

微燃性冷媒リスク評価研究会

最終報告書

平成 28 年 8 月

公益社団法人 日本冷凍空調学会

免責事項

本最終報告書に記載している内容については、最新の技術情報に基づき万全を期して作成しておりますが、掲載された情報の正確性を保証するものではありません。また、本最終報告書に掲載された情報・資料を利用、使用する等の行為に関連して生じたいかなる損害についても、本学会並びに著者は何ら責任を負いません。

著作権

本最終報告書の著作権は執筆者が有しています。許可なく全体あるいは一部の転載、複製はお断りします。

微燃性冷媒リスク評価研究会 最終報告書

2016年8月22日

編集 日本冷凍空調学会 微燃性冷媒リスク評価研究会

発行所 公益社団法人 日本冷凍空調学会

〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 13-7

日本橋大富ビル 5階

TEL 03-5652-3223 FAX 03-5623-3229

微燃性冷媒リスク評価研究会最終報告書目次

1. 序論	1
1.1 微燃性冷媒リスク評価研究会について	1
1.1.1 背景	
1.1.2 微燃性冷媒リスク評価研究会の活動	
1.2 国内外の冷媒規制動向	3
1.2.1 国際的な議論	
1.2.2 日本の冷媒規制	
1.2.3 欧米の冷媒規制	
1.2.4 途上国の動き	
1.3 国内外の冷媒安全規格動向	6
1.3.1 世界の安全規制規格と比較	
1.3.2 可燃性と微燃性の違い	
1.3.3 日本の高圧ガス保安法と国際規格の比較	
1.3.4 規制緩和の動き	
2. 燃焼特性	12
2.1 はじめに	12
2.2 可燃範囲への湿度影	13
2.2.1 実験室レベルの温度・湿度の燃焼限界への影響	
2.2.2 高温高湿度の燃焼限界への影響	
2.2.3 ASHRAE 法と保安法 A 法の比較：窒素或いは R744 混合系	
2.2.4 ASHRAE 法と種々の金属線を用いた保安法 A 法による燃焼限界	
2.3 燃焼速度	23
2.3.1 燃焼速度の温度，圧力，濃度依存性	
2.3.2 燃焼速度の湿度依存性	
2.4 最小着火エネルギー，消炎距離	26
2.4.1 はじめに：着火，消炎と火炎の成長	
2.4.2 消炎距離の測定	
2.4.3 最小着火エネルギーの推算	
2.4.4 実用上の着火エネルギーとの比較	
2.5 消炎直径	34
2.5.1 標準条件における消炎直径	
2.5.2 消炎直径の温度，湿度依存性	
2.6 冷媒の熱分解	37
2.6.1 R1234yf の熱分解	
2.6.2 R1234ze(E) の熱分解	
2.6.3 R22 の熱分解	
2.6.4 R32 の熱分解	
2.6.5 R134a の熱分解	
2.6.6 冷媒の熱分解開始温度	

2.6.7	R1123 の熱分解	
2.6.8	R1123/R32 混合冷媒の熱分解	
2.7	低温温室効果冷媒の熱分解生成物分析	44
2.7.1	はじめに	
2.7.2	実験方法および結果	
2.7.3	低温温室効果冷媒の熱分解生成物分析のまとめ	
2.8	実用環境における燃焼特性の評価	49
2.8.1	東京における冷媒の燃焼特性	
2.8.2	ジャカルタにおける冷媒の燃焼特性	
2.8.3	リヤドにおける冷媒の燃焼特性	
3.	事故シナリオに基づく安全評価	55
3.1	はじめに	55
3.2	取扱シチュエーション#1：暖房機器と A2L 冷媒搭載空調機器を同時使用した場合	56
3.2.1	概要	
3.2.2	実験	
3.2.3	結果及び考察	
3.3	取扱シチュエーション#2-(a)：A2L 冷媒滞留空間内で市販ライターを使用した場合	58
3.3.1	概要	
3.3.2	圧電ガスライター使用時の滞留 A2L 冷媒の着火可能性	
3.3.3	石油ライター使用時の滞留 A2L 冷媒の着火可能性	
3.4	取扱シチュエーション#2-(b)：A2L 冷媒がピンホールや破断口から噴出漏洩した場合	63
3.4.1	概要	
3.4.2	実験	
3.4.3	結果及び考察	
3.5	取扱シチュエーション#2-(c)：回収機等サービス・メンテナンス機器内への A2L 冷媒の漏洩	68
3.5.1	概要	
3.5.2	実験	
3.5.3	結果及び考察	
3.6	取扱シチュエーション#2-(d)：ポンプダウン時のディーゼル爆発	71
3.6.1	概要	
3.6.2	実験装置と実験方法	
3.6.3	実験結果	
3.6.4	まとめ	
3.7	取扱シチュエーション#3：多室型空調機の急速漏洩を想定した安全性評価	81
3.7.1	概要	
3.7.2	実験	
3.7.3	結果および考察	
3.8	実際の事故シナリオを想定した実大着火実験	86
3.8.1	概要	

3.8.2	想定シナリオ	
3.8.3	実験	
3.8.4	結果および考察	
3.9	まとめ	97
3.9.1	取扱シチュエーション#1：暖房機器と A2L 冷媒搭載空調機器を同時使用した場合	
3.9.2	取扱シチュエーション#2-(a)：A2L 冷媒滞留空間内で市販ライターを使用した場合	
3.9.3	取扱シチュエーション#2-(b)：A2L 冷媒がピンホールや破断口から噴出漏洩した場合	
3.9.4	取扱シチュエーション#2-(c)：回収機等サービス・メンテナンス機器内への A2L 冷媒の漏洩	
3.9.5	取扱シチュエーション#3：多室型空調機の急速漏洩を想定した安全性評価	
3.9.6	実際の事故シナリオを想定した実大着火実験	
4.	危害度評価	100
4.1	はじめに	100
4.2	燃焼試験	100
4.2.1	概要	
4.2.2	実験	
4.2.3	火炎速度と燃焼速度評価	
4.3	爆発強度評価	107
4.3.1	KG 値	
4.3.2	燃焼特性の整理と他媒体との比較	
4.3.3	KG をもとにした緩和圧力評価	
4.4	実験を再現する数値シミュレーションの検討	117
4.5	まとめ	120
5.	リスク評価手法について	122
5.1	はじめに	122
5.2	リスクアセスメントの概要	123
5.3	エアコン各機器とそのリスク評価状況	125
5.4	家庭用エアコンでのリスク評価手法	126
5.4.1	リスクアセスメントの事故発生確率(許容値)	
5.4.2	漏洩条件の設定 (市場全体の漏洩率と機器からの漏洩速度, 漏洩量)	
5.4.3	可燃となる空間体積の設定	
5.4.4	可燃時間空間体積の計算	
5.4.5	着火源の設定	
5.4.6	ヒューマンエラーの発生確率	
5.4.7	許容値との整合性	
5.4.8	ミニスプリットでのまとめ	
5.5	ビル用マルチエアコンとパッケージエアコンでのリスク評価手法の差異	134
5.6	チラーでのリスク評価手法の差異	136

5.7	FMEA とその他のハザード	137
5.8	リスク評価手法のまとめ	137
6.	ミニスプリットエアコンのリスク評価	139
6.1	はじめに	139
6.2	冷媒リークシュミレーション	140
6.3	着火源評価	140
6.3.1	着火源となる電装品	
6.3.2	室内及び室外機周辺の着火源(主に住宅)	
6.4	リスクアセスメントの事故発生確率(許容値)	142
6.5	漏洩条件の設定(市場全体の漏洩率と機器からの漏洩速度, 漏洩量)	142
6.6	FTA 結果の整理	142
6.7	1対1接続の壁掛けエアコンのリスクアセスメントと結果	143
6.7.1	室内機使用のリスクアセスメント	
6.7.2	サービスのリスクアセスメント	
6.8	ハウジングエアコンのリスクアセスメントと結果	145
6.8.1	ハウジングエアコンの設置形態と課題	
6.8.2	1対1接続の床置き形ハウジングエアコン(シングル床置きエアコン)の着火源と設置条件	
6.8.3	シングル床置きエアコンにおけるリスクアセスメントの事故発生確率の目標	
6.8.4	シングル床置きエアコンのリスクアセスメント検討	
6.8.5	4.5 畳設置を考慮したリスクアセスメント検討 [対策 S2]	
6.9	マルチ接続のハウジングエアコンのリスクアセスメントと結果	148
6.9.1	現実的な住宅環境を踏まえた検討条件の設定	
6.9.2	住宅環境を踏まえたドア隙間について: 開き戸と引き戸	
6.9.3	マルチ接続の床置きエアコンから部屋へ漏洩する冷媒の初期濃度	
6.9.4	可燃空間時空積	
6.9.5	マルチ接続タイプの床置き形ハウジングエアコンのリスクアセスメント検討	
6.9.6	室内機のファンによる拡散による効果	
6.9.7	マルチ接続タイプの床置き形ハウジングエアコンのリスクアセスメント結果	
6.10	マルチ接続タイプの壁掛け形エアコンのリスクアセスメント	152
6.11	ハウジングエアコンのリスク評価のまとめ	153
6.12	ディーゼル爆発と燃焼生成物の発生確率	153
6.13	実大着火実験への考え方	154
6.14	まとめ	155
7.	スプリットエアコン(店舗用パッケージエアコン)のリスク評価	157
7.1	はじめに	157
7.1.1	スプリットエアコンのリスク評価概要	
7.1.2	店舗用パッケージエアコンの特徴	
7.1.3	微燃性冷媒リスクアセスメント手法	
7.1.4	許容できるリスク(着火事故発生確率)の設定	
7.1.5	着火事故が発生する要因	

7.2	冷媒リークシミュレーション	160
7.2.1	室内モデルの算出例	
7.2.2	室外モデルの算出例	
7.3	着火源評価	164
7.3.1	着火源の設定	
7.3.2	着火源存在確率	
7.4	FTA	166
7.4.1	修理ステージのFTA（室外側）	
7.4.2	修理ステージのFTA（室内側）	
7.5	各モデルのリスクアセスメント結果	167
7.5.1	第一次モデル（代表的なモデル）	
7.5.2	第二次モデル（比較的リスクが高くなると想定されるモデル）	
7.5.3	第三次モデル（30kWまでのリスクが高くなると想定されるモデル）	
7.6	冷媒誤充填に対するリスク評価	174
7.7	まとめ	174
8.	ビル用マルチエアコンのリスク評価	176
8.1	はじめに	176
8.2	微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンの特徴	176
8.3	リスクアセスメントの準備	177
8.3.1	許容レベルの設定	
8.3.2	冷媒漏洩速度別の漏洩件数発生確率	
8.3.3	ヒューマンエラー発生確率	
8.3.4	着火源の評価	
8.3.5	着火事故発生確率の計算方法	
8.3.6	冷媒誤充填による着火確率の計算方法	
8.3.7	室内モデルの設定	
8.3.8	室外モデルの設定及び解析内容	
8.3.9	R1234yfを使用した場合のリスクアセスメント	
8.4	リスクアセスメントの結果と安全対策	185
8.4.1	輸送保管時	
8.4.2	据付時	
8.4.3	使用時（室内）	
8.4.4	床置機の安全対策の検討	
8.4.5	使用時（室外）	
8.4.6	修理時	
8.4.7	廃棄時	
8.4.8	作業時（保管，据付，修理，廃棄時）のまとめ	
8.4.9	冷媒誤充填の検討	
8.4.10	R1234yfでのリスクアセスメント	
8.5	冷媒充填率における安全係数の検討	194
8.5.1	各影響因子の抽出	
8.5.2	各影響因子の影響	

8.5.3 厳しい設置ケースにおける安全係数のまとめ	
8.6 全体まとめと今後の課題	198
9. チラーのリスク評価	199
9.1 はじめに	199
9.2 リスクアセスメントの前提	199
9.2.1 チラーの特徴と課題	
9.2.2 リスクアセスメントの手順	
9.2.3 リスクアセスメントリストとリスクアセスメントマップ	
9.3 冷媒漏えい時の可燃空間存在確率	203
9.3.1 解析モデル	
9.3.2 冷媒の可燃範囲, 漏えい速度の定義	
9.3.3 計算方法および計算条件	
9.3.4 計算結果	
9.3.5 可燃空間の存在確率	
9.4 着火源	211
9.4.1 機械室	
9.4.2 着火源の絞込み	
9.4.3 喫煙による着火	
9.4.4 電気品による着火	
9.4.5 着火源の存在確率	
9.5 冷媒漏えい発生確率	215
9.6 火災・火傷事故発生確率の算定	215
9.6.1 算定条件	
9.6.2 事故確率の算定	
9.7 安全を担保するための技術的要求事項	216
9.7.1 換気	
9.7.2 防爆仕様	
9.7.3 冷媒ガス漏えい検知警報設備	
9.8 まとめ	218
おわりに	221
執筆者一覧	222

1. 序 論

1.1 微燃性冷媒リスク評価研究会について

1.1.1 背景

オゾン層保護の観点から CFC 冷媒や HCFC 冷媒の使用が規制され、HFC 冷媒への転換が進んでいるが、地球温暖化係数 (GWP) 値の高い HFC 機が普及するにつれ、使用時の冷媒漏えいや廃棄機器から回収されない冷媒の大気漏えいが多いことが問題になり、その抜本的な解決のためには、GWP 値の低い冷媒への転換が急務であることが認識されてきた。

わが国においては、2020 年には代替フロン等 3 ガスの排出量が現在の 2 倍になり、冷凍空調分野からの排出がその 8 割を占めることになると考えられ、冷凍空調分野からの漏えいのうち、約 6 割が使用時の漏えいで、残りが廃棄時の未回収冷媒の漏えいである。以前は、廃棄時の冷媒回収が最も重要な冷媒対策と考えられていたが、それでは不十分であることが認識され、2013 年 6 月に「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律 (略称：フロン排出抑制法)」が成立し、2015 年 4 月に施行された。フロン排出抑制法では、冷凍空調機器メーカーには、製品ごとに、一定の目標年度までのノンフロン製品又は温室効果の低いフロン類を使用した製品への転換が求められている。

表 1-1 はわが国の主要製品分野の既存冷媒と次世代の低 GWP 冷媒、そしてフロン排出抑制法での GWP 上限値である。次世代冷媒と考えられている R32, R1234yf, R1234ze(E) は表 1-2 に示すように燃焼性があり、アメリカ暖房冷凍空調学会 (ASHRAE) の規格によると、微燃性 (2L 区分) に分類されている。表 1-2 の燃焼限界濃度は高压ガス保安法一般則 A 法によるもので、他の燃焼性は 25℃乾燥条件での測定のため R1234ze(E) は不燃となっている項目があるが、高温多湿条件 (60℃湿度 50%) では燃焼性を持つため、微燃 (2L) と分類されている。R290 (プロパン) は自然冷媒の仲間で、GWP は 1 ケタ台であるが、強い燃焼性を持つため、安全の観点から、広く利用するには難点がある。

表 1-1 既存冷媒と新冷媒の GWP と GWP 上限値

製品分野	既存冷媒 (GWP)	低 GWP 冷媒(GWP)	GWP 上限値
家庭用エアコンディショナー	R410A (2090)	R32 (675)	750
店舗・オフィス用エアコンディショナー	R410A (2090)	R32 (675)	750
自動車用エアコンディショナー	R134a (1430)	R1234yf (4)	150
ターボ冷凍機, チラー	R134a (1430)	R1234ze(E) (6)	—

表 1-2 各種冷媒の燃焼性特性 (表 2-2 より抜粋)

冷媒番号	R410A	R32	R1234yf	R1234ze(E)	R290
GWP	2090	675	4	6	<3
燃焼速度 (cm/s)	n.f.	6.7	1.5	n.f.	38.7
燃焼下限濃度 [vol %]	n.f.	13.3	6.21	6.39	1.92
燃焼上限濃度 [vol %]	n.f.	29.3	14.0	13.3	10.46
最小着火エネルギー (mJ)	n.f.	29	780	n.f.	0.35
燃焼性区分*)	1	2L	2L	2L	3

*) 燃焼区分 1：不燃, 2L：微燃, 3：強燃 n.f.：不燃

以上のように、冷凍空調の主要分野で冷媒の低 GWP 化を図るためには、微燃性冷媒を使いこなす必要があるが、これまで、冷凍空調機器での冷媒の使用、充填、回収、輸送、保管についての安全を定める冷凍保安規則や一般高圧ガス保安規則において微燃性冷媒の取り扱いに関する規定がなく、プロパンなどの強燃性冷媒と同様の厳しい扱いが求められてきた。そこで、産業界からは微燃性冷媒の燃焼性の強さに応じた、取り扱い規制の緩和が要望されてきたが、そのためには、科学的知見に基づいた微燃性冷媒のリスク評価が必要と認識されてきた。

1.1.2 微燃性冷媒リスク評価研究会の活動

低 GWP 冷媒は微燃性を有することが多いため、低 GWP 冷媒の使用を促進するため、科学的知見に基づいた微燃性冷媒のリスク評価の必要性が叫ばれ、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」プロジェクト (2011～2016 年) の中で、諏訪東京理科大学、九州大学、東京大学、産業技術総合研究所などが冷媒の安全性の研究を進めた。一方、(一社)日本冷凍空調工業会や(一社)日本自動車工業会はそれ以前から冷凍空調機器や自動車用エアコンに微燃性冷媒を適用するときのリスク評価を始めていた。日本冷凍空調工業会では、製品分野ごとに微燃性冷媒のリスク評価を実施するワーキンググループを設置し、設置条件の影響や着火源の存在などに個別に審議した。これら知見を集約し、第三者の目で客観的な評価を行う目的で、2011 年から 2016 年まで(公社)日本冷凍空調学会の中に「微燃性冷媒リスク評価研究会」を設置した。微燃性冷媒のリスク評価の審議体制は図 1-1 に示すように、産官学の協力体制が構築された。

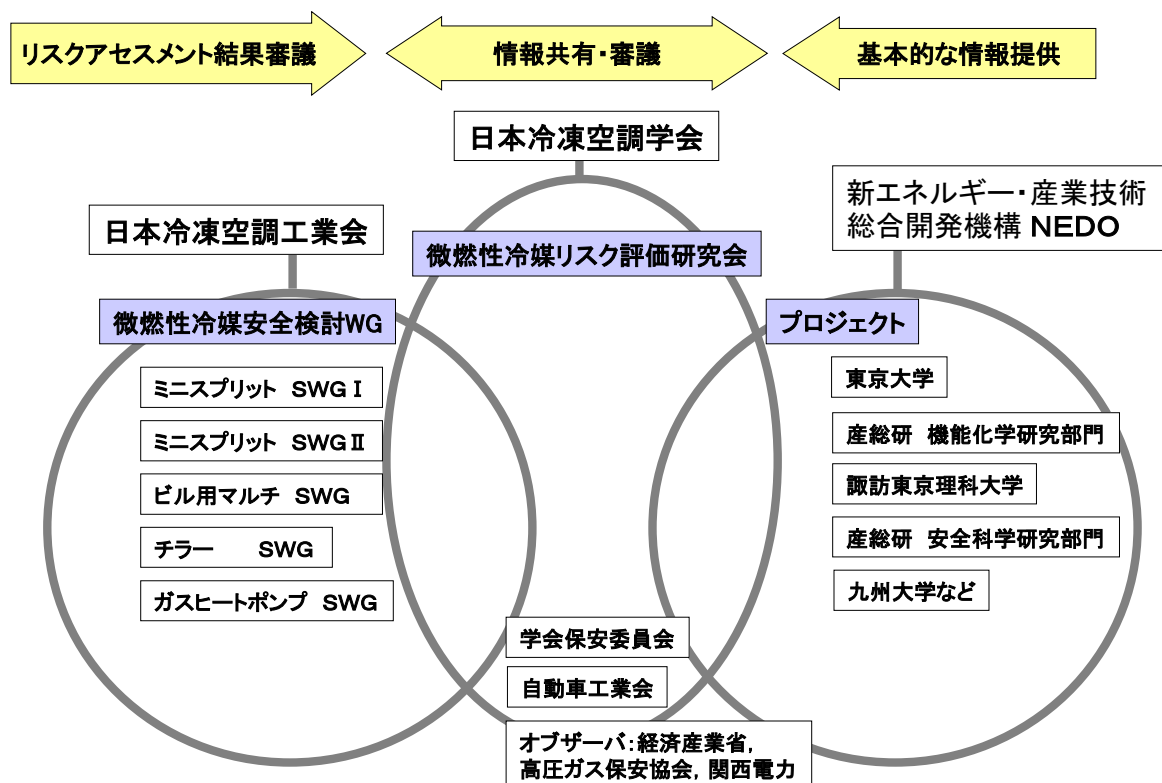


図 1-1 微燃性冷媒のリスク評価審議体制

日本冷凍空調学会の微燃性冷媒リスク評価研究会では、日本冷凍空調工業会の微燃性冷媒安全検討 WG と協力して以下の目的のもとに活動を行った。

- 1) 冷媒の燃焼性に関する諸特性の測定法の確立と特性値の収集
- 2) 微燃性冷媒が室内または室外に漏えいしたときの可燃体積の出現頻度情報の収集
- 3) 様々な火器・電気器具類が着火源になるかどうかの情報の収集

- 4) 微燃性冷媒が着火事故や熱分解事故を起こすときの危害度情報の収集
- 5) 製品分野ごとに着火事故が発生する確率を評価する
- 6) 着火事故を許容範囲内に収めるための対策の検討
- 7) 微燃性冷媒を安全に使用するための業界ガイドラインの策定
- 8) 冷凍保安規則や一般高圧ガス保安規則の改正にかかる委員会への情報提供
- 9) 活動成果の公開，啓蒙，世界的な規格（ISO，IEC など）改正への反映

微燃性冷媒のリスク評価活動を実施することにより，以下の成果を得た．

- 1) ルームエアコン，パッケージエアコン，ビル用マルチエアコン，チラーなどの製品分野におけるリスク評価に必要な情報を収集し，リスク評価を実施した．小規模な製品については安全といえるが，規模の大きい製品や設置場所によっては，安全対策が必要な場合があり，リスクが許容範囲内になるための安全対策を提言した．
- 2) 製品分野ごとに業界ガイドラインを策定し，検討が終了次第，順次公開している．
- 3) 微燃性冷媒リスク評価研究会の成果について，毎年度末に報告書を日本語と英語で作成し，日本冷凍空調学会ホームページで公開した．また，国内セミナー，国際会議等で積極的に成果を公表して啓蒙に努めるとともに，国際的なイニシアティブを獲得することに努めている．
- 4) 冷凍保安規則や一般高圧ガス保安規則の改正にかかる委員会への情報提供を行った．

1.2 国内外の冷媒規制動向

1.2.1 国際的な議論

冷凍空調機器に使用される冷媒は，オゾン層保護と地球温暖化防止という二つの課題の中で揺れ動いている．もともとオゾン層保護を目的としているモントリオール議定書締約国会議でも近年では冷媒の地球温暖化影響に対する対応の議論をしている．

2014年4月に公表された国連環境計画の専門家委員会である TEAP (Technology and economic assessment panel) のタスクフォースレポート¹⁻¹⁾によると，冷凍空調セクターの冷媒による温暖化影響はこのまま何の対策もしないと 2030年には先進国で約 8.5 億 CO₂ トン，途上国では約 23 億

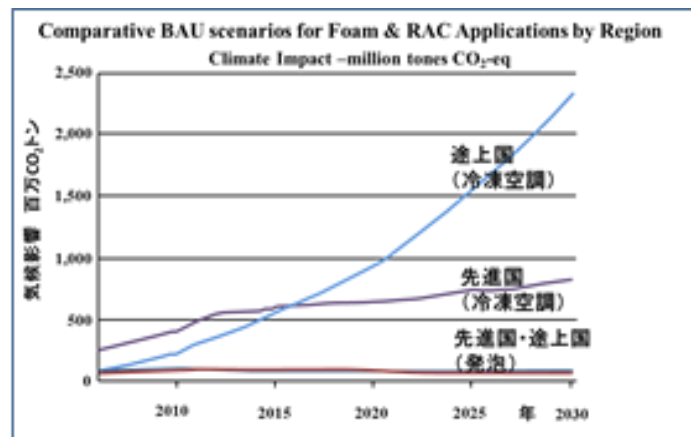


図 1-2 冷凍空調および発泡分野の気候影響

CO₂ トンに達すると予測している．この合計値は，世界全体の温室効果ガス約 318 億 CO₂ トン（2011 年）のほぼ 10%に相当する値である（図 1-2）．理由は新興国における急激な冷凍空調の普及である．

そのような中で，米国は HFC 冷媒温暖化削減計画をカナダ・メキシコと共同でモントリオール議定書締約国会議に提出している．大きな成果をあげているモントリオール議定書に HFC を含めることにより，冷媒の温暖化問題も解決して行こうという狙いである．モントリオール議定書はオゾン層保護を防止するための協定であり，それまでは冷媒の温暖化問題は気象変動条約の中で議論されてきた．この削減計画のベースラインは 2005 年から 2008 年の HFC と HCFC の温室効果総量とされている．先進国は 2033 年に HCFC を含めた HFC の温暖化係数換算で総量を 85%削減しようという非常に意欲的な内容である．この提案に途上国は反対していたが，これまで反対していた中国やインドなどが米国の説得により賛同に回り，2015 年

11月にドバイで開催されたモンテリオール議定国会議ではこの議論を続けることが決定され、今後、冷媒の温暖化対策の議論が進められることになった。

もちろん国連の場合だけではなく日本国内、欧州、米国、途上国においても冷媒はオゾン層保護の議論から地球温暖化影響抑制に向けた議論が行われている。

1.2.2 日本の冷媒規制

二つめの大きな動きは日本2015年4月、フロン排出抑制法が施行されたことである。この対策の為にフロン排出抑制法が施行された。日本では、冷凍空調分野の冷媒の温暖化影響が今後、増え続け2020年には4000万CO₂トン¹⁻²⁾、その時点での全体の温室効果ガスの約3～4%を占めると思われる(図1-3)。フロン排出抑制法では温暖化影響の少ない冷媒の使用と、冷媒の排出を抑制する対策がとられている。改正の基本的な方向性は、フロン類の「使用の合理化」及び業務用等製品に使用されるフロン類の「管理の適正化」を大きな二本柱にして、製造から廃棄までライフサイクルの各段階において4つの対策とその取組主体を明確にしたことである。「使用の合理化」とは温室効果の少ないフロン類の製造や量を削減することである。「管理の適正化」とは排出状況を把握することにより全体の排出量を抑制することである。

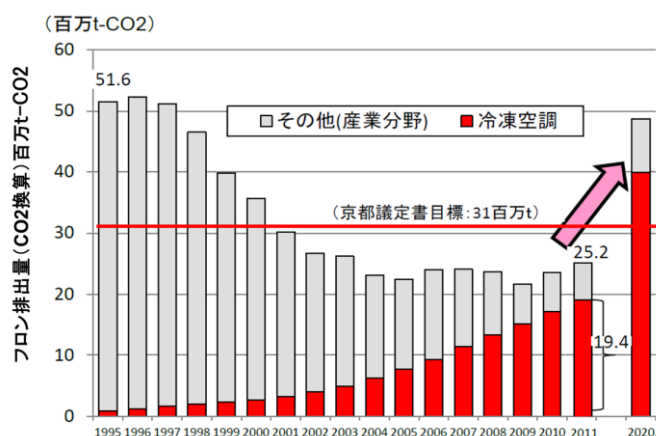


図 1-3 日本冷凍空調分野のフロン排出量

具体的な対策の方向性は以下の4点である。

- ① フロン類の実質フェーズダウン：
 - ガスメーカーは代替物質の開発や再生等により、温暖化影響を低減しフロン類の製造量を削減しなければならない。
- ② フロン類使用製品のノンフロン・低GWP化促進：
 - 機器・製品メーカーは技術進歩や市場動向を踏まえて、その時点で最も環境影響度の低い製品を普及させなければならない。表1-3に規制の目標値および目標年度を記載する。
- ③ 機器使用時におけるフロン類の漏えい防止：
 - 機器ユーザーは機器使用時において適切な管理を推進することで排出量を削減しなければならない。
- ④ 充填・回収行為の適正化：
 - 充填回収業者は適切な充填・回収を推進し、破壊及び再生を促進しなければならない。

表 1-3 指定製品区分ごとの目標値, 目標年度

対象機器	規制値 (GWP 値)	禁止期間
家庭用エアコン	750	2018
店舗用エアコン	750	2020
コンデンスユニット/定置式冷凍冷蔵ユニット	1500	2025
中央方式冷凍冷蔵機器	100	2019
自動車用エアコン	150	2023

以上の方向性に沿って、「フロン類の製造業者」、「フロン類使用製品の製造・輸入業者」、「業務用冷凍空調

機器の管理者」に対して、その責任の判断の基準となるべき事項を定め公表している。総量目標は気象変動条約への約束草案として記載されており 2030 年に 2013 年度比で△32%の水準とされている¹⁻³⁾。

1.2.3 欧米の冷媒規制

欧州も 2015 年 1 月に欧州 F ガス規制 (EC Regulation No842) 改訂を行った¹⁻⁴⁾。2006 年の欧州 F ガス規制は、定置用の空調冷凍分野では冷媒封じ込め制度や、業者の訓練認定、報告制度などを盛り込んでスタートした。その時点では自動車用空調は 2011 年に現行 R134a の禁止を決定した。この F ガス規制が改正され、2015 年 1 月 1 日に施行された。今回の改正はこれまでの規制の他に、用途ごとの GWP 規制やプレチャージ

を含む冷媒の総量管理を含めた対策により、2030 年に 2009-12 年の平均 CO₂ 換算総量を 79%削減する目標を設定している。F ガス規制のポイントは 3 つである。

- ① HFC の販売側の規制 (HFC 販売業者にクォータを付与して管理)。これは販売枠を与えることを意味するが、全体の 89%を既存業者が権利を持ち、残りの 11%を新規事業者に配分するものである。
- ② 輸入される空調機の冷媒も 2017 年以降はクォータが必要となる。
- ③ 機器の冷媒の GWP 規制。これは段階的に行われると言われている。定置用冷凍・冷蔵機器の規制が優先され 2018 年から、次に 2021 年にはマルチ型セントラル冷凍、シングルスプリットは 2024 年から規制される予定である。GWP 規制内容を表 1-4 に示す。

表 1-4 欧州 F ガス規制の GWP 値規制

Fガス禁止事項		
対象機器	規制値 (GWP値)	禁止時期
家庭用冷凍庫・冷蔵庫	150	2015/1/1
	2500	2020/1/1
全密閉構造の業務用冷凍庫冷蔵庫	150	2022/1/1
定置式冷凍冷蔵製品(-50℃未満を除く)	2500	2020/1/1
マルチ方式で能力が40kWを超える機器	150	2022/1/1
充填量3kg未満のスプリットエアコン	750	2025/1/1
自動車用エアコン(新型車)(MAC指令)	150	2013/1/1
自動車用エアコン(全ての新車)	150	2017/1/1

表 1-5 欧州と日本の冷媒 GWP 規制の比較

	日本 (改正フロン法)	欧州 (Fガス規制)	カナダ (環境省提案)	許容冷媒
家庭用	750 (2018)	750 (2025) (<充填量3kg)	750 (2023) (?)	R32、プロパン、 混合冷媒。
店舗用	750 (2020) (<3冷凍ト)	750 (2025) (<充填量3kg)	750 (2023) (?)	R32、プロパン、 混合冷媒。
冷蔵 ショーケース	1500 (2025) (商業・産業機器)	2500 (2020) (定置型)	1500 (2020) (商業・産業機器)	R410A,R32, CO ₂ 、混合、 炭化水素など
自動車用	150 (2023)	150 (2017) (新型車:2013)	150 (2021)	R1234yf

次に北米の動きである。米国大統領は行政施策として Climate Action Plan を強化し、米国環境省 EPA は冷媒認証制度 SNAP (Significant New Alternatives Policy) を使って、高 GWP 冷媒を禁止し、低 GWP 冷媒を認可することで冷媒対策を進めている。近々に SNAP 登録から外され実質的に禁止される冷媒は R404A と R507A、スタンドアローンの冷凍機やベンディングマシーンでは R134a や特定の HFC 混合冷媒である。カナダの動きは日欧に近い。具体的な機器に応じて GWP 規制値と規制開始年を公表している。

このように日本、欧州、カナダで GWP 規制が計画されているが、それを表 1-5 で比較する。見てもわかるようにほぼ同じである。これは適用できる冷媒が限られているからと思われる。比較表でも明らかのように、家庭用エアコンやある容量の店舗用エアコンは

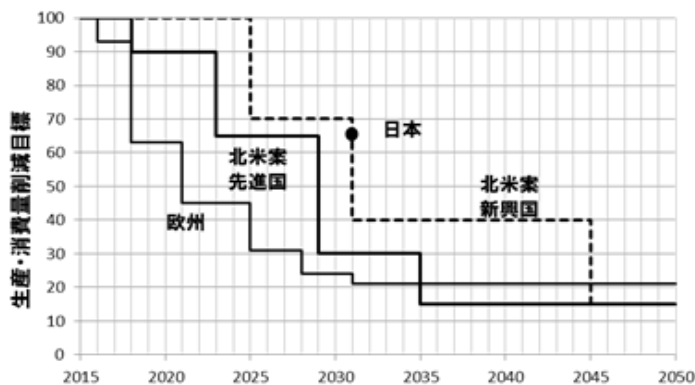


図 1-4 冷媒の温暖化影響削減計画の比較

R32 を想定した数値であり、冷凍冷蔵ショーケースは日本の場合は R410A と CO₂ の加重平均を想定し欧州の場合は R410A を想定している。自動車用エアコンは主に R1234yf を想定しており、日欧とも近い値になっている。候補冷媒が限られており、ほぼ同じ冷媒を想定されていることが理由である。

このように世界中で冷媒の温暖化影響の削減努力が進められている。前述の北米三国（米国、カナダ、メキシコ）よりモントリオール議定国会議に提案されている削減計画（北米案）と欧州の削減目標を図 1-4 に比較する。両方とも最終的には約 80% の削減を目指す長期目標である。

1.2.4 途上国の動き

四つ目の大きな動向は、途上国においてモントリオール議定書の HCFC フェーズアウト計画がスタートしていることであろう。2008 年にモントリオール議定書が改訂され、HCFC 禁止期限が途上国でも前倒しされた。図 1-5 に示すような協定が結ばれ、2013 年にオゾン破壊換算総量で 2009 年と 2010 年の平均値を超えないこと、2015 年に 10%、2020 年に 35% 削減しなければならないなどフェーズアウト計画が決められた。現在、途上国は 2015 年以降の第二ステップに向けた計画を検討中である。冷凍空調がますます普及し、冷媒消費が高まることが確実である途上国にとって、冷媒の削減あるいは転換は重大事である。冷媒がオゾン層を破壊する理由は、HCFC に含まれる塩素イオンがオゾン層を破壊するからであり、先進国では既に塩素のない HFC が CFC や HCFC の代替冷媒として使用されている。例えば R22 は主に R410A（HFC）に転換されている。しかし、途上国のほとんどは現在 R22 などの HCFC を使用している。フェーズアウト計画を目前にして、オゾン層破壊をしない冷媒に転換して、さらに温暖化影響の少ない冷媒に転換するという、二重の転換の負担を懸念している。国連環境計画（UNEP）も、温暖化係数（GWP）の高い HFC への転換を歓迎していない。国連幹部は、R410A への転換にはモントリオール基金から支援することは原則的にないとしている。

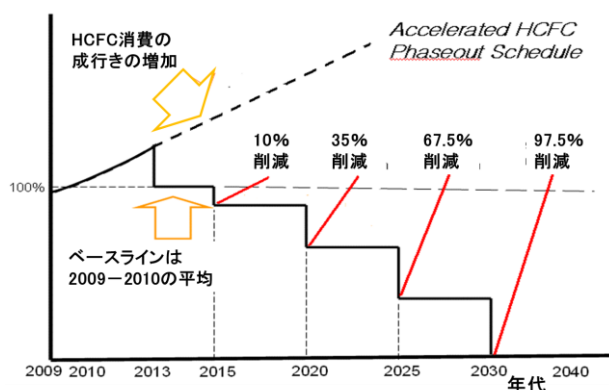


図 1-5 途上国の HCFC 削減計画

これらの途上国における冷媒転換はモントリオール多国籍基金を活用する為に国連に申請されており、毎年数回行われるエグゼクティブコミッティ（ExCom）で審議され¹⁻⁵⁾、その審議結果が WEB 上で公開されているので途上国の冷媒転換の方針がわかる。筆者が簡単にまとめたものを表 1-6 に紹介する。2015 年 11 月にドバイで開催されたモントリオール議定国会議で 2015 年から始まる第二期間（Phase2）について更なる進展があった。

表 1-6 途上国の HCFC 削減計画の具体例

国名	施策	開始年
インド	HCFC製品輸入禁止	2015年
インドネシア	HCFC製品生産・輸入禁止	2015年
タイ	HCFC製品生産・輸入禁止 (<14.5kW)	2017年
ベトナム	HCFC製品生産・輸入禁止検討中	2017?
マレーシア	HCFC製品生産・輸入・組立禁止	2015年
サウジ	HCFC製品生産・輸入禁止	2016年
トルコ	HCFC-22生産禁止	2015年

国連HPMP資料より当方で作成

1.3 国内外の冷媒安全規格動向

1.3.1 世界の安全規制規格と比較

現在、低GWP冷媒転換の最大の課題は、これらが微燃性であることに対する懸念である。前述のように R410Aの代替冷媒候補で不燃性(A1)の冷媒で有望なものはなく、妥当なGWPを持つものは全て微燃性 (A2

L) である。よって課題はこれらの微燃性冷媒の安全性を担保できるか、あるいは各国の安全規格や国際安全規格に対応できるか、である。このように温暖化対策と可燃性はトレードオフの関係にある。注目すべき国際規格にはISO、IECがある。またEN（欧州規格）やASHRAE（米国学会規格）、GHS(国連規格)も重要である。冷媒の定義分類と安全規格に関する国際規格、欧州規格、米国規格、中国規格の位置づけは表1-7のようになる。

表1-7 世界の冷媒の規格関係

	冷凍空調関係			一般ガス (輸送規格)
	冷媒	冷凍空調全般	機器	
国際規格	ISO817	ISO5149	IEC60335-2-40, 24, 89, 34	GHS
米国規格	ASHRAE34	ASHRAE15 UL1995, 484	UL984 UL60335-2-40	DOT
欧州規格	EN378	EN378	EN60335-2-40	
中国規格	GB/T 7778-2008	GB 9237-2001 SB/T 10345.1~4-2012 (EN378:2008)	GB 4706.32-2012 (IEC 60335.2.40:2005)	
日本法律	冷凍保安規則	冷凍保安規則	電気用品安全法	一般高圧ガス保安規則

現在、これらの国際規格や各国の規格において、微燃性冷媒を取り扱うための規格改定作業が進みつつある。ASHRAE34, ISO817, ISO5149 はすでに改定作業を終了し改訂版が発行されている。IEC60335-2-40 とGHS は改定作業中。これらの内容について以下に紹介する。

- ① ISO817 (Designation and safety classification) : 冷媒の命名法の規定であり、2014年、改訂され微燃性(2L) 区分を含む冷媒の安全等級の基準が盛り込まれた。冷媒の燃焼性に関する等級には微燃性であるクラス2Lが追加され、クラス1, クラス2L, クラス2, クラス3となった。表1-8にその定義を述べる。

表1-8 ISO817:2014における燃焼性クラス

燃焼性等級	英文表記	日本語表記	試験環境	判断基準		
				LFL(%)	HOC(kJ/kg)	BV(cm/s)
クラス1	No flame propagation	不燃性	温度 60°C	—	—	—
クラス2L	Lower flammability	微燃性	圧力 101.3kPa	>3.5%	and <19000	≤10 at 23°C
クラス2	flammable	可燃性		>3.5%	and <19000	—
クラス3	Higher flammability	強燃性		≤3.5%	or ≥19000	—

※ LFL(Low Flammable Limit) :爆発下限界 (volume %)

※ HOC(a Heat Of Combustion) : 燃焼エネルギー (kJ/kg)

※ BV(maximum burning velocity) : 燃焼速度 (cm/s)

※ 対象は単一冷媒か、混合の場合はWCF(worst case formulation)とWCFF(worst-case fractionated formulation)での評価が要求される。

※ 試験方法はASTME681に従う。

- ② ISO5149 (Mechanical refrigerating systems used for cooling and heating Safety requirement) : 冷凍空調機に関する安全性および環境性に関する規格である。1993年版は安全性のみの言及されており、微燃性冷媒の議論が出たあと長期間議論されてきたが更新されていなかった。2014年、改訂されR32, R1234yf, R1234ze

等の低毒性で微燃燃性（A2L）の冷媒の使用に関する要求事項を規定した。今回の改訂で大きく変化したのは微燃燃性冷媒も含めて冷媒充填量の基準が明確になったことで、例えば RCL は R32 では 0.061kg/m³ となり、総冷媒許容量も約 60kg 以下と明確になった。また、安全対策も微燃燃性冷媒には防爆要求はなくなったが、冷媒充填量によって換気、警報、遮断弁などが要求される。

- ③ IEC 60335-2-40 (Safety of household and similar electrical appliances) : エアコンやヒートポンプなど空調機器の安全規格。製品認証のための規格である。可燃冷媒規格をIECとISOの合同作業部会で作成した。現在、2Lに関する規定の検討がされており、第5版対応の中で室内側での機械継手を容認する改訂が完了したほか、5kVAまでの電磁開閉器の利用の規制緩和が決定、その他ビル用マルチの取り扱いなど基本的な部分が合意され、近々の改訂が予定されている。
- ④ GHS (The Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals) : GHS の目的は、物質および混合物に固有な危険有害性を特定し、その危険有害性に関する情報を伝えることである。そのためにGHSでは物質の危険有害性の分類基準を定め、情報を伝達するために、ラベル表示と安全データシート(SDS, Safety Data Sheet)の仕様を定めている。ただ、現状は微燃燃性に関する区分がなく、R32やR1234yfなど微燃燃性のものを「極めて可燃性 (Extremely Flammable)」と定義しており現場を混乱させている。GHSに関しては多くの関係者が疑問を感じており、日本政府とベルギー政府やフルオロカーボン協会の努力により「Extremely Flammable」から「Flammable」に改正することが検討されている。因みにR1234zeはGHSでは不燃であるがISO817では微燃、日本の一般ガス則では可燃なので、冷媒の可燃性定義の混乱を象徴している。表1-9にGHSでの燃焼性区分を記載する。

表 1-9 GHS での燃焼性区分

	区分 1 (極めて高い可燃性)	区分 2 (可燃性)	以外 (可燃性ガスではない)
条件	温度 20°C, 圧力 101.3kPa		
判断基準	燃焼下限濃度 LFL が 13%以下、 または爆発範囲が 12%以上。	爆発性範囲があり、 区分 1 以外。	爆発性範囲がない。
表記 (英文)	Extremely Flammable	Flammable	記載なし

1.3.2 可燃性と微燃燃性の違い

可燃性冷媒と微燃燃性冷媒との差は、燃え易さと燃えた後の危害の大きさが大きく違うことである。図1-6に燃え易さについて比較する。燃焼下限濃度(LFL)が低いほど少ない漏れでも可燃域ができるし、最小着火エネルギーが小さいほど少ないエネルギーで着火することを示している。例えばプロパンだと静電気でも着火する可能性がある。図1-6で左下に行けば行くほど小さい濃度で、小さいエネルギーで着火するので、着火する確率は高くなる。本研究会で議論してきたリスクアセスメントは着火確率を求めているので、主に燃焼下限LFLが大きく影響する。微燃燃性冷媒はLFLが大きいので可燃濃度になる領域が小さく、持続時間も短く、最小着火エネルギーが大きいために着火源も限られるので、これらを合わせると着火確率は非常に小さくなる。

燃焼速度と燃焼エネルギーは燃えた後の危害の大きさに影響するので、その比較を図1-7に示す。燃焼速度が速いと燃え方は激しくなり爆発的になる。特に強燃性冷媒は燃えると火炎伝播速度が速くなり燃焼が層流から乱流に転移するので燃焼速度の比率以上に爆発力が高くなる。微燃燃性冷媒は層流燃焼が比較的長く続くので通常は燃えても爆発力は小さい。燃焼エネルギーは火力に相当するので、大きければ大きいほど危害が大きくなることが想定される。

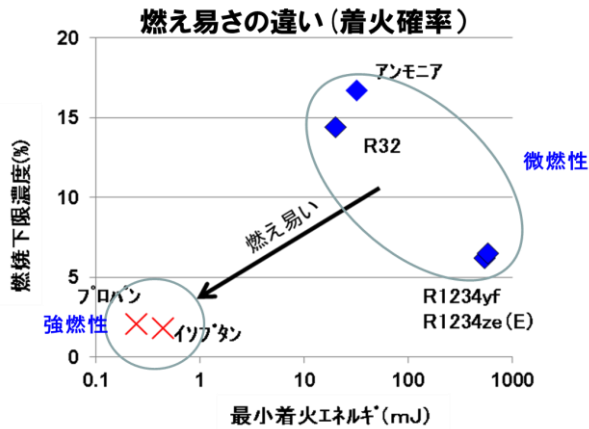


図 1-6 燃焼時の燃え易さ比較

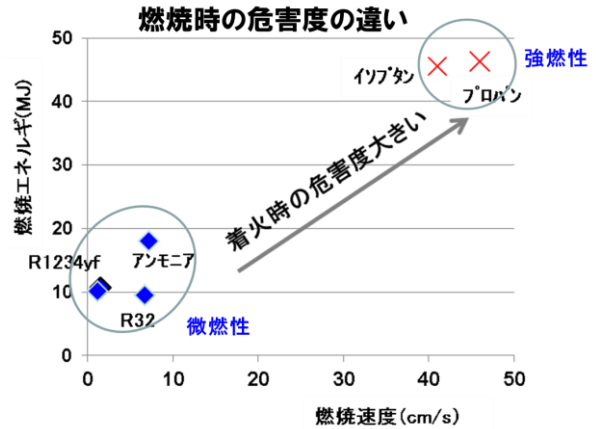


図 1-7 燃焼時の危害度への影響比較

1.3.3 日本の高圧ガス保安法と国際規格の比較

これらの国際規格と国内の高圧ガス保安法との関係を表 1-10 に比較する。これを見てもわかるように規格によって燃焼等級は異なっている。また国内と海外でも異なっている。この大きな理由は 3 つある。一つは試験方法の違いである。これについては第 3 章で言及されている。日本の試験方法は着火エネルギーが大きいので海外よりは厳しい値となっている。次に可燃性と判断する燃焼範囲も規格によって違う。例えば ISO817 では可燃を LFL3.5%以下としているが、GHS では火炎伝播あり、日本の高圧ガス保安法では 10%以

表 1-10 高圧ガス保安法と国際規格における冷媒区分

		冷媒の規格			一般高圧ガス規格			
	規則名	条件	判断	R32の場合	規則名	条件	判断	R32の場合
日本	冷凍保安規則		個別判断(掲名)	—		●温度条件: 室温、乾燥 ●試験方法は A法(着火エネ ルギは10J)	●可燃条件は LFL≤10%ある いは 幅≥20% ●不活性条件は 着火しないか可 燃性以外	不活性
海外	国際規格 ISO817	●温度条件: 60°CでLFL、 幅、燃焼熱を 確認の上、 23°Cで燃焼 速度確認 ●試験方法は ASTM E681	●A2条件は LFL≥3.5%、 燃焼熱≤19MJ/kg ●A2L条件は A2の中で、 燃焼速度 ≤10cm/s ●A1条件は 60°Cで火炎伝播が ないこと	微燃性 A2L	物質安全 性の国際規格 GHS(SDS ()	●温度条件: 20°C ●試験方法は ISO 10156	●Extremely Flammable 条件は LFL≤13%ある いは 幅≥12% ●Flammable条件 は 上記以外で燃焼す るもの	R1234yf も極めて 可燃性
	米国規格 ASHARE3 4	●温度条件: 60°CでLFL、 幅、燃焼熱を 確認の上、 23°Cで燃焼 速度確認 ●試験方法は ASTM E681	●A2条件は LFL≥0.1Kg/m3、 燃焼熱≥19MJ/kg ●A2L条件は A2の中で、 燃焼速度 ≤10cm/s ●A1条件は 60°Cで火炎伝播が ないこと	R1234yf R1234ze も A2L	輸送に関 する国際規格 TDG407	●温度条件: 20°C ●試験方法は ISO 10156	●可燃条件は LFL≤13%	可燃性
	欧州規格 EN378- 1(2008)	●温度条件: 60°C ●試験方法は ASTM E681	●A2条件は LFL≥3.5%、 燃焼熱≤19MJ/kg ●A2L条件はなし ●A1条件は 60°Cで火炎伝播が ないこと	可燃性 A2 ↓ 予定 A2L	輸送に関 する米国規格 DOT	●温度条件: 20°C ●試験方法は ASTM E681- 85	●可燃条件は LFL≤13%ある いは 幅≥12%	R1234yf も可燃性 R1234ze は可燃性 でない

下とそれぞれ異なっている。そして最も大きな違いは冷凍空調機器の中で使われる場合の定義と、一般高圧ガスとして使われる場合の定義が異なることである。微燃性という概念は冷凍空調機に用いられる場合に議論されているが一般高圧ガス保安規則の中にはまだ微燃性ガスを取り扱う規格はない。

日本の高圧ガス保安法では元々「微燃性」という概念がなかったが日本冷凍空調工業会の要請により、微燃性冷媒の取り扱いが明確になり、不燃性相当の意味である「不活性」と定義される予定である。日本だけが微燃性冷媒を不燃相当にするのはおかしいという声も聞かれるが、国内の高圧ガス保安法の「不活性」という用語は「危険性が著しく少ない」(KHK法律用語集)という意味で使用されており、冷媒の物性を表す用語ではなく、機器として使われた場合のリスクが少ないということの意味するので、この違いは矛盾するものではないと考えられる。

また表1-11にISO規格と高圧ガス保安法の冷凍規則における微燃性冷媒の取り扱いについて比較する。高圧ガス保安法では微燃性冷媒の定義はなく、微燃性冷媒は可燃性でもなく不活性でもない取り扱いが要求される¹⁶⁾。よって図1-8のように大きく三つの課題があり、微燃性冷媒の普及の最大の障害になっている。

- ① 冷凍能力3～5冷凍トンの機器において耐圧基準が異なるために大きな設計変更が必要であり、コストおよび質量に大きな影響を与える。
- ② 冷凍能力5～20冷凍トンまでの機器、例えばビル用マルチエアコンにおいて販売において20日前までに自治体への届出が必要であり、また補修・メンテなどにおいて冷媒回路を変更する場合にも事前の届出が必要であるので、顧客に多大の負荷をかけることになり、販売に大きなマイナスとなる。
- ③ 50冷凍トン以上の機器は、指定設備に認められると、認可は必要ではなく、届出とすることができるが、それができるのは不活性冷媒に限られる。

1-3-4 規制緩和の動き

日本では2015年3月12日、2016年3月9日の産業構造審議会保安分科会高圧ガス小委員会において高圧ガス保安法冷凍保安規則の規制緩和の方向性が打ち出されている¹⁷⁾。規制緩和の方向は冷凍規則においてR32、R1234yf、R1234ze(E)の3冷媒を「不活性」に位置づけるという方向性である。ただし、技術上の基準に必要な措置を講ずるという条件付きである。必要な措置というのは

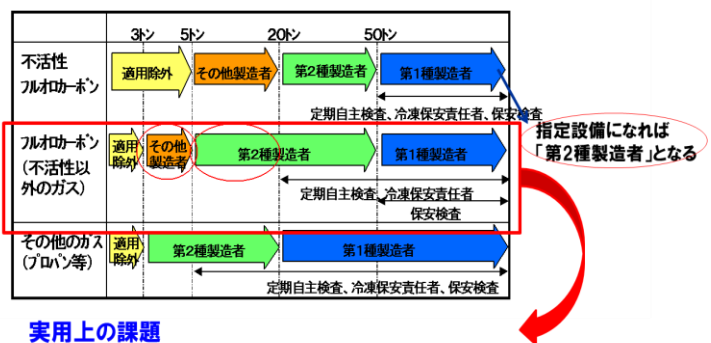
- ・これらの微燃性冷媒が漏洩した時に滞留しないような構造にすること
- ・滞留の恐れがある場所には検知・警報の設備を設けること

である。

また一般ガスに広く適用される一般高圧ガス保安規則や、主に工場に適用されるコンビナート等保安規則でも微燃性3冷媒を「不活性」と位置づける方針である。しかし冷凍保安規則と同様に技術上の基準に必要な措置を講ずるという条件付きである。

国際的にも規制緩和が進んでいる。2010年にはASHRAE34が改定され微燃性クラス(2L)が区分された。2013年にはIEC60335-2-

冷凍保安規則と冷媒区分による取扱



実用上の課題

- ① 3～5冷凍トンの耐圧基準が現行と違う
- ② 5～20冷凍トンの届出が必要
- ③ 50トン以上で指定設備にできない

図 1-8 高圧ガス保安法冷凍保安規則の課題

表 1-11 微燃性冷媒の取扱規格比較 (主要なもの)

項目	冷凍保安規則(法律) 可燃でも不活性でもない場合	ISO5149(規格)
適用区分	冷凍能力により区分	用途・設置で区分
最大充填量	制限なし	形態により制限あり
許容充填量	制限なし	部屋面積等により制限
火気取扱い	付近にないこと	AIT以下or700℃以下
防爆	要求なし。可燃性は有	要求なし
検知器等	要求なし 可燃・毒性冷媒は有	許容充填量を超える場合に必要(ビル用マルチ等)
届出許可等	設置・修理時に必要。 (5-20トン)	

注)ただし冷凍保安規則は例示基準やKHK施設基準で補完されている

40Ed.5 が改定され微燃性冷媒において例えばフレア管継手等が使用可能となった。続いて 2014 年に ISO817 と ISO5149 が相次いで改定され微燃性冷媒の使用規格がほぼ固まった。現在、IEC60335-2-40 の改定審議が続いており 2017 年に規制緩和される見通しである。この規制緩和では日本の主張するビル用マルチエアコンの最大漏れ量 10kg/h が米国の反対にあい争点になっていたがようやく合意が取れたために自然換気条件等の諸課題も決着を見るようになった。米国では温暖化対策の一環として環境省 EPA が主導して、冷媒使用認可制度 SNAP (Significant New Alternatives Policy) が改定され微燃性冷媒や充填量が少ない可燃性冷媒の使用が一体型の機器において認められ、一方で R404A, 一部の R134a など温暖化係数が高く代替冷媒がある場合は登録から外され結果的には禁止される予定である。大きな機器の規制緩和の議論は日本冷凍空調学会の ISO TC86 国内委員会において ASHRAE15 について進んでおり、この結果をベースに国際メカニカルコード等の改正を踏まえ最終的には建築基準等にも反映される見通しである。一方、SDS 等に反映される GHS の規制緩和の動きも進んでいる。GHS は物質の安全データシート (SDS) にも記載されるが、R32 や R1234yf など微燃性のものを「極めて高い可燃性 (Extremely Flammable)」と定義しており現場を混乱させている。GHS に関しては多くの関係者が疑問を感じており、日本とベルギー政府やフルオロカーボン協会の努力により「Extremely Flammable」から「Flammable」に改正することが検討されている。因みに R1234ze(E)は GHS では不燃である。日本では可燃性と位置付けられ、日本と GHS では矛盾しているが、これは測定試験方法の着火エネルギーの違いによるものであると言われている。

参考文献

- 1-1) UNEP OZONE SECRETARIAT Home page,
ozone.unep.org/new_site/en/assessment_panels_bodies.php?committee_id=6
- 1-2) 今後のフロン対策の方向性について 中環審・産構審 2014.12
www.env.go.jp/council/06earth/y0612-07/mat01.pdf
- 1-3) 日本の約束草案 温室効果ガス削減計画 官邸 2015.7.17
www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/.../siryou1-2.pdf
- 1-4) Guidance Document for F-gas regulation 2015.4
ec.europa.eu/clima/policies/f-gas/docs/f-gas_equipment_operators_en.pdf
- 1-5) 例えば UNEP Ozone unit ExCom
www.multilateralfund.org/.../64/English/1/6452.pdf
- 1-6) 高圧ガス保安法 冷凍保安規則
www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/law8.html
- 1-7) 産業構造審議会保安分科会高圧ガス小委員会
www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/koatsu_gas/pdf/007_05_03.pdf
www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/koatsu_gas/010_haifu.html

2. 燃焼特性

2.1 はじめに

不燃であるが GWP の高い従来型冷媒から、GWP が低い燃焼性を有する新冷媒への転換が注目されている。そのため、新冷媒への転換には、燃焼危険性を実用上許容できる低水準にとどめつつ、温暖化効果を可能な限り低減した冷媒やそれを用いた機器を開発することが重要な鍵となる。

ISO/IEC Guide 51(1999)²⁻¹⁾は、リスクを、危害の起こる確率と危害の激しさの組合せと定義している。この定義に従えば、冷媒の燃焼性リスク評価に関しては、冷媒漏洩時に爆発が起こるかどうかが(発生確率)と実際に爆発が起きた場合の被害の大きさの両因子に関する評価法を開発し、それを用いて種々の基礎的燃焼特性を明らかにすると共に、それらを適切に組み合わせた指標を整備する必要がある。

ISO 817(2014)『冷媒：呼称と安全等級』²⁻²⁾は、燃焼限界(下限界, LFL), 燃焼熱(H_c), 燃焼速度($S_{u,max}$)の3指標で冷媒の燃焼性等級を区分している。表 2-1 は、ISO 817 の冷媒の燃焼性等級と代表的な冷媒をまとめたものである。冷媒を国際的な規則に則って実用化するためには、これらの燃焼性指標を明らかにすることが不可欠である。ANSI/ASHRAE Standard 34-2010『冷媒の呼称と安全等級』²⁻³⁾及び ISO 817(2014)は、燃焼性の低い可燃性等級 Class 2 のうち、「燃焼速度」が $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下の冷媒を、可燃性のうち最も燃焼性の低い等級「Class 2L」(以下、Class 2L の冷媒を微燃性冷媒と云う)に区分して、他の可燃性冷媒と区別することにした。これを踏まえて、ISO 5149(2014)『冷凍システムとヒートポンプ：安全性及び環境要求』²⁻⁴⁾や IEC-60335-2-40『電気ヒートポンプ, エアコン, 及び除湿器の安全要求』²⁻⁵⁾では、微燃性冷媒について許容充填量の緩和など、使用上の制約を緩和する方向で規程の整備が進められている。

ANSI/ASHRAE Standard 15『冷凍システムの安全規格』²⁻⁶⁾は、A2 及び A3 冷媒を使用する場所では、裸火や 427°C を超える高温表面をおくことを禁止している。したがって、冷媒の高温表面での熱分解や燃焼に関する知見も重要な特性である。

以上のように、微燃性冷媒やそれを使用した機器の国際的な普及を考えた場合、上述のような燃焼特性を正しく評価することが必要になっている。

一方、実用に供する信頼性の高いリスク評価の確立を目指すならば、燃焼特性について実際に冷媒が使用される環境における最悪の条件まで考慮してデータを蓄積するべきである。その観点から、本プロジェクトでは燃焼特性の湿度依存性等についても検討対象としている。

表 2-1 ISO817(2014)の冷媒の燃焼性等級と代表的な冷媒

Flammability class	Definition	Representative refrigerant
Class 3 (強燃)	$LFL \leq 3.5 \text{ vol}\%$ or $H_c \geq 19 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	R290, R600a
Class 2 (弱燃)	$LFL > 3.5 \text{ vol}\%$ and $H_c < 19 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	R152a
Class 2L (微燃)	In Class 2, $S_{u,max} \leq 10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	R717, R32, R143a R1234yf, R1234ze(E)
Class 1 (不燃)	No flame propagation	R134a, R410A, R22

本レポートでは、まず本章で微燃性冷媒を中心に代表的な基礎燃焼特性について報告する。本章で得られた冷媒の基礎的燃焼特性を踏まえ、以降の章でより実用的なリスク評価の進捗について報告する。

前述のとおり、冷媒の燃焼性等級は、燃焼限界、燃焼熱、および燃焼速度の大ききで区分される。そこで、2.2 節では、微燃性及び不燃性冷媒を対象に可燃範囲(燃焼限界)について、温度および湿度の影響も含めて報告する。2.3 節では、微燃性及び不燃性冷媒の燃焼速度について、温度および湿度の影響を報告する。

化合物が実用環境で燃焼に至るかどうかが判断するには、化合物の着火に必要なエネルギーと周囲の着火源の情報が必要である。そこで、2.4 節では、冷媒の着火エネルギーと消炎距離について、温度、湿度、および

冷媒濃度依存性を含めて報告する。

本プロジェクトで、微燃性冷媒の燃焼特性を正しく評価する指標として、「消炎直径」という指標を新たに提案した。これは間隙を有する電気機器等の内部で発生した火花が可燃性冷媒の火災原因となりうるかどうかを判断する指標として考案したものである。2.5 節では、消炎直径について湿度依存性を含めて報告する。

2.6 節では、熱分解生成物について、代表的な微燃性冷媒と従来型の不燃性冷媒との比較を行った。燃焼性の観点では、上述のとおり可燃性冷媒を使用する場所では、裸火や 427°C を超える高温表面をおくことは禁止されているため、熱分解が始まる温度の情報は重要である。また、毒性の観点からも、熱分解温度や熱分解生成物の種類や濃度について、新冷媒と従来使用されてきた不燃性冷媒とで有意な差が現れるか、把握しておく必要がある。

2.7 節では、本章で得た基礎燃焼特性を用いて、いくつかの地域の気候条件をふまえた実用環境での冷媒の燃焼特性について見積もったものを例示する。同様の方法で、世界各地における冷媒のおよその燃焼特性を把握することが可能である。

これらの研究によって得られた燃焼特性を表 2-2 にまとめて示す。本レポートで使用するデータは、基本的に表 2-2 のデータを使用している。

2.2 可燃範囲への温度・湿度影響

地球温暖化への対応の一環として近年種々の冷媒化合物が開発されており、中には可燃性のものもある。冷媒は種々の条件で使用するため、燃焼限界の温度・湿度依存性の理解は重要である。特に、フッ素を多く含む化合物であれば湿度の影響を強く受けるものもある。以下では、関連の化合物の燃焼限界の湿度依存性について検討を行った結果を述べる。また、その文脈でいえば、フッ素を多く含む不燃性化合物の場合、通常の実験室条件では不燃性であっても、高温高湿下では可燃性になる可能性も考えなければならない。ここでは、不燃性と目されている R410A, R410B, R134a(CH₂FCF₃), R125(CHF₂CF₃)等の冷媒が高温高湿下でどのような燃焼性を示すか調べた結果についても報告する。なお R410A および R410B とは R32(CH₂F₂)と R125 との重量比がそれぞれ 50 : 50 および 45 : 55 の混合冷媒のことである。

燃焼限界の測定は ASHRAE 法²⁻³⁾ (ASTM E681 法²⁻⁷⁾) に則って行った。内容積 12L のガラス製球形容器を温度制御された空気槽中に設置した。容器のフランジは緩いバネで押さえる方式である。測定に際しては、試料ガス・乾燥空気の順に分圧法により爆発容器内に導入し、そのあと純水を注入し攪拌しながら蒸発させる方法で湿度調整を行った。注入には 2 種類の注射器を用いた²⁻⁹⁾。内容積 0.25mL の注射器の場合、純水 q (mL)を注入することによって容器中に得られる 23°C 換算の水蒸気分圧 p (mmHg)は次式のようにになった。

$$p = 80.06 \cdot q - 0.078 \quad (2-1)$$

また、高温・高湿度の実験では内容積 1.00mL の注射器を用いたが、純水 q (mL)を注入した場合に容器中に得られる 60°C 換算の水蒸気分圧 p (mmHg)は次式のようなであった。

$$p = 90.895 \cdot q \quad (2-2)$$

2.2.1 実験室レベルの温度・湿度の燃焼限界への影響

(a) 温度依存性について 一般の可燃性ガスの燃焼限界の温度依存性については、基本的に White 則²⁻¹⁰⁾に基づいて予測することができる。微燃性冷媒のように燃焼性の低いガスについても同様のことが期待できるものか確かめる必要がある。ここでは、微燃性冷媒のうち R717, R32, R143a, R1234yf, および R1234ze(E)について測定を行った。このうち R1234yf については乾燥空気中と湿潤空気中のそれぞれで測定を行った。また、R1234ze(E)については、湿潤空気中でのみ測定を行った。ここでの湿潤空気は 23°C 換算で 50%となる湿度である。測定結果を表 2-3 に示す。

表 2-2 代表的な冷媒の燃焼特性

	R290	R600a	R152a	R717	R143a	R32	R1234yf	R1234ze(E)	R413A	R410A	R134a	R22
ISO817 safety class	A3	A3	A2	B2L	A2L	A2L	A2L	A2L	A1/A2	A1	A1	A1
GWP _{100yr}	<3	3	124	<1	4470	675	4	6	2050	2090	1430	1810
Flammability limit (LFL/UFL) , vol% (upper pair) and kg·m ⁻³ (lower pair)												
HPGSA ^a -A method,	1.92/10.46	1.57/8.6	4.25/18.3	10.5/50.0	7.15/18.8	13.3/29.3	6.21/14.0	6.39/13.3				
25°C0%RH	0.035/0.189	0.037/0.204	0.115/0.494	0.073/0.348	0.246/0.646	0.283/0.623	0.290/0.653	0.298/0.620				
ASHRAE method ^b ,	2.02/ 9.81	1.67/7.66	4.3/17.3	15.3 / 30.4	7.3/17.9	13.5 / 28	6.7 / 12	n.f / n.f	n.f./n.f. ^c	n.f / n.f ^d	n.f / n.f	n.f / n.f
30°C0%RH	0.0358/0.174	0.039/0.179	0.114/0.460	0.105/0.208	0.247/0.605	0.282/0.586	0.307/0.550					
ASHRAE method,			4.36 / 14.8	18 / 24.5		13.5 / 23.6	4.8 / 15	5.05 / 15.5	7.16/14.3 ^c	15.6/ 21.8 ^d	11.5/ 15.9	n.f / n.f
60°C50%RH			0.105/0.358	0.112/0.153		0.257/0.449	0.200/0.626	0.211/0.647	0.291/0.581	0.414/0.579	0.429/0.594	
Heat of combustion (H_c), MJ·kg ⁻¹												
25°C0%RH	46.3	45.6	16.3	18.6	10.2	9.5	10.7	10.1	7.6 ^d	6.5 ^d	6.7	3.5
Maximum burning velocity ($S_{u,max}$), cm·s ⁻¹												
25°C0%RH	38.7	34.2	23.6	7.2	7.1	6.7	1.5	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.
60°C0%RH	47.4	41.3	29.0	8.8	9.1	7.8	1.9	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.
60°C50%RH						6.9	10.3	10.3	5.9 ^c	3 ^e	2 ^e	n.f.
Minimum ignition energy (E_{min}), mJ, estimated ^f												
25°C0%RH	0.35	0.62	0.9	45	27	29	780	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.
60°C50%RH						40	9	9	30 ^c	130 ^e	130 ^e	n.f.
Quenching distance (d_q), mm ^g												
25°C0%RH	1.70	2.0	2.33	8.95	7.0	7.55	24.8 ^e	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.
60°C0%RH	1.58	1.7 ^h	2.2 ^h	8.05	5.8 ^h	6.95	22.7 ^h	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.
60°C50%RH						8.25	5.0	5.15	7.55	13.25	12.5 ^e	n.f.
										12.5 ^e		
Flame extinction diameter (d^*), mm, for the distance between ignition point and opening (h) of 9 mm												
25°C0%RH	1.23			6.9		5.6	14.0 ⁱ	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.
							10.0 ^{e,i}					

60°C0%RH	5.25		n.f.	n.f.	n.f.	n.f.	n.f.
60°C50%RH	6.35	3.9	3.9				n.f.
Thermal decomposition temperature ^j , °C, at the stoichiometric concentration (C_s) with gas flow rate of 100 cm ³ ·min ⁻¹							
0%RH	570±10	610±10	580±20			710±20	500±10

n.f. = nonflammable.

a High Pressure Gas Safety Act.

b ASTM E681 (2004) method ²⁻⁷⁾ using a 12-L flask.

c Values obtained for WCFF composition of R413A, i.e. R218/134a/600a = 28.85/64.49/6.67wt%, instead of the nominal one, 9.0/88.0/3.0wt%. The WCFF of R413A was calculated by Professor Ryo Akasaka, Kyushu Sangyo University.

d Values obtained for the nominal composition of R410A and R413A.

e Values obtained in the microgravity environment where the buoyant flow is eliminated from the very slow flame propagation.

f Estimated value from ref. 2-8).

g Values measured by modified ASTM E582-07 method²⁻⁸⁾.

h Estimated value from ref. 2-8).

i d^* for $h = 58$ mm, instead of 9 mm.

j Thermal decomposition temperature is the temperature at which decomposition rate of the refrigerant attains 10%.

表 2-3 主な微燃性冷媒の燃焼限界の温度依存性

Refrigerant	Temperature range, °C	Intercept at 0°C, vol%		Temperature coefficient for LFL, vol%·K ⁻¹		Temperature coefficient for UFL, vol%·K ⁻¹	
		LFL	UFL	Observed	Predicted	Observed	Predicted
		R717	5-100	15.63	29.50	-0.0086	-0.0095
R32	5-100	13.68	27.40	-0.0070	-0.0064	0.0091	0.0133
R143a	5-100	7.51	17.60	-0.0051	-0.0038	0.0080	0.0093
R1234yf, dry	5-100	7.13	11.70	-0.0133	-0.0029	0.0102	0.0052
R1234yf, moist	20-100	5.55	13.15	-0.0045	-0.0028	0.0098	0.0071
R1234ze(E), moist	20-100	6.39	12.17	-0.0104	-0.0029	0.0174	0.0061

ここで、予測値は、White 則に基づいて下限界 $L_{(t)}$ および上限界 $U_{(t)}$ についてそれぞれ得られた次の二式で計算した値である。

$$L_{(t)} = L_{25} \left\{ 1 - \frac{100C_{pL}}{L_{25}Q} (t - 25) \right\} \quad (2-3)$$

および、

$$U_{(t)} = U_{25} \left\{ 1 + \frac{100C_{pL}}{L_{25}Q} (t - 25) \right\} \quad (2-4)$$

ここで、 t は温度 (°C), L_{25} および U_{25} は、25°C, 1 気圧における下限界および上限界 (vol%), C_{pL} は、濃度 L_{25} における未燃混合気の定圧熱容量 (J·mol⁻¹·K⁻¹), Q は燃料ガスの燃焼熱 (J·mol⁻¹) である。

この結果を見ると、R717 の燃焼限界の温度依存性は予測と良く合っている。また、R32 については上限界のずれがやや大きく、逆に R143a については下限界のずれがやや大きい、いずれもまずまずの一致といえよう。それに対して、特に乾燥空気中における R1234yf と湿潤空気中における R1234ze(E) とは、温度依存性が予測値と比べてかなり大きくなっている。この二つの化合物は燃焼力が一段と弱いため、それが温度依存性を大きくしているのであろう。

(b) 湿度依存性 フッ素原子は水素原子と結合して HF を形成しようとする強い傾向を持っている。そのため、分子中のフッ素原子数が水素原子数よりも多い冷媒では、空気中に水蒸気がある場合、燃焼の際に生成したフッ素原子が空気中の水蒸気から水素原子を引き抜く傾向を示す。その場合は、乾燥空気中での燃焼に比べて発熱量が増加し、可燃濃度範囲が広がる可能性が高い。従って、空気中にどの程度の湿度があれば可燃範囲がどの程度変化するか調べる必要がある。

しかしその前に、フッ素原子数が水素原子数に比べて多くない冷媒では、そのような傾向が無いことを確認しておくことが重要である。図 2-1 に、分子中のフッ素原子数がゼロの R717 とフッ素原子数が水素原子数を上回らない R32 および R143a について下限界 (LFL, vol%) および上限界 (UFL, vol%) を測定した結果を示した²⁻¹¹⁾。燃焼限界の測定温度は 35°C であるが、空気の湿度は 23°C 換算の相対湿度 (%RH) で表わされている。図で分かるように、これらの冷媒の燃焼限界は空気中の湿度の影響を殆ど受けないことが分かった。むしろ湿度の増加と共に、僅かではあるが可燃範囲は狭くなる傾向が見られた。

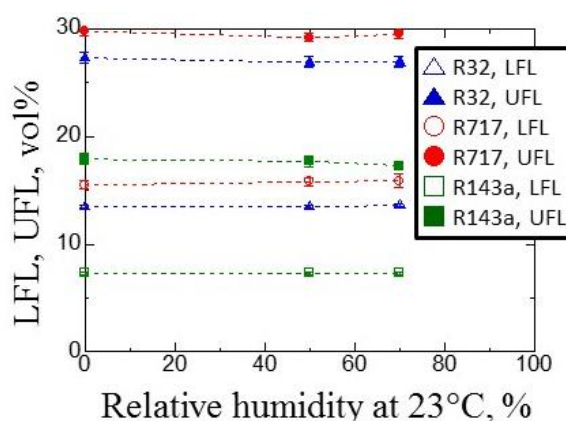


図 2-1 R717, R32, R143a の燃焼限界への湿度の影響
Measured at 35°C. Open symbols: LFL; solid symbols: UFL.

それに対して図 2-2 は、それぞれ R1234yf および R1234ze(E)の燃焼限界に対する湿度の影響を測定した結果を示している²⁻¹¹⁾。これらの冷媒は、湿度の増加と共に UFL は上昇し、LFL は低下することが分かった。全般的に、湿度の低いところでは変化が顕著であるが、湿度の増加と共に変化は次第に緩やかになる。特筆すべきことは、R1234ze(E)は湿度が 10%RH 以下では不燃性、10%RH を超えると可燃性であることである。この場合は可燃範囲の立ち上がりが急激であるために、燃焼限界の湿度依存性を単純に多項式で近似することは困難である。ここでは、楕円関数を用いた次の式(2-5)によって湿度の影響を表現することとした。

$$y = y_0 + a [2q(x - x_0) - (x - x_0)^2]^b \quad (2-5)$$

ここで、 y は燃焼限界(vol%)、 x は 23°C 換算の%RH を 100 で除した値を表す。また、 x_0 および y_0 は関数の起点であり、途中から不燃が可燃に変わる場合はその境界を表す。 q は楕円関数の極大値を与える横軸の値であり、通常は 1.00 とする。表 2-4 には、R1234yf および R1234ze(E)の上下限界の湿度依存性をこの式に当てはめて求めた係数 a 、 b の値を示してある。

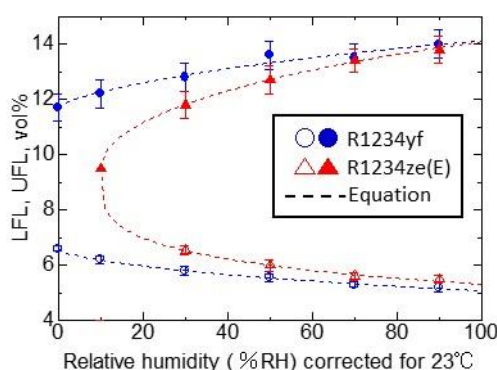


図 2-2 R1234yf および R1234ze(E)の燃焼限界への湿度の影響
Measured at 35°C. Broken curves are fitting functions expressed by Eq. (2-5).

表 2-4 35°C における R1234yf および R1234ze(E)の燃焼限界への湿度の影響 (湿度は 23°C 換算値)

Refrigerant	Flammability limit	Origin of function		Position of maximum	Parameter	
		x_0	y_0		a	b
R1234yf	LFL	0.00	6.6	2.80	-0.600±0.124	0.610±0.173
	UFL	0.00	11.7	2.80	0.856±0.071	0.681±0.073
R1234ze(E)	LFL	0.10	9.5	2.80	-2.92±0.18	0.25±0.06
	UFL	0.10	9.5	2.80	2.23±0.03	0.50±0.07

2.2.2 高温高湿度の燃焼限界への影響

(a) 不燃性冷媒の高温・高湿度における挙動 分子中のフッ素原子数が水素原子数よりも多い可燃性ガスは、燃焼の際に空気中の水蒸気から水素原子を引き抜く傾向があることを述べた。その場合は、乾燥空気中の燃焼に比べて反応が活発になり可燃範囲が拡大する可能性が高い。その文脈で言えば、通常不燃性と目されるガスであっても、高温高湿下では可燃性になる可能性が考えられる。前項では、いくつかの冷媒について燃焼限界に対する湿度の影響を評価した。その時の湿度条件は、温度 23°C 換算で相対湿度 90%RH までであった。これは最大で全圧 760Torr の空気中に 18.96Torr の水蒸気が含まれているということに相当するが、本項では、60°C において最大で湿度 50%RH という条件で測定を行った。60°C で湿度 50%RH というのは 760Torr 中に 74.72Torr の水蒸気ということであり、通常 ASHRAE 法で規定されている 23°C 換算で 50%RH というのと比べると 7.1 倍になる。ここでは、通常不燃性と目される R410A, R410B, R134a, R125 を

取り上げ、それぞれについて温度 60°C で相対湿度 0~50%RH の範囲で燃焼限界を調べた。

図 2-3 に R410A, R410B, R134a についての測定結果を示す²⁻⁹⁾。図から分かるように、R410A は相対湿度が 19%RH 以上になると可燃性になる。不燃から可燃性の領域に入るとその初期には急に可燃範囲が広がるが間もなく変化は穏やかになる。同様に R410B は相対湿度 25%RH 以上 R134a は 38%RH 以上になると可燃性になった。一方、R125 は今回の測定条件の範囲内で可燃性には変わることにはなかった。なお、60°C で相対湿度 50%RH の時の R410A, R410B, および R134a の可燃範囲は、それぞれ 15.6 ± 0.2 – 21.8 ± 0.4 vol%, 16.3 ± 0.3 – 20.9 ± 0.4 vol%, および 11.5 ± 0.3 – 15.9 ± 0.4 vol% であった²⁻⁹⁾。なお、表 2.5 には、この 3 種の冷媒の燃焼上下限界の湿度依存性を先の式(2-5)に当てはめて求めた係数の値も示してある。

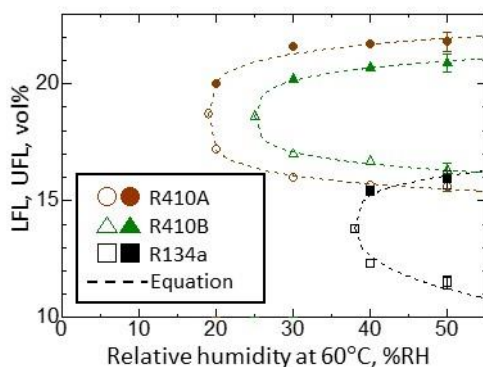


図 2-3 不燃性冷媒 R410A, R410B, R134a の燃焼限界に対する高湿度の影響
Measured at 60°C. Broken curves are fitting functions expressed by Eq. (2-5).

表 2.5 60°C における不燃性冷媒 R410A, R410B, および R134a の燃焼限界に対する湿度の影響

Refrigerant	Flammability limit	Origin of function		Position of maximum	Parameter	
		x_0	y_0		a	b
R410A	LFL	0.19	18.7	1.00	-3.70 ± 0.53	0.22 ± 0.09
	UFL	0.19	18.7	1.00	3.83 ± 0.59	0.25 ± 0.11
R410B	LFL	0.25	18.6	1.00	-2.90 ± 0.02	0.28 ± 0.11
	UFL	0.25	18.6	1.00	3.03 ± 0.02	0.29 ± 0.10
R134a	LFL	0.38	13.8	1.00	-5.04 ± 0.01	0.45 ± 0.13
	UFL	0.38	13.8	1.00	3.39 ± 0.01	0.27 ± 0.10

(b) 可燃性冷媒の高温・高湿度における挙動 本項では、元々可燃性であるものが前項と同じく 60°C で湿度 50% の条件下でどのような燃焼性を示すのか調べるため、R1234yf, R1234ze(E), R32, R143a, R152a, および R717 の 6 種の冷媒について燃焼限界の測定を行ってみた。結果を表 2-6 に示す²⁻⁹⁾。比較のために、23°C50%RH の湿潤空気を用い温度を 35°C にして測定した値も記した。先に見た通り、R1234yf と R1234ze(E) とは高湿度で上下限界とも可燃範囲が広がる方向に変化するが、その他の化合物ではむしろ可燃範囲が狭くなるのが分かった。これは水蒸気が単に不活性ガスとして働いていることを示している。

表 2-6 温度湿度条件と可燃冷媒の燃焼限界

Refrigerant	35°C/50%RH for 23°C		60°C50%RH	
	LFL,	UFL,	LFL,	UFL,
	vol%	vol%	vol%	vol%
R1234ze(E)	5.95±0.15	12.7±0.4	5.05±0.1	15.5±0.7
R1234yf	5.4±0.15	13.5±0.5	4.8±0.1	15.0±0.6
R32	13.5±0.2	26.9±0.5	13.5±0.2	23.6±0.6
R717	15.8±0.4	29.2±0.4	18.0±0.7	24.5±0.5
R143a	7.3±0.15	17.7±0.5	7.4±0.1	15.0±1.0
R152a	(4.3±0.1)	(17.3±0.5)	4.36±0.05	14.8±0.5

Values in the parentheses were obtained under the dry condition.

2.2.3 ASHRAE 法と保安法 A 法の比較：窒素或いは R744 混合系

これまで我々は、冷媒関連ガスの燃焼限界を主として ASHRAE 法によって測定してきた。一方、我が国には従来からハロゲン系ガスの燃焼限界測定法として高圧ガス保安法（High Pressure Gas Safety Act）の通達に付記された A 法（以下、保安法 A 法、HPGSA-A method）がある。上に述べたように、両測定法の内容はかなり異なるが、両者の測定結果を系統的に比較した例はない。ここでは、冷媒関連でよく目にする R32, R143a, R152a を取り上げ、これらを N₂ 或いは R744 で希釈した場合の Fuel inertization point (FIP) を両法で比較することを行ってみた。両者の比較を行うには、適当な対象ガスを選び、規定事項以外はすべて同じ条件で測定を行ってみる必要がある。

測定は全て温度 25°C の乾燥空気中で行うこととした。2L 容器の場合は室温を 25°C に制御して行なった。また、測定ガスについては、燃焼限界の判定のしやすさが重要である。冷媒関連では弱燃性のガスを取り扱うことが多いが、その場合、ASHRAE 法の 12L 容器中の火炎伝播角は 90°付近で停滞し、濃度変化に対する到達角の変化が小さくなる場合が多いので、燃焼限界の測定に大きな不確かさが伴うことになる。この傾向は特に上限界で顕著である。ここで、可燃性ガスを不活性ガスで希釈して FIP を定める測定を行うこととしたのは、それを避けるためである。FIP であれば上下限界の双方を測定する煩わしさもなくなる。希釈により得られる燃焼限界三角図を、火炎到達角を第 3 の軸として立体的に眺めた場合、FIP は山の稜線を不活性成分 100% の点に向かって下って行く途中に位置する。ここでは R32-N₂ 系、R32-R744 系、R143a-N₂ 系、および R152a-R744 系を測定対象とし、最初に ASHRAE 法によって三角図を作成し FIP を定める実験を行った。次に、各々三角図の稜線に沿って濃度を変化させ到達温度および圧力を測定して保安法 A 法としての FIP を定め、ASHRAE 法の結果と比較した。

最初の手順として、ASHRAE 法によって R32-N₂ 系、R32-R744 系、R143a-N₂ 系、および R152a-R744 系の三角図を測定して FIP を定めた。ASHRAE 法で測定された FIP における二成分系中の不活性成分の比率は、R32-N₂ 系、R32-R744 系、R143a-N₂ 系および R152a-R744 系について、それぞれ 0.53±0.02, 0.34±0.01, 0.69±0.02, および 0.815±0.010 であった。

次に、各三角図の稜線に沿って濃度を変化させながら保安法 A 法により可燃不燃の限界つまり FIP を求めた。保安法 A 法による測定では、温度上昇・圧力上昇の双方を測定した。図 2-4 は R32-N₂ 系の稜線に沿って濃度を変化させながら着火による a)到達温度および b)到達圧を測定した結果を示したものである。温度測定用の熱電対は 2L 容器の天井中央 (○) およびそれから略 45°下がった肩部 (□) の 2 か所に設置した。図 2-4 で見ると、温度 2 か所と圧力とはいずれも略同じ濃度で立ち上がり始めている。従って、立ち上がり始める濃度を燃焼限界と考えると、三者のいずれかで判定しても略同じ燃焼限界値を与えることになる。実際問題としては、温度なり圧力なりがどこまで上昇すれば可燃範囲内かという閾値

を設定することが必要である。ここでは到達圧が初圧の 30%以上になれば可燃範囲内であるとする事とした。これは ASHRAE 法で規定している可燃／不燃境界の火炎伝播範囲、つまり容器の底部から直径の 1/3 上方の点を頂点とする 90°の逆円錐内の容積が下限界火炎温度の既燃ガスで充たされたとした場合の圧力上昇に略等しい。このようにして、ASHRAE 法による稜線に沿って、保安法 A 法で測定した FIP における（二成分系中の）不活性成分の混合比は、それぞれ 0.58 ± 0.01 , 0.45 ± 0.02 , 0.74 ± 0.02 , および 0.84 ± 0.02 となった。これらの値はいずれも ASHRAE 法の値よりも大きい。つまり可燃範囲としてはより広く出ることになる。

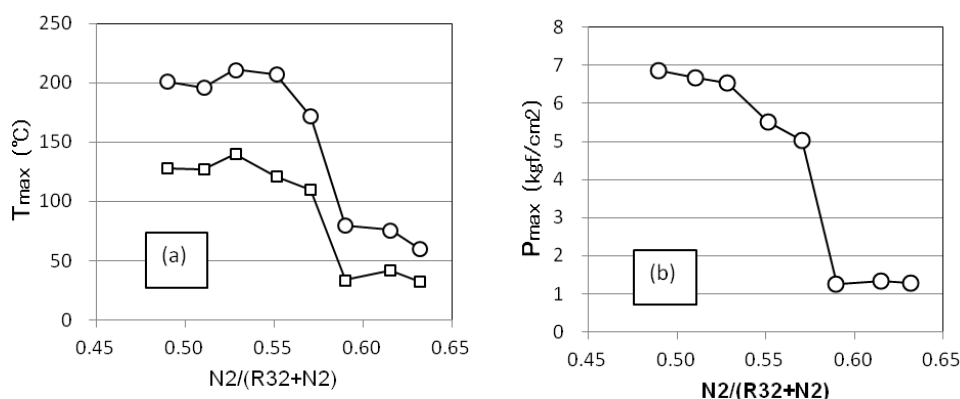


図 2-4 保安法 A 法による R32-N₂ 系の FIP 測定における (a)到達温度と (b)到達圧

2.2.4 ASHRAE 法と種々の金属線を用いた保安法 A 法による燃焼限界

(a) 保安法 A 法で種々の金属線を溶断した場合の測定値と ASHRAE 法 そこで、ASHRAE 法と保安法 A 法の測定値の整合性の問題であるが、理想的な測定方法が確立されていない状況でこの問題に適切に対処するためには、とりあえずどちらか一方をもう一方に整合化させるというやり方が考えられる。問題は、どちらをどちらに整合化すべきかである。ここで考慮すべきことは、燃焼限界測定法の信頼性について常に議論の的になる 2 つの問題である。一つは点火エネルギーでありもう一つは容器壁での冷却の問題である。この 2 点のいずれもが、充分大きな容器で測定すれば無視できるほど影響が小さくなることが期待される。その点、ASHRAE 法はごく限られたデータではあるが通常では使用されないような大型の容器で燃焼限界の測定を行い、それと値を合わせるような形で条件設定が行われた経緯がある²⁻¹²⁾ので比較的妥当性が高いといえよう。従って、両者間で整合性を図るとすれば保安法 A 法を手直しして ASHRAE 法に合わせるのがより合理的であると思われる。

具体的にどのように行うかであるが、他の条件はなるべく変えないで保安法 A 法による測定値を ASHRAE 法に近づけるためには、同じ AC100V の金属線溶断であっても、保安法 A 法本来の 0.3mmΦ 白金線とは異なる金属線を用いて測定することが考えられる。ここでは、①0.3mmΦ 白金線、②0.2mmΦ 白金線、③0.3mmΦ モリブデン線、④0.2mmΦ モリブデン線、⑤0.5mmΦ ニクロム線、⑥0.3mmΦ ニクロム線について測定を行ってみた。図 2-5 は、これらの金属線の溶断によってそれぞれ左から R32-N₂ 系、R32-R744 系、R143a-N₂ 系、および R152a-R744 系の稜線上で到達圧が初期圧の 1.3 倍に達した時の不活性成分の混合比を求め、ASHRAE 法で測定した FIP における値に対する比で示したものである。これで見ると、用いた金属線によって測定値はまちまちであり、試験した金属線の内では①0.3mmΦ 白金線および③0.3mmΦ モリブデン線が最も可燃範囲が広く、⑥0.3mmΦ ニクロム線がもっとも可燃範囲が狭いことが分かる。試験した 4 通りの系について得られた値の平均値と平均偏差で比較すると、④0.2mmΦ モリブデン線の場合に平均値が最も 1.0 に近く、また平均偏差も小さいことが分かった。

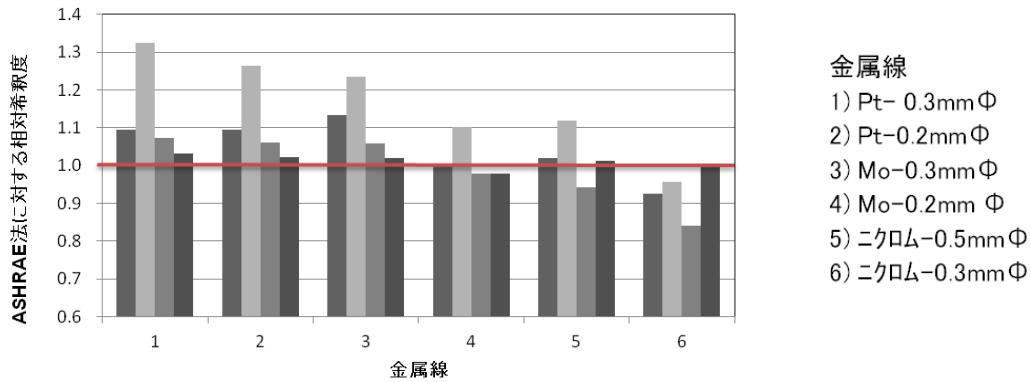


図 2-5 保安法 A 法で溶断する金属の種類を変えた場合の測定値と ASHRAE 法の測定値との比較(1) 可燃ガス-希釈ガス系の FIP における希釈度 (各 4 本の棒グラフは左からそれぞれ R32-N₂ 系, R32-R744 系, R143a-N₂ 系, および R152a-R744 系.)

同様の実験は, それぞれ R32, R143a, および R152a の単体ガスについても行っている. その結果を示したのが図 2-6 である. 左側が下限界, 右側が上限界である.

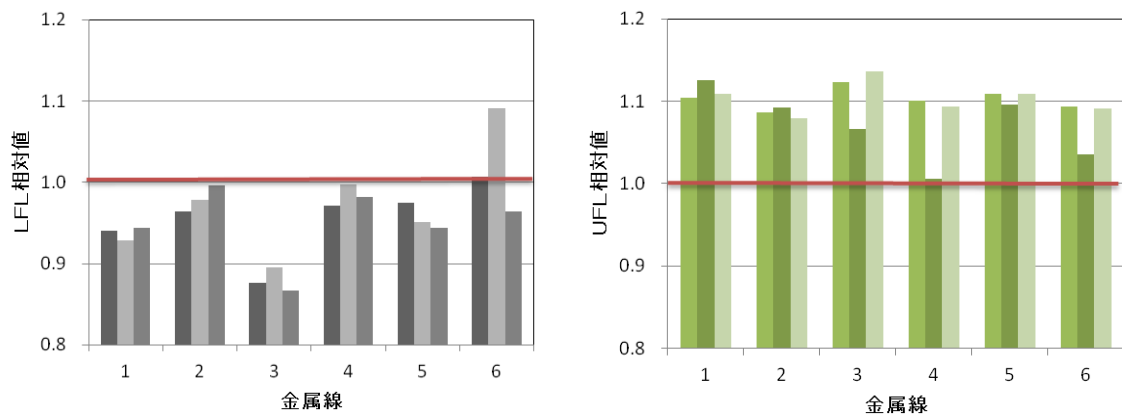


図 2-6 保安法 A 法で溶断する金属の種類を変えた場合の測定値と ASHRAE 法の測定値との比較(2) 燃焼限界 (各 3 本の棒グラフは左からそれぞれ R32, R143a, および R152a に対応. また, 金属線の対応は図 2-5 と同じ.)

下限界については 0.3mmΦ モリブデンが顕著に低濃度に出ているが, 最も ASHRAE 法に近いのは同じモリブデンの 0.2mmΦ の場合である. 上限界の場合は殆どの場合に ASHRAE 法よりも高濃度に出ているが, 強いて言えばこの場合もモリブデンの 0.2mmΦ が最も ASHRAE 法に近い.

以上をまとめると, ①熱電対の設置位置は頂部でも肩部でも実際上変わらない. ②温度および圧力の立ち上がる濃度は殆ど同じであるから, 判定には例えば圧力だけで充分である. ③保安法 A 法では ASHRAE 法に比べてより広い可燃範囲を与える. ④保安法 A 法で溶断に用いる金属線を変える方法をとれば小修正で ASHRAE 法に近づけることができる. 実際 0.3mmΦ 白金線の代わりに 0.2mmΦ モリブデン線を用いれば ASHRAE 法と比較的近い測定値が得られる (以下, Mo 法と呼ぶ).

(b) その他化合物の ASHRAE 法, 保安法 A 法, Mo 法による燃焼限界の測定 以上のように, 保安法 A 法では ASHRAE 法に比べてより広い可燃範囲を与えるが, 保安法 A 法の基本は変えず金属線を本来の 0.3mmΦ 白金線に代えて 0.2mmΦ モリブデン線を用いれば ASHRAE 法と比較的近い測定値が得られる

ことが分かった。しかしこれは、とりあえず R32, R143a, R152a についての結果であり、本プロジェクトで特に重要な微燃性冷媒化合物としても他に R717, R1234yf, R1234ze(E) などがある。これらについてどうなるかも確認しておく必要がある。

表 2-7 は R32, R143a, R152a に加えて、R717, R1234yf, R1234ze(E), R290, R600a の ASHRAE 法, 保安法 A 法, および Mo 法による燃焼限界測定値を示したものである。いずれも 25°C における測定値であるが R1234yf の ASHRAE 法による測定では火炎到達角は 7-10 vol% の領域でずっと 90° 付近に張り付いており、可燃範囲の特定は不可能であった。また、同じく R1234yf であるが、Mo 法による測定では確かに爆発もしくは燃焼の現象は確認されたがその濃度範囲が極めて狭かったので、誤差の見積もりは不可能もしくは無意味と判断された。

ただし、ここで ASHRAE 法に関しては注意しなければならない点がある。同法では 12L 球形フラスコの上部出口をフランジで押さえた状態で点火するが、得られる測定値は、フランジがどの程度の圧力で出口を押さえているかで変化する傾向がある。押さえる力が強ければ可燃範囲は広がるし弱ければ狭くなる。異なった測定から得られる値が揃うようにするためには、なるべく押さえる力を弱くする方向に持っていくというのが一つの考え方であろう。表 2-7 に掲載の ASHRAE 法の値は表 2-2 の該当する値に比べて若干可燃範囲が狭くなっているが、その理由はその辺にある。

表 2-7 種々の化合物の ASHRAE 法, 保安法 A 法, Mo 法による 25°C, 0%RH における燃焼限界(vol%)

Refrigerant	ASHRAE method	HPGSA-A method	Mo method
R32	14.15±0.20-26.7±0.5	13.3±0.2-29.3±0.5	13.75±0.15-29.4±0.5
R143a	7.7±0.1-16.7±0.8	7.15±0.15-18.8±0.5	7.68±0.10-16.8±0.4
R152a	4.5±0.1-16.5±0.7	4.25±0.20-18.3±0.3	4.42±0.10-18.05±0.40
R717	16.1±0.3-29.0±0.3	10.5±1.5-50±5	14.9±0.7-30.8±0.3
R1234yf	7-10 ^a	6.21±0.15-14.0±0.5	7.82-8.04 ^b
R1234ze(E)	n.f.	6.39±0.20-13.3±0.5	8.3±0.7-11.2±0.8
R600a	1.725±0.02-6.9±0.3	1.57±0.03-8.6±0.2	1.64±0.07-8.25±0.3
R290	2.08±0.04-9.5±0.5	1.92±0.04-10.46±0.2	1.91±0.04-10.41±0.10

a この濃度範囲でずっと火炎到達角は 90° 付近に張り付いており、可燃範囲の特定は不可能。

b 狭すぎて誤差の見積りは不可能。

前項で、R32, R143a, R152a については ASHRAE 法ではいずれも保安法 A 法よりも可燃範囲が狭く出るということを述べたが、表 2-7 を見ると、このことは他の R1234yf, R1234ze(E), R290, R600a を含めて云えることである。また、やはり前項で保安法 A 法における 0.3mmΦ 白金線に代えて 0.2mmΦ モリブデン線を用いれば ASHRAE 法による測定値に近い値が得られると述べたが、このことも R1234yf, R1234ze(E), R290, R600a を含めて概ね云えることである。ただし、近いとはいいながらさらに詳しく見ると少しずつではあるが、Mo 法でもなお ASHRAE 法よりも可燃範囲が広めに出ている。このように、特定の方法では他の特定の方法と比べ一貫してより広く出る、もしくは一貫してより狭く出るという傾向があり、もしどこかで理想的な燃焼限界測定法が見出された場合、それが現実的には実現の難しいような場合であっても比較的実用的なレベルの代替法を見出せる可能性を示唆している。

ただし、1 点気になるのは、保安法 A 法で測定した R717 の可燃範囲である。これは下限が 10.5 vol%, 上限がなんと 50 vol% ということで他の方法に比べ異常に広がっている。単に点火エネルギーの違いであればこういうことは甚だ考えにくいことであり、この場合は他の影響、例えば R717 の燃焼反応に対する白金の触媒作用などを考慮しないと説明できそうにない。

(c) 大型容器による R32 の燃焼下限界の測定 これまでの流れからの必然的な帰結として、できるなら

ば ASHRAE 法および保安法 A 法以外の、より理想に近い第三の測定方法による検証が望まれる。前項でも述べたように、それは点火方法に依存せず容器壁の干渉も受けにくい測定方法ということであり、通常の実験室レベルの試験装置を大きく超えた大型容器による測定でなければならない。ここでは、機会を得て限定的ではあるがこれまでに主として扱ってきた化合物のうち R32 について、そのような装置で燃焼下限界を測定することができた。

測定容器は直径 100 cm、内容積 520L の耐圧球形容器である。点火は容器中心から 15 cm 下がった位置で ASHRAE 法と同様にネオントランスを電源として 0.4 秒間の交流放電を行った。火炎伝播の様子は小窓からも覗け、もう一つの窓からビデオ撮影も行った。同時に容器頂部に熱電対と歪ゲージ式圧力計のセンサーを設置して温度・圧力計測を行った。このようにして得られた 25°C における燃焼下限界の値は、 $13.69 \pm 0.16 \text{ vol\%}$ であった。前項までに報告した ASHRAE 法、保安法 A 法、Mo 法の各対応する下限界値と比較すると、ASHRAE 法 > Mo 法 > 大型容器 > 保安法 A 法の順に小さくなる、つまり可燃範囲が広がる。一方、R143a, R152a, R717, R1234yf, R1234ze(E), R290, R600a については大型容器で測定していないが、前項で指摘したように、大型容器以外の三法についてはこれらの化合物についても概ね同様の傾向が見られる。これらの事実を勘案すれば、例えば保安法 A 法を基にして更に金属線の種類を検討することで、大型容器の測定に対する代替方法が見出せる可能性は十分あると考えられる。

2.3 燃焼速度

2.3.1 燃焼速度の温度、圧力、濃度依存性

代表的な冷媒化合物の燃焼速度の温度、圧力、濃度依存性は、これまで本プロジェクト等で報告してきた^{2-13,2-14,2-7}。燃焼速度の温度、圧力、濃度依存性は、R1234yf を除き、球形容器中心点火法を用いて得た。燃焼速度 S_u は、以下の式のように温度と圧力の関数として表現できる。

$$S_u = S_{u0} (T/T_S)^\alpha (P/P_S)^\beta. \quad (2-6)$$

ここで、 $T_S = 298.15 \text{ K}$, $P_S = 1 \text{ atm}$, S_{u0} は標準条件 (T_S , P_S) における S_u ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)、 α と β はそれぞれ温度および圧力依存性の係数である。

また、 S_u の濃度依存性については、以下の式で表現できる。

$$S_{u0} = S_{u0,\max} + s_1(\varphi - \varphi_{\max})^2 + s_2(\varphi - \varphi_{\max})^3 \quad (2-7)$$

$$\alpha = a_1 + a_2(\varphi - 1) \quad (2-8)$$

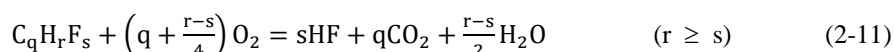
$$\beta = b_1 + b_2(\varphi - 1) \quad (2-9)$$

ここで、 $S_{u0,\max}$, s_1 , s_2 , φ_{\max} , a_1 , a_2 , b_1 , および b_2 は、測定した全ての温度、圧力、濃度条件の燃焼速度値を非線形最小二乗フィッティングして得たパラメータである。 $S_{u0,\max}$ は、標準条件 (T_S , P_S) および φ_{\max} における最大燃焼速度である。 a_1 および b_1 は、量論濃度 ($\varphi = 1$) における α および β の値である。式(2.7)において3次関数の形で表現したのは、燃焼速度の濃度依存性に対する非対称性を考慮したためである。また、当量比 $\varphi(-)$ と濃度 $C(\text{vol}\%)$ の関係は、以下の式で定義される。

$$\varphi = \frac{C/(100-C)}{C_{st}/(100-C_{st})}. \quad (2-10)$$

ここで、 C_{st} は量論濃度 ($\text{vol}\%$) である。また、含フッ素化合物およびその混合系の量論濃度は、以下の総括燃焼反応式で決定する²⁻¹⁵。

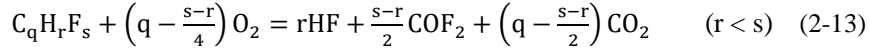
1) H原子数 \geq F原子数の冷媒の燃焼反応式



この場合、燃焼生成物は、HF, CO_2 , および H_2O であり、量論濃度は、

$$C_{st} = \frac{100}{1 + \frac{100}{21} \left(q + \frac{r-s}{4}\right)} \quad (2-12)$$

2) H原子数 < F原子数の冷媒の燃焼反応式



この場合、燃焼生成物は、HF、COF₂、およびCO₂であり、量論濃度はこの場合でも式(2-12)で表わせる。

これらにより得られた燃焼速度の温度圧力濃度依存性のパラメータを表 2-8 にまとめて示し、また 60°C0%RH における最大燃焼速度を表 2-2 に示す。

球形容器法の球状伝播火炎モデルを適用するには、火炎が浮力による変形を受けず壁面による冷却も火炎伝播が終わる頃まで生じない同心球状伝播火炎を得る必要がある。湿度 0%RH の R1234yf 火炎については、燃焼速度が極めて小さく、同心球状伝播火炎を得るには微小重力環境を用いるしかない。しかし、微小重力実験のデータはまだ限定的なため、同法による温度・圧力・濃度パラメータを揃えるに至っていない。そこで、図 2-7 に示すように、様々な初期温度 $T(K)$ における R1234yf の燃焼速度をシュリーレン法で測定し、それらを温度依存のみの関数として式(2-6)で $\beta = 0$ としてフィッティングすることにより、温度依存の係数 a_1 のみ求めた。なお、R1234ze(E)は、湿度 0%RH では、80°C までの温度において、自律火炎伝播は確認できなかった。

表 2-8 にまとめたとおり、これらの可燃性冷媒の燃焼速度は絶対温度に対しては凡そ 2 次で増加し、圧力に対してはゼロに近い負の依存性を取ることが分かった。濃度依存性に関しては、R1234yf 以外の化合物については、量論濃度よりもやや高濃度において、最大燃焼速度となることが分かった。R1234yf については、燃焼速度の濃度依存性自体がかなり変化に乏しいのだが、量論濃度よりもかなり高濃度側で最大燃焼速度を与えることが分かった。

表 2-8 冷媒の燃焼速度の温度、圧力、濃度依存パラメータ

Refrigerant	Temperature range, °C	$S_{u0,max}$, cm·s ⁻¹	s_1	s_2	ϕ_{max}	a_1	a_2	b_1	b_2
R1234yf	25–80	1.5			1.33	1.864	(0)	(0)	(0)
R32 ^a	25–100	6.7	-22.33	6.99	1.079	1.972	0.470	-0.055	-0.291
R717 ^b	25–100	7.2	-74.33	-105.7	1.098	1.505	3.824	-0.095	-0.910
R143a ^a	25–100	7.1	-39.49	52.53	1.018	2.319	-2.000	-0.177	-0.074
HFC254fb ^c	25–100	9.5	-44.40	50.91	1.033	1.627	2.955	-0.116	-0.669
R152a ^a	25–100	23.5	-92.86	-48.43	1.086	1.917	-0.450	-0.229	0.049
R600a ^c	25–100	34.2	-148.6	-94.94	1.079	1.810	-1.248	-0.272	0.254
R290 ^a	25–100	38.7	-138.4	5.82	1.056	1.892	-1.458	-0.274	0.544

a Data from ref. 2-13). b Data from ref. 2-14). c Data from ref. 2-8).

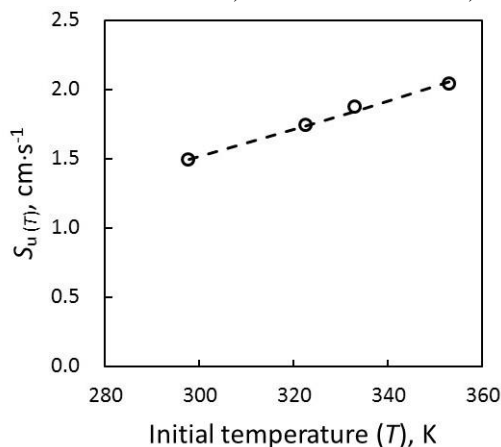
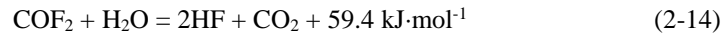


図 2-7 R1234yf の燃焼速度の温度依存性（濃度 10 vol%，湿度 0%RH）

2.3.2 燃焼速度の湿度依存性

前項で述べたとおり、含フッ素化合物およびその混合系の燃焼反応式は、H 原子と F 原子の数の大小関係

で大別される。式(2-13)で表現される反応（例えば R1234yf や R1234ze(E)の燃焼）では、反応系の全ての F 原子が HF を生成するのに十分な H 原子が無いため、余剰の F 原子は、COF₂を生成して止まる。この系に H 原子を供給することができる化合物（例えば炭化水素、R152a, R717 等の H 原子過剰な化合物、および水蒸気（H₂O）等）を加えると、この反応は例えば水蒸気を加えた場合、以下のように進行する。



その結果、反応系内の燃焼熱が 59.4 kJ·mol⁻¹ だけ増加する。

一方、式(2-11)で表現される反応（例えば R32, R143a, R152a）では、反応系の全ての F 原子が HF を生成するまで至るため、H 原子供給物質である水蒸気を加えても、燃焼反応には寄与せず、不活性な希釈ガスとして火炎温度を多少低下させる程度である。

以上のように、可燃性冷媒の種類によっては、水蒸気の有無によって燃焼性が大きく変化することが予想されるため、この湿度依存性について検討した。

(a)R32 の燃焼速度の湿度影響 R32 の燃焼速度の湿度依存性を図 2-8 に示す。データは温度 60°C、量論濃度におけるものである。湿度が高くなると R32 の燃焼速度は緩やかに減少し、60°C50%RH 程度（絶対湿度 0.068）まで高くなると、燃焼速度は 60°C0%RH に比べ 25%程度減少することが分かった。これは水蒸気による希釈効果によるものと考えられる。この燃焼速度と絶対湿度の関係について、今のところ測定データ数が限られているため、線形として近似すると次式のように表現される。

$$S_{u, \text{st}, 60^\circ\text{C}(\text{ABH})} = S_{u, \text{st}, 60^\circ\text{C}(0)} - 32.86 \cdot \text{ABH} \quad (2-15)$$

ここで ABH は絶対湿度、 $S_{u, \text{st}, 60^\circ\text{C}(\text{ABH})}$ および $S_{u, \text{st}, 60^\circ\text{C}(0)}$ は任意の絶対湿度および湿度ゼロにおける 60°C の量論燃焼速度である。図 2-8 から、近似式(2-15)と実験値の違いは小さく、実用環境の湿度条件においては、湿度影響を便宜的に式(2-15)で表わしても大きな問題は無いことが分かる。

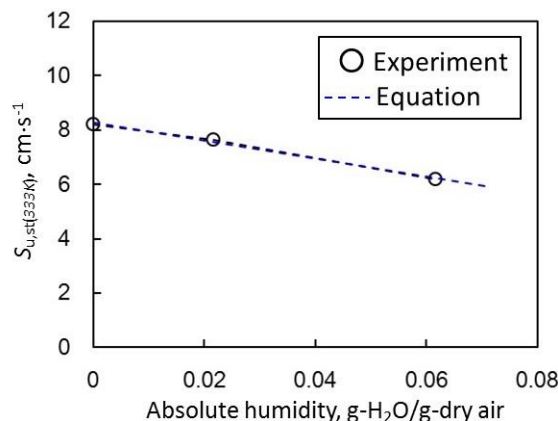


図 2-8 R32 の燃焼速度の湿度依存性（量論濃度，温度 60°C）

Blue broken line represents Eq. (2-15).

(b)R1234yf および R1234ze(E)の燃焼速度の湿度影響 次に、R1234yf および R1234ze(E)の最大燃焼速度の湿度依存性を図 2-9 に示す。データは温度 60°C におけるものである。図 2-9(a)から、湿度が高くなると R1234yf の燃焼速度は大きく増加し、60°C50%RH 程度（絶対湿度 0.068）まで高くなると、増加は緩やかになるが、ここまでは 60°C0%RH に比べ燃焼速度が 5 倍程度に増大することが分かった。これを混合ガス全体の F 原子数の数/H 原子数の数で整理すると、図 2-9(b)のようになる。F 原子の数が H 原子の数を上回る湿度の比較的低い条件下では、F/H 比が 1.0 程度になるまで燃焼速度は増加を続け、H 原子の数が F 原子の数を上回った湿度の比較的高い条件下では燃焼速度の変化が乏しくなるという、式(2-11)、(2-14)および式(2-13)で説明される反応から予想される結果が得られた。

この燃焼速度と絶対湿度の関係について、今のところ測定点が限られているため、F/H 比 ≤1.0 まで線形として近似すると次式のように表現される。

$$S_{u, \text{max}, 60^\circ\text{C}(\text{ABH})} = S_{u, \text{max}, 60^\circ\text{C}(0)} + 165.5 \cdot \text{ABH} \quad (\text{H/F ratio} \leq 1.0) \quad (2-16)$$

ここで $S_{u, \max, 60^{\circ}\text{C}}(\text{ABH}) = S_{u, \max, 60^{\circ}\text{C}}(0)$ は任意の絶対湿度及び湿度ゼロにおける 60°C の最大燃焼速度である。図 2-9(a) から、近似式(2-16) と実験値の違いは小さく、実用環境の湿度条件においては、湿度影響を便宜的に式(2-16) で表わしても大きな問題は無いことが分かる。

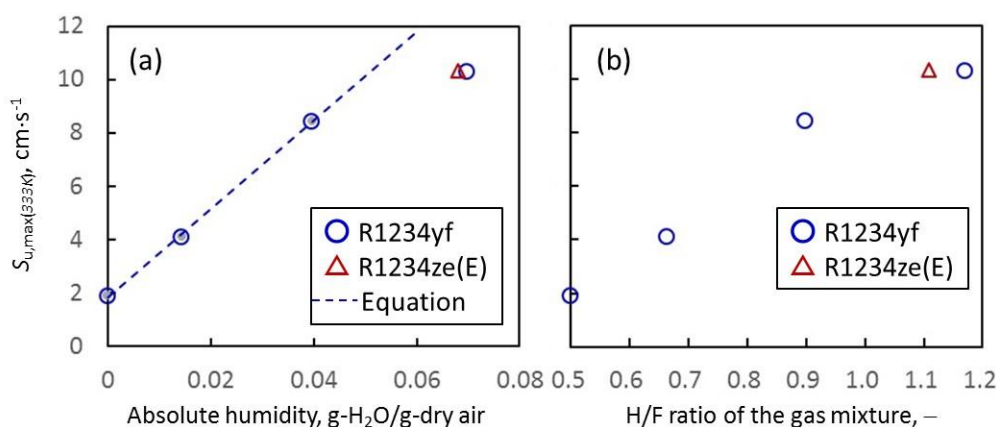


図 2-9 R1234yf および R1234ze(E) の最大燃焼速度の湿度依存性 (温度 60°C)

(a) $S_{u, \max}$ vs Absolute humidity; (b) $S_{u, \max}$ vs H/F ratio of the refrigerant/moist air mixture. Blue broken line represents Eq. (2-16).

2.4 最小着火エネルギー，消炎距離

2.4.1 はじめに：着火，消炎と火炎の成長

冷媒の着火・消炎特性について議論する前に、まず火炎の成長過程について知っておく必要がある。可燃濃度範囲にある可燃性ガス/空気の混合気に対し、電気火花によって高いエネルギーを与えたとき、生成した火炎球は図 2-10 のような成長過程をたどる²⁻⁸⁾。これは 21 vol% の R32/空気混合気に対し、様々な火花放電エネルギーを投入した場合に生成した火炎球のその後の様子を追跡したものである。図中の数字 (1-6) が大きいほど、投入した放電エネルギーが高いことを表している。

図 2-10(a) のグラフに示したとおり、火炎半径は放電後しばらくの間、放電エネルギーに依存した複雑な挙動を取る。放電エネルギーの低い 1 と 2 については、0.01 秒以内に消炎した。それ以外のものについては、更に時間が経過すると、火炎半径は放電エネルギーに依らず時間に対してほぼ同じ傾きで増加するようになった。これらのグラフを時間微分すると、図 2-10(b) が得られた。火花放電によって大きなエネルギーを与えられた初期火炎球は、まず急激に失速する。これは放電により初期火炎球が高温にされてガス膨張することにより火炎球の表面積が増え周囲の低温のガスへの熱損失が大きくなったためである。その後、火炎球が成長し表面積が大きくなるにつれて、火炎面の燃焼に伴う熱発生が増加し周囲への熱損失と釣り合うようになり火炎伝播速度は極小値を取る。ここから更に火炎球が大きくなることができれば、火炎面の熱発生が熱損失を上回るようになり、火炎球は伝播速度を増加させながら成長を続ける。この火炎伝播速度が極小となる火炎が最小火炎球と考えられ、これより火炎半径が大きくなると自律伝播火炎となる。火炎半径が 10 mm を超えると、火炎伝播速度は放電エネルギーの大きさに依らずほぼ一定値に漸近していく。これは熱発生と熱損失の関係が火炎球の大きさに依らない、つまり火炎面が球面から平面に近づいたことを表わしている。

ここで重要なことは、例えば R32 の場合、層流伝播火炎に成長する直径 20 mm 超えるサイズまで、火炎として弱い状態が存在することである。この間に何らかの冷却を受けた場合、層流伝播火炎よりも容易に消炎に至る。このような大きなサイズ (例えばコンセントや開閉器等電気部品の設計サイズと比較して) であることが微燃性冷媒特有の実用上の意味を持つてくる。一方、R290 など強燃性の火炎の場合、このサイズが 1 桁小さいため、例えばフレームアレスター用途以外の寸法を細かく調べてみても実用上はあまり意味が無い。

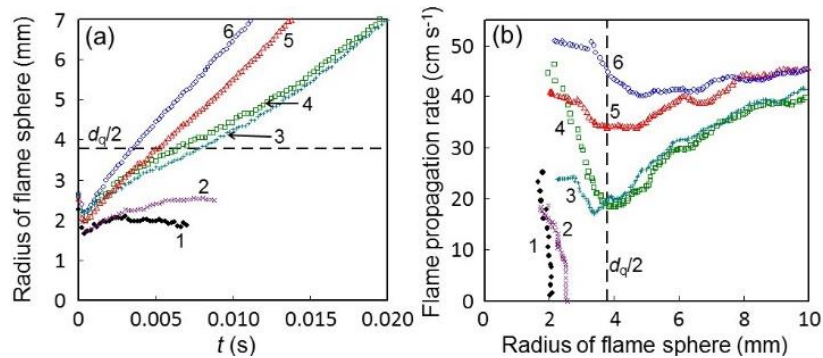


図 2-10 種々の放電エネルギーを与えた R32/空気火炎球の成長挙動 (25°C, 0%RH) 21 vol%. (a) 火炎半径の時間変化 ; (b) 火炎球の成長に伴う火炎伝播速度の変化.

燃焼が起こる可能性に関連する燃焼特性としては、2.2 節で述べた燃焼限界や、最小着火エネルギー (MIE , E_{min}) が代表的である. MIE という言葉自体は一般的に使用されているが、標準的測定法としては ASTM E582-07 (2007) 『最小着火エネルギーと消炎距離の標準的試験法』²⁻¹⁶⁾で次のように規定されている.

0. 火花放電電極は外径 1/16 インチ (1.59 mm ϕ) の金属棒で、その正・負極先端面にガラス製円板 (直径は電極間距離の 5–10 倍) を備える.
1. 消炎距離よりも十分に広いと考えられる電極間距離において、着火エネルギーの約 10 倍と考えられるエネルギーの火花を飛ばして着火させる.
2. 1. の条件から電極間距離を短縮していくと消炎距離近傍の電極間距離までは容易に着火が起こるが、それより 0.02–0.05 mm 短縮すると突然着火が起こらなくなる.
3. 2. の距離よりも僅かに広い距離において、 E_{min} を測定する.

このように、ASTM 法では、 MIE は、所定の平行平板付き電極を使用して消炎距離と同時に測定される値である. ASTM 法は、炭化水素等の燃料化合物について開発された方法であり、これを微燃性冷媒にそのまま適用すると、後述のように測定値のバラツキが非常に大きくなる.

図 2-11 は、代表的な冷媒化合物の MIE の既報値 (○) を、燃焼速度の大きさ順に整理したものである²⁻⁸⁾. R290 については、既報データのバラツキは 0.25–0.48 mJ と 2 倍程度、R717, R32, R1234yf といった微燃性冷媒の既報データのバラツキは 3 桁程度となっており、微燃性冷媒の MIE 測定の難しさを良く表している. 比較的報告例の多い R717 の E_{min} でさえ、NFPA77 (2000) 『静電気に関する推奨方法』²⁻¹⁷⁾では 680 mJ、高压ガス保安協会の教本²⁻¹⁸⁾では 14 mJ と記載されており、約 50 倍もの乖離がある. こうしたバラツキが E_{min} を基準にした実用上の燃焼危険性評価を困難なものにしている. 微燃性化合物において測定値のバラツキが大きいのは、強燃性化合物に比べて燃焼反応速度が小さいため、放電持続時間や電極への熱損失に関する装置条件の影響をより大きく受けるためと考えられる. そのため、微燃性化合物に適した MIE 測定法の開発が必要であると同時に、得られた E_{min} の妥当性を検証するため、 E_{min} を間接的に求める方法を検討する必要がある.

MIE は、燃焼速度や消炎距離と理論的に結び付けられる. また、消炎距離は E_{min} に比べて測定方法が簡便で、着火方式の違いによる差が小さく、信頼性の高い値が得られると期待される. そこで、信頼性の高い消炎距離の測定を行い、次に燃焼速度と消炎距離の実測値から E_{min} を見積もった²⁻⁸⁾. 燃焼速度に関連するパラメータを 2.3 節の表 2-8 に、消炎距離に関連するパラメータを表 2-9 に示す.

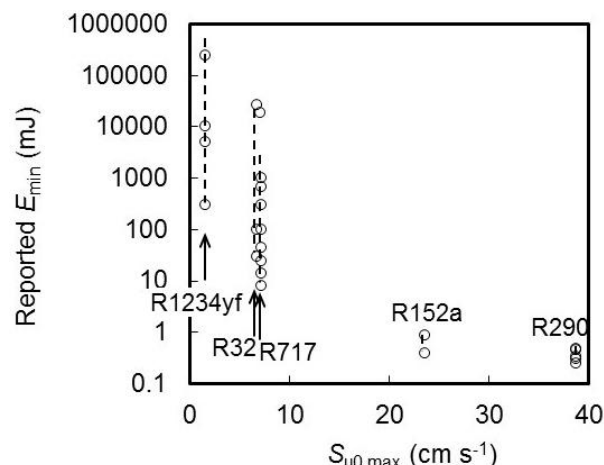


図 2-11 代表的な冷媒の最小着火エネルギー既報値 (o) のバラツキ²⁻⁸⁾

2.4.2 消炎距離の測定

(a) 標準条件における消炎距離 消炎距離は、ASTM E582 法を微燃性冷媒評価用に改造した装置を用いて測定を行った²⁻⁸⁾。対象は、表 2-9 に示すとおり燃焼性及び分子構造の異なる 11 種類の物質を対象とした。その内訳は、飽和 HFC (R32, HFC143, R143a, R152a, HFC254fb), 不飽和 HFC (R1234yf, HFO1243zf), 非フッ素系 (R290, R600a, R717), 可燃/不燃混合冷媒 (R152a/134a (50/50 vol%)) である。これらは ISO817(2014)²⁻²⁾ に登録されている可燃性冷媒の殆どのタイプを網羅したものである。

実験には、円筒部分がアクリル製の燃焼容器を用いた。円筒容器の両側フランジのおよそ中心に SUS 製の放電電極が取り付けられている。負極側電極はマイクロメーターによって正極側電極との距離を変化させることができる。電極先端の直径は 1mm である。両電極の先端に、直径 5–100 mm のマコール製円板を取り付け、平行平板間の距離を変化させて着火試験を行うことにより消炎距離 d を求めた。ここで d は、着火しなかった最長平板間距離と着火した最短平板間距離の平均値とした。冷媒濃度を幅広く変え、得られた各当量比 ϕ における d の値を、3 次関数でフィッティングすることにより d の最小値とそれを与える ϕ_{min} を求めた。次に、得られた ϕ_{min} の混合気において更に試験を行い、10 回の試行で 1 度も着火しなかった最長平板間距離と 1 度も着火した最短平板間距離の平均値を最終的な消炎距離 d_q とした。消炎距離の放電エネルギー依存性については、R32 において検討したが、0.2J から 1.2J までの結果の比較において有意差は見られなかった。

微燃性化合物の消炎距離は、火炎伝播速度が小さいほど浮力による上向きの力の影響を受ける。そこで、測定は ASTM 法と同様に円筒容器を横型に配置し平行平板を垂直にした場合と、図 2-12 のように円筒容器を縦型に配置し平行平板を水平にした場合の両方について行った。前者の条件で求めた消炎距離を $d_{q,v}$ 、後者の条件で求めた消炎距離を $d_{q,h}$ とした。R1234yf については浮力の影響を非常に強く受け、通常重力下では他の化合物と科学的に比較できる消炎距離を得られないため、微小重力下での測定も行い、浮力の影響の無い理想的な球状伝播火炎から消炎距離を求めた。

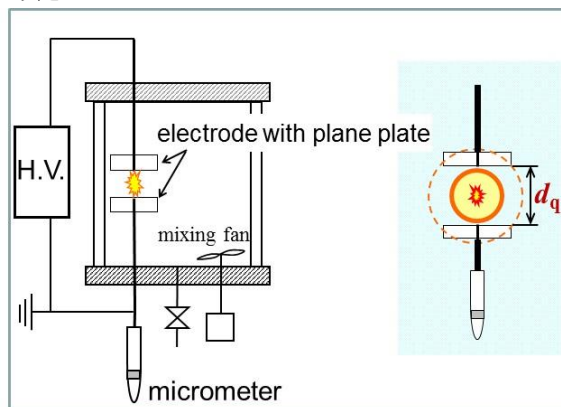


図 2-12 消炎距離測定装置 (縦型配置, $d_{q,h}$ 測定)

図 2-13 に、消炎距離 d_q を質量燃焼速度 ($\rho_u S_{u0,max}$) に対してプロットしたものを示す。ほぼ全ての化合物について、両者の関係は 1 つの相関式で表せることが分かった。また、最大燃焼速度 $S_{u0,max}$ が $9.5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の HFC254fb の消炎距離が 5.2 mm であることから、消炎距離が約 5 mm 以上の冷媒は、燃焼速度 $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下であると予想でき、よって微燃性等級 (Class 2L) に分類できることが分かった。

図 2-14 に、R1234yf を除く 10 化合物について、消炎距離の濃度依存性を示す。消炎距離の最小値を与える濃度から低濃度側へ離れるに従って、消炎距離は増大することが分かった。

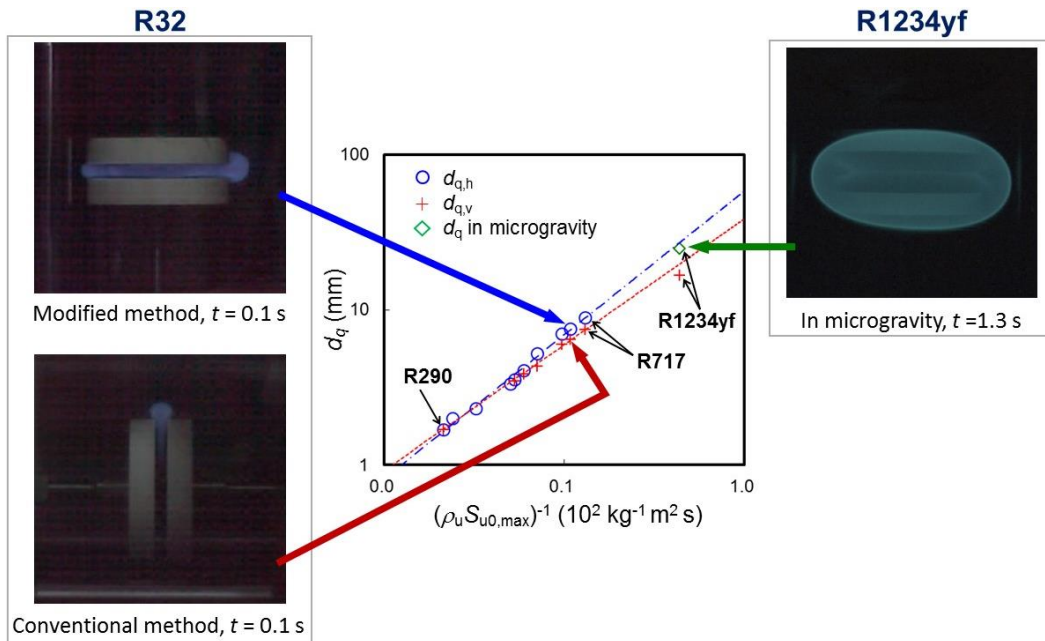


図 2-13 11 化合物の消炎距離 (25°C, 0%RH)

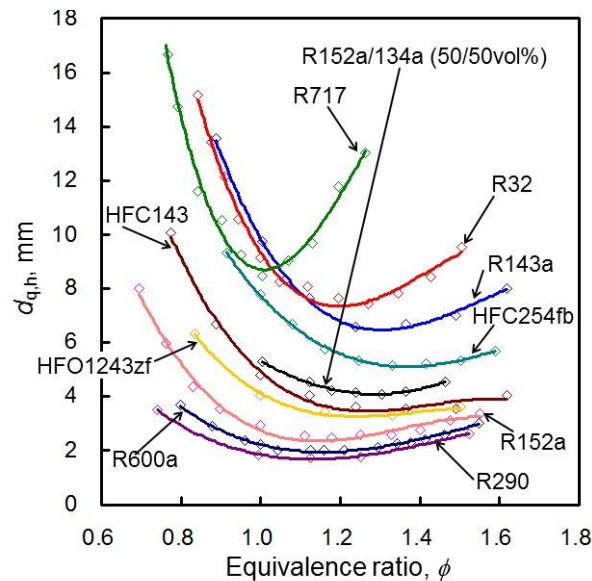


図 2-14 10 化合物の消炎距離の濃度 (当量比) 依存性 (25°C, 0%RH)

表 2-9 11 化合物の実測 d_q 及び推算 E_{\min} (25°C, 0%RH)

Compound	Exp. d_q				Calc. E_{\min} by Eq. (2-19) and $d_{q,h}$	Calc. E_{\min} by Eq. (2-19) and $d_{q,v}$
	$d_{q,h}$	$d_{q,v}$	Conc.	ϕ		
	mm	mm	vol%	-	mJ	mJ
R290	1.70	1.70	4.5	1.13	0.35	0.35
R600a	2.00	-	3.6	1.16	0.62	0.62
R152a	2.33	-	9.0	1.18	0.90	0.90
HFO1243zf	3.33	-	8.5	1.33	2.2	2.2
HFC143	3.58	3.48	11.5	1.24	2.9	2.6
R152a/134a (50/50 vol%)	4.08	3.88	11.5	1.24	3.8	3.0
HFC254fb	5.23	4.35	8.5	1.33	12	5.3
R143a	7.03	6.00	12.5	1.36	27	13
R32	7.55	6.45	21.0	1.27	29	14
R717	8.95	7.45	21.9	1.00	45	19
R1234yf	24.8 ^a	16.6	10.0	1.33	780	76

^a Measured in microgravity.

(b) 消炎距離の温度影響 次に、温度、湿度により着火消炎特性がどのように変化するか検討するため、消炎距離の温度、湿度依存性を調べた²⁻¹⁹⁾。

図 2-15 に、R290、R32、および R717 の消炎距離の温度依存性を示す。消炎距離を測定した濃度は、標準温度で最小値を与えた濃度に固定して測定している。図から、これらの化合物について消炎距離の温度変化は大きくないことが分かった。温度が 25°C から 60°C まで上昇しても、 d_q はわずか 10% 程度の減少にとどまった。これは、温度上昇によって、2.3.1 項で報告したとおり燃焼速度 $S_{u,\max(T)}$ が増加する一方、未燃ガス密度 $\rho_{u(T)}$ が低下するため、その積に逆相関する消炎距離 $d_{q(T)}$ はそれほど変化しないためである。

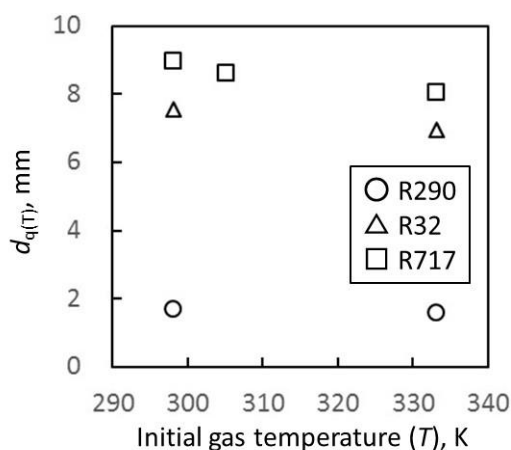


図 2-15 3 冷媒の消炎距離の温度依存性 (0%RH)

また、図 2-16 に、R32 および R717 の消炎距離の温度、圧力依存性を示す。これらの実験結果を用いて微燃性冷媒について適用可能な、様々な温度圧力における消炎距離と燃焼速度の相関式を、

$$d_{q(T,P)} = 50.16(\rho_{u(T,P)} S_{u,\max(T,P)})^{-0.847} \quad (2-17)$$

と求めた²⁻¹⁹⁾。図 2-16 中に曲線で示したとおり、全ての実測値を非常に良く再現できることが分かった。この式から求めた R1234yf の 60°C0%RH の消炎距離 d_q は 22.6 mm となり、温度が 25°C から 60°C まで上昇しても、R1234yf の d_q はわずか 9% 程度の減少にとどまることが示唆された。

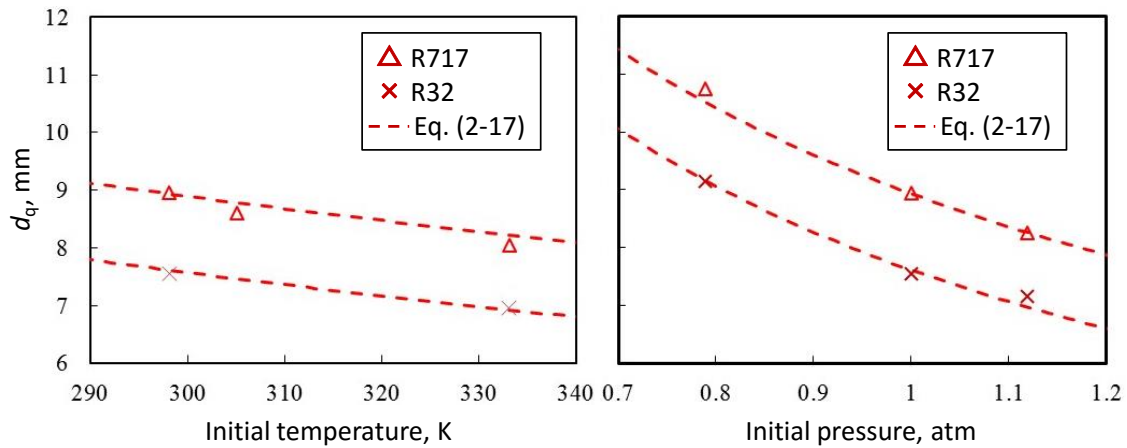


図 2-16 R32 および R717 の消炎距離の温度、圧力依存性 (0%RH)

(c) 消炎距離の湿度影響 一方、湿度依存性については、微燃性冷媒で大きく影響を受ける可能性があるものがあるので、測定を行った。温度、湿度条件は、60°C、50%RH で実施した。上述のとおり、温度上昇が消炎距離に与える影響は小さく、10%程度と考えられる。

図 2-17 に、高温高湿度条件における R1234yf, R1234ze(E), および R32 の消炎距離の濃度依存性を示す。R1234yf および R1234ze(E)については、濃度 8.9 vol% ($\phi = 1.1$) において、それぞれ最小値 5.0 mm および 5.15 mm を得た。この値は、25°C 乾燥空気中の R1234yf の消炎距離の 1/5 程度であった。上述のとおり、温度上昇が消炎距離に与える影響は小さいため、R1234yf および R1234ze(E)は高湿度条件で燃焼性が大幅に増加したことを示している。またこの変化率は、2.3.2(b)項で報告した R1234yf の燃焼速度の高湿度による増加率の逆数とほぼ対応している。また、R1234yf と R1234ze(E)の消炎距離は、濃度依存性も含めてほぼ一致しており、この条件で両者の大小関係を議論することは困難であった。R32 については、60°C50%RH では 18 vol%において 8.25 mm となり、60°C0%RH に比べて 20%増加、25°C0%RH と比べても 10%増加し、高湿度によって燃焼性が低下することが示された。この傾向も、2.3.2(a)項で報告した R32 の燃焼速度の高湿度による減少傾向と対応している。

湿度依存性をより詳細に調べた結果を図 2-18 に示す。R1234yf は、60°C0%RH では消炎距離が 22.6 mm であるが、水蒸気が加わり 60°C10%RH になると 10 mm 以下に減少し、更に湿度が増加すると緩やかに消炎距離が減少することが分かった。60°C50%RH を超えたあたりから、消炎距離は緩やかに増加に転じた。これは反応系内の水素供給物質である H₂O が十分に増えたことにより、式(2-14)の発熱反応がこれ以上は起こらず、余剰の H₂O が反応系の希釈剤として働くようになったためである。

比較のため、25°C0%RH で不燃の冷媒である R413A および R410A についても同様の測定を行った。結果を図 2-19 に示す。その結果、本系の 60°C50%RH の高湿度条件では可燃化することが分かった。

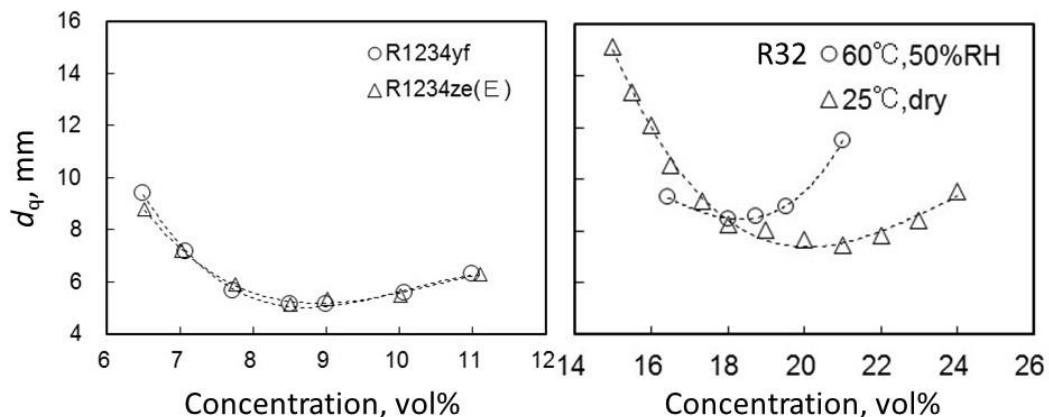


図 2-17 60°C50%RH における R1234yf, R1234ze(E), および R32 の消炎距離の濃度依存性

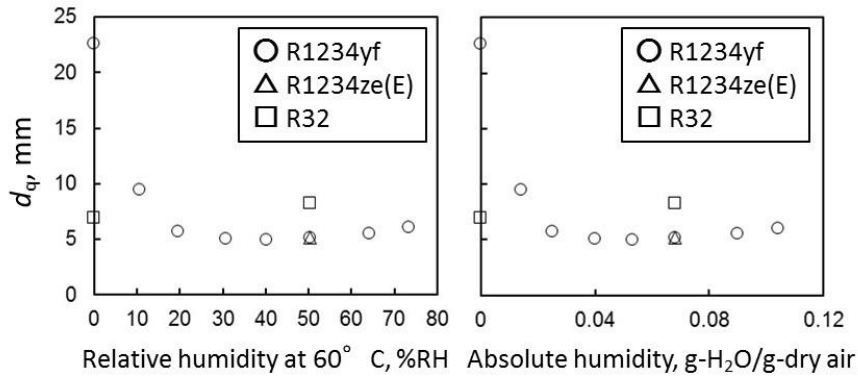


図 2-18 R1234yf, R1234ze(E), および R32 の消炎距離の湿度依存性 (60°C)
Left: d_q vs. relative humidity at 60°C; right: d_q vs. absolute humidity.

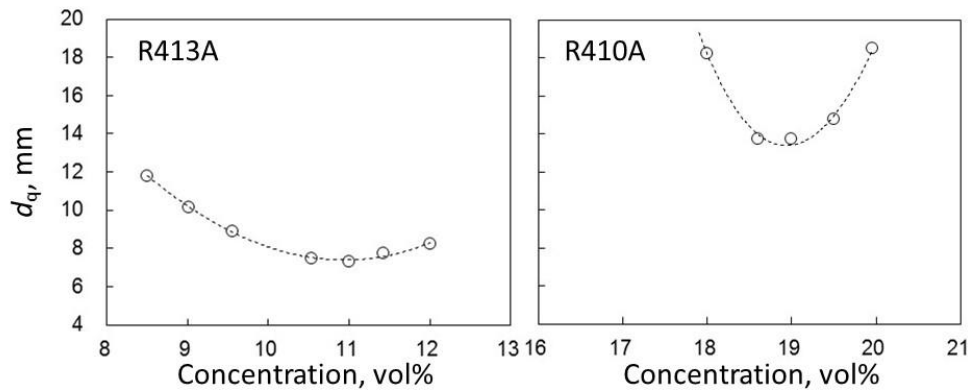


図 2-19 60°C, 50%RH における R413A および R410A の消炎距離の濃度依存性

2.4.3 最小着火エネルギーの推算

可燃性ガスの E_{\min} に関しては、次の理論式が知られている。

$$E_{\min} = (1/6) \pi d_{\min}^3 \rho_b c_p (T_b - T_u) \quad (2-18)$$

着火に要するエネルギー E_{\min} は、直径 d_{\min} 、温度 T_b の球形ガス領域が保持するエンタルピーと等しい、という式である。ここで、Lewis と Von Elbe²⁻²⁰⁾は、この高温球形ガス領域の直径として消炎距離 d_q 、温度には断熱火炎温度 T_b を仮定した。

一般に火炎球は、未燃ガスと接する火炎表面にあたる温度の比較的低い火炎帯と、その内部にある既燃ガスからなる断熱帯で構成されている。もし消炎距離の値 d_q が、火炎帯厚さを含むものであるなら、式(2-18)の d_{\min} に d_q を適用すると、温度の低い火炎帯も火炎温度 T_b まで上昇させていることになり、 E_{\min} を過大評価することになる。そこで、実測の消炎距離 d_q が火炎帯厚さを含むかどうか、R32 火炎について、極細電極を用いて最小着火エネルギー近傍の火花エネルギーを投入し、シュリーレン法で最小火炎球を観察した。シュリーレン法は、密度勾配を可視化する技術であり、数十°C 程度の温度上昇を可視化しているため、シュリーレン像の火炎球外径は火炎帯の大部分を含んでいる。このシュリーレン法で測定した最小火炎球直径と消炎距離 $d_{q,h}$ を比較した結果、両者はほぼ一致した。つまり、消炎距離 $d_{q,h}$ は断熱火炎帯(d_{\min})に加え火炎帯厚さ δ も含んでいることが確認できた。そこで、式(2-18)を次式のように修正した。

$$E_{\min} = (1/6) \pi (d_q - 2\delta)^3 \rho_b c_p (T_b - T_u) \quad (2-19)$$

$$\delta = 2\lambda_{av}/(c_p \rho_u S_{u,max}) \quad (2-20)$$

ここで λ_{av} は平均熱伝導率である。微燃性冷媒の場合、 δ が大きいいため、式(2-18)と式(2-19)の差が大きくなる。

式(2-19), (2-20)および $d_{q,h}$, $d_{q,v}$, $S_{u,max}$ の実測値を用いて E_{min} を見積もった結果を表 2-9 に示す。これらの結果、いずれの方法でも、R32 や R1234yf の E_{min} は、既報の ASTM E582 法による測定値よりも大幅に低くなった。

MIE の実験値が大きく上ぶれする原因として、電極間距離を消炎距離以下にセットして着火を行っているため、平行平板の冷却効果に打ち勝つ必要から大きな放電エネルギーを使用していることが考えられる。

図 2-20 は、既報の R717 の E_{min} の測定値を、測定時の電極間距離に対してプロットしたものである。これらの値のうち、 E_{min} が 100mJ を超えるものは、測定時の電極間距離が本研究で求めた消炎距離(図中○で示す)よりも有意に短い場合のみである。

同様に、Smith ら²⁻²¹⁾は、R290, R152a, R143a, および R32 について、消炎距離 ($d_{q,v}$) = 1.7, 3.2, 4.3, 5.2 mm, 及び E_{min} = 0.30, 0.89, 18,421, および 26,300 mJ と報告している。本研究では、これらの冷媒の消炎距離 ($d_{q,h}$) はそれぞれ 1.7, 2.3, 7.0, および 7.55 mm であった。つまり、Smith らは、R143a と R32 については消炎距離よりも 2 mm も内側に平行平板付電極を配置して着火させたと考えられる。彼らの用いた平行平板の直径は 25 mm と小型なので、強力な火花放電を投入すれば消炎距離以下でも着火させることが可能であったと考えられる。一方、彼らが消炎距離以上の電極間距離で測定した R290 と R152a については、MIE の実験値は他の研究の実験値や本研究の推算値とほぼ同じ値となっている。

多くの実験や実機による着火エネルギー試験においても、微燃性冷媒の消炎距離は非常に大きいため、消炎距離より小さい電極間距離で放電を発生させている場合がある。この場合、Smith らのように非常に大きいエネルギーを用いないと着火しない可能性がある。MIE を測定する場合は、電極間距離等の条件について注意深く確認する必要がある。

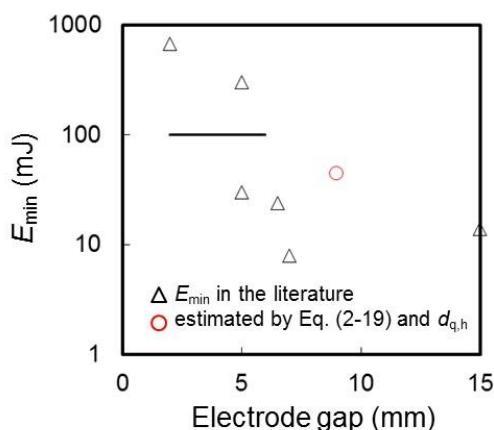


図 2-20 R717 の E_{min} の既報値と、測定時の電極間距離との関係²⁻⁸⁾

2.4.4 実用上の着火エネルギーとの比較

前項で得られた E_{min} と、人体からの静電気火花のエネルギーの大きさを比較してみる。通常の活動によって、人体は 10–15 kV に帯電することが可能で、火花エネルギーは 20–30 mJ に達すると云われる²⁻¹⁷⁾。一方、帯電した人体からの火花が金属経路で起こる場合(たとえばカッターナイフの先端等)、着火には E_{min} のおよそ 3 倍の火花エネルギーが必要で、皮膚経路の場合、60 倍の火花エネルギーが必要と報告されている²⁻²²⁾⁻²⁻²⁴⁾。これらが一般的に成り立つとすると、R290 については、人体からの静電気火花によって皮膚経路であっても着火が起こる可能性があるが、微燃性冷媒については、皮膚経路ではまず不可能で、金属経路でも着火する可能性はごく低いことになる。

これに加えて、静電気の放電距離と消炎距離の大小関係についても考慮する必要がある。気相中における火花放電の発生はパッシェン則に従う。すなわち、圧力 p (Torr)における気体の絶縁破壊に必要な電圧 V_p (kV)

は、電極間距離を $d(\text{cm})$ とすると、

$$V_p = 23.85\alpha d \left(1 + \frac{0.329}{\sqrt{\alpha d}} \right) \quad (2-21)$$

但し α は、相対空気密度で、

$$\alpha = 0.386p / (273 + T) \quad (2-22)$$

となる²⁻²⁵⁾。式(2-21)から、仮に大気圧下で絶縁破壊電圧 $V_p = 15 \text{ kV}$ で放電したとしても、放電可能な最長距離 d は 4.3 mm となり、微燃性冷媒の d_q を下回る。つまり帯電した人体からの静電気火花は、微燃性冷媒の消炎距離よりも短い間隙で発生するため、火炎核は電極による熱損失の影響を受けてしまう。その場合、図 2-20 に示した R717 の例のように、着火するには熱損失の無い E_{\min} よりも相当大きな火花エネルギーが必要になるため、人体からの静電気火花による微燃性冷媒への着火は現実的ではない。

人体以外の電気火花等を考えた場合、その着火条件は、研究者が調整した最適な濃度条件（図 2-14、2-17、2-19 参照）と異なる上に、放電条件、特に消炎距離以上の電極間距離（図 2-20 参照）とも異なるため、着火に要する火花エネルギーは、 E_{\min} 値を大きく超えるのが普通である。特に電極間距離について、微燃性冷媒の MIE は、約 5 mm を超える放電距離内に冷媒/空気混合気以外何の物体も存在しない環境で得られる値であるから、実際の小型電気部品（コンセントやブレーカー等）での着火には、 E_{\min} よりも相当強力な火花エネルギーが必要になる。

表 2-10 は、例として動作中のヘアドライヤーのプラグをコンセントから引き抜いた際に発生する火花放電によって、冷媒/空気混合気が着火するかどうかを調べた結果である。ヘアドライヤーの負荷は AC100V、1200W で、実測した放電エネルギーは $0.2\text{--}0.4\text{J}$ であった。ヘアドライヤーを使用した理由は、一般家庭にあり容易に持ち運びが可能なもののうち電力量が最も高い機器だからである。冷媒/空気混合気の濃度は、最小の消炎距離を与える濃度に調整した。温度 25°C 、湿度 $0\%\text{RH}$ である。その結果、R290 および R152a は、コンセントの引き抜きの際に着火に至った。一方、HFC254fb および R32 については、実測した放電エネルギーは、HFC254fb や R32 の MIE よりも十分に高いにも関わらず、40 回の試行によって着火は一度も確認されなかった。これは、火花が発生するコンセントの電極間の距離（最大 2.3 mm ）が、R290 や R152a の消炎距離と同等以上で、HFC254fb や R32 の消炎距離よりも有意に小さいことが原因であると考えられる。

表 2-10 電気機器（ヘアドライヤー）からの火花による各種冷媒の着火試験（ 25°C 、 $0\%\text{RH}$ ）

Refrigerant	(a) R290	(b) R152a	(c) HFC254fb	(d) R32
Flammability Class	3	2	2L	
$S_{u0,\max}$, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	39	24	9.5	6.7
Result, # of ignition / # of trial	3/3	1/1	0/100	0/100
				

2.5 消炎直径

2.5.1 標準条件における消炎直径

前節の消炎距離は、火花放電によって形成された初期火炎核が持続可能な伝播火炎に転移する火炎サイズを表している。これに対し、すでに持続伝播している火炎を消炎に至らしめる隙間の大きさ（小ささ）を、ここでは「消炎直径」と呼ぶ。2.4.1 項で述べたとおり、この指標は、層流伝播火炎よりも弱い状態が長く続

く微燃性冷媒において特に意味を持つ。類似の指標はいくつか存在しているが、圧力上昇を伴い火炎が容器外へ噴出する隙間（「安全隙間」）や、円筒バーナーの供給ガスを突然止めて円筒内を逆火する孔径（「消炎直径」）では、流速の影響を受け易く、浮力のため下方伝播しない微燃性冷媒の火炎を適切に評価することができない。そこで、微燃性冷媒に適した測定法から検討した。

消炎直径測定装置を図 2-21 に示す。着火源（放電電極）から高さ h (mm)だけ上方に、厚さ 1 mm の PTFE 板を置く。PTFE 板中心には、所定の大きさの孔を開けている。容器内に調整した冷媒/空気混合気に着火し、伝播火炎が孔を 1 度でも通過した場合の孔径と、それよりわずかに小さくし 10 回試験して 1 度も通過しなかった場合の孔径の平均値を消炎直径 d^* とした。R1234yf については、通常重力下では浮力の影響を受け、火炎球上部の火炎面は既燃ガス（不活性な CO_2 や HF 等）に接近されるため、火炎球側方の火炎面に比べ燃焼性が低下してしまう。そのため、微小重力下で測定を行い、既燃ガスによる冷却を受けていない消炎直径を得ることとした。消炎直径の放電エネルギー依存性については、R717 において検討したが、0.2 J と 2 J との結果の比較において有意差は見られなかった。

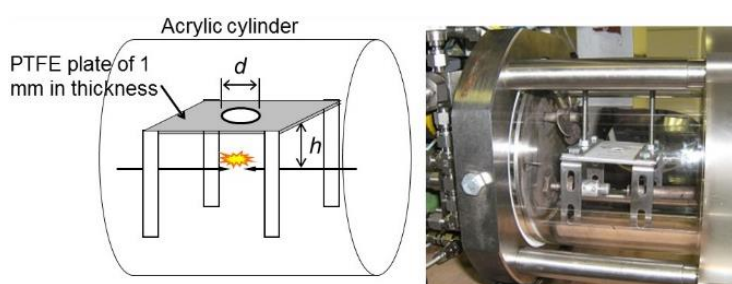


図 2-21 消炎直径測定装置

微燃性の R32, R717, HFC254fb について、消炎直径 d^* を図 2-22 に示す。所定の h において、図の記号よりも小さい孔径であれば火炎は通過できない。 h が大きくなるにつれて d^* は減少していき、一定値に漸近していく。この傾向は安定な伝播火炎の形成度合い（図 2-10 参照）と関連していると考えられる。

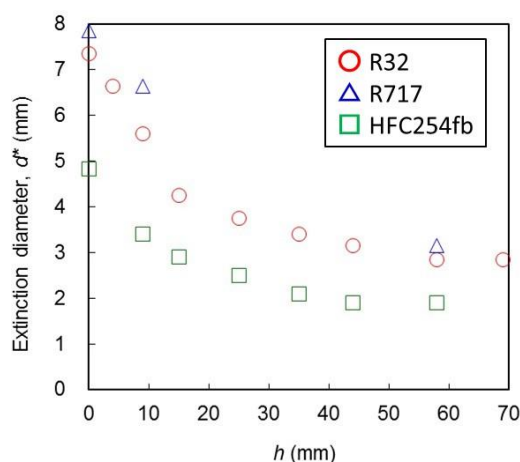


図 2-22 R32, R717, および HFC254fb の消炎直径 (25°C, 0%RH)

この消炎直径が孔の形状に依らず、以下の熱理論式(2-23)で一般化されることは、アスペクト比 5.0 までの長方形の孔を使った消炎直径測定や、隙間のある電磁開閉器を使った実機試験によって確認した。

$$d_{\text{eff}} \equiv 4A/P = 4\alpha/(c_p w_{\text{av}}) \quad (2-23)$$

ここで A は孔の断面積、 P は孔周囲長である。式(2-23)は、孔の形状を一般化するもので、ここでは d_{eff} を実効直径と呼ぶ。

代表的な冷媒の消炎直径のサイズをコンセントや電磁開閉器の隙間サイズと比較した画像を図 2-23 に示す。 $h = 9 \text{ mm}$ において、R290 火炎は、直径 1.25 mm の孔を通過する。一方、R32 火炎は、直径 5.5 mm の孔を通過できない。コンセントや電磁開閉器等の内部で着火が起こった場合、R290 は消炎直径がこれらの持つ隙間よりも小さいため、火炎は容易に隙間を通過して外部へ燃え広がるのに対し、R32 は消炎直径がこれらの隙間よりも大きいため、火炎は隙間を通過することができず、電気部品内部で消炎に至る。

このように、微燃性冷媒を使用した環境に存在する電気部品からの火花等が着火源になるかどうかは、その部品の孔の寸法と h を実測し、図 2-22 のグラフ中にプロットしてみれば予想できる。通常のコンセントやブレーカー、電磁開閉器等はできるだけコンパクトに作られているため、筐体内にある着火源から隙間までの距離は 10 mm に満たない。その場合、微燃性冷媒であれば、筐体の壁に直径 5 mm を超える隙間が無い限り、火炎は筐体外へ出て行くことができず、一般ユーザーの目に火炎として確認されることは無い。

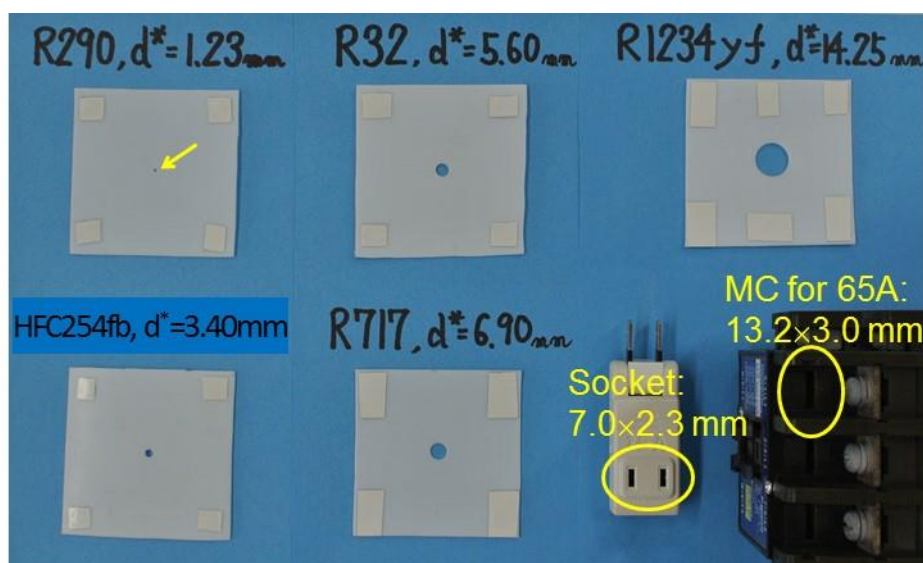


図 2-23 主な冷媒の消炎直径 ($h = 9 \text{ mm}$) と電気部品の隙間サイズの比較 (25°C , $0\% \text{RH}$)

2.5.2 消炎直径の温度、湿度依存性

消炎直径は、電磁開閉器等の電気部品が実用上の着火源となる可能性を評価するために導入した指標である。電気部品は機器運転時に高温になるなど、標準条件よりも過酷な環境におかれることも多い。そこで、高温、高湿度により消炎直径が大きく変化する可能性について検討するため、いくつかの微燃性冷媒について、消炎直径の温度、湿度依存性を測定した。温度、湿度条件は、 $60^\circ\text{C}0\% \text{RH}$ 、 $60^\circ\text{C}50\% \text{RH}$ で実施した。

まず温度依存性について、R32 について消炎直径の測定を行った。濃度条件は、 $25^\circ\text{C}0\% \text{RH}$ で消炎直径が最小となった $21 \text{ vol}\%$ を用いた。その結果、 $d^* = 5.25 \text{ mm}$ が得られ、 $25^\circ\text{C}0\% \text{RH}$ の $d^* = 5.6 \text{ mm}$ より約 7% だけ小さくなった。このように、消炎直径も消炎距離と同様、温度上昇によって大幅に減少するという事は無いことが分かった。

次に湿度依存性について、図 2-24 に、 $60^\circ\text{C}50\% \text{RH}$ の R1234yf および R1234ze(E) の $h = 9 \text{ mm}$ における消炎直径の濃度依存性を示す。濃度 $9.2 \text{ vol}\%$ ($\phi = 1.2$) において、最小値 $d^* = 3.8 \text{ mm}$ を得た。この値は、 $25^\circ\text{C}0\% \text{RH}$ の R1234yf の消炎直径の $1/3$ 以下であり、R1234yf と R1234ze(E) は高湿度条件で燃焼性が大幅に増大することを示している。また、R1234yf と R1234ze(E) の消炎直径は、濃度依存性も含めてほぼ完全に一致しており、両者の差異を明らかにすることは困難であった。R32 については、 $60^\circ\text{C}50\% \text{RH}$ の消炎直径は 6.35 mm であり、 $60^\circ\text{C}0\% \text{RH}$ の消炎直径より凡そ 20% 増加し、湿度によって燃焼性が低下することが分かった。また、この減少率は、消炎距離の湿度影響とほぼ同等であった。

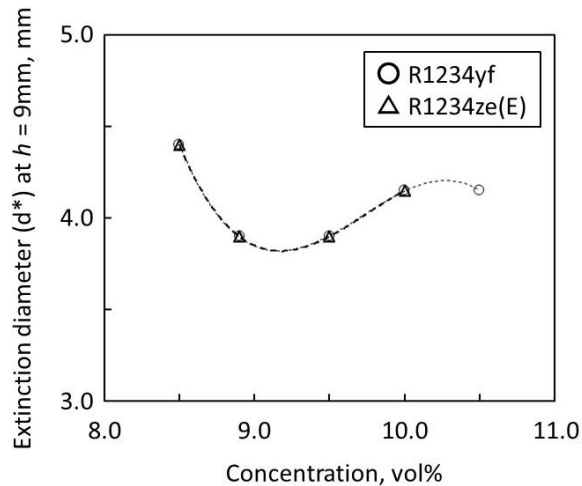


図 2-24 60°C, 50%RH における R1234yf および R1234ze(E)の消炎直径 ($h = 9 \text{ mm}$) の濃度依存性

2.6 冷媒の熱分解

R1234yf 等の可燃性冷媒が空気中に漏洩し、高温の金属面等に触れた際に着火・爆発に至るかどうか、またその際にどのような反応生成物がどの程度生成するかは、冷媒の漏洩時の危険性を明らかにする上で重要である。しかしながら、どのような状況を想定し、どのような方法で検討を行えば良いかと云う点に関しては十分に確立されていない。冷媒が高温の金属面等に触れた際の熱分解反応は、温度のみならず、冷媒濃度や反応時間（接触時間）に影響されると考えられる。また、冷媒が接触する面の材質や表面の状態にも影響される可能性がある。

そこで、ここでは反応温度、濃度、反応時間を種々変えて、これらの実験条件と分解生成物の関係に関する基礎的なデータを得ることを目的として、流通式の反応器を用いて冷媒の熱分解について調べた。図 2-25 に実験装置の概略を示す。

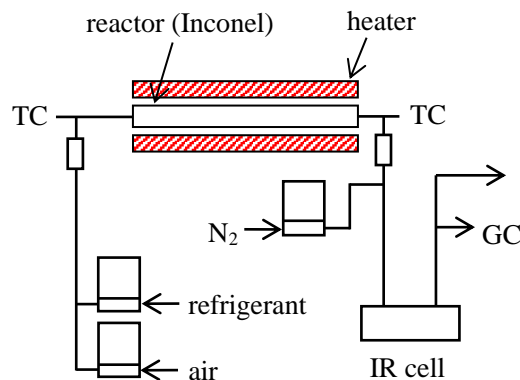


図 2-25 熱分解実験装置の概略

2.6.1 R1234yf の熱分解

R1234yf 等の冷媒と空気の流量はマスフローコントローラで計測・制御して反応管に供給した。反応管は外径 1/2 インチ ϕ (12.7mm ϕ), 内径 10.2mm ϕ , 肉厚 1.24mm, 長さ 44cm のインコネル製である。冷媒の熱分解で生成した HF 等で熱電対が腐食されるのを防ぐため、反応管の中心軸上に鞘管（インコネル製、外径 1/8 インチ ϕ (3.18mm ϕ), 内径 1.4mm ϕ , 長さ 62cm) を貫通させ、鞘管の中に上流側と下流側から 1mm ϕ のシース熱電対 (Type K) を各 1 本挿入して反応温度を測定した。反応後の未反応の冷媒濃度と HF 等の分解生成物の濃度は FT-IR (セル長 10cm, ZnSe 窓板) で測定した。未反応の酸素濃度はガスクロ (TCD 検出器, Ar

キャリアー、3mmφ×3m長のSUSカラムにMolecular Sieve 13X-Sを充填、カラム温度30℃)で測定した。反応管直後の位置で反応ガスにN₂を添加し、IRの吸収強度が適当になるように調節した。IRセルを通過したガスの一部は、ソーダライム管を通してガスクロに導入して酸素濃度の測定を行った。また、残りの反応ガスはソーダライム筒で処理した後、系外に放出した。測定は室温から開始し、段階的に温度を上げて、温度が定常状態になった後にFT-IRとガスクロによる濃度測定を行った。FTIRでは未反応の冷媒と熱分解で生成したHF、COF₂、CO₂、CO、CF₄を分析し、ガスクロではH₂、O₂、N₂を分析した。

R1234yf/空気組成系の測定は、R1234yf/空気の流量を100cm³/minで一定として、R1234yf濃度を1.0vol% (φ=0.12)から15.0vol% (φ=2.10)まで変化させて測定を行った。図2-26にR1234yf=7.8vol% (φ=1.0)の場合の測定結果を示す。図で酸素の消費率とHF等の生成率は供給したR1234yfの1モルに対して消費された酸素のモル数とHF等の生成モル数である。図は4回の繰り返し実験の結果を纏めて示してあるが、各々の実験のバラツキは小さく、再現性の高い結果が得られている。R1234yfと酸素の消費、およびHF等の生成は約600℃までは殆ど認められないが、600℃付近でR1234yfと酸素の消費は急激に大きくなった。熱分解による主な生成物として、HF、COF₂、CO₂、およびCOが検出され、CF₄も僅かではあるが検出されたが、これらの生成も600℃付近から急激に大きくなることが分かった。R1234yfの消費率等は、洗浄によって反応管内に付着している熱分解生成物を除去したクリーンな反応管を用いた場合と以前に熱分解実験に使用した反応管をそのまま用いた場合とで明瞭な違いは認められなかった。

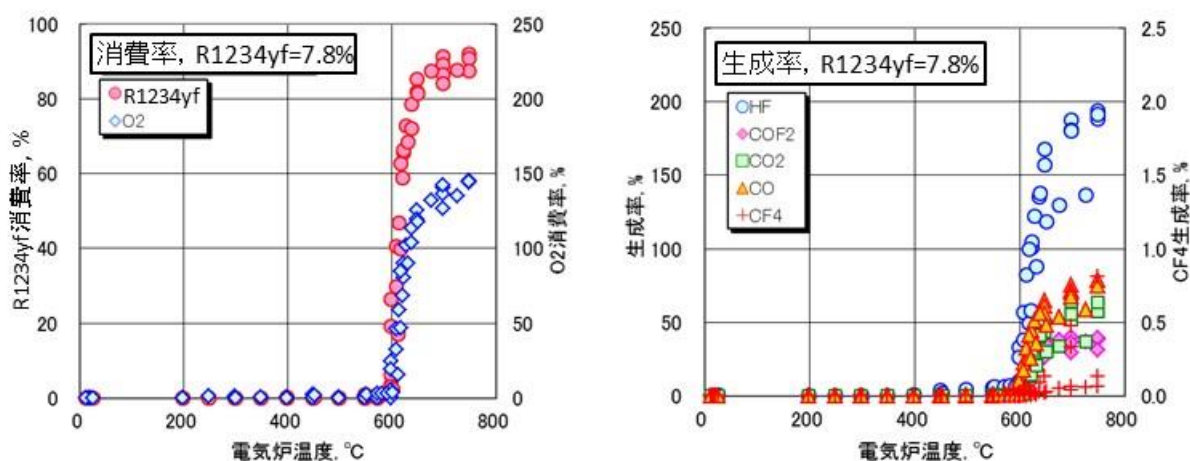


図 2-26 R1234yf の熱分解. R1234yf=7.8vol% (φ=1.0), 冷媒 + 空気流量=100cm³/min.

2.6.2 R1234ze(E)の熱分解

R1234ze(E)/空気組成系の測定は、R1234ze(E)/空気の流量を100cm³/minで一定として、R1234ze(E)濃度を3.0vol% (φ=0.37)から15.0vol% (φ=2.10)まで変化させて測定を行った。図2-27にR1234ze(E)=7.8vol% (φ=1.0)の測定結果を示す。クリーンな反応管を用いた場合は、R1234ze(E)の消費は約550℃以上の温度で認められ、酸素の消費とHF等の生成は約600℃以上の温度で認められ、R1234yfの場合と同様にR1234ze(E)と酸素の消費、およびHF等の生成は600℃付近で急激に大きくなった。一方、以前に熱分解実験に使用した反応管(以下、付着物ありと記す)を用いた場合は、約350℃からR1234ze(E)の消費が認められたが、酸素の消費とHF等の生成は約550℃まで認められなかった。図2-27に示した「付着物あり」の場合の実験結果は2回の繰り返し実験の結果を示しており、各々の実験における反応管内に付着した分解生成物の量は異なると思われるにもかかわらず、350~550℃の温度におけるR1234ze(E)の消費率の変化はほぼ同じであった。なお、クリーンな反応管を用いた場合、約550~600℃の温度でR1234ze(E)は消費されるものの、酸素の消費とHF等の生成は認められなかったことから、この温度範囲ではR1234ze(E)の消費は反応管内に付着している微量の熱分解生成物に影響されている可能性も考えられる。何れにしても、反応管内に一定量以上の熱分解生成物が付着している場合は、R1234ze(E)の熱分解が開始する温度は約200℃低下し、R1234ze(E)の消費率は付着

物の量には影響されないことが分かった。

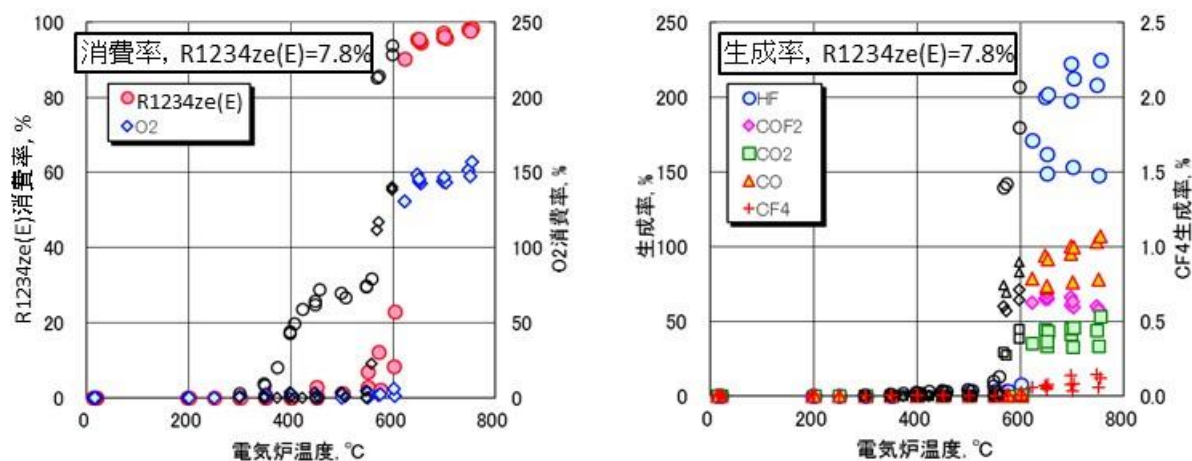


図 2-27 R1234ze(E)の熱分解. R1234ze(E)=7.8vol% ($\phi=1.0$), 冷媒 + 空気流量=100cm³/min. Open symbols represent the experimental results using the reactor to which thermal decomposition products were adhered.

2.6.3 R22 の熱分解

R22/空気組成系の測定は, R22/空気の流量を 100cm³/min で一定として, R22 濃度が 10.0vol% ($\phi=0.40$) から 21.9vol% ($\phi=1.0$) まで変化させて測定を行った. 図 2-28 に R22=21.9vol% ($\phi=1.0$) の場合の実験結果を示す. 熱分解による生成物として, HF, COF₂, CO₂, CO, および CF₄ 他に HCl も検出された. クリーンな反応管を用いた場合は, R22 と酸素の消費, および HF 等の生成は約 450°C 以上の温度で認められた. 約 450~650°C の温度では, 温度の上昇に伴い R22 と酸素の消費, および HF 等の生成は徐々に増加し, 温度の上昇に伴う消費率と生成率の増加の割合は R1234yf および R1234ze(E) に比べて小さいことが分かった. 一方, 「付着物あり」の場合は, R22 の消費は約 300°C 以上の温度で認められたが, 酸素の消費と HF 等の生成は約 450°C まで認められず, 約 450°C 以上の温度では, クリーンな反応管を用いた場合と「付着物あり」の場合で, 酸素の消費と HF 等の生成に大きな違いは認められなかった. 「付着物あり」の反応管を用いた場合, R1234ze(E) とは異なり, 約 300~600°C の温度における R22 の消費率は実験毎に大きな違いが認められたことから, R22 の場合は, R22 の消費率は反応管内に付着した分解生成物の量に大きく依存していると思われる.

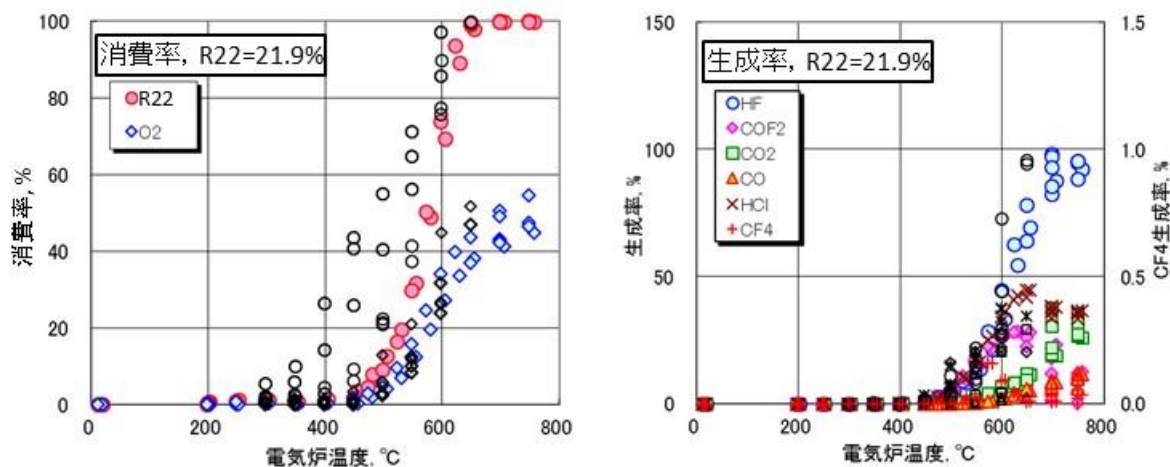


図 2-28 R22 の熱分解. R22=21.9vol% ($\phi=1.0$), 冷媒 + 空気流量=100 cm³/min.

Open symbols represent the experimental results using the reactor to which thermal decomposition products were adhered.

2.6.4 R32 の熱分解

R32/空気組成系の測定は、R32/空気の流量を $100\text{cm}^3/\text{min}$ で一定として、R32 濃度を $2.0\text{vol}\%$ ($\phi=0.10$) から $24.0\text{vol}\%$ ($\phi=1.50$) まで変化させて測定を行った。図 2-29 に R32=17.3vol% ($\phi=1.0$) の場合の実験結果を示す。R32 と酸素の消費、および HF 等の生成は約 550°C までは殆ど認められないが、それ以上の温度では R32 と酸素の消費率は温度の上昇と共に徐々に大きくなり、HF 等の生成率も温度の上昇と共に徐々に大きくなった。R32 の消費率等は、R1234yf の場合と同様に、洗浄によって反応管内に付着している熱分解生成物を除去したクリーンな反応管を用いた場合と以前に熱分解実験に使用した反応管をそのまま用いた場合とで明瞭な違いは認められなかった。

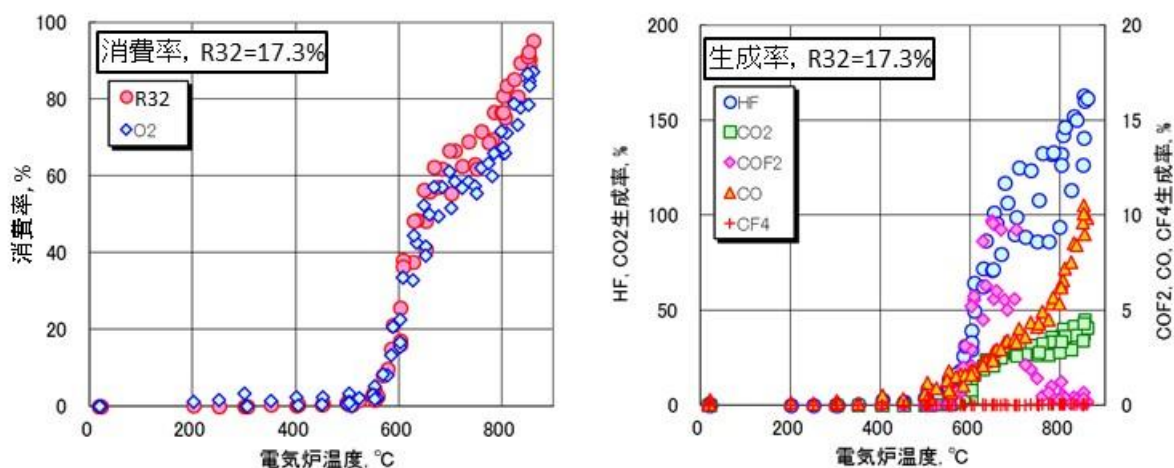


図 2-29 R32 の熱分解. R32=17.3vol% ($\phi=1.0$), 冷媒 + 空気流量= $100\text{cm}^3/\text{min}$.

2.6.5 R134a の熱分解

R134a/空気組成系の測定は、R134a/空気の流量を $100\text{cm}^3/\text{min}$ で一定として R134a 濃度を $1.5\text{vol}\%$ ($\phi=0.11$) から $14.5\text{vol}\%$ ($\phi=1.21$) まで変化させて測定を行った。図 2-30 に R134a=12.3vol% ($\phi=1.0$) の場合の実験結果を示す。クリーンな反応管を用いた場合は、R134a の消費は約 600°C 以上の温度で認められ、酸素の消費と HF 等の生成も約 600°C 以上の温度で認められた。一方、付着物ありの反応管を用いた場合は、約 400°C から R134a の消費が認められ、酸素の消費と HF 等の生成も約 400°C 以上で認められ、R1234ze(E) の場合と同様に、反応管内に一定量以上の熱分解生成物が付着している場合は、R134a の熱分解が開始する温度は約 200°C 低下することが分かった。

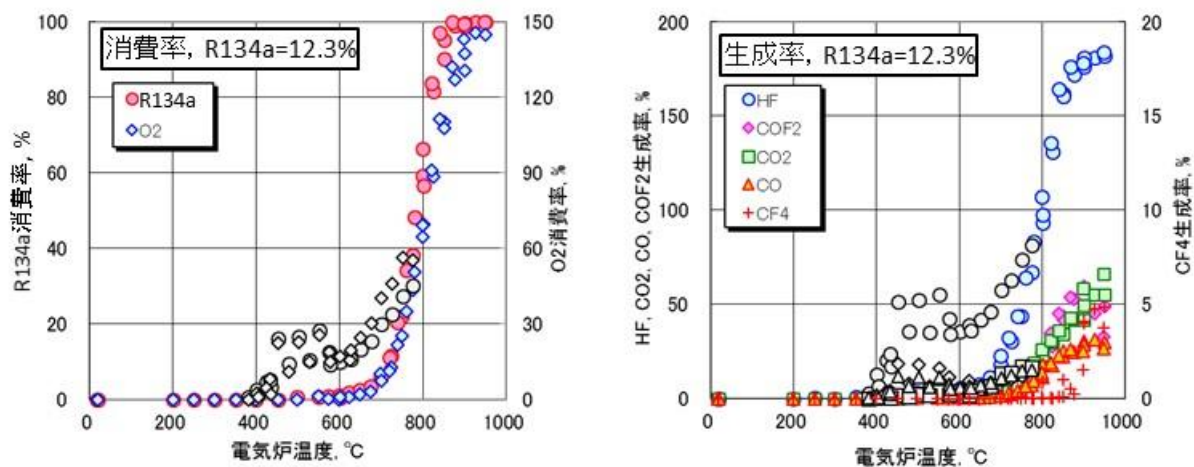


図 2-30 R134a の熱分解. R134a=12.3vol% ($\phi=1.0$), 冷媒 + 空気流量= $100\text{cm}^3/\text{min}$.

Open symbols represent the experimental results using the reactor to which thermal decomposition products were adhered.

2.6.6 冷媒の熱分解開始温度

図 2-31 には分解開始温度の冷媒濃度依存性を示す。ここで、分解開始温度は、冷媒の分解率が 10%に達する温度で定義した。R1234yf および R1234ze(E) の場合は、図 2-26 および図 2-27 と同様に、冷媒濃度が異なってもある一定温度で冷媒の分解率、および HF 等の生成率が急激に大きくなった。R22, R32, および R134a については、温度の上昇に伴う分解率の増加の傾向は、図 2-28～図 2-30 と同様に、R1234yf および R1234ze(E) の場合よりも小さいが、何れの場合も冷媒の分解が開始すると共に、酸素の消費、および HF 等の生成が認められた。分解開始温度と冷媒濃度の関係については、何れの冷媒についても、冷媒濃度が高くなると分解開始温度は低下する傾向にあることが分かった。

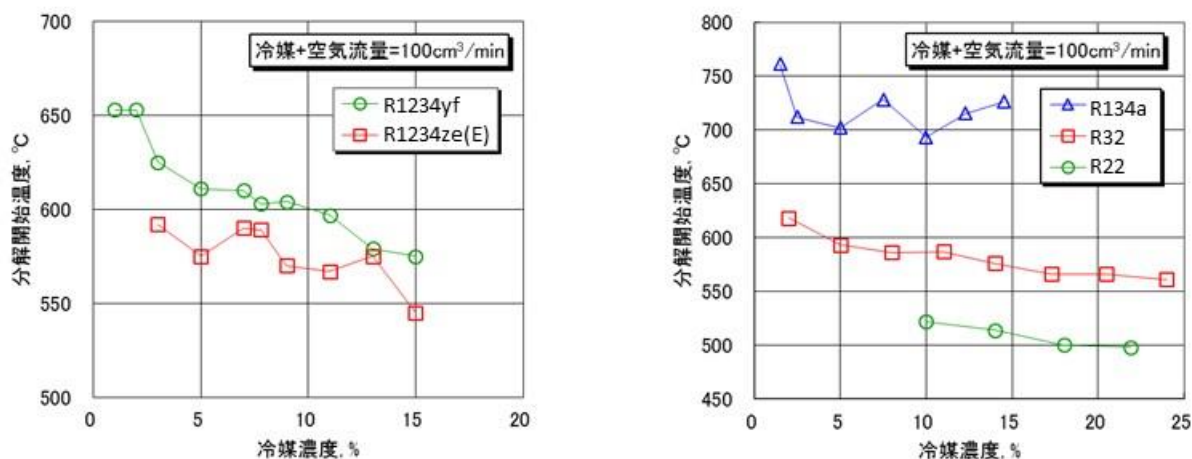


図 2-31 5 冷媒の熱分解開始温度の冷媒濃度依存性. 冷媒 + 空気流量=100cm³/min.

Thermal decomposition temperature is the temperature at which the decomposition rate of the refrigerant reaches 10%.

2.6.7 HFO1123 の熱分解

HFO1123/空気組成系の測定は、HFO1123/空気の流量を 100cm³/min で一定として HFO1123 濃度を 1.5vol% ($\phi=0.11$) から 22.0vol% ($\phi=2.02$) まで変化させて測定を行った。また、 $\phi=1.0$ で HFO1123/空気流量を変えた測定も行った。図 2-32 に HFO1123=12.3vol% ($\phi=1.0$) の場合の実験結果を示す。HFO1123 の分解は約 390°C 以上の温度で認められ、温度がそれよりも少し上昇すると HFO1123 の分解率は急激に大きくなった。熱分解による主な生成物は、R1234yf 等と同様に、HF, COF₂, CO₂, および CO であり、 ϕ が大きい時は CF₄ も僅かに生成した。酸素の消費と HF 等の生成も約 390°C 以上の温度で認められ、HFO1123 の分解率と同様に温度が少し上昇するとこれらも急激に大きくなった。HFO1123 の熱分解は、R22, R134a, および R1234ze(E) のように反応管に付着した熱分解生成物に著しい影響は受けないことが分かった。

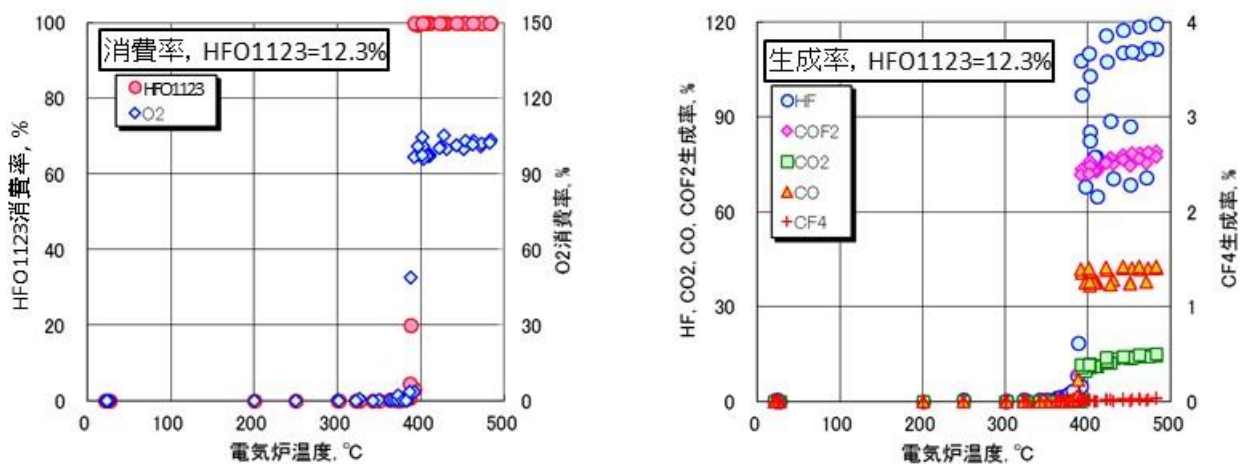


図 2-32 HFO1123 の熱分解. HFO1123=12.3vol% ($\phi=1.0$), 冷媒 + 空気流量=100cm³/min.

2.6.8 HFO1123/R32 混合冷媒の熱分解

HFO1123/R32/空気組成系の測定は, HFO1123/R32 混合冷媒中の HFO1123 濃度が 50vol% について, HFO1123/R32/空気の流量を 100cm³/min で一定として, HFO1123/R32/空気中の混合冷媒濃度が 3.0vol% ($\phi=0.18$) から 47.0vol% ($\phi=5.28$) の範囲で行った. さらに, $\phi=1.0$, HFO1123/R32/空気流量が 100cm³/min の条件で, HFO1123/R32 混合冷媒中の HFO1123 と R32 の比率を変えた測定も行った. また, HFO1123/R32 混合冷媒中の HFO1123 濃度が 50vol%, $\phi=1.0$ の条件で, HFO1123/R32/空気流量を変えた測定も行った. 図 2-33 に HFO1123(50%)/R32=14.4vol% ($\phi=1.0$) の場合の実験結果を示す. HFO1123 の熱分解は約 400°C から認められ, HFO1123 単体の場合と同様に熱分解開始温度よりも温度が少し上昇すると HFO1123 の分解率は急激に大きくなった. また, R32 の分解率, 酸素の消費率, および HF などの生成率も約 400°C で急激に大きくなった.

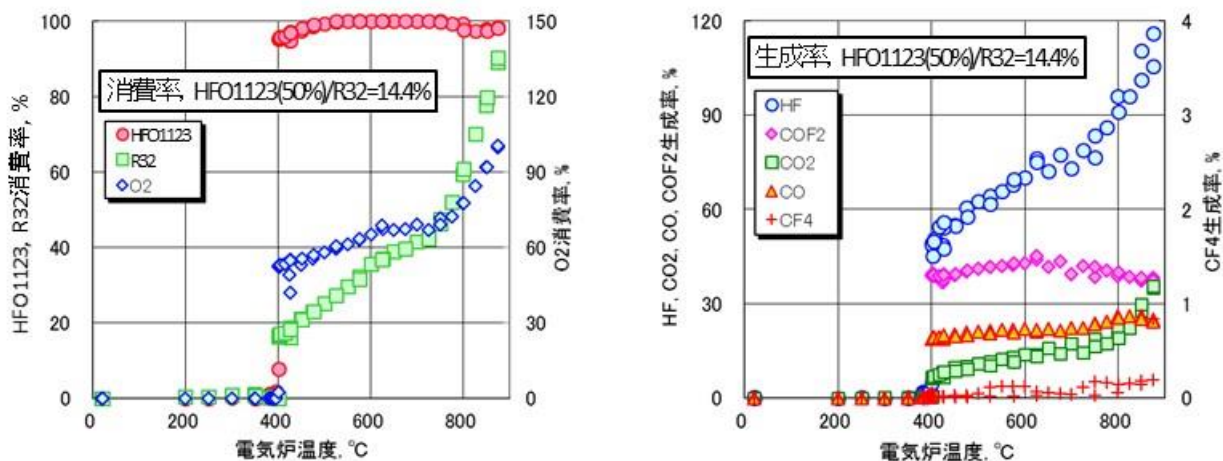


図 2-33 HFO1123/R32 混合冷媒の熱分解. HFO1123(50%)/R32=14.4vol% ($\phi=1.0$), 冷媒 + 空気流量=100cm³/min.

図 2-34 に冷媒/空気流量=100cm³/min の時の HFO1123 単体, および HFO1123(50%)/R32 混合冷媒について, 分解開始温度と冷媒濃度の関係を示す. HFO1123 単体, HFO1123(50%)/R32 混合冷媒共, 冷媒濃度の増加に伴って分解開始温度は低下し, HFO1123(50%)/R32 混合冷媒の場合は 20%を超えると分解開始温度はほぼ一定になることが分かった.

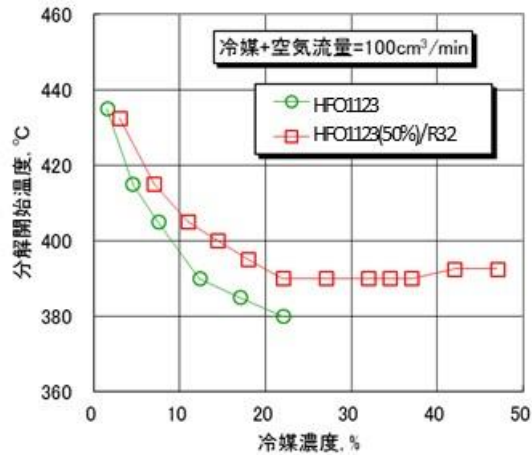


図 2-34 HFO1123 および HFO1123(50%)/R32 混合冷媒の熱分解開始温度の冷媒濃度依存性. 冷媒 + 空気流量=100cm³/min.

図 2-35 には、 $\phi=1.0$, HFO1123/R32/空気流量が 100cm³/min で HFO1123/R32 混合冷媒中の HFO1123 と R32 の比率を変えた測定の結果を示す. 図から分かるように、R32 単体に HFO1123 を 10%加えると分解開始温度は 100°C 以上低下し、HFO1123 の比率が更に増えると分解開始温度は徐々に低下し HFO1123 単体の分解開始温度に漸近した.

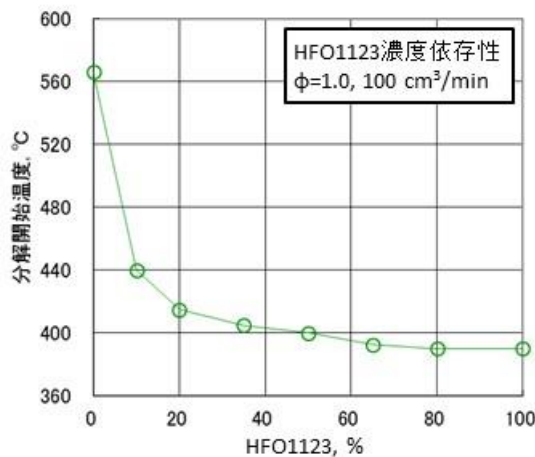


図 2-35 HFO1123/R32 混合冷媒($\phi=1.0$)の熱分解開始温度の HFO1123 混合比率依存性. 冷媒 + 空気流量=100cm³/min.

図 2-36 には HFO1123 単体, および HFO1123(50%)/R32 混合冷媒について、 $\phi=1.0$ で冷媒+空気流量を変えた測定の結果を示す. HFO1123 単体, HFO1123/R32 混合冷媒共, 流量の増加に伴って分解開始温度が高くなる傾向にあることが分かった.

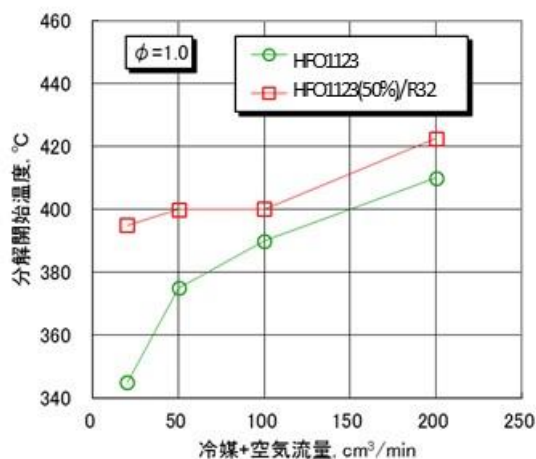


図 2-36 HFO1123 および HFO1123(50%)/R32 混合冷媒 ($\phi=1.0$) の熱分解開始温度の冷媒+空気流量依存性

2.7 低温室効果冷媒の熱分解生成物分析

2.7.1 はじめに

微燃性冷媒の利用に際してリスクを検討するためには、これらの冷媒の分解の容易性や反応生成物についての知見が必要であるが、HF の反応性の高さにより生成物の定量が困難であるうえ、また R1234yf などのように H 原子数より F 原子数の方が多き物質の場合、湿度の変化により可燃領域を含む反応性および反応生成物の組成が異なるという報告²⁻²⁷⁾もある。

そこで本研究では、冷媒の熱分解について、主な有毒生成物である HF 等を定量するとともに、壁面材質等の影響の比較を行うことを目的とする。

2.7.2 実験方法および結果

(a) 実験装置 冷媒の分解による HF の生成原因としては、冷媒自体の燃焼・熱分解・裸火との接触が考えられるが、本研究では熱分解を対象とした。

製作した装置の概略図を図 2-37 に示す。装置はガス混合部・加熱部・測定部・除害部からなり、ガス混合部は MFC (mass flow controller) を用い、任意の濃度・流量で冷媒と空気等を混合する。また、乾燥空気を加湿し一定湿度の空気を得るため、加湿装置と湿度センサーを取り付けている。加熱部は、長さ 550 mm の円管電気炉とその中通された加熱管からなり、加熱管内に試料ガスを通して加熱し、分解を生じさせる。測定部には、光路長 10cm のガスセルを組み込んだ FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy) を設置している。除害部は、装置を通過した試料ガスを除害装置付きのドラフトチャンバー内に放出するだけでなく、ドラフト内に設置した吸収管内を通した上で放出することで、より実験の安全を図るためのものである。

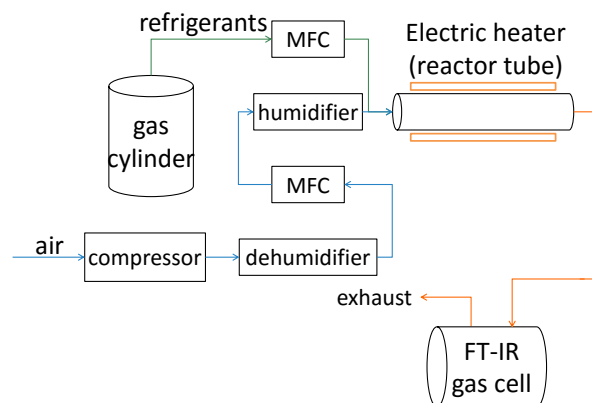


図 2-37 実験装置概略図

(b) パラメータおよび実験対象とする物質 測定時のパラメータを表 2-11 に示す。対象となる冷媒は、低 GWP 冷媒である R32, R1234yf および HFO1123 と、従来冷媒の R134a および R22 とした。加熱管の材質は、インコネル 600 およびステンレス(SUS304, 316)の 3 種を用いた。これは、HF 等による腐食の影響が少ないインコネルと、腐食による影響が生じる可能性があるステンレスの比較を行うことを目的としたものである。

表 2-11 実験条件

冷媒種類	低 GWP 冷媒: R32, R1234yf, HFO1123 従来冷媒: R134a, R22
加熱管材質	インコネル 600, ステンレス鋼 (SUS304 および SUS316)
冷媒濃度 [vol.%]	2.5~10
加熱炉温度 [°C]	400~700
湿度 [g-water/kg-dry air]	0~16
流量 [ml/min.]	100~200
加熱管内径 [mm]	10.7
加熱管断面積 [cm ²]	0.90
ヒーター長さ [mm]	550
加熱時間 [s] (200ml/min.の場合)	5~15 (温度条件等によって変化)

(c) 温度と湿度の影響 インコネル管を用い、冷媒の分解と温度や湿度の関係を測定した。その測定結果を図 2-38 ~ 2-47 に、概要を表 2-12 に示す。図 2-38, 2-39 が R32 と HF の出口濃度を温度と湿度別に示したものである、同様に図 2-40, 2-41 が R1234yf, 図 2-42, 2-43 が R134a, 図 2-44, 2-45 が R22, 図 2-46, 2-47 が HFO1123 の場合である。なお、図 2-38, 2-39 の絶対湿度(AH)の区分けは、“2”のマーカが $0 \leq AH[g/kg] < 2$ 、“4”が $2 \leq AH[g/kg] < 4$ を表し、他も同様である。分解が増加し始める温度には、冷媒濃度の影響が見られなかった。一方で、図 2-40 に示すように、R1234yf については他の冷媒とは異なり、冷媒分解率が 50% 付近となる、加熱炉温度 600°C 前後の条件において、湿度が高い場合に分解量が少なくなった。これは反応速度に差が生じたためと考えられる。

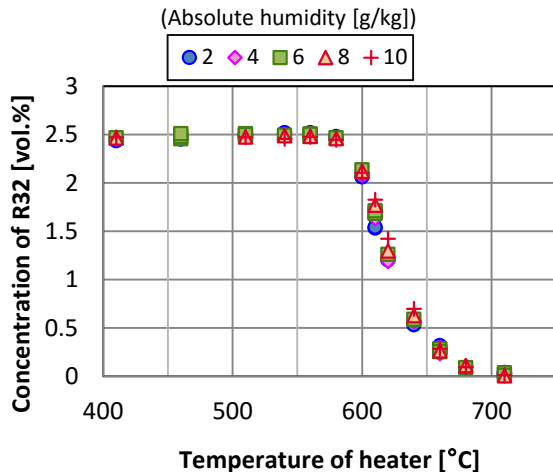


図2-38 加熱管温度とR32出口濃度の関係
 (Total flow rate of 200 ml/min;
 2.5 vol. % R32 with air; Inconel 600 tube)

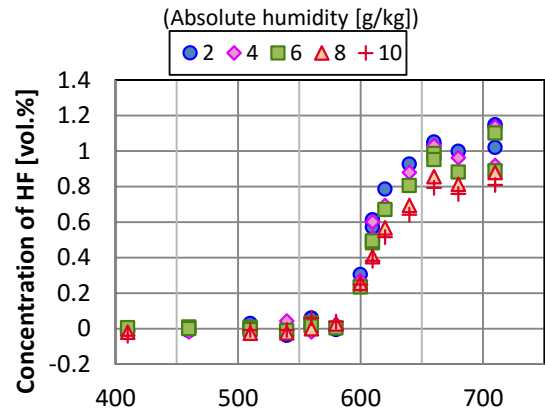


図2-39 加熱管温度とHF出口濃度の関係
 (Total flow rate of 200 ml/min;
 2.5 vol. % R32 with air; Inconel 600 tube)

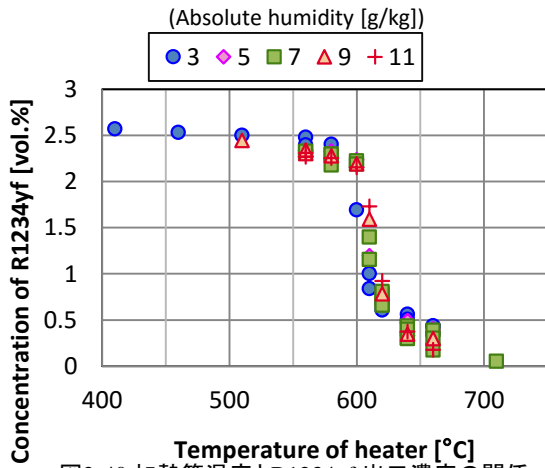


図2-40 加熱管温度とR1234yf 出口濃度の関係
 (Total flow rate of 200 ml/min;
 2.5 vol. % R1234yf with air; Inconel 600 tube)

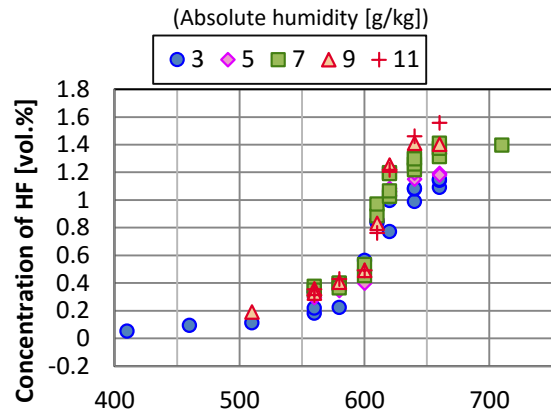


図2-41 加熱管温度とHF 出口濃度の関係
 (Total flow rate of 200 ml/min;
 2.5 vol. % R1234yf with air; Inconel 600 tube)

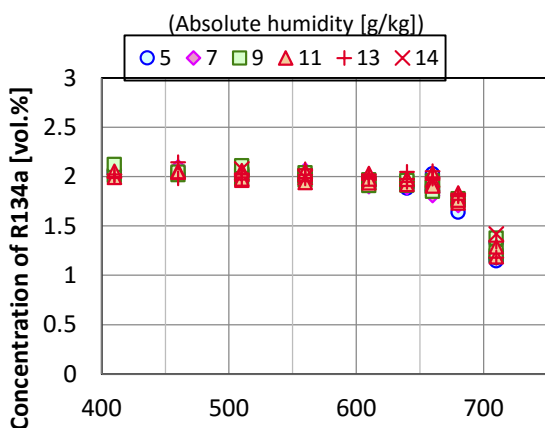


図2-42 加熱管温度とR134a 出口濃度の関係
 (Total flow rate of 200 ml/min;
 2.5 vol. % R134a with air; Inconel 600 tube)

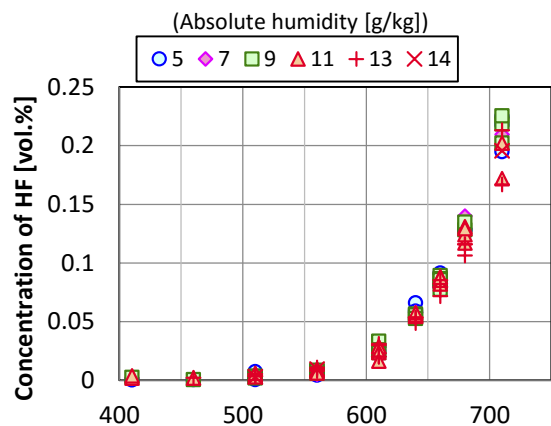


図2-43 加熱管温度とHF 出口濃度の関係
 (Total flow rate of 200 ml/min;
 2.5 vol. % R134a with air; Inconel 600 tube)

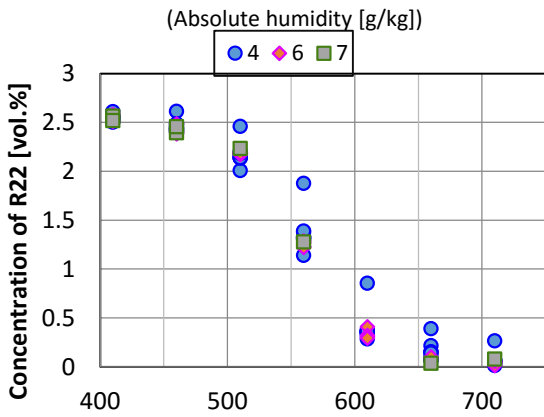


図2-44 加熱管温度とR22 出口濃度の関係
(Total flow rate of 200 ml/min;
2.5 vol. % R22 with air; Inconel 600 tube)

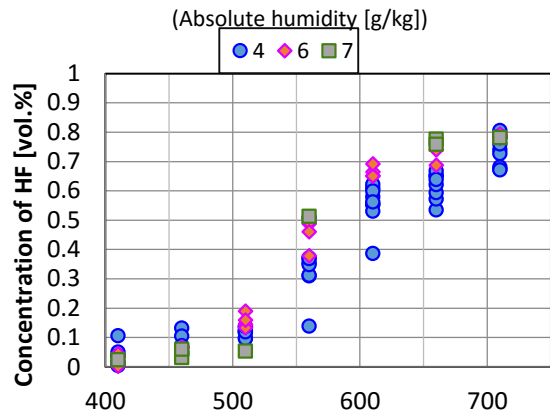


図2-45 加熱管温度とHF 出口濃度の関係
(Total flow rate of 200 ml/min;
2.5 vol. % R22 with air; Inconel 600 tube)

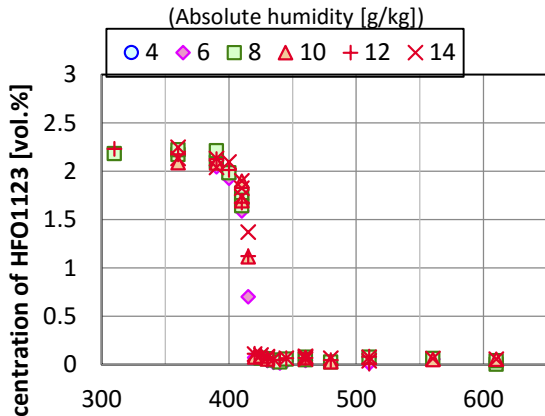


図2-46 加熱管温度とHFO1123 出口濃度の関係
(Total flow rate of 200 ml/min;
2.5 vol. % HFO1123 with air; Inconel 600 tube)

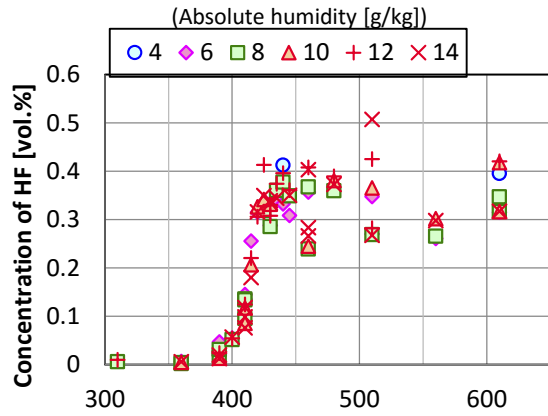


図2-47 加熱管温度とHF 出口濃度の関係
(Total flow rate of 200 ml/min;
2.5 vol. % HFO1123 with air; Inconel 600 tube)

表 2-12 温度と湿度の関係

冷媒	分解下限温度[°C]	湿度と分解量
R32	580~600	影響なし
R1234yf	560~580	湿度が高い場合に分解量が減少
R134a	610~640	影響なし
R22	460~510	影響なし
HFO1123	400~420	影響なし

(d) 管材質の影響 インコネル管の代わりにステンレス (SUS304 および 316) 管を用いて、加熱面温度を段階的に上昇させるように測定条件の順序を統一して分解量等の測定を行った。結果の一部を図 2-48, 2-49 に、インコネル管の場合も含めたまとめを表 2-13 に示す。なお、マーカの” 1st ”, ” 2nd ” …は、同一の管での繰り返し実験の回数 (1 回目, 2 回目…) を示す。腐食する前の管においてはインコネルでの測定とほぼ同じ結果が得られたが、管表面の腐食に伴って分解下限温度の低下がみられた。

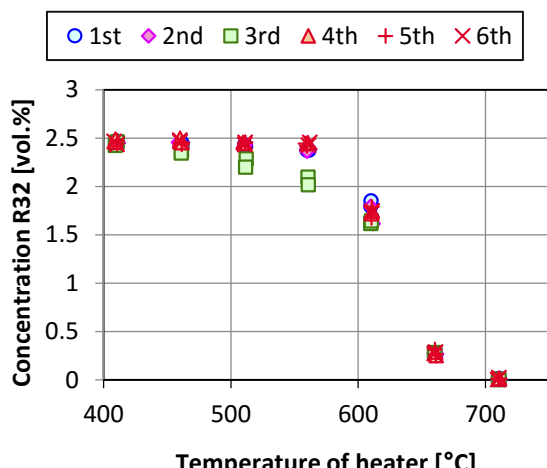


図2-48 加熱管温度とR32 出口濃度の関係
(Total flow rate of 200ml/min,
2.5vol. % R32 with humid air, SUS316 tube)

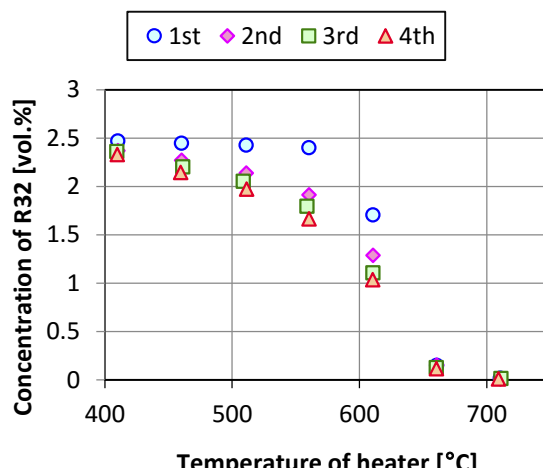


図2-49 加熱管温度とR32 出口濃度の関係
(Total 200ml/min,
2.5vol. % R32 with dry air, SUS304 tube)

表 2-13 壁面材質による分解下限温度への影響

管材質 冷媒	壁材の影響が少ないとき (インコネル 600)	SUS316		SUS304
	乾燥/加湿	乾燥条件	加湿条件 (絶対湿度 6[g/kg]程度)	乾燥条件
R32	580~600°C	560~610°C	460~510°C	410~460°C
R1234yf	560~580°C	410~460°C	410~460°C	410~460°C
R134a	610~640°C	610~660°C	610~660°C	460~510°C
R22	460~510°C	310~360°C	310~360°C	310~360°C
HFO1123	400~420°C	360~410°C	360~410°C	310~360°C

(e) 煤の付着による影響 インコネル管での測定時, R1234yf の場合のみ, 測定を繰り返すうちに結果の変化がみられた. 内部には煤の付着がみられ, これが原因であると推測された. この際の測定結果を図 2-50 に示す. この条件では, 図 2-40 に示した変化前の状態に比べ分解下限温度が低下し, R1234yf の分解量が増加した一方で, 生成物の検出量も同時に減少していた.

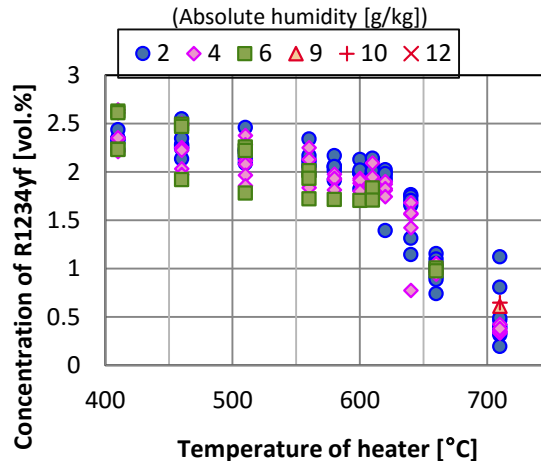


図2-50 加熱管温度とR1234yf 出口濃度の関係

(Total flow rate of 200 ml/min;

2.5 vol. % R1234yf with dry air; Inconel 600 tube with soot)

2.7.3 低温室効果冷媒の熱分解生成物分析のまとめ

微燃性冷媒の安全性を検討するために、冷媒が高温面に接触したときの分解特性を実験し、以下の知見を得た。

(a) 10 秒程度の加熱時間における分解下限温度は、以下のとおりとなった。

R32: 570~590°C, R1234yf: 550~570°C, HFO1123: 390~410°C,

R134a: 600~630°C, R22: 450~500°C

(b) 今回対象とした冷媒において、分解下限温度には湿度の影響がみられず、R1234yf の分解速度にのみ湿度の影響が見られた。

(c) 管壁の腐食によって、いずれの冷媒も分解下限温度の低下と、冷媒分解量と生成物量の増加が見られた。

(d) 煤の付着によって、R1234yf では、分解下限温度の低下と、冷媒分解量の増加、生成物量の減少が見られた。

2.8 実用環境における燃焼特性の評価

本節で報告した種々の燃焼性指標の応用例として、ここでは実際のいくつかの地域における微燃性冷媒の燃焼特性について求めてみた。

図 2-51 に、東京、ジャカルタ、およびリヤドの月別平均気温と相対湿度を図示したものを示す。ISO817(2014)では、燃焼限界を測定する際に使用する湿り空気の状態として温度 23°C, 相対湿度 50%RH (絶対湿度 0.0082 g-水蒸気/g-乾燥空気) と規定している (図 2-51 の黒線で示す)。燃焼速度については乾燥空气中で測定することとしている。一方、たとえば東京では、相対湿度 50%RH を下回る月は 1 ヶ月しかなく、ISO の条件で求めた燃焼性指標は、東京の夏季の高温多湿な条件に対応していない。より信頼性の高いリスク評価をするためには、地域の気候や使用環境等の実情を考慮して燃焼特性評価をすることが重要である。

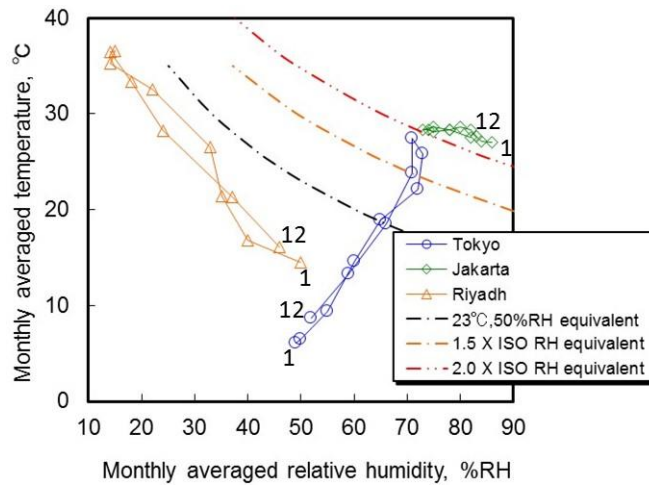


図 2-51 東京，ジャカルタ，およびリヤドの月平均気温および月平均相対湿度
1:January; 12: December.

各地の燃焼特性を求める際に用いた条件を以下に記す．今回の報告は限られた実験データから以下の条件を考慮して求めた参考値であり，各地域におけるより正確な燃焼特性評価を行うには，各地域の実用条件に近いより詳細な評価が必要である．

- 1)燃焼特性は,R290, R32, および R1234yf の 3 冷媒について評価し，以下の図 2-52～2-54 のグラフの相対値に対する基準値として表 2-14 に示す温度 25°C，湿度 0%RH の燃焼特性値を採用した．
- 2)燃焼速度の濃度依存性の積分値として， $1/2 \cdot (UFL-LFL)/100 \cdot S_{u,max}$ を近似的に定義した．
- 3)燃焼限界および燃焼速度の温度影響と湿度影響は独立して扱うことができるとした．具体的には，燃焼限界については式(2-3)，(2-4)と式(2-5)，燃焼速度については式(2-6)と式(2-15)，(2-16) はそれぞれ独立に計算して掛け合わせた．
- 5)R290 と R32 の燃焼限界の湿度影響は無視できるとした（図 2-1 参照）．
- 6)R290 の燃焼速度の湿度影響はこれまで評価しておらず，ここでは無視できると仮定した．

この方法で求めた R32 および R1234yf の 27°C露点（100%RH, ABH = 0.02269）の燃焼速度 $S_{u,max}$ は，それぞれおよそ $6.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ および $4.6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ と見積もられた．

表 2-14 3 冷媒の燃焼特性の基準値（25°C，0%RH）

Refrigerant	LFL, vol%	UFL, vol%	$S_{u0,max}$, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$1/2 \cdot (UFL-LFL)/100 \cdot S_{u0,max}$, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
R290	2.04	9.79	38.7	1.50
R32	13.5	27.6	6.7	0.48
R1234yf	6.8	12.0	1.5	0.039

2.8.1 東京における冷媒の燃焼特性

図 2-51 に示したとおり，東京の月別平均気温のうち，25°C を超えるのは 7 月と 8 月のみで，冬季は 6.1°C と低温になる．また東京の月別平均湿度は，1 月を除き 50%RH を超えており，8 月には ISO817 の燃焼限界試験の湿度条件（23°C50%RH）のほぼ 2 倍の絶対湿度に達する．したがって，東京において燃焼特性の基準値から大きく変化する原因は主に湿度影響によるものである．日本の気温，湿度は，屋外の風通しの良い日陰で計測されている．また，図 2-51 は月別平均値であることから，実際の温度，湿度の最高条件はこれらよりかなり高いことに注意が必要である．

図 2-52 に東京における 3 冷媒の月別燃焼特性（基準値に対する相対値）を示す．R290 については，温度影響は，25°C を超える月が殆ど無いため，燃焼特性を基準値より概ね低減させる．湿度影響は，

燃焼限界については依存性は殆ど無く、燃焼速度については今回考慮していない。これらの結果、R290の燃焼特性は通年、基準値と同等かやや低い値となる。

R32については、温度影響は、25°Cを超える月は殆ど無いため、燃焼特性を基準値より概ね低減させる。湿度影響は、燃焼限界については図 2-1 のとおり影響は殆ど無く、燃焼速度については図 2-8 のとおり僅かに負の影響があるため、絶対湿度の最も高い 8 月には湿度影響で燃焼速度が 7%程度低下する。これらの結果、R32の燃焼特性は通年、基準値よりやや低い値となる。

R1234yfについては、温度影響は、25°Cを超える月は殆ど無いため、燃焼特性を基準値より概ね低減させる。湿度影響は、燃焼限界については図 2-2 のとおり湿度によって可燃範囲が広がり、燃焼速度については図 2-9 のとおり大きな正の湿度依存性があるため、7、8 月には高湿度によって可燃範囲が 80%程度広がり、燃焼速度が 2.5 倍まで増加する。これらの結果、東京では燃焼特性が基準値を下回る月は無く、燃焼速度の濃度依存性の積分値は夏季に最大で基準値の 4.5 倍近くまで達し、冬季は最低で基準値の 1.3 倍程度まで低くなり、季節変動が大きい。

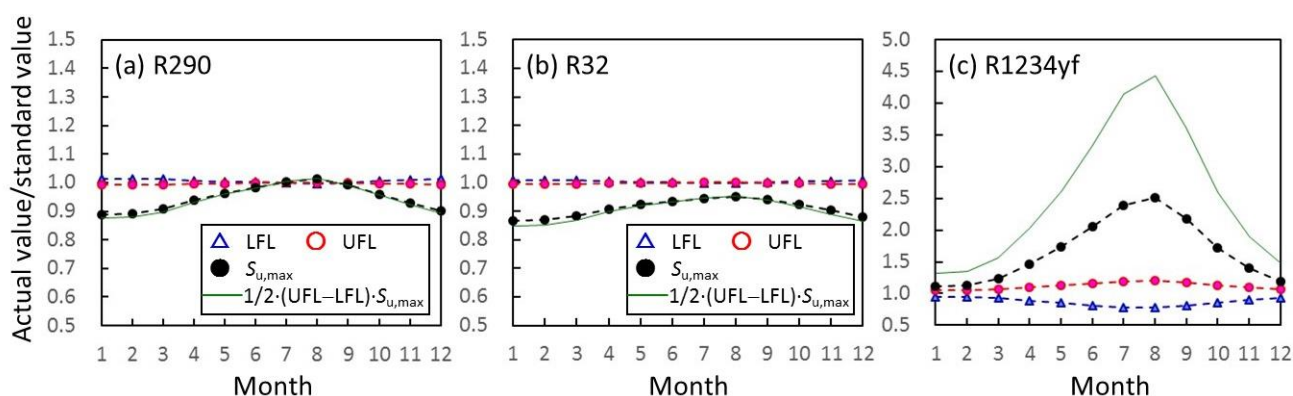


図 2-52 東京における 3 冷媒の月別平均燃焼特性

The standard values are listed in Table 2-11.

2.8.2 ジャカルタにおける冷媒の燃焼特性

図 2-51 に示したとおり、ジャカルタの月別平均気温は、最低 27.0°C、最高 28.6°C と、年間通してほぼ一定であり、燃焼特性を基準値よりほぼ一定量増加させる原因となる。また月別平均湿度は、73–86%RH と安定的に高く、絶対湿度では常に 23°C100%RH 相当を上回る。したがって、燃焼特性は通年ほぼ一定となる。

図 2-53 にジャカルタにおける 3 冷媒の月別燃焼特性を示す。R290 については、温度影響は、常に 25°C をやや超えてほぼ一定であるため、燃焼特性を基準値よりも通年一律に増加させる。湿度影響は、燃焼限界については依存性は殆ど無いとし、燃焼速度については今回考慮していない。これらの結果、R290の燃焼特性は通年基準値より僅かに高くほぼ一定の値となる。

R32については、温度影響は、常に 25°C をやや超えてほぼ一定であるため、燃焼特性を基準値よりも通年一律に増加させる。湿度影響は、燃焼限界については図 2-1 の測定絶対湿度範囲を通年超えてしまうため推測になるが、湿度依存性はあまり無いと考えられ、燃焼速度については図 2-8 のとおり僅かに負の依存性があるため、湿度の最も高い 4 月には湿度効果で燃焼速度が 9%程度低下する。これらの結果、R32の燃焼特性は通年基準値よりやや低いほぼ一定値となる。

R1234yfについては、温度影響は、常に 25°C をやや超えてほぼ一定であるため、燃焼特性を基準値よりも通年一律に増加させる。湿度影響は、燃焼限界については図 2-2 の測定絶対湿度範囲を通年超えてしまうため、図 2-2 の 23°C 100%RH の湿度影響を代表値として用いた場合、可燃範囲を基準値よりも通年一律に 80%程度広げる。燃焼速度については図 2-9 のとおり大きな正の湿度依存性があるため、

通年基準値の 2.8 倍程度の値となる。これらの結果、ジャカルタでは燃焼特性は基準値よりかなり大きなものとなり、燃焼速度の濃度依存性の積分値は通年基準値の 5 倍近くでほぼ一定となる。

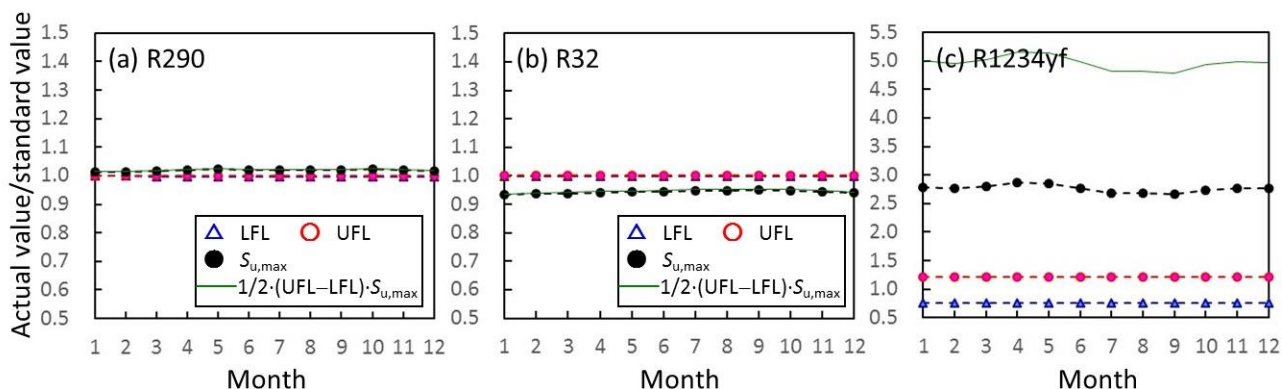


図 2-53 ジャカルタにおける 3 冷媒の月別平均燃焼特性

The standard values are listed in Table 2-11.

2.8.3 リヤドにおける冷媒の燃焼特性

図 2-51 に示したとおり、リヤドの月別平均気温は、7 月には最高 36.6°C にまで達し、燃焼特性を基準値より増加させる原因となる。また月別平均湿度は、絶対湿度が通年低くほぼ一定であり、ISO817(2014)の燃焼限界試験に用いる湿度条件 23°C 50%RH よりも低い。しかしながら、例えば R1234yf の燃焼限界の湿度影響は、少量の湿度条件において顕著なため、リヤドにおいて燃焼特性の基準値から変化する原因は、温度影響と湿度影響の両方によるものと考えられる。

図 2-54 にリヤドにおける 3 冷媒の月別燃焼特性を示す。R290 の温度影響は、燃焼限界については、既報²⁻²⁹⁾から求めた。燃焼限界の温度依存性はあまり大きく無いため、燃焼限界を変化させる効果は 5% 未満である。燃焼速度の温度依存性の方がより大きく、7 月平均気温では 7% 程度燃焼速度を増加させる。湿度影響は、燃焼限界については殆ど無いと考えられ、燃焼速度については今回考慮していないが影響は小さいと考えられる。これらの結果、R290 の燃焼速度の濃度依存性の積分値は基準値に比べ夏季に 8% 程度増加し、冬季に 7% 程度低下する。

R32 の温度影響は、燃焼限界については表 2-3 に示したとおり、あまり大きくない。燃焼速度については、表 2-8 から得られるように、最大で基準値より 8% 程度増加させる効果がある。湿度影響は、燃焼限界については図 2-1 のとおり殆ど無く、燃焼速度については図 2-8 のとおり僅かに負の効果がある。しかしながらリヤドの絶対湿度は低いため、絶対湿度の最も高い 4 月であっても湿度影響で燃焼速度は 3% 程度しか低下しない。これらの結果、R32 の燃焼速度の濃度依存性の積分値は基準値の 0.9 倍 (冬季) から 1.1 倍 (夏季) の範囲の分布となる。

R1234yf の温度影響は、燃焼限界については表 2-3 の乾燥空気における温度依存性から求めたが、温度による変化はあまり大きくなく、最大 2% 程度である。燃焼速度については、表 2-8 から得られるように、基準値より最大 7% 程度増加させるが、R1234yf の燃焼速度の値が小さいため、温度影響は絶対値としては殆ど無視できる。湿度影響は、リヤドは湿度が低いとはいえ、絶対湿度は 23°C 30%RH に相当する。R1234yf の燃焼限界の湿度影響は図 2-2 のとおり湿度が 23°C 30%RH より更に低い範囲において大きく変化するため、リヤドの湿度条件であっても、湿度影響で可燃範囲は基準値より 78% 程度広がる。燃焼速度については図 2-9 のとおり大きな正の湿度依存性があるが、リヤドの湿度は低いため、最も絶対湿度の高い 4 月においても基準値の 1.6 倍程度である。これらの結果、R1234yf の燃焼速度の濃度依存性の積分値は基準値の最大 3 倍程度となり、季節変動は大きくない。また、乾燥地域で夏季には高温になるリヤドであっても、湿度影響の方が温度影響よりも R1234yf の燃焼特性にとって影響が大きいことが分かった。

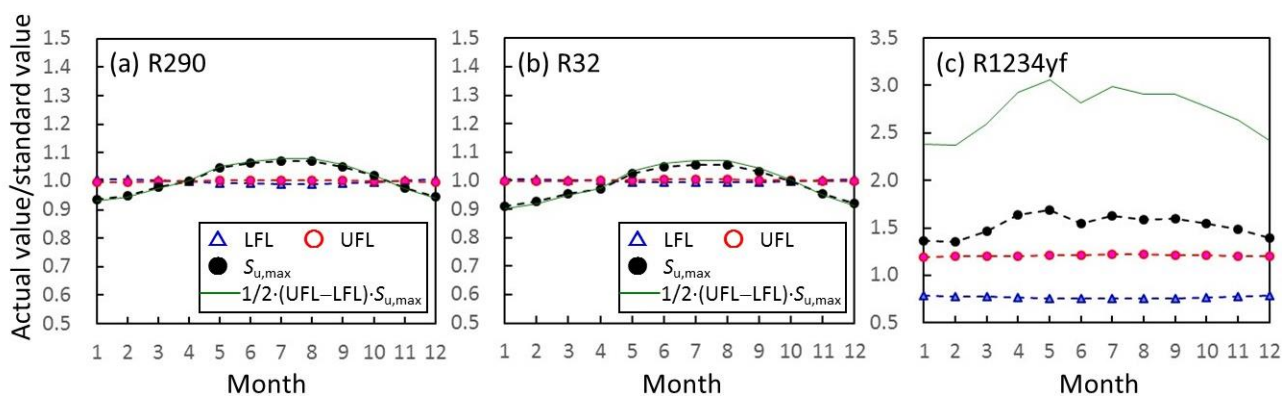


図 2-54 リヤドにおける 3 冷媒の月別平均燃焼特性

The standard values are listed in Table 2-11.

参考文献

- 2-1) ISO/IEC Guide 51, *Safety aspects— Guidelines for their inclusion in standards*, International Organization for Standardization, 1999.
- 2-2) ISO 817, *Refrigerants— Designation and safety classification*, International Organization for Standardization, 2014.
- 2-3) ANSI/ASHRAE Standard 34-2013, *Designation and safety classification of refrigerants*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc, 2013.
- 2-4) ISO 5149, *Refrigerating systems and heat pumps— Safety and environmental requirements*, International Organization for Standardization, 2014.
- 2-5) IEC 60335-2-40, *Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-40: Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers*, International Electrotechnical Commission.
- 2-6) ANSI/ASHRAE Standard 15-2013, *Safety Standard for Refrigeration Systems*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., 2013.
- 2-7) ASTM E681-04, *Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals*, ASTM International, 2004.
- 2-8) Takizawa, K., Igarashi, N., Takagi, S., Tokuhashi, K., Kondo, S., Quenching distance measurement of highly to mildly flammable compounds, *Fire Safety J.*, **71**, pp. 58-68, 2015.
- 2-9) Kondo, S., Takizawa, K., Tokuhashi, K., Effect of high humidity on flammability property of a few non-flammable refrigerants, *J. Fluor. Chem.*, **161**, pp. 29-33, 2014.
- 2-10) White, A. G., Limits for the propagation of flame in inflammable gas-air mixtures. Part III. The effects of temperature on the limits, *J. Chem. Soc., Trans.*, **127**, pp. 672-684, 1925.
- 2-11) Kondo, S., Takizawa, K., Tokuhashi, K., Effects of temperature and humidity on the flammability limits of several 2L refrigerants, *J. Fluor. Chem.*, **144**, pp. 130-136, 2012.
- 2-12) Richard, R., Refrigerant flammability testing in large volume vessels, *DOE/CE/23810-87*, pp. 1-8, 1998.
- 2-13) Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., Kondo, S., Sekiya, A., Burning velocity measurement of fluorinated compounds by spherical-vessel method, *Combust. Flame*, **141**, pp. 298-307, 2005.
- 2-14) Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., Kondo, S., Sekiya, A., Burning velocity measurements of nitrogen-containing compounds, *J. Hazard. Mater.*, **155**, pp. 144-152, 2008.
- 2-15) Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., Kondo, S., Sekiya, A., Reaction stoichiometry for combustion of fluoroethane blends, *ASHRAE Trans.*, **112**, pp. 459-468, 2006.
- 2-16) ASTM E582-07, *Standard test method for minimum ignition energy and quenching distance in gaseous mixtures*,

ASTM International, 2007.

- 2-17) NFPA 77, *Recommended Practice on Static Electricity 2000 Edition*, NFPA, 2000.
- 2-18) 高圧ガス保安技術第 12 次改訂版, 高圧ガス保安協会, pp. 102-103, 2015.
- 2-19) Takizawa, K., Igarashi, N., Tokuhashi, K., Kondo, S., *Effects of temperature and pressure on quenching distances of difluoromethane (R32) and ammonia (R717)*, The 13th Asia Pacific Conference on the Built Environment, pp. 143-155, 2015.
- 2-20) Lewis B., Von Elbe G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases, third ed.*, Academic Press, New York, pp. 333-361, 1987.
- 2-21) Smith, N. D., Mitchell, W. A., Tufts, M. W., Determining minimum ignition energies and quenching distances of difficult-to-ignite compounds, *J. Testing Eval.* **31**, pp. 178-182, 2003.
- 2-22) Tolson, P., The stored energy needed to ignite methane by discharges from a charged person, *J. Electrostat.*, **8**, pp. 289-293, 1980.
- 2-23) Wilson, N., The risk of fire or explosion due to static charges on textile clothing, *J. Electrostat.*, **4**, pp. 67-84, 1977.
- 2-24) Davies, D. K., The incendivity of sparks and brush discharges, *J. Electrostat.*, **27**, pp. 175-178, 1992.
- 2-25) The Institute of Electrostatics Japan, Handbook of Electrostatics, Ohmsha, Tokyo, pp. 220-221, 1981 (in Japanese)
- 2-26) Kondo, S., Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K., On the temperature dependence of flammability limits of gases, *J. Hazard. Mater.* **187**, pp. 585-590, 2011.
- 2-27) 滝澤賢二, 徳橋和明, 近藤重雄, 間宮幹人, 永井秀明, “R-1234yf 及び R-1234ze(E)の燃焼性評価”, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集, 146-147, 2011
- 2-28) 伊藤誠, 党超鋌, 飛原英治, “低温室効果冷媒の熱分解生成物分析”, 2014 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, A343-1 – 4, 2014

3. 事故シナリオに基づく安全性評価

3.1 はじめに

地球環境保護の観点から、オゾン層破壊係数（Ozone Depleting Potential: ODP）がゼロで、かつ、地球温暖化係数（GWP: Global Warming Potential）の小さい冷媒を家庭用空調機器に搭載しようとする動きが世界的に広がっている。これを満たす次世代冷媒として、ジフルオロメタン（R32）、2,3,3,3-テトラフルオロプロペン（R1234yf）、(Z/E)-1,3,3,3-テトラフルオロプロペン（R1234ze(E)）などの開発と実用化が期待されている。その一方で、低 GWP 冷媒は従来冷媒に比べてエネルギー的に不安定であるため、わずかではあるものの燃焼性を有している。ISO817³⁻¹⁾では、23 °C、101.3 kPa において、燃焼下限界が 3.5 vol% より大で、燃焼熱が 19,000 kJ/kg 未満であり、かつ、燃焼速度が 10 cm/s 以下であるガスを 2L クラスと位置づけており、これに該当しかつ毒性のない冷媒は A2L 冷媒と呼ばれる。A2L 冷媒の家庭用空調機器への導入のためには、実際に起こりうる事故シナリオに立脚した、A2L 冷媒が持つ物理的な危険性（フィジカルハザード）評価に基づいたリスク管理が必要であり、A2L 冷媒の燃焼性や毒性等の基本的性状の研究が世界的に進められている³⁻²⁾。

これらを踏まえ、(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）において、「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」事業が 2011 年度より開始された。その一部として、これらの A2L 冷媒の燃焼範囲、最小着火エネルギー、燃焼速度、爆風圧、消炎距離などの基礎的燃焼データの収集と予測モデルの開発³⁻³⁾⁻⁵⁾や、実際の事故シナリオを想定した危険性評価³⁻⁶⁾⁻⁹⁾などが進められている。ここでは、(一社)日本冷凍空調工業会におけるリスクアセスメントの一環として実施された、事故シナリオ洗い出し結果^{3-10),3-11)}に基づき実施された、A2L 冷媒取扱い時の着火危険性およびフィジカルハザード評価に関する一連の研究結果を報告する。

本研究では図 3-1 に示すように、大きく 3 つの A2L 冷媒取扱いシチュエーションを想定した。本報告書中の以降の記述では、以下のシチュエーション番号および事故シナリオ番号を用いることとする。

- (1) 取扱いシチュエーション #1：暖房機器と A2L 冷媒搭載空調機器を同時に使用した場合
- (2) 取扱いシチュエーション #2：A2L 冷媒搭載空調機器のサービス・メンテナンス時

ここでは、さらに以下の 4 つの事故シナリオを設定し、それぞれ着火危険性及び物理的危険度を実験的に評価した。

- (a) 事故シナリオ(a)：A2L 冷媒が漏洩した空間内で、作業者が喫煙用の市販ライターを使用した場合
- (b) 事故シナリオ(b)：A2L 冷媒とサービス・メンテナンス機器（例えば回収機など）を接続するホース等に形成されたピンホール等から冷媒が噴出漏洩した場合
- (c) 事故シナリオ(c)：例えば回収機などサービス・メンテナンス機器内へ冷媒が漏洩した場合

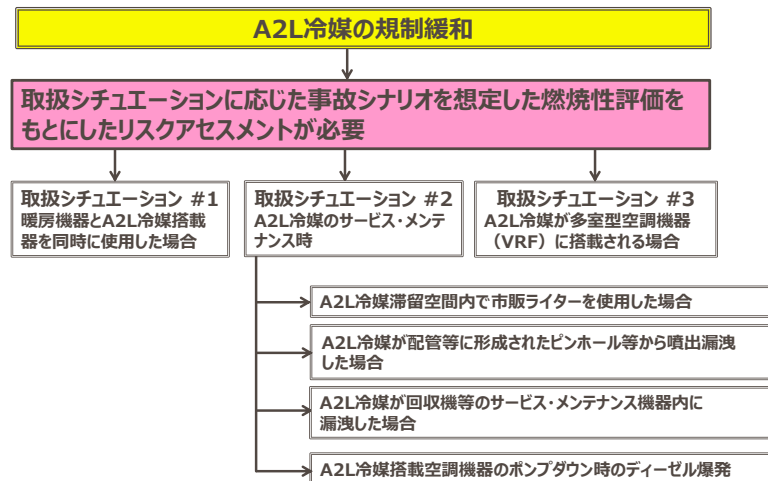


図 3-1 研究の構成

(d) 事故シナリオ(d) : A2L 冷媒搭載空調機器のポンプダウン時のディーゼル爆発

(3) 取扱シチュエーション#3 : A2L 冷媒が多室型空調機器 (VRF) に搭載された場合

本報告書ではこれらの各取扱いシチュエーションにおける検討結果に加え、事故シナリオを想定した実大着火実験の内容についても記載する。

3.2 取扱シチュエーション#1 : 暖房機器と A2L 冷媒搭載空調機器を同時使用した場合

3.2.1 概要

シナリオ#1 では、暖房機器を使用している室内に、空調機器から A2L 冷媒が漏洩した場合 (ケース(i)) と、A2L 冷媒が漏洩・滞留した室内で、暖房機器を動作させた場合 (ケース(ii)) の2つのケースについて、それぞれ実験的にハザード評価を行った。詳細は論文³⁻⁹⁾として公表されている。

3.2.2 実験

図 3-2 に示すように、一辺 2800 mm の立方体形状の実験室内に、市販の 6 畳用空調機器を高さ 2100 mm、側面壁から 1400 mm の位置に吹き出し口の中心が来るように設置した。冷媒は、空調機器の吹き出し口から、下方方向へ向かって漏洩させた。ケース(i)では、室内で既に動作している暖房機器として、反射式石油ストーブ (出力 2.4 kW, 13m²) 及び石油ファンヒーター (出力 3.2 kW, 16m²) を用いた。ケース(ii)では、滞留した A2L 冷媒を乱さないために、着火源を遠隔で制御する必要があるため、市販暖房機器の代わりにセラミックヒーター (出力約 1 kW) を用いた。

対象とした冷媒は、R1234yf, R32 及び現行冷媒の R410A であり、現行の家庭用空調機器の冷媒搭載量³⁻¹²⁾を考慮して、漏洩量は 800 g とした。漏洩速度は 10 g/min 及び 60 g/min の 2 パターン設定した。

測定項目は、暖房機器直近の冷媒濃度およびフッ化水素 (以下 HF) 濃度で、FT-IR により計測した。

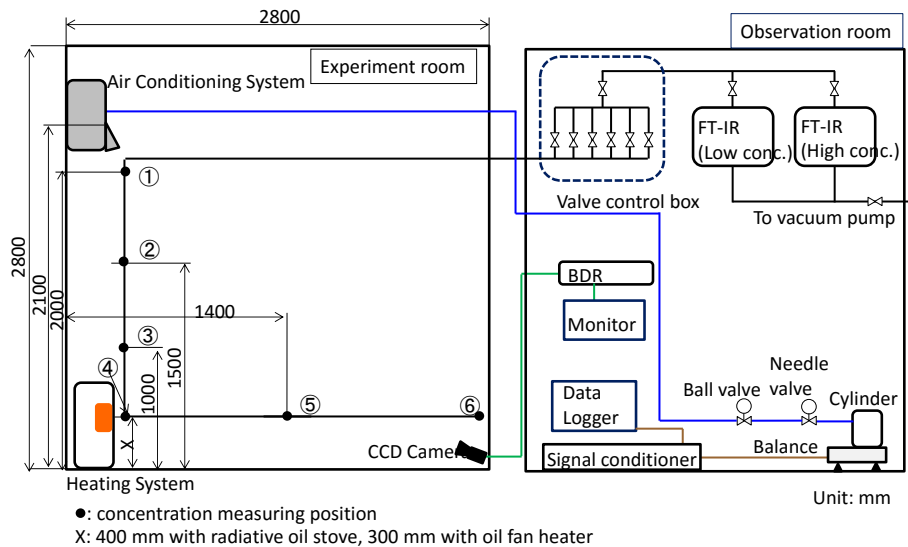


図 3-2 取扱シチュエーション#1 における実験システムの概略

3.2.3 結果及び考察

3.2.3.1 ケース(i)

今回実施した全ての実験ケースで、室内に漏洩・滞留した A2L 冷媒への火炎伝播は認められず、実験前後で室内の様子に変化はみられなかった。図 3-3 は、一例として石油ファンヒーターを使用した場合の、地点④ (暖房機器直前) における冷媒濃度および HF 濃度の経時変化を示したものである。冷媒濃度と HF 濃度の経時変化は空調機器の運転の有無にかかわらず非常によく似た曲線を描いている。冷媒濃度は高くても 2

vol%未満で、R32の燃焼下限界(13.5 vol%³⁻⁴⁾)にくらべて非常に低い値である。従って、壁掛け型家庭用空調機器に通常搭載される程度の量のA2L冷媒全量が室内(約8 m³)に漏洩したとしても、室内のR32濃度は燃焼下限界よりも低い値にしかならないので、火災伝播は起こらないと推定される。同様の傾向はR1234yfの漏洩の場合にも認められた。

図3-4は暖房機器との接触により発生したHF濃度を冷媒種ごとに示したものである。校正ガスの精度から、本実験系ではHF濃度は50 ppm以上で濃度値が保障されるが、測定したHF濃度は50~1500 ppmの範囲にあり、日本産業衛生学会が定める許容濃度(3 ppm³⁻¹³⁾)を大幅に超えるHFの発生が認められた。これは、A2L冷媒のみならず、R410Aの場合も同様であった。

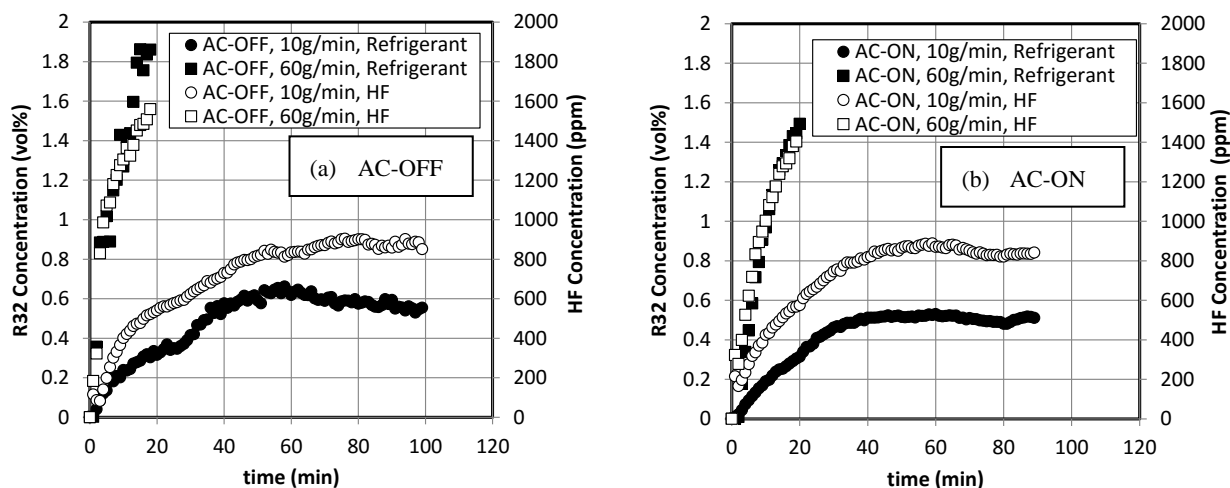


図3-3 暖房機器直前における冷媒濃度とHF濃度の経時変化。

暖房機器：石油ファンヒーター，冷媒：R32，実験室容積：22m³

(a) 空調機停止 (b) 空調機運転

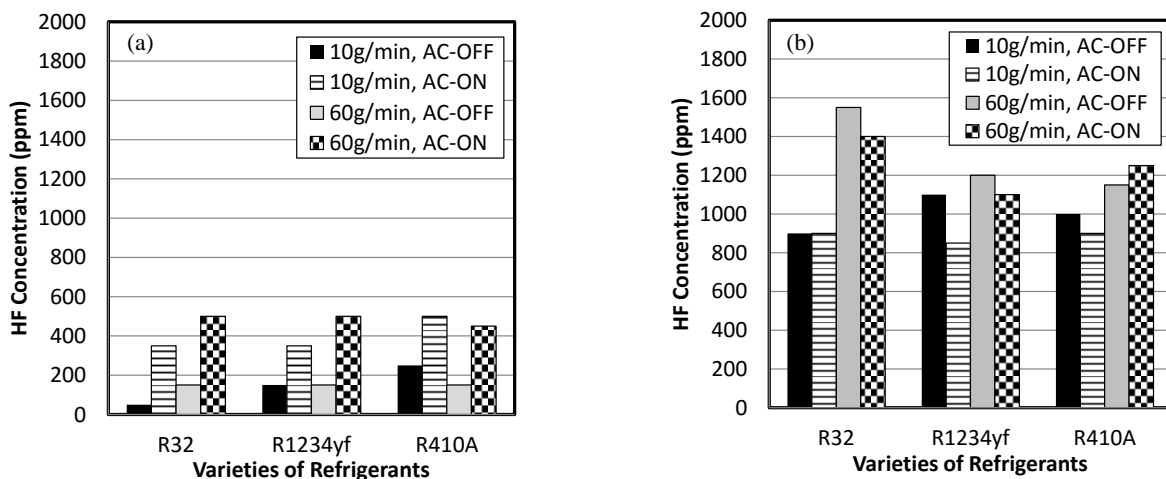


図3-4 漏洩速度および空調機の運転有無を凡例とした冷媒種ごとのHF発生濃度の比較

(a) 反射式石油ストーブ (b) 石油ファンヒーター

暖房機器種に注目すると、石油ファンヒーターを使用した場合の方が反射式ストーブの場合よりもHF濃度が高い。これは、石油ファンヒーターの場合は、ファンヒーター機内に吸い込まれた冷媒が裸火によって燃焼しているのに対して、ストーブでは熱源との接触による熱分解が大半であると考えられることや、ファンヒーターの場合は自身が作り出す気流により、単位時間当たりに熱源に接触する冷媒量が多いと考えられることなどによる。

空調機運転の有無が及ぼす影響についてみると、反射式ストーブの場合は、空調機運転時の方が高いHF濃

度を示したが、ファンヒーターの場合は必ずしもそうではなかった。空調機運転により室内循環流が生じるが、これによりストーブの場合は、単位時間あたりに熱源に接触する冷媒量が単調に増加するのに対して、ファンヒーターの場合はそれ自身が作り出す気流との相互作用によって、必ずしも単位時間あたりに熱源と接触する冷媒量が増加するわけではないためと考えられる。なお、冷媒種ごとの HF 発生能力を比較すると、R32 由来の HF 濃度がその他の A2L 冷媒由来の HF 濃度に比べて若干高い傾向を示したが、全体的に見れば、いずれも R410A 並みの HF 発生能力であった。

3.2.3.2 ケース(ii)

ヒーター作動後、室内冷媒に火炎が伝播する様子は確認されなかった。室内の冷媒濃度が燃焼下限界に遠く及ばないためと考えられる。HF はほとんど検知されなかった (50 ppm 未満)。

3.3 取扱シチュエーション#2-(a) : A2L 冷媒滞留空間内で市販ライターを使用した場合

3.3.1 概要

この取扱シチュエーションでは、サービス・メンテナンス現場等において、A2L 冷媒搭載空調機器から冷媒が漏洩し滞留した空間内で、作業員が喫煙のために市販ライターを使用した場合を想定した。評価対象とする市販ライターとして、圧電素子型ガスライターおよび石油ライターを取りあげ、これらにより滞留 A2L 冷媒に対し着火が発生し火炎伝播が認められるか否かを調べた。なお、たばこの熱による A2L 冷媒への着火及び火炎伝播の有無に関しては、メタンであっても着火が認められなかったとする報告³⁻¹⁴⁾に基づき、本研究では対象としていない。本節における研究成果の一部詳細は論文^{3-7),3-8)}として公表されている。

3.3.2 圧電ガスライター使用時の滞留 A2L 冷媒の着火可能性

3.3.2.1 対象とする冷媒組成

対象とする A2L 冷媒は、R1234yf, R1234ze(E), R32 の 3 種類である。実験対象とする A2L 冷媒の滞留濃度を決定するために、A2L 冷媒が滞留した空間内でのライターの着火可能性を、以下のようにして簡易的に予測した。

ライターの燃料を n -ブタンと仮定する。ライター着火口極近傍で n -ブタン/A2L 冷媒/空気の混合気 (本報告書ではこれを“燃料混合気 (fuel mixture)”と呼称する) が形成されており、 n -ブタン/A2L 冷媒の混合気 (本報告書ではこれを“燃料ガス (fuel gas)”と呼称する) が単一燃料として取り扱えるものと仮定する。一般に混合ガスの燃焼範囲の予測には、Le Chatelier の式が広く用いられている。本実験では燃料ガスは 2 成分系であるから、Le Chatelier の式は以下の (3.1) 式のように表せる。

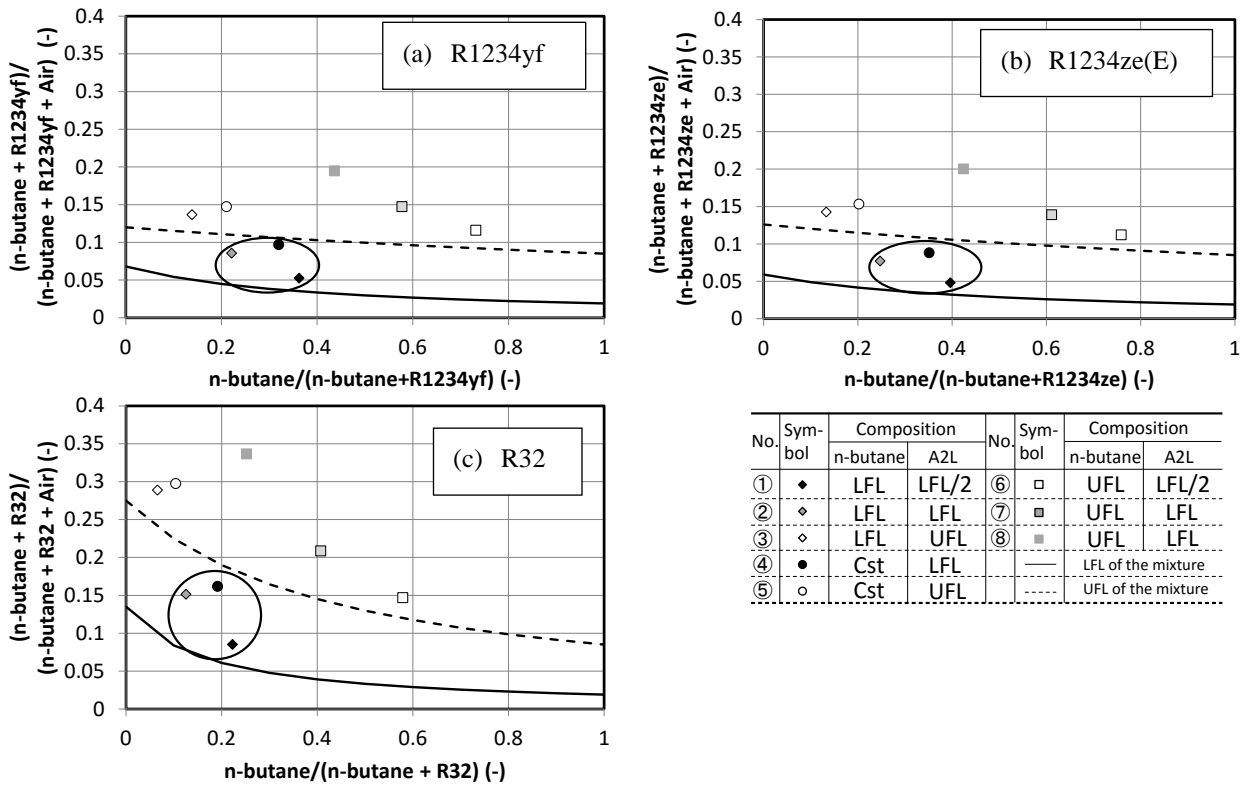


図 3-5 燃料混合気（ノルマルブタン+A2L 冷媒+空気）中の燃料ガス（ノルマルブタン+A2L 冷媒）の組成と予測燃焼範囲の関係

$$\frac{1}{LFL} = \frac{n_1}{LFL_1} + \frac{n_2}{LFL_2}, \quad \frac{1}{UFL} = \frac{n_1}{UFL_1} + \frac{n_2}{UFL_2} \quad (3-1)$$

ここで UFL は燃焼上限界 (vol%)， n は燃料ガスのそれぞれの成分の存在割合で，添字 1 は n -ブタン，添字 2 は A2L 冷媒を指し， $n_1 + n_2 = 1$ である．なお厳密には，Le Chatelier の式は，Burgess-Wheeler の法則が成り立つ飽和炭化水素系ガス同士の混合物の場合に適用可能であり，本実験で対象とした系では厳密には成り立たないが，ここでは実験条件とする燃料ガスの大まかな組成を決定するために，Le Chatelier の式を適用することとした．

先述のように空気中では，ライター着火口極近傍で，燃料が燃焼範囲内の濃度を持っているはずである．そこで， n -ブタンの濃度を 1.9 vol% (LFL)，3.1 vol% (化学量論濃度 C_{st})，8.5 vol% (UFL) の 3 パターンに設定し，これに混合する A2L 冷媒の濃度を LFL/2, LFL, UFL の 3 パターン設定して，それぞれの組み合わせに空気をバランスとした燃料混合気を考える．このとき，燃料ガスの燃料混合気中でのモル分率（燃料混合気中の燃料ガス濃度）を縦軸に，燃料ガス中の n -ブタンのモル分率を横軸にとって両者の関係を示したものが図 3-5 である．図 3-5 中には，Le Chatelier の式により求めた， n -ブタン/A2L 冷媒混合気の LFL 及び UFL を実線及び点線で示してある．その結果，図 3-5 の丸囲み部分に示すように，A2L 冷媒が LFL 以下の濃度で滞留した雰囲気下におけるライター着火口極近傍では，燃料ガスの濃度が，Le Chatelier の式で予測された燃焼範囲内に入ることがわかった．このとき，図 3-5 で示したそれぞれの燃料ガス組成について当量比を求め，その当量比に対応する n -ブタンの着火エネルギーを求めると，0.25~2.40 mJ の範囲の値をとる．一般にライターの圧電素子によるスパークのエネルギーは数 mJ 程度とされているので³⁻¹⁵⁾，A2L 冷媒が LFL 程度以下で n -ブタン及び空気と混合された混合気は，燃焼範囲及び着火エネルギーの双方から見て，着火の可能性があると推測される．この傾向は，本論文で対象とした R1234yf, R1234ze(E), R32 のすべてで同じように認められた．ただし，A2L 冷媒の着火エネルギーは，例えば R32 や R1234yf は，いずれも少なくとも数十 mJ 程度以上で，ブタンのそれより 1 桁以上大きいから， n -ブタン/A2L 冷媒混合気の着火エネルギーも，組成により異なるがブタンの着火エネルギーよりも十分大きいと推測される．従って，実際には着火の可能性は低い

と考えられる。上述の組成における着火可能性は最悪条件を想定したものである。

3.3.2.2 実験

空圧シリンダー（CKD 製 SSD-X）と治具により構成したライター押付装置を、一辺 1000 mm の立方体アクリルプール内の、床面から高さ 300 mm の位置に設置した。空圧シリンダーへの空気供給圧力は 0.15 MPa とし、電磁弁で制御した。対象とした冷媒は R1234yf, R1234ze(E) 及び R32 である。冷媒はプール底面から高さ 750 mm の位置から、鉛直下向きに漏洩させた。漏洩速度は 10 g/min である。ライター押付動作に先立ち、プール底面から高さ 0, 100, 300, 500, 750, 1000 mm の 6 地点の冷媒濃度を、FT-IR にて計測し、高さ 500 mm 以下の領域では、冷媒濃度分布は高さによらずほぼ均一になっていることを確認した。ライター押付動作は、2 秒ないし 10 秒を 1 サイクルとして、5 回ないし 9 回行った。ライター近傍の様子は、デジタルビデオカメラ（SANYO Xacti, 30 fps）にて撮影した。

3.3.2.3 結果及び考察

図 3-6 はライター押付動作時の、ライター着火口極近傍の様子を撮影したものである。A2L 冷媒が燃焼下限界濃度で混合された場合は、ライター着火口で一瞬白く見えるように着火が認められたものの、すぐに消炎し、周囲の A2L 冷媒への火炎伝播は認められなかった。この理由は、*n*-ブタン/A2L 冷媒混合気の着火エネルギーが、*n*-ブタンのそれよりも十分大きいと推測されることと、A2L 冷媒の燃焼速度が小さいことが大きな要因である。燃焼下限界の半分の濃度で混合した場合は、ライターの火炎自体は保炎するが、周囲への火炎伝播は認められなかった。これは、周囲の冷媒が燃焼下限界以下の濃度のためである。

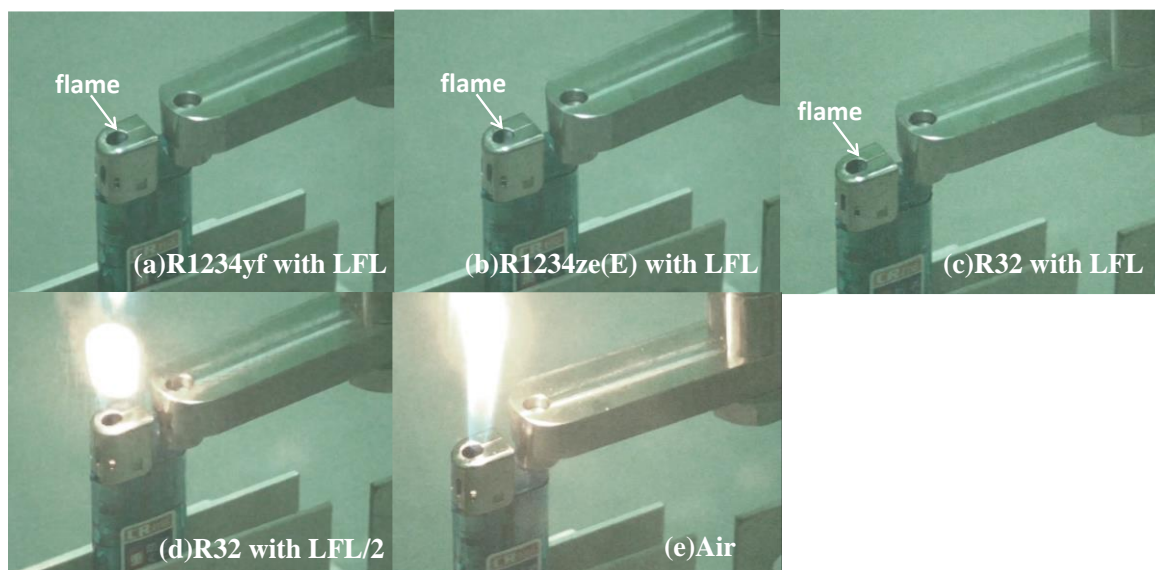


図 3-6 A2L 冷媒滞留雰囲気下における圧電ガスライター周囲の様子

3.3.3 石油ライター使用時の滞留 A2L 冷媒の着火可能性

3.3.3.1 概要

A2L 冷媒滞留空間内での喫煙動作として、石油ライターの使用が考えられる。石油ライターは、ライターのカバーキャップが開いていれば、燃料ガスがライター風防を通して常時蒸発するといった点で、ガス供給ボタンを押さない限り燃料ガスが外部へ出ない圧電ガスライターとは大きく異なる。また、圧電ガスライターに比べて、火炎の大きさが大きいうえ、消炎しにくいいため、冷媒への着火及び火炎伝播の可能性が比較的大きくなる。そこで、A2L 冷媒滞留空間内で石油ライターを使用した状況を模擬した実験により、着火可能性を評価した。本項における研究成果の詳細については、文献^{3-7), 3-16)}にて報告している。

3.3.3.2 実験

図 3-7 に実験装置の概略を示す。対象とした冷媒は R32 である。圧電ガスライター及び予混合ターボライター実験と同様に、一辺 1000 mm のアクリルプール内の、高さ 300 mm の位置に石油ライターを設置し、750 mm の高さから、冷媒を鉛直下向きに 10 g/min の速度で漏洩させた。滞留冷媒を乱さないために、ライターのフリントホイールを直接擦る代わりに、ライター風防内に直径 2 mm のステンレス製電極を挿入し（電極間隔 2 mm）、インバーター式ネオントランス（小寺電子製 CR-N16）を用いて交流放電を発生させてライターへ着火エネルギーを供給した。ネオントランスへの 1 次側電圧供給回路の途中にソリッドリレー（ミスミ製 GSR-20L-D32Z）を挿入し、これをファンクションジェネレータ（Agilent 製 33120A）からの 5 V_{p-p} 方形波信号により開閉することにより、放電時間を任意に制御可能とした。本実験では、放電時間は 50, 100, 500 ms に設定した。電極に流れる電流及び印加電圧は、それぞれ電流プローブ（Pearson 製 MODEL2100）及び高電圧プローブ（Tektronix 製 P6015A）にて計測した。

石油ライター周辺の R32 の挙動は、常速度デジタルビデオカメラ（Panasonic 製 HC-V520M）、高速度カメラ（Photron FASTCAM SA-X）、及び小型 CCD カラーカメラ（Mintron Enterprise, MTV-53KM21H）にて撮影した。高速度カメラの動作トリガーは、ソリッドリレー開閉用の方形波信号によった。従って放電と高速度撮影の開始時刻はほぼ同期している。

冷媒の漏洩量は 220 g とした。この場合、ライター設置高さ（300 mm）における冷媒濃度が概ね 16 vol% となる。着火実験に先立って、プール内の高さ 0, 100, 300, 500, 750, 1000 mm における冷媒濃度を、フーリエ変換式赤外分光光度計（日本分光製 FT-IR4200）にて計測した。

ライター風防内のガスの成分分析は、ガスクロマトグラフ質量分析計（GC/MS; 株島津製作所製 GC-17A）によった。内径 2 mm、長さ 2.0 m のナイロンチューブ（容積 25.12 mL）をライター風防内に挿入し、26 mL のサンプルガスをシリンジで採取して、そのうち 200 μ L について GC/MS により成分分析を行った。なお GC/MS 分析は 4 回繰り返して行った。

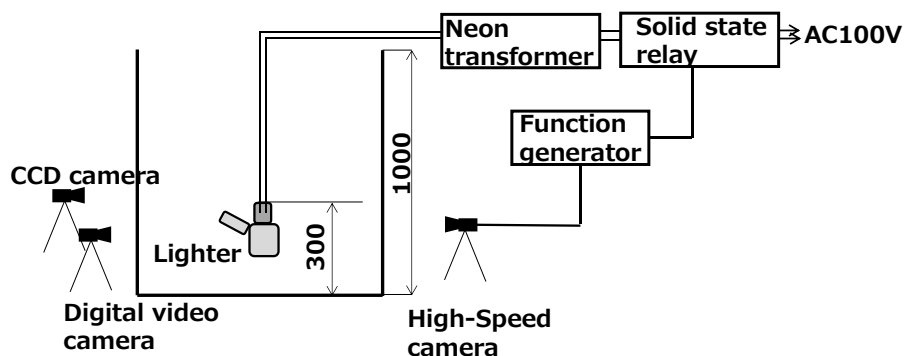


図 3-7 石油ライターを着火源とした場合の滞留 A2L 冷媒への着火実験の概略。単位：mm.

3.3.3.3 結果及び考察

(1) ライターに供給した交流放電エネルギーの妥当性の検証

本実験では、滞留冷媒を乱さないために、直接ライターのフリントホイールをこする代わりに、交流放電により着火のためのエネルギーを与える。従って両者のエネルギーに大きな差があると、実際の喫煙動作を必ずしも良好に模擬できないことになる。そこで、両者のエネルギーの妥当性を評価することとした。

まず、実際にフリント（火打石）をこすった際に発生する火花エネルギーについて検討した。ライターのフリントは、一般に鉄 30 wt% : セリウム 70 wt% の合金とされている³⁻¹⁷。本実験で使用したフリントもこれと同じ組成であると仮定して、フリントを 1 回こすった際に生ずるフリント粉の質量を、フリントを 500 回こすった際の質量減少から求めると、 1.2×10^{-4} g/回となった。これが燃焼（酸化）することにより生ずる酸化鉄及び酸化セリウムの生成熱が、摩擦火花のエネルギーの大勢を占めると仮定して、質量分率を考慮して生

成熟を求めると、約 1.2 J となった。

これに対し、放電時に測定した電流及び電圧波形から放電エネルギーを求めると、本実験で設定した放電時間 (50-500ms) では、0.2-2.3 J となり、上述のように見積もったライター摩擦火花のエネルギーと大差なかった。従って本実験において、交流放電を石油ライターの着火に用いる方法は、供給エネルギーの面では、フリントを直接こすることにより発生する摩擦火花のエネルギーを概ね模擬できていると考えられる。

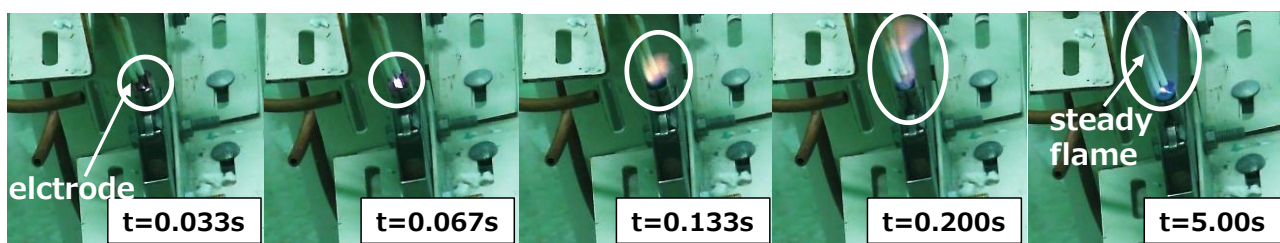
(2) 石油ライターによる着火実験結果

図 3-8(a)は、放電時間 50 ms における、R32 滞留下での石油ライター周辺の様子を撮影したものである。風防内で一瞬火炎形成が認められるが、200 ms 以内に消炎し、周囲の滞留 R32 への火炎伝播は認められなかった。図 3-8 (b)は放電時間 100 ms におけるもので、3 回目の放電で定常火炎が形成され、これによる周囲への火炎伝播が認められた。定常火炎の形成と周囲への火炎伝播確認後、安全のため即座に二酸化炭素により消火したが、もし消火していなければ、滞留冷媒全体へ火炎伝播が拡大した可能性もある。図 3-8(c)は放電時間 500 ms の場合であり、1 度目の放電で着火し定常火炎が形成され、放電時間 100 ms の場合よりもさらに速やかに周囲の滞留冷媒へ火炎伝播する傾向が確認された。

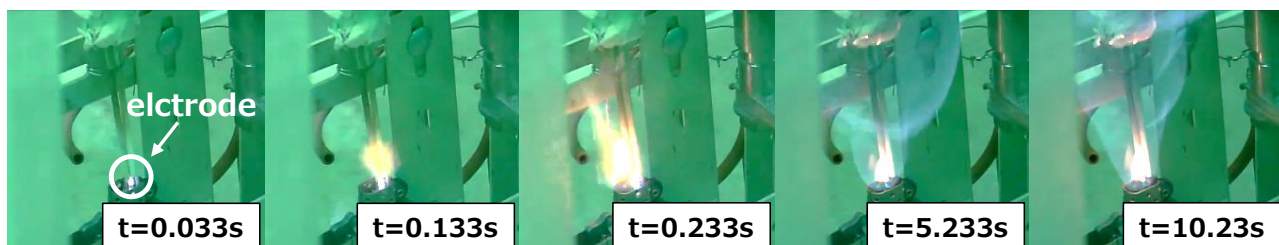
ところで、ライターを取り外して、単独で交流放電を発生させたところ、いずれの放電時間であっても冷媒の着火及び火炎伝播は認められなかった。放電エネルギーは、特に放電時間 500 ms では R32 の最小着火エネルギー (30-100 mJ) を大きく上回るが、それにもかかわらず交流放電エネルギーで火炎伝播が認められなかった。最小着火エネルギー測定時の濃度分布と異なり、滞留 R32 が鉛直方向に濃度分布を有していることが理由の 1 つとして挙げられるが、詳細は現時点では不明である。しかしながらこの結果から、ライター使



(a) 放電時間 50 ms



(b) 放電時間 100 ms



(c) 放電時間 500 ms

図 3-8 交流放電エネルギー供給前後の A2L 冷媒滞留雰囲気下における石油ライター周囲の様子
石油ライター近傍の R32 濃度：約 16 vol%

用時に見られた、滞留 R32 への着火と火炎伝播は、交流放電単独でのエネルギーによるものではなく、まず

石油ライターに着火し、形成された定常火炎により発生する可能性が高いと考えられた。また、電極をライター風防内に設置している場合は、電圧を印加するとほぼ確実に放電が発生したが、電極を風防内から取り出して、直接 R32 の滞留雰囲気下に曝すと、放電が発生しない場合がみられた。これは絶縁破壊強度の相違に由来するものと考えられるので、ライター風防内のガス組成は、R32 滞留雰囲気下とは異なる可能性が示唆されていると考えられる。

そこで風防内のガスを抽出し、GC/MS 分析を行ったところ、R32 単独の雰囲気下で出現する吸光ピークがほとんどみられず、石油ライター燃料単独の雰囲気下で出現する吸光ピークに酷似したピークが、4 つのサンプルガス全てで確認された。このことから、R32 滞留下であっても、本実験のように非常にゆっくりとした速度で冷媒を漏洩させた場合、風防内のガス組成には R32 は含まれていないということになる。これは、風防内部での燃料の蒸発による上昇気流が、冷媒の下降気流に打ち勝つため、冷媒が風防内へ進入できないためと考えられる。従って R32 滞留下であっても、風防内は空気中での使用時と同様に、依然ライター燃料と空気の混合気となっているため、摩擦火花と同等のエネルギーの供給によって着火して定常火炎を形成し、これによって周囲冷媒への火炎伝播に至ったと推測される。以上の結果及び考察から、A2L 冷媒が滞留した空間内で市販の石油ライターを使用した場合、滞留冷媒への着火及び火炎伝播の可能性は否定できない。

3.4 取扱シチュエーション#2-(b) : A2L 冷媒がピンホールや破断口から噴出漏洩した場合

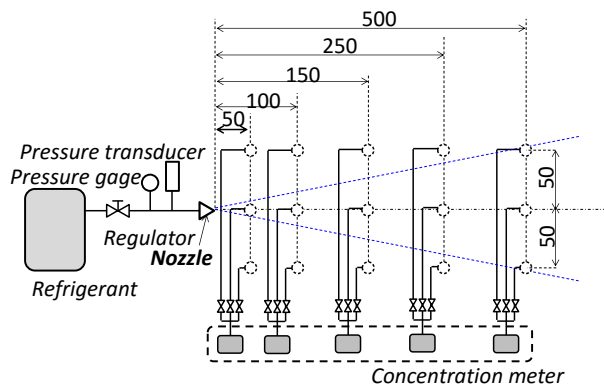
3.4.1 概要

この取扱シチュエーションでは、サービス・メンテナンス現場等において、A2L 冷媒が配管等に形成されたピンホールや破断口などから噴出漏洩した場合を想定した。特に、噴出した A2L 冷媒が何らかの着火源と接触することにより、ジェット火炎を形成するか否か、仮にジェット火炎を形成した場合、それによる周囲への危害度はどの程度になるか、を実験的に調べた。本節における研究成果の詳細は論文³⁻⁶⁾として公表されている。

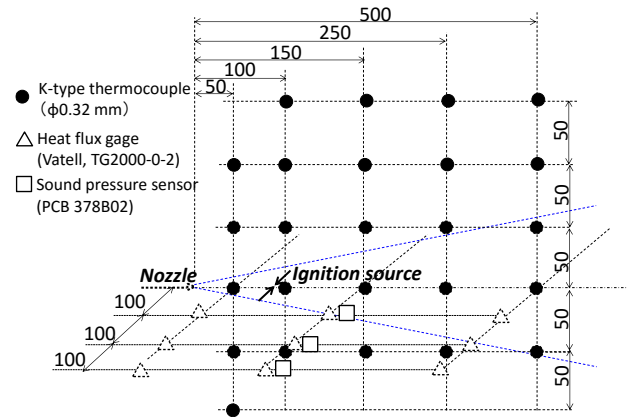
3.4.2 実験

3.4.2.1 冷媒漏洩系統

冷媒ポンペに 1/4 インチ (6.35 mmφ) 銅管を取り付け、銅管先端にピンホールユニットを取り付けて、冷媒の自圧あるいは減圧弁により調整した圧力で噴出漏洩させた。ピンホールユニットは 1/4 インチキャップ型継手 (Swagelok SS-400-C) の中央に穴をあけたものを使用した。ピンホールの形状は円形及びスリット状とし、特にスリットの場合は、縦長と横長の 2 パターンの実験を行った。ピンホール径は 0.2, 1.0, 3.0, 4.0 mmφ、スリットの場合は 1.0 mm×4.0 mm である。ピンホール径 4.0 mmφ は配管の破断を想定している。冷媒の漏洩量は重量計 (最小秤量単位 5 g) により測定した。冷媒の漏洩圧力は、ピンホールユニット手前に取り付けられたブルドン管圧力計 (Swagelok, PGI63B-MG2.5-LAQX) 及びストレーンゲージ型圧力トランスミッタ (共和電業製 PGS-20KA) によりモニターした。



(a) 濃度計測実験



(b) 着火実験

図 3-9 取扱シチュエーション#2-(b)の実験における冷媒濃度，温度，熱流束，音圧計測位置の概略
単位: mm

表 3-1 取扱シチュエーション#2-(b)実験条件
(濃度計測実験)

Experiment No.	Refrigerant	Pinhole diameter (mm)	Mass flow rate (g/min)	
J20-38	R32	0.2	47.5	
J20-08		1	82.5	
J19-01		1	66.7	
J20-03		3	116.7	
J20-04			126.7	
J20-09			297.5	
J20-05			110.0	
J20-10		4	195.0	
J20-11			540.0	
J20-07		1x4hor	82.5	
J20-13			187.5	
J20-06			1x4ver	97.5
J20-12				245.0
J20-24		R1234yf	0.2	5.0
J20-25			17.5	
J20-14			107.5	
J20-19	122.5			
J20-15	140.0			
J20-20	542.5			
J20-16	115.0			
J20-21	472.5			
J20-18	1x4hor		130.0	
J20-23			335.0	
J20-17	1x4ver		137.5	
J20-22			320.0	
J20-31			0.2	5.0
J20-32			22.5	
J20-26	R1234ze (E)		1	82.5
J20-33			97.5	
J20-27		97.5		
J20-34		272.5		
J20-28		87.5		
J20-35		192.5		
J20-30		85.0		
J20-37		92.5		
J20-29		85.0		
J20-36		102.5		

表 3-2 取扱シチュエーション#2-(b)実験条件
(着火実験)

Experiment No.	Refrigerant	Pinhole diameter (mm)	Ignition Source	Mass flow rate (g/min)	
J22-21	R32	1	Ne-TR	260.0	
J22-27			Spark	172.5	
J22-22		3	Ne-TR	726.7	
J22-28			Spark	600.0	
J21-01		4	Spark	285.0	
J21-02				250.0	
J21-03			Ne-TR	N.D.	
J21-04				670.0	
J21-05				Openflame	N.D.(*)
J22-25				Ne-TR	413.3
J22-26			Spark	847.5	
J22-24			1x4 hor	Ne-TR	386.7
J22-23		1x4 ver	Ne-TR	433.3	
J22-29			Spark	367.5	
J22-11			1	Ne-TR	106.7
J22-12			3	Ne-TR	400.0
J21-07	R1234yf	Spark	580.0		
J21-08		4	Ne-TR	500.0	
J21-09				500.0	
J21-10		650.0			
J22-14	1x4 hor	Ne-TR	346.7		
J22-13	1x4 ver	Ne-TR	353.3		
J22-15	R1234ze (E)	1	Ne-TR	120.0	
J22-16		3	Ne-TR	260.0	
J22-17		4	Ne-TR	220.0	
J22-20		1x4 hor	Ne-TR	260.0	
J22-18		1x4 ver	Ne-TR	140.0	
J22-19	213.3				

3.4.2.2 濃度計測系統

噴出漏洩した冷媒の濃度分布を取得するため、着火実験に先立って冷媒濃度を計測した。計測には超音波式ガス濃度計（第一熱研㈱製 US-II-T-S）5台を用いた。測定位置は図 3-9 に示すように、漏洩口から下流側に 50, 100, 150, 250, 500 mm の 5 地点、高さ方向には漏洩口中心を基準に +50, 0, -50 mm（鉛直上方がプラス）の 3 地点、計 15 地点である。測定ラインは下流位置ごとに、鉛直方向の濃度測定用に 3 本分岐している。冷媒濃度は概ね 30 秒未満で定常値に達したので、高さごとに 5 つの各下流位置で同時に 30 秒ずつ濃度を計測した。

3.4.2.3 着火実験

直流単発放電、交流連続放電、裸火を着火源とした。直流単発放電は、2 mmφ のタングステン対向電極と高圧電源装置（㈱ジェネシス製 MEL1140B）を用いて発生させた。放電エネルギーは概ね 10 J、放電時間は 500 μs である。交流連続放電では、ネオントランス（小寺電子㈱製 CR-N16, 15 kV）を電源として用いた。裸火の燃料は LPG であり、火炎の長さが約 30 mm になるよう流量を制御した。これらの着火源はいずれも、漏洩口と同じ高さで下流側 90 mm の位置に設置した。着火実験では、冷媒噴流周囲の温度（25 地点）、熱流束（9 地点）および爆風圧（3 地点）を計測した。温度は線径 0.32 mmφ の K 型熱電対にて、熱流束はガードン型サーモゲージ（Vatell 製 TG-2000）にて、爆風圧はマイクロフォンセンサ（PCB 製 378B02）にてそれぞれ計測した。

3.4.2.4 実験条件

表 3-1 に濃度計測実験の実験条件を、表 3-2 に着火実験の実験条件を示す。対象とした冷媒種は R1234yf, R1234ze(E)及び R32 である。冷媒はすべて気相状態で漏洩させた。本実験のような漏洩条件では、噴出した冷媒の断熱膨張に伴いタンク内の温度が低下するので、噴出圧力も時間とともに低下する。そのため質量流量の再現性は必ずしも良好ではないが、実際に配管等の亀裂などからの漏洩事故の場合も、断熱膨張に伴う質量流量の低下が生じると推測される。また、実際の空調機器運転時の圧力は、最高圧力においては本実験の圧力よりもやや高い圧力になっていると想定されるが、サービス・メンテナンス時においては、空調機器の運転は基本的に停止している。これらのことから、本実験は漏洩圧力においては、極めて厳しい事故シナリオを模擬している。

3.4.3 結果及び考察

3.4.3.1 燃焼範囲の形成

図 3-10 は測定冷媒濃度をもとに作成した、漏洩口周囲の等濃度線図である。図 3-10 の等濃度線は 2.5 vol% ごと（図 3-10 (d)のみ 1.0 vol%おき）に引いてあり、燃焼範囲に入る直前の等濃度線（R32: 12.5 vol%, R1234yf: 5.0 vol%）を太線で示している。図 3-10(a), (c)に示すように、R32 であっても R1234yf であっても、4 mmφ の漏洩口から自圧で漏洩した場合、可燃域となるのは漏洩口から下流側へは高々 100 mm であり、高さ方向へは上下 50 mm 程度でしかなかった。一方、配管などに形成された溶接欠陥等のピンホールからの漏洩を想定した、0.2 mmφ の場合は、図 3-10 (b), (d)にあるように可燃域そのものが認められなかった。

スリットの場合は、図 3-10 (e), (f)に示すように、可燃域は漏洩口から下流側へは高々 100 mm 程度、高さ方向へは上下 50 mm 程度の範囲に形成されるのみであった。スリットの向きの違いによる影響はほとんど確認できなかった。

3.4.3.2 着火と火炎伝播

図 3-11 は、直流単発放電を着火源とした場合の、放電前後での漏洩口の様子を示したものである。漏洩冷媒は R32、漏洩口径は 4.0 mmφ である。この場合、放電の瞬間には青白色の発光が確認できたが（図 3-11(a)の丸囲み部分）、即座に発光は消滅し（図 3-11 (b)）冷媒ジェットへの着火及び火炎伝播は認められなかった。

図 3-12 は交流持続放電を着火源とした場合の、放電前後での漏洩口周囲の様子を示したものである。漏洩冷媒は R32 で漏洩口径は 4.0 mmφ である。放電が開始されると、電極付近で青白色の放電発光が認められ、

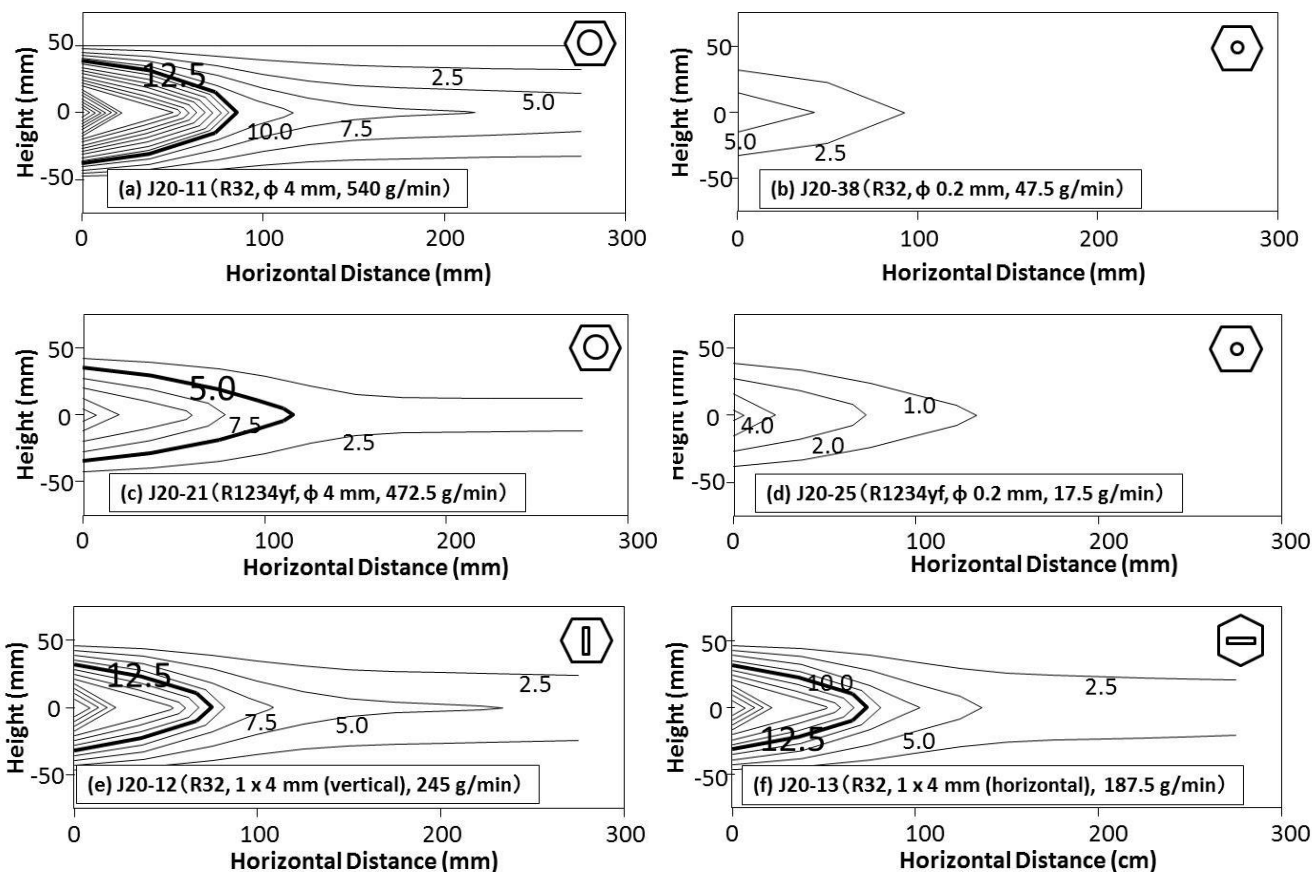


図 3-10 噴出冷媒ジェットの平均濃度分布

これが冷媒噴流と衝突すると、図 3-12 (b), (c) の丸囲内にみられるように、電極付近で下流側へ押し流されるような形の青白色の発光が認められ、その発光領域が大きくなっている。その後時間が経過して冷媒噴流が白い霧を形成すると、電極付近の青白色の発光は霧に隠れて見えなくなり、さらに時間が経過して霧が晴れると、電極付近に再び青白色の発光が認められた。ただし、発光は局所的であり、冷媒全体に火炎が伝播することはなかった。

図 3-13 は裸火を着火源とした場合の様子を示したものである。漏洩に伴い、鉛直に形成されていた裸火が下流方向へ押し流されるようになり、裸火由来のオレンジ色の発光が薄れ、裸火底部には冷媒の燃焼に由来すると思われる、青白色の発光が認められた。しかしその後すぐに青白色の発光は消滅し、冷媒ジェット全体への火炎伝播は認められなかった。裸火は吹き消されたものとみられる。

実際の作業環境では、静電気や摩擦火花などのエネルギーが着火源として考えられるが、これらのエネルギーは大きくても 1 J 未満である。今回の実験では 10 J 程度のエネルギーを有する着火源を使用した場合でも着火が認められなかったことから、A2L 冷媒が噴出漏洩した場合でも、実際の作業環境において考えられる着火源によって着火する可能性は極めて低いと考えられる。

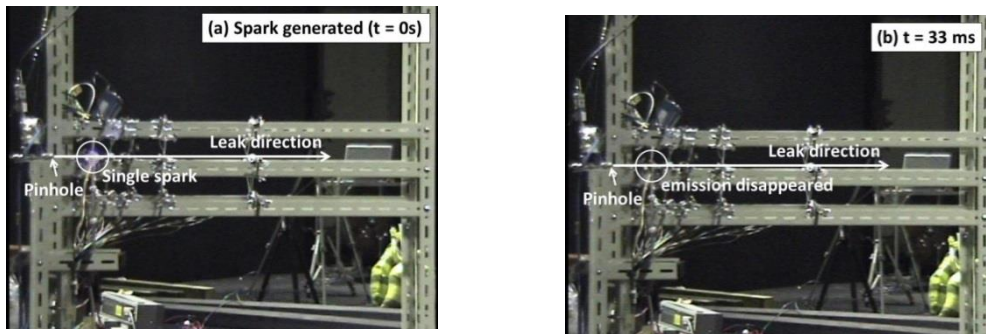


図 3-11 着火源を単発直流放電とした場合の冷媒ジェットの様子
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 0.81 MPa.

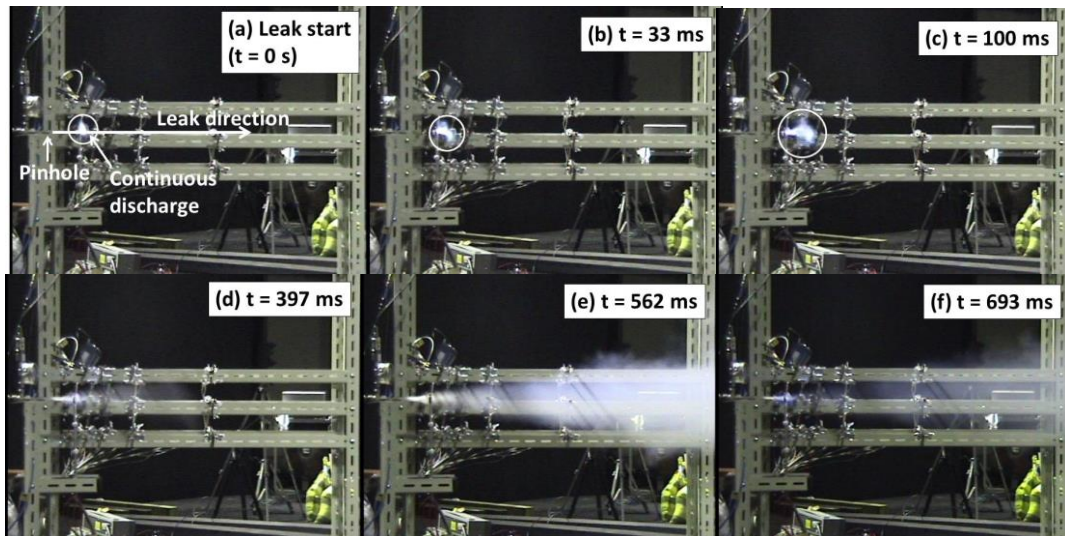


図 3-12 着火源を交流連続放電とした場合の冷媒ジェットの様子
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 0.66 MPa.

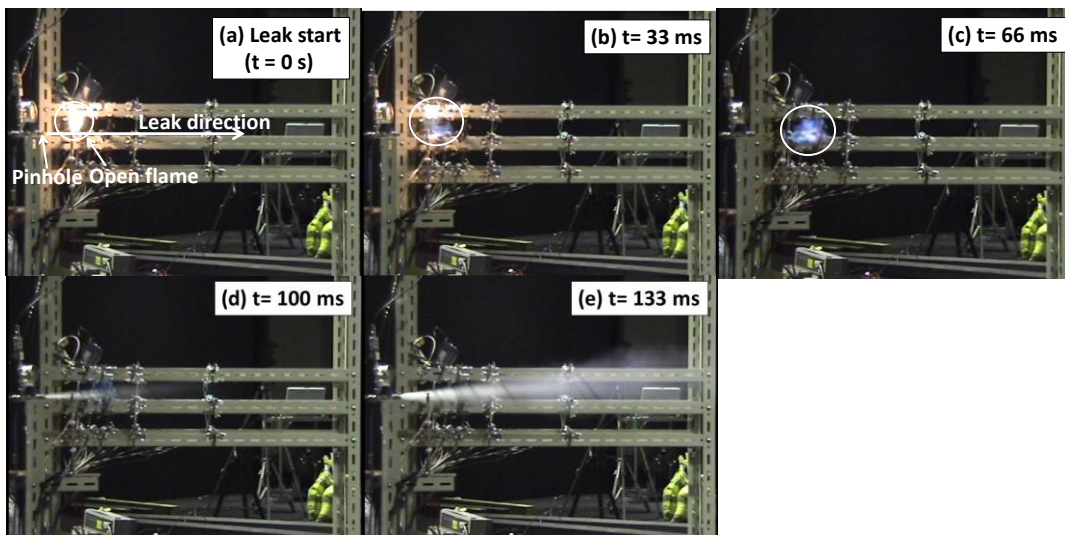


図 3-13 着火源を裸火とした場合の冷媒ジェットの様子
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 1.16 MPa.

3.4.3.3 着火による危害度：温度，熱流束，燃焼生成物濃度

図 3-14 (a)は圧力 1.06 MPa で直径 4 mm のピンホールから漏洩させた着火実験における，ピンホールと同じ高さの温度の経時変化を示したものである．着火源は交流スパークである．熱電対の線径が 0.32 mmφ のた

め応答時間が 1 s 程度かかるので、測定データは実際の温度変化を必ずしも追従できていない可能性があるが、仮に冷媒ジェットに着火し火炎伝播が認められるならば、有意な温度上昇が認められるはずである。ところが、断熱膨張による冷媒ジェットの温度低下は認められたものの、着火による温度上昇は認められなかった。

図 3-14 (b)は、冷媒ジェットと同じ高さで垂直方向に 100 mm 離れた地点で測定した熱流束の経時変化を示したものである。噴出による断熱膨張で温度低下した冷媒ジェットによる冷却効果は認められるが、着火による熱流束の有意な上昇や、じょ限量以上となる燃烧生成物 (HF) の発生は認められなかった。

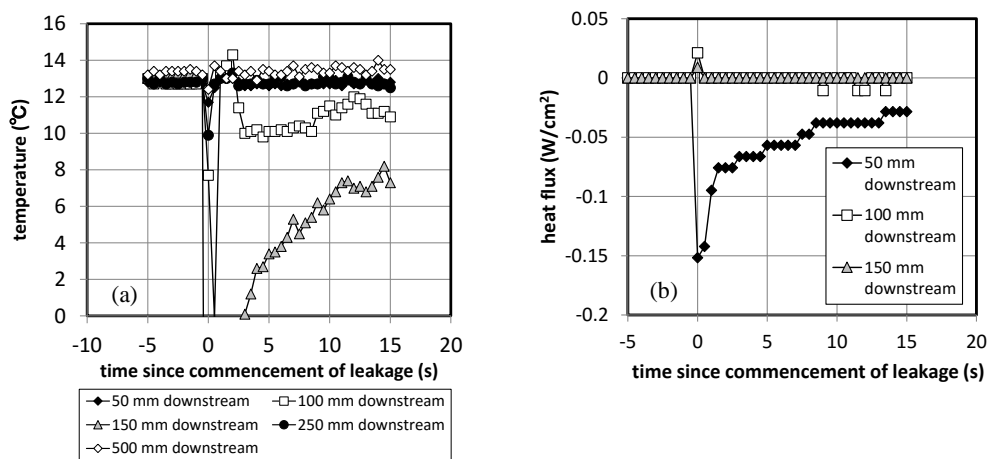


図 3-14 冷媒ジェット中心軸上の温度および周囲の熱流束の経時変化
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 1.06 MPa; 着火源: 交流持続放電

3.5 取扱シチュエーション#2-(c) : 回収機等サービス・メンテナンス機器内への A2L 冷媒の漏洩

3.5.1 概要

この取扱シチュエーションでは、A2L 冷媒が例えば冷媒回収機内に漏洩した場合に、回収機内の電気系統において発生しうるスパーク等に曝される場合を想定した。特に、回収機内に漏洩・滞留した A2L 冷媒がスパークにより着火するか否か、着火する場合どの程度の危害度があるかを調べた。実際の回収機には、冷媒滞留を防止するためにスリットが設けられているが、これにより A2L 冷媒の滞留及び着火を防止可能か否かについても、合わせて実験的に検討した。本節における研究成果の詳細は論文³⁻⁶⁾として公表している。

3.5.2 実験

3.5.2.1 実験装置

図 3-15 に示すように、冷媒回収機内部で冷媒が漏洩した場合を想定して、一辺 1000 mm のプール (以下、回収機模型と表記する) を製作した。回収機模型は実際の回収機に比べて若干大きいと思われるので、本実験で得られる結果は実際よりも危険側の結果を与えると考えられる。プールは 5 面が厚さ 2 mm のアクリル板で、1 面のみビニルシートとして、着火時の圧力を逃がす機構を持たせた。通常、実際の回収機には、漏洩した場合でも内部に滞留しないようにスリットが設けられているが、本実験でもこれを想定して、プールにスリットを設けた。

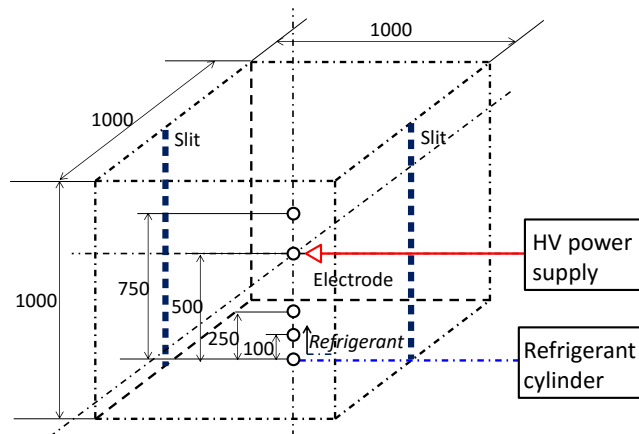


図 3-15 取扱シチュエーション #2-(c)における模型回収機の概略
○: 濃度測定位置

表 3-3 取扱シチュエーション #2-(c)における実験条件

Experiment No.	Refrigerant	Slit width (mm)	Mass flow rate (g/min)
J26-01	R1234yf	0	390.0
J26-02		1	390.0
J26-03		5	390.0
J26-04		10	410.0
J26-05		20	380.0
J26-07			
J26-08	R1234yf (Liquid)	20	560.0

本実験では、まず模型回収機内の冷媒濃度を計測した。冷媒濃度は 3.4 節で用いたものと同じ超音波式ガス濃度計を用いた。測定位置はプール中央部、高さ 0, 100, 250, 500, 750 mm の 5 地点とした。

着火実験では、直流スパーク発生装置（横河電子機器㈱製 16 J 点火装置）を着火源として使用した。スパークのエネルギーは約 16 J で、秒間 6 回の放電を発生させることが可能である。

3.5.2.2 実験条件

実験条件として、回収機模型のスリット幅を 0, 1, 5, 10, 20 mm に変化させた。本実験では R1234yf のみを対象とし、プール底面中央部に設置した外径 1/4 インチの銅管から、気相状態で鉛直上向きに噴出漏洩させた。漏洩速度は約 400 g/min で、漏洩時間は 1 分間とした。表 3-3 に実験条件を示す。ただし実験番号 J26-08 のみ液相状態で噴出させた。なお、着火実験ではスリット幅は 0 mm 及び 20 mm のみを対象とした。

3.5.3 結果及び考察

3.5.3.1 回収機模型内の濃度分布

図 3-16 に冷媒濃度の経時変化を示す。スリット幅 $w_s = 0$ mm の場合（図 3-16 (a)）、冷媒濃度は漏洩開始後ただちに上昇した。漏洩開始から 60 秒後に漏洩を停止したところ、濃度がある程度まで下がった後一定となり、その後は時間経過に対してほとんど変化しなかった。回収機模型内で定常的に滞留したものと思われる。

$w_s = 1$ mm の場合（図 3-16 (b)）、漏洩を停止すると、 $z = 750$ mm, $z = 500$ mm など、比較的高い位置ではスリットから冷媒が拡散する影響を受けて濃度低下がみられるのに対し、 $z = 0$ mm, 100 mm といった比較的床面付近では、冷媒濃度の低下が $z = 750$ mm の場合等に比べて緩やかであった。高さ $z = 500$ mm では、冷媒濃度が燃焼範囲に入っている時間は約 480 s であった。

スリット幅 $w_s = 20$ mm の場合（図 3-16 (c)）は、冷媒漏洩停止後、 $w_s = 1$ mm の場合と同様に高い位置ほど濃度が低下しやすい傾向が認められた。高さ $z = 500$ mm の位置で冷媒濃度が燃焼範囲に入っている時間は約 60 s であった。

図 3-17 は冷媒濃度が燃焼範囲に入っている時間と高さの関係を示したものである。冷媒濃度が燃焼範囲に入っている時間はスリット幅が広くなるにしたがって短くなる傾向が見られた。また、模型回収機底部ほど滞留時間が長くなる傾向が認められた。図 3-18 は冷媒濃度が燃焼範囲に入っている時間とスリット幅の関係を示したもので、スリット幅に対する依存度（両対数グラフの傾きを表す）は高さに依存せず、滞留時間はいずれもスリット幅の 2/3 乗に反比例する傾向が認められた。

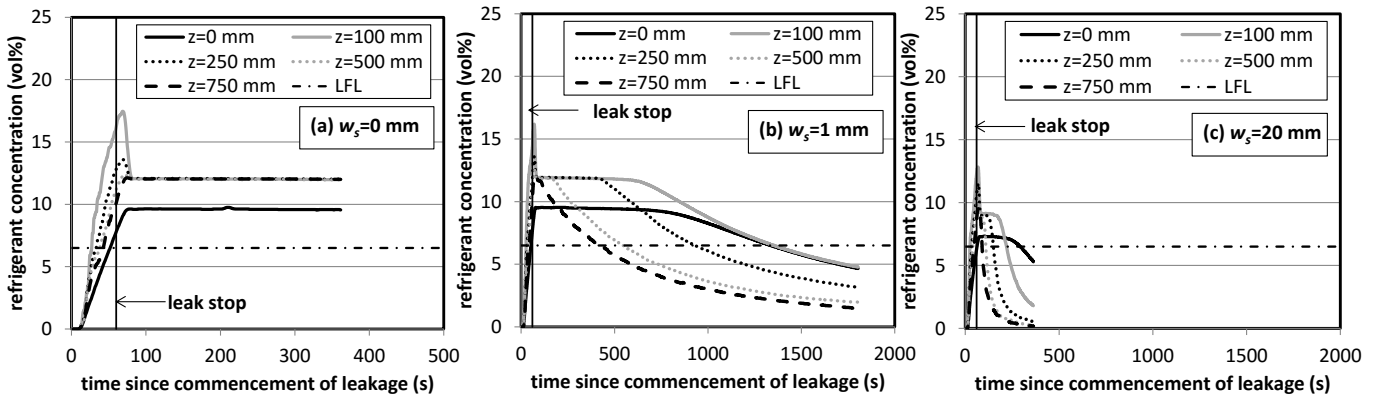


図 3-16 各スリット幅における回収機内の漏洩冷媒濃度の経時変化

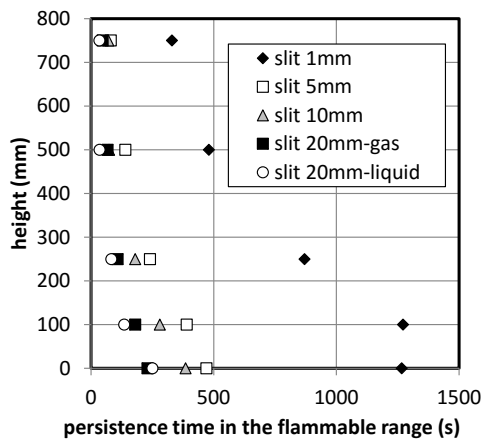


図 3-17 冷媒濃度が燃焼範囲内に入っている時間と高さの関係

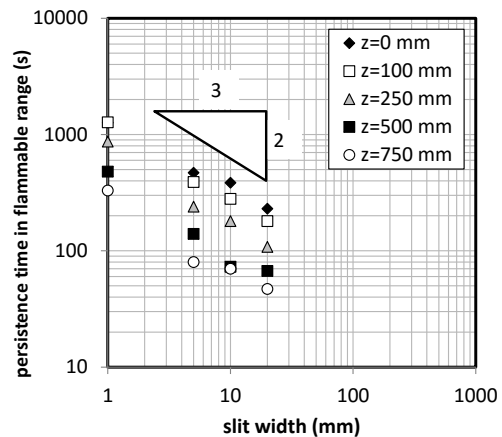


図 3-18 冷媒濃度が燃焼範囲内に入っている時間とスリット幅の関係

3.5.3.2 回収機模型内での着火実験

図 3-19 はスリット幅 $w_s = 0 \text{ mm}$ において、滞留した冷媒中で直流放電させた場合（エネルギー：16J）のプール内様子を示したものである。放電電極は回収機模型中央部（高さ 500mm）に設置してある。放電開始直後から、電極周囲の R1234yf に着火して青白色の火炎球が形成され、これが時間とともに水平に扁平しながら浮力の影響で上方向に伝播する様子が確認できる。天井面に衝突後は、火炎が水平方向前面にわたって伝播しながらゆっくりと降下し、ある高さで未燃領域と燃焼領域の境界がつり合った形状を示した。その後、プールの一面を覆っていたビニルシートが焼失し開口部ができると、ここから流入する酸素によって冷媒はプール全体で激しく燃焼した後、青白色の火炎は消え、輝炎が形成された。この輝炎はビニルシートの燃焼によるものと推測される。従ってビニルシートが焼失するまでは、前節で述べたようにプール下部の冷媒濃度が高く、酸素が比較的少ないために火炎伝播が起きなかったものと推測される。

ただし実際の回収機において、着火源となりうるのは回収機内部の電子回路等からのスパークであるが、これが有するエネルギーは高々 mJ オーダーである。図 3-19 に示すような着火及び火炎伝播が見られたのは、16J のエネルギーを与えた場合である。R1234yf の着火エネルギーは、研究者により幅はあるが、静穏かつ均一な濃度分布を有する雰囲気下（最悪条件）でも数百 mJ 程度は必要とされており³⁻¹⁷、回収機内で発生するスパークの数十倍以上のエネルギーとなる。従って回収機内に冷媒が滞留したとしても、実際に起こりうるスパークで図 3-19 のような燃焼が生じる可能性は極めて低い。

図 3-20 は $w_s = 20 \text{ mm}$ の場合において、漏洩停止後 30 秒で放電を発生させた場合の映像である。これは電極周囲の冷媒濃度がまだ燃焼範囲内にある時間帯であった。しかし、冷媒への着火は認められなかった。スリットの存在により、冷媒は外部へ拡散しようとするので模型回収機内に冷媒の流動が起こるが、R1234yf の燃焼速度が小さい (1.5 cm/s^{3-1}) ので、火炎が伝播しなかったものと考えられる。

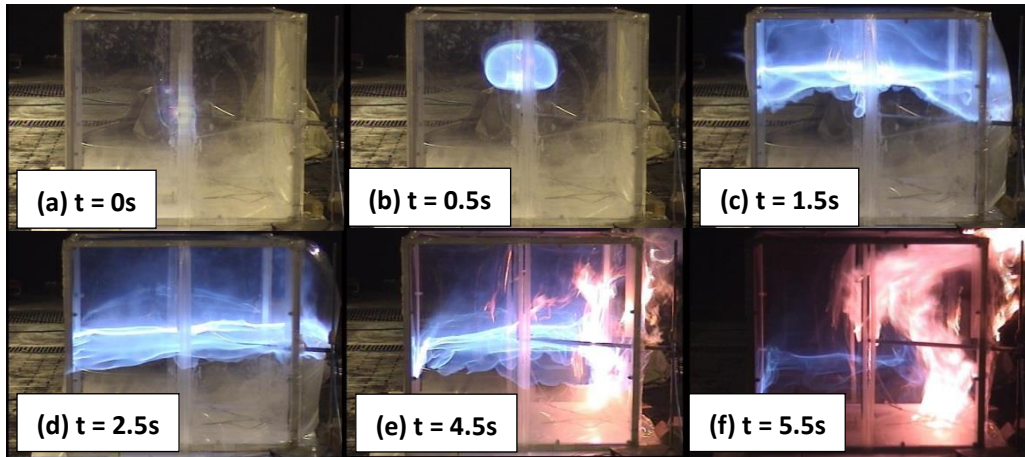


図 3-19 回収機内部に漏洩した冷媒の着火実験画像（スリットなし）
冷媒: R1234yf; 漏洩速度: 380 g/min; スパークエネルギー: ~16 J, t : スパーク発生からの経過時間 (s)

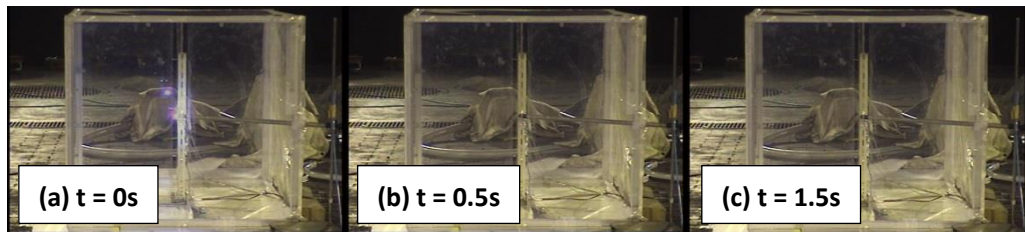


図 3-20 回収機内部に漏洩した冷媒の着火実験画像（スリット幅 20 mm）
冷媒: R1234yf; 漏洩速度: 380 g/min; スパークエネルギー: ~16 J.

3.6 取扱シチュエーション#2-(d) : ポンプダウン時のディーゼル爆発

3.6.1 概要

ヒートポンプにおける冷媒回収時にはポンプダウンを行うが、その際に想定される事故として、冷媒潤滑油混合気に空気が混入し、断熱圧縮され温度上昇することによる、自己着火燃焼が考えられる。ルームエアコン冷媒回収時の室外機破壊事故の報告例もある^{3-18) 3-19)}。低 GWP 冷媒として注目されている R1234yf や R32 は微燃性を持つため、従来の不燃性冷媒 R410A と比較して、安全性の評価が必要と認識されている。本研究ではディーゼル爆発を想定した実験装置を製作し、冷媒による燃焼の発生条件の違いを検討した。

3.6.2 実験装置と実験方法

3.6.2.1 実験装置

図 3-21 に実験装置の概略を示す。装置は空気供給系、冷媒供給系、温度調節系、潤滑油供給系、及び圧縮機から構成される。空気、冷媒、潤滑油の流量はそれぞれ制御される。それらの混合気はヒーターで加熱された後、圧縮機で圧縮される。圧縮機内圧力は圧力計で観測され、排気は FT-IR により光学的に分析した。

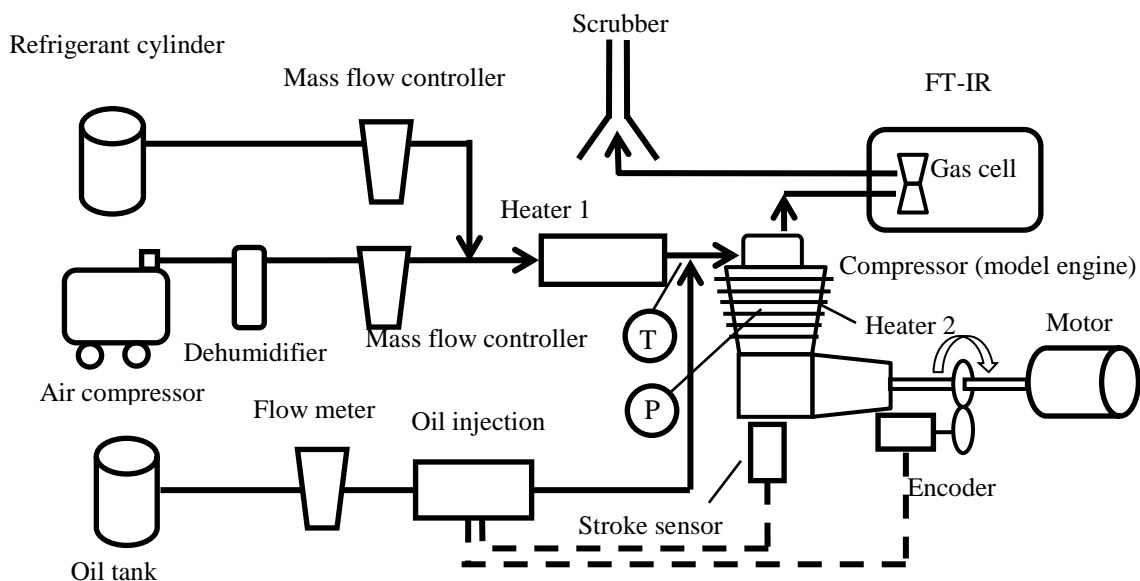


図 3-21 実験装置外略図

実際の圧縮機でディーゼル爆発を発生させると爆発する危険があるため、模型エンジン（R155-4C：塩谷製作所製）の軸をモーター（MELSERVO-J3：三菱電機製）で駆動することにより、圧縮機として用いた。図 3-22 にエンジンのカットモデルを、図 3-23 にエンジンとモーターの接続の様子をそれぞれ示す。エンジンの仕様圧縮比は 16.0 である。エンジンの回転数はモーターの回転数により制御した。エンジンとモーターを繋ぐ軸にはエンコーダーが取り付けられており、エンジンのピストン上死点及びクランク角を測定できる。



図 3-22 模型エンジンカットモデル

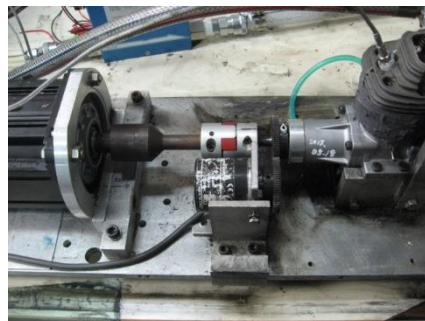


図 3-23 エンジン-モーター接続

潤滑油はオイル噴霧システム（Common Rail Electric Control Fuel Injection System：FC デザイン製）を用いて供給した。本装置は、潤滑油を 150MPa まで加圧し、インジェクターからエンジン吸気口に向け霧状に潤滑油を噴霧する。冷媒と空気の混合気に対し、エンジン吸気口直前で噴霧し、予混合した。

3.6.2.2 実験方法

表 3-4 に、実験に用いた冷媒及び潤滑油を示す。低 GWP 冷媒である R1234yf, R32 に加え、従来冷媒である R410A, R22, R134a, R125 を用いた。潤滑油として PAG（ポリアルキレングリコール）オイルと、POE（ポリオールエステル）オイルを用いた。いずれも R1234yf や R32 エアコンに用いられる潤滑油である。表 3-5 に実験条件を示す。エンジン回転数と、エンジン行程容積から混合気流量を算出した。入口気体温度は燃焼を発生しやすくするため、260°C まで加熱した。先に述べた熱分解反応試験の結果を元に、ヒーター壁面で冷媒の熱分解が発生しないよう加熱温度を設定した。潤滑油流量は、後述する理論空燃比を基に算出した当量比を基準として設定した。潤滑油噴霧タイミングはエンジンクランク角 90°とし、吸気行程において噴霧さ

れるようにした。

表 3-4 使用冷媒と潤滑油

Item	Type
Refrigerant	R1234yf, R32, R410A, R134a, R22, R125
Lubricating oil	PAG (VG46), POE(VG68)

表 3-5 実験条件

Number of revolutions, rpm	1500
Mixture flow rate , l/min	18.75
Inlet gas temperature, °C	260
Oil flow ratio , -	0.0, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6
Injection timing , degree	90 (at crank angle)

潤滑油の特性を表 3-6 に示す。それぞれの情報はそれぞれの潤滑油の製造元である出光興産 (PAG オイル), JX エネルギー (POE オイル) より提供して頂いた。CHO 比は潤滑油内に含まれる炭素, 水素, 酸素の質量割合である。理論空燃比となるように基準オイル流量を算出した。なお実際の事故において, 冷媒濃度によって圧縮機内のオイル量は変化しないと考え, 冷媒濃度の関わらずこの基準オイル流量を元に当量比を定めている。

表 3-6 潤滑油特性

	PAG(VG46)	POE(VG68)
CHO ratio , mass %	61.7 : 10.5 : 26.2	70.1 : 10.8 : 19.1
Flash point , °C	216	254
Ignition point , °C	350	408
Theoretical air fuel ratio , kg/kg	9.54	10.91
Standard flow rate , l/min	2.295×10^{-4}	3.519×10^{-4}

本研究では, 以下の 3 種類の実験を行った。

- (a) PAG オイルを用いて, 冷媒濃度変化による現象の違いを測定することで, 冷媒配管内への空気混入による燃焼現象を調べた。
- (b) 潤滑油流量を変化させることにより, 燃焼に対する潤滑油の寄与を調べた。
- (c) PAG オイルと POE オイルを比較することで, 潤滑油の特性による燃焼条件の違いを調べた。

3.6.3 実験結果

(a) 冷媒濃度変化による違い

実験(a)では, 冷媒濃度を変化させることで, エアコン圧縮機への空気混入を再現した。使用潤滑油は PAG オイル, 潤滑油流量は当量比 1.0 で一定とした。

図 3-24 に, 空気・潤滑油混合気を圧縮した際の, 代表的なエンジン内圧力変化を示す。横軸がエンジンクランク角を示し, 360°で圧縮上死点となる。ここでは, 圧縮・膨張行程に注目するため, クランク角 180°~540°を掲載した。縦軸はその際の絶対圧力を示す。プロットはクランク角 0.5°毎に行っている。青点は潤滑油を噴霧せず, 空気のみを圧縮した結果である。クランク角 180°~360°にかけての圧縮行程で断熱圧縮により圧力が上昇し, 上死点で最大圧力を取り, 360°~540°の膨張行程で圧力が低下している様子が分かる。この時エンジンはスムーズに回転していた。赤点は潤滑油を噴霧し, 空気・潤滑油混合気を圧縮した際の圧力グラフである。この時最大圧力は空気のみを圧縮した際と比較して上昇し, さらにエンジン回転時の振動, 異音が大

きくなった。潤滑油の自己着火が発生したと考えられる。

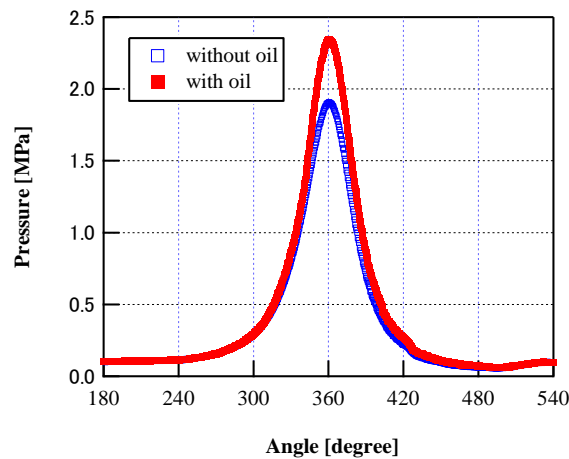


図 3-24 空気潤滑油混合気の圧縮時の圧力変化

図 3-25 に空気と冷媒の混合気を圧縮した際の、代表的なエンジン内圧力変化を示す。使用した冷媒は R1234yf である。青点、赤点、緑点が、それぞれ冷媒濃度 0%、20%、65% の際の圧力を表している。全ての冷媒濃度範囲において、冷媒濃度が高くなるに従い最大圧力は低下した。これは冷媒の比熱比が空気のそれに比べ小さいことに起因すると考えられる。またいずれの濃度においても燃焼や爆発は観測されず、エンジンの回転も静かであった。また冷媒の燃焼を起因とする物質は、FT-IR の分析において観測されなかった。これらの傾向は、全ての冷媒において同様であった。

図 3-26 に空気、冷媒、潤滑油の混合気を圧縮した際の、代表的なエンジン内圧力変化を示す。使用した冷媒は R1234yf である。青点、赤点、緑点が、それぞれ冷媒濃度 0%、10%、65% の際の圧力を表している。R1234yf について、冷媒濃度 65% では、空気・冷媒混合気圧縮の結果と同様に燃焼は発生しなかった。冷媒濃度 20% では、冷媒を加えなかった場合に比べ激しい圧力上昇が発生し、さらにエンジン回転時の振動や異音が激しくなった。内部で冷媒自体が燃焼したと考えられる。冷媒濃度 0% では、図 3-24 と同様に潤滑油の燃焼が発生した。

高い冷媒濃度範囲では燃焼は発生せず、冷媒濃度の減少に従い最大圧力は上昇した。冷媒濃度を下げると、ある濃度に達したところで燃焼が発生した。さらに冷媒濃度を下げると、最大圧力は減少した。これらの燃焼傾向は、R32、R410A、R134a、R22 でも同様であったが、燃焼が発生する濃度範囲やその時の最大圧力は冷媒によって多少の差が見られた。R125 については、冷媒濃度を下げても激しい燃焼は観測されず、最大圧力も小さかった

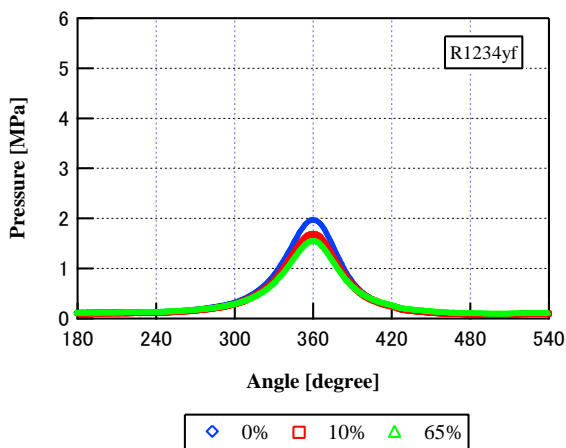


図 3-25 空気冷媒混合気の圧縮時圧力変化

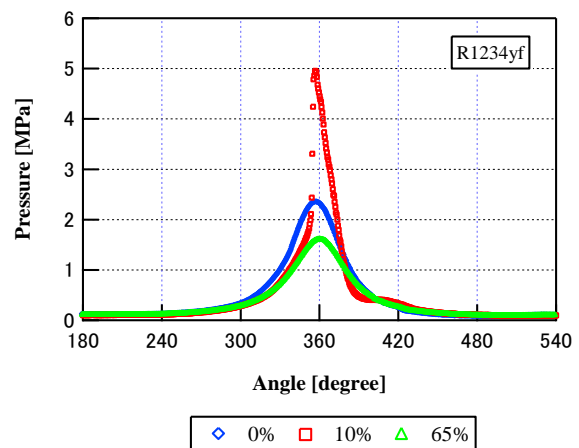


図 3-26 空気冷媒潤滑油混合気の圧縮時圧力変化

それぞれの実験について、FT-IR でエンジンから排気されたガスを分析した。図 3-27, 図 3-28 に代表的な排気ガスの吸光スペクトルを示す。実験条件は使用冷媒が R1234yf, 冷媒濃度は図 3-27 が 65%, 図 3-28 が 10%である。横軸が赤外光の波数であり、縦軸が吸光率になっている。図 3-27 において、1800~1000cm⁻¹にかけて特徴的な R1234yf の吸光スペクトルが観測されている。またこの時燃焼は発生していない。燃焼が発生した図 3-28 において、4200~3600cm⁻¹ 付近にフッ化水素(HF)のスペクトルが、1980~1880cm⁻¹ 付近にフッ化カルボニル(COF₂)のスペクトルが、2250~2000cm⁻¹ 付近に一酸化炭素(CO)のスペクトルがそれぞれ観測された。これらは冷媒の燃焼生成物と考えられる。

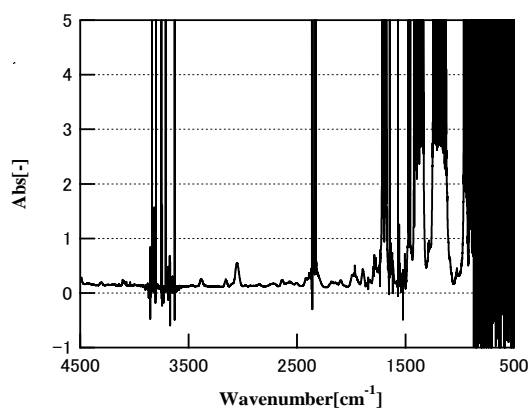


図 3-27 高冷媒濃度時排気ガス吸光スペクトル

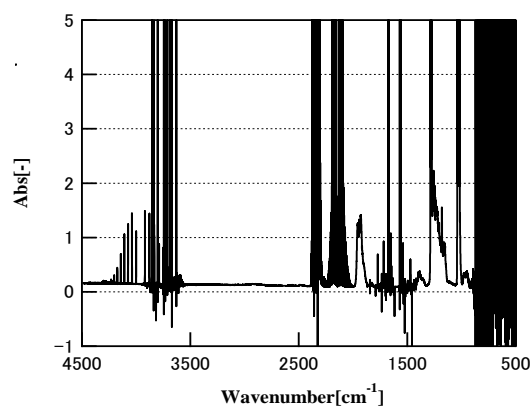


図 3-28 低冷媒濃度時排気ガス吸光スペクトル

以上の結果をまとめたものを図 3-29~図 3-34 に示す。横軸が冷媒体積濃度、縦軸左側が最大圧力であり、これは冷媒濃度 0%を基準として正規化したものである。縦軸右側が排気ガス中の HF 濃度である。また冷媒と空気の比熱比と比熱比を元に、断熱圧縮を仮定して理論値を計算した。

・ R1234yf

図 3-29 に冷媒濃度と最大圧力, HF 排気濃度のグラフを示す。冷媒濃度 30%以上では燃焼は確認されず、潤滑油噴霧の有無による圧力の違いはほとんど無い。冷媒濃度 20%以下では、潤滑油噴霧有りにおいて燃焼が確認された。この濃度範囲において最大圧力は上に凸なグラフとなり、冷媒濃度 10%で最大値 5MPa 程度を取った。また燃焼時は HF が発生し、圧力上昇に伴い、HF 濃度も上昇し、最大で約 3.5% vol を取った。

・ R32

図 3-30 に、冷媒濃度と最大圧力, HF 排気濃度のグラフを示す。冷媒濃度 30%以上では燃焼が確認されなかった。30%以下では燃焼が発生し、この濃度範囲では冷媒濃度上昇に伴い最大圧力も上昇した。冷媒濃度 30%で圧力は最大値 5MPa 程度を取った。この冷媒濃度付近で、HF 濃度が高くなった。

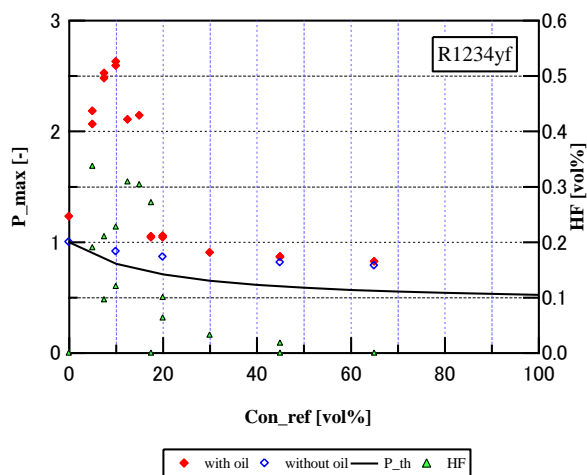


図 3-29 冷媒濃度と圧力の関係(R1234yf)

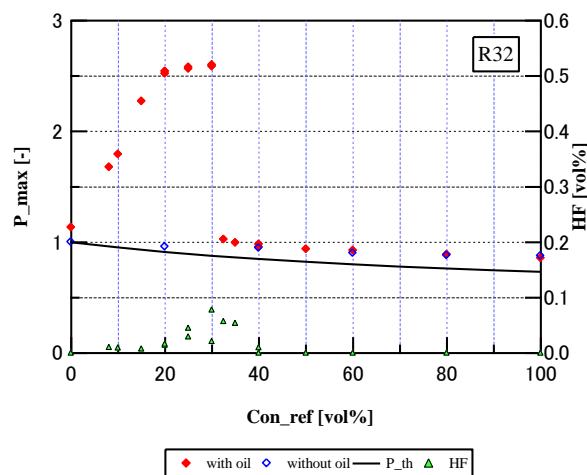


図 3-30 冷媒濃度と圧力の関係(R32)

・ R410A

図 3-31 に、冷媒濃度と最大圧力、HF 排気濃度のグラフを示す。冷媒濃度 20%以下で燃焼が確認された。燃焼濃度範囲において冷媒濃度の増加に伴い最大圧力は上昇した。最大圧力の上昇に伴い HF 濃度も上昇した。

・ R134a

図 3-32 に、冷媒濃度と最大圧力、HF 排気濃度のグラフを示す。冷媒濃度 30%以下で燃焼が確認されたが、この時の最大圧力は他の冷媒の時と比べ小さく、冷媒濃 0%と同程度となっている。冷媒自体は燃焼しておらず、潤滑油のみが燃焼していると考えられる。更に冷媒濃度を下げていくと、7.5%以下で激しい圧力上昇が確認され、最大圧力 4MPa 程度を取った。冷媒濃度 7.5%以下では冷媒濃度の増加に伴い最大圧力も上昇しており、冷媒が燃焼していると考えられる。HF 濃度も、冷媒の燃焼濃度境界付近で最大となっている。

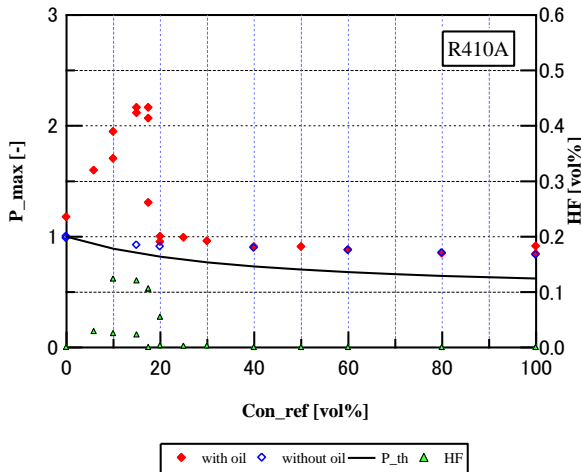


図 3-31 冷媒濃度と圧力の関係(R410A)

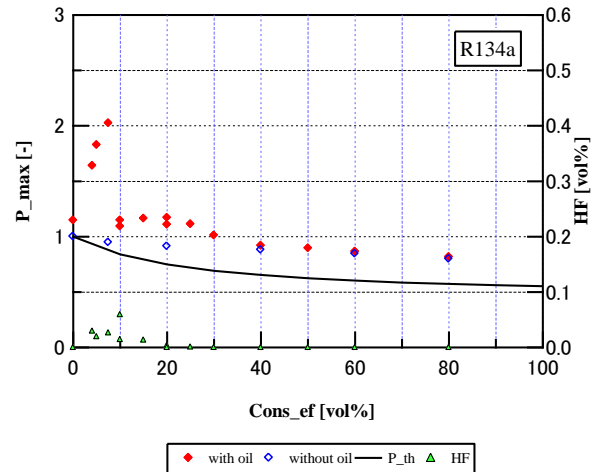


図 3-32 冷媒濃度と圧力の関係(R134a)

・ R22

図 3-33 に、冷媒濃度と最大圧力、HF 排気濃度のグラフを示す。冷媒濃度 50%以下の比較的広い範囲で燃焼が発生した。30%以下では激しい燃焼が発生し、22.5%で圧力は最大値を取った。HF 濃度も最大圧力と類似の傾向を取った。R22 は本実験で唯一分子内に塩素を含んだ冷媒であり、燃焼の排気ガス中から塩化水素 (HCl) が検出された。

・ R125

図 3-34 に、冷媒濃度と最大圧力、HF 排気濃度のグラフを示す。冷媒濃度 10%以上では燃焼が発生しなかった。また 5%以下で燃焼が発生したが他の冷媒に見られる激しい燃焼は確認されず、最大圧力も小さいものとなった。HF も微量しか検出されなかった。

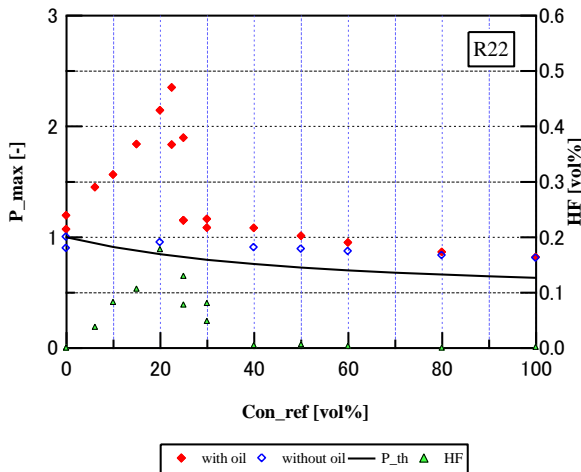


図 3-33 冷媒濃度と圧力の関係(R22)

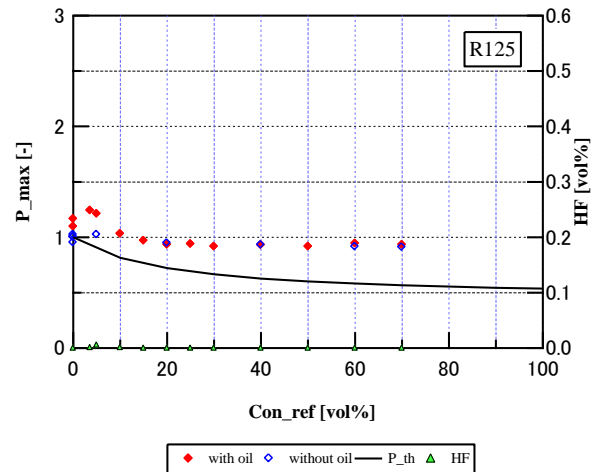


図 3-34 冷媒濃度と圧力の関係(R125)

R125 以外の冷媒において、冷媒濃度が高い場合燃焼が発生しなかった。これは実際の作業において、正常にポンプダウンが行われている状態に当たる。冷媒濃度を下げていくと、ある濃度以下で圧力が急激に大きくなる。これはポンプダウンの作業中に漏れ等により配管内に空気が混入し、圧縮機内での燃焼により爆発事故が発生した状態に当たる。空気・潤滑油混合気の結果より潤滑油自体は自己着火により燃焼すること、空気・冷媒混合気の結果より潤滑油が無ければ自己着火は発生しないことから、この冷媒濃度範囲では潤滑油の自己着火による燃焼が発生していると考えられる。さらに、圧力上昇の大きい冷媒濃度では、冷媒の燃焼を起因とする HF の、排気中濃度も高くなり、潤滑油のみが燃焼している時と比べて冷媒混合時に燃焼した場合の方が圧力上昇ははるかに大きい。このことから、混合気の燃焼時、潤滑油を起因として冷媒自体が燃焼し、圧力上昇に寄与していると言える。冷媒により燃焼が発生する濃度範囲に多少の違いがあるものの、微燃性冷媒に関しては燃焼範囲が第 1 章で述べたものよりも広がっている。さらに不燃性に分類されている冷媒においても、本実験では燃焼が確認された。R125 については、どの濃度においても激しい燃焼は確認されず、HF も少量しか発生しなかった。

先に述べたように R1234yf と R32 の燃焼範囲は本実験結果とは異なり、他の冷媒に関しては不燃性に区分されている。ところが他の研究により、空気中の湿度により冷媒の燃焼範囲が拡大し、不燃性に区分されている冷媒でも燃焼することがあるということが報告されている³³⁾。これは空気中の水分が冷媒中のフッ素原子と反応し、より燃焼しやすくするからである。本実験では除湿空気を用いているが、潤滑油燃焼時に水分が発生する。更に、他の研究によると、高い圧力により冷媒の燃焼範囲が拡大する³⁴⁾。これらのことから、圧縮機内は冷媒にとってより燃焼しやすい環境と言えよう。

(b) 潤滑油量変化による比較 (c) 潤滑油組成による比較

実験(b)、実験(c)では、異なる組成の潤滑油を用い潤滑油噴霧量を変化させ実験を行い比較することで、燃焼に対する潤滑油の寄与を調べた。使用潤滑油は PAG オイルと POE オイル、使用冷媒は R1234yf, R32, R410A, R22 とした。潤滑油流量は当量比 0.0, 0.7, 1.0, 1.3, 1.6 とした。これは理論空燃比を基準とした流量であり、オイルによって質量流量が異なることに注意が必要である。

図 3-35 に、空気・潤滑油 (PAG オイル) 混合気において、潤滑油量を変化させた際の代表的な圧力波形を示す。潤滑油当量比 0.7 以下では燃焼が発生しなかった。潤滑油当量比 1.0 以上では燃焼が発生し、潤滑油量が増加するに従い最大圧力も増加した。

図 3-36 に、空気・冷媒・潤滑油 (PAG オイル) 混合気において、潤滑油量を変化させた際の代表的なエンジン内圧力変化を示す。使用冷媒は R1234yf, 冷媒濃度は 20% である。潤滑油当量比 1.0 以下では燃焼は発生せず、空気・潤滑油混合気の場合と比べて圧力は低くなっている。これは実験(a)の結果と同様に、空気の比熱比と比較して冷媒のそれが小さいことに起因すると考えられる。潤滑油当量比 1.3 以上では燃焼が発生した。この時冷媒が無い場合と比較して激しく圧力が上昇し、エンジンの振動、異音も大きなものとなった。更に冷媒濃度を高くすると、いかなる潤滑油量においても燃焼が発生しなくなった。この傾向は、他の 3 冷媒 (R32, R410A, R22) についても同様であった。

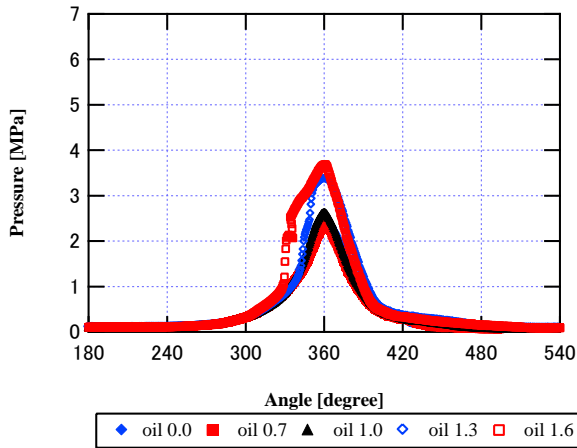


図 3-35 潤滑油量による圧力変化（冷媒濃度 0%）

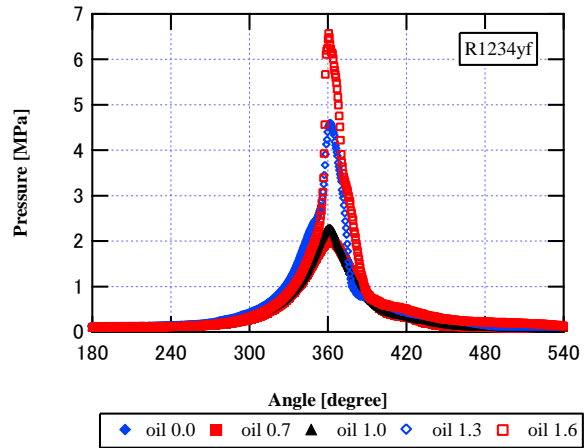


図 3-36 潤滑油量による圧力変化（冷媒濃度 20%）

表 3-7 に、各冷媒、各潤滑油量（PAG オイル）において、最大圧力と、その時の冷媒濃度をまとめたものを示す。燃焼範囲は潤滑油慮の増加に従い拡大し、合わせて最大圧力と、最大圧力を取る冷媒濃度も上昇していることが分かる。

表 3-7 潤滑油量と最大圧力の関係（PAG オイル）

Refrigerant	Maximum pressure (Normalized) [-]				Concentration of refrigerant at maximum pressure [vol %]				
	Oil flow ratio	0.7	1.0	1.3	1.6	0.7	1.0	1.3	1.6
R1234yf		1.98	2.54	2.59	2.74	5	15	15	20
R32		2.20	2.49	2.73	2.93	15	20	30	30
R410A		1.31	2.16	2.47	2.43	10	15	20	25
R22		1.08	1.67	2.04	1.99	0	10	30	30

図 3-37~図 3-40 に、各冷媒の燃焼の有無をまとめたものを示す。横軸が冷媒濃度、縦軸が潤滑油（PAG オイル）当量比を示しており、上に向かうほど潤滑油量が多くなる。赤点は燃焼が発生した冷媒濃度、潤滑油当量比を、青点は燃焼が発生しなかった条件をそれぞれ示す。潤滑油量の増加に従い、燃焼範囲が拡大していることが分かる。また、冷媒濃度が低く、潤滑油量が多いほど燃焼しやすい傾向にあることが分かる。

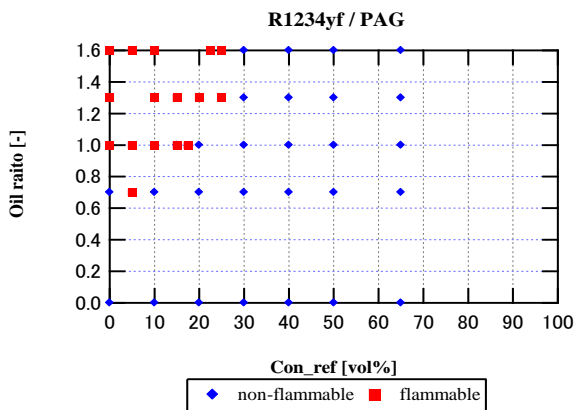


図 3-37 R1234yf 濃度、PAG 量と燃焼範囲の関係

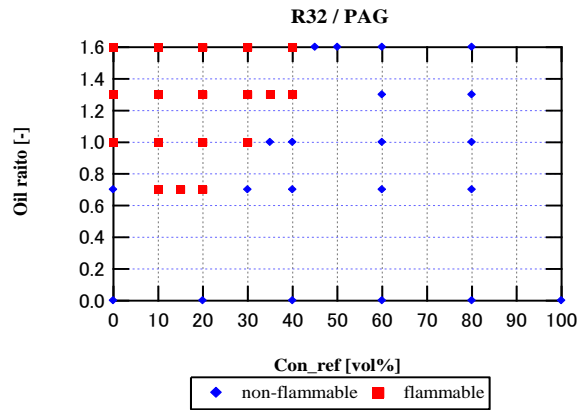


図 3-38 R32 濃度、PAG 量と燃焼範囲の関係

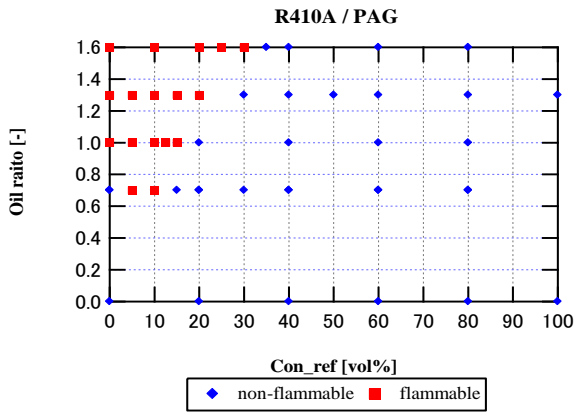


図 3-39 R410A 濃度，PAG 量と燃焼範囲の関係

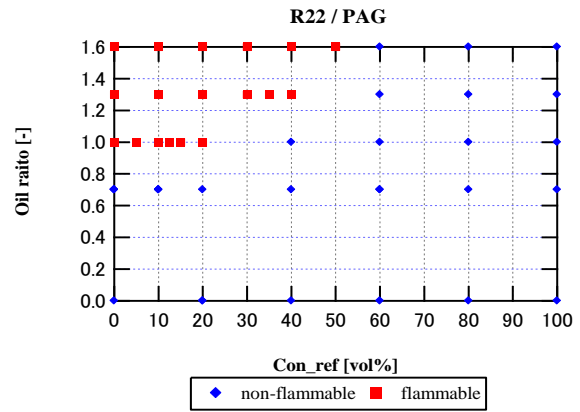


図 3-40 R1234yf 濃度，PAG 量と燃焼範囲の関係

図 3-41~図 3-48 に、各冷媒、各潤滑油当量比の実験結果をまとめたものを示す。横軸が冷媒濃度、縦軸が最大圧力であり、これは実験(a)と同様に正規化してある。断熱圧縮を仮定した圧力の理論値も、実験(a)と同様に算出した。いずれの冷媒も潤滑油当量比 0.0 では燃焼は発生していない。また、冷媒濃度が高濃度から減少するのに従い、最大圧力は上昇している。

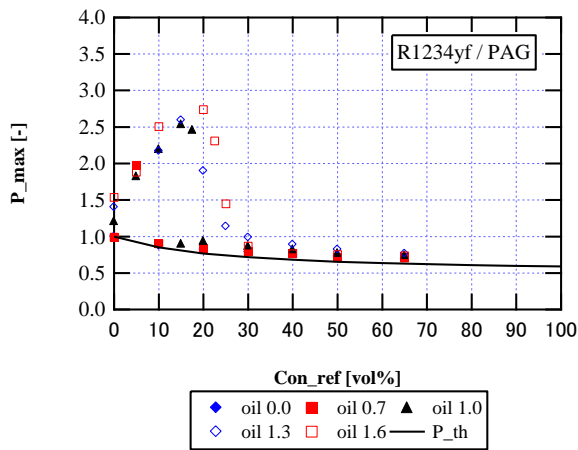


図 3-41 R1234yf 濃度，PAG 量と最大圧力の関係

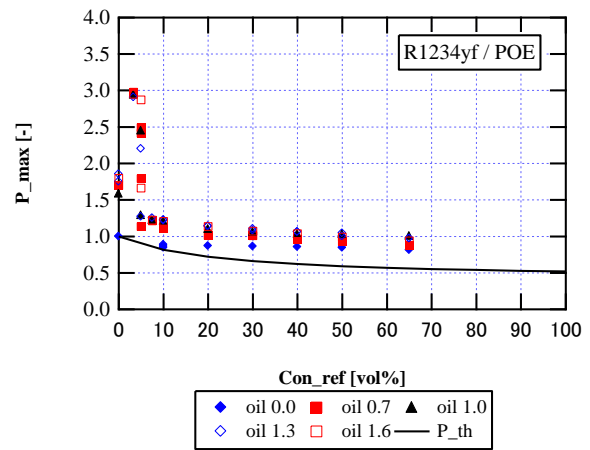


図 3-42 R1234yf 濃度，POE 量と最大圧力の関係

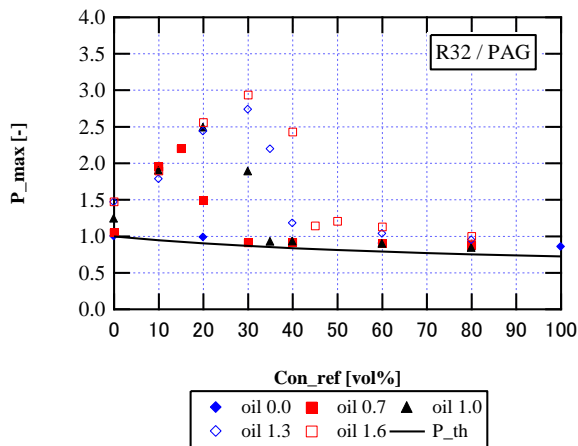


図 3-43 R32 濃度，PAG 量と最大圧力の関係

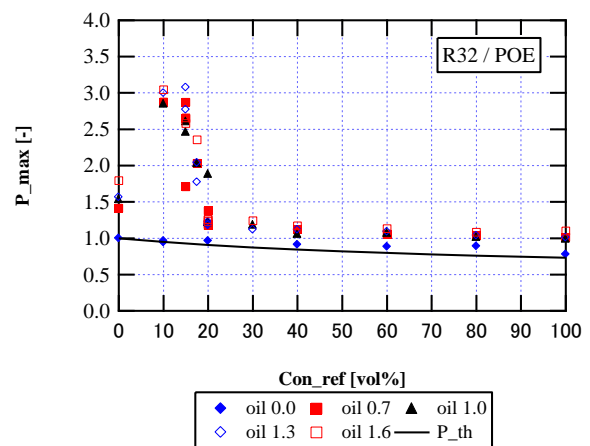


図 3-44 R32 濃度，POE 量と最大圧力の関係

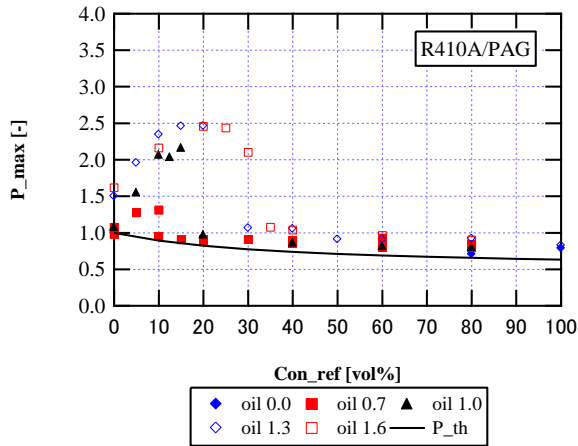


図 3-45 R410A 濃度，PAG 量と最大圧力の関係

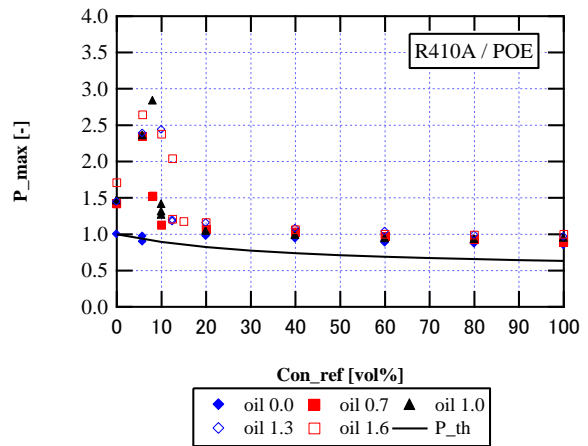


図 3-46 R410A 濃度，POE 量と最大圧力の関係

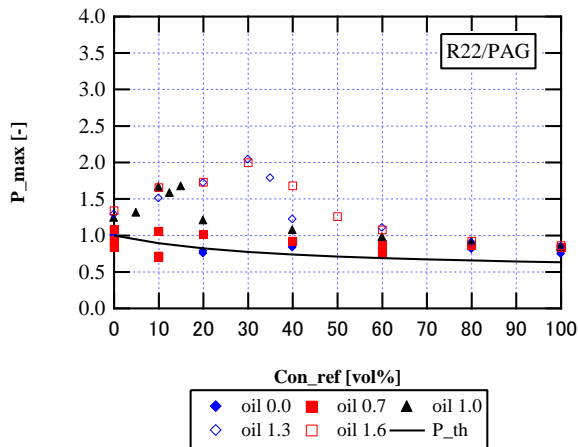


図 3-47 R22 濃度，PAG 量と最大圧力の関係

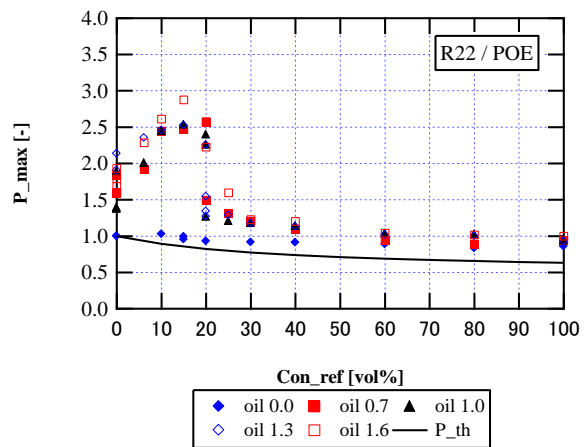


図 3-48 R22 濃度，POE 量と最大圧力の関係

いずれの冷媒においても、冷媒濃度が低い領域で燃焼が発生するという傾向は同様であった。燃焼範囲については、POE は PAG に比べて狭くなっており、図 3-41~図 3-48 のグラフでも各点が冷媒濃度の低い左側に寄っていることが分かる。また、PAG に見られたような潤滑油量による燃焼範囲、最大圧力の違いも、POE はあまり顕著ではなかった。

表 3-8 に、PAG と POE それぞれの結果における、燃焼範囲と、最大圧力、最大圧力と取った冷媒濃度比較したものを示す。最大圧力は正規化されている。PAG を用いた際の燃焼範囲は POE のそれと比較し、1.6 倍~5.0 倍と明確に広がっている。最大圧力については、燃焼範囲程の明確な差は見られなかった。

表 3-8 潤滑油の違いによる、UFL，最大圧力の比較

	PAG		POE		UFL ratio (PAG/POE)
	UFL (vol%)	Maximum pressure [-]	UFL (vol%)	Maximum pressure [-]	
R1234yf	25	27.4 @ 20%	5	2.97 @ 3.3%	5.0
R32	40	2.93 @ 20%	20	3.07 @ 15%	2.0
R410A	30	2.44 @ 25%	12.5	2.83 @ 8.1%	2.4
R22	50	2.04 @ 30%	25	2.87 @ 15%	2.0

3.6.4 まとめ

本研究では、ポンプダウン時の圧縮機爆発事故を再現した実験装置を作成し実験を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) ポンプダウン時の爆発事故は空気、冷媒、潤滑油混合気の自己着火によって引き起こされている。作業ミス等により圧縮機内に空気が混入していくと、まず潤滑油が自己着火をする。潤滑油の自己着火を起因として冷媒自体が燃焼し、激しい圧力上昇を引き起こすと考えられる。
- (2) 燃焼発生時にはフッ化水素等の有害物質が発生した。これらは、冷媒の燃焼生成物である。
- (3) 冷媒の燃焼性区分と、本実験における燃焼範囲、燃焼時の圧力には、明確な相関は見られなかった。特に、低 GWP・微燃性冷媒である R1234yf や R32 は、従来冷媒・不燃性冷媒である R410A, R22 と比較して、特に燃焼性が高いとは言えなかった。
- (4) 混合気中の潤滑油量の増加に従い、冷媒の燃焼範囲は拡大し、また燃焼時の最大圧力は増加した。冷媒濃度を変化させた際の最大圧力は、潤滑油量の増加に従い増加し、その時の冷媒濃度も上昇する傾向があった。これらの傾向は、R1234yf, R32, R410A, R22 のいずれの冷媒でも観測された。
- (5) 異なる潤滑油を用いることにより、燃焼範囲は大きく変化し得ることが明らかになった。このことから、ポンプダウン時の事故において、冷媒の特性だけでなく、潤滑油の特性（燃焼性）も重要な要素であることが分かった。

3.7 取扱シチュエーション#3：多室型空調機の急速漏洩を想定した安全性評価

3.7.1 概要

多室型空調システム（VRF: Variable Refrigerant Flow）は、複数の室内機を同一の冷媒系統で連結したシステムであり、設計施工の簡便性、個室分散空調が可能なゆえの柔軟性や、直膨式ゆえの省エネルギー性を備えており、国内のみならず世界市場に広く普及している。家庭用エアコンなどのように室内機と室外機が1対1で連結された空調システム（スプリット型）に対して、このシステムは室内機数の増加や冷媒管長の延長により、冷媒系統1つあたりの冷媒量が多くなる。このため冷媒が漏洩した場合の温暖化影響が大きいので、冷媒の低 GWP 化が強く望まれており、A2L 冷媒の使用が期待されているが、漏洩量の多さからスプリット型に比べて A2L 冷媒による燃焼・着火リスクが大きくなる。そのため、VRF への A2L 冷媒搭載に先立って、事故シナリオを想定しこれに基づいたハザード評価を行うことにより、VRF からの冷媒漏洩時の火災リスクを低減させる必要がある。

ここでは、事故シナリオとして VRF システムが設置された直方体形状の一般的オフィス空間に A2L 冷媒が漏洩し、何らかの着火源が発生した場合を想定し、着火可能性及び火炎挙動、燃焼威力を実験的に評価することとした。ここでは、まず実験室規模の実験として、容積 122.5 L (350 mm×350 mm×1000 mm) の直方体容器内で冷媒を滞留、燃焼させ、冷媒の漏洩高さおよび着火高さをさまざまに変化させながら、火炎挙動および圧力上昇挙動を調べた。

3.7.2 実験

3.7.2.1 実験装置および方法

実験装置は、小型直方体燃焼容器、攪拌系統、冷媒漏洩系統、冷媒濃度計測系統、着火系統、圧力上昇計測系統、温度計測系統、撮影系統、消火系統からなる。図 3-49 に実験装置の概略図を示す。

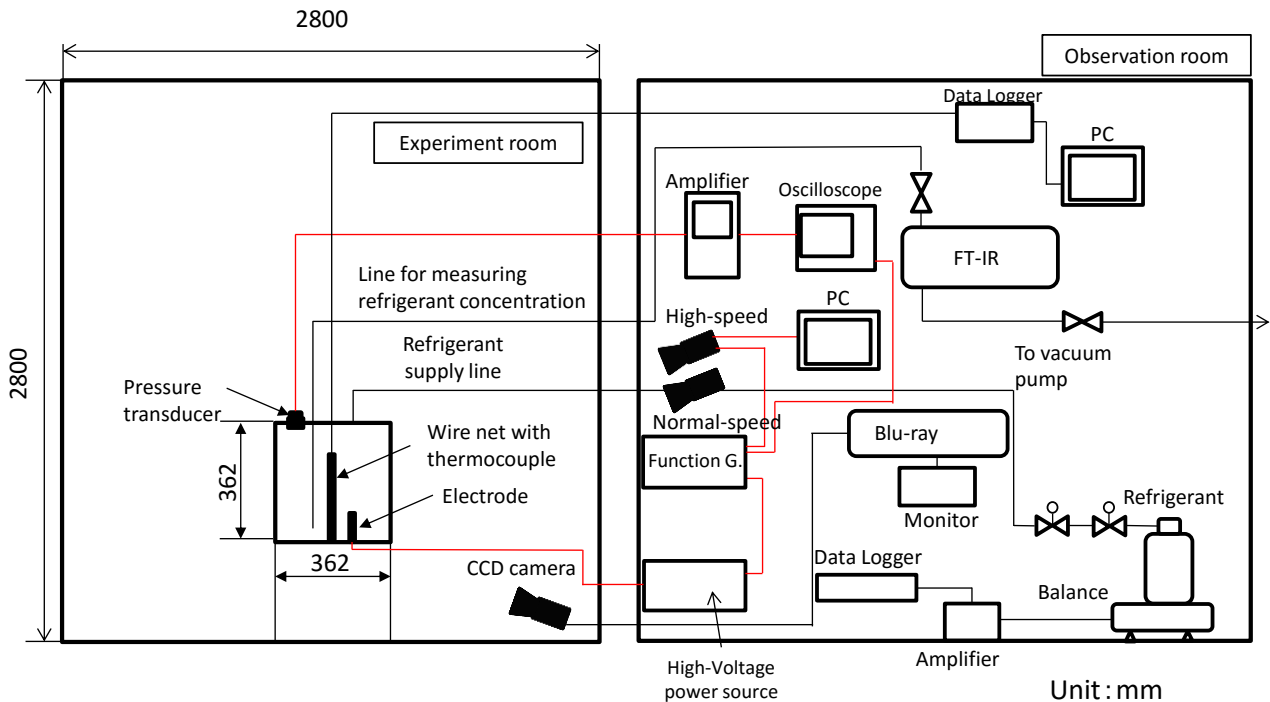


図 3-49 直方体容器内燃焼実験 実験概略図

(1) 直方体燃焼容器

直方体燃焼容器は、図 3-50 に示すように、妻面が一边 350 mm の正方形で、長さが 1000 mm であり、全体容積は 122.5 L で、SUS304 鋼製（設計耐圧 10 kPa）である。両側面に 150 mm×600 mm の観測窓が設けてあり、ここを通して容器内の火炎の伝播挙動を観測できるようになっている。上部には Rc3/8”および Rc1/4”のポートが取り付けられており、冷媒漏洩管、消火配管、冷媒濃度測定用配管、圧力トランスミッタなどを取り付けられるようになっている。また、上部右にブリーザー弁（100 mmφ、作動圧力 10 kPa）2 個が設置されており、圧力を逃がす構造となっている。したがって本燃焼容器では、10 kPa までの圧力上昇を計測することができる。

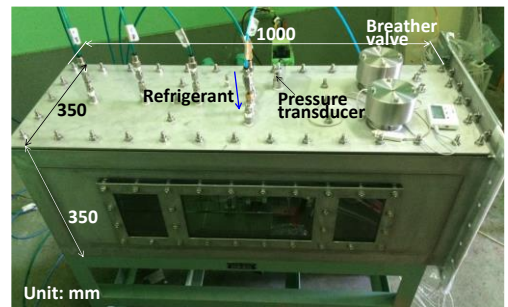


図 3-50 直方体燃焼容器

また、後述するように容器内に熱電対を挿入し、着火時の火炎温度を計測しているが、その挿入口としておよび避圧の目的で、容器妻面に 5 mm の縦長の隙間を持たせ、ここをビニルで封じて密閉した。したがって容器としての設計最大圧力は 10 kPa であるが、圧力上昇が 10 kPa に到達以前に、着火によりビニルが破損または焼損し、そこから圧力が抜けることもある。

(2) 攪拌系統

容器内の冷媒と空気の混合気を攪拌するために、ブラシレスモーター（オリエンタルモーター：BLF46A-A-3, 100 V, 60 W）とプロペラ（90 mmφ）を設置した。プロペラは容器内床上近傍に設置した。

(3) 冷媒漏洩系統・冷媒濃度計測系統

容器天井部の Rc1/4”ポートから外径 1/4”のステンレス管を挿入し、これを FT-IR に接続して、冷媒濃度を計測した。測定地点は底面中心を通過する鉛直軸に沿って、高さ 15, 125, 195, 265, 325 mm の 5 地点である。室内の冷媒濃度の鉛直分布の違いが燃焼挙動に及ぼす影響を調べるために、漏洩高さを 0 mm（OH：床漏洩、H は天井高さ）、175 mm（1/2 H）、263 mm（3/4H）および 350 mm（H）の 4 段

階設定した。以下、漏洩高さはかっこ内の H を用いた表記で統一する。

(4) 着火系統

着火は電極間に生じさせる直流スパークによった。電極はタングステン製で直径 1 mm ϕ であり、電極間隔は 3 mm である。これを直流高電圧発生装置（株ジェネシス製 MEL1140B）によって充電し、ファンクションジェネレータ（Agilent 製 33120A）からの 5 Vp-p 信号によって放電を発生させた。充電電圧は約 1.6 kV で、電極を含めた放電回路の静電容量は約 10 μ F であったので、放電エネルギーは約 13 J となる。

(5) 圧力上昇計測系統

容器上部の圧力トランスミッタ設置ポートに、圧力トランスミッタ（共和電業製 PGM-02KG, 圧力レンジ 20 kPa）を取り付け、信号をシグナルコンディショナ（共和電業製 WGA-670B）により増幅して、チャートレコーダ（日置電機製 8860-50）により記録した。チャートレコーダの開始タイミングは、(4) で用いたファンクションジェネレータによったので、放電発生と圧力計測の開始タイミングが同期している。

(6) 温度上昇計測系統

線径 0.32 mm ϕ の K 型熱電対を 27 点取り付け付けた金網を容器内に設置した。熱電対は計測室内にあるデータロガー（横河電機製 MX-100）に接続し、500 ms 周期でパソコンに記録した。熱電対の応答速度はおおよそ 1 s 程度であるので、ここで計測した温度は厳密には燃焼による温度変化を追従し切れてはいないが、温度上昇の参考値とした。

(7) 撮影系統

着火後の火炎挙動を高速度カメラ（Phoron SA-X, 5000fps）、常速度デジタルカメラ（Panasonic HC-V520M）および小型 CCD カメラ（Mintron Enterprize, MTV-53KM21H）にて撮影した。高速度カメラの撮影開始トリガーは、(4) で用いたファンクションジェネレータからの 5 Vp-p 信号によった。したがって、放電開始と撮影開始もまた同期している。小型 CCD カメラの映像はブルーレイディスクレコーダー（SONY BRAVIA）にて記録した。

3.7.2.2 実験条件

実験条件の詳細は以下のとおりである。

(1) 濃度分布計測

冷媒種は R32 のみを対象とした。冷媒漏洩量は 40, 50 g, 漏洩速度は 10 g/min とし、漏洩高さを先述の 4 段階に変化させた。各漏洩量・漏洩高さの組み合わせにおいて濃度計測を 3 回行い、再現性を調べた。

(2) 着火実験

冷媒種は R32 のみを対象とした。冷媒量は 40, 50 g, 漏洩速度は 10 g/min とした。漏洩高さは先述の 4 段階とし、着火高さを床面から 75 mm, 125 mm, 175 mm (=1/2H) の 3 段階とした。それぞれの冷媒量・漏洩高さ・着火高さの組み合わせにおいて 3 回着火実験を行い、再現性を調べた。

3.7.3 結果および考察

3.7.3.1 漏洩高さが濃度分布に及ぼす影響

図 3-51 は漏洩高さごとの R32 の鉛直濃度分布である。3 回の濃度計測結果はほぼ一致しており、良好な再現性が確認できた。また、漏洩高さが H の場合、高さ方向への濃度勾配は比較的小さかったが、漏洩高さが低くなるほど高さ方向への濃度勾配が出現するようになった。例えば漏洩高さ 0 H（床漏洩）では、高さ 15 mm での濃度は UFL を超える場合も見られた。これらの傾向は、漏洩量 40 g, 50 g の場合ともにみられたものである。

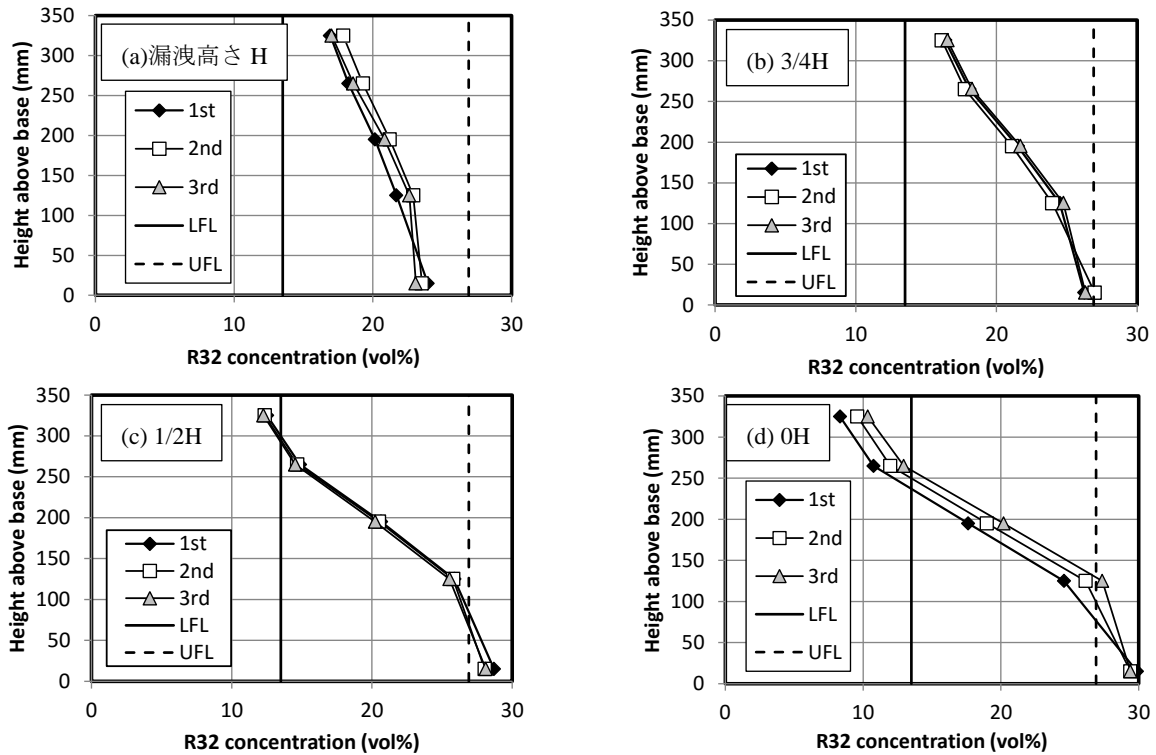


図 3-51 R32 濃度の鉛直分布 (漏洩量 50 g)

3.7.3.2 燃焼挙動に及ぼす漏洩高さ及び着火高さの関係

図 3-52(a)は、漏洩量 50 g、着火高さ 75 mm、漏洩高さ 0H における R32 の直方体容器内での火炎伝播挙動を撮影した常速度画像、図 3-52 (b)は漏洩高さ H の場合のもの、図 3-52 (c)は漏洩高さ H、着火高さを 125 mm とした場合のものである。

いずれも、火炎が着火地点から上方へ伝播し、その後水平方向に伝播しようとするが、写真左側に、容器妻面をビニルで封じた部分が存在するため、火炎が左方向に流れている様子が認められる。視認できる火炎の発光は、漏洩高さ H の場合のほうが強いようにみられた。上方への火炎伝播速度は、漏洩高さ H の場合

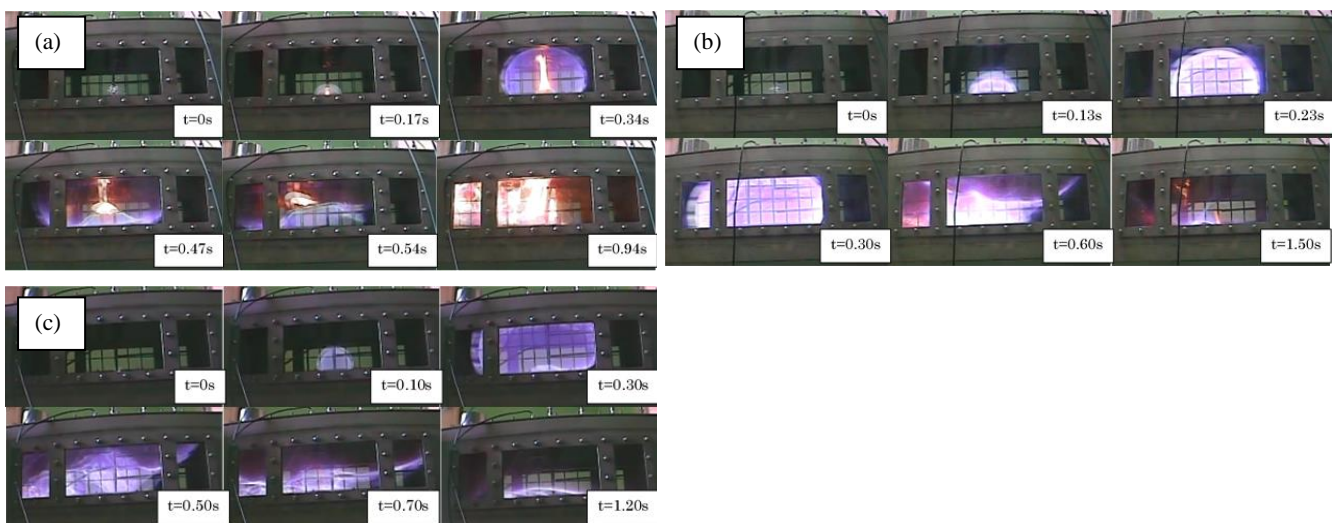


図 3-52 直方体容器内での R32 の火炎伝播挙動

(a)漏洩高さ 0H、着火高さ 75 mm (b)漏洩高さ H、着火高さ 75 mm (c)漏洩高さ H、着火高さ 125 mm
t: 着火 (放電) からの時間, 漏洩量 : 50 g

では 2.03 m/s, 0H の場合で 1.27 m/s であり, 漏洩高さ H の場合のほうが燃焼が激しかったようである. これは, 図 3-51 の濃度分布からもわかるように, 漏洩高さ H の場合は容器内全域が燃焼範囲に入っており, 天井部周辺で化学量論濃度 (17.3 vol%³⁻⁴⁾) であるのに対して, 0H では濃度勾配が比較的大きく, 着火高さ付近では UFL 以上, 天井部では LFL 以下となっており, 燃焼威力の大きな化学量論濃度付近の組成があまり存在しないためと考えられる. また, 図 3-52 (b)と(c)の比較により, 着火高さの影響に着目すると, いずれも着火し容器全体に火炎伝播が認められるが, 着火高さ 75 mm のほうが見た目の発光強度が強く, 上方向への火炎伝播速度も大きかった.

こうした挙動を示した理由は, R32 は燃焼速度が小さい (10 cm/s 未満) ために浮力の影響を大きく受けるため, 下方向への火炎伝播が阻害され, 主として上方向に伝播することに起因する. すなわち, 着火源よりも上方にあって, かつ, 燃焼範囲内の濃度となっている冷媒量が火炎伝播挙動に大きく影響すると考えられる.

3.7.3.3 有効可燃冷媒積の導入

前節までの結果とその考察で, R32 のような燃焼速度の小さな冷媒では, 着火源よりも上方にあって, なおかつ燃焼範囲内の濃度を有する, すなわち可燃となっている冷媒の量が燃焼挙動に大きな影響を及ぼすと推測された. そこで, あらかじめ取得した冷媒濃度分布, 着火源高さ, LFL, UFL を示す直線が囲む領域の面積に注目した. この面積は, 1 次元的ではあるが着火源より上方にある可燃冷媒の量を意味する. この面積は, 区間を 0.1 vol% ごとに分割した長方形の面積の総和として求めた.

ところで, 燃焼挙動を左右する燃焼速度は, 化学量論濃度付近で最大値となる上に凸の曲線を描くので, そのまま上述の手法で求めた 0.1 vol% ごとの長方形の面積の総和をとったのでは, 燃焼速度の濃度依存性が考慮されない. そこで, 既報の燃焼速度と当量比の関係を導入して, 各区間の面積に重みづけすることにより燃焼速度の濃度依存性を含めることとした.

具体的には, まず文献³⁻²²⁾にある燃焼速度—当量比の関係を 2 次関数にて近似した関係式を求めた. この関係式の頂点の y 座標の値を最大燃焼速度 Su_{max} とし, 文献³⁻²²⁾から読み取った, 各当量比における R32 の燃焼速度 Su を Su_{max} で除した値 Su/Su_{max} を求めた. この Su/Su_{max} と当量比の関係が燃焼速度の濃度依存性を示すので, これを 2 次関数にて近似すると式 (3.2) が得られ, 各濃度における Su/Su_{max} を算出可能となった (図 3-53).

$$\frac{Su}{Su_{max}} = -3.76\phi^2 + 8.25\phi - 3.52 \quad (3-2)$$

最終的に, 先に求めた, 分割された各長方形の面積に, 式 (3.2) から求められる Su/Su_{max} を各濃度で求めて乗じ, その総和をとった. これを本報では“有効可燃冷媒積”と呼ぶことにする.

3.7.3.4 有効可燃冷媒積と火炎伝播速度・ピーク過圧の関係

図 3-54(a)に有効可燃冷媒積と火炎伝播速度の関係を, 図 3-54(b)にピーク過圧との関係を示す. 上述のように, 有効可燃冷媒積は燃焼威力に及ぼす燃料濃度の影響を考慮した重みづけを含んだ値となっているが, 濃度が高い (すなわち面積が大きいほど大きな値を示す傾向があるため, 火炎伝播速度やピーク過圧は有効可燃冷媒積に対して必ずしも単調には増加せず, ある値で最大値をとる 2 次関数的な相関を示すと思われるが, 今回の実験の範囲内では, 火炎伝播速度は有効可燃冷媒積に対しておおむね単調に増加する傾向を示した. これより, 本実験で設定した条件の範囲内では, 漏洩高さや着火高さによらず, 濃度分布, 着火源高さ, LFL,

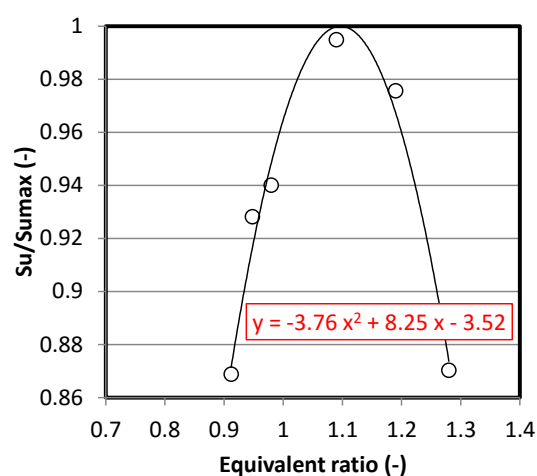


図 3-53 R32 当量比と Su/Su_{max} の関係

UFL といった事前に既知あるいはリスクアセスメントの前提として設定可能なパラメータのみによって、火炎伝播速度をある程度予測できる可能性が示された。

これに対してピーク過圧との関係は、全体的には有効可燃冷媒積に対して単調増加する傾向はみられるものの、火炎伝播速度ほど有意な関係は認められない。これは火炎が低耐圧側へ引き寄せられたことによるものとみられる。

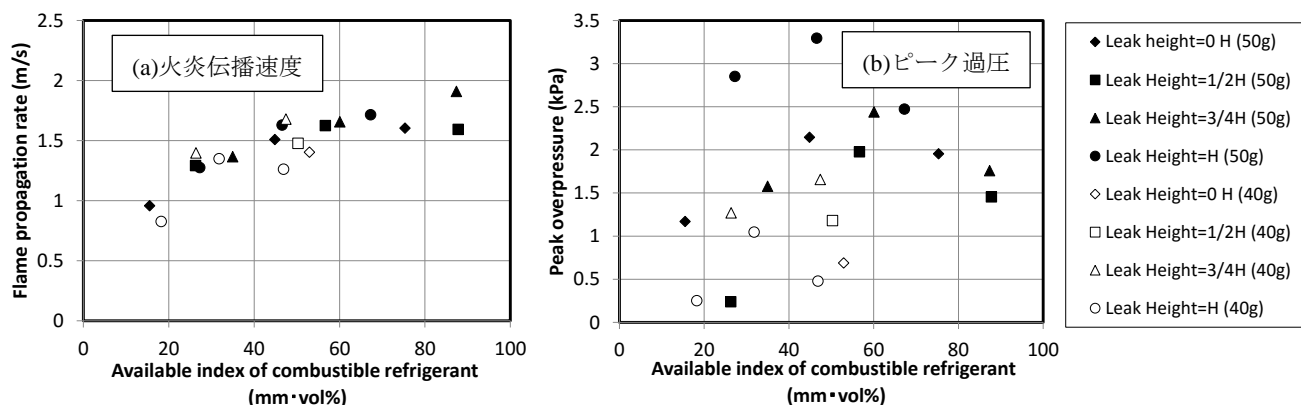


図 3-54 有効可燃冷媒積と火炎伝播速度およびピーク過圧の関係 (R32)

3.8 実際の事故シナリオを想定した実大着火実験

3.8.1 概要

これまで、業界団体等が実施したリスクアセスメントや議論等で抽出された事故シナリオに対して、詳細な実験により、着火可能性およびフィジカルハザード評価を実施してきた。しかしそのうちのいくつか、特に前節で述べた VRF からの急速漏洩などについては、取り扱われる冷媒量が多量であるために縮小模型を用いた実験によらざるを得ず、実験結果に対するスケール効果の影響が不明確であった。そこで、実際の事故シナリオを想定し、スケールも再現した実大実験を実施することにより、火災発生リスクおよびフィジカルハザード評価につながるデータを同時取得することをめざした。

3.8.2 想定シナリオ

床面積 4 m² の狭小カラオケルーム（音漏れの点から密閉度が高い）でパーティーを行っている状況下で、天井近辺設置の天井カセット型室内機（4 方向式）から冷媒が急速漏洩（10 kg/h）し、床上 50 cm の小テーブル上におかれたケーキのろうそくを熱源として着火する場合を想定した。この場合、冷媒は天井カセット型室内機から漏洩するので、周囲空気を巻き込みながら漏洩・拡散する。したがってこれを模擬するには、模型上部から直接冷媒を漏洩させるのでは不十分で、天井カセット型室内機を実際に実験模型に取り付け、これを通して漏洩させる必要がある。なお液相冷媒が大気中に放出される状況を想定して冷媒を漏洩させることとした。

また、一般にカラオケルームには機械換気が義務付けられているため、機械換気の運転/停止の有無および換気口の寸法を設定する必要がある。室内の換気率については、たとえば静岡県建築行政連絡会議³⁻²⁴⁾によれば、カラオケルームの換気設備について、有効換気量は以下の式で算出される値以上としている。

$$V = 20 A_f / N \quad (3.3)$$

V: 有効換気量 (m³/h), A_f: 床面積 (m²), N: 一人あたりの占有面積 (おおむね 2 m² とする) とされている。

ここで、(社)日本火災報知機工業会の報告³⁻²⁴⁾に基づき、カラオケルームの床面積を4m²と想定し、N=2m²として有効換気量を計算すると、V=40m³/hとなる。したがって、燃焼容器にはこの換気量を確保できる開口部を設ける必要がある。

3.8.3 実験

3.8.3.1 実験装置および方法

(1) 実験場

カヤク・ジャパン株式会社厚狭工場密閉試験場（山口県山陽小野田市）において実施した。

(2) 燃焼容器および換気設備

図 3-55 に燃焼容器の全体図および写真を示す。燃焼容器は底面が 2000 mm×2000 mm、高さ 3000 mm で、L 型アングルに厚さ 10 mm のポリカーボネート板を容器側面の 4 面に貼り、高さ 2400 mm にベニヤ板を貼って飾り天井とした。また、床面もベニヤ板で模擬した。したがって実験空間の寸法は 2000 mm×2000 mm×2400 mm である。このベニヤ板に穴をあけて、天井カセット型室内機（4 方向式）および換気口（80 mmφ、給気・排気の 2 か所）を取り付けた。室内機の吹き出し口開口部は幅 495.6 mm、

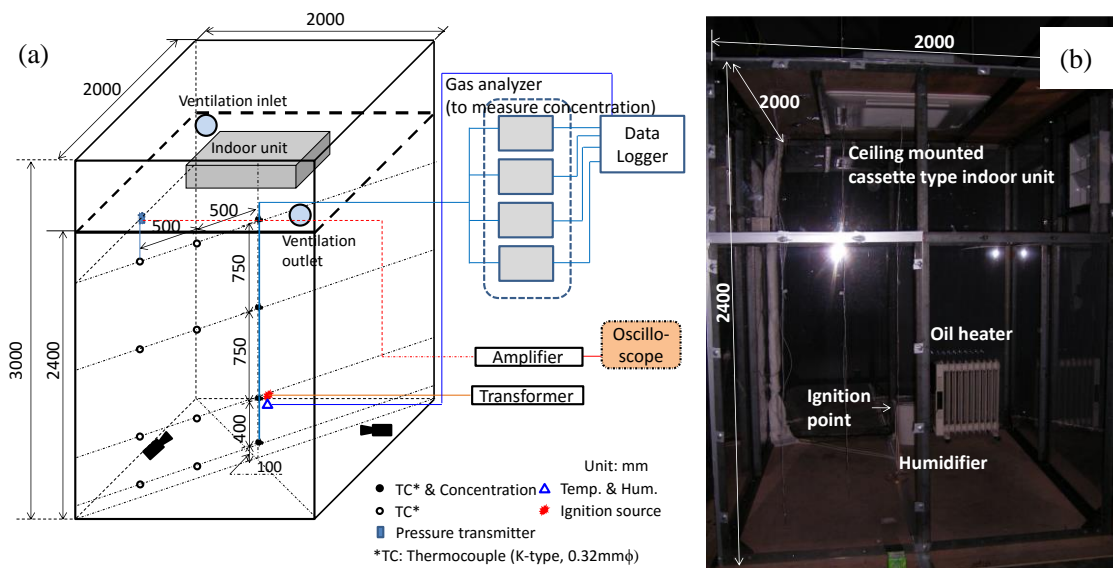


図 3-55 実大着火実験装置全景および燃焼容器写真

奥行 56.0 mm である。また、容器上部側面には避圧ダンパー（作動圧 2 kPa）を 2 か所設置した。

機械換気は、給気口にドライヤー（Panasonic 製 EH5101P-A）を取り付け送風することで模擬した。必要換気量 40 m³/h は、ドライヤーの給気口からの空気吸い込み量を調節することで確保した。排気口は開け放しで、換気なし条件の場合はビニルテープで封鎖した。

実験に先立ち燃焼容器自体が有する隙間等の開口部による換気回数を調べるために、容器内に R32 を 5.5 kg (UFL 相当量) 漏洩させて静置し、高さ 100, 500, 1250, 2000 mm における濃度変化を調べたものが図 3-56 である。横軸の時間は漏洩開始時を基準としており、漏洩停止時刻は 33 分である。高さ 1250 mm 以下の領域では、漏洩停止後の 60 分間で濃度低下はほとんど見られなかった。高さ 2000 mm では、避圧ダンパ

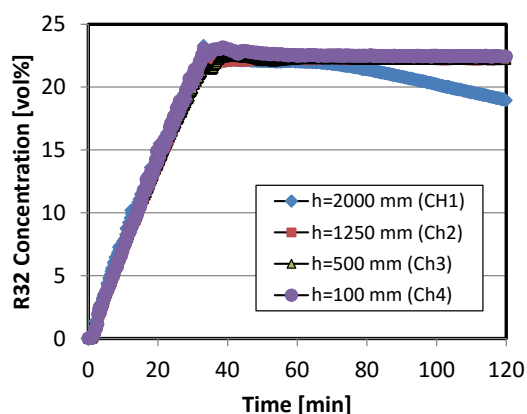


図 3-56 燃焼容器内の R32 濃度の経時変化

一や室内機側面からの自然換気により、その他の高さよりも有意に濃度低下が認められるが、1時間での濃度低下率は約9%であったから、換気回数は約0.1回/hとなる。したがって建築基準法で定められる必要換気回数（おおむね0.3回/h以上³⁻²⁶）よりも密閉度の高い空間である。

(3) 冷媒漏洩系統および方法

天井カセット型室内機からの漏洩を模擬するため、室内機に穴をあけて1/4"の銅チューブを通し、室内機の熱交換器固定板金にいったん冷媒を衝突させ、周囲空気を巻き込んだ冷媒を吹き出し口から実験空間へ漏洩させた。冷媒はポンペからは液相の状態で放出したが、室内機裏面板金に衝突する際にはほぼミスト状になっていた。冷媒漏洩速度は10kg/hとし、ブルドン管圧力計にてモニターしながら漏洩速度を監視した。

(4) 着火源

本シナリオでは、着火源としてろうそく等の裸火を対象とした。そこで、遠隔で裸火を発生させるために、マッチ先端の薬剤塗布部分を折り取り、これをニクロム線コイルに乗せて、ニクロム線にスライダックで通電することにより裸火を発生させた。着火源の設置高さは、カラオケルーム内のテーブル高さをイメージして、床面から50cmとした。

3.8.3.2 測定項目および方法

(1) 冷媒濃度分布

室内中央で、高さ0.1, 0.5, 1.25, 2.0mの4地点で、超音波式ガス濃度計（第一熱研(株)製 US-IIT-S）4台により、冷媒濃度を同時測定した。

(2) 火炎挙動

燃焼容器を設置した密閉試験場内に常速デジタルビデオカメラ（JVCケンウッド GZ-HM670, 30fps）および高速デジタルビデオカメラ（JVCケンウッド, GZ-E355, 300fps）を設置し撮影した。燃焼により発生するフッ化水素から防護するためカメラはアクリル製のケース内に設置した。

(3) 燃焼容器内温度

図3-55に示すように、K型熱電対（線径0.32mmφ）を燃焼容器内に設置し、容器内の温度上昇を計測した。熱電対からの出力は、データロガー（Graphtec製GL7000）により記録した。

(4) 燃焼容器内湿度

温湿度センサー（T&D, TR-51i）を、燃焼容器の隅部で高さ500mmの位置に設置し、容器内の温度および湿度をモニターした。

(5) 圧力上昇

燃焼容器側面、高さ2000mmの位置に穴を開け、圧力変換器（共和電業製PGM-02KG）を取り付けて、圧力上昇を計測した。圧力変換器からの出力はシグナルコンディショナ（株共和電業製CDV-900A）にて増幅し、データロガー（Graphtec製GL7000）にて記録した。

3.8.3.3 実験条件

表3-9に実験条件の一覧を示す。

(1) 冷媒種

R32およびR1234ze(E)を対象とした。R1234ze(E)の実験では、室内湿度が概ね80%R.H.以上となるように、オイルヒーターおよび加湿器を用いて調湿した。

(2) 漏洩量

エアコン搭載冷媒量全量が室内に漏洩した場合に、1/4LFL, 1/2LFL, LFL, UFLとなる量を漏洩させた。漏洩量数値は表3-9に示してある。

(3) 換気の有無

換気ありと換気なしの2パターンで実験を行った。換気なしの場合、給気口・排気口ともにビニルテープで密閉した。

表 3-9 実大着火実験ケース一覧

冷媒種	LFL (vol%) ³⁻¹⁸⁾	UFL (vol%) ³⁻¹⁸⁾	漏洩量	換気の有無
R32	13.5 ± 0.2	26.9 ± 0.5	690 g (1/4LFL 想定)	有
			1.4 kg (1/2LFL 想定)	
			2.7 kg (LFL 想定)	
			5.4 kg (UFL 想定)	
R1234ze(E)	5.95 ± 0.15	12.7 ± 0.4	670 g (1/4LFL 想定)	
			1.3 kg (1/2LFL 想定)	
			2.6 kg (LFL 想定)	
			5.7 kg (UFL 想定)	
R32	13.5 ± 0.2	26.9 ± 0.5	690 g (1/4LFL 想定)	無
			1.4 kg (1/2LFL 想定)	
			2.7 kg (LFL 想定)	
			5.4 kg (UFL 想定)	
R1234ze(E)	5.95 ± 0.15	12.7 ± 0.4	670 g (1/4LFL 想定)	
			1.3 kg (1/2LFL 想定)	
			2.6 kg (LFL 想定)	
			5.7 kg (UFL 想定)	

3.8.4 結果および考察

3.8.4.1 冷媒濃度の鉛直分布

(1) 換気なしの場合

図 3-57 に各漏洩量における冷媒濃度の鉛直分布を示す。いずれの漏洩量の場合も、高さ方向にはほとんど濃度勾配はみられず均一であった。またいずれの漏洩量の場合も、目標濃度より低い濃度で定常状態になっており、特に UFL 相当量漏洩の場合は、目標濃度 (UFL) よりも R32 で約 8 vol%, R1234ze(E) で約 2 vol% 低い濃度となった。本実験ではいずれの条件も、ボンベからは液相状態で、室内機裏面の板金にはミスト状態で衝突させ漏洩させている。漏洩停止後、冷媒がいくらか液化してドレンパンに溜まっており、これがゆっくりと蒸発していた。したがって UFL 相当量の冷媒を全量漏洩させても、室内へは全量が即時充満するのではなかったために、UFL 未満の濃度となったとみられる。また、密閉室内であっても、冷媒が急速で市内に漏洩してくるに伴い室内の圧力が上昇するので、これに伴い容器外壁がわずかに膨張して隙間を生じ、そこから室外へ冷媒が漏洩した可能性が考えられるため、これも室内濃度が目標濃度に到達しなかった一因として考えられる。なお、R32 では室内濃度が 19 vol% 程度であり、化学量論濃度 (17.3 vol%³⁻⁴⁾) より若干高い濃度であるため、着火した場合の燃焼威力としては最も危険

度の高い結果となる可能性が高い。

(2) 換気ありの場合

図 3-58 に一例として R32 および R1234ze(E) の UFL 相当量漏洩時における、冷媒濃度の鉛直分布を示す。換気により、UFL 相当量の冷媒を漏洩させた場合でも、R32, R1234ze(E) ともに、燃焼範囲内の濃度は計測されず、また、時間の経過に伴って濃度の低下が認められた。

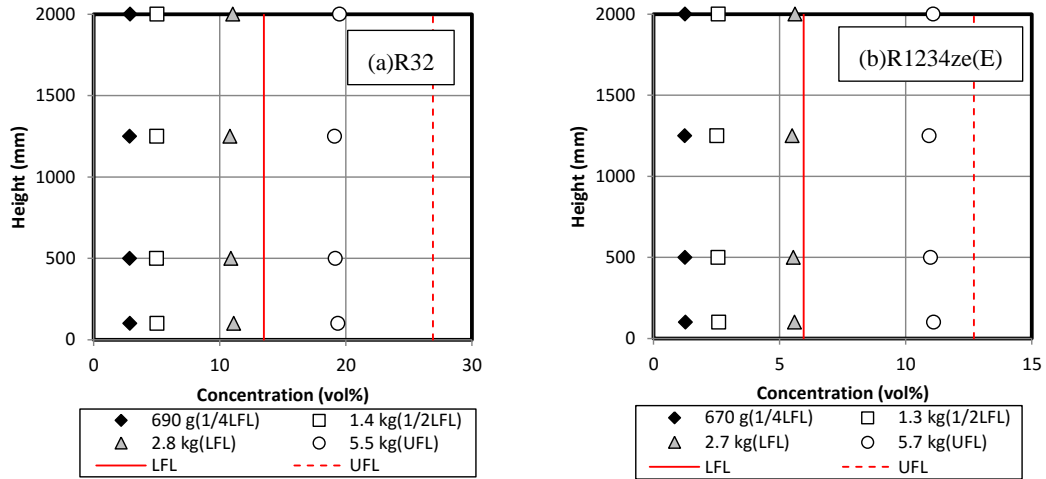


図 3-57 燃焼容器内冷媒濃度の鉛直分布（換気なし）

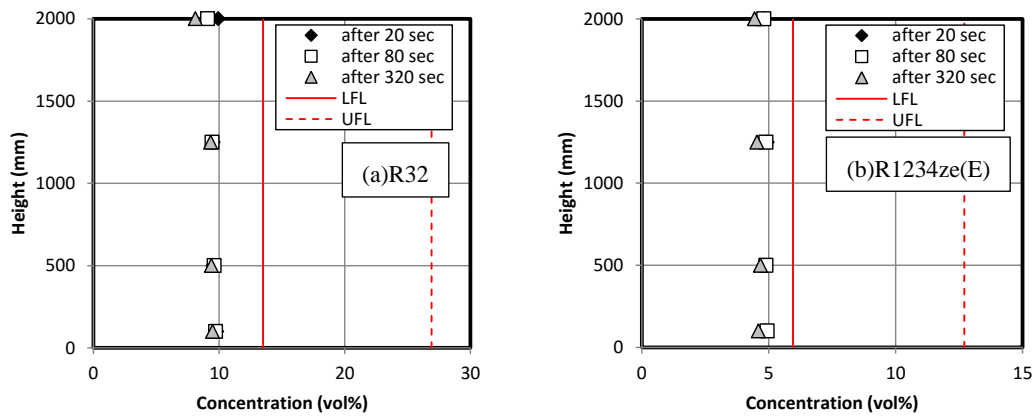


図 3-58 燃焼容器内冷媒濃度の鉛直分布（換気あり，UFL 相当量漏洩）

3.8.4.2 燃焼挙動

表 3-10 に実験結果の一覧を示す。

表 3-10 実大着火実験結果一覧

No.	冷媒種	漏洩量	漏洩前		漏洩後		換気	着火	最大ピーク過圧 [kPa]
			温度 [°C]	湿度 [%R.H.]	温度 [°C]	湿度 [%R.H.]			
①	R32	1/4LFL	15.9	56	16.4	52	あり	×	-
②		1/2LFL	15.9	26	15.3	24		×	-
③		LFL	4.1	73	4.8	68		×	-
④		UFL	5.6	58	5.9	47		×	-
⑤	R1234ze(E)	1/4LFL	22.7	53	21.8	51		×	-
⑥		1/2LFL	-	-	17.8	60		×	-

⑦		LFL	19.8	58	16.0	61		×	-
⑧		UFL	19.8	62	14.0	49		×	-
⑨	R32	1/4LFL	4.9	53	4.9	52	なし	×	-
⑩		1/2LFL	4.5	61	4.4	58		×	-
⑪		LFL	4.2	55	3.2	52		×	-
⑫		UFL	3.7	87	0.7	83		○	4.3
⑬	R1234ze(E)	1/4LFL	19.3	85	18.6	89		×	-
⑭		1/2LFL	20.9	83	18.9	81		×	-
⑮		LFL	19.9	85	14.4	89		×	-
⑯		UFL	16.3	90	10.1	89		○	4.0

(1) R32・換気なしの場合

1) 漏洩量 1/4LFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 2.9 vol%程度で、1/4LFL (=3.375 vol%)にも満たなかった。これは先述のとおり、冷媒が室内機内部のドレンパンでいくらか液化していたことと、冷媒漏洩に伴い容器にわずかに生じる隙間からの漏洩によるものと考えられる。ニクロム線に通電後 1s でマッチから発火したが、周囲の R32 への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は見られなかった。

2) 漏洩量 1/2LFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 5.0 vol%程度で、1/2LFL (=6.75 vol%)にも満たなかった。ニクロム線に通電後 1 s でマッチから発火したが、1/4LFL の場合と同様にマッチ周囲の R32 への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は認められなかった。

3) 漏洩量 LFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 10.8 vol%程度で、LFL (=13.5 vol%)に満たなかった。ニクロム

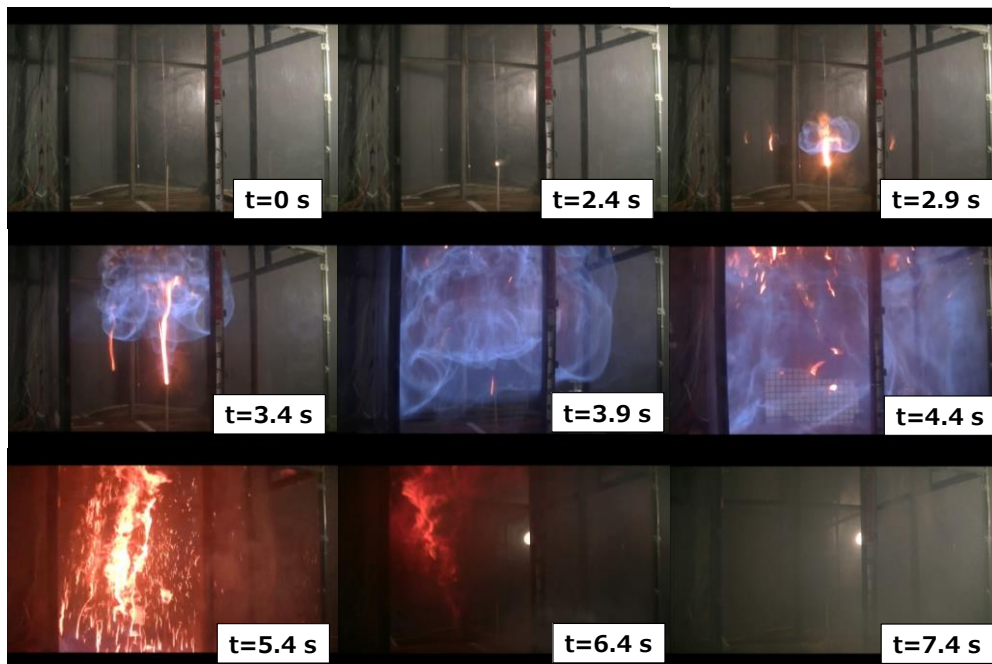


図 3-59 燃焼容器内での冷媒の着火および火炎伝播の様子 t : 通電からの経過時間
冷媒: R32, 換気なし, 漏洩量: UFL 相当 (5.4 kg)

線に通電後 1 s でマッチから発火したが、1/4LFL, 1/2LFL の場合と同様にマッチ周囲の R32 への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は認められなかった。

4) 漏洩量 UFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 19.2 vol% で、UFL (=26.9 vol%)には届かないものの LFL より高く、燃焼範囲内にある。図 3-59 に、ニクロム線通電後の容器内の連続写真を示す。ニクロム線通電後 2.4 s でマッチから発火し、その 500 ms 後にはマッチ付近の R32 に火炎伝播して、R32 火炎特有のブルーフレームが形成されていることがわかる。マッチの炎は R32 の火炎に包まれるようになるために、酸素不足となり灯芯のように細長く縦方向に伸長したものと考えられる。さらに 500 ms 経過すると、マッチの炎を軸にしてさらに伝播領域を広げながら、外回りに渦を巻きつつ上昇している。ニクロム線通電後 3.9-4.4 s では室内の R32 すべてに伝播して燃焼し、5.4 s では輝炎の発生が認められる。このケースではほぼすべての高さにおいて当量比が 1 を超えるため、未燃の R32 が不完全燃焼を起こしているものと思われる。7.4 s では容器内はほぼ消炎し、白くもやが発生している様子がわかる。これは燃焼により生成した水およびフッ化水素である。さらに詳細に調べると、通電後約 3.6 s で、燃焼による室内の圧力上昇に伴って、燃焼容器自体がわずかに（数 cm 程度）浮上しバウンドする様子が確認できた。このバウンドは通電後 5 s ごろまで断続的に続いた。したがって、仮に燃焼容器がバウンドしなかった場合、室内の圧力上昇はさらに大きな値を示した可能性はある。

図 3-60 は高さ 2000 mm の位置に取り付けた圧力トランスミッタによる室壁での圧力上昇波形である。通電後約 4 s で圧力上昇が開始し、5.1 s で約 2.3 kPa となったあといったん低下した。その後再度上昇に転じ、約 5.5 s で本ケースでの最高ピーク過圧 (4.3 kPa) を示した。したがって、火炎伝播映像と圧力上昇を照らし合わせると、映像からは燃焼最盛期をすでに超えていると思われる時刻 (5.4 s) 付近で、圧力上昇が最大値を迎えたことになる。すなわち、火炎が室内全域に伝播したのちも、室内温度は余熱によりある程度上昇を続けると推測されるので、圧力上昇と火炎伝播挙動の間には時間遅れが存在する。本実験で用いた燃焼室の壁は剛体ではないので参考値ではあるが、図 3-60 の圧力波形をもとに爆発圧力強度指数 (K_G 値) を算出すると、約 0.13 bar·m/s (=100 kPa·m/s) となった。4 章の図 4-11³⁻²⁶⁾に示されているように、一般に強燃性ガスでは容器寸法が大きくなるにつれて K_G 値も大きくなる傾向があるが、R32 については、容器寸法が K_G 値に及ぼす影響は見られなかった。また、得られた画像をもとにおおよその火炎伝播速度を求めると、約 1.0 m/s となり、これをもとにおおよその燃焼速度を見積もると約 0.13 m/s 程度となる。したがって、本実験のスケールで滞留 R32 が燃焼した場合、A2L の定義である 10 cm/s よりは若干大きな燃焼速度になったものの、炭化水素系ガスのような強燃性ガスの一般的な層流燃焼速度 (約 0.4~0.5 m/s) には至らず、したがって、乱流燃焼に遷移しているとは考えにくい。

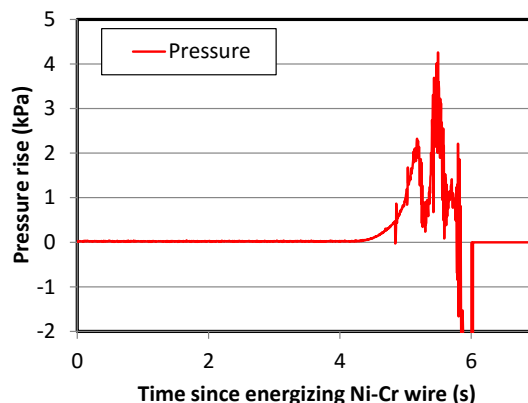


図 3-60 R32 の燃焼に伴う圧力上昇波形 換気なし、漏洩量：UFL 相当 (5.4 kg)

(2) R32・換気ありの場合

図 3-61 に R32 濃度の経時変化を示す。

1) 漏洩量 1/4LFL

着火源高さ付近での R32 濃度は最大でも約 2.0 vol%程度で、1/4LFL に満たず、換気なしの場合よりも約 0.9 vol%程度低い。これは換気の効果、冷媒が室内機内部のドレンパンでいくらか液化していたことと、冷媒漏洩に伴い容器にわずかに生じる隙間からの漏洩などによるものと考えられる。ただし漏洩初期の 7 分程度、室内機内のドレンパン部分の濃度は 1/4LFL 以上となる領域が形成されたようである。

ニコム線に通電後 1 s でマッチから発火したが、周囲の R32 への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は見られなかった。

2) 漏洩量 1/2LFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 3.4 vol%程度で、1/2LFL に満たず、換気なしの場合より約 1.6 vol%程度低い。これも 1/4LFL の場合と同様の理由によると思われる。ただし、室内機内のドレンパン部分については、漏洩初期の 8 分程度、1/2LFL を超える領域が形成された。通電後 1 秒でマッチの発火が確認できるが周囲への伝播は見られず、有意な圧力および温度上昇は見られなかった。室内の様子も、有意な変化はなかった。

3) 漏洩量 LFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 5.5 vol%程度で、LFL に満たず、換気なしの場合よりも約 5 vol%程度低い値となった。このように漏洩量が多くなるにつれて、換気の効果が大きくなってきていると考えられる。室内機のドレンパン部分においても、LFL を超える濃度領域の形成は認められなかった。通電後 1 s でマッチの発火が確認できるが周囲への伝播は見られず、有意な圧力

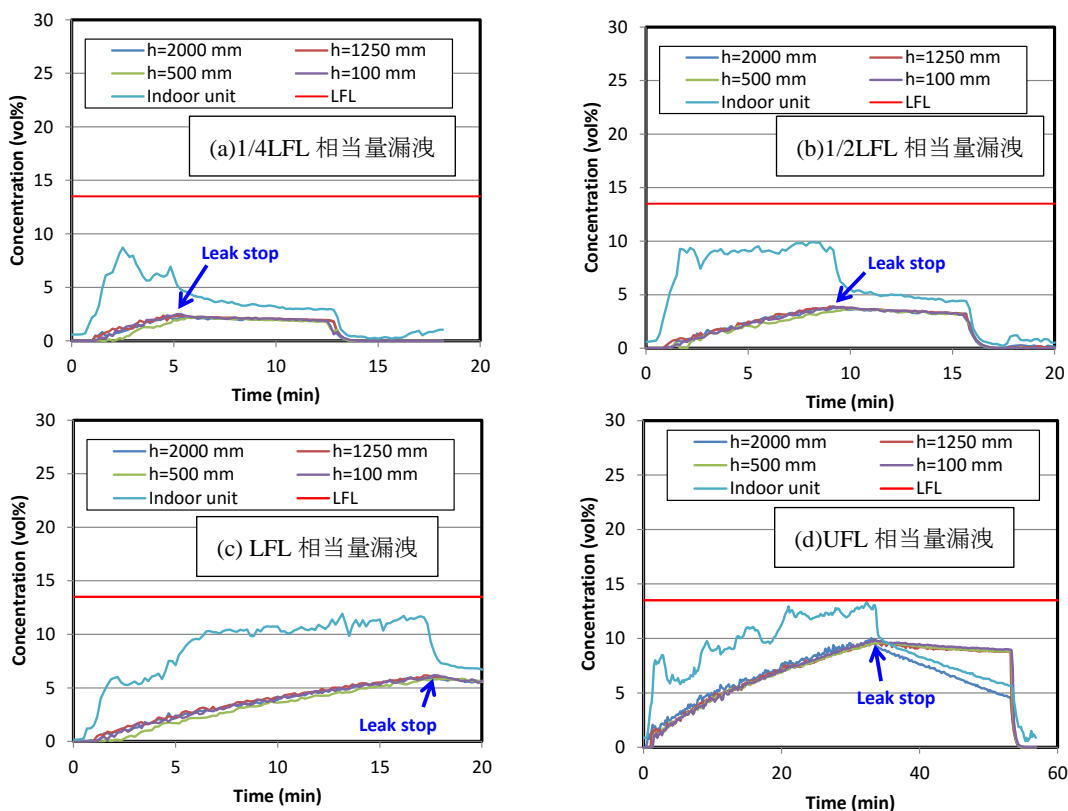


図 3-61 燃焼容器内冷媒濃度の経時変化（換気あり，冷媒種：R32）

および温度上昇は見られなかった。室内の様子も、有意な変化はなかった。

4) 漏洩量 UFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 9.4 vol%程度で、UFL はおろか LFL にも満たず、換気なしの場合よりも約 10 vol%程度低い値となった。室内機のドレンパン部分においても、UFL はおろか LFL を超える濃度領域の形成すら認められなかった。通電後 1 s でマッチの発火が確認できるが周囲への伝播は見られず、有意な圧力および温度上昇は見られなかった。室内の様子も、有意な変化はなかった。

(3) R1234ze(E)・換気なしの場合

1) 漏洩量 1/4LFL

着火源高さ付近での R1234ze(E)濃度は約 1.2 vol%程度で、1/4LFL (= 1.49 vol%)に満たなかった。これは先述のとおり、冷媒が室内機内部のドレンパンでいくらか液化していたことと、冷媒漏洩に伴い容器にわずかに生じる隙間からの漏洩によるものと考えられる。ニクロム線に通電後 1 s でマッチから発火したが、周囲の R1234ze(E)への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は見られなかった。

2) 漏洩量 1/2LFL

着火源高さ付近での R1234ze(E)濃度は約 2.5 vol%程度で、1/2LFL (= 3.0 vol%)に満たなかった。ニクロム線に通電後 1 s でマッチから発火したが、1/4LFL の場合と同様にマッチ周囲の R1234ze(E)への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は認められなかった。

3) 漏洩量 LFL

着火源高さ付近での R1234ze(E)濃度は約 5.0 vol%程度で、LFL (= 5.95 vol%)に満たなかった。ニクロム線に通電後 1 s でマッチから発火したが、1/4LFL、1/2LFL の場合と同様にマッチ周囲の R1234ze(E)への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は認められなかった。

4) 漏洩量 UFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 10.9 vol%で、UFL (= 12.7 vol%)には届かないものの LFL より高く、燃焼範囲内にある。図 3-62 に、ニクロム線通電後の容器内の連続写真を示す。ニクロム線通電後 2.6 s でマッチから発火し、その 500 ms 後にはマッチの炎が細長く伸びていく傾向が認められた。通電後 4.6 s では、マッチからの輝炎の外縁部に青白色の R1234ze(E)由来とみられる火炎が形成されるのが確認された。ただしこの青白色の火炎はわずかで、比較的輝炎に近い色を呈した火炎が、着火位置から倒立円錐状に形成され、天井面に衝突したのち重力によって火炎面が下方へ降下した。R1234ze(E)は比較的重いいため、室内下部（特に着火源より下方の領域）には未燃の R1234ze(E)が多量に滞留していたと思われるが、下降してきた火炎面はこの未燃 R1234ze(E)と接触した位置でいったんつり合って停止したのち、未燃 R1234ze(E)に伝播してさらに火炎面を下方に広げながら室内全体に伝播した。室内全体に火炎が伝播し終わるまでに約 10-12 s を要した。この点では、R32 よりも燃焼に要した時間は長かったことになる。消炎後は R32 と同様に、燃焼により生じた水とフッ化水素により室内は真っ白にもやがかかった。

R1234ze(E)の場合は、R32 で見られたような、燃焼による圧力上昇に伴う燃焼容器のバウンドは見られなかったが、発生したモーメントにより燃焼容器自体が時計回りに約 5°ほど水平回転していた。



図 3-62 燃焼容器内での冷媒の着火および火炎伝播の様子 t : 通電からの経過時間
冷媒: R1234ze(E), 換気なし, 漏洩量: UFL 相当 (5.7 kg)

図 3-63 は高さ 2000 mm の位置に取り付けた圧力トランスミッタによる室壁での圧力上昇波形である。通電後約 6 s で圧力上昇が開始し、6.4 s で約 2.4 kPa となったあといったん低下した。その後再度上昇に転じ、約 7.0 s で本ケースでの最高ピーク過圧 (4.0 kPa) を示した。したがって、火炎伝播映像と圧力上昇を照らし合わせると、R32 同様に映像からは燃焼最盛期をすでに超えていると思われる時刻付近で、圧力上昇が最大値を迎えることになる。また、R32, R1234ze(E)ともに、圧力上昇波形が 2 度のピークを示すようにみられるのは、まず、火炎が上昇して天井面に衝突することによって 1 度目のピークを生じ、その後、容器全体に伝播することによって 2 度目のピークを生じたものと考えられる。ただし、火炎面の到達と、火炎により温められるガスの温度上昇には時間遅れがあると推測されるので、これに伴い圧力上昇と火炎伝播挙動の間にも時間遅れが存在すると考えられる。R32 と同様に、図 3-63 の圧力波形をもとに K_G 値を算出すると、約 $0.12 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$ ($=100\text{kPa}\cdot\text{m/s}$) となり、R32 とほとんど同じ値であり、R32 同様に R1234ze(E)についても、容器寸法が K_G 値に及ぼす影響は見られなかった。なお、R1234ze(E)の火炎は、R32 のように比較的球形を保った状態で上昇するわけではなく、酸素不足により上方へ伸長した裸火の周囲から倒立円錐状に形成されたために、映像から火炎伝播速度を推定することができなかった。

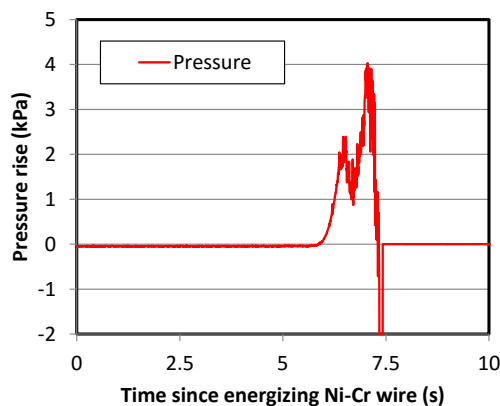


図 3-63 R1234ze(E)の燃焼に伴う圧力上昇波形 換気なし, 漏洩量: UFL 相当 (5.7 kg)

そのため、乱流火炎への遷移の有無は考察できていない。

(4) R1234ze(E)・換気ありの場合

図 3-64 に R1234ze(E)濃度の経時変化を示す。

1) 漏洩量 1/4LFL

着火源高さ付近での R1234ze(E)濃度は最大でも約 1.0 vol%程度で、1/4LFL に満たず、換気なしの場合よりも約 0.2 vol%程度低い。これは R32 同様に換気の効果及び冷媒が室内機内部のドレンパンでいくらか液化していたことと考えられる。ただし漏洩初期の 6 分程度、室内機内のドレンパン部分の濃度は 1/4LFL 以上となる領域が形成されたようである。

ニコム線に通電後 1 s でマッチから発火したが、周囲の R32 への火炎伝播は認められず、温度上昇、圧力上昇も、マッチの裸火によるものを除いては、有意な値は観測されなかった。室内の様子も、有意な変化は見られなかった。

2) 漏洩量 1/2LFL

着火源高さ付近での R1234ze(E)濃度は約 1.75 vol%程度で、1/2LFL (= 3.0 vol%)に満たず、換気なしの場合より約 0.75 vol%程度低い。これも 1/4LFL の場合と同様の理由によると思われる。ただし、室内機内のドレンパン部分については、漏洩中の 2 分程度、1/2LFL を超える領域が形成された。通電後 1 s でマッチの発火が確認できるが周囲への伝播は見られず、有意な圧力および温度上昇は見られなかった。室内の様子も、有意な変化はなかった。

3) 漏洩量 LFL

着火源高さ付近での R1234ze(E)濃度は約 3.0 vol%程度で、LFL に満たず、換気なしの場合よりも約 2.0 vol%程度低い値となった。R32 と同様、漏洩量が多くなるにつれて、換気の効果が大きくなってきていると考えられる。室内機のドレンパン部分においても、LFL を超える濃度領域の形成は認められなかった。通電後 1 s でマッチの発火が確認できるが周囲への伝播は見られず、有意な圧力および温度上昇は見られなかった。室内の様子も、有意な変化はなかった。

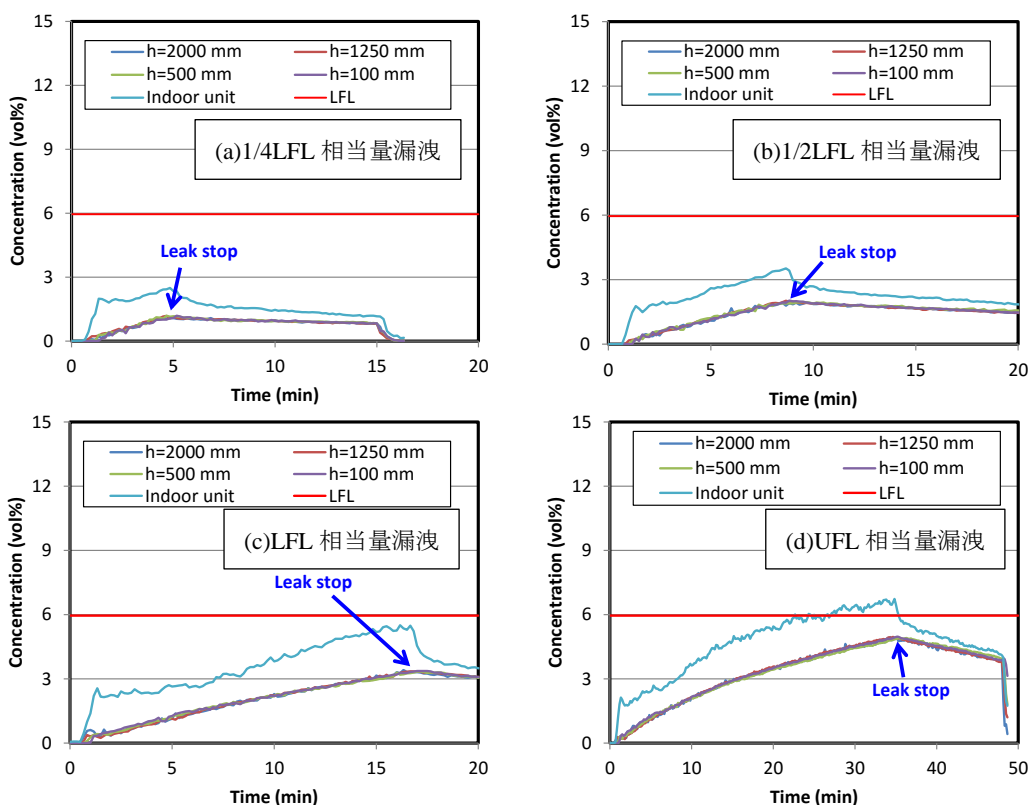


図 3-64 燃焼容器内冷媒濃度の経時変化（換気あり，冷媒種：R1234ze(E)）

4) 漏洩量 UFL

着火源高さ付近での R32 濃度は約 4.9 vol%程度で、UFLはおろか LFLにも満たず、換気なしの場合よりも約 6 vol%程度低い値となった。室内機のドレンパン部分においても、UFLはおろか LFLを超える濃度領域の形成すら認められなかった。通電後 1s でマッチの発火が確認できるが周囲への伝播は見られず、有意な圧力および温度上昇は見られなかった。室内の様子も、有意な変化はなかった。

3.9 まとめ

3.9.1 取扱シチュエーション#1:暖房機器と A2L 冷媒搭載空調機器を同時使用した場合

A2L 冷媒を搭載した壁掛け型家庭用空調機器と化石燃料系暖房機器（反射式石油ストーブ、石油ファンヒーター）が同時使用された場合のフィジカルハザードを実験的に評価した。その結果、①家庭用空調機器に搭載される程度の冷媒量が 4 畳半室内に漏洩しても、暖房機器による着火や火炎伝播は起こりえない、②熱分解生成物となるフッ化水素（HF）発生能力は現行冷媒と同等程度、③室内にいくらかの気流がある場合、HF 濃度が高くなる傾向があることが明らかになった。

3.9.2 取扱シチュエーション#2-(a):A2L 冷媒滞留空間内で市販ライターを使用した場合

- (1) A2L 冷媒が漏洩・滞留した空間内で、サービス・メンテナンス時に作業者が喫煙のため市販のライターを使用した場合を想定した実験的評価を行った。その結果、ライター着火口付近が燃焼範囲の組成になる場合がある可能性が、簡易計算により明らかになった。その組成で、市販の圧電ガスライターを用いて着火実験を行ったところ、R1234yf, R1234ze(E), R32 のいずれの冷媒でも着火は認められなかった。
- (2) 市販の予混合式ターボライターを用いたところ、R1234ze(E)が LFL 付近濃度となっている空間内（室温 19℃、湿度 71% R.H.）で、わずかに火炎伝播が認められたケースがあった。火炎は直ちに消炎しており、深刻な爆風圧の発生（アクリルプールを破損させる程度の爆風圧）は認められなかった。
- (3) 市販の石油ライターを用いたところ、ライターに定常火炎が形成され、これに伴って周囲の滞留冷媒への火炎伝播が認められた。ライター風防内のガス組成を GC/MS にて分析したところ、R32 由来のピークは検出されず、本実験の条件下では、A2L 冷媒中であっても、風防内のガス組成はライター燃料と空気が主となっていることが分かった。従って石油ライターによる A2L 冷媒への着火及び火炎伝播は否定できない。

3.9.3 取扱シチュエーション#2-(b):A2L 冷媒がピンホールや破断口から噴出漏洩した場合

配管の破断あるいは配管に形成されたピンホールから冷媒が急速漏洩した場合のフィジカルハザードを実験的に調べた。配管破断（漏洩口径 4 mmφ、蒸気圧で噴出）を想定した実験を行ったところ、R1234yf, R1234ze(E), R32 いずれの冷媒種でも、燃焼範囲は漏洩口極近傍に局所的に形成されるのみであった。着火実験では、実際の作業環境で想定される静電気や電気スパークなどよりも非常に大きなエネルギーを与えても、冷媒噴流全体への火炎伝播は認められず、爆風圧、温度、熱流束、フッ化水素濃度の有意な上昇は認められなかった。

3.9.4 取扱シチュエーション#2-(c):回収機等サービス・メンテナンス機器内への A2L 冷媒の漏洩

サービス・メンテナンス機器内で冷媒が漏洩した場合のフィジカルハザードを実験的に調べた。回収機模型内で冷媒を漏洩させ、回収機からの冷媒漏洩拡散特性に及ぼすスリットの効果を調べた。その結果、スリットがなければ（あるいはスリット幅が 1 mm 程度では）、回収機模型内部に漏洩した冷媒は長時間滞留し続け、16 J 程度のエネルギーを与えれば着火して火炎伝播することが分かった。ただし実際の回収機で 16 J ものエネルギーを有するスパークの発生は非常に考えにくく、かつ、R1234yf の最小着火エネルギーは、実際に

回収機内で生じると推測される放電エネルギーの数十倍から数百倍程度大きいので、冷媒が滞留したとしても着火し火炎伝播する可能性は極めて小さいと考えられる。スリット幅が 20 mm 程度あれば、冷媒の滞留を抑制し速やかに冷媒を回収機模型から漏洩拡散でき、着火を起こりにくくすることができる可能性が示された。

3.9.5 取扱シチュエーション#3: 多室型空調機の急速漏洩を想定した安全性評価

多室型空調機に充填された低 GWP 冷媒（ここでは R32）が、直方体形状の居室内に漏洩した場合を想定した着火実験を行った。着火高さおよび漏洩高さをさまざまに変化させて、燃焼（火炎伝播）挙動、火炎伝播速度、圧力上昇挙動について調べた。その結果、着火高さよりも上方にあり、かつ、燃焼範囲内の濃度となっている冷媒の量が、火炎伝播挙動および威力に大きな影響を及ぼすことが定性的に明らかになった。そこで、この冷媒量を示す新たな指標として、あらかじめ測定した濃度分布曲線から、燃焼速度と当量比の関係も考慮した“有効可燃冷媒積”を導入した。その結果、火炎伝播速度は着火高さや漏洩高さ（すなわち濃度分布）によらず、有効可燃冷媒積のおよそ 1/3 乗に比例して単調増加する傾向が認められた。このことより、あらかじめある程度予測可能な有効可燃冷媒積を指標に用いることにより、燃焼威力を表す指標の 1 つである、火炎伝播速度を予測できる可能性が示された。

3.9.6 実際の事故シナリオを想定した実大着火実験

実大の狭小カラオケルームを模擬した空間（2 m×2 m×2.4 m）内に、多室型空調機に充填された冷媒が急速に漏洩した場合に、カラオケルーム内の着火源による火災発生可能性とその威力を評価するための実大実験を実施した。冷媒漏洩量は、全量が室内に均一漏洩した場合に 1/4LFL, 1/2LFL, LFL および UFL となる 4 ケースとし、これに、室内換気の有無を条件として設定した。冷媒種は R32 および R1234ze(E)を対象とし、いずれも液相状態で漏洩するものとした。その結果、R32, R1234ze(E)ともに、LFL 相当量以下の漏洩量では、換気の有無にかかわらず着火は認められなかった。UFL 相当量の場合は、換気停止時にはいずれの冷媒でも着火し、室内全体への火炎伝播が認められ、4 kPa 程度の圧力上昇を確認した。これに対して換気運転時は、室内冷媒濃度は UFL はおろか LFL にすら到達せず、したがって着火および火炎伝播は起こらず、有意な温度および圧力上昇も観測されなかった。以上より、本事故シナリオにおいては、LFL 相当以下の冷媒量であれば、室内に全量漏洩した場合でも着火は発生せず、また、UFL 相当量の冷媒が漏洩した場合でも適切な換気量を確保することにより、着火の発生を防ぐことが可能であると考えられる。

参考文献

- 3-1) International Organization for Standards, 2014, “ISO817: Refrigerants: Designation and Safety Classification”, Third edition, Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:817:ed-3:v1:en>. [Last Accessed Jan 19, 2015].
- 3-2) Spatz, M., & Minor, B., 2008, “HFO-1234yf: A low GWP refrigerant For MAC”, Honeywell/DuPont joint collaboration, SAE World Congress, Detroit, Michigan. [ONLINE] Available at: http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/SmartAutoAC/MAC_SAE_HFO_1234yf.pdf. [Last Accessed Mar 30, 2016].
- 3-3) Takizawa, K., Igarashi, N., Takagi, S., Tokuhashi, K., & Kondo, S., 2015, Quenching distance measurement of highly to mildly flammable compounds, Fire Safety Journal, Vol. 71, pp.58–64.
- 3-4) Takizawa, K., Tokuhashi, K. and Kondo, S., 2009, Flammability assessment of CH₂=CFCF₃: Comparison with fluoroalkenes and fluoroalkanes, Journal of Hazardous Materials, Vol.172, pp.1329-1338.
- 3-5) Saburi, T., Matsugi, A., Shiina, H., Takahashi, A., & Wada, Y., 2014, “Flammable behavior of A2L refrigerants in the presence of moisture”, Proceedings of Tenth International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. Bergen: GexCon AS., p. 327–334.
- 3-6) Imamura, T., Kamiya, K. and Sugawa, O., 2015, “Ignition hazard evaluation on A2L refrigerants in situations of service and maintenance”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, in press, Available online at Jan.6, 2015.
- 3-7) Imamura, T. and Sugawa, O., 2014, “Experimental evaluation of physical hazard of A2L refrigerant assuming actual

- handling situations”, Proc. of the International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2014, pp.73-78.
- 3-8) 今村友彦, 宮下達也, 上矢恭子, 須川修身, 2013, A2L 冷媒滞留雰囲気下における市販電子ライターでの着火危険性評価, 安全工学, Vol.52, No.2, pp.91-98.
- 3-9) 今村友彦, 宮下達也, 上矢恭子, 森本崇徳, 須川修身, 2012, 微燃性冷媒搭載空調機器と化石燃料系暖房機器の同時使用時におけるフィジカルハザード評価, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.29, No.4, pp.401-411.
- 3-10) 高市健二, 平良繁治, 渡部岳志, 2014, “8.1 ミニスプリットリスクアセスメント SWG の進捗”, 日本冷凍空調学会微燃性冷媒リスク評価研究会 平成 25 年度プログレスレポート 第 8 章 日本冷凍空調工業会の取り組み, pp.78-89, Available at: http://www.jsrae.or.jp/committee/binensei/2013PR_j.pdf. (2015 年 3 月 10 日閲覧)
- 3-11) 矢嶋龍三郎, 2014, “8.2 ビル用マルチエアコンリスクアセスメント SWG の進捗”, 日本冷凍空調学会微燃性冷媒リスク評価研究会 平成 25 年度プログレスレポート 第 8 章 日本冷凍空調工業会の取り組み, pp.90-100, Available at: http://www.jsrae.or.jp/committee/binensei/2013PR_j.pdf. (2015 年 3 月 10 日閲覧)
- 3-12) (独) 製品評価技術基盤機構 (NITE), 2010, 平成 21 年度 PRTR 届出外排出量の推計方法等の詳細, 19. オゾン層破壊物質の排出量, <http://www.nite.go.jp/data/000008482.pdf> [Last Accessed Mar 10, 2015].
- 3-13) 日本産業衛生学会, 2011, “許容濃度等の勧告 (2011 年度)”, 産業衛生学雑誌, 53, pp.177-203. Available online at: http://joh.sanei.or.jp/pdf/E56/E56_5_14.pdf (2015 年 3 月 10 日閲覧)
- 3-14) Holleyhead, R., 1996, “Ignition of flammable gases and liquids by cigarettes: a review”, Science and Justice, 36(4), pp.257-266.
- 3-15) 松井英憲, 2012, “最小着火エネルギー”, TIIS ニュース, No.247, pp.4-6, Available online at: http://www.tiis.or.jp/pdf/TIISNEWS_2012247.pdf, (2015 年 3 月 9 日閲覧)
- 3-16) Imamura, T., Sano, T., Yuzawa, K., and Sugawa, O.: “Experimental evaluation of the possibility of ignition and flame propagation in accumulated difluoromethane (R32) from a kerosene cigarette lighter”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, in press, Available online at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950423016300882>
- 3-17) 日本喫煙具協会, 2008, “Lighter and Smoking Goods Manual”, p.3, Available online at: <http://www.jsaca.or.jp/pdf/Lighter-Manual.pdf> [LAST ACCESSED 26th, June. 2016.]
- 3-18) 滝澤賢二, 2016, “微燃性冷媒リスク評価研究会ファイナルレポート 2. 燃焼特性”
- 3-19) 東京都商品等安全対策協議会, 家庭用エアコンの取外し等に関する安全確保報告書, pp2-3, 2012
- 3-20) 東京都, エアコン取り外し中の作業ミスによる事故事例について (<https://www.shouhiseikatu.metro.tokyo.jp/attention/aircon.html>), 2012
- 3-21) Kondo,S, Takizawa, K, and Tokuhashi, K, On the pressure dependence of flammability limits of CH₂=CFCF₃, CH₂F₂ and methane, *Fire Safety Journal*, 46, 5: pp.289-293,2011
- 3-22) Kondo,S, Takizawa, K, and Tokuhashi, K, Effect of high humidity on flammability property of a few non-flammable refrigerants, *Journal of Fluorine Chemistry*, 161, pp.29-33,2014
- 3-23) 滝澤賢二, 徳橋和明, 近藤重雄, 間宮幹人, 永井秀明, 2011, “R1234yf および R1234ze(E)の燃焼性評価”, 第 49 回燃焼シンポジウム講演論文集, pp.146-147.
- 3-24) 静岡県建築行政会議ウェブサイト, 2015, <http://shizuoka-calc.jp/%e8%a1%8c%e6%94%bf%e9%80%a3%e7%b5%a1%e4%bc%9a%e8%ad%b0%e3%81%ae%e5%8f%96%e6%89%b1%e3%81%84/%e5%bb%ba%e7%af%89%e8%a8%ad%e5%82%99/2011/03/14/295>
- 3-25) 日本火災報知器工業会, 2010, カラオケ施設の個室における喫煙による煙感知器への影響実験報告書
- 3-26) 建築基準法解説 (抜粋) シックハウス関連の改正基準法, Available online at: <http://www.iny.jp/regulation/cnstreg5.html> [LAST ACCESSED 11st, March.2016.]
- 3-27) 佐分利禎, 2016, “微燃性冷媒リスク評価研究会ファイナルレポート 4. 危害度評価”

4. 危険度評価

4.1 はじめに

オゾン破壊係数 (ODP: Ozone Depletion Potential) にすぐれた冷媒として普及してきた代替フロンは、温暖化係数 (GWP: Global Warming Potential) が数千にも達し、地球温暖化の懸念から GWP 性能がより優れた R32 (CH₂F₂) や R1234yf (CH₂=CF₂CF₃), R1234ze(E) (CHF=CHCF₃) が次世代の低 GWP 冷媒として期待されている。ヨーロッパでは F ガス規制 (Directive/2006/40/EC^{4,1)}) でカーエアコン向けに定める規制値 GWP 150 以下に対応する冷媒として R1234yf (GWP 4) が、またエアロゾール噴出剤として R1234ze(E) (GWP 6) が候補になっている。代替フロンは今後さらに規制が進むことが予測される一方、これらの低 GWP 冷媒への転換促進をはかる際の問題として、これらの冷媒はわずかに燃焼性を有していることから微燃性冷媒と呼ばれており、ASHRAE(2010)^{4,2)} は微燃性冷媒向けに新たな燃焼区分(2L)を追加して新規冷媒の利用基準を定めるなど、次世代冷媒への転換促進に向けた環境づくりを進めている。日本においてもこれらの低 GWP 冷媒への転換を促進していくには、冷媒としての性能や対環境性能の評価だけでなく、据え付け作業時や運転時の事故などで環境中に漏洩した場合の燃焼安全性などを評価して、安全利用基準の策定も同時に行っていく必要がある。

本研究では、微燃性冷媒の基礎的な燃焼特性の評価と冷媒利用時の燃焼爆発影響評価を行うため、以下の一連の安全性評価を行った。

- ・ 大容量(524L)の密閉型球形燃焼容器を整備して、火炎面の浮き上がり効果が燃焼特性に与える影響を考慮した微燃性冷媒の燃焼試験を実施した。圧力計測や映像観察により、到達圧力や燃焼速度、爆発強度指数 K_G などを評価した。
- ・ 実規模での燃焼を想定し、15L 燃焼容器での試験結果との比較から爆発強度指数のスケール効果を検討した。
- ・ R1234ze(E) など、燃焼特性が温度・湿度依存を示す媒体について燃焼特性について調査した。
- ・ 産業界でよく用いられ、また燃焼特性が知られているアンモニアについて、これまで実施してきた試験設備を用いて試験し、微燃性冷媒の燃焼特性と直接的な比較を行った。
- ・ 実験を再現する燃焼モデルの検討を行い、数値シミュレーションへの導入を行った。
- ・ 密閉ではなく、部分的に開口部を持つ半密閉容器での燃焼試験を行い、容器内圧力の緩和効果について調査した。

4.2 燃焼試験

4.2.1 概要

微燃性冷媒の利用に関して、ASHRAE(2010)^{4,2)} はこれまでの冷媒の安全区分のクラス 2 (Class 2 – Lower Flammability Classification) に区分 2L を追加し、R32 や R1234yf, R1234ze は低毒性で燃焼速度が 10cm/s 以下の微燃性をもつとして A2L に分類される。A2L 冷媒はこのように低い燃焼速度を持つため燃焼時には浮力の影響が火炎面の浮き上がりとして顕著に現れ、特に実規模での影響を知る必要がある。そこで浮力の影響を考慮し、また燃焼特性の規模効果について検討するため、大容量の球形燃焼容器を準備し、まず R32 と R1234yf の火炎伝播挙動を高速度カメラで観測し、映像解析により火炎伝播速度を評価した。Takizawa ら^{4,3)} による球形火炎伝播を仮定した球形容器 (Spherical Vessel: SV) 法による燃焼速度の結果を参考に、大型燃焼容器内での燃焼時の圧力プロファイルから SV 法により燃焼特性を評価した。燃焼時の最高到達圧力であるピーク過圧や、ISO 6184-2^{4,4)} や NFPA68^{4,5)} に定められているように燃焼時の圧力上昇速度の最高値から評価される爆発強度指数 K_G を評価した。燃料と酸素の混合比として、化学量論比となる混合気に対する燃料/酸素混合比率として定義される当量比 ϕ を R32 では $\phi = 0.8-1.2$ 、R1234yf では $\phi = 1.2-1.4$ の範囲で変化させ、電気放電着火による

燃焼試験を行った。また、評価対象にR1234ze(E) を追加して夏場を想定した高温環境や水分の存在下での燃焼特性評価を実験的に調査し、着火時の燃焼挙動について評価を進めた。これら実験室規模での燃焼試験をもとに評価される K_G 値などをもとに、より現実的な環境を想定した場合の爆発影響の評価方法について検討した。

4.2.2 実験

直径 1m, 容積 0.524m³ の球形容器を備えた実験装置を図 4-1 に示す。ひずみ式圧力計変換器を容器上部に設置してあり、計測される燃焼中の圧力変化プロファイルをデータロガーで記録した。燃焼挙動は容器に備え付けた PMMA 製の観測窓を介して高速度カメラにより観測した。R32 の燃焼挙動は化学当量比 $\phi = 1.0$ を中心に $\phi = 0.8$ から 1.2 の範囲で調査した。R1234yf の燃焼挙動については、Takizawa ら⁴⁻³⁾が Metghalchi and Kech⁴⁻⁶⁾や Hill and Hung⁴⁻⁷⁾による SV 法を用いて燃焼速度と混合比について報告している燃焼範囲を参考に $\phi = 1.325$ (混合比 10vol%) を中心に $\phi = 1.2$ から 1.4 の範囲で調査した。燃料ガスは一定の分圧まで容器内に導入し、その後空気を全圧が大気圧 (101.325kPa) になるまで導入した。燃料の導入過程ではダイヤフラムポンプ (図 4-1 中の DP) を用いて循環ループを形成してガスの攪拌を行った。放電用の電極は直径 0.3mm のタンダステン線 2 本を 7mm のギャップを設けて対向設置し、電極自身による熱損失や擾乱の影響を避けた。燃焼容器全体にはジャケット式のマントルヒーターを設置して試験温度を一定に管理できるようにしている (図 4-1 写真参照)。直流高電圧を電極に供給し電気放電を起こして混合ガスを着火した。放電電圧と放電電流はオシロスコープで観測し、放電エネルギーを評価した。火炎面の膨張挙動は高速度カメラで観測した後、映像解析により水平方向への火炎速度と鉛直方向への火炎速度を評価した。

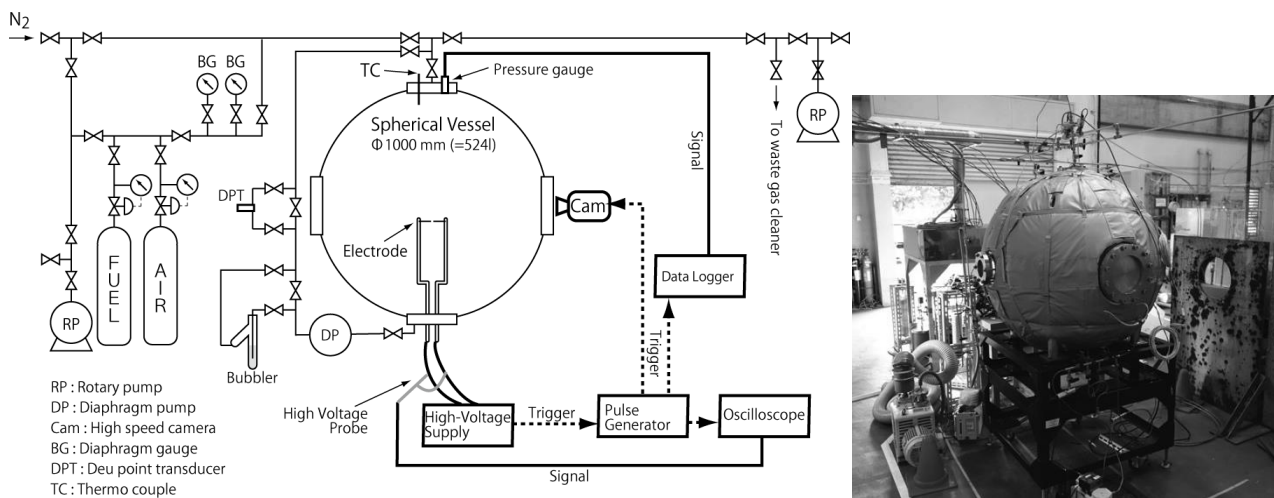


図 4-1 実験系統図(左), 写真 (右)

4.2.3 火炎速度と燃焼速度評価

(a) 映像観察 図 4-2 に R32 の当量比 $\phi = 0.9$ および 1.2 における火炎面伝播挙動を高速度カメラで撮影した例を示す。滑らかな火炎面が形成され、燃焼による膨張とともに浮力によりゆっくりと上昇していき、また未燃ガスと既燃ガスの境界となる火炎面形状は浮力と粘性の影響により球形から歪められていく。その膨張挙動は $\phi = 0.9$ と 1.2 でほとんど同じだが、時間的な変化が異なっている。図 4-3 (上側) には R1234yf の当量比 $\phi = 1.325$ における燃焼挙動の高速度ビデオカメラ映像を示す。R32 に見られたような明確で滑らかな燃焼面は観測されず、火炎面は軸対称性を失い乱雑に上昇していく。大型燃焼容器での試験状況においては R32 に比べて R1234yf の着火特性が不安定なのは確かであるが、この不安定性は R1234yf の燃焼特性そのものだけでなく、放電エネルギーや電極からの熱損失、電極構造など、何らかの擾乱を与えるきっかけが因子として存在していることも考えられた。そこで、大型燃焼容器を用いてこれらの検証をするのは困難なため、別途小型の球形燃焼容器 (直径 30cm, 容積 15L) や円筒形容器

(直径 10cm, 長さ 20cm, 1.6L) を用いて着火時の影響特性を評価した. 図 4-3 (下側) には小型円筒容器内での観測例を示す. 大型球形容器や 15L の小型球形容器では観測されなかった R32 に見られるような滑らかで明確な燃焼波面が, 小型円筒容器内での観測では捉えられた. また一方で, 高温の既燃ガス領域の発生による浮力の発生と流体的な対流, 遅い燃焼速度の関係により, その燃焼波面は下面側が急激に上昇して燃焼波面上部に接近していく. 密閉容器内での可燃性燃料の燃焼特性は, 燃料の濃度(燃料/空気比)や初気圧, 初期温度などの条件の他, 容器サイズや容器形状, 点火条件などの影響を受ける. 本結果は R1234yf の燃焼波面の形成については容器サイズや容器形状の影響を受ける結果となったが, 映像観察による燃焼速度評価は困難なものの, 容器内圧力変化は計測可能なため, 到達圧力や k_G 値はそのまま評価を行った.

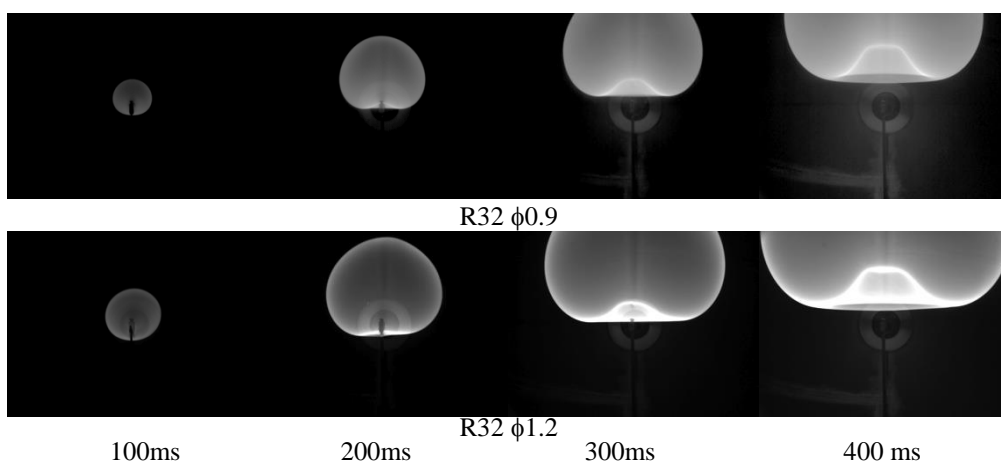


図 4-2 R32 の火炎面の伝搬挙動 (上: $\phi = 0.9$, 下: $\phi = 1.2$)

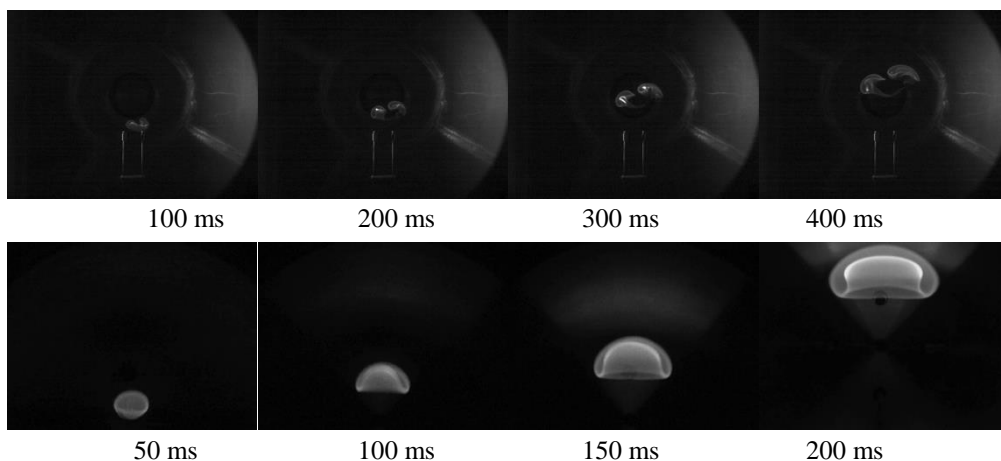


図 4-3 R1234yf の火炎面の伝搬挙動

($\phi = 1.325$, 上: 大球形容器, 下: 小型円筒容器).

圧力変換器で計測した R32 $\phi = 0.8$ から 1.2 までの圧力プロファイルを図 4-4 に示す. 圧力上昇過程は単調だが立ち上がりの初期過程にわずかな盛り上がりが見られる. 火炎面が容器内天井面に到達することによるはね返りによるものと考えられる. 映像解析の結果から鉛直方向の火炎面の天井到達時間を予測することができるが, $\phi = 0.9$ でおよそ 0.5 秒, $\phi = 1.0-1.2$ でおよそ 0.46-0.47 秒後である. 容器内圧力が最高値に達するのは火炎面の容器内天井への到達時間よりずっと後になる. R1234yf の $\phi = 1.2$ から 1.35 までの圧力プロファイルを図 4-5 に示す. $\phi = 1.4$ については本試験条件では明らかな圧力上昇が見られ

なかった。当量比の変化に対してプロファイルの変化は単調な傾向を示しておらず、映像にみられるように R1234yf の不安定な着火特性が影響していると思われるため、今後検討が必要である。全体的な圧力上昇挙動は R32 に比べ非常にゆっくりとしたものであり、ピーク圧に到達するまでに 6 秒以上経過している。φ=1.35 での圧力プロファイル変化は小さく、また φ=1.4 ではもはや圧力変化は観測されず、容器内のほとんどのガスは未燃のまま残ったと考えられる。

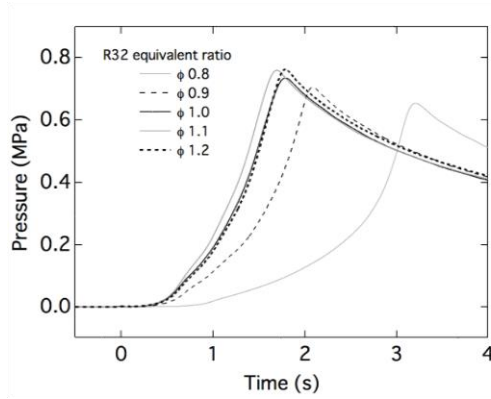


図 4-4 圧力履歴 (R32, φ = 0.8–1.2).

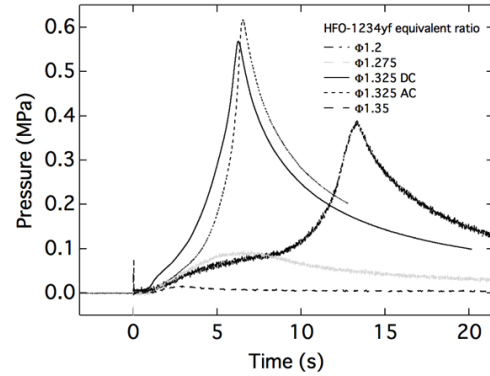


図 4-5 圧力履歴 (R1234yf, φ = 1.2–1.35).

- (b) **火炎速度と燃焼速度** 滑らかな火炎面が観測された R32 に関して水平方向の最大火炎幅と鉛直方向の火炎面上端位置を映像解析し、時間変化からそれぞれの方向の火炎伝播速度 S_f を評価した。鉛直方向の火炎速度は、燃焼の進行とともに既燃側の体積の増加と膨張により浮力が影響するため、水平方向の火炎速度に対して 2 倍ほど早くなる。R1234yf に関しては映像解析による火炎速度評価は適用できなかった。

燃焼速度 S_u は火炎速度 S_f から以下のように評価される (Pfahl *et al.*⁴⁻⁸⁾、

$$S_u = \zeta \frac{\rho_b}{\rho_u} S_f \quad (4-1)$$

は密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、 ρ の添字 u, b はそれぞれ未燃ガスと既燃ガスを示しており、 ρ_u は既知の初期状態の密度で、未知となる ρ_b については Gordon and McBride⁴⁻⁹⁾ による化学平衡計算プログラムにより評価した。 S_f は火炎速度 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) である。水平方向の火炎面最大幅から見積もられる火炎半径 r_f (cm) (Pfahl *et al.*⁴⁻⁸⁾ の広がりから水平方向の S_f を評価するとともに、鉛直方向への S_f も火炎面上端の位置変化から評価した。燃焼速度 S_u は火炎面が球状に膨張することを仮定することで SV 法 (Metghalchi and Keck⁴⁻⁶⁾, and Hill and Hung⁴⁻⁷⁾ により圧力履歴データからも燃焼速度 S_u を以下のように評価できる、

$$S_u = \frac{R}{3} \frac{1}{\zeta} \left[1 - (1-x) \frac{\rho_u}{\rho_b} \frac{P_0}{P} \frac{\gamma_u}{\gamma_b} \frac{1}{\zeta} \right]^{-2/3} \times \zeta \frac{\rho_u}{\rho_b} \frac{P_0}{P} \frac{1}{\zeta} \frac{dx}{dt} \quad (4-2)$$

R は容器内径 (m)、 x は既燃ガスの質量分率、 P_0 は容器内の初期圧 (Pa)、 P は燃焼中の容器内圧力 (Pa)、そして γ_u は比熱比である。各圧力における x と γ_u は化学平衡計算 (Gordon and McBride⁴⁻⁹⁾ により算出できる。R32 については火炎伝播速度 S_f から評価した燃焼速度 S_u と、火炎面の歪みが顕著にならない時間範囲で SV 法により評価した燃焼速度 S_u を、Takizawa⁴⁻¹⁰⁾ が示している参考値と比較して図 4-6 に示した。先に示した通り火炎は球状に膨張して伝播しないが、 S_{u0} を評価することで浮力による影響の度合いを

調査した。火炎伝播速度およびSV法をもとにした燃焼速度は当量比に関して類似の依存性を示すが、SV法により評価した値は若干低く評価された。図4-3および図4-5に示したように、R1234yfに関しては火炎面の伝播挙動が複雑でSV法の適用が困難だったため、 $\phi = 1.325$ に関してのみ燃焼速度 S_{u0} を評価した(図4-7)。Takizawaら⁴¹¹⁾は浮力の影響を排除するため、微小重力下 ($-\mu g$) の燃焼挙動を観測して燃焼速度 $S_{u0-\mu g}$ を評価しており、参考値として図4-7に示した。

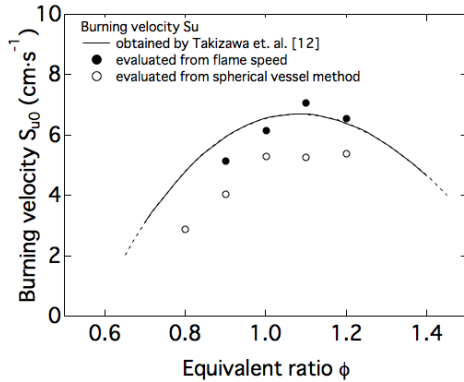


図 4-6 燃焼速度濃度依存性 (R32)

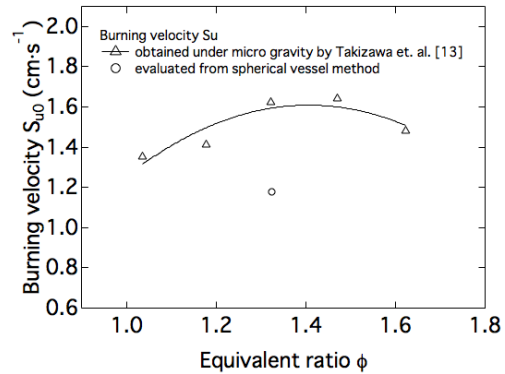


図 4-7 燃焼速度濃度依存性 (R1234yf)

- (c) **水分影響の評価** いくつかのA2L/2L冷媒の燃焼限界への温度と湿度の影響がKondoら⁴¹²⁾によって報告されており、特に夏期には高温多湿となる日本においては非常に重要な課題となる。R32やR1234yfの他R1234ze(E)を評価媒体に加え、球形容器(図4-1)に水分添加機能を追加整備して昇温・湿潤状態でのA2L冷媒の燃焼特性について実験的に評価した。攪拌用のループ経路(図4-1)の途中に設置した露点計による露点温度、および容器内分圧により混合ガス中の湿度を調整した。水分はバブラーにより添加した。R32については $\phi=1.1$ を中心に、R1234yfについては $\phi=1.325$ について乾燥条件(約 10°C – 30°C)と湿潤条件(約60%RH以上 $30\text{--}35^{\circ}\text{C}$)における燃焼試験を行った。またR1234ze(E)については 35°C の昇温状態で乾燥条件および湿潤条件(約50%RH以上)にて実験をおこなった。水分の添加と温度を高温(35°C)に維持することで、R32については乾燥室温環境と同じような燃焼波面を形成して反応が進行する様子が観測され、R1234yfについては室温・乾燥環境では不安定だった火炎面に比べ、はっきりとした火炎面の輪郭が形成される傾向が見られるようになった。また青炎だった燃焼挙動が、炭化水素の燃焼と思われる輝炎を示す傾向が観測された。R1234ze(E)は 35°C に昇温しても乾燥条件では不燃であったが、湿潤条件では燃焼し、明確な燃焼波面を形成して浮力の影響を受けながら上昇していく様子が観測された。図4-8にはR1234ze(E)の圧力プロファイルと P_{\max} 、 K_G 値の当量比依存性を示した。表4-1には昇温・乾燥/湿潤条件での評価結果を示す。

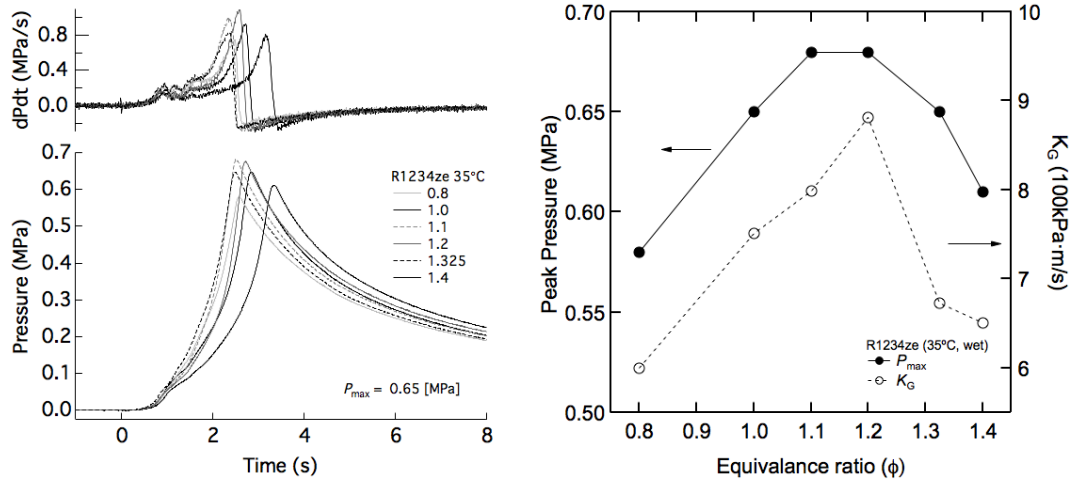


図 4-8 圧力履歴 (R1234ze(E), 35°C 湿潤条件)
 (左: 当量比の圧力への影響, 右: 当量比の P_{max} , K_G への影響).

表 4-1 冷媒の特性のまとめ

Refrigerant	Equivalence ratio (ϕ)	Temperature (°C)	Moisture (wet-dry condition)	P_{max} (100kPa)	K_G (100kPa·m·s ⁻¹)	Flame speed S_f (cm·s ⁻¹)	Burning velocity S_u (cm·s ⁻¹)
R32	1	35	Dry	7.5	7.6	62	7.3
	1.1	35	Dry	7.3	8	65	7.6
		35	Wet (64% RH)	7.2	10.6	71	8.5
R1234yf	1.325	30	Dry	6.2	5.72	—	—
	1.325	35	Wet (78% RH)	6.6	8.22	28	3.4
R1234ze(E)	0.8-1.5		Dry		Not flammable		
	1.2	35	Wet (50%RH)	6.8	8.81	33	4.1
	1.325		Wet (55%RH)	6.5	6.73	37	4.5

(d) **アンモニアとの直接比較** 微燃性冷媒について、大型球形燃焼容器を用いて燃焼試験を実施してきたが、評価された K_G 値などの各種数値をもってどのように安全性の評価をするのが重要となる。ここでは相対評価ではあるが、評価された K_G 値などの各種数値についてより直接的な比較検討を行うため、冷媒としても実績のあるアンモニアとの比較を行うことで微燃性冷媒の安全性について検討を行った。つまり、これまで微燃性冷媒に対して実施してきた試験装置、試験条件を用いてアンモニアの燃焼試験を実施し、燃焼特性やその規模効果について比較検討を行った。

まず、アンモニアの燃焼特性について、最高到達圧や K_G 値の濃度依存性を調査するため、18–28 vol%の濃度範囲において、15Lの小型球形燃焼容器を用いて濃度に対する燃焼特性の変化を調査した。図4-9に高速度カメラによる観察例を示す。図4-10にはアンモニアの圧力プロファイルと P_{max} , K_G 値の濃度依存性を示した。

図より P_{max} , K_G 値はともにおよそ24vol%で最大値を示しており、この濃度値を用いて大型燃焼容器にて燃焼試験を実施した。図4-11に大型燃焼容器にて実施した燃焼試験のアンモニアの圧力プロファイルを示す。計測結果より、アンモニアでの最高到達圧, K_G 値はそれぞれ0.5 MPa, 4.08 100kPa·ms⁻¹と評価された。

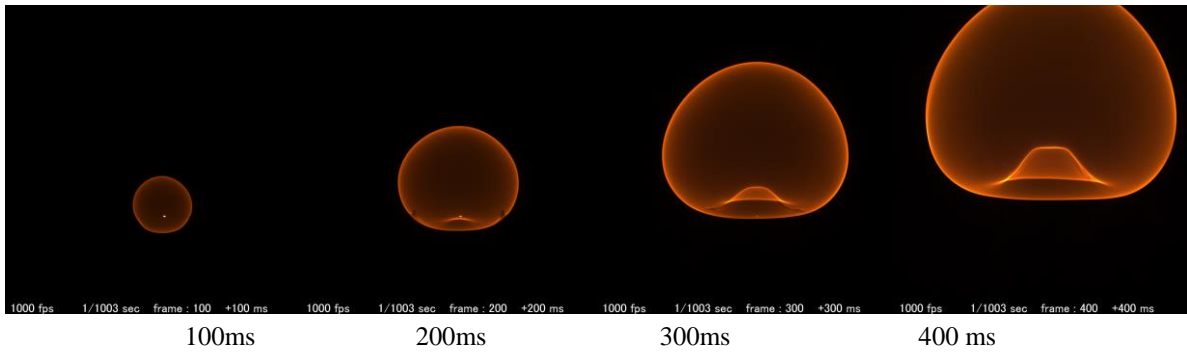


図 4-9 大型球形容器を用いたアンモニアの火炎の伝搬 (24 vol%).

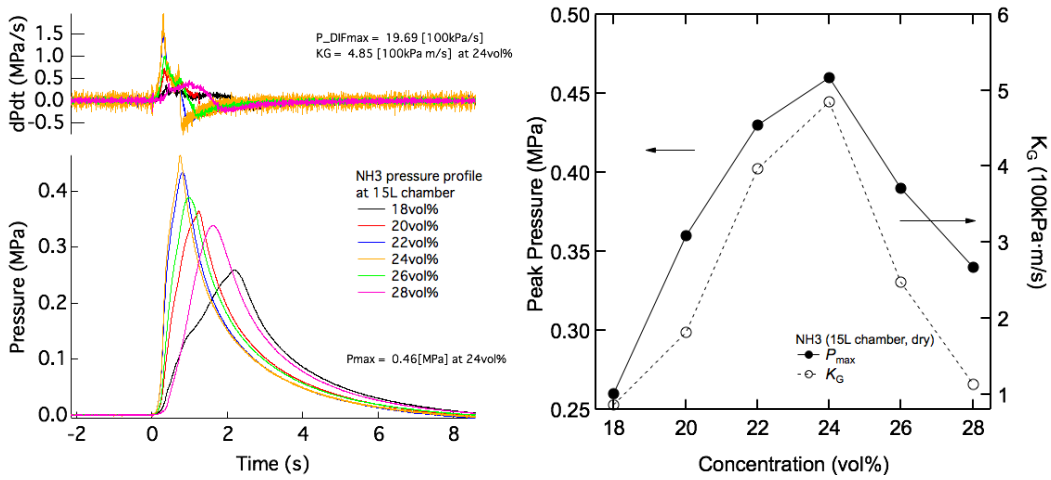


図 4-10 アンモニアの圧力履歴 (室温, 15L 球形容器)
(左: 当量比の圧力への影響, 右: 当量比の P_{max} , K_G への影響).

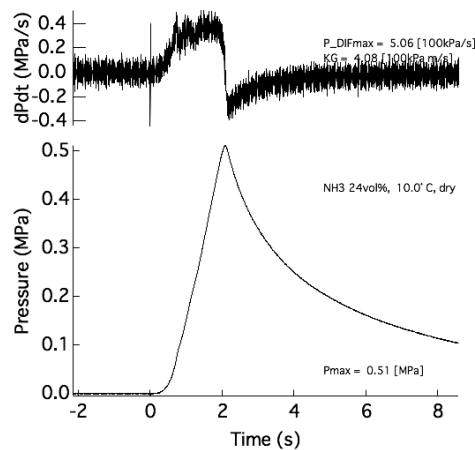


図 4-11 圧力履歴 (アンモニア, 524L 球形容器)

- (e) K_G 値の規模効果 これまでに15L小型燃焼容器, 524L大型燃焼容器を用いて実施した燃焼試験の結果から, K_G 値の規模効果について検討を行った. 図4-12に参考値とともに試験容器容量と K_G 値の関係を示す. 水素やプロパンなど規模効果を持つことが示されている一方, 微燃性冷媒および比較対象のアンモニアとともに, 今回評価した容器容量範囲においては K_G 値について目立った規模効果は見られなかった. また,

燃焼試験で圧力計測とともに実施している高速度カメラによる映像観察においても、火炎面の皺構造の発現や乱流燃焼への遷移の兆候は見られなかった。

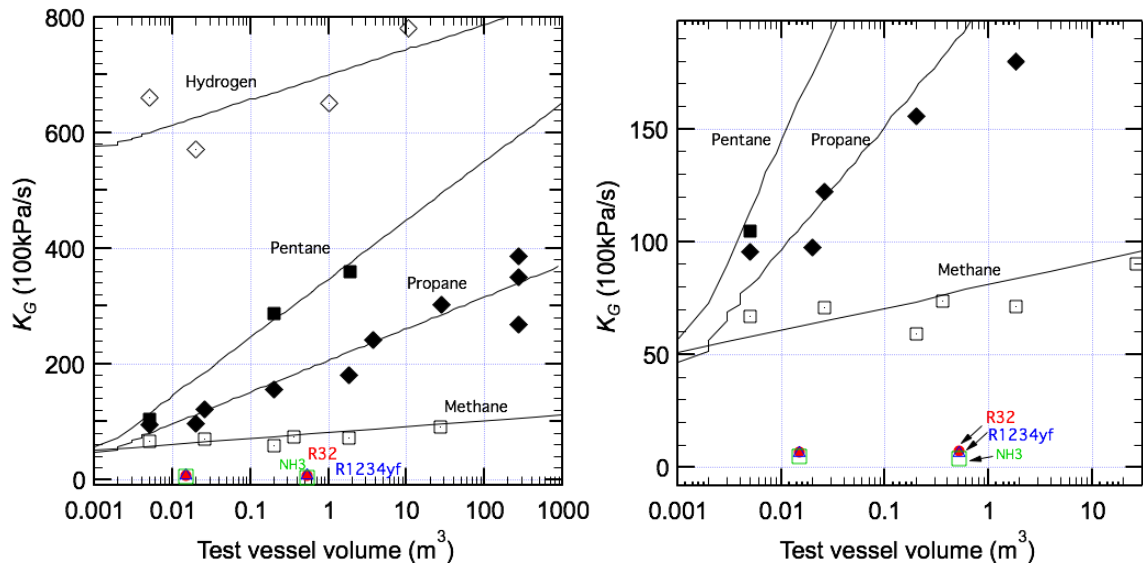


図 4-12 球形容器体積が K_G に与える影響

4.3 爆発特性評価

ここでは、前章までの燃焼特性評価結果の他、自然発火温度についても調査を行い、爆発強度指数 K_G を基準にして多媒体との比較により微燃性冷媒の爆発の発生や強度特性について検討した。また、実規模での爆発強度影響を評価するため、前節で実施した実験をもとに K_G 値から圧力上昇速度と開口率（部屋の隙間）に応じた放散圧力の関係について調べた。

4.3.1 K_G 値

はじめに指標として参考としている K_G 値についてあらためて述べる。 K_G 値は爆発の激しさを示す指標となっており、内部で爆発する虞れのある容器や配管等において、爆発によって生じる異常な圧力から機器や配管の損害を防ぐために備え付けられる爆発放散口（ベント）の放散口面積の設計によく用いられている。

K_G 値は ISO6184-2(1985)⁴⁴⁾ や NFPA68(2007)⁴⁵⁾ において定義されており、以下のように記述される、

$$K_G = \frac{P}{\rho} \frac{dP}{dt} \frac{1}{P_{max}} \times V_{vessel}^{\frac{1}{3}} \quad (4-3)$$

P は圧力(100kPa), t は時間(s), V_{vessel} は燃焼容器容積(m^3)である。 K_G 値が大きくなると爆発の激しさが増すことになり、例えば爆発放散口の設計ではより大きな面積が必要になる。本研究で現在のところ評価されている K_G 値について、到達圧力 P_{max} や、火炎伝播速度 S_f , 燃焼速度 S_u と併せて参考値とともに表 4-1 に示した。4.2.3 節で示したように、圧力の時間変化が最大となるのは上昇する燃焼波面が容器天井で反射した後であるため、 K_G 値の物理的解釈には注意が必要だが、実用上は爆発放散口の設計などにおいて活用可能と判断できる。現在は密閉容器内で評価される K_G 値とそれに基づく爆発放散口の設計指針を参考にし、 K_G 値と放散口を設けた場合の放散圧力(P_{red} : reduced pressure) の関係を調査して爆発強度の低減効果について検討を行っている。

4.3.2 燃焼特性の整理と他媒体との比較

火炎や電気放電などの他にも、高温表面なども着火源になりえる。可燃性ガスと空気の混合ガスが高温表面に接触した場合に発火する最低の温度を発火温度というが、その温度は測定方法により異なる。自然発火温度は可燃物が空气中で加熱されると、着火源がなくとも自ら発光を伴い発火する限界の温度である。その温度は混合気の濃度、圧力、加熱速度や接触物の状態等によって異なるため、特有の物性値ではなく、密閉・開放、試験容器の体積など、計測条件に依存した値となる。ガスや蒸気其自然発火試験方法としては EN14522 試験法、また防爆電気機器では IEC60079-20-1 に分類法と試験法が規定されているが、ここでは試験方法として ASTM E659 試験法に基づく試験装置を適用し、微燃性冷媒の自然発火温度を計測し、また比較のためアンモニアについても自然発火温度を計測して比較を行った。また、接触物の存在による影響も調査した。

a) 自然発火温度の計測

図 4-13, 図 4-14 に試験概要図を示す。本試験では燃焼前後にフッ化水素、アンモニアなどの有害ガスを取り扱うため、自然発火試験装置（吉田製作所製 ASTM 法自然発火試験器）はドラフト装置の中に納め、さらに試験装置はグローブボックスで囲み、排出される有害ガスは移動式排ガス処理装置（型番：TAKACHIHO ZHAZARD SWEEPER TM-HS-F/TM-HS-N）で除害した。本試験では、反応容器として 500mL のパイレックス製丸底フラスコを用いたが、アンモニアは自然発火温度が高温のため石英製の丸底フラスコを用いた。E659 試験法ではアルミ箔等でフラスコを包むことで温度むらをなくすとしているが、アルミの融点は 660°C 程度のため、本研究では銅箔（厚さ 0.035mm）で包んで温度むらとともに炉からの赤熱発光を防いだ。

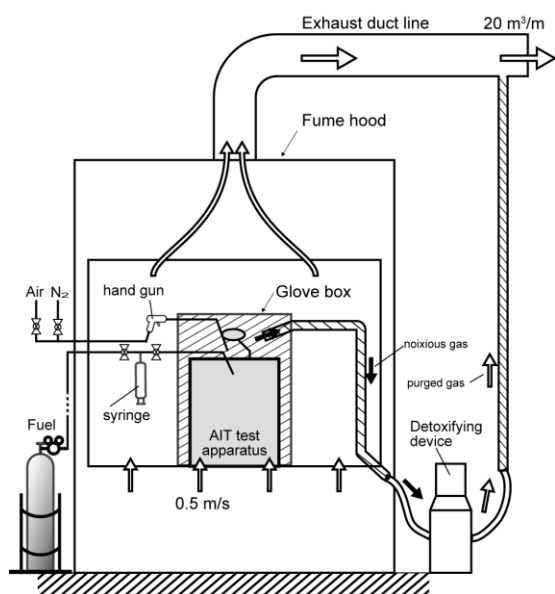
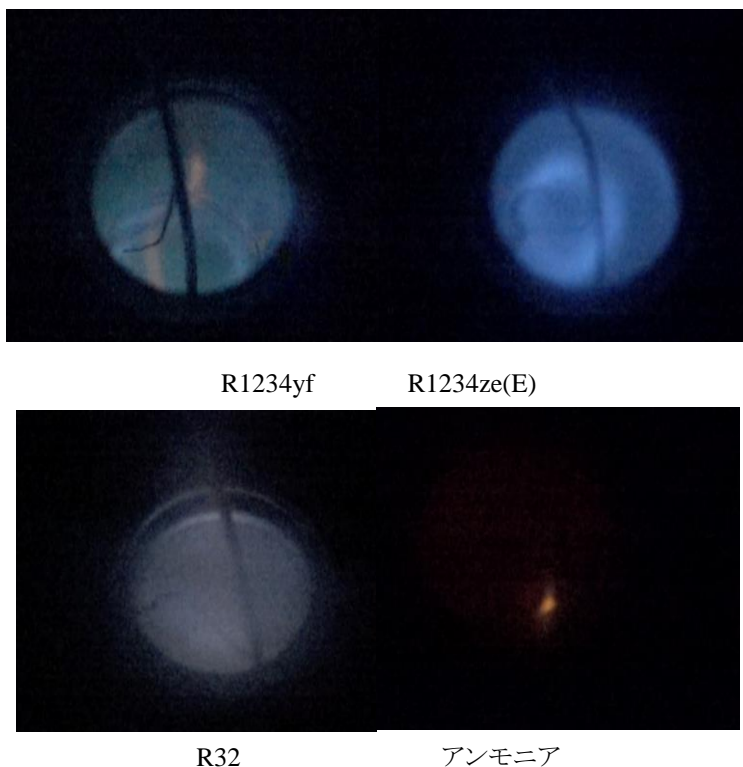


図 4-13 ASTM E659 試験装置



図 4-14 ASTM E659 試験装置 (左: プランジャ系, 右: 銅箔で包んだフラスコ).

R1234yf, R1234ze(E), R32, アンモニアそれぞれについて実施した試験について, 図 4-15 には目視とともに撮影した発火時発光例の写真を, 図 4-16 は計測した温度履歴を示す. R1234yf, R1234ze(E)については, 試験温度が下がるにつれて急激な温度上昇が現れるまでの遅延時間も延びていき, R1234yf については 357°C, R1234ze(E)については 356°Cにおいて目視による発火が確認されたが, それら以下の試験温度では, 目視による発火および急激な温度上昇は確認されなかった. R32 については発熱までの遅延時間は R1234yf や R1234ze(E)ほどに温度依存性がみられず, 発火する場合はおおよそ 10 秒程度で判定ができた. R32 は 478°Cにおいて目視による発火判定ができた. 一方, アンモニアについては一般に自然発火温度として 651°Cが報告されているが, このような温度域での試験では, 加熱炉が赤熱してバックグラウンドが明るくなってしまう影響で, 目視による発火判定が困難であった. アンモニアの分解温度付近では, シリンジで試料投入すると同時に試料投入ノズル口から直ちに発光が確認された. 温度履歴をみても, 投入とともに直ちに発熱していることが明らかであったが, 観測される温度上昇は 20-30°C程度であった. 試験温度が下がるとともに目視による発光判断は困難で, 温度上昇もわずかな上昇となり, 本試験でのアンモニア発火点の判断は困難であった. 本評価結果を各種冷媒の SDS 参考値とともに次節の表 4-2 にとりまとめた.



R1234yf

R1234ze(E)

R32

アンモニア

図 4-15 自己着火の写真例

(左上 : R1234yf, 右上 : R1234ze(E), 左下 : R32, 右下 : アンモニア) .

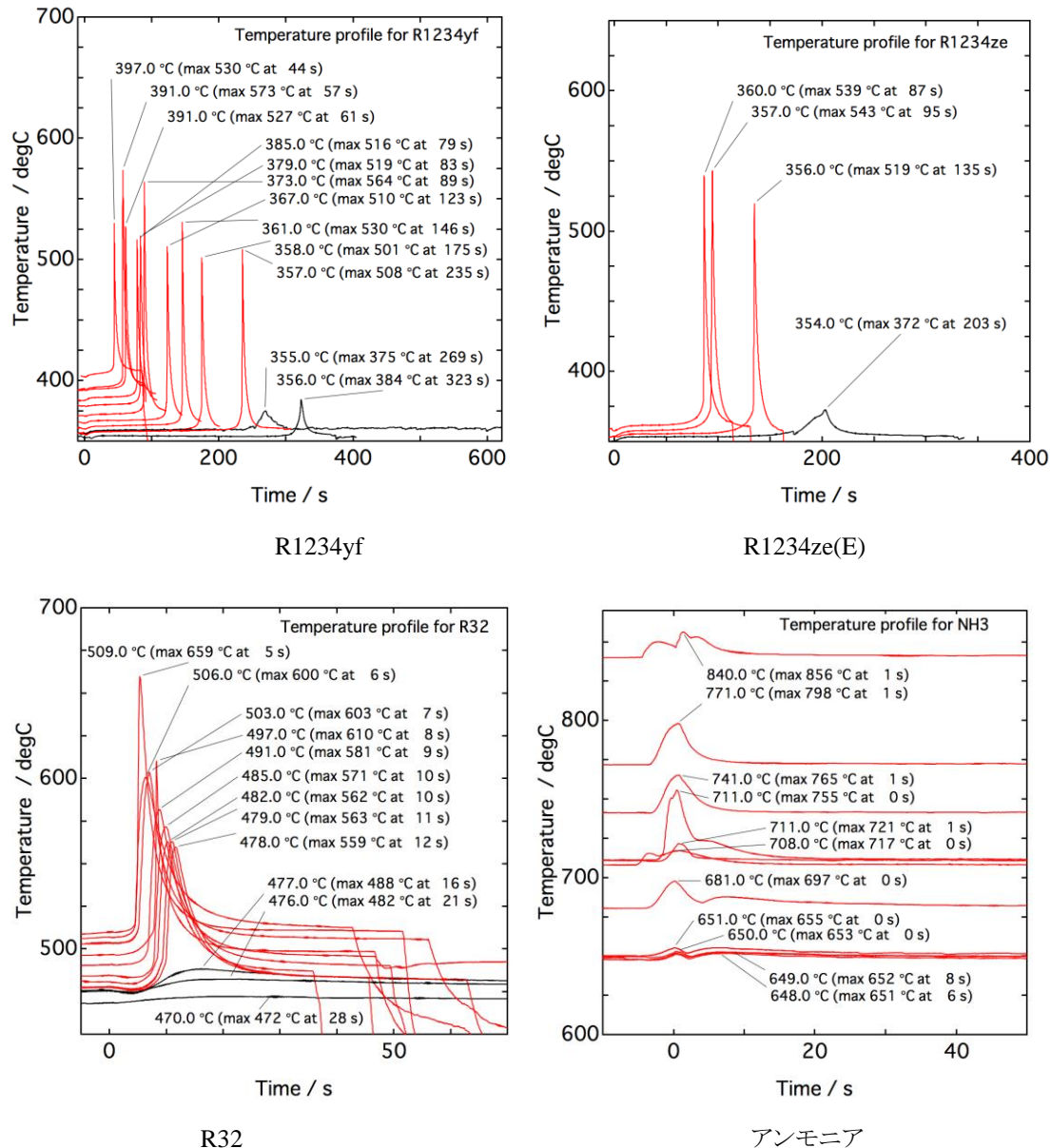


図 4-16 ASTM E659 温度履歴
(左上 : R1234yf, 右上 : R1234ze(E), 左下: R32, 右下: アンモニア) .

b) 燃焼特性の整理

A2L/2L 冷媒の実用化と安全利用のため、爆轟を含む爆発の潜在的リスクを評価しておくことは重要である。しかし、現段階では A2L/2L 冷媒に関して報告はほとんど見られないため、間接的ではあるが、他の可燃性ガスについて最小着火エネルギー (MIE) や爆轟範囲、 K_G 値などを調査して比較できるようにしておくのは有効と考えられる。いくつかのガスについて、空気との混合ガスの到達圧力 P_{max} , K_G , 燃焼範囲、爆轟範囲 (Mannan⁴⁻¹³)等をまとめたものを表 4-2 に示す。表は K_G 値を基準にしてならべたものになっており、到達圧力、燃焼速度は関連する傾向が見られる。R32 や R1234yf, R1234ze に関しては、 K_G 値に関する限りは低い値となっており、例えば NFPA68⁴⁻⁵)に示されているアンモニアの値(10)と同等かそれ以下となっている。この結果をもとに、直接比較のためサブテーマ①微燃性冷媒の燃焼爆発影響評価にて微燃性冷媒について実施した燃焼試験と同一の試験条件でアンモニアの燃焼試験を実施した、 P_{max} , K_G 値ともに報告値よりも低い値が評価されたが、同時に評価した K_G 値のスケール効果については微燃性冷媒もアンモニアも評価した範囲では依存性は確認されていない。また前節で自然発火について評価した結果も併せて表記した。

表 4-2 P_{\max} , K_G などの特性値の比較

Flammable Material	P_{\max}	K_G	Burning velocity ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Flammability limits (%)	Detonation limits (%) ^{*3}		Autoignition Temperature ($^{\circ}\text{C}$) ^{*6}
	(100 kPa)	(100 $\text{kPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			Confined tube	Unconfined	
Acetylene	10.6 ^{*1}	1415 ^{*1}	166 ^{*2}	2.5—80.0 ^{*3}	4.2—50.0		305
Hydrogen	6.8 ^{*1}	550 ^{*1}	312 ^{*2}	4.2—75.0 ^{*3}	18.3—58.9		400
Ethylene			80 ^{*2}	2.70—36.0 ^{*3}	3.32—14.70		490
Diethyl ether	8.1 ^{*1}	115 ^{*1}	47 ^{*2}				
Benzene			48 ^{*2}	1.3—7.9 ^{*3}	1.6-5.55		562
Ethane	7.8 ^{*1}	106 ^{*1}	47 ^{*2}	3.0—12.4 ^{*3}	2.87—12.20	4.0-9.2	515
Propane	7.9 ^{*1}	100 ^{*1}	46 ^{*2}	2.1—9.5 ^{*3}	2.57—7.37	3.0-7.0	450
Butane	8.0 ^{*1}	92 ^{*1}	45 ^{*2}	1.8—8.4 ^{*3}	1.98—6.18	2.5-5.2	405
Ethyl alcohol	7.0 ^{*1}	78 ^{*1}		3.3—19.0 ^{*3}	5.1—9.8		
Methanol	7.5 ^{*1}	75 ^{*1}	56 ^{*2}				
Methane	7.1 ^{*1}	55 ^{*1}	40 ^{*2}				
R32	7.6 [†]	11 [†]	9 [†]	13.5—26.9 ^{*7}			478 [†] (530 ^{*9})
R1234ze(E)	6.8 [†]	9 [†]	5 [†]	5.95—12.7 ^{*8}			356 [†] (365 ^{*9})
R1234yf	6.6 [†]	8 [†]	3 [†]	5.4—13.5 ^{*8}			357 [†] (405 ^{*9})
Ammonia	5.0 (5.4 ^{*1})	5 [†] (10 ^{*1})	7.2 ^{*4}	15—28 ^{*5}			— (651 ^{*9})

*1 Ref. (NFPA68, 2007), Table E.1 (0.005 ft³ sphere; E = 10 J, normal condition). *2 Ref. (NFPA68, 2007), Table D.1.

*3 Ref. (Mannan, 2005), Detonation limits obtained for confined tube.

*4 Ref. (ISO/DIS 817, 2010)

*5 Ref. (NFPA325, 1994)

*6 Ref. (Mannan, 2005), Table 16.4

*7 Ref. (Kondo, 2014), at 35°C and 50%RH condition

*8 Ref. (Kondo, 2012), at 35°C and 50%RH condition

*9 Ref. (From SDS sheets provided by manufacturer)

† This work. (at 35°C and wet condition).

4.3.3 K_G をもとにした緩和圧力評価

A2L/2L 冷媒を安全に空調機器に適用するため、前節で実施した実験室規模の基礎的評価結果をより現実的な状況下での燃焼・爆発安全性評価に適用していく必要がある。爆発強度と人体や構造物への影響の関係について K_G 値によるベント設計の概念を用いて検討した。例えば、一般的な部屋では完全な密閉空間とならず、隙間等の存在による圧力低減効果をベント設計の考えに基づいて検討した。図 4-17 はベントによる圧力の低減効果を説明している。前節で実施したような密閉容器内で観測される圧力 P のプロファイルや到達圧 P_{\max} に対し、ベント口の存在により開放される効果により緩和圧力プロファイル P_{red} や緩和最高到達圧力 $P_{\text{red,max}}$ 、ベント作動圧力 P_{stat} で特徴づけられる。ベント面積 A は K_G 値と目的とする $P_{\text{red,max}}$ から様々なモデルを用いて算出される (VDI-3673⁴⁻¹⁴; BS EN 14491⁴⁻¹⁵; Siwek⁴⁻¹⁶)。一般的に K_G 値をもとに算出されるベント面積 A_v はベントの開口形状が円形、正方形に近い形状が推奨され、開口形状が長方形の場合は長辺(L)と短辺(D)の比が $L/D < 2$ となることが望ましい (NIIS-TR-No.38⁴⁻¹⁷)。一般の室内で考えられる開口部は L/D が 2 を超えることも考えられるため実験的に有効なベント面積 A_v を評価した。前節の燃焼実験では球形の密閉型燃焼容器を用いたが、本実験ではより現実的な室内を模擬する一辺 50cm の立方体燃焼容器を準備した。図 4-18, 4-19 に使用した燃焼容器の概要と写真を示す。容器は厚さ 3mm のステンレス製容器で、前面は厚さ 10mm の PMMA 製の観測用窓となっている。容器側面部にはベントによる基準緩和圧力を評価するための丸穴を設け、冷媒の漏えい時は容器外に冷媒が漏れないように薄いビニルラップで開口部を封じた。容器天井部には冷媒ガスの導入・排出用および濃度計測用の配管を設けた。前節の密閉型燃焼容器は真空排気が可能なため、冷媒ガスの濃度調整は分圧により決定したが、本装置では一定量の冷媒を 5-10g/min 程度の速さで漏洩させ、濃度計測用の FT-IR 分析装置で濃度計測を行った。冷媒の漏えいは容器内床面に設置した攪拌機で攪拌しながら行って予混合状態とし、容器内床面から 15cm の高さで冷媒濃度を計測した。同じく容器内には床面から 15cm の

位置に放電着火用の電極を設置してあり、前節と同じく直流放電により着火を行った。容器天井部には、容器の圧力が設計耐圧以上になった場合の安全弁としてブリーザー弁を2箇所設けてある。放電と同時にトリガーをかけ、放電エネルギー計測、容器内圧力・温度計測、および高速度カメラによる映像観察を行った。

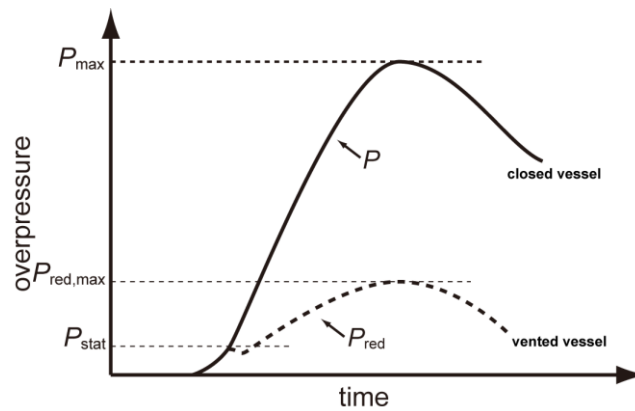


図 4-17 ベントによる圧力低減効果

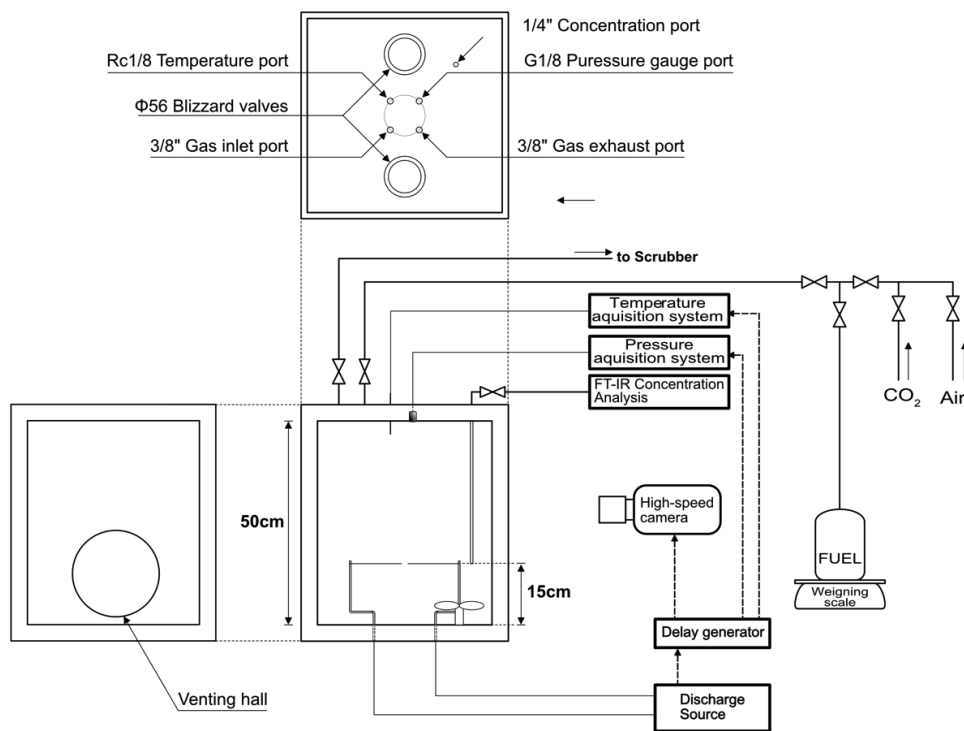


図 4-18 ベント効果の実験装置の系統図

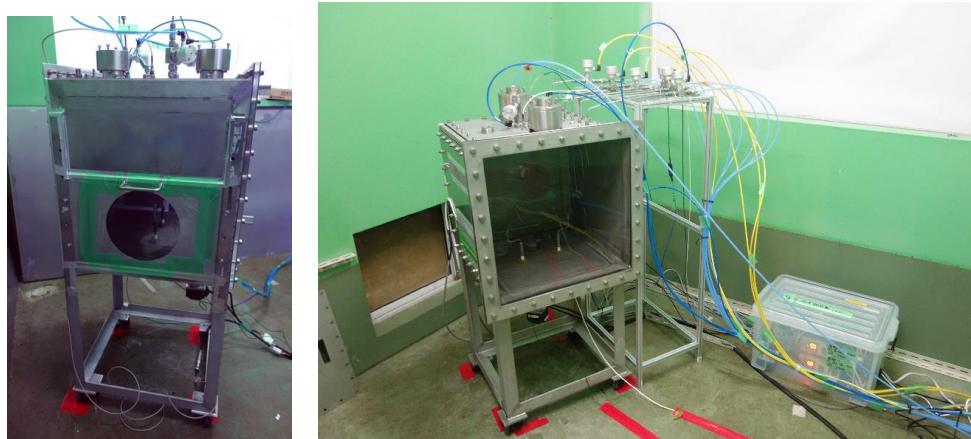


図 4-19 ベント効果の実験装置写真

図 4-20 に丸形状ベントの存在下での R32 の燃焼挙動を高速カメラで観察した例を示す。着火後は次第に浮力の影響によりその形状を歪めながらゆっくりと上昇し、燃焼とともに高温の生成ガスが発生して容器内の圧力が上昇することでベント開口部からガスが押し出され、燃焼面はその流れの影響を受け始める。ベント形状による圧力変化への影響に注目して整理し、容器内上昇圧力の低減効果(P_{red})を評価した。一方 K_G については、密閉容器で指針に従い⁴⁾⁵⁾計測されるべき値のため、ベント口をもつ半密閉容器で計測する本節では疑似的な値 K_G^* として取り扱った。図 4-21 には、円形状の面積を変えた条件で計測した P_{red} , K_G^* の計測例を示す。開放部面積が減少するにつれ、 P_{red} , K_G^* ともに上昇していくのがわかる。 P_{red} が 25 kPa あたりで飽和するのはブリーザー安全弁の作動によるものだが、圧力変化の最大値は容器内圧力が P_{red} に到達する前に最大になるため K_G^* はそのまま評価した。様々なベント形状・面積について R32 の容器内濃度を変化させて計測した結果をまとめ、図 4-22 および図 4-23 に P_{red} , K_G^* の容器内濃度依存性とベント口面積依存性についてまとめてそれぞれ示した。密閉容器での分圧による濃度計測に比べ、本計測環境では容器内濃度(n)の制御が高精度にできないこと、また特に燃焼限界付近では濃度変化による圧力変化 $\Delta P/\Delta n$ が大きくなるため評価値にばらつきが出やすくなる。評価の結果、円や矩形（正方，横長，縦長）などのベント口形状の違いによる緩和効果への影響ははっきりと現れなかったが、 P_{red} については円形での値を他形状の値が大幅に超えることはなく、 K_G^* についても同程度となる傾向が見られた。ベント面積 25cm² についての例を図 4-24 に示す。R1234yf についても容器内濃度をほぼ 10vol% に固定して計測を行い、その評価結果を図 4-25 および図 4-26 に示した。

NFPA68⁴⁾⁵⁾では強度が低い容器に対するベント面積 A_v (m²)について以下のように示している、

$$A_v = \frac{C \cdot A_s}{P_{red}^{1/2}} \quad (4-4)$$

C はベント変数、 A_s は容器内表面積(m²)である。変数 C は評価ガスの燃焼速度をもとにした数式もしくは表から決定することができる。このようにして本項で使用した容器について評価したベント面積を図 4-27 に示す。本実験で得られるベント面積—緩和圧力の関係を見ると上式から得られる A_v があれば十分に緩和圧力を満足することが示される。

これまでの評価では漏えいした A2L/2L 冷媒が当量比 1 を中心に均一に混合した状態を想定しており、いわば最悪の漏えい条件で評価を行っている。粉じん爆発に対する爆発放散面積の算出においては、対象となる装置空間内の限られた場所のみ粉じんが局在して存在する場合には必要放散面積の低減が期待でき、爆発を起こす粉じんが空間内で占有する割合から必要最小放散面積を算出する例もある⁴⁾¹⁷⁾ 本評価においても、実際の漏えい事故などにおいては鉛直方向に濃度勾配をもち、空間の一部のみが可燃域を形成すると考えられ、これにより放散面積を小さく見積もることが期待できる。

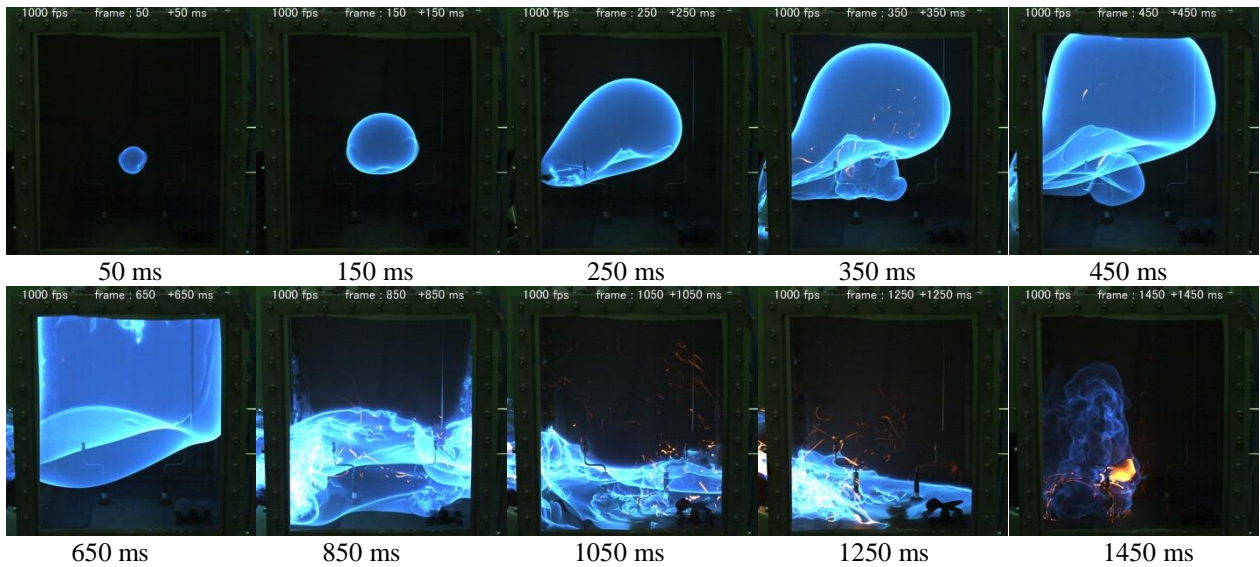


図 4-20 $\phi 212$ mm の円形ベントを有する矩形容器内の R32 の火炎伝搬 ($\phi = 1.54$)

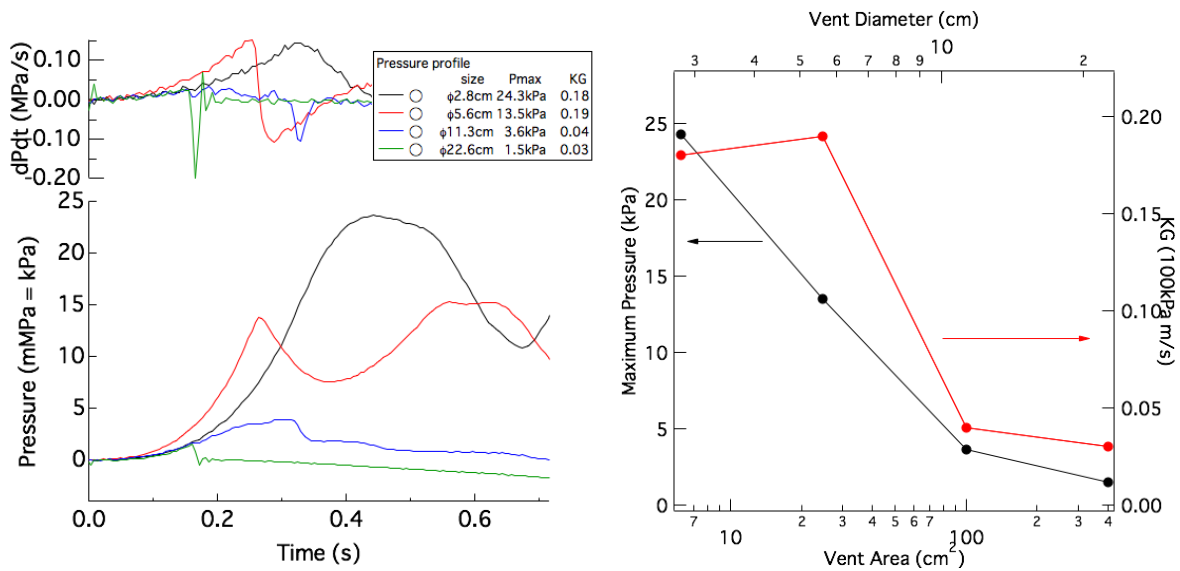


図 4-21 ベントによる圧力低減効果の実験結果 R32.
(左: 圧力履歴に与える当量比の影響, 右: 当量比が P_{max} and KG^* に与える影響).

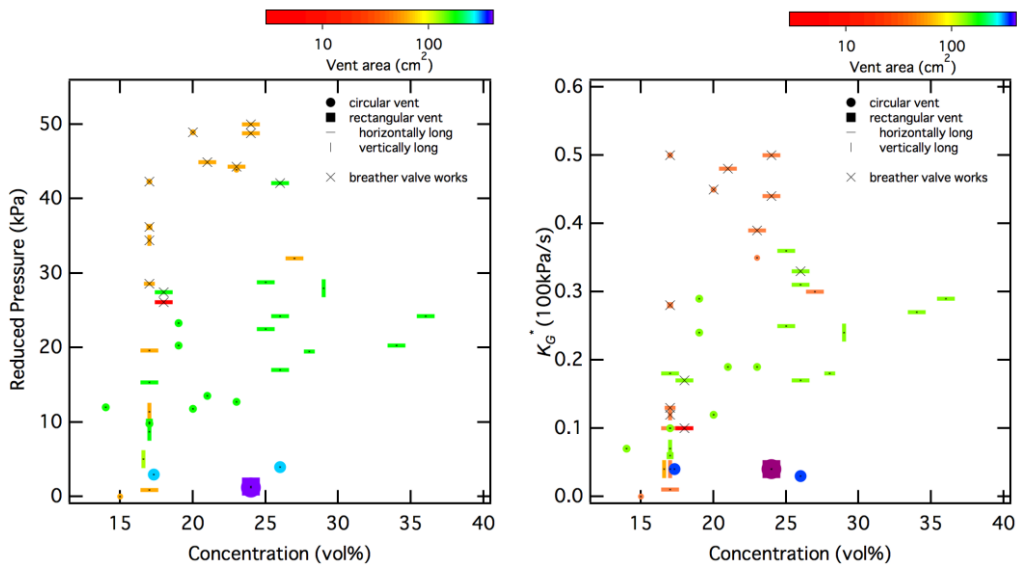


図 4-22 ベントを有する矩形容器内の濃度が圧力減少と K_G^* に与える影響 (R32).
(左: 濃度が P_{red} に与える影響, 右: 濃度が K_G^* に与える影響).

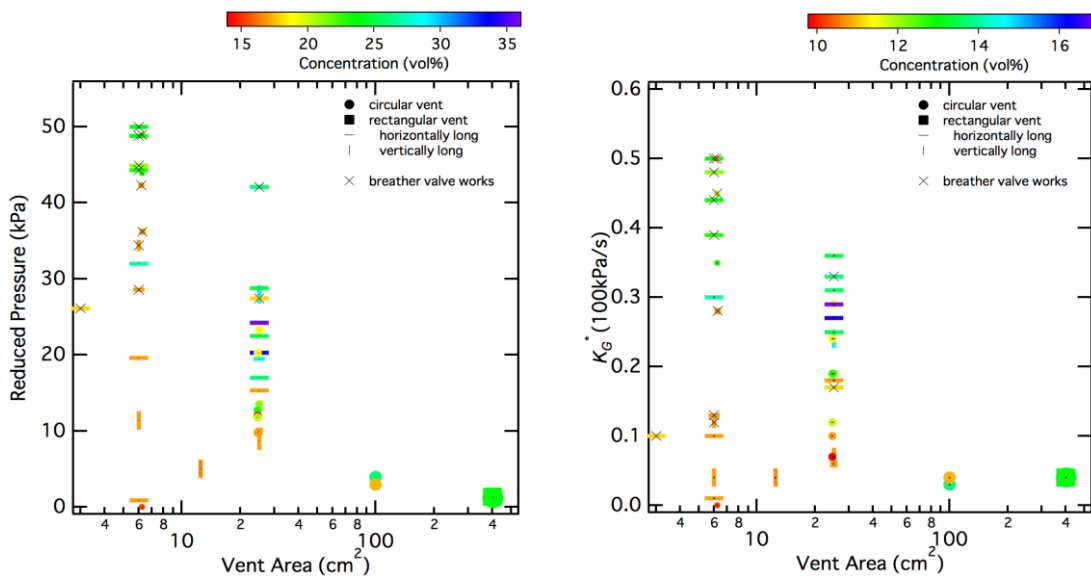


図 4-23 ベントを有する矩形容器内のベント面積が圧力減少と K_G^* に与える影響 (R32).
(左: ベント面積が P_{red} に与える影響, 右: ベント面積が K_G^* に与える影響).

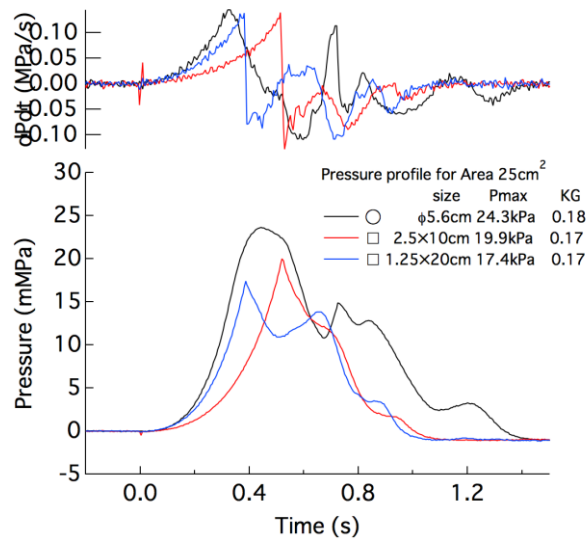


図 4-24 ベント形状が圧力履歴に与える影響 (ベント面積: 25cm², R32).

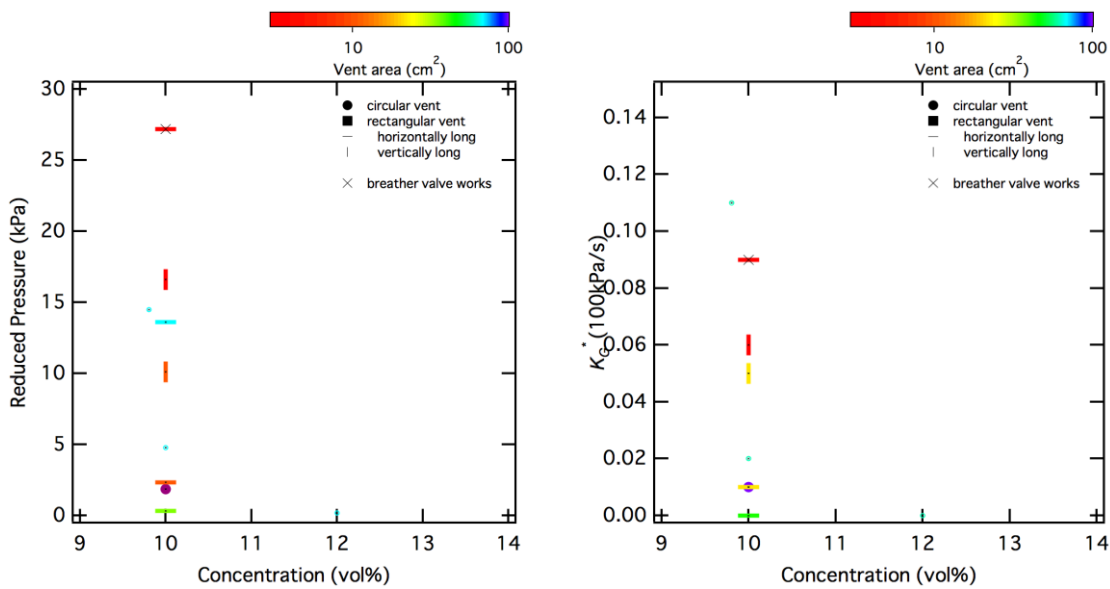


図 4-25 ベントを有する矩形容器内で濃度が圧力減少と K_G^* に与える影響 (R1234yf).
(左: 濃度が P_{red} に与える影響, 右: 濃度が K_G^* に与える影響)

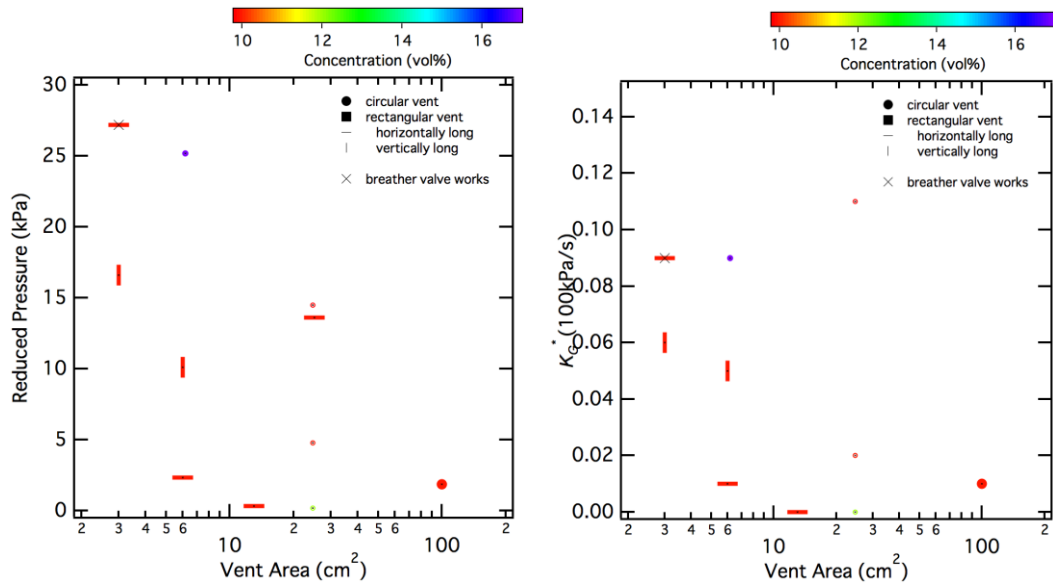


図 4-26 ベントを有する矩形容器内のベント面積が圧力減少と K_G^* に与える影響 (R1234yf).
(左: ベント面積が P_{red} に与える影響, 右: ベント面積が K_G に与える影響)

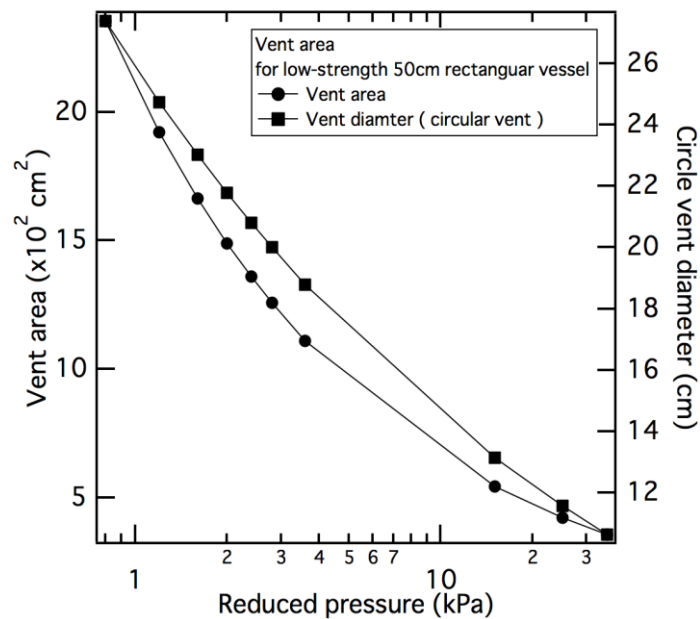


図 4-27 強度が弱い容器に必要なベント面積(L50cm 矩形容器).

4.4 実験を再現する数値シミュレーションの検討

事故シナリオに基づく安全性評価では、漏えい空間（部屋）、漏えい位置や漏えい規模（漏えい量、濃度分布）、また着火源の位置などを想定した評価が必要になる。事故シナリオごとの実験の実施、とくに実規模での実験的な評価は困難なことを考えると、数値シミュレーションの適用は今後期待される評価手段となる。そこで燃焼解析数値シミュレーションの実現について検討した。実験は燃焼・爆発反応を取り扱っているため、数値シミュレーションではこれを再現するための燃焼モデルが必要となる。

燃焼反応の数値シミュレーションに関してはさまざまな媒体について研究報告例はあるが、微燃性冷媒の燃焼反応についての報告例は少ない。微燃性冷媒の燃焼の総括反応式は最も簡単に燃焼反応を考えることが

できるが、微燃性冷媒はとくに燃焼速度が遅く、総括反応をもとにした燃焼モデルは再現できたとしても適用可能なのは非常に限定された条件に限られると思われる。微燃性冷媒の燃焼に寄与する素反応を記述して詳細反応モデルを構築することで様々な温度や圧力での反応も記述することが可能になるが、例えば水素でも詳細反応モデルは20もの素反応を記述する必要がある、微燃性冷媒にあたっては素反応の数、関与する化学種ともに取り扱う数は膨大なものとなり、何らかのモデルの簡略化が必要になる。素反応ごとに反応速度の評価も含め微燃性冷媒の簡略化した化学反応モデルの構築には時間がかかり、今後開発されてくる新規冷媒も考えると、まずは柔軟に対応可能なアプローチが別途必要になると考えられる。

ここでは予混合燃焼を前提とし、乱流効果も考慮可能なモデルとして、予混合燃焼モデルのうち乱流中の火炎を薄い火炎片 (laminar flamelet) の集まりと考え、火炎面を表現可能なスカラー変数を以下の方程式で輸送するモデルを採用する。

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D + D_{sgs}) \frac{\partial c}{\partial x_i} + S_T \left(\frac{\partial c}{\partial x_i} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right)^{1/2} \quad (4-5)$$

S_T は乱流燃焼伝播速度で、層流燃焼速度 S_L と以下の関係を持つ。

$$\frac{S_T}{S_L} = 1 + C_{pq} \left(\frac{u_{sgs}}{S_L} \right)^n \quad (4-6)$$

u_{sgs} は Subgrid 速度スケール、 C_{pq} はモデル定数である。

ここでスカラー変数 c を反応の進行度 (propagation variable) とみなし、 $c = 0$ を未燃ガス (燃焼前)、 $c = 1$ を既燃ガス (燃焼後) として $c = 0.5$ の等値面を燃焼面として捉える。化学種 i の濃度は c を用いて以下のように記述する。

$$Y^i = c Y_{burn}^i + (1 - c) Y_{unburn}^i \quad (4-7)$$

燃焼シミュレーションで上記変数 c を輸送させ予混合燃焼解析を可能にする。層流燃焼速度には、実験で評価された層流燃焼速度を直接与えることにより実際の燃焼挙動をシミュレーションに反映させることになる。また例えばテーブル型の濃度場と層流燃焼速度の関係を与えることで、濃度場に勾配が存在する場合の燃焼挙動を評価することも可能となる。

万が一乱流の効果が懸念される場合にも対応可能なモデルとして、フラクタル火炎伝播モデル⁴⁻¹⁸⁾の適用も行った。フラクタル火炎伝ばモデルは次式で表される。

$$S_T = \max \left\{ S_L, \frac{3}{2} c_g \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right) \frac{S_L^2}{\sqrt{\kappa}} t^{1/2} \right\} \quad (4-8)$$

上式は層流燃焼速度 S_L 、モデル定数 c_g の他に、ガスの膨張率 (ρ_u/ρ_b)、層流燃焼速度 (S_L) および熱拡散率 (κ) といった可燃性ガスの物性で示されている。この乱流燃焼モデルでは着火直後、層流燃焼速度 S_L で火炎が進行し、フラクタル火炎伝ばモデルによる S_T が S_L を上回ったときに S_T で火炎が加速される (図 4-28)。

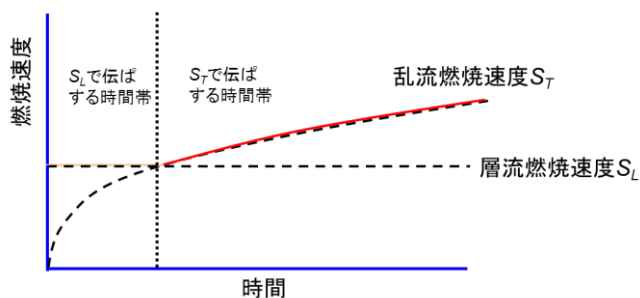


図 4-28 燃焼モデルにおける燃焼速度の扱い

さらに、選択拡散効果を考慮した燃焼モデル^{4,9)}についても適用を行った。燃料気体と支燃性気体の拡散速度に差があり、選択拡散現象が生じる場合、火炎に変形が発生すると火炎に供給される燃料と支燃性気体の濃度が場所によって変化するため、火炎各部分の燃焼速度に差異が生じ、火炎は不安定になる。選択拡散効果を考慮した平均局所燃焼速度モデルが提案されている。燃料の種類や当量比などによらず乱流燃焼速度特性を包括的に整理できる可能性を示している。

このように構築した燃焼モデルを流体解析コードに適用し、直径 1m の球状容器の中で空気と微燃性ガスの子混合状態に着火した場合の数値シミュレーションを実施した。解析モデル図を図 4-29 に示す。容器内部空間は燃料と空気の子混合ガスを仮定し、燃料としては R32 を想定して実験で評価される R32 の燃焼速度を燃焼モデルに与えた。また実験で見られるように燃焼速度の遅さから浮力の影響を受けるのは明らかのため、シミュレーションでは重力項を取り扱い z 軸下方向に重力を与えた。

実験での放電着火位置と同じ位置に高温域を設定し、着火と同時にシミュレーションを開始した。解析結果例として図 4-30 に容器断面の温度分布および燃焼反応後 ($c=1$) の既燃ガス分布の時間経過を示す。時間発展とともに、燃焼面が浮力の影響を受けながら天井方向に発展していく様子が得られた。実験でみられるような球形に拡大する燃焼面に対して発達する燃焼面底部の内側へのくぼみ形状の再現など、容器内部での流れ場と燃焼面の移流の関係をさらに追及すれば、整合性がさらに向上することが期待できる。

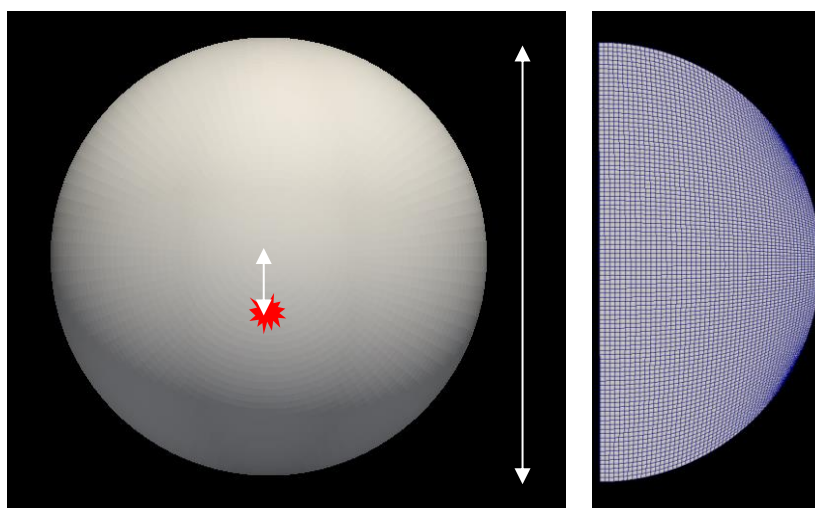


図 4-29 解析モデル

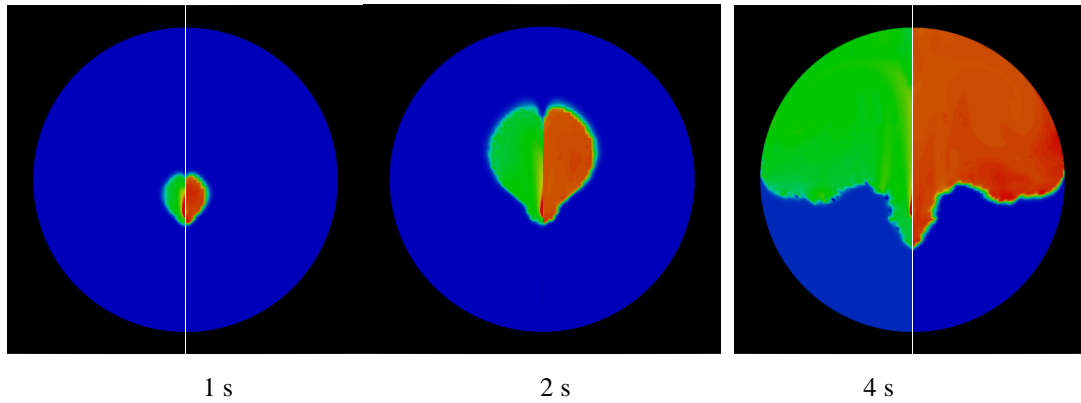


図 4-30 計算結果の時間経過例
(左半球: 温度, 右半球: 燃焼ガス分布).

4.5 まとめ

A2L 冷媒の安全利用に向けた燃焼・爆発によるフィジカルハザード評価を行うため、A2L 冷媒の基礎的な燃焼特性を行った。

- 1) 密閉型球形燃焼容器を整備して浮力を考慮した微燃性冷媒の燃焼試験を実施した。圧力計測や映像観察により、昇温・湿潤環境や遅い燃焼速度による浮力の効果などの影響のもとで火炎伝播速度や燃焼速度、 K_G 値、到達圧力 P_{\max} などを評価して燃焼特性を整理し、基礎データを取得した。
- 2) 実規模での燃焼を想定し 15L 燃焼容器での試験結果との比較により、爆発強度指数のスケール効果を検討した。試験した範囲内では試験した範囲内では、火炎面の皺構造の発現や乱流燃焼への遷移の兆候は見られず、また爆発強度指数のスケール依存性は見られなかった。
- 3) R1234ze(E)など、燃焼特性が温度・湿度に依存する媒体について燃焼特性について調査した。R32 は高温・湿潤条件にかかわらない燃焼性を示すが、R1234yf, R1234ze(E)は高温・湿潤条件依存性を示し、特に R1234ze(E)は室温・乾燥条件では不燃となる一方で、可燃性を示すようになる。
- 4) 産業界でよく用いられ、また燃焼特性が知られているアンモニアについて、これまで実施してきた試験設備を用いて試験し、微燃性冷媒の燃焼特性と直接的な比較を行った。これまで評価してきた条件においては、R32, R1234yf, また高温・湿潤条件での R1234ze(E)についても、アンモニアと同程度の燃焼性であることが示された。
- 5) 実験を再現する燃焼モデルの検討を行い、数値シミュレーションに導入した。実験が困難な実規模での燃焼挙動の評価や、今後開発される新規冷媒にも本アプローチを適用していくことが可能と思われる。
- 6) 密閉ではなく、部分的に開口部を持つ半密閉容器での燃焼試験を行い、容器内圧力の緩和効果について調査した。開口部面積に応じた緩和圧力を評価し、予混合条件では一定の開口面積がない限り許容圧力を越える。実際の漏えいシナリオから最大漏えい量および濃度勾配から可燃領域を推定し、開発した燃焼モデルを用いた燃焼シミュレーションにより到達圧力を評価・検討することが可能である。

記号

A_v	geometric vent area (m^2)
A_{eff}	effective vent area (m^2)
E_f	effective venting efficiency (%)
K_G	deflagration index for gases ($100 \text{ kPa}\cdot\text{m/s}^2$)
P	pressure (Pa)
P_{\max}	maximum pressure (Pa)
P_{red}	reduced pressure (Pa)

dP/dt	rate of pressure rise (100 kPa/s)
S_f	flame speed (cm/s)
S_u	fundamental burning velocity (cm/s)
S_{u0}	fundamental burning velocity at ambient condition (cm/s)
t	time (s)
T	temperature (K)
V_{vessel}	vessel volume (m ³)
ϕ	equivalence ratio
ρ	density (kg/m ³)

参考文献

- 4-1) Directive 2006/40/EC, Directive 2006/40/EC of the European Parliament and the Council of 17 May 2006 relating to emissions from air-conditioning systems in motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EEC, Official Journal of the European Union, L **161**:12-18.
- 4-2) ASHRAE, 2010, Designation and Safety Classification of Refrigerants, ANSI/ASHRAE Standard 34-2007 Addendum ak.
- 4-3) Takizawa, K., et al., 2009, Flammability Assessment of CH₂=CF₂: Comparison with Fluoroalkenes and Fluoroalkanes, Journal of Hazardous Materials, 172, pp. 1329–1338.
- 4-4) ISO 6184-2, 1985, Explosion Protection Systems– Part 2: Determination of Explosion Indices of Combustible Gases in Air.
- 4-5) NPFA, 2007, Guide for Venting of Deflagrations 2007 Edition, NPFA 68.
- 4-6) Metghalchi, M., and Keck, J. C., 1980, Combustion and Flame, 38, pp. 143–154.
- 4-7) Hill, P. G., and Hung, J., 1988, Laminar Burning Velocities of Stoichiometric Mixtures of Methane with Propane and Ethane Additives, Combustion Science and Technology, 60, pp.7–30.
- 4-8) Pfahl, U. J., Ross, M. C., and Shepherd, J. E., 2000, Flammability Limits, Ignition Energy, and Flame Speeds in H₂–CH₄–NH₃–N₂O–O₂–N₂ Mixtures, Combustion and Flame, 123, pp. 140–158.
- 4-9) Gordon, S., and McBride, B. J., 1994, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, I. Analysis, NASA RP-1311.
- 4-10) Takizawa, K., Takahashi, A., Tokuhashi, K. Kondo, S., and Sekiya, A., 2005, Burning Velocity Measurement of Fluorinated Compounds by the Spherical-Vessel Method, Combustion and Flame, 141, pp. 298–307.
- 4-11) Takizawa, K., Tokuhashi, K., Kondo, S., Mamiya, M., and Nagai, H., 2010, Flammability Assessment of CH₂=CF₂ (R-1234yf) and its Mixtures with CH₂F₂ (R-32), 2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, Tokyo, P 08.
- 4-12) Kondo, S., Takizawa, K., and Tokuhashi, K., 2012, Effects of Temperature and Humidity on the Flammability Limits of Several 2L Refrigerants, Journal of Fluorine Chemistry, 144, pp. 130–136.
- 4-13) Mannan, S., 2005, Lee's Loss Prevention in the Process Industries, 3rd ed., Elsevier, 2, p.1383.
- 4-14) VDI-3673, 2002, Pressure Venting of Dust Explosions, Verein Deutscher Ingenieure.
- 4-15) BS EN 14491, 2012, Dust Explosion Venting Protective Systems, British Standards Institution.
- 4-16) Siwek, R., 1996, Explosion Venting Technology, J. Loss Prev. Process Ind., 9, 81–90.
- 4-17) NIIS-TR-No.38, 2005, Technical Recommendations of the National Institute of Industrial Safety, ISSN 0911-8063 (in Japanese).
- 4-18) Tomizuka, T. et al., 2013, “A study of numerical hazard prediction method of gas explosion”, International Journal of Hydrogen Energy, 38, pp.5176-5180.
- 4-19) Kido, H. and Nakahara, M., A model of turbulent burning velocity taking the preferential diffusion effect into consideration, JSME International Journal Series B, Vol.41, No.3 (1999), pp. 666-673.

5. リスク評価手法について

5.1 はじめに

微燃性冷媒のリスクアセスメントに関しては、図 5-1 に示すように 2011 年から日本冷凍空調工業会（以下、日冷工）のワーキングで R32 や R1234yf 等を対象に推進してきた。リスク評価手法について以下に記述していく。

		2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
冷凍空調学会 微燃性冷媒リスク 評価研究会		◎ 10/27 ★ PR 発足	★ PR レポート ● 神戸シンポ	★ PR レポート	★ PR レポート ● 神戸シンポ	★ PR レポート ● ● セミナー, ICR	● 神戸 シンポ
日冷工	ミニスプリット I (家庭用 AC)	→ 課題抽出	→ 壁掛け リスクアセスメント	→ ◎ まとめ マニュアル	→ ◎ ハウジング リスクアセスメント	→ ◎ まとめ	
	ビル用マルチエ アコン	→ 課題抽出	→ リスクアセスメント	→ 安全策・安全要求	→ GL 作成	→ ◎ まとめ	
	チラー	→ 課題抽出	→ リスクアセスメント	→ 見直し	→ GL 作成	→ ◎ まとめ	
	ミニスプリット II (店舗用 AC)		→ 課題抽出	→ リスクアセスメント	→ 施工マニュアル	→ ◎ まとめ	

図 5-1 各 SWG のリスクアセスメント日程

図 5-2 に示すように最初にハザードを従来冷媒と R32 とで比較した。その結果、「可燃性」と「着火性」に起因する燃焼性について明らかに従来冷媒と異なることから、燃焼性のリスクアセスメントを大学や研究機関主導の NEDO プロジェクトで実施することになり日冷工の各ワーキングも加わった^{5-1),5-2)}。ただし「火炎接触による有害フッ素の影響」やサービスや移設、廃棄時の「ディーゼル爆発」のハザードについては NEDO プロジェクト開始時に科学的知見が少なく差異の有無が明確でなかった。そのため東京大学（以下、東大）や産業技術総合研究所機能化学研究部門（以下、産総研）で基礎検討を行い、ハザードの差が明確になれば必要なリスクアセスメントを実施することとしていた。現時点で後の 2 点のハザードについては従来冷媒と

新冷媒 R32 の危険性		圧力 (50°C)		毒性	
R410A	2.96MPa	R410A	人体に無害		
R32	3.04MPa	R32	人体に無害		
可燃性		着火源		ディーゼル爆発	
R410A	不燃性	R410A	裸火、電気スパーク、静電気未着火	R410A	発生
R32	微燃性	R32	裸火で着火の恐れあり 電気スパーク、静電気未着火	R32	発生
		火炎接触反応			
		R410A	有害なフッ酸が発生		
		R32	有害なフッ酸が発生		

図 5-2 新冷媒と従来冷媒のハザードの比較（冷媒 R32 の例）

大きな差がないことが明らかとなっており、課題はあるが社会的な容認があると考えられる。よって新たなハザードを設定してリスクアセスメント検討を行なう計画はない。

また着火源の実際的な評価に関しては諏訪東京理科大（以下、諏訪東理大）で実施し、その結果を順次リスクアセスメント評価に反映している。次節から可燃性のリスクアセスメントをどのように実施してきたかを中心にリスク評価手法として説明する。

5.2 リスクアセスメントの概要

次に具体的に「可燃性」に関するリスク評価をどのように進めたのかを図 5-3 の IEC の Guide51, 2014 年版⁵⁻³⁾の反復改善プロセスに基づくリスクアセスメント項目に、今回実施した「可燃性」の検討項目を a から t として追記する形で示した。詳細については 5.4 節で説明するが、追加した項目を列挙し簡単な説明を加える。

- a. 「評価対象範囲の選定」
家庭用エアコンや家庭用マルチエアコン等を区分して評価することを決定。
- b. 「リスクアセスメント手法の選択」
FTA, ETA, FMEA などの評価手法から可燃性評価に適した FTA 評価を選択。
- c. 「ライフサイクルのステージ選択」
エアコン製品を製造から輸送、使用、サービス、廃棄までどのようなステージに分けて評価するかを選択。製造のステージは各社で個別評価。
- d. 「エアコン設置環境の設定」
選択されたエアコン製品がどのような環境、具体的には設置空間やそこでの換気設備の有無などを調査し、リスクアセスメントすべき環境を決定。
- e. 「ハザード（危害の程度）の予測」
今回は可燃性による危害に絞ったがそれ以外の怪我傷害や感電、爆発などのハザードが生じないかを確認。
- f. 「許容値（事故発生確率）の設定」
エアコン製品で社会的に容認できる危害の発生頻度を設定。
- g. 「冷媒漏洩率と漏洩速度、漏洩量、初期漏洩濃度の調査設定」
エアコンサービス会社等の調査または漏洩した配管等のサンプル抽出などの解析から漏洩速度、漏洩量に関する値を設定し、また漏洩箇所とその初期漏洩濃度を設定。
- h. 「可燃時間空間体積（可燃時空積）の計算」
d 項で設定されたエアコン環境において、g 項で設定された漏洩の速度、量、濃度に基づき CFD シミュレーション等を行い可燃時間空間体積を算出。
- i. 「着火源の予測と着火性の区別」
文献や大学、産総研での実験検討から冷媒に対する着火源として電気接点やライターフリント、静電気

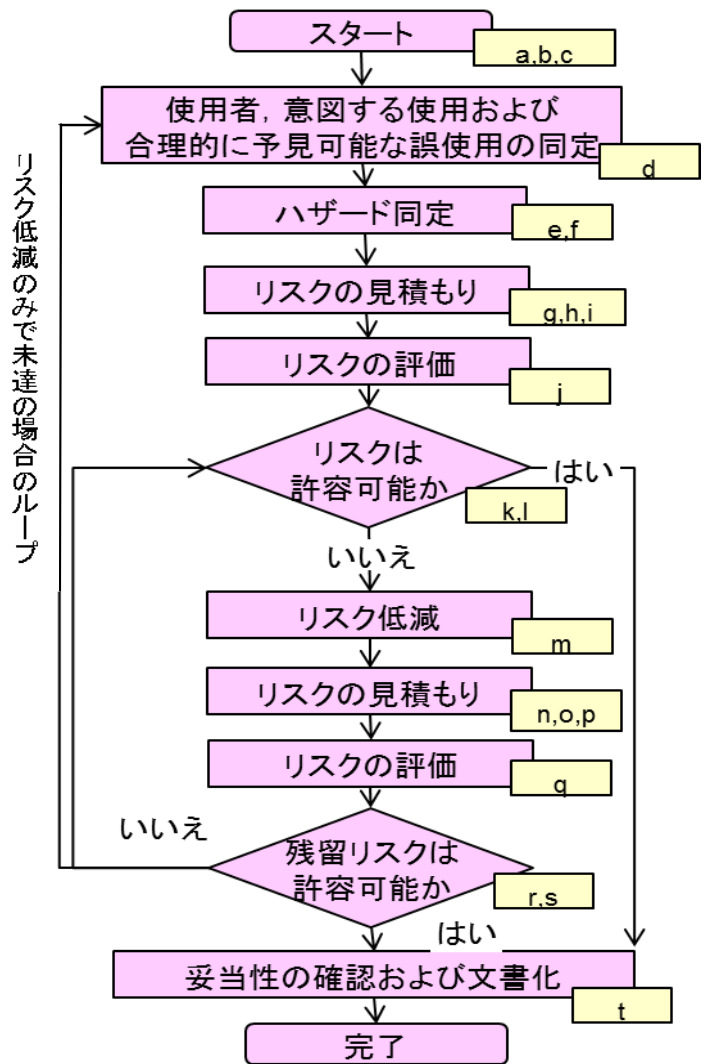


図 5-3 IEC の Guide51 の反復改善プロセスに基づく可燃性リスクアセスメント項目

などのスパークとなるか、ろうそくやマッチ類、燃焼機器等の裸火となるかを明確化しそれによる着火性の程度を区別。

以上の項目が整えば具体的に FTA を作成しリスクの評価を行う。

j. 「FTA 作成と精査」

燃焼性の FTA 作成では、着火源の存在と可燃域生成空間の存在は独立したツリーで構成し、最終段階でその確率を掛け合わせて事故発生確率を算出し内容を精査。

k. 「R-Map での評価」

算出した事故発生確率と危害の程度から R-Map 上で許容可能かどうかを評価。

l. 「リスク許容可否の判断」

上記評価に基づきリスク許容可否が確認できれば、リスク評価を終了。

許容できない場合は、以下のリスク低減策の立案と再検討を行う。

m. 「リスクの低減」

リスク低減の手段として機器の改良、安全手段の導入、マニュアルの整備、必要ならば法規制を考案、もしくは事故発生確率の値を大きくしている項目の見直しによるリスク低減。

n. o. p. 「FTA 要素の見直し」

リスク低減策に基づく g, h, i の要素の見直し。

q. 「FTA 再作成と再精査」

m のリスク低減で考案実施する項目を適切なツリーの位置に付け加え、FTA を再作成、事故発生確率を再算出し内容を精査。

r. 「R-Map での評価」

前述 k に同じ。

s. 「リスク許容可否の判断」

前述 l に同じ。

この m から s のループを FTA の計算値が許容可能となるまで、もしくは危害の程度が許容できるまで何度も繰り返す。許容できれば製品化を行う。

t. 「製品化（要件確認）と市場フォロー」

製品化に対しては FTA で設定した項目や m のリスク低減で考案した項目が正確に反映されることが必須、また設定した項目が市場で反映されているかをフォロー。

なお NEDO プロでは実験検討を推進する組織とリスクアセスメントを行う組織は、お互いに連携を図っているが、実験検討部分に時間がかかる場合もあり、実験結果が得られればリスクアセスメントの数字を見直し、精度を上げる形で進化した。

詳細については次節から記述する。

またリスクアセスメントに関しては一般的に FTA, ETA, FMEA などを使用することが知られている。今回の燃焼性のリスクアセスメントは「着火源の存在」と「可燃域の生成」が同時に存在した場合に発生する事象であり事象間の独立性が高い点、また発生確率の計算が容易である点から FTA を使用した。

なお、日冷工で 2001 年に実施

発生頻度	5	(件/台・年) 10 ⁻⁴ 超	頻発する	C	B3	A1	A2	A3	A領域
	4	10 ⁻⁴ 以下 ~10 ⁻⁵ 超	しばしば発生する	C	B2	B3	A1	A2	
	3	10 ⁻⁵ 以下 ~10 ⁻⁶ 超	時々発生する	C	B1	B2	B3	A1	B領域
	2	10 ⁻⁶ 以下 ~10 ⁻⁷ 超	起りそうにない	C	C	B1	B2	B3	
	1	10 ⁻⁷ 以下 ~10 ⁻⁸ 超	まず起り得ない	C	C	C	B1	B2	C領域
0	10 ⁻⁸ 以下	考えられない	C	C	C	C	C		
				無傷	軽微	中程度	重大	致命的	
				なし	軽傷	通院加療	重傷 入院治療	死亡	
				なし	製品発煙	製品発火 製品焼損	火災	火災 (建物焼損)	
				0	I	II	III	IV	
				危害の程度					

図 5-4 消費生活用品に用いる R-Map

された「プロパン使用ルームエアコンリスクアセスメント」⁵⁻⁴⁾も FTA をベースに行っているが、当時は R-Map の概念がまだ完全に確立されておらず以下に記述する事故発生確率（許容値）の設定は行われなかった。特に安全性の判断については、図 5-4 に示すリスクマップ（R-Map）の考え方を参照している⁵⁻⁵⁾。

リスク評価の対象機器の範囲の設定については、日冷工内の製品別委員会の設置状況から当初はミニスプリットエアコン（家庭用エアコン）、ビル用マルチエアコン、チラーの区分とした。実際には冷凍空調機器のバリエーションは広く、対象機器の範囲を明確に区分することは難しいが、製品仕様、設置状況、使用状態、設置業者やサービス業者の形態、廃棄時の取扱い（法規制の有無）などが明らかに異なる場合は、その区分を設けてそれぞれリスク評価を行うことが必要である。ただしあまり細かく区分すると 1 品 1 様のリスク評価を実施することになり、作業が煩雑になることやリスクアセスメントを実施する場合に共通のデータが使用できない問題が生じる。また細かく区分した場合には、対象製品の流通台数が少なくなり、後に記述する許容値が大きくなり実際の製品で安全が十分に確保されない懸念が残る。

5.3 エアコン各機器とそのリスク評価状況

図 5-5 にエアコンの製品の概略図を、表 5-1 にミニスプリットエアコン（以下家庭用エアコン）、パッケージエアコンとビル用マルチエアコンおよびチラー等の機器の差を比較した。



図 5-5 エアコン製品の概略図

表 5-1 エアコン製品の概要

エアコン形態	SWG名	製品馬力	冷房能力	冷媒量	主な設置形態 (外機:内機)
家庭用シングル	ミニスプリット (I)SWG	0.8~3HP	2.2~8.0kW	0.5~2kg	1台:1台
ハウジングマルチ		1.5~3HP	3.6~8.0kW	2~4kg	1台:2~4台
店舗用PAC	ミニスプリット (II)SWG	1.5~12HP	3.6~30kW	2~19kg	1台:1~4台 各室内機は同一空間
ビルマルチ	ビルマルチ SWG	5~60HP	14.0~168kW	5~100kg	1~3台:2~64台 各室内機は個別空間
GHP	GHP SWG	↑	↑	3~200kg	↑ (エンジン駆動)
チラー	チラー-SWG	3~500HP	7kw~	1~ 7000kg	1~120台:水冷で室内

また図 5-6 にリスクアセスメントでのリスク評価状況を簡単にまとめた。壁掛けの家庭用エアコンでは漏洩率、漏洩速度、空間体積、着火源の選定を行い初期的な FTA を行い、その後 NEDO プロジェクトの進捗で得られた知見を元に着火源と時空積を見直した。見直した結果、壁掛けの家庭用エアコンでは得られた値が R-Map で許容可能なリスク以下となりリスクアセスメントをストップした。ただし家庭用の床置きエアコンでは当初、許容可能な値に成らず、日本での使用実態や家屋特性の見直しを行い攪拌対策なども含めリスクアセスメント繰り返した結果、R-Map で許容可能なリスク以下となった。

パッケージエアコンとビル用マルチエアコンでも同じように漏洩率、漏洩速度、空間体積、着火源の選定

を行い初期的な FTA を行ったが、半地下や狭小地設置、カラオケ店など設置状況によって R-Map で許容可能なリスク以下には成らず対策を立案し、マニュアルや自主基準の作成により許容値以下とする方向である。チラーについては、設置されている機械室の容積に比べ冷媒封入量が多く、漏洩時の可燃時空積が大きくなる場合があり、さらに大電気容量の電磁開閉器など着火源が傍にあることから R-Map で許容可能なリスク以下にならない。そのため可燃濃度を形成しないことが必要な対策となり、従来から設置が義務付けられている機械換気の必要要件の明確化が考えられる。またその措置を担保するため、現行法規制の整合を確認中である。

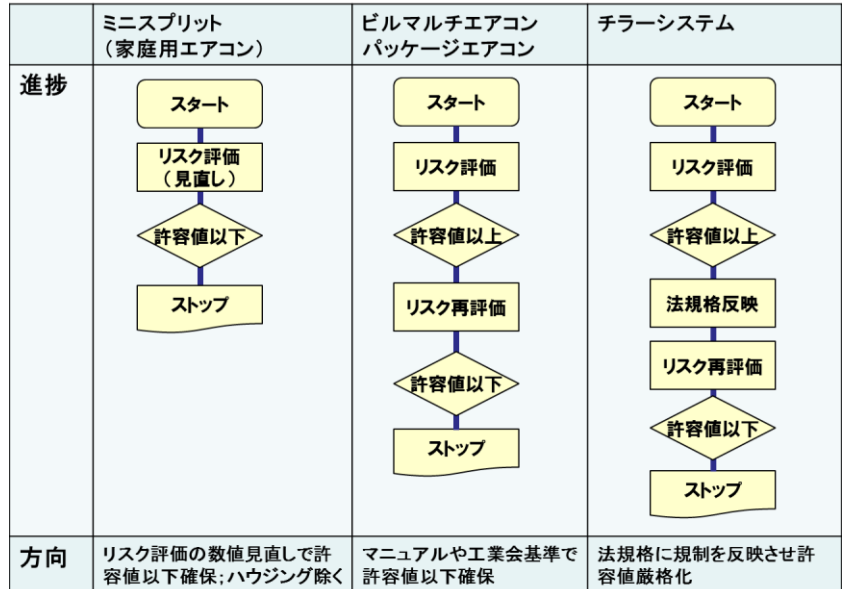


図 5-6 機器のリスク評価状況

このように機器の種類によって冷媒量や可燃時空積が大きくなるに従い、対策は機器本体での対策から、ガス警報や拡散ファン、排気ファンと外部機器での対策へ移ることが必要となり、またその対策を担保するために自主性に任せられるマニュアルや日冷工基準から、強制力のある法規制へ移らざるをえない。

以下ミニスプリットエアコン（家庭用エアコン）やビル用マルチエアコン、チラーなどで FTA の繰り返し評価や対策の差はあるが、リスク評価の基本は機器間で大きくは変わらないので、家庭用エアコンを中心に上述したリスク評価の各項目を説明する。内容的には昨年までの 3 報のプログレスレポートからリスク評価の手法の部分を抜き書きする形となるので、内容の重複についてはお許しいただきたい。順序としては家庭用エアコンでのリスク評価手法を記述したのちに、ビル用マルチエアコンやパッケージエアコン、チラーとの差異を説明する。なおビル用マルチエアコンやパッケージエアコン、チラーに独自のリスク評価手法については別途に章を設けて説明する。

5.4 家庭用エアコンでのリスク評価手法

5.4.1 リスクアセスメントの事故発生確率(許容値)

リスクアセスメント結果の事故発生確率（以下許容値）については、独立行政法人製品評価技術基盤機構（NITE）の資料を参照した。図 5-7 にその概要を示す⁵⁻⁶⁾。

事故発生の許容値については、化学工業など施設規模が大きく、各種法規制によって管理されている場合には 10^{-5} 程度の許容値となる。一方、家電製品のように一般消費者が比較的メンテナンスを考えずに使用する場合の許容値は「家電製品の重大事故発生確率の目標は 10^{-8} 台/年（100 万台ベース）」になる。つまり、年間 100 万台流通している製品は、100 年に 1 回の致命的事故が発

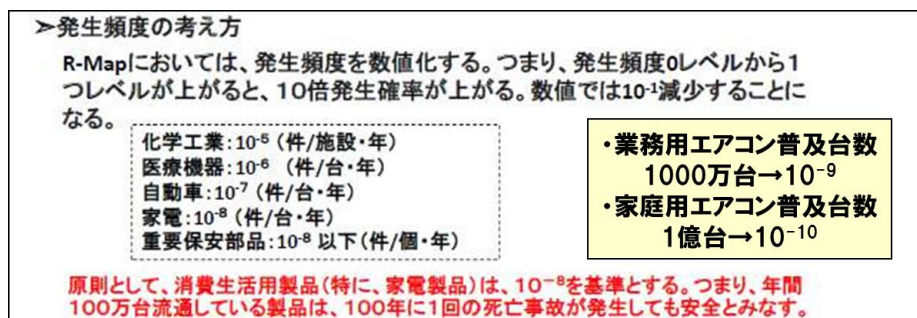


図 5-7 事故発生確率の考え方

生しても安全と見なす。国内の業務用のミニスプリットエアコン、家庭用エアコンの総台数は約 1 億台であり、使用時の事故発生確率の目標は計算上 10^{-10} 台/年以下の数字でなければならない。また使用時以外の事故発生の許容値は、作業者がマニュアルや手順書に基づき責任と注意を持って行う作業であり、職業人として要求される値として使用時の許容値の 10 倍から 1000 倍程度大きくなっても、実際には安全に作業できると考えられる。よってミニスプリットエアコン、家庭用エアコンでの使用時以外の各ステップでの許容値は 10^{-9} と設定しても実用上問題のないレベルと判断している。よって従来の一般的な使用環境では燃えなかった冷媒が微燃とは言え燃える事実を重視し、ミニスプリット SWG (I) としては当初は許容値を厳しく使用時は 10^{-10} に設定し、使用時以外の物流、据付け、サービス、廃棄の許容値は 10^{-9} と設定してスタートした。なお事前評価では図 5-4 の横軸である事故の危害度の評価を確定することは難しいが、実績に基づき微燃性冷媒の使用時の危害度が確認されることになれば、事故発生の許容値を変えて製品の経済性や利便性を改善することも可能である。

以下同様にビル用マルチエアコン SWG やパッケージエアコンと業務用エアコンを評価しているミニスプリット SWG (II) の許容値は「100 年に 1 回以下」を採用している。一方、チラーなど産業用途に近い設備ではメンテナンスや専門家の介入、法規制などによってリスクを軽減できるのでチラーSWG は「10 年に 1 回」を採用している。

なお、この流通台数と重大事故発生確率の関係は家電または家電類似の機器で 10 万台程度の流通台数がある場合であり、それより少ない流通台数では、重大事故の発生確率は一律に 10^{-7} 程度以下となるように設定する方がよいであろう。またこの許容値は日本国内の設定値であり、習慣や文化の異なる国や地域では当然、エアコン類に求める安全の要求や危害度の程度も異なるので各国が社会事情や受容性に応じて独自に設定すべき値である。

5.4.2 漏洩条件の設定（市場全体の漏洩率と機器からの漏洩速度、漏洩量）

漏洩条件の設定に当たっては、市場にある家庭用エアコン全体から 1 年間にどの程度の割合で冷媒漏洩するかを、日冷工に所属する各社のサービス会社の漏洩率の数値を、各社の市場シェアで分配しなおし平均値を求めた。日本国内では家庭用エアコンのサービス会社はほぼ機器製造メーカーの関連会社であり、サービス作業の大半はこの関連サービス会社が行っている。そのため数字の信頼性は高い。その集計された日本での家庭用エアコンの漏洩率は 0.023%/年となった。また漏洩速度については配管腐食による数日から数か月かけた微少漏れや、数時間程度で漏れる溶接不良の急速漏れなどが想定される。しかし IEC60335-2-40 に規定された 4 分間で充填冷媒が全量漏洩するという条件の方が、漏洩速度がさらに多く一番厳しいため、この条件を 1 次リスク評価で計算する場合の漏洩速度とした。この漏れ方は充填冷媒量が少ない家庭用エアコンで配管パイプ折れを起こし、冷媒噴出するが、噴出に伴う温度低下がなく、かつ冷媒の冷凍機油への溶解残がないような想定での漏洩速度であり現実的ではない。しかし、このような厳しい設定で計算したリスクアセスメント結果は後述するように許容値をほぼ満足したため、家庭用エアコンではこの漏洩速度や漏洩量を見直すことはしなかった。

一方ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンでは ISO5149 に規定された室内の漏洩速度としての 10kg/h を採用している。この値を市場不良データと比較参照し室内機、室外機での緩慢漏れ (1kg/h 未満)、急速漏れ (1~10kg/h)、噴出漏れ (10kg/h 超、75kg/h 迄) の比率を求めた。またチラーでは封入冷媒量がビル用マルチよりさらに多くなり、漏洩が生じた場合には音速で噴出すると仮定して漏洩速度を決定している。

5.4.3 可燃となる空間体積の設定

可燃性を評価する場合に前提となる空間体積の設定はもっとも重要な項目である。できうる限り小さな空間で評価すれば、どのような場合でも必ず着火し危害が生じる。すなわち微燃性とは言え、あまりにも小さな空間を設定すれば燃焼性を有する冷媒はいずれも使用できないこととなる。そのような視点で妥当と考えられる室内空間体積としては、日本家屋での家庭用エアコン設置状況から 6 畳前後の部屋への取り付けが標準的であることが判っているが、各社のカタログでは 4.5 畳までの取り付けを掲げている。そのことから、

4.5 畳の面積で設定することを考えた。しかし先行する 2000 年当時に試行された「プロパン使用ルームエアコンのリスクアセスメント」で設定された空間である 7m²、(4.3 畳相当)の空間面積が、より狭く厳しい条件となることからその値を踏襲した。よってリスクアセスメントにもっとも重要な家庭用エアコン使用時の室内空間容積としては、漏洩空間を床面積 7m²、高さ 2.4m の小部屋とし、壁掛け形室内機の設置位置を床面からの高さ 1.8m に、床置き形室内機は床面 0m に設置することとした。図 5-8 に室内空間の概要と設置状況を示す。室外機については 3 面が囲まれたマンションベランダ (4 面目もガラス窓等で封鎖されている) を仮定した。

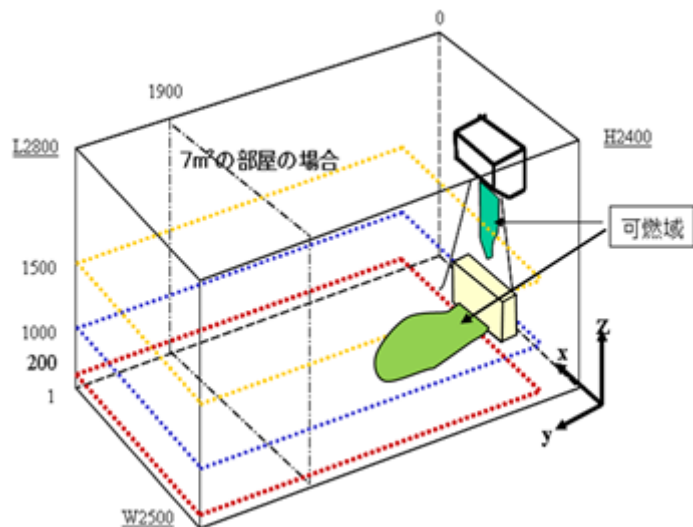


図 5-8 室内空間でのエアコンの設置

ビル用マルチエアコンでは当初、標準的な条件として 13m 四方、天井高さ 2.7m の事務所を設定した。その後、リスク評価が進むにつれ、カラオケや飲食店の小部屋など密閉性の高い小空間を仮定して検討を行った。詳細については昨年までのプログレスレポートのビル用マルチエアコンの報告を参照されたい。また室外機についても当初は 2 方を壁に囲まれた設定としたが、室内と同様にリスク評価が進むにつれ半地下設置や機械室など風による拡散効果が得られ難い厳しい条件を設定して検討した。またチラーでは空気調和衛生工学会誌 (2007~2010) の竣工設備調査一覧から、チラー容量に対する機械室面積の平均値、最小値、最大値を整理した。解析モデルでは面積は平均値を用い機械室高さを 5m とした。

次に物流時の仮定としては、倉庫保管時の冷媒漏洩でのハザードが考えられる。通常の家用品エアコンは消費地近くの大規模倉庫に保管されることが多いが、今回のリスク評価では建築基準法に定められている中規模の準耐火構造の倉庫を設定した。容積が小さく、リスクが高いと考えられる準耐火構造の倉庫は、一室が 300 坪(1000m²)以下となり、家庭用エアコンはこの大きさの倉庫に 10000 セット保管されている状態を仮定した。

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンでも輸送時の保管に関しては流通経路が変わらないことから、中規模の準耐火構造の倉庫を想定し、家庭用エアコンとは機器の大きさが異なるため 2300 セット保管されると仮定した。一方、チラーに関しては、現地で配管施工した後に機器へ冷媒が充填されるため、保管時の可燃性冷媒によるハザードはない。

なお、サービスや据付け廃棄などのステップでもそれぞれ各社の調査や、SWG 内の合議によって条件を決めたが、いずれも厳しめの条件を設定してリスク評価を行っている。

5.4.4 可燃時間空間体積の計算

可燃時間空間体積 (以下、可燃時空積) は、ある仮定された空間に可燃域がどれぐらいの大きさで、またその可燃域がどの程度の時間の長さで存在するかを、空間と時間の積分値として表し、リスクアセスメントでは重要な要素となる。ミニスプリットエアコンでは可燃時空積を初期は「プロパン使用ルームエアコンのリスクアセスメント」で算出された値を R32 に比例換算することによって求めた。最終的には冷媒漏洩に伴う圧力上昇が起こらないように境界面を設定して東京大学で 2012 年に改めて行われたシミュレーション結果 (CFD) から算出し直している。図 5-9 に東大でのエアコン各機器のシミュレーション状況を示す⁵⁻⁷⁾。図に示すような条件によってシミュレーションされたエアコン各機器の可燃時空積が東大から示され、日冷工の各 SWG はそれらを使用して着火確率を計算した。

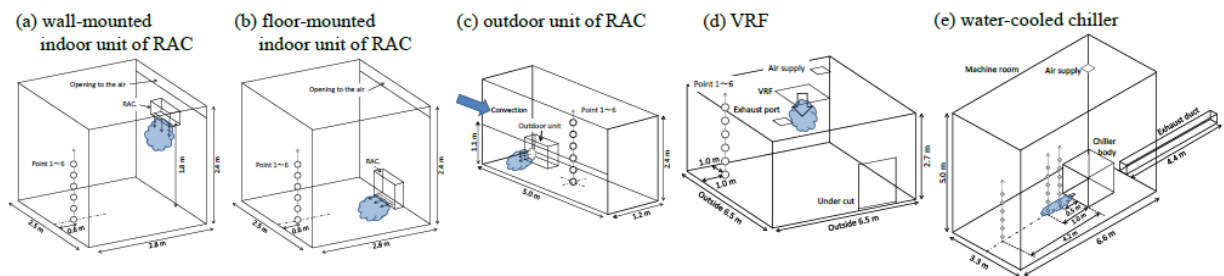


図 5-9 エアコン各機器のシミュレーション状況

ミニスプリットエアコン SWG (I) で使用した R32 と R1234yf の可燃時空積の値を表 5-2 に示す。なお R1234yf については、全体を網羅的にシミュレーションしていないので R32 のシミュレーション値と同条件の R1234yf のシミュレーション値と比較し、比例換算することによって各々の値を算出した。

ミニスプリットエアコンでの可燃時空積は冷媒充填時での漏洩を除くと $10^{-2} \text{ m}^3/\text{min}$ から $10^{-4} \text{ m}^3/\text{min}$ と体積も継続時間も小さいことが判る。一方、ビル用マルチエアコンやチラーでは $0.6 \sim 314 \text{ m}^3/\text{min}$ と桁違いに大きい場合がある。

表 5-2 各ステージの可燃時空積の値

	R290	R32	R1234yf
1.1 物流時	5.50×10	2.00×10^{-4}	2.20×10^{-4}
2.2 機器据付中	7.16×10^2	2.40×10^{-3}	2.50×10^{-3}
2.5 工事ミス	7.75×10^{-2}	9.00×10^{-3}	1.30×10^{-2}
2.10 冷媒充填時	8.51×10^3	9.97×10^1	3.70×10^2
3.1 室内機運転中漏洩	1.41×10	5.00×10^{-4}	5.50×10^{-4}
3.5 室内機停止中漏洩	7.16×10^3	2.40×10^{-2}	2.50×10^{-2}
4.1 室外機漏洩	7.76×10^{-1}	9.00×10^{-2}	1.30×10^{-1}
5.1 接続配管	8.51×10^3	9.97×10^2	3.70×10^3
7.8 サージ/冷媒放出	7.75×10^{-2}	9.07×10^{-3}	1.30×10^{-2}
8 廃棄	上記類似状況の値を準用		

なお可燃時空積は CFD で求めることが基本であるが、ベースとなる CFD の値があり、室内空間の形状や高さ床面積などが大きく変わらず、冷媒が漏洩する位置である漏れ高さが大きく変わらない場合には、片岡の論文の式⁵⁻⁸⁾を SWG メンバーが変形した「可燃時空積は、床面積や漏れ高さが変わった場合、漏れ高さ×床面積の 1/2 乗で冷媒漏れ量を割った値の 3 乗に比例する」との仮定で簡易式を作成し換算した。以下に簡易式 (5-1) として示す。

$$V_1 = V_0 \times ((m_1 \times h_0 \times A_0^{1/2}) / (m_0 \times h_1 \times A_1^{1/2}))^3 \quad (5-1)$$

ここで V_1 : 換算した設定可燃時空積 V_0 : CFD で求めたベース可燃時空積 m_0 : ベース冷媒漏れ量

h_0 : ベース漏れ高さ A_0 : ベース床面積 m_1 : 設定冷媒漏れ量 h_1 : 設定漏れ高さ A_1 : 設定床面積

ただし簡易式は、漏れ高さが変わる場合や、設定床面積の縦横の比率が大きく変わる場合、床面積が数倍となる場合には適用できない。また適用できる場合でも、換算された値が大きく変わる場合などは慎重に判断してリスクアセスメントに使用する必要がある。

5.4.5 着火源の設定

ミニスプリットエアコンが使用される環境に R32 冷媒が漏洩し可燃性雰囲気となった場合の着火源としては、電気機器や金属衝突、静電気によるスパークと、ろうそくや石油ストーブなどの燃焼機器の裸火が考えられる。また喫煙具ではスパークによってガスやオイルに着火し、裸火が生じる。諏訪東理大の今村⁵⁻⁹⁾や産総研の滝澤⁵⁻¹⁰⁾、1998 年に ADL 社 (Author. D. Little 社) の報告書 DOE/CE/23810-92⁵⁻¹¹⁾などを参照し、以下に家庭用エアコンで着火源と想定される項目を箇条書きする。

- ① カバーのない電磁接触器では 7.2 kVA 以上で着火するが、接点周りが 3 mm 以下の隙間を持つカバーで覆われている電磁接触器では、 12 kVA 定格容量以下であれば着火しない。一方、日本の家庭内にある低電圧の電気機器はほとんど着火しない。
- ② 電子式ライターは、まれに着火する場合があるが、火炎伝播しない。
- ③ 火炎を有しない喫煙中の煙草は着火しない。

- ④ 石油ファンヒーターは流れの影響で火炎伝播しない。
- ⑤ 居住空間で人間に起因する静電気は、ほとんど着火しない。
- ⑥ ろうそくやマッチなどの弱い火炎を有する裸火は着火する。

以上から小型のミニスプリットエアコンの R32 及び R1234yf の室内及び室外機周辺の着火源としては、裸火を仮定して、リスクアセスメントを推進した⁵⁻¹²⁾。なおミニスプリット SWG (I) ではサービス業者や据付け業者へのアンケート調査も行い着火源の数字把握も行っている。

表 5-3 に各種エアコンでの R32 の着火源を一覧として整理した。

表 5-3 各種エアコンでの R32 着火源の設定

○:着火、△:通常条件では火炎伝播しない、×:着火せず						
分類	着火源	家庭用	PAC	ビルマル	チラー	
スパーク (可燃空間 中で発生)	電気部品	電化製品(火災原因)	△	○	○	○
		電磁接触器(5kv以上)	—	△	△	○
		機器内電気部品	×	×	×	○
		電源コンセント	×	×	×	×
		照明用スイッチ	×	×	×	×
	喫煙器具	マッチ	○	○	○	○
		石油ライター	(評価中)	(評価中)	(評価中)	(評価中)
		電子ライター	×	×	×	×
	作業ツール	金属スパーク(フォークリフト爪)	○	○	○	○
		電動工具	×	×	×	×
		冷媒回収機	×	×	×	×
人体	人体からの静電気	×	×	×	×	
裸火 (可燃空間 と接触)	喫煙器具	マッチ	○	○	○	○
		石油・電子ライター	○	○	○	○
	燃焼式設備	燃焼式暖房機	△	○	○	○
		燃焼式給湯器	△	○	○	○
		燃焼式ボイラー	△	○	○	○
		燃焼式調理器	△	○	○	○
	作業ツール	ロウ付けバーナー	○	○	○	—

着火源に関しては、機器が大きくなるほど電気容量が増すため家庭用エアコン、ビル用マルチエアコン、チラーでの着火源の設定は異なる。また家庭用エアコンは漏洩冷媒量が少なく、燃焼式設備内で冷媒が燃えることはあっても、火炎伝播しない⁵⁻¹³⁾。

ミニスプリット SWG (I) ではこのような着火源の整理を行い、その着火源が家庭内で1年間にどれくらい発現するかを求めた。具体的には日本の消防庁の統計からガスによる火災事故を抽出し、着火源が裸火である件数を日本の住居数、住居面積で除して割り出した。これを一般家庭での住居面積あたりの「着火源の存在確率」とした。

また表 5-3 で「—」となっている項目について補足する。家庭用エアコンの電磁接触器(5kV 以上)は一般家庭には存在しない。チラーのロウ付けバーナーは、作業が専門事業者により計画・導入される産業用途に近い状態で実施され、換気確保や安全対策が十分に図られているため着火源と看做さない。

なお使用環境が異なるビル用マルチエアコンやパッケージエアコン(PAC)やチラーなどの「着火源」については後の節に記述する。

5.4.6 ヒューマンエラーの発生確率

据付け、修理、廃棄等の作業ステージにおける冷媒漏洩やその漏洩した冷媒への着火は、作業者のヒューマンエラーも要因となる。ビル用マルチ SWG で検討した作業者のヒューマンエラーの発生確率を表 5-4 に掲載する。この表は橋本邦衛が 1984 年に発行した著書、「安全人間工学」に記載したものであり、作業者の意識のモードに応じたエラー発生率を脳波との関係で整理したものである⁵⁻¹⁴⁾。元の文献では最後のカラムは、

作業が正確に行われる信頼性の確率として示しているが、今回の検討では分かり易いように逆数として、エラー発生率に置き換えた。

橋本によれば、理想的には常にフェーズⅢの緊張状態での作業が望ましいはずであるが、大脳生理学的にはそのような状態が長く続くことはなく、慣れた作業の大半はリラックスした状態のフェーズⅡで遂行され、エラー発生率は、 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ の範囲にあると

した。この中からSWGではミニスプリットエアコンの据付やサービス作業時のヒューマンエラー発生確率を 10^{-3} と仮定した。一方、比較的教育訓練が行き届いているビル用マルチエアコンの作業員では、FTA中に採用したヒューマンエラー発生確率は、 10^{-4} を選択している。

表 5-4 意識モードとエラー発生率

フェーズ	意識のモード	生理的状态	エラー発生率
0	無意識、失神	睡眠	1.0
I	意識ぼけ	疲労、居眠り	0.1 以上
II	正常、リラックスした状態	休息時、定例作業時	0.01～ 0.00001
III	正常、明晰な状態	積極活動時	0.000001 以下
IV	興奮状態	慌てている時、パニック時	0.1 以上

5.4.7 許容値との整合性

以上のようにリスク見積もりが必要な基礎項目を整理したのちFTAを作成して着火確率を求める。FTAの構成は冷媒が漏洩する確率と漏洩した冷媒が可燃濃度となって存在する確率（可燃時空積）、それに着火源の存在確率を掛け合わせることで冷媒への着火確率が求まる。なお、可燃時空積と着火源存在確率の項が時間的、空間的に一致する程度を表す項を重なり割合とした。結果、着火確率は(5-2)のような単純な式で表され、その値が許容値以下であれば、安全が確保される。

$$A_p > F_p = L_p \times V_p \times I_p \times D \cdots (5-2)$$

ただし 各項は A_p : 許容値 F_p : 着火確率 L_p : 急速冷媒漏洩が発生する確率 V_p : 可燃空間の時空積 I_p : 時間空間あたりの着火源存在確率 D : 可燃時空積と着火源存在確率の重なり割合である。

重なり割合については5.5節の(C)項にビル用マルチエアコンSWGで検討された発展系の式とともに詳しく説明するが、ここでは簡単な例で説明する。実際的な室内では V_p の存在部分と I_p の存在部分は完全に重ならないことが生じる。たとえば密度の大きい冷媒が漏洩して室内の床から15cm程度まで滞留し、可燃域は床面より3cmから12cmに生成しているとする。そこにいる人が椅子に着座状態で着火源となるオイル式ライターでタバコに火をつける場合には、一般的に着火燃焼は生じない。本来であればこのような状態を表すのに、椅子からかがみこんでタバコに火をつける場合など人間の動作を検討し、重なり割合 D を1から0の間で割り出して数値を調整すべきである。しかし煩雑な検討を行っても最終着火率への影響が少ないと考え、ミニスプリットSWG(I)ではほとんどの場合 $D=1$ と設定している。初期のリスクアセスメントで作成したFTAでの計算結果は、単純化すれば(1)式での計算結果であり $D=1$ と設定しているため、このような可燃域と着火源の場所が一致しない場合でも着火するとの確率計算となり、実際に導かれる値は安全に対してかなり尤度の大きな値となっている。また V_p についてミニスプリットSWG(I)等では、冷媒漏洩時の気流速度の効果は勘案していない。図5-10に先ほどの式(5-2)を基本としたFTAを示す。

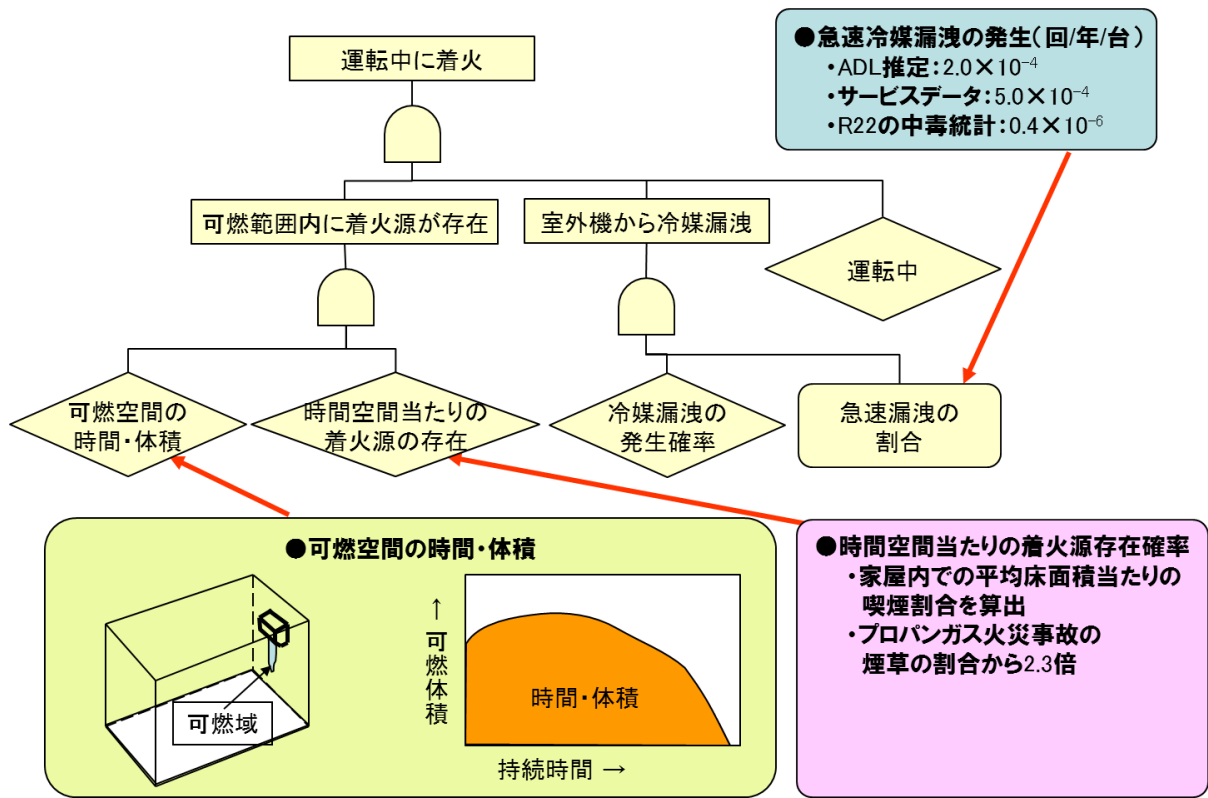


図 5-10 可燃性冷媒評価の基本 FTA

この FTA をステージごとに詳細に展開し、輸送保管、据付け、使用、サービス、廃棄での値を求める。その求められた値が許容値以下であれば、基本的にはリスク評価はストップとなり「t.製品化（要件確認）と市場フォロー」のステップに移行する。許容値以上の場合、2つの方向で見直しを行う。一つは「m.リスクの低減（改善手段として機器、マニュアル、法規制を考案実施）、n.FTA 要素の見直し、q.FTA 再作成と再精査、r.R-Map での評価、s.リスク許容可否の判断。」とリスク低減を対策から試行することである。2つ目は、FTA の中でリスク値を上げているクリティカルパスとなる事象を見出し、その事象の仮定された数字が概算数字でないか、もっと詳しく実験検討することや情報解析することでさらに正確な数値に置き換えて値が下がらないか、試行していくことも有効である。いずれにしてもこの見直し試行のループを FTA の計算値が許容値以下となるまで、何度も繰り返し許容値以下にするには何をすればよいのかを確定する。表 5-5 にミニスプリットエアコンの廃棄ステップで FTA に使用された数値の割付表の一部を示す。また図 5-11 にその割付表の数値を使用して FTA から実際に着火確率を算出した例を示す。

表 5-5 廃棄の割付表 ミニスプリット (I)

モード	No.	項目	未対策			対策あり		
			R32	1234yf	理由	R32	1234yf	理由
撤去	9.1	年間廃却頻度	8.3E-02	←	製品寿命を12年とした	←	←	←
	9.2	室内の可燃空間の時間・体積[min・m ³]	2.4E-02	2.50E-02	室内機停止中に漏えい	←	←	換気ファンによる対策はしないとした
	9.3	時間・体積当たりの着火源の存在確率[1/min・m ³]	1.0E-06	←	喫煙率を見直し 元8.6E-5	←	←	←
	9.4	多量漏えいに気づかない	3.0E-03	←	ADL過誤率	3.0E-04	←	教育の徹底により1/10
	9.5	残圧ありで配管取り外し(ボンパダウン不十分)	6.0E-03	←	ADL過誤率+NPR誤判断×100	6.0E-04	←	教育の徹底により1/10
	9.6	ボンパダウンで気づかず配管取り外し	4.6E-02	←	日冷アンケート結果(2012年実施)	←	←	←
	9.7	バルブ閉不十分	3.0E-03	←	ADL過誤率	3.0E-04	←	教育の徹底により1/10
	9.8	室外の可燃空間の時間・体積[min・m ³]	9.0E-03	1.3E-02	室外機で漏えい	←	←	←
	9.9	開口の無いベランダや塀に囲まれた空間の存在比率	1.6E-01	←	日冷アンケート結果(2012年実施)	←	←	←
	9.10	撤去作業者の喫煙率 ※JT 2012年調査の男性喫煙率	3.3E-01	←	喫煙率を見直し(元は男性の喫煙率)	←	←	←
	9.11	撤去作業者が訓練を無視	1.0E-02	←	ADLの値の1/10	1.0E-03	←	教育の徹底により1/10
	9.12	撤去作業時間に対する喫煙時間の割合	1.0E-01	←	ADLより	←	←	←
	9.13	喫煙中にライターを点けている時間の割合	1.7E-02	←	ライター着火時間5sec/喫煙時間5min(ADLより)	←	←	←
	9.14	可燃域内の着火源存在確率	5.0E-02	←	着火可能なライターの比率 5%	←	←	←

廃棄(室外機の撤去)
見直し後

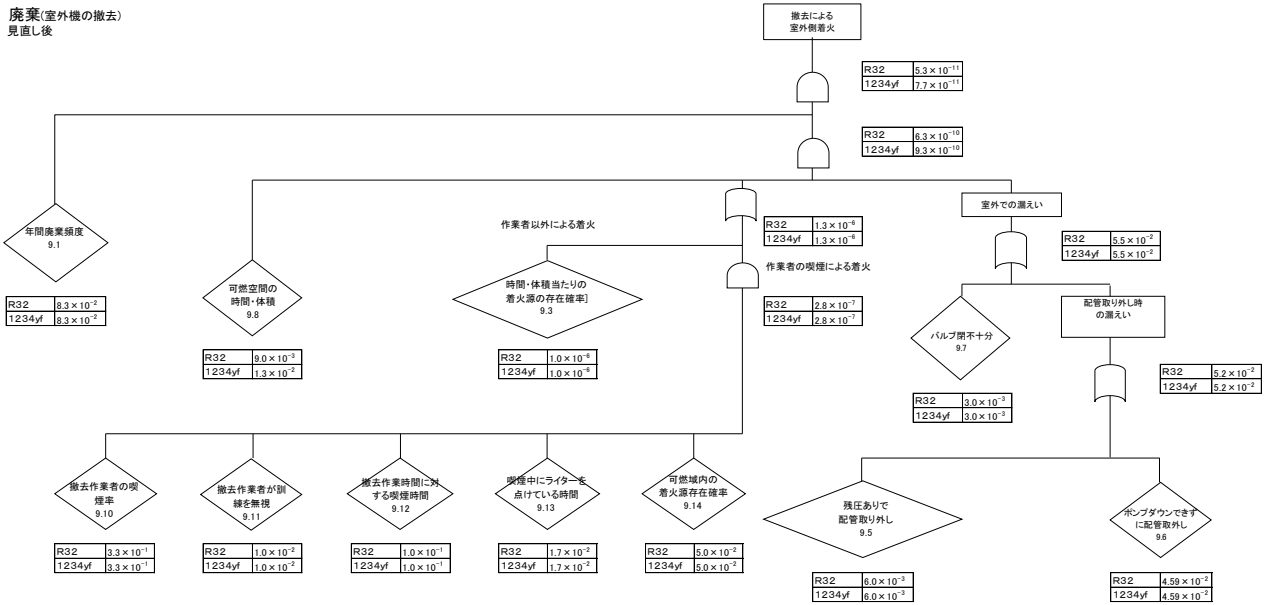


図 5-11 廃棄の FTA ミニスプリット (I)

割付表の項目としては、FTA の No, FTA 事象の項目、未対策ケース、見直しケースでの事象発生確率の数字、確率の数字を導きだした文献や根拠が理由として記入される。

ミニスプリット SWG(I)は物流、据付け、使用、サービス、廃棄の各ステップで厳しめの設定で FTA を作成し確率計算した結果、見直しを 1 回行うことで許容値を下回った。表 5-6 に許容値と R32 での着火確率の値を示す。ほぼ許容値となったことから、家庭用エアコンではさらに詳細な解析を行っても安全であるとの結果は変わらないため、現実の製品での安全性確保や、据付けサービス時の安全確保のためのマニュアル作成の作業が必要と判断し、それ以上の試行や解析は継続しなかった。なお、家庭用エアコンの範疇でも 1 対 1 接続の床置き形ハウジングエアコンやマルチ接続の床置き形ハウジングエアコンでは、1 次評価で許容値に至らなかった。その対応について、この後の第 6 章に詳述しているので参照されたい。

パッケージエアコンとビル用マルチエアコンでも同じように漏洩率、漏洩速度、空間体積、着火源の選定を行い第 1 次の FTA を行った結果オフィスの天井設置のエアコンからの冷媒漏洩では許容値以下となった。しかし 2 次評価として半地下や狭小地設置、カラオケ店など設置状況によって R-Map で許容可能なリスクには至らず漏洩検知対策や、マニュアルや自主基準の作成により許容値以下とする方向である。

表 5-6 ミニスプリットエアコンの冷媒差での着火確率

リスク：着火確率			
分類	許容値	R32	R1234yf
物流	1×10^{-9}	4.1×10^{-17}	4.5×10^{-17}
据付け	1×10^{-9}	2.7×10^{-10}	3.1×10^{-10}
使用 (室内)	1×10^{-10}	3.9×10^{-15}	4.3×10^{-15}
(室外)	1×10^{-10}	1.5×10^{-10}	2.1×10^{-10}
サービス	1×10^{-9}	3.2×10^{-10}	3.6×10^{-10}
廃棄	1×10^{-9}	3.6×10^{-11}	5.3×10^{-11}

チラーについては、冷媒封入量が多く、そのため漏洩時の可燃時空積が大きくなり、さらに大電気容量の電磁開閉器など着火源が傍にあることから 1 次評価では R-Map で許容可能なリスク以下にならなかった。そのため可燃濃度を形成しないことが必要な対策となり、排気装置などの措置が考えられる。またその措置を担保するため、基本的には法規制で強制力を持たせる方向で検討中である。

5.4.8 ミニスプリットでのまとめ

以上のようにミニスプリットエアコン（家庭用エアコン）のリスクアセスメントでは想定される空間体積をかなり小さく設定し、漏洩速度を大きな値としたにもかかわらず、可燃時空積はあまり大きくならず、またオイルライター以外の着火源の存在も最小限の評価としたため着火確率は許容値以下となった。よってリスクアセスメントとしては、これ以上条件を変更しても着火確率はさらに小さな数字になることが予想される。そのため第2次以降のリスクアセスメントを行わず、ライフサイクル全体の燃焼性に関するリスクを再抽出し、再抽出したリスクを逐次検討し、それらに問題がないことをミニスプリットSWG（I）メンバー全員で確認した。なお日本では一般的に家庭用エアコンの取り付け作業は電気店や専門業者が作業することが多く、据付サービス時の作業の精度向上を図るため「配管工事マニュアル」を作成した。この内容は日本冷凍空調工業会の関連会社や関連団体に公開されており、各エアコンメーカーや関係団体で作業マニュアルの内容として反映されている。なお床置きエアコンについては第6章に詳述しているので、ご参照いただきたい。

5.5 ビル用マルチエアコンとパッケージエアコンでのリスク評価手法の差異

以上述べてきたミニスプリットでのリスク評価手法に対して、ビル用マルチエアコンや店舗用パッケージエアコンでは冷媒封入量が多くなり設置条件や使用環境もかなり異なる。以下ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンについて前節までに記載できなかった点で、リスク評価手法が大きく異なる点を以下に箇条書きとして補足する。

(a) リスクアセスメントの許容値

ビル用マルチエアコンや店舗用パッケージエアコンのリスクアセスメントの許容値については、ミニスプリットと同じく100年に1回の事故発生確率を目標として、市場流通台数から求めた。なおビル用マルチエアコンとパッケージエアコンは同じような冷房能力の部分もあるが、室外機1台に対し室内機が1台となるパッケージエアコンと室外機1台に対し複数の室内機が取り付けられるビル用マルチエアコンでは封入冷媒量が大きく異なり、また実際に設置される場所や取付け業者などに違いがありリスクアセスメントの許容値は別々に設けた。許容値はビル用マルチエアコンの市場流通台数が1000万台であることから 1×10^{-9} 、サービスや設置など使用時以外は 1×10^{-8} とした。一方、店舗用パッケージエアコンの市場流通台数は780万台であり、同様に使用時の許容値は 1.3×10^{-9} 、ビル用マルチエアコンと同様にそれ以外は 1.3×10^{-8} とした。

(b) 漏洩率と漏洩速度

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンではISO5149に規定された室内の漏洩速度としての10kg/hを標準的な漏れ速度とみなし、この値をSWGで収集した市場不良データと比較参照し室内機、室外機での緩慢漏れ（1kg/h未満）、急速漏れ（1～10kg/h）、噴出漏れ（10kg/h超、75kg/hまで）の比率を求めた。室内機では漏洩不良サンプルで窒素による漏洩速度試験から換算した冷媒漏洩速度に噴出漏れが観察されなかったため件数を0件とした。一方、室外機では10kg/hを超えるサンプルがあり、急速漏れ件数の1/10を噴出漏れ件数としている。

(c) 着火源

ビル用マルチエアコン、パッケージエアコンでの着火源については表5-3に整理してあるように、燃焼式設備での着火の可能性を排除していない。表5-7にビル用マルチエアコンでの発火情報に基づく着火確率の表の一部を掲載する。

表 5-7 発火事故情報に基づく着火源存在確率（パッケージエアコンの場合）

主な建物用途			飲食店	レストラン	焼肉店	理美容室		ホテル
			厨房	客席・式場	客席	客席	バックヤード	客席
室内空間容積	高さ	m	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	床面積	m ²	57.2	9.7	9.7	14	14	24
冷媒量	機器馬力	HP	6	2	2	3	3	2
	冷媒量	kg	7	4	4	5	5	4
主な着火源存在確率 10 ⁻⁰⁵ 以上抜粋	燃焼式暖房機器		5.9×10 ⁻⁰⁵	5.9×10 ⁻⁰⁵	5.9×10 ⁻⁰⁵	5.9×10 ⁻⁰⁵	5.9×10 ⁻⁰⁵	-
	ガスコンロ		1.9×10 ⁻⁰⁵	1.9×10 ⁻⁰⁵	1.9×10 ⁻⁰⁵	-	1.9×10 ⁻⁰⁵	-
	給湯器		7.9×10 ⁻⁰⁵	-	-	-	7.9×10 ⁻⁰⁵	-
	ライター		-	2.2×10 ⁻⁰⁵	2.2×10 ⁻⁰⁵	2.2×10 ⁻⁰⁵	2.2×10 ⁻⁰⁵	2.2×10 ⁻⁰⁵
	花火		-	2.0×10 ⁻⁰⁵	-	-	-	-

ビル用マルチエアコンなどでは冷媒封入量が多く漏洩が生じた場合に、家庭用エアコンの様に短時間で可燃域が消失しないことや熱対流があったとしても冷媒濃度希釈が生じないためである。さらに着火源の存在確率を詳細に解析していく手段として家電製品等の発火事故率を NITE の統計より抽出し、普及台数などで除し「事務所モデル」や、着火源が多いとされる「厨房モデル」での着火源の存在確率を求めた。

なお、着火源の事故確率に関しても着火のトリガーを可燃空間が既にありその空間で着火が生じる場合と、既にある着火源に可燃性冷媒が流れて接触し着火する場合に細かく分けて確率を求めている。着火のトリガーは、例えば電気スパークの場合、着火源の作動である。燃えている蝋燭に可燃ガスが触れて着火する場合は、可燃空間の生成がトリガーとなる。可燃空間生成が時間的に先行すれば、前者になり、着火源 ON 状態の継続が時間的に先行すれば、後者になる。1つの着火源により引き起こされる着火事故確率は、この2つの和となる。各ライフステージのリスク計算においては、どちらが支配的かを判断の上、どちらか一方で計算している。表 5-8 にこの確率計算の式と定義を再録する。

表 5-8 着火事故確率の計算

事故発生のトリガー	PF 着火事故発生確率	PT 時間的遭遇確率	PS 空間的遭遇確率
着火装置の作動	$PF_i = N/V_r * M * PL$ $= N/V_r * V_f * T_f * PL$	$PT_i = N * T_f$	$PS = V_f/V_r$
可燃空間の発生	$PF_g = N * T_b * V_f/V_r * PL$	$PT_g = N * T_b$	
計	$PF = PF_i + PF_g$ $= N * V_f/V_r * (T_f + T_b) * PL$ $= PT * PS * PL$	PT $= PT_i + PT_g$ $= N * (T_f + T_b)$	$PS = V_f/V_r$

記号

PF : 着火事故確率	[回/(年・台)]
PL : 冷媒漏洩発生確率	[回/(年・台)]
PT : 時間的遭遇確率	[-]
PS : 空間的遭遇確率	[-]
N : 着火源の作動回数	[回/分]
V : 体積	[m ³]
T : 時間長さ	[分/回]
M : 可燃空間の時空積	[分・m ³ /回]

添字

i : トリガーは、着火装置の作動
g : トリガーは、可燃空間の発生
r : 対象空間
f : 可燃空間が有る
b : 裸火が有る
t : 着火源と可燃ガスの時間的な遭遇
s : 着火源と可燃ガスの空間的な遭遇

$$M = \int (V_f * T_f) dt$$

(d) ライフステージと設置ケース

ライフサイクルのステージ毎に、またエアコンの設置されるケースを事務所、飲食店、カラオケ、半地下、機械室と分けて作成しリスクアセスメントを各々試行している。表 5-9 にビル用マルチエアコンでの試行結果の表の一部を掲載する。

(e) まとめと対策

ビル用マルチエアコンやパッケージエアコンで着火確率の高いステージや設置ケースでの改善手段を、網羅的に掲げる。使用時で着火確率が高くなる設置ケースはドア隙間が最小となる密閉性の高いカラオケルームなどがあり、許容値を満足することができない。そのため安全対策としては冷媒漏洩検知装置に連動した換気装置を設置稼動することによって許容レベルに達する。次に修理時のステージでは着火源としてバーナーを使用せざるを得ない場面がある。その

表 5-9 ライフステージでの設置ケース毎の着火確率

設置ケース (冷媒量) [床*高さ]		ステージ	A.輸送・保管		B据付		C使用(室内) D使用(室外)	
		許容値	<1×10 ⁻⁸					
		対策	未	有	未	有	未	有
室内機	1.天井 (26.3)	事務所 [40.6*2.7]	1.1× 10 ⁻¹⁶ ~ 2.7× 10 ⁻¹⁵	-	1.9×10 ⁻⁹	-	3.5×10 ⁻¹²	-
	2.床 (52.8)	飲食店 [9.7*2.7]			1.9×10 ⁻⁹	-	3.8×10 ⁻⁷	8.4×10 ⁻¹¹
	3.天井 (88.1)	カラオケ [4*2.7]			-		1.2×10 ⁻⁶	0.0
室外機	4.地上 (26.3)	-			1.9×10 ⁻⁹	-	1.9×10 ⁻¹¹	-
	5.各階 (26.3)	- [3.4*4.0]			1.9×10 ⁻⁹	-	3.0×10 ⁻⁹	-
	6.半地下 (26.3)	- [15.3*3.5]			1.1×10 ⁻⁸	1.9×10 ⁻⁹	1.1×10 ⁻⁷	2.5×10 ⁻¹³
	7.機械室 (26.3)	- [21.8*5]			1.1×10 ⁻⁸	2.1×10 ⁻⁹	3.2×10 ⁻⁹	-

のためバーナー作業中に冷媒漏洩に気付けば、直ちにバーナーを消す。また漏洩に確実に気付くため冷媒検知器を携帯し、冷媒濃度を測定する。これら一連の行為を教育訓練によって取得、実践する。このことによって着火確率を許容値内に抑えることができる。最終的にはこれらのリスク評価結果をベースに日冷工の安全ガイドライン GL-13 を改定し、その普及を図っていくことが必要である。

5.6 チラーでのリスク評価手法の差異

5.5 節にてビル用マルチエアコンやパッケージエアコンでのリスク評価手法の違いについて述べてきたが、機械室などに設置され居室に冷媒配管を敷設しないセントラル空調熱源のチラーについて差異を述べる。最も大きく異なる点は、日本国内でチラーを設置、使用していく場合には従来冷媒でも安全確保のため既に各種の法規制やマニュアル類が存在すし、規制に従う必要がある。よって新しい冷媒を適用する場合も、全てのチラーでその安全要件を満たす必要があり、その前提でリスクアセスメントが実施される。

詳細は昨年プログレスレポートに記載されているが、前節までに記載できなかった点で、ミニスプリットエアコンやビル用マルチエアコン、パッケージエアコンとリスク評価手法が大きく異なる点を以下に箇条書きして補足する。

(a) リスクアセスメントの許容値

チラーでの許容値は、専門事業者により計画・導入される産業用途に近い設備となりメンテナンスや専門家の介在、法規制などによってリスクを軽減できるのでチラーSWGでは1×10⁻⁶としチラーの市場でのストック台数は134000台と推定されるので、「約10年に1回」程度の着火確率ならば許容できるとしている。

(b) ライフステージの設定

オーバーホールを追加し6つのステージで評価、容量の大きなチラーは設置後に真空・気密検査を行った後で冷媒封入を行うので運搬時の評価はない、小容量のものは、ビル用マルチエアコンなどと同じである。

(c) 機械室の条件

水冷チラーは通常機械室設置されるが、充填される冷媒が不活性の場合であっても、そこで想定される危害に配慮した規格があり (KHK 0302:2011, ISO 5149-3:1993, JIS C60079s:2008)、換気量や火器設置が制限されている。

また機械換気量は建築基準法により義務付けされており、給排気ガラリ面積や換気量については、4回/h以上の換気量 (ISO5149, 2014) や、給排気ガラリ面積は、鹿児島県建築基準「機械設備工事編」を参考に

し、給気口位置は機器本体の真上に、排気口は機器背面の壁に設置されているものとする。

(d) 冷媒漏洩箇所

冷媒漏洩箇所は、機器本体の前面の中心で床面から 0.15m の高さにあり、長さ 0.1m の円筒状ノズルを想定し冷媒が音速で漏洩するものとした。

(e) まとめと対策

前述した機械式強制換気がある条件では狭小な機械室においても、短時間のみ可燃域が生成し限定的となる。一方、換気がない場合には長く可燃域が消失しない。

冷媒充填量に比べ機械室容積が狭小である水冷チラーの場合は十分な換気が非常に重要で、また人の安全確保のためには床面近傍でのセンサー設置なども併せて必要になると考えられる。さらにチラーでは漏洩時の可燃空間発生を短時間に抑えるための換気が必須である。よってマニュアルや望ましくは法規制により安全化を図る必要がある。なお適正な換気条件では微燃性冷媒が漏洩しても可燃空間がほとんど形成されない。

以上のように、チラーでは既にある法規制、安全対策などのマニュアルや基準が多数存在していることから、それらがどの程度まで現行冷媒の使用時や据付け時、廃棄時などで遵守運用されているのかという人や作業や順法精神の視点で安全確保してゆくことが重要である。

5.7 FMEA とその他のハザード

各社での製品化に当たっては、各社での事情（過去の品質情報）に照らし合わせて網羅的にハザードを再抽出し FMEA を作成しリスク確率の高い項目が残っていないかを確認することが望ましい。また「火炎接触による有害フッ素の影響」や「ディーゼル爆発」のハザードについて、東大や産総研での基礎検討からハザードの差が従来冷媒と大差ないことが明らかであり、課題はあるが社会的に容認されていると判断している。しかし、各社のエアコンや圧縮機の仕様は異なり、過去の品質不良状況も異なることから、メーカーによっては何らかの追加検討は必要かも知れない。特に冷媒量の多い機器では一考の余地がある。なおチラーSWGでは各社共通項目について FMEA を実際に作成している。また日本の電気メーカーでもエアコン製品化にあたり、社内での FMEA 作成を義務づけている場合が多いので参考として欲しい。

5.8 リスク評価手法のまとめ

以上、東大や諏訪東理大、産総研機能化学研究部門などの協力により日冷工で進めてきたリスクアセスメントに基づいて、ミニスプリット SWG（I）で実施したことを例としリスク評価手法として示した。またビル用マルチエアコンやパッケージエアコン、チラーとの差異も記述した。

リスクアセスメントは、あくまでもこれから製品化する機器の事前評価であり、その製品化にどのようなハザードが存在しそのハザードの危害の大きさと発生確率から看過できる事象か、対処すべき事象か区別する道具でしかない。製品開発技術者はこの道具をうまく使いこなし安全でかつコストリーズナブルな商品を社会に提供することが義務であるとともに、残留リスクや「想定外のリスク」についても積極的に開示していくことが必要であろう。

一般論でまとめたくはないがエアコンでのリスク評価は、機器が大きくなるほど冷媒充填量が増し、また電源容量も大きくなることから、FTA 解析ではリスクが高くなる傾向となる。その対策として機器そのもので遮断弁を設け冷媒漏洩量を減らすのか、またファンを高速回転させることで濃度希釈するような対応とするのか、別置き拡散ファンや排気装置で冷媒濃度を下げる対応とするのか、設置区画外にある電源遮断装置で着火源をなくすことや警報装置などで人的対応を行うなど、リスクを回避する選択肢は多い。また設置時の冷却システムの気密性の確認とそれら点検に基づく安全確認届出や機器の定期点検などを法規格で強制し、リスク回避することも可能である。各機器の特性や設置条件、使用条件、また利便性やコストも考え、最良の対応手段を選択すべきである。

なおビル用マルチエアコンやパッケージエアコン、チラーについてのリスク評価については、過去のプロ

グレスレポートを参照し、筆者が単に抜粋した記述となっている。詳しい条件説明や評価方法、評価結果については過去に遡り再確認いただくと共に、本最終報告書にて最新の情報が公開されているのでご参照いただきたい。

参考文献

- 5-1) 飛原英治, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2014, Kobe(2012), pp59-60
- 5-2) 滝澤賢二, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2014, Kobe(2014), pp79-84,
- 5-3) ISO/IEC Guide 51 (2014)
- 5-4) 八尾健治, The International Symposium on HCFC Alternative refrigerants and Environmental Technology, pp182-189, (2000)
- 5-5) 高市健二, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2012, pp90-94, (2012)
- 5-6) http://www.cao.go.jp/consumer/history/01/kabusoshiki/anken/doc/006_110201_shiryu2.pdf, 2015.11.30
- 5-7) 飛原英治, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2014, Kobe(2014), pp69-72
- 5-8) 片岡修身, The International Symposium on HCFC Alternative refrigerants and Environmental Technology 2000, pp218-223, (2000)
- 5-9) 今村友彦, 須川修身, 微燃性冷媒搭載空調機器と化石燃料系暖房器の同時使用におけるフィジカルハザード評価, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.29 No.4, pp.401-411 (2012)
- 5-10) 滝澤賢二, Study on Minimum Ignition Energy of Mildly Flammable Refrigerant, (2011)
- 5-11) Goetzler, et al., Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a(30/7wt.%) in split system residential heat pumps:DOE/CE/23810-92, ADL, (1998)
- 5-12) Dean Smith, et.al, Determining Minimum Ignition Energies and Quenching Distances of Difficult to ignite Components, Journal of Testing and Evaluation, Vol.31, No.3
- 5-13) Imamura, et al., Evaluation of Fire Hazards of A2L Class Refrigerant, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology (2012)
- 5-14) 橋本邦衛, 「安全人間工学」, 中央労働災害防止協会, pp85-97, 東京 (1984)

6. ミニスプリットエアコンのリスク評価

6.1 はじめに

2011年から開始したミニスプリットエアコン（家庭用エアコン）のリスク評価は、微燃性冷媒の家庭用エアコンに関するリスク評価については、日本冷凍空調工業会（以下、日冷工）のミニスプリットリスクアセスメントサブワーキンググループ（以下、SWG）でR32やR1234yf等を対象に推進してきた。以下、第5章に記述したリスク評価手法に基づき記述していくが、最初にハザードについてR32と従来冷媒とを比較した結果から火の付き易さを示す「着火性」と燃える場合の挙動や性質を示す「可燃性」に起因して生じる「燃焼性」について、明らかに従来R410A冷媒と異なることから、燃焼性のリスク評価をNEDOプロジェクトで実施することにした。ただし「火炎接触で発生する有害フッ化水素の影響」やサービスや移設、廃棄時の「ディーゼル爆発」のハザードについてはNEDOプロジェクト開始時に科学的知見が少なく差異の有無が明確でなかった。そのため国立大学法人東京大学（以下、東大）や国立研究開発法人産業技術総合研究所機能化学研究部門（以下、産総研）で基礎検討を行い、ハザードの差が明確になれば必要なリスク評価を実施することとしていた。過去のプログレスレポートの結果から、後の2点のハザードについては従来冷媒と大きな差がないことが明らかとなっている。よって後の2点について課題はあるが社会的な容認があると考え、新たなハザードを設定してリスク評価を行なう予定はない。

着火性の評価に関しては諏訪東京理科大学（以下、諏訪東理大）で実際的な場面を想定した検討を実施し、その結果を順次リスク評価に反映している。今回のプログレスレポートでは過去のプログレスレポートの報告内容を再収録し、5章での燃焼性のハザードに対するリスク評価に沿って、冷媒リークシミュレーション、着火源評価、許容値となるリスクアセスメントの事故発生率、漏洩条件の設定、FTAの評価手法などを記述した。また今回のプロジェクトのリスク評価で得られた壁掛け形エアコンのFTA結果、1対1接続の床置き形ハウジングエアコンとマルチ接続の床置き形ハウジングエアコンのFTA結果とディーゼル爆発や燃焼生成物についても簡単に概括する。家庭に設置されるエアコンは一般的に壁掛け形がその大半を占めるが、ハウジングエアコンを含め表6-1に示すように「壁掛」、「天井埋込」、「壁埋め込み」、「床置」、地袋に設置した「ビルトイン」と様々な形態がある。リスク評価に当たっては「壁掛け」、「天井埋込」、「壁埋め込み」の中で比較的低い位置に設置される「壁掛け」を代表として評価した。また「床置」、「ビルトイン」に関しても漏洩位置が低い「床置」を代表として評価する。

6.2節から6.6節にこれらエアコンに共通の、冷媒リークシミュレーション、着火源評価、許容値、漏洩条件の設定について記述した。6.8節に1対1接続の床置き形ハウジングエアコンの簡単なリスク評価結果を、6.9節にマルチ接続の床置き形ハウジングエアコンの詳細なリスク評価を、6.10節にマルチ接続の壁掛け形ハウジングエアコンの簡単なリスク評価を記述した。以下言葉の煩雑さを避けるため、見出し以外の本文中では、1対1接続の壁掛け形エアコンを「通常壁掛けエアコン」、1対1接続の床置き形ハウジングエアコンを「シングル床置きエアコン」、マルチ接続の床置き形ハウジングエアコンを「マルチ床置きエアコン」、マルチ接続の壁掛け形ハウジングエアコンを「マルチ壁掛けエアコン」として記述する。

表 6-1 評価対象の家庭用エアコンの整理

冷媒量		壁掛	天井埋込 カセット	壁埋	床置	ビルトイン (地袋)
通常RAC	1.0kg	①(壁掛けに集約:6.5節)			②(床置きに集約:6.8節)	
ハウジングRAC	4.0kg	③(同上6.10節)			④(同上:6.9節)	

6.2 冷媒リークシミュレーション

家庭用エアコンでは可燃時空積を初期は「プロパン使用ルームエアコンのリスクアセスメント」⁶⁻¹⁾で算出された値を R32 に比例換算することによって求めた。最終的には冷媒漏洩に伴う圧力上昇が起こらないように境界面を設定して東京大学で 2012 年に改めて行われたシミュレーション結果から算出し直している⁶⁻²⁾。

図 6-1 に東大での家庭用エアコンの室内壁掛け機、室内床置き機、室外機でのシミュレーション状況の様子を示す。

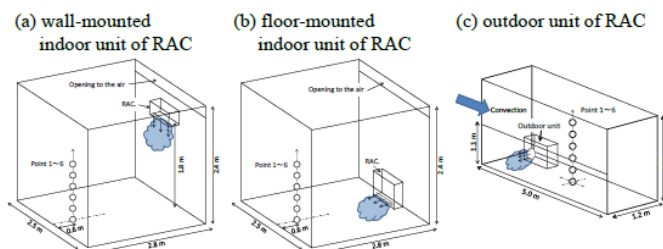


図 6-1 エアコン各機器のシミュレーション状況

具体的には日本家屋での家庭用エアコン設置では各社のカタログで 4.5 畳までの取り付けを掲げているので、その面積で設定することを考えた。しかし先行する「プロパン使用ルームエアコンのリスクアセスメント」で設定された 7m²、(4.3 畳相当)の空間面積が、より狭く厳しい条件となることからその値を踏襲した。よってリスクアセスメントにもっとも重要な家庭用エアコン使用時の室内空間容積としては、漏洩空間を床面積 7m²、高さ 2.4m の小部屋とし、壁掛けエアコンの設置位置を床面からの高さ 1.8m に、床置きエアコンは床面 0m に設置することとした。室外機については 3 面が囲まれたマンションベランダ (4 面目もガラス窓等で封鎖されている) を仮定した。図に示すような条件によってシミュレーションされたエアコン各機器の可燃時空積が東大から示され、ミニスプリット SWG (I) ではそれらを使用して着火確率を計算した。また 1234yf については、全体を網羅的にシミュレーションしていないので R32 のシミュレーション値と同条件の R1234yf のシミュレーション値と比較し、比例換算することによって各々の値を算出した。家庭用エアコンで使用した R32 と R1234yf の可燃時空積の値を表 6-2 に示す。

表 6-2 各ステージの可燃時空積の値 (修正済み)

	(m ³ ・min)		
	R290	R32	R1234yf
1.1 物流時	5.50 × 10	2.00 × 10 ⁻⁴	2.20 × 10 ⁻⁴
2.2 機器据付中	7.16 × 10 ²	2.40 × 10 ⁻³	2.50 × 10 ⁻³
2.5 工事ミス	7.75 × 10 ⁻²	9.00 × 10 ⁻³	1.30 × 10 ⁻²
2.10 冷媒充填時	8.51 × 10 ³	9.97 × 10 ¹	3.70 × 10 ²
3.1 室内機運転中漏洩	1.41 × 10	5.00 × 10 ⁻⁴	5.50 × 10 ⁻⁴
3.5 室内機停止中漏洩	7.16 × 10 ³	2.40 × 10 ⁻²	2.50 × 10 ⁻²
4.1 室外機漏洩	7.76 × 10 ⁻¹	9.00 × 10 ⁻²	1.30 × 10 ⁻¹
5.1 接続配管	8.51 × 10 ³	9.97 × 10 ²	3.70 × 10 ³
7.8 サービス/冷媒放出	7.75 × 10 ⁻²	9.07 × 10 ⁻³	1.30 × 10 ⁻²
8. 廃棄	上記類似状況の値を準用		

6.3 着火源評価

家庭用エアコンが使用される環境での着火源の評価と考察は、諏訪東京理科大の今村⁶⁻³⁾や産総研の滝澤⁶⁻⁴⁾、1998 年に ADL 社 (Author. D. Little 社) からの報告書 DOE/CE/23810-92⁶⁻⁵⁾などを参照して想定した。家庭用エアコンで着火源と想定される項目はスパークと裸火となる。R32 及び R1234yf の室内及び室外機周辺の着火源としては、スパークとしてはマッチやフォークリフトの爪の金属接触や石油ライターを、裸火は可燃域外から持ち込まれるマッチやライター類とサービス時に使用される溶接バーナーを着火源と看做す。なお家庭用エアコンは漏洩冷媒量が少なく、各種の燃焼式設備の燃焼室内で冷媒が燃えることはあっても、設備外に火炎伝播し難いことから給湯器や暖房機を着火源と看做さない。

なお日本冷凍空調学会の 2011 年、2012 年と 2013 年のプログレスレポートの記述を以下に再記述する。

6.3.1 着火源となる電装品

ミニスプリットエアコンが使用される環境に R32 冷媒が漏洩し可燃性雰囲気となった場合の着火性の評価試験結果については、1998 年に ADL から報告書 DOE/CE/23810-92 が AHRI に提出され web に公開されている。

この web 文献では、R32 可燃性雰囲気中で、以下の着火源が検討された。高圧電源のアーキや異常に高温となった電線、裸火及び 120V または 240V 電源での過大な圧縮機電動機の電流を遮断する場合は着火した。一方、壁面スイッチ、電動機、電動ドリル、ハロゲン電球、低電圧アーキ及び 120V での通常負荷電流によるスパークでは着火しなかった。最も大きいエネルギーが発生すると想定される、主回路用電磁接触器で発生する火花の着火性評価については、ADL の評価結果は、20 回の開閉試験で非着火と判定しているが、IEC 基準とは異なっている。

一方、日本の製品に用いられている電磁接触器の接点は、通常わずかな隙間しか持たないカバーで囲われている。最近の産総研の研究では、接点周りが 3mm 程度の隙間を持つカバーで覆われた 12kVA 定格容量の電磁接触器では、火炎伝播が起きないことが確認された。

これらの電気火花による着火の評価は主に R32 での結果であるが、R1234yf 及び R1234ze は、その最小着火エネルギーが R32 より大きい為、更に大きい接点容量の部品まで着火しないと考えられる^{6-6),6-7),6-8)}。

6.3.2 室内及び室外機周辺の着火源(主に住宅)

着火源の存在は、部屋の用途により大幅に異なるが、以下住宅用途及び厨房機器の使用される小規模業務用店舗で用いられている着火源を検討する。

(1) 裸火

ガス機器や蝋燭、薪、炭等の固形燃料、たばこ及びライター等が有り、炎が発生しているものは基本的に微燃性冷媒の着火源となり得る。しかしガスコンロのように炎による上昇気流が生成する場合には、滞留冷媒の濃度低下を引き起こし、さらに上昇気流の速度が冷媒の燃焼速度を超える場合は、火炎が吹き飛び、着火や火炎伝播は起こりにくい。また、炎を発生していないタバコの火や、圧電式のライターでは、R32 の着火には至らないと評価されている。

(2) 着火装置

石油やガス燃料の着火装置には、ピエゾ素子方式、マグネトー、高電圧発生装置によるアーキ、フリントがある。このような炭化水素系ガスの着火用に用いられている着火装置の電気火花、フリントの火花やニクロム線の着火装置では、R32 は着火しない。

(3) 電気機器

着火源となる電気機器は、大きなインダクタンスを持つ機器の通電開時に接点間に発生するアーキ放電火花やショート時の火花が考えられる。また大容量のコンデンサが接続された回路や電源投入時に発生する大電流が接触部を通過する時のエネルギー集中により発生する発熱で、接点の溶融やスパッターリングによる火花も着火源となる。なおブラシモーターのすり減ったブラシ接点から発生する火花も考えられるが、ケーシングの外部との隙間が消炎距離より小さい隙間の場合や全閉型の場合は着火しない。

(4) 静電気

日常空間での静電気の帯電は、一般的には合成材料などの摩擦で起こり、材質による静電容量と相対湿度との相関から絶縁破壊電圧まで帯電する。相対湿度が小さい場合、凡そ 12kV まで帯電する可能性があり、静電容量を 100PF とした場合、放電エネルギーは 7.2mJ である⁸⁾。また IEC61000-4-2 の第 4-2 部の試験条件である RH7%程度の乾燥した状態では、15kV 程度まで昇圧する可能性もあり、この場の放電エネルギーは 11.3mJ 程度に達する。通常、冬季にドアノブと人体間での放電や、衣類を脱ぐ場合に発生する放電では、1mJ 程度となる。

一般的に最小着火エネルギーで可燃性気体が着火する条件は、非常に細い電極の放電部分が突き出した先端部以外は、消炎距離以上の間隔を保ち、先端部が顕著な冷却の影響を与えない程度、離れた状態に限られ

る。また空気の絶縁性能は、3,000V/mmと言われており、電極間の距離が小さいと冷却の影響で、火炎が伝播しないので、微燃性冷媒が静電気で着火する可能性は極めて小さいと考えられる。

以上の内容を再度整理すると以下のようになる。

- ① カバーのない電磁接触器では7.2kVA以上で着火するが、接点周りが3mm以下の隙間を持つカバーで覆われている電磁接触器では、12kVA定格容量以下であれば着火しない。一方、日本の家庭内にある低電圧の電気機器はほとんど着火しない⁶⁻⁹⁾。
- ② ろうそくやマッチなどの弱い火炎を有する裸火は着火するが、石油ストーブや電子式ライターなど燃焼流が速い場合は着火しない。
- ③ 火炎を有しない喫煙中の煙草は着火しない。
- ④ 居住空間で人間に起因する静電気は、ほとんど着火しない。

以上の結果や過去のプログレスレポートの滝澤や今村の検討結果から、小型のミニスプリットエアコンのR32及びR1234yfの室内及び室外機周辺の着火源としては、裸火を仮定して、リスクアセスメントを推進した。なお使用環境が異なる店舗用エアコンの着火源については、別途記述する。

6.4 リスクアセスメントの事故発生確率(許容値)

リスクアセスメント結果の事故発生確率(以下許容値)については、本レポートの5章に詳述したように独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)の資料を参照した⁶⁻¹⁰⁾。家電製品のように一般消費者が比較的メンテナンスを考えずに使用する場合の許容値は「家電製品の重大事故発生確率の目標は 10^{-8} 台/年(100万台ベース)」になる。つまり、年間100万台流通している製品は、100年に1回の致命的事故が発生しても安全と見なす。国内の業務用のミニスプリットエアコン、家庭用エアコンの総台数は約1億台であり、使用時の事故発生確率の目標は計算上 10^{-10} 台/年以下の数字でなければならない。

6.5 漏洩条件の設定(市場全体の漏洩率と機器からの漏洩速度、漏洩量)

漏洩条件の設定に当たっては、市場にある家庭用エアコン全体から1年間にどの程度の割合で冷媒漏洩するかを、日冷工に所属する各社のサービス会社の漏洩率の数値を、各社の市場シェアで分配しなおし平均値を求めた。据付け・修理時の冷媒漏洩や火気の使用実態を、工業会が関係する工事業者や修理業者にアンケート調査し、約600件近い回答を得た。冷媒漏洩や火気使用の発生率は、以下の通りである。冷媒漏洩は据付け時0.77%、サービスでも0.74%とかなり整合性のある値となった。ただし、冷媒チャージ時や回収時の冷媒漏洩はさらに大きな数字となったが、チャージホースや接続ジョイントを脱着する時の微小漏れも、冷媒漏洩と記載された可能性が高く、冷媒漏洩の実態としては約1/100と言う数字が妥当と考えられる。また、火気使用ではサービス作業現場での喫煙率が1.3%、喫煙以外での火気の使用率が4.2%であった。サービス現場では配管のロウ付け作業が必要なケースがあるため、バーナーやバーナーへの着火ライター等の火気の使用が想定され火気の使用率の割合が上がったと予想される。喫煙については後述する。その平均化された日本での家庭用エアコンの漏洩率は0.023%/年となった。また漏洩速度については配管腐食による数日から数か月かけた微少漏れや、数時間程度で漏れる溶接不良の急速漏れなどが想定される。しかしIEC60335-2-40に規定された4分間で充填冷媒が全量漏洩するという条件の方が、漏洩速度がさらに速く一番厳しいため、この条件を1次リスク評価で計算する場合の漏洩速度とした。

6.6 FTA 結果の整理

以上の設定で家庭用エアコンの冷媒差によるリスク評価を行った結果を表6-3に示す。1対1接続の通常壁掛けエアコンでは見直しリスクアセスメントでのハザード発生確率(着火率)が使用時でほぼ 10^{-10} 、輸送、据付け、サービス、廃棄時で 10^{-9} 以下と許容値を下回ったので、それ以上のリスクアセスメント試行は行わ

なかった⁶⁻¹¹⁾。

なお従来の R410A 家庭用エアコンに微燃性冷媒を適用する場合に、R1234yf は性能や効率を従来と同等にするには、熱交換器を約 1.4 倍に大きくし、新たに大型の圧縮機を開発し、その信頼性を確保する必要がある。表 6-3 は昨年のプロGRESSレポートから少し値を見直した。

表 6-3 通常壁掛けエアコンの冷媒差での着火確率

リスク：着火確率			
分類	R32	R1234yf	R290
物流	4.1×10^{-17}	4.5×10^{-17}	$9.7 \times 10^{-16} \sim 1.2 \times 10^{-12}$
据付け	2.7×10^{-10}	3.1×10^{-10}	$3.7 \times 10^{-9} \sim 2.2 \times 10^{-8}$
使用（室内）	3.9×10^{-15}	4.3×10^{-15}	$5.0 \times 10^{-13} \sim 9.5 \times 10^{-9}$
（室外）	1.5×10^{-10}	2.1×10^{-10}	$4.9 \times 10^{-13} \sim 9.3 \times 10^{-9}$
サービス	3.2×10^{-10}	3.6×10^{-10}	$2.8 \times 10^{-7} \sim 8.1 \times 10^{-7}$
廃棄	3.6×10^{-11}	5.3×10^{-11}	$4.1 \times 10^{-7} \sim 5.1 \times 10^{-7}$

シングル床置きエアコン、マルチ床置きエアコンでは見直しリスクアセスメントを行っても、前記の許容値より大きくなった。そのためと設置状況の確認やサービス実態の調査、日本家屋を中心とした部屋のドアやふすまなどの隙間調査を行い、より使用実態に近いリスクアセスメントを実施した。また許容値についても通常の壁掛けエアコンと同じでよいのかの点も見直した。表 6-4 に各種ミニスプリットエアコンの設置形態、冷媒量差での着火率を対策案として実施した結果値として示す。ハウジングエアコンの床置きの使用時の許容値は 10^{-9} であり、それ以外の物流、据付けなどの許容値は 10^{-8} なので、ほぼ許容値を満足する数字となっている。各論は 6.8 節と 6.9 節に詳述する。

表 6-4 各種ミニスプリットエアコンの着火確率

リスク：着火確率			
分類	通常壁掛け R32	シングル床置き R32	マルチ床置き R32
物流	4.1×10^{-17}	3.6×10^{-11}	1.1×10^{-9}
据付け	2.7×10^{-10}	4.0×10^{-11}	9.0×10^{-9}
使用（室内）	3.9×10^{-15}	4.1×10^{-10}	4.7×10^{-10}
（室外）	1.5×10^{-10}	8.6×10^{-11}	1.1×10^{-9}
サービス	3.2×10^{-10}	2.6×10^{-10}	4.3×10^{-9}
廃棄	3.6×10^{-11}	2.5×10^{-11}	4.1×10^{-10}

6.7 1対1接続の壁掛けエアコンのリスクアセスメントと結果

以下、全ステップの中から室内機使用のステップとサービスのステップについてリスクアセスメント算出の経過を少し詳しく見ていく。

6.7.1 室内機使用のリスクアセスメント

R32 の室内機着火に関する FTA を R290 の FTA をベースに行った。Fault Tree の構成は R290 と同じである。微燃性冷媒 R32 を用いるが、可燃性に対し対策を行わない未対策ケースの FTA を図 6-2 に示す。

図のそれぞれの事象の値は R32 と R290 の値を併記した。FTA の事象のうち、可燃になる空間体積と持続時間については表 6-2 に記した値を反映させた。これ以外の事象の値については R290 と同じ値とした。室内での着火確率の R290 と R32 の比較を表 6-5 に示す。

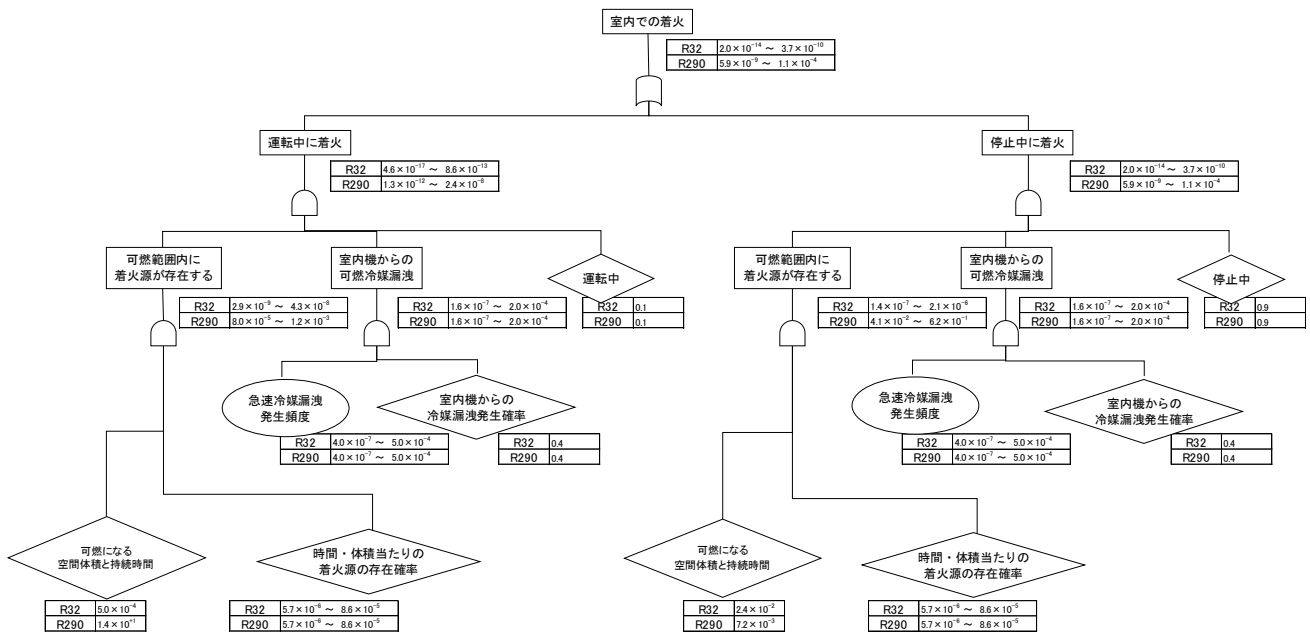


図 6-2 室内機の FTA (未対策)

表 6-5 室内機使用時の着火リスク確率

項目	R32		R290	
	未対策	対策	未対策	対策
室内での着火確率	2.0×10^{-14} $\sim 3.7 \times 10^{-10}$	1.8×10^{-17} $\sim 3.4 \times 10^{-13}$	5.9×10^{-9} $\sim 1.1 \times 10^{-4}$	5.0×10^{-13} $\sim 9.5 \times 10^{-9}$
R290 比	1/297555	1/27500	-	

R32 での室内機の着火確率は未対策ケースで R290 の 30 万分の 1, 対策ケースで R290 の 3 万分の 1 となった。これは、R290 に対して R32 の可燃になる空間体積と持続時間が未対策ケースの運転停止中で 30 万分の 1, 対策ケースで 3 万分の 1 となっており、その比率がそのまま着火確率の

比率となっているためである。今回の条件では、未対策ケースでも 10^{-10} 以下の着火確率であり、室内機に関してはリスクが小さくなっている。その後、喫煙率の整理や R32 では R290 に比べて着火源が少なくなることなどの見直しを経て、表 6-3 に示した 3.9×10^{-15} の値となった。

6.7.2 サービスのリスクアセスメント

同様に、サービスに関して R32 の FTA を行った。

R290 と R32 の着火確率比較結果を表 6-6 に示す。

まず、R290 の FTA を R32 に置き換えて着火確率を求めた。冷媒の種類を置き換えるにあたり、冷媒物性に直接関係する 2 つの項目の数値を変更した。一点目は可燃になる空間体積と持続時間であり、R32

表 6-6 サービス時の着火リスク確率

項目	R32		R290	
	未対策	対策	未対策	対策
室内での着火確率	1.8×10^{-6} $\sim 9.0 \times 10^{-6}$	3.3×10^{-10} $\sim 1.2 \times 10^{-9}$	1.7×10^{-6} $\sim 9.3 \times 10^{-6}$	2.3×10^{-7} $\sim 5.5 \times 10^{-7}$
R290 比	100/103	1/1400	-	

で算出すると R290 の約 1/10 となる。二点目は「延焼する確率」であり、R290 の報告書によると R32 を対象とした ADL の値を 1000 倍していることから (R290 の MIE が R32 の 1/1000 であるため)、今回は ADL の値をそのまま使用した。上記 2 項目を変更した結果、着火確率は $1.8 \times 10^{-6} \sim 9.0 \times 10^{-6}$ となり、R290 と同等であった。(R290: $1.7 \times 10^{-6} \sim 9.3 \times 10^{-6}$) これは、サービスのリスクアセスメントではサービスマンの喫煙による着火の数値が大きく、全体の数値に対して支配的となっているためである。上記 2 項目を変更しても、喫煙に関する項目の確率は変化しないことから、全体としての変化も少ない結果となった。

正確には対策とは言えないが、R32 のような微燃性冷媒では、ライターの花では着火しても煙草の花では着火しないことが判かっている。それを FTA に反映させ、ライターの火が点いている時間は喫煙時間に対して短時間であるため、時間の概念を入れて FTA を見直した。喫煙による着火確率の項目に「サービス時間に

対する喫煙時間の割合」と「喫煙中にライターを着けている時間の割合」を追加することで、ライターのみでの着火に限定した。その結果、着火確率は $2.3 \times 10^{-8} \sim 8.4 \times 10^{-8}$ となり、約 1/100 となった。ただし、この時間の割合の見直しに関してはもう少し深く考察する必要がある。

修理サービス時は、他ステージと比較して対策効果が少ない傾向にある。これは、対策可能な事象の大部分がヒューマンエラーに関する項目であることが要因である。対策内容としては、「手順書の作成」や「教育の徹底」などであり、その効果は推定で 1/2～1/5 程度としているため、全体の着火リスク低減幅も少ないと予想される。R32 として算出した未対策の着火確率に対して、対策後は $3.3 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-9}$ となった。その後、喫煙率の整理や R32 では R290 に比べて着火源が少なくなることなどの見直しを経て、表 6-3 に示した 3.2×10^{-10} の値となった。

6.8 ハウジングエアコンのリスクアセスメントと結果

6.8.1 ハウジングエアコンの設置形態と課題

ハウジングエアコンには壁掛け形の他に様々な種類の室内機の形態があり、据付方法や接続仕様により個別のリスクアセスメントが要求される。図 6-3 に、ハウジングエアコンの設置形態と検討条件についてハウジングエアコンのマルチ接続タイプの設置形態を 1 対 1 接続タイプのエアコンと比較した。ハウジングエアコンの室内機は壁掛け形以外に床置き形、天井埋込カセット形、壁埋込形およびビルトイン形がある。一方、現在評価対象としている微燃性冷媒はフロン系であり対空気密度が大きいことから床面に溜まる傾向がある。設置形態の中で冷媒が漏洩した場合のリスクは床置き形が一番高くなり、また冷媒封入量が多くなるマルチ接続の床置き形ハウジングエアコンがさらにリスクが高くなると予想される。煩雑さを避けるため、まず 1 対 1 接続の床置き形ハウジングエアコンのリスク評価について説明し、その後、マルチ接続の床置きハウジングエアコンに言及する。最後にマルチ接続の壁掛け形エアコンの着火リスク確率を参考として提示する。

6.8.2 1 対 1 接続の床置き形ハウジングエアコン(シングル床置きエアコン)の着火源と設置条件

シングル床置きエアコンの着火源としては、従来の壁掛け形と同様の仮定で行った、また室内空間についても壁掛け形と同様の床面積 7m^2 、高さ 2.4m の小部屋とし、室内機の設置位置は床面とした。

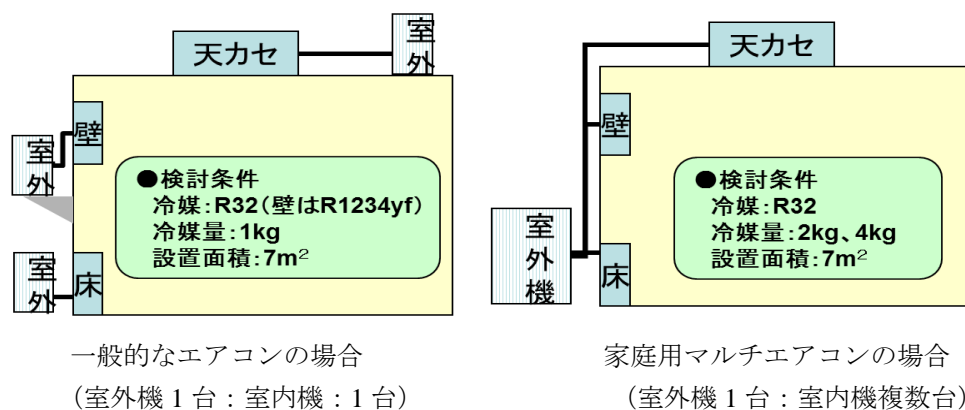


図 6-3 ハウジングエアコンの設置形態と検討条件

表 6-7 シングル床置きエアコンのライフステージと許容値（事故発生確率）

ライフステージ	RAC(壁掛)	RAC(床置)	PAC(カセット)
冷媒種	R32,R1234yf	R32	R32
代表モデル	壁掛 冷媒量:1.0kg / 7m ²	床置 冷媒量:1.0kg/7m ² 使用(室内)では10m ²	-室内機:カセット、天井リ 冷媒量:3kg/11m ² -室外機:冷媒量6kg/42m ²
輸送・保管	10000台/1000m ² (室外機)	10000台/1000m ² (室外機)	2300台/1000m ² (ダイン倉庫実績)
使用	室内	-急速漏洩発生確率 4.0E-4~4.7E-4 -換気条件:換気なし,隙間なし -着火源:全て共通 -着火事故発生確率の計算方法 ⇒瞬間的なON動作が主体	-急速漏洩発生確率(ビルマル×安全率3) 5.0E-6×3 -換気条件:3mm×900mmの隙間 -着火源:共通+業種毎に設定 -着火事故発生確率の計算方法 ⇒着火源に応じて、瞬間的なON 動作が継続的な動作か判断
	室外	-急速漏洩発生確率 2.2E-7~2.8E-4 -風速:1.0m/s	-急速漏洩発生確率(ビルマル同等) 急速:1.34E-3 噴出:1.37E-4 風速:0.0.5m/s
サービス・修理	ヒューマンエラー発生確率:1.0E-3	ヒューマンエラー発生確率:1.0E-3	ヒューマンエラー発生確率:1.0E-3
廃棄 (リサイクル法)	量販業者撤去(ホンダタウン) 機器の冷媒回収⇒リサイクルセンター (家電リサイクル法対象)	専門業者撤去(ホンダタウン) 機器の冷媒回収⇒リサイクルセンター (家電リサイクル法対象)	室外機の冷媒回収 -設置場所 -設置場所以外
リスク許容 レベルの設定	普及台数1億台/10年、100年に1度の事故 1E-10 以下	普及台数20万台、100年に1度の事故 使用時:1E-08 以下 作業時:1E-07 以下 並行して審議を進めているSWG II、ビルマルチSWG とリスク許容レベルを同等とする 使用時:1E-09以下 作業時:1E-08以下	普及台数600万台、100年に1度の事故 使用時:1E-09 作業時:1E-08 ※1 ※1 常時作業する作業者の場合は自己防衛 により危害度が1ランク低下するとの考え)

6.8.3 シングル床置きエアコンにおけるリスクアセスメントの事故発生確率の目標

リスクアセスメントの事故発生確率の許容値は壁掛け形と同じように NITE(National Institute of Technology and Evaluation : 独立行政法人技術基盤機構)の考えに従った。床置き形を含むハウジングエアコンは家庭用エアコンの据付け業者が設置する場合もあるが、通常は十分な教育を受けた専門業者が設置することが多い。床置き形ハウジングエアコンのリスクアセスの評価は、市場流通台数が壁掛け形に比べて約 1%以下と少ないこと、またパッケージエアコンやビル用マルチに仕様や使い方が似ていることから、使用時の事故発生確率の許容リスク値を 10⁻⁹ 以下と設定した。なお使用時以外は職業人として要求される許容値として、使用時の目標の 10 倍としても安全が確保できると考え 10⁻⁸ と設定した。表 6-7 に許容リスク値を導くベースの考え方と許容値を整理して示す。

6.8.4 シングル床置きエアコンのリスクアセスメント検討

6.8.4.1 設置面積制限対策によるリスクアセスメント検討 [対策 S1]

先ほどの仮定で R32 冷媒について床置き形エアコンの FTA に基づくリスクアセスメントを床面積 7m² (4.3 畳相当) の居室で実施した。結果からは許容値を満足しないことが分かった。

そのため第 5 章に示した IEC の Guide51 の反復改善プロセスに基づくリスクアセスメント項目に基づき、「m.リスクの低減」を SWG で考案した。考案に当たっては日科技連 R-Map 実践研究会の「リスク低減の方法とその効果」の表を参照にした⁶⁻¹²⁾。低減に当たっては安全原則に則り本質安全となる「リスクの除去」と「リス

表 6-8 リスク低減方法と効果

リスク低減レベル	具体的な方法	低減効果(セル数)		
		最大	通常	最小
リスク除去	室内着火源をなくす、ブライン方式で室内に冷媒を持たせない	-4	-3	-2
リスク低減	インターロック、攪拌による濃度低減、排気による濃度低減、	-3	-2	-1
安全装置・ 防御装置	濃度検知による冷媒回路弁遮断、 電源遮断	-2	-1	-1
警報	濃度検知による警報、	-1	-1	0
取扱説明・ 注意銘板	マニュアルと教育訓練、注意・警 告表示、設置面積制限	-1	0	0

クの低減」, 保護手段による「安全装置や防御装置」の設置, 使用上の情報提供となる「警報」や「取扱説明・注意銘板」の整備の項目に従い床置き形エアコンに適用できる具体的対策方法を考案した. 表 6-8 に具体的対策方法を整理して列記する.

本質安全に基づく「リスクの除去」の対策方法は, 着火源を室内に設置しないことや持込まないこと, ブラインなどを用いて冷媒を室内に持込まないことなどであるが現実的ではない. また表 6-8 の最後のカラムは各対策方法による R-Map での対策効果の低減度合いを示したものである. 冷媒拡散や排気, インターロックなどの対策方法でのリスク低減は, おおむね 2 段階程度の効果が期待できる. 一方, 取り扱い説明書の整備や注意喚起の表示は, リスク低減効果が 1 段階程度となり, 効果的な説明書の作成や分かり易い注意表示が求められることとなる.

この中からまず床置き形エアコンの対策方法 S1 として, 効果は小さいが実施が容易な注意喚起に当たる使用(室内)ステージにおいて 6 畳未満の居室への設置を制限することを考えた.

この条件でその他のステージも含め着火リスク確率を計算した結果を表 6-9 に示す. 対策 S1 を行なえば, 室内の使用時における着火確率は, 9.9×10^{-10} と許容値をわずかに下回る数値となる.

表 6-9 床置き形ハウジングエアコンの
着火リスク確率 (対策 S1 の場合)

Risk: Ignition Probability		
Type	Representative model	R32 (Measure 1)
Logistics (for each warehouse)	Middle-size warehouse	3.6×10^{-11}
Installation	3.24 m ² veranda	4.0×10^{-11}
Use (Indoor)	9.9 m ² room	9.9×10^{-10}
(Outdoor)	3.24 m ² veranda	8.6×10^{-11}
Service	3.24 m ² veranda	2.6×10^{-10}
Disposal	3.24 m ² veranda	2.5×10^{-11}

表 6-10 床置き形ハウジングエアコンの
着火リスク確率 (対策 S2 の場合)

Risk: Ignition Probability		
Type	Representative model	R32 (Measure 2)
Logistics (for each warehouse)	Middle-size warehouse	3.6×10^{-11}
Installation	3.24 m ² veranda	4.0×10^{-11}
Use (Indoor)	7 m ² room	4.1×10^{-10}
(Outdoor)	3.24 m ² veranda	8.6×10^{-11}
Service	3.24 m ² veranda	2.6×10^{-10}
Disposal	3.24 m ² veranda	2.5×10^{-11}

6.8.5 4.5 畳設置を考慮したリスクアセスメント検討 [対策 S2]

居室設置面積の制限による対策は据付け業者に依存する面が強い. そこで冷媒量 1kg が部屋全体に拡散した場合には, 冷媒濃度が 2.7% 程度となることから対策 S2 を考案した. 対策 S2 は本質安全の「リスク低減」に該当する漏洩検知後, 室内機のファン拡散により居室空間を LFL 濃度未満にすることである. またこの対策 S2 については, 停電やブレーカ OFF, また部品の故障等でファンによる拡散ができない場合も考慮した. ブレーカ OFF については, 冷房および暖房シーズン以外で, ユーザーがブレーカを切る場合があるため, 製品本体へ注意喚起の明示を行う対策も考慮した. 注意喚起による効果は, ブレーカ OFF の頻度を 1/10 に抑制するとした. 室内機のファンによる拡散を行うと可燃域が生成しないため, 可燃時空積は実質ゼロになる. しかし今回行った着火確率の計算においては, 対策 S2 を実施しない場合の可燃時空積の値の 1/10000 になると仮定して FTA を作成した. 対策 S2 を講じた場合の床置きエアコンの着火確率を表 6-10 に示す. 床置き形エアコンの室内(使用時)の着火確率は, 漏洩検知後に室内機のファン拡散を行う対策 S2 を施した場合に通常壁掛け形エアコンと同様の小さな部屋でも許容値を下回ることが分かった.

対策 S2 として漏洩検知後, 室内機のファンによる拡散により居室内の空間を LFL 濃度未満にすることを検討した. また, 対策 S2 については, 停電(※1)・ブレーカ OFF(※2)・部品の故障等(※3)でファンによる拡散ができない場合も考慮した. またブレーカ OFF については, 冷房および暖房シーズン以外で, ユーザーがブレーカを切る場合があるため, 製品本体へ注意喚起の明示を行う. 注意喚起による効果は, ブレーカ OFF の頻度を 1 / 10 に抑制するとした. また室内機のファンによる拡散で可燃空間は実質ゼロになるが, 着火リスク確率の計算においては対策 S2 を実施しない場合の可燃時空積の値の 1/10000 と仮定して FTA を作成した.

床置き形ハウジングエアコンの室内(使用時)の着火確率は, 対策 S2 を施した場合に通常壁掛けエアコン

と同様の小部屋（床面積 7m²、高さ 2.4m）でも許容リスク値（10⁻⁹以下）を下回ることが判った。ファン拡散の効果についてはマルチ床置きエアコンの節で詳細に記す。

(※1) 全国 10 電力会社での年間平均停電時間率

(※2) エアコンを使用しない中間期を 4 か月（4, 5, 10, 11 月）。この期間中にユーザーがブレーカ OFF する率（リサーチ会社調査結果より算出）

(※3) 製品本体のプリント基板、冷媒検知センサのプリント基板および室内機のファンモータ故障率の合計（市場サービスでの各部品交換率より算出）

6.9 マルチ接続のハウジングエアコンのリスクアセスメントと結果

マルチ接続タイプのハウジングエアコンの設置形態と課題は、一台の室外機に最大 4 台程度の室内機を接続することから冷媒封入量が多くなる。そのため冷媒漏洩時の可燃時空積が大きくなることによってリスクが高くなることが問題となる。本節ではマルチ接続タイプのハウジングエアコンの中でリスクが高い床置き形エアコンについてリスクアセスメントの前提と結果を詳述し、最後にマルチ接続タイプの壁掛け形エアコンの FTA 結果を示す。

マルチ床置きエアコンの室内機の設置形態、使用実態はシングル床置きエアコンと全く同じため、着火源についても同じとして取り扱える。表 6-11 に、マルチ接続タイプのハウジングエアコンのライフステージと許容値（事故発生確率）について示す。表 6-11 に示すように、マルチ床置きエアコンの許容値はシングル床置きエアコンと同じとなり、使用時の許容リスク値を 10⁻⁹ 以下、業者作業時は 10⁻⁸ 以下と設定した。冷媒量は、マルチ接続タイプのハウジングエアコンで想定される最大冷媒量である 4kg を設定した。

表 6-11 ハウジングマルチエアコンのライフステージと許容値(RAC マルチ)

ライフステージ	RAC(壁掛)	RACマルチ	ビル用マルチ	
冷媒種	R32 R1234yf	R32	R32	
代表モデル	壁掛 冷媒量1.0kg / 7m ²	壁掛、床置 冷媒量4.0kg / 7m ²	・四方カセット/3馬力/冷媒量26.3kg/4.2m ² ・床置き	
輸送、保管	10000台/1000m ² (室外機)	10000台/1000m ² (室外機)	1000台/1000m ²	
使用	室内	・急迫漏洩発生確率 4.0E-4~4.7E-4 ・換気条件:換気なし/隙間なし ・着火源:全て共通 ・着火事故発生確率の計算方法 ⇒瞬間的なON動作が主体	・急迫漏洩発生確率 1.5E-5 (SWGII同等) ・換気条件:換気なし/隙間なし ・着火源:共通+規定部屋毎に設定 ・着火事故発生確率の計算方法 ⇒瞬間的なON動作が主体	・急迫漏洩発生確率 5.0E-6 ・換気条件:18.0514(FDISの安全対策) ・着火源:共通+装置毎に設定 ・着火事故発生確率の計算方法 ⇒着火源に応じて、瞬間的なON動作か継続的な動作か判断
	室外	・急迫漏洩発生確率 2.2E-7~2.6E-4 ・風速:1.0m/s	・急迫漏洩発生確率 2.2E-7~2.6E-4 ・風速:1.0m/s	・急迫漏洩発生確率 2.2E-7 ・噴出:1.37E-3 風速:0.05m/s
サービス、修理	ヒューマンエラー発生確率:1.0E-3	ヒューマンエラー発生確率:1.0E-3	ヒューマンエラー発生確率:1.0E-4	
廃棄 (リサイクル法)	量販業者撤去(ホンダタウン) 機器の冷媒回収⇒リサイクルセンサ (家電リサイクル法対象)	専門業者撤去(ホンダタウン) 機器の冷媒回収 埋込型⇒専門解体業者 埋込型以外⇒リサイクルセンサ	専門業者撤去(ホンダタウン) 機器の冷媒回収⇒専門解体業者 (家電リサイクル法対象外)	
リスク許容 の設定	レベル 普及台数1億台/10年、100年に1度の事故 1E-10 以下	普及台数100万台、100年に1度の事故 使用時:1E-08 以下 作業時:1E-07 以下 並行して審議を進めているSWGII、ビルマルチSWGとリスク許容レベルを同等とする 使用時:1E-09以下 作業時:1E-08以下	普及台数1000万台、100年に1度の事故 使用時:1E-08 以下 作業時:1E-08 以下※1 ※1 常時作業する作業者の場合は自己防衛により危害度が1ランク低下するとの考え	

また部屋の想定と漏洩実態を見直し、より現実的な以下の 2 点の条件変更を行った。

- 1) 住宅における各居室には必ずドアや引き戸があり隙間がある。このドアの上下隙間を各 3mm とする。
- 2) 床置き形エアコンからの冷媒の初期の吹出し濃度を、日本冷凍空調工業会の数社で行った実機で漏洩試験結果より 30%とする。

6.9.1 現実的な住宅環境を踏まえた検討条件の設定

ビルと住宅では換気の違いがあるので、住宅環境に合わせた隙間を検討する。住宅内の換気は、隙間換気（ドア隙間）と機械換気があり換気効果を出すには、給気経路と排気経路が必要である。図 6-4 に一般的な

住宅の給排気経路の概略を示す。

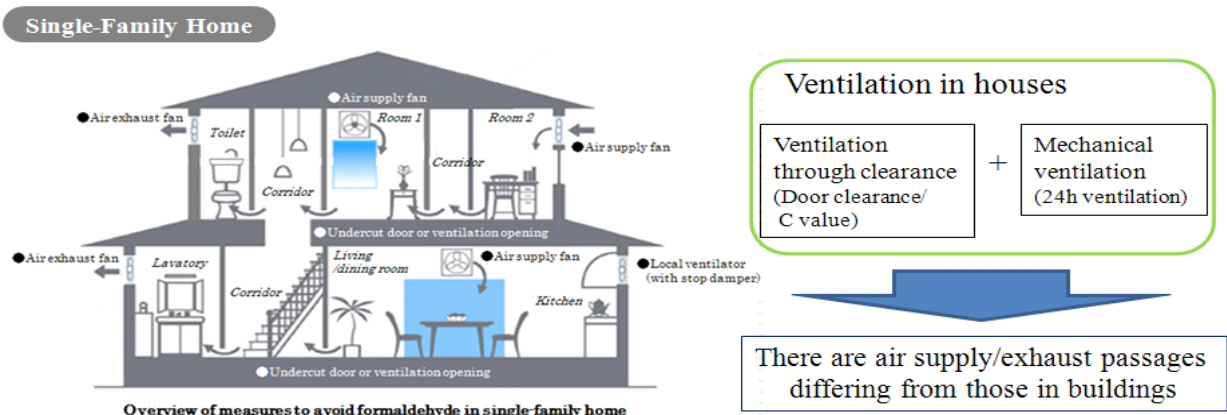


図 6-4 現実的な住宅環境をふまえた換気経路の検討

6.9.2 住宅環境を踏まえたドア隙間について：開き戸と引き戸

住宅環境を踏まえた住宅におけるドア隙間の考え方について説明する。一般的に住宅における隙間は、ドアを換気通路にする場合と換気通路にしない場合の2つの考え方がある。具体的には、ドアを換気通路にする場合はドア隙間は10mm以上となる。一方、換気通路にしない場合もドア上側およびドア下側の隙間がある。図6-5に開き戸における各メーカーのドア隙間調査結果を示す。各ドアメーカーより最小：上3mm、下4mmとの結果を得た。

次に同じく引き戸での調査結果を図6-6に示す。引き戸については最小：上3mm、下3mm、ドアスリット6.5mmとの結果を得た。

以上より、実際の試験やFTAは上下とも厳しい条件の3mm隙間(ドアスリットなし)として行なった。ただし襖や障子のような引き戸については、個別に建具を製作する場合下隙間がない場合も考慮し、下側隙間0mm、上側隙間3mm、側面隙間6.5mmとし別途シビアリスクとしてリスクアセスメントを実施している。

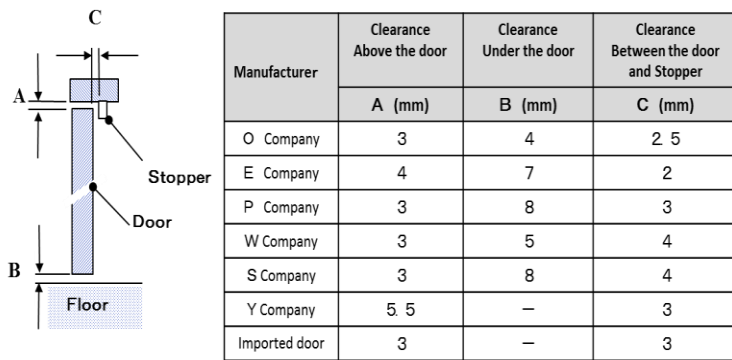


図 6-5 各社の開き戸の隙間寸法

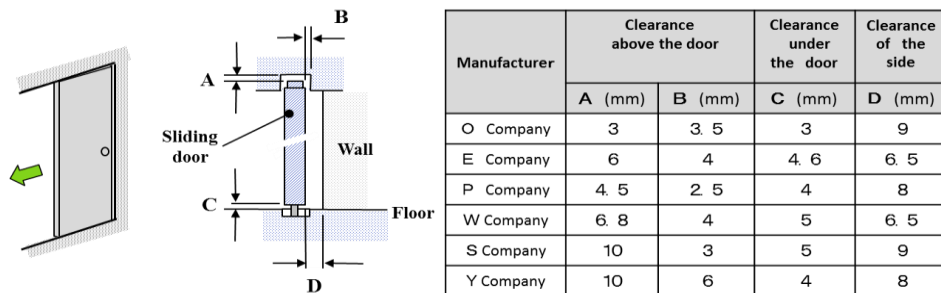


図 6-6 各社の引き戸の隙間寸法

6.9.3 マルチ接続の床置きエアコンから部屋へ漏洩する冷媒の初期濃度

マルチ床置きエアコンの吹出口から漏洩する冷媒濃度は、製品機器の風路出口から部屋へ漏洩する濃度の中で、着火リスクの算出時の条件として重要なパラメータである。従来はリスクを高めに見積もるためプログレスレポートに記載された東大シミュレーション条件（SWG 提案の初期漏洩濃：100%）と仮定していたが、より現実的な条件でシミュレーションを行うため、今回は日冷工の各社の実験結果（初期：30%）を用いて検討を行った。図 6-7 に今回の現実的な住宅での条件と従来の東大シミュレーション条件との比較を示す。また、市場での冷媒漏れ調査結果より冷媒漏れ速度も 10kg/h に変更した。

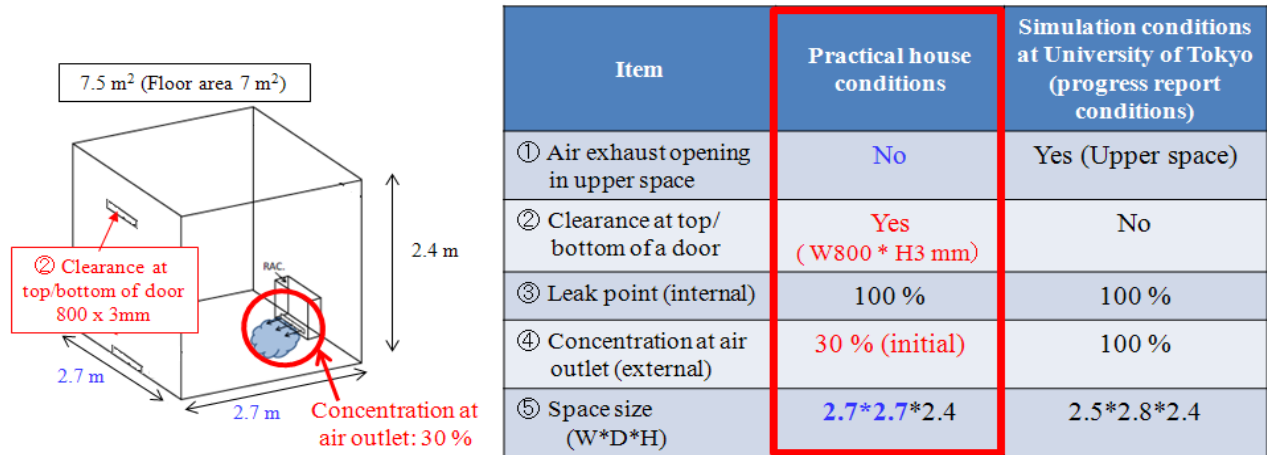


図 6-7 シミュレーション条件の比較

6.9.4 可燃空間時空積

図 6-7 に示す現実的な住宅でのシミュレーション条件において、マルチ床置きエアコンを想定し、室内への冷媒漏洩量 4kg の場合の冷媒漏洩時の解析をした。その結果を図 6-8、表 6-12 に示す。マルチ床置きエアコンでは、室内へ冷媒が漏洩すると R32 は空気より重いため、床面付近に濃い濃度の冷媒が溜まり込み、ドアの下側隙間より冷媒が室外に排出される。図 6-8 より、“開き戸の場合”において、冷媒漏洩が完了する 24 分時点で、室内に残っている冷媒量は 2.4kg となり全冷媒漏洩量の 4 割が室外へ排出されている。また“引き戸の場合”においても、“開き戸”と同様に側面側の隙間より冷媒が室外に排出され 24 分後には、全冷媒漏洩量の約 3 割が排出される。表 6-12 に、開き戸と引き戸の場合の可燃時空積のシミュレーションによる解析結果を示す。開き戸に対して引き戸の方が床面付近の濃度の濃い冷媒が排出できる隙間が狭いため、室内での可燃空間が存在する時間がわずかに長くなるが、側面側の縦方向の隙間があるため、可燃時空積はそれぞれ 1.43m³/h と 1.51m³/h になり、ほぼ同じ値となった。このように、現実的な住宅にあるドア等の隙間を考慮すると、室外に冷媒が排出される効果は大きく、冷媒漏洩したとしても室内に冷媒が長時間滞留することは無い。

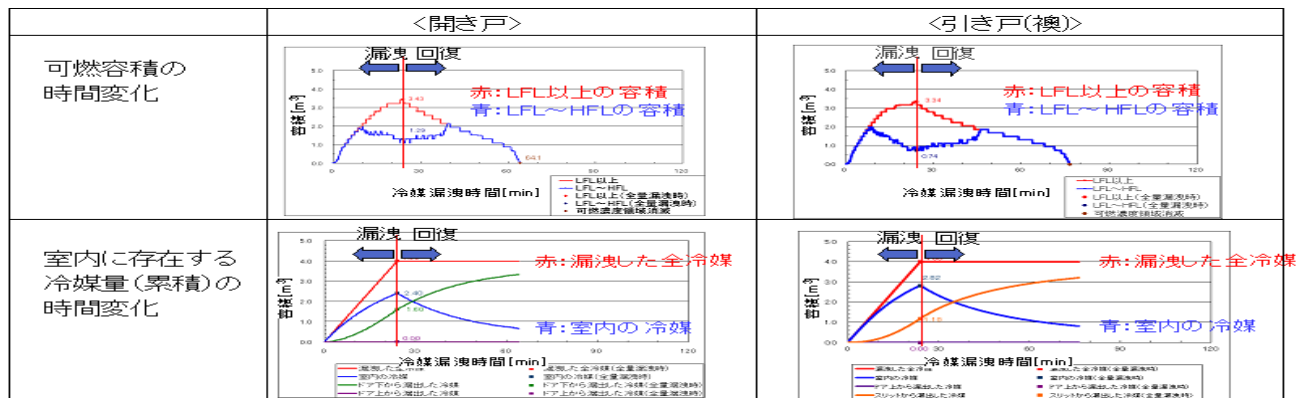




図 6-8 可燃容積と室内に存在する冷媒量の時間変化

表 6-12 開き戸と引き戸の場合での可燃時空積（4.5 畳の部屋の場合）

	開き戸 	引き戸 (下隙間なし) 
可燃空間時空積 [m ³ /h]	1.43	1.51
室内に可燃空間が存在 する時間 [min]	64	77

6.9.5 マルチ接続タイプの床置き形ハウジングエアコンのリスクアセスメント検討

6.9.4 節において、現実的な住宅のドア隙間を考慮すると、室内へ漏洩した冷媒はドア隙間より室外へ排出されるが、依然として床面付近には可燃空間は存在する。このため、着火リスクを低減させるため、シングル床置きエアコンで対策とした室内機ファンによる拡散（対策 M2）も織り込んで検討した。

6.9.6 室内機のファンによる拡散 による効果

図 6-9 は、冷媒 R32 を室内（4.5 畳の部屋）へ 4kg 漏洩させた時の実験結果のデータであり、部屋の高さごとの冷媒濃度の変化を示した。左側のグラフは、拡散無しの場合、右側のグラフはファンによる拡散（対策 M2）有りの実験結果である。また拡散（対策 M2）有りで室内への冷媒漏洩開始 20 秒後から室内機のファンを回した結果である。室内機のファンによる拡散は「LFL 濃度×部屋容積」未満の冷媒量の漏洩の場合に効果があり、4.5 畳の部屋において冷媒 4kg が漏洩しても LFL 濃度に到達しないことが判る。

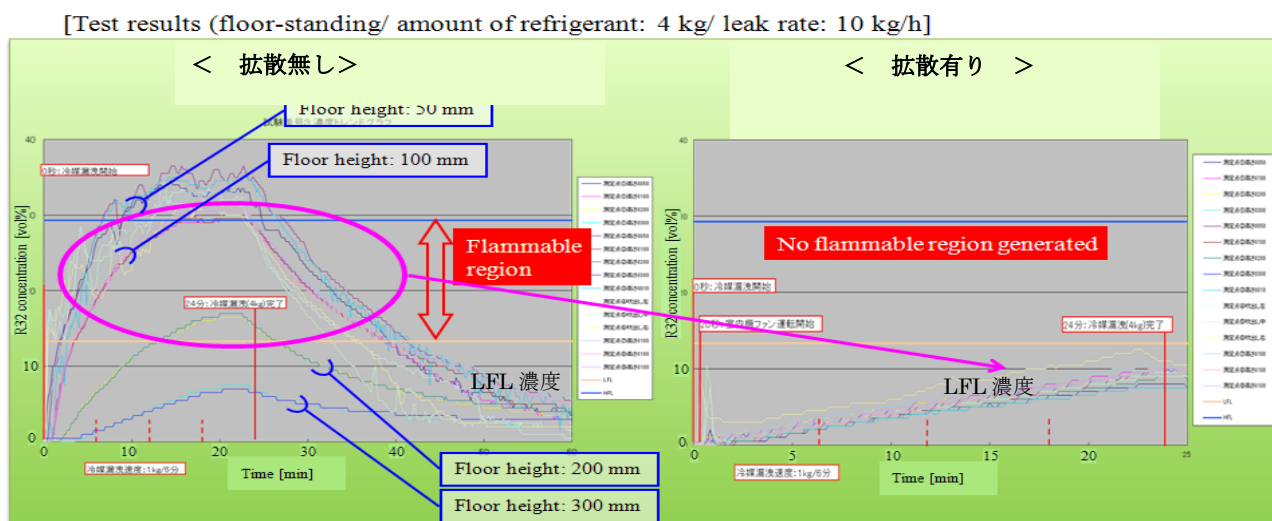


図 6-9 室内への冷媒漏洩時における部屋の高さごとの冷媒濃度（部屋 4.5 畳の場合）

6.9.7 マルチ接続タイプの床置き形ハウジングエアコンのリスクアセスメント結果

表 6-13 に、マルチ床置きエアコンの各ライフステージの着火確率を示した。室内（使用時）のステージの着火確率は、一般的な開き戸の場合を想定した結果である。表 6-13 の結果より、使用時以外のステージでは対策不要の結果になった。一方、使用時のステージでは、現実の住宅にあるドア隙間を考慮することに加えて、室内機のファンによる拡散（対策 M2）を織り込むことにより、4.5 畳の部屋に設置された場合でも着火リスク確率は 4.7×10^{-10} となり許容値 (10^{-9} 以下) を下回る値となった。また、引き戸の場合においても同様に 4.7×10^{-10} となり許容値を下回った。なお、今回のリスク評価をもとに、日冷工で作成した「R32 冷媒使用家庭用エアコンの配管施工マニュアル」に気密の高い部屋への設置時の注意書きの追記を行った。

表 6-13 ライフステージごとの着火リスク確率（マルチ接続タイプ床置き形の場合）

Risk: Ignition Probability		
Type	Representative model	R32
Logistics (for each warehouse)	Middle-size warehouse	1.1×10^{-09}
Installation	3.24 m ² veranda	9.0×10^{-09}
Use (indoor)	7 m ² room	4.7×10^{-10}
Use (outdoor)	3.24 m ² veranda	1.1×10^{-09}
Service	3.24 m ² veranda	4.3×10^{-09}
Disposal	3.24 m ² veranda	4.1×10^{-10}

表 6-14 には使用時のステージにおいて、FTA 展開で想定したパターンごとの発生割合とそれぞれパターンでの着火確率を示す。表において、パターン 2 が室内機のファンによる拡散（対策 M2）を行った場合であり、全パターンのうち 50.91%の割合を占める。また、パターン 1（エアコン運転中）と合すると全パターンの発生割合の 99.7%がファン運転となり、着火リスク確率もパターン 1, 2 の合計で 1.58×10^{-11} となり許容リスク値 (10^{-9} 以下) と比較しても非常に低い値となっていることが判る。

表 6-14 使用時のステージ（室内機）での F T A 展開した発生パターンの割合と着火リスク確率

パターン	[対策2]の内容		電源	運転/停止	部品 故障有無	全パターン 内での 発生割合	着火リスク確率
	室内ファンに よる拡散	ブレーカOFF 防止対応					
通常 リスク	1	拡散可	ブレーカ ON	運転 (室内ファンON)	無	48.80 %	7.7×10^{-12}
	2			停止→ 室内ファンON	無	50.91 %	8.1×10^{-12}
通常発 生しな いリスク	3	拡散不可	ブレーカ ON	停止	有	0.04 %	5.6×10^{-11}
	4		停電		無	0.002 %	2.4×10^{-12}
	5		ブレーカ OFF		無	0.25 %	3.9×10^{-10}
着火リスク確率合							4.7×10^{-12}

6.10 マルチ接続タイプの壁掛け形エアコンのリスクアセスメント

最後にマルチ壁掛けエアコンの各ライフステージの着火確率を表 6-15 に示す。室内機の形態が異なる点から使用時（室内）のステージ以外は、マルチ床置きエアコンの着火確率を示した表 6-13 の値と同じである。マルチ壁掛けエアコンの場合に、使用時（室内）のステージでの着火リスク確率は、対策なしでも 1.0×10^{-9} となり、許容値 (10^{-9} 以下) を満足する値となっている。よってマルチ接続タイプの壁掛け形エアコンでは対策 M2 を考える必要はない。

表 6-15 ライフステージごとの着火リスク確率（マルチ接続タイプ壁掛形の場合）

Risk: Ignition Probability		
Type	Representative model	R32
Logistics (for each warehouse)	Middle-size warehouse	1.1×10^{-09}
Installation	3.24 m ² veranda	9.0×10^{-09}
Use (indoor)	7 m ² room	1.0×10^{-09}
(outdoor)	3.24 m ² veranda	1.1×10^{-09}
Service	3.24 m ² veranda	4.3×10^{-09}
Disposal	3.24 m ² veranda	4.1×10^{-10}

6.11 ハウジングエアコンのリスク評価のまとめ

ミニスプリット SWG (I) では、通常の壁掛け形エアコンを中心にリスク評価を進めてきたが、地球温暖化防止の動きを加速させるため、ハウジングエアコンまで対象を拡げてリスク評価を行った。ハウジングエアコンとしては、R32 の床置き形ハウジングエアコンのリスクアセスメントを検討し、対策 S1 を行うことで問題なく使用できることを確認した。さらに、冷媒充填量 4kg のマルチ接続タイプのハウジングエアコンのリスクアセスメント結果も、対策 M2 を行うことによって許容値である 10^{-9} 以下（業者作業時は 10^{-8} 以下）となった。よって、一番リスクが厳しいマルチ接続タイプ床置き形ハウジングエアコンでも住宅の隙間の確認および室内機のファンによる冷媒拡散などの対策を講じれば問題なく使用できることを検証した。以上により、ハウジングエアコン（1 対 1 およびマルチ接続）の全ての形態である壁掛け形、天井埋込カセット、壁埋形、床置き形、ビルトイン（地袋設置）に関して、R32 のリスクアセスメントを完了し問題なく使用できることを確認した。

6.12 ディーゼル爆発と燃焼生成物の発生確率

燃焼性以外のハザードとしてはディーゼル爆発と燃焼による有害物質生成発生が考えられる。以下これらについて簡単に整理する。

ディーゼル爆発については据付け、サービス、廃棄時の冷媒を圧縮機に回収する時に手順を間違え空気を吸引させることから生じる。特にフロン類の大気放出が制限されるようになってからは、10 年に数度程度の割合で発生しているように感じられる。ディーゼル爆発による危害は圧縮機が爆発し飛散した破片等による打撲や障害であり、圧縮機内のステータやローター、機械室部分など重量のある部品が人に当たった場合は、危害の程度はⅢとなる。また発生確率は 10 年に 3 回程度として、市場での家庭用エアコン普及台数を加味した発生確率は 3×10^{-9} 程度と予想される。単純に R-Map に当てはめてみると B 領域となり、一般ユーザーには直接危害がおよぶことはないが、何らかの対応が必要な領域となる。このハザードについては、日冷工のホームページで注意は呼びかけているし各社の取扱い説明書などにも記載している。しかし昨年大阪で起こったディーゼル爆発事故のように、不十分な知識と技能で頼まれてエアコンを移設する時に生じるような事故であり、エアコン設置移設の専門技術者以外にまた DIY での移設や取り外しを行う個人にどのように働きかければ効果的に、事故が減らせるか課題の多いハザードである。今後とも専門技術者の教育訓練を継続するとともに、専門技術者以外で作業を行う個人にディーゼル爆発のリスクをどの様に伝え、正確で安全な作業を行ってもらうのか工夫が必要であろう。

燃焼生成物によるハザードに対するリスク評価は、しかし従来の R410A や R22 などの不燃性冷媒も含めフッ素系冷媒では、燃焼機器や高温表面との接触により、着火燃焼しない場合でも有害な化学物質が発生することが知られている。最新の研究成果として今村らの文献では、反射式石油ストーブや石油ファンヒーターの暖房機器に、壁掛けエアコンから冷媒が漏洩すると、暖房機器との接触によりフッ酸が怒限度 3ppm を超えて発生することが判った。この傾向は R1234yf, R32 および R410A（現行冷媒）のいずれでも、大きく差はなかった⁶⁻¹³⁾。

一方、冷媒の種類に関係なく、反応したフッ酸発生によって人に危害が生じるには、(1) フッ酸が発生すること、(2) 発生したフッ酸が人の存在する所まで到達すること、(3) そのフッ酸の刺激に対して、回避行動がなされないこと。以上の 3 条件が揃った場合（和集合）で、なおかつフッ酸の発生量が怒限度である 3ppm の数十倍以上の高濃度となる場合に、重大な事故発生に繋がる。

ミニスプリットリスクアセスメント SWG 内でのインタビュー結果から、エアコンのクレームとしてフッ酸発生での異臭とは同定できないが、エアコンでの異臭騒ぎは過去から存在することが知られている。しかし R410A や R22 が漏洩して燃焼機器や高温表面との接触があり、有害なフッ酸やホスゲンが発生し、異臭騒ぎが生じていたとしても、過去 20 年以上これらの燃焼生成物が重症や入院治療を要するような重大な危害（Ⅲ）に繋がったことはないようである。一般的論では、フッ酸の刺激に対して回避行動の取れない幼児や

寝たきりの高齢者は多く存在するが、そのような人々がエアコンと燃焼機器が同時使用された空間に独立して存在する機会は極めて少ないので、重大な危害（Ⅲ）に繋がらないのではないかと想像される。

燃焼機器で R1234yf や R32 が急速に燃焼する現象は生じなくても、現行 R410A も含め、冷媒が漏洩した場合に燃焼機器や高温表面との接触があると、フッ酸などの有害物質発生のフィジカルハザードは厳しいことから、微燃性の A2L 冷媒を使う場合にも、この事象に対して今まで以上の注意喚起が必要と考えられる。

回避行動が採られることから R-Map 上で危害の程度はⅡ（軽傷）程度となり、また日冷工各社へのインタビューでも被害が 20 年以上報告されていないことから、発生確率は 5×10^{-10} 程度と予想される。よって R-Map では C 領域となり、従来冷媒でも問題視されなかった可能性が高い。過去のプログレスレポートを参照すると R32 や R1234yf でも東大や産総研の検討結果からは有害物質の発生量も、発生した化学物質も従来冷媒と大きな差がなかった。よって細かい議論は必要かもしれないが、微燃性冷媒の燃焼物生成は従来冷媒と同様に社会一般に許容されると考える。もちろん従来冷媒同様、火気との同時使用に対し注意喚起が必須であることは言うまでもない。

6.13 実大着火実験への考え方

このプログレスレポートの前半で、小空間での微燃性冷媒の実大着火実験結果が報告されている。この章でその実験結果に言及することが適切であるかどうか疑問ではあるが、結果に対する考え方を簡単に整理する。実大着火実験では R32 や R1234ze が急速漏洩し LFL を越えた濃度で、裸火から着火すると、印象的な燃焼が生じた。現象としては燃焼速度がかなり遅い爆燃が生じたと考えている。

この現象を燃焼現象の中で他と区別するため「微弱な爆燃」と言う言葉を使い易く用いることにする。実験結果では、火炎が目視可能であったことから多少の乱流による加速が生じたとしても、微燃性冷媒の一般的な燃焼速度から大幅に速度が増加している結果になっておらず、実大着火実験の結果が爆轟や一般的な燃焼速度の速い爆燃になっているとは考え難い。よって今回の現象を燃焼速度の遅い「微弱な爆燃」の現象ととらえて整理し、以降の記述に使用することをお許し願いたい。

以下、今回の実験結果を「微弱な爆燃」現象として捉え、漏洩による可燃域生成と着火源の存在から発生の可能性を考え、また危害の程度を考慮して議論を進め、実際に業界として使用しているエアコン機器、または使用を目指している冷凍空調機器でどの様に考えればよいかを記述する。

まず微燃性冷媒による家庭用エアコンでの微弱な爆燃の発生可能性について整理する。家庭用エアコンでは設置環境の床面積が規定されていることから、そのような空間に封入冷媒量が全量漏洩し均一に混合された場合にでも、冷媒濃度が LFL に達しない。もちろん小空間への設置が生じる可能性はゼロではないが一般的な家庭用エアコンに封入された 1kg の R32 冷媒が全量漏洩し 2.2m の天井高さの部屋で LFL に達するためには、床面積は 1.47m² 以下、約 1.2m 四方の部屋となり、このような部屋で隣室を考慮せずにエアコンを設置することは考えられない。よってこのような最悪の設置でも通常は隣室も含めると LFL 以下の濃度となることが予想され、均一混合となれば微弱な爆燃には至らないと考える。また家庭用エアコンが設置される一般家庭にある着火源としては、裸火であるオイルライターやろうそくなどに限定され、他の家電や静電気のスパークなどは着火源とならない。その結果、微弱な爆燃発生の可能性はさらに小さいことが、日冷工のミニスプリットエアコンリスクアセスメント SWG の検討から判っている。

一方チラー、パッケージエアコンやビルマルチエアコンでは、基本的に管理された空間に専門業者がそれらの設備を設置するため、多量の冷媒が漏洩しても事前に設けられた換気装置や空調サイクルの遮断装置などの安全手段により冷媒濃度は LFL に達しない。そのため着火源があった場合でも着火燃焼は生じない。特にチラーでの微弱な爆燃の発生は、通常設置される地下の機械室などの空間が法規制により換気が義務付けられており、一般的には生じないと考えられる。しかし換気装置が全て故障することや追加工事による仕切り壁設置による小部屋化などの人為的、偶発的な事象が複数重なる場合を否定することはできない。しかしこのような場合の発生確率は、日冷工の各 SWG が実施したリスクアセスメント結果の発生確率よりさらに小さな値となる。よってチラー、パッケージエアコンやビルマルチエアコンでも漏洩冷媒が可燃濃度になり、微弱

な爆燃が生じることは偶発的な事象が複数重ならない限り生じないと考える。

次に実大着火実験結果から予想される危害の解釈は色々と考えられるが、微弱な爆燃現象が生じたとの仮定のもと微燃性冷媒を使用した製品を提供する者として、一般的な見解を以下に述べる。微燃性冷媒の微弱な爆燃時の危害は人的なものと物的なものに分けられる。人的な危害は、燃焼による発熱での火傷、急激な圧力上昇による鼓膜等への被害や骨折などの身体的損傷が考えられる。また燃焼時に生成するフッ酸等の有害化学物質による影響も無視できない。微弱な爆燃時にこれらの危害が最大となれば、人にとって最悪の事態に至る可能性も否定できないと考えられる。それ以外にも微弱な爆燃時の温度上昇による気体膨脹での圧力上昇から建物の一部が損壊することや、ガラスなどへの物的な損傷、それに伴う拡大被害も考えられる。

いずれにせよ今回の実大着火実験の結果は、微燃性冷媒でも様々な条件を燃焼現象が発現できるように設定し着火すれば、微弱な爆燃が生じることを検証したものであり、微燃性冷媒である限り全く生じない現象であると否定できるわけではない。このことから空調分野の開発に携わる技術者はこのような現象が発生するとの認識を常に持つべきであろう。

なお最後に比較対象ではないが、炭化水素の場合は着火エネルギーが小さく爆燃発生の可能性は格段に大きくなり、場合によっては爆轟に近い現象に推移することもあり、さらに圧力上昇は大きく燃焼速度も桁違いに速い。よってその危害の程度は人のみならず建物の破壊までも引き起こし、大きな拡大被害が生じることは過去のプロパンガスなどの漏洩爆発事故を考えるまでもなく自明であろう。

以上に述べたように微燃性冷媒を使用していくことは地球環境の視点から必須ではあるが、今回の微弱な爆燃現象を生じさせないために、冷媒封入量を適切に管理し、必要があれば換気装置や冷媒漏洩遮断装置をインターロックで連動させ、設置基準を設けてそれを遵守する体制を構築することや冷却サイクルの冷凍漏洩機密検査を徹底することなど、さまざまな手段で安全性の向上を図ることが必要である。危害の程度をきっちりと区分し、漏洩着火の発生の可能性やその条件を見極めてリスク評価を行ってきたことが、現在まで日冷工で行ってきた SWG の活動成果であり、微燃性冷媒を地球環境の改善のため、人や物に配慮した形で、適切に管理された状況の中で使用していくことが重要であることを実大着火実験は再認識させてくれた。

なお、以上の内容は日冷工の意見を集約したものではないが、R32 等の微燃性冷媒を適用したエアコンを上市しているメンバー企業間では意図の共有化は図られている。

6.14 まとめ

ミニスプリット SWG (I) では家庭用エアコンの壁掛け形設置での R32 および R1234yf でのリスクアセスメントを検討し、課題がないことを確認した。また R32 のハウジングエアコンのリスクアセスメントも検討し、対策を講じれば問題なく使用できることを確認した。リスクを下げるため、ミニスプリット SWG (I) では据付けやサービス時に使用するマニュアル改訂も行った。具体的には日冷工が発行した「R32 冷媒使用家庭用エアコンの配管施工マニュアル」(工業会内部資料)として、サービスマニュアルや据付け説明書への注意喚起など、R32 を使用する時に実施できる対策を提案し文書化した。

最後に微燃性冷媒リスクアセスメント研究会に参画している東大や諏訪東理大、産総研での検討結果から FTA を見直すことによってリスク評価の精度を高く改善できたことに謝辞を表す。今後、危害の程度について明らかになってくれば、今以上に R32 や R1234yf のエアコンが安全に使用でき、地球温暖化防止に貢献できることを期待して家庭用エアコンのリスク評価を終了する。

参考文献

- 6-1) 八尾健治, The International Symposium on HCFC Alternative refrigerants and Environmental Technology, pp182-189, (2000)
- 6-2) 飛原英治, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2014, Kobe(2014), pp69-72
- 6-3) 今村友彦, 須川修身, 微燃性冷媒搭載空調機器と化石燃料系暖房器の同時使用におけるフィジカルハザ

一卜評価, 日本冷凍空調学会論文集 Vol.29 No.4, pp.401-411 (2012)

- 6-4) 滝澤賢二, Study on Minimum Ignition Energy of Mildly Flammable Refrigerant, (2011)
- 6-5) Goetzler et al., Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a(30/7wt.%) in split system residential heat pumps: DOE/CE/23810-92, ADL, (1998)
- 6-6) Dean Smith et al., Determining Minimum Ignition Energies and Quenching Distances of Difficult to Ignite Components, Journal of Testing and Evaluation, Vol.31, No.3
- 6-7) Minor et al., Flammability Characteristics of HFO-1234yf, AIChE Process Safety Progress (Vol.29, No.2)
- 6-8) Minor, et al., Next Generation Low GWP Refrigerant HFO-1234yf Part 2, ASHRAE meeting N.Y. (Jan. 2008)
- 6-9) Imamura et al., Evaluation of Fire Hazards of A2L Class Refrigerant, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology (2012)
- 6-10) http://www.cao.go.jp/consumer/history/01/kabusoshiki/anzen/doc/006_110201_shiryou2.pdf, 2015.11.30
- 6-11) 高市健二, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2012, pp90-94, (2012)
- 6-12) 経済産業省商務流通グループ : 2011, 「リスクアセスメントハンドブック実務編」 P19
http://www.meti.go.jp/product_safety/recall/risk_assessment_practice.pdf

7. スプリットエアコン（店舗用パッケージエアコン）のリスク評価

7.1 はじめに

7.1.1 スプリットエアコンのリスク評価概要

微燃性冷媒を使用したスプリットエアコン（店舗用パッケージエアコン，以下店舗用PAC）のリスクアセスメントを第一次，第二次，第三次と3段階に分けて実施した。対象冷媒はR32，R1234yf，R1234ze（E）で行った。第一次では，一般的に広く使用されているモデルとして，『一般事務所設置（天井カセットタイプ室内機）』『室外機地上設置（現地追加冷媒充填無し）』『準耐火中型倉庫保管』を選定し，第二次では，冷房定格能力14.0kW（6HP）以下の床置き設置室内機を除く様々な設置条件を対象に，比較的リスクが高くなると考えられるモデルを抽出した。第三次では，床置き設置室内機も含め，かつ，冷房能力30kW（12HP）までの全ての店舗用PACシステムを対象として，評価を実施した。

また，リスクを低減するために求められる安全対策について，微燃性（A2L）冷媒を使用した業務用エアコンの冷媒漏えい時の安全機能要求事項（JRA4070），微燃性（A2L）冷媒を使用した業務用エアコンの冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン（JRA GL-16）等にまとめ，周知させていく予定である。

図7-1に，リスクアセスメント日程を示す。

◆：アウトプット

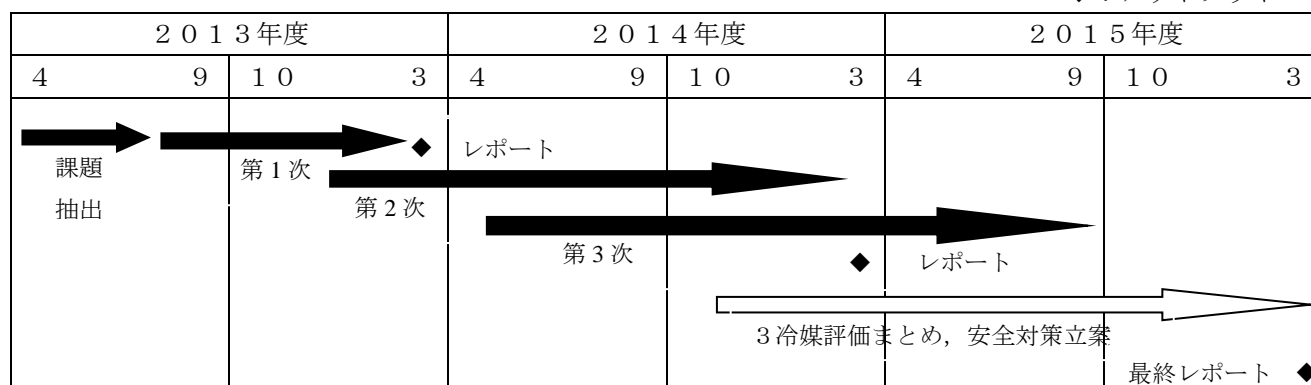


図7-1 店舗用パッケージエアコンのリスクアセスメント日程

7.1.2 店舗用パッケージエアコンの特徴

微燃性冷媒使用時のリスクの観点から，店舗用PACの特徴をミニスプリットエアコン（家庭用エアコン，以下RAC）とビル用マルチエアコン（以下ビル用マルチ）と対比して，表7-1にまとめた。

まず，冷房能力は，3.6-30kWと中程度の大きさであり，それに比例して，冷媒量も2-19kgとRACとビル用マルチの中間に位置している。冷媒量に関しては，日本市場の約20%が30m以上の室内外配管長で施工されるケースがあり，現地にて冷媒が追加充填される場合も想定する必要がある。一方，室内機が複数台接続される場合があるが，個別空調運転が出来ないため，必ず同一空間に設置されるので，個別空調されるビル用マルチと比較すると，漏洩時のリスクは小さくなる。

次に，室内機の形態については，業務用の用途に使用されることから，RACとは異なり，ビル用マルチ室内機とほぼ同様の仕様となっている。室内機の設置場所も，自然換気開口のある事務所や飲食店，あるいは，機械換気を有する密閉度の高いカラオケルーム等，ビル用マルチに近い環境となっている。

室外機の形態については，一部氷蓄熱式も含まれるが，全て空冷式であり，屋外設置が基本となっている。よって，屋内機械室設置となる水冷式システムよりは設置上のリスクは軽減する。しかしながら，店舗用PAC室外機の場合，横吹きスリムタイプの為，雑居ビル等の路地隙間の狭小空間に設置されることがあり，換気の悪い狭小設置環境での評価が必要と考えられる。

保管・輸送についても、小容量の店舗用PAC室外機は、RAC室外機と同様に取り扱われることがあり、狭小空間倉庫やワゴン車輸送での評価を追加した。表 7-2 にリスクが高くなると想定されるモデルをまとめた。

表 7-1 エアコンの製品形態による特徴の比較

製品形態	ルームエアコン	店舗用PAC	ビル用マルチ
製品馬力(室外基準)	0.8~3HP	1.5~12HP	5~60HP
冷房定格能力	2.2~8.0kW	3.6~30kW	14.0~168kW
冷媒量	1~2kg	2~19kg	5~50kg
主な設置システム (外:内)	基本1台:1台 個別マルチ有り	1台:1~4台 全室内機は同一空間	1~3台:1~64台 各室内機は個別空間
主な室内機タイプ	壁掛け形 床置き形 天井カセット形	天井カセット形 天井吊形 壁掛け形 ビルトインダクト形 床置き形(スリム形)	天井カセット形 天井吊形 壁掛け形 ビルトインダクト形 床置き形(ペリメータ形)
主な室外機タイプ	空冷式 横吹き	空冷式 横吹き 氷蓄熱式(空冷)横吹き	空冷式 上吹き 氷蓄熱式(空冷)上吹き 水冷式(機械室設置)
主な室内機設置場所	住宅(居住空間)	事務所 厨房/食堂 工場 カラオケ(密閉度:高)	事務所 厨房/食堂 工場 カラオケ(密閉度:高)
主な室外機設置場所	地上(屋上) ベランダ	地上(屋上) 各階設置 半地下 狭小地(路地隙間)	地上(屋上) 各階設置 半地下 機械室
主な保管場所	準耐火中型倉庫 狭小(販売店)倉庫	準耐火中型倉庫 狭小(販売店)倉庫	準耐火中型倉庫
主な輸送形態	トラック ワゴン車	トラック ワゴン車(3HP以下)	トラック

表 7-2 店舗用PACの想定される主なリスクモデル

条件	理由	一般的使用モデル	リスクが高くなるモデル
配管長	冷媒量:大	30m以内(チャージレス)	長配管(現地追加有)
室内機設置高さ	漏洩時の滞留	天井設置モデル:1.8m以上	床置き設置モデル:0m
室内機設置場所	着火源:多	事務所	厨房
	自然換気:有無		カラオケルーム
室外機設置場所	漏洩時の滞留	地上(屋上)	各階設置
			半地下設置
			狭小設置
保管場所	漏洩時の滞留	準耐火中型倉庫	狭小(販売店)倉庫
輸送形態	着火源:多	トラック	ワゴン車

7.1.3 微燃性冷媒リスクアセスメント手法

微燃性冷媒を使用した場合のリスクは、現行冷媒（R410A）よりも微かに燃焼性を有することによる漏洩冷媒への着火事故の発生である。その着火メカニズムは、図 7-2 として表され、各要因の確率を掛け合わせた数値が着火事故発生確率となり、許容されるレベル以下となるかがリスクアセスメントのポイントとなる。許容されるレベルを上回る場合は、安全対策を行いリスクの低減が求められる。

ミニスプリット⁷⁻¹⁾、ビル用マルチエアコン⁷⁻²⁾各リスクアセスメントSWGの手法と同様に、以下の考え方によりリスク評価をしている。

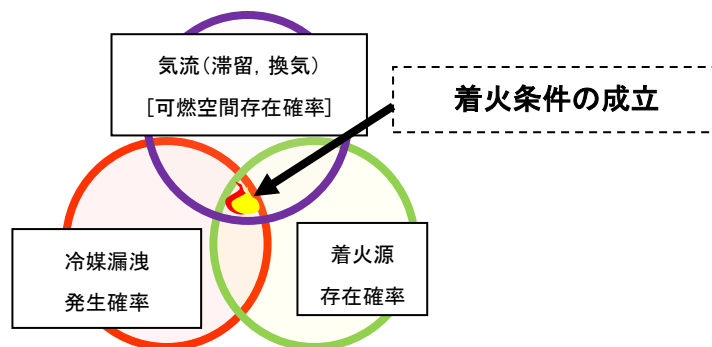


図 7-2 微燃性冷媒の着火メカニズム

7.1.4 許容できるリスク(着火事故発生確率)の設定

店舗用PACの市場ストック 780 万台 (60 万台 x 製品寿命 13 年) に対して、100 年に一度重大事故が発生するレベルを許容範囲とした。また、各ライフステージにおいて、使用時以外は、常に機器を取り扱う作業者が携わっているため、作業者はリスクを制御する立場であることから、事故が起きた際にも自己防御による危害度低減が可能だと考え、許容値を 10 倍している。

- ・使用時 : 1.3×10^{-9} 回/(台・年)
- ・使用時以外 (輸送・保管, 据付, 修理, 廃棄時) : 1.3×10^{-8} 回/(台・年)

7.1.5 着火事故が発生する要因

着火事故発生メカニズムは、図 7-2 のように考えられる。通常、店舗用PACから冷媒が漏洩することは無いが、何らかの理由により漏洩した場合、その冷媒が設置環境において可燃濃度に達し燃焼し得る状態となる存在確率と、その空間に着火源が存在する確率を掛け合わせたものが着火事故発生確率として算出できる。

まず、製品からの冷媒漏洩確率は、機器の設計仕様が近いビル用マルチSWGの調査結果及び店舗用PACでの日冷工各社アンケートにより、以下とした。

- ・室内機：緩慢漏れ 1.03×10^{-3} 回/(台・年), 急速漏れ 1.50×10^{-5} 回/(台・年)
- ・室外機：緩慢漏れ 6.13×10^{-2} 回/(台・年), 急速漏れ 1.34×10^{-3} 回/(台・年), 噴出漏れ 1.37×10^{-4} 回/(台・年)

また、据付、修理、廃棄等の作業ステージでは、作業者の冷媒回収ミスやバルブ誤動作などのヒューマンエラーにより冷媒漏洩が発生する。ヒューマンエラーの確率は、ビル用マルチSWG (10^{-4}) に対し、店舗用PAC作業現場では、作業者の専門レベルがやや劣ることから、 10^{-3} 回/(台・年)とした。

次に、漏れた冷媒が設置空間内で可燃濃度となる空間容積とその持続時間を 3 次元濃度解析シミュレーションにより求めた。主な設置モデルの冷媒リークシミュレーションを次項にまとめる。

また、その可燃空間に存在する着火源については、本リスク評価研究会で得られた結果を元に、店舗用PACの設置環境での存在確率を各々算出した。それらについては、7.3 項にまとめる。

7.2 冷媒リークシミュレーション

各モデルにおいて、機器漏洩冷媒量、冷媒漏洩速度、設置空間容積、気流条件等により、漏洩した冷媒の3次元濃度解析を行い、LFL~UFL となる可燃空間容積および持続時間を算出した。この可燃空間容積と持続時間を掛け合わせたものを、可燃空間時空積と定義し、1回の冷媒漏洩における可燃空間発生度合いとして使用している。

7.2.1 室内モデルの算出例

(a) 天井設置モデル

代表的な室内設置モデルである事務所天井設置は、設置条件がビル用マルチエアコンと同様のため、ビル用マルチエアコンの評価で用いられた図 7-3, 7-4 に示す東京大学のシミュレーション結果より、冷媒量の差異を考慮し、可燃空間時空積を求めた。また、室内空間容積が若干異なる厨房モデルは、(漏れ高さ×床面積の1/2 乗)で冷媒漏れ量を割った値の3乗に、可燃空間時空積が比例するとして試算した。結果を表 7-3 に示す。

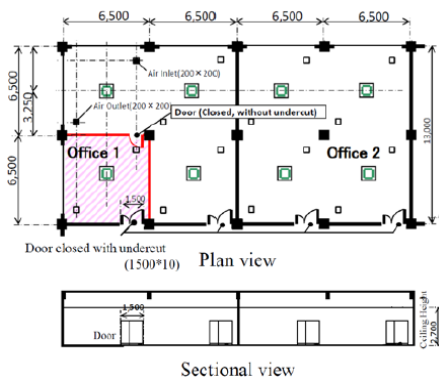


図 7-3 室内 事務所のシミュレーションモデル

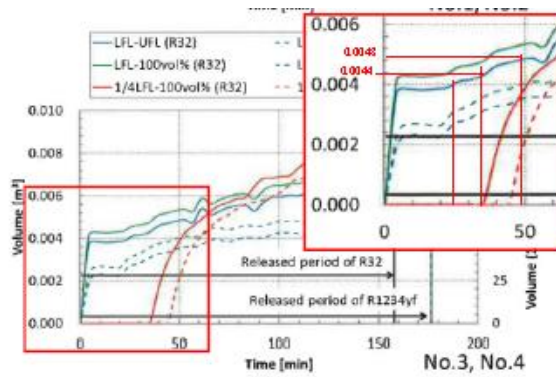


図 7-4 事務所モデルの可燃空間解析結果

表 7-3 天井設置モデルの可燃空間時空積 算出結果

モデル 【R32】	床面積	高さ	自然換気口 (幅×高さ)	冷媒量	漏洩速度	可燃空間 持続時間	可燃空間時空積 (停止時)
	m ²	m	mm	kg	kg/h	min	m ³ ・min
SIMベース	42.3	2.7	1500×10	26.3	10	158	1.62 × 10 ⁰
7.1kW 事務所	42.3	2.7	1500×10	3	10	18	6.40 × 10 ⁻²
14kW 厨房	57.2	2.5	1500×10	8	10	48	1.53 × 10 ⁻¹

(b) 床置き設置モデル

漏洩冷媒が室内の底部に高濃度で滞留し易い床置き設置モデルは、図 7-5 のように濃度解析シミュレーションを行った。漏洩箇所は室内機内部のフレア部から 100%としている。機器を運転しない場合は、床面近くに可燃空間が長時間発生し、前述した天井設置モデルと比較して非常に大きな可燃空間時空積となった。これは、天井設置モデルは、漏洩冷媒が拡散落下しているのに対し、床置きは自然換気口があったとしても底部に高濃度で滞留するからである。図 7-6, 表 7-4 に結果を示す。

濃度解析シミュレーションの妥当性を検証するため、図 7-7 の通り、同一条件での実証試験を実施した。ファン停止中の濃度測定結果は、解析シミュレーションと比較すると若干低いもののほぼ一致した。また、漏洩開始約 1 分後にファンを 10m³/min にて送風運転すると、部屋全体に漏洩冷媒が攪拌され、均一濃度となり可燃空間が解消することがわかった。ファンの起動タイミングは、室内機から 1m 離れた床面高さ 100mm の濃度が 5vol% になる時点とした。店舗用 P A C で使用される床置き室内機は、スリムタイプで吹出し口が床面から比較的高く、送風運転による漏洩冷媒の攪拌効果が高い。床置き設置モデルの安全対策として、冷

媒漏洩センサーの設置と室内機の強制送風運転が有効と考えられる。

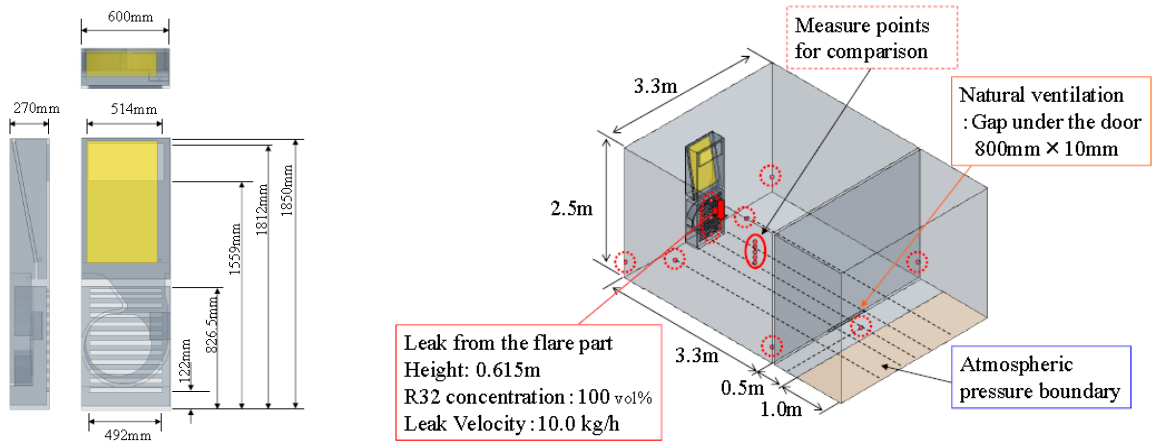


図 7-5 床置きスリム形のシミュレーションモデル

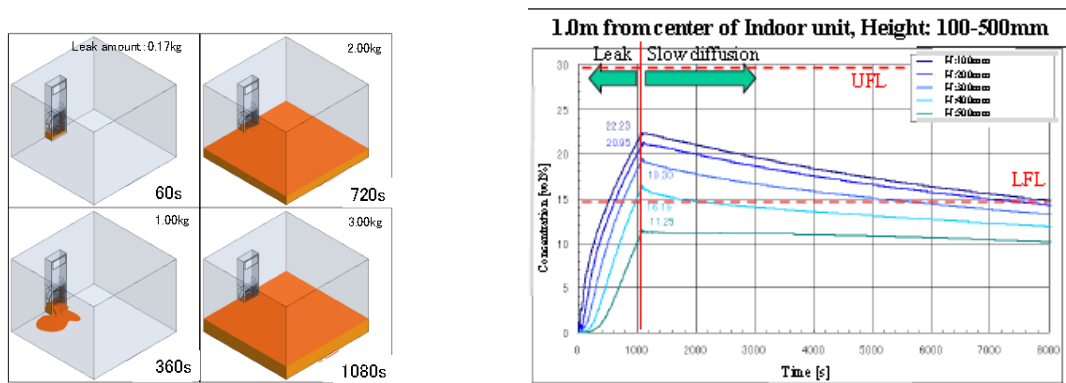


図 7-6 床置きスリム形の 3次元濃度解析シミュレーション結果

表 7-4 床置きスリム形の可燃空間時空積 算出結果

モデル 【R32】	床面積	高さ	自然換気口 (幅×高さ)	冷媒量	漏洩 速度	漏洩箇所	可燃空間 持続時間	可燃空間時空積 (停止時)
	m ²	m	mm	kg	kg/h	-	min	m ³ ・min
SIMベース	10.9	2.5	800×10	3	10	フレア部	142	4.64 × 10 ²
5.0kW 飲食店	14	2.5	800×10	3	10	フレア部	142	3.23 × 10 ²

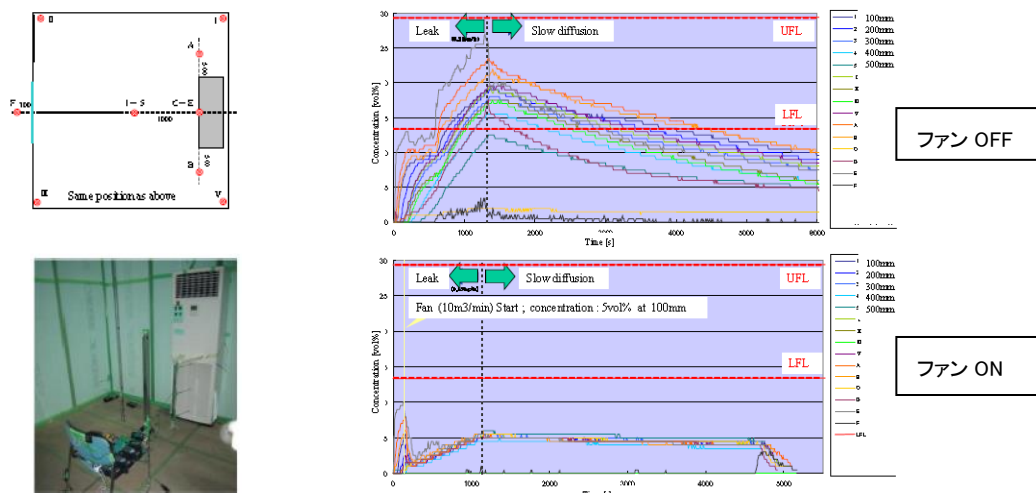


図 7-7 床置きスリム形の冷媒漏洩濃度解析に対する実証試験結果

また、室内機ファンによる自己攪拌効果の冷媒種による違いを評価すべく、3次元濃度シミュレーションを実施した。その結果を表7-5に示す。冷媒量は8.9kgとし、R1234yfは湿度影響を受けるため高湿条件で評価した。漏洩冷媒の密度により持ち上がり易さに差が生じることから、R32に比べてR1234yfのほうが厳しい結果となったが、送風風量10m³/min以上であれば同等の攪拌効果を得られる結果となった。

表7-5 床置スリム形の冷媒種による可燃空間時空積 算出結果

冷媒種	密度	LFL [高湿]	床面 積	高さ	自然換気口 (幅×高さ)	冷媒量	漏洩 速度	可燃空間 持続時間	可燃空間時空積 (停止時)
	kg/m ³	%							
R32	2.14	14.5	14	2.5	800×3	8.9	10	53.44	0.25
R1234yf [27°C露点]	4.73	6.2	14	2.5	800×3	8.9	10	53.49	0.89

ユニット送風条件: ①吹出し風量: 10.0m³/min
 ②吹出口面積: 0.146m²
 ③吹出風速: 1.13906m/s
 ④吹出口高さ(上端): 1.5m

7.2.2 室外モデルの算出例

(a) 地上設置モデル, (b) 半地下設置モデル

室外側の設置モデルについても同様に漏洩冷媒の濃度解析シミュレーションを実施した。まず、漏洩冷媒がほとんど滞留しない「地上設置」と、4面閉塞により滞留しやすい「半地下設置」の濃度解析を示す。図7-8、7-9の通り、「半地下設置」の場合、漏洩した冷媒が長時間滞留し、可燃濃度空間を生成することがわかった。冷媒量8kgのシステムでは、可燃空間時空積が約10000倍高くなる結果となった。可燃空間時空積を表7-6に示す。

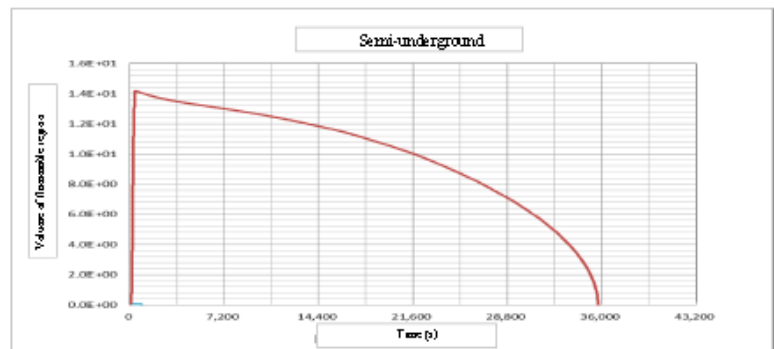
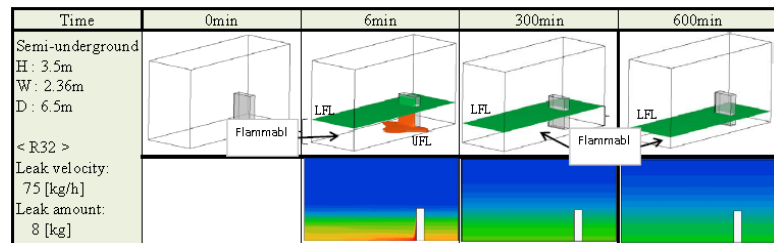
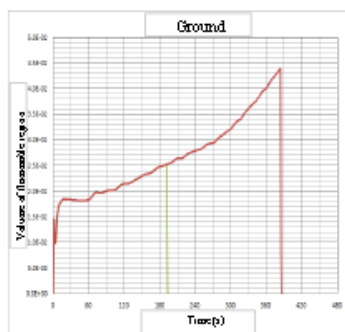
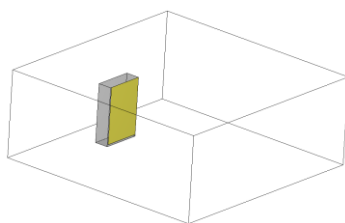


図7-8 「地上設置」の可燃空間解析結果

図7-9 「半地下設置」の可燃空間解析結果

表 7-6 可燃空間時空積 算出結果

モデル【R32】	設置環境	床面積 m ²	高さ m	冷媒量	漏洩速度 kg/h	漏洩箇所 -	可燃空間 持続時間	可燃空間時空積 (停止時) m ³ ・min
	-			kg			min	
室外機 地上設置	四面開放	50	2	4	75	熱交換器全体	3.3	2.94 × 10 ⁻²
				8			6.5	2.80 × 10 ⁻¹
室外機 半地下設置	四面閉塞	15.34	3.5	4	75	熱交換器全体	15.9	2.08 × 10 ¹
	上部開放			8			595.3	5.97 × 10 ³

(c) 狭小設置モデル

店舗用PAC特有の設置条件である「狭小空間設置」は、以下のモデルで解析した。図7-10に示す通り、雑居ビルの路地隙間に横吹き室外機が設置され、左右に障害物があり換気し難い設置環境を想定した。室外機の前2面は閉塞、右面も閉塞、左1面のみ僅かに通路が確保されている条件とした。1面開口寸法として、人が通れる寸法の0.6mと、0.3mの2条件で解析した。図7-11及び表7-7に各条件の可燃空間時空積結果を示す。この2条件では、可燃空間時空積が倍以上の差が生じた。

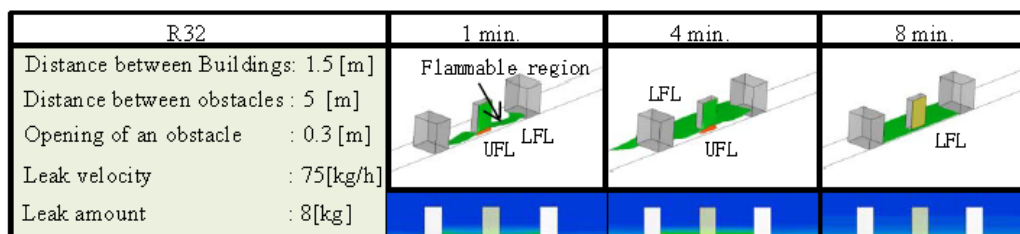


図 7-10 室外狭小設置のシミュレーションモデル

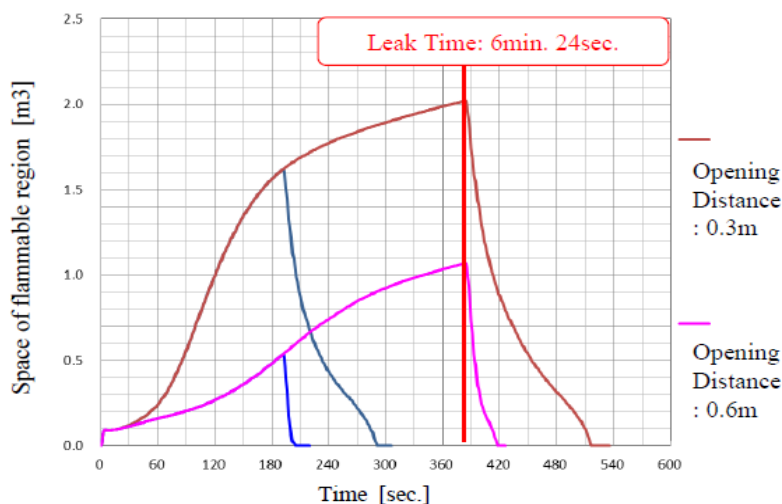


図 7-11 室外狭小設置の可燃空間解析結果

表 7-7 室外狭小設置の可燃空間時空積 算出結果

モデル 【R32】	隙間距離	障害物 開口寸法	床面積	高さ	冷媒量	漏洩速度	漏洩時間	可燃空間時空積 (停止時)
	m	m	m ²	m	kg	kg/h	min	m ³ ・min
室外機 狭小設置	1.5 1面部分 開放	0.3	7.5	2	4	75	4.9	3.24 × 10 ⁰
		0.6					3.5	8.30 × 10 ⁻¹
		0.3			8		8.6	9.75 × 10 ⁰
		0.6					7.0	3.75 × 10 ⁰

7.3 着火源評価

7.3.1 着火源の設定

着火事故は、2つのトリガーにより発生する。1つは、可燃空間となっている場所に、瞬間的なスパークが発生した場合であり、もう1つは、継続的な裸火に、可燃空間が接触してくる場合である。これら2つのトリガーにより、着火事故発生確率の各要因が異なるため、着火源も2つに分けて表 7-8 にまとめた。

本リスク評価研究会で得られた着火源評価結果^{7-3),7-4)}より、室内に多く存在するコンセント、電源スイッチ、喫煙用具のうちの電子ライターのスパーク（オイルライター、マッチは着火源）、人体から発生する静電気では着火しないとした。可燃空間中に発生する瞬間的なスパークの着火源は、強燃性のプロパン（R290）に比べて、微燃性冷媒では大幅に減少することがわかる。

7.3.2 着火源存在確率

各設置モデルにおける着火源の存在確率を市場データ^{7-5),7-6)}から集計した。店舗用PACの設置される場所は、業務用として、ビル用マルチに近く、同様の手法で算出した。

表 7-9 に、室内使用条件の、代表的な「事務所モデル」と、着火源が多いとされる「厨房モデル」を比較してまとめた。着火源の存在確率は、裸火を伴う機器の場合、機器の使用率を設定して算出し、その他の機器（主に電化製品）はNITE 事故情報の機器の発火事故確率から算出した。

室外使用条件についても、代表的な「地上設置モデル」と、「各階設置モデル」、「半地下設置モデル」、「狭小設置モデル」について、着火源存在確率を表 7-10 にまとめた。

このように設置モデル毎に、また各ライフステージの場面に応じて、それぞれ着火源存在確率を算出した。

表 7-8 微燃性冷媒の着火源

○：着火，×：着火せず

		着火源	R32, R1234yf, R1234ze(E)	R290(参考)
スパーク (可燃空間 中で発生)	電気部品	電化製品(火災要因)	○	○
		機器内電気部品(5kVA 以下の電磁開閉器)	×	○
		電源コンセント	×	○
		照明用スイッチ	×	○
	喫煙器具	マッチ	○	○
		石油ライター	○	○
		電子ライター	×	○
	作業ツール	金属スパーク(フォークリフト爪)	○	○
		電動工具	×	○
		冷媒回収機	×	○
人体	人体からの静電気	×	○	
裸火 (可燃空間 と接触)	喫煙器具	マッチ	○	○
		石油・電子ライター	○	○
	燃焼式設備	燃焼式暖房機	○	○
		燃焼式給湯器	○	○
		燃焼式ボイラー	○	○
		燃焼式調理器	○	○
	作業ツール	ロウ付けバーナー	○	○

表 7-9 「事務所モデル」と「厨房モデル」の着火源存在確率比較

着火源存在確率【単位】		事務所	厨房	※発火・発煙事故件数は、NITE 統計による。	
スパーク (時間・空間 当りの発生回数) 【回 /m ³ min】	室内機	5.7×10 ⁻¹⁶	4.5×10 ⁻¹⁶	Pt(空間的遭遇確率)=台数*事故件数/市場台数/空間容積/(365×24×60) 発火・発煙事故件数:3 件/年(NITE 統計), 市場存在台数:88.4 百万台	
	電化 製品	空気清浄機	7.0×10 ⁻¹⁶	-	台数 0.2 台, 事故件数:3.6 件/年, 存在台数:17.3 百万台
		加湿器	5.6×10 ⁻¹⁶	-	台数 0.09 台, 事故件数:3 件/年, 存在台数:8.11 百万台
		携帯電話	7.6×10 ⁻¹⁶	-	台数 8.12 台, 事故件数:23 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:23.9 百万台.
		パソコン	1.2×10 ⁻¹⁴	-	台数 8.12 台, 事故件数:174 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:11.8 百万台
		照明器具	1.3×10 ⁻¹⁵	1.6×10 ⁻¹⁵	事務所 10 台, 厨房 15 台, 事故件数:227 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:165 百万台
		トラッキング	6.7×10 ⁻¹⁶	1.1×10 ⁻¹⁵	事務所 10 箇所, 厨房 20 箇所, 事故件数:202 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:298 百万台
		冷蔵庫	-	1.6×10 ⁻¹⁴	台数 3 台, 事故件数:267 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:3.88 百万台
		冷凍庫	-	3.8×10 ⁻¹⁵	台数 2 台, 事故件数:16 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:0.658 百万台
		食器洗浄機	-	9.7×10 ⁻¹⁵	台数 2 台, 事故件数:71 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:1.511 百万台
電話機		-	2.5×10 ⁻¹⁶	台数 1 台, 事故件数:18 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:5.67 百万台	
テレビ	-	1.1×10 ⁻¹⁵	台数 1 台, 事故件数:355 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:25.2 百万台		
換気扇	-	5.5×10 ⁻¹⁵	台数 4 台, 事故件数:105 件/17 年:寿命 10 年, 存在台数:5.96 百万台		
	喫煙器具 (マッチ/石油ライター)	8.8×10 ⁻⁰⁷	-	P=喫煙者が室内に居る確率×0.209×17.1/空間容積/(24×60)*0.05 ・喫煙者が室内に居る確率:0.1 ・喫煙率:0.209(日本人成人) ・喫煙本数:17.1 本/日/人(2013 年JT調査), マッチ・石油ライター使用率:0.05	
	着火器具 (マッチ/石油ライター)	-	1.2×10 ⁻⁰⁶	P=5/空間容積/(24*60)*0.05 ・ガスバーナへの着火に利用 5 回/日, マッチ・石油ライター使用率:0.05	
裸火 (存在 確率) 【-】	燃焼 設備	ガス給湯器	8.3×10 ⁻⁰³	6.7×10 ⁻⁰²	【事務所】0.1 台, 使用 2h/日. 【厨房】2 台, 使用 60 分/日. 普及率 80%
		燃焼式暖房機	-	2.7×10 ⁻⁰⁵	0.001 台, 使用 4h/日. 60 日/年
		ガスコンロ	-	3.1×10 ⁻⁰¹	15 台, 使用 0.023. 普及率 90%
		ガス炊飯器	-	5.0×10 ⁻⁰²	2 台, 使用 2h/日. 普及率 30%
		ガスオープン	-	5.8×10 ⁻⁰⁴	2 台, 普及率 2.9E-04
		コーヒーサイフォン	-	8.7×10 ⁻⁰⁴	3 台, 普及率 2.9E-04
		ガスバーナー	-	6.9×10 ⁻⁰⁴	0.5 台, 使用 0.2 分/回. 10 回/日
ガスロスター	-	5.8×10 ⁻⁰⁴	2 台, 普及率 2.9E-04		

表 7-10 室外「地上」, 「各階」, 「半地下」, 「狭小」の着火源存在確率比較

着火源存在確率【単位】		地上	各階	半地下	狭小		
スパーク (時間・空間当りの発生回数) 【回/m ³ min】	室外機	1.4×10 ⁻¹⁴	9.5×10 ⁻¹⁴	2.5×10 ⁻¹⁴	9.1×10 ⁻¹⁴	Pt(空間的遭遇確率)=5.6/7,800,000/空間容積/(365×24×60) 事故件数:5.6件/年(NITE). 存在台数:7.8百万台.	
	喫煙器具	作業員	3.6×10 ⁻¹⁰	1.3×10 ⁻⁹	1.7×10 ⁻⁹	1.7×10 ⁻⁹	【作業員の喫煙】 P=機器近傍確率×0.1[年間サービス率]×[喫煙率]×(16[本]/空間容積/(24×60))×0.05[スパーク]×0.01[訓練無視確率] ・機器近傍確率:地上:0.2, 各階:0.1, 半地下・狭小:0.5 ・作業員の喫煙率:0.322(日本人男性:JT調査) ・喫煙本数(勤務時):16本/日(総務庁調査) ・[スパーク]マッチ・石油ライター使用率:0.05
		使用者	5.6×10 ⁻⁸	5.4×10 ⁻⁸	1.1×10 ⁻⁷	1.1×10 ⁻⁷	【使用者(ユーザー)の喫煙】 P=使用者が周辺に居る確率×[喫煙率]×(17.1[本]/空間容積/(24×60))×0.05[スパーク]×[周辺喫煙可率] ・周辺に居る確率:地上・半地下・狭小:0.05, 各階:0.0125 ・喫煙率:0.209(日本人成人)・喫煙本数:17.1本/日/人 ・周辺喫煙可率:地上・半地下・狭小:0.9, 各階:0.5
裸火 (存在確率) 【-】	喫煙	作業員	6.0×10 ⁻⁸	3.0×10 ⁻⁸	1.5×10 ⁻⁷	1.5×10 ⁻⁷	【作業員の喫煙】 P=機器近傍確率×0.1[年間サービス率]×0.322[喫煙率]×(16[本]×5[秒/本:裸火燃焼時間]/(24×60×60))×0.01[訓練無視確率]
		使用者	9.3×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻⁶	9.3×10 ⁻⁶	9.3×10 ⁻⁶	【使用者(ユーザー)の喫煙】 P=使用者が周辺に居る確率×0.209[喫煙率]×(17.1[本]×5[秒/本:裸火燃焼時間]/(24×60×60))×[周辺喫煙可率]
	燃焼式給湯器	6.6×10 ⁻⁴	2.2×10 ⁻⁴	2.2×10 ⁻⁴	2.2×10 ⁻⁴	P=運転率×0.001[普及率] ・運転率…地上:0.66(24H/日, 20日/月) 地上以外:0.22(8H/日, 20日/月)	

7.4 FTA

これまで説明してきた着火事故発生要因を、各ライフステージ（輸送保管、据付、使用、修理、廃棄）毎に想定されるリスクシナリオに基づき FTA を作成し、着火事故発生確率を算出した。各ステージにて、室外側と室内側に分けて FTA を作成した。基本的に、(冷媒漏洩確率) × (可燃空間存在確率) × (着火源存在確率) を掛け合わせて着火事故発生確率を算出した。以下に、修理ステージの FTA の概要を紹介する。

7.4.1 修理ステージの FTA (室外側)

修理ステージの FTA を図 7-12 に示す。図内の各数値は「室外機地上設置、冷房能力 14kW での最大冷媒量 8kg」の条件で算出した確率を示した。

修理時の主な着火源として「ロウ付けバーナー」と「サービスマンの喫煙(マッチ、石油ライター)」を取り上げ、それぞれのシナリオを FTA に組み込んだ。特にロウ付けバーナーによる冷媒への着火が支配的であったため、シナリオを細分化してそれぞれの確率を算出している。具体的には、冷媒漏洩する場所がロウ付けしている場所か、または別の場所かによって、バーナーと遭遇する確率が異なるため、FTA 上で区別して確率を算出した。想定する冷媒漏洩速度についても、各シナリオに合わせて設定しており、ロウ付けしている場所から漏洩する場合は、急激に漏れることが考えられるため、漏洩速度は「噴出漏れ(75kg/h)」を想定している。一方、別の場所から漏洩してきた場合は、サービスマンが気付かない程度の漏洩であることから、「緩慢漏れ(1kg/h)」を確率数値に反映させている。

7.4.2 修理ステージの FTA (室内側)

FTA の構成は室外側と同様であるが、室内側で実施することのない作業(冷媒充填、冷媒回収など)に関するリスク、及びサービスマンが室内で喫煙することについては、確率数値を「0」として算出した。従って、サービス作業に伴うリスクや、喫煙によるリスクは室外側よりも低くなったが、可燃空間時空積の影響は室外側よりも大きくなった。

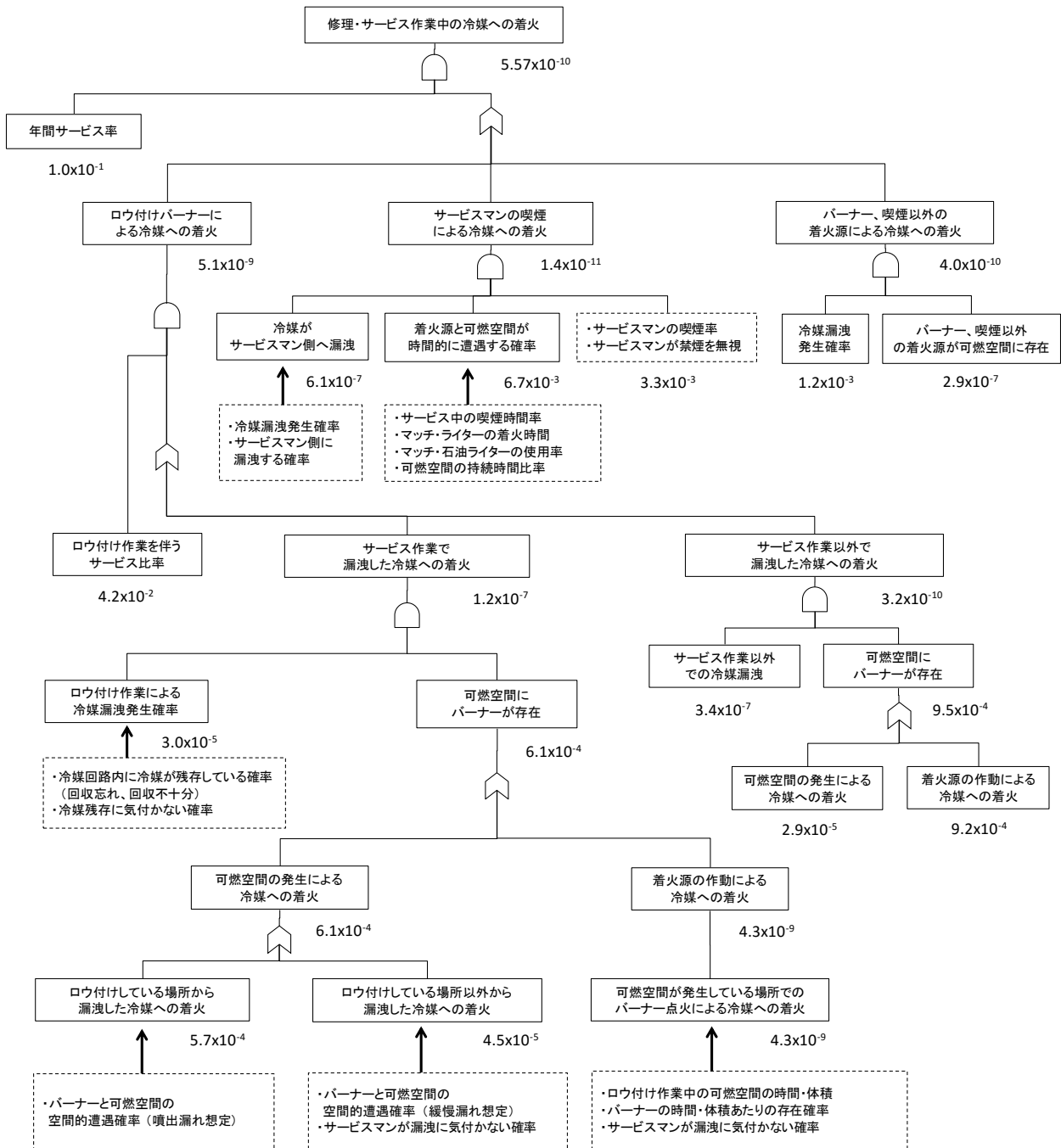


図 7-12 修理ステージの FTA

7.5 各モデルのリスクアセスメント結果

店舗用 PAC のリスクアセスメントを 3 段階に分けて実施した。第一次では、一般的に使用される代表的なモデルを選定し、第二次では、床置き室内機を除く 14.0 kW 以下の比較的风险が高くなると想定されるモデルを選定し、第三次で、床置き室内機も含め 30 kW まで対象範囲を広げ店舗用 PAC 全体の評価を行った。対象冷媒は、まず R32 で行い、R1234yf、R1234ze(E) も同様に可燃空間時空積を求め比較評価した。湿度影響を受ける冷媒は、いずれも高湿 (27°C 露点) 条件で算出している。R1234yf、R1234ze(E) は、比較的风险の高くなる第二次、第三次のモデルで評価した。

7.5.1 第一次モデル(代表的なモデル)

第一次では、代表的なモデルとして、表 7-11 の条件を設定した。

店舗用 PAC の約 80%は、配管長が 30m以下であり、現地冷媒追加充填を必要としない。

室内条件は、最も販売台数の多い 7.1kW クラスの四方向カセット形を選定し、自然換気口を有する事務所への設置とした。室外条件は、設置スペースが、7.1~14.0kW のボリュームゾーンで同一となることから、設置面積当り冷媒量の多い 14.0kW を代表モデルに選定している。設置場所は、4方に障壁がなく、漏洩冷媒が滞留しない一般的な地上設置を選定した。輸送・保管場所は、一般的なトラック輸送と、準耐火中型倉庫に保管されている状態を設定した。尚、トラック輸送では、荷台に着火源が存在せず着火リスクはないので、下表から割愛した。倉庫保管では、フォークリフトの爪による金属スパークを着火源として試算した。

これら代表的なモデルに対して、輸送保管、据付、使用、修理、廃棄各ステージにおける着火事故発生確率を算出した。表 7-12 の通り、従来冷媒と同様の取扱いでも着火事故発生確率は、許容されるレベル以下となり、追加の安全対策は不要となった。

表 7-11 第一次モデルの設定

条件	形態	設置場所	特徴	設置空間		冷房能力 (kW)	配管長 (m)	冷媒量 (kg)
				床面積(m ²)	高さ(m)			
室内	天井設置	事務所	自然換気口有	42.3	2.7	7.1	≤30	3
室外	横吹きスリム形	地上	4面開放	50	2	14.0	≤30	4
保管	段積保管	中型倉庫	室外機 2300 台	1000	—	14.0	—	4

表 7-12 第一次モデルのリスクアセスメント結果【R32】

ライフステージ [許容レベル]		輸送 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		据付 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		使用 [≤ 1.3×10 ⁻⁹]		修理 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		廃棄 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]	
モデル【R32】		未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有
室内	事務所	—	—	6.59×10 ⁻¹⁰	不要	3.37×10 ⁻¹²	不要	1.19×10 ⁻¹⁰	不要	3.12×10 ⁻¹²	不要
室外	地上	—	—	6.73×10 ⁻¹⁰	不要	6.35×10 ⁻¹¹	不要	2.23×10 ⁻¹⁰	不要	6.05×10 ⁻¹¹	不要
保管	中型倉庫	1.55×10 ⁻¹¹	不要	-	-	-	-	-	-	-	-

7.5.2 第二次モデル(比較的风险が高くなると想定されるモデル)

第二次では、室内床置き設置を除く冷房能力 14.0kW 以下のシステムにおいて、比較的风险が高くなると想定されるモデルを、表 7-14 の通り、選定した。

まず、配管長については、各システムの最大許容配管長を考慮し、それに応じた冷媒量を設定した。

室内条件は、比較的着火源の多いレストランの厨房と、自然換気口がなく密閉度の高いカラオケルームを選定した。カラオケルームは居室空間容積の最も小さくなる 3.6kW モデルを選定した。

カラオケルームでは、通常機械換気がされているが、それが故障した場合に、漏洩冷媒が LFL 濃度となる空間に滞留したと仮定して計算した。実際には、室内全体に拡散されるので可燃空間が存在し続ける可能性は低く、より安全と考えられるが、密閉空間でのシミュレーション結果が無いので、最悪条件で試算した。また、使用室内での冷媒漏洩速度は、通常の急速漏れ (10kg/h) では、使用者が気づき扉を開放する可能性が高いと考え、緩慢漏れ (2kg/h) と仮定した。カラオケルームの利用時間を 3 時間として、着火事故確率を求めた。図 7-13, 7-14 に仮定条件を示し、表 7-13 に可燃空間時空積を示す。

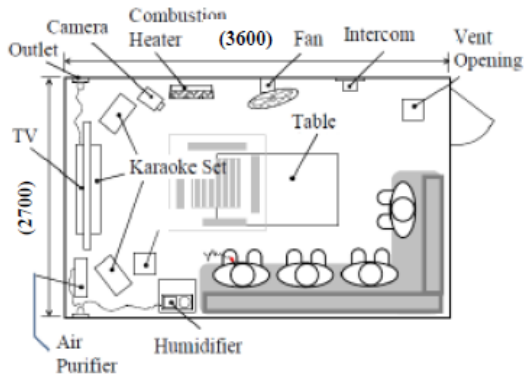


図 7-13 カラオケルームモデル

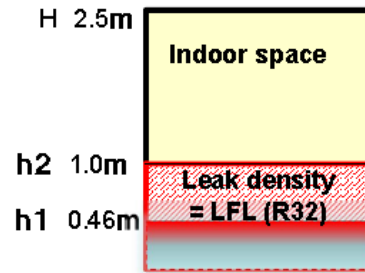


図 7-14 カラオケルームの冷媒滞留仮定条件

表 7-13 可燃空間時空積 算出結果

可燃濃度 限界高さ	滞留高さ m	床面積 m ²	高さ m	【R32】冷媒量 kg	漏洩速度 kg/h	漏洩時間 min	可燃空間時空積(停止時) m ³ ・min
h1:ULF	0.46	9.7	2.5	3	2	138	6.16×10 ²
h2:LFL	1.0	9.7				90	8.73×10 ²

室外条件は、前述の通り、4つの設置場所を選定した。

輸送・保管条件は、販売店の狭小倉庫に一時保管されるケースがあり、そのモデルを追加した。また、輸送においては、7.1kW以下の小筐体室外機の場合、着火源との遭遇がほぼないトラック輸送以外に、運転席と荷台が同一空間となるワゴン車輸送も考えられ、運転者の喫煙等により着火リスクが高くなるモデルとして選定した。ワゴン車の場合、輸送振動が生じる場所での冷媒漏洩となるため、漏洩速度は噴出漏れ(75kg/h)と設定して試算した。これらのモデルの着火事故発生確率を表7-15～17に示す。

室外の「半地下設置」「狭小設置」において、一部許容レベルを満足しない結果となったため、支配的なリスク要因を整理し、実現性の高い安全対策を選定し、リスクを許容レベル以下に低減させた。表7-18に、リスクが高くなる支配的な要因と、その安全対策をまとめた。作業時は、冷媒回収作業ミスによる可燃域の発生や活線作業ミスによるスパークの発生等のヒューマンエラーと、着火源としてロウ付けバーナーの存在確率が、支配的なリスク発生要因となり、「作業員への教育」と、「冷媒漏洩検知センサーの携行」が、効果的な安全対策となった。半地下設置の使用時は、一定冷媒許容充填率を超える設置（半地下深さ $\geq 1.2\text{m}$ 、冷媒充填量 $> 1/2 \times \text{LFL} \times A$ （設置床面積） $\times 1.2$ ）の場合、滞留する高濃度の漏洩冷媒を除去するために、「冷媒漏洩時の強制換気あるいは機器の強制送風攪拌運転（ただし、最小風速 $\geq 4.0\text{m/s}$ 、かつ半地下深さ $\leq 2\text{m}$ 、かつ吹出し口から壁までの距離 $\leq 3\text{m}$ ）」が有効な安全対策となった。また、狭小設置に対しては、「最低1面0.6mの通路を確保」すれば許容レベル以下となることがわかった。

冷媒種による差は、高湿度条件では、若干R1234yf及びR1234ze(E)のほうがR32よりも可燃空間時空積が大きくなり、着火事故発生確率が上昇したが、同様の安全対策を講じることにより、許容できるレベルに低減できた。

表 7-14 第二次モデルの設定

条件	形態	設置場所	特徴	設置空間		冷房能力 (kW)	配管長 (m)	冷媒量 (kg)
				床面積 (m ²)	高さ (m)			
室内	天井設置	事務所	最大配管・冷媒量	42.3	2.7	7.1	75	6
		厨房	着火源が多い	57.2	2.7	14.0	75	8
		カラオケルーム	密閉・機械換気	9.7	2.4	3.6	50	3
室外	横吹き	地上設置	4面開放	50	2	14.0	75	8
		各階設置	3面閉塞・1面開放	3.6	4	14.0	75	8
		半地下設置	4面閉塞・上部開放	15.3	3.54	14.0	75	8
		狭小設置	1面部分開放	7.5	2	14.0	75	8
保管	5台平置	狭小倉庫	保管空間容積小	15	2.7	14.0	—*	8*
輸送	小筐体2台	ワゴン車	荷台・運転席一体	4.65	1.34	7.1	—*	6*

※廃棄の輸送・保管時、最大配管長分ポンプダウン考慮

表 7-15 第二次モデルのリスクアセスメント結果【R32】

ライフステージ [許容レベル]		輸送 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		据付 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		使用 [≤ 1.3×10 ⁻⁹]		修理 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		廃棄 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]	
モデル【R32】		未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有
室内	事務所	—	—	6.63×10 ⁻¹⁰	不要	4.20×10 ⁻¹²	不要	1.21×10 ⁻¹⁰	不要	3.37×10 ⁻¹²	不要
	厨房	—	—	6.64×10 ⁻¹⁰	不要	1.03×10 ⁻¹⁰	不要	2.65×10 ⁻¹⁰	不要	2.80×10 ⁻¹²	不要
	カラオケルーム	—	—	6.77×10 ⁻¹⁰	不要	8.71×10 ⁻¹¹	不要	1.04×10 ⁻⁹	不要	2.04×10 ⁻¹¹	不要
室外	地上設置	—	—	7.53×10 ⁻¹⁰	不要	3.13×10 ⁻¹⁰	不要	5.57×10 ⁻¹⁰	不要	2.60×10 ⁻¹⁰	不要
	各階設置	—	—	8.49×10 ⁻¹⁰	不要	5.79×10 ⁻¹⁰	不要	1.47×10 ⁻⁹	不要	6.81×10 ⁻¹⁰	不要
	半地下設置	—	—	3.60×10 ⁻⁷	4.89×10 ⁻⁹	7.14×10 ⁻⁷	1.68×10 ⁻¹⁰	1.12×10 ⁻⁷	2.33×10 ⁻⁹	8.68×10 ⁻⁸	9.46×10 ⁻⁹
	狭小設置	—	—	2.77×10 ⁻⁹	不要	5.96×10 ⁻⁹	5.77×10 ⁻¹⁰	1.84×10 ⁻⁸	4.21×10 ⁻¹⁰	7.21×10 ⁻⁹	不要
保管	狭小倉庫	1.26×10 ⁻¹¹	不要	—	—	—	—	—	—	1.22×10 ⁻⁸	不要
	ワゴン車	1.73×10 ⁻¹⁰	不要	—	—	—	—	—	—	6.66×10 ⁻¹⁰	不要

表 7-16 第二次モデルのリスクアセスメント結果【R1234yf 高湿条件 (27℃露点)】

ライフステージ [許容レベル]		輸送 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		据付 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		使用 [≤ 1.3×10 ⁻⁹]		修理 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		廃棄 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]	
モデル【R1234yf】		未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有
室内	事務所	—	—	6.64×10 ⁻¹⁰	不要	4.97×10 ⁻¹²	不要	1.26×10 ⁻¹⁰	不要	3.83×10 ⁻¹²	不要
	厨房	—	—	6.66×10 ⁻¹⁰	不要	1.24×10 ⁻¹⁰	不要	3.03×10 ⁻¹⁰	不要	3.30×10 ⁻¹²	不要
室外	地上設置	—	—	7.68×10 ⁻¹⁰	不要	3.60×10 ⁻¹⁰	不要	1.59×10 ⁻⁹	不要	3.95×10 ⁻¹⁰	不要
	半地下設置	—	—	3.60×10 ⁻⁷	4.89×10 ⁻⁹	2.11×10 ⁻⁶	5.15×10 ⁻¹⁰	1.61×10 ⁻⁷	3.07×10 ⁻⁹	9.97×10 ⁻⁸	1.09×10 ⁻⁸
	狭小設置	—	—	3.10×10 ⁻⁹	不要	7.67×10 ⁻⁹	9.93×10 ⁻¹⁰	2.63×10 ⁻⁸	5.57×10 ⁻¹⁰	8.89×10 ⁻⁹	不要
保管:ワゴン車		1.73×10 ⁻¹⁰	不要	—	—	—	—	—	—	6.66×10 ⁻¹⁰	不要

表 7-17 第二次モデルのリスクアセスメント結果【R1234ze(E)高温条件 (27℃露点)】

ライフステージ [許容レベル]		輸送 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		据付 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		使用 [≤ 1.3x10 ⁻⁹]		修理 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		廃棄 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]	
モデル【R1234ze】		未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有
室外	地上設置	—	—	7.63x10 ⁻¹⁰	不要	3.25x10 ⁻¹⁰	不要	1.43x10 ⁻⁹	不要	3.46x10 ⁻¹⁰	不要
	半地下設置	—	—	3.60x10 ⁻⁷	4.89x10 ⁻⁹	2.03x10 ⁻⁶	4.95x10 ⁻¹⁰	1.55x10 ⁻⁷	2.98x10 ⁻⁹	9.97x10 ⁻⁸	1.09x10 ⁻⁸
	狭小設置	—	—	3.03x10 ⁻⁹	不要	7.26x10 ⁻⁹	9.36x10 ⁻¹⁰	2.39x10 ⁻⁸	5.17x10 ⁻¹⁰	8.41x10 ⁻⁹	不要
保管:ワゴン車		1.73x10 ⁻¹⁰	不要	—	—	—	—	—	—	6.66x10 ⁻¹⁰	不要

表 7-18 第二次モデルの必要とされる安全対策

リスクが高い要因		使用		据付/修理		廃棄	
室外機 半地下 設置 (半地下 深さ≥ 1.2m)	項目	冷媒の滞留	着火源の存在	作業者のヒューマンエラー	作業者のヒューマンエラー		
	要因	換気少	ボイラーの存在確率	冷媒回収作業 ロウ付け作業	冷媒回収作業 活線作業		
	安全対策	冷媒充てん量>1/2xLFLxAx1.2の場合, 漏洩センサー検知時に室外ファン強制 ON (吹出風速≥4.0(m/s), 深さ≤2m, かつ 壁までの距離≤3m), あるいは局所強制排気装置		作業者への教育 かつ 冷媒漏洩センサーの携行			
室外機 狭小設 置	項目	冷媒の滞留	着火源の存在	作業者のヒューマンエラー	作業者のヒューマンエラー		
	要因	1面開口少	ボイラーの存在確率	冷媒回収作業 ロウ付け作業	冷媒回収作業 活線作業		
	安全対策	1面開口寸法 0.6m以上		作業者への教育 かつ 冷媒漏洩センサーの携行			

7.5.3 第三次モデル(30kW までのリスクが高くなると想定されるモデル)

第三次では、表 7-19 の通り、床置き設置室内機も含め冷房能力 30.0 kW まで対象を拡げて、比較的リスクが高くなると想定されるモデルを選定した。30.0 kW システムでは、室内外配管長が最大 120m となり、それに応じたシステム最大冷媒量で評価した。また、室内機は、4 台接続を想定し、冷媒漏洩発生確率を高く設定した。

室内床置き設置については、最も室内空間容積が小さくなる 4.5 kW クラスと、最大冷媒量となる 30.0 kW (7.1 kW : 4 台設置) の 2 条件を選定した。また、店舗用 PAC として製品化されている小型氷蓄熱システムも追加した。小型氷蓄熱システムは、室外機近傍に氷蓄熱槽を有しているが、着火リスクに対する差異としては、同一能力当りの冷媒量が増加する点だけである。室内設置空間に対する冷媒量比率が厳しくなる為、室内条件に追加した。一般的に、事務所・学校等に納入されており、室内条件は天井設置形を選定した。店舗用としては、14.0 kW が最大であり、最大配管長時の冷媒量 9kg と設定した。

輸送・保管については、狭小倉庫、ワゴン車輸送がない為、中型倉庫のみ評価した。工場出荷時の 30.0 kW 室外機の冷媒量は 7kg として試算した。

表 7-20~22 にリスクアセスメント結果を示す。室内「床置き設置」と室外「半地下設置」「狭小設置」で許容レベルを満足しない結果となった。

室内「床置き設置」については、前述した通り、冷媒が漏洩した場合、高濃度で室内空間下部に滞留し易いため、非常に大きな可燃空間時空積となった。使用時の安全対策としては、「室内機下部に冷媒漏洩センサーを備え漏洩感知した場合に、強制送風運転すること」が効果的であった。作業時は、室外条件同様、作業

者への教育と冷媒漏洩検知センサーの携行が、効果的な安全対策となった。床置き設置以外の室内条件については、第二次と比較して、冷媒量が増加したものの室内設置空間も大きくなったために、リスクは若干減少した。

室外・保管条件については、設置環境・設置スペースが第二次と同等のため、冷媒量が増加した分だけ、若干リスクが上昇した。しかしながら、必要とされる安全対策は大きな差異はなく、同様な対策で許容できるレベルを満足した。必要とされる安全対策を表 7-23 にまとめた。

冷媒種による差は、第二次と同様、高湿度条件では、若干 R1234yf 及び R1234ze(E)のほうが R32 よりも可燃空間時空積が大きくなり、着火事故発生確率が上昇したが、同様の安全対策を講じることにより許容できるレベルに低減できた。

表 7-19 第三次モデルの設定

条件	形態	設置場所	特徴	設置空間		冷房能力 (kW)	配管長 (m)	冷媒量 (kg)
				床面積 (m ²)	高さ (m)			
室内	天井設置	事務所	最大配管・冷媒量	169	2.7	30.0	120	19
		厨房	着火源が多い	80	2.7	30.0	120	19
	床置き設置	飲食店	下部漏洩滞留	14	2.5	4.5	50	3
		工場	下部漏洩滞留	100	3	30.0	120	19
室内(氷蓄熱)	天井設置	事務所	冷媒量：多/部屋	50	2.7	14.0	75	9
室外	横吹き	地上設置	4面開放	50	2.5	30.0	120	19
		各階設置	3面閉塞・1面開放	3.6	4	30.0	120	19
		半地下設置	4面閉塞・上部開放	15.3	3.54	30.0	120	19
		狭小設置	1面部分開放	7.5	2.5	30.0	120	19
保管	段積保管	中型倉庫	室外機 2300 台	1000	—	30.0	—	7

表 7-20 第三次モデルのリスクアセスメント結果【R32】

ライフステージ [許容レベル]	輸送 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		据付 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		使用 [≤ 1.3×10 ⁻⁹]		修理 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		廃棄 [≤ 1.3×10 ⁻⁸]		
	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	
モデル【R32】											
室内	事務所	—	—	6.61×10 ⁻¹⁰	不要	7.61×10 ⁻¹³	不要	4.82×10 ⁻¹²	不要	1.90×10 ⁻¹²	不要
	厨房	—	—	6.75×10 ⁻¹⁰	不要	7.97×10 ⁻¹¹	不要	1.65×10 ⁻¹⁰	不要	7.33×10 ⁻¹²	不要
	飲食店	—	—	1.70×10⁻⁸	2.45×10 ⁻¹⁰	9.39×10⁻⁹	1.00×10⁻¹²	9.28×10⁻⁹	2.81×10⁻⁹	2.99×10 ⁻⁹	不要
	工場	—	—	2.30×10 ⁻⁹	不要	1.05×10 ⁻⁹	不要	3.11×10 ⁻⁹	不要	7.04×10 ⁻¹⁰	不要
	氷蓄熱			6.68×10 ⁻¹⁰	不要	3.62×10 ⁻¹²	不要	4.10×10 ⁻¹¹	不要	2.79×10 ⁻¹²	不要
室外	地上設置	—	—	8.02×10 ⁻¹⁰	不要	2.61×10 ⁻¹⁰	不要	5.53×10 ⁻¹⁰	不要	7.60×10 ⁻¹⁰	不要
	各階設置	—	—	1.00×10 ⁻⁹	不要	6.15×10 ⁻¹⁰	不要	1.48×10 ⁻⁹	不要	2.01×10 ⁻⁹	不要
	半地下設置	—	—	3.67×10⁻⁷	5.64×10⁻⁹	4.65×10⁻⁶	1.14×10⁻⁹	1.18×10⁻⁷	2.93×10⁻⁹	1.43×10⁻⁷	1.59×10⁻⁹
	狭小設置	—	—	5.34×10 ⁻⁹	不要	8.49×10⁻⁹	3.97×10⁻¹⁰	1.91×10⁻⁸	4.95×10⁻¹⁰	2.61×10 ⁻⁸	2.84×10⁻⁹
中型倉庫	8.30×10 ⁻¹¹	不要	-	-	-	-	-	-	-	-	

表 7-21 第三次モデルのリスクアセスメント結果【R1234yf 高湿条件 (27°C露点)】

ライフステージ [許容レベル]		輸送 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		据付 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		使用 [≤ 1.3x10 ⁻⁹]		修理 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		廃棄 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]	
モデル【R1234yf】		未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有
室内	事務所	—	—	6.62x10 ⁻¹⁰	不要	8.92x10 ⁻¹³	不要	5.61x10 ⁻¹²	不要	2.15x10 ⁻¹²	不要
	厨房	—	—	6.78x10 ⁻¹⁰	不要	9.36x10 ⁻¹¹	不要	1.93x10 ⁻¹⁰	不要	8.33x10 ⁻¹²	不要
室外	地上設置	—	—	8.30x10 ⁻¹⁰	不要	4.12x10 ⁻¹⁰	不要	1.57x10 ⁻⁹	不要	9.77x10 ⁻¹⁰	不要
	半地下設置	—	—	3.67x10 ⁻⁷	5.64x10 ⁻⁹	9.94x10 ⁻⁶	1.28x10 ⁻⁹	1.71x10 ⁻⁷	4.11x10 ⁻⁹	3.41x10 ⁻⁷	3.71x10 ⁻⁹
	狭小設置	—	—	7.02x10 ⁻⁹	不要	1.23x10 ⁻⁸	1.14x10 ⁻⁹	2.74x10 ⁻⁸	6.72x10 ⁻¹⁰	3.68x10 ⁻⁸	4.01x10 ⁻⁹

表 7-22 第三次モデルのリスクアセスメント結果【R1234ze(E)高湿条件 (27°C露点)】

ライフステージ [許容レベル]		輸送 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		据付 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		使用 [≤ 1.3x10 ⁻⁹]		修理 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]		廃棄 [≤ 1.3x10 ⁻⁸]	
モデル【R1234ze】		未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有	未対策	対策有
室外	地上設置	—	—	8.14x10 ⁻¹⁰	不要	3.70x10 ⁻¹⁰	不要	1.42x10 ⁻⁹	不要	8.55x10 ⁻¹⁰	不要
	半地下設置	—	—	3.67x10 ⁻⁷	5.64x10 ⁻⁹	9.86x10 ⁻⁶	1.26x10 ⁻⁹	1.66x10 ⁻⁷	4.06x10 ⁻⁹	3.29x10 ⁻⁷	3.58x10 ⁻⁹
	狭小設置	—	—	6.51x10 ⁻⁹	不要	1.09x10 ⁻⁸	1.02x10 ⁻⁹	2.45x10 ⁻⁸	6.09x10 ⁻¹⁰	3.34x10 ⁻⁸	3.64x10 ⁻⁹

表 7-23 第三次モデルの必要とされる安全対策

モデル	リスクが高い要因		使用	据付/修理	廃棄
室内機 床置き 設置	項目	冷媒の滞留	空間の気流	作業者のヒューマンエラー	-
	要因	換気少	攪拌	ロウ付け作業	-
	安全対策	漏洩センサー検知時に室内ファン強制 ON (最小風量: 10m ³ /min かつ最小風速: 1.0m/s)		作業者への教育 かつ 冷媒漏洩センサーの携行	
室外機 半地下 設置 (半地下 深さ≥ 1.2m)	項目	冷媒の滞留	着火源の存在	作業者のヒューマンエラー	作業者のヒューマンエラー
	要因	換気少	ボイラーの存在確率	冷媒充填, 回収作業 ロウ付け作業	冷媒回収作業 活線作業
	安全対策	冷媒充てん量 > 1/2xLFLxAx1.2 の場合, 漏洩センサー検知時に室外ファン強制 ON (吹出風速 ≥ 4.0(m/s), 深さ ≤ 2m, かつ 壁までの距離 ≤ 3m), あるいは局所強制排気装置		作業者への教育 かつ 冷媒漏洩センサーの携行	
室外機 狭小設 置	項目	冷媒の滞留	着火源の存在	作業者のヒューマンエラー	作業者のヒューマンエラー
	要因	1面開口少	ボイラーの存在確率	冷媒充填, 回収作業 ロウ付け作業	冷媒回収作業 活線作業
	安全対策	1面開口寸法 0.6m以上		作業者への教育 かつ 冷媒漏洩センサーの携行	

7.6 冷媒誤充填に対するリスク評価

微燃性冷媒を使用するシステムに必要とされる安全対策は、前項にまとめたが、旧冷媒（R410A）システムに誤って微燃性冷媒を充填した場合、前述した安全対策のリスク低減効果が見込めないために、冷媒誤充填した場合のリスク評価を追加した。具体的には、前項の各モデルの未対策リスク確率に、冷媒誤充填確率を掛け合わせたものが、許容できるレベル以下になるかを検証した。許容できるレベルを満足しない場合、機器側に誤充填防止のため、冷媒充填ポートの形状を変更する等の対策が必要となる。

冷媒の誤充填確率は、以下とした。

①据付時： 0.2 （追加充填確率） $\times 10^{-3}$ （ヒューマンエラー） $\times 6.5$ （市場蓄積年数） $\div 13$ （製品寿命年数）

②修理時： 0.1 （故障率） $\times 0.15$ （冷媒充填率） $\times 10^{-3}$ （ヒューマンエラー） $\times 6.5$ （市場蓄積年数）

許容できるレベルは、使用者及び作業者に微燃性冷媒使用の意識がないために、10倍厳しくした。

表 7-24 に、第三次で安全対策が必要とされたモデルに誤充填確率を加味したリスク評価結果をまとめた。未対策の数値は、第三次【R32】（表 7-20）のものを使用している。室外条件は、構成比率を考慮して合算している。（半地下設置：0.001%、狭小設置：2.78%）結果は、許容されるレベルを満足したため、冷媒充填ポート形状の変更等の追加対策を講じる必要はないと考えられる。

表 7-24 冷媒誤充填に対するリスク評価

ライフステージ	据付		使用		修理		廃棄	
許容レベル	1.3×10^{-9}		1.3×10^{-10}		1.3×10^{-9}		1.3×10^{-9}	
誤充填蓄積影響	据付時		据付時+修理時		据付時+修理時		据付時+修理時	
誤充填確率	1.0×10^{-4}		2.0×10^{-4}		2.0×10^{-4}		2.0×10^{-4}	
着火事故確率	未対策	誤充填込	未対策	誤充填込	未対策	誤充填込	未対策	誤充填込
床置き 飲食店	1.70×10^{-8}	1.70×10^{-12}	9.39×10^{-9}	1.88×10^{-12}	9.28×10^{-9}	1.86×10^{-12}	-	-
室外 半地下/狭小	3.67×10^{-12}	3.67×10^{-16}	2.83×10^{-10}	5.66×10^{-14}	5.32×10^{-10}	1.06×10^{-13}	1.43×10^{-12}	2.86×10^{-16}

7.7 まとめ

微燃性冷媒を使用する店舗用PACに対して、3段階に分けてリスクアセスメントを実施した。

一般的に使用される代表モデルでは、着火事故発生確率が許容されるレベル以下となり、安全対策は不要となった。しかしながら、構成比率は低いが、いくつかのシビアモデルケースでは、許容されるレベルを超えたため、安全対策が必要となった。具体的には、室内「床置き設置」モデル、及び室外「半地下設置」「狭小設置」モデルにおいて、使用時、あるいは、据付、修理、廃棄時にリスクが高い結果となり、支配的なリスク要因を低減するための安全対策を策定した。なお、今回、評価検討したシビアモデルケースは、冷媒量、設置床面積等、現在市場で設置されている条件に基づいて選定している。

微燃性冷媒を用いた機種冷媒充填ポート形状の変更は、冷媒誤充填リスク影響が小さいため、不要と考えられる。

リスクを低減するために求められる安全対策について、微燃性冷媒を使用する業務用エアコン製品ガイドライン（JRA4070）、安全確保のための施設ガイドライン（JRA GL-16）等にまとめ、周知させていく予定である。

参考文献

- 7-1) 高市健二, 平良繁治, 渡部岳志, 「微燃性冷媒リスク評価研究会」平成 25 年度 プログレスレポート, pp.78-89, 2014
- 7-2) 矢嶋龍三郎, 「微燃性冷媒リスク評価研究会」平成 25 年度 プログレスレポート, pp.90-100, 2014
- 7-3) 今村友彦, Experimental Evaluation of Physical Hazard of A2L Refrigerants, The International Symposium on New Refrigerants and Environment Technology 2014, pp.73-78, 2014
- 7-4) 滝澤賢二, Fundamental and Practical Flammability Properties, The International Symposium on New Refrigerants and Environment Technology 2014, pp.79-84, 2014
- 7-5) 独立行政法人 製品評価技術機構ホームページ, 2013 年 各種統計データ, 2013
- 7-6) JT (日本たばこ産業株式会社), 2013 年 「全国たばこ喫煙者率調査」, 2013

8. ビル用マルチエアコンのリスク評価

8.1 はじめに

ビル用マルチエアコンにおいて現在使用されている R410A 冷媒の地球温暖化係数（GWP）は 2090（IPCC 第 4 次評価報告書）と大きく、使用時や廃棄時に大気に漏洩した際の温暖化影響が大きなことから、GWP の低い冷媒への転換が社会的に要請されている。しかし、R410A は燃焼性を有しない不燃性冷媒であるのに対して、低 GWP 冷媒である R32、R1234yf、R1234ze(E)は、僅かながらの燃焼性を有するため、微燃性冷媒と呼ばれている。これらの微燃性冷媒が民生用のエアコンに安全に使用できるのかどうかを評価し、必要な安全対策を明確にすることが大きな課題であった。

エアコンに可燃性冷媒を使用した際のリスク評価としては、日本冷凍空調工業会（JRAIA）が行った R290（プロパン）を用いた家庭用エアコンのリスクアセスメント⁸⁻¹⁾や、Goetzler ら⁸⁻²⁾が行った R32 及び R32/R134a を用いた家庭用のユニットリーエアコンのリスクアセスメントがある。1 年間に 1 台の機器に発生する着火事故発生確率（以降、着火確率と記す）を推定するには、例えば室内空間の一部が可燃濃度に達するような冷媒漏洩が発生する確率を知る必要がある。市場で発生する多くの漏洩は、全量の冷媒が漏洩する迄に数日や数か月が経過するような緩慢な漏洩であり、可燃空間を生じさせることはない。可燃空間を生じさせるには、漏洩速度が拡散速度に打ち勝つような急速漏洩でなければならず、そのような急速漏洩は、全体の漏洩の中のごく一部でありその頻度は低い。緩慢な漏洩を含む全ての漏洩件数発生確率（以降、漏洩確率と記す）はサービスデータから知ることが出来るが、この中の一部である急速漏洩事故を抽出しその件数を知ることは不可能であった。JRAIA の報告⁸⁻¹⁾では、配管のロウ付け作業を伴った漏洩を急速漏洩と仮定している。Goetzler らの報告²⁾では、全体の漏洩の 5%が急速漏洩だと仮定して求めている。この推定の仕方により、急速漏洩確率や着火確率は大きく影響され、安全性の評価結果が左右されることになる。

本報では、この急速漏洩確率を知るために、市場で漏洩を起こしたサンプル部品を回収しそれらのサンプルの冷媒漏洩速度を測定するとともに、年間約百万件の修理受付データに含まれる顧客の声やサービスマンの修理記録を用いて、ビル用マルチエアコンの急速漏洩確率を推定した。

着火事故は、着火源と可燃空間が時間的・空間的に遭遇した際に発生する。JRAIA の報告⁸⁻¹⁾では、着火源は主に喫煙器具であり、可燃空間の中で喫煙器具が着火動作する回数を求めて、着火確率が計算されている。また、Goetzler らの報告⁸⁻²⁾では、主にバーナーや喫煙器具が着火源であり、その裸火が燃えている際に可燃濃度になった漏洩ガスと接触する回数を求めて、着火確率が計算されている。本報では、その双方について式化して、着火確率を求めた。微燃性冷媒を着火させ得る着火源については、滝澤⁸⁻³⁾や今村⁸⁻⁴⁾による各種着火源の試験結果を用いた。

JRAIA の報告⁸⁻¹⁾では、家庭用壁掛エアコンを対象としており、4 畳半の居室に設置された場合を想定している。Goetzler らの報告⁸⁻²⁾では、米国式のユニットリーエアコン室内ユニットが地下室・屋根裏・クローゼットに設置された場合を想定している。本報では、ビル用マルチエアコンでは多様な室内及び室外の設置ケースがあることを想定し、その中でもリスクの高い設置ケースを抽出し、それらのケースにおいて冷媒漏洩時の濃度解析を行って可燃空間の発生について調べた。解析は岡本⁸⁻⁵⁾や JRAIA 各社が分担し行った。着火源と可燃空間が遭遇する確率については JRAIA が各設置ケースにおける各種のデータや妥当性の有る仮定から着火確率の推定を行い、確率を許容値以下に低減するための安全対策を提案した。リスクアセスメントは、代表的冷媒として R32 を用いるものとして進め、その結果をベースにして R1234yf のリスクアセスメントを行った。R1234ze については、R1234yf よりリスクが小さいと考え、安全対策は同じとした。

8.2 微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンの特徴

表 8-1 に、ビル用マルチエアコンの特徴を示した。最大の特徴は、冷媒充填量が多く、室内で冷媒漏洩した

場合、冷媒システムの全ての冷媒が一台の室内機から放出され得ることである。冷媒配管の接続箇所が多いので、配管施工後の冷媒漏洩チェックは、正圧での気密試験、負圧での真空保持チェック、と二重に実施され、厳しい漏洩チェックがなされている。また、通常、据付・修理を行うのは専門技術者や高レベルのサービスマンがあたりため、作業ミス発生は抑制されている。

表 8-2 に、微燃性冷媒 R32 と強燃性冷媒 R290（プロパン）の燃焼特性を示した。R32 の燃焼下限界 LFL は R290 に比べて大きいので、可燃空間を発生させるにはより多くの冷媒漏洩量が必要となる。また、最小着火エネルギー MIE の値も大きいので、R290 を着火させ得る程度の電気スパークでは、R32 を着火させることは出来ない。

室内機形態や設置場所による冷媒滞留のし易さ、設置先の業種による着火源種類や換気条件を検討し、リスクの大きいと思われる設置ケースを抽出しリスク評価を行った。

R410A 機に誤って R32 が充填され着火事故に至るリスクについても今回検討した。もしこのリスクが許容出来ないレベルの値であれば、作業者が冷媒を間違えないように、機器に冷媒充填するためのサービスポートを R32 と R410A 機とで変更する必要が出て来る。

8.3 リスクアセスメントの準備

8.3.1 許容レベルの設定

許容出来る事故発生確率は、本来は危害度により異なるが、危害度評価が未完のため、全ての事故を致命的な重大事故だと仮定して許容レベルを設定した。100 年に一度の重大事故が発生する確率が許容されるレベルであると考え、市場にストックされている室内機約 1000 万台から、使用時（室内）の許容事故発生確率を 10^{-9} とした。また、使用時（室外）の許容事故発生確率は、台数を室内機の 1/4 と見込み、 4×10^{-9} とした。市場データでは、室外機 1 台あたり 8 台接続が平均なので十分に危険側でみている。使用時以外は、消費者ではなく常に機器を取り扱う作業者が携わっているので、事故が起きた際にも自己防御による危害度低減が可能だと考え、1 桁上げて 10^{-8} 以下とした⁸⁾⁵⁾。

冷媒誤充填による事故に関しては、安全対策の検討がなされていない中で発生することになるので、危害度が増すと考え、使用時、作業時共に、更に 1 桁分、許容事故発生確率を下げ、厳しく評価した。

8.3.2 冷媒漏洩速度別の漏洩件数発生確率

実態を知るため、市場で冷媒漏洩を起こした漏洩部品を回収し、窒素での漏洩速度試験により漏洩穴相当径を求め、求めた穴相当径と冷媒圧力から、冷媒漏洩速度を求めた。求めた穴相当径は、室内機サンプルで 0.004~0.17mm、室外機サンプルで 0.007~0.58mm であった。この際、流速が窒素の音速を超えていたので、相当径を求める式には、大阪大学機械工学科による臨界流の式⁷⁾を用いた。R32 での流量を求める際には、液

表 8-1 ビル用マルチシステムと A2L 冷媒の特徴

Features of VRF system compared with single split	Risk
➤ Large amount of refrigerant charge that can all leak into just one room	↑ up
➤ Numerous joints connecting refrigerant circuit or parts of valves, vessels and sensors	
➤ Strict check of refrigerant sealing and leaks	↓ down
➤ Highly skilled personnel for installation, repair and maintenance	
➤ A variety of system configuration, mode free type, water cooled or ice storage type, etc.	Risk should be specified
➤ Wide range capacity of outdoor and indoor units	
Features of A2L refrigerants compared with A2, A3	Risk
➤ Lower size of flammable cloud because of larger LFL	↓ down
➤ Type of ignition source is limited because of larger MIE	

表 8-2 R32 と R290 の燃焼特性

Burning characteristics		R32	R290
Burning velocity ^{*)}	[cm/sec]	6.7	46
Lower flammable limit ^{*)}	[kg/m ³]	0.307	0.038
Minimum ignition energy ^{**)}	[mJ]	29	0.35

^{*)} ISO817 2014 : Refrigerants – Designation and safety classification

^{**)} Takizawa, JSRAE, Progress report, P22, 2014

漏洩量の場合は、流量係数を 0.6 とし液密度を用いてベルヌーイ式で求めた。管内側の温度と圧力は、液漏洩の場合は 63℃飽和液、ガス漏洩の場合は 10℃飽和ガスの値とした。漏洩後時の外部圧力は、大気圧とした。

市場から回収した室内機漏洩部品 22 個での測定結果を図 8-1 に示す。バー上の矢印は、顧客から「室内機から白煙が出ている」という申告によりサービスマンが緊急出動したことを示す。4 件中 3 件が、液漏洩 1kg/h 弱から 10kg/h 以下の比較的大きな漏洩速度を示し、1 件のみ 0.01kg 以下となっている。この 1 件は冷媒の急速漏洩ではなく、ガス欠運転で発生した水蒸気を見た顧客からの申告によると推定する。これを除いた白煙発生ケースが 10kg/h 近くの冷媒漏洩速度を示していることから、急速漏洩が起これば、白煙発生により顧客が異常に気付くケースが多いということが推察出来る。同様の方法で、室外機のサンプル 26 個についても計測を行った。結果を図 8-2 に示す。室外機については、室内機に比較して相対的に漏洩速度が大きく、液漏洩 10kg/h を超えるものが 3 ケあった。

ビル用マルチエアコンについて冷媒充填量基準を定めている国際規格 (ISO5149⁸⁻⁸⁾ Part1A5 章) では、室内での冷媒漏洩速度として、圧縮機などの振動源が無いことなどを条件に 10kg/h を採用している。室内機の部品の測定結果は、これと一致している。

上記のサンプル数の結果からでは、ppm オーダーの速度別漏洩確率を求めることは難しい。そこで、サービスマンが扱った年間の漏洩件数全体を対象に、顧客からの「白煙、異臭」申告があった件数、または、サービスマンが「配管折れ」「熱交換器や配管に穴空き」と診断した件数を抽出し、全ての漏洩件数が抽出出来ない可能性も考慮し厳しめに、室内機の場合はその件数の 10 倍を、顧客が異常に気づき難い室外機の場合にはその 100 倍を急速漏洩件数とした。噴出漏洩については、室内機では噴出漏洩の報告がなかったため、ゼロとした。室外機では、10kg/h を超えるサンプルがあったため、急速漏洩件数の 1/10 を噴出漏洩件数とした。急速漏洩と噴出漏洩以外は、1kg/h 以下の緩慢漏洩件数と判断した。結果を表 8-3 に示した。

8.3.3 ヒューマンエラー発生確率

据付、修理、廃棄等の作業ステージにおける冷媒漏洩は、作業者のバルブ誤操作などのヒューマンエラーにより発生する。ヒューマンエラーの発生率に関

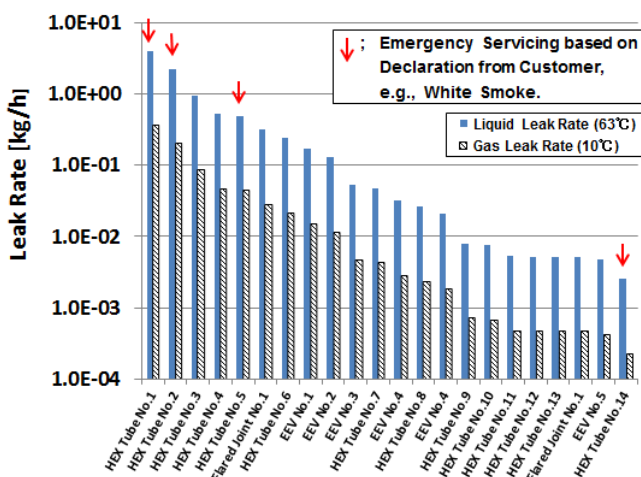


図 8-1 室内機不良部品の漏洩速度

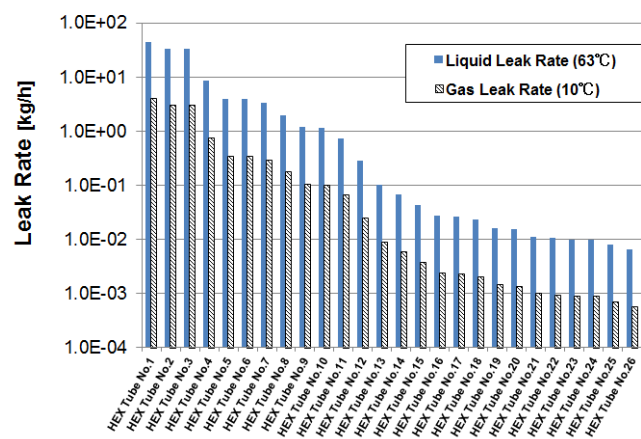


図 8-2 室外機不良部品の漏洩速度

表 8-3 漏洩速度別の漏洩確率

Number of leaks reports indicating rapid leaks, 2010, Manufacturer B

	White Smoke	Smelled Burning	Holes in Pipe	Nrp
Indoor Unit	0	1	0	1
Outdoor Unit	1	3	3	7

Probability of leak classified in leak rate

		Total	Slow Leak	Rapid Leak	Burst Leak
			~1 [kg/h]	~10 [kg/h]	~75 [kg/h]
Indoor Unit	Distribution Ratio [-]	1	0.986	0.014	0
	Probability of Leak [ppm]	350	345	5	0
Outdoor Unit	Distribution Ratio [-]	1	0.806	0.178	0.018
	Probability of Leak [ppm]	7600	6126	1338	137

[Method]

Leak Probability: Weighted mean value of probability for each JRAIA manufacturer

Number of rapid leaks = Nrp × 10 (indoor) or 100 (outdoor)

Number of burst leaks = Number of rapid leak × 0.1 (outdoor), 0 (indoor)

Number of slow leaks = Total - (rapid + burst)

Nrp: Number of leaks as reported by customer or service technician indicating rapid leak, white smoke, smell (customer comment), or breakage or hole in pipe (service technician comment).

表 8-4 着火源

		Y: Ignited N: not ignited		
		Ignition Source	R32	R290 (ref.)
Spark <small>(in flammable cloud)</small>	Electric Parts	Appliance (cause of fire)	Y	Y
		Parts in Unit	N	Y
		Power Outlet, 100V Light Switch	N	Y
	Smoking Equipment	Match	Y	Y
		Oil Lighter	Y : being evaluated	Y
		Electric Gas Lighter	N	Y
	Work Tool	Metal Spark (forklift)	Y	Y
Electric Tool Recovery Machine		N	Y	
Body	Static Electricity	N	Y	
Open Flame <small>(contact with flammable cloud)</small>	Smoking Equipment	Match	Y	Y
		Oil or Gas Lighter	Y	Y
	Combustion Equipment	Heater	Y	Y
		Water Heater	Y	Y
		Boiler Cooker	Y	Y
Work Tool	Gas Burner	Y	Y	

して、橋本⁸⁻⁹⁾や鈴木⁸⁻¹⁰⁾らによる値を参考に求めた。ビル用マルチエアコンの作業については、比較的高い技術レベルの専門技術者があたるため、作業ミス発生は抑制されていることから、ビル用マルチエアコンの作業におけるヒューマンエラー発生確率は、 10^{-4} とした。

8.3.4 着火源の評価

表 8-4 に今回想定した着火源を示した。微燃性冷媒の場合には、微燃性冷媒リスク評価研究会の滝澤、今村らにより得られた着火源評価結果より、室内に多く存在する電源コンセント、照明用スイッチ、喫煙用具のうちの電子ライターのスパーク、人体から発生する静電気では着火しないとした。石油ライターとマッチは、着火源になり得るとし、全体の喫煙具の中で5%の比率を占めるとした。なお、プロパンは、これらの着火源により着火する¹⁾。

8.3.5 着火事故発生確率の計算方法

着火事故は、可燃空間を生じさせる程度の冷媒漏洩が発生し、かつ、微燃性冷媒を着火させ得る着火源と可燃空間が場所的かつ時間的に遭遇した時に起きる。この着火確率の計算式を表 8-5 に示した。ここで、

PF:着火確率 [time/(year・unit)]

PL:漏洩確率 [time/(year・unit)]

PT:着火源と可燃ガスとの時間的遭遇確率 [-]

PS:着火源と可燃ガスとの空間的遭遇確率 [-]

N:着火源動作回数 [time/min]

V:対象とする空間体積 [m³]

T:1回の漏洩あたりの可燃空間継続時間または1回の着火源動作あたりの作動継続時間 [min/time]

M:可燃空間の時空積 [min*m³/time]

$$M = \int (V_f * T_f) dt$$

表 8-5 着火事故発生確率の計算法

Trigger of Fire	PF	PT	PS
Ignition of Device	$PF_i = N/V_r * M * PL$ $= N/V_r * V_f * T_f * PL$	$PT_i = N * T_f$	$PS = V_f/V_r$
Generation of Flammable Space	$PF_g = N * T_b * V_f/V_r * PL$	$PT_g = N * T_b$	
Total	$PF = PF_i + PF_g$ $= N * V_f/V_r * (T_f + T_b) * PL$ $= PT * PS * PL$	$PT = PT_i + PT_g$ $= N * (T_f + T_b)$	$PS = V_f/V_r$

PF: Probability of Fire [time/(year × unit)]

PL: Probability of Leak [time/(year × unit)]

PT: Probability of Encounter in time between Ignition Source and Flammable Gas [-]

PS: Probability of Encounter in space between Ignition Source and Flammable Gas [-]

N: Number of Operations of Ignition Source [time/min]

V: Volume [m³]

T: Duration [min/time]

M: Time Multiplied by Volume of Flammable Region [min × m³/time]

$$M = \int (V_f * T_f) dt$$

suffix

i: Trigger is Operation of Ignition Source

g: Trigger is Generation of Flammable Space

r: Room

f: Flammable Region

b: Ignition Source

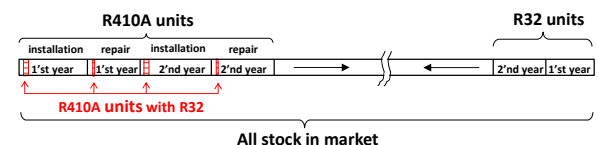
< Basic Idea >

The fire probability at each life stage for the case without measures is multiplied by E.

< Equation for probability of charge of R32 to R410A units >

Charge of R32 into R410A units is subject of human error during the installation or repair of R410A units. The number of R410A units with R32 becomes maximum after half the service life duration since the start of R32 sales.

$$E = E_i + E_r = 5.0 \times 10^{-5} + 1.1 \times 10^{-5} = 6.1 \times 10^{-5} [-]$$



Notation

E_i = Installation 1time/(15 years × unit) × 7.5 years × E_h

E_r = Repair 0.1time/(year・unit) × refrigerant charge 0.15 (time/time) × 7.5year × E_h

E: Probability of charge of R32 into R410A units [-]

E_i : Probability of charge of R32 into R410A units during installation [-]

E_r : Probability of charge of R32 into R410A units during repair [-]

E_h : Probability of human error by workers = $1E-04$ [unit/time]

L: Life year = 15 [year]

図 8-3 R410A 機に R32 を誤充填することによる着火確率の計算

着火事故を発生させるトリガーは、例えば電気スパークの場合、着火源の作動である。表 8-5 中の上段に確率計算式を示す。また、燃えているロウソクに可燃ガスが触れて着火する場合は、可燃空間の生成がトリガーとなる。表 8-5 中の中段に計算式を示す。可燃空間生成が時間的に先行すれば、前者になり、着火源 ON 状態の継続が時間的に先行すれば、後者になる。1つの着火源により引き起こされる着火確率は、この2つの和となる。表 8-5 中の下段に計算式を示す。各ライフステージのリスク計算においては、どちらが支配的かを判断の上、計算を行った。

8.3.6 冷媒誤充填による着火確率の計算方法

微燃性冷媒機のサービスポート仕様を従来冷媒と変更すべきか否かを判断する材料を得るために、同仕様とした際に R32 冷媒が R410A 機に誤充填され着火事故が発生する確率を求めた。図 8-3 にその計算方法を示した。冷媒誤充填による着火確率は、未対策時の着火確率に、誤充填発生確率 E を乗じて求めた。E は、R410A 機の据付の際に R32 を誤って充填する確率 E_i と修理の際に誤って充填する確率 E_r の和として求めた。これらの誤充填はヒューマンエラーにより起こると考えて、1年あたりの据付や修理の際の冷媒充填回数にヒューマンエラー確率 10^{-4} を乗じて求めた。

8.3.7 室内モデルの設定

室内機より冷媒が漏洩した場合の室内空間可燃空間の発生状況を、冷媒漏洩時の濃度解析をベースとして検討を行った。

8.3.7.1 事務所小会議室

ビル用マルチエアコンが設置される標準的ケースとして、事務室を想定したモデルを設定した。事務室向け出荷台数の容量別分布調査の結果より室外機容量は 560 型 (20Hp) とし、室内機に出荷台数の過半数を占める天井カセット 4 方向吹出しタイプを選択した。室外機 1 台当たり同容量の室内機が 8 台接続されているとして、室内機の容量は 71 型 (2.8Hp) を選択、冷房負荷 $170\text{W}/\text{m}^2$ とし床面積 42m^2 を設定した。図 8-4 に全体図を示す。リスク評価は室内機 1 台分が空調を行う事務所の中の小会議室 ($6.5\text{m} \times 6.5\text{m}$) を対象として行った。換気は、天井の給排気口各 1ヶ所とドア下部の隙間 (アンダーカット部) 1ヶ所から行われるとした。1人あたり専有床面積を 5m^2 とし想定在籍人数は 8.4 人、1人あたり換気量は $20\text{m}^3/\text{h}$ とし、換気量は $169\text{m}^3/\text{h}$ とした⁸⁻¹¹⁾、⁸⁻¹²⁾。給排気口は、面風速は $2.0\text{m}/\text{s}$ とし、 $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ と

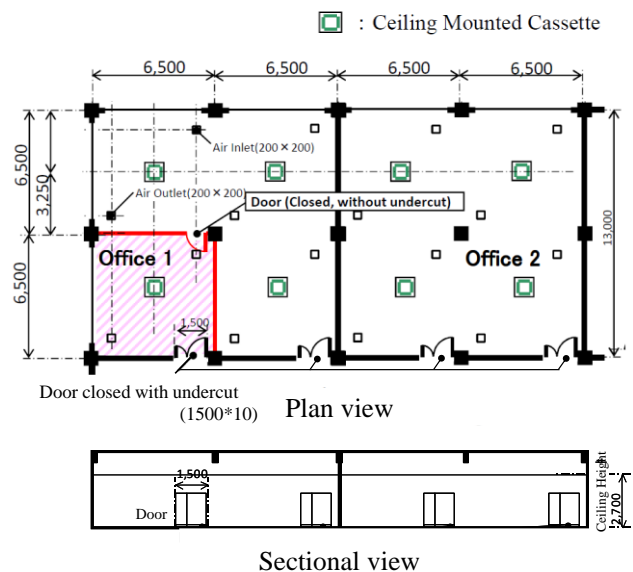


図 8-4 事務所会議室(天井カセット型)

表 8-6 小会議室の CFD シミュレーションの計算条件と結果

No.	Refrigerant	Charge Amount G [kg]	Leak Velocity [kg/h]	Ventilation Amount [m ³ /h]	Undercut	Vent	Condition	Space-Time Product of Flammable region	
								G = 26.3 ²⁾	G = 88.1
1	R32	26.3	10	0	N	Open	Most severe condition. Widest flammable space	$1.70 \cdot 10^0$	$3.66 \cdot 10^4$
2		88.1	10	0	Y	Open	Natural ventilation through undercut	$8.30 \cdot 10^{-1}$	$2.80 \cdot 10^0$
2'		10	0	Y	Closed	Natural ventilation through undercut, Vent closed	$1.62 \cdot 10^0$	-	
4		1	0	Y	Open	Natural ventilation through undercut	$0.00 \cdot 10^0$	-	
5		10	169	Y	Open	Mechanical ventilation, ACH=1.5 [1/h]	$7.00 \cdot 10^{-1}$	-	
6		10	0 to 169 ¹⁾	Y	Open	Vent. starts after leak detection	$7.30 \cdot 10^{-1}$	-	
8		10 to 1 ¹⁾	0	N	Open	Shut-off valve operates after leak detection	$3.10 \cdot 10^{-2}$	-	
9'		R1234yf	29.4	10	0	Y	Open	Effect of refrigerant in No.2	$6.30 \cdot 10^{-1}$

*1) Operation after activation of leak detector

*2) Charge amount of R32, G= 29.4 [kg] in case of R1234yf

[m³·min]

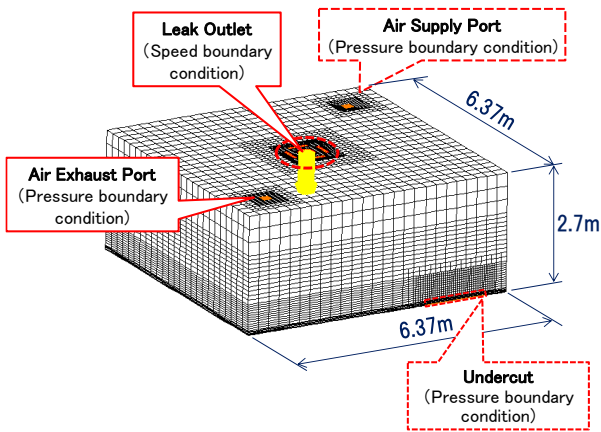


図 8-5 小会議室の CFD モデル

した⁸⁻¹³⁾。ドア形状は幅 1500mm とした。ドア下部の隙間寸法は、10mm⁸⁻¹⁴⁾ に設定した。

冷媒充填量は、R410A を基準として冷媒密度差分を補正し、R32 では係数 0.85 を乗じて算出した。その結果、平均的な施工を想定した冷媒充填量は 26.3kg、最大冷媒充填量 88.1kg となり、この 2 ケースに対して濃度解析を行った。

冷媒と空気の拡散係数などシミュレーションを実施する上で必要な諸値は、本ケースを対象として東京大学が実施した解析と同様に設定して⁸⁻¹⁵⁾、漏洩速度、ドア下隙間有無などの条件の影響と、換気や漏洩検知による冷媒遮断の効果など各影響を確認するため、表 8-6 に示す条件でシミュレーションを行った。ここで、冷媒の漏洩速度は、微少漏洩の場合は 1kg/h、急速漏洩の場合は 10kg/h とした。計算モデルを図 8-5 に示す。

表 8-6 中に可燃空間の時空積の結果を合わせて示す。ここで、時空積とは、可燃空間容積と可燃空間が継続して存在する時間との積を意味する。計算式は表 8-5 中の M に示した。例えばドア下隙間からの自然換気の影響を評価したケースとして No.2 (冷媒漏洩速度 E=10kg/h) の場合がある。

No.2 条件における、漏洩冷媒量 88.1kg 漏洩終了時点の濃度分布と可燃空間体積を図 8-6、図 8-7 に示す。本ケースの場合、可燃空間は漏洩箇所となる部屋中央部からその下部にかけて柱状に形成され、その大きさは安定している。図 8-7 の可燃空間体積の積分値が時空積となり、本ケースにおいては $2.80 \times 10^0 \text{m}^3 \cdot \text{min}$ となる。

この他のリスクが高いと想定されたケースについての検討結果を示す。

8.3.7.2 飲食店小部屋 低い位置で使用される床置タイプは漏洩直後より床面付近に可燃空間が形成され滞留するので特にリスクが高い。居酒屋の個室に床置機が設置されているケースを想定した。図 8-8 にモデルを示す。冷媒充填量は 52.8kg とした。表 8-7 に解析条件と結果を示す。未対策ケースとしては、給排気の換気口が共

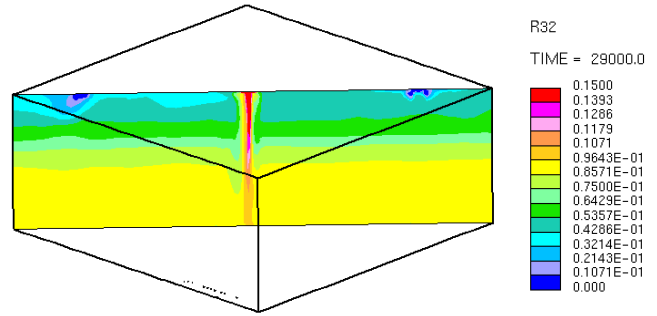


図 8-6 No.2 モデルの濃度分布

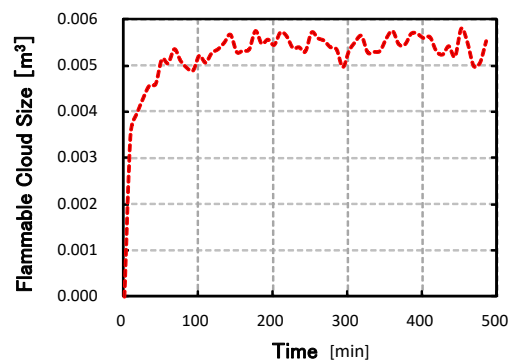


図 8-7 No.2 モデルの可燃空間体積

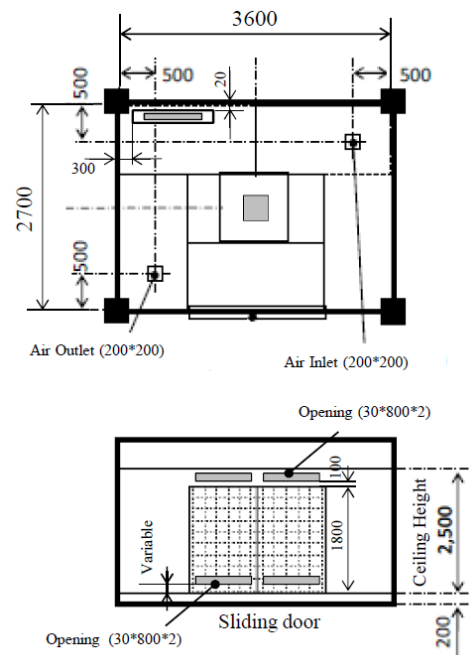


図 8-8 日本レストラン小部屋 (床置き型)

表 8-7 日本レストラン小部屋(床置き型)CFD シミュレーションの計算条件と結果

	Analysis Condition						Flammable Region			
	Refrigerant	Charge [kg]	Leak Rate [kg/h]	Mixing in Unit	Ventilation Amount [m ³ /h]	Ventilation Condition		Mean Volume [m ³]	Time [min]	Space-Time Product [m ³ min]
						Inlet	Outlet			
Without Measures	R32	52.8	10	No	112	Ceiling	Ceiling	1.17	910	1070
				Yes				1.28	900	1150
With Measures	R32	52.8	10	Yes	164	Ceiling	300mm above floor level	0.01	320	416
							200mm above floor level	0.10	317	30.7
							30mm above floor level	1.30	317	2.40

に天井に設置されており、換気量は 112m³/h とした。通常のカセットコンロ(発熱量 3kW)が運転されていた場合に、室内の CO₂ 濃度を 1000ppm 程度に維持するための換気量は 500m³/h が必要となるが、安全をみてその 1/5 程度の値とした。天井に排気口が設置された機械換気では、床面付近に滞留した冷媒を希釈できずに可燃空間が大きくなった。JRAIA のガイドラインである GL-13⁸⁻¹⁶⁾ が定める対策ケースとしては、床面付近に排気開口を設けることが要求されている。換気量は、漏洩速度 10kg/h で濃度が R32 の RCL 値(冷媒濃度限界, 0.061kg/m³)以上とならない値、164m³/h(=10/0.061)とした。排気開口の高さ(下面)を 30~300mm に変化させた結果、可燃空間容積への影響が大きいことが判った。

8.3.7.3 カラオケルーム 防音のため気密性が高いカラオケルームもリスクが高いと想定された。図 8-9 にモデルを示す。北島⁸⁻¹⁷⁾ や野村⁸⁻¹⁸⁾ の実態調査を参考とした。音漏れ防止のため機械換気が採用されているとした。冷媒充填量は、最大の 88.1kg、容積は 9.5m³、1 回 3 時間で客が入れ替わるとし、入れ替わり時に冷媒濃度は一旦低下後、短時間で再び部屋全体が可燃空間になるとした。着火源としてはロウソク、燃焼式暖房機、ガスコンロや、カラオケ機器はじめとする凶中電気機器の発火、を想定した。室内機は天井カセット型であり、濃度は室内で均一になるものとして求めた⁸⁻¹⁹⁾。

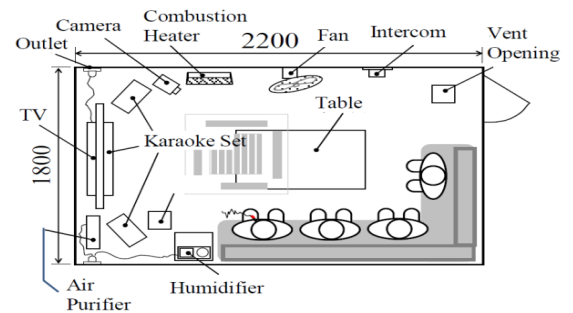


図 8-9 カラオケルーム(天井カセット型)

8.3.7.4 美容院バックヤード 狭い空間に給湯設備による火源があり換気も期待できないケースとして検討の対象とした(対象広さ 3.15m×1.85m)。厚生労働省調査より従業員 6 名、10 時間営業を想定すると、バックヤードのガスコンロは器具の消毒時と休憩時に使用され、年間の使用時間は 470 時間と推定された。天井設置タイプと床置タイプの両方を想定した。

8.3.7.5 焼肉店 個室で強い火力を使用する焼肉店もリスクが高いと予想された(対象個室 3.825m×2.05m)。焼肉店への来店頻度調査より求められた対象個室のコンロ使用時間は年間 2050 時間と推定された。天井設置タイプと床置タイプの両方を想定した。

8.3.7.6 換気が停止される場合の検討 換気が前提となる場所で換気が行われない場合を検討した。換気装置の故障率は調査の結果 0.025%とした。特に事務所で夜間に換気停止される場合に残業者が喫煙して着火する場合の影響が大きかったので、評価に取り入れた。

8.3.8 室外モデルの設定及び解析内容

室外機設置は、周囲に障害物が無い地上設置・各階設置・機械室設置・半地下設置の 4 パターンとし、図 8-10 に示した。機器容量は、最も市場で多い 560 型(20Hp)とし、上吹き出し三面熱交タイプを選定した。R32 の冷媒充填量は R410A の規定量の 85% (26.3kg)とし、連結設置の内 1 台の熱交換器全体から均一に漏洩する

条件とした。図 8-11～図 8-14 に、各設置モデルの詳細図を示す。表 8-8 に解析結果を示した。

冷媒漏洩速度が 10kg/h の条件では、障害物が無い、または、各階設置では可燃空間が 10^{-6}m^3 レベルの大きさであり、無視できることが判った。75kg/h の場合には、全パターンにて可燃空間が発生した。図 8-15 に半地下設置での濃度分布解析結果を示す。漏洩速度は 75kg/h である。漏洩終了迄の 20 分間は、薄い可燃空間層が床面から上昇し、漏洩終了後は拡散によって可燃空間層の厚さが増加していく。半地下以外の設置パターンでは冷媒漏洩後、可燃空間が数十秒で消滅するのに対し、半地下設置の場合、可燃空間の冷媒の滞留がおこり、可燃空間消滅まで 64 時間を要

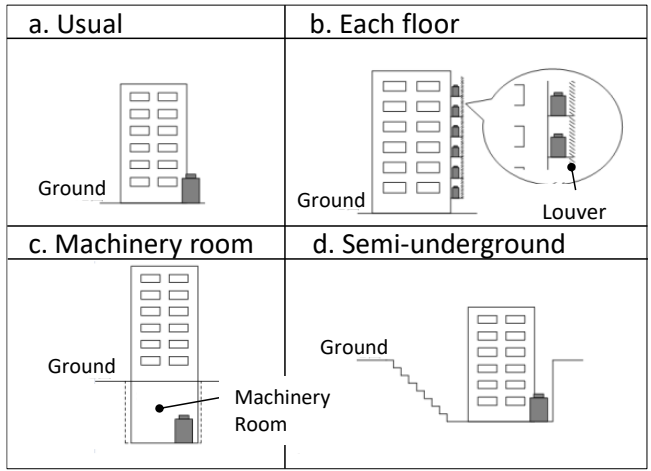


図 8-10 室外機設置モデル

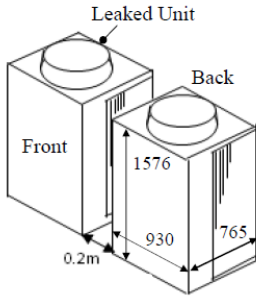


図 8-11 地上設置

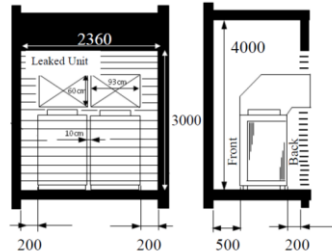


図 8-12 各階設置

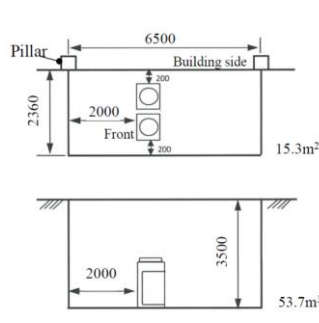


図 8-13 半地下設置

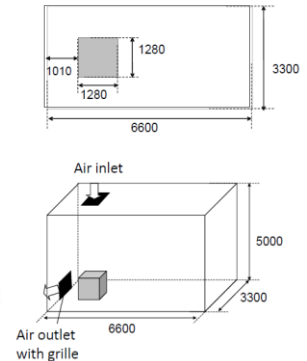


図 8-14 機械室設置

した。

また、冷媒充填量が半地下空間の容積に比べて大きい程、半地下の深さが深い程、時空積が大きくなる傾向があった。安全対策として排気ダクトによる換気、または、漏洩検知時の室外機ファンの運転を行うものとした。図 8-16 に半地下設置での安全対策を考慮した冷媒漏洩 20 分後の解析結果を示す。緑の面が LFL 濃度面を示し、それより下の領域が可燃空間となっている。

排気ダクトは 0.5m 角とし床上 0.5m に配置した。排気ダクト吸い込み面高さ 0.5m より上では、可燃空間は消滅している。室外機ファン稼働は、室外機ファン同サイズのファンを室外機近傍に設置したモデルとした。排気ダクトの場合、滞留している冷媒を強制的に排気したため、排気ダクト風量 520m³/h 時の可燃空間消滅時間は 23 分と短縮した。室外機ファン稼働の場合も、半地下全体に対流を起し冷媒の拡散を速めたため、可燃空間消滅時間が 21 分と短縮した。安全対策を施さない場合に対し、一気に可燃空間消滅迄の時間が減少した。そして、換気風量、室外機

表 8-8 室外機の CFD 結果

	Analysis Condition			Results -- Flammable cloud --			
	Installation Case	Leak rate [kg/h]	Leak amount [kg]	Leak time [min]	Mean volume [m³]	Time [min]	Space-time product [m³min]
Each case (No vent)	Typical	10	26.3	157.8	0.00	0	0.00
	Each floor				1.01×10^{-6}	4.2	4.27×10^{-6}
	Typical	75	26.3	21.0	8.31×10^{-2}	21.1	1.75
	Each floor				1.88×10^{-1}	21.3	4.02
	Semi-underground				1.64 × 10	3852	6.31×10^4
Semi-underground (Suction duct)	Vent.Air : 520m³/h	75	26.3	21.0	1.38	23.3	3.21×10^1
	Vent.Air : 260m³/h				4.03	28.3	1.14×10^2
	Outdoor fan operating				5.73×10^{-1}	21.6	1.24×10^2
Machinery Room (Suction and supply)	Air change : 2times/h	75	26.3	21.0	5.81	31.5	1.83×10^2
	Air change : 4times/h				5.25×10^{-1}	21.4	1.12×10^1
	Air change : 8times/h				6.24×10^{-2}	21.1	1.32

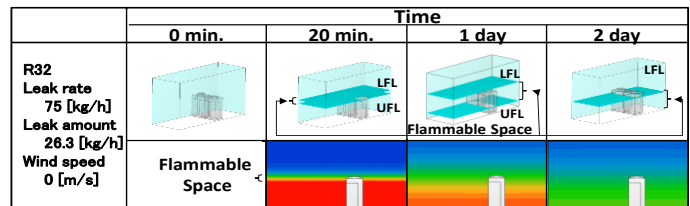


図 8-15 半地下設置の濃度分布

安全対策を施さない場合に対し、一気に可燃空間消滅迄の時間が減少した。そして、換気風量、室外機

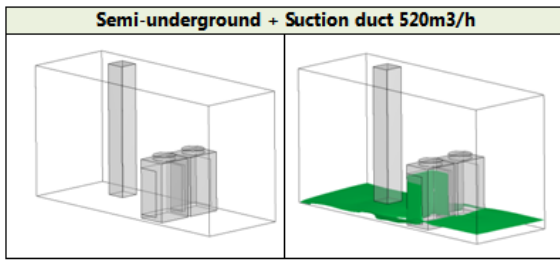


図 8-16 半地下設置の CFD 計算による可燃空間体積(漏洩開始 20 分後)

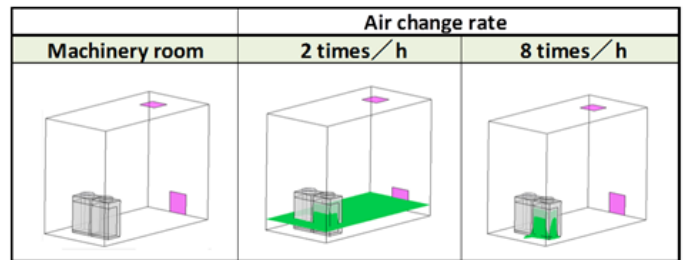


図 8-17 機械室設置の CFD 計算による可燃空間体積(漏洩開始 20 分後)

ファン風量が多い程、可燃空間の消滅が速くなった。

機械室も同様の傾向を示した。一例として、換気回数を変化させた場合の冷媒漏洩後 20 分後における解析結果を図 8-17 に示す。換気回数の変化は風量変化に相当する。換気回数 2 回/h 時は可燃空間消滅まで 31 分を要したが、換気回数 4 回/h 時は 21 分と短縮した。

8.3.9 R1234yf を使用した場合のリスクアセスメント

R1234yf や R1234ze (E) を冷媒として使用した場合のリスクについては、R32 におけるリスク評価結果をベースにして、R32 と異なる部分についてのみ検討を行い、R32 に適用可能とした安全対策が R1234yf にも適用可能かどうかを判断した。図 8-18 は、ISO/IEC Guide51 に沿ったリスクアセスメントのプロセスと、R1234yf において R32 と異なった冷媒特性に起因する要検討事項①～⑦を示した。

R1234yf は、分子量が 114 であり、R32 分子量 52 に比較して倍以上となるため、ガス密度も倍以上であり、冷媒漏洩時、換気時、床置き機での攪拌時の濃度分布及び可燃空間時空積に影響を与える可能性がある。また、湿度が高くなると、燃焼範囲が広くなり、また、燃焼速度も増加する特性を有する。滝澤によって得られた高湿度時の燃焼範囲の結果を用いて、東京大学が可燃空間時空積の値を求めた結果を、表 8-9 に示した。換気無の条件では、R1234yf の時空積は、R32 比 1.33 倍となっている。これは主に冷媒量の増加による。また、R1234yf において、高湿度条件 (27°C100%RH) では、ISO817 湿度条件 (23°C50%RH) に比べて、時空積が 1.58 倍となっている。従って、R32 ISO817 条件での時空積に対して、R1234yf 高湿度条件での時空積は、 $1.33 \times 1.58 = 2.1$ 倍と考えた。R1234yf の FTA を作成するにあたっては、R32 の時空積を 2.1 倍とした時空積を用いた。但し、事務所 (夜間換気停止) やカラオケでは、室内全体が可燃空間となると想定しており、この場合は可燃空間が継続する時間のみ増加するとした。

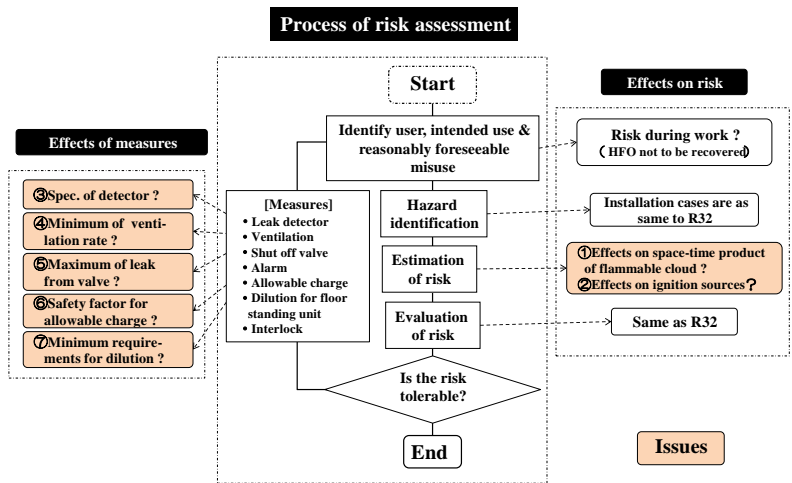


図 8-18 R1234yf のリスクアセスメントで評価すべき事項

表 8-9 R1234yf の可燃時空積

No.	Ref.	Charge [kg]	Vent.	[m³min]		
				ISO817 ^{*1)}	High moisture ^{*2)}	
1	R32	26.3	No	1.622	-	
2	R1234yf	29.4	No	2.152	1716	
3	R32	26.3	Natural	0.831	-	
4	R1234yf	29.4	Natural	0.661	1.044	
				deg C/RH%	23/50	27/100
				LFL%/UFL%	6.2/12.3	5.1/14.2

*1) Space-time product from 2012 progress report

*2) Space-time product from Tokyo University

8.4 リスクアセスメントの結果と安全対策

8.4.1 輸送保管時

輸送時の貨物室には着火源が無く、冷媒が漏洩しても着火することはないこと、積み降ろし時は、漏洩冷媒が貨物室から容易に拡散し可燃空間が生じないことから、輸送時のリスクは無視できるとした。

保管時については、建築基準法の準耐火構造である 300 坪以下の中規模倉庫を想定し、保管台数を 1000 台とした。可燃空間の時空積は、広い空間でのルームエアコンからの R32 漏洩時を想定した際の時空積をベースに、冷媒充填量と床面積を考慮し、 $8.4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{min}$ とした。着火源は、喫煙時の着火とフォークリフトの火花着火を仮定した。この時空積値は、ルームエアコンから倉庫等への広い空間への R32 漏洩を想定した場合の時空積値をベースに、冷媒充填量と床面積の差を考慮して求めた。冷媒漏洩頻度は、保管頻度を耐用年数 15 年より 1/15 とし、漏洩速度は使用中の急速漏洩の値とした。フォークリフトの爪が金属接触で火花を発生し着火するとしたが、火花発生確率は、J RAIA の報告⁸⁻¹⁾で使用されている数値を用いた。以上の条件を想定した FTA を図 8-19 に示す。着火確率は $7.8 \times 10^{-17} \sim 1.8 \times 10^{-16}$ 件/(台・年)となり、許容値である 10^{-8} 以下となった。

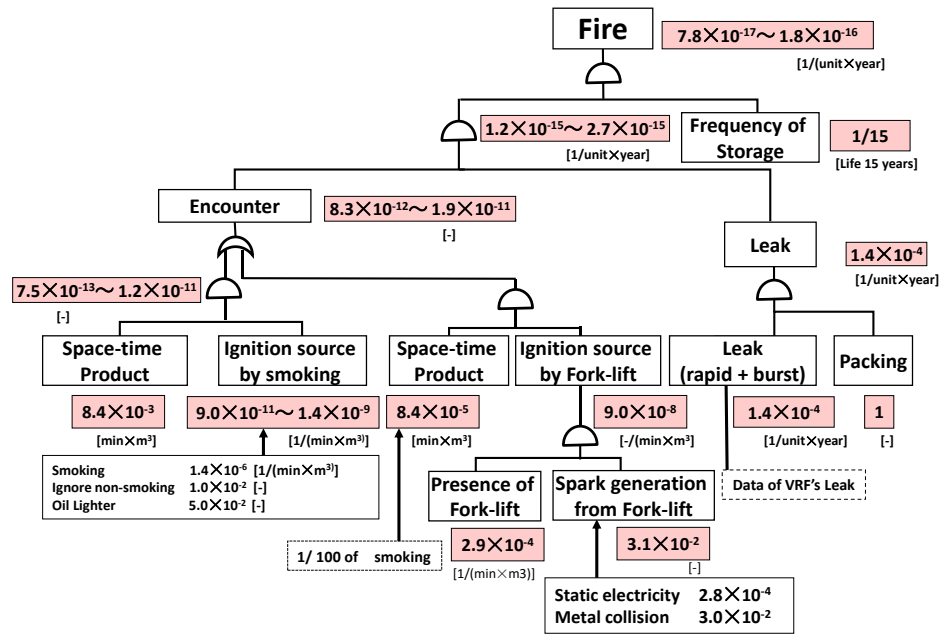


図 8-19 倉庫保管についての FTA

8.4.2 据付時

天井設置の室内機が床面積 40.6m² の事務所に設置され、室外機は半地下に設置されたケースを想定した。冷媒充填量は 26.3kg とした。主要な着火源には、配管接続時のロウ付けと試運転時の電気系・暖房機器系及びボイラを考え、それぞれ着火源存在確率を求めた。前者は、室外機が配管接続された状態でガスバーナによるロウ付け作業が行われるケースが 10%あると仮定し、バルブ誤動作起因の冷媒漏洩による着火を考え、平均ロウ付け時間と配管接続作業時間から着火源存在確率を求めた。後者は、感電事故・波及事故の事故例²⁰⁾より、室内や天井裏の着火確率を求め、且つ、全国オフィスビル調査データ²¹⁾から空間容積等を求めて、着火源存在確率を算出した。

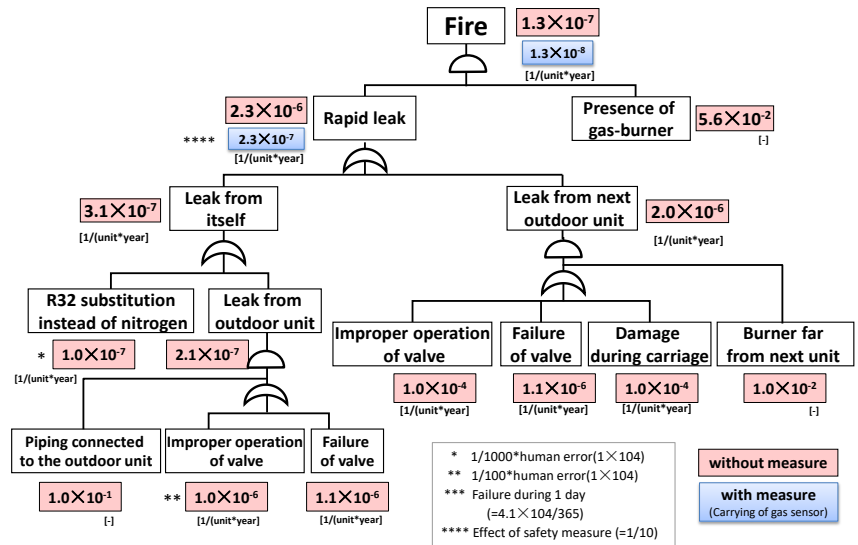


図 8-20 半地下据付時の FTA

また、冷媒漏洩は、①バルブ不良、②バルブ誤操作(閉め忘れ)、③N₂置換の際、R32冷媒を誤充填、④既設配管の流用などが起因の冷媒漏洩、⑤配管工事前に配管が室外機に接続(10%想定)、⑥未接続の室外機がロウ付け作業の付近に仮置き(1%想定)、による発生を想定した。

上記条件を想定した FTA を作成し(図 8-20 にロウ付け作業時の場合を記す)、着火確率を算出した。各作業における着火確率と全体の着火確率を表 8-10 にまとめる。全体では、許容値(10⁻⁸)をわずかにオーバーしている。対策は、ロウ付け作業時に冷媒漏洩検知器を携行することで、着火確率は 1.1×10⁻⁸から 1.9×10⁻⁹となつて、許容内となる。ここでは、漏洩検知器の携行により、配管ろう付時の漏洩確率が 1/100 となり、また、携行忘れが 1/10 の確率で発生するとして、漏洩確率が 11/100 になるとした。

表 8-10 据付時の着火確率

Ignition source	Location	Indoor unit	Probability of fire accident
		Outdoor unit	
Smoking tools	Outdoor unit	Oil lighter, match	1.9 × 10 ⁻¹⁰ ~ 9.3 × 10 ⁻¹⁰
Other than smoking tools	Connecting pipe	Brazing burner	1.3 × 10 ⁻⁷
	Connecting pipe in test run	Electrical or Heating appliances	2.2 × 10 ⁻¹⁴
	Indoor unit in test run	Electrical or Heating appliances	2.4 × 10 ⁻¹⁸
	Outdoor unit in test run	Electrical or Heating appliances	1.6 × 10 ⁻⁸
	Outdoor unit in elevator	Electrical parts	2.8 × 10 ⁻²² ~ 1.2 × 10 ⁻²¹
Total	Above * Frequency of installation		1.1 × 10 ⁻⁸

8.4.3 使用時 (室内)

8.4.3.1 リスクアセスメント結果

標準的ケースおよびシビアリスクとして挙げられたケースを加えて全体の FTA を構築した。

一例としてシビアケースとして検討した事務室 1・小部屋の夜間換気停止・急速漏洩・未対策ケースの FTA を図 8-21 に示す。ツリーはまず運転中①の事象と停止中②の事象に大別されるが、それぞれの下部構造は同様であるので停止中②以下を例として説明する。最上部は着火源の存在確率③と 3.2 項に示される室内機冷媒急速漏洩故障の発生確率④に全時間中において停止中である確率⑤0.7 の and (積) となる。着火源の存在確率③は可燃空間の発生がトリガーとなるケース⑥と着火源の作動がトリガーとなるケース⑦の 2 ケースが考えられそれぞれで可燃空間の時空積および着火源が異なるので、個別に確率算出した結果の or (和) となる。以下⑥⑦とも可燃空間発生に関わる確率⑧⑩と、着火源の存在確率に関わる⑨⑪の and (積) により発生確率が求められる。可燃空間の時空積については 3.6 項の検討結果を、着火源の存在確率については 3.4 項の検討結果を元に、FTA 中の数値に取り込んだ。

夜間換気停止時に、残業者が事務所内で喫煙する際に用いる、石油ライター、マッチを着火源とした。25% の在室人数 (8.5 人) が残業し、喫煙率 23.9%、1/10 の在室者 (分煙) が事務所内で喫煙するとして、喫煙頻度は 1.6 本/時間、石油ライター、マッチの使用率は 5% とすると時間・体積当たりの存在確率⑪は 6.85×10⁻⁸ となる。これを上記と同様に検討した結果として、事務所で夜間換気停止時の着火確率は、7.6 × 10⁻⁹ となり、許容できないリスク (>10⁻⁹) となった。

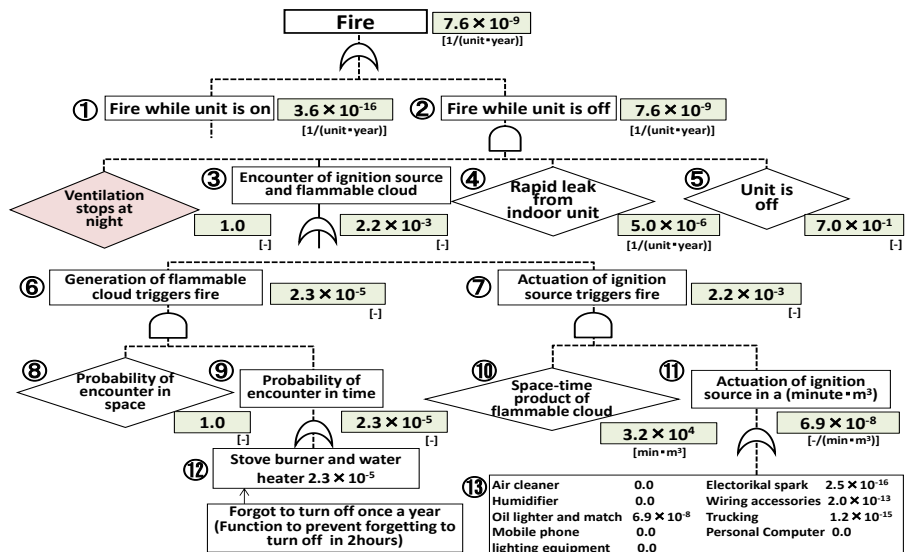


図 8-21 室内使用時の FTA (事務室, 換気なし, 夜間)

8.4.3.2 結果のまとめ

以上のような FTA による着火確率の検討を、想定したケースに対して標準的ケースおよびシビアリスクケースの全てに対して行った。各々のケースの発生構成比と着火確率の積の総和が、室内機起因による着火確率となる。想定したケースの構成比と未対策の場合の着火確率を表 8-11 にまとめて示す。ここでは、市場における換気実態調査結果から、換気実施率 R を求め、その R を用いて、換気無しの場合と換気有の場合の着火確率を加重平均して未対策の場合の着火確率とした。

検討の結果、シビアリスクとして挙げたケースにおいて更に通常建築基準法に準拠した強制換気が動作しない最悪の状況を想定した場合は、目標とする着火確率 10^{-9} 以下に及ばなかった。建築基準法に準拠した強制換気が適用されている場合、殆どのケースで目標を満足したが、飲食店（床置）については建築基準法以上の対応が必要となった。

8.4.3.3 室内機の安全対策について

国際安全規格 ISO5149⁽⁸⁻⁸⁾ Part1 では、ビル用マルチエアコンの室内安全要件として、冷媒充填率（＝冷媒充填量／部屋容積）が基準値より

も大きくなると、安全対策として、漏洩検知、換気、警報、冷媒遮断装置の設置を要求している。これらの安全対策を実施した場合の着火確率を表 8-12 に示した。安全対策によるリスク低減効果については、機械換気に関しては設置条件ごとに定めたが、遮断弁では 1/50、警報では人間が介在することを考慮して 1/10 とし、また、機械換気や遮断弁の対策が実施できる場合には、それらの対策を優先して実施することとした。

これらの安全対策は、施工時において実行されるものであるが、市場の実際の施工現場において、これらの安全対策が確実に実行されるかどうかについては不確実性が残る。安全対策の実行を確実にするために、これらの安全対策が室内機本体の機能として備えていることとした。具体的には、検知・換気・冷媒遮断装置が、室内機本体とインターロックをとること、または、検知や冷媒遮断装置が本体と一体の構造であること、とした。その上で安全要件は、（要件 A、または、要件 B、または、要件 C、または、要件 D）、かつ、要件 E、とした。

- ・ 要件 A 冷媒充填量[kg]/室内容積[m³]で求められる冷媒濃度が、LFL/2 以下であること。
- ・ 要件 B 室内に冷媒漏洩検知手段を備え、機械換気装置を備えること。
- ・ 要件 C 室内に冷媒漏洩検知手段を備え、漏洩検知時に冷媒漏洩を遮断する手段を備えること。
- ・ 要件 D 室内に冷媒漏洩検知手段を備え、漏洩検知時に警報を発する手段を備えること。
- ・ 要件 E 1つの冷媒系統の冷媒充填量が、60kg 以下であること。

要件 A の中で、LFL に関する安全係数を 1/2 とした。従来の国際的な安全規格においては、この安全係数の値は、1/4 (ASHRAE34 による) もしくは 1/5 (ISO817 による) とされている。今回、JRAIA における議論において、冷媒種を R32, R1234yf, R1234ze(E) の微燃性冷媒に限定し、更に冷媒漏洩速度や室内機形態に限定を付けた上で安全係数に影響する要因を詳細に検討した結果、1/2 に変更できるとの結論を得た。国際的な安全規格で定められた値と異なることもあり、今後、更に広く議論を継続する必要がある。詳細は、後述す

表 8-11 安全対策がない場合の室内使用時の着火確率

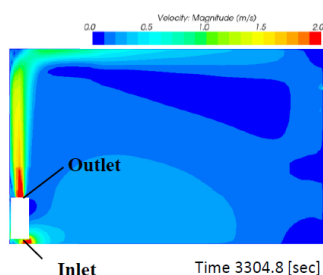
In each installation cases					[time/(unit*year)]			Not allowable	Allowable
Installation case					Fire accident probability, A				
Site	Type	Constituent ratio, P	Allowable probability	Ratio of no vent, R	Without measures			Mean $A_m=RA_1+(1-R)A_2$	
					No vent A_1	Vented A_2			
Indoor	Office	Ceiling	3.8×10^{-1}	1.0×10^{-9}	1.0	7.6×10^{-9} ^{*1)}	3.5×10^{-12}	7.6×10^{-9}	
	Karaoke	Ceiling	2.1×10^{-3}		5.0×10^{-2}	1.8×10^{-7}	6.2×10^{-11}	9.0×10^{-9}	
	Restaurant	Floor	2.0×10^{-2}		2.0×10^{-1}	3.8×10^{-7}	5.4×10^{-9}	8.0×10^{-8}	
	Hair salon	Ceiling	1.6×10^{-3}		2.0×10^{-1}	1.3×10^{-9}	1.2×10^{-10}	3.6×10^{-10}	
	BBQ restaurant	Ceiling	7.8×10^{-4}		1.0×10^{-1}	2.8×10^{-9}	4.4×10^{-10}	6.8×10^{-10}	
	Ceiling space	Ceiling concealed	1.0×10^0		1.0×10^0	3.0×10^{-10}	-	3.0×10^{-10}	
Total in market									
Total = $\sum(P * A)$		4.0×10^{-1}	1.0×10^0	-	1.1×10^{-8}	4.1×10^{-10}	4.8×10^{-9}		

*1) Ventilation turned off at night from 18:00 to 09:00.

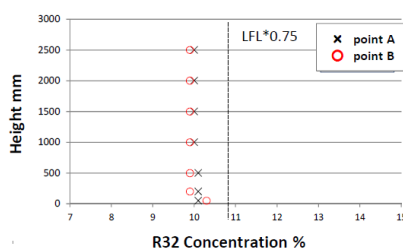
表 8-12 安全対策がある場合の室内使用時の着火確率

In each installation cases					[time/(unit*year)]			Not allowable	Allowable
Installation case					Fire accident probability				
Site	Type	Allowable probability	Without measures		With measures				
			Mean	Mechanical vent.	Shut off valve	Safety alarm			
Indoor	Office	Ceiling	1.0×10^{-9}	7.6×10^{-9}	3.5×10^{-12}	1.5×10^{-10}	7.6×10^{-10}		
	Karaoke	Ceiling		9.0×10^{-9}	≈ 0	1.8×10^{-10}	9.0×10^{-10}		
	Restaurant	Floor		8.0×10^{-8}	2.6×10^{-10}	1.6×10^{-10}	8.0×10^{-10}		
	Hair salon	Ceiling		3.6×10^{-10}	6.8×10^{-12}	7.1×10^{-12}	3.6×10^{-11}		
	BBQ restaurant	Ceiling		6.8×10^{-10}	1.5×10^{-11}	1.4×10^{-11}	6.8×10^{-11}		
	Ceiling space	Ceiling concealed		3.0×10^{-11}	-	-	-		

Velocity distribution in vertical section



Concentration distribution at end of leak



CFD model for floor standing unit

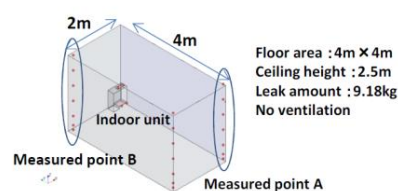


図 8-22 室内機ファン運転による希釈効果 ($V=2\text{m/s}$, Air volume $7\text{m}^3/\text{min}$, Leak rate 10.0kg/h)

る。

ISO5149 Part1 では、微燃性冷媒の場合には、最大冷媒充填量を $195[\text{m}^3] \times \text{LFL}[\text{kg}/\text{m}^3]$ としており、例えば R32 では、 60kg が上限となる。

8.4.4 床置機の安全対策の検討

床面で可燃空間が発生し易い床置機における安全対策を検討した。

床面付近に滞留した冷媒を検知した場合、室内機ファン運転による強制対流で漏洩冷媒を吹き上げることで、冷媒を攪拌・希釈し、床面における可燃空間の生成を防止することができる。

図 8-22 に $4\text{m} \times 4\text{m} \times$ 高さ 2.5m の室内において風速 $2\text{m}/\text{sec}$ 、風量 $7\text{m}^3/\text{min}$ でファンを運転した時の解析結果を示す。対象は製品高さ 600mm 程度のローボーイ型床置機である。部屋容積 (40m^3) \times $\text{LFL} \times 0.75$ で算出した冷媒充填量 (9.18kg) 全て漏洩しても、室内機内部に搭載したセンサーにより冷媒漏洩を検知後に下部から吸込み上部から垂直方向に吹き出すファンを運転することで、漏洩冷媒を天井付近まで吹き上げることができ、床面付近を含め冷媒濃度は $\text{LFL} \times 0.75$ に達しておらず十分に希釈が生じ安全対策となり得ることが分かる。R32

と R1234yf において、同様の計算を行うことにより、上吹き床置機において冷媒漏洩を検知した時にファンを作動させる場合の許容充填量を、図 8-23 のように定めた。冷媒を吹き上げる際には、分子量の大きいほど風速・風量を増やす必要があるが、冷媒の分子量は、 52 から 114 の間で適用可能である。

Allowable refrigerant charge, m_{max} , with a dilution for upward-flow floor standing unit

$$m_{\text{max}} = 0.75 \times \text{LFL} \times h \times A$$

where all of the following conditions are fulfilled

- > $v \geq 0.0048 \times M + 0.748$
- > $Q \geq 3.7$
- > $v \geq -0.35 \times Q + 0.014 \times M + 2.01$

m_{max} : maximum allowable charge [kg]
 LFL : lower flammability [kg/m³]
 h : ceiling height [m]
 If h exceeds 2.2m, h is defined 2.2m.
 A : floor area [m²]
 v : outlet velocity [m/sec]
 Area of air outlet shall include area of outlet grill
 Q : outlet flow rate [m³/min]
 M : molecular weight ($52 \leq M \leq 114$)

図 8-23 上吹き床置機機の許容充填量

8.4.5 使用時 (室外)

8.4.5.1 リスクアセスメント結果

着火源は、喫煙 (マッチ,ライター)・室外機電気スパーク・併設ボイラの 3 件を選定し、濃度解析結果から求めた時空積値と着火源存在確率より着火確率を算出した。喫煙時の条件は、サービスする他機器が存在する確率 10% (半地下, 機械室においては 50%)、他機器の年間サービス率 1 日/10 年、サービスマンが作業場所で喫煙する確率 10%、サービスマンが注意喚起ラベル表示を無視して喫煙する確率 10%、日本人男性喫煙率 33.6%、平均喫煙本数 16 本 (JT 統計)、マッチやライターが着火源となる率 5%、喫煙 1 本あたりの点火時間 5 秒とした。室外機電気スパークについては、発煙・発火事故数 5.6 件/年 (NITE 統計)・発火事故発生すると必ず着火する、とした。併設ボイラについては、普及率 0.1%・ボイラ運転率 21.9% (年間運転時間: 8 時間/日 \times 20 日/月 \times 12 ヶ月)・可燃濃度にある冷媒がバーナー一部に吸入されたら必ず着火する、とした。

上記前提条件のもと FTA を作成し各設置パターンでの着火確率を算出した結果、着火源別の着火確率は表 8-13 のとおりであった。一例として、半地下設置での FTA 構造を図 8-24 に記す。

通常設置・各階設置の着火確率は、それぞれ判定基準 4.0×10^{-9} を下回り 安全対策は不要であったが、半地下では漏洩した冷媒拡散速度が非常に遅く、着火確率 1.74×10^{-6} となり許容レベルを満足しない。機械室については未対策条件下においても通常は連続換気が行われているとしたので、着火確率は許容レベルを満足するが、密閉空間であり換気量規定が必要であるとした。表 8-14 に各設置ケースでの着火確率を示した。

表 8-13 室外機の着火確率

	Smoking	Electric spark	Boiler
Usual	9.2×10^{-17}	5.3×10^{-16}	2.1×10^{-11}
Each floor	3.0×10^{-14}	8.5×10^{-14}	3.4×10^{-9}
Semi-underground	3.1×10^{-11}	7.1×10^{-12}	1.7×10^{-6}
Machinery room	5.5×10^{-15}	3.1×10^{-14}	1.2×10^{-9}

8.4.5.2 設置基準について

半地下と機械室については漏洩冷媒が滞留し、非常に着火リスクが大きくなることが想定されることから、可燃空間を発生させないための冷媒量規制、または換気量規定が必要となる。

(1) 半地下設置基準

室外機からの漏洩パターンは、除霜不具合により熱交換器破断、筐体下部からの漏洩も想定されるが、暖房運転中にはほぼ限定されると推測するため対象としない。また、熱交換器腐食などによる穴あきでは、漏洩ガス噴出により攪拌効果が非常に高くなるため、筐体内部での漏洩冷媒が熱交換器から機外へ排出されるパターンを最悪ケースとし、最も攪拌効果が小さく考えられる熱交換器全面からの漏洩としている。床面冷媒濃度が LFL に達したときの冷媒量と鉛直方向濃度分布は図 8-25 の通りとなり、漏洩相当高さ hr は 1.2m であったため、式(8-1)より許容冷媒量を規定した。

$$M/A = 1/2 \times LFL \times hr \quad (8-1)$$

M：冷媒量[kg]， A：床面積[m²]

また、通常室外機は屋外に設置されることから、自然風による冷媒拡散効果が期待できる。図 8-26 の解析モデルから鉛直方向での自然風影響を評価した結果、図 8-27 のように半地下高さ 1.2m 空間への鉛直方向有風時、風速 0.3m/s あれば床面まで風が届くことが判った。その際の可燃空間継続時間は図 8-28 に示す通り最大でも 90s であった。

風速 0.3m/s 以上であれば可燃空間が発生しないことから、風速データを調査した。結果を

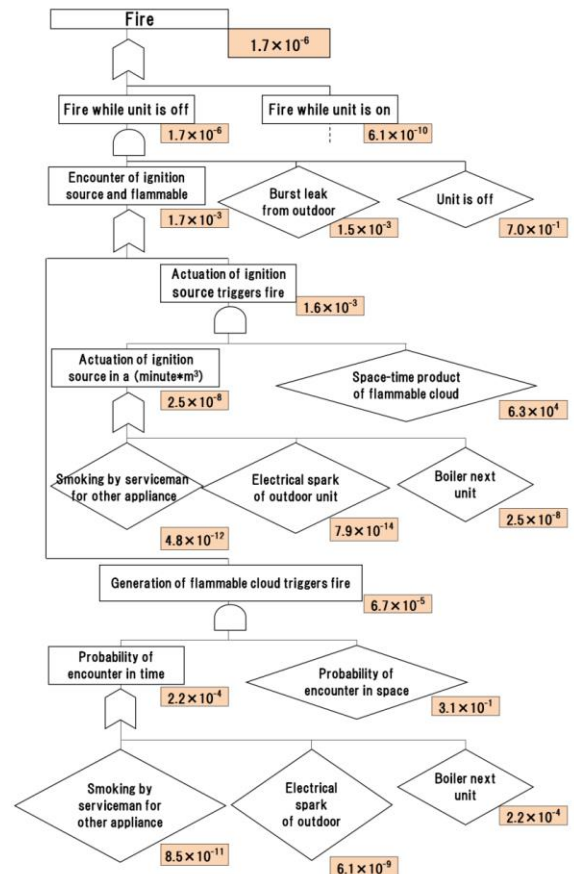


図 8-24 半地下に設置された室外機の使用時 FTA (対策なし)

表 8-14 室外機運転時の着火確率

In each installation cases			[time/(unit*year)]		Not allowable	Allowable
Installation case			Ignition probability A			
Site	Constituent ratio	Allowable probability	Without measures	With measures		
Out-door	Usual	9.4×10^{-1}	1.9×10^{-11}	—		
	Each floor	5.0×10^{-2}	3.0×10^{-9}	—		
	Semi-underground	1.0×10^{-4}	1.7×10^{-6}	3.6×10^{-9}		
	Machinery room	6.0×10^{-3}	1.2×10^{-9}	—		
Total in market						
Total = $\Sigma(P * A)$			1.0	4.0×10^{-9}	3.5×10^{-10}	1.8×10^{-10}

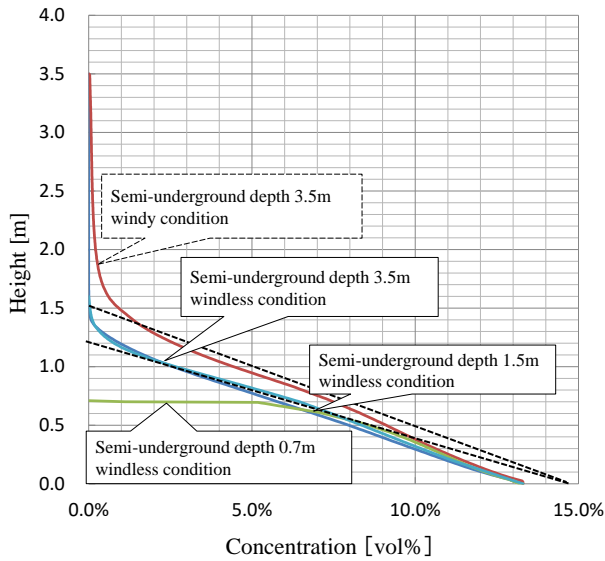


図 8-25 半地下の濃度分布

図 8-29 に示した．風速 0.3m/s 未満（簡単のため，無風と記す）である年間時間比率は 2.5% であり尤度を 2 倍とって 5% とみた．屋外風速環境は有風，無風を繰り返し，無風になった時点より漏洩速度に応じて一定時間 B 時間経過後に可燃空間が発生する．時間 B は，床面高さ 0.15m までは着火源が無いため漏洩相当高さ hr を 1.35m として(8-1)式より求めた．B 時間の間，無風を継続する確率は 0.05^B で表せられ，漏洩速度 75kg/h 時で 83.5%，漏洩速度 10kg/h 時で 26.0% である．この時の着火確率は，B 時間の中に無風を継続する確率(A)，冷媒漏洩確率(B)，無風率(C)，ボイラ併設率(D)，ボイラ運転率(E)，室外機停止率(F)をすべて乗じた値となり，表 8-15 の通り許容レベルを満足する．

(2)機械室設置基準

部屋の冷媒濃度 $C \text{ kg/m}^3$ と冷媒漏洩速度 $m \text{ kg/h}$ ，換気回数 $n \text{ 回/h}$ ，部屋の容積 $V \text{ m}^3$ の関係は以下の通り．
 $C = m / (n \times V)$

$m=75, V=95, n=4$ であるときの許容冷媒量 C は， $75 / (4 \times 95) = 0.197 \text{ kg/m}^3$ となり，LFL 0.307 kg/m^3 に対する安全率は 0.642 である．換気回数 4 回/h 時の可燃空間発生箇所は，図 8-30 に示す通り，室外機熱交換器表面の極く近傍と床面の一部に限定され，可燃空間空間比率は 0.5% であった．床上 0.15m までは着火源が無いこと，室外機熱交換器表面の極く近傍には着火源は存在しないことから，安全率 0.642 であれば可燃空間発生箇所は限定され，着火源に接する機会はほぼ無いと言える．

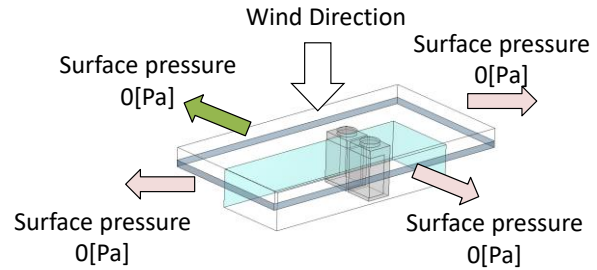


図 8-26 自然風がある半地下の CFD モデル

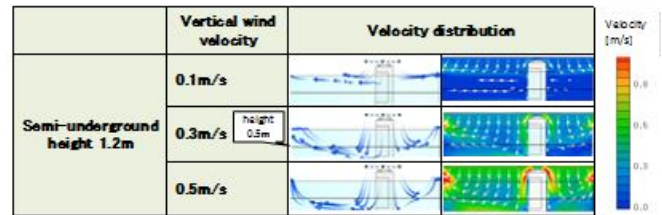


図 8-27 垂直風による速度分布

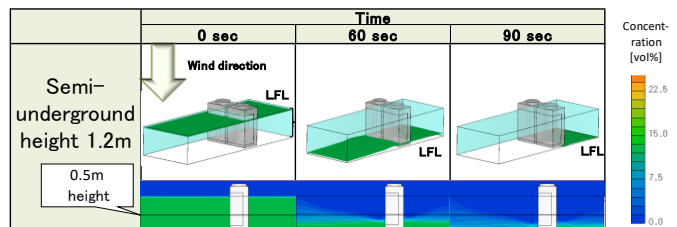


図 8-28 高さ 1.2m の半地下モデルの CFD 結果

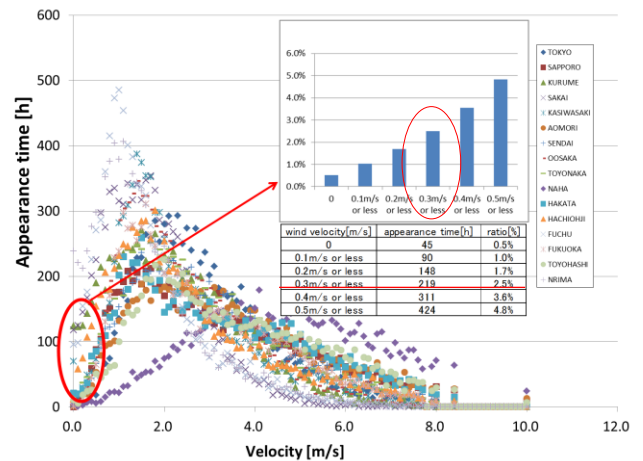


図 8-29 風速の出現時間 (2014 年日本)

表 8-15 半地下設置室外機の着火確率

	h	Burst leak	Rapid leak
		75kg/h	10kg/h
Time B	h	0.06	0.45
Probability of continuous windless for B hour (A)	%	83.5	26.0
Probability of Leak (B)	ppm	137	1338
Probability of windless leak occurred (C)	%	5	
Boiler installed next unit ratio (D)	%	0.1	
Boiler operation ratio (E)	%	21.9	
Unit off ratio (F)	%	70	
Fire accident probability		8.77E-10	2.67E-09

8.4.5.3 結果のまとめ

(半地下設置基準)

- ・半地下高さ 1.2m 以下 ・ ・ 規制なし
- ・半地下高さ 1.2m 超 ・ ・ $M/A \leq 0.18[\text{kg}/\text{m}^2]$

(機械室設置基準)

$$n = 75 / (0.642 \times \text{LFL} \times V)$$

n : 必要換気回数[回/h], V : 部屋の容積[m³]

注)換気機器は2基設置のこと

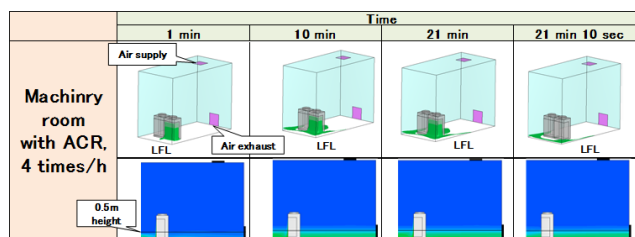


図 8-30 機械室モデルの CFD 結果

8.4.5.4 室外機の安全対策について

通常設置と各階設置については、着火確率が許容値 4.0×10^{-9} 以下となり安全対策は不要となった。ここでは、半地下設置について記述する。

半地下設置基準を満足しない場合、可燃空間発生を抑制できないため、室外ファン ON または吸込みダクト外設置により漏洩冷媒を排出する必要がある。

(室外ファン ON の場合)

ショーケースにおける漏洩速度 75kg/h 時の 1.8m 吹上高さに必要な風速風量限界を流用し、室外吹出最低風速を 2.6m/s と規定した。室外機風量はショーケースに対して十分大きいとして、必要最低風速のみ規定した。半地下高さは 3.3m まで適用可とした。

(吸込みダクトの場合)

機械室設置基準と同様に、部屋の冷媒濃度 C (kg/m³) と冷媒漏洩速度 m(kg/h), 換気回数 n(回/h), 部屋の容積 V(m³) の関係は以下の通り。

$$C = m / (n \times V)$$

m=75, V=53.69 とし、可燃空間の半地下容積に対する比率が 0.5% 以下とするために必要な最低風量は、650m³/h であることが図 8-31 の通り判っており、その際の換気回数 n は 12 回/h である。許容冷媒量 C は、 $75 / (12 \times 53.69) = 0.116 \text{kg}/\text{m}^3$ となり、LFL 0.307kg/m³ に対する安全率は 0.379 である。換気回数 12 回/h 時の可燃空間発生箇所は、室外機の極く近傍と床面の一部に限定され、可燃空間空間比率は 0.5% である。床上 0.15m までは着火源が無いこと、室外機近傍にはボイラは設置されないことから安全率 0.3 であれば可燃空間発生箇所は限定され、着火源に接する機会はほぼ無いと言える。

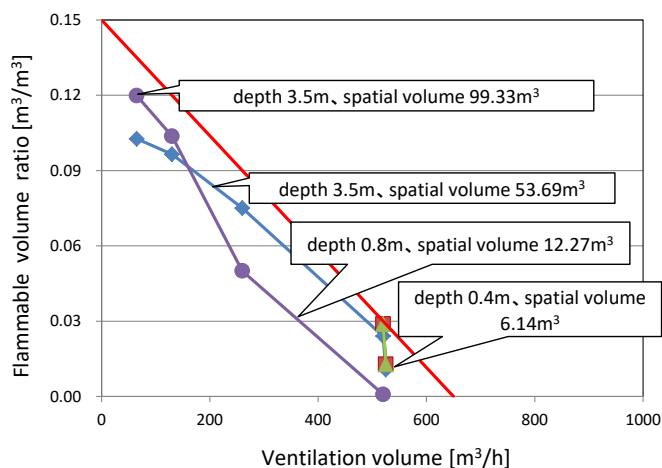


図 8-31 半地下の可燃空間体積

8.4.6 修理時

現場に設置されている室外機・室内機・配管(天井裏)の修理時におけるリスクを検討した。ここでは、リスクが高くなると想定される室外半地下設置の検討結果を中心に記述する。

着火源としては、①ロウ付けバーナー ②サービスマンの喫煙 ③それら以外(電気スパーク、ボイラ等燃焼機器、活線作業)を想定し、冷媒漏洩原因については、i)バーナーを使って外した配管からの冷媒漏洩(冷媒回収不十分、忘れ) ii) サービス作業に伴わない冷媒漏洩(配管亀裂による冷媒漏洩等のサービス作業と関連のない要因)を考慮した。

また、サービス時間は 5 時間(冷媒回収 1hr + 部品交換 0.5hr + リークチェック 0.5hr + 真空引き 2hr + 冷媒充填 0.5hr + 試運転 0.5hr), ロウ付け時間は 8 分(2 分×4 回 部品の取り外しでロウ付け 2 回, 取り付けでロウ付け 2 回の合計 4 回), バーナー作業空間は 1 m³(高さ 2m×幅 1m×奥行 0.5m)と設定した。

FTA(未対策ケース)を 図 8-32 に示す。算出の結果、着火確率は 3.6×10^{-7} 回/(年・台)となり、許容値 (10^{-8}) を超え

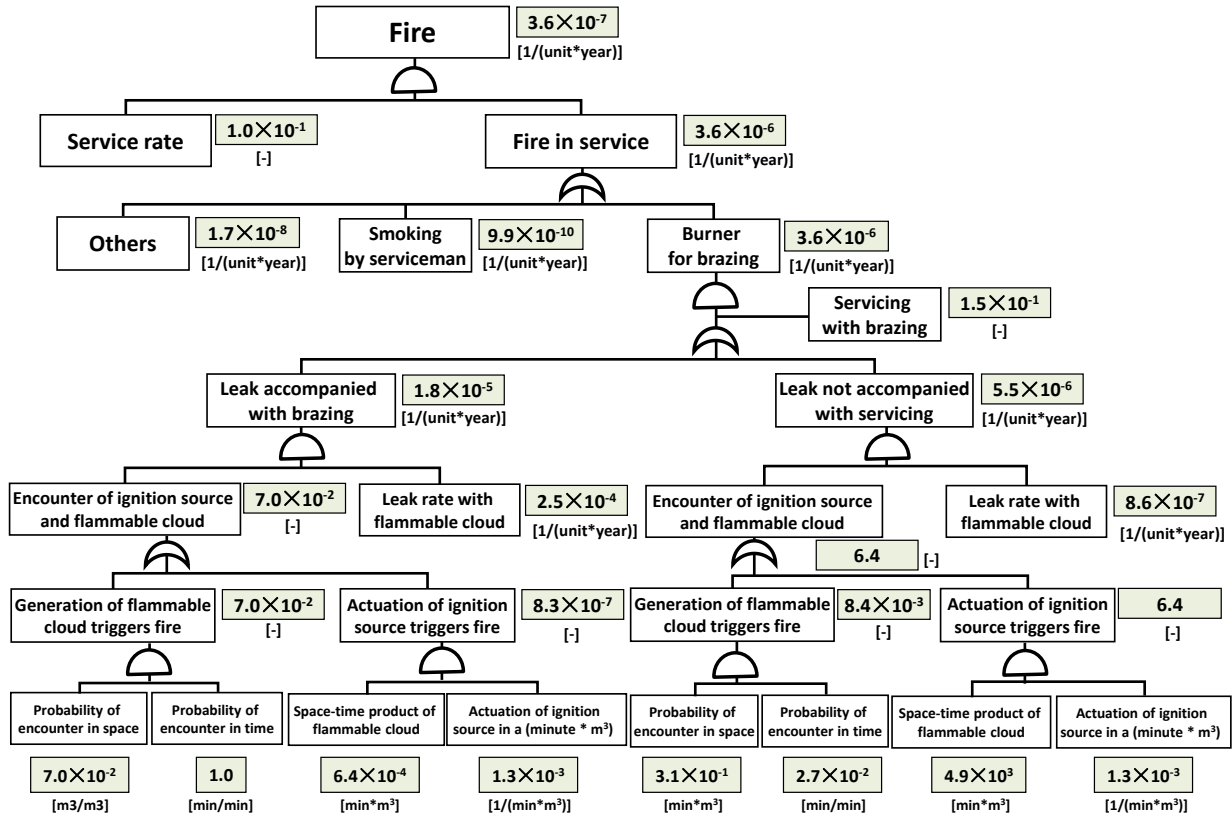


図 8-32 半地下設置修理時の FTA (対策なし)

ることとなった。支配的な着火源はロウ付けバーナーで、リスクを低減させるには作業中のバーナー取扱いに関して対策を施すことが重要となる。以上を踏まえ、着火確率の低策策として、以下を提案した。

対策① サービスマンに対する教育訓練を実施する。(バーナー作業中に冷媒漏洩に気付いたら直ちにバーナーを消す等)

対策② 冷媒漏洩検知器を携行し、作業前、作業中に冷媒漏洩のチェックを行う。

上記双方の安全対策と室外使用時の安全対策(吸込ダクトによる換気)を施した場合の着火確率の算出を行った。その結果、着火確率は 2.1×10^{-9} 回/(年・台)となり、許容値 (10^{-8}) 以内とすることができた。

室外半地下設置以外にも、構成比の大きい設置形態(室外地上、屋上設置、室外各階設置、室内天井設置)と構成比は大きくないが、リスクの高い設置形態(室外機械室設置、室内床置き設置、配管天井裏設置)でリスク評価を実施した。それぞれの着火確率を表 8-16 に示す。室内天井設置、室外地上、屋上設置、室外各階設置、配管天井裏設置は許容値 (10^{-8}) 内となったが、室内床置き設置、室外機械室設置では許容値を超えた。室内床置き設置は、自然換気(ISO5149 Part3⁸⁾)、下部戸開口位置を床面から 30mm 以下に設置、機械室設置は室外使用時の換気装置設置の対策をそれぞれ行うとともに、室外半地下設置と同様に、サービスマンに対する教育訓練と冷媒漏洩検知器の携行の対策を行うことで、許容値 (10^{-8}) 内に収まることとなった。

表 8-16 修理時着火確率

Model case		Fire accident probability	
		without measure [1/(unit*year)]	with measure [1/(unit*year)]
Outdoor	Usual	1.4×10^{-9}	1.4×10^{-10}
	Each floor	3.1×10^{-9}	3.4×10^{-10}
	Semi-underground	3.6×10^{-7}	2.1×10^{-9}
	Machinery room	8.6×10^{-7}	5.4×10^{-9}
Indoor	Ceiling	8.7×10^{-11}	8.8×10^{-12}
	Floor standing	1.2×10^{-8}	3.9×10^{-11}
Pipe	Ceiling space	3.0×10^{-9}	3.0×10^{-10}

8.4.7 廃棄時

設置現場からのユニット・配管取外し作業時のリスクを検討した。冷媒回収時及びユニット取外し時の冷媒漏洩確率にバーナー等の着火源存在確率を乗じ、撤去作業と新ユニット設置作業が同時進行する場合の着

火確率を算出した結果、室外機の半地下設置時：更新有/無=7.76×10⁻⁷/(3.04×10⁻⁹)、機械室設置時：更新有/無=8.07×10⁻⁷/(5.57×10⁻⁹)となり、リスクが許容値(10⁻⁸未満)を超えた。そこで、着火確率低減策として、以下を想定した。

対策① <教育> 喫煙時や燃焼機器使用時のリスク教育及び注意喚起や、冷媒漏洩時は直ちにバーナーを消火することを教育する。リスク低減効果は1/10とする。

対策② <漏洩検知器携行> 狭小地作業時には漏洩検知器の携行を義務付ける。リスク低減効果は1.09×10⁻¹(漏洩検知器携行：1/100, 1/10の携行忘れを想定)。

対策①及び②により、着火確率は半地下設置時：更新有/無=8.61×10⁻⁹/(1.85×10⁻¹⁰)、機械室設置時：更新有/無=9.16×10⁻⁹/(4.31×10⁻¹⁰)と許容リスク範囲内になり、対策①により、その他すべての設置ケースにおいて、許容リスク範囲内となった。さらに、更新有比率を50%、新ユニット設置の同時進行率を10%とし、各機器の構成比率も考慮した結果、着火確率は、未対策時6.28×10⁻¹⁰、対策時5.36×10⁻¹¹となった。図8-33に半地下撤去作業時の対策時FTAを示す。

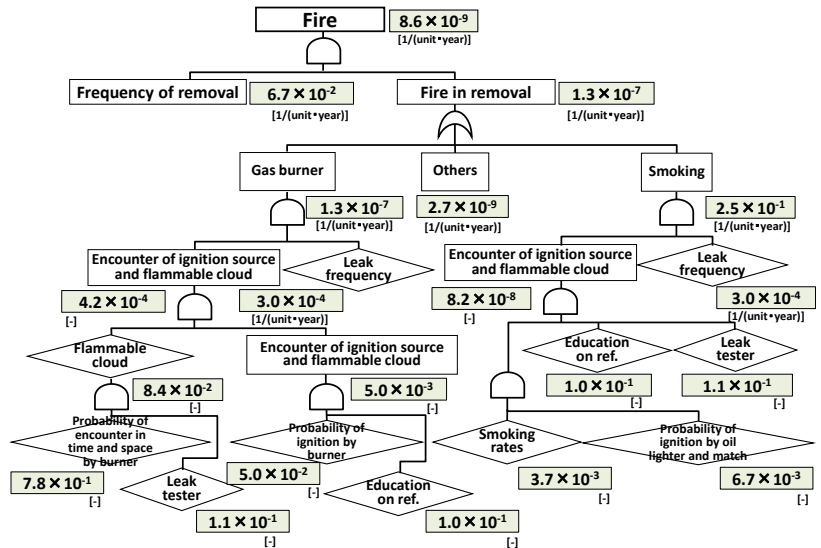


図 8-33 半地下設置撤去時の FTA (対策あり)

8.4.8 作業時(保管, 据付, 修理, 廃棄時)のまとめ

表 8-17 に結果を示した。床置室内機の修理時と、半地下及び機械室での各作業時において、事故確率は許容値を超えた。市場での事故確率は、許容値以下となった。

8.4.9 冷媒誤充填の検討

冷媒誤充填による着火確率を、8.3.6 節に記した計算方法に従って求めた結果、全ての使用時、全ての作業時において、許容値以下となった。従って、R32 ビル用マルチ機のサービスポートは、R410A 機のものと同仕様とすることとなった。

8.4.10 R1234yf でのリスクアセスメント

表 8-17 各作業時着火確率

In each installation cases				[time/(unit*year)]					
				Fire accident probability A					
				Installation		Repairing		Disposal	
Installation case		Constituent ratio P	Allowable probability	Without meas.	With meas.	Without meas.	With meas.	Without meas.	With meas.
In-door	Office	Ceiling	3.8 × 10 ⁻¹	1.9 × 10 ⁻⁹	—	8.7 × 10 ⁻¹¹	8.8 × 10 ⁻¹²	2.9 × 10 ⁻¹⁴	2.9 × 10 ⁻¹⁵
	Restaurant	Floor	2.0 × 10 ⁻²	1.9 × 10 ⁻⁹	—	1.2 × 10 ⁻⁸	3.9 × 10 ⁻¹¹	3.4 × 10 ⁻¹²	3.4 × 10 ⁻¹³
	Karaoke	Ceiling	2.1 × 10 ⁻³	—	—	—	—	—	—
Out-door	Usual	—	9.4 × 10 ⁻¹	1.9 × 10 ⁻⁹	—	1.4 × 10 ⁻⁹	1.4 × 10 ⁻¹⁰	2.4 × 10 ⁻¹⁰	3.2 × 10 ⁻¹¹
	Each floor	—	5.0 × 10 ⁻²	1.9 × 10 ⁻⁹	—	3.1 × 10 ⁻⁹	3.1 × 10 ⁻⁹	1.0 × 10 ⁻⁹	1.4 × 10 ⁻¹⁰
	Semi-underground	—	1.0 × 10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻⁸	1.9 × 10 ⁻⁹	3.6 × 10 ⁻⁷	2.1 × 10 ⁻⁹	4.2 × 10 ⁻⁸	6.1 × 10 ⁻¹⁰
	Machinery room	—	6.0 × 10 ⁻³	1.1 × 10 ⁻⁸	2.1 × 10 ⁻⁹	8.6 × 10 ⁻⁷	5.4 × 10 ⁻⁹	4.6 × 10 ⁻⁸	8.7 × 10 ⁻¹⁰
Total in market				Without meas.		With meas.			
Indoor total = Σ(P * A)				0.4	1.0 × 10 ⁻⁸	1.0 × 10 ⁻⁹		4.1 × 10 ⁻¹²	
Outdoor total = Σ(P * A)				1.0	1.0 × 10 ⁻⁸	9.0 × 10 ⁻⁹		3.7 × 10 ⁻¹⁰	

表 8-18 R1234yf 室内使用時の着火確率

In each installation cases				[time/(unit*year)]	
				Fire accident probability, A	
				Without measures	
Site	Type	Allowable probability	R32 (88.1kg)	R1234yf (98.4kg)	
Indoor	Office	Ceiling	7.6 × 10 ⁻⁹	8.5 × 10 ⁻⁹	
	Hair salon	Ceiling	1.3 × 10 ⁻⁹	2.4 × 10 ⁻⁹	
	BBQ restaurant	Ceiling	2.8 × 10 ⁻⁹	4.2 × 10 ⁻⁹	

表 8-18 に、R1234yf の室内使用時における着火確率を R32 と比較した結果を示す。充填量が大きくなる、高湿度条件での時空積が大きくなるなどの影響により、R1234yf の方が R32 より着火確率は大きくなった。しかし、各々の設置ケースで、 10^{-9} のオーダーであり、リスク低減効果が小さい警報における 1/10 の効果でも、許容値以下となる。従って、R32 において検討した、機械換気、遮断弁、警報の各安全対策は、R1234yf でも有効な対策であるとの結論に達した。

R32 において検討した安全対策が、R1234yf でも有効であることが確認できた。

室外使用時、及び、各作業時において同様の検討を行った結果を表 8-19、表 8-20 に示した。

表 8-19 R1234yf 室外使用時の着火確率

In each installation cases		[time/(unit*year)]	Not allowable	Allowable
Installation case		Fire accident probability, A		
Site		Allowable probability	R32 (26.3kg)	R1234yf (26.3kg)
Outdoor	Semi-underground	4.0×10^{-9}	1.7×10^{-6}	2.0×10^{-6}
	Machine room		1.2×10^{-9}	1.9×10^{-9}

表 8-20 各作業時の R1234yf の着火確率

In each installation cases		[time/(unit*year)]		Not allowable	Allowable				
Installation case		Refrigerant	Allowable probability	Fire accident probability A					
Outdoor	Semi-underground			R32	1.0×10^{-8}	Installation		Repairing	
		Without meas.	With meas.			Without meas.	With meas.	Without meas.	With meas.
		R1234yf		1.1×10^{-8}	1.9×10^{-9}	3.6×10^{-7}	2.1×10^{-9}	4.2×10^{-8}	6.1×10^{-10}
		R32		1.1×10^{-8}	3.1×10^{-9}	5.1×10^{-7}	2.9×10^{-9}	4.6×10^{-8}	8.2×10^{-10}
	Machinery room	R32		1.1×10^{-8}	2.1×10^{-9}	8.6×10^{-7}	5.4×10^{-9}	4.6×10^{-8}	8.7×10^{-10}
		R1234yf		-	-	1.3×10^{-6}	7.7×10^{-9}	5.2×10^{-8}	1.3×10^{-9}

室外使用時、及び、各作業時において同様の検討を行った結果を表 8-19、表 8-20 に示した。

8.5 冷媒充填率における安全係数の検討

ISO5149 や ASHRAE15 などの国際安全規格においては、 $S \times LFL [kg/m^3] \times$ 室内容積 $[m^3]$ より小さな冷媒充填量では、安全対策が不要とされている。ここで、 S は安全係数であり、漏洩時の冷媒濃度分布により局所的に LFL を超える有意な空間が出来ないように定められた経験値である。

表 8-21 に、許容冷媒充填量や安全係数について、各種安全規格を比較した。これらの国際規格での対象冷媒は、強燃性冷媒も含む。また、室内機としては、床置き機、及び、圧縮機を室内機内に有するものも対象として含んでおり、室内機形態を問わない共通の安全係数となっている。

今回は、冷媒を微燃性冷媒に限定した。また、濃度分布が小さい天井設置機と高さ方向に大きな濃度分布を形成する床置き機とは、許容冷媒充填量を別々に定義した。また、圧縮機を搭載しない室内機のみを対象とすることにより冷媒漏洩速度を $10kg/h$ 以下に限定し、以下の検討を行った。

表 8-21 安全規格における安全係数の比較

Standard & Regulation	Refrigerants	Allowable charge limit without measures [kg]		Safety factor	Definition of volume $[m^3]$	Leak velocity $[kg/h]$	
		Other than floor standing	Floor standing				
Proposal	JRAIA Guideline (Draft)	A2L (R32, R1234yf, R1234ze(E))	$1/2 * LFL * V_h$	$1/2 * LFL * 0.2 * A$ (Upward flow)	$1/2$	V_h (other than floor stand.)	10 以下 (Comp. is outdoor)
Conventional	ISO5149 (ISO817)	All of flammable ref.	$1/5 * LFL * V_r$	←	$1/5$	V_r	No definition (10 in case that comp. is outdoor)
	ASHRAE15 (ASHRAE34)	All of flammable ref.	$1/4 * LFL * V_d$	←	$1/4$	V_d	No definition
	High pressure gas safety law	Highly flammable ref. (+Ammonia)	No definition	←	No definition (Leak detection is at $1/4 * LFL$)	No definition	No definition

V_h : Volume between floor and leak height = $A * h$ $[m^3]$
 V_r : Volume of room $[m^3]$
 V_d : Volume of dispersion $[m^3]$
 A : Floor area $[m^2]$

h : Leak height $[m]$
 ceiling cassette → ceiling height
 ceiling suspended • wall mounted → lower edge of unit

↑ : the condition is severer than conventional
 ⬅ : the condition is more limited than conventional

8.5.1 各影響因子の抽出

表 8-22 に、安全係数に与える影響因子を示す。a は、建築図面における寸法誤差によって生じる影響である。

b は、室内にはテーブル・ロッカー・書棚などの内装品が置かれており、冷媒の拡散できる自由空間が小さくなることを考慮した因子である。c は、冷媒漏洩時には濃度は均一ではないことを考慮した因子である。

その他については、影響度を検討した上で、安全係数の計算には含めないこととした。例えば、室内機から漏洩する冷媒の相については、多くの漏洩試験の結果から液相漏洩は実際には起きないとの結論に至った。また、冷媒種については、各冷媒の漏洩時濃度分布を比較し、R32 での検討結果は R1234yf や R1234ze(E)にも適用できるとの結論を得た。

表 8-22 安全係数に与える影響因子

Factor included in safety factor		Factor not included in safety factor		
Influential factor	How to effect ?	Included in safety factor ?	Reasons	
a	Errors in equipment construction drawings	Real volume is smaller than one calculated from drawings	Yes	Relatively large effects
b	Volume of interior article	Gas can not penetrate into article	Yes	Large effects
c	Distribution of leaked gas	Un-uniform distribution makes flammable region	Yes	Large effects
d	Accuracy of CFD analysis	CFD errors in calculation of allowable charge limit	No	Examined by results of university of Tokyo
e	Leak rate from indoor units	Leak rate larger than 10kg/h can be occurred ?	No	Rate larger than 10kg/h can be prevented by manufactures
f	Phase of leaked refrigerant	Liquid phase leak can be occurred ?	No	Liquid leak can be ignored from experimental results
g	Temperature of leaked refrigerant	Decrease in temperature has effects ?	No	Temp. decrease makes uniform distribution
h	Properties of refrigerant	Difference of gas density or diffusion factor have effects ?	No	R32 is not safety side due to small molecular weight

8.5.2 各影響因子の影響

8.5.2.1 建築図面誤差の影響

建築図面上では、部屋の縦横寸法は、壁中心間の距離で表されるため、壁厚さの分、室内容積が実際には小さくなる。壁厚さを 50mm としてこの影響を考えた。また、建築構造物においては、建築途中で生じる誤差が避けられない。品確法で傾斜誤差の許容値が、1m につき 3mm 以内とされていることから、安全をみて 1m につき 10mm の誤差があるとした。また、複雑な構造の代表として下がり天井を考え、この分の自由空間の容積減少を考慮した。

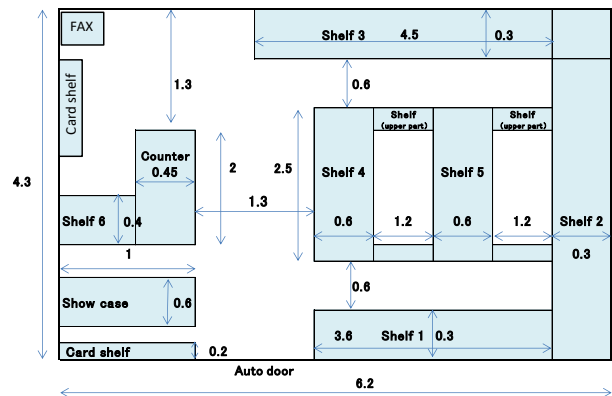


図 8-34 古書店の内装品の例

8.5.2.2 内装品容積の影響

内装品容積の影響については、ミニスプリット II サブワーキングで調査された幾つかの業種モデルで、自由空間の減少率を計算した。また、消防庁による内装品容積の調査結果も参考にした。図 8-34 は、東京の古書店を対象に、実際に寸法調査した結果である。古本が書棚の上まで積み上げられており、通路も非常に狭いことから、容積減少の度合いが大きい例である。

表 8-23 には、この古書店における自由空間容積の計算結果を示した。内装品の実測寸法や大凡目視にて判定した充填率から、内装品容積を計算し部屋の全容積から差し引いて自由空間容積を求めた。室内機が天井カセットの場合を示したが、壁掛機の場合も同様な計算を行って

表 8-23 古書店の自由空間容積

	Width W [m]	Depth D [m]	Height of lower part than leak height h [m]		Filling rate R [-]	Volume of not-free space W*D*h*R [m³]	
			Ceiling cassette	Wall mounted		Ceiling cassette	Wall mounted
shelf 1	3.6	0.3	2.5	1.8	0.95	2.57	1.85
shelf 2	4.3	0.3	2.5	1.8	0.95	3.06	2.21
shelf 3	4.5	0.3	2.5	1.8	0.95	3.21	2.31
shelf 4	2.5	0.6	2.5	1.8	0.95	3.56	2.57
shelf 5	2.5	0.6	2.5	1.8	0.95	3.56	2.57
showcase	1.0	0.6	1.3	1.3	1.00	0.78	0.78
counter	2.0	0.5	1.3	1.3	0.20	0.23	0.23
upper part of shelf	4.8	0.25	0.3	0.3	0.95	0.34	0.34
person(3)						0.24	0.24
shelf 6	0.55	0.4	1	1	0.95	0.21	0.21
shelf for card 1						0.21	0.21
shelf for card 2	1.0	0.2	1.8	1.8	0.95	0.34	0.34
copy machine						0.20	0.20
Total						18.5	14.0
Volume of lower part than leak height	4.3	6.2	2.5	1.8	1.00	66.7	48.0
Ratio of free space						0.72	0.71

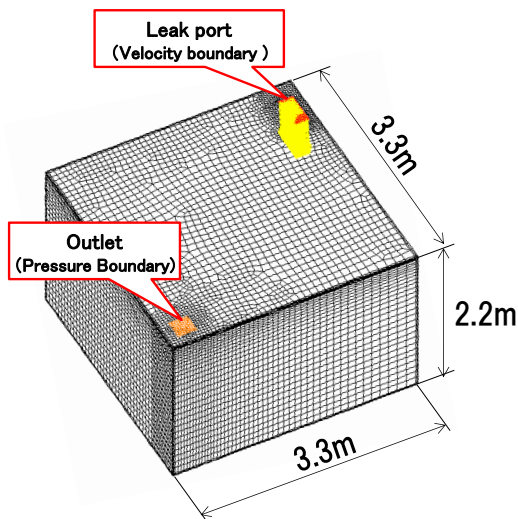


図 8-35 極小会議室の CFD モデル

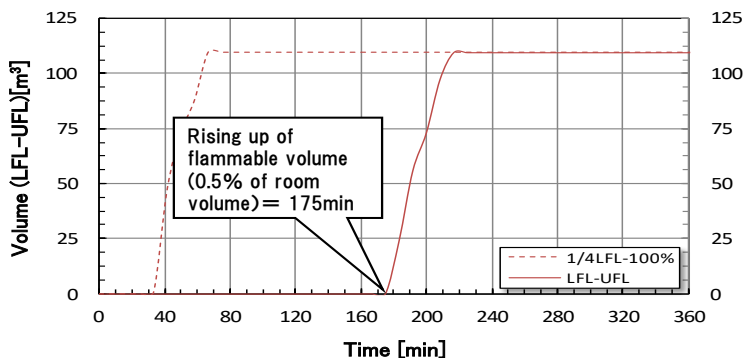


図 8-36 小会議室モデルの可燃空間体積の変化

表 8-24 限界充填量比のまとめ

Installation case		Indoor unit	Room size W[m]×D[m]×H[m]	Critical charge ratio *1)
1	Small office	Ceiling mouted cassette (center of room)	6.37×6.37×2.7	0.87
2	Ultra small office	Ceiling suspended (center of room)	3.3×3.3×2.2	0.86
3	Ultra small office	Ceiling mouted cassette (corner of room)	3.3×3.3×2.2	0.83

*1) Leak amount which generates flammable space (0.5% of room)/
[Room volume×LFL (=0.307[kg/m³])]

る。

8.5.2.3 冷媒濃度分布の影響

ここでは、設置部屋のサイズ、室内機の位置、内装品の有無などが漏洩時の濃度分布に与える影響を調べた。各想定ケースにおいて、可燃空間体積が増大し始める点(部屋容積の0.5%以上になる点)における漏洩量と、自由空間容積×LFLで求めた漏洩量との比を求めた。以下、この比を限界充填量比と表す。

計算モデルは、図 8-5 に示した事務所の小会議室モデルと、図 8-35 に示す極小会議室モデルを用いた。漏洩速度は 10[kg/h]、換気無しとした。図 8-36 には、小会議室モデルにおける可燃空間体積の時間変化を示した。本検討では、部屋内には内装品がない状態での結果を示したが、別途、机や衝立等の内装品を設置した場合の解析も行い、内装品による自由空間容積の減少さえ考慮すれば、限界充填量比への影響は無視できることを確認した。

例えば、図 8-36 において、限界充填量比を以下のように求めた。可燃空間が大きくなった冷媒漏洩量は 29.2[kg](=10kg/h×175min/60min)であり、限界充填量比は 0.87(=29.2kg/(部屋容積 109.6m³×LFL 0.307 kg/m³))となる。

表 8-24 に限界充填量比のまとめを示す。部屋の大きさ、室内機設置位置に対しての影響度は約 5% レベルであることがわかった。

表 8-25 内装品体積の統計データに基づく限界安全係数

8.5.3 厳しい設置ケースにおける安全係数のまとめ

内装品容積の影響について、消防庁の調査結果を用いて検討した結果を表 8-25 に示す。内装品容積としては、その分布における 3σ 値を採用した。また、充填率については、全内装品容積内部が密であり充填率が 1 となる場合と、1/2 の内装品内部が密であるとした場合の 2 種類を考えた。どちらの場合も、安全係数 1/2 でも可燃空間が生じない結果となった。8.5.2.1 項で述べた建築図面誤差については、表中にその考

Influential factors		All volume of article decrease free volume *1)	Half volume of article decrease free volume *2)	Remarks
Errors in facility design drawings	① Thickness of wall, floor and ceiling	0.948	0.948	Thickness is 0.05m, Room size is 3.3m×3.3m×2.2m, (3.3-0.05)×(3.3-0.05)×(2.2-0.05)/(3.3×3.3×2.2)=22.71/23.96=0.948
	② Errors in construction	0.970	0.970	Error is 10mm per 1m, as allowable decline is 3/1000 by housing quality security acceleration act.
	③ Volume of pillars	0.9975	0.9975	Width of pillar is 0.22m, wall thickness is 0.05m, then volume of 4 pillars at each corners is 0.25% of room.
	④ Errors due to compli- cated shape of room	0.984	0.984	Volume of falling ceiling is 0.3*0.4*3.2=0.384m ³ , compared to volume of room, (23.96- 0.384)/23.96=0.984
	①*②*③*④	0.903	0.903	
Volume of interior article	⑤ Decrease in free volume due to interior article	0.763	0.882	3σ value of statistical distribution of volume rate of interior article is 0.237. Free volume ratio is 1-0.237 in case of *1), it is 1-0.237/2 in case of *2).
Concentration distribution of leaked gas	⑥ Distribution by gas leak	0.83	0.83	It follows critical charge ration of No.3 in Table 8.5.4.
	⑦ Distribution by liquid leak	1.00	1.00	It is clarified that leaked liquid mist evaporates inside casing or through air filter of indoor unit.
Critical safety factor	①*②*③*④*⑤*⑥*⑦	0.57	0.66	

え方を示した。

各業種最悪ケースで可燃空間が発生しない限界の安全係数を、図 8-37 に示した。横軸には、天井カセット機の場合を、縦軸には壁掛け機の場合を示した。どちらの場合にも、限界の安全係数は 0.5 以上となっている。

8.6 全体まとめと今後の課題

地球温暖化影響の低い微燃性冷媒 R32 を使用したビル用マルチエアコンのリスクアセスメントを行い、室内・室外の使用時や据付・修理・廃棄時における、最も厳しい各設置ケースにおける着火確率を求めた。冷媒漏洩速度や急速漏洩の発生確率は、漏洩部品サンプルの穴径調査や急速漏洩に伴う顧客やサービスマンの申告数から求めた。未対策の事故確率が許容値を超えた場合には、事故の発生を 100 年に 1 回以下とするための安全対策を提案した。これらの安全対策により、着火事故の発生を 100 年に 1 回以下とし許容レベル以下のリスクに低減出来ることを明らかにした。今後は、これらの安全対策を JRAIA の安全基準としてまとめ市場への浸透を図る。

また、微燃性冷媒を用いる場合において、安全対策が不要な許容冷媒充填量を決める際の安全係数について詳細に検討を行い、冷媒が滞留しやすい床置き機や振動による配管破損時に噴出漏れを起こす可能性がある室内圧縮機搭載型の室内機を除いて、安全係数を 1/2 としても十分安全であることが判った。現在我が国で進められている規制改革の動きの中で、微燃性冷媒に関しても実用化を容易にすべく冷凍保安規則の改訂が進められているが、安全係数の緩和提案に関してはとりわけ慎重に議論が行われることが予想される。更に、安全係数の値が ASHRAE や ISO などの国際的安全規格と異なることもあり、今後は、中期的な観点から、安全係数に関する議論を更に深めていくことが望まれる。

参考文献

- 8-1) Yao et al., Risk Assessment of Room Air Conditioner using R290, International Symposium on Environment and Alternative Refrigerants, 2000, Kobe, pp.184.
- 8-2) Goetzler et al., Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a(30/70wt%) in Split System Residential Heat Pumps, ARTI MCLR Project, 1998.
- 8-3) Takizawa, JSRAE, Progress Report (Eng.), 2013, pp.35.
- 8-4) Imamura, JSRAE, Progress Report (Eng.), 2013, pp.48.
- 8-5) Okamoto, JSRAE, Progress Report (Eng.), 2012 pp.24.
- 8-6) Mukaidono, Concept of Safety, Trends in Academic, Sep. 2009, pp.14.
- 8-7) Osaka Univ. Mech. Eng., Rinkai Ryu, Lecture Note, 2006, pp6.
- 8-8) ISO5149: Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements (2014) .
Part 1) Definitions, classification and selection criteria.
Part 2) Design, construction, testing, marking and documentation.
Part 3) Installation site.
Part 4) Operation, maintenance, repair and recovery.
- 8-9) Hashimoto, Japan Ergonomics, Japan Industrial Safety & Health Association, 1988.
- 8-10) Suzuki et al., Quality Control, Union of Japanese Scientists and Engineers, 2001, No.9.
- 8-11) Building Standards Act, Article 28.
- 8-12) Building Standards Act, Order for Enforcement, Article 20, 2.
- 8-13) Public Buildings Association, Design Criteria for Building Facility Compiled by MLIT, 2006.

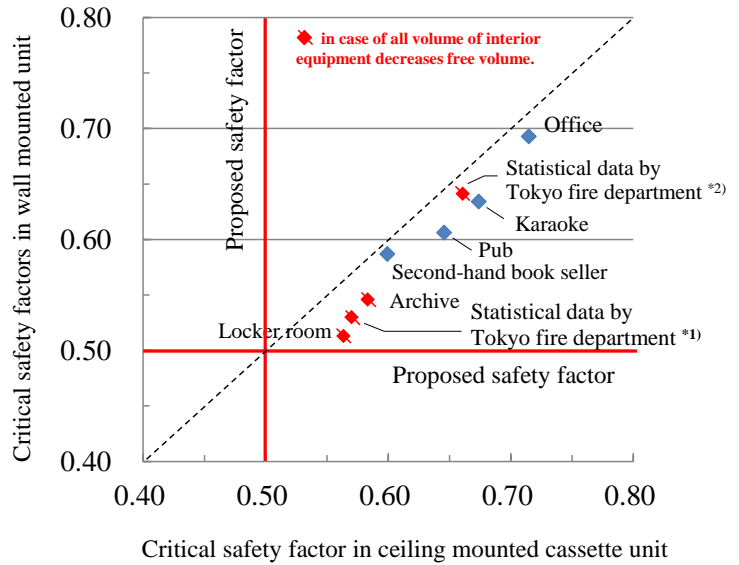


図 8-37 最も厳しい設置ケースの安全係数

- 8-14) Better Living, Ventilation Equipment Manual, 2003, pp.17.
- 8-15) Hihara, JSRAE, Progress Report (Eng.) , 2012, pp13.
- 8-16) JRAIA, Guideline of design construction for ensuring safety against refrigerant leakage from multi-split system air conditioners, JRA GL-13.
- 8-17) Kitajima, Actual Survey on the Air Environment at Various Numbers of People in *Karaoke* Rooms, Shibaura Institute of Technology, 2011.
- 8-18) Nomura, Actual Survey of the Air Environment of 20 *Karaoke* Box Stores in Tokyo, Shibaura Institute of Technology, 2011.
- 8-19) Morijiri et al., Study of fire characteristics in a standard room, Report of fire technology and safety laboratory, Tokyo Fire Department, No.39, pp.1, 2012

9. チラーのリスク評価

9.1 はじめに

熱媒に冷温水を用いるセントラル空調の熱源機であるチラーには、主に R134a や R410A の HFC 冷媒が用いられている。しかしいずれも GWP が 1,000 を超えているため、地球温暖化への影響が懸念され、GWP の低い R1234ze(E)や R1234yf, R32 などが注目されている。一方、これら冷媒は微かな燃焼性があり、使用するにはリスクアセスメント(以下、RA と呼ぶ。)を実施し許容できないリスクを排除することが必要である。

そこで本章では 2011 年度から一般財団法人日本冷凍空調工業会において、専門技術者らによって実施された、微燃性冷媒をチラーに用いた場合の火災・火傷事故に関する RA^{9-1), 9-2), 9-3)}について報告する。対象機器は主に機械室に設置する水冷チラーおよび屋外に設置する空冷ヒートポンプで、冷凍能力は約 7.5～17,500kW⁹⁻⁴⁾である。設置環境の特定できない移動式チラーは対象外とした。

9.2 リスクアセスメントの前提

RA の対象となるチラーは、同じ技術規格・法^{9-5), 9-6)}に従っている不燃冷媒を使用する従来機器と構造、構成、保安装置が同じであり、また空調機器や工業プロセスにポンプを介して冷温水を供給するといった用途も同じである。つまり、従来実施してきた不燃冷媒の漏えいにより生じる事故に対する RA や安全設計^{9-7), 9-8)}は本 RA においても有効といえる。これら RA の中で冷媒漏えい確率の算出方法に、各事象の上位下位や論理的な結合関係を説明できる Fault Tree Analysis (以下、FTA と呼ぶ。)を用いた。

チラーの冷媒漏えい事故は、高圧ガス保安法により届出が義務づけられており、同一構造である機器の漏えい事故統計データ⁹⁻⁹⁾として参照できる。RA では事故データに基づいた冷媒漏えい確率を用いた。

R1234ze(E), R1234yf と R32 は従来から知られている R290 などの可燃性ガスと比べて、燃焼下限界濃度や最小着火エネルギーの値が大きい。つまり着火しにくく、かつ可燃空間を形成するために多くのガスを必要とする。そこで、拡散・流動解析手法を用いて、どのような設置環境で、どの程度の可燃領域が形成されるのかを可燃空間の大きさと存在時間を定量化することで評価した。

なお、冷媒の燃焼特性、着火源および可燃空間解析の取り扱いに注意を払い、同時期に進めてきたミニスプリットエアコン、ビル用マルチエアコンと整合性させた。

9.2.1 チラーの特徴と課題

冷媒漏えい事故の視点からチラーの特徴と課題を示す。冷水や温水を用いて居室などに冷温熱を供給するチラーは大容量機器に好適であり、その特徴から冷媒はユニット内に留まるため、機械室等の設置場所のみに冷媒が集中する。そこで、冷媒を漏えいさせないようチラーを設置する手順に注意を払っている。中・小容量のチラーは気密試験、真空試験の後に冷媒充填され工場から出荷される。ターボ冷凍機に代表される大容量のチラーは、設置された後に気密試験、真空試験、冷媒充填の手順で実施される。ほとんどのチラーは一体で工場出荷されるが、分割して出荷される場合は、フランジや管継手を用いて工場で分割され、設置場所で再組立てされた後、気密試験・真空試験を経て冷媒充填される。これらの作業にロウ付け・溶接は伴わないが、教育訓練された専門技能者により工場と同じ品質で組立てられる。さらに設置後定期的な冷媒漏えい点検により事故の未然防止が図られている。

チラーの設置場所は機械室内や建物屋上等の屋外にほぼ限定されている。いずれも人が不用意に立ち入ることが制限された区画であり、立ち入る者はチラーの設置、点検、修理または運転操作のために教育訓練された専門技能者である。つまりチラーの設置場所は外部からもたらされる不特定多数のリスクからは隔離されているといえる。また機械室や屋外の設置場所は居室とは明確に隔離されているということも特徴である。これらより、RA においてリスクに成り得るもの及び行為は限定的であり、リスクの回避・削減策も具体的にかつ効果的である。ただし機械室内には他の機械設備、電気設備等が存在しており、これらがリスクと成り

得る可能性は十分考慮されなければならない。

9.2.2 リスクアセスメントの手順

(a) 手順 RA は IEC の Guide 51⁹⁻¹⁾の反復改善プロセスに基づき、下記手順により実施した。

1) 開始

- ・ RAにおける対象製品を用途，容量，構造形式，設置場所から設定する。
- ・ RAの手法を選択する。
- ・ 製品におけるライフステージを設定する。

2) 使用意図の明確化

- ・ 設定した設置場所および用途から，正常・安全である状況，または異常・危険である事象とは何かを明らかにする。

3) リスクの抽出・特定

- ・ 異常・危険な事象をもたらすと推定される要因を分析し，リスクとして抽出する。

4) リスクの見積

- ・ 各ステージにてリスクの存在によってもたらされる事象の危害程度とその事象が発生する頻度を見積もる。

5) リスクの評価

- ・ 事象発生頻度と危害の程度より，総合的な事象の重大性を評価する。

6) リスク達成の可否判断

- ・ 許容できないリスクが排除できれば，RAを終了する。
- ・ 許容できないリスクが残る場合，低減策を検討した上で，再び 2)～5) を行う。

7) リスクの低減

- ・ 頻度，程度を軽減する安全対策を立案する。

8) 安全策の決定

- ・ 終了に至る要件を確認し，これを安全策として決定する。

本RAは，微燃性を有する冷媒を使用することに関するリスク評価であるため，着目すべきは着火源の存在確率と可燃域形成の要因となる冷媒漏えい事象の発生確率である。ここでは着火源の存在，冷媒漏えい事象とそれらの関係性についてFTA手法を用いて示し，着火源の存在確率，漏えい確率そして漏えい時に生じる可燃空間の時空積から火傷や火災事故となる確率を導出した。またそれらの事故事象はそれぞれ独立していると考え，確率を合算して1台あたりの年間事故発生頻度として示す。

RAは一般的にFTA，ETA，FMEAなどを使用することが知られている。今回のRAは「着火源の存在」と「可燃域の生成」が同時に存在した場合にリスクが生じる事象であり，事象間の独立性が高い点，また発生確率の計算が容易である点からFTAを使用した。またリスク評価については，安全性の総合判断をするリスクマップの考え方を参照している。

一方，前項に示すチラーの特徴から，冷媒漏えい確率の算出に当たっては事故統計データを用い，この分析結果を組み込む独自の手法とした。

(b) 標準仕様の設定 本RAで扱うチラーは大分類として，「機械室に設置する水冷チラー」，「屋外に設置する空冷ヒートポンプ（空冷チラー）」とがあり，その製品分類として，「遠心（ターボ）冷凍機」，「スクリーユ冷凍機」，「蒸気圧縮機式チリングユニット」とがある。

チラーとして冷凍能力で 7.5kW 以上を対象とするが，RAを実施する上で具体的な機器の統一イメージを共有して評価する必要がある。このため，RAワーキンググループ参加の各製造メーカーが持つ特定期間中の製品出荷実績を事務局が集計し，最も出荷台数の多い容量帯を代表冷凍能力とする方法を採用した。またこの代表冷凍能力に合致する各製造メーカーの製品カタログから，平均的な外形寸法と冷媒充填量を設定した。

表 9-1 に RA 対象の水冷チラーおよび空冷ヒートポンプの標準仕様を示す。各社出荷台数の多い容量から、水冷チラーは 60 馬力クラス、空冷ヒートポンプは 30 馬力クラスを標準とした。水冷チラーの 60 馬力クラスは各社 170~180 kW と幅があるが、後述する機械室容積および換気量がより厳しい扱いとなる 170 kW を標準容量とした。

表 9-1 リスク評価を行うチラーの標準仕様

Type of chillers	Water cooled	Air cooled
Cooling capacity	Approx. 170 kW	Approx. 90 kW
Refrigerant charge	23.4 kg	11.7 kg*
Outer dimensions (W×L×H)	1.28 m×1.28 m×1.28 m	1.00 m×3.00 m×2.30 m
Installation location	Machine room	Outdoors

*single refrigeration circuit

(c) ライフステージの定義 RA^{9-7), 9-8)}で示される「物流, 据付, 使用, 修理, 廃棄」の 5 つのライフステージ (以下, LS と呼ぶ。) に「オーバーホール」を加え, 6 つの LS とした。「据付」と「使用」では設置場所が異なる水冷チラーと空冷ヒートポンプをそれぞれ分けた。水冷チラーと空冷ヒートポンプの台数割合は国内出荷台数実績より確率の重みづけを 3 : 7 として評価した。後述する事故発生確率を算出する際, 「物流」, 「廃棄」では使用者がリスクに曝されないため, 合算対象から外した。また表 9-2 に各 LS に想定される台数と, 全体に対する台数比率を LS 比率として示す。

表 9-2 各 LS で想定されるチラー台数

LS	Target	Ratio		Number of sales	LS ratio
		Air-cooled	Water-cooled		
Logistics	Supplier	Total		9,687	0.0517
Installation	Operator	7	3	9,687	0.0517
Usage	Operator	7	3	134,000	0.7145
Repair	Operator	Total		22,637	0.1207
Overhaul	Operator	Total		1,838	0.0098
Disposal	Supplier	Total		9,687	0.0517

(d) FTA の基本構成 後述する各漏えい速度について, 各 LS における基本 FTA (図 9-1) を作成した。図 9-1 より冷媒漏えい時に生じる可燃空間の存在確率に着火源の存在確率を乗じた値に, さらに LS 比率を乗じ各々合計した値が各漏えい速度における事故発生確率となることが判る。図 9-2 に要素別に着火源の存在確率が算出できる様に整理した。

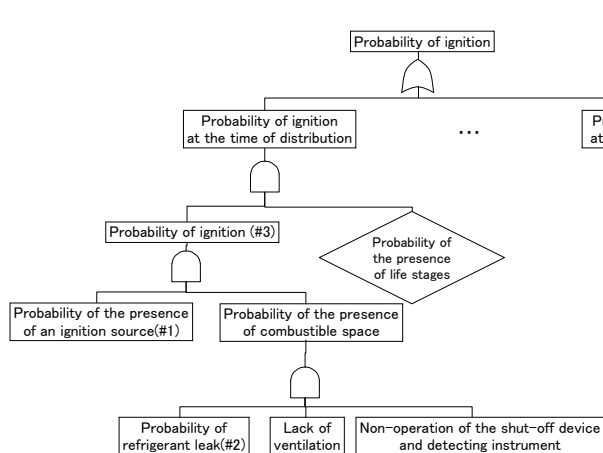


図 9-1 各漏えい速度における着火確率の標準 FTA

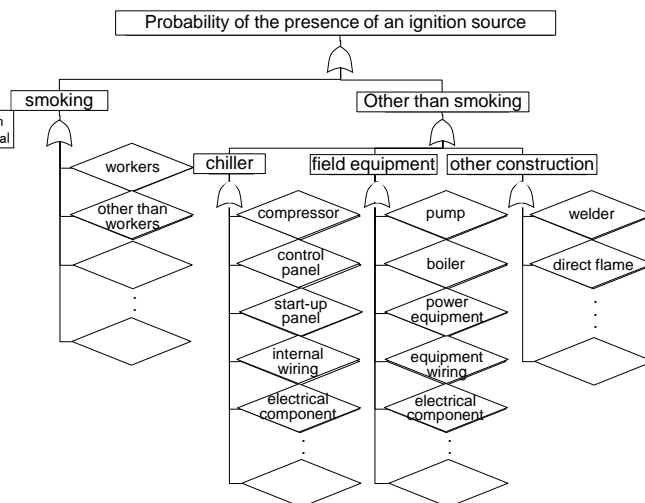


図 9-2 各 LS での着火源評価の標準 FTA

9.2.3 リスクアセスメントリストとリスクアセスメントマップ

RA で必要となる危害程度の推定や対策検討及び記録にはリスクアセスメントリスト (以下, R-List, 表 9-3) を用いた. R-List を用いて予測されるリスクの全てについて, 発生確率と危害程度を推定し, リスクアセスメントマップ (以下, R-map, 表 9-4) に従ってリスクレベルを判定した. リスクレベルが「許容できない」A 領域または「条件付き許容」B 領域にある場合は, 「許容できる」C 領域へ移行するための対策を検討した. なお, R-map 中の発生確率と危害程度は次節に示す値を用いた. また同時に IEC60079⁹⁻⁶⁾に従い既存防爆技術規格との整合性を確認した.

(a) 許容可能な発生確率 日本冷凍空調工業会の出荷統計より, 水冷チラー, 空冷ヒートポンプの国内市場ストックは 13 万 4 千台と推計される (2011 年時点). 経済産業省のリスクアセスメント・ハンドブック⁹⁻³⁾ (以下, HB と呼ぶ.) より, 危害程度に関係なく事故発生確率は産業・業務用途の場合, 1.0×10^{-6} 件/(台・年) 以下であれば市場で許容される. つまりチラーの規模では 10 年に一度, 7.5×10^{-7} 件/(台・年) の発生頻度に相当する.

(b) 危害程度 危害程度は HB の火災・火傷の定義を用いて評価した.

表 9-3 リスクアセスメントリスト (例)

Timing of severity occurrence			Equipment/Case/Cause	
Life stage	Service status	Subject	Equipment	
Installation	Carry-in/Installation/storage	work	Open flame	

Details of severity condition				
Ignition source	Mis-operation(mis-work)	Severity condition	Accident category	Type of severity source
Bringing stove and gas burner	Erroneous operation	Ignition from devices using open flame	Property damage	Damage to equipment

measure	Risk assessment		Anti-explosion assessment			Risk level
	Severity of harm	Probability of occurrence	Ventilation grade	Ventilation level/Efficacy	Assessment	
before measure	IV	1	-	Low	Zone 1	B
Safety measure	III	0	Grade 2	High	Non hazardous	C

表 9-4 リスクアセスメントマップ

Reference data from HB	Chiller market (for risk assessment)		Risk region				
	Probability of hazard cases/(unit-yr)	Frequency of hazard cases/(unit-yr)	Probability of hazard cases/(unit-yr)	0	I	II	III
5 Frequent Consumer goods: 10^{-2} , Industrial products: 10^{-1}	1 out of 10 units once every year	1.0×10^{-1}	13	24	27	29	30
4 Probable Consumer goods: 10^{-4} , Industrial products: 10^{-2}	1 out of 100 units once every year	1.0×10^{-2}	12	20	23	24	28
3 Occasional Consumer goods: 10^{-5} , Industrial products: 10^{-3}	134 times once every year	1.1×10^{-3}	10	16	19	22	25
2 Remote Consumer goods: 10^{-6} , Industrial products: 10^{-4}	14 times once every year	1.1×10^{-4}	6	9	15	18	21
1 Improbable Consumer goods: 10^{-7} , Industrial products: 10^{-5}	1 to 2 times once every year	7.5×10^{-6}	3	4	8	14	17
0 Incredible Consumer goods: 10^{-8} , Industrial products: 10^{-6}	1 to 2 times once every 10 years	7.5×10^{-7}	1	2	5	7	11

		A region: 25-30 Intolerable
		B region: 14-24 Acceptable (If the risk is as low as reasonably practicable)
		C region: 1-13 Acceptable

R-map (ISO/IEC Guide 51) (JIS Z 8051)	0	I	II	III	IV
		None (No injury)	Negligible (Smoke generation of product)	Marginal (Fire and ignition of product)	Critical (Serious injury)
	Severity of harm →				

9.3 冷媒漏えい時の可燃空間存在確率

冷媒が漏えいした際、そのガスが空気中に噴出拡散する状況を解析し、可燃域となる空間体積と存在時間から、可燃空間の存在確率を算定した。また、生じた可燃空間が機械換気により消滅する時間を算定した。

9.3.1 解析モデル

(a) 機械室 水冷チラーが設置される機械室は、使用機器に応じた技術規格^{9-10), 9-11), 9-12)}に従い、換気量や火気設備の設置に制限がある。機械室床面積は、空気調和衛生工学会誌の竣工設備調査一覧データ（2007年～2010年）を参照した。それら値を図9-3に示す。図中にチラーの熱量に対する平均床面積を直線で近似した。チラー標準容量170kW（表9-1）では床面積21.8m²であり、機械室の高さを5mとして標準容積を109m³とした。また詳細は示していないが同様に最小容積を75m³とした。機械室の床面形状は1:2の長方形とし、長手方向半分にチラー本体、もう一方に補機が配置されていると想定した。メンテナンススペースを、操作盤前面は1.2m以上、その他面は1.0mを設けた（図9-4）。給排気ガラリ面積は鹿児島県建築基準「機械設備工事編」⁹⁻¹³⁾を参考とした。また冷媒は空気より重い為、換気給気口を機器本体の真上に、排気口は機器背面の壁下部に設置した。給気口と排気口の開口率（面風速）はそれぞれ、0.7（2.0m/s）、0.3（4.0m/s）とし、各面積は、換気風量条件に応じて変更している。

冷媒漏えいは、機器本体の最も低い所から漏れると想定し、脚部基礎を考慮して床面から0.15mの高さとした。漏えい口の形状は、配管を模擬して長さ0.10mの円筒ノズルとした。なお、機械室は地下15mに設置されていると仮定し、冷媒ガスは排気口から地上に延長されたダクトを通じて排出される。

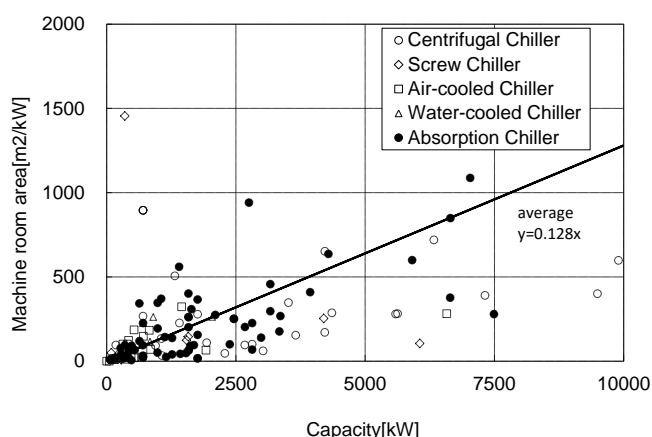


図9-3 機械室面積とチラー能力の関係

(b) 屋外 通常、屋上等四方に壁のない場所に設置される空冷ヒートポンプでは、大気の流れがあるため、可燃空間は形成され難いと考えられる。そこで大気の流れが淀み易い条件としてチラーが防音壁に囲まれた場合に限定し、製造メーカーの防音壁設置要領を参考にして、2面の壁（開口率0%）、開口率25%の壁2面を想定した（図9-5）。冷媒漏えいは、熱交換器配管が破損して壁に向かって漏れ出すケース（①）と、化粧パネル内で漏れいして本体底部にある前後2ヶ所のパネル隙間（2m×0.01m）から漏れ出すケース（②）を想定した（図9-5）。

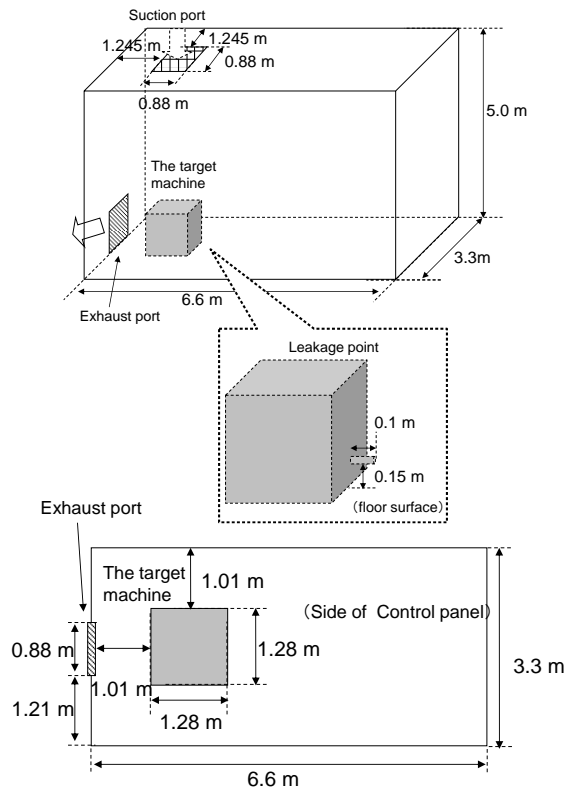


図 9-4 機械室の概要

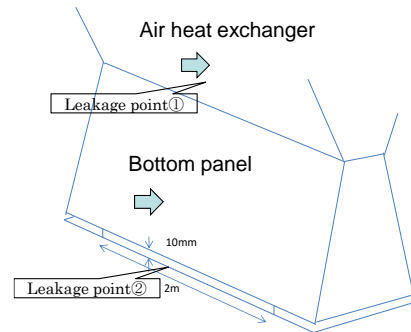
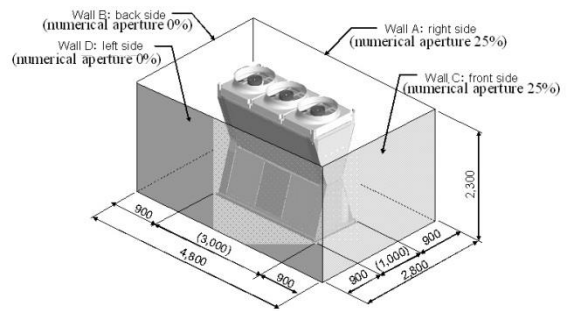


図 9-5 空冷式チラーモデル

9.3.2 冷媒の可燃範囲，漏えい速度の定義

冷媒の代表物性を表 9-5 に示す。R1234ze(E)は乾燥空気中では燃焼しないため、23 °C 相対湿度 90 % 相当での燃焼下限界（以下，LFL），燃焼上限界（以下，UFL）を用いた。漏えい速度を表 9-6 に示す。R1234ze(E)，R1234yf と R32 の各漏えい速度は JRA GL-13⁹⁻¹⁴⁾（解説）に従い、20°C 飽和圧力から大気中に放出されるとしてそれぞれ算定した。

表 9-5 冷媒の燃焼性⁹⁻¹⁵⁾

		Limit of flammability		Maximum burning velocity	Diffusion coefficient
		LFL vol%	UFL vol%	cm/s	
R32	-	13.5	27.5	6.7	0.135
R1234yf	dry air	6.7	11.7	1.5	0.075
	wet air	5.15 ^{※1)}	13.6 ^{※1)}	5.9 ^{※2)}	
R1234ze(E)	dry air	not flammable	not flammable	not flammable	0.074
	wet air	5.9 ^{※1)}	12.6 ^{※1)}	5.2 ^{※2)}	

※1 Absolute humidity 0.016 kg/kgDA (Equivalent of 23 °C 90 %RH)

※2 Absolute humidity 0.03 kg/kgDA (Equivalent of 35 °C 83 %RH)

表 9-6 冷媒の漏えい速度

	Slow leak	Rapid leak	Burst leak
R32	1kg/h ^{※1)} or less	10kg/h	75 ^{※1)} or 200kg/h
R1234yf	0.9kg/h ^{※1)} or less	8.9kg/h	67 ^{※1)} or 178kg/h
R1234ze(E)	0.7kg/h ^{※1)} or less	7.3kg/h	54 ^{※1)} or 145kg/h
Location	Pinhole, Welded part, Brazed part, Cauterized part	cracking flare, Flare-welded part, Flare fitting joint, Cauterized part	slip-out from flare fitting joint, Pipe fitting

※1 Analysis condition

9.3.3 計算方法および計算条件

(a) 計算方法 次項で示す冷媒漏えい時の可燃空間の時間変化を求める解析では、汎用熱流体解析コード STAR-CCM+を用いた。解析方法は、非定常圧縮性流れとして多成分理想気体条件を用いた。乱流モデルは Realizable k- ϵ モデル (RKE モデル) を使用した。流入境界条件は一定流量条件を適用し、漏えい終了後は流量をゼロにした。隙間や開口部などの流出境界は大気圧相当の圧力出口境界を適用した。機械室に冷媒が充満している状態から換気を開始した場合の冷媒濃度の時間変化を求める解析では、汎用熱流体解析コード ANSYS FLUENT を用いた。なお解析方法、乱流モデルは STAR-CCM+と同様である。

(b) 計算条件 表 9-7 は冷媒の漏えいシナリオ、表 9-8 は機械室内に冷媒が充満した状態から換気を行った場合の解析条件をそれぞれ示す。表 9-9 に冷媒物性などの入力条件を示す。

表 9-7 冷媒の漏えいシナリオ⁹⁻¹⁴⁾

Case no.	Refrigerant	Charged amount	Room volume	Leakage velocity	Ventilation (Airflow)	Air vent			
water-cooled chiller									
1	R32	23.4 kg	109 m ³	10 kg/h	0 m ³ /h	present			
2				(rapid leakage)	218 m ³ /h	present			
3					436 m ³ /h	present			
4				75 kg/h	0 m ³ /h	present			
5				(burst leakage)	218 m ³ /h	present			
6					436 m ³ /h	present			
7				75 m ³	10 kg/h	0 m ³ /h	present		
8			(rapid leakage)		150 m ³ /h	present			
9					300 m ³ /h	present			
10			75 kg/h		0 m ³ /h	present			
11			(burst leakage)		150 m ³ /h	present			
12					300 m ³ /h	present			
air-cooled chiller									
13	R1234ze(E)	23.4 kg	109 m ³	7 kg/h	0 m ³ /h	present			
14				(rapid leakage)	218 m ³ /h	present			
15					436 m ³ /h	present			
16				54 kg/h	0 m ³ /h	present			
17				(burst leakage)	218 m ³ /h	present			
18					436 m ³ /h	present			
19				75 m ³	7 kg/h	0 m ³ /h	present		
20			(rapid leakage)		150 m ³ /h	present			
21					300 m ³ /h	present			
22			54 kg/h		0 m ³ /h	present			
23			(burst leakage)		150 m ³ /h	present			
24					300 m ³ /h	present			
25	R32	11.7 kg	31 m ³	10 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)			
26				(rapid leakage)	(0.5 m/s)	(outdoor)			
27				75 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)			
28				(burst leakage)	(0.5 m/s)	(outdoor)			
29				10 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)			
30				(rapid leakage from bottom apertures)	(0.5 m/s)	(outdoor)			
31				75 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)			
32				(burst leakage from bottom apertures)	(0.5 m/s)	(outdoor)			
33				R1234ze(E)	11.7 kg	31 m ³	7 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)
34							(rapid leakage)	(0.5 m/s)	(outdoor)
35							54 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)
36							(burst leakage)	(0.5 m/s)	(outdoor)
37	7 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)						
38	(rapid leakage from bottom apertures)	(0.5 m/s)	(outdoor)						
39	54 kg/h	(0 m/s)	(outdoor)						
40	(burst leakage from bottom apertures)	(0.5 m/s)	(outdoor)						

表 9-8 機械室が可燃ガスで充満した後に換気を行うときの解析条件

Refrigerant	Room Volume	Ventilation
R1234ze(E)	109 m ³	218 m ³ /h
		436 m ³ /h
	75 m ³	150 m ³ /h
		300 m ³ /h

表 9-9 入力データ⁹⁻¹⁶⁾

Refrigerant		R32	R1234ze(E)
Temperature	°C	20	20
Pressure		atmospheric pressure	atmospheric pressure
Absolute humidity	kg/kg DA (dry)		0.016
Mass charged in water-cooled chiller	kg	23.4	23.4
Mass charged in air-cooled chiller	kg	11.7	11.7
Lower flammability limit (LFL)	vol.%	13.5	5.9
Upper flammability limit (UFL)	vol.%	27.5	12.6
Burning velocity (BV)	m/s	0.067	0.052
Molecular weight	kg/kmol	52.024	114.04
Specific heat at constant pressure	J/kg.K	842.01	881.88
Thermal conductivity	W/m.K	1.2187×10^{-2}	1.2683×10^{-2}
Viscosity	Pa.s	1.2398×10^{-5}	1.2151×10^{-5}
Diffusivity in air	m ² /s	1.35×10^{-5}	7.4×10^{-6}

9.3.4 計算結果

機械室設置と屋外設置における可燃空間の時間変化の評価では、可燃空間体積を時間積分した可燃時空積 $\int V dt$ [m³min]を導入した。LFL の 1/4 以上 UFL 以下の濃度域となる体積 $V_{0.25FL}$ 、可燃域となる LFL 以上 UFL 以下の濃度域となる体積 V_{FL} およびその空間内で気流速度が燃焼速度以下となる体積 V_{BVFL} を検討した。それぞれの case について時空積 $\int V_{0.25FL} dt$ 、 $\int V_{FL} dt$ および $\int V_{BVFL} dt$ を表 9-10 に示す。計算例として 8 ケースを抽出し、図 9-6 に V_{FL} 、 V_{BVFL} と $\int V_{FL} dt$ 、 $\int V_{BVFL} dt$ の時間変化、図 9-7 に漏えい終了直前での LFL および UFL 等値面を示す。

機械室設置における時空積の解析結果を表 9-10 の No. 1~24、図 9-6 および図 9-7 の(a)~(d)に示す。換気の無い容積 109 m³ の室内に急送漏えいする場合 (No. 1, 13) では、一度可燃空間が生じると消滅しないため 200 分までの解析とした。図 9-6 の(d)から室内で生じた可燃空間は、換気が無いため非常に大きくなり、漏えい終了後も消滅していないことが確認できる。一方、換気の無い容積 75 m³ の室内に噴出漏えいする場合 (No. 10, 22)、濃度が UFL を超え可燃空間は小さくなった。本解析では漏えい位置を床面近傍に設置していることから、対象空間が大きい場合、漏えいした冷媒は空間上部へ拡散し難く、高濃度域は底部に生成される。一方、空間が小さい場合や漏えい速度が大きい場合は空間が大きい場合に比べて空間全体に冷媒は拡散し濃度を平均的に上昇させる一方、底部の濃度を低下させる傾向が見られる。想定を下回る狭小な機械室では、平均的な濃度上昇により冷媒の噴出位置、噴出方向が変われば、可燃空間が生じることも考えられる。

屋外設置における時空積の解析結果を表 9-10 の No. 25~40 と図 9-6 および図 9-7 の(e)~(h)に示す。空気熱交換器配管から漏えいする場合 (No. 25~28, 33~36)、冷媒は広い空間に拡散し続け、可燃空間は漏えい口のごく近傍にしか生成されず、可燃時空積は極めて小さな値となった。また本体内部で漏えいが発生し、本体下のパネル隙間から漏えいするケースでは、床面近傍位置での漏えいとなるため、上部空間に広く拡散することなく、床上 10 mm 程度の薄い可燃空間が形成される。特に、噴出漏えいの場合は、冷媒の漏えい中はほぼ床面全域に可燃空間が広がる (No. 31, 32, 39, 40)。しかし、周囲の壁 2 面に開口があるため、滞留し続け

ることはなく、漏えいが終了すれば可燃空間は短時間で消滅する。また、表 9-10 より 0.5 m/s の風の影響は殆ど無いといえる。

表 9-10 可燃時空積の計算結果

Case no.	$\int V_{0.25FLdt}$ m ³ min	$\int V_{FLdt}$ m ³ min	$\int V_{BVFLdt}$ m ³ min	Case no.	$\int V_{0.25FLdt}$ m ³ min	$\int V_{FLdt}$ m ³ min	$\int V_{BVFLdt}$ m ³ min
water-cooled chiller				21	0.32	0.0009	0
1*	up to 13487	up to 2481	—	22*	up to 2223	0.784	0
2	0.351	0.0004	0	23*	up to 2807	0.046	0
3	0.186	0.0007	0	24	1359	0.025	0
4*	up to 2759	0.011	0	air-cooled chiller			
5*	up to 2283	0.008	0	25	0.018	0.0002	0
6	1396	0.006	0	26	0.021	0.0002	0
7*	up to 9711	0.012	0	27	0.071	0.0004	0
8*	up to 2.884	0.0008	0	28	0.128	0.0007	0
9	0.223	0.0007	0	29	56.27	3.732	2.827
10*	up to 2309	0.037	0	30	53.26	3.775	3.112
11*	up to 2500	0.016	0	31	11.5	4.242	0.671
12	1326	0.012	0	32	11.62	4.164	0.693
13*	up to 7934	up to 3129	—	33	0.033	0.0003	0
14	0.422	0.001	0	34	0.035	0.0003	0
15	0.277	0.0009	0	35	0.134	0.001	0
16*	up to 3293	0.027	0	36	0.174	0.001	0
17*	up to 2502	0.017	0	37	58.42	3.989	2.054
18	1483	0.015	0	38	56.82	4.038	2.313
19*	up to 9070	up to 6363	up to 1464	39	15.3	5.685	0.646
20*	up to 1.353	0.0009	0	40	15.35	5.544	0.662

*Calculations were stopped before the flammable volumes vanished because of their very long residence times.

図 9-8 に機械室内に冷媒が充満した状態で換気を開始した後の可燃空間の可燃空間体積変化を示す。換気回数が 4 回/h の場合は空間容積 109 m³ では 6 分後に、75 m³ では 20 分後に可燃空間は消滅する。本解析は、換気が停止した状態で長期休止している冷凍設備において、冷媒漏えいが生じた際の可燃空間の排除を想定したものである。

冷媒充填量に着目し大容量機器について次の評価を行った。高圧ガス保安法冷凍保安規則で届出の制限を受ける最小容量を 300 kW、相当する機械室容積を 192 m³ として冷媒充填量を制限しない場合、つまり冷媒が漏れ続ける状態（噴出漏れ）での換気量と可燃空間について解析を行った。解析結果図 9-9 より 4 回/h 換気では可燃空間は形成されず 2% を下回る濃度域が支配的となり、2 回/h 換気であっても可燃空間の形成には至らず濃度は約 4% で平衡した。つまり 300 kW 以上のチラーでは 2 回/h の機械換気であっても冷媒量に関係なく可燃空間が生じないと言える。

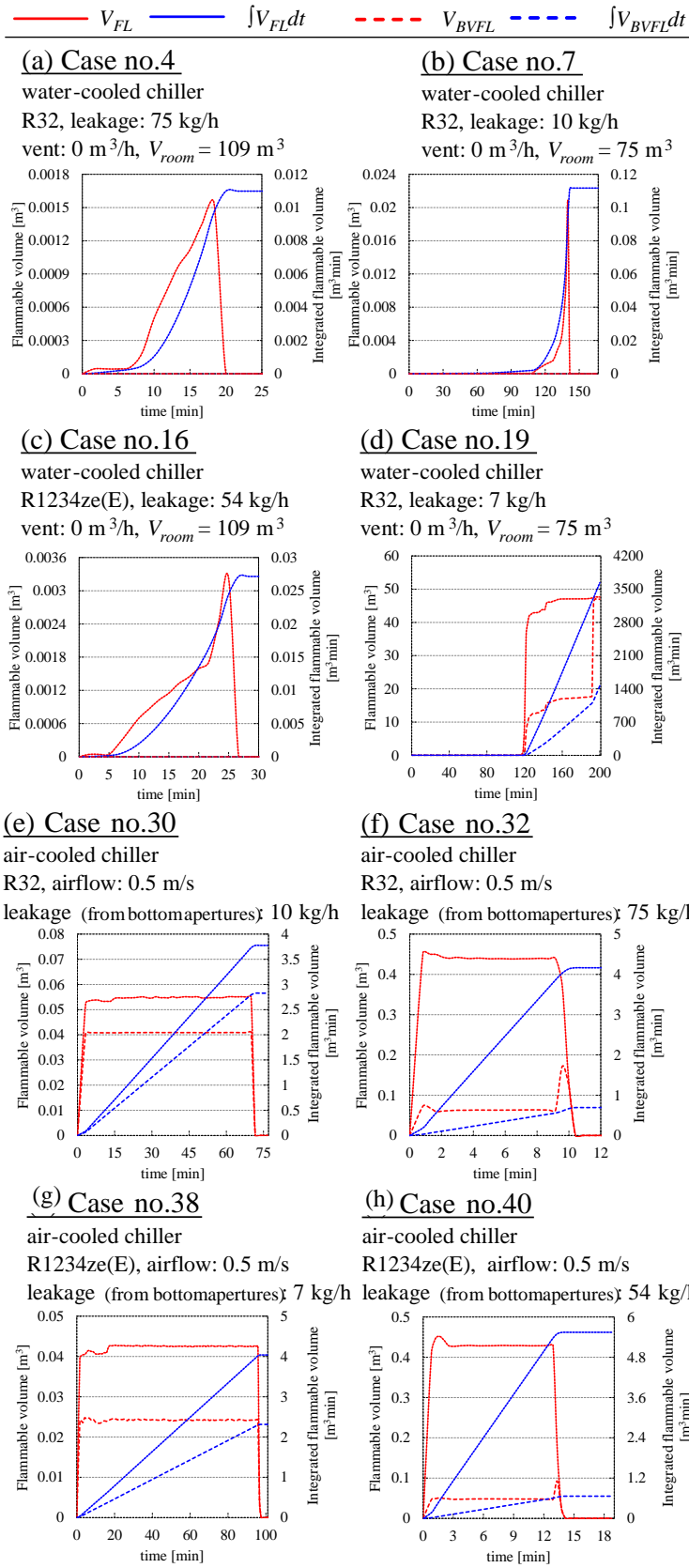
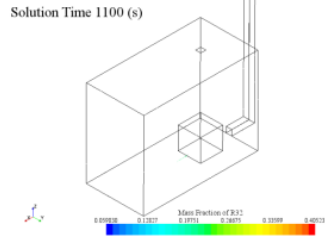


図 9-6 可燃空間体積 V_{FL} , V_{BVFL} , 可燃時空積 $\int V_{FL} \cdot dt$, $\int V_{BVFL} \cdot dt$ の時間変化

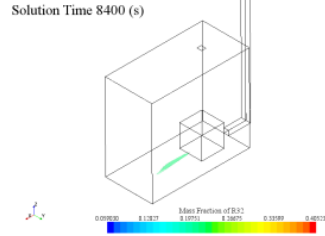
(a) Case no.4

water-cooled chiller
R32, leakage: 75 kg/h
vent: 0 m³/h, V_{room} = 109 m³



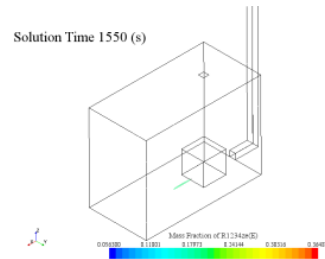
(b) Case no.7

water-cooled chiller
R32, leakage: 10 kg/h
vent: 0 m³/h, V_{room} = 75 m³



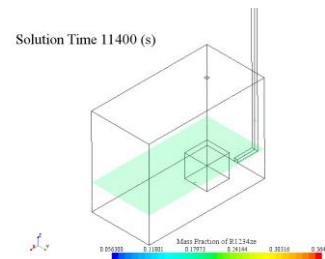
(c) Case no.16

water-cooled chiller
R1234ze(E), leakage: 54 kg/h
vent: 0 m³/h, V_{room} = 109 m³



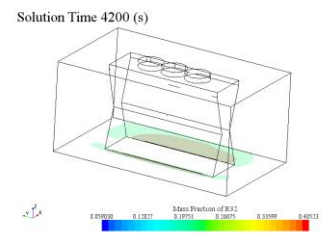
(d) Case no.19

water-cooled chiller
R32, leakage: 7 kg/h
vent: 0 m³/h, V_{room} = 75 m³



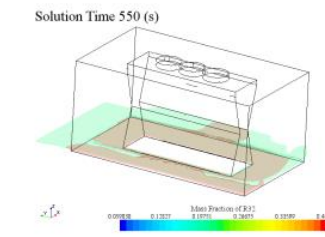
(e) Case no.30

air-cooled chiller
R32, airflow: 0.5 m/s
leakage(from bottom apertures): 10 kg/h



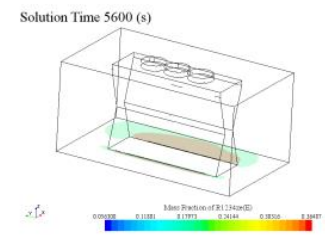
(f) Case no.32

air-cooled chiller
R32, airflow: 0.5 m/s
leakage(from bottom apertures): 75 kg/h



(g) Case no.38

air-cooled chiller
R1234ze(E), airflow: 0.5 m/s
leakage(from bottom apertures): 7 kg/h



(h) Case no.40

air-cooled chiller
R1234ze(E),airflow: 0.5 m/s
leakage(from bottom apertures): 54 kg/h

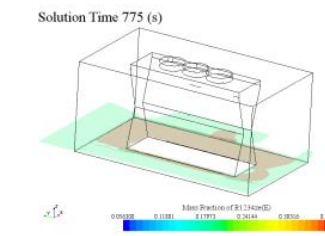


図 9-7 漏えい終了直前の LFL と UFL の等値面

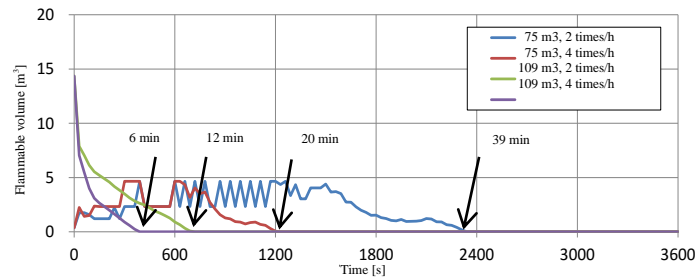
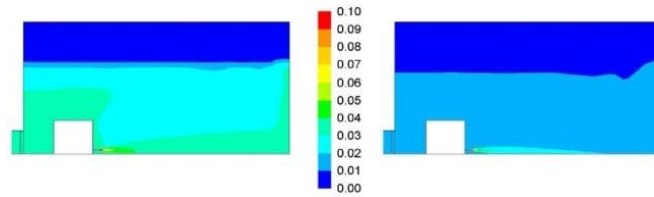


図 9-8 換気動作後の可燃空間体積の変化



(a) Two air-changes/h (b) Four air changes/h

図 9-9 換気回数による冷媒濃度分布の違い
(R1234ze (E), burst leak, 192 m³)

9.3.5 可燃空間の存在確率

可燃空間の存在確率を次式で定義した。

可燃空間の存在確率 = 可燃空間の時空積(m³・min)/対象空間(m³)×525,600(min/year)

可燃空間の存在確率は、漏えい速度、各 LS における機械換気装置の稼働率、水冷チラーと空冷ヒートポンプの設置割合、その他 LS に特有の条件により異なる。これら条件を考慮し各 LS、各漏えい速度について可燃空間の存在確率を算出し表 9-11 に示す。

表 9-11 各 LS における可燃空間の存在確率

LS	Without ventilation [case/(unit/year)]	Probability of existence of a flammable space, P_{fs} [-]		
		Burst leak	Rapid leak	Slow leak
Logistics	Transportation	-	0	0
	Storage in warehouse	0.01	2.64×10^{-10}	5.46×10^{-7}
Installation	Carry-in, installation, filling refrigerant and storage	0.5	7.84×10^{-8}	8.26×10^{-6}
	Trial	0.01	7.84×10^{-8}	2.33×10^{-7}
Usage [machine room]	machine room	0.01	2.64×10^{-10}	5.46×10^{-7}
	air-conditioned room	-	0	0
Usage [outdoor]	-	1.12×10^{-7}	9.84×10^{-8}	0
Repair	0.01	7.84×10^{-8}	2.33×10^{-7}	0
Overhaul	0.01	7.84×10^{-8}	2.33×10^{-7}	0
Disposal	0.5	7.84×10^{-8}	8.26×10^{-6}	0

以下条件は、RA においてチラー設置実績を調査し決定した。

(a) 実際に使用される可能性の高い冷媒として、水冷チラーは R1234ze(E)、空冷ヒートポンプは R32 の時空

積を用いる（表 9-10: No. 13-18, No. 25, 27, 29, 31）。

- (b) 対象空間は、機械室設置で 109 m³，屋外設置で防音壁に囲われた空間容積 31 m³ とする。
- (c) 機械換気装置は、2 回/h×2 系統で構成される。
- (d) 機械換気装置が設置されていない確率を 1% とする。また、「据付」および「廃棄」ではチラーは停止した状態で作業されることを想定し、機械換気装置が停止している確率を 50% とする。
- (e) 機械換気装置の故障率は、ダクト用ファンと同様であるとし、2.5×10⁻⁴ 件/(台・年) とする。
- (f) 可燃空間の解析結果より、換気のある微小漏れでは可燃空間の存在確率を 0 とする。
- (g) 屋外設置では、より厳しい評価とするため、風速 0 m/s 時の可燃時空積を用いる。
- (h) 空冷ヒートポンプの冷媒漏えい時、空気熱交換器、ユニット化粧パネルからの発生割合を 4:3 と仮定する。
- (i) 「物流」の輸送において、チラーを密閉コンテナで輸送することはないため、冷媒漏えい時に可燃空間は形成されない。

以上より、可燃空間の存在確率 P_{fs} は下式で表される。

$$P_{fs} = X_a P_{fs,a} + X_w P_{fs,w} \quad (9-1)$$

$$P_{fs,a} = \int V_{FL,a} dt / (V_{all,a} t_{all,a}) \quad (9-2)$$

$$P_{fs,w} = [(1 - P_{vent}) \int V_{FL,w,v0} dt + P_{vent} \{(1 - P_{vent,out})^2 \int V_{FL,w,v4} dt + 2(P_{vent,out} - P_{vent,out}^2) \int V_{FL,w,v2} dt + P_{vent,out}^2 \int V_{FL,w,v0} dt\}] / (V_{all,w} t_{all,w}) \quad (9-3)$$

ただし、式(9-1)の X_a , X_w , $P_{fa,a}$, $P_{fa,w}$ は空冷ヒートポンプの市場構成比，水冷チラーの市場構成比，空冷ヒートポンプの可燃空間存在確率，水冷チラーの可燃空間存在確率である。式(9-2)の V_{all} , t_{all} は空冷ヒートポンプの全空間体積，全時間である。式(9-3)の P_{vent} は換気設置確率， $P_{vent,out}$ は換気装置故障確率， $\int V_{FL,w,v0} dt$ は換気回数 0 回/h の時の可燃空間の時空積， $\int V_{FL,w,v2} dt$ は換気回数 2 回/h の時の可燃空間の時空積， $\int V_{FL,w,v4} dt$ は換気回数 4 回/h の時の可燃空間の時空積であり，右辺中括弧 { } 内の第 1 項は 2 系統の換気装置が正常運転の場合，第 2 項は 1 系統が故障している場合，第 3 項は 2 系統共に故障している場合である。

9.4 着火源

9.4.1 機械室

チラーが設置される屋外，機械室それぞれにおいて着火源を推定する必要があるが，解析結果より屋外での可燃空間の存在確率は小さく，ほぼ無視できる結果となっていることから，屋外における着火源については除外し，水冷チラーが設置される機械室における着火源の推定を行った。推定に当たり，機械室を具体的に定義することで着火源として扱うかどうかを精査した。図 9-10 に機械室内の設備イメージを示す。

機械室への立ち入りは専門技術者であるオペレータ，サービスマン，工業者に限られ，関係者以外の立ち入りは禁止されている。また火気厳禁，禁煙である。機械室内には大容量の電源用遮断器や電磁開閉器，接触器，リレー，その他作動時にスパークが発生するものを内蔵したチラーを起動するための動力盤が複数設置される。またチラー本体には制御機器を内蔵した操作盤や各種電装機器が付属し，さらに冷水ポンプ，冷却水ポンプも設置され，それらの電源用遮断器や電磁開閉器，接触器，リレー，その他作動時にスパークが発生するものを内蔵した補機動力盤が設置されると考えられる。燃焼機器への吸気は直接ブローで機械室から導入されるが，排気は防熱された独立ダクトで屋外に排出される。機械室には強制換気装置が設置されており，建築基準法では燃焼機器が必要とする換気量，設置機器の発熱を除去するのに相当する換気量を指定している。また，ISO 5149-part3⁹⁻¹⁷⁾では，機械室容積の 4 回/h の換気量を規定している。

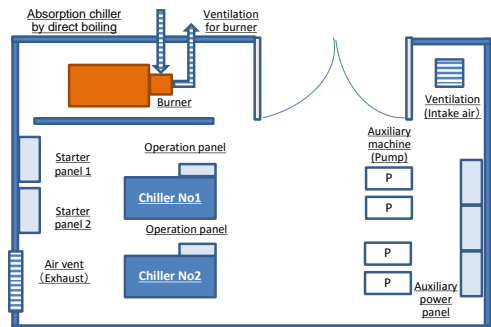


図 9-10 機械室のイメージ

9.4.2 着火源の絞り込み

微燃性冷媒は可燃性冷媒である R290 などと異なりコンセントのスパークや静電気、タバコ火では着火しないため着火源の絞り込みが重要である。そこで本 RA と並行して進められた研究^{9-18)~9-22)}から燃焼性および着火性を評価し、これら対象冷媒の着火源となるのは裸火、金属スパークと大容量の電気品（電磁開閉器、遮断器）とした。表9-12および表9-13にそれぞれ着火源になりうるとして抽出したスパークおよび裸火を示す。

表 9-12 機械室での着火源(火花)

Category	Spark		
	Ignition Source	Ignition	Remarks
Electrical parts	Home appliance and a Small-sized electrical product	N	5kVA or below
	Electrical part inside equipment	Yes	Solenoid switch with 5kVA or above
	AC power source	N	Equivalent to quenching distance
	Lighting switch	N	Equivalent to quenching distance
Work tools	Metal spark (folk of a forklift)	Yes	-
	Electrical power tool	N	Small capacity
	Refrigerant recovery apparatus	N	Small capacity
Human body	Static electricity emitted from a human body	N	Minimum ignition energy or less

Yes; ignited N; not ignited

表 9-13 機械室での着火源(裸火)

Category	Spark		
	Ignition Source	Ignition	Remarks
Smoking supplies	Match	Yes	Ignition = open fire
	Oil lighter	NF	Open fire once ignited
	Electric lighter	N	Spark not ignited
Burning appliance	Electric radiant heater	Yes	Prohibited to use
	Electric fan heater	N	Prohibited to use
	Gas water heater	Yes	Prohibited to use
	Gas boiler (burner)	N	No timing of ignition
	Ventilation duct, boiler surface	N	140°C or below
	Gas cooking appliance	Yes	Prohibited to use
	Work tool	Burner for brazing	N

Yes; ignited N; not ignited NF; no flame propagation

ボイラや直焚き吸収冷凍機には燃焼室に裸火が存在し、ファンを用いて機械室から燃焼室に空気を導入して燃料ガスを燃焼させている。図 9-11 に吸収冷凍機のバーナ構成図を示す。そこで運転開始から停止までの手順を確認した。運転開始時は、ファンのみの運転⇒点火装置によりパイロットバーナに点火⇒メインバーナを点火⇒パイロットバーナを停止、メインバーナで通常運転する。運転停止時は、メインバーナを停止⇒ポストパーズ運転、ファンによる燃焼室冷却・温度低下⇒ファンを停止する。したがって、燃焼器内に裸火がある間、ファンは常に作動しており、燃焼室に冷媒ガスが流入し燃焼する可能性はあっても、燃焼室の炎が機械室に逆流することはない。漏えいした微燃性冷媒の着火源とならない。なお、ストーブ、コンロ等の裸火は持ち込み禁止であり着火源として扱わない。

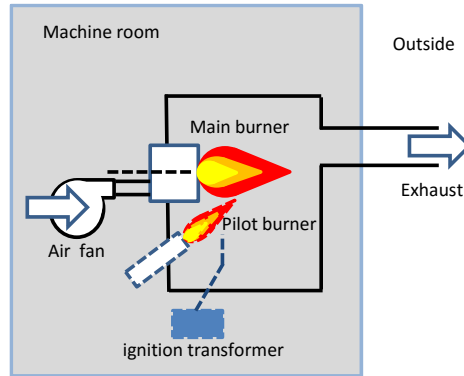


図 9-11 吸収冷温水機のバーナ

9.4.3 喫煙による着火

喫煙時において着火源となりうるのは、マッチおよび石油ライター⁹⁻¹⁹⁾である。そこで 2012 年に専門技術者の代表として 1,358 人のサービスマンの喫煙行動調査をアンケート形式で行い、以下条件を抽出した。

- (a) サービスマンの喫煙率は 53% で、サービスマン全体の 7.1% が過去 1 年作業現場で喫煙している。
- (b) 喫煙本数 (男性) は 19.1 本/日⁹⁻²³⁾である。
- (c) サービスマンの活動時間は 18 時間、うち勤務時間は 8 時間とした。
- (d) 1 日あたりの着火源の存在しうる時間は、勤務時間の 8 時間である。
- (e) サービスマンの現地勤務日数は 4 日/年
- (f) サービス作業は現地 2 名対応である。
- (g) 喫煙時の裸火の存在時間は 2 秒である。
- (h) 着火器具は 99.6% がライターを用い、マッチは 0.4% である。ライター使用者の内 95% が電子式ライター、5% が石油ライターである。

上記より着火源の存在確率は、サービスマンが 1 日当たり現地で喫煙する本数に、1 本当たりの着火時間を積算し、その着火源が存在する可能性のある時間で除すことにより算出できる。以下にその確率を示す。

$$\{0.07 \times 19.1 \text{ 本/(日} \cdot \text{人)} \times 8/18(\text{h/h}) \times 4/365(\text{日/日}) \times 2 \text{ 人} \times 2/3600 \text{ 秒/(本} \cdot \text{h)}\} / 8 (\text{h/日}) = 9.04 \times 10^{-7}$$

9.4.4 電気品による着火

機械室内には電動機、電磁開閉器、遮断器、プリント基板、トランス等さまざまな電気品があるが、スパークにより着火する可能性のある電気品は前述のとおり電源用遮断器や電磁開閉器、接触器、リレー、その他作動時にスパークが発生するものである。電源用遮断器、電磁開閉器については、一般用として可燃性雰囲気内での使用は想定されておらず、スパーク発生時のガスを排出するために開口部が設けられている。発生するスパークが着火源となるか否かに関しては、開口部の許容有効穴寸法が IEC 60335-2-40 の Annex JJ において検討されており、(9-4) 式が提案されている⁹⁻²⁴⁾。

$$d_{\text{eff}} = 22,3 \times \text{Su}^{-1.09} \leq 7 \text{ mm} \quad (9-4)$$

(d_{eff} : 許容有効穴寸法 [mm], Su : 冷媒燃焼速度 [cm/s])

(9-4) 式を満たさない場合(許容有効穴寸法が 7 mm より大きくなる場合)には、実験により着火源となるか否かを確認しなければならない。

また、スパークは電気容量が大きいほどエネルギーが大きく、着火源となり得るが、着火源となる電気容量の算出式として (9-5) 式が提案されている⁹⁻²⁴⁾。

$$\text{電気容量(kVA)} = 5 \times (6.7/\text{BV})^4 \quad (9-5)$$

(BV : 冷媒燃焼速度[cm/s])

本来、電源用遮断器や電磁開閉器、接触器、リレー、その他作動時にスパークが発生するものが着火源となるか否かに関しては、(9-4) 式にあるような消炎距離 (許容有効穴寸法) から評価を行うべきだが、本報

告書においては、フィールドで扱う際の扱いやすさ等から電気容量で確認を行うこととして、産総研の滝澤、ADL社（Author.D.Little社）の報告書 DOE/CE/23810-92(1998)⁹⁻⁸⁾より、R32の場合、5kVA以下では着火源とならないとした。

各社のチラーの冷却能力（呼称kW）と電磁開閉器の電気容量を整理すると、7.5kW（10馬力）以下のチラーの動力系では概ね5kVA以下となる⁹⁻¹⁰⁾。7.5kW（10馬力）を超えるチラー（大型ターボ冷凍機含む）であっても制御系で5kVAを超える電気品はなく、着火源は動力系の電磁開閉器に限られることから、動力系で5kVAを超える（着火源となり得る）電磁開閉器の動作頻度から着火源の存在確率を求めた。まず接点接触時間を1秒と仮定し、発停回数上限から、スクリーチラーが6回/h、ターボが2回/hとする。スクリーチラーとターボのストック台数比率0.952：0.048から、チラーの最大発停回数は、 $6 \times 0.952 + 2 \times 0.048 = 5.8$ 回/hとなる。また、運転時間に関しては12時間/日とする。

以上より着火源としての存在確率は、 $(1/3600 \times 5.8 \times 12) / 12 = 1.61 \times 10^{-3}$ と算定される。

9.4.5 着火源の存在確率

表 9-14 各LSにおける着火源の存在確率

LS	Electrical part inside equipment	Metal spark	Match	Oil lighter	Electrical Radiant heater	Gas water Heater & Gas cooking appliance	Other	Total $\sum_i P_i$	
Logistics	Transportation	-	1.67×10^{-4}	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	-	6.35×10^{-8}	3.36×10^{-2}	
	Storage in warehouse	-	8.33×10^{-5}	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	3.33×10^{-2}	6.35×10^{-8}		
Installation	Carry-in, installation and storage	-	8.33×10^{-5}	9.04×10^{-9}	2.25×10^{-6}	3.33×10^{-2}	-	3.63×10^{-2}	
	Trial	2.87×10^{-3}	-	9.04×10^{-9}	2.25×10^{-6}	-	1.47×10^{-6}		
	Filling refrigerant	8.05×10^{-4}	-	4.52×10^{-9}	1.13×10^{-6}	3.33×10^{-2}	-		6.08×10^{-8}
Usage [machine room]	Online ^{※1}	1.05×10^{-2}	-	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	-	6.35×10^{-8}	8.78×10^{-2}	
	Offline ^{※1}	1.05×10^{-2}	-	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	-	6.35×10^{-8}		
	Online ^{※2}	2.50×10^{-4}	-	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	3.33×10^{-2}	1.18×10^{-6}		6.35×10^{-8}
	Offline ^{※2}	-	-	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	3.33×10^{-2}	1.18×10^{-6}		6.35×10^{-8}
Usage [outdoor]	Online	1.16×10^{-2}	-	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	-	1.41×10^{-6}	1.25×10^{-2}	
	Offline	9.00×10^{-4}	-	4.72×10^{-9}	1.18×10^{-6}	-	1.41×10^{-6}		
Repair	Piping work	8.54×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-	2.05×10^{-1}	
	Cutting work	8.54×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
	Discharging refrigerant	8.54×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
	Detecting of refrigerant	8.54×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
	Charging refrigerant	8.54×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
	Checking and repair	8.54×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
Overhaul	Takedown	8.05×10^{-4}	8.33×10^{-5}	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-	1.70×10^{-1}	
	Refrigerant recovery	8.05×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
	After refrigerant recovery	-	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
	Setup	8.05×10^{-4}	8.33×10^{-5}	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
	Filling refrigerant	8.05×10^{-4}	-	3.62×10^{-9}	9.00×10^{-7}	3.33×10^{-2}	-		
Disposal	Refrigerant recovery	8.05×10^{-4}	-	4.52×10^{-9}	1.13×10^{-6}	3.33×10^{-2}	-	1.35×10^{-2}	
	After refrigerant recovery	-	-	4.52×10^{-9}	1.13×10^{-6}	3.33×10^{-2}	-		
	Dismantling	8.05×10^{-4}	8.33×10^{-5}	4.52×10^{-9}	1.13×10^{-6}	3.33×10^{-2}	-		
	Take out	-	8.33×10^{-5}	4.52×10^{-9}	1.13×10^{-6}	3.33×10^{-2}	-		

※ 1 In machine room ※ 2 In air-conditioned room

各 LS における作業内容を想定し、着火源となりうる各機器、裸火の存在確率 P_{fi} を算出した。表 9-14 に各 P_{fi} と各 LS の着火源の存在確率の合算値 $\sum_i P_{fi}$ を示す。

9.5 冷媒漏えい発生確率

2010 年に高圧ガス保安協会（以下、KHK と呼ぶ。）が集計した 76 件の冷媒漏えい事故届⁹⁾⁹⁾ を分析した結果、そのうち 59% が小配管や継手、弁類からの漏えいであり、容器からの漏えいは 1% に限られている。これらは JRA-GL13⁹⁾¹³⁾ で想定されているビル用マルチエアコンでの漏れ部位と同じと評価されるため、漏えい速度を「噴出漏れ」、「急速漏れ」、「微小漏れ」に分類した。

噴出漏れに分類される 6 件の事故は主に小配管の振動による折損、工事時の傷によるもので、急速漏れに近いガス状態での漏えいであった。

急速漏れの 7 件は主に伝熱管の損傷で、冷温水側へ漏洩する場合を含めて、ガス状態での漏えいであった。

その他微小漏れの 63 件はシール部、亀裂、継手部の緩み、ピンホール等の腐食・劣化に分類されるものであった。

さらにこれら事故届に相当するチラー製造メーカ各社のメンテナンスデータ⁹⁾²⁵⁾ を収集し比較した。2004 年~2011 年の各社出荷実績から市場ストック台数への寄与率を推定し、水冷チラー、空冷ヒートポンプチラー、ターボ冷凍機のそれぞれについて漏えい速度別の漏えい確率 P_l を算出し表 9-15 に示す。前述の冷媒漏えい事故届と比較すると、噴出漏れと急速漏れの合算が 1×10^{-4} 件/(台・年)と同等程度で下回っておらず、本集計データは有効と判断した。なお冷媒充填量の多いターボ冷凍機では、微小漏れ箇所が点検時に修理されるため、噴出漏れおよび急速漏れは発生していない。

表 9-15 2004-2011 年の冷媒漏えいの発生確率

2004-2011Fy	Probability of the occurrence of refrigerant leakage (case/(unit-year))			
	Water-cooled chiller	Air-cooled heat pump	Centrifugal chiller	Total
Burst leak	5.83×10^{-6}	1.35×10^{-5}	0	1.07×10^{-5}
Rapid leak	1.07×10^{-4}	1.87×10^{-4}	0	1.56×10^{-4}
Slow leak	1.64×10^{-3}	2.21×10^{-3}	7.09×10^{-3}	2.27×10^{-3}

9.6 火災・火傷事故発生確率の算定

9.6.1 算定条件

事故確率を過小評価しないために、確率算定に当たり、次の条件を設定した。

- 機械室にはチラーが 4 台設置され、隣接するチラーやポンプの発停回数を考慮した。
- 屋外設置ではすべてのユニットに前述の防音壁が設置され、ユニット下部から漏えいした場合生じる可燃空間を適用した。
- 床表面から可燃空間全体に想定される着火源が均等に存在するとした。たとえば、ライターの裸火は床面付近にも存在するとしている。
- 換気無しの場合、漏れ確率を可燃空間の存在確率とした。

9.6.2 事故確率の算定

式 (9-6) で表される火災事故発生確率 P_{fire} は、1 台の機器が 1 年間で発生する件数であり、各漏えい速度での可燃空間の存在確率 P_{fsLV} (表 9-11)、冷媒の漏えい確率 P_{lLV} (表 9-15)、各着火源の存在確率 P_{fi} の積算値 (表 9-14) を乗じて各漏えい速度について積算し、これに LS 比率を乗じて、各 LS について合算した値である。

$$P_{fire} = \sum_{LS} \left[R_{LS} \left\{ \sum_{LV} \left(P_{fsLV} P_{LLV} \sum_i P_{fi} \right) \right\}_{LS} \right] \quad (9-6)$$

表 9-16(a)に次章で詳細を示す安全対策つまり機械換気を備えた場合の事故発生確率 3.89×10^{-12} 件/(台・年)とその内訳を示す。この値は機械室設置の水冷チラーと防音壁を備えた空冷ヒートポンプチラーの事故確率の合算値であり、機械換気については故障率 2.5×10^{-4} 件/(台・年)を考慮した。10年に一度より著しく小さい事故確率であり対策として十分であると言える。

表 9-16(b)では機械換気が無い場合 $P_{fs}=1$ の事故確率 1.32×10^{-4} 件/(台・年)を比較対象として算出している。微燃性冷媒ガスが漏えいすると必ず可燃領域ができるとした事故確率となり、実態より大きな数値となるが、機械換気が無い、換気量が十分でない機械室が 1 %あるとすると 1.32×10^{-6} 件/(台・年)となり許容できないことが判る。

表 9-16 火災事故の発生確率
(a)換気あり

LS		LS ratio R	With ventilation [1/(unit-year)]	
			P_{fire}	P_{fire} under user's management
Suppliers	Logistics	0.0517	1.51×10^{-13}	-
	Installation [carry-in]	0.0517	2.39×10^{-12}	3.89×10^{-12}
Operator	Installation [trial]	(0.0023)		
	Usage [machine room]	0.2144	4.97×10^{-13}	
	Usage [outdoor]	0.5002		
	Repair	0.1207	1.00×10^{-12}	
	Overhaul	0.0098		
Suppliers	Disposal	0.0517	9.22×10^{-12}	-

(b)換気なし

LS		LS ratio R	Without ventilation [1/(unit-year)]	
			P_{fire}	P_{fire} under user's management
Suppliers	Logistics	0.0517	4.28×10^{-6}	-
	Installation [carry-in]	0.0517	4.66×10^{-6}	1.32×10^{-4}
Operator	Installation [trial]	(0.0023)		
	Usage [machine room]	0.2144	6.19×10^{-5}	
	Usage [outdoor]	0.5002		
	Repair	0.1207	6.51×10^{-5}	
	Overhaul	0.0098		
Suppliers	Disposal	0.0517	1.72×10^{-5}	-

9.7 安全を担保するための技術的要求事項

前節までに発生する事故確率を許容可能なレベルに低減するための本質的な技術要件を示したが、これら要件を日本冷凍空調工業会では「微燃性冷媒を使用したチラーの冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン」(JRA-GL15²⁰¹⁶, 以下ガイドライン)としては本節の通り示した。これら要件は可燃性ガスを使用する際に参照すべき安全規格 EN1127-1⁹⁻⁵⁾, IEC60079s⁹⁻⁶⁾との整合を取った。前節にて、機械室内は冷媒漏えい時に IEC60079-10⁹⁻¹¹⁾で規定される危険区域を生成しないように、安全対策として換気を確保することが必須であることを示した。

9.7.1 換気

(a) **機械換気装置** A2L 冷媒は空気より重く機械室内で冷媒が漏えいすると床面に滞留しやすい(図 9-7). そこで床面近くの低い位置より排気し, 冷凍設備最上面より高い位置から給気する機械換気装置とし, 原則として外部押込み方式とする.

(b) **必要換気量** ガイドラインでは, 機械室に機器を設置する前であっても換気容量を決めることができる機械室の容積基準の時間あたりの換気回数で規定した. ISO5149-3(2014)⁹⁻¹⁶⁾では同様に, 通常時と緊急時でそれぞれ必要換気量を規定しており, 通常時は換気回数 4 回/h, 緊急時は冷媒充填量による算出式より換気量で規定している.

9.3 節では, 平均容積 109 m³ および最小容積 75 m³ において噴出漏れが発生しても, 換気回数 2 回/h を確保すれば可燃空間は形成されないことを確認した(表 9-10). 高圧ガス保安法冷凍保安規則で第二種製造者の冷凍設備となる 50 冷凍トン(約 300 kW)に相当する機械室容積 192 m³ における解析においては, 換気回数 2 回/h で可燃空間が生じないことを確認した(図 9-8).

以上の結果から, ガイドラインでは, 換気回数 4 回/h 以上を常時確保することとし, 機械室容積が 192 m³ 以上の場合は換気回数 2 回/h 以上とした.

ただし, 冷凍設備に封入された冷媒が全量機械室に漏えいしても冷媒ガスの平均濃度が LFL/4 を超えない場合は, 火災事故の危険は無いため, 機械換気は必要要件ではないが, ガイドラインでは換気回数 2 回/h 以上を確保することが望ましいとした.

なお, ガイドラインで規定している換気回数の基準容積は機械室の床面積または床面から仕切られた壁により囲まれ冷凍設備が設置された区画の面積に, 給気の開口部から床面までの高さを乗じたものをいう.

(c) 換気装置のバックアップ

故障によるリスク低減策として, 機械換気装置は換気回数 2 回/h×2 系統で構成するとした. RA では, 機械換気装置が 1 系統故障する確率を 2.5×10^{-4} 件/(台・年)としたが, この場合はもう一方の系統で換気回数 2 回/h を確保することにより可燃空間の形成を防止することができる. 2 系統とも故障すれば可燃空間が発生するが, その確率は 6.25×10^{-8} 件/(台・年)と極めて小さい. 次に, 誤って機械換気装置を停止された場合もしくは機械換気装置が設置されていない場合に対するリスク低減策として, それぞれの系統の機械換気装置の正常動作を冷凍設備のインターロックとして構成することを規定した.

なお, 機械換気機能の維持管理が重要であり, 機械設置時と製造メーカーが推奨する周期に点検を実施し, 記録を保管し継続的にリスクを抑制しなければならない.

(d) 長期停止時の復旧

長期停止時の漏えいを想定し, 室内に冷媒が充満した状態から換気を開始した解析では, 平均容積 109 m³ で検知警報設備が漏えいを検知し, かつ機械換気装置が長期停止している状態において冷凍設備を復旧する場合は, 機械換気装置を 20 分以上運転し, 冷媒濃度が警報設定値を下回るまで(図 9-8) 機械室及び低圧容器室への入室並びに冷媒設備を設置した区画(冷凍・冷蔵倉庫内を除く.)又は一体形の冷凍装置を設置した区画への立ち入り, 及び冷凍設備の起動をしてはならないとした.

9.7.2 防爆仕様

(a) **冷凍設備** KHKS 0302-3(2011)⁹⁻¹⁰⁾では, 可燃性ガスを冷媒に用いる場合, 照明, 保安用具(冷媒漏えい検知器, 作業灯, 局所排気ファン)等の電気品には防爆性能を要求している. A2L 冷媒では 5kVA 以下の電気品や表面温度 700℃以下の機器は着火源とならず, さらに適正な換気量を確保することで可燃空間も形成されない. そこでガイドラインでは機械換気を必須とし, これら電気品の防爆を不要とした.

あわせて, 直火(ストーブの持ち込み, ライターやマッチ等の喫煙行為)は禁止として機械室の出入口付近や冷凍装置の設置場所には A2L 冷媒を用いる冷凍装置が設置されていることを示す警戒標や火気持込み禁止の警戒標を掲げることをガイドラインに規定した.

(b) **冷凍装置** A2L 冷媒を使用する冷凍装置は, 冷媒が漏えいした場合に, 冷凍装置内部に滞留して危険区域を生成することを防止するため, 化粧パネル等で囲まれる構造の冷凍装置は, 適切な面積の開口部や排気ファン等を設けるなどの構造とする.

9.7.3 冷媒ガス漏えい検知警報設備

機械室の換気装置の故障リスクの回避手段として、換気装置を2系統備えることとしているが、それでも2系統が同時故障するリスクがゼロにはならないので、冷媒ガス漏えい検知警報設備を設置する。

検知警報設備を常に動作させておくために、チラー及び換気装置とは別電源（電池によるバックアップ電源含む）にする。また冷媒漏えいを検知した場合、人が常駐している場所であって、必要な対策ができる場所に、光（ランプの点灯又は点滅）と音（ブザー等の警告音）の警報を発しなければならない。

A2L 冷媒等の漏えい検知器は、酸化スズ等の半導体にガスを吸着させて抵抗変化を測定する半導体方式のものが主流である。半導体方式の検知器は比較的安価であるが雑ガスに反応するため、雑ガスの多い環境では、ガス種特有の波長の光の量を測ってガス濃度を検知する赤外線方式の検知器が適しているが、比較的高価である。しかし、いずれの方式であっても、経年劣化をするため、1年に1回以上等、適切な間隔で、定期点検を行うことが望ましい。また、検知警報器は、故障検査機能を備えているものが多いが、完全な機能ではない。設置環境によっては、劣化が早くなる可能性もあるため、「機能しない」あるいは「誤検知する」場合に備え、予備器を設置することが望ましい。

半導体方式の検知器は、化学式にHやOHを持つ雑ガスや水分の影響を受けて誤検知をすることがある、金属を腐食させるガス雰囲気下では使用できない、シリコンガスに弱い（シリコン被毒すると元に戻らない）、等の欠点がある。また、鋭敏化（薄い濃度の冷媒でも反応するようになる）の方向に経年劣化することが多く、通常はメンテナンスによりある程度元に戻るが、数万ppmレベルの非常に濃い濃度のガスに触れると、ガスの濃度が薄くなっても検知面の特性が元に戻らなくなる可能性がある（R32：LFL=144,000ppm、LFL/4=36,000ppm）。また-40℃以下に対応している検知器は殆どない。

赤外線方式の検知器は、発光部や受光部に結露すると検知する値が変わるため高湿度に弱く、-20℃以下に対応している素子はない、等の欠点がある。また、発光部の汚れにより鈍化（高い濃度のガスでないと検知しなくなる）の方向に劣化するが、一般的にメンテすれば元に戻る（発光部、受光部の汚れを除去）。

検知器の設置環境（雑ガスの量等）により劣化速度は異なるが、検知方式によらず検知器は必ず経年劣化をするため、通常は、1年に1回以上の定期点検を行う。第2種製造者以上の製造設備においては、ガス種によっては冷凍保安規則例示基準に点検が義務付けられており、微燃性ガスに用いられる検知警報器においても、冷凍保安規則関係例示基準の規定が適用される見込みである。一方、家庭用のガス警報器においても、酸化スズ等の半導体方式の検知器が使用されることがあり、ガス警報器の規格では、耐久性試験を行うことにより、5年間の継続使用を認めている（5年経過後交換する）。これらを踏まえ、冷凍保安規則関係例示基準とガス警報器の規格を参考にして規定した検知警報器の日冷工規格を策定中であり、同規格に基づいて製造された検知警報器を使用すること望ましい。

第2種製造者以上、第2種製造者未満のいずれの製造設備に対応するものであっても、検知警報器は、必ず経年劣化をするものであることを理解し、各検知方式にとって苦手な環境に設置する場合には注意して使用することが重要である。また、警報設定を高めに設定すると、誤検知を少なくすることができる。更に、冷媒漏えいが発生し、警報がなされた場合は、検知警報器の点検を行い、必要に応じて校正を行い、校正を行っても規定の性能が保証できない場合は交換しなければならない。

9.8 まとめ

従来チラーと同じ漏えい事故確率や漏えい速度で微燃性冷媒 R1234ze(E), R1234yf, R32 が漏えいしても可燃空間は小さく短時間の形成に限られる。また、これら冷媒の燃焼性や着火源も限定的であるため、火災事故確率は低く抑えられると推定することができた。さらに、安全対策として機械室に常時2系統で2~4回/hの換気量の機械換気を備えることで、屋外設置の空冷ヒートポンプを含めても火災事故確率は許容できるとされる10年に一度より著しく小さく、許容できないリスクは残らない。したがって安全に微燃性冷媒をチラーに用いることができるといえる。

記号

P_{fire}	火災事故発生確率	-
P_{fs}	可燃空間の存在確率	-
P_{fi}	着火源の存在確率	-
P_l	漏えい確率	-
P_{vent}	機械換気装置存在確率	-
$P_{vent,out}$	機械換気装置故障率	-
V_{FL}	可燃空間体積	m^3
V_{BVFL}	気流速度が燃焼速度 以下となる可燃空間体積	m^3
$\int V_{FL,vn}dt$	換気回数 n 回/h の可燃空間の時空積	m^3min
X	市場構成比	-
R	ライフステージ比率	-

添字

a	空冷ヒートポンプ
w	水冷チラー
vn	換気回数 (n 回/時)
LV	漏えい速度
LS	ライフステージ

参考文献

- 9-1) ISO/IEC Guide51:2014, Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards, 2014.
- 9-2) ISO 12100:2010, Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction, 2010.
- 9-3) Risk Assessment Handbook (Practice), Ministry of Economy, Trade and Industry, 2011.
- 9-4) JIS B 8613:1994, Water Chilling Unit, 1994.
- 9-5) ISO EN1127-1:Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection, 2011.
- 9-6) IEC60079s:Explosive atmospheres, 2011.
- 9-7) Risk Assessment of room air conditioning using R290, JRAIA, 1999.
- 9-8) W. Goetzler, L. Bendixen, P. Bartholomew, "Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a (30/70 wt. %) in Split System Residential Heat Pumps, Arthur D. Little. inc., United state, 1998.
- 9-9) https://www.khk.or.jp/activities/incident_investigation/hpg_incident/refrig_incident.html
- 9-10) KHKS0302-3:Facility criteria of refrigeration and air conditioning equipment [Facilities of flammable gas (including mildly flammable gas)], 2011.
- 9-11) JISC60079-10:2008, Electrical apparatus for explosive gas atmospheres Part 10: Classification of hazardous areas, 2008.
- 9-12) IEC60335-2-40:Household and similar electrical appliances-Safety-Part 2-40) Particular requirements for electrical heat pumps, air-conditioners and dehumidifiers, 2005.
- 9-13) Building standards of Kagoshima Prefecture, Machinery and Equipment Construction, Kagoshima Prefecture.
- 9-14) JRA GL-13: Guideline of design construction for ensuring safety against refrigerant leakage from multi-split system air conditioners, JRAIA, 2012.
- 9-15) Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants 2014 Progress Report, JSRAE, 2014, pp.142-161. (in

Japanese)

- 9-16) National Institute of Standards and Technology (NIST), Standard Reference Database 23, Version 9.1, 2013.
- 9-17) ISO5149:2014, Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements, 2014.
- 9-18) T. Imamura, “Ignition Hazard Evaluation on Leaked A2L Refrigerants by Commercial-use Electronic Piezo Lighter,” Journal of Japan Society for Safety Engineering, 2013, 52 (2), pp.91-98. (in Japanese)
- 9-19) T. Imamura, “Experimental Evaluation of Physical Hazard of A2L Refrigerant Assuming Actual Handling Situations,” Proceedings of The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2014, 2014, pp.73-78.
- 9-20) T. Saburi, “Combustion Characteristics of Flammable Refrigerant Gases,” Proceedings of The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012, 2012, pp. 69-72.
- 9-21) K. Takizawa, “Flammability Property of 2L Refrigerants,” Proceedings of The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012, 2012, pp. 73-79.
- 9-22) Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants 2014 Progress Report, JSRAE, 2014, pp.42-58. (in Japanese)
- 9-23) http://www.jti.co.jp/investors/press_releases/2012/0730_01_appendix_02.html
- 9-24) IEC : 61D/WG9/2016/151G, (Revision proposal for IEC 60335-2-40: Household and similar electrical appliances – Safety – [Part2-40 : Particular requirements for electrical heat pumps, air conditioners and dehumidifiers]), 2016
- 9-25) K. Ueda, “Risk Assessment of Chiller with A2L Refrigerant in Progress,” Proceedings of The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012, 2012, pp.101-105

おわりに

本レポートは、微燃性冷媒リスク評価研究会が平成 28 年 3 月をもって活動を終了するにあたり、成果をまとめたものである。本研究会の活動にあたって経済的なご支援をいただいた国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構には心よりお礼申し上げます。また、執筆にご協力いただいた委員各位にもお礼申し上げます。

本レポートは公開物です。著作権は分担執筆者が有しているもので、引用の際には出典を明記するようにお願いいたします。

研究会委員名簿（2016 年 3 月）

	所 属	部 署	氏 名		
主査	国立大学法人 東京大学	大学院新領域創成科学研究科	教授 飛原 英治		
副主査	一般社団法人 日本冷凍空調工業会	(ダイキン工業株式会社)	藤本 悟		
委員	国立大学法人 九州大学	大学院総合理工学研究院	教授 小山 繁		
	国立大学法人 東京大学	大学院新領域創成科学研究科	准教授 党 超鋺		
	学校法人 東京理科大学 諏訪東京理科大学	工学部機械工学科	教授 須川 修身		
			准教授 今村 友彦		
	国立研究開発法人 産業技術総合研 究所	機能化学研究部門	グループ長	須田 洋幸	
			主任研究員	滝澤 賢二	
		安全科学研究部門	グループ長	和田 有司	
			主任研究員	佐分利 禎	
	一般社団法人 日本冷凍空調工業会		技術部長	松田 憲兒	
			技術課長	長谷川 一広	
				(パナソニック株式会社)	高市 健二
				(パナソニック株式会社)	渡部 岳志
				(ダイキン工業株式会社)	矢嶋 龍三郎
			(三菱重工業株式会社)	上田 憲治	
一般社団法人 日本自動車工業会	業務統括部	一ノ瀬 健二			
公益社団法人 日本冷凍空調学会	保安委員会(三菱重工冷熱株式会社)	委員長	一岡 順		
		保安委員会(ダイキン工業株式会社)	副委員長 辻 健次		
事務局	公益社団法人 日本冷凍空調学会		事務局長 西口 章		
オブザ ーバ	経済産業省 製造産業局	化学物質管理課オゾン層保護等推進室	課長補佐 石川 高志		
		産業機械課	課長補佐 鹿沼 昇		
国立研究開発法人 新エネルギー・産 業技術総合開発機構		環境部	主任研究員 阿部 正道		
			主査 寶山 登		
			職員 須澤 美香		
高圧ガス保安協会	高圧ガス部冷凍空調課	課長	飯沼 守昭		
関西電力株式会社	お客さま本部	担当部長	中曾 康壽		

執筆者一覧

1. 序論	飛原英治(東京大学), 藤本悟(ダイキン工業株)
2. 燃焼特性	滝澤賢二(産業技術総合研究所) 執筆協力者: 飛原英治(東京大学), 党超鋌(東京大学), 伊藤誠(東京大学)
3. 事故シナリオに基づく安全性評価	今村友彦(諏訪東京理科大学), 須川修身(諏訪東京理科大学) 執筆協力者: 飛原英治(東京大学), 党超鋌(東京大学), 東朋寛(東京大学)
4. 危険度評価	佐分利禎(産業技術総合研究所), 和田有司(産業技術総合研究所)
5. リスク評価手法について	高市健二(パナソニック株) 執筆協力者: 矢嶋龍三郎(ダイキン工業株), 上田憲治(三菱重工株), 渡部岳志(パナソニック株), 藤本悟(ダイキン工業株)
6. ミニスプリットエアコンのリスク評価	高市健二(パナソニック株), 平良繁治(ダイキン工業株) 執筆協力者: 上野円(シャープ株), 村田勝則(ダイキン工業株), 田坂昭夫(ダイキン工業株), 山口広一(東芝キャリア株), 高藤亮一(日立ジョンソンコントロールズ空調株), 藤利行(株富士通ゼネラル), 牧野浩招(三菱電機株), 藤本悟(ダイキン工業株)
7. スプリットエアコン(店舗用パッケージエアコン)のリスク評価	渡部岳志(パナソニック株) 執筆協力者: 山田剛(ダイキン工業株), 鈴木啓浩(東芝キャリア株), 土橋一浩(日立ジョンソンコントロールズ空調株), 藤利行(株富士通ゼネラル), 村上健一氏(三菱重工業株), 藤野哲爾(三菱重工業株), 鈴木康巨(三菱電機株), 矢嶋龍三郎(ダイキン工業株), 平良繁治(ダイキン工業株), 長谷川隆(ダイキン工業株), 山口広一(東芝キャリア株), 佐々木俊治(日立ジョンソンコントロールズ空調株), 平原卓穂(三菱電機株), 滝本直(三菱電機株), 高市健二(パナソニック株), 長谷川一広(日本冷凍空調工業会)
8. ビル用マルチエアコンのリスク評価	矢嶋龍三郎(ダイキン工業株) 執筆協力者: 木口行雄(東芝キャリア株), 山口広一(東芝キャリア株), 関根卓(パナソニック株), 津野勝之(パナソニック株), 高市健二(パナソニック株), 佐々木俊二(日立ジョンソンコントロールズ空調株), 岸谷哲志(日立アプライアンス株), 佐藤英治(日立ジョンソンコントロールズ空調株), 伊藤俊太郎(株富士通ゼネラル), 松永隆廣(株富士通ゼネラル), 山下浩司(三菱電機株), 観音立三(三菱重工株), 本田雅裕(ダイキン工業株), 吉澤正人(ダイキン工業株), 長谷川一広(日本冷凍空調工業会)

9. チラーリスク評価

上田憲治(三菱重工業株)

執筆協力者：相山真之(日立ジョンソンコントロールズ空調株)，伊藤幹雄(荏原冷熱システム株)，井場功(東芝キャリア株)，小林直樹(三菱重工株)，七種哲二(三菱電機株)，隅田嘉裕(三菱電機株)，山下浩司(三菱電機株)，仙田守(パナソニック株)，平原卓穂(三菱電機株)，向井洋介(三菱重工業株)，山口広一(東芝キャリア株)，田下友和(株神戸製鋼所)，深野修司(株前川製作所)，岡本洋明(東京大学)
