第2部 次世代冷媒の安全性・リスク評価(WGII)の進捗

目次

第	-	はじめに	
	1.1	NEDO プロジェクトの概要	
	1.2	次世代冷媒に関する調査委員会 WGⅡの活動	6
	1.3	本報告書について本報告書について	8
		東京大学の進捗	
	- — 2.1	はじめに	
	2.2	可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究	
		1 緒言	
		.1 相言	
		.2 行保空調機器が600行媒備伐美線	
		.4 まとめ	
		可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究	
		.1 はじめに	
		.2 小型容器における燃焼実験	
		.3 燃焼現象のシミュレーション	
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	・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
	3.7	照明スイッチの動作によるプロパンへの着火性	
	3.8	まとめと今後の課題	
	 4 章	産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
	- - - 1.1	はじめに	
	1.2	燃焼限界測定法の評価	
		R32/1234yf 混合系の燃焼限界	
		R32 及び R1234yf の燃焼限界の温度依存性	
		R32 次 ○ R123-y1 ○ ※※※※※※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※	
	5.1	冷媒変更と日本冷凍空調学会との連携について	
		リスクアセスメントの許容値について	
		ラハノノ Cハハン 190日 存 値に フィ C	
•		看 久(赤)に ラゾ・ C	
		1 輸送休日時の有久族	
		.3 室内設置の着火源	
		.4 室外設置の着火源	
		.5 修理時の着火源	
		.6 廃棄時の着火源	
	5.4	漏えいシミュレーションについて	36
		.1 バルコニーでのシミュレーション条件	
		.2 シミュレーション手法	
	5.4	3 無風条件での結果	20
:		修理	38
			38
	5.5 5.6	修理	38 39

5.7.2 修理時	40
5.7.2 BAT	
5.8 まとめ	
- 3.0 - 3.0 - 2	
第6年 日本/7 末王嗣工未去による N3 7 末の P3 献 フョーケースの サスノ 計画の 定抄	
6.2 安全規格の見直し	
6.3 IEC60335-2-89 の主な改定案	
6.3.1 最大冷媒充填量	
6.3.2 最小設置床面積	
6.3.3 冷媒漏えい試験	
6.3.4 IEC60335 2-89 の今後の予定	
6.4 リスクアセスメント	
6.4.1 リスクアセスメントのプロセス	
6.4.2 内蔵ショーケースのリスクモデルの設定	
6.4.3 許容レベルの設定	
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	
6.6.2 ショーケースに係わる着火源	
6.6.3 CVS 店舗内に設置している機器に係わる着火源	
6.7 まとめ	

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挙すると、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

【產業技術総合研究所(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。

【產業技術総合研究所(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.

	5	(件/台·年) 10-4超	頻発する	С	ВЗ	A1	A2	А3				
発	4	10-4以下 ~10-5		С	B2	ВЗ	A1	A2				
生	3	10-5以下 ~10-6		С	B1	B2	ВЗ	A1				
頻	2	10-6以下 ~10-7	起りそうに	С	С	B1	B2	ВЗ				
度	1	10-7以下	まず	С	С	С	В1	В2				
	0	10-8以下	考えられ ない	С	С	С	С	С				
				無傷	軽微	中程度	重大	致命的				
				なし	軽傷	通院加療	重傷入院治療	死亡				
				なし	製品発煙	製品発火 製品焼損	火災	火災 (建物延焼)				
				0 I II IV 危害の程度								

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

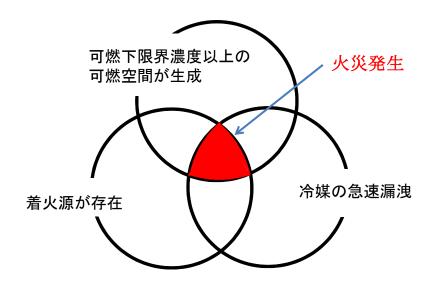


Fig. 1-2 Conditions for fire accident occurrence

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。

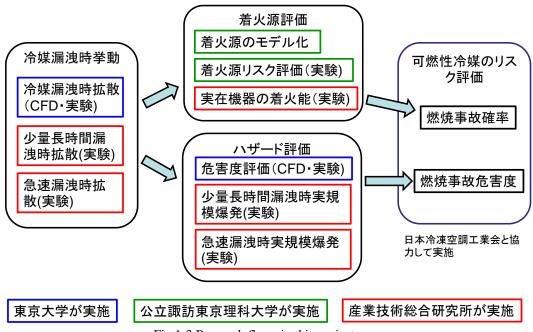


Fig.1-3 Research flows in this project

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。

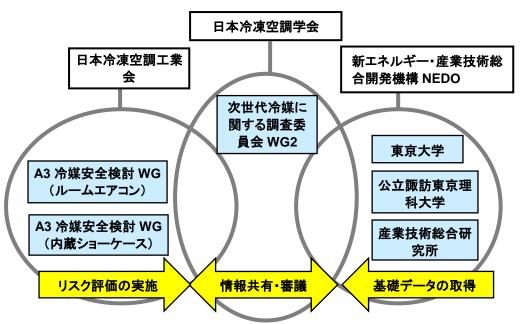


Fig. 1-4 Deliberation system for risk assessment of flammable refrigerants

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

Table 1-	1 mvestigation committee on	Next-Generation Refrigerants, WSI	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 拡海
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㈱		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㈱		山下 浩司
		東芝キヤリア㈱		山口 広一
		ダイキン工業㈱		藤本 悟
		ダイキン工業㈱		平良 繁治
		日立ジョンソンコントロールズ	空調㈱	佐々木 俊治
		三菱重工サーマルシステムズ㈱)	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
	東京大学	大学院新領域創成科学研究科	准教授	党 超鋲
			特任研究員	伊藤 誠
	新エネルギー・産業技術	環境部	主任研究員	阿部 正道
	総合開発機構		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る。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たい。

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),党超鋲,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),白籏恭平,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(株))
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(株)

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、 CO_2 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.

TE 1 1 A 1 D1	. 1 1	CI 1 '1'	. •	C C .
Table 7-1 Ph	vsical and	tlammahility	nronerfies	of refrigerants
14010 2 1 1 11	y sicui ana	i i a i i i i i a o i i i i y	properties	of refrigerants

		<u> </u>		
	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/m3]	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	_	_

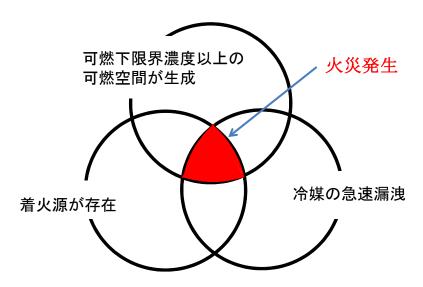


Fig. 2-1 Mechanism of ignition

(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, $\phi100mm$ 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.

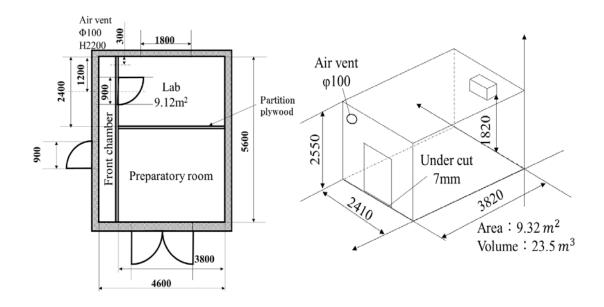


Fig. 2-2 Overview of constricted room

(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.

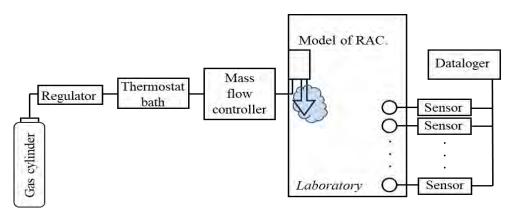
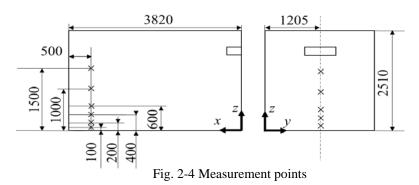


Fig.2-3 Schematic of experimental setup



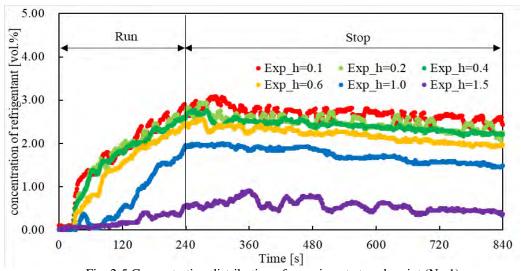


Fig. 2-5 Concentration distribution of experiment at each point (No.1)

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、計算アリゴリズムには 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 $3820 \,\mathrm{mm} \times 2410 \,\mathrm{mm} \times 2550 \,\mathrm{mm}$ とし,一方の壁の床面から $2100 \,\mathrm{mm}$ 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 100 $\,\mathrm{mm}$ の排気口とドア下隙間 $900 \,\mathrm{mm} \times 7 \,\mathrm{mm}$ 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 $4 \,\mathrm{min}$ で $1 \,\mathrm{kg}$ 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, $3 \,\mathrm{cm}$ 9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。

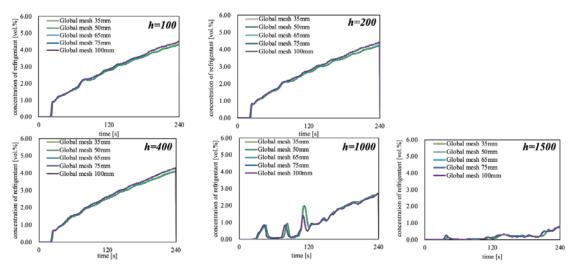


Fig. 2-6 Concentration of refrigerant on each point

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以下での低地点において、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。

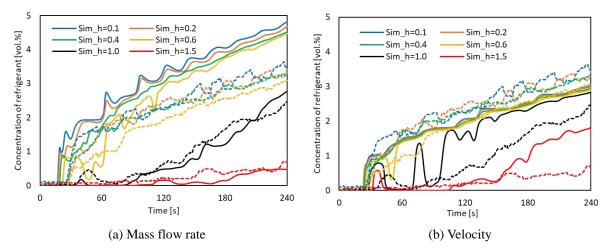


Fig. 2-7 Competitions of boundary condition

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)を挙げようと試みた. 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。

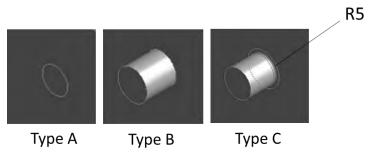


Fig. 2-8 Each shape of vents

Table 2-3 Volume balance of each vents shape									
	境界部形状			積算気体体積 (流入が正)	流入体積—流出体積 [m³]				
	児外部形 仏	換気口	ドア下 隙間	室内機 吹き出し部	室内機 吸い込み部	加入体值—加山体值 [m·]			
Type A	切断面	i -0.248 -1.403 1.894 -1.403		-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%)			

 \times R32 1kg \rightarrow 0.474[m³], Air 1kg \rightarrow 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.

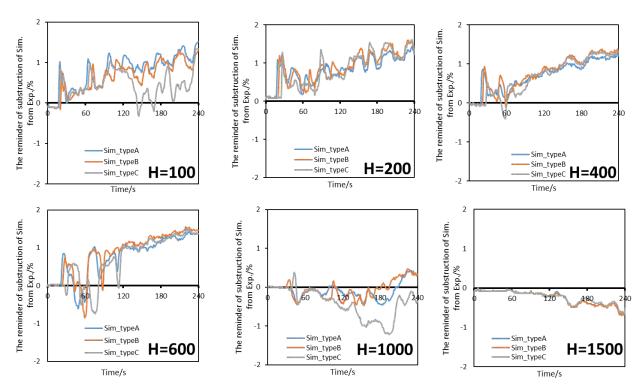


Table 2-9 Residual between simulation and experiment

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。

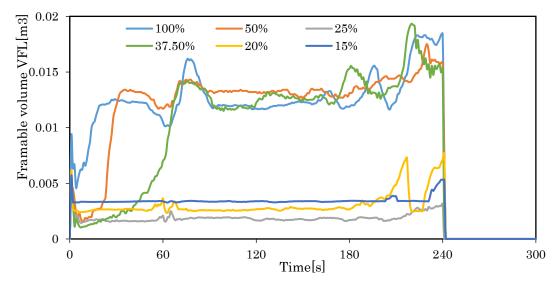


Fig. 2-10 Flammable volume of each leak concentration

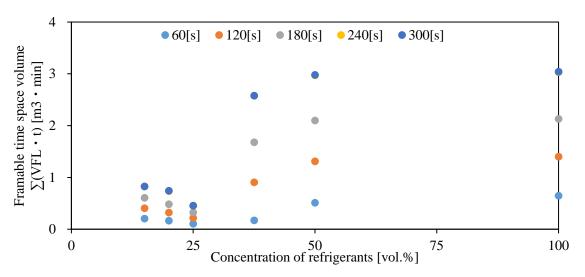


Fig. 2-11 Relationship between refrigerants concentration and flammable time space volume

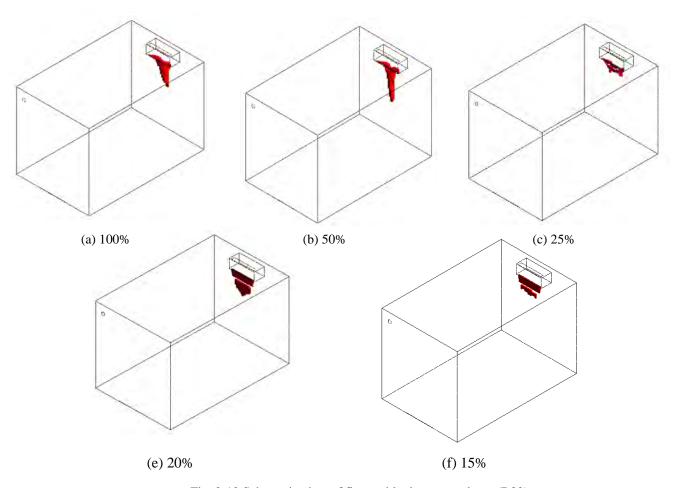
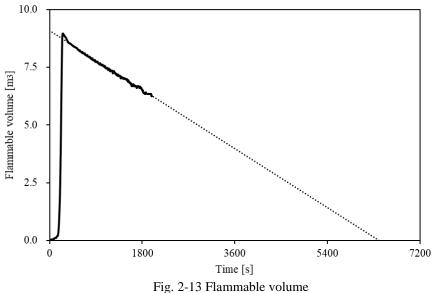


Fig. 2-12 Schematic view of flammable time gas volume (R32)

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.



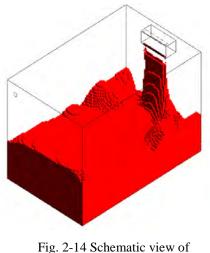


Fig. 2-14 Schematic view of flammable time space volume (R290)

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 $3.98[m^3]$ 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 $^{2-0}$ において、容器体積が KG 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、 $0.01\text{m}^3\sim1\text{m}^3$ 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.

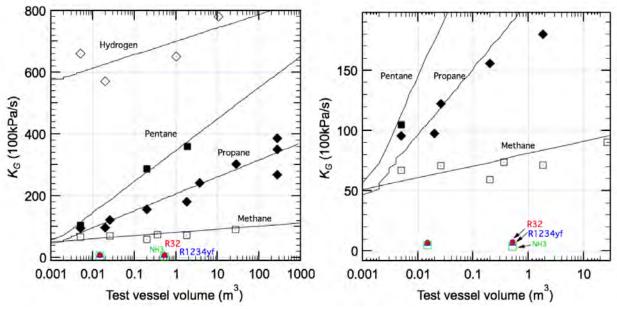


Fig.2-15 Influence of spherical container volume on K_G ²⁻⁶⁾

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標としている.

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け込み, 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.

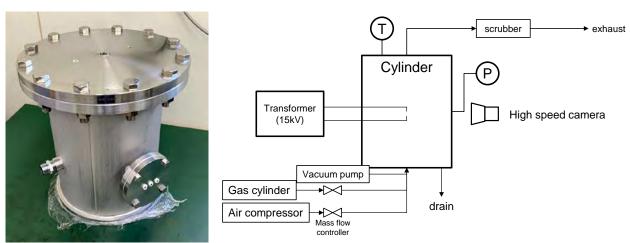


Fig.2-16 Small-scale combustion test equipment

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標としている. 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 $0\sim1$ 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一群である。R290 に類似の炭化水素類については、Lawrence Livermore National Laboratory National University of Ireland Parallel Pa

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.

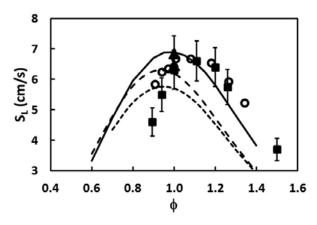


Fig.2-17 Relationship between experimental and predicted values of R32 air mixing ratio and laminar burning velocity ²⁻⁹⁾

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

MD F	luorometha	nes: Therm	al Deco	mposition		A	b	E/R	note	refI	ref2	Hr
7 C	H2SING	+ HF	=	CH3F		1.91E+23	-3.62	896.	xg	73SCH/WAG	nist	-89
8 C	HF	+ H2	=	CH3F		2.25E+17	-2.85	6543.	ak		nist	-83
90	H2F	+ H	=	CH3F		3.03E+21	-3.38	1741.	ak		nist	-97
10 C	HF	+ HF	=	CH2F2		3.64E+24	-4.26	2043.	ak.		nist	-72
11 C	F2	+ H2	=	CH2F2		1.70E+06	-0.71	20584.	ak		nist	-62
12 C	HF2	+ H	=	CH2F2		2.75E+06	-0.32	3870.	ak		nist	-99
13 C	HF3	+ M	=	CF2	+ HF	2.39E+30	-4.00	34751.	xg	91HID/NAK	nist	61
14 C	F3	+ F	Ŧ	CF4		1.60E+39	-7.90	4504.		86PLU/RYA	nist	-130
NN F	luoromethy	ls: Oxidatio	n			A	b	E/R	note	ref1	ref2	Hr
10	H2F	+ 02	=	CHF:O	+ O +H	2.26E+09	1.14	14343.	r CF3	dH	nist	28
2 0	HF2	+ 02	=	CF2:O	+ O +H	2.26E+09	1.14	8304.	r CF3	dH	nist	
3 0	F3	+ 02	=	CF3O	+ 0	2.26E+09	1.14	10820.	k		nist	21
40	H2F	+ 0	F	CHF:0	+ H	5.70E+13	0.00	0.	r CH3	CF3	nist	-91
5 C	HF2	+ 0	=	CF2:O	+ H	3.70E+13	0.00	0.	r CH3	CF3	nist	-103
60	F3	+ 0	=	CF2:O	+ F	1.87E+13	0.00	0.	x	89TSA/BEL	nist	-81
7 0	H2F	+ OH	=	CH2O	+ HF	2.50E+13	0.00	0.	r CH3		nist	-95
8 0	HF2	+ OH	=	CHF:0	+ HF	2.50E+13	0.00	0.	r CH3		nist	-105
9 0	F3	+ OH	-	CF2:0	+ HF	2.00E+13	0.00	0.	r CH3		nist	-115
10 C	H2F	+ HO2	=	CH3F	+ 02	3.00E+12	0.00	0.	r CH3		nist	-49
11 0	HF2	+ HO2	=	CH2F2	+ 02	3.00E+12	0.00	0.	r CH3		nist	-50
12 C	F3	+ HO2	=	CHF3	+ 02	2.00E+12	0.00	0.	r CH3		nist	-59
13 C	H2F	+ HO2	=	CHF:0	+ OH + H	1.50E+13	0.00	0.	r CH3		nist	-24
14 C	HF2	+ HO2	=	CF2:O	+ OH + H	1.50E+13	0.00	0.	r CH3		nist	-37
15 C	F3	+ HO2	=	CF3O	+ OH	1.00E+13	0.00	0.	r CH3	-	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	Brush motor	Fan		
	Exhaust fan		Vacuum cleaner		
	Vacuum cleaner		Hair dryer		
	Air cleaner	Human operation	Plugging in/out of outlet		
	Hair dryer		Wall-mounted lighting		
			switch		
	Electric carpet	General appliances	Air cleaner		
	Printer		Humidifier		
	Electric pot		Cell phone		
	Rice cooker		PC		
	Liquid crystal television		Lighting equipment		
	Audio&Video equipment		Refrigerator Freezer Dishwasher Phone		
	Phone				
	Fax				
Thermostat	Refrigerator				
	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、 $10^{-3} - 10^{-2}$ 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はプロパンー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. 例えば針ー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 などのラジカルの生成特性を実験により調べており、OH ラジカルの減衰時定数として 150 µs を得ている。また、Cathey ら $^{3-11}$)も OH ラジカルの LIF 計測を行っており、可燃性混合気中では 100 µs 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 $^{100-150}$ µs 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 μ 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 μs 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と読み取れる.

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、接点開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を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 $^{3\text{-}16)}$ 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 $3000~\mathrm{rpm}$ 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 $3000~\mathrm{rpm}$ 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 $17~\mathrm{V},0.55~\mathrm{A},37~\mathrm{\mu s}$ であったので、これよりエネルギーは $0.35~\mathrm{mJ}$ となる。アーク継続時間が $100~\mathrm{\mu s}$ 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 $650\,\mathrm{nm}$ 、ブルーレイプレーヤーでは $405\,\mathrm{nm}$ とされている $^{3-17)}$. これに対し、プロパンの吸収帯 $^{3-18)}$ は $3370\,\mathrm{nm}$ (吸収率 $90.6\,\%$)、 $6800\,\mathrm{nm}$ (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り、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ている。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関値(100 GW/cm² 3-29))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界(LFL、2.1 vol%)及び燃焼上限界(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. スイッチ動作は冶具を電動スライダー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.

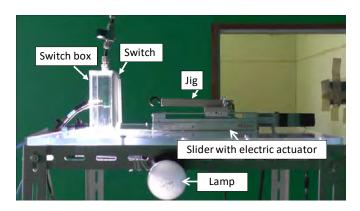


Fig.3-2 Photo of the experimental setup to investigate the discharging energy at the electrical contact of the wall-mounted lighting switch.

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にのみ導入した.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 $12\,\mathrm{mL}$ $21\,\mathrm{mL}$ とした.本実験では回路負荷は白熱電球($60\,\mathrm{W}$)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 mm³-30)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 コンタクタ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り、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: 「接点開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/jceeek/2005/0/2005_0_138/_pdf/-char/ja (2005).
- 3-14) 菫学博: 「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) ナンチャッテ技術者の凸凹日記: ちょいと分解: 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℃, 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≥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≥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≥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(<i>d</i> =1/4",Δ <i>t</i> =0.4s)	5L(<i>d</i> =5mm, ∆t=0.2s)			2L(0.3ΦPt)			ASHRAE	
		vol%		ΔΡ	ratio			∆P 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	LFL	-	-	-	-	-	-	6.3	6.4	n.f.
(E)	UFL	-	-	-	-	-	14.1	13.9	13.7	n.f.

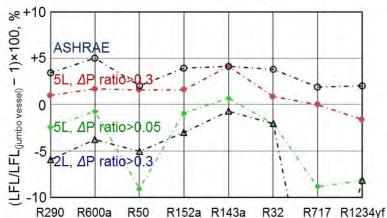


Fig.4-1 Difference in LFL value of different test methods from jumbo vessel for eight refrigerants.

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。

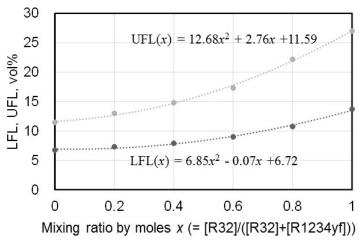


Fig.4-2 Flammability limits of R32/1234yf blend as functions of mixing ratio.

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°C、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°C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.

Т	R32		R1234yf	
°C	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、代替化技術を確立した。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.

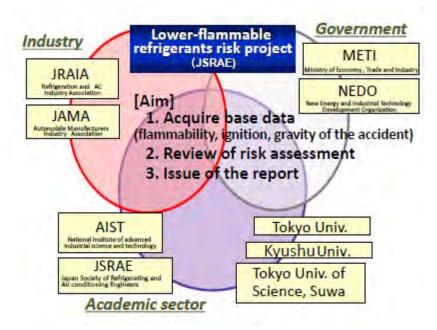


Fig.5-1 Organization for A2L risk evaluation

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 10⁸ 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 10¹⁰ 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°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。高温表面は電気ヒー

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、通常の作業者は咥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充分に考えられる。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、着火の可能性が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 $7m^2$ 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.

Veranda Floor mounted Veranda Ceiling mounted Figure 5m 0.1m 0.859m Outdoor 0.714m 0.1m 0.859m 0.1m 0.859m 0.1m 0.859m 0.1m 0.859m 0.1m 0.859m 0.1m 0.859m 0.1m 0.859m

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° C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 \mathbf{k} - ϵ モデルを用いて解析を行ない、 \mathbf{k} 値、 \mathbf{e} 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充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.



Fig.5-4 Analysis space

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

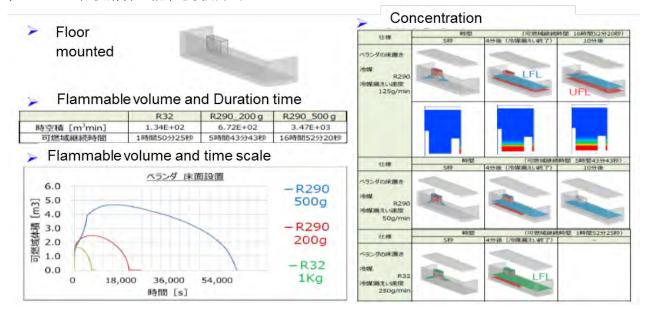
Table 5-2 Analysis condition

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.

(4minitues)

R290, R32 とも漏えい時は噴出する流速と重力落下の流速で撹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が、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.



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時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時、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、使用時(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,使用時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.

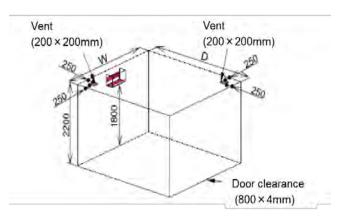


Fig.5-6 Analysis model

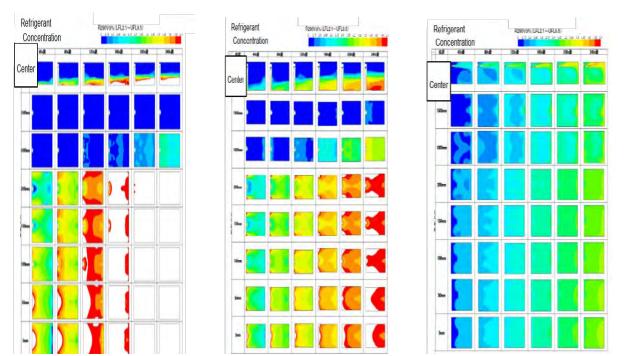


Fig.5-7 200 g leakage without air flow Fig.5-8 500 g leakage without air flow Fig.5-9 500 g leakage with air flow

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、可燃域をできう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。よって作業者へ教育を行い、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少な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 $Amin(m^2)$ 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.

$$Amin = M/(H \times 0.25 \times LFL)$$
 (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(高圧側、低圧側は 134g/min/mm²)なので、冷媒放出速度は 44.4g/min(2.66kg/h)となる.

$$m = q \times 0.32 \times M$$
 (6-2)
 $tc = 103 \times M/m$ (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(tc)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.

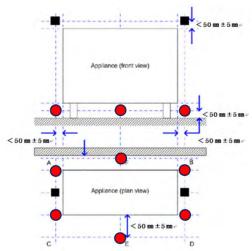


Fig.6-2 Schematic illustration of the refrigerant concentration sampling points

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ー(CVS)とした.

一般に内蔵ショーケースは工場で生産された後、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。

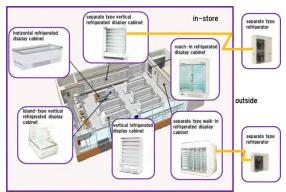


Fig.6-3 Refrigerated display cabinet installation example in CVS

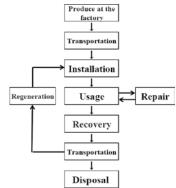


Fig.6-4 Life cycle of Refrigerated display cabinet

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 5.26×10^9 (= $1/(1.9\times10^9)/100$)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 CO_2 を発生させるドライアイスを置き、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 CO_2 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, CO_2 の濃度測定はできておらず,また,漏えいした CO_2 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 CO_2 で試験を行えれば、防爆試験室が必要なくなるため、 CO_2 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 $\pm 5\%$ 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)





front view

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

6.5.2 CFD 解析

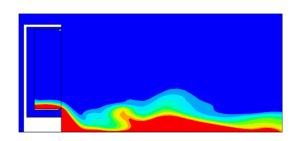
解析を行ったリーチインショーケースは、高さ 2.0m、幅 1.542m、奥行き 0.7m で、庫内体積は 1.08m³ である。ショーケースの下部には圧縮機、凝縮器及び送風機が内蔵された凝縮器ユニットがあり、ショーケースの前面から空気を吸って、背面を通ってショーケースの上部に吹き出す風路構造となっている。凝縮器ユニットは、開口部の面積を 8.3×10^2 m² とし、解析では開口部の風量を $0\sim14.94$ m³/min(風速 $0\sim3$ m/s)の間で変化させた。ショーケースは、正方形の店内の壁際中央に設置した。解析では、庫内に冷媒が漏えいした後にドアを一気に開けることを想定して、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。

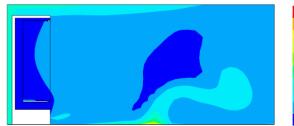
庫内漏えい時の解析結果を Fig.6-7 に示す. 図の(a)は凝縮器ファンモータを止めている状態, (b)は凝縮器ファンモータを動かした状態で, 赤い部分が LFL と UFL の間の可燃域になる. 扉解放時は製品前面に可燃域が出来るが, Fig.6-7 に示す様に, 50 秒後には凝縮器ファンモータの運転の有無により, ケース前面の冷媒濃度に大きな差が出ることが確認できた. Fig.6-8 は, Fig.6-7(a)と同じ条件での扉急開放後 30 秒までの 5 秒毎の濃度分布図である. 扉急開放後,数秒で可燃域が部屋の端まで到達し,その後全体に広がっている様子が分かる. IEC 規格の改正案では,5 分以内は可燃域ができても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.

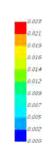
なお、IEC 規格の当初の改正案では、式(6-1)の安全係数は 0.35 であった.これに対して、日本から、安全係数を 0.35 と 0.25 にした場合の CFD 解析結果を IEC/61C/WG4 に提示し、安全係数 0.35 の方が可燃域は大きくなるため、安全係数を空調機の IEC 規格 IEC60335-2-40 でも採用されている 0.25 にすべきと主張し、これが採用された.

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

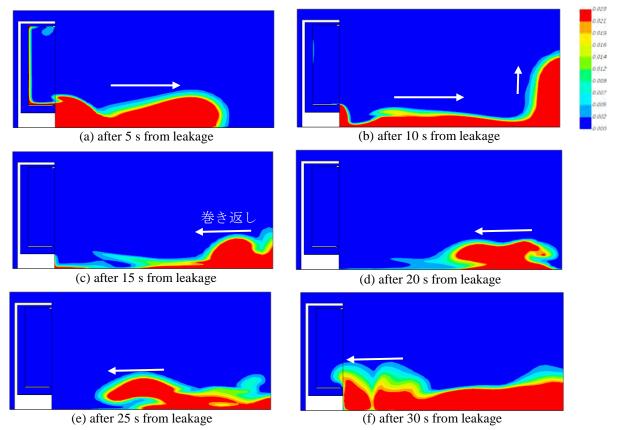


Fig.6-8 Concentration distribution of reach-in type refrigerated display cabinet (2)

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 ⁶²⁾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、どういう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

コーヒーマシーンは、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えていない。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⁶⁴)。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).