

2.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

2.2.1 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発 【国立大学法人東京大学・公立大学法人公立諏訪東京理科大学・国立研究開発法人産業総合技術研究所】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
可燃性冷媒の燃焼に係る安全性とリスク評価の研究 【東京大学】		
可燃性低 GWP 冷媒を安全に使用するために評価すべき事項について、共通基盤的な情報を提供し、可燃性低 GWP 冷媒の実用化を促進する。	GWP が極めて小さい炭化水素のリスク評価を行うのに必要な共通基盤的な特性や HF0 冷媒の固有反応の抑制可能性について情報を提供した。産学官が協力して、リスク評価の実施に協力した。	○
[1] 可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究		
炭化水素がルームエアコンから室内に漏洩したとき、および炭化水素がショーケースから室内に漏洩したときの濃度分布のシミュレーション解析を行う。	炭化水素がルームエアコンから室内に漏洩したとき、およびショーケースから室内に漏洩したときの濃度分布のシミュレーション解析を行い、最大充填量評価、ファンによる攪拌効果を評価した。	○
[2] 可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究		
小型容器内で炭化水素、可燃性冷媒 (R32) が燃焼するときのシミュレーションを行う。燃焼性の強さと圧力の上昇速度の関係を整理する。	炭化水素、可燃性フルオロカーボン冷媒 (R32) が層流燃焼するときのシミュレーションをゼロ次元から 3 次元までの燃焼モデルに対して実施した。燃焼性の強さと、燃焼時の圧力の上昇速度の関係を整理した。	○
[3] エアコンポンプダウン時のディーゼル爆発の発生抑制		
圧縮機内でのディーゼル爆発の発生条件を明らかにし、ディーゼル爆発の発生を抑制する方法を提案する。	添加剤を含む潤滑油 (POE) と冷媒 R22, R32, R1234yf, R290 の組み合わせでディーゼル圧縮実験を行った。複数の燃焼抑制剤の効果を明らかにした。	○
[4] HF0 冷媒の自己分解反応の安全評価		
HF01123 冷媒について、自己分解反応の発生条件を明らかにする。反応抑制ガスを添加し、抑制効果を整理する。	HF01123 冷媒+R32+CF3I 混合系による自己分解反応の抑制効果を明らかにした。R32 と CF3I には反応抑制に関する相乗効果があることを明らかにした。	○
[5] 冷媒圧縮機におけるレイヤーショートの原因および放電パターンの解明 (静岡大学に再委託)		
HF0 冷媒の自己分解反応を引き起こす原因となる冷媒圧縮機内のレイヤーショートについて、その発生要因と発生時の通電エネルギーを明らかにする。	圧縮機モータのそれぞれの端子におけるショート時の保護回路の動作と通電エネルギーを調査した。主巻き線のショートは物理的に起きない構造にする必要があり、副巻き線のショートには適切な保護回路の導入が有効であることが分かった。	○
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【公立諏訪東京理科大学】		

炭化水素系自然冷媒やHFC系・HF0系冷媒等の次世代冷媒を搭載した業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器の、実際の使用時を想定した着火源の評価手法の確立を目指す。	実際の使用時を想定した着火源候補を、有識者及び関係団体との綿密な意見交換により抽出し、それぞれグループ分けして、再現実験及びモデル実験による着火性評価を実施している。当初計画通りの進捗がみられている。	○
[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		
特に炭化水素系自然冷媒について、着火源となりうる機器及び現象を文献調査その他の方法により抽出し、いくつかの着火源カテゴリーへ分類すること。分類したカテゴリーごとに着火源モデルを構築すること。	NEDO 調査委員会及び同委員会 WG2 に出席するなどにより、有識者・関係団体と綿密な意見交換を実施した。これにより、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器冷媒の炭化水素系冷媒への転換にあたって検討しなければならない着火源を抽出し、電気系（接点リレー、照明スイッチ、プラグ抜き差し、静電気、整流火花）着火源及び高温熱面（煙草等）に分類し、それぞれについて着火性評価手法の考え方を一通り構築した。	○
[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		
特に炭化水素系自然冷媒に注目し、テーマ[1]で分類・構築した着火源モデルによる着火可能性について、主として実験によりデータを蓄積するとともに、実使用環境における着火源を考慮したフィジカルリスク評価手法の確立に向けた見通しを得ること。初期湿度や劣化度等の影響について、主として実験により、各着火源モデルによる着火特性に対する初期湿度や劣化度等の環境条件の影響評価の見通しを得ること。	上記テーマ[1]での要検討着火源候補について、それぞれ実験により着火性評価を進めた。電気系着火源では接点リレー、照明スイッチ、プラグ抜き差しについては状況を再現した実験により、静電気については主として文献により着火性評価を実施した。整流火花についても調査を開始したところである。高温表面着火源ではモデル実験により着火性の評価を行っている。今後は、電気系着火源については着火性評価手法の一般化を課題としており、そのために、回路特性が放電エネルギー及び着火性に及ぼす影響を明らかにする予定である。高温熱面についてはモデル実験により構築する着火性評価手法の妥当性検証のためのケーススタディを実験的に実施する予定である。	○
実使用条件を考慮した自然冷媒使用冷凍空調機器の燃焼に係る実規模フィジカルハザード評価【産業技術総合研究所安全科学研究部門】		
可燃性ガスである自然冷媒のプロパン、R290を用いた冷凍空調機からの冷媒の漏洩を想定して、プロパンガス、実在機器を使用した実規模の点火能評価実験、漏洩拡散挙動計測実験を行い、漏洩着火事故の頻度評価に寄与する知見を提供するとともに、漏洩拡散挙動計測実験の結果を用いて燃焼影響評価実験を行い、漏洩着火事故の実規模フィジカルハザードを評価する。	点火能評価試験の実施手法を確立し、当初予定の3件の評価を行った。リスク評価上の必要性から3件程度の追加を予定している。また、漏洩事故におけるフィジカルハザード評価については、エアコン室内機からの急速漏洩における実規模拡散挙動計測を完了し、最大許容充填量の妥当性や送風、扉下隙間の影響に関する知見を得た。	○
[1] 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		
冷凍空調機器からの冷媒漏洩事故事例の検討を行い、着火事故とその周囲影響が懸念される漏えい条件のモデル化を完了する。	比較的小規模の空調システムの漏洩事故事例を検討し、急速漏洩に関する実験のための漏洩条件のモデル化を行った。	○
[2] 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価		
公立諏訪理大の研究により着火源となり得るとされた機器について、最大6件程度の実在の機器類を用いて評価する。	2019年度に、実験用アクリル容器と遠隔操作手法を確立し3件の機器について評価した。	○
[3] 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		
少量長時間漏洩時の冷媒拡散挙動を計測し、着火の危険性を評価する。また危険性が高いと推定される条件が見いだされた場合、燃焼影響評価実験を行い燃焼影響を評価する。	今年度の実規模拡散挙動計測の実験条件を絞り込むためのスケール実験を準備中。2021年度以降に予定されていた燃焼影響評価実験を今年度に前倒した。	○

[4] 室内機等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		
<p>実規模室内空間における、室内機等に発生した破断等の大きな漏洩口を想定した、冷媒の急速漏洩時の拡散挙動を計測し、着火の危険性を評価する。また危険性が高いと推定される条件について燃焼影響評価実験を行い、燃焼影響を評価する。</p>	<p>2019 年度にエアコン室内機の実規模拡散挙動計測を終了。2021 年度以降に予定されていた燃焼影響評価実験を今年度に前倒しした。冷蔵機内蔵ショーケースに関する実規模拡散挙動計測、燃焼影響評価実験を追加した。</p>	<p>○</p>

【 ◎:計画以上、○:計画通り(目標達成又は達成見込み)、△:ほぼ計画通り(一部未達)、×:目標未達 】

2.2.1.1 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発 【国立大学法人東京大学】

①「可燃性冷媒の燃焼に係る安全性とリスク評価の研究」

1-1) 家庭用ルームエアコンからの冷媒漏洩

【数値流体解析の方法】

実験室モデルについての概要をF図 2.2.1.1-1 にまとめた。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 3800 mm×2400 mm×2550 mm で、エアコンの対面に、φ100 mm の排気口とドア下隙間 900 mm×7 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。また、冷媒漏洩実験との比較の際には、R290 の代わりに R744 を用いた。これは、R290 の試験は着火の危険があるため、物性値の近い R744 で代替したからである。

壁掛け式室内機と床置き式室内機はどちらも吸い込み口と吹き出し口をもっている。境界条件として、吸い込み口では自由流出条件を与え、吹き出し口では一様流速条件を設定している。室内機内部は計算を行っていない。冷媒漏洩後に室内空気を攪拌するために室内機ファンを稼働させる。

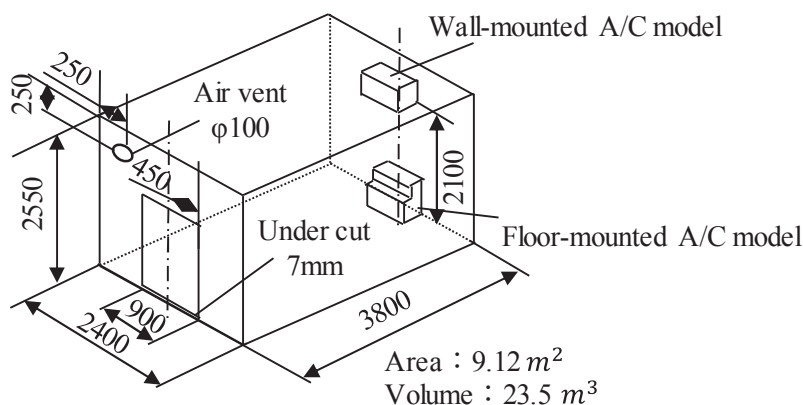


図 2.2.1.1-1 モデルルーム

【数値計算による可燃性冷媒の最大許容充填量の検討】

計算対象としては、壁掛け式エアコン及び床置き式エアコンとした。可燃性冷媒の最大充填量の規制値は、IEC 60335-2-40:2018 に規定されている式

$$m_{max} = 2.5 \times LFL^{(5/4)} \times A^{1/2} \times h_0 \quad (2.2.1.1-1)$$

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

$$m_{max} = F \times LFL \times A \times 2.2 \quad (2.2.1.1-2)$$

の評価を行った。

【壁掛け式室内機からの漏洩】

シミュレーション結果から時々刻々変化する可燃ガス体積 V_{FL} の算出を行った。冷媒充填量が少ないときには漏洩終了後(240 s)ただちに可燃ガス体積が消滅するが、充填量が増えると漏洩終了後も可燃ガス体積が存続する。その限界の冷媒充填量を最大許容充填量として床面積毎に求め、式(2.2.1.1-8)及び式(2.2.1.1-9)との比較を R290, R32 それぞれ行った結果を図 2.2.1.1-2 に示す。図中のシンボル○は、冷媒漏洩が終了するとすぐに可燃ガスが消滅する最大充填量である。このシンボル以上の量を漏洩すると、冷媒漏洩終了後も可燃ガスが残ることを意味する。図 2.2.1.1-2 から R290 も R32 も計算値が式(2.2.1.1-1)を上回り、式(2.2.1.1-1)は妥当な見積もりをしていることが分かった。式(2.2.1.1-2)について評価すると、R32 の場合はすべての広さで安全側に見積もる。しかし、R290 については、7.5 m² 以上の面積では危険な見積もりとなることが分かった。したがって、この時には室内機ファンによる攪拌が必須となる。

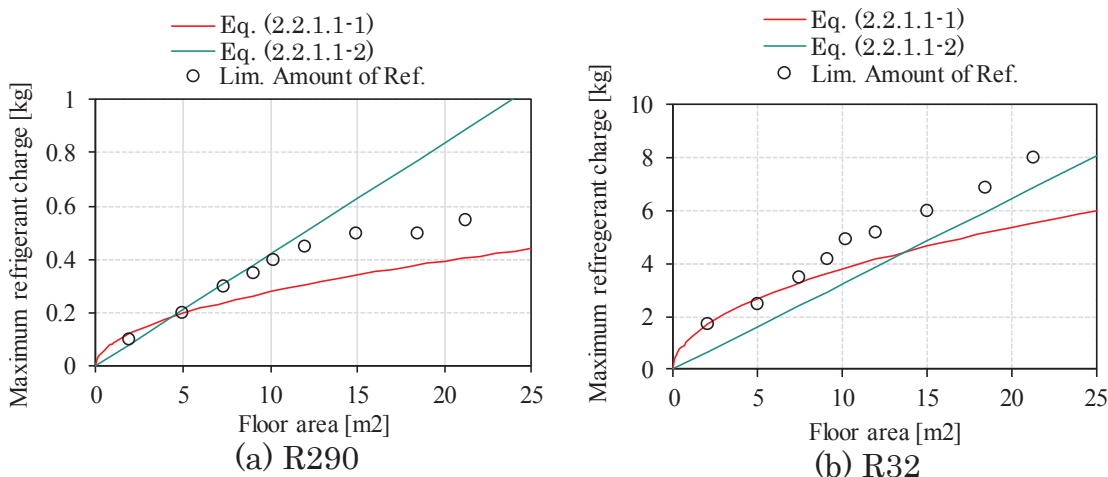


図 2.2.1.1-2 最大許容冷媒充填量の比較
(壁掛け式ルームエアコン)

【床置き式室内機からの漏洩】

床置きエアコンについても、計算により最大許容充填量を床面積毎に求め、式(2.2.1.1-1)及び式(2.2.1.1-2)との比較を R290, R32 について行った結果を図 2.2.1.1-3 に示す。R290 について計算結果を式(2.2.1.1-1)と比較すると、式(2.2.1.1-1)はほぼ妥当な推定を与えている。R32 については、式(2.2.1.1-1)は全ての面積において計算値を下回るという結果となり安全が確認された。式(2.2.1.1-2)は、R290, R32 ともに計算値より大幅に上回っているものが多く、危険であることが分かった。

以上のことを踏まえ、R290 と R32 の各面積におけるファンによる可燃濃度域の攪拌の影響を計算により求めた。室内機ファンが稼働すると、可燃ガス体積は徐々に減少していくが、壁掛けエアコンのときとは異なり、減少に時間を要した。R290 に関しては 5 m² 及び 9.12 m² のとき、R32 に関しては 12 m² 以下のとき、可燃ガスはファンの攪拌により完全に消滅する。しかし、R290 が 15 m² 以上のとき、R32 が 21.28 m² のときには冷媒は冷媒漏洩終了後も可燃ガスは少し残ることあるが、その量は多くない。

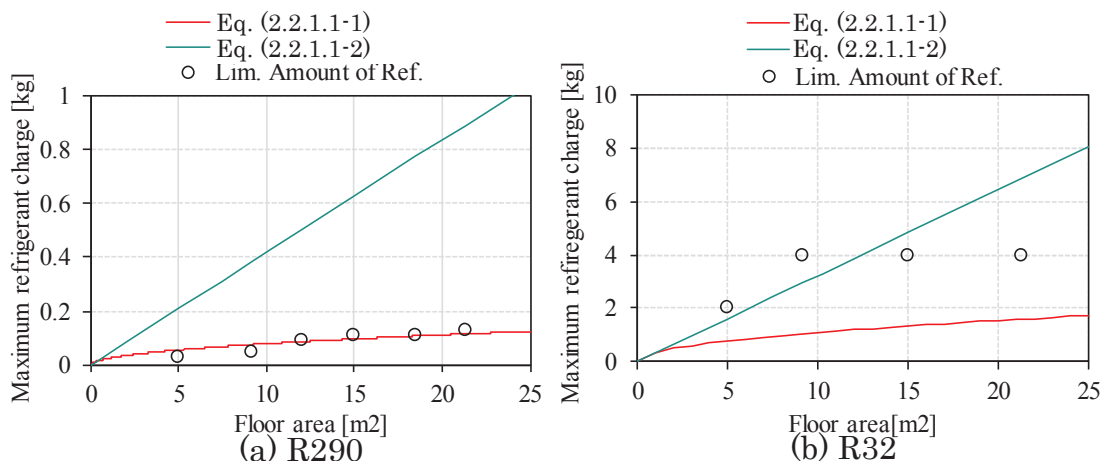


図 2.2.1.1-3 最大許容冷媒充填量の比較
(床置き式ルームエアコン)

【まとめ】

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(2.2.1.1-1)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(2.2.1.1-2)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に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。

1-2) 業務用ショーケースからの冷媒漏洩

【数値流体解析の方法】

実験室モデルについて、部屋の概要を図 2.2.1.1-4 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 の排気口と、ショーケースモデルの対面にドア下隙間 2200 mm × 7 mm を設けた。ショーケースが設置される店舗においては、必ず扉があり扉の下には隙間があるとともに、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。換気口とドア下隙間には、圧力境界を設定した。また、冷媒漏洩実験との比較の際には、R290 の代わりに R744 を用いた。

業務用ショーケースモデルの詳細を図 2.2.1.1-5 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。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。ファンの稼働開始時刻は漏洩開始 30 s 後とした。

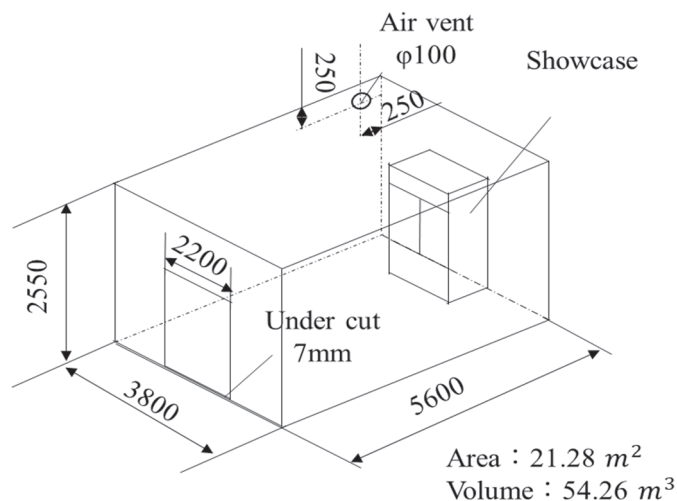


図 2.2.1.1-4 モデルルーム

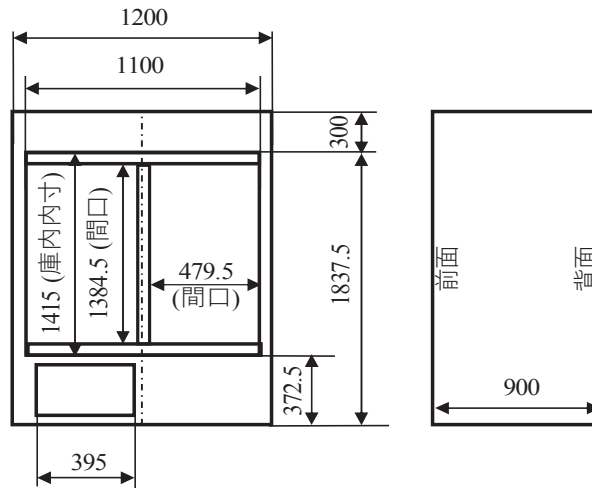


図.2.2.1.1-5 ショーケースの詳細

【数値計算による可燃性冷媒の最大許容充填量の検討】

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、 $m_{max}=150g$ 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。

$$m_{max} = 13 \times LFL \quad (2.2.1.1 - 3)$$

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(2.2.1.1-3)の評価を行った。IEC60335-2-89:2019 によれば、定められた測定点すべてにおいて、5 分間は LFL の 50%の濃度を超えてはならないとなっている。床面積 21.28 m^2 の冷媒量毎の測定点 No. 1~No. 8 の濃度分布についての評価を行い、まとめたものを 図 2.2.1.1-6 に示す。また、図中には 5 min (300 s) と LFL の 50%の濃度を記した。図から、漏洩量が $300 \sim 500 \text{ g}$ のとき、漏洩開始から 5 min 後 LFL の 50%を No. 1~No. 6 の測定点で上回っている。それに対し、漏洩量が 200 g のとき、No. 1~No. 6 は LFL の 50%近傍の値を示している。これらの結果から、ファンが稼働しないときには、可燃性冷媒の最大充填量は 150 g が妥当な指標であることが分かった。

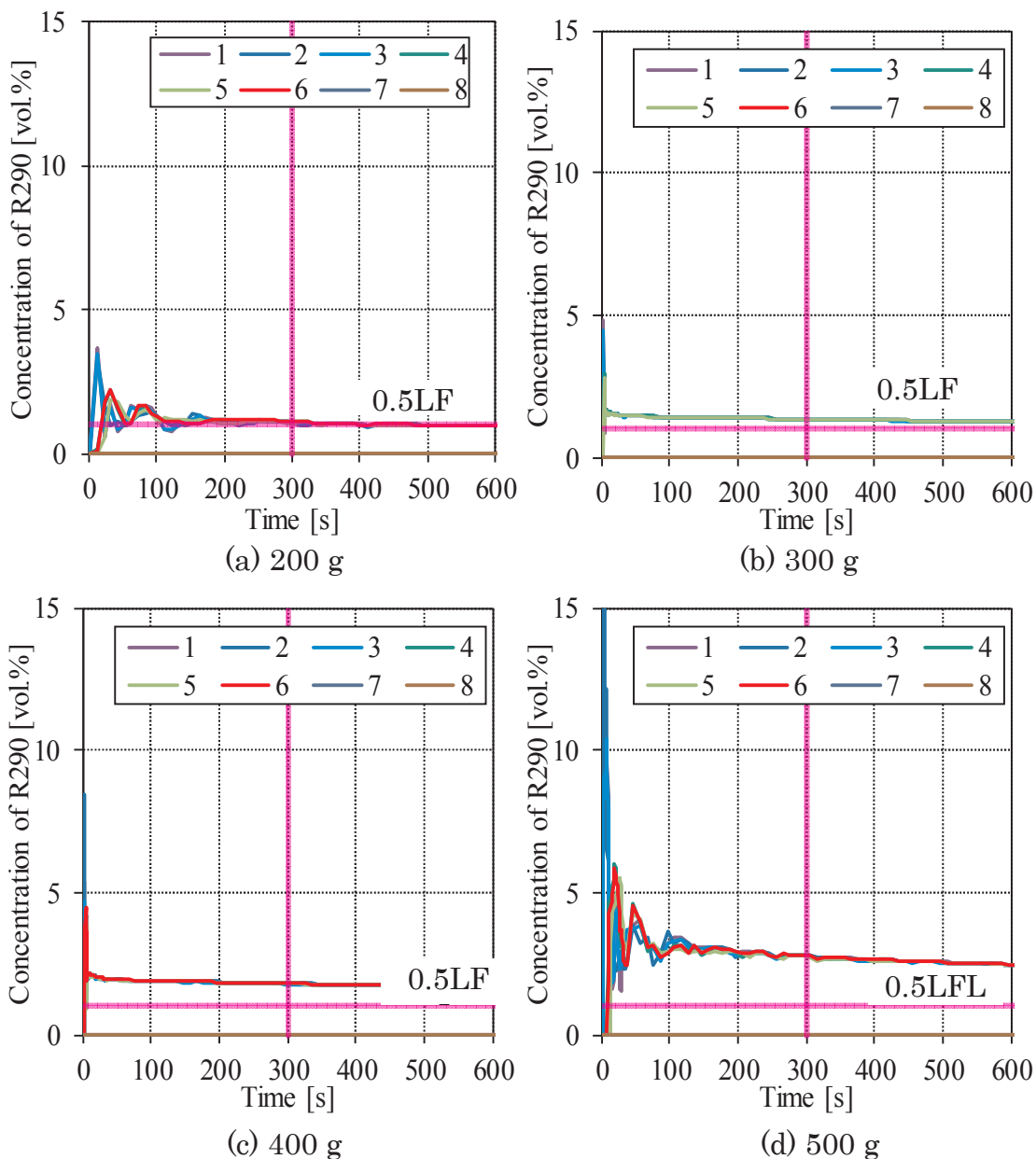


図 2.2.1.1-6 濃度拡散のシミュレーションと実験の時間変化の結果(R290, A=21.28 m²)

これまでの検討から、凝縮器のファンが動いていない状態では、ショーケースシステムに充填する冷媒量を多くすると危険であることが分かった。そこで、ファンによる攪拌の効果について検討する。業務用ショーケースでは凝縮器の設置個所は上下 2 箇所が想定されるため、上ユニットと下ユニットの両方を対象とした。床面積 21.28 m²にて、R290 を 500 g 充填したときの可燃ガス体積の時間変化を図 2.2.1.1-7 に示す。図 2.2.1.1-7(a), (b)は凝縮器ユニットがそれぞれ下部、上部にある場合の結果である。下部にファンがある場合には、ファン速度が上昇するにしたがって、可燃ガス体積の消滅は早まることがわかる。しかし、上部にファンがある場合には、低風速では攪拌効果が小さく、可燃ガスの消滅は早まらない。ファン風速が 2.4m/s 以上になると、ファンの風が対面の壁に到達し、戻ってくる流れなどにより有効な攪拌をするようになる。

以上の結果から、漏洩時のリスクを低減するには、凝縮器ファンの効果がおおきいことが分かった。当然、凝縮器ファンが下部に設置されているほうが、攪拌効果は大きくなる。床面積 21.28 m² でファン風速 $v > 2.5$ m/s の時には、凝縮器を上部においても下部においても攪拌効果の差異は小さいことが分かった。しかし、上部に凝縮器ファンを設置するときには、ショーケースの周りにおかれた他の冷凍空調機器がファンの流れを阻害する可能性もあるので、攪拌効果は削減される。安全のためには、凝縮器ユニットは下部設置に限定するほうがよい。

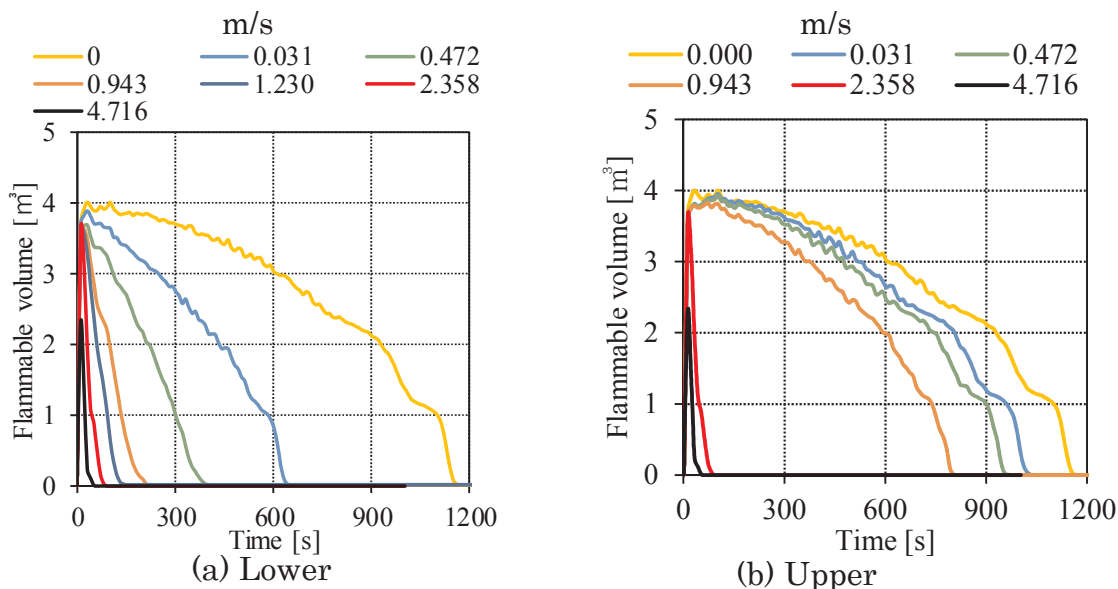


図 2.2.1.1-7 可燃ガス体積の変化

【まとめ】

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をする為に、数値流体解析により国際規格の最大充填量評価をおこなった。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 21m² の部屋に設置し、R744 を用いて冷媒漏洩実験を行った。扉を開放することによりショーケース内に充填した冷媒を漏洩させ、濃度の変化を実測し、シミュレーション結果と比較した。その結果、シミュレーションの濃度分布の再現性が高いことが示された。
- 2) 凝縮器ファンが稼働していないときの冷媒漏洩シミュレーションを行い、可燃ガス体積の時間積分値と可燃ガス体積の消滅時間について調査した。凝縮器ファンが稼働しない場合は、可燃ガスが長時間滞留し、危険であることが判明した。
- 3) 凝縮器ファンの効果を検討するために、凝縮器がショーケース上部に設置されている場合と下部に設置されている場合について、ファン風量を変化させて、可燃ガス体積の時間積分値と可燃ガスの消滅時間を計算した。ファンの稼働により室内での着火リスクを大きく低減できる可能性が示された。当然のことながら、凝縮器をショーケース下部に設置する方が少ないファン風量で可燃ガスを早期に消滅させることができる。凝縮器をショーケース上部に設置する場合には、攪拌専用のファンを下部に設置すべきである。

1-2) 可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究

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。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、式(2.2.1.1-4)のように定義される。

$$K_G = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} \quad (2.2.1.1 - 4)$$

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 プロジェクトにおいて、容器体積が K_G に与える影響についての検討が行われ、R32 や R1234yf については、 $0.01\text{m}^3 \sim 1\text{m}^3$ 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。

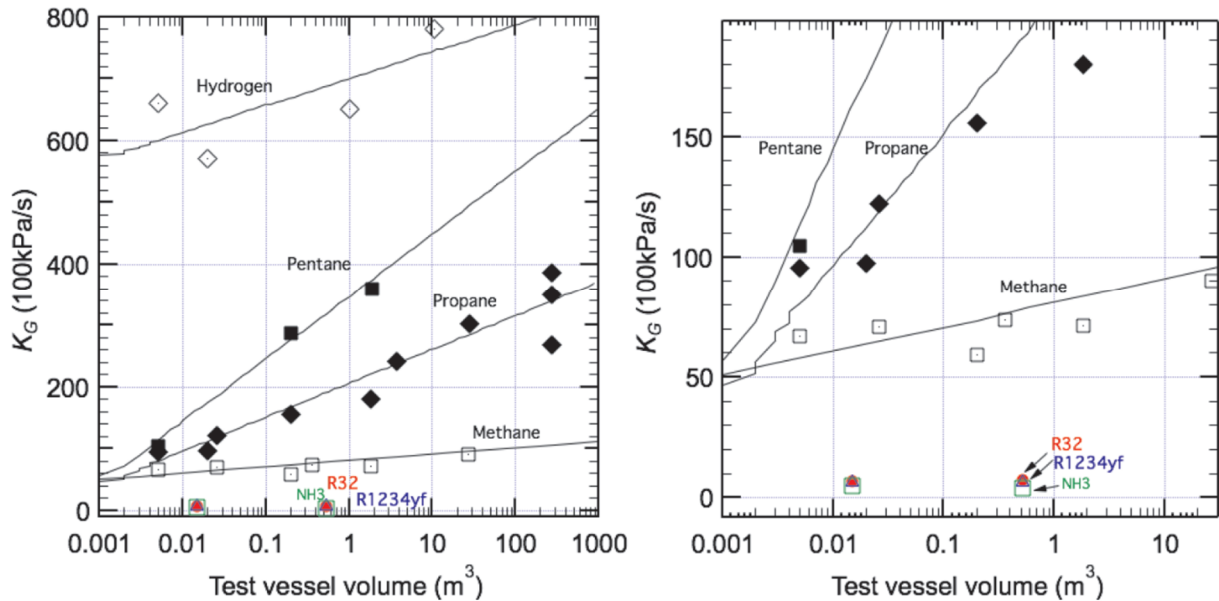


図 2.2.1.1-8 K_G に対する球形容器体積の影響

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。

【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 図 2.2.1.1-9 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。

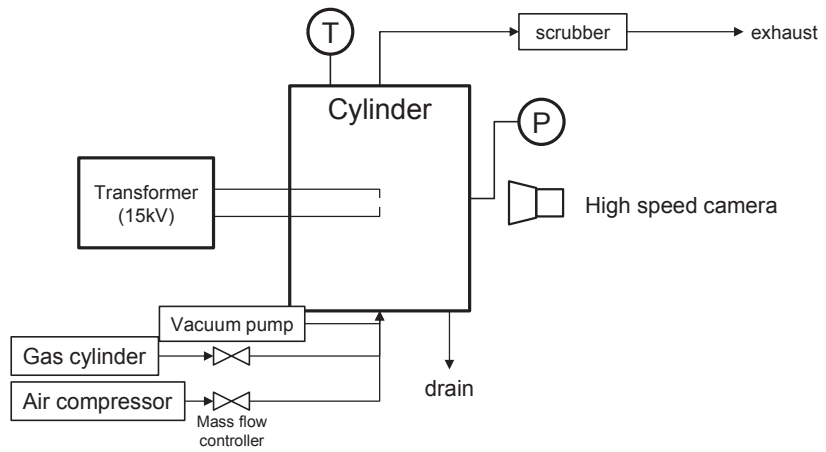
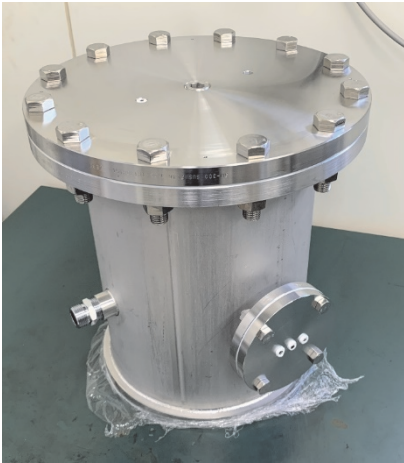


図 2.2.1.1-9 小規模燃焼試験装置

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行っている。

【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 0~1 次元の現象について、CHEMKIN などの反応解析ソフトウェアにおいて用いられる、素反応データの調査や評価が行われている。これらは多数の素反応についての反応速度を、温度などの関数として表す関数のパラメータ群である。R290 に類似の炭化水素類については、Lawrence Livermore National Laboratory や National University of Ireland によりデータベースとして公表されており、またフルオロカーボン類の一部についても P.Papas らや D.Burgess らにより評価や実験値との比較が行われている。例としては、図 2.2.1.1-10 に示す通り、R32 と空気の混合比を変えた場合の燃焼速度の変化について、複数の反応モデルの検討が行われている。

R32 の素反応データを 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、0-D 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っている。

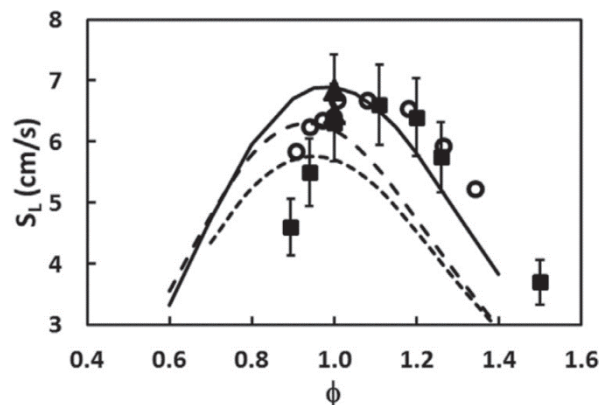


図 2.2.1.1-10 R32 の空気混合比に対する層流燃焼速度の実験値と予測値と関係

1-3) 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

冷凍空調機器の圧縮機の潤滑に用いられる潤滑油の性状は、潤滑の基本特性である潤滑性、冷媒との共存や長期間の油の安定性などが求められ、その機能を維持するために油(ベースオイル)に添加剤が加えられている。添加剤には目的に応じて、酸化防止剤、安定剤、耐摩耗剤などの種類がある。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。油の着火は、ラジカルを生成し酸化の連鎖反応を引き起こして持続的な燃焼に至ると考えられる。添加剤はラジカルを捕捉することにより連鎖反応を抑制することが期待されることから、これまでフェノール系酸化防止剤(A1)、エポキシ系安定化剤(A2)の入った潤滑油(POE)で実験を行った。そして、添加剤は燃焼抑制効果があり、圧縮機の爆発の確率を低下させると報告している。本研究では、燃焼抑制効果について、フェノール系酸化防止剤(A1)とリン系耐摩耗剤(P1)に注目し、添加剤の濃度、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。

【実験装置と実験条件】

図 2.2.1.1-11 は、エアコンのポンプダウン時に発生するコンプレッサー爆発事故時の様子を模擬した実験装置である。装置は主に冷媒圧縮機と駆動する系、冷媒を供給する系、空気を供給する系、潤滑油を供給する系と計測と制御系から成っている。冷媒圧縮機と駆動システムについては、冷媒圧縮機は小型模型エンジン(ENYA R155-4C 改造エンジン)で模擬し(以後、「模擬圧縮機」と呼ぶ。)、エンジンクランクシャフトに直接接続された電気モーター(三菱電機 AC 汎用 AC サーボ HP-JP203)で駆動した。

冷媒を供給する系については、マスフローコントローラで流量制御された冷媒は冷媒ポンペから配管を通じて模擬圧縮機に供給される。空気を供給する系については、空気圧縮機から供給される圧縮空気をマスフローコントローラ(コフロック製 MODEL8550MC-0-0-1-1)で制御し、除湿機を介して配管から模擬圧縮機に供給している。冷媒と空気は管路途中で合流し、電気ヒータにより所定の温度に上昇し模擬圧縮機に供給される。潤滑油を供給する系は、タンクから供給された潤滑油を油圧ポンプで昇圧し、オイル噴射システム(FC デザイン、燃料噴射システム)のインジェクタから模擬圧縮機の吸気管に噴射する。エンコーダとストロークセンサでピストンの位相を読み取り、ピストンの位相角が 90° (吸気の上死点位置を 0°) の時にオイルを噴射した。当量比 (ϕ) は、実際のオイルの質量とエンジンの行程容積の空気と完全燃焼するオイルの質量の比で定義されている。理論空燃比はエンジンの行程容積の空気とオイルの CHO 質量分率から求めた。オイル噴射圧力は 100MPa であり、オイル噴射時間とオイル質量の関係は予め実測して校正した。モーターの制御はパソコンによりサーボアンプを介して行った。エンジン内の圧力は圧電式圧力センサ(キスラー6045A)で電気信号に変換し、排ガス温度は排気管に設置した K 型シース熱電対(0.5mm-OD)で電気信号に変換した。圧力、温度の電気信号とオイル噴射装置の信号(エンコーダ、ストロークセンサ、オイル噴射信号)はデータロガーを介してパソコンに記録した。

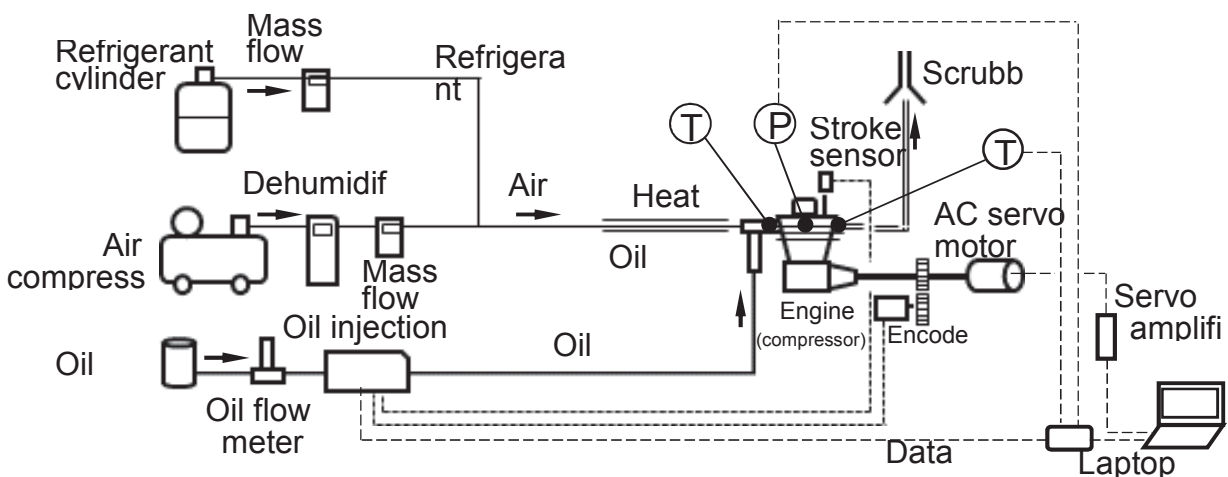
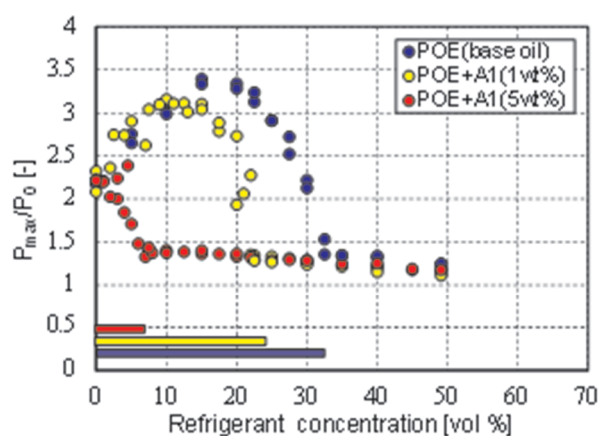


図 2.2.1.1-11 実験システム

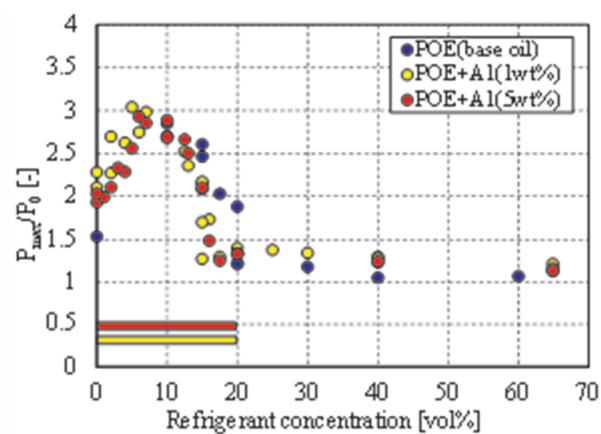
実験は次の順序で行った。エンジンの回転数 50rpm で運転しながら、指定の空気量を模擬圧縮機に供給する。模擬圧縮機入口の空気温度が所定の温度になるまでパイプに巻かれた電気ヒータの電圧を上げ、温度が安定した後に所定の冷媒量を流す。模擬圧縮機回転数を 1500rpm に変更した後、オイル噴霧システムを稼働してオイルを噴射する。オイルが噴射し数秒後にパソコンでデータを収録し始める。実験は、異なる冷媒、添加剤とその濃度、当量比(φ)1 の潤滑油(POE)で行った。

【フェノール系酸化防止剤(A1)を添加する場合】

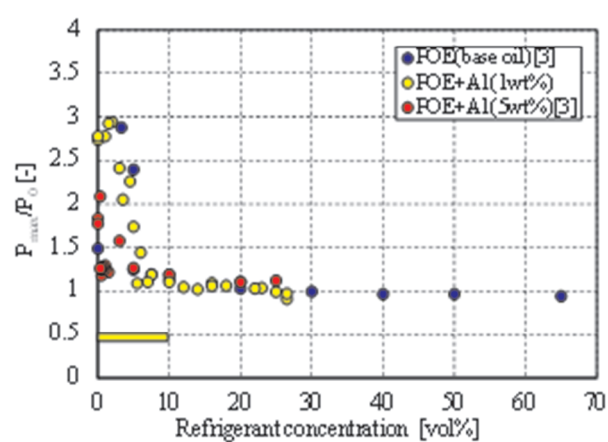
図 2.2.1.1-12 (a)-(d)に添加剤濃度をパラメータにして、それぞれ R22, R32, R1234yf, R290 の冷媒濃度に対する無次元最高圧力を示した。これまでの実験結果より、低冷媒濃度で無次元圧力が約 1.5 以上の高圧領域は自己着火燃焼が起こっている。図 2.2.1.1-12 (a)において、R22 の燃焼範囲の上限の冷媒濃度を比較すると、添加剤無し(0wt%は base oil)は 32vol%, そして添加剤(A1)の 1wt%と 5wt%はそれぞれ 22vol%と 5vol%であり、添加剤濃度の増加と共に上限値は低下する。添加剤濃度が増加すると燃焼範囲は顕著に小さくなるが分かる。また、0wt%の添加剤(A1)のときの無次元最高圧力は 3.4, 1wt%のときは 3.2, 5wt%のときは 2.3 であり、最高圧力は添加剤濃度の増加と共に低下している。R32 の燃焼範囲の冷媒濃度は 0-20vol%で R22 の 0-30vol%により狭く、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%で小さく、無次元最高圧力は 0wt%の添加剤で 3.3, 1wt%で 2.7, 5wt%で 2.4 より、最高圧力は添加剤濃度の増加と共に低下している。ところで、燃焼範囲と圧力波形変化の範囲を添加剤 1wt%で比較してみると、R22 の燃焼の上限と圧力変化の上限は 22vol%と 25vol%であり、R32 では 15vol%と 20vol%, そして R1234yf では 6vol%と 10vol%である。つまり、圧力波形の変化は燃焼範囲より高冷媒濃度に現れる。実際のポンプダウンでは、圧縮機入口の冷媒濃度は徐々に低くなることから、圧力波形の変化は燃焼の前兆となる。前兆をとらえることにより事故を未然に防止することが期待される。



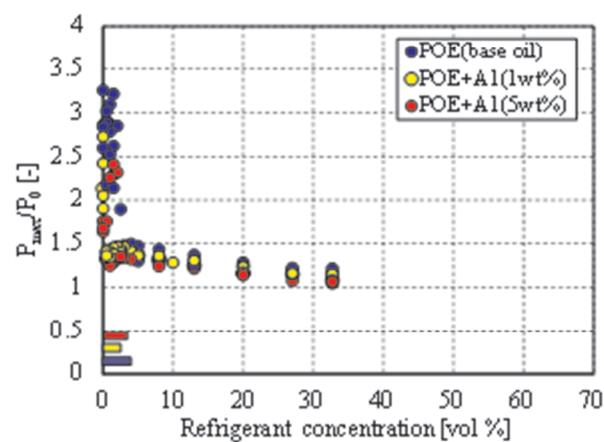
(a) R22



(b) R32



(c) R1234yf



(d) R290

図 2.2.1.1-12 燃焼ガスの最大圧力と冷媒濃度の関係 (A1 の場合)

【リン系摩耗抑制剤(P1)を添加する場合】

図 2.2.1.1-13(a)-(c)に添加剤(P1)を添加した場合の実験結果を示した。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(0wt%, base oil)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。

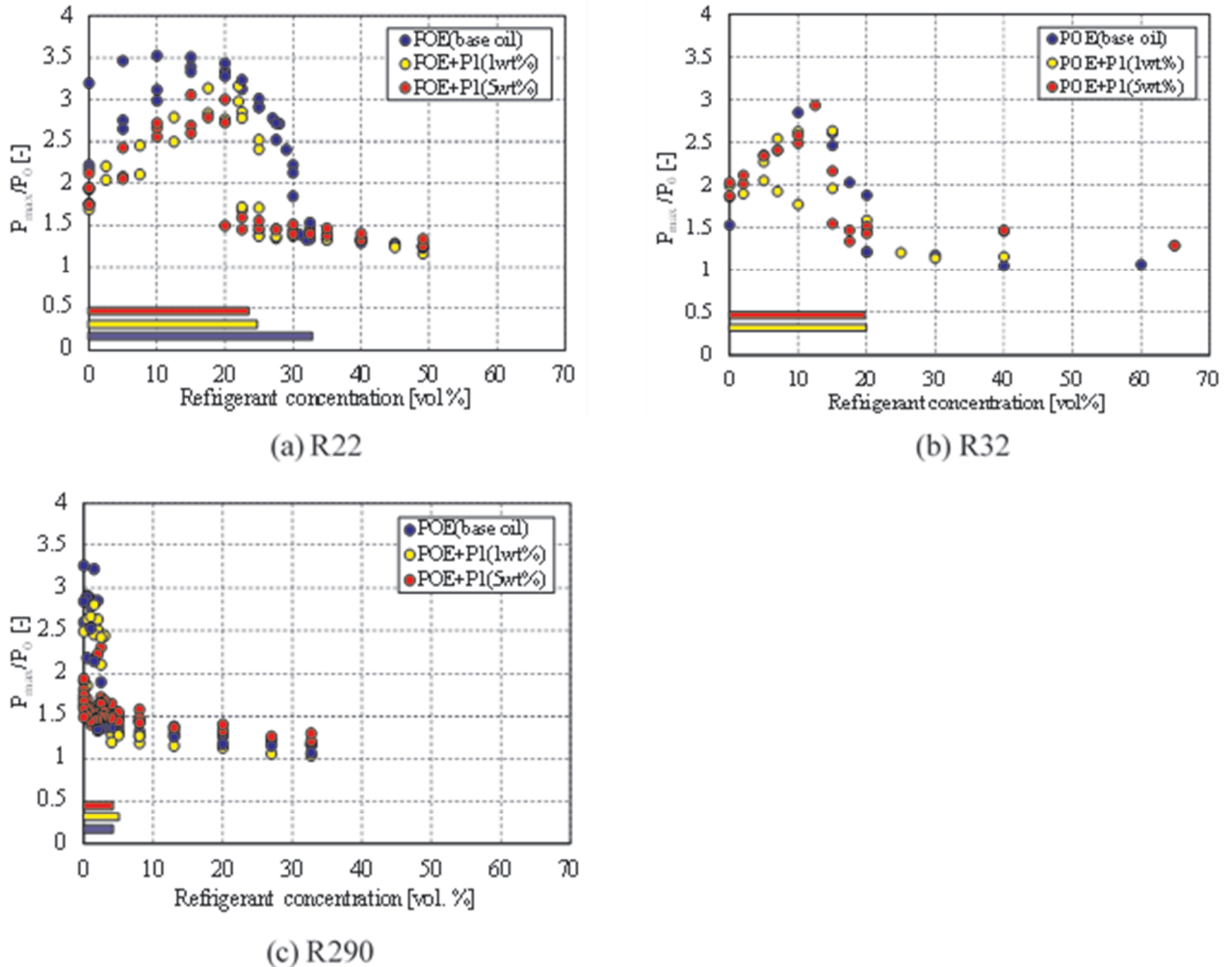


図 2.2.1.1-13 燃焼ガスの最大圧力と冷媒濃度の関係(P1 の場合)

【まとめ】

添加剤を含む潤滑油(POE)と冷媒 R22, R32, R1234yf, R290 の組み合わせでディーゼル圧縮実験を行った。添加剤はフェノール系酸化防止剤(A1)とリン系摩耗防止剤(P1)でそれらの濃度は 1, 5wt%である。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(A1)とR22の組み合わせのとき、添加剤の燃焼抑制効果は顕著であった。しかし、他の組み合わせでは燃焼抑制効果は小さかった。
- (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。

添加剤は多くの種類がある。燃焼抑制効果は、冷媒と添加剤の組み合わせにより異なることから、さらに他

の添加物との組み合わせによる研究が望まれる。

②「HFO冷媒の自己分解反応の安全性とリスク評価の研究」

1) HFO冷媒の自己分解反応の安全評価

HFO-1123 (CF₂CHF)は分子内部に炭素の二重結合があるので大気中での寿命が短いため、非常に低いGWPを持っている。したがって、冷凍および空調の分野の次世代冷媒として期待されている。しかしながら、HFO-1123は高温高圧条件下でEq.(2.2.1.1-5)のような不均化反応を起こすことが知られている。機器の故障によりエネルギーが投入されると、生成した火炎が伝播して、生成熱によって圧力と温度が著しく上昇する可能性がある。これは酸素を必要とする燃焼反応ではなく、自己分解反応である。



このように、不均化反応が生じれば危険であるため、HFO-1123 を実用化するためには、不均化反応が起こる条件を明らかにするとともに、反応を抑制する必要がある。それには反応抑制物質を添加することが有効である。物質添加によるHFO-1123の不均化反応の抑制のメカニズムは以下の二種類が考えられる：

- (1) 不活性なガスを混合することによる熱希釈効果。
- (2) 反応の中間生成物のラジカルをトラップすることにより不均化反応の伝播を止める。

本研究では、図 2.2.1.1-14 の三角図に示されているように HFO-1123 に二種類の抑制剤を混合した場合の不均化反応の発生条件を実験で調べた。試験ガスの組成をまとめて表 2.2.1.1-1 に示す。R32 の混合量は、混合ガスの GWP が 150 になるように選んだ。試験ガスの初期温度を 150°C に固定し、初期圧力を変えて不均化反応が伝播するかどうかを判定した。初期圧力が低圧の時は火炎は伝播せず、ある圧力を超えると、伝播するようになる。圧力が上がって HFO-1123 分子の密度が大きくなると、反応は継続的に進み、火炎は伝播するのである。この火炎が伝播する境界の圧力を調べた。反応抑制剤のメカニズムを検討するために、火炎温度の計測、GC-MS による反応後ガスの定性分析を行った。

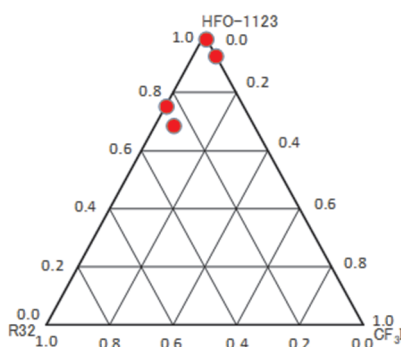


図 2.2.1.1-14 混合ガスの三次元プロット

表 2.2.1.1-1. 試験ガスの組成

Case	HFO-1123	R32	CF ₃ I
1	100	0	0
2	78	22	0
3	95	0	5
4	72.4	22	5.6

【実験方法】

HFO-1123 の不均化反応を観察し、不均化反応が伝播する圧力境界を調査するための実験装置を図 2.2.1.1-15 に示す。実験装置はステンレス鋼製圧力容器、着火源、真空ポンプ、冷媒容器、および安全弁からなる。圧力容器に充填するガスの圧力と温度を設定して安定化させた後にエネルギーを投入し、不均化反応が開始し、それが伝播するかどうかを圧力変化から判定する。それと同時に、実験容器に設置されている上下 2つの観察窓から火炎の動きを観察することができる。

これまではモリブデン細線を溶断することで実験容器内へエネルギーを投入していたが、本研究ではアーク放電法に切り替えた。その理由は、アーク放電は実際のエアコンのコンプレッサーのモーター内で起きるレイヤーショートに近いからである。アーク放電法は高電圧で電極の間に不連続な絶縁破壊を発生させる火花放電と違って、低電圧で電極の間に連続的な大電流を発生させる放電法である。

本実験では銅製の二つの渦巻電極の一部を軽く重ね、電極の間に直流 220V を 1.5ms 印加することで渦巻電極の間にアーク放電を発生させ、実験容器内へエネルギーを投入した。投入エネルギーは電圧、電流の変化を時間積分してその積から計算した。

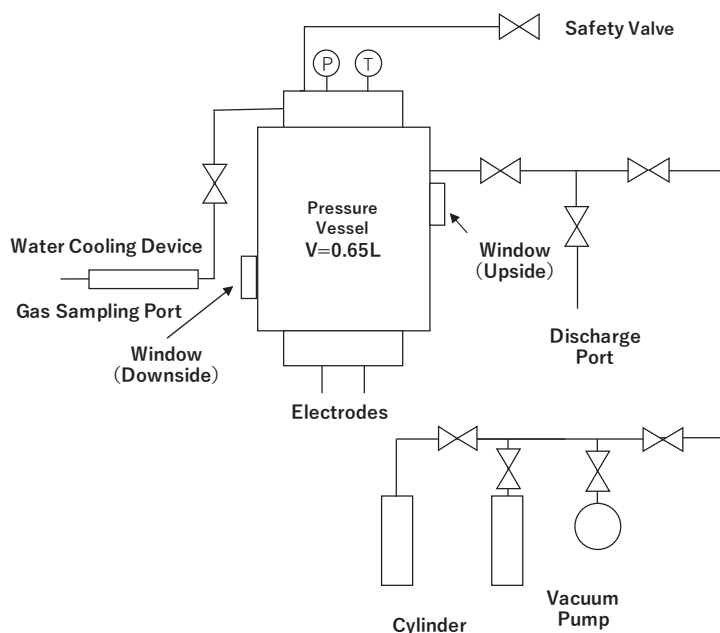


図 2.2.1.1-15 実験装置の概要

【純冷媒 HFO-1123 の圧力境界線】

HFO-1123 純冷媒について、温度を 150°C一定に保ち、不均化反応が伝播する圧力境界を実験で調べた。電圧を印加した後の圧力変化を図 2.2.1.1-16 に示す。圧力変化を見ると、圧力波形が急激に上昇するケースと緩やかに上昇する二つのケースに分かれていることが分かった。溶断法の時では不均化反応が伝播しないと考えられていた条件(例えば 150°C、0.70~0.76MPa)でも放電法の場合は圧力上昇が観測された。

図 2.2.1.1-17 は放電法による圧力境界と溶断法による圧力境界を比較した結果を示す。放電法の場合は初期圧力が 0.772MPa の時には確率的に圧力がピークをもって立ち上がり、初期圧力が 0.770MPa の時には確率的に緩やかに立ち上がる傾向があり、不均化反応が伝播する圧力条件は 0.770MPa の近傍にある。これは溶断法の圧力境界である 0.780MPa に近い結果となった。

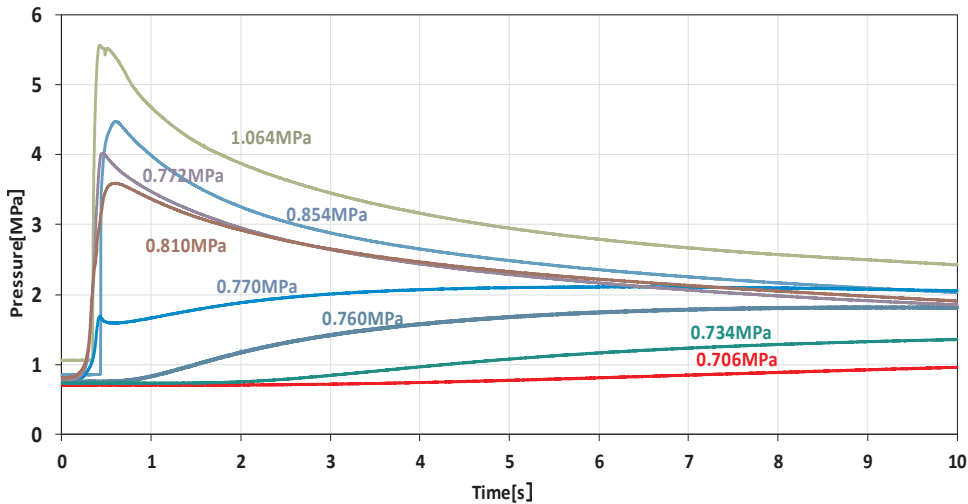


図 2.2.1.1-16. 着火後の圧力変化(HFO-1123)

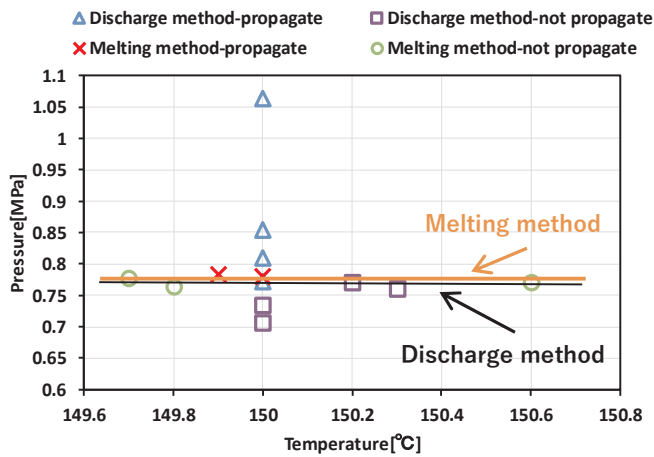


図 2.2.1.1-17. 反応伝播に関する圧力境界

【22wt%R32-78wt%HFO-1123 混合ガスの圧力境界】

冷媒 R32 を混合することで、HFO-1123 の分圧を低下させるとともに不均化反応の反応熱を希釈する効果が期待される。混合する量は GWP150 を目指し、GWP 値が 675 である R32 を 22wt%まで混合するように設定した。

初期圧力と圧力上昇の結果をFi図 2.2.1.1-18 に示す。圧力境界は 1.0MPa の付近である。

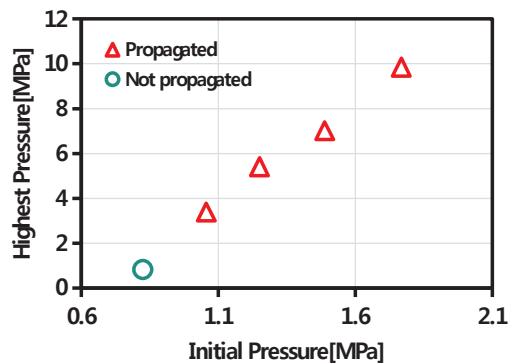


図 2.2.1.1-18 圧力の上昇値(22 wt% R32 / 78wt% HFO-1123)

【5wt%CF₃I-95wt%HFO-1123 混合ガスの圧力境界】

CF₃I は代表的な燃焼抑制剤で消火剤としてよく使われおり、Honeywell が開発した不燃性冷媒 R466A でも混合されている。CF₃I 分子中のヨウ素が、不均化反応中に生成するラジカルをトラップすることが期待される。少量の添加でも抑制効果があるのではないかと期待されるため、5wt%の混合量とした。判定結果を図 2.2.1.1-19 に示す、結果から CF₃I を 5wt%混合した場合、境界圧力条件は 0.921MPa の付近にあることが明らかになり、劇的な反応抑制効果はないことが分かった。

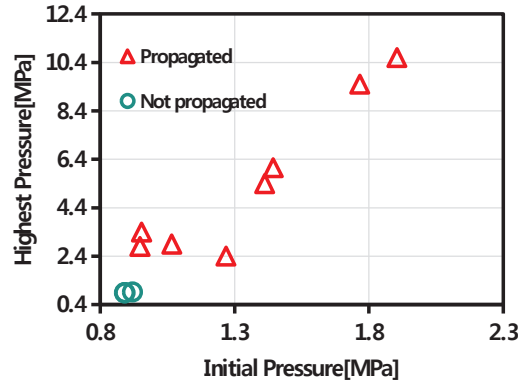


図 2.2.1.1-19 圧力の上昇値 (5 wt% CF₃I / 95wt% HFO-1123)

【5.6wtCF₃I-22wt%R32-72.4wt%HFO-1123 混合ガスの圧力境界】

二種類の抑制メカニズムの抑制剤を純冷媒 HFO-1123 と混合した二成分の混合ガスで実験を行った結果、抑制効果は期待していた程大きくなかったため、二種類の抑制剤を同時に混合した三成分の混合ガスで実験を行った。不均化反応伝播の判定結果を図 2.2.1.1-20 に示す。圧力境界は 1.539MPa と 1.606MPa の間にある可能性が高い。結果から二種類の抑制メカニズムをもつ抑制剤を同時に混合した場合、相乗効果が得られることが分かった。

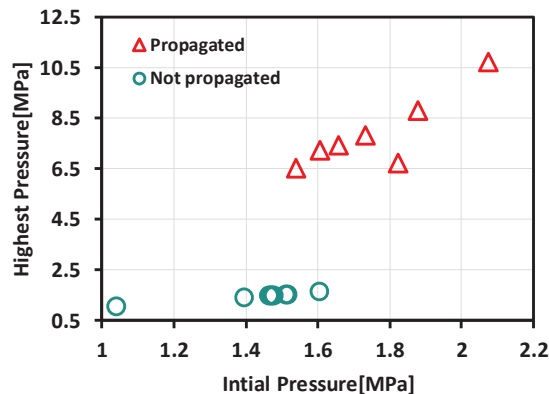


図 2.2.1.1-20. 圧力の上昇値 (5.6 wt% CF₃I / 22 wt% R32 / 72.4wt% HFO-1123)

【まとめ】

本研究では、初期温度を 150°C に固定し、純粋 HFO-1123 と三種類の混合ガスの不均化反応が伝播する初期圧力条件の境界について調査を行った。熱希釈による抑制効果が期待されている R32 のみを混合した場合は境界条件が 0.77Mpa から 1.0MPa 付近まで上がり、ラジカルトラップによる抑制効果の CF₃I を混合すると境界条件が 0.921MPa まで上がった。一種類の抑制剤のみ混合することによる抑制効果は大きくないが、同時に二種類の抑制メカニズムをもつ抑制剤を混合した三成分の混合ガスの場合はより良い抑止効果を得ることができ、圧力境界が 1.539~1.606MPa の間にある可能性が高いことが分かった。また二種類の抑制剤を評価するために二色法を用いて火炎の最頻温度の最高値と最低値を求め、不均化反応が伝播後の生成ガスを GC-MS で組成について調査も行った。その結果、抑制剤 R32 は反応経路を変えて不均化反応の伝播を抑制するよりも熱希釈効果が大きいことが分かった。

2) 冷媒圧縮機におけるレイヤーショートの原因および放電パターンの解明(静岡大学に再委託)

【冷媒圧縮機内のレイヤーショートと不均化反応】

低 GWP 冷媒の 1 つである HFO-1123 は、加圧条件下で高い着火エネルギーを与えると不均化反応が発生し、冷媒圧縮機内で不均化反応が発生すると圧縮機の破壊を引き起こす。冷媒圧縮機内のモータの絶縁破壊による巻線間でのショート(レイヤーショート)は圧縮機における不均化反応の発生要因になりうるが、経年劣化などで発生する通常運転時におけるレイヤーショートは発生頻度がわずかであり、レイヤー短ートの発生メカニズムやレイヤーショート時の発生エネルギーなどについては不明である。本研究では、冷媒圧縮機内においてレイヤー短ートを意図的に発生させ、レイヤーショートが発生したときの電流および電圧を計測することにより、レイヤー短ートの発生の仕方の違いによる通電エネルギーの違いを明らかにすることを目的とする。1 年目及び 2 年目は、ショート発生機構を組み込んだロータリ圧縮機を製作し、圧縮機の 3 つのターミナルに繋がるリード線をショートさせた際の、保護回路の動作、電流、電圧およびモータコイルの温度変化を計測し、ショート時に発生する火花の様子を高速度カメラで観察する実験を行った。

【実験方法】

本研究では、冷媒圧縮機運転中において圧縮機内のモータコイルのショートを実現するために、ショート発生機構を組み込んだロータリ圧縮機を作成した。図 2.2.1.1-21 に、本研究で製作した圧縮機及びショート発生機構の概略図を示す。

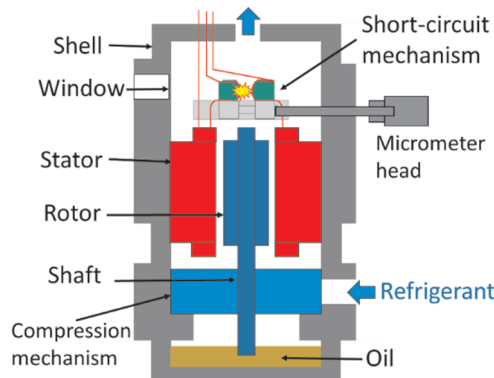


図 2.2.1.1-21 実験用冷媒圧縮機

この冷媒圧縮機は、圧縮機外部に取り付けられたマイクロメータヘッドによってショート発生機構を操作し、予め絶縁被膜を剥がした任意のリード線 2 本を、圧縮機運転中に任意のタイミングでショートさせることができる。また、圧縮機シェルにはガラス窓が設置されていて、ショートした際のリード線の接触部分を圧縮機外部から観察することができる。実験で使用した冷凍サイクルはガスサイクルであり、安全面から冷媒は R410A を使用した。

図 2.2.1.1-22 に実験で使用した圧縮機の駆動回路図を示す。

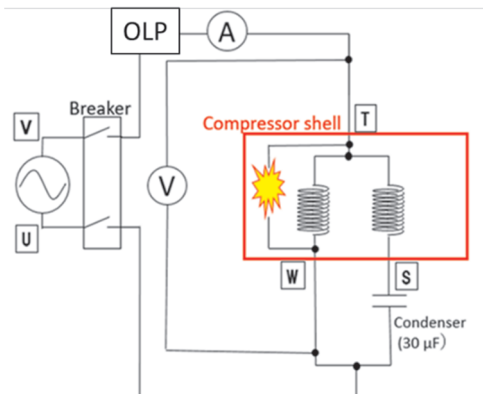


図 2.2.1.1-22 実験回路 (W-T ショート)

モータは 200 V の単相誘導モータ(コンデンサ方式)であり、ブレーカ(配線用遮断器)は定格 20 A、OLP(Over Load Protector: 機器保護用遮断器と温度ヒューズにより構成)は定格 15 A のものを用いた。図中の W、T、S はモータコイルのリード線と圧縮機外部の駆動回路を繋ぐターミナルの端子を表して

いる。図 2.2.1.1-22 は端子 W と端子 T のそれぞれに繋がるリード線を、ショート発生機構を用いてショートさせた場合の回路図である（このショートを W-T ショートと呼ぶ）。電流はショートさせる 2 本のリード線の接触部を流れる電流、電圧はそれらのリード線間の電圧を計測した。また、モータコイル（コイルエンド）の 2 か所において、モータ巻線の温度を熱電対で計測した。

【W-T ショート】主巻き線両端のショート

W-T 間のショートは、電源をショートさせることになり、W-T 間をショートさせると大きな火花が発生し、ブレーカと OLP が作動してモータが停止した。また、ショート後のエナメル線は溶断していた。W-T ショート発生時の電流、電圧および出力の変化を図 2.2.1.1-23 に示す。

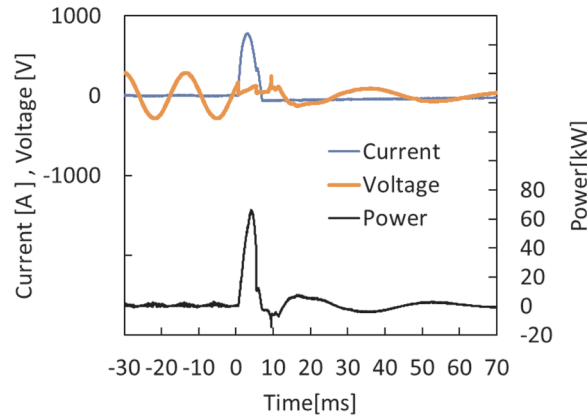


図 2.2.1.1-23 電流、電圧、電力（W-T ショート）

通電エネルギーは、電流と電圧の積を短絡時間（大電流が流れている時間）で積分して求めた。この時の最大電流は 812A、通電エネルギーは 168J であり、HF0-1123 の不均化反応を引き起こすのに十分なエネルギーとなる。そのため、圧縮機内における HF0-1123 の不均化反応を防ぐためには、W-T 間のショートは避けなければならない、物理的にショートが起こらないような構造とする必要がある。

図 2.2.1.1-24 に、W-T 間のショート実験を複数回行った結果（電流最大値、通電エネルギーおよび短絡時間）を、ショート発生時の電圧位相角に対して示す。図中の IN は、W-T 間のショートを圧縮機シェル内部でショート発生機構を用いて発生させた結果であり、OUT は圧縮機外部においてナイフスイッチにより W-T 間のショートを発生させた場合の結果である。

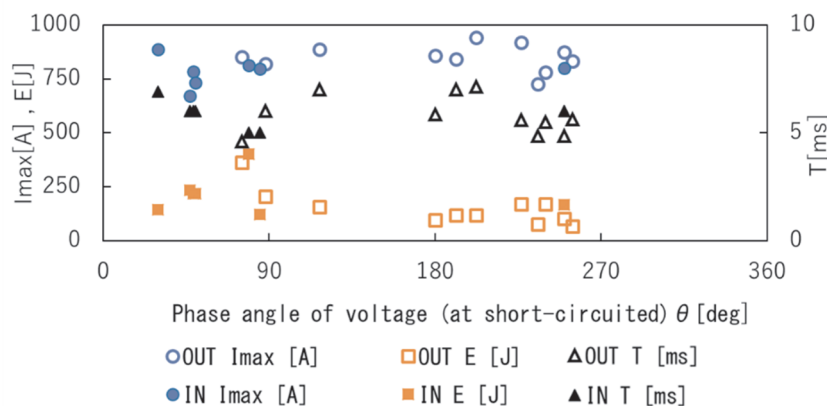


図 2.2.1.1-24 電圧位相角と最大電流、通電エネルギー、短絡時間の関係

図より、ショートは電圧の位相角が 0-90° および 180-270° のときに発生することが多いことがわかる。また、完全にリード線がショートする場合には、ショートが圧縮機の内部で発生しても外部で発生しても、通電エネルギー等には大きな違いは見られなかった。

【W-S ショート】主巻き線と副巻き線の並列回路を形成

W-S間をショートさせると、微小な火花が発生し、OLPが作動して圧縮機が停止した。また、エナメル線が軽く溶着したが、溶断することはなかった。図 2.2.1.1-25 に W-S ショート発生時の電流、電圧の変化を示す。

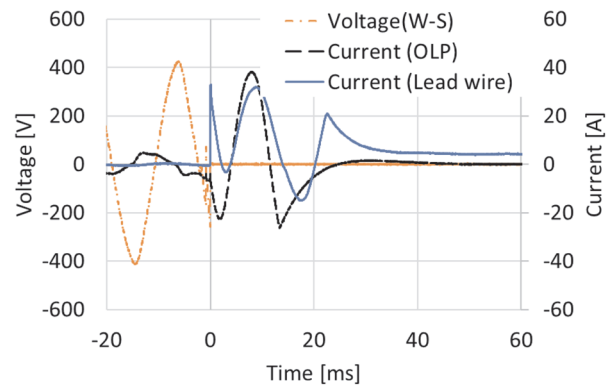


図 2.2.1.1-25 電流、電圧 (W-S ショート)

OLP を流れる電流が 40 A 付近に達したおよそ 5 ms 後に OLP が作動した。また、ショート発生後のリード線接触部を流れる電流の最大値は 30 A 程度、通電エネルギーは 1 J 程度であった。

【S-T ショート】主巻き線とコンデンサの並列回路を形成

S-T間をショートさせると、微小な火花が発生したが、OLPは作動せず、モータが停止した状態で通電が続き、モータコイルの急激な温度上昇が発生した。図 2.2.1.1-26 に S-T ショート発生時の電流、電圧の変化を示す。

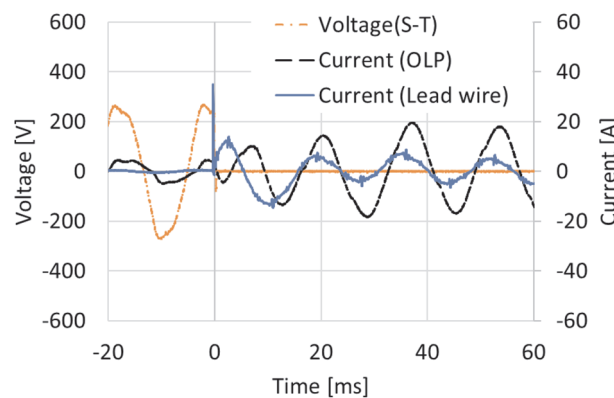


図 2.2.1.1-26 電流、電圧 (S-T ショート)

S-T ショートが発生すると、S-T間の電圧がほぼ 0 V まで下がると同時にリード線接触部に振幅 5 A 程度、OLP に振幅 18 A 程度の電流が流れた。図 2.2.1.1-27 に、S-T ショートが発生した場合のモータコイルエンドにおけるモータ巻線の温度変化を示す。

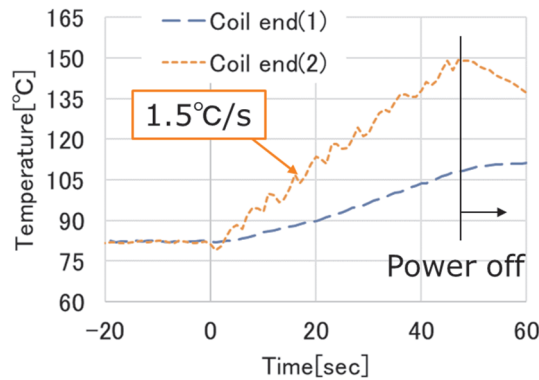


図 2.2.1.1-27 モータ巻線温度 (S-T ショート)

S-T ショートが発生して圧縮機が停止すると、モータ巻線に流れる電流が大きくなり、モータ巻線の温度が上昇し始める。図において、モータ巻線の温度が 150°C に達した時点で、巻線の保護のために圧縮機の電源は OFF にしている。温度上昇の速度は、コイルエンド (1) において 1.5 °C /s であり、このまま通電が続けば、モータコイルの温度はさらに上昇し、巻線の絶縁劣化によるレイヤーショート発生の要因となりうる。

この問題を解決するために、OLP を定格電流の小さなもの (10 A) に変更して実験を試みたが、モータ起動時には通常運転時より大きな電流が流れるため、起動時に OLP が作動してしまい、圧縮機を起動することができなかった。通常運転での起動時 (時刻 0 で起動) の電流、電圧の変化を図 2.2.1.1-28 に示すが、起動時には電流の振幅が定常運転時の約 4~5 倍となっていることが分かる。

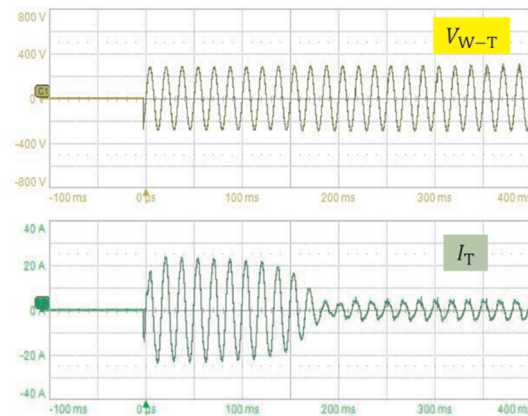


図 2.2.1.1-28 起動時の電流と電圧 (通常運転)

そこで、図 2.2.1.1-29 に示すように、OLP にバイパス (ナイフスイッチ) を並列に接続し、起動時に OLP をバイパスすることで、定格 10 A の OLP を設置した状態でも圧縮機を起動することができ、通常運転も可能となった。定格 10A の OLP を適用した場合には、S-T ショート時にも OLP が作動して圧縮機への電流供給は遮断され、モータコイルの急激な温度上昇を防ぐことが可能となった。

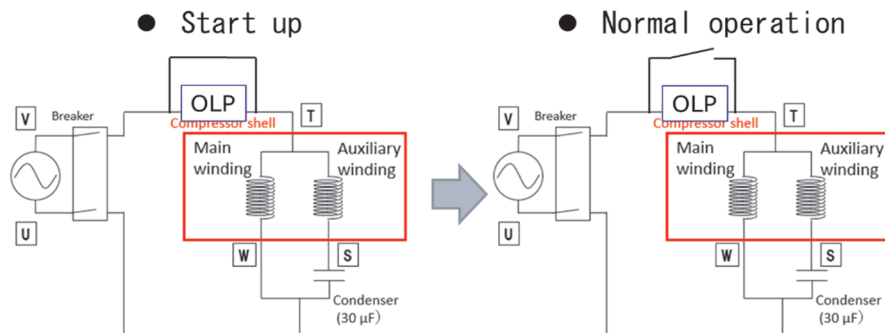


図 2.2.1.1-29 OLP にバイパスを接続するときの駆動回路

【まとめ】

冷媒圧縮機運転中にモータ巻き線のショートを用意的に発生させることができる圧縮機を製作し、レイヤーショートの発生による通電エネルギーについて実験的に測定を行った。電源の短絡と等価であるW端子とT端子間の短絡では、大きな音と火花が発生し、ブレーカが落ちる。この時の最大電流は800～900A、通電エネルギーは約150Jであり、HF01123の不均化反応を引き起こすのに十分なエネルギーとなる。W-S間を短絡させると回路は主巻き線と副巻き線の並列回路となり、定格15Aのオーバーロードプロテクタ(OLP)が作動した。短絡発生時のリード線接触部を流れる電流の最大値は30A程度、通電エネルギーは1J程度であった。一方、S-T間を短絡させると回路は主巻き線とコンデンサの並列回路となり、圧縮機は停止したがOLPは作動せず、モータコイルの温度は急激に上昇した。この状態が継続すればレイヤーショートが発生する可能性があるが、駆動回路を工夫して低容量のOLPを組み込むことにより、この現象は回避できることが分かった。

2.2.1.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発 【公立大学法人公立諏訪東京理科大学】

2.2.1.2.1 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「電気スパーク」「高温面」「裸火」などの大分類に区分し、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等を各大分類の下に紐づけ、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。表2.2.1.2.1-1に評価対象とした着火源の一覧を示す。

表 2.2.1.2.1-1 本研究で抽出した実環境下で想定される着火源候補の一覧

大分類	中分類	小分類
電気スパーク	有接点リレー	冷蔵庫、洗濯機、ドライヤー、炊飯器、電子レンジ、除湿機、掃除機、電気カーペット、オーブンレンジ、扇風機、テレビ、プリンター、エアコン、AV 機器、電話、ファックス
	サーモスタット	冷蔵庫、電気ストーブ、オーブントースター、電気ポット、電気こたつ、アイロン、ドライヤー
	人的操作	プラグ抜き差し、照明スイッチ
	ブラシモータ	掃除機、ドライヤー、電気カミソリ
	帯電	プリンター、静電気放電
高温表面		電気ヒーター、ホットプレート、たばこ
裸火		たばこ及びライター、ろうそく

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形成されるかどうか、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 Elbe[1]は、火花放電の継続時間を $10^{-8} \sim 10^{-7}$ s と見積もっている。Strehlow[2]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。例えば、可燃性ガス/空気混合気では、静電気のような数 mJ のエネルギーで着火するが、これと同じ熱量をニクロム線のジュール熱として与えても、着火は見られない。また、容器内の灯油や木片などには電気スパークでは一般に着火できない。これらは見かけの着火過程が異なるからであるが、本質的な着火過程[3, 4]は概ね以下の通りで共通である。

着火は持続的な燃焼反応の開始であり、燃焼反応は連鎖反応によって構成されるので、燃焼場には連鎖担体である OH や H などの活性化学種が多数存在する必要がある。可燃性混合気にエネルギー（熱）が与えられて温度上昇するとこの活性化学種の数が増加する。それと同時に、可燃性混合気から周囲へ熱や活性化学種が失われる。つまり発熱の速度と熱損失の速度のつりあいによって活性化学種の数が決まることになる。反応による発熱速度は一般にアレニウス式

$$\dot{q}_1 = QVC^n B \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.2.1.2.1-1)$$

で与えられる。ここで、 V は反応系の体積 (m^3)、 Q は反応体積の物質の発熱量 (kJ/m^3)、 C は反応速度の濃度項、 C は単位体積中のモル数 (mol/m^3)、 n は反応次数、 B 以下は速度定数であり E は活性化エネルギー (kJ/mol)、 R はガス定数 ($kJ/molK$)、 T は温度 (K)である。

一方、熱損失速度はニュートンの冷却則より

$$\dot{q}_2 = hS(T - T_0) \quad (2.2.1.2.1-2)$$

で与えられる。ここで、 h は熱伝達率 (kW/m^2K)、 S は系の境界の面積 (m^2)、 T は系内部の温度 (K)、 T_0 は系の境界の温度 (K)である。この両式を温度に対してプロットすると図 2.2.1.2.1-1 のようになる。つまり $\dot{q}_1 > \dot{q}_2$ であれば系の温度は際限なく上昇するので必ず着火し、 $\dot{q}_1 < \dot{q}_2$ であれば放熱のほうが大きいので温度が上昇せず着火しない。電気スパークのように瞬間的に局所的な高温が形成される場合（反応や放熱作用が無視できる場合）は、火炎核と生じる高温ガス塊が電極間に形成され、この火炎核が定常的な火炎伝播に十分なエネルギーを持っている場合に着火に至ると考えられる。

一方ホットプレートなどのように、混合気が徐々に加熱される場合は、放熱の影響を無視できないし、初期の低温の段階では反応による発熱はほとんどない。したがって、着火には外部から供給される加熱エネルギー（またはパワー）が支配的となり、要するエネルギーは電気スパークによる最小着火エネルギーよりもけた違いに大きくなる。すなわち、熱面着火においては、上述の定義の最小着火エネルギーとの比較で着火性を論じるのは適当ではない。

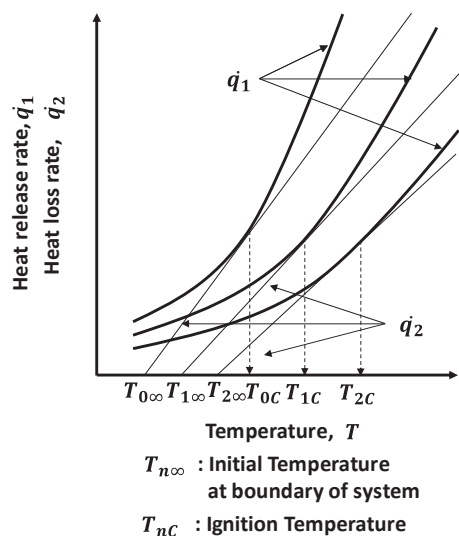


図 2.2.1.2.1-1 発熱速度と放熱速度のつり合いによる着火の概念図

2.2.1.2.2 有接点リレーで生じる電気スパークによる着火性の評価

2.2.1.2.2.1 着火モデル

有接点リレーで生じる電気スパークの場合においても、本質的には先に述べた通り着火は発熱速度と放熱速度のつりあいによって決まるので、放電時間の大小が着火エネルギーを大きく左右することになる。すなわち、エネルギー供給開始からある時間までは熱損失の影響を無視できる特性時間が存在し、その時間内で生じたエネルギーが燃焼反応継続に十分なエネルギー（最小着火エネルギー）であれば着火できる、と考えることができる。木下[5]はこの時間を”臨界着火時間”とよび、およそ $100 \mu s$ ($10^{-4} s$)としている。その根拠として Strehlow[2]が示しているプロパン-空気混合気の火炎のシュリーレン撮影結果から、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したという結果を挙げている。これ以外にも、燃焼を支配する連鎖担体である OH ラジカルの時定数が $100 \mu s$ 程度という報告が、燃焼とは独立に放電

のメカニズムを調べた研究も含めて多数報告されている[6-10]。

しかし家電製品に使用されている有接点リレーでは、放電エネルギーの放出に $10^{-3}\sim 10^{-2}$ s程度かかるとされている[5]ことに対して、最小着火エネルギーは $10^{-8}\sim 10^{-7}$ sの放電時間[1]である容量性放電を用いて測定されていることが多い。放電時間が長ければそれだけ放熱量も大きくなるから、有接点リレーでの放電における着火は、最小着火エネルギーよりもかなり大きなエネルギーが必要になると推測されるが、ここではまず最悪状況を想定した簡易評価のために、有接点リレーの接点間で生じた放電エネルギーのうち100 μ s以内に放出されるエネルギーが最小着火エネルギーより大きい場合に着火の可能性が高いとして、評価を進めることとした。

2.2.1.2.2.1.1 既往文献による着火性の評価

鳳ら[11]は、電話用リレー、カーボンランプ（抵抗性負荷）、DC 48 V電源からなる回路を用いた実験により、アークエネルギーを計測している。これによると、接点電流が1.4 A未満の場合、アーク継続時間は概ね100 μ s以下となるので、放電エネルギーはほぼすべて着火に寄与すると考えられる。このとき、接点材質にも依存するが概ね0.6 A以上の接点電流であれば、プロパン/空気混合気の最小着火エネルギーを超えるエネルギー（ ~ 0.5 mJ）が生じる。ただし電気スパークによる着火エネルギーは燃料濃度に対して下に凸の曲線を描くので、この値であれば、燃焼範囲のすべての濃度にわたって着火できるわけではなく、着火可能なプロパン/空気混合気の燃料濃度範囲はせいぜい3.0-6.9 vol%の範囲に限られる。

制御電流が2 A超となるパワーリレーや電磁コンタクタについても、文献[12-14]の電圧電流測定結果をもとに、放電開始後100 μ s以内に生じるエネルギーを求めたところ、約6-7 mJとなる場合がみられた。燃焼下限及び上限での着火エネルギーは約4 mJであるから、この場合はプロパン/空気混合気の燃焼範囲すべてにわたって着火可能となる。

以上のことから、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みれば着火の可能性を否定できず、特に制御容量2 A以上の場合は燃焼範囲全体にわたって着火可能となる。

これらの結果をもとに、日常生活で用いられているいくつかの電気機器によるプロパンの着火性を、実機の分解調査及びWeb上に掲載されている分解写真をもとに評価した。その結果は以下のとおりである。

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

② 扇風機

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

③ 電子レンジ

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

④ 掃除機

市販の掃除機（TWINBIRD, FW3K167）を分解し、着火源となりうる部品の調査を行った。供試掃除機にはユニバーサルモーターが使用されていた。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ー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[15]を調べたところ、基板上にリレーが使用されていた。この基盤はモーター付近に設置されており、密閉性は低い。以上のことから、ブラシモーターで生じるアーク放電や、基板上的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[16]（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[17]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[18, 19]（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。ブラシモーターも確認された。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（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[20]（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[21]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

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、その波長はDVDプレーヤーで650 nm、ブルーレイプレーヤーで405 nmとされている[22]。これに対しプロパンの吸収帯[23]は3370 nm（吸収率90.6%）、6800 nm（吸収率19.7%）であるから、レーザー照射部に可燃範囲のプロパン／空気混合気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。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、ブラシモーターが使用されていると考えられる。したがって、ブラシモーター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[24]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[25]なので、レーザーブレイクダウン閾値 (100 GW/cm²[26]) よりも小さい。このため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。

2.2.1.2.2.2 有接点リレーの放電エネルギーの実測

前項までの調査結果を立証するため、実験を実施した。

(1) 実験概要

市販の 2 種類の有接点リレー (OMRON MK2P, G7J) を用いた。負荷を接続し、接点閉成時及び開離時のそれぞれについて接点両端の電圧と回路を流れる電流をそれぞれプローブで計測し、チャートレコーダに記録した。回路図及び装置写真を図 2.2.1.2.2.2-1 に示す。使用した負荷はドライヤー 2 種、電動ドライバー 2 種、LED 電球 1 種である。実験条件として負荷種類及びリレー種類を表 2.2.1.2.2.2-1 に示すように変化させた。実験実施場所の交流電源周波数が 60 Hz であることから、1 つの負荷種類・リレー種類の組み合わせにおいて、60 回の計測を実施した。

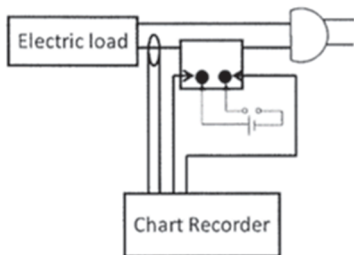


図 2.2.1.2.2.2-1 実験装置の概要

表 2.2.1.2.2.2-1 使用した家電製品の諸元

Type of relay	Type of Electrical Load			Consumption Power (W)
Type 1	Inductive & Resistance	Hair dryer	Type A HIGH	840
			MIDDLE	440
			LOW	40
	Capacitive & Resistance	Screwdriver	Type B HIGH	1050
			MIDDLE	1000
			LOW	700
Resistance	Electric bulb		50	
Type 2	Inductive & Resistance	Hair dryer	Type A HIGH	840

(2) 結果

いずれの負荷を使用した場合も、100 μs 間で放出される放電エネルギーは全て最小着火エネルギーよりも大きな値を示した。特にリレー閉成時に開離時よりも大きなエネルギーを示す傾向があった。放電エネルギーは消費電力の増加に伴って増加する傾向が認められた。負荷のインダクタンス・キャパシタンス・抵抗が及ぼす影響については、完全ではないものの、放電エネルギーは抵抗にはあまり依存せず、インダクタンスが小さくキャパシタンスが大きいほど大きくなる傾向がみられた。

2.2.1.2.2.3 ブラシモータで生じる電気スパークによる着火性の評価

ブラシモータで生じる電気スパークの場合においても、有接点リレーと同様の考え方で着火が支配されると考えることができる。ブラシモータの放電波形を測定した一例として、伊里[27]が実施した直流モータの高速回転時の整流現象とブラシ摩耗に関する研究がある。本研究では電流電圧波形を観測し、その結果をもとにアーク継続時間、アーク電圧、残留電流と回転速度の関係がまとめられている。アーク継続時間及び残留電流は、回転速度 3000 rpm 付近で最小値をとったのち増加に転じ、アーク電圧は回転速度に対してほぼ一定である結果が報告されている。そこで、最もエネルギーが小さいと思われる、回転速度 3000 rpm での電流・電圧・アーク継続時間を読み取ると、それぞれ 17 V, 0.55 A, 37 μs であったので、これよりエネルギーは 0.35 mJ となる。アーク継続時間が 100 μs であることから、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。

2.2.1.2.2.4 照明スイッチの操作で生じる電気スパークによる着火性の評価

(1) 概要

ここでは、電気スパークによる着火の可能性のある想定事故シナリオの 1 つとして、家庭用空調機器からプロパン冷媒が漏洩し、室内で可燃性混合気形成された環境下で、壁面スイッチにより照明を点灯あるいは消灯させた場合を考える。壁面スイッチは図 2.2.1.2.2.4-1 に示すように接点を有す

るので、その周囲においてアーク放電を生じ、これにより着火する恐れがある。そこで実験により、この動作による着火性を定性的・定量的に評価することとした。また、日本やアメリカでは 100～110V の電圧が使用されているが、主要 20 か国において、200～230V を使用している国は 16 か国ある 3-19) ことから、供給電圧を AC 100 V 及び AC 230 V に設定して実験を実施した。



図 2.2.1.2.2.4-1 供試照明スイッチの外観写真。上段：スイッチ筐体，中下段：接点部
左列：Type A，右列：Type B

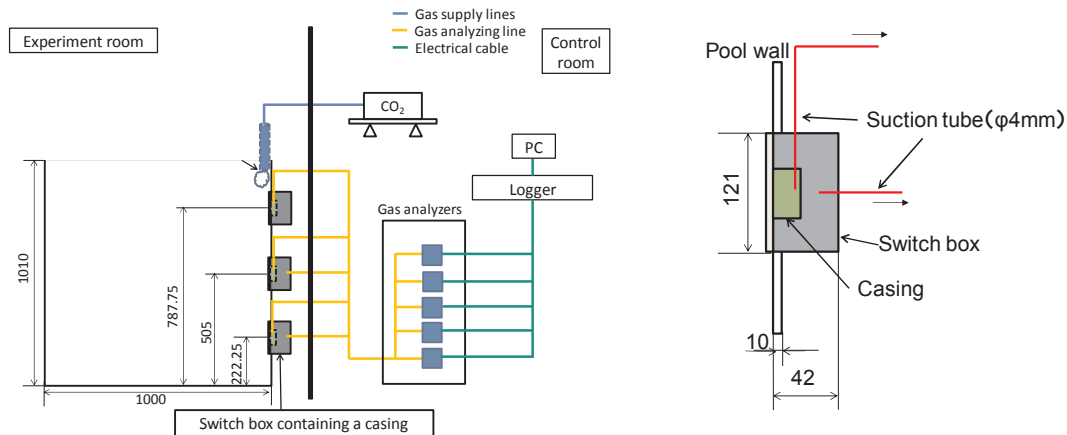
(2) 研究の流れ

まず、着火源と想定されるスイッチ接点付近で可燃範囲のプロパン／空気混合気が形成されるか否かを確認するために、試験空間内及び接点が格納されたケーシング（以下、“接点ケーシング”）内のプロパン濃度を測定した（実験 A）。次いで、空気雰囲気下でスイッチを動作させ、接点間両端の電圧及び回路電流を計測して放電エネルギーを求め、着火能力の評価を行った（実験 B）。これらの結果を踏まえて、試験空間内にプロパン／空気の可燃性混合気を形成させてスイッチを動作させる着火実験を実施し、接点周囲の放電及び着火挙動を視覚的に観測するとともに、放電エネルギー及び発光部の距離を計測することにより、着火の有無との関係を定量的に検討した（実験 C）。

(3) 実験の概要

1) 実験 A（濃度計測実験）

図 2.2.1.2.2.4-2 に示すように、一辺 1 m の立方体形状の亚克力製プールを製作し、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。使用したスイッチは図 2.2.1.2.2.4-1 に示す 2 種類（Type A: Panasonic, WNP5101MW, Type B: Panasonic, WTP50011WP）で、両者を合わせた国内シェアは 90 % 以上と推定される。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。



(a) 濃度測定装置全体図 (b) スイッチボックス拡大図 (単位: mm)
 図 2.2.1.2.2.4-2 スイッチケーシング内プロパン濃度の計測装置図

2-1) 実験 B-1 (放電エネルギー計測実験: 100V)

図 2.2.1.2.2.4-3 に示す装置を用いて、照明スイッチ接点における放電エネルギーを測定した。負荷には抵抗性負荷の白熱電球 (40, 60, 100 W) 及び LED 電球 (60 W) を使用した。照明スイッチと負荷との間にカレントモニターを設置して通電時の電流波形を観測するとともに、オシロスコープにてスイッチ両端の電圧を計測した。スイッチ動作は治具を電動スライダ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、鉛直下方から高速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。得られた電流及び電圧波形の積を時間積分し放電エネルギーを求めた。

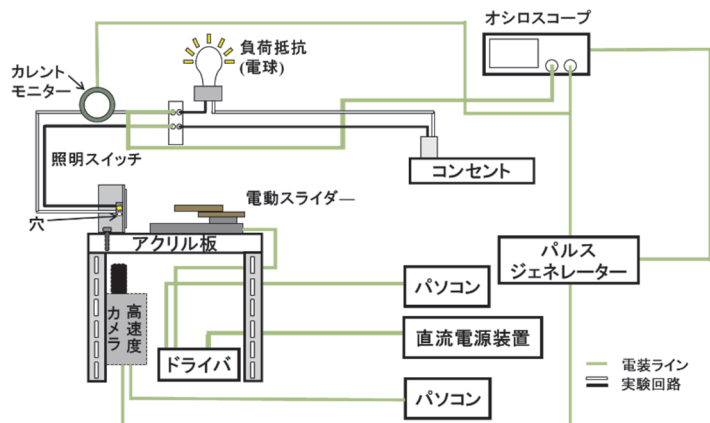


図 2.2.1.2.2.4-3 照明スイッチ接点での放電エネルギーの計測装置

2-2) 実験 B-2 (放電エネルギー計測実験: 230 V)

実験 B-1 と同様の回路を用いて、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 6 種類 (40, 60, 95 W 各 1 種類及び 100 W 3 種類) 及び Hf 蛍光灯 (32 W) を使用した。印加電圧は 100 V 及び 230 V とし、使用するスイッチは、図 2.2.1.2.2.4-1 の Type A とした。スイッチの接点雰囲気は空気とし、スイッチ押下動作は 1 つの負荷について 60 回実施した。放電エネルギーは実験 B-1 と同様にして求めた。

3-1) 実験 C-1 (着火実験: 100V)

用いた着火実験装置は実験 B-1 と同じである。安全のため、プロパンはスイッチボックス内のみ導入した。実験 A での濃度計測結果から、スイッチボックス内と接点ケーシング内はほぼ同等の濃度を示したので、スイッチボックス内に可燃濃度範囲のプロパン/空気混合気が存在すれば、接点ケーシングの穴を通してケーシング内へプロパンが流入すると考えた。あらかじめ所定量のプロパンをシリンジに測りとり、これをスイッチボックスに取り付けた導入ポートから導入した。導入量は全量がスイッチボックス内に拡散した場合にボックス内濃度が LFL 及び化学量論濃度となる量として、それぞれ 12 mL, 21 mL とした。本実験では回路負荷は白熱電球 (60 W) のみとし、スイッチタイプは Type

Bのみとした。着火の有無はビデオカメラ及び目視観察によった。照明スイッチの閉成及び開離に伴う放電エネルギーは実験 B-1 と同様に求めた。

3-2) 実験 C-2 (着火実験 : 230V)

着火実験に使用した燃焼容器は、厚さ 10mm のアクリル板で製作した、内容積 150×150×150 mm のプールである。容器上面はアルミホイルで封じており、燃焼時にはこれが破れて圧力を放散するようになっている。プール内には小型のファンを設置した。スイッチのコンセント部は容器外壁に沿って鉛直に取り付けられており、スイッチ接点のケーシングがプール内側に位置している。回路構成は実験 B と同じである。スイッチの電極間にプロパンガスが流入するよう、接点ケーシング部に開口部を設けた。アクリルプール内にプロパンガスを導入し、濃度を均一にするため小型ファンにより 1 分間攪拌した。プール内のプロパンガス濃度は化学量論濃度となる約 4 % に設定した。高速度カメラを用いて、接点ケーシング下部にあけた穴より放電の様子を撮影した。負荷は、実験 B-2 で放電エネルギーが大きかった 100 W 白熱電球及び Hf 蛍光灯 (32W) とし、印加電圧は 230V とした。スイッチ押下動作は 1 つの負荷について 50 回実施した。放電エネルギーは、実験 B-2 と同様に求めた。

(4) 結果及び考察

1) 接点ケーシング内への可燃性混合気の流入

Type A, Type B とともに、いずれの漏洩高さの場合も、1/2H 及び 1/4H の高さに設置されたスイッチの接点ケーシング内への、可燃範囲内の組成をもつプロパン/空気混合気の流入が認められた。プロパンはスイッチのプレートとスイッチ本体の間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。

2) 接点での放電エネルギー

実験の結果、以下の知見が得られた。

- ① 1 回のスイッチ動作で複数回の放電が生じる場合があった
- ② 実験 B-1 (プロパン導入量 21 mL) の接点間放電エネルギーから明らかなように、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。
- ③ 交流の場合、一般的に位相が 90° 付近でアーク放電の電圧は最大値となる。しかし、印加電圧に関係なく、蛍光灯では位相が 20~90° の範囲で大きな電圧が得られた。これは、蛍光灯器具内の安定器の影響と考えられる。放電エネルギーは 100 V の場合に比べて 230V の場合の方が大きくなった (実験 B-2 の結果より)。
- ④ 上記の傾向は負荷の種類に依存しなかった。

これらのことから、照明スイッチの接点付近に可燃組成のプロパン/空気混合気が形成される可能性と、最小着火エネルギーを上回る放電エネルギーが接点において生じる可能性は否定できず、したがって着火の可能性を否定できないことが示された。

3) 着火実験

以上を踏まえ着火実験を実施したが、各濃度条件において 60 回 (100 V) 及びプロパンガス濃度約 4 % で 200 回 (230 V) のスイッチ動作の繰り返しのうち、着火が認められたケースは 1 度もなかった。放電時の様子を撮影した高速度カメラ画像から発光部の距離を読み取ると、おおむね 0.1-0.4 mm 程度であった。これは、プロパンの消炎距離 (1.7 mm [28]) に比べて 1/10-1/4 程度の値である。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。したがって、本実験で着火が認められなかったのは、放電核の大きさが消炎距離未満であったために、接点との接触によって熱損失を受け、持続可能な火炎に成長できなかったためと考えられる。

しかしながら一般にスイッチ接点の技術基準として、IEC 規格 [29] に 3 mm ギャップと呼ばれる基準が存在する。したがって接点間には最低でも 3 mm の間隔が存在することになるので、このギャップ長全体にわたって放電が生じて火炎核が形成されていれば、火炎はギャップを通り抜けて全体に伝播することになる。

そこで、ギャップ長と絶縁破壊電圧の関係について検討した。気体中で絶縁破壊 (すなわち放電) が生じる電圧 V_s は、気体の圧力 p と電極間隔 d の積の関数となり、次式で表される (パッシェンの法則)。

$$V_s = \frac{Bpd}{K + \ln(pd)}, K = \ln \left\{ \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right\} \quad (2.2.1.2.2.3-1)$$

ここでB, Kは定数で, γ は陰極の二次電子放出係数であり, 空気の場合は $\gamma = 0.01$ とみなせる。一般に空気の絶縁破壊電圧は330 Vとされているので, 式(3-3)からこれに対応するギャップ長dを大気圧の下で求めると0.01 mmとなる。ギャップ長3 mmでは12 kV超, 消炎距離となるギャップ長1.7 mmでは約7.8 kVとなる。照明スイッチの動作ではこれだけの電圧は生じないと思われるので, 放電時のギャップ長は最大でも消炎距離未満になると推測される。よって照明スイッチの接点でのアーク放電による着火の可能性は無視できると考えられる。

2.2.1.2.2.5 電源プラグの抜き差しで生じる電気スパークによる着火性の評価

(1) 研究の概要

コンセントへの電源プラグの抜き差し(主に引き抜き)時に生じる電気スパークによる着火性については, 電気スパークのエネルギー等の基礎的知見のみでは評価困難であり, また, このような研究報告はほとんど見当たらない。そこで, これを再現した実験により, 着火性を評価することとした。なお本検討結果の一部は2019年度に口頭発表している[30]。

(2) 研究の流れ

コンセントを取り付けた燃焼容器内に所定濃度のプロパン/空気混合気を導入し, 負荷の電源プラグを挿入して, 着火の有無を高速度撮影により観測した。抜き差し時の電流及びプラグ両端電圧の変動を計測し, 着火挙動の定量的評価を試みた。

(3) 実験の概要

図2.2.1.2.2.5-1に示すように, 上面をアルミホイルで封じた一辺150 mmの容器内に, 図2.2.1.2.2.5-2に示す市販のAタイプコンセントを鉛直に取り付けた空間で着火実験を実施した。コンセント筐体内部と挿入口との間に仕切りはなく, 挿入口からガスが進入した場合, 筐体内部全体に拡散・滞留する構造となっている。①電源プラグの抜き差しを200回繰り返した場合(実験①)と, ②コンセントの引き抜き動作のみを100回繰り返した場合(実験②)の2パターンの実験を実施した。実験①では, 容器内に導入したプロパンは着火が認められるたびに交換するものとし, 一方実験②では着火の有無にかかわらず毎回交換した。いずれの実験でも, 最も厳しい評価をするために, 最小着火エネルギーを示すとされる5.18 vol%のプロパン濃度を対象とした。電源プラグ両端の電圧と回路電流をそれぞれプローブで計測し, チャートレコーダに記録した。使用した負荷は表2.2.1.2.2.5-1に示す仕様の市販の家電製品(ドライヤー・電動ドライバー・掃除機)である。

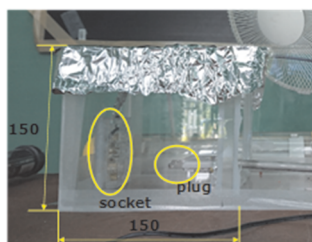


図 2.2.1.2.2.5-1 実験装置の概要

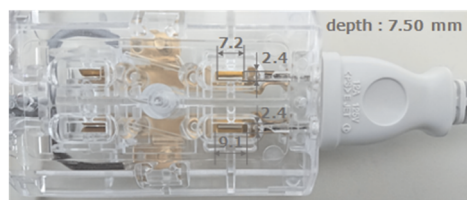
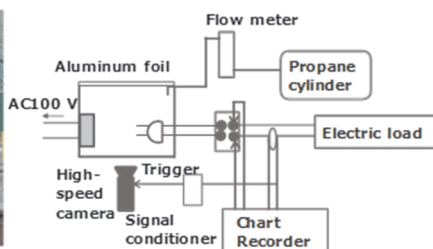


図 2.2.1.2.2.5-2 供試コンセントの外観

表 2.2.1.2.2.5-1 供試家電製品の消費電力

Type of Electrical Load				Consumption Power (W)
Inductive & Resistance	Hair dryer	Type A	HIGH	810
			MIDDLE	420
		Type B	HIGH	1040
			MIDDLE	700
Capacitive & Resistance	Screwdriver	Type A	200	
		Type B	80	
Inductive & Capacitance	Vacuum cleaner	Type A	1000	
		Type B	970	

(4) 結果及び考察

1) 着火確率

いずれの負荷を使用した場合も、実験②では着火が1度も認められなかった。このことから、何度かのプラグの抜き差しの繰り返しが必要であると考えられる。着火確率は概ね消費電力が大きくなるにしたがって大きくなる傾向がみられた。

2) 着火及び火炎伝播機構

図 2.2.1.2.2.5-3 はドライヤー Type B を負荷とした場合のコンセント周囲のカラー高速撮影写真である。図中の t は放電が開始したと思われる発光がみられてからの経過時間である。図 2.2.1.2.2.5-3(a) と (b) はよく似た挙動を示している。いずれも、放電時間（この発光の継続時間）は 4.3-4.5 ms であり、プラグがコンセントから抜けてから約 100-130 ms 後に、プラグが接続されていた場所とは異なるコンセント口（上部）から火炎が噴出している。このときの放電エネルギーは約 4.5 mJ であったので、エネルギー的には着火可能である。コンセントのプラグ挿入口の隙間は約 2.4 mm であるのに対してプロパン火炎の消炎距離は 1.70 mm であることも併せて考えると、抜き差し動作の繰り返しによって、コンセント外のプロパン/空気混合気がコンセント筐体内に侵入し、これにコンセント引き抜き時のスパークで着火して、コンセント上部から噴出したものと考えられる。

これに対して、図 2.2.1.2.2.5-3(c) では若干その様相が異なる。コンセント内での発光の後、図 2.2.1.2.2.5-3(a) と (b) よりも有意に早期の段階で、プラグ刃付近に火炎の発生が認められ、これが約 6 ms のうちに同心円状に伝播している。プラグ刃付近からコンセント方向へ火炎の伝播が認められることから、このケースの着火機構は図 2.2.1.2.2.5-3(a) と (b) とは異なり、コンセント外で着火してこれが容器内の未燃混合気に伝播したと考えられる。その着火要因は、抜き差しの繰り返しにより容器内の塵を巻き上げてプラグ刃との間で静電気放電が生じたか、あるいは抜き差しによりコンセント内部から連行されてきた金属粉などとプラグ刃の間での静電気放電によるものと考えられるが、今回の実験のみでは確証は得られなかった。また、インダクタンス、キャパシタンス、抵抗といった負荷条件が着火に及ぼす明確な影響は認められず、上述のように主として消費電力のみに依存した。

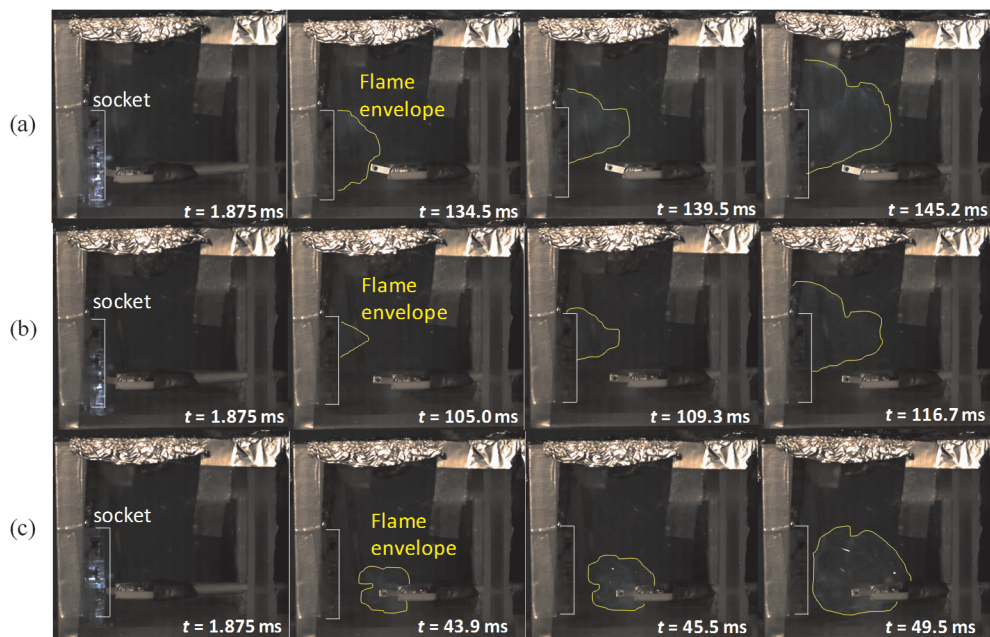


図 2.2.1.2.2.5-3 コンセント抜き差しによるプロパン/空気混合気の着火挙動

2.2.1.2.3 静電気による着火性の評価

(1) 概要

静電気スパークによる着火性を評価するため、日常生活における帯電シナリオ及び人体からの放電シナリオを、日冷工で実施されているリスクアセスメントと共同して検討し、これに基づいて帯電電位、エネルギー及びこれらに及ぼす湿度の影響を文献等により推測した。シナリオ構築にあたっては放電場所と可燃性混合気濃度の位置関係や放電の生じる確率などを総合的に勘案する必要があるが、ここではこれらについては触れない。

(2) 評価の概要と結果

(a) 帯電シナリオ

日常生活における人体への帯電事例としては、歩行・摺り足歩行、ソファ・イスからの起立、衣服の脱衣、毛布の折り畳み、整髪、などが考えられる。これらにより帯電した人体からの放電シナリオとして、①ドアノブを触って放電する場合と、②衣服を脱ぐ際に放電する場合を取り上げる。

(b) 放電種類と着火能力の学術的分類

静電気放電の形態には、主として火花放電、コロナ放電、ブラシ放電、沿面放電、コーン放電、雷状放電などがある。それぞれの特性は以下のとおりである[31]。

- ① 火花放電：導体間で起きる放電であり、放電エネルギーは $E = (1/2)CV^2$ (C ：静電容量(F), V ：電圧(V)) で与えられ、比較的高い。最小着火エネルギーが 100 mJ 以下の可燃性ガスを着火させようというガイドラインもあり、着火源となりうる。帯電電位と静電容量の関係は図 2.2.1.2.3-1 に示されるとおりである。導体の最大帯電電位が 330 V よりも大きいときに火花放電の発生の可能性があると考えられている。

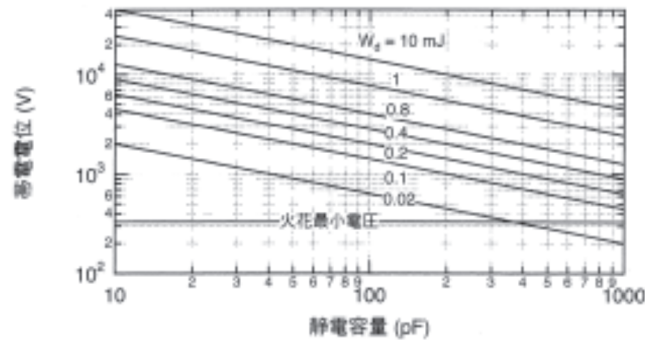


図 2.2.1.2.3-1 火花放電の帯電電位と静電容量及び静電エネルギーの関係[31]

- ② コロナ放電：先のとがった針電極、細線電極や曲率半径の極めて小さい電極の近傍に不平等電界場が形成され、この局所的に高くなった電界により生じる放電である。一般に曲率半径が 5 mm 以下で起こる。ただし、放電エネルギーが比較的小さいので、水素のように極めて小さい着火エネルギーを持つ可燃性ガス以外には、一般に着火性はない。
- ③ ブラシ放電：主に絶縁物が帯電し、曲率のある接地金属、指先などが近づくときに起きる。正極性の放電のほうが着火性が高いことが知られている。ブラシ放電のエネルギーは 1~3 mJ までで、4 mJ を超えることはないが、可燃性ガスの着火源となりうる。絶縁体表面の平均電位とブラシ放電の放電エネルギーとの関係は図 2.2.1.2.3-2 に示されるとおりである（接地導体球の半径を 20 mm とする場合）。
- ④ 沿面放電：絶縁物の厚さが薄くなると絶縁物の表裏に電気二重層が形成されるので、さらに大きな表面電荷を保持できるようになる。このような絶縁物の表面に沿って起きる放電が沿面放電である。放電エネルギーは 10 J 程度になることもあり可燃性ガスの着火源となりうるが、図 2.2.1.2.3-3 に示すように絶縁物の厚さが 8 mm 以下でかつ絶縁層の電位が 4 kV 以上ないと生じない。
- ⑤ コーン放電：絶縁性の粉体を空気輸送する際に、帯電粉体が堆積するコーン状のフィード表面で生じる放電のことである。
- ⑥ 雷状放電：サイロなどへの粉体の投入や搬入、タンク内でのジェット洗浄などにおいて、帯電粉体あるいはミストが気相空間中を浮遊し空間電荷雲を形成し、これから設置されたサイロやタンク壁に向かって生じる雷のような放電。しかし 500 kV/m もの高電界を要するため通常は生じない。

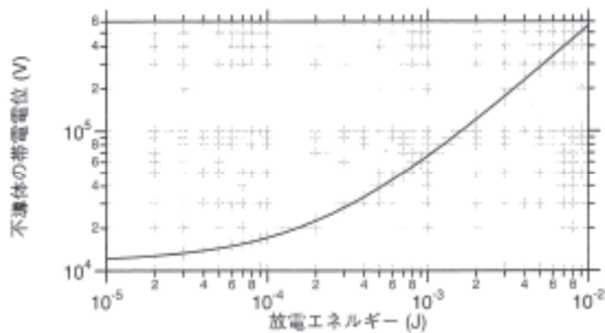


図 2.2.1.2.3-2 ブラシ放電の帯電電位と放電エネルギー[31]

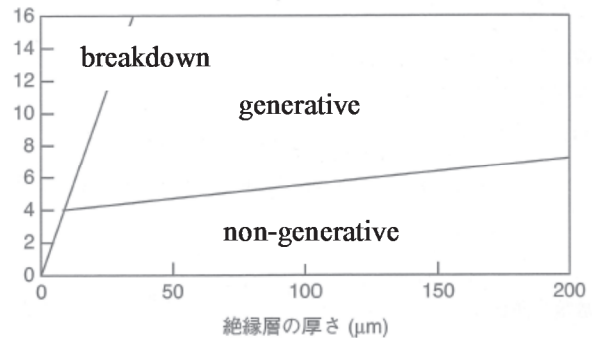


図 2.2.1.2.3-3 沿面放電の電位と絶縁層の厚さの関係[31]

(c) ドアノブ接触時の放電による着火性

この場合の放電は上記(b)の火花放電に該当する。放電の発光が確認できるのは人体帯電電位が4 kV以上であるとされ、この電位では“針で深く刺された感じを受け、指がかすかに痛む”電撃の強さに相当するとされている[31]。これは一般的な生活環境での静電気感覚に合致すると思われるので、ここでは帯電電位を4 kVと見積もることとする。人体の静電容量は一般に100 pFとされていることが多い。これらをもとに火花放電のエネルギーを見積もると $E = 0.80$ mJとなり、単純にエネルギーだけで見れば着火の可能性は否定できない。

(d) 衣服脱衣時の放電による着火性

この場合の放電は上記(b)のブラシ放電に相当する。衣服脱衣時の帯電電位は文献によるとおよそ4.0-5.0 kVとされている。この場合図2.2.1.2.3-2から、放電エネルギーは 10^{-5} J未満のオーダーとなるから、プロパン/空気混合気を着火させるには至らない。よって、衣服脱衣時の静電気放電による着火性は無視できると考えられる。

2.2.1.2.4 高温熱面による着火性の評価

(1) 研究の概要及び流れ

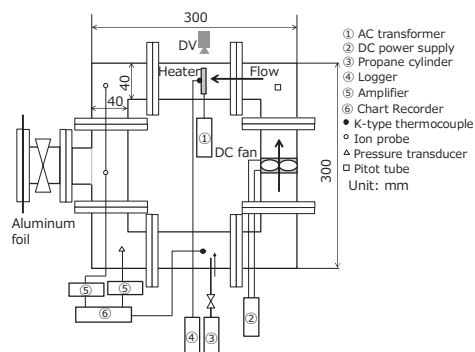
前節までは主に電気スパークによる着火性について述べたが、ここではたばこの火や電気ヒーター(電気ストーブ)、ホットプレートなど的高温熱面による着火性について実験的に検討した結果を述べる。まず、加熱壁面に対してある流速を有した可燃性ガスが接触する状況を再現できる装置を製作し、濃度、加熱壁面への印加電圧、流速を変化させて着火の有無、着火時の温度、加熱開始から着火までに要する時間を計測した。2.2.1.2.1節で示した着火のメカニズムをもとに供給電圧と着火エネルギーの間に成り立つ関係を導き実験結果を説明するとともに、最小着火エネルギーの存在及びこれを与える供給電力の流速・濃度依存性を明らかにした。なお本節の内容については文献[32-34]に詳細な記載があるので参考にされたい。

(2) 実験の概要

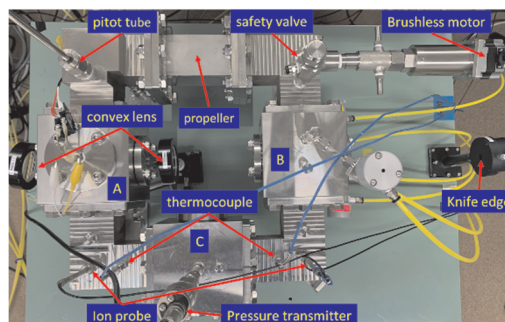
本実験では、図2.2.1.2.4-1(a)に示すアクリル製および図2.2.1.2.4-1(b)に示すステンレス製のループ型燃焼容器(管路断面40 mm角、管路長340 mm角)を用いた。2つの容器を用いた理由は、はじめ内部視認の容易さからアクリル製容器を使用していたが、加熱に伴い容器が容易に劣化するので、ステンレス製容器を用いることとしたものである。いずれの容器を用いた場合も、その他の装置仕様および寸法は同じであり、実験条件が異なる。可燃性混合気の流れは容器内に設置したブラシレスファンによって生じさせた。容器内には一辺25 mm角の正方形セラミックヒーターが流れに対向するように設置されており、スライダックにより所定の電圧を印加して加熱面とした。加熱面の温度はヒーター内蔵のR型熱電対にて計測した。加熱面周囲の着火挙動は、ステンレス容器を用いた実験においては容器に取り付けた直径20 mmの観測窓からシュリーレン法により高速度撮影した。アクリル容器の実験では常速度デジタルビデオカメラにて撮影した。

実験条件として流速を0.0-4.0 m/s(アクリル容器)及び0.0-2.0 m/s(ステンレス容器)、プロパン濃度を2.1 vol% (アクリル容器) および2.1-9.5 vol% (ステンレス容器)、電圧を50-90 Vの範囲で変

化させた。着火は、加熱面周囲の視覚的変化、容器の圧力上昇、イオンプローブの応答、温度上昇等から総合的に判断した。加熱時間を最大 10 分間、実験回数は 1 つの流速・電圧・濃度の組み合わせについて最大 10 回とし、この間に 1 度でも着火した場合はその条件は着火と判定した。また、着火が認められた最小の電圧を最小着火電圧と定義した。



(a) アクリル製燃焼容器



(b) SUS 製燃焼容器

図 2.2.1.2.4-1 高温表面着火実験装置の概要

(3) 実験結果及び考察

(a) 供給電力と着火電圧の関係

本実験の系においては、可燃性混合気の正味の発熱速度 q_{net} (加熱壁面から未燃混合気へ熱伝導で与えられる熱流束 q_w と化学反応による内部発熱による熱流束 q_r の和と熱損失 q_l との差、いずれも単位は W/m^2) に反比例して着火時間 t_{ig} (s) が決まる。供給電力を P (W)、加熱面面積を A (m^2) としたとき、 t_{ig} は以下の式で書ける。

$$t_{ig} \propto \frac{1}{q_{net}} = \frac{1}{q_w + q_r - q_l} \quad (2.2.1.2.4-1)$$

ここで、化学反応による熱流束 q_r は反応直前の微小時間内にしか発生しないので無視できるものとし、温度が加熱時間に対して単調に上昇する時間帯では $q_w \propto P/A$ で近似できるとすると、式 (2.2.1.2.4-1) から、 t_{ig} は P/A が大きくなるほど短縮し、逆に q_l が大きくなれば延長されることがわかる。 q_l が無視できるほど P/A の値が大きくなると、 t_{ig} は P/A のみに反比例する。 q_l は流速に比例するから、 P/A が q_l に比べて十分大きい場合、流速の大小によらず P/A の値に応じて t_{ig} が決まることを表す。このことは実験からも認められた。

(b) 着火エネルギー

着火までに要したエネルギー E_{ig} (J) は、着火時間 t_{ig} と供給電力 P の積で与えられるとすると、式 (2.2.1.2.4-1) を考慮して以下の式で与えられる。

$$\frac{E_{ig}}{A} = t_{ig} \cdot \frac{P}{A} \propto \frac{(P/A)}{(P/A) + q_r - q_l} \quad (2.2.1.2.4-2)$$

いま q_r は無視できるので、 P/A が q_l に比較して十分大きい場合、 E_{ig}/A は式 (2.2.1.2.4-2) から一定値をとることになる。このとき、供給された電力は見かけ上損失なく着火に寄与することになるから、一定値となる E_{ig}/A は最小着火エネルギーに相当する。実験結果から、 P/A の値が大きくなるほど E_{ig}/A が小さくなって流速の影響がなくなり、最終的に E_{ig}/A が一定値に近づいた。すなわち、 P/A がある値以上の範囲においては、上述の最小着火エネルギーで着火するので、加熱面の面積と供給電力の値から着火時間を予測可能であること、 P/A の値によって着火するか否かを評価可能であることが示された。今後、たばこ等の日常的着火源について上記の整理結果が適用可能か、実験等により検証する予定である。

(参考文献)

- [1] Lewis, B. and von Elbe, G.: "Combustion, Flame and Explosions of Gases", p.346, Academic Press, New York and London, 1961.
- [2] Strehlow, R.A., 水谷幸夫訳: "基礎燃焼学", pp.211-215, 森北出版, 1972.
- [3] 平野敏右: "燃焼学—燃焼現象とその制御—", 海文堂, pp.93-140, 1986.
- [4] 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一編: "燃焼現象の基礎", pp.121-149, オーム社, 2001.

- [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，1987.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Lou, G., Bao, A., Nishihara, M., Keshav, S., Utkin, Y.G., Rich, J.W., Lempert, W.R., Adamovich, I.V.: “Ignition of Premixed Hydrogen-Air Flows by Repetitively Pulsed, Nanosecond Pulse Duration Plasma”, Proc. Combust. Inst., 31(2), pp.3327-3334, 2007.
- [9] 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.
- [10] Cathey, C.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.715-727, 2008.
- [11] 鳳誠三郎，渡部泰昭：“接点开離時のアーク放電について”，電気学会雑誌，81，pp.1331-1337，1961.
- [12] 早田和也，池上知顯：“リレー間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.138，2005.
- [13] 董学博：“電気接点の諸特性に与える周囲気体と圧力の影響”，日本工業大学研究報告，47(1)，pp.105-108，2016.
- [14] 富士通株式会社 Web サイト：“リレー技術解説”，
<http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fcl/relays/relay-technology.pdf>，2019.
- [15] http://kenshi.air-nifty.com/ks_memorandom/2009/04/post-9deb.html (2020.6.25 閲覧).
- [16] <https://blog.alphawave.co.jp/eng/index.php?itemid=1744> (2020.6.25 閲覧)
- [17] <http://d.hatena.ne.jp/tomtom1ono/20130128/1359321525> (2020.6.25 閲覧)
- [18] <https://rifle.blog.so-net.ne.jp/2014-02-18> (2020.6.25 閲覧)
- [19] <http://www.tabogami.tokyo/archives/1284> (2020.6.25 閲覧)
- [20] <https://incomprehensiveness.blogspot.com/2014/09/sr-ss18a-nationalpanasonic-ih.html> (2020.6.25 閲覧)
- [21] <https://insertyourname.blog.so-net.ne.jp/2015-04-09> (2020.6.25 閲覧)
- [22] <https://www.sony.jp/bd/about/technology/index.html> (2020.6.25 閲覧)
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] https://jp.ricoh.com/kouken/science_caravan/QandA/science/qanda6_5.html (2020.6.25 閲覧)
- [26] 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).
- [27] 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.
- [28] JSRAE: “Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants Final Report 2016, Table 2-9, p.41, 2017.
- [29] IEC60947-1: Low-voltage switchgear and controlgear- Part 1: General rules, 2007.
- [30] 今村友彦，青木幹尚，春山智成：“コンセントプラグの抜き差しによる滞留プロパンの着火性状”，第52回安全工学研究発表会講演予稿集，pp.173-176，2019.
- [31] 独立行政法人労働安全衛生総合研究所：労働安全衛生総合研究所技術指針 静電気安全指針 2007，JNIOOSH-TR-No.42，pp.18-39,2007.
- [32] 中澤誠人，苅谷優行，下村蓮，桑名一徳，今村友彦：“循環するプロパン／空気混合気の加熱壁面による着火のエネルギーと燃料濃度の影響”，2020年度日本火災学会研究発表会概要集，2020.
- [33] 飯塚洋行，桑名一徳，今村友彦：“加熱壁面に衝突する予混合淀み流の着火条件”，日本火災学会論文集，70(1)，pp.1-8，2020.
- [34] Imamura, T., Uehara, K., Nakata, K., Maruyama, S., Kuwana, K.: “Quasi-steady Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heated Surface”, Fire Safety Journal, in press.

2.2.1.3 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発 【国立研究開発法人産業総合技術研究所】

2.2.1.3.1 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

現在日本国内では可燃性の自然冷媒を用いたルームエアコンは販売されておらず、漏洩事故事例もほとんど報告されていないため、漏洩条件を決定するために微燃性冷媒を使用した室内機での漏洩条件を参考とした。微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンのリスク評価報告には、R32を用いたビル用マルチエアコンの漏洩箇所、漏洩箇所形態、相当径が記載されている。報告されているうち最も相当径が大きい、家庭用室内機熱交換器伝熱管での全面腐食での相当径は0.174 mmであり、63 °Cの液漏洩での漏洩速度は67 g min⁻¹と急速漏洩のリスク評価に用いられている4分全量放出の放出速度と同程度である。また報告されている漏洩箇所は熱交換器伝熱管と電子膨張弁がほとんどである。そこで本研究では家庭用ルームエアコンの室内機における急速漏洩の漏洩条件として、充填量の全量を4分間で放出する条件と、配管の破断に相当する口径から30 °Cでの自圧で放出する2通りの放出速度を採用した。また漏洩箇所として、熱交換器の中央部分、熱交換器と接続配管の継ぎ目付近、室内機内で冷媒配管を取りまわす際の配管継ぎ手部分の3か所を採用した。

2.2.1.3.2 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価

評価対象機種は、諏訪東京理科大学が担当している機器使用時に問題となる着火源のスクリーニングによる部品検討の結果や日本冷凍空調工業会によるA3冷媒のリスク評価から決定した。今年度は、レーザープリンター、ヘアードライヤー、電気掃除機の評価を行った。

実際の機器類の動作によって、周囲に充満したプロパン-空気予混合が着火を起こした場合、機器類の一部が爆発により飛散する可能性があるため、実験は産総研爆発ピット内にアクリル容器を設置して行った。1.00 m×1.00 m×1.00 mのアクリル製容器に、プロパンガス、プロパン-空気混合気を濃度、流量を調整しながら導入し、プロパン濃度を5.2 vol%に保った。機器類はアクリル容器内に固定し、エアアクチュエーターによりスイッチ類を爆発ピット外から遠隔操作した。

レーザープリンター、ヘアードライヤー、電気掃除機は、構造が一般的と考えられる機種の中から使用電力の大きい機種を選定し、各2台の新品個体を使用した。ヘアードライヤーはブラシモーターを用いた機種を選定した。電気掃除機は紙製のごみ袋を内蔵するタイプを選定した。

レーザープリンターの実験では、2台の個体についてカラー両面印刷を250枚ずつ行ったが、いずれでも異常は見られなかった。

ヘアードライヤーの実験では、2台の個体とも、温風送風開始数秒後にプロパン-空気混合気に着火し爆発が起きた。(図 2.2.1.3.2-1)

電気掃除機の実験の1個体では、7秒間「強」運転、5秒間停止を5、6回繰り返した後、発煙した。実験の都合上、窒素によるプロパン-空気混合気の希釈作業を発煙10秒程度後から開始したが、それまでにプロパン-空気混合気の爆発は起こらなかった。電気掃除機の実験のもう1個体では、7秒間「強」運転、5秒間停止を500回繰り返しても、5分間の連続「強」運転を行っても異常は見られなかった。発煙した個体の内部はモーター部から排気口にかけてプラスチック部品の焦げや溶解が見られた。(図 2.2.1.3.2-2)

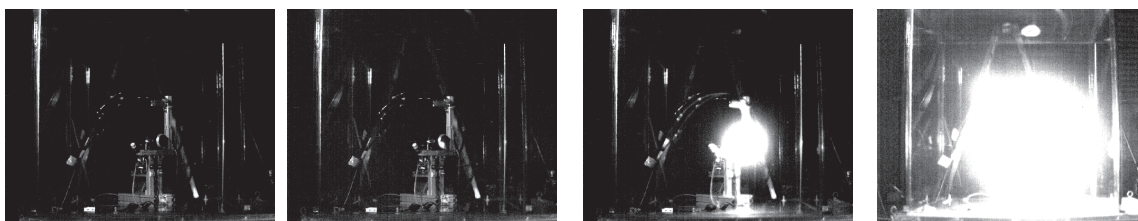


図 2.2.1.3.2-1 赤外線高速カメラで撮影されたドライヤーによる着火爆発の様子



図 2.2.1.3.2-2 発煙した電気掃除機の様子

2.2.1.3.3 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

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 となる位置にルームエアコン室内機を設置した。室内機は部屋の広さに対し一般的なサイズであり、送風機構も日本国内で一般的に採用されているものとした。2.7 m × 2.7 m の空間にそれぞれ 1 つずつ計 2 つの扉下隙間 800mm × 4mm を設置し、使用しない場合はアルミテープで塞ぐことによって濃度分布時間履歴に与える影響を調べた。Fig. 4-1 に模擬室と濃度センサーの配置を示す。センサー位置に示した色は濃度変化時間履歴グラフに対応している。プロパン濃度センサーは接触燃焼式センサーを用い、エアコン室内機直下と床面、床上 25cm までには計測範囲 0-6.6 vol% のセンサーを 14 点、それ以外には計測範囲 0-2.2 vol% のセンサーを 14 点の計 28 点を設置した。

プロパンの放出量は、IEC60335-2-40 : 2018 に採用されている片岡の式 (2.2.1.3.3-1) を用いて求めた送風など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を前提とした許容充填量 (2.2.1.3.3-2) を用いた。2.7 m × 2.7 m × 高さ 2.4 m の模擬室では、およそ 230g と 340g、2.7 m × 5.4 m × 高さ 2.4 m の模擬室では、およそ 330g と 680g になる。

$$m_{max} = 2.5 \times LFL^{5/4} \times A^{1/2} \times h_0 \quad (\text{式 2.2.1.3.3-1})$$

$$m_{max} = 0.5 \times LFL \times V \quad (\text{式 2.2.1.3.3-2})$$

m_{max} : 最大許容充填量, LFL : 燃焼下限界, A : 床面積, h_0 : 機器下面高さ, V : 室内容積

これらの充填量を 4 分で全量放出する場合には、プロパンを封入した 20kg ボンベを 30 °C に湯浴し、ガス取りしたプロパンガスをニードルバルブで流量調整し、マスフローメーターで流量を確認しながら室内機の放出配管から放出した。また圧縮され液化した状態で漏洩する場合を模擬するためには、30 °C に調整した恒温槽内に 5kg ボンベに封入された最大許容充填量のプロパンを設置して液取りし全量を放出した。

実験における放出動作等はすべて大空間外の計測室から、安全監視用ビデオカメラや濃度センサー指示値で安全を確認しながら遠隔操作して行った。

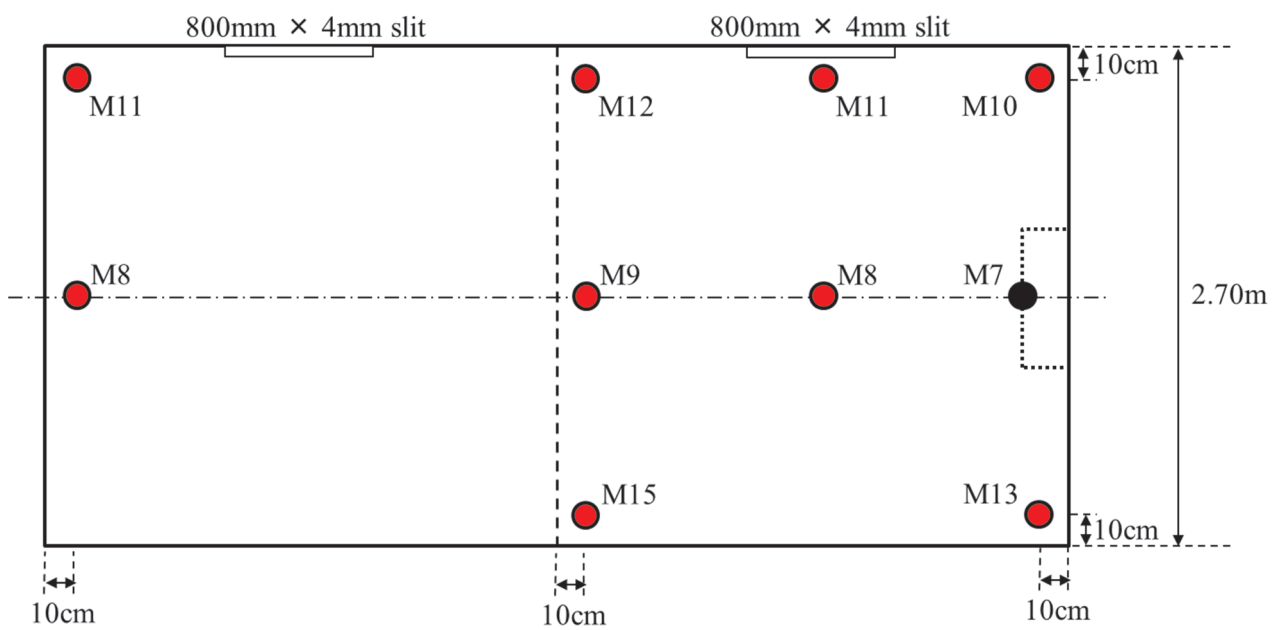
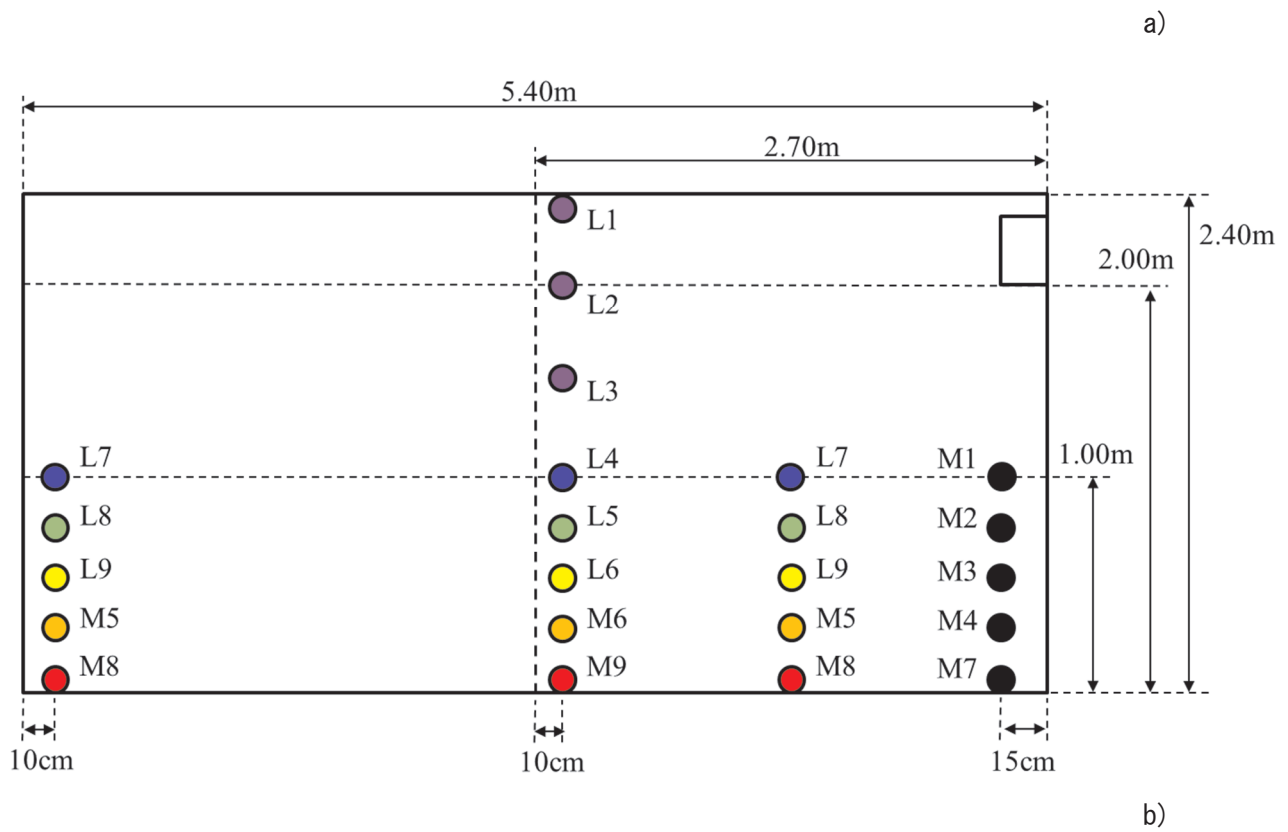


図 2.2.1.3.3-1 センサー配置図

a) 垂直断面図 b) 平面図 L- : 0-2.2 vol% センサー, M- : 0-6.6 vol% センサー

室内空間の広さ，放出量（想定充填量），放出位置，放出速度，エアコン送風の条件，扉下隙間の有無の条件を変えながら実験を行い，条件が濃度分布時間履歴に与える影響を観察し，点火実験による燃焼爆発影響評価を行う条件を検討した。

図 2.2.1.3.3-2 から図 2.2.1.3.3-10 に計測されたプロパン濃度の時間履歴を示す。

(1) 2.7 m×2.7 m×h2.4 m 空間における放出量の影響

この空間広さでは，式 (2.2.1.3.3-1) と式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量は，230g と 340g であり差が小さいため濃度分布にも大きな違いは見られなかった。放出量 230g の場合と，放出量 340g で送風を行った場合には，計測した位置で 2.2 vol% の下限界を超える可燃濃度域は形成されなかった。

(2) 2.7 m×2.7 m×h2.4 m 空間における放出位置，放出形態の影響

放出量 340g で送風を行わなかった場合でも放出位置によっては，可燃濃度域がほとんど形成されなかった。熱交換器中央でガス状態 4 分全量放出の場合，(図 2.2.1.3.3-2 a) 床面付近に 10 分程度可燃濃度域が形成された。熱交換器と配管接続部分に設置した 1.5mm 径ピンホールから液状で 30 °C の自圧で放出させた場合，(図 2.2.1.3.3-2 c) 放出中のエアコン直下と放出開始後 5 分間程度の間の床面に可燃濃度域が形成された。

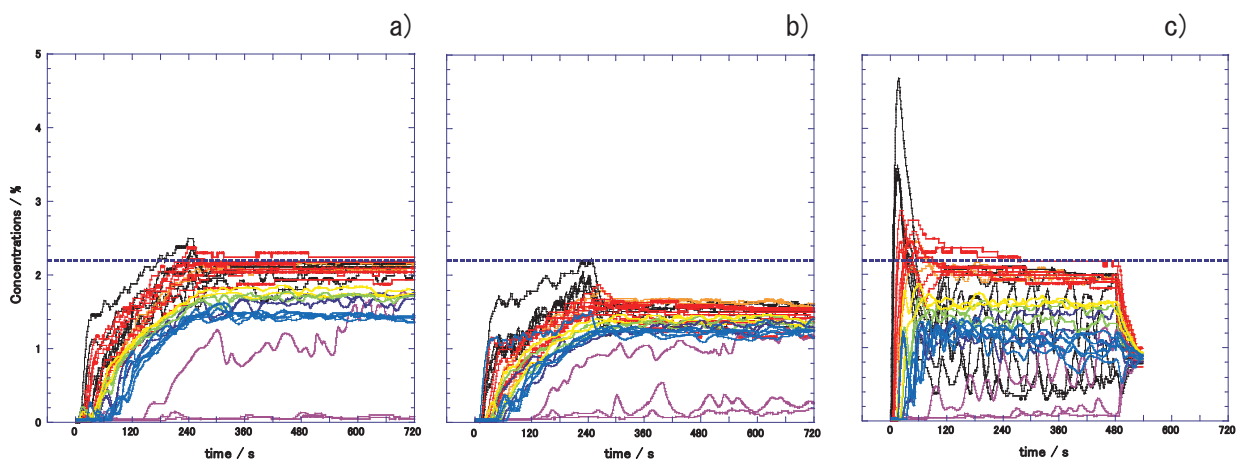


図 2.2.1.3.3-2 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×2.7 m×h2.4 m, 340g プロパン, 送風なし, 扉下隙間なし.

a) 熱交換器中央, ガス取り 4 分全量放出.

b) 室内機内部配管継ぎ手, ガス取り 4 分全量放出.

c) 熱交換器-配管接続部 1.5mm ピンホール, 液取り.

(3) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出量の影響 1

この空間広さでは、式 (2.2.1.3.3-1) と式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量は、330g と 680g で差が倍以上であるため濃度分布も大きな違いが見られた。放出量 330g の場合は、放出終了後には室内に可燃領域は見られなかった。

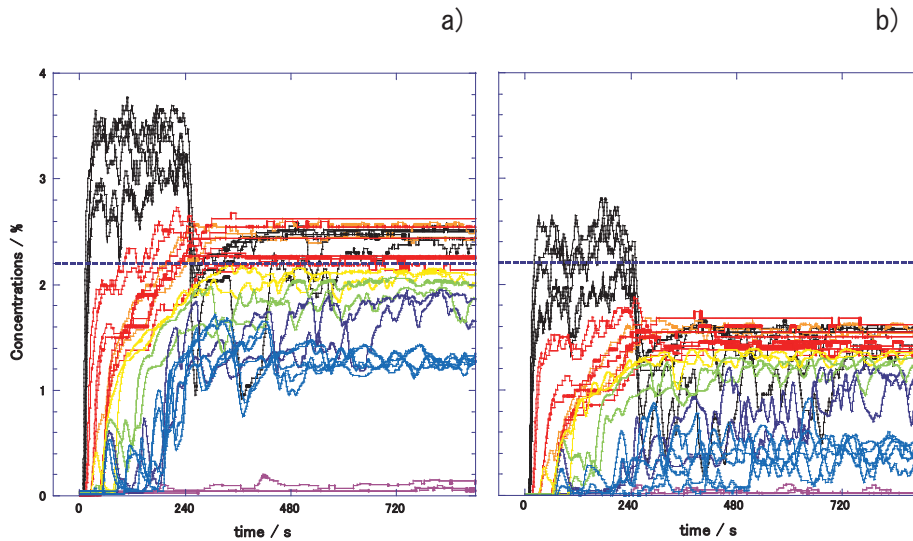


図 2.2.1.3.3-3 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, ガス取り 4 分全量放出.
a) 680g. b) 330g プロパン.

(4) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出位置の影響

式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量 680g を放出し送風を行わなかった場合には、熱交換器中央、熱交換器-配管接続部、室内機内配管接続部のいずれの放出位置で放出した場合も、漏洩中のエアコン直下には高濃度の可燃領域が形成された。また熱交換器中央から放出された場合は、床面付近に 1 時間以上可燃領域が形成され続けた。これは、熱交換器中央付近は室内機の吸気口と排気口が大きく開いており、室内機内のプロパンが低線流速で室内機外に放出され室内の攪拌が起こりにくかったためだと考えられる。

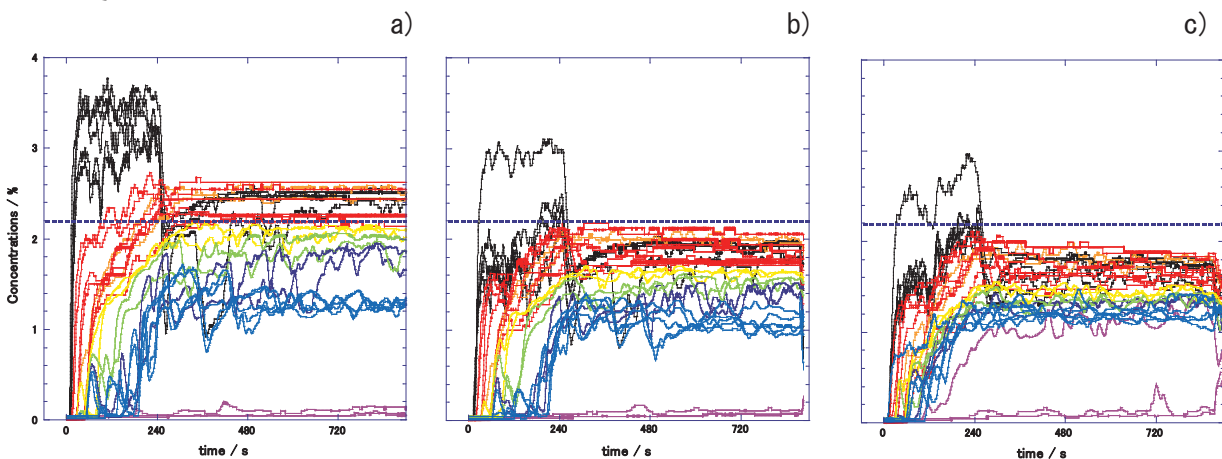


図 2.2.1.3.3-4 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 680g プロパン, 送風なし, 扉下隙間なし, ガス取り 4 分全量放出.
a) 熱交換器中央放出, b) 熱交換器-配管接続部放出. c) 室内機内部配管継ぎ手位置放出.

(5) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m空間における扉下隙間の影響

式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量 680g を放出し送風を行わなかった場合, 扉下隙間の有無, 個数は放出中や放出直後の濃度にほとんど影響を与えない. これは床面高さに設置された扉下隙間から室外に押し出されるプロパン-空気混合気の体積は, 室内に放出された濃度 100 %のプロパンと同体積であり, 濃度は計測されている2-3 vol %程度だからである. しかし, 床面に可燃濃度域が存在する時間は, 扉下隙間が増えると短くなる.

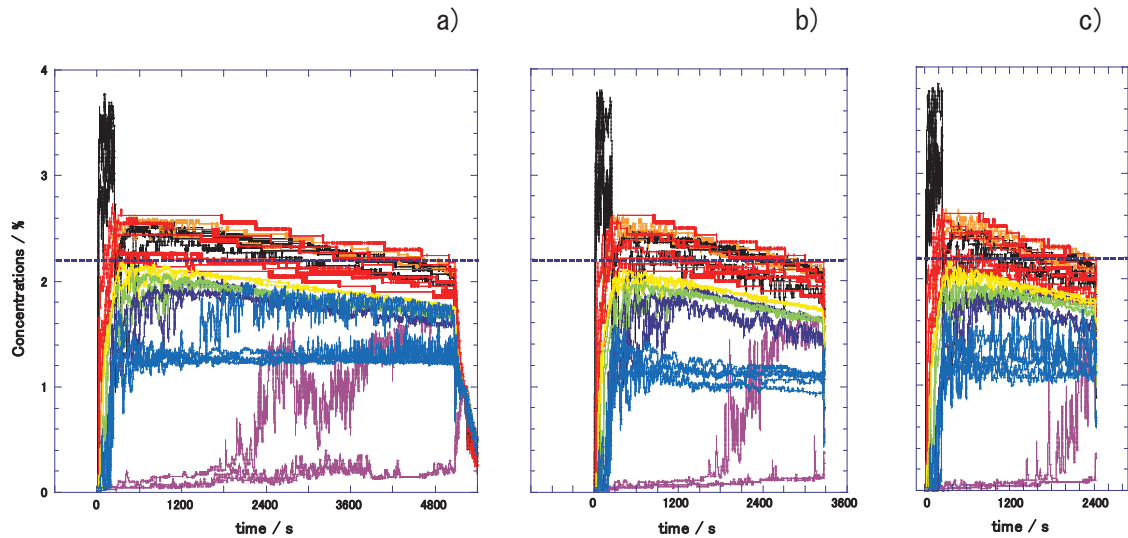


図 2.2.1.3.3-5 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン ガス取り4分全量放出.

a) 扉下隙間なし. b) 扉下隙間1か所. c) 扉下隙間2か所.

(6) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m空間におけるエアコン送風の影響 1

図 2.2.1.3.3-6 b) の計測では, プロパン放出開始前から最も弱い風速で水平向きにエアコン送風を連続運転した. 送風により4分間の放出中にも放出終了後も室内に可燃領域は観測されなかった.

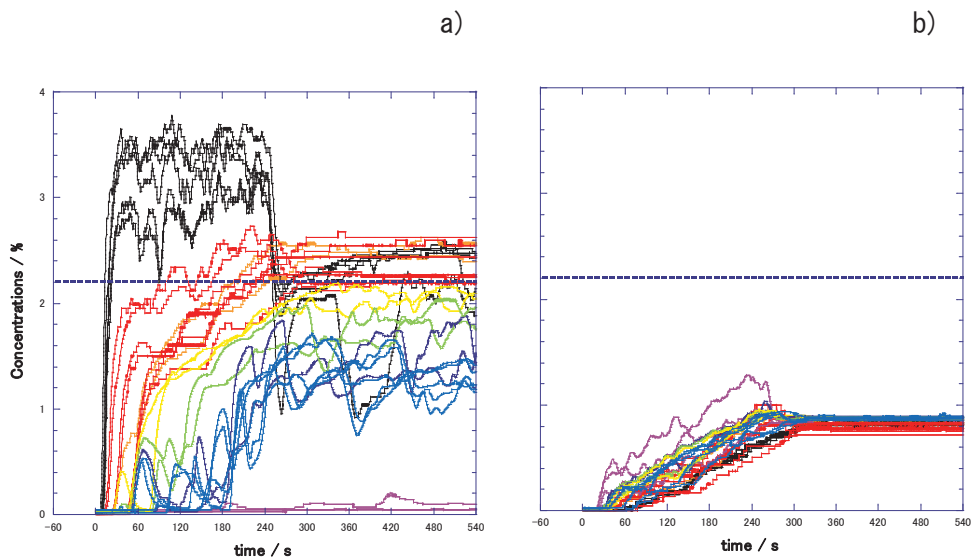


図 2.2.1.3.3-6 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン ガス取り4分全量放出.

a) 送風なし. b) 送風あり(水平・最弱風)

(7) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間におけるエアコン送風の影響 2

いずれの計測でも、下向きに最も強い送風をプロパン放出開始から a) では 30 秒後、b) では 1 分後、c) では 2 分後に開始した。(送風なしの条件は図 2.2.1.3.3-6 a) 送風開始直後からエアコン直下・床面とも濃度が低下し、可燃領域が消滅していく様子が観測された。

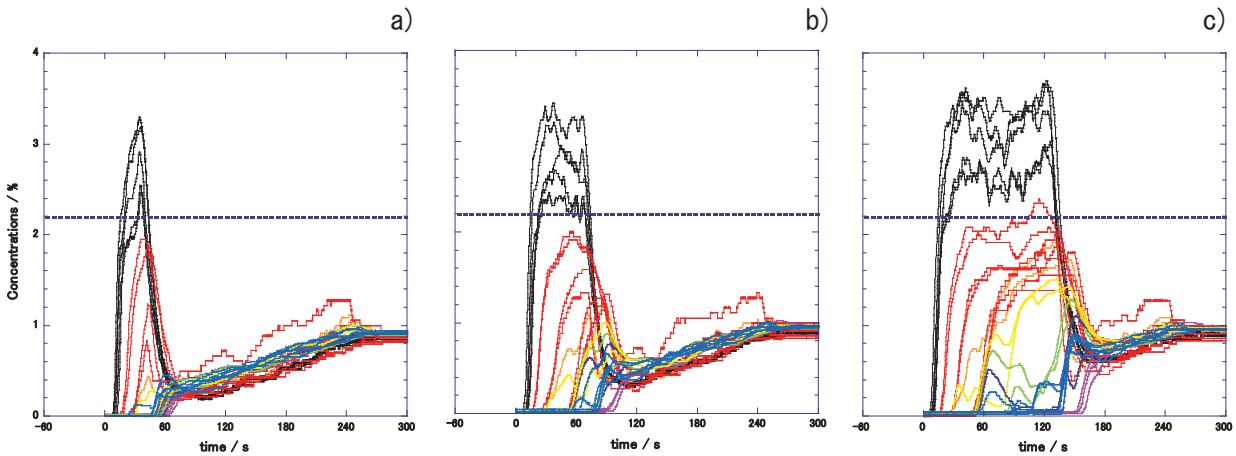


図 2.2.1.3.3-7 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン ガス取り 4 分全量放出.
送風あり(プロパン放出後に下向・最強風速) a) 30 秒後. b) 1 分後. c) 2 分後

(8) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出形態の影響

図 2.2.1.3.3-8 b) の計測では、1/4 インチの L 字型継ぎ手から、プロパン 30 °C の蒸気圧である 0.95 MPa (ゲージ圧) で液取りのプロパンを放出した。これは、室外機で圧縮された液化プロパンが室内機までほとんど気化せずに到達し完全に破断した配管から漏洩するシナリオを模擬した、単位時間あたりの漏洩量として想定される最悪の条件だと考えられる。放出直後はエアコン直下と床面に比較的に高濃度の可燃領域が観測されるが、放出 4 分後はガス状態 4 分全量放出での濃度とほぼ同様である。また 10 分後以降は可燃領域が消滅し可燃領域の存在時間は 4 分全量放出より短い。

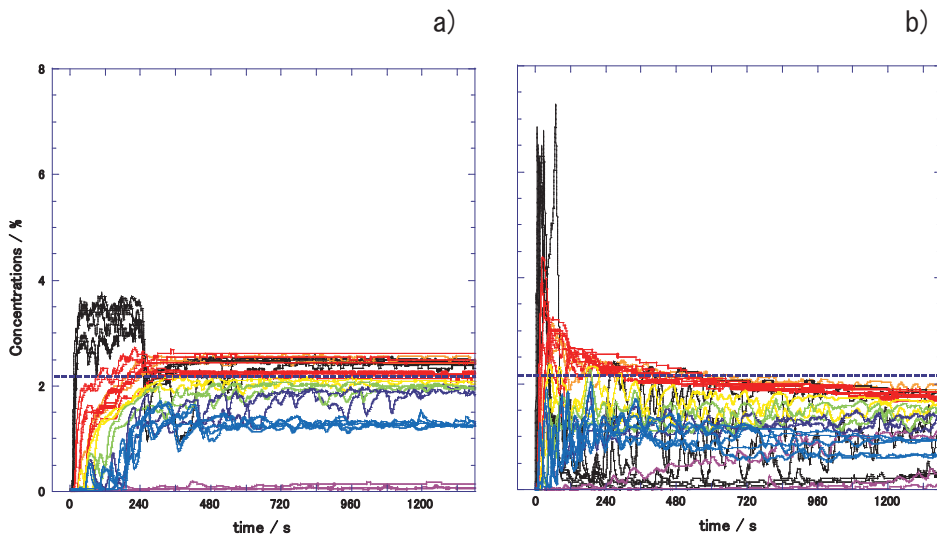


図 2.2.1.3.3-8 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン
a) ガス取り 4 分全量放出. b) 液取り φ4 mm, 0.95 MPa (G).

(9) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出量の影響 2

0.95 MPa (ゲージ圧) で液取りのプロパンを放出した場合でも、片岡の式から計算した放出量 330g では、放出終了数十秒後には室内に可燃領域は見られなかった。

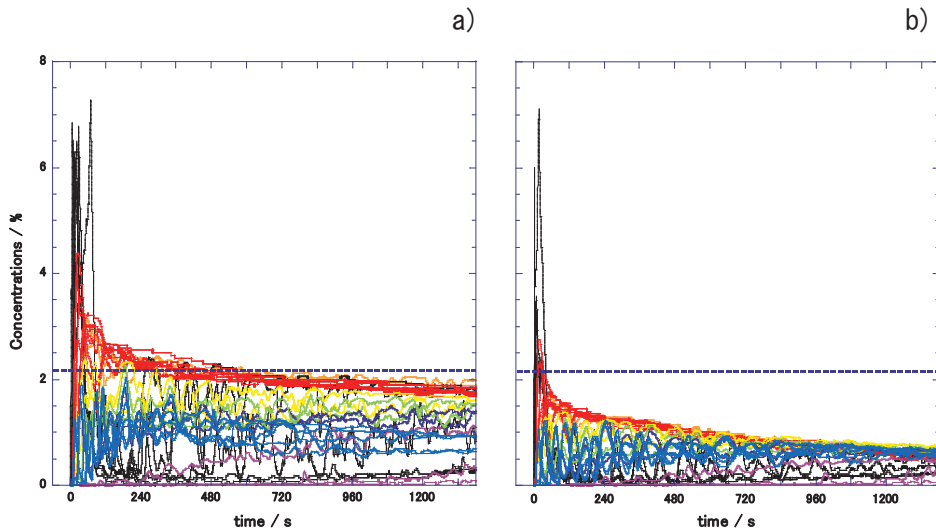


図 2.2.1.3.3-9 プロパン濃度時間履歴
2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出,
液取りφ4 mm, 0.95 MPa(G). a) 680g. b) 330g プロパン.

(10) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間におけるエアコン送風の影響 3

0.95 MPa (ゲージ圧) で液取りのプロパンを 680g 放出した場合でも、放出開始前から最も弱い風速で水平向きに連続運転するか、下向きに最も強い送風をプロパン放出開始から 30 秒後に開始すると、放出開始 2 分後には可燃領域が消滅する様子が観測された。

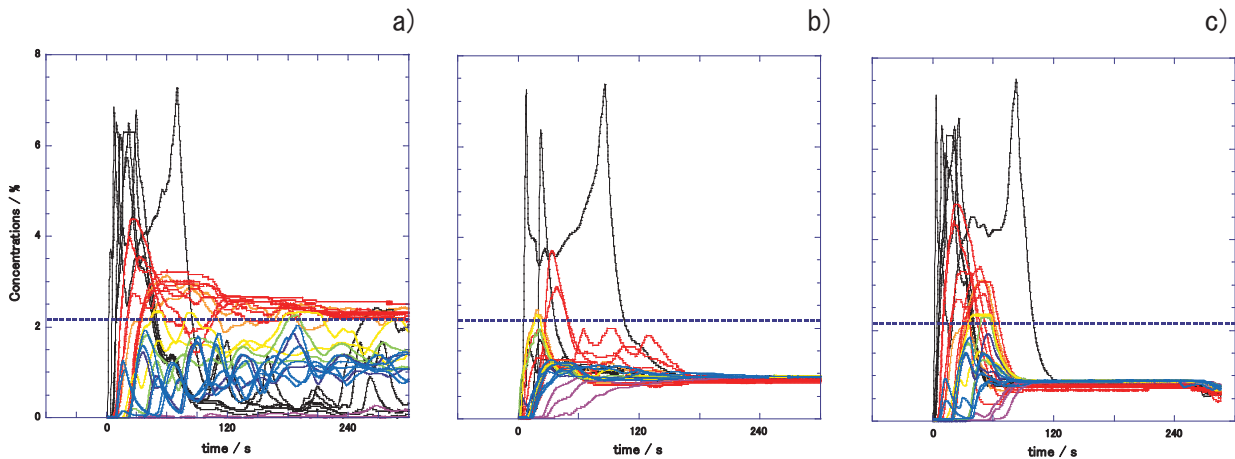


図 2.2.1.3.3-10 プロパン濃度時間履歴
2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出,
680g プロパン 液取りφ4 mm, 0.95 MPa(G).
送風 a) なし. b) あり (水平・最弱風・連続運転) c) あり (放出 30 秒後に下向・最強風)

<特許、論文、外部発表等の件数> (詳細内容は添付リストを参照)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
2018FY				1件		
2019FY				2件	7件	
2020FY				1件		

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

1件

2.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

2.3.1 自然冷媒および超低 GWP 冷媒を適用した大形クーリングユニットの研究【三菱電機株式会社】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ： 自然冷媒および超低 GWP 冷媒を適用した大形クーリングユニットの研究		
当社 60 馬力 R404A 冷凍機比で、定格条件ならびに年間の運転を想定した特定の負荷パターンでの年間 COP が 100%以上。機器販売価格が 140%以下。	COP 目標達成のための冷媒のメリットとデメリットを明確にし、安価かつ高効率実現のための機能部品の仕様を明確化した。また机上検討結果の実機検証で性能特性、PFC 熱交換器の圧力損失と放熱量を明確化した。	○
[1] 高元側に最適な冷媒選定		
高元側冷媒選定／理論性能／実現コスト見積もりと製品の馬力に応じた最適圧縮機選定	高元側に最適な冷媒選定を目的として、4つの冷媒(R290、R1234yf、R32、CO2)の性能計算と特徴比較(GWP、COP、圧縮機の必要容量、燃焼性、コスト)を行い、それぞれの冷媒のメリットとデメリットを明確化した。	○
[2] 安価かつ高効率実現のための高元側サイクルの開発		
圧縮機吸入圧損の低減技術、圧縮機増速による小型化技術及び熱交換器の最適分配及び最適容量の開発	安価かつ高効率実現のための高元側サイクルの開発として、オールアルミ熱交換器(PFC 熱交換器)、アキュムレータ、カスケード熱交換器(プレート式熱交換器)のシミュレーション計算を行い、必要な仕様を明確化した。	○
[3] 机上検討結果の実機検証		
机上検討結果の実機での検証	上記机上検討結果の実機検証での評価を行い、候補冷媒それぞれにおいて、性能特性、PFC 熱交換器の圧力損失と放熱量の関係を明確化した。試験後の各部品の調査を進める。	○
[4] 高元側に最適な冷媒での詳細構造設計と実機検証		
機器の詳細構造設計および実現コスト見積もり、課題抽出と製品の馬力に応じた最適圧縮機の搭載構造設計	冷媒回路部品と制御回路の仕様検討を行い、高元側の圧縮機仕様と制御I/O、制御機器の組み合わせによるコスト比較を行った。	○
[5] 安価かつ高効率実現のための二元サイクルの開発		
圧縮機吸入圧損の低減技術、圧縮機増速による小型化技術の実現見極めと二元冷凍機サイクルの制御構築。またその実証試験機評価	高元回路の PFC 熱交換器の最適パスについて検討し仕様を構築した。	○

【 ◎:計画以上、○:計画通り(目標達成又は達成見込み)、△:ほぼ計画通り(一部未達)、×:目標未達 】

- [1] 高元側に最適な冷媒選定を目的として、4つの冷媒（R290、R1234yf、R32、CO2）の性能計算と特徴比較（GWP、COP、圧縮機の必要容量、燃焼性、コスト）を行い、それぞれの冷媒のメリットとデメリットを明確化した。また、高元側冷媒にはR1234yfを選定した。
- [2] 安価かつ高効率実現のための高元側サイクルの開発として、オールアルミ熱交換器（PFC熱交換器）、アキュムレータ、カスケード熱交換器（プレート式熱交換器）のシミュレーション計算を行い、必要な仕様を明確化できた。低元側高圧部の圧力抑制することにより、システムコストは現行R404A機に対し現状で140%程度を達成した。
- [3] 上記机上検討結果の実機検証での評価を行い、候補冷媒それぞれにおいて、性能特性、PFC熱交換器の圧力損失と放熱量の関係を明確化した。高元サイクルのCOPは基礎試験結果から理論値同等を確認し、低元システムも理論値同等とした場合の二元システムCOPは、目標（現行R404A機同等以上）に対し、100%以上達成見込みであることを確認した。
- [4] 高元側に最適な冷媒での詳細構造設計と実機検証（20年度開発内容）
機器の詳細構造設計および実現コスト見積もり、課題抽出と製品の馬力に応じた最適圧縮機の搭載構造設計を進める。
- [5] 安価かつ高効率実現のための二元サイクルの開発（20年度開発項目）
圧縮機吸入圧損の低減技術、圧縮機増速による小型化技術の実現見極めと二元冷凍機サイクルの制御構築（低元高圧抑制とデフロスト性能が課題）、またその実証試験機評価を進める。

<特許、論文、外部発表等の件数>

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
2019FY	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	1	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.3.2 コンデンシングユニットの次世代低 GWP 冷媒対応化技術の開発【東芝キャリア株式会社】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ:コンデンシングユニットの次世代低 GWP 冷媒対応化技術の開発		
1. 低 GWP 冷媒種を選定する。 2. 従来機種に対して同等の定格機器性能を確保する。 3. 年間機器性能 5%改善可能な見込みを得る。	1. 候補冷媒を 3 種まで絞り込んだ。 2. 蒸発温度帯ごとの実力を把握した。熱交換器改善およびサイクル部品追加により、2020 年度末までに達成見込みである。 3. 弊社社内基準による年間使用電力量試算し実力把握した。2020 年度までに課題抽出と改善施策立案まで完了予定である。	○
[1]冷媒の探索と選定		
現行利用冷媒 R404A と物性値の近い、低 GWP 冷媒を選定する。	冷凍サイクルシミュレーション実施し、コンデンシングユニット用の次世代低 GWP 冷媒の候補として、HFO 混合冷媒 3 種を抽出した。またこれら冷媒のドロップイン試験を実施し、性能ポテンシャル把握に必要なデータ蓄積を行った。	○
[2]冷媒物性値の把握		
絞り込み済み冷媒種の物性値計測、および物性式修正と、REFPROP 混合モデルの評価を行う。	低温側計測のための設備改造が完了し、2020 年度末までに物性値計測完了見込みである。また、現状の物性式での REFPROP 混合モデル評価が完了し、2020 年度までに推算式修正による評価完了予定である。	○
[3]性能ポテンシャル把握		
従来機種に対して同等の定格機器性能確保、および年間機器性能 5%改善をはかる。	コンデンシングユニット仕様(冷凍サイクル構成、サイクル制御)検討を実施し、2020 年度末までに仕様確定予定である。	○
[4]信頼性把握		
コンデンシングユニット長期信頼性評価を行う。	設計寿命を満足するための信頼性評価を実施し、候補冷媒に対する課題洗い出し(ウィークポイント抽出)、および対応施策の策定を実施予定である。	○
[5]安全性検討		
微燃性冷媒漏えい時の安全性評価を行う。	冷媒漏えいシミュレーション、および漏えい試験を実施する。その結果に準じた安全対策組み込み、および対応制御実装までを実施予定である。	○

【 ◎:計画以上、○:計画通り(目標達成又は達成見込み)、△:ほぼ計画通り(一部未達)、×:目標未達 】

< 1. 冷媒の探索と選定 >

HF0 混合冷媒の冷媒物性値に関しては、物性計測そのものが低温域で行われておらず、また、複数のショーケースでの使用を考えた場合、ショーケース間での混合冷媒の成分比率の変動などが考えられることから、その物性推算式の精度把握が重要となる。検討により、HF0 混合冷媒の中には、構成する 2 成分間の混合物性に関し、精度が低い推算式が使用されていることが判明し、その精度改善に取り組んだ。

< 2. 冷媒物性値の把握 >

候補冷媒として絞り込んだ HF0 混合冷媒の冷媒物性推算値の精度向上を目的に、物性値計測と物性値推算式の修正について検討した。冷媒物性推算に使用する Refprop では、2 成分混合冷媒の混合モデルに関し、一部物性推算精度が低いものが含まれていると予想される。また、混合冷媒での成分比率が局所的に変動した場合の冷媒物性推算精度にも課題が残っていることが想定される。そこで、本研究では候補冷媒種の低温域物性値計測、および同冷媒種の REFPROP における物性データ精度の現状評価を行うこととした。物性値計測については、低温側計測のための設備改造が完了し、2020 年度末までに物性値計測完了見込みである。また、現状の物性式での REFPROP 混合モデル評価が完了し、2020 年度までに推算式修正による評価完了予定である。

< 3. 性能ポテンシャル把握 >

非共沸冷媒採用するための性能リカバリー策として、図 2.3.2-1、図 2.3.2-2 のような内部熱交換器および過冷却熱交換器の改善効果を冷凍サイクルシミュレーションにより試算した結果、過冷却熱交換器ではどの冷媒種においても概ね 5%程度の改善効果が見込めることが分かった。従って、過冷却熱交換器を組み込んだ性能評価試験機を製作することとした。また、サイクル制御最適化検討を実施し、コンデンシングユニット仕様（冷凍サイクル構成、サイクル制御）を 2020 年度末までに確定予定である。なお、定格機器性能だけでなく部分負荷性能まで含めた年間消費電力量を表 2.3.2-1 の試算条件に従って試算した結果、1 次概算ではあるが現行機種に対して約 8%の改善効果が期待できることがわかった。今後、試作機での機器性能評価を進め、年間消費電力量（対現行機種）5%改善可能な機器仕様を確定していく。

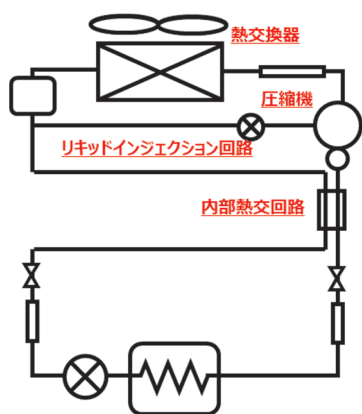


図 2.3.2-1 内部熱交換器回路

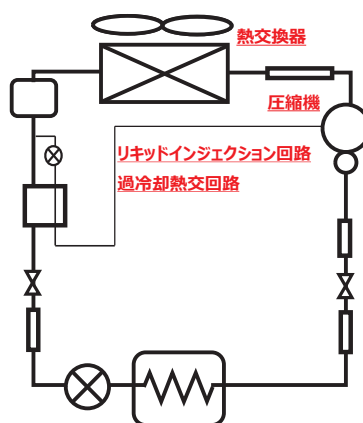


図 2.3.2-2 過冷却熱交換器回路

表 2.3.2-1 年間消費電力量試算条件

季節		夏季		中間季		冬季	
想定日数		92日		122日		151日	
運転想定条件	状態	日中	夜間	日中	夜間	日中	夜間
外気温度		32℃	25℃	20℃	18℃	10℃	7℃

< 4. 信頼性把握 >

コンデンシングユニット長期信頼性確保を目的として、図 2.3.2-3 信頼性評価計画に従って、弊社設計寿命を満足するための評価試験を開始した。評価項目は、表 2.3.2-2 の通りである。冷凍機油と対象冷媒種との安定性評価、電気絶縁性評価、相溶性評価と潤滑性評価を耐久評価試験として実施する。

研究開発項目		19年度	20/1Q	20/2Q	20/3Q	20/4Q	21年度
④信頼性把握	(1)評価項目選定		■				
	(2)冷媒入手		■				
	(3)試験機準備			■			
	(4)評価試験				■		
	(5)評価					▽	
	(6)改善検討						■

①安定性評価
 ②電気絶縁性評価
 ③相溶性評価
 ④潤滑性評価

図 2.3.2-3 信頼性評価計画

表 2.3.2-2 信頼性評価項目

検討項目	内容
安定性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、主に圧縮機構成部品の材料適合性評価を行う。
電気絶縁性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、圧縮機モータからの漏えい電流評価を行う。
相溶性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、相溶性確認試験を行い、圧縮機吐油特性、および圧縮機への油戻り特性評価を行う。
潤滑性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、冷凍機油への冷媒溶解度に対する粘度特性評価を行う。また、弊社基準に従い、圧縮機耐久試験での摩耗量評価にて採用判断する。

< 5. 安全性検討 >

選定した冷媒種はいずれも燃焼性を有するため、図 2.3.2-4 安全性検討計画、および表 2.3.2-3 検討項目に従い、漏えいシミュレーションを実施した。また、漏えい時の店舗内冷媒濃度分布のシミュレーション結果妥当性を確認するため、代替え冷媒（CO2）漏えい試験も実施した。その結果に応じ、漏えい検知器設置場所の選定などの安全対策を取り入れた対応制御ソフト実装までを 2020 年度実施予定である。

研究開発項目		19年度	20/1Q	20/2Q	20/3Q	20/4Q	21年度
⑤ 安全性検討	(1) 可燃性情報入手			▼ガス密度、可燃濃度等			
	(2) 冷媒漏えいシミュレーション				▼安全対策要否		
	(3) 漏えい試験装置試作						
	(4) 漏洩試験						
	(5) 評価						▼リスク評価
	(6) 漏えい検知器の検討						

図 2.3.2-4 安全性検討計画表

表 2.3.2-3 安全性検討項目

検討項目	内容
● 可燃性情報入手	2019年度に選定した冷媒の可燃情報を調査する。
● 冷媒漏えい挙動の把握 (冷媒漏えいシミュレーション)	冷媒漏洩シミュレーションによる可燃域の生成の様相を把握し、可燃域を許容レベル以下にするための安全対策の立案を行う。
● 冷媒漏えい実験	シミュレーションの精度確認のため、漏洩実験を行う。
● 安全対策0次ソフトウェア製作	漏えいセンサー出力値に対する、圧縮機の動作制御、漏えい報知動作制御などの安全性対応ソフトウェアを製作する。
● 漏えい検知器の検討	候補冷媒用漏えい検知器、およびその設置場所の選定を行い、漏えい検知可否評価を行う。

< 特許、論文、外部発表等の件数 >

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
2019FY	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.3.3 低温機器における CO₂ 冷媒を使用した省エネ冷凍機システム開発及びその実店舗評価
【パナソニック株式会社】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ：低温機器における CO ₂ 冷媒を使用した省エネ冷凍機システム開発及びその実店舗評価		
CO ₂ 冷媒の導入促進を目的に、以下の課題を解決する技術を開発する。 [1]CO ₂ 冷凍機の大出力化 [2]高外気温度対応 [3]CO ₂ 冷媒の特性を活かした未利用熱利用 [4]中高温領域への利用範囲拡大	[4]を除いた全ての課題に対して、試作機を製作し、評価推進中。また、実証実験先が決定し、実証実験の準備も並行して推進中。	○
[1]CO ₂ 冷凍機の大出力化		
水冷式 40HP 冷凍機の開発完了	水冷式 20HP の屋内型圧縮機ユニットを 2 台連結した水冷式 40HP 冷凍機の試作が完成。年度内に、性能評価及び改良検討を行い、実証実験を実施予定。	○
[2]高外気温度対応		
貯水しないメンテナンスフリーの空冷型水冷却熱交換器ユニットの開発完了	課題抽出を行うために、現行 HFC 冷媒用リモートコンデンサを用いた散水効果の予備評価を実施。また、空冷型水冷却熱交換器ユニットの試作が完成。年度内に、性能評価及び改良検討を行い、実証実験を実施予定。	○
[3]CO ₂ 冷媒の特性を活かした未利用熱利用		
CO ₂ 冷凍機の排熱を利用した給湯システムの開発完了	水冷式冷凍機の排熱を有効に利用できる水回路を開発。年度内に性能評価及び改良検討を行い、実証実験を実施予定。 また、排熱を利用した空調システムの一次試作機が完成。年度内に性能評価及び改良検討を行い、次年度実証実験を実施予定。	○
[4]中高温領域への利用範囲拡大		
中高温領域にも適用可能な CO ₂ 冷凍機の構想設計完了	予備評価の準備に着手。2020 年度下期より本格的に構想設計開始予定。	○

【 ◎:計画以上、○:計画通り(目標達成又は達成見込み)、△:ほぼ計画通り(一部未達)、×:目標未達 】

2.3.3.1 CO₂冷凍機の大出力化

2019年度は、試作した水冷40HP冷凍機を用いて試運転を行い、圧縮機の合計運転周波数における冷凍能力の変化を確認した。

図2.3.3.1-1に圧縮機の合計運転周波数における冷凍能力の変化を示す。また、合計運転周波数が30～60rpsは圧縮機1台運転、60～120rpsは圧縮機2台運転、120～240rpsは圧縮機4台運転を示す。

図2.3.3.1-1より、運転台数切り替え時(○印)に能力階段が発生しており、リニアな冷凍能力変化を実現する制御検討が必要であることを確認した。

2020年度は、上記リニアな冷凍能力変化を実現する制御を含む圧縮機運転出力の適正制御、低騒音・低振動連結技術を開発し、実証実験を実施する。

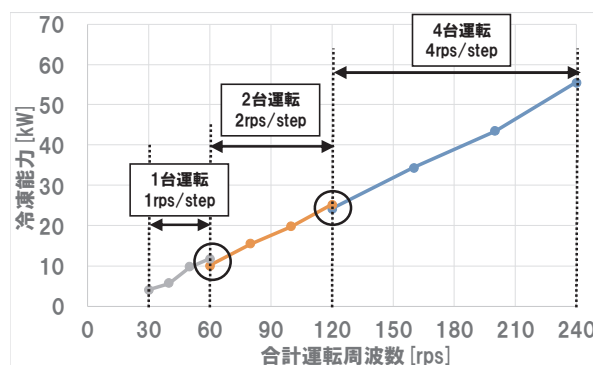


図 2.3.3.1-1 合計運転周波数における冷凍能力

2.3.3.2 高外気温度対応

2019年度は、現行のHFC冷媒用リモートコンデンサを用いて、散水による吸込み空気温度の変化について予備評価を実施した。表2.3.3.2-1に示すように、散水により、散水マット入口の空気温度29.3℃、相対湿度59.7%（湿球温度23.9℃）に対して、散水マット出口の空気温度は25.1℃（湿球温度との差1.2K）まで低下する結果が得られた。

表 2.3.3.2-1 散水による空気温度の変化

	単位	目標値	散水あり	散水なし
散水マット吸込み空気温度	℃	30.0	29.3	29.8
散水マット吸込み空気相対湿度	RH%	60.0	59.7	59.4
散水マット吸込み空気湿球温度	℃	23.9	23.9	23.9
散水温度	℃	25.0	24.9	-
散水マット出口空気温度(全12点平均)	℃		25.1	29.4
湿球温度との差 (散水マット出口空気温度(全12点平均)-散水マット吸込み空気湿球温度)	K	3以下	1.2	5.5

2020年度は、間接散水制御ロジック及び空冷ファンと冷却水循環ポンプによる放熱量制御ロジックを開発し、実証実験を実施する。

2.3.3.3 CO₂冷媒の特性を活かした未利用熱利用

2.3.3.3.1 排熱給湯技術

水冷冷凍機の排熱を利用した給湯システムを開発中である。本研究開発の排熱給湯システムの特長は、高温出湯を可能とする排熱回収ガスクーラーと、冷凍能力の維持を可能とする過冷却ガスクーラーの二つのガスクーラーと、冷却水の流し方にある。

2019年度は、市場での使用方法を考慮して、冷凍能力優先モードと給湯能力優先モードの二つの運転モードを設定することとし、各運転モードに対する冷却水の流し方を考案した。

冷凍能力優先モードにおける性能評価の結果、目標としていた「冷凍能力同等、COP2倍以上」を達成した。

2020年度は、給湯能力優先モード（出湯量最大）における性能評価を行い、実証実験を実施する。

2.3.3.3.2 排熱空調技術

冷凍機の排熱を利用した空調システムを開発中である。

2019年度は、試作機の仕様を検討し、一次試作機が完成した。2020年度は、試作機を用いて性能評価及び改良検討を行い、排熱空調技術を完成させる。

<特許、論文、外部発表等の件数>

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
2019FY	3	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.3.4 GWP10 以下の直膨型空調機用 微燃性冷媒の開発【ダイキン工業株式会社】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ： GWP10以下の直膨型空調機用 微燃性冷媒の開発		
直膨型空調機に使用されている市販フロン品と同等以上の性能(COP、APF 等)を示す GWP 10 以下の冷媒を開発することを目標とする	次世代冷媒の成分物質について、燃焼性、毒性に関する基礎データを取得。新冷媒の代表的な候補について、初期評価を行い、性能(COP、APF)が R410A 比で 90%以上であることを確認した。	○
[1] 温暖化係数		
・温暖化係数が 10 以下	次世代冷媒の成分物質と GWP<10 になるような混合する成分物質を絞り込んだ。 次世代冷媒の成分物質の熱分解開始温度、分解率、生成物の評価を行った。	○
[2] 燃焼性		
・微燃性(ASHRAE 安全性区分 2L) ・冷媒充填量の許容量を把握	次世代冷媒の成分物質単体及び別の物質との混合における燃焼性に係るデータを取得し、評価を行った。	○
[3] 毒性		
・急性毒性 LC50 > 20,000 ppm。 ・ASHRAE 安全性区分で区分 A の見通し	次世代冷媒の成分物質の毒性試験において、急性毒性 LC50 で 20,000ppm 以上であることを確認した。	○
[4] 冷媒性能		
・COP, APF において R410A 比で 90%以上 ・機器開発課題を明確化	次世代冷媒候補のサイクルシミュレーション評価及びドロップイン試験による性能(COP,APF)の初期評価を行った。	○

【 ◎:計画以上、○:計画通り(目標達成又は達成見込み)、△:ほぼ計画通り(一部未達)、×:目標未達 】

2.3.4.1 温暖化係数と安定性評価

2.3.4.1.1 次世代冷媒の成分物質の安定性評価

次世代冷媒の成分物質について、水、空気、金属存在下での安定性試験を実施した。冷凍機油中で R1234yf と比べて酸価が若干上昇する結果になったが、冷凍機油の開発検討により使用可能と考えられる。一方、次世代冷媒の成分物質の安定性挙動について、詳細に調べることが必要であることも確認できた。

2.3.4.1.2 重合反応性の抑制検討

次世代冷媒の成分物質について、保存安定性試験を行った。HF0-1123 は試験後、使用したサンプルの約 80% がポリマーとして析出したのに対し、次世代冷媒の成分物質はポリマー析出がなく、ガス成分にも変化がなかった。

2.3.4.1.3 次世代冷媒の成分物質の分解生成物および環境影響評価【産総研 機能化学研究部門 担当】

次世代冷媒の成分物質の大気中における分解生成物の解析を行った。分解生成物を含む GWP は 1.41 より小さく、環境影響は小さいことが明らかとなった。

2.3.4.1.4 次世代冷媒の成分物質の熱分解開始温度および生成物解析【産総研 機能化学研究部門 担当】

次世代冷媒の成分物質の分解は 500°C 前後から認められた。

2.3.4.1.5 直膨型空調機に適した次世代冷媒候補の選定

次世代冷媒の成分物質を含む混合冷媒を数種検討し、GWP<10 で、ASHRAE 燃焼性クラス 2L の R410A 同等の性能が確保できる試算になった。

2.3.4.2 燃焼性評価

2.3.4.2.1 次世代冷媒の成分物質の燃焼範囲データ取得

次世代冷媒の成分物質の燃焼限界 (LFL) の測定を実施した。

2.3.4.2.2 次世代冷媒の成分物質の燃焼速度のデータ取得

次世代冷媒の成分物質単体の最大燃焼速度と燃焼速度、混合組成での燃焼速度を測定し、ASHRAE 安全性区分 2L の基準である 10cm/sec 以下になることを確認した。

2.3.4.2.3 次世代冷媒の成分物質の着火/消炎特性の評価【産総研 機能化学研究部門 担当】

温度 25°C、圧力 1atm、湿度ゼロでの次世代冷媒の成分物質/空気混合気の消炎距離測定を行い、濃度 7vol% から 15vol% までの消炎距離の測定を行った。

2.3.4.3 毒性評価

2.3.4.3.1 急性毒性の評価

次世代冷媒の成分物質の急性毒性試験を行い、LC50 が 100,000ppm 以上であることを確認した。

2.3.4.3.2 14日間 反復毒性の評価

次世代冷媒の成分物質について 14日間 反復吸入毒性試験を実施した。

2.3.4.4 冷媒性能評価

2.3.4.4.1 次世代冷媒候補の冷凍サイクルシミュレーション評価

GWP<10 の次世代冷媒候補の冷凍サイクルシミュレーション評価を行い、ASHRAE クラス 2L の混合冷媒組成物において、R410A 同等の冷房/暖房性能が確保できる試算になった。

2.3.4.4.2 次世代冷媒候補のドロップイン試験による性能初期評価

R32 用 RAC 機 (4KW クラス、ダイキン工業社製 E シリーズ) にてドロップイン評価を実施した。

システム	ダイキン工業社製 R32 機 E シリーズ	室内機	R40VTEP
		室外機	F40VTEP-W
冷媒	R32, R410A, 次世代冷媒候補①, 次世代冷媒候補②		

ドロップイン試験の結果、次世代冷媒候補①の冷房／暖房の定格・中間条件での COP、APF で 90%以上となり R410A 同等の結果を得た。また、次世代冷媒候補②では、冷房定格・中間条件での COP は R410A 比 90%未満だった。圧力損失の影響に対して機器を改良すれば使用できる可能性があることを確認した。

<特許、論文、外部発表等の件数>

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
2019FY	4	1	1	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

キガリ改正及びパリ協定の削減目標を達成するためには、産業・民生分野でエネルギー消費の比較的大きく、かつ冷媒利用のHFCの排出量が多い冷凍空調分野での対策が重要である。地球温暖化は、国全体、地球全体の喫緊の課題であること、また、これらの製造している企業にとっては対策コストが高く、投資が進まないことを考慮すると国が主導的に研究開発を行うことが必要である。さらに、冷凍・空調機器は食品の流通、我々の居住空間の改善に必須であり、国民生活に不可欠なものである。よって、生活の利便性を可能な限り維持しつつ、温室効果の高いHFCからグリーン冷媒をはじめとする温室効果の低い物質への転換の実現へ向けて、次世代冷媒及びその適用機器開発は国の支援を得て産学の持つ技術を集結して当てる必要がある。

本プロジェクトの成果は、事業者・研究者の技術力向上ひいては国内業界レベル、および国際競争力の向上に大きく貢献することが期待される。また、新たな産業の構築や研究開発のシーズの開拓が考えられる。

対象技術毎の成果の実用化・事業化の見通しを下表に示す。

研究開発項目	対象等	実用化・事業化見通し
①基本特性	低 GWP 冷媒評価(基本特性)	<ul style="list-style-type: none"> ・本研究開発を通して取得した成果について、低 GWP 冷媒の社会実装に必要な国際規格（IEC60335-2-40、IEC60335-2-89）の改定および国際データベース（REFPROP）への登録に向け、積極的に情報を提供し、効果的に低 GWP 冷媒の実用化の支援に貢献。
②安全性・リスク評価	低 GWP 冷媒評価(安全性・リスク)	<ul style="list-style-type: none"> ・講演・論文・投稿等を通じた成果の周知や、冷凍空調業界団体等を通じての PR、および規格・法整備に係る働きかけを内外に広く展開していくことにより、低 GWP 冷媒適用の環境整備に寄与する。
③冷媒・機器開発	低 GWP 冷媒・適用機器開発	<ul style="list-style-type: none"> ・本助成事業において、個々のテーマ毎に実用化へ向けた要素技術等の技術的な課題は明確化され、解決の見込み。 ・一部の機器開発においては、本事業期間中にフィールド試験を実施し、本事業終了後速やかに事業化フェーズへ移行が可能。 ・新冷媒の開発においては、規格等の取得を含め、市場展開への検討を進める。

次に、研究開発テーマ毎の成果の実用化・事業化へ向けた取組及び見通しについて示す。

1. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本事業における「実用化」の考え方：

冷媒の性能、安全性・リスク評価に係る公共的な知的基盤が整備され、社会的利用（規格化、標準化、データベース、アセスメント等への利用、産業界における研究開発への利用、他の研究開発への利用等）に供されること。

1.1 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価

1.1.1 中小型規模の冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の熱物性、伝熱特性および基本サイクル性能特性の評価研究【国立大学法人九州大学】

本研究開発では、以下の点において実用化に向けての見通しを得ることができ、実用化に向けての取り組みを行った。

- (1) 単一冷媒である HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)に関しては、基本的熱物性である熱力学的性質及び輸送性質を明らかにし、信頼できる熱物性計算が可能となる状態方程式及び相関式を作成した。さらに、これらの冷媒熱物性を、熱物性データベースを NIST の REFPROP 上で計算できるように、FLD ファイルを構築した。この2物質に関しては、実用化に必要となる冷媒評価の情報の提供には見通しが立ったと考えられる。この結果は、REFPROP の次のバージョンアップにおいて、成果的に公開されるべく、NIST と連携して準備を進めている。本プロジェクトの成果を REFPROP 上で発信することは、日本で開発された HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)の冷媒熱物性値情報が国際標準値として位置付けられることを意味するとともに、本熱物性値が、世界中で共通した製品研究開発に利用されることになり、公開前から利用できる、わが国の冷凍空調機器開発においても、優位性を確保できることになる。
- (2) 現冷媒メーカーから市場に数多く提案されている冷媒の大半は混合冷媒であり、ほとんどが挑戦的な混合冷媒ばかりといっても過言ではない。そのために、新しい混合冷媒の信頼できる熱力学的性質や輸送性質の実験データは、ほとんど皆無な状態であり、冷凍空調機器の研究開発に用いる冷媒物性は、アメリカの NIST が提供している熱物性ソフトウェア REFPROP(最新版が Ver.10.0)を用いるケースが大半である。新たな混合冷媒に関しては、その計算精度(推算精度)は保証されていないのは致し方なく、熱物性計算の精度を向上させるためには、実験的な情報に基づいて、状態方程式や相関式の精度を向上させるしかない。本研究開発で行なった結果は、繊細に行われた測定の結果が大半であり、根拠強く、時間をかけての作業の繰り返しであるが、いずれも高精度で、世界的に評価される情報ばかりである。そのため、今回測定した2種類の3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO₂ (R455A を含む)及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系(Amorea を含む)に関する冷媒物性の信頼性は高く、冷凍空調機器の研究開発における性能評価の信頼性を保証するものである。
- (3) さらに、現時点の世界状況を見た場合、混合冷媒に限らず単一冷媒においても冷媒熱物性データを高精度で実測できる研究機関は、日本の本グループ以外には、アメリカ、イタリア、フランス、中国の限られたグループしかない。そして、中国以外の研究機関との間には、本プロジェクトを実施している九州大学の NEXT-RP として密接な連携関係を有している。さらに、冷媒開発の主流となるグローバルな冷媒メーカーとも NEXT-RP は連携をとって情報交換を進めているので、新しい冷媒を開発のリアルタイムで入手できるのは、本プロジェクトしかない。この後も、研究開発のスキームを確立した本システムを活用して、新たに対象として考えられる混合冷媒の性能評価を進めていくことで、より幅広い実用化に貢献できると考えられる。
- (4) 図 1.1.1-1 及び図 1.1.1-2 に九州大学が考える、次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーンを示す。冷凍機器性能が良く、GWP 値が比較的小さい HFC32 を許容範囲で活用し、GWP が一般的に小さい HFO 系冷媒を組み合わせるものが、今後の利用が考えられる近未来的に地球温暖化防止対策用となる混合冷媒の主流として考えられる。しかし、近年開発が進んでいる HFO 系冷媒に関しては、市場に流通している冷媒はまだまだ限られている。一歩先に市場流通が進んでいる HFO 系冷媒が HFO1234yf と HFO1234ze(E) であるので、第一段階では HFC32+HFO1234yf 及び HFC32+HFO1234ze(E) の2成分系混合冷媒が、混合冷媒探索の柱となるだろう。この2種類の混合冷媒に関する研究開発は、九州大学と NEDO において、2009 年度から 2010 年度、及び 2011 年度から 2015 年度の2つの NEDO プロジェクト内ですでに実施してきた。さらに、2016 年度から 2017 年度では、同じ NEDO のプロジェクトで開発された HFO1123 と HFC32 の混合冷媒に着目し、性能評価を実施した。今回のプロジェクトでは、さらなる延長線上の研究として、中小型規模冷凍空調機器用冷媒としての利用

を考えた、HFC32+HFO1234yf 混合冷媒に CO₂ や HFO1123 を添加した3成分系混合冷媒に関して、研究開発の基盤データとなる熱物性評価、伝熱性能評価及びサイクル特性評価を行なったわけであり、本研究開発で得られた成果は、同じ NEDO プロジェクト内の他の研究項目で研究開発を進めているグループや民間企業とも、情報共有を行い、一部は公開前の情報として提供している。信頼できる基盤となる情報を、事前に、リアルタイムで入手できるという体制構築は、機器開発で用いるシミュレーションや、機器開発の製品評価に直接つながることであり、実用化にとっては非常に大きな利点であると考えられる。

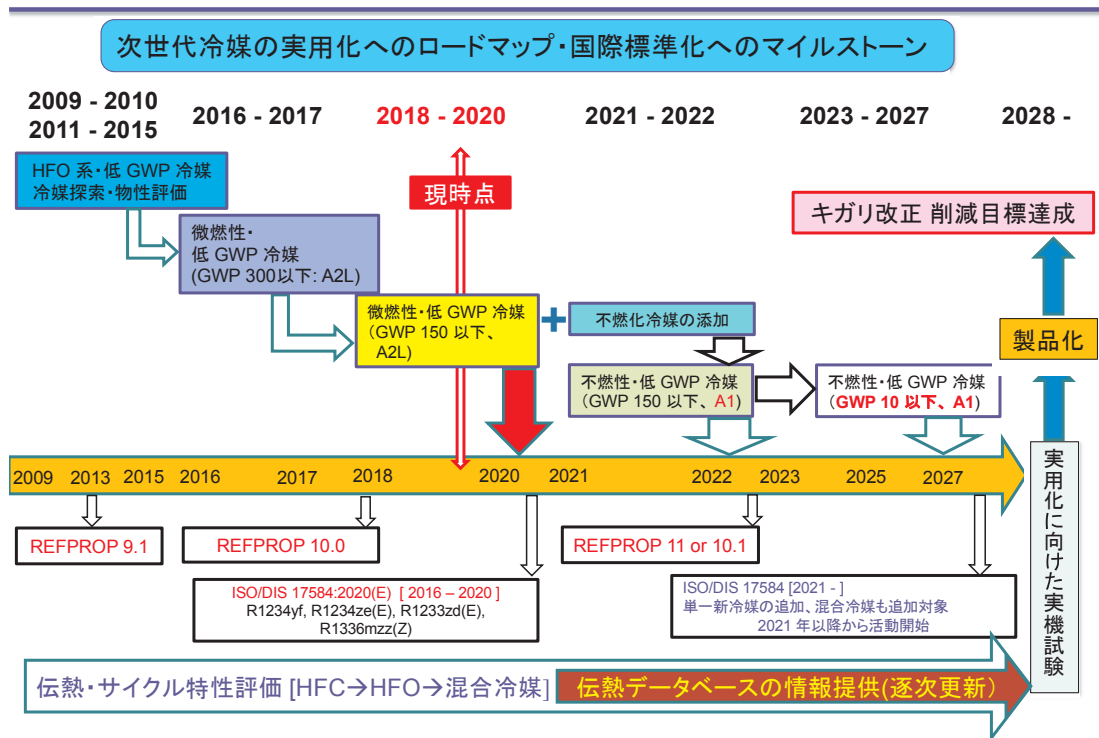


図 1.1.1-1 次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン(基本方針)

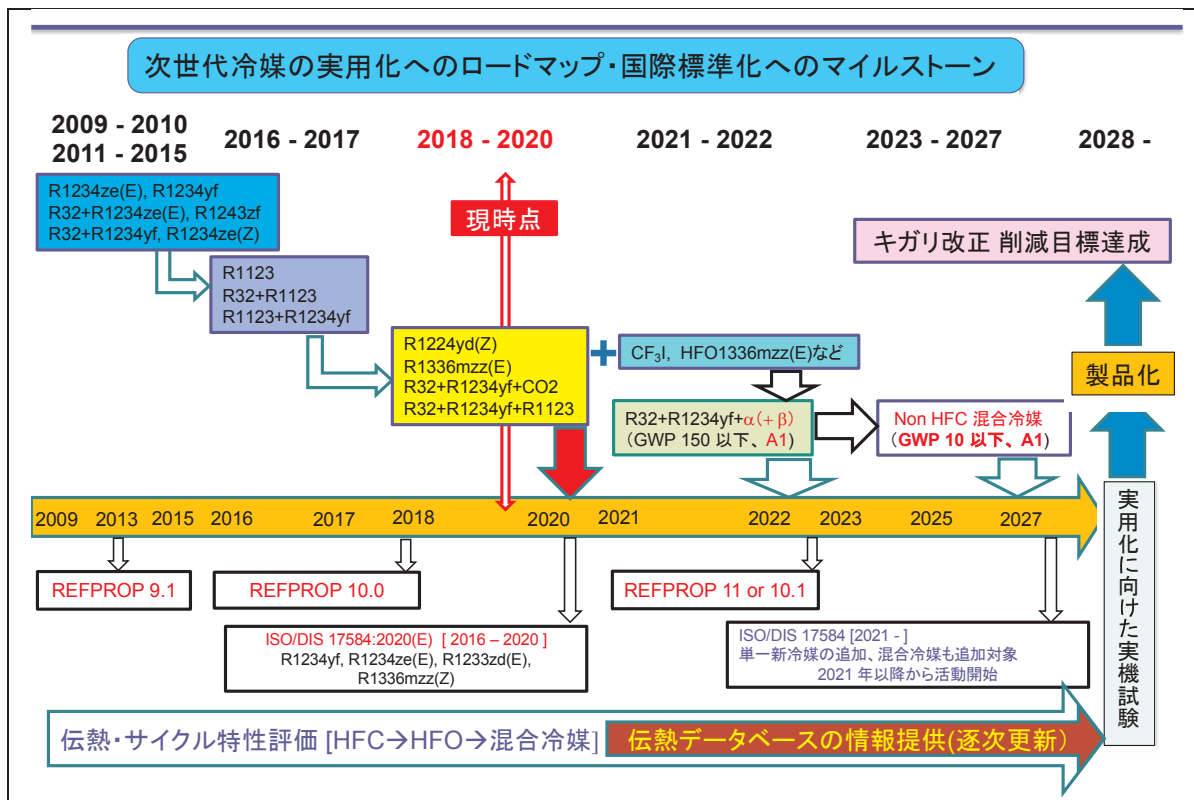


図 1.1.1-2 :次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン
(具体的な冷媒の取り組み)

1.1.2 低GWP低燃焼性混合冷媒の安全性評価【国立研究開発法人産業総合技術研究所】

本研究開発では、低GWP低燃焼性混合冷媒の信頼性の高い燃焼性評価を実施することにより、冷媒メーカーや冷凍空調機器メーカーが、安全性を向上した低GWP冷媒及び機器を迅速に実用化することを支援することを目的としている。その目的のため、本研究開発の成果である混合冷媒の燃焼特性評価データ及び評価方法が、ISO817やANSI/ASHRAE Standard 34等の国際標準、高圧ガス保安法、及びISO817冷媒一覧表等データベース等への利用に供されることを想定している。この成果の反映の取り組みとして、通常半年に1度開催されるASHRAE SSPC34委員会等へ、代表的な混合冷媒の燃焼特性の基準となるデータの提供や、燃焼特性評価方法の見直しとして規格改定に係る提案を主導することにより、その審議に適切に対処していく。

1.1.3 低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発【学校法人早稲田大学】

本研究開発では、大きく5つの項目での実用化を目指している。

- ・ 【解析技術の標準化】
- ・ 【シミュレーターの標準化と国際規格提案】
- ・ 【実運転評価技術の標準化と国際規格提案】
- ・ 【低GWP冷媒データベースの構築】
- ・ 【データベースの国際情報発信】

これらについては、ロードマップを図1.1.3.1に示している。また、国際データベースについては、データを取得するだけでなく、シミュレーションコードや評価装置を用いて解析した各次世代冷媒のサイクル性能や年間性能の解析データや取得した実運転性能データをデータベース化し、すでに次世代冷媒の情報発信基地として構築している「W-Refrigerant.com」上に掲載し、国際的な周知を図っていく。

【解析技術の標準化】

多様な次世代冷媒の省エネ性を実験レベルだけで比較検討することは不可能であるため、数理解析技術を導入することとする。実用機レベルの機器性能を高精度に数理解析するために、まずは、機器を構成する各種デバイスの数理解析モデル、数値解析手法を確立する。すでに比較的簡易な数理解析モデルは構築できているが、低GWP冷媒を導入する際に不可欠となる混合冷媒の最適成分比率や冷媒のスローリーク時の機器性能の変化、さらには最適な冷媒充填量については高精度解析が実現していない。そこで、実験結果を活用しながら、高精度解析を実現する数理解析モデル、数値解析手法を明確化する。冷凍空調技術のシミュレーション技術を総合的に取り扱ったハンドブックはこれまでに世界的に見ても見当たらない。これを学術的な成果として世の中に発信し、冷凍空調技術解析の標準化を目指す。

【シミュレーターの標準化と国際規格提案】

このプロジェクトで開発するシミュレーターは、混合冷媒も含む低GWP冷媒を採用した機器性能の高精度予測が可能となる。また、今回開発する評価手法により、機器性能がより実運転性能に近い形で評価されるため、今後より省エネ性能高い製品開発等につなげられる。さらに、ユーザーが扱いやすいGUIを搭載した熱交換器シミュレーター、システムシミュレーター、年間性能・LCCPシミュレーターによって、デバイスから機器の年間性能までを一貫して、比較的容易に公平・公正な立場から解析が可能となる。これにより、技術者、研究者、さらには、行政関係者等に広く活用されることが期待できる。

本研究開発で開発するシミュレーターは、わが国の標準コードとして国家戦略構築やアカデミックな研究に活用いただくことが主たる目的として、日本冷凍空調工業会のメンバー企業や日本冷凍空調学会、日本機械学会の学会員に公開部分を無償で活用いただく。すでに日冷工ではあるWGの標準解析コードととして活用いただいている。

図 1.1.3.2 に示すように 2018～2020 年度には、シミュレーションに関する研究結果を適宜日冷工側の解析にも反映し、2019/9 日冷工として、高外気温地域向けの A2L ルームエアコンの性能シミュレーションの解析結果を日本冷凍空調学会年次大会で発表している。また、日冷工で、内蔵 SC に A2L 及び A3 冷媒を導入時の性能シミュレーション解析実施し、IEC 60335-2-89 への A2L 冷媒の最大冷媒量緩和（1.2 kg→13×LFL）に繋げるための漏えい解析の解析条件である A2L 冷媒の必要冷媒量を算出。間接的に IEC 規格の緩和に貢献している。

引き続き、2021 年度以降は、シミュレーションに関する研究結果を適宜日冷工側の解析にも反映する。そして、2021/10 には、日冷工が内蔵ショーケースへの A2L・A3 冷媒適用の性能解析結果を神戸シンポにて発表予定である。2021/9・2021/10 には、日冷工として、高外気温地域向けのルームエアコンでの A3 冷媒と A2L 冷媒の性能解析結果の比較を日本冷凍空調学会年次大会及び神戸シンポで発表予定である。このように日冷工が本シミュレーターを活用して、規格提案を進めている。

【実運転評価技術の標準化と国際規格提案】

すでに述べた通り、今後従来の定常データをベースとした機器の年間性能評価から実運転ベースの性能評価方法に大きく変わろうとしている中で、早稲田大学としては、そのような評価手法に対応可能なハイブリッド型性能評価装置を新たに構築する。この評価装置は、このままでは単なる早稲田大学の学生実験用設備となってしまいが、これを我が国で唯一のエアコンの性能検定試験場として検定試験だけでなく、エアコンへの性能保証ラベルの発行も行っている日本冷凍空調研究所（厚木）のサテライトラボとして認定予定である。日本冷凍空調研究所では、複数の国と同一の製品の性能を比較するラウンドロビンテストを実施し、国際的性能検定機関として認知されている。ここに認められた場合には、当然国際的性能評価機関としての一翼を担うこととなる。

【国際データベースの構築と情報発信】

今回の NEDO プロジェクトによってシミュレーターと機器の実運転性能評価装置が開発されたことにより、多様な次世代冷媒を採用した機器の運転性能が測定されとともにシミュレーションが実施され、多くのデータを蓄積することができる。その結果をデータベース化することが可能である。すでに早稲田大学では、次世代冷媒の情報発信基地としての「W-Refrigerant.com」を立ち上げ、次世代冷媒に関連する情報発信を進めている。図 1.1.3.3 に示すようにここに今回の NEDO プロジェクトで収集したデータを掲載し、機器性能のデータベースを構築する。これを世界に向けて発信する。すなわち、自ら国際データベースを構築することにより、状本発信を進める。

もちろん、アカデミックな論文として発信したり、さらにはそれらの継続によって国連等へ発信したりする。これによって、政府のロードマップや規格策定に役立てたり、企業にとってこのようなデータベース作成に貢献することによって、企業の社会的価値創造に役に立てたり、国際的に高性能な機器の普及促進に役立てたりすることを目指す。

図 1.1.3.1 実用化に向けた課題、スケジュール、マイルストーン

	2020	2021	それ以降
数値解析の国際標準化	<p>ドライアウトモデル, ポイド率モデル, 沸騰モデル, AI伝熱モデル, 伝熱実験, ポイド率実験</p> <p>オイル考慮モデル, 冷媒段ごみモデル</p> <p>3次元解析, システム解析定式化, 基礎実験</p>	<p>熱交換器(蒸発器, 凝縮器)モデルの高度化</p> <p>圧縮機モデルの高度化</p> <p>膨張弁モデルの高度化</p> <p>システム解析論完成</p>	<p>2022</p> <p>書籍出版による国際標準化</p>
シミュレータの国際標準化	<p>熱交換器シミュレーター開発</p> <p>東南アジア大学との共同による標準化</p> <p>冷凍サイクルシミュレーター開発</p> <p>LCCPシミュレーター開発</p>	<p>コンソーシアムへの公開による標準化</p> <p>日冷工への公開による国際的発表</p>	
評価装置の国際標準化と試験結果の国際規格提案(次ページ参照)	<p>ハイブリッド評価装置の完成</p> <p>HCショークウェース性能評価</p>	<p>日冷工のサテライトラボ化による国際的標準化</p> <p>バックケージ性能評価(定常・非定常)</p> <p>熱交換器性能評価</p>	<p>2022</p> <p>国際規格への提案</p>
低GWP冷媒のデータベース化		<p>低GWP冷媒定常性能集構築</p> <p>熱交換器最適化性能集構築</p> <p>低GWP冷媒動的性能集構築</p>	
国際データベースの国際情報発信	<p>2019年度 "W.Refrigerant.com" の立ち上げ</p> <p>早稲田大学次世代ヒートポンプ技術戦略研究コンソーシアム立ち上げ</p>	<p>次世代冷媒ドロップイン結果国際データベース公開</p> <p>次世代冷媒最適化結果国際データベース公開</p>	<p>次世代冷媒非定常結果国際データベース公開</p>

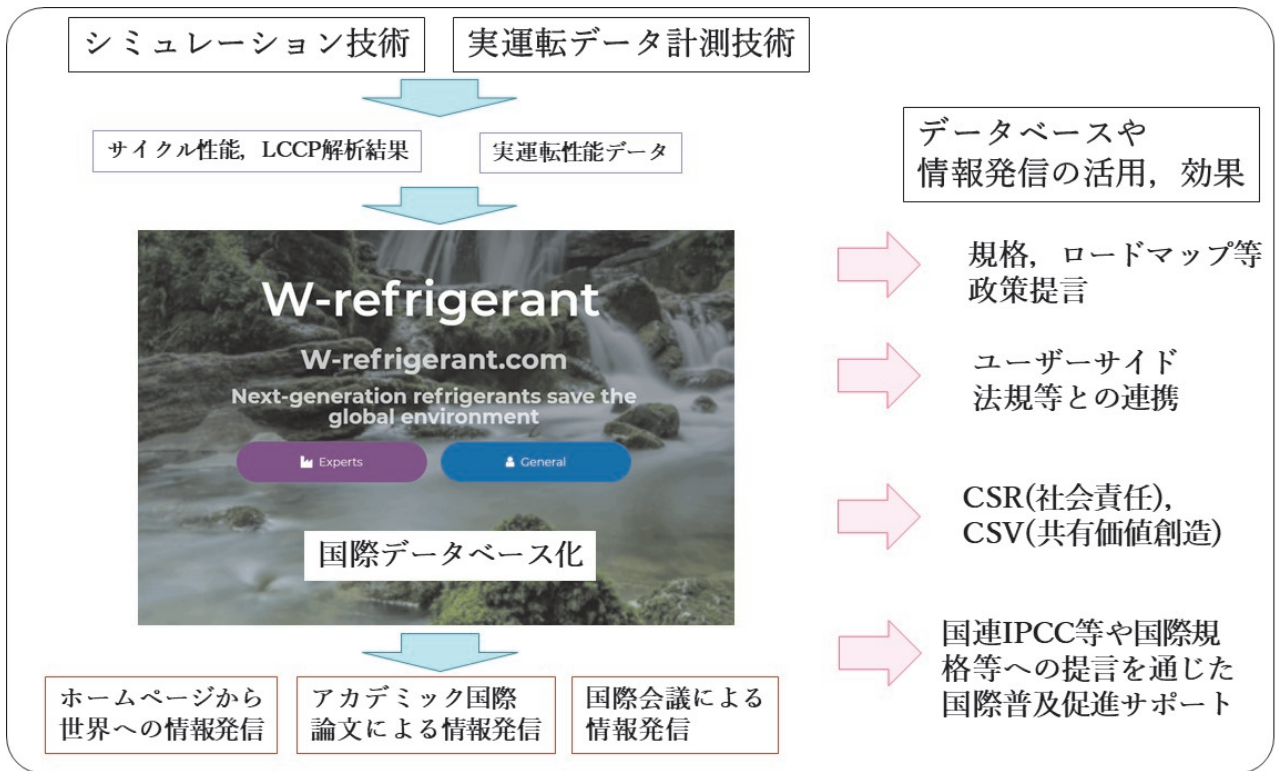


図 1.1.3.3 国際データベースの構築その活用

1.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

1.2.1 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発 【国立大学法人東京大学・公立大学法人公立諏訪東京理科大学・国立研究開発法人産業総合技術研究所】

1.2.1.1 ルームエアコンの国際規格や国内規格への貢献

ルームエアコンに可燃性冷媒を充填するときの国際規格 IEC60335-2-40 を改定するための WG16 は、空調機における A3(強燃性)冷媒の早期安全使用を実現することを目的として設立されたことから、その検討範囲を限定して活動していくことが決められた。本事業での安全性検討が IEC60335-2-40 の改訂に対しての貢献は、下記となる。

(1)充填冷媒量に関するもの(東京大学、産総研)

次期 Edition7.0 にて新規記載される A3 冷媒の許容冷媒充填量の緩和概念の妥当性の検証に貢献している。本事業にて要所を抑え実施された検証により、短期間で妥当なものであると結論づけることができた。

(2)ディーゼル爆発に関するもの(東京大学)

2018 年 6 月に開催された WG16 のブリージュ会議にて、ディーゼル爆発の安全性が検討された。審議を行うのに際し、2018 年 GL 会議で発表された東京大学のディーゼル爆発に関する論文が取り上げられ、爆発に関しては、A3 冷媒の場合は濃度範囲が狭いとの本事業での結果に基づき、その発生確率が小さいと判断され、規定を記載する必要がないとの結論となった。

(3)今後の予定

Edition7.0 は、CDV を発行する段階であるが、幾つかの課題もある。日冷工の規格を含めた国内規格および残課題解決を軸とした国際規格への提案が考えられる。

充填冷媒量に関しては、冷媒量緩和の一手段であるファン攪拌に関する必要風量に関して、今後、本事業の検討結果をベースに整合性のある案が提案できれば、Edition 7.0 以降の国際規格への反映が期待される。

着火源に関しては、Edition7.0 以降では、検討範囲になると考えられる。着火源から除外可能な電気部品の電圧電流条件や負荷条件を整理、理論化することや、高温表面温度の着火性に関して対流要件や放熱メカニズムが整理、理論化できれば、Edition 7.0 以降での反映が可能である。

1.2.1.2 業務用内蔵ショーケースの国際規格や国内規格への貢献

(1)公立諏訪東京理科大学の貢献

2018～2020 年度については、各種着火源の評価及び着火有無判定結果の提示を行い、適宜日冷工のリスクアセスメントに反映された。2021 年度以降は、引き続き、日冷工のリスクアセスメントに反映される予定。

(2)東京大学の貢献

2018～2020 年度については、内蔵ショーケースにおける R290 漏えい測定及び解析での合わせこみ結果の提示し、これは日冷工が兼ねてより主張していた、IEC 60335-2-89 のリーチインショーケースに関する規定の危険性についての検証結果となった。上記を踏まえ日冷工規格の妥当性が検証され、2021 年 1 月発行予定の日冷工規格(JRA 4078・JRA GL-21)に反映された。2021 年度以降は、IEC 60335-2-89 の次期バージョンに提案される予定の R290 最大冷媒量の増量に対する安全性評価に繋げる予定である。

2. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

本事業における「実用化・事業化」の考え方：

実用化とは、現状市販フロン製品と同等以上の性能を実現する技術を確立し、その技術に基づく試作品等の社会的利用（顧客への提供等）が開始されることであり、事業化とは、当該研究開発に係る商品、製品等の販売や利用により、企業活動（売り上げ等）に貢献すること。

2.1 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

2.1.1 自然冷媒および超低 GWP 冷媒を適用した大形クーリングユニットの研究【三菱電機株式会社】

下記の通り、事業化を予定している。

表 2.1-1 事業化のスケジュール

年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度
製品設計	基本技術設計 ならび基礎試験	← 基本技術設計および構造設計 →	フィールドテスト機を想定した工場での検証試験	← フィールドテスト機実施 →		
量産検討 設備投資					← 量産設備検討 → 量産準備	
販売					← 施工対応マニュアル準備 → アフターサービス準備	
収益発生						← 量産および収益発生は → 2024 年度以降

2.1.2 コンデンシングユニットの次世代低 GWP 冷媒対応化技術の開発【東芝キャリア株式会社】

本助成事業において、現行冷媒 R404A より実用上の性能を向上させ、市場に受け入れられるコンデンシングユニットの実用化を目指す。これまでの検討で冷媒特性としては候補冷媒のいずれもが低温側領域で現行冷媒よりも性能低下することがわかった。今後、コストアップをできる限り抑制して性能向上できる施策を見出す予定である。また、燃焼性を有する冷媒の使用については、業界のコンセンサスと施工/サービスなどでの様々な課題への対応が必要である。本事業においては、リスクアセスメントなど安全検討を進め、市場で燃焼性を有する冷媒が受け入れ可能な用途を明確にすることでターゲットを絞り込む予定である。また、HFC 規制の動向に合わせて、冷媒メーカーや業界団体への働きかけを行うとともに、業務用冷凍冷蔵機器利用者や中間業者の認知浸透度やニーズなど、情報収集を図り、必要な啓蒙や対応を検討していく。その上で、環境整備の進行、需要等のタイミングを計って事業化を推進していく。

2.1.3 低温機器における CO₂ 冷媒を使用した省エネ冷凍機システム開発及びその実店舗評価【パナソニック株式会社】

各業界のユーザーの中には、環境保護への対応として、補助金を得ながら、CO₂ 冷媒を使用した冷設機器の導入を推進されているユーザーも多い。一方で、補助金が適用されない範囲では、未だ HFC 冷凍システムが導入されており、CO₂ 冷凍システムの低コスト化が導入促進の鍵となると考えられる。また、HFC 冷凍システムでは成し得ない総合エネルギー効率の高い排熱利用システムの提供により、CO₂ 冷凍機システムの適用範囲拡大に繋がると考えられる。

事業化については、各課題に対する研究開発終了後に順次量産化していく予定である。

2.1.4 GWP10 以下の直膨型空調機用 微燃性冷媒の開発【ダイキン工業株式会社】

GWP10 以下の直膨型空調機の冷媒としては、CO₂ やプロパンが検討されているが、CO₂ は圧力と低臨界温度による機器コストアップ、プロパンには安全性の課題がある。本事業において、開発する次世代冷媒は、CO₂ やプロパンに比べて、現行の R410A、R32 機器に最も近い仕様になり、円滑な普及が期待できる。

グローバルへの展開を図るため、ASHRAE34 規格、ISO817 規格等の取得、新冷媒の成分物質の製造を同時に検討しながら、早期に事業化できるよう準備を進めていく。

3. 波及効果

本研究開発の目標を達成し実用化されれば、国の環境行政に大きく寄与するものである。また我が国の国際的な環境に対する責務を果たすことに大きく寄与する。

さらに、世界に先駆けた次世代冷媒技術の開発は我が国産業の競争力強化につながる。

対象技術毎の波及効果について次に示す。

研究開発項目	対象	技術的波及効果	対象技術分野の国内市場規模※1	対象技術分野の冷媒推計排出量※2	社会的波及効果
①基本特性	HC系冷媒、HFO系冷媒の安全性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・低 GWP 冷媒基礎データの普及による実用化研究開発の促進 ・リスクアセスメントの推進 	—	—	<ul style="list-style-type: none"> ・内外の規格・法規整備の提言(高圧ガス保安法、ISO等)、国際データベース等への登録 ・次世代冷媒適用冷凍空調機器の実用化推進
②安全性・リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> ・低 GWP 冷媒の物性データ取得 ・低 GWP 冷媒の燃焼性評価 ・性能評価シミュレーターの開発 		—	—	
③冷媒・機器開発	低 GWP 冷媒・適用機器開発	<ul style="list-style-type: none"> ・高効率化(圧縮機、熱交換器等)及び他用途(広範囲の冷凍空調機器等)への展開 	・約 8,090 億円	・約 4,090 万 t-CO ₂ ※3	<ul style="list-style-type: none"> ・世界に先駆けた次世代冷媒技術の開発による我が国産業の競争力強化

※1: 「ヒートポンプ 温水・空調市場の現状と将来展望 2017 (株式会社富士経済, 2017)」に基づき、NEDO 環境部で業務用冷凍空調機器及び家庭用空調機器を対象に 2025 年時点の予測値を算出。

※2: 2018 年度の推計排出量。産業構造審議会 製造産業分科会フロン類等対策ワーキンググループ (2020 年 2 月 14 日) 資料より

※3 業務用冷凍空調機器及び家庭用空調機器を対象として算出。

3.1 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価

3.1.1 中小型規模の冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の熱物性、伝熱特性および基本サイクル性能特性の評価研究【国立大学法人九州大学】

本研究開発では、以下の点において実用化に向けての見通しを得ることができ、実用化に向けての取り組みを行った。

- (5) 単一冷媒である HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)に関しては、基本的熱物性である熱力学的性質及び輸送性質を明らかにし、信頼できる熱物性計算が可能となる状態方程式及び相関式を作成した。さらに、これらの冷媒熱物性を、熱物性データベースを NIST の REFPROP 上で計算できるように、FLD ファイルを構築した。この2物質に関しては、実用化に必要となる冷媒評価の情報の提供には見通しが立ったと考えられる。この結果は、REFPROP の次のバージョンアップにおいて、成果的に公開されるべく、NIST とも連携して準備を進めている。本プロジェクトの成果を REFPROP 上で発信することは、日本で開発された HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)の冷媒熱物性値情報が国際標準値として位置付けられることを意味するとともに、本熱物性値が、世界中で共通した製品研究開発に利用されることになり、公開前から利用できる、わが国の冷凍空調機器開発においても、優位性を確保できることになる。
- (6) 現冷媒メーカーから市場に数多く提案されている冷媒の大半は混合冷媒であり、ほとんどが挑戦的な混合冷媒ばかりといっても過言ではない。そのために、新しい混合冷媒の信頼できる熱力学的性質や輸送性質の実験データは、ほとんど皆無な状態であり、冷凍空調機器の研究開発に用いる冷媒物性は、アメリカの NIST が提供している熱物性ソフトウェア REFPROP(最新版が Ver.10.0)を用いるケースが大半である。新たな混合冷媒に関しては、その計算精度(推算精度)は保証されていないのは致し方なく、熱物性計算の精度を向上させるためには、実験的な情報に基づいて、状態方程式や相関式の精度を向上させるしかない。本研究開発で行なった結果は、繊細に行われた測定の結果が大半であり、根拠強く、時間をかけての作業の繰り返しであるが、いずれも高精度で、世界的に評価される情報ばかりである。そのため、今回測定した2種類の3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO₂ (R455A を含む)及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系(Amorea を含む)に関しての冷媒物性の信頼性は高く、冷凍空調機器の研究開発における性能評価の信頼性を保証するものである。
- (7) さらに、現時点の世界状況を見た場合、混合冷媒に限らず単一冷媒においても冷媒熱物性データを高精度で実測できる研究機関は、日本の本グループ以外には、アメリカ、イタリア、フランス、中国の限られたグループしかない。そして、中国以外の研究機関との間には、本プロジェクトを実施している九州大学の NEXT-RP として密接な連携関係を有している。さらに、冷媒開発の主流となるグローバルな冷媒メーカーとも NEXT-RP は連携をとって情報交換を進めているので、新しい冷媒を開発のリアルタイムで入手できるのは、本プロジェクトしかない。この後も、研究開発のスキームを確立した本システムを活用して、新たに対象として考えられる混合冷媒の性能評価を進めていくことで、より幅広い実用化に貢献できると考えられる。
- (8) 図 3.1.1-1 及び図 3.1.1-2 に九州大学が考える、次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーンを示す。冷凍機器性能が良く、GWP 値が比較的小さい HFC32 を許容範囲で活用し、GWP が一般的に小さい HFO 系冷媒を組み合わせるものが、今後の利用が考えられる近未来的に地球温暖化防止対策用となる混合冷媒の主流として考えられる。しかし、近年開発が進んでいる HFO 系冷媒に関しては、市場に流通している冷媒はまだまだ限られている。一歩先に市場流通が進んでいる HFO 系冷媒が HFO1234yf と HFO1234ze(E) であるので、第一段階では HFC32+HFO1234yf 及び HFC32+HFO1234ze(E) の2成分系混合冷媒が、混合冷媒探索の柱となるだろう。この2種類の混合冷媒に関する研究開発は、九州大学と NEDO において、平成 21 年度から平成 22 年度、及び平成 23 年度から平成 27 年度の2つの NEDO プロジェクト内ですでに実施してきた。さらに、平成 28 年度から平成 29 年度では、同じ NEDO のプロジェクトで開発された HFO1123 と HFC32 の混合冷媒に着目し、性能評価を実施した。今回のプロジェクトでは、さらなる延長線上の研究として、中小型規模冷凍空調機器用冷媒としての利用を考えた、HFC32+HFO1234yf 混合冷媒に CO₂ や HFO1123 を添加した3成分系混合冷媒に関して、研究開発の基盤データとなる熱物性評価、伝熱性能評価及びサイクル特性評価を行なったわけであり、本研究開発で得られた成果は、同じ NEDO プロジェクト内の他の研究項目で研究開発を進めているグループや民間企業とも、情報共有を行い、一部は公開前の情報として提供している。信頼できる基盤となる情報を、事前に、リアルタイムで入手できるという体制構築は、機器開発で用いるシミュ

レーションや、機器開発の製品評価に直接つながることであり、実用化にとっては非常に大きな利点であると考えられる。

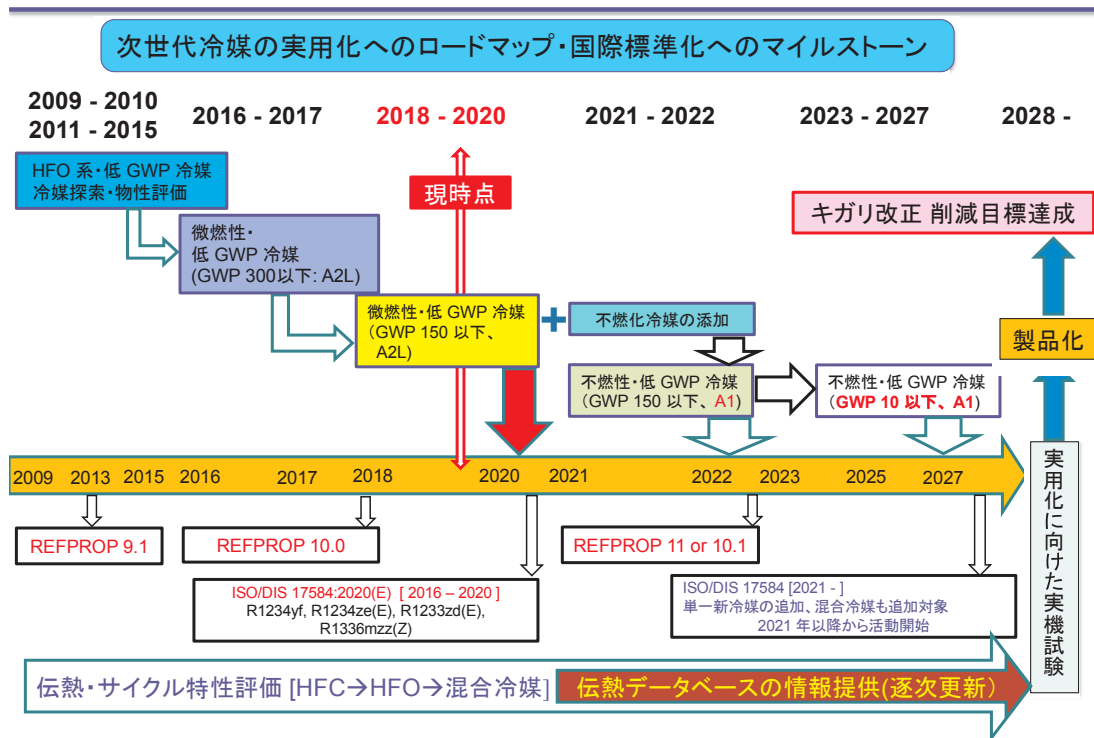


図 3.1.1-1 次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン(基本方針)

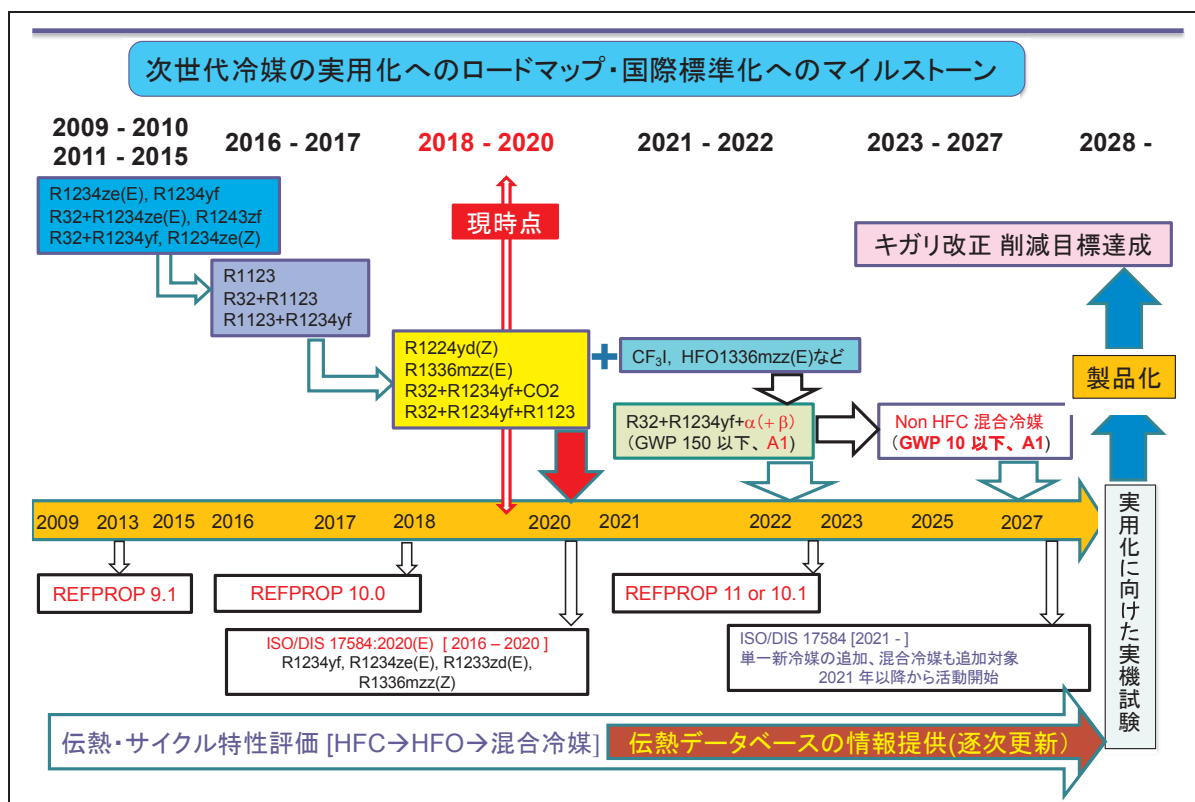


図 3.1.1-2 :次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン
(具体的な冷媒の取り組み)

3.1.2 低GWP低燃焼性混合冷媒の安全性評価【国立研究開発法人産業総合技術研究所】

新冷媒を広く実用化するためには、まず ISO817 や ANSI/ASHRAE Standard34 による新冷媒の登録が必要となる。また、登録された冷媒の燃焼特性データ及び燃焼性等級は、ISO 5149（冷凍システムの安全性及び環境要求）や IEC 60335-2-40（エアコン等の安全要求）に適用されることから、新冷媒の国際規格登録が進まないことは新冷媒及びそれを使用した冷凍空調機器の開発・普及にとって大きな障害となる。逆に、ISO817 において新冷媒が R32 等の微燃性冷媒と同等以下の燃焼性であることが認められれば、過去の微燃性冷媒のリスク評価の結果から、冷凍空調機器の規格や高圧ガス保安法において自動的に優遇措置が受けられることが期待される。本研究開発で実施した代表的な混合冷媒の燃焼特性の混合組成依存性やその評価方法が標準化されることにより、新規混合冷媒の研究開発、混合冷媒の規制緩和及び普及の迅速化、及びそれを用いた冷凍空調機器の実用化が期待される。

3.1.3 低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発【学校法人早稲田大学】

本研究成果である、冷凍空調機器の評価手法やシミュレーターは、すでに述べた通り、産業界、学術界でできる限り無償で広く普及させ、日本の冷凍空調技術の発展に貢献するものである。このため、市場規模に対する市場シェアのような考え方をすることは困難であるが（例えばルームエアコンは国内市場で 9 百万台 500,000 百万円規模、世界では 8 千万台 3,000,000 百万円規模）、研究開発期間終了後 5 年以内には、少なくとも国内においては、冷凍空調工業分野における唯一の標準シミュレーターとなることは確実である。

本プロジェクトを実施していることもあり、早稲田大学に 2020 年 4 月よりわが国初のヒートポンプ関連のコンソーシアム「次世代ヒートポンプ技術戦略研究コンソーシアム」を立ち上げることができた。ここには、我が国の主要冷凍空調機器メーカーも参加しており、ここでシミュレーターを標準コード化したり、ハイブリッド実運転性能評価装置により我が国の冷凍空調機器の実運転性能を把握したりすることにより、その運転データをデータベースとして世界に発信することによって日本製品の普及へ大きく貢献できる。

今回開発する手法は、海外においても利用可能なものであるため、東南アジアにおける大学からまず普及促進を図る。現在、わが国のヒートポンプ機器のアジアへの普及戦略を始めており、この際、このシミュレーターもそのまま普及させる予定である。さらに、相手国政府機関との交流も計画しており、ここでもこの活用を強く推進する予定である。これにより、東南アジアにおける標準シミュレーターとなることも目指す。

3.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

3.2.1 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発【国立大学法人東京大学・公立大学法人公立諏訪東京理科大学・国立研究開発法人産業総合技術研究所】

東京大学が分担した研究課題に関しては、本研究開発を通し、炭化水素系冷媒のリスク評価にかかわるデータを提供することができた。こうした成果は、新冷媒の開発・実用化の指標となり、安全性の基準作り、新規混合冷媒の選定、および可燃性冷媒を安全に使用するための機器の構造設計等に大いに役立つものと考えられる。

公立大学法人公立諏訪東京理科大学が分担した研究課題に関しては、1.2.1.2 で記載の通り、本件研究成果は業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器冷媒の低 GWP 化の達成及び世界に先駆けた技術普及をめざした IEC 規格の更新に資すると期待されている。これまでに本研究で実施した、主として電気系着火源及び高温熱面着火源候補の着火性の実験的評価結果は、従来着火能力が不明であった着火源の絞り込みに大きく資しており、この評価手法のさらなる一般化を今後強力に進めていくことで、より幅広い着火シナリオのリスク評価につなげられると期待される。

産業総合技術研究所安全科学研究部門が分担した研究課題に関しては、実規模実験をもとに安全性を確認された機器類が普及することで、被漏洩空間に対して充填量の上限を規制できる機器類への冷媒としてのプロパンの利用が進めば、地球温暖化ガスの放出低減に大きく寄与することができると考えられる。

3.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

3.3.1 自然冷媒および超低 GWP 冷媒を適用した大形クーリングユニットの研究【三菱電機株式会社】

本システムが製品化でき、市場展開された場合の地球温暖化防止効果の試算として機器封入冷媒のCO₂削減量は以下となる。(年間台数 31 台、延長配管 20m)

表 3.3.1-1 実用化時の CO₂ 削減量

	1台当たり			年間(31台当たり)		
	冷媒量kg	CO ₂ -t	削減量 (CO ₂ -t)	冷媒量kg	CO ₂ -t	削減量 (CO ₂ -t)
R404A機	54	212	-	1674	6,562	-
二元サイクルシステム機	49	0.05	212	1519	1.5	6,561

3.3.2 コンデンシングユニットの次世代低 GWP 冷媒対応化技術の開発【東芝キャリア株式会社】

現在、我が国には、キガリ改正に基づく段階的な HFC 使用量の削減が義務付けられている。HFC 使用量は、CO₂ 換算量で評価されるため、業務用冷凍冷蔵機器利用者は、必然的に GWP が低い冷媒への移行が進んでいくとの認識を持ちつつも、規制による最終削減量と現在使用量の差があまりに大きいため、使用冷媒が数回にわたり変化し、機器をたびたび買い替えなければならないとの懸念が、産構審などで表明されており、さらなる転換が必要でない GWP を持つ冷媒の使用が望まれる。それゆえ、本事業で開発される機器は、このことを念頭においた機器であり、コンデンシングユニット市場全体の低 GWP 冷媒への転換を後押しできるものであると考えられる。一般に機器からの CO₂ 排出量は、冷媒の GWP に起因する直接効果と、機器稼働によって消費される電気量に起因する間接効果に振り分けることができるが、本事業は、両方の効果で CO₂ の削減が可能であり、結果、コンデンシングユニット市場全体の大幅な CO₂ 量削減につながるものである。

一方、本事業で得られた技術は、空調分野への適用も可能である。現在、入手可能な混合冷媒は大きな温度勾配を持つものもあり、機器性能へ悪影響を及ぼすため、とりわけ空調分野では、これまで、ほぼ温度勾配のない R22、R410A、R32 が、主要冷媒として選択されてきた。空調機器と冷凍冷蔵機器では、温度勾配に対する機器性能への影響度が異なるため、本事業と同一の冷媒を用いることは困難であるが、温度勾配対応技術は適用可能であり、現状よりも GWP が低い冷媒、すなわち多少の温度勾配を持つ冷媒の使用を実現し、CO₂ 削減の効果を得ることができる。

3.3.3 低温機器における CO₂ 冷媒を使用した省エネ冷凍機システム開発及びその実店舗評価【パナソニック株式会社】

本研究開発により、当社の CO₂ 冷凍機のラインナップ拡充及び機能付加価値のアップ、さらに冷媒規制により市場における CO₂ 冷媒の付加価値がアップすることで、CO₂ 冷凍機の国内市場構成比の拡大(普及)が見込めると考える。また、これに伴い、CO₂ 排出削減効果も期待される。

3.3.4 GWP10 以下の直膨型空調機用 微燃性冷媒の開発【ダイキン工業株式会社】

本事業により GWP 10 以下の微燃性冷媒および高効率な直膨型空調機が開発されれば、国内だけに留まらず、グローバル規模で広く普及することが期待される。

開発中の新冷媒の成分物質を使用した混合冷媒は、混合組成を変えることにより、直膨用空調機器だけでなく幅広い用途に使用することができる。冷凍冷蔵用に使用されている R404A 代替や、カーエアコン冷媒の用途への展開も期待される。

論文リスト(1/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
1	Kondou, C. Koyama, S.	長崎大学 九州大学	Heat Transfer and Pressure Drop of R1123/R32 Flow in Horizontal Microfin Tubes During Condensation and Evaporation	17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Paper no. 164	有	2018,7	①
2	Kondou, C. Matsuzono, T. Higashi, Y.	長崎大学 長崎大学 九州大学	Surface Tension Measurement of Low GWP Refrigerant Mixture HFO-1123/HFC-32 and HFO-1234ze(E)/HFC-32	17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Paper no. 165	有	2018,7	①
3	Righetti, G. Longo, G. A. Zilio, C. Akasaka, R. Mancin, S.	Univ. of Padova Univ. of Padova Univ. of Padova 九州産業大学 Univ. of Padova	R1233zd(E) Flow Boiling inside a 4.3 mm ID Microfin Tube	Int. J. Refrig., 91, 69-79	有	2018,7	①
4	Higashi Y. Sakoda N.	九州大学 九州大学	Measurements of PvT Properties, Saturated Densities, and Critical Parameters for 3,3-Trifluoropropene (HFO1243zf)	J. Chem. Eng. Data, 63, 3818-3822.	有	2018,9	①
5	Akasaka, R. Higashi, Y. Koyama, S.	九州産業大学 九州大学 九州大学	Development of the Equation of State for HCFO-1224yd(Z): Detailed and Extensive Evaluation of the Current Equation and Outlook for a New Equation	1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants	有	2018,9	①
6	Kondou, C. Koyama, S.	長崎大学 九州大学	Evaporation Heat Transfer of HFC-32/HFO-1123 (60/40 mass%) Flow in a Horizontal MmicrofinTube	1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants, Paper no. 1129,	有	2018,9	①
7	Kondou, C. Matsuzono, T. Higashi, Y.	長崎大学 長崎大学 九州大学	Surface Tension Measurement for Low GWP refrigerants HFO-1123 and HCFO-1224yd(Z)	1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants, Paper no. 1126	有	2018,9	①
8	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	Speed of Sound and Dielectric Constant Measurements for a Mixture of HFO-1123 and R-32 in the Gas Phase	Proc. 1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants, 1145, Birmingham, UK, 2018.	有	2018,9	①
9	近藤智恵子 東之弘	長崎大学 九州大学	低GWP混合冷媒R32/R1234yf および R744/R32/R1234yfの表面張力測定	第88回マリンエンジニアリング学術講演会, no.207	無	2018,10	①
10	Miyara, A. Alam, Md. J. Yamaguchi, K. Kariya, K.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Development and Validation of Tandem Capillary Tubes Method to Measure Viscosity of Fluids	日本冷凍空調学会論文集, Vol.36, No.1, pp.1-6	有	2019,3	①
11	岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 九州大学	示差毛管上昇法による新規低GWP作動媒体R1336mzz(Z)およびR1336mzz(E)の表面張力測定	第53回空気調和・冷凍連合講演会 no.24	無	2019,4	①
12	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	地球温暖化係数の小さい新規冷媒の音速・誘電率測定	第53回空気調和・冷凍連合講演会講演資料、6、東京、2019.	無	2019,4	①
13	Takezato, K. Senba, S. Thu, K. Miyazaki, T. Takata, N. Higashi, Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Heat Pump Cycle using Refrigerant Mixtures of HFC32 and HFO1234yf	International Conferences on Polygeneration (ICP2019)	有	2019,5	①
14	Miyara, A. Kariya, K.	佐賀大学 佐賀大学	Expanded Study on Heat Pump and Refrigeration Systems for Low GWP Refrigerants	Proceedings of the 5th International Conference on Polygeneration (ICP 2019), pp.17	有	2019,5	①
15	Miyara, A. Kariya, K. Wakasugi, S.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Two Phase Flow and Heat Transfer in a Channel of Plate Heat Exchanger	Proceedings of 10th International Conference on Multiphase Flow, (ICMF 2019), Rio de Janeiro, Brazil	有	2019,5	①
16	Tanaka, K.	日本大学.	Development of the Apparatus for Measuring pvTx Relationships to Obtain VLE data	International Conference on Properties & Phase Equilibria for Process & Product Design 2019	無	2019,5	①

論文リスト(2/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
17	Kyaw T. Takezato K. Senba S. Perera U.C.A Takata N. Higashi Y. Miyazaki T.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Heat Pump Cycle Performance using Low GWP Ternary Mixture of R32, R1234yf and R744	International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019)	有	2019.6	①
18	Righetti G. Akasaka R. Bobbo S. Brown J.S. Fedele L. Higashi Y. Longo G.A. Mancin S. Zillio C.	Univ. of Padova 九州産業大学 CNR-ITC Catholic Univ. America CNR-ITC 九州大学 Univ. of Padova Univ. of Padova Univ. of Padova	Effect of Refrigerant Properties Estimation on the Prediction Capabilities of Well-Established Two-Phase Heat Transfer and Pressure Drop Models for New Refrigerants	37th UIT Heat Transfer Conference	有	2019.6	①
19	Higashi, Y.	九州大学	Thermodynamic Property Measurements of New Refrigerants and Their Mixtures (Invited)	International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019)	無	2019.6	①
20	Hashimoto, M. Otsuka, T. Fukushima, M. Okamoto, H. Hayamizu, H. Ueno, K. Akasaka, R.	AGC AGC AGC AGC AGC AGC 九州産業大学	Development of New Low-GWP Refrigerants-Refrigerant Mixtures Including HFO-1123	Science and Technology for the Built Environment, 25(6), 776-783	有	2019.7	①
21	Sakoda N., Higashi Y.	九州大学 九州大学	Measurements of PvT Properties, Vapor Pressures, Saturated Densities, and Critical Parameters for cis-1-Chloro-2,3,3,3-tetrafluoropropene (R1224yd(Z))	J. Chem. Eng. Data, 64, 3983-3987.	有	2019.8	①
22	Sakoda N. Shiheng J Nakazaki M. Takata Y. Higashi Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Thermodynamic Properties of Binary Mixtures of Trifluoroethene (HFO1123)+2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene(HFO1234yf)	25th IIR International Congress Of Refrigeration (ICR2019)	有	2019.8	①
23	Kondou, C.	長崎大学	Heat Transfer and Pressure Drop of R1123/R32 (40/60 mass%) Flow in Horizontal Microfin Tubes during Condensation and Evaporation	Science and Technology for the Built Environment, 25 (6) 1281-1291	有	2019.8	①
24	Kondou, C. Elabbadi, J. Houriez, C. Masella, M. Higashi, Y., Coquelet, C.	長崎大学 MINES ParisTech MINES ParisTech CEA Saclay 九州大学 MINES ParisTech	Surface Tension Measurement and Modeling Work for New Low GWP Working Fluids	The 25th IIR Int. Cong. Refrig., paper no. 059	無	2019.8	①
25	Akasaka, R. Lemmon, E. W.	九州産業大学 NIST	Fundamental Equations of State for cis-1,3,3,3-Tetrafluoropropene [R-1234ze(Z)] and 3,3,3-Trifluoropropene (R-1243zf)	J. Chem. Eng. Data, 64(11), 4679-4691	有	2019.8	①
26	Kariya, K. Miyara, A.	佐賀大学 佐賀大学	Condensation and Evaporation Heat Transfer Characteristics of Pure and Binary-Mixture HFO Refrigerants Inside a Plate Heat Exchanger	The 25th IIR International Congress of Refrigeration (ICR2019), 1363, Montreal, Canada	有	2019.8	①
27	迫田直也 東之弘	九州大学 九州大学	HFO1336mzz(Z)およびHFC1336mzz(E)の飽和蒸気圧測定	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019.9	①
28	岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 九州大学	HFO系低GWP純冷媒の表面張力測定結果と相関式の評価	2019年度 日本冷凍空調学会年次大会, D141 p. 1-6	無	2019.9	①
29	三ヶ尻 直樹 菊池 省吾 地下 大輔 井上 順広	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	水平扁平多孔管内におけるHFO1336mzz(E)の沸騰熱伝達に関する実験的研究	2019年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, A111 (6pages).	無	2019.9	①
30	Kikuchi, S. Mikajiri, N. Jige, D. Inoue, N.	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	Experiments on Flow Boiling Characteristics of HFO1234yf and HFC32 in a Multiport Tube with Rectangular Minichannels	Proceedings of the 2019 Energy and Refrigerating Air-Conditioning Conference, Paper Number:ERAC2019-IS002 (2019), TAIWAN.	無	2019.10	①

論文リスト(3/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマNo.※
31	Mondal, D. Hori, Y. Kariya, K. Miyara, A.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Measurement of Vapor Viscosity of R1123/R32 Mixture Refrigerant by a Tandem Capillary Tubes Method	The 12th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC2019), Xi'an, China	無	2019,10	①
32	Tanaka, K.	日本大学	PVT Property of HCFO-1224yd(Z)	12th Asian Thermophysical Properties Conference	無	2019,10	①
33	迫田直也 東之弘	九州大学 九州大学	次世代冷媒R1233zd(E)の蒸気圧の測定	第40回日本熱物性シンポジウム	無	2019,10	①
34	不動勇心 中村琢夢 岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 長崎大学 長崎大学 九州大学	低GWP作動流体の三重点測定	第40回日本熱物性シンポジウム	無	2019,10	①
35	菊池 省吾 三ヶ尻 直樹 地下 大輔 井上 順広	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	次世代低GWP冷媒の扁平多孔管内における沸騰熱伝達特性	第89回(平成31年度)マリンエンジニアリング学術講演会, OS2-5, 167-168.	無	2019,10	①
36	田中 勝之	日本大学	HCFO-1224yd(Z)の臨界点におけるPVT測定	第40回日本熱物性シンポジウム	無	2019,10	①
37	沼館拓弥 岩崎俊 城島有基 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 長崎大学 長崎大学 九州大学	示差毛管上昇法による新規低GWP混合冷媒R448Aの表面張力測定	第89回マリンエンジニアリング学術講演会講演会, OS2-8, p. 173-174	無	2019,10	①
38	東之弘	九州大学	キガリ改正の約束を実現するための地球温暖化係数の低い次世代冷媒の開発と熱物性計測	日本法科学技術学会第25回学術集会(基調講演)	無	2019.11	①
39	Thu, K. Takezato, K. Senba, S. Perera, U. A. Takata, N. Miyazaki, T. Higashi, Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	The Exergetic Analysis of a Mechanical Vapour Compression System using a Ternary Mixture (R32/R1234yf/R744) for Low GWP Applications	日本冷凍空調学会年次大会	無	2019,11	①
40	Tanaka, K.	日本大学	Measurements of PVTx Properties for Refrigerant Mixtures R32/R1234yf	The 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference	無	2019,12	①
41	Jige, D. Kikuchi, S. Eda, H. Inoue, N.	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	Flow Boiling in Horizontal Multiport Tube: Development of New Heat Transfer Model for Rectangular Minichannels	International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 144, 118668	有	2019,12	①
42	Miyara, A. Kariya, K.	佐賀大学 佐賀大学	Measurement of Local Heat Transfer Characteristics and Flow Behavior of Two Phase Flow in a Complex Channel	The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC), 2KL14, Maui, Hawaii, USA	無	2019,12	①
43	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	Speed of Sound and Dielectric Constant Measurements for HFO-1335mzz(E) in the Gas Phase	Proc. 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference, 24041, Hawaii, USA, 2019.	有	2019,12	①
44	Tomassetti, S. Perela, U. A. Di Nicola, G. Pierantozzi, M. Higashi, Y. Thu, K.	Marche Polytech. Univ. 九州大学 Marche Polytech. Univ. Marche Polytech. Univ. 九州大学 九州大学	Two-Phase and Vapor Phase Thermophysical Property (pvTz) Measurements of the Difluoromethane + trans-1,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene Binary System	J. Chem. Eng. Data, 65, 1554-1564.	有	2020	①
45	岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 九州大学	新規低GWP純冷媒の表面張力およびパラコールの測定	日本冷凍空調学会論文集, 37(1), 73-80	有	2020,2	①
46	McLinden, M.O. Akasaka, R.	NIST 九州産業大学	Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-hexafluorobutene [R-1336mzz(Z)]: Vapor Pressure, (p, ρ, T) Behavior, and Speed of Sound Measurements and Equation of State	J. Chem. Eng. Data(掲載決定)	有	2020,3	①
47	粥川洋平 迫田直也 赤坂亮	産業技術総合研究所 九州大学 九州産業大学	オレフィン系低GWP冷媒の熱物性に関する研究動向	日本冷凍空調学会論文集, 37(1), 1-44	有	2020,3	①
48	Fedele, L. Bobbo, S. Scattolini, M. Zilio, C. Akasaka, R.	CNR-ITC CNR-ITC CNR-ITC CNR-ITC 九州産業大学	HCFO Refrigerant cis-1-Chloro-2,3,3,3-tetrafluoropropene [R1224yd(Z)]: Experimental Assessment and Correlation of the Liquid Density	Int. J. Refrig.(掲載決定)	有	2020,5	①

論文リスト(4/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
49	Mondal, D. Hori, Y. Kariya, K. Miyara, A. Alam, Md. J.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Measurement of Viscosity of a Binary Mixture of R1123 + R32 Refrigerant by Tandem Capillary Tube Method	International Journal of Thermophysics, Vol.41, No.6(2020.6)	有	2020.6	①
50	東之弘	九州大学	地球温暖化係数の低い新冷媒の熱物性測定と状態方程式の開発	化学工学、84(7)	無	2020.7	①
51	Sakoda, N. Higashi, Y. Akasaka, R.	九州大学 九州大学 九州産業大学	Measurements of Vapor Pressures for trans-1-Chloro-3,3,3-trifluoropropene(R1233zd(E)) and cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-nutene (R1336mzz(Z))	J. Chem. Eng. Data(掲載決定)	有		①
52	Takezato, K. Senba, S. Miyazaki, T. Takata, N. Higashi, Y. Thu, K.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Heat Pump Cycle using Refrigerant Mixtures of HFC32 and HFO1234yf	Heat Transfer Engineering(掲載決定)	有		①
53	Thu, K. Takezato, K. Takata, N. Miyazaki, T. Higashi, Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Performance Evaluation of a Heat Pump System using a Binary Blend of HFC32 and HFO1234yf with GWP below 150	Applied Thermal Engineering(査読中)	有		①
54	三好克弥 Mondal, D. Tuhin, A. R. 仮屋圭史 宮良明男	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	HFO冷媒R1336mzz(E)の熱伝導率測定	2020年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、講演申し込み	無		①
55	Tun, T. Yoshida, K. Kariya, K. Miyara, A.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Simulation Aided Measurement of Local Heat Transfer Coefficient of Plate Heat Exchanger	The10th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, Hangzhou China	有		①
56	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	Dipole Moment and Heat Capacity in the Ideal Gas State Derived from Relative Permittivity and Speed of Sound Measurements for HFO-1123 and HCFO-1224yd(Z)	Int. J. Refrig.(査読中)	有		①
57	Akasaka, R. Higashi, Y. Sakoda, N. Fukuda, S. Lemmon, E. W.	九州産業大学 九州大学 九州大学 九州産業大学 NIST	Thermodynamic Properties of Trifluoroethene (HFO1123): (p, ρ, T) Behavior and Fundamental Equation of State	Int. J. Refrig.(掲載決定)	有		①
58	Miyamoto, H. Saito, T. Sakoda, N. Perera, U. A. Ishi, T. Thu, K. Higashi, Y.	富山県立大学 富山県立大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Measurement of the Vapor-Liquid Equilibrium Properties of the Binary Low GWP Refrigerant R32/R1123	Int. J. Refrig.(掲載決定)	有		①
59	三ヶ尻 直樹 菊池 省吾 地下 大輔 井上 順広	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	扁平多孔管内における3成分混合冷媒R455Aの凝縮熱伝達に関する実験	2020年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、講演申し込み	無		①
60	滝澤賢二、五十嵐直治、徳橋和明、近藤重雄	産業技術総合研究所	On simple method for predicting burning velocities for lower flammability refrigerants using quenching distance measurement	International Journal of Refrigeration	有	2020	②
61	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Theoretical Formulation of Two-phase Flow Distribution in Microchannel Heat Exchangers using Electric Circuit Analogy	International Workshop on Environmental Engineering 2019	有	2019, 6	③
62	Seiichi YAMAGUCHI	早稲田大学	Development of finned-tube heat exchanger simulator for heat pumps	International Workshop on Environmental Engineering 2019	有	2019, 6	③
63	宮岡洋一	早稲田大学	低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発-一次世代低GWP冷媒のサイクル性能評価研究の概要と2018年度の取り組み-	2019年日本冷凍空調学会年次大会D132	無	2019, 10	③

論文リスト(5/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
64	榎木光治	電気通信大学	膨張弁における混合冷媒流れの数値解析)	2019年日本冷凍空調学会年次大会D133	無	2019, 10	③
65	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Numerical Simulation of Finned-Tube Heat Exchangers with Arbitrary Connectivity and Flexible Set of Input Conditions	The Fifth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems, IMPRES2019	有	2019, 10	③
66	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Semi-Theoretical Formulation of Annular Flow Void-Fraction	IMAT 2019: The 11th International Meeting on Advances in Thermofluids	有	2019, 11	③
67	榎木光治	電気通信大学	AI技術の活用事例 ～管内沸騰熱伝達率の整理～	西日本地区技術セミナー 日本冷凍空調学会主催	無 (招待)	2020, 2	③
68	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Prediction of two-phase flow distribution in microchannel heat exchangers using artificial neural network	International Journal of Refrigeration Volume 111 March 2020, P 53-62	有	2020, 5	③
69	榎木光治	電気通信大学	相変化熱伝達予測への人工知能の適用について ～人工知能の基礎と特性を理解した上での利用方法～	第6.5回相変化界面研究会 日本機械学会主催	無 (招待)	2020, 5	③
70	湊明彦	電気通信大学	次世代空調細管の二相流数値解析	2020年度混相流シンポジウム	無	2020, 8	③
71	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Formulation of steady-state void fraction through the principle of minimum entropy production	JSME Journal of Thermal Science and Technology	有	2020, 8	③
72	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Semithoretical formulation of annular flow void fraction using the principle of minimum entropy production	International Journal of Thermal Sciences, Elsevier	有	2020, 8	③
73	和田 瑛里花	早稲田大学	低GWP冷媒の実用化に向けたシミュレーションによる圧縮機の性能評価第1報:漏れと熱伝達を考慮したスクロール圧縮機モデル	2020年日本冷凍空調学会年次大会A131	無	2020, 9	③
74	荻原 拓視	早稲田大学	低GWP冷媒をドロッパイン冷媒としたR410A用ルームエアコンの冷房運転及び暖房運転における	2020年日本冷凍空調学会年次大会B343	無	2020, 9	③
75	松井 隼	早稲田大学	蒸気圧縮式ヒートポンプの非定常特性の解明と制御検討	2020年日本冷凍空調学会年次大会B344	無	2020, 9	③
76	宮岡 洋一	早稲田大学	低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する 研究開発第2報:2019年度の取り組みと成果	2020年日本冷凍空調学会年次大会A321	無	2020, 9	③
77	鄭 宗秀	早稲田大学	低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する 研究開発第3報:シミュレーター開発	2020年日本冷凍空調学会年次大会A322	無	2020, 9	③
78	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	ADVANCES IN NUMERICAL SIMULATION OF FINNED-TUBE HEAT EXCHANGERS WITH ARBITRARY TUBE CONNECTIVITY	ISTP31, Honolulu (USA)	有	2020, 10	③
79	和田 瑛里花	早稲田大学	Evaluating Compressor Performance by Simulation for practical use of low-GWP refrigerants	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
80	荻原 拓視	早稲田大学	Performance Evaluation in Cooling Operation and Heating Operation of Low GWP Refrigerant as a Drop-in Replacement for R 410A in Room Air Conditioner	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
81	松井 隼	早稲田大学	Study on Unsteady-state Characteristics and consideration of control of Vapor Compression Heat Pumps	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
82	宮岡 洋一	早稲田大学	Construction of a hybrid type air conditioner performance evaluation equipment under actual use conditions	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③

論文リスト(6/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
83	鄭 宗秀	早稲田大学	Development of a practical evaluation simulator for low GWP refrigerants	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
84	榎本光治	電気通信大学	The characteristics of the local heat transfer on surface property changes of low GWP mixing-refrigerants.	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
85	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	A variational formulation of minimum entropy production principle for dissipative two-phase flows	Entropy 2021: The Scientific Tool of the 21st Century	有	2021, 5	③
86	Makoto Ito, Naoya Kurokawa, Chaobin Dang, Eiji Hihara	University of Tokyo	Disproportionation Reaction of HFO-1123 Refrigerant	International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 9-12, July, 2018, Purdue University, USA	有	2018, 7	④
87	Tomohiro HIGASHI, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yuji SHITARA	University of Tokyo	Combustion suppression effect of additives for lubricating oil during Diesel explosion at pump-down of air conditioner	25th IIR International Congress of Refrigeration	有	2019, 8	④
88	Makoto Ito, Zhihua Zhang, Chaobin Dang, Eiji Hihara	University of Tokyo	Disproportionation Reaction of HFO-1123 Refrigerant	25th IIR International Congress of Refrigeration	有	2019, 8	④
89	芦原 直也, 伊藤 誠, 党 超鋌, 飛原 英治	東京大学	次世代冷媒の空調機から室内への漏洩に関する研究	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019, 9	④
90	斎藤 静雄, 東 朋 寛, 党 超鋌, 飛原 英治	東京大学	エアコンポンプダウン時の圧縮機のディーゼル燃焼特性に関する潤滑油添加剤の影響	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019, 9	④
91	張 之華, 伊藤 誠, 党 超鋌, 飛原 英治	東京大学	HFO-1123 の不均化反応の解明及び反応抑制剤の評価	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019, 9	④
92	Makoto ITO, Naoya ASHIHARA, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yu CHEN	University of Tokyo	Numerical Simulation of Strongly Flammable Refrigerant Leakage from a Split Air Conditioner	14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants	有	2020, 12 発表予定	④
93	Shizuo SAITOH, Tomohiro HIGASHI, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yu CHEN, Yuji	University of Tokyo	Effect of lubricating oil additives on compressor explosion accident in pump-down operation of an air conditioner	14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants	有	2020, 12 発表予定	④
94	張 之華, 伊藤 誠, 党 超鋌, 飛原 英治, 陳 昱	東京大学	HFO-1123の不均化反応の反応抑制剤の評価	2020年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2020, 9 発表予定	④
95	Shizuo SAITOH, Tomohiro HIGASHI, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yu CHEN, Yuji	University of Tokyo	Effect of additive concentration on diesel combustion in pump-down operation of an air conditioner	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
96	Naoya Ashihara, Makoto Ito, Chaobin Dang, Yu Chen, Eiji Hihara	University of Tokyo	Safety study on leakage of strongly flammable refrigerant from a split household air conditioner	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
97	Naoya Ashihara, Makoto Ito, Chaobin Dang, Yu Chen, Eiji Hihara	University of Tokyo	Safety study on leakage of strongly flammable refrigerant from a commercial refrigeration display case	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
98	Zhihua Zhang, Makoto Ito, Chaobin Dang, Yu Chen, Eiji Hihara	University of Tokyo	Suppression of disproportionation reaction of HFO-1123 by adding inhibitor	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
99	Mitsuhiro Fukuta, Hideyuki Fujimoto, Masaaki Motozawa	Shizuoka University	Study on layer short mechanism and discharge pattern in refrigerant compressor for refrigerants with disproportionation reaction like HFO-1123	13th IEA Heat Pump Conference	有	2021.4 発表予定	④

論文リスト(7/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマNo.※
100	今村友彦, 上原航祐, 中田啓太, 丸山将也, 桑名一徳	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	Quasi-Steady Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heated Surface	Fire Safety Journal (in Press, Available Online)	有	2020,5	④
101	今村友彦, 上原航祐, 中田啓太, 丸山将也, 桑名一徳	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	Quasi-Steady Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heated Surface	Proceedings of 13th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS2020)	有	2021,4	④
102	今村友彦, 青木幹尚, 春山智成	公立諏訪東京理科大学	コンセントプラグの抜き差しによる滞留プロパンの着火性状	第52回安全工学研究発表会予稿集, pp.173-176	無	2019,11	④
103	中澤誠人, 苅谷優行, 下村蓮, 桑名一徳, 今村友彦	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	高温表面による流動プロパンの着火特性	第57回燃焼シンポジウム, (ダウンロード配布)	無	2019,11	④
104	今村友彦, 白旗恭平, 成澤弘明	公立諏訪東京理科大学	電気部品による次世代家庭用空調機冷媒の着火性評価	2019年度日本冷凍空調学会年次大会, (USB配布)	無	2019,9	④
105	今村友彦, 白旗恭平, 成澤弘明	公立諏訪東京理科大学	家庭用空調機器へのプロパン冷媒搭載を想定した一般家電の着火リスク評価	安全工学シンポジウム2019, pp.356-359	無	2019,9	④
106	今村友彦, 白旗恭平, 成澤弘明, 山本宗一郎, 上矢恭子	公立諏訪東京理科大学	Manuscript-Experimental Evaluation on Ignition Possibility of Propane by Operation of Wall Switch	日本冷凍空調学会論文集	有	(2020) 発表準備中	④
107	今村友彦, 中澤誠人, 桑名一徳	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	Transient Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heating Surface	Fire Safety Journal	有	(2020) 発表準備中	④

※テーマNo.

- ①: 中小型規模の冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の熱物性、伝熱特性および基本サイクル性能特性の評価研究【九州大学】
- ②: 低GWP低燃焼性混合冷媒の安全性評価【産業技術総合研究所(機能化学)】
- ③: 低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発【早稲田大学】
- ④: 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発【東京大学・産業技術総合研究所(安全科学)・諏訪東京理科大学】
- ⑤: 自然冷媒および超低GWP冷媒を適用した大形クーリングユニットの研究【三菱電機】
- ⑥: コンデンシングユニットの次世代低GWP冷媒対応化技術の開発【東芝】
- ⑦: 低温機器におけるCO2冷媒を使用した省エネ冷凍機システム開発及びその実店舗評価【パナソニック】
- ⑧: GWP11以下の直膨型空調機器用 微燃性冷媒の開発【ダイキン工業】

「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」

基本計画

環境部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

①政策的な重要性

特定フロン（CFC、HCFC）等のオゾン層破壊物質は、オゾン層保護の観点から、モントリオール議定書により生産の段階的な廃止が義務付けられている。この特定フロンの代替として開発され、オゾン層破壊のおそれがない代替フロン等4ガス（HFC、PFC、SF₆、NF₃）は、その優れた特性から、冷媒（冷凍・冷蔵庫、空調機器、自動車エアコン等）、発泡剤、洗浄剤、絶縁材等として利用されており、特定フロンからの転換が進むにつれ、これらの使用量・排出量が増加しつつある。一方で、代替フロン等4ガスは、大気中に長期間に亘って安定に存在し、かつ極めて高い温室効果を有する化合物であることから、京都議定書及びパリ協定において排出削減対象ガスに指定され、排出削減のための対策が進められているところである。また、機器使用中・廃棄時の冷媒の漏れを完全にゼロにすることは極めて困難であるため、排出量削減の根本的な対策としては、地球温暖化への影響が極めて少ない冷媒（以下「次世代冷媒」という。）への転換が有効であると考えられている。特に、代替フロン（HFC）が使用されている冷凍空調機器は、一旦市場に出荷されれば十数年にわたり排出源として温暖化に悪影響を及ぼすため、一刻も早く冷媒転換技術を開発し、市場投入を図ることが不可欠である。

さらに、HFCについては、従来はオゾン層保護を目的とするモントリオール議定書の規制対象外であったが、2016年10月ルワンダの首都キガリにおいて開催されたモントリオール議定書第28回締約国会合（MOP28）において、新たにHFCの生産及び消費量の段階的削減義務を定める旨のモントリオール議定書の改正（以下「キガリ改正」という。）が採択された。本改正で先進国は、HFC生産・消費量を2011-2013年の平均数量から最終的には2036年までに85%を段階的に削減する目標が定められており、既存冷媒物質の継続使用ではこの目標を達成できないことが予想されている。このことから、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器の早期開発が必須の状況となっている。

②我が国の動向

我が国は、京都議定書に対する目標達成計画において、第1約束期間中（2008年～2012年）に代替フロン等の大幅な排出抑制に努め、温室効果がより小さい代替物質の開発・普及と設備等の導入を推進してきた。また、2016年11月に発効したパリ協定における我が国の温室効果ガス排出削減目標では、代替フロン等4ガス排出量を2013年に比べ、2030年までに約25%削減すること（HFCについては約32%削減）としており、今後、更なる長期的・継続的な排出削減対策の実施が求められている。

この対策の一つとして、2015年4月に「フロン排出抑制法」が施行され、この中で冷凍空調関連分野の5区分の製品を指定製品として、地球温暖化係数（GWP[※]）の目標値と目標年度を設定し、HFCを含むフロン類の排出量削減対策を促進している。また、同法においては、我が国におけるフロン対策に関する研究開発の推進が謳われている。

こうした状況の中、これまで、冷凍空調分野に対しては「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」事業（2011～2015年度）において、大型である業務用空調機器分野等を対象として冷媒転換の技術開発を行った。また、「高効率低GWP冷媒を使用した中小型空調機器技術の開発」事業（2016～2017年度）では、家庭用空調機器を対象として、高効率を実現しつつ低温室効果冷媒及び適用空調機器の基盤要素技術開発を実施した。

さらに、2019年1月のキガリ改正発効によるHFCの生産量・消費量の削減義務の履行を国内で担保するため、HFCの製造及び輸入を規制する等の措置を講じた「オゾン層保護法」が改正、公布されている。本法では、HFCの生産量・消費量の限度を定めて段階的削減を推進していくとしている。また、法運用において、HFC削減に寄与する画期的な低GWP冷媒の製造等に対するインセンティブの付与や次世代冷媒を活用した機器の開発・導入を促すこととされている。

※ GWP:地球温暖化係数（Global Warming Potential）の略。CO₂の温室効果の大きさを基準（1.0）として、同量・同期間における温室効果の大きさを相対比較した値。

③世界の動向

欧州では、2006年に、HFC、PFC、SF₆、NF₃といったフッ素を含むガスの排出抑制を目的とするF-gas規制が欧州議会において制定された。さらに、2030年までにF-gasの漏えいを現状の2/3のレベルにまで減らすこと及び環境に優しい冷媒が開発された分野ではF-gasを使用する機器の販売を禁止することを目標に、欧州で販売されるHFCの年間総量（各冷媒の販売量にGWPを掛けて総和をとった等価CO₂量）を2030年には現状の1/5にまで削減することを加えた改正F-gas規制が2014年に発効されている。

米国では、オゾン層や地球温暖化への影響、可燃性、有毒性の観点から、オゾン破壊物質からの代替物質を評価するSNAPプログラム（Significant New Alternatives Policy Program）において、代替物質として使用可能なものをリスト化しているが、このリストにはHFC冷媒の一部を登録しておらず、実質的に使用禁止とされている。

さらに、2016年10月のキガリ改正においては、新たにHFCの生産及び消費量の段階的削減義務が定められ、先進国及び開発途上国を問わず、HFCの生産及び消費削減スケジュールについて対応を迫られている状況にある。

こうした世界的なHFC削減意識の高まりの一方で、現在の次世代冷媒候補は、いずれも従来のHFC冷媒適用機器と同等の機器性能を維持、あるいはそれ以上の性能とするための技術的ハードルが高く、さらに安全性においても課題（燃焼性、化学的不安定性等）があることから、世界的に次世代冷媒適用冷凍空調機器は実用化に至っていない。これは、次世代冷媒の基本特性評価及び次世代冷媒使用時の安全性評価・リスク評価の標準的な評価手法が確立していないことが大きな原因の一つである。

④本事業のねらい

世界的な次世代冷媒への転換意識の高まりの中、キガリ改正の結果、先進国は、2036年までにHFCの生産及び消費量を段階的に85%削減する目標が示された。我が国においては、現在、フロン排出抑制法で定められている目標GWP値を達成できる冷媒であっても、この目標を達成するのは困難と考えられる。

そのため、これまでより一層GWPの低い次世代冷媒への転換が急務であるが、次世代冷媒の基本特性評価及び次世代冷媒使用時の安全性評価・リスク評価の評価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。

冷凍機器のうち、家庭用冷凍冷蔵庫においては既に強燃性冷媒の安全性評価が十分に行われ、低GWP冷媒への転換が進んでいるが、業務用小型冷凍冷蔵庫等に対しては、次世代冷媒候補の使用に必要な安全対策の技術開発や安全性・リスク評価手法が確立していないことから、依然としてHFC冷媒が使用されている。また、空調機器の中でも、家庭用空調機器は市中冷媒ストック量がきわめて多く、大気中への漏えい源としても影響が大きい。

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、業務用冷凍冷蔵庫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研究開発を実施する。

さらに、新たな技術が普及する期間を考慮すると、キガリ改正の目標達成のためには、次世代冷媒の適用が一部ではなされているものの普及に至っていない領域に対し、新しいシーズ技術を踏まえた幅広い対策を実施し、多方面から可能な限り迅速な普及を後押しする技術開発を行うことが重要である。普及を妨げる技術課題に対して技術開発を進め、効率の向上・適用範囲の拡大を通して普及を促進していくことが必要不可欠であることから、次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発を実施する。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

【中間目標】

- 1) 冷凍空調機器性能と省エネ性を両立しうる次世代冷媒候補について、基本物性データ（熱物性、伝熱特性等）の取得及び評価（漏洩時挙動評価、フィジカルハザード評価等）を実施し、安全性・リスク評価手法確立に向けた目途付けを行う。
- 2) 産官学の外部有識者との検討を踏まえつつ、本事業で得られた次世代冷媒の安全性評価手法に関する成果を、次世代冷媒を普及させるために必要な業界の実用的な安全基準や、国際規格化・国際標準化、及び国際データベース等^{*}への登録に効果的に結び付けるためのロードマップを策定する。

※ 次世代冷媒の社会実装に必要な国際規格、国際標準としては ISO5149（機器）、ISO817（冷媒物性）、IEC60335-2-40（空調）、IEC60335-2-89（冷凍冷蔵）、ASHRAE34（冷媒物性）、ASHRAE15（機器）が想定される。また、国際データベースでは、NIST（アメリカ国立標準技術研究所）が作成する冷媒熱物性データベースソフトウェア；REFPROP が想定される。

- 3) 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発において、現状市販フロン品と同等以上の性能（COP、APF 等^{*}）を実現する技術について、個別テーマごとに目標を定め、これを達成する見通しを得る。

※ COP:成績係数（Coefficient Of Performance）の略。冷暖房器具のエネルギー消費効率を示す係数で、消費電力 1kW に対しての機器の冷却能力、暖房（加熱）能力を表したものの。

APF: 通年エネルギー消費効率 (Annual Performance Factor) の略。1年を通して、ある一定条件のもとにエアコンを使用した時の消費電力 1kW あたりの冷房・暖房能力を表したものの。

【最終目標】

- 1) 中間評価結果を踏まえ、冷凍空調機器性能と省エネ性を両立しうる、次世代冷媒候補について、基本物性データの取得及び評価を実施し、安全性・リスク評価手法を確立する。
- 2) 次世代冷媒使用にあたっての実用的な安全基準（業界規格等）の策定に資するデータや評価結果を提供する。
- 3) 次世代冷媒の基本物性データ及び安全性・リスク評価手法等について、国際規格・国際標準への提案を1件以上、及び国際データベース等への登録申請を1件以上行う。
- 4) 中間評価結果を踏まえ、次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発において、現状市販フロン品と同等以上の性能(COP、APF等)を実現する技術について、個別テーマごとに目標を定め、これを達成する。

なお、中間目標、最終目標等については、研究開発費の確保状況、研究開発の進捗状況、産業への波及効果等を総合的に勘案し、適宜見直しを行う。

②アウトカム目標

- 1) 次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器の特性データや安全性・リスク評価手法を、次世代冷媒を普及させるために必要な国際規格化・国際標準化及び国際データベース等への登録を行う。
- 2) 本事業による開発成果を踏まえ、次世代冷媒を適用して、現状市販されているフロン冷媒適用機器と同等以上の性能を有し、かつ年間消費電力量で現行機器より10%の省エネを達成する機器の開発に貢献する。その後、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器が、2026年を目途に製品化し、2029年を目途に国内普及することによって、モントリオール議定書キガリ改正における日本のHFC生産・消費量削減目標（2029年までに70%削減、2036年までに85%削減）及びパリ協定における日本のHFC排出削減目標（約10百万t-CO₂、2030年までに2013年比で約32%の削減）の達成に貢献する。

- 3) 途上国におけるキガリ改正の削減義務が厳しくなる 2040 年代（2047 年までに 85%削減）に、日本発の技術が普及することによって、途上国の HFC 削減目標達成に貢献する。

③アウトカム目標達成に向けての取り組み

本事業では、国内審議団体、業界団体及び企業の標準化関係者との積極的かつ緊密な情報・意見交換の場を設けたうえで、ロードマップを策定し、次世代冷媒の特性データの国際データベースへの登録や、開発した次世代冷媒の安全性・リスク評価手法を国際規格化・国際標準化に結びつける。

上記の取り組みの結果、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器の実用化に大きく貢献することとなり、現在市販されている冷凍空調機器と同等の安全性が担保された次世代冷媒適用冷凍空調製品が国内に普及し、我が国のパリ協定及びモントリオール議定書のキガリ改正の目標達成に寄与する。また、現在市販されている冷凍空調機器と同等の安全性を担保した国際標準等を満たした次世代冷媒適用冷凍空調機器が、世界市場に普及することに繋がる。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために以下の研究開発項目について、別紙 1 の研究開発計画及び別紙 2 の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施する。

【委託事業】

研究開発項目①次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価

研究開発項目②次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

上記研究開発項目は、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器の安全性評価手法の確立を目的としており、我が国の冷凍空調産業界全体にとって高い共通基盤性を有する研究であり、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うことが見込めない「公共財の研究開発」事業として、委託事業を実施する。

【助成事業（助成率：1/2）】

研究開発項目③次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

上記研究開発項目は、既に民間企業等が主要な技術やノウハウ等を所有している技術について、ユーザーサイドのニーズをくみ取ることにより開発終了後の事業化計画を明確にして、実用化及び普及化の研究を行う。本開発終了後、数年以内に製品化を

想定できるものを対象とする。これらは、助成事業（助成率：1/2）として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、プロジェクトマネージャー（以下「PM」という。）にNEDO環境部 阿部 正道を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理を実施させる。また、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果の最大化を推進させる。

NEDOは公募により研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは独立行政法人大学改革支援・学位授与機構研究開発部特任教授 飛原 英治氏を研究開発責任者（プロジェクトリーダー（以下「PL」という。））、早稲田大学総合領域研究機構熱エネルギー変換工学・数学融合研究所 所長 齋藤 潔氏を副研究開発責任者（サブプロジェクトリーダー（以下「SPL」という。））とし、各実施者はPLの下で研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

① 研究開発の進捗把握・管理

PMは、PL・SPLや研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

具体的には、四半期に一回程度 PL・SPL等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受け、必要に応じて、NEDOに設置する技術検討委員会等を開催し、外部有識者の意見を参考として、選択と集中により優秀な技術を短期間に育成するマネジメント

トを行う（例えば、成果が得られた時点で、標準化事業など次ステップへの転出を奨励する。反面、期間内に成果が見込めないと判断された事業は研究開発途中であっても中止するなど。）

②技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査の効率化の観点から、必要に応じて本プロジェクトにおける委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成30年度から平成34年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。

評価の時期は、中間評価を平成32年度、事後評価を平成35年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直しするものとする。

また、中間評価を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

5. その他重要事項

(1) 研究開発成果の取り扱い

① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

② 標準化施策等との連携

得られた研究開発の成果については、データベースへのデータの提供、規格・標準の提案等に積極的に活用する*と共に、内容を公開し国内外の基準（標準）形成に資することとする。

※ 次世代冷媒の社会実装に必要な国際規格、国際標準としてはIS05149（機器）、IS0817（冷媒物性）、IEC60335-2-40（空調）、IEC60335-2-89（冷凍冷蔵）、ASHRAE34（冷媒物性）、ASHRAE15（機器）が想定される。また、国際データベースでは、NIST（アメリカ国立標準技術研究所）が作成する冷媒熱物性データベースソフトウェア；REFPROPが想定される。

③ 知的財産権の帰属、管理等取扱い

研究開発委託事業の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。なお、基盤技術の研究開発段階から、事業化を見据えた知財戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

④ 知財マネジメントに係る運用

本事業は、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」適用対象とする（研究開発項目①、②のみ）。

（2）プロジェクト基本計画の見直し

PMは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

（3）根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1号二、第3号及び第9号に基づき実施する。

（4）その他

本事業の実施を通じて、イノベーションの担い手として重要な若手研究員及び女性研究員の育成等を支援することとする。

6. 基本計画の改訂履歴

（1）平成30年2月、制定。

- (2) 平成 31 年 1 月、研究開発項目の追加による改訂。
- (3) 2020 年 6 月、プロジェクトリーダーの所属先、役職及びサブプロジェクトリーダーの所属先名称の変更による改訂。

(別紙1) 研究開発計画

1. 研究開発の必要性

昨今の地球温暖化防止への具体的貢献が求められる情勢の下、地球温暖化への影響が極めて少ない冷媒（以下「次世代冷媒」という。）への転換が模索されている。しかし、次世代冷媒の多くは、いずれも従来のHFC冷媒適用機器と同等の機器性能を維持、あるいはそれ以上の性能とするための技術的ハードルが高く、さらに安全性においても課題（燃焼性、化学的不安定性等）があることから、世界的に次世代冷媒適用冷凍空調機器は実用化に至っていない。これは、次世代冷媒の基本特性評価及び次世代冷媒使用時の安全性評価・リスク評価の標準的な評価手法が確立していないことが大きな原因の一つである。特に、温室効果の大きさと燃焼性とは反比例する性質があることから、燃焼性を有する冷媒を受け入れていかなければ、冷凍空調機器の分野での低炭素社会構築は難しく、燃焼性のある冷媒を安全に使用するための研究開発が重要となっている。

こうした状況の中、冷凍空調機器のうち、次世代冷媒への転換の可能性が高いと考えられている業務用小型冷凍冷蔵機器や、冷媒の市中冷媒ストック量が格段に多く、大気中への漏えい源としての影響が大きい家庭用空調機器を主とする中小型冷凍空調機器においては、次世代冷媒を冷凍空調機器に適用するにあたって、安全性・リスク評価手法を確立し、その後の次世代冷媒適用冷凍空調機器の実用化及び普及促進を支援することが求められている。

一方で、冷凍空調機器分野において、次世代冷媒の適用が一部ではなされているものの技術的課題があることで全体の普及に至っていない領域があることが明らかになってきている。例えば、自然冷媒のCO₂を用いた業務用冷凍冷蔵機器では、温室効果は低いものの運転圧力が高く、使用可能な温度領域が限定されること等からコストや適用範囲の拡大に課題を有している。また、ユーザー側からは、次世代冷媒に転換する際に、設置期間の短縮や既存設備の利用等で施工性を向上させる要求も高まってきている。このように、次世代冷媒の実用化や普及化を妨げている技術課題に対して、新たな技術開発によりいち早く解消することが次世代冷媒を適用した冷凍空調機器の普及を促進する上で必要不可欠であって、実用化及び普及促進に向けた多面的な技術開発が求められている。

2. 研究開発の具体的内容

研究開発項目①「次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価」

次世代冷媒について、数値計算や室内実験により、基本特性の評価試験（沸点、蒸気圧、GWP、毒性、熱物性、反応性、燃焼性、伝熱特性、ヒートポンプサイクル性能等）を行う。さらに、実用化評価試験（実環境を加味した冷媒特性評価、混合冷媒比率の最適

化等)に関するデータ取得及び評価を実施する。必要に応じ、研究開発項目②「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」へデータ提供を行うなどして、連携を図る。

また、取得した基本物性データ及び評価結果について、国際規格化・国際標準化及び国際データベース等^{*}への登録に取り組む。

研究開発項目②「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」

次世代冷媒の安全性・リスク評価について、評価項目(事故シナリオの検討・抽出、漏洩時挙動評価、着火時の挙動、爆発影響評価、フィジカルハザード評価、実験環境模擬実験、冷媒充填量の許容量の把握等)を検討し、数値計算や室内実験・室外実験等により、安全性・評価手法を確立する。

また、産官学連携により効率的に次世代冷媒の安全性・リスク評価手法を検証することを目的とした研究会を設置し、本研究会を通して安全性・リスク評価手法の開発の成果(着火源評価、リスクアセスメント、フィジカルハザード評価等)を国内外に公表及び発信する。

また、次世代冷媒の安全性・リスク評価手法等について、国際規格化・国際標準化に取り組む^{*}。

※ 次世代冷媒の社会実装に関する国際規格、国際標準としては ISO5149 (機器)、ISO817 (冷媒物性)、IEC60335-2-40 (空調)、IEC60335-2-89 (冷凍冷蔵)、ASHRAE34 (冷媒物性)、ASHRAE15 (機器) が想定される。また、国際データベースでは、NIST (アメリカ国立標準技術研究所) が作成する冷媒熱物性データベースソフトウェア ; REFPROP が想定される。

なお研究開発項目①及び②の成果を踏まえ、産官学の外部有識者と連携の上、次世代冷媒の安全性・リスク評価手法に関する成果を、業界の実用的な安全基準や、国際規格化・国際標準化等に効果的に結び付けるためのロードマップを策定する。なお、このロードマップは、必要に応じ、有識者との検討や標準化動向等を踏まえて見直しを図り、更新する。

研究開発項目③「次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発」

次世代冷媒の実用化や普及化を妨げている技術課題に対して、新たな技術開発により技術課題を解決して次世代冷媒や次世代冷媒を適用した冷凍空調機器の実用化および普及化を図る。

3. 達成目標

【中間目標】

研究開発項目①「次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価」

- 1) 冷凍空調機器性能と省エネ性を両立しうる次世代冷媒候補について、基本物性データ（熱物性、伝熱特性等）の取得及び評価（漏洩時挙動評価、フィジカルハザード評価等）を実施する。
- 2) 取得した基本物性データ及び評価結果に関して、国際規格化・国際標準化や国際データベース等への登録に必要なデータについて整理し、取得を進める。

研究開発項目②「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」

- 1) 冷凍空調機器性能と省エネ性を両立しうる次世代冷媒候補について、安全性・リスク評価（漏洩時挙動評価、フィジカルハザード評価等）を実施し、安全性・リスク評価手法確立に向けた目途付けを行う。

なお、研究開発項目①及び②の成果を踏まえ、産官学の外部有識者と連携の上、本事業で得られた低温温室効果次世代冷媒の評価手法に関する成果を、業界の実用的な安全基準や、国際規格・国際標準等への提案に効果的に結び付けるためのロードマップを策定する。

また、次世代冷媒の基本物性データ及び安全性・リスク評価手法等について、国際規格・国際標準への提案を1件以上、及び国際データベース等への登録申請を1件以上行う目途を得る。

研究開発項目③「次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発」

- 1) 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発において、現状市販フロン品と同等以上の性能(COP、APF等[※])を実現する技術について、個別テーマごとに目標を定め、これを達成する見通しを得る。

※ COP:成績係数 (Coefficient Of Performance) の略。冷暖房器具のエネルギー消費効率を示す係数で、消費電力1kWに対しての機器の冷却能力、暖房(加熱)能力を表したもの。

APF:通年エネルギー消費効率 (Annual Performance Factor) の略。1年を通して、ある一定条件のもとにエアコンを使用した時の消費電力1kWあたりの冷房・暖房能力を表したもの。

【最終目標】

研究開発項目①「次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価」

- 1) 中間評価結果を踏まえ、冷凍空調機器性能と省エネ性を両立しうる次世代冷媒候補について、基本物性データの取得及び評価を実施する。

研究開発項目②「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」

- 1) 中間評価結果を踏まえ、冷凍空調機器性能と省エネ性を両立しうる、次世代冷媒候補について、安全性・リスク評価手法を確立する。
- 2) 次世代冷媒使用にあたっての実用的な安全基準（業界規格等）の策定に資するデータや評価結果を提供する。

なお、研究開発項目①及び②の成果を踏まえ、次世代冷媒の基本物性データ及び安全性・リスク評価手法等について、業界団体等を通して、国際規格・国際標準への提案を1件以上、及び国際データベース等への登録申請を1件以上行う。

研究開発項目③「次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発」

中間評価結果を踏まえ、次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発において、現状市販フロン品と同等以上の性能(COP、APF等)を実現する技術について、個別テーマごとに目標を定め、これを達成する。

以上

(別紙2) 研究開発スケジュール

	H30	H31	H32	H33	H34	H35
研究開発項目① 「次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価」						
研究開発項目② 「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」						
研究開発項目③ 「次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発」						
評価時期			中間評価			事後評価



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **6**

地球環境対策（フロン）分野の 技術戦略策定に向けて

2015年10月

1 章 地球環境対策（フロン）技術の概要	2
2 章 地球環境対策（フロン）技術の置かれた状況	3
2-1 規制の動向	3
2-2 技術開発の動向	9
2-3 産業競争力（諸外国との比較）	11
3 章 地球環境対策（フロン）分野の技術課題	14
4 章 おわりに	15

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

1章 地球環境対策(フロン)技術の概要

1970年代にフロンのオゾン層への影響が指摘されたことを受け、オゾン層破壊効果を有する物質である特定フロン(CFC(クロロフルオロカーボン)及びHCFC(ハイドロクロロフルオロカーボン))について、生産及び消費を規制する「モントリオール議定書」が1987年に採択され、先進国においては2020年までに実質全廃となる見通しである。その後、地球温暖化防止に関して、1988年に国連環境計画(UNEP)が世界気象機関(WMO)とともに「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」を設立し、地球温暖化に関する自然科学的及び社会科学取組を開始した。1992年には「気候変動枠組条約」が採択され、その具体的な温室効果ガスの排出抑制対策として、

1997年に「京都議定書」が採択され2005年に発効した。

特定フロンの代替物質として利用が進んだ代替フロン等3ガス^{*1}はODP^{*2}がゼロである一方、大気中に長期間にわたって安定に存在し、かつ極めて強力な温室効果を有することから、京都議定書において排出削減対象ガスに指定されている。2013年には新たにNF₃(三フッ化窒素)が指定され、これを加えた代替フロン等4ガスについて、排出削減対策が検討されている(図1、表1)。

代替フロンの主用途は冷凍空調機器の冷媒であり、HFCガスが利用されている。今後、同機器の利用は世界各国で継続し、また、途上国を中心に増加の見通しである。一方、冷媒の利用においては地球温暖化防止との両立が重要な前提条件であることから、更なる低GWP^{*3}冷媒の利用を促進することが望まれる。

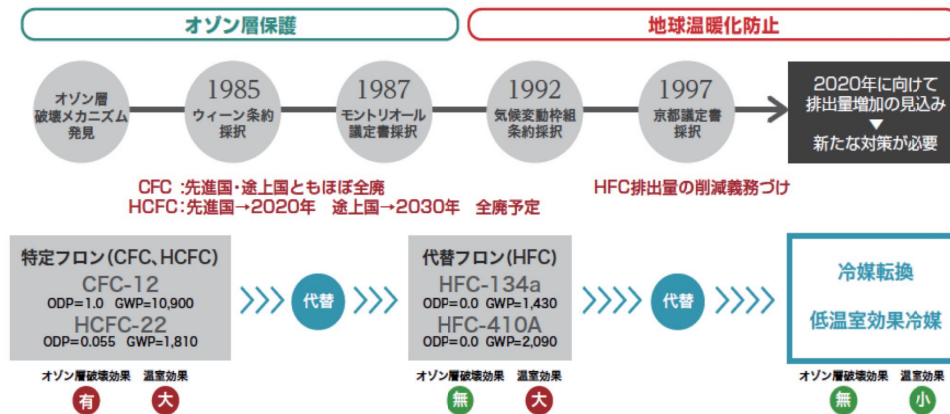


図1 フロン類を巡る規制と対策の流れ
出所: NEDO 環境部作成 (2015)

表1 特定フロン及び代替フロン等4ガス

総称	特定フロン		代替フロン等4ガス			
	CFC (クロロフルオロカーボン)	HCFC (ハイドロクロロフルオロカーボン)	HFC (代替フロン) (ハイドロフルオロカーボン)	PFC (パーフルオロカーボン)	SF ₆ (六フッ化硫黄)	NF ₃ (三フッ化窒素)
国際規制	モントリオール議定書対象物質 (生産・輸入規制) 京都議定書対象外		京都議定書対象物質 (NF ₃ は2013年より)			
オゾン層破壊効果	大きい	比較的小さい	まったくオゾン層を破壊しない			
温室効果(GWP)	極めて大きい (約10,000)	大きい (数百~約2,000)	大きい (数百~約4,000 ^{**})	極めて大きい (約6,000~9,000)	極めて大きい (約23,900)	極めて大きい (約17,200)
主な用途	・冷凍空調機器の冷媒 ・洗浄剤、溶剤等 (95年以降全廃済み)	・冷凍空調機器の冷媒 ・洗浄剤、溶剤等 (2020年全廃予定)	・冷凍空調機器の冷媒 ・断熱材の発泡剤等	・半導体、液晶製造 ・洗浄剤、溶剤	・電気絶縁機器 ・半導体、液晶製造 ・マグネシウム製造	・半導体、液晶製造等

出所: 各種公開資料を基に NEDO 環境部作成 (2015)

※1 HFC(ハイドロフルオロカーボン)、PFC(パーフルオロカーボン)、SF₆(六フッ化硫黄)の三種のフッ素化合物の総称
 ※2 ODP:オゾン層破壊係数(Ozone Depletion Potentialの略であり、CFC-11を1.0として、オゾン層に与える破壊効果の強さを表す値。)

※3 GWP:地球温暖化係数(Global Warming Potentialの略であり、CO₂を基準(1.0)として、同量、同期間における温室効果の大きさを相対比較した値。本稿では100年間の影響を考えた場合の数値を示す。)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

2章

地球環境対策(フロン) 技術の置かれた状況

2

-1 規制の動向

(1) 温室効果ガス排出削減における政府方針

京都議定書第一約束期間(2008～2012年)における我が国の温室効果ガスの排出削減目標は基準年(1990年)比で-6%である。この目標達成のため、CO₂(二酸化炭素)、CH₄(メタン)、N₂O(亜酸化窒素)とともに代替フロン等3ガスも排出削減目標が設定され、-6%のうちの-1.6%を担うこととなった。

フロン類の排出量削減のため、使用済みとなった機器からのフロン類の回収・破壊等については、「フロン回収・破壊法」、「家電リサイクル法」、「自動車リサイクル法」等の施行により対策が行われている。さらにフロン類の回収率向上を図るため、「フロン回収・破壊法」の改正が行われ、2007年に施行されている。

その後、フロン類の製造から廃棄までのライフサイクル全体を見据えた包括的な対策実施を目的として、「フロン回収・破壊法」が全面改正され、「フロン排出抑制法」が2015年に施行されている。

さらに、2015年12月のCOP21において、2020年以降の国際枠組みが合意されることとなっており、我が国の約束草案は、2030年度に2013年度比-26.0%(2005年度比-25.4%)の水準にすることを目標としている。代替フロン等4ガスについては、2013年度比-25.1%(2005年度比+4.5%)の水準にすることを目標としている。これは総排出量比で-0.7%に相当する。

(2) 国内における温室効果ガスの排出状況

① 温室効果ガス排出量

我が国の2013年度の温室効果ガス排出量は14億800万トン(2005年度比+0.8%、1990年度比+10.8%)である(図2)。2005年度と比べて温室効果ガス排出量が1,100万トン増加している要因としては、エネルギー起源CO₂の排出量増加のほか、特定フロンから代替フロンへの転換に伴い、冷媒使用機器からのHFCガスの排出量が増加したことなどが挙げられる。

② 代替フロン等4ガスの排出量の推移

代替フロン等4ガスの排出量は、2004年度までに大幅に減少したが、その後は増加傾向にある。2013年度の代替フロン等4ガス排出量の内訳としてはHFCが最も大きく、全体の8割以上を占める。HFCは2005年度から排出量が大きく増加している(図3)。

さらにHFCの排出量を用途別にみると、HCFC-22を製造する際の副生成物であるHFC-23の排出量が1995年をピークに大幅に減少している一方、エアコン等の冷媒からの排出量は、オゾン層破壊物質であるCFC、HCFCからオゾン層を破壊しないHFCへの冷媒転換に伴って増加を続けており、2005年度以降大幅に増加している(図4)。また、冷凍空調機器に利用されているHFCにおいては、使用中の漏れによる排出量が冷凍空調全体の排出量の約半分であることがわかる(表2)。

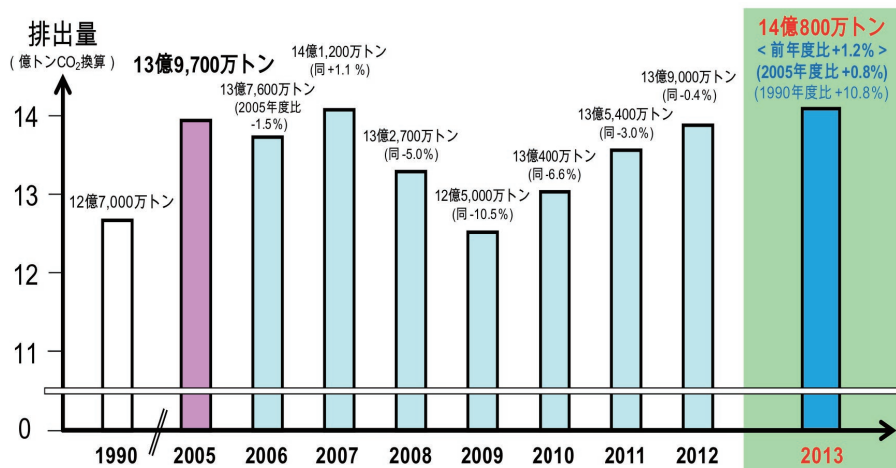


図2 我が国の温室効果ガス排出量

出所: 2013年度(平成25年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について(環境省, 2015)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

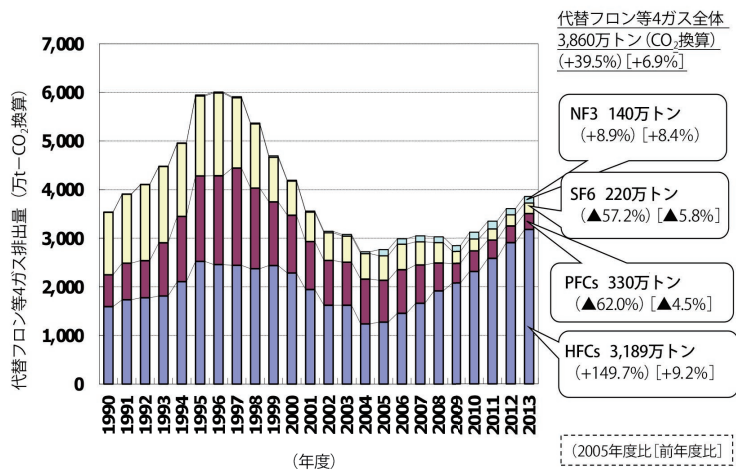


図3 代替フロン等4ガスの排出量の推移

出所: 2013年度(平成25年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について(環境省, 2015)を基にNEDO環境部作成

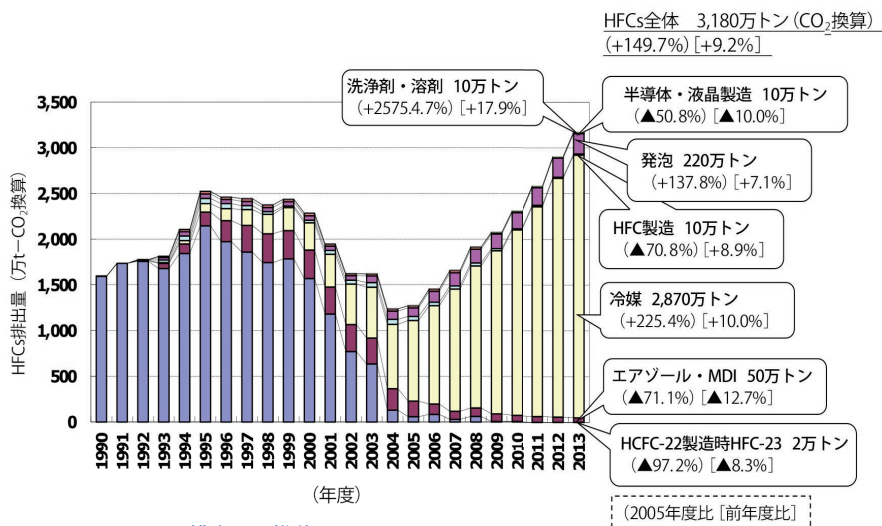


図4 HFC排出量の推移

出所: 2013年度(平成25年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について(環境省, 2015)を基にNEDO環境部作成

表2 冷凍空調機器の使用時におけるHFC冷媒漏えい割合

機種 (内は代表的冷媒、下段は1台辺り冷媒充填量)	推計市中稼働台数 (台)	毎年の漏えい割合		使用時HFC漏えい量 (2020年BAU推計) (百万t-CO2)
		従前	現在	
小型冷凍冷蔵機器 (内蔵型業務用冷蔵庫等) (R-404A, HFC-134a 等) 数百g~数kg	約760万台	0.01 ~0.02%	2%	0.1
別置型ショーケース (R-404A, R-407C 等) 数十~数百kg	約140万台	0.7%	16%	9.6
その他中型冷凍冷蔵機器 (除く別置型冷凍冷蔵ショーケース) (R-404A, R-407C 等) 数kg~数十kg	約130万台	1~9%	13~17%	1.8
大型冷凍機 (HFC-134a, R-404A 等) 数百kg~数t	約0.8万台	2%	7~12%	0.9
ビル用PAC (R-410A, R-407C 等) 数十kg~数百kg	約100万台	0.9%	3.5%	2.2
その他業務用空調機器 (R-410A, R-407C 等) 数kg~数十kg	約950万台	0.9~4.4%	3~5%	3.1
家庭用エアコン (R-410A 等) 約1kg程度	約1億台	0.2%	2%	3.5
推計市中稼働台数 計	約1億2000万台	使用時漏えい量 計 ※冷凍空調全体の排出量 39.9		21.2

* BAU推計: BAUとはBusiness As Usualの略。一般的には対策を取らなかった場合の推計を示すこともあるが、本資料においては現状の対策を継続した場合の推計を示す。

出所: 冷凍空調機器の冷媒管理のための政策のあり方について(経済産業省資料, 2012)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

(3) 代替フロン等4ガスに関する法規制

①フロン排出抑制法

2002年に「フロン回収・破壊法」が施行されている。この法律では、オゾン層破壊物質であるCFCとHCFCのみならず、オゾン層を破壊しないものの強い温室効果をもつHFCを対象として、業務用の冷凍・冷蔵・空調機器からの冷媒フロン類(CFC、HCFC、HFC)の回収・破壊を義務づけている。

さらに、「フロン回収・破壊法」が全面的に改定され、2015年4月

に「フロン排出抑制法」が施行された。これはフロン類の排出量削減を目的とし、冷凍空調関連では5区分の製品を指定製品として環境影響度の目標値と目標年度が決められている。このうち目標年度の最も早いものは家庭用エアコンであり、2018年度に目標年度、目標値が定められている(表3、図5)。また、この法律においては、我が国におけるフロン対策に関する研究開発の推進がうたわれている^{※4}。

なお、図5中のHFO(ハイドロフルオロオレフィン)とは、HFC冷媒の高GWP対策として登場した冷媒である。

表3 フロン排出抑制法における指定製品の区分抜粋

指定製品の区分	現在使用されている主な冷媒 ^{※5} (GWP)	環境影響度の目標値	目標年度
家庭用エアコンディショナー (マルチ型を除く)	R410A (2090) R32 (675)	750	2018
店舗・オフィス用エアコンディショナー (床置型等を除く)	R410A (2090)	750	2020
自動車用空調機器 (乗用自動車(定員11名以上のものを除く)に搭載されるものに限る)	R134a (1430)	150	2023
コンデンシングユニット及び定置式冷凍冷蔵ユニット (圧縮機の定格出力が1.5kW以下のものを除く)	R404A (3920) R410A (2090) R407C (1774) CO ₂ (1)	1500	2025
中央方式冷凍冷蔵機器 (5万㎡以上の新設冷凍冷蔵倉庫向けに出荷されるものに限る)	R404A (3920) アンモニア (一桁)	100	2019
硬質ウレタンフォーム (現場発泡用のうち住宅建材用に限る)	R245fa (1030) R365mfc (795)	100	2020
ダストブロー (可燃性を要する用途のものを除く)	R134a (1430) R152a (124) CO ₂ (1)、DME(1)	10	2019

■ 冷凍空調分野

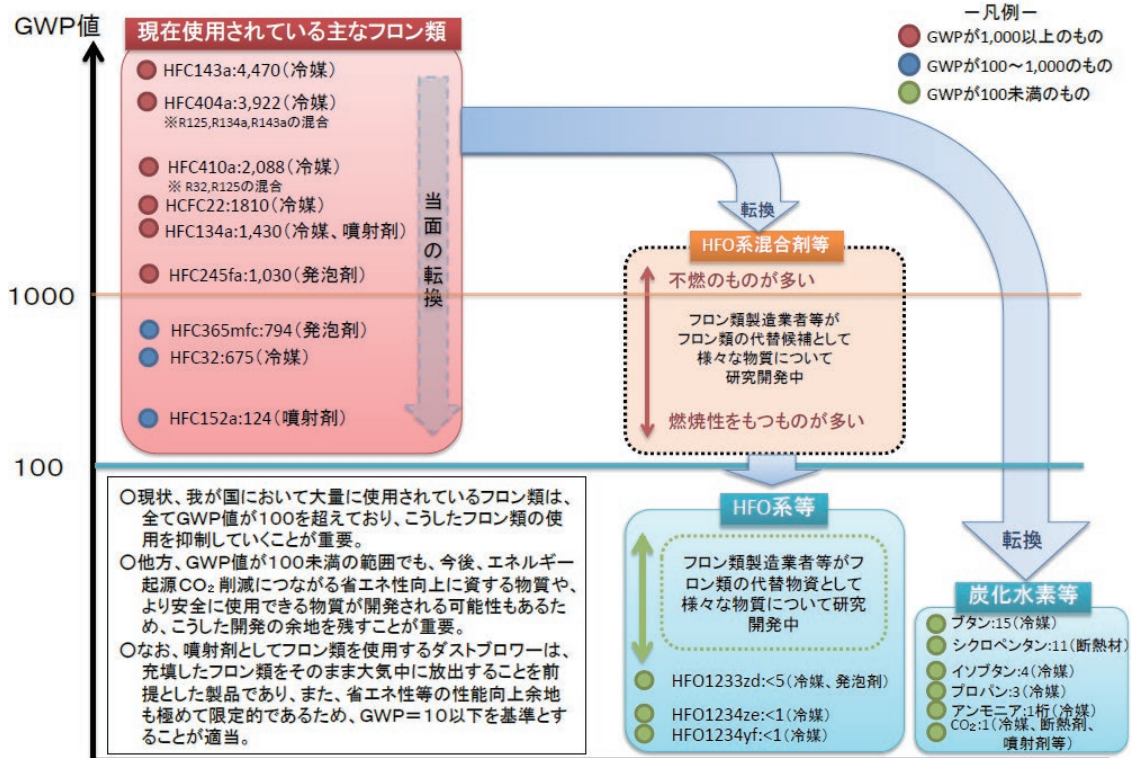
出所: フロン排出抑制法の概要(経済産業省, 2015)を基にNEDO環境部作成(2015)

※4 フロン排出抑制法「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」(研究開発の推進等)

第九十八条 国は、フロン類代替物質の研究開発その他のフロン類の使用の合理化に関する技術の研究開発、特定製品に使用されるフロン類の管理の適正化に関する技術の研究開発その他フロン類に係る環境の保全上の支障の防止に関する研究開発の推進及びその成果の普及のために必要な措置を講ずるものとする。

※5 冷媒の「R」表記: Rで始まる番号はISO817で定められた冷媒番号。RはRefrigerant(冷媒)の頭文字、千の位は不飽和炭化水素に対する不飽和炭素結合の数、百の位は炭素原子の数-1、十の位は水素原子の数+1、一の位はフッ素原子の数、「A」等の添え字は構造異性体、又は混合物における組成を区別する。ただしこの規則は、混合冷媒である400番台や500番台には適応されない。

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて



※ GWP 値は基本的に全て IPCC Fourth Assessment Report (AR4) の値を採用している。ただし、HFO 系物質は AR4 に GWP 値の掲載がないため、IPCC Fifth Assessment Report (AR5) の値を採用している。

図5 フロン類使用製品が最終的に目指すべきGWP値について

出所: フロン排出抑制法の概要(経済産業省, 2015)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

②高圧ガス保安法

現行の冷媒は不燃性で、高圧ガス保安法の中では不活性ガスとして第1グループに掲名されている。一方、温暖化対策の観点から転換が望まれる低温室効果冷媒の多くは微燃性を有するため、不活性以外のガスとして第2グループに属する可能性がある。仮に第2グループに属することになると、特に商業用の冷凍空調機器において、より厳しい規制区分(図6の注参照)が適用されるなどの様々な制約を受けることとなる(図6)。

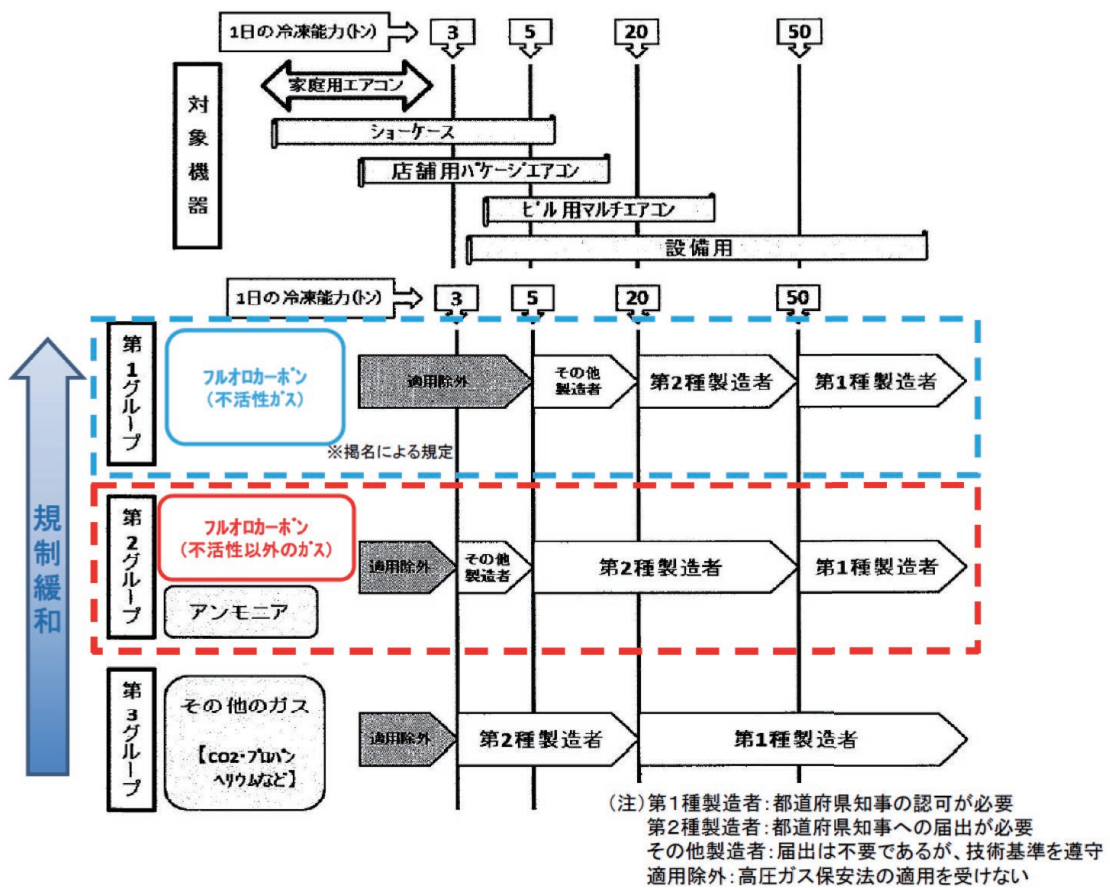


図6 高圧ガス保安法 冷凍保安規則の規制体系の概要

出所: 産構審地球温暖化防止対策小委員会・中間審査フロン類等対策小委員会 第3回合同会議参考資料(2012/8)を基に NEDO環境部作成(2012)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

(4) 欧米の動向

欧州における定置用冷凍空調機器についての規制は、F-gas (フッ素化ガス) 規制 Regulation (EC) No842/2006 と呼ばれている。この規制は、冷凍空調機器からの冷媒漏えいを削減することに重点が置かれており、適切な機器管理、作業者の研修、F-gas を使用している機器のラベリング、F-gasを生産・輸入・輸出している事業者の報告義務を課している。

本規制による効果の検証、制度の見直しが進められ、2012年11月に規制の強化案が欧州委員会から提案された。この提案では、2030年までにF-gasの漏えいを現状の2/3のレベルにまで減らすこと、環境に優しい冷媒が開発された分野ではF-gasを使用する機器の販売を禁止することを目指しており、また、これらを実現するために、欧州で販売

されるHFCの年間総量(各冷媒の販売量にGWPを掛けて総和をとった等価CO₂量)の削減を2015年から開始し、2030年には現状の1/5にまで削減するスケジュール案が示された。本案に基づき、2013年12月に欧州委員会、理事会、議会の間で定置用冷凍空調機器に対するF-gas規制の合意形成がなされている。

また、今後、途上国を中心にHCFCからHFCへの転換が急速に進むことを踏まえ、2009年に北米3か国から、HFCの生産・消費規制を導入すべき旨のモントリオール議定書改正提案が提出された(図7)。これに対して、我が国は2012年7月に賛成を表明している。2013年10月のモントリオール議定書締約国会合においては、議論を進めるためのディスカッショングループが設置され、代替技術や財政面の課題等についての議論が行われ、検討が継続されている。

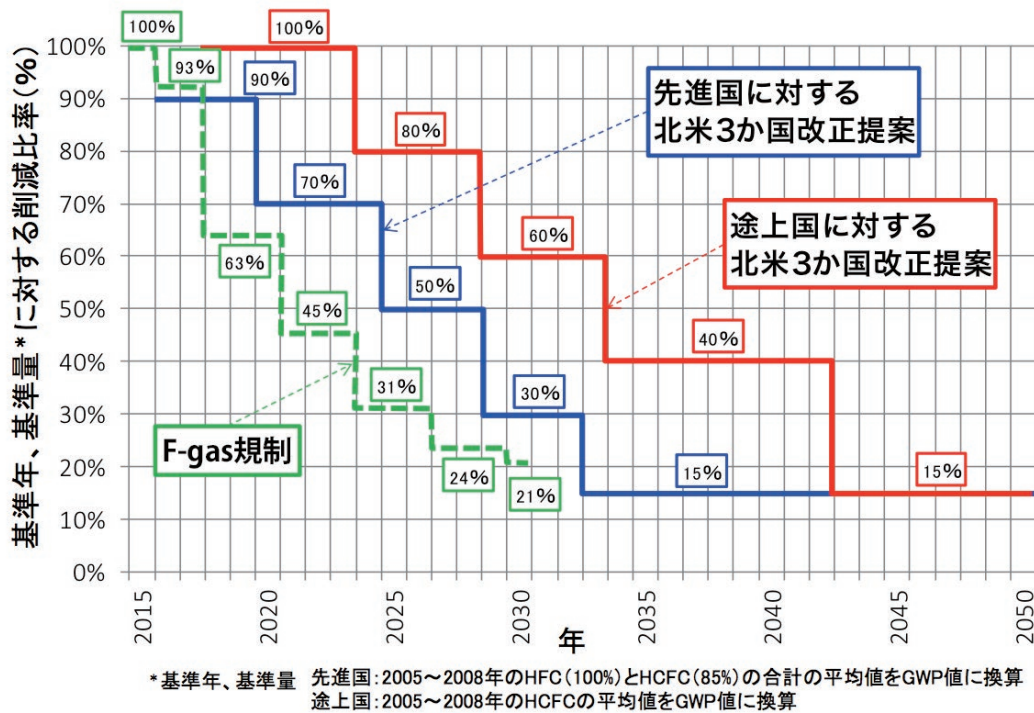


図7 モントリオール議定書北米3か国改正提案、F-gas規制 (EU) の温室効果ガス削減スケジュール
出所: 平成26年度成果報告書「次世代冷凍空調に関する今後の技術開発に向けた可能性調査」(NEDO, 2015) を基に NEDO 環境部作成 (2015)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

2 -2 技術開発の動向

(1) 冷媒

家庭用空調機器の冷媒には従来 HCFC-22 (R22) が使用されていたが、前述のとおり、1987年のモントリオール議定書における、HCFCを含む特定フロンの先進国での生産及び消費を2020年までに実質全廃とする決定を受けて、HFC-410A (R410A) が使用されるようになった。さらにその後、1997年の京都議定書の採択により、自然冷媒や低GWPフロン冷媒への転換が検討されている。

①フロン冷媒の開発

HFC冷媒の高GWP対策として登場してきた冷媒として、HFO冷媒が挙げられる(図8)。

各種冷媒の機器への適用可否は冷媒の物性に大きく依存する。HFO冷媒の中には、HFC冷媒と似通った物性をもっていることから、既存冷媒の代替が可能なものもある。例えばHFO-1234yf^{※6}は、現在カーエアコンに使用されているHFC-134aの転換冷媒として評価が高いため、各社によって精力的に開発が進められている。しかし、動作圧力の違い等の理由から、業務用空調機器及び家庭用空調

機器に対しては適さないとされている。

NEDOの「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」で開発中のHFO-1123は、他のHFO冷媒と比べて沸点が-56℃と低く、R410Aの沸点(-51℃)に近いことから、使用中の不安定性という課題はあるものの、ルームエアコン等に適用可能な次世代の冷媒として期待されている。

また近年、冷媒としての性能がよく、GWPが低いことからR22やR410Aの代替冷媒として注目されているものがR32である。R32はGWPがR410Aの1/3ほどの675であり、作動効率が比較的良好で、安全性、経済性にも優れていることから、2012年に発売されたルームエアコンに使用されている。

ただし、HFO-1123やR32には、わずかな燃焼性(微燃性)を有するという課題がある。国内では、高圧ガス保安法において、不燃性のフロン冷媒に比べて微燃性冷媒には利用に多くの制約が課せられるとともに、製造工程の防爆対策が必要となる。これまで、特に家庭用や業務用の空調機器への使用は避けられる傾向にあったが、近年、実際の冷媒使用状況下におけるリスクを詳細に評価し直し、その安全性を明確にした上で使用できるようにする検討が行われている。

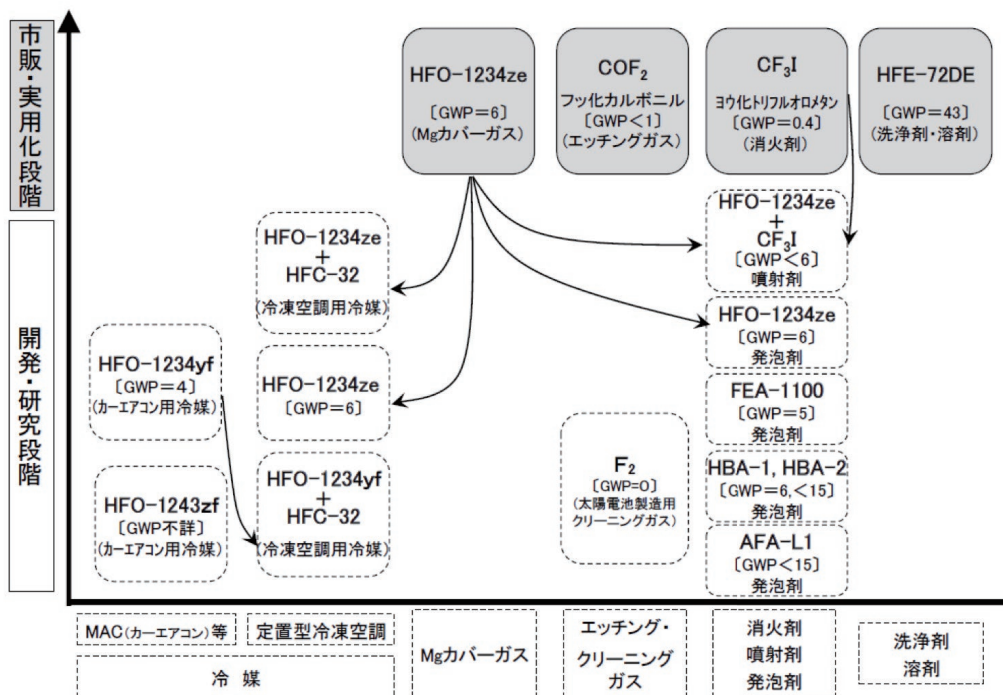


図8 国内外のフロン代替物質の適用分野と開発状況

出所: 産構審地球温暖化防止対策小委員会・中間審査フロン類等対策小委員会第3回合同会議(経済産業省, 2010)を一部改変

※6 DuPont(米国)、Honeywell(米国)が製造、販売

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

②自然冷媒の利用

国内及び欧州を中心に自然冷媒（アンモニア、二酸化炭素（CO₂）、プロパン・ブタンなどの炭化水素等）の冷凍空調機器への採用の検討も進んでいる。

業務用冷凍空調機器のうち中・大型機器について、過去には冷却性能がフロン冷媒より優れるアンモニアが利用されていたが、アンモニア冷媒は可燃性及び毒性を有するため、その利用には高压ガス保安法等に基づき一定の管理体制を要する。また、アンモニアの毒性と特有の臭気から、住宅地や商業地に設置し難いなどの立地上の制約が生じるため、現在ではアンモニア冷媒機を熱源とした間接冷却式が推奨されている。間接冷却式とは、アンモニアを一次冷媒として用い、二酸化炭素やブライン液（不凍液）を二次冷媒として用いる冷却方式であり、アンモニアが二次冷媒を冷やし、二次冷媒が冷房や冷凍庫などのための冷気を作り出す。安全性と性能を同時に向上させた機器といえるが、初期導入コストが高いことが課題である。

自然冷媒を利用している冷凍空調機器のうち、出荷台数が多い機器は、ヒートポンプ給湯器（CO₂）、家庭用冷蔵庫（イソブタン）及び飲料用の自動販売機（CO₂、イソブタン）である（（ ）内は冷媒）。なかでも、家庭用ヒートポンプ給湯器のエコキュートは、2000年に初めて実用化された製品であり、2001年の発売後、2014年12月末までの累計での出荷台数は約450万台に達している。

このように、CO₂冷媒に関しては、家庭用ヒートポンプ給湯機において実用化されており、家庭用エアコンへの導入も検討されている。しかし、CO₂の特性上、エアコンが作動する温度域では効率が著しく低下するという課題がある。また、CO₂はHFCに比べて圧力損失が大きいため、膨張動力の回収等、機器の大幅な改善が必要である。これまでにCO₂冷媒を適用したエアコンが欧州でテスト販売された実績はあるが、現在のところ量産化には至っていない。

また、プロパンをはじめとする炭化水素系冷媒に関しては、これをエアコンにフロン冷媒と同量使用することにより、優れた冷却性能を発揮することがわかっている。ただし、炭化水素系冷媒は強い可燃性をもつため、普及においては安全性に課題が残る。

(2) 機器

①圧縮機の開発

冷凍機用のオイル（潤滑油）は圧縮機の潤滑性を確保するために必要であるが、オイルに冷媒が溶け込むことにより、圧縮機起動

時に圧縮機損傷を招く可能性がある。さらに、冷媒を含んだオイルが熱交換器内部に付着すると、熱交換性能の低下につながる。冷媒の3割近くが圧縮機内に留まっているという例も報告されており、特に自然冷媒等のオイルに溶け込みやすい冷媒の使用においては課題が残る。

この根本的な解決策として圧縮機のオイルフリー化、すなわち、冷媒圧縮機構部にオイルを使用しないタイプの圧縮機が検討されている。現在、一般的に使用されている圧縮機のうちオイルフリー構造が可能なのはスクリー式、ターボ式等である。

②熱交換器の開発

カーエアコン以外の冷凍空調で使用される空気と冷媒の熱交換器は、数十年以上にわたりほぼ全てがフィン&チューブ熱交換器であったが、近年、冷媒量の削減が可能なマイクロチャネル熱交換器の開発が精力的に進められており、実際の機器への採用も始まったところである（図9）。マイクロチャネル熱交換器は熱交換特性に優れることから、熱交換器の小型化、軽量化が実現できるため、1980年代頃よりカーエアコン用にフィン&チューブ熱交換器に代わるサーペンタイン型等の新たな熱交換器が採用され始めた。カーエアコン以外の冷凍空調機器にも、数年前からマイクロチャネル熱交換器が採用されている。熱交換特性が良く小型化が可能であり、材料にアルミニウムを用いることができるため、コスト削減が可能となる。

2013年頃から、業務用パッケージエアコン等の屋外機にマイクロチャネル熱交換器が採用され始めている。現在、マイクロチャネル熱交換器については屋外機用の熱交換器としての利用が多いが、今後、屋内機側にも採用できるようになれば、更に冷媒使用量の削減が可能となる。

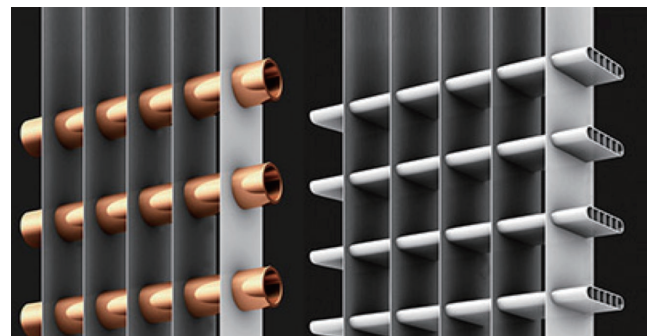


図9 フィン&チューブ熱交換器(左)とマイクロチャネル熱交換器(右)
出所:平成26年度成果報告書「次世代冷凍空調に関する今後の技術開発に向けた可能性調査」(NEDO環境部,2015)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

2-3 産業競争力(諸外国との比較)

(1) 市場規模(国内・海外)

ここでは、冷媒の主用途である冷凍空調機器のうち、ルームエアコンについての市場動向を示す。

米国、欧州等の先進国においてエアコン市場は成熟している一方、2014年の時点で世界最大の中国エアコン市場(図10)は、先進国より高い経済成長が見込まれることもあり、今後も同様の規模が維持されるとみられる。今後の市場拡大が見込めるのは、現在は普及率が低いアジア諸国、中南米等の新興国と考えられ(2012年時点の普及率^{※7}: ブラジル13.3%、トルコ12.8%、インド9.6%、インドネシア7.6%)、これらの国々では経済発展とともに、また、気候の面からもエアコンの導入が進展する余地が大きい。また、エアコンの寿命は約10年であることを加味すると、導入された機器の買い替え需要が常に存在するといえる。ルームエアコン市場の主要なプレイヤーは、中国系企業(Glee

Electric、Midea、Haier)、日系企業(パナソニック、ダイキン工業)、韓国系企業(LG Electronics)であり、中でも、中国系企業が世界最大の中国国内市場を獲得している。

「ヒートポンプ 温水・空調市場の現状と将来展望 2015(富士経済, 2014)」によると、2015年のルームエアコン市場は、金額で約3兆1,193億円、台数で約8,600万台と推計されており、2020年には金額で3兆6,165億円、台数で1億200万台規模に成長すると予測されている(図11)。

なお、ヒートポンプは、ルームエアコンのキーテクノロジーの一つであり、エアコン(空調)だけではなく、エコキュート(給湯)、冷蔵・冷凍庫、乾燥機能つき洗濯機など、さまざまな機器に利用されている。冷凍空調機器を含むヒートポンプ市場全体における、日本企業のシェアは世界市場の約30%であり、高い割合を占めている(図12)。このことから、我が国が強みとするヒートポンプのような先進技術を活用したグローバル展開を強化する取組が期待される。

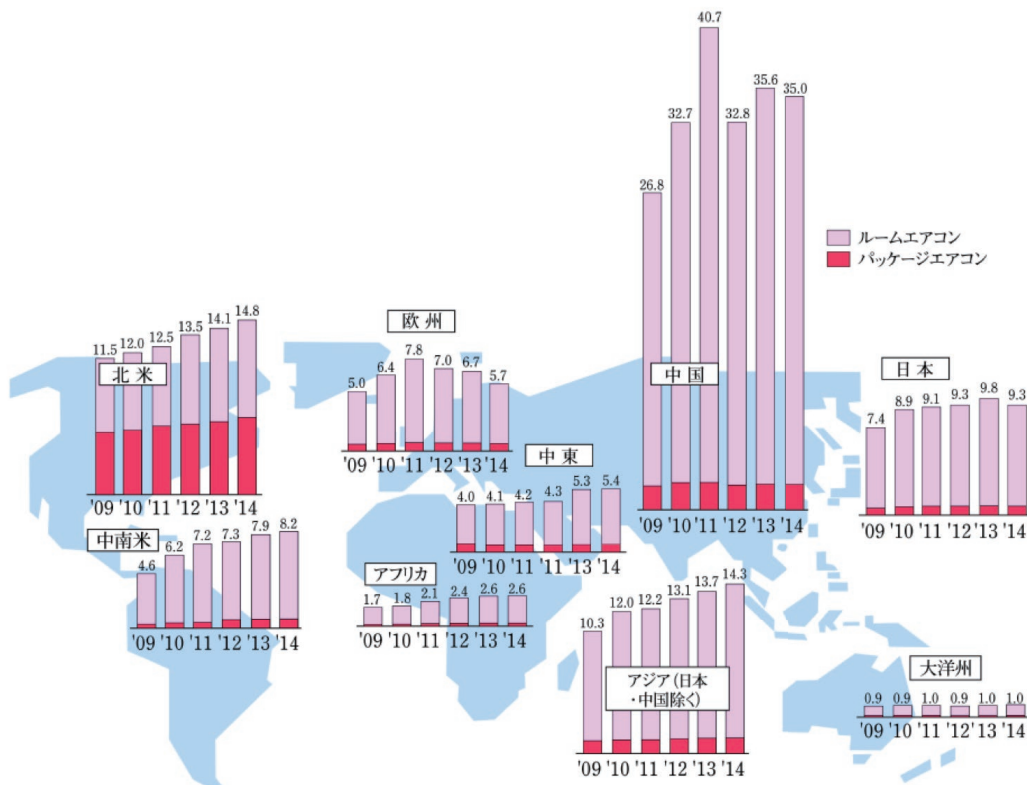


図10 地域別のエアコン需要推移(単位:百万台)
出所: 世界のエアコン需要推定(日本冷凍空調工業会, 2015)

※7 通商白書(経済産業省, 2013)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

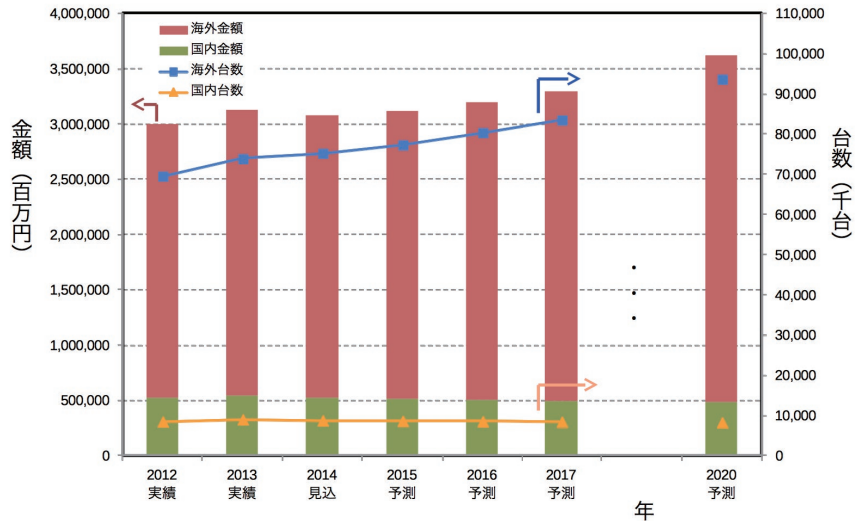


図11 ルームエアコンの市場推移と予測

出所: ヒートポンプ 温水・空調市場の現状と将来展望 2015 (富士経済, 2014) を基に NEDO 環境部作成 (2015)

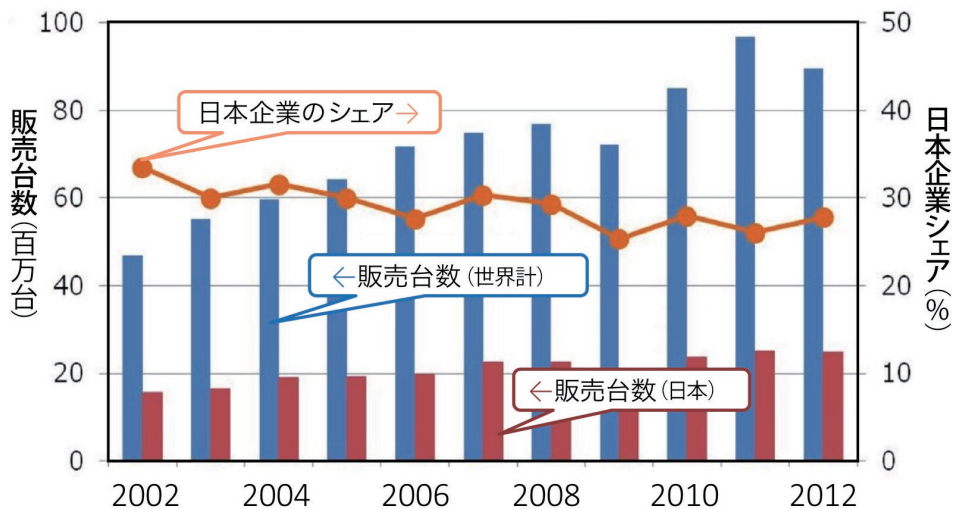


図12 世界のヒートポンプ市場における日本企業のシェア

出所: IEA HEAT PUMP CENTRE NEWSLETTER Vol.32 - No.1/2014 (IEA Heat Pump Centre, 2014) を基に NEDO 環境部作成 (2015)

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

(2) 論文・特許件数等

①冷媒

低GWP冷媒に関する論文は増加傾向にあり、投稿件数は米国・中国が常にリードしている。近年ではイタリアやドイツなどの欧州諸国、インドや韓国などのアジア諸国が積極的に研究開発を行っている。直近5年間で日本の論文投稿数は世界で第4位である(図13)。

世界を視野に入れた冷媒開発を積極的に展開している主要企業としては、Honeywell(米国)、DuPont(米国)が挙げられる。同社らは、自国ばかりでなく近隣諸国やアジア圏にも事業を拡大しているとともに、新冷媒に係る特許を積極的に出願し、結果として競合他社の技術開発可能な範囲を限定的にしている。これらの特許は実質的な用途をもった化学物質自体に与えられる物質特許である。物質特許の権利は強く、その物質に関する限り、どのような製法で製造されても、どのような用途で使用されても、特許権の効力が及ぶことになる。

②機器(エアコン)

図14は、国際特許分類F24F(空気調節;空気加湿;換気;しゃへいのためのエアカーテンの利用)に関する、出願人国籍が日本、中国、韓国、欧州、米国の特許出願件数を、出願先国別に示したものである。日本国籍の出願人は2003年からの10年間に、他地域と比

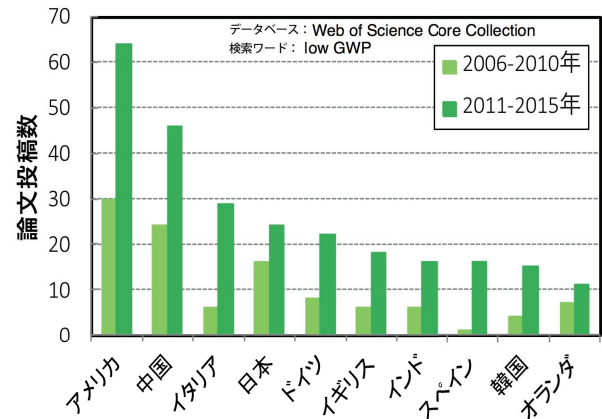


図13 「低GWP冷媒」に関する世界の論文発表数の経年変化
出所: NEDO環境部作成(2015)

較して非常に多くの自国特許を出願している。また、図に示した全ての地域で自国特許に次いで件数が多いのは、日本国籍の出願人による特許出願である。

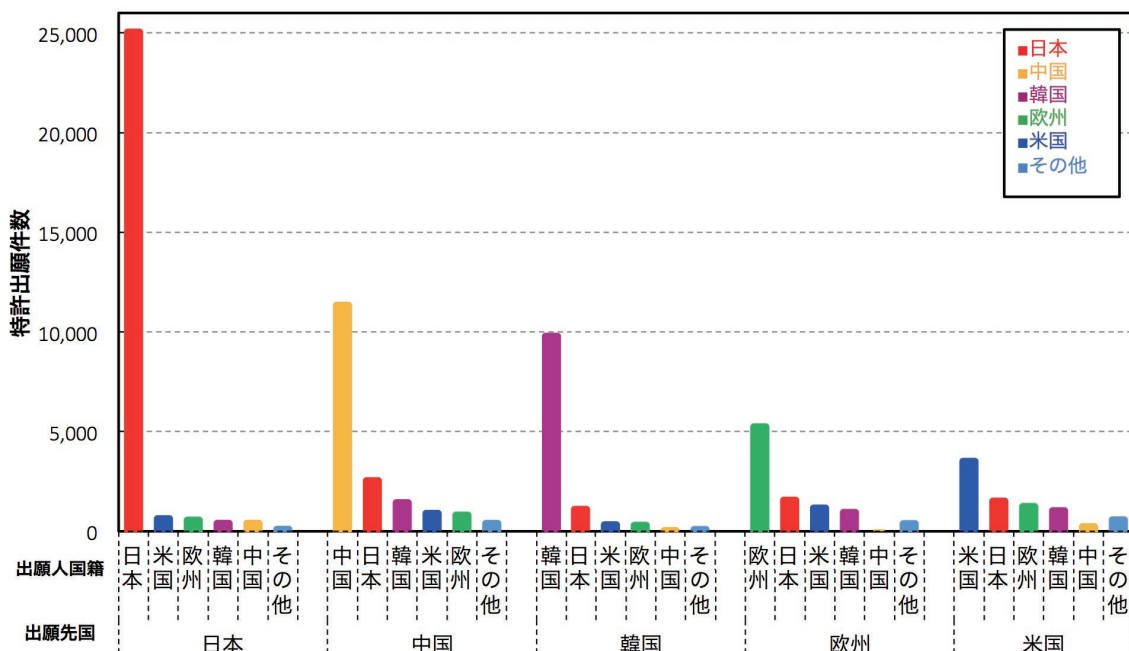


図14 出願人国籍別及び出願先国別(日米欧中韓)のエアコンに関する特許出願件数
(出願年〔優先権主張年〕: 2003~2012年)

出所: 平成26年度特許出願技術動向調査報告書(概要) 空気調和機(エアコン)(特許庁, 2014)を基にNEDO技術戦略研究センター作成

地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

3章 地球環境対策(フロン)分野の技術課題

前述のように、冷媒の利用における地球環境対策上の基本課題は、オゾン層保護と地球温暖化防止の二つの側面がある。これらのうちオゾン層保護については、オゾン層を破壊する塩素を含む冷媒からODPがゼロの冷媒への転換を進めることにより既に対策が行われた。一方、地球温暖化防止については、温室効果が小さいHFC系などの低GWP代替冷媒への転換により対策が行われてきたものの、現状使用されているものよりも更にGWPが低い冷媒が要求されている状況にある。

地球温暖化対策を主眼とする、冷媒の利用に関する技術的な対策は、図15に示すように低GWP冷媒への転換と、既に導入済みの冷媒の排出抑制の二つに分けられる。

冷媒転換においては、冷媒の種類ごとに沸騰温度、凝縮温度、熱伝達率、燃焼性などの特性が異なるため、冷媒の物性値などを正確に把握することが必要である。また、GWP値が低い冷媒には燃焼性を有するものが多いため、冷媒の循環量(以下「冷媒量」という。)については少量であることが安全性の観点から望ましい。ただし、冷媒量を削減すると、一般に機器性能は低下する傾向にあるため、このような燃焼性を有する冷媒への転換においては、冷媒量を可能な限り少量化できる機器の開発が望まれる。

機器開発に係る主な技術課題は、転換冷媒の物性と循環量に応じた圧縮機、熱交換器、膨張機といった基本構成機器の新規開発である。これを冷暖房性能等に関する詳細な機器性能評価と組み合わせながら進めることにより、冷媒量が少量であっても高効率化が図れる基本構成機器を開発し、更には機器としてのエネルギー消費効率の向上にも結びつけることが必要である。また、冷媒種によっては潤滑油に溶け込む性質があることから、潤滑油を使用しないスクリー式あるいはターボ式などのオイルフリー圧縮機の開発を進めることも技術課題の一つである。

また、機器の普及においては、単に高効率であるだけでなく、機器の使用時における高い安全性が確保されていることが重要である。特に、燃焼性や毒性を有する冷媒を利用しようとする際には、上述した基本構成機器の開発とともに、冷暖房性能等に関する機器性能評価、冷媒の安全性評価のほか、実際の使用条件におけるトラブル等を想定したシナリオに基づくリスク評価を含めた総合的な評価を行い、機器使用における効率と安全を両立することが必要である。

他方、冷媒排出抑制については、機器等の廃棄処分時に漏えいなく冷媒を回収することが重要である。回収された冷媒は、燃焼などによる無害化処理後にクリーンなガスとして大気へ排気されるか、又は再生処理によって再び冷媒などの原材料として使用される。したがって、転換冷媒の種類に応じた適切かつ効率的な除害処理技術、又は再生処理技術が必要となる。

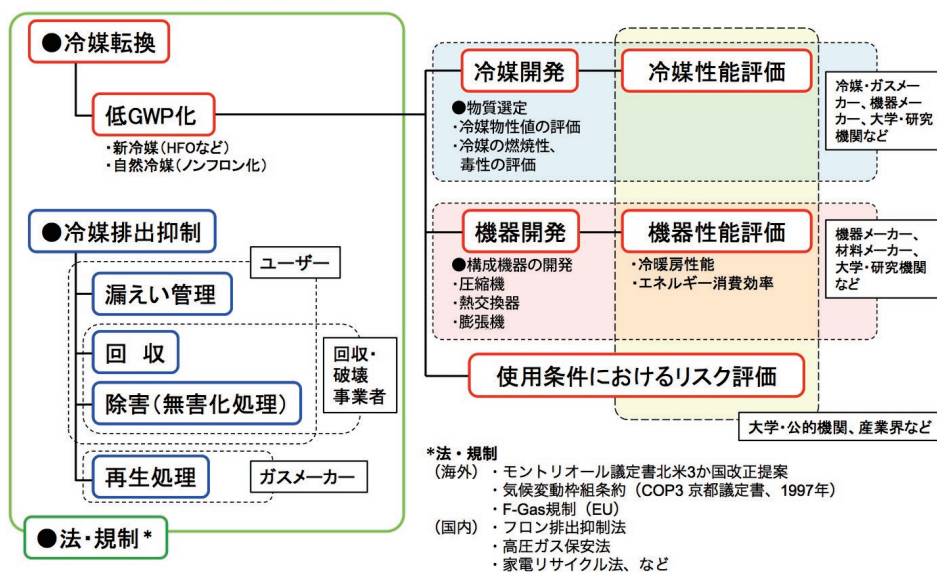


図15 地球温暖化対策(フロン)に係る技術等の体系
出所: NEDO 環境部作成 (2015)

4章 おわりに

気候変動枠組条約締約国会議COP21(2015年12月)での合意に向け、主要7か国首脳会議(G7サミット、2015年6月)では、2050年までに温室効果ガス排出量を2010年と比較して40%から70%削減することを目指すこととしている。

冷凍空調機器の冷媒については、特定フロンからHFCへの転換が進行していることにより、HFCの排出量は今後急増が見込まれることから、これを減少に転換させることにつながる方策の展開が期待される。特に、空調機器は一旦市場に出荷されれば十数年にわたり排出源として温暖化に悪影響を及ぼすため、低GWP冷媒、及びこれに対応した機器の開発が進むことが望まれる。

研究開発事業に係る技術評価書(事前評価) (経済産業省)						
事業名	省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発			推進課室名	化学物質管理課オゾン層保護等推進室	
事業開始年度	平成30年度	事業終了(予定)年度	平成34年度	主管課室名	化学物質管理課オゾン層保護等推進室	
事業の目的	昨年10月のモントリオール議定書キガリ改正において、オゾン層を破壊しないが温室効果の高い代替フロン(HFC)が規制対象物質に追加されたことにより、我が国を含む先進国は、2036年までにHFCを85%削減する必要がある。この目標は、既存の冷媒物質の利用では達成困難であるため、代替物質への転換が必要となる。本事業において、エネルギー効率を向上させつつ、低温室効果を実現できる次世代冷媒を使用した省エネルギー型冷凍空調機器等の開発基盤を整備することで、2036年までのHFC85%削減目標を達成する。					
事業概要	別紙記載のとおり。					
平成30年度概算要求額	250 (百万円)					
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	国際標準等に提案、反映等を行った件数		目標値	件	- 年度	41 年度
根拠として用いた統計・データ名(出典)	日本冷凍空調学会年次報告、微燃性冷媒リスク評価研究会プログレスレポート					
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	キガリ改正の最終目標年度(2036年度)に冷媒由来で削減できる温室効果ガスの量(CO2換算)		目標値	万CO2t	- 年度	41 年度
根拠として用いた統計・データ名(出典)	空調機器国内出荷実績(台数:日本冷凍空調工業会)					
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	成果の対外発表、講演、論文数		目標値	件	32 年度	34 年度
根拠として用いた統計・データ名(出典)	掲載された論文誌、予稿集					
横断的な施策に係る成果目標及び成果実績(アウトカム)	成果指標		分類	単位	中間目標年度	目標最終年度
	目標・指標	1t当たりCO2削減コスト	目標値	円/t-CO2	- 年度	41 年度
地球温暖化対策関係	算出方法	事業に係る予算予定総額/冷媒転換によるCO2削減相当量	直接効果	目標値	円/t-CO2	-
	活動指標		単位	30年度活動見込		
活動指標(アウトプット)	本研究の対象として評価を行った冷媒数		当初見込み	件	4	
事業所管部局による点検・改善						
	項目			評価	評価に関する説明	
国費投入の必要性	事業の目的は国民や社会のニーズを的確に反映しているか。			○	モントリオール議定書キガリ改正におけるHFCを2036年までに85%削減する目標については、既存の冷媒物質の利用では達成困難であり、既存冷媒に比べて低温室効果を有し、かつエネルギー効率の高い次世代冷媒及びそれに対応した冷凍空調機器等のリスク評価手法の確立及び実用環境下での評価が必要不可欠。	
	地方自治体、民間等に委ねることができない事業なのか。			○	次世代冷媒のリスク評価手法の確立や実用環境下での評価については、産業界全体の共通の基盤であり、また安全性等の評価については、中立性の担保も必要であるため、国が主体となって実施することが必要。	
	政策目的の達成手段として必要かつ適切な事業か。政策体系の中で優先度の高い事業か。			○	モントリオール議定書キガリ改正目標の達成に向けては、次世代冷媒・冷凍空調機器等の開発期間を考慮すると、その開発加速のための共通基盤を早急に整備する必要があるため、国の支援が不可欠。	
	競争性が確保されているなど支出先の選定は妥当か。			○		
	一般競争契約、指名競争契約又は随意契約(企画競争)による支出のうち、一者応札又は一者応募となったものはないか。			無	公募形式で中立な評価者による評価を経て選定される。	
	競争性のない随意契約となったものはないか。			無		

事業の効率性	受益者との負担関係は妥当であるか。		○	次世代冷媒のリスク評価手法の確立や実用環境下での評価については産業界全体の共通の基盤であるため、産業界からも知見を求める予定であり、また、安全性等の評価については、中立性を担保するために国が主体となって実施することが必要な事業であることから、妥当である。
	単位当たりコスト等の水準は妥当か。		○	過去の類似の事業を参考としつつ、事業の内容について専門家へのヒアリングを踏まえ単価を設定しており、妥当である。
	資金の流れの中間段階での支出は合理的なものとなっているか。		-	-
	費目・使途が事業目的に即し真に必要なものに限定されているか。		○	NEDO内の評価委員会による事業の事前評価を受けており、また事業の実施途中においても中間評価を受けた上で事業の見直しを行うことにより、真に必要なものに限定されるような仕組みを取る予定。
	利用率が大きい場合、その理由は妥当か。(理由を右に記載)		-	-
	繰越額が大きい場合、その理由は妥当か。(理由を右に記載)		-	-
	その他コスト削減や効率化に向けた工夫は行われているか。		○	事業のコスト削減や効率化を図るため、事業の進捗や社会情勢、NEDO内の評価委員会による中間評価を踏まえた事業の見直しを行う予定。
事業の有効性	成果実績は成果目標に見合ったものとなっているか。		-	-
	事業実施に当たって他の手段・方法等が考えられる場合、それと比較してより効果的あるいは低コストで実施できているか。		-	-
	活動実績は見込みに見合ったものであるか。		-	-
	整備された施設や成果物は十分に活用されているか。		-	-
関連事業	関連する事業がある場合、他部局・他府省等と適切な役割分担を行っているか。(役割分担の具体的な内容を各事業の右に記載)		-	-
	所管府省名	事業番号	事業名	-
	0	0 - 0000 - 00	0	
	0	0 - 0000 - 00	0	
	0	0 - 0000 - 00	0	
	0	0 - 0000 - 00	0	
点検・改善結果	点検結果	-		
	改善の方向性	-		
外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見【技術評価】				
次世代空調機器開発の基盤技術として、評価手法の開発及び標準化は国が世界をリードして取り組むべき課題である。国際標準獲得を実現するためには、冷媒の性能と安全性を広く世界に認知させ、支援国を増やすことが鍵であり、その目的を踏まえて目標をより具体的に設定する必要がある。さらに、世界市場シェア獲得に至るまでの道筋を明確にするためには、次世代空調機器の事業戦略にまで踏み込んだ検討をするべきである。(NEDO研究評価委員会における事前評価結果を抜粋。原文はNEDOのWeb上で公開。)				
外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見を踏まえた改善点等				
市場獲得に対して実効性のある安全性・リスク評価の項目を選定し、4つの研究テーマとしている。さらに、標準化・規格化の進め方や評価結果の効果的な普及について業界団体等との連携を図るため、事業体制や想定事業者以外の協力関係等を検討している。				

省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調 技術の最適化及び評価手法の開発

平成30年度概算要求額 **2.5億円（新規）**

事業の内容

事業目的・概要

- 平成28年10月のモントリオール議定書締約国会議において、代替フロン（HFC）の生産及び消費量の段階的削減義務等を定める議定書の改正が決議されました。
- 本改正では、先進国は2036年までにHFCを85%削減することが合意されました。この目標は、既存の冷媒物質では達成困難であり、代替物質への転換が避けられません。
- 新たな冷媒への転換に向けては、エネルギー効率と低温室効果の両立が鍵となりますが、次世代の冷媒候補物質については、可燃性を有するなどの課題があり、実用化にあたってのリスク評価が必要不可欠です。
- このため、次世代の冷媒候補物質について、冷媒として使用した場合のリスク評価手法を確立し、合わせて実環境下での評価を行うことにより、新たな冷媒に対応した省エネルギー型冷凍空調機器等の開発基盤を整備します。

成果目標

- 平成30年度から平成34年度までの5年間の期間で、次世代冷媒のリスク評価手法を確立し、国際標準化を目指すことで、省エネルギー・低温室効果を実現する次世代冷媒・冷凍空調機器等の開発加速を支援します。

条件（対象者、対象行為、補助率等）

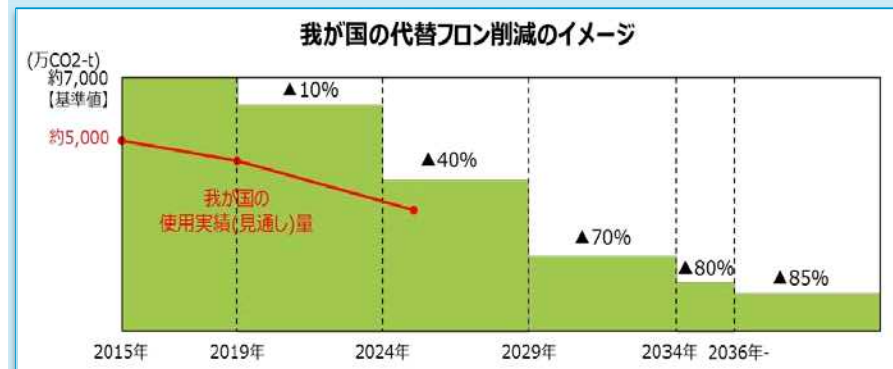


事業イメージ

- 次世代の冷媒候補物質について、従来以上のエネルギー効率と低温室効果を両立させ、それに対応した省エネルギー型冷凍空調機器の開発を促進するため、次世代冷媒候補物質及び冷凍空調機器の評価手法を確立し、実用環境下における評価を合わせて行います。
- 具体的には、低温室効果を有する次世代冷媒候補物質について、これを冷凍空調機器に使用した場合の物質挙動（燃焼条件・安定性等）やリスク（実用環境下での着火リスク、漏えい時のリスク等）について、基盤となる評価手法を確立し、国際標準化を目指します。

（主な技術開発課題）

- ・低温室効果を有する次世代冷媒の物質挙動やリスクの評価手法の確立、及び次世代冷媒を用いた省エネルギー型冷凍空調機器の実用環境下での評価。



**「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発 基本計画（案）」に対する
パブリックコメント募集の結果について**

平成30年2月21日
NEDO
環境部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
貴重なご意見をいただき、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間
平成 30年 1月 29日～平成 30年 2月 13日
2. パブリックコメント投稿数<有効のもの>
計 1 件
3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画・技術開発課題への 反映
1. 研究開発の目的		
(3) 研究開発の内容		
[意見1] (1件) 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価には、現在想定されている内容だけでなく、冷媒の摩擦特性への影響に関する技術開発も効果的だと考える。冷媒は潤滑油に混入し、その性能に大きく影響するため、冷媒の最適化には潤滑油も含めた摩擦特性評価と性能向上も重要。	ご意見いただきました研究開発の内容につきましては、現在の基本計画における冷媒特性評価に含まれるものと考えます。 今後実施を予定しております研究開発の公募におきまして同内容の提案が応募された場合には、採択審査において本プロジェクトの目的を達成するために最適かつ優先度の高い内容と判断された場合には実施することとなります。	特になし。

以上