# 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

## 平成 26 年 4 月

## 公益社団法人 日本冷凍空調学会

## 免責事項

本プログレス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 グレス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.

1	はじめに 飛原英治	1	~	4
2	微燃性冷媒の法的課題 2.1 高圧ガス保安法の解説と微燃性冷媒のもつ法的課題 一岡順,辻健次	5	~	9
	2.2 海外の法・規格・規制の現状 ~冷媒に関する世界動向~ 藤本悟	10	~	15
3	微燃性冷媒の安全性研究の概要・東京大学の進捗 飛原英治,党超鋲,岡本洋明,伊藤誠,東朋寛	16	~	32
4	微燃性冷媒の安全性研究の概要・九州大学の進捗 小山繁,東之弘,宮良明男,赤坂亮	33	~	43
5	微燃性冷媒の安全性研究の概要・諏訪東京理科大学の進捗 今村友彦,須川修身	44	~	53
6	微燃性冷媒の安全性研究の概要・産総研環境化学技術研究部門の進捗 滝澤賢二,田村正則	54	~	67
7	微燃性冷媒の安全性研究の概要・産業技術総合研究所安全科学部門の進捗 佐分利禎,和田有司	68	~	77
8	日本冷凍空調工業会の取り組み 8.1 ミニスプリットリスクアセスメントSWGの進捗 高市健二,平良繁治,渡部岳志	78	~	89
	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 矢嶋龍三郎	90	~	100
	8.3 チラーリスクアセスメントSWGの進捗 上田憲治	101	~	112
9	カーエアコン用新冷媒(R1234yf)国内導入における規制緩和への取組み 一般社団法人 日本自動車工業会 サービス部会	113	~	121
10	おわりに			

目

次

飛原英治 122

## 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 への転換が見えてきたが,ルームエアコンやパッケージエアコン用冷媒の低 GWP 化の研究は,端緒 についたばかりである.

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 (European Parliament, 2006) 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 1 日からは、新型車に対する GWP が 150 を超える冷媒の使用禁止は実施されている.

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(European Parliament, 2006).現在の規制は、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ている.

2012年11月に欧州委員会は現行規制を強化する提案を行っている(European Parliament, 2012).新しい提案は、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CO2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案が提案されている.2013年12月に欧州委員会,理事会、議会の間で、定置用冷凍空調機器に対するF-gas規制が合意された.合意案は欧州委員会提案よりも現実的なものになっている.

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, 2013)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、図1.1に欧州合意案と北米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.

欧州合意案では、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1日以降上市禁止となっており、GWP750未満の冷媒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。2017年1月1日以降は冷媒を工場でプリチャージするには、冷媒の割り当てを受けていなければならない。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 1.2 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 1.3 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」が 2013 年 6 月 5 日国会で成立した.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.改正フロン法では、(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.

事項	北米3か国提案	欧州委員会・理事会・議会合意案
提案時期	2013年10月第25回締約国会合	2013年12月
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	2008~2010年の平均 先進国:HFC+HCFCの85% 途上国:HCFCの90%	2009~2012 年の平均
HFC 類の Phase	先進国:2033年に基準値の15%	2030 年に 其進値の 21%
down 最終值	途上国:2043年に基準値の15%	2050 中に本中心の2170
その他		<ul> <li>(1) 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 1 日以降上市禁止</li> <li>(2) 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</li> <li>(3) 割当て管理下にない 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</li> </ul>

表 1.1 HFC 類の規制概要







## 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.表1.2に燃焼性のある冷媒の特性を示す.LFL、ULF、BV、MIEはそれぞれ燃焼下限界濃度、燃焼上限界濃度、燃焼速度、最小着火エネルギーである.燃焼性の強いプロパンに比べて、燃焼速度が小さく、最小着火エネルギーは大きいことがわかる.

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 1.4 のように、次の条件をすべて満たさなければ ならない.

(1) 冷媒濃度が燃焼限界内にある.

(2)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.

(3)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工業会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、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.日本冷凍空調工業会や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2013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.

Defricement	CWD	LFL	UFL	BV	MIE
Kenngerant	GwP	[vol%]	[vol%]	[cm/s]	[mJ]
R290 (Propane)	< 3	2.1	9.5	38.7	0.246
R717 (Ammonia)	< 1	15.5	27	7.2	380- 680
R32	675	13.3	29.3	6.7	15
R1234yf	4	6.2	12.3	1.5	200

表 1.2 冷媒の燃焼性特性(Takizawa, et al., 2012, 日本フルオロカーボン協会, 2012)



## 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, Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases, 7 November, 2012.

Council of the European Union, Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases, 6 January 2014

Takizawa, K., *et al.*, "Flammability properties of 2L refrigerants", The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012, (2012) .

US Environmental Protection Agency, Summary: North American 2013 HFC Submission to the Montreal Protocol, EPA, US, 2013.

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).

日本フルオロカーボン協会, "特定フロン (CFC/HCFC) およびフルオロカーボン類の環境・安全データー覧表", http://www.jfma.org/atabase/table.html, (2012).

## 2. 微燃性冷媒の法的課題

## 2.1 高圧ガス保安法の解説と微燃性冷媒のもつ法的課題

## 2.1.1 まえがき

現行の冷凍保安規則では、不活性ガス、可燃性ガス、毒性ガス及び不活性のものを除くフルオロカーボンの四つの区 分となり、前三者は掲名されることで定義され、運用を求められている.規制体系の概要を、付図2.1.2 に例示する.

将来的には低炭素社会に向けて低GWP(Global Warming Potential)冷媒ガスの使用を求められる可能性が高く, 微燃性 ガス((ISO/FDIS 817 の A2L)の安全性を担保したうえで, 諸外国と協調した対応ができるような方策も一考かと思われる が, 微燃性ガスの取り扱いを A1(不活性)並みにして使用できる内容と, 出来ない内容を明確にして運用を誤らない ようにするため, 目下行政当局と協議中である.

#### 2.1.2 高圧ガス保安法の概要

我が国には、圧力に対する安全性の確保または危険性を予防する観点から種々の法規制があり、用途に応じて運用を 行っている.法律は言うまでもなく強制であり、運用を誤った場合は行政制裁(罰則)を伴う.規格は法律に引用され てはじめて拘束性を伴うが、基本的には任意(参考)である.ややもすると法律と規格の運用を混同しがちだが、その ようなことが無いように注意して運用したいものである.

我が国の圧力に係る法規制(いわゆる機械安全)で代表的な法律に①高圧ガス保安法,②労働安全衛生法,③ガス事 業法,④電気事業法などが上げられる.これらを総称して保安四法と呼ばれている.日常の快適な生活・環境を維持す るために使用するパッケージエアコン,チリングユニット,ターボ冷凍機など(総称して冷凍設備と呼ぶ.)の製造, 運転,保守,整備など,広く法規制を行っているのは高圧ガス保安法である.以下に高圧ガス保安法の概要を述べる.

(a) 高圧ガス保安法の体系 高圧ガスに関する保安に関しては、主に法律、政令、省令及び告示によって定められている. 基本は法律にあり、技術基準、申請手続き、検査などが省令にて細かく定められている.政令は、法の適用除外、 製造・貯蔵の許可、届出の必要な値、販売の届出の不要な高圧ガス等が定められている、省令は、業種や規制対象物件 等に応じて幾つかに別れているが、冷凍設備に係る省令は冷凍保安規則で平成13年に性能規定化されている.

- 法律: 高圧ガス保安法
- 政令: 高圧ガス保安法施行令
- 省令: ①冷凍保安規則(冷凍則)… 冷凍設備の製造・販売などを規制
   ②一般高圧ガス保安規則(一般則)… 高圧ガス設備の製造・販売などを規制
   ③容器保安規則(容器則)… 高圧ガスをいれたボンベを規制
- 告示: ①高圧ガス保安法施行令関係告示(関係告示と呼ぶ) ②製造施設の位置、構造及び設備並びに製造の方法等に関する技術基準の細目を 定める告示(製造細目告示と呼ぶ)など

(b) 関係例示基準および運用解釈 他に法律,政令,省令及び告示の解釈・運用や個別事項についての内規が定められている.この内規に上記の省令の関係例示基準があり,冷凍設備に係る基準は「冷凍保安規則関係例示基準」と呼称されている.同基準は、性能規定化になっている省令の技術的要件を出来る限り具体的に例示され仕様規定となっている.以下に例を記す.

例 ①火気に対して安全な措置②冷媒ガスが滞留しないような構造

③耐圧試験、気密試験
 ④許容圧力以下にもどすことができる安全装置
 ⑤ガス漏えい検知警報設備とその設置場所
 ⑥冷媒設備に用いる材料
 ⑦設計圧力
 ⑧冷媒設備に係る容器に対する基準の適用
 ⑨溶接基準
 ⑩溶接部の機械試験
 ⑪溶接部の非破壊試験など

(c) 製造・販売に係る運用 冷凍設備の製造・販売(輸出品も含む.)に対して,法律(政令,省令,告示等)に基づき運用するよう法規制が行われている.運用を怠った場合は,行政制裁を伴うので互いに注意が必要である.

#### 2.1.3 微燃性冷媒の使用に向けた日々の課題(例)

ルームエアコン,パッケージエアコン,ターボ冷凍機など(以下、冷凍装置と呼ぶ)の使用に当たり、日々の行動において付きまとい、解釈に難があるのは、「運転」「充てん」「回収」の基本的な三要素である.また、個々の作業において適用する法令及びその対応(届出など)を施工業者、製造者(使用者)など、携わる関係者全てに理解とその知識で対応を求められている点にある.

(a) 運転と適用法令 冷凍装置に適用される法令は、冷凍保安規則だが、あくまで『冷凍のためガスを圧縮し、また は液化して高圧ガスの製造する行為のみ(いわゆる運転時をいう)』で、その他の行為は、一般高圧ガス保安規則など、 他の法令を適用される.

(b) (充てんまたは回収と適用法令) 冷凍装置の冷媒ガスが抜ける事象に至った場合,冷媒ガスの充てん(必要により回収)を行う行為は,高圧ガスを製造する行為に当たり,関係法令は一般高圧ガス保安規則で判断され,設置場所毎に届出が必要である.回収装置で行う不活性のフルオロカーボンの充てんまたは回収の行為は適用除外\*<sup>1</sup>となっている.

\*1高圧ガス保安法施行令第2条第3項第6号並びに高圧ガス保安法施行令関係告示第2条をいう.

(c) 販売と適用法令 冷凍装置を設置に伴って充てん,修理・サービスに伴って充てんするなどの行為は,高圧ガス を製造する行為以外に販売行為(有償,無償を問わない)にも当たり一般高圧ガス保安規則の高圧ガス販売事業届(ま たは販売に係る高圧ガスの種類変更届書含む)が必要である.ただし,内容積が小さい容器(略称;ボンベと呼ぶ)(内 容積1L以下)\*<sup>2</sup>を使用して行う行為は,高圧ガス保安法から適用除外されているため,所要の高圧ガスの製造届並びに 販売届も免除されている.また,第一種冷凍装置を販売する場合は,冷凍保安規則の高圧ガス販売事業届も,別途必要 となる.

\*2高圧ガス保安法施行令第2条第3項第8号並びに高圧ガス保安法施行令関係告示第4条をいう.

#### 2.1.4 R1234yf、R1234ze(E)、R32 などの法的扱いについて

(a) 冷凍保安規則での扱い 冷凍保安規則第二条では、「可燃性ガス」、「毒性ガス」、「不活性ガス」が定義され、 それぞれに冷媒名が掲名されているが、定義する判断基準が明確になっていない.勿論「微燃性」の定義はない.現在、 R1234yf、R1234ze(E)、R32 は、不活性ガスにも可燃性ガスにも掲名されていない.この場合、種々の規制の緩和策も R1234yf、R1234ze(E)、R32 には適用されない.

(b) 一般高圧ガス保安規則での扱い 一般高圧ガス保安規則第二条でも「可燃性ガス」,「毒性ガス」,「不活性ガス」が定義され、それぞれにガス名が掲名されている.冷凍保安規則と異なるところは「不活性ガス」にフルオロカー

ボン(可燃性のものを除く)という記載があり、「可燃性ガス」には掲名されたもの以外にその他のガスで次のイまた はロのものという記載がある.

#### イ:爆発限界の下限が10%以下のもの

ロ:爆発限界の上限と下限の差が20%以上のもの

これを図示し, R1234yf, R1234ze(E), R32, R717 が該当するところを示したのが図 2.1.1 である. 図の網掛けしている 部分が「可燃性」で, 網掛けしていない部分が「可燃性ではない」ということになる.



図 2.1.1 一般高圧ガス保安規則での測定結果 (日本フルオロカーボン協会, 2012)

(c) ASHRAE (米国暖房冷凍空調学会)の規格 ASHRAE では 2010 年に『ASHRAE 規格 34』で R 1234yf, R1234ze(E), R32, R717 を「2L」と定義したが扱いが明確になっていない.

(d) R1234yf, R1234ze(E), R32の回収について 高圧ガス保安法施行令関係告示では、法の適用除外となるのはフル オロカーボン回収装置内のフルオロカーボン(不活性のものに限る)とあるので, R 32 はそれに該当する. しかし R 1234yf, R 1234ze(E)は、回収装置内において一般高圧ガス保安規則を適用される.

#### 2.1.5 微燃性冷媒に係る高圧ガス保安法の課題

(a) 掲名主義の改訂 冷凍保安規則第二条では、「可燃性ガス」、「毒性ガス」、「不活性ガス」が定義され、それ ぞれに冷媒名が掲名されているが判断基準が示されていない. 『ASHRAE 規格 34』(ASHRAE 34 : 2013)で「A2」(微燃 性)に分類されている R413A が不活性ガスに掲名されているのは疑問である.

現在,地球温暖化防止の観点から新しい冷媒ガス(特に微燃性ガス)並びに同混合ガスの扱いが判断できないため, 経済産業省商務流通保安グループ高圧ガス保安室に都度,相談し,対応しているところである.冷凍保安規則も一般高 圧ガス保安規則と整合性がとれるように,「可燃性」の数値概念を規定する必要がある.

(b) 不活性ガスの扱いを受けないガスの回収行為と法制化 可燃領域にあるガスであっても一律に規制するのでは なく、不活性ガスに近い可燃性ガス(微燃性ガスのうち A2L)に限定し門戸の緩和を検討する必要がある.また、その 回収装置の技術基準の確立に向けて検討する必要がある.

試案) ①内部の継手は、原則として溶接又はろう付けに限る. 但し、溶接又はろう付けによる

ことが適当でない場合は、保安上必要な強度を有するフランジ接合継手による接合をもって代えることができる. (ねじ接合継手は不可) ②外部接続は、確実に接合が可能なカップリングとする.

(c) 指定設備の要件の緩和 指定設備は、高圧ガス保安法施行令関係告示\*<sup>3</sup>で不活性のフルオロカーボン に限定されているが可燃性ガスでないフルオロカーボンへの適用範囲の検討も加えたいものである..

- 現状) フルオロカーボン(不活性のものに限る)
- 試案) 可燃性ガスでないフルオロカーボンに限る.

\*3平成9年3月24日通商産業省告示第139号第6条第2項第2号

#### 2.1.6 諸外国から見た微燃性冷媒に係る気付き課題

保安行政を担当される視点で見た場合、次のような考えを専門的な角度で明確にすることを望まれる.

- ① R32 を不活性ガスと掲名する場合は、諸外国から異質で見られる恐れがないような配慮 が求められる.
- ② A2 から A2L に変化することによって何が緩和または変化するのか明確にしておくべき である.
- ③ 法制化に当たり、諸外国の動きの説明が必要である.



付図 2.1.2 冷凍保安規則の規制体系の概要 (赤塚, 2010)

## 参考文献

赤塚、2010, 冷凍空調設備で発生した事故とその教訓,高圧ガス,第47巻11号, pp.29-45 日本フルオロカーボン協会,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/database/table.html

## 2.2 海外の法・規格・規制の現状 ~冷媒に関する世界動向~

ここでは冷媒に関する世界の規格規制動向を記載する.ただし決して全体像ではなく,一部の情報である ことを了解いただきたい.

#### 2.2.1 日本の動向

日本政府は従来のフロン回収・破壊法を改正し、改正フロン法を2013年6月12日に公布した.2015年4月1日 の法律全面施行に向け、政省令の策定等の準備が進められている.8月1日に第1回会議が開催されたが、中 央環境審議会・産業構造審議会の合同会議にて政省令が審議される.現状の予定では、2014年夏ごろに「フ ロン類の使用の合理化及び特定製品に使用されるフロン類の管理の適正化に関する指針」および「冷凍空調 機器の管理者の判断基準等の省令等」を公布する予定である.また2014年夏から秋にかけて、「指定製品等 に関する政令」について閣議決定を行い公布される予定.また同時期に「ガス、製品製造事業者の判断基準 の省令・告示等」を公布予定である.ここで「指定製品」とは国が製造・輸入業者に対し、安全性・経済性・ 性能等を考慮したGWPベースの数値を設定し、ある年度での数値達成を課す製品区分のことである.

製品の判断基準等に係る審議を行う産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策 ワーキンググループの第一回会合が2013年12月13日に開催された.この会合において、今般のフロン類対策 における課題として以下の内容が紹介された.

- ① 2012年度の産業界の自主行動計画の取り組み状況について,HFC排出量のCO2換算値推計が出され, 冷凍空調分野の2012年排出量は22.0百万-CO2トン.また2020年の見通しは,冷凍冷蔵機器の冷媒に使 用されるHFCの排出が急増するとされ,排出量は現状の2倍に達すると推定している.
- ② 冷媒回収率向上の取り組みについては、機器廃棄時等の冷媒回収率は3割程度で低迷
- ③ 2009年の経済産業省調査で、機器使用時の大規模漏えいが判明、特に業務用冷凍冷蔵機器は年間13~ 17%漏えい。
- ④ 一方で、国内において低GWP製品やノンフロン製品の技術開発が進み、一部は実用化されている.
- ⑤ 世界的にも、欧州のFガス規制やモントリオール議定国会議に出されている北米提案など、高GWPを めぐる規制強化の動きがある.

改正フロン法においてはこれらの課題に対応するため、現行法のフロン回収・破壊に加えて、フロン製造 から廃棄までのライフサイクル全体にわたる包括的な対策として、以下の対策を講じることとしている.

- ① フロン類使用製品の低GWP・ノンフロン化促進(機器・製品メーカーによる転換)
  - ・ 特定のフロン類使用製品(空調.冷凍冷蔵,断熱材,ブロアー等)の指定
  - ・ 指定製品に係る低GWP・ノンフロン化推進に関する判断基準
- ② フロン類の実質的フェーズダウンのための回収冷媒の再利用促進(ガスメーカーによる取組)
  - フロンによる環境負荷を低減するためのガスメーカーの取り組み(低GWP化, 製造・輸入の抑制, 回収・再利用)に関する判断基準の設定.
- ③ 業務用冷凍空調機器使用時におけるフロン類の漏えい防止(ユーザーによる冷媒管理)
  - ・ ユーザーによる適切な機器管理(定期点検など)の取り組みに関する判断基準の設定
  - ・ ユーザーによる冷媒漏えい量報告
- ④ 登録業者による充填,許可業者による再生

## 2.2.2 欧州の動向

現行の欧州Fガス規制は2005年成立し、2007年に施行されており、2011年には改定案のレビューが予定さ

れていた. EU委員会は2009年から改定案の検討を始め、少し遅れてはいるが、HFCフェーズダウンを軸に した改正案を2012年11月7日に出した.これに対し、EU議会の委員会が修正案を2013年6月19日に提出、こ の内容は2020年に定置型冷凍冷蔵庫やエアコンでのHFC使用禁止の内容を含んでおり非常に厳しいものであ った.それに対し同9月30日にはEU理事会がEU委員会案に近いHFCフェーズダウンの修正案を出した.こ のような状況の中でEU委員会、EU議会の環境委員会、EU理事会の見解を調整するための三者協議が行 われ、2013年12月16日の第4回協議にて合意に達した.欧州理事会の合意結果の概要を以下にまとめる.

		現行規制	三者協議結果					
Н	定置型エアコン	規制なし	2025年1月1日よりGWP750以上のFガス3Kg以下を含むシン					
F			グルスプリットエアコンを禁止					
С	商業用	規制なし	2020年1月1日よりGWP2500以上のFガスを使用する商業用冷					
禁	冷凍冷蔵庫		凍冷蔵庫の使用を禁止					
止	(ハーメチック)		2022年1月1日よりGWP150以上のFガスを使用するハーメチッ					
			ク型商業用冷凍冷蔵庫					
	定置型冷凍冷蔵	規制なし	2022年1月1日よりGWP150以上のFガスを含む能力40kW以上					
	システム		の商用マルチパック中央型冷凍冷蔵システムを禁止(カスケ					
			ードシステムの第1冷媒回路はGWP1500まで許容)					
	※各国	※HFC禁止の除外規定が追加						
	ビルコードへの	・ある特定用途	金での技術的・安全的理由あるいは見合わないコストが発生する					
	配慮	場合はEU各国な	ゝらのリクエストに応じ, EU委員会は例外的に4年までの暫定期					
		間を設けること	ができる					
		・EU委員会は	2017年1月1日までにEU各国の冷凍冷蔵・空調機器における代					
		替冷媒の使用に	あたっての国独自コード、規格、規制に関する情報を収集しレ					
		ポートを発行す	る					
プレ	チャージ禁止	規制なし	2017年1月1日より開始. ただし, 割当システムの中で割当を受					
			けたHFCであれば上市可能. 追跡できるように自己宣言書が必					
			要.					
HFC	上市量の削減	規制なし	2030年に21%まで削減. (ベースは2009年-2012年のCO2換算平					
			均値,議会案が採用された)					
冷媒	供給の割当制度	規制なし	新規参入分の割当量は11%					

表2.2.1 Fガス規制に関する三者合意内容

この改正案は、EU議会環境委員会の承認後、EU議会全体投票(3月11日予定)にかけられ、EU理事会の承認を経て公布、2015年1月1日より施行見込みである.

#### 2.2.3 米国の動向

米国における動向は、モントリオール議定国会議における北米提案、CACC動向、ASHRAE規格改 正動向、UL規格改正動向、SNAP動向などがあるが、ここでは主にAHRIの冷媒評価プログラム「低GWP 代替冷媒評価プログラム」(AREP)について記載する.AHRIは2011年春にAREPを発足.候補代替冷媒を募 集し、標準化した方法でテスト、結果を公表している.代替冷媒候補に優先順位を付けず、市場の評価に委 ねる方針である.今回のプログラムに、評価者は合計21社、冷媒供給者は5社が参加している.低GWP冷媒 候補が2012年10月末に公表された.その後、圧縮機カロリメーターテスト、システムドロップインテスト、 ソフト最適化テストによって冷媒の性能を評価し、2013年末にプロジェクト第一期を終了する.すでに多く の報告書が出されているので、参加企業と報告書一覧を紹介する.詳細は以下のURLで確認できる. http://www.ahrinet.org/App\_Content/ahri/files/RESEARCH/AREP\_Final\_Reports/

米国機器メーカー	米国以外の機器メーカー
Carrier Corporation	ARMINES-MINES ParisTech(フランス)
Emerson Climate Technology	Embraco Brazil(ブラジル)
Goodman Manufacturing	Embraco Slovakia Sro (スロバキア)
Johnson Control Inc.	GD Midea Air-Conditioning Equip (中国)
Oak Ridge National Lab.	ダイキン工業(日)
Lennox Industries Inc.	上海日立アプライアンス (中国)
Tecumseh Company Co.	冷媒メーカー
McQuay International	Arkoma Inc
Tranc/Ingersoll Rand	F I Du Pont deNemouurs and Co
Hussmann Corp.	Honneywall International Inc
Climate Master	Movisham Eluor Inc
Manitowoc Ice	ガイモン工業
Follett Co.	
Thermo King/Ingersoll Rand	
University of Maryland	

表 2.2.2 AREP プロジェクト参加企業

表 2.2.3	AHRI	低	<b>GWP AREP</b>	ŀ	゛ロッフ゜	心試験報告書の概要(Nol~Nol4	1)
---------	------	---	-----------------	---	-------	--------------------	----

Ν	報告書題目	評価担当	対象冷媒	GWP
0	(対象冷媒)	会社		値
1	5RT 空冷ウォーターチラーの代	トレーン社	Arkema ARM32a (R1234yf/R32/R125/R134a) (20:25:30:25)	1577
	替冷媒評価(R410A)	(米国)	Arkema ARM70a (R1234yf/R32/R134a) (40:50:10)	482
			Dupont DR5 (R1234yf/R32) (27.5:72.5)	490
			Mexichem HPR1D (R1234ze/R32/R744) (60:6:34)	407
			Honeywell L41a (R1234yf/R1234ze/R32) (15:12:73)	494
			Honeywell L41b (R1234ze/R32) (27:73)	494
2	製氷機での評価(R404A)	Manitowoc	Honeywell L40(R1234yf/R1234ze/R32/R152a)(20:30:40:10)	285
		Ice 社	Honeywell L41a (R1234yf/R1234ze/R32) (15:12:73)	494
		(米国)	Honeywell N40b	1311
			(R1234yf/R134a/R32/R125) (30:20:25:25)	
3	5RT 空冷 HP 評価	オークリッジ研	National Refrigerant (R32/R152a) (95:5)	647
	(R410A)			
4	3.5RT スプリット HP 評価	Lennox 社	R32	675
	(R410A)			
5	3RT スフ <sup>°</sup> リット HP ソフトシステム	Goodman 社	R32	675
	(R410A)			
6	5RT 空冷ウォーターチラート・ロッ	トレーン社	Arkema ARM32a (R1234yf/R32/R125/R134a)(20:25:30:25)	1577
	ブ <sup>°</sup> イン	(米国)	Dupont DR7 (R1234yf/R32) (64:36)	246
	(R22)		Honeywel L20 (R1234ze/R32/R152a) (35:45:20)	331
			Mexichem LTR4X (R1234ze/R134a/R32/R125) (31:16:28:25)	1265
			Mexichem LTR6A (R1234ze/R32/R744) (63:7:30)	206
			ダイキン D52Y (R1234yf/R32/R125) (60:15:25)	959
7	230RT 水冷水チラードロップ	トレーン社	Arkema ARM42a (R1234yf/R134a/R152a) (82:7:11)	117
	イン(R134a)	(米国)	Honeywell N13a (R1234yf/R1234ze/R134a)(18:40:42)	604
			Honeywell N13b (R1234ze/R134a) (58:42)	604
			R1234zeE	6
			Dupont OpteonXP10 (R1234yf/R134a) (56:44)	631
8	商用ボトムクーラー/冷蔵庫で	Hussmann	R1234yf	4
	の	(米国)	Honeywell N13a (R1234yf/R1234ze/R134a)(18:40:42)	604
	ト゛ロッフ゜イン (R134a)		R1234zeE	6
			Dupont OpteonXP10 (R1234yf/R134a) (56:44)	631
9	トレーラー冷凍ユニット冷媒ドロッ	Ingersoll-Ra	Arkema ARM30a (R1234yf/R32) (71:29)	199
	ブ゜インシステム (R404A)	nd &	Dupont DR7 (R1234vf/R32) (64:36)	246
		ThermoKin	Honeywell L40(R1234vf/R1234ze/R32/R152a)(20:30:40:10)	285
		g		
10	3.5RT スプリット HP	Lennox 社	HFO1234yf	4
	(R410A)			_
11	3RT 圧縮機カロリーメータ	オークリッシ゛	R32	675
	(R410A)	国立研究所	Dupont DR5 (R1234yf/R32) (27.5:72.5)	490
			Honeywell I 41a (R1234yf/R1234ze/R32) (15:12:73)	494
10		T 11		
12	ハ /空調機 (R134a)	Ingasoll-	Mexichem AC5 (R1234ze/R32/R152a) (83:12:5)	92
		Kanu &	Honeywell N13a (R1234yf/R1234ze/R134a) (18:40:42)	604
13	バス空調機 (R407C)	a nermoKin	Honeywell L20 (R1234ze/R32/R152a) (35:45:20)	331
		Б	ダイキン D52Y (R1234yf/R32/R125) (60:15:25)	959
14	175PT 灾冷フカリューチラー	Johnson	Arkema $\Delta PM/2a$ (P123/wf/P134a/P152a) (P2.7.11)	117
14	(R134a)	Contorols	$\frac{1}{1} \frac{1}{1} \frac{1}$	11/

表 2.2.4	AHRI	低	<b>GWP AREP</b>	1	゙ロップ゜	12試	験報告	吉書の	り概要	(No1	$5\sim$	No32	2)
---------	------	---	-----------------	---	-------	-----	-----	-----	-----	------	---------	------	----

Ν	報告書題目(対象冷媒)	評価担当	対象冷媒	GWP
0		会社		値
15	8RTVRF マルチスヒ゜リット	ダイキン	R32	675
	HP(R410A)			
16	3RT 水冷 HP	Climate-	R32	675
	(R410A)	Master 社	National Refrigerant(英国) (R32/R152a) (95:5)	647
		(米国)	Dupont DR5 (R1234yf/R32) (27.5:72.5)	490
17	1.25RT 圧縮機カロリーメータ	EMBRACO	R1270	1.8
	(R22)			
18	0.85RT	EMBRACO	Honeywell N13a (R1234yf/R1234ze/R134a) (18:40:42)	604
	圧縮機カロリーメータ(R134a)		Arkema ARM42a         (R1234yf/R134a/R152a)         (82:7:11)	117
19	カロリーメータ(R134a)No18 追 試験	EMBRACO	Honeywell N13a (R1234yf/R1234ze/R134a) (18:40:42)	604
20	3RT 空冷 HP	メリーランド大	R32	675
	(R410A)	:Goodman	ターイキン D2Y-60 (R1234yf/R32) (60:40)	272
		製	Honeywell L41a (R1234yf/R1234ze/R32) (15:12:73)	494
21	0.65RT 圧縮機	オークリッシ゛	Arkema ARM31a (R1234yf/R32/R134a) (51:28:21)	492
	カロリーメータ (R404A)	国立研	ダ イキン D2Y65 (R1234yf/R32) (65:35)	239
			Honeywell L40 R1234yf/R1234ze/R32/R152a)(20:30:40:10)	285
			R32/R134a (50:50)	1053
22	3RT スプ リットシムテム HP	Carrier 社	Arkema ARM70a (R1234yf/R32/R134a) (40:50:10)	482
	(R410A)		Dupont DR5 (R1234yf/R32) (27.5:72.5)	491
			Honeywell L41a (R1234yf/R1234ze/R32) (15:12:73)	494
			Honeywell L41b (R1234ze/R32) (27:73)	494
			R32	675
23	3RT 空冷 HP(R410A) No20 追加	メリーランド大	Honeywell L41a (R1234yf/R1234ze/R32) (15:12:73)	494
24	0.6RT 圧縮機カロリーメータ (R410A)	Emerson 社	Dupont DR5 (R1234yf/R32) (27.5:72.5)	490
25	200RT スクリューチラー	ダ イキン-	R1234ze(E)	6
	(R134a)	McQuay 社		574
	· · ·		7 177  D4Y (K1234yt/K134a) (60:40)	574
26	0.5RT 圧縮機カロリーメータ (R410A)	上海日立	R32	675
27	1.6RT 水冷 HP	CEP Mines	Arkema ARM70a (R1234yf/R32/R134a) (40:50:10)	482
	(R410A)	PARISTEC H	Dupont DR5 (R1234yf/R32) (27.5:72.5)	490
28	0.2RT 圧縮機カロリーメータ (R404A)	Embraco Sl	Honeywell L40 R1234yf/R1234ze/R32/R152a)(20:30:40:10)	285
29	0.2RT 圧縮機カロリーメータ	Embraco Sl	Dupont DR7 (R1234vf/R32) (64:36)	246
	(R404A)			
30	0.3RT 圧縮機加リーメータ	Embraco Sl	R1234yf	4
	(R134a)			
31	2RT スフ <sup>°</sup> リットシステム HP	上海日立	R32	675
	(R410A)			_
32	3RT 空	メリーランド大	$\beta^{*}(\dagger 2)$ D2Y-60 (R1234yf/R32) (60:40)	272
\ <b>`</b>	HP(R410A)No20 追加 計除士社士士!!!!	T1	いい おがみ 友廷心共公母へおがけていてなってもいい 生	
**	■	Jhonson	・ソ۸アム前半価法, 合種代谷府保の評価結未等の又厭リ۸ト集 ・28 百起生ま	
		Controls	20 只形口百	

#### 2.2.4 国際動向

HFCの規制に関して国際的には数々の動きがあるがその一部を紹介する.

① 2013 年 9 月 5 日~6 日, ロシアのサントペテルブルグで G20 サミットが開催された. 合意文章の中の気 象変動の項目に HFC 対策が盛り込まれた

[G20合意文章抜粋]

「我々は,経済的,技術的に実現可能な代替手段の調査に基づいた,ハイドロフルオロカーボン (HFCs) の生産と消費の段階的削減のための,モントリオール議定書の専門知識と機関の利用を含む多国間アプ ローチを通じた補完的イニシアティブを支持する.我々は,排出量のアカウンティングと報告に関して 引き続き HFCs を UNFCCC と京都議定書の範囲内に含める」

- ② 2013年6月8日,米国と中国は首脳会談でHFCの生産・使用削減に向けて協力していくことで合意した. 50年までに最近の世界の温室効果ガス排出量の2年分に相当する900億トン(CO2換算)分を削減できるとしている.米国は6月25日に公表した温暖化対策の行動計画の中でもHFC排出削減を明記.オバマ大統領は同日の演説で、米中でのHFC対策が「温室効果ガス削減の重要な一歩になる」と強調した.米国は過去4年間、カナダ、メキシコと共同でモントリオール議定書の下でのHFC削減を提案してきたが、中国などが強く反対してきた.それだけに、温室効果ガスの2大排出国がHFC対策の重要性を世界に示した意義は大きいと言われている.
- ③ 2013年10月21日~25日、バンコクにおいて、オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書 第25回締約国会合(MOP25)が開催された.前回に引き続き、HFCの生産・消費規制に関する提案が提 出され、本提案の扱い及びHFC代替技術等に関する議論が行われたほか、オゾン層破壊物質である臭化 メチル等の不可欠用途申請、ODS代替物質の検討等が行われた.今回もHFCの生産・消費を規制するた めにモントリオール議定書を改正するとの北米三か国(米・カナダ・メキシコ)等の提案が昨年に続き 提出された.オゾン層破壊物質でないHFCをモントリオール議定書の規制対象物質に追加するとの本提 案について、一部の発展途上国から引き続き強い懸念と反発があったが、多くの参加国が今次会合で議 論することを支持したため、モントリオール議定書を通じたHFC管理に関する公式のディスカッション グループが開催された.本ディスカッショングループでは、HFC代替の技術的側面及び資金に関する問 題、及びモントリオール議定書でHFCを規制する場合の法的問題やHFC排出を規制する京都議定書と の関係等に関し各国の見解が表明され、今後、HFC管理に関するワークショップを開催することとなっ た.
- ④ 国際規格では、15年以上議論が続いてきた ISO5149の改定案が各国投票によって可決された. ISO5149 は 機器の安全規格であり、①冷媒の充填量、②機器の構造、③据付、④資格者認定の4つのパートで構成 されており、空調機にとっては重要な規格.現在の ISO5149 は 1993 年版で、冷媒の安全区分が不燃性、 可焼性、可焼性かつ有毒の3つしかなく、燃焼性の冷媒は一部の例外を除いては使用を認めていない. 今回の改正において、微燃性冷媒(2L)を含む新しい安全性区分導入の改訂作業が進んでいた.2013年 10月中旬に一度、各国投票が終わったがパート4を除いて否決された.しかし、否決の主たる原因は手 続きと文法、および表の誤記等であり、微燃性冷媒(2L)冷媒の取り扱いを否定するものではなかった ため、2013年11月に再投票が行われ、2014年1月に可決された.賛成は27票、反対は4票(パート2,3) ~5票(パート1).反対したのはパート2,3 に関しては米国、オーストラリア、ニュージーランド、イ タリアであり、パート1に関しては米国、オーストラリア、ニュージーランド、イタリア、フィンラン ドであった. ISO5149では、燃焼性に応じて冷媒充てん量が規制される.また機械室等に使用する場合に 可燃性冷媒についてこれまで電気設備の防爆が要求されていたが、微燃性の2L冷媒は除外されている.

## 3. 微燃性冷媒の安全性研究・東京大学の進捗

## 3.1 はじめに

モントリオール議定書により使用が禁止された冷媒 CFC や HCFC の代替冷媒として HFC が普及してきた.しかし HFC は GWP が高いために,京都議定書により排出量削減の対象となっている.そこで,次世代冷媒として R32 や R1234yf などの従来冷媒に比べ GWP が低い冷媒が注目されているが,これらには微燃性を有するものが多い.代表的な冷媒の燃焼に関する物性値を表 3.1.1 に示す(Takizawa, 2012, JFMA, 2012).ここで LFL, UFL, BV, MIE はそれぞれ燃焼下限濃度,上限濃度,燃焼速度,最小着火エネルギーである.

本学では、そのような微燃性冷媒の実機での利用に際してのリスク評価において必要となる知見を得ること を目的として、下記の研究を行った.

1. 微燃性冷媒の漏えいシミュレーション

2. 低温室効果冷媒の熱分解生成物分析

3. ヒートポンプ・ポンプダウン時のディーゼル爆発の安全性研究

	(1 akizawa (2012), JFMA (2012))										
Refrigerant	$\mathrm{GWP}^{*1}$	$LFL^{*2}$	UFL <sup>*3</sup>	$\mathrm{BV}^{*4}$	MIE <sup>*5</sup>						
R290 (propane)	< 3	2.1 vol%	9.5 vol%	38.7 cm/s	0.246 mJ						
R717 (ammonia)	< 1	15.5 vol%	27 vol%	7.2 cm/s	$380 \sim 680 \text{ mJ}$						
R32	675	13.3 vol%	29.3 vol%	6.7 cm/s	15 mJ						
R1234yf	4	6.2 vol%	12.3 vol%	1.5 cm/s	200 mJ						
R1234ze(E)	4	7.0 vol%	9.5 vol%	_	_						
*1 GWP: Global warmi	ing potential										
*2 LFL: Lower flamma	ble limit										

Table 3.1.1 Physical and flammability properties of Low-GWP refrigerants

\*3 UFL: Upper flammable limmit \*4 BV: Burning velocity

\*4 BV. Burning velocity

\*5 MIE: Minimum ignition energy

## 3.2 微燃性冷媒の漏えいシミュレーション

#### 3.2.1 はじめに

冷媒が空間内に漏えいすると、それが空気より重ければ床面に滞留する(Kataoka *et al.*, 1996). 図 3.2.1 は燃 焼の 3 要素を示す. 冷媒が漏えいする場合、ここに示すように、濃度が燃焼範囲内にあり、かつ気流が燃焼速 度以下で、さらに最小着火エネルギー以上の着火源が存在すると、着火し火災に発展する危険が生じる. ゆえ に、これらの冷媒を空調機に使用するには、適切な安全基準を作成する必要がある.

安全基準の作成の際,冷媒の拡散現象を理解することは重要となるが,大空間における冷媒漏えい試験は困難である.そのため,数値解析によるアプローチは有効な手段となる.そこで,居室やオフィスといった空調 機器が設置されている大空間に冷媒が漏えいした時の拡散現象を計算し,可燃領域体積,気流速度分布を数値 解析により解析した.また,家庭用ルームエアコン(RAC)に関しては,実験による検証も行った(本報では 省略).

### 3.2.2 計算方法

計算条件は表 3.2.1 に示す. 冷媒拡散現象の数値シミュレーションには,汎用熱流体解析コード STAR-CD を 用いた. 差分法には有限体積法が用いられている.

計算方法は非定常流れとし、密度の計算には理想気体の状態方程式を用いた.計算アルゴリズムには PISO 法 等を用いた.対流項の離散化には UD と MARS,表 3.2.3の No. 1 ~ 22 には乱流モデルに標準 *k-ε* モデルを, No. 23 ~ 32 には Realizable *k-ε* モデルを使用した.境界条件として冷媒の流入条件は一定流量の流入条件,流出条件 は大気圧相当の圧力境界等を用い、壁境界には壁法則を用いた.



Fig. 3.2.1 Mechanism of ignition

T 11 0 0 1	<b>T</b> 1	
Table 3.2.1	Leakage	scenarios
1 uoio 5.2.1	Dounugo	beenuirob

case No.	Туре	Refrigerant	Charged amount	Leakage velocity	Ventilation air flow	Air vent	case No.	Туре	Refrigerant	Charged amount	Leakage	velocity	Ventilation air flow	Air vent
1	wall-mounted indoor unit	t R32	1.0 kg	125 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	17	VRF	R32	26.3 kg	10→0 kg	/h	0 m <sup>3</sup> /h	exist
2	of RAC			250 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	18		R1234yf	29.4 kg	10 kg/h		0 m <sup>3</sup> /h	none
3				1000 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	19						0 m <sup>3</sup> /h	exist
4		R1234yf	1.4 kg	175 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	20						169 m <sup>3</sup> /h	exist
5				350 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	21						0→169 m <sup>3</sup> /h	exist
6				1400 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	22				10→0 kg	/h	0 m <sup>3</sup> /h	exist
7		R290	0.2 kg	50 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	23	water-cooled chiller	R32	23.4 kg	75 kg/h	(burst leak)	0 m <sup>3</sup> /h	exist
8			0.5 kg	125 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	24				10 kg/h	(rapid leak)	0 m <sup>3</sup> /h	exist
9	floor-mounted indoor uni	it R32	1.0 kg	250 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	25						545 m <sup>3</sup> /h	exist
10	of RAC	R1234yf	1.4 kg	350 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	exist	26		R1234yf	23.4 kg	70 kg/h	(burst leak)	0 m <sup>3</sup> /h	exist
11	outdoor unit of RAC	R32	1.0 kg	250 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	(outdoor)	27				9 kg/h	(rapid leak)	0 m <sup>3</sup> /h	exist
12		R1234yf	1.4 kg	350 g/min	0 m <sup>3</sup> /h	(outdoor)	28						545 m <sup>3</sup> /h	exist
13	VRF	R32	26.3 kg	10 kg/h	0 m <sup>3</sup> /h	none	29		R1234ze(E)	23.4 kg	54 kg/h	(burst leak)	0 m <sup>3</sup> /h	exist
14					0 m <sup>3</sup> /h	exist	30						545 m <sup>3</sup> /h	exist
15					169 m <sup>3</sup> /h	exist	31				7 kg/h	(rapid leak)	0 m <sup>3</sup> /h	exist
16					0→169 m <sup>3</sup> /h	exist	32						545 m <sup>3</sup> /h	exist

## 3.2.3 計算モデル

図 3.2.2 に本研究で実施した 5 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) 壁掛け室内機からの漏えい 壁掛け室内機からの漏えいは, 2.8 m×2.5 m×2.4 mの小部屋をモデル化した. 床面から 1.8 mの高さに大きさ 0.6 m×0.24 m×0.3 mの室内機が設置され, 0.6 m×0.06 mの吹き出し口より冷媒が漏えいする. 格子数は約 20 万で,漏えい口直下と床面付近に要素を集中させている. 対象冷媒は R32, R1234yf, R290 (プロパン)とした.

(b) **床置き室内機からの漏えい** 床置き室内機からの漏えいは, 壁掛け室内機からの漏えいと同じ広さの小 部屋をモデル化し,大きさ 0.7 m × 0.21 m × 0.6 m の床置き室内機が設置され, 0.46m×0.045m の吹き出し口より 冷媒が漏えいする.格子数は約 24 万で,漏えい口と床面付近に要素を集中させている.対象冷媒は R32, R1234yf とした.

(c) 室外機からの漏えい 室外機からの漏えいは, 5.0 m×1.2 m×1.1 mのベランダをモデル化した. ベラン ダには大きさ 0.77 m×0.29 m×0.68 mの室外機が設置され, φ400 の室外機ファンより冷媒が漏えいする. また, ベランダ周りには 0.5 m/s の風がある. 格子数は約 35 万である. 今回は, ベランダの排水口や隣家との仕切り板 の隙間は考慮していない. 対象冷媒は R32, R1234yf とした.

(d) ビル用マルチエアコンからの漏えい VRFの設置位置はオフィスルームを想定し、その寸法は床面積が 外寸 6.5 m×6.5 m で高さ 2.7 m である. 部屋の天井面には VRF が 1 台設置されており、吹き出し口の大きさは 450 mm×64.5 mm,吸い込み口の大きさは φ370 であり、吹き出し口と吸い込み口から冷媒が真下に漏えいする. また,天井面には寸法が 200 mm × 200 mm の給気口と排気口があり,さらに,壁面にはドアが設置されており, その下部には寸法 1500 mm × 10 mm の隙間が存在する.格子数は約 15 万であり,吹き出し口,吸い込み口,給 排気口,ドア下隙間付近には要素を集中させている.対象冷媒は R32, R1234yf とした.

(e) 水冷チラーからの漏えい 機械室内は 6.6 m×3.3 m×5.0 m(面積 22.0 m<sup>2</sup>), チラーは 1.28 m×1.28 m×1.28 mで, その設置位置は, 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面には, チラー側面から 100 mm, 床面から 150 mmの場所に漏えいポイントを模擬したノズルがある. ノズル内径は漏えい形態によって異なり, 急速漏れでφ4.0 mm, 噴出漏れでφ8.0 mmとしている.

漏えい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 4.4 mのダクトで外部へと排気されるものとする. またチラー上部の天井には給気口が設けられている.給気口および排気口の面積は、以下のように決まるものとしている. 給気口および排気口の面風速および開口率を以下のように定める.

・ 給気口:面風速*v<sub>in</sub>* = 2.0 m/s / 開口率*α<sub>in</sub>* = 0.7

排気口:面風速v<sub>out</sub> = 4.0 m/s / 開口率α<sub>out</sub> = 0.3

また, 換気量は以下のように求める.

換気量 q = XV

ここで, XとVはそれぞれ換気回数および機械室空間容積(m<sup>3</sup>)である.これらをもとに,以下の式から給気口および排気口の面積A<sub>in</sub>およびA<sub>out</sub>を算出する.

 $q = \alpha_{in} v_{in} A_{in} = \alpha_{out} v_{out} A_{out}$ 対象冷媒は R32, R1234yf, R1234ze(E)とした.



Fig. 3.2.2 Analytical geometries

### 3.2.4 シミュレーション結果および考察

表 3.2.3 に計算結果を示す.  $\Sigma(V:t)$ は可燃領域の体積と存在時間の積であり、この大きさがリスクにかかわってくる.以下、これを可燃時空積と呼ぶ.なお、 $V_{FL} \geq V_{BVFL}$ はそれぞれ、可燃濃度領域のみを考慮した体積と、可燃濃度領域内で気流速度が燃焼速度以下の範囲を考慮した体積を表す.

(a) 壁掛け室内機からの漏えい 表 3.2.3 の No.1~8 に,壁掛け室内機からの漏えいの結果を示す.これから わかるように,家庭用ルームエアコンの壁掛け室内機から微燃性冷媒が漏えいしても,可燃時空積は非常に小 さいことがわかる.また,No.1~6 に関して,可燃領域内での気流速度を考慮した可燃時空積においては,ど れも0という結果となった.これは空間内の可燃領域内の気流は燃焼速度以上の速さとなっているため,着火 源があっても,冷媒の漏えいによって生まれる対流によって着火が起こらないことを示唆している.ゆえに, 室内機内に着火源がない限り,燃焼には至らないと考えられる.

室内機内で燃焼が発生しても火炎が伝播しないような構造にすることで危険を最小限に抑えることができる. 火炎は、ある一定以上の隙間がないと伝播しない消炎距離、ある一定以上の隙間がないと通過しない消炎直径 というものがある(Takizawa, 2012).室内機の構造をこの消炎距離、消炎直径よりも小さくすることができれ ば、燃焼が発生しても危険を最小限に抑えることができると考えられる.

No. 7 に関してはプロパンの最大許容充てん量を超えた量の計算ではあるが,可燃時空積のオーダーが他に比べ, 105 ほど大きいことから,非常に危険であることがわかる.

No. 8 に関しては、プロパンの最少着火エネルギーは 0.246 mJ と、他の R32 や R1234yf の最少着火エネルギー よりも小さく、消炎距離も非常に狭いため、容易に火炎が伝播してしまう. そのため可燃時空積が No. 1 から No. 6 の 10 倍ほどであっても、他に比べて危険であることには変わりはない.

(b) 床置き室内機からの漏えい 表 3.2.3 の No.10, 11 に床置き室内機からの漏えいの結果を示す.床置き室 内機は漏えい口が低い位置にあるため,可燃領域は床面に広がり, No.9 は 100 分以上, No.10 に至っては存在時 間が 300 分以上と壁掛け室内機に比べ非常に長くなっている.

存在時間が長く、床面全体が可燃領域となることから、可燃時空積が大きくなり、壁掛け室内機に比ベリスク が高くなる.また表 3.2.3 から、どちらの可燃時空積もほぼ同等の結果となっていることがわかる.これは、可 燃領域内のほとんどは、気流が燃焼速度以下となっており、着火源が存在すると、可燃領域ほぼ全域に着火の 危険性があることを表している.さらに、LFL は R32 より R1234yf の方が低いために、存在時間が長くなって いる.ゆえにリスクは R32 より R1234yf の方が高いという結果になった.

以上のことから、床置き室内機からの漏えいは壁掛け室内機からの漏えいよりリスクが高いことから、使用 する場合、換気を行う等、制限を設ける必要があると考えられる.

(c) 室外機からの漏えい 表 3.2.3 の No. 12, 13 に室外機からの漏えいの結果を示す. 室外機も床置き室内機 同様,漏えい口が低いために床面全体に可燃領域が広がり,長い時間可燃領域が存在した.本来,集合住宅の ベランダには隣室との仕切りの下部には,数センチ程度の隙間が存在する.また,排水溝も存在するため,実 際には漏えいした冷媒は隣室のベランダや排水溝に流れ込み,可燃領域は小さくなると考えられる.

(d) ビル用マルチエアコンからの漏えい 表 3.2.3 のNo. 13 ~ 22 に、VRFからの漏えいの結果を示す.これを 見ると、空気の供給源となる給排気口の存在が存在時間や可燃時空積に大きな影響を与えることがわかる.さ らに、VRFは冷媒量が多いために漏えい時間がどちらの冷媒も 2 時間 30 分以上と非常に長い.その影響もあり、 可燃領域の体積が小さくても可燃時空積 $\Sigma(V_{FL}.t)$ が家庭用ルームエアコンの壁掛け室内機に比べ、大きくなって いる.しかし、気流速度を考慮した可燃時空積 $\Sigma(V_{BVFL}.t)$ は大幅に低下している.R1234yfの場合は、燃焼速度が 小さいため、着火の可能性は極めて低いが、R32 は冷媒漏えい検知センサーを設置するだけでなく、警報や換 気等、安全対策が必要になると考えられる.

(e) 水冷チラーからの漏えい 表 3.2.3 のNo.23 ~ 32 に,水冷チラーからの漏えいの結果を示す.また,図 3.2.3 には $V_{FL}$ が最大となるときのLFL境界面を,図 3.2.4 には $\Sigma(V_{FL}\cdot t)$ と $V_{FL}$ の時間変化を示す.なお,No.26,27, 29 については,漏洩終了後 100 秒後で解析を中止したが,その時点でも可燃空間は存在していたため,実際の 存在時間および可燃時空積は,これらの結果で示す値より大きくなるはずである.また,R1234ze(E)に関しては, 本解析のように湿度ゼロ条件では不燃であるため, $\Sigma(V_{BVFL}\cdot t)$ をゼロとしているが,これに関しては湿度を考慮 した条件の検討が必要となる.

解析結果より、VRFの解析結果と同様に、給排気が存在時間や可燃時空積に大きな影響を与えることがわかる. 例えば、No. 24 とNo. 25 からはR32 の急速漏れにおける、またNo. 27 とNo. 28 からはR1234yfの急速漏れにおける 5 回換気と換気無しの結果を比較できるが、両条件とも、5 回換気とする場合には $\Sigma(V_{FL}.t)$ が非常に小さく、また $\Sigma(V_{BVFL}.t)$ がゼロとなっており、冷媒が噴き出しても空間にはほとんど滞留せず、排気ダクトから排出される. 可燃濃度範囲は漏えい口近傍のみに形成されるが、流れが速いため $\Sigma(V_{BVFL}.t)$ は存在しない. これは換気回数が 5 回と多いことの影響もあると考えられる. 一方、換気が無い場合においては、R1234yfの可燃時空積がR32 のそれより大きくなっているが、これは前述のように、R1234yfはR32 よりもLFL低いために、可燃濃度範囲の存在時間が長くなることによる. ゆえにリスクはR32 よりR1234yfの方が高いという結果になった.

また,水冷チラーの解析では,RACやVRFの解析条件とは異なり,漏えいの形態が噴出漏れか急速漏れという高速漏えいを想定しているため,たとえ漏えい時に可燃濃度領域が大きくなっても,その部分の流速が非常に早く,結果としてΣ(V<sub>BVFL</sub>・t)はゼロか非常に小さい値となるケースが非常に多い.ただし,No.26,27,29のように換気が無く,また漏洩終了後にも高濃度域が消滅しない場合は,Σ(V<sub>BVFL</sub>・t)がより拡大する恐れがある.

よって水冷チラーの場合は、十分な換気が非常に重要で、また床面近傍でのセンサー設置などの安全対策も 併せて必要になると考えられる.

					( = / = /		
case	Presence time,	$\Sigma(V_{FL}\cdot t),$	$\Sigma(V_{BVFL} \cdot t),$	case	Presence time,	$\Sigma(V_{FL}\cdot t),$	$\Sigma(V_{BVFL} \cdot t),$
No.	min	m <sup>3</sup> min	m <sup>3</sup> min	No.	min	m <sup>3</sup> min	m <sup>3</sup> min
1	4.01	1.18×10 <sup>-2</sup>	0	17	8.36	3.14×10 <sup>-2</sup>	0
2	4.01	1.23×10 <sup>-2</sup>	0	18	176.47	2.152	0
3	8.01	9.79×10 <sup>-3</sup>	0	19	176.42	0.661	0
4	8.01	1.07×10 <sup>-2</sup>	0	20	176.41	0.583	0
5	1.03	3.73×10 <sup>-2</sup>	0	21	176.41	0.592	0
6	1.05	4.34×10 <sup>-2</sup>	0	22	10.25	2.14×10 <sup>-2</sup>	0
7	1473.00	7689	7688	23	18.72	0.013	0
8	4.73	0.258	0.161	24	140.40	0.599	0.000022
9	111.00	136.83	136.81	25	140.40	0.002	0
10	309.00	507.82	507.50	$26^{*1}$	up to22.62	up to 127.84	up to 3.449
11	45.00	43.01	42.50	$27^{*1}$	up to 157.67	up to 1108.44	up to 44.15
12	93.00	62.54	61.53	28	156.00	0.008	0
13	157.85	1.622	0.021	$29^{*1}$	up to 27.67	up to 361.62	$0^{*2}$
14	157.82	0.831	0.011	30	26.00	0.014	$0^{*2}$
15	157.82	0.702	0.014	31	200.58	16.352	$0^{*2}$
16	157.82	0.725	0.011	32	200.58	0.009	$0^{*2}$

Table 3.2.3 Predicted  $\Sigma(V_{FL} \cdot t)$  and  $\Sigma(V_{BVFL} \cdot t)$ 

\*1 the condition that calculation stopped at 100 second after refrigerant completely leaked out

\*2 R1234ze(E) is non-flammable on the condition whose relative humidity equals zero



Fig. 3.2.3 LFL isosurface in case that  $V_{FL}$  reaches maximum value



Fig. 3.2.4  $\Sigma(V_{FL} \cdot t)$  and  $V_{FL}$  changes in accordance with time change

## 3.2.5 微燃性冷媒の漏えいシミュレーションに関する研究のまとめ

本研究では、空間内に微燃性冷媒が漏えい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. 壁掛け室内機からの漏えいでは、可燃領域は漏えい口直下にのみ存在し、そこに着火源の存在することは 極めて稀であることから、室内機内に着火源がない限り、燃焼には至らない.
- 2. 床置き室内機からの漏えいでは、吹き出し口が低い位置にあり可燃領域は床面全体に広がるため、密閉空間での使用は避け、使用時には換気を行う等の制限を設けることが望ましい.
- 3. 室外機からの漏えいに関しては、室外機ファンが低い位置にあり、可燃領域は床面全体に広がるため、ベ ランダの構造でできる限り隙間を設けるなどの対応が望ましい.
- 4. 床置き室内機と室外機からの漏えいでは、LFL は R32 より R1234yf の方が低いため、R1234yf の方がリスク が高い.
- 5. ビル用マルチエアコンの天井設置型室内機からの漏えいでは、自然換気が適切に確保されれば、気流速度 の条件を考慮すると、可燃領域の体積および存在時間は極めて小さくなる.

6. 水冷チラーからの漏えいでは、換気の有無が可燃時空積に大きく効く.換気が無く、漏えい速度が速い場 合は、漏えい終了後にも可燃時空積が拡大する恐れがある.

## 3.3 低温室効果冷媒の熱分解生成物分析

## 3.3.1 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 F 原子数より H 原子 数の方が多い物質の場合、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、その他の生成物の分析 を行うことを目的とする.

#### 3.3.2 実験装置と方法

(a) 実験装置 漏洩した冷媒の分解による HF の生成原因としては,加熱による熱分解および燃焼の両方が考えられるが,熱分解のみを対象とする実験装置を作成した.

実験装置は図 3.3.1 に示すようにガス混合部・加熱部・測定部・除害部からなる. ガス混合部はマスフローコ ントローラーを用い,指定の濃度・流量で冷媒と空気等を混合する.また,乾燥空気を加湿し一定湿度の空気を得 るため,加湿装置と湿度センサーを取り付けている.加熱部は長さ 550 mmの円管電気炉とその中に通された管か らなり,管内に試料ガスを通して加熱し,熱分解を生じさせる.管材質は,耐蝕性が高く,HFの影響が小さいと思わ れるインコネル 600 および,比較対象としてのムライト (3AIO<sub>3</sub>・2SiO<sub>2</sub>) であり,内径はインコネル管が 10.7 mm, ムライト管が 11 mmである.また,熱電対により管外壁温及び管内温度 (ムライトのみ)を3点ずつ測定した.管内 の熱電対は,熱電対自体の腐食防止のため,加熱管と同材質の保護管 (外径 6 mm)内に収納しており,この場合試 料ガスは加熱管と保護管の間の隙間 2.5 mm,断面積 0.67 cm<sup>2</sup>の環状流路を通過する.測定部には,検出可能な濃度 範囲を拡げるため,異なる光路長の2種類 (10 cmおよび 12 m)のFT/IRガスセルを設置し,選択して利用可能とし ている.除害部は,装置を通過した試料ガスをソーダ石灰入りの容器内を通した上で除害装置付きのドラフトチ ャンバー内に放出することで,より実験の安全を図るためのものである.



Fig. 3.3.1 Schematic diagram of experimental apparatus

(b) 実験対象物質 冷媒 R32, R1234yf, R134a のいずれかと空気の混合物を対象とした.

(c) 計測機器 生成物を含むガス濃度の測定機器として,日本分光製FT/IR-4200 およびHarrick社製ガスセル (光路長 10 cm, CaF<sub>2</sub>窓板)を用いた.FT/IRを選択した理由は,試料ガスの入っているガスセルの外側に光源や検出 器があるため,HFの腐食性による測定器への影響を抑えられるためである.

(d) 定量方法 各物質についてそれぞれ設定した波数の吸光度ピーク高さによって定量を行った. 冷媒については,加熱炉を切った状態で,測定時同様に冷媒と空気の混合ガスをガスセルに流し,その測定値を元に検量線を 作成した. HFおよびCOF<sub>2</sub>については,同様の方法による測定ができないため, Northwest-Infraredのデータベース (PNNL, 2012)を用いて濃度を計算した.

(e) 実験条件 実験条件として以下のパラメータを設定した.

1. 電気炉温度:~700 °C
 2. 冷媒濃度:LFL以下の数点
 3. 冷媒と空気を合わせた流量:100~200 ml/min
 4. 湿度:0~60 %RH

## 3.3.3 実験結果および考察

(a) インコネル管における測定 インコネル管における測定のうち, 冷媒濃度 2.5 vol.%, 合計流量 200 ml/min. の条件における, 絶対湿度をパラメータとした加熱炉温度とR32, HF, COF2濃度の関係を冷媒ごとに以下に示す. ・R32

R32 での測定におけるR32 残量及びHF検出量を図 3.3.2,図 3.3.3 に示す. 570~590 ℃以上でR32 の減少とHFの 生成が生じた. COF<sub>2</sub>については 0.01 vol.%以下であった. また, R32 の減少量に湿度の影響はみられない.



Fig. 3.3.2 Concentration of R32 and heater temperature (total 200ml/min, 2.5vol.% with air)



Fig. 3.3.3 Concentration of HF and heater temperature (total 200ml/min, 2.5vol.% with air)

#### • R1234yf

**R1234yf**での測定における**R1234yf**残量及びHF, COF<sub>2</sub>検出量を図 3.3.4, 図 3.3.5, 図 3.3.6 に示す. この測定では, 同一の管を用いて繰り返し実験を行った際に, 分解下限温度が低下するとともに, **R1234yf**分解量と生成物量が 徐々に増加する変化が見られた.変化前においては分解下限温度が 500 ~ 550 ℃で, 生成物はHFが 500 ~ 550 ℃, COF<sub>2</sub>が 600 ℃以上でみられた.

R1234yfの減少量は,変化前には湿度の影響は見られなかったが,変化後は湿度上昇によって分解量の増加が見 られるようになった.



Fig. 3.3.4 Concentration of R1234yf and heater temperature (total 200 ml/min, 2.5vol.% with air)



Fig. 3.3.5 Concentration of HF and heater temperature (total 200 ml/min, 2.5vol.% with air)



Fig. 3.3.6 Concentration of COF<sub>2</sub> and heater temperature (total 200 ml/min, 2.5 vol.% with air)



(total 200 ml/min, 2.5 vol.% with air)







R134aでの測定におけるR134a残量及びHF, COF<sub>2</sub>検出量を図 3.3.7,図 3.3.8,図 3.3.9 に示す. 500 ~ 550 °C以上でR134aの減少とHFの生成が生じ,650 °C以上でCOF<sub>2</sub>の生成が生じた.また,R134aの減少量に湿度の影響はみられない.

(b) インコネル管における測定の考察 腐食による再現性の低下を回避するため、耐蝕性の高いインコネル管 を使用して実験を行ったにも関わらず、R1234yf については実験毎に変化が生じてしまった.この管については、 取り外したところ内部から煤のようなものが得られた.これの除去により再現性の向上が期待される.

(c) ムライト管による測定結果 まず、加湿していない場合の加熱後の冷媒の残存率を、R32、R1234yf のそれ ぞれについて、冷媒濃度 (vol.%) をパラメータとして図 3.3.10 および図 3.3.11 に示す. 2 種の冷媒ともに、加熱部の 温度が 500 ℃以下ではほとんど分解されておらず、550 ~ 600 ℃以上で残存率が低下している.

次に,加湿をした場合の R1234yf の残存率と湿度の関係を図 3.3.12 および図 3.3.13 に示す. R1234yf は湿度によって反応性が異なるとの報告もあるが,この結果からは反応性の差が見られない.

図 3.3.14 に, 図 3.3.10 で示した R32 の測定における HF 生成量を示す. 温度・濃度の上昇によって HF 生成量 は増加しているが, R32 濃度にほぼ比例すると予想されるのに対しその差が小さく, また量そのものも予想の 1/10~1/30 となっている.



Fig. 3.3.10 Remain rate of R32 and heater temperature (dry, total 100 ml/min with air)



Fig. 3.3.11 Remain rate of R1234yf and heater temperature (dry, total 100 ml/min with air)



Fig. 3.3.12 Remain rate of R1234yf and humidity (total 100ml/min, 2.8vol. % in air)



Fig. 3.3.13 Remain rate of R1234yf and humidity (total 200ml/min, 2.8vol. % in air)

Fig. 3.3.14 Hydrogen fluoride and heater temperature (R32, dry, total 100ml/min with air)

(d) ムライト管による測定の考察 R1234yf の測定においては, 温度・湿度に関わらず HF の検出量が小さく 検出できなかった. これについては, HF の生成がなかったのではなく, R1234yf あるいはその分解生成物が, 加熱 管壁面において HF を何らかの形で吸着していると推測されるが, 機構については明らかではない.

熱分解における反応は、R32 については

CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> → 2HF + CO<sub>2</sub>, R1234yf については, H<sub>2</sub>O非存在下: CF CF=CH<sub>2</sub> + 5/2O<sub>2</sub> → 2CO<sub>2</sub> + COF<sub>2</sub> + 2HF H<sub>2</sub>O存在下: CF CF=CH<sub>2</sub> + 5/2O<sub>2</sub> + x(H<sub>2</sub>O) → (2+x)CO<sub>2</sub> + (1-x)COF<sub>2</sub> + 2(1+x)HF

が予想されている (滝澤ら, 2011).しかし,本研究での測定においては,予想されるよりもHFの検出量が少なく, また,湿度に対して十分な量のR1234yfが分解されている条件 (即ち,乾燥ガスが熱分解した条件)においても COF<sub>2</sub>の定量に用いられる 1930 cm<sup>-1</sup>付近の吸収ピーク (NIST, 2011) が検出されず, COF<sub>2</sub>の発生は確認されていな い.COF<sub>2</sub>が検出されない理由については,主に壁面とHFの間で

 $AlO_3 + 3HF \rightarrow AlF_3 + \frac{3}{2}H_2O + \frac{3}{4}O_2$ 

等の反応によりH<sub>2</sub>Oが供給され、そのH<sub>2</sub>OによりCOF<sub>2</sub>が分解されたためだと推測される.

R1234yfの測定でのみ HF が検出されなかった理由は不明であるが, 測定後の管を 600 ℃ 程度に加熱し空気を 流すと 1~2 時間程度後に HF が検出され始めることから, 何らかの理由で HF の壁面との反応が促進されていて, R1234yf の方が R32 よりその効果が大きいのではないかと考えられる.

#### 3.3.4 低温室効果冷媒の熱分解生成物分析のまとめ

3種の冷媒について,壁面の影響が少ないと思われる熱分解下限温度と,HFおよびCOF2生成量が得られた.今後,煤等による影響のさらなる抑制,一般に利用されるSUS等の壁面による実験,および反応メカニズムの考察を行ってゆく予定である.

## 3.4 ヒートポンプ・ポンプダウン時のディーゼル爆発の安全性研究

### 3.4.1 はじめに

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(TRK,東京都庁,2012).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(JFMA,2012). 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.

なお、本実験では事故を再現するために、ディーゼル爆発を誘発するような条件を意図的につくりだしてい るため、この結果によって各冷媒の危険が示されるものではないことをここに述べておく.

## 3.4.2 実験装置と実験方法

図 3.4.1 に実験装置の概略を示す.装置は主に、空気供給系、冷媒供給系、温度調節系、潤滑油供給系、及び モーター駆動によるコンプレッサー(模型エンジン)から構成されている.



Fig. 3.4.1 Experimental apparatus

(a) 空気供給系 空気はコンプレッサー(オイルレスエアーコンプレッサー39L/ACP-160SL: EARTH MAN 製) で 0.7 MPA に圧縮し, 除湿機(エアードライヤーGK3103D-AC100V: CKD 製) を通り, 減圧弁(AR20-

02BE: SMC 製) で 0.3 MPa 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(SRSERIES: ヤマト産業製)に入り 0.3 MPA に減圧し, マスフローコントローラー(FCST1500FC-8J3-F400L-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.本実験では、このヒーターに よって、ディーゼル爆発を誘発するような条件を意図的につくりだしている.

(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 150 MPa 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) コンプレッサー 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 25.42 cc, 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 駆動した. 回転数はコンピューターにより制御した.

(f) 計測系 計測は、コンプレッサー(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、コンプレッサー内の圧力は圧力計(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)を介してパソコンに収録した.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.

(g) 実験方法 使用した冷媒と潤滑油は表 3.4.1 に示す.現行主要冷媒である R410A,新冷媒の R32, R1234yf に加え,比較のため不燃性純冷媒である R134a,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,回転数,使用冷媒, 冷媒体積濃度とした.

Table 3.4.1 Refrigerant and lubricant oil			
Item	Test substance		
Refrigerant	R1234fy, R32, R410A, R134a, N <sub>2</sub>		
Lubricant oil	PAG (VG46)		

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.実験条件を表 3.4.2 に示す.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計測した.

Table 3.4.2 Conditions of experiment 1			
Air-oil mixing gas			
Number of revolutions, rpm	500 ~ 1500		
Air flow rate, l/min	6.3 ~ 18.8		
Inlet gas temperature, °C	250		
Oil flow rate, l/min	$(0.765 \sim 2.295) \times 10^{-4}$		

実験2では、実験1を踏まえ空気、冷媒、潤滑油混合気の自己着火燃焼を、冷媒体積濃度を変化させて測定した.実験条件を表3.4.3に示す.潤滑油の量は冷媒濃度にかかわらず一定とした.

Table 3.4.3 Conditions of experiment 2			
Air-refrigerant mixing gas			
Number of revolutions, rpm	500 ~ 1500		
Refrigerant concentration, vol%	0 ~ 100		
Mixing gas flow rate, l/min	6.3 ~ 18.8		
Inlet gas temperature, °C	260		
Oil flow rate, l/min	$(0.765 \sim 2.295) \times 10^{-4}$		

実験3では、空気、冷媒、潤滑油混合気の自己着火燃焼時における排気ガスを、FT/IRを用いて測定した.実 験条件を表 3.4.4 に示す. 生成物の同定には、PNNLのデータ(2012)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,4039 cm<sup>-1</sup>のスペクトルを用いた.

Table 5.4.4 Collations of experiment 5			
Air-refrigerant-oil mixing gas			
Number of revolutions, rpm	1500		
Refrigerant concentration, vol%	20, 30 (R32)		
Mixing gas flow rate, l/min	18.8		
Inlet gas temperature, °C	260		
Oil flow rate, l/min	$2.295 \times 10^{-4}$		

|--|

### 3.4.3 実験結果

本実験では、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 2 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.実験3 では燃焼が発生した際の排気ガスを分析することで,圧力上昇に対する冷媒の寄与を調べた.

図 3.4.2 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. (a) 実験1の結果 実験条件は回転数 1500 rpm,吸気側気体温度 250℃である.図の横軸はクランク角であり,360°で圧縮上死点と なる. 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.これは昨年度の先行研究の結果とも一致しており、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.





(b) 実験 2 の結果 図 3.4.3 および図 3.4.4 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.実験条件は回転数 1500 rpm,使用冷媒は図 3.4.3 が R1234yf,図 3.4.4 が R134a である.

冷媒濃度0%では、実験1の結果と同様に燃焼が発生し、圧力が上昇した.またこの時白煙が発生した.冷媒 濃度が30~40%以上の範囲では、急激な圧力上昇は見られず、白煙も少量しか発生しなかった.冷媒濃度が上 がるのに従って、最大圧力は減少した.

冷媒濃度が低い範囲では、冷媒濃度0%と比べて大きな圧力上昇が発生した.この時最大圧力は50 MPa 程度 まで上昇した.激しい音や振動が発生し、大量の黒煙が観測された.燃焼が発生する冷媒濃度領域では冷媒濃 度が下がるに従って最大圧力も低下した.潤滑油を噴霧しない時は、いずれの冷媒濃度でも燃焼は発生しなか った.黒煙、白煙共発生せず、回転も静かだった.以上の現象は、R1234yf、R32、R410A を用いた際の実験結 果において同様の結果となった.

一方 R134a と N2 の実験結果では、冷媒濃度 70 %以上では、燃焼が発生せず、回転も静かであった.冷媒濃度 50 %以下では燃焼が発生した. 白煙が発生し、多少の振動が起きた. 既述の冷媒のような、大量の黒煙と激しい震動は確認されなかった. 冷媒濃度が下がるのに従って最大圧力が上昇し、冷媒濃度 0 %で最大圧力が最大となった.



Fig. 3.4.3 Pressure in the engine at R1234yf mixture gas



図 3.4.5 および図 34.6 に,実験 2 の結果をまとめたグラフを示す. 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,断熱圧縮を仮定して理論値を計算した.

R1234yf のグラフにおいて,冷媒濃度 50%以上では自己着火が発生せず,最大圧力も潤滑油無しの場合とほぼ同等であった.冷媒濃度の減少に従って最大圧力が上昇しているが,これは空気と冷媒の比熱比の違いによるものだと考えられる.冷媒濃度が更に低くなると,自己着火が発生する.この時の最大圧力は空気のみと比べて大きくなっている.冷媒自体が燃焼反応を起こしていると考えられる.R32,R410A についても,同様の結果が得られた.

R134aのグラフでは、冷媒濃度が高い範囲ではR1234yfと同様に自己着火が発生しなかった。冷媒濃度が低くなると自己着火が発生したが、最大圧力はR1234yfと比べて小さく、冷媒濃度 0%で最大となった。冷媒自体の燃焼反応は起きていないと考えられる. N<sub>2</sub>についても同様の結果が得られた.





(c) 実験3の結果 図 3.4.7 に、空気、R1234yf、潤滑油混合気を圧縮し、燃焼が発生した際の、排気ガスの FI/IRによる分析結果を示す. 混合気の自己着火が発生している時、排気における冷媒濃度の減少や、冷媒の分 解を起因とするHFやCOF<sub>2</sub>の発生が確認された. 以下にR1234yfと酸素の反応式を示す(JSRAE, 2013). 他の 3 冷媒についても同様にHFやCOF<sub>2</sub>の発生が確認された. R410Aについては、特にR32 濃度の減少が見られ、これ が燃焼反応を起こしていると考えられる.

$$C_3H_2F_4 + \frac{5}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2HF + COF_2$$

HFの濃度については表 3.4.5 のようになった.



Fig. 3.4.7 Infrared absorption spectrum of exhaust at R1234yf mixture gas

Table 3.4.5 HF absorbance at each refrigerant

Refrigerant	HF concentration [vol. %]
R1234yf	0.361
R32	0.182
R410A	0.261
R134a	0.126

## 3.4.4 ヒートポンプ・ポンプダウン時のディーゼル爆発の安全性研究のまとめ

空気,冷媒,潤滑油混合気を圧縮した際の,冷媒濃度と最大圧力の概略図は図 3.4.8 になる.これは横軸に冷 媒濃度,縦軸に最大圧力を取っている.高冷媒濃度領域ではいずれの冷媒でも燃焼は発生せず,冷媒濃度の低 下に従って最大圧力は上昇した.低冷媒濃度領域では,まず潤滑油の自己着火が発生する.この際冷媒の燃焼 性が高いと冷媒自体が燃焼反応を起こし,最大圧力は大きくなる.一方冷媒の燃焼性が低い場合冷媒自体の燃 焼は発生せず,最大圧力は小さい.



Fig. 3.4.8 Schematic diagram of the concentration of refrigerant and the maximum pressure

R1234yf, R32 など微燃性冷媒については、いずれの場合も上記の区分において燃焼性を有する冷媒と同様の 結果が、R134aについては燃焼性の低い冷媒と同様の結果がそれぞれ得られた. R410Aは不燃性冷媒であるが、 成分物質のR32 の影響を受けて、燃焼性を有する冷媒と同様の結果となった. このことから、R410A冷媒を用い たエアコンで、ポンプダウン時の圧縮機破壊事故が起こることがある程度理解できる. また燃焼の有無によら ず、いずれの冷媒の排気からもHFやCOF<sub>2</sub>が検出され、冷媒が何らかの分解反応を起こしていたことが分かった. 冷媒、空気、潤滑油混合気のディーゼル爆発は、その発生機構や発生限界が不明なことが多く、今後も検討し てゆく必要がある.

## 参考文献

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, 横浜.

東京都庁, 2012, 東京都商品等安全対策協議会報告, https://www.shouhiseikatu.metro.tokyo.jp/attention/aircon.html 東京都冷凍空調設備協会 (TRK), 技術レポート — トラブル例:エアコン・圧縮機破裂事故, 東冷協だより. 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

ーター覧表, http://www.jfma.org/atabase/table.htm

日本冷凍空調学会 (JSRAE), 2013, 微燃性冷媒リスク評価研究会 平成 24 年度プログレスレポート, JSRAE, http://www.jsrae.or.jp/info/2012progress\_report\_j.pdf

Kataoka, O., Yoshizawa, M., Ohnishi, H., and Ishida, S., 1996, Flammability evaluation of HFC-32 and HFC-32/134a under practical operating conditions, *Proceedings of the International Refrigeration Conference*, Purdue, USA, July 1996.

National Institute of Standards and Technology (NIST), 2011, Chemistry WebBook, NIST, http://webbook.nist.gov/chemistry/

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2012, Northwest-Infrared, https://secure2.pnl.gov/nsd/nsd.nsf/Welcome

Takizawa, K., 2012, Flammability properties of 2L refrigerants, *Proceedings of the International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012*, Kobe, Japan.

## 4. 微燃性冷媒の安全性研究・九州大学の進捗

## 4.1 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. HFO 系冷媒候補物質の中で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 HFO-1234ze(Z) に 注目し、そ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. HFO-1234ze(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 HFO-1234ze(Z)の熱物性測定、状態方程式の作成および伝熱特性測定試験の結果について報告し、さらに、低 GWP 混合冷媒として選定した HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO2 の混合モデルの検証、伝熱特性試験およびサイクル性能試験結果の一部についても報告する.

## 4.2 HF0-1234ze(Z)の熱物性および伝熱特性測定試験

#### 4.2.1 HF0-1234ze(Z)の熱力学的性質

メニスカスの消滅を観察する方法により、気液共存曲線(飽和密度)および臨界点を測定する装置と、事前 に内容積を計測している圧力容器に試料を封入して、圧力と容積(密度)と温度の関係(PpT 性質)および飽和蒸 気圧を測定する装置を用いて、HFO-1234ze(Z)の熱力学性質の測定を行った。飽和密度に関しては、密度範囲 223.7 kg/m<sup>3</sup> から 833.2 kg/m<sup>3</sup>,温度範囲 403 K から 423.3 K の 10 点、飽和蒸気圧に関しては、温度範囲 310 K か ら 420 K,圧力範囲 263 kPa から 3333 kPaで 19 点の実測値を得た.また、PpT 性質に関しては、圧力範囲 263 kPa から 6 MPa、密度範囲 45 kg/m<sup>3</sup> から 1002 kg/m<sup>3</sup>,温度範囲 310 K から 440 K で、11 本の等容線に沿って、計 236 点の実測値を得た.

HFO-1234ze(Z) に関して、メニスカスの消滅と臨界タンパク光による着色の様子、そして飽和蒸気圧曲線の補外から、臨界定数を実験的に以下のように決定した.

$T_{\rm c} = 423.27 \pm 0.03$	Κ	(4.1)
$\rho_{\rm c} = 470 \pm 5$	kg/m <sup>3</sup>	(4.2)
$P_{\rm c} = 3533 \pm 10$	kPa	(4.3)

平成 24 年度に作成した HFO-1234ze(Z)の簡易型ヘルムホルツ状態方程式を改良し,実測値の再現性を高めた 新たな状態方程式を開発した.図4.2 に作成した HFO-1234ze(Z)の *P-h*線図を示す。この状態方程式の適用範囲 は温度が 273 K から 430 K まで,圧力が 6 MPa までである.この範囲内における実測値の平均的な再現性は, 飽和蒸気圧に対して 0.15%,蒸気密度に対して 0.4%,液体密度に対して 0.2%,気体音速に対して 0.05%である. また,適用範囲外においても熱力学的に妥当な挙動を示すことが確認されている.図 4.3 は状態方程式からの飽 和蒸気圧の計算値に対する実測値の偏差の温度依存性を示したものである.また,図 4.4 は気液共存曲線の計算 値および実測値を *T-p*線図上にプロットしたものである.いずれの図からも、本研究で開発した状態方程式が実 用上十分な再現性を持っていることが確認できる.

本研究で開発した状態方程式に基づく HFO-1234ze(Z)の FLD ファイル(REFPROP の物質定義ファイル)は, 2013 年 12 月から NIST のサイトで全世界に公開されている.


### (4/0.615 kg/ m , 423.27

## 4.2.2 HF0-1234ze(Z)の輸送的性質

HFO-1234ze(Z)の熱伝導率を長さの異なる2本の白金細線(直径:15µm)を用いた非定常細線法によって測定 した. 昨年度は HFO-1234ze(Z), HFO-1234ze(E), および HFC-32 およびの飽和液熱伝導率の測定を実施し, 今 年度は HFO-1234ze(Z)の蒸気熱伝導率,および HFO-1234ze(E)と HFO-1234ze(Z)の液粘度について測定を行った.

図 4.5(a)に気体熱伝導率の測定条件を,図 4.5(b)にその測定結果を示す.測定は、図 4.5(a)に示すような密度 一定の条件で行った.図 4.5(b)中,線で示すのは,REFPROP9.1 で求めた値である.ただし,HFO-1234ze(Z)の 値は、本プロジェクトで開発された拡張対応状態原理(ECS)モデルを用いた求められた値で、これは Akasaka の提供する FLD ファイルに組込まれているモデルである.図に示される通り、HFC-32 および HFO-1234ze(E)の 値は、REFPROPの予測する値とよく一致しており、新規冷媒 HFO-1234ze(Z)の値は ECS モデルの予測する値と よく一致している.

図 4.6(a)および(b)はそれぞれ、HFO-1234ze(E)の液(圧縮液)粘度の測定条件および測定結果である.また、 図 4.7(a)および(b)は同様に HFO-1234ze(Z)の液粘度の測定条件および結果を示す.測定は飽和温度 99.5,90, 70 °C となる圧力の下、図の様に温度を変化させて行った.図中の線は REFPROP9.1 および本プロジェクトの ECS モデルによる予測値を示す.図より、HFO-1234ze(E)の HFO-1234ze(Z)のいずれの液冷媒も、温度が上昇す るにつれて粘度は著しく低下する.また、同じ飽和温度に対応する圧力条件では、HFO-1234ze(Z)の液粘度の方 が、HFO-1234ze(E)に比して著しく高いことが分かる.この様な傾向は、線に示す予測によって良くとらえられ ており、特に HFO-1234ze(E)の測定結果と予測値は良い一致を示す.HFO-1234ze(Z)の液粘度に関しては、本実 験結果を基に、今後、ECS モデルを修正する予定である.



図 4.7 HFO-1234ze(Z)の液粘度の測定

## 4.2.3 HF0-1234ze(Z)の伝熱特性

(a) 水平ら旋溝付管内伝熱特性 蒸気圧縮式ヒートポンプループを用いて,HFO-1234ze(Z)のら旋溝付管内での蒸発および凝縮伝熱特性を測定した.ここに,試験に用いたら旋溝付管の仕様は,外径 6.08 mm,最大内径

5.49 mm, 平均内径 5.34 mm, フィン高さ 0.255 mm, リード角 20.1 度, フィン数 48, 面積拡大率 2.24 である. また, 4 つのサブセクションから構成された全長 2216 mm のテストセクションを用いて, 溝付管の長さ 554 mm ごとの圧力損失と溝付管の長さ 414 mm ごとの平均熱伝達率を測定した.

図 4.8 は HFO-1234ze(Z)の蒸発および凝縮熱伝達率である.条件は,質量速度 200 kg/(m<sup>2</sup>s),熱流束 10 kW/m<sup>2</sup> である.蒸発の場合の飽和温度は 30 ℃で、横軸に乾き度を示しており、凝縮の場合の飽和温度は 65 ℃で、横軸に湿り度を示している.なお、比較のため、HFC-134a および HFO-1234ze(E)の実験結果も同図に示す.また、図中の線は、蒸発伝達率に対して提案された森らの式(2002),および凝縮熱伝達率に対して提案された Cavallini らの式(2009)を示す.

蒸発過程において, 乾き度 0.3 以下では HFO-1234ze(Z)の熱伝達率は HFC-134a および HFO-1234ze(E)に比し て低い値を取る.しかし, それを除く範囲では, HFO-1234ze(Z)の蒸発および凝縮過程の熱伝達率は他の 2 冷媒 よりもいく分高い.これらの傾向は、Akasaka ら (2013)の提供する FLD ファイルを用いて予測された物性値 を用いることで, 蒸発では森らの式 (2002), 凝縮では Cavallini らの式 (2009) など, これまでに提案されて いる式によって十分に捉えられる.

図 4.9 へ,同様に,HFC-134a,HFO-1234ze(E)および HFO-1234ze(Z)の,蒸発および凝縮過程の圧力損失を示 す.図中の線は,蒸発に対して提案された久保田らの式(2001),凝縮に対して提案された米本-小山の式 (2007)を示す.

HFO-R1234ze(Z)の圧力損失は、HFC-134a および HFO-1234ze(E)に比して 3 倍程高い. この主な原因としては、 HFO-1234ze(Z)の蒸気密度が小さいため蒸気速度が高くなることが挙げられる. 同様の理由から, 飽和温度 30 ℃ の蒸発過程の圧力損失と, 飽和温度 65 ℃ の凝縮過程の圧力損失とを比較すると, 凝縮過程の方が約 1/3 と低い. 飽和温度が上昇するに従い, 蒸気密度が増し蒸気速度が低下することから, 圧力損失が低くなる. こ れらの特性は, 久保田らの式 (2001) や, 米本-小山の式 (2007) など, 従来の式によって十分精度よく予測さ れる.



(b) 水平平滑円管外の伝熱特性 自然循環式試験ループを用いて,水平平滑円管外の凝縮およびプール沸騰熱 伝達率を測定した.ここに,試験に用いた平滑円管の仕様は,外径 19.12 mm,有効伝熱区間 400 mmである.

図 4.10 に HFC-134a, HFO-1234ze(E)および HFO-1234ze(Z)の過冷却度に対する凝縮熱伝達率変化を示す.図 中のシンボルは凝縮熱伝達率の実験値、シンボルから伸びるバーは不確かさを示している.また、実線および 破線は Nusselt の理論解(1916)を示しており、物性データの確かさが最も良く検証されている HFC-134a の結果は、理論値に対して不確かさ以内で良く一致している.このことより、本実験手法の信頼性が確認できる.

図 4.10(b)および(c)に示す HFO-1234ze(E)および HFO-1234ze(Z)の実験値は、Akasaka ら (2013) によって提案 された物性を用いて算出した理論値に対し、約 10%以内で一致する.また、凝縮熱伝達率は HFO-1234ze(E), HFC-134a、HFO-1234ze(Z)の順に高い値を示す.このことは HFC-134a および HFO-1234ze(Z)の液熱伝導率が HFO-1234ze(E)に比して約 8 ~ 20% 高く、凝縮潜熱は約 6 ~ 24% 高いことなどで説明ができる.これら物性の影 響を加味することにより、新冷媒 HFO-1234ze(Z)に対しても、Nusselt の理論解(1916) で精度良く熱伝達率が 予測できる.

図 4.11 に HFC-134a, HFO-1234ze(E)および HFO-1234ze(Z)の壁面熱流束に対するプール沸騰熱伝達率の変化 を示す. 図中の実線および破線は Stephan-Abdelsalam (1978)の冷媒に関する相関式である. HFO-1234ze(Z)の プール沸騰熱伝達率は HFC-134a および HFO-1234ze(E)に比して明らかに低い. 低圧冷媒である HFO-1234ze(Z) の、本実験条件範囲内での換算圧力 p\*は 0.02~0.15 と低いため、表面張力は他の冷媒に比して大きく、これと バランスを保つために離脱気泡径は大きくなり、より高い過熱度が必要になるからであると考えられる.

図 4.12(a)から(c)に HFC-134a, HFO-1234ze(E)および HFO-1234ze(Z)の飽和温度 20 °C, 熱流束 15 kW/m<sup>2</sup>, 図 12(d)に HFO-1234ze(Z)の飽和温度 40 °C, 熱流束 15 kW/m<sup>2</sup>の核沸騰様相を示す. 図 4.12(c)より HFO-1234ze(Z)の 気泡径は同条件の他の冷媒(図 4.12(a)および(b))に比して大きいことがわかる. 一方, 発泡点密度をみると, HFO-1234ze(Z)の発泡点密度は他の 2 冷媒に比して小さいことがわかる. Gaertner-Westwater (1960)は, 離脱気 泡直径が大きくなると発泡点密度は減少することを報告している. このようには発泡点密度が減少することも HFO-1234ze(Z)のプール沸騰熱伝達率が低いことの一因であると考えられる.



図 4.12 R134a, R1234ze(E)および HFO- 1234ze(Z)の核沸騰様相

## 4.2.4 HF0-1234ze(Z)のサイクル特性

低 GWP 冷媒として注目されている HFO-1234ze(E)および HFO-1234ze(Z)をヒートポンプに用いる場合の適切 な熱源温度条件を見出すための、ドロップイン試験と数値解析を行った.

表 1 に示す熱源温度条件で,対向流式熱交換器,密閉式圧縮機および電子膨張弁で構成された水熱源ヒートポンプを用いてドロップイン試験を試みた.この条件の下,HFO-1234ze(E),HFO-1234ze(Z)および HFO-1234ze(E)に5 mass% HFC-32 を添加した混合冷媒について,高温側熱源水温度が 50 から 75 ℃ での COP を比較した.

図 4.13 にドロップイン試験の結果を示す. 図より,本条件では,HFO-1234ze(Z)に比して,HFO-1234ze(E)が COP および加熱能力が高いことが分かる. さらに,HFO-1234ze(E)に HFC-32 を 5 mass% 添加することによって, COP,加熱能力のいずれも改善できることが分かる. なお,図より加熱能力が低い場合は HFO-1234ze(Z)の COP は高い値をとるが,加熱能力の増加とともに COP は急激に低下する. このことは,HFO-1234ze(Z)は凝縮 器熱源温度がより高温の場合の作動媒体として適していることを示唆している.

図 4.14 は、ドロップイン試験では確認できなかった凝縮温度 75 ℃ 以上における不可逆損失の内訳と、COP に関する数値解析結果である.まず、加熱能力 1.8 kW における実験結果と解析で求めた HFO-1234ze(E)および HFO-1234ze(Z)の COP がよく一致していることから、解析方法の妥当性が確認できる.また、これは、HFO-1234ze(Z)の圧縮機内の損失や圧力損失に起因する不可逆損失が HFO-1234ze(E)に比して著しく大きいことが分 かる.この条件では、HFO-1234ze(Z)の体積能力が小さく、同じ加熱能力を維持するためには、体積循環量を増 やさなければならず、圧力損失に起因する不可逆損失が著しく増加するためである.しかし、凝縮温度が 105、125 ℃ と上昇するに従い、この不可逆損失が大きく低減できるため、HFO-1234ze(Z)の COP は向上する.した がって、HFO-1234ze(E)の臨界点である 109 ℃ 以上での利用が見込まれるような機器に対して、HFO-1234ze(Z) は有望な候補冷媒になり得る.

表 4.1 ドロップイン試験の熱源温度条件

Water Temp.	Cond.	[°C]	50→75	
	Eva.		45→39	
Degree of superheat		[K]	3	
Heat transfer rate		[kW]	1.2~2.4	



## 4.3 低 GWP 混合冷媒の探求

今年度は、昨年度に続き、HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO2の3成分混合冷媒について、管内熱伝達率の測定と、 ドロップイン試験による熱力学的性能評価を実施した。 表 4.2 は、3 成分混合冷媒の組成比を選定するために実施した、熱力学的性能評価の条件である. その結果と 表 4.2 に示す条件に基づき、その組成比を選定した. 図 4.15 にその選定結果を示す. 図中には、GWP、蒸発器 内の冷媒温度すべり(相変化に伴う温度変化)、HFC-410A に対する COP 比および HFC-410A に対する体積能 力比を示している. 以上の結果から、GWP 値が 300 弱となる混合冷媒 A (HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>: 53/43/4 mass%) および GWP 値が 200 弱となる混合冷媒 B (HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>: 62/29/9 mass%) を選定した. 図中の赤印および青印がそれぞれ混合冷媒 A および B である.

衣 4.2 組成比の選足条件					
Condition	Α	В			
GWP	< 300	< 200			
Temperature glide	< 10 K	< 15 K			
Volumetric capacity ratio	> (	).8			
COP ratio	> 1.0				

R744 10K 15K 200 200 0.8 1.0 0.95 1.00 R1234ze(E) GWP Temp. glide COP ratio Vol. capacity ratio 図 4.15 組成比の選定結果

(計算条件;凝縮温度 30°C, 過冷却温度 0K, 蒸発温度 -3°C, 過熱度 3K, 圧縮機効率 0.85)

## 4.3.1 低 GWP 混合冷媒の熱力学的性質

純物質 HFO-1234ze(Z)と同じく、メニスカスの消滅を観察する方法により、気液共存曲線(飽和密度)および 臨界点を測定する装置と、事前に内容積を計測している圧力容器に試料を封入して、圧力と容積(密度)と温 度の関係( $P\rhoT$  性質)および飽和蒸気圧を測定する装置を用いて、3 成分系混合物 HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>の熱 力学性質の測定を行った.今回組成に関しては、GWP の値を考慮して、54 mass% HFO-1234ze(E)+43 mass% HFC-32+3 mass% CO<sub>2</sub> で行なった.飽和密度に関しては、密度範囲 240.6 kg/m<sup>3</sup> から 807.5 kg/m<sup>3</sup>、温度範囲 345.9 K から 363.1 K の 13 点、 $P\rhoT$  性質に関しては、圧力範囲 1784 kPa から 6.9 MPa、密度範囲 181 kg/m<sup>3</sup> から 666 kg/m<sup>3</sup>、温度範囲 310 K から 385K で、6本の等容線に沿って、計 101 点の実測値を得た.

本3成分系混合冷媒に関しても、メニスカスの消滅と臨界タンパク項による着色の様子、そして飽和蒸気圧 曲線の補外から、臨界定数を実験的に以下のように決定した.

$T_{\rm c} = 361.83 \pm 0.03$	Κ	(4.4)
$\rho_{\rm c} = 466 \pm 5$	kg/m <sup>3</sup>	(4.5)
$P_{\rm c} = 5394 \pm 10$	kPa	(4.6)

HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>の3成分混合冷媒に対する熱力学モデルの開発を行った.本研究で開発したモデルはヘルムホルツ自由エネルギーの混合則に基づく多流体モデルである.多流体モデルは、3成分系における分子間相互作用を各2成分間の相互作用の和として表現する.したがって、2成分間の相互作用モデルがまだ確立していない HFO-1234ze(E)/HFC-32のモデル構築を最初に試みた(HFO-1234ze(E)/CO<sub>2</sub>および HFC-32/CO<sub>2</sub>の各2成分混合冷媒に対するモデルはすでに提案されている).

図 4.18 は、HFO-1234ze(E)/HFC-32 のモデルから計算した気液共存曲線と実測値とを比較したものである. 臨 界点近傍の飽和蒸気側の挙動にやや差異が見られるものの、飽和液側は極めて良く一致している. また、モデ ルから計算した臨界定数も実測値に近い値が得られている.

図 4.19 は、HFO-1234ze(E)/HFC-32 のモデルを組み込んで HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>の3成分系における気液 共存曲線を計算し、実測値と比較したものである.3成分固有のパラメータ等は含んでいないが、飽和液側の挙 動および臨界定数の値は良く一致している.





図 4.16 HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>混合冷媒 の *T-p* 線図

図 4.17 HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>混合冷媒 の P-T線図





## 4.3.2 低 GWP 混合冷媒の伝熱特性

(a) 水平ら旋溝付管内伝熱特性 純冷媒 HFO-1234ze(Z)の場合と同じ装置,同じ手法で混合冷媒のら旋溝付管 内熱伝達率および圧力損失を測定した.ただし平均飽和温度(露点および沸点の平均値)は,蒸発試験の場合 は10°C,凝縮試験の場合は40°Cとし,空調機の冷房/暖房運転に近い条件を設定した.試験冷媒は,次の2成 分系混合冷媒と3成分系冷媒である.GWP約200の(HFO-1234ze(E)/HFC-32:70/30 mass%)および(HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>:62/29/9 mass%).そしてGWP約300の(HFO-1234ze(E)/HFC-32:60/40 mass%)および (HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>:53/43/4 mass%)の計4種類である.また,冷媒温度,乾き度等は,過冷器出口で 測定している液の組成の値を用いて,Higashiらの測定結果(2013)等をもとに,Akasaka(2013)が作成,提供 するFLDファイルを用いて計算することとした. 図 4.20 へ,測定された蒸発および凝縮熱伝達率を示す.全体的に,混合冷媒の熱伝達率は純冷媒の熱伝達率 よりも著しく低い.これは,混合冷媒に特有の物質伝達抵抗が,円滑な蒸発あるいは凝縮を阻害するためであ る.この物質伝達抵抗により,温度すべりが大きい場合,各組成の気液間モル濃度差が大きい場合,蒸気速度 が遅い場合に熱伝達が大きく劣化することがこれまでの研究で明らかとなっている.本実験では、3成分混合冷 媒(HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>:62/29/9 mass%)の温度すべりが他の2倍程大きく,その凝縮熱伝達率が他の冷 媒に比して明らかに低いことから,それらの知見に沿う結果が出ていることが確認できる.一方,蒸発流では いずれの冷媒の熱伝達率も著しく低いため,それほど大きな差異は見られなかったものの,CO<sub>2</sub>の分率が比較的 大きく蒸気密度が高いために蒸気速度が緩やかだと想定される(HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>:62/29/9 mass%)の 熱伝達率が最も小さい値を示した.

図 4.21 へ同様に、測定された圧力損失の結果を示す. 熱伝達率と異なり、混合冷媒の圧力損失は純冷媒と比較して著しい差異は無い. 冷媒ごとに比較をすると、CO2分率および HFC-32 分率がより高く、蒸気が密な冷媒ほど、蒸発過程の圧力損失は低くなる傾向にある. 凝縮過程では、全体的に圧力損失は蒸発過程よりも低く、冷媒によって著しい差異は見られなかった.



(b) プレート熱交換器内伝熱特性 ヘリボーン溝加工を施したアクリル製透明プレートを用いて水-空気二 相流の流動様相を可視化し,またボイド率を測定した.次いで,ステンレス板にヘリボーン溝加工を施したプ レート式熱交換器を強制循環式ポンプループに設置し,HFO-1234ze(E)の凝縮および蒸発熱伝達率を測定した.

厚さ 10 mm のステンレス製試験プレートには、熱源水側および冷媒側伝熱面に、22.4 mm 間隔で 5 箇所へ熱電 対を差し込む溝を設けている.測定された水側および冷媒側の表面温度から、そこでの局所熱流束を一次元定 常熱伝導の仮定のもとに求める、これらの局所熱伝達率と局所伝熱面温度から、局所熱伝達率を測定する.試 験条件は、凝縮飽和温度 35 から 40 ℃、蒸発飽和温度は 5 から 10 ℃、質量速度 10 kg/(m<sup>2</sup>s)である.

図 4.22(a)および(b)にそれぞれ、凝縮過程の壁面温度分布および局所熱伝達率の結果を示す. 凝縮が進むにつれ、測定された左右の冷媒側壁面温度差が大きくなる.テストセクション内の局所熱伝達率を見ると、凝縮の進行とともに単調に減少していることが確認できる.プレート左右の熱伝達率を比較すると、出入口が近く冷 媒の速度が比較的高いと思われる左半面の熱伝達率が僅かに高い.

図 4.23(a)および(b)へ同様に蒸発試験結果を示す. 図に示される通り, 乾き度の上昇とともに左半面の熱伝達 率が増加しているのに対し, 右半面の熱伝達率は減少していることが確認できる. この原因としては, 高い乾 き度で強い気液分配の偏りが生じていることが考えられる. 出入口が近く蒸気流速が比較的高い左半面では, 液膜が薄くなるため高い熱伝達率が得られるが, 一方, 蒸気速度が比較的遅い右半面では, 厚い液膜が形成さ れるために熱伝達率が低下したと考えられる.

### 4.3.3 低 GWP 混合冷媒のサイクル特性

純冷媒 HFO-1234ze(Z)の場合と同じ装置で、同様の手法を用い、3 成分混合冷媒の成績係数および冷房/暖房能力を検証した.ただし、混合冷媒の状態量は、過冷却器出口で計測する循環組成を用いて評価した.

表 4.3 は冷房および暖房の実験条件である.ついで,表 4.4 に試験冷媒を示す. 試験冷媒は GWP が 300 および 200 程度の 2 成分系混合冷媒(HFO-1234ze(E)/HFC-32:57/43 mass%) および(HFO-1234ze(E)/HFC-32:72/28 mass%), ならびに 3 成分系混合冷媒 (HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>:53/43/4 mass%) および (HFO-

1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>: 62/29/9 mass%) である.比較対象のため,現行冷媒のHFC-410A についても同様に測定した.

図 4.24 に、冷房および暖房条件における成績係数 COP と冷房/暖房能力 Q の関係を示す.いずれの冷媒においても、成績係数 COP は能力の増加に伴って減少する.これは、能力の増加に伴い、不可逆損失が増大するためである.冷媒別に比較すると、GWP 約 200 の場合、2 成分系混合冷媒および 3 成分系混合冷媒の COP は、いずれも HFC-410A と同等あるいはそれより低い.この主たる原因としては、2 成分混合冷媒の場合、体積能力が不足し、圧縮機の損失や圧力損失が増大することが挙げられる.一方、3 成分系混合冷媒は、体積能力は HFC-410A と同等であるが温度すべりが大きすぎるため、特に蒸発器内での不可逆損失が増加することが挙げられる. これに対し、GWP 約 300 の場合、2 成分系混合冷媒および 3 成分系混合冷媒の COP は、いずれも HFC-410A と同等であるが温度すべりが大きすぎるため、特に蒸発器内での不可逆損失が増加することが挙げられる. これに対し、GWP 約 300 の場合、2 成分系混合冷媒および 3 成分系混合冷媒の COP は、いずれも HFC-410A と同等、あるいはそれよりも高い.2 成分混合冷媒では、体積能力が GWP 約 200 の場合よりも高く、また温度 すべりによって熱交換器内の温度ピンチが回避され、熱源水との平均温度差を低減で出来ることが主な原因で ある.3 成分系混合冷媒は、体積能力が HFC-410A と同等でありながら、温度すべりが熱源水温度とマッチし、 熱源水との平均温度差を低減できるため、試験冷媒の中で最も高い COP を示す.



表 4.3 ドロップイン試験条件

	Heating	Cooling
Heat source temp. [°C]	$15 \rightarrow 9$	$20 \rightarrow 10$
Heat sink temp. [°C]	$20 \rightarrow 45$	$30 \rightarrow 45$
Degree of superheat [K]		3
Heat transfer rate [kW]	$1.6\sim 2.6$	$1.4\sim2.4$

老	€4.4 試験	演冷媒	
Refrigerants		GWP	Temp. glide [K]
R-32/1234ze(E)	43/57	294	9.61
	28/72	194	11.90
R-744/32/1234ze(E)	4/43/53	294	13.67
	9/29/62	200	21.59
R-410A		2088	0.11

\* At bulk temperature 10 °C



## 4.4 まとめ

本報告では、今年度実施した NEDO 受託研究の一部を紹介した.今年度までの研究により、HFO-1234ze(Z)の 詳細な熱力学的および輸送的性質が明らかとなり、それらを基に状態方程式が提案された.本研究で得られた HFO-1234ze(Z)の物性データは、米国 NIST から REFPROP で計算できるよう FLD ファイルとして頒布されてい る.また、HFO-1234ze(Z)の水平平滑管外熱伝達率に関する結果も新規に報告した.

さらに, 選定した 3 成分系混合冷媒 HFO-1234ze(E)/HFC-32/CO<sub>2</sub>の熱物性測定結果, 混合モデルの検証などが 新たになされた.また, それらを基に実施した伝熱特性試験およびサイクル性能評価試験結果の一部をここに 紹介した.

## 参考文献

- Fedele, L., Di Nicola, G., Brown, J. S., Bobbo, S., Zilio, C., 2013. Measurements and Correlations of cis-1,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234ze(Z)) Saturation Pressure. to be published in *Int. J. Thermophys*.
- Higashi, Y., Hayasaka, S., Ogiya, S.,2013. Measurements of PVT Properties, Vapor Pressures, and Critical Parameters for Low GWP Refrigerant R-1234ze(Z). In: Proceedings of Fourth Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants (Paper No. TP-018), Delft, The Netherlands.
- Kayukawa, Y., Tanaka, K., Kano, Y., Fujita, Y., Akasaka, R., Higashi, Y., 2012. Experimental Evaluation of the Fundamental Properties of Low-GWP Refrigerant HFO-1234ze(Z). In: Proceedings of the International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012, Kobe, Japan.
- Raabe, G., 2012. Molecular Modeling of Fluoropropene Refrigerants. J. Phys. Chem. B, 116(19), 5744--5751.
- Tanaka, K., Maruko, K., Fujimoto, Y., Tanaka, M., 2013. PVT Properties of R1234ze(Z). In: Proceedings of Fourth Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants (Paper No. TP-072), Delft, The Netherlands.
- Akasaka, R., Higashi, Y., Koyama, S., 2013. A fundamental equation of state for low GWP refrigerant HFO-1234ze(Z). In: Proceedings of Fourth Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants (Paper No. TP-052), Delft, The Netherlands.
- Akasaka, R., 2013. Thermodynamic property models for the difluoromethane (R-32) + trans-1,3,3,3-tetrafluoripropene (R-1234ze(E)) and difluorimethane + 2,3,3,3- tetrafluoropropene mixtures, *Fluid Phase Equilib.*, 358, 98-104.
- Mori, H., Yoshida, S., Koyama, S., Miyara, A., Momoki, S., 2002. Prediction of heat transfer coefficients for refrigerants flowing in horizontal spirally grooved evaporator tubes. In: *Proc. 14th JSRAE Annual Conf.*, 97-100, (in Japanese).
- Cavallini, A., Del Col, D., Mancin, S., Rossetto, L., 2009, Condensation of Pure and Near-Azeotropic Refrigerants in Microfin Tubes: a new computational procedure, *Int. J. Refrig.*, vol. 32: p. 162-174.
- Yonemoto R., Koyama S., 2007, Experimental study on condensation of pure refrigerants in horizontal micro-fin tubes: proposal of correlations for heat transfer coefficient and frictional pressure drop, *Trans. JSRAE*, 24 (2), 139-148, (2007). (in Japanese)
- Kubota, A., Uchida, M., Shikazono, N., 2001. Predicting Equations for Evaporation Pressure Drop Inside Horizontal Smooth and Grooved Tubes, *Trans. JSRAE*, 18(4), 29-37 (in Japanese).
- Nusselt, W., 1916, "Die Oberflachenkondensation des wasserdampfes.," Veeines Dtsch. Ingenieure, vol. 60, no. 27, pp. 541–546.
- Stephan, K. and Abdelsalam, M., 1978, "Heat-Transfer Correlations for Natural Convection Boiling," Int. J. Heat Mass Transfer., vol. 23, pp. 73–87.
- Gaertner, R. F., and Westwater, J. W., 1960. "Population of Active Sites in Nucleate Boiling Heat Transfer," Chem. Eng. Prog., Symp. Ser., Vol. 56, No. 30.

# 5. 微燃性冷媒の安全性研究・諏訪東京理科大学の進捗

## 5.1 はじめに

本学では、(公社)日本冷凍空調学会微燃性冷媒リスク評価研究会において、産総研安全科学研究部門と連携して"微燃性冷媒の燃焼・爆発性評価と空調機器使用時のリスクアセスメント"というプロジェクトを担当している。このプロジェクトは、(I)"微燃性冷媒の基礎的な燃焼・爆発特性評価"(産総研安全科学研究部門担当)と(II)"実際に起こりうる事故シナリオに基づいた微燃性冷媒の危害度評価"(諏訪東京理科大学担当)の2つの柱から成り立っており、それぞれで得た結果をフィードバックしあうことによって、より実際の使用状況に即したフィジカルハザード評価を可能にすることを目指している。ここでは、本プロジェクトのうち本学担当分の、実際に起こりうる事故シナリオに基づいた微燃性冷媒の危害度評価について、研究開始から現在まで(2011FY~2013FY)の研究の概略を述べる。

## 5.2 想定した事故シナリオ

図1に示すように大きく3つの事故シナリオを想定した。本報告書中の以降の記述では、以下のシナリオ番号 およびサブシナリオ番号を用いることとする。

- (1) シナリオ#1:暖房機器と A2L(微燃性)冷媒搭
   載空調機器を同時に使用した場合の危害度評価
- (2) シナリオ#2:A2L 冷媒のサービス・メンテナン ス時の危害度評価 このシナリオでは、さらに以下の 3 つのサブ ントリットすぎについることのかけれていた。

シナリオを設定し、それぞれ着火危険性及び物 理的危害度を実験的に評価した。

(a) サブシナリオ(a): A2L 冷媒が漏洩した空間 内で、作業者が喫煙動作を起こした場合



図1 サブテーマ(II)"事故シナリオに基づく 微燃性冷媒の危害度評価"の構成

- (b) サブシナリオ(b): A2L 冷媒とサービス・メンテナンス機器(例えば回収機など)を接続するホー ス等から冷媒が漏洩した場合
- (c) サブシナリオ(c):冷媒がサービス・メンテナンス機器(例えば回収機など)から漏洩した場合
- (3) シナリオ#3: A2L 冷媒搭載多室型空調機器(VRF)使用時の危害度評価

## 5.3 事故シナリオごとの研究進捗詳細

### 5.3.1 シナリオ#1:暖房機器と同時使用の場合

### 5.3.1.1 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。詳細は昨年度のプログレスレポート(今村ら, 2013)及び文献(今 村ら, 2012)に記載してあるので、ここでは概略だけ述べる。

### 5.3.1.2 実験

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 800g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。

#### 5.3.1.3 得られた成果

本実験により得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 家庭用空調機器に搭載される冷媒全量が4畳半面積相当の室内に漏洩した場合でも、暖房機器との同時使用による火炎伝播は認められなかった。
- (2) 漏洩した冷媒が高温熱源に接触すると、許容濃度 3 ppm(日本産業衛生学会,2013)を超える HF が 発生するが、HF の発生能力は、現行冷媒(例えば R410A)並み程度である。
- (3) 反射式石油ストーブを使用した場合、空調機器運転時に高い HF 濃度を示した。しかし、石油ファン ヒーターの場合は、空調機器運転により必ずしも HF 濃度が高くなるわけではなかった。
- (4) 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 濃度が高かった。

## 5.3.2 シナリオ#2:サービス・メンテナンス時のフィジカルハザード評価

#### 5.3.2.1 サブシナリオ(a): 喫煙動作時のフィジカルハザード評価

#### 概要

このシナリオでは、サービス・メンテナンス時に冷媒が漏洩・滞留した雰囲気下で、市販ライターを使用 した場合の着火可能性及びフィジカルハザードを評価した。2012年度は電子ライターを使用した評価を行い、 A2L 冷媒滞留下で電子ライターを使用しても、滞留冷媒全域に火炎が伝播する現象は認められないことを報 告した。2013年度は、電子ライターに比べてより予混合燃焼に近い、ターボライターを使用して、着火可能 性及びフィジカルハザードを評価した。

#### 対象とする冷媒組成

対象とする冷媒組成の決定方法の詳細は、昨年度のプログレスレポート(今村ら, 2013)及び文献(今村ら, 2013)に記載してあるので、ここでは概略のみ説明する。

ライターの燃料をn-ブタンと仮定し、Le Chaterier の式を用いてn-ブタン/A2L 冷媒/空気混合気の燃焼範囲を算出した。n-ブタンはライター着火口極近傍では、必ずLFL 程度以上の濃度であるから、A2L 冷媒がLFL 程度以下の濃度で滞留した場合に、ライター着火口極近傍のn-ブタン/A2L 冷媒/空気混合気は燃焼範囲に入る可能性があることが分かったため、これを実験対象組成とした。

### 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寄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 (Xacti, 30 fps) にて撮影した。

### 得られた成果

(1) 電子ライター使用の場合

A2L 冷媒が LFL で混合された場合は、ライター着火口で一瞬白い発光が確認されたが、その 1/30 秒 後には白い発光は消滅しており、周囲の冷媒への火炎伝播は認められなかった。A2L 冷媒が LFL/2 の 濃度で混合された場合は、ライターに着火する場合があったが、周囲の冷媒に火炎が伝播することは なかった。これは、いずれの冷媒種の場合も同様の結果であった。

(2) ターボライター使用の場合

R32, R1234yf の場合は、電子ライターと同じ傾向を示したが、R1234ze(E)の場合、ライター周囲の冷 媒への火炎伝播が認められたケースがあった。ほぼ同じ冷媒組成・湿度条件(71% R.H.)で、複数日 にわたって計 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。 周囲冷媒へ火炎が伝播した詳細な理由は現時点では不明であるが、押付動作の繰り返しにより着火口 近傍での冷媒濃度が薄まってライターに着火し、これが周囲冷媒に伝播した可能性がある。しかしプ ール内全体の冷媒に火炎が伝播するわけではなく、1~2 秒の後に自動的に消炎した。

# 5.3.2.2 サブシナリオ(b):ピンホール漏洩時のフィジカルハザード評価

### 概要

このシナリオでは、サービス・メンテナンス工場等において、配管等に生じたピンホールや破断口から A2L 冷媒が漏洩した場合を想定する。これは定置用空調機器のサービス・メンテナンス時のみでなく、カーエア コンと回収機の接続ホースでの漏洩など、広く類似の事故に応用可能である。本シナリオでは、噴出漏洩し た冷媒周辺に電気スパークなどの着火源が存在した場合に、着火してジェット火炎を形成するような可能性 があるか否か、また、ジェット火炎を形成した場合、その危害度はどの程度になるか、実験的に評価した。

## 実験

(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 mmø, スリットの場合は 1.0 mm×4.0 mm である。ピンホール径 4.0 mmø 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たブルドン型圧力計(Swagelok, PGI63B-MG2.5-LAQX)及びスト レイ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。



図2 濃度および温度計測位置(シナリオ#2・サブシナリオ(b))

(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㈱製 US-II-T-S)5台を用いた。測定位置は図2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) 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(㈱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㈱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。

(4) 実験条件

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・メンテナンス時においては、空調機器の運転は基本的に停止している。これ らのことから、本実験は漏洩圧力においては、極めて厳しい事故シナリオを模擬している。

### 得られた成果

図3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の等濃度線は2.5 vol%ごと (図3(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(a), (c)に示すように、R32 であってもR1234yf であっても、4 mm¢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¢ の場合は、図3(b), (d)にあるように可燃域そのものが認められなかった。



図3 冷媒噴流周囲の濃度分布 図中の数値は濃度 (vol%)



図 4 交流持続放電を着火源とした場合の冷媒噴流の様子 冷媒:R32, ピンホール:4 mm, 漏洩速度:413 g/min

スリットの場合は、図 3(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。

図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∲ 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 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。

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1J未満である。今回の実験では10J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 う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。

# 5.3.2.3 サブシナリオ(c):サービス・メンテナンス機器内で漏洩した場合のフィジカルハザード評価 概要

このシナリオでは、サービス・メンテナンス機器(例えば回収機など)の内部で A2L 冷媒が漏洩したという事故シナリオを想定した。この場合に、回収機等のサービス・メンテナンス機器の電気リレー等でのスパークにより冷媒が着火する危険性があるか否かを実験的に評価した。

### 実験

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2mm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。冷媒濃度はサブシナリオ(b)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。冷媒 種は R1234yf のみ対象とし、外径 1/4 インチの銅管を床面中央部から鉛直上向きに設置して噴出させた。ま た、実験条件として対向スリットの幅を0,1,5,10,20 mmに設定した。

次に、着火実験を行った。直流スパーク発生装置(横河電子機器㈱製16J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16Jで、秒間6回の放電を発生させることが可能である。着火実験におい ても、また、着火実験では、スリット幅は0mm及び20mmのみ対象とした。なお着火源となる電極は、回 収機模型中央(高さ500mm)の位置に設置した。対象冷媒はR1234yfで、漏洩速度は約380~400g/minとし、 漏洩時間は1分間とした。

### 得られた成果

(1) 回収機模型内の濃度分布

スリット幅 $w_s = 0 \text{ mm}$ の場合、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。 $w_s = 1 \text{ mm}$ の場合、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。



図 5 着火実験における回収機模型内部の様子 スリット幅 w<sub>s</sub> = 0 mm, 冷媒: R1234yf, 漏洩速度: 380 g/min, 漏洩量: 380 g

スリット幅 $w_s = 20 \text{ mm}$ の場合は、冷媒漏洩停止後、 $w_s = 1 \text{ mm}$ 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。

(2) 回収機模型内での着火実験

図5はスリット幅ws=0mmにおいて、滞留した冷媒中で直流放電させた場合(エネルギー:16J) のプール内の様子を示したものである。放電電極は回収機模型中央部(高さ500mm)に設置してあ る。放電開始直後から、電極周囲のR1234yfに着火して青白色の火炎球が形成され、これが時間とと もに水平に扁平しながら浮力の影響で上方向に伝播する様子が確認できる。天井面に衝突後は、火炎 が水平方向前面にわたって伝播しながらゆっくりと降下し、ある高さで未燃領域と燃焼領域の境界が つり合った形状を示した。その後、プールの一面を覆っていたビニ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、(1) で述べたようにプール下部の冷媒濃度が高く、酸素が比較的少ないために 火炎伝播が起きなかったものと推測される。

ただし実際の回収機において、着火源となりうるのは回収機内部の電子回路等からのスパークであ るが、これが有するエネルギーは高々mJオーダーである。図5に示すような着火及び火炎伝播が見 られたのは、16Jのエネルギーを与えた場合である。R1234yfの着火エネルギーは、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5のような燃焼が生じる可能性は極めて低い。

w<sub>s</sub> = 20 mmの場合に、漏洩停止後 30 秒で放電を発生させた。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(1.2 cm/s, Takizawa et al, 2009)ので、火炎が伝播しなかったものと考えられる。

なお、これらの成果は文献(Imamura, et al, 2013, 2014) で公表している。

## 5.3.3 シナリオ#3:多室型空調機器使用時のフィジカルハザード評価

### 5.3.3.1 概要

このシナリオでは、多室型空調機器(ビル用マルチ空調機器)から冷媒が漏洩し、着火源が存在した場合のフィジカルハザードを実験的に評価することとした。今年度は、小規模実験により A2L 冷媒燃焼時の火炎

挙動,爆風圧,温度,熱流束の発生特性を明らかにし、スケール則を見出すことを目的とした。ここでは、 (a)着火源が既に存在している空間内に冷媒が漏洩した場合(ケース 1)),(b)冷媒が漏洩・滞留した空間内 で着火源を動作させた場合(ケース 2)),の2ケースについて検討した。

## 5.3.3.2 実験

## アクリル製プール及び測定センサー

ー辺 1000 mm のアクリル製のプールを、厚さ 10 mm のアクリル板を用いて製作した。プールは 6 面ともア クリル板で覆われているが、上面のみ 300 mm×600 mm の開口部を設け、この開口部に、熱流束センサー (Vatell 製 TG-2000) 及び線径 0.32 mm¢の K 型熱電対を取り付けたセラミックフランジを取り付けた。フラ ンジと熱流束センサー,熱電対接点の表面は同一表面上にある。着火に伴い発生する爆風圧を計測するため に、マイクロフォンセンサー(PCB 製 378B02)を、高さ 500 mm でかつアクリル壁面近傍に設置した。

#### 冷媒の漏洩方法

冷媒は、外径 1/4 インチの銅管を用い、鉛直下方向に漏洩させた。漏洩高さは床から 0, 500, 750, 1000 mm の 4 段階変化させた。漏洩速度は 10 g/minとした。着火実験に先立ち、鉛直 6 地点(高さ 0, 100, 300, 500, 750, 1000 mm)の冷媒濃度を、FT-IR(日本分光㈱製FT-IR4200)にて計測した。対象とした冷媒はR32 及びR1234yf である。冷媒漏洩量は、着火源高さ(高さ 300 mm)での冷媒濃度が燃焼下限界濃度LFL,化学量論濃度*C*<sub>st</sub>、*C*<sub>st</sub>よりやや高い濃度,の3パターンを想定して適宜設定した。

#### 着火源

ケース 1)では、着火源として市販のろうそくを使用した。ろうそく着火時の火炎の大きさは概ね 20 mm で あった。ケース 2)では、着火源としてマッチを使用した。マッチは、先端の薬剤塗布部のみを折り取り、ニ クロム線で作ったコイルに接触させた。コイルにスライダック(山菱電機㈱製 10-781-5)で電圧を印加し、 マッチ着火後すぐに電圧印加を止めた。なお、最悪条件として、マッチなしで冷媒が燃焼するまでニクロム 線コイルに電圧を与え続ける実験も合わせて行った。

### 5.3.3.3 得られた成果

## 冷媒の濃度分布

得られたデータをもとに冷媒の濃度分布を求めたところ、高さ0mmから漏洩させた場合(床面漏洩)で は、床面付近で高濃度領域となり、高さ方向に行くにしたがって濃度が薄くなる結果となった。つまり、高 さ方向に対して明確な濃度勾配を有した。この濃度勾配は、漏洩高さが高くなるにしたがって緩やかになり、 漏洩高さ1000mm(天井漏洩)では、高さ750mm以下の領域の濃度は高さによらずほぼ同じになった。

## 着火特性

(1) ケース 1)

漏洩速度 10 g/min の場合、ろうそくの炎が大きくなる,冷媒に着火する、などといった現象は認められず、有意な爆風圧や温度上昇は認められなかった。ただし漏洩速度 60 g/min では、冷媒に着火し 火炎伝播するケースがあった。

(2) ケース 2)

まず R1234yf の場合、着火源がマッチの場合は、いずれの漏洩高さの場合も着火した。このとき、 湿度はいずれも 50 % R.H 前後であった。青白色の倒立の円錐状の火炎が形成され、これが浮力によ って鉛直上方へ伝播しながら移動する傾向が見られた。火炎は天井に接触したのちしばらく自分で燃 焼しているが、やがて消炎した。このとき有意な圧力上昇がみられ、温度上昇は高いときで 900℃ 程度であった。着火源より下方にあるとみられる未燃冷媒への火炎伝播は認められなかった。これに 対して着火源をニクロム線とした実験では、いずれの漏洩高さでも着火が認められなかった。ニクロ ム線の実験では、いずれも湿度が20~30% R.H.であり、着火の有無は着火源よりも主に湿度に大きく 依存していると考えられた。

R32の場合は、マッチ,ニクロム線ともに着火した。この時の湿度はそれぞれ 30~60 % R.H.であ り、R32の場合は湿度の影響はほとんど見られなかった。R32では、着火源付近でわずかに水平に扁 平した火球を形成したのち、火球が浮力により鉛直に伝播しながら天井に衝突し、天井付近でしばら く定常的に燃えたのち自動的に消炎する傾向が見られた。有意な爆風圧及び温度上昇が観測された。 これらの爆風圧と漏洩高さの関係を調べてみると、漏洩高さ 500 mm 及び 750 mm の場合の爆風圧が 比較的大きな値を示す傾向が見られた。着火源高さを 300 mm とした場合、漏洩高さ 500 mm 及び 750 mm の場合に、着火源上部で比較的燃焼範囲に入っている冷媒量が多くなっていたためと考えられる。 ただし燃焼によって生じる爆風圧は、1000 mm×1000 mm×厚さ 10 mm のアクリル板(約 12 kg)を わずかに持ち上げる程度のもので、プールを破壊するような爆風圧は生じなかった。

## 5.4 まとめ

## 5.4.1 ①暖房機器と同時使用時の安全性評価

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。

## 5.4.2 ②サービス・メンテナンス時の安全性評価

- (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、市販の電子ライターを 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。市販の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(湿 度 71 % R.H., 室温 19°C)で、わずかに火炎伝播が認められたケースがあった。ただし火炎は直ちに 自動的に消炎しており、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。
- (2) 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4mm¢,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みても、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) サービス・メンテナンス機器内で冷媒が漏洩した場合のフィジカルハザードを実験的に調べた。回 収機模型内で冷媒を漏洩させ、回収機からの冷媒漏洩拡散特性に及ぼすスリットの効果を調べた。そ の結果、スリットがなければ(あるいはスリット幅が1 mm 程度では)、回収機模型内部に漏洩した 冷媒は長時間滞留し続け、16 J 程度のエネルギーを与えれば着火して火炎伝播することが分かった。 ただし実際の回収機で 16 J ものエネルギーを有するスパークの発生は非常に考えにくく、かつ、 R1234yfの最小着火エネルギーは、実際に回収機内で生じると推測される放電エネルギーの数十倍か ら数百倍程度大きいので、冷媒が滞留したとしても着火し火炎伝播する可能性は極めて小さいと考え られる。スリット幅が 20 mm 程度あれば、冷媒の滞留を抑制し速やかに冷媒を回収機模型から漏洩

拡散でき、着火を起こりにくくすることができる可能性が示された。

## 5.4.3 多室型空調機からの急速漏洩を想定した安全性評価

多室型空調機からの急速漏洩を想定したフィジカルハザード評価を実施した。プール内の冷媒の濃度分布 は漏洩高さに大きく依存し、漏洩高さが床面に近いほど、高さ方向に大きな濃度勾配を有する傾向が見られ た。プール内で着火実験を行ったところ有意な圧力上昇や温度上昇が確認された。その大きさは、着火源よ りも上方にある、燃焼範囲内の濃度を有する冷媒量に依存することが分かった。ただし燃焼によって生じる 爆風圧は、1000 mm×1000 mm×厚さ 10 mmのアクリル板(約 12 kg)をわずかに持ち上げる程度のもので、 プールを破壊するような爆風圧は生じなかった。

## 謝辞

本実験の実施及び解析に当たり、元東京理科大学大学院 宮下達也氏,日本法医工学株式会社 森本崇徳 氏,上矢恭子氏,山崎裕太氏,日本自動車研究所 三石洋之氏,田村陽介氏,竹内正幸氏,諏訪東京理科大 学 中村俊太氏,真下峻典氏のご尽力に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 今村友彦,須川修身,2013,3-3 諏訪東京理科大学の進捗:事故シナリオに基づいたA2L冷媒のフィジカルハザード評価,微燃性冷媒リスク評価研究会 平成 24 年度プログレスレポート, pp.30-37, <u>http://www.jsrae.or.jp/info/2012progress report j.pdf</u>
- 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, 29 (4), pp.401-411.
- (独) 産業評価技術基盤機構(NITE) ウェブサイト,平成21年度PRTR届出外排出量の推計方法の詳細:19.
   オゾン層破壊物質の排出量,7章 家庭用エアコンからのオゾン層破壊物質の環境中への排出,2010, http://www.prtr.nite.go.jp/prtr/pdf/estimation23/syosai/syosai23t.pdf.

日本産業衛生学会,2013,許容濃度等の勧告(2013年度),産業衛生学雑誌,55,pp.182-208.

- 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, 52 (2), pp.91-98.
- Imamura, T., Morimoto, T., Yamazaki, Y., Kamiya, K., Mitsuishi, H. and Sugawa, O., 2013, Experimental study on ignition hazards of leaked A2L refrigerant from a pinhole, Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety 2013, Singapore, Paper No.C3-03.
- Imamura, T., Kamiya, K. and Sugawa, O., 2014, Ignition hazard evaluation on A2L refrigerants in situations of service and maintenance, 10th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Bergen, submitted.
- Takizawa, K., Tokuhashi, K. and Kondo, S., 2009, Flammability assessment of CH<sub>2</sub>=CFCF<sub>3</sub>: Comparison with fluoroalkenes and fluoroalkanes, Journal of Hazardous Materials, **172**, pp.1329-1338.

# 6. 微燃性冷媒の安全性研究・産業技術総合研究所環境化学技術研究部門の

## 進捗

## 6.1 はじめに

我々は本プロジェクトにおいて、「ノンフロン型冷媒の実用条件の燃焼性評価と着火エネルギー評価法の開 発」を実施している.ここで「実用条件の燃焼性評価」とは、ひとつは冷媒を実際に使用する際の環境を想 定した、温度・湿度条件における燃焼特性の評価である.もうひとつは、実用化する上で、現に使用されて いる不燃性冷媒との比較となる燃焼性評価である.また、「着火エネルギー評価法の開発」とは、これまで報 告されてきた微燃性(2L)冷媒の着火エネルギー値のバラツキが大きく、着火源の想定に利用することが困 難なため、これをより妥当な値に収束させ、あわせて着火・消炎を決定する要因を検討することにより、こ れらを危険性評価の指標として利用可能にしようというものである.これらの内容の進捗を以下に報告する.

## 6.2 実用条件の燃焼性評価

## 6.2.1 燃焼性の温度·湿度依存性

(a) 2L 冷媒化合物の燃焼限界の温度・湿度依存性 主な 2L 冷媒化合物について燃焼限界の温度・湿度依存 性の測定を行った.測定はすべて ASHRAE 法に則って行った.空気の湿度調整は,測定容器中に計算量 の純水を直接注入し蒸発させた.

温度依存性について、一般の可燃性ガスの燃焼限界であれば基本的にWhite則に基づいて予測することができるが、2L冷媒のような弱燃性のガスについても予測できるか確かめる必要がある.そこで、アンモニア(NH<sub>3</sub>, R717), R32, R143a, R1234yf, R1234ze(E)について測定を行った.このうちR1234yfについては乾燥空気中と湿り空気中のそれぞれで測定を行った.また,R1234ze(E)については、湿り空気中でのみ測定を行った.ここでの湿り空気は23℃換算で50%の湿度である.結果を表 6.1 に示す.予測値は、下限界(L)及び上限界(U)についてWhite則に基づいて得られる次式で計算した値である.

$$L = L_{25} \left\{ 1 - \frac{100C_{p,L}}{L_{25} \cdot Q} (t - 25) \right\} \qquad ; \qquad U = U_{25} \left\{ 1 + \frac{100C_{p,L}}{L_{25} \cdot Q} (t - 25) \right\}$$
(6.1)

ここで、tは温度(℃)、L及び $L_{25}$ は℃及び 25℃の下限界(vol%)、U及び $U_{25}$ は℃及び 25℃の上限界(vol%)、  $C_{p,L}$ は 25℃における下限界の混合気の定圧熱容量(J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)、Qは燃焼熱(J mol<sup>-1</sup>) である.

アンモニアの燃焼限界の温度依存性は予測とよく合っている.また,R32については上限界のずれがやや大きく,逆にR143aについては下限界のずれがやや大きいが,いずれもまずまずの一致といえよう.それに対して, 乾燥空気中のR1234yfと湿り空気中のR1234ze(E)とは,予測値と比べ温度依存性がかなり大きくなっている.この二つの化合物は燃焼力が一段と弱いため,それが温度依存性を大きくしている可能性がある.

冷媒	温度係数	予測値	温度係数	予測値
R717	-0.0086	-0.0095	0.0208	0.0189
R32	-0.0070	-0.0064	0.0091	0.0133
R143a	-0.0051	-0.0038	0.0080	0.0093
R1234yf (dry)	-0.0133	-0.0029	0.0102	0.0052
R1234yf (wet)	-0.0045	-0.0028	0.0098	0.0071
R1234ze(E) (wet)	-0.0104	-0.0029	0.0174	0.0061

表 6.1 主な 2L 冷媒の温度依存性

湿度依存性について,分子中のフッ素(F)原子数が水素(H)原子数よりも多い化合物では,燃焼の際に空気中の水分からH原子を引き抜くことで反応が加速されるため,湿り空気中では燃焼範囲が拡大する可能性がある.図 6.1 は,R1234yf及びR1234ze(E)についての測定結果である.燃焼限界の測定温度は 35℃であるが,空気の湿度は 23℃換算の相対湿度で表わされている.湿度と共に上限界は上昇し下限界は低下することで燃焼範囲は広がる.特に湿度の低いところで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.ただし,R1234ze(E)は湿度 10%RH以下では不燃性である.なお,分子中に十分H原子のあるNH<sub>3</sub>とR32の燃焼限界は湿度の影響を殆ど受けないことが確認された.



図 6.1 R1234yf 及び R1234ze(E)の燃焼限界(LFL, UFL)の湿度依存性

(b) 不燃性冷媒の高湿度条件下における可燃化 前項に述べたように、余剰のF原子を含む化合物は、新たなH原子を求めて水蒸気と反応するために、その燃焼性は湿度の影響を受ける可能性が高い.従って、こうした化合物であれば、通常の温度湿度条件では不燃性であっても、湿度を高くすれば可燃性になる可能性がある.実際に、R410A、R410B、R134aの各不燃性冷媒について、温度60℃で湿度50%RHの条件下で測定したところ、いずれも可燃性になることが判明した.その際の燃焼限界は表 6.2 のようであった.温度 60℃のもとで、不燃から可燃に変化する湿度条件は、R410A、R410B、R134aについてそれぞれ 20%、25%、38%であった. R125 については同じ条件で可燃性に変わることはなかった.また、これら4種の冷媒を23℃換算で湿度 50%の下で温度100℃まで上昇させてみたが、いずれも不燃性のままであった.

表 6.2 60℃, 50%RH 条件での不燃性冷媒の燃焼性					
冷媒	下降	艮界	上限界		
	vol%	±	vol%	<u>±</u>	
R134a	11.5	0.3	15.9	0.4	
R410A	15.6	0.2	21.8	0.4	
R410B	16.3	0.3	20.9	0.4	

(c) アンモニアとマルチフッ素化合物の二元混合系の燃焼限界 前述のとおり、余剰のF原子を含む化合物の燃焼性は、湿度の影響を受けることが多い.それでは水分の代わりにアンモニア等であればどうか.もし反応するようであれば、その混合系の燃焼限界はル・シャトリエ式の予測と大きくずれてくる可能性がある. そこでR1234yf, R1234ze(E), R134a, R125の4種類の化合物とNH<sub>3</sub>との混合系について測定を行った.

図 6.2 は、R1234yfとNH<sub>3</sub>混合系の燃焼限界の測定結果である.実測値は、ル・シャトリエ式による 予測値と大きく異なっている.特に、R1234yfにNH<sub>3</sub>を添加し始める場合はいきなり予測値からずれ始 める.下限界の最小値は、R1234yf単体の下限界を下回る.このような挙動を説明するために、添加ゼ ロから急勾配で立ち上がるような補正項が必要である.結局、原点に縦に接する楕円関数によってル・ シャトリエ式を修正することとした.次式である.

$$1/L = \left(c_{am}/L_{am}\right)\left(1 + p_{1}c_{yf} + p_{2}\sqrt{c_{yf} - c_{yf}^{2}}\right) + \left(c_{yf}/L_{yf}\right)\left(1 + p_{3}c_{am} + p_{4}\sqrt{c_{am} - c_{am}^{2}}\right)$$
(6.2)

ここで、L, L<sub>am</sub>, L<sub>yf</sub>はそれぞれ混合系、NH<sub>3</sub>、R1234yfの燃焼限界、c<sub>am</sub>, c<sub>yf</sub>はNH<sub>3</sub>及びR1234yfの混合分 率で c<sub>am</sub>+c<sub>yf</sub> = 1 である.また、p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub>, p<sub>4</sub>はパラメータである.図 6.2の実線は式(6.2)を実測値にフ ィットするようにパラメータ値を決めることにより得られた計算値である.計算値は実測値をよく再 現していることが分かる.



図 6.2 R1234yf-NH<sub>3</sub>系の燃焼限界

図 6.3 は, R1234ze(E)とNH<sub>3</sub>混合系の燃焼限界の測定結果である. R1234ze(E)は不燃性であるが, NH<sub>3</sub>が 4% 以上混合されると可燃性となる. NH<sub>3</sub>が 20%以上になると, 燃焼限界はR1234yfの場合と殆ど同じになる. しかし, NH<sub>3</sub>がゼロであれば不燃性であるから, 可燃性と不燃性の混合ということであり, 式(6.2)をそのまま 使用することはできない. そこで, 式(6.2)の基本形はそのまま維持し, 横軸を引きのばしてこの系に応用することにした. 次式である.

$$1/L = \left(x_{am}/L_{am}\right)\left(1 + q_1 x_{ze} + q_2 \sqrt{x_{ze} - x_{ze}^2}\right) + \left(x_{ze}/L_{FIP}\right)\left(1 + q_3 x_{am} + q_4 \sqrt{x_{am} - x_{am}^2}\right)$$
(6.3)

ここで、L, L<sub>am</sub> はそれぞれ混合系及びNH<sub>3</sub>の燃焼限界, L<sub>FIP</sub>はこの系のFIPにおける燃焼限界の収束値で ある.また、FIPにおけるR1234ze(E)の混合分率をc<sub>FIP</sub>とし、 $f = 1/c_{FIP}$ とすると、 $x_{ze} = c_{ze}f$ ,  $x_{am} = 1-x_{ze}$ で ある.また、 $q_1, q_2, q_3, q_4$ はパラメータである.図 6.3の実線は、式(6.3)を最小二乗法で実測値にフィッ トして得られた計算値である.計算値は実測値をよく再現している.同様の不燃性ガスとして、R134a やR125 がある.これらでは、NH<sub>3</sub>を少しずつ添加していき、可燃性になる初期の燃焼限界の変化が大きい ことでもR1234ze(E)の場合と同様である.それらの実測値の解析にも式(6.3)が有効であることが分かった.



図 6.3 R1234ze(E)-NH<sub>3</sub>系の燃焼限界

(d) 2L 冷媒の燃焼速度の湿度依存性 R1234yf と一般的な空気の混合気の燃焼反応は次式で表現できる.

 $CH_2=CFCF_3 + 2.5O_2 + yH_2O = (2+2y)HF + (1-y)COF_2 + (2+y)CO_2 + (1169+57y) kJ$  (6.4) ここでyは空気中の水蒸気のモル数である. R1234yfは分子内のF/H比が1より大きいため,乾燥空気中(y=0) では余剰のFがHF生成まで進まずCOF<sub>2</sub>を生成する.水蒸気のようなH原子供給物質を反応系に供給すると, HFの生成が進むことにより燃焼熱は増加し, F/H比が1となる条件(y=1,絶対湿度0.052 g-water/g-dry air) で最大となる. R1234ze(E)についても同様であるが,燃焼熱はR1234yfよりも僅かに低い.

ここで、燃焼速度( $S_u$ )に及ぼす湿度の影響を検討した.量論混合濃度(当量比 $\varphi = 1$ )における燃焼速度 $S_{u,st}$ は湿度の約2次に比例して増加した.一方、分子内のF/H比が1であるR32は、湿度の影響が見られなかった.次に、JIS Z8703の定める常湿の上限(35℃、85%RH)に相当する絶対湿度0.03において $S_u$ の濃度依存性を測定した結果を図6.4に示す.その結果、最大燃焼速度 $S_{u,max}$ は量論濃度に近い7%( $\varphi = 0.95$ )で5.9 cm s<sup>-1</sup>であることが分かった.この $S_{u,max}$ は乾燥空気中の $S_{u,max}$ の約4倍であり、R32の $S_{u,max}$ に近い、興味深いことに、R1234yfの燃焼速度は、乾燥空気中ではかなり過濃条件(10 vol%、 $\varphi = 1.3$ )で最大となり、7vol%では不燃に近いのだが、湿り空気中ではこの濃度よりも3%も低い7 vol%で最大となった.つまり、高湿度下では、R1234yfがより希薄な条件で最大の被害をもたらすことが予想される.R1234ze(E)の $S_u$ については、全体的にR1234yfより僅かに低いが、ほぼ同様の濃度依存性を示した.



図 6.4 R1234yf 及び R1234ze(E)の燃焼速度の濃度依存性(乾燥空気及び絶対湿度=0.03)

**R1234yf**の $S_u$ が,湿度増加によってどこまで増加を続けるのか興味深いが,常温で湿度を高い条件で制御することは難しい.そこで,H<sub>2</sub>Oの代わりに常温で気体であるNH<sub>3</sub>を用いることで,R1234yfのH原子供給物質依存性をより広範囲に調べた.結果を図 6.5 に示す.水分添加の時とほぼ同様,NH<sub>3</sub>添加に伴い $S_{u,st}$ は増大し, F/H比が1をやや下回ったR1234yf:NH<sub>3</sub> = 1:1において最大値 8.6 cm s<sup>-1</sup>に達した.この値はNH<sub>3</sub>単体の $S_{u,st}$ さえ上回る.このことから,高湿度条件のR1234yfの $S_{u,st}$ は絶対湿度 0.052 をやや超えたあたりで最大約9 cm s<sup>-1</sup>に達するまで増加し,その湿度条件における $S_{u,max}$ は10 cm s<sup>-1</sup>程度になる可能性がある.



図 6.5 R1234yf-H<sub>2</sub>O系及びR1234yf-NH<sub>3</sub>系の量論燃焼速度(S<sub>ust</sub>)の混合比依存性

(e) R1234yf の消炎距離の湿度依存性 消炎距離の詳細は後述することにし、ここでは R1234yf の消炎距離の湿度影響についてのみ述べる.測定温度は乾燥空気中の値は 25℃,他は全て 60℃である.まず、相対湿度 50% RH における消炎距離の R1234yf 濃度依存性を測定し、最小値を与える濃度を求めた.その結果、濃度 8.8vol%において消炎距離の最小値約5 mm を与えることが分かった.次に、R1234yf 濃度を,ほぼ最小の消炎距離を与える濃度である 9vol%に固定し、湿度を変えて消炎距離を測定した.結果を図 6.6 に示す.乾燥状態から湿度が加わるといきなり消炎距離は半分以下になり、反応系全体の F/H 比がほぼ1となる、湿度 40% RH あたりで最小 5mm を下回ることが分かった.



図 6.6 R1234yfの消炎距離の湿度依存性(乾燥空気データは 25℃, 10vol%.他は 60℃, 9vol%)

R1234yf は、燃焼限界は R32 やアンモニアと比べて低いが、消炎距離は非常に大きいため着火が起こりに くく、燃焼速度はこれらの数分の1 であるため着火した場合にも火炎伝播は弱々しく威力は非常に小さい. R1234ze(E)については火炎伝播が持続しない.乾燥空気中ではこのとおりである.しかし、高湿度条件にお いては、R1234 類は湿度の影響を強く受けるため、可燃濃度範囲は大きく広がり、消炎距離は数分の1 に減 少し、燃焼速度は数倍に増大する.その結果、R1234 類の低燃焼性という優位性は薄れてしまう.同じ理由 で、アンモニアや炭化水素等の可燃性のH原子供給物質に単体としては燃焼性の低い R1234 類を混合しても、 燃焼性低減効果はあまり期待できないので注意が必要である.R1234yf を使用する場合には、乾燥した環境 で使用すれば最も燃焼性の低い可燃性冷媒として期待できるが、高い湿度環境で使用する場合には、アンモ ニアよりも燃焼性の高い冷媒となる可能性があることが分かった.

### 6.2.2 従来の不燃性冷媒との比較となる燃焼性評価

(a) 不燃性指標へ向けて フロン代替冷媒は,性能と安全性のバランスを得るために混合物として開発されることが少なくない.それには不燃性成分が含まれることが多い.そうした冷媒の燃焼性を正しく評価するためには,不燃性の程度を定量的に評価することが必要になるが,これまでそうした方法は確立されていない.以前に,そのための試みの一つとして限界メタン濃度(LMC)というものを提案したことがある.LMCとは,特定の不燃性化合物にメタンを加えていった時に初めて可燃領域が現れるその限界のメタン濃度である.こうした方法が真に有効であるためには,メタンならメタンを添加するとして,添加量の変化と共にそれに比例して変化するような燃焼性指標が必要である.その直線性が評価方法の妥当性の目安になる.以前から用いられている F-ナンバーは添加と共に大きく湾曲することが知られており今回の目的には適当でない.そこで今回次式による F2-ナンバーを提案する.

$$F2 = \left(U - L\right)^2 / UL$$

(6.5)

これは上限界と下限界の差を燃焼範囲の中心値で規格化し二乗したものである.この量はおおよそ当 該ガスの燃焼力と云ったものに対応すると考えられる.

次の問題は、基準となる可燃性ガスとしてどのようなものを選定すれば、F2 は添加量に比例するようになるだろうかということである.上記の LMC ではメタンをそれに採用したと云うことになるが、

2L 冷媒関連の可燃性及び不燃性ガスでは分子内に過剰のフッ素原子を有するものがあるので,前項の アンモニア同様,メタンというのも望ましくない.そこで,その後同じ目的で自らが過剰フッ素を有 する R1234yf,フッ素水素同数の R32,そしてフッ素も水素も含まない可燃性ガスである一酸化炭素を それぞれ選定し,種々のガスとの混合系における F2の直線性を検討してみた.しかし残念ながらこれ までのところ,いずれの場合も結果は思わしくない.因みに図 6.7 は,R32を基準ガスとして種々のガ スを添加した場合の F2をプロットしたものである.直線性は,窒素,二酸化炭素で良く,メタン,R152a, R134a,R125 ではまずまずであるが,R1234yf及び R1234ze(E)では良くないことが分かった.



図 6.7 R32 混合系の F2 ナンバー

(b) 冷媒の熱分解 流通式反応管を用いて冷媒の熱分解及び熱分解生成物の測定を行った.図 6.8 に実験装置の概略を示す.実験に用いた反応管は,外径 1/2 インチ,内径 10.2mm,長さ 44cm のインコネル製であり,所定の温度に保った電気炉内に設置した.冷媒と空気流量の計測と制御は較正したマスフローコントローラで行い,冷媒/空気混合気は連続的に反応管に供給した.冷媒の熱分解で生成した HF 等で熱電対が腐食されるのを防ぐため,反応管の中心軸上に鞘管(インコネル製,外径 1/8 インチ,内径 1.4mm,長さ 62cm)を貫通させ,鞘管の中に外径 1mm のシース熱電対(Type K)を挿入して温度の測定を行った.

反応後の未反応の冷媒濃度とHF等の分解生成物の濃度はFT-IR(セル長 10cm, ZnSe 窓板)で測定した. 未反応の酸素濃度はガスクロ(TCD検出器, Arキャリアー, 3mmφ×3m長のSUSカラムにMolecular Sieve 13X-S を充填,カラム温度 30℃)で測定した.反応管直後の位置で反応ガスに窒素を添加し,IRの吸収強度が適当 になるように調節した.IRセルを通過したガスの一部は、ソーダライム管を通してガスクロに導入して酸素 濃度の測定を行った.残りの反応ガスはソーダライム筒で処理した後,系外に放出した.測定は室温から開 始し、段階的に温度を上げて、温度が定常状態になった後にFT-IRとガスクロによる濃度測定を行った.



図 6.8 熱分解実験装置の概略

先ず, R1234yfの熱分解に対するR1234yf/空気組成,及びR1234yf/空気の流量依存性について検討した. R1234yf/空気組成の依存性は,R1234yf/空気の流量を100cm<sup>3</sup>/minで一定として,R1234yf濃度が1vol%( $\varphi$ =0.12)から15vol%( $\varphi$ =2.10)まで変化させて測定を行った.R1234yf濃度が1vol%と15vol%の結果を図 6.9と図 6.10に示す. 図で酸素の消費率とHF等の生成率は,供給したR1234yf1モルに対して消費された酸素のモル数とHF等の生成モル数である.図には2回あるいはそれ以上の繰り返し実験の結果を纏めて示している.R1234yf の場合は,組成あるいは流量が異なっても,ある一定温度でR1234yfの分解率が急上昇し,その温度はR1234yf 濃度が 5.0, 3.0, 2.0,及び 1.0vol%の時それぞれ 620~630°C,630~640°C,660~720°C,及び 670~770°Cであり,R1234yf濃度が低下するとR1234yfの分解率が急上昇する温度は高くなる傾向にあることが分かった. 一方,R1234yf濃度が低下するとR1234yfの分解率が急上昇する温度は高くなる傾向にあることが分かった. 一方,R1234yf濃度が不も図 6.10のR1234yf = 15.0vol%のように分解率が急上昇する温度は殆ど変化しないことが分かった.熱分解による主な生成物は,HF,COF<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>,及びCOであるが,これらの生成と酸素の消費率はR1234yfの分解率の増加と共に大きくなることが分かった.なお,R1234yfの分解率等は,洗浄によって反応管内に付着している熱分解生成物を除去したクリーンな反応管を用いた場合と以前に熱分解実験に使用した反応管をそのまま用いた場合で違いは認められなかった.

R1234yf/空気の流量依存性については、R1234yf濃度を7.8vol%(φ=1.0)で一定として、R1234yf/空気流量 を 20cm<sup>3</sup>/minから 200cm<sup>3</sup>/minまで変えて測定を行った.その結果、R1234yfの分解率が急上昇する温度は、 R1234yf/空気流量が 20,50,100,200cm<sup>3</sup>/minの時、それぞれ 570~580℃,600℃弱、約 600℃,及び約 630℃ であり、R1234yf/空気流量が増すと、R1234yfの分解率が急上昇する温度は高くなることが分かった.







図 6.10 R1234yfの熱分解. R1234yf = 15.0vol% (φ = 2.10), R1234yf/空気流量 = 100cm<sup>3</sup>/min.

次に、R1234ze(E)の熱分解実験の結果を図 6.11 に示す. クリーンな反応管を用いた場合は、R1234ze(E)の 消費は約 550℃以上の温度で認められ、酸素の消費と HF 等の生成は約 600℃以上の温度で認められた. 一方, 以前に熱分解実験に使用した反応管(以下,「付着物あり」と記す)を用いた場合は、約 350℃から R1234ze(E) の消費が認められたが、酸素の消費と HF 等の生成は約 550℃まで認められなかった. 図 6.11 に示した「付 着物あり」の場合の実験結果は 3 回の繰り返し実験の結果を示しており、各々の実験における反応管内に付 着した分解生成物の量は異なると思われるにも係わらず、350~550℃の温度における R1234ze(E)の消費率の 再現性は良好であった. なお、クリーンな反応管を用いた場合、約 550~600℃の温度で R1234ze(E)は消費さ れるものの、酸素の消費と HF 等の生成は認められなかったことから、この温度範囲では R1234ze(E)の消費 は反応管内に付着している微量の熱分解生成物に影響されている可能性も考えられる. 何れにしても、反応 管内に一定量以上の熱分解生成物が付着している場合は、それ以降 R1234ze(E)の熱分解が開始する温度は約 200℃低下し、R1234ze(E)の消費率は付着物の量には影響されないことが分かった.



図 6.11 R1234ze(E)の熱分解. R1234ze(E) = 7.8vol% (φ = 1.0), R1234ze(E)/空気流量 = 100cm<sup>3</sup>/min. 白抜きの記号は反応管に付着物がある状態での測定結果.

次に, R22 の熱分解実験の結果を図 6.12 に示す. クリーンな反応管を用いた場合は, R22 と酸素の消費, 及び HF 等の生成は約 450℃以上の温度で認められた.約 450~650℃の温度では,温度の上昇に伴い R22 と 酸素の消費,及び HF 等の生成は徐々に増加し,温度の上昇に伴う消費率と生成率の増加の割合は R1234yf 及び R1234ze(E)に比べて小さいことが分かった.一方,「付着物あり」の場合は,R22 の消費は約 300℃以上 の温度で認められたが,酸素の消費と HF 等の生成は約 450℃まで認められなかった.約 450℃以上の温度で は,クリーンな反応管を用いた場合と「付着物あり」の場合で,酸素の消費と HF 等の生成に大きな違いは 認められなかった.「付着物あり」の場合,約 300~600℃の温度における R22 の消費率は実験毎に大きな違 いが認められた.従って,R22 の場合は,R22 の消費率は反応管内に付着した分解生成物の量に大きく依存 していると思われる.



図 6.12 R22 の熱分解. R22 = 21.9vol% (φ = 1.0), R22/空気流量 = 100cm<sup>3</sup>/min. 白抜きの記号は反応管に付着物がある状態での測定結果.

## 6.3 着火エネルギー評価法の開発

## 6.3.1 最小着火エネルギーと消炎距離

微燃性化合物の最小着火エネルギー(MIE, *E*<sub>min</sub>)については幾つかの測定値が報告されているものの,その値には 2~3 桁程度のバラツキがある.比較的研究例の多いアンモニアの*E*<sub>min</sub>でさえ,NFPA77 では 680mJ,高圧ガス保安協会の教本では 14mJと記載されており,約 50 倍の開きがある.こうしたバラツキが*E*<sub>min</sub>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,測定値の妥当性を検証するため,*E*<sub>min</sub>を間接的に求める方法を検討する必要がある.

MIEは、燃焼速度や消炎距離と理論的に結び付けられる.また、消炎距離は*E*minに比べて測定方法が簡便で、 着火方式の違いによる差が小さく、信頼性の高い値が得られると期待される.そこで、信頼性の高い消炎距 離の測定を行い、次に燃焼速度と消炎距離の実測値から*E*minを間接的に求めることにした.

(a) 消炎距離の測定 消炎距離について、ASTM E-582 法を模した装置を用いて測定を行った.対象は、表 6.3 に示すとおり様々な燃焼性を有する 11 種類の化合物や混合物である.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てある.正極側 のフランジはアクリル製で、負極側のフランジはSUS製である.正極側電極はフランジに固定してあり、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℃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化させ、得られた各当 量比φにおけるdの値を、3 次関数でフィッティングすることによりdの最小値とそれを与えるφminを求めた. 次に、φmin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<sub>g</sub>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鉛直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、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*<sub>q,v</sub>,後者の条件で求めた消炎距離を *d*<sub>q,h</sub>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、産総研北海道センターにある 10m微小重力装置を用いて微小重力下での測 定も行い、浮力の影響の無い理想的な消炎距離を求めた.

Name	Formula	$S_{u,max}$	$d_{q,h}$ ,	$d_{q,v}$ ,	$\phi_{\min}$ ,	Estimated $E_{\min}^{b}$ ,	Calibrated $E_{\min}^{b}$ ,
		$cm s^{-1}$	mm	mm		mJ	c),
							mJ
Propane	$C_3H_8$	38.7	1.70	1.70	1.13	0.35 (0.35)	0.247
Isobutane	$(CH_3)_2 CHCH_3$	34.2	2.00		1.16	0.62	0.44
R152a	$CH_3CHF_2$	23.6	2.33		1.17	0.90	0.63
1243zf	CH <sub>2</sub> =CHCF <sub>3</sub>	14.1	3.33		1.24	2.2	1.5
HFC-143	$CH_2FCHF_2$	13.1	3.58	3.48	1.30	2.9 (2.6)	2.0 (1.8)
R152a/134a	$CH_3CHF_2$	11.7	4.08	3.88	1.29	3.8 (3.0)	2.7 (2.1)
(50/50vol%)	/CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>						
HFC-254fb	$CH_2FCH_2CF_3$	9.5	5.23	4.35	1.35	12 (5.3)	8.4 (3.7)
R143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	7.2	7.03	6.00	1.36	27 (13)	19 (9.4)
Ammonia	NH <sub>3</sub>	7.1	8.95	7.45	0.99	45 (19)	32 (14)
R32	$CH_2F_2$	6.7	7.55	6.45	1.19	29 (14)	20 (9.8)
R1234yf	CH <sub>2</sub> =CFCF <sub>3</sub>	1.5	24.75 <sup>a)</sup>	16.75	1.23	770 <sup>a)</sup> (80)	540 <sup>a)</sup> (56)

表 6.3 11 種類の冷媒の消炎距離と Emmの推算値

a)  $d_q$  measured in microgravity. b) number in the parenthesis is  $E_{min}$  estimated from  $d_{q,v}$ . Others estimated from  $d_{q,h}$ . c) By 11% reduction of adiabatic flame zone diameter,  $d_q - \delta$ , to make  $E_{min}$  of propane 0.247 mJ, which is the most cited value reported by Lewis and Von Elbe (1987).

まず,微燃性冷媒を測定する上で平行平板のサイズが十分な大きさであることを確認するため,消炎距離の平板径依存性を測定した.図 6.13 に,主要な冷媒について,消炎距離 $d_{q,h}$ の平板径依存性を示す.プロパン については,直径 25 mm以上の平板において,測定値 $d_{q,h}$ =1.7 mmでほぼ一定値に収束した.この値はLewis and Von Elbe (1987)の値と等しい.一方,アンモニアやR32 については,平板径が大きくなるにつれて $d_q$ は増大した.微燃性冷媒は $d_q$ が大きいため,平板径を 50 mm以上に大きくしないと適切に消炎距離を決定できないこ とが分かった.因みにASTM E-582 では,平板径は平板間距離の 5~10 倍とするよう指示している(図 6.13 中に一点鎖線で示す).

表 6.3 に、2L冷媒については直径 100mm平板、それ以外の冷媒については直径 50mm平板で測定した $d_{q,h}$ 、  $d_{q,v}$ を示す. 但しR1234yfについては、通常重力下ではこれまでのところ $d_{q,h}$ を正確に求めることができず、  $d_{q,v}$ についても平板径を大きくすると $d_{q,h}$ は単調増加し、収束しきっていない可能性がある.また微小重力に おいても、平板直径 100mmまでに 充分収束していない可能性がある.



図 6.13 消炎距離d<sub>q,h</sub>の平行平板径依存性

(b) 最小着火エネルギーの推算 可燃性ガスの*E*<sub>min</sub>に関しては, Lewis and Von Elbe (1987)の理論式が知られている.

$$E_{\min} = (1/6)\pi d_{\min}^{3} \rho_{b} c_{p} (T_{b} - T_{u})$$

$$(6.6)$$

ここで、 $\rho_b$  は既燃ガスの密度、 $c_p$ は未燃ガスの定圧熱容量である.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 $d_a$ 、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(6.6)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前後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、数十度程度の温度上昇を可視化しているため、シュリーレン像の外側直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 $d_{qh}$ を比較した結果、両者はほぼ一致した.つまり、消炎距離 $d_{qh}$ は断熱火炎帯( $d_{min}$ )に加え火炎帯厚さるも含んでいることが確認できた.そこで、式(6.6)を次式のように変形した.

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

$$\delta = 2\lambda_{av} / \left( c_p \rho_u S_{u,\max} \right)$$
(6.7)
(6.8)

ここでλ<sub>av</sub>は平均熱伝導率である.

式(6.7), (6.8), 及び $d_{q,h}$ ,  $d_{q,h}$ ,  $S_{u,max}$ の実測値を用いて $E_{min}$ を見積もった結果を表 6.3 に示す.また,プロパンの $E_{min}$ 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 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 法による既報値よりも小さくなった.

## 6.3.2 消炎直径について

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 6.14 に示す.着火源(放電電極)から高さ h 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.



図 6.14 消炎直径測定装置

微燃性の R32, アンモニア, HFC-254fb について, 消炎直径 *d*\*を図 6.15 に示す. 特定の *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. この傾向は安定火炎の形成度合いと関連していると考えられる.



図 6.15 R32, R717, 及び HFC-254fb の消炎直径

ここで、消炎直径について熱理論的に考えてみる.図 6.16 のようにパラメータを設定する.このとき、孔内での熱生成速度H<sub>gen</sub>は、

$$H_{gen} = A \cdot \delta \cdot C_P (T_b - T_0) w_{av}$$
(6.9)

ここで、 $w_{av}$ は平均反応速度 (~ $S_{u}^{2}$ ) である. 一方, 孔壁による熱損失速度 $H_{loss}$ は、

$$H_{loss} = P \cdot \delta \cdot \alpha \left( T_b - T_0 \right) \tag{6.10}$$

ここで、αは熱伝達率である.式(6.9)が式(6.10)を下回らない限り、火炎は通過するであろう.よって、

$$d_{eff} \equiv 4A/P = 4h/(C_P \cdot w_{av}) \tag{6.11}$$

が得られる.式(6.11)は,孔の形状に依らず成立し,孔の形状を一般化するもので,ここでは*d*<sub>eff</sub>を実効直径 と呼ぶ.



図 6.16 実効直径の概念図

消炎直径を,長方形の孔を使って測定を行った.図 6.17 に R32 の結果を,円孔の結果と併せて示す.アスペクト比3及び5の長方形孔は,いずれのhの場合でも,式(6.11)の実効直径を導入することで円孔と同じ結果を与えることが明らかになった.この実効直径は,次項で述べるとおり,隙間のある電磁開閉器(図 6.18)を使った実機着火試験においても同様に成り立つことが確認された.



図 6.17 円孔と長方形孔で求めた R32 の実効消炎直径

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 6.18 に示す. *h*=9 mm において、プロパン火炎は、*d*=1.25 mm の孔を通過した. 一方、R32 火炎は、*d*=5.5 mm の孔を通過できなかった. 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、プロパン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で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 6.15 のグラフ中にプロットしてみれば予想できる.



図 6.18 主な冷媒の消炎直径(h=9 mm)と電気部品の隙間サイズの比較

## 6.3.3 実機を用いた着火試験

実際の電磁開閉器を用いて着火試験を行った.図 6.19 に,装置の全体像と燃焼容器内に配置した電磁開閉器(カバー付き)の様子を示す.R32 及び R1234yf について,図 6.18, 6.19 に示した電磁開閉器の前面のカバーを取り外し接点を露出させた状態で数百回の試験を行った.これまでのところ,表 6.3 の最小着火エネルギーよりも大きい AC220V, 60A, 4J 程度の接点間火花でも,殆ど着火しなかった.また,図 6.19 のようにカバーを取り付けた状態で同様の試験を行ったが,前項のとおり電磁開閉器外部への火炎の広がりは全く確認されなかった.



図 6.19 電磁開閉器を用いた着火試験

(1)モーター (2)パウダーブレーキ (3)定電圧電源 (4)スライダック、トランス (200V, 220V, 400V に設定)
(5)冷却ブロア (6)円筒容器 (I.D.=310mm, L=310mm, V=24.3L) (7)電磁開閉器

## 6.3.4 着火エネルギー評価のまとめ

これまでの研究によって、微燃性冷媒はプロパンと比較し、

- ・最小着火エネルギーは1桁以上大きいこと.そのため、プロパン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なこと.
- ・消炎距離は約3倍以上大きく、そのため実際に火花が生じる場合には消炎距離以下の電極間距離で生じる可能性があり、その場合、電極による冷却に打ち勝つために大きな放電エネルギーが必要になること.
- ・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こと.

を定量的に明らかにした.

# 文献

Lewis, B., Von Elbe, G., 1987, "Combustion, Flames and Explosions of Gases", third ed., Academic Press, New York, p. 333-361.

# 7. 微燃性冷媒の安全性研究・産業技術総合研究所安全科学研究部門の進捗

Difluoromethane(R32, CH2F2)や 2,3,3,3-tetrafluoropropene(R1234yf, CH2=CFCF3) 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 は GWP が EC(2012)の定める基準値 150 以下となっており、これらのことから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微燃性を有しているため、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、 ASHRAE(2010)は GWP にすぐれる一方でわずかに燃焼性を持つ微燃性冷媒向けに新たな燃焼区分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<sub>G</sub>値などの燃焼特性を評価した.燃焼・爆発の危険性評価のための数値シミュレーション や燃焼モデルについて、A2L/2L冷媒の自然発火温度について述べた.

## 用語

dP/dt	圧力上昇速度 (100kPa/s)	ギリシ	ャ文字
$K_G$	爆発(強度)指数 (100kPa m/s <sup>2</sup> )	$\phi$	当量比
Р	圧力 (100kPa)	ρ	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
$P_{\rm red}$	放散(最大)圧力 (100kPa)	添え字	
$V_{\text{vessel}}$	容器容積 (m <sup>3</sup> )	u	未燃ガス (ρu:−の密度:)
Т	温度 (K)	b	既燃ガス (ρ₀:−の密度:)
$S_f$	火炎伝ば速度 (cm/s)	0	標準状態 (S <sub>u0</sub> :-の燃焼速度:)
$S_u$	燃焼速度 (cm/s)	max	最大 (P <sub>max</sub> :-の圧力値)
t	時間 (s)	μg	微少重力 (Su0-µg:-での燃焼速度)

## 7.1 A2L/2L 冷媒の焼燃・爆発性影響評価

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<sub>G</sub>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∮をR32では∮0.8-1.2, R1234yfでは∮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水分の存在や高温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<sub>G</sub>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.



 $\boxtimes$  7-1 Schematic drawing and picture of experimental apparatus.

## 7.1.1 燃焼実験

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 7-1 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φ1.0 を中心に φ0.8 からφ1.2 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 φ1.325(混合比 10vol%)を中心にφ1.2 からφ1.4 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 7.1 中のDP)を用いて循環ループを形成してガスの撹拌を行った. 昨年度まで放電用の電極は直径 1mm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ていたが,今年度からは電極自身による熱損失や擾 乱の影響を避けるため,直径 0.3mmの電極を使用するように変更している.また,評価対象としている冷媒の 中にはその燃焼特性に温度依存性を持つものが含まれており, 30 度付近で燃焼特性が変化することが指摘さ れているため,本年度は大型の燃焼容器全体に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 7.1 写真参照). 高電圧を電極に供給して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.

## 7.1.2火炎速度と燃焼速度の評価

## 映像観察

図 7.2 に R32 の当量比 \phi0.9 および \phi1.2 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 \phi0.9 と \phi1.2 でほとんど同じだが,時間的変化が異なっている.

図 7.3 (左側) には R1234yf の当量比 (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 30 cm,容積 15 L)や円筒形容器(直径 10 cm,長さ 20 cm,
1.6L)を用いて着火時の影響特性を評価した. 図 7.3(右側) 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てい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.



400 ms





 $\boxtimes$  7.2 Images of flame front propagation for R32 ( $\phi$ 0.9 for left,  $\phi$ 1.2 for right).



(\$\overline\$\Vertical Vertical Vertica

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 7.4 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 φ1.2から 1.35 までの圧力プロファイルを図 7.5 に示す. φ1.4 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. φ1.35 での圧力プロファイル変化は小さく, またφ1.4 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.

# 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*<sub>f</sub>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の影響が効果をあたえ、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*<sub>u</sub>は火炎速度*S*<sub>f</sub>から以下のように評価される (Pfahl *et al.*, 2000)、

$$S_{u} = \left(\frac{\rho_{b}}{\rho_{u}}\right) \cdot S_{f} \tag{7.1}$$

 $\rho$  は密度(k・gm<sup>-3</sup>),  $\rho$ 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(cm・s<sup>-1</sup>)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.水平方向の $S_f$  は浮力の影響を最小限にするが, 鉛直方向の $S_f$  は浮力の影響を最大限に受けたものとなる.

燃焼速度S<sub>u</sub>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

$$S_{u} = \frac{R}{3} \left[ 1 - (1 - x) \left( \frac{P_{0}}{P} \right)^{\frac{1}{r_{u}}} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{P_{0}}{P} \right)^{\frac{1}{r_{u}}} \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$$
(7.2)

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7.6に示すように、R32について燃焼速度S<sub>u</sub>を水平方向の火炎伝播速度S<sub>f</sub>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7.6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<sub>u0</sub>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7.3 および図7.5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、検1.325に関してのみ燃焼速度S<sub>u0</sub>を図7.7に評価している.Takizawaら(2010)は浮力の影響を排除する ため、微小重力下での燃焼挙動を観測して燃焼速度S<sub>u0</sub>の燃焼容器での燃焼試験では火炎面が乱れ、また滑らかな燃焼波 面が観測できた小型の円筒容器での試験で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は注意深く検討する必要がある.



 $\boxtimes$  7.4 Pressure profile for R-32 ( $\phi$  0.8–1.2).



図 7.5 Pressure profile for R-1234yf (\$ 1.2-1.35).





# 7.1.3 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. 混合ガスの湿度を制御するため, MICHELL 社製の SF72 露点計を用いて容器内の露点温度を評価できるようにし,図 7.1 に示す撹拌用のルー プ経路の途中に設置した. 水分はバブラーにより添加し,混合ガスの湿度は露点温度と気体温度から評価し た. R32 についてはф1.1 を中心に,また R1234yf についてはф1.325について乾燥条件(約 10℃-30℃)と湿潤条件 (約 60%RH 以上 30-35℃)における燃焼試験を行った. 水分の添加と温度を高温(35℃)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たが,R1234yf につ いては乾燥室温環境では火炎面が乱れて不安定だったものが火炎面の輪郭が形成される傾向が見られるよう になったと同時に,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.R32 と R1234yf については評価結果の公表準備を進めており,また水分と温度の依存性が強いと考えられている R1234ze については現在燃焼試験を実施中であり,今後試験結果を取りまとめていく予定である. 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ф1.325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化学量論比や可燃域も変動することも考えられるため,水 分と温度が燃焼挙動にあたえる影響とともに来年度も引き続き現象を追求していく予定である.

# 7.1.4 爆発強度指数(K<sub>e</sub>値)の評価

爆発強度指数*K*<sub>G</sub>は圧力プロファイルを解析することで評価される.*K*<sub>G</sub>値は爆発の激しさを示す指標となっており,内部で爆発する虞れのある容器や配管等において,爆発によって生じる異常な圧力から機器や配管の損害を防ぐために備え付けられる爆発放散口(ベント)の放散口面積の設計によく用いられている.*K*<sub>G</sub>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,

$$K_{\rm G} = \left(\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}\right)_{\rm max} \cdot V_{\rm vessel}^{\frac{1}{3}} \tag{7.3}$$

Pは圧力(100kPa), tは時間(s),  $V_{vessel}$  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 7.1 に示した. 7.1.2 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.ま た表 7.2 には他の燃焼性を持つガスについての $K_G$ 値を示した. R32 やR1234yf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と同等かそれ以下となっている. 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

		$P_{\rm max}$	<i>K</i> <sub>G</sub> (100kРа т	Flame speed $S_{\rm f}$		Burning veloicty $S_{\mathrm{u}}$		
Refrigerant	Equivalent Ratio (0			$S_{ m f,t=0.1s}$	$S_{ m f}$	$S_{ m u}$	$S_{\mathrm{u}0}$	$S_{ m u0}$
	πατιο φ	(100KI)	$s^{-1}$	(cm ·s <sup>-1</sup> )	(cm ·s <sup>-1</sup> )	$(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	(cm ·s <sup>-1</sup> )	(cm ·s <sup>-1</sup> )
	0.8	6.5	9.4	_	_	_	2.87	$4.80^{a}$
R32	0.9	7	9.2	41.4	39.8 - 53.3	5.13	4.03	5.93 <sup>a</sup>
	1	7.4	8.1	52.4	51.6 - 63.1	6.15	5.29	6.55 <sup>a</sup>
	1.1	7.6	8.7	58.6	56.4 - 63.3	6.76	5.24	$6.69^{a}$
	1.2	7.6	8.9	56.0-	54.4 - 58.6	6.5	5.38	$6.39^{a}$
	1.2	3.9	1.5	-	-	-	-	-
D1094f	1.275	1	0.6	-	-	-	-	-
R1254y1	1.325	6.2	5.6	-	-	-	1.18	$1.625 \ ^{\rm b}$
	1.35	0.2	0.2	-	-	-	-	-

Table 7.1 Summary of evaluated properties for refrigerants.

a Ref. (Takizawa et al., 2005)

b Ref. (Takizawa et al., 2010), Obtained data under micro-gravity(S<sub>u0-ug</sub>).

# 7.1.5 A2L/2 冷媒の爆発強度評価手法の検討

新規冷媒を実際に設置される空調機器等に安全に適用していくには、冷媒の基礎的燃焼特性の評価結果を より現実的な条件での安全性評価に反映し、事故シナリオに基づいた実規模における影響評価を可能にする必要が あり、燃焼・爆発の激しさとそれによる人体や構造物への影響を関連づける爆発強度の評価手法について検討をす すめている.事故シナリオに基づき機器設置条件や漏えい箇所.漏洩規模など.広範囲にわたる評価項目につい て実験的な評価を行うのは困難であるが、数値シミュレーションを利用した安全性評価と対策技術開発は非 常に有効な評価手段となる.NFPA68(2007)での爆発放散口の設計基準を参考に、実規模の室内等を想定した 適用可能性を検討している. 数値シミュレーションにより室内等の実スケールでの圧力上昇挙動の解析を可能に し、K<sub>G</sub>値の評価手法に基づいた部屋の隙間等の開口率と圧力上昇度の関係を明らかにする予定である.初期の段 階では、まず密閉容器内での燃焼実験で得られる圧力上昇挙動を再現し、開口部が存在した場合の圧力(Pred) を調査して圧力低減効果を評価する. さらにA2L/2L冷媒と空気の予混合気の燃焼モデルの開発により, 燃焼 モデルを流体解析コードに組み込むことで、様々な条件下での燃焼挙動を解析し、火炎伝播距離や爆風圧の 評価を検討可能にしていく予定である. 燃焼モデルの検証には本研究での燃焼爆発実験データを用い. 燃焼 モデルの概念はZimont(2000)の手法にならい反応の進行度を示す変数cの輸送方程式を解いて評価する.実規 模の現象においては、浮力や粘性など様々な不安定性を要因とする実験からの逸脱が懸念されるが、 今後の モデル開発を通してこれらの要因に対応し、実験的評価が困難な実規模評価への適用を可能にしていく予定で ある.

# 7.2 過剰なエネルギーによる A2L/2L 冷媒の燃焼・爆発特性

# 7.2.1 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,KG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 7.2 に示す. 表はKc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.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が近いアンモニアに注目して比較評価を 進めていく予定である.

Flammable	$P_{\rm max}$	$K_G$	Burning velocity	Flammability	Detonation	imits(%)*3	Autoignition
Material	(100 kPa)	(100 kPa·m·s <sup>-1</sup> )	$(cm \cdot s^{-1})$	limits(%)	Cofined tube	Unconfined	Temperature $(^{\circ}C)^{*7}$
Acetylene	10.6 *1	1415 *1	166*2	$2.5 - 80.0^{*3}$	4.2-50.0		305
Hydrogen	6.8 *1	550 *1	312*2	4.2-75.0*3	18.3—58.9		400
Ethylene			$80^{*2}$	2.70-36.0*3	3.32-14.70		490
Diethyl ether	8.1 *1	115 *1	47*2				
Benzene			$48^{*2}$	1.3-7.9*3	1.6-5.55		562
Ethane	7.8 *1	106 *1	47*2	3.0-12.4*3	2.87-12.20	4.0-9.2	515
Propane	7.9 *1	100 *1	46*2	2.1-9.5*3	2.57-7.37	3.0-7.0	450
Butane	8.0 *1	92 <sup>*1</sup>	45 <sup>*2</sup>	$1.8 - 8.4^{*3}$	1.98-6.18	2.5-5.2	405
Ethyl alcohol	7.0 *1	$78^{*1}$		3.3-19.0*3	5.1—9.8		
Methanol	7.5 *1	75 <sup>*1</sup>	56 <sup>*2</sup>				
Methane	7.1 *1	55 <sup>*1</sup>	$40^{*2}$				
Ammonia	5.4 *1	10 *1	7.2*4	15-28*5			651
R32	7.6 <sup>†</sup>	9†	5†	13.3-29.3*6			
R1234yf	$6.2$ $^{\dagger}$	6†	1†	6.2—12.3*6			

表 7.2 Comparison of  $P_{\text{max}}$ ,  $K_G$  and other parameters with other gases.

\*1 Ref. (NFPA68, 2007), Table E.1 (0.005ft3 sphere; E=10J, normal condition). \*2 Ref.(NFPA68, 2007), Table D.1. \*4 Ref. (ISO/DIS 817, 2010)

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

\*5 Ref. (高圧ガス保安協会, 2011)

\*7 Ref. (Mannan, 2005), Table 16.4

\*6 Ref.(日本フルオロカーボン協会, 2013) † This work.

# 7.2.2 自然発火温度

自然発火温度(Autoignition temperature: AIT)は燃焼性物質が標準大気において外部からの放電や火炎などに よるエネルギー供給なしに発火する最低温度である. A2L/2L冷媒の自然発火特性を評価するため, ASTM E 659 試験法(ASTM, 2005)に従った試験に向けて整備を進めている.本試験は本来引火性液体や,可燃性固体に 関する試験法だが、本試験法を可燃性ガスにも適用し、さらに本研究では水分の存在や、触媒として想定さ れる金属の存在による影響を評価する予定である.図7.8に示す試験装置は最高1000℃までの運転を想定し て設計しているが、開放系での試験となるためR32やR1234yfの発火後に発生する有害なガスを除去するため の除害設備が必要であり,設備の整備を進めるとともに現在は有害ガスを発生しないガスでの試験評価を進 めている.一般的な可燃性ガスの自然発火温度は表 7.2 に掲載しているが、KG値を基準に整理する限りは自然 発火温度と爆発強度との直接の相関性は見られない. 今後微燃性冷媒の自然発火温度の評価を行うとともに, 自然発火温度もKa値なとど同様に容器の大きさや形状,材質等に対して依存性をもつため,同一の試験環境 条件においてA2L/2L冷媒と,他の代表的な可燃性ガスとの比較を行う計画である.



図 7.8 ASTM E659 自然発火試験概略図

# 7.3 まとめ

A2L/2L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、燃焼・爆発に関するフィジカルハザード評価を行った.R32やR1234yfについて大容量の球形燃焼容器を用いた予混合着火試験により火炎伝播速度や燃焼速度、K<sub>G</sub>値、到達圧力P<sub>max</sub>などを評価して燃焼特性を整理した.ま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検証した.燃焼・爆発の危険性評価のための数値シミュレーションや燃焼モデル、自然発火温度に関して検討を行った.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5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.

# 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.
- 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 Standarization, 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, *J. Fluorine Chem.*, 144, pp.130-136.

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.
- NPFA, 2007, Guide for venting of deflagrations 2007 Edition, NPFA 68, (2007).
- Pfahl, U. J., Ross, M. C., and Shepherd, J. E., 2000, Flammability Limits, Ignition Energy, and Flame Speeds in H2-CH4-NH3-N2O-O2-N2 Mixtures, *Combustion and Flame*, **123**, pp.140–158.
- Takizawa, K., et al., 2009, Flammability Assessment of CH2=CFCF3: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 CH2=CFCF3(R-1234yf) and its Mixtures with CH2F2 (R-32), 2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, Tokyo, P 08.
- Zimont, V. L., 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,
- 日本フルオロカーボン協会, 2013, 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 ター覧表, http://www.jfma.org/database/table.pdf (2013)

# 8 日本冷凍空調工業会の取組み

# 8.1 ミニスプリットリスクアセスメント SWG の進捗

# 8.1.1 ミニスプリットリスクアセスメント SWG の概要と取組み範囲

ミニスプリットリスクアセスメント SWG では 2.2 kW から 8 kW の壁掛け形の小型の業務用エアコン (家庭用エアコン同等)のリスクアセスメントを先行的に進め、今期は一台の室外機に複数の室内機を設置する家庭用のマルチエアコンのリスクアセスメントにも着手した.また、従来から課題とされてきた 8 kW 以下の小型の家庭用床置き形エアコン に関しても、リスクアセスメントに取り組んだ.図 8.1.1 に壁掛け形エアコンと床置き形エアコンの室内空間での設置の概要を示す.なお 3.6 kW から 25 kW の1対1の店舗用エアコンのリスクアセスメントを行うため、新たにミニスプリットリスクアセスメント SWG (II)を設け、その機器の専門家を集めてリスクアセスメントを推進している.



図 8.1.1 室内空間でのエアコン設置

図 8.1.2 消費生活用品に用いる R-Map

今回の中間報告では、以下の項目のリスクアセスメント結果について記述する.

- ① R32 および R1234yf の 2.2 kW 相当の壁掛け形ミニスプリットエアコン (小型の業務用エアコンと家庭用エアコン) のリスクアセスメント結果
- ② R32 の 2.2 k W 相当の家庭用床置き形エアコンのリスクアセスメント結果
- ③ R32の7.1kW相当の1対1天井設置店舗用エアコンを中心としたリスクアセスメント結果

なお、家庭用のマルチエアコンについてはリスクアセスメントを実施し、実用上問題のない条件を見出したが、課題も あり最後に記述する.

# 8.1.2 リスクアセスメントの概要

R410A を使用しているミニスプリットエアコンでの地球温暖化防止を目的とした代替冷媒としては,R32 単体と R1234yf に R134a や R32 等を混合した冷媒が提案されている.これら提案された冷媒は当然オゾン層破壊を伴わないこ とは言うまでもない.ミニスプリットリスクアセスメント SWG ではこのような冷媒を使用した場合に問題となる安全 性の課題抽出と対策立案を目的として,単体の R32 と単体の R1234yf および自然冷媒の代表である単体の R290 の比較 を中心にリスクアセスメントを推進している.

リスクアセスメントは 2000 年当時に片岡が日本冷凍空調工業会の検討会で発案し、八尾が発表した「プロパン使用 ルームエアコンのリスクアセスメント」で試行した着火源の存在と可燃域の存在が、同時に成立する確率を FTA (fault tree analysis) によって計算することを踏襲して評価した. すなわち、微燃性冷媒を使用することで従来エアコンからの 変化点となる、燃焼性のフィジカルハザード評価を行なった. なおリスクアセスメント手法は 2000 年当時から変わっ ており、経済産業省が発行している「リスクアセスメントハンドブック実務編」をできうる限り参照した. 特に安全性 の判断については、図 8.1.2 に示すリスクマップ(R-Map)の考え方を参照した.

#### 8.1.3 着火源の検討結果と想定

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.これら着火源の評価と考察は、日本冷凍空調工業会の2011年と2012年のプログレスレポートに詳述している.諏訪東京理科大の今村や産総研の滝澤、1998年にADL社(Author.D.Little 社)から報告書 DOE/CE/23810-92 などを参照し、以下に着火源と想定される項目を箇条書きする.

- ① カバーのない電磁接触器では7.2 kVA以上で着火するが、接点周りが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 ろうそくやマッチなどの弱い火炎を有する裸火は着火するが、石油ファンヒーターや電子式ライターなど燃焼 流が速い場合は着火しない。
- ③ 火炎を有しない喫煙中の煙草は着火しない.

④ 居住空間で人間に起因する静電気は、ほとんど着火しない.

以上から小型のミニスプリットエアコンの R32 及び R1234yf の室内及び室外機周辺の着火源としては、裸火を仮定して、リスクアセスメントを推進した.なお使用環境が異なる店舗用エアコンの着火源については、別途記述する.

#### 8.1.4 **可燃域の検討結果**

#### 8.1.4.1 可燃空間について

今回のリスクアセスメントで仮定した空間は、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」で設定された空間を見直したが、適切な仮定が見当たらず従来の空間を踏襲した.リスクアセスメントに もっとも重要なエアコン使用時の室内空間としては、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に設定した.前ページの図8.1.1に室内空間の概要と設置 状況を示す.また物流時の仮定としては、建築基準法に定められている準耐火構造の倉庫を設定した.容積が狭く、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、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.

# 8.1.4.2 可燃域の生成

微燃性冷媒のリスクアセスメントを行っていく上で重要となる可燃域の生成については、2000 年当時に「プロパン 使用ルームエアコンのリスクアセスメント」で計算したデータと 2012 年に改めて行われた東京大学でのシミュレーシ ョン結果から簡易的に R32 と R1234yf の値を求めた. 今回のリスクアセスメントに関して使用した着火の確率を可燃空 間体積・時間とし表 8.1.1 に示す.

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

表 8.1.1 各ステージの可燃空間体積・時間の値(修正済み)

# 8.1.5 サービス時, 据付け時のアンケート調査

据付け・修理時の冷媒漏洩や火気の使用実態を、工業会が関係する工事業者や修理業者にアンケート調査し、約600 件近い回答を得た.

冷媒漏洩や火気使用の発生率は、以下の通りである.冷媒漏洩は据付け時0.77%、サービスでも0.74%とかなり整合 性のある値となった.ただし、冷媒チャージ時や回収時の冷媒漏洩はさらに大きな数字となったが、チャージホースや 接続ジョイントを脱着する時の微小漏れも、冷媒漏洩と記載された可能性が高く、冷媒漏洩の実態としては約1/100と 言う数字が妥当と考えられる.また、火気使用ではサービス作業現場での喫煙率が1.3%、喫煙以外での火気の使用率 が4.2%であった.サービス現場では配管のロウ付け作業が必要なケースがあるため、バーナーやバーナーへの着火ラ イター等の火気の使用が想定され火気の使用率の割合が上がったと予想される.喫煙については後述する.

# 8.1.6 リスクアセスメントの結果と見直し

#### 8.1.6.1 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結果の事故発生確率については、独立行政法人製品評価技術基盤機構の資料によると「家電製品の重大事故発生確率の目標は 10<sup>8</sup>台/年(100万台ベース)」と示されている.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.

#### 8.1.6.2 リスクアセスメントの結果

微燃性冷媒のひとつである R32, R1234yf と強燃性冷媒 R290 の物流, 据付け, 使用, サービス, 廃棄の各ステップ での工業会で試算した現状でのリスクアセスメント結果を表 8.1.2 に示す. なお, 製造のステップに関しては各社が個 別に検討することとした.

リスク:着火確率					
分類	R290	R32	R1234yf		
物流	1.9×10 <sup>-8</sup> ~4.9×10 <sup>-6</sup>	$1.7 \times 10^{-10}$	1.9×10 <sup>-10</sup>		
据付け	1.5×10 <sup>-6</sup> ~1.7×10 <sup>-5</sup>	1.2×10 <sup>-6</sup>	2.5×10 <sup>-6</sup>		
使用(室内)	5.9×10 <sup>-9</sup> ~1.1×10 <sup>-4</sup>	$2.1 \times 10^{-12}$	2.2×10 <sup>-12</sup>		
(室外)	9.7×10 <sup>-13</sup> ~1.9×10 <sup>-8</sup>	$8.4 \times 10^{-10}$	1.2×10 <sup>-9</sup>		
サービス	9.3×10 <sup>-6</sup> ~1.7×10 <sup>-5</sup>	2.6×10 <sup>-9</sup>	2.8×10 <sup>-9</sup>		
廃棄	$1.8 \times 10^{-5} \sim 1.3 \times 10^{-4}$	5.3×10 <sup>-11</sup>	7.8×10 <sup>-11</sup>		

表 8.1.2 現状リスクアセスメント結果

リスクアセスメント結果の値を見てみると、使用時の室内での着火確率は、R290 が  $5.9 \times 10^9 \sim 1.1 \times 10^4$ であるのに対し、R32 では  $2.1 \times 10^{12}$ , R1234yfでは  $2.2 \times 10^{12}$ となり、目標の  $10^{10}$ 台/年以下よりかなり小さな値となり、安全性は高い、 一方、据付けに関してはR32 とR1234yfで、それぞれ  $1.2 \times 10^6$ や  $2.5 \times 10^6$ やとなり、サービスでも  $10^9$ のオーダであり、 何らかの対応が必要と考える. この目標となる  $10^{10}$ 台/年以下の数字は一般人に対して、着火燃焼による図 2 のリスク マップのマトリクスでのハザードが、全て致命的、危害の程度が(IV)と考えられる建物焼損の火災事故を発生すると 仮定した場合に要求される値であり、引き続き調査が必要である.

なお、2011 年からミニスプリットリスクアセスメントSWGとして公表している値とは、少し異なった値となってい るが、その要因としては着火源の見直しを行い、また基礎となる火災統計のデータを最新のものに見直した結果である. 特に室外に関しては、ガラリ(室外機用の装飾囲い)の設置や、マンションベランダなどでよく見られる複数台置の状 況を反映したため、10<sup>-10</sup>より少し大きな値になった.

# 8.1.6.3 見直しリスクアセスメントの結果

見直しリスクアセスメントとしては、現状のリスクアセスメント結果に最近の知見を反映し、また特に着火源として 支配的な喫煙の FTA を見直した.具体的には諏訪東京理科大の検討結果である R32 のような微燃性冷媒は、煙草の火 では着火しないし、圧電式のライターの火でも着火しないことを反映した.また喫煙については、ライターの火が点い ている時間は喫煙時間に対して短時間であるため、時間の概念を入れて FTA を見直し、喫煙による着火確率の項目に 「喫煙時間の割合」や「喫煙中にライターを着けている時間の割合」を追加した.また着火源としても「可燃域内の着 火源存在確率(着火源が圧電ライターでない割合)」を追加することで、オイルライターやマッチ等での着火に限定し た.

以上のような新たな知見を入れて物流, 据付け, 使用, サービス, 廃棄の各ステップで FTA を見直したリスクアセ スメント結果の値を表 8.1.3 に示す.

リスク:着火確率						
分類	R290	R32	R1234yf			
物流(倉庫毎)	9.2×10 <sup>-11</sup> ~1.4×10 <sup>-7</sup>	4.1×10 <sup>-12</sup>	4.5×10 <sup>-12</sup>			
据付け	3.7×10 <sup>-9</sup> ~2.2×10 <sup>-8</sup>	$2.7 \times 10^{-10}$	$3.1 \times 10^{-10}$			
使用(室内)	5.0×10 <sup>-13</sup> ~9.5×10 <sup>-9</sup>	3.9×10 <sup>-15</sup>	4.3×10 <sup>-15</sup>			
(室外)	4.9×10 <sup>-13</sup> ~9.3×10 <sup>-9</sup>	$1.5 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-10}$			
サービス	2.8×10 <sup>-7</sup> ~8.1×10 <sup>-7</sup>	3.2×10 <sup>-10</sup>	3.6×10 <sup>-10</sup>			
廃棄	4.1×10 <sup>-7</sup> ~5.1×10 <sup>-7</sup>	3.6×10 <sup>-11</sup>	5.3×10 <sup>-11</sup>			

表 8.1.3 見直しリスクアセスメント結果

見直した使用時(室内)の着火確率は、R32とR1234yfで国内でのエアコン台数から導き出した目標値の10<sup>-10</sup>台/年の 数字よりかなり小さな数字となり、問題のないレベルと考える.一方、使用時(室外)の着火確率は1.5×10<sup>-10</sup>と2.1× 10<sup>-10</sup>となり目標値の10<sup>-10</sup>台/年より僅かに大きくなる.今回のFTAの値はリスクマップ(R-Map)のマトリクスでハザー ドが、全て致命的、危害の程度が(IV)となると仮定しているが、開放空間である室外での着火で危害の程度が(IV) となるかの検証は必要である.

さらにサービス時が最も大きな値である 3.2×10<sup>-10</sup>と 3.6×10<sup>-10</sup>となり,据付けでも同じような値を示す.この値は, 使用時の目標値の 10<sup>-10</sup>台/年以下の数字よりは,リスクが高くなる値である.しかしこれら作業はマニュアルや手順書 に基づき責任と注意を持って行う作業であり,職業人として要求される値として使用時の目標の 10 倍から 1000 倍程度 大きくなっても,実際には安全に作業できると考えられ,各ステップとも実用上問題のないレベルと判断している.

# 8.1.7 床置き形エアコンのリスクアセスメント

# 8.1.7.1 床置き形エアコンの設置形態と課題

ミニスプリットエアコンには壁掛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 8.1.3 にミニスプリットエアコンのマルチ接続タイプであるハウジングエアコンの設 置形態を通常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形以外に床置き形,天井カセット形,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 床面に貯まる傾向がある.そのため室内機の各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ハウジングエアコンの床置き形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,まず通常エアコンの床置き形のリスク評価について説明し,最後にハウジングエアコンについて言及する.



通常エアコン(室内機1台:室外機1台) ハウジングエアコン(室外機1台:室内機数台)図 8.1.3 ハウジングエアコンの設置形態と検討条件

## 8.1.7.2 床置き形エアコンの着火源と可燃空間

床置き形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、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.また可燃空間体積も表 8.1.1 に示した値をベースに、漏洩の高さを変えて簡易計算した値を使用した.

# 8.1.7.3 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目標は壁掛け形と同じようにNITEの考えに従った.床置き形エアコンやハウ 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,通常は充分な教育を受けた専門業者が設置す ることが多く,市場流通台数が壁掛形に比べて約1%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目標値(以下許容値と言う)を10<sup>9</sup>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<sup>8</sup>以下と設定した.壁掛け形のミニスプリットエアコン と天井カセット形のパッケージエアコンを,今回対象とした床置き形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比較し,リスクアセスメントの許容値(事故発生確率)を導き出した結果を表 8.1.4 に整理して示す.

ライフ	ステージ	RAC(壁掛)	RAC(床置)	PAC(カセット)
7	令媒種	R32,R1234yf	R32	R32
代	表モテ゛ル	壁掛 冷媒量:1.0kg / 7m²	床置 冷媒量:1.0kg/7m <sup>2</sup> 使用(室内)では10m <sup>2</sup>	・室内護:カセット、天吊り 冷媒量:3kg/11㎡ ・室外護:冷媒量6kg/42㎡
輸	送,保管	10000台/1000m²(室外機)	10000台/1000m²(室外機)	2300台/1000m²(ダイキン倉庫実績)
使用	室内	<ul> <li>急速漏洩発生確率</li> <li>4.0E-4~4.7E-4</li> <li>換気条件:換気なし,隙間なし</li> <li>着火源:全て共通</li> <li>着火事故発生確率の計算方法</li> <li>→瞬間的なON動作が主体</li> </ul>	<ul> <li>急速漏洩発生確率</li> <li>1.5E-5</li> <li>換気条件:換気なし,隙間なし</li> <li>着火源:共通+想定部屋毎に設定</li> <li>着火事故発生確率の計算方法</li> <li>⇒瞬間的なON動作が主体</li> </ul>	<ul> <li>急速漏洩発生確率(ビルマル×安全率3)</li> <li>5.0E-6×3</li> <li>換気条件:3mm×900mmの隙間</li> <li>・着火源:共通+業種毎に設定</li> <li>・着火源に応じて、瞬間的な0N</li> <li>動作か継続的な動作か判断</li> </ul>
	室外	·急速漏逸発生確率 2.2E-7~ <b>2.8E-4</b> ·風速:1.0m/s	- 急速漏逸発生確率 2.2E−7~ <b>2.8E−4</b> · 風速:1.0m/s	·急速漏洩発生確率(ビルマル同等) 急速:1.34E-3 噴出:1.37E-4 風速:0,0.5m/s
サービ	゚゚ス・修理	ヒューマンエラー発生確率:1.0E-3	ヒュ-マンエラ-発生確率:1.0E-3	ヒュ-マンエラ-発生確率:1.0E-3
廃棄 (リサ	『 イクル法〉	量販業者撤去(ホンプダウン) 機器の冷媒回収⇒りサイクルセンタ- (家電りサイクル法対象)	専門業者撤去(ホンブダウン) 機器の冷媒回収⇒りサイクルセンタ- 〔家電りサイクル法対象〉	室外機の冷媒回収 - 設置場所 - 設置場所以外
リスク レヘ <sup>*</sup> )	許容	普及台数1億台/10年、100年に1度の事故 1E-10 以下	<ul> <li>普及合数20万合、100年に1度の事故 使用時:1E-08以下 作業時:1E-07以下</li> <li>並行して審議を進めているSWGI、ビルマルチSWG とりスク許容レベルを同等とする</li> <li>使用時:1E-09以下 作業時:1E-08以下</li> </ul>	普及合数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〉

#### 表 8.1.4 ライフステージと許容値(事故発生確率)

# 8.1.7.4 床置き形エアコンのリスクアセスメント見直し検討

以上の仮定で床置き形エアコンのFTAに基づくリスクアセスメントを実施した結果,対策なしの現状の許容値は使用時に9.8×10<sup>8</sup>となり目標値にならないことが判った.

R32 冷媒は一般的に空気より重いため、高さが低いほど溜まり易い特性を持つ.また想定される着火源によっては存在する床面からの高さが具体的に特定できるものがあるため、高さ別に空間を切り分けてリスクアセスメントを見直すことにした.具体的には室内において冷媒が漏れた場合の床面からの高さを特定した着火源を検討した.図 8.1.4 に高さを特定した着火源を示す.図より人の動作と床面からの高さの具体的な数値が特定でき、寝ている状況が一番厳しいが、それ以外の着火源は比較的床面から高い位置にあることがわかる.



また,エアコン使用時の室内空間での具体的なシーンを評価するため,一般的に着火源の多いと想定されるキッチン および和室に関して図8.1.4 と同様に着火源の高さを検討した.表8.1.5 に,キッチンおよび和室の各着火源とその高さ を示す.表より,床面からリスクが高いのがキッチンにおいてはガスオーブン,和室については喫煙ライターが代表的 に想定される高さであることがわかる.また床置き形エアコンの見直した可燃空間体積については,床面積の大きさを 着眼点に,漏洩したR32 冷媒が全量最小可燃濃度LFLの空間を形成する最厳条件を考え,床上到達高さを計算した.

#### 8.1.7.5 床置き形エアコンのリスクアセスメント結果

家庭用床置き形エアコンのリスクアセスメント結果を表 8.1.6 に示す.

リスク:着火確率					
分類	代表モデル	R32			
物流(倉庫毎)	中型倉庫	3.6×10 <sup>-11</sup>			
据付け	3.24m <sup>2</sup> ベランダ	4.0×10 <sup>-11</sup>			
使用(室内)	9.9m <sup>2</sup> 居室	9.9×10 <sup>-10</sup>			
(室外)	3.24m <sup>2</sup> ベランダ	8.6×10 <sup>-11</sup>			
サービス	3.24m <sup>2</sup> ベランダ	2.6×10 <sup>-10</sup>			
廃棄	3.24m <sup>2</sup> ベランダ	2.5×10 <sup>-11</sup>			

表 8.1.6 RAC 床置リスクアセスメント結果

また,図 8.1.5 に具体的な小型の 2.8 k wクラスの床置機での部屋の大きさである床面積と冷媒が漏洩した場合の着火 確率の関係を示す.さらに使用(室内)においては、冷媒が漏洩した場合の床上到達の高さを検討した.表 8.1.7 に床 上到達高さに冷媒充填量と床面積の及ぼす影響を示す.表 8.1.6、表 8.1.7 および図 8.1.5 より、室内の使用時における 冷媒充填量と床面積の関係を検討した結果 1.6×10<sup>9</sup>と許容値を下回る数値になり、対策は不要であることを確認した.

したがって、床置き形エアコンは仮定した 7m<sup>2</sup>より大きな部屋である 8 畳から 12 畳用に設置されることを勘案し、6 畳未満の居室への設置を制限する対策により使用時の許容値を満足することを確認した.

また平行して検討していたハウジングエアコンの床置き形についても、冷媒量4kgの漏洩条件で8畳未満の居室への 設置制限とファン等による冷媒拡散を行えば許容値を満足することが判明している.しかし現在のエアコンの国際規格 である IEC60335-2-40 では8畳の居室に設置できる床置き形エアコンの冷媒量の上限は約3kgであり、引き続き安全性 確保の考え方も含め検討が必要である.

なお、上記の設置制限は、一般的な床置き形エアコンで多数の割合を占めている設置条件を阻害しないと考える.

# 表 8.1.7 床上到達高さへの冷媒量と床面積の影響

<LFL濃度空間 床上到達高さ>

	7m <sup>2</sup>	9.9m <sup>2</sup>	13.2m <sup>2</sup>
冷媒1kg	0.48m	0.33m	0.25m
冷媒2kg	0.93m	0.66m	0.50m
冷媒4kg	1.87m	1.32m	0.99m

#### 8.1.7.6 床置き形エアコンのまとめと今後の展開

ミニスプリットリスクアセスメント SWG ではこれま で壁掛形に注力してリスク評価を進めてきたが、本 SWG では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評価結果を確認した.



したがって, 冷媒充填量 lkg程度のハウジングエアコンに

おいて、全形態でリスクアセスメントの値がリスク許容度とする 10<sup>9</sup>以下(業者作業時は 10<sup>8</sup>以下)であることをFTA に基づき確認した.具体的な対策の事例としては、室内の使用時に設置面積を制限する条件で 9.9×10<sup>-10</sup>を得た.また、床置き形エアコンの使用(室内)のステップにおいて、リスク要因はエアコン据え付け高さが着火リスクに大きく影響 することがわかった.

今後は、1対1設置の通常ルームエアコンに比し封入冷媒量が多く、リスクが厳しいハウジングマルチエアコンに関しては、設置面積、可燃空間時間などの検討を継続して行う.また、FTAによる着火リスクの精度を高めるため高さ概念 を検討し、より実用的な検討も継続して行う.さらに、室外での使用時の危害の大きさに関しても大学や研究機関と共同で評価し確認して行く.

#### 8.1.8 リスクの再抽出検討

ここまで述べてきたミニスプリットエアコン(家庭用エアコン)の FTA は物流, 据付け, 使用, サービス, 廃棄の 各ステップで通常起こりやすい条件, また比較的予想される条件に基づいてリスクを考えてきた. 一方, 予想し難い条 件についても事象の再抽出を行った. これら予想し難い条件のリスク評価と考察は, 日本冷凍空調工業会の 2011 年と 2012 年のプログレスレポートに詳述している.以下, 要点のみ箇条書きにする.

- ① 通常予想される範囲外の起こりにくい過小な空間、大量の漏洩、強度の着火源となる条件.
- ② 地震,火災,津波など自然災害が生じた時に、自然災害の被害以上に微燃性冷媒によって、拡大被害が生じそうな条件.
- ③ 人間の過誤によって、被害が止められないか拡大する状況に陥る条件.

SWG メンバーより物流, 据付け, 使用, サービス, 廃棄の各ステップで 34 件のリスクを再抽出し,「家電小売店が エアコン設置のために,小型のバンにエアコンを積み移動中に,配管折れによって冷媒が噴出し,運転者が煙草を吸う ために火をつけ着火爆発した」とのストーリーは可能性が高いと判断した.これについて輸送中の配管折れがどの程度 生じるのかも含め, FTA で見直し,結果,着火リスク確率が充分低いことが判った.大筋としては 8.1.6.3 章で議論し たエアコンの物流,据付け,使用,サービス,廃棄の各ステップの FTA 値は,常識的な範囲にあり,大きく変わる条 件はほとんどないことが判った.よって実施したリスクアセスメントで再検討しなければならない課題はない.

## 8.1.9 有害物質発生のフィジカルハザード評価

以上, 微燃性冷媒が漏洩して着火燃焼し, 火災が発生するフィジカルハザードについて述べてきた. しかし従来の R410A や R22 などの不燃性冷媒も含めフッ素系冷媒では, 燃焼機器や高温表面との接触により, 着火燃焼しない場合 でも有害な化学物質が発生することが知られている.

R410はR32とR125の混合冷媒であり、燃焼時に有害なフッ酸(HF)が発生する.特に塩素を含むR22では条件によ

っては、フッ酸のみならず毒ガスであるホスゲン(COCl<sub>2</sub>)が発生する場合もある.なお、R1234yfも燃焼時に有害なフ ッ酸 (HF) が発生する.

この有害物質発生に関して,最新の研究成果として今村らの文献では,反射式石油ストーブや石油ファンヒーターの 暖房機器に,壁掛け形エアコンから冷媒が漏洩すると,暖房機器との接触によりフッ酸が恕限度 3ppmを超えて発生す ることを証明した<sup>1</sup>. この傾向はR1234yf, R32 およびR410A(現行冷媒)のいずれでも,大きく差はなかった.

一方,冷媒の種類に関係なく,反応したフッ酸発生によって人に危害が生じるには,①フッ酸が発生すること,②発生したフッ酸が人の存在する所まで到達すること,③そのフッ酸の刺激に対して,回避行動がなされないこと.以上の3条件が揃った場合(和集合)で,なおかつフッ酸の発生量が恕限度である3ppmの数十倍以上の高濃度となる場合に,重大な事故発生に繋がる.

ミニスプリットリスクアセスメント SWG 内でのインタビュー結果から、エアコンのクレームとしてフッ酸発生での 異臭とは同定できないが、エアコンでの異臭騒ぎは過去から存在することが知られている.しかし R410A や R22 が漏 洩して燃焼機器や高温表面との接触があり、有害なフッ酸やホスゲンが発生し、異臭騒ぎが生じていたとしても、過去 20 年以上これらの燃焼生成物が、図 8.1.2 のリスクマップに示すような重症や入院治療を要するような重大な危害(III) に繋がったことはないようである.ただしこの現象は無視できるほどリスクが低いと言える値ではないことは確かであ る.一般的論では、フッ酸の刺激に対して回避行動の取れない幼児や寝たきりの高齢者は多く存在するが、そのような 人々がエアコンと燃焼機器が同時使用された空間に独立して存在する機会は極めて少ないので、重大な危害(III) に繋 がらなかったと判断する.

燃焼機器で R1234yf や R32 が急速に燃焼する現象は生じなくても,現行 R410A も含め冷媒が漏洩した場合に燃焼機器 や高温表面との接触があると,フッ酸などの有害物質発生のフィジカルハザードは厳しいことから,新しい微燃性冷媒 を使う場合にも,従来と同様にこの事象に対して今後も厳重な注意喚起が必要である.

# 8.1.10 店舗用パッケージエアコンの進捗(ミニスプリットリスクアセスメントSWG(I))

# 8.1.10.1 店舗用パッケージエアコンの特徴

店舗用パッケージエアコン(以下,店舗用PAC)は、家庭用ルームエアコン(以下,RAC)と比較して冷媒量が 多く、事務所、中小型店舗、あるいは学校等のやや広い空間に設置されることが多い. 微燃性冷媒使用時の店舗用PA Cリスクアセスメントでは、RACを対象としたミニスプリットリスクアセスメントSWGの手法を基本としながら、 設置条件や使用条件の近いビル用エアコンマルチリスクアセスメントSWGの考え方を参考にして、同様な評価を進め ている. 表 8.1.8 に、RAC、店舗用PAC、ビル用マルチの主な特徴をまとめる.

下表の通り,店舗用PACは,RACとビル用マルチの中間に位置する製品であり,本リスクアセスメントでは,他の製品形態との差異を明確にすることにより,懸念されるポイントを絞り評価を実施した.

第1次リスクアセスメントでは、一般的に広く使用されているモデルケースとして、『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)』『中型倉庫保管』等の条件で、各ライフステージ毎の着 大事故発生確率を算出しリスクを評価した.また図 8.1.6 に、現在進めている店舗用PACのリスクアセスメント日程 を示す.



図 8.1.6 店舗用 PAC のリスクアセスメント 日程

製品形態	RAC	店舗用PAC	ビル用マルチ
製品馬力(室外基準)	0.8~3HP	1.5~10HP	5~60HP
冷房定格能力	2.2~8.0kW	3.6~25kW	14.0~168kW
冷媒量	1~2kg	2~10kg	5~50kg
主な設置システム	基本1台:1台	1台:1~4台	1~3台:1~64台
(外:内)	個別マルチ有り	全室内機は同一空間	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	<ul> <li>天井カセット形</li> <li>天井吊形</li> <li>壁掛け形</li> <li>ビルトインダクト形</li> <li>床置き形</li> </ul>	<ul> <li>天井カセット形</li> <li>天井吊形</li> <li>壁掛け形</li> <li>ビルトインダクト形</li> <li>床置き形</li> </ul>
主な室外機タイプ	空冷式 横吹き	空冷式 横吹き 氷蕃熱式(空冷)	空冷式 上吹き 氷蓄熱式(空冷) 水冷式(機械室設置)
主な室内設置場所	住宅(居住空間)	事務所 厨房/食堂 工場 カラオケ (密閉空間)	事務所 厨房/食堂 工場 カラオケ (密閉空間)
主な室外設置場所	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 8.1.8 エアコンの製品形態による特徴の比較

# 8.1.10.2 店舗用PACリスクアセスメントの考え方

前述したミニスプリット(RAC),ビル用エアコンマルチ各リスクアセスメントSWGでの手法と同様に,以下の考 え方によりリスクを評価している.

① 許容できるリスク(着火事故発生確率)の設定

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 ているので、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、目標値を10倍している.

・使用時 : 1.3×10<sup>-9</sup>

・使用時以外(輸送・保管, 据付, 修理, 廃棄時): 1.3×10<sup>-8</sup>

冷媒漏洩発生確率の想定

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,機器 からの冷媒漏れ発生確率は以下とした.

・室内機 : 急速漏れ 1.50×10<sup>5</sup>, 緩慢漏れ 1.03×10<sup>-3</sup>

- ・室外機 : 急速漏れ 1.48×10<sup>3</sup>, 緩慢漏れ 可燃域を生成しないため考慮せず また,据付,修理,廃棄等の作業ステージでは,作業者の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<sup>4</sup>) 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<sup>3</sup>とした.
- 可燃空間発生の推測

各ライフステージにおけるモデルケースにおいて,機器漏洩冷媒量,設置空間容積,気流条件等により,可燃空間時空積を算出した.

④ 着火源の存在確率

微燃性冷媒の着火源となり得る,燃焼式設備の裸火,ロウ付けバーナー,喫煙時の裸火,電化製品の火災,電気 スパーク等の存在確率を,各ライフステージの使用条件にて調査し算出した.

上記, ②~④が遭遇する確率をFTAにてライフステージ毎に算出し,着火事故発生確率の算出とリスク評価を行い, ①の目標値を満足するかどうか判定している.許容レベルを超える場合は,安全対策を考え,使用者及び作業者の危険が除去できる安全施策を作っていく.

# 8.1.10.3 店舗用PAC第1次リスクアセスメントの結果と今後の課題

第1次リスクアセスメントでは、表8.19に示した店舗用PACの代表的なモデルケースについて、各ライフステージでの着火事故発生確率を算出した.使用(室内)の設置条件は、ビル用マルチリスクアセスメント第1次評価と同じく、一般事務所(床面積42m<sup>2</sup>,高さ2.7m)に四方向天井カセット形7.1kWタイプ(冷媒量3kg)を中央に配置しているモデルで評価している.結果を表8.3.1に示す.

ライフステージ	代表モデルケース	着火事故発生確率	許容値
輸送・保管	準耐火中型倉庫	$1.6 \ge 10^{-12}$	1.3 X 10 <sup>-8</sup>
据付	2~6 馬力システム	$2.3 \ge 10^{-9}$	1.3 X 10 <sup>-8</sup>
使用(室内)	R32:最大4kg	$5.0 \ge 10^{-11}$	1.3 X 10 <sup>-9</sup>
使用(室外)	(室内)事務所	$6.7 \ge 10^{-10}$	1.3 X 10 <sup>-9</sup>
修理	天井設置	3.0X10 <sup>-9</sup>	1.3 X 10 <sup>-8</sup>
廃棄	(室外)地上設置	2.5 X 10 <sup>-9</sup>	1.3 X 10 <sup>-8</sup>

表8.1.9 店舗用PAC第1次リスクアセスメント結果

上表の通り、第1次リスクアセスメントでは、全てのライフステージにおいて、許容値を下回る数値となった。今回の モデルケースは、一般的な使用条件であり市場で多くの割合を占めていると考えられるが、市場での存在確率は少ない もののリスクが大きいと想定されるケースについて、現在、第2次リスクアセスメントを行っている。具体的なモデル ケースを表 8.1.10 にまとめる.

-								
段階	システム(冷媒量)	室内機タイプ	室内設置	室外設置	保管	輸送		
第1次	現地追加冷媒なし (冷媒量 : 最大 4kg)	天井設置形	事務所	地上	中型倉庫	トラック		
第2次	現地追加冷媒あり (冷媒量 : 最大 8kg)	<ol> <li>① 天井設置形</li> <li>② 床置き形</li> </ol>	<ol> <li>事務所</li> <li>厨房</li> <li>密閉空間</li> </ol>	<ol> <li>1) 地上</li> <li>2) 各階</li> <li>3) 半地下</li> <li>④ 狭小地</li> </ol>	<ol> <li>通常</li> <li>小倉庫</li> </ol>	<ol> <li>通常</li> <li>ワゴン</li> </ol>		
第3次	10HP,氷蓄熱式 (冷媒量:最大19kg)	↑	1	↑ (	↑ <sup>†</sup>	↑		

表8.1.10 店舗用PACの各段階でのモデルケース

店舗用PACでは、室内外配管長が最大30mまでは、追加冷媒充填を必要としないが、それ以上になると配管長に 応じて現地追加充填するため、システムの保有冷媒量が多くなり、冷媒漏洩時のリスクが高まる.また、多種多様な室 内機形態のうち、床置き形設置型は、室内空間に漏洩冷媒が滞留しやすいため、可燃空間が生成されやすい.室内設置 空間についても、着火源の多い厨房や、自然換気が少ないカラオケルームなどの密閉空間は注意が必要とされる.また、 店舗用PAC特有の条件として、室外機を商業ビルの隙間のような狭小空間に設置する場合や、販売店の小型倉庫やワ ゴン車輸送等の比較的小さな空間に置かれる可能性がある.このような着火事故発生リスクが高くなると想定されるケ ースについて、第2次リスクアセスメントで評価を進めている.さらに、冷媒量が8kgを超えるような10HPまでの システムや氷蓄熱式システムについて、最も厳しいケースでのリスク評価を実施し、必要に応じて安全対策を策定して いく予定である

#### 8.1.11 まとめと今後の課題

ミニスプリットリスクアセスメント SWG では小型の業務用エアコン(実質的に家庭用エアコン同等)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.なお,R1234yf の適用に当たっては,可燃濃度に湿度依存性があるので充分に注意を払う必要がある.さらに冷媒転換する機器の課題としては,従来のR410A ミニスプリットエアコンに微燃性冷媒を適用する場合に,R32 は機器の大幅な設計変更を行わずに適用可能である.一方,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り,課題解決に時間が必要である.

また R32 の家庭用床置き形エアコンのリスクアセスメントも検討し,問題なく使用できることを確認した.なお,一 台の室外機に複数の室内機を設置する家庭用のマルチエアコンのリスクアセスメント結果からは,冷媒封入量と設置空 間の関係が課題となることを見出した.この件に関しては国際規格との整合性もあり,日本冷凍空調工業会の別なワー キンググループで継続検討していく.

1対1店舗用エアコンのR32の天井設置時の第1次リスクアセスメント検討では、全てのライフステージにおいて、 リスク目標値を下回る数値となり安全対策は不要との結果となった.

リスクを下げるため,SWG 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.具体的には日本冷凍空調 工業会が発行した「R32 冷媒使用家庭用エアコンの配管施工マニュアル」(工業会内部資料)として、サービスマニュ アルや据付け説明書への注意喚起など、R32 を使用する時に実施できる対策を提案しマニュアル化した.

今後も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京大学や諏訪東京理科大学,産業技術総合研究所での 検討結果から FTA の精度を高めていく一方,危害の程度についても明らかにしていく.以上の取組みにより,さらに 精度の高いミニスプリットエアコンのリスクアセスメントを推進する.

# 謝辞

本報告は日本冷凍空調工業会に設けられたミニスプリットリスクアセスメント SWG(I)および SWG(II)のシャ ープ(㈱上野円氏,ダイキン(㈱山田剛氏,東芝キヤリア(㈱山口広一氏,鈴木啓浩氏,日立アプライアンス(㈱高藤亮一氏, 土橋一浩氏,(㈱富士通ゼネラル藤利行氏,三菱重工(株)藤野哲爾氏,三菱電機㈱平原卓穂氏,鈴木康巨氏と牧野浩招 氏との調査研究成果を,ダイキン(㈱平良繁治氏,パナソニック(株)渡部岳志と筆者が分担して執筆しまとめたもので ある.11名の委員に感謝申し上げる.また事務局として労をとって頂いた松田部長,長谷川課長(日本冷凍空調工業会 事務局)にも改めて感謝申し上げる.

# 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, p. 401 - 411 (2012).
- 高市健二, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology, p. 90-94, 神戸, (2012).
- 高市健二「微燃性冷媒のリスク評価研究会 平成23年度プログレスレポート」,2013年3月,日本冷凍空調学会編,p.58, (2013).
- 滝澤賢二, Study on Minimum Ignition Energy of Mildly Flammable Refrigerant, (2011).
- 飛原英二,「微燃性冷媒のリスク評価研究会 平成 23 年度プログレスレポート」,2013 年 3 月,日本冷凍空調学会編,p. 5,(2013).
- 飛原英二,服部達仁,「微燃性冷媒のリスク評価研究会 平成23年度プログレスレポート」,冷凍空調学会編p. 13, (2013). 八尾健治, *The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology*, p. 182–189,神戸, (2000).
- 矢嶋龍三郎, 「微燃性冷媒のリスク評価研究会 平成23年度プログレスレポート」,2013年3月,日本冷凍空調学会編, p. 65, (2013).

- Dean Smithet, *et al.*, Determining Minimum Ignition Energies and Quenching Distances of Difficult to ignite Components, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 31, No. 3.
- Goetzler et a.l., Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32 / 134a (30/7wt.%) in split system residential heat pumps : DOE/CE/23810-92, ADL (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、「リスクアセスメントハンドブック実務編」,(2011)

http://www.meti.go.jp/product\_safety/recall/risk\_assessment\_practice.pdf

# 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

# 8.2.1 はじめに

低 GWP の微燃冷媒を使用したビル用マルチのリスクアセスメントを,第一次と第二次に分けて活動を進めてきた. 概略日程を図 8.2.1.1 に示す. リスクアセスメントは,図 8.2.1.2 に示すライフステージ毎に行った.

第一次リスクアセスメントでは、市場での冷 媒漏洩発生確率の推定、各種着火源の評価、 着火事故確率の算定方法の検討など、FTA 作 成に必要な基本データや方法論を検討した. また、市場で代表的な設置ケースにおける着 火事故発生シナリオや FTA を作成し着火事 故発生確率を推定した.第二次リスクアセス メントでは、市場で僅かにしか存在しないが リスクが大きいと思われる設置ケースにつ きリスク評価を行い、リスク低下のための安 全対策を提案した.2014 年度秋にはビル用 マルチにおいて微燃性冷媒を安全に使用す るための安全ガイドラインを制定する予定 である.



図8.2.1.1 A2L冷媒を用いたビル用マルチのリスクアセスメント日程





# 8.2.2 微燃性冷媒を用いたビル用マルチエアコンの課題

表 8.2.2.1 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、冷媒系統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.

# 表8.2.2.1 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。	144 the
★弁、容器、センサ−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。	定心
★据付、修理・保守作業者の技能レベルは比較的高い。	派少
★冷暖同時、水冷、氷蓄熱等、多様なシステム構成。	リック性ウェ
★室外機、室内機シリーズとも、能力の範囲が広い。	リスク特定安
御獣性冷雄の特徴(対強獣性)	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。	演れ
★最小着火エネルギーが大、着火源の種類が限定される。	減少

## 8.2.3 リスクの特定

第二次リスクアセスメントでは、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.また, 微燃性冷媒が既存の R410A 機に誤って充填された場合のリスクも検討の対象とした.

# 8.2.4 リスクアセスメントの準備

# 8.2.4.1 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<sup>9</sup>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\*10<sup>9</sup>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ので、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<sup>8</sup>以下とした.この点、向殿の考え方を参考とした.

# 8.2.4.2 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 8.2.4.1 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 8.2.4.2 に示す. 室外機については,室内機に比較して相対的に漏







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

洩速度が高く,液漏れ10kg/hを超えるものが3ケあった.

表 8.2.4.1	漏洩速度	別の冷媒	<b>ష漏洩発生確率</b>
負速漏れの年	問由生性数	2010 年 度	1-1-B

ACA JOS INH 1							
		白煙	焦	げ臭	ľ	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							
			84	緩慢漏オ	ι	急速漏れ	噴出漏れ
			AT	~1[kg∕h	]	∼10[kg/h]	~75[kg/h]
室内機	構成比率	率 [-]	1	0.9	986	0.014	0
	漏洩発	生確率 [ppm]	350	:	345	5	0
<b>安</b> 从 J#	構成比量	率 [-]	1	0.0	B06	0.176	0.018
王尔城	漏洩発	生確率 [ppm]	7600	6	126	1338	137
【算出7 漏洩発 急速漏 噴出漏 緩慢漏	5法】 生確率: れ件数= れ件数= れ件数=	日冷工各社の出 急速漏れ申告件 急速漏れ件数 × 全漏れ件数 - (約 10-10-10-00-00-00-00-00-00-00-00-00-00-0	荷シェア加重 数Nrp×10( 0.10 (室外) 急速漏れ件 あまっちにち	平均値 (室内) or 100 (、0 (室内) 数+噴出漏れ スト用われる	)(室 h件 中生	5 <b>外)</b> 数)	s /+ /4-#4

Nrp:ユーサーやサービスマンからの急速漏れによると思われる甲告を伴った漏れ発生件数 (例えば、ユーサーからは、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)

表 8.2	.4.2 着火》	原の範囲 🛛 🤇	): <mark>着火、</mark> ×:	着火せず
	分類	着火源	R32	<b>R290</b> (参考)
	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	0 × × ×	0000
スパ <sup>°</sup> ーク (可燃空間 中で発生)	喫煙器具	<sub>⋜ッチ</sub> 石油ライター 電子ライター	<mark>〇</mark> 評価中 ×	000
中で発生)	作業ツール	金属スパーク(フォークリフト抓) 電動工具 冷媒回収機	O × ×	000
	人体	人体からの静電気	×	0
	喫煙器具	マッチ 石油・電子ライター	0	0
<b>裸火</b> (可燃空間 と接触)	燃焼式設備	燃焼式暖 <b>房機</b> 燃焼式給湯器 燃焼式ボイラー 燃焼式調理器	0000	0000
	作業ツール	ロウ付い・ーナー	0	0

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 8.2.4.1 に示した.

# 8.2.4.3 着火源の評価

表 8.2.4.2 に、本リスク評価における各種着火源の評 価を示した. 電気部品や喫煙器具のスパークは、プロ パン等の強燃性ガスの爆発事故の着火源として大きな 要因となっているが、最小着火エネルギーの大きな微 燃性冷媒の着火源にはならない.

#### 8.2.4.4 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.表 8.2.4.3 に,橋本による作業 者の状態に応じたエラー発生率を示す. 正常なリラ ックスした状態では、10<sup>-2</sup>~10<sup>-5</sup>の範囲とされている が、ビル用マルチを扱う作業者は比較的教育訓練が 行き届いていることから, FTA中のヒューマンエラ 一発生確率は, 10<sup>-4</sup>を選択した.

#### 8.2.4.5 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 8.2.4.4 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

#### 表 8.2.4.3 ヒューマンエラーの発生確率

フェーズ	意識のモード	生理的状態	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
I	正常 リラックスした状態	休息時 定例作業時	1E-2~1E-4
Ш	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 8.2.4.4 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 <sub>i</sub> = N/V <sub>r</sub> * M * PL = N/V <sub>r</sub> * V <sub>f</sub> * T <sub>f</sub> * PL	$PT_i = N*T_f$	
可燃空間の 発生	$PF_{g} = N^* T_{b}^* V_{f} / V_{r}^* PL$	$PT_g = N*T_b$	$PS = V_f / V_r$
計	$PF = PF_{i} + PF_{g}$ = N*V <sub>f</sub> / V <sub>r</sub> * (T <sub>f</sub> + T <sub>b</sub> ) * PL = PT * PS * PL	$PT = PT_i + PT_g = N^*(T_f + T_b)$	$PS = V_f/V_r$
<u>記号</u> PF :: 着次開 PL :: 冷晴間 PS :: 合称時間 PS :: 合称時間 N :: 合称時間 N :: 合称時 M :: 一 M :: 小 M :: 小 M :: 小 M :: 小 M :: 小 M :: 小 M :: 100 M :	版確率 [回/(年 現発生確率 [四/(年 )遭遇確率 [-] 1遭遇確率 [-] の作動回数 [回/分 [m <sup>3</sup> ] さ [分/回] 間の時空積 [分・m $M = \int (V_f * T_f) dt$ 着火装置の作動 可燃空間の発生	=・台)] =・台)] ] ] ³/回]	

f:可燃空間が有る

b:裸火が有る

# 【基本的な考え方】

各ライフステージ着火事故確率(未対策)に誤充填発生確率Eを掛けて求める。 【誤充填発生確率Eの算出式】

R410A機据付及び修理時の冷媒充填の際に、ヒューマンエラーによりR32が誤充填 されるとした。R32機発売後、誤充填機は当初増加するが、R410A機ストック台数が 減るに従い増加から減少に転ずる。寿命年数/2の経過時点で最大になるとした。



図 8.2.4.3 冷媒誤充填による着火事故確率の計算法

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.

# 8.2.4.6 誤充填による事故確率の予測方法

微燃性冷媒機のサービスポート仕様を従来冷媒と変更すべきか否かを判断する材料を得るために,同仕様 とした際に R32 冷媒が R410A 機に誤充填され着火事故が発生する確率を求めた. 図 8.2.4.3 にその計算方法 を示した.

# 8.2.4.7 室内モデルの設定

# (1) 事務所小会議室

室外機容量は,事務室向け出荷台数の容量別分布調査の結果から,560型(20馬力)とした.室内機の容 量は71型(2.8馬力)であり,室外機1台当たり室内機は8台接続されているとした.床面積は,冷房負荷 170W/m<sup>2</sup>として求めた. 図8.2.4.4 に全体図を示す.リスク評価は,事務所の中の小会議室を想定した事務室 1(6.5m×6.5m)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.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169m<sup>3</sup>/hと した.給排気口は,公共建築協会を参考に,面風速は2.0m/sとし,0.2m×0.2mとした.ドア形状は,幅1500mm とし,下部の隙間寸法は10mmに設定した.

表 8.2.4.5 冷媒封入量(平均的な施工時)

			冷媒量[kg]			
	項目	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	-	-	-	
#7.65	液管: Ø15.88	40m	7.6	6.5	7.2	
HC.E.	液管: �9.53	72m	4.3	3.7	4.1	
	소라		30.9	26.3	20.4	

表 8.2.4.6 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 8.2.4.5 モデル No.4 の計算結果(濃度分布)

冷媒量は, R410A を基準として, 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 8.2.4.5)で行ったが,最大冷媒量(表 8.2.4.6)の 場合の検討も行った.

表 8.2.4.7 に事務室 1 を対象とした場合のシミュレーション条件 とその結果(可燃空間の時空積)を示す. ここで,冷媒の漏洩速 度は,微少漏れの場合は 1kg/h,急速漏れの場合は 10kg/h とした. 東京大学と日冷工とで分担し実行した.



図 8.2.4.4 空調機が接続される事務室の全体図



図 8.2.4.6 モデル No.4 の計算結果(速度分布)



図 8.2.4.7 モデル No.1 の計算結果(平均濃度)

Na	·A+#	冷媒量M	漏洩速度E	強制換気Q	ドア下	機械	<b>友止</b>	可燃空間時空積[m <sup>3</sup> •min]		
INO.	「「「埰	[kg]	[kg/h]	[m³/h]	隙間	換気口	(1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	M=26.3 <sup>(%2)</sup>	M=88.1	
1		26.3	10	0	無	開	最も厳しく, 可燃域が発生する見込み。	1.70×10º	3.66 × 10⁴	
2		88.1	10	0	有	開	ドア下での自然換気。	8.30 × 10 <sup>-1</sup>	2.80 × 10º	
2'			10	0	有	閉	ドア下での自然換気。ただし機械換気口は閉。	1.62×10º	-	
4	R32	32 1 0		有	開	ドア下での自然換気。	0.00×10°	-		
5		26.3	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 <sup>(※1)</sup>	有	開	漏洩検知後に換気作動。	7.30 × 10 <sup>-1</sup>	-	
8			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'	R1234yf	29.4	10	0	有	開	No.2との冷媒比較。	6.30 × 10-1	-	

表 8.2.4.7 事務室1(小部屋)でのシミュレーション条件設定と解析結果

(※1) →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]。

冷媒漏洩検知後に機械換気装置を稼動(モデル No.6)や冷媒配管に設置した遮断弁の作動(モデル No.8)によっ て,可燃空間の時空積を低減可能であり、安全対策として有効である.

ドア下の隙間による自然換気が有効である場合,冷媒漏洩速度 E=1[kg/h]では図 8.2.4.5 に示す冷媒の濃度分布 からわかるように,空間全域にわたり可燃空間が生成されていない(モデル No.4). 速度分布は図 8.2.4.6 に示す. 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と考えられる.時空積を下げるため にはドア下に隙間を設けると共に機械換気口が開いていなければならな

いことが分かる. つまり, 空気の流入と流出が必須の条件となる.

なお, 天井設置タイプでの冷媒濃度は, 場所により濃度は変わらないと した集中モデル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 8.2.4.7). 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.

#### (2) 飲食店小部屋

図 8.2.4.8 に、モデルを示した. 居酒屋の個室に、床置機が設置さ れている. 冷媒量は, R32 で 52.8, R1234yf で 58.5[kg]とした. 表 8.2.4.8 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[m3/h]とした. 通常のカセットコン ロ(発熱量3kW)が運転されていた場合に、室内のCO2濃度を1000[ppm] 程度に維持するための換気量は500[m3/h]が必要となるが、安全をみてそ の 1/5 程度の値とした. 床置機からの漏洩では床面付近に冷媒が滞留す



るが, 天井に排気口が設 置された機械換気では, 冷媒を希釈できずに可燃 空間が大きくなった. GL-13 が定める対策ケー

表 8.2.4.8 飲食店・床置きの濃度解析結果

				<b>鮮</b> 析 第	2件			可燃空间	
	冷媒	冷媒量	漏洩速度	機内撹拌	機械換気量	換気口	平均容積	継続時間	時空積
		[kg]	[kg/h]		[m3/h]		[m3]	[min]	[m3min]
化学生	R32	52.8	10	無し	112	<u>天井給気·天井排気</u>	1.17	910	1070
不对束	同上	同上	同上	「有り」	同上	 同上	1.28	900	1150
	R32	52.8	10	有り	164	天井給気·床上300mm排気	0.01	320	416
対策	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

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/m3]以上とならない値, 164[m3/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

図 8.2.4.9 に、モデルを示した.野村、北島の実態調査を参考とし た. 音漏れ防止のため自然換気では無く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 客が入れ替わるが,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、ローソク、燃焼式暖房機、ガスコンロや、カラオ



図 8.2.4.9 カラオケ店の全体図

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.

# (4) 天井裏

図 8.2.4.10 のように、事務室1の天井裏の区画が他と隔絶 されており、使用時FTAでは、最悪を考え、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,点検ロが 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2の天井裏を想定して決めた.

# 8.2.4.8 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 8.2.4.11 に示す設置パターンでは、周囲 に障害物が無い地上設置パターンの他に各階設置、半地下設置の 3パターンを想定した.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 8.2.4.11 室外機の設置モデル



図 8.2.4.12~図 8.2.4.14 に,各設置モデルの詳細図を示す.機械室は,床が 6.6m\*3.3m,高さ 5m として,既存の機械換気設備が設けられているとした.

表 8.2.4.9 に解析結果を示した. 冷媒漏洩速度が 10[kg/h]の条件では, 障害物が無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 8.2.4.15 に半地下設置での濃度分布解析結果を示す. 漏洩速度は 75[kg/h]である. 漏洩終了迄の 20 分間は、上面が LFL、下面が UFL の濃度となった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.半地下の設置 の濃度分布を図 8.2.4.12 に, 可 燃 域 の 時 間 推 移 を 図 8.2.4.13 に示した.

表 8.2.4.9 室外機の濃度解析結果

	解析多	条件	解析結果 一可燃空間-			
目が思いない。	漏洩速度	周囲速度	漏洩時間	平均容積	継続時間	時空積
産外収直ハターン	[kg/h]	[m/s]		[m <sup>3</sup> ]	-	[m <sup>3</sup> min]
周囲に障害物無し	10		9時間97公49秒	0.0E+00	0	0.0E+00
各階設置	10		2时间37万40秒	1.0E-06	4min13s	4.3E-06
周囲に障害物無し		0		8.3E-02	21min6s	1.8E+00
各階設置	75		21分2秒	1.9E-01	21min20s	4.0E+00
半地下設置				1.6E+01	64h12min	6.3E+04
周囲に障害物無し	10		9時間97公49秒	0.0E+00	0	0.0E+00
各階設置	10		2时间377540秒	0.0E+00	0	0.0E+00
周囲に障害物無し		0.5		9.4E-03	21min2s	2.0E-01
各階設置	75		21分2秒	1.8E-01	21min47s	3.8E+00
半地下設置				3.1E+00	4h40min	8.8E+02



図 8.2.4.15 室外機の濃度分布解析結果

図 8.2.4.16 可燃域の時間推移

# 8.2.5 リスクアセスメントの結果と安全対策

第一次リスクアセスメント(2012年度のプログレスレポートで報告)では、R290ミニスプリットのリスク アセスメントを踏襲してFTAを作成した.そこでは、微燃性冷媒についての着火源評価や濃度解析が未完了 であった、また、各作業ステージでの実態が十分把握出来ていなかったために、喫煙用ライター、コンセン ト、照明スイッチも着火源となり得る、可燃空間の大きさを危険側に見積もる、更に、冷媒回収後に高確率 で冷媒が噴出しロウ付バーナーで着火するとの事故シナリオを採用するなどしたために、各ステージの事故 確率を高めに予測する結果となっていた.第二次リスクアセスメントでは、諏訪東京理科大学や産総研で実 施された着火源評価の結果や、東京大学や各社にて実施した濃度解析結果、作業現場調査の結果を反映し、 より実態を反映したFTAを作成した.以下、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.

#### 8.2.5.1 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.

建築基準法の準耐火構造である 300 坪以下の中規模倉庫に 1000 台保管しているとして検討を行った.可燃 空間の時間・体積の数値は、物流時の値である 8.4\*10<sup>-3</sup> を使用した.着火源としては、作業者による喫煙時 の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、冷媒漏洩の頻度は、使用中と 同じ値とした.エアコンの保管頻度を耐用年数 15 年から 1/15 として、 FTAを作成した.その結果、着火確 率は 7.8\*10<sup>-17</sup>~1.2\*10<sup>-16</sup> (着火/1 台・年)となり、許容値である 10<sup>-9</sup>以下となった.

一方,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,積み降ろし時は火気厳禁であり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,FTA 検討する必要性は極めて薄い.以上より,輸送保管時のリスクは問題ないと判断した.

# 8.2.5.2 据付時

下記(a)~(c)をポイントとしてリスク評価を行った.

(a)連絡配管のロウ付け作業に関するリスク推定を詳細に行った.通常,接続配管のロウ付けは,室外機が接続されない状態で実施されることが多いため,この場合にはロウ付け作業時に冷媒漏洩する可能性は少ない.しかし,0 ではないため,10%の室外機が接続された状態で配管接続が行われていると仮定して,この想定の下で着火確率を算出した.

(b)感電事故・波及事故の調査分析結果の値を用いて,天井裏での電気スパークの着火源存在確率を算出した. (c)冷媒漏洩要因としては,①バルブ不良,②N2置換の際,R32冷媒を誤充填,③既設配管の流用,④配管工 事前に配管が室外機に接続されている割合,を考慮し,着火源としては,⑤未接続の室外機がロウ付け作業 付近に仮置きされるケース,⑥室外機の着火源にボイラーも想定した.

上記を反映したFTAを作成し、大半を占める室外機:地上設置(94%)、室内機:天井設置(99%)のケースの 事故率を求めた.結果は1.9\*10<sup>-9</sup>となり、目標内の値が得られた.

室外機の半地下と機械室設置ケースの場合に目標値を超えた.室内機に関しては、いずれも目標内となった.支配要因は、接続配管のロウ付作業(冷媒充填前)とボイラーの着火源であった.それらの事故率は目標値より1桁大きな値であるため、対策として、ロウ付け作業時に冷媒漏洩検知器を携行することにした.結果、 全ての条件で目標内に収まることとなった.

### 8.2.5.3 使用時(室内)

平均的な設置の事例とワーストケースの事例について検討した. 平均的な設置の事例としては事務所(事務室1:小部屋)を想定し,機械換気が実施されているケース(モデル No.5)について検討することにした. ワーストケースではまず,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た. その結果,天井設置タイプでは直火の着火源が存在する可能性があり,部屋が小 さく,ドア下隙間の存在しないカラオケルームが,床置きタイプは直火の着火源が存在する可能性があり, 部屋が小さい飲食店客室が,着火確率が高く算出されたため,本節で詳細に検討することにした. さらに, 天井裏についても事務室1の天井裏を想定し検討することにした.

着火源の存在確率は、裸火を伴う機器は、機器の使用率を仮定し算出し、その他の機器(主に電気品)は NITE 事故情報の機器の発火事故確率から算出した.

その結果,ワーストケースとして取り上げた天井設置タイプのカラオケルームと床置きタイプの飲食店客 室では本リスクアセスメントで設定した安全の許容レベル 10<sup>9</sup>未満を満足することができなかった.そのた め安全対策が必要であり,安全対策としては冷媒漏洩検知装置にて検知後,検知装置に連動して換気装置を 稼動することで安全の許容レベル 10<sup>9</sup>未満に設定できることを確認した.

# 8.2.5.4 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(機械 室は,半地下時空積値からの推定算出)と着火源存在確 率より着火確率を算出した.表 8.2.5.1 に示す着火源存在

表 8.2.5.1 使用時(室外)での着火源

	喫煙	室外機電気スパーク	併設ホイラ
通常設置	7.97E-08	9.43E-15	1.78E-08
各階設置	2.82E-06	6.68E-13	2.87E-06
機械室設置	1.87E-06	8.83E-14	
半地下設置	1.03E-06	1.79E-13	6.69E-05

確率は、喫煙については日本人男性喫煙率 33.6%および平均喫煙本数 16本(JT 統計)より、室外機電気スパークは発煙・発火事故数 5.6件/年(NITE 統計)より、ボイラー併設は普及率 0.1%として算出した.

上記前提条件のもとFTAを作成し各設置パターンでの着火確率を算出した結果,通常設置・各階設置の着 火確率は,それぞれ判定基準4.0\*10<sup>9</sup>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1.1\*10<sup>7</sup>となり許容レベルを満足しない.なお,機械室では既存換気設備があり, またボイラー吸排気も専用ダクトを引き回すため,漏えい冷媒がバーナーに触れることが無いとして,一定 条件のもと安全対策は不要である.

機械室・半地下設置の場合,冷媒量や空間容積,または半地下の高さによって着火確率は変動する.安全 対策要否判定基準と,室外機据付空間容積に応じた最大冷媒量や必要換気風量を規定する必要があり,今後 この制約条件を検討していく予定である.

#### 8.2.5.5修理時

FTA中で着火事故確率に大きく影響する主な着火源はバーナーであり、主な可燃域発生要因はバーナー作 業に伴う冷媒漏洩であった.第2次リスクアセスメントの着火事故発生確率は、室内天井設置、室外地上設 置、室外各階設置、天井裏は許容値10<sup>3</sup>内となったが、室内床置き設置、室外半地下設置、室外機械室設置 では許容値を超えたため、対策が必要となった.室内床置き設置は、自然換気(ISO5149による)、下部戸開 口位置を床面から30mm以下に設置、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)、冷媒漏洩検知器を携行し作業中に冷媒漏洩をチェックするという 対策を行う.室外は半地下設置、機械室設置共に換気装置(半地下は吸込ダクト使用)の設置、サービスマ ンは室内と同様に教育訓練を受ける(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)、冷 媒漏洩検知器を携行するという対策を行うことで許容値内に収まることとなった。

### 8.2.5.6 廃棄時

設置現場からのユニット・配管取外し作業におけるリスクを検討した.冷媒漏洩原因としては,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た.着火源としては,喫煙,活線作業,バーナー等を着火源として想定した.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.更新有りは、全体の50%とした.また、更新有りの内、新ユニット設置が同時進行 で進められる割合を10%とした.

室外機が、半地下・機械室に設置されるケースにおいてリスクが許容値を超える結果となった.着火確率 を低減させるための対策としては、以下を想定している.

対策① 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.

対策② 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.

例えば,未対策時の着火確率が最も大きい,半地下設置室外機の撤去作業時の着火確率は,未対策時:更新有/無=6.1\*10<sup>-7</sup>\*/2.4\*10<sup>9</sup>,対策時:更新有/無=6.8\*10<sup>9</sup>/1.5\*10<sup>-10</sup>となるが,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.この際,検知器の携行忘れの確率(10%)も考慮し ている.この結果,半地下設置室外機の作業時の着火確率は,未対策時:3.3\*10<sup>-8</sup>,対策時:4.8\*10<sup>-10</sup>となった.

半地下と機械室設置室外機については、対策①、②の双方を実施することで、着火確率が許容リスク範囲 内(10<sup>8</sup>未満)となる.その他の設置ケースについても、対策①を実施することが望ましく、対策①を行うこ 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 スク範囲内とすることが出来た.

#### 8.2.6 結果のまとめ

表 8.2.6.1 に、第二次リスクアセスメントの結果をまとめた.未対策で許容レベルを超えた場合には、安全 対策を実施し、許容レベル以下になるようにした.天井設置機/事務所において、今回設定した機械換気有 りの条件でリスクが許容レベル以下となった.ビル用マルチでは、事務所用途が最も多く、また、室内機は 天井設置機が 95%以上を占める.今回設定した条件と異なる換気・冷媒量条件ではリスクが許容値以上にな る可能性もあるので、その場合は ISO5149 による適切な安全対策を必要とする.床置き/飲食店では室内使 用時と修理時に、天井設置機/カラオケでは室内使用時に、許容値を超えた.室外機が半地下に設置された 場合は、輸送保管時以外は許容値を超えた.誤充填リスクについては、検討した使用時、修理時、廃棄時ラ イフステージにおいて、全て許容値以下となった.各ケースにおいて、必要とされる安全対策は、表 8.2.6.2、 表 8.2.6.3 に示した.

バーナー使用の多い修理と廃棄時に関しては、作業者教育が必要であり、また、半地下や機械室など冷媒 が滞留し易い設置場所での据付、修理、廃棄時に関しては、冷媒漏洩検知器の携行が必要である.

表 8.2.6.4, 表 8.2.6.5 には、リスクシナリオの中で事故着火確率に最も大きな影響を与えている着火源と 冷媒漏えい要因を示した.使用中においては、燃焼式暖房器やガスコンロ等の裸火が支配的であり、据付・ 修理・廃棄などの作業中においては、ロウ付バーナーが支配的である.リスクを低減するには、室内の裸火 や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.事務所、機械室、輸送保管時においては、 石油ライターによる着火が支配的である.石油ライターに関しては可燃空間中で着火源になり得るかどうか を諏訪東京理科大において評価中であり、この結果によっては、リスク値が変更になる可能性がある.

# 8.2.7 今後の展開

#### 8.2.7.1 床置き安全対策について

天井設置機では,漏洩冷媒が天井から床面に向かって落下する際の加速効果(図 8.2.4.6)により,周囲空気と冷媒が混合することにより希釈がおき,室内濃度分布が均一に近くなる.しかし,床置機ではこの希釈効果が期待出来ず,床面濃度が高くなり可燃空間が発生し易い.主に窒息事故防止のために想定されている現在のGL-13の床置安全対策における機械換気口の位置や,自然換気効果に及ぼす室内外温度差の影響など, 微燃性冷媒の安全対策に関して今後も検討が必要である.GL-13では想定していないが,下部から上部への

# 表 8.2.6.1 R32ビル用マルチ第2次リスクアセスメント結果

쿺	表中の指数値は、着火事故確率(年・台当たり)										許容内	許容超
ŧ	<b>设置ケース</b>	ステージ	A.輸注 保管	A.輸送• 保管		B.据付		C.使用(室内) D.使用(室外)		理	F.房 (撒	• <b>棄</b>
	( <b>冷媒量</b> kg)	許容				<1E-08		<1E-09(内), 4E-09(外)		<1E	E-08	
<	、回視m <sup>2*</sup> 高さm> 「	***	未有		未	有	未	未有		有	未	有
安	<b>1.天井</b> (26.3)	<b>事務所</b> <40.6*2.7>			1.9E-09	-	3.5E-12*1)	-	8.7E-11	8.8E-12	2.9E-14	2.9E-15
主内機	<b>2.床</b> (52.8)	<b>飲食店</b> <9.7*2.5>			1.9E-09	-	3.8E-07	2.6E-10	1.2E-08	3.9E-11	3.4E-12	3.4E-13
1750	<b>3.天井</b> (88.1)	<b>አラオケ</b> <4*2.4>	7 8E-		-		1.2E-06	0.0		-		
	<b>4.地上</b> (26.3)	-	17 ~ 1 8E-	-	1.9E-09	-	1.9E-11	-	1.4E-09	1.4E-10	2.4E-10	3.2E-11
室	<b>5.各階</b> (26.3)	- <3.4*4.0>	16		1.9E-09	-	3.0E-09	-	3.1E-09	3.4E-10	1.0E-09	1.4E-10
外機	<b>6.半地下</b> (26.3)	- <15.3*3.5>			1.1E-08	1.9E09	1.1E-07	2.5E-13	3.6E-07	2.1E-09	3.3E-08	4.8E-10
	<b>7.機械室</b> <sup>(26.3)</sup>	- <21.8*5>			1.1E-08	2.1E-09	3.2E-09 <sup>*1)</sup>	-	8.6E-07	5.4E-09	2.2E-08	3.3E-10
	<b>8.天井裏</b> (26.3)	- <38.4*0.8>			室内機	に含む	3.0E-10	3.0E-11	3.0E-09	3.0E-10	7.2E-11	1.1E-11
		許容					<1E-10(内)	,4E-10(外)		<1E	E-09	
	9.誤充填						8.7E-11(カラオケ) 1.2E-14 (外)		6.0E-13		3.0E-14	
											*1) 機械	【換気有り

表 8.	2.6.2 室	内での安全対策		表 8.2.6.3 室外での安全対策						
R	設置ケース 使用		修理	設置ケース	据付	使用	修理	廃棄(撤去)		
床	飲食店	機械換気	検知器携行+教育	半地下	检机器排行	機械換気	換気 ⊥ ☆知器推行	検知器携行		
天井	天井 カラオケ 漏洩検知→機械換気		-	機械室	快和奋场打	既存換気	十 便和 奋 伤 1 丁 十 教 音	+教育		

表	表 8.2.6.4 リスクシナリオ中で支配的な着火源							表	8.2.6.5	リスクシ	ィナリオ中	で支配的	な漏洩要因							
1	皮置ケース	ステージ	A. <b>輸送・</b> 保管	B. <b>据</b> 付	C.使用(室内) D.使用(室外)	E. <b>修</b> 理	F.廃棄 (撒去)	1	設置ケース	ステージ	A. <b>輸送・</b> 保管	B.据付	C.使用(室内) D.使用(室外)	E.修理	F.廃棄 ( <sup>激去)</sup>					
室	1.天井	事務所			・喫煙器具 ・給湯器	叩付	・ロウ付 パーナー パーナー	室	1.天井	事務所				・10 付 作業時	・回収 作業になで					
内機	2.床	飲食店			·燃焼式暖房機	N-7-		内機	2.床	飲食店			·停止時漏洩	漏れ	漏洩					
	3.天井	カラオケ			・カ・スコンロ				3.天井	カラオケ										
	4.地上	-	·喫煙 器具	・ロウ付	・ロウ付	•□ウ付	•□ウ付	•□ウ付	•叩付					4.地上	-	・室外機 から 漏洩	・パルフ 操作ミス	·停止時漏洩		
室	5.各階	-		パーナー	・ホイラー	・ロウ付 パーナー	・ロウ付 パーナー	· <sup>10分付</sup> 外 ハーナー 機	5.各階	-		·運搬時 損傷 上記+		· 叩付	・回収 作業に 伴う漏れ					
外機	6.半地下								6.半地下	-			・窪地で 冷媒滞留	作業時 漏れ						
				上記+ ・ボイラー					7.機械室	-		・充填時 接続不良	・閉空間で 冷媒溝図							
	7. 機械至	-			・喫煙器具								7 () 39K/m (m)	.nd/#	, Dub					
8	.天井裏	-		室内機に 含む	<ul> <li>・空調機の発火</li> <li>・漏電での発火</li> </ul>	・ロウ付 パーナー	・ロウ付 パーナー	1	3.天井裏	-		室内機に 含む	・室内機から 漏洩	作業時温れ	作業えで 漏洩					

機械換気で床面付近に滞留した冷媒を希釈できるか検討の必要がある.濃度分布解析するにあたっては、床 置ユニットから出る漏洩冷媒の濃度境界条件の与え方により可燃空間生成の様子が大きく変わる. ローボー イ型床置ユニットを使って3社で実験を行い解析結果と比較した結果、ユニット内での撹拌も含めて解析す ることで、実験結果を再現し得ることが判った.現在、この解析手法による、機械換気や自然換気の有効性 評価も併せて行っている.

# 8.2.7.2 R1234yf, R1234ze の扱いについて

リスクアセスメントから安全対策提案までの作業を一旦完了させるため、対象冷媒として R32 を優先して

進めてきた.その結果をベースとして,R1234yf,R1234zeが有するR32とは異なる特性や課題について評価 する予定である.分子量がR32の2倍以上となるためガス密度が大きく漏洩時の冷媒滞留に影響しないか, また,可燃限界範囲が空気中の湿度が高くなれば広がるという特性が着火事故確率に影響しないか,という 点につき,評価を進めている.

# 8.2.7.3 安全かつ市場化可能な規制の在り方

冷媒量が多いため、ペア型のエアコンに比べて相対的にリスクが高いと思われるビル用マルチエアコンに おいて、微燃性冷媒を安全に用いるためには、リスクアセスメントの結果に基づき、必要なケースにおいて 必要な安全対策を実施することが重要である. 今後は、今回のリスクアセスメントをベースに、日冷工安全 ガイドライン GL-13 を改訂し、その普及を図っていきたい.

必要度の低いケースで過剰な安全対策を実施しようとすれば市場では実施不可能となり,温暖化効果の削減効果は得られない.逆に,必要度の高いケースで安全対策が疎かになれば,安全性が損なわれる結果となる.従って,現実を反映したリスクアセスメントに基づき,過剰でも不足でも無い合理的な安全対策の実施 をルール化する必要がある.今回のリスク評価においては,表 8.2.6.4 のように,使用時おいては燃焼機器, 作業時においてはろう付バーナーが主な着火源となったが,安全対策において着火源に対する適切な処置を 施すことの重要性が判った.可燃空間を発生させる主な要因としては,急速冷媒漏洩が要因となっているこ とからは,その発生確率を更に減少させるための技術的な施策を検討することが必要だと思われる.

#### 8.2.8 謝辞

本報告書作成は、木口行雄様(東芝キャリア)、津野勝之様(パナソニック)、坪江宏明様(日立アプライ アンス)、伊藤俊太郎様(富士通ゼネラル)、山下浩司様(三菱電機)、観音立三様(三菱重工)の各位と、主 査 矢嶋龍三郎(ダイキン)の共同作業によるものである.また、オブザーバーとして、山口広一様(東芝 キャリア)、佐藤英治様(日立アプライアンス)、平原卓穂様(三菱電機)、高市健二様(パナソニック)、松岡慎 也様(ダイキン)、平良繁治様(ダイキン)の皆様のご協力を頂いた.事務局の労をとって頂いた長谷川様(日冷 工事務局)も含め、ここに深く感謝申し上げる.

# 8.2.9 参考文献

一般社団法人公共建築協会,平成 18,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 片岡ら, Experimental and Numerical Analyses of Refrigerant Leaks in a closed Room, ASHRAE Transact., Vol 105, Pt 2, 1999

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

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,ビル用マルチサブワーキング 2011 年度プログレスレポート

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20店舗の空気環境の実測調査、芝浦工業大

橋本, Japan Ergonomics

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\_gl13.html

ISO5149-1, 2, 3, 4/FDIS, ISO Website

# 8.3 チラーSGW 進捗:チラーのリスクアセスメントとガイドライン作成

# 8.3.1 はじめに

冷温水を用いた空調用熱源機には、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大きい.そこで、低 GWP 冷媒への代替が重要となってくるが、低 GWP 冷媒でレトロフィットや性能評価が報告されているものは、R1234yf、R1234ze(E)またはその混合冷媒であ る.いずれの冷媒も微かな燃焼性を有する.そこで冷媒の着火・燃焼特性に着目して、前述の 2 冷媒と R32 を 加えたリスクアセスメント(以下 RA)を実施し、火災事故や火傷に対する安全性を評価する.

RA は一般社団法人日本冷凍空調工業会(以下日冷工)にチラー専門技術者を委員とした WG(以下チラーSWG) を設置し、実施中である. RA により抽出した対策・処置を盛り込んだ設計・施設における要求事項を 2014 年度に日冷工ガイドライン(以下 GL)として制定する.本論ではその進捗状況を報告する.

エル 0.21 エニ のいの リュカマトコノン 一丁印

Table.o.5.1 ノノ SWG リハクノ ヒハメント工程									
	2011	2012	2013/2014						
大工程	解羅袖出	1次リスクアセスメント	2次 リスクアセスメント GL創定						
	FTA (素)	FTA确定	>						
詳細工程	漏洩解析条								
	専門課題の抽出	調査·対応検討	リスク評価 対策 対策 地震						

### 8.3.2 対象範囲

主にセントラル空調熱源として屋外設置の空冷ヒートポンプ,機械室設置の水冷チラーで,移動式を除く冷 房能力範囲が約7.5~17500kWの機器を対象とした.

# 8.3.3 リスクアセスメント実施の前提

機器の構造や用途は従来から同じであるため,これまで実施してきた RA(日冷工,1999, Arthur D. Little inc, 1998) は大部分で有効である.そこで評価の整合性に注意し,冷媒の燃焼特性の違いに着眼して進めている. また RA が先行するミニスプリットエアコンとビル用マルチの検討結果を参考にした.

## 8.3.3.1 リスクマップ

FTA 手法を用いリスクの洗い出しを行い,存在しうる着火源や冷媒漏れ事象毎に発生頻度と危害程度から, リスクマップ(以下 R-map) (Fig.8.3.1) にプロットし,数値評価を行う.リスク評価が A または B 領域にある場 合,C 領域へ移行できる頻度・危害程度低減の対策・処置を検討する.

	頻発して 起こる	10 cases/units per year	13	24	27	29	30	<u>A領域</u> :25~30 受け入れられない。		
1	しばしば起 こる	10-2	12	20	23	26	28	<u>B領域</u> :14~24 曾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。		
臣確率	時々発生 する	1.06 × 10 <sup>-3</sup>	10	16	19	22	25	· · · · <u>C領域</u> :1~13許容でき · · · · る。		
危害発生	起こりそう にない	1.06 × '10 <sup>-4</sup>	6	9	15	18	21	—		
	まず起こり 得ない	1.59 × '10 <sup>-5</sup> ~ 7.94 × '10− <sup>6</sup>	3		.8	14	17			
	考えられな い	1.59 × '10 <sup>-6</sup> ~ 7.94 × '10 <sup>-7</sup>	····]····	2	-5	7	11			
			0	Ι	I	I	IV			
(1:	R-map SO/IEC Gu (JIS Z 805	ide51 i1))	無傷	軽微 ( <u>製品発煙</u> ) <u>程度</u> )	軽度 ( <u>発火、製品</u> ( <u>焼損</u> )	重度 ( <u>製品链損、</u> <u>火災</u> )	致命的 (火災、他設 備焼損、建屋 火災)			
				危	:害程度 -					

Fig.8.3.1 リスクマップ

# (1) 発生頻度

水冷チラー,空冷ヒートポンプの国内市場ストックはこれまでの日冷工の出荷統計より 13 万 4 千台と推定し

た. ミニスプリットと比べると,おおよそ 1/1000 小さい.そこで危害発生頻度はハンドブック(経済産業省, 2011,以下 HB)より Table.8.3.2 に示す通りとした.

#### (2) 危害程度

危害程度はHB(経済産業省, 2011)の火災の定義を用いた(Table.8.3.3).

Table.8.3.2 発生確率

	危害発生確率	産業用途(採用)
5	<u>頻発して起こる</u> (消費材10-3、産業用10-1件/台年)	毎年10台に1台は発生
4	<u>しばしば起こる</u> (消費材10-4、産業用10-2件/台年)	毎年100台に1台は発生
3	<u>時々発生する</u> (消費材10-5、産業用10-3件/台年)	毎年134件発生
2	<u>起こりそうにない</u> (消費材10-6、産業用10-4件/台年)	毎年14件発生
1	<u>まず起こり得ない</u> (消費材10-7、産業用10-5件/台年)	毎年1~2件発生
0	<u>考えられない</u> (消費材10-8、産業用10-6件/台年)	10年に1~2件発生

Table.8.3.3 危害程度

	危害程度評価								
IV	致命的	火災、他設備焼損、建屋火災							
Ш	重度	製品焼損、火災							
П	軽度	発火、製品焼損							
Ι	軽微	製品発煙程度							
0	無傷	無傷							

#### 8.3.3.2 ライフステージの定義

既報(日冷工, 1999, Arthur D Little inc, 1998)を参考にオーバーホールを追加し,物流,据付,使用,修理, オーバーホール,廃棄の 6 つのライフステージ(以下 LS)を定義した.設置状況の異なる水冷チラー,空冷ヒー トポンプは LS 毎に適宜区別した.

#### 8.3.3.3 リスクアセスメントリストによるリスク評価

検討ではリスクアセスメントリスト(以下 R-list)を用い定量化した.抽出した着火源,漏洩要因の組合せを各 LS 全てについて列記し,危害程度,発生頻度から R-map を用いたリスク評価と,JISC60079-10 (JIS, 2008)を 用い危険区域のレベル評価を同時に実施した.次に十分リスクの低い着火源と漏洩事象の組み合わせを排除し, 評価すべきリスクのある組合せを抽出する.リスクのある事象に対する本質安全設計や具備すべき要件を明ら かとし,KHK0302-2 (KHK, 2011),JISC60079s (JIS, 2008),ISO5149-3 (ISO, 1993)の設備要件を明示し対処 すべき処置を GL に展開する.

# 8.3.4 冷媒漏洩時の可燃空間解析モデルの設定

冷媒漏洩時の可燃空間の時間・体積の推定,及び安全性評価のために解析を実施する.

# 8.3.4.1 機械室の解析モデル

## (1) 機械室の定義

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,そこで想定されるリスクに配慮した規格があり(KHK, 2011, ISO, 1993,日冷工, 2011),換気量や火器設置制限を解析条件に反映した. (2)機械室面積

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(Fig.8.3.2).解析モデルでは平均値を用い機械室高さを5mとした.

# (3)機器設置位置

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する. またメンテ ナンススペースは操作盤前面に 1.2m 以上、その他面は 1.0m 以上を設ける(Fig.8.3.3).

# (4) 換気量の想定と給排気ガラリ面積

機械式強制換気により 5回/h 以上の換気量(ASHRAE, 2010)とする.給排気ガラリ面積は,鹿児島県建築基準「機械設備工事編」を参考にした.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(Fig.8.3.3).

#### (5)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.



Fig.8.3.2 機械室面積とチラー容量の関係

Fig.8.3.3 機械室レイアウト

### 8.3.4.2 屋外設置の解析モデル

四方に壁のない屋外に設置される空冷ヒートポンプは機械室に設置される水冷チラーと比べると可燃空間が 形成される可能性は低い.そこで製造メーカの防音壁設置要領から最も可燃空間が形成されやすい条件,2面の 壁,2面の開口率25%の壁をモデルとした(Fig.8.3.4).



冷媒漏洩箇所は,次に示す2つとした.

①空気熱交換器、 ②ユニットの化粧パネル内

化粧パネル内に充満後、ユニット外へ漏れ出す、ヒートポンプ内の部品を着火源としての評価をする.

# 8.3.4.3 冷媒の可燃範囲,及び漏洩量の定義

対象とする 3 種の冷媒の代表物性を Table.8.3.4 に示す. チラーも漏れ部位はビル用マルチと構造の大きさは 同じため,漏洩量を JRA GL-13 (解説) (日冷工, 2011) に従い決定した(Table.8.3.5).

## Table.8.3.4 冷媒特性(Takizawa, et al., 2011)

冷媒種	類	量論比	燃焼範囲		燃焼範囲		燃焼範囲		最大 燃焼速度	燃焼熱	拡散係数
		vol%	LFL vol%	UFL vol%	cm/s	10 <sup>6</sup> J/kg	cm <sup>2</sup> /s				
R32		17.36	13.5	27.5	6.5 <sup>**4</sup>	9.3	0.135				
D1004-6	dry air	7.75	6.7	11.7	1.6	10.3	0.075				
RTZ34yf	wet air	7.41	5.15 <sup>%1</sup>	13.6 <sup>**1</sup>	5.9 <sup>**2</sup>	10.8 <sup>**3</sup>					
D1004(E)	dry air					10.2	0.074				
RIZ34ZE(E)	wat air		F 0 <sup>%1</sup>	10.0%1	F 0 <sup>%2</sup>	10 7 2 3	0.074				

| \_\_\_\_\_\_ vet air| \_\_\_\_\_\_ 5.9<sup>^,,</sup> | 12.6<sup>^,</sup> | ※1 絶対湿度:0.016, ※2 絶対湿度:0.03, ※2 絶対湿度:0.052

※4 微小重力

# 8.3.4.4 冷媒漏洩時の可燃空間の解析

#### (1) 機械室の解析条件

Table.8.3.6 に示すケースについて、解析評価を実施した.

a)ケース 1:噴出漏れの漏洩条件において,換気回数を変えて,冷媒漏洩開始から冷媒が換気されるまでの存 在確率を算出するため非定常解析を行った.また,冷媒 R1234ze(E)と R32 の違いについても評価を行った. b)ケース 2:継続する漏洩に対して換気量を変え,可燃区間の形成の程度を算定した(定常解析).冷媒の漏

洩継続時間を無限とすることで、装置の冷媒充填量によらず換気量と可燃空間との関係を評価した.	
---	--

No			機械室面積 [m2]	冷媒種類	漏洩	ケース [kg/h]	換気回数 [1/h]	換気風量 [m3/h]
Casal		Α	22 -	R1234ze(E)	Burst		1	109
	非定常解析	В				54	2	218
Caser		С					5	545
		D		R32	leak		2	218
C	中呼图击	Α		D122470(E)			1	109
Gasez	<b>正</b> 市 胖 们	В		R123426(E)			2	218

Table.8.3.6 解析条件 (機械室)

#### (2) 室外機の解析条件

室外機では、可燃空間の存在確率を算出するため、非定常解析のみを実施した.実施した解析条件を Table.8.3.7 に示す.

No	冷媒漏洩箇所	冷媒種類	機器馬力 [Hp]	漏洩ケース [kg/h]		冷媒充填量 [kg]	風速 [m/s]
1	少雄混油笛武			slow leak	1		
2	∩%%///////////////////////////////////	R32	30	rapid leak	10	11.7	0
3	U			burst leak	75		
1				slow leak	1		
2	冷媒漏洩箇所	R32	20	rapid leak	10	117	0
3	2		30	burst leak	75	11.7	0
4		R1234yf		rapid leak	8.9		

Table.8.3.7 解析条件 (室外機)

# 8.3.4.5 冷媒漏洩解析結果

#### (1) 機械室の解析結果

a)ケース1

Fig.8.3.5 に各評価点と,換気回数2回/h,1回/hの各評価点における冷媒濃度の時間変化を示す.漏洩開始 から時間が経過するとともに冷媒濃度が増加し、チラーの評価点においても漏洩終了時に濃度が最大となる. 冷媒漏洩終了時、1回/hの換気条件では床面から装置高さ付近までが可燃域となり、その可燃域は27 m<sup>2</sup>に達 した.一方で、2回/hの換気条件では可燃空間は漏洩部のみに形成され、その他の空間の冷媒濃度はLFL以 下となった.Table.8.3.8 に可燃空間体積、及び時空積を示す.可燃空間は、冷媒濃度がLFL以上かつUFL以 下である範囲であり、燃焼速度の制約は考慮していない.Table.8.3.8 より、換気回数が2回/hであれば、可燃 空間体積は非常に小さく、冷媒の吹き出し流速を考えると着火しないとして良いと考える.また、R32で、 換気回数2回/hの解析を実施した.Table.8.3.8 に可燃空間体積、及び時空積を示す.R1234ze(E)とR32の比較 の結果、R32の方が拡散しやすく高濃度空間も大きくなるが、LFLの濃度が高いため、可燃空間は小さくなる. 可燃空間の形成する1回/hの換気条件について、着火条件として濃度に燃焼速度を考慮にする場合と考慮 しない場合それぞれの可燃領域の体積変化をFig.8.3.6 に示す.R1234ze(E)の燃焼速度は物性が非常に類似の

#### Table.8.3.5 冷媒漏洩ケース

<b>`</b> 合fi	ま 1話 米石	冷媒漏洩ケース					
7135	卡作主 天見	微小漏れ 急速漏れ		噴出漏れ			
	R32	1kg/h or less	10kg/h	75 or 200kg/h			
漏洩速度	R1234yf	0.9kg/h or less	8.9kg/h	67 or 178kg/h			
	R1234ze(E)	0.7kg/h or less	7.3kg/h	54 or 145kg/h			
漏洩件	数(確率)	検知できるかわか らない程度	稀に発生	Remote			
漏逃	<b></b> 181	ピンホール、溶接、 ロウ付、腐食	フレア割れ、フレ ア、腐食	フレア抜け、配管部			

R1234yf の 1.5cm/s を代用した.漏洩中の可燃空間は漏洩部近傍の燃焼速度以上の気流速度になっている部分 を中心に形成されているため、燃焼速度を考慮に入れる場合の可燃空間は燃焼速度を考慮に入れない場合に 比べて非常に小さくなる.しかし、漏洩終了後は機械室全体の気流速度が小さくなるため、可燃空間は燃焼 速度の考慮の有無を問わずほぼ同じ体積となる.そこで、本報では危険側の燃焼速度を考慮しない可燃空間 で評価を行った.



Fig.8.3.5 非定常解析による可燃領域の推移(Case1-A,B)

No		換気回数 (物気量)	存在時間	可燃空	間体積	時空積			
		(里以知)		最大値	平均值				
		(m <sup>3</sup> /h)	min	m³	m³	m <sup>3</sup> •min			
	А	1 (109)	56	27	6.4	36			
Casal	В	2 (218)	26	8.90E-04	2.70E-03	7.10E-02			
Casel	С	5 (545)	25	3.30E-04	2.70E-03	7.90E-04			
	D	2 (218)	26	2.80E-05	1.70E-05	4.50E-04			

Table.8.3.8 非定常解析結果

b)ケース2

Fig.8.3.7 に定常解析結果を示す.図の赤色で示した面は LFL の等値面である.1回/h の換気条件では装置高 さに LFL の等値面が存在しており、床面から装置高さまで LFL 以上の空間になっている.一方,2回/h の換 気条件では,可燃空間は漏洩部近傍のみに限定されている.結果としては冷媒充填量を無限大化したこのケ ースにおいても、2回/h 以上の換気条件では可燃空間は漏洩部近傍のみに形成され、その他の空間の冷媒濃度 は LFL 以下となり、ケース1と同様に着火の可能性は小さいと言える.


Fig.8.3.7 定常解析結果

a), b)の解析の結果, 平均値の機械室条件においては 2 回/h 以上の換気条件であれば漏洩部直近(Fig.8.3.7) に,着火源となる大容量のブレーカーやマッチの火が存在しえない事を考えると着火の可能性は無く,機械式 の強制換気量が 4 回/h 以上と定められている ISO5149 (ISO, 1993)の基準に基づいて機械室が設計されている 場合は着火の確率は非常に低くなる.さらに定常解析の結果では,冷媒充填量に係らず,可燃空間が形成され ない結果となった.従って,チラーGL では冷媒充填量の制約を設けない方向で検討を進めている.

一方で、機械室床面積が平均値より小さな狭小な機械室も存在する(Fig.8.3.2). そのような機械室では、同 一の換気回数があっても換気量が小さくなるため、時間当たりの漏れ量が相対的に大きく、可燃空間が形成さ れる可能性がある.そこで、平均的な床面積に加え、その 1/3 である最小床面積を想定した狭小な機械室につい て追加解析が必要である.また、故障等により換気が停止した場合のリスクについては、可燃空間とともに冷 媒濃度によるインターロックの動作の有無等を考慮して、着火の危険性についての評価を検討している.

### (2)室外機の解析結果

a)空気熱交換器から漏洩する場合

解析結果を Fig.8.3.8 に示す. 拡散が速いため,可燃空間は高さ 1.13m に設定した冷媒漏洩箇所近傍に小さ く形成された. 空気熱交換の直近に着火源が存在しないこと,吹き出し流速からから着火の可能性は非常に 小さいと言える.

b)ユニットの化粧パネル内から漏洩する場合

解析結果を Fig.8.3.9 に示す. 室外機の化粧パネル内から漏れ出る場合,パネル内に充満した冷媒がユニット下部のスリット部からに漏えいするためユニット設置面に冷媒がたまり,可燃空間が1分程度形成される. 冷媒漏洩終了後は,1分以内で可燃空間が消失する. 空気熱交換器からの漏洩と異なり,可燃空間が形成されるため,着火源の存在確率等を踏まえ,着火リスクを評価する必要があるが,床面から高さ 50mm に存在する着火源は想定さていない。

また,冷媒種の違いについては R32の可燃空間は R1234yf の約 2.5 倍となり,室外機の解析では,R32 での評価が危険側の評価であると言える.

Table.8.3.9 に a), b)の可燃空間の時空積算出結果をまとめる.

(1),(2)の解析は危険か否かの当りをつけるために実施した.従って,さらに条件を追加し解析を進め,上記結果が問題ないか精査していく予定である.

### <冷媒漏洩箇所①>

Burst leak 75kg/h 漏洩時間 9min21s



Fig.8.3.8 非定常解析結果(可燃領域の推移)

### <冷媒漏洩箇所②>

Burst leak 75kg/h 漏洩時間 9min21s



Fig.8.3.9 非定常解析結果(可燃領域の推移)

Table.8.3.9 非定常解析結果

No		冷媒漏洩箇所	冷媒種類	漏洩ケース		可燃空間体積 (平均値)	継続時間	時空積
					[kg/h]	[m <sup>3</sup> ]	[min]	[m <sup>3</sup> •min]
	1		R32	slow leak	1	1.60.E-07	702	1.12.E-04
	2	冷媒漏洩箇所①		rapid leak	10	1.16.E-05	70	8.11.E-04
	3			burst leak	75	1.40.E-04	9	1.31.E-03
	1 2 <sub>入坩泥油签配</sub> ③			slow leak	1	3.48.E-03	702	2
		R32	rapid leak	10	1.54.E-01	71	11	
	3	∩炑/胴/氐固川℃		burst leak	75	4.02.E-01	11	452
	4	R1234yf	rapid leak	8.9	5.66.E-02	79	448	

# 8.3.5 FTA の基本構成

機械室は関係者以外立ち入り禁止であり、特定少数のオペレータやサービスマンに出入りが限られる、5kVA を超える容量の比較的大きな電気機器の存在、そしてボイラ等の燃焼器機との併設などがある.一方でミニス プリットやビル用マルチと異なり機械室とその設備は安全面から管理される状況にある.

前述した各 6 つの LS 間で冷媒漏洩,着火源の遭遇確率の整合のために,基本 FTA を構成した(Fig.8.3.10-a).

また各 LS で着火源を見落とすことの無い様,その存在確率について共通 FTA を構成した(Fig.8.3.10-b). 漏洩 確率についても同様に検討した(図示せず).



### 8.3.6 KHKS0302-3, IS05149-3 の機械室要件

KHKS0302-3(KHK, 2011)は高圧ガス保安法冷凍保安規則(以下冷凍則)等の関係法規に沿って記述されている.安全維持のため機械室について①開口部,又は機械換気設置による換気,②加えて安全弁とガス放出管の設置,③作業性確保のための防爆照明と,④防/消火設備の規定で構成されている.

KHKS を ISO5149-3(ISO, 1993(2014版))と比較すると、必要換気量は、KHKS が機器の法定冷凍トンを 用いて算定され、ISO では冷媒充填量を用いて算定される. KHKS の 3.2.3「滞留防止」の冒頭で、「冷媒全量 が漏えいした場合でも機械室を冷媒の限界濃度以下とすること.」が原則と記述されているが、その後の計算 式が法定冷凍トン基準では圧縮方式の違いにより充填量が同じであっても換気量が異なってくる. そこで GL で は機器の冷媒充填量によらない安全な換気量基準を示すこととするが、必要に応じて冷媒充填量を用いる.

次に機械室内の火器設置制約である. ISO は裸火の禁止を明記しているが,機械室内の設備の温度基準はない. GL では, RA に基づいた表面温度規定が必要である.

GL では、基礎物性データと漏えいシミュレーションに基づき、微燃性冷媒対応の新たな基準設定(可能ならば基準緩和)につなげる.

#### 8.3.7 冷媒漏洩事故発生確率の推定

冷媒漏洩事故発生確率を推定するにあたり,以下の2種の調査を行った.

(a)平成 22 年度高圧ガス保安法事故一覧

対象機器の種別,冷媒漏洩事故報告内容(噴出・急速・微小)を読み取り集計した.

(b)SWG 各委員による冷媒漏洩事故件数の調査

SWG に参加する各社の冷媒漏洩事故件数を調査し、また各々の出荷実績から市場ストック台数への寄与率を勘案し、市場ストック台数に対する事故発生台数を算出した.

2 つの調査結果の構成比は、概ね合致しており、(b)の集約結果を以って事故発生確率を求めることとした. 結果は以下のとおりである.

噴出漏れ 1.0×10<sup>-5</sup>件/台・年 [Improbable]

急速漏れ 1.6×10<sup>-4</sup>件/台・年 [Remote]

### 8.3.8 アンモニアに関する法規上の取り扱い

アンモニアは、微燃性冷媒の代表ガスである。爆発限界の上限が 28vol%、下限が 15vol%であり、RA の対象 冷媒と同様に微燃性を有する.本章では、アンモニアの冷凍則上での取扱いをまとめる.

#### 8.3.8.1 冷凍則上の規定

アンモニアは,第二条に可燃性ガスおよび毒性ガスとして掲名されており,これに基づき技術上の基準が規 定されている.以下に可燃性ガスの取扱いの概要を示す.

(1)機械室は、冷媒ガスが漏洩した際、滞留しないような構造とする.(七条第三号)

(2)安全弁等の放出管の開口部は、冷媒ガスの性質に応じた適切な位置とする.(七条第九号)

(3)受液器の液面計は、丸型ガラス管液面計以外を使用する.ガラス管液面計は、破損防止措置、破損した場合の漏洩防止措置を取る.(七条第十号、十一号)

(4)その規模に応じて、適切な消火設備を適切な箇所に設ける.(七条第十二号)

(5)冷媒設備の電気設備(アンモニアを除く可燃性ガス)には、設置場所および冷媒ガスの種類に応じた防爆性能 を有する構造にする. (七条第十四号)

(6)ガスが滞留する可能性のある場所に、漏洩検知設備を設置する.(七条第十五号)

(7)冷媒ガスを安全にかつ速やかに除害するための措置を取る.(七条第十六号)

(8)修理の際は、危険を防止するための措置を取る. (九条第三号ロ)

#### 8.3.8.2 アンモニアの可燃性に関する適用除外

アンモニアは前項(5)電気設備の防爆性能が適用除外となっている.適用除外は技術的文献(豊中,1995)によると、実験を行い、①爆発限界の範囲の中での着火しやすい濃度、②着火する場合の着火エネルギー量、③空間性とその中の濃度分布条件、④着火頻度、時間の関連性を把握し、これらに基づき冷凍則の正当性を再確認したと記載されている.

これにより、本 SWGにおいても上記①~④を一つの指針に着目することで、防爆仕様の妥当性を評価する.

### 8.3.9 着火確率導出について

着火確率は以下の手順で整備する.

#### 8.3.9.1 機械室設置機器の表面温度

対象機器と同一区画内に置かれている機械・器具のうち,表面温度が比較的高温となる下記機器について調 査中である.

1)燃焼機構を有する熱源機(ボイラ等)

2)溶液類駆動機器(ポンプ用モータ等)

3)換気装置(換気装置のファン)

4)暖房器具(電気ストーブ等)

5)照明器具(蛍光灯,白熱灯等)

諏訪東京理科大学,産業技術総合研究所等で実施中の微燃性冷媒の着火試験結果(今村,2012,佐分利,2012, 滝澤,2012)と,機械室内の機器の表面温度を比較し,機械室内の表面温度の制限を明示していく.

#### 8.3.9.2 喫煙率

喫煙によるタバコの火,及びライター・マッチの火が考えられる.サービスマンの喫煙率と喫煙行動についての調査を行った.

・サービスマンの 53%は喫煙し、その内 28%が現場での喫煙経験がある.過去一年に絞れば現場での喫煙率 は全体の7%となる.

・着火器具の99.6%がライターを用い、マッチは0.4%である.

サービスマンの喫煙確率 7%, 男性喫煙者の1日の喫煙本数 19.1本(JT, 2013), サービスマンの活動時間 8 時間, 1回の喫煙での直火の存在時間 2 秒と仮定し, ライターは着火源とせず, マッチに限ると, 喫煙による着 火源の存在確率(着火頻度)は, 10<sup>8</sup>~10<sup>9</sup>のオーダとなる.

#### 8.3.9.3 構成電気品

チラーユニットに搭載される電気部品(電動機,電磁開閉器,電磁接触器,プリント基板,トランス等)中で, 発火の可能性のある部品としてアークが発生する電磁接触器が挙げられる.チラーの種類・容量(馬力)毎に 電磁接触器の定格容量を整理した. チラーでは対象とする機器の容量範囲が広く,幅広い容量の電磁接触器が使用されている.その中で,20馬 カ以下の製品では,概ね 5kVA 未満となる.5kVA 未満の電気品は他の SWG の評価に従い,着火源としない. 本報告では 5kVA 以上の電気品を中心に評価を進めていく.

20 馬力を超える製品でも制御系で 5kVAを超える電気品はなく,駆動系に限られる.リスクを最大見積もる ため、5kVA以上の電気品では、1 回発停すると必ず着火源となると仮定する。1 日の最大発停回数 6 回/h(スク リューチラー)、2 回/h(ターボ)、電磁接触器の存在時間 1 秒と仮定し、マッチの火と同様に着火源の存在確率を 推定すると 10<sup>-4</sup> の桁となる.マッチの火と比較すると確率が大きく、さらに詳細な検討を進める.

### 8.3.10 リスクアセスメントとガイドラインとの関係性

可燃空間の存在確率を1(換気装置がなく,着火源が存在すると必ず着火するとの考え)として,LSごとの 着火確率を算出した.算出結果をTable.8.3.10に示す.換気装置のない条件であっても火災,火傷の発生確率は 合算すると10<sup>-6</sup>を超えるため社会が許容する値とするために対策を講じる必要がある.具体的には換気基準とそ の担保である.

自己シナリオ	ライフス テージ確	確率 (回/年·台)	評価
輸送・物流時の着火	0.0564	3.22x10 <sup>-7</sup> X 可燃空間確率	安全
据付・試運転時の着火	0.0564	5.01x10 <sup>-7</sup> X 可燃空間確率	安全
使用時の着火	0.7809	3.82x10 <sup>-6</sup> X 可燃空間確率	ほぼ安全
修理時の着火	0.2523	2.73x10 <sup>-6</sup> X 可燃空間確率	ほぼ安全
廃棄時の着火	0.0565	1.38x10 <sup>-6</sup> X 可燃空間確率	安全

Table.8.3.10 リスクアセスメント結果

GLへ展開している対策案を下記に示す.

- ・物流過程の機器の状況(移動,保管等)は多岐にわたる.微燃性ガスが充填されていることの注意喚起,及び 取扱い方法のステッカーを大きく示す.
- ・屋外については、空気流れがあると考えられるため設置条件の取り扱いを明確とすることを考える.
- ・IEC60335-2-40(IEC, 2005)の範囲となる 5kVA 未満の電磁接触器はミニスプリット SWG の検討結果を踏まえ,着火源としない.
- ・化粧パネル等により冷媒ガスが滞留する可能性のある構造のチラーユニットを規定する技術規格はなく, 密閉構造とならない開口面積の要求等本質安全設計として GL に記載する.
- ・廃棄では、冷媒回収作業に着目し、リスク評価を進める.

## 8.3.11 IEC60079-10-1 を考慮したガイドライン計画

#### 8.3.11.1 IEC60079-10-1の原則

「可燃性物質の放出およびその結果として危険区域の範囲が頻度・持続時間および量の点で最小限となるように設計,操作を行う」と記載される原則は非常に重要である.

可燃性ガスによって危険が生じる可能性がある危険区域の分類については IEC60079-10-1 (IEC, 2008) で定め られており,可燃性ガスの放出源を3つの放出等級で分類し,換気条件の有効性を表す2つの指標"換気度",及び "換気の有効度"を用いて3つの危険区域に分類している(Table.8.3.11).また,国内では,JISC60079-10 (JIS, 2008)として制定されており,危険区域の分類に差異はなく,チラーSWGではJISを用いて検討を行った.

### 8.3.11.2 IEC60079-10 を考慮したガイドライン計画

国内では可燃性ガスをチラーで使用する場合,冷凍則(七条十四号)を遵守し,防爆仕様の電気機器を適用 する必要があり,技術規格 JISC60079s(JIS, 2008)に従う.しかし,機器設置基準 KHK0302-3(KHK, 2011)や 参照される ISO5149(ISO, 1993)とJISC60079s(JIS, 2008)の関係は明示されていない.JISC60079s(JIS, 2008) では,前述する換気条件の有効性により防爆機器は不要となる非危険区域が示されているが,冷凍則を考える と微燃性冷媒を可燃性ガスと掲名しないことと整合が取れる.

	換気							
	換気度							
放出等級	高		中			低		
				有効度				
	良	可	弱	良	可	弱	良/可/弱	
連続	非危険 区域	Zone 2	Zone 1	Zone 0	Zone 0 + Zone 2	Zone 0 + Zone 2	Zone 0	
第一	非危険 区域	Zone 2	Zone 2	Zone 1	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 or Zone 0	
第二	非危険 区域	非危険 区域	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 1 and even Zone 0	

Table.8.3.11 換気度及び有効度による危険区分の分類

そこで SWG では検討した RA 実施条件,手法,結果を報告するとともに,機器の本質安全設計要求事項に反 映し,さらに JISC60079s(JIS, 2008)の原則に従い危険区域を設定する必要のない機器設置要件を GL に反映する.以下に作成中の GL の基本方針と、課題についてまとめる.

### 8.3.11.3 ガイドライン基本方針

KHKS 0302-3 に対して, RA にて抽出したリスクに対する処置の追記, 及び ISO 5149-1,3 から項目が不足する 項目を補完する形で GL を作成している. GL の基本方針は下記の通りである.

- ・対象冷媒として微燃性冷媒(A2L)限定として、その他冷媒の適用表現を削除する.
- ・機械室内は、冷媒漏えい時も危険区域とならないよう、IEC60079を参照し、下記措置を必須とする. ①機械式換気の設置、及び点検
- (必要に応じて複数台設置によるバックアップを含む)
- ②冷媒検知器(UPS,定期検査を含む)
- ※SWG内にて継続議論中
- ・屋外設置については、解析により、非危険区域となることを担保する.
- ・これより、電気機器は非防爆仕様とし、IEC/ISOと整合させる.
- ・解析結果を受けて,数値(換気回数2回/H以上,危険区域の範囲)を決定する.
- ・火器については、工事用の火器とそれ以外の火器に分類し(ISO と合致),リスクアセスメントから工事期 間は除いて考える.

#### 8.3.11.4 ガイドライン策定時の課題

GL には次に示す課題があり、これらに起因するリスクを低減する手段について記載して 2014 年度中の制定 を目指す.

- 1)長期停止時の復帰時の規定について
  - ・機械換気停止状態で、長期停止時に漏えいした場合と復帰操作時のリスク評価について検討中.
- 2) IEC60079 を考慮した屋外設置の規定について

可燃域が着火源の想定される領域に形成されることがなく、想定した製造メーカの条件の設置制限を GL として規定する必要があるか否かを含め検討中.

3) 自然着火温度の考え方について

ISO5149に相当する機械室内の直火の持ち込み制限と、機器表面温度の制限により、適正な規制となるよう に検討中.

- 4) 冷媒検知器の規定について
  - ・GL-13 をベースに ISO と比較し, 適正な GL とする.

①電源(警報機、検知器)

- UPS や独立性電源が望ましいとする。
- ②検知対象
- 酸素濃度ではなく冷媒濃度(RCL 基準)とする。
- ③設定値 ISO と GL-13 に整合させる.

④インターロック

IEC60079を考慮し、採用検討しているが、リスクが小さければ設定しない.

- 5) 冷媒濃度管理(充填量規制) について
  - KHKS では限界濃度以下になるように機械室体積,冷媒充填量を管理することが要求しているが,GL で は換気を前提としているため,緩和を検討中.
  - ・定常解析結果より、機械室体制の最小値のみの規制を検討(充填量規制なし).

### 謝辞

本報告は 10名の委員,相山真之氏,伊藤幹雄氏,井場功氏,七種哲二氏,隅田嘉裕氏,仙田守氏,平原卓穂氏, 深野修司氏,山口広一氏,田下友和氏との研究成果を向井洋介氏とともに筆者がまとめたものである.感謝申 し上げる.

### 文献

日本冷凍空調工業会(日冷工),1999. 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).

Arthur D Little inc, 1998. Risk Assessment of HFC-32 and HFC-32/134a(30/70wt%), Split System Residential Heat Pump.

- 経済産業省,2011. スクアセスメント・ハンドブック 実務編.
- 日本工業規格 (JIS), 2008. JIS C60079-10(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
- 高圧ガス保安協会 (KHK), 2011. 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].
- International Organization for Standardization(ISO), 1993. ISO5149 : Refrigerating systems and heat pumps Safety and environmental requirements.
  - Part1) Definitions, classification and selection criteria
  - Part2) Design, construction, testing, marking and documentation
  - Part3) Installation site

Part4) Operation, maintenance, repair and recovery.

International Electrotechnical Commission (IEC), 2005. IEC60335-2-40: Household and similar electrical appliances – Safety –

Part 2-40) Particular requirements for electrical heat pumps, air conditioners and dehumidifiers.

日本冷凍空調工業会(日冷工), 2011. JRA GL-13: マルチ形パッケージエアコンの冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(ASHRAE), 2010. ASHRAE15: Proposed Addendum a to Standard 15-2010, Safety Standard for Refrigeration Systems

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, 横浜.

豊中俊之, 1995. 冷凍, 70 (811), 5.

今村友彦, 2012. 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, 神戸.

佐分利禎, 2012. Combustion Characteristics of Flammable Refrigerant Gases, 環境と新冷媒国際シンポジウム 2012, pp.69-72, 神戸.

滝澤賢二, 2012. Flammability Property of 2L Refrigerants, 環境と新冷媒国際シンポジウム 2012, pp.73-79, 神戸.

日本たばこ産業株式会社 (JT), 2013. 2012 年全国たばこ喫煙者率調査,

http://www.jti.co.jp/investors/press\_releases/2012/0730\_01\_appendix\_02.html

International Electrotechnical Commission (IEC), 2008. IEC60079-10-1 : Explosive atmospheres -

Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres

# 9. カーエアコン用新冷媒(R1234yf)国内導入における規制緩和への取組み

### 9.1 R1234yf の国内導入における背景

カーエアコン用冷媒は、温室効果ガス(GHG)削減の一環として、温暖化係数(GWP)の小さいガスへの代替に向けた動きが進みつつある. EU では 2011 年以降の新型車について GWP150 以下の冷媒の使用を禁止する 規制を施行(2017 年以降は全ての生産車に適用)しており、国産車メーカーも EU 輸出車については対応を進めている.

また,北米においても SAE(米国自動車技術会)によるリスク評価や ASHRAE(米国暖房冷凍空調学会)による R1234yf を微燃性冷媒とするカテゴリー分けの検討が行われた.加えて, EPA(環境保護局)GHG 規制ファイナルルール(2010年4月1日発行)では,低 GWP 冷媒採用車にクレジット付与が認められ,規制値未達分への補填が可能となるなど、導入に向けた準備が進みつつある.

一方,国内では今のところ欧州のような規制は無いが,2011年2月17日に開かれた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において,物質代替の当面の課題と対策の方向性について中間論点整理の承認が得られた.その中で「自動車メーカーと国,研究機関,機器メーカー等は連携し,国内市場における早期の冷媒代替の促進を図る.具体的には,2014年を目途として代替促進にあたっての諸課題の解決に取組み,その上で代替実現を目指す」と謳われている.

以上の状況を鑑み,国内では 2014 年を目途に,R1234yf を自動車整備工場等で安全且つ容易に取り扱うため, 一般社団法人日本自動車工業会(以下,自工会)を中心に,冷媒回収・充填機メーカーや各研究機関が連携しリ スクアセスメントを進めているところである.

# 9.2 R1234yf の国内導入における課題

自動車のライフサイクルを通じた R1234yf 導入に伴う問題点を表 5.1 に整理する.

①車両製造ライン	可燃性ガスのため防爆対策が必要(大臣特認に基づく申請)	課題 あり
②充填用ガス(アフ ターサービス)	告示139号の要件を満たせば適用除外 (サービス缶) 0.8MPa(温度35度)以下の液化ガスであって,かつ,告示第139号第四条第三号の要件を 満たせば適用除外であり問題なし	課題 なし
③充填用ガスの貯蔵	【高圧ガス保安法】 火気,可燃物からの安全距離確保が必要	課題 あり
④回収・充填(アフ ターサービス)	【高圧ガス保安法】 保安物件からの安全距離確保(病院,学校等:15m以上,住宅等:10m以上),静電気除 去等対応の上,整備事業場単位での都道府県知事の許認可が必要等	課題 あり

#### 表 9.1 R1234yf 導入時の影響

製造段階では、工場ライン毎に大臣特認を受け、防爆対策の簡素化を実施しているが、今後適用車種拡大に伴い、その都度対応が必要となることから、更なる規制緩和が課題である.

一方,アフターサービス段階では,事故や故障による修理を実施する場合に回収又は充填作業が発生するが, その実施者は一般整備事業者をはじめ,板金事業者,電気装置整備事業者等多岐にわたり,その規模も様々で ある.現在の法制下では,規制に則った対応をするには多大な投資が必要であり,非現実的な状況にあると言 わざるを得ない.

以上より,表 9.1 の④については,安全距離確保が不可能な場合が存在する為,規制緩和が必須である.従って自工会サービス部会として最優先で取組むこととした.

なお、使用済自動車の解体段階については、現段階では回収義務が無いことからここでは取り扱わないことと

する.

### 9.3 自工会サービス部会の取組み

前述のように、自工会をはじめ、冷媒回収・充填機製造者、冷媒供給者、整備業界団体等が協力し、2014 年を 目途に諸課題解決に向けた取組みを進めている.

具体的には、リスクの程度に応じ、実態に即した安全規制の見直しを要望するために、「危害の発生確率」と「その危害の重大さ」の組合せで評価する、R-Map(両者を 6×5 のマトリックス上で表現したもの)を活用して リスクアセスメントを行った.

まず,作業現場におけるリスクを抽出・整理するために,回収・充填機メーカーへのヒアリングや回収充填作 業を行う事業者を対象としたアンケートを実施した.アンケートは,社団法人日本自動車整備振興会連合会, 日本自動車車体整備協同組合連合会,全国自動車電装品整備商工組合連合会を通じて,規模や業種に偏りが出 ないように全国の整備工場に配付し,756件から回答を得た.このうち,自社でカーエアコンの整備・修理を行 っている 533件の回答から,整備工場の概要(工員数,取扱車数,レイアウト等)および工員の作業実態に関 する事象(漏洩有無,換気状況,着火源有無等)の基礎データを取得した.

次に、アンケートにより明らかになった、漏洩頻度の高い部位や漏洩量、着火源となり得る電気設備のスペックに基づき、最悪事象を想定した着火試験および漏洩シミュレーションを実施した.これらの結果から発生 頻度と危害度を算定し、最終的に R-Map に基づいてリスクを評価した.

これらの知見に基づいて, R1234yf を不活性ガスである現行冷媒と同等に扱うための対策を立案し,規制当局へ 提案すべく進めているところである(表 9.2).

リスクアセスメント(NEDOプロジェクト,アンケート, JARI委託等によりデータ取得)	2011/4~ 2013/3
規制適用除外への具体案検討(経産省委託 KHK 事業への参画)	2012/10~ 2013/3
経産省検討への提案	2013/4~

表 9.2 自工会の取組事項

# 9.4 着火試験

#### 9.4.1 試験方法

着火試験は、一般財団法人日本自動車研究所城里テストセンターHy-SEFの耐爆火災試験設備(図 9.1)において、諏訪東京理科大学が実施した.



図 9.1 Hy-SEF 概要

上述のアンケート結果から表 9.3 のようにリスクを整理し、頻度と危険度から優先順位を付け、「②ホース破断」 と「④回収・充填機内部の漏洩」、つまり下記の2点を検証事項とした.

・配管等に形成されたピンホールから冷媒が漏洩した場合に、可燃性混合気を形成する範囲はどの程度か.また、着火は起こるか.

 回収・充填機内で冷媒が漏洩した場合に、回収・充填機内の電気リレーやその他何らかの火花等によって着火 する危険性があるか。

	リスク	漏れ速度 (漏れ量/時間)	備考
1	接続部からのスローリーク	1kg/24h(ガス)	着火可能性:低い
2	ホース破断(含むピンホール)	1kg/60s(ガス)	配管内径:φ4mm 内圧:0.5MPa(常温)
3	容器安全弁(溶栓)作動	24kg/1h(ガス)	発生可能性:低い
4	回収・充填機内部の漏洩(安全弁等)	300g/60s(液) (初期 100g/0.5s)	発生可能性:低い

表 9.3 アンケートによるリスクの整理

設備内に整備作業場を模擬した試験スペース(8m×8m)と、回収・充填機を模擬した試験装置(アクリル製の1 m<sup>3</sup>の箱)を設置した(図 9.2,図 9.3).回収・充填機模擬体の両側面に、換気口として幅 20 mmのスリットを設けた.

ピンホール漏洩着火試験では、まずピンホールから冷媒を漏洩させ、拡散濃度を計測した.続いて、冷媒漏洩 ロ付近に電気スパーク(単発及び連発)と裸火により、着火の有無を見た.

回収·充填機漏洩着火試験では、スリットが有る場合と無い場合とで、着火源を単発スパークとした着火試験 を行い、着火の有無を見た.



換気口(スリット幅:20mm) 火花放電 ジンボ ガス放出 1000

図 9.2 整備作業場を模擬した試験スペース

#### 図 9.3 回収・充填機を模擬した試験装置

### 9.4.2 試験結果

試験結果を表 9.4 に示す.ホース破断を想定した試験では,漏洩部から約 10cm の範囲で可燃域となることが 確認できた.しかし,回収・充填機内の最大エネルギー(リレー接点の 1.07J)を超える 10J 以上の着火エネルギーを与えても着火が見られなかった.

また回収・充填機内の漏洩を想定した試験では、両側面のスリットで外部との換気が行われたため、可燃域に 16Jの十分大きな着火エネルギーを与えたが着火は見られなかった.

なお、スリットを塞ぎ密閉空間とした場合には、既知の通り、着火して火炎が伝播した.ただし、爆風圧は発 生しなかった.

与件	試験内容	結果
ホース破断	φ4mmパイプより噴出し濃度分布と着火を確認 ・漏洩速度:470g/min (ボンベを 50℃加熱) ・着火源: 電気連続スパーク	<ul> <li>可燃域は噴出部より</li> <li>約 10cm の範囲で発生</li> <li>・燃焼せず</li> </ul>
回収・充填機 内部の漏洩	1m <sup>3</sup> の密閉空間に漏洩. 但し2面に20mmの縦スリ ット ・漏洩速度:380g/min ・着火源:電気スパーク (16J,6Hz) ・温度湿度:25℃,75%	・噴出後可燃域発生 ・燃焼せず

表 9.4 着火試験結果

## 9.5 漏洩シミュレーション

前節で述べたように、回収・充填機漏洩着火試験では、スリットにより換気が生じた場合、十分大きな着火エネルギーを R1234yf に与えても着火しなかった.この現象をより詳細に把握するため、漏洩シミュレーションを行い、回収・充填機模擬体内での冷媒濃度および流速を解析した.解析条件は以下である.

- 解析コード: PHOENICS (熱流体解析コード)
- 解析モデル:1m×1m×1m立方体,幅20mm・高さ1mの縦スリット2箇所(対面)付
- ガス放出速度:500 g/min(底面より)
- ・ モデルサイズ: 50万要素(100×100,高さ方向 50分割)
- 計算方法:0.5 秒ステップ,反復回数 50 回

図 9.4 に,冷媒放出中の冷媒濃度を示す. 燃焼下限界(LFL)は 6.2 vol%で(日本フルオロカーボン協会), 解析画像上では,漏洩部から LFL および 1/4LFL までの距離は,それぞれ 256 mm,964 mm であった. これらの 距離関係が現実の事象でも成立すると仮定すると,前節の着火試験では LFL 長が約 10 cm であるので,1/4LFL 長は約 38 cm となる.



図 9.4 冷媒放出時の冷媒濃度

続いて、図 9.5, 9.6 に冷媒の漏洩を停止してから 30 秒後の冷媒流速を示す.スリット近傍では換気により空気の侵入と排出が同時に起こるので低流速域が発生する.しかし、それ以外の殆どの空間では、R1234yf の最大燃焼速度 1.5 cm/sec を超える 2 cm/sec 以上の流速が発生する(Tankizawa, et al., 2012). つまり、換気状態の容器内では、この流速の発生により R1234yf が着火しないことが明らかとなった.



# 9.6 R-Map によるリスクアセスメント

### 9.6.1 危害の発生確率

危害の発生確率を FTA (Fault Tree Analysis: 故障の木解析) により算出した. FTA とは, 好ましくない事象 (頂上事象)を初めに設定し, その故障・事故に至る道筋を, 発生確率と共に, FT 図(故障の木図)で表し分 析する手法である. 上位の故障・事故から下位の原因へとトップダウン的に展開していく.

既に SAE では,整備工場における着火リスクを FTA で評価した報告書を発行している (Gradient Corporation, 2008, 2009). ここで得られた知見を参考にして,日本の整備現場の実態等を考慮した FTA を実施した.

FT 図を図 9.7 に示す. 頂上事象は「着火」である. 着火するには, 「冷媒が燃焼する濃度(LFL(下限可燃限界) ~UFL(上限可燃限界))」, 「不適切な換気状態での作業」, 「最少着火エネルギーを上回るエネルギーを 伴う火炎源の存在」の 3 事象が同時に起こる必要がある. これを表 9.3 のリスクの整理に基づき,「ホース接続 部」, 「ホース破断」, 「ボンベ」の部位ごとに分け, アンケート, 試験, シミュレーションにより得られた データを基に, 各事象の発生確率を求めた.



(a) 冷媒の漏洩(図 9.7 中の※1)

アンケートから得られた漏洩件数により漏洩確率を算出した.

#### (b) 不十分な換気(図 9.7 中の※2)

そもそも法令で換気が義務付けられていることもあり、アンケートでは換気不可の回答がなかった.また,着 火試験および漏洩シミュレーションにより,屋内および隙間のある容器内では,換気状態であり冷媒流速が最 大燃焼速度を超える為安定した火炎が生じないことがわかった.作業中の現場で空気の流れが全くないとは極 めて考えにくいため,10<sup>-8</sup>とした.

#### (c) 可燃域内の着火源(図 9.7 中の※3)

着火試験では、約 10 cmの可燃域内でも、屋内での空気の対流により、16 Jのスパークでも安定した火炎が発生 しなかった.更に、教育を受けた整備士が、暖房機や溶接機等の設備を、可燃性冷媒を扱う作業場所から約 10 cm以内の距離で扱うとは極めて考えにくい.また、回収・充填機内で最大着火エネルギーを持つ着火源はコンプ レッサー駆動型リレー接点である.図 9.8 に示すように、カバーで覆われて外気との隙間が微少であるため、 R1234yfの消炎直径(火炎が通過しない最大孔径)が7~8 mmであることを考慮すると、仮に接点部で着火した としても周囲への延焼は考えられない.よって 10<sup>8</sup>とした.

#### (d) 着火

以上より、着火の発生確率は  $1 \times 10^{-18}$ となった. 一般財団法人日本科学技術連盟R-Map実践研究会の指針に基づき、重要保安部品である当該部品の発生頻度  $0 \nu \prec \nu c$   $10^8$ とすると、本最終事象の発生頻度は「考えられないレベル」となる.



図 9.8 回収・充填機内のリレー(汎用品)

### 9.6.2 危害度

危害度は,着火試験結果より求めた.具体的には,物理的指標(熱,圧力)として火炎温度,輻射熱,音圧, 化学的指標(毒性)としてフッ化水素(HF)濃度に基づいた.

実際の整備作業場および回収・充填機内部を想定した試験では着火しなかったため、熱、圧力、毒性とも認められず、危害度は0(無傷)であった(表 9.5).

		私 J.J. 歪曲 IF未颁入	
	測定項目	測定値	危害度
劫	火炎温度	温度上昇認められず	無傷
杰	輻射熱	認められず	無傷
圧 力	音圧(爆風圧)	認められず	無傷
毒性	HF濃度	認められず (濃度計で 0.0 ppm)	無傷

表 9.5 整備作業場での危害

一方,密閉空間で燃焼する最悪条件を想定した試験では,表9.6のような結果となった.映像を分析すると, 着火の1.25秒後に50cm離れた側壁の塩化ビニルシートに延焼し,400℃以上になったと推定できる.ただし, 爆発的な燃焼ではなく,火炎が仮に人体に触れたとしても,火炎の持続は数秒であるため,軽い火傷程度と考 えられる.また,HF濃度は最大許容濃度を超えるため,作業者がHFを浴びると刺激を感じる可能性があるが, HFはすぐに拡散し危険域に達するほどの時間的持続はなく,作業者も避難することが可能である.以上より, 最悪条件で着火した場合の危害度はI(軽微)と判断した.

表 9.6	着火試験に:	おける
日西夕仲	(虚明虚明)	TOEL

東悪条件(密闭空間) じの厄吉					
測定項目		測定項目	測定値	危害度	
	熱	火炎温度	未測定 (映像より推定 400℃以上)	軽微	
		輻射熱	未測定		
	圧力	音圧 (爆風圧)	<ul><li>無し</li><li>(映像より)</li></ul>	無傷	
	毒性	HF濃度	最大許容濃度(3ppm)を 超える	軽微	

#### 5.6.3 リスクの評価

以上で求めた発生確率と危害度により, R1234yf が回収・充填作業中に着火するリスクは, 最悪条件での危害 度を考慮しても, R-Map上でC領域にプロットされる(図 9.9). つまり社会的に十分許容可能なリスクである.



図 9.9 R-Map

## 9.7 規制緩和への進捗

#### 9.7.1 リスク低減対策の検討

以上のリスクアセスメント結果を,経済産業省委託事業として高圧ガス保安協会(KHK)が 2012 年 10 月に 設置した「R1234yf 用回収装置技術基準運用検討委員会」(委員長・飛原英治東京大学教授)に提供し活用した (高圧ガス保安協会).

当委員会において, R1234yf の着火は, 要因ごとの着火可能性有無を再確認した結果、社会的に十分許容可能 なリスクであることが理解されたが, 規制緩和に向けては, 2重の安全対策を施すことによる, 更なるリスク 低減を検討した. 具体的には, ハード面の対策として, 回収・充填機本体に対し, 常に換気できる構造(2 方向 の換気口とファンの作動)とすることや, 静電気の除去, 冷媒貯蔵容器容量の制限, 可燃性冷媒であることを ユーザーに示すコーションラベル貼付などである.

当委員会の報告書(2013年6月に経済産業省より正式公開)にて、これらの対策案により,現行にて高圧ガス 保安法の適用除外となっている不活性フルオロカーボン用回収・充填機と同等の安全が確保できると結論づけら れた.

### 5.7.2 産業構造審議会

2014年3月以降,審議会でR1234vfの回収・充填機の適用除外について検討される予定.

### 5.8 まとめ

以上の取組みにより、 R1234yf 用回収・充填機について規制緩和の目処が立ち、目標である 2014 年を目途とした低 GWP 冷媒代替促進にあたっての諸課題解決に向け大きく前進しているところである.

### 謝 辞

アンケートの配付にご協力いただいた,一般社団法人日本自動車整備振興会連合会,日本自動車車体整備協 同組合連合会,全国自動車電装品整備商工組合連合会,及び,アンケートに回答していただいた整備工場関係 者の皆様,ならびにリスクアセスメントにご協力いただいた一般財団法人日本自動車研究所の鈴木徹也研究員, 株式会社ヤマダコーポレーションの草刈善佐氏,着火試験にご協力いただいた諏訪東京理科大学の須川修身教 授,今村友彦講師に心より謝意を表する.

# 参考文献

Gradient Corporation, "Risk Assessment for Alternative Refrigerant HFO-1234yf" (2008)

Gradient Corporation, "Risk Assessment for Alternative Refrigerants HFO-1234yf and R744(CO2) - Phase III" (2009)

Takizaswa, K., *et al*, "Flammability properties of 2L refrigerants", The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012 (2012)

高圧ガス保安協会,平成 24 年度経済産業省委託高圧ガス保安対策事業(高圧ガス保安技術基準作成・運用検討) R1234yf用回収装置技術基準検討委員会報告書

日本フルオロカーボン協会,"特定フロン(CFC/HCFC)およびフルオロカーボン類の環境・安全データー覧表"

# 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2013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新エネルギー・産業技術総合開発機構および関西電力株式会社の方々に 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.

	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
副主查	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
事務局	公益社団法人 日本冷凍空調学会	事務局		関田	真澄
	公益社団法人 日本冷凍空調学会		事務局長	西口	章
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
	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
	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	党走	召鋲
	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		田村	正則
			研究員	滝澤	賢二
		安全科学研究部門	主幹研究員	包坂	正幸
			研究員	佐分利	训 禎
			研究員	椎名	拡海
			グループ長	和田	有司
	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
		<ul><li>(ダイキン工業株式会社)</li></ul>		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	グループ長	一ノ速	順 健史
		(トヨタ自動車株式会社)	グループ長	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	(株式会社 東洋製作所)		一岡	順
		(ダイキン工業株式会社)		过 使	建次
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	分析官	及川	信一
				片桐	信三
			専門職	宮下	洋一
	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	統括主幹	角野	慎治
			<u>主幹</u>	高野	正好
			主査	阿部	正道
	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	お客様本部 営業計画グループ	担当部長	中曽	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
			学生	伊藤	誠

研究会委員名簿