

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

第2部 次世代冷媒の安全性・リスク評価

2020 年度プロGRESSレポート ―概要版―

2021 年 6 月 1 日

公益社団法人日本冷凍空調学会 次世代冷媒に関する調査委員会

免責事項

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

著作権

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

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
第2部次世代冷媒の安全性・リスク評価
2020年度プロGRESSレポート ―概要版―

2021年6月1日

編集 日本冷凍空調学会 次世代冷媒に関する調査委員会

発行所 公益社団法人 日本冷凍空調学会

〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 13-7

日本橋大富ビル 5 階

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

目 次

1.	はじめに	3
1.1	NEDO プロジェクトの概要	3
1.2	次世代冷媒に関する調査委員会 WGII の活動	3
2.	東京大学の進捗	4
2.1	家庭用ルームエアコンからの冷媒漏洩	4
2.2	業務用ショーケースからの冷媒漏洩	5
2.3	ルームエアコンのポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制	6
3.	公立諏訪東京理科大学の進捗	7
3.1	着火源の抽出と着火能力の評価手法	7
3.2	各種着火源の着火性評価	7
3.2.1	電気スパークによる着火性の評価	7
3.2.2	高温面による着火性の評価	8
4.	産業技術総合研究所安全科学研究部門の進捗	9
4.1	可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価	9
4.1.1	評価対象機器の選別と実験手法	9
4.1.2	点火能評価の実験結果	9
4.2	ルームエアコン室内機の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価	9
4.2.1	ルームエアコン室内機における漏洩拡散挙動計測	10
4.2.2	ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価	10
4.3	リーチインショーケースの拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価	10
4.3.1	冷凍機内蔵リーチインショーケースにおける漏洩拡散挙動計測	10
4.3.2	冷凍機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価	11
5.	産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗	12
5.1	低 GWP 混合冷媒の燃焼限界の評価	12
5.2	低 GWP 混合冷媒の燃焼速度の評価	13
5.3	低 GWP 混合冷媒の消炎距離の評価	14
6.	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	16
6.1	リスクアセスメントの範囲	16
6.2	室内使用時の着火源及び冷媒漏えいシミュレーション	16
6.3	室外使用時の冷媒漏えいシミュレーション	17
6.4	リスクアセスメントの想定外事象の考え方と提言	18
7.	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	20
7.1	国際規格 IEC60335-2-89 の主な改正点	20
7.2	冷媒漏えい解析	20
7.3	リスクアセスメントの条件及び方法	20
7.4	日本の法律（高圧ガス保安法）	21
7.5	日本の規格	21

1. はじめに

1.1 NEDO プロジェクトの概要

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が重要である。そして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も重要である。こうした状況をふまえ、NEDO 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た研究開発事業を実施している。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が開発項目の一つとなっている。

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」については、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。また、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。

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3事象（冷媒の急速漏洩、可燃空間の存在、着火源の存在）が同時に発生する必要がある。火災事故の発生確率は、冷媒の急速漏洩と可燃空間の存在と着火源が存在する確率の積となるので、そ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。

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業務用リーチイン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。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している。

1.2 次世代冷媒に関する調査委員会 WGⅡ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可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(2018~2022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(WGⅡ)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。

2. 東京大学の進捗

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がルームエアコン室内機から漏洩する時と業務用ショーケースから漏洩するときのリスクの研究とルームエアコンのポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制の研究の3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。本研究では、まず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妥当性を検証した。

ヒートポンプにおける冷媒回収時にはポンプダウンを行うが、その際に想定される事故として、冷媒潤滑油混合気に空気が混入、断熱圧縮され温度上昇し、自己着火燃焼（ディーゼル爆発）が考えられる。本研究ではディーゼル爆発を想定した実験装置を製作し、燃焼を抑制する物質を潤滑油に添加し、ディーゼル爆発の発生を抑制する研究を行った。

2.1 家庭用ルームエアコンからの冷媒漏洩

実験室モデルについての概要を Fig. 2-1 にまとめた。計算モデルは $3800\text{ mm} \times 2400\text{ mm} \times 2550\text{ mm}$ で、エアコンの対面に、 $\phi 100\text{ mm}$ の排気口とドア下隙間 $900\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ を設けた。メッシュは境界近傍が細くなるようにした。漏洩速度は、IEC 60335-2-40:2018 に基づき4 min で全量室内に放出するようにしている。冷媒に関しては、通常の計算ではR290とR32を対象とした。

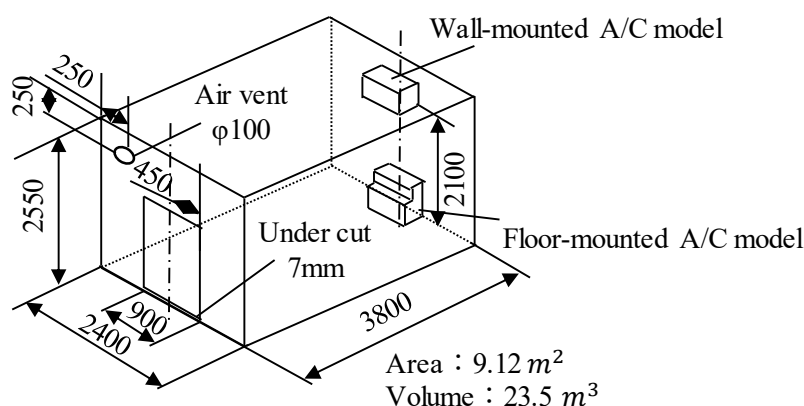


Fig. 2-1 Modeled room

家庭用エアコンの次世代冷媒の候補とされているR290が室内に漏洩した際のリスク評価をする為に、数値流体解析によって最大許容充填量の評価をおこなった。本研究から得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 本研究にて用いた数値流体解析手法は、R744及びR32を用いて行った冷媒漏洩実験の結果の比較から濃度分布の再現性が高いことが示され、計算手法の妥当性が確認された。
- 2) 最大許容充填量式（本編の式(2-8)）について、壁掛け式エアコンに関しては本計算結果からR290、R32ともに適切に運用できることが分かった。床置き式エアコンに関しては、計算から求めた最大許容充填量からはR32については十分に安全と判断できるが、R290では危険とは言えないが、安全余裕はないことが分かった。
- 3) 最大許容充填量式（本編の式(2-9)）について、壁掛けエアコンに関しては可燃ガス体積がファン稼働と同時に直ちに消滅もしくは吹き出し口の直下のみ発生することから、リスク低減に非常に効果があることが示された。床置きエアコンに関しては、冷媒漏洩が続いている間はファン稼働後にも可燃ガス体積が局所的発生するが、冷媒漏洩終了後には直ちに消滅することが分かった。漏洩を感知しての室内機ファンの駆動が安全確保上で不可欠であること、漏洩開始30秒後にファン稼働を開始した場合広い

部屋では可燃ガスが少し残ることが分かった。

2.2 業務用ショーケースからの冷媒漏洩

数値計算手法はルームエアコンからの漏洩シミュレーションと同じである。実験室モデルについて、部屋の概要を Fig. 2-2 に示す。計算モデルは後述する冷媒漏洩実験のために建設した実験室と同等のサイズである。大きさは 5600 mm×3800 mm×2550 mm で、ショーケース模型を設置した壁の側面の壁に φ100 mm の排気口を設けた。ショーケースが設置される店舗においては、必ず換気口があるからである。メッシュは境界近傍が細くなるようにした。室内の初期条件は、ゲージ圧力を 0 Pa、温度は 300 K とし、ショーケース庫内には充填量と庫内体積から計算し求められた冷媒濃度を適宜設定している。換気口には、圧力境界条件を設定した。

業務用ショーケースモデルの詳細を Fig. 2-3 に示す。ショーケースには 2 枚の扉が設けられており、漏洩試験においては、2 枚両方が開く。冷凍機はショーケースの下部、あるいは上部に設置されており、運転中は冷凍機に付属する凝縮器ファンが動く。Fig. 2-3 は冷凍機が下部に設置されている場合である。ショーケースは壁面から 100 mm 離し、ショーケースの中心線と実験室モデルの中心線が一致するように設置される。冷媒に関しては、通常の計算では R290 を対象とした。スウィング扉の回転速度は、国際規格に基づき 3 秒で 60° 回転するようにしている。冷媒漏洩後に室内空気を攪拌するために凝縮器ファンを稼働させる時には、ファンの風速をパラメータとした。

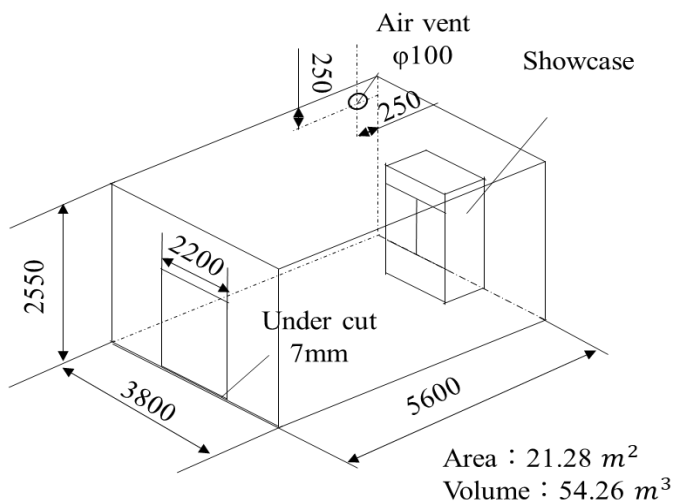


Fig. 2-2 Modeled room

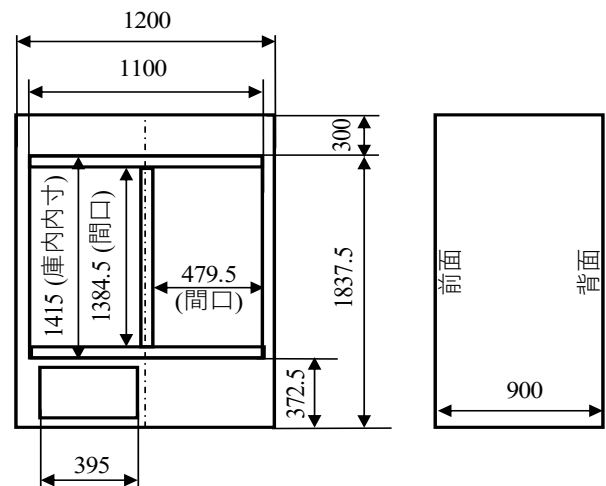


Fig. 2-3 Details of display cabinet

旧 IEC 60335-2-89 では、補助的な安全機器を動作させなくても安全が確保される条件として、 $m_{\max}=150\text{g}$ とされていたが、2019 年に改正され、IEC 60335-2-89:2019 では冷媒漏洩時に空調機のファンを稼働させることを前提とする可燃性冷媒の最大許容充填量に関する式が決まっている。

$$m_{\max} = 13 \times LFL \quad (2-1)$$

R290 の LFL は 0.038 kg/m^3 なので、最大冷媒充填量は 494g となる。本研究では式(2-1)の評価を行った。

業務用ショーケースの次世代冷媒の候補とされている R290 が室内に漏洩した際のリスクアセスメントの目的で、数値流体解析により冷媒充填量およびファンの稼働による、可燃領域の生成規模への効果の評価をおこなった。本研究から以下のような知見が得られた。

- 1) 本研究にて用いた数値流体解析手法の妥当性の検証のために、ショーケース模型を床面積 21m^2 の部屋に設置し、R744 を用いて冷媒漏洩実験を行った。ショーケース内への漏洩を想定して冷媒を導入・攪拌後、扉を開放した際の室内の濃度分布の推移を計測した。リスク評価上重要と予想される漏洩後 5 分程度についての精度、およびそれ以降についての妥当性を検証した。

- 2) 凝縮器ファンが動作していない条件で冷媒充填量を増加させた場合の可燃領域の規模について評価した。R290 を 494g 放出する場合は可燃ガスが 30 分以上残ることが分かった。
- 3) 凝縮器ファンの設置位置・風速・吹出方向ごとに、可燃領域の容積の推移および時間積分値を評価し、ファンの攪拌により可燃領域が減少する効果を検討した。下方に凝縮器ファンを設置する場合は、風向を前方としても後方としても可燃ガスを消滅させる効果はほとんど同じであることが分かった。
- 4) 凝縮ファンを上部に設置する場合は、冷媒ガスの攪拌効果はほとんど期待できないことが分かった。

2.3 ルームエアコンのポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制

冷媒に関係したエアコンの圧縮機の破裂事故があり、この事故報告は少ない。これはエアコンの移設あるいは廃棄の際の冷媒ガスを室外機に回収するポンプダウン作業時に、圧縮機が異常な高圧になり破裂する事故である。我々は圧縮機の破裂事故の要因として空気の混入が必要であると考え、圧縮機を模型エンジンで模擬して空気、冷媒、潤滑油の混合物を爆発させる実験を行ってきた。低冷媒濃度域において燃焼が起こり圧力上昇が発生すること、燃焼には潤滑油が必要であることが分かっている。これまでの研究により、油（ベースオイル）の燃焼が冷媒に伝播しさらに圧力が上昇することがわかっている。潤滑油の燃焼を抑止できれば、圧縮機の爆発事故の被害を小さく、あるいは防止することができる。本研究では、ディーゼル爆発抑制効果について、POE をベースオイルとして、フェノール系酸化防止剤 (A1)、エポキシ系安定化剤 (A2)、リン系耐摩耗剤 (P1) を添加剤とし、その濃度、添加剤と冷媒との組み合わせによる影響をそれぞれ実験的に調べた。冷媒としては、R22, R32, R1234yf, R290 の 4 種類とした。

フェノール系酸化防止剤 (A1) を添加する場合

R22 の燃焼範囲の上限の冷媒濃度を比較すると、添加剤無しは 32vol%，そして添加剤(A1)の 1wt%と 5wt% はそれぞれ 22vol%と 5vol%であり、添加剤濃度の増加と共に上限値は低下する。添加剤濃度が増加すると燃焼範囲は顕著に小さくなるが分かる。R32 の燃焼範囲の冷媒濃度は 0-20vol%で R22 の 0-30vol%でより狭く、R1234yf の 0-6vol%より広い、つまり燃焼範囲は冷媒により異なる。R32 と R1234yf において、添加剤濃度の影響ははっきりしないが燃焼範囲のわずかな縮小が見て取れる。R290 においては、燃焼範囲は 0-2.5vol%で小さい。

エポキシ系安定化剤 (A2) を添加する場合

R22 の燃焼範囲の上限の冷媒濃度を比較すると、添加剤無しは 32vol%，そして添加剤 A2 の 1wt%と 5wt% はそれぞれ 22vol%と 18vol%であり、添加剤濃度の増加と共に上限値は低下するが大きくはない。R32 の燃焼範囲の上限の冷媒濃度を比較すると、添加剤無しは 20vol%，そして添加剤 A2 の 1wt%では 10vol%であり、5wt%になると高圧力上昇を伴う燃焼範囲は消えている。R1234yf の燃焼範囲の上限の冷媒濃度はあまり系統的な傾向が見られない。R290 においては、添加剤濃度 1%でも燃焼範囲は消滅している。

リン系摩耗抑制剤 (P1) を添加する場合

燃焼に対する添加剤 (P1) 濃度の影響は添加剤 (A1) と同様な傾向を示した。冷媒 R22 において、添加剤の濃度別に燃焼範囲の上限を比較すると、添加剤無しは 32vol%，そして添加剤(P1)の 1wt%と 5wt%はそれぞれ 25vol%と 20vol%であり、それらの上限と無次元最高圧力は添加剤濃度の増加と共に低下した。しかしながら、添加剤 (P1) による燃焼および圧力の抑制効果は添加剤 (A1) のそれより小さい。R32 と R290 について、添加剤 (P1) による燃焼および圧力の抑制効果は添加剤 (A1) とほぼ同程度である。

まとめ

実験結果より以下の知見が得られた。

- 1) 添加剤は燃焼範囲と最高圧力に影響し、添加剤濃度の増加と共に燃焼範囲は狭くなり最高圧力は低下するようになる。従って、添加剤濃度の増加は、燃焼抑制効果を増し爆発の破壊力を低下することから、冷媒圧縮機の爆発事故の発生確率の低下と被害の大きさの縮小が期待される。
- 2) 燃焼抑制効果は添加剤と冷媒の組み合わせにより異なり、添加剤 A2 は 1%の添加でも多くの冷媒に対して抑制効果を示した。特に、R290 や R1234yf についてはディーゼル爆発の発生濃度範囲を著しく縮小させることができた。
- 3) R290 については、他の冷媒に比較してディーゼル爆発の発生範囲は非常に狭い。

3. 公立諏訪東京理科大学の進捗

次世代冷媒を搭載した家庭用空調機器及び業務用リーチインショーケースの使用時に、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実施している。具体的には空調機器から漏洩・滞留した R290（プロパン）／空気混合気について、有接点リレーや接点スイッチ等の使用時に生じるスパークやたばこ熱面などによる着火性を、文献・Web 調査、実験、数値シミュレーション等により評価している。

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。

3.1 着火源の抽出と着火能力の評価手法

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関するリスクアセスメントにおいて、着火リスクを詳細に検討する必要があると指摘された着火源を、電気スパーク、高温熱面、裸火の大分類に区分した。次にこれらの分類ごとにそれぞれ着火機構を検討した。これを受けて、着火源候補となる電気機器や現象を各大分類の下に分類し、大分類の着火機構モデルに基づいて着火性を評価することとした。

3.2 各種着火源の着火性評価

3.2.1 電気スパークによる着火性の評価

本サブテーマでは①有接点リレーのアーカ放電による着火性、②照明用壁面スイッチの動作による着火性、③一般家電機器の電源プラグ抜き差し時のアーカ放電による着火性、について実験的に検討した。また、静電気による着火性については主として文献および Web により調査した結果に基づいて評価した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 着火が発熱速度と放熱速度のつりあいで決まるとの考え方に基づいて、特定の時間内に生じた放電エネルギーと最小着火エネルギーの比較から簡易的に着火性を評価する手法を考案した。これをもとに一般家電製品の着火性をスクリーニングした。
- (2) 有接点リレーのアーカ放電による着火性について、消費電力に依存して放電エネルギーが大きくなること、スイッチ閉成時のほうが開離時よりも大きな放電エネルギーを示すこと、プロパン／空気混合気の最小着火エネルギーを超える放電エネルギーが生じることを実験により明らかにした。また、回路の電流の大きさが放電エネルギーの大きさに関係することを明らかにし、回路電流の値を指標として着火頻度を予測する可能性を示した。
- (3) 照明用壁面スイッチの動作によるプロパン／空気混合気への着火実験を実施した。接点ケーシング内へ可燃性混合気が流入する可能性が認められた。さらに接点での放電エネルギーは最小着火エネルギー以上となりうることから、着火性は否定できないと予測されたが、実験では 1 度の着火も認められなかった。その原因は、接点間距離が小さいために火炎が定常伝播できるまでに成長しなかったためと考えられた。
- (4) プロパン／空気予混合気中で電源プラグを抜き差しした実験により、ヘアドライヤーを接続した場合に着火する場合がみられた。その着火確率は消費電力の増大にともなって増加する傾向がみられた (Fig. 3-1)。また、海外規格 (AC230 V) においても同様に、着火する場合が認められた。いずれの場合も最小着火エネルギーよりは 2〜3 桁大きな放電エネルギーが計測された。
- (5) 静電気放電による着火危険性について、シナリオを検討し、既知の放電特性と比較検討した。その結果、帯電人体のドアノブ接触時の放電による着火の可能性は否定できないが、衣服脱衣に伴う静電気での着火性は無視できることが分かった。

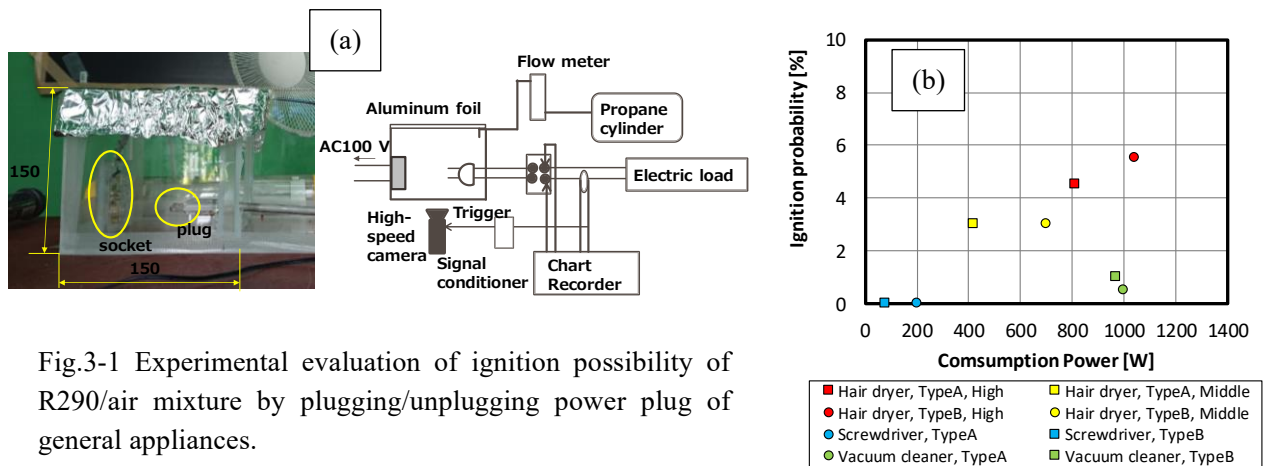


Fig.3-1 Experimental evaluation of ignition possibility of R290/air mixture by plugging/unplugging power plug of general appliances.

(a) Photo and schematic diagram of experimental setup
(b) Dependence of ignition possibility on consumption power

3.2.2 高温面による着火性の評価

本サブテーマでは、たばこに代表される高温の熱面による着火性について実験的に評価した。まず、R290/空気混合気の熱面による着火の臨界条件を明らかにするために、モデル実験が行われた。実験パラメータとして R290 の濃度、流速、熱面寸法、熱面への供給パワーを変化させている。得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 供給パワーと着火時間の間には明確な相関があり、これに対して濃度が寄与する影響は小さいことが分かった。また、ある供給パワーで着火時間が無限大（すなわち不着火）になることから、着火の成否を支配する臨界着火熱流束が存在し、その値は流速が大きくなるにしたがって大きくなった（すなわち着火しにくくなった）(Fig.3-2)。この傾向はヒーター寸法の大小によらないが、臨界着火熱流束の値に対しては、ヒーター寸法が小さいほうが有意に大きくなった。
- (2) 無次元臨界熱流束 $q_{w,c}^*$ をダムケラー数の関数として表現することにより、異なるヒーター寸法における臨界着火熱流束を予測可能であることを見出した。
- (3) モデル実験及び理論解析で得た臨界着火熱流束の値及びヒーターサイズへの依存性を勘案すると、たばこの熱面による着火性は極めて小さいと考えられた。

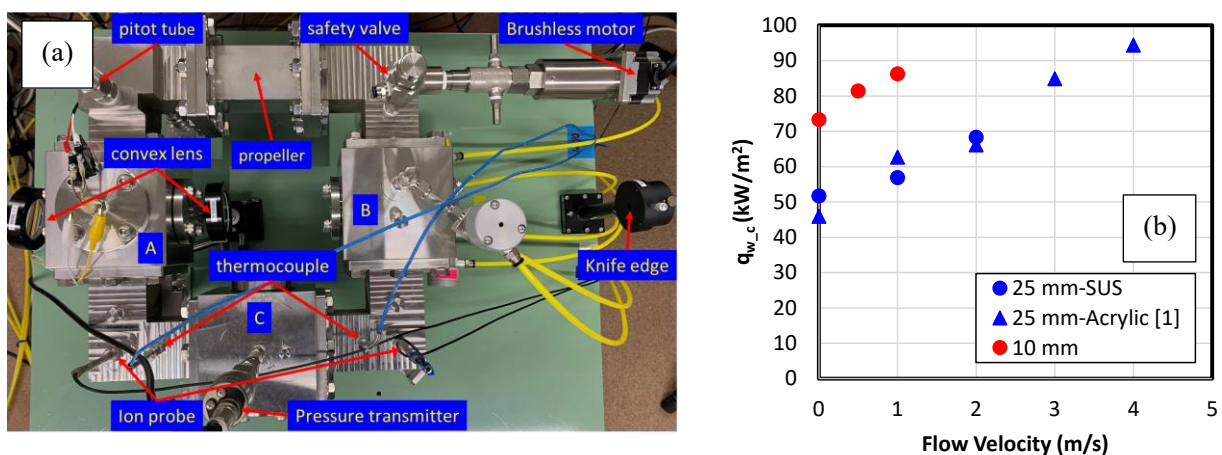


Fig.3-2 Experimental investigation of ignition possibility of R290/air mixture by a heated surface.

(a) Photo of experimental setup (b) Dependence of critical heat flux for ignition on the flow velocity

4. 産業技術総合研究所安全科学研究部門の進捗

産総研安全科学研究部門の担当研究項目は、可燃性冷媒が室内で漏洩し可燃濃度域が形成された場合に、室内に存在する家電等の機器類が着火源となり得るか否かを調査する点火能評価と、ルームエアコン室内機と冷蔵庫内蔵リーチインショーケースで想定される漏洩着火事故の実規模フィジカルハザード評価である。

4.1 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価

地球温暖化効果の小さい次世代冷媒として期待されている可燃性ガスのプロパン（R290）を、冷媒として使用した機器類から漏洩事故が起こった場合のリスク評価上の着火確率を決定するための基礎データとして、静電気着火が最も起こりやすいとされている 5.2%程度のプロパン-空気予混合気を満たした容器内で、電気機器類を繰り返し遠隔操作し、着火の有無を観測した。

4.1.1 評価対象機器の選別と実験手法

これまで、レーザープリンター、ヘアードライヤー、電気掃除機、電動ドライバー、ホットプレート、石油ファンヒーターの着火評価実験を行った。

点火能評価実験には石油ファンヒーターを除き、1.00 m×1.00 m×1.00 m の4面のアクリル壁と鋼製床面を持ち、天井面にビニルシートを張ったアクリル製容器を用いた。アクリル製容器は産総研爆発ピット内に設置し、機器類に遠隔操作のエアアクチュエーターを取り付けて容器内に設置した後、プロパンと空気を流量調整して容器内に導入した。濃度センサーによりおよそ 5.2%のプロパン濃度に調整して維持し、爆発ピット外から機器類を最大数百回程度遠隔操作した。着火は赤外高速度カメラと可視常速カメラにより観測した。

4.1.2 点火能評価の実験結果

ヘアードライヤー、電気掃除機、ホットプレート、石油ファンヒーターでは着火が確認された。単一の機種を用いた実験結果ではあるが、可燃濃度域内で作動した場合のリスク評価上の着火確率は1とすべきだと考えられる。使用電力や構造の違い等によって着火が起こらない可能性がある場合は、追加試験を検討する。

レーザープリンター、電動ドリルでは着火が確認されなかった。単一の機種、限定された繰り返し実験回数での評価であるため、防爆構造を持たないこれらの機器のリスク評価上の着火確率をゼロとすることはできないが、今後ある程度の機種数・繰り返し実験回数で着火が起こらないことが確認できれば、その繰り返し回数に応じてリスク評価上の着火確率を下げる可以考虑とされる。

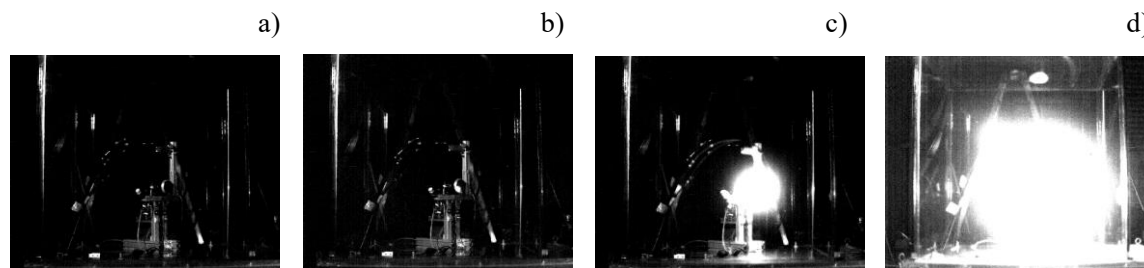


Fig. 4-1 Images taken by near infrared high-speed video camera

4.2 ルームエアコン室内機の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価

プロパン（R290）を冷媒として使用したルームエアコン室内機から漏洩事故が起こった場合のリスク評価上の危害度を決定するため、漏洩着火事故の燃焼影響を評価した。実使用条件を想定して実物大の模擬室内にルームエアコン室内機を設置し、想定される複数の漏洩条件での漏洩拡散挙動を計測して、着火時に危害度が大きいと予測される条件について、点火実験を行って燃焼影響を評価した。

4.2.1 ルームエアコン室内機における漏洩拡散挙動計測

労働安全衛生総合研究所配管等爆発実験施設の屋内大空間に、2.7 m×5.4 m×高さ 2.4 m の木製模擬室を設置し、内壁を設置することで 2.7 m×2.7 m×高さ 2.4 m との 2 通りの広さで計測を行った。2.7 m×5.4 m 空間の短辺側中央に下面が床面から 2.00 m となる位置にスプリット型ルームエアコンの室内機を設置した。

プロパンの放出量は、IEC60335-2-40 : 2018 で採用されている片岡の式を用いて求めた送風等の安全対策のない場合の最大許容充填量と、今後採用が検討されている十分な風量での送風等を前提とし緩和された許容充填量を用い、4 分間で全量を均等に放出した。

片岡の式を用いて計算した最大許容充填量を放出したすべての実験で、放出終了後にプロパンの可燃濃度域は観測されなかった。またエアコンの送風機能を用いて室内気を攪拌したすべての実験で送風運転中に可燃濃度域は観測されなかった。つまり、

4.2.2 ルームエアコン室内機における実規模フィジカルハザード評価

日立セメント太平田鉱山堆積場跡地の野外実験場に、2.7 m×5.4 m×高さ 2.4 m の鋼製模擬室を設置し、拡散挙動計測と同様の方法でプロパンを放出して点火し、燃焼影響評価実験を行った。現実の部屋に近い条件で燃焼影響を観測するため、2.7 m×5.4 m 空間のルームエアコン室内機を設置した短辺の反対側壁中央に幅 180 cm の引き違いの掃き出しガラス窓を設置した。点火には、発電機からの交流 100 V をネオントランスで 15 kV に昇圧して放電させた電気スパークを用いた。

室内機送風ファンを運転せず片岡の式で計算された充填量 330 g を 4 分全量放出した直後に、模擬室中央床上 2 cm で点火しても着火は起こらなかった。また室内機送風ファンを水平に弱運転し続けた状態で、緩和された充填量 625 g を 4 分全量放出した直後に、模擬室中央床上 2 cm で点火しても着火は起こらなかった。

室内機送風ファンを運転せず片岡の式で計算された充填量 330 g を 4 分全量放出する放出速度で放出し、放出中である放出開始後 3 分 30 秒に室内機下の床上 150 cm で点火したところ、着火が確認されエアコン室内機が全焼した。計測された室内圧の最大値は 2.3 kPa、放射熱の最大値は 7.5 kW m⁻²であった。Fig. 4-2 に着火直後から 200 ms ごとの静止画像を示す。

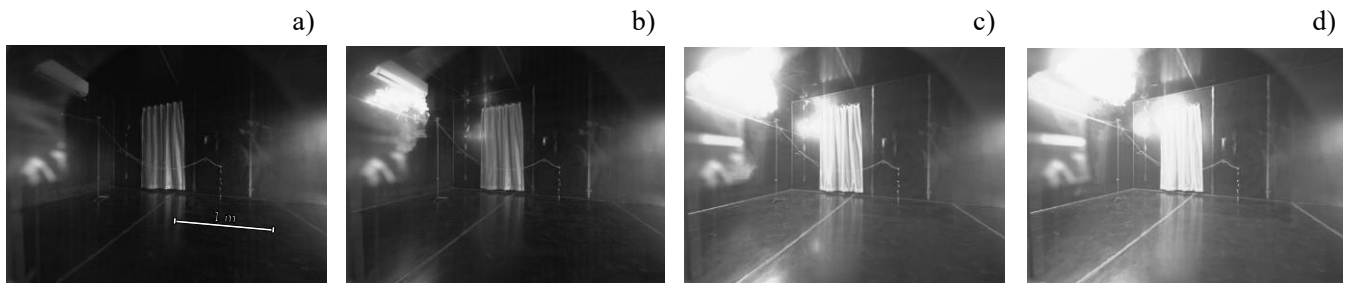


Fig. 4-2 Fire observed after ignition at 30 seconds before finishing blowout. (200 ms each)

また、室内機送風ファンを運転せず、緩和された充填量 625 g を 4 分全量放出した直後に模擬室中央床上 2cm で点火したところ、着火が確認された。室内機正面のガラス掃き出し窓は窓枠・ガラスとも破損し、室外に飛散した。計測された室内圧の最大値は 5.6 kPa、放射熱の最大値は 6.1 kW m⁻²であった。掃き出し窓外 10 m で計測された爆風圧の最大値は 36 Pa であった。ガラス窓等が破損し室内圧の上昇が限定的である場合は、燃焼による人体影響は小さいと考えられる。

4.3 リーチインショーケースの拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価

プロパン (R290) を、冷媒として使用した冷凍機内蔵リーチインショーケースから漏洩事故が起こった場合のリスク評価上の危害度を決定するため、漏洩着火事故の燃焼影響を評価した。実使用条件を想定して実物大の模擬室内にリーチインショーケースを設置し、想定される複数の漏洩条件での漏洩拡散挙動を計測して、着火時に危害度が大きいと予測される条件について、点火実験を行って燃焼影響を評価した。

4.3.1 冷凍機内蔵リーチインショーケースにおける漏洩拡散挙動計測

屋内大空間に 4.9 m×4.9 m×高さ 2.8 m の木製模擬室を設置し計測を行った。模擬室の一壁面中央に幅 120 cm、奥行き 85 cm、高さおよそ 200 cm の冷蔵庫内蔵リーチインショーケースを設置した。リーチインショーケースの扉は観音開きで、圧縮機等の機械部分はショーケース部分の下部に設置されている。

プロパンの漏洩は、冷媒として充填されたプロパンの全量がまずショーケース庫内に漏洩拡散し、すべてのプロパンが庫内に保たれ均一濃度になった状態で扉が開かれる想定で行った。充填量は 100g, 500g, 1000g の 3 通りとした。ショーケースの扉は、扉に設置したエアアクチュエーターを大空間外の計測室から遠隔操作し、観音開きの両扉を同時に 3 秒間でそれぞれ 60° の角度まで開いた。

送風等での室内気の攪拌を前提として緩和を検討されている 500 g の充填量で、ショーケース下部の凝縮器ファンを運転した場合を中心に、充填量、ファン運転の有無、庫内商品の有無等の条件を変えながら拡散挙動を計測した。凝縮器ファンを運転して 500 g の充填量を庫内に漏洩させ開扉した場合、開扉後 5 分程度で模擬室内の可燃濃度域が消滅した。凝縮器ファンを運転せずに 500 g の充填量を庫内に漏洩させ開扉した場合、模擬室内に 90 分程度の間、可燃濃度域が形成され続けた。凝縮器ファンを運転しない場合でも充填量を 100 g とした場合は、可燃濃度域は 1 分程度で消滅した。庫内に設置した冷蔵模擬ボトルの影響は大きくなかった。

4.3.2 冷凍機内蔵リーチインショーケースにおける実規模フィジカルハザード評価

野外実験場に、4.9 m×4.9 m×高さ 2.8 m の鋼製模擬室を設置し、拡散挙動計測と同様の方法でプロパンを放出して点火し、燃焼影響評価実験を行った。現実の部屋に近い条件で燃焼影響を観測するため、ショーケースを設置した壁の反対側の壁に、自動ドアを模擬した幅 240 cm の両開きスライドガラス扉を設置した。

漏洩拡散挙動計測に用いたものと同型のリーチインショーケースの冷蔵室下部にある凝縮器ファンを運転した状態で、500 g のプロパン全量がショーケース庫内に漏洩したと想定した 26 %に庫内プロパン濃度を調整して遠隔操作により開扉し放電スパークにより点火した。ショーケース扉の開扉 5 分後に部屋中央床上 2 cm で点火した場合には着火は起こらなかった。ショーケース開扉 40 秒後にショーケース扉前 50 cm 床上 2 cm で点火した場合、着火が確認されたが、模擬室ガラス扉の破損は起こらなかった。ショーケース開扉直後にショーケース扉前 50 cm 床上 2 cm 点火した場合、着火が確認され、模擬室ガラス窓の窓枠・ガラス共に破損し飛散した。

Fig. 4-3 に着火直後から 100 ms ごとの室内火炎伝播の様子を静止画像で示す。ガラス扉は模擬室内圧の上昇により外向きに飛散した後、ガラスが破損した。

計測された室内圧の最大値は 5.0 kPa、掃き出し窓外 10m で爆風圧の最大値は 29 Pa であった。ガラス窓が破損することで、室内圧の上昇が 5 kPa 程度に抑えられたと考えられる。室外での爆風圧の影響は小さかった。

計測された放射熱の最大値は、室内外で 160 kW m⁻² 程度であり、持続時間が短いもののやけどを負うほどの危害度となった。

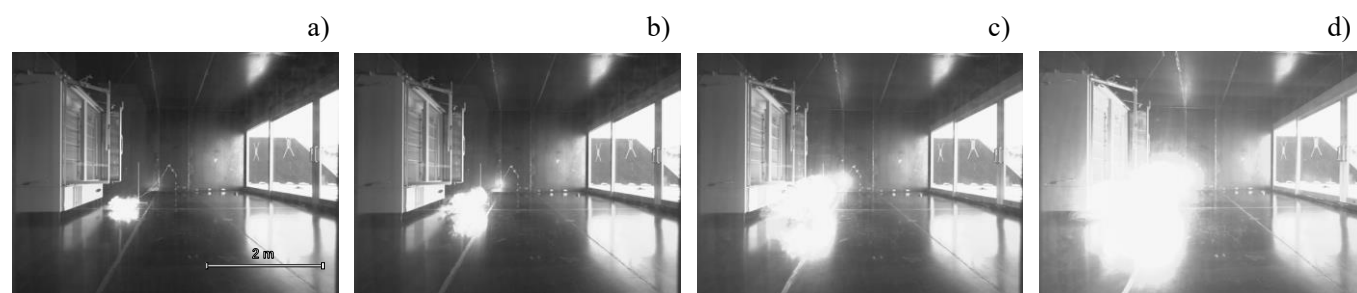


Fig. 4-3 Fire observed after opening door with continuous ignitions. (100 ms each)

また、冷蔵室下部にある凝縮器ファンを停止した状態で、100 g のプロパン全量がショーケース庫内に漏洩したと想定した 5.2 %に庫内プロパン濃度を調整して遠隔操作により開扉し、ショーケース扉前 50 cm 床上 2 cm で放電スパークにより点火した。着火と模擬室ガラス扉枠の破損が確認されたが、ガラスは飛散しなかった。計測された室内圧の最大値は 4.4 kPa、放射熱の最大値は 8.7 kW m⁻² であった。掃き出し窓外 10 m で計測された爆風圧の最大値は 26 Pa であった。

5. 産業技術総合研究所機能化学研究部門の進捗

本研究開発は、低 GWP かつ安全性に優れた冷媒の開発・普及を支援するため、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を目的とする。可燃性の低 GWP 冷媒と、燃焼性の低い冷媒の組合せを評価対象とし、国内外で検討されている冷媒の安全性基準を満たすガス（例えば、国際標準 ISO817 における「微燃性等級（Class 2L）」に分類され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 冷媒の将来的な実用化を見据え、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する。

2018－2020 年度は、新規低 GWP 混合冷媒として R32/1234yf 混合系を対象とし、混合冷媒の各混合組成について、標準条件、温度条件、及び湿度条件における燃焼限界、燃焼速度、及び消炎距離等の燃焼特性評価を行い、データを蓄積した。その結果、新規低 GWP 混合冷媒については、任意の混合組成において、実用上の温度、湿度条件下で、既存の「特定不活性ガス」（R1234yf 及び R32）よりも低い燃焼特性を示すことを明らかにした。

5.1 低 GWP 混合冷媒の燃焼限界の評価

燃焼限界の評価は、種々の冷媒について実規模の燃焼限界に最も近い結果が得られることを示した、EN1839B 法を用いて測定し、判定基準として圧力上昇率 $100 \times (P_{\max} - P_0)/P_0 \geq 30$ (%) で判定する方法によって実施した。多くの混合冷媒の構成成分である R32 及び R1234yf 各々単独ガスについて、25°C 乾燥条件における測定結果を Fig. 5-1 に示す。圧力上昇率 30% で判定した場合、燃焼限界（下限界, LFL）は R32 について 13.7 ± 0.15 vol%, R1234yf について 6.7 ± 0.2 vol% となった。次に、R32 及び R1234yf 単体について燃焼限界の温度湿度影響を明らかにするため、まず、温度影響の測定を実施した。その結果、実用上の温度範囲 15～60°C において、燃焼限界値は大きく変化しないことが分かった。次に、R32 及び R1234yf 単体の燃焼限界の湿度影響について測定を実施した。燃焼限界を相対湿度に対して関数化した。

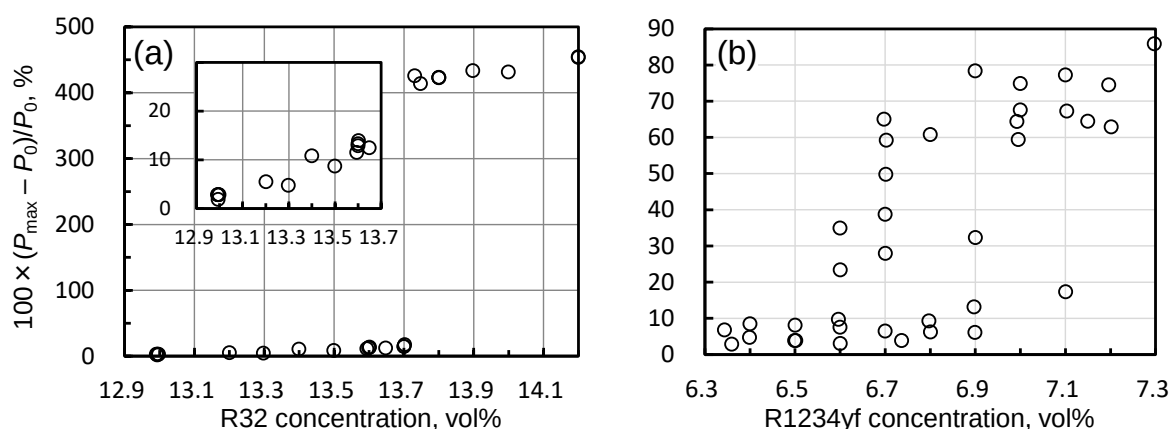


Fig. 5-1 Pressure rise rate vs. refrigerant concentration measured by EN1839 B method for (a) R32 and (b) R1234yf at 25°C and 0 % RH.

次に、R32/1234yf 混合系について、混合比に対する燃焼限界の温度依存性を測定した（温度範囲 15～60°C，湿度 0%RH）。各単体の場合と同様、この温度範囲では、燃焼限界に大きな変化が見られないことが確認できた。乾燥空気中での燃焼限界の変化は、上限界（UFL）、LFL とも R32 のモル混合比増加に伴い単調に増大し、概ねル・シャトリエ式に従い、また簡単な 2 次式によって近似できることが分かった。

次に、R32/1234yf 混合系について、燃焼限界に対する湿度の影響を調べた。測定温度は全て 35°C，また、LFL, UFL 共に最高の相対湿度は 35°C 換算で 63%RH である。結果を Fig. 5-2 に示す。いずれの場合も、燃焼限界測定値(y)は R32 モル混合比(x) に対して $y = ax^2 + bx + c$ の形の 2 次式で良好な近似が可能であるこ

とが判明した。LFL, UFL のそれぞれについて得られた混合比依存の係数 a , 係数 b , 係数 c の値をそれぞれ最小二乗法により相対湿度 ($r \equiv \%RH/100$) に対する 2 次式として得た。こうして得られた式に, 例えば $r = 0.50$ を代入すれば, 相対湿度 50%RH における任意の混合組成に対応する LFL 及び UFL の予測値が得られると期待できる。これを実際に検証した結果, 予測値は誤差範囲内で測定値と一致した。本混合系については, 任意の混合比及び湿度, 及び実用の温度範囲において, 燃焼限界を予測できる可能性が示された。

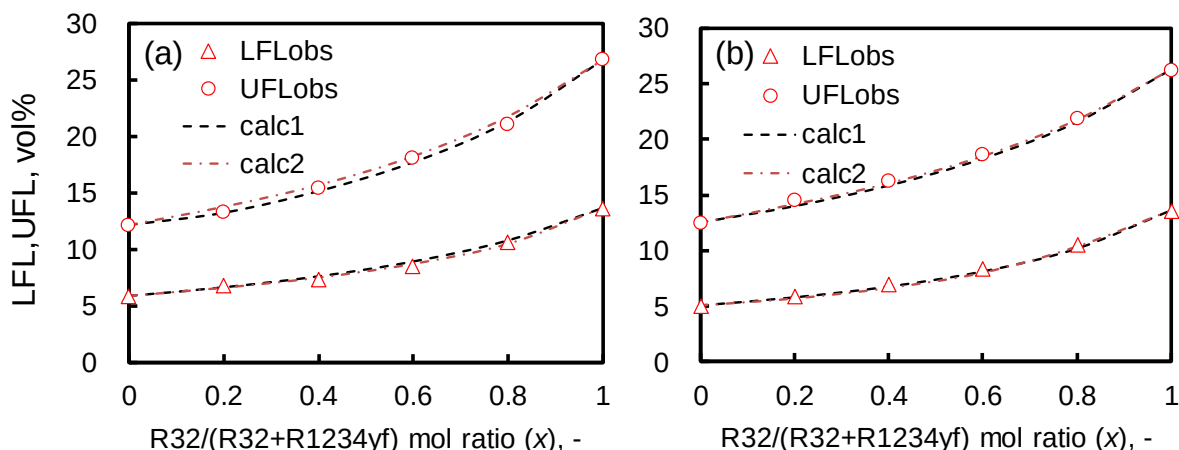


Fig. 5-2 Effect of humidity on flammability limits of R32/1234yf blends measured at (a) 35°C and 10%RH and (b) 35°C and 63%RH.

5.2 低 GWP 混合冷媒の燃焼速度の評価

R32/1234yf 混合系について, 種々の温度湿度条件における燃焼速度の混合比依存性を, シュリーレン可視化法を用いて評価した。まず, 湿度 0%RH の混合比全域について, 広範な温度での測定を行った。Fig. 5-3 に結果の一例を示す。燃焼限界の場合と同様, 実用上の温度範囲においては最大燃焼速度 ($S_{u,max}$) の差がほとんど無いことを確認した。また乾燥空気条件では, R32 モル混合比の増加につれて燃焼速度は単調増加するが, 火炎温度の傾向と同様, R32 モル混合比が 0.5 を超える程度まで燃焼速度の顕著な増加は確認されなかった。Fig. 5-3 に曲線で示したとおり, 本混合系の最大燃焼速度は, 重量分率又はエネルギー分率のル・シャトリエ式で良好に表現できた。また, 本混合系について, 35°C における燃焼速度の湿度影響評価を行った。結論として, 本混合系は任意の混合組成において, 35°C63%RH 以下の実用上の温度・湿度条件下で, 同一条件下での R1234yf 単体及び R32 単体よりも低い燃焼速度を示すことが分かった。

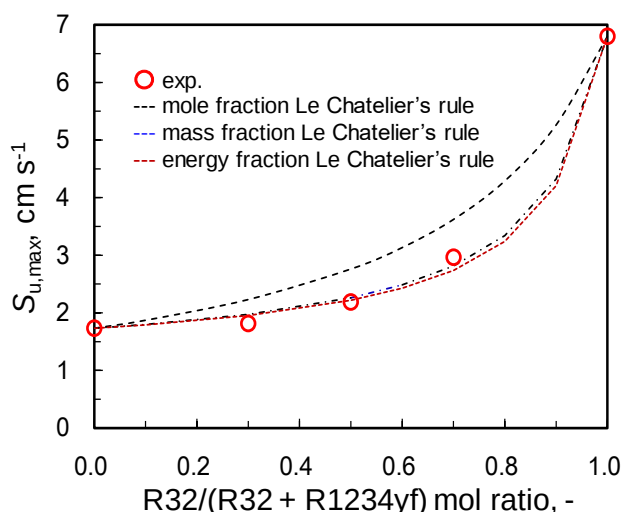


Fig. 5-3 Maximum burning velocities as a function of mixing rate for R32/1234yf blends at 35°C and 0%RH.

5.3 低 GWP 混合冷媒の消炎距離の評価

着火消炎特性の評価として消炎距離の測定を行った。R32/1234yf 混合系の測定を行い、各単体の結果から混合系について消炎距離の推算が可能か検証を行った。まず、R32/1234yf 混合系の初期圧力 2 atm 及び 3 atm における消炎距離の混合比の影響について評価した（測定温度は 25°C、湿度は 0%RH）。Fig. 5-4 に、実験結果と種々のル・シャトリエ式による推算結果を示す。混合系の消炎距離は、各単体の結果を用いた重量分率又はエネルギー分率のル・シャトリエ式で良好に表現できた。高压条件を利用することでごく微燃性の冷媒の消炎距離についても精度良く測定できるようになり、混合比依存性の傾向も燃焼速度と同様に推算可能であることが分かった。

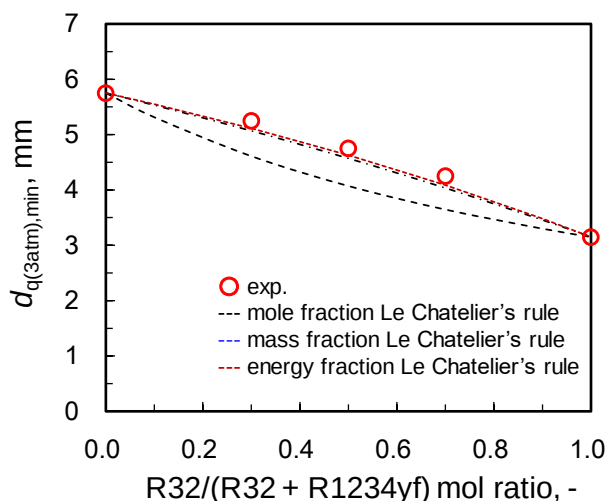


Fig. 5-4 Quenching distances of R32/1234yf blends measured at 3 atm, 25°C, and 0%RH.

次に、R32/1234yf 混合系について、消炎距離の温度、湿度、及び混合比依存性を評価した。Fig. 5-5、Fig. 5-6 に結果を示す。燃焼速度の結論と同様、任意の混合組成で、実用条件において、同一条件下での R32 又は R1234yf 単体の消炎距離よりも大きく、着火性が同等以下であることが分かった。また、Fig. 5-6 のとおり、高湿度条件において、本混合系の消炎距離は種々のル・シャトリエ則によって概ね表現できることが分かった。

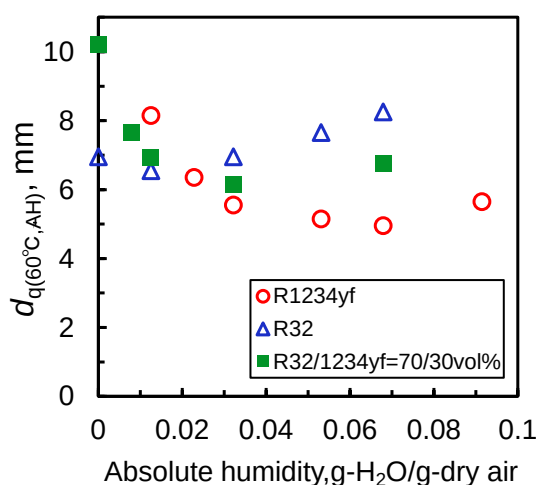


Fig. 5-5 Effect of humidity on d_q of R32, R1234yf, and R32/1234yf (70/30 v/v) blends at $T_0 = 60^\circ\text{C}$ and $P_0 = 1 \text{ atm}$.

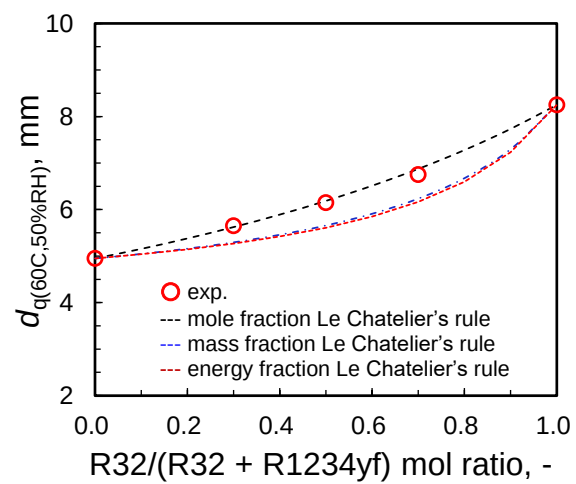


Fig. 5-6 d_q of R32/1234yf blends under high humidity (60°C and 50%RH).

6. 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

日本冷凍空調工業会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、2016 年 7 月から、A3 冷媒を使用したミニスプリットエアコン（以下エアコンと称す）のリスクアセスメントを開始した。同リスクアセスメントは、A2L 冷媒と同様に官学産の連携体制で、2018 年後半より NEDO プロジェクトとして開始した。

本レポートは、R290 等の A3 冷媒を使用したエアコンの漏えいを想定したリスクアセスメントを R32 に比して行い、安全な運用方法について、過去 3 年間で对外報告を行った内容を中心にまとめた。

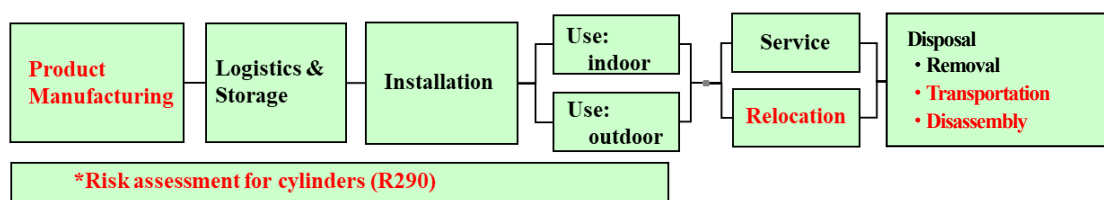
本レポートでのリスクアセスメントは途中段階であり、体系的に記述されていない。本レポートの内容は適正化した形で 2021 年 10 月開催の神戸国際シンポジウムで報告する予定である。

6.1 リスクアセスメントの範囲

一般的にリスクアセスメントは、製造から廃棄までのライフステージが対象となる。Fig. 6-1 は、今回検討しているリスクアセスメントの対象ステージを示しており、“輸送・保管”，“据付”，“使用時の室内と室外”，“修理”，“廃棄”が対象範囲である。図 1 において赤字で示した項目は、リスクアセスメントの検討範囲外である。

“輸送・保管”，“据付”，“使用時の室内と室外”，“修理”，“廃棄”が対象範囲である。以下の項目は、本リスクアセスメントの検討範囲外である。

- ・ 製品の製造：各社のノウハウがあるため。
- ・ エアコンの移設：基本的に“運搬”と“据付”の 2 つのステージを合せたものと考えた。
- ・ 廃棄：撤去，リサイクル工場までの運搬，解体に分けられるが、今回は、撤去のみ対象とする。



Note: The stages in red are not included in the JRAIA risk assessment.

Fig.6-1 Life stages covered by risk assessment

6.2 室内使用時の着火源及び冷媒漏えいシミュレーション

室内機から冷媒が漏えいした際の着火事故発生確率を求めるため、室内での冷媒漏えいシミュレーションによる可燃空間の形成状況の確認と室内に存在する着火源の検討を行った。

室内機の冷媒漏えいシミュレーション

代表的な室内機の使用環境として、床面積は 4.5 畳（7.0 m²）とし、冷媒(R290)充填量は IEC 60335-2-40 Ed6.0（以下 IEC 規格と称す）において安全対策が無い場合に許容される 200g とした。また、1000 g の HFC 冷媒を使用した製品と同等の性能が得られる R290 使用製品の冷媒充填量である 500 g についても計算し、その際の床面積を攪拌による安全対策をすることにより許容される 11.88 m²とした。天井高さは 2.2 m、室内機はその下面が床面から 1.8 m の高さに設置されるものとした。冷媒漏えい速度は、IEC 規格で採用されている 4 分全量漏れとした。

漏えいはエアコン停止中（ファン送風による攪拌なし）、運転中（攪拌あり）の両方を想定した。運転中では空気と冷媒の混合気体が漏出するものとし、風量は Colbourne らの式より算出した。

攪拌の影響

Fig. 6-2 に漏えい終了(4 分経過)時点の冷媒濃度分布を示す。可燃空間は、攪拌がない場合には冷媒量 200 g で床面から 0.008 m, 500 g で 0.326 m の高さの範囲に発生し、攪拌がある場合には冷媒量 200 g で吹出位置から水平方向に約 0.1 m まで、500 g で同じく約 0.3 m までの範囲に発生した。暖房運転時には吹出口から下方向に同等の範囲で可燃空間が発生すると考えられる。

冷媒量の影響

上記のとおり、攪拌がない場合は冷媒が室内機の真下に漏えいし、床面から可燃域が積層していくため、可燃空間体積を床面積で除した値がおおむね床面からの可燃空間の高さとなる。可燃空間体積は冷媒量に比例するのではなく、冷媒量に対して指數的に増加する傾向があるように見える。

室内着火源の特定

着火源の特定にあたっては、冷媒漏えいシミュレーションで得られた可燃空間の高さと室内に存在する熱源の存在高さを逐一比較した。ファン送風による攪拌がない場合は、エアコンの真下から床面までの間にも可燃空間が形成されるため、熱源が室内機の真下で使用されうる場合には、それを着火源として特定することとした。

特定した着火源は、裸火ではタバコ、石油ストーブ、高温表面では電気ストーブ、スパークではレーザープリンター、電気シェーバー、電気こたつ、電気ストーブ、アイロン、ドライヤー、空気清浄機、除湿機、掃除機、電子カーペット、ロウソク、調理器具、照明用スイッチ、コンセントの抜き差しであった。一方、本来は着火源になるが、熱源の存在高さを考慮することで着火源にならないと判断したものにロウソク、コンロ、調理器具、ドアノブに接触したときに発生する静電気、照明用スイッチの ON/OFF などがある。今後、NEDO 研究の結果も踏まえ、リスクのある着火源に関しては対策を考えていく。

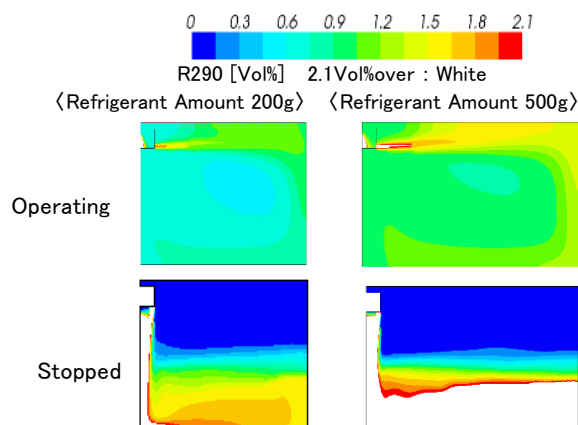


Fig. 6-2 Refrigerant concentration distribution after 4 min

6.3 室外使用時の冷媒漏えいシミュレーション

室外機から冷媒が漏えいした際の着火事故発生確率を求めるため、室外の冷媒漏えい解析による可燃空間の形成状況の確認と、更に共同住宅でよく見られる隣室とのベランダ仕切り板の下部隙間の影響や、自然風の影響を確認した。また、室外機周辺に発生する着火源の検討を行った。

室外の冷媒漏えいシミュレーション

代表的な室外機の設置環境として、共同住宅の三方向を壁で覆われたベランダを想定した。また室外機の据付方法として、床面設置、二段積み設置及び天吊り設置を想定した。冷媒漏えい量は 200 g, 500 g, 1000 g とし、冷媒漏えい速度は、4 分全量漏れとした。さらに共同住宅でよく見られる隣室とのベランダ仕切り板の下部隙間の影響や、自然風の影響を確認した。

ベランダ仕切り板の下部隙間の影響

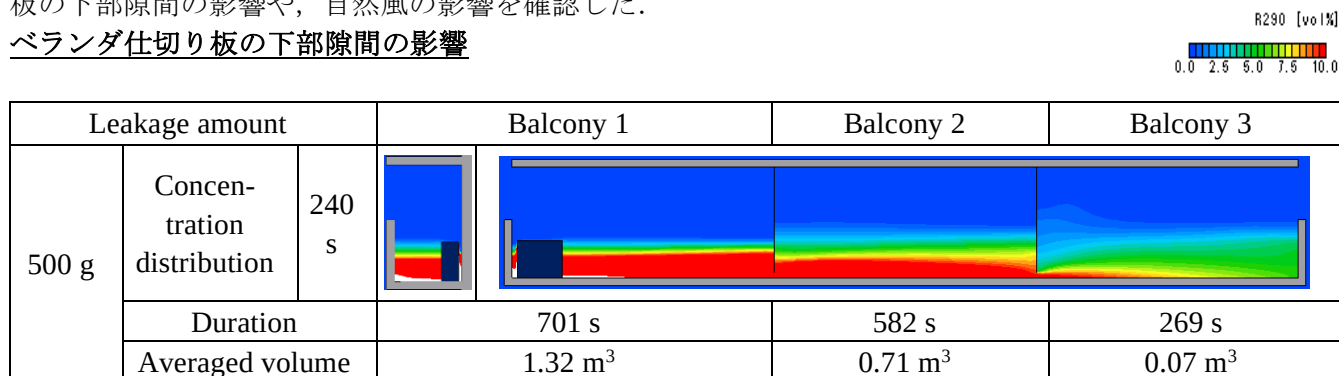


Fig. 6-3 Concentration distribution, the duration and time averaged volume of flammable regions within each balcony with partition plates

隙間高さ 0.1m のパーティションを設けた 3 世帯が隣接したベランダの漏えい解析の結果、漏えいした冷媒が隙間を通じて隣接するベランダに流出し、隙間が無い条件と比較して、可燃空間の継続時間及び平均体積は減少した。冷媒量が 500 g と 1000 g では、2 つ隣のベランダまで可燃空間が形成された。Fig. 6-3 に代表として漏えい量 500 g の場合のシミュレーション結果を示す。

自然風の影響

日本の代表都市における自然風の発生割合を調査し、風速は 1.0 から 2.0 m/s の間の発生頻度が高く、0.0 m/s の発生割合は 0.5 % であった。つまり、99.5 % は風が吹いていることになる。そこで、自然風がある条件で解析を行い、解析結果と各風速の発生割合で加重平均した着火事故発生確率を算出した。結果、着火確率が自然風を考慮しない場合の 1/100 程度に下がった。

据付方法による影響

据付方法別の冷媒漏えい解析の結果、可燃空間の継続時間は、床面設置に対して、二段積み設置や天吊り設置など、設置高さを高くするほど短くなった。しかし、可燃空間の平均体積は、床面への UFL 以上の濃度雰囲気形成状況によっては小さくなる条件もある。

室外着火源の検討

着火源として、使用者の喫煙時のタバコの赤火や喫煙器具やガス石油温水機器の裸火、それと他のエアコン室外機のスイッチ ON/OFF によって発生する電気スパークを想定した。またこれらの着火源について、使用実態や動作原理を考慮して発生頻度と発生時間を決定した。ただし、文献調査の結果、喫煙やエアコン室外機のスイッチ ON/OFF については、R290 に対して着火源にならないとの報告もあった。また、ガス石油機器については、点火前の燃焼ファンの動作により冷媒が攪拌されるため、着火源にならないと推定した。今後は、このような見解も考慮して着火事故発生確率を算出する必要がある。

室外機の安全対策の方向性

設置条件による安全対策として、室外機の設置高さ制限を設けることや、隙間がある場所への設置、風通しの良い場所への設置が、可燃空間生成の抑制に有効であることが確認された。

使用時室外に対する安全対策としては、一般使用者も対象として、IEC 規格にあるように、注意喚起ラベルの貼り付けが現実的に実施可能な安全対策と考える。

6.4 リスクアセスメントの想定外事象の考え方と提言

ここでは、通常考えられない作業や工程に関して想定外の考え方と提言を述べる。

リスクアセスメントでの想定外事象の考え方

① 廃棄回収

廃棄時に適法なルート以外で扱われているエアコンの冷媒の回収は想定外の事象の一つである。経産省・環境省のプレスリリースでは 6 割近いエアコンは見えないルートで回収され、冷媒が適切に回収・処理されているか定かではない。冷媒の回収は処理費用が負担になるため、大気中に放出したならば、着火事故が増加する可能性を否定できない。また、不用品回収業者が、リユース、スクラップ処理をする場合も同様のリスクを生じる。

② 据付、修理

本リスクアセスメントでは、エアコンの据付や修理は、エアコンの知識、技術等の訓練を受けた作業が行うことを前提としている。しかし、“DO IT YOURSELF” の場合や、一部の引越業者などがエアコンを移設する場合など、訓練を受けていない作業が行うことがあり、その実態を把握できていない。また、現状でも可燃性冷媒に関する確実な安全知識を持ち合わせず、あるいは、据付に関して知識のない素人に近い作業が行う場合、エアコン製造者責任の範囲外で冷媒種を違えて施工していることもある。さらに、繁忙期の対応など急いだ状態で作業を行う場合、人のミスを誘発し重大事故に繋がることも考えられるが、これらの状況の割合を把握できていない。

③ 想定しない事故事象

一般的に、リスクアセスメントでは故意に行われるエアコン室外機への放火や、使用中の室外機の持ち去りなども想定外である。

以上、これらの想定外の事項は実際の着火事故を増加させることが容易に想像できる。また、これらの危険性を定量化することは非常に困難である。さらに、安全性の担保の課題や、違反事項の課題などもある。

リスクアセスメントでの想定外事象に対する提言

リスクアセスメントとは許容しうる危険発生確率をもって、新しい製品や技術を使用するとの立場であり、ある発生確率以下のリスクが残ることは自明である。したがって、安全と安心の差異に対する理解を深めるため、リスクマネジメントについて、更に啓蒙を図るべきである。一方で、前項で記述した想定外事象に対する提言も今後は重要な課題となる。なお、現在、市場で普及している A2L 冷媒の R32 を使用したエアコンは想定外事象をリスクアセスメントで考慮していたわけではない。それにもかかわらず実際の着火事故は発生していない。その理由は、①R32 は先に列挙した想定外事象があったとしても、A3 冷媒に比して着火源の種類が少ないこと、②最小着火エネルギーが大きいこと、③燃焼下限界の濃度が 13.5%と可燃域の形成が極めて困難なことなどが考えられる。一方、R290 は、着火源が多いこと、最小着火エネルギーが R32 の約 80 分の 1 で小さいこと、燃焼下限界濃度が 2.02%で低いことなどから R32 に比して容易に可燃域が形成されると推定される。したがって、R290 の実用化にあたっては、本リスクアセスメントの想定外事象をいかに排除できるかが重要である。

以下に、R290 を冷媒として実用化するための方策を提言する。

①エアコンの冷媒が適正に回収・処理されるための取り組みの強化

家電リサイクル制度を含めたエアコンの冷媒の回収・処理に関するインフラ整備の検討が必要であり、特に人が介在する場合の安全性を担保することが必須である。このような方策で効果が得られない場合には、“新たな社会システムの検討”をはじめめるべきである。

②エアコン据付や修理を行う作業員への免許制度

冷凍空調に関連する団体が講習、実地訓練をベースとした可燃性冷媒作業の資格制度を整備すること、もしくは法的な背景を基にした免許制度を設立するなどの、新たな仕組み。

以上の施策は、排除すべき不安全な作業及び行為をさせない“人への対策”であるが、労働安全や機械安全のリスクアセスメントでは、国際規格 ISO 45001、ISO 12100 及び JIS Z8115 に則った“人は必ずミスをする、機械は必ず故障する”との前提で安全を確保することを求めている。R290 を冷媒として採用する場合には、この原点に立ち返って、着火事故がおきても人が危害を受けない、あるいは冷媒が漏れても着火濃度を形成しない対策を考えることが必要である。そしてより安全性を向上させるために、作業時の保護具の着用、漏れい時の適切な機器の停止手段、撤去時の適切な冷媒放出策などの対応を、今後の検討に反映していきたい。

また、実社会での R290 冷媒の使用にあたっては“安全”のみならず“安心”の観点も重要である。両者の差異に対する理解を深めるためにも、リスクマネジメントに関する啓蒙活動や“安全と安心”の観点からの緊密なリスクコミュニケーションが必須である。

7. 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

冷凍機を内蔵したショーケース（内蔵ショーケース）は、飲食店、食料品販売店、スーパーマーケット等で使用されているが、モントリオール議定書のキガリ改正を受け、GWP の低い冷媒への転換が望まれている。そのため、2019 年 6 月に国際規格 IEC 60335-2-89 が Edition 3.0 に改正され、A3 冷媒の最大冷媒充填量が従来の 0.15 kg から約 0.5 kg（R290 の場合）に緩和された。日本冷凍空調工業会（日冷工）では、2016 年 7 月から、R290 等の A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースの庫内及び庫外からの漏えいを想定した冷媒漏えい解析やリスクアセスメントを行い、A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースを安全に運用する方法を検討している。今までの検討内容をまとめた。

7.1 国際規格 IEC60335-2-89 の主な改正点

- (1) 可燃性冷媒を、LFL の 13 倍と 1.2 kg のうち小さい値まで充填してよいことが規定された。R290 の場合、LFL が 0.038 kg/m^3 であるため 0.494 kg まで充填できる。
- (2) 可燃性冷媒を使用した機器を設置する部屋は、冷媒量が部屋の容積に対し LFL の 1/4 となる最小設置床面積以上の床面積を持っていなければならないことが規定された。R290 を 0.494 kg 充填した機器の場合は、 23.7 m^2 以上の床面積の場所に設置しなければならない。
- (3) 冷媒回路に冷媒を 0.15 kg 以上充填した場合は、規定の冷媒漏えい試験を行い、機器の周囲に可燃域が生成されないことを確認しなければならない。ただし、測定開始から 5 分間は濃度測定が免除されており、この間に大きな可燃域が生成されたとしても可燃域が生成されないとみなされてしまう。

7.2 冷媒漏えい解析

- (1) リーチインショーケースの庫内漏れ後に扉を急開放すると、庫外に必ず可燃域が形成され、凝縮器ユニットの風量及び床面積を変化させても、可燃空間体積の最大値は殆ど変わらなかった。A3 冷媒では、可燃域の生成が短時間であっても、可燃域に着火源が存在すれば容易に着火に至る可能性がある。しかし、IEC 規格では、扉開放開始から 5 分以内は大きな可燃域が生成されても安全であるとみなされてしまう。
- (2) 平形ショーケースの凝縮器ユニット漏えいでは、風量を規定値以上にすると可燃域が形成されなかった。
- (3) 密閉空間において、リーチインショーケースの庫内漏れに関し、庫内エアカーテン無、凝縮器ユニットの風量有無の時の可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の近似式を導出した。また、平形ショーケースの凝縮器ユニット漏れに関し、凝縮器ユニットの風量無の時の可燃域継続時間及び平均可燃空間体積の近似式を導出した。これらの式はリスクアセスメントにて使用する。
- (4) ショーケース下部の凝縮器ユニットからの R290 漏えいにおいて、漏えい速度がかなり遅くなっても可燃空間時空積の値に殆ど変化はなかった。従って、A3 冷媒では、微少漏れを含む全ての漏えいを考慮して着火確率を計算する必要がある。また、このことから、リスクアセスメントに使用する内蔵ショーケースの冷媒漏えい速度を、安全のため、空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 で使用している 4 分全量漏れ速度とするが、この設定に大きな問題はないと言える。
- (5) 多段形オープンショーケースの庫内漏えいに関して、下部に設置した凝縮器ユニットの風量がある程度確保されていれば、庫外には着火に至る有意な可燃域は生成されなかった。

7.3 リスクアセスメントの条件及び方法

可燃性冷媒を使用した機器の着火確率は、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、可燃域の空間分布を表す空間的遭遇確率及び冷媒漏えい発生確率を乗じて算出する。この時、可燃域継続時間及

び平均可燃空間体積は、冷媒漏えい解析結果から導出した近似式を使用する。リスクアセスメントを行うモデル店舗は、揚げ物等の簡単な調理が可能なコンビニエンスストアとし、ショーケースの冷媒回路内の冷媒量は 0.5 kg、店舗内の床面積は 84.7 m² とした。内蔵ショーケースのライフステージとして、輸送時、保管時、設置時、使用時、修理時、撤去時を設定し、各ステージのシナリオの想定内容について説明した。使用時の着火源について、各電気機器の電気スパーク、静電気、裸火等の詳細検討内容を説明した。

7.4 日本の法律（高圧ガス保安法）

高圧ガス保安法では、冷凍能力が 3 トン未満の冷媒回路内における高圧ガスが適用除外となっている。しかし、これは冷凍保安規則（冷凍則）に関してのことである。冷凍則の適用を受けるものを除き、炭素数が 3 又は 4 の炭化水素を主成分とする冷媒は液化石油ガス保安規則（液石則）の適用を受け、それ以外の冷媒は一般高圧ガス保安規則（一般則）の適用を受ける。機器の冷媒回路から大気への冷媒の放出（冷媒の廃棄）、冷媒の回収、機器への冷媒の充填に関して、一般則又は液石則が適用されると、20 日前までの届け出が必要となり、実質、機器の修理ができなくなってしまう。そこで、日冷工では、これを緩和すべく、経済産業省高圧ガス保安室との折衝を重ねた。その結果、大気への冷媒の放出（冷媒の廃棄）及び充填に関して、2020 年 7 月に、次の判断が経済産業省高圧ガス保安室によってなされた。これによって、修理時等に届け出なしに現地で冷媒の廃棄及び充填を行うことが可能となった。

「圧力を変更するための処理設備を使用しない差圧による冷凍能力が 3 トン未満の冷凍装置からの冷媒の廃棄及び差圧による冷凍能力が 3 トン未満の冷凍装置への冷媒の充填は高圧ガス保安法の適用除外である」

なお、A3 冷媒の回収に関しては、高圧ガス保安法の適用除外にならないため、20 日前までの届け出が必要となり、実質、修理時に A3 冷媒の回収はできない。

7.5 日本の規格

JIS C 9335-2-89 は、IEC 60335-2-89 を和訳し必要なデビエーション（国際規格との差異）を加えた日本の規格である。日冷工が原案を作成しており、IEC 60335-2-89 の Edition 3.0 に対応する改正を行った。JRA 4078 及び JRA GL-21 は、A3 冷媒を使用した内蔵ショーケース等のリスクアセスメントに基づく日冷工規格である。JIS C 9335-2-89 と日冷工規格（JRA 4078 及び JRA GL-21）を総称して日本の規格と呼称する。その主な規定内容を説明した。

- （1）A2L 冷媒は、A2 冷媒及び A3 冷媒よりも燃焼性が低いが、IEC 60335-2-89 の規定では 1.2 kg までしか充填できないため、大形機器で A2L 冷媒を使用できない。しかし、空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 では、燃焼性の違いから A2L 冷媒の充填量は A2 冷媒及び A3 冷媒よりも緩和されている。そこで、日本の規格では 1.2 kg の上限を無くし、全ての冷媒で LFL の 13 倍まで充填できる規定とした。
- （2）IEC 60335-2-89 の規定では、漏えいする可燃性冷媒にさらされる表面の温度が冷媒の自己着火温度から 100 K を減じた温度を超えてはならない。しかし、空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 では、A2L 冷媒は燃焼性が低いため、表面温度は 700 °C まで許容している。そこで日本の規格では、A2 冷媒及び A3 冷媒は自己着火温度から 100 K を減じた温度、A2L 冷媒では 700 °C を超えてはならないと規定した。
- （3）冷媒漏えい解析によって、リーチインショーケースの庫内に全冷媒量が漏えいした後に扉を開けると、庫外に大きな可燃域ができることがわかっている。IEC の規定では 5 分間の測定免除時間があり、この間の可燃域の生成は無視されるが、A3 冷媒では、静電気や店舗内の電気機器のリレー等も着火源となるため、短時間でも可燃域が生成されれば、着火事故に至る可能性がある。そこで日本の規格では、5 分間の測定免除時間を削除し、試験開始時から可燃域の生成を許容しない規定とした。そして、庫外の可燃域の生成防止のために、庫内の漏えいを検知する手段と冷媒回路を遮断する装置を規定した。
- （4）IEC 60335-2-89 には作業時の安全を担保するための規定はない。日冷工規格（JRA GL-21）では、静電気を防止する手袋の着用、携帯形漏えい検知器の携行等の作業時の着火リスク低減のための規定を設けた。また、現地で冷媒回路の修理を行う場合には、冷媒廃棄時及び冷媒充填時に、機器の周囲から着火源となるものを排除し、通風を良くすることを規定した。