

次世代冷媒に関する調査委員会
「次世代冷媒・冷凍空調技術の基本性能・最適化・評価手法および
安全性・リスク評価」

平成30年度 プログレスレポート

平成31年3月

公益社団法人 日本冷凍空調学会

目 次

1 はじめに 香川澄	1
------------	---

2 調査委員会の体制と日程 井上順広	4
--------------------	---

分冊：

第 1 部 次世代冷媒の基本特性・性能評価（WGⅠ）の進捗

第 2 部 次世代冷媒の安全性・リスク評価（WGⅡ）の進捗

第 3 部 次世代冷媒の規制・規格の調査（WGⅢ）の進捗

1. はじめに

公益社団法人日本冷凍空調学会 会長 香川澄（防衛大学校）

冷凍空調機器は現代社会において欠かせないものになり、さらに、機器が使用される分野が広がっている。それに従って、冷凍空調機器を運転する際の使用エネルギー量は年々増加し、国内で使用されるエネルギー量は国内全体量の 7%(CO₂ 換算)にまで達している。現在使用されている冷凍空調機器の多くは蒸気圧縮式であり、その冷媒としてフルオロカーボン（通称、フロン系冷媒）^{※1}が主に用いられる。しかし、1987 年に採択された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によって冷媒やフルオロカーボンを用いる断熱材を取り巻く状況が急変した。モントリオール議定書によって、先進国では 1996 年までにフルオロカーボンのうち塩素原子を含む CFC 系冷媒等の全廃（開発途上国では 2015 年まで）が決まった。さらに、2007 年のモントリオール議定書第 19 回締約国会合では先進国での HCFC 系冷媒の消費量・生産量は共に 2020 年に全廃（既存の冷凍空調機器の補充用冷媒を除く）^{※2}することになった。

ところが、2016 年のモントリオール議定書改正では、CFC 系冷媒や HCFC 系の代替冷媒である HFC 系冷媒が環境保護を目的としてその生産が規制され、先進国では 2019 年から（開発途上国では 2024, 2028 年から）削減することが定められた。この削減スケジュールによると、日本では HFC の削減の基準値を約 7000 万 CO₂ トン（2011-2013 年の平均数量＝各年の HFC 生産・消費量の平均＋HCFC の基準値の 15%）とし、2036 年までにその 85%までに段階的^{※3}に削減することになる¹⁾。

このキガリ改正に伴って、冷媒を地球温暖化係数 GWP が小さいもの、さらに、それを使用する機器、断熱材を環境負荷のより少ないものへの変更が必要になる。また、HFC 系冷媒の総量規制（国内担保法）として、特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律（オゾン層保護法、1988 年制定、逐次改正）が 2018 年に改正され、生産および消費を規制し、その需要を円滑かつ着実に削減する工程が始まっている。

また、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（2001 年制定、フロン排出抑制法、2015 年改正）が改正されて、フロン類を使用している業務用冷凍空調機器の管理者（機器の所有者）機器の定期点検、国へのフロン冷媒漏えい量報告等が課せられ、冷凍空調機器の設備施工・保守・メンテナンス業者に冷媒の充填に関わる実施基準、そして充填・回収証明書の発行、破壊業者・再生業者への引渡しスキーム等が課せられた。この中で、温暖化に影響を及ぼす製品に対して GWP の目標値および目標年度が指定されている。さらに 2019 年に本規制において冷媒の管理がより厳しいものに改正された。また、地球温暖化対策計画（2016 年閣議決定）では、京都議定書、パリ協定約束草案の達成に向けた

^{※1} 炭化水素の水素原子をフッ素に置き換えた化合物、一般的にフロンとも呼ばれる。構成される原子によって、CFC（クロロフルオロカーボン）、HCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）、HFC（ハイドロフルオロカーボン）、HFE（ハイドロフルオロエーテル）、HFO（ハイドロフルオロオレフィン）などのように表記される。

^{※2} 2010 年までに 75%削減、2015 年までに 90%削減、2020 年に全廃

^{※3} 2019 年までに 10%、2024 年までに 40%、2029 年までに 70%、2034 年までに 80%、2036 年までに 85%削減

取組を含め温暖化対策を推進する計画が立てられている。

このように、冷媒に関する法規制が制定される中で、現在までに開発されている低 GWP 冷媒で、HFC 系冷媒と同等の性能を有するものは限られる。そこで、低 GWP 冷媒の開発は先の法規制に合わせて指定製品ごとに行われている。しかし、指定されていない機器製品や指定されている一部の製品においては低 GWP 冷媒が開発の途中である。また、開発されていても使用する機器の性能が劣っていたり（運転時の二酸化炭素排出量が増加することに結び付く）、燃焼性や毒性などの安全性（安全区分）や冷媒としての安定性に問題があったり、市場価格が高いものがある。一方、冷媒を混合した混合冷媒の検討が進められているが、多くの混合冷媒は非共沸混合冷媒になり、そのために信頼性の高い熱物性情報が十分に得られていなかったり、組成の取り扱いや伝熱特性に問題があったりするので早期に解決する必要がある。

これらの他に、既に設置された機器に充填されている冷媒には GWP が非常に高いものがあるので、これを低 GWP 冷媒に変更する試み（レトロフィット、ドロップイン）も大切であり、欧米では新規冷媒の生産量を減らす目的で積極的に進められている。また、機器運転時の漏洩を減らすにはその原因・箇所を探る必要がある。フロン排出抑制法に基づき業務用冷凍空調機器の管理者から得られたデータによると設置時の漏れ（配管部）、そして長期運転による漏洩事故（圧縮機や熱交換器、配管部）が多いとされる。さらに、高性能な冷媒回収機器の開発、廃棄時やメンテナンス時に冷媒回収を容易にする製品システムの開発、加えて、回収した低 GWP 冷媒の再生（蒸留、成分調整）、リサイクル（簡易再生）冷媒が普及することで冷媒漏洩の低減、そして回収率の向上に結び付く。

そのため、政府として補助金制度「自然冷媒機器の冷凍冷蔵分野への展開を目的とした脱フロン・低炭素社会の早期実現のための省エネ型自然冷媒機器導入加速化事業」、「フルオロカーボンの回収率向上を目指す環境研究総合推進費」や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）事業「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発／次世代冷媒に係る安全性・リスク評価に関する検討」などを設けて、新冷媒および機器の開発・導入の促進を試みている。

先に触れたように、2016 年のモントリオール議定書キガリ改正により HFC 系冷媒の生産及び消費量の段階的な削減義務が追加され、低 GWP 冷媒の基本物性評価、及びそれを適用した省エネ冷凍空調機器の早期開発・最適化手法の必要性がこれまで以上に高まっている。一方で、新冷媒の候補となる炭化水素を含めた低 GWP の次世代冷媒は安全性に対する課題（燃焼性、化学不安定性等）があるため、次世代冷媒の基本的特性の把握及び次世代冷媒使用時の安全性・リスクの標準的な評価手法の確立が不可欠となっている。そこで、公益社団法人日本冷凍空調学会は NEDO 調査事業の「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発」（平成 30 年 9 月～平成 35 年 2 月（前期：平成 30 年 9 月～平成 33 年 2 月、後期：平成 33 年 3 月～35 年 2 月））の委託を受けて、平成 30 年 9 月より研究調査を行っている。

この調査研究では、研究開発項目①「次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価」、及び研究開発項目②「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」の研究開発の成果を効率的に国際規格化・国際標準化等へ結び付けることをねらいとして、本委託事業における各研究開発項目を横断して進捗・結果等の情報を取りまとめ、次世代冷媒の基本特性評価及びそれを使用した省エネ冷凍空調機器の早期開発・最適化と冷凍空調機器への適用に係る安全性・リスク評価に関する手法の調査を実施する計画である。

地球温暖化は人類が直面している最大の危機といえる。この危機を乗り越え、かつ持続可能な世界を構築するには冷媒に関する問題を解決する必要がある。しかし、関連する規制や対策が進んでいる欧米や日本においても道のりはまだ遠い。冷媒に関する制限値や目標値の到達を目指して、冷媒の市場投入量の制限（総量規制）が行われているが、環境負荷が大きい中型の冷凍冷蔵機器やビルマルなどに用いる低 GWP 冷媒が開発半ばである。このため、現在の法規制の下で安定して冷媒供給が継続できるか不明なところが多い。また、現在の対策による効果が十分でない場合には、台数が非常に多いルームエアコンや現時点ではまだ規制対象となっていない機器への新冷媒採用も検討する必要があることが予想される。また、冷凍空調機器が運転時に使用するエネルギーは全エネルギーの約 1 割にも達しており、今後も冷凍空調機器の市場投入台数の増加に伴い増加する傾向にある。このため、新冷媒の開発と共に効率（成績係数）が高い機器を開発することも重要になる。

冷凍空調分野が抱える環境問題は非常に大きい。この問題を可能な限り速やかに解決できるように関係者が国内のみならず海外において開発・協力を努めることで、これからも冷凍空調分野が発展していくことを期待する。

平成 31 年 3 月 31 日

2. 調査委員会の目的・体制と活動状況

調査委員会委員長 井上順広（東京海洋大学）

2.1 はじめに

公益社団法人日本冷凍空調学会は、平成 30 年度 NEDO 調査事業「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発／次世代冷媒に係る安全性・リスク評価に関する検討」に 6 月 29 日に採択された。その事業を遂行するため、情報収集、取りまとめ等を実施する調査委員会を学会内に設置した。

2.2 背景

2016 年モントリオール議定書改正による HFC 冷媒の生産及び消費量の段階的な削減義務が追加され、これまで以上に低温室効果の冷媒の基本物性評価及びそれを適用した省エネ冷凍空調機器の早期開発・最適化・性能評価手法の必要性が生じてきた。一方で、候補となる次世代冷媒（低 GWP 冷媒）は安全性に対する課題（燃焼性、化学不安定性等）があるため、次世代冷媒の基本的特性の把握及び次世代冷媒使用時の安全性・リスクの標準的な評価手法の確立が不可欠となっている。

2.3 調査目的

NEDO の研究開発事業「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発」では、次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価や次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発を推進している。これらの研究開発の成果を効率的に国際規格化・国際標準化等へ結び付けることをねらいとして、本調査事業においては研究開発事業における各研究開発項目を横断して進捗にともなう問題点の抽出・結果等の情報を取りまとめ、次世代冷媒の基本特性評価及びそれを使用した省エネ冷凍空調機器の早期開発・最適化・性能評価と冷凍空調機器への適用に係る安全性・リスク評価に関する手法の調査を実施する。

2.4 調査体制

日本冷凍空調学会内に、調査委員会を設置する。さらに委員会内に 3 つのワーキンググループ（WG）を設置し、情報交換・討議を行う。

1) 調査委員会の設置と役割

- ・調査委員会は WG の内容を吸い上げてとりまとめ、全体を通して調査結果を確認・整理する。
- ・調査委員会では提供された情報の取りまとめ方法、さらに対外的発信する内容についての審議を行う。
- ・調査委員会は各 WG のまとめられた内容を「プログレスレポート」として毎年度公表する。
- ・調査委員会の開催は、4 回/年を予定する。

2) WG の設置と役割

- ・WG は NEDO 事業者をはじめとする学術研究者・業界団体・その他の有識者間の情報交換の場とする。
- ・WG は情報交換・討議を適時行うとともに、討議を踏まえ、調査委員会へ提供する情報の調整を行う。
- ・各 WG の内容は以下のとおり。
 - WG I 次世代冷媒の基本特性、性能評価
 - WG II 次世代冷媒の安全性・リスク評価
 - WG III 次世代冷媒の規制・規格調査

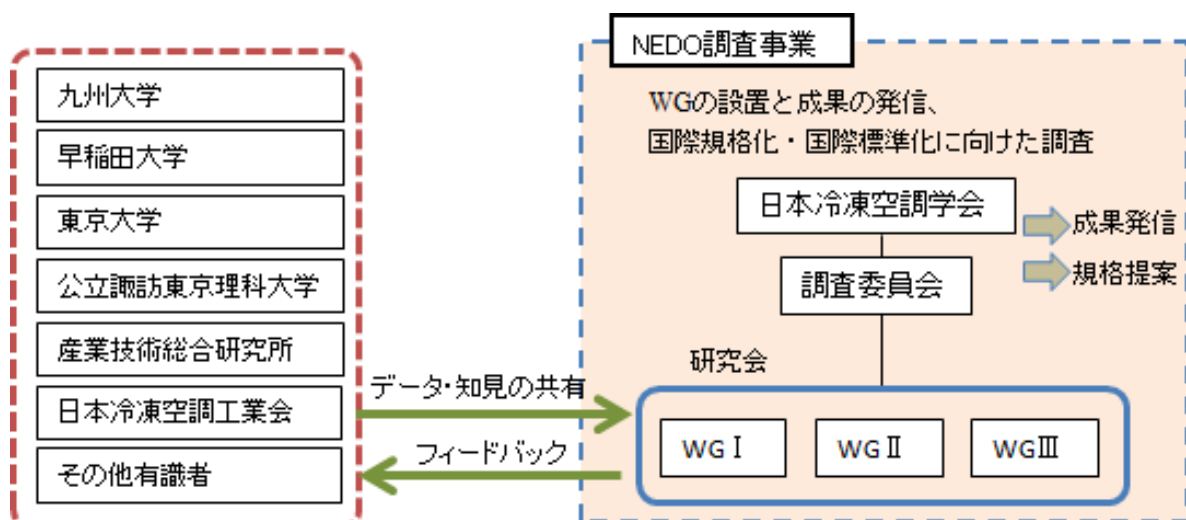


Fig.2-1 Interacting structure of research project

3) 委員会メンバー

委員長は東京海洋大学・井上順広教授が務め、委員の構成については Table 2-1 に示す産官学の有識者で組織する委員会とした。

4) WG メンバー

WG の構成を Table 2-2 に示す。WG I は次世代冷媒の基本特性、性能評価に係る事項で主査は早稲田大学・齋藤潔教授、WG II は次世代冷媒の安全性、リスク評価に係る事項で東京大学・飛原英治教授、WG III は次世代冷媒の規制、規格調査に係る事項で環境エネルギーネットワーク 21・岸本哲郎理事長とした。

Table 2-1 Member of research project committee

		氏名	所属
委員長		井上 順広	東京海洋大学 教授
副委員長		上村 茂弘	日本冷凍空調学会
委員	有識者事務局	香川 澄	防衛大学 教授
		杉浦 好之	高圧ガス保安協会 理事
		岸本 哲郎	環境エネルギーネットワーク21理事長(WGⅢ主査)
		片岡 修身	日本冷凍空調学会 ISO国内分科会主査
		松本 浩二	中央大学 IJRアジア地区エディター長
		上田 憲治	日本冷凍空調学会 総務/会計担当理事
		松田 謙治	日本冷凍空調学会 事務局長
		学術関係者	東 之弘
	滝澤 賢二		産業技術総合研究所 主任研究員
	齊藤 潔		早稲田大学 教授 (WGⅠ主査)
	飛原 英治		東京大学 教授 (WGⅡ主査)
	今村 友彦		公立諏訪東京理科大学 准教授
	椎名 拓海		産業技術総合研究所 主任研究員
	業界 (日冷工)	岡田 哲治	日本冷凍空調工業会 専務理事
酒井 猛		日本冷凍空調工業会 参事	
オブザーバー		皆川 重治、直井 秀介	経済産業省 オゾン層保護等推進室
		古波倉 聖乃	
		阿部 正道、市川 直喜	NEDO環境部
		神戸 正純、須澤 美香	

Table 2-2 Member of working group

WG	内容	主査	メンバー
WG I 次世代冷媒の 基本特性・性能評価	次世代冷媒の ➢ 基本特性に係る データ共有 ➢ 性能評価手法に係る検討 ※国際規格化・標準化等を見据えたものとする。	早稲田大学 齋藤教授	東 之弘（九州大学） 宮良 明男（佐賀大学） 山口 誠一（早稲田大学） 大野 慶祐（早稲田大学） ※日冷工はオブザーバー参加
WG II 次世代冷媒の 安全性・リスク評価	次世代冷媒の ➢ 安全性・リスク評価 （主としてHCIに関わるものからスタート） ※国際規格化・標準化等を見据えたものとする。	東京大学 飛原教授	滝澤 賢二（産業技術総合研究所） 今村 友彦（公立諏訪東京理科大学） 椎名 拓海（産業技術総合研究所） ※日冷工はオブザーバー参加
WG III 次世代冷媒の 規制・規格調査	次世代冷媒の ➢ 規制・規格の調査 ➢ 国際規格化・標準化への提案調査	環境エネルギー ネットワーク21 岸本理事長	片岡 修身（日本冷凍空調学会） 宮田 征門（国土技術政策総合研究所） 東條 健司（日本冷凍空調学会） 飯沼 守昭（高圧ガス保安協会） ※日冷工には必要に応じ参加要請

2.5 調査内容

次世代冷媒を適用した省エネ冷凍空調機器の実用化開発に係る冷媒基本特性・最適化・性能評価及び安全性・リスク評価について、以下の情報収集・取りまとめを実施する。

1) 次世代冷媒に係る規制、規格等の動向調査（調査委員会 WGⅢ関連事項）

- ・国内外における次世代冷媒に係る規制動向、既存の安全規格（国際規格、国際標準、業界規格等）、性能評価の情報収集・整理し、新たな策定・改正等の動向に関する情報収集・整理を行う。
- ・国内外における次世代冷媒の基本的特性の研究及び標準化の動向、機器開発における最適化・性能評価の動向を情報収集・整理し、新たな基本的特性・性能評価の標準化及び機器開発における動向に関する情報収集・整理を行う。

2) 次世代冷媒及びその適用機器の使用時における基本特性・最適化・安全性・リスクに係る課題の抽出及びその対応方法に係る調査（調査委員会 WGⅠ、Ⅱ関連事項）

- ・次世代冷媒の基本特性及びそれらを適用した省エネ冷凍空調機器の早期開発・最適化に関する課題、進捗にともなう課題の抽出と、その対応方法の調査を行う。
- ・次世代冷媒を適用した省エネ冷凍空調機器のシステムの最適化・性能評価に関する課題、進捗にともなう課題の抽出と、その対応方法の調査を行う。
- ・上記を踏まえ、次世代冷媒及びその適用機器を最適に安全に使用するための対応法を情報収集・整理する。
- ・次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発に関する課題、進捗にともなう課題の抽出と、その対応方法の調査を行う。

3) 次世代冷媒及びその適用機器に係る安全性・リスク評価手法に関する国際規格化・国際標準化に向けた調査（調査委員会 WGⅢ関連事項）

- ・(1)、(2)の調査結果及びNEDOの研究開発事業「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発」における次世代冷媒及びその適用機器の安全性・リスク評価手法に関する研究開発結果を踏まえ、国際規格・国際標準等へ提案すべき内容を情報収集・整理する。

2.6 調査委員会の活動状況

平成 31 年 2 月 4 日に第 1 回調査委員会を開催した。主な議事内容は以下の通りである。

1. 委員の紹介（事務局）
2. NEDO プロジェクトの背景と最近の政策動向について（オゾン室皆川室長）
3. NEDO 調査事業の概要（香川委員）
4. 調査委員会／WG の設置と位置づけ・役割について（井上委員長）
5. WG の活動状況（上村副委員長）
6. 次世代冷媒関連の国内外発信（案）について（井上委員長）
7. 平成 30 年度成果のとりまとめについて（井上委員長）
8. 今後のスケジュール（上村副委員長）

2.7 調査委員会の 2019 年度開催予定

調査委員会は年 4 回開催とし、2019 年度の開催日程を予め以下とする。

- 第 1 回 4 月 22 日（月）
- 第 2 回 7 月 24 日（水）
- 第 3 回 11 月 11 日（月）
- 第 4 回 2 月 27 日（木）

2.8 本プロGRESSレポートについて

平成 30 年度成果のとりまとめは、WGⅠ 次世代冷媒の基本特性・性能評価、WGⅡ 次世代冷媒の安全性・リスク評価、WGⅢ 次世代冷媒の規制・規格調査の 3 部構成とし、巻頭言として日本冷凍空調学会長から委員会の設置について述べ、調査委員会委員長から学会調査事業の推進体制・活動状況を述べた内容となっている。

第 1 部 次世代冷媒の基本特性・性能評価（WG I）の進捗

目次

1. はじめに	3
2. 九州大学の進捗	4
2.1 総論	4
2.2 HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の熱物性評価	6
2.3 HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の伝熱特性評価	11
2.4 HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価	14
3. 早稲田大学の進捗	16
3.1 総論	16
3.2 事業概要	16
3.3 性能解析技術研究開発	18
3.4 性能評価技術研究開発	21
3.5 シミュレーター開発とその活用	24
3.6 研究進捗と今後の計画	25
3.7 電気通信大学の進捗	26

1. はじめに

公益社団法人日本冷凍空調学会が受託した NEDO 調査事業「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発」では、3 つの WG で調査を進めている。本報告書は、WG I 「次世代冷媒の基本特性・性能評価」の平成 30 年度の成果をまとめたものである。

WG I では、さらに 2 つのグループ体制で調査を行っている。九州大学のグループが次世代冷媒の基本特性の調査を行い、早稲田大学のグループが省エネ冷凍空調機器システムの最適化・性能評価に関する調査を進めた。

本報告書の執筆者は、Table 1-1 に示す通りである。

Table 1-1 Author list

章	執筆者
2. 九州大学の進捗	東 之弘〔代表〕(九州大学), 高田 保之, 迫田 直也, 宮崎 隆彦, Kyaw Thu, 高田 信夫, 宮本 泰行 (富山県立大学), 田中 勝之 (日本大学), 近藤 智恵子 (長崎大学), 狩野 祐也 (産業技術総合研究所), 粥川 洋平, 藤田 佳孝, 赤坂 亮 (九州産業大学), 福田 翔, 宮良 明男 (佐賀大学), 仮屋 圭史, 井上 順広 (東京海洋大学), 地下 大輔, 野口照貴
3. 早稲田大学の進捗	齋藤 潔 (早稲田大学), 山口 誠一, ジャンネッティ ニコロ, 宮岡 洋一, 榎木 光治 (電気通信大学), 井上 洋平, 清 雄一

免責事項

本報告書に掲載されている情報の正確性については万全を期していますが、著者および当学会は利用者が本報告書の情報を用いて行う一切の行為について、何らの責任を負うものではありません。本報告書の利用に起因して利用者に生じた損害につき、著者および当学会としては責任を負いかねますので御了承ください。

2. 九州大学の進捗

2.1 総論

1) 事業目的

本研究開発では、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模冷凍空調機器用冷媒としてのHFC32とHFO1234yfからなる二成分系混合冷媒に、CO₂やHFO1123を第3成分として混合した三成分系混合冷媒や、中規模冷凍空調機器用として比較的沸点の高いHFO1336mzz(E)やHCFO1224yd(Z)などの次世代純冷媒を主たる研究開発対象冷媒として位置付け、これら次世代冷媒に関する熱力学的性質及び輸送的性質の高精度データを取得し、信頼できる熱物性計算ツールを開発して、伝熱特性及び冷凍サイクル基本特性を明らかにし、既設の容積圧縮式ヒートポンプ試験装置を用いて、次世代冷媒のヒートポンプサイクル基本性能評価を行うことを目的としている。特に混合冷媒に関しては、実環境を加味した冷媒特性評価及び混合冷媒比率の最適化を行い、GWPの低いHFO系冷媒を主成分とした次世代冷媒を使用する上で、業界の実用的な安全基準、国際規格化・国際標準化としてのISO817(冷媒物性)、ASHRAE34(冷媒物性)等への登録に結びつける取り組みや国際データベース NIST REFPROPへの登録を行う。

具体的な研究開発・評価は以下の三項目からなり、平成30年度は、純冷媒のHFO1336mzz(E)及びHCFO1224yd(Z)を研究対象の中心として位置づけた。

- a. HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO系冷媒の熱物性評価
- b. HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO系冷媒の伝熱特性評価
- c. HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価

2) 研究スキーム及び体制

次世代新規冷媒の探索及び評価を行うにあたり、タイムリーかつ迅速に成果を上げるためには、様々な要素研究が連携して行われる必要がある。そのために、Fig.2.1-1 に示す研究スキームを構築し、九州大学を含む8つの研究機関から構成される、Fig.2.1-2 にまとめた冷媒特性評価体制で行った。

研究スキームに関しては、対象冷媒のスクリーニングから始まり、将来、次世代冷媒として期待できる冷媒をいくつかの選択条件から選定する。次に、新冷媒のあらゆる評価を行う上で、信頼できる熱物性情報を集約することが最優先と考え、必要となる熱物性値情報の種類と、その情報を測定できる研究機関にお願いした。今回取り扱う新冷媒は、まさに次世代冷媒であって、世の中に熱物性値情報が入手できないものがほとんどであると予想される。そのために、あらゆる熱物性値を、世界のトップレベルで測定できる研究体制を構築したことが本研究事業の成功の可否につながると考えている。幸いにも冷媒の熱物性に関する研究は、Fig.2.1-2 に示すように、日本国内に世界をリードする研究者が集まっている。加えて、測定した熱物性値は生データであるため、このままでは扱いにくい情報である。そこで、熱物性データを数式化し、ユーザーフレンドリーに利用できるソフトウェアの開発も行うことが必要と考えた。ここでは、NIST REFPROPをアウトプットといちづけで、REFPROP 開発チームとも連携する体制をとっている。

これらのデータが集まった上で、次に伝熱性能評価、具体的には熱交換器の特性評価を行うことになる。熱交換器の種類は様々であり、評価には経験と実績が必要不可欠である。本研究では4種類の熱交換器を対象にした伝熱特性評価を行うことにした。なお、平成30年度の初年度においては、熱物性値情報の確定に時間が要したことと、伝熱性能評価試験に使用するだけの次世代冷媒の絶対サンプル量が整わなかったために、伝熱性能評価の時期が少し遅れた結果となった。しかしながら、本年度装置の改良や、混合冷媒の評価の基準となる各成分冷媒に関する評価データは蓄積できたので、次年度以降順調に進展できると確信している。

そして最後に、ヒートポンプシステムを使った実機性能評価を行い、機器性能を実際に確かめた。実機性能評価試験は、最低限の熱物性値データが揃った時点で、前倒しでデータ取得は開始している。今後実験は継続し、熱物性・伝熱特性の評価結果が出揃ったのち、詳細な検討を行う

予定である。

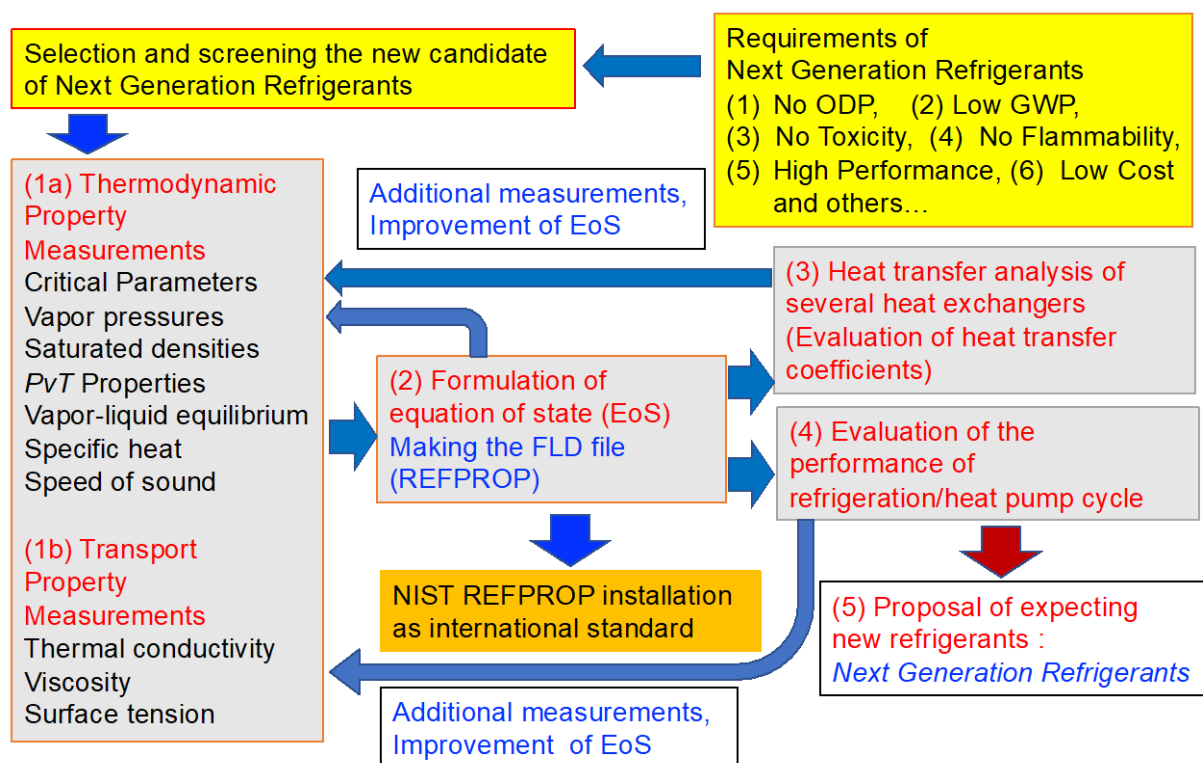


Fig.2.1-1 Scheme for new refrigerant search and evaluation.

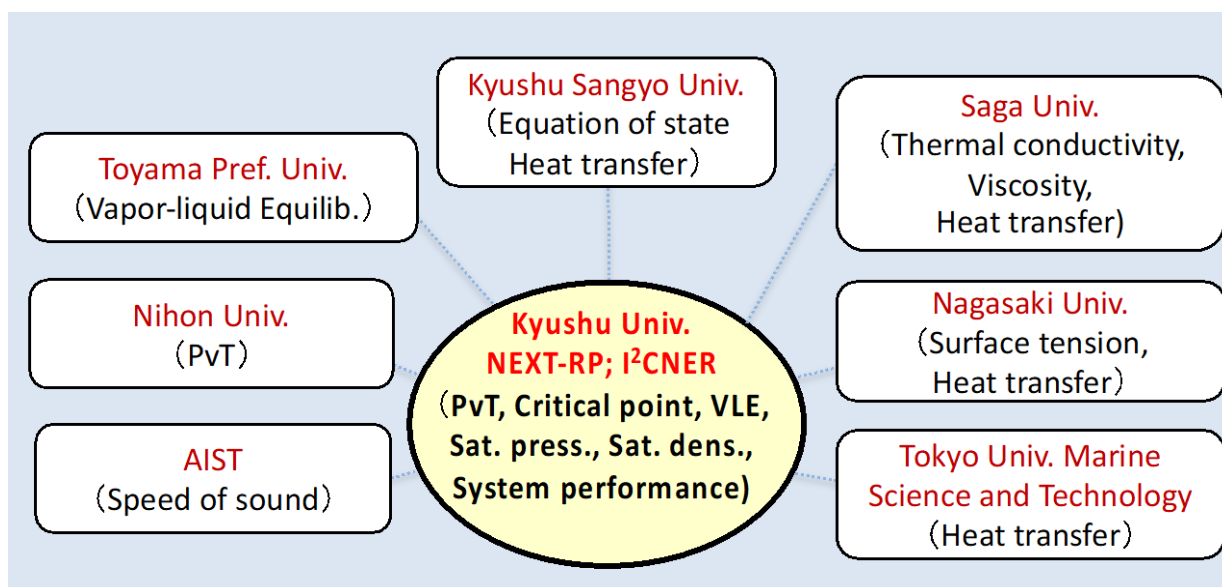


Fig.2.1-2 Research network for the evaluation of next generation refrigerants.

2.2 HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の熱物性評価

1) 臨界点近傍を含む熱力学性質の測定

九州大学伊都キャンパス NEXT-RP では、等容法を利用した PVT 性質測定装置と、メニスカスの消滅を肉眼で観察することにより臨界点近傍の飽和密度（気液共存曲線）を測定する装置の 2 つの実験装置を用いて、平成 30 年度は HFO1336mzz(E) の熱力学性質及び HCFO1224yd(Z) の飽和蒸気圧測定を行なった。対象とした次世代冷媒 HFO1336mzz(E) は、米国ケマーズ社が商品化し、国内の新冷媒評価委員会で承認された次世代冷媒であるが、現時点において、その熱力学性質が十分には解明されておらず、NIST REFPROP の最新版 Version 10 でも、まだ熱物性計算はできない。また、国内の AGC 株式会社が高温用の冷媒・作動媒体として開発した R1224yd(Z) は、こちらも新冷媒評価委員会ですでに承認済みの国産冷媒であるが、熱物性値情報には依然と信頼性の低いものも多く、より高精度の熱物性情報が求められていた実情があった。ここでは、HFO1336mzz(E) に関する熱物性値情報について紹介するが、実験生データに関しては、現在論文としてまとめているところであり、数値情報としての公表は差し控える。

本研究では、HFO1336mzz(E) に関して、等容法による測定装置で PVT 性質を温度 333 K～410 K、圧力 750 kPa～5681 kPa で 7 本の等容線、 PVT 性質データ 39 点、飽和蒸気圧を温度 287 K～臨界温度まで 26 点測定した。また、メニスカスの観察から測定した飽和密度 14 点、等容線の折れ曲がり点から決定した飽和密度 7 点を密度範囲 $52 \text{ kg/m}^3 \sim 1216 \text{ kg/m}^3$ で測定した。測定結果を用いて、HFO1336mzz(E) の飽和蒸気圧式を作成し、臨界温度 $403.53 \pm 0.01 \text{ K}$ 、臨界圧力 $2779 \pm 2 \text{ kPa}$ 、臨界密度 $513 \pm 3 \text{ kg/m}^3$ を決定した。Fig.2.2-1 には、HFO1336mzz(E) の PVT 性質の測定結果を P - T 線図上に示し、Fig.2.2-2 には HFO1336mzz(E) の飽和密度データを T - ρ 線図上に示した。非常に妥当な熱力学状態局面を表現していることがわかる。

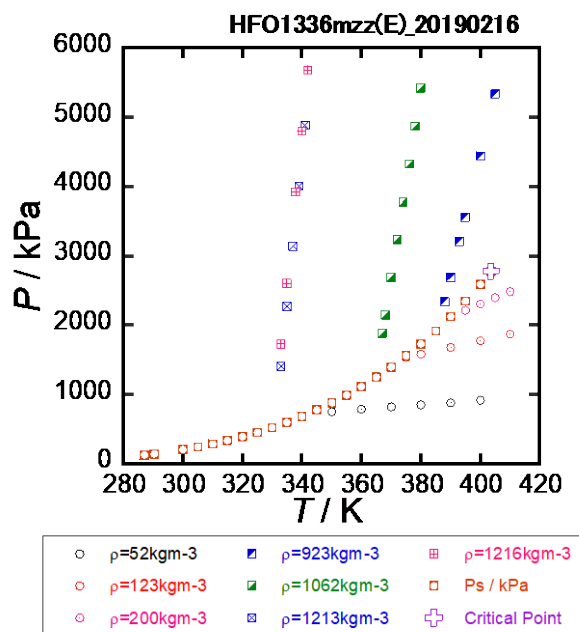


Fig.2.2-1 PVT experimental data of HFO1336mzz(E) .

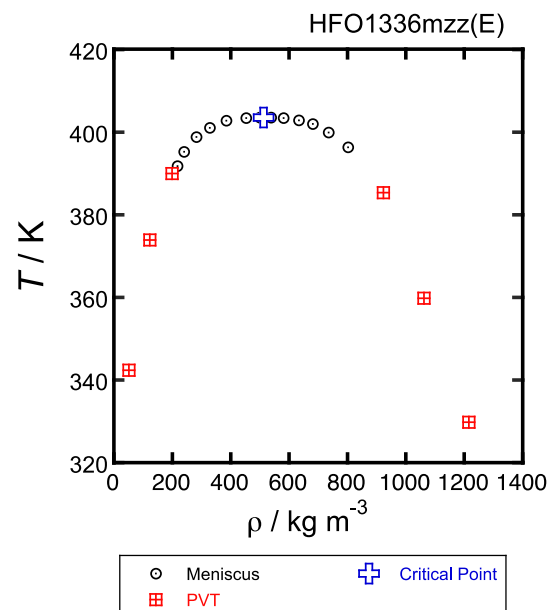


Fig.2.2-2 Saturated density data of HFO1336mzz(E).

2) 気液平衡性質の測定

富山県立大学では、再循環型の気液平衡性質測定装置を用いて、HFO 二成分系混合冷媒の気液平衡性質（沸点及び露点圧力の温度・組成傾向）の高精度測定を実施した。平成 30 年度には、気液平衡性質測定装置の圧力及び温度計測系の大幅な改良を実施し、測定精度を大幅に向上させることができた。結果として、本測定における拡張不確かさ ($k=2$) は、温度 0.042 K、圧力 1.38 kPa、及び組成 0.43% となった。特に、圧力の拡張不確かさは従来より 20 分の 1 程度に向上させ

ることができた．試験として実施した R32 の飽和蒸気圧力の測定値は，REFPROP 9.1²⁻¹⁾ の計算結果（Tillner-Roth and Yokozeki 式）と標準偏差±0.1%で一致した．

引き続き実施した HFO1123/HFO1234yf 混合系の測定に際しては，組成の異なる計 4 点の組成・面積分率の校正データを自前で計測し，九州大学による計測値も併せて入力値とした上で，Eq. 2.2-1 に示す検量線式を作成した．なお $M_{\text{HFO1234yf}}$ 及び $A_{\text{HFO1234yf}}$ は，それぞれ HFO1234yf の質量分率及び面積分率を示す．Fig.2.2-3 に，Eq. 2.2-1 と富山県立大学及び九州大学の検量線計測値との比較を示す．両大学の計測結果が極めて良好な一致性を示していることと，Eq. 2.2-1 が全組成域で高精度に成立することが伺える．

$$M_{\text{HFO1234yf}} = A_{\text{HFO1234yf}} + 0.1076(1 - A_{\text{HFO1234yf}}) \quad (2.2-1)$$

続いて，HFO1123/HFO1234yf 混合系を対象として，温度 300 K～330 K，圧力 1.9 MPa～3.5 MPa，及びモル分率 0.2 の温度・圧力・及び組成域における，信頼性の高い沸点及び露点圧力の測定値を得た．本実測値の P - x 線図上における分布を Fig.2.2-4 に示す．Fig.2.2-4 から，得られた実測値は，REFPROP 9.1²⁻¹⁾（Kuntz-Wagner 混合則）からの計算結果と比較的良好に一致することが確認できた．

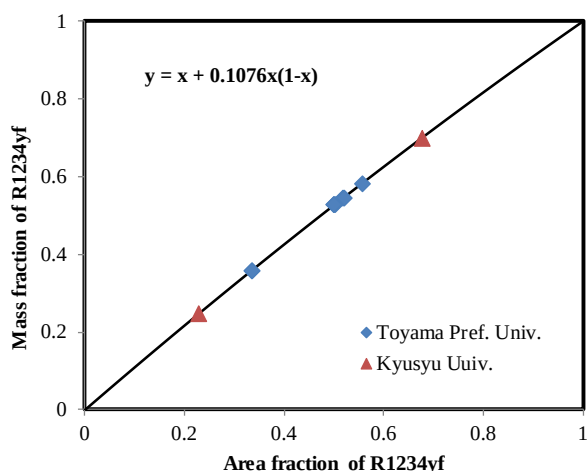


Fig.2.2-3 Calibration plots and line from Eq. 2.2-1 for the HFO1123/HFO1234yf binary mixtures.

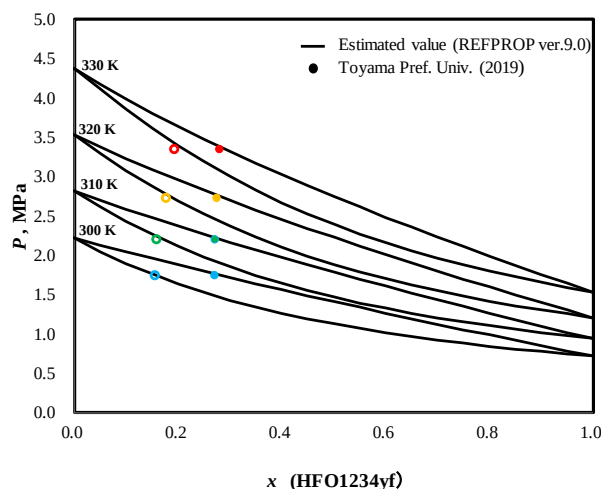


Fig.2.2-4 Plots of the present vapor-liquid equilibrium properties for the HFO1123/HFO1234yf binary mixtures.

3) 高温 PVT_x 性質の測定

日本大学理工学部では，等容法を利用した PVT 性質測定装置に膨張容器を増設し，試料の組成比を保ったまま密度のみを変化できる機構に改良し，混合冷媒の PVT_x 性質測定を可能にした．また，高温下における膨張の際に弁からの試料漏れを防ぐため，ベローズバルブを採用した．平成 30 年度は，この装置の改良後に HFO1234yf/HFC32 系混合冷媒の PVT_x 性質測定と，HCFO1224yd(Z)の PVT 性質測定をおこなった．HFO1234yf/HFC32 系混合冷媒の PVT_x 性質測定に関して，Fig.2.2-5 に示すように温度 323 K～453 K，圧力 10 MPa までの範囲で 3 組成において 12 本の等温線に沿って 106 点（内 31 点の 2 相域データを含む）の測定結果を得た．また，HCFO1224yd(Z)に関して，Fig.2.2-6 に示すように温度 323 K～453 K，圧力 10 MPa までの範囲で 10 本の等温線に沿って 101 点の測定結果を得た．

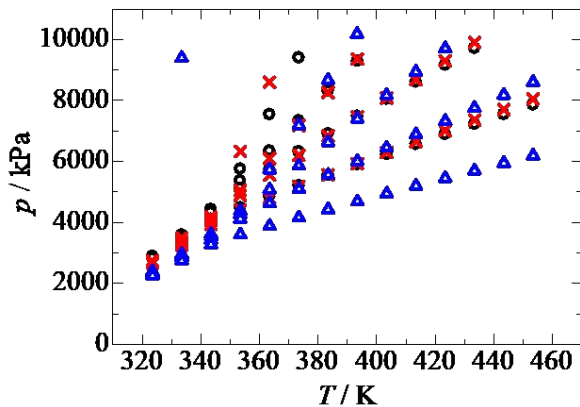


Fig.2.2-5 PVTx data for HFO1234yf/HFC32 system.

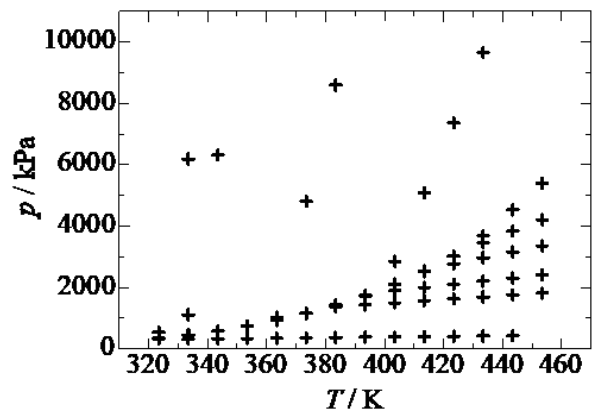


Fig.2.2-6 PVT data for HFO1224yd(Z).

4) 表面張力の測定

長崎大学工学部では、示差毛管上昇法を用いた表面張力測定を行った。平成30年度はHFO1336mzz(E)の表面張力を265 K～375 Kの範囲で測定した。表面張力の算出にあたり必要となる飽和密度の値は、九州産業大学が提案する状態方程式を用いて計算した。Fig.2.2-7に測定結果を示す。測定はサンプルを充填しなおして4回実施した。シンボルに付されているエラーバーは測定誤差を表し、その値は概ね $\pm 0.15 \text{ mN m}^{-1}$ である。比較対象データとして、HFO1234ze(E)とHFC245faの測定結果もFig.2.2-7中に示した。測定されたHFO1336mzz(E)の表面張力は273.15 Kで 12.8 mN m^{-1} であり、HFO1234ze(E)と比較的近い値である事がわかった。また、測定結果と九州大学で測定された臨界温度の値より van der Waals 型の相関式を提案することができた。

引き続き、R455A (HFO1234yf/HFC32/CO₂:75.5/21.5/3.0 mass%) の表面張力を、温度265 K～330 Kの範囲で測定した。Fig.2.2-8にその測定結果を示す。測定されたR455Aの表面張力は、273.15 Kで 9.2 mN m^{-1} であった。REFPROP 9.1²⁻¹⁾の計算結果とは 0.3 mN m^{-1} 以上の差異があるが、REFPROP 10²⁻²⁾の計算値とは概ね測定誤差範囲内で一致することを確認した。REFPROPがVersion 9.1 から 10 への移行に際し、REFPROP 内部の表面張力計算用混合モデルが改善されており、その違いがこの混合物質の値へ顕著に現れている。R455A の場合は、REFPROP 10 の計算結果で実用上問題ないと判断される。

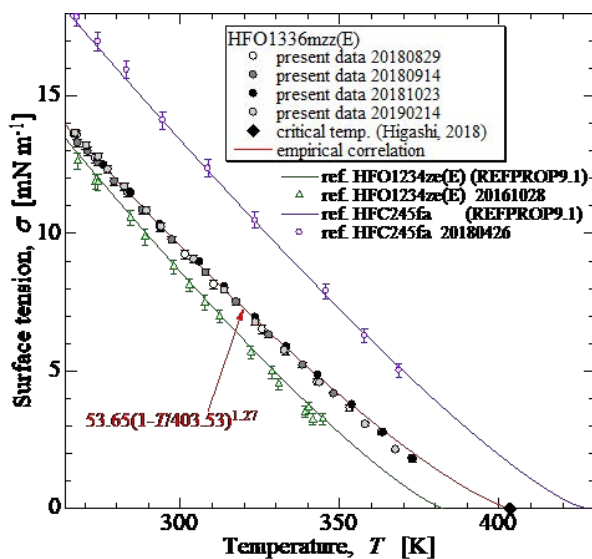


Fig.2.2-7 Surface tension data of HFO1336mzz(E).

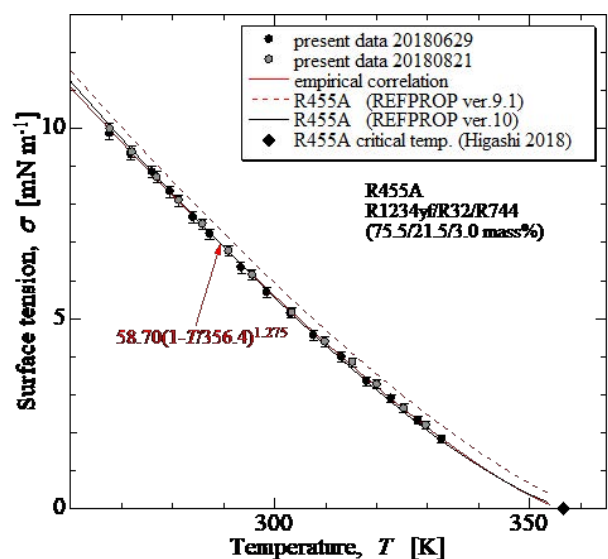


Fig.2.2-8 Surface tension data of R455A.

5) 音速の測定

産業技術総合研究所では、本年度はまず円筒型共鳴法による音速測定装置の温度制御システムの改良を実施した。具体的には、ジャケット型恒温槽及び遠心式攪拌機を特注製作し、高沸点冷媒の測定に対応できるよう 423 K まで測定温度範囲を拡張した。同装置を用い、HFO1336mzz(E)について温度範囲 303~343 K、圧力範囲 40~500 kPa における気相域の音速を測定し、計 18 点の音速データを得た。音速測定結果を Fig.2.2-9 に示す。なお、各状態量測定の拡張不確かさは、音速が 0.1 %、温度が 0.01 K、圧力が 0.1 kPa 程度である。

得られた音速データに基づいて音響ビリアル状態式を作成し、各温度における理想気体状態の定圧比熱値を求めた。得られた理想気体比熱を Fig.2.2-10 に示す。Joback and Reid²⁻³⁾ 及び Rihani and Doraiswamy²⁻⁴⁾ による原子団寄与法に基づく理想気体比熱の推算値と比較したところ、最大で 5 % 程度の相違があることが明らかとなった。

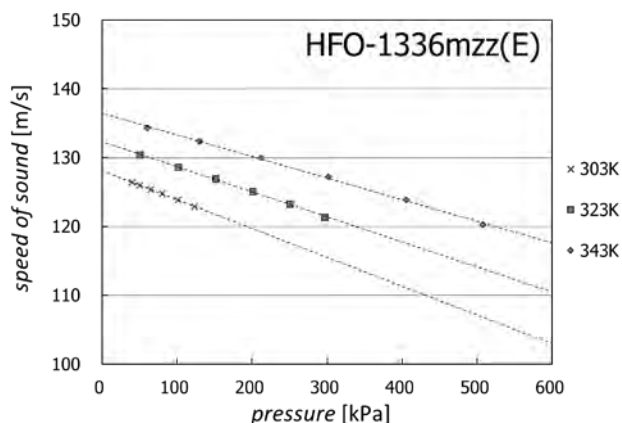


Fig.2.2-9 Speed of sound data for HFO1336mzz(E) in the gas phase.

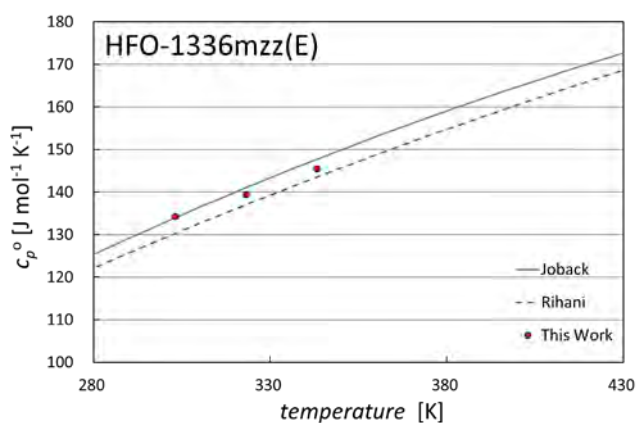


Fig.2.2-10 Isobaric heat capacity in the ideal gas state for HFO1336mzz(E).

6) 状態方程式の開発

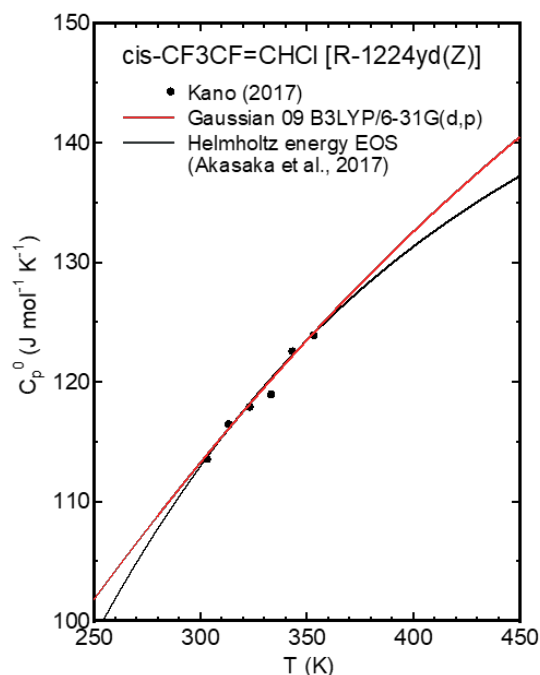


Fig.2.2-11 Ideal-gas isobaric heat capacities calculated from ab initio molecular dynamics for HCFO1224yd(Z).

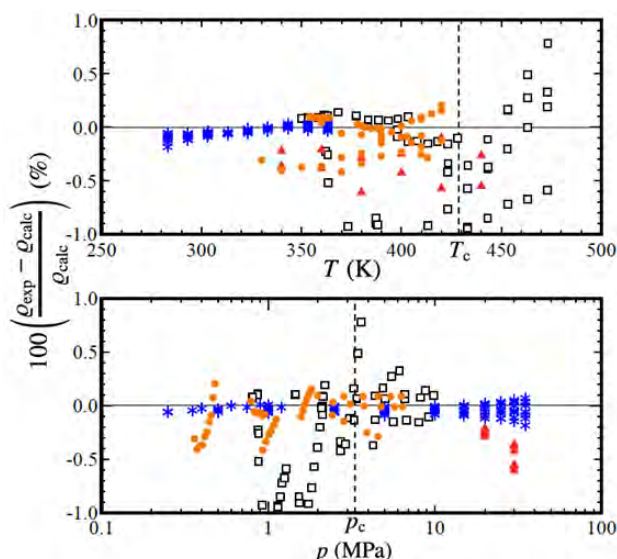


Fig.2.2-12 Deviations in experimental densities of HCFO1224yd(Z) from values calculated with the published equation of state: $\square$ Fukushima et al. (2016), $\blacktriangle$ Raabe (2017), $\bullet$ Sakoda and Higashi (2018), $*$ Fedele et al. (2018).

九州産業大学では、平成30年度、HCFO1224yd(Z)について、第一原理計算による分子構造最適化及び基本振動解析を行い、理想気体比熱を決定した。その結果を用いて、ヘルムホルツ型状態方程式の理想気体部分を構成した。Fig.2.2-11は第一原理計算による理想気体比熱と気体音速から外挿により求めた実測値との比較である。計算値は実測値と良好に一致している。

また、イタリアの研究者による液体密度の測定結果を既存状態方程式と比較し、補外域での不確かさ評価を行った。Fig.2.2-12は状態方程式からの計算値における相対偏差を温度及び圧力に対して示したものである。300 K以下及び20 MPa以上で偏差が実測値の不確かを上回っており、状態方程式の修正が必要であることが明らかになった。

7) 輸送的性質の測定及びモデル化

佐賀大学では、タンデム型細管法を利用した装置で粘度測定を、非定常細線を利用した装置で熱伝導率測定を行っている。平成30年度は、HFO1234fyなどの測定対象としている混合冷媒の単成分物質の測定と装置の改良、測定結果の健全性確認などを行った。また、HFO系及びHCFO系冷媒の輸送性質測定の現状と動向に関する文献調査を行った。Table 2.2-1は最近公表されたBobboら²⁻⁵⁾の低GWP冷媒の熱物性研究に関する調査結果の報告から抜粋したものであり、粘度及び熱伝導率に関する文献の数と測定範囲を示す。調査は論文が採択された2018年3月頃までのものであるが、低GWP冷媒に関する熱物性測定は日進月歩であり、その後も論文発表や学会発表がいくつかなされている。Table 2.2-2はBobboらの調査後、主な論文集や国際会議などで発表された粘度及び熱伝導率の測定に関する文献をまとめたものである。高沸点冷媒の開発が進み、著者らの測定や米国、中国などの研究者の発表が行われている。Table 2.2-1に示す冷媒より低沸点側の冷媒開発が求められているが、まだ候補冷媒が無く、輸送性質も測定されていない。なお表には示していないが、HFOとHFCとの混合冷媒の粘度や熱伝導率の測定結果もいくつか報告されている。

Table 2.2-1 Review by Bobbo *et al.*²⁻⁵⁾

ASHRAE designation	(a) Viscosity			(b) Thermal conductivity		
	Number of references	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Number of references	Temperature (K)	Pressure (MPa)
R1234yf	7(2)	243-365	0.11-30.0	1	242-344	0.2-23
R1234ze(E)	4(1)	243-373	0.07-30.0	2	203-407	0.05-23
R1234ze(Z)	2(2) [2(2)]	283-440	0.18-3.00	1(1) [1(1)]	283-353	-
R1233zd(E)	1(0)	270-380	0.10-1.35	-	-	-

Number of references: Total(conference), []:Authors' reports

Table 2.2-2 Recent measurements which are not included in Bobbo *et al.* (by December 2018).

ASHRAE designation	(a) Viscosity			(b) Thermal conductivity		
	Number of references	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Number of references	Temperature (K)	Pressure (MPa)
R1234ze(Z)	1(1) [1(1)]	313-455	0.5-4.0	1(1) [1(1)]	313-452	0.2-4.2
R1233zd(E)	2(1) [2(1)]	314-474	1.0-4.1	1(0) [1(0)]	313-474	0.15-4.1
R1336mzz(Z)	3(2) [2(1)]	314-475	0.5-4.1	3(2) [3(2)]	314-496	0.1-4.0
R1224yd(Z)	1(1) [1(1)]	303-475	1.0-4.0	1(1) [1(1)]	317-453	0.2-4.0
HFE356mmz	1(1) [1(1)]	313-475	0.5-4.0	1(1) [1(1)]	319-462	0.18-4.0
RE347mcc	1(1)	-	-	-	-	-

Number of references: Total(conference), []:Authors' reports

2.3 HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の伝熱特性評価

1) プレート式熱交換器内の伝熱特性評価

プレート式熱交換器は単位体積あたりの伝熱面積が他の熱交換器に比べて大きく、高い伝熱性能が得られるため、冷凍空調機器においても凝縮器や蒸発器としての使用が広がっている。また流路の内容積が小さいので、冷媒充填量の削減にも効果がある。しかしプレート式熱交換器は流路構造が複雑であるため、内部の流動や熱伝達特性に関して不明な点が多い。佐賀大学では、あまり明らかにされていない内部流動及び局所熱伝達特性を明らかにする目的で実験を行った。

Fig.2.3-1 は、透明なアクリルでプレート式熱交換器の流路を再現した流動観察用のテストセクションである。この透明流路内を断熱気液二相流で流れる FC72 の流動観察を行った。Fig.2.3-2 に上昇流の流動観察写真及び画像解析により得られたボイド率分布の一例を示す。観察結果より、冷媒の流入流出口のあるプレート左側に多くの蒸気が流れ、ボイド率も高くなっていることがわかる。

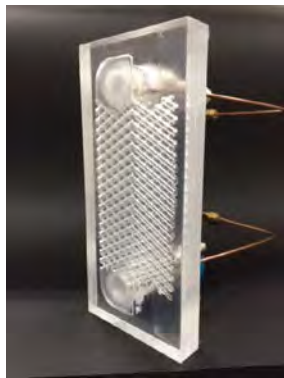


Fig.2.3-1 Transparent channel.



(a) Flow observation.

0.37	0.71	0.49	0.35	0.25
0.39	0.69	0.52	0.31	0.19
0.38	0.69	0.58	0.3	0.2
0.2	0.67	0.52	0.32	0.22
0.35	0.63	0.52	0.31	0.31
0.36	0.56	0.43	0.3	0.21
0.33	0.5	0.35	0.22	0.14
0.33	0.43	0.38	0.16	0.13

(b) Estimated void fraction.

Fig.2.3-2 Two phase flow behavior

$G = 10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ and $x = 0.1$.

Fig.2.3-3 に局所熱伝達率測定用のテストセクションを示す。赤色のプロットで示した位置で表裏 2 点の温度を測定し、熱流束、表面温度及び熱伝達率を算出した。Fig.2.3-4 は局所凝縮熱伝達率の測定例である。局所熱伝達率はプレートの両側面側で低くなっており、伝熱面中央付近に最大値が表れている。対面しているプレートのそれぞれで熱伝達率に若干の違いが見られる。また、全体的に Nusselt の理論値より高い値を示すことがわかる。

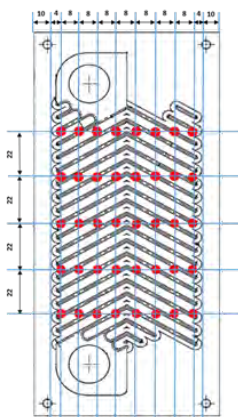
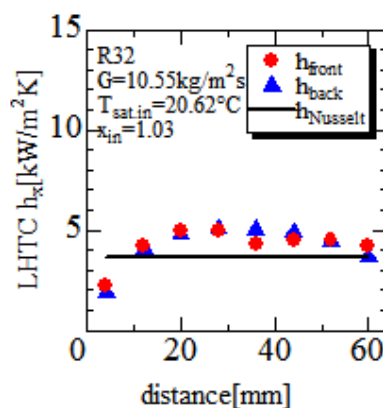
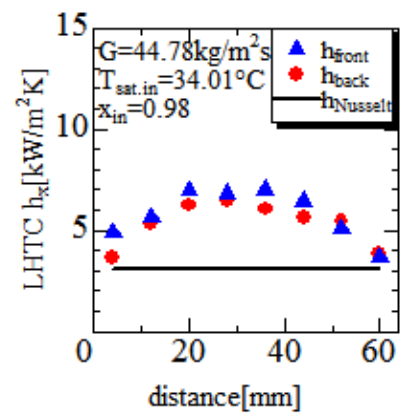


Fig.2.3-3 Test section for local heat transfer.



(a) $G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $x=0.92$.



(b) $G=50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $x=0.92$.

Fig.2.3-4 Horizontal variation of condensation heat transfer coefficient.

2) 扁平多孔管内の伝熱特性評価

東京海洋大学では、ポンプを使用した強制循環ループを用いて、扁平多孔管内での凝縮・沸騰熱伝達及び圧力損失の評価を行った。扁平多孔管は、熱交換器の小型・高性能化及び冷媒充填量削減が期待できるため、空調機器の凝縮及び蒸発器用の伝熱管として期待されている。扁平多孔管は水力直径 1 mm 以下の非円形微細流路を複数有しており、重力の影響に比べて表面張力の影響が相対的に大きくなることから、これまでの空調機器等に用いられている従来径の伝熱管とは異なる伝熱及び流動特性を示すことが知られている。しかしながら、扁平多孔管内での新規代替冷媒及びそれらの混合物の伝熱及び圧力損失特性に関する十分な知見は得られているとは言い難い。

平成 30 年度は、比較対象とするために、HFO1234yf の扁平多孔管内の凝縮・沸騰熱伝達率及び圧力損失の評価を行った。試験伝熱管は、水力直径 0.8 mm の複数の微細矩形流路を有する扁平多孔管であり、その断面写真及び仕様を Fig.2.3-5 及び Table 2.3-1 に示す。凝縮伝熱実験の場合は扁平多孔管を上下から冷却ジャケットにより冷却し、熱流束センサを用いて熱流束を測定した。また、沸騰伝熱実験の場合は扁平多孔管の上下から面状ヒータを用いて所定の熱流束条件で加熱し、投入電力から熱流束を求めた。凝縮伝熱実験は飽和温度 40 °C、質量速度 50～400 kgm⁻²s⁻¹、熱流束 5～10 kWm⁻² の範囲で、沸騰伝熱実験は飽和温度 15 °C、質量速度 50～400 kgm⁻²s⁻¹、熱流束 5～20 kWm⁻² の範囲で実施した。また、HFC32 についても、質量速度及び熱流束をパラメータとし、凝縮・沸騰熱伝達率及び圧力損失を測定した。

平成 30 年度の成果の一例として、Fig.2.3-6 に質量速度 400 kgm⁻²s⁻¹ での HFO1234yf 及び HFC32 の沸騰熱伝達率の測定値を示す。HFO1234yf 及び HFC32 とともにクオリティの増大にともない熱伝達率は増大し、強制対流の影響がみられ、クオリティ 0.9 近傍でドライアウトによる熱伝達率の低下がみられた。また、HFO1234yf の熱伝達率は HFC32 に比して平均で 60%程度低い値を示した。



Fig.2.3-5 Cross-section of the test tube.

Table 2.3-1 Details of test multiport tube.

Number of channels	12
Tube width	16 mm
Tube thickness	1.5 mm
Hydraulic diameter	0.82 mm

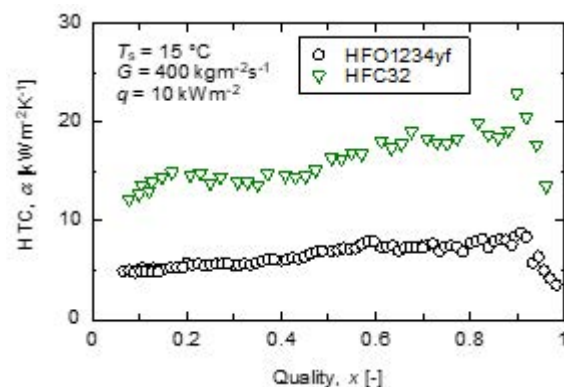


Fig.2.3-6 Boiling heat transfer coefficients of HFO1234yf and HFC32.

3) 円管内の伝熱特性評価

長崎大学工学部では蒸気圧縮式冷凍機を用い、外径 6 mm のら旋溝付管内を流れる低 GWP 冷媒の熱伝達特性と圧力損失特性を評価している。平成 30 年度は HCFO1224yd(Z)の評価を行った。試験には、等価内径が 5.21 mm、フィン高さ 0.27 mm、フィン数 60、ねじれ角 18 度、面積拡大率 2.62 の銅製水平伝熱促進管を用いた。飽和温度 10 °C (圧力 0.085MPa に相当)、熱流束 10 kWm⁻² の条件のもと測定を行ったので、Fig.2.3-7 及び Fig.2.3-8 へそれぞれ、熱伝達率及び圧力損失の測定結果を示す。HCFO1224yd(Z)の蒸気密度が著しく低いため、試験装置の制約上、質量速度 100 kgm⁻²s⁻¹ で測定を行い、200 kgm⁻²s⁻¹ で測定された HFC32 及び HFO1123/HFC32 (40/60mass%) のデータと比較を行った。HCFO1224yd(Z)の蒸発熱伝達率は、HFC32 や HFO1123/HFC32 (40/60mass%) に比して幾分低い値を示す。これは、HCFO1224yd(Z)の液熱伝導率や蒸発潜熱が小さいためであると推察されるが、それらの正確な値が報告されていないため、

まだ断定が出来ない．一方，HCFO1224yd(Z)は質量流速が低いにも関わらず，他の冷媒よりも高い圧力損失の値を示す．これは蒸気密度が低く，体積流量が極めて高いためであると推察される．

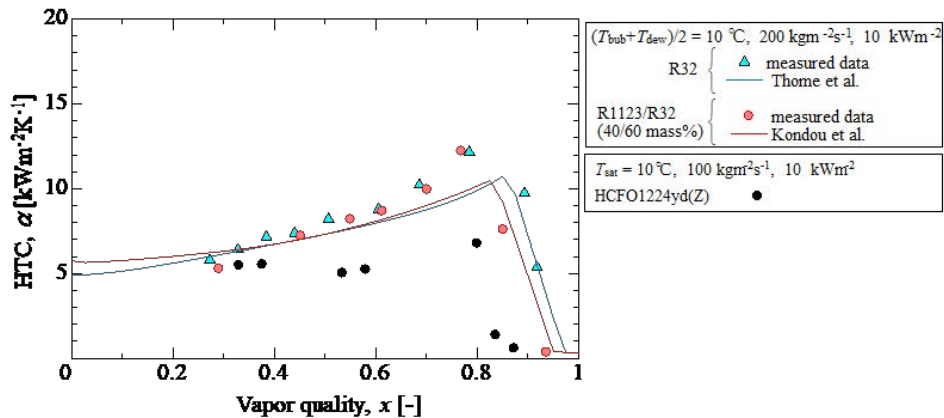


Fig.2.3-7 Heat transfer coefficients of HCFO1224yd(Z) flow during evaporation process.

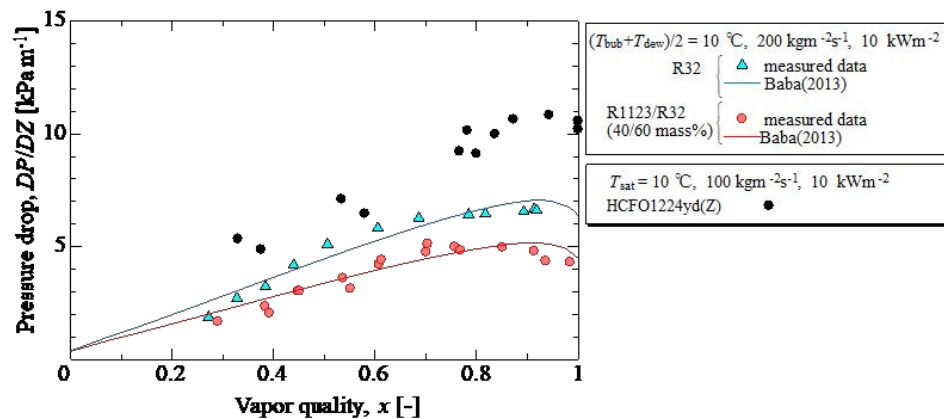


Fig.2.3-8 Pressure drop of HCFO1224yd(Z) flow during evaporation process.

4) 水平円管外の伝熱特性評価

九州産業大学では，九州大学より管外熱伝達装置を移設し，新規冷媒候補の伝熱測定を行うにあたり，装置の健全性を確認するために，既存冷媒である R134a を用いて飽和温度 20°C，30°C 及び 40°C における熱伝達率の測定を行った．健全性の確認は，試験結果と平滑管外凝縮熱伝達の理論式から算出した値と比較することで行った．Fig.2.3-9 に試験結果，理論式の結果及び理論式の結果 $\pm 10\%$ を示した結果であり，試験結果は理論式の結果と $\pm 7\%$ 以内で一致したことから，装置の健全性が確認された．

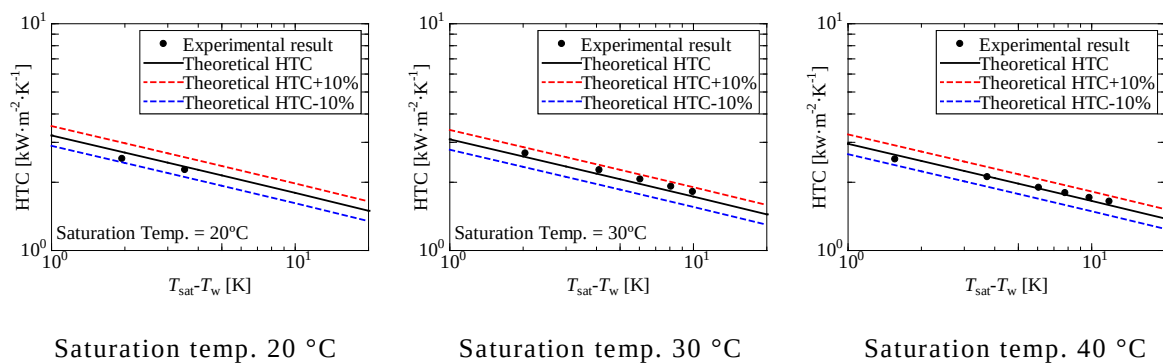


Fig.2.3-9 Compare experimental results with theoretical HTC.

2.4 HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価

1) ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析

九州産業大学では、混合冷媒の評価を行うために、HFO1234yf/HFC32/CO₂ 系混合冷媒において、凝縮温度及び蒸発温度を変化させて、熱力学的解析を行った。凝縮温度及び蒸発温度を変化させることで、混合比率に対してサイクル性能が変化することを確認した。Fig.2.4-1 に蒸発温度 -3°C、過熱度 3K、過冷度 0K において、凝縮温度を 20°C、30°C、40°C と変化させた計算結果 (COP(R410A 比))を示す。凝縮温度が上昇するとともに、COP 比が 1 を超えるエリアが増加していることがわかる。つまり、使用条件に合わせた冷媒比率の選定が必要である。

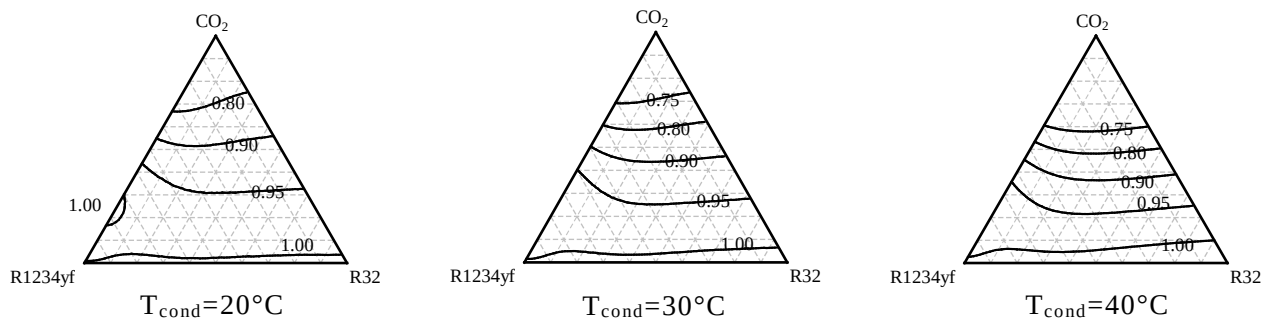


Fig.2.4-1 Thermodynamic analysis result of HFO1234yf/HFC32/CO₂.

2) ヒートポンプサイクル特性の実験的評価

九州大学筑紫キャンパスでは、GWP150 以下をターゲットとした二成分及び三成分混合冷媒について、ヒートポンプサイクルの性能を実験的に評価した。実験に用いた冷媒は、二成分混合冷媒 HFO1234yf/HFC32（重量比 78%/22%），及び三成分混合冷媒 HFO1234yf/HFC32/CO₂（重量比 72%/22%/6%）である。暖房、冷房の各種温度条件のもとで実験を実施し、R410A、R32 及び重量比の異なる二成分混合冷媒と性能の比較を行った。

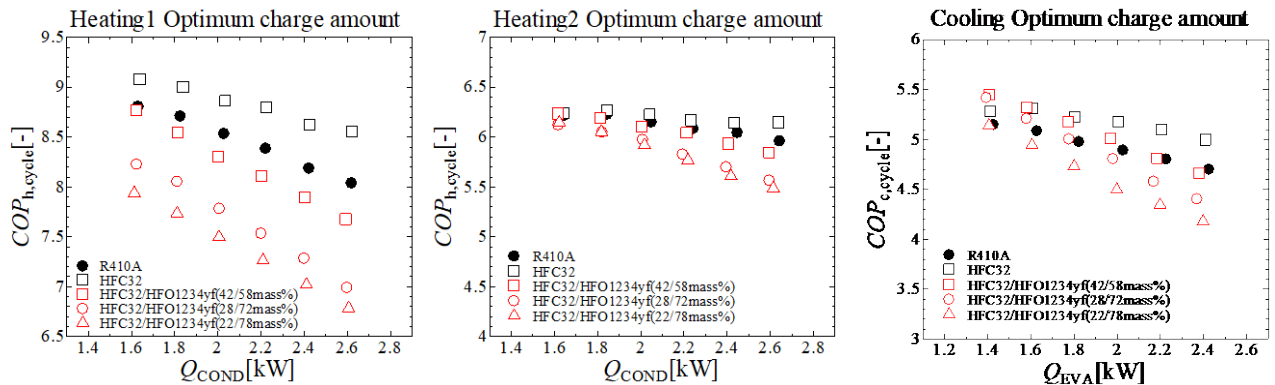


Fig.2.4-2 Compare COP of zeotropic mixture refrigerants of HFC32/HFO1234yf with that of existing refrigerant.

(Heating 1: Heating load water 15°C → 9°C, Cooling load water 20°C → 30°C,

Heating 2: Heating load water 15°C → 9°C, Cooling load water 20°C → 40°C,

Cooling: Heating load water 20°C → 10°C, Cooling load water 30°C → 45°C).

実験条件によっては、二成分混合冷媒 HFO1234yf/HFC32 の COP は R410A と同等以上であり、R32 の COP と同程度の COP が得られる条件もあることがわかった。しかし、HFO1234yf の比率を高くするほど COP が低下する。一方、三成分混合冷媒については、三角図を使って理論的なサイクル性能の評価を行った。そして、GWP150 以下を達成し、かつ、R410A と同等以上の COP を得られる組成について実験した結果、三成分混合冷媒 (HFO1234yf/HFC32/CO₂ = 72/22/6) の COP

は、二成分混合冷媒（HFO1234yf/HFC32 = 78/22）の COP と同等または下回ることが明らかとなった。

参考文献

- 2-1) Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties - REFPROP Ver. 9.1, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA.2013
- 2-2) Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.
- 2-3) Joback K. G., and Reid R. C., "Estimation of pure-component properties from group-contributions," Chem. Eng. Commun. 57, 233, (1987).
- 2-4) Rihani D. N., and Doraiswamy L. K., "Estimation of heat capacity of organic compounds from group contributions," Ind. Eng. Chem. Fundam. 4, 17, (1965).
- 2-5) Bobbo, et al. "Low GWP halocarbon refrigerants: A review of thermophysical properties, Int. J. Refrig., 90, 181 (2018).

3. 早稲田大学の進捗

3.1 総論

次世代冷媒を導入する場合には、安全性や GWP だけでなく、機器の実運転性能が評価すべき最重要因子の一つである。それは、機器の実運転性能によってエネルギー起源の CO₂ 排出による地球温暖化影響が決定されるからである。しかし、現状では、機器性能については、十分な評価が行われないまま、冷媒の選定が進められているのが実情である。

この理由としては、運転される温度帯や機能、運転方法が大きく異なる多様な機種を短期間で開発することが求められることから、新たな冷媒向けのプロトタイプ機器を開発し、性能を逐次評価するような手間がかかる手法を採用することはほぼ不可能なためである。現状では、従来の HFC 系冷媒向けに開発された機器に新たな冷媒をドロップインして機器性能を評価したり、現実とは大きく異なる理想サイクルとしての性能で実機性能を推定したりするような手法がとられている。

このようなやり方では、都合よく機器性能を評価できてしまうため、冷媒メーカー、機器メーカー等の思惑が入り乱れ、冷媒の選定がミスリードされる可能性を十分に有する。

このため、工業界や学术界で公平・公正に共有できる実用機レベルまでの性能評価手法や性能評価ツールの開発、これに基づいた冷媒評価の実施が強く望まれている。

そこで、本研究開発では、低 GWP 冷媒を導入した中小型規模の冷凍空調機器の性能を実用機レベルにおいてまで評価できる手法を確立し、工業界や学术界でも広く標準ツールとして活用が可能な共通解析プラットフォームとしてのシミュレーションツールとして展開することを目指している。

3.2 事業概要

上記目的を達成するために、「性能解析技術研究開発」、「性能評価技術研究開発」、「シミュレーター開発とその活用」の3項目の研究開発を実施する。

まず各種低 GWP 冷媒を採用した機器の実用機レベルの性能を高精度に解析できる性能解析技術を確立する。ここでは、熱交換器、圧縮機、膨張弁の高精度な数理モデルを構築する。また、現象究明がいまだ十分に進んでいない混合冷媒の性能や冷媒充填量を評価できる混合冷媒性能評価装置、冷媒充填量評価装置を製作する。

次に、統一された公平・公正な条件で機器性能を比較分析できる性能評価技術を研究開発する。ここでは、数理的に評価可能な評価手法を構築する。同時に数理的だけでなく実運転性能をも評価することが求められることからハイブリッド型性能評価装置を製作する。

さらには、デバイスとして多様な冷媒の熱交換性能を解析できる熱交換器シミュレーターを製作する。また、システムの性能を評価できるシステムシミュレーターの計算エンジンと GUI を製作する。年間性能を評価可能な年間性能・LCCP 評価シミュレーターをも製作するが、これについては、年間性能が計算できる計算エンジンまで製作する。

ここで、「性能解析技術研究開発」の一部と「性能評価技術研究開発」の一部は、国立大学法人電気通信大学に再委託し研究を進める。プロジェクト全体のイメージを Fig.3.2-1 に示す。

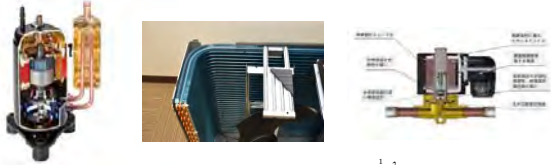
以下に、項目ごとの進捗状況について、次項に記述する。

プロジェクト全体のイメージ

1. 性能解析技術研究開発

1.1 モデリング，性能解析：早大+電通大

- 次世代低GWP冷媒を動作流体とする熱交換器，膨張弁，圧縮機の高精度数値モデルの構築
- モジュラー解析手法を活用したシステムの定常解析



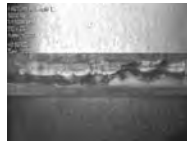
$$\frac{\partial(\rho_h u_h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_h v_h h_h)}{\partial z} = -\frac{LC_{in}}{S_{in}} q_{in}$$

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{LC_f}{S_f} q_c + \frac{L_{A2} L_{F2}}{L_{F,2} S_f} (q_{f,1} - q_{f,0}) - \frac{A_{GC} + \eta_f A_f}{S_f L} (q_{out} + h_v J_{out})$$

$$\alpha_m = \left(Nu_m^2 + Nu_b^2 \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\lambda_m}{D_m}$$

$$Nu_F = 2.12 \sqrt{f_v} \Phi_v \left(\frac{\rho_b}{\rho_v} \right)^{0.5} \left(\frac{x}{1-x} \right) Pr_L^{0.5} Re_L^{0.5}$$

$$Nu_B = \frac{1.98}{Pr_A^{0.5}} H(\xi) \frac{1}{Bo^{0.25}} \left(\frac{Ga Pr_L}{Ph_L} \right)^{0.25}$$



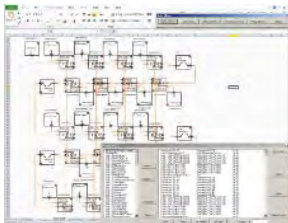
2. 性能評価技術研究開発

2.1 数理的性能評価手法開発：早大+電通大

次世代低GWP冷媒を採用した機器性能を比較検討する際の機器の基本構造，比較条件を明確化

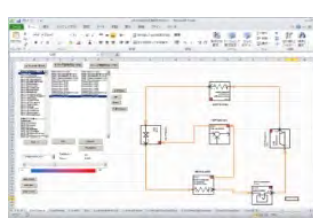


3.1 熱交換器シミュレーター：早大



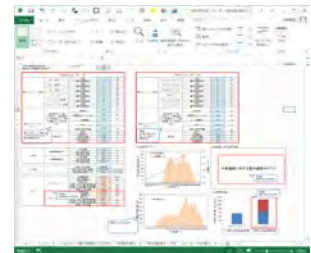
複雑な構造でもグラフィカルな操作のみで容易に解析が可能な熱交換器シミュレーターを製作。

3.2 システムシミュレーター：早大



多様な低GWP冷媒に対応でき，機器の制御まで含めたシステムシミュレーターの計算エンジン，GUIの製作

3.3 年間性能,LCCPシミュレーター 早大



機器の年間性能やLCCPを評価が可能なシミュレーターの計算エンジンを製作。

Fig.3.2-1 Image of the whole project

3.3 性能解析技術研究開発

次世代冷媒の性能の良し悪しを判断するためには、当然であるが、それを導入した機器の省エネ性能となる。省エネ性能は、実験レベルだけで比較検討することは不可能であるため、数理解析技術を導入して数理的な評価が有効となる。そこで、本研究開発では、最終的には、実用機レベルの機器性能の高精度な数理解析の実現を目指しており、その第一段階として機器を構成する各種デバイスの数理モデル、数値解析手法の検討を進めた。

すでに比較的簡易な数理モデルは構築できているため、今年度は、多様な冷媒の解析をも可能とする熱交換器、圧縮機、膨張弁の数理モデルを構築するための検討を行った。具体的な取り組み結果は次のとおりである。

1) 熱交換器

次世代低 GWP 冷媒を用いた熱交換器については、基礎研究レベルでの理想化された状態では、現象の究明や、伝熱性能等の定式化が進められ、多くの成果が得られている。しかし、実用機レベルになると冷媒の分配、分岐を含む複雑な冷媒流路、空気側のフィン形状により機器全体構造が複雑となるため、性能解析誤差が大きくなる。第一段階として、特に流れ場のモデリングが重要となるため、誤差の大きな要因を突き止めることを目指し、文献調査や実験、CFD 解析等を行った。今年度実施した主な項目は次のとおりである。

- 誤差の大きいボイド率計算に採用すべき式の調査を実施

結果については、未発表のため、本レポートでは記述を差し控える。

2) 圧縮機

圧縮機は、システムとしての解析を行うレベルでは、断熱効率や体積効率で簡易に示されることが多い。しかし、詳細なシステム評価を行う際には、圧縮機での放熱や、冷媒の寝込み現象等についての解析が不可欠である。そこで、圧縮機内部での状態まで詳細に解析できるモデルを構築するために、今年度は、文献調査により以下の検討を行った。

- 適用すべき数理モデルを分析
- 各種冷媒で実機性能がどのようなになっているのかを調査

Fig.3.3-1 にスクロール圧縮機の概略図を示す³⁻¹⁾。

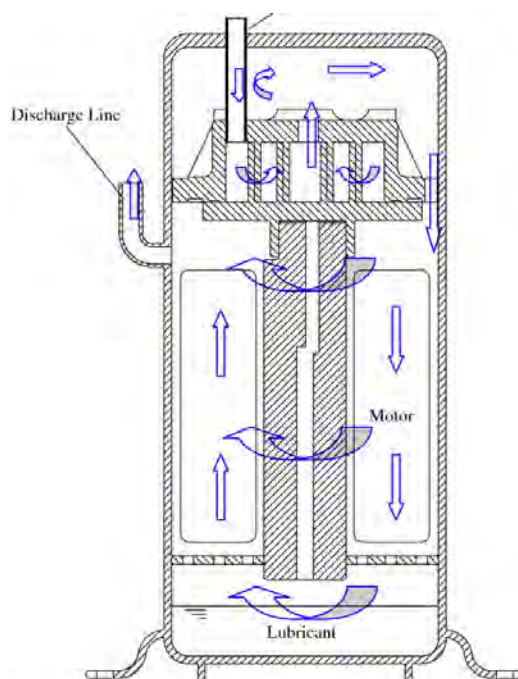


Fig.3.3-1 Schematic of the high-side scroll compressor

文献調査により，圧縮機については，回転方向に対して圧縮室の構造変化を表す関係式と具体的な冷媒の運動やエネルギーに関する方程式，オイルの運動やエネルギーに関する方程式，冷媒の漏れの式として下記の関係式³⁻²⁾を抽出した．

$$V_{suction} = \frac{1}{2} \delta r_b r_o \left[\left(2\theta\varphi_e - \theta^2 - \frac{3}{2}\theta\pi \right) + 2(1 - \cos\theta) - 2(\varphi_e - \pi)\sin\varphi - \frac{\pi}{4}\sin 2\theta \right] \quad (3.1-1)$$

$$\frac{dV_{suction}}{d\theta} = \frac{1}{2} \delta r_b r_o \left[\left(2\varphi_e - \theta - \frac{3}{2}\pi \right) - 2(\varphi_e - \pi)\cos\theta - \frac{\pi}{2}\cos 2\theta + 2\sin\theta \right] \quad (3.1-2)$$

$$V_{chamber} = 2\pi\delta r_b r_o \left(2\varphi_e - 2\theta - \frac{7}{2}\pi \right) \quad (3.1-3)$$

$$\frac{dV_{chamber}}{d\theta} = -4\pi\delta r_b r_o \quad (3.1-4)$$

$$\frac{dM_g}{dt} = m_{g,in} - m_{g,out} \quad (3.1-5)$$

$$\underbrace{\rho_g \frac{D(\bar{v})}{Dt}}_{\text{Momentum variation}} = \underbrace{-\bar{\nabla} p}_{\text{P gradient}} + \underbrace{\rho_g \bar{g}}_{\text{Body forces}} + \underbrace{\mu_g \bar{\nabla} \bar{\tau}}_{\text{Viscous forces}} \quad (3.1-6)$$

$$\underbrace{\frac{dU_g}{dt}}_{\text{Energy variation}} = \underbrace{-\delta W}_{\text{Work done}} + \underbrace{\delta Q}_{\text{Heat transfer}} + \underbrace{\sum \frac{dH_{in}}{dt}}_{\text{Inflow matter energy}} - \underbrace{\sum \frac{dH_{out}}{dt}}_{\text{Outflow matter energy}} + \underbrace{\Phi}_{\text{Energy dissipation}} \quad (3.1-7)$$

$$\frac{dM_o}{dt} = m_{o,in} - m_{o,out} \quad (3.1-8)$$

$$\underbrace{\frac{dU_o}{dt}}_{\text{Energy variation}} = \underbrace{\delta Q}_{\text{Heat transfer}} + \underbrace{\sum \frac{dH_{in}}{dt}}_{\text{Inflow matter energy}} - \underbrace{\sum \frac{dH_{out}}{dt}}_{\text{Outflow matter energy}} + \underbrace{\Phi_o}_{\text{Energy dissipation}} \quad (3.1-9)$$

$$\dot{M} = cA \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa-1} p_{in} \rho_{in} \left\{ \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} \quad \frac{p_{out}}{p_{in}} \geq \left(\frac{\kappa}{\kappa-1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (3.1-10)$$

$$\dot{M} = cA \sqrt{p_{in} \rho_{in} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad \frac{p_{out}}{p_{in}} \leq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (3.1-11)$$

3) 膨張弁

膨張弁では，高速な冷媒が気液二相として流通するため，動作解析や機器設計において考慮すべき因子が複雑に関連している．そこで，本研究では複雑な膨張過程の解析を段階的に進めている．今年度は，以下の検討を行った．

- 膨張弁性能評価装置により予備実験の実施

予備実験を行い，実験データも取得も可能なことを明らかにしている．Fig.3.3-2 に予備実験に用いた実験装置の外観を，Fig.3.3-3 に R410A を用いた実験結果の一例をそれぞれ示す．



Fig.3.3-2 Preliminary experimental equipment

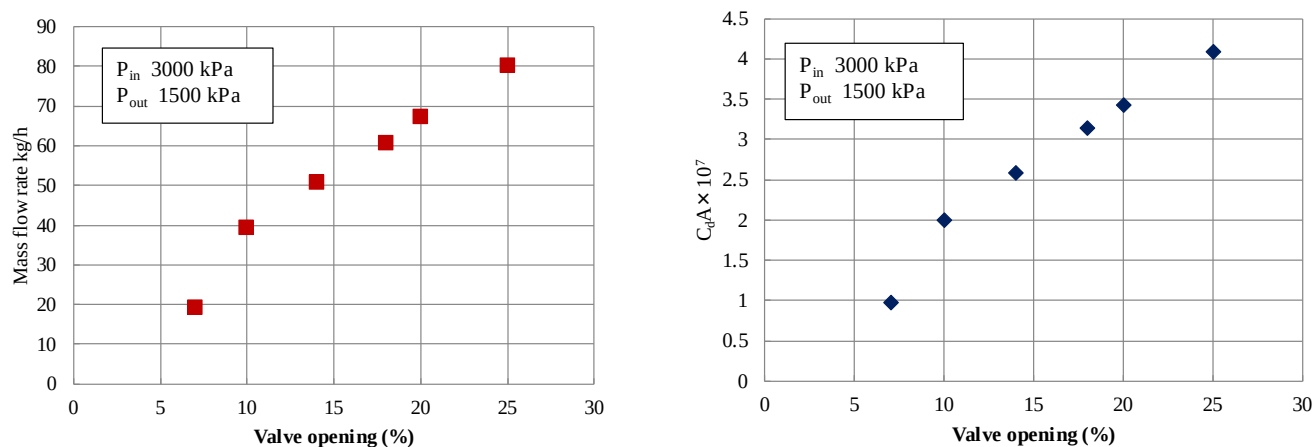


Fig.3.3-3 Experimental result

3.4 性能評価技術研究開発

多様な冷媒を用いた実機性能を比較検討するためには、それぞれの冷媒において最適に設計された機器に対して統一的な条件で性能を評価すべきであるが、その指針が明確となっていない。このため、都合よく機器性能を高く見せるような操作をすることも可能となってしまう。そこで、本研究では、性能評価方法を明確化するとともに、実運転性能をも測定可能な革新的な評価装置を新たに開発し、評価方法の妥当性を検証することを目指す。

1) 数理的性能評価手法開発

実機性能を比較する際に、評価方法が複雑過ぎれば、採用されなくなってしまう。そこで、機器の性能解析や具体的な実験を通じて機器性能に影響が大きい因子を抽出するとともに、AI(特に進化計算技術)を適宜導入した数理的最適化手法を導入しながら、それぞれの冷媒に対してどのように設計された機器で性能を比較すべきかを明確化する。今年度は以下の検討を行った。

- ・ 空気側について最適化計算を実施した。ここでは、AIを用いてフィン高さ、フィンピッチ等を最適化する計算を行った。
- ・ その対象としては、円管とマイクロチャンネルとして、最適化計算を実施した。

その結果、必要となる体積の中で、フィンをどのように最適に設計すべきかを明確するとともに、必要となるファン動力を明確化できた。最適化の結果については、未発表のため、本レポートでは記述を差し控える。

2) 性能評価装置

使用温度帯や運転条件、運転方法が大きく異なるが、今後の中小型空調機器として非常に重要となるエアコンとショーケースを取り上げ、機器性能を具体的に評価する。計画では、平成31年度から検討を始めることとしていたが、早稲田大学における評価装置の設置場所を検討する都合上、予定よりも先行して、今年度から装置の大きさやレイアウト、概算費用等の基本的な設計を進めている。従来のAPFの評価装置では、制御ループを外し、圧縮機を固定した定常状態で数点のデータで性能を計測しているが、今回開発する評価装置の特徴は以下の通りである。

- ・ 開発装置は、機器が自らの制御によって運転されている性能を計測可能
- ・ 省スペースでVRFにおけるバランスが崩れた性能評価も可能

Fig.3.4-1 に性能評価装置の概念図を、Fig.3.4-2 には、今回開発する性能評価装置の原型機となる装置の外観写真を示す。また、今回開発する性能評価装置の概要図例を Fig.3.4-3（室外機室と室内機室を上下方向に配置した例）と Fig.3.4-4（室外機室と室内機室を水平方向に配置した例）を示す。

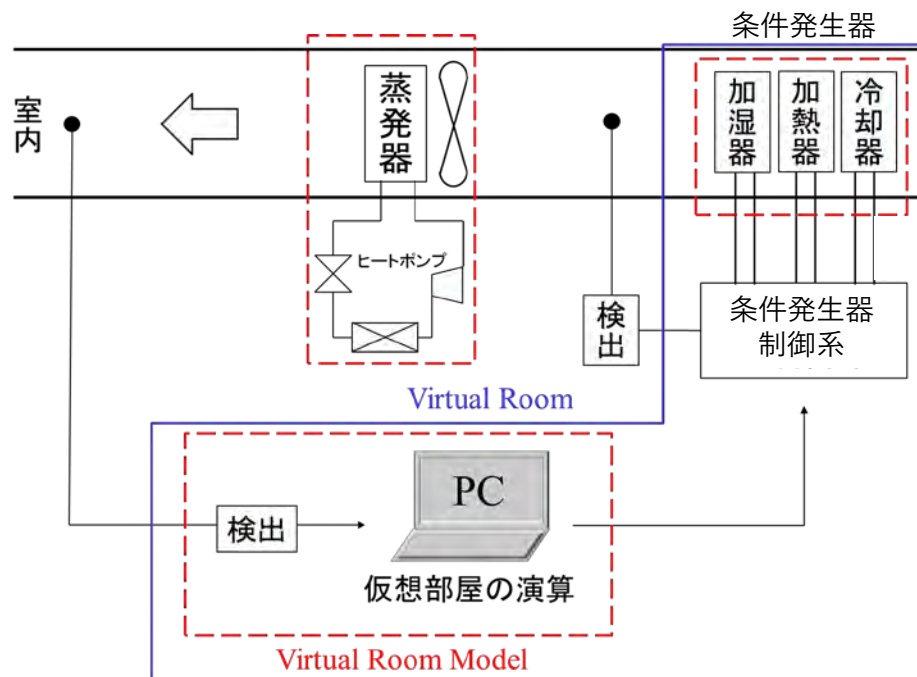


Fig.3.4-1 Conceptual diagram of evaluation device



Fig.3.4-2 Appearance of prototype machine

ヒートポンプエアコン性能評価装置 概要図

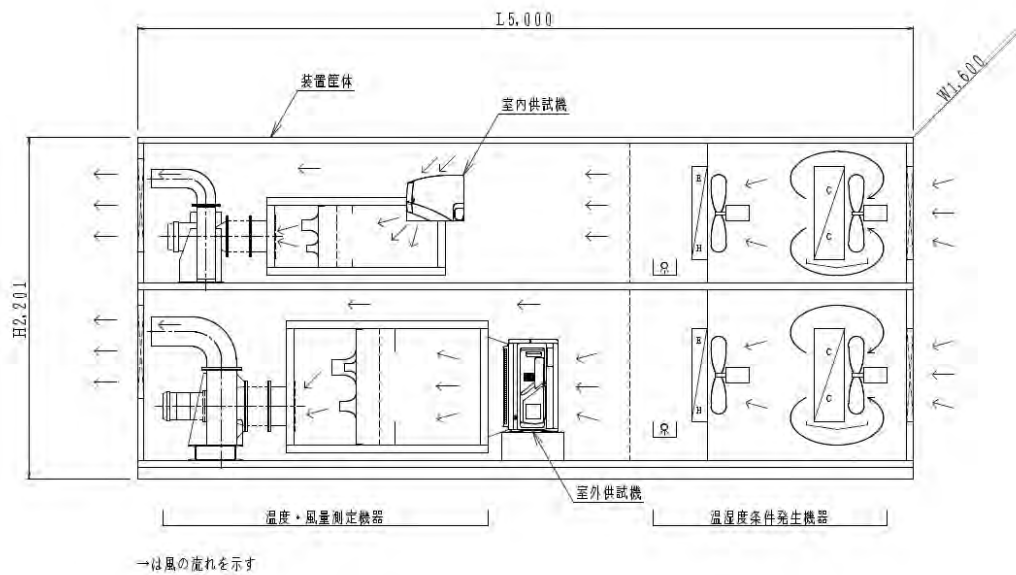


Fig.3.4-3 Outline drawing of evaluation device examined
(The case where outdoor unit room and indoor unit room are stacked up and down in two stages)

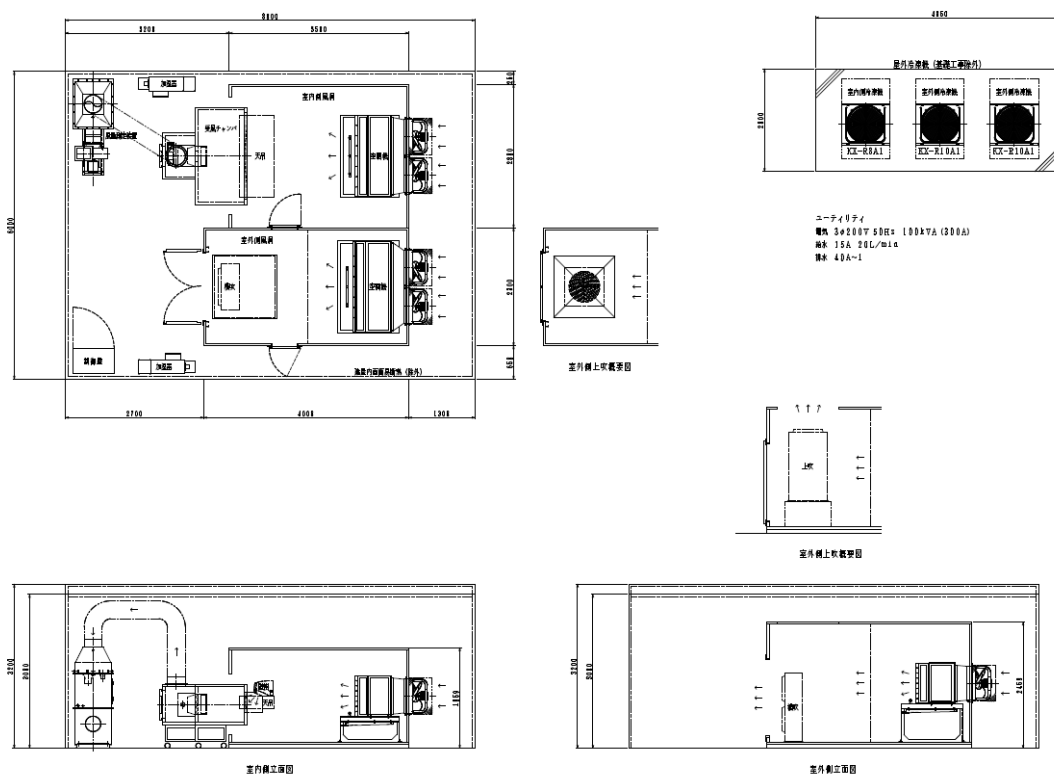


Fig.3.4-4 Outline drawing of evaluation device examined
(The case where outdoor unit room and indoor unit room are arranged in parallel)

3.5 シミュレーター開発とその活用

構築した数理モデルを導入して、混合冷媒も含む多様な次世代低 GWP 冷媒を用いた機器の性能解析を可能とするシミュレーターを開発する。ここでは、工業界や学术界でシミュレーションを専門としない技術者、研究者の利用も考慮し、ユーザーが数値計算を意識することなくグラフィックユーザーインターフェース(GUI)を活用しながら容易にこのような解析が可能な解析環境を構築する。今年度の進捗状況は以下のとおりである。

- ・ 文献調査により数理モデル、計算ロジックを分析
- ・ C++で計算エンジンを実際に作成
- ・ GUI の基本構成を構築

なお、従来のシミュレーターとの違いは以下のとおりである。

＜従来＞

精度良くシミュレーション計算するためには、実機の詳細な仕様や、制御方法などの詳細データをメーカーから開示してもらうことが必要である。

＜今回の開発＞

熱交換器や圧縮機など、理論に基づき数値モデルを作成することにより、混合冷媒を含めて、従来にない新冷媒に対しても妥当性のあるシミュレーションができる。

1) 熱交換器

パス数や冷媒の分岐方法、空気側のフィン形状によって熱交換器の性能がどのようなものかを容易にシミュレーション可能な熱交換器シミュレーターを開発する。今年度は、数理モデルと計算ロジックの文献調査を行い、簡易な計算ロジックでの数値計算を実現した。ソフトウェア専門会社に外注し、入出力の GUI を大幅に改善する検討を行った。なお、現状のシミュレーターの課題と GUI の開発方針は、以下のとおりである。

＜課題の整理＞

- ・ 冷媒充填量に大きな誤差があるため、速度比の補正で対応が必要
- ・ 混合冷媒時熱量に計算誤差があるため、物性や温度の考え方の再検討が必要
- ・ 実用を目指した計算の大幅な高速化が必要

＜GUI の開発方針＞

- ・ 熱交換器の GUI を簡単にする
- ・ 計算の途中経過が表示されるようにする
- ・ 線図に表記されるようにする

まずは、簡易な GUI を構築し、その使い勝手について検討を進めているところである。

Fig.3.5-1 に簡易な GUI の例を示す。

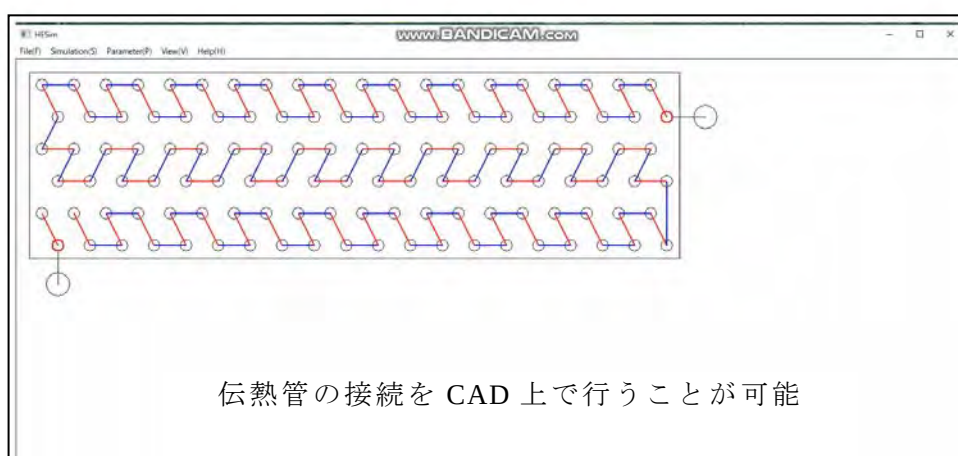
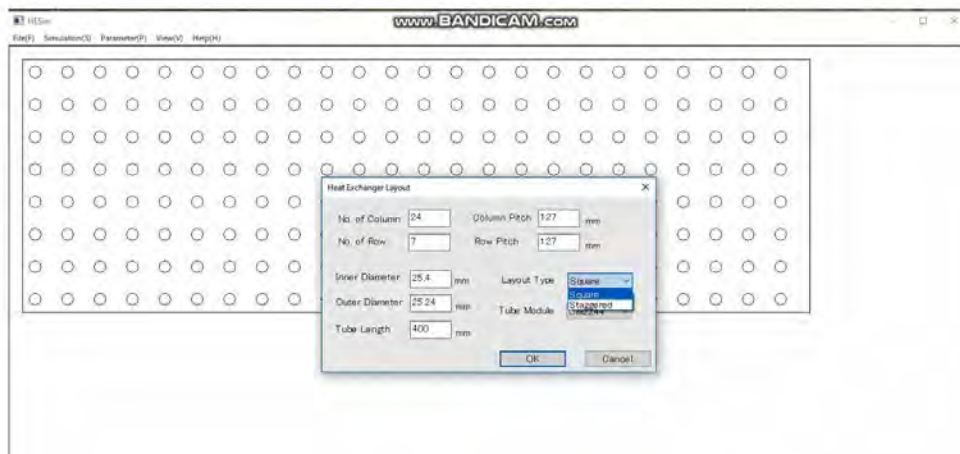


Fig.3.5-1 Simple GUI

3.6 研究進捗と今後の計画

今年度の進捗と次年度以降の計画は，Table 3.6-1 のとおり．

Table 3.6-1 Research progress plans and results

大項目	小項目	明細	担当機関		平成30年度	平成31年度	平成32年度
1. 性能解析技術研究開発	1-1 モデリング、性能解析	熱交換器	早稲田+電通大	計画 実績			
		圧縮機	早稲田	計画 実績			
		膨張弁	早稲田+電通大	計画 実績			
		システム	早稲田	計画 実績			
	1-2 現象究明実験	混合冷媒評価	電通大	計画 実績			
		冷媒充填	早稲田	計画 実績			
	1-3 モデルの妥当性検証	熱交換器	早稲田	計画 実績			
		システム定常	早稲田	計画 実績			
		システム非定常	早稲田	計画 実績			
2. 性能評価技術研究開発	2-1 数値的性能評価手法開発	熱交換器	早稲田+電通大	計画 実績			
		システム	早稲田+電通大	計画 実績			
	2-2 性能評価装置開発		早稲田	計画 実績			
			早稲田	計画 実績			
	2-3 評価手法の妥当性検証	熱交換器	早稲田	計画 実績			
		エアコン	早稲田	計画 実績			
3. シミュレーター開発とその活用	3-1 熱交換器		早稲田	計画 実績			
	3-2 システム		早稲田	計画 実績			
	3-3 年間性能, LOCP		早稲田	計画 実績			

参考文献

- 3-1) B. Wang, W. Shi, X. Li, Q. Yan, (2008), Numerical research on the scroll compressor with refrigeration injection, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 440–449.
- 3-2) K. Tojo, M. Ikegawa, N. Maeda, S. Machida, M. Shilbayashi, (1986), Computer Modeling of Scroll Compressor with Self Adjusting Back-Pressure Mechanism, International Compressor Engineering Conference Proceedings, Purdue University, West Lafayette, U.S.A..

3.7 電気通信大学の進捗

1) 総論

全体としては、概ね順調に進んでいる。2018 年度の実施事項は、熱交換器の冷媒側の熱伝達文献調査およびプログラム作成、そして、膨張弁の数値解析である。以下に、今後の計画と課題を含め報告する。

2) 熱交換器の冷媒側 熱伝達率文献調査およびプログラム作成

現在、熱交換器の冷媒側熱伝達率の予測式について、様々な提案がなされている。そこで、文献調査を行い、以下の 10 の熱伝達整理式について、一度に熱伝達率整理式の各特徴と信頼性を抽出できるように、Excel 上で物性値計算ソフトウェア Refprop10³⁻³⁾ を連携させた VBA プログラムの開発を行った。

Chen 型・・・核沸騰と強制対流蒸発熱伝達を、線形和として整理式として表現。 気液二相流の強制対流蒸発が単相流に対してどれくらい倍増されるのかの係数 F と、核沸騰熱伝達が強制対流蒸発で抑制される係数 S を組み合わせて、熱伝達の物理現象を再現できるようにされている。以下の 9 つの整理式については、係数 F や S の違いで説明できる場合もある。

1. **Chen (1966)**, Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow, Ind. Engng. Chem. Proc. Des. Dev. 5, 322–329
2. **Lazarek and Black (1982)**, Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113. Int. J. Heat Mass Transfer 25, 945–960
3. **Jung et al. (1989)**, A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures. Int. J. Heat Mass Transfer 32, 1751–1764
4. **Liu and Winterton (1991)**, A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation. Int. J. Heat Mass Transfer 34, 2759–2766
5. **森ら(1999)**, 冷媒の水平平滑蒸発管内熱伝達係数の予測式の修正, Trans. JSRAE 16, 177–187, in Japanese
6. **Sumith et al. (2003)**, Saturated flow boiling water in a vertical small diameter tube. Experimental Thermal Fluid Science 27, 789–801
7. **Kandlikar and Balasubramanian (2004)**, An extension of the flow boiling correlation to transition, laminar, and deep laminar flows in minichannels and microchannels. Heat Transfer Engineering 25, 86–93
8. **Zhang et al. (2004)**, Correlation for flow boiling heat transfer in mini-channels. Int. J. Heat Mass Transfer 47, 5749–5763
9. **Saitoh et al. (2007)**, Correlation for boiling heat transfer of R-134a in horizontal tubes including effect of tube diameter. Int. J. Heat Mass Transfer 50, 5215–5225

一方で、宮田ら³⁻⁴⁾は、近年熱交換器の熱交換密度を高めて、高性能化とコンパクト化を図る手法として使用されている微細流路内の沸騰熱伝達について、なぜ熱交換効率が上昇しているかのメカニズムを解明した上で、従来の Chen 型に加え、微細流路内に特有の薄い液膜によって熱伝達が促進される蒸発熱伝達項を線形和として与えた。この事で、他の研究者の実験データについても微細流路内熱伝達を非常に良好な精度で再現できるようになった。一方で、1MPa を越えるような高圧冷媒や水平流熱伝達の精度を向上させる必要があり、以下の榎木ら（再委託先研究者として参加）が、宮田らの整理式の修正を行って、より一般化したモデルを提案している。

宮田ら型・・・微細流路内で生じる特有の蒸発熱伝達現象を Chen 型に加算して表現。

10. **榎木ら(2015)**, 微細流路内沸騰熱伝達の整理式の修正, Trans. JSRAE 32, 275–284, in Japanese

以上、取り上げた 10 の整理式は、実験条件の入力のみで自動計算および比較が可能となっている。具体的な比較としては、各々の整理式の比較が可能でグラフとして可視化でき、また実験値との比較の場合については、標準偏差 *SD*、単純平均偏差 *AD*、絶対値平均偏差 *MD*、そして全体の実験値に対して予測精度が 20 % and 30 % 以内の割合をパーセンテージ表記として出力し、それぞれの整理式の特徴と比較が可能となっている。

3) 膨張弁解析

膨張弁の前後における冷媒の CFD 解析を実施した。冷媒として、R410A 混合冷媒を参照し、基礎式としては圧縮性二流体モデルによる質量・運動量・エネルギー保存則をそれぞれ適用した。基礎式は有限体積法により空間離散化し、圧縮性による不連続に対応可能な Godunov 法を二流体モデルに適用した³⁻⁵⁾。

流れ場を 2 次元軸対称流れと仮定し、膨張弁を含む断面において数値解析を実施した。流速は壁面境界では滑りなし条件とし、非壁面境界では速度勾配ゼロ条件を課した。出入口境界の圧力には一定圧力条件を課した。初期条件として、高压側では 2MPa、低压側では 0.5MPa とし、両者が膨張弁の隙間部で非連続的に接続するようにした。

初期状態から 1 ms 経過後の冷媒のボイド率分布を Fig.3.7-1 に示す。ボイド率の分布から、冷媒は噴出後に速やかに気液混合状態となるとともに、界面形状が蛇行することが示されるなど、膨張弁周りの流体の挙動が定性的に再現された。

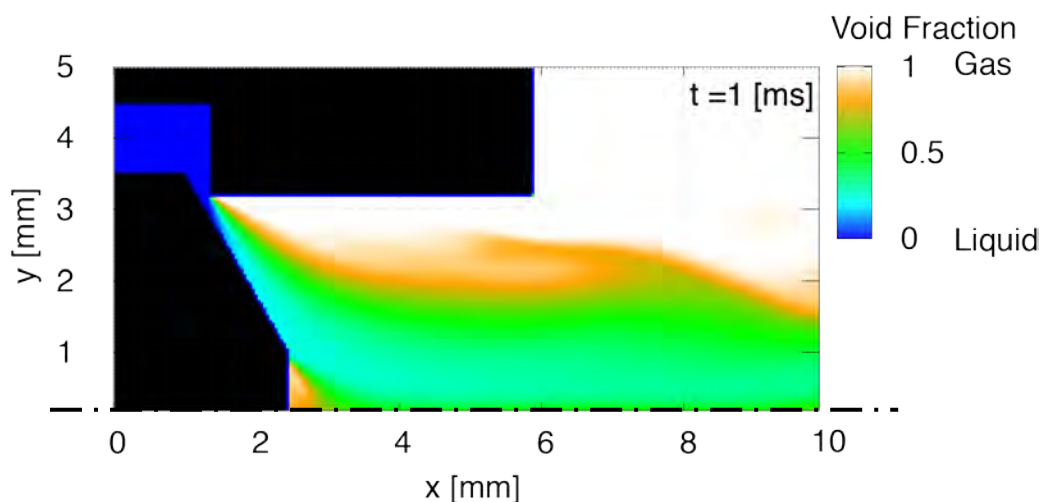


Fig.3.7-1 Void fraction of the coolant at $t=1$ ms: white region indicates gas state, while blue region indicates liquid state.

4) 次年度の予定と課題

次年度以降は、このまま順調に研究遂行できるように、早稲田大学との連携強化のために TV 会議を頻繁に行う予定で調整している。

熱交換器については、圧力損失の数値モデルを構築し計算を可能なようにする。またガスクロマトグラフ質量分析計や高速度カメラを購入し、混合冷媒の沸騰熱伝達メカニズムを解明していき、実際の熱交換器の予測が可能になるように実験装置の準備を行っていく。

膨張弁の数値解析については、膨張弁の前後において、物性の急変を伴う臨界二相流が生じることが予測されるが、現状では計算領域・解像度が限定された条件で、かつ、物性値は実験等で得られた数表データを参照した流動解析となっている。次年度においては、今年度導入した計算サーバを用いて、より高解像度で高速な解析が可能となることから、臨界二相流に関するより精緻な解析を進める。また、物性値計算ソフトウェア Refprop を導入し、計算メッシュごとの物性値計算を行うなど、より定量的な議論となるよう検討する。

参考文献

3-3) Lemon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O.; NIST Standard Reference Database 23, 2018, Ver.10.0

3-4) 宮田一司, 森英夫, 濱本芳徳:「微細管内流沸騰熱伝達の整理式」, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.28, No.2, pp.137-148 (2011)

3-5) 湊明彦: 機論 B, 68(673), pp.2489-2494(2002).

第 2 部 次世代冷媒の安全性・リスク評価（WGⅡ）の進捗

目次

第1章 はじめに	4
1.1 NEDO プロジェクトの概要	4
1.2 次世代冷媒に関する調査委員会 WG II の活動	6
1.3 本報告書について	8
第2章 東京大学の進捗	9
2.1 はじめに	9
2.2 可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究	9
2.2.1 緒言	9
2.2.2 冷凍空調機器からの冷媒漏洩実験	9
2.2.3 可燃性冷媒の漏洩シミュレーション	12
2.2.4 まとめ	17
2.3 可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究	17
2.3.1 はじめに	17
2.3.2 小型容器における燃焼実験	18
2.3.3 燃焼現象のシミュレーション	19
第3章 公立諏訪東京理科大学の進捗	21
3.1 はじめに	21
3.2 本研究の構成	21
3.3 着火源の抽出と着火能力の評価手法	22
3.3.1 着火源の抽出	22
3.3.2 着火性評価の考え方	22
3.4 各種電気部品によるプロパンの着火性評価	23
3.5 各種電気機器によるプロパンの着火性	25
3.6 各種電気部品及び一般家電製品によるプロパンへの着火性に関する調査のまとめ	26
3.7 照明スイッチの動作によるプロパンへの着火性	27
3.8 まとめと今後の課題	29
第4章 産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗	32
4.1 はじめに	32
4.2 燃焼限界測定法の評価	32
4.3 R32/1234yf 混合系の燃焼限界	33
4.4 R32 及び R1234yf の燃焼限界の温度依存性	34
第5章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒の ルームエアコンのリスク評価の進捗	35
5.1 冷媒変更と日本冷凍空調学会との連携について	35
5.2 リスクアセスメントの許容値について	35
5.3 着火源について	35
5.3.1 輸送保管時の着火源	36
5.3.2 据付け時の着火源	36
5.3.3 室内設置の着火源	36
5.3.4 室外設置の着火源	36
5.3.5 修理時の着火源	36
5.3.6 廃棄時の着火源	36
5.4 漏えいシミュレーションについて	36
5.4.1 バルコニーでのシミュレーション条件	36
5.4.2 シミュレーション手法	37
5.4.3 無風条件での結果	38
5.5 修理	38
5.6 リスクアセスメント結果	39
5.7 対策について	39
5.7.1 使用時室内	39

5.7.2 修理時.....	40
5.7.3 各ステージでの対策後の着火率.....	40
5.8 まとめ.....	41
第6章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒の 内蔵ショーケースのリスク評価の進捗.....	42
6.1 はじめに.....	42
6.2 安全規格の見直し.....	42
6.3 IEC60335-2-89 の主な改定案.....	42
6.3.1 最大冷媒充填量.....	42
6.3.2 最小設置床面積.....	42
6.3.3 冷媒漏えい試験.....	43
6.3.4 IEC60335 2-89 の今後の予定.....	43
6.4 リスクアセスメント.....	43
6.4.1 リスクアセスメントのプロセス.....	43
6.4.2 内蔵ショーケースのリスクモデルの設定.....	44
6.4.3 許容レベルの設定.....	44
6.4.4 冷媒漏えい発生確率について.....	45
6.5 冷媒漏えい解析.....	45
6.5.1 可視化試験.....	45
6.5.2 CFD 解析.....	46
6.6 着火源の検討.....	47
6.6.1 人に係わる着火源.....	47
6.6.2 ショーケースに係わる着火源.....	47
6.6.3 CVS 店舗内に設置している機器に係わる着火源.....	47
6.7 まとめ.....	48

第1章 はじめに

1.1 NEDO プロジェクトの概要

フロン排出抑制法の指定製品制度により、部門ごとに低 GWP 冷媒の普及が求められている。しかし、炭化水素のような強燃性冷媒の安全性評価・リスク評価の手法は確立されていない。したがって、次世代冷媒の基本特性を把握し、同時に次世代冷媒の持つ課題に対する安全性・リスク評価方法を確立し、国内安全基準の策定や国際規格化・標準化策定に取り組むことで、省エネルギーかつ低温室効果を実現する次世代冷媒適用冷凍空調機器等の開発を支援することが重要である。こうした状況をふまえ、本事業では、次世代冷媒を使用した省エネ冷凍空調機器の開発基盤を整備し、2026 年を目途とする冷媒及び冷凍空調機器製品の市場投入に貢献することをねらいとしている。そのために業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模の冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の安全性・リスク評価手法を確立することを目指している。

NEDO プロジェクト「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」の中の項目「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」においては、東京大学、公立諏訪東京理科大学、産業技術総合研究所（安全科学研究部門）が共同提案し、受託している。3 機関の可燃性冷媒の燃焼事故時の安全評価に関する研究項目を列举すると、以下のようになる。

【東京大学】

- ・可燃性冷媒漏洩時のリスクの評価
- ・可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の評価

【公立諏訪東京理科大学】

- ・着火源のスクリーニングと着火源モデルの構築
- ・各種着火源のフィジカルリスク評価

【産業技術総合研究所（安全科学研究部門）】

- ・冷凍空調機器からの冷媒漏洩事故事例の検討と漏えい条件のモデル化
- ・可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価
- ・少量長時間漏洩時の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価
- ・室内機内での急速漏洩時の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価

上記 3 機関の共同提案とは別に、産業技術総合研究所（機能化学研究部門）は低 GWP 低燃焼性混合冷媒の安全性評価を行うことを目的として NEDO から研究を受託している。研究項目は以下のとおりである。

【産業技術総合研究所（機能化学研究部門）】

- ・混合冷媒の燃焼特性評価
- ・混合冷媒の実用上の燃焼安全性評価

家電製品のリスクを評価する手法として、R-Map が知られている。これは、リスクを 6 つの発生頻度と 5 つの危害度からなる 6×5 のマトリクス上で表現するものである。文部科学省所管の(財)日本科学技術連盟が開発したものである。Fig. 1-1 に R-Map 例¹⁻¹⁾を示す。A 領域は許容できないリスク領域でリコールしなければならないものに該当する。B 領域は最低限のリスクまで発生頻度を低減すべき領域である。C 領域はリスクが無視でき、そのまま流通できる領域である。事故の発生頻度に関しては、家電製品などの消費生活用製品については、100 年に 1 回の死亡事故が発生しても安全と見なす（C 領域と見なす）という基準が示されている。例えば、わが国のルームエアコンのように 1 億台流通している場合は、許容される事故発生頻度は 10^{-10} （件／台・年）となる。Fig. 1-1 の発生頻度は 100 万台流通している場合の例である。

以上のように、製品のリスク評価を行うためには、事故の発生頻度評価と危害度の評価を行う必要がある。冷凍空調機器から可燃性冷媒が漏えいして火災事故になるためには Fig. 1-2 に示すような 3 条件（冷媒の急速漏洩、可燃空間の存在、着火源の存在）が重なる必要がある。3 条件を独立事象と仮定すると、火災事故の発生確率は、冷媒の急速漏洩の発生確率と可燃空間の存在確率と着火源が存在する確率の積となるので、火災事故の発生確率を求めるためには 3 要素のそれぞれの発生確率を求める必要がある。

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

Fig. 1-1 R-Map for Consumer Products when 1 million units are distributed.¹⁻¹⁾

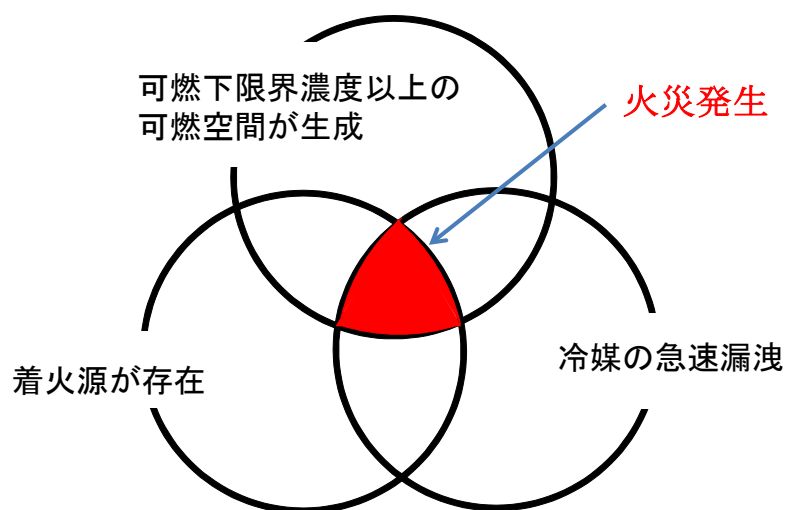


Fig. 1-2 Conditions for fire accident occurrence

本事業では、火災事故が発生する頻度のための研究と、事故時の危害度評価のための研究を行っている。当面は冷媒としてプロパンを冷媒とし、ルームエアコンおよび独立型ショーケースからの冷媒漏洩に伴う火災事故を研究対象としている。3機関の研究項目の関係を Fig. 1-3 に示す。相互に協力しながら研究を進めてゆく計画となっている。最終的なリスク評価は日本冷凍空調工業会と協力しながら実施する予定である。

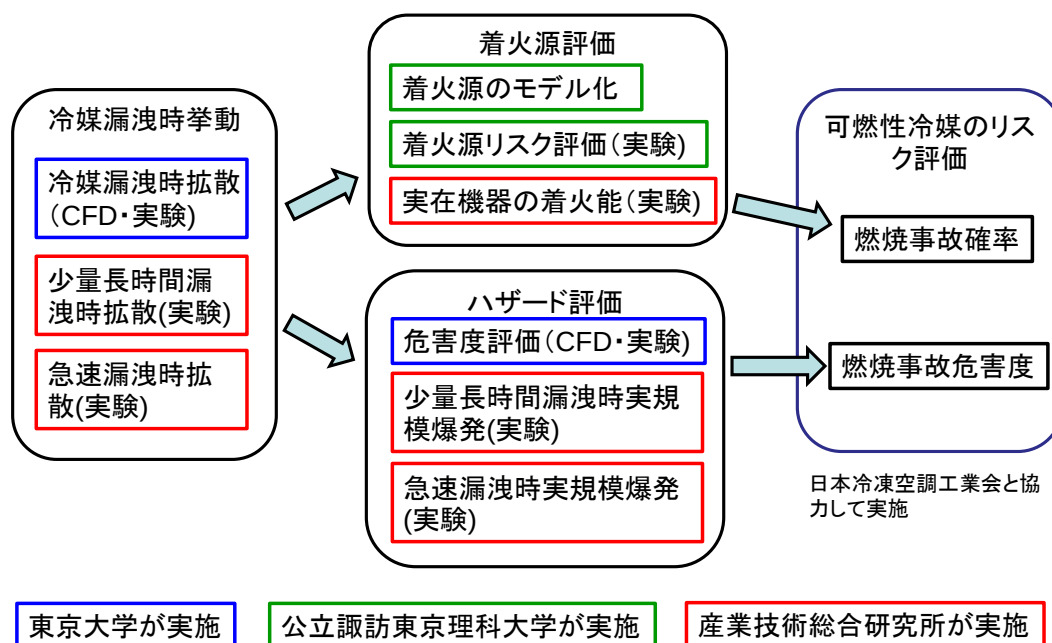


Fig.1-3 Research flows in this project

1.2 次世代冷媒に関する調査委員会 WG II の活動

低 GWP 冷媒は微燃性を有することが多いため、低 GWP 冷媒の使用を促進するため、科学的知見に基づいた微燃性冷媒のリスク評価の必要性が叫ばれ、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」プロジェクト(2018～2020年)の中で、公立諏訪東京理科大学、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。一方、(一社)日本冷凍空調工業会は2016年から冷凍空調機器に強燃性冷媒(A3冷媒)を適用するときのリスク評価を始めている。日本冷凍空調工業会では、設置条件の影響や着火源の存在になどについて個別に審議している。これら知見を集約し、第三者の目で客観的な評価を行う目的で、2018年からNEDOの調査事業として、(公社)日本冷凍空調学会の中に「次世代冷媒に関する調査委員会」が設置された。当該調査委員会の中のワーキンググループII(WG II)において可燃性冷媒の安全性とリスク評価が審議されている。WG IIの審議体制はFig. 1-4に示すように、産官学の協力体制が構築されている。委員構成はTable 1-1に示すとおりである。

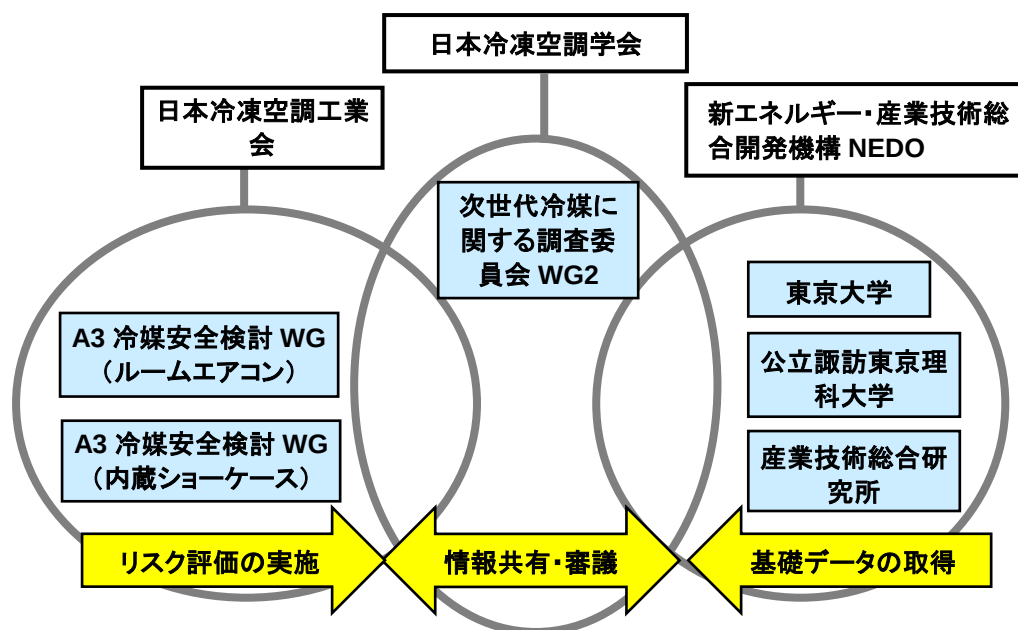


Fig. 1-4 Deliberation system for risk assessment of flammable refrigerants

Table 1-1 Investigation Committee on Next-Generation Refrigerants, WSII Committee List as of March 2019

	所 属	部 署	役 職	氏 名
主査	東京大学	大学院新領域創成科学研究科	教授	飛原 英治
委員	公立諏訪東京理科大学	工学部機械工学科	准教授	今村 友彦
	産業技術総合研究所	機能化学研究部門	主任研究員	滝澤 賢二
	産業技術総合研究所	安全科学研究部門	主任研究員	椎名 拓海
	産業技術総合研究所	安全科学研究部門	主任研究員	椎名 拓海
オブザーバ	日本冷凍空調工業会	パナソニック(株)		室園 宏治
		パナソニック(株)		高市 健二
		サンデン・リテールシステム(株)		坂本 圭久
		三菱電機(株)		山下 浩司
		東芝キャリア(株)		山口 広一
		ダイキン工業(株)		藤本 悟
		ダイキン工業(株)		平良 繁治
		日立ジョンソンコントロールズ空調(株)		佐々木 俊治
	東京大学	三菱重工サーマルシステムズ(株)		高野 雅司
		技術部	部長／参事	松田 憲兒
			参事	酒井 猛
		技術部	参事補	長谷川 一広
		大学院新領域創成科学研究科	准教授	党 超鋌
			特任研究員	伊藤 誠
	新エネルギー・産業技術 総合開発機構	環境部	主任研究員	阿部 正道
			主査	市川 直喜
			主査	神戸 正純
			主任	須澤 美香
事務局	日本冷凍空調学会			上村 茂弘

1.3 本報告書について

本報告書は、次世代冷媒に関する調査委員会 WG2 の平成 30 年度の成果をまとめたものである。本研究会の活動にあたって経済的なご支援をいただいた国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構には心よりお礼申し上げます。また、執筆にご協力いただいた委員、執筆協力者各位にもお礼申し上げます。

本報告書は公開物である。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してください。

Table 1-2 Author list

章	執 筆 者
第 1 章 はじめに	飛原英治(東京大学)
第 2 章 東京大学の進捗	飛原英治(東京大学), 党超鋌, 伊藤誠, 芦原直也
第 3 章 公立諏訪東京理科大学の進捗	今村友彦(公立諏訪東京理科大学), 白旗恭平, 成澤弘明, 上矢恭子, 須川修身
第 4 章 産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗	滝澤賢二(産業技術総合研究所)
第 5 章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒のルームエアコンのリスク評価の進捗	高市健二(パナソニック㈱)
第 6 章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒の内蔵ショーケースのリスク評価の進捗	坂本圭久(サンデン・リテールシステム㈱)

免責事項

本報告書に掲載されている情報の正確性については万全を期していますが、著者および当学会は利用者が本報告書の情報を用いて行う一切の行為について、何らの責任を負うものではありません。本報告書の利用に起因して利用者に生じた損害につき、著者および当学会としては責任を負いかねますので御了承ください。

参考文献

1-1) リスクアセスメント・ハンドブック実務編：経済産業省，2011 年 6 月

第2章 東京大学の進捗

2.1 はじめに

東京大学では、可燃性冷媒の燃焼に係る安全性とリスク評価の研究を受託している。この研究は可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究と可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究の2項目で構成されている。

可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究に関しては、可燃性冷媒を用いるルームエアコンや業務用ショーケースから冷媒が室内に漏洩したときの冷媒濃度の拡散をシミュレーションし、可燃濃度をもつガスの体積の時間的な推移を計算することを目的としている。この結果を用いて、可燃性冷媒が室内に漏洩したときの着火確率を計算すること

ができる。これまで、漏えいガスの拡散のシミュレーションは行われてきているが、計算結果と実験結果を比較することにより、シミュレーションモデルの検証は十分には行われていなかった。本研究では、二酸化炭素などの安全でGWPの小さいガスを用いた漏えい実験を行い、その結果を用いてシミュレーションモデルの改良を行うことを予定している。

可燃性冷媒が冷凍空調機器から漏えいして火災事故を起こすときのリスクは、火災事故の発生確率と火災に伴う危害の大きさの両面から評価される。これまで、火災事故の発生確率については多くの取り組みがなされてきたが、火災に伴う危害度の評価は十分ではなかった。そこで、本研究では、冷凍空調機器から可燃性冷媒が漏えいしたときの危害度の大きさを理論的に検討することを目的としている。可燃性冷媒の燃焼の素反応モデルを数値流体力学計算プログラムに組み込み、燃焼のシミュレーションを行い、冷媒ガスの燃焼性の違いによる危害度の大きさを評価する予定である。

2.2 可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究

2.2.1 緒言

従来、冷媒はCFCやHCFCなどといった物質が使用されてきたが、そのオゾン層破壊能の高さからモントリオール議定書により規制の対象とされた。その後、オゾン層破壊能が0である代替フロン4ガスと呼ばれるHFCが冷媒として用いられるようになってきた。しかし、CO₂に対し1000倍以上と高い地球温暖化係数(以下、GWPとする)を持っていることから、京都議定書やキガリ改正により規制の対象とされた²⁻¹⁾。そこで、次世代冷媒としてR32などの低GWP冷媒や、R290などのノンフロン冷媒が注目されているが、これらの物質は可燃性を有するものが多い。本研究で対象とする冷媒の燃焼に関する物性値をTable 2-1に示す。ここで示す、LFL, UFL, BV, MIEはそれぞれ燃焼下限濃度、燃焼上限濃度、燃焼速度、最小着火エネルギーである。

本研究では、そのような可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) 可燃性冷媒の漏洩シミュレーション
- 2) 冷凍空調機器からの冷媒漏洩実験

2.2.2 冷凍空調機器からの冷媒漏洩実験

(1) 目的

Table 2-1に記す可燃性冷媒は、いずれも空気よりも密度が高いため、空調機から漏洩した際、床面に滞留するものと考えられる²⁻²⁾。この時、Fig. 2-1に示すように冷媒が急速に漏洩し、冷媒濃度が燃焼範囲内にあり、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が、多種多様な条件下での大空間における冷媒漏洩試験は困難である。しかし、シミュレーションの妥当性を検証するためには、最低限の試験が必要である。そこで、本実験においては、一般的なサイズの室内空間を建設し、実際に実機を用いて漏洩実験を行い、シミュレーションと濃度分布に関して比較を行い、シミュレーション結果の妥当性を検証することが目的である。

Table 2-1 Physical and flammability properties of refrigerants

	R32	R290	HFO-1123	二酸化炭素
化学式	CH ₂ F ₂	C ₃ H ₈	CF ₂ =CHF	CO ₂
分子量 [g/mol]	52	44	82	44
密度 [kg/m ³]	2.11	1.76	—	1.98
GWP	675	<3	0.3	1
LFL [vol%]	13.3	1.8	6.3	—
UFL [vol%]	29.3	9.5	31.7	—
BV [cm/s]	6.7	38.7	6.6	—
MIE [mJ]	15	0.246	—	—

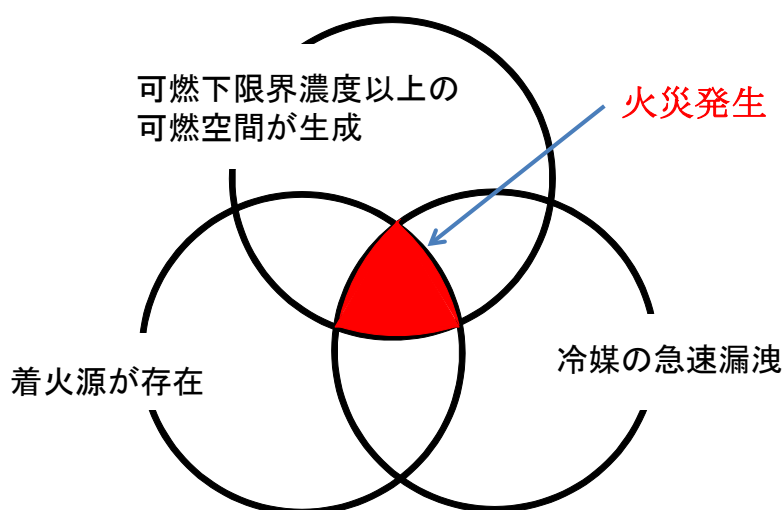


Fig. 2-1 Mechanism of ignition

(2) 実験手法

冷媒漏洩試験を行うに当たり、実験室の建設を行った。実験室は、Fig. 2-2 に示すように、5.6mX4.6m の空間に、仕切り壁を取り外した広さの実験室 A 及び、仕切り壁を設置したときの上部の実験室 B を建設し、それぞれ実験室 A は内蔵型ショーケースの冷媒漏洩試験、実験室 B は家庭用空調機の冷媒漏洩試験の実施を目的とした。実験室 B には壁掛け式エアコンを 1 台設置し、エアコンと対面する壁面には 900mmX7mm のドア下隙間を設置した。また、換気口の有無による濃度拡散の状況を調査するため、φ100mm の排気口を設置した。

実験の系統図を Fig. 2-3 に示す。液体で封入されている冷媒を恒温槽にて室温にし、気体状態にした後、マスフローコントローラーを用いて流量を制御しながら室内に漏洩させる。

濃度測定用のセンサーには低濃度酸素濃度計(イチネンジコーJICO-O2 Ver.3) を設置し、室内の酸素濃度の変化から冷媒の濃度変化を測定する。測定位置は Fig. 2-4 に示す 6 箇所とする。

また、冷媒の漏洩量や漏洩時間に関しては、実際の使用状況²⁻³⁾や国際規格²⁻⁴⁾を元に R32 の場合は 1kg を 4min、また R290 の場合は 500kg を 4min で漏洩させる。

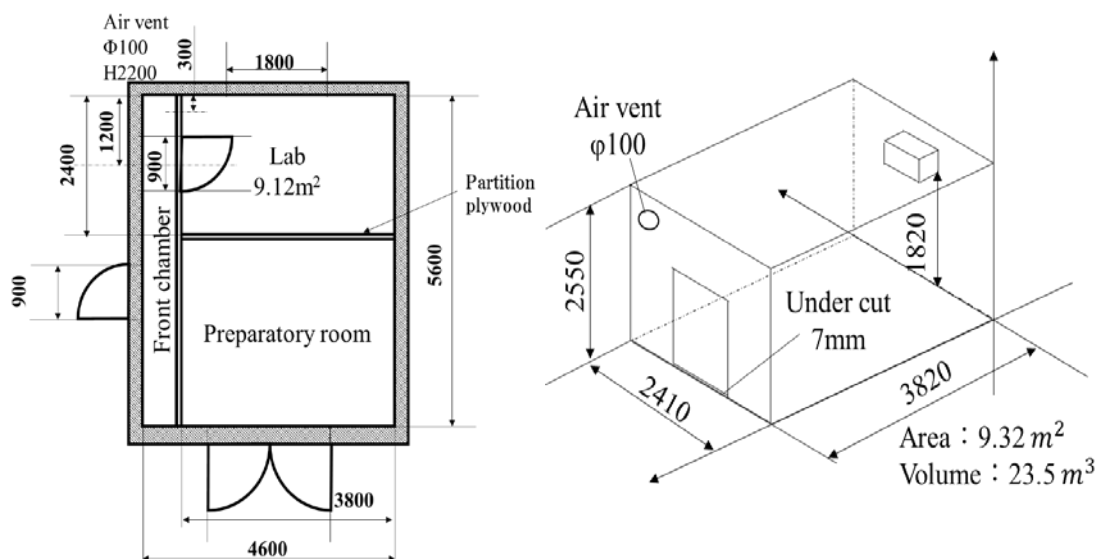


Fig. 2-2 Overview of constricted room

(3) 実験の結果及び考察

冷媒漏洩試験により測定した R32 の濃度分布を Fig. 2-5 に示す．冷媒濃度は低濃度酸素計による酸素濃度の減少から算出した．最大濃度は，0.1m 地点で約 3[vol.%]である．R32 の LFL が Table 2-1 より 13.3[vol.%]であり，最大濃度は LFL に対して 25%未満であることから，発火のリスクは非常に低いと考えられる．また，0.6m 以下の低地点では冷媒濃度の挙動がほぼ同様の結果になったが，1.0m 以上の地点では濃度が大きく低減されるという結果になった．R32 冷媒は密度が空気に対して十分大きいため，床面に滞留しているものと考えられる．

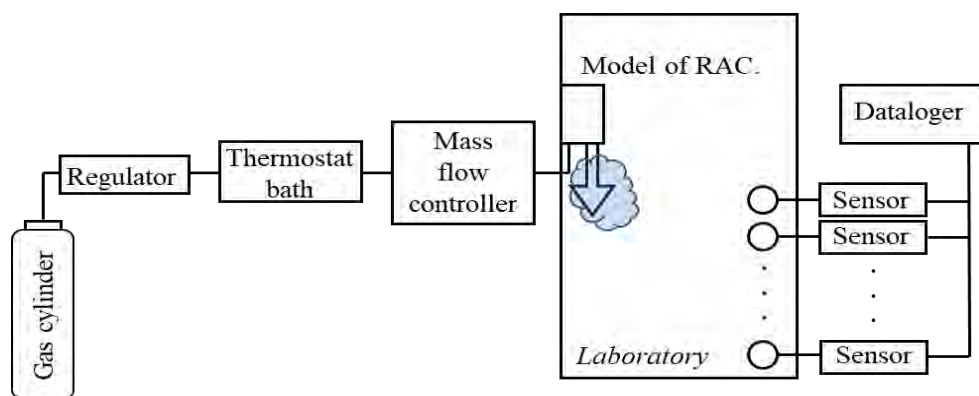


Fig.2-3 Schematic of experimental setup

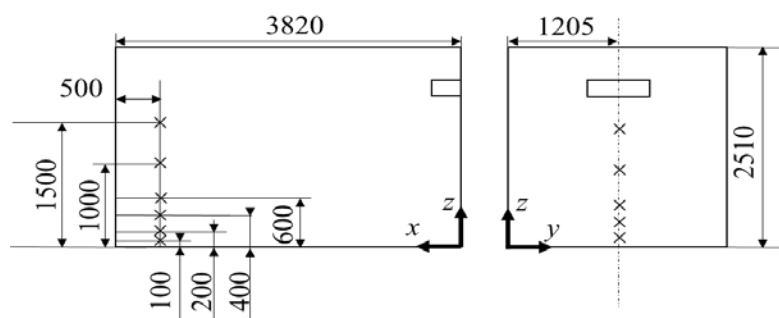


Fig. 2-4 Measurement points

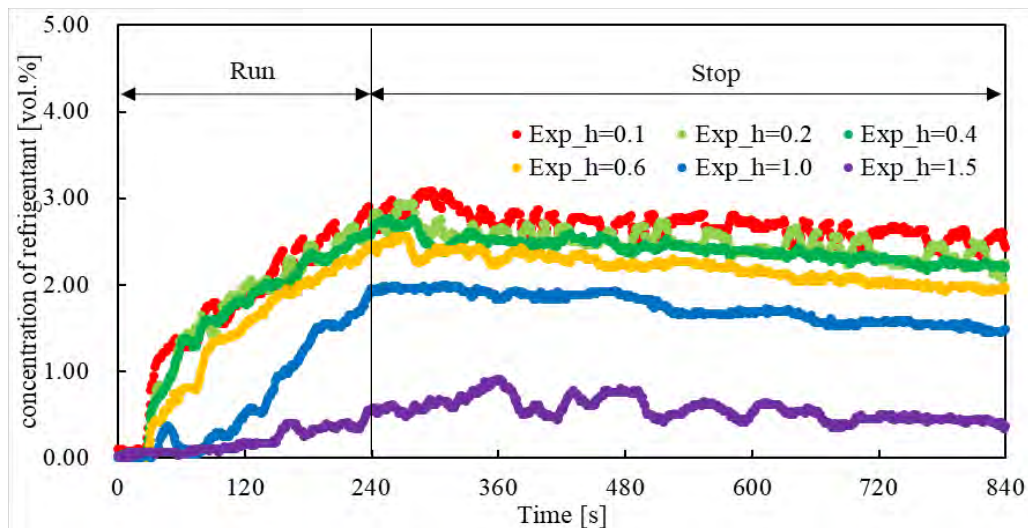


Fig. 2-5 Concentration distribution of experiment at each point (No.1)

2.2.3 可燃性冷媒の漏洩シミュレーション

(1) 目的

安全性基準作成の際、冷媒の拡散現象を理解することは重要であるが、多種多様な条件下での大空間における冷媒漏洩試験は困難である。そのため、本研究では冷媒漏洩試験はあくまでもシミュレーションの妥当性の検証のためのものと位置づけ、シミュレーションによるアプローチを採用した。本シミュレーションの主な目的は以下の2点とした。

- 1) 可燃体積の時間積分値(以下、可燃時空積とする)の算出
- 2) 冷媒の濃度拡散の可視化

まず、冷媒漏洩時の濃度分布シミュレーションで計算し、冷媒漏洩試験で測定した冷媒濃度と比較し、シミュレーションの妥当性を検証する。

- 1) の可燃時空積とは、ある仮定された空間に可燃域がどれくらいの大きさで、またその可燃域がどの程度の時間の長さで存在するかを、空間と時間の積分値として表し、リスクアセスメントでは重要となる。また、
- 2) 多種多様な条件下での冷媒の濃度分布を可視化する。これにより、どのような条件の時に、どの地点に冷媒が滞留するかを確認し、それを回避するための手法の検討を行う。

(2) 計算手法と計算モデル

冷媒漏洩シミュレーションには、ANSYS Fluent 18.1 を用いた。計算方法は非定常流れとし、乱流モデルには Realizable k- ϵ を用いた。また、計算アルゴリズムには SIMPLE 法を用いた。

計算モデルに関する概要を Table 2-2 に示す。試験室モデルは Fig. 2-2 に示すような冷媒漏洩試験のために建設した試験室と同等のサイズである 3820mm×2410mm×2550mm とし、一方の壁の床面から 2100 mm の位置にエアコンを模した箱をモデル化し、吹き出し口を設けた。また、箱の上部には流入口を設けた。また、空調機の反対の壁に、 ϕ 100mm の排気口とドア下隙間 900mm×7mm を設けた。境界条件には、冷媒の吹き出し口及び流入口に質量流量と流速による境界を設け、その比較を行った。吹き出し口では、冷媒が 4min で 1kg 漏洩するよう質量流量と流速を計算した。また、排気口とドア下隙間には、3つのタイプのモデルを作成し、圧

Table 2-2 Simulation model

Simulation	Unsteady
Turbulence model	Realizable k- ϵ model
Method	SIMPLE
Scheme	Pressure: Presto! Others: Second order upside

力境界を設定し、その比較を行った。測定点は、Fig. 2-4 に示す 6 箇所である。また、吹き出し濃度は既存研究を参考にしていずれの冷媒も 25% とした²⁻⁵⁾。

(3) シミュレーションの結果及び考察

1) メッシュ妥当性検討

まず、誤差と計算時間のバランスから、妥当なメッシュサイズの検討を行う必要があるため、グローバルメッシュサイズ 35mm, 50mm, 65mm, 75mm, 100mm にてメッシュ依存性の検討を行った。使用冷媒は、R32 とし、吹き出し口には質量流量境界を設けた。Fig. 2-6 示すシミュレーションの妥当性を調査した結果から、グローバルメッシュサイズ 50mm 以下で結果は収束しており、50 mm で十分精度が保証されていることが示された。

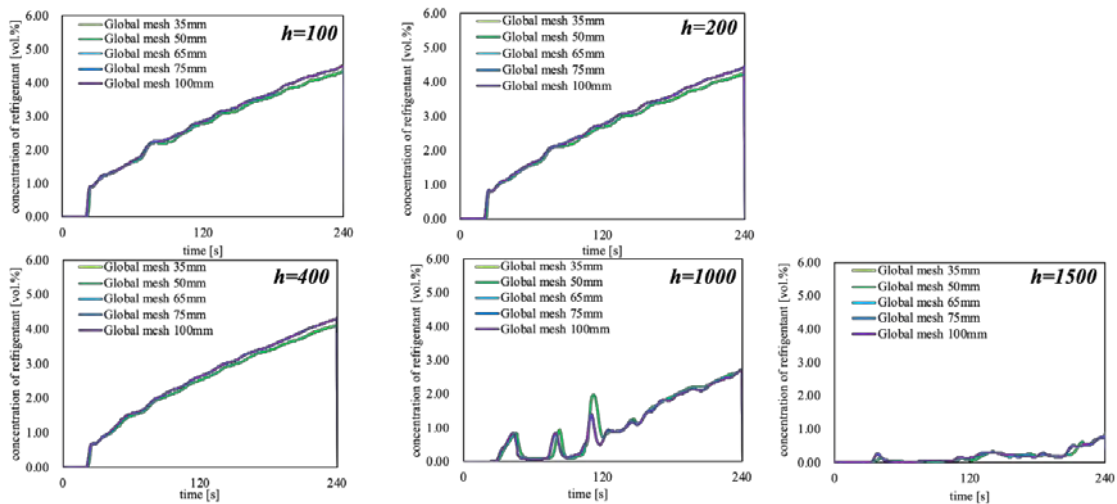


Fig. 2-6 Concentration of refrigerant on each point

2) 質量流量境界と流速境界

エアコン室内機から冷媒が流出するときの境界条件として、質量流量によって設定した結果を、Fig. 2-7(a) に、流速によって設定した結果を Fig. 2-7 (b) に示す。質量流量によって境界条件を与えた結果については、0.6m 以下の低地点において、実験値と計算値で大きく差が生じており、吹き出し終了時には最大 1.5[vol.%] ほどの差が生じている一方、1.0m 以上の高地点ではおおむね一致している傾向が見受けられる。それに対し流速で境界条件を与えた場合、低地点での濃度分布はおおむね一致しているが、高地点において大きく差が生じていることが示された。冷媒濃度が高いとき、リスク評価に及ぼす影響が大きいため、本解析では吹き出し境界にて流速境界を採用することとした。

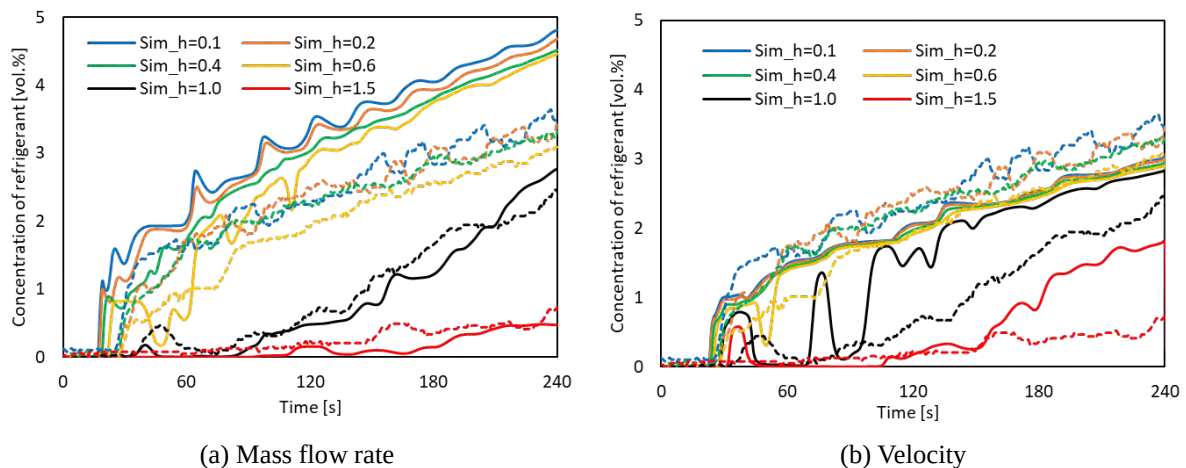


Fig. 2-7 Competitions of boundary condition

3) 圧力境界の形状の検討

従来、ドアした隙間や換気口などの圧力境界では Fig. 2-8 の Type A のように壁に穴をあけるだけであった。Type A の場合は Table 2-3 に示すように、室内の体積の収支が 0 になっておらず、収束性が悪いことが分かった。換気口やドア下隙間などの圧力境界では、流路の急拡大や急縮小があるため、シミュレーションの精度向上に向け、収支のバランスの改善を図った。さらに、換気口ではガスが逆流していることも分かった。そこで、本項では境界形状を変更し、その形状が収支に影響を与えるかどうかについて検討した。Type B では境界条件に奥行を付け、滑らかに流入流出できるようにすることで収束性（気体の体積保存）を上げようと試みた。また、Type C では、Type B の端部に R を付け、より流れを滑らかに流入流出させようと試みた。

その結果、Type B 及び Type C では Type A に比べ体積の収支が向上していることが分かった。また、その誤差は $10^{-2}\%$ のオーダーであり、非常に高いことが示された。

Fig. 2-9 には、それぞれの Type のシミュレーション結果と、実験結果との各点での濃度分布の濃度差をまとめたものを示した。この結果によると、圧力境界の形状の影響は大きくないと考えられるが、シミュレーションの妥当性という観点から、Type C を以降のシミュレーションでは採用することとした。

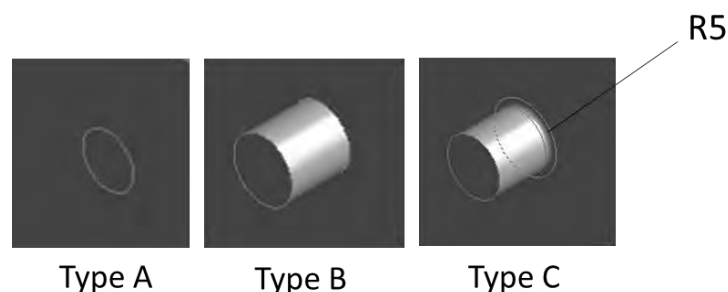


Fig. 2-8 Each shape of vents

Table 2-3 Volume balance of each vents shape

	境界部形状	4 分間の積算気体体積 [m ³] (流入が正)				流入体積－流出体積 [m ³]
		換気口	ドア下隙間	室内機 吹き出し部	室内機 吸い込み部	
Type A	切断面	-0.248	-1.403	1.894	-1.403	-1.159 (-5.1%)
Type B	形状付加	0.713	-1.215	1.894	-1.403	0.011 (0.048%)
Type C	形状付加 & R	0.483	-0.987	1.894	-1.403	-0.013 (-0.057%)

※ R32 1kg→0.474[m³], Air 1kg→0.861[m³]

4) R32 冷媒の可燃時空積

R32 冷媒の冷媒漏洩シミュレーションを行ったときの可燃体積と可燃時空積について述べる。冷媒の吹き出し境界については、2)で行ったシミュレーションの検討から、流速境界の方が妥当性が高いと判断したため、流速境界とした。また、これまで冷媒の吹き出し濃度を 25%としてシミュレーションを行ってきたが、冷媒の吹き出し濃度が可燃体積及び可燃時空積の結果に影響するのにかについても検討するため、吹き出し濃度を 100[vol%], 50[vol%], 37.5 [vol%], 25[vol%], 20[vol%]と変えて計算した。

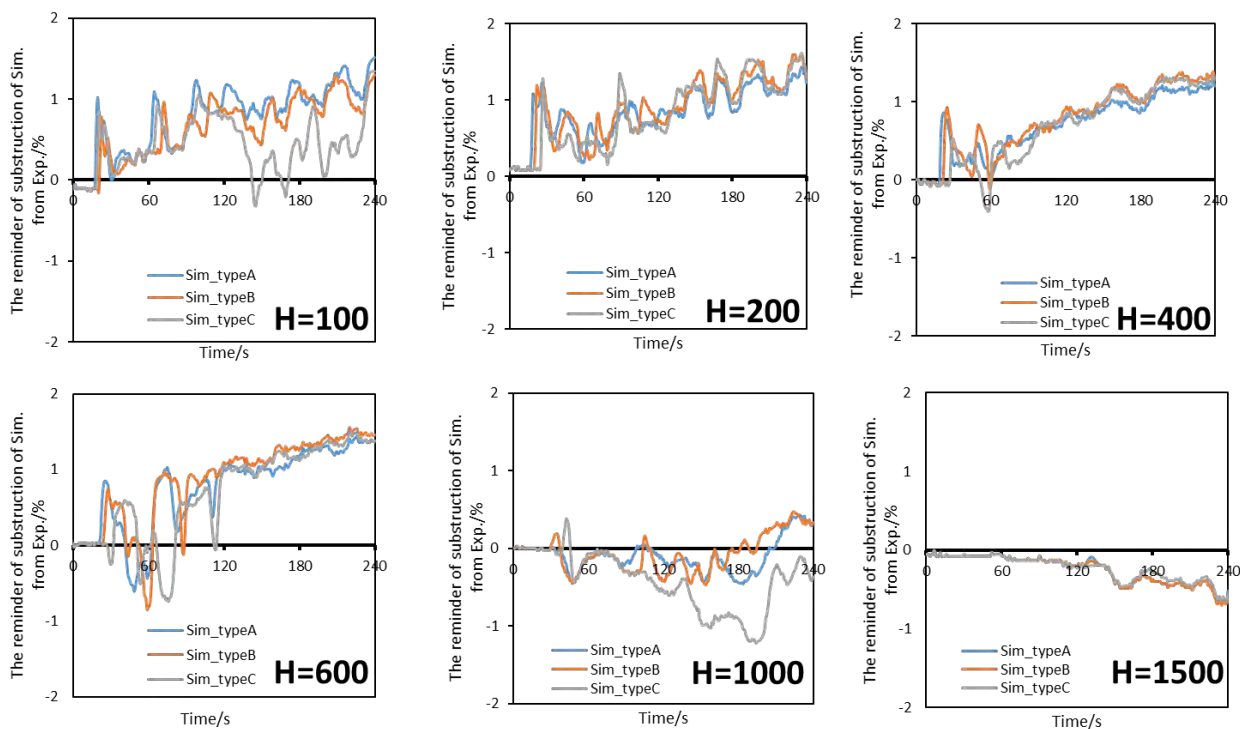


Table 2-9 Residual between simulation and experiment

可燃体積の結果を Fig. 2-10 に示す。また、各吹き出し濃度での可燃時空積の時間変化を Fig. 2-11 に示し、可燃ガス部を示した図を Fig. 2-12 に示す。R32 の可燃体積は、吹き出し濃度が 35% 以上の場合には、漏洩から 60s 以降はほぼ一定であることが示された。これは、可燃濃度の堆積が、吹き出し口直下でのみ発生しており、冷媒が床面に向かって拡散しているからであると考えられる。また、吹き出し濃度漏洩終了時には可燃体積が消失していることが分かった。R32 が微燃性冷媒であることや、燃焼に至る 3 条件に加え、燃焼速度が気流速度以上であるという条件が加わることから、燃焼に至るリスクはいずれも低いものと考えられる。また、吹き出し濃度毎で比較すると、吹き出し濃度の影響が大きいことが、結果から示された。その中でも、これまで採用してきた 25% では全体的に可燃時空積は少ない結果となった。本シミュレーションにおいて、流速を変化させて濃度を調整しているので、流速が可燃時空積に影響を与えるものと考えられる。

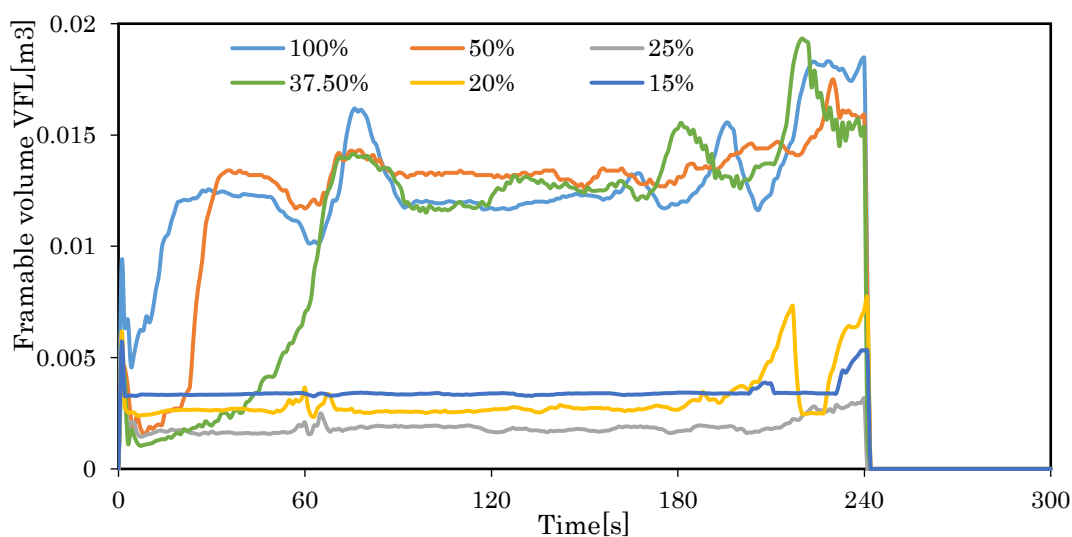


Fig. 2-10 Flammable volume of each leak concentration

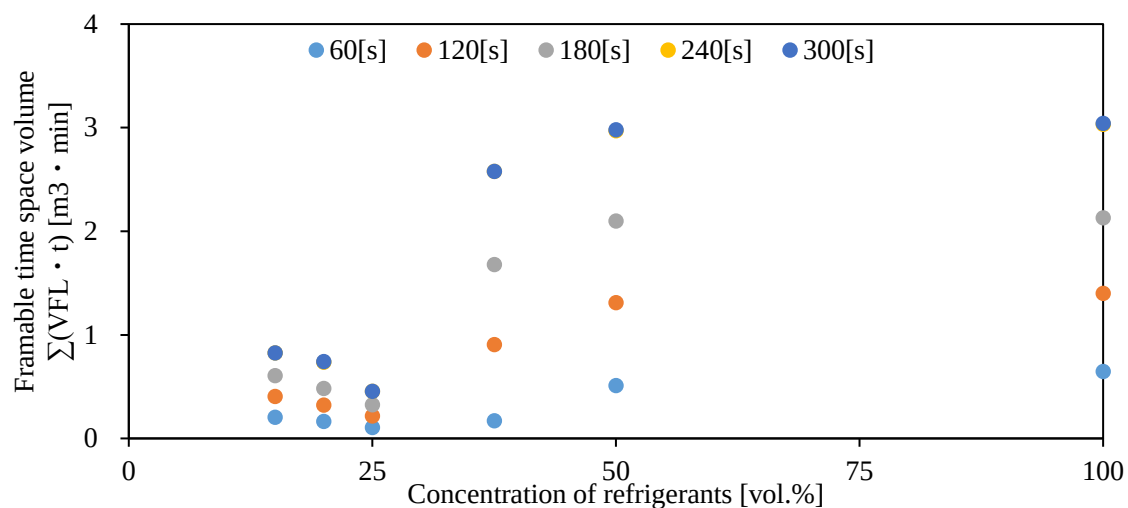


Fig. 2-11 Relationship between refrigerants concentration and flammable time space volume

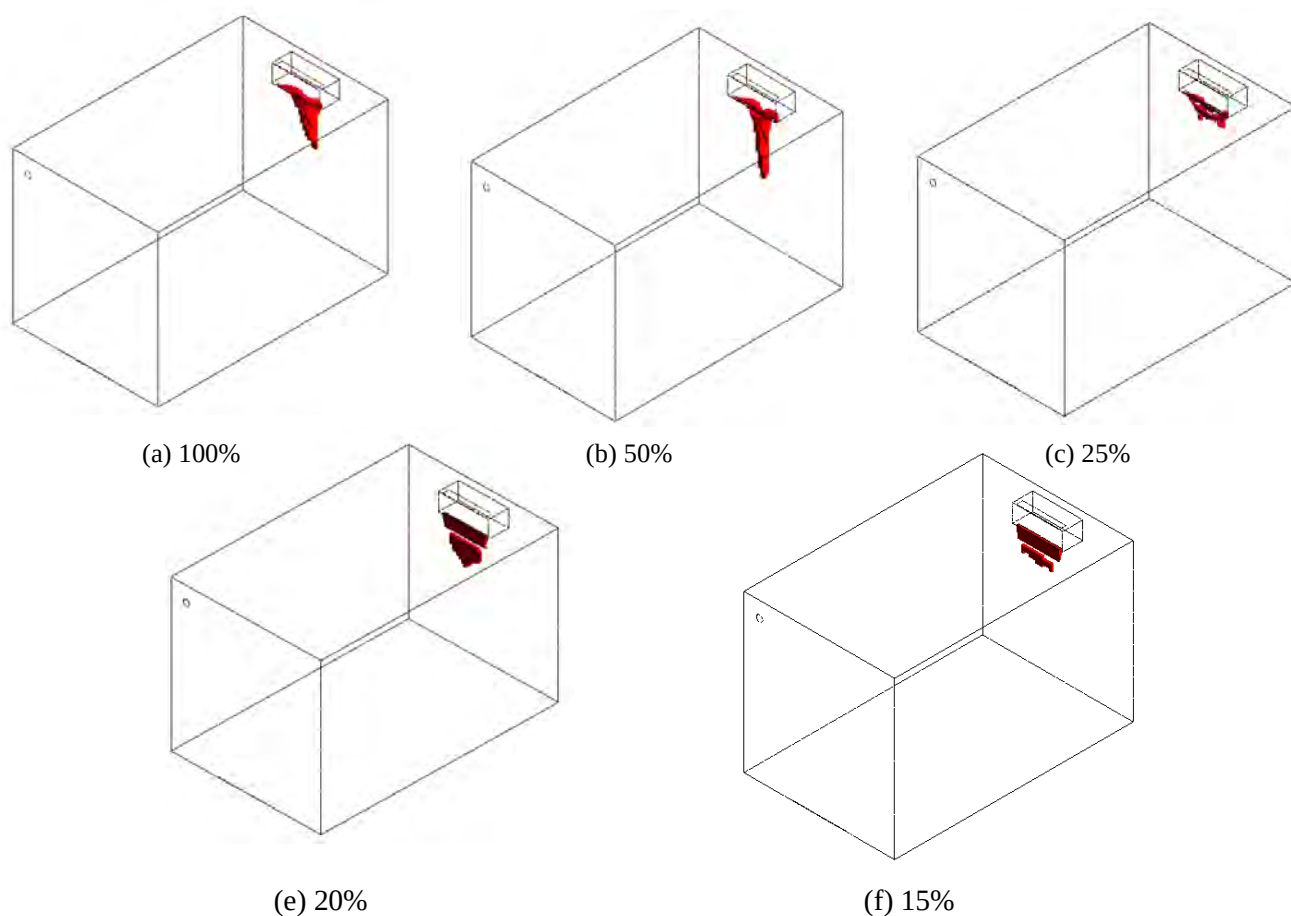


Fig. 2-12 Schematic view of flammable time gas volume (R32)

5) R290 可燃時空積

R290 冷媒の冷媒漏洩シミュレーションを行ったときの可燃体積と可燃時空積について述べる. 500g の R290 を 25% の濃度で漏洩時の可燃体積の結果を Fig. 2-13 に示し, 可燃ガス部を示した図を Fig. 2-14 に示す. Fig.

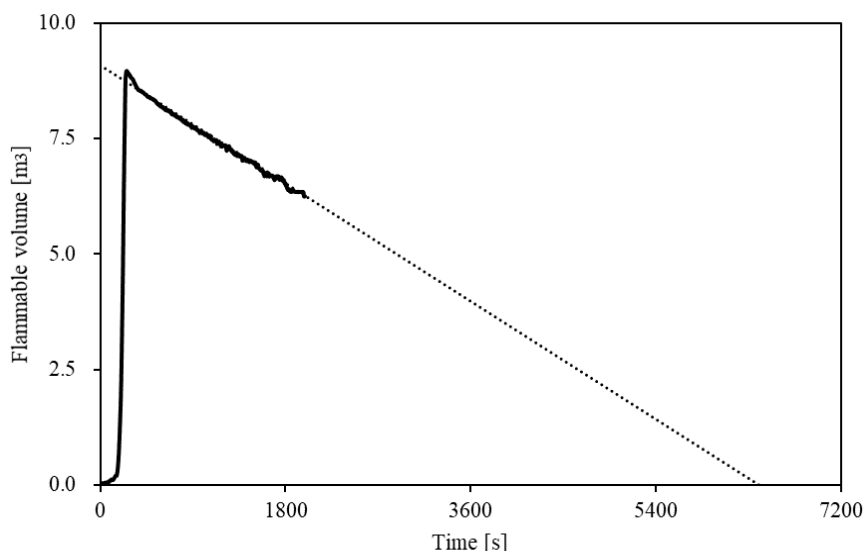


Fig. 2-13 Flammable volume

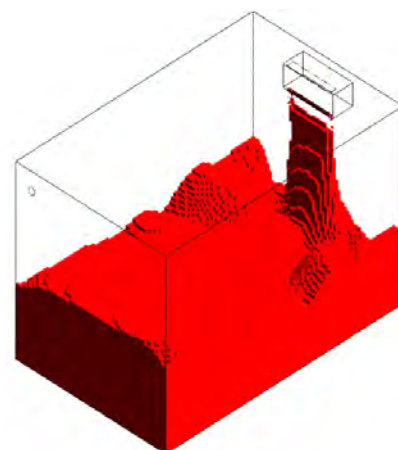


Fig. 2-14 Schematic view of flammable time space volume (R290)

2-13 では、シミュレーションを 1800s まで実行したが、まだ可燃体積は消滅していない。しかし、可燃体積は線形的に減少していくことが分かったため、本図ではその傾きを算出し、破線にて外挿した。R32 と異なり、可燃体積は全体的に大きく、吹き出し停止時に最大で部屋の体積の 38% を占めることが分かった。また、漏洩開始から 1h 経つと 3.98[m³] となり、全体の 17% 程となり、完全に消滅するには 6400s (1h 46min) 必要になることが分かった。本結果から、R290 を 500g 充填することは、非常に危険であると考えられる。

2.2.4 まとめ

本年度の研究において得られた知見を以下に示す。

- 1) 壁掛け室内機からの R32 冷媒の漏洩において、可燃域は空調機の吹き出し口直下にのみ存在し、空調機付近に着火源が存在しない限り、燃焼のリスクは低い。
- 2) 壁掛け室内機からの R32 冷媒の漏洩において、6 箇所の測定点では、R32 冷媒の LFL の 25% 程度の濃度しか存在せず、燃焼リスクは低いことが分かった。

今後は、漏えい解析シミュレーションの精度を改善することを目的として、プロパンと物性が非常に近い二酸化炭素を用いた漏えい実験を積み重ねてゆく予定である。

2.3 可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究

2.3.1 はじめに

可燃性冷媒が燃焼するときのリスク評価は、燃焼事故の発生確率と危害度から評価され、それらの関係をリスクマップと称している (Fig. 2-15)。危害度が大きい事故については発生確率を極めて低く抑えなければならないのに対し、危害度が小さい事故については、ある程度の事故発生が許容される。可燃性冷媒が空調冷凍機から漏洩して着火、燃焼する事故のリスク評価を正確に行うためには、危害度評価がされなければならない。

人体への危害度を評価するにあたって指標となりうる項目としては、ISO6184-2 や NFPA68 に定められている爆発強度指数 K_G があり、下記のように定義される。

$$K_G = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3}$$

これは圧力上昇速度の最大値を基にした指標で、ここでの V は空間の容積である。

この K_G について、過去の NEDO プロジェクト²⁻⁶⁾において、容器体積が K_G に与える影響についての検討が行われ、R32 や R1234yf については、0.01m³~1m³ 程度の範囲においては影響があまりないといった報告がなされている。

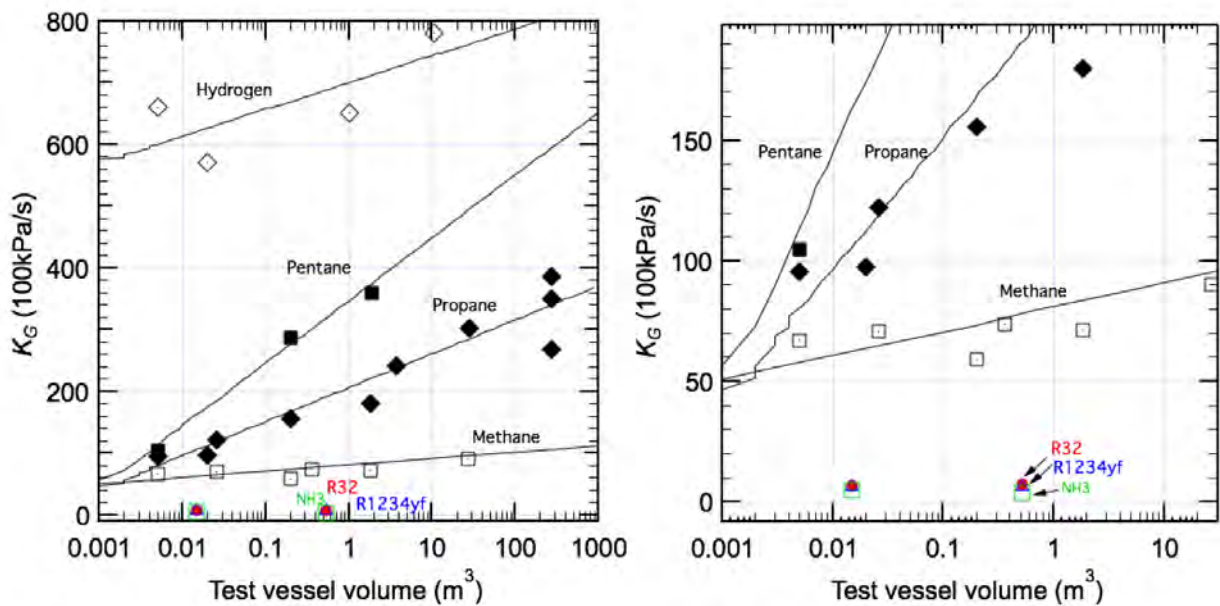


Fig.2-15 Influence of spherical container volume on K_G ²⁻⁶⁾

本研究では燃焼事故の危害度評価を行うため、燃焼現象のシミュレーションを行い、燃焼性の影響、スケール則を明らかにすることを目的としている。具体的には、小型容器内で炭化水素、可燃性フルオロカーボン冷媒が燃焼するときのシミュレーションを行い、燃焼性の強さと、燃焼時の最大圧力や圧力の上昇速度の関係を整理することを目指としている。

2.3.2 小型容器における燃焼実験

燃焼実験を行うため、小規模容器を作成した。これは圧力上昇や火炎伝播を直接計測するだけでなく、後述の燃焼シミュレーションとの比較検討を行うことも目的としている。

装置の概略図・写真を Fig. 2-16 に示す。容器は内径 310mm、内寸高さ 400mm の円筒形状 (容積:30.2L) をしており、底面から 150mm の高さの側面に、放電点火用の電極、圧力計、高速度カメラによる撮影用の窓を設置している。実験の際は、真空引きした容器内に、マスフローコントローラーを用いて冷媒および空気を導入し混合する。容器天面には排気ポートが設けられており、排気はフッ化水素等を除去するスクラバーを介して外部に放出される。これにより、燃焼によるガスの膨張によって容器に過剰な圧力がかかることを避けている。

また、燃焼の反応生成物として生じる水分にフッ化水素が溶解込み、容器などを腐食させることを避けるため、底面に排水ポートを設け、排水や洗浄ができるようにしている。

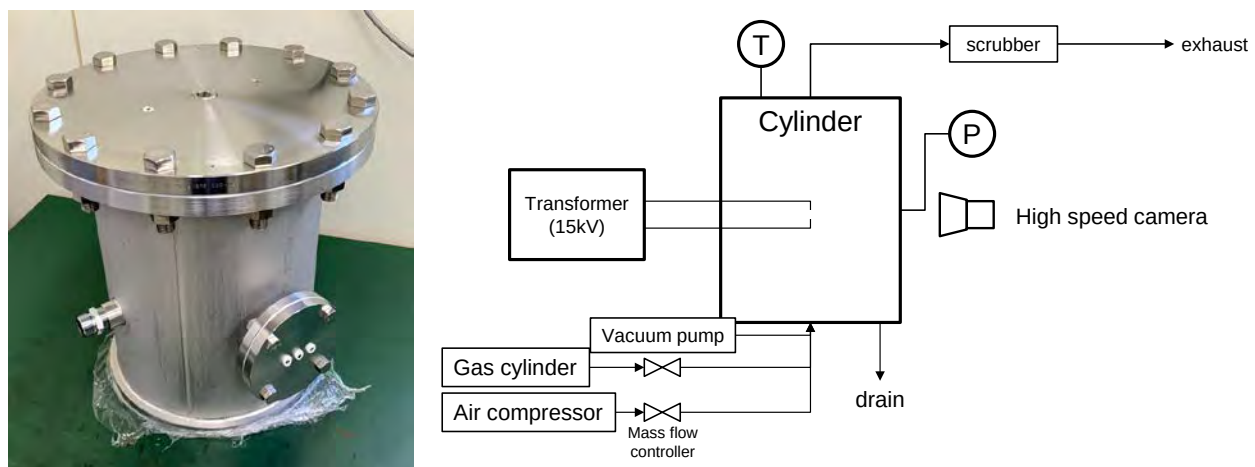


Fig.2-16 Small-scale combustion test equipment

計測については、高速度カメラの輝度解析による温度計測およびそれによる燃焼モデルの検討、GC-MS 等による燃焼後の組成分析などを予定している。

また、複数の容器サイズで同様の検討を行うため、100L 程度の容器を用いて同様の実験を行うことも予定している。

2.3.3 燃焼現象のシミュレーション

燃焼シミュレーションにおいては、漏洩時の室内分布を初期条件とした 3 次元での燃焼シミュレーションを行うことで、実環境での圧力伝播を評価する手法を提案することを目指している。そのため、汎用数値流体シミュレーション(CFD)ソフトウェアによるシミュレーションが可能になるよう、基礎データの調査と手法の検討を進めている。

燃焼性評価については、燃焼速度などの 0~1 次元の現象について、CHEMKIN などの反応解析ソフトウェアにおいて用いられる、素反応データの調査や評価が行われている。これらは多数の素反応についての反応速度を、温度などの関数として表す関数のパラメーター群である。R290 に類似の炭化水素類については、Lawrence Livermore National Laboratory²⁻⁷⁾や National University of Ireland²⁻⁸⁾によりデータベースとして公表されており、またフルオロカーボン類の一部についても P.Papas ら²⁻⁹⁾や D.Burgess ら²⁻¹⁰⁾により評価や実験値との比較が行われている。例としては、Fig.2-17 に示す通り、R32 と空気の混合比を変えた場合の燃焼速度の変化について、複数の反応モデルの検討が行われている。

Table 2-4 に素反応データの例として R32 関連の一部を示す（参考文献 2-10）より一部を抜粋）。これを CFD と統合し、3 次元空間に適用するにあたっては、CFD ソフトウェアの機能を用いて、通常 CFD で行われる圧力や伝熱、物質移動についての式に、0D と同様の反応速度計算による組成の変化の式を加えた連立方程式を CFD の各セルに対して設定し、収束計算を行うことでシミュレーションを行う。

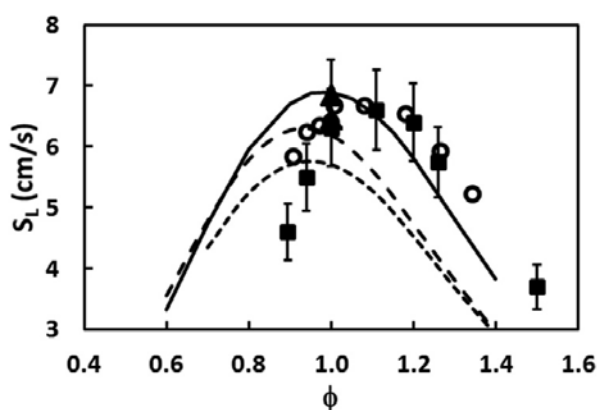


Fig.2-17 Relationship between experimental and predicted values of R32 air mixing ratio and laminar burning velocity ²⁻⁹⁾

Table 2-4 Examples of elementary reaction data related to combustion of R32 ²⁻¹⁰⁾

MD	Fluoromethanes: Thermal Decomposition				A	b	E/R	note	ref1	ref2	Hr
7	CH ₂ SING	+ HF	=	CH ₃ F	1.91E+23	-3.62	896.	xg	73SCH/WAG	nist	-89
8	CHF	+ H ₂	=	CH ₃ F	2.25E+17	-2.85	6543.	ak		nist	-83
9	CH ₂ F	+ H	=	CH ₃ F	3.03E+21	-3.38	1741.	ak		nist	-97
10	CHF	+ HF	=	CH ₂ F ₂	3.64E+24	-4.26	2043.	ak		nist	-72
11	CF ₂	+ H ₂	=	CH ₂ F ₂	1.70E+06	-0.71	20584.	ak		nist	-62
12	CHF ₂	+ H	=	CH ₂ F ₂	2.75E+06	-0.32	3870.	ak		nist	-99
13	CHF ₃	+ M	=	CF ₂ + HF	2.39E+30	-4.00	34751.	xg	91HID/NAK	nist	61
14	CF ₃	+ F	=	CF ₄	1.60E+39	-7.90	4504.	xk	86PLU/RYA	nist	-130

NN	Fluoromethyls: Oxidation				A	b	E/R	note	ref1	ref2	Hr
1	CH ₂ F	+ O ₂	=	CHF:O + O + H	2.26E+09	1.14	14343.	r CF ₃	dH	nist	28
2	CHF ₂	+ O ₂	=	CF ₂ :O + O + H	2.26E+09	1.14	8304.	r CF ₃	dH	nist	
3	CF ₃	+ O ₂	=	CF ₃ O + O	2.26E+09	1.14	10820.	k		nist	21
4	CH ₂ F	+ O	=	CHF:O + H	5.70E+13	0.00	0.	r CH ₃	CF ₃	nist	-91
5	CHF ₂	+ O	=	CF ₂ :O + H	3.70E+13	0.00	0.	r CH ₃	CF ₃	nist	-103
6	CF ₃	+ O	=	CF ₂ :O + F	1.87E+13	0.00	0.	x	89TSA/BEL	nist	-81
7	CH ₂ F	+ OH	=	CH ₂ O + HF	2.50E+13	0.00	0.	r CH ₃		nist	-95
8	CHF ₂	+ OH	=	CHF:O + HF	2.50E+13	0.00	0.	r CH ₃		nist	-105
9	CF ₃	+ OH	=	CF ₂ :O + HF	2.00E+13	0.00	0.	r CH ₃		nist	-115
10	CH ₂ F	+ HO ₂	=	CH ₃ F + O ₂	3.00E+12	0.00	0.	r CH ₃		nist	-49
11	CHF ₂	+ HO ₂	=	CH ₂ F ₂ + O ₂	3.00E+12	0.00	0.	r CH ₃		nist	-50
12	CF ₃	+ HO ₂	=	CHF ₃ + O ₂	2.00E+12	0.00	0.	r CH ₃		nist	-59
13	CH ₂ F	+ HO ₂	=	CHF:O + OH + H	1.50E+13	0.00	0.	r CH ₃		nist	-24
14	CHF ₂	+ HO ₂	=	CF ₂ :O + OH + H	1.50E+13	0.00	0.	r CH ₃		nist	-37
15	CF ₃	+ HO ₂	=	CF ₃ O + OH	1.00E+13	0.00	0.	r CH ₃		nist	-32

参考文献

- 2-1) M. Hu *et al.*, Experimental and numerical simulation analysis of R-290 air conditioner leak, Int. J. Ref., 90 (2018), pp.163-167.
- 2-2) O. Kataoka, et al: "Flammability evaluation of HFC-32 and HFC-32/134 under practical operating conditions", International Refrigeration Conference, Purdue, July 1996.
- 2-3) "建築基準法第 28 条・建築基準法施工令第 20 条の 2".
- 2-4) 片岡ら, "可燃冷媒の安全性規格の理論的背景", 代替冷媒と環境 国際シンポジウム, 2000.
- 2-5) 服部ら, "室内空間における冷媒漏洩濃度実測と数値解析の手法の確立", 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 33, No. 2, (2016), pp. 133-142.
- 2-6) 日本冷凍空調学会: 「微燃性冷媒リスク評価研究会 最終報告書」, pp.100-121 (2016)
- 2-7) Lawrence Livermore National Laboratory: <https://combustion.llnl.gov/> (2019)
- 2-8) National University of Ireland: <http://c3.nuigalway.ie/> (2019)
- 2-9) P. Papas, S. Zhang, W. Kim, S.P. Zeppieri, M.B. Colket, P. Verma: Proceedings of the Combustion Institute 36 (2017) pp.1145-1154
- 2-10) D.R.F Burgess, Jr., M. R. Zachariah, W. Tsang, and P.R. Westmoreland: "NIST Technical note 1412" (1995)

第3章 公立諏訪東京理科大学の進捗

3.1 はじめに

2016年のモントリオール議定書キガリ改正³⁻¹⁾を受け、わが国は2011-13年度比で85%のHFC排出削減を求められている。現行冷媒をそのまま適用するのであれば、2029年にはこの目標値をクリアできなくなるとされており³⁻²⁾、HFC削減は待ったなしの状況となっている。そこで抜本的な対策として、現行冷媒からプロパン等の次世代冷媒に転換することを現実的に考えなければならない。しかしこれらの次世代冷媒の多くは強燃性を示すので、実用化のためにはプロパン等の漏洩に起因する火災・爆発シナリオを想定し、これに伴う物理的リスク（フィジカルリスク）を社会的に受容できるレベルまで低減させる必要がある。本学ではこの観点から、「実使用環境における着火源を考慮した次世代冷媒の燃焼に係るフィジカルリスク評価手法の確立」と題して、次世代冷媒を搭載した家庭用空調機器及び内蔵ショーケースの業務用冷凍冷蔵機器の使用時に、着火源となりうる機器及び現象の評価手法の開発を目的とした研究開発を開始した。これにより、次世代冷媒適用を見据えたリスクアセスメントにおいて重要となる着火確率を、従来よりも精密に評価可能になると期待される。2018-2020年度は次世代冷媒の中でも特に炭化水素系自然冷媒に注目しており、そのうち2018年度は、一般家電等の電気機器の通常使用によって、空調機器から漏洩・滞留したプロパンへの着火性を文献・Web及び実験により評価した。

なお着火源の選定にあたっては、一般社団法人日本冷凍空調工業会（以下、日冷工）が実施する、家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器のリスクアセスメント結果と密接に連携している。本研究はNEDO事業「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」の一環として実施されるものであり、共同提案機関である国立大学法人東京大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下、産総研）安全科学研究部門と密接に連携して、実験データおよび構築するフィジカルリスク評価手法の精度及び信頼性向上を図る。

3.2 本研究の構成

本研究は大きく分けて以下の2本の柱からなる。

(1) 機器使用時に問題となる着火源のスクリーニングと着火源モデルの構築

家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器の冷媒を、次世代冷媒として期待されている強燃性の炭化水素系自然冷媒に転換した場合を想定し、実際の環境で着火源となりうる機器や現象を抽出する。抽出された着火源を着火機構ごとにカテゴリー分けし、カテゴリーごとに着火機構のモデル（以下、着火源モデル）を構築する。

2018年度は、主に家庭用空調機器の使用時を想定して、着火源候補となる電気機器を、日冷工によるリスクアセスメント結果をもとに抽出し、機器に用いられている、着火源となる恐れのある電気部品ごとに分類した。各電気部品の着火能力を文献およびWebサイトをもとに調査し、プロパンの最小着火エネルギーと比較して評価した。この結果と、先に抽出された家電製品を分解調査した結果から、各電気機器の着火能力を評価した。次節以降でその詳細を述べる。

(2) 各種着火源による次世代冷媒のフィジカルリスク評価

上記(1)で構築された着火源モデルに基づき、主として実験により着火可能性に関するデータを取得・蓄積する。共同提案先である東京大学及び産総研安全科学研究部門と密接に連携して知見を共有する。得られたデータをもとに、炭化水素系自然冷媒やHFC系・HFO系微燃性冷媒等の次世代冷媒の着火特性について、学術的に一般性のある評価手法を確立する。

2018年度は、文献およびWebのみでは着火性が評価できなかったもののうち、壁面の照明スイッチの動作による着火性評価を試みた。照明スイッチの動作による着火は、照明スイッチの接点部で生じる放電によって発生すると考えられるので、まず接点が格納されているケーシング内へのプロパン流入の可能性を実験的に調べた。次いで、接点での放電エネルギーを電圧・電流の測定結果から見積もり、実際に着火実験を行って、着火の有無及びその機構を学術的に検討しまとめた。次節以降でその詳細を述べる。

3.3 着火源の抽出と着火能力の評価手法

3.3.1 着火源の抽出

日冷工にて実施されている，家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器へのプロパン導入に係るリスクアセスメントにおいて，着火リスクをさらに詳細に検討する必要があるとして挙げられた機器を，まず大項目としてその本質的な着火機構から「裸火」「高温表面」「電気スパーク」に分類した．2018年度は，このうち「電気スパーク」を着火要因とする機器について，特に家庭用空調機器との同時使用を想定して着火性の評価を行うこととした．Table 3-1 に評価対象とした電気機器の一覧を示す．これらの電気機器に搭載されていると考えられる電気部品のうち，電気スパークを生じると考えられるものとして，「接点リレー」及び「ブラシモータ」を対象とした．さらに，プリンターや DVD 再生機器などに用いられている「レーザー」も評価対象とした．Table 3-1 に示した電気機器内にこれらの部品が使用されているか否かを分解調査により調べるとともに，これらの部品による放電エネルギーを文献および Web 調査により見積もることとした．

Table 3-1 List of general appliances which are expected as the ignition source for propane.

Category	Name of general appliance	Category	Name of general appliance
Electrical relay	Refrigerator	Charged	Printer
	Dehumidifier		Electrostatic discharge
	Washing machine		Fan
	Exhaust fan	Brush motor	Vacuum cleaner
	Vacuum cleaner		Hair dryer
	Air cleaner		Plugging in/out of outlet
	Hair dryer	Human operation	Wall-mounted lighting switch
	Electric carpet		Air cleaner
	Printer	General appliances	Humidifier
	Electric pot		Cell phone
	Rice cooker		PC
	Liquid crystal television		Lighting equipment
	Audio&Video equipment		Refrigerator
	Phone		Freezer
	Fax		Dishwasher
Thermostat	Refrigerator		Phone
	Table with an electric heater		Television
	Electric stove		Exhaust fan
	Toaster		Fan
	Microwave		Vacuum cleaner
	Hair dryer		Hair dryer
	Electric pot		Tracking

3.3.2 着火性評価の考え方

可燃性ガスの着火性を議論するには，一般的にはエネルギー供給源周囲に可燃性混合気が形成されるかどうかと，そのエネルギー供給源が可燃性混合気を着火させるだけのエネルギーを有しているかどうかで評価できる．前者は燃焼範囲，後者は（最小）着火エネルギーという物理量を用いて評価される．ここで，（最小）としたのは，着火エネルギーは可燃性混合気の濃度に依存するので，最小着火エネルギーのみで評価すると，過大に着火しやすいと評価してしまう可能性があるためである．

一般に最小着火エネルギーは、静穏な可燃性ガス中で容量性火花放電を用いて測定されることが多い。例えば Lewis and Elbe³⁻³⁾は、火花放電の時間を $10^{-8}\sim 10^{-7}$ s と見積もっている。Strehlow³⁻⁴⁾は、最小着火エネルギーの実験的な決定に際して、空気コンデンサを用いた自発放電では、貯蔵エネルギーの最高 90 % 程度が 10^{-5} s 以内に火花として放出されるとしている。しかし本研究では上述の通り、各種電気機器に使用されている接点リレーやブラシモータを対象としているので、容量性放電とは放電時間が異なると推測される。木下³⁻⁵⁾は各種電気機器からの火花による可燃性ガスへの着火性について実験的に評価しているが、その中で、“始動リレーの接点においては、 $10^{-3}\sim 10^{-2}$ s の時間内にエネルギーが放出され、「臨界着火時間 (10^{-4} s 程度)」以内に放電エネルギーのすべてが放出されない”としている。ここで「臨界着火時間」とは、“放電等による火炎核が安定な火炎伝播に移行するために必要な時間”としている。この時間はおよそ 10^{-4} s に相当するとされているが、その根拠として Strehlow³⁻⁶⁾はプロパン-空気混合気の火炎をシュリーレン撮影した結果をもとに、火花放電が生じてから相当時間 (約 10^{-4} s) 経過してなお、エネルギーがある臨界値以上であれば、火花放電で生じた初期火炎は真の火炎に発達し、それ以下であれば初期火炎からの熱は電極へ損失して、火炎伝播が中断され消滅することを挙げている。

これとは別に、放電のメカニズムの面からこの「臨界着火時間」の妥当性について検討した。放電プラズマの点火特性に関する研究において、いくつかの独立した研究論文で以下のことが報告されている。例えば針-平板電極での放電では、正極性の電圧を加えた場合、まず放電開始電圧でバーストパルスコロナ放電が発生する。その後電圧の上昇とともに、ストリーマ放電、グロー放電に成長し、最終的にスパーク放電になるとされている³⁻⁷⁾。また、渡辺ら³⁻⁸⁾は、放電現象の中で荷電粒子、ラジカル、準安定原子や分子などが生成され燃焼の開始や維持・促進に関与し、これらは特に非平衡プラズマ (ストリーマ放電) の高電界部で生成され、その中でも OH ラジカルは燃焼に大きく寄与していると述べている。

本研究で対象としたような、一般家電製品のリレー接点やブラシモータ等で発生する放電は基本的にアーク放電 (スパーク放電) であるので、放電のごく初期にはストリーマ放電が生じていると考えられる。ストリーマ放電は非熱平衡プラズマを生成するが、この非熱平衡プラズマによる燃料への点火機構について、Lou ら³⁻⁹⁾は“まず非熱平衡プラズマにより燃料が酸化されてラジカルが生成され、この酸化過程での発熱反応で温度が上昇し、その温度上昇と生成されたラジカルにより化学反応が開始・促進され、点火に至る”と説明している。田上ら³⁻¹⁰⁾はその妥当性を検証するために、レーザー誘起蛍光法 (LIF) を用いて、非熱平衡プラズマによる OH などのラジカル生成特性を実験により調べており、OH ラジカルは減衰時定数として $150\text{ }\mu\text{s}$ を得ている。また、Cathey ら³⁻¹¹⁾も OH ラジカルは LIF 計測を行っており、可燃性混合気中では $100\text{ }\mu\text{s}$ となることを報告している。これらの結果は、言い換えれば、放電開始から $100\sim 150\text{ }\mu\text{s}$ 程度までの間に、OH ラジカルが反応により消費されることを表していると推測され、上述の臨界時間と時間オーダーがほぼ一致する。

以上により本研究では、リレーの接点やブラシモータ等で生じるアーク放電について、臨界着火時間内に臨界エネルギーを超えるエネルギーが与えられた場合に着火が達成されるものと考え、その臨界着火時間は 10^{-4} s ($100\text{ }\mu\text{s}$) であるとして、以下、各電気部品によるプロパンへの着火性を評価した。

3.4 各種電気部品によるプロパンの着火性評価

1) 接点リレー

(a) 接点リレーにおける放電エネルギー

接点リレーにおける放電を調べた研究例を文献により調査した。鳳ら³⁻¹²⁾は、通信障害の原因となる接点開離時のアーク放電火花を消去するための回路を設計するために、アークエネルギーを実験により求めており、試験回路は供試接点 (電話用継電器)、無誘導抵抗 (カーボンランプ)、直流電源 (48 V) からなっている。接点材質は Pt-Pt, Pd-Pd, PGS-PGS, GS-GS, Pd-Au である (Pt: 白金, Pd: パラジウム, Au: 金, GS: 金・銀合金, PGS: 白金・金・銀合金)。まず、アーク発弧率と接点電流の関係がまとめられており、これによると、接点電流が 1.4 A 未満の場合、アーク継続時間はおおむね $100\text{ }\mu\text{s}$ 以下となっている。接点材質ごとにアーク継続時間と接点電流の関係もまとめられているが、上述の接点電流とアーク継続時間の関係は接点材質に関係なく認められることから、接点材質によらず接点電流がこの値未満であればアーク放電は臨界着火時間内に終了するので、アークエネルギーはほぼすべて着火に寄与すると考えられる。鳳

らはアークエネルギーと接点電流の関係も明らかにしており、その結果から、接点材質にも依存するが 0.6 A 程度以上の接点電流であればプロパンの最小着火エネルギーを超えるエネルギーを生じる可能性があるを読み取れる。

制御容量 2 A 超のパワーリレーについても、既報³⁻¹³⁾の電流電圧波形の測定結果から放電エネルギーを推算した。この測定結果において、パワーリレーの定格は DC 30 V, 10 A と AC 250 V, 10 A であり、接点材料は銀・インジウム・スズ (AgInSn) と銀・酸化カドミウム (AgCdO) である。放電時間はおよそ 0.65 ms, 電力は約 70 W であった。この放電時間は臨界着火時間よりも長いので、電力値に臨界着火時間 (10^{-4} s) を乗じて臨界着火時間内に生じたエネルギーを求めると約 7 mJ となり、最小着火エネルギーを 1 桁上回る。

制御信号を主回路から検出する電磁コンタクタについても、接点分離時のアークエネルギーが調べられている³⁻¹⁴⁾。接点材料は銀とニッケルの合金で、電圧は DC 100V, 閉成時電流は 2, 5, 10, 15, 20, 30 A で測定されている。このうち閉成時電流 5 A の場合、アークエネルギーは 0.27 J であったと報告されているが、アーク継続時間が臨界着火時間よりも長い (約 2.4 ms) ので、このエネルギーすべてが着火に寄与するわけではない。そこで、測定されている電力 - アーク継続時間の関係から臨界着火時間内に生じた電力を読み取り、これに臨界着火時間に乗じてアークエネルギーを求めると 6 mJ となった。この値はパワーリレー同様、プロパンの最小着火エネルギーに比べて 1 桁大きい。以上のことから、リレー等の接点を有する電気部品の接点部でアーク放電が生じた場合、放電エネルギーだけで見れば着火の可能性は否定できず、特にパワーリレーや電磁コンタクタの接点での放電の場合は、プロパンの燃焼範囲全体にわたって着火できるだけのエネルギーが臨界着火時間内に放出されると考えられ、通常の有接点リレーよりも着火の可能性は高いと評価できる。

着火特性に及ぼす接点材質の影響³⁻¹²⁾については、Pd-Au の組み合わせの場合が最も小さい接点電流でアークを生じる結果となっており、供試接点種類の中では最も着火性が高いと考えられる。Pt-Pt の場合は接点電流が 1.4 A よりも大きいので、放電エネルギーのすべてが着火に使われるものではないと考えられることから、着火の可能性はその他の材質の場合に比べて小さいと考えられる。

(b) 接点リレーの放電エネルギーに及ぼす負荷種類の影響

リレーの閉成時に生じる突入電流波形の継続時間に及ぼす負荷の影響は、文献³⁻¹⁵⁾に記載されている。例えば白熱ランプであれば約 0.1 s, モータであれば約 0.2-0.5 s, コンデンサであれば約 0.01-0.03 s 程度であり、いずれも臨界着火時間よりも長い。したがって、これらの電気機器では放電エネルギーがすべて着火に寄与するわけではないと考えられ、着火の有無は臨界着火時間内に消費されるエネルギーで評価する必要がある。

この文献に記載されていた、接点材質が金と銀の場合における最小のアーク電圧及びアーク電流の値をもとにエネルギーを求めると、いずれの負荷の場合も、プロパンの最小着火エネルギーよりわずかに大きな値 (0.32-0.36 mJ) を示した。したがってプロパン - 空気混合気の濃度によっては、これらの負荷を接続した場合の接点リレーでの放電によって着火する可能性は否定できないと考えられる。

2) ブラシモータ

ブラシモータの放電波形を測定した一例として、伊里³⁻¹⁶⁾が実施した直流モータの高速回転時の整流現象とブラシ摩耗に関する研究がある。本研究では電流電圧波形を観測し、その結果をもとにアーク継続時間、アーク電圧、残留電流と回転速度の関係がまとめられている。アーク継続時間及び残留電流は、回転速度 3000 rpm 付近で最小値をとったのち増加に転じ、アーク電圧は回転速度に対してほぼ一定である結果が報告されている。そこで、最もエネルギーが小さいと思われる、回転速度 3000 rpm のときの電流・電圧・アーク継続時間を読み取ると、それぞれ 17 V, 0.55 A, 37 μ s であったので、これよりエネルギーは 0.35 mJ となる。アーク継続時間が 100 μ s 未満であるから、このエネルギーはすべて着火に寄与すると考えられるので、先述のパワーリレーや電磁コンタクタほどではないが、濃度によってはプロパンを着火させる可能性があると考えられる。

3) レーザー

プリンターや CD・DVD 再生機器等に用いられているレーザーも、着火源として懸念されている。レー

ザーは可視光線であり、DVD プレーヤーのそれは 650 nm、ブルーレイプレーヤーでは 405 nm とされている³⁻¹⁷⁾。これに対し、プロパンの吸収帯³⁻¹⁸⁾は 3370 nm (吸収率 90.6%)、6800 nm (吸収率 19.7%) であるから、レーザー照射部に可燃範囲のプロパンが存在していたとしても、そのエネルギーを吸収することはない。よって、レーザーは着火源にはならないと考えられる。

3.5 各種電気機器によるプロパンの着火性

3.4 節で、電気部品として「接点リレー」「ブラシモータ」が使用されている場合、これらの放電発生個所がプロパン - 空気混合気に暴露されていれば、濃度によっては着火の可能性がある、特にパワーリレー及び電磁コンタクタの接点付近ではいかなる濃度でも着火できるほどの大きなエネルギーが生じると推測された。そこで、先に抽出した着火源候補となる各種電気機器について、いくつかを実際に分解調査するとともに、いくつかについては Web 上に掲載されている分解写真を参考に、着火源となる恐れのある電気部品の存在と、放電発生予測箇所へのプロパン - 空気混合気の侵入可能性を検討して、着火性を評価した。

1) インクジェットプリンター

市販のインクジェットプリンター (EPSON, EP-806AR) を分解し、3.4 節で述べた着火源となりうる電気部品の調査を行った。プリンター内には紙送りのブラシモータが 2 個、インクカートリッジを動かすためのブラシモータが 1 個見つかった。インク吐出制御と紙送り制御のために 2 個の電子基板があったが、いずれにも接点リレーは使用されていなかった。以上のことから、インクジェットプリンターの場合、ブラシモータが存在することによる着火の可能性があると考えられる。

2) 扇風機

市販の扇風機 (三菱電機製, Summer life R30C-W) を分解し、着火源となりうる電気部品の調査を行った。機器内部にはブラシレスモータが用いられており、ブラシレスであることからこれによる着火の可能性は小さい。操作スイッチ部には接点があり、ここでは電磁コンタクタあるいは接点リレーと同様の放電が生じると考えられるので、これによる着火の可能性は否定できないとみられる。なお、今回分解調査したものは古い年式のものであるが、これと異なり扇風機の動作を電子制御するものが現在では広く流通している。この場合、電子基板を内蔵しているものと思われ、ここで接点リレーが使用されていれば、これを放電源として着火が生じる可能性は否定できないと考えられる。

3) 電子レンジ

市販の電子レンジ (SANYO, EM-LP1) を分解し、着火源となりうる部品の調査を行った。まずターンテーブル駆動用のモータを発見したが、このモータは 6 rpm 定格であり、この回転数ではアーク放電は発生しないと考えられる。また、モータはプラスチック製の歯車に直結されているため、この点から見ても着火性の放電が生じるとは考えにくい。これとは別に、庫内にはサーモスタットが使用されていた。サーモスタットはバイメタルを使用した接点スイッチであり、過去にエチルエーテルがサーモスタットからの火花によって引火した事例が報告されている。また、そのほかにも庫内からは接点部品が見つかった。これらのことから、電子レンジについては、サーモスタットの存在によりプロパンの着火源となる可能性は否定できないと考えられる。

4) 掃除機

市販の掃除機 (TWINBIRD, FW3K167) を分解し、着火源となりうる部品の調査を行った。供試掃除機にはユニバーサルモータが使用されていた。これは整流子とブラシを持つため、アーク放電や機械火花を生じる。実際にこのユニバーサルモータを動作させたところ、空気中における放電の発生が確認できた。また、インターネット上に掲載されていた別の掃除機の分解写真³⁻¹⁹⁾を調べたところ、基板上にリレーが使用されていた。この基盤はモータ付近に設置されており、密閉性は低い。以上のことから、ブラシモータで生じるアーク放電や、基板上のリレーで生じる放電等により、プロパンを着火させる可能性は否定できないと考えられる。

5) 洗濯機

インターネット上に掲載されていた洗濯機の分解写真³⁻²⁰⁾ (TOSHIBA AW70DG, National NA-F50Z8) から、使用されていた電気電子部品を推定した。いずれも電子基板が操作パネルの下にあり、そこに接点リレーが用いられていたが、洗濯機は漏電防止のために基板上に樹脂を充てんして防水加工が施されている。

インターネット上の写真からは、電気部品が樹脂によって完全に覆われているわけではないものの、密閉性は高いものと推測される。したがって洗濯機に使用されている接点リレーは着火源にはなりにくいものと推測される。

6) 除湿機・空気清浄機

インターネット上に掲載されていた除湿機（CORONA, CD-J107X）の分解写真³⁻²¹⁾及び空気清浄機（SHARP KC-Y65, KC-B50, Panasonic f-vxe60）を実際に分解した結果から、使用されていた電気電子部品を推定した。洗濯機と同様、操作パネルの下に電子基板があり、有接点・無接点リレーともに使用されているようである。洗濯機とは異なり防水加工があまり施されていない。したがって基板部分の有接点リレーによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

7) ドライヤー

インターネット上に掲載されていたドライヤーの分解写真^{3-22), 3-23)}（National EH534, Nobby NB1902）から、使用されていた電気電子部品を推定した。基板は持ち手の内部に存在し、接点リレーの存在も確認された。ブラシモータも確認された。以上により、ドライヤーによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

8) 電気ポット

インターネット上に掲載されていた電気ポットの分解写真³⁻²⁴⁾（タイガー PDK-G）から、使用されていた電気電子部品を推定した。基板は製品の底部に存在し、接点リレーの存在も確認された。電気ポットやケトルの底面は密閉性が低いものが多く、また、サーモスタットやサーミスタ等も使用されている可能性がある。以上により、電気ポットによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

9) 電気炊飯器

インターネット上に掲載されていた電気炊飯器の分解写真³⁻²⁵⁾（National SR-SS18A, タイガー JAQ-A550）から、使用されていた電気電子部品を推定した。基板は製品の側面下部に存在し、接点リレーの存在も確認された。以上により、電気ポットによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

10) 電気カーペット

一般に電気カーペットは操作部が床に設置されることが多く、インターネットに掲載されていた写真³⁻²⁶⁾では、操作部にリレーが組み込まれていたものも存在した。熱線によってカーペット全体を暖めているため、回路全体の抵抗が大きく、接点部での放電が起こりやすいと考えられる。また、サーモスタットによって温度を管理しているものが多く、サーモスタットによる可燃性気体の火災事例も存在するため、電気カーペットによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

11) レーザープリンター

印刷部以外はインクジェットプリンターと同じ機構であるので、ブラシモータが使用されていると考えられる。したがって、ブラシモータから生じるアーク放電によっては、着火源となる可能性は否定できないと考えられる。これ以外に、感光ドラムを帯電させるためのコロナワイヤー及びレーザーが着火源になる可能性が考えられるが、コロナワイヤーで生じるコロナ放電のエネルギーは 0.1 mJ 未満³⁻²⁷⁾と考えられるので、プロパンの最小着火エネルギーに満たず、着火の可能性は小さいと考えられる。また先述の通りプロパンはレーザーの波長帯に吸収帯を持たないので、基本的にレーザーでの着火の可能性はない。プリンター内のレーザーはレンズで集光されるので、通常のレーザーよりもエネルギーが大きくなるが、それでも約 0.1 MW/cm² 程度³⁻²⁸⁾なので、レーザーブレイクダウン閾値（100 GW/cm²³⁻²⁹⁾）よりも小さい。このため、レーザープリンターはレーザーでの着火の可能性は極めて小さいが、ブラシモータのアーク放電により着火する可能性がある。

3.6 各種電気部品及び一般家電製品によるプロパンへの着火性に関する調査のまとめ

3.4 節、3.5 節で述べた、各種電気部品及び一般家電製品によるプロパンへの着火性に関する文献および Web 調査結果及びそこから見える課題をまとめると以下のとおりである。

- (1) 電気部品のうち有接点リレー、ブラシモータが使用されている場合、これらの接点で生じるアーク放電のエネルギーはプロパンの最小着火エネルギーより大きいことから、エネルギーの面だけで見れば着火性は否定できない。特に電磁コンタクタ、パワーリレーの場合は最小着火エネルギーよりも 1 桁

程度大きなエネルギーとなるため、プロパン／空気混合気の濃度範囲によらず着火の可能性がある。レーザーによる着火の可能性は小さい。

- (2) インクジェットプリンター、扇風機、電子レンジについて、実物を分解調査したところ、それぞれ接点リレー及びブラシモータの存在が認められた。これにより、エネルギー的には着火の可能性があるとわかった。
- (3) 洗濯機、空気清浄機、ドライヤー、電気ポット、電気炊飯器について、インターネット上に掲載されていた装置の分解写真から使用されている電気電子部品を調べたところ、着火源となりうる部品の存在が確認され、着火の可能性が否定できないとわかった。
- (4) 上記 (2) (3) の各種電気機器の着火性の評価は、上記 (1) の電気部品の放電エネルギーの推定結果に基づいているが、上記 (1) の放電エネルギーの推定は、限定された負荷（主として抵抗性負荷）の条件におけるものである。しかし、誘導性負荷や容量性負荷の場合は、抵抗性負荷の場合よりも大きなエネルギーになると考えられることから、最も小さいエネルギーと予測される抵抗性負荷の場合の値で着火性を評価することは、安全側の結果を与えると考えられ、評価手法として妥当である。

3.7 照明スイッチの動作によるプロパンへの着火性

3.4－3.6 節では、主として家電製品そのものによる放電による着火性を評価したが、これらが接続されているコンセント部で生じる放電については評価できていない。また、居室内でコンセントに接続する家電製品から独立して使用される機器として室内照明があるが、この照明スイッチは機械的に接点を開閉して動作するので、スイッチ接点部における放電は着火を誘発する可能性がある。これについては文献および Web による検討結果が乏しいため、実験により着火性を評価することとした。本節では照明スイッチを動作させた場合の着火性評価について述べる。

1) 評価の流れ

対象とした照明スイッチは現在日本国内で広く流通している Fig.3-1 に示す 2 タイプ (Type A: Panasonic, WNP5101MW, Type B: Panasonic, WTP50011WP) とした。いずれのスイッチも接点はプラスチック製のケーシング（以下、接点ケーシング）に格納されている。スイッチは通常、居室壁面にあけた穴の中に埋め込まれるので、まず、居室内に漏洩滞留したプロパンがこの壁面の穴及び接点ケーシング内へ流入するか否か、すなわちエネルギー源となる接点ケーシング内にプロパンの可燃性混合気が形成されるか否かを調べる必要がある。そこで、壁面に照明スイッチを取り付けた居室の模型を製作し、模型空間内及び接点ケーシング内のプロパン濃度を測定して、接点ケーシング内へのプロパンの流入特性を調べた。次に、接点開閉時の電流電圧波形を取得し、放電エネルギーを算出した。これを踏まえ、壁面のスイッチ設置部の空間を想定したボックス（以下、スイッチボックス）に、接点ケーシングを含むスイッチ本体を取り付け、スイッチボックス内に所定濃度のプロパンを導入して着火実験を行い、着火性を評価した。以下、それぞれの詳細を述べる。

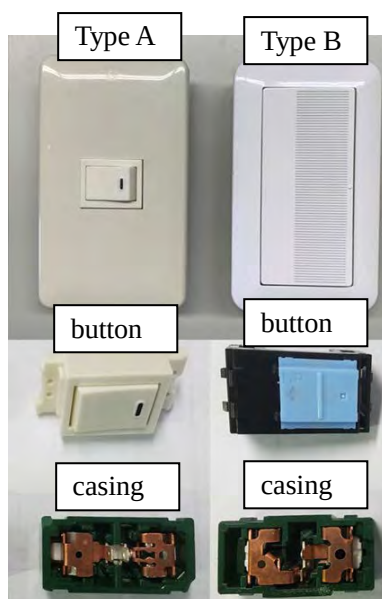


Fig.3-1 Photos of test wall-mounted lighting switches.

2) 模型居室内から接点ケーシング内へのプロパン流入の可能性

1 m 立方のアクリルプールを製作し、その壁面に穴をあけて、接点ケーシングを含むスイッチ本体とこれを支持するスイッチボックスを取り付けた。スイッチの取り付け位置はプール底面から 787.75, 505, 222.25 mm の高さとした。これらの位置はそれぞれおよそ 3/4H, 1/2H, 1/4H (H はプール高さ : 1000 mm) の高さに相当するので、本報告書では以後この表記でスイッチの位置を表すものとする。このプール内に、鉛直下向きにプロパンを漏洩させて、プール内のプロパン濃度を高さ方向に異なる 5 地点で、超音波式ガス濃度計 (第一熱研製 US-II-T-S) を用いて計測した。漏洩地点の床面からの高さは 0, 100, 300, 500, 1000 mm の 5 地点としてそれぞれ濃度計測を行った。漏洩速度は 10 g/min とし、漏洩量は 41 g 及び 87 g とした。これは全量がプール内に漏洩して均一拡散した場合に、プール内のプロパン濃度がそれぞれ燃焼下限 (LFL, 2.1 vol%) 及び燃焼上限 (9.5 vol%) になる量である。ただし、安全性の観点から、プロパンと分子量がほぼ同じであることから漏洩挙動がよく似ていると推測される二酸化炭素を、プロパンの代わりに漏洩させた。プロパン濃度は、超音波式ガス濃度計によってあらかじめ測定した二酸化炭素濃度とプロパン濃度の校正曲線に基づき求めた。

実験の結果、Type A, Type B とともに、いずれの漏洩高さの場合も、1/2H 及び 1/4H の高さに設置されたスイッチの接点ケーシング内への、可燃範囲内の組成をもつプロパン/空気混合気の流入が認められた。プロパンはスイッチのプレートとスイッチ本体の間の間隙からスイッチボックス内に流入し、接点ケーシングにある穴を通して内部へ流入したものと推測される。

3) 照明スイッチ接点における放電エネルギーの測定

Fig.3-2 に示す装置を用いて、照明スイッチ接点における放電エネルギーを測定した。負荷には抵抗性負荷の白熱電球 (40, 60, 100 W) 及び LED 電球 (60 W) を使用した。照明スイッチと負荷との間にカレントモニターを設置して通電時の電流波形を観測するとともに、オシロスコープにてスイッチ両端の電圧を計測した。スイッチ動作は治具を電動スライダに取り付けて遠隔操作で実施した。接点ケーシング内の接点の様子を観察するためにケーシングに穴をあけ、Fig.3-2 に示すように鉛直下方から高速度カメラにて放電の様子を撮影した。なお、接点周囲は空気雰囲気とし、スイッチ押下動作は 1 つの負荷について 10 回実施した。

本実験の結果、接点における放電エネルギーについて以下の事項が明らかになった。

- ① 1 回の押下動作で複数回の放電が生じる場合があった。
- ② いずれの負荷の場合も、プロパンの最小着火エネルギーよりも大きな放電エネルギーを示す場合が認められた。

- ③ 回路開離時のほうが回路閉成時よりも大きな放電エネルギーを示した。ただし、回路開離時は回路閉成時よりも放電時間自体が長くなったので、臨界着火時間内の放電エネルギーに限ると回路閉成時のほうが大きな値を示した。しかしいずれも最小着火エネルギーよりも大きなエネルギーを示す場合が認められた。

以上のことより、接点における放電エネルギーは、接点周囲のプロパン濃度によってはこれを着火させうると推測された。

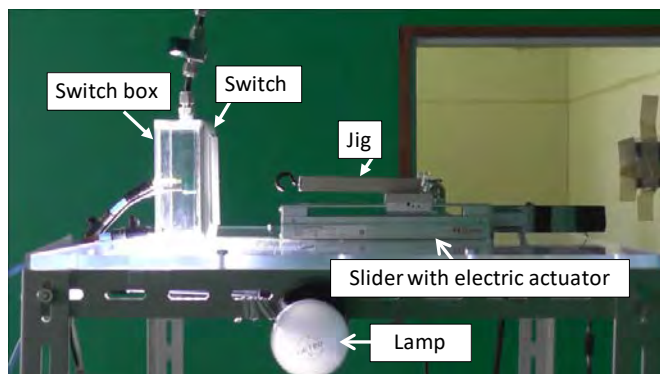


Fig.3-2 Photo of the experimental setup to investigate the discharging energy at the electrical contact of the wall-mounted lighting switch.

4) 照明スイッチ接点での放電による着火実験

以上の結果で、ガス組成および放電エネルギーの面からは、照明スイッチの接点における放電によって着火する可能性があることが分かった。そこで、以下のようにして着火実験を実施した。

着火実験装置は Fig.3-2 とほぼ同じである。安全のため、プロパンはスイッチボックス内のみ導入した。先の濃度計測結果から、スイッチボックス内と接点ケーシング内はほぼ同等の濃度を示したので、スイッチボックス内に可燃濃度範囲のプロパン／空気混合気が存在すれば、接点ケーシングの穴を通してケーシング内へプロパンが流入すると考えた。あらかじめ所定量のプロパンをシリンジに測りとり、これをスイッチボックスに取り付けた導入ポートから導入した。導入量は全量がスイッチボックス内に拡散した場合にボックス内濃度が LFL 及び化学量論濃度となる量として、それぞれ 12 mL, 21 mL とした。本実験では回路負荷は白熱電球 (60 W) のみとし、スイッチタイプは Type B のみとした。着火の有無はビデオカメラ及び目視観察によった。照明スイッチの閉成及び開離に伴う放電エネルギーは上述 2) と同様にして求めた。

ところが本実験では、1つの導入量についてスイッチ押下動作を 60 回繰り返したが、着火は 1 度も認められなかった。放電時の様子を撮影した高速度カメラ画像から接点間の距離を読み取ると、おおむね 0.1-0.4 mm 程度であった。これは、プロパンの消炎距離 (1.7 mm^{3-30}) に比べて 1/10-1/4 程度の値である。また、接点の径は約 2.0 mm 程度で、これも接点間距離に比して 1 桁大きい。

このことから、接点ケーシング内で可燃性混合気が形成され、最小着火エネルギーを超える放電エネルギーが生じているにもかかわらず着火が認められなかった理由は、接点間距離が消炎距離よりも十分小さいためと考えられる。すなわち、放電によって火炎核が生成されるが、それが十分成長する前に接点に衝突して熱損失し、自発的に安定伝播できる限界の半径まで火炎核が成長できなかったことが原因と思われる。

3.8 まとめと今後の課題

一般家電製品によるプロパンへの着火性を文献・Web 及び実験により調べた結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 着火を誘発する電気電子部品として接点リレー、ブラシモータ、レーザーについてその着火能力を文献および web により調査した。その結果、レーザーは着火能力はほとんどないとみてよいが、接点リ

レー及びブラシモータについては着火能力が無視できないと考えられた。特にパワーリレー及び電磁コンタクトの接点におけるアーク放電エネルギーでは燃焼範囲すべてにわたって着火可能なエネルギーとなることがわかった。

- (2) プロパンが漏洩・滞留した空間内で照明スイッチを動作させた場合の着火特性について実験的に評価した。プロパンが室内に漏洩し燃焼範囲の濃度組成となった場合、その濃度組成でスイッチ内部の接点ケーシングまでプロパンが流入することが分かった。スイッチの接点での放電エネルギーは最小着火エネルギーを超える値を示すが、着火実験では着火が認められなかった。この原因は、接点間距離が消炎距離の 1/10 - 1/4 程度であるため、火炎核が接点で熱損失して安定な火炎伝播が持続できないためと考えられた。

今後の課題としては以下の事項があげられる。

- (1) 今回調査した結果のうち、接点リレーでのアーク放電エネルギーの推算は、かなり古い年式の接点リレーを用いた実験結果に基づいている。現在は、省エネ等の観点から突入電流の値が異なる可能性がある。当然、旧式の接点部品を使用した家電製品も未だに市場流通していると思われるので、今回の調査結果は信頼できる結果を与えていると考えられるが、より実際に即した評価を行うためには、現在主流となっている接点部品を調査しそのエネルギーを評価する必要がある、今後これを進めていく予定である。
- (2) コンセントへのプラグの抜き差し時に生じる放電による着火性を実験的に評価する必要がある。この場合は、回路負荷に放電エネルギーが大きく影響されると考えられるので、容量性負荷・誘導性負荷・抵抗性負荷の中から数種類の負荷を選んで放電エネルギーを測定し評価する。
- (3) 国際標準化を見据えると、海外の電圧電流定格に対応した製品による着火性を評価する必要がある。そこで、海外の家電をいくつか取り寄せ、分解調査により使用されている電気部品を調べるとともに、その放電エネルギーを測定して着火特性を評価する。コンセントについても日本製品と同様に、実験により放電エネルギーを求めて着火特性を評価する。

謝辞

本研究の実施に当たり、着火源情報の提供やその他研究内容の妥当性等について、(一社)日本冷凍空調工業会次世代冷媒リスク評価ワーキンググループの皆様から貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 3-1) 経済産業省製造産業局オゾン層保護等推進室：「モントリオール議定書及びキガリ改正の概要について」、https://www.env.go.jp/press/y067-07/ref01_5.pdf, (2017).
- 3-2) 経済産業省製造産業局オゾン層保護等推進室：「モントリオール議定書及びキガリ改正への対応と最近の動向について」、http://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/kagaku_busshitsu/pdf/005_07_00.pdf (2018).
- 3-3) Lewis, B., and von Elbe, G. “Combustion, Flame and Explosions of Gases”, p.346, Academic Press, New York and London, (1961).
- 3-4) Strehlow, R.A., 水谷幸夫訳：「基礎燃焼学」, p.211, 森北出版, 東京(1972).
- 3-5) 木下勝博：「電気による火花や加熱に起因する火災に関する研究」, 工学院大学学位論文, p.58 (1997).
- 3-6) Strehlow, R.A., 水谷幸夫訳：「基礎燃焼学」, p.215, 森北出版, 東京(1972).
- 3-7) チャング ジェン シー：「大気圧プラズマの物理と化学」, プラズマ・核融合学会誌, 82(10), pp.682-692 (2006).
- 3-8) 渡邊正人, 堀田栄喜, 田上公俊, 牛丸浩二, 窪山達也, 森吉泰生：「繰り返しナノパルス放電プラズマ中のラジカル計測と点火特性」, プラズマ・核融合学会誌, 89(4), pp.229-233 (2013).
- 3-9) Lou, G., Bao, A., Nishihara, M., Keshav, S., Utkin, Y.G., Rich, J.W., Lempert, W.R., Adamovich, I.V.: “Ignition of Premixed Hydrocarbon-Air Flows by Repetitively Pulsed, Nanosecond Pulse Duration Plasma”, Proc. Combust. Inst., 31(2), pp.3327-3334 (2007).
- 3-10) 田上公俊, 牛丸浩二, 菅雅裕, 窪山達也, 森吉泰生, 渡邊正人, 堀田栄喜：「繰り返しナノパルス放電プラズマの点火特性に関する研究－非平衡プラズマの点火特性－」, 日本燃焼学会誌, 56(175), pp.59-66 (2014).
- 3-11) Cathey, Cain, J., Wang, H., Gunderson, M.A., Carter, C., Ryan, M.: “OH Production by Transient Plasma and Mechanism of Flame Ignition and Propagation in Quiescent Methane-Air Mixtures”, Combustion and Flame, 154(4) pp.7150727 (2008).
- 3-12) 鳳誠三郎, 渡部泰昭：「接点开離時のアーク放電について」, 電気学会雑誌, 81(875), pp.1331-1337 (1961).
- 3-13) 早田和也, 池上知顯：「リレーの接点間アークの計測」, 平成 17 年度電気関係学会九州支部連合大会予稿集, p.138, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jceek/2005/0/2005_0_138/pdf-char/ja (2005).
- 3-14) 董学博：「電気接点の諸特性に与える周囲気体と圧力の影響」, 日本工業大学研究報告, 46(1), pp.105-108 (2016).

- 3-15) 富士通株式会社ウェブサイト:「リレー技術解説」, <http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fcl/relays/relay-technology.pdf> (2019).
- 3-16) 伊里賢行:「DC モータの高速回転時の整流現象とブラシ摩耗に関する研究」, 日本工業大学研究報告, 47(1), pp.154-157 (2017).
- 3-17) SONY ウェブサイト: <https://www.sony.jp/bd/about/technology/index.html> (2019).
- 3-18) 佐野尊, 竹花立美, 関根和喜:「レーザーと赤外線カメラを用いた LP ガス漏洩検知システムの研究」, 圧力技術, 42(1), pp.36-47 (2004).
- 3-19) K's Memo-Random:” 朝っぱらから掃除機を修理しました”: http://kenshi.air-nifty.com/ks_memorandom/2009/04/post-9deb.html (2019).
- 3-20) Engineers Blog:洗濯機が壊れた話:アルファ・ウェーブ: <https://blog.alphawave.co.jp/eng/index.php?itemid=1744> (2019).
- 3-21) Tom のブログ:6年ぶりの除湿機メンテナンス-その1-: <http://d.hatena.ne.jp/tomtom1ono/20130128/1359321525> (2019).
- 3-22) ナンチャット技術者の凸凹日記:ちよいと分解:ヘア・ドライヤー [電子回路]: <https://rifle.blog.so-net.ne.jp/2014-02-18> (2019).
- 3-23) KEISUKE TABOGAMI KICHIJOJI, TOKYO:美容師必見】ドライヤー (Nobby) の分解後, うまく戻せなくなった時の対処法: <http://www.tabogami.tokyo/archives/1284> (2019).
- 3-24) JapaneseClass:電気分解: <https://japaneseclass.jp/dictionary/%E9%9B%BB%E6%B0%97%E5%88%86%E8%A7%A3> (2019).
- 3-25) 中年男の日記帳:SR-SS18A (National/Panasonic IH 炊飯ジャー) 分解フォトレポート: <https://incomprehensiveness.blogspot.com/2014/09/sr-ss18a-nationalpanasonic-ih.html> (2019).
- 3-26) ホットカーペットを解体 [道具類]: <https://insertyourname.blog.so-net.ne.jp/2015-04-09> (2019).
- 3-27) 児玉勉:「静電気による爆発とその防止対策」, 電気設備学会誌, 29(8), pp.624-627 (2009).
- 3-28) レーザーの仕組みを教えてください - コピーの不思議 Q&A | Ricoh Japan, https://jp.ricoh.com/kouken/science_caravan/QandA/science/qanda6_5.html (2019).
- 3-29) 高橋栄一, 古谷博秀:「レーザー着火研究の基礎と最新動向」, 日本燃焼学会誌, 57(180), pp.112-119 (2015).
- 3-30) 滝澤賢二:「微燃性冷媒リスク評価研究会最終報告書 2. 燃焼特性」, p.30 (2016).

第4章 産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗

4.1 はじめに

本研究開発の目的は、低 GWP かつ安全性に優れた冷媒の開発を支援するため、特にフッ素系冷媒の混合が燃焼特性等の安全性に与える影響を明らかにすることである。具体的には、評価対象として燃焼性の高い低 GWP 冷媒と、燃焼性の低い冷媒の組合せを中心に検討し、国内外で検討されている冷媒の安全性基準を満たす混合組成範囲、例えば、国際標準 ISO817 における「微燃性等級 (Class 2L)」に分類され我が国の高圧ガス保安法における「特定不活性ガス」に位置づけられるガスと同等以上の高安全性となる混合組成範囲を明らかにする。また、低 GWP 冷媒の実用化を見据え、温度、湿度、冷媒の濃度分布等が燃焼性に与える影響を評価し、実用上の燃焼安全性を明らかにする。

今年度は、まず本研究開発で燃焼限界の値を評価する方法をひとつに決定するため、種々の標準規格が採用している種々の燃焼限界測定方法を用いて代表的な冷媒の測定を行った。得られたデータの比較を行い、実用下での燃焼限界値を得るのに最も適当な測定方法を決定した。次に、採用した評価方法を用いて、次世代混合冷媒の代表例であるフルオロオレフィン R1234yf とフルオロアルカン R32 の混合系の燃焼限界の混合比依存性ならびに単体の R1234yf 及び R32 の燃焼限界の温度依存性を評価した。

4.2 燃焼限界測定法の評価

我が国のハロゲンを含むガスの燃焼限界の測定法は、1968 年の高圧ガス保安法通達（以下、「保安法 A 法」と呼ぶ）で定められた耐圧球形容器を用いる方法であるが、これは日本独自の方法であり、データの信頼性の問題及び国際整合化の観点から妥当性の検証が必要と考えられてきた。そのため 2016 年から 2019 年まで、高圧ガス保安協会の委員会において燃焼限界測定法についての検討を行ってきた。一方、現在国際標準に規定されている燃焼限界の測定法としては、ISO10156 及び EN1839T 法で定められた円管を用いる方法、ISO817 及び ANSI/ASHRAE 34 で定められたガラスフラスコを用いる方法、及び EN1839B 法で定められた耐圧球形容器を用いる方法がある。燃焼限界は装置に依存する値であるため、測定法が異なれば燃焼限界値も異なる。更に、これらの実験値と室内ほどの空間での燃焼における燃焼限界値とは有意に異なっている可能性がある。今後この研究開発を進めるにあたり、評価法をひとつに決定する必要があることから、まず種々の測定方法によって代表的な化合物の燃焼限界がどのように変化するか、またそのうちどの方法が最も実環境での燃焼限界を表現しているか調べることにした。

Table 4-1 に、代表的な化合物の燃焼限界の測定値を一覧表にまとめて示す。測定条件は温度 25°C、圧力 1 気圧、湿度ゼロである。ここで、見出しの「520L」とは、内容積 520L（内径 1m）の大規模耐圧球形容器を用いた燃焼限界測定の結果を表わす。「5L」とは、EN1839 B 法を表わすが、可燃判定基準として圧力上昇が初気圧比 0.05, 0.1, 0.2, 及び 0.3 となった場合の値を示す。「2L」とは、保安法 A 法を表わすが、可燃判定基準として圧力上昇が初気圧比 0.1, 0.2, 及び 0.3 となった場合の値を示す。次に、実環境での燃焼限界を表現する値として、内容積 520L の大規模耐圧球形容器を用いた燃焼限界の値を採用し、この値と種々の測定方法との値の差異を調べた。Fig.4-1 に結果をまとめて示す。LFL 値、UFL 値とも、常に ISO817 法は甘め（下限界は高く、上限界は低く）の結果を与え、保安法 A 法及び EN1839B 法の圧力上昇 $\geq 5\%$ 判定（R143a 下限界値を除く）は厳しめ（下限界は低く、上限界は高く）の結果を与えることが明らかになった。また、EN1839B 法で圧力上昇 $\geq 30\%$ 判定とした場合が大規模容器の結果に最も近い結果を与えることが明らかになった。この結果から、本研究開発では今後の燃焼限界の評価は、EN1839 B 法圧力上昇 $\geq 30\%$ 判定によって実施する方針とし、もしそれ以外の測定方法での評価が必要になった場合は、個別に検討することにした。

Table 4-1 Flammability limits determined by four different test methods for nine typical refrigerants (in vol%).

		520L($d=1/4"$, $\Delta t=0.4s$)	5L($d=5mm$, $\Delta t=0.2s$)				2L(0.3Φ Pt)			ASHRAE
		vol%	ΔP ratio				ΔP ratio			vol%
			0.05	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	90deg
C3H8	LFL	2.02±0.02	1.97	2.03	2.03	2.04	1.88	1.89	1.90	2.09±0.04
	UFL	9.75±0.15	11.0	10.7	10.3	10.0	-	10.6	10.5	9.2±0.5
iC4H10	LFL	1.642±0.010	1.63	1.65	1.66	1.67	-	1.56	1.58	1.725±0.02
	UFL		8.9	8.2	7.9	7.7	8.7	8.6	8.5	6.9±0.3
CH4	LFL	4.95±0.15	4.50	4.73	4.92	5.03	4.26	4.65	4.70	5.05±0.10
	UFL	15.8±0.2	16.6	16.2	16.15	16.1	22.2	19.0	17.5	15.1±0.3
R152a	LFL	4.33±0.10	4.29	4.32	4.37	4.40	-	4.1	4.2	4.5±0.1
	UFL	17.1±0.3	18.6	18.2	17.6	17.1	18.5?	18.3?	18.1	16.5±0.7
R143a	LFL	7.25±0.05	7.3	7.5	7.5	7.55	7.0	7.1	7.2	7.55±0.15
	UFL		18.3	17.8	17.1	16.6	19.7	19.3	19.0	16.5±0.5
R32	LFL	13.58±0.10	13.3	13.5	13.6	13.7	12.9	13.2	13.3	14.1±0.3
	UFL	27.6±0.3	27.7	27.4	27.2	27.0	30.5	29.5	29.3	26.6±0.5
NH3	LFL	15.8±0.2	14.4	14.8	15.4	15.8	7.7	9.6	11.7	16.1±0.3
	UFL	29.7±0.4	32.0	31.1	30.3	29.8	62.0	55.7	49.3	29.0±0.3
R1234yf	LFL	6.86±0.20	6.3	6.5	6.6	6.75	6.1	6.2	6.3	7
	UFL	11.2±0.2	12.8	12.4	11.8	11.4	14.7	14.0	13.7	10
R1234ze (E)	LFL	-	-	-	-	-	-	6.3	6.4	n.f.
	UFL	-	-	-	-	-	14.1	13.9	13.7	n.f.

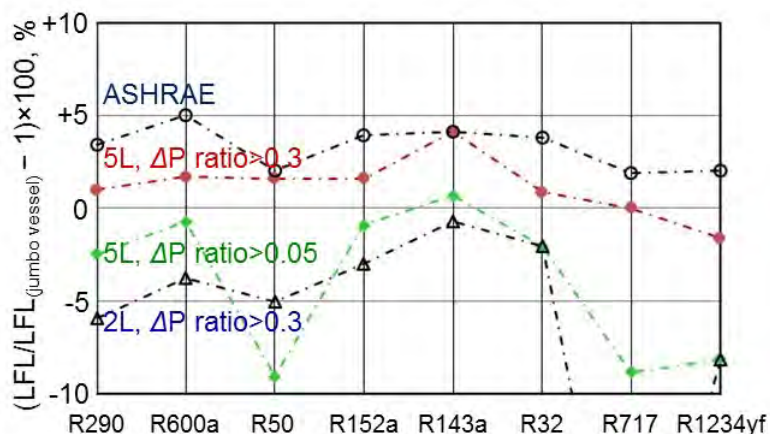


Fig.4-1 Difference in LFL value of different test methods from jumbo vessel for eight refrigerants.

4.3 R32/1234yf 混合系の燃焼限界

低 GWP 混合冷媒の代表例の一として R32/1234yf を選び、25℃乾燥空気中における燃焼限界の混合比による変化を測定した。結果を Fig.4-2 に示す。その結果、混合組成（モル）に対する燃焼限界の変化は、上下限界共に簡単な 2 次式によって良好な近似が得られることが分かった。これにより、任意の混合組成による R32/1234yf の燃焼限界を数値化することができる。今後、他の一般的な混合系についても適当な近似が可能か検討する。

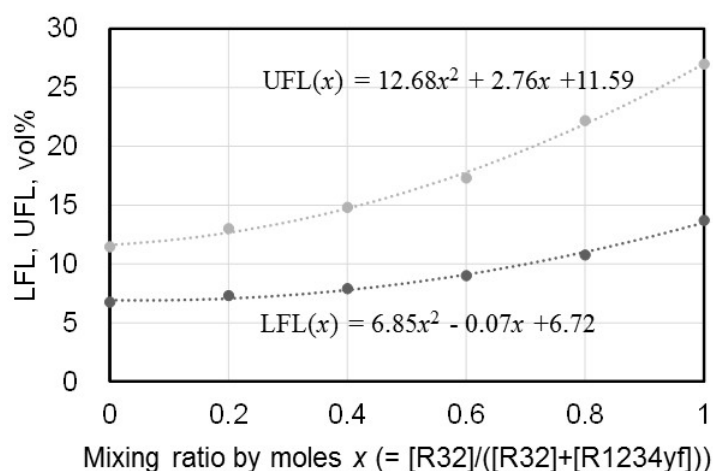


Fig.4-2 Flammability limits of R32/1234yf blend as functions of mixing ratio.

4.4 R32 及び R1234yf の燃焼限界の温度依存性

本研究開発では、低 GWP 混合冷媒の実用化に向け、現行の ISO817 の規定する条件（均一混合条件，23℃，湿度ゼロ，等）をこえて，温度・湿度・冷媒漏洩時の濃度分布等の実用上考慮すべき条件を設定した燃焼性評価を実施する予定である．ここではまず，R32/1234yf 混合系の構成成分である R32 及び R1234yf の，各単独ガスに関わる燃焼限界の温度湿度変化を明らかにするため，温度変化の測定を開始した．Table 4-2 に燃焼限界の温度依存性の結果を示す．今回測定した 15—60℃の温度範囲において，概ね下限界値は温度の上昇と共に低下し，上限界値は殆ど変化しない傾向が見られた．引き続き，混合冷媒及び構成成分の燃焼限界の温度依存性の評価を進める．

Table 4-2 Effect of temperature on flammability limits of R32 and R1234yf.

T	R32		R1234yf	
	LFL, vol%	UFL, vol%	LFL, vol%	UFL, vol%
15	13.55±0.20	26.9±0.4	7.05±0.20	11.5±0.5
25	13.70±0.15	27.0±0.4	7.0±0.3	11.4±0.2
35	13.45±0.15	27.0±0.3	6.9±0.2	11.3±0.2
45	13.57±0.15	27.0±0.3	6.66±0.15	11.5±0.2
60	13.28±0.10	27.15±0.20	6.40±0.15	11.3±0.2
80				
100				

第5章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒の ルームエアコンのリスク評価の進捗

5.1 冷媒変更と日本冷凍空調学会との連携について

日本冷凍空調工業会（JRAIA）では地球温暖化対応として低 GWP 冷媒への段階的な転換を目指し、2011 年から A2L 冷媒に関する検討を行い、代替化技術を確認した。JRAIA に所属する企業は 2013 年から、家庭用エアコン、店舗用パッケージエアコンで商品化を図り、既に市場に 3000 万台以上の製品出荷を行っている。このエアコンでの冷媒転換に関して JRAIA は、日本冷凍空調学会、NEDO のプロジェクト、経済産業省と協力して A2L 冷媒のリスクアセスメントを進めてきた。特に日本冷凍空調学会とは、所属する大学や研究機関と連携を密にし、リスクアセスメント推進の課題を逐次大学や研究機関に提示し、検討結果を得てリスクアセスメントに反映し、その内容の精査と許容値の精度向上を行った。正にこの連携により A2L 冷媒を使用したエアコンの速やかな製品化と普及が図られたと考えている。Fig.5-1 に A2L 冷媒のリスク評価体制を示す。

しかし温暖化への影響は依然として残り、さらなる低 GWP 冷媒への転換が望まれ、A3 冷媒が候補の一つであるが、強い燃焼性がある。そこで JRAIA では家庭用エアコンに関して、2016 年 9 月から新たにワーキンググループを発足させ、低 GWP の A3 冷媒のリスクアセスメントを開始した。A3 冷媒のリスクアセスメントに関しても、A2L 冷媒を検討した時と同様な官学産の連携が図れる体制の構築が望まれ、2018 年後半より同様の体制での検討がスタートした。ただし、今回、自動車工業会 JAMA は R1234yf 転換の検討が終了しているので、体制に参加していない。

本論文では、このような体制の中で JRAIA がリスクアセスメントを実施する上で、課題と認識している項目に関して、許容値に関する記述を行い、次に、自然冷媒である R290 を使用した家庭用エアコンにおける漏えい時の可燃空間の形成状況と、また静電気等の着火源の検討状況、リスクアセスメントの経過について概括する。

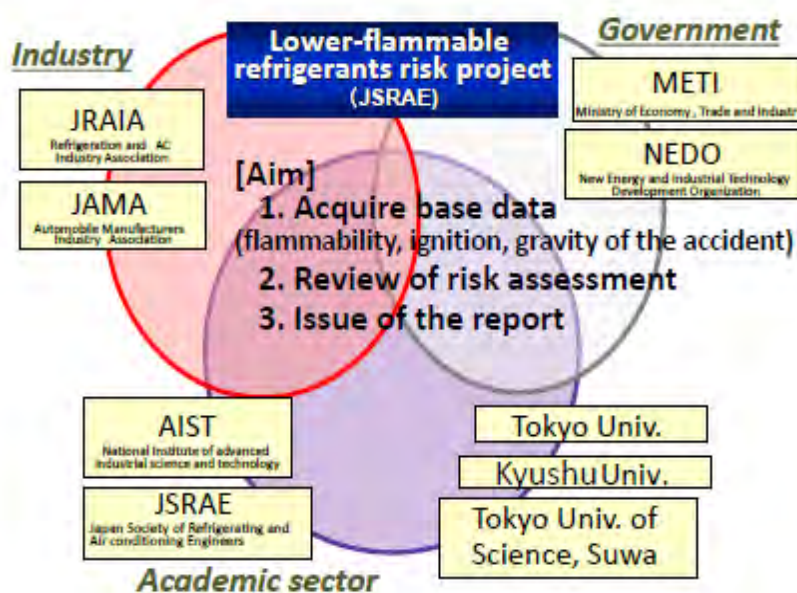


Fig.5-1 Organization for A2L risk evaluation

5.2 リスクアセスメントの許容値について

JRAIA で実施した家庭用エアコンの A2L 冷媒に対するリスク評価では、リスクアセスメントで判定基準となる事故発生率の許容値について、製品評価技術基盤機構の資料を根拠としている。具体的には、100 万台市場に存在する製品に関しては、使用時（室内、室外）の目標を 100 年に 1 回以下の事故発生となる 10^{-8} 件/台年以下としている。日本市場で使用されている家庭用エアコンの総台数は 1 億台であり、使用時の目標は 10^{-10} 件/台年となる。なお使用時以外の輸送保管、据付け、修理、廃棄の各ステージでは職業人としての義務感などで許容度は大きくなると仮定し、許容値は使用時の値の 10 倍程度大きい、つまり 10^{-9} 件/台年以下で受容できると判断した。

5.3 着火源について

A3 冷媒の着火源については Table 5-1 に示したように、裸火と高温表面とスパークに分けられる。裸火はライター、キャンドル、ガスコンロなどであり、A3 冷媒と接触すると確実に着火する。高温表面は電気ヒ-

Table 5-1 Comparison of ignition sources

Ignition source	R410;A1	R32;A2L	R290;A3 (Propane)
● Open flame (Blazing torch, Oil lighter, Candle)	No ignition	Rare ignition	Ignition
● Electric spark	No ignition	Rare ignition	Ignition
● Static electricity	No ignition	No ignition	Occasional Ignition

タやホットプレート類であり、空気対流などの影響はあるが、着火する可能性が高い機器類である。スパークは静電気によるスパークと電気機器類によるスパークに分けられる。さらに電気スパークは掃除機などのブラシモータやアイロンなどのサーモスタットなどから発生するスパークと、着火源となる可能性が高いコンセントの抜き差しや照明用スイッチの ON-OFF によるスパークに分けられる。各着火源による R32 及び R290 の着火の可能性を Table 5-1 に示す。

以下に輸送・保管、据付け、使用時（室内、室外）、修理、廃棄のステージ毎に着火源となるものを順次示す。

5.3.1 輸送保管時の着火源

輸送、保管時の着火源としては、ワゴン車等の同一車内にエアコンと人が存在する場合を考え、人がタバコを吸う場合のライターや煙草を着火源とみなしている。また保管倉庫では着火源となるものは少ないが、エアコン搬送のフォークリフトが床や金属支柱などに衝突し発生する火花や、倉庫に持ち込まれるストーブなど暖房器具を着火源とみなした。

5.3.2 据付け時の着火源

据付け時の着火源としては、ガス石油温水機器（屋外据置形）とガス発電システムや室外に設置された洗濯機など、バルコニーや庭先にあるものを仮定している。なお人がタバコを吸う場合のライターや煙草については、通常の作業者は啞え煙草で作業することはないが、マニュアルを遵守しない場合を考慮して、それらも着火源とみなした。

5.3.3 室内設置の着火源

室内の着火源としては、喫煙時のライターなど、また冬場に使用される石油ストーブなど明らかに着火するものがあり、無視できないレベルである。タバコの赤火も着火源となる可能性がある。なお石油ファンヒーターなどのファンを使用する暖房機は、ファン起動、着火装置起動の順序で作動するので、通常使用時は漏えい冷媒単独で着火する可能性はない。また R32 では着火源とならない各種の家電製品も R290 では着火源となる可能性が高い。特に洗濯機や掃除機などのブラシモータ使用製品からの着火は十分に考えられる。明確ではないが照明のスイッチやコンセントの抜き差しなど、着火の可能性のあるものも室内には多数存在する。今後ひとつひとつ丁寧に、それらの電気機器類が A3 冷媒の着火源になるか、なる場合の着火の可能性はどれ位なのかについて検討を行っていく予定である。

5.3.4 室外設置の着火源

室外の着火源はガス石油温水機器（屋外据置形）とガス発電システムや室外に設置された洗濯機など、据付け時と変わらないと仮定し、それらを着火源とみなした。

5.3.5 修理時の着火源

修理時の着火源については後の章で詳述する。着火源としては、接続部のろう付けバーナーによる冷媒への着火や作業者の喫煙に伴う着火、冷媒回収機での誤回収による着火、ブラシモータ式電動ドライバーなど修理時特有の着火源がある。

5.3.6 廃棄時の着火源

撤去時に関しては、可燃性ガスである R290 に対しては、日本の現行法令（高圧ガス保安法）下では冷媒回収機を用いて冷媒を回収することが困難である。そのため、基本作業手順の設定を(FTA 作成の前提条件)として、①エアコンが運転できる場合には、ポンプダウンして冷媒を室外機に回収する。②エアコンが運転できない場合には、室外機の閉止弁を閉じた後、室内機と内外接続配管中の冷媒を適切に処理する。具体的な処理方法は「修理ポートに冷媒用のホースを接続し、ホースの先端を着火源が無い安全な開放空間に設置して、冷媒を大気開放する。」とした。それぞれの場合に回収業者の喫煙に伴う着火、誤って冷媒回収機を使用する場合の着火、大気開放した場合の周辺に設置されたガス石油温水機器とガス発電システムや室外に設置された洗濯機など、場合分けを行って着火源を検討している。

5.4 漏えいシミュレーションについて

5.4.1 バルコニーでのシミュレーション条件

各ステージでシミュレーションによって、可燃時空積を求めているが、以下使用時の室外で CFD により解析を行った結果を例として、冷媒漏えい挙動を説明する。日本において据え付け、修理等の作業が行われる現場は様々な形態がある。Fig.5-2 に日本の戸建て住宅のバルコニーでの家庭用エアコンの設置形態の一例を示す。バルコニーは上部空間が開放されているが、上部以外は隙間のない壁で囲まれている。R290 は空気との密度差があるため、箱状のバルコニーでは底部に漏えい冷媒が溜まる可能性が考えられる。



Fig.5-2 Typical Japanese detached house (a) balcony, (b) appearance

Fig.5-3 に住宅バルコニー写真などから仮定しシミュレーションに使用した設置空間条件を示す。具体的には図に示すような床面設置と天吊設置にて、冷媒量 200g または 500g が漏えいするとした。R290 の冷媒量は、室内床面積 7m² に対する IEC 規格の許容冷媒量から算出される 200g と R32 において検討した 1kg と同等の冷房性能を得られる 500g とした。

なお、設置条件の天井高さ及び壁高さは日本の建築に関する法律である建築基準法での最低高さとした。また漏えいする冷媒は、熱交換器の全面から一様に流出するとの仮定を設けた。

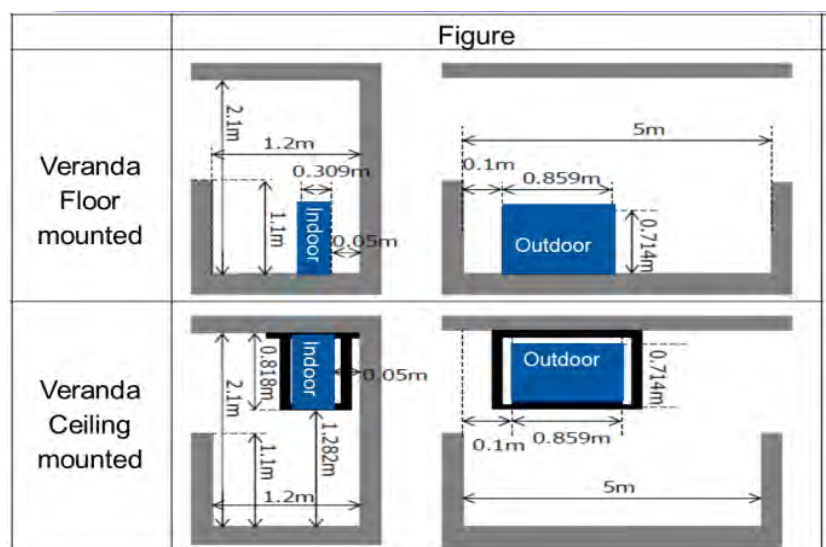


Fig.5-3 Installation conditions of air conditioner

5.4.2 シミュレーション手法

冷媒拡散現象の CFD 解析は、STREAM を用いて空気と R290 の 3 次元混合流体解析を質量保存式、運動量保存式および物質移動の保存式を用いて行った。温度場は 25℃一定としているため、エネルギー保存式は用いていない。しかし、空気と R290 の混合による密度変化を考慮するため、圧縮性流体扱いとした。R290 は、IEC 規格 60335-2-40 で採用されている 4 分全量漏れ相当の質量流量では、乱れが小さいとみなし、冷媒は熱交換器全面より均一に漏えいするとした。この条件において、乱流解析では、標準 k-ε モデルを用いて解析を行ない、k 値、ε 値ともに 1×10^{-4} とした。一方、拡散係数については、乱流解析では、乱流シュミット数の形で、層流解析では、Table 5-2 の一定の物性値の形で与えている。解析空間は次ページの Fig.5-4 に示すようにバルコニー外部に十分に大きな空間を設ける形状とし、メッシュ数は約 150 万に設定した。

Table 5-2 Analysis condition

Refrigerant	R290		R32
Temperature	25°C		
Flammable area	2.1~9.5vol%		13.3~29.3vol%
Leakage amount	200g	500g	1000g
Leakage speed (4minutes)	50g/min	125g/min	250g/min



Fig.5-4 Analysis space

5.4.3 無風条件での結果

Fig.5-5 に自然風のない場合に、エアコン室外機を床置きした場合の R290 と R32 を比較した層流モデルの解析結果を示した。

R290, R32 とも漏えい時は噴出する流速と重力落下の流速で攪拌され濃度が低下する。漏えい終了後は、ほぼ拡散係数による因子のみで拡散し、濃度低下が生じにくい。R290 は燃焼下限界 (LFL) の値が小さいため、可燃空間が長時間に渡って存在することになる。具体的には、床置き設置の場合、R32 の可燃濃度域は 1 時間 50 分程度継続する。R290 は IEC 規定量相当の 200g で 5 時間 43 分、性能が確保できる 500g 充填では 16 時間 52 分となり、R32 の 9.2 倍も可燃域が継続する。また天吊り設置でも同様の検討を行なった結果、R32 の可燃濃度域は 4 分程度と漏えい終了と同時に可燃域がなくなる。一方 R290 は 500g 充填で 1 時間 52 分となり、R32 の 28 倍も可燃域が継続することになる。すなわち自然風がほとんどない場合には、冷媒が拡散せずに危険な状態が約 17 時間も継続することになることが判った。このような状態で着火源と遭遇すれば危険な事象が生じる。なお、自然風が吹き込んだ場合の検討は、バルコニーに対して垂直方向と長手方向から吹き込んだ場合のシミュレーションを行った。この際、日本での代表地点での風速の分布などの調査結果を考慮した。これらの解析結果を FTA に反映する。なお、FTA には乱流解析の結果を使用する。

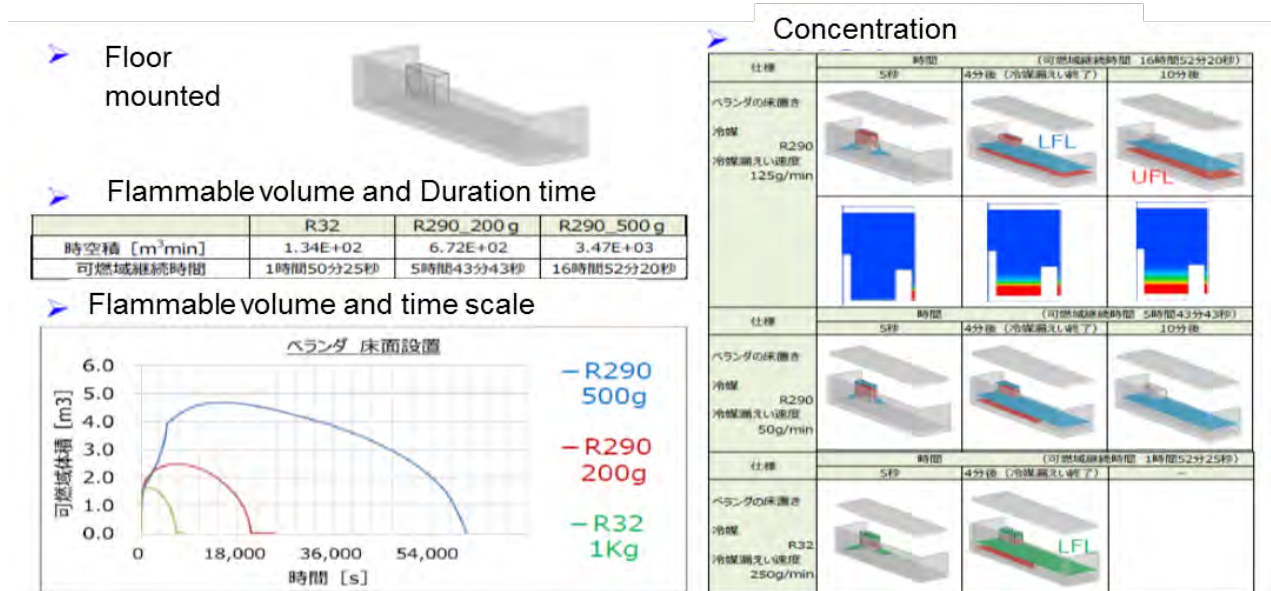


Fig.5-5 Concentration and flammable volume at floor mounted AC with no wind condition

5.5 修理

修理の想定シナリオとしては、据付場所を室内使用时および室外使用時の想定と同様とし、修理作業時間は、1時間とする。

修理内容は室内側としては以下の手順とする。

- 1) パネル等の交換
- 2) 基板の交換
- 3) 熱交換器の交換

作業手順は、室内機の交換とほぼ同様となるため、室内機の交換で考える。この場合、接続配管を外す必要があり、冷媒漏えいする可能性がある。なお、室内側でのろう付け作業は行わないと想定した。次に室外側の修理作業は以下の手順とした。

- 1) パネル・グリル等の交換
- 2) ファン、ファンモータの交換
- 3) 基板の交換
- 4) 圧縮機、弁類の交換

最後の作業では、ろう付け作業が発生するため、リスク評価の対象とする。また、室外機そのものの交換では、接続配管を外す必要があり、冷媒漏えいする可能性がある。

修理作業時の室内側では、「活線作業による電気スパーク」、「作業者の帯電による静電気スパーク」、「作業者が使用するブラシモータ式電動ドライバーでの電気スパーク」を着火源と想定する。なお日本の作業者は室内側では喫煙はしないと考え、「作業者の喫煙」は着火源には想定しない。また、修理作業に伴わない着火源としては、「住人による喫煙に伴う裸火」、「住人の帯電による静電気スパーク」、「住人の生活に伴う着火源」、「電化製品の故障事故による電気スパーク」を着火源と想定する。

次に室外側の着火源としては、「ろう付けバーナーの裸火」、「作業者の喫煙」、冷媒回収機を誤って使用した場合の「回収機電源スイッチによる電気スパーク」、「活線作業による電気スパーク」、「作業者の帯電による静電気スパーク」、「作業者が使用するブラシモータ式電動ドライバーでの電気スパーク」を想定した。なお、共同住宅および戸建てのバルコニーでは、ろう付け作業はせず作業者は喫煙しないと想定する。また修理作業に伴わない着火源については、室内側の修理時と同様とした。

次に可燃空間の生成については、室内側、室外側ともそれぞれ室内使用时、室外使用時の冷媒漏えい解析結果より、可燃空間の時間・体積、可燃空間の継続時間、可燃空間の平均体積を適用した。

ただし、可燃空間の継続時間が作業時間の60分を超える場合は、60分とする。

なお、現状は微小漏えい、急速漏えいにおいても4分全量漏えいでの解析結果を適用している。

5.6 リスクアセスメント結果

以上の着火源や可燃空間の生成から、未対策時の輸送保管、据付け、使用时（室内、室外）、修理、廃棄の各ステージの着火確率を計算したところ、現時点の知見からは、安全対策無では、日本社会で受け入れられる許容値を満足できない、という結果となった。

5.7 対策について

以下、使用时室内と修理時を取り上げ、現時点で考えられる対策を記載する。なお日本冷凍空調学会の大学や研究機関でのリスクアセスメントに関する検討評価が進めば、当然対策内容が異なってくる可能性があり、それら大学や研究機関での取組みが重要であることは言うまでもない。

5.7.1 使用時室内

着火源の安全化に関しては、老朽化した家電製品の不使用や廃棄またアース線への接続などが考えられる。しかしこれらの具体的対策としては、取り扱い説明書やホームページを通しての注意喚起であり、一定の効果は期待できるが、FTA上の数値には反映し難い。

もうひとつの有効な手段は、センサー等により漏えいを検知し、室内ファンによって漏えい冷媒を攪拌し濃度を下げることである。Fig. 5-6に解析モデルを示す。

Fig. 5-7に攪拌無の時の冷媒が200g漏えいした場合の高さ方向の冷媒濃度の分布を示す。赤い部分は可燃域であり床に近い領域に可燃域が生成していることが判る。

Fig.5-8 は攪拌無の時の冷媒が 500g 漏えいした場合の高さ方向の冷媒濃度の分布を示す。赤い部分は可燃域であり、白い部分は燃焼上限界 (UFL) を超えていることを示す。図から明らかなように、約 3 分後からは床から 200mm 以下の領域では可燃域にある領域が存在し、着火源があれば事故に至る可能性が、極めて大きいことが判る。

次に冷媒が 500 g 漏えいした場合に 214m³/h の風量で攪拌を行った場合を Fig.5-9 に示す。図から明らかなように、漏えい開始時からわずかな可燃域が生じるが、漏えい終了と共に可燃体積はゼロとなる。よって攪拌なし時に比べ平均可燃空間体積が 1/4500 となり、許容値以下となった。

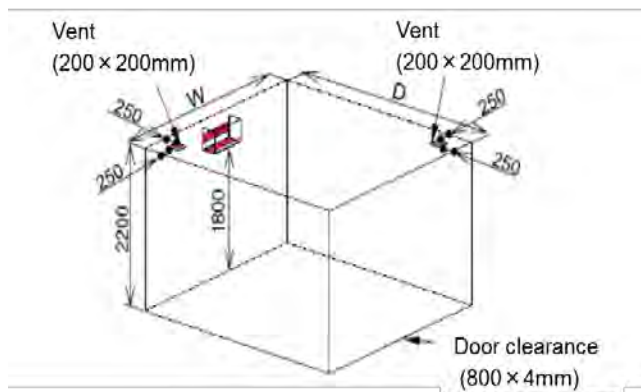


Fig.5-6 Analysis model

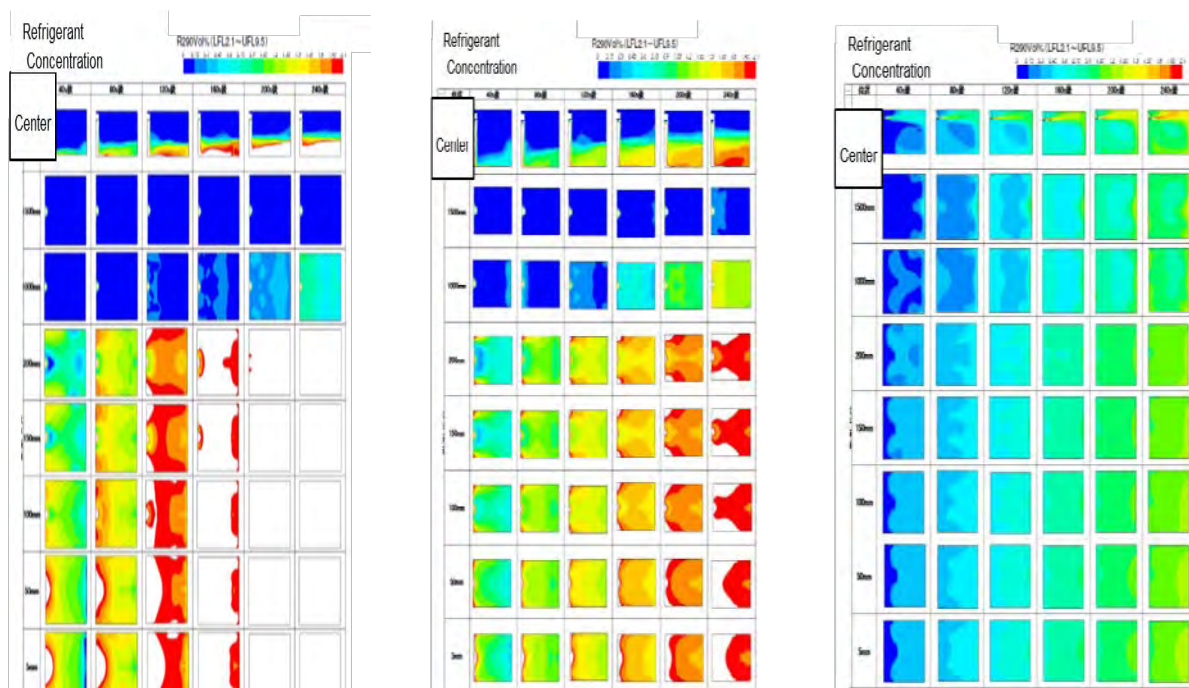


Fig.5-7 200 g leakage without air flow

Fig.5-8 500 g leakage without air flow

Fig.5-9 500 g leakage with air flow

なお、リスクアセスメントでは、攪拌を行うエアコン本体の送風装置の故障確率や、センサーの動作不良などを考慮する。

5.7.2 修理時

修理時においても、可燃域をできる限り減らすことと、着火源となる機器を排除することが有効である。よって作業員へ教育を行い、送風による可燃域の形成をなくすことや、携帯形冷媒漏えい検知器を携行すること、作業場所周辺で着火源となる機器の使用停止を呼びかけることが効果的な安全対策となる。ただし、携帯形冷媒漏えい検知器は、防爆形又は対象とする冷媒に使用できるものでなければならない。室内と同じように、これら対策を行えば、リスクアセスメントからは A3 冷媒である R290 を使用した家庭用エアコンで修理対応することは可能である。

5.7.3 各ステージでの対策後の着火率

以上のような対策を行った場合、各ステージでの R290 冷媒での着火確率は、日本で設けた許容値以下になる可能性が高い。

5.8 まとめ

現在 JRAIA で実施している A3 冷媒のリスクアセスメントについて、着火源の評価や、室外バルコニーでの可燃空間の生成について進捗状況と現時点での検討内容をまとめた。また未対策時の輸送保管、据付け、使用時（室内、室外）、修理、廃棄の各ステージから、室内使用時と修理時を取り上げ、それらステージに対して効果的なリスク低減手段の例を提示した。

今後これら記述から考察される内容について、日本冷凍空調学会に所属する大学や研究機関と連携を密にし、A3 冷媒のリスクアセスメント推進の課題を逐次、大学や研究機関に提示し、検討結果を得てリスクアセスメントに反映し、その内容の精査と許容値の精度向上を図っていきたい。それらに基づき有効な対策を盛り込んだ日本向けのマニュアルや JRAIA の規格、ガイドラインを整備していく。

参考文献

- 5-1) Kenji Takaichi, The International Symposium on New refrigerants and Environmental Technology 2012, 90. 94, Kobe Symposium (2012).
- 5-2) NITE URL (in Japanese) <https://www.nite.go.jp/data/000055687.pdf>

第6章 日本冷凍空調工業会による A3 冷媒の

内蔵ショーケースのリスク評価の進捗

6.1 はじめに

飲食店、食料品販売店、スーパーマーケットなどで使用されている冷凍機を内蔵したショーケース（内蔵ショーケース）は、冷媒に R404A, R134a 等の HFC 冷媒を使用しており、その使用量は製品 1 台あたり数十 g から 1 kg を超えるものまでである。

近年の世界レベルでノンフロン及び低 GWP 冷媒の使用に関する議論が行われている中、冷媒充填量が比較的小さい内蔵ショーケースについて、可燃性冷媒であるプロパン(R290, GWP:3), イソブタン(R600a, GWP:4)等を採用した製品が上市されるようになった。しかし安全性評価に関する検討報告が非常に少なく、その取扱いに関する詳細な規格化が必要であること。また国際規格である IEC 規格の見直しにより、可燃性冷媒の許容充填量が 150g から約 500g(R290 の場合)に増量されることなどを踏まえ、日本冷凍空調工業会(JRAIA)では、2016 年 7 月にワーキンググループを発足させ、A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメントを実施している。

本章では、内蔵ショーケースに R290 を使用した際の着火源や可燃空間の関する検討内容、及びリスクアセスメントについて報告する。

6.2 安全規格の見直し

内蔵ショーケースの安全規格は、国際規格である IEC60335-2-89 “Household and similar electrical appliances—Safety—Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances with an incorporated or remote refrigerant unit or compressor” において、構造、構成部品、電気部品、冷媒などが規格化されている。また国内規格は、この IEC60335-2-89 を和訳し、国内での使用方法を考慮して編集した JIS C 9335-2-89「家庭用及びこれに類する電気機器の安全性—第 2-89 部：業務用冷凍冷蔵機器の個別要求事項」がある。

欧州の冷媒規制である「F ガス規制」では、内蔵ショーケースに使用される冷媒が、2022 年から GWP150 未満の冷媒しか認められていない。そのため欧州では、現在使用しているフロン系冷媒の代替として、R290 や R600a などの可燃性冷媒が検討されている。すでに家庭用冷蔵庫では R600a が使われており、海外や国内の家庭用冷蔵庫の安全規格は制定されている。内蔵ショーケースも家庭用冷蔵庫の規格を参考にして、IEC60335-2-89 第 1 版の制定時に、可燃性冷媒に係る安全規格を盛り込んで作成されている。しかし、可燃性冷媒の最大冷媒充填量が 150g 以下であるため、一部の小型内蔵ショーケースしか対応できない規格となっている。そこで、冷媒充填量の制限値を見直し、可燃性冷媒が使用できる内蔵ショーケースの範囲を拡大することを目的とした、IEC の検討ワーキング活動(IEC/61C/WG4)が始まっている。JRAIA では、リスクアセスメントと並行して、IEC 改正案の妥当性を検討し、安全性の観点から適宜意見出しを行ってきた。

6.3 IEC60335-2-89 の主な改定案

次に、今回の IEC60335-2-89 の改正案の主な内容を示す。

6.3.1 最大冷媒充填量

機器規格である IEC60335-2-89 の現在の規定では、可燃性冷媒を使用する冷凍サイクルには 1 つの冷凍サイクルあたり 150g を上限としており、これを超える場合は施設側の規格である ISO5149-1 が適用される。今回の改定案では、可燃性冷媒の最大冷媒充填量を燃焼下限界(Lower Flammability Limit : LFL)の 13 倍までとしている。R290 の場合、LFL が 0.038 kg/m³ なので、最大冷媒充填量は 494g となる。

6.3.2 最小設置床面積

最大冷媒充填量の緩和に伴い、製品から冷媒が漏えいした時の冷媒への着火リスクを回避する必要がある。そのため、可燃性冷媒を使用した製品を設置する部屋の床面積 $A_{min}(m^2)$ を式(6-1)で規格化し、製品にもその数値を表示することになる。天井高さ H は 2.2 m(固定値)であり、0.25 は安全係数、 M は冷媒量(kg)である。

例えば、R290 を 494g 使用した製品の場合は、23.7m²以上の床面積の場所に置かなくてはならない。

$$A_{min} = M / (H \times 0.25 \times LFL) \quad (6-1)$$

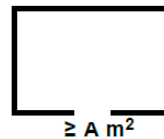


Fig.6-1 Symbol of minimum room floor area (IEC 60417-6415(2019-03))

6.3.3 冷媒漏えい試験

冷媒を 150g 以上充填した冷凍サイクルは、冷媒漏えい試験が必要である。

冷媒は、最も不利な結果になる箇所からの漏えいを想定する。試験中の冷媒放出量は、冷凍サイクルの冷媒充填量と同じでなくてはならない。そのときの冷媒放出速度は、式(6-2)で求めた質量流量とする。R290 を 494g 使用した製品の場合、 q が 281g/min/mm²(高压側、低压側は 134g/min/mm²)なので、冷媒放出速度は 44.4g/min(2.66kg/h)となる。

$$m = q \times 0.32 \times M \quad (6-2)$$

$$t_c = 103 \times M / m \quad (6-3)$$

この時、Fig.6-2 の■と●の部分の冷媒の濃度を測定する。ガス濃度は 5 秒以下の間隔で測定し、試験時間は、冷媒が放出されるのに要する時間(t_c)の 2 倍以下とする。この試験において、どの測定点においても、5 分を超える期間において LFL の 50%の濃度を超えてはならない。

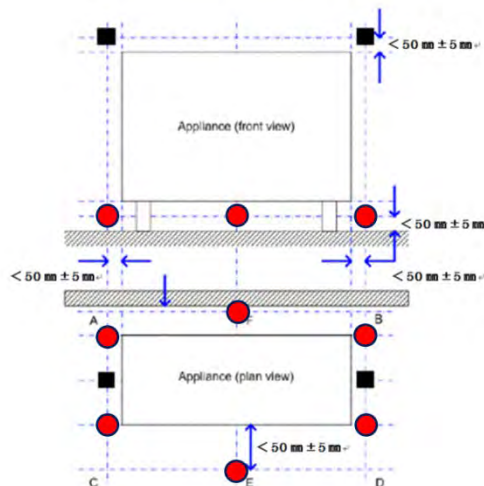


Fig.6-2 Schematic illustration of the refrigerant concentration sampling points

6.3.4 IEC60335 2-89 の今後の予定

現在の状況から考えると、2019 年末～2020 年初頭に改正版が発行される見込みである。日本では、IEC が改訂された約 1 年～1 年半後に JIS が改訂されると予想され、冷媒充填量の大幅な緩和は、2021 年以降の国内の内蔵ショーケースだけではなく、IEC60335-2-89 の適用範囲に含まれる業務用冷凍冷蔵機器全体に大きな影響を及ぼすことになる。

6.4 リスクアセスメント

可燃性冷媒の許容充填量に関する国際規格の見直しは行われているが、必ずしも十分に安全性を担保できるものにはなっておらず、また、国内における実使用時の安全面の評価も十分に検討されていない。そこでリスクアセスメントを行い、リスクの明確化とリスクを排除するための対応策を検討している。

6.4.1 リスクアセスメントのプロセス

リスクアセスメントにおける冷媒への着火確率は、冷媒漏えい発生確率と、着火源が可燃域と接触する時間率である時間的遭遇確率及び可燃域の空間分布を表す空間的遭遇確率を乗じて算出する。冷媒濃度が LFL と燃焼上限界(Upper Flammability Limit : UFL)の間にある領域が可燃域となる。この体積が可燃空間体積であり、可燃域が持続する時間が可燃域継続時間である。可燃域継続時間、着火源存在時間及び着火源作動回数を用いて時間的遭遇確率を算出し、平均可燃空間体積を対象空間の体積で除して空間的遭遇確率を算出する。着火確率は、ファン運転時及びファン停止時（故障時等）の双方の着火確率を運転率で加重平均を取って求める。

6.4.2 内蔵ショーケースのリスクモデルの設定

リスクアセスメントを行う前提条件として、ショーケースを設置するモデル店舗とその店舗で使用するショーケースを設定した。モデル店舗としては、揚げ物などの簡単な調理が可能なコンビニエンスストア(CVS)とした。

一般に内蔵ショーケースは工場生産された後、倉庫で一時保管されてから使用される店舗などに輸送され、設置されてから使用される。使用時に不具合が生じたときは、設置場所で修理するか、その場では十分な作業が出来ないと判断されたときには製品をメーカーのサービス・修理機関に持ち帰り、不具合部分を修理した後に再設置される。製品が不要になった場合は設置先から回収し、一時的に倉庫に保管してから廃棄処理されるか、一部の製品は再生又は整備後に中古品として再設置されている。

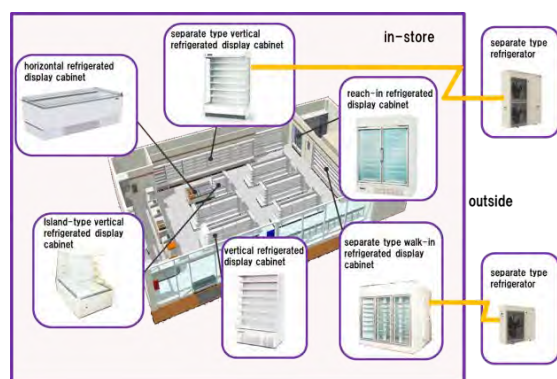


Fig.6-3 Refrigerated display cabinet installation example in CVS

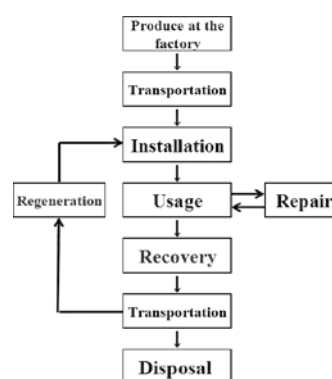


Fig.6-4 Life cycle of Refrigerated display cabinet

6.4.3 許容レベルの設定

内蔵ショーケースの国内普及台数は、2014 年度時点で 190 万台であった⁶⁻¹⁾。JRAIA の年度別内蔵ショーケース国内出荷台数推移より、2014 年以降の出荷台数の増減幅が非常に小さいため、2016 年における国内普及台数も 2014 年度と同等と考えて 190 万台とした。

許容できる事故の発生確率は、100 年に 1 回以下の重大事故が発生するレベルと考え、市場に普及している台数 190 万台から $5.26 \times 10^{-9} (= 1 / (1.9 \times 10^6) / 100)$ を許容レベルとした。また使用時以外は常に機器を取り扱う専門の作業者が携わっているため、許容レベルを使用時よりも 1 桁上げて 5.26×10^{-8} とした。

Table 6-1 Acceptable Level

Stage	The allowable level of ignition probability
Stage of usage	5.26×10^{-9}
Another Stage	5.26×10^{-8}

Table 6-2 Leakage Probability

Refrigerant leak	Leak probability
Burst leak	5.26×10^{-7}
Rapid leak	1.89×10^{-5}
Slow leak	9.82×10^{-4}
The total refrigerant leak	1.00×10^{-3}

6.4.4 冷媒漏えい発生確率について

内蔵ショーケースの冷媒漏えい発生確率は、JRAIA 会員会社の市場での冷媒漏えい事故数を調査して算出し、冷媒漏えい速度毎に、噴出漏れ確率 5.26×10^{-7} 、急速漏れ確率 1.89×10^{-5} 、微小漏れ確率 9.82×10^{-4} 、合計の冷媒漏れ確率は 1.00×10^{-3} とした。

6.5 冷媒漏えい解析

内蔵ショーケースから冷媒が漏えいした場合、最も危険性が高いと考えられる条件が、リーチインショーケースの庫内漏えいである。冷媒が庫内漏えいした場合、冷媒が庫内に充満してしまい、扉を開けると製品前面下部に冷媒が流れ出ることにより、可燃域が発生すると予想した。そこで、冷媒漏えいの状態を確認するために、可視化試験と CFD 解析を行った。

6.5.1 可視化試験

冷却ユニットを製品下部に配置したリーチインショーケースの庫内に、R290 と分子量がほぼ同じである CO₂ を発生させるドライアイス置き、庫内にドライアイスのガスを充満させた状態から扉を開いて、ドライアイスの拡散状態を確認する可視化試験を行った。R290 と CO₂ の大気圧・常温でのガス密度の差は 1.3%(REFPROP Ver.8.0 にて計算)である。

Fig.6-5 に示す様に、凝縮器ファンモータを止めた状態で、扉を開くと、すぐに庫内底部付近からドライアイスが流れ出し、床面を這うように広がった。Fig.6-6 は、凝縮器ファンモータを運転させた状態で、扉を開くと、すぐにドライアイスが床面を這うように広がったが、流れ出たドライアイスの一部は凝縮器の吸込み口より吸い込まれていくため、拡散の範囲は Fig.6-5 より小さく、また薄くなった。なお、この可視化試験においては、設備・装置上の問題から、CO₂ の濃度測定はできておらず、また、漏えいした CO₂ の総量も正確には把握できていない。

IEC 規格では実際に漏えい試験を行う内容になっており、R290 での試験には防爆試験室が必要になる。しかし、R290 の代わりに CO₂ で試験を行えば、防爆試験室がなくなるため、CO₂ での代替試験が可能になるように、日本から IEC/61C/WG4 に提案を行って採用され、大気圧・常温での密度差が±5%の冷媒であれば使用できることが規定された。



side view



front view

Fig.6-5 Visualization of refrigerant leakage in reach cooler (air velocity: 0.0 m/s)



side view



front view

Fig.6-6 Visualization of refrigerant leakage in reach cooler (air velocity: 1.16m/s)

6.5.2 CFD 解析

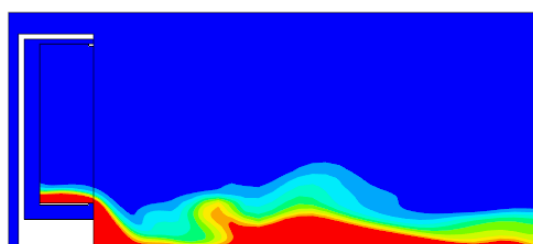
解析を行ったリーチインショーケースは、高さ 2.0m、幅 1.542m、奥行き 0.7m で、庫内体積は 1.08m³である。ショーケースの下部には圧縮機、凝縮器及び送風機が内蔵された凝縮器ユニットがあり、ショーケースの前面から空気を吸って、背面を通してショーケースの上部に吹き出す風路構造となっている。凝縮器ユニットは、開口部の面積を $8.3 \times 10^{-2} \text{m}^2$ とし、解析では開口部の風量を $0 \sim 14.94 \text{m}^3/\text{min}$ (風速 $0 \sim 3 \text{m/s}$) の間で変化させた。ショーケースは、正方形の店内の壁際中央に設置した。解析では、庫内に冷媒が漏えいした後にドアを一気に開けることを想定して、庫内が均一冷媒濃度になっている状態から解析を開始し、扉はないものとしてショーケース前面から外部へ冷媒が重力及び分子拡散により自然に漏えいする解析を行った。解析には SRAR-CCM+を用い、冷媒は R290 として、REFPROP Ver.8.0 で計算した大気圧・常温の物性値を与え、分子拡散係数の式から算出した値を拡散係数として使用した。

庫内漏えい時の解析結果を Fig.6-7 に示す。図の(a)は凝縮器ファンモータを止めている状態、(b)は凝縮器ファンモータを動かした状態で、赤い部分が LFL と UFL の間の可燃域になる。扉解放時は製品前面に可燃域が出来るが、Fig.6-7 に示す様に、50 秒後には凝縮器ファンモータの運転の有無により、ケース前面の冷媒濃度に大きな差が出る事が確認できた。Fig.6-8 は、Fig.6-7(a)と同じ条件での扉急開放後 30 秒までの 5 秒毎の濃度分布図である。扉急開放後、数秒で可燃域が部屋の端まで到達し、その後全体に広がっている様子が分かる。IEC 規格の改正案では、5 分以内は可燃域ができてよい内容となっているが、この解析結果は、部屋の中に着火源があれば、数秒間のうちにその周囲に可燃域ができ、着火する可能性があることを示唆しており、安全を担保するためには、IEC 規格案から 5 分間の規定を削除し、可燃域の生成を許可しない内容とすべきである。

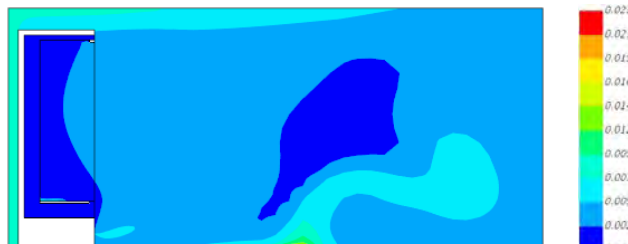
なお、IEC 規格の当初の改正案では、式(6-1)の安全係数は 0.35 であった。これに対して、日本から、安全係数を 0.35 と 0.25 にした場合の CFD 解析結果を IEC/61C/WG4 に提示し、安全係数 0.35 の方が可燃域は大きくなるため、安全係数を空調機の IEC 規格 IEC60335-2-40 でも採用されている 0.25 にすべきと主張し、これが採用された。

また、リーチインショーケースの庫内漏えいに対する対応は、安全上、特に重要であり、従来の内蔵ショーケースでは、凝縮器ファンモータが停止している除霜中においても、可燃域を生成させない必要があると考え、日本からこの内容を IEC/61C/WG4 に提案し、機器に通電している状態においては常に規定を満足しなければならない旨の文章が採用された。

CFD 解析に対応する実際の定量的な測定がまだできておらず、解析結果は定性的には正しいと思われるが、定量的な評価に関しては、今後の課題である。



(a) air velocity: 0.0 m/s, after 50 s



(b) air velocity: 3.0 m/s, after 50 s

Fig.6-7 Concentration distribution of reach-in type refrigerated display cabinet (1)

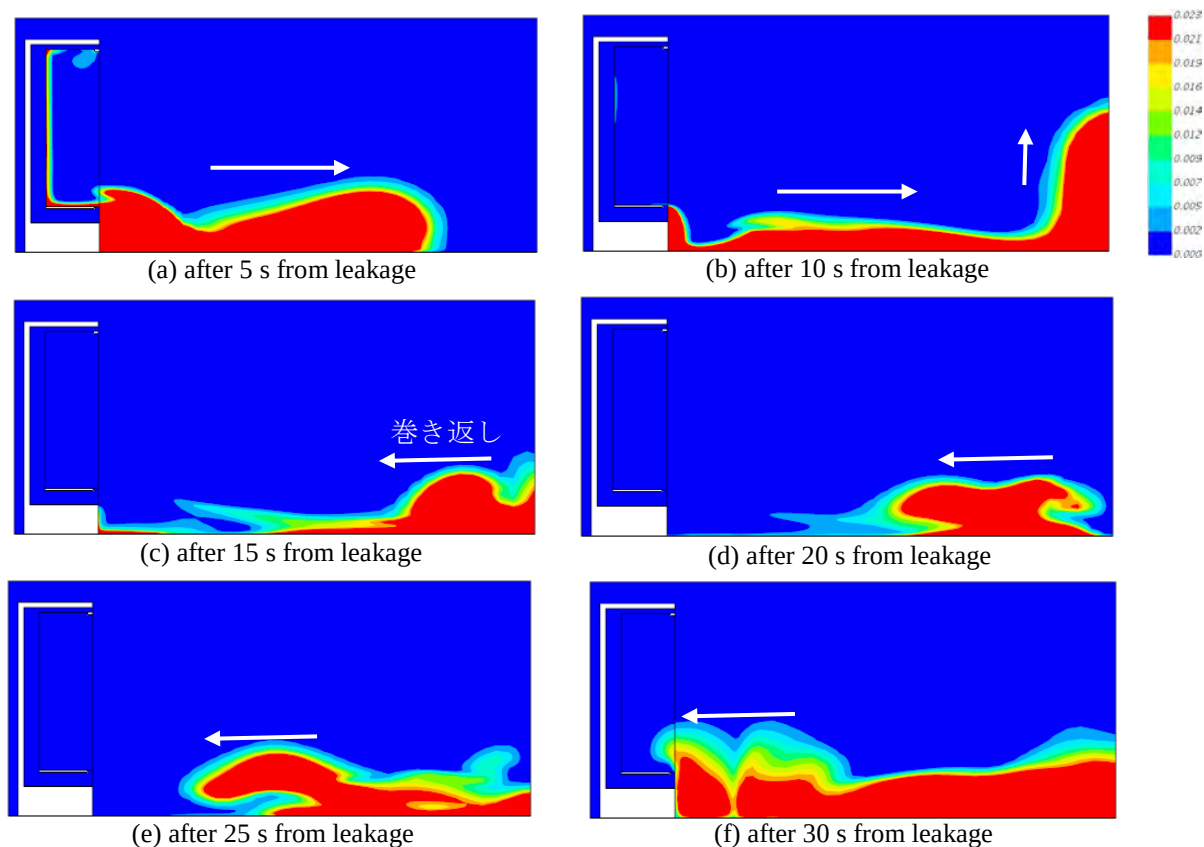


Fig.6-8 Concentration distribution of reach-in type refrigerated display cabinet (2)

6.6 着火源の検討

着火源は、喫煙や静電気等の人に係わるものと、機器や周囲環境によるものがあげられる。

6.6.1 人に係わる着火源

人に係わる着火源のうち、喫煙時に使用するライターやマッチ等の直火は着火源になる。しかし、たばこや静電気などは様々な検討がなされているが、検討条件等の違いにより異なる結果が得られている。

たばこは、火がついてくすぶっている状態では着火源にならないが、Li et al. (2014)の検討⁶⁻²⁾では、吸引時の中心温度は R290 の自己着火温度である 470℃を上回る 700℃に達していると報告している。しかし、この吸引時でも R290 に着火しなかったという報告もある⁶⁻³⁾。また静電気は、R290 にとっては着火源とはなり得るが、放電エネルギーの湿度依存性等、十分に把握できていない点が多い。したがって、人に係わる着火源であるたばこや静電気等が R290 等に対して、どのような時に着火源となり得るのかについて、継続検討が必要である。

6.6.2 ショーケースに係わる着火源

Fig.6-9 にショーケースの主な電気部品構成を示す。コンセントからのプラグの抜き差し時に生じるスパークは着火源になる。また各部品の運転制御に使用するスイッチやリレー等、接点を有するものは、スパークを発生するために着火源になる可能性も考えられるが、このスパークが着火エネルギー以上になるか詳細検討が必要である。その他モータ類はブラシモータが着火源となるためブラシレスタイプの使用、またヒータ類は規格面から R290 の自動着火温度に対して 100K 低い 370℃以下に制御するなどの対応が必要である。



Fig.6-9 Configuration of main electrical components of the showcase

6.6.3 CVS 店舗内に設置している機器に係わる着火源

CVS 店舗内には、ショーケースの他にも食品什器や事務機器なども置かれている。店内のショーケースから R290 が漏えいした場合に、これらの機器の周囲に可燃空間が生成されることが想定できる。そのため、Fig.6-10 に示す各これらの機器の構成部品についても着火源となるか、確認する必要がある。

(1) 温蔵機器

揚げ物用ケース、おでん什器、缶ウォーマー、中華まんスチーマー等の温蔵機器は、ヒータを有しているが、過昇防止スイッチや温度ヒューズで保護されている。しかし、Fig.6-11 に示すような制御で使用するスイッチやリレー等が着火源になり得るか不明のため、当面リスクアセスメントにおいては着火源として取り扱うが、継続検討が必要である。



Fig.6-10 Other appliance of CVS



Fig.6-11 Expected ignition source in equipment

(2) 調理用機器

フライヤー、ホットプレート等の調理用機器は、ヒータを有しているが、油の温度やプレート温度を 250℃ 以下に制御しており、R290 の自動着火温度に対して 100K 低い 370℃ 以下で保護されている。しかし、制御で使用するスイッチやリレー等が着火源になり得るか不明のため、当面リスクアセスメントにおいては着火源として取り扱うが、継続検討が必要である。

(3) コーヒーマシーン

コーヒーマシンは、ボイラーや各種モータを有している。ボイラーは、空焚き防止を考慮して過昇防止スイッチやヒューズ等で保護されている。各種モータは、確認した範囲ではブラシモータは使われていない。しかし、制御で使用するスイッチやリレー等が着火源になり得るか不明のため、当面リスクアセスメントにおいては着火源として取り扱うが、継続検討が必要である。

(4) 電子レンジ

電子レンジはマグネトロン、高圧トランス等を有している。マグネトロンは密閉構造で内部に冷媒が入らない構造になっており、他の部品も一般的な使用条件において着火源にはならない。また加熱室に冷媒が侵入しても、マイクロ波は冷媒に影響を及ぼさないため、冷媒が加熱されることが無い。しかし、制御で使用するスイッチやリレー等が着火源になり得るか不明のため、当面リスクアセスメントにおいては着火源として取り扱うが、継続検討が必要である。

(5) マルチコピー機

マルチコピー機は、レーザー光を使う書き込み部、コロナ放電が発生する帯電ローラー、ヒータを使用してトナーを上に定着させる定着部等から構成されている。レーザー光やコロナ放電が着火に影響を及ぼすかが不明であり、家庭用プリンターと業務用コピー機との違いも不明なため、当面リスクアセスメントにおいては着火源として取り扱うが、継続検討が必要である。

(6) その他

その他として、壁面に設置してある照明用、換気扇のスイッチや空調用のコントローラー、一部の店舗で使用される暖房機器等についても、継続的に検討していく必要がある。

6.7 まとめ

現在、JRAIAでは、CVSをモデル店舗としてリスクアセスメントを行っている。庫内での冷媒漏えいによる扉を開いた際の可燃域の生成が最も危険であると考え、CFD解析を行い、その定性的な挙動を把握した。また、CFD解析結果から可燃域継続時間、可燃空間時空積及び平均可燃空間体積を算出し、リスクアセスメントに使用しているが、実機を使った漏えいの確認試験は行っていない。今後、東京大学で実施予定の、可燃性冷媒を使用したショーケースの漏えい状態の実機検討及び漏えい解析で得られる知見をリスクアセスメントに活用する必要がある。

ントに反映していきたい。さらに、着火源に関しては、スイッチやリレーをはじめ、たばこや静電気に関しても定量的に十分な知見が得られていないため、諏訪東京理科大学及び産業技術総合研究所での、着火源に関する研究の状況を適宜リスクアセスメントに反映して行きたい。

JRAIAは、検討結果に基づき、安全を担保するための規格修正案を、適宜、IEC/61C/WG4に提案してきたが、なかなか意見を聞いてもらえず、規格に反映できた内容は少ない。よって、JRAIAは、現在のIEC改正案では安全上の問題があると考えている。そこで、JRAIAでは、IECの内容を補完するための規格及びガイドラインを作成し、IECの規定と、JRAIA規格及びガイドラインの規定の双方を守ることによって、安全を担保する方向で検討を進めようと考えている。JRAIAでは、A2Lに対する検討から、実際の漏えい速度はIEC規格のそれよりも速いことが分かっている⁶⁻⁴⁾。そこで、IEC規格よりも速い漏えい速度を想定し、さらに、わずかの時間であっても可燃域の生成を許容しないことを前提に、内容の検討を行って行く予定である。

参考文献

6-1) Mitsubishi Research Institute

Heisei 20 FY2007 energy use streamlining promotion infrastructure development project (survey on energy conservation measures of machinery and equipment etc.) report, PP. 224-227 (in Japanese)

6-2) B. Li, H.R. Pang, J. Xing, B. Wang, C. Liu, K.G. McAdam, J.P. Xie, “Effect of reduced ignition propensity paper bands on cigarette burning temperatures”, Thermochimica Acta 579, pp.93-99.(2014)

6-3) T. Kashimura, S. Goto, A. Fushimi: “Ignition mechanism by cigarette”, Report of Fire Science Laboratory of Tokyo Fire Department 7, pp. 34-45 (1970). (in Japanese)

6-4) “Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants Final Report 2016”, The Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2017.5).

第 3 部 次世代冷媒の規制・規格の調査

目次

1. はじめに	3
2. 対象とする冷媒、冷凍空調機器	3
3. 国内外の法規制、規格の現状	3
3.1 冷媒・冷凍空調機器関連の規制・規格	3
3.2 国内の規制・規格の概要	3
3.3 海外の規制・規格の概要	3
3.4 国内外安全規制・規格の比較	14

本報告書について

本報告書は、次世代冷媒に関する調査委員会 WGⅢ（規制・規格の調査）の平成 30 年度の成果をまとめたものです。

WGⅢ名簿

	氏名	所属
主査	岸本 哲郎	環境エネルギーネットワーク 2 1 理事長
メンバー	片岡 修身	日本冷凍空調学会 ISO 国内分科会主査
	宮田 征門	国土交通省 国土技術政策総合研究所 住宅研究部 建築環境研究室 主任研究官
	東條 健司	日本冷凍空調学会 国際委員会委員長
	飯沼 守昭	高圧ガス保安協会 高圧ガス部冷凍空調課長
事務局	松田 謙治	日本冷凍空調学会 事務局長
	西口 章	日本冷凍空調学会
	上村 茂弘	日本冷凍空調学会

本報告書に掲載されている情報の正確性については万全を期していますが、著者および当学会は利用者が本報告書の情報を用いて行う一切の行為について、何らの責任を負うものではありません。本報告書の利用に起因して利用者に生じた損害につき、著者および当学会としては責任を負いかねますので御了承ください。

1. はじめに

公益社団法人日本冷凍空調学会が実施する調査事業の目的は、NEDO 事業「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発」の成果を横断的にとりまとめ、国内外に発信すると共に、次世代冷媒の基本特性、性能評価及びこれを適用した冷凍空調機器の安全性、リスク評価に関し、国際規格、国際標準に提案すべき内容の調査を行うことにある。

進め方として、調査委員会の中に WGⅢ を設け、有識者による意見交換を通じて情報を集約していくこととした。先ず第一段階として、冷媒、冷凍空調機器に関わる国内外の規制、規格の種類、内容について整理した。

2. 対象とする冷媒、冷凍空調機器

現在使用されている冷媒、また将来有望とみられ検討されている冷媒の数は多い。Fig.1 に製品別に従来の冷媒と転換が進みつつある冷媒の例を示す。地球温暖化対策により、低 GWP（地球温暖化係数）であることは必須で、従来のフロン類に替わり、Fig.1 に記されている物質以外にも、HFO（ハイドロフルオロオレフィン）系や HC（炭化水素）、二酸化炭素、アンモニア等の自然冷媒系、その他新物質に関する研究開発が実施されている。^{1),2)}

本事業で調査対象となる次世代冷媒としては、先ずはプロパン等の HC 系冷媒、HFO 系冷媒及び HFO 系冷媒を含む混合冷媒が中心となる。

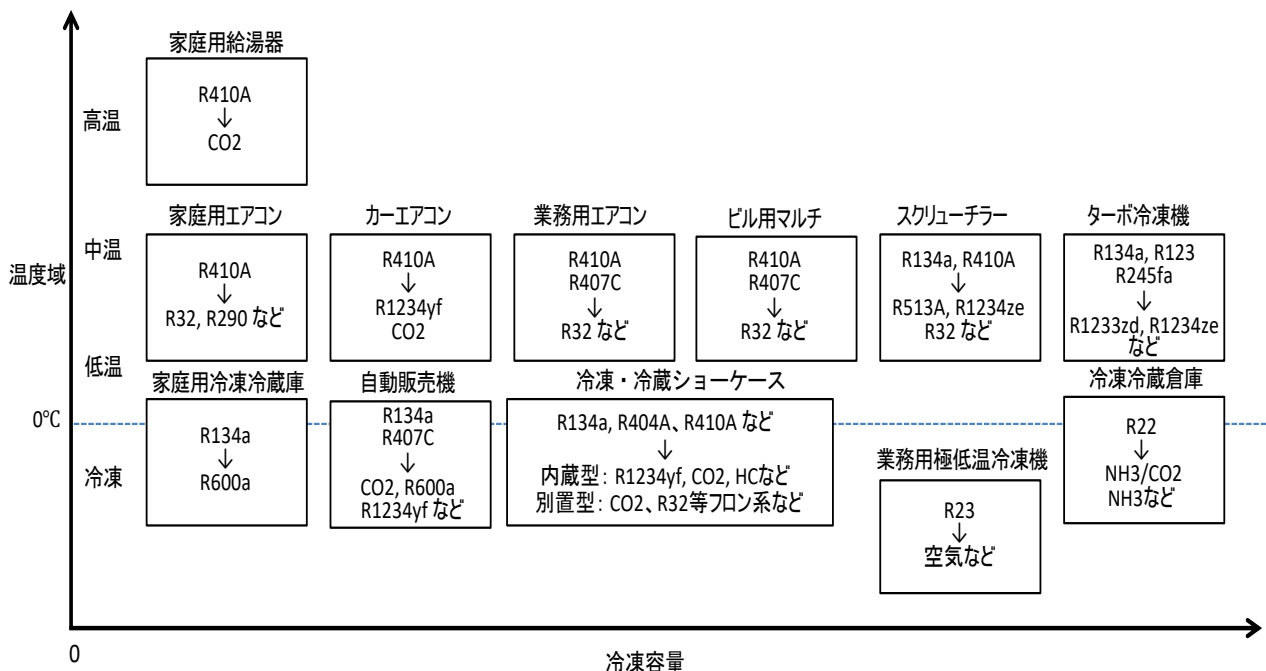


Fig.1 Alternative refrigerants for each product

3. 国内外の法規制・規格の現状

3.1 冷媒・冷凍空調機器関連の規制・規格

冷媒、冷凍空調機器に関係する国際規格、日本及び米国、欧州の規制、規格をリストアップすると Table 1 のようになる。近年、地球温暖化対策の強化に伴って、より GWP の低い冷媒の使用が進められているが、この使用、普及に当たっての新たな規制や使用基準の明確化、緩和が行われている。

特に、ASHRAE34、15、ISO817、5149、IEC60335 は新冷媒の使用に関して主導的な位置づけにあるとみられ、注目が必要である。また、米国の SNAP、欧州の F ガス規制も日本への影響が大きく、動向把握が重要である。

Table 1 Regulations and standards related with refrigerant and refrigeration air-conditioning products

		国際	日本	米国	欧州
冷凍空調関係	冷媒	モントリオール議定書 ISO817 ISO17584 GHS	オゾン層保護法	Clean Air Act、SNAP ASHRAE34 UL2182	Fガス規制 EN378
	全般	ISO5149	フロン排出抑制法	ASHRAE15	EN378
	機器	IEC60335-2-24,34,40,89	電気用品安全法	UL984 UL60335-2-24,34,40,89	EN60335-2-24,34,40,89
高圧ガス保安法関係			冷凍保安規則 一般高圧ガス保安規則		
建築空調設備関係		ISO52000	省エネ法 建築物省エネ法		

3.2 国内の規制・規格の概要

1) オゾン層保護法

1988 年に制定。モントリオール議定書に基づく特定フロン（CFC、HCFC）の生産量・消費量の削減義務を履行するため、特定フロンの生産及び輸入の規制措置が講じられた。この後、2016 年、ルワンダのキガリにて議定書が改正され、代替フロン（HFC）も、温室効果が高く、地球温暖化に影響を与えることに鑑み、生産量・消費量の削減義務が課せられることとなった。これを受け、国内担保措置として、2018 年 6 月にオゾン層保護法が改正され、代替フロンの製造及び輸入の規制措置が定められた。日本は 2018 年 12 月にキガリ改正を受諾し、2019 年 1 月 1 日より規制が開始されている。³⁾

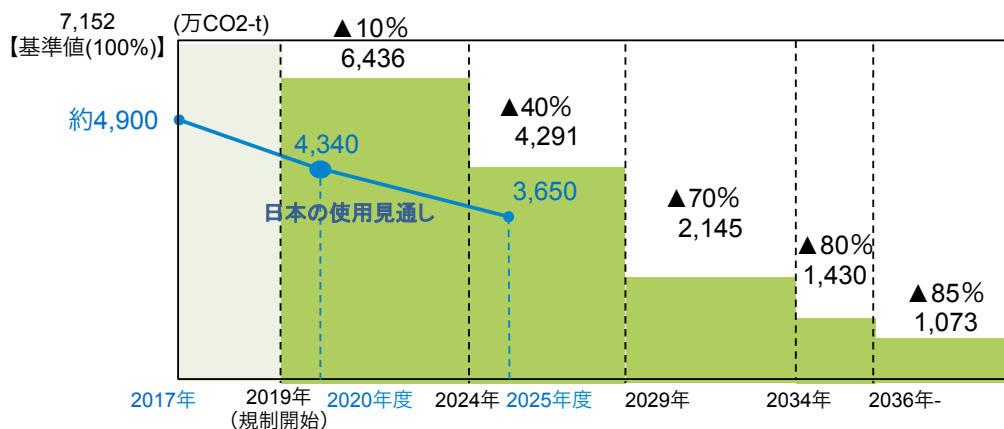


Fig.2 Limited consumption volume in Japan based on Kigari amendment

改正オゾン層保護法の主な措置事項は以下のとおりである。

- 経済産業省大臣及び環境大臣は、議定書に基づき日本が遵守すべき代替フロンの生産量・消費量の限度を定めて公表する。
- 製造者は、経済産業大臣の許可を受けなければならない。
- 輸入者は、外為法に基づく経済産業大臣の承認を受けなければならない。

日本における代替フロンの主な用途は、冷凍空調機器の冷媒が約9割を占める。残りの用途は、断熱材用の発泡剤、噴射剤等である。

Fig.2 に示されるように、日本の使用見通しから見ると、2029 年以降の削減義務達成が厳しくなるとみられ、HFC に替わる冷媒及びこれを活用した製品の開発、さらに導入のための規制、規格等の整備が必須となってくる。

2) フロン排出抑制法

2001 年にフロン回収・破壊法が制定され、業務用冷凍空調機器の整備時、廃棄時のフロン類の回収、回収されたフロン類の破壊が進められた。しかし、HFC の急増、冷媒回収率の低迷、機器使用中の大規模漏えいの判明等の課題が生じ、これらへの対応が求められることとなった。そのため、フロン類の回収、破壊に加え、フロン類の製造から廃棄までのライフサイクル全体にわたる対策が取られるよう、2014 年に改正され、名称もフロン排出抑制法と改められ、2015 年 4 月より施行された。フロン類の使用の合理化と管理の適正化を二本柱として、以下の 4 点の対策が実施されている。

- フロン類のフェーズダウン：ガスメーカーは代替物質の開発や再生等により、温暖化影響を低減し、製造量を削減しなければならない。
- フロン類使用製品のノンフロン化、低 GWP 化の促進：機器メーカーは技術進歩や市場動向を踏まえて、その時点で最も環境影響度の低い製品を普及させなければならない。
- 機器使用時のフロン類の漏えい防止：機器ユーザーは機器使用時において、適切な管理を推進することで排出量を削減しなければならない。
- 充填・回収行為の適正化：冷媒回収業者は適切な充填・回収、及び再生・破壊を推進しなければならない。

この法律で、指定製品制度が設けられ、代替冷媒候補に対応した製品の技術開発及び安全性評価等の状況を踏まえ、対象製品毎に環境影響度の目標（GWP）、目標年度が定められた。対象製品、目標値、目標年度は随時見直しが実施される。⁴⁾

Table 2 Target value GWP and year for each designated products

指定製品の区分	現在使用されている 主な冷媒及びGWP	環境影響度 の目標値	目標年度
家庭用エアコンディショナー（壁貫通型等を除く）	R410A(2090)、R32(675)	750	2018
店舗・オフィス用エアコンディショナー			
①床置型等除く、法定冷凍能力3トン未満のもの	R410A(2090)、R32(675)	750	2020
②床置型等除く、法定冷凍能力3トン以上のものであって、③を除くもの	R410A(2090)	750	2023
③中央方式エアコンディショナーのうちターボ冷凍機を用いるもの	R134a(1430)、 R245fa(1030)	100	2023
自動車用エアコンディショナー (乗用自動車(定員11人以上のものを除く)に掲載されるものに限る)	R134a(1430)	150	2023
コンデンシングユニット及び定置式冷凍冷蔵ユニット (圧縮機の定格出力が1.5kW以下のものを除く)	R404A(3920)、 R410A(2090) R407C(1770)、CO2(1)	1500	2025
中央方式冷凍冷蔵機器 (5万m以上の新設冷凍冷蔵倉庫向けに出荷されるものに限る)	R404A(3920)、 アンモニア(一桁)	100	2019
硬質ウレタンフォームを用いた断熱材(現場発泡用のうち住宅建材用に限る)	HFC-245fa(1030) HFC-365mfc(795)	100	2020
専ら噴射剤のみを充填した噴霧器(不燃性を要する用途のものを除く)	HFC-134a(1430) HFC-152a(124) CO2(1)、DME(1)	10	2019

3) 高圧ガス保安法（冷凍保安規則、一般高圧ガス保安規則）

高圧ガス保安法は、高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、輸入、移動、消費、廃棄等を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスに関する自主的な活動を推進し、公共の安全を確保することを目的とした法律である。

次世代冷媒の開発、評価にとっては、特に冷凍保安規則への関わりが深い。次世代冷媒は低 GWP であることが必須であるが、現在のその候補の冷媒には微燃性の特性を持つものがある。温暖化影響と燃焼性はトレードオフの関係にあり、これらの微燃性冷媒の安全性の担保、規制、規格への対応が大きな課題になっている。

従来、冷凍保安規則では可燃性ガス、毒性ガス及び不活性ガスの用語の定義に冷媒ガス名を掲名する方式であり、微燃性冷媒はどこにも掲名されておらず、不活性のフルオロカーボン以外のフルオロカーボン（第2グループ）の位置づけであった。2013 年以来、冷凍保安規則の規制合理化の検討がなされてきて、R1234yf、R1234ze 及び R32 の微燃性 3 冷媒は、2016 年 11 月に、可燃性ガスの定義から除かれ、不活性ガスの定義中の「フルオロカーボン（可燃性ガスを除く。）」に該当することとなり、不活性ガス（第1グループ）に位置づけられ、特定不活性ガスにこれらの微燃性 3 冷媒が掲名された。しかし、これらはわずかな燃焼性があるため、冷媒ガスが漏えいしたとき滞留しない構造と漏えいするガスが滞留するおそれがある場所への検知警報設備の設置が義務づけられた。

なお、2017 年 7 月、二酸化炭素も不活性ガス（第1グループ）に区分されている。

Table 3 Refrigerant classification and management on High Pressure Gas Safety Act

	冷凍能力(1日)			
	3トン	5トン	20トン	50トン
第1グループ フルオロカーボン (不活性のものに限る) 二酸化炭素	適用除外		許可・届出不要 法の適用 (その他製造)	届出 (第2種製造者)
第2グループ フルオロカーボン (不活性のものを除く) アンモニア	適用除外	許可・届出不要 法の適用 (その他製造)	届出 (第2種製造者)	
第3グループ その他のガス プロパン等		届出 (第2種製造者)		許可 (第1種製造者)

また、一般高圧ガス保安規則においても冷凍保安規則と同様な特定不活性ガスの区分が新設され、R1234yf、R1234ze 及び R32 が位置づけられた。⁵⁾

4) 省エネ法・建築物省エネ法

冷凍空調機器の省エネルギー化は地球温暖化対策にとって重要で、冷媒転換による機器の効率低下防止が大きな課題となる。省エネ法及びこれに基づく JIS によって省エネ性の算定の方法や表示が規定されている。機器の種類によって、通年エネルギー効率 (APF)、省エネ基準達成率、目標年度、省エネ性マーク等の表示が定められている。

建築物省エネ法は、2015 年に制定された法律で、一定規模以上建築物の新築、増改築時に省エネ性基準の適合性が判断されることから、空調機器の省エネ性が大きく関わることになる。

冷凍空調機器の地球温暖化への影響は、温室効果ガスとしての冷媒の放出の要因よりも運転時のエネルギー消費によるものが圧倒的に大きい。この面から、建築物との関係における機器の使用方法の最適化がより重要になると予想される。

5) その他の関係法律

その他関係する法律としては、温室効果ガスとしてのフロン^⑤の排出量算定、報告を規定した温暖化対策推進法（温対法）、電気機器の安全性を規定した電気用品安全法がある。

6) 業界規格

日本冷凍空調工業会は業界基準として、3 冷凍トン以上の冷凍空調機器を対象に、冷媒の安全性に係る設備及び施設の技術基準である JRA 規格・ガイドラインを策定している。

Table 4 にこの事例を示す。^⑥

Table 4 JRA Standards and Guideline by JRAIA

番号	規格番号	名称	対象機種	適用範囲
1	JRA GL-20	特定不活性ガスを使用した冷媒設備の冷媒ガスが漏えいしたときの燃焼を防止するための適切な措置	特定不活性ガス使用設備	5～20トン
2	JRA 4068	冷凍空調機器に関する冷媒漏えい検知警報器要求事項		定置式検知警報器
3	JRA GL-15	微燃性（A2L）冷媒を使用したチラーの冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン	チラー	7.5 kW～
4	JRA 4070	微燃性（A2L）冷媒を使用した業務用エアコンの冷媒漏えい時の安全機能要求事項	ビル用マルチ店舗PAC	3～20トン
5	JRA GL-16	微燃性（A2L）冷媒を使用した業務用エアコンの冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン	ビル用マルチ店舗PAC	3～20トン
6	JRA 4072	微燃性（A2L）冷媒を使用した低温機器の冷媒漏えい時の安全機能要求事項	低温機器	3～20トン
7	JRA GL-18	微燃性（A2L）冷媒を使用した低温機器の冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン	低温機器	3～20トン
8	JRA 4073	微燃性（A2L）冷媒を使用した設備用エアコンの冷媒漏えい時の安全機能要求事項	設備用PAC	～20トン
9	JRA GL-19	微燃性（A2L）冷媒を使用した設備用エアコンの冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン	設備用PAC	～20トン
10	JRA 4076	R744（CO2）を使用した小形冷凍装置の安全基準	冷凍機器	～5トン

3.3 海外の規制・規格の概要

1) 国際的な冷媒規制

モントリオール議定書が 1987 年に採択され、オゾン層破壊物質の生産量・消費量削減が実施されてきた。2019 年 1 月現在、196 ヶ国及び EU が締結している。何度かの規制強化を行いつつ着実に実効をあげてきた環境規制として国際的な評価が高い。2016 年には議定書改正（キガリ改正）が行われ、CFC、HCFC の代替物質であった HFC の段階的生産量・消費量の削減が規定された。これを受け、各国では国内法の整備が行われている。

気候変動枠組条約においては、京都議定書に代わる枠組として 2015 年にパリ協定が採択され、途上国も含め各国が温室効果ガス排出削減の将来目標の設定を行なった。ここには HFC、PFC も含まれている。

2) 欧米の冷媒規制

米国では、大気浄化法（Clean Air Act）によりモントリオール議定書遵守等のための規制措置がなされている。これに基づき、環境保護庁（EPA）が重要代替物質政策（SNAP）を公表し、冷媒対策を推進している。技術動向や経済性も考慮しながら、機器別に使用

を承認する物質、禁止する物質と適用年のリストアップがなされており、拘束力がある。用途によっては、R134a、R404A、R410A 等の高 GWP 冷媒は規制措置がかかる方向にある。⁷⁾

欧州では、2006 年に F ガス規制が採択され、2014 年に改定が行われている。この規制は F ガスの上流（ガス、製品の製造）、中流（使用時漏洩防止）、下流（廃棄時の回収、再生、破壊）まで幅広く規制するものである。以下に規制項目を示す。⁸⁾

- 高 GWP 封入機器の販売禁止：GWP レベルと禁止時期の規定
 - メンテナンス時における高 GWP ガス（2500 以上）の使用禁止（2020 年以降）
 - HFC の段階的な総量規制と生産者と輸入業者への割当制度
 - その他：漏洩点検システム、研修と業者認証、記録・報告義務等
- 欧州は、2030 年に 2009-12 年平均 CO₂ 換算総量の 79%の削減を目標としている。

3) 途上国の状況

現在、途上国の大半はモントリオール議定書に基づく HCFC の全廃対策が中心とみられる。HCFC 全廃計画（HPMP）がモントリオール多数国間基金を活用し国連環境計画（UNEP）で推進されている。R410A、R404A 等への転換が主であるが、学会、展示会等の情報では、GWP の低い R1234yf、R1233zd、新混合冷媒等の採用が行われている。また、R290、R600a 等の A3 クラス冷媒も有望と捉えている面がみられる。

4) ISO、IEC 規格

ISO817：冷媒の命名法、安全等級の国際規格であり、2014 年に改訂され、冷媒の燃焼性に関する等級に微燃性の区分 2L が追加された。⁹⁾

Table 5 Flammability classification on ISO817(2014)

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

また、毒性についても低毒性 A、高毒性 B の区分けがなされており、燃焼性と合わせた称呼がなされている。例えば、R123 や R245fa は B1、R32 や R1234yf は A2L となる。

Table 6 Toxicity classification on ISO817(2014)

毒性等級	英文表記	日本語表記	判断基準：暴露濃度限界 OEL (ppm)
クラス A	Lower Toxicity	低毒性	OEL ≥ 400
クラス B	Higher Toxicity	高毒性	OEL < 400

ISO5149：冷凍空調機器の安全性、環境性について定められた国際規格。2014 年に R32、R1234yf、R1234ze 等の低毒性で微燃性の冷媒（2L クラス）の使用に関する要求事項が規定された。この中で、安全対策が不要な許容冷媒充填率（RCL）、総冷媒充填量が定められ

たが、その後、機器の設置状態を考慮した見直し等の検討がなされている。¹⁰⁾

IEC60335-40：ヒートポンプ、エアコン、除湿機に関する安全、製品認証規格。ISO と連携し、2018 年に 2 L 冷媒についての規定が導入されている。¹¹⁾

ISO52000：建築物のエネルギー性能の評価、建築環境設計に関する規格で、冷暖房の計算方法、エネルギー性能指標、評価等が含まれ、総合的なアプローチがなされており、冷凍空調機器の省エネ性評価との関わりが深い。EPB (Energy performance of buildings) として、現在追加検討が進んでいる模様である。特に、EU ではこれを EN 規格への落とし込みがなされている。¹²⁾

5) ASHRAE 規格

ASHRAE34：冷媒の命名法、安全等級の米国規格であり、世界をリードしている。2011 年に燃焼熱量が 19000kJ/kg 以下で燃焼速度が 10cm/s 以下の微燃性冷媒について、2 L ランクが新設され、R32、R1234yf、アンモニアが分類されている。内容は ISO817 とほぼ同様である。既に規制になっている CFC、HCFC を除き、現在登録されている物質を整理し、GWP 値を加えたものを Table7-1,2,3,4 に示す。¹³⁾

Table 7-1 Refrigerant Data and Safety Classification (ANSI/ASHRAE Standard 34-2016)

Refrigerant Number	Chemical Formula	Normal Boiling Point (°C)	Safety Group	RCL (g/m3)	GWP	備考 (主な適用状況)
Methane Series						* 2014年以降の追加物質
14	CF4	-128	A1	400	7,390	
23	CHF3	-82	A1	120	14,800	単一（極低温冷凍機）
32	CH2F2	-52	A2L	77	675	単一、混合系（全般）
41	CH3F	-78				
50	CH4	-161	A3		25	
Ethane Series						
116	CF3CF3	-78	A1	550	12,200	
125	CHF2CF3	-49	A1	370	3,500	主に混合系
134a	CH2FCF3	-26	A1	210	1,430	単一、混合系（全般）
143a	CH3CF3	-47	A2L	70	4,470	主に混合系
152a	CH3CHF2	-24	A2	32	124	主に混合系
170	CH3CH3	-89	A3	8.7		
Ethers						
E170	CH3OCH3	-25	A3	16	1	
Propane						
218	CF3CF2CF3	-37	A1	690	8,830	主に混合系
227ea	CF3CHF2CF3	-15.6	A1	580	3,220	主に混合系
236fa	CF3CH2CF3	-1	A1	340	9,810	主に混合系
245fa	CHF2CH2CF3	15	B1	190	1,030	単一（ターボ冷凍機）
290	CH3CH2CH3	-42	A3	9.5	3	単一、混合系
Cyclic Organic Compounds						
C318	-(CF2)4-	-6	A1	660		
Miscellaneous Organic Compounds						
hydrocarbons						
600	CH3CH2CH2CH3	0	A3	2.4	15	単一、混合系
600a	CH(CH3)iCH3	-12	A3	9.6	4	単一、混合系
601	CH3CH2CH2CH2CH3	36.1	A3	2.9		
601a	(CH3)2CHCH2CH3		A3	2.9		
oxygen compounds						
610	CH3CH2OCH2CH3	35				
611	HCOOCH3	32	B2			
sulfur compounds						
620						
Nitrogen Compounds						
630	CH3NH2	-7				
631	CH3CH2(NH2)	17				
Inorganic Compounds						
717	NH3	-33	B2L	0.22	1	主に単一
718	H2O	100	A1		< 1	主に単一
744	CO2	-78	A1	54	1	主に単一
Unsaturated Organic Compounds						
1130(E)	CHCl=CHCl	47.7	B1	4		
1132a	CF2=CH2	-86.7	A2	33		*
1150	CH2=CH2	-104	A3			
1224yd(Z)	CF3CF=CHCl	14.5	A1	360		*
1233zd(E)	CF3CH=CHCl	18.1	A1	85	1	単一（ターボ冷凍機）
1234yf	CF3CF=CH2	-29.4	A2L	75	1	単一、混合系
1234ze(E)	CF3CH=CFH	-19	A2L	75	1	単一、混合系 *
1270	CH3CH=CHz	-48	A3	1.7	3	主に混合系
1336mzz(Z)	CF3CHCHCF3	33.4	A1	87	2	*

Table 7-2 Refrigerant Data and Safety Classification (ANSI/ASHRAE Standard 34-2016)

Number	Composition (Mass%)	Bubble Point (°C)	Dew Point (°C)	Safety Group	RCL (g/m3)	GWP	備考 (主な適用状況、代替候補等)
Zeotropes							* 2014年以降の追加物質
404A	R-125/143a/l 34a (44.0/52.0/4.0)	-46.6	-45.8	A1	500	3,920	主に冷凍冷蔵
407A	R-32/125/134a (20.0/40.0/40.0)	-45.2	-38.7	A1	300	2,110	
407B	R-32/125/134a (10.0/70.0/20.0)	-46.8	-42.4	A1	330	2,800	
407C	R-32/125/134a (23.0/25.0/52.0)	-43.8	-36.7	A1	290	1,770	主に空調
407D	R-32/125/134a(15.0/15.0/70.0)	-39.4	-32.7	A1	250	1,630	
407E	R-32/l 25/134a (25.0/15.0/60.0)	-42.8	-35.6	A1	280	1,550	
407F	R-32/125/l 34a (30.0/30.0/40.0)	-46.1	-39.7	A1	320	1,820	
407G	R-32/125/134a (2.5/2.5/95.0)	-29.2	-27.2	A1	210	1,460	*
407H	R-32/125/134a (32.5/15.0/52.5)	-44.7	-37.6	A1	300	1,500	*
407I	R-32/125/134a (19.5/8.5/72.0)	-39.8	-33.0	A1	250	1,460	*
410A	R-32/125(50.0/50.0)	-51.6	-51.5	A1	420	2,090	空調、冷凍冷蔵
410B	R-32/125 (45.0/55.0)	-51.5	-51.4	A1	430	2,230	
413A	R-218/134a/600a (9.0/88.0/3.0)	-29.3	-27.6	A2	94	2,050	
417A	R-125/134a/600 (46.6/50.0/3.4)	-38.0	-32.9	A1	56	2,350	
417B	R-125/134a/600 (79.0/18.3/2.7)	-44.9	-41.5	A1	70	3,030	
417C	R-125/134a/600 (19.5/78.8/1.7)	-32.7	-29.2	A1	87	1,810	
419A	R-125/134a/E170 (77.0/19.0/4.0)	-42.6	-36.0	A2	67	2,970	
419B	R-125/134a/E170 (48.5/48.0/3.5)	-37.4	-31.5	A2	74	2,380	
421A	R-125/134a (58.0/42.0)	-40.8	-35.5	A1	280	2,630	
421B	R-125/134a (85.0/15.0)	-45.7	-42.6	A1	330	3,190	
422A	R-125/134a/600a (85.1/11.5/3.4)	-46.5	-44.1	A1	290	3,140	
422B	R-125/134a/600a (55.0/42.0/3.0)	-40.5	-35.6	A1	250	2,530	
422C	R-125/134a/600a (82.0/15.0/3.0)	-45.3	-42.3	A1	290	3,080	
422D	R-125/134a/600a (65.1/31.5/3.4)	-43.2	-38.4	A1	260	2,730	
422E	R-125/134a/600a (58.0/39.3/2.7)	-41.8	-36.4	A1	260	2,590	
423A	R-134a/227ea (52.5/47.5)	-24.2	-23.5	A1	310	2,280	
424A	R-125/134a/600a/600/601a (50.5/47.0/0.9/1.0/0.6)	-39.1	-33.3	A1	100	2,440	
425A	R-32/134a/227ea (18.5/69.5/12.0)	-38.1	-31.3	A1	260	1,510	
426A	R-125/134a/600/601a (5.1/93.0/1.3/0.6)	-28.5	-26.7	A1	83	1,510	
427A	R-32/125/143a/134a (15.0/25.0/10.0/50.0)	-43.0	-36.3	A1	290	2,140	
428A	R-125/143a/290/600a (77.5/20.0/0.6/1.9)	-48.3	-47.5	A1	370	3,610	
429A	R-E170/152a/600a (60.0/10.0/30.0)	-26.0	-25.6	A3	13	12	
430A	R-152a/600a (76.0/24.0)	-27.6	-27.4	A3	21	94	
431A	R-290/152a (71.0/29.0)	-43.1	-43.1	A3	11	36	
432A	R-1270/E170 (80.0/20.0)	-46.6	-45.6	A3	2.1	3	
433A	R-1270/290 (30.0/70.0)	-44.6	-44.2	A3	5.5	3	
433B	R-1270/290 (5.0/95.0)	-42.7	-42.5	A3	8.1	3	
433C	R-1270/290 (25.0/75.0)	-44.3	-43.9	A3	6.6	3	
434A	R-125/143a/134a/600a (63.2/18.0/16.0/2.8)	-45.0	-42.3	A1	320	3,250	
435A	R-E170/152a (80.0/20.0)	-26.1	-25.9	A3	17	25	
436A	R-290/600a (56.0/44.0)	-34.3	-26.2	A3	8.1	3	
436B	R-290/600a (52.0/48.0)	-33.4	-25.0	A3	8.2	3	
436C	R-290/600a (95.0/5.0)	-41.5	-39.5	A3	9.1	3	*

Table 7-3 Refrigerant Data and Safety Classification (ANSI/ASHRAE Standard 34-2016)

Number	Composition (Mass%)	Bubble Point (°C)	Dew Point (°C)	Safety Group	RCL (g/m ³)	GWP	備考 (主な適用状況、代替候補等)
Zeotropes							* 2014年以降の追加物質
437A	R-125/134a/600/601 (19.5/78.5/1.4/0.6)	-32.9	-29.2	A1	82	1,810	
438A	R-32/125/134a/600/601a (8.5/45.0/44.2/1.7/0.6)	-43.0	-36.4	A1	79	2,260	
439A	R-32/125/600a (50.0/47.0/3.0)	-52.0	-51.8	A2	76	1,980	
440A	R-290/134a/152a (0.6/1.6/97.8)	-25.5	-24.3	A2	31	144	
441A	R-170/290/600a/600 (3.1/54.8/6.0/36.1)	-41.9	-20.4	A3	6.3	7	
442A	R-32/125/134a/152a/227ea (31.0/31.0/30.0/3.0/5.0)	-46.5	-39.9	A1	330	1,890	
443A	R-1270/290/600a (55.0/40.0/5.0)	-44.8	-41.2	A3	3.1	3	
444A	R-32/152a/1234ze(E) (12.0/5.0/83.0)	-34.3	-24.3	A2L	81	88	
444B	R-32/152a/1234ze(E) (41.5/10.0/48.5)	-44.6	-34.9	A2L	69	293	*
445A	R-744/134a/1234ze(E) (6.0/9.0/85.0)	-50.3	-23.5	A2L	67	130	
446A	R-32/1234ze(E)/600 (68.0/29.0/3.0)	-49.4	-44.0	A2L	39	460	*
447A	R-32/125/1234ze(E) (68.0/3.5/28.5)	-49.3	-44.2	A2L	42	582	*
447B	R-32/125/1234ze(E) (68.0/8.0/24.0)	-50.1	-46.0	A2L	360	739	*
448A	R-32/125/1234yf/134a/1234ze(E) (26.0/26.0/20.0/21.0/7.0)	-45.9	-39.8	A1	390	1,390	R404A代替候補 *
449A	R-32/125/1234yf/134a (24.3/24.7/25.3/25.7)	-46.0	-39.9	A1	370	1,400	R404A代替候補 *
449B	R-32/125/1234yf/134a (25.2/24.3/23.2/27.3)	-46.1	-40.2	A1	370	1,410	*
449C	R-32/125/1234yf/134a (20.0/20.0/31.0/29.0)	-44.6	-38.1	A1	360	1,250	*
450A	R-134a/1234ze(E) (42.0/58.0)	-23.4	-22.8	A1	320	601	R134a代替候補 *
451A	R-1234yf/134a (89.8/10.2)	-30.8	-30.5	A2L	81	147	*
451B	R-1234yf/134a (88.8/11.2)	-31.0	-30.6	A2L	81	161	*
452A	R-32/125/1234yf (11.0/59.0/30.0)	-47.0	-43.2	A1	440	2,140	*
452B	R-32/125/1234yf (67.0/7.0/26.0)	-51.0	-50.3	A2L	360	698	R410A代替候補 *
452C	R-32/125/1234yf (12.5/61.0/26.5)	-47.5	-44.2	A1	430	2,220	*
453A	R-32/125/134a/227ea/600/600a (20.0/20.0/53.8/5.0/0.6/0.6)	-42.2	-35.0	A1	120	1,770	*
454A	R-32/1234yf (35.0/65.0)	-48.4	-41.6	A2L	450	237	R404A代替候補 *
454B	R-32/1234yf (68.9/31.1)	-50.9	-50.0	A2L	360	465	R410A代替候補 *
454C	R-32/1234yf (21.5/78.5)	-46.0	-37.8	A2L	460	146	R404A代替候補 *
455A	R-744/32/1234yf(3.0/21.5/75.5)	-51.6	-39.1	A2L	380	146	R404A代替候補 *
456A	R-32/134a/1234ze(E) (6.0/45.0/49.0)	-30.4	-25.6	A1	320	685	*
457A	R-32/1234yf/152a (18.0/70.0/12.0)	-42.7	-35.5	A2L	400	137	R404A代替候補 *
458A	R-32/125/134a/227ea/236fa (20.5/4.0/61.4/13.5/0.6)	-39.8	-32.4	A1	280	1,650	*
459A	R-32/1234yf/1234ze(E) (68.0/26.0/6.0)	-50.3	-48.6	A2L	360	459	*
459B	R-32/1234yf/1234ze(E) (21.0/69.0/10.0)	-44.0	-36.1	A2L	470	143	*
460A	R-32/125/134a/1234ze(E) (12.0/52.0/14.0/22.0)	-44.6	-37.2	A1	380	2,100	*
460B	R-32/125/134a/1234ze(E) (28.0/25.0/20.0/27.0)	-45.2	-37.1	A1	400	1,350	*
460C	R-32/125/134a/1234ze(E) (2.5/2.5/46.0/49.0)	-29.2	-26.0	A1	310	763	*
461A	R-125/143a/134a/227ea/600a (55.0/5.0/32.0/5.0/3.0)	-42.0	-37.0	A1	270	2,770	*
462A	R-32/125/143a/134a/600 (9.0/42.0/2.0/44.0/3.0)	-42.6	-36.6	A2	62	2,250	*
463A	R744/32/125/1234yf/134a (6.0/36.0/30.0/14.0/14.0)	-58.4	-46.9	A1	300	1,490	R404A代替候補 *
464A	R-32/125/1234ze(E)/227ea (27.0/27.0/40.0/6.0)	-46.5	-36.9	A1	430	1,320	*
465A	R-32/290/1234yf (21.0/7.9/71.1)	-51.8	-40.0	A2	40	143	*
466A	R-32/125/CF3I (49.0/11.5/39.5)						登録候補 (R410A代替候補)

Table 7-4 Refrigerant Data and Safety Classification (ANSI/ASHRAE Standard 34-2016)

Number	Composition (Mass%)	Normal Bubble Point (°C)	Safety Group	RCL (g/m ³)	GWP	備考 (主な適用状況、代替候補等)
Azeotropes						* 2014年以降の追加物質
507A	R-125/143a (50.0/50.0)	-46.7	A1	520	3,990	
508A	R-23/116 (39.0/61.0)	-86	A1	220	5,770	
508B	R-23/116 (46.0/54.0)	-88.3	A1	200	6,810	
510A	R-E170/600a (88.0/12.0)	-25.2	A3	14	1	
511A	R-290/E170 (95.0/5.0)	-42.1	A3	9.5	3	
512A	R-134a/152a (5.0/95.0)	-24	A2	31	189	
513A	R-1234yf/134a (56.0/44.0)	-29.2	A1	320	630	R134a代替候補 *
513B	R-1234yf/134a (58.5/41.5)	-29.2	A1	330	594	* *
514A	R-1336mzz(Z)/1130 (E) (74.7/25.3)	29	B1	14		R123代替候補 *
515A	R-1234ze(E)/227ea (88.0/12.0)	-18.9	A1	300	387	* *
516A	R-1234yf/134a/152a (77.5/8.5/14.0)	-29.4	A2L	110	140	* *

Table7の掲載基準

掲載物質：CFC、HCFC及びこれが含まれる混合物、及びNH₃、H₂O、CO₂以外の無機物は除く

GWP値：IPCC AR4及び経済産業省、環境省告示の値¹⁴⁾による。これに記載のない混合冷媒は組成比からの計算値

ASHRAE15：冷凍空調機器の基準を定めた米国規格。ISO5149 と対応している。現在、2016 年版が最新版。¹⁵⁾

6) EN 規格

EN378：冷媒と機器の安全、環境基準を定める欧州規格。4つのパートから成り、冷媒の区分、機器の設計、据付、メンテナンス等をカバーしている。ISO817、5149 に対応している。2016 年版で微燃性冷媒 2 L が導入されている。¹⁶⁾

7) GHS 規格

GHS とは、化学物質の危険有害性分類基準と表示方法に関する国際的システムである。化学物質固有の危険有害性の情報を伝えるための安全性データシート (SDS) とラベル表示の仕様が定められている。2003 年に国際連合主導で最初のバージョンが出され、2019 年現在改定 7 版になっている。¹⁷⁾

この中に可燃性ガスの分類基準があり、Table 9 に示す内容となっている。

Table 9 Criteria for flammable gases on GHS

区分	有害性情報	判定基準	注意喚起語	シンボル	該当物質例
1A	極めて可燃性 Extremely flammable	気圧 101.3kPa、20°Cで燃焼下限濃度が13% 以下 または 爆発(燃焼)範囲が12% 以上 下記を含む ・自然発火性ガス:54°C以下で自然発火するガス ・化学的に不安定なガス A)気圧 101.3kPa、20°Cで不安定 B)気圧 101.3kPa超及び/又は20°C超で不安定 1Bに合致した場合を除く	危険 (Danger)		
1B	可燃性 Flammable	区分1Aの判定基準を満たし、自然発火性、化学的不安定がなく、以下の条件を満たすもの ・燃焼下限が6%超 または ・燃焼速度が10cm/s未満	危険 (Danger)		R32 R1234yf
2	可燃性 Flammable	1A、1B以外のガスで、気圧 101.3kPa、20°Cで爆発(燃焼)範囲を有するもの	警告 (Warning)	なし	

混合ガスの場合は、ISO10156 に従った計算での判定法が記載されている。

ただ、GHS では現状微燃性の区分がなく、R32 や R1234yf は区分 1B、R1234ze は可燃性以外となっており、ISO817 等との整合性が課題となっている。

3.4 国内外安全規制・規格の比較

次世代の冷媒として GWP の低い物質を探索する場合、燃焼性への対応が避けられない状況にある。上記で述べた規制、規格における可燃性ガスの区分けを Table 10 に整理した。

Table 10 Refrigerant flammability classification on related regulations and standards

	(1) ISO817,EN378 (2) ASHRAE34		GHS	一般高圧ガス 保安規則
可燃性 分類	Class 1 不燃性 No Flame Propagation	火炎が伝播しない	不燃性 燃焼範囲を 有しないもの	不活性ガス フルオロカーボン (可燃性ガスを除く) 特定不活性ガス R32, R1234yf R1234ze
	Class 2L 微燃性 Lower Flammability	(1) LFL>3.5% (2) LFL>0.1kg/m3 HOC<19000 BV≤10	Category2 可燃性 下記以外で燃焼範囲を 有するもの Flammable	可燃性ガス ・ 掲名されているもの ・ その他のガスであって 爆発限界の下限が 10%以下のもの又は 爆発限界の上限と 下限の差が20%以上 のもの (R1234yf, R1234zeを 除く)
	Class 2 可燃性 Flammability	(1) LFL>3.5% (2) LFL>0.1kg/m3 HOC<19000	Category1B 可燃性 Flammable LFL>6% または BV<10cm/s	
	Class 3 強燃性 Higher Flammability	(1) LFL≤3.5% (2) LFL≤0.1kg/m3 HOC≥19000	Category1A 極めて可燃性 Extremely Flammable LFL≤13% または D≥12%	
試験 条件	LFL, D(=UFL-LFL), HOC: 60°C BV: 23°C 試験方法: ASTM E681		20°C 試験方法: ISO 10156	試験方法: A法※

LFL: 燃焼下限界(%またはkg/m3) UFL: 燃焼上限界(%またはkg/m3) 燃焼幅D=UFL-LFL(%) HOC: 燃焼エネルギー(kJ/kg)
BV: 燃焼速度(cm/s)

※A法: 「火薬類・高圧ガス取締月報 第37号」(昭和43年1月15日 通商産業省化学局保安課発行)の「爆発限界の測定方法の基準」

参考文献

- 1) 小山繁: NEDO TSC Foresight セミナー「冷媒の低 GWP 化への挑戦と将来展望」(2015.10)
- 2) 岸本哲郎: 講演資料「空調・冷凍業界における次世代低 GWP・ノンフロン冷媒動向」(2017.4)
- 3) 改正オゾン層保護法について: 産構審フロン対策 WG 資料 (2019.1)
- 4) 指定製品の目標値、目標年度の設定について: 産構審フロン対策 WG 資料 (2017.12)
- 5) 冷凍関係法規集 (第 58 次改訂版): 日本冷凍空調学会 (2018)
- 6) 日本冷凍空調工業会 <https://www.jraia.or.jp/jra/index.html>
- 7) Significant New Alternatives Policy Program <https://www.epa.gov/snap>

- 8) F ガス規制について（経済産業省資料）
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/kagaku_busshitsu/flon_taisaku/pdf
- 9) ISO817-2014 <https://www.sis.se/api/document/preview/917426/>
- 10) ISO5149-2014 <https://www.iso.org/standard/54979.html>
- 11) IEC60335-40 <https://www.sis.se/api/document/preview/80000891/>
- 12) ISO52000-2017 <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:52000:-1:ed-1:v1:en>
- 13) ASHRAE34-2016
<https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/ashrae-refrigerant-designations>
- 14) 経済産業省、環境省告示第二号（2016.3）
https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/ozone/files/law_furon/07_gwp-kokuji_160329.pdf
- 15) ASHRAE15-2010 <http://sspc15.ashraepcs.org/documents.php>
- 16) EN378-2016 <https://www.agas.com/media/4504/en378-ior-guidance-note.pdf>
- 17) GHS（環境省資料） <http://www.env.go.jp/chemi/ghs/>