



次世代低GWP冷媒の実用化に向けた高効率冷凍空調技術の開発

プロGRESSレポート

概要

＜2023～2025 年度進捗報告＞

2026 年 7 月

（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

目次

第1分冊 プロジェクト概要	1
第2分冊 冷媒グループ：低GWP混合冷媒の特性評価	2
1. 研究開発概要とアウトカム	2
2. 低GWP混合冷媒の熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み（九州大学）	4
3. 低GWP混合冷媒の音速データ取得（産業技術総合研究所工学計測標準研究部門）	6
4. 低GWP混合冷媒の状態方程式及び混合モデルの開発（九州産業大学）	6
5. 低GWP混合冷媒の絞り込みに資する安全性特性評価（産業技術総合研究所機能化学研究部門）	7
6. 低GWP混合冷媒のサイクル特性及び冷凍サイクルモデル試験機による性能評価（九州産業大学） ..	8
7. 低GWP混合冷媒のサイクル要素内損失分析（長崎大学）	9
8. 低GWP混合冷媒対応空調機器のLCCP評価方法の開発及びAI解析（エイゾス）	10
第3分冊 機器グループ：混合冷媒に対応する機器要素技術開発	11
1. 研究開発概要とアウトカム	11
2. 低GWP混合冷媒の伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発（佐賀大学）	12
3. 低GWP混合冷媒の伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発（東京海洋大学）	13
4. アルミニウムの表面構造制御による混合冷媒の蒸発・凝縮性能の向上と 伝熱管適用に関する研究開発（UACJ）	13
5. 低GWP混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発（神戸大学）	14
6. 圧縮機における冷凍機油の冷媒溶解挙動と適合性評価及び低GWP混合冷媒圧縮特性の解明 （静岡大学）	16
7. 圧縮機の機械効率向上のための低GWP混合冷媒雰囲気中における摩擦・摩耗・潤滑特性の解明 （大阪電気通信大学）	19
8. 圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価（アドバンスコンポジット）	19
第4分冊 安全グループ：低GWP混合冷媒の安全性・性能評価	22
1. 研究開発概要とアウトカム	22
2. HF0冷媒の自己分解反応の安全性の研究（電力中央研究所）	23
3. 自己分解反応評価手法の開発及びHF0-1123混合冷媒の研究（AGC）	24
4. 自己分解反応の評価手法の開発及びR1132(E)を含む混合冷媒の安全性確認（ダイキン工業）	26
5. 圧縮機内での自己分解反応誘発要因の特定とエネルギー評価手法の開発 （公立諏訪東京理科大学）	27
APPENDIX 自己分解反応の可能性のある冷媒の実使用における安全性評価（日本冷凍空調工業会） ..	28
第5分冊 評価グループ：低GWP混合冷媒のシステム評価手法開発	30
1. 研究開発概要とアウトカム	30

- 2. 次世代冷媒を採用した冷凍サイクルの性能評価研究開発（早稲田大学） 31
- 3. 冷凍サイクルシミュレーター用 AI 最適化アルゴリズムの開発（電気通信大学） 33

第 6 分冊 補助事業：低 GWP 冷媒の対応機器の開発 35

- 1. グリーン冷媒を使用したコンデンシングユニットの開発
（日立グローバルライフソリューションズ）..... 35

第1分冊 プロジェクト概要

モントリオール議定書のキガリ改正および日本のフッ素化合物の適正利用及び適正管理に関する法律は、地球温暖化係数（GWP）の低い次世代冷媒への移行を加速することを求めている。しかしながら、多くの低GWP冷媒は可燃性であり、その安全な取り扱いには多大な技術的・社会的コストが伴う。こうした課題に対処するため、日本は十分に低いGWP、低い可燃性（A2L分類）、そして高いエネルギー効率を兼ね備えた冷媒の開発を目指している。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援により、次世代低GWP冷媒の実用化に向けた冷凍空調技術の開発（JPNP23001）という国家研究開発プログラムが2023年に開始された。この5年間のプロジェクトは、大学、国立研究所、そして産業界のパートナーとの連携によって進められている。本プログラムは、以下の4つの並行研究テーマを統合している。（1）低GWP冷媒混合物のスクリーニングと特性評価、（2）化学的不安定性および自己分解リスクの評価と軽減、（3）高いシステム性能を維持するための主要コンポーネントおよび材料の開発、（4）性能評価方法および安全基準の確立。

これらの活動を通じて、本プロジェクトは、空調・冷凍システム向け低GWP冷媒の安全な商業化と国際標準化を加速させ、世界的な脱炭素化への取り組みとHVAC産業の持続可能な成長に貢献することを目指している。

第2分冊 冷媒グループ：低GWP混合冷媒の特性評価

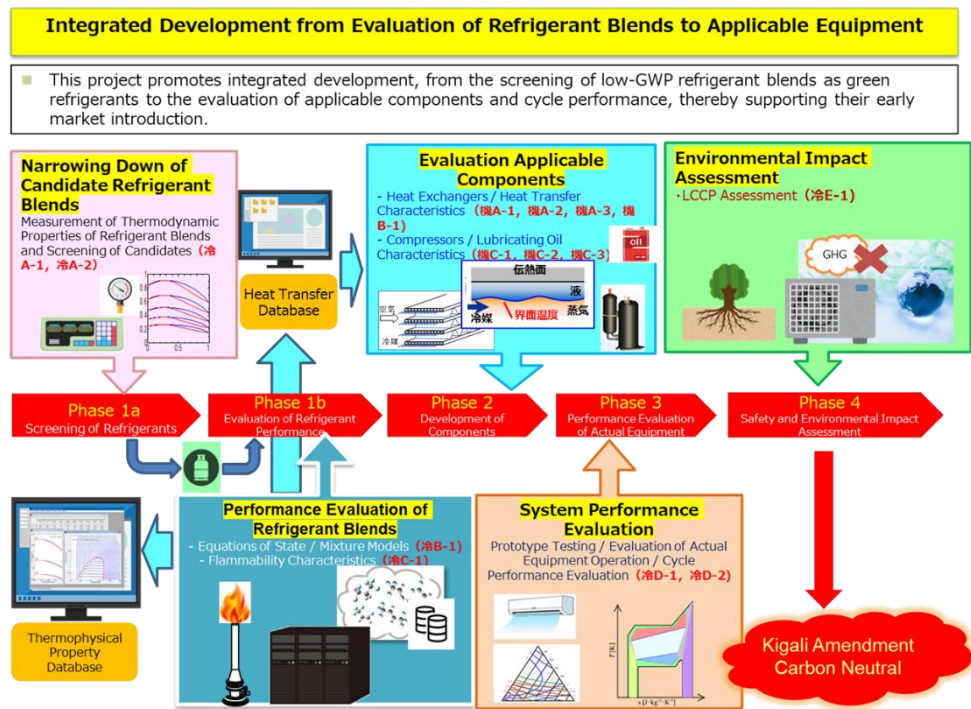
1. 研究開発概要とアウトカム

研究開発小項目「低 GWP 混合冷媒の熱物性・安全性・環境影響評価，対応機器の要素技術開発及びシステムの性能評価」では，Figure 2.1-1 に示すように「混合冷媒候補の絞り込み」（冷 A-1，冷 A-2）から，「混合冷媒性能評価」（冷 B-1，冷 C-1），「要素機器評価」（機 A-1，機 A-2，機 A-3，機 B-1，機 C-1，機 C-2，機 C-3），「システム性能評価」（冷 D-1，冷 D-2），そして「環境影響評価」（冷 E-1）まで，低 GWP 冷媒に対応するヒートポンプ空調機の実現を一気通貫で目指すものであり、本研究開発「低 GWP 混合冷媒の特性評価」では，Figure 2.1-1 の「混合冷媒候補の絞り込み」（冷 A-1，冷 A-2），「混合冷媒性能評価」（冷 B-1，冷 C-1），「システム性能評価」（冷 D-1，冷 D-2）及び「環境影響評価」（冷 E-1）に該当する部分を担当する。

まず「混合冷媒候補の絞り込み」（冷 A-1，冷 A-2），「混合冷媒性能評価」（冷 B-1，冷 C-1）では，低 GWP 混合冷媒候補のスクリーニングを行った後，2 成分系あるいは 3 成分系混合冷媒の中から，候補冷媒に関する熱物性値を高精度で測定し，状態方程式及び混合モデルを開発して，米国商務省標準技術研究所（NIST）が公開している熱物性計算ソフトウェア REFPROP への組み込みを行う。このことにより，次世代グリーン冷媒の対象を早急に絞り込むことができるようにする。そしてこれまでの NEDO プロジェクトで実施してきた冷媒物性評価では，GWP 値や熱物性，伝熱特性，そしてサイクル性能評価を中心に次世代冷媒の絞り込みを行ってきたが，今回新たに燃焼性などの安全性評価，新規混合冷媒の商品化のタイミング，冷媒の入手性，そして ASHRAE Standard 34 冷媒認証評価の結果も重要な要素として考慮した絞り込みを行い，「要素機器評価」（機 A-1，機 A-2，機 A-3，機 B-1，機 C-1，機 C-2，機 C-3）以降につながる研究開発のための信頼できる基盤となる情報を，いち早く提供する。

一方「システム性能評価」（冷 D-1，冷 D-2）では，「混合冷媒候補の絞り込み」（冷 A-1，冷 A-2），「混合冷媒性能評価」（冷 B-1，冷 C-1）で絞り込まれた混合冷媒を対象とし，機 A-1，機 A-2，機 A-3，機 B-1，機 C-1，機 C-2，機 C-3 で開発した先進的な熱交換器や圧縮機，冷凍機油を用いて，冷凍サイクルとして組み上げた形でのシステム評価を行う。そのためには，開発が進む熱交換器や圧縮機などの各要素部分を取り替えながら，柔軟にシステム性能評価が行える冷凍サイクルモデル試験機を新たに製作する必要がある。冷 A-1，冷 A-2，冷 B-1，冷 C-1 と結果を逐次フィードバックさせながら，サイクル性能評価を行って成果を検証するほか，より発展的なシステム性能評価，シミュレーション試験及び実機製作へ情報を提供する。この時，「混合冷媒性能評価」（冷 B-1，冷 C-1）において開発された状態方程式及び混合モデルが組み込まれた REFPROP が共通の熱物性計算ソフトウェアとして役に立つはずである。もし他の委託事業及び助成事業で実施される実機試験と，シミュレーション試験との間の差異が見られたとしても，相互連携が構築されることで，原因究明を迅速に行うことができる環境が整えられていれば，フィードバック作業で開発時間の短縮が見込まれる。

「環境影響評価」（冷 E-1）では，製品化を考えた時の LCCP 評価を実施し，事業化や生産性を考えた新冷媒を用いる製品の市場性を調査する。具体的には，低 GWP 混合冷媒対応空調機器について，LCCP 評価方法を開発し，LCA 評価を実施し，低 GWP 混合冷媒対応空調機器 1 台あたりの環境影響を評価する。また，低 GWP 混合冷媒対応空調機器の将来需要推計を行う。LCA 評価と将来需要推計を融合し，低 GWP 混合冷媒対応空調機器の普及に伴う将来の日本全体における環境影響を評価する。得られた成果は，各研究機関及び企業にフィードバックし，研究戦略の策定に向けた支援を行う。また，研究開発項目冷 A-1，冷 A-2，冷 B-1，冷 C-1，冷 D-1，冷 D-2，機 A-1，機 A-2，機 A-3，機 B-1，機 C-1，機 C-2，機 C-3 に対して，AI を用いた解析ツールを開発・活用し，研究開発の効率化を支援する。



Refrigerant Development Group: Kyushu University (冷A-1), NMIJ, AIST (冷A-2), Kyushu Sangyo University (冷B-1, 冷D-1), Research Institute for Sustainable Chemistry, AIST (冷C-1), Nagasaki University (冷D-2), AIZOTH (冷E-1)
Equipment Development Group: Saga University (機A-1), Tokyo University of Marine Science and Technology (機A-2), UACJ (機A-3), Kobe University (機B-1), Shizuoka University (機C-1), Osaka Electro-Communication University (機C-2), Advance Composite (機C-3)

Figure 2.1-1 Workflow of the development of the next-generation refrigeration systems

2. 低 GWP 混合冷媒の熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み（九州大学）

モントリオール議定書キガリ改正により、日本では 2036 年までに HFC の生産・消費量を 85%削減する義務があり、さらに 2050 年カーボンニュートラル達成の観点からも、低 GWP 冷媒の開発が強く求められている。このため、本研究では「GWP（地球温暖化係数）を可能な限り低くする」ことを最優先条件とする低 GWP 混合冷媒の開発の初期段階で必要不可欠となる候補冷媒の選定（スクリーニング）、熱物性データの取得、および混合冷媒の特性評価を行った。

冷媒は蒸発・凝縮の相変化を利用して熱輸送を行うため、使用機器の温度域に適合した熱物性（標準沸点、臨界定数など）を有する必要がある。また、安全性（燃焼性・毒性・分解反応）も重要な評価項目であり、この安全性評価に関しては、他グループとの連携により総合的に検討されている。候補冷媒の初期スクリーニングでは、NIST の McLinden らの研究成果を基盤とし、日本の研究者による実測データと経験を加味して、13 種類の冷媒が選定された。これらは HFO 系（R-1132a, HFO-1123, R-1132(E), R-1234yf など）、HFC 系（R-32, R-152a）、炭化水素（R-290 など）および CO₂ (R-744)などで構成される。ただし、単一物質としての使用は、性能・安全・環境の全条件を満たすことが困難であるため、現時点では混合冷媒としての利用が前提となる。

これら候補冷媒の中でも、特に HFO-1123 および R-1132(E)は、GWP が 1 以下と極めて低く、既存冷媒に近い熱力学特性を有するため第 1 成分冷媒として有望であると考えられる。しかし、自己分解反応の懸念から単一冷媒としての利用は難しく、混合冷媒の成分としての利用が想定されている。第 2・第 3 成分としては、入手性や実用性を考慮し、R-1234yf, R-1234ze(E), R-32, R-152a など有力候補に選び、さらにプロパン（R-290）や CO₂（R-744）といった自然冷媒も利用条件を限定すれば検討対象候補として残している。

九州大学では、多数の候補となる混合冷媒の熱物性測定を実施し、2026 年 3 月時点で、Table 2.2-1 および Table 2.2-2 にまとめた 2 成分系および 3 成分系について、PVT 特性、飽和密度、臨界点、気液平衡などのデータ取得を実施した。PVT 測定は、恒温槽中の圧力容器を用いた等容法を用い、温度 ± 5 mK、圧力 ± 1 kPa、密度 $\pm 0.15\%$ の高精度でデータ取得が行われた。飽和密度および臨界点の測定は、メニスカスの消滅の直接観察法により決定し、複数容器を組み合わせることで少量試料でも効率的な測定を可能としている。さらに気液平衡は循環法により測定し、TCD ガスクロマトグラフを用いて組成決定を行った。なお、これらの測定装置はすでに多くの実績を有しており、その信頼性は十分保障されている。

具体的な成果の一部として、まず R-32/1234yf 系混合冷媒の PVT_x データを取得し、既存の REFPROP の混合モデル（Akasaka モデル）と新しい Bell モデルとの比較を行った。R-32/1234yf 系混合冷媒は、ASHRAE の R 番号を取得している 3 成分系混合冷媒の中で、最も多く使用されている 2 成分系混合冷媒であり、この 2 成分系混合冷媒自体も R-454 系でも登録されており、R-454B (68.9mass% R32), R-454C (21.5mass% R32) を使用した機器が流通し始めている。R-32/1234yf 混合系に関する今回の評価では、REFPROP10.0 オリジナルモデルの Akasaka モデルは高密度域で精度が低下するが、Bell モデルは広い範囲で実験データを良好に再現できることが確認された。今後の計算には Bell モデルの使用が強く推奨される。

次に R-1132(E)/1234yf 系についても詳細な測定が行われ、臨界点近傍を除き密度偏差 0.5%以内という高精度で再現可能であることが示された。これにより、信頼性の高い実測データに基づく状態方程式と混合モデルの重要性が明確になった。さらに 3 成分系混合冷媒についても、複数の種類での測定が行われ、その評価を図で示している。

本研究は、低 GWP 混合冷媒の実用化に向けて必要不可欠となる候補物質の選定から、精密な熱物性測定、さらには REFPROP 計算モデルの検証までを包括的に実施しており、今後の冷媒開発およびデータベース整備に大きく貢献する基盤的成果であるといえる。

Table 2.2-1 Binary refrigerant mixtures measured at Kyushu University (as of March, 2026).

binary mixture	Composition [mass%]	PvT	Saturated density	critical point	critical locus	VLE
R-1132(E)/1234yf	23/77 (R-474A)	✓	N/A	N/A	✓	✓
	30/70	✓	✓	✓		
	50/50	✓	✓	✓		
	70/30	✓	✓	✓		
R-1132(E)/32	20/80	✓	✓	✓	✓	✓
	50/50	✓	✓	✓		
	80/20	✓	✓	✓		
R-32/1234yf	7/93	✓	N/A	N/A	✓	✓
	10/90	N/A	✓	✓		
	20/80	✓	✓	✓		
	21.5/78.5 (R454C)	✓	N/A	N/A		
	43/57	✓	N/A	N/A		
	50/50	✓	✓	✓		
HFO-1123/1234yf	30/70	✓	✓	✓	✓	✓
	50/50	✓	✓	✓		
HFO-1123/32	40/60	✓	✓	✓	✓	✓
	60/40	✓	✓	✓		
R-1132(E)/290	60/40	✓	✓	✓	✓	✓
	80/20	✓	N/A	N/A		
HFO-1123/290	65/35	✓	✓	✓	✓	✓
	80/20	✓	✓	✓		
R-1132(E)/744	90/10	✓	N/A	N/A	N/A	N/A
	60/40	✓	N/A	N/A		

(*) Check mark indicates that the measurement has completed, while “N/A” indicates that it has not yet been measured.

Table 2.2-2 Ternary refrigerant mixtures measured at Kyushu University (as of March, 2026)

Ternary mixture	Composition [mass%]	PvT	Saturated density	Critical point	Critical locus	VLE
R-32/1132(E)/1234yf	10/30/60	✓	✓	✓	N/A	✓
	21.5/28.0/50.5 (R-479A)	✓	✓	✓		
	22.0/19.5/58.5	✓	✓	✓		
	44/23/33 (R-479B)	✓	N/A	N/A		
R-32/1123/1234yf	10/40/50	✓	✓	✓	N/A	✓
	21.5/40.0/38.5	✓	✓	✓		

3. 低 GWP 混合冷媒の音速データ取得（産業技術総合研究所工学計測標準研究部門）

産業技術総合研究所工学計測標準研究部門では、次世代冷媒の高精度な状態方程式の開発に必要となる熱力学性質を正確に評価するため、HFO1123 や R1132(E) を主成分とする各種混合冷媒を対象として、気相域および液相域における音速と密度の精密測定を実施した。冷媒の状態方程式は、多様な熱力学性質が温度・密度についての微分から導出されるため、その基礎となる実測データの信頼性が極めて重要となる。特に音速は、エンタルピーやエントロピーなど冷凍サイクル評価において重要な物性の計算精度を左右する熱力学性質であり、状態方程式の計算精度向上に大きく寄与する。本研究では、産業技術総合研究所工学計測標準研究部門において独自に開発された二つの測定装置を用い、気相域および液相域の両相で高精度かつ広範囲にわたって音速・密度データを取得した。

気相域では、円筒型キャビティを用いた音波・マイクロ波共振法により音速・密度の同時測定を行った。サンプルガスが封入された円筒共振器内で音波共鳴を発生させ、その共鳴周波数を測定することで音速を求めることができる。本装置は音波共鳴に加えてマイクロ波共振も測定できるシステムとなっており、円筒共振器内が真空状態におけるマイクロ波共振周波数の計測からキャビティ寸法を求めることができる。そのため、参照流体による校正を必要とすることなく、気体音速の絶対測定を実現している点が本装置の大きな特徴となっている。この方法により、気体音速は約 0.04 % の拡張不確かさで測定することができ、音速が良く知られているアルゴンを用いた検証実験からも測定の信頼性が確認されている。さらに、サンプルガスが封入された円筒共振器内でマイクロ波共振周波数を測定することで、誘電率を同時に測定することができる。得られた誘電率データを誘電ベリアル式に基づき解析することにより、サンプルガスの密度も求めることができる。この方法により、気体密度は約 1 % の拡張不確かさで測定することができ、気体密度が良く知られているアルゴンを用いた検証実験からも測定の信頼性が確認されている。気相域における音速および誘電率データからは、理想気体状態の定圧比熱や分極率、双極子モーメントなど、状態方程式の理想気体項の構築に不可欠な基礎物性も導出することができる。

液相域では、超音波パルス伝搬式の音速センサと振動式密度計を組み合わせた音速・密度の同時測定装置を開発した。音速測定では、4 MHz の超音波パルスがサンプル液体中を伝搬する時間を測定し、センサ内部の温度・圧力補正パラメータを用いて音速を算出する。密度測定では、耐圧仕様の振動式密度計を用い、サンプル液体が封入された U 字管の振動周期から密度を決定した。音速および密度が良く知られている純水および R1336mzz(Z) を参照流体として装置の校正を行い、音速および密度測定の拡張不確かさはそれぞれ 0.17 % および 0.08 % と見積もられた。音速・密度データを同一の温度・圧力条件で同時に取得することで、断熱圧縮率の導出も可能となり、液相域物性を包括的に評価できる体制を構築した。

これらの装置および手法を活用し、HFO1123 および R1132(E) を主成分とし、R1234yf や R32 との 2 成分系・3 成分系の混合冷媒について、広範囲の温度・圧力域にわたって音速・密度データを取得した。各冷媒について得られたデータは、温度・圧力依存性を精密に示しており、混合冷媒の熱力学性質を評価する上で貴重な情報となる。特に、冷媒組成比の違いによる音速・密度の変化を系統的に示した点は、混合則モデルの検証や新たな状態方程式開発に大きく寄与するものである。

4. 低 GWP 混合冷媒の状態方程式及び混合モデルの開発（九州産業大学）

本研究開発項目「低 GWP 混合冷媒の特性評価」では、低 GWP 混合冷媒候補の迅速な絞り込みと、機器・システム評価に共通して利用できる高信頼な熱物性基盤の整備を目的としている。九州産業大学の担当は、

(1) 低 GWP 純冷媒 R-1132(E) のヘルムホルツ型状態方程式の開発、ならびに (2) R-32/1132(E) および R-1132(E)/1234yf の混合モデル（Kunz-Wagner モデルに基づく多流体近似）の構築である。得られたモデルは、

NIST の熱物性計算データベース REFPROP への実装を見据え、冷媒候補の絞り込み（冷 A-1）からサイクル評価（冷 D-1 および冷 D-2）および機器評価に至る一貫通貫の研究開発を支える共通基盤として位置付けられる。

まず R-1132(E)について、既存の実測値（蒸気圧、飽和液・飽和蒸気密度、 (p, ρ, T) 関係、気相音速、理想気体定圧比熱）を用いてヘルムホルツ型状態方程式を開発した。その結果、蒸気圧は 240 K～臨界温度近傍の範囲において平均偏差 0.08%で再現され、275 K 以上では概ね 0.05%以内に収まった。単相密度は液相で平均偏差 0.03%、気相で 0.17%と測定不確かさと同程度であり、気相音速は平均偏差 0.04%で再現された。一方、臨界近傍では密度偏差が最大約 2.9%となる点があり、臨界領域のデータ拡充が今後の状態方程式の高度化における課題である。また、限られたデータに基づくモデルで生じ得る外挿域の挙動破綻を避けるため、ベリアル係数、等容比熱、音速、相識別パラメータ（PIP）等を用いた熱力学的健全性の確認を実施し、広い温度・圧力範囲で不自然な挙動がないことを確認した。

次に、上記の純物質ヘルムホルツ式を用いて、R-32/1132(E)および R-1132(E)/1234yf の 2 成分系に対し、KW モデルに基づく多流体混合モデルを構築した。混合パラメータ（換算温度・換算密度に関する 4 パラメータと超過量の寄与を調整する係数）を、冷 A-1 で取得した単相 (p, ρ, T) 関係および気液平衡（飽和密度、沸点圧力）のデータに対する非線形最小二乗法により最適化した。目的関数にはデータ種別に応じた重み付けを導入し、液相密度の再現性を重視しつつ、飽和蒸気密度など不確かさが大きい量が過度に最適化を支配しないよう配慮した。さらに、過学習に起因する気液平衡計算の数値不安定や物理的不整合を避けるため、最適化の過程で気液平衡曲線、比熱、音速などの挙動を臨界・外挿領域で監視し、必要に応じて使用データ点や重みを調整して最終パラメータを確定した。その結果、沸点圧力は両系とも相対偏差 1%以内で再現され、飽和密度についても REFPROP 推算パラメータを用いた場合に比べて再現性が向上した。一方で R-1132(E)/1234yf 系では飽和蒸気密度の偏差が 3～5%程度観察され、KW0 モデルの一般化偏奇関数の適用限界が示唆されたため、臨界近傍挙動の改善にはこの系に特化した偏奇関数導入や高压域データ拡充が今後の課題である。

以上より、本研究課題では、低 GWP 混合冷媒候補の評価・設計に不可欠な純物質ヘルムホルツ型状態方程式と混合冷媒に対する混合モデルを整備し、サイクル評価や機器設計に共通する熱物性基盤情報を構築した。今後は、臨界近傍を含む追加データの取得とモデル高度化、ならびに REFPROP 実装を通じた他項目への迅速なフィードバックを進め、低 GWP 混合冷媒の候補絞り込みと実用化検討の加速に貢献する。

5. 低 GWP 混合冷媒の絞り込みに資する安全性特性評価（産業技術総合研究所機能化学研究部門）

本研究開発では、特に GWP が低く、安全性に優れた次世代冷媒の検討を進めるため、候補冷媒の燃焼特性の定量評価を行い、混合冷媒の絞り込みを支援するデータを取得することを目的とした。

対象候補冷媒として、低 GWP フルオロエチレン系冷媒を含む 3 成分混合系を中心に検討し、燃焼諸特性の混合比および冷媒濃度依存性等の評価を行い、国内外で検討されている冷媒の安全性基準を満たす混合組成範囲、例えば、国際標準 ISO817 における「微燃性等級（Class 2L）」に分類され我が国の高压ガス保安法令（HPGSA）が定める「特定不活性ガス」に位置づけられるガスと同等以上の高安全性となる混合組成範囲を明確化することを目指した。評価指標としては、特に微燃性等級を定義する上で必須の燃焼限界および燃焼速度を中心に評価した。

具体的には、R1132(E)/R32/R1234yf 系および CO₂/HFO-1123/R290 系の燃焼特性を評価した。これら 3 成分混合系の評価に必要な 2 成分混合系や成分単体の燃焼特性についても必要に応じて評価した。またその過程で、通常重力下では評価が難しいことが判明した極微燃性冷媒に対しては、微小重力実験装置や軽量化

消炎距離測定装置等を駆使し、正確な燃焼速度や消炎距離を測定できるようにした。さらに、冷媒評価グループで絞り込んだ2種類の候補の爆発限界については、HPGSA 法による測定に加えて ISO817 が要求する燃焼限界測定法（ASHRAE 法）において評価を実施することにより、ASHRAE 34 や ISO 817、高压ガス保安法令への国際・国内登録に向けた根拠となるデータを示した。

まず、冷媒評価グループで冷媒候補として選定された R1132(E)/R32(10 wt%固定)/R1234yf 混合系の燃焼特性評価を行った。まず、燃焼特性が明らかになっていない R1132(E)単体について種々の条件における燃焼諸特性の評価を行い、R290 とほぼ同等の燃焼速度や消炎距離を有することを明らかにした。次に2成分混合系 R1132(E)/R1234yf の標準条件における評価を行い、混合比との関係を得た。それらを基に R1132(E)/R32(10 wt%固定)/R1234yf 系の燃焼特性の混合比依存性を明らかにし、特に R1132(E)比が 61 wt%以下であれば最大燃焼速度が 10cm s^{-1} 以下の微燃性等級となることを明らかにした。更に、冷媒評価グループで絞り込まれた2つの候補 30/10/60 および 40/10/50 wt%について、ISO817 の定める ASHRAE 法により燃焼限界の測定を行い、国内外の標準登録申請に耐えうるデータを取得した。その結果、HPGSA 法と ASHRAE 法による評価値がほぼ一致することを示し、いずれの候補も微燃性等級となることを明らかにした。

また、3成分混合系 CO_2 /HFO-1123/R290 の燃焼特性評価を行った。まず、必要な2成分混合系 CO_2 /R290 について、標準条件における燃焼限界、燃焼速度、燃焼熱、消炎距離等の燃焼特性評価を行い、 CO_2 による熱希釈の理論を基に数式化することにより、不燃から強燃性まで任意の混合組成における燃焼特性データを取得可能にした。次に当該3成分混合系の評価を行い、微燃性等級となる混合条件を明らかにした。HFO-1123 に R290 が少量でも加わると、燃焼性を低減するために必要な CO_2 量が大幅に増え、微燃化するためには CO_2 /R290 系と大差が無いほど多くの CO_2 が必要になることを明らかにした。

また、燃焼速度や消炎距離といった実測値と理論モデルとの整合性の確認も行い、これらの混合系においても本質的には燃焼速度と消炎距離の逆比例関係が成り立つことを示し、信頼性の向上を進めるとともに、燃焼性推算手法の確立も目指して研究を進めた。今後こうした成果を基に、冷媒評価グループおよび他の開発グループとの連携を通じて、実機での使用を見据えた総合的な冷媒評価を進めていく。

6. 低 GWP 混合冷媒のサイクル特性及び冷凍サイクルモデル試験機による性能評価 (九州産業大学)

本節では、家庭用エアコンを想定した冷凍サイクルモデル試験機を用いて、既存冷媒である R32 と、低 GWP 混合冷媒である R474B のサイクル特性を比較し、その性能差と適用可能性について検討している。評価の主眼は、同一試験機・同一条件の下で両冷媒にどのような差が表れるかを明らかにするとともに、その差がどの機器・どの熱力学的要因によって生じるのかを整理する点にある。とくに本研究では、システム全体の成績係数、サイクル単体の成績係数、熱交換器内温度分布、圧縮比、不可逆損失、圧縮機効率などを主要な評価指標とし、単なる能力比較ではなく、冷凍サイクル内部の損失構造まで踏み込んだ検討が行われている。

試験機は、圧縮機、クロスフィンチューブ式凝縮器、電子膨張弁、クロスフィンチューブ式蒸発器から構成される冷媒ループと、凝縮器側・蒸発器側に接続された熱源水ループによって構成されている。この装置を用いることで、暖房条件および冷房条件の双方において、R32 と R474B のサイクル挙動を比較できるようになっている。すなわち、本研究は単に冷媒そのものの物性比較ではなく、実際の冷凍サイクル中で冷媒がどのように振る舞い、どこで損失が増幅されるのかを実験的に把握しようとした点に特徴がある。

実験の結果、R474B は暖房条件・冷房条件のいずれにおいても R32 より低い COP を示した。ただし、その差は冷房時よりも暖房時に大きく現れた。最も重要な要因の一つは作動圧力の差である。R474B は R32 よりも低圧で作動するため、同程度の熱交換量を得るには蒸気密度の低下を補う形で冷媒流速が増加しやすい。その結果、配管や熱交換器内部での圧力損失が増え、圧縮機入口圧力が低下する。圧縮機入口圧力の低下は

圧縮比の上昇につながり、圧縮に必要な仕事を増加させるため、COP 低下の大きな要因となる。とくに暖房条件では蒸発器側が厳しい低温条件となるため、この入口圧力低下の影響が強く表れ、R474B の不利が拡大したと考えられる。

さらに、R474B が非共沸混合冷媒であることに由来する温度グライドも、性能差の重要な要因として挙げられる。R32 では二相域で温度がほぼ一定に推移するのに対し、R474B では凝縮・蒸発の過程で温度が連続的に変化する。そのため、熱交換器内において冷媒と熱源水との温度差が局所的に拡大しやすく、熱交換の不可逆性が高まる。特に暖房時の凝縮器側では、この温度グライドの影響が顕著となり、不可逆損失の増加が暖房性能の低下に直結している。したがって、R474B の性能低下は、単に圧縮機負荷の増大だけでなく、熱交換器内での熱力学的不整合が重なって生じているといえる。

また、圧縮機側の適合性も無視できない要素である。本文では、圧縮機における不可逆損失が暖房条件で特に大きく、圧縮比の上昇に伴って断熱圧縮仕事だけでなく、内部漏れや摩擦に伴う損失の寄与も増加すると整理されている。加えて、インバータ効率には大きな差が見られなかった一方で、圧縮機効率や体積効率には差が確認されており、冷媒物性や潤滑油との適合性、必要トルク、冷却状態などが関係している可能性が示唆されている。すなわち、R474B の性能課題は熱交換器側だけではなく、圧縮機・潤滑油を含めたシステム全体の適合設計に関わる問題である。

一方で、R474B が全面的に不利であるわけではない。冷房条件では暖房条件ほど大きな性能差は現れておらず、体積効率についても常に悪化するとは限らないことが述べられている。これは、R474B の適用可能性が運転条件や機器とのマッチングに強く依存することを示している。また、R474B の最大の利点は GWP の低さであり、今後ますます環境負荷低減が求められる中で、低 GWP 冷媒としての価値は大きい。そのため、現行の R32 用システムへそのまま代替する用途には課題が残るものの、低压損熱交換器、温度グライドを考慮した熱交換器設計、適合した圧縮機および潤滑油を前提とした次世代システム用冷媒として再評価することに意義がある。

以上より、本研究は R474B の現状性能を R32 と比較して明らかにしただけでなく、その性能低下の要因を圧力損失、温度グライド、不可逆損失、圧縮機適合性といった観点から整理し、改善の方向性まで示した点に意義がある。すなわち、R474B は現時点では単純置換用冷媒としては課題を有するものの、専用設計を施した次世代低環境負荷システム向け冷媒としての可能性があり、今後さらに検討を進めることで、その有効性や適用条件をより明確にしていく必要がある。

7. 低 GWP 混合冷媒のサイクル要素内損失分析（長崎大学）

本研究では、低 GWP 冷媒を用いた空調用冷凍サイクルの性能評価を目的として、2 kW クラスの蒸気圧縮式実験装置を用いた圧縮機効率の測定と、その結果を用いたサイクルシミュレーションを実施した。実験装置は圧縮機、二つのクロスフィンチューブ式熱交換器、電子膨張弁から構成され、空気熱源を模擬するため水槽内で熱源水と直交流動させて熱交換を行った。温度および圧力を各測定点で計測し、得られたデータと冷媒循環組成から REFPROP を用いて冷媒状態量を算出し、断熱効率、機械効率、体積効率およびインバータ効率を評価した。実験は R32、R1234yf およびその混合冷媒について実施した。

測定の結果、断熱効率は冷媒種による顕著な差は見られず既存の相関式とよく一致した。一方で、機械効率および体積効率には冷媒による差異が確認された。これは POE オイルと冷媒の相溶性の違いに起因すると考えられ、R1234yf では溶解性が高いためオイル粘度が低下し、漏れ損失が増加することで機械効率が低下した。また蒸気密度の高い R32 では必要トルクが大きいものの漏れ損失が小さいため、インバータ効率が高い傾向を示した。これらの測定結果を用いて圧縮機特性をモデル化し、熱交換器内の微小区間分割計算を含

むサイクルシミュレーションを構築した。実験結果とシミュレーション結果を $P-h$ 線図上で比較したところ、両者は良好に一致し、モデルの妥当性が確認された。

構築したモデルを用いて、R32/HFO-1123/R1234yf 系および R32/R1132(E)/R1234yf 系の三成分混合冷媒について冷房能力 2.0kW 条件で性能予測を行った。その結果、最大 COP はそれぞれ 3.4 および 4.1 となり、温度グライドの増加に伴い COP が低下し必要伝熱面積が増大することが明らかとなった。最大体積能力は R32/HFO-1123/R1234yf 系が 7500 kJm^{-3} 、R32/R1132(E)/R1234yf が 6500 kJm^{-3} となり、最高 COP の場合とその優位性は逆転する。最大体積能力は R1234yf がより少ない組成で表れた。また、最大 COP および体積能力は GWP 制約および不均化反応のリスクによって制限される組成領域の影響を強く受けることが確認された。

さらに、蒸発器内温度グライドと COP 低下率の関係を R32/HFO-1123/R1234yf 系および R32/R1132(E)/R1234yf 系を例に整理した。その結果、 $\text{COP}/\text{COP}_{\text{ideal}}$ は温度グライドに対してほぼ線形関係を示し、平均傾きは約 -0.036 となった。この相関式による COP 予測の平均絶対誤差は約 2% 以内であり、簡易設計手法として有用であることが示された。

8. 低 GWP 混合冷媒対応空調機器の LCCP 評価方法の開発及び AI 解析（エイゾス）

本研究は、低 GWP（地球温暖化係数の低い）混合冷媒を用いた空調機器の普及が、日本全体の環境に与える影響を評価することを目的とする。具体的には、ライフサイクルアセスメント（LCA）およびライフサイクル温暖化特性（LCCP）評価と将来の需要推計を統合し、機器の製造から使用、廃棄に至るまでの環境負荷を包括的に分析する。また、安全性や社会受容性も考慮した評価枠組みを構築し、得られた知見を研究機関や企業にフィードバックすることで、研究・事業戦略の高度化を支援する。

本研究では、LCA/LCCP 評価を活用して、家庭用エアコン 1 台あたりの環境影響および日本全体への影響を評価する。LCCP 評価では、LCCP 評価の枠組みの中で日本標準の係数を用いて解析を行うとともに、特許情報に基づく冷媒製造時の LCA 評価や、サイクルシミュレーションによる消費電力推計等を組合せて解析する。

冷媒製造時の LCA 評価の結果、冷媒製造時の環境負荷は原料や製造プロセスの歩留まりに大きく依存し、特に歩留まりが低い場合には負荷が増大することが明らかとなった。自然冷媒（プロパンや CO_2 ）は製造段階の負荷が比較的小さい一方、一部の合成冷媒は高い環境負荷を示した。

サイクルシミュレーションの結果、エアコンの年間消費電力量は冷媒によって異なり、単一冷媒の方が混合冷媒よりも消費電力が小さい傾向が確認された。

LCCP 評価では、環境影響の大部分が使用時の電力消費に由来することが示され、冷媒自体の GWP が低くても、エネルギー効率が低下すれば LCCP が増加することが分かった。したがって、冷媒選定においては GWP だけでなく、ライフサイクル全体での影響を考慮することが不可欠である。総合的に見ると、低 GWP かつ低 LCCP を両立する冷媒として、R1132(E)、R1234ze(E)、R290 などが有望とされたが、安全性（可燃性など）への配慮も重要な課題である。

日本におけるエアコンの将来需要を推計した結果、小型機種が大きな割合を占め、人口減少に伴い稼働台数が減少する傾向が示された。今後は、これらの需要予測と 1 台あたりの環境影響を組み合わせ、普及シナリオに基づく日本全体の環境影響評価を行う。

最後に、本研究では AI を活用した解析も実施した。機械学習により、冷媒の GWP を高精度に予測する手法を開発した。このモデルは分子構造情報から GWP を推定し、新規冷媒や混合冷媒のスクリーニングを効率化するものである。本ツールにより、環境性能に優れた冷媒の探索と空調機器設計の最適化が加速されることが期待される。

第3分冊 機器グループ：混合冷媒に対応する機器要素技術開発

1. 研究開発概要とアウトカム

本章（本分冊）で報告する研究では、キガリ改正への対応に向けた次世代低 GWP 混合冷媒の実用化を目的とし、混合冷媒特有の温度グライドおよび物質伝達抵抗に起因する熱交換器性能低下に対する課題克服、また混合冷媒を使用する圧縮機の性能および信頼性の確保のため、熱交換器および圧縮機に関する要素技術の高度化を統合的に推進した。本課題では、複数機関の連携により、(1) 混合冷媒の伝熱劣化メカニズムの解明と抑制技術、(2) 熱交換器設計および性能評価、(3) 冷媒輸送性質の測定・モデル化、(4) 伝熱データベースおよび機械学習による予測、(5) 圧縮機における冷媒－油系特性評価および混合冷媒圧縮特性解明、(6) 圧縮機の機械効率向上、(7) 圧縮機部品用材料の開発について包括的に研究開発を実施した。

まず、混合冷媒の凝縮および蒸発過程において、物質拡散抵抗に起因する伝熱劣化が発生し、純冷媒と比較して凝縮で 30～40%、蒸発で 15～50%程度の熱伝達率低下が生じることを明らかにした。また、微細流路内の流動様式、ボイド率、圧力損失、核沸騰特性を体系的に評価し、混合冷媒ではボイド率低下や沸騰開始過熱度の増大（約 22 K）および熱伝達率低下（最大約 40%）が生じることを示した。さらに、並列流路における流動不安定性や振動流が伝熱特性に与える影響を明らかにし、リウエット効果による伝熱促進の可能性を示した。

熱交換器技術に関しては、扁平多孔管とコルゲートフィンで構成された熱交換器の実験および数値解析により性能評価を行い、従来の対数平均温度差（LMTD）法の適用限界を示すとともに、局所熱伝達を考慮した分割解析手法を構築した。また、表面構造および流路構造の最適化により伝熱劣化抑制を図り、多孔質表面による約 10～15%の伝熱向上、微細フィン流路による 1.3～2.7 倍の伝熱促進効果を確認した。一方で、多孔管内壁への均一表面処理の困難性など、実用化に向けた課題も明確化した。加えて、約 9.7 万点の伝熱・圧力損失データからなるデータベース（RECDB）を構築し、相関式評価機能を整備するとともに、機械学習により熱伝達率予測モデルを開発し、従来相関式を上回る精度を達成した。

冷媒輸送性質については、粘度および熱伝導率の高精度測定と拡張対応状態原理（ECS）に基づくモデル化により、新規冷媒および混合冷媒の実測値に対して $\pm 1\sim 2\%$ 程度の誤差で予測可能なモデルを構築した。

圧縮機技術に関しては、冷媒－冷凍機油混合系の溶解特性、組成変化および油戻り特性を解明し、混合冷媒特有の組成偏析や液膜輸送挙動が圧縮機性能に影響を与えることを明らかにした。また、摺動部の摩擦・摩耗特性を実験的に評価し、摩擦係数が無次元軸受定数に依存して変化すること、高速運転条件において摩擦特性が機械効率に大きく影響することを示した。さらに、複合材料の適用により転がり接触の増加や摩耗低減の可能性が示される一方、材料内部構造に起因する異常摩耗などの課題を抽出した。

圧縮機用材料技術としては、圧縮機部品への適用を目的としたアルミニウム基複合材料を開発し、密度 2.73 g/cm^3 と従来鋳鉄に対して約 60%の軽量化を達成するとともに、引張強さ 360 MPa、ヤング率 120 GPa、疲労強度 133 MPa を実現し、機械的特性の向上を確認した。また、被削性評価により切削抵抗増加と引き換えに工具摩耗を約 30%低減できることを示し、加工性および耐摩耗性の観点からも適用可能性を明らかにした。

以上の成果により、新規低 GWP 混合冷媒に対応した熱交換器および圧縮機の設計に必要な基盤技術として、伝熱現象、流動特性、物性、データ科学、材料、および機械要素を統合した評価体系の構築を進めた。本研究成果は、低 GWP 混合冷媒を用いた冷凍空調機の開発および普及を促進し、HFC 系冷媒の使用削減に貢献するとともに、その高効率利用および冷凍空調機器の省エネルギー化に資するものである。

2. 低 GWP 混合冷媒の伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発（佐賀大学）

本研究では、次世代低 GWP 冷媒の実用化において課題となる伝熱性能の低下を克服するため、混合冷媒特有の伝熱現象を考慮した熱交換器要素技術の高度化を目的として研究開発を実施した。具体的には、(1) 熱交換器設計および性能評価、(2) 冷媒の輸送性質の測定およびモデル化、(3) 相関式評価機能を備えた伝熱データベースの構築、(4) 機械学習による熱伝達率予測、の 4 つの観点から統合的な検討を行った。

まず、非共沸混合冷媒の熱交換特性に着目した。混合冷媒では、相変化過程において温度グライドが生じるため、純冷媒とは異なる温度分布および伝熱特性を示す。例えば、R32 と R1234yf の混合冷媒である R454A、R454B、R454C では、組成に応じて温度グライドが約 1~5℃ の範囲で変化する。なお、この 3 つの混合冷媒では、R1234yf の割合が増加するほど GWP は低下する一方で温度グライドは増大する傾向を示す。さらに、熱交換器内部では摩擦圧力損失に伴う温度変化も生じ、特に凝縮過程では温度グライドと同方向に作用するため、伝熱性能の低下や必要圧縮機動力の増加につながる。このような背景から、混合冷媒を適用した空調機器においては、小さな温度差で高効率に熱交換可能な熱交換器設計が重要となる。

この課題に対し、本研究では温湿度可変風洞を用いた熱交換器性能評価装置を構築し、混合冷媒を使用した熱交換器の評価実験を行った。まず、扁平多孔管を伝熱管とし、空気側にフィンを有する熱交換器を対象とし、空気側圧力損失および凝縮・蒸発伝熱特性の測定を行った。実験の結果、空気側圧力損失はレイノルズ数の増加に伴い増大し、摩擦係数は低下する一般的な傾向を示すことを確認し、既存のルーバーフィン用相関式の係数を修正することで、実験データを良好に再現可能であることを示した。さらに、凝縮試験において、熱交換器性能指標である KA 値を評価した結果、対数平均温度差 (LMTD) を用いる従来の手法は、過熱蒸気から過冷却液まで状態が連続的に変化する混合冷媒系には適用が困難であることが明らかとなった。この問題に対し、熱交換器を微小領域に分割した数値解析手法を導入し、局所的な熱伝達率および温度分布を反復計算により求めることで、実験結果と整合する評価が可能であることを示した。

冷媒の輸送性質（粘度および熱伝導率）は、熱交換器設計やシステムシミュレーションにおいて不可欠な情報であり、新規冷媒に対しては高精度な測定およびモデル化が求められる。本研究では、粘度をタンデム型細管法により、熱伝導率を非定常細線法により測定し、REFPROP に組み込まれている拡張対応状態原理 (ECS) に基づく計算モデルの高精度化を図った。その結果、既存の REFPROP では十分な精度が得られない新規の冷媒に対しても、パラメータフィッティングにより $\pm 1 \sim 2\%$ 程度の精度で測定値を再現可能であることを示した。なお、参照流体の状態方程式および輸送性質を用いて対象流体の物性値を推算する ECS モデルのパラメータフィッティングの枠組みを整備し、新規の純冷媒および混合冷媒への適用性を確認した。

本研究では伝熱データの統合的活用を目的として、伝熱データベース (RECDB) の構築を進めた。本データベースには、円管内、扁平多孔管内、プレート式熱交換器内の蒸発および凝縮熱伝達、ならびに圧力損失に関して、本 NEDO プロジェクトで得られた実験データおよび文献データから収集した実験データが収録されており、2026 年 3 月時点で約 97,000 点以上のデータが蓄積されている。RECDB では、データ検索・可視化・条件抽出機能に加え、相関式評価ツールの開発を進めており、目的に応じたデータ選別と相関式の適用性評価が可能となる。これにより、多様な冷媒および伝熱条件に対する知見の体系化と、設計指針の高度化が期待される。

RECDB に蓄積された大規模データを活用し、機械学習による熱伝達率予測モデルの構築を行った。まず、18 種類の純冷媒を対象とした約 22,000 点の流動沸騰（蒸発）のデータを用い、線形回帰、ワイドニューラルネットワーク、サポートベクターマシンなどを含む計 28 種類のモデルの予測性能を比較した。その結果、Bagged Trees モデルが最も優れた予測性能を示し、RMSE は 1.97 と高い精度を達成した。また、SHAP 解析により、冷媒種類および管形状が最も重要な因子であり、次いで壁面温度や質量流束が支配的な影響を持つことを明らかにした。これにより、従来の経験式では捉えきれなかった非線形かつ多変量の影響を高精度に表現可能であることを示した。

以上のように、本研究では、新規低 GWP 混合冷媒に対応した熱交換器設計のための基盤技術として、熱交換器の実験評価、輸送性質の測定・モデル化、データベース構築、機械学習解析を統合した包括的な評価体系を構築した。今後は、本研究で確立した手法を他の冷媒系や熱交換器構成へ展開し、次世代低 GWP 冷媒の実用化に向けた高効率冷凍空調技術の確立に貢献することを目指す。

3. 低 GWP 混合冷媒の伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発（東京海洋大学）

現在開発が進められている低 GWP 混合冷媒の多くは非共沸性であり、熱交換器内において混合冷媒特有の凝縮過程及び蒸発過程における物質伝達抵抗に起因する伝熱性能の低下（伝熱劣化）が課題となっている。本研究開発項目では、低 GWP 混合冷媒に対応する熱交換器の開発のために、混合冷媒の伝熱劣化メカニズムを解明し、表面処理を施した伝熱面や微細な流路構造による伝熱劣化の抑制技術を確立することを目指す。これまでに扁平多穴管を模した水平並列微細流路内における混合冷媒の相変化を伴う流動様相および液膜構造の可視化、ならびに蒸発・凝縮熱伝達率の評価を行うとともに、伝熱面への表面処理および流路形状による伝熱劣化抑制効果について検証した。

・低 GWP 混合冷媒の沸騰・凝縮熱伝達特性の解明

扁平多穴管を模した並列微細流路（水力直径 1.0 mm）を用い、非共沸混合冷媒の凝縮および蒸発流の流動様相の可視化および熱伝達特性の評価を実施した。混合冷媒の熱伝達率は純冷媒よりも低く、特に低質量速度域において伝熱劣化の影響が大きいことを確認した。R474A の熱伝達率は、純冷媒 R1234yf と比較して、同質量速度・クオリティ条件において凝縮では 30–40%、蒸発では 15–50%低い値を示すことを明らかにし、その要因が物質拡散抵抗によることを特定した。

・表面性状による伝熱促進

これまでに微細流路内における混合冷媒の沸騰熱伝達特性に及ぼす表面性状の影響については十分な知見が得られていない。本研究では、アルミニウム合金製の流路に多孔質層を形成した表面処理面（アノード酸化処理面）における熱伝達率を測定し、表面性状による伝熱促進効果について評価した。平滑面と比較して、表面処理面ではより微細かつ多数の気泡の形成が観察され、多孔質層が気泡核生成を促進することを確認した。特に、熱流束が比較的高い場合に表面処理面による伝熱促進効果がみられ、平滑面と比較して熱伝達率は約 15%向上し、純冷媒 R1234yf を上回る熱伝達率が得られることを確認した。

・流路形状による伝熱促進

流れの攪拌を促進するとともに境界層の破壊を目的として、多数の傾斜微細フィンを有する流路（以下、微細フィン流路）を製作し、その伝熱劣化抑制および伝熱促進効果について検討した。低質量速度条件（ $G = 50 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）においても、並列微細流路と比較して微細フィン流路では 1.3–2.7 倍の高い伝熱促進効果が得られ、微細フィンによる流れの攪拌促進効果が非共沸混合冷媒の伝熱劣化抑制および伝熱促進に有効であることを確認した。

本研究により、多孔質層の形成および微細フィンによる流れの攪拌促進が伝熱促進および伝熱劣化抑制に有効であることを明らかにした。今後は、他の候補冷媒を含めた低 GWP 混合冷媒を含めた評価を行うとともに、他研究開発項目と連携して熱交換器の開発のため伝熱劣化の抑制および伝熱促進に関する要素技術の開発を目指す。

4. アルミニウムの表面構造制御による混合冷媒の蒸発・凝縮性能の向上と伝熱管適用に関する研究開発（UACJ）

アルミニウム多孔管は、省スペース化と軽量化の利点から、近年定置型空調用の熱交換器としての普及が進んでいる。微細流路内における気液二相流の表面張力効果により、円形流路よりも熱伝達率が向上する特

性を有している。近年の環境規制に伴い低 GWP の非共沸混合冷媒の適用が有力視されているが、これらを用いる場合管内熱伝達性能が低下するという大きな課題がある。重力や表面張力による流動分布の偏りで成分分離が生じることや、低沸点成分が優先的に蒸発し高沸点成分が表面に濃縮されることで、液膜が不均一になり伝熱効率を阻害するため、これら課題を解決する新たな改善策が必要である。

本プロジェクトでは、混合冷媒特有の伝熱性能低下を抑制し、熱交換性能を最大化するための要素技術開発を行っている。具体的には、アノード酸化（陽極酸化）技術を用いて伝熱管となるアルミニウム表面にナノスケールの多孔質（ポーラス）構造を形成し、沸騰特性を改善するアプローチを検証している。2027 年度の最終目標として、伝熱劣化抑制効果のある表面処理技術と、最適化された流路構造を組み合わせた試作熱交換器を開発し、その性能評価を行うことを目指している。

表面処理による伝熱性能向上の検証では、定電流アノード酸化および化学溶解処理により、アルミニウム表面に厚さ約 700 nm、孔径約 70 nm の無数の細孔を持つポーラス型酸化皮膜を安定的に形成することに成功した。この多孔質表面を有する試験片に対し混合冷媒（R454C）を用いて沸騰伝熱特性を評価した結果、気泡核の生成が促進されて気泡が微細化し、無処理の流路と比較して熱伝達率が約 13%向上することが確認された。これにより、表面の微細構造制御が混合冷媒の沸騰伝熱促進に有効であることが実証された。

実際の多穴管の流路内壁へのアノード酸化処理の適用性を検証した結果、多穴管を単純に電解液へ浸漬して通電する方法では、イオン拡散が律速となり、多穴管外面ばかりに厚い酸化皮膜が形成され、流路内壁の皮膜は極端に薄くなることが判明した。管外面をマスキングした実験や、管内部に補助電極（白金線）を挿入した実験においても、反応が流路入り口付近に集中して局所的な溶解が発生し、均一な皮膜が形成されず、閉鎖的な長尺流路への「付き周り性の悪さ」が浮き彫りとなった。

これまでの結果から、多穴管流路内壁へ均一な多孔質構造を形成するには、単純な浸漬法ではなく、流路内への液の強制流動などを組み合わせた特殊な表面処理プロセスの構築が必要不可欠である。プロジェクト後半では、この付き周り性を改善した表面処理手法の確立に注力する。さらに、表面処理だけでなく、ドライアウト（乾き）領域へ液相を連続的に供給し、最適な液膜を保持するための「多穴管の断面形状の最適化」による伝熱促進も並行して進める。最終的にはこれらの知見を統合した試作熱交換器を作製し、風洞実験を通じた熱交換性能の総合評価を計画している。

5. 低 GWP 混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発（神戸大学）

低 GWP 冷媒として開発されている HFO 系冷媒は、単体での使用では熱輸送能力が低いため HFC 系冷媒を混ぜた混合冷媒として使用することが不可避の状況にある。非共沸混合では、平衡状態が保たれていても相変化とともに飽和温度が変化する温度グライドが存在するとともに、気液界面での非平衡による界面温度の変化によって蒸発熱伝達率を低下させる。一方、空調機の成績係数の向上は省エネルギーの観点から強く求められており、また、熱交換器の小型軽量化のためにも KA 値（熱通過率 K 、伝熱面積 A ）の増大が必要である。非共沸混合冷媒では K の増大は望めないことから、 A の増大をせざるを得ない状況にある。この要求に対しては、冷媒流路の細径化による伝熱面積密度の増大が有効であり、冷媒-空気熱交換器では、アルミ製扁平多孔管の利用が不可避であると考えられる。

そこで、神戸大学では微細流路内冷媒熱流動特性の解明を目的とした単流路実験、非共沸冷媒での液相攪拌を狙った並列流路での振動流に関する実験、液膜内核沸騰による液相攪拌につなげるための沸騰開始過熱度および核沸騰熱伝達に関する実験を行った。得られた研究成果を以下にまとめ示す。

・微細流路内冷媒二相流の熱流動特性とボイド率特性

内径 1mm の円形流路に対し純冷媒 R1234yf と非共沸混合 R454C を用いた水平気液二相流実験を行い、流動様式、ボイド率、圧力損失を評価した。流動様式はスラグ流、セミアニュラー流、環状流、擾乱のない環

状流が観察された。気液各相の Weber 数 We_G, We_L で整理した流動様式線図では、Akbar and Ghiaasiaan の流動様式遷移モデルと概ね一致したが、R454C では環状流への遷移が少し高い We_G 、つまり高い気相速度になる傾向が確認された。平板型電極を用いた静電容量センサで計測した体積平均ボイド率を蒸気乾き度に対して下図に示す。Cioncolini and Thome の相関式とほぼ同じ傾向であったが、その値は相関式よりも低くなった。R454C は R1234yf よりやや低い値となった。加熱部直下流での計測であったため、R454C の場合、相変化の遅れで実際の蒸気乾き度が低かった可能性がある。摩擦圧力損失は Lockhart-Martinelli 法で整理できる。R454C の二相増倍係数は Kim and Mudawar の相関式より低い値を示した（下図参照）。低乾き度での高い温度変化が影響している可能性が示唆される。

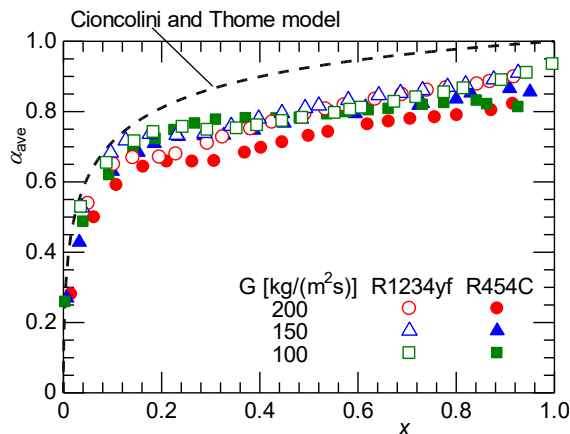


Figure3.5-1 Average void fraction of R1234yf and R454C.

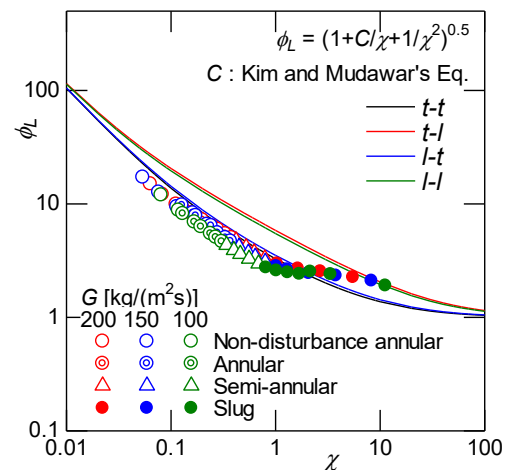


Figure3.5-2 Frictional pressure loss arranged by L-M method.

・並列流路内の冷媒蒸発流の振動流と熱伝達特性への影響

扁平多孔管を模擬した水平並列流路における蒸発熱伝達実験を行い、並列流路の入口ヘッダ容積が流動様相および熱伝達特性に及ぼす影響を評価した。定容量ポンプで一定の質量流量を供給する条件において、ポンプ入口圧力を一定とした場合、並列流路において顕著な振動流、偏流は確認されなかった。一方、実用熱交換器を想定し、並列流路入口の圧力を一定とした場合、入口ヘッダの容積が大きいほど流動が不安定となり、並列流路から入口ヘッダ部へ逆流する様子も観察された。ヘッダにアルミ製金属多孔板を設置し、並列流路入口との距離 Δh を変化させることでヘッダ空間の容積を操作した。 $\Delta h=0, 2, 4 \text{ mm}$ とした場合の熱伝達率計測結果を下図に示す。200 mm の加熱区間で計測された局所熱伝達率であり、同じ条件で計測された 3 ヶ所の計測結果が実線で結ばれている。振動流が観察された条件を中抜き記号で、振動流が観察された条件を中塗り記号で示されている。低乾き度では 4 mm の結果が最も低くなったが、振動流によって核沸騰が抑制されたためである。一方、高乾き度ではドライパッチのリウェット効果によって平均熱伝達率が向上した。

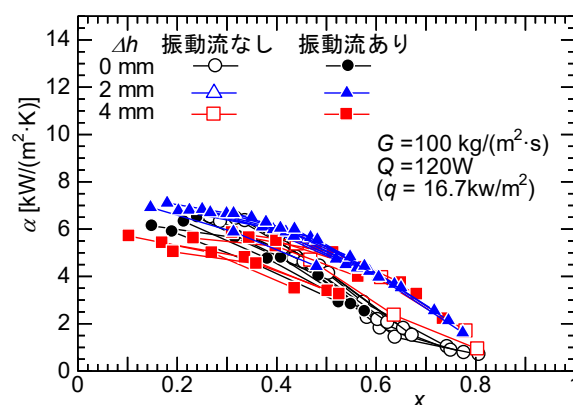


Figure3.5-3 Local heat transfer coefficient.

・ 沸騰開始過熱度の特定と非共沸混合冷媒組成比の影響

プール沸騰実験において沸騰開始過熱度および核沸騰熱伝達特性を評価した。純冷媒と比較して R454C の沸騰開始過熱度は 22.24 K と高く、R1234yf に対して 1.17 倍であった。R454C の発達した核沸騰での熱伝達率は純冷媒に対して約 40 %低下した。熱流束に対する変化割合は純冷媒とほぼ同じであった。一方、R1234yf と R32 で構成される非共沸混合冷媒について、R32 の組成比を操作した実験を行った。沸騰曲線に及ぼす組成比の影響を下図に示す。図中の割合は、R32 の組成比である。壁面過熱度が大きいほど熱伝達率が低いことを意味する。これより、沸騰開始過熱度に及ぼす混合比の影響は小さく、高沸点媒体である R1234yf 純冷媒での値とほぼ同等であった。しかし、核沸騰熱伝達率は、R32 の組成比の低下によって大きく低下した。10%で大きく低下しているが、R32 の割合を大きくするほど熱伝達率は改善し、50%で R1234yf と同程度の熱伝達率になっている。プール沸騰における核沸騰熱伝達率の低下は、気泡上昇時の気泡成長における蒸発速度の低下によるものであり、細管内強制流動蒸発において核沸騰支配となれば、液膜攪拌によって熱伝達率の低下が抑制されると期待できる。

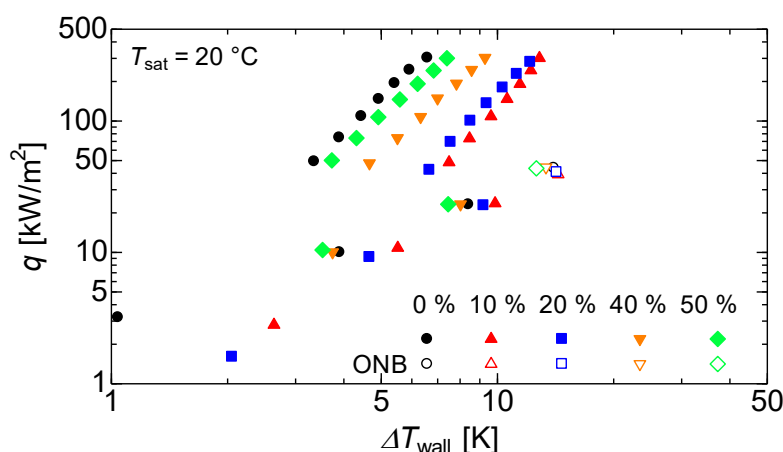


Figure3.5-4 Boiling curve for refrigerant with several mixing ratio at $T_{\text{sat}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6. 圧縮機における冷凍機油の冷媒溶解挙動と適合性評価及び低 GWP 混合冷媒圧縮特性の解明 (静岡大学)

近年、冷凍空調分野においては地球温暖化対策として低 GWP（地球温暖化係数）冷媒への転換が強く求められている。冷凍サイクルにおいて、冷媒圧縮機が果たす役割は大きく、低 GWP 冷媒への転換には低 GWP 冷媒に対応した冷媒圧縮機の開発が不可欠である。低 GWP 混合冷媒利用下の冷媒圧縮機において、圧縮機の性能と信頼性を確保するためには、低 GWP 混合冷媒に適した冷凍機油の開発・評価、非共沸混合冷媒の冷

凍機油への溶解特性、非共沸混合冷媒の圧縮特性の把握が重要となる。このような背景の下、本研究では、次の研究項目に分けて、研究を実施した。

- ・ 冷凍機油／冷媒混合物の溶解特性 ～溶解度・物性計測・体積変化について～
- ・ 冷凍機油／冷媒混合物の溶解特性 ～溶解成分・溶解度予測について～
- ・ 鉛直上昇管の油膜計測に基づく油戻り量の定式化
- ・ 混合冷媒の組成変化を考慮した圧縮機特性予測モデルの構築と代替冷媒適用性評価
- ・ 低 GWP 冷媒用高速圧縮機の設計指針の構築と試作圧縮機試験

2023 年度～2025 年度は、現在入手が容易な非共沸混合冷媒を対象に試験を行い、基礎特性・物性の把握を行った。また、圧縮機開発・実用に向けて、これらの基礎特性を考慮した圧縮機計算モデルの構築・モデル計算を行い、圧縮機の設計指針を検討し、試作圧縮機試験の準備を進めた。それぞれの各研究項目について、以下に概要を記す。

- ・ 冷凍機油／冷媒混合物の溶解特性 ～溶解度・物性計測・体積変化について～

冷媒圧縮機では、一般的に冷媒と相溶性を持つ冷凍機油が用いられる。圧縮機内では冷媒が冷凍機油に溶解し、その溶解度に応じて種々の物性も変化する。このため、冷凍サイクルにおける冷凍機油の選定においては、種々の温度・圧力条件における冷凍機油に対する冷媒の溶解度と共に、溶解度に応じた混合物の物性変化を把握しておくことが重要である。また、本研究プロジェクトが対象とする低 GWP 非共沸混合冷媒では、沸点の異なる複数の単一冷媒が混合されているため、純粋な冷媒とは溶解挙動が異なる可能性がある。本研究項目では、POE または PVE と R454C 冷媒とその混合成分である R32・R1234yf との混合液の溶解度の測定と物性値の一つとして屈折率の測定を行った。測定は、温度を 30～90℃、冷媒濃度を 0～100%まで変化させて行っている。この計測に加えて、冷凍機油／冷媒混合物の体積も測定し、混合による体積変化についても調べた。

非共沸混合冷媒では一定温度における露点圧力と沸点圧力が異なるため、露点圧力以上沸点圧力未満の圧力範囲において、単一冷媒と異なる状態で気液平衡が成立する可能性がある。このため、冷媒溶解度測定として、一般的な溶解度の計算方法に加え、冷凍機油に溶解している冷媒のみを考慮した冷媒溶解度の算出も行った。両者の結果はほぼ同じ傾向を示しており、POE/R454C 混合物について、圧力は冷媒質量分率の増加とともに増加し、質量分率が 0.5 程度までは圧力は大きな上昇幅で急激に増加し、一方で、質量分率 0.5 程度以上では増加傾向も緩やかになり、露点圧力と沸点圧力の範囲内で緩やかな増加が見られた。加えて、圧力変化が緩やかになる質量分率は高温である程大きく、30℃においては 0.4 程度であった。

冷凍機油／冷媒混合物の屈折率は、POE/R454C 混合物について、30℃～70℃の温度では冷凍機油中の冷媒濃度の増加に伴い屈折率は低下する傾向が見られ、ほぼ同じ冷媒濃度でも温度の上昇に伴い屈折率はわずかに低下した。一方、90℃では二層分離が発生するため冷媒濃度が 60%以上で屈折率がほとんど変化しなくなった。

冷凍機油への冷媒混合による体積変化については、質量分率が 50%程度の時に混合前の純粋な冷媒と油の液量と比較して、混合時に体積が最も小さくなった。また、この質量分率の時、温度が大きいほど、混合時に体積が減少していることが分かった。

- ・ 冷凍機油／冷媒混合物の溶解特性 ～溶解成分・溶解度予測について～

非共沸混合冷媒は、沸点の異なる複数の単一冷媒から構成されているため、各成分が冷凍機油に対してそれぞれ異なる溶解特性を示す可能性がある。本研究項目では、HFO 系冷媒を含む非共沸混合冷媒の冷凍機油に対する溶解特性として、混合冷媒を構成する各成分の冷凍機油への選択溶解を実験により調べた。

冷凍機油／冷媒混合物の飽和溶解状態における溶解組成として、PVE/R454C 混合物において計測を行った結果、20℃においては、溶解組成は充填時組成とほとんど一致しており、選択溶解はほとんど確認されな

った。一方で、60℃においては、冷媒質量分率が30～60%において、R32の溶解組成が充填時の組成よりわずかに小さくなっており、この領域では、R32よりR1234yfの選択溶解性がわずかに確認された。

・鉛直上昇管の油膜計測に基づく油戻り量の定式化

新冷媒の実用を考えると、冷凍サイクルの配管における油戻りの特性についても評価する必要がある。圧縮機への配管においては、流れは環状二相流の流動様式となり、粘度の高い冷凍機油が冷媒の流動によってどの程度輸送されるか調べる必要がある。本研究項目では、可視化による流動様相の観察および液膜センサによる油膜厚さの経時変化を測定し、予測について必要な計測パラメータについて検討した。

実験では、水および二種類の粘度のグリセリン水溶液を用いて液膜厚さを測定した結果について、Inoue and Maeda (Phys. Fluids, 2021)により導出された式をもとに、界面摩擦係数としてWallisの式を用いることで、実験で得られた基底液膜のみを精度良く予測できた。一方、界面摩擦係数としてBlasiusの式を用いると、特に大きく値が外れた低い液膜Re数の領域、すなわち高粘性液体において、本実験結果よりその基底液膜厚さが予測可能であり、線形速度分布より基底液膜によって輸送される液膜量も見積もることができた。

環状気液二相流における液膜の輸送機構について、基底液膜による液体搬送に管内の気体流量によって決定する限界値の存在が予想でき、基底液膜によって運ぶことが困難な供給液体流量に対する余剰分の液体が、表面波によって搬送されるものと予想することができた。

・混合冷媒の組成変化を考慮した圧縮機特性予測モデルの構築と代替冷媒適用性評価

低GWP冷媒として、非共沸混合冷媒が有力な代替候補として検討されている。しかしながら、混合冷媒では組成比に応じて熱物性が変化するため、圧縮機の性能や損失特性に大きな影響を及ぼす可能性があり、予測モデルの構築等により、様々な組成において圧縮機特性を予測できるようにする必要がある。

冷媒にR22を用いた際の実測データと構築した圧縮機モデルの比較を行った。冷媒質量流量、圧縮機動力、体積効率および全効率、いずれの評価量についても、計算値と実測値は概ね±10%以内で一致していることが確認され、構築した圧縮機モデルの妥当性が示された。

R32/R1234yf混合冷媒の組成比を変化させた場合の冷媒質量流量、圧縮機動力、体積効率、全効率について、構築した圧縮機モデルを用いて予測を行った。R32の質量分率の増加に伴い、冷媒流量は単調に減少し、これに対応して体積効率も同様に低下する。一方、圧縮機動力および全効率は、R32の質量分率の増加に伴い緩やかに減少する傾向を示した。また、図示損失、漏れ損失および機械損失に対する組成変化の影響はほとんど認められなかった。

・圧縮機設計指針の構築と試作圧縮機試験

現在検討されている低GWP混合冷媒の多くは、従来の冷媒に比べて体積冷凍能力が低い傾向にあり、必要な冷凍能力を確保するためには、圧縮機の大形化や高速化が挙げられるものの、実用を考えると圧縮機の高速度により現行冷媒と同等の冷凍能力を確保することが有効なアプローチとなる。そこで、本研究項目では、ロータリ圧縮機を対象として、高速化に伴い顕著となる損失要因を理論的に検討し、これらの検討結果をもとに圧縮機の改良点を精査し、試作圧縮機を製作した。

圧縮機高速化における課題との方策を検討し、理論的検討をもとにそれぞれの方策の効果を検討した。以上の検討結果を基に、国内圧縮機メーカー製の2.8kW級2シリンダロータリ圧縮機をベースに圧縮機の試作を行った。試作機では、モータを高速運転が可能なモータに変更し、ベーンおよびピストンに再委託先で開発された軽量化部材を適用（変更）した。完成した試作圧縮機を試験用冷凍サイクルに接続し、運転性能の測定を開始している。

7. 圧縮機の機械効率向上のための低 GWP 混合冷媒雰囲気中における摩擦・摩耗・潤滑特性の解明 (大阪電気通信大学)

低 GWP 混合冷媒を使用した圧縮機について、現在と同等の性能を維持し、さらなる向上を目指すためには、圧縮容積の拡大が必要となる。圧縮容積拡大のためには、圧縮機本体を大きくする、または、圧縮機の運転速度を上げて時間当たりの圧縮量を増やす必要がある。圧縮機本体を現在より大きくしないという要望にも応えるためには、圧縮機を高速運転化する必要がある。その際、高速運転することにより各機構摺動部の摩擦損失が増大し、機械効率が低下することがないようにしておく必要がある。

本研究開発項目では、従来よりも高速運転をする圧縮機の開発に役立てるために、機 C-3 で開発される複合材料を使用し、低 GWP 混合冷媒雰囲気中での摩擦特性を明らかにする。特に、機械損失に大きく関わる圧縮機機構部での摩擦・摩耗・潤滑特性を詳しく調べ、機 C-1 で検討の高性能な低 GWP 混合冷媒用圧縮機の設計指針作成に役立てる。

ロータリー圧縮機では、ベーンとシリンダーの溝、ベーンとローリングピストン、ローリングピストンとシリンダー等の各部がいかによく滑りあえるか、いかに良く転がれるかが機械効率に影響する。それぞれの箇所における摩擦特性を明らかにするため、実機の摺動条件を再現した試験機を作製し、冷媒雰囲気中での摩擦力、油膜力を実験的に計測している。

ベーンとシリンダー溝の摩擦係数は、粘度と速度の積を単位長さ当たりの押付力で割った無次元軸受定数が 5×10^{-7} 程度より小さい範囲では摩擦係数はほぼ一定であり、それ以上になると、徐々に低下する傾向が確認できた。鋳鉄同士を組み合わせるよりも複合材料を使用する方が摩擦係数がやや大きくなることが確認できた。また、複合材料を使用する場合、複合材と鋳鉄を組み合わせるのではなく、複合材料同士を組み合わせた方が摩擦係数がやや小さくなる傾向が確認できた。

ベーンとローリングピストンの摩擦係数は、鋳鉄同士を組み合わせた場合、無次元軸受定数が 5×10^{-5} 程度より小さい範囲では摩擦係数はほぼ一定であった。無次元軸受定数がおおよそ 5×10^{-5} 以上のとき摩擦係数が徐々に低下する傾向がみられた。複合材と鋳鉄を組み合わせた場合には無次元軸受定数がおおよそ 1×10^{-4} 以上のとき摩擦係数が徐々に低下する傾向がみられたが、複合材同士を組み合わせた場合には今回の試験の範囲では摩擦係数の低下は確認できなかった。

材料の摩耗特性を検討するために、摩耗による減少体積を共焦点顕微鏡を用いて計測し、比摩耗量で整理している。表面粗さや接触面圧の影響について分析を進めているところであり、結果の詳細については追って報告する。

本研究課題で得られた摩擦係数の計測値は、過去の研究で見いだされた摩擦係数値に近い値になっているが、両者の間には有意な差が認められる。もちろん、冷媒、潤滑油、材料などの諸因子に原因しているものと考えられる。軸受定数が高い領域で摩擦係数が急激に低下する特性も観測されている。この結果は、圧縮機の高速運転時には軸受定数が大きくなるので、その際の性能をシミュレーションするうえで極めて重要であると考えられる。高速運転をするロータリー圧縮機の可動部品に複合材料を使用した場合に機械効率を最大にする寸法諸元はどうあるべきか等についても計算を進めている。解析の結果については追って報告する。

8. 圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価 (アドバンスコンポジット)

近年、冷凍空調分野では地球温暖化対策として、低 GWP 冷媒への転換が強く求められている。低 GWP 冷媒を用いた冷凍サイクルでは、冷媒圧縮機の性能がシステム全体の効率や信頼性に大きく影響する。一方で、低 GWP 冷媒では冷凍能力の低下が懸念されており、これを補うためには圧縮機の高回転化や大型化が必要となる可能性がある。しかし、圧縮機の大規模化は設置面積や重量の増加につながり、高回転化はモーター軸

や摺動部品への負荷増大、耐久性低下の要因となり得る。そのため、低 GWP 冷媒に対応した圧縮機の実現には、圧縮機部品の軽量化、高剛性化および信頼性向上が重要な技術課題となる。

本研究では、アドバンスコンポジット株式会社が有する金属基複合材料技術を活用し、低 GWP 混合冷媒対応圧縮機部品に適した軽量高剛性材料の開発と基礎物性評価を行った。特に、圧縮機の回転部品等に一般的に使用される鋳鉄 FC250 を比較対象とし、これに代替可能なアルミニウム基複合材料の設計、試作および評価を進めた。開発目標としては、密度 3.0 g/cm^3 以下、引張強度 200 MPa 以上、ヤング率 110 GPa 以上、熱膨張係数 14 ppm/K 以下、疲労強度 100 MPa 以上、ブリネル硬さ 120 HBW 以上を設定し、軽量性と機械的特性を両立する材料の開発を目指した。

2023 年度は、圧縮機部品に使用される材料の調査と、金属基複合材料の基礎設計を実施した。圧縮機部品、特に回転部品には鋳鉄 FC200 または FC250 が用いられる例が多いことから、FC250 相当の機械的特性を基準として開発を進めた。材料設計にあたっては、密度、熱膨張係数、弾性率などの概算に複合則を活用した。ただし、強度や弾性率、熱的特性は、強化材の粒子形状、粒径、分散状態、ならびにマトリクスとの界面状態に大きく影響されるため、複合則は設計の目安として用いた。初期検討では、既存材料である AC-Albolon® を基準に、マトリクス合金の変更による強度向上を試みた。その結果、開発材は密度 2.79 g/cm^3 、引張強度 $240 \sim 260 \text{ MPa}$ 、ヤング率 $110 \sim 115 \text{ GPa}$ 、熱膨張係数 $11 \sim 12 \text{ ppm/K}$ 、疲労強度 105 MPa 、ブリネル硬さ 129 HBW を示し、概ね開発目標を満足した。一方で、疲労強度は目標値を上回ったものの、さらなる信頼性向上の余地があることが分かった。破面観察では、強化材を取り囲むようにマトリクス材が線状に分布し、その周辺に沿って亀裂が進展している様子が確認された。また、強化材の形状や粒径にばらつきが見られ、これらが材料強度のばらつきや疲労特性に影響している可能性が示された。

2024 年度は、2023 年度の結果を踏まえ、強化材の粒子形状および粒径を見直し、複合材料の再設計を行った。その結果、開発材‘24_MMC02N は、密度 2.73 g/cm^3 、引張強度 360 MPa 、ヤング率 120 GPa 、熱膨張係数 12.5 ppm/K 、疲労強度 133 MPa 、ブリネル硬さ 174 HBW を示した。これにより、FC250 と比較して大幅な軽量化を達成しながら、引張強度、ヤング率および疲労強度を上回る機械的特性を得ることができた。特に、マトリクス変更のみの場合と比較して、強化材構造の見直しが機械的特性の向上に有効であることが明らかとなった。破面観察の結果、引張試験片では破壊起点を示す放射状模様が明瞭に確認され、外観上は脆性的な破壊形態を示した。一方、SEM による微視的観察では、延性破壊の痕跡であるディンプルも認められた。疲労試験片では、金属基複合材料特有の平滑な破面形態が観察され、強化材の形状に由来すると考えられる微細な気孔状形態も確認された。また、一部に介在物が認められたことから、今後の量産化に向けては、強化材加工工程における異物混入の抑制や品質安定化が重要であると考えられる。

2025 年度は、開発材‘24_MMC02N の実用化を見据え、被削性評価を実施した。ミーリング加工では、従来の AC-Albolon® と比較して、MMC02N は切削抵抗および刃先温度が高い傾向を示した。これは、開発材の機械的強度が高いことに起因すると考えられる。一方で、工具摩耗については、加工初期では両材料に大きな差は見られなかったものの、加工距離の増加に伴い、MMC02N は摩耗進行が緩やかとなった。最終的には、MMC02N は従来材に比べて工具摩耗量が少ない結果を示し、高強度でありながら加工性の面でも実用化の可能性を有することが確認された。また、旋盤加工では、超硬工具およびダイヤモンド工具を用いて、工具摩耗、切削抵抗および加工後の表面粗さを比較評価した。その結果、超硬工具では切削抵抗が高く、工具摩耗も大きくなる傾向が見られた。一方、ダイヤモンド工具では、特に仕上げ加工において工具摩耗が小さく、安定した加工が可能であることが確認された。表面粗さについては、一部条件で初期摩耗やアルミの溶着に起因すると考えられる粗さの増加が見られたが、加工距離の増加とともに安定する傾向も確認された。これらの結果から、MMC02N の加工には工具材種および加工条件の最適化が重要であり、ダイヤモンド工具の適用が有効である可能性が示された。

以上の成果により、本研究で開発した‘24_MMC02N は、FC250 と比較して密度を約 62% 低減しながら、引

張強度を 44%，ヤング率を 20%，疲労強度を 18.8%向上させることができた．熱膨張係数についても FC250 に近い値を維持しており，圧縮機部品に求められる寸法安定性の面でも有望である．これにより，本研究の目標である圧縮機の軽量化，特に圧縮機 10%軽量化への貢献が期待できる．また，被削性評価では，開発材は切削抵抗が高い一方で工具摩耗が少ない傾向を示し，適切な工具選定および加工条件の設定により，実用加工が可能であることが示された．

今後は，これまでに得られた機械的物性および加工性に関する成果を基盤として，生産性，品質安定性およびコストの観点から開発を進める．特に，強化材の粒子形状・粒径管理，介在物混入の抑制，量産工程における品質ばらつきの低減，ならびに最適加工条件の確立が重要である．これらの課題を解決することで，低 GWP 冷媒対応圧縮機向けの軽量高剛性金属基複合材料として，実用化および市場展開が期待される．

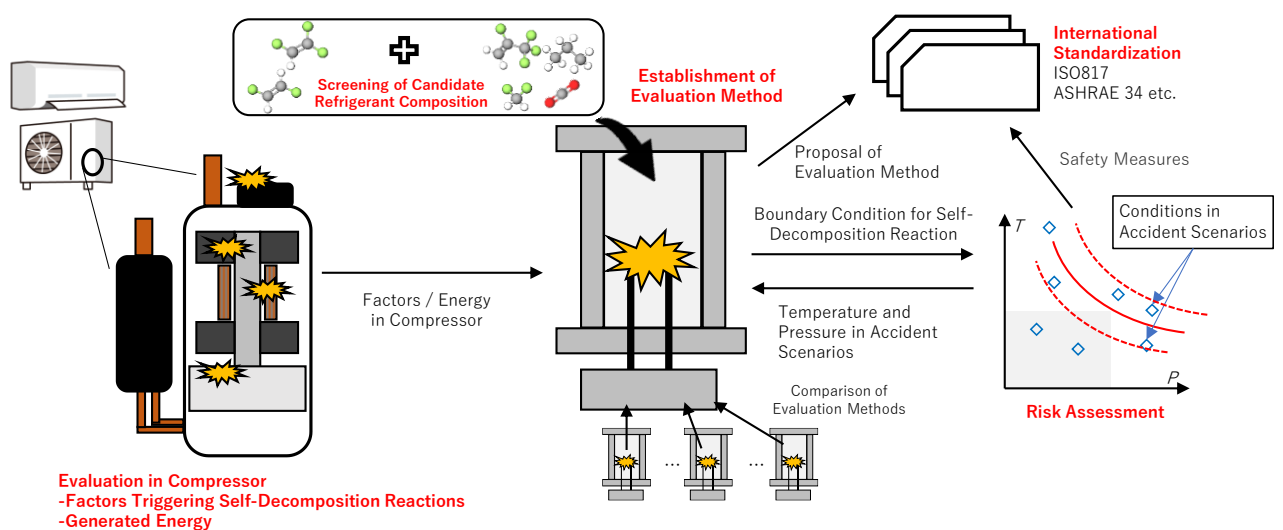
第4分冊 安全グループ：低 GWP 混合冷媒の安全性・性能評価

1. 研究開発概要とアウトカム

代替フロンである HFC は温室効果が高く、京都議定書、パリ協定、ならびにモントリオール議定書キガリ改正により、生産・消費量の大幅削減が求められている。このため、家庭用・業務用空調機器や小型冷凍冷蔵機器を対象として、低 GWP 冷媒とその適用機器の早期開発が重要課題となっている。特に、代替冷媒が未確定な家庭用空調機等では、冷媒候補の選定から機器設計・評価までを一体で進めることが必要である。次世代低 GWP 冷媒として、HFO-1123 および R1132(E)が注目されている。これらは現行主要冷媒 R32 に近い熱物性を有し、家庭用・業務用空調、電動車用空調、冷凍冷蔵用途で有望な候補である。一方で、これらの冷媒は自己分解反応を生じ得るため、従来の燃焼性・毒性に加えて、安定性の観点を含む新たな安全性評価が必要である。自己分解反応は、高圧・高温条件、冷媒組成、および外部からの投入エネルギーに強く依存する。特に、異常運転により圧縮機内で高温・高圧状態が生じ、かつ電気絶縁不良により放電が発生した場合には、自己分解反応が誘発される可能性がある。この反応は発熱反応であるため、圧力・温度上昇により圧縮機破裂等の重大事故につながる懸念がある。

以上を踏まえ、安全性評価グループでは、①自己分解反応誘発要因特定とエネルギー評価手法開発、②自己分解反応評価法の開発、③冷媒組成絞り込み、④リスク評価、⑤国際標準化、を主要課題として研究開発を進めている (Figure 4.1-1)。また、日本冷凍空調工業会と共に自己分解反応研究会を組織し、産官学の枠組みでリスク検討を実施している。

本研究により、家庭用空調機器実機における各種短絡モードに応じた放電エネルギーと、自己分解反応発生限界データを比較することで、自己分解反応の発生リスクを評価できる。さらに、自己分解反応の観点から安全と判定される冷媒組成の規定、安全な冷媒・機器要件の提示、および国際規格への反映が可能となる。他グループの安全性・環境性・性能評価成果と統合することで、次世代 HFO 冷媒の実用化と国際標準化を加速し、パリ協定およびキガリ改正の目標達成や、冷媒メーカー・機器メーカーによる次世代 HFO 冷媒の実用化にも貢献する。



2. HFO 冷媒の自己分解反応の安全性の研究（電力中央研究所）

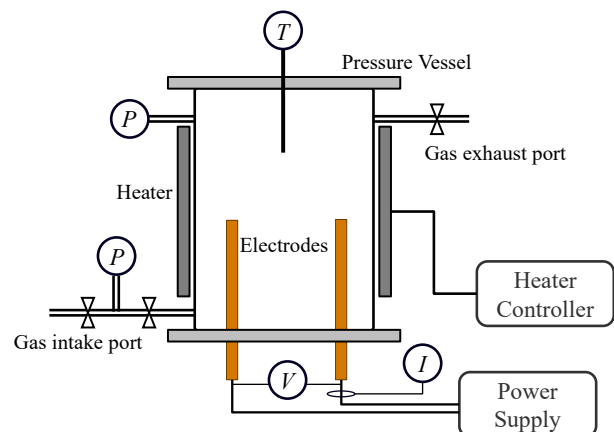
HFO-1123 や R1132(E)は極めて低い GWP を有する一方、自己分解反応による安全性の懸念が実用化・普及の障害となっている。また、低 GWP 性や安全性に加え、冷媒として十分なサイクル性能を満たす必要がある。先行 NEDO プロジェクトでは、HFO 冷媒およびその混合冷媒の自己分解反応条件が調査されたが、試験方法が統一されておらず、評価法によって反応境界が異なることが課題として残された。このため、国際標準化に向けて、試験手法および判定法を含む評価法の標準化が不可欠である。

現行の冷媒安全性等級は、ISO 817:2024 において燃焼性と毒性に基づいて定められている。しかし、自己分解反応のような安定性に関する課題は扱われていない。自己分解反応性を有する次世代低 GWP 冷媒の登場を受け、ISO/TC86/SC8 (Refrigerants and refrigeration lubricants) では、我が国主導で TF3 (Refrigerant Stability Classification) が設置され、ISO 817 に冷媒安定性分類を追加する改定作業が開始された。2026 年 3 月現在では、十分な安定性を持つクラス α 、制御条件下で十分な安定性を持つクラス β 、不安定で使用不可のクラス γ のような区分が検討されている。本研究は、この規格改定に必要な試験装置および評価手法の開発を目的としている。

自己分解反応評価試験では、反応容器内に封入した高圧・高温の冷媒に、外部から投入エネルギーを与えることで反応伝播の有無を評価する。試験装置を Figure 4.2-1 に示す。自己分解反応標準化に際し、試験装置の構成に加え、温度、圧力、および着火法（冷媒へのエネルギー投入法）といった試験法を規定する必要がある。これらの中でも、反応開始に必要なエネルギーを与える着火法は特に重要である。



(a) Appearance



(b) Schematic diagram

Figure 4.2-1 Self-decomposition reaction evaluation apparatus

着火法に関して、細線溶断法、放電法（可動電極、渦巻電極、絶縁破壊）、ヒートスポット法など、既往の複数手法を整理した。比較の結果、同一冷媒・同一条件でも手法により反応境界が大きく異なることが明らかとなり、再現性、簡便性、投入エネルギー制御性、および高圧冷媒雰囲気中での安定放電性を満たす評価法の必要性が示された。この要件に基づき、細線溶断発弧法を国際標準化に向けた有望手法として選定した。本手法では、電極間に設置した金属細線を通電により溶断し、生成した金属蒸気を利用してアーク放電を安定的に形成することで、冷媒にエネルギーを与える（Figure 4.2-2）。

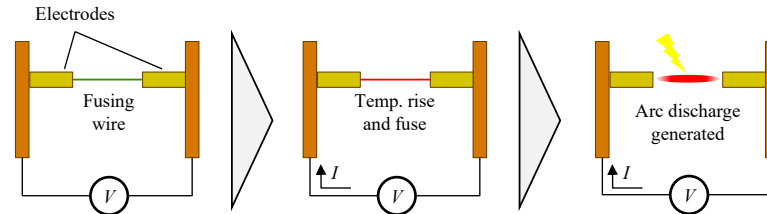


Figure 4.2-2 Fusing wire and discharge method.

細線溶断発弧法について、発弧線の溶断過程とアーク放電過程を分けて評価し、投入エネルギーの予測・制御性を検討した。溶断までに必要なエネルギーは、発弧線の物性値と完全溶融に必要なエネルギーに基づいて概ね予測可能であり、アーク放電時の投入エネルギーは、アーク電圧、電流、通電時間から定量可能であった。また、アーク電圧は放電距離、ガス密度、ガス種に依存して整理でき、これらに基づき投入エネルギーの予測・制御が可能であることが示された。これらの検討を通じて、冷媒の自己分解反応評価に適した試験パラメータを選定した。

細線溶断発弧法の妥当性検証のため、電中研、AGC、ダイキン工業の3機関で試験所間比較試験を実施した。対象冷媒にはR1132aを用い、温度150℃、投入エネルギー25J、放電距離1mmの条件で、反応境界圧力を比較した。その結果、3機関の反応境界圧力は平均値に対して概ね±5%以内で一致した。これにより、細線溶断発弧法が異なる試験機関間でも一貫した結果を与える、妥当な自己分解反応評価法であることを確認した（Figure 4.2-3）。

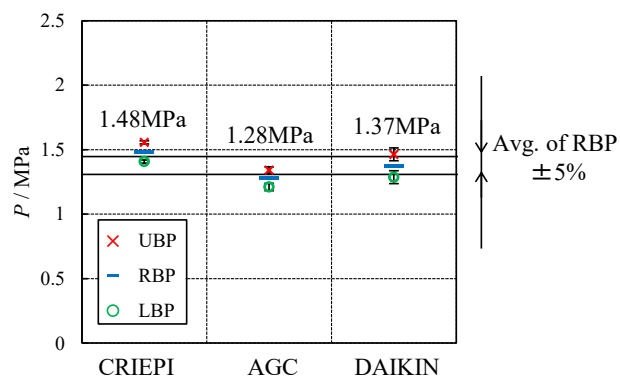


Figure 4.2-3 Comparison of results obtained by three organizations

*: UB: Upper Bound Pressure, RBP: Reaction Boundary Pressure, LBP: Lower Bound Pressure

以上の結果を踏まえ、本研究では、ISO 817 改定に向けて、自己分解反応性評価法の概要、試験手法、主要試験条件を提案している。今後は、投入エネルギー量や投入時間、容器容積等、結果に影響し得る追加パラメータの依存性を明らかにするとともに、開発した評価法を用いた次世代低 GWP 冷媒の安全性評価、冷媒組成の絞り込み、実使用時を想定したリスク評価を進める。これにより、次世代低 GWP 冷媒を安全に使用できる環境整備と、実用化・国際標準化に向けた基盤形成に貢献する。

3. 自己分解反応評価手法の開発及び HFO-1123 混合冷媒の研究 (AGC)

近年冷凍空調の分野では地球温暖化を含む環境問題への関心が高まる中、環境規制も日々厳しくなり、より環境に優しい次世代冷媒への転換需要が高まっている。HFO 冷媒のうち、次世代冷媒として注目を集めている HFO-1123 と R1132(E)の共通点は炭素と炭素間の二重結合を持つため、化学的に不安定性であり、自己分解反応に起因するリスクが存在する。上記の化合物では、一定の条件（温度、圧力、投入エネルギー）に

到達すると自己分解反応が連鎖的に周囲に伝播する現象が発生することが知られている。この現象が実機の冷媒圧縮機内で発生すると、内部が高温高压の状態になり、事故へ繋がるリスクがある。そのため、このような課題を持つ HFO 冷媒を次世代冷媒として普及するには安全性を担保するためのリスクアセスメントが必要である。しかしながら、自己分解反応が伝播する条件を調査するための評価手法はまだ確立されておらず、各社・研究機関で異なる試験装置や試験方法で実施されているのが現状である。そのため試験所間で異なる結果が得られることが懸念される。そのため、次世代冷媒として普及するためには、評価手法の国際標準化が不可欠である。本研究では自己分解反応評価手法の国際標準化に不可欠な試験法及び装置の妥当性を支持する基盤的なデータの取得に取り組んだ。

最初に自社の既存在着火法の改良検討を行った。既存の着火法は誘発要因である実機の放電現象をよく再現できているが、定量的な放電エネルギーの再現性に課題があり、膨大な試験点数が必要となり国際標準化には適当ではない。既存の着火法に対して交流放電法から直流放電法に変え、且つ電極構造を改良することで、Figure 4.3-1 に示されているような実機で起きる異なるエネルギー密度とエネルギー量の放電パターンを再現することが可能な着火法の開発に成功した。

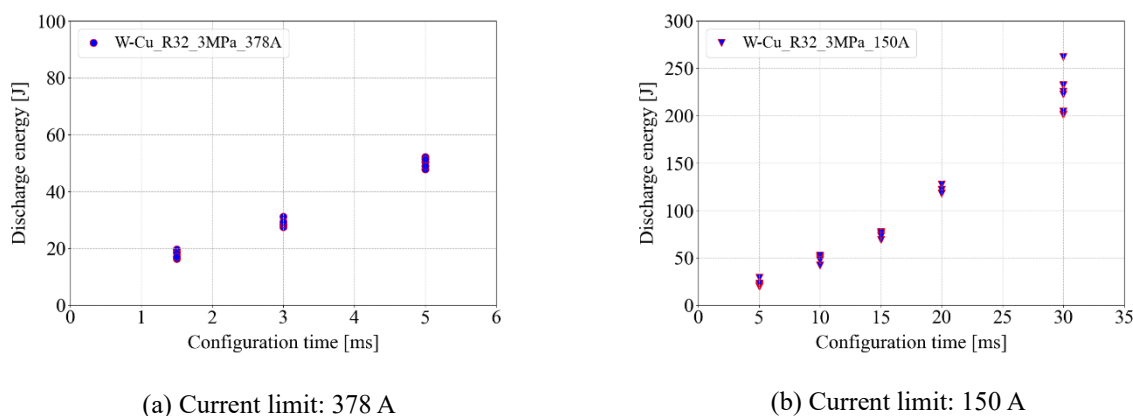


Figure 4.3-1 Discharge energy quantification at 3.0 MPa R32 under different current limiters.

安全 Gr. では TDG 法を基に、実機での誘発要因である放電現象の再現性と試験の簡便性を同時に満たす細線溶断発弧法が提案された。この着火法を国際標準化するには着火法の妥当性の根拠になる基盤的な試験データが求められるために基礎的な調査を行い、評価結果の整合性を確認するために安全 Gr. 内の三機関（電力中央研究所、AGC、ダイキン工業）で R1132a（Vinylidene Fluoride）を標準物質とした試験所間比較試験を行った。各機関で得られた 150 °C、放電距離が 1 mm、放電エネルギー量が 25 ± 5 J の条件下で得られた自己分解反応が伝播する境界圧力が許容される誤差範囲内にあることが確認され、評価手法の整合性を検証することができた。

着火法の妥当性を確認するため、異なる着火法の自己分解反応伝播に至る境界圧力への種々の要因調査も実施し、電極構造による伝熱が大きく寄与していることが分かった。投入エネルギー量が同じでも、電極構造体への熱拡散により着火箇所から周囲のガスに伝わるエネルギー量が異なることが要因となることが分かった。国際標準化に提案している細線溶断発弧法は、エネルギーが周囲のガスに伝わり易い手法であり、実機の自己分解反応の伝播リスクが過大評価される懸念がある。リスクアセスメントで適切に発生リスクを評価するには実機の冷媒圧縮機内で放電現象が起きる箇所の周囲の熱環境も考慮してリスクアセスメントを実施する必要があることが示唆された。

効率的にリスク評価に必要なデータを取得するには、室温での評価で代替することが望ましい。本研究では細線溶断発弧法で得られる自己分解反応が伝播する境界圧力の温度依存性が小さいことが分かった。温度が高いほど分子の衝突頻度が高まり、結果として反応性が高まる。一方で、同じ圧力で試験しているため、

温度が高いほど分子密度が低くなり、衝突頻度が低下し結果として反応性が低下する効果もある。ほぼ同じ境界圧力が得られた理由は上記のように両者の効果が相殺し、結果として同じような境界圧力になったと推測している。

低 GWP 冷媒への転換需要に対して、HFO-1123 を含む GWP150 の混合冷媒を開発するために、HFO-1123/R32/R1234yf の三元系混合冷媒の場合の HFO-1123 の最大混合率について調査した。試験条件は家庭用エアコンの通常運転条件を想定した 130℃と 4 MPa の条件で実施し、試験結果を Figure 4.3-2 に示す。通常運転条件を想定した条件下で、30 J までのエネルギーが投入される場合、HFO-1123 の混合率が 50 mass%までの組成であれば、自己分解反応が伝播しないことが分かった。この結果は HFO-1123 を含む混合冷媒のサイクル性能改善のための組成開発に活用できる。

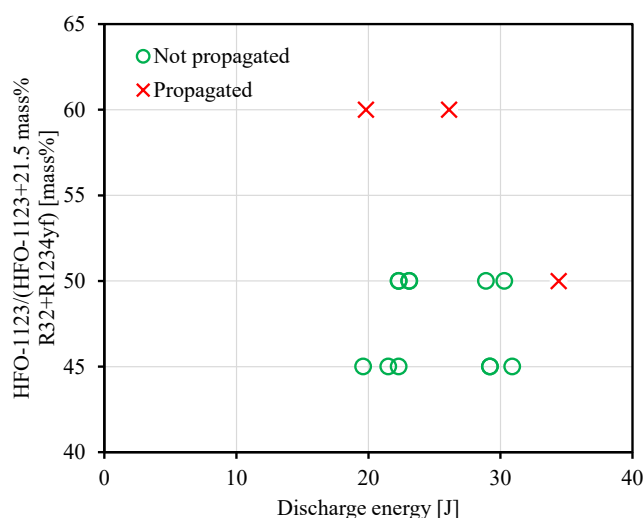


Figure 4.3-2 Experimental results varying HFO-1123 concentration and discharge energy.

4. 自己分解反応の評価手法の開発及び R1132 (E) を含む混合冷媒の安全性確認（ダイキン工業）

空調機内における自己分解反応の評価に適した試験方法の確立のため、高ガス圧に対応した放電試験装置を開発するとともに、規格化に向けた検討を行う。加えて、開発した試験方法で R1234yf 等との混合系について自己分解反応の R1132(E)混合率限界(境界)を検討する。また自己分解反応のメカニズムを解明するとともに、空調機で使用する際に想定されるリスクを検証し、機器対策の要否の際の判断材料を提供する。

開発した溶断放電法は、入力電圧を従来よりも低く抑えつつ放電エネルギーの再現性を確保でき、装置構成の簡素化や取り扱い性向上に寄与することが示された。放電物性の評価は、放電が成立する最大放電距離を用い、金属細線の材質・径、ガス(冷媒)圧力・温度、印加電圧、放電距離といった装置・条件パラメータが放電挙動に与える影響を系統的に確認した。その結果、最大放電距離は特に圧力(密度)と電極間電圧に強く依存し、圧力上昇に伴い放電しやすさが変化すること、温度については本試験範囲では相対的に影響が小さいことが示唆された。また、金属細線の材質差(融点・沸点・仕事関数等)や径の影響についても、放電成立条件に反映される傾向が整理され、評価手法としてのパラメータ設計指針が得られた。

自己分解反応の評価条件(試験条件)については、国連危険物輸送勧告(TDG)で提示される方法を参照しつつ、冷媒機器で想定される高温高压の異常状態も踏まえた温度・圧力条件の設定を行い、ISO817 に対する安全性評価手法の候補として位置づけた。加えて、試験所間比較(ILC)により装置・方法の妥当性を確認し、R1132aを用いた検証では、自己分解反応が生じる境界条件(圧力と放電エネルギーの関係)を概ね 1.3~1.5 MPa 付近で捉えられることが示され、試験間で整合的な傾向が得られた。容器依存性の評価では、容器体積を変えて

境界の変動を確認し、少なくとも評価した条件範囲では容器サイズによる境界の変化は限定的であることがわかった。

R1132(E)を含む混合冷媒については、R1132(E)/R1234yf 系を対象に、特に R474B の評価を実施。現在、ISO817 に提案中の試験方法では自己分解しないことを確認した。今後他の混合組成でも検証し、自己分解反応境界を明らかにする。また既存の絶縁破壊法との比較では、低ガス圧領域において境界条件は変わらないことを確認した。自己分解反応のメカニズムについては、反応経路に関する仮説を立て、計算化学(Gaussian 等)を用いたエネルギー評価により候補経路の妥当性検討を進めており、実験結果と整合する説明づけに向けた基礎を整備した。

次世代低 GWP 冷媒の普及にあたり、自己分解反応の安全対策を実用化・標準化していくための基盤データと評価手段を提供するものである。普及段階で想定される課題として、複数企業が保有する機器特許が採用障壁にならないための仕組みづくり、設計・製造・メンテナンスに関するノウハウの共有・活用の枠組み、ならびに国際的な標準化・広報(官民連携のプロモーション)の重要性が整理され、NEDO 事業等を通じた国内外の連携体制のもとで、ISO/ASHRAE 等への提案・反映を見据えた取り組みが必要であることが示された。中でも、複数企業が保有する機器特許が採用障壁にならないための仕組みづくりについて、専門家等にヒアリング、検討したものをまとめた。

5. 圧縮機内での自己分解反応誘発要因の特定とエネルギー評価手法の開発 (公立諏訪東京理科大学)

本研究では、代替候補冷媒の自己分解反応発生リスクの評価に資するため、調査・理論・計算・実験的アプローチを駆使して家庭用空調機器の圧縮機内において異常時に発生しうるエネルギー源を定量的に収集してその発生メカニズムを解明するとともに、その成果に基づき圧縮機の運転条件等を入力変数としてエネルギー値を定量的に予測できる推算モデルを開発することを目的としている。2023～2025 年度は、圧縮機の異常時におけるエネルギー発生源として巻線間及び巻線と大地との間の短絡に伴うアーク放電に注目し、これを実験的に再現できる装置を開発して、さまざまな運転条件、環境条件における短絡時の電流電圧波形、放電発光の視覚的挙動の高速度映像及び分光スペクトルを取得した。これらのデータをもとに放電エネルギーを推算し、これらに及ぼす環境条件の影響を調べた。加えて、実験によらないエネルギー予測手法を確立するために、数値シミュレーションを用いた計算手法の構築および簡易な理論式の導出を試みた。

実験では、市販の单相 100V 及び 200V のインバータ式家庭用空調機の圧縮機および单相 100V 一定速圧縮機の電源とモータの配線を分岐させて、6MPa、150 °C の環境を達成可能な円筒型容器内に設置した短絡電極に導き、一方の電極を短絡させた。まず单相 200V インバータ機の相間短絡では、短絡後瞬間的に電流が立ち上がるとともに、約 20 V で 12 μ s 程度のアーク放電が生じた。放電はほぼ単発であった。これはインバータ保護回路の作動により放電時間が制限されるためである。電圧と電流の積を放電時間で積分した放電エネルギーは 2.5-4 mJ 程度であり、電源仕様および短絡相の違いは放電エネルギーにほとんど影響しなかった。この値は雰囲気温度および圧力にはほとんど依存せず一定であったが、一方で放電による発光領域(プラズマ)は圧力および雰囲気温度の上昇に伴い拡大した。そこで発光スペクトルを分光分析した結果、プラズマ中心のみが熱平衡に至っていると考えればそのエネルギーは上述の放電エネルギーとほぼ同じオーダーであることを確認した。このように雰囲気圧力や温度、電源仕様が放電エネルギーにあまり寄与しなかった原因は、アーク放電では電極からの熱電子放出が放電を持続させる主因子であり、電極の温度が支配因子であるためと思われる。

一定速圧縮機の実験ではインバータ機と異なり放電波形が毎回異なり、複数の放電がみられた。また、放電時間は 10ms 程度になる場合もあった。これは一定速機は商用電源と直結されて作動するためであり、特に電圧が高い瞬間(およそ電源位相 90°～120° 程度と見込まれる)に短絡が生じると大きなエネルギーを発す

ることが分かった。放電エネルギーは平均で 1.9 J 程度であった。これらの結果をもとに、市販数値シミュレーションソフトを用いた解析でも、実験結果とオーダー的に一致する結果を得た。

以上の成果により、インバータ式圧縮機及び一定速圧縮機内の短絡による放電エネルギーを予測する手法の確立に向けた見通しを得た。今後、特にインバータ圧縮機の地絡及び一定速圧縮機の相間短絡及び地絡時の放電エネルギー予測モデルを構築するとともに、その他のエネルギー発生要因についても調査する。

APPENDIX 自己分解反応の可能性がある冷媒の実使用における安全性評価（日本冷凍空調工業会）

日本冷凍空調工業会（以下、「日冷工」）自己分解反応リスク検討 WG では、NEDO グリーン冷媒として検討されている、自己分解反応の可能性がある冷媒の実使用における安全性評価を実施した。この検討の目的は、自己分解反応を発生する可能性のあるエチレン系 HFO を使用した混合冷媒について、冷凍空調機器で使用時のリスク評価の実施、及び安全性を確保するために必要な対策を検討することで、自己分解反応を回避し、機器の安全性を確保できる条件を確立することである。また、NEDO グリーン冷媒が自己分解反応を回避して使用できる見通しを広く周知し、冷凍・空調関係者がこの冷媒の検討に早期に着手できるようにすることも目的の一つである。

日冷工では、2022 年度に自己分解反応の可能性がある冷媒のリスク評価方法の検討のため「自己分解反応リスク検討準備 WG」を立ち上げて活動を実施していたが、今回、前身の WG で得られた知見を受け継ぎながら、「自己分解反応リスク検討 WG」として NEDO 自己分解反応研究会と連携する形で 2023 年 12 月より本格的に活動を開始した。

安全性確保の目的に関しては、主に NEDO 自己分解反応研究会や冷媒メーカーより提供された、自己分解反応が発生・拡散する境界条件となる温度と圧力の関係線（以下、自己分解反応限界線）を基に、日冷工自己分解反応リスク検討 WG では実機でこの境界条件を超えるシナリオやその発生確率についての検討を実施した。

自己分解反応リスク検討の考え方として、自己分解反応限界線は、冷媒に印加され自己分解反応を発生させるエネルギー（以下、印加エネルギー）、及び、混合冷媒中の R1132(E)の組成比により変化する特徴があり、それらの組み合わせは様々なパターンが想定され、非常に複雑となる。これに対し、自己分解反応限界線を得るには、数多くの試験を実施して自己分解反応が発生する境界を調査する必要がある。そこで、自己分解反応限界線による判定を単純化するために、印加エネルギーを固定し、R1132(E)の組成比 5%刻みで自己分解反応限界線を冷媒メーカーにて推定した。

印加エネルギーは主に圧縮機のモーター部で短絡が発生した時の放電により発生すると考えられる。このエネルギーは圧縮機を駆動する電源仕様により異なり、特にインバータと一定速では大きく異なると考えられる。また、インバータにおいても電源仕様や出力により印加エネルギーは異なる。今回の検討においては、電源仕様をインバータに限定し、発生し得る印加エネルギーの最大値を推定することで、印加エネルギーを最大値に固定することとした。参加各社の RAC 用インバータでの最大放電エネルギーを測定することで、RAC 用の単相 100 V インバータの最大印加エネルギーを導き出し、その結果を基に三相や 200 V 等の他の電源、及び大型空調機器用のインバータも含めて適用可能な最大印加エネルギーを設定した。

混合冷媒中の R1132(E)組成比は、温度グライドのある冷媒においては実機にて使用中に封入組成から変化する可能性がある。自己分解反応の可能性を一次判定するために、R1132(E)の組成比を発生し得る最大組成比に固定することを検討した。このための簡易的な組成推定方法として、冷凍サイクル全体をアキュムレータとそれ以外と仮定し、組成変化はアキュムレータ内に滞留した液冷媒の量によって変化すると考えることにより、アキュムレータに滞留し得る液冷媒量の封入冷媒量に対する比率（以下、滞留冷媒量比）をパラメータとして R1132(E)の最大組成比を導き出した。

実機において発生し得る温度、圧力条件については、WG 内で高温、高圧になるシナリオを抽出し、その中でもより高温、高圧になると考えられる自己分解反応発生シナリオについて到達条件の確認試験を実施した。

これらの結果を基に、温度－圧力 MAP 上に、R1132(E)成分比毎の自己分解反応発生限界線と自己分解反応シナリオの到達圧力、温度条件をプロットし、自己分解反応発生の可能性について評価した。全体的には、自己分解反応が発生する可能性のある機器の条件はかなり限定されることが考えられるが、この結果をわかりやすく伝えるために以下の形で結果を示すことにした。

まず、現在の自己分解反応シナリオの到達条件が自己分解反応限界線を超えない最大 R1132(E)組成比を、各冷媒の「R1132(E)限界組成比」として定義した。R474A、R474B では、45%、R479A では 55%となる。次に、上述のアクムレータ滞留冷媒量比から導かれる、R1132(E)の最大組成比のデータを基に、滞留冷媒量比に対して、自己分解反応が回避可能であるかどうかを冷媒毎に判定した。

上記の自己分解反応回避可能性の判定結果を広く周知するために、「NEDO プロジェクト「次世代低 GWP 冷媒の実用化に向けた高効率冷凍空調技術の開発」活動報告会」、及び、「環境と新冷媒国際シンポジウム 2025」にて、これらの冷媒が自己分解反応を回避して使用できる見込みとその機器仕様範囲について発表を実施した。

第5分冊 評価グループ：低 GWP 混合冷媒のシステム評価手法開発

1. 研究開発概要とアウトカム

本プロジェクトの目的は、次世代冷媒を導入した機器性能を、理論解析と実験の両方から高精度に評価できる技術を開発することである。具体的には以下の2点を目的とする。

- ① 既存の冷媒はもちろん、新たに開発される多様な次世代冷媒に対しても適用可能な、汎用的な熱交換器シミュレーターおよび冷凍サイクルシミュレーターを開発すること
- ② 当該シミュレーターおよび2022年度までに開発した性能評価装置を基盤として、国際的に通用する性能評価基準および評価手法の確立を目指すこと

これらの目標を達成するため本研究開発では、以下の4つの研究項目に分けて研究を進めている。

(1) 評 A-1-1：シミュレーション技術研究開発

既存冷媒および新たに開発される多様な次世代冷媒に対応可能な、汎用的な冷凍サイクルシミュレーターの開発を行う。

(2) 評 A-1-2：最適化技術研究開発

各冷媒に応じて最適な熱交換器となるよう、冷媒の分配パスを検討する熱交換器シミュレーターの開発を行う。

(3) 評 A-1-3：冷凍サイクルシステム評価技術研究開発

熱交換器シミュレーターおよび冷凍サイクルシミュレーターによる計算結果の妥当性を検証するため、「最適化検証装置」と名付けた実験装置を用いて実験的検証を行い、シミュレーション計算の精度確認を行う。

(4) 評 A-2：冷凍サイクルシミュレーター用 AI 最適化アルゴリズムの開発（再委託）

熱交換器シミュレーターに搭載する、各冷媒に応じた最適な冷媒分配パスを探索するためのアルゴリズムの開発を行う。

本研究では、低 GWP 混合冷媒を含む多様な冷媒に対して、従来困難であった実機レベルでの性能を公平かつ高精度に評価できるシステム評価基盤の構築を目的としている。例えば、特定の冷媒（R32 等）を前提に設計された熱交換器を用いて他の冷媒（R454C 等）を評価する、いわゆるドロップイン評価では、冷媒固有の性能を適切に評価することが困難である。

そこで本研究では、各冷媒に適した熱交換器条件の下で性能評価を行うことを基本方針とした。一方で、熱交換器の寸法や構造を含む完全な最適設計を対象とすると、設計自由度が極めて大きくなり、冷媒間の性能比較における評価条件の統一が困難となる。このため、本研究では熱交換器の大きさや段数などの基本構造を固定し、冷媒流路パスのみを最適化した熱交換器を「各冷媒に応じた最適な熱交換器」と定義した。本方針により、実用性および標準化可能性を考慮しつつ、冷媒性能を公平に比較できる評価基盤の構築を目指している。なお、本評価思想については、機器メーカーの団体である日本冷凍空調工業会とも情報交換を行い、その妥当性について一定の理解を得ている。

本研究では、熱交換器シミュレーターにより冷媒流路パスの最適化を行い、その結果を反映した冷凍サイクルシミュレーションによって各冷媒の性能を比較評価する。これらの取り組みは、熱交換器設計手法そのものの最適化を目的とするものではなく、冷媒間の公平な性能比較を可能とするシステム評価基盤の構築を目的としている。Figure 5.1-1 に本研究の研究開発全体構成を示す。

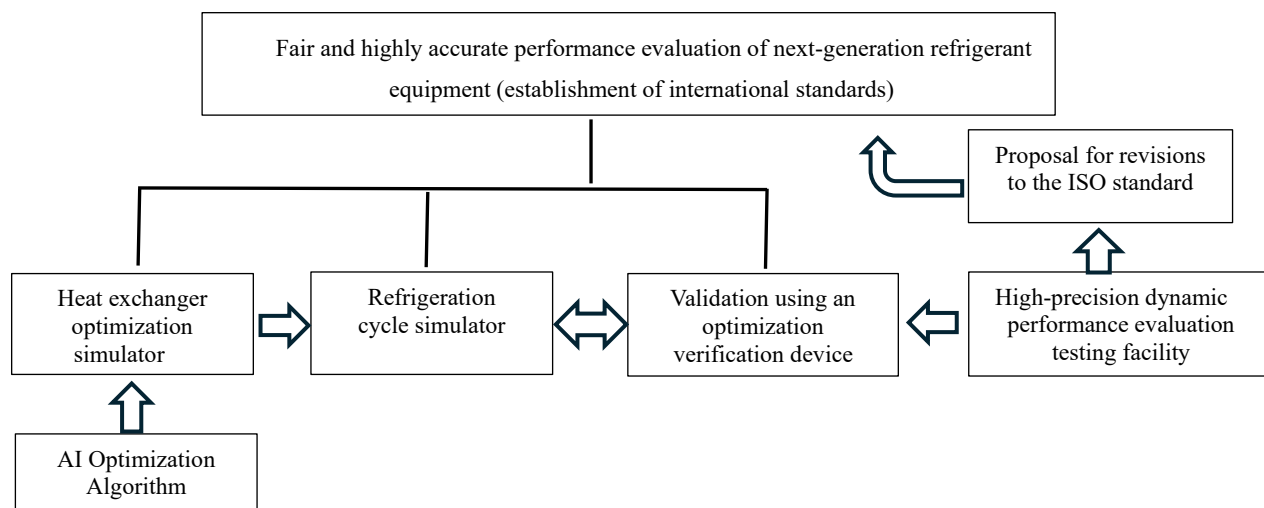


Figure 5.1-1 Overall structure of research and development in this study

本研究により，以下を実現した．

- (1) 冷媒ごとの特性を考慮した公平な性能比較評価手法の確立
- (2) シミュレーションと実験を統合した高信頼評価基盤の構築
- (3) AI を活用した実用設計レベルの熱交換器最適化技術の確立

これらは，次世代冷媒を用いた機器開発における性能設計，最適化設計，環境影響評価を一体的に実現する基盤技術である．特に，本研究で確立した「冷媒ごとに最適化した条件で性能を評価する」という考え方は，今後の国際的な性能評価基準の高度化において重要な指針となる．

本研究開発により，

- (1) 次世代冷媒機器の設計指針の高度化
- (2) 国際的な性能評価基準の標準化への貢献
- (3) 低 GWP 冷媒の社会実装加速

が可能となる．本研究成果は，冷媒転換期における機器性能評価の信頼性向上に直接寄与する．

2. 次世代冷媒を採用した冷凍サイクルの性能評価研究開発（早稲田大学）

(1) 評 A-1-1：シミュレーション技術開発研究

目標：実機性能を約 5%の精度で予測可能な冷凍サイクルシミュレーターの開発

成果：アキュムレーター等のデバイスモデルを含むことで，冷媒量およびサイクル挙動を高精度に再現．純冷媒および非共沸混合冷媒の双方に対応した汎用解析基盤を実現．これにより，従来冷媒を対象として，実機レベル性能を約 5%の誤差で予測可能なシミュレーターを構築した．Figure 5.2-1 にデバイスモデルの一例としてアキュムレーターの概略構造図を示す．

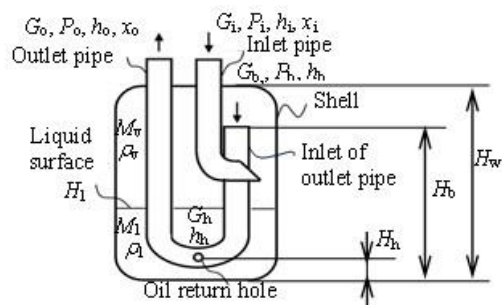


Figure 5.2-1 Schematic structure diagram of accumulator

(2) 評 A-1-2：最適化技術開発研究

目標：冷媒ごとの特性を反映した熱交換器冷媒回路最適化手法の確立

成果：遺伝的アルゴリズムにより、実機として実現可能な条件を考慮しつつ、分岐構造（流量分配・圧力損失制御）や回路配置（温度分布・相分布の最適化）の設計要素を最適化により、蒸発器・凝縮器を対象とした詳細熱交換器シミュレーターを開発した。その結果、運転条件に応じた最適回路構造（例：クロスパレル／クロスカウンタ）が自動導出可能となり、非共沸混合冷媒特有の温度グライド影響を考慮した設計が可能となった。Figure 5.2-2 にパス生成アルゴリズムの進化過程の概念図を示す。

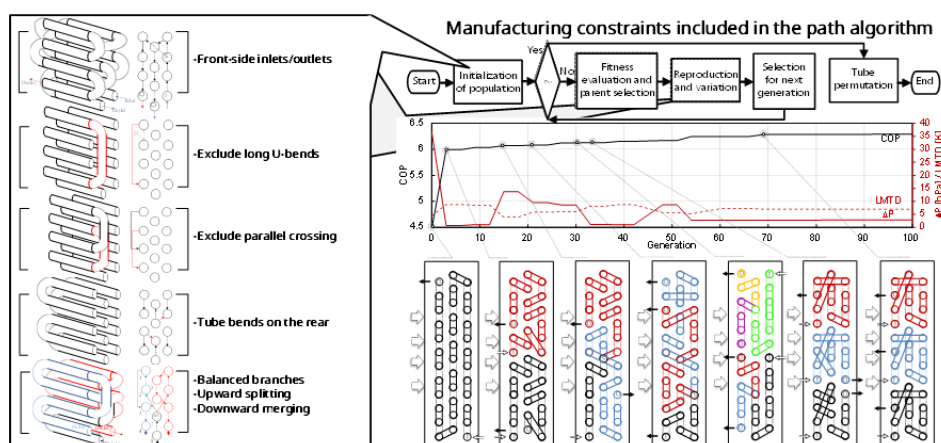


Figure 5.2-2 Conceptual description of the evolutionary progression of the path generation algorithm

(3) 評 A-1-3：冷凍サイクルシステム評価技術開発研究

目標：シミュレーション結果を実験により検証する評価・検証基盤の構築

成果：従来冷媒への適用性を確認するために、R32 および R454C に対して最適化検証装置を用いた試験検証を実施した。そして、シミュレーション結果と実験結果が良好に一致し最適化手法の妥当性を確認した。また、蒸発器最適化により COP は最大約 20% 向上、凝縮器最適化により COP 最大 11% 向上、蒸発器・凝縮器の同時最適化により COP は最大約 23% 向上すること、さらに、最適化設計は運転条件ごとに最適解が異なることを実証した。結論として、熱交換器の最適化により R454C の性能を R32 に近い水準まで向上可能であること、および、非共沸混合冷媒では蒸発器だけでなく凝縮器側特性も重要であることを解明した。熱交換器パスを最適化した場合の R454C と R32 のサイクル性能比較を Figure 5.2-3 に示す。これにより、従来困難であった冷媒間の公平な性能比較評価を実現する統合的手法を確立した。

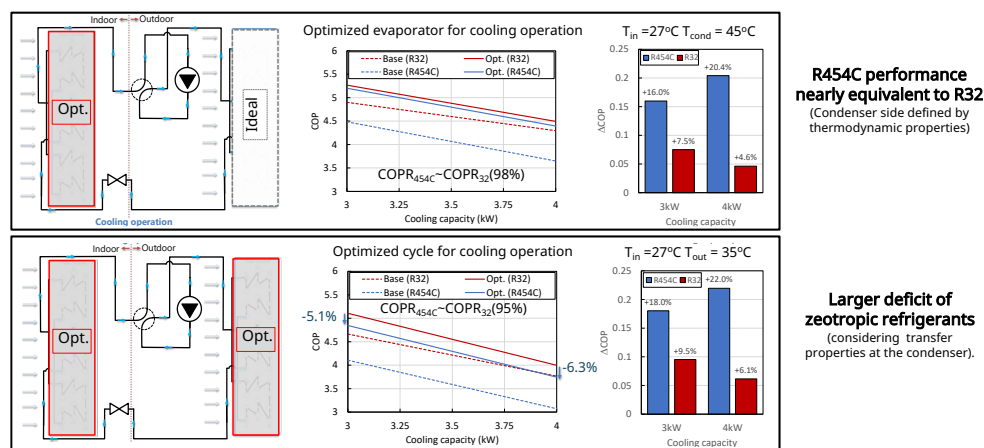


Figure 5.2-3 Optimized cycle performance comparison for different refrigerants

さらに、LCCP 評価への展開として、シミュレーション結果を実機による性能評価結果と比較した上で LCCP 評価を実施した。その結果、熱交換器最適化により R454C の LCCP を R32 と同等レベルに低減可能であることを示し、低 GWP 冷媒の環境性能とエネルギー性能の両立可能性を示した。冷房定格能力 4kW の空調機の計算結果を Figure 5.2-4 に示す。熱交換器最適化により、R454C の LCCP が R32 と同等レベルまで低減されることを確認した。

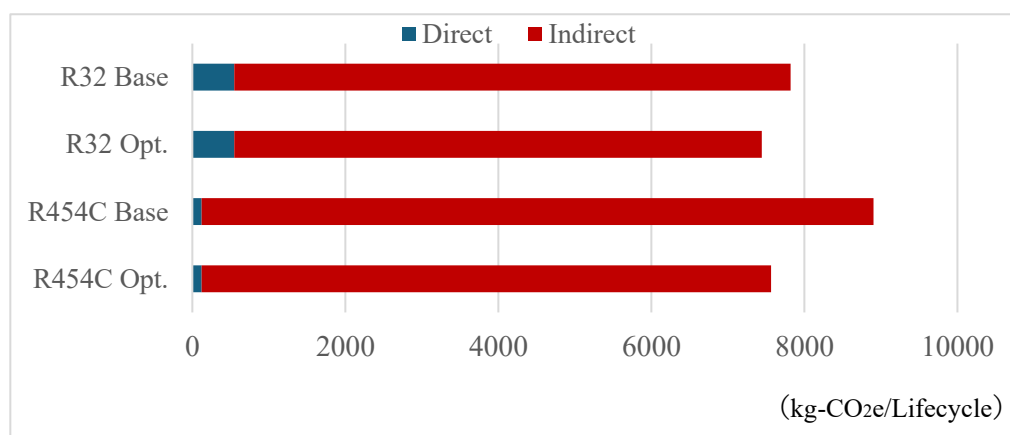


Figure 5.2-4 LCCP calculation results based on heat exchanger optimization
 (Air-conditioner with a cooling capacity of 4kW for residential)

3. 冷凍サイクルシミュレーター用 AI 最適化アルゴリズムの開発（電気通信大学）

(1) 評 A-2：冷凍サイクルシミュレーター用 AI 最適化アルゴリズム開発

目標：製造制約を考慮した AI 最適化アルゴリズムの開発

成果：最大 2,000 通り以上の制約条件組合せに対応し、配管構造を DAG（有向非巡回グラフ）としてモデル化し、製造制約を考慮した実用的アルゴリズムを開発した。実装した機能は、制約組み込み最適化、自動修復（repair）機構、評価キャッシュによる高速化、構造重複排除による探索効率向上、スワップ機能による局所探索強化等である。その結果、実機製造可能な設計のみを対象とした高速最適化を実現でき、従来手法に比べて探索効率を大幅に向上できた。これにより、従来は設計者の経験に依存していた熱交換器回路設計を、定量的かつ自動的に最適化することが可能となった。作成した可視化プログラムを Figure 5.3-1 に示す。

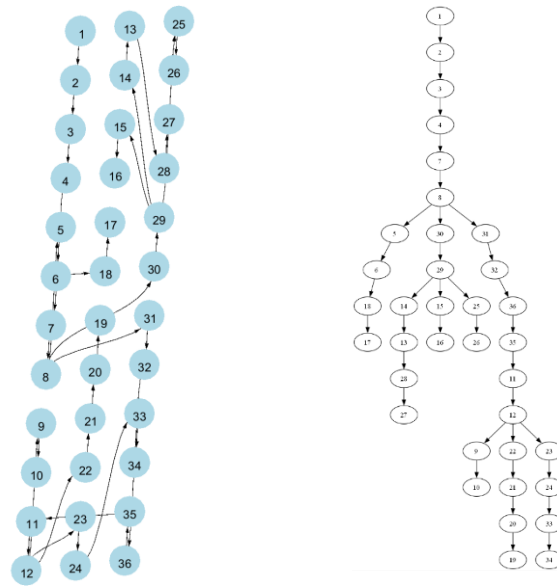


Figure 5.3-1 Examples of structural visualization
 Left: Visualization maintaining physical spatial relationships
 Right: Visualization of the flow from entrance to exit

第6分冊 補助事業：低 GWP 冷媒の対応機器の開発

1. グリーン冷媒を使用したコンデンシングユニットの開発 (日立グローバルライフソリューションズ)

キガリ改正により、先進国では 2036 年までに HFC 消費量を GWP 換算で 85%削減することが求められており、冷凍・冷蔵分野においても冷媒の低 GWP 化は重要な社会的要請となっている。冷凍冷蔵ショーケースや冷蔵倉庫で使用されるコンデンシングユニットは、設置後に長期間使用される機器であり、運転中に漏洩する冷媒が長期にわたり環境へ影響を及ぼす可能性がある。このため、機器効率の向上と併せて、冷媒そのものの環境負荷低減が強く求められている。本研究は、GWP10 未満のグリーン冷媒を使用しながら、現行機（R448A 機）と同等以上の性能および同等レベルの初期導入コストを実現するコンデンシングユニットの開発を目的としている。

本研究は日立グローバルライフソリューションズを主体として、冷媒メーカ、冷凍機油メーカ、ショーケースメーカとの連携体制のもとで実施された。単体機器としての性能評価に留まらず、実際の店舗利用を想定したシステム構成での評価までを視野に入れ、冷媒選定、材料・油適合性評価、圧縮機およびユニット設計、試作、実証試験を一貫して実施した点に本研究の特長がある。机上検討から実機検証へのフィードバックループを形成することで、実用化段階を見据えた技術課題の抽出と解決を図った。

研究開発は7項目で構成される。①「シミュレーションによる HFO 混合冷媒の性能評価と選定」では、弊社シミュレーションに、冷媒メーカ提供の冷媒物性を組み込み、冷凍機性能を考慮し冷媒の選定を行った。②「冷凍機油及び材料評価と選定」では、選定冷媒に対して冷凍機油の熱化学的安定性および材料適合性を評価し、長期信頼性に対する課題抽出と適正な油・材料の選定を行った。これらの結果を踏まえ、③「圧縮機の設計」および④「コンデンシングユニット設計」を実施した。また、⑤「圧縮機試作及び性能信頼性評価」、⑥「コンデンシングユニット試作及び性能評価」にて設計妥当性を検証した。最終段階として、⑦「実店舗相当のモニタ評価」を行い、ショーケースと接続した実店舗模擬試験室で性能と信頼性を総合的に評価し、得られた知見を設計改善へフィードバックすることで実使用条件に耐え得る仕様の確立を図った。

目標は、現行機と同等以上の性能を実現可能とする要素技術および周辺機器技術の開発の道筋を明確化することである。具体的には(1)冷媒種類・冷媒組成の選定、(2)油・材料適合性評価、(3)性能向上策の策定、(4)圧縮機／ユニットの設計・試作評価（長期信頼性は現行機同等、COP は現行機比 100%以上）を技術目標として設定した。

本研究を通じて、環境性・安全性・省エネルギー性および経済性の観点から冷凍機用途に適した低 GWP 冷媒として R474B を選定し、冷凍機油・材料の適合性評価により現行機と同等以上の長期信頼性を確保できる見通しを得た。さらに、R474B 対応の圧縮機およびコンデンシングユニットを試作・評価し、現行機同等以上の COP を達成した。これらの成果により R474B コンデンシングユニットは現行機との親和性が高いため、低 GWP 冷媒機器のさらなる普及を通じ、カーボンニュートラル実現に貢献できる。

当社冷凍サイクルシミュレーション技術を用いて冷媒候補の性能・安全性を机上検討した。その結果、目標条件に合致する冷媒として R474B を選定した。次に、冷凍機油の熱安定性試験および材料適合性評価を行い、長期信頼性確保に向けた油・材料を選定した。圧縮機は外形サイズを変更せず高速運転化により循環量を増加させる設計とした。そして、要素試験および単体試験で運転範囲と信頼性を確認した。ユニットでは、ドロップイン時に COP が現行機比 94%程度に低下する要因を整理し、過冷却回路の追加による低压側圧力損失低減、アキュームレータの低圧力損失化、ファン形状最適化によるファン入力低減等の改善策を適用して COP を改善し、現行機比 100.5%を達成した。実店舗相当条件での評価では、冷媒を現行の R448A から R474B に変更することで、年間消費電力は現行機比 95.4%に低減し、試作圧縮機の適用と冷媒量調整により 89.1%ま

で低減した.