

# 微燃性冷媒リスク評価研究会

平成 26 年度 プログレスレポート

平成 27 年 6 月

公益社団法人 日本冷凍空調学会

## 免責事項

本プロGRESSレポート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、本プロGRESSレポートに掲載された情報・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。

# 目 次

概要	1
1. はじめに	15
1.1 冷媒規制の動向	15
1.2 微燃性冷媒の安全研究の動向	18
2. 燃焼特性	20
2.1 はじめに	20
2.2 可燃範囲への湿度影響	23
2.2.1 実験室レベルの湿度変化の影響	
2.2.2 不燃性冷媒の高温・高湿度における挙動	
2.2.3 可燃性冷媒の高温・高湿度における挙動	
2.2.4 断熱火炎温度について	
2.3 燃焼速度	27
2.4 最小着火エネルギー，消炎距離	30
2.4.1 消炎距離の測定	
2.4.2 最小着火エネルギーの推算	
2.4.3 実用上の着火エネルギーとの比較	
2.5 消炎直径	34
2.6 低温温室効果冷媒の熱分解生成物分析	36
2.6.1 はじめに	
2.6.2 実験方法および結果	
2.6.3 低温温室効果冷媒の熱分解生成物分析のまとめ	
3. 事故シナリオに基づく安全性評価	42
3.1 はじめに	42
3.2 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価（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）	43
3.2.1 概要	
3.2.2 実験	
3.2.3 結果及び考察	
3.3 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価（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）	45
3.3.1 概要	
3.3.2 圧電ガスライター及び予混合ターボ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 冷媒の着火可能性結果及び考察	
3.4 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価（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）	50

3.4.1	概要	
3.4.2	実験	
3.4.3	結果及び考察	
3.5	A2L 冷媒のフィジカルハザード評価（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）	55
3.5.1	概要	
3.5.2	実験	
3.5.3	結果及び考察	
3.6	A2L 冷媒のフィジカルハザード評価（取扱シチュエーション#2-(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）	58
3.6.1	概要	
3.6.2	実験装置と実験方法	
3.6.3	実験結果	
3.7	まとめ	65
3.7.1	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	
3.7.2	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	
3.7.3	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	
3.7.4	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	
3.7.5	取扱シチュエーション#2-(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	
4.	危険度評価	68
4.1	はじめに	68
4.2	燃焼試験	68
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	73
4.3.1	K <sub>G</sub> 値	
4.3.2	燃焼特性の整理と他媒体との比較	
4.3.3	K <sub>G</sub> をもとにした緩和圧力評価	
4.4	まとめ	77
5.	リスク評価手法について	79
5.1	はじめに	79
5.2	リスクアセスメントの概要	79
5.3	エアコン各機器とそのリスク評価状況	81
5.4	家庭用エアコンでのリスク評価手法	82
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	可燃空間時空積の計算	
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	ビルマルチとパッケージエアコンでのリスク評価手法の差異	89
5.6	チラーでのリスク評価手法の差異	91
5.7	FMEA とその他のハザード	92
5.8	リスク評価手法のまとめ	92
6.	ミニスプリットエアコンのリスク評価	94
6.1	はじめに	94
6.2	冷媒リークシュミレーション	94
6.3	着火源評価	95
6.4	リスクアセスメントの事故発生確率(許容値)	95
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)	95
6.6	FTA 結果の整理	95
6.7	ディーゼル爆発と燃焼生成物の発生確率	96
6.8	ハウジングエアコンのリスクアセスメントと結果	96
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 畳設置を考慮したシングル床置きエアコンの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	99
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	103
6.11	ハウジングエアコンのリスク評価のまとめ	104
6.12	まとめ	104
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	105
7.1	はじめに	105
7.1.1	スプリットエアコンのリスク評価進捗	
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	108
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	111
7.3.1	着火源の設定	
7.3.2	着火源存在確率	
7.4	FTA	113
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	114
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	119
7.7	まとめ	120
8.	ビル用マルチエアコンリスクアセスメントの進捗	121
8.1	はじめに	121
8.2	微燃性冷媒を用いたビル用マルチエアコンの課題	121
8.3	リスクの特定	121
8.4	リスクアセスメントの準備	122
8.4.1	許容レベルの設定	
8.4.2	冷媒漏洩速度別の漏洩件数発生確率	
8.4.3	ヒューマンエラー発生確率	
8.4.4	着火源の評価	
8.4.5	着火事故発生確率の計算方法	
8.4.6	室内モデルの設定および解析内容	
8.4.7	室外モデルの設定	
8.5	リスクアセスメントの結果と安全対策	129
8.5.1	輸送保管（製品）時	
8.5.2	据付時	
8.5.3	使用時（室内）	
8.5.4	床置機の安全対策の検討	
8.5.5	使用時（室外）	
8.5.6	室外機の安全対策について	
8.5.7	修理時	
8.5.8	廃棄時	

8.6	リスクアセスメントのまとめ	136
8.6.1	室内使用時の着火事故発生確率	
8.6.2	室外使用時の着火事故発生確率	
8.6.3	作業時の着火事故発生確率	
8.6.4	市場での着火事故発生確率	
8.7	安全要件のまとめ	138
8.7.1	高圧ガス保安法による規制	
8.7.2	室内機本体機能としての安全対策	
8.7.3	安全かつ市場化可能な規制の在り方	
8.8	全体まとめと今後の課題	139
9.	チラーリスクアセスメントの進捗	141
9.1	はじめに	141
9.2	リスクアセスメント実施の前提	141
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での標準機器仕様	
9.2.4	ライフステージ (LS) の定義	
9.2.5	FTA の基本構成	
9.2.6	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	冷媒漏洩時の可燃空間解析	145
9.3.1	解析モデル	
9.3.2	冷媒の可燃範囲, 漏洩量の定義	
9.3.3	解析条件	
9.3.4	解析結果	
9.4	着火確率	150
9.4.1	機械室での着火源	
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	
9.5	冷媒漏洩発生頻度	152
9.6	リスクの算定	152
9.6.1	リスクアセスメントリスト	
9.6.2	火災の事故確率	
9.6.3	安全を担保するための技術的な要求事項	
9.7	冷媒リークシミュレーション	154
9.7.1	計算方法	
9.7.2	シミュレーション結果および考察	
9.8	まとめ	159

10. 将来冷媒候補の熱物性とサイクル特性	161
10.1 はじめに	161
10.2 熱力学的性質の測定と状態方程式の作成	161
10.2.1 R1243zfの熱力学的性質の測定	
10.2.2 R1243zfの状態方程式の作成	
10.2.3 低GWP冷媒の表面張力の測定	
10.3 輸送的性質の測定と推算式の作成	169
10.3.1 R1234ze(Z)の熱伝導率の測定	
10.3.2 R1234ze(Z)の粘度の測定	
10.4 サイクル性能の評価試験	175
10.4.1 試験装置および方法	
10.4.2 試験結果	
10.5 まとめ	178
おわりに	180
執筆者一覧	181



# 概 要

## 1. はじめに

### 1.1 冷媒規制の動向

欧州では、カーエアコン用冷媒に関する指令 2006/40/EC により、2011 年 1 月 1 日から GWP が 150 を超える冷媒を有する新型車の発売は禁止され、2017 年 1 月 1 日からはすべての新車にその冷媒を用いることを禁止される。また、欧州における定置用冷凍空調機器に対する規制は、F-gas（フッ素化ガス）規制 Regulation (EC) No 842/2006 と呼ばれている。当初の規制は、冷凍空調機器からの冷媒漏洩を削減することに重点が置かれており、適切な機器管理、作業者の研修、F-gas を使用している機器のラベリング、F-gas を生産・輸入・輸出している業者の報告義務を課したものであった。欧州連合は 2015 年 1 月には、2030 年までに F-gas の漏えいを現状の 2/3 のレベルにまで減らすこと、環境に優しい冷媒が開発された分野では F-gas を使用する機器の販売を禁止することを目指して、修正を行った。それを実現するために、欧州で販売される HFC の年間総量（各冷媒の販売量を GWP を掛けて総和をとった等価 CO<sub>2</sub> 量）を 2015 年から削減を初めて、2030 年には現状の 1/5 にまで削減するスケジュールが策定されている。欧州の規制は冷媒販売者（生産者および輸入者）に対して冷媒販売の割当てを行うもので、割当てを受けない者は販売できない。2017 年 1 月以降は欧州域外で冷媒をプリチャージした製品を輸出販売する機器メーカーは、冷媒販売の割当てを獲得する必要がある。

わが国においては、「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 2013 年 6 月国会で成立し、2015 年 4 月に施行された。フロン排出抑制法では、(1)フロンメーカーには、温室効果のより低いフロン類の技術開発・製造や、一定の使用済フロン類の再生といった取組を通じ、環境負荷の低減が求められている。(2)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目標の達成が求められている。(3)業務用冷凍空調機器使用者には、フロン類の漏えい防止のための適切な設置、点検、故障時の迅速な修理等の適切な管理に取組むことが求められている。(4)回収・破壊業者には、業務用冷凍空調機器に使用されるフロン類の充填業の登録制、再生業の許可制が導入される。以上、それぞれの立場で、HFC 類の転換、冷媒管理、冷媒回収を進め、HFC 類の大气漏えい量を削減することが求められている。

### 1.2 微燃性冷媒の安全研究の動向

冷凍空調技術の発展のためには、ルームエアコンやパッケージエアコン用冷媒の新規開発が急務である。候補として考えられている R1234yf 混合冷媒や R1234ze 混合冷媒を業務用冷凍空調機器に適用した時の性能の評価法が確立されておらず、従来冷媒との性能比較に関する情報がなく、研究開発を阻害している。また、これら低 GWP 冷媒は微燃性を有しており、実用化のためには燃焼性に関する基礎データの集積と安全性の評価を行うことが不可欠である。基礎的な物性情報、サイクル性能情報、LCCP 情報、燃焼性情報、リスク情報を整備することにより、適切な冷媒選択を容易にし、その実用化を加速することができる。こうした取り組みは、わが国の冷凍空調産業が世界における主導的な地位を維持することに貢献することが期待される。

ASHRAE34 の 2L ランクの新設は、燃焼性の強さによって取扱いの制約を変え、燃焼性が弱い冷媒の使用の途を拓くものである。しかし、わが国の高圧ガス保安法や冷凍保安規則には不燃と可燃の分類しかないなど、燃焼性の弱い冷媒の取り扱いについての考慮が少ない。微燃性冷媒のリスク評価を実施するための基礎的なデータを整備することを目的として、2011 年から始まった 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ている。

これら研究成果を利用して一般社団法人日本冷凍空調工業会（以下、日冷工）の中で微燃性冷媒のリスク評価を行っていただき、そのリスク評価の適正さを第三者の立場から検討することを目的として、公益社団法人日本冷凍空調学会の下に微燃性冷媒のリスク評価を検討する研究会が設置された。日冷工や一般社団法人日本自動車工業会が具体的なリスク評価を行っている。本報告書は、微燃性冷媒のリスク評価研究会の 2014 年度の活動をまとめたものである。この成果が関係分野の方々のお役にたてば幸いである。

## 2. 燃焼特性

燃焼性を有する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。

その目的を達成するには、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（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を考慮する必要がある、それらを適切に表現する指標を整備する必要がある。

本章では、微燃性冷媒を中心に代表的な基礎燃焼特性について進捗を報告する。

微燃性及び不燃性冷媒を対象に可燃範囲（燃焼限界）について測定を行い、湿度の影響について数式化した。R1234yf と R1234ze(E)について、湿度によって可燃範囲が顕著に広がることを明らかにした。一方、フッ素原子数が水素原子数よりも多くない冷媒分子については、湿度により燃焼範囲が広がることは無かった。

更に、通常不燃性とされる R410A, R410B, R134a, R125 等の化合物が、60℃で相対湿度 50%迄の条件でどのような燃焼性を示すか調べた。その結果、R410A は湿度 19%以上になると可燃、R410B は 25%以上で可燃、R134a は 38%以上で可燃になることが分かった。それに対して R125 は 50%までの湿度条件で不燃のままであった。比較のために、60℃で相対湿度 50%の条件で可燃性ガスがどのような影響を受けるか調べたところ、R1234yf, R1234ze(E)ではさらに燃焼範囲が広がったが、R32, R143a, R152a, NH<sub>3</sub> 等では逆に燃焼範囲は狭まることが分かった。後者においては、水蒸気は単に不燃性の希釈ガスとして働いているのみであると考えられる。

微燃性冷媒の燃焼速度測定では、R1234ze(Z)について微小重力環境を用いて測定し、また、R32 と 3 種類の R1234 の混合系の燃焼速度測定を行った。更に酸素濃度比を高めた空気を用いて燃焼速度の測定を行い、3 種類の R1234 の比較を行った。その結果、R1234ze(Z)は R1234yf よりも燃焼速度が低く、R1234ze(E)とほぼ同じ燃焼速度であることを明らかにした。

化合物が実用環境で燃焼に至るかどうか判断するには、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、強燃性から微燃性までの冷媒の着火エネルギーと消炎距離について評価をし、冷媒濃度依存性や R1234yf の追加測定を新たに反映させた結果を報告した。微燃性冷媒の最小着火エネルギーはプロパンに比べ 1 桁以上大きく、消炎距離は 3 倍以上大きいことを明らかにした。既往の研究と比較した結果、既往の研究のうち大きな最小着火エネルギーを報告しているものは、火炎が電極による冷却を受けている可能性があることを明らかにした。

本プロジェクトでは、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。今回は消炎直径について新たな測定データを加え、火炎の成長度合いとの関係について考察を加えた。

冷媒の熱分解について、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。また、湿度の有無による熱分解挙動の変化、インコネルと SUS の材質の違いによる熱分解挙動の差異について報告した。

## 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、オゾン層破壊係数がゼロでかつ地球温暖化係数の小さい冷媒の開発と実用化が、世界的に求められている。これを満たす代替候補冷媒は、わずかではあるが可燃性を有するため、実用化に向けては、実際の冷媒取扱シチュエーションを想定したリスク評価が必要となる。そこで、想定される冷媒取扱シチュエーションにおいて洗い出された事故シナリオについて、その危険性を実験的に評価した。

### 3.2 取扱シチュエーションごとのフィジカルハザード評価

#### 3.2.1 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、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。

#### 3.2.2 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

- A) 圧電ガスライターを使用した場合、簡易計算により燃焼範囲内と推測されたライター燃料／冷媒／空気組成で実際にライターを動作させたところ、いずれの実験ケースでも着火は認められず、滞留冷媒への火炎伝播も見られなかった。
- B) 予混合ターボライターの場合は、着火及び火炎伝播が認められるケースがあったが、火炎は数秒で消滅し、深刻な爆風圧や温度上昇は観測されなかった。
- C) 石油ライターの場合は、実際に火打石に発生する摩擦火花と同等のエネルギーにより、ライターに定常火炎が形成され、これにより周囲の冷媒へ火炎が伝播する現象が見られた。

#### 3.2.3 取扱シチュエーション#2-(b)：A2L 冷媒がピンホール等から噴出漏洩した場合

- A) 配管の破断を想定して 4 mmφ のピンホールから冷媒を蒸気圧で漏洩させたところ、燃焼範囲となるのは漏洩口から下流側 100 mm、鉛直上下方向に 50 mm 程度であり、実際の作業環境中で想定される着火源よりも過剰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なかった。

#### 3.2.4 取扱シチュエーション#2-(c)：A2L 冷媒がサービス・メンテナンス機器内に漏洩した場合

- A) 回収機等のサービス・メンテナンス用機器内で冷媒が漏洩した場合を想定した。回収機模型からの冷媒滞留を防止するための開口部（スリット）が取り付けられていない場合、冷媒は回収機模型内に滞留し、十分大きなエネルギーを持つ着火源があれば、着火して火炎伝播する現象が観察された。
- B) 実際の回収機内では、このようなエネルギーを持つスパークが発生する可能性は極めて小さい。また、適当なスリットにより、冷媒の滞留を極短時間に抑えられ、着火を防止できることが確認された。

#### 3.2.5 取扱シチュエーション#2-(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

ポンプダウン時の空気混入を想定した。ポンプダウン時の爆発事故は、潤滑油の自己着火により発生していることが明らかになった。この際冷媒自体も燃焼し、激しい圧力上昇とフッ化水素の発生を引き起こしていた。A2L 冷媒と既存の A1 冷媒を比較した結果、燃焼濃度範囲、規模ともに大きな違いは見られなかった。

## 4. 危険度評価

微燃性を有する R32 や R1234yf, R1234ze(E) などが冷媒として利用される場合、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・爆発影響などの危険度評価を行う必要が有る。微燃性冷媒の基礎的な燃焼特性の評価として R32 や R1234yf をはじめとする冷媒について大容量の球形燃焼容器を用いた燃焼特性実験を行い、安全性評価を行った。浮力による火炎面の浮き上がり効果や水分の存在が燃焼特性に与える影響を

考慮して火炎速度，燃焼速度，爆発強度指数  $K_L$  値などの燃焼特性を評価した。得られた燃焼特性を評価して他媒体との比較を行った。 $K_L$  値をもとにした緩和圧力評価を実施した。

R32やR1234yf, R1234ze(E)などの微燃性冷媒は 10cm/s以下の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る。燃焼試験では，これらの新規代替冷媒の安全利用の観点から，浮力の影響を考慮して基本的な燃焼特性を観測するため，大容量の球形燃焼容器を準備し，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，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 $K_L$ を評価した。本年度はさらに高温・多湿となる夏場を想定し，評価対象にR1234ze(E)を加えて昇温・湿潤環境下での燃焼特性の評価や，着火時の燃焼挙動について評価を進め，またこれら実験室規模での燃焼試験をもとに評価される $K_L$ 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を進めた。

爆発強度指数 $K_L$ 値は爆発の激しさを示す指標で，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。爆発強度評価では， $K_L$ 値をもとに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を明らかにすることで，実規模での爆発強度影響を評価することを検討した。さらに $K_L$ 値を中心に燃焼特性を整理して他媒体と比較を行い，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)や爆轟範囲についてまとめた。燃焼特性値に近いアンモニアに注目して同一条件での比較を念頭に評価を進めていく予定である。

$K_L$ をもとにした緩和圧力評価では，A2L/2L冷媒を安全に空調機器に適用するため，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 $K_L$ 値によるベント設計の概念を用いて検討した。例えば，一般的な部屋で隙間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。一般的に $K_L$ 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が，一般の室内でドア下の隙間などで想定される開口形状は $L/D$ が2を大きく超えるため実験的に有効なベント面積 $A_v$ を評価した。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，一定量の冷媒を10g/min程度の速さで漏洩させ，濃度計測を行った。冷媒の漏えいは予混合状態とし，容器内床面から15cmの高さで冷媒濃度を計測した。ベント形状は丸形状の他に正方形，そして縦方向，横方向に $L/D$ を変えながら着火させて圧力・温度変化などを計測した。特にベント面積と長方形の形状比 $L/D$ による圧力変化への影響に注目して整理し，爆発強度の低減効果を評価していく予定である。また鉛直方向に濃度勾配をもった場合において空間占有割合の考え方や濃度勾配を形成した上で実験的に $K_L$ 値を計測するなどして放散圧力の低減効果を評価する予定である。

## 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評価手法について，日冷工のワーキングで R32 や R1234yf 等を対象に燃焼性に関して推進した内容をもとに説明した。図 1 の IEC の Guide51 の評価プロセスに燃焼性で検討した項目を追記する形で示した。また実際に着火確率を求める過程では，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。さらにリスクマップ(R-Map)の考え方を参照している。リスク評価の対象機器の範囲の設定については，当初はミニスプリットエアコン(家庭用エアコン)，ビルマルチエアコン，チラーの区分とした。

## 5.2 リスク評価手法

リスク評価手法を具体的に実施し、リスク見積もりを行うためには以下の項目を設定し明確にしなければならない。リスクアセスメントの許容値の項目としては、独立行政法人製品評価技術基盤機構（以下、NITE）の資料から家庭用エアコンやビルマルチエアコンでは、「100年に1回の致命的事故が発生しても安全と見なす」との仮定を採用した。一方、チラーは産業用途に近い設備なので「10年に1回」を採用している。

以下、家庭用エアコンでは漏洩条件の設定の項目としては IEC60335-2-24 の4分間全量漏洩、可燃となる空間体積の項目は7m<sup>2</sup>の最小室内空間、可燃空間時空積は東大でのCFD計算からの項目を反映し、着火源は裸火、ヒューマンエラーの発生確率は10<sup>-3</sup>などリスク見積もりに必要な基礎項目を整理したのち、FTAを作成し着火確率を求めた。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終了する。許容値以上の場合には、2つの方向で見直しを行う。一つはリスク低減を具体的な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を見出し、その仮定された事象の数字の精度を上げることでリスク値が下げられないか検討することである。いずれにしてもこの見直し試行のループをFTAで繰り返し許容値以下となるまで実施する。その評価手法の手順や背景となる考え方を簡単に記述してある。またビルマルチエアコン、パッケージエアコンやチラーについても家庭用エアコンとの差異を記述した。

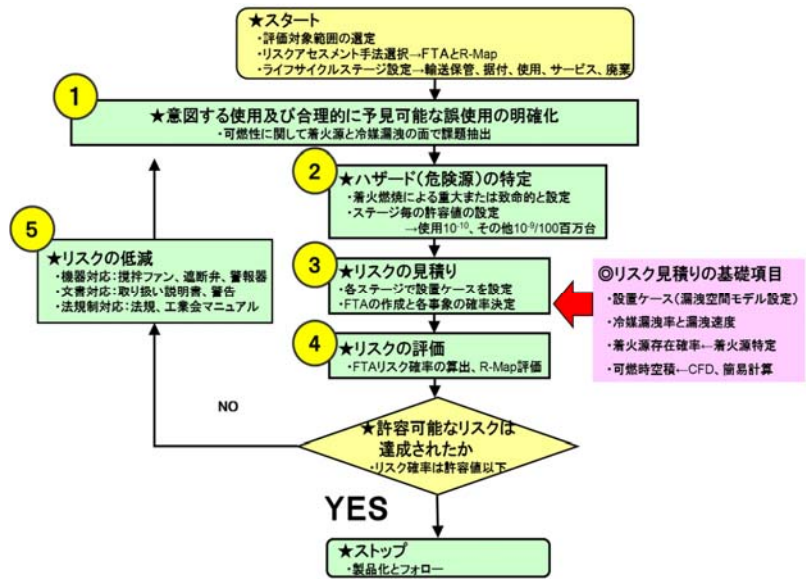


図1 IECのGuide51とリスク評価手法

以下、家庭用エアコンでは漏洩条件の設定の項目としては IEC60335-2-24 の4分間全量漏洩、可燃となる空間体積の項目は7m<sup>2</sup>の最小室内空間、可燃空間時空積は東大でのCFD計算からの項目を反映し、着火源は裸火、ヒューマンエラーの発生確率は10<sup>-3</sup>などリスク見積もりに必要な基礎項目を整理したのち、FTAを作成し着火確率を求めた。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終了する。許容値以上の場合には、2つの方向で見直しを行う。一つはリスク低減を具体的な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を見出し、その仮定された事象の数字の精度を上げることでリスク値が下げられないか検討することである。いずれにしてもこの見直し試行のループをFTAで繰り返し許容値以下となるまで実施する。その評価手法の手順や背景となる考え方を簡単に記述してある。またビルマルチエアコン、パッケージエアコンやチラーについても家庭用エアコンとの差異を記述した。

## 5.3 リスク評価手法のまとめ

東京大学や諏訪東京理科大、産業総合研究所化学部門などの協力により日冷工のミニスプリットSWG（I）で進めてきたリスクアセスメントを中心に、リスク評価手法として示している。一般論的である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のか、別置き拡散ファンや排気装置で冷媒濃度を下げるのか、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。また設置工事時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。リスク評価手法はこのような具体的対応を考えながら、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ることで、実効性を有することとなる。

## 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）のリスク評価は対象製品の全てで評価を終了し、今回のプログレスレポートでの報告を最後とする予定である。家庭用エアコンの燃焼性のハザードに対するリスク評価については、冷媒リークシミュレーション、着火源評価、FTA の評価などから着火確率が許容度以下になるようにリスク低減を図ってきた。以下、今回のプロジェクトのリスク評価で得られた壁掛けエアコンの冷媒差による FTA 結果、家庭用エアコンでリスクが高い 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 結果について簡単に概括する。

## 6.2 リスクアセスメントの手法

リスクアセスメント結果の事故発生確率（許容値）については NITE の資料から、国内の家庭用エアコン（小型ミニスプリットエアコン含む）の総台数 1 億台をベースに、使用時の目標を  $10^{-10}$  台/年以下とした。同様に床置きエアコンでは総台数が 1 桁小さいことから  $10^{-9}$  が使用時の目標となる。なお使用時以外のステップでは職業人としての義務感などで許容度が大きくなると考え、許容値は使用時の 10 倍程度大きくなっても受容されるとした。

リスクアセスメントの検討は、室内漏洩空間を床面積  $7\text{m}^2$ 、高さ 2.4m の小部屋とし東京大学で行われた冷媒リークシミュレーションの結果や「プロパン使用ルームエアコンのリスクアセスメント」で試行した可燃域の存在などから、可燃時空積を求めた。また着火源については諏訪東京理科大、産業技術総合研究所、DOE/CE/23810-92 報告書などを参照し、日本の家庭内にある低電圧の電気機器や電子式ライター、喫煙中の煙草、人間に起因する静電気は、ほとんど着火しないと判断し、裸火を着火源と仮定した。その他、漏洩条件の設定やヒューマンエラーの発生確率などを調査しそれら結果を FTA に作成し着火確率を求めた。

## 6.3 家庭用エアコンのリスクアセスメントの結果

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 1 に示す。1 対 1 接続の通常壁掛けエアコンの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 R32, R1234yf とともに使用時でほぼ  $10^{-10}$ 、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検討は行わなかった。

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点に注意が必要である。また表 1 は昨年からのプログレスレポートから少し値を見直している。

表 1 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	$4.1 \times 10^{-17}$	$4.5 \times 10^{-17}$	$9.7 \times 10^{-16} \sim 1.2 \times 10^{-12}$
据付け	$2.7 \times 10^{-10}$	$3.1 \times 10^{-10}$	$3.7 \times 10^{-9} \sim 2.2 \times 10^{-8}$
使用（室内）	$3.9 \times 10^{-15}$	$4.3 \times 10^{-15}$	$5.0 \times 10^{-13} \sim 9.5 \times 10^{-9}$
（室外）	$1.5 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-10}$	$4.9 \times 10^{-13} \sim 9.3 \times 10^{-9}$
サービス	$3.2 \times 10^{-10}$	$3.6 \times 10^{-10}$	$2.8 \times 10^{-7} \sim 8.1 \times 10^{-7}$
廃棄	$3.6 \times 10^{-11}$	$5.3 \times 10^{-11}$	$4.1 \times 10^{-7} \sim 5.1 \times 10^{-7}$

シングル床置き形ハウジングエアコン、マルチ床置き形ハウジング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

中心とした部屋の開き戸や引き戸の隙間調査を行い、より使用実態に近いリスクアセスメントを実施した。表 2 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が実施された結果値として示す。

表 2 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	$4.1 \times 10^{-17}$	$3.6 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-9}$
据付け	$2.7 \times 10^{-10}$	$4.0 \times 10^{-11}$	$9.0 \times 10^{-9}$
使用（室内）	$3.9 \times 10^{-15}$	$4.1 \times 10^{-10}$	$4.7 \times 10^{-10}$
（室外）	$1.5 \times 10^{-10}$	$8.6 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-9}$
サービス	$3.2 \times 10^{-10}$	$2.6 \times 10^{-10}$	$4.3 \times 10^{-9}$
廃棄	$3.6 \times 10^{-11}$	$2.5 \times 10^{-11}$	$4.1 \times 10^{-10}$

ミニスプリットエアコンの一形態であるハウジングエアコンの床置きの使用時の許容度は  $10^{-9}$  であり、それ以外の物流、据付けなどの許容度は  $10^{-8}$  なので、ほぼ許容度を満足する数字となっている。

#### 6.4 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 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、設置空間の制限や漏洩検知後の室内機ファンによる拡散などの対策を講じ、住宅の開き戸や引き戸の隙間の実態を考慮す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」（日冷工内部資料）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研究機関での可燃域や着火源の検討結果から 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。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。

### 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

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、先行するミニスプリットエアコンとビル用マルチエアコンの評価を参考に、それらのシステムとの相違点を明確にして、同様の手法で実施した。まず、指標となる許容されるリスクレベルは、市場で 100 年に一度重大事故が発生するレベル以下とした。微燃性冷媒の着火時の危害度評価については、まだ研究中のため、全ての事故を重大事故として扱った。着火事故発生確率は、冷媒漏洩発生確率と、冷媒リークシミュレーションから求まる可燃空間発生確率と、その空間内の着火源存在確率を掛け合わせて求めた。各ライフステージ（輸送保管、据付、使用、修理、廃棄）毎に、想定されるリスクモデルを 3 段階にわけて設定し、リスクシナリオに応じた FTA より着火事故確率を算出した。

第一次では、代表的な設置モデルとして、現地追加冷媒充填しない冷房定格能力 14.0 kW 以下の室内事務所天井設置、室外地上設置、中型倉庫保管を選定した。

第二次では、室内床置き設置を除く 14.0kW以下のシステムで、比較的风险が高くなると思われるモデルを選定した。室内外接続配管長及び冷媒量は最大とした。室内条件は、着火源存在確率の高い厨房、密閉度の高いカラオケルームを、室外条件は、各階設置、半地下設置、狭小設置を選定した。輸送保管についても、狭小倉庫、ワゴン車輸送を追加した。

第三次では、室内床置き設置も含み 30.0kW以下の全ての店舗用PACを対象にリスクの高くなるモデルを選定した。室内条件は、漏洩冷媒が高濃度で滞留し易い床置き設置、室内空間に対する冷媒充填量の高い氷蓄熱システムを追加した。

一般的に使用される代表モデルである第一次リスクアセスメント結果では、着火事故発生確率は許容されるレベル以下となり、安全対策は不要となった。第二次、第三次の一部のシビアモデルでは、安全対策が必要となった。

室外条件では、半地下設置、狭小設置の作業時及び使用時にリスクが高くなった。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、着火源存在確率と可燃空間発生確率の支配的なリスク要因となる、「ボイラー近傍への室外機設置禁止」、および「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」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の通路開口を確保」すれば許容レベル以下となることがわかった。

室内条件では、床置き設置が、前述した室外条件同様、漏洩した冷媒が高濃度で滞留しやすく安全対策が必要となった。作業時は、室外条件同様、「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。使用時は、「冷媒漏洩時の機器の強制送風攪拌運転」が有効であった。

上記の安全対策は、微燃性冷媒を使用する店舗用パッケージエアコンの施行マニュアル等で情報発信していく予定である。今回は、R32冷媒で評価を実施したが、その他の微燃性冷媒についても、湿度影響等も考慮した燃焼特性が明らかになれば評価に加える予定である。また、微燃性冷媒着火時の危害度評価についても最新の研究内容を本リスクアセスメントに加え、より実用的で汎用性のあるものに改善していく予定である。

## 8. ビル用マルチエアコンのリスク評価

### 8.1 はじめに

本リスクアセスメントの目的は、地球温暖化影響の低い微燃性冷媒を使用したビル用マルチのリスクを適正に評価し、その結果に基づき市場にて十分に安全を確保できる安全基準を策定することである。温暖化影響の削減を実現するためには、これらの安全基準を満たした商品が市場にとって受け入れ可能なものでなければならず、過度な規制を避け、実現可能な安全基準作りを進めなければならない。商品化と両立可能な安全規制を提案するために、市場実態に近い設置ケースも含む市場全体における着火事故確率の推定を行い、確率を許容値以下に低減するための安全のための基準を提案した。リスクアセスメントは、冷媒として R32 を用いたとして進めた。

### 8.2 リスクアセスメントの結果

最初に、輸送・保管、据付、使用、修理、廃棄の各ライフステージに、リスクの大きい可能性の有る設置ケースを特定した。次に、特定した設置ケース毎にFTAを作成し、着火事故確率を求めた。その際には、現行冷媒である R410A を R32 に置き換える以外には特別の対策を施さない場合を想定し、未対策での着火事故確率



値とした。その値が、設定した許容値を超える場合には、安全対策の実施が必要とした。着火事故の発生が100年に1回以下であれば、社会的に許容され得ると考え、その頻度に相当する着火事故確率値を許容値とした。

表3、表4に、室内使用時、および、室外使用時の着火事故確率を示した。表中の縦方向には、想定した各設置ケースを列挙した。横方向には、設置場所、ユニット型式、各設置ケースの市場における構成比、着火事故確率の許容値、を示した。また、未対策時の着火事故確率として、機械換気無しの場合と建築基準法準拠の機械換気量がある場合の値を示した。また、機械換気無しの値が許容値を超えている場合には、安全対策を実施した場合のそれぞれの着火事故確率を示した。許容値を超えた場合は、白抜きで表している。各表の最下欄には、各設置ケースでの事故確率に市場構成比を乗じて積算することで、市場全体での事故確率を求めた。

室内使用時においては、天井裏以外の設置ケースでは、機械換気無し場合の着火事故確率は許容値以上となり、安全対策が必要となった。特に構成比の大きな事務所では、夜間に換気が停止するケースにおいて、喫煙用の石油ライターが着火源となり、事故確率が許容値以上となった。

室外使用時においては、半地下や機械室において、着火事故確率が許容値を超えるため、機械換気や室外機ファンによる攪拌などの安全対策の実施が必要である。

表5に、輸送・保管、据付、修理、廃棄などの作業ステージにおける着火事故確率を示した。半地下や機械室においては、ロウ付けバーナが着火源となる着火事故の確率が許容値を超えた。対策としては、作業中に漏洩検知器により漏洩チェックが必要となる。床置機が設置されている飲食店では、修理作業中には十分な機械換気が必要である。

### 8.3 着火事故確率の分析

表3. 室内使用時の着火事故確率まとめ

各設置における着火事故確率 (件/台・年)					非許容域			許容域			
設置ケース					各設置ケース事故確率 A						
					未対策時			対策時			
設置場所	型式	構成比 P	許容値		機械換気無し	建築基準法換気有		機械換気無し	建築基準法換気有		
室内	カラオケ	天井	2.1E-03	1.0E-09	1.8E-07	4.4E-11	0.0E+00				
	飲食店	床置	2.0E-02		3.8E-07	5.4E-09 <sup>*1)</sup>	2.6E-10 <sup>*2)</sup>				
	美容室 パーラー	天井	1.6E-03		1.3E-09	1.2E-10	6.8E-12				
	焼肉店	天井	7.8E-04		2.8E-09	4.4E-10	1.5E-11				
	天井裏	天井	1.0E00		3.0E-10	-	3.0E-11				
夜間に換気停止した場合											
設置ケース					各設置ケース事故確率 A						
					未対策時			対策時			
設置場所	型式	構成比 P	許容値		機械換気無し	建築基準法換気有		機械換気無し	建築基準法換気有		
室内	事務所	天井	3.8E-01	1.0E-09	7.6E-09 <sup>*3)</sup>	3.5E-12	3.5E-12				
市場での予測											
室内計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A					4.0E-01	1.0E-09	1.1E-08	1.1E-10	3.7E-11		

\*1) 天井裏での給排気量を想定、冷媒は揮発せず床面に滞留し可燃域発生。  
 \*2) 排気開口を床面近側に設けた機械換気や、漏洩検知時のファンによる換排を行えば許容域になる。  
 \*3) 18:00～翌日09:00のみ換気停止。残業者による喫煙や、給湯機の消し忘れを着火源として想定。

表4. 室外使用時の着火事故確率まとめ

各設置ケースでの着火事故確率 (件/台・年)					非許容域			許容域			
設置ケース					各設置ケース事故確率 A						
					未対策時			対策時			
設置場所	型式	構成比 P	許容値		機械換気無し	建築基準法換気有		機械換気無し	建築基準法換気有		
室外	地上	-	9.4E-01	4.0E-09	1.9E-11	-	-				
	各階	-	5.0E-02		3.0E-09	-	-				
	半地下	-	1.0E-04		1.1E-07	-	2.5E-13 <sup>*1)</sup>				
	機械室	-	6.0E-03		6.1E-08	-	3.2E-09 <sup>*2)</sup>				
市場における予測											
室内計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A					1.0E+00	4.0E-09	5.4E-10	-	1.9E-11		

\*1) 吸引が外にて機械換気。  
 \*2) 2回/h<sup>2</sup>系統の機械換気。

表5. 作業時の着火事故確率まとめ

各設置ケースにおける着火事故確率 (件/台・年)					非許容域						許容域					
設置ケース					各設置ケース事故確率 A											
					据付				修理				廃棄			
					未対策		対策		未対策		対策		未対策		対策	
設置場所	型式	構成比 P	許容値		未対策	対策	未対策	対策	未対策	対策	未対策	対策	未対策	対策		
室内	事務所	天井	3.8E-01	1.0E-08	1.9E-09	-	8.7E-11	8.8E-12	2.9E-14	2.9E-15						
	飲食店	床置	2.0E-02		1.9E-09	-	1.2E-08	3.9E-11	3.4E-12	3.4E-13						
	カラオケ	天井	2.1E-03		-	-	-	-	-	-						
室外	地上	-	9.4E-01	1.0E-08	1.9E-09	-	1.4E-09	1.4E-10	2.4E-10	3.2E-11						
	各階	-	5.0E-02		1.9E-09	-	3.1E-09	3.1E-09	1.0E-09	1.4E-10						
	半地下	-	1.0E-04		1.1E-08	1.9E-09	3.6E-07	2.1E-09	3.3E-08	4.8E-10						
	機械室	-	6.0E-03		1.1E-08	2.1E-09	8.6E-07	5.4E-09	2.2E-08	3.3E-10						
市場における予測																
室内作業計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A					4.0E-01	1.0E-08	1.0E-09		4.1E-12							
室外作業計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A					1.0E+00	1.0E-08	9.0E-09		3.7E-10							

図 2 に、家庭用エアコンで R32, R290 を冷媒とした場合とビル用マルチエアコンで R32 を冷媒とした場合の室内使用時の着火事故確率を示した。縦軸は、着火事故確率を示し、冷媒が漏洩して可燃域が出来る確率と、可燃域が着火源と遭遇する確率とに分解して示した。R32 を用いた場合に比べて R290 を用いると、可燃域が着火源と遭遇する確率が高くなり、急速な冷媒漏洩が起きれば容易に着火事故が引き起こされることが判る。これは、R290 は燃焼下限濃度 (LFL) が低いために比較的小さな漏洩量でも大きな可燃域が生成することと、電源コンセントや照明スイッチなど室内に多くある電気部品や電子ライターが容易に着火源になり得ることによる。R32 を用いたビル用マルチでは、家庭用エアコンに比べると冷媒量が多いため、可燃域の大きさが大きく、かつ、長時間にわたって可燃域が存在し続けるため、着火源と遭遇する確率は大きくなる。

R290 家庭用エアコンと R32 ビル用マルチでは、着火事故確率を許容値以下にするために、安全対策が必要となる。R290 家庭用エアコンでは、確率を約 100 万分の 1 以下に低下するために、冷媒充填量規制、防爆処置、換気などの安全対策を確実に実施することが必要となる。そのためには厳格な法規制を始めとする手段が求められる。R32 ビル用マルチエアコンでは、確率を約 10 分の 1 にする安全対策が求められるが、必ずしも法規制に限らず、公的規格や業界基準なども含めた手段も選択肢に入る。安全対策としては、機械換気、漏洩検知と警報や冷媒遮断等が考えられるが、ユニット本体に安全機能を備えることで、事故確率が 1/10 以下になることが期待できる。

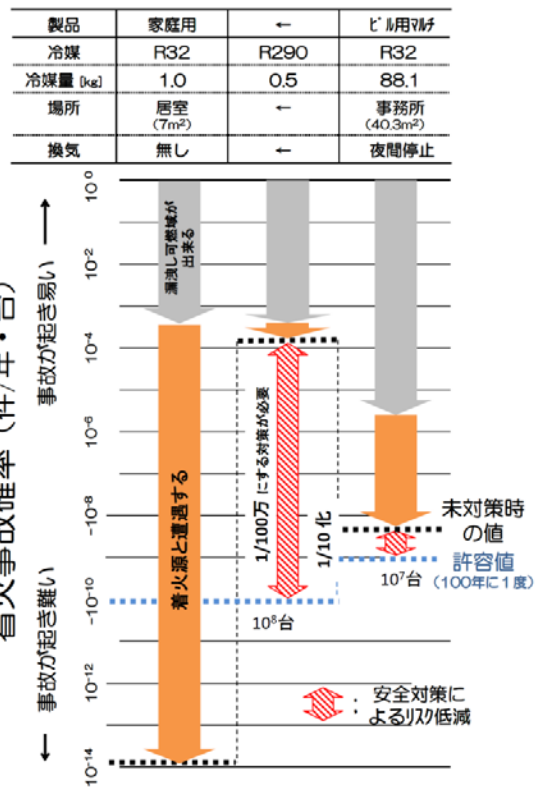


図 2. 家庭用とビル用マルチの使用時着火事故確率

## 8.4 まとめ

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いても着火事故の発生を100年に1回以下とするための安全対策を提案した。また、市場全体における使用時着火事故確率の推定を行い、本体機能としての安全対策により、着火事故の発生を100年に1回以下と出来ることを明らかにした。

今後は、これらの安全要件を技術基準としてまとめ、設置時の事前届出等の法規制に代わり得る本体機能としての安全対策を業界として確立していくことが望まれる。

## 9. チャラーのリスク評価

### 9.1 はじめに

冷温水を用いたセントラル空調用熱源機には、主に R410A や R134a の HFC 冷媒が用いられている。いずれも GWP が 1000 を超えるため地球温暖化への影響が懸念されており、より GWP の低い冷媒への代替が重要となってくる。ドロップイン、レトロフィットや性能評価などで報告され注目されているものは、R1234yf, R1234ze (E) と

R32 またはその混合冷媒であるが、これらの冷媒は微かな燃焼性を有する。これら冷媒をチラーに用いた場合の火災・火傷事故について、2011 年度よりリスクアセスメント（以下、RA）を実施している。対象機器は主にセントラル空調熱源として屋外設置する空冷ヒートポンプおよび機械室設置する水冷チラーで、冷凍能力範囲が約 7.5～17500kW の機器を対象とする。設置環境の特定できない移動式は除いた。本年は主に(a)東京大学とチラーSWG による冷媒漏洩解析結果や着火源および事象の見直しを反映した確率を用いたリスクの定量化、(b)抽出した対策・処置を盛り込んだ設計・施設における要求事項に基づく RA、(c)技術要求事項を展開するための日冷工ガイドライン（以下 GL）の原案作成を実施した。本論ではその進捗を報告する。

## 9.2 リスクアセスメントの手順

リスクアセスメントは基本リスクアセスメントフローに従い、下記手順により実施した。

- A) リスクアセスメント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。
- B) リスクを機器の出荷から廃棄までのライフステージ(以下、LS)ごとに分析。
- C) 着火源の存在、冷媒漏洩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、漏洩確率そして漏洩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する。それら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。
- D) リスクの高い事象は、頻度を低減させる安全対策を立案する。安全対策はガイドラインへ展開する。

## 9.3 リスクアセスメントリスト

東京大学とチラーSWG による冷媒漏洩解析結果や着火源および事象の見直しを反映した確率を用いたリスクの定量化の結果をもとに、現状の火傷・火災のリスクの算定では、噴出漏れ、急速漏れについて、可燃空間の時空積を算定し、その時間内のそれぞれの着火源がどの程度の確率で存在するかを算定した。6つの LS 毎に存在する着火源が異なることに注意して整理した。いくつか算定上の条件を設定している。

- A) 空調用熱源機を想定し据付台数を 4 台として隣接する機器の発停回数を考慮した。
- B) 機械換気はダクト用ファンの故障率  $2.5 \times 10^{-4}$  件/(年・台)を使用し、冷媒漏洩解析で換気によって可燃域はごく小さい範囲での生成に押さえられることが確認されたことから、2回/h×2系統で4回/hとする構成とした。
- C) 機械換気が存在しない確率を 1%、据付・廃棄の LS では工事中として 50%とした。
- D) LS のうち使用者が直接関わらない物流と廃棄は事故確率から除外したが数値は示した。
- E) 換気無しでは、漏れ頻度を可燃空間そのものの存在頻度とした。
- F) 換気のある微小漏れでは可燃空間が存在しないとして可燃空間の存在確率を 0 とした。
- G) 可燃空間の存在確率を可燃空間の時空積[m<sup>3</sup>・min]/対象空間[m<sup>3</sup>]×8760[H]×60[min]として定義する。空冷ヒートポンプの場合は防音壁で囲まれている領域を対象空間とした。
- H) 危険側の確率として床表面から可燃空間全体に、それぞれ想定される着火源が均等にあると仮定した。たとえば、人が使用するライター裸火は床面表面付近にも存在すると仮定している。
- I) 可燃空間の時間存在確率算出に用いる時空積は、使用される可能性のより高い冷媒を考慮して、水冷チラーでは R1234ze(E)、空冷ヒートポンプでは R32 での計算結果を用いた。

## 9.4 火災の事故確率

表 6 に各 LS における対策前後の事故発生確率を示す。対策前の値は換気が無い条件で、微燃性冷媒ガスが漏洩すると必ず可燃域ができて着火源の存在頻度で着火するとした火災事故確率である。噴出漏れ、急速漏れ、微小漏れの頻度が全て加算されており、使用者が直接関わる LS において実態より大きな数値  $1.32 \times 10^{-4}$  件/(台・

年)となっている。例えば狭小な換気の無い機械室の存在割合を 1%とすれば  $1.32 \times 10^6$  件/(台・年)となるが、これは許容できなる頻度でない。対策後の火災事故確率は、換気のある条件でチラー、機械室それぞれの標準モデルで生じる可燃空間との遭遇確率を考慮したものである。空冷ヒートポンプでは防音壁を標準としているので非常に厳しい条件となっているが、市場での使用者が直接関わる LS において事故発生確率が  $3.90 \times 10^{-12}$  件/(台・年)であり、「起こりえない」と評価できる。

表 6 事故発生確率

対象	LS	LS 比率	対策前 [件/(台・年)]		対策後 [件/(台・年)]	
			各 LS での確率	使用者が直接関わる LS での確率	各 LS での確率	使用者が直接関わる LS での確率
供給者	物流	0.0517	$4.28 \times 10^{-6}$	-	$1.51 \times 10^{-13}$	-
使用者	据付[搬入]	0.0517	$4.67 \times 10^{-6}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$2.40 \times 10^{-12}$	$3.90 \times 10^{-12}$
	据付[試運転]	(0.0023)				
	使用[機械室]	0.2144	$6.19 \times 10^{-5}$		$4.97 \times 10^{-13}$	
	使用[屋外]	0.5002				
	修理	0.1207	$6.52 \times 10^{-5}$		$1.00 \times 10^{-12}$	
オーバーホール	0.0098					
供給者	廃棄	0.0517	$1.72 \times 10^{-5}$	-	$9.23 \times 10^{-12}$	-

## 9.5 安全を担保するための技術的な要求事項

本リスクアセスメントで得た安全を担保すべき要件を示す。なお、これらの要件は KHKS0302-3、ISO5149-3(2014年)を参考にし、国内法規の要求事項との比較を元に検討した。

### (1)機械換気装置

- ・ 常時機械換気を備えること。換気量は機械室容積基準の機械室広さによって 2～4 回/h とし、2 系統で実現する。
- ・ 排気口は冷媒の滞留しやすい床面に近い位置に設置し、ダクトを通して直接外気へ排出する。
- ・ 換気装置は機械室外から操作可能とする。

### (2)冷媒検知器および漏洩警報装置

- ・ 冷媒の滞留しやすい位置にセンサー部を設けた冷媒検知器を 1 つ以上設置する。
- ・ 冷媒検知器および漏洩警報装置は、無停電電源 (UPS) 等の独立電源で動作するものであること。
- ・ 冷媒検知器は漏洩警報装置による警報機 (音および光) に連動し、機械室の外から確認できるものであること。

### (3)火気の持ち込み禁止

- ・ 裸火のある暖房機器、給湯機、コンロ等の機械室持ち込みは禁止する。
- ・ 禁煙、火気使用厳禁とする。

### (4)点検

- ・ 機械換気装置、冷媒検知器、漏洩警報装置と UPS 等の独立電源は、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、記録を保管すること。

### (5)保護装置

- ・ 機械室の機械換気装置および冷媒検知器の正常動作を冷凍機の起動インターロックとして構成する。

## 9.6 まとめ

チラーSWGのRAの結果、微燃性冷媒を使用した水冷チラー、空冷ヒートポンプでは漏れ事故確率と着火源の存在確率から、火災・火傷事故の発生頻度が十分低いことが確認された。また、適切な機械換気適切な機械換気（2～4回/h（2系統化））を備える機械室とすることで事故発生頻度は100年に一度よりも小さくなることが確認された。これまでのRAで明らかとなった安全担保の骨子は以下のとおりである。

- A) 適切な機械換気装置および換気量の確保
- B) 一つ以上の冷媒検知器および漏洩警報装置による漏洩監視
- C) 冷媒検知器と機械換気のチラーとのインターロック
- D) 冷媒検知器の独立電源化等による停電時の作動確保である。

また、これらの技術要求事項を展開するためのGLの原案作成を実施した。来年度は、GLの制定に向けた作業をよび総括を実施する予定である。

## 10. 将来冷媒候補の熱物性とサイクル特性

将来冷媒候補の熱物性やサイクル特性に関して、以下の研究開発課題に取り組んでいる。

- A) 熱物性およびサイクル性能がほとんど明らかにされていない低GWPの新規冷媒候補物質の安全性を含む化学的性質、熱力学的・輸送的性質、伝熱特性およびサイクル基本特性を明らかにする。
- B) R1234ze(Z)を含むHFO系冷媒、HFC系冷媒、自然冷媒などを組み合わせることによって得られる低GWP混合冷媒の中から業務用空調機器の冷媒として適した混合冷媒を探求・選定し、選定した混合冷媒の熱力学的・輸送的性質の測定、伝熱特性の測定およびサイクル性能の評価を行う。
- C) 低GWP混合冷媒を実用冷媒として使用する為の基盤技術を構築する。

2014年度は、R1243zfの熱物性測定、R1243zfの状態方程式の作成、HFO系冷媒の表面張力の測定、R1234ze(Z)の熱伝導率および粘度の測定、およびGWP値が300弱および200弱のR32/R1234ze(E)系2成分非共沸混合冷媒のサイクル性能試験を行い、以下の結果を得た。

- A) 臨界点測定用実験装置および等容法実験装置を用いて、R1243zfの飽和密度（気液共存曲線）、臨界点（臨界温度、臨界密度）、圧力と密度と温度の関係( $P$ - $\rho$ - $T$ 性質)および飽和蒸気圧を測定した。また、
- B) 飽和蒸気圧の計算式を作成した。
- C) 本研究によるR1243zfの熱力学的性質の測定データと既に論文等で公表されているR1243zfの熱物性値を用いて、ヘルムホルツ型状態方程式を開発するとともに、REFPROP用物質定義ファイル（FLDファイル）も合わせて作成した。
- D) 示差毛細管法を用いて、R1243zf、R1234ze(Z)およびR1233zd(E)の表面張力を測定し、それらの表面張力の推算式を作成した。
- E) 2線式非定常細線法を用いて、R1234ze(Z)の飽和液および過熱蒸気の熱伝導率を測定し、その結果が拡張状態対応原理モデルに基づく熱伝導率の推算式による予測値と良く一致することを確認した。
- F) タンデム型細線式粘度測定法を用いて、R1234ze(Z)の飽和液および過熱蒸気の粘度を測定し、その結果が拡張状態対応原理モデルに基づく粘度の推算式による予測値と良く一致することを確認した。
- G) GWP値が300弱および200弱のR32/R1234yf系2成分非共沸混合冷媒のサイクル性能試験を行い、得られた結果と既存冷媒R410AおよびR1234ze(E)とR32からなる2成分非共沸混合冷媒の結果との比較を行った。その結果、R32/R1234ze(E)系2成分非共沸混合冷媒とR32/R1234yf系2成分非共沸混合冷媒のCOPは、GWP値が同程度となる組成であれば、ほぼ同じとなることが分かった。また、GWPが300弱の場合、それらの混合冷媒のCOPはR410AのCOPよりも若干高いことを明らかにした。



# 1. はじめに

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、GWP 値の高い HFC 機が普及するにつれ、使用時の冷媒漏洩や廃棄機器から回収されない冷媒の大気漏洩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。2013 年の空調機器の国内出荷量はルームエアコンが 901 万台、業務用パッケージエアコンが 80 万台、カーエアコンが 500 万台、冷凍・冷蔵ショーケースが 29 万台で、これらが空調機械の主要な用途である。カーエアコンは R1234yf への転換、ルームエアコンは R32 への転換が図られることとなりそうであるが、ビル用マルチエアコンや冷凍ショーケース用冷媒の低 GWP 化の研究は、多くの課題を残している。

冷凍空調用機器に使用されている冷媒 (HFC) の GWP が高いことから、地球温暖化の防止のために、国内外で GWP の高い冷媒の規制の動きが活発化している。本稿では、欧米における温暖化防止のための HFC 冷媒規制の動向を解説するとともに、冷媒規制に伴って新冷媒の開発が急務となっているので、その動向を解説する。

## 1.1 冷媒規制の動向

欧州では、カーエアコン用冷媒に関する指令 2006/40/EC により、2011 年 1 月 1 日から GWP が 150 を超える冷媒を有する新型車の発売は禁止され、2017 年 1 月 1 日からはすべての新車にその冷媒を用いることを禁止することになっている。自動車業界は 2009 年に従来冷媒 R134a に代わる冷媒として、低 GWP 冷媒である R1234yf を使用することを決定したが、R1234yf の供給不足により、2012 年 4 月に欧州委員会は R134a 冷媒を使用し続けることを一時的に許可した。しかし、2013 年 1 月からは、新型車に対して GWP が 150 を超える冷媒の使用は禁止され、2017 年 1 月からはすべて新車に対して禁止される。

また、欧州における定置用冷凍空調機器に対する規制は、F-gas (フッ素化ガス) 規制 Regulation (EC) No 842/2006 と呼ばれている。当初の規制は、冷凍空調機器からの冷媒漏洩を削減することに重点が置かれており、適切な機器管理、作業者の研修、F-gas を使用している機器のラベリング、F-gas を生産・輸入・輸出している業者の報告義務を課したものであった。欧州連合は 2015 年 1 月にはこの規制を強化する修正を行った (表 1.1.1、

表 1.1.1 HFC 類の規制概要

事項	北米 3 か国提案	欧州連合の F ガス規制
提案時期	2014 年 11 月第 26 回締約国会合	2015 年 1 月発効
根拠法律	モントリオール議定書	Regulation (EC) No 842/2006 の修正
対象冷媒	HFC 類 19 種(R1234yf, R1234ze を含まず)	HFC 類 (R1234yf, R1234ze を含まず)
HFC 類の Phase down 基準値	先進国：HFC100% + HCFC 85% (2008 ~2010 年の平均) 途上国：HFC100% + HCFC 40% (2011 ~2012 年の平均)	2009~2012 年の平均
HFC 類の Phase down 最終値	先進国：2035 年に基準値の 15% 途上国：2045 年に基準値の 15%	2030 年に基準値の 21%
その他		(1) GWP2500 以上のサービス・メンテナンス用途は 2020 年 1 月 1 日以降禁止 (2) 割当て管理下でない HFC を充填した冷凍・空調・ヒートポンプ機器は、2017 年 1 月 1 日以降上市禁止

1.1.2, 図 1.1.1 を参照) . 新しい規制は, 2030 年までに F-gas の漏えいを現状の 2/3 のレベルにまで減らすこと, 環境に優しい冷媒が開発された分野では F-gas を使用する機器の販売を禁止することを目指している. それを実現するために, 欧州で販売される HFC の年間総量 (各冷媒の販売量に GWP を掛けて総和をとった等価 CO<sub>2</sub> 量) を 2015 年から削減を初めて, 2030 年には現状の 1/5 にまで削減するスケジュールが策定されている. 欧州の規制は冷媒販売者 (生産者および輸入者) に対して冷媒販売の割当てを行うもので, 割当てを受けない者は販売できない. 2017 年 1 月以降は欧州域外で冷媒をプリチャージした製品を輸出販売する機器メーカーは, 冷媒販売の割当てを獲得する必要がある. 高 GWP 冷媒の使用規制については表 1.1.2 にまとめてあり, GWP750 以上, 3kg 未満のシングルスプリット空調システムは 2025 年 1 月以降上市禁止となっており, GWP750 未満の冷媒 (例えば R32) はそれ以降も上市可能である. GWP2500 以上の冷媒のサービス・メンテナンス用途での使用は, 2020 年 1 月 1 日以降禁止である. 冷凍ショーケース用冷媒の GWP の上限は 2500 であるから, R404A は将来的には使用できない.

表 1.1.2 欧州連合の高 GWP 冷媒の使用規制

対象機器	規制値(GWP 値)	禁止開始時期
家庭用冷凍庫・冷蔵庫	150	2015/1/1
全密閉構造の業務用冷凍庫冷蔵庫	2500	2020/1/1
定置式冷凍冷蔵機器 (-50℃未満を除く)	150	2022/1/1
マルチバックセントラル方式で能力が40kW を超える冷凍冷蔵機器	2500	2022/1/1
全密閉式の移動式家庭用エアコンディショナー	150	2020/1/1
充填量3kg 未満のマルチ以外のスプリットエアコンディショナー	750	2025/1/1
自動車用エアコンディショナー	150	2013/1/1 (新型車) 2017/1/1 (全ての新車)

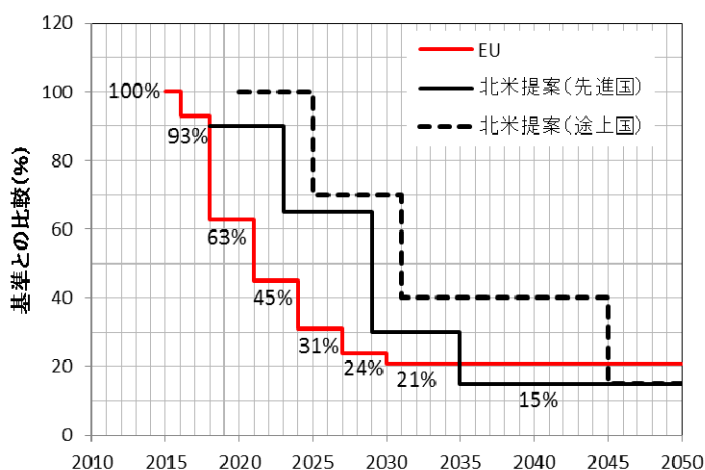


図 1.1.1 HFC 類のフェーズダウンスケジュール

一方, 北米 3 か国 (米国, カナダ, メキシコ) は, オゾン層を破壊する物質の全廃を目指すウィーン条約・モントリオール議定書締約国会議において, HFC の生産・消費を規制するための議定書の改正提案 (EPA, US,



2014)を提出している。HFCはオゾン層を破壊する物質ではないが、オゾン層破壊物質であるCFCやHCFCが禁止され、GWPの大きいHFCに代替された結果、温暖化が進む問題が引き起こされたので、モントリオール議定書の枠組みの中で、HFCの販売を削減することが提案されている。表 1.1.1, 図 1.1.1 に欧州 F ガス規制と北米 3 か国提案のフェーズダウンスケジュール等に関する比較を示す。

わが国においては、中央環境審議会地球環境部会フロン類等対策小委員会と産業構造審議会化学・バイオ部会地球温暖化防止対策小委員会が合同で「今後のフロン類等対策の方向性について」の審議を行い、今後の規制骨子（環境省，経済産業省，2013）についてまとめている。同小委員会の資料によれば、図 1.1.2 のように、このまま追加的対策が取られない場合は、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り、本分野の対策が重要である。図 1.1.3 のように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。使用時漏えいの約 4 割は別置型ショーケースからの漏えいになると予想されている。これまでは、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た。これら審議に基づいて、「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 2013 年 6 月国会で成立し、2015 年 4 月に施行された。名称についても「特定製品に係るフロン類の回収及び破壊の実施の確保等に関する法律」から改められた。フロン排出抑制法では、(1)フロンメーカーには、温室効果のより低いフロン類の技術開発・製造や、一定の使用済フロン類の再生といった取組を通じ、環境負荷の低減が求められている。(2)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目標の達成が求められている。(3)業務用冷凍空調機器使用者には、フロン類の漏えい防止のための適切な設置、点検、故障時の迅速な修理等の適切な管理に取組むことが求められている。(4)回収・破壊業者には、業務用冷凍空調機器に使用されるフロン類の充填業の登録制、再生業の許可制が導入される。以上、それぞれの立場で、HFC 類の転換、冷媒管理、冷媒回収を進め、HFC 類の大気漏えい量を削減することが求められている。

冷凍空調機器メーカーに対しては、フロン類使用製品の低 GWP・ノンフロン化を進めるため、家庭用エアコンなどの指定製品について、製品区分ごとに GWP の上限値と目標年度が定められている。その製造・輸入業者は出荷する製品区分ごとに加重平均で目標を達成することが求められている。指定製品の GWP の上限値と目標年度を表 1.1.3 に示す。

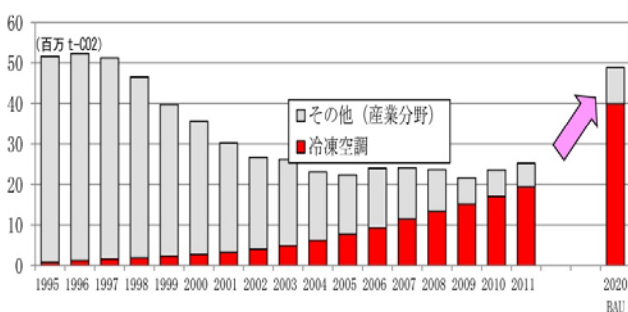


図 1.1.2 代替フロン等 3 ガスの排出量推移

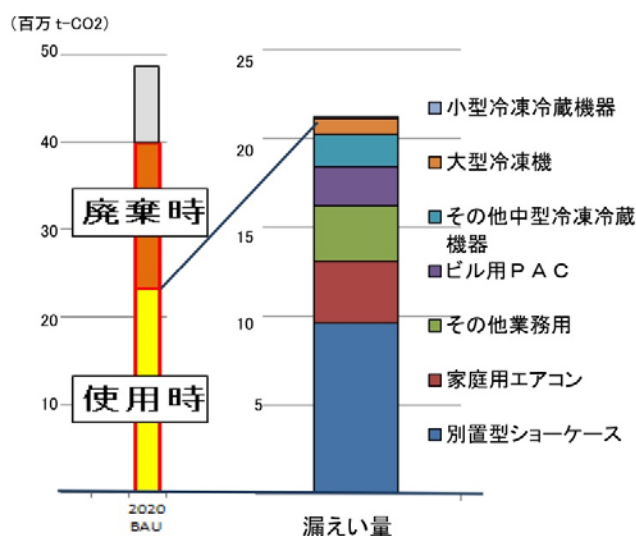


図 1.1.3 2020 年排出予測に占める使用時漏えい

表 1.1.3 指定製品の GWP 上限値と目標年度

指定製品の区分	現在使用されている主な冷媒及び GWP	GWP 上限値	目標年度
家庭用エアコンディショナー	R410A(2090), R32(675)	750	2018
店舗・オフィス用エアコンディショナー	R410A(2090)	750	2020
自動車用エアコンディショナー	R134a(1430)	150	2023
コンデンシングユニット及び定置式冷凍冷蔵ユニット	R404A(3920), R410A(2090), R407C(1774), CO <sub>2</sub> (1)	1500	2025
中央方式冷凍冷蔵機器	R404A(3920), アンモニア(<1)	100	2019
硬質ウレタンフォームを用いた断熱材	R245fa(1030), R365mfc(795)	100	2020
専ら噴射剤のみを充填した噴霧器	R134a(1430), R152a(124), CO <sub>2</sub> (1), DME(1)	10	2019

## 1.2 微燃性冷媒の安全研究の動向

冷凍空調技術の発展のためには、ルームエアコンやパッケージエアコン用冷媒の新規開発が急務である。候補として考えられている R1234yf 混合冷媒や R1234ze 混合冷媒を業務用冷凍空調機器に適用した時の性能の評価法が確立されておらず、従来冷媒との性能比較に関する情報がなく、研究開発を阻害している。また、これら低 GWP 冷媒は微燃性を有しており、実用化のためには燃焼性に関する基礎データの集積と安全性の評価を行うことが不可欠である。基礎的な物性情報、サイクル性能情報、LCCP 情報、燃焼性情報、リスク情報を整備することにより、適切な冷媒選択を容易にし、その実用化を加速することができる。こうした取り組みは、わが国の冷凍空調産業が世界における主導的な地位を維持することに貢献することが期待される。

R1234yf や R32 はプロパンなどと比べて燃焼性が弱く、微燃性といわれる。ASHRAE34 規格では、燃焼熱量が 19MJ/kg 以下で燃焼速度が 10cm/s 以下の微燃性冷媒について 2L というランクが新設され、アンモニアとともに R1234yf や R32 が分類されている。

冷媒が機器から漏れ出て、着火源において着火するには、図 1.2.1 のように、次の条件をすべて満たさなければならない。

- A) 冷媒濃度が燃焼限界内にある。
- B) 着火源が最小着火エネルギー以上のエネルギーをもつこと。
- C) 着火源まわりの気流速度が燃焼速度以下であること。

着火源近傍の気流速度が燃焼速度より大きいときには、気流に逆らって火炎が伝搬することができないので、爆発的な燃焼とはならない。

ASHRAE34 の 2L ランクの新設は、燃焼性の強さによって取扱いの制約を変え、燃焼性が弱い冷媒の使用の途を拓くものである。しかし、わが国の高圧ガス保安法や冷凍保安規則には不燃と可燃の分類しかないなど、燃焼性の弱い冷媒の取り扱いについての考慮が少ない。微燃性冷媒のリスク評価を実施するための基礎的なデータを整備することを目的として、2011 年から始まった 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ている。

これら研究成果を利用して日冷工の中で微燃性冷媒のリスク評価を行っていただき、そのリスク評価の適正さを第三者の立場から検討することを目的として、公益社団法人日本冷凍空調学会の下に微燃性冷媒のリスク

評価を検討する研究会が設置された。日冷工や一般社団法人日本自動車工業会が具体的なリスク評価を行っている。本報告書は、微燃性冷媒のリスク評価研究会の 2014 年度の活動をまとめたものである。この成果が関係分野の方々のお役にたてば幸いである。

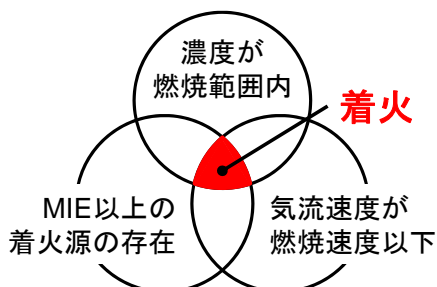


図 1.2.1 可燃性冷媒が着火する条件

## 参考文献

European Parliament, Directive 2006/40/EC of the European Parliament, 17 May 2006.

European Parliament, Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament, 17 May 2006.

European Parliament, Regulation (EC) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council, 16 April 2014.

US Environmental Protection Agency, Summary: 2014 North American Amendment Proposal to Address HFCs under the Montreal Protocol, EPA, US, 2014.

環境省, 経済産業省, ”今後のフロン類等対策の方向性について”, 経済産業省, 環境省ホームページより(2013).

## 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 が低いが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)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』は、燃焼限界、燃焼熱、燃焼速度の3指標で冷媒の燃焼性等級を区分している。表 2.1.1 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』及び ISO 817 は、燃焼性の低い可燃性等級 Class 2 のうち、「燃焼速度」が  $10 \text{ cm s}^{-1}$  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』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』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定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』は、A2 及び A3 冷媒を使用する場所では、裸火や  $427^\circ\text{C}$  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の使用環境としてあり得ない条件でのデータを積上げるのは有害無益な行為であり、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限界や熱分解の湿度依存性等についても検討対象としている。

表 2.1.1 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)	燃焼限界 3.5%以下, 又は燃焼熱 $19,000 \text{ kJ kg}^{-1}$ 以上	R290, R600a
Class 2 (弱燃)	燃焼限界 3.5%を超え, 且つ燃焼熱 $19,000 \text{ kJ kg}^{-1}$ 未満	R152a
Class2L (微燃)	Class 2 のうち, 燃焼速度が $10 \text{ cm s}^{-1}$ 以下	R717, R32 R1234yf, R1234ze(E)
Class 1 (不燃)	火炎伝播が確認されない	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進捗を報告する。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、及び燃焼速度の大きさで区分される。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、湿度の影響も含めて報告する。

2.3 節では、冷媒の燃焼速度について、R1234ze(Z)について新たに測定した結果を報告する。

化合物が実用環境で燃焼に至るかどうか判断するには、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、冷媒濃度依存性や R1234yf の追加測定を新たに反映させた結果を報告する。

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着火源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、消炎直径について新たな測定データ及び解釈を加えた。

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。

これらの研究によって得られた燃焼特性を表 2.1.2 にまとめて示す。国際規格に既に掲載されている数値についても併せて示す。本レポートで使用するデータは、基本的に表 2.1.2 のデータを使用している。

またこれらの燃焼特性を図として整理した一例を、図 2.1.1 に示す。図の棒グラフは、これまでに明らかにした燃焼性諸指標を、微燃性冷媒 (R32 及び R1234yf) と、強燃性冷媒 (R290 (プロパン)) とで視覚的に比較したものである。指標の詳細については後述するが、図中の①②③が、国際規格の燃焼性等級区分に用いられている指標である。また、①④⑤は燃焼の確率に関連する指標であり、②③は燃焼の激しさに関連する指標である。微燃性冷媒は R290 に比べ、具体的に以下のような点で定量的に差があることが分かる。

- ・燃焼熱及び燃焼速度が著しく低く、燃焼しても R290 のようには激しく燃えない。
- ・燃焼限界（下限界）が著しく高く、高濃度でないと燃えないため、燃焼自体が起こりにくい。
- ・最小着火エネルギーは 1 桁以上大きい。そのため、R290 と異なり人体由来の静電気火花（およそ 10 mJ）で着火させることは極めて困難である。
- ・消炎距離は約 3 倍以上大きく、そのため実際に電極間で火花が生じる場合には消炎距離以下の距離で生じる可能性が増す。その場合、電極による冷却に打ち勝つために更に大きな放電エネルギーが必要になる。

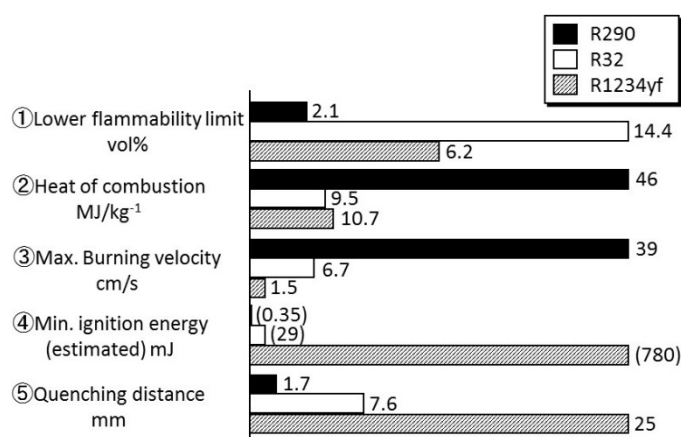


図 2.1.1 微燃性冷媒と強燃性冷媒の燃焼特性の比較

表 2.1.2 代表的な冷媒等化合物の燃焼特性

Compound	Chemical formula	$C_{st}$ vol%	ISO817 (2014)			This work											
			$S_{u0,max}$ cm s <sup>-1</sup>	LFL vol%	$H_c$ MJ kg <sup>-1</sup>	$S_{u0,max}$ cm s <sup>-1</sup>	Flammability limits <sup>a</sup> , vol%				$H_c$ MJ kg <sup>-1</sup>	$E_{min}$ mJ estimated	$d_q$ mm				
							23 °C, 50%RH		35 °C, 0%RH					35 °C, 50%RH		60 °C, 50%RH	
							LFL	UFL	LFL	UFL				LFL	UFL	LFL	UFL
R290	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4.02	46 <sup>b</sup>	2.1	46.3	38.7 <sup>c</sup>	2.02 <sup>d</sup>	9.81 <sup>d</sup>	---	---	---	---	---	0.35 <sup>e</sup>	1.70 <sup>e</sup>		
R152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	7.73	23	4.8	16.3	23.6 <sup>c</sup>	4.3 <sup>f</sup>	17.3 <sup>f</sup>	---	---	4.36 <sup>f</sup>	14.8 <sup>f</sup>	---	0.90 <sup>e</sup>	2.33 <sup>e</sup>		
R254fb	CH <sub>2</sub> FCH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	6.53	---	---	---	9.5 <sup>e</sup>	4.3 <sup>g</sup>	14.5 <sup>g</sup>	---	---	---	---	11.4	12 <sup>e</sup>	5.23 <sup>e</sup>		
R143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	9.48	7.1	8.2	10.3	ISO	7.3 <sup>h</sup>	17.9 <sup>h</sup>	7.3 <sup>f</sup>	17.7 <sup>f</sup>	7.4 <sup>f</sup>	15.0 <sup>f</sup>	---	27 <sup>e</sup>	7.03 <sup>e</sup>		
R32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	17.3	6.7	14.4	9.5	ISO	13.5 <sup>h</sup>	28.0 <sup>h</sup>	13.5 <sup>f</sup>	26.9 <sup>f</sup>	13.5 <sup>f</sup>	23.6 <sup>f</sup>	---	29 <sup>e</sup>	7.55 <sup>e</sup>		
R717	R717	21.8	7.2	16.7	18.6	ISO	15.3 <sup>h</sup>	30.4 <sup>h</sup>	15.8 <sup>f</sup>	29.2 <sup>f</sup>	18.0 <sup>f</sup>	24.5 <sup>f</sup>	---	45 <sup>e</sup>	8.95 <sup>e</sup>		
R1234yf	CH <sub>2</sub> =CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7.73	1.5	6.2	10.7	ISO	6.7 <sup>h</sup>	12.0 <sup>h</sup>	5.4 <sup>h</sup>	13.5 <sup>h</sup>	4.8 <sup>f</sup>	15.0 <sup>f</sup>	---	780 <sup>e</sup>	24.8 <sup>e</sup>		
R1234ze(E)	(Z)-CHF=CHCF <sub>3</sub>	7.73	1.2	6.5	10.1	ISO	n.f.	n.f.	5.95 <sup>h</sup>	12.7 <sup>h</sup>	5.05 <sup>f</sup>	15.5 <sup>f</sup>	---	n.a.	n.a.		

$S_{u0,max}$ : maximum burning velocity at 25°C and 0%RH (relative humidity); LFL: lower flammability limit; UFL: upper flammability limit,  $H_c$ : heat of combustion at 25°C and 0%RH;  $E_{min}$ : minimum ignition energy at 25°C and 0%RH;  $d_q$ : quenching distance at 25°C and 0%RH.

n.f.: nonflammable.

n.a.: not applicable because this compound is nonflammable under the test conditions.

<sup>a</sup> Experiments were done by the ASTM E681 (2004) method, unless otherwise specified.

<sup>b</sup> NFPA 68-2000 Annex C (informative), which quotes the highest  $S_{u0,max}$  value in NACA report 1300 (1959), which was measured not in accordance with ISO 817 but done by the Bunsen burner method. The other  $S_{u0,max}$  values were determined in accordance with ISO 817 (2014).

<sup>c</sup> Takizawa et al. (2005).

<sup>d</sup> Kondo et al. (2011). The test method is similar to but not exactly the same as ASTM E681 method.

<sup>e</sup> Takizawa et al. (2015).

<sup>f</sup> Kondo et al. (2014).

<sup>g</sup> Kondo et al. (2006). The test method is similar to but not exactly the same as ASTM E681 method.

<sup>h</sup> Kondo et al. (2012).

## 2.2 可燃範囲への湿度影響

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 ( $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ ), R125 ( $\text{CHF}_2\text{CF}_3$ )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 及び R410B は、R32 と R125 との重量比がそれぞれ 50 : 50 及び 45 : 55 の混合冷媒である。

燃焼限界の測定は ANSI/ASHRAE Standard 34-2013 (ASHRAE, 2013) に規定された測定法 (ASHRAE 法) 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・乾燥空気の場合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 種類のサイズの注射器を用いた (Kondo ら, 2014)。比較的低湿度の調整には内容積 0.25 mL の注射器を用い、その時の 23°C 換算の水蒸気分圧の実測値  $p$  (mmHg) と注入した純水量  $v$  (mL) の関係は、 $p = 80.06 v - 0.078$  のようになった。一方、高温・高湿度の実験では内容積 1.00 mL の注射器を用いたが、その時の 60°C 換算の水蒸気分圧の実測値  $p$  (mmHg) と  $v$  の関係は、 $p = 90.895 v$  のようになった。両式で得た水蒸気分圧の理想気体の法則からのズレは 5~6% 程度であった。

### 2.2.1 実験室レベルの湿度変化の影響

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 2.2.1 に、分子中のフッ素原子数がゼロの R717 ( $\text{NH}_3$ ) とフッ素原子数が水素原子数を上回らない R32 及び R143a について測定した結果を示した (Kondo ら, 2012)。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。むしろ相対湿度の増加と共に、僅かではあるが可燃範囲は狭くなる傾向が見られた。これは、冷媒/空気混合気が不活性の水蒸気ガスにより物理的に希釈されたためと考えられる。

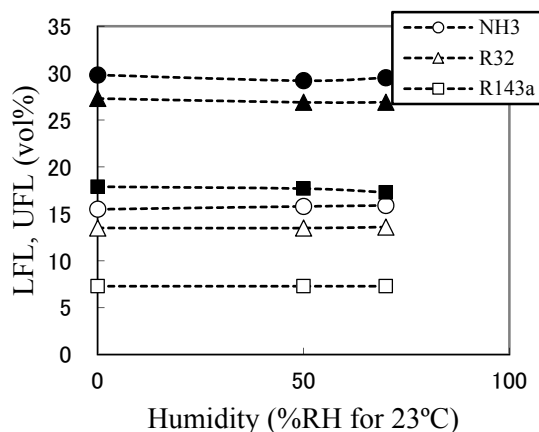


図 2.2.1 R717, R32, R143a の燃焼限界への湿度の影響  
Measured at 35°C. Open symbols: LFL; solid symbols: UFL.

それに対して図 2.2.2 は、それぞれ R1234yf 及び 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 (Kondo ら, 2012)。これも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。これらの冷媒は、湿度の増加と共に上限界は上昇し、下限界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な多項式で表現しようとしたが困難であった。結局、楕円関数を用いた次の式(2.2.1)によって湿度の影響を表現することとした。

$$y = y_0 + a [2q(x - x_0) - (x - x_0)^2]^b \quad (2.2.1)$$

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、 $x_0$  及び  $y_0$  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 2.2.1 には、R1234yf 及び 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。

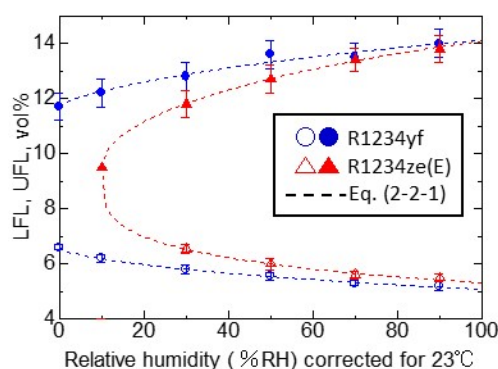


図 2.2.2 R1234yf 及び R1234ze(E)の燃焼限界への湿度の影響  
Measured at 35°C. Broken curves are fitting functions expressed by Eq. (2.2.1).

表 2.2.1 35°C における R1234yf 及び R1234ze(E)の燃焼性に対する湿度の影響 (湿度は 23°C 換算値)

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

## 2.2.2 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変わ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 (1 Torr = 133.32 Pa)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 (ASHRAE, 2013) 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 2.2.3 に、R410A, R410B, R134a についての測定結果を示す (Kondo ら, 2014). 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らなかった. なお、60°C で相対湿度 50%RH の時の R410A, R410B, R134a の可燃範囲は、それぞれ  $15.6 \pm 0.2$ – $21.8 \pm 0.4$  vol%,  $16.3 \pm 0.3$ – $20.9 \pm 0.4$  vol%,  $11.5 \pm 0.3$ – $15.9 \pm 0.4$  vol% であった (Kondo ら, 2014). なお、表 2.2.2 には、これら 3 種の冷媒の燃焼上下限界の湿度依存性を先の式(2.2.1)に当てはめて求めた係数の値も示してある.

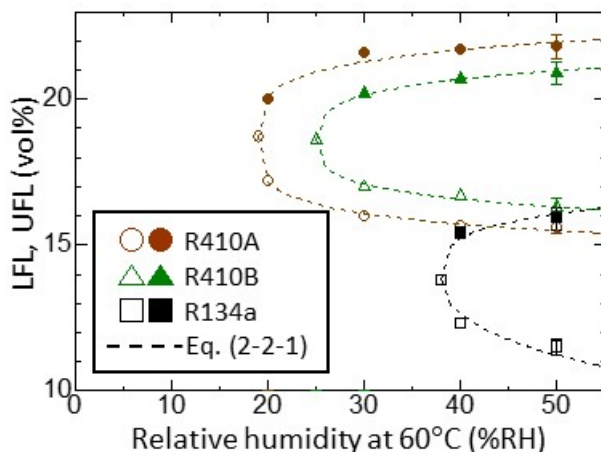


図 2.2.3 R410A, R410B, R134a の燃焼限界に対する高湿度の影響  
Measured at 60°C. Broken curves are fitting functions expressed by Eq. (2.2.1).

表 2.2.2 60°C における不燃性冷媒 R410A, R410B, 及び 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	$-3.70 \pm 0.53$	$0.22 \pm 0.09$
	UFL	0.19	18.7	1.00	$3.83 \pm 0.59$	$0.25 \pm 0.11$
R410B	LFL	0.25	18.6	1.00	$-2.90 \pm 0.02$	$0.28 \pm 0.11$
	UFL	0.25	18.6	1.00	$3.03 \pm 0.02$	$0.29 \pm 0.10$
R134a	LFL	0.38	13.8	1.00	$-5.04 \pm 0.01$	$0.45 \pm 0.13$
	UFL	0.38	13.8	1.00	$3.39 \pm 0.01$	$0.27 \pm 0.10$

### 2.2.3 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%RH 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, R717 の 6 種の化合物について燃焼限界の測定を行ってみた. 結果を表 2.2.3 に示す (Kondo ら, 2014). 比較のために、湿度 23°C 換算で 50%RH の湿潤空気を 35°C で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 2.2.3 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°C/50%RH	
	LFL, vol%	UFL, vol%	LFL, vol%	UFL, 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.

## 2.2.4 断熱火炎温度について

ここでは、これまでに見てきたような湿度条件が燃焼性に与える効果について、少し別の面から考察するために、異なった湿度条件における各化合物の燃焼限界について断熱火炎温度  $T_{ad}$  の計算を行ってみた。その結果を図 2.2.4 に示した (Kondo ら, 2014)。図中の横軸 1-9 の冷媒番号 (Refrigerant #) は、順に R410A, R410B, R134a, R1234yf, R1234ze(E), R32, R143a, R152a, R717 を表わす。この図から次のことが分かる。

- (1) 下限界と上限界の限界火炎温度を比べると、化合物の種類によらず一貫して上限界における値の方が低いことが分かった。これは上限界の方がいろいろな反応の可能性があるため反応経路に柔軟性があり、より低い温度でも火炎の持続が可能であることを示していると考えられる。
- (2) 不燃性冷媒と可燃性冷媒とを比較すると、限界火炎温度は不燃性冷媒の方が高い傾向がある。元々不燃性と目される冷媒はそれだけ燃え難いということであるから、そこで燃焼反応を継続させるためにはより高温にしなければならないということであろう。
- (3) 湿度が 60°C50%RH か 23°C50%RH かで上下限界の値は変化することが多いが、限界火炎温度の方はそれほど変化しないことが分かった。特に、フッ素原子数が相対的に少ない冷媒化合物では、水蒸気は単に不活性ガスとして働くだけであり、その希釈効果によって可燃範囲は顕著に狭まったりするが、その場合でも、限界火炎温度の値はあまり変化していない。ただ、R1234yf や R1234ze(E) 等のフッ素原子数が水素原子数よりも多い冷媒は例外であり、この場合は、湿度の増加と共に限界火炎温度が顕著に低下する。これは水蒸気が積極的に燃焼反応に関与することで反応の中身が変わり活性化エネルギーが低下するためと考えられる。

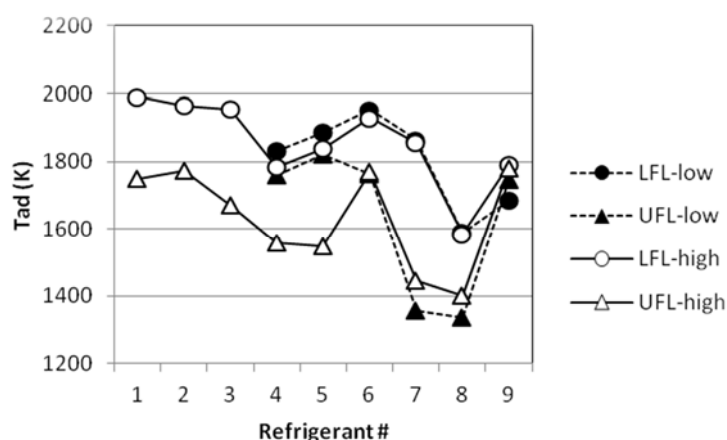


図 2.2.4 各種冷媒の燃焼限界における断熱火炎温度

●, ▲ : 35°C, 23°C 換算 50%RH の燃焼限界濃度における火炎温度, ○, △ : 60°C, 50%RH の燃焼限界濃度における火炎温度. Refrigerant #は、順に R410A, R410B, R134a, R1234yf, R1234ze(E), R32, R143a, R152a, R717 を表わす。

## 2.3 燃焼速度

燃焼速度について、今回は R1234ze(Z)について検討した結果を報告する。燃焼速度測定は、これまで通常重力下で横型窓付円筒容器を用いて燃焼させ、シュリーレン法によって可視化し、火炎半径の時間変化（火炎伝播速度）から燃焼速度を得た(Takizawa ら, 2012)が、通常重力下ではこの火炎は浮力の影響を受け浮上し、すぐに容器天井に接触して消炎するため、自律伝播しているのか単に放電火花で加熱された高温ガスが浮力で浮上しているだけなのか、判断することが極めて難しい。

そこで、産総研北海道センターにある微小重力距離 10 m の微小重力落下装置（微小重力時間は 1.3 秒間、微小重力レベルは  $10^{-3}$  G）を用いてほぼ無重力の状態での燃焼実験を行うことにより、浮力と壁面冷却の効果を取り除いた R1234ze(Z)の球状伝播火炎を得、球形容器法によって燃焼速度を求めることにした。

実験操作はこれまでの通常重力下の報告と同様である (Takizawa ら, 2005)。容器中心部で火花放電により混合気に点火し、燃焼に伴う圧力の時間変化をひずみゲージで測定した。放電の代表的な条件は、電極間距離 8 mm、放電エネルギー約 10 J、放電時間 30 ms であった。これは、これまでの微燃性冷媒の燃焼速度測定で用いた最大級の放電エネルギーであり、R1234yf の燃焼実験で通常用いる放電条件の 5 倍程度である。また火炎が空間的に広がる様子を直接測定するため、容器中心で点火した後の火炎の様子を高速ビデオカメラ（撮影速度 1000 コマ/秒）で撮影した。測定は、温度  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  で行い、各濃度につき混合気の初期圧力 650, 760, 850 Torr の 3 回測定した。

図 2.3.1 は、各濃度における R1234ze(Z)の圧力—時間データと、火炎伝播挙動の直接撮影像である。火炎伝播が確認できたのは僅かに濃度 11.0, 11.5, 12.0 vol% の場合のみであり、またこれらの濃度においても、初期圧力が大気圧未満の場合には火炎伝播が確認できなかった。おそらく着火のためには発熱エネルギー密度が高い必要があるのであろう。11 vol% では火炎はブルーフレームであり、この近傍が実質的な量論組成と考えられる。12.0 vol% では、途中から輝炎となった。

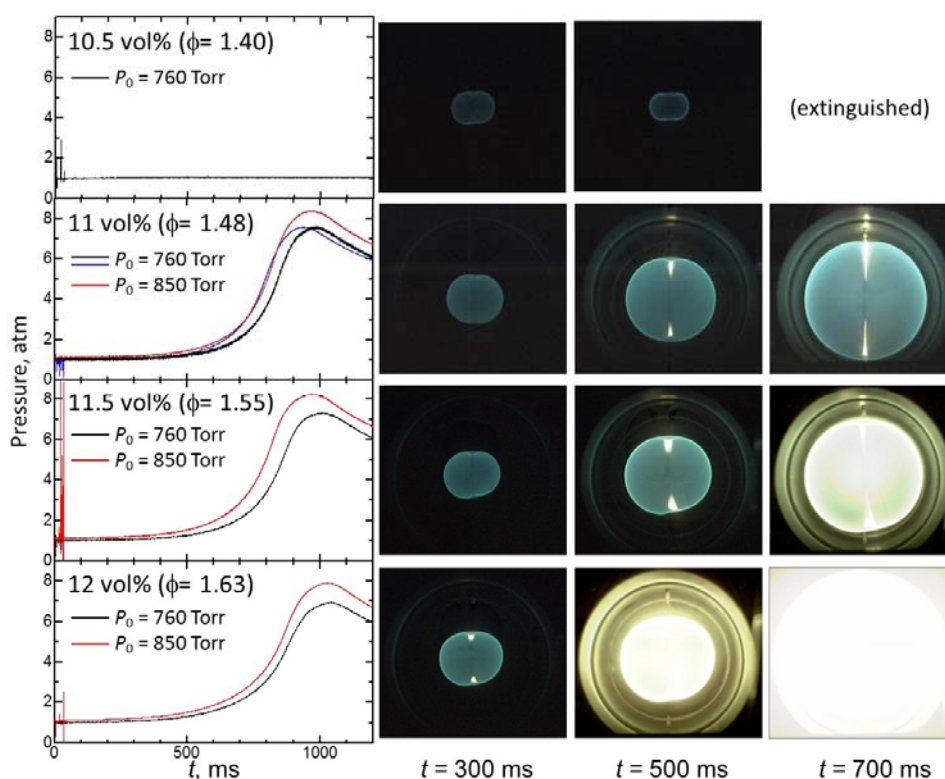


図 2.3.1 R1234ze(Z)の各濃度における火炎伝播挙動と圧力挙動（微小重力下）

圧力挙動は合理的な挙動をとった。すなわち、11 vol% の 1 度を除き、初期圧力の異なる  $P_{(t)}$  曲線は互い

に交わらず、そのピークは初期圧力によらずほぼ同じ時間に得られた。これは、一般に燃焼速度が圧力に殆ど依存しないことに対応している。圧力の最大値はほぼ  $t = 1 \text{ s}$  で得られた。

得られた  $P_{(t)}$  から、球形容器法（球形伝播モデル）を用いて燃焼速度を求めた。取得したデータは極めて限定的だが、暫定値として最大燃焼速度  $1.9 \text{ cm s}^{-1}$  を得た。これは、R1234yf の燃焼速度よりも僅かに高かった。しかしながら、R1234yf は通常重力下で可燃であり、通常重力下で不燃（乾燥空气中）の R1234ze(Z) の方が燃焼速度が高いのは合理的ではない。

この結果を検証するため、R1234ze(Z) に僅かに可燃性ガスを混合して燃焼性を増したものの燃焼速度を調べ、放電条件等を統一にして測定した R1234yf 混合系及び R1234ze(E) 混合系と比較することにした。

まず、混合する可燃性ガスとして、燃焼速度ができるだけ低く、H/F 比が 1 で反応系に過剰に活性ラジカルやスカベンジャーを供給しないと考えられる R32 を選定した。

図 2.3.2 に、R32/R1234 = 80/20, 60/40, 40/60 vol% の混合冷媒の圧力挙動を比較して示す。図 2.3.2(a) に示すとおり、R32/R1234 = 80/20 vol% では、 $P_{(t)}$  曲線は異性体間でほぼ区別できず、3 種の R1234 の燃焼性を区別することは困難であった。そこで R32 の混合比率を引き下げていった。図 2.3.2(b) に示すとおり、R32/R1234 = 60/40 vol% では、R1234yf の  $P_{(t), \text{max}}$  は他 2 種よりも早期に現れ、R1234yf の燃焼速度が他 2 種よりも高いことが示された。R1234ze 系については、両者の  $P_{(t)}$  曲線はほぼ同一で区別できなかった。

更に R32 混合比率を下げると、図 2.3.2(c) に示すとおり、R32/R1234ze = 40/60 vol% では、R1234ze(Z) の  $P_{(t), \text{max}}$  は R1234ze(E) よりも僅かに早く現れ、燃焼速度がより高いことが示唆された。この条件における燃焼速度を球形容器法で求めたところ、僅か  $0.1 \text{ cm s}^{-1}$  程度、R1234ze(Z) の方が燃焼速度が高かった。

次に、酸素濃度比を高めた乾燥空気を用いて、R1234ze(Z) の燃焼性を高めより安定な伝播火炎を得ることにより燃焼速度を求めた。空气中的酸素濃度比を変えることは、窒素濃度比を変えることと同じであり、物理的希釈効果は変わるが化学反応は変化しないと考えられる。

図 2.3.3 に、量論濃度における R1234ze(Z) の燃焼速度の酸素濃度比依存性を示す。比較のため、R1234yf 及び R1234ze(E) の結果も示す。図から、全ての酸素濃度比において、R1234ze(Z) は R1234yf よりも燃焼速度が低く、R1234ze(E) とほぼ等しいことが分かった。

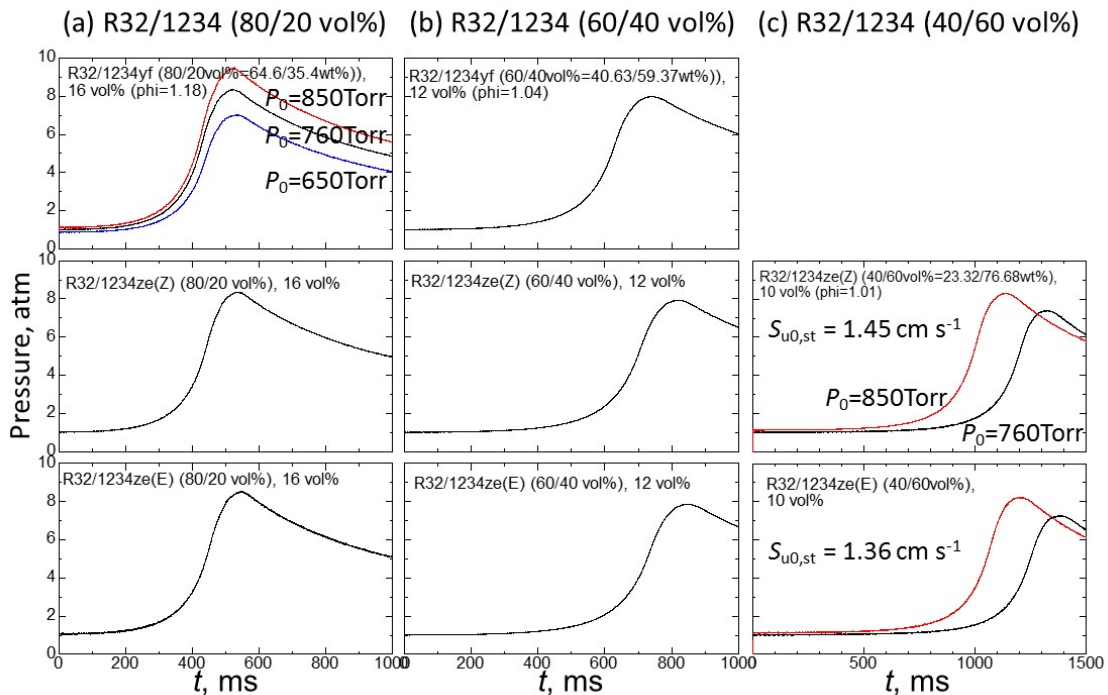


図 2.3.2 R32/R1234 混合系の圧力挙動の混合比依存性（微小重力下）

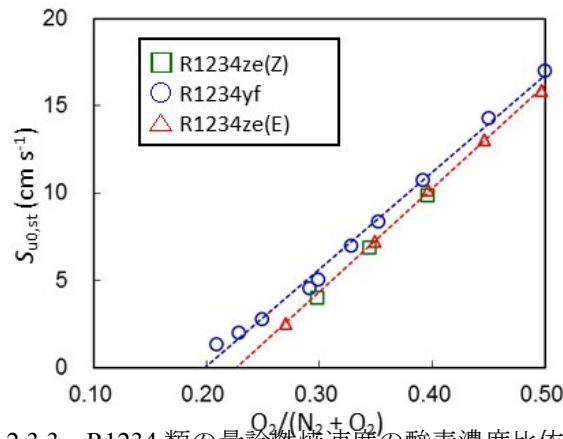


図 2.3.3 R1234 類の量論燃焼速度の酸素濃度比依存性

以上の検証結果から、R1234ze(Z)単体の燃焼速度は、R1234yf 単体よりも低いと考えられる。微小重力球形容器法で得られた燃焼速度がその逆の結果になったのは、強力な放電火花による加熱の効果と、取得できたデータが極めて限定的であったことが理由として考えられる。前述のとおり、R1234ze(Z)単体の伝播火炎を得るためには、R1234yf 単体に対する放電エネルギーの 5 倍のエネルギーを投入する必要がある、その結果としてわずかに燃焼速度が高く表れた可能性がある。また、初期圧力 1 気圧未満の低圧側の燃焼挙動が得られないため、燃焼速度の収束値が高圧側に偏っている可能性がある。これを是正するためには、初期圧力を変える代わりに初期温度を変えることで収束値を得る等の検討をする必要がある。

表 2.3.1 は、2.4 節において使用する、燃焼速度及び関連するパラメータである。微燃性冷媒を定義する指標である燃焼速度と、それ以外の指標とを結びつけることにより、微燃性冷媒の総合的な燃焼特性の理解を進めている。

表 2.3.1 11 種類の冷媒の燃焼性パラメータ

Compound	Formula	$T_{ad}$ , K	$S_{u0,max}$ , $cm\ s^{-1}$	$\rho_u$ , $kg\ m^{-3}$	$\rho_b$ , $kg\ m^{-3}$	$c_p$ , $J\ (g\ K)^{-1}$	$\lambda_{av}$ , $10^{-3}\ W\ (m\ K)^{-1}$	$\delta$ , mm	$\alpha$ , $10^{-1}\ cm^2\ s^{-1}$	$t_c$ , ms
R290	$C_3H_8$	2278	38.7	1.21	0.15	1.36	87.9	0.26	5.1	0.34
R600a	$(CH_3)_2CHCH_3$	2268	34.2	1.22	0.15	1.39	87.3	0.29	5.0	0.43
R152a	$CH_3CHF_2$	2222	23.6	1.32	0.16	1.36	79.1	0.37	4.3	0.78
R1243zf	$CH_2=CHCF_3$	2312	14.1	1.40	0.16	1.33	80.4	0.59	4.2	2.1
R143	$CH_2FCHF_2$	2249	13.1	1.45	0.16	1.34	78.5	0.61	4.0	2.3
R152a/134a (50/50 vol%)		2179	11.7	1.45	0.14	1.34	76.6	0.67	3.9	2.8
R254fb	$CH_2FCH_2CF_3$	2183	9.5	1.49	0.18	1.35	75.7	0.78	3.7	4.1
R143a	$CH_3CF_3$	2118	7.1	1.46	0.18	1.34	75.1	1.06	3.8	7.5
R32	$CH_2F_2$	2207	6.7	1.38	0.16	1.33	77.7	1.22	4.1	9.1
R717	$NH_3$	2076	7.2	1.08	0.15	1.49	85.4	1.46	5.2	10
R1234yf	$CH_2=CFCF_3$	2083	1.5	1.53	0.18	1.28	72.6	4.83	3.6	160

$T_{ad}$ : 平衡計算によって求めた断熱火炎温度,  $\rho_u$ ,  $\rho_b$ : 未燃及び既燃ガス密度,  $c_p$ : 平均定圧熱容量,  $\lambda_{av}$ : 平均熱伝導率,  $\delta$ : 火炎帯厚さ,  $\alpha$ : 熱拡散率,  $t_c$ : 化学反応特性時間.  $T_{ad}$ は、全濃度における最大値、他は、最大燃焼速度を与える濃度における値。

## 2.4 最小着火エネルギー，消炎距離

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測定法』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 2.4.1 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（Takizawa ら，2015）。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。比較的研究例の多い R717 の  $E_{min}$  でさえ、NFPA77 (2000) 『静電気に関する推奨方法』では 680 mJ、高圧ガス保安協会の教本では 14 mJ と記載されており、約 50 倍もの開きがある。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係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、まず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（Takizawa ら，2015）。燃焼速度に関連するパラメータを 2.3 節の表 2.3.1 に、消炎距離に関連するパラメータを表 2.4.1 に示す。

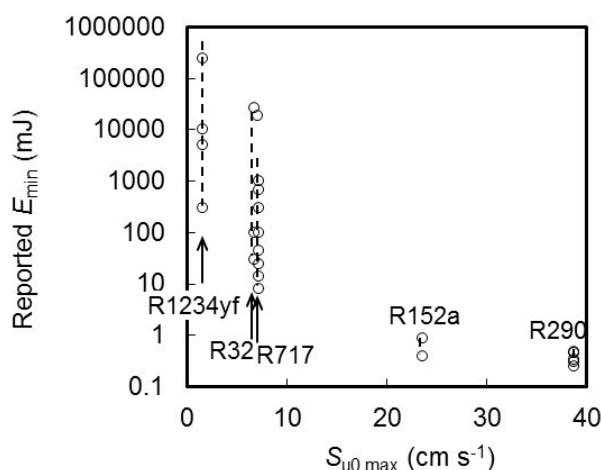


図 2.4.1 代表的な冷媒の最小着火エネルギー既報値のバラツキ

### 2.4.1 消炎距離の測定

消炎距離は、ASTM E-582 法を微燃性冷媒評価用に改良した装置を用いて測定を行った（Takizawa ら，2015）。対象は、表 2.4.1 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, R143, R143a, R152a, R254fb), 不飽和 HFC (R1234yf, R1243zf), 非フッ素系 (R290, R600a, R717), 可燃/不燃混合冷媒 (R152a/134a (50/50 vol%)) である。これらは現在 ISO817 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, 25, 50, 75, 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。測定温度は  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  である。ここで  $d$  は、着火しなかった最大平板間距離と着火した最小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  $\phi$  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  $\phi_{\min}$  を求めた。次に、得られた  $\phi_{\min}$  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大平板間距離と 1 度でも着火した最小平板間距離の平均値を最終的な消炎距離  $d_q$  とした。

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 2.4.2 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。

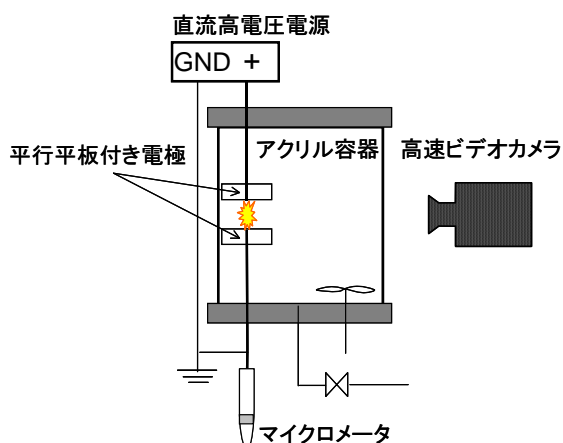


図 2.4.2 消炎距離測定装置 (縦型配置,  $d_{q,h}$  測定)

図 2.4.3 に、消炎距離  $d_q$  を質量燃焼速度 ( $\rho_u S_u$ ) に対してプロットしたものを示す。消炎距離の収束値がまだ決定できていない R1234yf を除く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、最大燃焼速度が  $9.5 \text{ cm s}^{-1}$  の R254fb の消炎距離が 5.2 mm であることから、消炎距離が約 5mm 以上の冷媒は、燃焼速度  $10 \text{ cm s}^{-1}$  以下であると予想でき、よって微燃性等級に区分できることが分かった。

図 2.4.4 に、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。

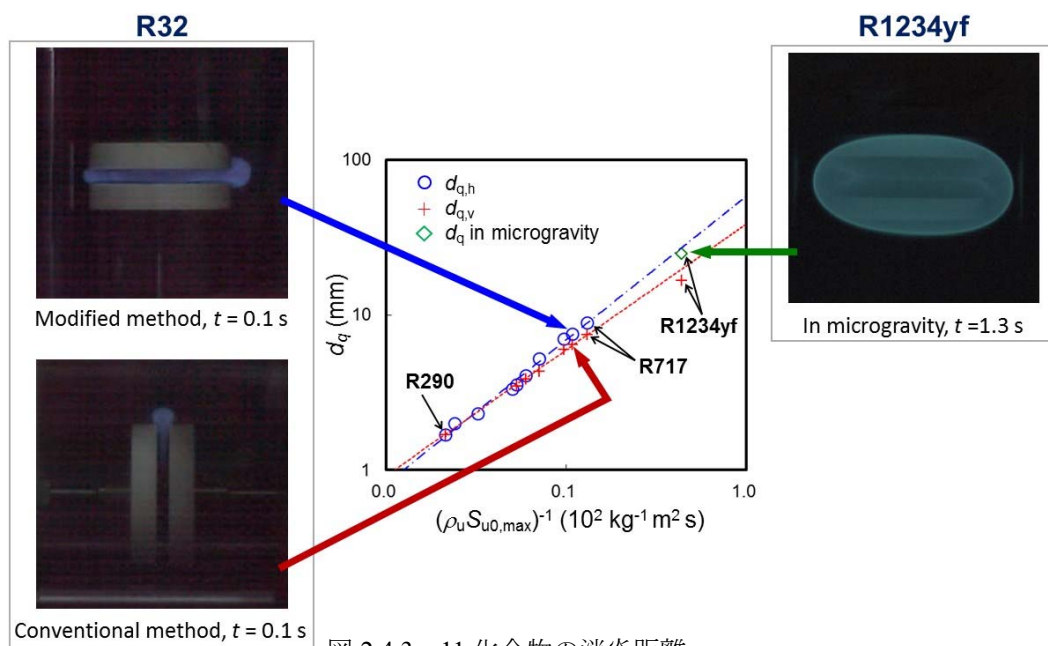


図 2.4.3 11 化合物の消炎距離

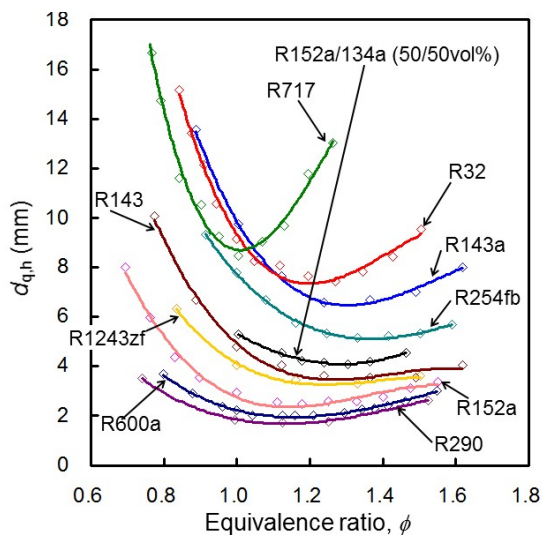


図 2.4.4 10 化合物の消炎距離の濃度（当量比）依存性

表 2.4.1 11 化合物の実測  $d_q$  及び推算  $E_{min}$

Compound	Exp. $d_q$		Conc. vol%	$\phi$	$a$	Calc. $E_{min}$ , mJ	Calib. $E_{min}$ , mJ <sup>c</sup>	Calc. $E_{min}$ , mJ
	$d_{q,h}$ , mm	$d_{q,v}$ , mm				by Eq. (2.4.2) and $d_{q,h}$		by Eq. (2.4.2) and $d_{q,v}$
R290	1.70	1.70	4.5	1.13	6.4	0.35	0.25	0.35
R600a	2.00	-	3.6	1.16	6.8	0.62	0.44	0.62
R152a	2.33	-	9.0	1.18	6.3	0.90	0.63	0.90
R1243zf	3.33	-	8.5	1.33	5.6	2.2	1.5	2.2
R143	3.58	3.48	11.5	1.24	5.9	2.9	2.0	2.6
R152a/134a (50/50 vol%)	4.08	3.88	11.5	1.24	6.1	3.8	2.7	3.0



R254fb	5.23	4.35	8.5	1.33	6.7	12	8.4	5.3
R143a	7.03	6.00	12.5	1.36	6.6	27	19	13
R32	7.55	6.45	21.0	1.27	6.2	29	20	14
R717	8.95	7.45	21.9	1.00	6.1	45	32	19
R1234yf	24.8 <sup>a, b</sup>	16.6 <sup>b</sup>	10.0	1.33	5.1	780	550	76

<sup>a</sup> 微小重力下での測定値. <sup>b</sup> 現時点で収束値を得るに至っていない. “R290 の  $E_{\min}$  が Lewis and Von Elbe (1987)の報告値(0.247 mJ)と等しくなるように, 全ての化合物の断熱火炎帯の直径 ( $d_{q,h} - 2\delta$ ) を一律 11%減じたもの.

## 2.4.2 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.

$$E_{\min} = (1/6) \pi d_{\min}^3 \rho_b c_p (T_b - T_u) \quad (2.4.1)$$

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 and Von Elbe (1987)は, この高温球形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(2.4.1)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, 数十度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  $\delta$  も含んでいることが確認できた. そこで, 式(2.4.1)を次式のように修正した.

$$E_{\min} = (1/6) \pi (d_q - 2\delta)^3 \rho_b c_p (T_b - T_u) \quad (2.4.2)$$

$$\delta = 2\lambda_{av}/(c_p \rho_u S_{u,max}) \quad (2.4.3)$$

ここで  $\lambda_{av}$  は平均熱伝導率である. 微燃性冷媒の場合,  $\delta$  が大きいいため, 式(2.4.1)と式(2.4.2)の差が大きくなる.

式(2.4.2), (2.4.3), 及び  $d_{q,h}$ ,  $d_{q,v}$ ,  $S_{u,max}$  の実測値を用いて  $E_{\min}$  を見積もった結果を表 2.4.1 に示す. また, R290 の  $E_{\min}$  について, 最も広く知られている Lewis and Von Elbe (1987)の測定値に等しくなるように, 全ての冷媒の断熱火炎帯の直径を一律 11%縮小した結果も併せて示す. これらの結果, いずれの方法でも, R32 や R1234yf の  $E_{\min}$  は, ASTM E582 法による既報測定値よりも低くなった.

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ために大きなエネルギーを投入していることが考えられる.

図 2.4.5 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, 電極間距離が本研究で求めた消炎距離 (図中○で示す) よりも有意に小さい場合のみである.

同様に, Smith ら(2003)は, R290, R152a, R143a, 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, 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, 6.5, 7.4 mm であった. つまり, Smith ら(2003)は, R143a と R32 については消炎距離よりも 2 mm も内側に電極を配置して着火させた可能性がある. 彼らの用いた平行平板の直径は 25 mm と小型なので, 強力なエネルギー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結果となっている.

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(2003)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。

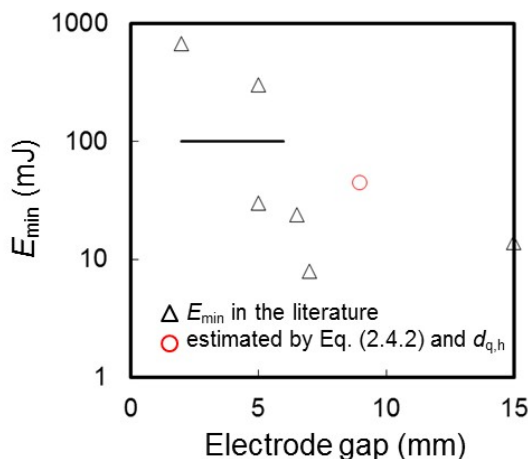


図 2.4.5 R717 の  $E_{min}$  の既報値と、測定時の電極間距離との関係 (Takizawa ら, 2015)

### 2.4.3 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 に達するとされる (NFPA 77.2000)。一方、帯電した人体からの火花が金属経由で起こる場合 (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、皮膚経由の場合、60 倍の火花エネルギーが必要と報告されている (Tolson 1980, Wilson 1977, Davies 1992)。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由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、皮膚経由では極めて困難で、金属経由でも着火する場合は少ないことになる。

実際の環境を考えた場合、その着火条件は、研究者が調整した最適な濃度条件 (図 2.4.4 参照) とは異なり、放電条件、特に消炎距離以上の電極間距離 (図 2.4.5 参照) と異なるため、着火に要する火花エネルギーは、通常  $E_{min}$  値を大きく超える。特に電極間距離について、微燃性冷媒の MIE は、約 5mm 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。

## 2.5 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。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、円筒バーナーのガスを突然止めて逆火する孔径 (「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 2.5.1 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、上部の火炎面が既燃ガス (不活性な  $\text{CO}_2$  や HF 等) に接近されるため、火炎側方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にした．

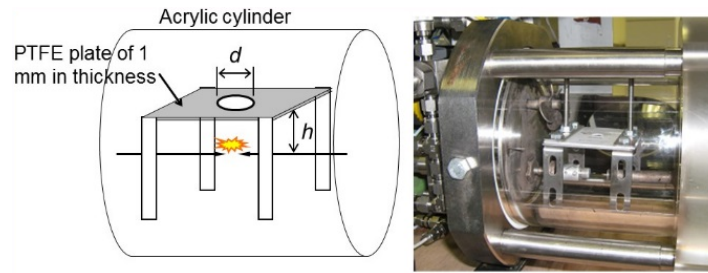


図 2.5.1 消炎直径測定装置

微燃性の R32, R717, R254fb について，消炎直径  $d^*$  を図 2.5.2 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と関連していると考えられる．

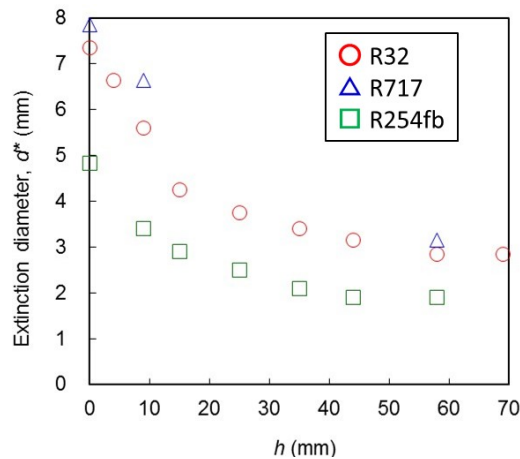


図 2.5.2 R32, R717, 及び R254fb の消炎直径

そこで，図 2.5.2 の  $d^*$  及び  $h$  を，各化合物の  $d_{q,h}$ ，すなわち最小自律伝播火炎の直径で規格化し，プロットしてみた．結果は図 2.5.3 のとおりで，火炎が成長するにつれ，消炎直径は一定値  $d^*_{\infty}$  に収束していく傾向が確認された．

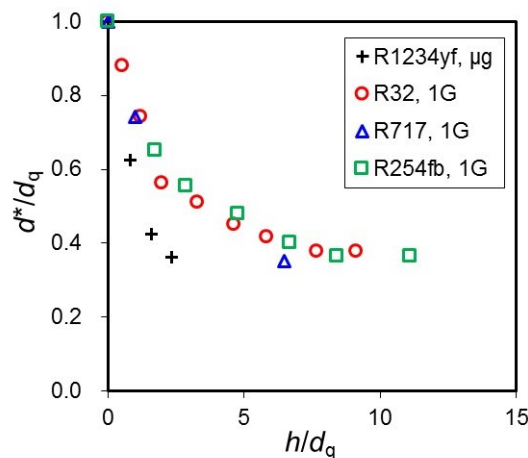


図 2.5.3 消炎直径  $d^*$  と  $h$  の関係（消炎距離  $d_q$  で規格化したもの）

この消炎直径は孔の形状に依らず，以下の熱理論式(2.5.1)で一般化されることが，アスペクト比 5 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された．

$$d_{\text{eff}} \equiv 4A/P = 4\alpha / (c_p w_{\text{av}}) \quad (2.5.1)$$

ここで  $A$  は孔の断面積、 $P$  は孔周囲長である。式(2.5.1)は、孔の形状を一般化するもので、ここでは  $d_{\text{eff}}$  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 2.5.4 に示す。楕円で囲った部分の中央に消炎直径の孔が開いている。 $h=9\text{ mm}$  において、R290 火炎は、直径  $1.25\text{ mm}$  の孔を通過する。一方、R32 火炎は、直径  $5.5\text{ mm}$  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とが分かる。

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 2.5.2 のグラフ中にプロットしてみれば予想可能である。微燃性冷媒の場合、強燃性冷媒に比べて消炎直径は数倍大きく、電気部品に小さな隙間があっても火炎は外部へ通過できないため、そういった電気部品内部のスパークは火種にならない。

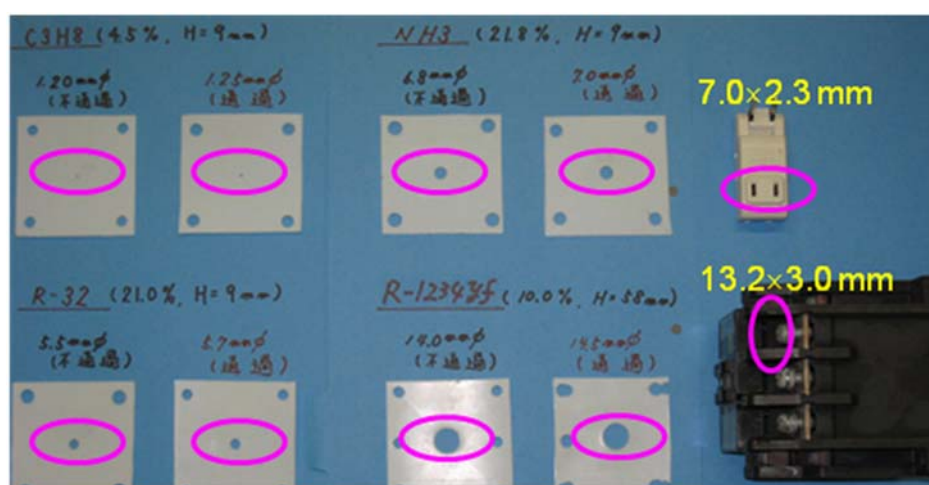


図 2.5.4 主な冷媒の消炎直径 ( $h=9\text{ mm}$ ) と電気部品の隙間サイズの比較

## 2.6 低温室効果冷媒の熱分解生成物分析

### 2.6.1 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 (滝澤ら, 2011) 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。

### 2.6.2 実験方法および結果

#### 2.6.2.1 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  $550\text{ mm}$  の円管電気炉とその中に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  $10\text{ cm}$  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気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。

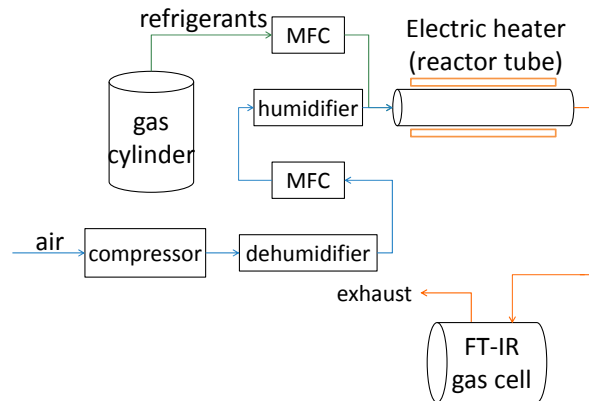


図 2.6.1 実験装置概略図

### 2.6.2.2 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 2.6.1 に示す。対象となる冷媒は、低 GWP 冷媒である R32 及び R1234yf、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ためである。

表 2.6.1 実験条件

冷媒種類	低 GWP 冷媒: R32, R1234yf 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 <sup>2</sup> ]	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)

### 2.6.2.3 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 2.6.2~2.6.9 に、概要を表 2.6.2 に示す。図 2.6.2, 2.6.3 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 2.6.4, 2.6.5 が R1234yf、図 2.6.6, 2.6.7 が R134a、図 2.6.8, 2.6.9 が R22 の場合である。なお、図 2.6.2, 2.6.3 の絶対湿度(AH)の区分けは、“2”のマーカーが  $0 \leq AH[g/kg] < 2$ 、“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 2.6.4 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。

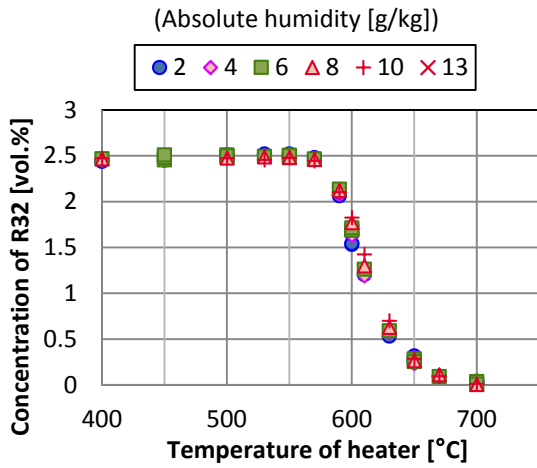


図2.6.2 加熱管温度とR32出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;  
2.5 vol. % R32 with air; Inconel 600 tube)

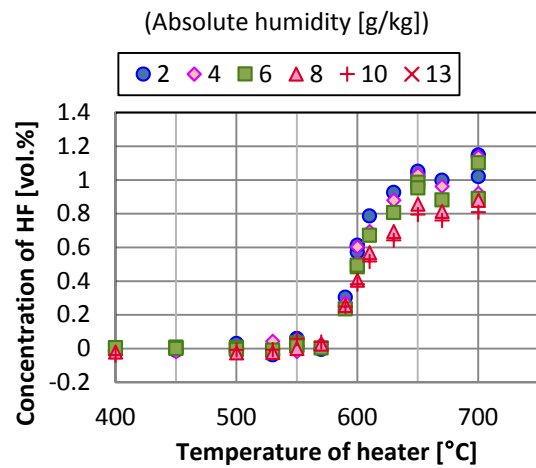


図2.6.3 加熱管温度とHF出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;  
2.5 vol. % R32 with air; Inconel 600 tube)

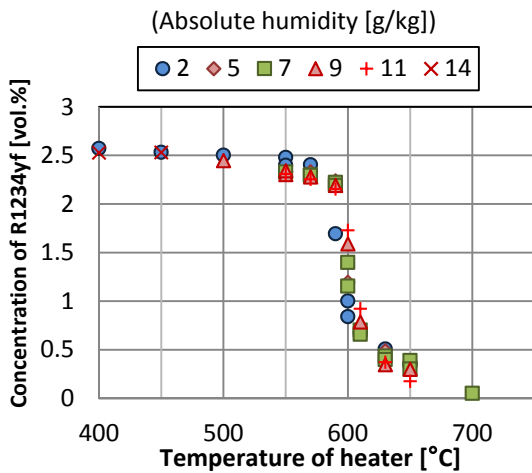


図2.6.4 加熱管温度とR1234yf出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;

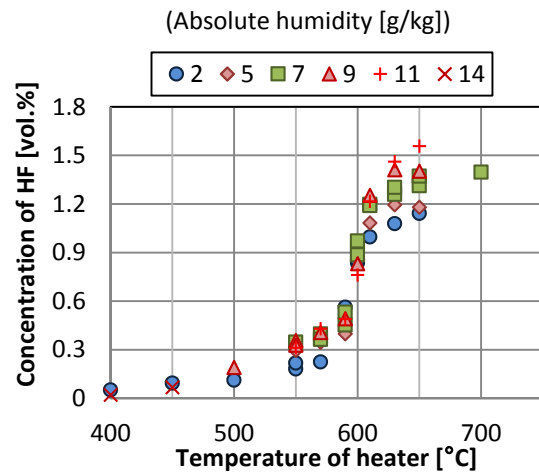


図2.6.5 加熱管温度とHF出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;  
2.5 vol. % R1234yf with air; Inconel 600 tube)

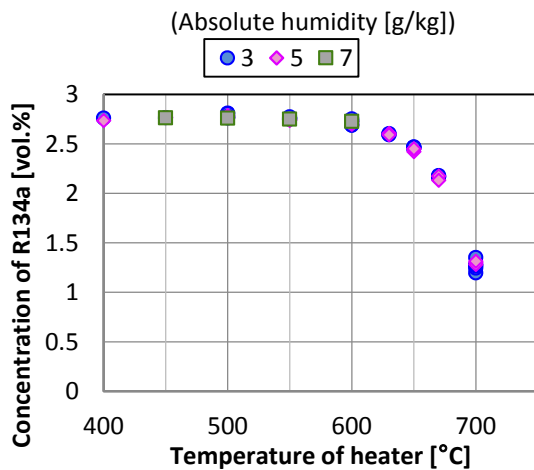


図2.6.6 加熱管温度とR134a出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;

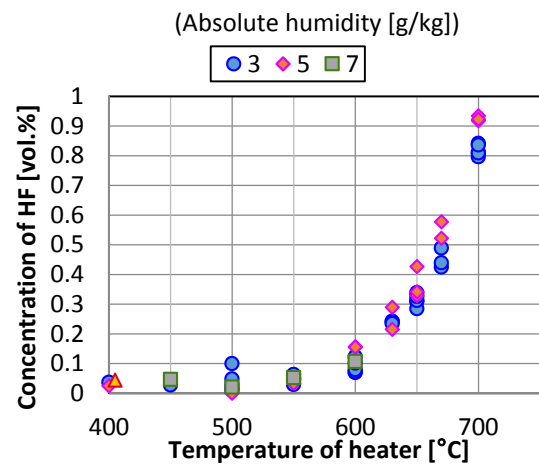


図2.6.7 加熱管温度とHF出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;  
2.5 vol. % R134a with air; Inconel 600 tube)

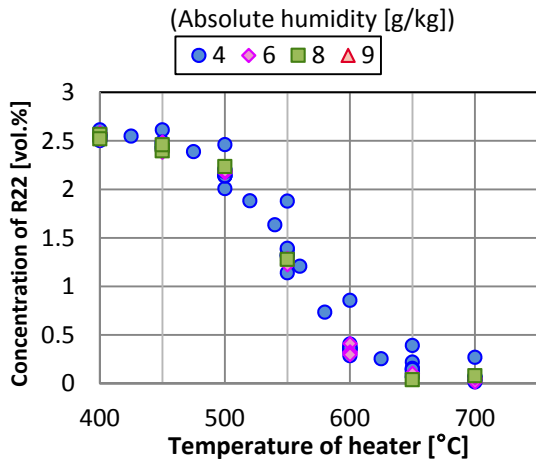


図2.6.8 加熱管温度と R22 出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;  
2.5 vol. % R22 with air; Inconel 600 tube)

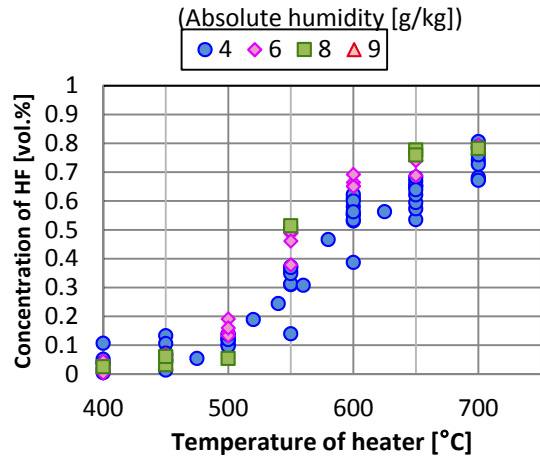


図2.6.9 加熱管温度と HF 出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;

表 2.6.2 温度と湿度の関係

冷媒	分解下限温度[°C]	湿度と分解量
R32	550~570	影響なし
R1234yf	570~590	湿度が高い場合に分解量が減少
R134a	600~630	影響なし
R22	450~500	影響なし

#### 2.6.2.4 ステンレス管の影響

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 2.6.10, 2.6.11 に、インコネル管の場合も含めたまとめを表 2.6.3 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。

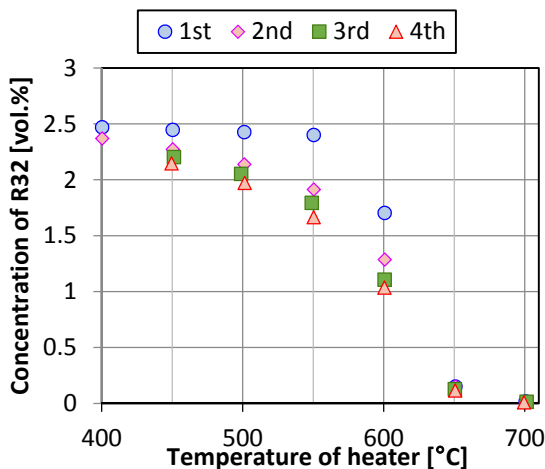


図2.6.11 加熱管温度と R32 出口濃度の関係  
(Total 200ml/min,  
2.5vol. % R32 with dry air, SUS304 tube)

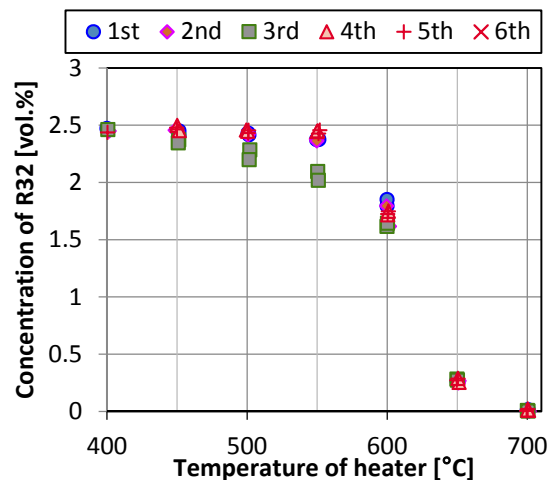


図2.6.10 加熱管温度と R32 出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200ml/min,  
2.5vol. % R32 with humid air, SUS316 tube)

表 2.6.3 壁面材質による分解下限温度への影響 [°C]

冷媒	管材質	SUS316		SUS304
	壁材の影響が少ないとき (インコネル 600)	乾燥条件	加湿条件(6[g/kg]程度)	乾燥条件
R32		570~590	450~500	400~450
R1234yf		550~570	400~450	400~450
R134a		600~630	600~630	450~500
R22		450~500	300~350	300~350

### 2.6.2.5 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 2.6.12 に示す。この条件では、図 2.6.4 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。

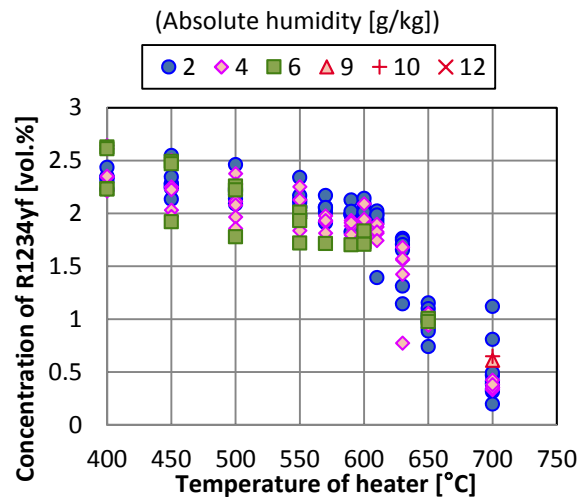


図2.6.12 加熱管温度とR1234yf 出口濃度の関係  
(Total flow rate of 200 ml/min;  
2.5 vol. % R1234yf with dry air; Inconel 600 tube with soot)

### 2.6.3 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。

1) 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,

R134a: 600~630°C, R22: 450~500°C

2) 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。

3) 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。

4) 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。



## 参考文献

- ASHRAE. 2013. ANSI/ASHRAE Standard 34-2013, Designation and safety classification of refrigerants. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE. 2013. ANSI/ASHRAE Standard 15-2013, Safety Standard for Refrigeration Systems. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.
- ASTM. 2004. ASTM E681-04, Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals., ASTM International.
- ASTM. 2007. ASTM E582-07, Standard Test Method for Minimum Ignition Energy and Quenching Distance in Gaseous Mixtures., ASTM International.
- Davies D. K., 1992, The incendivity of sparks and brush discharges, *J. Electrostat.*, **27**: pp. 175-178.
- ISO. 1999. ISO/IEC Guide 51, Safety aspects— Guidelines for their inclusion in standards. International Organization for Standardization.
- ISO. 2014. ISO 817, Refrigerants— Designation and safety classification. International Organization for Standardization.
- ISO. 2014. ISO 5149, Refrigerating systems and heat pumps— Safety and environmental requirements. International Organization for Standardization.
- Kondo S., Urano Y., Takizawa, K., Takahashi A., Tokuhashi K., Sekiya A., 2006, Flammability limits of multi-fluorinated compounds, *Fire Safety J.*, **41**: pp. 46-56.
- Kondo S., Takizawa, K., Takahashi A., Tokuhashi K., 2011, On the temperature dependence of flammability limits of gases, *J. Hazard. Mater.* **187**: pp. 585-590.
- Kondo S., Takizawa, K., Tokuhashi K., 2012, Effects of temperature and humidity on the flammability limits of several 2L refrigerants, *J. Fluor. Chem.*, **144**: pp. 130–136.
- Kondo S., Takizawa, K., Tokuhashi K., 2014, Effect of high humidity on flammability property of a few non-flammable refrigerants, *J. Fluor. Chem.*, **161**: pp. 29-33.
- Lewis B., Von Elbe G., 1987., Combustion, Flames and Explosions of Gases, third ed., Academic Press, New York: pp. 333-361.
- NFPA. 2000. NFPA 77, Recommended Practice on Static Electricity 2000 Edition., 2000NFPA.
- NFPA. 2002. NFPA 68, Guide for Venting of deflagrations 2002 Edition., 2002, National Fire Protection Association.
- Smith N. D., Mitchell W. A., Tufts M. W., 2003, Determining Minimum Ignition Energies and Quenching Distances of Difficult-To-Ignite Compounds, *J. Testing Eval.* **31**: pp. 178-182.
- Takizawa, K., Takahashi A., Tokuhashi K., Kondo S., Sekiya A., 2005. Burning velocity measurement of fluorinated compounds by spherical-vessel method. *Combust. Flame*, **141**: pp. 298-307.
- Takizawa, K., Tokuhashi K., Kondo S., Mamiya M., Nagai H., 2012 “RP-1583 Assessment of Burning Velocity Test Methods”, pp. 44-49, [http://www.techstreet.com/ashrae/cgi-bin/detail?product\\_id=1840089](http://www.techstreet.com/ashrae/cgi-bin/detail?product_id=1840089).
- Takizawa K., Tokuhashi K., Kondo S., 2015, Quenching distance measurement of highly to mildly flammable compounds, *Fire Safety J.* **71**: pp. 58-68.
- Tolson, P., 1980, The stored energy needed to ignite methane by discharges from a charged person, *J. Electrostat.*, **8**: pp. 289-293.
- 伊藤誠, 党超鋌, 飛原英治, 2014, “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
- 滝澤賢二, 徳橋和明, 近藤重雄, 間宮幹人, 永井秀明, 2011, “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

### 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おり、ISO817 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、これに該当し且毒性のない冷媒は 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となる。この観点から、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（例えば、Takizawa, et al, 2015, 2009, Saburi, et al, 2014, Spatz&Minor, 2008）や、実際の事故シナリオを想定した危険性評価（例えば、Imamura, et al, 2015, 2014, 2013, 2012）などが進められている。

これらを踏まえ、（独）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、特に実際に A2L 冷媒を取り扱う様々なシチュエーションを想定した危険性評価を実施している。ここでは、日冷工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（高市ら、2014、矢嶋ら、2014）に基づき、図 3.1.1 に示すように、大きく 3 つの A2L 冷媒取扱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携帯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

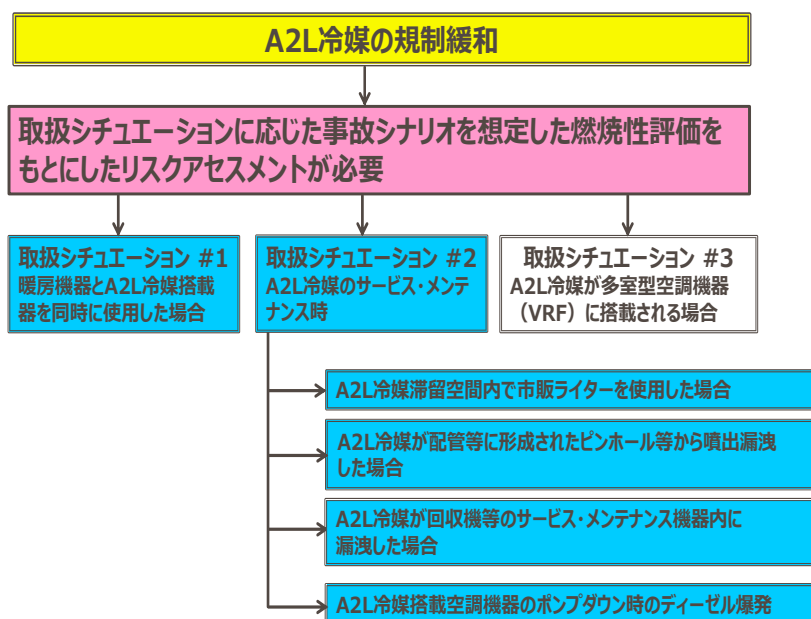


図 3.1.1 研究の構成

ース等から冷媒が漏洩した場合

(c) 事故シナリオ(c) : 例えば回収機などサービス・メンテナンス機器の内部へ冷媒が漏洩した場合

(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、このうち特に取扱シチュエーション#1 と#2 について詳細を述べる。

## 3.2 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価 (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 (今村ら, 2012) として公表されている。

### 3.2.2 実験

図 3.2.1 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 畳用空調機器を天井下 700 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, 13m<sup>2</sup>) 及び石油ファンヒーター (出力 3.2 kW, 16m<sup>2</sup>) 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を考慮 ((独) 製品評価技術基盤機構, 2010) 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。

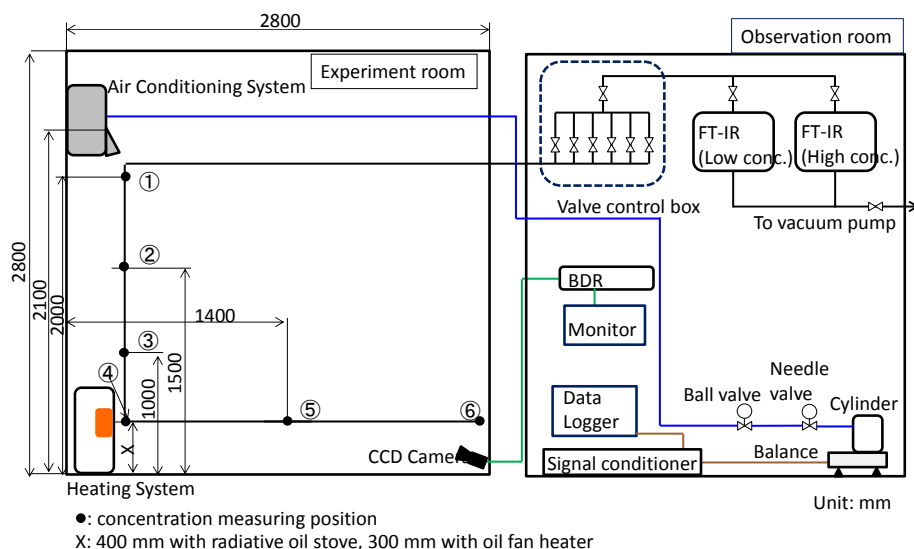


図 3.2.1 取扱シチュエーション#1 における実験システムの概略

### 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がみられなかった。図 3.2.2 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。冷媒濃度は高くても 2 vol%未満で、R32 の燃焼下限界（13.5 vol% (Takizawa, 2009)）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 m<sup>3</sup>）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、火炎伝播は起こらないと推定される。類似の傾向は R1234yf の漏洩の場合にも認められた。

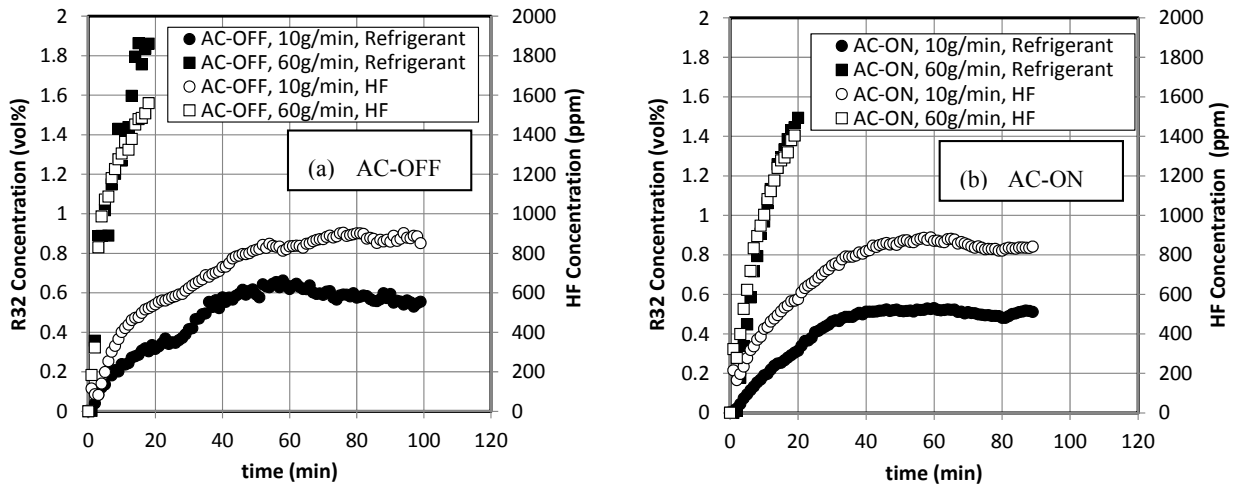


図 3.2.2 暖房機器直前における冷媒濃度と HF 濃度の経時変化。  
暖房機器：石油ファンヒーター，冷媒：R32，実験室容積：22m<sup>3</sup>  
(a) 空調機停止 (b) 空調機運転

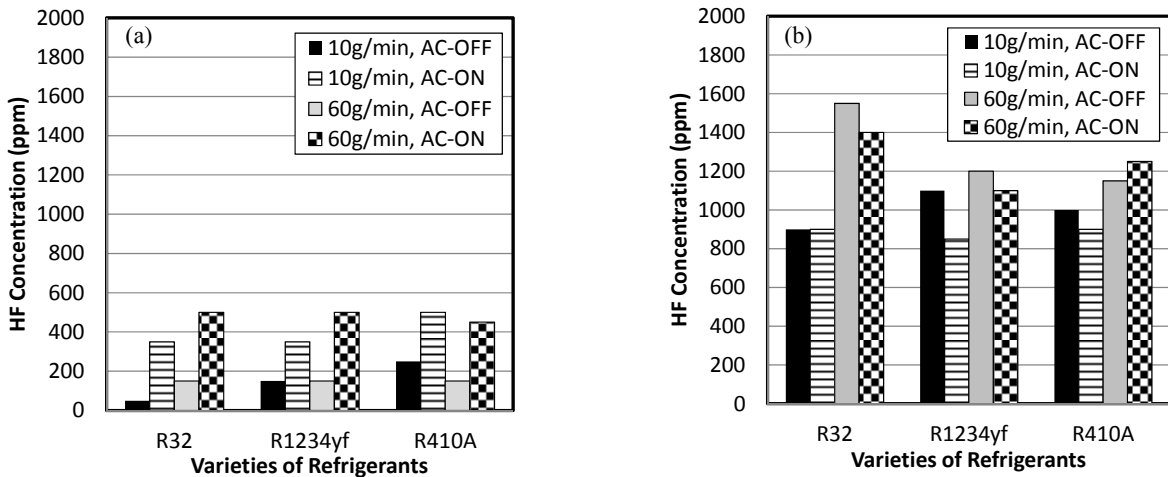


図 3.2.3 漏洩速度および空調機の運転有無を凡例とした冷媒種ごとの HF 発生濃度の比較  
(a) 反射式石油ストーブ (b) 石油ファンヒーター

図 3.2.3 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 ppm，日本産業衛生学会誌，2014）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、現行冷媒である R410A の場合も同様であった。

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、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、ファンヒーターの方が自身が作り出す気流により、単位時間あたりに熱源に接触する冷媒量が多いと考えられることによる。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かったためと考えられる。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、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、室内冷媒に火災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 濃度はほとんど検知されなかった (50 ppm 未満)。

## 3.3 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価 (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携帯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携帯ライターとして、圧電素子型ガスライター、予混合式ターボライター、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災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災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 (Holleyhead, 1996) 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 (Imamura, et al, 2014, 2013) として公表されている。

### 3.3.2 圧電ガスライター及び予混合ターボ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) が単一の燃料ガス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 (3.3.1) 式のように表せる。

$$\frac{1}{LFL} = \frac{n_1}{LFL_1} + \frac{n_2}{LFL_2}, \quad \frac{1}{UFL} = \frac{n_1}{UFL_1} + \frac{n_2}{UFL_2} \quad (3.3.1)$$

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。

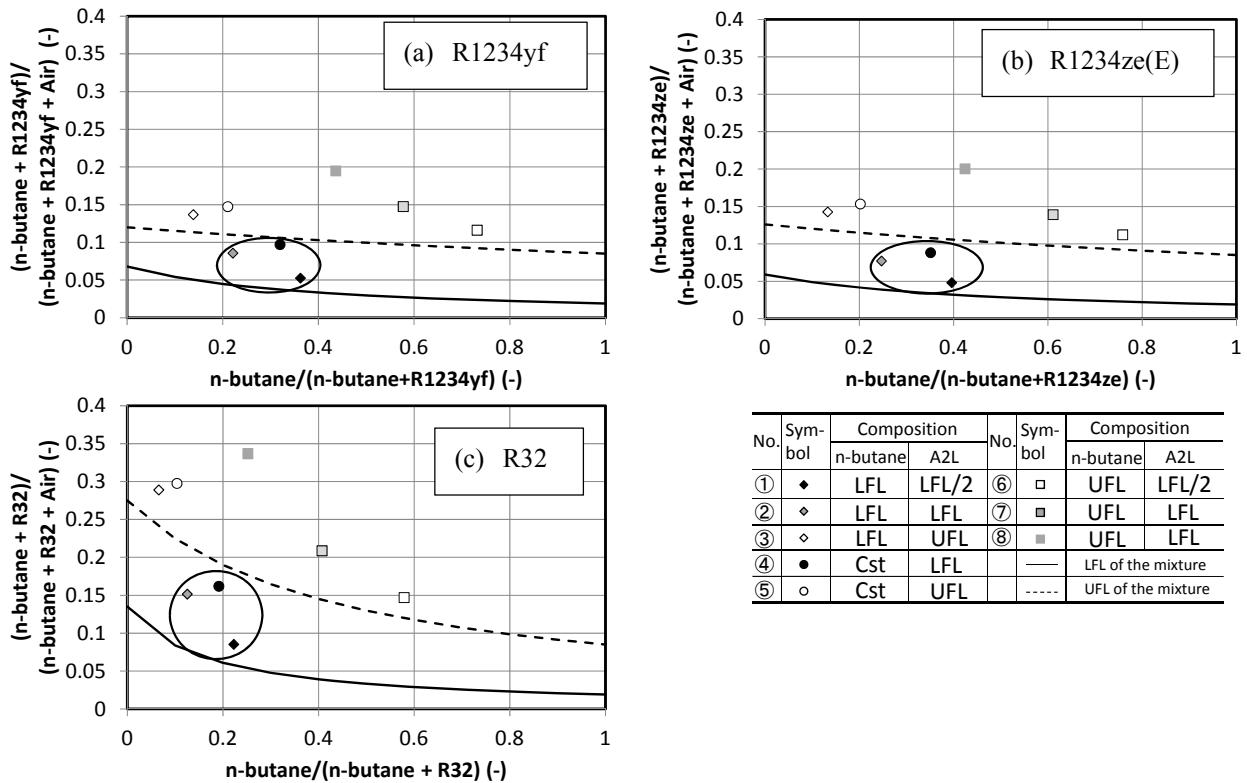


図 3.3.1 燃料混合気（ノルマルブタン+A2L 冷媒+空気）中の燃料ガス（ノルマルブタン+A2L 冷媒）の組成と予測燃焼範囲の関係

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、燃料ガスの空気中でのモル分率（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 3.3.1 である。図 3.3.1 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 3.3.1 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。ちなみに、図 3.3.1 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（松井, 2008）、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

#### 3.3.2.3.1 圧電ガスライターの場合

図 3.3.2 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。

#### 3.3.2.3.2 予混合ターボライターの場合

図 3.3.3 は予混合ターボライターを動作させた場合のライター着火口極近傍の様子を撮影したものである。R1234yf 及び R32 が燃焼下限界濃度程度で混合された場合は、圧電ガスライターの場合とほぼ同じ挙

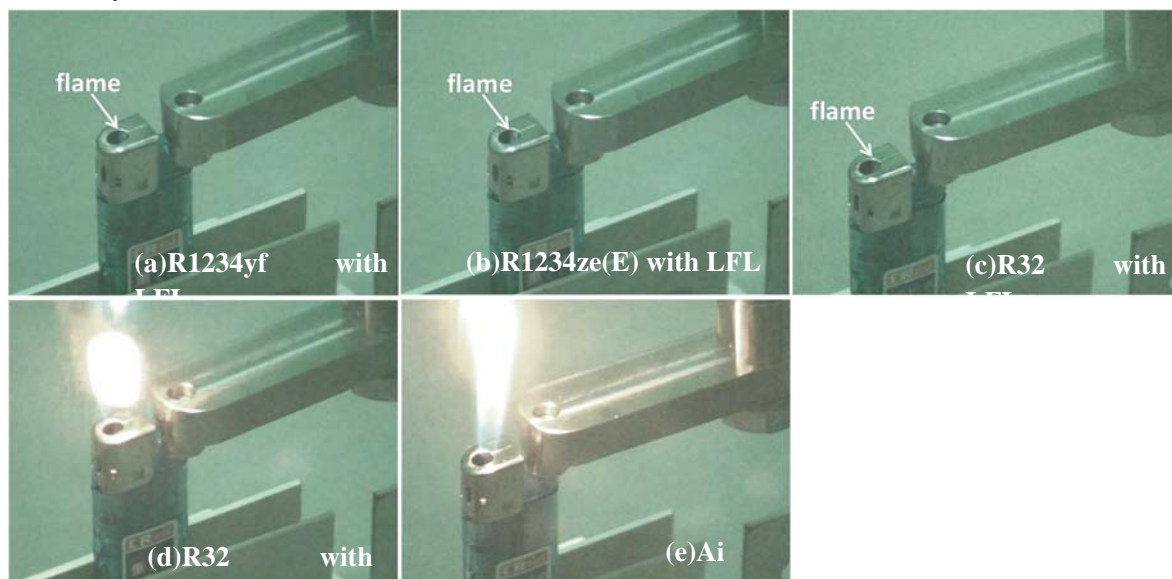


図 3.3.2 A2L 冷媒滞留雰囲気下における圧電ガスライター周囲の様子

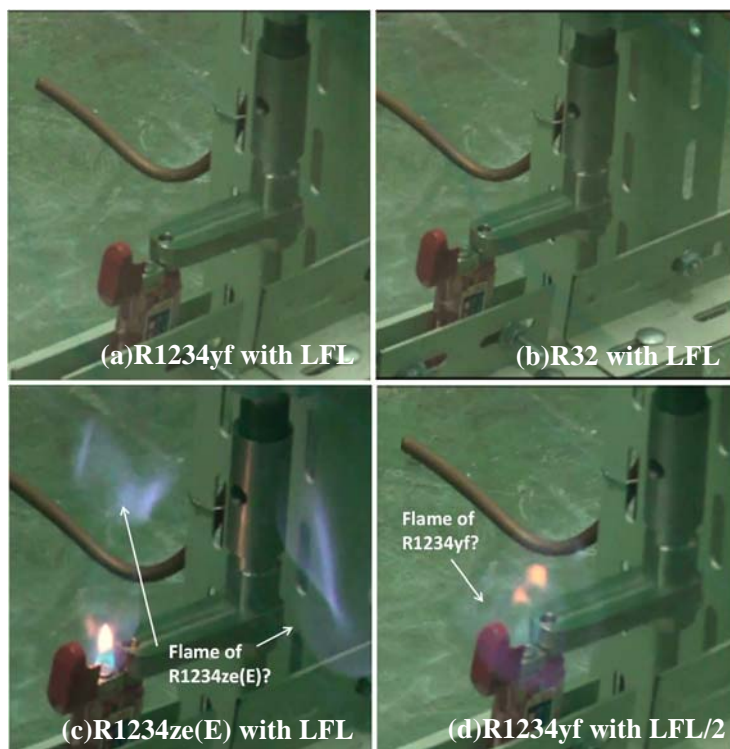


図 3.3.3 A2L 冷媒滞留雰囲気下における予混合式ターボライター周囲の様子

動がみられ、滞留冷媒への着火及び全体への火炎伝播は認められなかった。ところが R1234ze(E)が燃焼下限界濃度程度で混合された場合（室温 19 °C，相対湿度 71 %）では、図 3.3.3(c)にみられるように、着火口付近に火炎が形成され、これが周囲の冷媒へ伝播したケースがみられた。最終的に、複数日にわたって同じ冷媒組成・湿度条件において、計 27 回の押付動作を行ったところ、着火が認められたのはある一日のみの 3 回であった。着火及び火炎伝播が認められた理由は今のところ未解明であるが、冷媒滞留空間内で繰り返しライターボタンの押下動作を繰り返したために、周囲の滞留 R32 が空気と混合されて燃焼しやすくなった可能性があげられる。ただしこの場合でも、火炎伝播は持続的ではなく、およそ 1-2 秒で消炎した。

### 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ライターガスが外部へ出ない圧電ガスライター、予混合ターボライターとは大きく異なる。また、圧電ガスライターや予混合ターボライターに比べて、ライター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可能性がある。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については、一部詳細を国際会議（Imamura, et. al., 2014）にて報告しているが、現在、詳細をまとめた論文を国際誌に投稿中であるので、本報告書では要点のみを記載する。

#### 3.3.3.2 実験

図 3.3.4 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、ライターのフロ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 Vp-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。

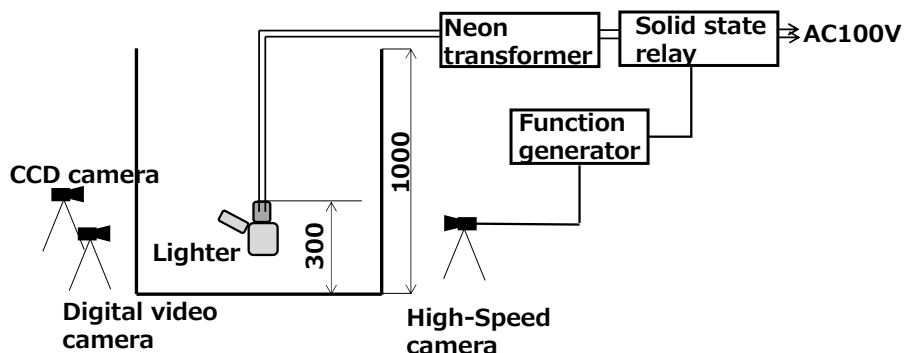


図 3.3.4 石油ライターを着火源とした場合の滞留 A2L 冷媒への着火実験の概略。単位：mm。

冷媒の漏洩量は 220 g とし、ライター設置高さ（300 mm）における冷媒濃度が概ね 16 vol%となるように調整した。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; 株式会社島津製作所製 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  $\mu$ 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。

### 3.3.3.3 結果及び考察

#### 3.3.3.3.1 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

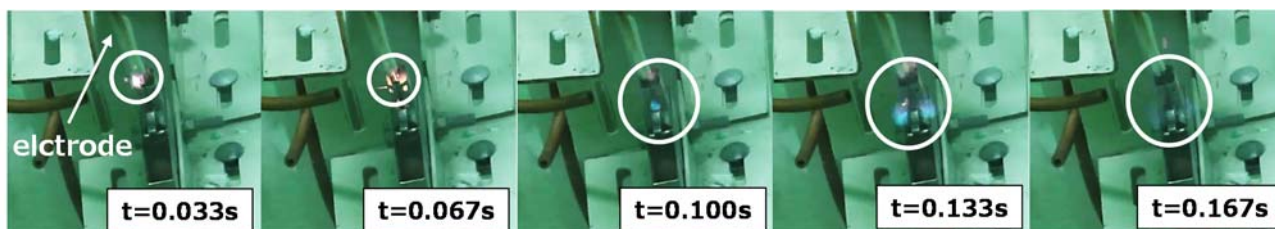
本実験では、滞留冷媒を乱さないために、直接ライターのフリントホイールをこする代わりに、交流放電により着火のためのエネルギーを与える。従って両者のエネルギーに大きな乖離があると、実際の喫煙動作時を必ずしも良好に模擬できないことになる。そこで、両者のエネルギーの妥当性を評価することとした。

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 (日本喫煙具協会, 2008)。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、 $1.2 \times 10^{-4}$  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熱を求めると、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の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模擬できていると考えられる。

#### 3.3.3.3.2 石油ライターによる着火実験結果

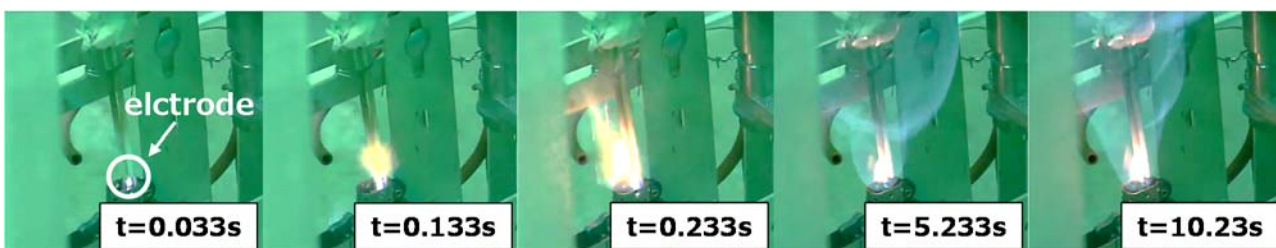
図 3.3.5 (a) は、放電時間 50 ms における、R32 滞留下での石油ライター周辺の様子を撮影したものである。風防内で一瞬火炎形成が認められるが、200 ms 以内に消炎し、周囲の滞留 R32 への火炎伝播は認められな



(a) 放電時間 50 ms



(b) 放電時間 100 ms



(c) 放電時間 500 ms

図 3.3.5 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%

かった。図 3.3.5 (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 3.3.5 (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 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価 (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)

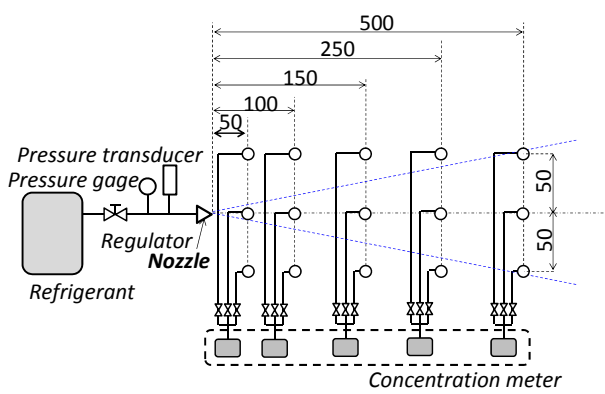
### 3.4.1 概要

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 (Imamura, et al, 2015) として公表されている。

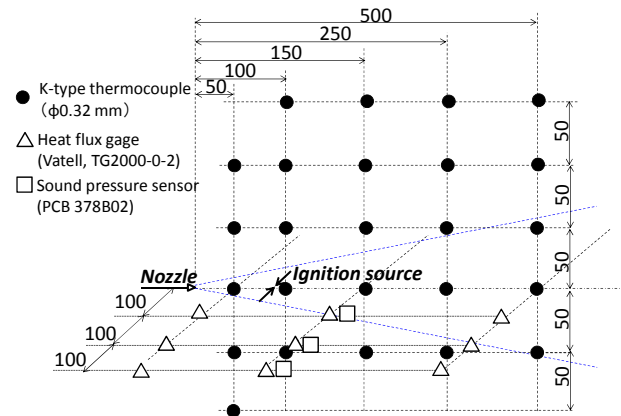
### 3.4.2 実験

#### 3.4.2.1 冷媒漏洩系統

冷媒ボンベに 1/4 インチ銅管を取り付け、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 mm $\phi$ , スリットの場合は 1.0 mm $\times$ 4.0 mm である。ピンホール径 4.0 mm $\phi$  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-LAQQ) 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 3.4.1 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 3.4.1 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	R1234ze (E)	0.2	5.0	
J20-32		22.5		
J20-26		1	82.5	
J20-33		97.5		
J20-27		97.5		
J20-34		3	272.5	
J20-28		4	87.5	
J20-35			192.5	
J20-30		1x4hor	85.0	
J20-37			92.5	
J20-29			1x4ver	85.0
J20-36				102.5

表 3.4.2 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				N.D.	
J21-04			Ne-TR	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		R1234yf	1	Ne-TR	106.7
J22-12			3	Ne-TR	400.0
J21-07	4		Spark	580.0	
J21-08			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測計（第一熱研樹製 US-II-T-S）5台を用いた。測定位置は図 3.4.1 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 mm $\phi$  のタングステン対向電極と高圧電源装置 (樹ジェネシス製 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  $\mu$ s である。交流連続放電では、ネオントランス (小寺電子(株)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 mm $\phi$  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 3.4.1 に濃度計測実験の実験条件を、表 3.4.2 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 3.4.2 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 3.4.2 の等濃度線は 2.5 vol% ごと (図 3.4.2 (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 3.4.2 (a), (c) に示すように、R32 であっても R1234yf であっても、4 mm $\phi$  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 mm $\phi$  の場合は、図 3.4.2 (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 3.4.2 (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。

#### 3.4.2.2 着火と火炎伝播

図 3.4.3 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 mm $\phi$  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 3.4.3 (a) の丸囲み部分)、即座に発光は消滅し (図 3.4.3 (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。

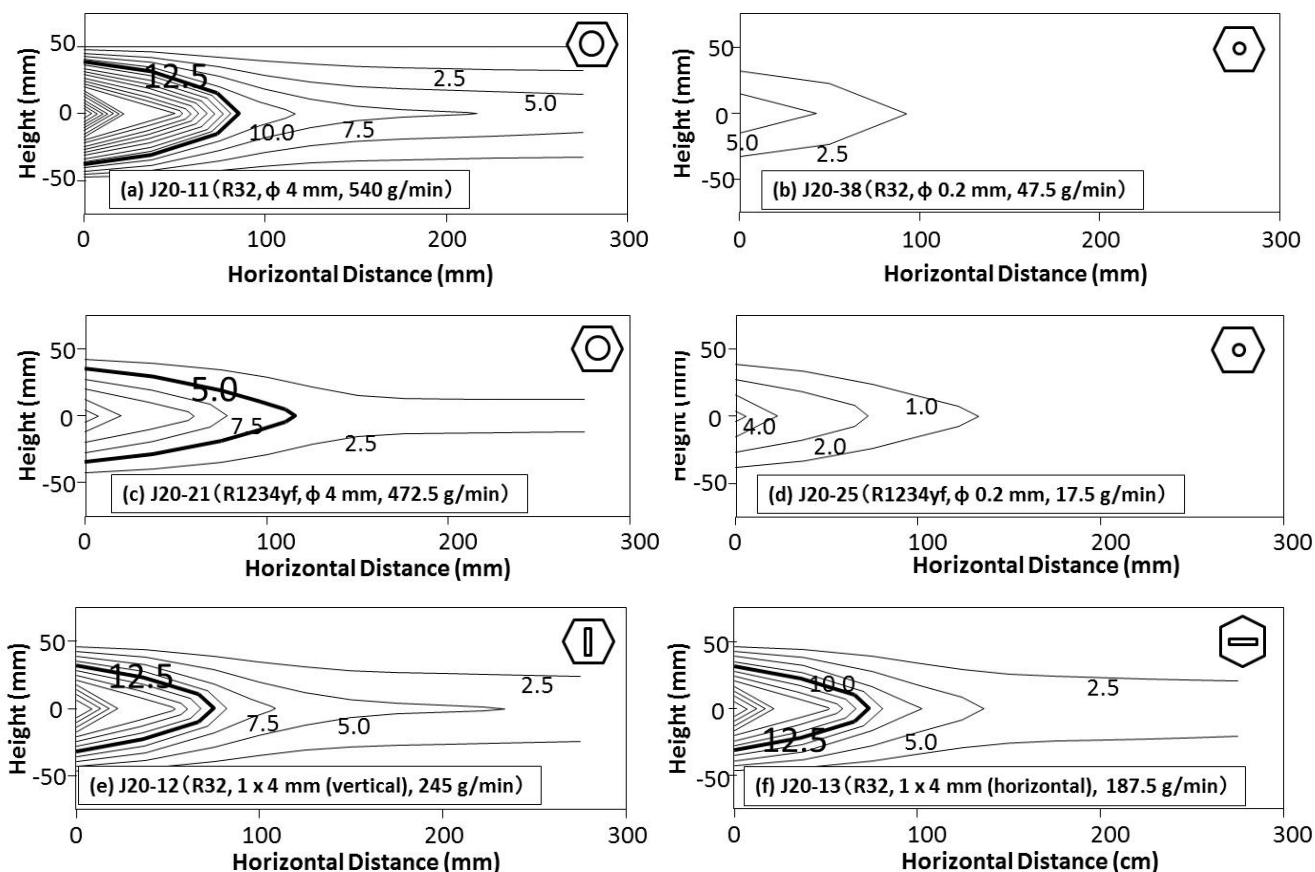


図 3.4.2 噴出冷媒ジェットの平均濃度分布

図 3.4.4 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 mm $\phi$  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、これが冷媒噴流と衝突すると、図 3.4.4 (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 3.4.5 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。

### 3.4.2.3 着火による危害度：温度、熱流束、燃焼生成物濃度

図 3.4.6 (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 mm 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。

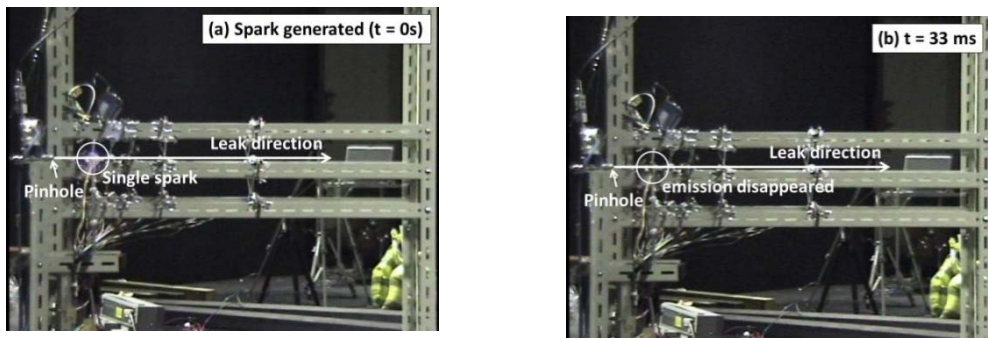


図 3.4.3 着火源を単発直流放電とした場合の冷媒ジェットの様子  
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 0.81 MPa.

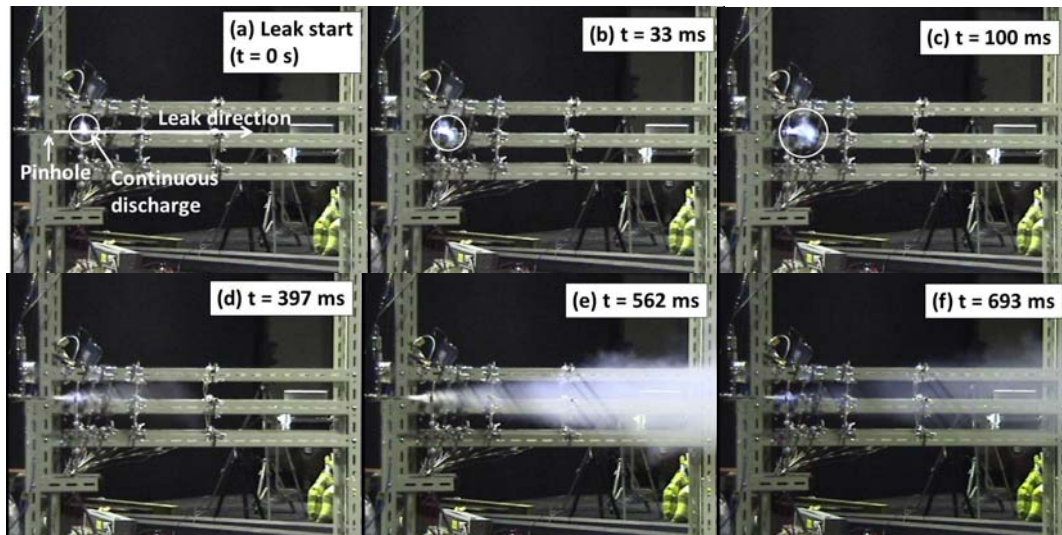


図 3.4.4 着火源を交流連続放電とした場合の冷媒ジェットの様子  
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 0.66 MPa.

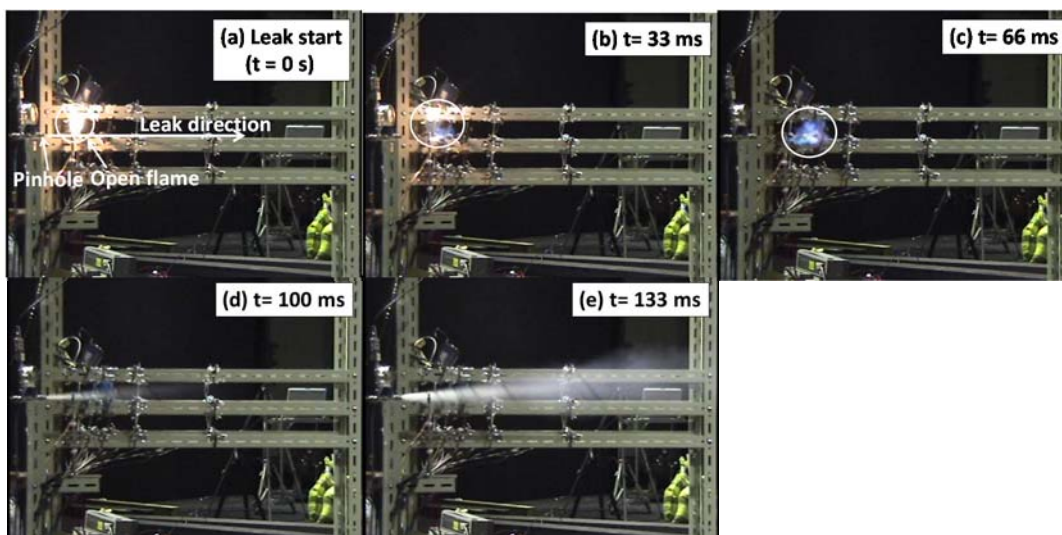


図 3.4.5 着火源を裸火とした場合の冷媒ジェットの様子  
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 1.16 MPa.

図 3.4.6 (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焼生成物 (HF) の発生は認められなかった。

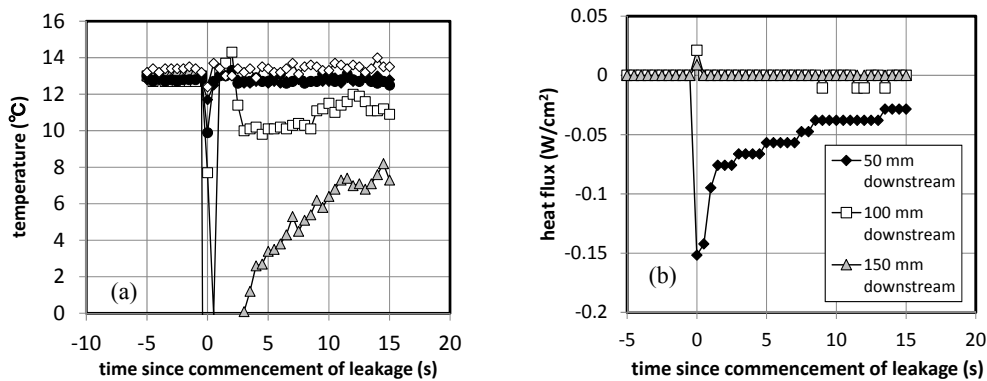


図 3.4.6 冷媒ジェット中心軸上の温度および周囲の熱流束の経時変化  
冷媒: R32; ピンホール: 4 mmφ; 漏洩圧力: 1.06 MPa; 着火源: 交流持続放電

### 3.5 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価（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 (Imamura, et al, 2015) として公表している。

#### 3.5.2 実験

##### 3.5.2.1 実験装置

図 3.5.1 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 面のみビニールシートとして、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。

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 3.4.2.2 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

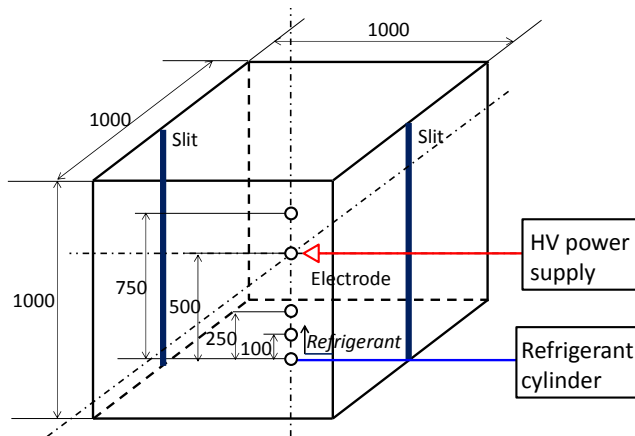


図 3.5.1 取扱シチュエーション #2-(c)における模型回収機の概略

○: 濃度測定位置

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 3.5.1 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。

表 3.5.1 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			380.0
J26-07			380.0
J26-08	R1234yf (Liquid)	20	560.0

### 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 3.5.2 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 3.5.2 (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 3.5.2 (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 3.5.2 (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 3.5.3 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 3.5.4 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。

#### 3.5.3.2 回収機模型内での着火実験

図 3.5.5 はスリット幅  $w_s = 0$  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: 16 J) 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 500 mm) 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ー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。この輝炎はビニールシートの燃焼によるものと推測される。従ってビニー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。



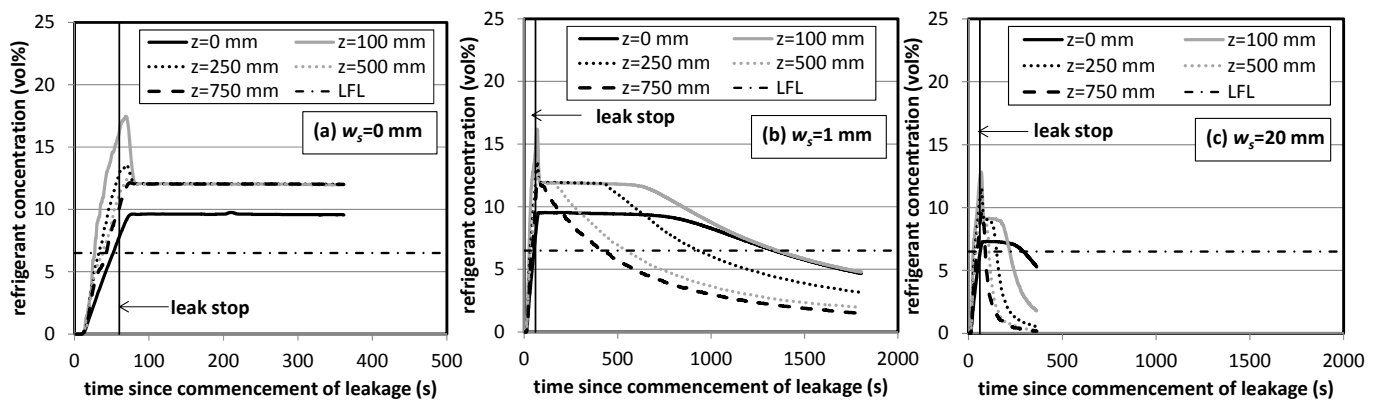


図 3.5.2 各スリット幅における回収機内の漏洩冷媒濃度の経時変化

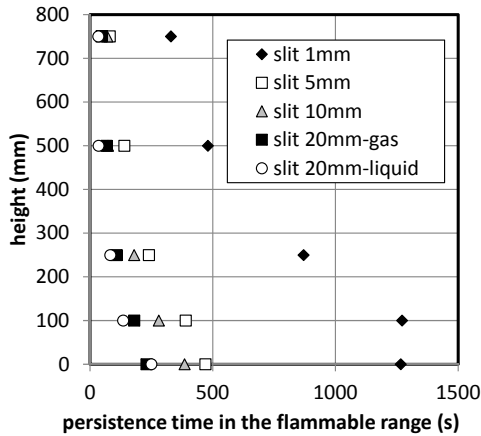


図 3.5.3 冷媒濃度が燃焼範囲内に入っている時間と高さの関係

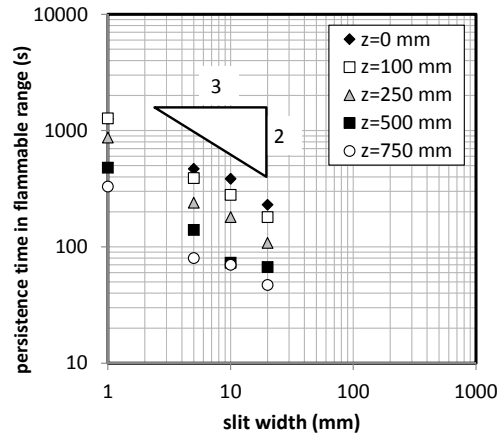


図 3.5.4 冷媒濃度が燃焼範囲内に入っている時間とスリット幅の関係

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 3.5.5 に示すような着火及び火炎伝播が見られたのは、16 J 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、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 200-500 mJ 程度は必要とされており、回収機内で発生しう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 3.5.5 のような燃焼が生じる可能性は極めて低い。

図 3.5.6 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 (1.5cm/s, ISO, 2014) ので、火炎が伝播しなかったものと考えられる。

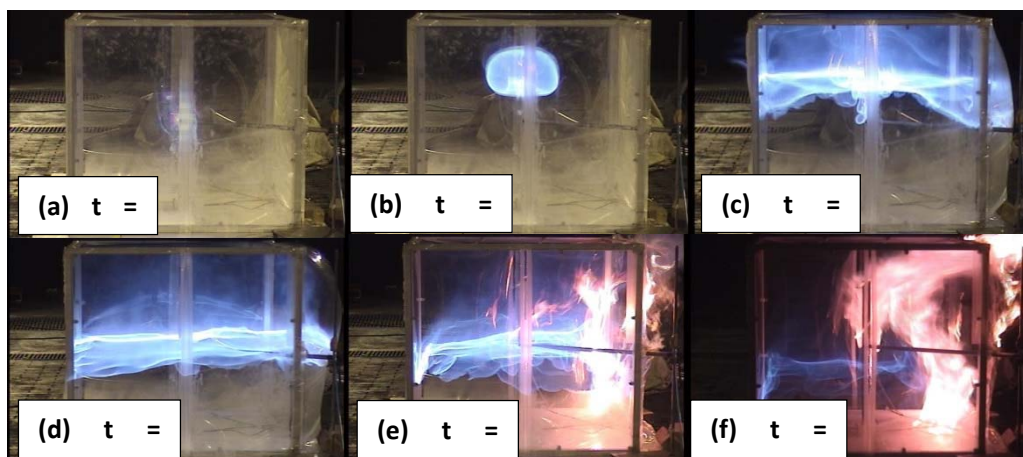


図 3.5.5 回収機内部に漏洩した冷媒の着火実験画像（スリットなし）  
冷媒: R1234yf; 漏洩速度: 380 g/min; スパークエネルギー: ~16 J.  
 $t$ : スパーク発生からの経過時間 (s)

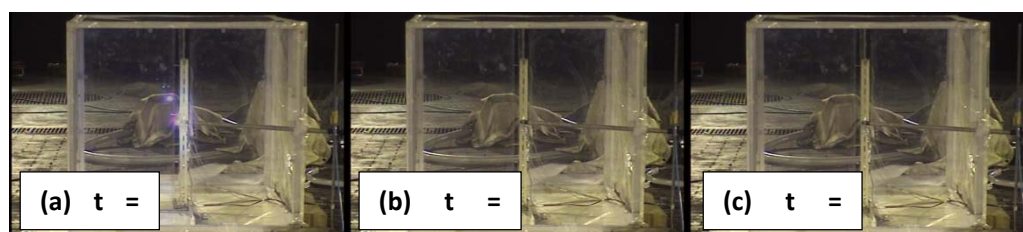


図 3.5.6 回収機内部に漏洩した冷媒の着火実験画像（スリット幅 20 mm）  
冷媒: R1234yf; 漏洩速度: 380 g/min; スパークエネルギー: ~16 J.

## 3.6 A2L 冷媒のフィジカルハザード評価（取扱シチュエーション#2-(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）

### 3.6.1 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、断熱圧縮され温度上昇し、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。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。

本実験において、燃焼するための理想的な条件を設定したため、本実験結果のみから冷媒自体が危険であるとは結論付けられないことを留意する必要がある。

### 3.6.2 実験装置と実験方法

#### 3.6.2.1 実験装置

図 3.6.1 に実験装置の概略を示す。実際の圧縮機でディーゼル爆発を発生させると危険なため、代わりに模型エンジンを使用した。装置は空気供給系、冷媒供給系、温度調節系、潤滑油供給系、模型エンジン及び計測系から構成されている。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、モーターで駆動された模型エンジン内で圧縮される。エンジン内圧力は圧力計で測定され、排気は FTIR により分析した。

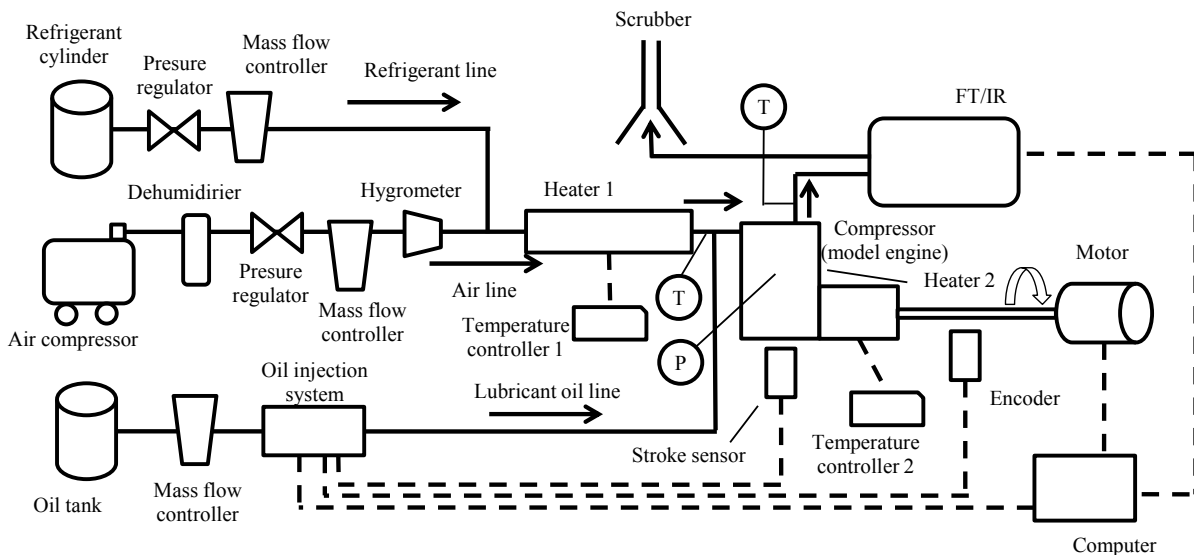


図 3.6.1 実験装置概略

(a) 空気供給系

空気はコンプレッサーで 0.7MPa に加圧し，除湿機を通り，減圧弁で 0.3MPa に減圧した．流量はマスフローコントローラー (MODEL8550MC-0-1-1 : コフロック製) で制御した．

(b) 冷媒供給系

冷媒はボンベからガス状態で減圧弁に入り 0.3MPa に減圧し，マスフローコントローラー (FCST1050LC-4F2-F50L-N2 : フジキン製) で流量制御し，空気と混合される．

(c) 温度調節系

空気と冷媒の混合気を，シース熱電対を用いて測定し，ヒーター1 と温度調節器 (FHP-201 : 東京硝子機器製，TC-1000 : アズワン製) で温度制御した．またヒーター2 で後述の模型エンジンの温度制御をし，エンジン吸気側気体温度とエンジン壁面温度が等しくなるようにした．これらにより燃焼が発生しやすい実験条件を設定した．

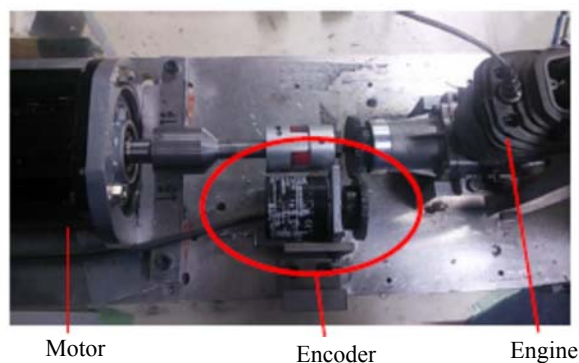
(d) 潤滑油供給系

潤滑油はオイルタンクから流量計 (MODEL213-311/295 : 東洋コントロールズ製) を通り，燃焼噴射システム (コモンレール電子制御燃料噴射システム : FC デザイン製) により，圧力 180MPa から噴霧状に供給した．噴霧のタイミングは，模型エンジンの軸に取り付けたエンコーダーと行程センサーの信号から決定した．

(e) 圧縮機

コンプレッサーとして模型エンジン (R155-4C : ENYA 製，4 サイクル，行程容積 25.42cc，圧縮比 16.0) を用い，クランクシャフトに直結したモーター (MELSERVO-J3 : 三菱電機製) により駆動し，回転数を制御した．

図 3.6.2 に使用した模型エンジンのカットモデルを示す．点火プラグの代わりに圧力計を取り付けている．図 3.6.3 に模型エンジンとモーターの接続部分を示す．両者をつなぐ軸にはエンコーダーギアが取り付けられている．



### 図 3.6.2 エンジンカットモデル

### 図 3.6.3 エンジンモーター間接続

#### (f) 計測系

計測は、模型エンジンの吸気・排気の気体温度をシース熱電対により、模型エンジン内の圧力は圧力計（6045A：KISTLER 製）により、エンジンクランク角をエンコーダーにより行い、オイル流量、インジェクタ信号等と共にデータロガー（データ収集システム NR-2000：KEYENCE 製）を介して収録した。サンプリングレートは 40kHz とした。また排気を FT/IR（フーリエ変換赤外光光度計 FT/IR-4700：日本分光製）により分析した。FT/IR はシングルビーム方式を採用しているため、計測の際は試料の吸光スペクトルと、あらかじめ測定していたバックグラウンドスペクトルを比較して測定する。

#### 3.6.2.2 実験方法

実験条件を表 3.6.1 に、使用した冷媒と潤滑油を表 3.6.2 にそれぞれ示した。現行主要冷媒である R410A, R22, 新冷媒の R32, R1234yf に加え、比較のため不燃性純冷媒である R134a, R22, R125 と、不活性ガスである窒素を用いた。潤滑油の流量は、エンジンの回転数と行程容積で決まる空気流量から理論空燃比を基準に決定した。SVC 東京による潤滑油の CHO 成分の分析結果を元に、PAG (VG46) の理論空燃比は 9.5 となった。実験パラメータは、潤滑油の有無、使用冷媒、冷媒体積濃度とした。

表 3.6.1 実験条件

Rotational speed, rpm	1500
Mixture flow rate, l/min	18.8
Inlet gas temperature, °C	260
Oil flow rate, l/min	$2.295 \times 10^{-4}$
Refrigerant concentration, vol%	0 to 100

表 3.6.2. 使用冷媒と潤滑油

Item	Type
Refrigerant	R1234yf, R32, R410A, R134a, R22, R125, N <sub>2</sub>
Lubricating oil	PAG (VG46)

#### (a) 実験 1

実験 1 では、空気と潤滑油の混合気体における自己着火燃焼を調べた。潤滑油流量は理論空燃比となるように設定した。潤滑油噴霧の有無によるエンジン内圧力の変化を測定した。

#### (b) 実験 2

実験 2 では、冷媒濃度を変化させつつ、空気と冷媒の混合気を圧縮した際のエンジン内圧力を測定した。

#### (c) 実験 3

実験 3 では、空気、冷媒、潤滑油混合気の自己着火燃焼を、冷媒濃度を変化させつつ測定した。潤滑油流量は、冷媒濃度に関わらず一定とした。

実験 2 と 3 において、排気ガスを FT/IR を用いて測定した。生成物の同定には、PNNL のデータを参考にした。また HF の定量分析には、H<sub>2</sub>O や CO<sub>2</sub> によるノイズを避けるため、4039cm<sup>-1</sup> のスペクトルを用いた。

### 3.6.3 実験結果

本実験は、実験 1 で潤滑油の有無によるエンジン内圧力の違いを調べた。実験 3 では冷媒濃度を変化させて実験することで、ポンプダウン時に空気が混入する状況を再現し、エンジン内圧力の変化を調べた。また、実験 2 と 3 を比較することで、混合気圧縮時の圧力変化に対する潤滑油の寄与を調べた。

### 3.6.3.1 実験1の結果

図 3.6.4 に空気と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。図の横軸はクランク角であり、 $360^\circ$  で圧縮上死点となる。0.5 度刻みでプロットしている。潤滑油を噴霧していない時はエンジンは滑らかに動いており、燃焼は発生していないと考えられる。潤滑油を噴霧すると圧縮過程の途中で圧力の急激な変化が起こることが分かる。この時エンジンからは白煙が発生し、大きな音や振動が観測された。断熱圧縮による温度上昇のため、潤滑油が自己着火を起こしたと考えられる。

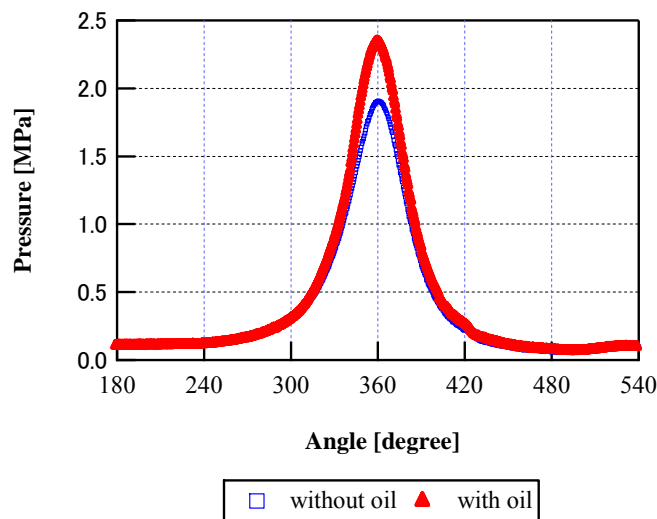


図 3.6.4 エンジン内圧力

### 3.6.3.2 実験2の結果

図 3.6.5 に空気、冷媒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。使用冷媒は R1234yf である。冷媒濃度が上がるのに従って、最大圧力は減少した。これは冷媒の比熱比が空気のそれに比べて、小さいことに起因すると考えられる。いずれの冷媒濃度においても燃焼は発生せず、エンジンの目立った振動は確認されなかった。これらは全ての冷媒において同様であり、潤滑油が無い場合自己着火は発生しないことが分かった。

### 3.6.3.3 実験3の結果

#### (a) エンジン内圧力

図 3.6.6 に空気、冷媒、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。使用冷媒は R1234yf である。

R1234yf において、冷媒濃度が高い場合は、急激な圧力上昇は見られなかった。この時、冷媒濃度が減少するに従い、最大圧力は上昇した。更に冷媒濃度が減少すると、エンジン内圧力は急上昇し、激しい音と振動が観測された。また、エンジンから黒煙が排気された。冷媒自体が燃焼したと考えられる。燃焼が発生している冷媒濃度領域においては、冷媒濃度が減少するに従い、最大圧力は減少した。これらの傾向は、燃焼した冷媒濃度の違いやその時の圧力に多少の違いはあったが、R32, R410A, R134a, R22 を用いた実験においても同様であった。

R125 を用いた実験では、冷媒濃度が高い場合は他の冷媒と同様に燃焼は確認されなかった。しかし冷媒濃度が低い場合も激しい燃焼は確認されず、最大圧力も低かった。

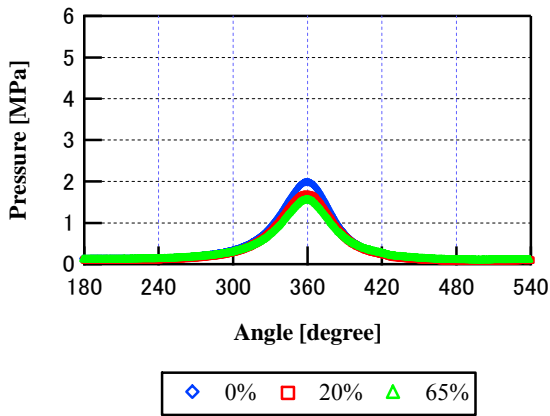


図 3.6.5 エンジン内圧力（潤滑油無し）

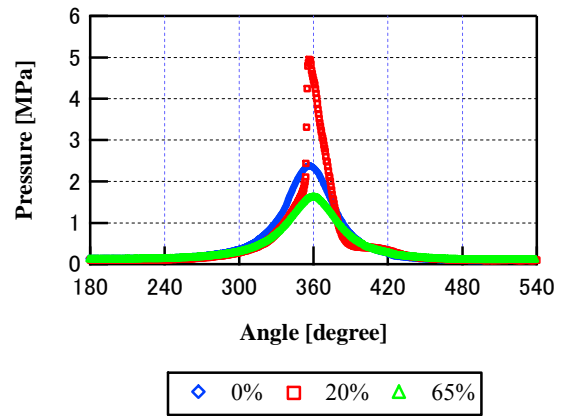


図 3.6.6 エンジン内圧力（潤滑油有り）

(b) 排気分析

それぞれの冷媒を用いた実験の際に、排気ガスを分析した。図 3.6.7 と図 3.6.8 に、排気ガスの代表的な吸光スペクトルを示す。使用冷媒は R1234yf であり、冷媒濃度は図 3.6.7 が 60%、図 3.6.8 が 10%である。図 3.6.7 において、特徴的な R1234yf の吸光スペクトルが、 $1800\text{cm}^{-1}$  から  $1000\text{cm}^{-1}$  の間に見られる。この際、燃焼は発生していない。図 3.6.8 の実験の際は燃焼が発生しているが、この時フッ化水素 (HF) のスペクトルが  $4200\text{cm}^{-1}$  から  $3600\text{cm}^{-1}$  にかけて、フッ化カルボニル ( $\text{COF}_2$ ) のスペクトルが  $1980\text{cm}^{-1}$  から  $1880\text{cm}^{-1}$  にかけて、一酸化炭素 (CO) のスペクトルが  $2250\text{cm}^{-1}$  から  $2000\text{cm}^{-1}$  にかけて、それぞれ観測された。HF や  $\text{COF}_2$  は、冷媒の燃焼を起因とした生成物と考えられる。

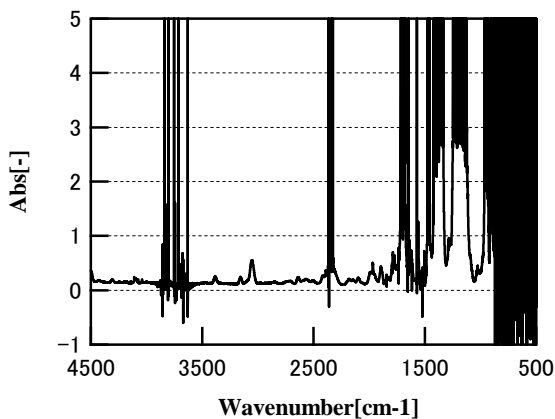


図 3.6.7 高冷媒濃度における排気ガスの赤外吸光スペクトル

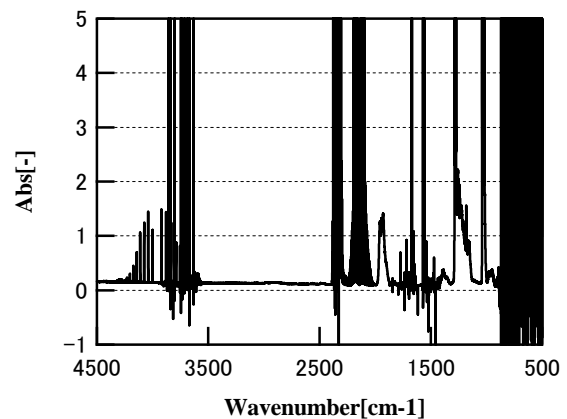


図 3.6.7 低冷媒濃度における排気ガスの赤外吸光スペクトル

3.6.3.4 圧力と冷媒濃度の関係

図 3.6.9 に、実験 2 と実験 3 の結果をまとめたものを示す。横軸が冷媒体積濃度、縦軸が最大圧力であり、これは冷媒濃度 0% を基準として正規化したものである。また冷媒と空気の比熱比を元に、ポアソンの法則を使用して理論値を計算した。

(a) R1234yf

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、最大圧力上昇に伴い、HF 濃度もおおむね上昇し、最大で約 3.5%vol を取った。

(b) R32

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% で最大圧力は最大値約 5MPa を取り、燃焼の有無の濃度境界は非常に明瞭だった。またこの境界付近の冷媒濃度で、HF 濃度が高くなった。

(c) R410A

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、燃焼の有無の濃度境界は比較的明瞭なものとなった。また最大圧力の上昇に伴い HF 濃度も上昇した。実際の事故は R410A 冷媒を用いた空調機器で発生していると考えられることから、本実験は実際の事故を良く再現していると言えよう。

#### (d) R134a

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、冷媒無し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、最大圧力約 4MPa を取った。この時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。

#### (e) R22

冷媒濃度 50%以下の比較的広い範囲で燃焼が発生した。冷媒濃度減少に伴い最大圧力は上昇し、22.5%で最大値を取った。HF 濃度も最大圧力と類似の傾向を取った。また R22 でのみ、燃焼時塩化水素 (HCl) の発生が確認された。図 3.6.10 に FT/IR による燃焼時の排気のスペクトルを、図 3.6.11 に冷媒濃度と最大圧力、HCl 濃度の関係を示す。FT/IR による分析結果において、 $3100\sim 2600\text{cm}^{-1}$  に特徴的な HCl のスペクトルが見られる。HCl の定量には  $2844\text{cm}^{-1}$  のスペクトルを用いた。HF と HCl の濃度傾向は類似しており、冷媒の燃焼により HCl が発生していることが分かる。

#### (f) R125

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ような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。

#### (g) 窒素ガス

窒素ガスは空気と性質がほぼ等しいため、最大圧力の理論値のグラフはほぼ水平となっている。窒素ガス濃度 70%以下で燃焼が確認され、50%以下では最大圧力はほぼ横ばいとなっている。

### 3.6.3.5 燃焼の様子考察

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。実験 1 の結果より潤滑油自体は自己着火により燃焼すること、実験 2 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る。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、その範囲は通常の燃焼範囲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 に関しては、全ての冷媒濃度において激しい燃焼は発生せず、HF 濃度も非常に小さいものだった。

### 3.6.3.6 冷媒の燃焼性

通常冷媒が着火限において着火するには、次の条件を全て満たさなければならない(JSRAE, 2014)。

- (1)冷媒濃度が燃焼範囲内にある。
- (2)着火限が最小着火エネルギー以上のエネルギーを持つ。
- (3)着火限まわりの気流速度が燃焼速度以下。

前章で示した冷媒の物性値をまとめた表によると、R410A, R134a, R22, R125 に関しては燃焼範囲を持たず、R1234yf と R32 に関しては本実験で得られたものとは異なる燃焼範囲を持っている。先に示した研究によると、空気中の水分により燃焼範囲は拡大し、不燃性に区分されている冷媒でも燃焼範囲を持つことがある。これは水分が冷媒分子中のフッ素と反応して燃焼を促進することから引き起こされている。

実験には乾燥空気を用いたが、潤滑油の燃焼により水分が発生していると考えられる。さらに近藤らによると、高い圧力より冷媒の燃焼範囲は拡大する可能性がある(Kondo *et al.*, 2011)。圧縮機内の環境は、冷媒にとってより燃焼しやすいものと言える。

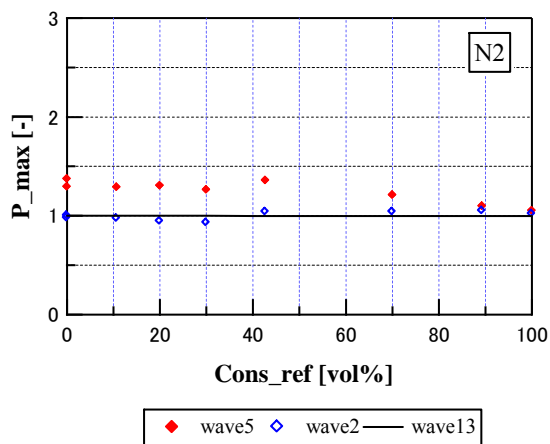
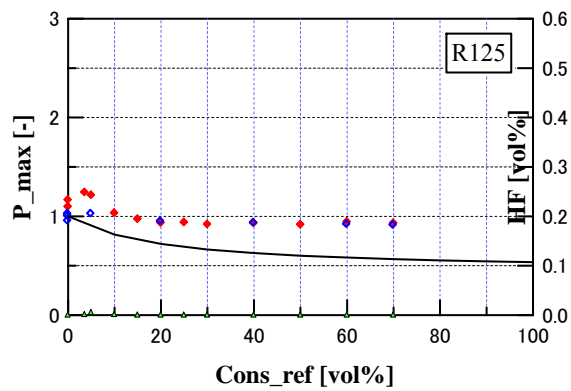
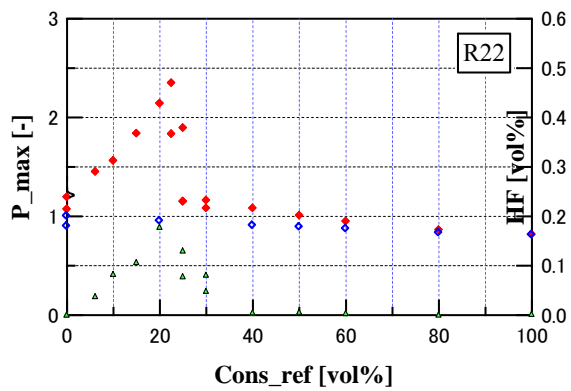
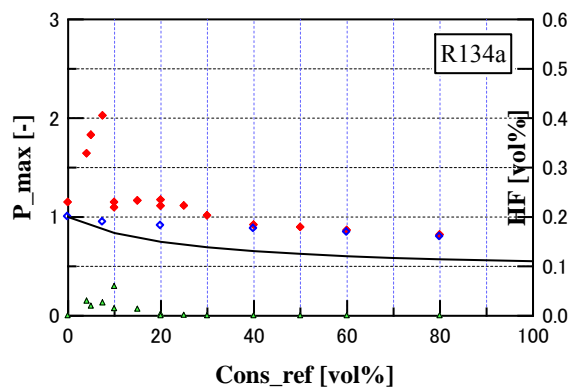
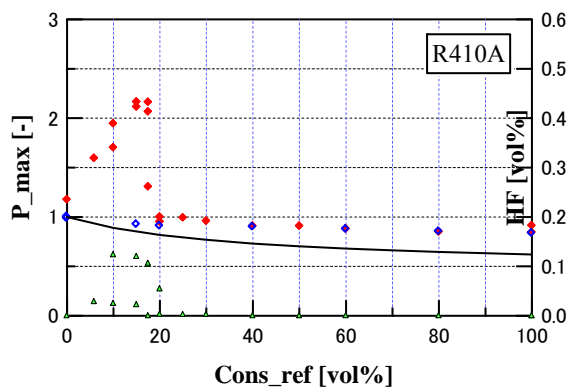
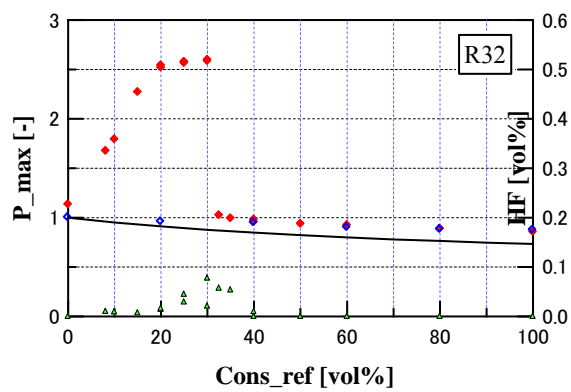
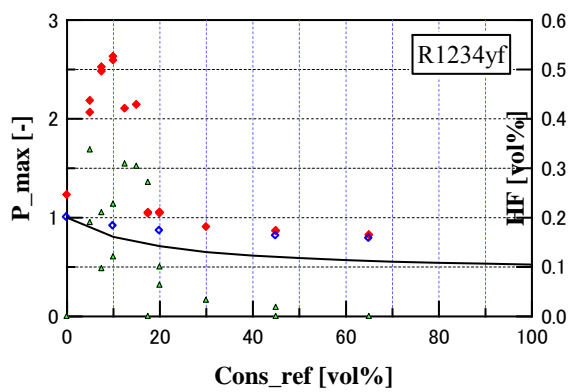


図 3.6.9 冷媒濃度と最大圧力, HF 濃度の関係



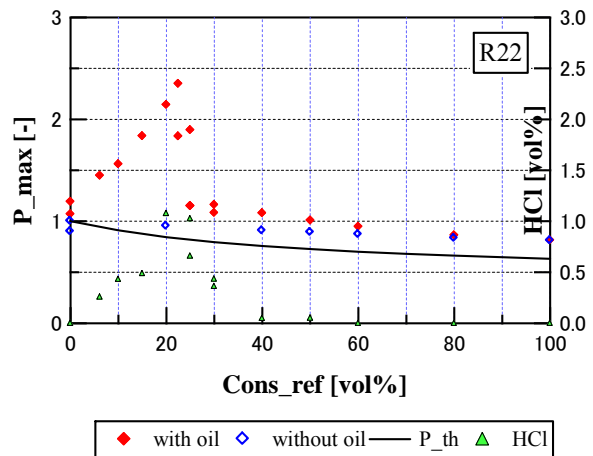
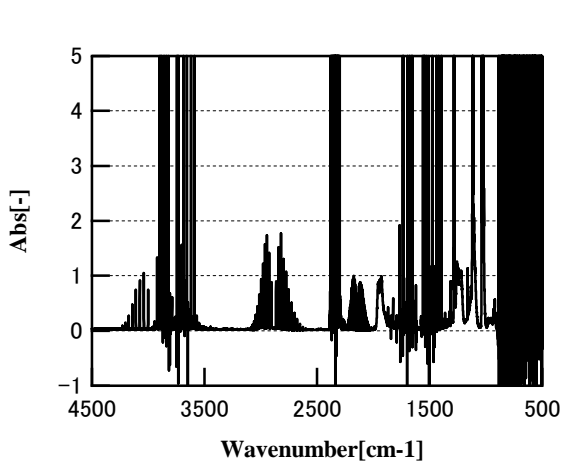


図 3.6.10 R22 を用いた排気ガスの赤外吸光スペクトル 図 3.6.11 R22 における冷媒濃度と最大圧力, HCl 濃度の関係

### 3.7 まとめ

#### 3.7.1 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。

#### 3.7.2 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。

#### 3.7.3 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。

### 3.7.4 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、着火を起りにくくすることができる可能性が示された。

### 3.7.5 取扱シチュエーション#2-(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

ポンプダウン時の断熱圧縮を模した実験装置を用いて、ポンプダウン時の爆発の様子を測定した。本研究において、ポンプダウン時の爆発事故は空気、冷媒、潤滑油混合気のディーゼル爆発によって引き起こされていることが明らかとなった。本実験条件において空気と冷媒のみの混合気では、全ての冷媒において燃焼は発生しなかった。また、空気、潤滑油のみの混合気においても燃焼は発生したが、冷媒の混合により圧力急激に上昇し、その最大値も大きくなった。これらの結果から、まず潤滑油が自己着火をし、それにより冷媒自体が燃焼し、圧力上昇に寄与しているからだと考えられる。R410A や R22 といった従来冷媒と比較して、R1234yf や R32 といった新・低 GWP 冷媒では、燃焼範囲や燃焼時の圧力に大きな違いは見られなかった。

## 参考文献

- Holleyhead, R., 1996, "Ignition of flammable gases and liquids by cigarettes: a review", *Science and Justice*, 36(4), pp.257-266.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- International Organization for Standards, 2014, "ISO817: Refrigerants: Designation and Safety Classification", Third edition. [ONLINE] Available at: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:817:ed-3:v1:en>. [Last Accessed Jan 19, 2015].
- 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*, Vol.144, pp.130-136.
- Kondo, S., Takizawa, K., and Tokuhashi, K., 2011, On the pressure dependence of flammability limits of CH<sub>2</sub>=CFCF<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub> and methane, *Fire Safety Journal*, 46, 5: pp.289-293
- (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].
- 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](http://joh.sanei.or.jp/pdf/E56/E56_5_14.pdf) (2015年3月10日閲覧)
- 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](http://www.tiis.or.jp/pdf/TIISNEWS_2012247.pdf), (2015年3月9日閲覧)
- 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.
- 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](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/SmartAutoAC/MAC_SAE_HFO_1234yf.pdf). [Last Accessed Jan 19, 2015].
- 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](http://www.jsrae.or.jp/committee/binensei/2013PR_j.pdf). (2015年3月10日閲覧)
- 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.
- Takizawa, K., Tokuhashi, K. and Kondo, S., 2009, Flammability assessment of CH<sub>2</sub>=CF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>: Comparison with fluoroalkenes and fluoroalkanes, Journal of Hazardous Materials, Vol.172, pp.1329-1338.
- 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](http://www.jsrae.or.jp/committee/binensei/2013PR_j.pdf). (2015年3月10日閲覧)

## 4. 危険度評価

### 4.1 はじめに

Difluoromethane (R32,  $\text{CH}_2\text{F}_2$ ) や 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234yf,  $\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$ ), trans-1,3,3,3-tetrafluoropropylene (R1234ze(E),  $\text{CHF}=\text{CHCF}_3$ ) はオゾン破壊係数 (ODP: Ozone Depletion Potential) がゼロであり, また温暖化係数 (GWP: Global Warming Potential) が低く, 特に R1234yf や R1234ze の GWP は EC(2012)がカーエアコン向けに定める基準値の 150 以下となっており, 次世代の冷媒として期待されている. しかし, 一方でこれらの冷媒はわずかに燃焼性 (微燃性) を有しているため, 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を確認する必要がある. 従来型の空調機器用冷媒の利用による地球温暖化への対策として, ASHRAE34(2013) 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.

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, R32 や R1234yf をはじめとする A2L 冷媒について大容量の球形燃焼容器を用いた燃焼特性実験を行い, 安全性評価を行った. 昇温・湿潤状態や浮力による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て火炎速度, 燃焼速度, 爆発強度指数  $K_G$  値などの燃焼特性を評価した.

### 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)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を追加した. 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る. これらの新規代替冷媒の安全利用の観点から, 本研究では浮力の影響を考慮して基本的な燃焼特性を観測するため, 大容量の球形燃焼容器を準備し, 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 (2009) 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(1985)やNFPA68(2007) 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 $\phi$ 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. 本年度はさらに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を進めた.

#### 4.2.2 実験

直径 1m, 容積 0.524m<sup>3</sup>の球形容器を備えた実験装置を図 4.2.1 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(2009)が Metghalchi and Kech (1980) や Hill and Hung (1988)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 4.2.1 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

グステン線 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 4.2.1 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ている。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。

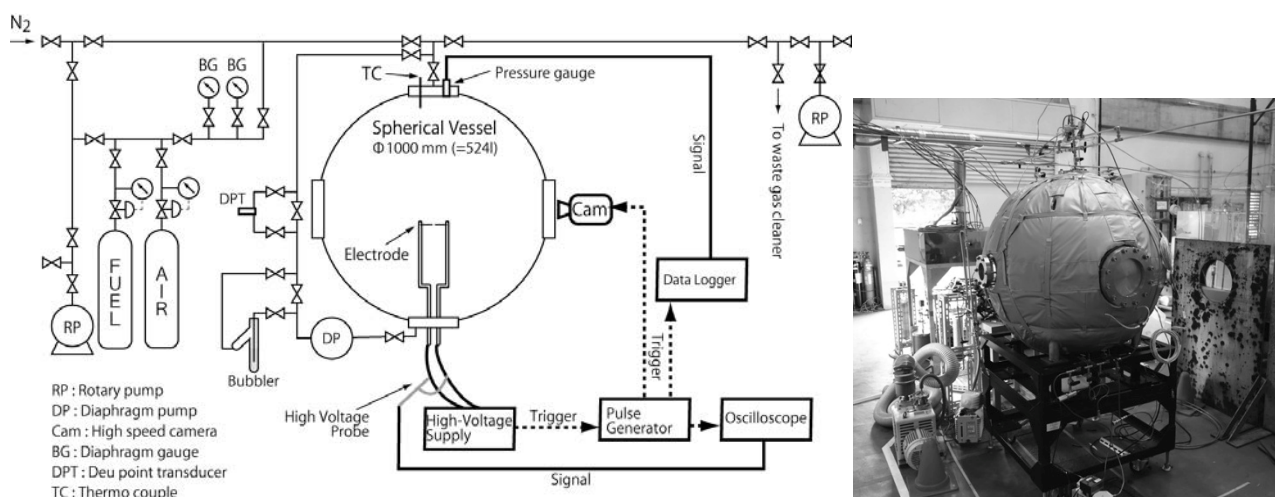


図 4.2.1 Schematic drawing (left) and photograph (right) of experimental apparatus.

### 4.2.3 火炎速度と燃焼速度評価

(a) 映像観察 図 4.2.2 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、時間的变化が異なっている。図 4.2.3 (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 4.2.3(下側) には小型円筒形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容積もしくは容器形状の影響を受けることを示唆しており、密閉容器内での流体的な挙動も含め、特に実規模で燃焼特性の変化に注目して今後より深く調査する必要がある。

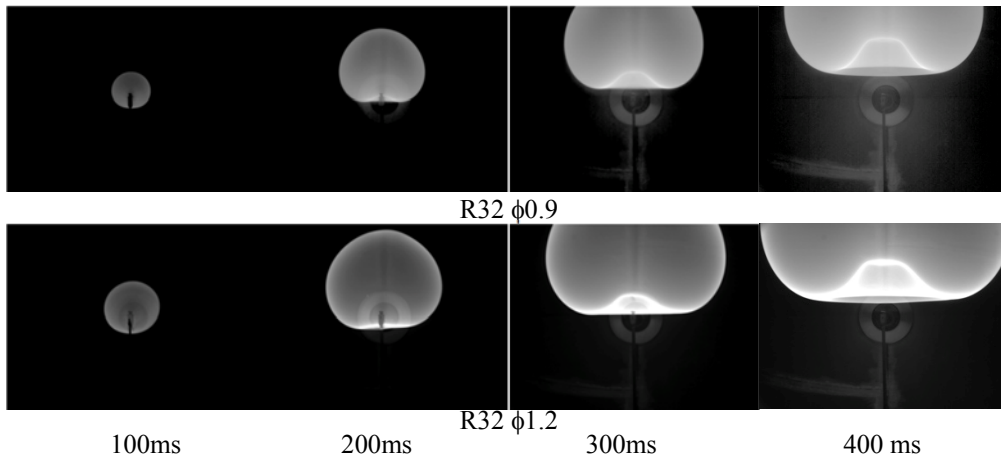


図 4.2.2 Images of flame front propagation for R32 (top:  $\phi=0.9$ , bottom:  $\phi=1.2$ )

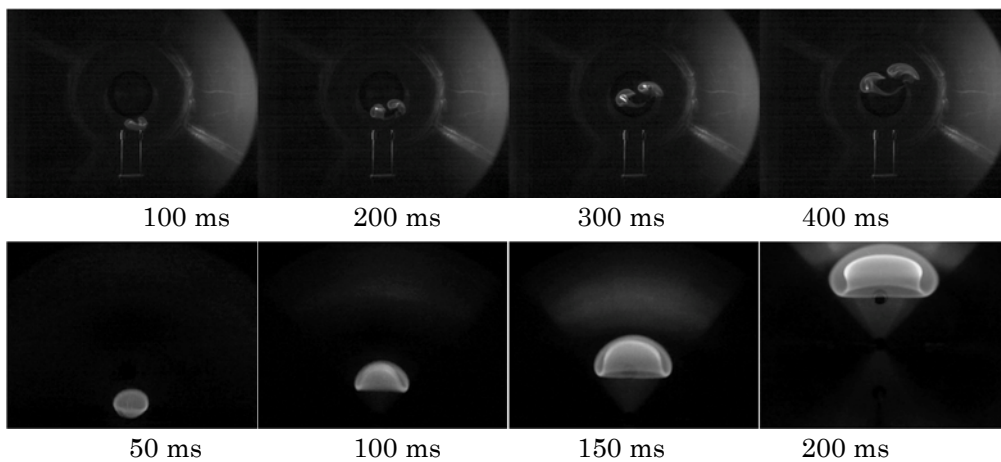


図 4.2.3 Images of flame propagation for R1234yf

( $\phi=1.325$ , top: large spherical vessel, bottom: compact elongated vessel).

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 4.2.4 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 4.2.5 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。 $\phi=1.35$  での圧力プロファイル変化は小さく、また  $\phi=1.4$  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。

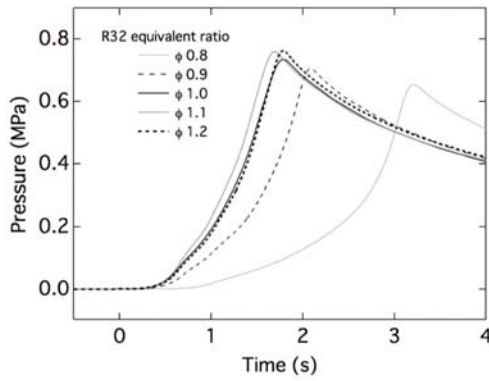


図 4.2.4 Pressure profile for R32 ( $\phi = 0.8-1.2$ ).

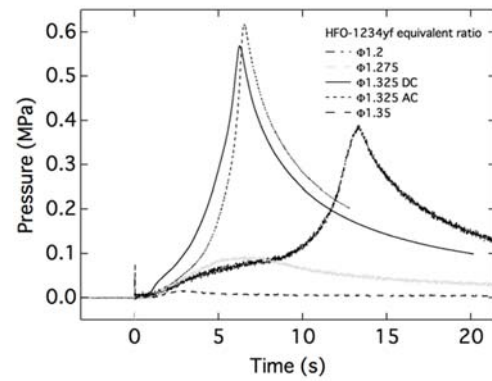


図 4.2.5 Pressure profile for R1234yf ( $\phi = 1.2-1.35$ ).

- (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をあたえ、水平方向の火炎速度に対して1.2倍から2倍早くなる。R1234yfに関しては現段階の成果では火炎幅と火炎面上端の映像解析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.*, 2000),

$$S_u = \left( \frac{\rho_b}{\rho_u} \right) \cdot S_f \quad (4.2.1)$$

$\rho$  は密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $\rho$ 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,  $\rho_u$  は既知の初期状態の密度で, 未知となる  $\rho_b$  についてはGordon and McBride (1994)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.*, 2000)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。水燃焼速度 $S_u$ は火炎面が球状に膨張することを仮定したSV法 (Metghalchi and Keck, 1980, and Hill and Hung, 1988)により以下のように評価している,

$$S_u = \frac{R}{3} \left[ 1 - (1-x) \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma_u}} \right]^{-2/3} \cdot \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma_u}} \frac{dx}{dt} \quad (4.2.2)$$

$R$  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 $\gamma_u$  は比熱比である。各圧力における $x$ と $\gamma_u$  は化学平衡計算(Gordon and McBride, 1994)により算出できる。図4.2.6に示すように, R32について燃焼速度 $S_u$ を水平方向の火炎伝播速度 $S_f$ から評価した。SV法を用いて火炎面が球状に膨張することを想定した場合の燃焼速度も計測により得られた圧力プロファイルと数値計算から評価し図4.2.6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。解析では初期段階での火炎面の歪みが球形から大きく逸脱しない範囲圧力プロファイルに注目し, Takizawaら(2005)が示している参考値と比較した。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4.2.3および図4.2.5に示したように, R1234yfに関しては現在のところ火炎面の伝播挙動が複雑でSV法の適用が困難なため,  $\phi=1.325$ に関してのみ燃焼速度 $S_{u0}$ を図4.2.7に評価している。Takizawaら(2010)は浮力の影響を排除するため, 微小重力下( $-\mu\text{g}$ )での燃焼挙動を観測して燃焼

速度 $S_{u0-ug}$ を評価しており、参考値として図4.2.7に示した。R1234yfについては先に述べたように大型の燃焼容器での燃焼試験では火炎面が乱れ、また小型円筒容器での試験で観測された空洞状の火炎面形状を前提とすると、大型の燃焼容器ではSV法による燃焼速度のみならず、火炎伝播速度についても評価方法について注意深く検討する必要がある。

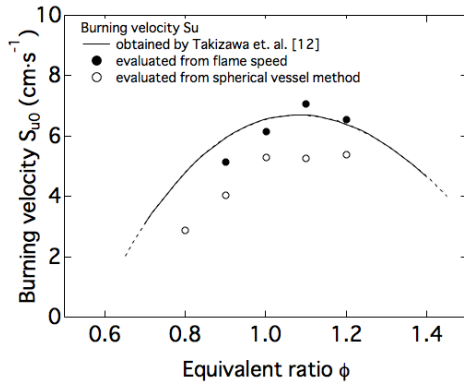


図 4.2.6 Estimated burning velocity for R32.

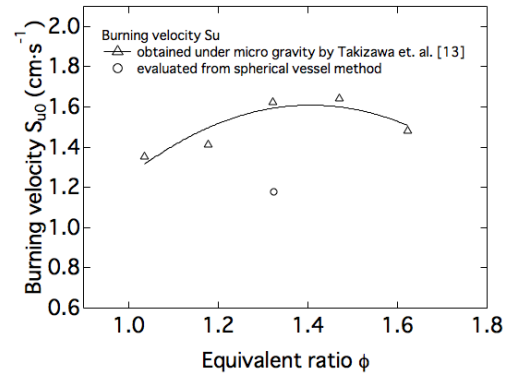


図 4.2.7 Estimated burning velocity for R1234yf.

- (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(2012)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、昇温・湿潤状態でのA2L冷媒の燃焼特性について球形容器(図4.2.1)を使用して実験的に評価した。攪拌用のループ経路(図4.2.1)の途中に設置した露天計による露天温度、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 $10^{\circ}\text{C}$ – $30^{\circ}\text{C}$ )と湿潤条件(約60%RH以上  $30$ – $35^{\circ}\text{C}$ )における燃焼試験を行った。またR1234zeについては $35^{\circ}\text{C}$ 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( $35^{\circ}\text{C}$ )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は $35^{\circ}\text{C}$ 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4.2.8にはR1234ze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4.2.1には昇温・乾燥/湿潤条件での評価結果を示す。

試験時の燃料/空気混合気についてはR1234yfについては乾燥条件で燃焼速度が最も高くなる $\phi = 1.325$ を基準に観測しているが、水分の添加や温度によってその当量比や可燃域も変動することが考えられ、また水分添加調整が難しく湿度条件にばらつきがあるため、再現性を含めて水分と温度が燃焼挙動にあたる影響について来年度も引き続き現象を追求していく予定である。



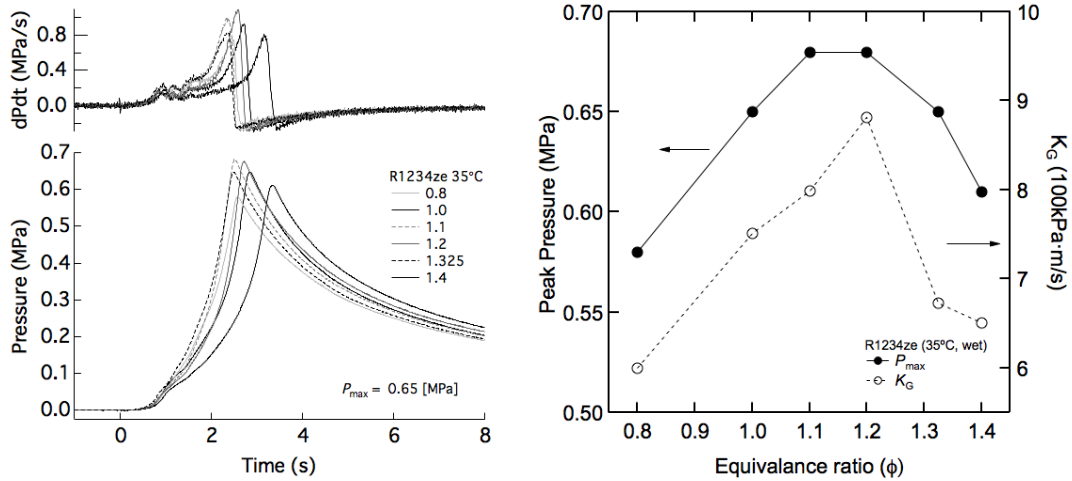


図 4.2.8 Example profiles of R1234ze at 35°C and wet condition

(left: effect of equivalence ratio on pressure profile, right: effect of equivalence ratio on  $P_{max}$  and  $K_G$ ).

表 4.2.1 Brief summary of evaluated properties for refrigerants.

Refrigerant	Equivalence ratio ( $\phi$ )	Temperature (°C)	Moisture (wet-dry condition)	$P_{max}$ (100kPa)	$K_G$ (100kPa·m·s <sup>-1</sup> )	Flame speed $S_f$ (cm·s <sup>-1</sup> )	Burning velocity $S_u$ (cm·s <sup>-1</sup> )
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	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

### 4.3 爆発強度評価

爆発強度指数 $K_G$ は圧力プロファイルを解析することで評価される。 $K_G$ 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。実規模での爆発強度影響を評価するため、4.2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

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

$$K_G = \left( \frac{dP}{dt} \right)_{\max} \cdot V_{\text{vessel}}^{\frac{1}{3}} \quad (4.3.1)$$

$P$  は圧力(100kPa),  $t$  は時間(s),  $V_{\text{vessel}}$  は燃焼容器容積(m<sup>3</sup>)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 4.2.1 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

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(Mannan 2005)等をまとめたものを表 4.3.1 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 NFPA68(2007)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。これらのガスと A2L/2L 冷媒との比較検討を行い、新規冷媒の爆発危険性についてさらに調査を進めていく。特に、表に掲げた中で燃焼特性値に近いアンモニアに注目して同一条件での比較を念頭に評価を進めていく予定である。

表 4.3.1 Comparison of  $P_{max}$ ,  $K_G$  and other parameters with other gases.

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

\*1 Ref. (NFPA68, 2007), Table E.1 (0.005 ft<sup>3</sup> 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  
 † 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、4.2 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、一般的な部屋で隙間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 4.3.1 はベントによる圧力の低減効果を説明している。4.2 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  $P_{red,max}$ 、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  $P_{red,max}$  から様々なモデルを用いて算出される(VDI-3673 ,

2002; BS EN 14491,2012; Siwek, 1996). 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.38, 2005). 一般の室内でドア下の隙間などで想定される開口形状は  $L/D$  が 2 を大きく超えるため実験的に有効なベント面積  $A_V$  を評価した. 4.2 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 4.3.2 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てあり, 冷媒の漏れ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てある. 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が設けてある. 4.2 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 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. 冷媒の漏れ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, 4.2 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 4.3.3 に丸形状ベントの存在下での R32 の燃焼挙動を高速度カメラで観察した例を示す. 放電直後は 4.2 節での燃焼試験と同じく球形に燃焼波面が広がり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ていくが, 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. ベント形状は丸形状の他に正方形, そして縦方向, 横方向に  $L/D$  を変えながら計測した. 特にベント面積と長方形の形状比  $L/D$  による圧力変化への影響に注目して整理し, 爆発強度の低減効果を評価する予定である.

これまでの評価では漏れいした 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, いわば最悪の漏れ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 (NIIS-TR-No.38, 2005). 本評価においても, 実際の漏れ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. このような鉛直方向に濃度勾配をもった場合において空間占有割合の考え方や濃度勾配を形成した上で実験的に  $K_G$  値を計測するなどして放散圧力の低減効果を評価する予定である.

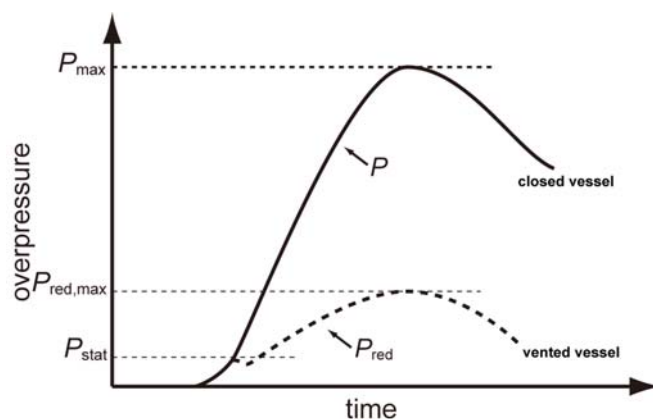
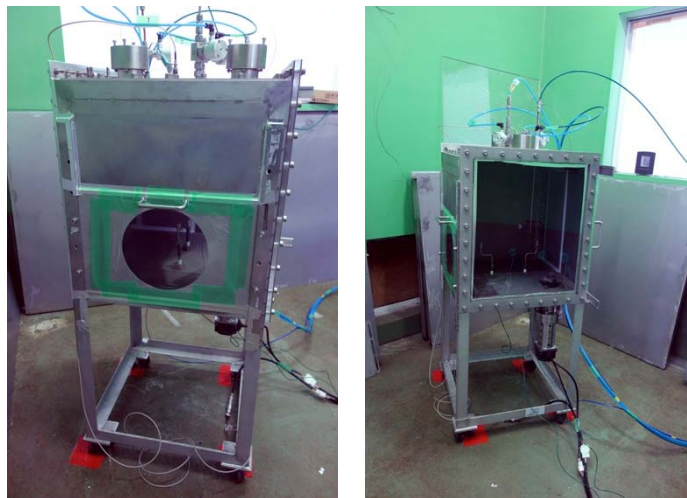
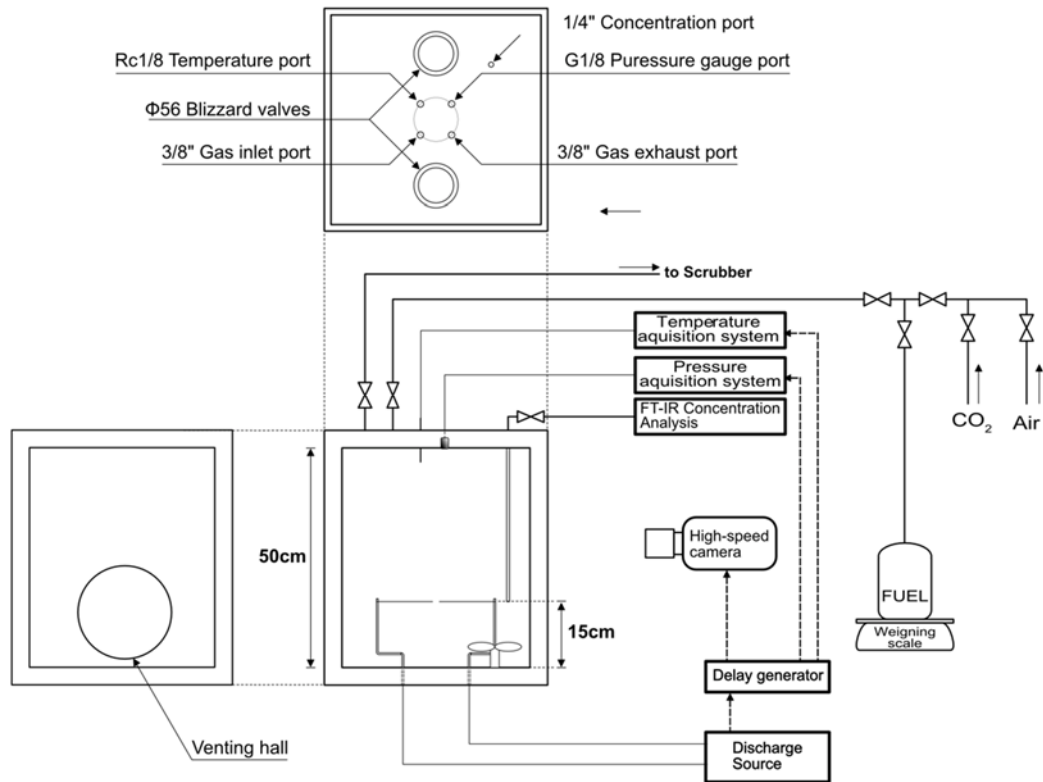
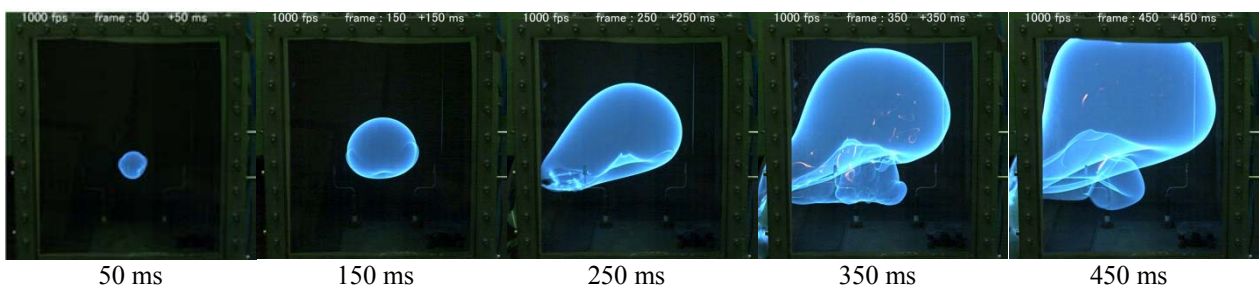


図 4.3.1 Reduced pressure behavior for venting.



☒ 4.3.2 Schematic apparatus and photos of rectangular experimental vessel for vent effect.



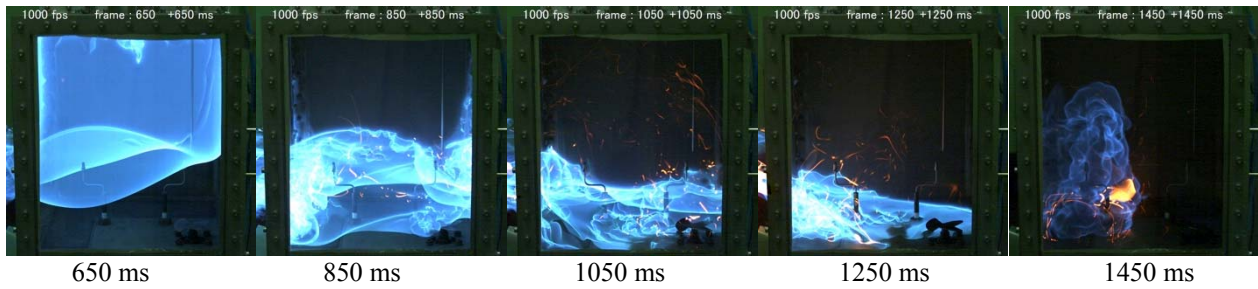


図 4.3.3 Images of flame propagation for R32 ( $\phi=1.54$ ) in rectangular vessel with  $\phi 212\text{mm}$  circle vent.

## 4.4 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。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  $P_{\max}$  など評価して燃焼特性を整理した。爆発強度影響評価のため、一般的な部屋で隙間の存在による圧力低減効果とベント口面積についてベント設計の考えに基づいて実験的に評価した。一辺 50cm の立方体燃焼容器を準備し、丸形状や様々な縦横比の長方形形状のベント形状のもとで燃焼挙動と緩和圧力を観測した。ベント面積と長方形の形状比  $L/D$  による圧力変化への影響に注目して整理し、爆発強度の低減効果を評価する予定である。A2L/2L 冷媒の爆発危険性を評価するため、他の可燃性ガスの燃焼速度や爆轟範囲の比較を行った。現在、評価対象として R1234ze を追加して評価を進めており、今後は 3 章(担当: 東京理科大学)で実施の安全性評価と連携し、実規模での燃焼爆発影響評価が可能にするべく評価手法の検討を進めていく予定である。

## 記号

$A_v$	geometric vent area ( $\text{m}^2$ )
$A_{eff}$	effective vent area ( $\text{m}^2$ )
$E_f$	effective venting efficiency (%)
$K_G$	deflagration index for gases ( $100 \text{ kPa}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ )
$P$	pressure (Pa)
$P_{\max}$	maximum pressure (Pa)
$P_{red}$	reduced pressure (Pa)
$dP/dt$	rate of pressure rise ( $100 \text{ kPa}/\text{s}$ )
$S_f$	flame speed ( $\text{cm}/\text{s}$ )
$S_u$	fundamental burning velocity ( $\text{cm}/\text{s}$ )
$S_{u0}$	fundamental burning velocity at ambient condition ( $\text{cm}/\text{s}$ )
$t$	time (s)
$T$	temperature (K)
$V_{vessel}$	vessel volume ( $\text{m}^3$ )
$\phi$	equivalence ratio
$\rho$	density ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

## 参考文献

- American Society for Testing and Materials, 2005, Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals, ASTM E 659–78.
- ASHRAE, 2010, Designation and Safety Classification of Refrigerants, ANSI/ASHRAE Standard 34-2007 Addendum ak.

- BS EN 14491, 2012, Dust Explosion Venting Protective Systems, British Standards Institution.
- European Commission, 2012, Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Certain Fluorinated Greenhouse Gases, COM (2012) 643 Final.
- Gordon, S., and McBride, B. J., 1994, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, I. Analysis, NASA RP-1311.
- 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.
- ISO 6184-2, 1985, Explosion Protection Systems– Part 2: Determination of Explosion Indices of Combustible Gases in Air, (1985).
- ISO/DIS 817, 2010, Refrigerants: Designation and Safety Classification, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, (current DRAFT DFS/ISO/FDIS 817:2012).
- 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.
- Kondo, S., Takizawa, K., and Tokuhashi, K., 2014, Effects of High Humidity on Flammability Property of a Few Non-Flammable Refrigerants, *Journal of Fluorine Chemistry*, **161**, pp. 29–33.
- Mannan, S., 2005, *Lee's Loss Prevention in the Process Industries*, 3rd ed., Elsevier, **2**, p.1383.
- Metghalchi, M., and Keck, J. C., 1980, *Combustion and Flame*, **38**, pp. 143–154.
- NFPA, 1994, NFPA 325 Guide to Fire Hazard Properties of Flammable Liquids Gases, and Volatile Solids, NFPA.
- NFPA, 2007, Guide for Venting of Deflagrations 2007 Edition, NFPA **68**.
- NIIS-TR-No.38, 2005, Technical Recommendations of the National Institute of Industrial Safety, ISSN 0911-8063 (in Japanese).
- Pfahl, U. J., Ross, M. C., and Shepherd, J. E., 2000, Flammability Limits, Ignition Energy, and Flame Speeds in H<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>–NH<sub>3</sub>–N<sub>2</sub>O–O<sub>2</sub>–N<sub>2</sub> Mixtures, *Combustion and Flame*, **123**, pp. 140–158.
- Saburi, T., *et al.*, 2014, Flammable Behaviour of A2L Refrigerants in the Presence of Moisture, *10th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, Bergen, pp. 327–334.
- Siwek, R., 1996, Explosion Venting Technology, *J. Loss Prev. Process Ind.*, **9**, 81–90.
- Takizawa, K., *et al.*, 2009, Flammability Assessment of CH<sub>2</sub>=CF<sub>2</sub>: Comparison with Fluoroalkenes and Fluoroalkanes, *Journal of Hazardous Materials*, **172**, pp. 1329–1338.
- 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.
- Takizawa, K., Tokuhashi, K., Kondo, S., Mamiya, M., and Nagai, H., 2010, Flammability Assessment of CH<sub>2</sub>=CF<sub>2</sub> (R-1234yf) and its Mixtures with CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub> (R-32), *2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology*, Tokyo, P 08.
- VDI-3673, 2002, Pressure Venting of Dust Explosions, Verein Deutscher Ingenieure.
- Zimont, V., 2000, Gas Premixed Combustion at High Turbulence: Turbulent Flame Closure Combustion Model, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **21**, pp. 179–186.
- 高圧ガス保安協会, 2011, 高圧ガス保安技術(第8次改訂版), p.101,

## 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、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が、R32 を例として最初にハザードを図 5.1.1 に示すように従来冷媒と比較した。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 NEDO プロジェクトで実施することにした。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化学部門（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。

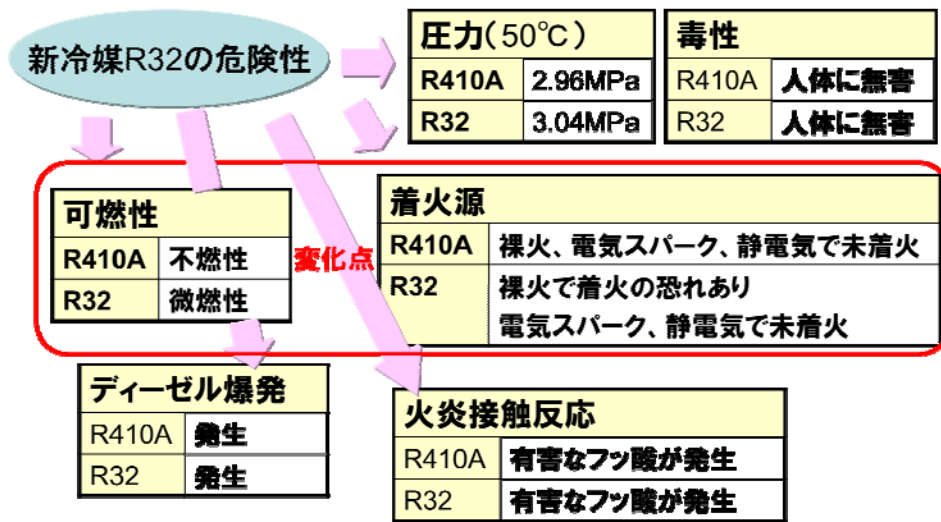


図 5.1.1 新冷媒と従来冷媒のハザードの比較 (冷媒 R32 の例)

また着火源の評価に関しては諏訪東京理科大（以下、諏訪東理大）で実際的な評価を実施し、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。次節から燃焼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について説明する。

### 5.2 リスクアセスメントの概要

燃焼性に関するリスクアセスメントをどのように進めたのかを、次ページ図 5.2.1 の 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燃焼性の検討項目を追記する形で示した。

項目としては、「a. 評価対象範囲の選定, b. リスクアセスメント手法の選択, c. ライフサイクルのステージ選択, d. エアコン設置環境の設定, e. ハザード (危害の程度) の予測, f. 事故発生確率 (許容値) の設定, g. 冷媒漏洩率と漏洩速度, 漏洩量の調査設定, h. 可燃時間空間体積 (可燃時空積) の計算もしくは CFD シミュレーション, i. 着火源の予測と着火性の識別。」が必要である。

以上の準備できれば具体的に FTA でのリスクの見積もりを行う。

「j. FTA 作成と精査, k. R-Map での評価, l. リスク達成の可否判断 (許容値との整合性)」

リスク達成の可否判断で許容値以下の値となれば、リスクアセスメントはストップする。許容値以上の場合、

「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), j. FTA 再作成, k. R-Map での評価,

1.リスク達成の可否判断。」を行う。この m から 1 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す。許容値以下となれば、「n.製品化（要件確認）と市場フォロー」となる。

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行した。詳細については次章から記述する。

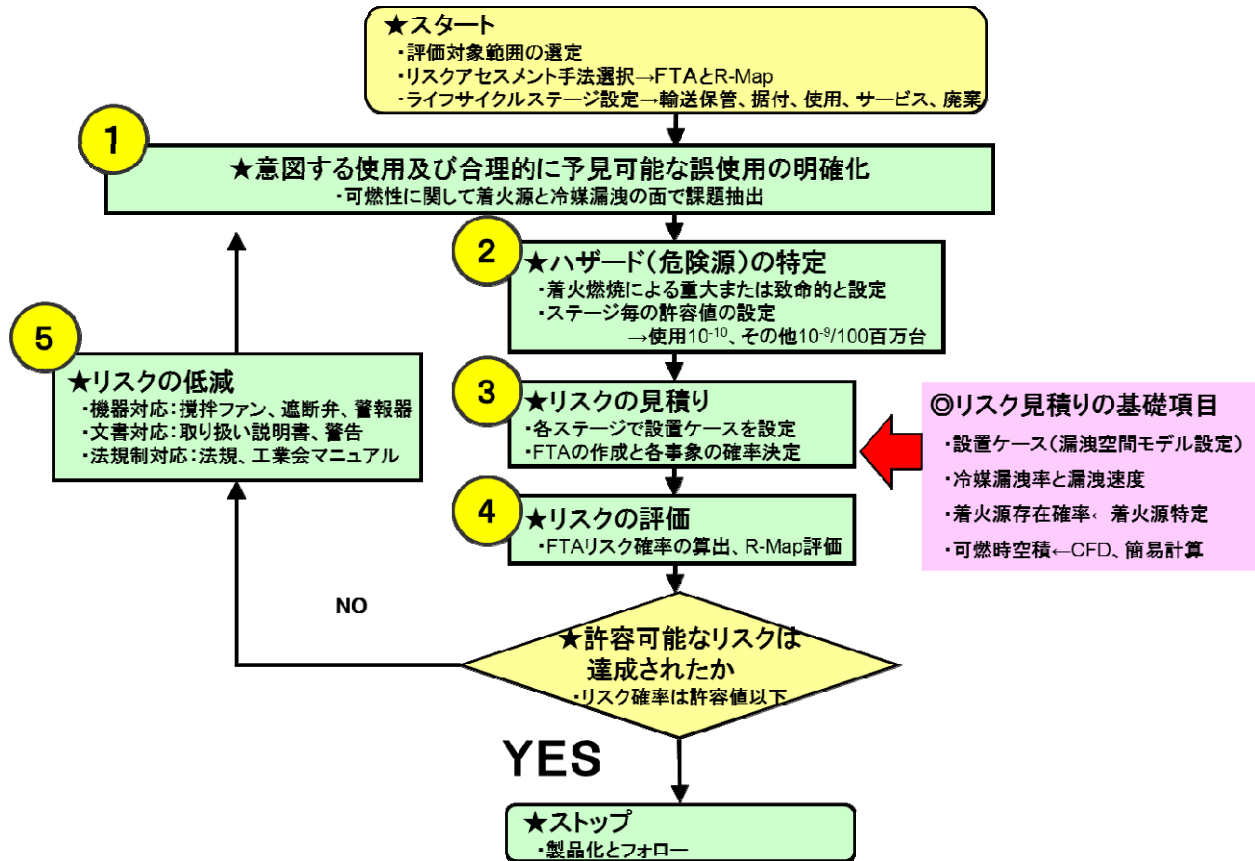


図 5.2.1 IEC の Guide51 の反復改善プロセスに基づく燃焼性リスクアセスメント項目

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 年に実施されたプロパン使用エアコンリスクアセスメントも 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

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	通院治療	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 5.2.2 消費生活用品に用いる R-Map

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 5.2.2 に示すリスクマップ（R-Map）の考え



方を参照している。

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 5.3.1 にエアコンの製品の概略図を、表 5.3.1 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 5.3.1 エアコン製品の概略図

表 5.3.1 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

また次ページ図 5.3.2 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。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工業会基準から、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。

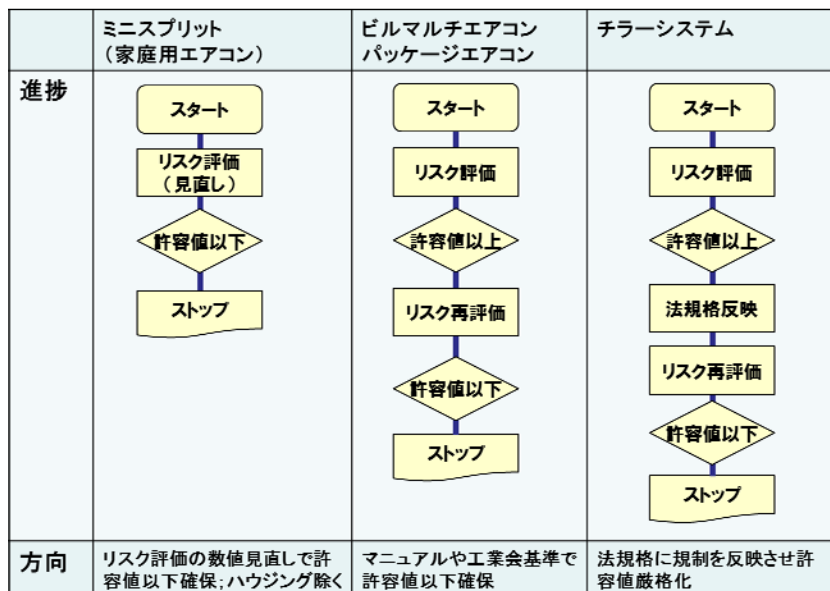


図 5.3.2 機器のリスク評価状況

## 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 5.4.1 にその概要を示す。

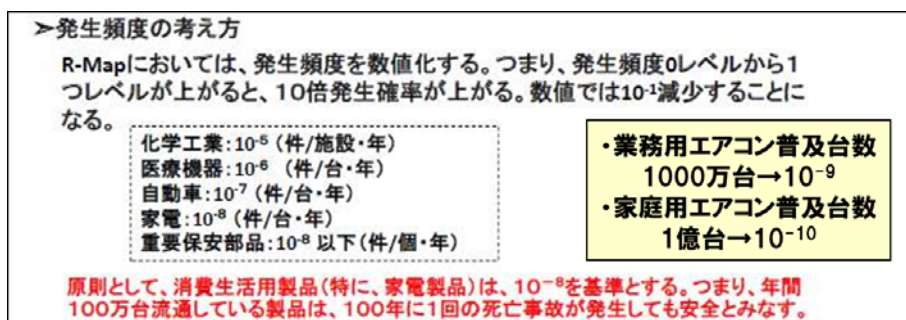


図 5.4.1 事故発生確率の考え方

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が、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。

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 $10^{-7}$ 程度以下と設定する方がよいだろうと考えられる。

ただし経済産業省のハンドブックでは致命的あるいは重大事故発生確率を言及にしているのに対し、当リスクアセスメントでは許容値を設定した当時は危害度の評価が進捗しておらず、着火事故が起これば最悪の致命的な重大事故に直結するという前提に立っていた。重大事故が1件発生するためにはその背後に300件の兆候があるとしたハインリッヒの経験則が今回のリスクアセスメントに当てはまるならば、すなわち微燃性冷媒のミニスプリットエアコンでのリスクアセスメント結果はおおむね軽微な危害を算出していると考えれば、300倍の緩い許容値でもよい。しかし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設定してスタートした。なお図5.2.2の横軸である危害度の評価が進むにつれて、微燃性冷媒の安全性が確認されてくれば発生頻度を緩くし製品の経済性や利便性を改善することも可能である。同様にビルマルチエアコンSWGやパッケージエアコンや業務用エアコンを評価しているミニスプリットSWG（II）などの許容値は「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は「10年に1回」を採用している。なお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IEC60335-2-24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。

一方ビルマルチ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）の比率を求めた。またチラーでは封入冷媒量がビル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

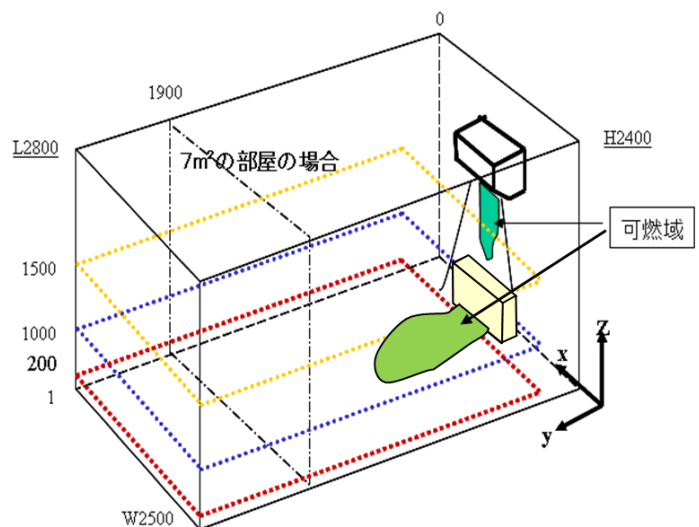


図 5.4.1 室内空間でのエアコンの設置

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7m<sup>2</sup>、(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7m<sup>2</sup>、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5.4.1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。

ビル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。通常家庭用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(1000m<sup>2</sup>)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、保管時の微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 可燃空間時空積の計算

上記の漏洩速度、空間体積を元に可燃域の生成体積とその継続時間を求めそれらを積分した値を「可燃時空積」とする。可燃時空積は単純に言う、想定された空間の中で1年間にどれぐらいの割合で可燃域が生成し、存在し続けるかの比率を示している。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5.4.2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。

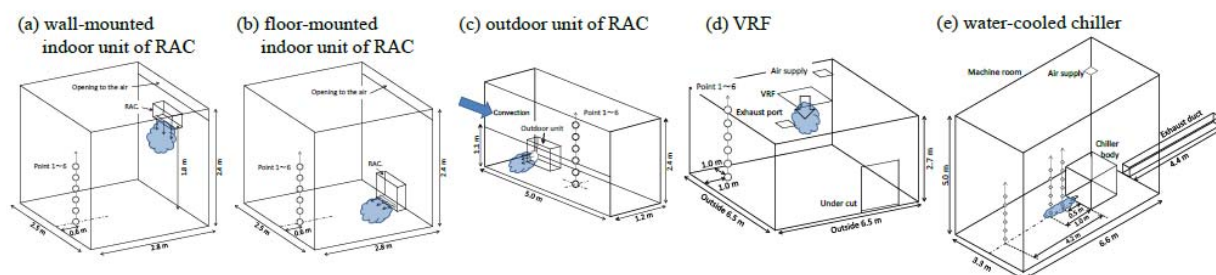


図 5.4.2 エアコン各機器のシミュレーション状況

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。

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5.4.1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。

表 5.4.1 各ステージの可燃時空積の値 (修正済み)

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

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<sup>2</sup> m<sup>3</sup>/min から 10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/min と体積も継続時間も小さいことが判る。一方、ビルマルチエアコンやチラーでは 0.6~314m<sup>3</sup>/min と桁違いに大きい場合がある。

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 の値がある場合には、片岡の論文の式を SWG メンバーが式変形し「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」との仮定で計算した。以下に簡易式 (5.4.1) を示す。

$$V_1 = V_0 \left( \frac{m_1 h_0 A_0^{1/2}}{m_0 h_1 A_1^{1/2}} \right)^3 \quad (5.4.1)$$

ここで V<sub>1</sub> : 換算した設定可燃時空積, V<sub>0</sub> : CFD で求めたベース可燃時空積, m<sub>0</sub> : ベース冷媒漏れ量, h<sub>0</sub> : ベース漏れ高さ, A<sub>0</sub> : ベース床面積, m<sub>1</sub> : 設定冷媒漏れ量, h<sub>1</sub> : 設定漏れ高さ, A<sub>1</sub> : 設定床面積

ただし計算に当たって設定された室内空間の形状や高さ床面積などが大きく変わる場合には、算出された値を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。諏訪東理大の今村や産総研の滝澤、1998 年に ADL 社 (Author: D. Little 社) の報告書 DOE/CE/23810-92 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 7.2kVA 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。
- 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。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。

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。表 5.4.2 に各種エアコンでの着火源を一覧として整理した。

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。

表 5.4.2 各種エアコンでの着火源の設定

○: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	ロウ付バーナー	○	○	○	—

また表 5.4.2 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失火は、作業者のヒューマンエラーも要因となる。ビルマル 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 5.4.3 に掲載する。この表は橋本邦衛(1984)が「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示す。正常なリラックスした状態でのエラー発生率は、 $10^{-2}$ ~ $10^{-5}$ の範囲とされている。この中からミニスプリット SWG (I) ではヒューマンエラー発生率は $10^{-3}$ を基本としたが、FTA 作成時期によっては ADL 社のさらにエラー発生率が高い $3 \times 10^{-3}$ の値が使用されている場合もある。パッケージエアコンの作業者のヒューマンエラー発生率は $10^{-3}$ とし、また比較的教育訓練が行き届いているビルマルチエアコンの作業者では、FTA 中に使用するヒューマンエラー発生確率は、 $10^{-4}$ を選択している。

表 5.4.3 意識モードとエラー発生率

フェーズ	意識のモード	生理的状態	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に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 (5.4.2) のような単純な式で表され関西電力株式会社、その値が許容値以下であれば、安全が確保される。

$$A_p > F_p = L_p \times V_p \times I_p \times D \dots (5.4.2)$$

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  $D=1$  と設定しているので、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 5.4.3 に先ほどの式 (1) を基本とした FTA を示す。

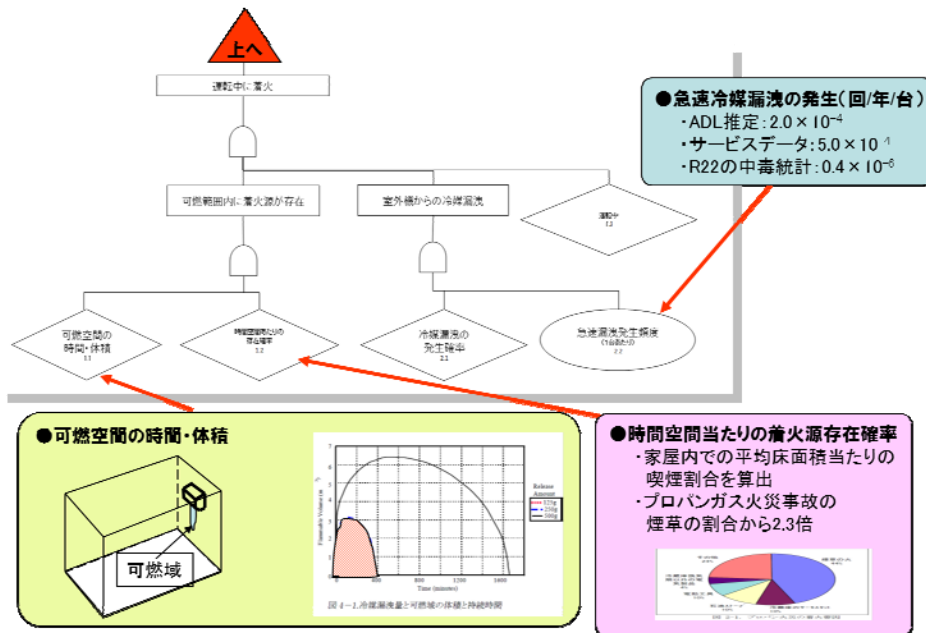


図 5.4.3 可燃性冷媒評価の基本 FTA

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「n. 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)、j.FTA 再作成、k.R-Map での評価、l. リスク達成の可否判断。」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。図 5.4.4 にミニスプリットエアコンの廃棄ステップで実際に着火確率を算出した FTA を示す。また表 5.4.4 にその FTA に使用された数値の割付表の一部を示す。

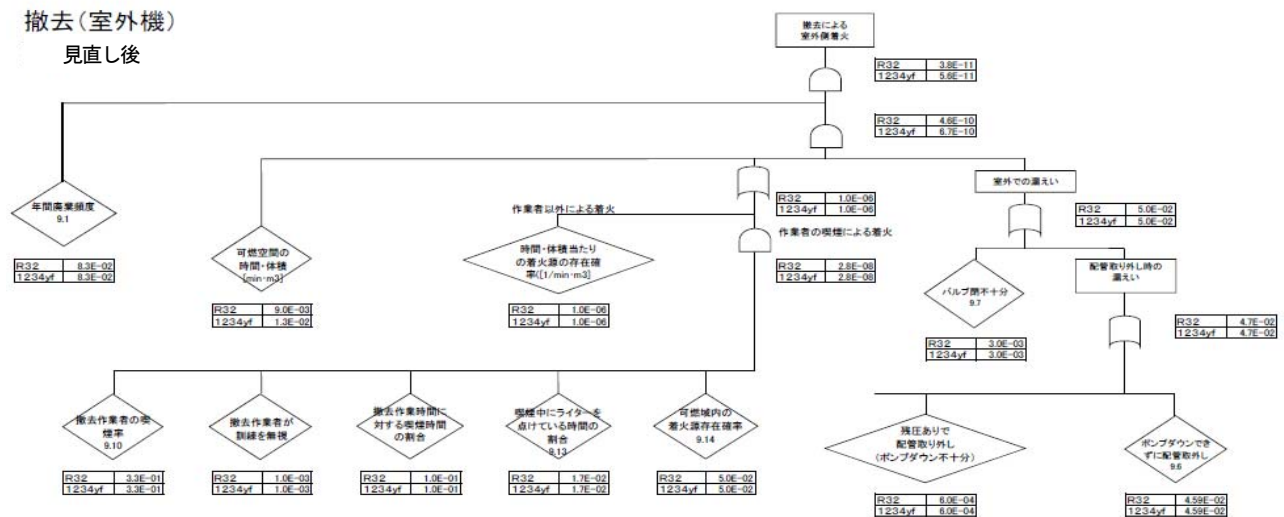


図 5.4.4 廃棄の FTA ミニスプリット (I)

表 5.4.4 廃棄の割付表 ミニスプリット (I)

モード	No.	項目	未対策		理由	対策あり		理由
			R32	1234yf		R32	1234yf	
撤去	9.1	年間廃却強度	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[ $\text{min} \cdot \text{m}^3$ ]	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かった
	9.3	時間・体積当たりの着火源の存在確率[ $(1/\text{min} \cdot \text{m}^3)$ ]	1.0E-06	—	喫煙率を見直し 元3.6E-5	—	—	—
	9.4	多量漏えいに気づかない	3.0E-03	—	ADL過換率	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過換率+NPR絶対値×100	6.0E-04	—	教育の徹底により1/10
	9.6	ボンパダウンできずに配管取り外し	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過換率	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[ $\text{min} \cdot \text{m}^3$ ]	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廊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	撤去作業員の喫煙率 ※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	撤去作業員が訓練を無視	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%	—	—	—

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 5.4.5 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 5.4.5 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	$1 \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-17}$	$4.5 \times 10^{-17}$
据付け	$1 \times 10^{-9}$	$2.7 \times 10^{-10}$	$3.1 \times 10^{-10}$
使用（室内）	$1 \times 10^{-10}$	$3.9 \times 10^{-15}$	$4.3 \times 10^{-15}$
（室外）	$1 \times 10^{-10}$	$1.5 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-10}$
サービス	$1 \times 10^{-9}$	$3.2 \times 10^{-10}$	$3.6 \times 10^{-10}$
廃棄	$1 \times 10^{-9}$	$3.6 \times 10^{-11}$	$5.3 \times 10^{-11}$

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。この内容は日冷工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 ビルマルチ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。以下ビルマルチエアコンやパッケージエアコンについて前章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り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 $1 \times 10^{-9}$ 、サービスや設置など使用時以外は $1 \times 10^{-8}$ 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 $1.3 \times 10^{-9}$ 、ビルマルと同様にそれ以外は $1.3 \times 10^{-8}$ とした。

#### (b) 漏洩率と漏洩速度

ビル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ので件数を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 5.4.2 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。ビル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。

表 5.5.1 に発火情報に基づく機器ごとの着火確率の表の一部を掲載する。

表 5.5.1 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 <sup>2</sup>	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 <sup>-05</sup> 以上 抜粋	燃焼式暖房機器		5.9×10 <sup>-05</sup>	5.9×10 <sup>-05</sup>	5.9×10 <sup>-05</sup>	5.9×10 <sup>-05</sup>	5.9×10 <sup>-05</sup>	-
	ガスコンロ		1.9×10 <sup>-05</sup>	1.9×10 <sup>-05</sup>	1.9×10 <sup>-05</sup>	-	1.9×10 <sup>-05</sup>	-
	給湯器		7.9×10 <sup>-05</sup>	-	-	-	7.9×10 <sup>-05</sup>	-
	ライター		-	2.2×10 <sup>-05</sup>	2.2×10 <sup>-05</sup>	2.2×10 <sup>-05</sup>	2.2×10 <sup>-05</sup>	2.2×10 <sup>-05</sup>
	花火		-	2.0×10 <sup>-05</sup>	-	-	-	-

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 5.5.2 にこの確率計算の式と定義を再録する。

表 5.5.2 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<sup>3</sup>]
- T : 時間長さ [分/回]
- M : 可燃空間の時空積 [分・m<sup>3</sup>/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 5.5.2 にビルマルチエアコンでの試行結果の表の一部を掲載する。

表 5.5.2 ライフステージでの設置ケース毎の着火確率（ビルマルチエアコンの場合）

表中の指数値は、着火事故確率(年・台当たり)

設置ケース [冷媒量kg] <床面積m <sup>2</sup> *高さm>		ステージ	A.輸送・保管		B.据付		C.使用 D.使用	
			<1E-08		<1E-09(内),			
		許容	対策	未	有	未	有	未
室内機	1.天井 (26.3)	事務所 <40.6*2.7>	7.8E-17 ~ 1.8E-16	-	1.9E-09	-	3.5E-12 <sup>(1)</sup>	
	2.床 (52.8)	飲食店 <9.7*2.5>			1.9E-09	-	3.8E-07	
	3.天井 (88.1)	カラオケ <4*2.4>			-	-	1.2E-06	
室外機	4.地上 (26.3)	-			1.9E-09	-	1.9E-11	
	5.各階 (26.3)	- <3.4*4.0>			1.9E-09	-	3.0E-09	
	6.半地下 (26.3)	- <15.3*3.5>			1.1E-08	1.9E09	1.1E-07	
	7.機械室 (26.3)	- <21.8*5>			1.1E-08	2.1E-09	3.2E-09 <sup>(1)</sup>	

(e) まとめと対策

ビルマルやパッケージ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働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、前章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 $1 \times 10^6$ 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 (KHKS 0302-2:2011, ISO5149-3:1993, JISC60079s: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、それらほ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（故障モードとその影響の解析）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、産総研化学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、昨年まで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、本プログレスレポート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

- ・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)
- ・高市健二, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2012, pp90-94, (2012)
- ・滝澤賢二, Study on Minimum Ignition Energy of Mildly Flammable Refrigerant, (2011)
- ・八尾健治, The International Symposium on HCFC Alternative refrigerants and Environmental Technology, pp182-189, (2000)
- ・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
- ・Goetzler 等, Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a(30/7wt.%) in split system residential heat pumps:DOE/CE/23810-92, ADL 社, (1998)
- ・Imamura et al., Evaluation of Fire Hazards of A2L Class Refrigerant, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology (2012)
- ・Minor et al., Flammability Characteristics of HFO-1234yf, AIChE Process Safety Progress(Vol.29, No.2)
- ・Minor et al., Next Generation Low GWP Refrigerant HFO-1234yf Part 2, ASHRAE meeting N.Y. (Jan. 2008)
- ・経済産業省商務流通グループ [http://www.meti.go.jp/product\\_safety/recall/risk\\_assessment\\_practice.pdf](http://www.meti.go.jp/product_safety/recall/risk_assessment_practice.pdf) : 2011, 「リスクアセスメントハンドブック実務編」
- ・片岡修身, The International Symposium on HCFC Alternative refrigerants and Environmental Technology 2000, pp218-223, (2000)
- ・橋本邦衛 (1984) : 「安全人間工学」, 中央労働災害防止協会

## 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）のリスク評価は対象製品の全てで評価を終了し、今回のプログレスレポートでの報告を最後とする予定である。家庭用エアコンの燃焼性のハザードに対するリスク評価については、冷媒リークシミュレーション、着火源評価、FTAの評価手法など、第5章にも記述したので参照いただきたい。以下、今回のプロジェクトのリスク評価で得られた壁掛けエアコンの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簡単に概括する。なお6.8章に1対1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結果を、6.9章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。

### 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」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。図6.2.1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。

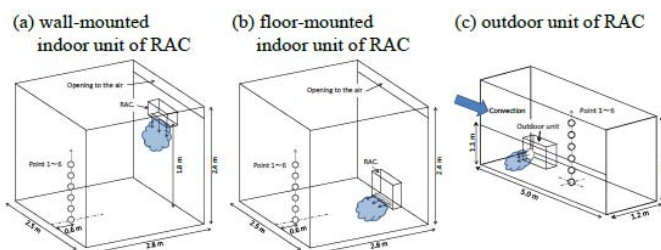


図 6.2.1 エアコン各機器のシミュレーション状況

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7m<sup>2</sup>、(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7m<sup>2</sup>、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6.2.1に示す。

表 6.2.1 各ステージの可燃時空積の値(修正済み)

	R290	R32	(m <sup>3</sup> ・min)
			R1234yf
1.1 物流時	5.50 × 10 <sup>0</sup>	2.00 × 10 <sup>-4</sup>	2.20 × 10 <sup>-4</sup>
2.2 機器据付中	7.16 × 10 <sup>2</sup>	2.40 × 10 <sup>-3</sup>	2.50 × 10 <sup>-3</sup>
2.5 工事ミス	7.75 × 10 <sup>-2</sup>	9.00 × 10 <sup>-3</sup>	1.30 × 10 <sup>-2</sup>
2.10 冷媒充填時	8.51 × 10 <sup>3</sup>	9.97 × 10 <sup>1</sup>	3.70 × 10 <sup>2</sup>
3.1 室内機運転中漏洩	1.41 × 10 <sup>0</sup>	5.00 × 10 <sup>-4</sup>	5.50 × 10 <sup>-4</sup>
3.5 室内機停止中漏洩	7.16 × 10 <sup>3</sup>	2.40 × 10 <sup>-2</sup>	2.50 × 10 <sup>-2</sup>
4.1 室外機漏洩	7.76 × 10 <sup>-1</sup>	9.00 × 10 <sup>-2</sup>	1.30 × 10 <sup>-1</sup>
5.1 接続配管	8.51 × 10 <sup>3</sup>	9.97 × 10 <sup>2</sup>	3.70 × 10 <sup>3</sup>
7.8 サービス/冷媒放出	7.75 × 10 <sup>-2</sup>	9.07 × 10 <sup>-3</sup>	1.30 × 10 <sup>-2</sup>
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、諏訪東理大の今村や産総研の滝澤、1998年にADL社 (Author: D. Little 社) からの報告書DOE/CE/23810-92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。公益社団法人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を参照のこと。

### 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、NITEの資料を参照した。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。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IEC60335-2-24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6.6.1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。

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6.2は昨年のプログレスレポートから少し値を見直した。

表 6.6.1 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	$4.1 \times 10^{-17}$	$4.5 \times 10^{-17}$	$1.9 \times 10^{-8} \sim 5.0 \times 10^{-6}$
据付け	$2.7 \times 10^{-10}$	$3.1 \times 10^{-10}$	$1.5 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-5}$
使用 (室内)	$3.9 \times 10^{-15}$	$4.3 \times 10^{-15}$	$5.9 \times 10^{-9} \sim 1.1 \times 10^{-4}$
(室外)	$1.5 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-10}$	$9.7 \times 10^{-13} \sim 1.9 \times 10^{-8}$
サービス	$3.2 \times 10^{-10}$	$3.6 \times 10^{-10}$	$9.3 \times 10^{-6} \sim 1.7 \times 10^{-5}$
廃棄	$3.6 \times 10^{-11}$	$5.3 \times 10^{-11}$	$1.8 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4}$

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 6.6.2 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を実施した結果値として示す．各論は 6.8 章と 6.9 章に詳述する．

表 6.6.2 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	$4.1 \times 10^{-17}$	$3.6 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-9}$
据付け	$2.7 \times 10^{-10}$	$4.0 \times 10^{-11}$	$9.0 \times 10^{-9}$
使用 (室内)	$3.9 \times 10^{-15}$	$4.1 \times 10^{-10}$	$4.7 \times 10^{-10}$
(室外)	$1.5 \times 10^{-10}$	$8.6 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-9}$
サービス	$3.2 \times 10^{-10}$	$2.6 \times 10^{-10}$	$4.3 \times 10^{-9}$
廃棄	$3.6 \times 10^{-11}$	$2.5 \times 10^{-11}$	$4.1 \times 10^{-10}$

ハウジングエアコンの床置きの使用時の許容度は  $10^{-9}$  であり，それ以外の物流，据付けなどの許容度は  $10^{-8}$  なので，ほぼ許容度を満足する数字となっている．

## 6.7 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．特にフロン類の大气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  $3 \times 10^{-9}$  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，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  $5 \times 10^{-10}$  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．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．

## 6.8 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 6.2.1 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<sup>2</sup>、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 6.8.1 に概略を示す。

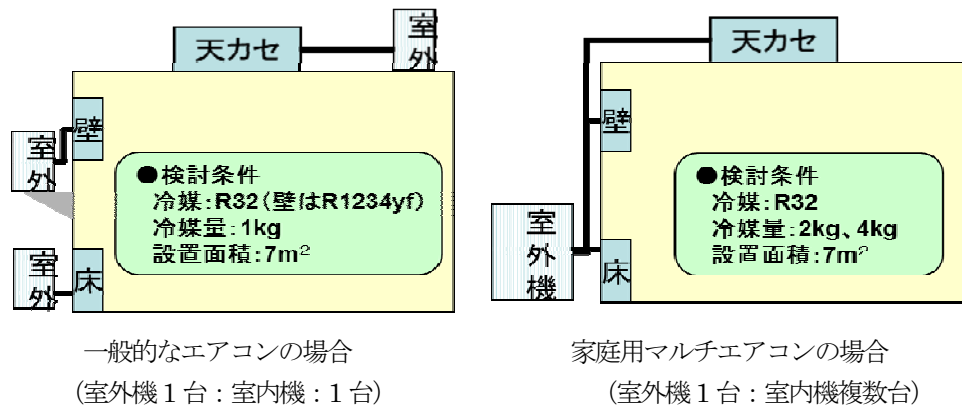


図 6.8.1 ハウジングエアコンの設置形態と検討条件

表 6.8.1 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 <sup>2</sup>	床置 冷媒量:1.0kg/7m <sup>2</sup> 使用(室内)では10m <sup>2</sup>	-室内機:カセット、天井り 冷媒量:3kg/11m <sup>2</sup> -室外機:冷媒量6kg/42m <sup>2</sup>
輸送,保管	10000台/1000m <sup>2</sup> (室外機)	10000台/1000m <sup>2</sup> (室外機)	2300台/1000m <sup>2</sup> (ダikin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 1.5E-5 -換気条件:換気なし,隙間なし -着火源:共通+想定部屋毎に設定 -着火事故発生確率の計算方法 ⇒瞬間的なON動作が主体
	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 2.2E-7~2.8E-4 -風速:1.0m/s
サ-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(ホンプロタウン) 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(ホンプロタウン) 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 <b>使用時:1E-09以下</b> <b>作業時:1E-08以下</b>	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メントの評価は、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。なお業者作業時は自己防衛により危険度が1ランク下がるとの考えより $10^{-8}$ 以下と設定した。今回対象とした床置き形ハウジングエアコンでリスクアセスメントを実施するに当たって、ライフステージ全般に渡って、壁掛け形のルームエアコンと天井埋込カセット形のパッケージエアコンを比較し、リスクアセスメントの許容リスク値（事故発生確率）を導きく仮定を整理した結果とライフステージでの許容値（事故発生確率）を表6.8.1に示す。

### 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

先ほどの仮定でシングル床置きエアコンのFTAに基づくリスクアセスメントを床面積 $7\text{m}^2$ （4.3畳相当）の居室で実施した結果、許容値を満足しないことが判った。そのため対策S1としてシングル床置きエアコンの使用（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、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6.8.2に示す。対策S1を行えば、室内の使用時における着火確率は、 $9.9 \times 10^{-10}$ と許容値を下回る数値となる。

表 6.8.2 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	$3.6 \times 10^{-11}$
Installation	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$4.0 \times 10^{-11}$
Use (Indoor)	$9.9 \text{ m}^2$ room	$9.9 \times 10^{-10}$
(Outdoor)	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$8.6 \times 10^{-11}$
Service	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$2.6 \times 10^{-10}$
Disposal	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$2.5 \times 10^{-11}$

表 6.8.3 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	$3.6 \times 10^{-11}$
Installation	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$4.0 \times 10^{-11}$
Use (Indoor)	$7 \text{ m}^2$ room	$4.1 \times 10^{-10}$
(Outdoor)	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$8.6 \times 10^{-11}$
Service	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$2.6 \times 10^{-10}$
Disposal	$3.24 \text{ m}^2$ veranda	$2.5 \times 10^{-11}$

### 6.8.5 4.5畳設置を考慮したシングル床置きエアコンの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 $1\text{kg}$ 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。対策S2を講じた場合の床置きエアコンの着火確率を表6.8.3に示す。

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 $7\text{m}^2$ 、高さ $2.4\text{m}$ ）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章で詳細に記す。

(※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のが問題となる。本章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6.9.1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6.9.1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。

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。

表 6.9.1 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 <sup>2</sup>	壁掛、床置 冷媒量4.0kg / 7m <sup>2</sup>	四方カセット3馬力/冷媒量26.3kg/42m <sup>2</sup> 床置き
輸送・保管	10000台/1000m <sup>2</sup> (室外機)	10000台/1000m <sup>2</sup> (室外機)	1000台/1000m <sup>2</sup>
使用	室内	急速漏洩発生確率 1.5E-5 (8WGII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	急速漏洩発生確率 5.0E-6 換気条件:18D5149D18の安全対策 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動作か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 2.2E-7~2.8E-4 風速:1.0m/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(ポンプダウン) 機器の冷媒回収⇒リサイクルセンタ- (家電リサイクル法対象)	専門業者撤去(ポンプダウン) 機器の冷媒回収 埋込型⇒専門解体業者 埋込型以外⇒リサイクルセンタ-	専門業者撤去(ポンプダウン) 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	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8WGII、ビルマルチ8WG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

### 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6.9.1に一般的な住宅の給排気経路の概略を示す。

## Single-Family Home

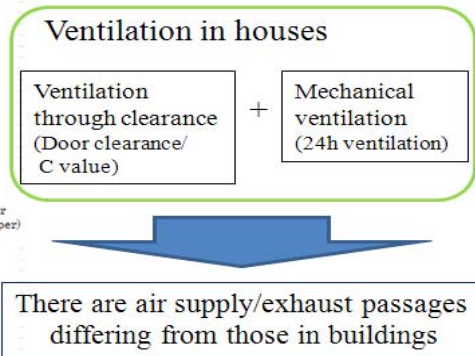
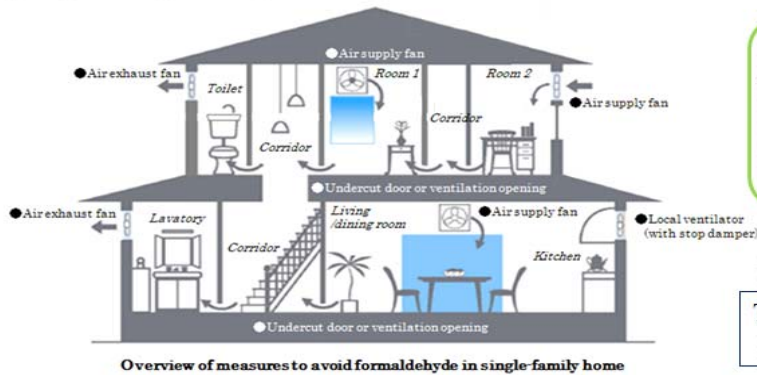


図 6.9.1 現実的な住宅環境をふまえた換気経路の検討

### 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 6.9.2 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 6.9.3 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 6.9.2 各社の開き戸の隙間寸法

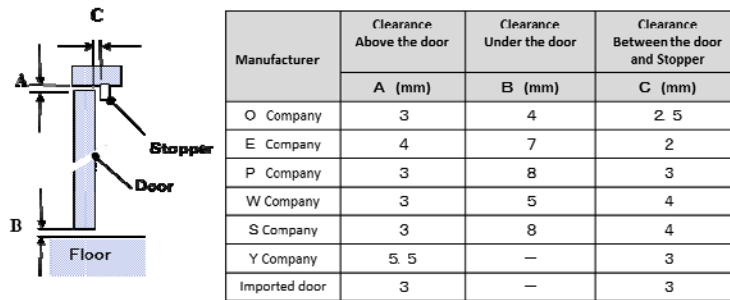
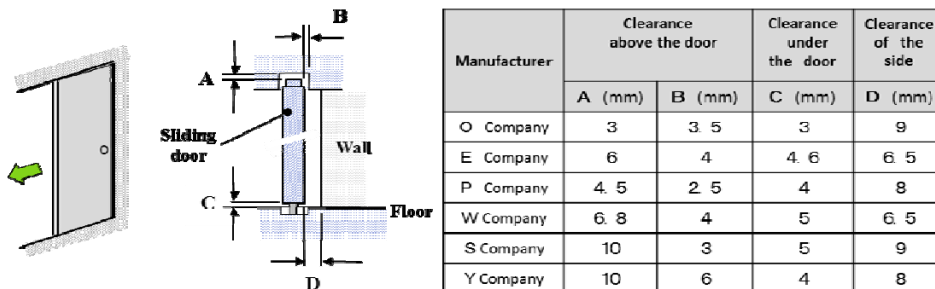


図 6.9.3 各社の引き戸の隙間寸法



### 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ことで、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 6.9.4 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。

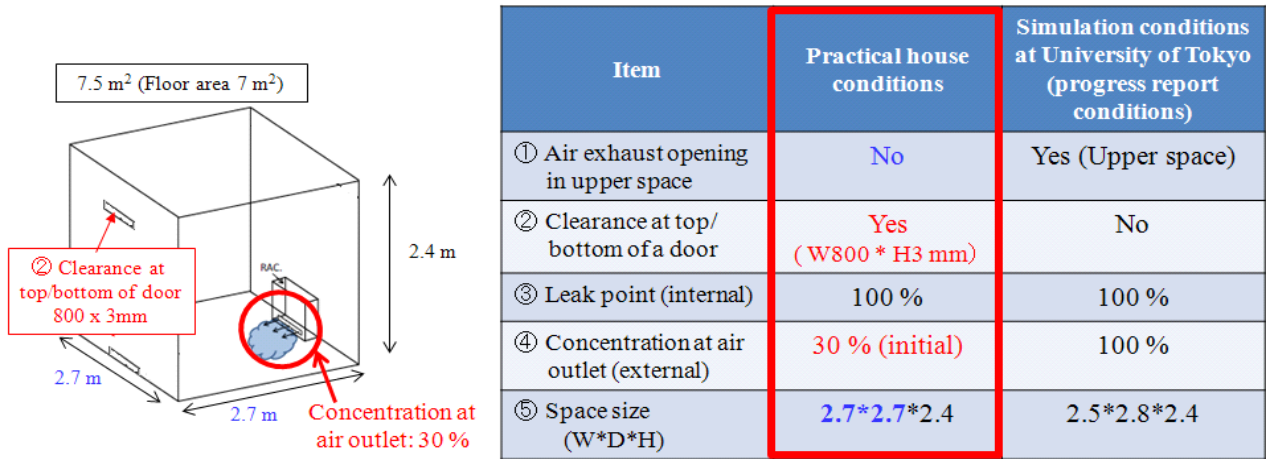


図 6.9.4 シミュレーション条件の比較

### 6.9.4 可燃空間時空積

図 6.9.4 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 6.9.5、表 6.9.2 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 6.9.5 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 6.9.2 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。

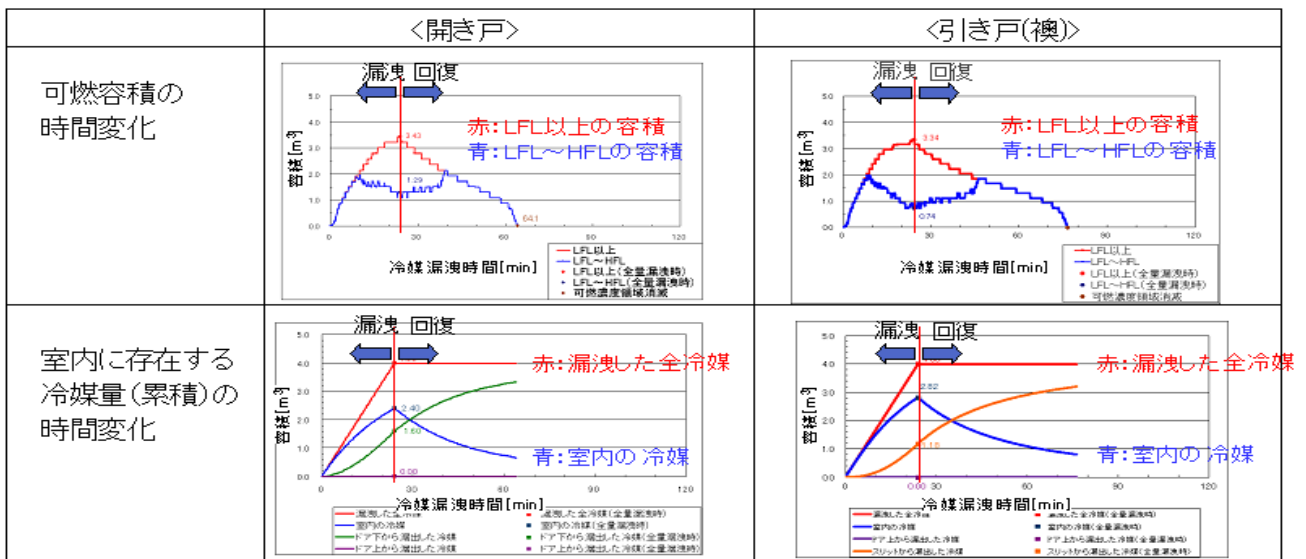




図 6.9.5 可燃容積と室内に存在する冷媒量の時間変化

表 6.9.2 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 <sup>3</sup> /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

前述 6.9.4 章において、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 6.9.6 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。

[Test results (floor-standing/ amount of refrigerant: 4 kg/ leak rate: 10 kg/h)]

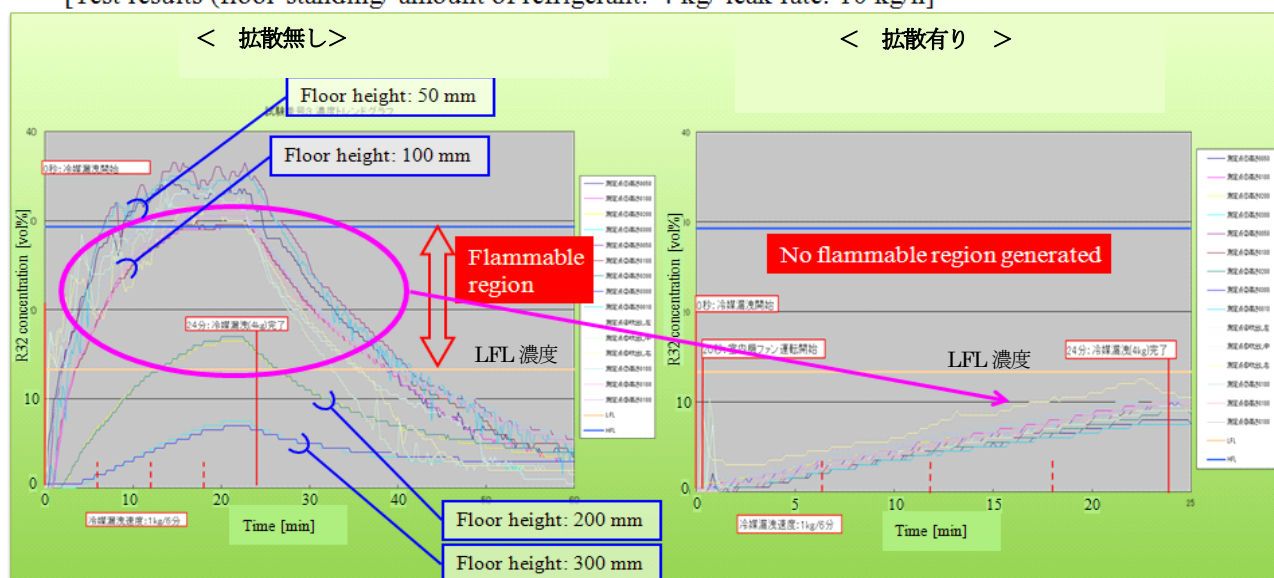


図 6.9.6 室内への冷媒漏洩時における部屋の高さごとの冷媒濃度 (部屋 4.5 畳の場合)

### 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 6.9.3 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 6.9.3 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  $4.7 \times 10^{-10}$  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  $4.7 \times 10^{-10}$  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 6.9.3 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	$1.1 \times 10^{-9}$
Installation	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$9.0 \times 10^{-9}$
Use (indoor)	7 m <sup>2</sup> room	$4.7 \times 10^{-10}$
Use (outdoor)	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$1.1 \times 10^{-9}$
Service	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$4.3 \times 10^{-9}$
Disposal	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$4.1 \times 10^{-10}$

表 6.9.4 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  $1.58 \times 10^{-11}$  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 6.9.4 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OFFさせないよう製品本体に注意喚起表示	ブレーカON	運転 (室内ファンON)	無	48.80 %			
	2							停止→ 室内ファンON	無	50.91 %
通常発生しないリスク	3	拡散不可	同上	ブレーカON	停止	有	0.04 %			
	4							ブレーカOFF	無	0.002 %
	5									
着火リスク確率合計							4.7E-10			

## 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 6.10.1 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 6.9.3 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  $1.0 \times 10^{-9}$  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 6.10.1 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	$1.1 \times 10^{-9}$
Installation	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$9.0 \times 10^{-9}$
Use (indoor)	7 m <sup>2</sup> room	$1.0 \times 10^{-9}$
(outdoor)	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$1.1 \times 10^{-9}$
Service	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$4.3 \times 10^{-9}$
Disposal	3.24 m <sup>2</sup> veranda	$4.1 \times 10^{-10}$

## 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 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」（日冷工内部資料）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

- ・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)
- ・高市健二, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology, pp90-94, 神戸, (2012)
- ・滝澤賢二, Study on Minimum Ignition Energy of Mildly Flammable Refrigerant, (2011)
- ・八尾健治, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology, pp182-189, 神戸, (2000)
- ・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
- ・Goetzler 等, Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a(30/7wt.%) in split system residential heat pumps:DOE/CE/23810-92, ADL 社, (1998)
- ・Imamura et al., Evaluation of Fire Hazards of A2L Class Refrigerant, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology (2012)
- ・Minor et al., Flammability Characteristics of HFO-1234yf, AIChE Process Safety Progress(Vol.29, No.2)
- ・Minor et al, Next Generation Low GWP Refrigerant HFO-1234yf Part 2, ASHRAE meeting N.Y. (Jan. 2008)
- ・経済産業省商務流通グループ [http://www.meti.go.jp/product\\_safety/recall/risk\\_assessment\\_practice.pdf](http://www.meti.go.jp/product_safety/recall/risk_assessment_practice.pdf) : 2011, 「リスクアセスメントハンドブック実務編」





## 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進捗

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ている。使用冷媒はR32で行い、今後、他の微燃性冷媒でも評価していく予定である。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、比較的风险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、冷房定格能力30kW（12HP）までの全ての店舗用PACシステムを対象として、評価を実施している。

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、微燃性冷媒を使用する店舗用PACの施工マニュアル等にまとめ、周知させていく予定である。

図7.1.1に、リスクアセスメント日程を示す。

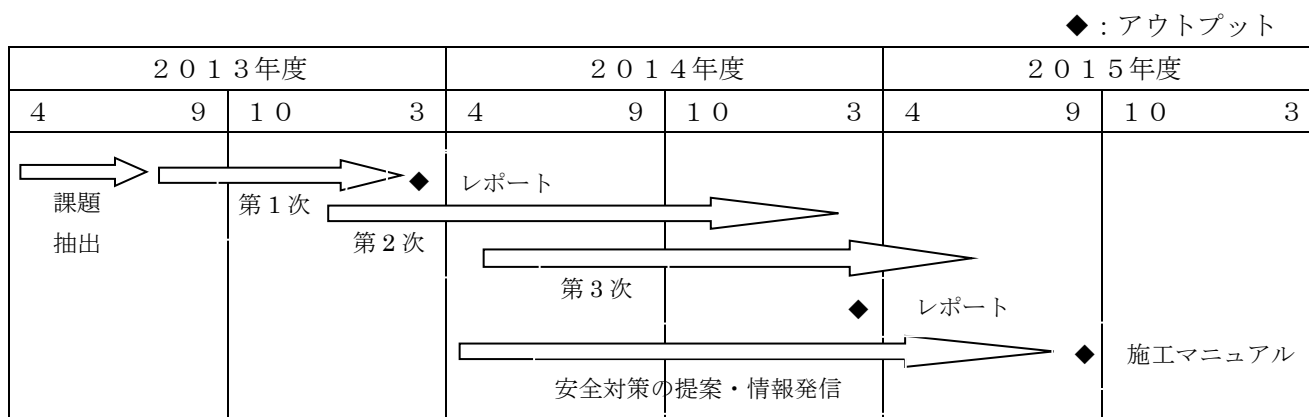


図 7.1.1 店舗用パッケージエアコンのリスクアセスメント日程

#### 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7.1.1にまとめた。

まず、空調能力は、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いられることがあり、

狭小空間倉庫やワゴン車輸送での評価を追加した。表 7.1.2 にリスクが高くなると想定されるモデルをまとめた。

表 7.1.1 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 7.1.2 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 7.1.2 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、ビル用マルチ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。

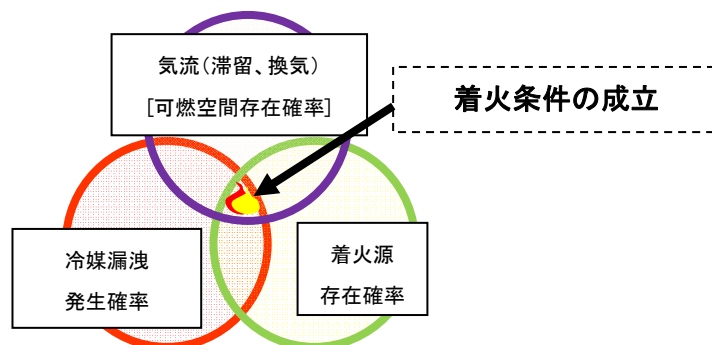


図 7.1.2 微燃性冷媒の着火メカニズム

### 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×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。実際には、着火事故の危害度評価が必要であるが、まだ完了していないため、全ての着火事故を重大事故として扱っている。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 :  $1.3 \times 10^{-9}$
- ・使用時以外（輸送・保管、据付、修理、廃棄時） :  $1.3 \times 10^{-8}$

### 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 7.1.2 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  $1.03 \times 10^{-3}$ 、急速漏れ  $1.50 \times 10^{-5}$
- ・室外機 : 緩慢漏れ  $6.13 \times 10^{-3}$ 、急速漏れ  $1.34 \times 10^{-3}$ 、噴出漏れ  $1.37 \times 10^{-4}$

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、 $10^{-3}$ 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と同様のため、ビル用マルチの評価で用いられた図 7.2.1-2 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 x 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 7.2.1 に示す。

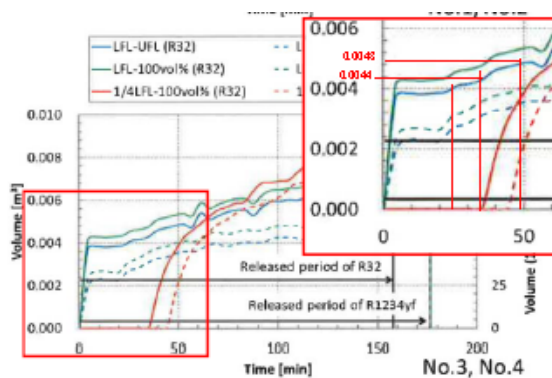
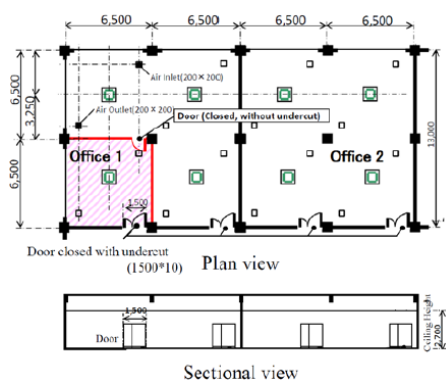


図 7.2.1 室内 事務所のシミュレーションモデル

図 7.2.2 事務所モデルの可燃空間解析結果

表 7.2.1 天井設置モデルの可燃空間時空積算出結果

モデル	床面積	高さ	自然換気口 (幅 x 高さ)	R32 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 <sup>2</sup>	m	mm	kg	kg/h	min	m <sup>3</sup> ・min
SIMベース	42.3	2.7	1500 x 10	26.3	10	158	1.62 x 10 <sup>0</sup>
7.1kW 事務所	42.3	2.7	1500 x 10	3	10	18	6.40 x 10 <sup>-2</sup>
14kW 厨房	57.2	2.5	1500 x 10	8	10	48	1.53 x 10 <sup>-1</sup>

#### (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 7.2.3 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 7.2.4、表 7.2.2 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 7.2.5 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 10m<sup>3</sup>/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、スリムタイプで吹き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。

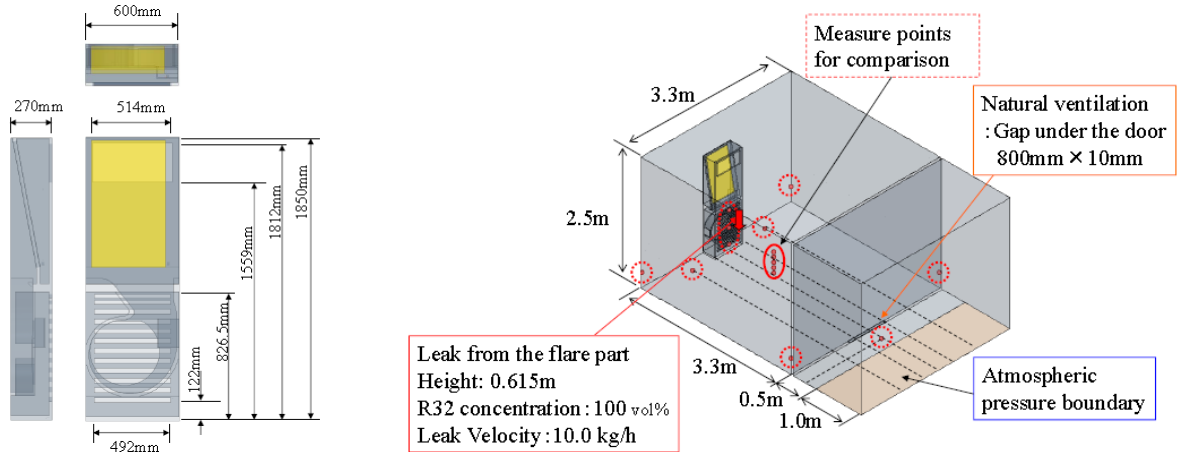


図 7.2.3 床置きスリム形のシミュレーションモデル

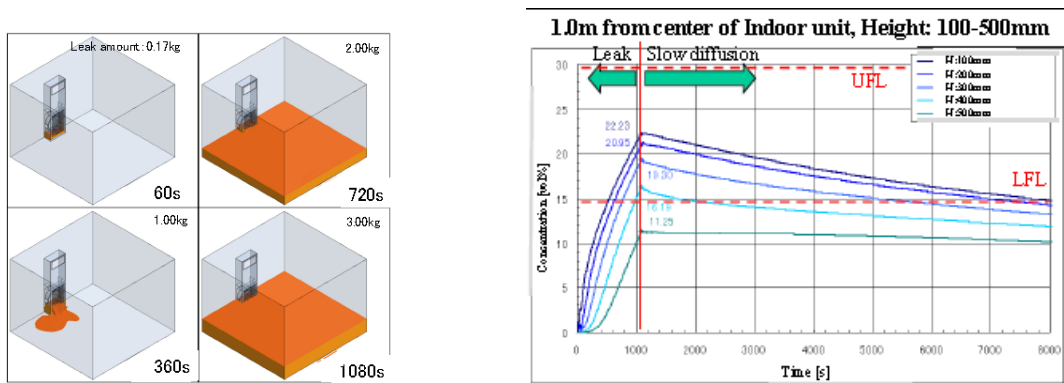


図 7.2.4 床置きスリム形の3次元濃度解析シミュレーション結果

表 7.2.2 床置きスリム形の可燃空間時空積算結果

モデル	床面積	高さ	自然換気口 (幅 x 高さ)	R32 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 <sup>2</sup>	m	mm	kg	kg/h	-	min	m <sup>3</sup> ・min
SIMベース	10.9	2.5	800 x 10	3	10	フレア部	142	4.64 x 10 <sup>2</sup>
5.0kW 飲食店	14	2.5	800 x 10	3	10	フレア部	142	3.23 x 10 <sup>2</sup>

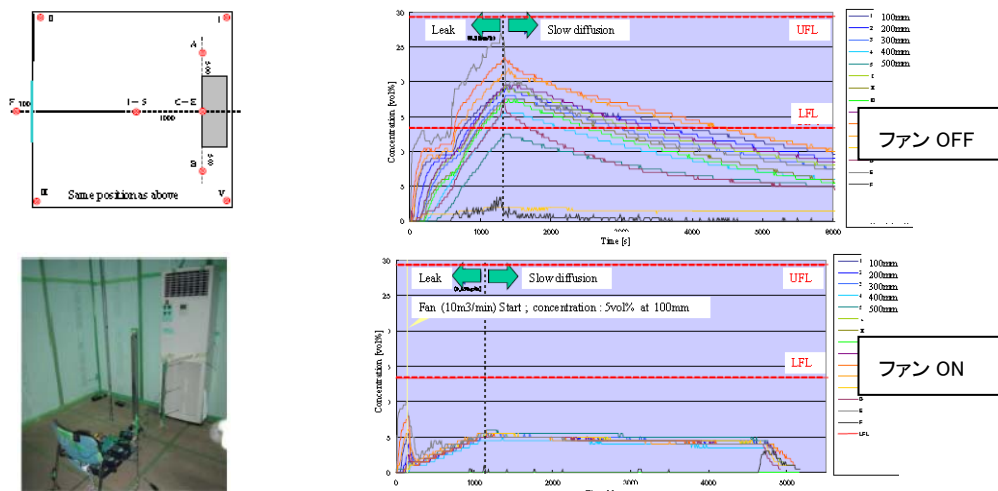


図 7.2.5 床置きスリム形の冷媒漏洩濃度解析に対する実証試験結果

## 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7.2.6-7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7.2.3に示す。

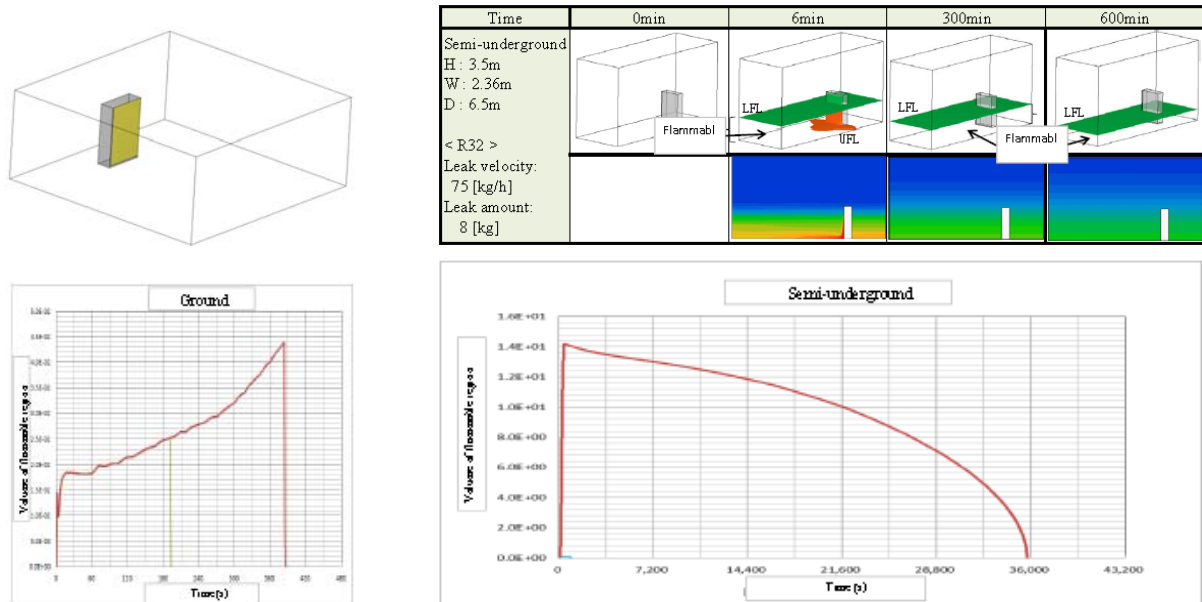


図 7.2.6 「地上設置」の可燃空間解析結果

図 7.2.7 「半地下設置」の可燃空間解析結果

表 7.2.3 可燃空間時空積 算出結果

モデル	設置環境	床面積 m <sup>2</sup>	高さ m	R32 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)
	-			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 x 10 <sup>-2</sup>
				8			6.5	2.80 x 10 <sup>-1</sup>
室外機 半地下設置	四面閉塞 上部開放	15.34	3.5	4	75	熱交換器全体	15.9	2.08 x 10 <sup>1</sup>
				8			595.3	5.97 x 10 <sup>3</sup>

(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。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。この2条件では、可燃空間時空積が倍以上の差が生じた。

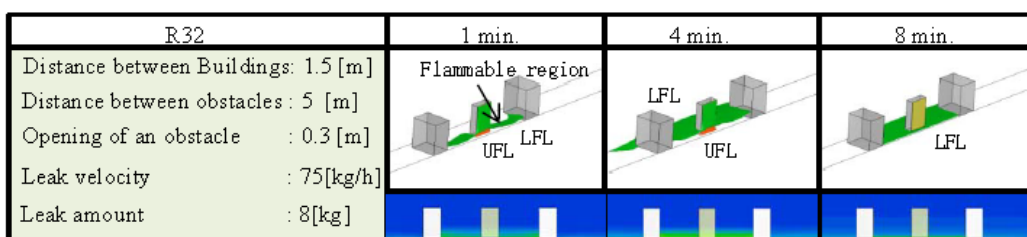


図 7.2.8 室外狭小設置のシミュレーションモデル

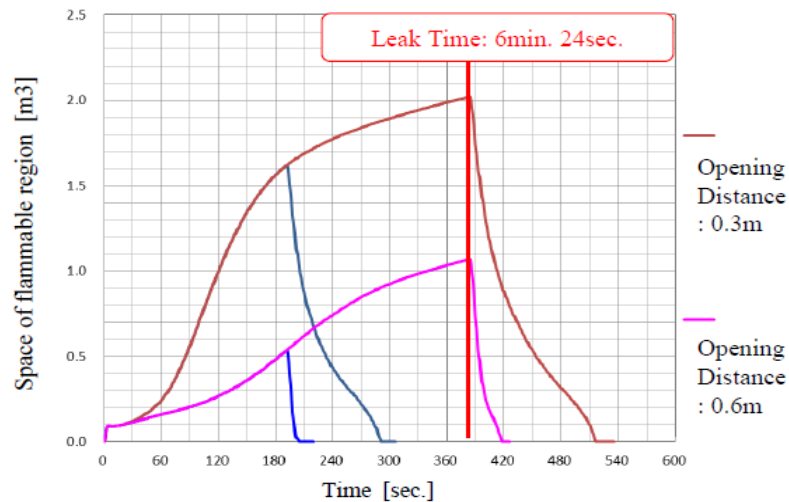


図 7.2.9 室外狭小設置の可燃空間解析結果

表 7.2.4 室外狭小設置の可燃空間時空積 算出結果

モデル	隙間距離	障害物 開口寸法	床面積	高さ	R32 冷媒量	漏洩速度	漏洩時間	可燃空間時空積 (停止時)
	m							
室外機 狭小設置	1.5 1面部分 開放	0.3	7.5	2	4	75	4.9	$3.24 \times 10^0$
		0.6					3.5	$8.30 \times 10^{-1}$
		0.3			8		8.6	$9.75 \times 10^0$
		0.6					7.0	$3.75 \times 10^0$

## 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 7.3.1 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、R32 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 7.3.2 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 7.3.3 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 7.3.1 R32 の着火源

○：着火、×：着火せず

		着火源	R32	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 (5 k VA 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	ロウ付バーナー	○	○

表 7.3.2 「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 <sup>3</sup> min】	室内機	5.7 x 10 <sup>-16</sup>	4.5 x 10 <sup>-16</sup>	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 x 10 <sup>-16</sup>	-	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 x 10 <sup>-16</sup>	-	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 x 10 <sup>-16</sup>	-	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 x 10 <sup>-14</sup>	-	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 x 10 <sup>-15</sup>	1.6 x 10 <sup>-15</sup>	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 x 10 <sup>-16</sup>	1.1 x 10 <sup>-15</sup>	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 x 10 <sup>-14</sup>	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 x 10 <sup>-15</sup>	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 x 10 <sup>-15</sup>	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 x 10 <sup>-16</sup>	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 x 10 <sup>-15</sup>	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 x 10 <sup>-15</sup>	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 x 10 <sup>-07</sup>	-	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 x 10 <sup>-06</sup>	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 x 10 <sup>-03</sup>	6.7 x 10 <sup>-02</sup>	【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 x 10 <sup>-05</sup>	0.001 台、使用 4h/日。60 日/年
		ガスコンロ	-	3.1 x 10 <sup>-01</sup>	15 台、使用 0.023。普及率 90%
		ガス炊飯器	-	5.0 x 10 <sup>-02</sup>	2 台、使用 2h/日。普及率 30%
		ガスオーブン	-	5.8 x 10 <sup>-04</sup>	2 台、普及率 2.9E-04
		コーヒーマシン	-	8.7 x 10 <sup>-04</sup>	3 台、普及率 2.9E-04
		ガスバーナー	-	6.9 x 10 <sup>-04</sup>	0.5 台、使用 0.2 分/回。10 回/日
		ガスロースター	-	5.8 x 10 <sup>-04</sup>	2 台、普及率 2.9E-04

表 7.3.3 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 <sup>3</sup> min】	室外機	1.4 x 10 <sup>-14</sup>	9.5 x 10 <sup>-14</sup>	2.5 x 10 <sup>-14</sup>	9.1 x 10 <sup>-14</sup>	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 x 10 <sup>-10</sup>	1.3 x 10 <sup>-9</sup>	1.7 x 10 <sup>-9</sup>	1.7 x 10 <sup>-9</sup>	【作業員の喫煙】 P=機器近傍確率 x 0.1[年間作業率] x [喫煙率] x (16[本]/空間容積/(24×60)) x 0.05 [スパーク] x 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: J T 調査) ・喫煙本数(執務時): 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 x 10 <sup>-8</sup>	5.4 x 10 <sup>-8</sup>	1.1 x 10 <sup>-7</sup>	1.1 x 10 <sup>-7</sup>	【使用者(ユーザー)の喫煙】 P=使用者が周辺に居る確率 x [喫煙率] x (17.1[本]/空間容積/(24×60)) x 0.05 [スパーク] x [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 x 10 <sup>-8</sup>	3.0 x 10 <sup>-8</sup>	1.5 x 10 <sup>-7</sup>	1.5 x 10 <sup>-7</sup>	【作業員の喫煙】 P=機器近傍確率 x 0.1[年間作業率] x 0.322[喫煙率] x (16[本] x 5 [秒/本: 裸火燃焼時間] / (24x60x60)) x 0.01[訓練無視確率]
		使用者	9.3 x 10 <sup>-6</sup>	1.3 x 10 <sup>-6</sup>	9.3 x 10 <sup>-6</sup>	9.3 x 10 <sup>-6</sup>	【使用者(ユーザー)の喫煙】 P=使用者が周辺に居る確率 x 0.209[喫煙率] x (17.1[本] x 5 [秒/本: 裸火燃焼時間] / (24x60x60)) x [周辺喫煙可率]
	燃焼式給湯器	6.6 x 10 <sup>-4</sup>	2.2 x 10 <sup>-4</sup>	2.2 x 10 <sup>-4</sup>	2.2 x 10 <sup>-4</sup>	P=運転率 x 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) x (可燃空間存在確率) x (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 7.4.1 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。

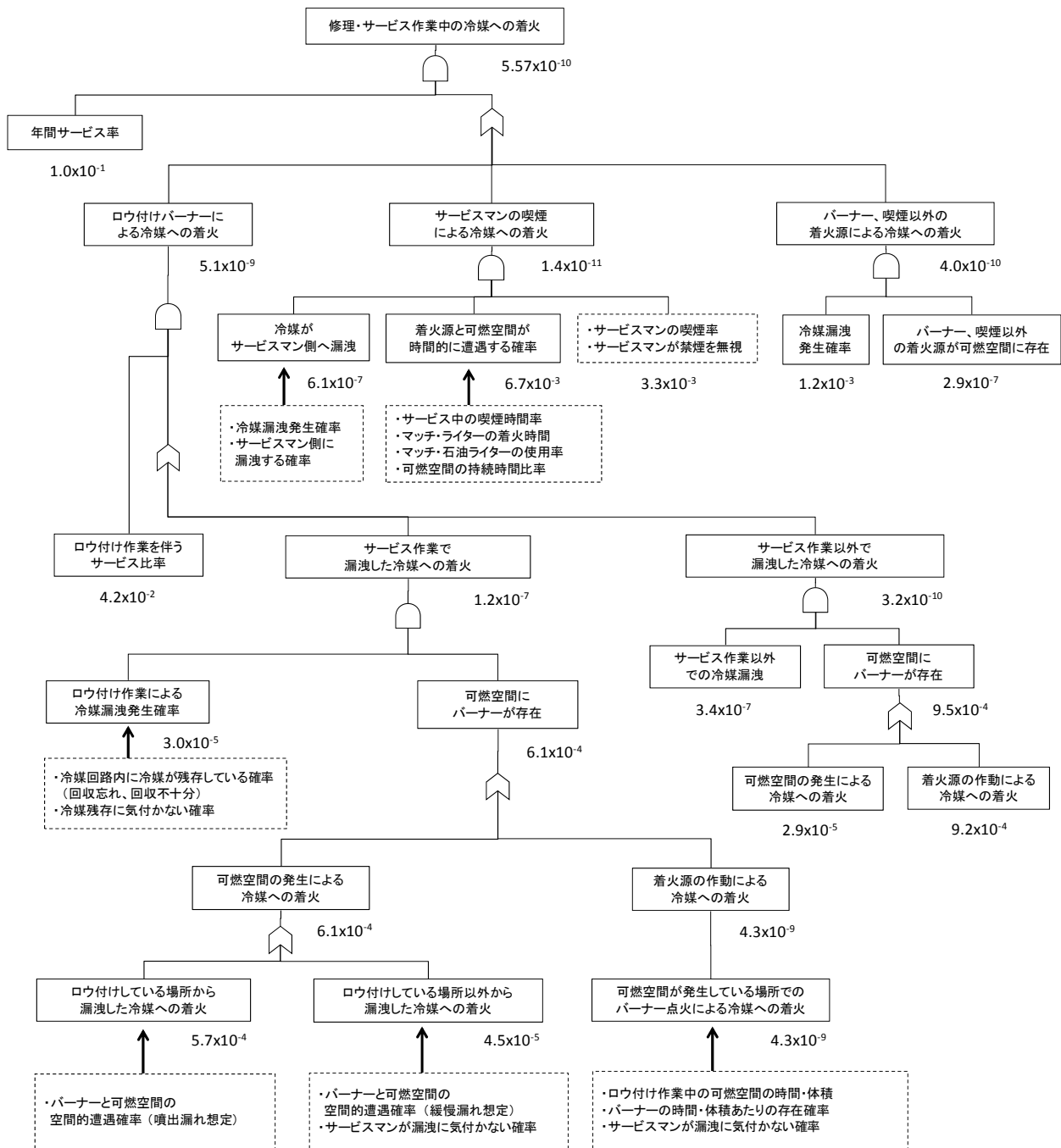


図 7.4.1 修理ステージの FTA

## 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14.0kW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30kWまで対象範囲を広げ店舗用PAC全体の評価を行っている。使用冷媒は、R32で行い、今後、他の微燃性冷媒でも評価していく予定である。以下に、現時点での結果をまとめる。

### 7.5.1 第一次モデル (代表的なモデル)

第一次評価では、代表的なモデルとして、表 7.5.1 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 7.5.2 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 7.5.1 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 <sup>2</sup> )	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 7.5.2 第一次モデルのリスクアセスメント結果

ライフステージ [許容レベル]	輸送 [ ≤ 1.3 x 10 <sup>-8</sup> ]		据付 [ ≤ 1.3 x 10 <sup>-8</sup> ]		使用 [ ≤ 1.3 x 10 <sup>-9</sup> ]		修理 [ ≤ 1.3 x 10 <sup>-8</sup> ]		廃棄 [ ≤ 1.3 x 10 <sup>-8</sup> ]	
	モデル	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
室内 事務所	—	—	6.61 x 10 <sup>-10</sup>	不要	3.37 x 10 <sup>-12</sup>	不要	1.19 x 10 <sup>-10</sup>	不要	3.12 x 10 <sup>-12</sup>	不要
室外 地上	—	—	6.75 x 10 <sup>-10</sup>	不要	6.35 x 10 <sup>-11</sup>	不要	2.23 x 10 <sup>-10</sup>	不要	6.05 x 10 <sup>-11</sup>	不要
保管 中型倉庫	1.55 x 10 <sup>-11</sup>	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 7.5.4 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、比較的风险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、R32 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 7.5.1-2 に仮定条件を示し、表 7.5.3 に可燃空間時空積を示す。

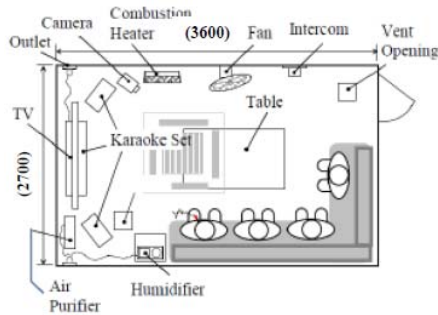


図 7.5.1 カラオケルームモデル

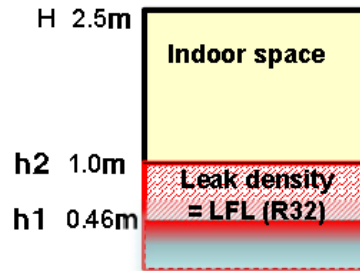


図 7.5.2 カラオケルームの冷媒滞留仮定条件

表 7.5.3 可燃空間時空積算結果

可燃濃度 限界高さ	滞留高さ m	床面積 m <sup>2</sup>	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 <sup>3</sup> ・min
h1 : ULF	0.46	9.7	2.5	3	2	138	6.16 x 10 <sup>2</sup>
h2 : LFL	1.0	9.7				90	8.73 x 10 <sup>2</sup>

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7.5.5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7.5.6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、着火源存在確率と可燃空間発生確率の支配的なリスク要因である「ボイラー近傍への室外機設置禁止」および「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」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。

表 7.5.4 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 <sup>2</sup> )	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 7.5.5 第二次モデルのリスクアセスメント結果

ライフステージ [許容レベル]		輸送 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]		据付 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]		使用 [ $\leq 1.3 \times 10^{-9}$ ]		修理 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]		廃棄 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]	
モデル		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	—	—	$6.65 \times 10^{-10}$	不要	$4.20 \times 10^{-12}$	不要	$1.21 \times 10^{-10}$	不要	$3.37 \times 10^{-12}$	不要
	厨房	—	—	$6.66 \times 10^{-10}$	不要	$1.03 \times 10^{-10}$	不要	$2.65 \times 10^{-10}$	不要	$2.80 \times 10^{-12}$	不要
	カオケーム	—	—	$6.79 \times 10^{-10}$	不要	$8.71 \times 10^{-11}$	不要	$1.04 \times 10^{-9}$	不要	$2.04 \times 10^{-11}$	不要
室外	地上設置	—	—	$7.55 \times 10^{-10}$	不要	$3.13 \times 10^{-10}$	不要	$5.57 \times 10^{-10}$	不要	$2.60 \times 10^{-10}$	不要
	各階設置	—	—	$8.51 \times 10^{-10}$	不要	$5.79 \times 10^{-10}$	不要	$1.47 \times 10^{-9}$	不要	$6.81 \times 10^{-10}$	不要
	半地下設置	—	—	$3.60 \times 10^{-7}$	$4.89 \times 10^{-9}$	$7.14 \times 10^{-7}$	$1.13 \times 10^{-9}$	$1.12 \times 10^{-7}$	$2.33 \times 10^{-9}$	$8.68 \times 10^{-8}$	$9.46 \times 10^{-9}$
	狭小設置	—	—	$2.77 \times 10^{-9}$	不要	$5.96 \times 10^{-9}$	$1.17 \times 10^{-10}$	$1.84 \times 10^{-8}$	$4.21 \times 10^{-10}$	$7.21 \times 10^{-9}$	不要
保管	狭小倉庫	$1.26 \times 10^{-11}$	不要	-	-	-	-	-	-	$1.22 \times 10^{-10}$	不要
	ワゴン車	$1.73 \times 10^{-10}$	不要	—	—	—	—	—	—	$6.66 \times 10^{-10}$	不要

表 7.5.6 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	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	① ボイラー近傍への設置禁止 かつ 漏洩センサー検知時に室外ファン強制 ON ② ボイラー近傍への設置禁止+換気 11回		① 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 1面開口寸法 0.6m以上 ② ボイラー近傍への設置禁止		① 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 7.5.7 の通り、床置き設置室内機も含め冷房能力 30.0kW まで対象を拡げて、比較的风险が高くなると想定されるモデルを選定した。30.0kW 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 4.5kW クラスと、最大冷媒量となる 30.0kW (7.1kW : 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、14.0kW 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 30.0kW 室外機の冷媒量は 7kg として試算した。

表 7.5.8 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 7.5.9 にまとめた。

表 7.5.7 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 <sup>2</sup> )	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 7.5.8 第三次モデルのリスクアセスメント結果

ライフステージ [許容レベル]	輸送 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]		据付 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]		使用 [ $\leq 1.3 \times 10^{-9}$ ]		修理 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]		廃棄 [ $\leq 1.3 \times 10^{-8}$ ]		
	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											
室内	事務所	—	—	$6.63 \times 10^{-10}$	不要	$7.61 \times 10^{-13}$	不要	$4.82 \times 10^{-12}$	不要	$1.90 \times 10^{-12}$	不要
	厨房	—	—	$6.77 \times 10^{-10}$	不要	$7.97 \times 10^{-11}$	不要	$1.65 \times 10^{-10}$	不要	$7.33 \times 10^{-12}$	不要
	飲食店	—	—	<b><math>1.70 \times 10^{-8}</math></b>	$2.45 \times 10^{-10}$	<b><math>9.39 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>1.20 \times 10^{-11}</math></b>	<b><math>9.28 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>2.81 \times 10^{-9}</math></b>	$2.99 \times 10^{-12}$	不要
	工場	—	—	$2.30 \times 10^{-9}$	不要	$1.05 \times 10^{-9}$	不要	$3.11 \times 10^{-9}$	不要	$7.04 \times 10^{-10}$	不要
	氷蓄熱	—	—	$6.70 \times 10^{-10}$	不要	$3.62 \times 10^{-12}$	不要	$4.10 \times 10^{-11}$	不要	$2.79 \times 10^{-12}$	不要
室外	地上設置	—	—	$8.04 \times 10^{-10}$	不要	$2.61 \times 10^{-10}$	不要	$5.53 \times 10^{-10}$	不要	$7.60 \times 10^{-10}$	不要
	各階設置	—	—	$1.00 \times 10^{-9}$	不要	$6.15 \times 10^{-10}$	不要	$1.48 \times 10^{-9}$	不要	$2.01 \times 10^{-9}$	不要
	半地下設置	—	—	<b><math>3.67 \times 10^{-7}</math></b>	<b><math>5.64 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>4.65 \times 10^{-6}</math></b>	<b><math>1.23 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>1.18 \times 10^{-7}</math></b>	<b><math>2.93 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>1.43 \times 10^{-7}</math></b>	<b><math>1.59 \times 10^{-9}</math></b>
	狭小設置	—	—	$5.34 \times 10^{-9}$	不要	<b><math>8.49 \times 10^{-9}</math></b>	<b><math>3.97 \times 10^{-10}</math></b>	<b><math>1.91 \times 10^{-8}</math></b>	<b><math>4.95 \times 10^{-10}</math></b>	$2.61 \times 10^{-8}$	<b><math>2.84 \times 10^{-9}</math></b>
保管	狭小倉庫	$8.30 \times 10^{-11}$	不要	-	-	-	-	-	-	$3.51 \times 10^{-9}$	不要

表 7.5.9 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	① 漏洩センサー検知時に室内ファン強制 ON		① 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	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	①ボイラー近傍への設置禁止 かつ 漏洩センサー検知時に室外ファン強制 ON ②ボイラー近傍への設置禁止+換気 11 回		① 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	①1面開口寸法 0.6m以上 ②ボイラー近傍への設置禁止		① 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、現在の冷媒（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 7.6.1 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。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 7.6.1 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	$1.3 \times 10^{-9}$		$1.3 \times 10^{-10}$		$1.3 \times 10^{-9}$		$1.3 \times 10^{-9}$	
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	$1.0 \times 10^{-4}$		$2.0 \times 10^{-4}$		$2.0 \times 10^{-4}$		$2.0 \times 10^{-4}$	
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	$1.70 \times 10^{-8}$	$1.70 \times 10^{-12}$	$9.39 \times 10^{-9}$	$1.88 \times 10^{-12}$	$9.28 \times 10^{-9}$	$1.86 \times 10^{-12}$	-	-
室外 半地下/狭小	$3.67 \times 10^{-12}$	$3.67 \times 10^{-16}$	$2.83 \times 10^{-10}$	$5.66 \times 10^{-14}$	$5.32 \times 10^{-10}$	$1.06 \times 10^{-13}$	$1.43 \times 10^{-12}$	$2.86 \times 10^{-16}$



## 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、R32冷媒の場合、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。微燃性冷媒使用時の店舗用パッケージエアコン施工マニュアルとして、今後、安全対策を周知させていく予定である。微燃性冷媒を用いた機種 of 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。

R32以外の微燃性冷媒に関しては、湿度による可燃に対する影響などが引き続き研究されており、今後、燃焼特性が明らかになれば、リスクアセスメントに含めていく予定である。また、微燃性冷媒の着火時の危害度評価も研究されており、それらの最新情報をリスクアセスメントに反映し、より実用的な評価となるように修正していく予定である。

### 参考文献

一般社団法人 日本電機工業会ホームページ, JEMA 2013年 自主統計

一般社団法人 日本冷凍空調工業会 環境企画委員会 微燃性冷媒安全検討WG

ミニスプリットリスクアセスメントSWG, 2012, ミニスプリットリスクアセスメントSWGの検討結果 (第一次報告書) P27-28

今村友彦, 2014, Experimental Evaluation of Physical Hazard of A2L Refrigerants, The International Symposium on New Refrigerants and Environment Technology 2014, P73-78,

片岡修身, 2000, The International Symposium on HCFC Alternative refrigerants and Environmental Technology 2000, pp218-223

高市健二、平良繁治、渡部岳志、2014「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、P78-89

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

滝澤賢二, 2014, Fundamental and Practical Flammability Properties, The International Symposium on New Refrigerants and Environment Technology 2014, P79-84,

矢嶋龍三郎、2014「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、P90-100

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」

## 8. ビル用マルチエアコンリスクアセスメントの進捗

### 8.1 はじめに

表 8.1.1 にこれまでのリスクアセスメントの進展を示す。リスクアセスメントの目的は、地球温暖化影響の低い微燃性冷媒を使用したビル用マルチのリスクを適正に評価し、その結果に基づき市場にて十分に安全を確保できる安全基準を策定することである。一方、温暖化影響を削減するには、これらの安全基準を満たした商品が市場にとって受け入れ可能なものでなければならず、過度な規制を避け、実現可能な安全基準作りを進めなければならない。第1次では、リスクアセスメント方法を確立するために、冷媒漏洩率や着火源評価などの基本データの収集を行った。第2次では、リスクを低減可能な安全対策を提案するために、リスクの大きな設置ケースを抽出し着火事故確率の推定を行い、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。第3次では、商品化と両立可能な安全規制を提案するために、市場実態に近い設置ケースも含む市場全体における着火事故確率の推定を行い、確率を許容値以下に低減するための安全のための基準を提案した。リスクアセスメントは、冷媒として R32 を用いたとして進めた。

表 8.1.1 微燃性冷媒ビル用マルチのリスクアセスメント進展

	リスクアセスメントの進展		
	第1次 '11/4 ~ '12/7	第2次 '12/8 ~ '14/9	第3次 '14/1 ~ '15/3
目的	・リスク評価方法の確立	・安全対策の提案	・商品化と両立可能な安全規制の提案
アウトプット	・リスクアセスメント方法	・安全ガイドラインGL-13改訂提案	・適正なリスク特定と評価に基づき技術基準を提案
実行項目	・冷媒漏洩確率特定 ・着火源評価 ・ヒューマンエラー確率特定 ・確率計算法共有化	・最悪設置ケース特定し、安全対策策定 ・GLに微燃性冷媒追加 ・国際規格改訂提案反映	・リスク特定の適正化 ・着火源評価 ・換気条件想定 ・規制改訂の提案

### 8.2 微燃性冷媒を用いたビル用マルチエアコンの課題

表 8.2.1 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るため、作業ミス発生は抑制されている。

微燃性を有する 2L 冷媒は、他の燃焼性冷媒に比べて、燃焼下限界 LFL や最小着火エネルギーの値が大きいという特徴を有する。LFL が大きいと可燃空間を発生させるための冷媒漏洩量が大きくなる。また、強燃性を有するプロパンを着火させ得る着火源でも、最小着火エネルギーが大きな 2L 冷媒を着火させることが出来ないことになる。

着火事故確率の算出にあたっては、冷媒漏洩時に可燃空間がどのように発生するか、また、そこに 2L 冷媒を着火させ得る着火源がどのように存在するかを把握する必要がある。

### 8.3 リスクの特定

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た。室内では、冷媒滞留し易い床置機を裸火が使用される頻度が高い飲食店の小部屋に設置されたケースや、音漏れ防止のためドア下隙間が無く自然換気を期待できないカラオケ店に天井カセットが設置されるケー

表 8.2.1 ビル用マルチシステム、微燃性冷媒の特徴

ビル用マルチの特徴(対ペア)	リスク増減
★冷媒充填量が大、漏洩時には1室に冷媒全量が漏洩。	増加
★弁、容器、センサー等、冷媒配管の接続箇所数が多い。	
★配管の気密や冷媒漏洩が、厳密に検査される。	減少
★据付、修理・保守作業者の技能レベルは比較的高い。	
★冷暖同時、水冷、氷蓄熱等、多様なシステム構成。	リスク特定要
★室外機、室内機シリーズとも、能力の範囲が広い。	
微燃性冷媒の特徴(対強燃性)	リスク増減
★LFLが大、可燃空間を発生させる冷媒漏洩量が大きい。	減少
★最小着火エネルギーが大、着火源の種類が限定される。	

スを抽出した。通常は換気が行われない天井裏も想定した。室外では、冷媒滞留し易い、各階設置、半地下、機械室に設置されたケースを抽出した。

## 8.4 リスクアセスメントの準備

### 8.4.1 許容レベルの設定

許容出来るリスクの事故発生確率は、本来は危害度により異なるが、危害度評価が未完了のため、全ての事故を致命的な重大事故だと仮定した上で許容レベルを設定した。市場ストック室内機台数約 1000 万台から、100 年に一度の重大事故発生が許容されるレベルだと考え、使用時（室内）は  $10^{-9}$  以下を許容レベルとした。使用時（室外）は、台数を 4 倍として  $4 \times 10^{-9}$  とした。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、1桁上げて  $10^{-8}$  以下とした。この点、向殿（2009）の考え方を参考とした。

### 8.4.2 冷媒漏洩速度別の漏洩件数発生確率

ビル用マルチについて冷媒充填量基準を定めている国際規格（ISO5149 Part1 A5 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。実態を知る為、市場で冷媒漏洩を起こした漏れ部品を回収し、窒素での漏洩速度試験により漏れ穴径を求め、求めた穴径と冷媒圧力から、冷媒漏洩速度を求めた。

市場から回収した室内機漏れ部品 22 ケでの測定結果を図 8.4.1 に示した。ここで、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、液漏れ 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 件は冷媒の急速漏れでは無く、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 ケについても計測を行った。結果は、図 8.4.2 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高く、液漏れ 10kg/h を超えるものが 3 ケあった。

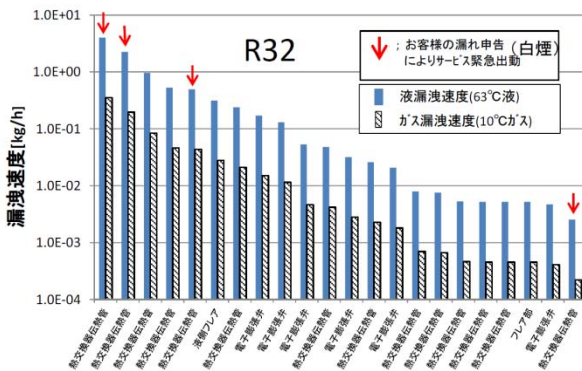


図8.4.1 室内機冷媒漏洩速度の測定結果

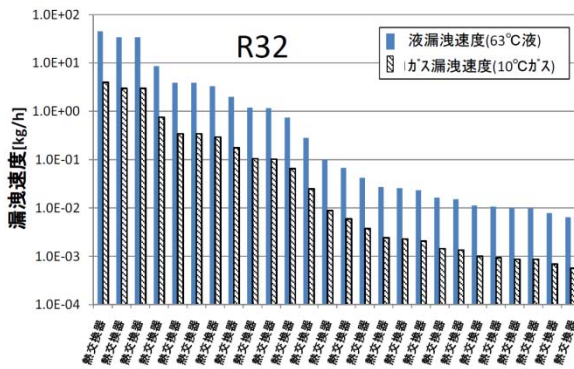


図8.4.2 室外機冷媒漏洩速度の測定結果

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件数発生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れ件数全体を対象に、顧客からの「白煙、異臭」申告があった

表 8.4.1 漏洩速度別の冷媒漏洩発生確率

急速漏れの年間申告件数、2010年度、メーカーB

	白煙	焦げ臭	パイプに穴	申告数 Nrp
室内機	0	1	0	1
室外機	1	3	3	7

漏洩速度別の漏洩発生確率

	計	緩慢漏れ	急速漏れ	噴出漏れ
		~1[kg/h]	~10[kg/h]	~75[kg/h]
室内機	構成比率 [-]	1	0.986	0.014
室内機	漏洩発生確率 [ppm]	350	345	5
室外機	構成比率 [-]	1	0.806	0.176
室外機	漏洩発生確率 [ppm]	7600	6126	1338

【算出方法】

漏洩発生確率：日冷工各社の出荷シェア加重平均値

急速漏れ件数 = 急速漏れ申告件数 Nrp × 10 (室内) or 100 (室外)

噴出漏れ件数 = 急速漏れ件数 × 0.10 (室外), 0 (室内)

緩慢漏れ件数 = 全漏れ件数 - (急速漏れ件数 + 噴出漏れ件数)

Nrp：ユーザーやサービスマンからの急速漏れによると思われる申告を伴った漏れ発生件数  
(例えば、ユーザーからは、白煙や焦げ臭、サービスマンからは管に穴や割れがあった等)

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明き」と診断した件数を抽出し、室内機の場合はその件数の10倍を、室外機の場合にはその100倍を急速漏れ件数とした。所謂バーストリーク（噴出漏れ）は、ビル用マルチの室内機部品では無かったため、噴出漏れ件数はゼロとした。残りを1kg/h以下の緩慢漏れ件数と判断した。室外機では、10kg/hを超えるサンプルがあったため、急速漏れ件数の1/10を噴出漏れ件数とした。結果を表8.4.1に示した。

### 8.4.3 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して、橋本（1988）による値を表8.4.2、鈴木ら（2001）による値を表8.4.3に示す。作業は、正常でリラックスした状態での作業であると考えられ、これらの文献値の幅からみて、一般のエアコン作業時のヒューマンエラー発生率としては0.001が妥当な値と言える。ビル用マルチの作業については、比較的高い技術レベルの専門技術者やサービスマンがあたるため、これらの作業者のヒューマンエラーは、教育訓練により作業ミス発生は抑制されている。教育訓練された場合には、1桁程度の発生率の低減が期待できる。従って、ビル用マルチの作業におけるヒューマンエラー発生確率は、0.0001とした。

### 8.4.4 着火源の評価

表8.4.4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 滝澤（2013）、今村ら（2013）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。プロパンでは、これら室内に多く存在する着火源により容易に着火する。従ってプロパンと微燃性冷媒とでは、着火事故確率に大きな差が出ることとなる。

表 8.4.4 微燃性冷媒 R32 の着火源の範囲

○：着火  
×：着火せず

分類		着火源	R32	プロパン (参考)
スパーク (可燃空間中で発生)	電気部品	電化製品(火災原因)	○	○
		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)	○
		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	ロウ付バーナー	○	○	

表 8.4.2 ヒューマンエラーの発生確率

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
I	意識ぼけ	疲労、居眠り	1E-1以上
II	正常 リラックスした状態	休息時 定例作業時	1E-2~1E-5
III	正常 明晰な状態	積極活動時	1E-5以下
IV	興奮状態	慌てている時 パニック時	1E-1以上

表 8.4.3 ヒューマンエラーの発生確率その2

注意レベル	状態	エラーレート	持続時間
マイナス	慌て、パニック	0.1以上	
0	居眠り		
I	単調作業による飽き・疲労	0.01以上	
II	通常作業時	0.01~0.0001	
III	積極作業時	0.00001以下	15~20分

表 8.4.5 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	$PF_i = N/V_i \cdot M \cdot PL$ $= N/V_i \cdot V_f \cdot T_f \cdot PL$	$PT_i = N \cdot T_f$	$PS = V_f/V_r$
可燃空間の 発生	$PF_g = N \cdot T_b \cdot V_f/V_r \cdot PL$	$PT_g = N \cdot T_b$	
計	$PF = PF_i + PF_g$ $= N \cdot V_f/V_r \cdot (T_f + T_b) \cdot PL$ $= PT \cdot PS \cdot PL$	$PT = PT_i + PT_g$ $= N \cdot (T_f + T_b)$	$PS = V_f/V_r$

#### 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<sup>3</sup>]  
 T : 時間長さ [分/回]  
 M : 可燃空間の時空積 [分・m<sup>3</sup>/回]

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

#### 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

### 8.4.5 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冷媒漏洩が発生し、かつ、A2L 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。この確率の計算式を表 8.4.5 に示した。

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。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、計算を行っている。

### 8.4.6 室内モデルの設定および解析内容

室内機より冷媒が漏洩した場合の室内空間可燃域の発生状況を、冷媒漏洩シミュレーションをベースとして検討を行った。ビル用マルチエアコンが設置される標準的的施工条件を想定した事務所小会議室モデルによる種々条件のシミュレーション評価を実施した。

#### (1) 事務所小会議室

ビル用マルチエアコンが適用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 (20 馬力) 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 台当たりと同容量の室内機が 8 台接続されているとして、室内機の容量は 71 型 (2.8

表 8.4.6 冷媒封入量 (平均的な施工時)

項目	冷媒量[kg]				
	R410A	R32	R1234yf		
室外機	56kW(20馬力)	19.0	16.1	18.1	
室内機	7.1kW(2.8馬力)x4台x2部屋	-	-	-	
配管	液管:φ15.88	40m	7.6	6.5	7.2
	液管:φ9.53	72m	4.3	3.7	4.1
合計		30.9	26.3	29.4	

表 8.4.7 冷媒封入量 (最大冷媒量)

冷媒	R410A	R32	R1234yf
室外機(出荷分)	40.6kg	-	-
冷媒追加量(最大)	63kg	-	-
合計	103.6kg	88.1kg	98.4kg

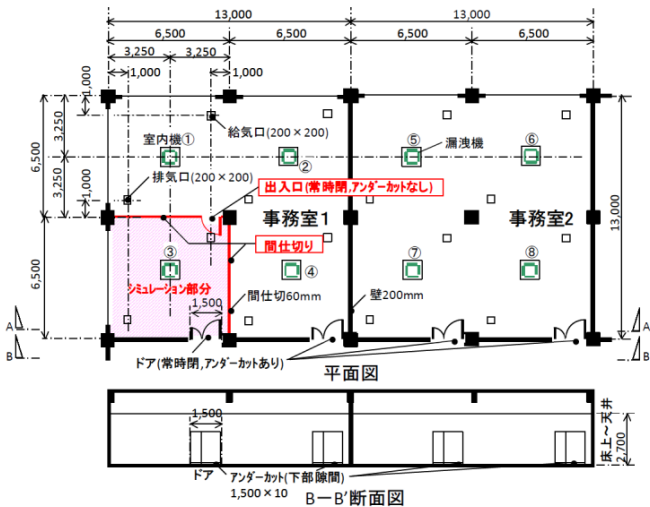


図 8.4.3 空調機が接続される事務室の全体図

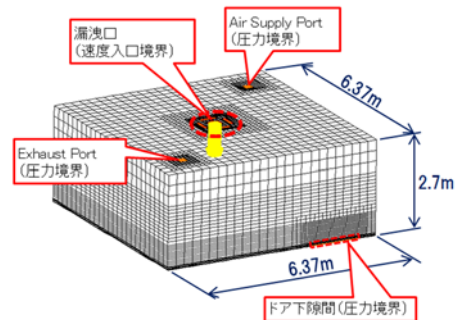


図 8.4.4 計算モデル (事務所・小部屋)

表 8.4.8 事務所 (小部屋) でのシミュレーション条件設定と解析結果

No.	冷媒	冷媒量M [kg]	漏洩速度E [kg/h]	強制換気Q [m³/h]	ドア下隙間	機械換気口	条件	可燃空間時空積[m³・min]	
								M=26.3(※2)	M=88.1
1	R32	26.3	10	0	無	開	最も厳しく、可燃域が発生する見込み。	1.70 × 10 <sup>0</sup>	3.66 × 10 <sup>4</sup>
2		88.1	10	0	有	開	ドア下での自然換気。	8.30 × 10 <sup>-1</sup>	2.80 × 10 <sup>0</sup>
2'		10	0	有	閉	ドア下での自然換気。ただし機械換気口は閉。	1.62 × 10 <sup>0</sup>	-	
4		1	0	有	開	ドア下での自然換気。	0.00 × 10 <sup>0</sup>	-	
5		10	169	有	開	機械換気(1.5回/h)有り。換気効率を評価。	7.00 × 10 <sup>-1</sup>	-	
6		10	0→169(※1)	有	開	漏洩検知後に換気作動。	7.30 × 10 <sup>-1</sup>	-	
8	R1234yf	29.4	10→0(※1)	0	無	開	漏洩検知後に冷媒配管を緊急遮断。	3.10 × 10 <sup>-2</sup>	-
9'			10	0	有	開	No.2との冷媒比較。	6.30 × 10 <sup>-1</sup>	-

(※1) ーは、漏洩検知センサ発報時の動作を表す。  
 (※2) R32の時の冷媒量。R1234yfの時はM=29.4[kg]。

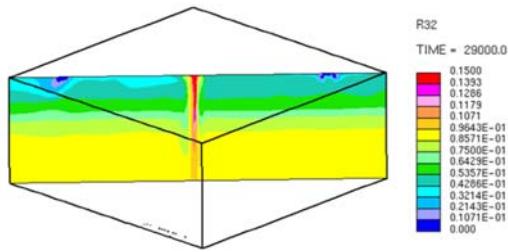


図 8.4.5 モデル No. 2 の計算結果（濃度分布）

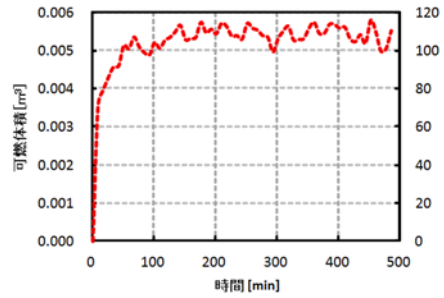


図 8.4.6 モデル No. 2 の計算結果（可燃体積）

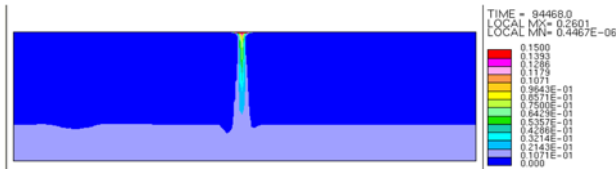


図 8.4.7 モデル No. 4 の計算結果（濃度分布）

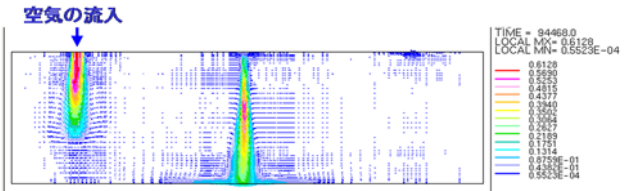


図 8.4.8 モデル No. 4 の計算結果（速度分布）

馬力) を選択, 冷房負荷  $170\text{W}/\text{m}^2$  として床面積を設定した. 図 8.4.3 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. 給排気口からの換気量は, 建築基準法 28 条により, 想定在籍人数から  $169\text{m}^3/\text{h}$  とした. 給排気口は, 公共建築協会 (2006) を参考に, 面風速は  $2.0\text{m}/\text{s}$  とし,  $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$  とした. ドア形状は幅  $1500\text{mm}$  とした. ドア下部の隙間寸法は, ベターリビングが推奨している  $10\text{mm}$  に設定した (換気設備マニュアル, 2003).

冷媒量は, R410A を基準として冷媒密度差分を補正し, R32 では  $0.85$ , R1234yf では  $0.95$  の係数を乗じて算出した. 平均的な施工を想定した冷媒量 (表 8.4.6) で行ったが, 最大冷媒量 (表 8.4.7) の場合の検討も行った.

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, 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 8.4.8 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, 微少漏れの場合は  $1\text{kg}/\text{h}$ , 急速漏れの場合は  $10\text{kg}/\text{h}$  とした. 計算モデルを図 8.4.4 に示す. なおシミュレーションは東大と日冷工とで分担し実行した. 表 8.4.8 中に可燃空間の時空積の結果を合わせて示す.

ドア下隙間からの自然換気の評価した例としては, No.2 と No.4 があり, 前者は冷媒漏洩速度  $E=10[\text{kg}/\text{h}]$ , 後者は  $E=1[\text{kg}/\text{h}]$  の場合である. No.2 条件における, 漏洩冷媒量  $88.1\text{kg}$  漏洩終了時点の濃度分布と可燃域体積を図 8.4.5, 図 8.4.6 に示す. 本ケースの場合, 可燃域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 8.4.6 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. No.4 条件における, 漏洩冷媒量  $26.3\text{kg}$  漏洩終了時点の濃度分布と速度分布を図 8.4.7, 図 8.4.8 に示す. 図 8.4.7 に示す冷媒の濃度分布からわかるように, 可燃空間は室内機漏洩口の極く近傍にのみ生成している. 一方, 速度分布からは, 天井面の給排気口からの空気の流入により, 空間内の R32 の濃度が上昇しなかったことが判る.

これらの結果から, ドア下の隙間などの自然換気は濃度上昇抑制への効果が期待できることが分かった. 一方, 時空積を下げるためには漏洩冷媒を排出する隙間と共に空気の流入口が必要であることも分かる. ドア下隙間の大きさに関しては市場でのバラツキがあるなど, 確実性に関して懸念もある. 漏洩検知, 強制換気の設定条件・仕様とともに, 今後明確にしていく.

冷媒漏洩検知後に機械換気装置を稼動するモデル No.6 や, 冷媒配管に設置した遮断弁の作動で冷媒漏洩を止めるモデル

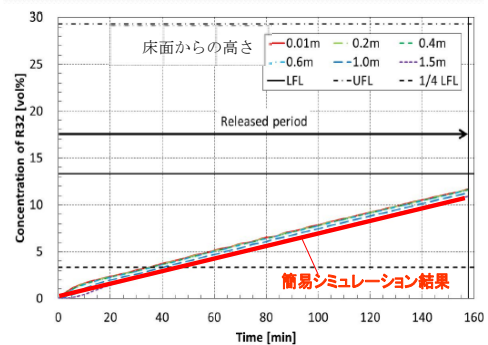


図 8.4.9 モデル No. 1 の計算結果（平均濃度）

No.8の結果から、これら手段により可燃空間の時空積低減が可能であり、安全対策として有効であることがわかる。

なお、天井設置タイプでの冷媒濃度は、室内の濃度を均一と仮定した集中モデル(2011)によって求めた簡易シミュレーション結果とよく一致していることが分かる(図 8.4.9)。このことから、天井設置タイプで換気量が規定されているモデルについては簡易シミュレーションを実施することにした。以下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。

### (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域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 8.4.10 にモデルを示す。冷媒量は、R32 で 52.8, R1234yf で 58.5[kg]とした。表 8.4.9 に解析条件と結果を示した。未対策ケースとしては、給排気の換気口が共に天井に設置されており、換気量は 112[m<sup>3</sup>/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 CO<sub>2</sub> 濃度を 1000[ppm]程度に維持するための換気量は 500[m<sup>3</sup>/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。日冷工のガイドラ

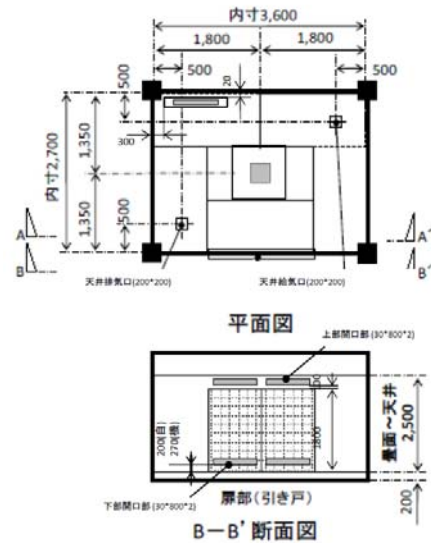


図 8.4.10 飲食店の全体図

表 8.4.9 飲食店・床置機の濃度解析結果

	解析条件					可燃空間			
	冷媒	冷媒量 [kg]	漏洩速度 [kg/h]	機内搅拌	機械換気量 [m <sup>3</sup> /h]	換気口	平均容積 [m <sup>3</sup> ]	継続時間 [min]	時空積 [m <sup>3</sup> min]
未対策	R32	52.8	10	無し	112	天井給気・天井排気	1.17	910	1070
	同上	同上	同上	有り	同上	同上	1.28	900	1150
対策	R32	52.8	10	有り	164	天井給気・床上300mm排気	0.01	320	416
	同上	同上	同上	同上	同上	天井給気・床上200mm排気	0.10	317	30.7
	同上	同上	同上	同上	同上	天井給気・床上30mm排気	1.30	317	2.40

インであるGL-13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 10[kg/h] で濃度が RCL0.061[kg/m<sup>3</sup>]以上とならない値、164[m<sup>3</sup>/h](=10/0.061)とした。排気開口の高さ(下面)を 30~300[mm]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。

### (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 8.4.11 にモデルを示す。野村(2011)や北島(2011)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。冷媒量は、最大の 88.1[kg]、容積は 9.5[m<sup>3</sup>]、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、燃烧式暖房機、ガスコンロや、カラオケ機器はじめとする図中電気機器の発火、を想定した。濃度は簡易シミュレーションにて求めた。

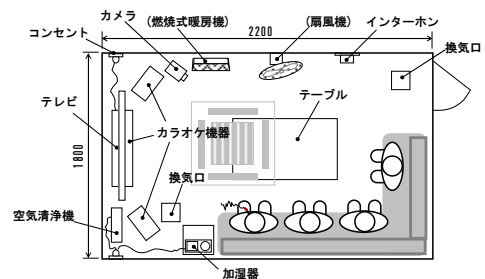


図 8.4.11 カラオケルームの全体図

### (4) 天井裏

冷媒配管が通る密閉性の高い小空間として屋根裏も検討の対象とした。図 8.4.12 のように、前記事務所小会議室の天井裏を対象として、最悪を考えてこの区画が他と隔離され

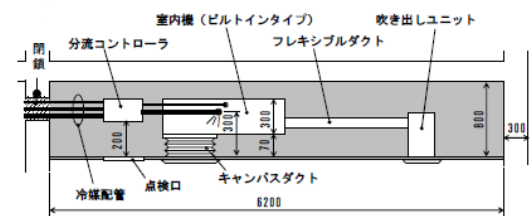


図 8.4.12 天井裏(事務室・小部屋)の全体図

ており、機器使用時漏洩後に全域が可燃域となり 10年間継続するとした。着火源としては、室内機の発火や漏電事故を考えた。据付時などの作業時は、点検口が開いていることを考慮して、可燃空間の継続時間は 4 時間とした。また容積は、事務室・小部屋の天井裏を想定して決めた。

### (5) 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 3150×1850）。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。

#### (6) 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 3825×2050）。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。

#### (7) 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の検討した。換気装置の故障率は調査の結果 0.025%として取り入れた。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) 床置タイプの漏洩検知と対応の検討

前述のように、床置タイプにおいては漏洩直後より床面に可燃域が発生し易いため、漏洩検知と対策が必須となる。漏洩検知センサーを室内機内設置し、漏洩検知に基づき送風運転して部屋内の空気を攪拌することにより可燃域を減少させる安全対応をシミュレーション検討中である。

### 8.4.7 室外モデルの設定

市場設置が最も多い 20Hp(10Hp×2 台)とし、上吹き出し三面熱交タイプを選定した。図 8.4.13 に示す設置パターンでは、周囲に障害物がない地上設置パターンに加え、各階設置、半地下設置の 3 パターンを想定した。R32 の冷媒量は 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 8.4.14～図 8.4.17 に、各設置モデルの詳細図を示す。

表 8.4.10 に解析結果を示した。冷媒漏洩速度が 10[kg/h]の条件では、障害物がない、または、各階設置では可燃空間が発生しなかった。75[kg/h]の場合には、全パターンで可燃空間が発生した。

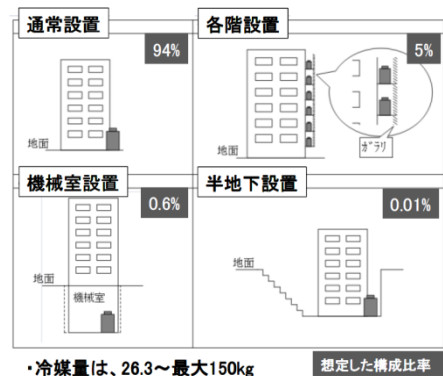


図 8.4.13 室外設置モデル

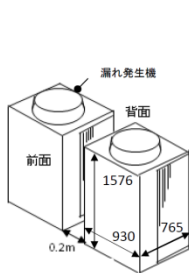


図 8.4.14 通常設置  
(障害物無し)

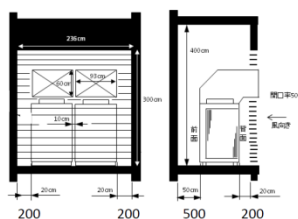


図 8.4.15 各階設置

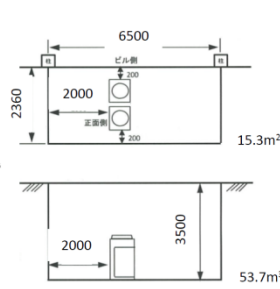


図 8.4.16 半地下設置

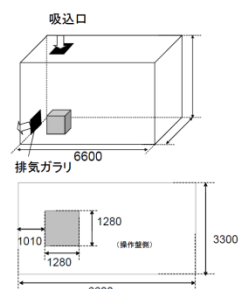


図 8.4.17 機械室設置

図 8.4.18 に半地下設置での濃度分布解析結果を示す。漏洩速度は 75[kg/h]である。漏洩終了迄の 20 分間は、可燃域層が床面から上昇し、漏洩終了後は拡散によって可燃域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、可燃域が数十秒で消滅するのに対し、半地下設置の場合、可燃域の冷媒の滞留がおこり、可燃域消滅まで 64 時間を要した。

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。安全対策としての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とした。図 8.4.20 に半地下設置での安全対策を考慮した冷媒漏洩 20 分後の可燃域分布解析結果を示す。

排気ダクトは 0.5m 角とし床上 0.5m に配置した。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

表 8.4.10 室外機の濃度解析結果

	解析条件	解析条件				漏洩時間	解析結果		
		室外機能力 [Hp]	漏洩速度 [kg/h]	漏洩量 [kg]	周囲速度 [m/s]		平均容積 [m <sup>3</sup> ]	継続時間 -	時空積 [m <sup>3</sup> min]
排気無	屋外設置パターン								
	周囲に障害物無し	20	10	26.3	0	2時間37分48秒	0.00E+00	0	0.00E+00
	各階設置						1.01E-06	4分13秒	4.27E-06
	周囲に障害物無し						8.31E-02	21分6秒	1.75E+00
	各階設置	20	75	26.3	0	21分2秒	1.88E-01	21min20s	4.02E+00
排気有	半地下設置						<b>1.64E+01</b>	<b>64時間12分</b>	<b>6.31E+04</b>
	半地下設置 高さ 0.8m						5.31E+00	4時間49分40秒	1.54E+03
	半地下設置+排気ダクト 520m <sup>3</sup> /h						1.38E+00	23分16秒	3.22E+01
	半地下設置+排気ダクト 260m <sup>3</sup> /h	20	75	26.3	0	21分2秒	4.03E+00	28分18秒	1.14E+02
	半地下設置(体積26.8m <sup>3</sup> ) + 排気ダクト						2.12E+00	22分30秒	4.78E+01
吸排気有	半地下設置+室外機ファン稼働						5.73E-01	21分36秒	1.24E+01
	半地下設置+排気ダクト 520m <sup>3</sup> /h			150		2時間	1.83E+00	2時間2分14秒	2.24E+02
	機械室設置 換気回数2回/h	20	75	26.3	0	21分2秒	5.81E+00	31min29s	1.83E+02
	機械室設置 換気回数4回/h						5.25E-01	21分24秒	1.12E+01
	機械室設置 換気回数8回/h						6.24E-02	21分5秒	1.32E+00

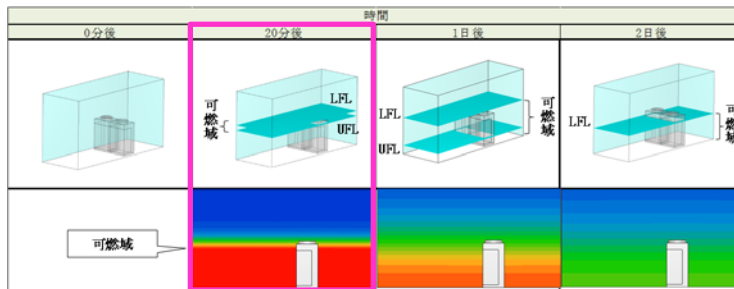


図 8.4.18 室外機の濃度分布解析結果

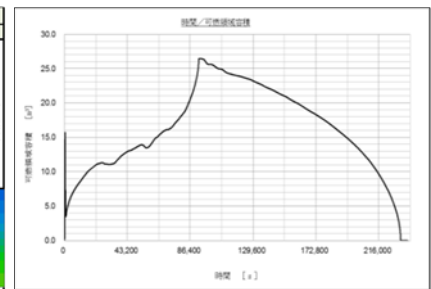


図 8.4.19 可燃域の時間推移

たモデルとした。

排気ダクトの場合、滞留している冷媒濃度を強制的に排気したため、排気ダクト風量 520m<sup>3</sup>/h 時の可燃域消滅時間は 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こし冷媒の拡散を速めたため、可燃域消滅時間が 21 分と短縮した。安全対策を施さない場合に対し、一気に可燃域消滅時間が減少した。そして、換気風量、室外機ファン風量が多い程、可燃域消時間が速くなった。

機械室も同様の傾向を示していた。一例とし換気回数の相違を図 8.4.21 に冷媒漏洩後 20 分後の可燃域分布解析結果を示す。換気回数の変化は風量変化に相当する。換気回数 2 回/h 時は可燃域消滅まで 31 分を要したが、換気回数 4 回/h 時は 21 分と短縮した。

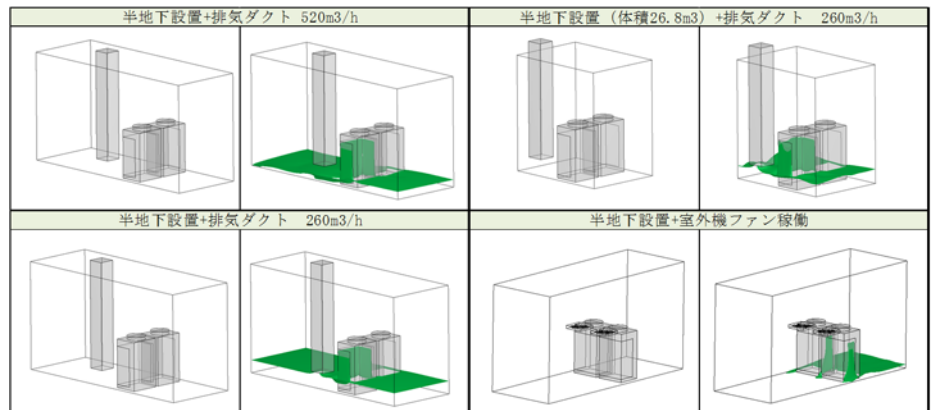


図 8.4.20 室外機の可燃域分布解析結果 (冷媒漏洩 20 分後)

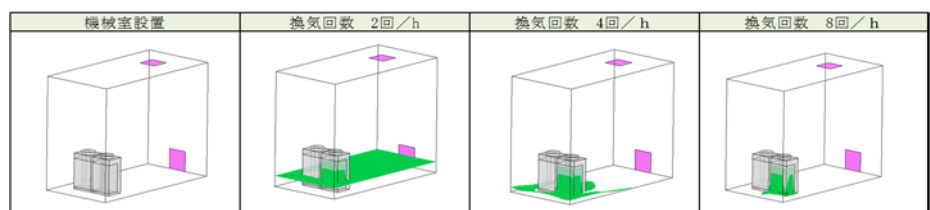


図 8.4.21 室外機の可燃域分布解析結果 (冷媒漏洩 20 分後)

## 8.5 リスクアセスメントの結果と安全対策

各ライフステージでのリスク評価結果について記述する。

### 8.5.1 輸送保管（製品）時

輸送保管を、倉庫保管と輸送の2つに分けて、それぞれのリスク検討を行った。

倉庫は、建築基準法の準耐火構造である300坪以下の中規模倉庫と想定し、そこに1000台保管される、とした。冷媒漏洩時の可燃空間の時空積の数値は、 $8.4 \times 10^{-3} [m^3 \text{ min}]$ を使用した。着火源としては、作業による喫煙時の石油ライター等による着火と、フォークリフトの荷扱い時の火花着火を仮定した。冷媒漏洩の頻度は、使用中と同じ急速漏洩の値とした。エアコンの保管頻度を耐用年数15年より、1/15とした。以上の条件を想定した作成したFTAを図8.5.1に示す。着火事故確率は $7.8 \times 10^{-17} \sim 1.8 \times 10^{-16} [件/(台 \cdot 年)]$ となり、許容値である $10^{-8}$ 以下となった。

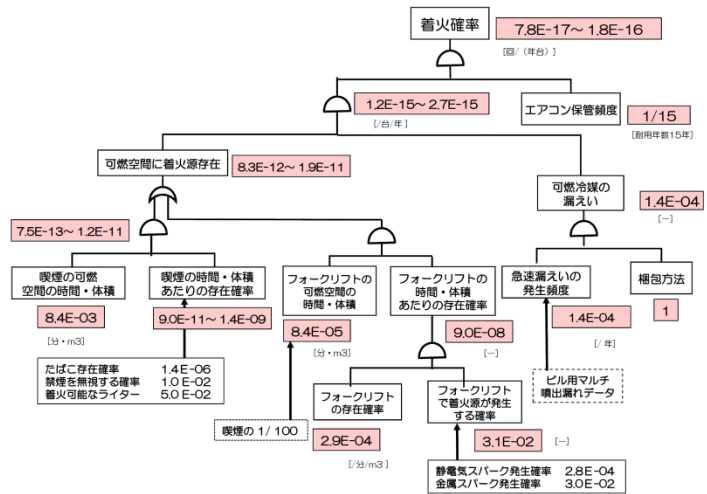


図 8.5.1 倉庫内での FTA

輸送時の貨物室内には着火源は無いと考えられるため、冷媒が漏洩しても着火燃焼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域が生じないことから、輸送保管時のリスクは無視できると判断した。

### 8.5.2 据付時

天井設置の室内機が、床面積40.6m<sup>2</sup>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。冷媒量は26.3kgとした。主要な着火源として、接続配管のロウ付けを考えた。通常、配管のロウ付けは、室外機が配管接続されない状態で実施されることが多い。仮に、室外機が配管接続された状態でロウ付け作業が行われるケースが10%あると仮定し、ヒューマンエラーによるバルブの誤動作により、ロウ付け作業中の配管から冷媒が漏洩し、ガスバーナにより着火すると考えた。平均ロウ付け時間と配管接続作業時間からガスバーナによる着火存在確率を求めた。

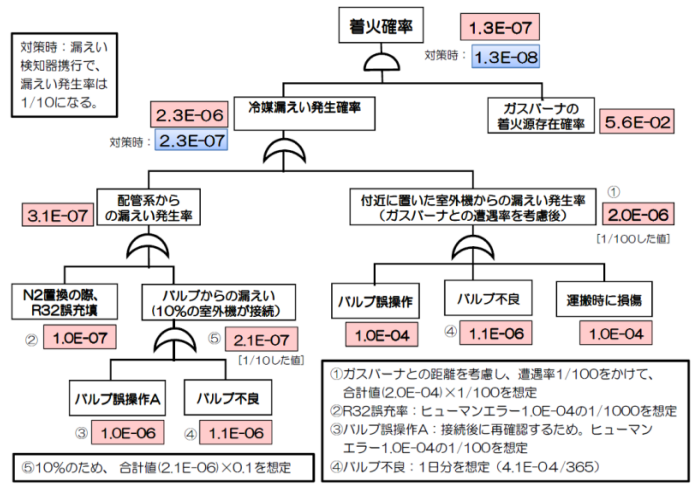


図 8.5.2 据付時のFTA（半地下・ロウ付け時の場合）

表 8.5.1 据付時の着火確率

(室内:天井設置, 室外:半地下設置)

	機器と作業内容 (着火源)	着火確率
(1) 喫煙以外による着火	①接続配管・ロウ付け作業時 (ガスバーナ)	1.4E-07
	②接続配管・試運転時 (電気・暖房機器系)	2.2E-14
	③室内機・試運転時 (電気・暖房機器系)	2.4E-18
	④室外機・試運転時 (電気・暖房機器系)	1.6E-08
	⑤室外機・エレベータ内運搬時 (電気系)	2.8E-22~1.2E-21
(2) 喫煙による着火		1.9E-10~9.3E-10
据付時の着火確率(合計値に、据付頻度: 6.7E-02をかけた値)		1.1E-08

を用いて空間容積等を求め、電気系・暖房機器系の着火源存在確率を算出し、用いた。また、室外機の試運転時については、ボイラーも着火源として考慮した。

冷媒漏えい発生については、①バルブ不良、②バルブ誤操作(閉め忘れ)、③N<sub>2</sub>置換の際、R32冷媒を誤充填、④漏えいリスクがある既設配管の流用などが起因の冷媒漏えいや、⑤配管工事前に配管が室外機に接続されている場合(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される場合(1%想定)を想定した冷媒漏えいを考慮した。

上記条件を想定したFTAを作成し、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8.5.1に纏めた。全体では、目標値(10<sup>-8</sup>)をわずかにオーバーしているが、接続配管のロウ付け作業時によるものが主要因であり、それ以外は、目標内の値である。

対策は、ロウ付け作業時に、冷媒漏えい検知器を携行することにした。結果、その作業における着火確率が1桁小さくなり、全体の着火確率は、1.1×10<sup>-8</sup>から1.9×10<sup>-9</sup>となって、目標(10<sup>-8</sup>)内にすることができた。

### 8.5.3 使用時(室内)

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。前回報告までにシビアリスクケースとして換気の有無、着火源の種類、部屋の大きさの異なる建物用途28種類について簡易的に着火確率を算出し、その結果カラオケルーム、飲食店客室、天井裏について評価を行った。今回さらに8.4.6項に示したように美容院バックヤード、焼肉店、夜間に換気が停止されるケースを加えて検討を行った。

一例として標準的ケースとして検討した事務室1・小部屋の換気有・急速漏れ・未対策ケースのFTAを図8.5.3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8.4.2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とも可燃域発生に関わる確率⑧⑩と、着火源の存在確率に関わ

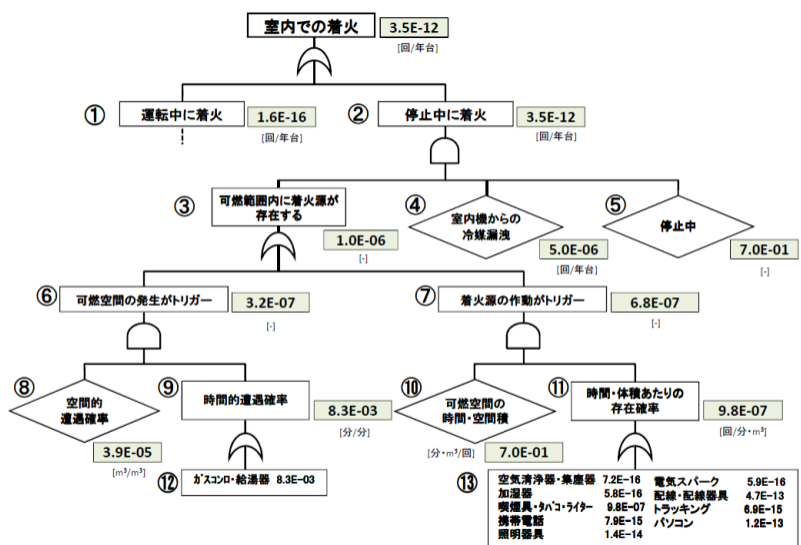


図8.5.3 室内使用時のFTA(事務所, 連続換気の場合)

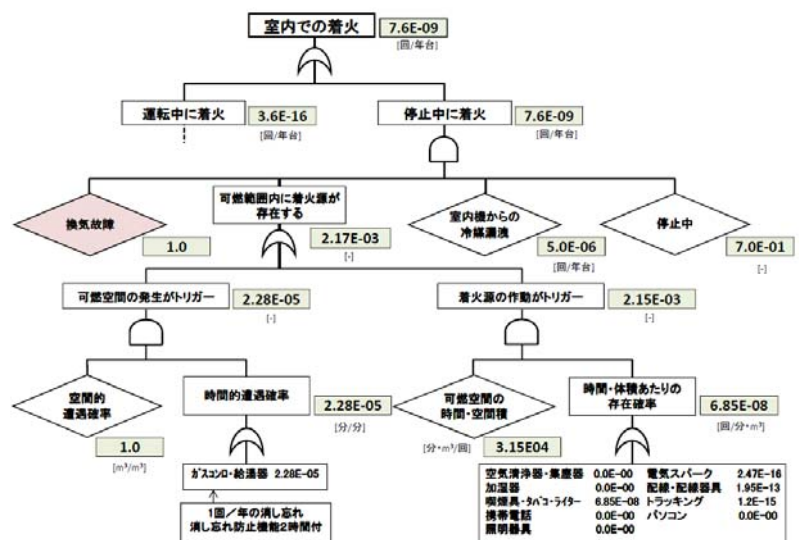


図8.5.4 室内使用時のFTA(事務所, 夜間換気停止の場合)

る⑨⑩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 8.4.6 項の検討結果を、着火源の存在確率については 8.4.4 項の検討結果を元に、FTA 中の数値に取り込んだ。

表 8.5.2 想定ケースと着火発生確率

想定ケース	部屋の大きさ m <sup>3</sup>	室内機 タイプ	換気 (未対策/対策時)	冷媒量 kg	評価結果			
					構成比	未対策時	対策時	
標準的ケース	事務所	109.6	天井設置	強制換気有り/ー	88.1	3.8E-01	3.5E-12	(対策不要)
シビアリスク ケース	事務所、夜間換気停止	109.6	天井設置	強制換気夜間無し/有り	88.1	3.8E-01	7.6E-09	3.5E-12
	飲食店	24.3	床置タイプ	無し/強制換気有り	52.8	2.0E-02	3.8E-07	2.6E-10
	カラオケルーム	9.5	天井設置	無し/強制換気有り	88.1	2.1E-03	1.8E-07	0.0E+00
	美容院バックヤード	14.0	天井設置	無し/強制換気有り	88.1	1.6E-03	1.3E-09	6.8E-12
	焼肉店	19.6	天井設置	無し/強制換気有り	88.1	7.8E-04	2.8E-09	1.5E-11
	天井裏	30.8	天埋タイプ	無し/点検有り	20.0	1.0E+00	3.0E-10	3.0E-11
合計						1.1E-08	3.7E-11	

シビアケースとして、夜間に換気が停止する場合の着火事故確率を検討した。FTA を図 8.5.4 に示した。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た。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⑩は $6.85 \times 10^{-8}$ 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事故確率は、 $7.6 \times 10^{-9}$ となり、許容できないリスク( $> \times 10^{-9}$ )となった。

以上のような FTA による着火発生確率の検討を、8.4.6 項にて挙げた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発生確率の積の総和が、室内機起因による着火事故発生確率となる。想定したケースの構成比と着火発生確率を表 8.5.2 にまとめて示す。

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、目標とする着火発生確率  $10^{-9}$  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が、全ての対策を織り込んだ場合の着火確率は  $3.7 \times 10^{-11}$  となり、目標を満足した。

### 8.5.4 床置機の安全対策の検討

床面で可燃域が発生し易い床置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漏洩検知した場合には、室内機ファンによる強制対流により漏洩冷媒を吹き上げることで、冷媒を攪拌・希釈し、床面における可燃域の生成を防止することとした。室内ファンの攪拌によりどの程度の希釈効果が得られるかを CFD 解析で検討した。対象としたのは製品高さ 600mm 程度のローボーイ型床置き機で、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を想定した。

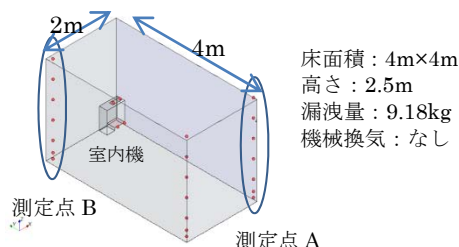


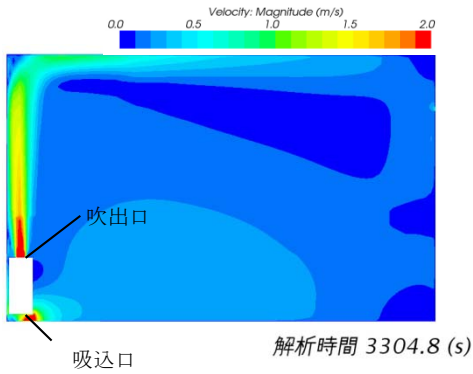
図 8.5.5 床置機の解析モデル

図 8.5.5 に、解析モデルを示した。4m x 4m x 高さ 2.5m の室内において風速 2m/s、風量 7m<sup>3</sup>/min でファンを運転した時の解析結果を図 8.5.6 に示す。十分に天井まで吹き上がっていることがわかり、部屋容積(40m<sup>3</sup>) x LFL x 0.75 で算出した冷媒量(9.18kg)全てが漏洩しても床面付近を含め冷媒濃度は LFL x 0.75 に達しておらず十分に希釈が生じていることが分かる。これらの風速、風量の条件においては、冷媒漏洩を検知してファンを運転することにより、攪拌により十分な希釈が得られると考える。冷媒量が LFL x 0.75 x 部屋容積を超える場合には、攪拌のみでは無く機械換気、冷媒遮断弁、警報などの安全対策を必要とする。

図 8.5.7 に風速 1m/s、風量 7m<sup>3</sup>/min での解析結果を示す。天井までは達しておらず吹き上がり高さは低くなることがわかる。この条件下では希釈は十分に生じているが、さらに条件を変えると吹き上がり高さが足りずに安全対策にならないことも十分に考えられる。

そこで現在は、安全対策となり得るファンの運転条件(風速、風量)や、その際に許容される冷媒充填量の範囲を明らかにするための検討を行っている。

垂直断面での流速分布



漏洩終了時の濃度分布

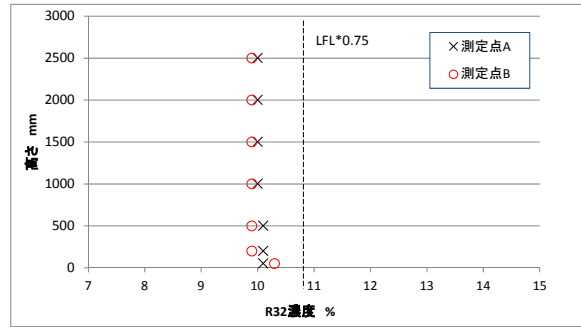
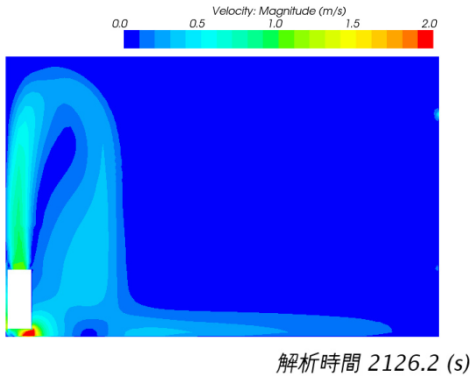


図 8.5.6 ファン運転による攪拌効果 (風速 2m/s, 風量 7m<sup>3</sup>/min, 漏洩速度 10kg/h)

垂直断面での流速分布



漏洩終了時の濃度分布

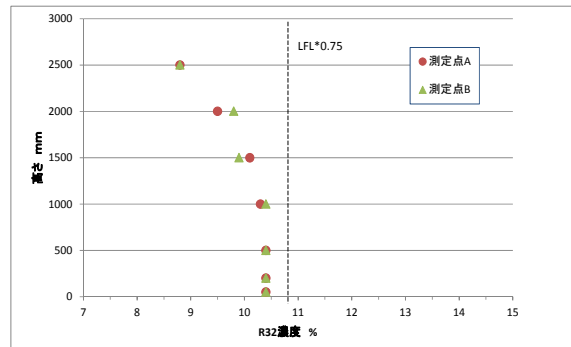


図 8.5.7 ファン運転による攪拌効果 (風速 1m/s, 風量 7m<sup>3</sup>/min, 漏洩速度 15.54kg/h)

8.5.5 使用時 (室外)

室外機設置は、通常設置・各階設置・機械室設置・半地下設置の右記 4 パターンとした。着火源は、喫煙 (マッチ、ライター)・室外機電気スパーク・併設ボイラーの 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

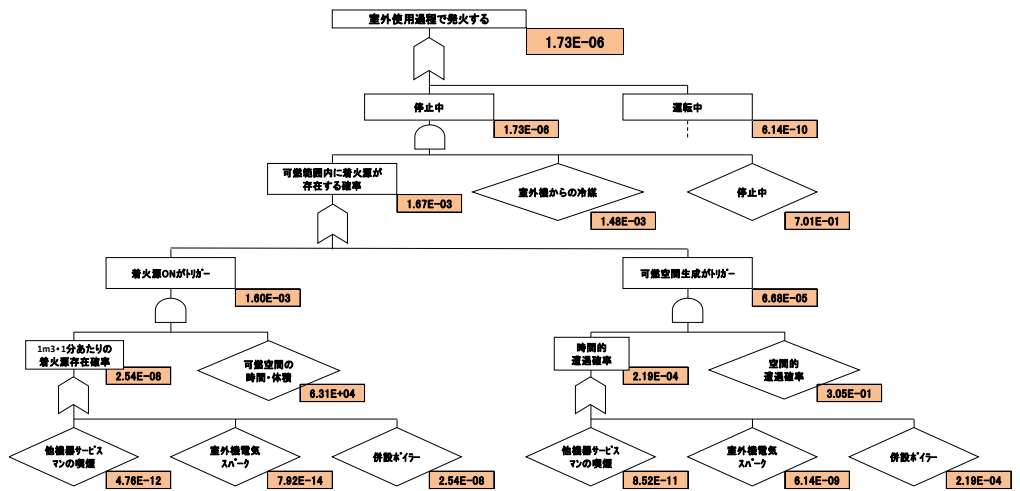


図 8.5.8 半地下設置での FTA

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。併設ボイラーについては、普及率 0.1%・ボイラー運転率 21.9% (年間運転時間: 8 時間/日×20 日/月×12 ヶ月)・可燃域濃度にある冷媒がバーナー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

表 8.5.3 使用時 (室外) での着火確率

	喫煙	室外機電気スパーク	併設ボイラ
通常設置	9.24E-17	5.25E-16	2.09E-11
各階設置	3.00E-14	8.47E-14	3.37E-09
半地下設置	3.12E-11	7.12E-12	1.73E-07
機械室設置	5.54E-15	3.12E-14	1.24E-09

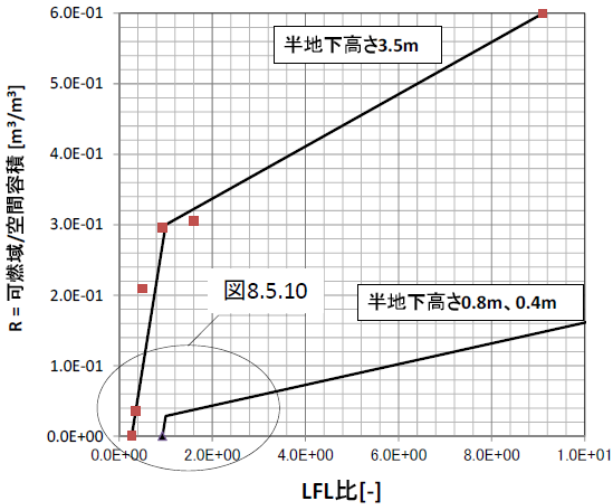


図 8.5.9 LFL 比と可燃域/空間容積

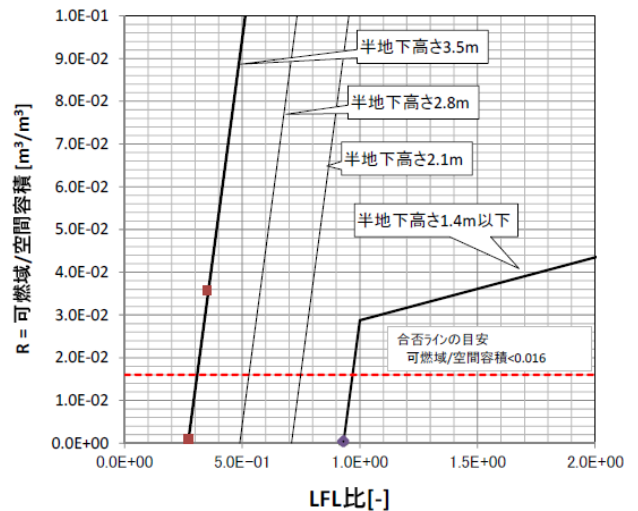


図 8.5.10 LFL 比と可燃域/空間容積 (左図の拡大)

表 8.5.4 LFL 比と可燃域/空間容積 (解析値)

■半地下での時空積 (停止時、未対策) LFL = 0.307 [kg/m<sup>3</sup>]

冷媒量 [kg]	床面積 [m <sup>2</sup> ]	高さ [m]	空間容積 [m <sup>3</sup> ]	冷媒量/空間容積 [-]	LFL 比 [-]	可燃空間平均容積 [m <sup>3</sup> ]	可燃域/空間容積 [-]
26.3	15.3	3.5	53.7	0.49	1.60	1.64E+01	3.05E-01
150	15.3	3.5	53.7	2.79	9.10	3.22E+01	6.00E-01
26.3	26.3	3.5	91.9	0.29	0.93	2.72E+01	2.96E-01
26.3	49.0	3.5	171.4	0.15	0.50	3.59E+01	2.09E-01
26.3	70.4	3.5	246.4	0.11	0.35	8.82E+00	3.58E-02
26.3	91.8	3.5	321.2	0.08	0.27	3.36E-01	1.05E-03

の着火確率を算出した結果、着火源別の着火確率は表 8.5.3 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 8.5.8 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  $4.0 \times 10^{-9}$  を下回り安全対策は不要であったが、半地下では漏えいした冷媒拡散速度が非常に遅く、着火確率  $1.73 \times 10^{-7}$  となり許容レベルを満足しない。

ただし、半地下高さや冷媒量によっては設置許容可能な場合もあることが解析結果から判明したため、極力分かりやすい判定式 (安全対策要否基準) を作成することとした。LFL 比 < 1 を対象とし、半地下高さ 3.5m を基準として下記①～③前提のもと、判定式を求めた。ここで LFL 比とは、冷媒量を半地下の容積で割って求めた冷媒濃度の LFL に対する比を指す。

$$\text{LEL 比} = \frac{\text{冷媒封入量}}{\text{LFL} \times \text{空間容積}}$$

ただし、LFL の単位は kg/m<sup>3</sup>。

■前提条件

- ① LFL 比 < 1 において、可燃域/空間容積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] は概ね比例関係にある (図 8.5.9)。
- ② R = 可燃域/空間容積 ≤ 0.016 が着火確率  $4.0 \times 10^{-9}$  以下となる目安である。
- ③ 半地下高さ 3.5 [m] では、半地下表面から 1.4 [m] の範囲は可燃域が生じない (図 8.5.11)。

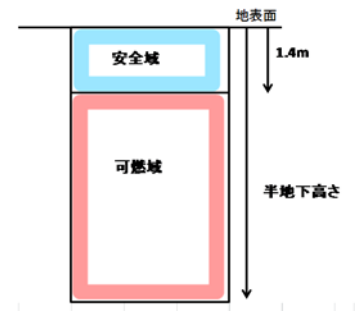


図 8.5.11 半地下での可燃域発生

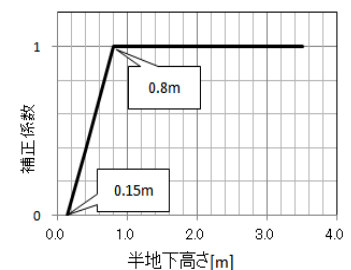


図 8.5.12 補正係数

なお、支配的着火源はボイラーであり、バーナー部は床面高さ 0.15～0.8mの範囲内にあるとして補正係数を定めた。また、この判定式 1 は可燃域生成トリガーのみ考慮し着火源ONトリガーを含まないため、安全率 1.2 を乗じている。

**判定式 1**  $R = (0.411 \times \text{LFL 比} + R_0) \times \text{補正係数} \times \text{安全率} \leq 0.016$   
 ここで、 $R_0 = (\text{半地下高さ} - 1.4) / (3.5 - 1.4) \times (0.382 - 0.109) - 0.382$   
 図 8.5.10 における LFL 比に対する R の傾きが 0.411、y 切片が  $R_0$  である。

さらに現地利用の簡便化を狙い安全サイド側にて簡略化を図った。

**判定式 2**  $\text{LFL 比} \leq -0.3 \times \text{半地下高さ} + 1.3$

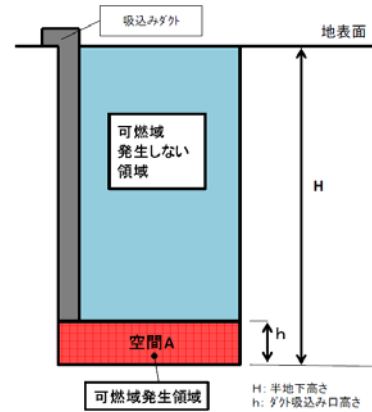


図 8.5.13 可燃域発生領域

### 8.5.6 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  $4.0 \times 10^{-9}$  以下となり安全対策は不要であった。ここでは、半地下設置と機械室設置について記述する。

半地下での安全対策要否判定の結果設置不可となった場合でも、換気を行うことで設置可能となる条件を定める。図 8.5.13 のように排気ダクトを設置して換気を行った場合、可燃域は空間 A (図 8.5.13、容積は  $V_a$ ) のみで発生し、排気ダクト吸込み面より上方には可燃域が発生しなかった。また、換気回数と可燃域平均容積/ $V_a$  の関係を分析したところ、図 8.5.14 のような一次特性であったため、式(8.1)(8.2)の相関が成立する。式(8.1)は、前節②と同一式である。式(8.2)は、図 8.5.14 の LFL 比 1.6 のラインより求めた。式(8.3)は、式(8.1)(8.2)より求まる。

$$h/H \times \text{平均可燃容積}/V_a \leq 0.016 \quad (8.1)$$

$$\text{平均可燃容積}/V_a = 1 - \text{換気回数}/12.5 \quad (8.2)$$

よって必要な換気回数は以下の通りである (図 8.5.14)。

$$\text{必要換気回数} \geq 12.5 - 0.4 \times H \quad (8.3)$$

※ $h=0.5\text{m}$  とした。

機械室については、通常換気設備が設置される。

ここでは、天井面に給気口、床上近傍に強制排気口を設け、空間容積と床面積・換気回数をパラメータとしてリスクアセスメントを実施した。換気設備の故障率は 0.025%/年であるが無視できないリスクとして、換気設備 2 基設置することとした。結果、着火確率  $4.0 \times 10^{-9}$  を満足する設置条件は、表 8.5.5 に示す通りである。

### 8.5.7 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、一旦冷媒が漏れると拡散に時間を要するため、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ロウ付けバーナー・喫煙以外 (電気スパーク、ボイラー等燃焼機器、活線作業) を想定し、冷媒漏えい原因については、i) バーナーを使って外した配管からの冷媒漏えい (冷媒回不十分、忘れ) ii) サービス作業に伴わない冷媒漏えい (配管亀裂によ

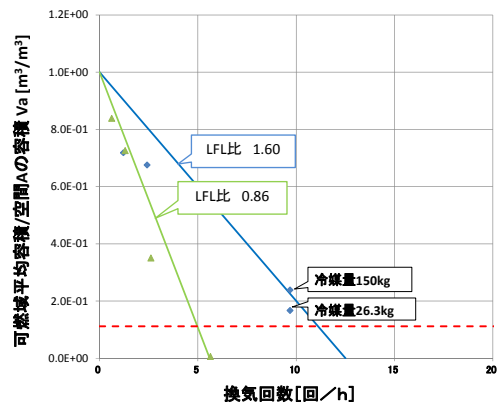


図 8.5.14 換気回数特性

表 8.5.5 機械室設置可能条件

空間条件	設置許可条件
空間容積95m <sup>3</sup> 以上かつ、 床面積19m <sup>2</sup> 以上	換気回数2回/h以上の換気機器を 2基以上設置
空間容積55m <sup>3</sup> 以上かつ、 床面積11m <sup>2</sup> 以上	換気回数8回/h以上の換気機器を 2基以上設置
上記以外	設置禁止

る冷媒漏えい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1m<sup>3</sup>(高さ2m×幅1m×奥行0.5m)と設定した。

FTA(未対策ケース)を図8.5.15に示す。算出の結果、着火事故確率は $3.6 \times 10^{-7}$ となり、許容値( $10^{-8}$ )を超えることとなった。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、着火確率の低減策として、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、着火事故確率は $2.1 \times 10^{-9}$ 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。それぞれの着火事故発生確率を表8.5.6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 Part3<sup>12)</sup>、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くとともに、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。

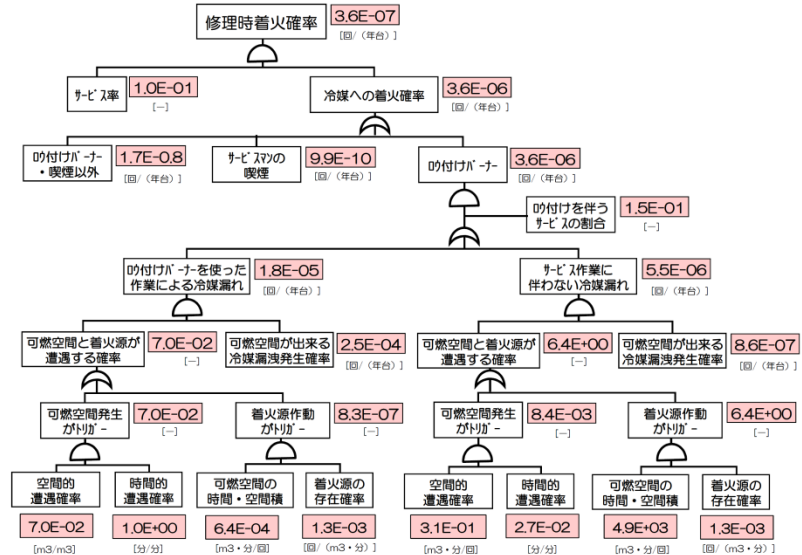


図 8.5.15 修理時室外半地下 FTA (未対策ケース)

は、自然換気(ISO5149 Part3<sup>12)</sup>、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くとともに、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 8.5.6 修理時の着火事故発生確率

設置ケース	着火事故発生確率	
	対策前	対策後
室外地上・屋上設置	1.4E-09	1.4E-10
室外各階設置	3.1E-09	3.4E-10
室外機半地下設置	3.6E-07	2.1E-09
室外機械室設置	8.6E-07	5.4E-09
室内天井設置	8.7E-11	8.8E-12
室内床置き設置	1.2E-08	3.9E-11
配管天井裏設置	3.0E-09	3.0E-10

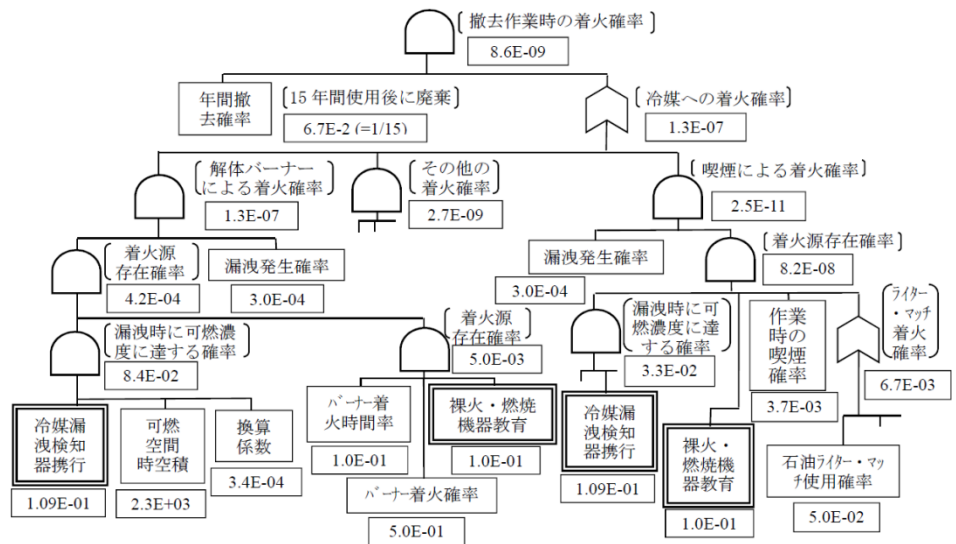


図 8.5.16 半地下からの撤去作業時の着火確率の FTA (対策ケース)



### 8.5.8 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。冷媒回収時のバルブ開け忘れ・故障、ユニット取外し時のバルブ閉め忘れ・故障、配管接続不完全、配管亀裂・不良、外力による破損等を考慮して冷媒漏洩発生確率を算出し、喫煙、活線作業、バーナー等を着火源として想定して着火源存在確率を算出し、これらに乗じて冷媒への着火確率を算出した。バーナーによる着火シナリオとしては、取外しと共に新ユニットが設置される更新有りのケースにて、取り外しのユニットから漏洩した冷媒に、同時進行する新ユニットの配管工事で使用されているバーナーにより着火するケースを考えた。

結果、室外機が半地下に設置されるケースの着火確率が更新有/無= $7.76 \times 10^{-7} / (3.04 \times 10^{-9})$ 、室外機が機械室に設置されるケースの着火確率が更新有/無= $8.07 \times 10^{-7} / (5.57 \times 10^{-9})$ となり、この両ケースの更新有時においてリスクが許容値 ( $10^{-8}$  未満) を超えた。そこで、着火確率を低減させるための対策として、以下を想定した。

**対策①** < 裸火・燃焼機器の教育 > 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。

**対策②** < 冷媒漏洩検知器携行 > 狭小空間 (半地下、機械室) での作業時には冷媒漏洩検知器の携行を義務付ける。リスク低減効果は  $1.09 \times 10^{-1}$  (冷媒漏洩センサー携行時はリスクが 1/100 になり、10 回に 1 回は携行を忘れるとした)。

半地下と機械室設置の室外機については対策①、②の双方を実施することにより、半地下設置の着火確率は更新有/無= $8.61 \times 10^{-9} / (1.85 \times 10^{-10})$ 、機械室設置の着火確率は更新有/無= $9.16 \times 10^{-9} / (4.31 \times 10^{-10})$  と許容リスク範囲内 ( $10^{-8}$  未満) となった。その他の設置ケースについても、対策①を実施することにより、更新有り・同時進行のケースだけを考えても、すべての設置ケースにおいて、着火確率を許容リスク範囲内となった。そして、更新有りの比率を全体の 50% とし、更新有りのうち新ユニット設置が同時進行で進められる割合を 10% とし、更新有りでかつ同時進行の比率で重み付き平均し、各設置ケースでの事故確率を求めた。さらに、各機器の構成比率 (室内機の構成確率は天井設置型・壁掛け型 99%、床置き型 1%、室外機の構成確率は屋外設置 94.39%、各階設置 5%、半地下設置 0.01%、機械室設置 0.6%、天井裏設置 99% とした) を仮定して、機器の構成比率込みの着火確率を算出した。結果、廃棄時の着火確率は、未対策時  $6.28 \times 10^{-10}$ 、対策時  $5.36 \times 10^{-11}$  となった。図 8.5.16 に FTA の一例として、半地下からの撤去作業時の着火確率の FTA (対策ケース) を示す。なお、図において可燃空間発生確率は各設置ケースにおける冷媒漏洩の流体解析を基に算出した。

## 8.6 リスクアセスメントのまとめ

### 8.6.1 室内使用時の着火事故発生確率

表 8.6.1 に結果をまとめた。未対策時には、機械換気無しの場合と、建築基準法で定められた機械換気量が有る場合との、両ケースにて確率を示した。機械換気が無い、または、夜間に停止する場合は、着火事故確率は許容値を超えた。建築基準法準拠の機械換気量 (ISO5149 Part3 に記載の換気量とほぼ同量) が確保される場合は、飲食店 (床置) の場合を除き、許容値以下となった。機械換気の排気口位置を床面近くにすることで許容値以下となった。

表 8.6.1 室内使用時の着火事故確率まとめ

各設置における着火事故確率 [件/(台・年)]					非許容域	許容域	
設置ケース					各設置ケース事故確率 A		
設置場所	型式	構成比 P	許容値	未対策時		対策時	
				機械換気無	建築法換気有		
室内	カラオケ	天井	2.1E-03	1.0E-09	1.8E-07	4.4E-11	0.0E+00
	飲食店	床置	2.0E-02		3.8E-07	5.4E-09 <sup>*1)</sup>	2.6E-10 <sup>*2)</sup>
	美容室 (ヘアサロ)	天井	1.6E-03		1.3E-09	1.2E-10	6.8E-12
	焼肉店	天井	7.8E-04		2.8E-09	4.4E-10	1.5E-11
	天井裏	天井	1.0E00		3.0E-10	-	3.0E-11

夜間に換気停止した場合

設置ケース					各設置ケース事故確率 A	
設置場所	型式	構成比 P	許容値	未対策時		対策時
				機械換気無	建築法換気有	
室内	事務所	天井	3.8E-01	1.0E-09	7.6E-09 <sup>*3)</sup>	3.5E-12

市場での予測

室内計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A	4.0E-01	1.0E-09	1.1E-08	1.1E-10	3.7E-11
------------------------	---------	---------	---------	---------	---------

\*1) 天井裏での給排気管を想定、冷媒は維持せず床面に滞留し可燃域発生。  
 \*2) 排気口を床面近傍に設けた機械換気や、漏洩後即時のFANによる維持を行えば許容域になる。  
 \*3) 18:00~翌日09:00のみ換気停止、残業者による喫煙や、給湯器の消し忘れを着火源として想定。

リスクの大きな設置ケースは抽出できているため、構成比 100%の場合の値と桁数が変わるような差は無いと思われる。

表 8.6.2 室外使用時の着火事故確率まとめ

各設置ケースでの着火事故確率 [件/(台・年)]					非許容域	許容域	
設置ケース					各設置ケース事故確率 A		
設置場所	型式	構成比 P	許容値	未対策時		対策時	
				機械換気無	建築法換気有		
室外	地上	-	9.4E-01	4.0E-09	1.9E-11	-	-
	各階	-	5.0E-02		3.0E-09	-	-
	半地下	-	1.0E-04		1.1E-07	-	2.5E-13 <sup>*1)</sup>
	機械室	-	6.0E-03		6.1E-08	-	3.2E-09 <sup>*2)</sup>

市場における予測

室内計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A	1.0E+00	4.0E-09	5.4E-10	-	1.9E-11
------------------------	---------	---------	---------	---	---------

\*1) 吸引が外にて機械換気。 \*2) 2回/h\*2系統の機械換気。

市場での事故発生件数をイメージするための、この表の最下欄に、各設置ケースの事故確率 A に構成比 P を乗じた値の和を示した。全ての設置ケースを網羅できていないため、構成比の和は 40%に留まっているが、

### 8.6.2 室外使用時の着火事故発生確率

表 8.6.2 に結果を示した。機械換気無では、半地下と機械室においては、冷媒が滞留するため、事故確率が許容レベルを超えた。市場での事故確率は、許容値以下となった。

### 8.6.3 作業時の着火事故発生確率

表 8.6.3 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。

表 8.6.3 作業時の着火事故確率まとめ

各設置ケースにおける着火事故確率 [件/(台・年)]					非許容域	許容域				
設置ケース					各設置ケース事故確率 A					
設置場所	型式	構成比 P	許容値	据付		修理		廃棄		
				未対策	対策	未対策	対策	未対策	対策	
室内	事務所	天井	3.8E-01	1.0E-08	1.9E-09	-	8.7E-11	8.8E-12	2.9E-14	2.9E-15
	飲食店	床置	2.0E-02		1.9E-09	-	1.2E-08	3.9E-11	3.4E-12	3.4E-13
	カラオケ	天井	2.1E-03		-	-	-	-	-	-
室外	地上	-	9.4E-01	1.0E-08	1.9E-09	-	1.4E-09	1.4E-10	2.4E-10	3.2E-11
	各階	-	5.0E-02		1.9E-09	-	3.1E-09	3.1E-09	1.0E-09	1.4E-10
	半地下	-	1.0E-04		1.1E-08	1.9E-09	3.6E-07	2.1E-09	3.3E-08	4.8E-10
	機械室	-	6.0E-03		1.1E-08	2.1E-09	8.6E-07	5.4E-09	2.2E-08	3.3E-10

市場における予測

室内作業計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A	4.0E-01	1.0E-08	1.0E-09	4.1E-12
室外作業計 = Σ 構成比 P * 事故確率 A	1.0E+00	1.0E-08	9.0E-09	3.7E-10

### 8.6.4 市場での着火事故発生確率

表 8.6.4 に市場での事故確率をまとめて示した。機械換気無しでは、室内使用時のみ許容レベルを超えた。前述のように、夜間の換気停止時に事故確率が高くなるのが影響している。室外使用時や作業時には許容値以下となった。

建築基準法準拠の換気量がある場合、および、安全対策を実施した場合には、いずれも許容値以下となった。これらのことから、換気を安全対策として実施することが必要となる。表 8.6.5 にリスクアセスメント結果から導かれた安全対策を示した。

表 8.6.4 市場での着火事故確率まとめ

[件/(台・年)]					非許容域	許容域
ライフステージ	構成比 P	許容値	構成比を考慮した着火事故確率			
			未対策時		対策時 <sup>*2)</sup>	
			機械換気無	建築法換気有 <sup>*1)</sup>		
使用時	室内合計	4.0E-01	1.0E-09	1.1E-08 <sup>*3)</sup>	1.1E-10	3.7E-11
	室外合計	1.0E-00	4.0E-09	5.4E-10	-	1.9E-11
作業時	室内合計	4.0E-01	1.0E-08	1.0E-09	-	4.1E-12
	室外合計	1.0E-00	1.0E-08	9.0E-09	-	3.7E-10

\*1) 建築基準法の機械換気量での時空積を採用。故障率は、0.025%。  
 \*2) 対策時は、換気連続ON。  
 \*3) 事務所では、夜間18:00~09:00のみ換気停止。

表 8.6.5 リスクアセスメントにより定めた安全対策

#### 室内での安全対策

設置ケース	使用	修理	
床	飲食店	機械換気	検知器携行+教育
天井	カラオケ	機械換気	-

#### 室外での安全対策

設置ケース	据付	使用	修理	廃棄(撤去)
半地下	検知器携行	機械換気	換気+検知器携行+教育	検知器携行+教育
機械室		既存換気		

## 8.7 安全要件のまとめ

### 8.7.1 高圧ガス保安法による規制

表 8.7.1 に、我が国の高圧ガス保安法による規制の概要を示す。R32, R1234yf, R1234ze(E)などの微燃性冷媒は、冷凍保安規則において不活性以外のフルオロカーボンとされ、R410A 等の不活性のフルオロカーボンよりも厳しい制約を受ける。ビル用マルチは、3~20 法定冷凍トンの範囲に属し、R410A を用いる場合には、「対象外」もしくは「その他製造」に属し、耐圧が十分であることや現地施工時の気密試験が義務付けられているだけであった。R32 などの微燃性冷媒を用いる場合には、5 トン以上が「第 2 種製造」となり、施工時や変更時の際には、20 日前に都道府県知事への届出が施主に義務付けられることとなる。業務用空調機として既に広汎に普及しているビル用マルチに対する事前の届出規制は、微燃性冷媒を用いる場合の大きな障害となる。そこで、届出に代わって市場で安全を確保するための安全要件を明確にすることが必要となる。

表 8.7.1 高圧ガス保安法による現行規制

冷媒種		法定冷凍トンによる分類			
		3トン	5トン	20トン	50トン
不活性のフルオロカーボン	R410A R134a	対象外	その他	第2種	第1種
不活性以外のフルオロカーボン	R32 R1234yf R1234ze(E)	対象外	その他 (耐圧・気密)	第2種 (届出)	第1種 (許可)
その他のガス	プロパン・ヘリウム・CO <sub>2</sub>	対象外	第2種	第1種	

微燃性ビル用マルチの範囲

### 8.7.2 室内機本体機能としての安全対策

国際安全規格 ISO5149 Part1 では、ビル用マルチの室内安全要件として、冷媒充填率（＝冷媒量／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[m<sup>3</sup>]で求められる冷媒濃度が、LFL/4 以下であること。
- ・ 要件 B 室内に冷媒漏えい検知手段を備え、機械換気装置を備えること。
- ・ 要件 C 室内に冷媒漏えい検知手段を備え、漏えい検知時に冷媒漏えいを遮断する手段を備えること。
- ・ 要件 D 室内に冷媒漏えい検知手段を備え、漏えい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、Xkg 以下であること。(Xの値は未決定)

ISO5149 Part1 では、微燃性冷媒の場合には、最大冷媒量を 195[m<sup>3</sup>]×LFL[kg/m<sup>3</sup>]としており、例えば R32 では、60[kg]が上限となるが、室内の安全を担保するための冷媒量上限値そのものの値に関しては、今後の検討課題である。警報については、冷媒量の範囲によっては、他の要件と組み合わせることも検討する必要がある。

床置機については、漏洩検知装置と検知時に冷媒を攪拌する為に室内ファンを運転することとした。

製品	家庭用	←	ビル用マルチ
冷媒	R32	←	R290
冷媒量 [kg]	1.0	←	0.5
場所	居室 (7m <sup>2</sup> )	←	事務所 (40.3m <sup>2</sup> )
換気	無し	←	夜間停止

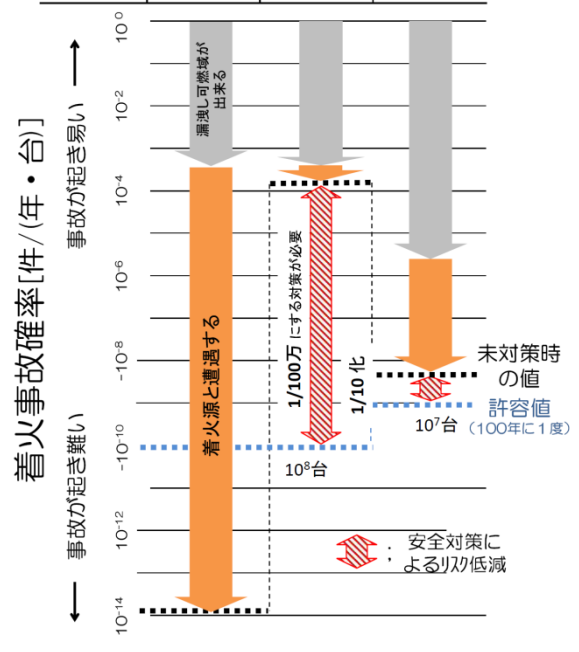


図 8.7.1 家庭用とビル用マルチの使用時着火事故確率

### 8.7.3 安全かつ市場化可能な規制の在り方

図 8.7.1 に、R32 を使用したビル用マルチと家庭用エアコン、さらに R290（プロパン）を使用した家庭用エアコンの未対策時の着火事故確率を比較した。100 年に一度以下という考え方から得られる許容される着火事故確率の値も示している。R290 家庭用エアコンについては、2000 年当時に日冷工（八尾ら）で実施されたリスクアセスメントにより得られた着火事故確率値を用いた。冷媒量は、500[g]、部屋容積は 16.8[m<sup>3</sup>]（床面積 7[m<sup>2</sup>]×天井高さ 2.4[m]）、漏洩確率は  $2.0 \times 10^{-4}$ [回/(台・年)]である。R32 家庭用エアコンについては、第 6 章におけるミニスプリットエアコンの評価結果を引用した。ビル用マルチについては、市場で最も支配的な値である事務所の夜間換気停止時の値を示した。

R32 家庭用エアコンでは、事故確率が未対策において許容値以下となっている。R290 家庭用エアコンでは、着火事故確率を許容される値にまで低下させるために、 $10^{-6}$  のリスク低減効果を有する安全対策が必要であるのに対して、R32 ビル用マルチでは、 $10^{-1}$  のリスク低減効果を有する安全対策が必要となる。

安全対策を要求する方法としては、日冷工としての自主規格の他に、法律による許可制や届出制などの事前規制や、事前規制ではないが違反には罰則を科す方法、または、法規制に準ずる公的規格等にすることが望ましい。

製品自身の安全装置・防護装置のリスク低減効果としては、 $10^{-1} \sim 10^{-3}$  とされており（経産省リスクアセスメントハンドブック P19）、上記の本体機能としての安全対策によれば、まだ明確になっていない部分もあるが、 $10^{-1}$  以上のリスク低減効果は十分に見込めるものと推測する。

安全対策を本体機能とするについては、多くの技術開発の可能性があり、メーカー自身によって達成することが必要となる。

## 8.8 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いても着火事故の発生を 100 年に 1 回以下とするための安全対策を提案した。また、市場全体における使用時着火事故確率の推定を行い、本体機能としての安全対策により、着火事故の発生を 100 年に 1 回以下と出来ることを明らかにした。

今後は、これらの安全要件を技術基準としてまとめ、設置時の事前届出等の法規制に代わり得る本体機能としての安全対策を業界として確立していくことが望まれる。

### 参考文献

- 一般社団法人公共建築協会，2006，年国土交通省大臣官房庁営繕部設備・環境課監修 建築設備設計基準
- 今村，日本冷凍空調学会，プログレスレポート，44，2013
- 北島，カラオケボックスにおける人数毎の空気環境に関する実測調査，芝浦工業大，2011
- 建築基準法第 28 条，建築基準法施行令第 20 条の 2
- 集中モデル，日本冷凍空調学会，プログレスレポート，ビル用マルチサブワーキング，2011
- 鈴木ら，品質管理，日科技連出版社，No.9，2001/9
- 滝澤，日本冷凍空調学会，プログレスレポート，P54，2013
- 日冷工，Guideline of design construction for ensuring safety against refrigerant leakage from multi-split system air conditioners，JRA GL-13
- 野村，東京都におけるカラオケボックス 2 0 店舗の空気環境の実測調査，芝浦工業大，2011
- 橋本，安全人間工学，日本労働災害防止協会，1988
- ベターリビング，換気設備マニュアル，P17，2003
- 向殿，Concept of Safety，Trends in Academic，Sep.，2009，P14
- 八尾ら，Risk Assessment of Room Air Conditioner using R290，2000，International Symposium on Environment and Alternative Refrigerants 2000，Kobe  
[http://www.jraia.or.jp/product/com\\_aircon/pac\\_gll13.html](http://www.jraia.or.jp/product/com_aircon/pac_gll13.html)

ISO5149 : Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements(2014)

Part1 Definitions, classification and selection criteria

Part2 Design, construction, testing, marking and documentation

Part3 Installation site

Part4 Operation, maintenance, repair and recovery.

## 9. チラーリスクアセスメントの進捗

### 9.1 はじめに

冷温水を用いたセントラル空調用熱源機には、主に R410A や R134a の HFC 冷媒が用いられている。いずれも GWP が 1000 を超えるため地球温暖化への影響が懸念されており、より GWP の低い冷媒への代替が重要となっている。ドロップイン、レトロフィットや性能評価などで報告され注目されているものは、R1234yf, R1234ze (E) と R32 またはその混合冷媒であるが、これらの冷媒は微かな燃焼性を有する。これら冷媒をチラーに用いた場合の火災・火傷事故について、2011 年度よりリスクアセスメント（以下、RA）を実施している（表 9.1.1）。対象機器は主にセントラル空調熱源として屋外設置する空冷ヒートポンプおよび機械室設置する水冷チラーで、冷凍能力範囲が約 7.5～17500kW の機器を対象とする。設置環境の特定できない移動式は除いた。本年は主に (a) 東大とチラーSWG による冷媒漏洩解析結果や着火源および事象の確率の見直した結果に基づくリスクの定量化、(b) 抽出した対策・処置を盛り込んだ設計・施設における要求事項に基づく RA、(c) 技術要求事項を展開するための日冷工ガイドライン（以下 GL）の原案作成を実施した。本論ではその進捗を報告する。

表 9.1.1 チラーSWG リスクアセスメント工程

2011 年度	2012 年度	2013 年度	2014 年度	2015 年度
課題抽出	リスクアセスメント	◆プロGRESSレポート リスクアセスメント見直し	◆プロGRESSレポート リスクアセスメント見直し	◆プロGRESSレポート
		SWG 解析	大学解析◆	
			GL 原案作成	GL 制定作業 ◆JRA-GL
				総括◆

### 9.2 リスクアセスメント実施の前提

微燃性を有する冷媒を使用するチラーの構造は従来機器と同じであり、空調機器や工業プロセスに冷水や温水を供給するといった用途も同じである。そこで、従来実施してきた不燃冷媒の漏洩により生じる事故に対する RA・安全設計<sup>1), 2)</sup>は本 RA においても有効であると考えた。また冷媒漏洩は故障やヒューマンエラーが重なり発生するため、その頻度の算出方法としては、FTA を用いて積算する手法が知られている。しかし高圧ガスの冷媒漏洩事故には届出義務があり、同一構造である機器の漏洩統計データ<sup>3)</sup>が揃っているため、チラーSWG では、漏洩頻度は実データを用いてリスク評価を行った。

これらの微燃性ガスは従来から知られている燃焼性ガスと比べて、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、かつ可燃空間の形成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。

一方で、冷媒物性、着火源そして共通する機器構造に起因する値は RA が先行している作業部会であるミニスプリットエアコン（以下、スプリット SWG）とビル用マルチエアコン（以下、ビル用マルチ SWG）の数値を用いた。

#### 9.2.1 チラーの特徴と課題

チラーは冷水や温水を熱媒として居室などに供給する熱源機であり、冷媒は機械室などに設置されるユニット内に留まることから、熱量あたりの冷媒量はビル用マルチなどと比べて少ない。しかし、チラーは大容量機器に対応して、多くの冷媒が機械室一カ所に集中するという特徴がある。

次に出荷および据付作業に着目する。中小型容量のチラーは気密試験・真空試験を経て、冷媒充填された状態で出荷される。ターボ冷凍機に代表される大容量のチラーは、機械室に据え付けた後で冷媒が充填されるため、ほとんどのユニットは工場出荷形態のまま設置される。また、分割して出荷されるチラーの場合、分割部をろう

付けや溶接の伴わないフランジや管継手で接続を行う現地作業となり、ろう付けが伴うビル用マルチの現地作業に比べ、作業は単純になる。なお、分割後に組み立てられるユニットは、気密試験・真空試験を経て冷媒充填される点、訓練教育された専門技術者により据付・点検・修理が行われる点はビル用マルチと同じである。

### 9.2.2 リスクアセスメントの手順

リスクアセスメントは図 5.2.1 に示す基本リスクアセスメントフローに従い、下記手順により実施した。

- (1) リスクアセスメント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。
- (2) リスクを機器の出荷から廃棄までの 6 つのライフステージ（以下、LS）ごとに分析。
- (3) 着火源の存在、冷媒漏洩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、漏洩確率そして漏洩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する。それら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。
- (4) リスクの高い事象は、頻度を低減させる安全対策を立案する。安全対策はガイドラインへ展開する。

### 9.2.3 リスクアセスメントでの標準機器仕様

リスクアセスメントにおける表 9.2.1 に示すチラーの標準機種は、最も出荷台数の多い容量帯と、各社カタログの平均仕様から設定した。

表 9.2.1 設定したチラーの標準機種

冷却方式	水冷	空冷
冷房能力 kW	約 180	約 90
冷媒充填量 kg	23.4	11.7(1 系統あたり)
機器寸法 m	1.28W×1.28D×1.28H	1.00W×3.00D×2.30H
設置場所	機械室	屋外

### 9.2.4 ライフステージ (LS) の定義

参照した RA<sup>1), 2)</sup>で示された「物流」, 「据付」, 「使用」, 「修理」, 「廃棄」の 5 つに加え、チラー固有のオーバホールを追加し、6 つの LS を定義した。「据付」および「使用」は水冷チラーと空冷ヒートポンプを分けて評価した。「物流」, 「廃棄」を除く 4 つの LS は使用者がリスクに曝される可能性があるため、発生頻度の合算対象とした。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 3: 7 として評価した。表 9.2.2 に各 LS における対象台数と LS 比率を示す。

表 9.2.2 それぞれの LS における出荷台数比率

L S	対象	台数割合		該当台数	LS 比率
		空冷	水冷		
物流	供給者	共通		9,687	0.0517
据付	使用者	7	3	9,687	0.0517
使用	使用者	7	3	134,000	0.7145
修理	使用者	共通		22,637	0.1207
オーバホール	使用者	共通		1,838	0.0098
廃棄	供給者	共通		9,687	0.0517

### 9.2.5 FTA の基本構成

後述する 3 つの漏洩速度について、全 LS における基本的 FTA (図 9.2.1) を作成し、6 つの LS ごとに生じる可燃空間の時空積と着火源の存在確率を求め、それらに LS 比率を乗じ加算することでリスク評価をした。なお各 LS で存在する着火源は、着火源 FTA (図 9.2.2) を用いて漏れなく評価した。最終的に評価される 3 種の基本 FTA である「噴出漏れ」, 「急速漏れ」, 「微小漏れ」の値を合算することで火災・火傷事故の発生確率となる。

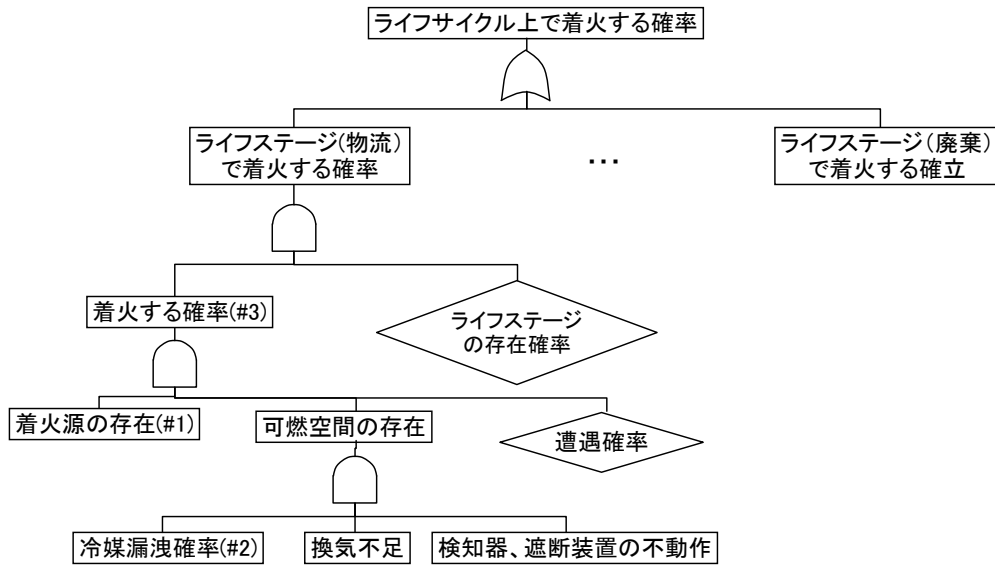


図 9.2.1 各漏洩ケースにおける基本 FTA

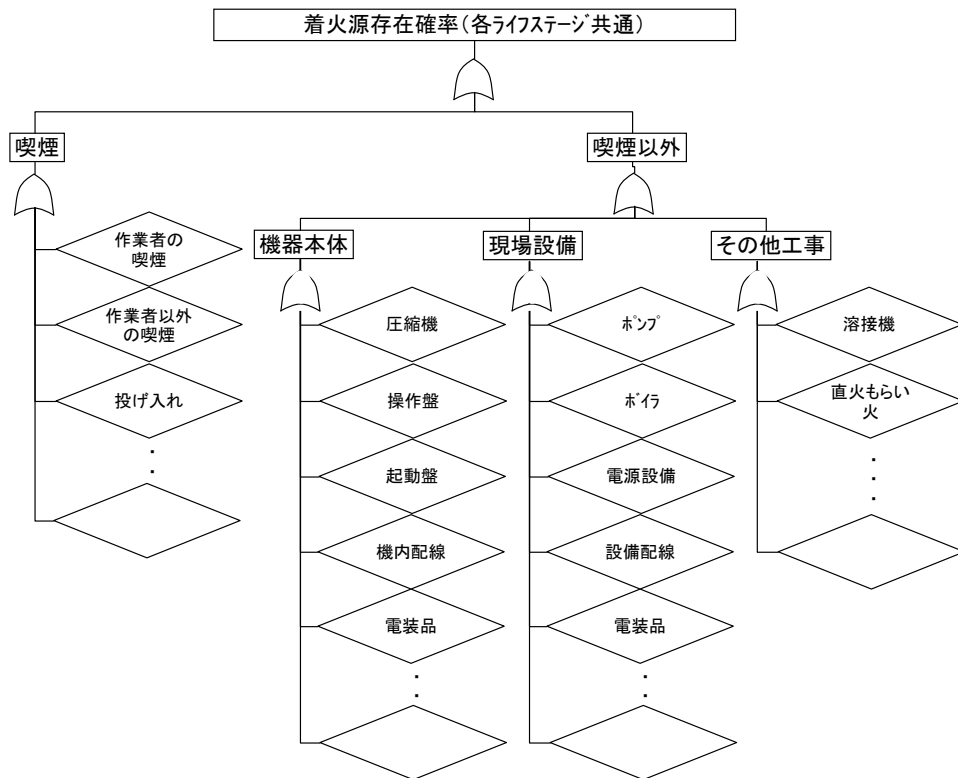


図 9.2.2 各 LS での着火源存在確率検討のための基本 FTA

### 9.2.6 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

それぞれの事象について危害程度の推定や対策検討が必要であり、リスクアセスメントリスト（以下、R-List、表 9.2.3）を用いてそれら検討結果を記録した。R-List には全ての事象についてリスクアセスメントマップ（以



下, R-map, 表 9.2.4) 上のどのリスク領域に分類されるのか明記している。リスク評価が A または B 領域にある場合, C 領域へ移行するための対策を検討した。また, R-map 中の危害程度発生確率および危害程度は以下の値を用いた。

(1) 危害程度発生確率

日冷工の出荷統計より, 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 千台と推定され, ビル用マルチと比べると 1/100 と小さい。使用者に許容される危害発生確率は経済産業省リスクアセスメント・ハンドブック<sup>4)</sup>(HB)に示されており, 産業・業務用途で許容される頻度は「致命的」とされる危害程度で  $1.0 \times 10^{-6}$  件/(台・年)である。つまりチラーのストック規模では 10 年に一度の発生頻度  $7.9 \times 10^{-7}$  件/(台・年)に相当する。微燃性ガスの着火による危害程度推定が難しい状況を踏まえると, この頻度以下に抑えることが重要である。

(2) 危害程度

HBの火災の定義を用いた。

表 9.2.3 リスクアセスメントリスト

危険発生時期		機器・事象・要因		危険状態の内容				
ライフステージ	作業内容	対象	機器	着火源	誤操作(誤作業)	危険状態	事故区分	危険源の種類
使用	停止中	設備	電気・電装品設備	配線不良による短絡	圧縮機筐体の損傷	機器損傷し冷媒漏れ, 着火源により着火	物損	機器損傷
							傷害	火傷

<対策前>

リスク評価		防爆評価			リスクレベル
危害程度	発生確率	放出等級	換気度・有効度	防爆評価	
II	0	第2	高・弱	Zone 2	C
I	0	第2	高・弱	Zone 2	C

<対策後>

リスク評価		防爆評価			リスクレベル
危害程度	発生確率	放出等級	換気度・有効度	防爆評価	
0	0	第2	高・弱	Zone 2	C
0	0	第2	高・弱	Zone 2	C

表 9.2.4 リスクアセスメントマップ

HB 記載の危害発生確率 件/(台年)	チラー国内市場ベース 危害発生頻度	採用した 危害発生確率 件/(台年)	リスク領域				
			13	24	27	29	30
5 頻発して起こる (消費材 $10^{-3}$ , 産業用 $10^{-1}$ )	毎年 10 台に 1 台	$1.0 \times 10^{-1}$					
4 しばしば起こる (消費材 $10^{-4}$ , 産業用 $10^{-2}$ )	毎年 100 台に 1 台	$1.0 \times 10^{-2}$					
3 時々発生する (消費材 $10^{-5}$ , 産業用 $10^{-3}$ )	毎年 134 件	$1.1 \times 10^{-3}$					
2 起こりそうにない (消費材 $10^{-6}$ , 産業用 $10^{-4}$ )	毎年 14 件	$1.1 \times 10^{-4}$					
1 まず起こり得ない (消費材 $10^{-7}$ , 産業用 $10^{-5}$ )	毎年 1~2 件	$7.5 \times 10^{-6}$					
0 考えられない (消費材 $10^{-8}$ , 産業用 $10^{-6}$ )	10 年に 1~2 件	$7.5 \times 10^{-7}$					
R-map (ISO/IEC Guide 51) (JIS Z 8051)			0	I	II	III	IV
			無傷	軽微 (製品発 煙程度)	軽度 (発火, 製品焼 損)	重度 (製品焼 損, 火 災)	致命的 (火災, 他設備 焼損, 建 屋火災)
			危害程度 →				

	A 領域:25-30 受け入れられない
	B 領域:14-24 合理的に実施可能な レベルまでリスクが 低ければ許容できる
	C 領域:1-13 許容できる

### 9.3 冷媒漏洩時の可燃空間解析

冷媒が漏洩した際、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の算定をした。なお、本解析は9.8項に詳細を示す東京大学による評価とチラー-SWGによる評価を分担し実施した。

#### 9.3.1 解析モデル

##### (1) 機械室設置

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<sup>5), 6), 7)</sup>に従い、換気量や火気設備の設置に制限がある。それらを解析条件に反映した。機械室の標準モデルとして、空気調和衛生工学会誌の竣工設備調査一覧(2007年~2010年)から、チラー標準モデルの容量に対する機械室面積を整理し決定した(図9.3.1)。機械室容積は部屋の高さを5mとして109m<sup>3</sup>(21.8m<sup>2</sup>×H5m)であり、最小容積75m<sup>3</sup>(15m<sup>2</sup>×H5m)に近い。具体的には機械室の床面形状を1:2の長方形とし、半分にチラー本体、もう一方に補機の配置を想定した。メンテナンススペースとして、操作盤前面に少なくとも1.2m、その他面は1.0m以上を設けた(図9.3.2)。給排気ガラリ面積は鹿児島県建築基準「機械設備工事編」を参考に設定した。空気より重い冷媒を排出する必要があるため、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されているものとした。冷媒漏洩箇所は機器本体の最も低い所から漏れると想定し、脚部を考慮し床面から0.15mの高さとした。また漏洩口の形状は、配管を模擬し、長さ0.10mの円筒ノズルとした。なお、機械室は地下15mにあり、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とした。

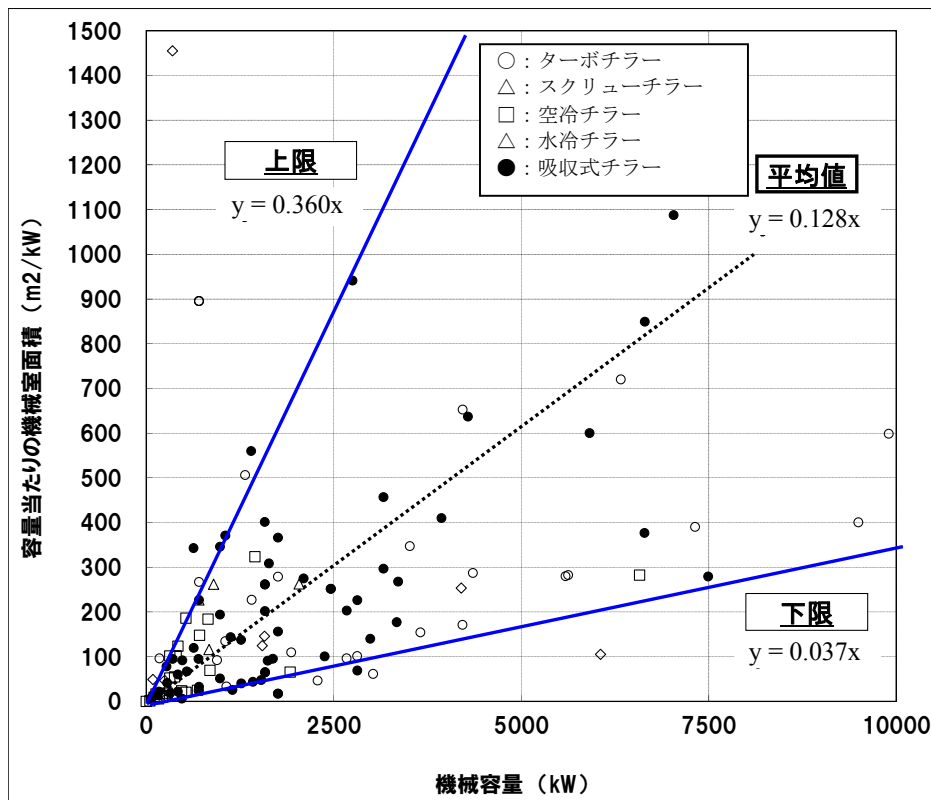


図 9.3.1 機械室面積とチラー容量の関係

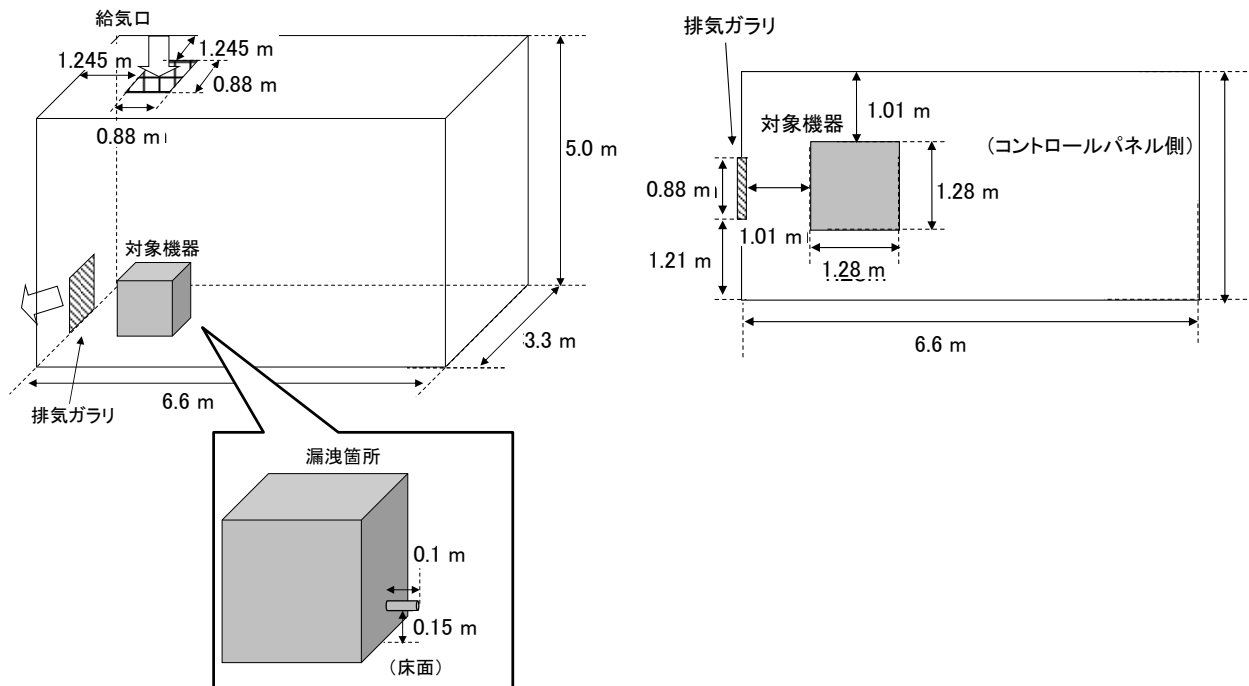


図 9.3.2 機械室レイアウト

(2) 屋外設置

通常、四方に壁のない屋上等に設置される空冷ヒートポンプでは、大気の流れもあり、ごく小さな可燃空間しか形成されない。そのため可燃空間が形成されやすい条件として防音壁に囲まれた場合を想定する。そこで製造メーカーの防音壁設置要領から 2 面の壁、2 面の開口率 25%の壁を想定した (図 9.3.3)。冷媒漏洩箇所は、①空気熱交換器、②ユニットの化粧パネル内の 2 ケースとした。

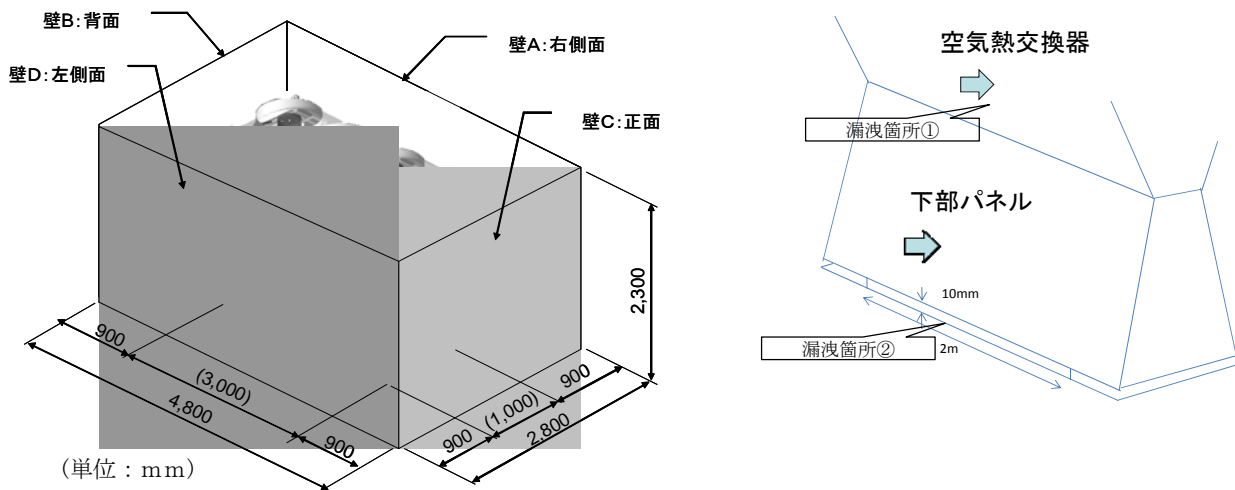


図 9.3.3 屋外設置解析モデル

### 9.3.2 冷媒の可燃範囲, 漏洩量の定義

冷媒の代表物性を表 9.3.1 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% 相当の LFL, UFL を用いた。漏洩量は JRA GL-13 (解説)<sup>8)</sup> に従い (表 9.3.2), R32 を基準として、各冷媒の 20°C 飽和圧力(ゲージ)から大気中に放出されるとして算定した。

表 9.3.1 冷媒の燃焼特性<sup>9)</sup>

	燃焼範囲		最大燃焼速度	拡散係数
	LFL vol%	UFL vol%	cm/s	cm <sup>2</sup> /s
R32	13.5	27.5	6.7	0.135
R1234yf	dry air	6.7	11.7	1.5
	wet air	5.15 <sup>※1</sup>	13.6 <sup>※1</sup>	5.9 <sup>※2</sup>
R1234ze(E)	dry air	不燃	不燃	不燃
	wet air	5.9 <sup>※1</sup>	12.6 <sup>※1</sup>	5.2 <sup>※2</sup>

※1 絶対湿度 0.016kg/kgDA (23°C 相対湿度 90% 相当)

※2 絶対湿度 0.03kg/kgDA (35°C 相対湿度 83% 相当)

表 9.3.2 漏洩速度

漏洩ケース	微小漏れ	急速漏れ	噴出漏れ
漏洩速度			
R32	1kg/h <sup>※1</sup> or less	10kg/h	75 <sup>※1</sup> or 200kg/h
R1234yf	0.9kg/h <sup>※1</sup> or less	8.9kg/h	67 <sup>※1</sup> or 178kg/h
R1234ze(E)	0.7kg/h <sup>※1</sup> or less	7.3kg/h	54 <sup>※1</sup> or 145kg/h
漏洩箇所	ピンホール, 溶接, ロウ付け, 腐食	フレア割れ, フレア, 腐食	フレア抜け, 配管部

※1 解析での採用値

### 9.3.3 解析条件

#### (1) 機械室設置

チラーと機械室の標準モデルについて冷媒種類, 漏洩量, 換気回数を組み合わせて解析を行った。換気回数は ISO5149-part3 を参考に機械室容積の 4 回/h から, 2 回/h, 0 回/h, 冷媒漏洩開始から冷媒が換気されるまでの可燃空間の時空積について非定常解析を実施した (case1)。次に換気装置停止中 (設備の停電停止中) における漏洩冷媒の換気を想定し, 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可燃空間の時空積について非定常解析を実施した (case2)。

#### (2) 屋外設置

空冷ヒートポンプの漏洩箇所を空気熱交換器からとユニット化粧パネル下部からを想定した解析を行った。冷媒漏洩開始から可燃空間が消失するまでの可燃空間の時空積を非定常解析で算定した。

### 9.3.4 解析結果

#### (1) 機械室設置 (case1)

換気が無い条件 (0 回/h) において, 急速漏れでは大きな可燃濃度域が生じ時空積が大きくなった。一方, 噴出漏れは急速漏れに比べて空間内での拡散が効くため, 可燃空間の時空積は小さくなり, LFL より低い濃度の空間が広範囲に存在する結果となった。換気がある条件 (2 回/h, 4 回/h) では, 可燃濃度域は大幅に抑制され, 時空積が小さい結果となった (表 9.3.3)。R1234ze(E) の急速漏れにおける解析結果, 時空積と漏洩終了直前の LFL 等値面を換気がない条件 (0 回/h) について図 9.3.4 に, 換気がある条件 (4 回/h) について図 9.3.5 に示す。換気によって可燃域はごく小さい範囲での生成に押さえられることが確認された。

表 9.3.3 非定常解析結果 (機械室)

機械室容積 [m <sup>3</sup> ]	冷媒	漏洩ケース	漏洩速度 [kg/h]	換気回数 [1/h]		
				0	2	4
109	R32	噴出漏れ	75	0.011	0.008	0.006
		急速漏れ	10	2481	0.0004	0.0007
	R1234ze(E)	噴出漏れ	54	0.027	0.017	0.015
		急速漏れ	7.3	3129	0.001	0.0009

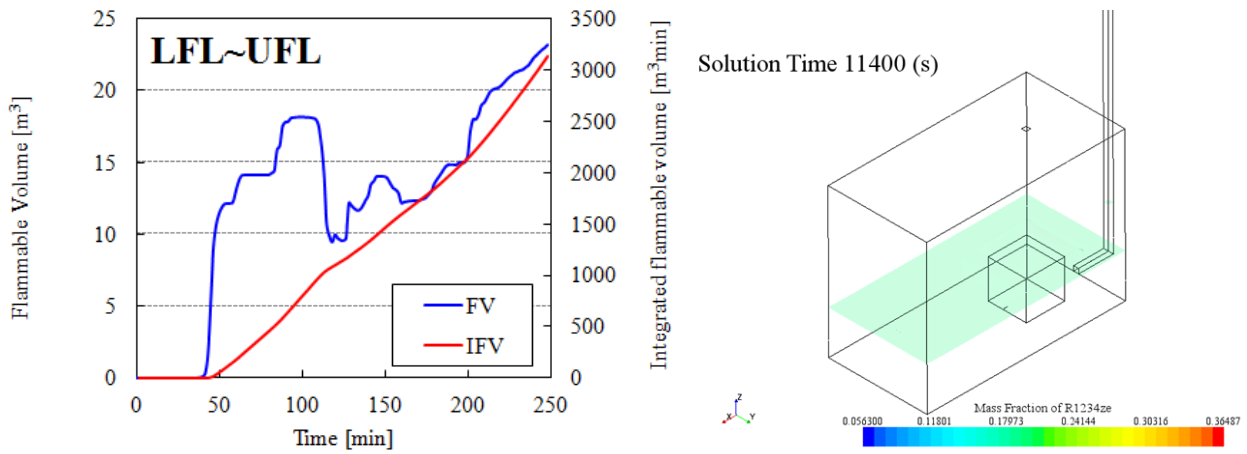


図 9. 3. 4 濃度および時空積解析結果 (R1234ze(E) wet, 換気回数 0 回, 急速漏れ)

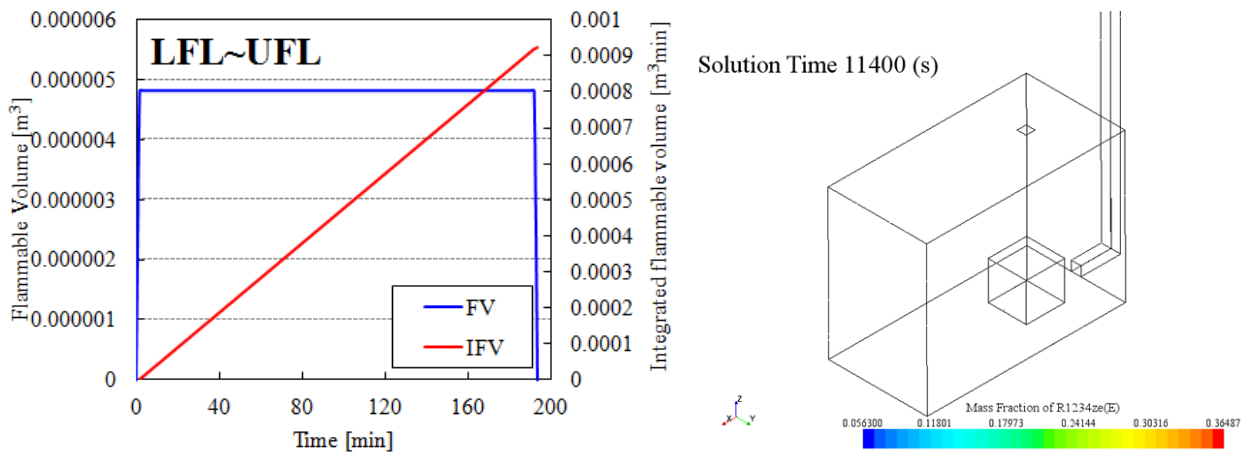


図 9. 3. 5 濃度および時空積解析結果 (R1234ze(E) wet, 換気回数 4 回, 急速漏れ)

(2) 換気停止時の漏れからの換気 (case2)

図 9. 3. 6 に、機械室内に R1234ze (E) が充満した状態で換気を開始した後の可燃空間の体積変化を示す。4 回/h であれば平均容積 109m<sup>3</sup> では 6 分後に、最小容積 75m<sup>3</sup> では 20 分後に可燃空間は消滅する。本結果は、長期停止している冷凍設備を復旧する際の機械室への入室および冷凍設備の起動の制限事項として GL に盛り込む。

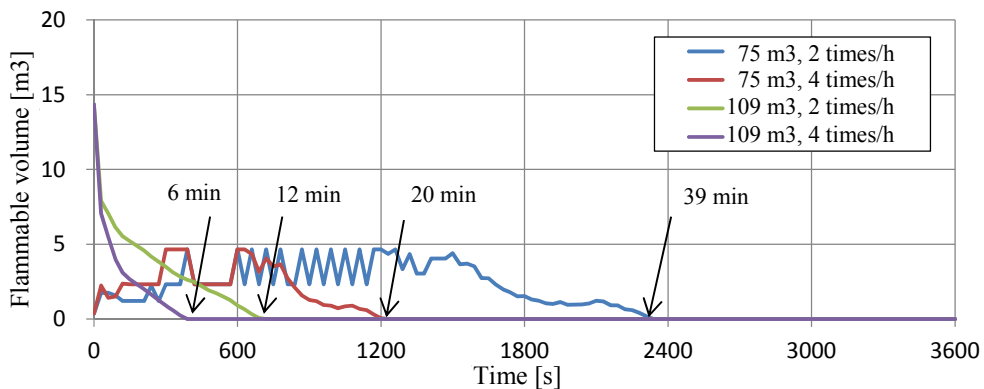


図 9. 3. 6 換気開始後の可燃体積変化

### (3) 冷媒充填量の影響

標準モデルは機械室が小さく冷媒の噴出量に対して相対的に換気量の小さな条件である。一方、大きな機器では冷媒充填量が増え、冷媒漏洩が継続することでリスクが生じる。そこで国内法を参照しながら、冷媒充填量が大きくなる機器、300kWを下限容量とし、図9.3.1より機械室を192m<sup>3</sup>とし、噴出漏れが継続している状況での定常解析を実施した。R1234ze(E)の4回換気では2%濃度を下回る領域が多く可燃空間が生じない、2回換気では4%濃度を超える領域が存在するが可燃空間はほとんど形成されない(図9.3.7)。一定容量以上のチラーでは機械換気を設置することで冷媒量に関係なく可燃空間が生じないといえる。

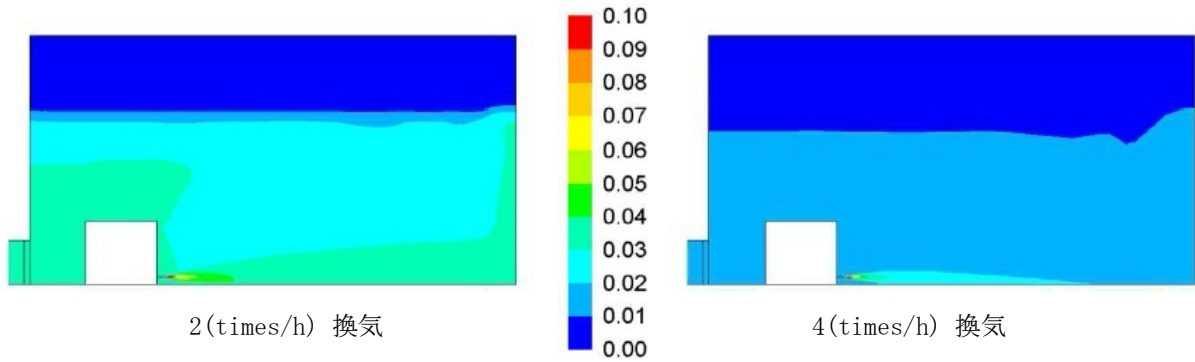


図 9.3.7 継続漏洩での濃度分布 (R1234ze(E), 噴出漏れ, 192 m<sup>3</sup>)

### (4) 屋外設置

表9.3.4に解析結果を示す。一例として、化粧パネル内からR32が漏洩した場合の急速漏れと噴出漏れにおけるLFLとUFLの等値面を図9.3.8に示す。空気熱交換器から漏洩した場合、可燃空間は著しく小さく無視できる。一方、化粧パネル内で漏洩した場合、ユニット下部に冷媒ガスが滞留する形で可燃空間が形成されるため、着火源の存在確率と合わせて評価する。

表 9.3.4 非定常解析結果(空冷チラー)

機器馬力 [Hp]	漏洩箇所	冷媒	漏洩ケース	漏洩速度 [kg/h]	時空積 [m <sup>3</sup> min]
					風速 0 [m/s]
30	空気熱交換器	R32	急速漏れ	10	0.0002
		R1234ze(E)	急速漏れ	7.3	0.0003
	ユニット化粧 パネル下部	R32	急速漏れ	10	3.732
			噴出漏れ	75	4.242
		R1234ze(E)	急速漏れ	7.3	3.989
			噴出漏れ	54	5.685

(a) 急速漏れ

(b) 噴出漏れ

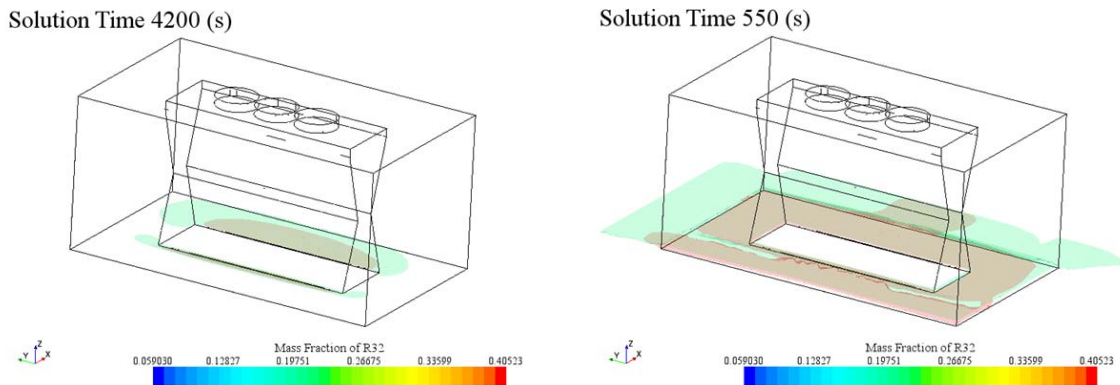


図 9.3.8 R32の化粧パネル下部からの漏洩時の濃度等値面(風速 0 m/s)

## 9.4 着火確率

### 9.4.1 機械室での着火源

水冷チラーが設置される機械室における着火源を推定した。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、工事業者等に限られ、関係者以外の立ち入りは禁止されている。また火気厳禁、禁煙であり、機械室に存在する着火源は限られる。機械室内には大容量の遮断器や電磁開閉器を内蔵したチラーを起動するための動力盤が設置されている。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ている。さらに冷水ポンプ、冷却水ポンプも設置され、それらの遮断器や電磁開閉器を内蔵した補機動力盤が設置される。燃焼機器への吸気は直接フロアで機械室から導入されるが、排気は独立ダクトで屋外に放出される。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 ISO5149-part3 では、機械室容積の 4 回/h の換気量を規定している。図 9.4.1 に機械室内設備イメージ、表 9.4.1 および表 9.4.2 に抽出した着火源一覧を示す。なお抽出した各着火源において、その着火の有無は冷媒の燃焼特性および微燃性冷媒リスク評価研究会での研究結果に基づき判断した。

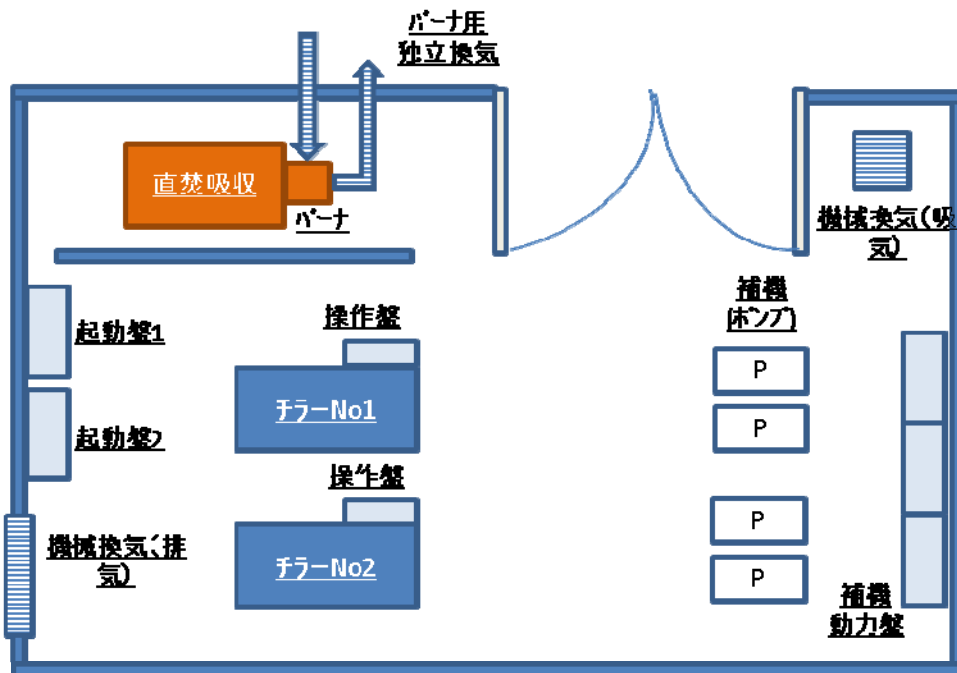


図 9.4.1 機械室内設備イメージ

表 9.4.1 機械室における着火源一覧（スパーク）

分類	スパーク		
	着火源	着火 ○：着火する ×：着火しない	備考
電気部品	家電製品、小型電気機器	×	5kVA 以下
	機器内電気部品	○	5kVA 以上の電磁開閉器
	電源コンセント	×	消炎距離相当
	照明スイッチ	×	消炎距離相当
作業ツール	金属スパーク(フォークリフト爪)	○	-
	電動工具	×	容量小
	冷媒回収機	×	容量小
人体	人体からの静電気	×	最小着火エネルギー以下

表 9.4.2 機械室における着火源一覧（裸火）

分類	裸火		
	着火源	着火 ○：着火する ×：着火しない	備考
喫煙器具	マッチ	○	着火＝裸火
	オイルライター	○	着火した裸火から
	電子ライター	×	ライターが着火しない
燃焼機器	反射式ストーブ	○	使用禁止
	電気ファンヒータ	×	使用禁止
	燃焼式給湯器	○	使用禁止
	燃焼式ボイラー（バーナ）	×	着火するタイミングがない
	排気ダクト，ボイラー表面	×	140° C 以下
	燃焼式調理器	○	使用禁止
作業ツール	ロウ付けバーナ	×	ガス速度が速い

### 9.4.2 着火源の絞り込み

機械室内の着火源として、燃焼器を備えるボイラーや吸収冷温水器、ポンプ等の駆動用モータ、換気装置のファン、電気ストーブ、反射式石油ストーブ、石油ファンヒータなどの暖房機器、照明器具、燃焼器の排気ダクト、ガスおよび電気コンロ、静電気、大容量の電気機器、電動工具、ろう付けバーナ、静電気を抽出した。

微燃性冷媒の着火試験結果<sup>10), 11), 12)</sup>と上記機器の表面温度等を比較した結果、着火源となるのは裸火、金属スパークと後述する大容量の電気品である。ボイラーや直焚き吸収冷凍機の排気は、建物外に直接ダクトで導かれている。一方、吸気は機械室内の空気を導入しており、冷媒が漏洩した場合にはバーナの炎が着火源となりうるため(図 9.4.2)、着火から停止までのシーケンスタイミングを確認した。ファンのみの運転を暫く行った後、点火装置によりパイロットバーナに点火し、その後メインバーナを点火させる。通常運転時はパイロットバーナを停止させ、メインバーナのみで燃焼を行っている。停止時はメインバーナを停止し、ポストパージのためファンのみで一定時間継続運転する。運転中、ファンは常に運転している。機器内に冷媒ガスが流入し、燃焼することはあっても、燃焼室の炎が室内に逆流することはない。漏洩ガスによる火災の可能性はない。また、ストーブ、コンロ等の火気は持ち込み禁止とすることで着火源として扱わない。

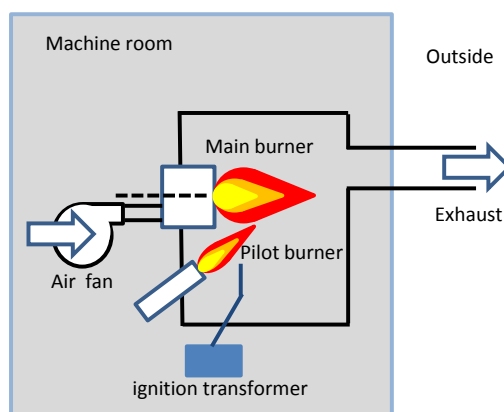


図 9.4.2 直焚き吸収式冷凍機内のバーナイメージ

### 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である。そこで、サービスマン（オペレーターも同等）の喫煙行動調査を行い、各LSにおける喫煙による着火源の存在確率を算出した。着火検証ではライターが着火しにくい現象が確認されているが、着火できるものは何回着火動作しようと裸火が発生する喫煙回数で着火源とした。



- ・ サービスマンの53%は喫煙し、そのうち28%が機械室内での喫煙経験がある。過去一年に限れば現場での喫煙率は全体の7%である
- ・ 喫煙者が使用する着火器具は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95%が電子式ライター、5%が石油ライターを用いる
- ・ 男性喫煙者の1日の喫煙本数は19.1本<sup>13)</sup>である
- ・ サービスマンの活動時間は18時間、うち勤務時間は8時間である
- ・ サービスマンの現地での勤務日は4日、1回のサービス工事での勤務人数は2名である
- ・ 1回の喫煙での裸火の存在時間は2秒である
- ・ 1日あたりの着火源の存在時間は、サービスマンの勤務時間である8時間である

上記より着火源の存在確率を算出すると、 $(0.07 \times 19.1 \times 2 / 3600 \times 8 / 18 \times 4 / 365 \times 2) / 8 = 9.04 \times 10^{-7}$ となる。

#### 9.4.4 電気品による着火

機械室内に存在する電気品として電動機、電磁開閉器、遮断器、プリント基板、トランス等があるが、アークにより着火する可能性のある電気品は電磁開閉器である。ア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うるが、本報告書では、産総研の滝澤、ADL社 (Author: D. Little 社) の報告書 DOE/CE/23810-92 (1998)<sup>2)</sup> から、5kVA以下では着火源とならないとした。チラーの容量毎に電気容量を整理すると、20馬力(法定冷凍能力13トン)以下のチラーの動力系では概ね5kVA以下となる<sup>5)</sup>。20馬力を超えるチラー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。そこで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。運転時間を12時間/日とすると、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。

### 9.5 冷媒漏洩発生頻度

2010年に高圧ガス保安協会(以下、KHK)が集計した74件の冷媒漏洩事故届を分析した結果、小配管やシール部位からの漏洩であったことから、ビル用マルチと同じ漏れ部位と評価し、JRA-GL13を参考に「噴出漏れ」、 「急速漏れ」、 「微小漏れ」に分けた。噴出漏れに分類される事故はいずれも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洩であった。急速漏れはキャピラリー配管やセンサー部の漏れ、工事時の小傷であり、これらもガス状態での漏洩であった。微小漏れはシール劣化、亀裂、継手部の締め付け不良に起因するものであった。これら事故届をSWG委員から各社のメンテナンスデータを収集し比較した。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、ターボ冷凍機のそれぞれについて漏洩速度別の漏れ頻度を算出した(表9.5.1)。集計データはほぼKHK事故届と頻度が一致していることから本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、噴出漏れおよび急速漏れは発生していない。

表 9.5.1 2004年から2011年における漏洩速度別漏れ頻度計算結果

2004- 2011年	漏れ頻度[件/(台・年)]			
	水冷チラー	空冷HP	ターボ	合計
噴出漏れ	$5.83 \times 10^{-6}$	$1.35 \times 10^{-5}$	0	$1.07 \times 10^{-5}$
急速漏れ	$1.07 \times 10^{-4}$	$1.87 \times 10^{-4}$	0	$1.56 \times 10^{-4}$
微小漏れ	$1.64 \times 10^{-3}$	$2.21 \times 10^{-3}$	$7.09 \times 10^{-3}$	$2.27 \times 10^{-3}$

### 9.6 リスクの算定

#### 9.6.1 リスクアセスメントリスト

現状の火傷・火災のリスクの算定では、噴出漏れ、急速漏れについて、可燃空間の時空積を算定し、その時間内のそれぞれの着火源がどの程度の確率で存在するかを算定した。6つのLS毎に存在する着火源が異なることに注意して整理した。いくつか算定上の条件を設定している。

- (1) 空調用熱源機を想定し据付台数を4台として隣接する機器の発停回数を考慮した。
- (2) 機械換気はダクト用ファンの故障率 $2.5 \times 10^{-4}$ 件/(年・台)を使用し2回/h×2系統で4回/hとする構成とした。
- (3) 機械換気が存在しない確率を1%, 据付・廃棄のLSでは工事中として50%とした。
- (4) LSのうち使用者が直接関わらない物流と廃棄は事故確率から除外したが数値は示した。
- (5) 換気無しでは, 漏れ頻度を可燃空間そのものの存在頻度とした。
- (6) 換気のある微小漏れでは可燃空間が存在しないとして可燃空間の存在確率を0とした。
- (7) 可燃空間の存在確率を可燃空間の時空積 $[m^3 \cdot min]$ /対象空間 $[m^3] \times 8760[H] \times 60[min]$ として定義する。空冷ヒートポンプの場合は防音壁で囲まれている領域を対象空間とした。
- (8) 危険側の確率として床表面から可燃空間全体に, それぞれ想定される着火源が均等にあると仮定した。たとえば, 人が使用するライター裸火は床面表面付近にも存在すると仮定している。
- (9) 可燃空間の時間存在確率算出に用いる時空積は, 使用される可能性のより高い冷媒を考慮して, 水冷チラーではR1234ze(E), 空冷ヒートポンプではR32での計算結果を用いた。

### 9.6.2 火災の事故確率

可燃空間の解析結果より, 機械室設置の水冷チラーにおいて換気が無い条件では, 急速漏洩が起きた場合, 可燃空間の時空積は非常に大きくなった。さらに, 可燃域が発生していない結果においても, 全体として, LFLを大きく下回っているわけではないことから, 冷媒の噴出位置, 方向, 速度が変われば, 逆にほぼ全域が可燃空間となることも考えられるため, 決してリスクが小さいわけではないことがわかった。火災事故発生確率は, 1台の機器が1年間で火災となる事故の発生確率である。よって事故発生確率は, それぞれのLSでの着火源の存在確率, 可燃空間の存在確率, 冷媒漏れ確率を積算したものを合算して算出した。それぞれの漏洩ケースにおけるLSごとの火災事故の発生確率を表9.6.1に示す。火災の事故確率の算定は, 機械換気がないリスクを考慮した条件と機械換気のある条件について行い, それぞれの評価を行った。表9.6.2に各LSにおける対策前後の事故発生確率を示す。対策前の値は換気が無い条件で, 微燃性冷媒ガスが漏洩すると必ず可燃域ができて着火源の存在頻度で着火するとした火災事故確率である。噴出漏れ, 急速漏れ, 微小漏れの頻度が全て加算されており, 使用者が直接関わるLSにおいて実態より大きな数値 $1.32 \times 10^{-4}$ 件/(台・年)となっている。例えば狭小な換気の無い機械室の存在比を1%とすれば $1.32 \times 10^{-6}$ 件/(台・年)となるが, これは許容できなる頻度でない。対策後の火災事故確率は, 換気のある条件でチラー, 機械室それぞれの標準モデルで生じる可燃空間との遭遇確率を考慮したものである。空冷ヒートポンプは防音壁を標準としているので非常に厳しい条件となっているが, 市場での使用者が直接関わるLSにおいて事故発生確率が $3.90 \times 10^{-12}$ 件/(台・年)であり, 「起こりえない」と評価できる。

表 9.6.1 漏洩ケース別の火災事故発生確率

LS	換気なし [件/(台・年)]			換気あり [件/(台・年)]		
	噴出漏れ	急速漏れ	微小漏れ	噴出漏れ	急速漏れ	微小漏れ
物流	$1.73 \times 10^{-8}$	$2.77 \times 10^{-7}$	$3.99 \times 10^{-6}$	$4.55 \times 10^{-18}$	$1.51 \times 10^{-13}$	0
据付[搬入]	$1.96 \times 10^{-8}$	$3.13 \times 10^{-7}$	$4.33 \times 10^{-6}$	$1.53 \times 10^{-15}$	$2.40 \times 10^{-12}$	0
据付[試運転]						
使用[機械室]	$2.51 \times 10^{-7}$	$4.01 \times 10^{-6}$	$5.76 \times 10^{-5}$	$6.99 \times 10^{-15}$	$4.90 \times 10^{-13}$	0
使用[屋外]						
修理	$2.64 \times 10^{-7}$	$4.22 \times 10^{-6}$	$6.07 \times 10^{-5}$	$2.07 \times 10^{-14}$	$9.83 \times 10^{-13}$	0
オーバーホール						
廃棄	$6.98 \times 10^{-8}$	$1.12 \times 10^{-6}$	$1.61 \times 10^{-5}$	$5.48 \times 10^{-15}$	$9.23 \times 10^{-12}$	0

表 9.6.2 事故発生確率

対象	LS	LS 比率	対策前 [件/(台・年)]		対策後 [件/(台・年)]	
			各 LS での確率	使用者が直接関わる LS での確率	各 LS での確率	使用者が直接関わる LS での確率
供給者	物流	0.0517	$4.28 \times 10^{-6}$	-	$1.51 \times 10^{-13}$	-
使用者	据付[搬入]	0.0517	$4.67 \times 10^{-6}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$2.40 \times 10^{-12}$	$3.90 \times 10^{-12}$
	据付[試運転]	(0.0023)				
	使用[機械室]	0.2144	$6.19 \times 10^{-5}$			
	使用[屋外]	0.5002	$6.52 \times 10^{-5}$		$4.97 \times 10^{-13}$	
	修理	0.1207			$1.00 \times 10^{-12}$	
	オーバーホール	0.0098				
供給者	廃棄	0.0517		$1.72 \times 10^{-5}$	-	$9.23 \times 10^{-12}$

### 9.6.3 安全を担保するための技術的な要求事項

本リスクアセスメントで得た安全を担保すべき要件を示す。なお、これらの要件は KHKS0302-3<sup>5)</sup>、ISO5149-3(2014年)<sup>14)</sup>を参考にし、国内法規の要求事項との比較を元に検討した。

#### (1) 機械換気装置

- ・ 常時機械換気を備えること。換気量は機械室容積基準の機械室広さによって2～4回/hとし、2系統で実現する。
- ・ 排気口は冷媒の滞留しやすい床面に近い位置に設置し、ダクトを通して直接外気へ排出する。
- ・ 換気装置は機械室外から操作可能とする。

#### (2) 冷媒検知器および漏洩警報装置

- ・ 冷媒の滞留しやすい位置にセンサー一部を設けた冷媒検知器を1つ以上設置する。
- ・ 冷媒検知器および漏洩警報装置は、無停電電源 (UPS) 等の独立電源で動作するものであること。
- ・ 冷媒検知器は漏洩警報装置による警報機 (音および光) に連動し、機械室の外から確認できるものであること。

#### (3) 火気の持ち込み禁止

- ・ 裸火のある暖房機器、給湯機、コンロ等の機械室持ち込みは禁止する。
- ・ 禁煙、火気使用厳禁とする。

#### (4) 点検

- ・ 機械換気装置、冷媒検知器、漏洩警報装置とUPS等の独立電源は、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、記録を保管すること。

#### (5) 保護装置

- ・ 機械室の機械換気装置および冷媒検知器の正常動作を冷凍機の起動インターロックとして構成する。

## 9.7 冷媒リークシミュレーション

本項では東大による、チラーからの冷媒リークシミュレーション結果および考察を示す。

### 9.7.1 計算方法

解析対象ケースを表 9.7.1 に、また冷媒物性などの入力条件を表 9.7.2 に示す。数値シミュレーションには、汎用熱流体解析ソフト STAR-CCM+を用いた。解析方法は非定常圧縮性流れとし、多成分理想気体条件を用いた。乱流モデルは Realizable  $k-\epsilon$  モデル (RKE モデル) を使用した。R1234ze(E)については、乾燥空気中では不燃であるため、23°C / 相対湿度 90 %相当の上下限可燃濃度 (UFL, LFL) および燃焼速度 (BV) を適用した。流入境界条件は一定流量条件を適用し、漏洩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。

表 9.7.1 漏洩シナリオ (Reference “ISO 5149-3, 2014”)

Case no.	Refrigerant	Charged amount	Room volume	Leakage velocity	Ventilation (Airflow)	Air vent			
water-cooled chiller									
1	R32	23.4 kg	109 m <sup>3</sup>	10 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present			
2				(rapid leakage)	218 m <sup>3</sup> /h	present			
3					436 m <sup>3</sup> /h	present			
4				75 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present			
5				(burst leakage)	218 m <sup>3</sup> /h	present			
6					436 m <sup>3</sup> /h	present			
7				75 m <sup>3</sup>	10 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present		
8					(rapid leakage)	150 m <sup>3</sup> /h	present		
9						300 m <sup>3</sup> /h	present		
10					75 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present		
11					(burst leakage)	150 m <sup>3</sup> /h	present		
12						300 m <sup>3</sup> /h	present		
air-cooled chiller									
13	R1234ze(E)	23.4 kg	109 m <sup>3</sup>	7 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present			
14				(rapid leakage)	218 m <sup>3</sup> /h	present			
15					436 m <sup>3</sup> /h	present			
16				54 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present			
17				(burst leakage)	218 m <sup>3</sup> /h	present			
18					436 m <sup>3</sup> /h	present			
19				75 m <sup>3</sup>	7 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present		
20					(rapid leakage)	150 m <sup>3</sup> /h	present		
21						300 m <sup>3</sup> /h	present		
22					54 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	present		
23					(burst leakage)	150 m <sup>3</sup> /h	present		
24						300 m <sup>3</sup> /h	present		
air-cooled chiller									
25	R32	11.7 kg	31 m <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	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 9.7.2 入力条件 (Reference “滝澤ら 2011, NIST 2013”)

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	$1.2187 \times 10^{-2}$	$1.2683 \times 10^{-2}$
Viscosity	Pa.s	$1.2398 \times 10^{-5}$	$1.2151 \times 10^{-5}$
Diffusivity in air	m <sup>2</sup> /s	$1.35 \times 10^{-5}$	$7.4 \times 10^{-6}$

図 9.7.1 に本研究で実施した 2 ケースの解析ジオメトリを示す。解析条件の詳細を以下に述べる。

**(a) 水冷チラーからの漏洩** 1.28 m × 1.28 m × 1.28 m の水冷チラーが地下にある機械室内に設置されている。機械室容積は、通常機械室を想定した 6.6 m × 3.3 m × 5.0 m (109 m<sup>3</sup>) と、最も狭小な機械室を想定した 5.6 m × 2.7 m × 5.0 m (75 m<sup>3</sup>) の 2 室を検討した。チラー設置位置は、壁面位置から 1.01 m 離れた場所としている。広空間側を向いているチラー側面には、床面から高さ 0.15 m に、長さ 0.1 m の漏洩口を模擬したノズルを設け、床面に水平な方向に漏洩する。漏洩形態は急速漏洩 (Rapid Leakage) と噴出漏洩 (Burst Leakage) の 2 種類とした。配管が破損して機械室内に噴出することを想定したため、漏洩速度は両条件とも音速とした。ノズル内径は条件によって異なり、流速が音速となる径を採用した。漏洩ポイントの反対側の機械室壁面底部には排気口があり、そこから 15 m 上方の地上へとダクトが伸びている。チラー上部の天井には給気口があり、換気時にはここから空気が供給され、換気が無いときは開口部として扱った。給気口と排気口の開口率/面風速はそれぞれ、0.7 / 2.0 m/s, 0.3 / 4.0 m/s とし、各面積は、換気風量条件に応じて変更している。格子数は約 50 万で、漏洩口、壁面、床面、圧力境界近傍などのメッシュを細かくしている。

**(b) 空冷チラーからの漏洩** 3 m × 1 m × 2.3 m の空冷チラーが、四方を壁に囲まれた 4.8 m × 2.8 m × 2.3 m の屋外空間の中央に設置されていると想定した。ただし、内 2 面は開口率 25% の防音壁を想定しており、天井は無い。漏洩形態は、水冷チラーと同様に急速漏洩 (Rapid Leakage) と噴出漏洩 (Burst Leakage) の 2 種類としたが、それぞれに、熱交換器配管が破損して壁側の空間へ音速で漏洩するケースと、空冷チラー器内で漏洩して本体底部にある 2 m × 0.01 m × 前後 2 ヶ所のパネル隙間から漏れ出すケースの 2 種類を検討した。よって漏洩形態は計 4 種類ある。熱交換器配管の破損による漏洩の解析では、空冷チラーの中心から 0.15 m 上方に、水冷チラーの解析の時と同様のノズルを与えて漏洩口を模擬した。漏洩速度は音速で、流速が音速となるようにノズル内径を調整した。また防音壁に沿って 0.5 m/s の風がある場合と無風の場合についても検討した。格子数は約 70 万で、漏洩口、床面、圧力境界近傍などのメッシュを微細にしている。

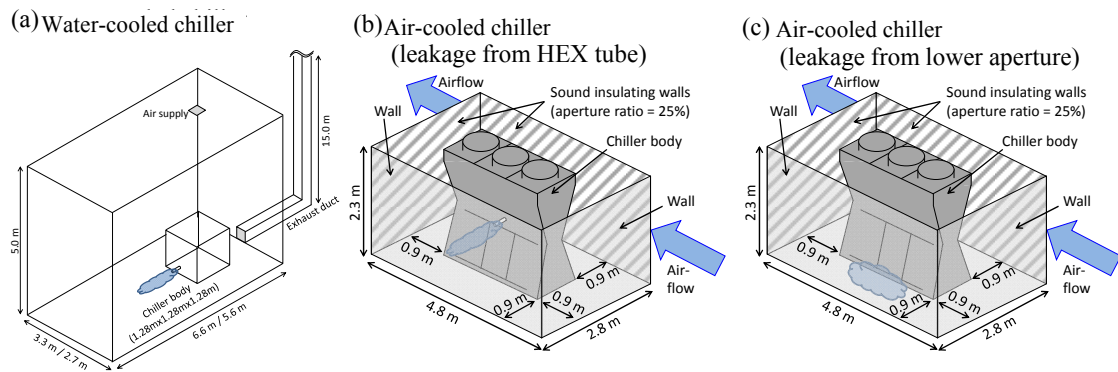


図 9.7.1 解析ジオメトリ

## 9.7.2 シミュレーション結果および考察

評価に際して、可燃領域を時間積分した可燃時空積  $\int V dt$  を導入した。可燃領域は、LFL~UFL の領域  $V_{FL}$  と、その領域内で気流速度が燃焼速度以下の範囲  $V_{BVFL}$  を検討した。 $V_{FL}$  については、消滅するまでの存在時間も確認した。表 9.7.3 に解析結果を、図 9.7.2 と図 9.7.3 には、例として全 40 ケース中 8 ケースの  $V_{FL}$ 、 $V_{BVFL}$  と  $\int V_{FL} dt$ 、 $\int V_{BVFL} dt$  の時間変化および漏洩終了直前での LFL および UFL 等値面を示している。

**(a) 水冷チラーからの漏洩** 表 9.7.3 の No. 1 ~ 24 と図 9.7.2 および図 9.7.3 の (a) ~ (d) に結果を示す。なお、No. 1, 13, 19 については、 $V_{FL}$  の存在時間が非常に長いため、可燃域が消滅する前に計算を停止した。これより、空間容積 109 m<sup>3</sup> の室内で急速漏洩が起きた場合、換気が無いと  $V_{FL}$  が非常に大きくなり、漏洩終了後も消えないという結果となった (No. 1, 13)。一方、噴出漏洩や空間容積 75 m<sup>3</sup> の場合は、換気が無くとも  $V_{FL}$  がかなり小さくなる場合があるという結果となった (No. 4, 7, 16)。本解析条件では漏洩位置がかなり床面に近いことから、空間が大きいと、空間上部へ拡散せず、高濃度域が底部に生成される。一方、空間が小さくなったり、高質量流量で漏洩したりすると、空間の広範囲へ冷媒が行き渡り、結果、LFL 以下となる領域が拡大する。そのことで可燃領域が小さくなっていると考えられる。ただし、これらの結果を見ると、全体として LFL を大きく下回っているわけではない上に、冷媒の噴出位置、方向、速度が変われば、逆にほぼ全域が  $V_{FL}$  となることも考えられるため、決してリスクが小さいわけではない。

換気に関しては、1 時間当り空間容積の 2 倍程度の風量の換気を行えば、かなり  $V_{FL}$  を抑えられるという結果となった。よって十分な換気が安全対策上非常に重要になると考えられる。また、ファンによる攪拌も効果的であると考えられる。

**(b) 空冷チラーからの漏洩** 表 9.7.3 の No. 25 ~ 40 と図 9.7.2 および図 9.7.3 の (e) ~ (h) に結果を示す。これより、熱交換器配管に穴が開き、非常に高速で外部へ漏出する場合 (No. 25 ~ 28, 33 ~ 36)、設置場所が屋外であるため、冷媒は外部へ拡散し続け、 $V_{FL}$  は漏洩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。また本体内部で漏洩が発生し、本体下のパネル隙間から漏洩するケースでは、床面近傍位置での漏洩となるので、重力などにより加速されることなく漏洩する。そのため、上部空間に広く拡散することなく、床上 10 mm 程度の薄い  $V_{FL}$  が拡大する。特に、噴出漏洩の場合は、冷媒の漏洩中はほぼ床面全域に  $V_{FL}$  が広がる (No. 31, 32, 39, 40)。しかし設置場所が屋外であり、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、漏洩が終了すれば  $V_{FL}$  はすぐに消滅する。また、風の有無で比較しても殆ど結果に差異は無い。

表 9.7.3 可燃濃度域の存在時間と可燃時空積

Case no.	$V_{FL}$ residence time, min	$\int V_{FL} dt$ m <sup>3</sup> min	$\int V_{BVFL} dt$ m <sup>3</sup> min	Case no.	$V_{FL}$ residence time, min	$\int V_{FL} dt$ m <sup>3</sup> min	$\int V_{BVFL} dt$ m <sup>3</sup> min
water-cooled chiller							
1*	up to 200	up to 2481	—	21	193.3	0.0009	0
2	141.7	0.0008	0	22	26.7	0.784	0
3	141.7	0.0007	0	23	26.7	0.046	0
4	20	0.011	0	24	26.7	0.025	0
5	20	0.008	0	air-cooled chiller			
6	20	0.006	0	25	70.8	0.0002	0
7	141.7	0.112	0	26	70.8	0.0002	0
8	141.7	0.0008	0	27	9.67	0.0007	0
9	141.7	0.0007	0	28	10	0.0007	0
10	20	0.037	0	29	71.7	3.989	2.054
11	20	0.016	0	30	71.7	4.038	2.313
12	20	0.012	0	31	10.8	5.685	0.646
13*	up to 248	up to 3129	—	32	10.4	5.544	0.662
14	210	0.001	0	33	96.7	0.0003	0
15	193.3	0.0009	0	34	96.5	0.0003	0
16	26.7	0.027	0	35	14.2	0.001	0
17	26.7	0.017	0	36	13.3	0.001	0
18	26.7	0.015	0	37	96.7	3.989	2.054
19*	up to 200	up to 3636	up to 1464	38	97.5	4.038	2.313
20	193.3	0.0009	0	39	14.2	5.685	0.646
				40	14.2	5.544	0.662

\* Calculations were stopped before the flammable volumes vanished because of their very long residence times.

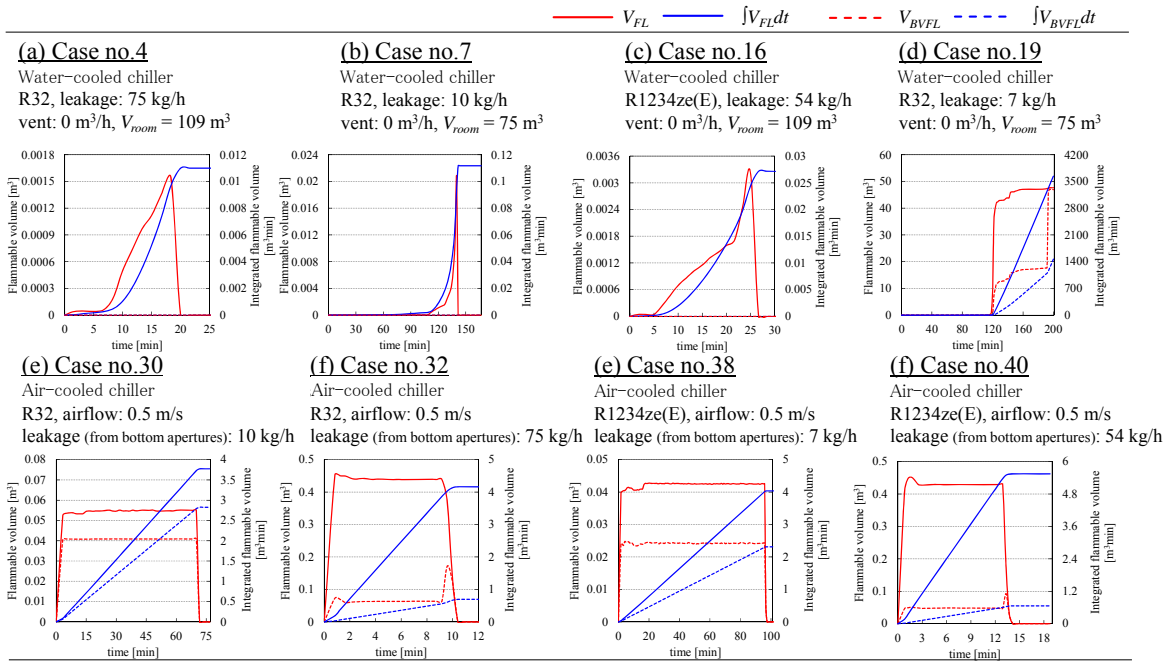


図 9.7.2 可燃濃度範囲と可燃時空積の時間変化

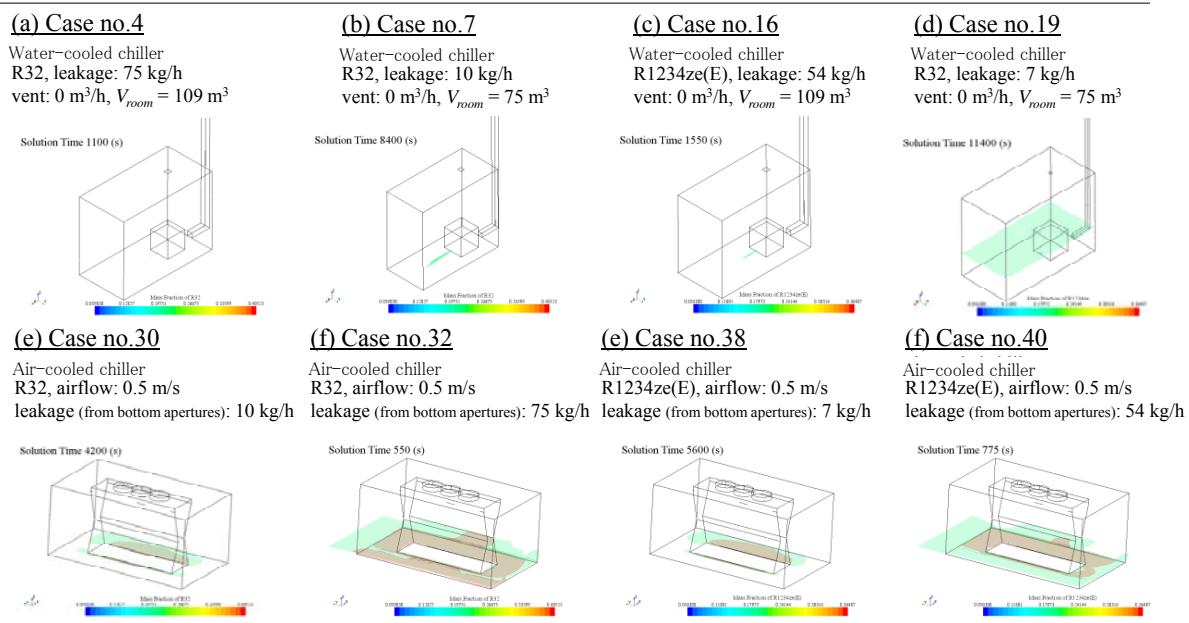


図 9.7.3 漏洩終了直前での LFL および UFL 等値面

## 9.8 まとめ

チラーSWGのRAの結果、微燃性冷媒を使用した水冷チラー、空冷ヒートポンプでは漏れ事故確率と着火源の存在確率から、火災・火傷事故の発生頻度が十分低いことが確認された。また、適切な機械換気（2～4回/h（2系統化））を備える機械室とすることで事故発生頻度は100年に一度よりも小さくなることが確認された。これまでのRAで明らかとなった安全担保の骨子は以下のとおりである。

- (1) 適切な機械換気装置および換気量の確保
- (2) 一つ以上の冷媒検知器および漏洩警報装置による漏洩監視
- (3) 冷媒検知器と機械換気のチラーとのインターロック
- (4) 冷媒検知器の独立電源化等による停電時の作動確保

また、これらの技術要求事項を展開するためのGLの原案作成を実施した。来年度は、GLの制定に向けた作業および総括を実施する予定である。

チラーから空間内に微燃性冷媒が漏洩した場合のシミュレーションにより、以下の知見を得た。

- (1) 水冷チラーからの漏洩では、換気が可燃領域抑制に大きく効く。換気が無い場合は非常に広範囲に $V_{FL}$ が拡大する恐れがある。
- (2) 空冷チラーからの漏洩では、高速で外部へ漏洩する場合、可燃時空積は極めて小さな値となる。本体下のパネル隙間から漏洩する場合は広範囲に薄く $V_{FL}$ が拡大するが、漏洩が終了すれば $V_{FL}$ はすぐに消滅する。

## 文献

- 1) R290冷媒使用ルームエアコンのリスクアセスメント検討結果報告書：日冷工環境部会冷媒温暖化対応委員会 非FC冷媒検討分科会まとめ(1999)。
- 2) “Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a(30/70wt%)”, Split System Residential Heat Pump, Arthur D Little inc, United state(1998)。
- 3) 高圧ガス事故の統計と解析 編著 小林英男 高圧ガス保安協会 2014年2月発行 p149-159
- 4) 経済産業省：リスクアセスメント・ハンドブック実務編(2011)。
- 5) KHKS0302-3：冷凍空調装置の施設基準[可燃性ガス(微燃性のものを含む)の施設編](2011)。
- 6) JISC60079-10(2008)：爆発性雰囲気で使用する電気機械器具—第10部：危険区域の分類。



- 7) IEC60335-2-40 : Household and similar electrical appliances -Safety - (2005)  
Part 2-40) Particular requirements for electrical heat pumps, air conditioners and dehumidifiers.
- 8) JRA GL-13 : マルチ形パッケージエアコンの冷媒漏洩時の安全確保のための施設ガイドライ (2011).
- 9) R-1234yf 及び R-1234ze (E) の燃焼性評価 : 第 49 回燃焼シンポ (2011/12).
- 10) 今村友彦 : Evaluation of Fire Hazards of A2L Class Refrigerants, 環境と新冷媒国際シンポジウム 2012, pp. 65-68, (2012. 11).
- 11) 佐分利禎 : Combustion Characteristics of Flammable Refrigerant Gases, 環境と新冷媒国際シンポジウム 2012, pp. 69-72, (2012. 11).
- 12) 滝澤賢二 : Flammability Property of 2L Refrigerants, 環境と新冷媒国際シンポジウム 2012, pp. 73-79, (2012. 11).
- 13) JT ホームページ :  
[http://www.jti.co.jp/investors/press\\_releases/2012/0730\\_01\\_appendix\\_02.html](http://www.jti.co.jp/investors/press_releases/2012/0730_01_appendix_02.html) (2013).
- 14) ISO5149 : Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements (2014)  
Part1) Definitions, classification and selection criteria  
Part2) Design, construction, testing, marking and documentation  
Part3) Installation site  
Part4) Operation, maintenance, repair and recovery.
- 15) 日本フルオロカーボン協会 (JFMA), 2012, 特定フロン (CFC / HCFC) およびフルオロカーボン類の環境・安全データ一覧表, <http://www.jfma.org/atabase/table.htm>
- 16) National Institute of Standards and Technology (NIST), 2013, *Standard Reference Database 23, Version 9.1.*

## 10. 将来冷媒候補の熱物性とサイクル特性

### 10.1 はじめに

本研究グループは、NEDOプロジェクト「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」の中で以下の研究開発課題に取り組んでいる。

- (1) 熱物性およびサイクル性能がほとんど明らかにされていない低 GWP の新規冷媒候補物質の安全性を含む化学的性質、熱力学的・輸送的性質、伝熱特性およびサイクル基本特性を明らかにする。
- (2) R1234ze(Z)を含む HFO 系冷媒、HFC 系冷媒、自然冷媒などを組み合わせることによって得られる低 GWP 混合冷媒の中から業務用空調機器の冷媒として適した混合冷媒を探求・選定し、選定した混合冷媒の熱力学的・輸送的性質の測定、伝熱特性の測定およびサイクル性能の評価を行う。
- (3) 低 GWP 混合冷媒を実用冷媒として使用する為の基盤技術を構築する。

本報告書では、今年度の成果として R1243zf の熱物性測定および状態方程式の作成、HFO 系冷媒の表面張力、熱伝導率および粘度の測定の結果を報告し、さらに、GWP 値が 300 弱および 200 弱の低 GWP 混合冷媒のサイクル性能試験の結果を報告する。

### 10.2 熱力学的性質の測定と状態方程式の作成

#### 10.2.1 R1243zf の熱力学的性質の測定

3,3,3-trifluoropropene:  $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CH}_2$  の熱力学的性質の測定を行った。R1243zf は R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z) などと同様に、二重結合を有するオレフィン系冷媒(HFO系冷媒)の一つであり、熱物性としては標準沸点が 247 K 付近にあり、R134a や R1234yf に近い熱物性を持つ物質である。可燃性の点で危惧がもたれるが、エアコン用の冷媒に適していると考えられる。なお、今回使用した R1243zf 試料は、メキシケム社製から提供を受けた高純度試料であり、その純度は 99.5 %以上と報告されている。

本研究では、2種類の装置を使って測定を行った。一つは、メニスカスの消滅を直接肉眼で観察する方法により飽和密度(気液共存曲線)および臨界点(臨界温度、臨界密度)を測定する臨界点測定用実験装置であり、もう一つは、圧力と密度と温度の関係( $P \cdot T$ 性質)および飽和蒸気圧を、事前に内容積を精密に計測している圧力容器を使って測定する等容法実験装置である。この2つの装置を関連付けながら、並行して測定を進めていった。

まず飽和密度に関しては、密度  $182.7 \text{ kg/m}^3$  から  $723.7 \text{ kg/m}^3$ 、温度  $360.7 \text{ K}$  から臨界温度までの範囲で計 14 点の実測値を得た。温度の測定精度は  $\pm 10 \text{ mK}$  以内、密度の測定精度は膨張回数によって異なるが 0.05 から 0.2%以内であると推定している。図 10.2.1 には飽和密度の測定結果を示し、さらに臨界点近傍の拡大図を図 10.2.2 に示した。

本研究では、4シリーズの測定を、それぞれ新たな試料充填で行っている。4シリーズのデータがスムーズに連なっていることで、実験データの再現性の確認をしている。飽和密度に関しては、図 10.2.1 の十字印で示したイタリアのグループのデータしか従来存在しなかった。本研究の結果は、臨界点近傍を除いて、彼らのデータとよく一致した結果が得られている。

本研究の実測値のうち、特に頂上部の実測値の観察結果を用いて、メニスカスの消滅位置および臨界タンパク光による着色の様子から、臨界温度と臨界密度を以下のように決定した。なお、本研究では、メニスカスの消滅位置が中央であり、さらに臨界タンパク光の着色の様子が、気相と液相で均等であり、かつ着色の度合いが最も強い時を臨界点であると実験的に定義している。

$$T_c = 376.93 \pm 0.02 \text{ K}, \quad \rho_c = 414 \pm 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (10.2.1)$$

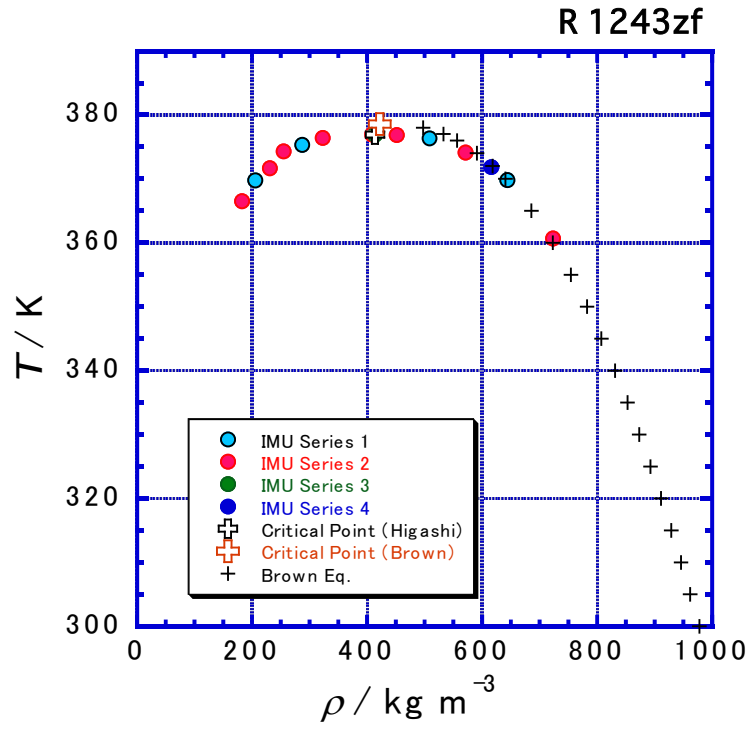


図 10.2.1 R1243zf の飽和密度 (気液共存曲線)

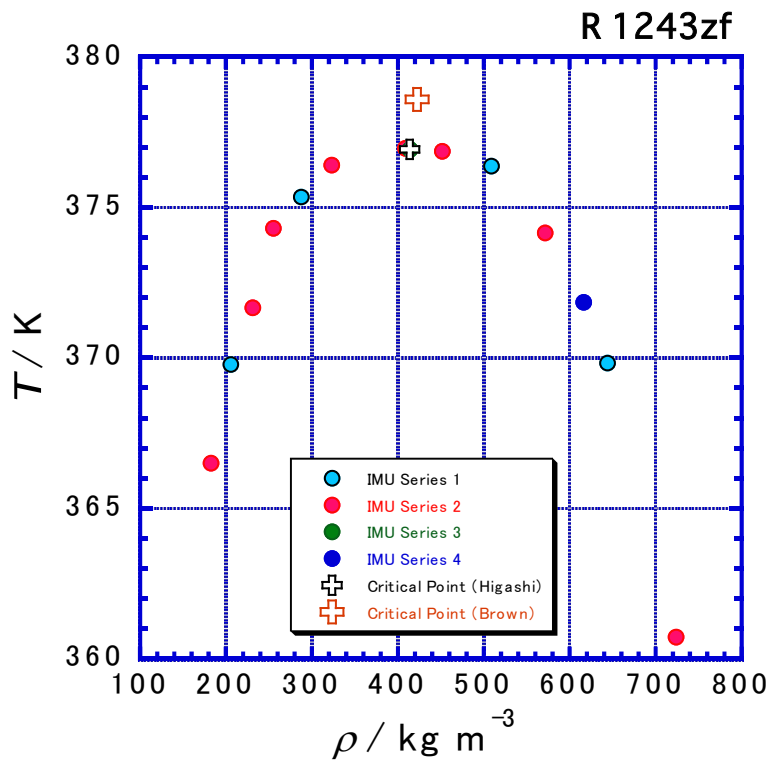


図 10.2.2 臨界点近傍の気液共存曲線

次に、飽和蒸気圧の測定結果を図 10.2.3 に、そして  $P\rho T$  性質の測定結果を図 10.2.4 に示した。飽和蒸気圧に関しては、温度 310 K から 375 K まで、圧力 815 kPa から 3390 kPa までの範囲で 19 点の実測値を得た。また、同じ装置を用いて行った  $P\rho T$  性質の測定では、圧力 815 kPa から 6902 kPa、密度 50 kg/m<sup>3</sup> から 900 kg/m<sup>3</sup>、温度 310 K から 430 K の範囲で、7 本の等容線に沿って、計 133 点の実測値を得ることができた。

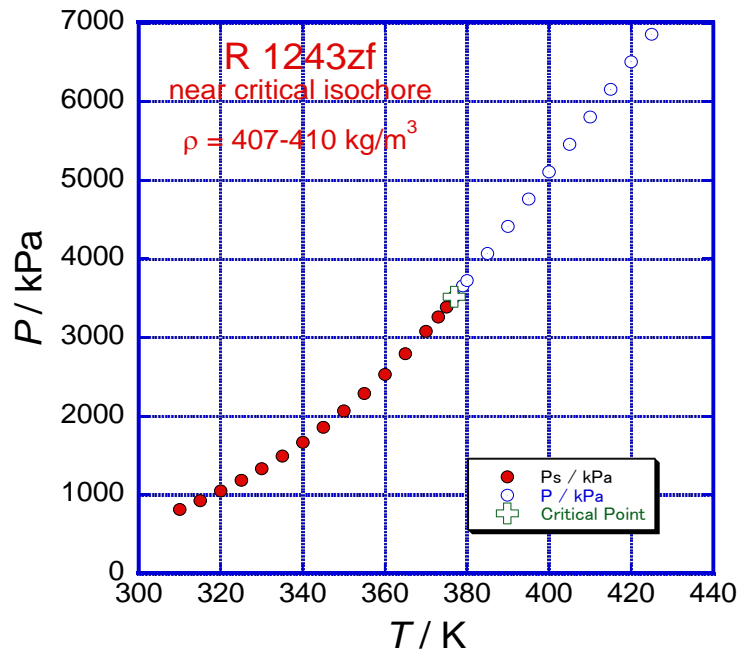


図 10.2.3 R1243zf の飽和蒸気圧曲線測定結果

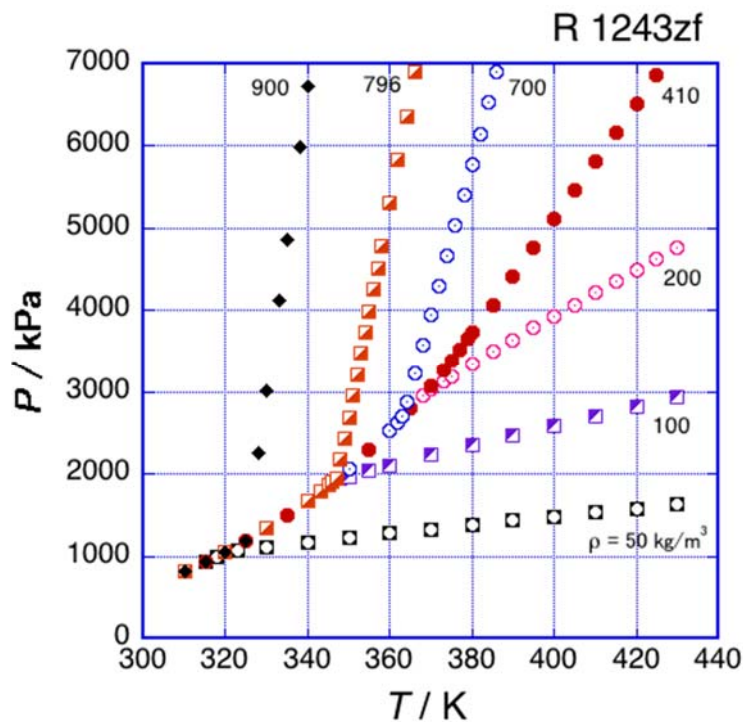


図 10.2.4 R1243zf の  $P\rho T$  性質の測定結果

臨界密度の値で密度を設定し、 $P\rho T$  性質における等容線を測定すれば、それが飽和蒸気圧曲線となる。また、飽和蒸気圧曲線の測定において、メニスカスの消滅の観察により決定した臨界温度で、十分に温度を安定にしたのち、その時の飽和蒸気圧を直接計測すれば、臨界圧力が直接測定できる。しかし、完全に臨界密度に設定できなければ、飽和蒸気圧曲線上であるかどうかはわからないため、一般には飽和蒸気圧曲線の相関式を作成し、臨界温度まで補外する形で臨界圧力を決定することもできる。本研究で決定した臨界圧力の値、および飽和蒸気圧相関式は以下のようになった。

$$P_c = 3517 \pm 3 \text{ kPa} \quad (10.2.2)$$

$$\ln\left(\frac{P_s}{P_c}\right) = \frac{T_c}{T}(N_1\theta + N_2\theta^{1.5} + N_3\theta^{3.8} + N_4\theta^5) \quad (10.2.3)$$

なお、変数  $\theta$  は  $1-T/T_c$  であり、式(10.2.3)において、臨界温度  $T_c$  は式(10.2.1)の値を用いる。臨界圧力は臨界温度までの補外により求められるが、実際には飽和蒸気圧の実測値を用いて本相関式を作成する際の fitting parameter として算出することができ、結果として 3517.1 kPa となった。また  $N_1$  から  $N_4$  のそれぞれ係数の値は、 $N_1=-7.26583$ 、 $N_2=-1.34642$ 、 $N_3=-11.7799$ 、 $N_4=19.1288$  である。

### 10.2.2 R1243zf の状態方程式の作成

すでに論文等で公表されている R1243zf の熱物性値に加え、本研究で測定した臨界定数および飽和蒸気圧を用いてヘルムホルツ型状態方程式を開発した。ヘルムホルツ型状態方程式は一般に次式で表される。

$$\frac{a(T,\rho)}{RT} = \alpha(\tau, \delta) = \alpha^0(\tau, \delta) + \alpha^r(\tau, \delta) \quad (10.2.4)$$

ここで、 $\tau$  および  $\delta$  は無次元温度および無次元密度であり、 $\tau = T_c/T$  および  $\delta = \rho/\rho_c$  である。また、 $\alpha^0$  および  $\alpha^r$  はそれぞれ理想気体部分および残留部分である。理想気体部分は理想気体の定圧比熱から次式に従って解析的に計算できる。

$$\alpha^0(\tau, \delta) = \frac{h_\delta^0 \tau}{RT_c} - \frac{s_\delta^0}{R} - 1 + \ln \frac{\delta \tau_0}{\delta_0 \tau} - \frac{\tau}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau^2} d\tau + \frac{1}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau} d\tau \quad (10.2.5)$$

本研究では、Joback 法により求めた次式のような  $c_p^0$  を用いて  $\alpha^0$  を計算する。

$$c_p^0 = N_0^0 + N_1^0 T + N_2^0 T^2 + N_3^0 T^3 \quad (10.2.6)$$

ここで、 $c_p^0 = (\text{J mol K}^{-1})$  および  $T = (\text{K})$  であり、 $N_0^0 = -9.030$ 、 $N_1^0 = 0.4300$ 、 $N_2^0 = -3.833 \times 10^{-4}$  および  $N_3^0 = 1.306 \times 10^{-7}$  である。

一方、残留部分は経験的に定められた次のような関数形を、非線形最小二乗法によって実測値に合うよう最適化して決定する。

$$\alpha^r(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^{n_1} \tau^{t_i} \delta^{d_i} + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-\delta^{e_i}) \quad (10.2.7)$$

本研究では、実測値との偏差の他、種々の熱力学的束縛条件を考慮して上式の項数ならびに係数および指数を決定した。本研究で作成した状態方程式の適用範囲は、温度について  $250\text{K} \leq T \leq 380\text{K}$ 、圧力について  $0 \leq p \leq 35\text{MPa}$ 、である。

図 10.2.5 は、飽和蒸気圧の実測値と状態方程式からの計算値との相対偏差を温度に対して示したものである。図より、本研究で測定した値はほぼ  $\pm 0.1\%$  の偏差内で再現されていることが確認できる。平均偏差は  $0.03\%$  である。また、Brown らの実測値は状態方程式の最適化には用いられていないものの、全温度範囲にわたってほぼ  $\pm 0.3\%$  以内で再現されており、平均偏差は  $0.15\%$  であり、実測値の不確かさよりもわずかに大きい程度である。

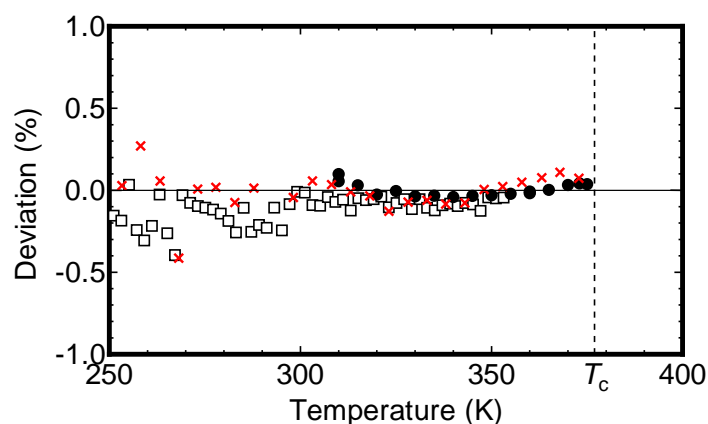


図 10.2.5 飽和蒸気圧の実測値に対する状態方程式からの計算値の偏差  
 (●) 本研究, (□×) Brown et al.(2013)

図 10.2.6 は、状態方程式から計算した飽和限界線を飽和液密度および飽和蒸気密度の実測値と共に示したものである。このより、状態方程式は飽和液密度および飽和蒸気密度を、臨界点近傍も含めて広い温度範囲にわたって良好に表現していることが確認できる。

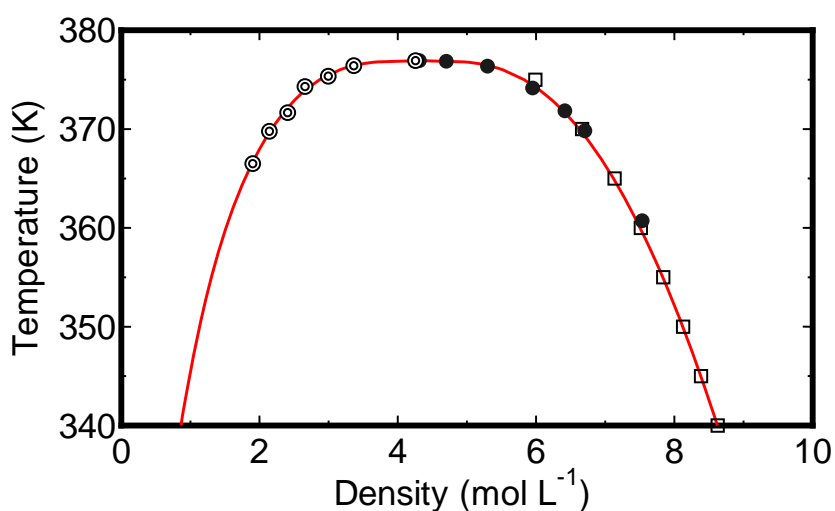


図 10.2.6 状態方程式から計算した飽和限界線と飽和液密度および飽和蒸気密度の実測値  
 — 状態方程式からの計算値, (●◎) 本研究, (□) Di Nicola et al.(2013)

図 10.2.7 に Di Nicola らによる液密度の実測値と状態方程式からの計算値との偏差を示す。図より、すべての温度において実測値の偏差は±0.1 以内に収まっており、実測値が極めて良好に再現されていることがわかる。全実測値における平均偏差は 0.04% である。気体密度についても、平均偏差 0.59% で実測値を再現できることが確認されている。

本研究で開発した状態方程式に基づいて REFPROP 用物質定義ファイル (FLD ファイル) も合わせて作成した。このファイルを用いることにより、REFPROP 上で熱力学的性質を簡便に計算できる。

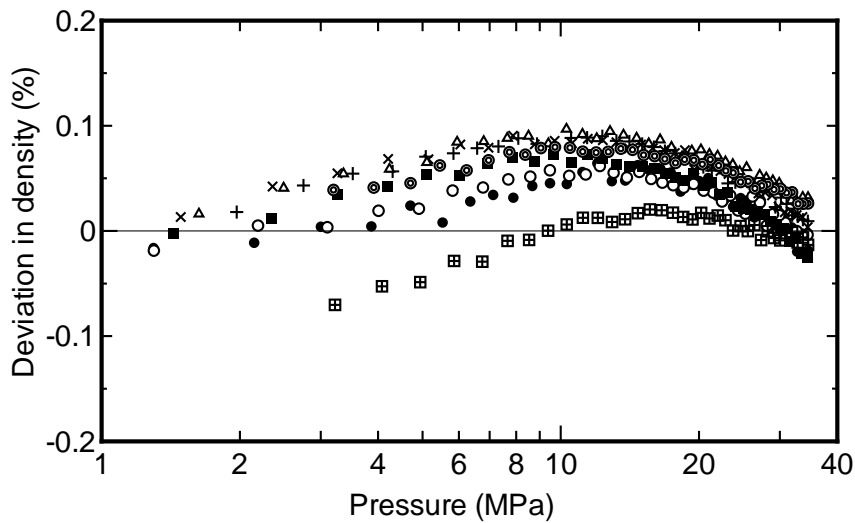


図 10.2.7 液密度の実測値 (Di Nicola et al, 2013) に対する状態方程式からの計算値の偏差 (●) 283.15K, (○) 293.15K, (■) 303.15K, (×) 313.15K, (+) 323.15K, (△) 333.15K, (⊙) 343.15K, (⊠) 353.15K

### 10.2.3 低 GWP 冷媒の表面張力の測定

#### 10.2.3.1 実験方法

図 10.2.8 に表面張力測定に用いた実験装置の概略を示す。パイレックスガラス製の圧力容器 A の中には、それぞれ内半径  $0.4222 \pm 0.0009$  mm および  $0.7526 \pm 0.0009$  mm の毛細管が鉛直に設置されている。その圧力容器は水を伝熱媒体に用いた恒温槽 B 内に設置されている。恒温槽内温度は、メインヒータ J およびシース熱電対 D を参照する PID 制御器を用いたサブヒータ K によって、設定温度に対して  $\pm 2$  mK の範囲内で制御される。また、圧力容器内の冷媒温度は、恒温槽内の水温において熱平衡であるとみなし、ITS-90 に準拠して校正された白金測温抵抗体 C により測定される温度とした。毛細管内試料の上昇高さの測定は、恒温槽外部より観察窓を介してデジタル読取顕微鏡 (最小目盛  $0.01$  mm) を用いて行った。読取顕微鏡には CCD カメラが設置されており、外部モニターを通して毛管上昇高さが観察できる。毛細管および圧力容器は、冷媒充填直前に弱アルカリ溶液と超音波洗浄器を用いて十分に洗浄されており、毛細管内壁と冷媒との接触角は解析上無視できるものとしている。

図 10.2.9 に示差毛管上昇高さの模式図を示す。示差毛管上昇高さ  $\Delta h_m (=h_{m1}-h_{m2})$  は、読み取り顕微鏡およびその読み取り顕微鏡に取り付けられた CCD カメラを用いて各細管のメニスカスの底部の差を測定した。高さ測定において、個人差を除外するために、測定回数は 6 名で各 2 回の計 12 回とした。また、メニスカスの影響を考慮するため、測定された示差毛管上昇高さは、以下に示す Reyleigh の方法 (1916) により補正を行った。

$$\Delta h_c = (h_{m1} - h_{m2}) + \frac{(r_1 - r_2)}{3} - 0.1288 \left( \frac{r_1^2}{h_{m1}} - \frac{r_2^2}{h_{m2}} \right) + 0.1312 \left( \frac{r_1^3}{h_{m1}^2} - \frac{r_2^3}{h_{m2}^2} \right) + \dots \approx \Delta h_m + \frac{(r_1 - r_2)}{3} \quad (10.2.8)$$

毛管定数  $a^2$  は、細管内径  $r$  および補正された示差毛管上昇高さ  $\Delta h_c$  から以下のように定義される。

$$a^2 = \frac{g \Delta h_c}{g_n (1/r_1 - 1/r_2) \cos \theta} \approx \frac{g \Delta h_c}{g_n (1/r_1 - 1/r_2)} \quad (10.2.9)$$

ここに、 $g$  および  $g_n$  はそれぞれ、測定地の重力加速度 (いわき市  $9.8001 \text{ m s}^{-2}$ ) および標準重力加速度 ( $9.80665 \text{ m s}^{-2}$ ) である。式(10.2.9)に含まれる接触角  $\theta$  は毛細管が十分に洗浄されているため、ゼロと見なされる。

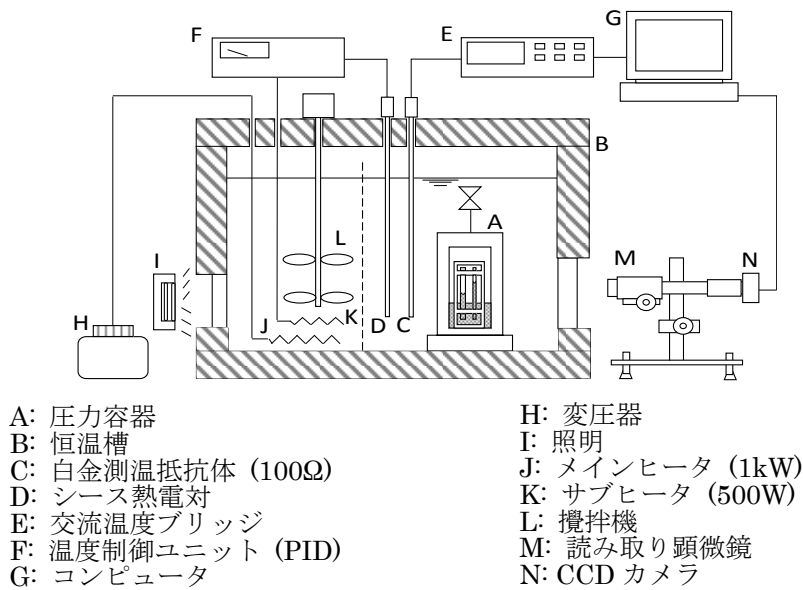


図 10.2.8 実験装置概略図

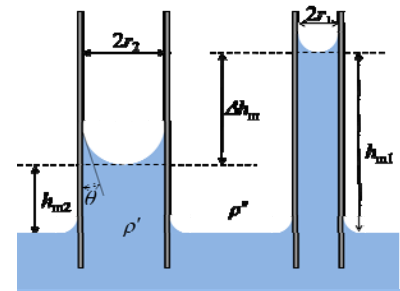


図 10.2.9 示唆毛管上昇法の原理

$$a^2 = \frac{2\sigma}{g_n(\rho' - \rho'')} \quad \therefore \sigma = \frac{g\Delta h_c}{2(1/r_1 - 1/r_2)\cos\theta} \approx \frac{g\Delta h_c(\rho' - \rho'')}{2(1/r_1 - 1/r_2)} = \left[ \frac{gr_1r_2}{2(r_2 - r_1)}\Delta h_m - \frac{gr_1r_2}{6} \right] (\rho' - \rho'') \quad (10.2.10)$$

また、式(10.2.10)を計算するにあたり、R134a, R245fa および R1233zd(E)の飽和液および飽和蒸気密度の算出には REFPROP 9.1 (Lemmon *et al.*, 2013) を用いた。R1243zf および R1234ze(Z)に関しては、Higashi ら (2015, 2014) によって測定された実測値に基づき、Akasaka ら (2015, 2014) によって最適化された状態方程式の係数が組み込まれた REFPROP 用 Fluid ファイルを用いた。

表 10.2.1 に本研究で用いた測定機器の測定の不確かさを示す。表面張力の測定の不確かさは、 $\pm 0.2 \text{ mN m}^{-1}$  以内と見積もられる。試験冷媒 R1234ze(Z) および R1233zd(E) はセントラル硝子株式会社製である。また、それらの冷媒は蒸留された後に TCD 型ガスクロマトグラフにより不純物の含有率を確認されている。それらの不純物はモル比で 0.1% 以下であり、その値はガスクロマトグラフの不確かさに比して小さい。試験冷媒 R1243zf はメキシケム社 (Mexichem, Ltd., UK) 製であり、その純度は 99.5% 以上であると報告されている。

上述した測定方法の健全性ならびに再現性の確認のために、R134a および R245fa の表面張力の測定を行った。それらの実測データを図 10.2.10(a) および (b) に示す。従来、報告されているいくつかの R134a および R245fa の表面張力の測定値も併せて示す。図 10.2.10(a) および (b) より、それぞれの実測値は REFPROP 9.1 を用いて算出した計算値と良く一致している。実測値および計算値の標準偏差は  $0.13 \text{ mN m}^{-1}$  であり、その値

表 10.2.1 測定の不確かさ

測定項目	測定機器	不確かさ
温度 (ITS-90)	白金測温抵抗体, 交流温度ブリッジ (ASL F500)	5 mK
示差毛管上昇高さ	デジタル読み取り顕微鏡	0.046 mm
	(日本光器製作所, NRM-D-2XZ)	(最小目盛 0.01 mm)
細管の内半径	-	0.0009 mm
飽和密度, $\rho'$ および $\rho''$	-	計算値の 0.04%



は測定の不確かさ  $0.2 \text{ mN m}^{-1}$  に比して十分に小さい。また、図 10.2.10 (b) に示した実測値シリーズ 1 およびシリーズ 2 は、それぞれ別の日に測定しており、それらの実測値は計算値と良く一致している。これらの結果より、測定方法の健全性ならびに再現性が確認された。

### 10.2.3.2 実験結果

図 10.2.11 (a), (b) および (c) に、それぞれ R1243zf, R1234ze(Z) および R1233zd(E) の表面張力測定結果を示す。図中のシンボルは表面張力の実測値、シンボルに付している垂直のバーは表面張力に関する測定の不確かさを示している。ひし形のシンボルはそれぞれ、R1243zf は Higashi ら (2015), R1234ze(Z) は Higashi ら (2014), R1233zd(E) は Hulse ら (2012) によって測定された臨界温度である。図 10.2.11 (c) より、R1233zd(E) の実測値は Hulse らによって測定された値に比して約  $1.5 \text{ mN m}^{-1}$  大きい。次に、従来、提案されている表面張力の推算式との比較を行う。Macleodo-Sugden の式は実測値に対して大きく推算する傾向にあり、特に

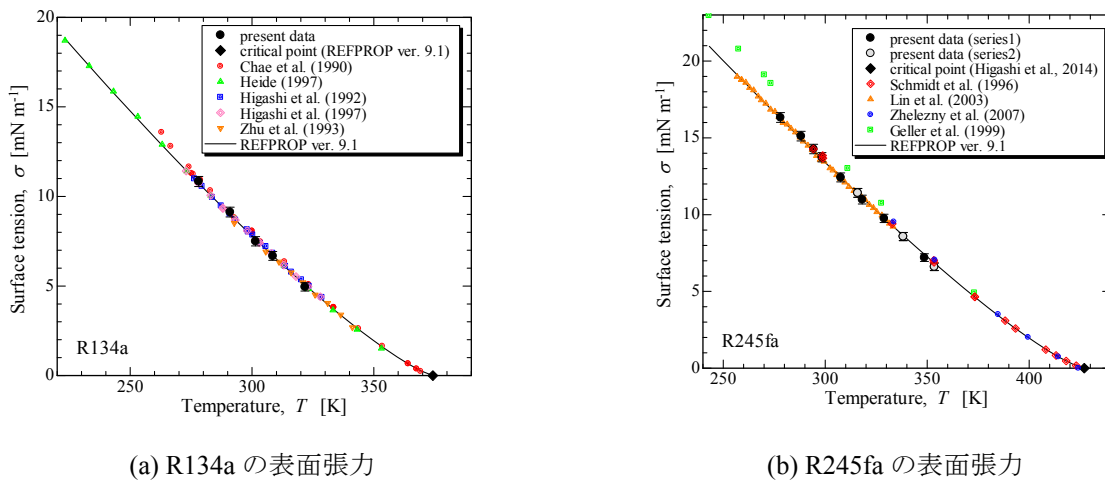


図 10.2.10 測定方法の健全性

R1233zd(E) においてその差は最も大きい。R1243zf および R1234ze(Z) に関して、Miller の式および Di Nicola らの式は実測値に対して測定の不確かさ以内で良く一致しているが、Miqueu らの式は実測値に対して  $0.7 \text{ mN m}^{-1}$  大きく推算する。一方、R1233zd(E) に関して、これら 3 式は実測値に対して  $-0.25 \text{ mN m}^{-1}$  から  $-0.51 \text{ mN m}^{-1}$  程度小さく推算する。

ここで、より良い精度で表面張力を推算するために、ファンデルワールス型の式、 $\sigma = \sigma_0(1 - T/T_{\text{crit}})^n$  を用いて相関式を作成した。ここに、 $\sigma$  は表面張力 [ $\text{mN m}^{-1}$ ]、 $T$  は温度 [K]、 $T_{\text{crit}}$  は臨界温度 [K] である。また、 $\sigma_0$  および  $n$  は実測値を用いて最小二乗法により決定されるパラメータである。対応状態原理から、Guggenheim (1945) によって指数  $n$  は 1.22 と導かれ、Brock-Bird (1955) によってその値は検証されている。Reid ら (1987) によると、ほとんどの非極性流体において、指数  $n$  は 1.2 から 1.3 の範囲であると報告されている。また、スケーリング則より、指数  $n$  は、 $n = 2\nu$  で与えられる。Widom (1974) によると、臨界指数  $\nu$  は 0.64 と報告されているが、Moldover (1985) によると、近年、臨界指数  $\nu$  は 0.63 が最もよく用いられていると報告されている。以下に、実測データを用いて作成した相関式を示す。

$$\sigma = 59.90(1 - T/427.01)^{1.237} \quad [\text{mN m}^{-1}] \quad \text{for R245fa} \quad (10.2.11)$$

$$\sigma = 53.30(1 - T/376.93)^{1.247} \quad [\text{mN m}^{-1}] \quad \text{for R1243zf} \quad (10.2.12)$$

$$\sigma = 56.57(1 - T/423.27)^{1.220} \quad [\text{mN m}^{-1}] \quad \text{for R1234ze(Z)} \quad (10.2.13)$$

$$\sigma = 61.95(1 - T/438.75)^{1.277} \quad [\text{mN m}^{-1}] \quad \text{for R1233zd(E)} \quad (10.2.14)$$

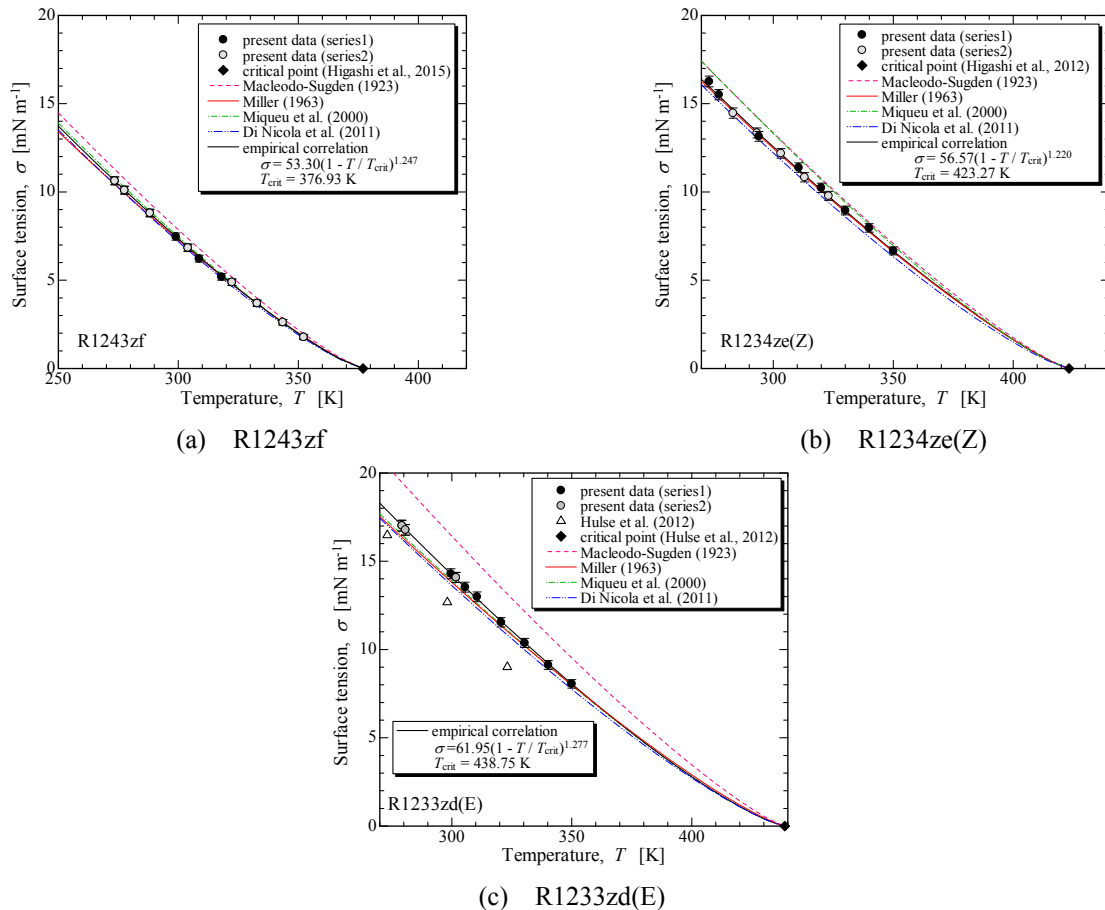


図 10.2.11 表面張力の温度依存性

図 10.2.11 にそれぞれ式(10.2.12), (10.2.13)および(10.2.14)からの計算値を太線で示す。これらの相関式は R1243zf, R1234ze(Z)および R1233zd(E)ともに、冷媒温度 270 K から 360 K の範囲において、本研究で得られた実測値を標準偏差±0.13 mN m<sup>-1</sup>以内で計算できる。また、その値は本実験の不確かさに比して十分小さい。

## 10.3 輸送的性質の測定と推算式の作成

### 10.3.1 R1234ze(Z)の熱伝導率の測定

熱伝導率は非定常細線法を用いて測定する。非定常細線法は試料流体中に鉛直に張った金属細線をステップ関数状に通電加熱し、このときの細線の発熱量とその温度応答から熱伝導率を算出する方法である。以下に、熱伝導率測定の理論、実験装置、および測定方法について説明する。

#### 10.3.1.1 非定常細線法の理論

熱伝導率は非定常細線法を用いて測定する。非定常細線法は試料流体中に鉛直に張った金属細線をステップ関数状に通電加熱し、このときの細線の発熱量とその温度応答から熱伝導率を算出する方法である。鉛直で無限長さの線熱源が無限に広がりをもつ流体中に置かれている理想的なモデルを考えると、加熱後の温度変化は次式で表される。

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln\left(\frac{4\kappa t}{r^2}\right) - \gamma + \frac{r^2}{2\kappa t} - \frac{\beta-1}{\beta} \cdot \frac{r^2}{2\kappa t} \left\{ \left( \ln\frac{4\kappa t}{r^2} \right) - \gamma \right\} + \dots \right] \quad (10.3.1)$$

ここで、 $\Delta T$ は線熱源の温度変化、 $q$ は単位長さあたりの発熱量、 $\lambda$ は流体の熱伝導率、 $\kappa$ は熱拡散率、 $t$

は時間,  $r$ は細線の半径,  $\gamma$ はオイラ一定数 ( $\gamma = 0.5772157\cdots$ ),  $\beta$ は流体と線熱源の単位体積当たりの熱容量比である. 一様加熱で, 物性値が温度上昇中に変化せず, 対流が発生しないと仮定すれば  $r^2/4\kappa$ は微小となり式(10.3.2)は

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \ln\left(\frac{4\kappa t}{r^2}\right) - \gamma \right\} \quad (10.3.2)$$

と表すことができる. また, 式(10.3.2)を  $\ln t$  で微分して, 整理すると,

$$\lambda = \frac{q/4\pi}{d\Delta T/d\ln t} \quad (10.3.3)$$

となる. 式(10.3.3)が熱伝導率を算出するために使用する非定常細線法の基礎式であり, 実験においては単位長さあたりの発熱量  $q$ と温度の時間変化  $dT/d\ln t$ を測定して熱伝導率を求める.

### 10.3.1.2 実験装置および方法

図 10.3.1 に本実験で製作する熱伝導率測定装置の概略図を示す. 試験流体は長短 2本の白金細線とともに圧力容器  $A_1$  内に封入されており, 高温高压の状態を達成するために, 圧力容器  $A_2$  においてヘリウムガスにより加圧する. 測定セルの内径は 22mm であり, 内部に直径  $15\mu\text{m}$ , 長さ 100mm および 50mm の白金細線が取り付けられる. それぞれの白金細線は白金製のフックに溶接され, ブリッジ回路に組込まれる. このブリッジ回路の非平衡電圧の時間変化を測定することにより, 熱伝導率を求める. 図 10.3.2 は熱伝導率測定に用いる白金細線を設置する圧力容器  $A$  の設計図面である.

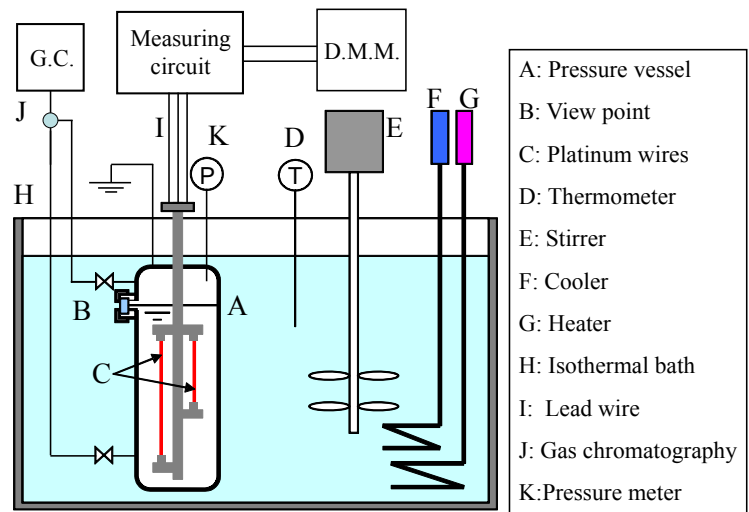


図 10.3.1 実験装置概略

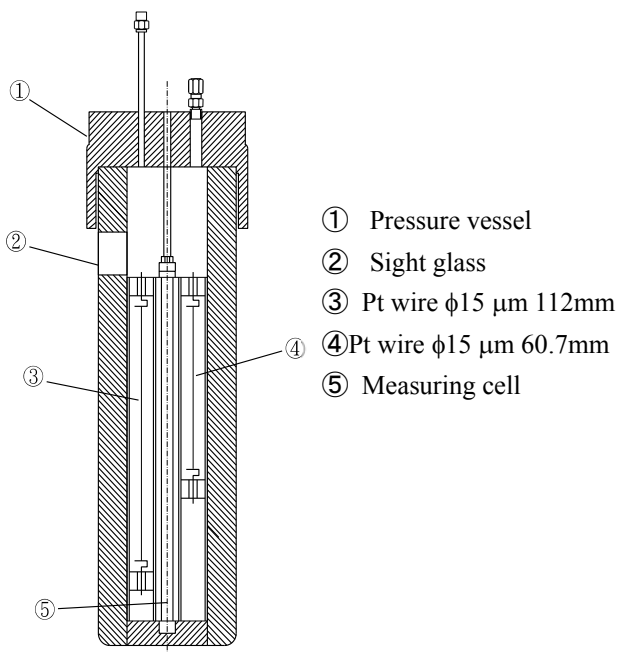


図 10.3.2 圧力容器

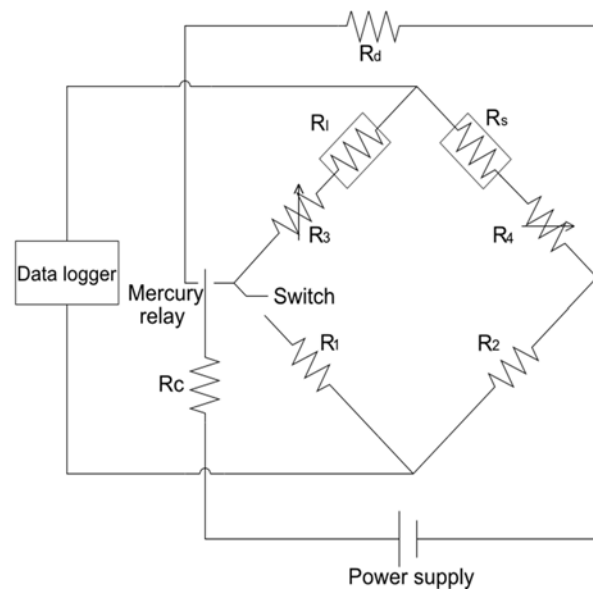


図 10.3.3 測定回路

図 10.3.3 は測定に使用するブリッジ回路である。測定セル内の 2 本の白金細線  $R_1$  および  $R_2$  は図に示すようにブリッジ回路に組み込まれている。 $R_1, R_2$  は  $100\ \Omega$  の固定抵抗であり、 $R_3, R_4$  は可変抵抗である。可変抵抗は白金細線と直列に接続されており、測定前のブリッジ回路全体の平衡を取るために使用する。印加電圧を安定させるため、測定前にダミー回路である  $100\ \Omega$  の固定抵抗  $R_0$  に電流を流しておき、測定開始時にブリッジ回路への切り替えを行う。切り替えにはチャタリングを防止するために水銀リレーを使用する。測定前には可変抵抗で出力電位差のゼロ点調整をしておき、測定開始後の白金細線の抵抗変化によって発生する非平衡電位差をデータロガーによって測定する。

### 10.3.1.3 測定結果

R1234ze(Z) の熱伝導率測定は、280–350 K における飽和液および過熱蒸気条件にて実施した。図 10.3.4 および図 10.3.5 に飽和液および過熱蒸気の測定結果をそれぞれ示す。図中プロットが測定値であり、実線は拡張状態対応原理モデル(Extended Corresponding State Model, ECS Model)に基づき検討した熱伝導率の予測値である。

流体の熱伝導率は、分子同士の衝突によるエネルギー輸送分  $\lambda^{\text{trans}}(T, \rho)$  および分子自身の運動によるエネルギー輸送分  $\lambda^{\text{int}}(T)$  の和として、以下のように表される。

$$\lambda(T, \rho) = \lambda^{\text{int}}(T) + \lambda^{\text{trans}}(T, \rho) \quad (10.3.4)$$

$\lambda^{\text{int}}(T)$  は以下のように表される。

$$\lambda^{\text{int}}(T) = \frac{f_{\text{int}} \eta^*}{M} \left( C_p^* - \frac{5}{2} R \right) \quad (10.3.5)$$

$$f_{\text{int}} = a_0 + a_1 T \quad (10.3.6)$$

ここに、 $C_p^*$  および  $R$  は理想気体の定圧比熱  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  および気体定数 ( $=8.314472 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ) であり、 $\eta^*$  はから得られる希薄気体の粘度である。

また、 $\lambda^{\text{trans}}(T, \rho)$  は、希薄気体(密度  $\rho \rightarrow 0$  の極限)の熱伝導率  $\lambda^*(T)$ 、臨界項  $\lambda^{\text{crit}}(T, \rho)$  および残余項  $\lambda^{\text{f}}(T, \rho)$  を用いて以下のように表される。

$$\lambda^{\text{trans}}(T, \rho) = \lambda^*(T) + \lambda^{\text{f}}(T, \rho) + \lambda^{\text{crit}}(T, \rho) \quad (10.3.7)$$

基準物質(ここでは、R134a を用いた)における値(下付き添え字 0)を用いると、残余項は以下のようになる。

$$\lambda^{\text{f}}(T, \rho) = \lambda^{\text{f}0}(T_0, \rho_0) F_\lambda(T, \rho) \quad (10.3.8)$$

$$F_\lambda(T, \rho) = f^{1/2} h^{-2/3} \left( \frac{M_0}{M} \right)^{1/2} \quad (10.3.9)$$

ここに、関数  $f$  および  $h$  の定義は、以下の通りである。

$$f = \frac{T_C}{T_{C,0}} \theta, \quad h = \frac{\rho_{C,0}}{\rho_C} \varphi \quad (10.3.10 \text{ a, b})$$

ここに、関数  $\theta$  および  $\phi$  は形状因子と呼ばれ、対象流体の残留項  $\Delta\eta$  を基準流体の残留項モデル  $\Delta\eta_0$  で対応させるためのものである。実験データのフィッティングにより定数  $\theta$  および  $\phi$  を求めた結果、以下の値が得られた。

$$\theta = 1.170, \phi = 0.899 \quad (10.3.11 \text{ a, b})$$

図より、本モデルにより、R1234ze(Z) の熱伝導率を精度よく予測できることが確認できる。今後、実験データ範囲の拡充により、より広範囲に適用可能な予測計算モデルを検討する予定である。

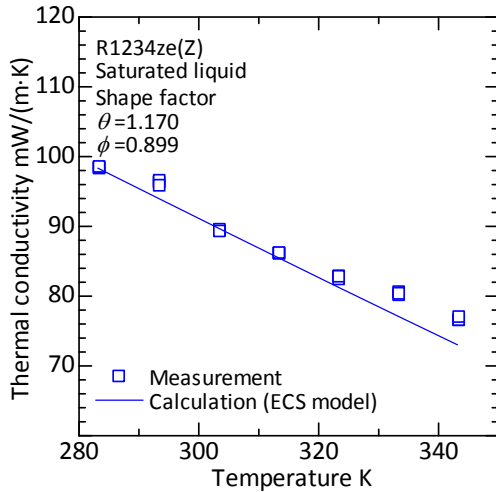


図 10.3.4 測定結果（飽和液）

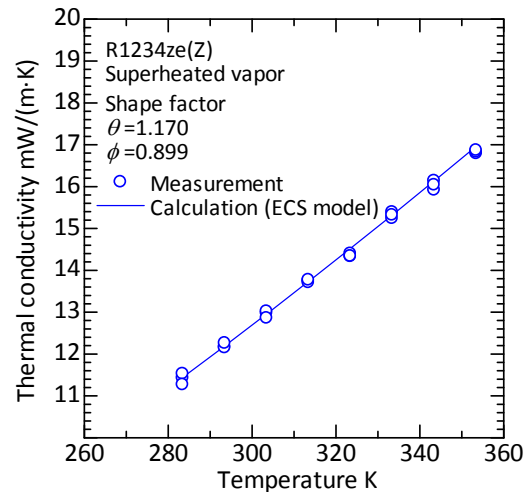


図 10.3.5 測定結果（過熱蒸気）

### 10.3.2 R1234ze(Z) の粘度の測定

粘度はタンデム型の細管法を用いて測定する。細管法は、細管内を層流状態で流れる媒体の圧力変化の測定値から粘度を求める方法であり、ハーゲン・ポアズユの理論式をベースとする最も確立した測定法である。なお、単一細管を用いる一般的な方法では管端部における損失を考慮する補正係数を与える必要があるが、タンデム型ではそれらの損失を消去した測定が可能となる。以下に、タンデム型細管式粘度測定の理論、実験装置、および測定方法について説明する。

#### 10.3.2.1 タンデム型細管式粘度測定の理論

図 10.3.6 に示すような細管内を層流状態で流れる流体の粘度  $\eta$  と圧力損失  $\Delta P$  の関係は次式で表される。

$$\eta = \frac{\pi a^4 \Delta P}{8Lq} \quad (10.3.12)$$

ここで、 $a$  は細管半径、 $\Delta P$  は細管出入口における圧力差、 $L$  は細管長さ、 $q$  は体積流量である。しかし実際には細管端面において流体が出入りする際に図 10.3.7 のような損失が生じるため、測定値は真の圧力差よりも大きくなる。このため、式(10.3.12)に損失分の運動エネルギーの補正および管端補正を施した次式が提案されている。

$$\eta = \frac{\pi a^4 \Delta P}{8(L+na)q} - \frac{m\rho q}{8\pi(L+na)} \quad (10.3.13)$$

ここで、 $n$  は管端補正係数、 $m$  は運動エネルギー補正係数、 $\rho$  は流体の密度である。なお、管端補正係数や運動エネルギー補正係数は装置定数として実験的に求める必要があり、その影響を小さくするためには細管の長さを十分長くする必要がある。

本研究では、2つの細管を図 10.3.7 に示すように直列に設置したタンデム型の細管式粘度測定法を考案した。この場合の圧力分布は図に示すようになり、測定される2つの圧力差はいずれも十分に発達した層流区間の圧力損失に加えて、出入口での圧力損失を含んでいる。これを重ね合わせると、2つの圧力差から発達した層流区間の圧力損失を次式で求めることができる。

$$\eta_{LS} = \frac{\pi a^4 (\Delta P_1 - \Delta P_2)}{8(L_1 - L_2)q} \quad (10.3.14)$$

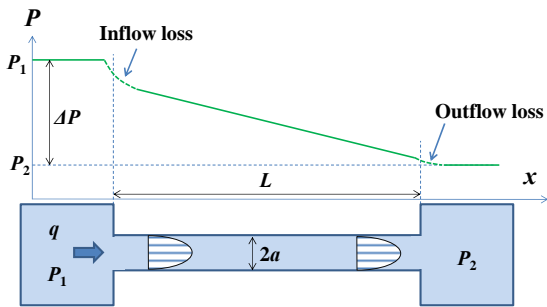


図 10.3.6 単一細管の場合の圧力変化の概念

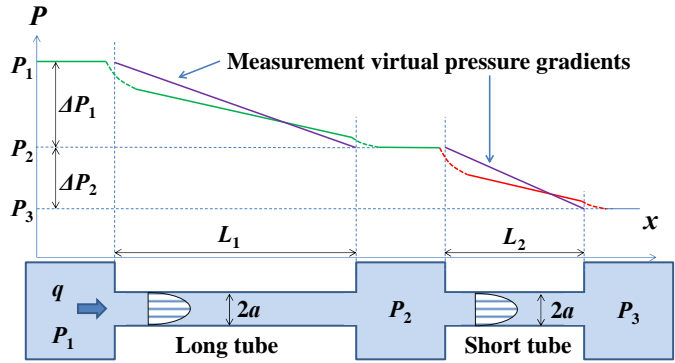


図 10.3.7 タンデム型細管の場合の圧力変化の概念

### 10.3.2.2 実験装置

図 10.3.8 に本実験で製作する粘度測定装置の概略図を示す。試験流体は圧力容器に封入されており、ポンプ I により長短2本の細管を直列に流れる。細管の内径は0.1mmで、長さは100mmおよび50mmである。それぞれの細管における圧力損失は差圧計により測定し、前述した方法で粘度を求める。なお、細管は石英ガラスで製作した。図 10.3.9 には粘度測定に用いる細管を設置する圧力容器を示している。

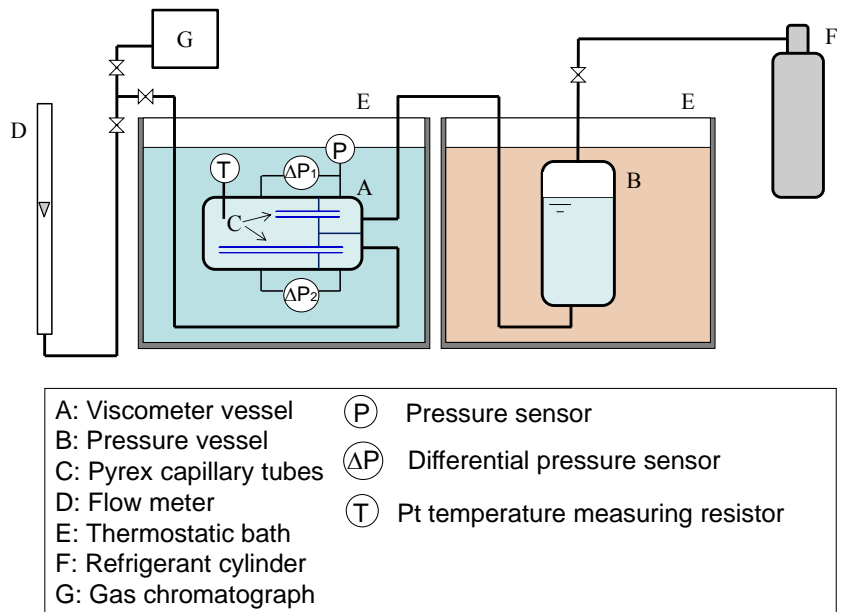


図 10.3.8 実験装置概略

### 10.3.2.3 実験結果

R1234ze(Z) の粘度測定は、280–350 K における圧縮液および過熱蒸気条件にて実施した。図 10.3.10 および図 10.3.11 に圧縮液および過熱蒸気の測定結果をそれぞれ示す。図中プロットが測定値であり、実線は ECS モデルに基づき検討した予測値である。ここで、粘度に関する ECS モデルについて述べる。対象流体の粘度  $\eta$  は、以下のような式で整理できる。

$$\begin{aligned} \eta(T, \rho) &= \eta^*(T) + \Delta\eta(T, \rho) \\ &= \eta^*(T) + \Delta\eta_0(T_0, \rho_0) F_\eta(T, \rho) \end{aligned} \quad (10.3.15)$$

ここに、 $\eta^*(T)$  は、希薄気体(密度  $\rho \rightarrow 0$  の極限)における値であり、以下の関係式により求める。

$$\eta^*(T) = \frac{5}{16} \sqrt{\frac{Mk_B T}{\pi N_A}} \frac{1}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)}(T^*)} \quad (10.3.16)$$

ここに、 $M$  はモル質量 kg/mol,  $k_B$  はボルツマン定数 J/K,  $N_A$  はアボガドロ数 1/mol,  $\sigma$  は剛体球直径 m である。  $\Omega^{(2,2)}$  は衝突積分であり、無次元温度  $T^*$  の関数として与えられている。また、式(10.3.15)の下付き添え字 0 は、基準物質における値を示しており、基準物質の温度  $T_0$  および密度  $\rho_0$  は、対象流体の温度  $T$  および  $\rho$  と以下のように対応している。

$$T_0 = \frac{T}{f}, \quad \rho_0 = \rho h \quad (10.3.17)$$

$$f = \frac{T_C}{T_{C,0}} \theta, \quad h = \frac{\rho_{C,0}}{\rho_C} \varphi \quad (10.3.18)$$

ここに、関数  $\theta$  および  $\varphi$  は形状因子と呼ばれ、対象流体の残留項  $\Delta\eta$  を基準流体の残留項モデル  $\Delta\eta_0$  で対応させるためのものである。また、式(10.3.15)中の関数  $F_\eta(T, \rho)$  は、関数  $f$  および  $h$  と以下の関係がある。

$$F_\eta = f^{1/2} h^{-2/3} \left( \frac{M}{M_0} \right)^{1/2} \quad (10.3.19)$$

実験データのフィッティングにより定数  $\theta$  および  $\varphi$  を求めた結果、以下の値が得られた。

$$\theta = 1.063, \quad \varphi = 0.942 \quad (10.3.20)$$

図より、計算値は測定値を精度よく再現していることが確認できる。今後、測定の範囲を拡張し、より広範囲に適用可能なモデルを構築予定である。

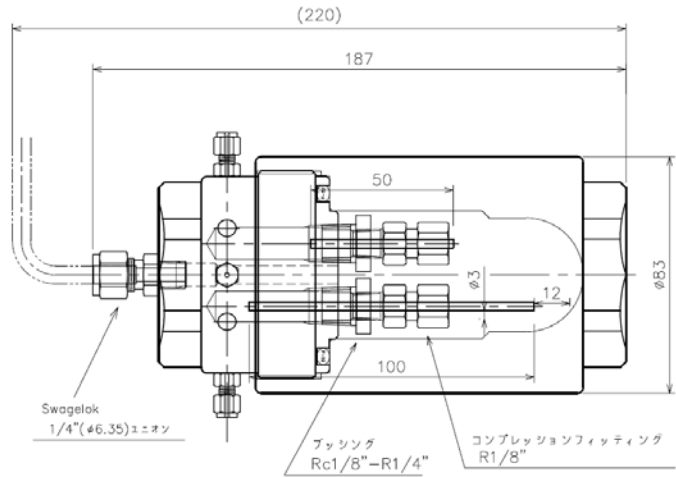


図 10.3.9 圧力容器概略

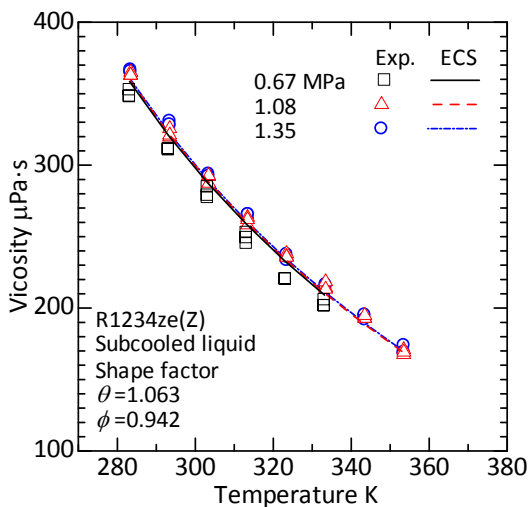


図 10.3.10 測定結果(圧縮液)

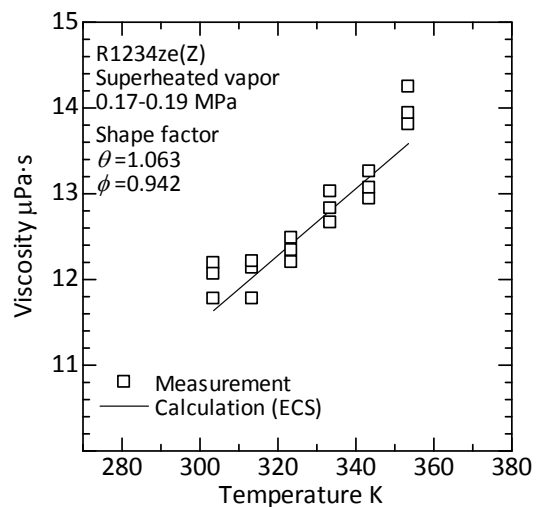


図 10.3.11 測定結果(過熱蒸気)

## 10.4 サイクル性能の評価試験

昨年度までは R1234ze(Z), R1234ze(E), R32/R1234ze(E) および CO<sub>2</sub>/R32/R1234ze(E) のサイクル性能試験を行った。R1234ze(Z) および R1234ze(E) 単体では体積能力不足のため、加熱能力を維持するためには冷媒の体積循環量を増加させる必要があり、COP が大幅に低下した。体積能力の向上のため、R1234ze(E) に R32 および CO<sub>2</sub> を混合した 2 成分混合冷媒 (R32/R1234ze(E)) および 3 成分混合冷媒 (CO<sub>2</sub>/R32/R1234ze(E)) の試験結果では、ともに GWP が約 300 となる組成において COP が既存冷媒である R410A とほぼ同等、またはそれ以上であることが確認された。

今年度は新たに R1234ze(E) の構造異性体である R1234yf と R32 からなる 2 成分非共沸混合冷媒のサイクル性能試験を行い、得られた結果と既存冷媒 R410A および R1234ze(E) と R32 からなる 2 成分非共沸混合冷媒の結果との比較を行った。

### 10.4.1 試験装置および方法

図 10.4.1 にサイクル性能の試験装置の系統図を示す。本試験装置は熱源流体に水を用いた蒸気圧縮式ヒートポンプサイクルである。冷媒ループの主要構成機器はロータリー型圧縮機、凝縮器、電子膨張弁、および蒸発器である。各構成機器の前後には混合平均温度および圧力を測定するための混合室を設けており、電子膨張弁の手前の液単相域において冷媒流量が測定される。熱源水ループは恒温槽およびポンプから構成されている。各熱交換器の前後には熱源水温度を測定するための混合室を設けている。また、圧縮機およびインバータへの投入電力を測定するためにデジタルパワーメータを設置している。なお、熱交換器は対向流型二重管式となっており、その仕様を表 10.4.1 に示す。

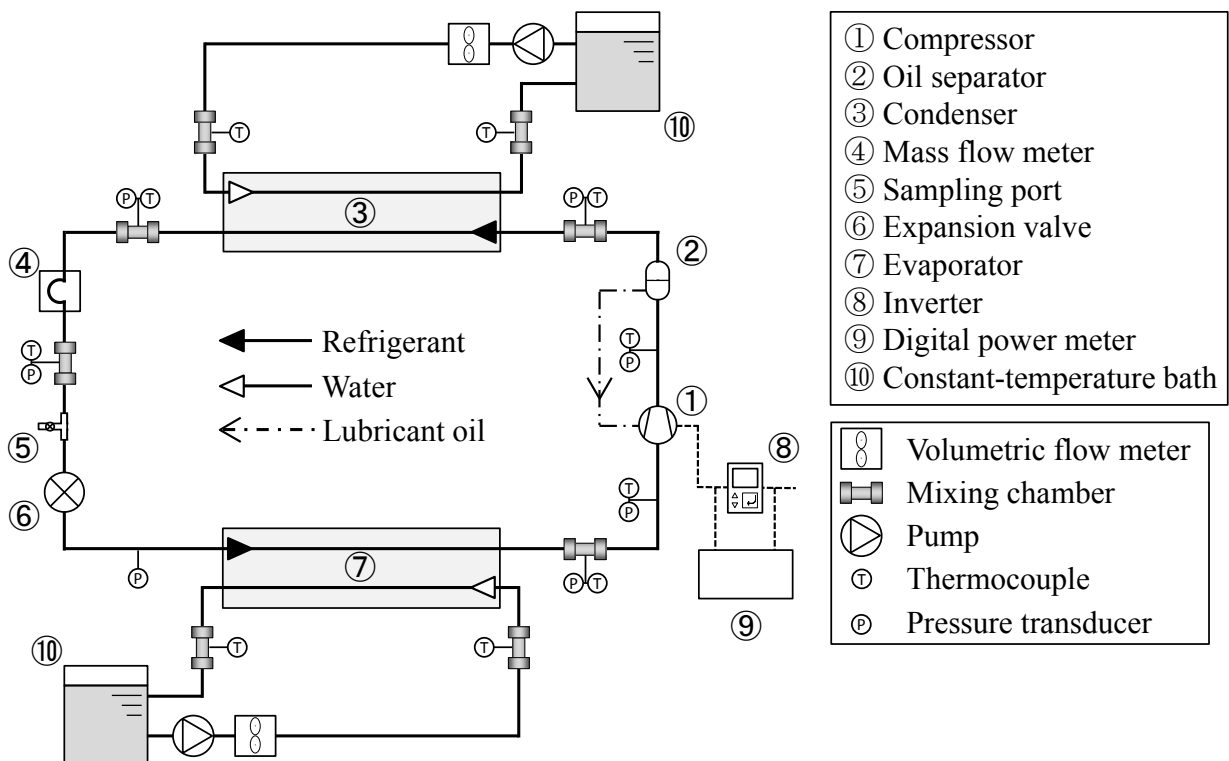


図 10.4.1 ヒートポンプサイクル試験装置



表 10.4.1 熱交換器仕様

	外径 [mm]	内径 [mm]	長さ [mm]	タイプ
外管	15.88	13.88	7200	平滑管
内管	9.53	7.53	7200	溝付管

表 10.4.2 に試験冷媒を示す。試験冷媒は R32/R1234yf (42/58 mass% および 28/72 mass%) である。また、比較対象として R32/R1234ze (E) (42/58mass% および 28/72 mass%)，並びに R410A も併記する。R32/R1234yf および R32/R1234ze (E) 混合冷媒の組成は GWP が 300 および 200 以下となるように設定した。ほぼ同じ GWP 値を有する R32/R1234yf および R32/R1234ze (E) の 20℃における物性値を比較すると，R32/R1234yf の体積能力は約 20%高い一方で，R32/R1234yf の露点と沸点の温度差（温度すべり）は 4 K 程度小さい。

表 10.4.3 に暖房および冷房条件を示す。それぞれ，表中の熱源水温度変化および過熱度を指定した。

表 10.4.2 試験冷媒

冷媒	GWP [-]	標準沸点 [°C]	体積能力* [kJ・m <sup>-3</sup> ]	露点沸点温度差* [K]	
R410A	2088	-51.4	11043	0.1	
R32/R1234yf	42/58 mass%	285	-43.4	8233	5.4
	28/72 mass%	190	-39.3	7184	7.1
R32/R1234ze (E)	42/58 mass%	285	-35.6	7040	9.6
	28/72 mass%	190	-30.4	5969	11.7

\*平均温度 20 °C

表 10.4.3 実験条件

	暖房条件	冷房条件
蒸発器熱源水温度 [°C]	15→9	20→10
凝縮器熱源水温度 [°C]	20→45	30→45
過熱度 [K]	> 3	> 3
能力 [kW]	1.6-2.6	1.4-2.4

## 10.4.2 試験結果

図 10.4.2 に暖房条件におけるサイクル成績係数と暖房能力の関係を示し，図 10.4.3 に冷房条件におけるサイクル成績係数と冷房能力の関係を示す。また，暖房条件および冷房条件における凝縮器，蒸発器，膨張弁，圧縮機，接続配管部の各要素における不可逆損失および圧力損失による不可逆損失を解析した結果を，それぞれ図 10.4.4 および図 10.4.5 に示す。

図 10.4.2 に示す暖房条件の結果では，いずれの冷媒においても，COP は能力の増加に伴って減少する。暖房能力 2.2 kW では，R32/R1234ze (E) (42/58 mass%) の COP が最も大きく，次いで R32/R1234yf (42/58 mass%)，R410A，R32/R1234yf (28/72 mass%)，R32/R1234ze (E) (28/72 mass%) となっており，GWP が約 300 である混合冷媒は既存冷媒である R410A よりも高いサイクル

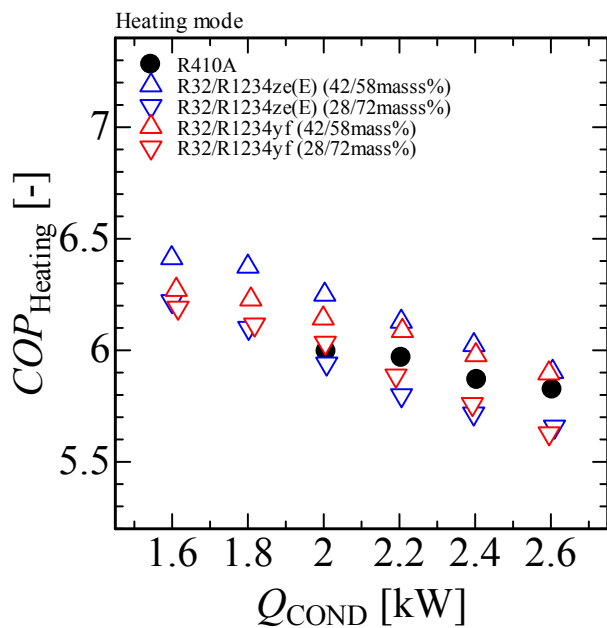


図 10.4.2 暖房条件における成績係数

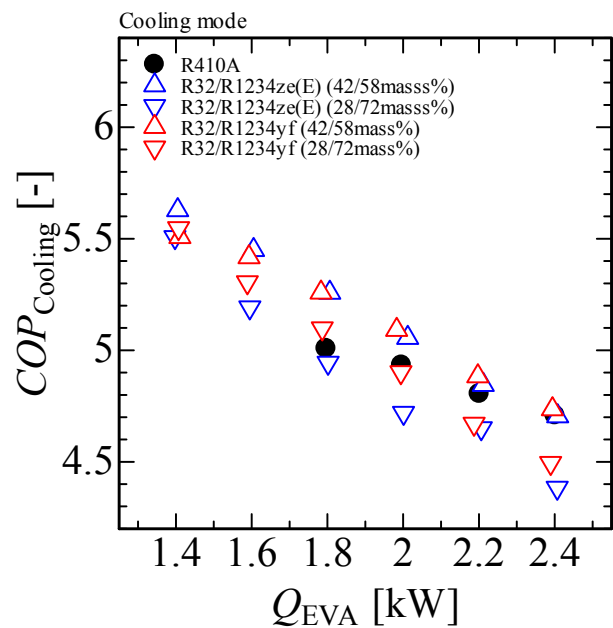


図 10.4.3 冷房条件における成績係数

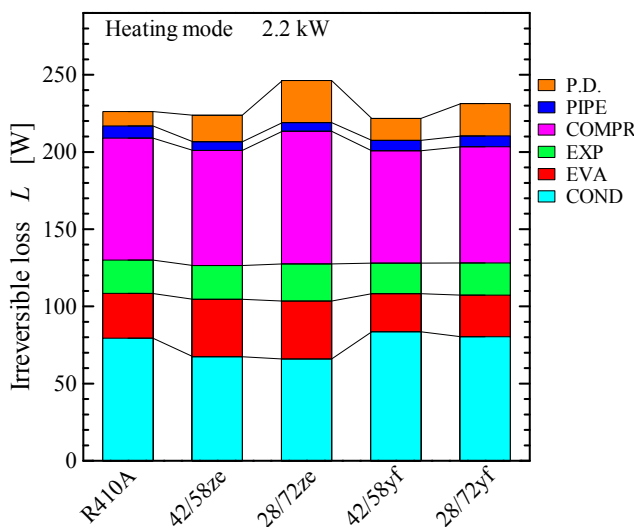


図 10.4.4 暖房条件における不可逆損失の内訳

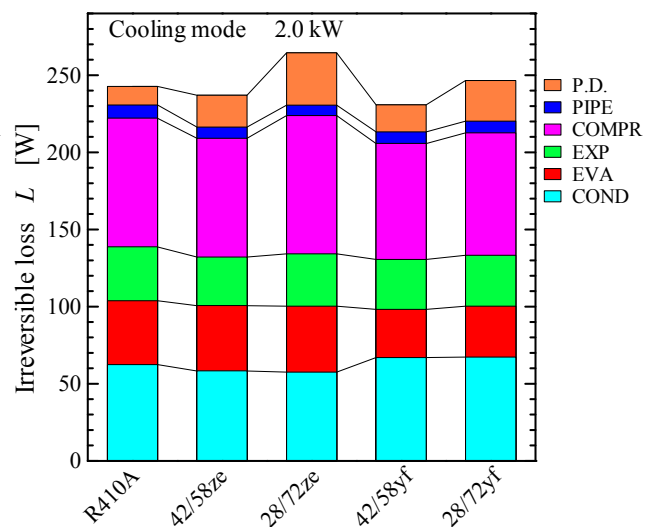


図 10.4.5 冷房条件における不可逆損失の内訳

性能を示す。また、R32/R1234yf(42/58 mass%)は同GWP値である。R32/R1234ze(E)(42/58 mass%)に比してCOPが低い傾向にある。この要因としては、温度すべりが挙げられる。図 10.4.6 に熱交換器内の温度分布を示す。R32/R1234yfの温度すべりはR32/R1234ze(E)の温度すべりに比して小さいため、熱源水出入口温度差が6 Kと比較的小さい蒸発器内では、熱源水と冷媒との平均温度差が小さくなり、R32/R1234ze(E)に比して不可逆損失を低減できる。一方、熱源水出入口温度差が25 Kと大きい凝縮器内では、熱源水と冷媒との平均温度差が大きくなるため、R32/R1234ze(E)に比して不可逆損失が増大する。また、凝縮器内不可逆損失は蒸発器よりも大きいため、R32/R1234yfを用いる場合、温度すべりによる不可逆損失低減の効果はR32/R1234ze(E)を用いる場合よりも小さい。その他の要因としては圧縮機での損失が挙げられる。図 10.4.4 に示すように、GWPが約200である混合冷媒の体積能力は他の冷媒よりも小さく、圧縮機回転数を上げて体積流量を増加させる必要があるため、圧縮機内不可逆損失および圧力損失が大きくなる。

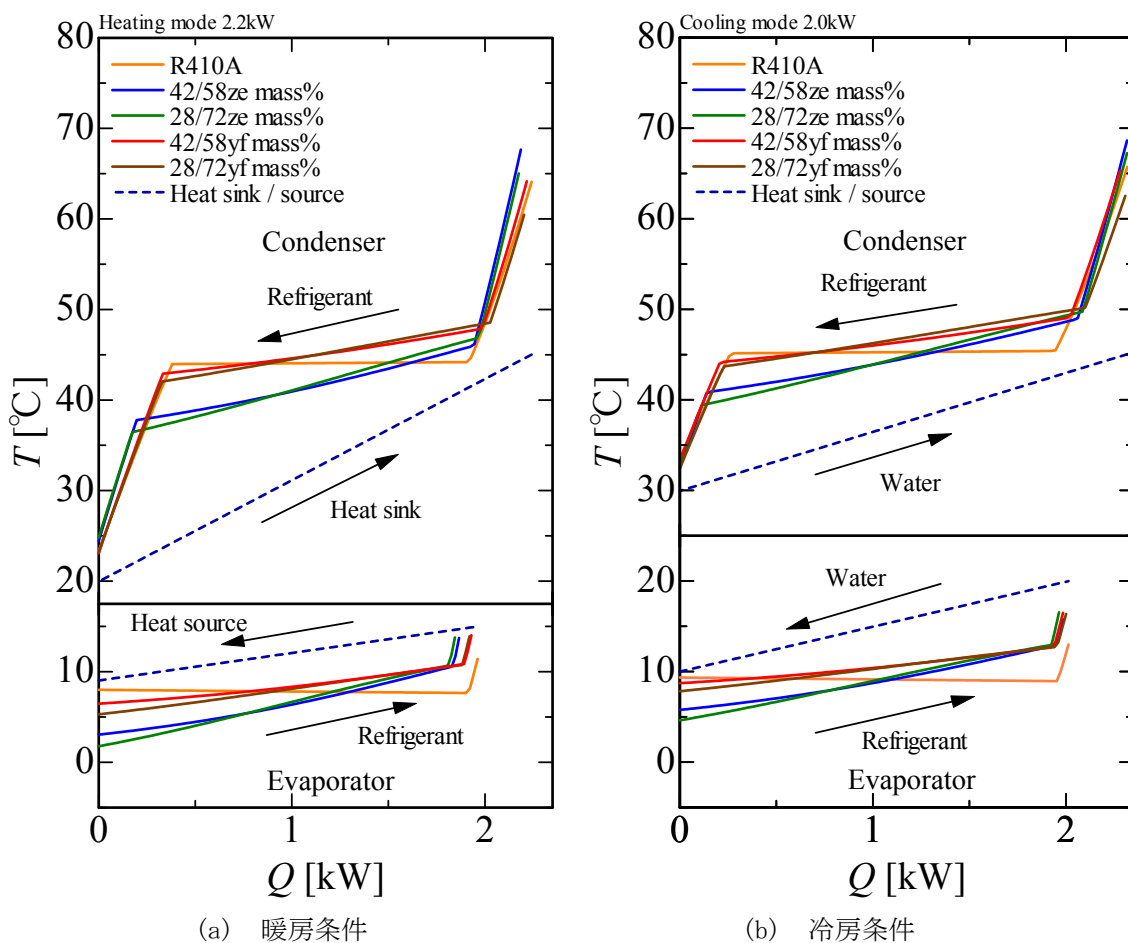


図 10.4.6 熱交換器内温度分布

図 10.4.5 の冷房条件では、冷房能力 2.0kW で R32/R1234yf (42/58 mass%) および R32/R1234ze (E) (42/58 mass%) が同程度であり、以下、R410A, R32/R1234yf (28/72 mass%), R32/R1234ze (E) (28/72 mass%) となっている。冷房条件では凝縮器での熱源水出入口の温度差が 15 K と暖房条件ほど大きくないため、R32/R1234ze (E) を用いる場合、温度すべりによる不可逆損失低減の効果が暖房条件ほどあらわれない。そのため、熱交換器全体での不可逆損失は、同じ GWP 値を有する R32/R1234ze (E) と R32/R1234yf とでは同程度となる。

以上より、R32/R1234ze (E) と R32/R1234yf の COP は、GWP 値が同程度となる組成であれば、ほぼ同じとなることが分かった。また、GWP が約 300 となる組成では、これらの混合冷媒の COP は R410A の COP を超えることが示された。

## 10.5 まとめ

今年度は、R1243zf の熱物性測定、R1243zf の状態方程式の作成、HF0 系冷媒の表面張力の測定、R1234ze (Z) の熱伝導率および粘度の測定、および GWP 値が 300 弱および 200 弱の R32/R1234ze (E) 系 2 成分非共沸混合冷媒のサイクル性能試験を行い、以下の結果を得た。

(1) 臨界点測定用実験装置および等容法実験装置を用いて、R1243zf の飽和密度 (気液共存曲線)、臨界点 (臨界温度、臨界密度)、圧力と密度と温度の関係 ( $P$ - $\rho$ - $T$  性質) および飽和蒸気圧を測定した。また、飽和蒸気圧の計算式を作成した。

- (2) 本研究による R1243zf の熱力学的性質の測定データと既に論文等で公表されている R1243zf の熱物性値を用いて、ヘルムホルツ型状態方程式を開発するとともに、REFPROP 用物質定義ファイル (FLD ファイル) も合わせて作成した。
- (3) 示差毛細管法を用いて、R1243zf, R1234ze (Z) および R1233zd (E) の表面張力を測定し、それらの表面張力の推算式を作成した。
- (4) 2 線式非定常細線法を用いて、R1234ze (Z) の飽和液および過熱蒸気の熱伝導率を測定し、その結果が拡張状態対応原理モデルに基づく熱伝導率の推算法による予測値と良く一致することを確認した。
- (5) タンデム型細線式粘度測定法を用いて、R1234ze (Z) の飽和液および過熱蒸気の粘度を測定し、その結果が拡張状態対応原理モデルに基づく粘度の推算法による予測値と良く一致することを確認した。
- (6) GWP 値が 300 弱および 200 弱の R32/R1234yf 系 2 成分非共沸混合冷媒のサイクル性能試験を行い、得られた結果と既存冷媒 R410A および R1234ze (E) と R32 からなる 2 成分非共沸混合冷媒の結果との比較を行った。その結果、R32/R1234ze (E) 系 2 成分非共沸混合冷媒と R32/R1234yf 系 2 成分非共沸混合冷媒の COP は、GWP 値が同程度となる組成であれば、ほぼ同じとなることが分かった。また、GWP が 300 弱の場合、それらの混合冷媒の COP は R410A の COP よりも若干高いことを明らかにした。

## おわりに

本レポートは、微燃性冷媒のリスク評価研究会の平成 26 年度の活動をまとめたものである。本研究会の実施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（2015 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	
			講師 今村 友彦	
	独立行政法人 産業技術総合研究所	環境化学技術研究部門	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 健史		
		(トヨタ自動車株式会社)	大木 厚	
	財団法人 日本自動車研究所	研究員 鈴木 徹也		
公益社団法人 日本冷凍空調学会	保安委員会(東洋製作所)	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	
	独立行政法人 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	
	国立大学法人 東京大学	大学院新領域創成科学研究科	特任研究員 岡本 洋明	

## 執筆者一覧

---

1. はじめに	飛原英治(東京大学)
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(日立アプライアンス株), 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(日立アプライアンス株), 藤利行(株富士通ゼネラル), 村上健一(三菱重工業株) 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(日立アプライアンス株), 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リスクアセスメントの  
進捗 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), 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(日立アプライアンス株), 岸谷哲志(日立アプライアンス株), 佐藤英治(日立アプライアンス株), 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), 松岡慎也(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. チラーリスクアセスメントの進捗 上田憲治(三菱重工業株)

執筆協力者:相山真之(日立アプライアンス株), 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)

---

10. 将来冷媒候補の熱物性とサイクル特性 小山繁(九州大学), 近藤智恵子(九州大学), 東之弘(いわき明星大学), 赤坂亮(九州産業大学), 宮良明男(佐賀大学), 仮屋圭史(佐賀大学)

---