

「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」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部
-----	--------------------------------------

—目次—

概要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
1. 事業の背景・目的・位置づけ.....	I-1
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性.....	I-9
2.1 NEDO が関与することの意義.....	I-9
2.2 実施の効果（費用対効果）.....	I-16
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標.....	II-1
2. 事業の計画内容.....	II-9
2.1 研究開発の内容.....	II-9
2.2 研究開発の実施体制.....	II-29
2.3 研究開発の運営管理.....	II-30
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性.....	II-32
3. 情勢変化への対応.....	II-33
4. 評価に関する事項.....	II-33
III. 研究開発成果について	III-1
1. 事業全体の成果.....	III-1
2. 研究開発項目毎の成果.....	III-8
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	IV-1
1. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて.....	IV-2
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.....	IV-11
3. 波及効果.....	IV-13

（添付資料）

- ・特許論文等リスト
- ・プロジェクト基本計画
- ・地球環境対策（フロン）分野の技術戦略策定に向けて
- ・プロジェクト開始時関連資料（事前評価結果、パブリックコメント募集の結果）

概 要

		最終更新日	2020年9月1日
プロジェクト名	省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発	プロジェクト番号	P18005
担当推進部/ PMまたは担当者	環境部 PM 阿部 正道 (2018年4月～現在)		
0. 事業の概要	2026年を目途とする次世代冷媒及び次世代冷媒適用機器の実用化及び普及を実現するため、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業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模の冷凍空調機器に対する次世代冷媒使用時の性能評価及び安全性・リスク評価手法を開発する。さらに、冷凍空調機器のうち、一部では次世代冷媒の適用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次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術を開発する。		
1. 事業の位置 付け・必要性 について	<p>現在、冷凍空調機器の冷媒をはじめ様々な用途で使用されている代替フロン（HFC）は、温室効果が大きく、パリ協定において排出削減対象ガスに指定され、排出削減対策が求められている。また、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対象外であったが、2016年10月の改正（キガリ改正）において、新たに生産及び消費量の段階的削減義務が追加された。本改正で先進国は、HFC生産・消費量を2011-2013年の生産・消費量の平均数量等に基づく基準値から最終的には2036年までに85%を段階的に削減する目標が定められている。</p> <p>一方、地球温暖化への影響が極めて少ない冷媒（次世代冷媒）の多くは、従来のHFC冷媒適用冷凍空調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）があるため、世界的に冷凍空調機器分野では実用化に至っていない。</p>		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>【中間目標】</p> <ol style="list-style-type: none"> 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。 <small>※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。</small> 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。 <p>【最終目標】</p> <ol style="list-style-type: none"> 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。 		

事業の計画内容	主な実施事項	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	
	基本特性データ取得及び評価	→					
	安全性・リスク評価手法の開発	→					
	冷媒及び適用技術の開発	→					
	成果取りまとめ						
事業費推移 (会計・勘定別に NEDO が負担した実績額 (評価実施年度については予算額) を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	2018fy	2019fy	2020fy	2021fy	2022fy	総額
	一般会計	—	—	—	—	—	—
	特別会計 (需給)	250	653	700	—	—	(1603)
	開発成果促進財源	—	—	—	—	—	—
	総 NEDO 負担額	250	653	700	—	—	—
	(委託)	250	333	380	—	—	—
	(助成) : 助成率 1/2	—	320	320	—	—	—
開発体制	経産省担当原課	製造産業局化学物質管理課オゾン層保護等推進室					
	プロジェクトリーダー	PL: 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 SPL: 早稲田大学総合研究機構熱エネルギー交換工学・数学融合研究所 所長 齋藤 潔					
	プロジェクトマネージャー	環境部 阿部 正道					
	委託先 (助成事業の場合「助成先」とするなど適宜変更) (組合が委託先に含まれる場合は、その参加企業数及び参加企業名も記載)	<p><u>2018 年度</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 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 【委託先】九州大学、早稲田大学、(国研)産業総合技術研究所 【再委託先】東京海洋大学、九州産業大学、佐賀大学、富山県立大学、(国研)産業総合技術研究所、日本大学、長崎大学 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 【委託先】東京大学、公立諏訪東京理科大学、(国研)産業総合技術研究所 【再委託先】静岡大学 <p><u>2019 年度</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 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 【委託先】九州大学、早稲田大学、(国研)産業総合技術研究所 【再委託先】東京海洋大学、九州産業大学、佐賀大学、富山県立大学、(国研)産業総合技術研究所、日本大学、長崎大学 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 東京大学、公立諏訪東京理科大学、(国研)産業総合技術研究所 【再委託先】静岡大学 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 【助成先】三菱電機(株)、東芝キャリア(株)、パナソニック(株)、ダイキン工業(株) 【再委託先】(国研)産業総合技術研究所 <p><u>2020 年度</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 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 【委託先】九州大学、早稲田大学、(国研)産業総合技術研究所 					

		<p>【再委託先】東京海洋大学、九州産業大学、佐賀大学、富山県立大学、（国研）産業総合技術研究所、日本大学、長崎大学</p> <p>・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</p> <p>【委託先】東京大学、公立諏訪東京理科大学、（国研）産業総合技術研究所</p> <p>【再委託先】静岡大学、広島大学</p> <p>・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</p> <p>【助成先】三菱電機(株)、東芝キャリア(株)、パナソニック(株)、ダイキン工業(株)</p> <p>【再委託先】（国研）産業総合技術研究所</p>
情勢変化への対応	<p>2019年1月のモントリオール議定書キガリ改正発効による代替フロン(HFC)の生産量・消費量の削減義務を履行するため、2019年1月にHFCの製造及び輸出を規制する等の措置を講じた「オゾン層保護法」が改正・公布された。本法においては、HFC削減に寄与する画期的な低GWP冷媒の製造等に対し、インセンティブの付与やグリーン冷媒及びそれを活用した機器の開発・導入を計画的に推進することとされている。本事業では、これらの政策動向及び社会動向に応え、グリーン冷媒を含む次世代冷媒の導入の促進に大きく寄与するものである。</p>	
中間評価結果への対応	-	
評価に関する事項	事前評価	2017年度実施 担当部 環境部
	中間評価	2020年度 中間評価実施
	事後評価	2023年度 事後評価実施（予定）
3. 研究開発成果について	<p>研究開発項目①～③について、2018年度から採択の下記、委託事業4テーマ（(a)～(d)）及び2019年度から採択の下記、助成事業（助成率1/2）4テーマ（(e)～(h)）について、研究開発を実施した。また、NEDOは適宜進捗検討会議を開催し、委託先/助成先に対して、研究開発成果及び進捗状況等について、PL、SPLと連携して確認・指導を実施した。各研究開発テーマの内及び成果は以下の通り。</p> <p>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」</p> <p>(a) 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】</p> <p>本研究開発では、中小型規模冷凍空調機器用冷媒としてのHFC32+HF01234yf混合冷媒にCO2やHF01123などを添加した次世代の3成分系混合冷媒や、中規模冷凍空調機器用としてHF01336mzz(E)やHCF01224yd(Z)などの次世代の純冷媒に関する熱力学的性質及び輸送的性質の高精度データを取得し、信頼できる熱物性計算ツールを開発して、伝熱特性及び冷凍サイクル基本特性を明らかにし、次世代冷媒のヒートポンプサイクル基本性能評価を行うことである。特に混合冷媒に関しては、実環境を加味した冷媒特性評価及び混合冷媒比率の最適化を行い、GWPの低いHF0系冷媒を主成分とした次世代冷媒を使用する上で、業界の実用的な安全基準、国際規格化・国際標準化としてのISO817（冷媒物性）、ISO17584、ASHRAE34（冷媒物性）等への登録に結びつける取り組みや国際データベースNIST REFPROPへの登録を目標とし、以下の研究開発を実施した。</p> <p>(1)HF0系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点HF0系冷媒の熱物性評価</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定（担当：九州大学） ② 気液平衡性質の測定（担当：富山県立大学） ③ 高温PVT_x性質及び定圧比熱の測定（担当：日本大学理工学部） ④ 表面張力の測定（担当：長崎大学） ⑤ 音速の測定（担当：産業技術総合研究所） ⑥ 状態方程式の開発（担当：九州産業大学） ⑦ 輸送的性質の測定及びモデル化（担当：佐賀大学） <p>(2)HF0系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点HF0系冷媒の伝熱特性評価</p> <ol style="list-style-type: none"> ① プレート式熱交換器内の伝熱特性評価（担当：佐賀大学） ② 扁平多孔管内の伝熱特性評価（担当：東京海洋大学） ③ 円管内の伝熱特性評価（担当：長崎大学） ④ 水平円管外の伝熱特性評価（担当：九州産業大学） ⑤ 伝熱データベースの構築（担当：佐賀大学、東京海洋大学、長崎大学） <p>(3)HF0系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点HF0系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価</p> <ol style="list-style-type: none"> ①ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析（担当：九州産業大学） 	

②ヒートポンプサイクル特性の実験的評価（担当：九州大学）

目 標	研究開発成果
テーマ： 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	
HF0 系冷媒を含む混合冷媒、高沸点 HF0 系冷媒の熱物性、伝熱特性及びヒートポンプサイクル性能を評価する。	本研究では、ターボ圧縮式の中型から大型冷凍空調機器用次世代冷媒として新冷媒 HCF01224yd (Z)、HF01336mzz (E)、3 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+CO ₂ 系、日本初の国産冷媒である HF01123 を成分物質に含む 3 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+HF01123 に注目して、新規低 GWP 混合冷媒を中小型空調機器用冷媒として使用するための熱物性、伝熱特性、及びサイクル特性に関する基礎技術を構築することを目的として、下記の研究項目を実施した。
(1)HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の熱物性評価	
①臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定	沸点の高い HF0 系冷媒 HCF01224yd (Z) 及び HF01336mzz (E)、そして 3 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+CO ₂ 及び HFC32+HF01234yf+HF01123 における PVT 性質、飽和密度、飽和蒸気圧、臨界定数を高精度で測定した。
②気液平衡性質の測定	HFC32+HF01234yf 系および HF01123+HF01234yf 系混合冷媒の気液平衡性質を測定し、PR-MC 状態方程式を相関した。また、HFC32+HF01234yf+HF01123 系混合冷媒の測定準備を実施した。
③高温 PVT _x 性質及び定圧比熱の測定	PVT _x 性質は、HCF01224yd (Z) の純成分ならびに HFC32+HF01234yf の 2 成分系は 3 組成で、HF01336mzz (E) + HF01336mzz (Z) の 2 成分系は 1 組成で、HFC32+HF01234yf+CO ₂ の 3 成分系は 2 組成で測定をおこなった。定圧比熱測定は、装置を製作し、完成した。
④表面張力の測定	表面張力は、HF01336mzz (E) と HF01336mzz (Z)、そして三成分系の混合冷媒 R455A (HF01234yf/HFC32/CO ₂ : 75.5/21.5/3.0 mass%) 及び HF01123/HFC32/HF01234yf (65.0/24.0/11.0 mass%) に対し測定を行った。さらに-40℃までの低温域を測定できるよう装置の改良を行い、順次低温の補足データを取得した。
⑤音速の測定	HF01336mzz (E) 及び HF01336mzz (Z) の音速データを取得し、それぞれの理想気体比熱を求め、状態式開発に必要な温度相関式を作成した。また、2 成分系混合冷媒 R454C の音速データを取得した。
⑥状態方程式の開発	HFC32+HF01234yf+CO ₂ 系及び HFC32+HF01234yf+HF01123 系の 3 成分系混合冷媒、単一冷媒 HF01336mzz (E) 及び HCF01224yd (Z) の状態方程式を作成し、REFPROP で計算できるようにした。
⑦輸送的性質の測定及びモデル化	単一冷媒 HF01234yf および HF01336mzz (E) の、圧縮液および過熱蒸気域における熱伝導率および粘度データを取得するとともに、理論計算モデル (ECS モデル) との比較を行った。
(2)HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の伝熱特性評価	
①プレート式熱交換器内の伝熱特性評価	単一冷媒 HF01234yf 及び HFC32 のプレート式熱交換器内局所蒸発・凝縮熱伝達率の測定を行い、熱伝達特性の把握及び既存冷媒データとの比較検討を行った。
②扁平多孔管内の伝熱特性評価	扁平多孔管内における純冷媒 HFC32、HF01234yf、HF01336mzz (E) 及び 2 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf の凝縮・蒸発熱伝達特性を評価するとともに、3 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+CO ₂ の凝縮熱伝達特性を評価した。また、扁平多孔管内における純冷媒の沸騰熱伝達率の予測式を新たに提案した。

③ 円管内の伝熱特性評価	らせん溝付き円管内における、HF01224yd(Z)の蒸発熱伝達特性、そしてR455A (HF01234yf/HFC32/CO ₂ :75.5/21.5/3.0 mass%)の凝縮・蒸発熱伝達特性を測定し、以前取得したHFC32とHF01123/HFC32(40/60mass%)の結果と比較を行った。
④ 水平円管外の伝熱特性評価	HF01336mmz(E)の管外凝縮熱伝達率を測定し、ヌセルトの液膜理論より算出した理論値と比較を行い、状態方程式の妥当性を検討した。
(3)HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点HFO系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価	
①ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析	HF01234yf+HFC32+CO ₂ 系混合冷媒の熱力学的解析を実施した。また、解析に圧力損失および熱交換器性能を導入中である。
②ヒートポンプサイクル特性の実験的評価	3成分系混合冷媒HFC32+HF01234yf+CO ₂ 及びHFC32+HF01234yf+HF01123についてGWPが約150となる混合比、ならびにGWPが約120となるHFC32+HF01234yf+HF01123の混合比について実験を実施し、COP等の性能指標を計測した。その結果、冷暖房熱負荷及び熱源運転条件がサイクル性能に与える影響を明らかにした。各要素機器の特性がサイクル性能に与える影響について2020年度中に整理する予定である。

(b) 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】

本課題では、次世代冷凍空調機器用の冷媒に求められる要素のうち、低GWPかつ安全性に優れた冷媒の開発を支援するため、対象として沸点の低い炭素数3以下の、燃焼性の高い低GWP冷媒と、燃焼性の低い中～高GWP冷媒の組合せを中心に検討し、国内外で採用されている冷媒の安全性基準を満たす冷媒と同等以上の高安全性となる混合組成範囲を明らかにし、併せて混合に伴い有意に安全性が向上或いは低下する組成について定量化し、安全性の観点から科学的根拠に基づく最適な混合組成を明らかにする。また、次世代冷媒の国内外での実用化を見据え、現行のISO817の規定する評価条件（均一混合条件、23℃、1気圧、湿度ゼロ、等）を超えて、温度、湿度、冷媒の濃度分布等が燃焼性に与える影響を評価し、実用上の燃焼安全性を明らかにする。

目 標	研究開発成果
テーマ： 低GWP低燃焼性混合冷媒の安全性評価	
産学官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、およ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。そのために低GWP混合冷媒の安全性評価、実用上の安全性評価を実施する。	低GWP低燃焼性混合冷媒の対象として、国内外で開発中の代表的な混合系を選定し、冷媒の国際標準において必要な燃焼限界、燃焼速度や、実用化の検討において重要な消炎特性について評価した。また、混合系の実用上の燃焼特性として、温度湿度影響の評価を実施中である。燃焼限界測定法は、種々の標準法を実用上の火災に近い大規模容器での測定結果と比較検証した。
(1)低GWP混合冷媒の安全性評価	
① 安全特性の混合比依存性の評価 ② 不活性化条件の明確化	①評価対象として、R32/1234yf混合系を選定し、標準条件における燃焼限界、燃焼速度の混合比依存性を明らかにし、消炎距離については高压条件からの推算も行い混合比依存性を明らかにした。 ②特定不活性ガスであるR32、R1234yf単体よりも燃焼性が低いことを示した。
(2)低GWP混合冷媒の実用上の安全性評価	
①実用条件下での安全特性の混合比依存性の評価 ②濃度分布を有する条件における評価法の検討	①評価対象として、R32/1234yf混合系を選定し、燃焼限界の温度湿度依存性を明らかにし、数式化した。燃焼速度及び消炎距離の温度湿度影響を評価中である。 ②大規模容器での均一混合系の燃焼性評価を可能にし

た。冷媒の濃度分布を測定するための計測系を用意した。

(c) 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】

本研究は、HC冷媒やHFO系冷媒、さらにはそれらの混合冷媒や次世代冷媒が次々と提案される混沌とした状況の中で、単に冷媒の低GWP化だけでなく、次世代冷媒を導入した機器の性能も含めてどのような冷媒が次世代冷媒としてふさわしいのかを冷静に選定していく必要がある。そこで、次世代冷凍空調機器に対して適切な冷媒の選定に必要な不可欠な論理的、実験的性能評価ツールとしてのシミュレーション技術、評価装置を開発することを目標とし、以下の研究を実施した。

目 標	研究開発成果
テーマ： 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	
次世代冷凍空調機器に対して適切な冷媒の選定に必要な不可欠な論理的、実験的性能評価ツールとしてのシミュレーション技術、評価装置を開発する。 具体的な項目は以下。 【1】性能解析技術、【2】性能評価技術、【3】シミュレーター開発とその活用	評価に必要な解析と評価ツールを開発し、次世代冷媒の性能評価確立を目的に次の研究項目を実施した。 【1】性能解析技術 研究開発 【2】性能 評価技術 研究開発 【3】シミュレーター開発とその活用
【1】性能 解析技術 研究開発	
デバイスやシステムの定常、非定常解析を実現するとともに、現象自体が不明確な現象については、詳細な特性を把握できる評価装置を開発する。熱交換器については、モデルの妥当性を確認する。	・熱交換器、圧縮機、膨張弁からなるデバイスのモデリングとシステムの定常、非定常解析を可能とする。 ・混合冷媒の伝熱性能評価を可能とする実験装置を完成し、実験的に混合冷媒の組成が機器性能に与える現象の解明を可能とする。2022年度まで継続予定 ・冷媒充填量評価を可能とする実験装置を完成し、機器内をどのように冷媒が分布、滞留しているのか評価を可能とする。2022年度まで継続予定 ・熱交換器モデルが上記精度で解析可能なことを実験で確認する。
【2】性能 評価技術 研究開発	
次世代冷媒の性能の良しあしを比較分析可能な評価方法をシミュレーション、実験の両面で確立する。	・構造が複雑で多様な構造をとるため、最も性能評価が難しい熱交換器に対して最適性も保証した構造での性能評価手法を明確化する。 ・5%の精度で定常状態の評価を可能なハイブリッド実運転性能評価装置を開発する。
【3】シミュレーター開発とその活用	
最重要な要素となる熱交換器とそれを含むシステム全体のシミュレーションを可能とするシミュレーターを開発する。	・混合冷媒を含む多様な冷媒で、多様な構造となる熱交換器の性能を予測可能なシミュレーターの開発を完了する。 ・混合冷媒を採用したシステムのシミュレーターを開発する。 ・年間の性能を評価できるシミュレーターの概形の開発を完了する。

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」

(d) 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】

次世代冷媒を空調機器や冷凍冷蔵機器に適用するときの燃焼に伴う安全性やリスク評価を行う手法の確立を目指して、冷媒漏えい時の拡散、燃焼時の危害度評価、現実的な使用環境下で

想定される着火源による火災危険性評価、実規模実験によるフィジカルハザード評価を行う。また、HF0 冷媒の自己分解反応の機構解明、抑制効果評価を行う。本研究開発は 10 のサブテーマにより構成されており、各サブテーマにおける研究成果は以下の通り。

目 標	研究開発成果
テーマ：次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発【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] 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。
テーマ： 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。	<左記目標に対する成果を記載> 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。

テーマ： 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

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。

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。

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」

(e) 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】

本研究開発は、入れ替え気運が高まっている大型冷蔵倉庫向けのクーリングユニットに環境負荷の少ない自然冷媒である CO₂ を適用し、そのうえで安価で高い省エネ性を持ち、設備管理者も不要なシステムの開発を目的として、下記の研究項目を実施した。

目 標	研究開発成果
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、CO ₂ ）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）、アキュームレータ、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。

(f) 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】

本研究開発では、低 GWP 冷媒を使用したコンデンシングユニットの開発を目的とし、以下の研究項目を実施した。

- ・冷媒種の選定
- ・定格機器性能 対従来比 100%
- ・実運転に基づく機器仕様の確立
- ・実運転時の年間機器性能 5%改善

目 標	研究開発成果
-----	--------

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。

(g) 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】

本事業では、以下の課題を解決し、CO₂冷媒の普及を促進することを目的とする。

CO₂冷凍機の普及が促進されない要因には、業界の CO₂冷凍機の出力帯の主体が、2～20HP となっており、スーパーマーケットで使用される 30HP 以上の出力機種がないため、使用台数が多くなり施工費用が高くなることが挙げられる。また、冷凍機の仕様が屋外型一体型のみのもので構成となっていることも要因の一つとなっている。このことに加え、業界の認識が HFC 冷媒に対する自然冷媒に転換するメリットが環境性のみになっているため、導入が促進されない状況にあると分析している。このことに鑑み、本研究開発では、各課題に対して、下記の研究項目を実施した。

目 標	研究開発成果
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]中高温度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。

(h) 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】

次世代冷媒の成分物質を用いて、直膨型空調機器を対象に GWP<10 の混合冷媒の開発を目的として、下記の研究項目を実施した。冷媒性能目標としては、機器については直膨型空調機器を対象に現行冷媒である R410A に対して COP、APF において 90%以上を設定した。燃焼性については、現行で R32 が使用されていることから、ASHRAE 安全性区分 2L を目標に設定した。また、毒性については、民生用途では、低毒性が求められることから、ASHRAE 安全性区分 A の目標を設定した。

目 標	研究開発成果
テーマ： GWP 10 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 > 20,000ppm。 ・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	
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。
	投稿論文	「査読付き」40件、「その他」34件
	特 許	「出願済」9件、「登録」1件、「実施」0件（うち国際出願2件）
	その他の外部発表 (プレス発表等)	9件
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	<p>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、実用的な安全基準、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率的に結び付けるため、次世代冷媒に係る規制、規格等の動向調査をはじめとする次世代冷媒の冷凍空調機器への適用に係る安全性・リスク評価に関する調査を実施している。本調査においては、研究開発項目①及び研究開発項目②の事業者や業界団体を中心とした産学官の有識者で組織する委員会を定期的に開催し、意見交換等を踏まえて国際規格化・国際標準化等へ向けた課題等を共有し、研究開発へ反映している。</p>	
5. 基本計画に関する事項	作成時期	2018年2月 制定
	変更履歴	2019年1月 改訂（研究開発項目の追加）

プロジェクト用語集

APF	Annual Performance Factor(通年エネルギー消費効率):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1kWhあたりの冷房・暖房能力を表したもの。
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(アメリカ暖房冷凍空調学会):暖房、換気、空調、冷凍など(空気調和、HVAC&R)に関わるあらゆる個人や団体のための国際的学会。冷媒の安全性に係る規格(毒性、燃焼性など)も作成している。ASHRAE34は冷媒に関する規格。
CFC(CFCs)	CFC(クロロフルオロカーボン):フロン的一种。冷媒、発泡剤、洗浄剤等として使用される。オゾン層破壊物質であり、モントリオール議定書の規制対象物質。また、強力な温室効果ガスでもある。先進国では1995年末に生産・消費が全廃されており、開発途上国でも2009年末に生産・消費が全廃された。
COP	Coefficient Of Performance(成績係数(動作係数)):冷暖房器具のエネルギー消費効率をチェックするための係数のこと。消費電力1kWに対しての機器の冷却能力、暖房(加熱)能力を示す。
COP3(4,・・・)	Conference of the Parties(締約国会議):気候変動枠組条約に基づき、温室効果ガスの排出量を削減するために開催されている会議。1997年12月に京都で開催されたものがCOP3(第3回)であり、COP3で採択された京都議定書では、地球温暖化問題に対して21世紀以降、人類が中長期的にどのように取り組んでいくのかという道筋の第一歩が定められ、この仕組みを京都メカニズムと呼んでいる。
GHG	Green House Gas:温室効果ガスのこと。
GWP	Global Warming Potential(地球温暖化係数):二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などの各種の温室効果ガス毎に定められる、温室効果の程度を示す値。二酸化炭素のGWPを1とする。別表参照。
HCFC(HCFCs)	HCFC(ハイドロクロロフルオロカーボン):フロン的一种。オゾン層破壊物質であり、モントリオール議定書の規制対象物質。オゾン層破壊係数はCFCよりも小さい。また、強力な温室効果ガスでもある。先進国では2020年までに、また開発途上国でも2030年までに、生産・消費が全廃される予定。
HFC(HFCs)	HFC(ハイドロフルオロカーボン):CFCやHCFCの代替物質として使用が増えている。オゾン層破壊効果はないものの強力な温室効果ガスであり、京都議定書において排出削減の対象となっている。
HFO(-1234yf,-1234ze(E))	HFO(ハイドロ・フルオロ・オレフィン):フロン的一种。水とフッ素または二フッ化酸素が反応して生成する極めて不安定な化合物で、すぐにフッ化水素と酸素に分解する。オゾン層を破壊せず、GWPも1と極めて低い。
IEC	International Electrotechnical Commission(国際電気標準会議):電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な標準化団体。その標準の一部は国際標準化機構(ISO)と共同で開発されている。IEC60335-2-40はエアコンに関する基準。
ISO	International Organization for Standardization(国際標準化機構):電気分野を除く工業分野の国際的な標準である国際規格を策定するための民間の非政府組織。ISO5149は冷凍空調機器に関する基準、ISO817は冷媒の安全等級等に関する基準。
LCCP	Life Cycle Climate Performance(製品寿命気候負荷):生産から使用、廃棄段階におけるトータルの冷媒漏洩とエネルギー消費(燃費)の影響を加味した環境影響評価手法。
ODP	Ozon Depletion Potential(オゾン破壊係数):オゾン層を破壊する力を定数値化した値。R11(CFC)を1.0として、同一質量の他の物質が放出されたときのオゾンへの影響(破壊すると考えられる能力)を相対値で示すもの。別表参照。
R~(ex.R410A)	フロンに付けられている物質番号(冷媒番号)。別表参照。
RAC	Room Air Conditioner:家庭用室内エアコンの略称。
REFPROP	アメリカ国立標準技術研究所(NIST)が作成する、冷媒物性データベースの標準版として現在流通しているソフトウェア。
オゾン層	地球の大気中でオゾンの濃度が高い部分のこと。オゾンは、地上から約10~50kmほどの成層圏に多く存在し、特に地上20~25kmの高さで最も密度が高くなる。太陽からの有害な紫外線の多くを吸収し、地上の生態系を保護する役割を果たしている。
オゾン層保護法	モントリオール議定書の国内担保措置として、国内における特定フロンの製造や輸入を規制している。キガリ改正を受けて、2018年に本法を改正し、HFCについても国内における生産・消費を規制することとなった。
キガリ改正	キガリとは、ルワンダの首都キガリのことで、2016年のモントリオール議定書第28回締約国会合(MOP28)開催地。その会合でモントリオール議定書改正が採択されたことに因んで、その改正は「キガリ改正」と呼ばれる。
京都議定書	1997年に京都で開催されたCOP3において採択された議定書。2005年2月に発効した。二酸化炭素(CO2)など6種類の温室効果ガスを先進国全体で削減することを義務づけるとともに、排出量取引などの京都メカニズムや森林吸収源の算定などを盛り込んでいる。
京都議定書目標達成計画	地球温暖化対策の推進に関する法律(地球温暖化対策推進法)に基づき、京都議定書発効の際、温室効果ガス6%削減約束を確実に達成するために必要な措置を定めるものとして作成された計画のこと。

高圧ガス保安法	高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、輸入、移動、消費、廃棄等を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスに関する自主的な活動を促進し、公共の安全を確保することを目的とする法律。本法律の一般高圧ガス保安規則によれば、HFO-1234yfは可燃性ガスに分類される。
自然冷媒	人工的に化学合成されたものではなく、もともと自然界に存在し生成から消滅までの循環サイクルがすでに確立されている物質を冷媒として使用する場合、このような冷媒を自然冷媒と呼ぶ。アンモニア、プロパン、ブタンなどの炭化水素、炭酸ガス、空気、水、等がある。別表参照。
消炎距離	混合気中を火炎が伝播するとき、火炎が固体壁へ近づくと、壁に熱を奪われて、ある距離以下にまでは近づけず、そこで消炎が起こる。壁近傍の、この火炎伝播が阻害される領域の厚みのこと。通常、平板を向かい合わせにした配置での間隔で議論する。
ショーケース	スーパーマーケット、コンビニエンスストア等において冷凍・冷蔵が必要な商品の陳列に使用する冷凍冷蔵ショーケースのこと。「冷凍機別置型」と「冷凍機内蔵型」がある。
ターボ冷凍機(遠心冷凍機)	遠心式圧縮機を利用した冷凍機で、回転する羽根車で冷媒を外周部へ吐き出すことで圧縮を行う蒸気圧縮式冷凍機の一つ。冷凍能力は100トン～10000トンと範囲が広く、オフィスビル、地域冷暖房、病院等に適用されている。
代替フロン	特定フロンの代替として産業利用されている合成化合物のこと。HCFC類やHFC類等が該当し、オゾン層破壊効果はないが温室効果はある。
代替フロン等4ガス	代替フロンのうち、温室効果が高く、広く使用されているHFC、PFC(パーフルオロカーボン)、SF ₆ (六フッ化硫黄)、NF ₃ のこと。 (代替フロン等3ガスは、HFC、PFC、SF ₆ のこと)
直膨型空調機	利用する場所で冷媒を膨張させ熱を奪う「直接膨張方式」を用いた空調機のこと。
低GWP冷媒(低温室効果冷媒)	GWPが小さく、温室効果の少ない冷媒。HFOや自然冷媒(CO ₂ 、アンモニア、炭化水素、水)など。
特定フロン	特にオゾン層破壊効果が大きい、CFC(クロロフルオロカーボン)等5種類のフロンおよび3種類のハロンのこと。
ドロップイン試験	冷凍空調機器において、システムには何の変更も加えずに冷媒だけを入れ替えて、性能等の変化を確認する試験。
燃焼限界	空気と可燃性ガスの混合気において、燃焼できる混合気に含まれる可燃性ガスの濃度の限界のこと。可燃性ガスの濃度の薄い方の燃焼限界を下限界、濃い方の燃焼限界を上限界という。
ノンフロン冷媒	オゾン層破壊の恐れが無く温室効果の低い冷媒の総称として使用。
パリ協定(COP21)	パリ協定は、1997年に定まった「京都議定書」の後を継ぎ、国際社会全体で温暖化対策を進めていくための礎となる条約で、2015年12月にフランス・パリで開催されたCOP21(国連気候変動枠組条約第21回締約国会議)で成立した。世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して、2°Cより充分低く抑え、1.5°Cに抑える努力を追求することを目的としています。
微燃性冷媒	燃焼性の弱い冷媒のこと。我が国の高圧ガス保安法や冷凍保安規則には不燃と可燃の分類しかなく、燃焼性の弱い冷媒の取り扱いについての考慮が少ない。ASHRAE34規格では2L(燃焼熱量<19MJ/kg、燃焼速度<10cm/s)に位置付けられており、アンモニア、R32、R1234yf、R1234ze(E)等が含まれる。
フロン	炭化水素の水素を塩素やフッ素で置換した化合物(CFC、HCFC、HFC)の総称で、このうち水素を含まないものをクロロフルオロカーボン(Chlorofluorocarbons; CFCs)と呼んでいる。化学的に安定で反応性が低く、ほとんど毒性を有しない。また揮発性や親油性などの特性を持っており、冷蔵庫などの冷媒、半導体などの精密な部品の洗浄剤、ウレタンフォームなどの発泡剤、スプレーの噴射剤などとして幅広く使用されてきた。
フロン排出抑制法	2001年に制定された「特定製品に係るフロン類の回収及び破壊の実施の確保等に関する法律(フロン回収・破壊法)」において、フロン類の適正な回収・破壊によるフロン類の大気中への放出抑制を進めてきたが、2013年にこれまでのフロン類の回収・破壊に加え、フロン類の製造から廃棄までのライフサイクル全体にわたる包括的な対策にとられるよう法改正され、名称も「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(フロン排出抑制法)」と改められた(2015年4月施行)
ポスト京都	京都議定書の第1約束期間(2008年から2012年まで)の後に来る、2013年以降の地球温暖化ガス削減を目指す枠組み。同議定書については、アメリカの不参加や、中国・インドなどに削減義務がないこと、途上国と先進国間の立場と意見の相違、各国の取り組みの温度差などさまざまな課題がある。第2約束期間(2013～2020)については、我が国は不参加となった。
マルチ空調機	一つの室外機で複数の室内機を使用し空調を行うもの。中小規模の建築物で一般に使用されている。室内機の個別起動・停止が可能で、増設が容易。マルチ、ビルマルチ(ビル用マルチ空調機)と省略されることが多い。
モントリオール議定書	正式名称は「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」。1987年に採択、1989年発効。日本は1988年9月30日に加入。事務局はナイロビのUNEPに置かれている。ウィーン条約に基づき、オゾン層を破壊するおそれのある物質を特定し、該当する物質の生産、消費及び貿易を規制することをねらいとしている。具体的には、成層圏オゾン層破壊の原因とされるフロン等の環境中の排出抑制のための削減スケジュールなどの規制措置を定めている。議定書の発効により、

	特定フロン、ハロン、四塩化炭素などが先進国では 1996 年以降全廃となり、同議定書のキガリ改正により代替フロンも大幅に削減することとなった。
冷媒番号	ISO817(国際標準化機構)で定められた、冷媒の種類を表す R で始まる番号。冷媒番号はRの次に 3 ないし 4 桁の数字と英添え字で表される。別表参照。
レトロフィット	代替フロンを冷媒とする従来の冷凍空調機器に、低 GWP 冷媒を適用させること。

プロジェクト用語集（別表）

代表的な冷媒

●フルオロカーボン類^{*1}

種類	冷媒番号	略称	化学式(組成)	地球温暖化係数 GWP	オゾン破壊係 数 ODP	安全性 分類 ^{*2}
CFC	R12	CFC12	CCl_2F_2	10900	1	A1
HCFC	R22	HCFC22	CHClF_2	1810	0.055	A1
HFC	R32	HFC32	CH_2F_2	675	0	A2L
	R125	HFC125	CHF_2CF_3	3500	0	A1
	R134a	HFC134a	CH_2FCF_3	1430	0	A1
混合系	R404A	—	(HFC125/143a/134a)	3920	0	A1
	R407C	—	(HFC32/125/134a)	1770	0	A1
	R410A	—	(HFC32/125)	2090	0	A1
	R422A	—	(HFC- 125/134a/R600a)	3140	0	A1
	R422D	—	(HFC- 125/134a/R600a)	2730	0	A1
	R417	—	(HFC-125/134a/R600)	2350	0	A1
HFO	R1234yf	HFO1234yf	$\text{CH}_2=\text{CFCF}_3$	1	0	A2L
	R1234ze(E)	HFO1234ze(E)	$\text{CHF}=\text{CHFF}_3$	1	0	A2L

*1：「特定フロン（CFC/HCFC）およびフルオロカーボン類の環境・安全データ一覧表（日本フルオロカーボン協会）」より抜粋

*2：ASHRAE 34 冷媒安全性分類規格； A 低毒性、B 毒性、1 不燃性、2L 低微燃性、2 微燃性、3 強燃性

●自然冷媒

種類	冷媒番号	化学式
プロパン	R290	C_3H_8
プロピレン	R1270	C_3H_6
ブタン	R600	C_4H_{10}
イソブタン	R600a	$\text{CH}(\text{CH}_3)_3$
二酸化炭素	R744	CO_2
アンモニア	R717	NH_3
水	R718	H_2O

I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

はじめに、本事業の背景であるフロン類を巡るオゾン層対策及び地球温暖化対策の動向を示す。

1.1 オゾン層保護対策の動向

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、特定フロン等（CFC、HCFC等）のオゾン層破壊物質は、1985年に採択された「オゾン層保護に関するウィーン条約」に基づき、フロン規制のための国際的な枠組みとして、モントリオール議定書（1987年）により生産、輸出入の段階的な廃止が義務付けられることとなった。その後、2007年9月開催の第19回締結国会合において、消費量についても段階的に削減することが定められた。特定フロンについて、CFCは1996年に全廃、HCFCは2020年までに全廃することが決定されている。この結果、特定フロンの代替として、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）が開発され、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・排出量が増加している（表1.1-1）。

我が国におけるモントリオール議定書の国内担保措置としては、「特定物質の規制等によるオゾン層の保護に関する法律（オゾン層保護法）」の下、特定フロンの規制を進めてきた。同法では、国が生産量・消費量の限度を定め、製造許可及び輸入承認を行うこととしている。

表 1.1-1 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			
			代替フロン等3ガス			—
種類	CFC <small>(クロロフルオロカーボン)</small>	HCFC <small>(ハイドロクロロフルオロカーボン)</small>	HFC <small>(代替フロン)</small> <small>(ハイドロフルオロカーボン)</small>	PFC <small>(パーフルオロカーボン)</small>	SF ₆ <small>(六フッ化硫黄)</small>	NF ₃ <small>(三フッ化窒素)</small>
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・パリ協定対象物質 <small>(NF₃は2013年より)</small>			
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※1)	極めて 大きい <small>(約10,000)</small>	大きい <small>(数百～約2,000)</small>	大きい <small>(数百～約4,000)※2</small>	極めて 大きい <small>(約6,000～ 9,000)</small>	極めて 大きい <small>(約23,900)</small>	極めて 大きい <small>(約17,200)</small>
主な用途	・ <u>冷凍空調機器の冷媒</u> ・洗浄剤、溶剤等 <small>(95年以降全廃済み)</small>	・ <u>冷凍空調機器の冷媒</u> ・洗浄剤、溶剤等 <small>(2020年全廃予定)</small>	・ <u>冷凍空調機器の冷媒</u> ・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

1.2 温暖化対策の動向

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CO₂の数百倍から一万倍超という極めて高い温室効果を有する。代替フロン等4ガスの排出量のうち、HFCが最も多く2018年度においては約89%に上る（図1.2-1）。また、HFC排出量のうち、特定フロンからの転換に伴いエアコン等の冷媒が増加し、2018年度においてはその約90%を冷媒が占めている（図1.2-2）。特に、冷凍空調機器は、市中冷媒ストック量が極めて多く、一旦市場に出荷されれば十数年にわたり大気中への漏洩源として温暖化への悪影響が懸念される（図1.2-3）。

特定フロンから代替フロン等への転換が進むにつれて、代替フロン等の持つ温室効果が問題となり、フロン類を巡る対策は地球温暖化防止へと移ってきた（図1.2-4）。

これまで、温暖化を巡っては、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

的取組を開始した。その後、1992年には「気候変動枠組条約」が締結され、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。2015年11月には、気候変動枠組条約の加盟国らによる第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）がパリで開催され、主要排出国を含む全ての国が参加し、パリ協定が合意された。

代替フロン等4ガスは、その温室効果から京都議定書（1997年）及びパリ協定（2015年）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。パリ協定における我が国の削減目標では、温室効果ガスの総排出量を2030年度に2013年度比-26.0%の水準にすることを目標としている。そのうち、代替フロン等4ガスについては、2013年比-25.1%（HFCについては約-32%）の水準にすることを目標とし、これは総排出量比で-0.7%に相当する（表1.2-2）。

国内における、この対策の一つとして、2015年4月に「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（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[※]。

一方、代替フロンの温室効果による地球温化影響から、2016年10月のモンリオール議定書第28回締結国会合（MOP28）において、特定フロンに加えてHFCについても規制の対象とする議定書の改正が採択された（キガリ改正）。先進国は2036年までにHFCの生産及び消費量を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た。キガリ改正を受けて、我が国においては、オゾン層保護法について、2018年7月HFCの製造及び輸入を規制する等の措置を講じた改正がなされ、HFCの生産量・消費量の限度を定めて段階的削減を推進することとなった。

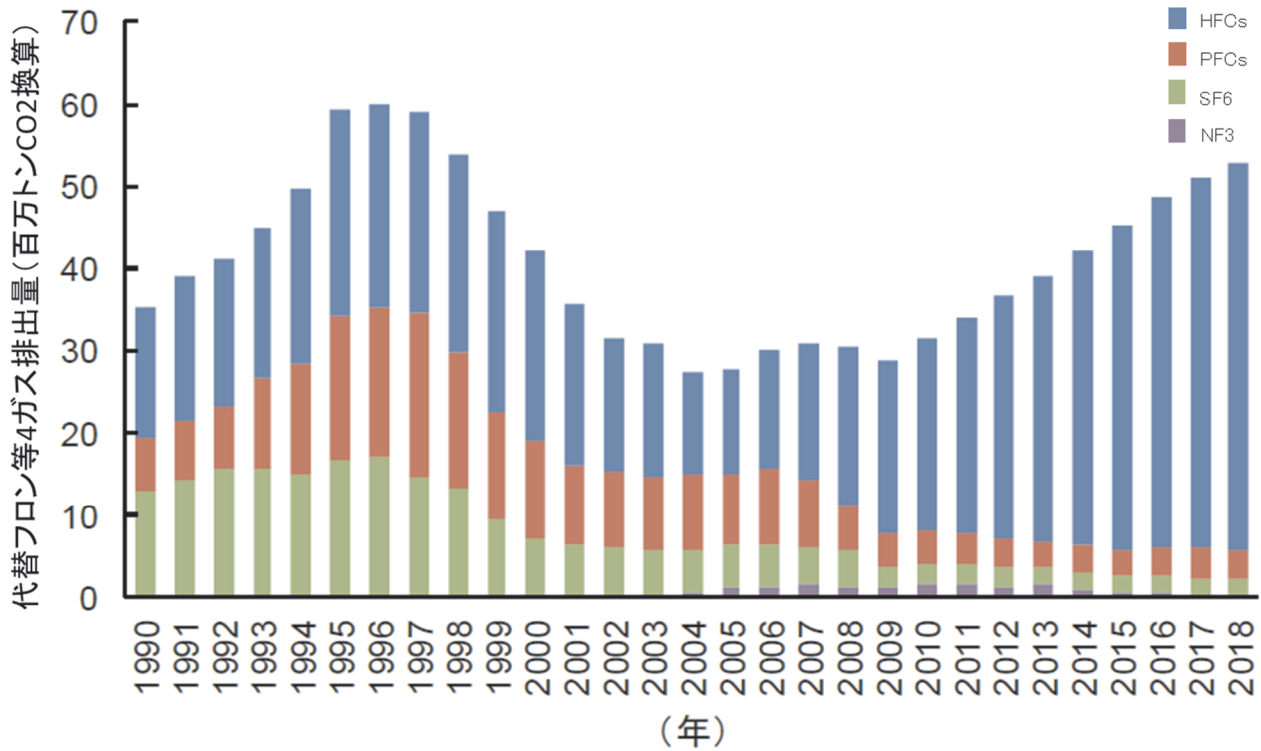
我が国においては、フロン排出抑制法に基づく国の「フロン類使用見通し」（2015年策定）から、2020年は4,340万CO₂-t、2025年度は3,650万CO₂-tとなっており、2029年以降の目標達成には新たな対策が必要となる（図1.2-5）。2020年2月には、キガリ改正におけるHFCの生産量及び消費量の削減目標を達成するための「フロン類の使用見通し（案）」を踏まえた今後の削減シナリオが示された（図1.2-6）。フロン類対策における現在までの国際規制と国内政策等の対応を図1.2-7に示す。

こうした状況の中、代替フロン等4ガスの排出削減対策として、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には、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。

以上のことから、キガリ改正における日本のHFC生産・消費量削減目標、及びパリ協定における日本のHFC排出削減目標の達成へ向けて、早期に冷媒転換技術を開発し、市場投入を図ることが求められる。

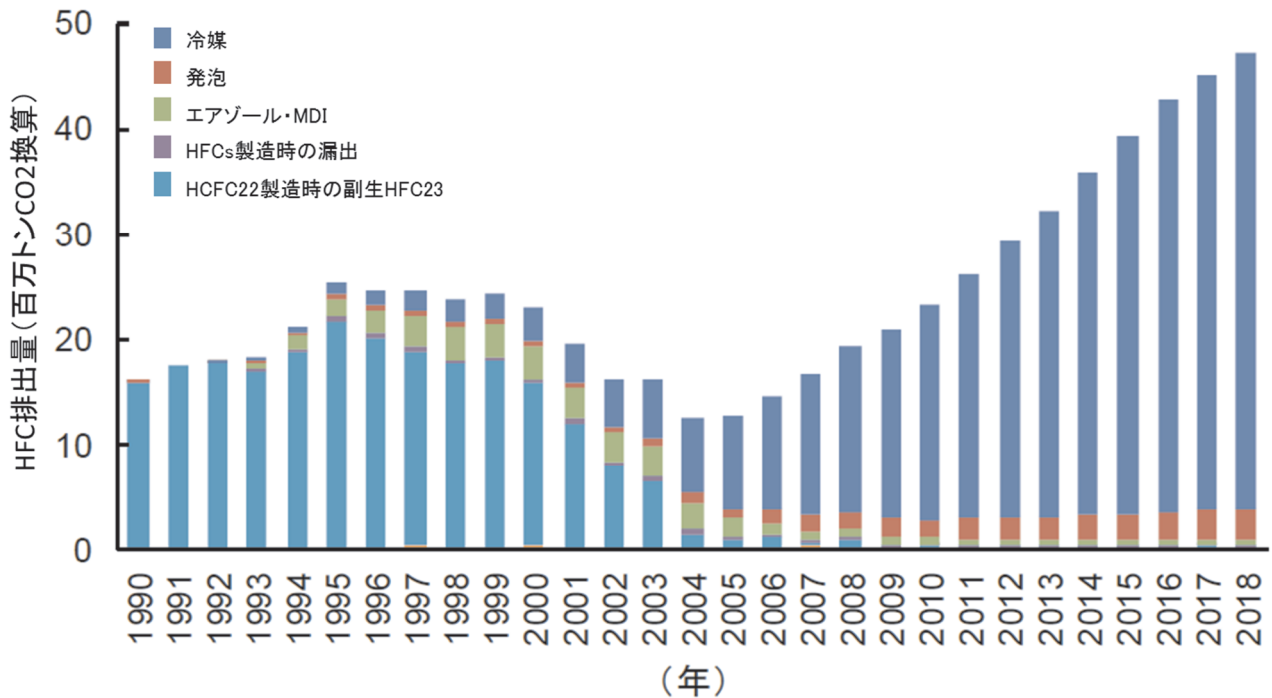
※「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」（フロン排出抑制法）抜粋：

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。



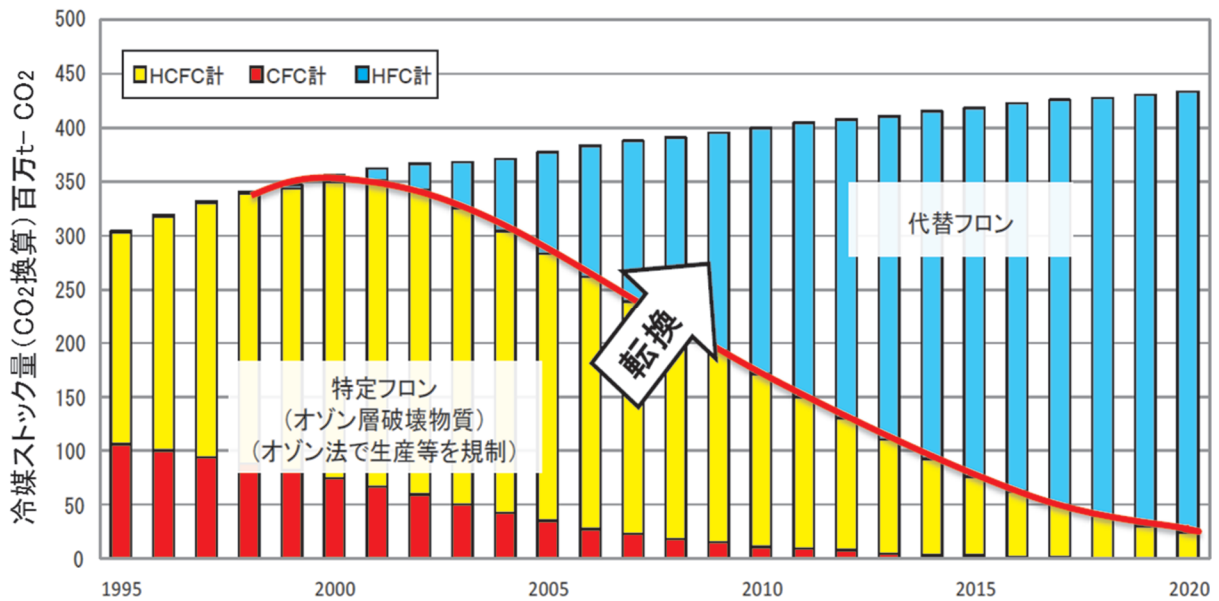
出典：環境省「2018年度（平成30年度）の温室効果ガス排出量（確報値）について」より

図 1.2-1 代替フロン等4ガス排出量の推移



出典：環境省「2018年度（平成30年度）の温室効果ガス排出量（確報値）について」より

図 1.2-2 HFC 排出量の推移と主な排出源



(BAU : Business As Usual ※フロン分野の排出推計においては、現状の対策を継続した場合の推計を示す。)

※実績は政府発表値。2020年予測は、冷凍空調機器出荷台数（日本冷凍空調工業会）、使用時漏洩係数、廃棄係数、回収実績等からの経済産業省試算（2015）

図 1.2-3 冷凍空調機器における冷媒の市中ストック量

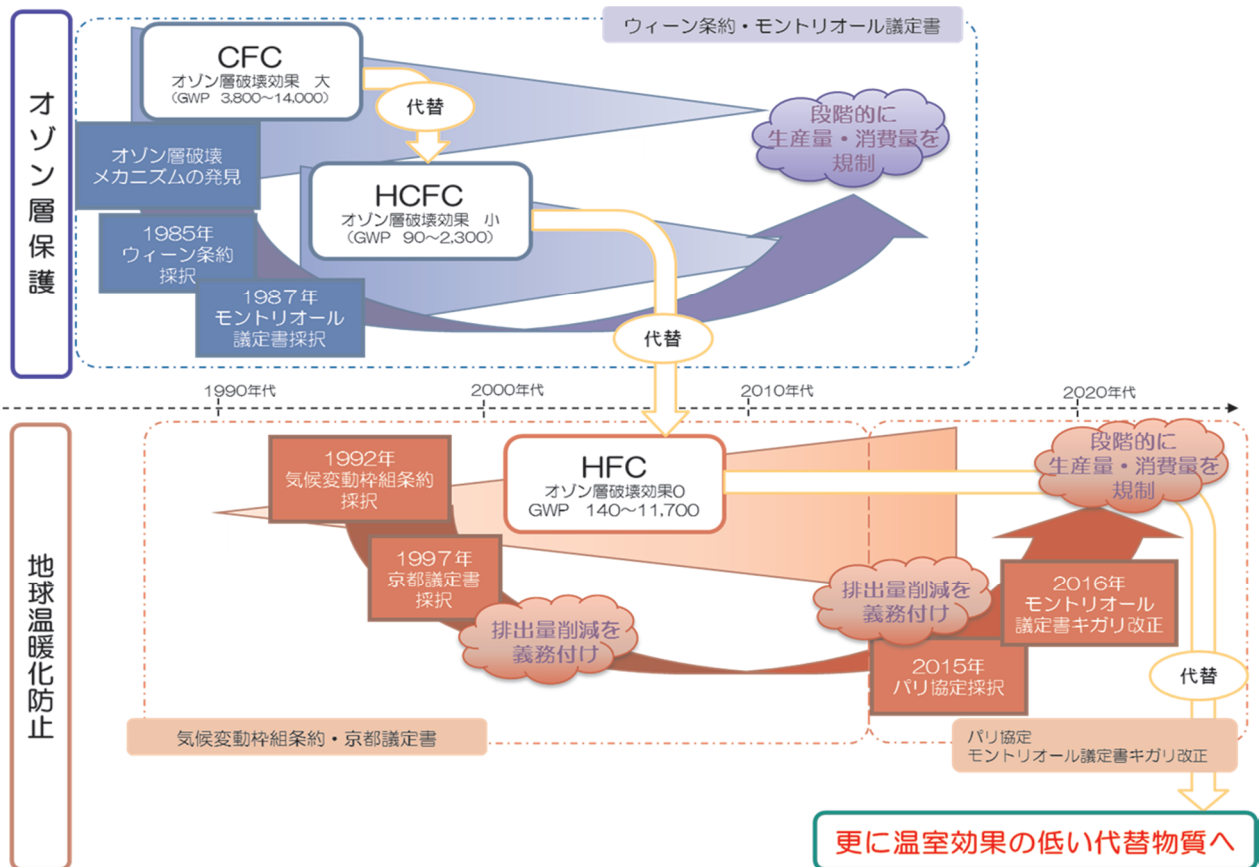
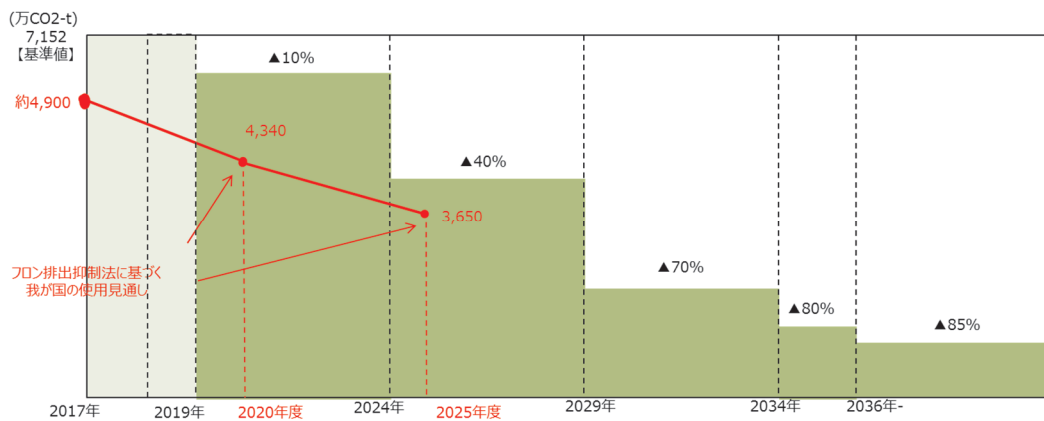


図 1.2-4 フロン対策を巡る規制と対策の流れ

表 1.2-1 パリ協定における代替フロン4ガス排出削減目標

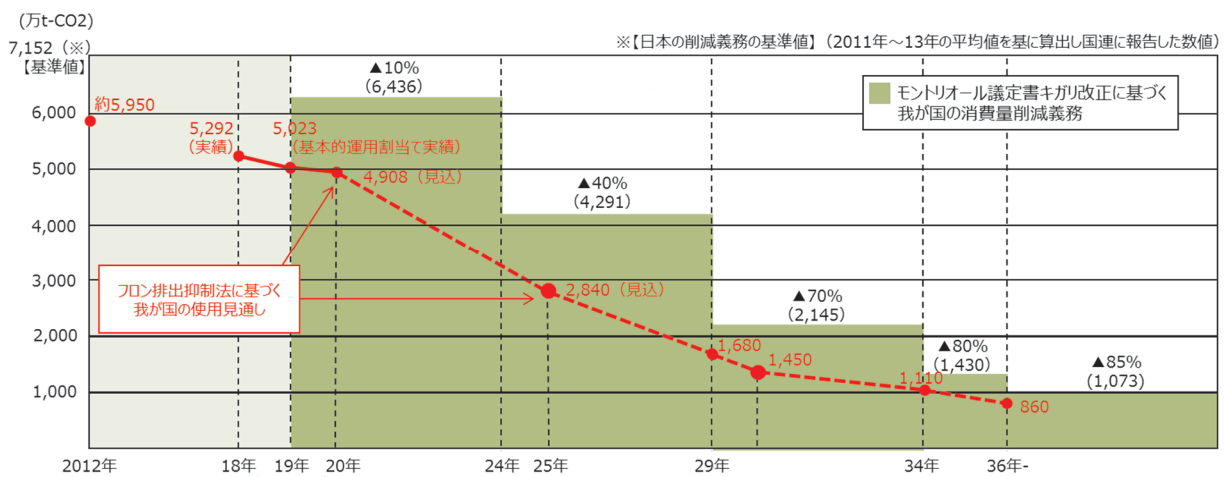
	2013年 (百万t-CO ₂)	2030年 (百万t-CO ₂)	2013年総排出 量比 (%)
エネルギー起源 CO ₂	1235	927	▲21.9
非エネルギー起源 CO ₂ 、CH ₄ 、 N ₂ O	134.4	123.5	▲0.8
代替フロン等4ガス (HFC、PFC、SF₆、NF₃)	38.6	28.9	▲0.7
温室効果ガス吸収源 (森林吸収等)	—	(▲37.0)	▲2.6
合計	1408	1042	▲26.0

※上記表は四捨五入の都合上、各欄の合計は一致しない場合がある



【出典：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（2019年1月16日）資料より NEDO 作成】

図 1.2-5 モントリオール議定書キガリ改正の削減スケジュールと「フロン類使用見通し」（2015年策定）を踏まえた削減のイメージ



【出典：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 NEDO 作成】

図 1.2-6 モントリオール議定書キガリ改正の削減スケジュールとキガリ改正における削減目標を達成するための「フロン類の使用見通し（案）」を踏まえた今後の削減シナリオ

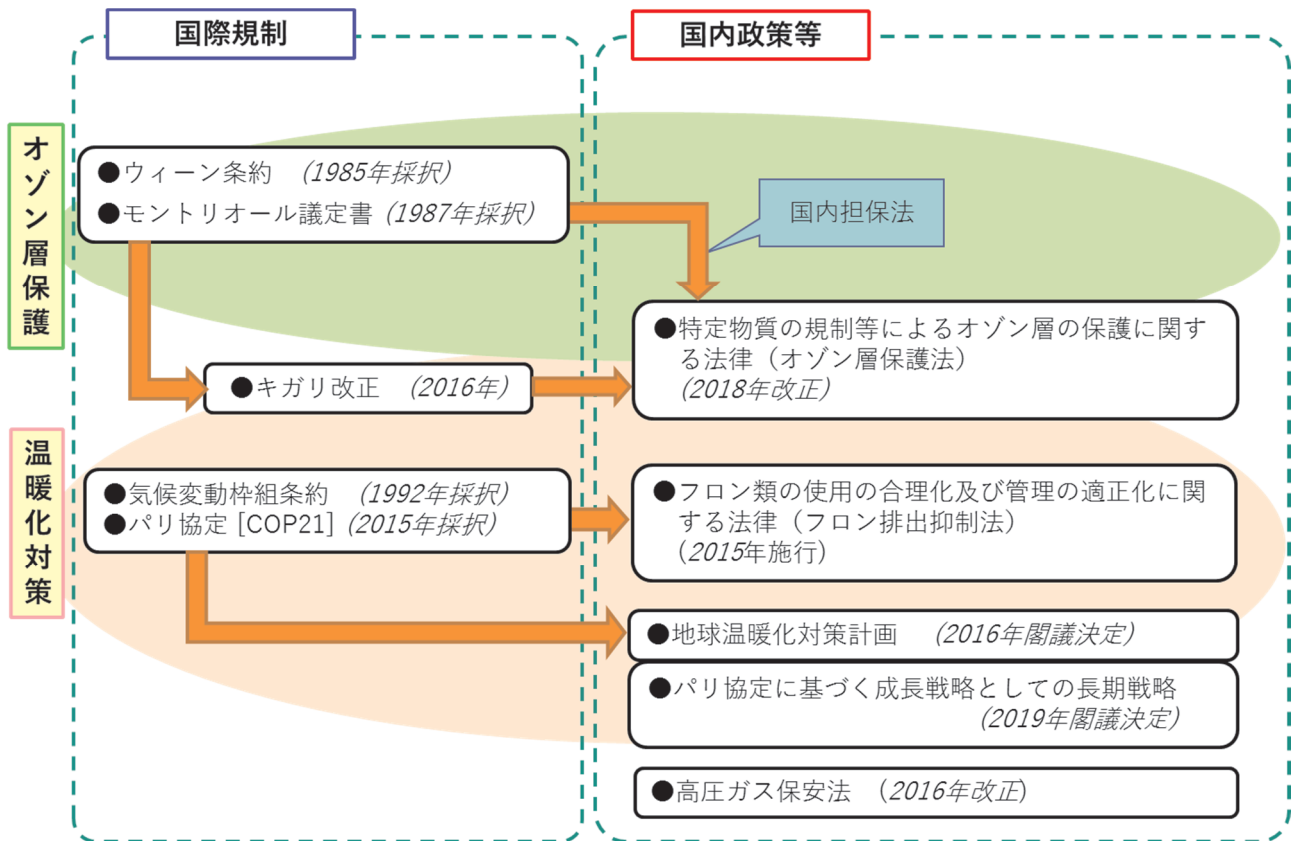


図 1.2-7 フロン類対策における現在までの国際規制と国内政策等の対応

1.3 フロン類に対する世界の動向

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。

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。

1.4 本事業の目的と位置づけ

世界的な次世代冷媒への転換意識の高まりの中、2016年にキガリ改正が採択され、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、フロン対策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ことは困難であると考えられる。

このような状況の中、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、またはそれ以上の性能とするための技術的ハードルが高く、さらに燃焼性や科学的不安定性等の安全性における課題があることから、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。これまでより、一層GWPの低い次世代冷媒へ転換を進めるためには、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・リスク評価の評価手法を確立し、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、次世代冷媒適用機器等の開発を支援することが重要である（図1.4-1）。

冷凍空調分野における低GWP冷媒への転換状況を図1.4-2に示す。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機器等に対しては、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。

こうした状況を踏まえ、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指導投入に貢献することをねらいとして、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模の冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の安全性評価手法を確立する研究開発を目指す。さらに、キガリ改正の目標の達成に当たって、新たな技術が普及する期間を考慮すると、次世代冷媒の普及に至っていない領域に対し、普及を妨げる技術課題の技術開発を促進することが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している。

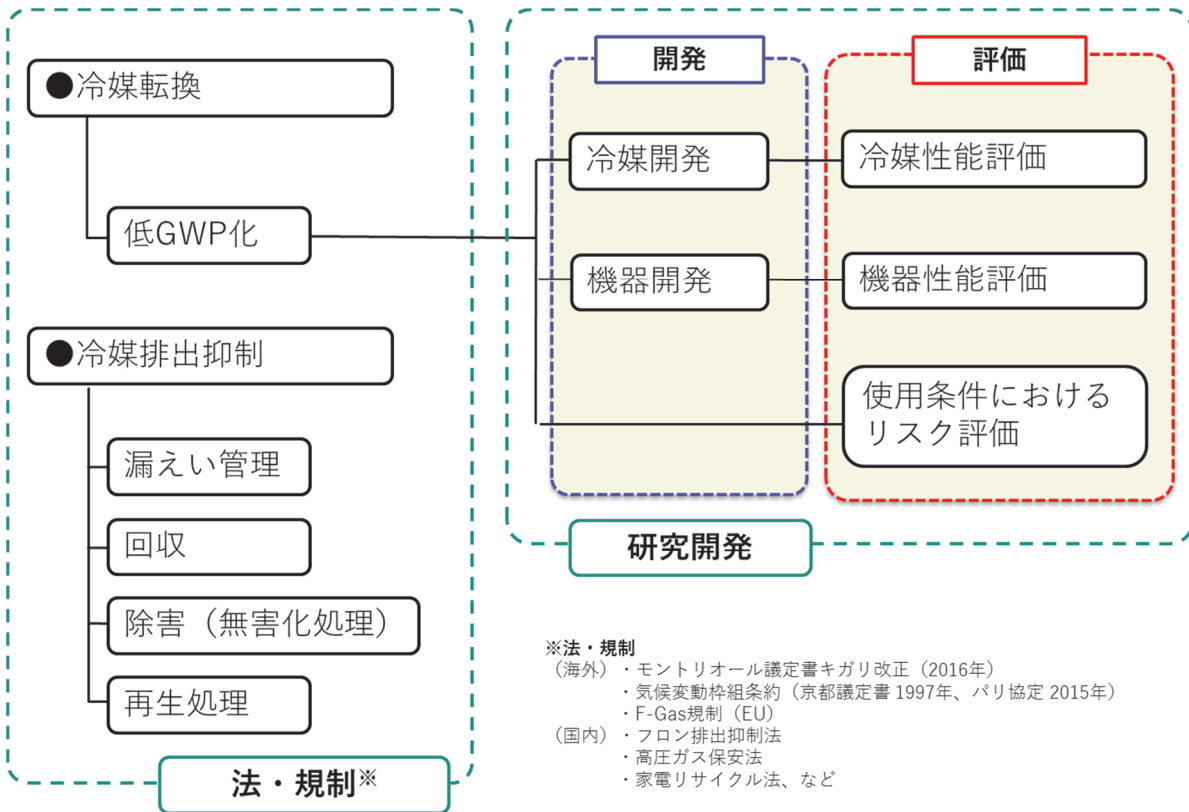
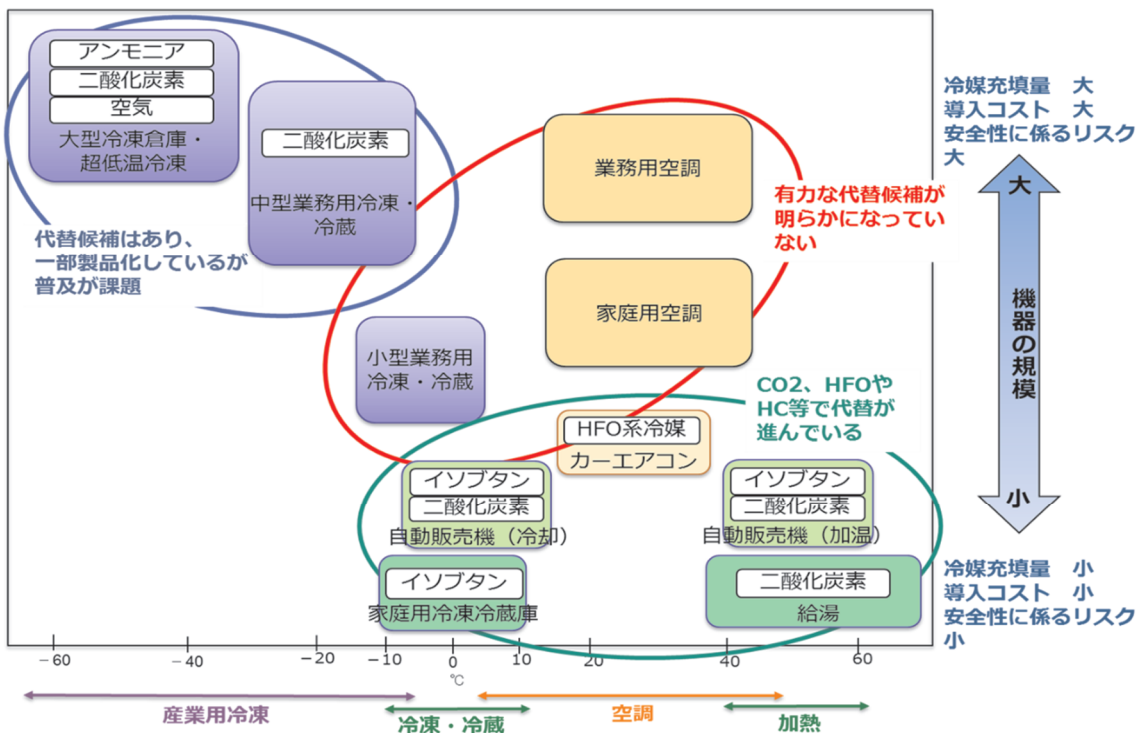


図 1.4-1 HFC 排出抑制へ向けた対策の方向性



出典：産業構造審議会化学・バイオ部会地球温暖化防止対策小委員会第3回冷媒対策ワーキンググループ資料（2010/6）を参考にNEDO 環境部作成（2017）

図 1.4-2 冷凍空調分野における低 GWP 冷媒への転換状況

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

2.1.1 本事業の必要性

2016 年にキガリ改正が採択され、先進国は 2036 年までに HFC の生産及び消費量を段階的に 85%削減が義務付けられた。この目標の達成は、現在の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困難であり、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。

さらに、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（2019 年 6 月閣議決定。以下、「長期戦略」という。）」において、フロン類を中長期的に廃絶することとしており、具体的な対策の一つとして、「グリーン冷媒技術の開発・導入」が示されている。本項目では、代替フロンの製造量及び消費量の大幅削減（2036 年までに基準値比▲85%）を達成すべく、グリーン冷媒及びそれを用いた機器技術の開発及び導入を計画的に推進することとしている。また、「長期戦略」及び「統合イノベーション戦略 2019」に基づき策定された「革新的環境イノベーション戦略（2020 年 1 月統合イノベーション戦略推進会議決定）」においては、我が国のエネルギー・環境分野におけるイノベーションの創出について、温室効果ガスの削減量が大きく、日本の技術力による大きな貢献が可能な 39 テーマを設定している。この中で、フロン類の削減に向けたグリーン冷媒及び利用機器の開発および既存製品と同等の価格まで低減させ社会実装を進めることとしている。

グリーン冷媒を含む低温室効果冷媒へ転換を一層推進するためには、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。さらに、次世代冷媒の普及に至っていない領域に対して、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を積極的に活用し、開発終了後の速やかな実用化及び普及化の研究を実施する必要がある。

2.1.2 分野別の対応状況

以下、各研究開発項目における対応状況について簡潔に記載する。

2.1.2.1 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価

2.1.2.1.1 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】

従来、中小型空調機として主として使用されてきた容積圧縮式ヒートポンプには、作動圧力が比較的高い純冷媒あるいは温度すべりの小さい混合冷媒が適している。現時点では、容積圧縮式ヒートポンプ用の次世代冷媒として、GWP が比較的低い HFC32 に、GWP が 1 程度と低い冷媒の HF01234yf、HF01234ze (E)、HF01123 などを添加した低 GWP 混合冷媒、さらには GWP が 1 の CO₂ を添加した低 GWP 混合冷媒などが提案されている。また、ターボ圧縮式の中型から大型の冷凍空調機器用次世代冷媒としては、HF01234ze (Z)、HCF01233zd (E)、HF01336mzz (Z)、HF01336mzz (E)、HCF01224yd (Z) などが提案されている。しかしながら、上述の次世代冷媒の熱力学的性質、輸送的性質、伝熱特性、サイクル基本特性などは十分に解明されたとは言えず、省エネ化・低温室効果を実現できる次世代冷凍空調技術は未だ確立されていない。

本研究開発では、中小型規模冷凍空調機器用冷媒としての HFC32+HF01234yf 混合冷媒に CO₂ や HF01123 などを添加した多成分系混合冷媒や、中規模冷凍空調機器用として比較的沸点の高い HF01336mzz (E) や HCF01224yd (Z) などの次世代冷媒を対象にして、熱力学的性質及び輸送的性質の高精度データを取得し、信頼できる熱物性計算ツールを開発する。その結果に基づいて、ヒートポンプサイクル特性の熱力学的解析を行うとともに、既設の伝熱特性測定装置及びヒートポンプ試験装置を用いて、次世代冷媒の伝熱特性及びヒートポンプサイクル基本特性を明らかにすることにある。

本研究において、熱物性評価及び伝熱特性評価のために高精度データが取得される次世代冷媒は、新たに世の中に登場する新冷媒として位置づけられるため、普及に必要となる業界の実用的な安全基準の設定や、冷媒の国際規格化・国際標準化及び国際データベースへの構築に必要不可欠なものである。次世代冷媒及び次世代冷媒を適用した冷凍空調機器の実用化を共通基盤的研究によって支援するため、

本事業で得られた成果を国際規格化・国際標準化へ積極的に結び付ける取り組みをして貢献することができる。また、次世代冷媒物性の国際データベースとして国際標準化の位置付けを確立し、様々な法規制の際の冷媒物性計算に用いられている NIST の REFPROP を作成しているグループとの連携を強固なものとし、新規次世代冷媒の物性計算が、タイムリーに REFPROP で登録できるように積極的に貢献して、省エネルギーの推進、地球温暖化防止の観点で世界をリードする位置付けになる。

2.1.2.1.2 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】

近年、国内外において R32、R1234yf、R1234ze(E) といった、従来の冷媒よりも GWP が低くわずかに燃焼性を有する冷媒が、過去の NEDO プロジェクト等における安全性のリスク評価や、関連する安全性基準・規制の緩和を経て広く実用化されるようになった。現在、これらの冷媒は、国際標準 ISO817 や ANSI/ASHRAE Standard 34 における「微燃焼等級」、高圧ガス保安法における「特定不活性ガス」に分類され、従来の可燃性冷媒ガスよりも使用や保管等に関する制約が緩和されるようになった。

実際の冷凍空調機器用冷媒では、上記のような単体で用いられる冷媒の他、冷凍能力や環境性の向上等のため冷媒を混合して用いる例が多く、国際標準にも次々と多種多様な混合冷媒が登録されている状況であり、こうした新規混合冷媒についても実用化に向けた安全性基準の構築が急務となる。

こうした背景の下、本課題では、次世代冷凍空調機器用の冷媒に求められる要素のうち、低 GWP かつ安全性に優れた冷媒の開発を支援するため、対象として沸点の低い炭素数 3 以下の、燃焼性の高い低 GWP 冷媒と、燃焼性の低い中～高 GWP 冷媒の組合せを中心に検討し、国内外で採用されている冷媒の安全性基準を満たす冷媒と同等以上の高安全性となる混合組成範囲を明らかにする。先行する冷媒と同等の規制緩和を受けられる根拠となるデータを提供することにより、次世代混合冷媒の迅速な普及に資する。併せて、混合に伴い有意に安全性が向上或いは低下する組成について定量化し、安全性の観点から科学的根拠に基づく最適な混合組成を明らかにする。多様な条件や評価法を組合せて結果の妥当性を相互検証し、信頼性の高い安全性データを取得し国内外に発信する。一連の研究開発を通し、安全性という価値基準から次世代冷媒の設計方針を提案する。

また、次世代冷媒の国内外での実用化を見据え、現行の ISO817 の規定する評価条件（均一混合条件、23°C、1 気圧、湿度ゼロ、等）を超えて、温度、湿度、冷媒の濃度分布等が燃焼性に与える影響を評価し、実用上の燃焼安全性を明らかにする。

2.1.2.1.3 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】

パリ協定を受け、エアコン（ルーム、パッケージ、マルチ）、ショーケース等の中小型規模の冷凍空調機器へ導入される冷媒の低 GWP 化へ向けた研究開発が本格化している。このような次世代冷媒としては、プロパン等の HC 系冷媒、HFO 系冷媒やそれらの混合冷媒も含めた多様な冷媒が候補となっているが、可燃性や毒性を有する場合が多いため、安全性、リスク評価が進められ成果も上がりつつある。

一方で、これらの次世代冷媒を導入する場合には、安全性や GWP だけでなく機器としての実運用性能が評価すべき最重要因子の一つであることは誰もが認識しているところであろう。当然、それによってエネルギー起源の CO₂ 排出による地球温暖化影響が決定されるためである。しかし、現状では、機器性能については、十分な評価が行われないうまま、冷媒の選定が進められているのが実情である。

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

このようなやり方では、都合よく機器性能を評価できてしまうため、冷媒メーカー、機器メーカー等の思惑が入り乱れ、冷媒の選定がミスリードされる可能性を十分に有する。事実、過去には R407C のように一旦は業務用の冷媒として選定されたにもかかわらず、以降わずかにしか利用されなかった冷媒も存在する。

このため、工業界や学術界で公平・公正に共有できる実用機レベルまでの性能評価装置や性能評価ツールの開発、これに基づいた冷媒評価の実施が強く望まれていた。そこで、本研究開発では、低 GWP 冷媒を導入した中小型規模の冷凍空調機器の性能を理想化された基礎研究レベルにとどまらず、実用

機レベルにおいてまで評価できる手法を確立する。具体的には、まず工業界や学術界でも広く標準ツールとして活用が可能な共通解析プラットフォームとしてのシミュレーションツールとして展開する。このツールを活用して候補として挙げられている具体的な次世代低GWP冷媒を導入した機器性能の評価を実施する。また、従来、検定試験場として機能する日空研でも評価できなかった機器の実運転性能を製品検定で用いられるレベルの高精度で把握できる革新的な評価装置を開発する。これらのシミュレーションや実運転データの評価結果は、データベース化し、ホームページ等から世界に向けて情報発信する。

このような新たな冷媒を導入した実用機レベルの性能をいち早く高い精度でしかも公平・公正な視点から把握できる評価装置やシミュレーションツール、さらには具体的な評価データは、規格等に即効性ある形で展開されるだけでなく、メーカーには、機器開発コストを低減したり、開発速度を速めたりすることができる。政府機関には、規格や規制、将来戦略の策定等へのサポートができ、冷凍空調機器の発展に大きな貢献ができる。このようなことを目的とした研究開発であるため、NEDOのプロジェクトとしての実施が必要であるとともに、その意義が大いにあることとなる。

2.1.2.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

2.1.2.2.1 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】

2.1.2.2.1.1 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】

本プロジェクトでは、現行の代替フロン冷媒に比べ大幅に温室効果を下げた低温室効果冷媒を用い、かつ高効率を両立する業務用小型冷凍冷蔵機器を実現するため、次世代冷媒候補の安全性評価に係る技術開発を行う。新冷媒は概ね可燃性を有していることから、特に強燃性を有する冷媒に着目し、リスク評価に係る項目について、室内実験や数値計算の技術を駆使した評価研究を実施する。また、有望なHFO冷媒の中には不均化反応が発生するものがあり、安全性確保のために不均化反応の抑制に関する研究開発を行うことを目的とした。

低GWP型空調機器、業務用小型冷凍冷蔵機器用冷媒の性能評価と安全性評価をするために、東京大学は強燃性を有するプロパンを対象として、エアコンの室内への冷媒リーク時の安全性評価、ポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制に関する研究を実施し、HFO1123冷媒を対象として不均化反応を抑制し安全性を確保するための研究を実施した。

再委託先の静岡大学はHFO1123冷媒の不均化反応の起源と考えられている、冷媒圧縮機内で発生するレイヤーショートが発生条件などを検証した

2.1.2.2.1.2 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】

地球温暖化防止・モントリオール議定書キガリ改正によるHFC削減目標対応の観点から、家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器の冷媒のさらなる低GWP化が求められている。これを達成できる有力な候補冷媒としてR290（プロパン）が国際的にも大きく期待されている。しかしながらR290は強燃性を有するので、家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器冷媒のR290への転換に向けては、起こりうる漏洩シナリオ及び着火・爆発シナリオに対する十分なリスクアセスメントと、これに基づいたリスクマネジメントが不可欠となる。

本学ではこれに資するため、特に実使用環境下で想定される着火源候補の着火能力を定量的に評価することを本プロジェクトでの研究の柱としている。そのためには、さまざまな漏洩シナリオ及び着火・爆発シナリオを想定する必要がある。ゆえに関係業界団体との密接な連携が不可欠であるが、このような製品リスクに係る事柄は機器メーカーごとに公開できる情報に差があるものと推測される。したがって本研究の遂行において、実際に問題となる着火源候補の抽出を、NEDOが中心となって産学各団体をつなぐことが最も有益と考えられる。

2.1.2.2.1.3 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】

可燃性ガスの燃焼爆発影響評価の分野において、可燃性ガスと空気等との予混合気に濃度勾配がある

場合や、容器が大きく火炎の加速が大きい場合、複雑な容器形状や不均一な破壊が起こる場合等には、スケール則の様な比較的単純なモデルは適応できず、予測技術は確立されていない。そこで現時点では漏洩着火事故の影響評価には実規模の燃焼爆発影響評価実験が必要であるが、安全に実規模燃焼爆発実験を行うためには、適切な規模の実験場の選択、自治体・住民との連絡体制、安全管理体制等、実験を安全に行う知見以外の運営体制も必要であり、機器開発企業が独自に評価実験を行うことは困難である。

2.1.2.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

2.1.2.3.1 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】

1970～1980 年にかけて建設された R22 冷媒を採用した大型冷凍・冷蔵倉庫の入れ替えが現在進行中でおおよそ 2025 年前後まで継続して続くものと考えられる状況下で、中堅中小冷蔵倉庫ユーザーの機器入替意識は高まっているものの、設備投資余力がなく、また、現在市場を席巻しているアンモニア-CO₂ システムには設備管理者が必要となることから入れ替えを躊躇している状況にある。

CO₂ システムは、入れ替え前の機器に比べると省エネを実現することは可能であるが、R410A などの高密度系フロン冷媒の最新機器に比べると省エネ性が低くなる。

このような状況において比較的投資余力のない中堅中小冷蔵倉庫ユーザーにおいても自然冷媒機器への入れ替え促進をはかることを目的に既存のフロン機用接続配管を使用でき、かつ、既存フロン機同等以上の省エネ性機器であり空調機部材活用することにより既存自然冷媒機器より安価に導入できる室内外セット機器として、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開発を行う。

2.1.2.3.2 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】

地球温暖化防止の観点から、低 GWP 冷媒への転換が要求されている。従来 CO₂ を使用した製品に加え、当社を含めたいくつかの機器メーカーから、GWP1200～GWP1500 の HFO 混合冷媒を使用した製品が、商品化され始めている。しかしながら、2019 年 1 月から、キガリ改正に対応した HFC 冷媒の消費量に関するフェーズダウンが始まり、2036 年には基準年に対し 85%の削減が行われる。昨今の生活スタイルの変化を考えると、冷凍・冷蔵需要の減少およびそれに伴う市場規模の縮小は考えられないため、2025 年以降も GWP1200～1500 の冷媒の使用を継続した場合、市場における冷媒供給量が不足し、製品設置およびサービスに支障が出る可能性が高い。一方、機器ユーザー側からは、フェーズダウンに合わせた冷媒転換は、機器の投資コスト増を招くことから、再度転換の必要がない GWP 値を持つ冷媒を使用した機器の製品化が望まれている。このような状況を踏まえ、低 GWP 冷媒を使用したコンデンシングユニットの開発を行う必要がある。

2.1.2.3.3 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】

2016 年 10 月のモントリオール議定書キガリ改正において、日本を含む先進国は、2036 年までに HFC 冷媒の生産量を 2011～2013 年の平均を基準として 85%の段階的削減が義務付けられており、今後、低 GWP 冷媒への転換を加速することが求められている。このような中、コンビニエンスストアやスーパーマーケットで使用されるショーケース及び冷凍機は、長い冷媒配管の現場施工を伴い、使用時の冷媒漏洩量が多く、管理が難しいことと、導入後使用年数が長いことから早期に環境性に優れている自然冷媒の導入拡大が必要である。

そのような状況の中、当社では、逸早く CO₂ 冷媒を使った冷凍機システムの開発を行ってきた。しかしながら、CO₂ 冷媒は直接影響（冷媒漏洩）に対する環境性には優れているものの、冷媒自体の理論効率が低く、省エネ性（間接影響）について疑義を持たれている。そのため、これまで、CO₂ 冷凍機システムの省エネ技術を開発し、HFC 冷凍機システムより優れた省エネ効果が得られることを実証してきたものの、普及が進まない状況にある。また、普及が進まないため、量産効果が得られず、高コストから抜け出せない状況となっていることも要因となっている。

2.1.2.3.4 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】

2016年10月のモントリオール議定書改正において、HFC生産及び消費量の段階的削減義務が追加され、低温室効果の冷媒及びそれを適用した冷凍空調機器の早期開発が必要になっている。特に日本では、2019年1月「オゾン層保護法」施行により、HFC生産量・消費量の限度を定めて、製造・輸入の規制が改正された。直膨型空調機用の冷媒として使用されているR410A（GWP=2080）は、現在、R32（GWP=675）への代替が進んでいるが、HFC削減目標の達成を確実にするため、さらに低GWP化が求められており、GWP 10以下の直膨型空調機用の微燃性冷媒およびそれをを用いた高効率な空調機の技術開発が必要と考える。

2.1.3 技術的な課題とNEDOの関与する意義

フロン対策分野の研究開発の取組は、フロン等の破壊・回収技術の開発と、フロンの代替物質の開発として物質の探求とその合成および精製技術の開発、さらに、フロン類を全く使用しないノンフロン化技術の開発に分類され、NEDOのプロジェクトとして体系的に実施してきた（表2.1.3-1、図2.1.3-1）。

このうち、ノンフロン化技術においては、「ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発」事業（2005～2010年度）により、冷却のみを行う業務用冷凍冷蔵や機器規模が小さい家庭用エアコン分野を対象として冷媒転換の技術開発を行い、従来機比10%省エネのノンフロンショーケースを実用化する等の成果を挙げてきた。また、「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」（2011～2015年度）においては、業務用冷凍空調機器を対象として、従来フロン機以上の効率性（省エネ性）と冷媒の低GWP化を両立する技術の開発、さらに低温室効果冷媒の安全性評価を実施し、業務用冷凍空調機器についてノンフロン化を進めてきた。「高効率低GWP冷媒を使用した中小型空調機器技術の開発」（2016～2017年度）においては、低温室効果冷媒として自然冷媒およびHFO系冷媒を対象とし、機器としては家庭用エアコン規模の中小型空調機器を対象とした冷媒開発・機器開発・安全性評価手法の検討を実施してきた。

一方、冷媒を使用する機器のうち、中間的温度帯の業務用・家庭用空調機器において、HFCと同程度の性能・安全性を持つ有力な低温室効果冷媒候補が見つかっていない等、従来のHFC冷媒適用機器以上の性能とするための技術的ハードルが高い。さらに、現在の低温室効果冷媒の候補は、実際に冷媒を適用する際に重要となる基本特性、安全性・リスクの評価手法が確立されていない。

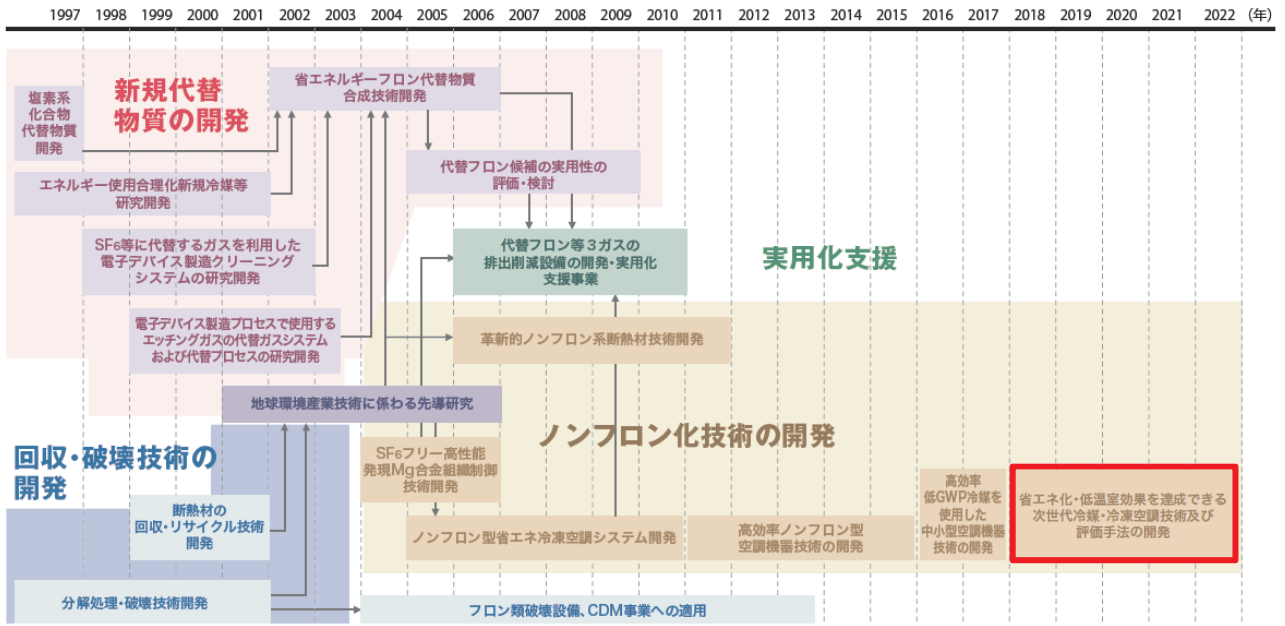
「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」（2018～2022年度）においては、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模の冷凍空調機器に使用する低温室効果冷媒の安全性・リスク評価手法の開発、さらに低温室効果冷媒適用機器の普及を妨げる技術課題を克服するための冷媒開発・機器開発を実施している。安全性・リスク評価手法を確立し、国内安全基準の策定や国際規格化・標準化を実現することで、低温室効果冷媒適用機器等の開発を支援する。

こうした開発はいずれも基礎（実験室レベル）からの取り組みが必要であり技術的不確実性が高い。また、低温室効果冷媒への転換はコストアップ要因となる一方、メーカー・ユーザーともに直接の経済的利益がなく事業者が開発インセンティブが働きにくい。低温室効果冷媒の安全性評価、物性評価については、多くの企業、大学、研究機関の知見の結集によるオープンイノベーションが不可欠で、一企業では実施不可能な内容であり、国のプロジェクトとして実施する必要性は高い。さらに、冷媒の安全性評価や基準化手法の策定は、産業界全体の基盤となる技術であり、特定企業に偏りのない実施が必要であることから、国が主体となって実施することが必要である。

表 2.1.3-1 NEDO におけるフロン対策技術プロジェクト

プロジェクト名	実施期間	研究概要
【分解・破壊技術】		
HFC-23 破壊技術の開発	1998～2001 年度 総額 12 億円	HFC-22 製造時に複製する HFC-23 を高温燃焼破壊し無害化、CaF ₂ として回収
冷媒フロンのケミカルリサイクル技術の開発（3R 技術実用化補助金）	2000 年度 総額 2.2 億円	使用済みエアコンから回収した冷媒フロンを樹脂原料としてリサイクル
【新規代替物質開発】		
塩素系化合物代替物質開発	1996～1997 年度 総額 3 億円	半導体・液晶製造用や産業用洗浄剤への適用
SF ₆ 等に代替するガスを利用した電子デバイス製造クリーニングプロセスシステムの研究（半導体 CVD 洗浄プロジェクト）	1998～2002 年度 総額 25 億円	COF ₂ を用いた CVD チャンバークリーニングシステムの有効性を実証
省エネルギーフロン代替物質合成技術開発	2002～2006 年度 総額 10 億円	HFE 類、CF ₃ I、COF ₂ などの低 GWP 値・新規化合物の工業的合成技術開発
【ノンフロン化技術】		
SF ₆ フリー高機能発現マグネシウム合金組織制御技術開発プロジェクト	2004～2006 年度 総額 2.9 億円	高強度な Mg 合金ビレットを、SF ₆ を使用せずに連続鋳造
ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発	2005～2010 年度 総額 42 億円	ノンフロン冷媒利用の安全かつ省エネな冷凍空調機器の基礎研究、並びに実用化開発
革新的ノンフロン系断熱材技術開発プロジェクト	2007～2011 年度 総額 15 億円	現行フロン系断熱材同等以上のノンフロン断熱材製造技術開発
高効率ノンフロン型空調機器技術の開発	2011～2015 年度 総額 18.9 億円	低温室効果冷媒を用い、かつ高効率を両立する業務用空調機器を実現
高効率低 GWP 冷媒を使用した中小型空調機器技術の開発	2016～2017 年度 総額 3.8 億円	低温室効果冷媒を用い、かつ高効率を両立する中小型空調機器実現に必要な要素技術の開発
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	2018～2022 年度 総額 30 億円 (予定)	中小型冷凍空調機器に使用する低温室効果冷媒の安全性・リスク評価手法の開発及び低温室効果冷媒・適用冷凍空調機器の開発
【共通の技術開発】		
代替フロン等 3 ガスの排出削減設備の開発・実用化支援事業	2006～2010 年度 総額 67 億円	温室効果ガス排出量削減に資する先進的かつ波及性の高い事業への助成

図 2.1.3-1 NEDO におけるフロン対策技術の変遷



2.2 実施の効果（費用対効果）

2.2.1 産業界への効果

本事業で得た次世代冷媒の物性データを国際データベースへ登録させ、安全性・リスク評価手法を国際規格化・標準化させることで、従来機器と同様に安全性が担保された次世代冷媒開発及び適用冷凍空調機器の開発・製品化を推進する。さらに、次世代冷媒適用冷凍空調機器のうち、ルームエアコンについては、国内における商品化・普及ののち、2040年代に世界市場（約4兆円/年）において日本企業のシェア拡大が期待される。

2.2.2 費用対効果

本事業では、5年間で予算総額は30億円（予定）である。

現在（3年目）まで、2018年度2.5億円（委託事業のみ）、2019年度6.53億円、2020年度7.0億円を投入しており、これは、性能評価、安全性・リスク評価、機器開発、冷媒開発の各分野において実施している。本事業は、年間消費電力が現行機器より10%省エネを達成する冷凍空調機器の開発基盤を整備し、2026年を目途に製品化、2029年までに国内普及することを目指す。次世代冷媒適用冷凍空調機器が商品化・普及することで、パリ協定における日本のHFC排出削減目標及びモントリオール議定書キガリ改正におけるHFC生産・消費量の削減目標に貢献する（本プロジェクトによるCO₂排出量削減効果は2029年度に最大で572万CO₂-t/年[※]）。

※本プロジェクトの成果により、家庭用エアコン、業務用エアコン、小型冷凍冷蔵機器、中型冷凍冷蔵機器において、GWP（地球温暖化係数）が150に低下することを前提として算出した。対象機器は、2025年に上市し、2025～28年の4年で新たに出荷される全品目を置き換えると想定した。

2.2.3 制度への適応性

冷凍・空調機器の製造、使用、修理・メンテナンス、廃棄における冷媒漏洩を完全にゼロにすることは極めて困難である。このため、地球温暖化問題への貢献に向けて、グリーン冷媒を含む次世代冷媒及びその適用冷凍空調機器を開発することが最も望ましい。

本事業の最終目標は「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品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を開発する」ことにある。次世代冷媒の基本物性データ及び安全性・リスク評価手法等の開発により、実用的な安全基準（業界規格等）を示し、現状市販フロン品と同等以上の性能を実現する要素機器技術やシステムコンポーネントの開発により省エネルギーで安全な製品を産業界へ供給し、フロン排出抑制法の目指すフロン類の排出量削減に貢献すると同時に、長期的観点からCO₂排出量の削減に貢献する。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

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指導投入に貢献することをねらいとして、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模の冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の安全性評価手法を確立する。さらに、次世代冷媒の全体の普及に至っていない領域に対し、普及を妨げる技術課題の技術開発を促進し、次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発を実施する。本事業のアウトプット目標として3年経過時を中間目標、事業終了時を最終目標として設定した。また、最終目標が達成されることによるアウトカム目標を設定した。

<アウトプット目標>

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」

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」

【中間目標（2020年度）】

- 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。

【最終目標（2022年度）】

- 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。

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」

【中間目標（2020年度）】

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。

【最終目標（2022年度）】

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。

<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。
以下、各研究開発項目における目標を示す。

表 1.2-1 「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」研究開発テーマ

研究開発項目	事業者名	テーマ	委託/助成	契約期間	対象
① 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価	九州大学 (再委託：富山県立大学、日本大学、長崎大学、産業技術総合研究所、九州産業大学、佐賀大学、東京海洋大学)	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	委託	2018-2020	HF0 系混合冷媒の物性データ取得
	産業総合技術研究所 機能化学研究部門	低 GWP 低燃焼性混合冷媒の安全性評価	委託	2018-2020	HF0 系混合冷媒の燃焼性評価
	早稲田大学 (再委託：電気通信大学)	低 GWP 冷媒を採用した次世代冷媒冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発	委託	2018-2020	性能評価シミュレーターの開発
② 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発	東京大学 (再委託：静岡大学、広島大学) 公立諏訪東京理科大学 産業総合技術研究所 安全科学研究部門	次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発	委託	2018-2020	HC 系冷媒、HF0 系冷媒の安全性評価
③ 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発	三菱電機株式会社	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	助成	2019-2020	【機器開発】 大型冷凍冷蔵倉庫向けクーリングユニット
	東芝キャリア株式会社	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	助成	2019-2020	【機器開発】 コンデンシングユニット
	パナソニック株式会社	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	助成	2019-2020	【機器開発】 コンビニエンスストア、スーパーマーケット、物流倉庫、食品加工工場の CO ₂ 冷凍機システム
	ダイキン工業株式会社	GWP10 以下の直膨型空調機用微燃性冷媒の開発	助成	2019-2020	【冷媒開発】 冷媒、直膨型空調 (家庭用エアコン、業務用エアコンの一部)

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】

本研究開発の目標は、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模冷凍空調機器用冷媒としての HFC32+HF01234yf 混合冷媒に CO₂ や HF01123 など添加した次世代の 3 成分系混合冷媒や、中規模冷凍空調機器用として比較的沸点の高い HF01336mzz (E) や HCF01224yd (Z) などの次世代の純冷媒を主たる研究開発対象冷媒として位置付け、これらの次世代冷媒に関する熱力学的性質及び輸送的性質の高精度データを取得し、信頼できる熱物性計算ツールを開発して、伝熱特性及び冷凍サイクル基本特性を明らかにし、既設の容積圧縮式ヒートポンプ試験装置を用いて、次世代冷媒のヒートポンプサイクル基本性能評価を行うことである。特に混合冷媒に関しては、実環境を加味した冷媒特性評価及び混合冷媒比率の最適化を行い、GWP の低い HF0 系冷媒を主成分とした次世代冷媒を使用する上で、業界の実用的な安全基準、国際規格化・国際標準化としての ISO817（冷媒物性）、ISO17584、ASHRAE34（冷媒物性）等への登録に結びつける取り組みや国際データベース NIST REFPROP への登録を目標とする。

具体的には、以下の三項目からなる研究開発を、九州大学及び再委託先である富山県立大学・日本大学理工学部・長崎大学・産業技術総合研究所・九州産業大学・佐賀大学・東京海洋大学と共同で実施する。

- (1) HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の熱物性評価
- (2) HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の伝熱特性評価
- (3) HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価

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】

産学官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、およ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ことを目的として以下の評価を実施する。

①低 GWP 混合冷媒の安全性評価

【中間目標（2020 年度）】

フルオロオレフィン混合系及び比較としての従来型混合系のそれぞれ 1 種類以上の組合せについて安全性の混合組成（総 GWP）依存性を検討し明らかにするとともに、不活性化条件を明確化する。

【最終目標】

安全性の観点から最適な混合系及び混合組成を検討し、選定した 3 種類以上の組合せについて、安全性の混合組成依存性及び混合効果を明らかにするとともに、不活性化条件を明確化する。

②低 GWP 混合冷媒の実用上の安全性評価

【中間目標（2020 年度）】

1 種類以上のフルオロオレフィン混合系の燃焼特性の温度及び湿度依存性を検討し明らかにする。熱対流や構造物の影響を極力排除した濃度分布を有する条件における混合冷媒の燃焼特性評価法を検討し、評価可能な環境を整備する。

【最終目標】

3 種類以上のフルオロオレフィン混合系の燃焼特性の温度及び湿度依存性を検討し明らかにする。1 種類以上のフルオロオレフィン混合系の燃焼特性の濃度分布依存性を明らかにする。

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】

HC 冷媒や HF0 系冷媒、さらにはそれらの混合冷媒が次世代冷媒が次々と提案される混沌とした状況の中で、単に冷媒の低 GWP 化だけでなく機器の性能も含めてどのような冷媒が次世代冷媒としてふさわしいのかを冷静に選定していく必要がある。そこで、次世代冷凍空調機器に対して適切な冷媒の選

定に必要不可欠な論理的、実験的性能評価ツールとしてのシミュレーション技術、評価装置を開発することが本研究の目標となる。同時にこのツールを活用して、具体的な次世代冷媒を導入したデバイスやシステムの実用化評価を行い、その評価結果を規格改定等に有効活用するとともに、データベース化して正しい情報を広く世界に発信していく。研究全体の流れは、図 1.1.3.1 に示ようになる。

それを実現するために、【1】性能解析技術、【2】性能評価技術、【3】シミュレーター開発とその活用を大きな3つの柱として研究開発を推進する。

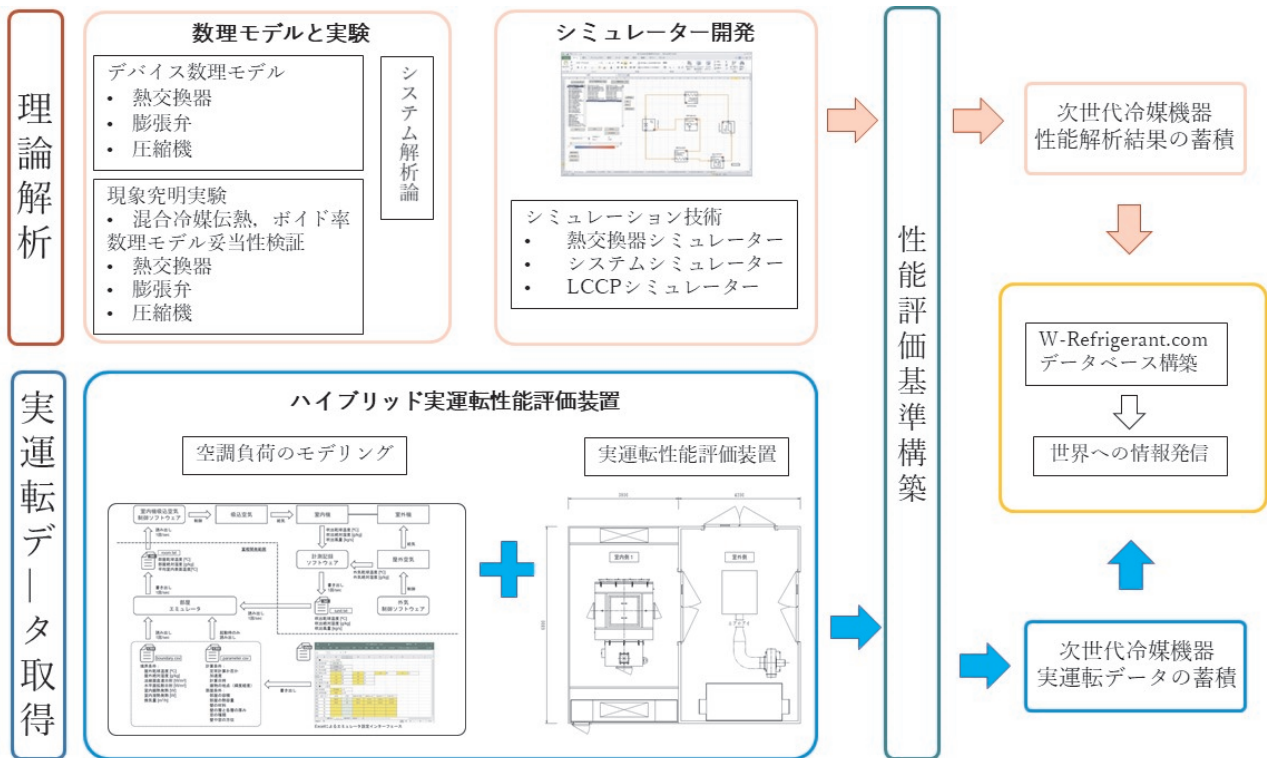


図 1.1.3.1 研究全体の流れ

【1】性能解析技術

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、シミュレーションによって解析を行うことが有効となる。そこで、シミュレーション技術を確認するための基盤となる数理解析手法を確立する。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フ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、説明が不十分な現象については適宜実験を活用しながら、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し、最終的には、これを活用したシミュレーター開発に結びつける。なお、モデリングが困難と判断された物理現象については、深層学習を含む機械学習及び進化計算等の人工知能関連技術（以下 AI と記載）も活用しながら高精度なモデリングを試みる。

【2】性能評価技術

多様な冷媒を用いた機器の実機性能を明確化するとともに、その性能を比較検討するためには、それぞれの冷媒において最適に設計された機器に対して統一的条件で性能を評価すべきである。しかし、その指針が明確となっていないため、都合よく機器性能を高く見せるような操作をすることが可能なのが現状であり、多くの文献で異なる結果が報告されている。

また、冷凍空調機器がインバーター化され空調負荷や外気温度が時々刻々と変化する多様な運転条件においても高性能に駆動が可能となってきた。しかし、いまだ、その評価は、圧縮機の回転数を固定したごく数点の運転データで機器の年間性能が予想されているのが現状である。このため、次世代冷媒が導入されるとその性能差が大きく出ることが予想される起動停止や近年空調負荷が低下してい

るため、発生頻度が大きく増えている断続運転時の性能が全く評価されることなく機器性能が判断されているのが現状である。そこで、次世代冷媒を採用した機器の真の性能が正しく評価されるように非定常で運転される実運転性能をも測定可能な革新的な評価装置を新たに開発するとともにその評価方法の妥当性まで確認する。

【3】シミュレーター開発とその活用

項目【1】で構築した数理モデルは、非線形偏微分連立方程式の解法やAI解析をはじめとした高度な数学を駆使することが必要となる。当然、工業界や学术界で数理解析を専門としない技術者、研究者も容易に理論分析を可能とすることが次世代冷媒導入測人には必要不可欠である。そこで、このような利用者が容易に数理解析を可能とするためにシミュレーション技術を確立する。ここでは、ユーザーが数値計算を意識することなくグラフィックユーザーインターフェース(GUI)を活用しながら容易にこのような解析が可能な解析環境を構築する。

同時にこのシミュレーターを活用して次世代低GWP冷媒としての候補冷媒を用いた機器の実用機レベルでの性能評価を実施し、その性能を比較検討する。シミュレーターを活用すれば、次世代冷媒の様々な運転状態や機器性能を解析可能となり、多くの解析結果を得ることができる。これらを【2】の実運転評価装置を用いて獲得した実験データとともにデータベース化し、開発するデータベースの情報発信基地としてのホームページから国内外へ積極的に情報発信する。これにより、次世代冷媒の正しい機器性能を広く世界に周知し、適切な冷媒選定がなされるための道筋を明確化する。

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 【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】

次世代冷媒を空調機器や冷凍冷蔵機器に適用するときの燃焼に伴う安全性やリスク評価を行う手法の確立を目指して、冷媒漏えい時の拡散、燃焼時の危害度評価、現実的な使用環境下で想定される着火源による火災危険性評価、実規模実験によるフィジカルハザード評価を行う。また、HFO冷媒の自己分解反応の機構解明、抑制効果評価を行う。

本研究は東京大学、公立諏訪東京理科大学、産業技術総合研究所の共同提案である(代表機関を定めない)。可燃性冷媒の燃焼時の安全性に係る実験成果を共有することによって、研究を高度化し、リスク評価の精度を高める。HFO冷媒の自己分解反応については、東京大学から静岡大学に反応原因の解明について再委託を行う。

1.2.1.1 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)可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究

HFO1123冷媒、その混合冷媒、炭化水素が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完了する。また、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完了する。その結果を上記冷媒の燃焼性リスク評価を行っているグループに提供する。

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、可燃性フルオロカーボン冷媒(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、燃焼時の最大圧力や圧力の上昇速度の関係を整理する。小型容器を製作し、燃焼実験を行い、燃焼シミュレーションの精度を実用的レベルにまで高める。燃焼をする空間のスケールを居室規模にまで広めた場合の問題点の抽出を行う。

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については、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。炭化水素を冷媒とするときは、特に危険性が危惧されるので、その防止方法を提案する。これら結果を炭化水素を冷媒とするエアコンのリスク評価に反映し、安全に使用するための基準

作りに貢献する。

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

HFO1123冷媒について、自己分解反応の発生条件を明らかにする。プロパンなどの反応抑制ガスを添加し、反応抑制効果を整理する。自己分解反応の発生機構に関して熱モデルを構築し、反応発生条件や反応抑制効果の理論的解明を行う。

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)

ppmオーダーの出現頻度である、冷媒圧縮機の通常運転時に生じるレイヤーショート現象について、ショート発生の原因ごとにおける発生パターン、放電パターン、放電エネルギー等を明らかにする。また、それらに対する冷媒ガスの誘電率の影響や、冷凍機油の影響について明らかにする。

電源投入時に発生するショートのみではなく、実機定常運転時の回転数、圧力、温度を模擬した試験装置を開発し、冷媒圧縮機の通常運転時に生じるレイヤーショート現象について広範囲のデータを収集することにより、HFO1123を混合成分とする冷媒の不均化現象を検討するための評価基準を策定する。

3) 計算化学的手法を用いた HFO 冷媒の自己分解反応及び抑制機構の理論的解明(広島大学に再委託)

計算化学的手法を用いて HFO1123 冷媒に抑制剤を添加したときの自己分解反応の抑制機構の解明を図る。複数の抑制剤を添加したときの相乗効果の機構を解明し、抑制に効果のある抑制剤の組み合わせや濃度範囲について、知見を得る。GWP を上げることなく自己分解反応を抑制することのできる組成を提案する。

1.2.1.2 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】

本研究開発は2つのサブテーマにより構成される。各サブテーマにおける達成目標は以下のとおりである。

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

業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を実際に取り扱う状況で、次世代冷媒の中でも特に炭化水素系冷媒について、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。分類したカテゴリーごとに着火源モデルを構築する。

2) 各種着火源による次世代冷媒のフィジカルリスク評価

次世代冷媒の中でも特に炭化水素系自然冷媒に注目し、テーマ1)で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。初期湿度や劣化度等の影響について、主として高速度撮影、レーザ誘起蛍光法(LiF)や粒子画像流速測定法(PIV)等の燃焼計測技術を用いた実験により計測し、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。

得られた成果を論文及び口頭発表等にて発信することにより、成果のオーソライズと、リスクアセスメント資料としての活用根拠の構築を目指す。そのために、国際・国内論文誌、国際会議、国内会議等で年間2件以上の成果発信を行う。

1.2.1.3 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】

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での、各サブテーマの構成と達成目標は以下の通りである。

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。

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。

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。

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

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。

1.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

1.3.1 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】

本研究の目標は、入れ替え気運が高まっている大型冷蔵倉庫向けのクーリングユニットに環境負荷の少ない自然冷媒である CO₂ を適用し、そのうえで安価で高い省エネ性を持ち、設備管理者も不要なシステムを開発することにある。大形冷蔵庫向けクーリングユニットの代表モデルとして、60 馬力機器にて研究を実施する。

① 中間目標（2020 年度まで）

目標値：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。

② 最終目標（2022 年度まで）

目標値：当社 60 馬力 R404A 冷凍機比で、定格条件ならびにフィールド実使用条件下での年間 COP が 100%以上。機器販売価格は中間目標に同じ。

1.3.2 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】

本研究開発では、低 GWP 冷媒を使用したコンデンシングユニットの開発を実施する。現在、実用化されている低 GWP 冷媒の多くは、HFO/HFC の混合冷媒であるため、GWP と性能にはトレードオフの関係が存在する。これらは、過去の 1234yf/R32 に関する NEDO 研究からも明らかであり、今回の NEDO 事業の基本計画でも同等性能を実現するための技術ハードルが高いことが言及されている。これらのことから、冷媒種選定を完了したうえで定格機器性能を現状機器同等とした。また、実環境での運転では、さまざまなサイクル状態が発生し、これらが信頼性や機器性能へ影響する。従って、最終的には、フィールド試験から得た結果に基づき、商品化するための機器仕様を確立させることが重要である。あわせて、実運転時の省エネ性能 5%改善を目指すこととした。

[中間目標] 冷媒種の選定完了
定格機器性能 対従来比 100%

[最終目標] 実運転に基づく機器仕様の確立
実運転時の年間機器性能 5%改善

1.3.3 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】

本事業では、以下の課題を解決し、CO₂ 冷媒の普及を促進することを目的とする。

CO₂ 冷凍機の普及が促進されない要因には、業界の CO₂ 冷凍機の出力量の主体が、2~20HP となっており、スーパーマーケットで使用される 30HP 以上の出力機種がないため、使用台数が多くなり施工費用が高くなることが挙げられる。また、冷凍機の仕様が屋外型一体型のみ構成となっていることも要因の一つとなっている。このことに加え、業界の認識が HFC 冷媒に対する自然冷媒に転換するメリットが環境性のみになっているため、導入が促進されない状況にあると分析している。このことに鑑み、本研究開発では、各課題に対して、以下の目標を設定した。

【最終目標】

[課題 1] CO₂ 冷凍機の大出力化；
圧縮機ユニットの連結による大出力冷凍機を開発する。

[課題 2] 高外気温度対応；

高外気温度においても高効率な水冷式冷凍機のための、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を開発する。

[課題 3] CO₂冷媒の特性を活かした未利用熱利用；
CO₂冷凍機の排熱を利用したシステムを開発する。

[課題 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 CO₂ 冷凍機を開発する。

1.3.4 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】

次世代冷媒の成分物質を用いて、直膨型空調機器を対象に GWP<10 の混合冷媒の開発を行う。冷媒性能目標としては、機器については直膨型空調機器を対象に現行冷媒である R410A に対して COP, APF において 90%以上を設定した。燃焼性については、現行で R32 が使用されていることから、ASHRAE 安全性区分 2L を目標に設定した。また、毒性については、民生用途では、低毒性が求められることから、ASHRAE 安全性区分 A の目標を設定した。

(中間目標) 直膨型空調機に適した GWP10 以下の次世代冷媒の組成を決定する

(最終目標) GWP10 以下の次世代冷媒の直膨型空調機への適用可能性を評価して、圧縮機、熱交換器などの空調機器の要素部品の基本仕様を確立する。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価

2.1.1.1 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】

(1)HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の熱物性評価

①臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定(担当:九州大学)

2018年度は、純冷媒のHFO1336mzz(E)及びHCFO1224yd(Z)の臨界定数及び臨界点近傍における飽和密度をメニスカス消滅の観察により測定する。また等容法を用いた装置により、飽和蒸気圧及びPVT 性質の測定を行う。2019年度は、HFC32+HFO1234yf+CO₂混合冷媒を対象とし、冷媒番号の取得が完了している R455A(21.5mass%HFC32+75.5mass% HFO1234yf+3mass%CO₂)について、臨界定数及び臨界点近傍における飽和密度、PVT_x 性質の測定、及び室温以下の低温域を主とした気液平衡の測定を行う。この測定においては、データ処理上、3成分系混合冷媒を構成する、3種類の2成分系混合冷媒の熱物性測定が必要となる場合は、その測定にも着手する。2020年度はHFC32+HFO1234yf+HFO1123混合冷媒を対象にして、2019年度と同様の熱物性測定を実施する。また、より低温での気液平衡測定が行えるように、低温熱源用恒温槽を増設する。

②気液平衡性質の測定(担当:富山県立大学)

2018年度は、HFO1123+HFO1234yf 系及び HFC32+HFO1234yf 系混合冷媒の気液平衡測定を実施する。実施に先駆けて精度の大幅な向上を図るとともに、検量線作成用の校正データを計測する。その後、測定装置の健全性を確認したうえで、まずは HFO1123+ HFO1234yf 系の気液平衡性質の測定から開始する。2019年度は、2成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf 系の気液平衡性質の測定を実施する。さらに3成分系の気液平衡性質を等温線の屈折点から高精度に解明するため、密度可変・高圧 PVT_x 性質測定装置の改造を行う。2020年度には、3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf +HFO1123 系まで測定を拡張する。

③高温 PVT_x 性質及び定圧比熱の測定(担当:日本大学理工学部)

2018年度には、PVT_x性質及びPVT_x性質の測定対象をHCFO1224yd(Z)及びHFC32+HFO1234yfの2成分系混合冷媒とし、1組成あたり5本以上の等密度線で5組成以上を目標とする。2019年度には、HFC32+HFO1234yfにCO₂を加えた3成分系を測定対象とし、さらにHFO1336mzz(E)+HFO1336mzz(Z)の2成分系の測定をおこなう。さらに定圧比熱の測定のため、サーマルフロー型カロリメータを製作し、純冷媒の測定をおこなうために装置製作に着手する。2020年度は、前年度から引き続きHFO1336mzz(E)+ HFO1336mzz(Z)の2成分系のPVT_x測定をおこなう。定圧比熱については、HFC32+HFO1234yf+CO₂ 3成分系で2成分系を含めて測定対象とし、さらにHFO1336mzz(E)+HFO1336mzz(Z)の2成分系の測定をおこなう。

④表面張力の測定(担当:長崎大学)

2018年度は、HFO1336mzz(E)単体の測定を行うとともに、極低温域での表面張力が計算できるよう、パッケージソフトを用いた数値シミュレーションを試みる。2019年度は、HFO1336mzz(Z)の測定も試みる。また、現在測定可能な最低温度が-6℃であるが、-25℃到達を目標に装置を改造する。そのために低温用恒温槽を導入する。低温の測定結果が得られれば、HFO1123及びその混合冷媒などの比較的沸点の低い冷媒の表面張力推算式がより高い精度で提案できる。2020年度は、HFO1123を成分とする混合冷媒HFO1234yf+HFO1123の低温域を含める測定を試みる。

⑤音速の測定(担当:産業技術総合研究所)

2018年度は、HFO1336mzz(E)及びHFO1336mzz(Z)の純冷媒を測定対象として、既存の装置を用いて音速ならびにPVT_x性質測定を実施するとともに、測定範囲の拡張を図るため液体音速測定装置の設計ならびにPVT_x性質測定装置の改良に取り組む。2019年度は、HFC32+HFO1234yf系及びHFO1123+HFO1234yf系の2成分系混合冷媒を測定対象として、既存及び改良した装置を用いて音速ならびにPVT_x性質測定を実施するとともに、測定範囲の拡張を図るためシングアラウンドユニットを調達して液体音速測定装置の開発に取り組む。2020年度は、HFC32+HFO1234yfにCO₂を添加した3成分系混合冷媒を測定対象として、既存及び開発した装置を併用して音速ならびにPVT_x性質

測定を実施する

⑥状態方程式の開発(担当:九州産業大学)

2018年度においては、既存のデータを用いてHFC32+HFO1234yf+CO₂系3成分混合冷媒及びHCFO1224yd(Z)の暫定的な状態方程式を作成する。既存データの収集においては、幅広く文献を調査しデータの評価を行う。2019年度は、研究開発項目①-1から①-5で測定された追加データを用いてHFC32+HFO1234yf+CO₂系3成分混合冷媒及びHCFO1224yd(Z)の状態方程式の高度化(予測精度の向上と適用可能範囲の拡大)の検討を行うとともに、熱物性計算ソフトウェアREFPROPへの組み込みを行う。さらに、HFC32+HFO1234yf+HFO1123系3成分系混合冷媒及びHFO1336mzz(E)の暫定的な状態方程式を作成する。2020年度は、HFC32+HFO1234yf+HFO1123系3成分系混合冷媒及びHFO1336mzz(E)の状態方程式の高度化の検討及びREFPROPへの組み込みを行う。

⑦輸送的性質の測定及びモデル化(担当:佐賀大学)

2018年度においては、既存の測定装置を用いてHFC32+HFO1234yfやHFO1123+HFO1234yfの2成分系混合冷媒の測定を行うための調整のため、まずそれぞれに純冷媒の測定を行い、その後、混合冷媒の測定に着手する。2019年度は、HFO1336mzz(E)などの次世代の純冷媒の測定に着手する。また、0℃以下の低温条件で混合冷媒の測定を行うために低温恒温槽を導入し、広い温度範囲で測定する。さらに、①-6で開発された混合モデルをECSモデルに適用して予測精度を検証する。2020年度はHFC32+HFO1234yf 混合冷媒にCO₂を添加した次世代の3成分系混合冷媒の測定に着手し、こちらも①-6で開発された混合モデルを用いてECSモデルによる予測精度の検証を行う。

(2)HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点HFO系冷媒の伝熱特性評価

①プレート式熱交換器内の伝熱特性評価(担当:佐賀大学)

2018年度は、まず測定装置の改良を行い、比較対象となるHFC系及びHFO系の既存冷媒のデータを取得し、装置の健全性を確認するとともに、基本的な伝熱特性を明らかにする。2019年度の第2四半期までには比較対象物質の実験データを得て、局所伝熱特性を詳細に明らかにする。第3四半期からは、2成分系混合冷媒HFC32+HFO1234yf系及びHFO1123+HFO1234yf系の伝熱特性を測定する。2020年度は、二相流動の観察実験を開始するため、高速度カメラを導入する。また、HFC32+HFO1234yf 混合冷媒にCO₂を添加した次世代の3成分系混合冷媒の測定を実施する。

②扁平多孔管内の伝熱特性評価(担当:東京海洋大学)

2018年度は、まず測定装置の改良を行い、比較対象となるHFC系及びHFO系の既存冷媒のデータを取得し、装置の健全性を確認するとともに、HFO1336mzz(E)などの次世代の純冷媒の扁平多孔管内の凝縮熱伝達実験及び蒸発熱伝達実験を行い、基本的な伝熱特性を明らかにする。2019年度には対象物質となる2成分系混合冷媒HFC32+HFO1234yf系及びHFO1123+HFO1234yf系の伝熱特性の測定を行い、局所伝熱特性を詳細に明らかにする。2020年度は、HFC32+HFO1234yf混合冷媒にCO₂を添加した3成分系混合冷媒の測定を実施する。

③円管内の伝熱特性評価(担当:長崎大学)

2018年度は、まだ明らかになっていない低圧冷媒 HCFO1224yd(Z)及び3成分系混合冷媒HFC32+HFO1234yf+CO₂のR455A 組成を主として、溝付管内熱伝達率測定を行う。2019年度は、飽和蒸気圧などの物性が先行して測定された冷媒HFO1336mzz(E)及びHFO1336mzz(Z)の測定を試みる。2020年度は、HFC32+HFO1234yf系及びHFO1123+HFO1234yf系の2成分系混合冷媒の測定を試みる。さらに、より一般的な管内伝熱性能評価指標として平滑管内熱伝達性能を得るため、外径が同じく6mmである平滑管を用いたテストセクションを装置へ組み込む。この平滑管を用い、凝縮温度40℃、蒸発温度10℃の条件のもと、これまでに溝付管で評価されている低GWP冷媒の測定を行う。

④水平円管外の伝熱特性評価(担当:九州産業大学)

2018年度においては、HFO1336mzz(E)の管外熱伝達実験を行うにあたり、装置の健全性を確認するために既存冷媒を用いて、管外熱伝達実験を行う。また、それに伴い、標準器を用いて測定機器(温度センサ、圧力センサ等)の再検定を行う。2019年度は、2018年度に健全性を確認した管外熱伝達実験装置を用いて、HFO1336mzz(E)の管外熱伝達実験を行う。2020年度は、2019年度に取得した管外熱伝達特性の結果を用いて、研究開発課題①-6及び①-7において確立したHFO1336mzz(E)の状態方程式及び輸送的性質モデルの妥当性を検討する。また、その結果に伴い、再実験及び新たな実験条件(実験範囲)での実験を行う。

⑤伝熱データベースの構築(担当:佐賀大学、東京海洋大学、長崎大学)

新規冷媒の使用拡大を図り、地球温暖化の抑制に貢献するためには、得られた成果を学会や論文などで公表することが重要であるが、さらなる普及を促進するためには、伝熱データそのものを他の研究者や設計者が利用できるようにすることが効果的である。測定及びモデル化に成果の目処が見え始める 2020 年度の第2四半期から、本事業の研究開発課題②-1 から ②-4 の伝熱特性評価で得られたデータ、すなわちプレート式熱交換器内熱伝達実験データ、扁平多孔管内の伝熱実験データ、円管内伝熱実験データ、及び水平円管外伝熱実験の全ての伝熱データを整理し、インターネット上で閲覧できる環境を整備する。なお、ここで構築した伝熱データベースは、今後の伝熱性能改善、また高性能熱交換器を開発するための貴重な情報となり、最終的には学会等を通じて、国際標準化に寄与することを目指す。

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

①ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析(担当:九州産業大学)

2018年度においては、3成分系混合冷媒についてのヒートポンプサイクルの基本特性の熱力学的解析を行うにあたり、既存冷媒のみから構成される混合冷媒を用いて熱力学的解析を実施し、より実機に近い評価方法の検討を行う。2019年度は、2018年度に検討した評価方法を用いて HFC32+HFO1234yf+CO₂系3成分系混合冷媒の熱力学的解析を実施し、適正な混合冷媒組成比や運転条件などを見出す。2020年度は、2019年度に引き続き、同様の評価方法を用いて HFC32+HFO1234yf+HFO1123系の次世代3成分系混合冷媒の熱力学的解析を実施し、適正な混合冷媒組成比や運転条件などを見出す

②ヒートポンプサイクル特性の実験的評価(担当:九州大学)

容積圧縮式ヒートポンプに適した低 GWP 混合冷媒の探求を目指して、本研究開発プロジェクトにおいて熱力学的性質、輸送的性質、熱交換特性及び熱力学的サイクル基本特性の解明を試みる、HFC32+HFO1234yf 系混合冷媒に CO₂ や HFO1123 を添加した次世代の3成分系混合冷媒について、既設の水熱源容積圧縮式ヒートポンプサイクル試験装置によるサイクル性能実験を実施し、冷暖房熱負荷及び熱源運転条件がサイクル性能に及ぼす影響を明らかにする。ついで、各要素機器の特性がサイクル性能に影響度を評価して、実用化のための機器設計の基本知見を得る。2018年度は、HFC32+HFO1234yf+CO₂系3成分混合冷媒について、サイクル特性及び圧縮機性能と熱交換器特性を加味したシステム特性を詳細に解析する。2019年度は HFC32+HFO1234yf +HFO1123 系3成分混合冷媒について実験的解析を実施する。さらに 2020年度は、HFC32+HFO1234yf+CO₂系及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系の実験的性能評価の結果をもとに、冷暖房熱負荷及び熱源運転条件がサイクル性能に及ぼす影響及び各要素機器の特性がサイクル性能に影響度を明らかにする。

2018 年度

事業項目	2018 年度			
	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
a. HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の熱物性評価				
a-1. 臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定 (九州大学)		HFO1336mzz(E)の測定	→	HCFO1224yd(Z)の測定
a-2. 気液平衡性質の測定 (富山県立大学)		HFO1123+HFO1234yf の 高圧気液平衡性質測定	→	HFC32+HFO1234yf の 高圧気液平衡性質測定
a-3. 高温 PVTx 性質の測定 (日本大学理工学部)		装置の調整	→	HCFO1224yd(Z) 高温 PVT の測定 HFC32+HFO1234yf の 高温 PVTx の測定
a-4. 表面張力の測定 (長崎大学)		HFO1336mzz(E) の測定	→	数値解析
a-5. 音速の測定 (産業技術総合研究所)		HFO1336mzz(E)及び HFO1336mzz(Z)の測定	→	液体音速測定装置設計
a-6. 状態方程式の開発 (九州産業大学)		HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の状態方程式作成	→	HCFO1224yd(Z) の状態方程式作成
a-7. 輸送的性質の測定及びモデル化 (佐賀大学)			→	HFC32+HFO1234yf 及び HFO1123+HFO1234yf の測定
b. HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の伝熱特性評価				
b-1. プレート式熱交換器内の伝熱特性評価 (佐賀大学)		装置の改良	→	測定の健全性確認 HFC, HFO 単体の 比較対象データ取得
b-2. 扁平多孔管内の伝熱特性評価 (東京海洋大学)		装置の改良	→	HFC, HFO 単体の 比較対象データ取得 HFO1336mzz(Z) の測定
b-3. 円管内の伝熱特性評価 (長崎大学)			→	HCFO1224yd(Z)の測定 HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の測定
b-4. 水平円管外の伝熱特性評価 (九州産業大学)		センサ類の校正 及び配線	→	測定の健全性 確認 既存冷媒を用いた 比較対象データ取得
b-5. 伝熱データベースの構築 (佐賀大学/東京海洋大学/長崎大学)				
c. HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価				
c-1. ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析 (九州産業大学)		既存冷媒で構成される 3 成分系混合冷媒の サイクル基本特解析・評価方法検討		
c-2. ヒートポンプサイクル特性の実験的評価 (九州大学)		HFC32+HFO1234yf+CO ₂ サイクル解析への 圧縮機モデル及び熱交換器モデル導入		

2019年度

事業項目	2019年度			
	第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
a. HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO系冷媒の熱物性評価				
a-1. 臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定 (九州大学)	(臨界定数の測定)	HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の測定 (PVTx 性質の測定)	(気液平衡の測定)	
a-2. 気液平衡性質の測定 (富山県立大学)	真空ポンプの増設	HFC32+HFO1234yfの測定	高圧微圧調整用ハンドポンプの増設	
a-3. 高温 PVTx 性質及び定圧比熱の測定 (日本大学理工学部)	HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の測定		HFO1336mzz(E)+HFO1336mzz(Z)の測定	
a-4. 表面張力の測定 (長崎大学)	HFO1336mzz(Z) 低温域測定用の測定	低温域測定装置改造	低温域測定健全性確認	数値解析の精度評価と向上
a-5. 音速の測定 (産業技術総合研究所)	HFC32+HFO1234yfの測定		HFO1123+HFO1234yfの測定	液体音速装置の開発
a-6. 状態方程式の開発 (九州産業大学)	高性能ワークステーション導入	REFPROP 用 HFC32+HFO1234yf+HFO1123 ファイル作成	状態方程式作成	HFO1336mzz(Z)の状態方程式作成
a-7. 輸送の性質の測定及びモデル化 (佐賀大学)	HFO1336mzz(E)の測定	低温域測定装置改造	低温域測定及び予測精度の検証	
b. HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO系冷媒の伝熱特性評価				
b-1. プレート式熱交換器内の伝熱特性評価 (佐賀大学)	HFC, HFO 単体の比較対象データ取得		HFC32+HFO1234yf 及び HFO1123+HFO1234yfの測定	
b-2. 扁平多孔管内の伝熱特性評価 (東京海洋大学)	HFC32+HFO1234yf の測定		HFO1123+HFO1234yf の測定	
b-3. 円管内の伝熱特性評価 (長崎大学)	HFO1336mzz(E)の測定		HFO1336mzz(Z)の測定	
b-4. 水平円管外の伝熱特性評価 (九州産業大学)	HFO1336mzz(E)の測定		高温域測定のため装置改造	
b-5. 伝熱データベースの構築 (佐賀大学/東京海洋大学/長崎大学)				
c. HFO系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価				
c-1. ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析 (九州産業大学)	HFC32+HFO1234yf+CO ₂ のサイクル基本特性解析			
c-2. ヒートポンプサイクル特性の実験的評価 (九州大学)	HFC32+HFO1234yf+HFO1123 のサイクル特性実験的解析			

2020 年度

事業項目	2020 年度			
	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
a. HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の熱物性評価				
a-1. 臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定 (九州大学)	(臨界定数の測定)	HFC32+HFO1234yf+HFO1123 の測定 (PVTx 性質の測定)	HFO1123 の測定 (気液平衡の測定)	
a-2. 気液平衡性質の測定 (富山県立大学)	HFC32+HFO1234yf+HFO1123 の高圧気液平衡性質測定			
a-3. 高温 PVTx 性質及び定圧比熱の測定 (日本大学理工学部)	HFO1336mzz(E)+HFO1336mzz(Z)の測定			
a-4. 表面張力の測定 (長崎大学)	HFO1234yf+HFO1123 の測定			
a-5. 音速の測定 (産業技術総合研究所)	HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の測定			
a-6. 状態方程式の開発 (九州産業大学)	HFC32+HFO1234yf+HFO1123 の REFPROP 用状態方程式作成		HFO1336mzz(E) の REFPROP 用状態方程式作成	
a-7. 輸送的性質の測定及びモデル化 (佐賀大学)	HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の測定			
b. HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の伝熱特性評価				
b-1. プレート式熱交換器内の伝熱特性評価 (佐賀大学)	高速度カメラによる流動様相可視化		HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の測定	
b-2. 扁平多孔管内の伝熱特性評価 (東京海洋大学)	HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の測定			
b-3. 円管内の伝熱特性評価 (長崎大学)	HFC32+HFO1123 の測定	HFO1234yf+HFO1123 の測定	平滑管試験用に装置改造	
b-4. 水平円管外の伝熱特性評価 (九州産業大学)	HFO1336mzz(E)の高温域測定		HFO1336mzz(E)の状態方程式輸送的性質モデルの妥当性確認	
b-5. 伝熱データベースの構築 (佐賀大学/東京海洋大学/長崎大学)	伝熱データベースの作成		インターネット上でのデータ公開	
c. HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価				
c-1. ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析 (九州産業大学)	HFC32+HFO1234yf+HFO1123 のサイクル基本特性解析			
c-2. ヒートポンプサイクル特性の実験的評価 (九州大学)	HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の実験的評価		HFC32+HFO1234yf+ HFO1123 の実験的評価	

2.1.1.2 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】

(1) 低GWP混合冷媒の安全性評価

①安全特性の混合比依存性の評価

2018年度は、ごく微燃性の燃焼性評価実験及び解析に必要な装置や解析ソフトウェアを整し、研究対象としてのフルオロオレフィンを含む混合系や従来型のHFC混合系を選定する。また、ごく微燃性の燃焼特性の評価方法を検討し、本研究で適用する方法を決定する。2019年度、および2020年度は、25℃、1気圧、湿度ゼロ等の標準条件における混合組成の燃焼特性、燃焼限界、燃焼速度、消炎距離、消炎直径の評価を実施し、データを蓄積する。

②不活性化条件の明確化

2019年度は、前項で得られた結果を既存の「特定不活性ガス」（R32、R1234yf、及びR1234ze(E)）と比較し、これらと同等以下のごく微燃性となる混合組成について、詳細に燃焼特性評価を実施し、これらを下回る不活性化条件を明確化する。2020年度は、これまでの燃焼特性評価のアウトプットを数式として整理し、比較試験及び追試験を行い、当該混合冷媒の燃焼安全性の観点から見た最適混合組成を決定する。

(2) 低GWP混合冷媒の実用上の安全性評価

①混合系の温度・湿度依存性の評価

2018年度は、燃焼性評価実験の温度、湿度条件を制御する環境を整備する。また、フルオロオレフィンを含む低GWP混合系の複数の混合組成について、「特定不活性ガス」と比較可能な温度25℃、35℃、及び60℃を含む種々の温度条件において燃焼特性評価を実施し、データを蓄積する。また、当該混合系について、「特定不活性ガス」と比較可能な温度35℃湿度63%を含む種々の湿度条件において燃焼特性評価を実施し、データを蓄積する。2020年度は、これらのデータをまとめて、当該混合冷媒の燃焼特性の温度湿度依存性を明らかにする。

②混合系の濃度分布依存性の評価

2020年度は、冷媒濃度分布の影響評価について、より実用上の燃焼に近い大規模容器での燃焼性評価を行う実験環境を整える。低燃焼性混合冷媒の燃焼特性の濃度分布依存性を評価可能にする。

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
(1) 低GWP混合冷媒の安全性評価												
①安全特性の混合比依存性の評価												
②不活性化条件の明確化												
(2) 低GWP混合冷媒の実用上の安全性評価												
①混合系の温度・湿度依存性の評価												
②混合系の濃度分布依存性の評価												

2.1.1.3 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】

すでに述べた3つの大項目における目標を実現するために、表2.1.1.3.1の研究開発スケジュールに示した小項目まで含めて具体的内容について説明する。なお、この表中に示した大項目、小項目の番号は説明文の番号と一致している。

開発担当メンバーは早稲田大学と電気通信大学である。早稲田大学の提案グループは、冷凍空調技術に対するシステム解析やシステム評価に多くの実績があり、電気通信大学の提案グループは、基盤伝熱現象、二相流流動現象解析、AIを用いたシステムの性能予測や最適化に実績がある。本研究開発で目標とする論理的、実験的なツール開発や評価手法の確立は、両機関の協力があって初めて実現できるものとなるため、このような体制を組むこととした。

【1】性能解析技術 研究開発

ここでは、モデリングと性能解析を実施することになるが、基本的には、これまで研究開発責任者がメーカーと行ってきた共同研究の中で求められてきた定常解析で5%、非定常解析で10%の精度で性能解析を可能とすることをベースとする。

[1.1]モデリング、性能解析[早大、電通大]

冷凍空調機器を構成する代表的なデバイスは、熱交換器、圧縮機、膨張弁になる。これらデバイスには、非常に複雑な挙動を呈する二相流冷媒が流動することとなるため、現象そのものを記述する数理モデルは解すら得られていないことも多い。また、従来から採用されてきた簡易モデルでは、冷媒の混合も想定される次世代冷媒を採用した機器の性能を詳細に解析することはできない。そこで、システム解析に必要な適切な現象因子を抽出したデバイスの数理モデルを構築するとともに、最終的にはデバイスモデルを統合したシステム全体としての定常、非定常解析を高精度で実現可能とする。

[1.2]現象究明実験

・混合冷媒性能評価[電通大]

次世代低GWP冷媒の候補となっている複数の混合冷媒の組成変化実験結果をもとに性能解析に必要な伝熱現象、流動現象の定式化を行い、冷媒組成変化時のシステム性能を解析可能とする。この実験では、局所的な成分比率等まで計測することが求められるため、実験装置の開発が最大のポイントとなる。この研究は本年度から開始される予定していたが、研究を加速し、昨年度から準備をはじめ、本年度中に実験装置を開発する。

・冷媒充填量評価[早大]

次世代冷媒は可燃性を有することが圧倒的に多いため、冷媒の充填量削減が求められている。このため、様々な構造の機器に対する冷媒充填量を予測する必要があるが、いまだ、場合によっては、2倍もの予測誤差を有しているのが現状である。特に冷媒分布を解明するために必要となる二相流のボイド率は計測方法が確立すらされていない。そこで、この研究グループで開発した誘電率ボイド率計を用いて機器内をどのように冷媒が分布、滞留しているのか評価を可能とする。この実験も重要であるため、本年度より開始する予定であったが、加速し、昨年度より自主的に検討を開始し、本年度中には実験装置を完成するとともに、いくつかのデータ取得ができるところまでこぎつける。

[1.3]モデルの妥当性検証[早大]

構築した数理モデルを用いて数値解析を可能とするとともにシステム全体として必要精度で解析が可能なることを実験で確かめる。

【2】性能評価技術 研究開発

[2.1]数理的性能評価手法開発[早大、電通大]

次世代冷媒は、冷媒混合も必要不可欠な状況であるため、非共沸となることも避けられず、熱力学的性質も異なるため、最適な伝熱管形状や冷媒流路が大きく異なることとなる。この影響は特に熱交換器に対して大きく表れる。そこで、最適性がある程度保証された形での熱交換器の性能比較ができる評価基準をAIを用いて確立する。もちろん最終的にはこれを用いてシステム解析も実現する。

[2.2]性能評価装置開発[早大]

高精度でありながら、次世代冷媒の真の実運転性能を計測可能なハイブリッド型の新たな評価装置を開発する。

[2.3]性能評価手法の妥当性検証1[早大]

混合冷媒を含む数種類の次世代低 GWP 冷媒としての候補冷媒を採用したエアコンとショーケースそれぞれについて評価を実施し、評価方法の妥当性を確認する。

【3】シミュレーター開発とその活用

[3.1] 熱交換器[早大]

混合冷媒を含む多様な冷媒で、多様な構造となる熱交換器の性能を予測可能なシミュレーターの開発する。特に熱交換器の複雑なフローを GUI 上で表現する際に、数日を要してしまっていたが、この GUI を根本から見直し、新規の熱交換器を解析する場合でも、数時間程度でフローの記述が可能なものとする。このシミュレーターを用いて混合冷媒を含む次世代低 GWP 冷媒の候補冷媒を採用した熱交換器の解析を実施し、熱交換器性能を比較検討する。

[3.2] システム[早大]

混合冷媒を採用したシステムのシミュレーターを開発する。数日を要していたフローを GUI 上で表現する際に、数時間で記述可能なものとし、計算時間も定常解析で数分程度、非定常解析で実時間程度とする。この活用により混合冷媒を含む次世代低 GWP 冷媒の候補冷媒を採用したシステム解析を実施し、特性解析や性能比較を実施する。

[3.3] 年間性能・LCCP[早大]

多様な冷媒を用いた機器の年間性能を世界の多様な条件下でも解析可能とする。同時に LCCP を評価できるシミュレーターを開発する。計算時間は年間性能で数分程度を目指す。この活用により混合冷媒を含む次世代低 GWP 冷媒の候補冷媒を採用した機器の解析を実施し、年間性能や LCCP を比較検討する。なお、このシミュレーターの開発は本年度から開始するため、中間評価時にはシミュレーターの概形を決定し、年間性能の解析を可能とする。

なお、上記熱交換器、システム、年間性能・LCCP の 3 種類のシミュレーターは、最終的にはすべてシームレスに連動し、一貫した解析を行うことが可能とする。

大項目		小項目	明細	担当機関	2018年度		2019年度		2020年度		中間評価	中間目標	
1. 性能解析技術研究開発	1-1	モデリング、性能解析	熱交換器	早稲田+電通大	文献調査・モデリング	数値解析手法、コーディング検討(単相)	数値解析手法検討(2成分)						
			圧縮機	早稲田	文献調査・モデリング	理想気体解析 漏れ考慮解析	オイル、伝熱考慮解析						
			膨張弁	早稲田+電通大	文献調査・CFD	純物質CFD,従来冷媒データ取得	3次元CFD,定式化						
			システム	早稲田		解析論構築,コーディング,ハンドブック作成	コーディング,ハンドブック作成						
	1-2	現象究明実験	混合冷媒評価	電通大		評価装置フロー確定(加速)	試験装置製作						
	1-3	モデルの妥当性検証	冷媒充填	早稲田		予備試験装置製作(別予算)	データ取得,本試験装置製作						
	2. 性能評価技術研究開発	2-1	数理的・性能評価手法開発	熱交換器	早稲田+電通大	伝熱管接続マトリクス検討	単相最適化検討, AIコーディング	二相流最適化検討					
				システム	早稲田+電通大	文献調査・計算方法検討	コーディング	熱交換器最適化と連成					
		2-2	性能評価装置開発	熱交換器	早稲田	ルーム用評価装置設計(加速検討)	5馬力,防塵,ショークケース評価装置設計	装置製作 試運転, 準認定評価, 性能評価					
		2-3	評価手法の妥当性検証	熱交換器	早稲田				新評価装置での評価				
エアコン				早稲田				新評価装置での評価					
ショークケース				早稲田				新評価装置での評価					
3. シミュレーター開発とその活用	3-1	熱交換器	早稲田	GUI作成	コーディング	GUIとコードの接続							
	3-2	システム	早稲田		GUI開発,コーディングの見直し	GUIとコードの接続							
	3-3	年間性能, LCCP	早稲田			年間性能解析実現, LCCP概形構築							

研究は次の図 2. 1. 1. 3. 1 に示すような体制で実施した。なお、外注機関でも重要な役割を果たしている機関をここで示すこととする。システム解析、規格や性能評価、シミュレーター開発に実績のある早稲田大学が関連の研究開発と全体研究の統括を実施する。伝熱、二相流解析、AI に多くの実績のある電通大に熱交換器や膨張弁のモデリングや現象解析、AI を活用した性能評価を中心に再委託する。評価装置の製作は、わが国最大の製作会社である大西熱学に外注する。シミュレーターのコーディングは、エネルギーシミュレーター開発に多くの実績のあるアサンキヤに外注する。

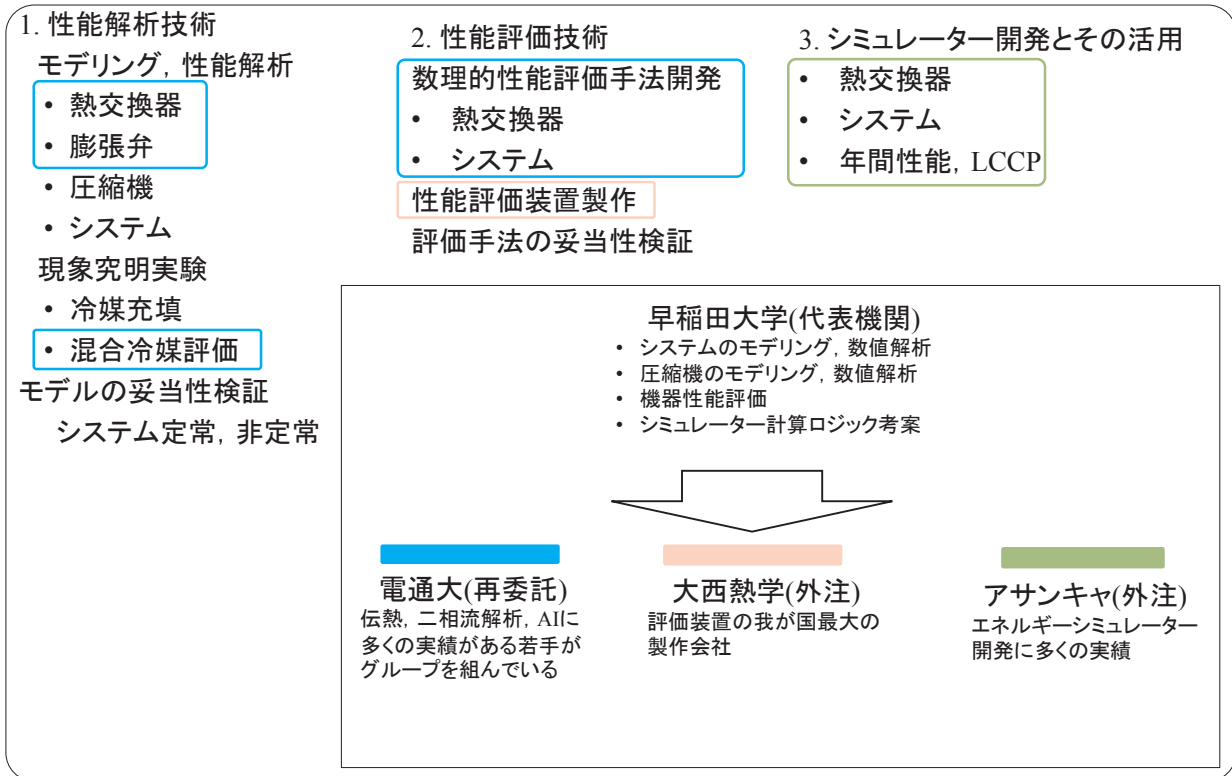


図 2. 1. 1. 3. 1 研究体制

2.1.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

2.1.2.1 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】

本事業では、東京大学、公立諏訪東京理科大学、産業技術総合研究所（安全科学研究部門）が共同提案し、受託している。3機関の可燃性冷媒の安全評価に関する研究項目を列挙すると、以下のようになる。

【東京大学】

- ・可燃性冷媒漏洩時のリスクの評価
- ・可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の評価
- ・エアコンポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制
- ・HFO 冷媒の自己分解反応の抑制

【公立諏訪東京理科大学】

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

【産業技術総合研究所(安全科学研究部門)】

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

家電製品のリスクを評価する手法として、R-Map が知られている。これは、リスクを6つの発生頻度と5つの危害度からなる6×5のマトリクス上で表現するものである。文部科学省所管の(財)日本科学技術連盟が開発したものである。図2.1.2.1-1はR-Mapの例である。A領域は許容できないリスク領域でリコールしなければならないものに該当する。B領域は最低限のリスクまで発生頻度を低減すべき領域である。C領域はリスクが無視でき、そのまま流通できる領域である。事故の発生頻度に関しては、家電製品などの消費生活用製品については、100年に1回の死亡事故が発生しても安全と見なす(C領域と見なす)という基準が示されている。例えば、わが国のルームエアコンのように1億台流通している場合は、許容される事故発生頻度は 10^{-10} (件/台・年)となる。図2.1.2.1-1の発生頻度は100万台流通している場合の例である。

以上のように、製品のリスク評価を行うためには、事故の発生頻度評価と危害度の評価を行う必要がある。冷凍空調機器から可燃性冷媒が漏えいして火災事故になるためには図2.1.2.1-2に示すような3条件(冷媒の急速漏洩、可燃空間の存在、着火源の存在)が重なる必要がある。3条件を独立事象と仮定すると、火災事故の発生確率は、冷媒の急速漏洩の発生確率と可燃空間の存在確率と着火源が存在する確率の積となるので、火災事故の発生確率を求めるためには3要素のそれぞれの発生確率を求める必要がある。

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

図2.1.2.1-1 100万ユニットが配布された消費製品のリスクマップ。

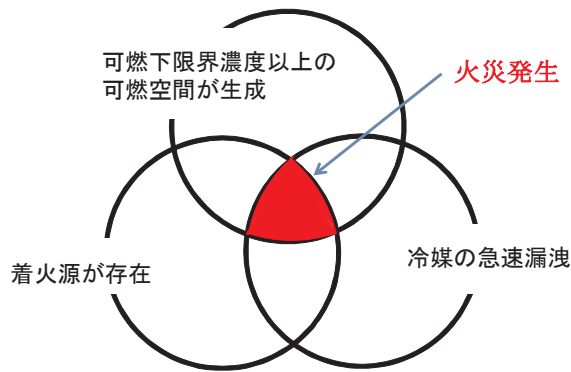


図 2.1.2.1-2 火災事故発生の条件

本事業では、火災事故が発生する頻度のための研究と、事故時の危害度評価のための研究を行っている。当面は冷媒としてプロパンを冷媒とし、ルームエアコンおよび独立型ショーケースからの冷媒漏洩に伴う火災事故を研究対象としている。3 機関の研究項目の関係を図 2.1.2.1-3 に示す。相互に協力しながら研究を進めてゆく計画となっている。最終的なリスク評価は日本冷凍空調工業会と協力しながら実施する予定である。

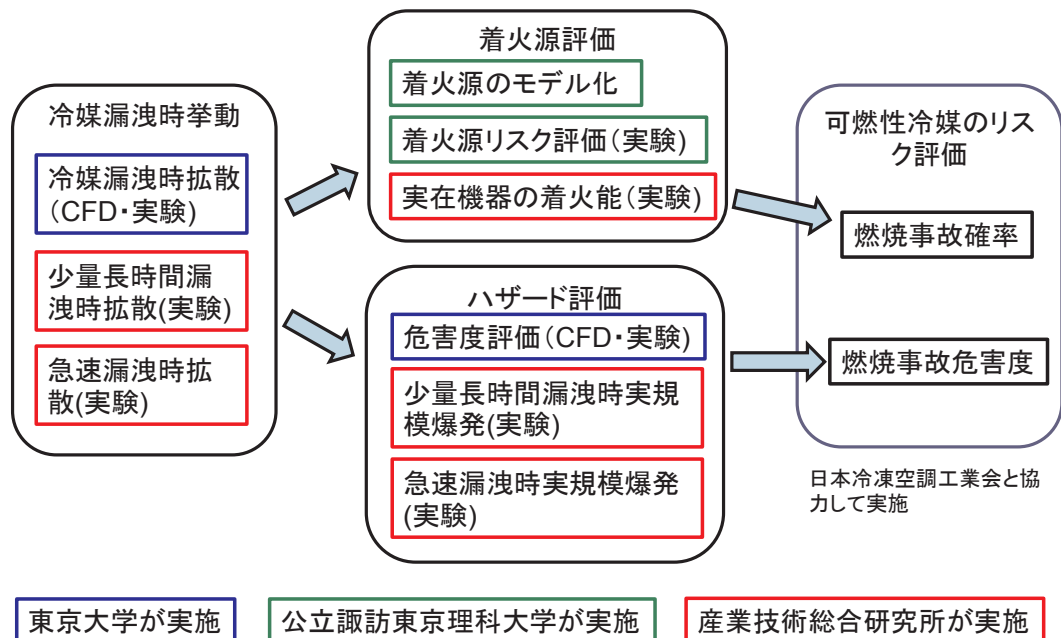


図 2.1.2.1-3 プロジェクトの研究のながれ

2.1.2.1.1 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)可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究

HFO 冷媒, その混合冷媒, 炭化水素などの自然冷媒が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。冷媒の漏洩シナリオを検討して漏洩箇所, 漏洩スピード, 冷媒状態, 室内状況を設定し, 冷媒濃度の時間変化を計算する。

ある実験室内を改装し模擬室を設置し, 模擬室内に設置されたルームエアコンやショーケースなどからの冷媒漏えい実験を実施する。冷媒拡散実験結果とシミュレーション結果を比較することにより, シミュレーションの高度化を行う。

漏えいシナリオについて, 冷媒濃度の時間的推移を計算し, 可燃範囲に入る条件を明らかにする。リスク評価の結果, 何らかの対策が必要な場合は, 可能な対策, 冷媒充填量の削減を検討し, その効果を明らかにする。

2) 可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究

可燃性冷媒が室内漏えいして燃焼事故が発生するとき、そのリスクを評価するためには危害度を評価しなければならない。可燃性冷媒が燃焼するときの危害度が不明のため、現在のリスク評価においては、致命的な危害度と仮定している。可燃性冷媒が燃焼するとき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う。

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

エアコンのポンプダウン運転時の事故として想定される圧縮機内でのディーゼル爆発について、爆発の抑制効果を検証するため、燃焼ガス分析を行い着火のメカニズムを解明し、発生条件を実験的に明らかにする。潤滑油から冷媒へと燃焼が伝搬する仕組みとの解明に努め、潤滑油の燃焼特性に注目することにより、潤滑油に添加物を加えることによって、自己着火燃焼の抑制効果を明らかにする。

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

フルオロカーボン冷媒は高温、高圧下で大きなエネルギーを受けると、炭素の二重結合や炭素-フッ素結合が切れ、また再結合をするなどの連鎖反応を起こして、エネルギーの低い物質へと分解する。このとき、大きなエネルギーを放出し、圧縮機などの圧力が耐圧以上に上がり、爆発事故を招く恐れがある。フルオロカーボンであれば自己分解反応は起こりうるが、炭素の二重結合を有するHFO冷媒は自己分解反応が起こりやすい可能性がある。

HFO1123冷媒を対象として、内容積0.6Lの圧力容器(所有)を用いて、自己分解反応の発生条件を明らかにする。反応内部の可視化、火炎温度測定、排気ガス分析を行い、自己分解反応の機構解明に努める。自己分解反応を抑制するために、他のガスを混合し、抑制効果を検証する。

自己分解反応研究会を組織して定期的に開催する。本プロジェクトの中で得られた知見などを基に、自己分解反応の抑制効果、リスクアセスメントなどを評価する。本プロジェクト事業者、冷媒メーカー、機器メーカーなどをメンバーとし、非公開で開催するが、得られた成果は積極的に公表する。

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)

本研究では、冷媒圧縮機の通常運転時に圧縮機内で発生するレイヤーショートに対し、その発生を模擬した(レイヤーショートが発生するように細工をした)圧縮機を用い、その発生要因ごとの放電パターンおよび放電エネルギーを実験的に調査することにより、不均化現象について検討する際の評価基準を明らかにすることを目的としている。初年度は、レイヤーショートの発生法や発生時の放電パターンおよび放電エネルギーの測定方法を確立し、発生要因ごとの違いや再現性を確認する。次年度は、冷媒を模擬した作動流体の誘電率や冷凍機油の影響を検討すると共に、回転数や圧力・温度が圧縮機の通常運転条件と同様な条件下で試験を行うことができる装置を開発して検討を行う。この様にして得られた放電パターンや放電エネルギーのデータは、随時、不均化試験の評価条件として東京大学の研究グループおよび関係機関に提供する。3年目には、試験容器または実機において評価条件で行われた不均化試験の結果をフィードバックしながら、再現性およびより広い範囲での試験を行い、冷媒圧縮機の通常運転状態における不均化現象の評価条件を確立する。

3) 計算化学的手法を用いた HFO 冷媒の自己分解反応及び抑制機構の理論的解明(広島大学に再委託)

空調機器における実用上の安全性と効率を確保しながら、混合冷媒としての GWP をより低いものとするための最適組成物を提案するためには、自己分解反応機構と混合物質の分解抑制機構を解明し混合組成決定や機器設計に活用することが重要となる。

HFO1123の自己分解反応は、結合開裂と再結合を含み、固体炭素であるススの発生を伴う複雑な反応であり1000以上の素反応から構成されている。HFO1123の自己分解における主要な反応に、抑制剤がどのように作用し自己分解を抑制するかを抑制剤の分解も含めた多数の素反応について計算化学的手法で検証し、重要な過程を検証して行くことで抑制機構を解明することが必要である。そのため、HFO1123にR32を添加したときの反応抑制機構の解明、CF₃Iの反応抑制機構の解明及びR32との相乗効果についての考察、解析ソフトを活用した機器内部の温度、圧力上昇解析などを実施する。

2.1.2.1.2 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】

2.1.2.1.2.1 事業内容の概要

本研究開発は、炭化水素系自然冷媒やHFC系・HFO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ものである。

これにより、次世代冷媒適用を見据えたリスクアセスメントにおいて重要となる着火確率を、従来よりも精密に評価可能になると期待される。また、一般社団法人日本冷凍空調工業会が実施する、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器のリスクアセスメントや、公益社団法人日本冷凍空調学会が実施する NEDO プロジェクト調査事業「次世代冷媒に係る安全性・リスク評価に関する検討」とも密接に連携して、着火源になりうると考えられるケースを集中的に評価する。さらに、共同提案研究機関である国立大学法人東京大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所安全科学研究部門（以下 RISS）の成果とも密接に連携して、実験データ及び構築するフィジカルリスク評価手法の精度及び信頼性向上を図る。なお 2018～2020 年度は、次世代冷媒の中でも特に炭化水素系自然冷媒に注力した研究を実施する。

2.1.2.1.2.2 事業内容の詳細

2.1.2.1.2.2.1 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

業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器の冷媒を、次世代冷媒として期待されている強燃性の炭化水素系自然冷媒及び HFC 系、HF0 系の微燃性冷媒に転換した場合を想定し、冷媒の漏洩に伴う可燃性混合気の形成シナリオについて、実際の環境で着火源となりうる機器や現象を抽出する。抽出された着火源を着火機構ごとにカテゴリー分けし、カテゴリーごとに着火機構のモデル（以下、着火源モデル）を構築する。具体的には以下の流れで研究を展開する。

a) 着火源のスクリーニング：実際の機器取扱環境で着火源となりうることが想像される、静電気、たばこ（ライター、マッチ等の喫煙器具を含む）、電気機器等のスイッチ、コンセントの抜き差し、電気製品（モーター、ヒーター、IH ヒーターなどの高温表面）、バッテリー（モバイルバッテリーなどを含む）などについて、文献調査その他の方法により着火源となるか否かのスクリーニングを行う。

b) 着火源モデルの構築：上記スクリーニングにより評価する必要があるとされた着火源を、いくつかのカテゴリー（例えば、裸火、電気スパーク、静電気、高温表面等）に分類し、文献調査その他の方法により、学術的根拠に基づいた着火機構のモデルを構築する。分類したカテゴリーにつき、以下の 2.1.2.1.2.2.2 で実施する実験による着火可能性評価実施の優先順位をつける。

上記 a) で抽出された着火源及び b) で構築された着火源モデルは、共同研究機関である RISS へ適宜情報提供し、RISS が実施する実大規模の燃焼実験に反映させることにより、本研究で抽出した着火源の着火可能性を実大規模で評価可能になるよう発展させる。

2.1.2.1.2.2.2 各種着火源による次世代冷媒のフィジカルリスク評価

2.1.2.1.2.2.1 で構築された着火源モデルに基づき、主として実験により着火可能性に関するデータを取得・蓄積する。共同提案先である東京大学及び RISS で得られる成果とリンクして、学術的根拠に基づいた次世代冷媒のフィジカルリスク評価手法を確立する。具体的には以下のサブテーマに示す研究開発を実施する。

a) 着火源モデルを用いた着火可能性評価手法の確立：上記 2.1.2.1.2.2.1-b) で構築した、裸火・電気スパーク・静電気・高温表面等の各着火源カテゴリーの着火源モデルにおいて、着火の有無を決定づけるファクター（燃焼範囲、消炎距離、最小着火エネルギー等）を、主として高速度撮影、レーザ誘起蛍光法 (LiF)、粒子画像流速測定法 (PIV) 等の燃焼計測技術を用いた実験により計測し、データを蓄積する。対象漏洩シナリオにおける冷媒濃度分布、燃焼特性等に関するデータは共同研究機関である東京大学及び RISS と密接に連携して知見の共有を行い、効率的に研究開発を進める。得られたデータをもとに、炭化水素系自然冷媒や HFC 系・HF0 系微燃性冷媒等の次世代冷媒の着火特性について、学術的に一般性のある評価手法を確立する。

b) 着火特性に及ぼす環境条件の影響評価：例えば静電気であれば、その発生機構や強度は環境中の湿度に大きく依存する。また、各種機器の劣化度も、着火に少なからず影響を及ぼすと考えられる。このように、各着火源モデルにおいて、環境条件が着火の有無を決定づけるファクターに及ぼす影響を実験的に検証する。

2.1.2.1.3 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】

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では、可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価と、冷媒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を行う。

機器類の点火能評価では、共同提案事業者である公立諏訪東京理科大学や調査事業で行われているリスク評価でのスクリーニングの結果を受けて、漏洩ガス雰囲気内で動作すると着火源となる可能性がある機器類について、点火能評価実験を行う。実験は、電気エネルギーによる着火エネルギーが最も低いと報告されている濃度のプロパン-空気予混合気をアクリル容器内に形成し、実在の機器を選定して設置し遠隔操作することで着火が起こるか否かを観測する。

冷媒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研究では、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と、少量長時間漏洩時の拡散挙動計測と実規模フィジカルハザード評価、室内機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を行う。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は、拡散挙動計測を行うための実験条件を決定することを目的として、実際の機器類で起こりえる漏洩条件を実際の漏洩事故例から検討し、反復実施が可能な実験の放出条件としてモデル化する。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では、家庭用ルームエアコン室内機からの比較的小流速の漏洩事故について、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では、家庭用ルームエアコン室内機と冷蔵機内蔵ショーケースからの大流速の漏洩事故について模擬した漏洩拡散挙動計測実験を行い、実規模模擬室内に漏洩させたプロパン濃度の濃度分布時間履歴を計測する。プロパン濃度が燃焼下限界を超え、着火事故の可能性がある条件がある場合には、野外実験場において燃焼影響評価実験を行い、実規模模擬室内に形成した予混合気に点火して、燃焼により生じる模擬室内外の圧力上昇挙動、放射熱、ガラス窓等の破壊挙動等を計測し、実規模フィジカルハザードを評価する。

2.1.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

2.1.3.1 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】

2019 年度

- [1] 高元側に最適な低 GWP 冷媒の選定（机上検討）
 - ①高元側冷媒選定と理論性能、製品化実現コストの見積もり
 - ②製品の馬力に応じた最適圧縮機選定
- [2] 安価かつ高効率実現のための高元側サイクルの開発（机上検討）
 - ①圧縮機吸入圧損の低減技術の開発
 - ②圧縮機増速による小型化技術の開発
 - ③熱交換器の最適分配および最適容量の開発
- [3] 机上検討結果の実機検証

2020 年度

- [4] 高元側に最適な低 GWP 冷媒での詳細構造設計と実機検証
 - ①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
 - ②製品の馬力に応じた最適圧縮機の搭載構造設計
- [5] 安価かつ高効率実現のための二元サイクルの開発
 - ①圧縮機吸入圧損の低減技術の実現見極め
 - ②圧縮機増速による小型化技術の実現見極め
 - ③熱交換器の最適分配および最適容量の詳細設計
 - ④二元冷凍サイクルシステム制御の構築
 - ⑤二元冷凍サイクル全体の実証試験機評価

2.1.3.2 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】

冷媒の探索と選定から手掛け、大学等からの情報収集と物性式を入手する。その後、定格機器性能維持と年間機器性能 5%改善するための性能ポテンシャル把握、製品化（企業化）のための信頼性把握、および安全性検討を進める。社内での基礎フィールド試験、実店舗でのフィールド試験にて実証評価をもって開発完了とする。

研究 開発項目	年度		2019年度		2020年度		2021年度		2022年度	
①冷媒の探索と選定 (1)冷媒情報入手 (2)シミュレーション (3)評価 (4)冷媒入手 (5)試験機準備 (6)ドロップイン試験 (7)評価										
②冷媒物性値の把握 (1)冷媒入手 (2)大学への測定依頼 (3)物性式入手										
③性能ポテンシャル把握 (1)選定冷媒の入手 (2)熱交・圧縮機試作 (3)試験機準備 (4)性能測定 (5)改善検討 (6)評価										
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										
⑤安全性検討 (1)可燃性情報入手 (2)冷媒漏洩シミュレーション (3)漏洩試験装置試作 (4)漏洩試験 (5)評価 (6)漏洩検知器の検討										
⑥基礎フィールド試験 (1)冷媒入手 (2)試験機試作・組立 (3)制御仕様検討 (4)分流性検討 (5)フィールド試験 (6)評価										
⑦実店舗フィールド試験 (1)店舗選定 (2)試験機試作 (3)計測システム試作 (4)設置工事 (5)実証試験 (6)移設 (7)現状復帰 (8)評価										
⑧開発完了										

2.1.3.3 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】

本研究開発では、各課題を解決するために、以下の開発を行う。

[課題 1] CO₂ 冷凍機の大出力化；

CO₂ 冷凍機の導入を促進するためには、省エネ性に加えて、現在 HFC 冷凍機が稼働している既存店の置き換えに対応ができることと、大出力化による適用分野の拡大が必要となる。

そこで、圧縮機ユニットの連結による大出力化技術を開発し、CO₂ 冷凍機の適用分野の拡大を図る。

[課題 2] 高外気温度対応；

CO₂ 冷媒は臨界点が約 31°Cにあるため、水冷式冷凍機で湿球温度を利用することにより、年間の大半を亜臨界のサイクルで運転することができるようになる。一般的に多く用いられているクーリングタワーでは、貯水されるため、藻や菌の繁殖があり、定期的なメンテナンスが必要であり、そのため、空冷式に移行されてきた経緯がある。

そこで、クーリングタワーに代わり、貯水しないメンテナンスフリーの冷却水の放熱が可能なシステムを開発する。

[課題 3] CO₂ 冷媒の特性を活かした未利用熱利用；

CO₂ 冷媒の特長である高温排熱を利用し、HFC 冷媒以上の省エネ技術により、飛躍的な省エネ性の提供を行って、普及促進を図る。

[課題 4] 中高温領域への利用範囲拡大；

現在 CO₂ 冷凍機が使用できず、HFC 冷凍機での対応を余儀なくされている中高温領域に対して、CO₂ の使用範囲拡大を行うために中高温冷凍機に適した方式を研究開発する。

以下に、実施計画を示す。

	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
課題1. CO ₂ 冷凍機の大出力化				→
課題2. 高外気温度対応			→	
課題3. CO ₂ 冷媒の特性を活かした未利用熱利用				→
課題4. 中高温領域への利用範囲拡大			→	

2.1.3.4 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】

次世代冷媒の成分物質の安定性評価、燃焼性評価、毒性評価などを実施し、直膨型空調機での性能試算を行う。既存冷媒と同等の性能で使用可能と思われる次世代冷媒の組成を抽出して、直膨型空調機に対してドロップイン試験、耐久性試験を実施することにより、GWP10 以下の直膨型空調機用微燃性冷媒の混合組成を決定する。

具体的には、①安定性評価としては、次世代冷媒の成分物質の安定性、環境分解、熱分解について検討を行う。②燃焼性評価としては、次世代冷媒の成分物質および混合冷媒の燃焼範囲、燃焼速度、着火消炎特性の評価を行う。③毒性評価については、次世代冷媒の成分物質の ASHRAE 登録に必要な試験を実施していく。④冷媒性能評価を行いながら組成を決定していき、機器の開発に繋げていく。

開発項目	年度	19年度	20年度
①温暖化係数と安定性評価	<ul style="list-style-type: none"> 安定性評価 重合反応性の検討 次世代冷媒の成分物質の分解生成物と環境影響評価 次世代冷媒の成分物質の熱分解開始温度と分解生成物 直膨空調機用の冷媒候補の選定 安定化方法の検討 リスクアセスの内容整理 直膨空調機用の冷媒候補の決定 		
②燃焼性評価	<ul style="list-style-type: none"> 冷媒候補の燃焼範囲 冷媒候補の燃焼速度 次世代冷媒の成分物質の着火/消炎特性 新冷媒の着火/消炎特性 新冷媒の着火/消炎特性 湿度影響 (21年2Qまで) 次世代冷媒の成分物質の着火/消炎特性 湿度影響(21年4Qまで) 		
③毒性評価	<ul style="list-style-type: none"> 急性毒性試験 心感受性試験 14日反復毒性試験 28日反復毒性試験 許容濃度の決定 (22年) 		
④冷媒性能評価	<ul style="list-style-type: none"> 新冷媒候補のサイクルシミュレーション評価 新冷媒候補の空調機へのドロップイン試験 新冷媒候補の信頼性評価と課題抽出 		

2.2 研究開発の実施体制

本事業においてはプロジェクトマネージャーに NEDO 環境部 主任研究員 阿部正道を任命し、プロジェクトの進行全体を企画・管理させる。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成果を最大化させる。さらに、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、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 飛原英治氏をプロジェクトリーダー、早稲田大学総合領域研究機構熱エネルギー交換工学・数学融合研究所 所長 齋藤潔氏をサブプロジェクトリーダーとして研究開発を実施している。

研究開発の実施体制及び役割分担を図 2.2-1 に示す。

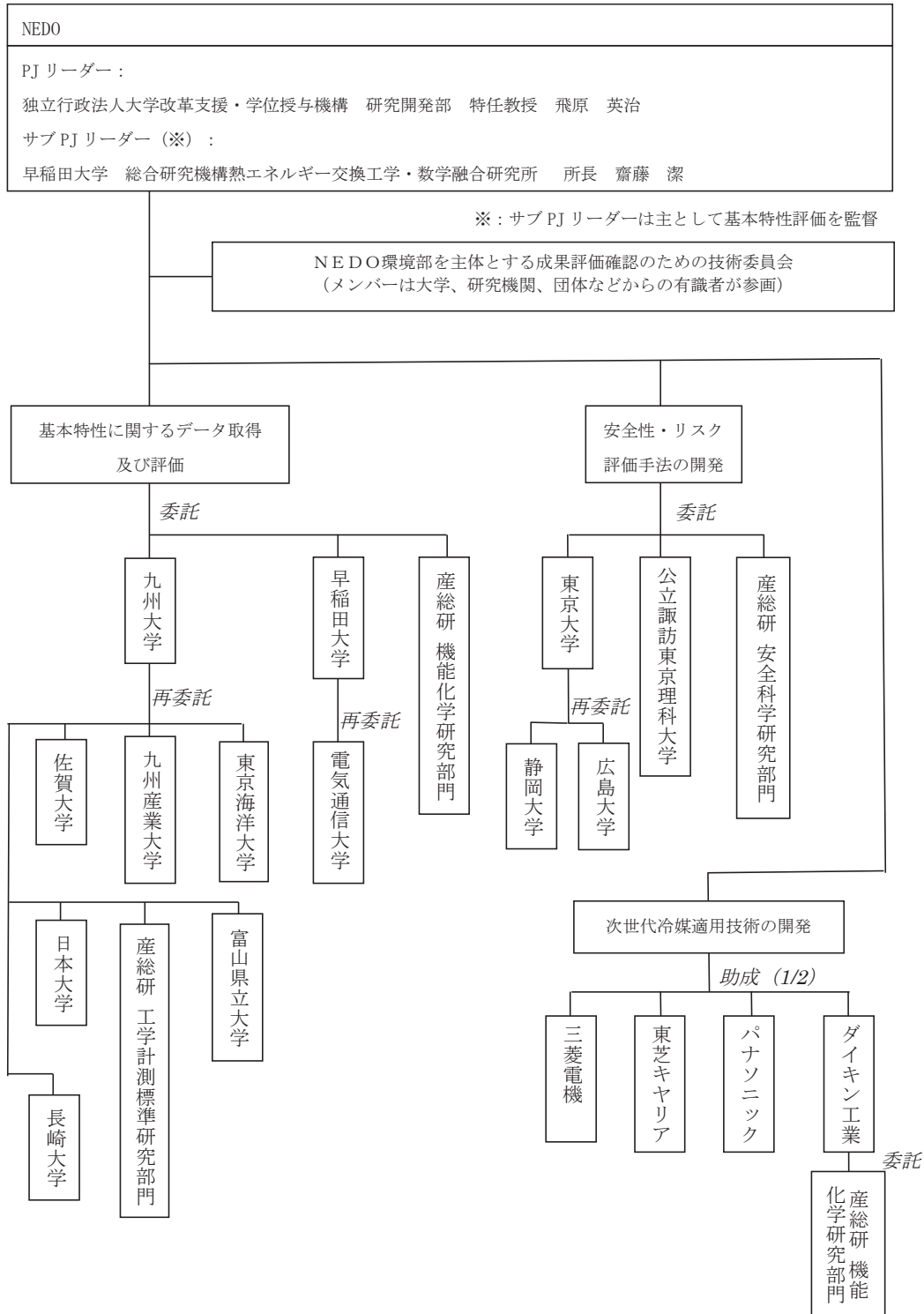


図 2.2-1 事業実施体制の全体図

2.3 研究開発の運営管理

NEDO は、研究開発全体の管理・執行を適切に遂行するため、経済産業省、プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダー及び各実施者等と密接な関係を維持しつつ、プロジェクトの目的、目標に照らして適切な運営管理を実施した。具体的には、外部有識者の意見を運営管理に取り入れるため技術検討委員会を定期的に開催したほか、プロジェクトリーダーと各事業の進捗管理を行った。

2.3.1 事業実施に係る委員会

事業の実施に当たっては、外部有識者で構成される採択審査委員会を開催し、効率的かつ効果的な事業の実施者・実施体制、採択条件などを決定した。

表 2.3.1-1 採択審査委員会 委員リスト

委員	所属	役職	担当種別
亀山 秀雄 (委員長)	国立大学法人東京農工大学	名誉教授	委託・調査・助成
浅野 等	国立大学法人神戸大学 大学院工学研究科機械工学専攻	教授	委託・助成
勝田 正文	学校法人早稲田大学	名誉教授	委託・調査・助成
齋川 路之	一般財団法人電力中央研究所 エネルギーイノベーション創発センター	首席研究員	委託・助成
高石 吉登	学校法人幾徳学園 神奈川工科大学 工学部 機械工学科	教授	委託・助成
西村 伸也	公立大学法人大阪市立大学 工学研究院	教授	委託・調査・助成

2.3.2 研究開発の進捗把握・管理

本研究開発の進捗管理の概要を以下に示す。なお、プロジェクトマネジメントに当たっては、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し（表 2.3.2-1）、定期的に技術的評価を受け、次年度研究開発計画への反映を行った。

- ① 月例報告（委託先／助成先より研究進捗報告（月報）を提出）
・ NEDO 及びプロジェクトリーダー（PL）による確認・把握
- ↓
- ② プロジェクトリーダー、NEDO による事業者ヒアリング（年 2 回開催）
- ↓
- ③ ①及び②による研究進捗の整理
・ NEDO における次年度繰越案の策定（計画修正・予算配分）
- ↓
- ④ 技術検討委員会（年 1 回開催）による評価（年度末及び事業終了前）

表 2.3.2-1 技術検討委員会 委員リスト

委員	所属	役職
亀山 秀雄 (委員長)	国立大学法人東京農工大学	名誉教授
浅野 等	国立大学法人神戸大学 大学院工学研究科機械工学専攻	教授
勝田 正文	学校法人早稲田大学	名誉教授
齋川 路之	一般財団法人電力中央研究所 エネルギーイノベーション創発センター	首席研究員
西村 伸也	公立大学法人大阪市立大学 工学研究院	教授

(3) 技術分野における動向の把握・分析

NEDO は、プロジェクトで取り組む技術分野について、下表の通り調査を実施し、技術の普及方策を分析、検討した。なお、調査の成果を適宜、研究開発へ反映させることにより、内外の技術開発動向、政策動向等に応じた運営管理を実施した。

表 2.3.2-2 本事業における調査事業一覧

調査名	実施期間 (年度)	委託先	内容
次世代冷媒に係る安全性・リスク評価に関する検討	2018～2022	公益社団法人 日本冷凍空調学会	研究開発項目①「次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価」及び研究開発項目②「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」の成果を効率的に国際規格化・国際標準化等へ結び付けることをねらいとして、次世代冷媒に係る規制、規格等の動向調査、次世代冷媒使用時における安全性・リスクに係る課題の抽出及びその対応方法に係る調査等を含む、次世代冷媒の冷凍空調機器への適用に係る安全性・リスク評価に係る調査を実施。
開発途上国におけるモントリオール議定書の目標達成に向けた動向に関する調査	2018～2019	三菱 UFJ モルガン・スタンレー証券株式会社 イー・アンド・イーソリューションズ株式会社	本事業の成果により、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器が普及することにより、国内のみならず、開発途上国等の HFC 削減目標達成に貢献することが期待されることから、先進国とは異なる削減スケジュールが定められている開発途上国の規格・標準等の動向調査を実施。
HFC23 冷媒の代替に関する調査	2019～2020	一般社団法人 日本試験機工業会	環境試験装置や食品等の極低温冷凍冷蔵設備等の特殊な環境下で冷媒として使用される HFC23 について、将来的な HFC23 代替冷媒及び代替冷媒適用技術の開発を行う必要性や開発にあたっての技術的課題等を明確化するため、HFC23 の使用実態、代替冷媒及び代替冷媒適用技術に係る動向等に係る調査を実施。
トラック・バス等における搭載空調機器等への次世代冷媒使用時のリスクに関する調査	2020	DNV GL AS, Japan Branch	キガリ改正における HFC 生産量・消費量削減目標の達成に向けて、冷凍空調機器（自動車用カーエアコン等）を搭載する車両においても、更なる低温室効果冷媒への転換促進に取り組む必要がある。トラック・バス等における搭載空調機器等への微燃性冷媒使用時のリスクを評価することで、今後の次世代冷媒への代替の方向性、技術開発の必要性等を検討する。

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2.4.1 事業全体のアプローチ

本事業においては、以下の通り実用化・事業化へ向けたマネジメントを実施した。

- 1) 運営管理に従った、計画・予算の絞り込み等により、実用化・事業化の高い技術開発に資源を集中した。
- 2) 技術検討委員会等において、各事業者は実用化・事業化の見通しについて発表し、それに対してプロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダー、外部有識者が意見を述べるとともに助言を行い、各研究開発項目の内容にフィードバックさせる。
- 3) 研究開発項目①、②（委託事業）は公共性が高いことから、産業界を加えた研究会を通じて成果を共有する。
- 4) 研究開発項目③（助成事業）は原則として競争的雰囲気を実施する。よって、成果報告等の場においては、各事業者個別に発表を行うこととする。

2.4.2 知財戦略・標準化戦略に関する妥当性

- 1) 研究開発項目①及び②（委託事業）については、主として公共的な知的基盤の整備を目的とするため、原則として成果は積極的に公表し、国際規格化・国際標準化や国際データベース等への登録を行う。（ただし、知的財産取得を妨げるものではない。）
- 2) 研究開発項目③（助成事業）については、各事業者の企業戦略（積極的な出願、ノウハウ秘匿のための出願抑制等）に沿った知的財産管理を推奨している。
- 3) 調査事業「次世代冷媒に係る安全性・リスク評価に関する検討」において、次世代冷媒に係る規制・規格等の動向調査の他、研究開発項目①及び②（委託事業）の事業者を中心とした産学官のワーキンググループを設定し、次世代冷媒及びその適用機器の使用時における安全性・リスクに係る課題の抽出及びその対応方法の検討を進めている。これにより、国際規格化・国際標準化に向けた提案内容を精査し、効率的かつ効果的な国際規格化・国際標準化に向けた活動を推進する。

2.4.3 事業者の取り組み

研究開発項目②（委託事業）では公共性が高いことから、産学官連携の研究会（HF0 研究会）を設置し、成果を共有、また国内外に公表及び発信する。

- ・独立行政法人大学改革支援・学位授与機構特任教授 飛原英治氏（プロジェクトリーダー）が主体となり、発足。
- ・研究開発項目②で実施する次世代冷媒の安全性評価・リスク評価手法について、産業界を含めて効率的に検証し、研究内容にフィードバックさせる。

3. 情勢変化への対応

2016年10月にモントリオール議定書第28回締結国会合（MOP28）が開催され、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（キガリ改正）が採択された。2019年1月にキガリ改正が発行することに伴うHFCの生産量・消費量の削減義務の履行を国内で担保することを目的として、「オゾン層保護法」が2018年7月に公布、2019年1月に施行された。本法では、我が国が遵守すべきHFCの生産量・消費量の限度を定めて公表し、これらの限度を2019年以降、段階的に切り下げていくこととしている。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グリーン冷媒及びそれを活用した機器の開発・導入を計画的に推進していくとしている。これを受け、本事業においては、2019年より研究開発項目③「次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発」を追加し、2029年以降の削減義務（基準値から70%削減）に貢献すべく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普及に至っていない領域を対象に技術シーズを踏まえた普及を妨げる技術課題に対する技術開発を実施している。

この他、高圧ガス保安法（微燃性冷媒の取扱い）、フロン排出抑制法等の法・規制及び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、ISO1549（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）等を想定し、動向を注視しつつ、研究開発を実施していく。

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。なお、評価の時期は、中間評価を2020年度、事後評価を2023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。

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

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】

本研究では、ターボ圧縮式の中型から大型冷凍空調機器用次世代冷媒としての新冷媒 HCF01224yd(Z) 及び HF01336mzz(E)、そして3成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+CO₂系、さらには H23 年度～H27 年度の NEDO 研究プロジェクト受託研究「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」で新規に開発された、日本初の国産冷媒である HF01123 を成分物質に含む3成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+HF01123 に注目して、新規低 GWP 混合冷媒を中小型空調機器用冷媒として使用するための熱物性、伝熱特性、及びサイクル特性に関する基礎技術を構築することを目的として、下記の研究項目を実施した。

(1) HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の熱物性評価

- ①臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定
- ②気液平衡性質の測定
- ③高温 PVT_x 性質及び定圧比熱の測定
- ④表面張力を測定する
- ⑤音速の測定
- ⑥状態方程式の開発
- ⑦輸送的性質の測定及びモデル化

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

- ①プレート式熱交換器内の伝熱特性評価
- ②扁平多孔管内の伝熱特性評価
- ③円管内の伝熱特性評価
- ④水平円管外の伝熱特性評価
- ⑤伝熱データベースの構築

(3) HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価

- ①ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析
- ②ヒートポンプサイクル特性の実験的評価

以上の研究開発によって、以下の主たる成果が得られた。

(1) HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の熱物性評価

- ①沸点の高い HF0 系冷媒 HCF01224yd(Z) 及び HF01336mzz(E)、そして3成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+CO₂ 及び HFC32+HF01234yf+HF01123 における PVT 性質、飽和密度、飽和蒸気圧、臨界定数を高精度で測定した。
- ②HFC32+HF01234yf 系および HF01123+HF01234yf 系混合冷媒の気液平衡性質を測定し、PR-MC 状態方程式を相関した。また、HFC32+HF01234yf+HF01123 系混合冷媒の測定準備を実施した。
- ③PVT_x 性質は、HCF01224yd(Z) の純成分ならびに HFC32+HF01234yf の2成分系は3組成で、HF01336mzz(E)+HF01336mzz(Z) の2成分系は1組成で、HFC32+HF01234yf+CO₂ の3成分系は2組成で測定をおこなった。定圧比熱測定は、装置を製作し、完成した。
- ④表面張力は、HF01336mzz(E) と HF01336mzz(Z)、そして三成分系の混合冷媒 R455A (HF01234yf/HFC32/CO₂: 75.5/21.5/3.0 mass%) 及び HF01123/HFC32/HF01234yf (65.0/24.0/11.0

mass%) に対し測定を行った。さらに -40°C までの低温域を測定できるよう装置の改良を行い、順次低温の補足データを取得した。

- ⑤ HF01336mzz (E) 及び HF01336mzz (Z) の音速データを取得し、それぞれの理想気体比熱を求め、状態式開発に必要な温度相関式を作成した。また 2 成分系混合冷媒 R454C の音速データを取得した。
- ⑥ HFC32+HF01234yf+C02 系及び HFC32+HF01234yf+HF01123 系の 3 成分系混合冷媒、単一冷媒 HF01336mzz (E) 及び HCF01224yd (Z) の状態方程式を作成し、REFPROP で計算できるようにした。
- ⑦ 単一冷媒 HF01234yf および HF01336mzz (E) の、圧縮液および過熱蒸気域における熱伝導率および粘度データを取得するとともに、理論計算モデル (ECS モデル) との比較を行った。

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

- ① 単一冷媒 HF01234yf 及び HFC32 のプレート式熱交換器内局所蒸発・凝縮熱伝達率の測定を行い、熱伝達特性の把握及び既存冷媒データとの比較検討を行った。
- ② 扁平多孔管内における純冷媒 HFC32、HF01234yf、HF01336mzz (E) 及び 2 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf の凝縮・蒸発熱伝達特性を評価するとともに、3 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+C02 の凝縮熱伝達特性を評価した。また、扁平多孔管内における純冷媒の沸騰熱伝達率の予測式を新たに提案した。
- ③ らせん溝付き円管内における、HF01224yd (Z) の蒸発熱伝達特性、そして R455A (HF01234yf/HFC32/C02: 75.5/21.5/3.0 mass%) の凝縮・蒸発熱伝達特性を測定し、以前取得した HFC32 と HF01123/HFC32 (40/60mass%) の結果と比較を行った。
- ④ HF01336mzz (E) の 管外凝縮熱伝達率を測定し、ヌセルトの液膜理論より算出した理論値と比較を行い、状態方程式の妥当性を検討した。

(3) HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価

- ① HF01234yf+HFC32+C02 系混合冷媒の熱力学的解析を実施した。また、解析に圧力損失および熱交換器性能を導入中である。
- ② 3 成分系混合冷媒 HFC32+HF01234yf+C02 及び HFC32+HF01234yf+HF01123 について GWP が約 150 となる混合比、ならびに GWP が約 120 となる HFC32+HF01234yf+HF01123 の混合比について実験を実施し、COP 等の性能指標を計測した。その結果、冷暖房熱負荷及び熱源運転条件がサイクル性能に与える影響を明らかにした。各要素機器の特性がサイクル性能に与える影響について 2020 年度中に整理する予定である。

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】

低 GWP 低燃焼性混合冷媒の対象として、国内外で開発中の代表的な混合系を選定し、混合組成全域で、冷媒の国際標準において必要な燃焼限界及び燃焼速度や、実用化の検討において重要な消炎特性について評価した。また、混合系の実用上の燃焼特性として、温度湿度影響の評価を実施中である。燃焼限界測定法は、種々の標準法を実用上の火災に近い大規模容器での測定結果と比較検証した。

① 低 GWP 混合冷媒の安全性評価

評価対象として、R32/1234yf 混合系を選定し、標準条件における燃焼限界及び最大燃焼速度の混合比依存性を明らかにし、消炎距離については高圧条件での測定値からの推算も用い標準条件における消炎距離の混合比依存性を明らかにした。その結果、本混合系は全ての混合組成において特定不活性ガス R32 及び R1234yf 単体と同等以下の燃焼性を有することを示した。

② 低 GWP 混合冷媒の実用上の安全性評価

評価対象として、R32/1234yf 混合系を選定し、混合組成全域で燃焼限界の温度湿度依存性を明らかにし、

数式化した。燃焼速度及び消炎距離の温度湿度影響については評価を実施中である。また、より

実用上の燃焼に近い大規模容器での均一混合系の燃焼性評価が可能となった。本装置で冷媒の

濃度分布を測定するための計測系を用意した。

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】

低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の早期実用化を可能とするために必要不可欠となる評価手法の確立を目的に次の研究項目を実施した。

- 【1】 性能解析技術 研究開発
[1-1]モデリング・性能解析, [1-2]現象究明実験, [1-3]モデルの妥当性検証
- 【2】 性能評価技術 研究開発
[2-1]数理的性能評価手法, [2-2]性能評価装置開発, [2-3]評価手法の妥当性検証
- 【3】 シミュレーター開発とその活用
[3-1]熱交換器, [3-2]システム, [3-3]年間性能・LCCP

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 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) 可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究

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。最大許容充填量式（片岡の式）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。

最大許容充填量を増やす式について評価し、壁掛けエアコンに関しては可燃ガス体積がファン稼働と同時に直ちに消滅もしくは吹き出し口の直下のみ発生することから、リスク低減に非常に効果があることが示された。床置きエアコンに関しては、冷媒漏洩が続いている間はファン稼働後にも可燃ガス体積が局所的発生するが、冷媒漏洩終了後には直ちに消滅することが分かった。漏洩を感知しての室内機ファンの駆動が安全確保上で不可欠であること、漏洩開始 30 秒後にファン稼働を開始した場合広い部屋では可燃ガスが少し残ることが分かった。

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冷媒シミュレーションを行い、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。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。

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、可燃性フルオロカーボン冷媒（R32）が燃焼するときのシミュレーションを行った。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した。小型容器を製作し、燃焼実験を行い、燃焼シミュレーションの精度を実用的レベルにまで高めた。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、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

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。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。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。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。

② 「HF0 冷媒の自己分解反応の安全性とリスク評価の研究」

1) HF0 冷媒の自己分解反応の安全評価

本研究では、初期温度を 150°C に固定し、純粋 HF0-1123 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に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）

冷媒圧縮機運転中にモータ巻き線のショートを意図的に発生させることができる圧縮機を製作し、レイヤーショートが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。モータは 200 V 単相誘導コンデンサモータで、駆動電気回路には定格 15A のオーバーロードプロテクタ (OLP) が挿入されている。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、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。

1.2.1.2 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】

前章 2.1.2.1.2 節で述べた事業計画に基づき研究を進め、リレー及びスイッチの接点における放電による着火性、市販電気機器のコンセントの抜き差しによる着火性、静電気による着火性、たばこ等の高温熱面による着火性について主として実験による評価を実施した。具体的な研究成果は本章 2.2.1.2 節で述べるが、概要は以下のとおりである。本研究は大きく分けて以下の 2 つの柱からなる。

1) 機器使用時に問題となる着火源のスクリーニングと着火源モデルの構築

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

これまでの進捗内容は次のとおりである。主に家庭用空調機器の使用時を想定して、着火源候補となる機器や現象を日冷工によるリスクアセスメント結果をもとに抽出し分類した。まず電気スパークによるプロパン/空気混合気への着火能力について、文献および Web サイトの調査結果をもとに着火機構を示したモデルを立て、プロパンの最小着火エネルギーと比較して評価した。この結果と、先に抽出された家電製品を分解調査した結果から、各電気機器の着火能力を評価した。さらに、静電気及び高温面による着火についても、学術的基礎理論をもとに着火機構のモデルを構築した。

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

上記 1) で構築された着火源モデルに基づき、主として実験により着火可能性に関するデータを取

得・蓄積する。共同提案先である東京大学及び RISS と密接に連携して知見を共有する。得られたデータをもとに、炭化水素系自然冷媒や HFC 系・HFO 系微燃性冷媒等の次世代冷媒の着火特性について、学術的に一般性のある評価手法を確立する。

これまでの進捗内容は次のとおりである。1) での分類結果において、電気スパーク及び高温面に分類される各種着火源候補のうち、①有接点スイッチ（照明用壁面スイッチ）、②プラグの抜き差し、③有接点リレー開閉時の電気スパーク、④静電気、⑤高温面について、文献調査及び実験によりプロパン／空気混合気への着火性を調べた。

得られた成果は 2020 年 6 月現在で国内学術会議での口頭発表 5 件、国際会議論文 2 件として公表している。

1.2.1.3 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】

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のうち機器類の点火能評価ではこれまでに、ドライヤー、電気掃除機、レーザープリンターの点火能評価実験を行い、ドライヤーで雰囲気ガスである 5.2 vol% のプロパン－空気予混合気への着火を確認した。電気掃除機では発煙が観測されることがあったが雰囲気ガスへの着火は起こらなかった。レーザープリンターでは異常は見られなかった。

冷媒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ではこれまでに、家庭用ルームエアコン室内機からの急速漏洩に関して、冷媒漏洩事故事例の検討と漏えい条件のモデル化と拡散挙動計測を行った。可燃性ガス冷媒の漏洩事故事例の報告は少ないため、微燃性冷媒を使用した室内機での漏洩事故例を参考として漏洩口径、漏洩箇所等の条件を決定した。

拡散挙動計測は 2 通りの空間広さ、2 通りの許容充填量を想定した実室内機内でのプロパン放出による実規模漏洩拡散濃度計測実験を行い、放出位置、放出速度、エアコン送風の有無、扉下隙間の有無の影響を調査した。充填量を 4 分間で均等に全量放出した場合も液状で短時間に放出した場合も、最大許容充填量ごとの前提を守れば放出中の室内機直下以外に可燃域は形成されず、放出終了後速やかに可燃領域は消滅した。送風による攪拌を前提とした充填量を放出し送風を行わなかった場合は、放出位置・放出速度によっては床面に 1 時間以上可燃領域が形成され続けた。扉下隙間は長時間の可燃域形成を短くする効果はあるが、放出中や放出直後の濃度を顕著に低下させる効果は見られなかった。

1.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

1.3.1 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】

下記の研究項目を実施した。

- [1] 高元側に最適な冷媒選定
 - ・冷媒の性能計算と特徴比較
- [2] 安価かつ高効率実現のための高元側サイクルの開発
 - ・オールアルミ熱交換器（PFC 熱交換器）、アキュームレータ、カスケード熱交換器のシミュレーション計算
- [3] 上記机上検討結果の実機検証
 - ・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
- [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）
 - ・最適圧縮機の搭載構造設計
- [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）
 - ・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

1.3.2 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】

低 GWP 冷媒を採用した、経済性に優れた別置き型コンデンシングユニットの開発を目的として、下記研究項目を実施した。

- ① 冷媒の探索と選定：冷凍サイクルシミュレーション、およびドロップイン試験実施した。
- ② 冷媒物性値の把握：候補冷媒の物性情報を計測し、冷凍サイクルシミュレーション精度向上をはかるため、予測式の修正を実施した。※
- ③ 性能ポテンシャル把握：製品仕様を決定するため、まずは冷凍サイクルシミュレーション結果より検討仕様を選定した。また、実機検討を行うため、熱交換器および改善アイテム試作を行い、サイクル制御定数の最適化を実施した。※
- ④ 信頼性把握：信頼性把握のため、材料適合性試験（安定性評価）、コンプレッサ絶縁抵抗確認（電気絶縁性評価）、冷凍機油と冷媒の溶解度特性確認（相溶性評価）、動粘度特性確認（潤滑性評価）を実施した。※
- ⑤ 安全性検討：安全性検討のため、冷媒漏えいシミュレーション、および冷媒漏えい試験を実施した。また、安全性対応制御組み込み制御仕様の検討と実装を実施した。※

注) ※印は 2020 年度実施予定

1.3.4 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】

CO₂ 冷媒の普及促進を目的として、下記の研究項目を実施した。

[課題 1] CO₂ 冷凍機の大出力化；

圧縮機の制御検討及び冷凍機の性能確認用に、水冷 40HP 冷凍機（20HP 圧縮機ユニット×2 台連結）及び水冷 40HP 冷凍機用性能評価装置の仕様検討、設計・製作を行った。

2020 年度に、製作した装置を使用して、性能評価及び改良検討を行い、実証実験を実施する。

[課題 2] 高外気温度対応；

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した。また、性能評価用に、空冷型水冷却熱交換器ユニット及び空冷型水冷却熱交換器ユニット用性能評価装置の仕様検討、設計・製作を行った。

2020 年度に、製作した装置を使用して、性能評価及び改良検討を行い、実証実験を実施する。

[課題 3] CO₂冷媒の特性を活かした未利用熱利用；

排熱給湯技術の開発において、水冷式冷凍機の排熱を有効に利用できる水回路を開発した。2020年度に、性能評価及び改良検討を行い、実証実験を実施する。

また、排熱空調技術の開発において、性能検討用に冷凍機及び排熱空調ユニットの仕様検討、設計・製作を行った。2020年度に、性能評価及び改良検討を行う。

[課題 4] 中高温領域への利用範囲拡大；

2020年度に、予備評価用小型ユニット試験装置によるサイクル検討（仕様検討、設計・製作）を実施し、中高温冷凍機の構想設計を行う。

1.3.4 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】

1.3.4.1 温暖化係数と安定性評価

次世代冷媒の成分物質の重合性試験を実施し、次世代冷媒の成分物質が保存に問題なく、使用条件でも冷媒成分として適用可能性があることを確認できた。火災時の分解挙動も市販 HFO や HFC 冷媒と同水準であることを確認し、大気環境下でも高 GWP 物質を生成する懸念が無いことを確認できた。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。

1.3.4.2 燃焼性評価

次世代冷媒の成分物質および混合組成物の燃焼下限界(LFL)と燃焼速度を確認した。混合組成物において、ASHRAE 安全性区分 2L になることを確認した。また、次世代冷媒の成分物質の消炎距離を確認した。

1.3.4.3 毒性評価

次世代冷媒の成分物質の急性毒性試験で LC50 が 100,000 ppm 以上であり、目標の 20,000 ppm 以上を確認できた。

1.3.4.4 冷媒性能評価

次世代冷媒の成分物質の混合冷媒 (GWP<1) を用いて、R32 用 RAC 機にてドロップイン評価を実施した。冷房/暖房の定格・中間条件で、COP, APF が R410A に対して 90%以上の性能を示すことを確認した。

2. 研究開発項目毎の成果

研究開発は順調な進捗であり、研究開発データ毎の中間目標に対する 2020 年度末の達成度はほとんどのテーマにおいて「目標達成」となっている。

論文等の成果は、表 2-2 に示す通りである。委託事業である研究開発項目①及び②においては、論文投稿、講演発表等が数多く実施されている。一方、研究開発項目③は、研究開発が 2019 年度より開始され研究開発途上ということもあり、知的財産の観点からも、現時点で成果の外部発表は少ない。

知的財産権の状況については、表 2-3 に示す通りである。研究開発途上であることから、現時点で、特許等の登録には至っていない。また、研究開発項目①及び②については、公共性の高いテーマであることから、現時点で知的財産等が発生していない。

表 2-1 中間目標に対する達成度

テーマ	対象	中間目標	成果	達成度 (2020 年度末)
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」				
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	HF0 系混合冷媒の物性データ取得	次世代冷媒の熱力学的性質及び輸送的性質の高精度データを取得し、信頼できる熱物性計算ツールを開発する。さらに、伝熱特性及び冷凍サイクル基本特性を明らかにし、既設の容積圧縮式ヒートポンプ試験装置を用いて、次世代冷媒のヒートポンプサイクル基本性能評価を行う。	単体の新冷媒 (HCF01224yd (Z), HF01336mzz (E)) 及び 3 成分系混合冷媒 (HFC32+HF01234yf +CO ₂ 系等) を対象に熱物性、伝熱特性及びサイクル特性に関する基礎的データ取得を進めている。混合冷媒に関しては、国際データベースへの登録等を目指す。	○
低 GWP 低燃焼性混合冷媒の安全性評価	HF0 系混合冷媒の燃焼性評価	次世代冷媒の実用化にむけた基本特性の評価として、特に冷媒の混合が燃焼特性等の安全性に与える影響を明らかにする。	低 GWP 低燃焼性混合冷媒の対象として、国内外で開発中の代表的な混合系を選定し、冷媒の国際標準において必要な燃焼限界、燃焼速度や、実用化の検討において重要な消炎特性について評価した。また、混合系の実用上の燃焼特性として、温度湿度影響の評価を実施中。燃焼限界測定法は、種々の標準法を実用上の火災に近い大規模容器での測定結果と比較検証した。	○
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	性能評価シミュレーターの開発	次世代冷媒空調機器に対する性能評価ツールを開発するため、性能解析技術、性能評価技術、シミュレーター開発の目的付けを行う。次世代冷媒を採用した冷凍空調機器の性能を理論と実験で明確化する。	評価に必要な解析と評価ツールを開発し、次世代冷媒の性能が評価可能なことを確認する。	○

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」				
可燃性冷媒の燃焼に係る安全性とリスク評価の研究		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 HFO 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。	○
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	HC 系冷媒、HFO 系冷媒の安全性評価	炭化水素系自然冷媒や HFC 系・HFO 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。	<左記目標に対する成果を記載> 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。	○
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		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。	○
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」				
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	大型冷凍冷蔵倉庫向けクーリングユニット	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。	○
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	コンデンシングユニット	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。	○
低温機器における CO ₂ 冷媒を使用した省エネ冷	コンビニエンスストア、スー	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	[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	○

<p>凍機システム開発及びその実店舗評価</p>	<p>パーマケット、物流倉庫、食品加工工場のCO₂冷凍機システム</p>	<p>[2]高外気温度対応 [3]CO₂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</p>	<p>用に対して、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。</p>	
<p>GWP10以下の直膨型空調機用 微燃性冷媒の開発</p>	<p>冷媒、直膨型空調（家庭用エアコン、業務用エアコンの一部）</p>	<p>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</p>	<p>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。</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 】

表 2-2 論文等の成果

研究開発項目 区分	成果の発表			計
	① 基本特性評価	② 安全性・リスク評価	③ 冷媒・機器開発	
論文 (査読付き)	36	4	0	40
論文 (その他)	27	7	0	34
その他外部発表 (プレス発表等)	9	0	0	9
計	72	11	0	83

表 2-3 本事業の特許状況

研究開発項目 区分	特許出願			計
	① 基本特性評価	② 安全性・リスク評価	③ 冷媒・機器開発	
国内	0	0	7	7
外国	0	0	1	1
PCT*出願	0	0	2	2
計	0	0	10	10

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

以下、研究開発テーマ毎に研究開発成果の詳細を述べる。

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価

2.1.1 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】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ： 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		
HFO 系冷媒を含む混合冷媒、高沸点 HFO 系冷媒の熱物性、伝熱特性及びヒートポンプサイクル性能を評価する。	本研究では、ターボ圧縮式の中型から大型冷凍空調機器用次世代冷媒として新冷媒 HCFO1224yd(Z)、HFO1336mzz(E)、3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO ₂ 系、日本初の国産冷媒である HFO1123 を成分物質に含む3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+HFO1123 に注目して、新規低 GWP 混合冷媒を中小型空調機器用冷媒として使用するための熱物性、伝熱特性、及びサイクル特性に関する基礎技術を構築することを目的として、下記の研究項目を実施した。	○
(1)HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の熱物性評価		
①臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定 ②気液平衡性質の測定 ③高温 PVT _x 性質及び定圧比熱の測定 ④表面張力の測定 ⑤音速の測定 ⑥状態方程式の開発 ⑦輸送的性質の測定及びモデル化	・沸点の高い HFO 系冷媒 HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)、そして3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO ₂ 及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 における PVT 性質、飽和密度、飽和蒸気圧、臨界定数を高精度で測定した。 ・HFC32+HFO1234yf 系および HFO1123+HFO1234yf 系混合冷媒の気液平衡性質を測定し、PR-MC 状態方程式を相関した。また、HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系混合冷媒の測定準備を実施した。 ・PVT _x 性質は、HCFO1224yd(Z)の純成分ならびに HFC32+HFO1234yf の 2 成分系は 3 組成で、HFO1336mzz(E)+ HFO1336mzz(Z)の 2 成分系は 1 組成で、HFC32+HFO1234yf+CO ₂ の 3 成分系は 2 組成で測定をおこなった。定圧比熱測定は、装置を製作し、完成した。 ・表面張力は、HFO1336mzz(E)と HFO1336mzz(Z)、そして三成分系の混合冷媒 R455A (HFO1234yf/HFC32/CO ₂ : 75.5/21.5/3.0 mass%) 及び HFO1123/HFC32/HFO1234yf (65.0/24.0/11.0 mass%) に対し測定を行った。さらに-40°Cまでの低温域を測定できるよう装置の改良を行い、順次低温の補足データを取得した。 ・HFO1336mzz(E)及び HFO1336mzz(Z)の音速データを取得し、それぞれの理想気体比熱を求め、状態式開発に必要な温度相関式を作成した。また、2成分系混合冷媒 R454C の音速データを取得した。 ・HFC32+HFO1234yf+CO ₂ 系及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系の3成分系混合冷媒、単一冷媒 HFO1336mzz(E)及び HCFO1224yd(Z)の状態方程式を作成し、REFPROP で計算できるようにした。 ・単一冷媒 HFO1234yf および HFO1336mzz(E)の、圧縮液及び過熱蒸気域における熱伝導率および粘度データを取得するとともに理論計算モデル(ECS モデル)との比較を行った。	○
(2)HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒の伝熱特性評価		
①プレート式熱交換器内の伝熱特性評価 ②扁平多孔管内の伝熱特性評価 ③円管内の伝熱特性評価 ④水平円管外の伝熱特性評価 ⑤伝熱データベースの構築	・単一冷媒 HFO1234yf 及び HFC32 のプレート式熱交換器内局所蒸発・凝縮熱伝達率の測定を行い、熱伝達特性の把握及び既存冷媒データとの比較検討を行った。 ・扁平多孔管内における純冷媒 HFC32、HFO1234yf、HFO1336mzz(E)及び 2 成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf の凝縮・蒸発熱伝達特性を評価するとともに、3 成分系混合冷媒 HFC3122+HFO1234yf+CO ₂ の凝縮熱伝達特性を評価し	○

	<p>た。また、扁平多孔管内における純冷媒の沸騰熱伝達率の予測式を新たに提案した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・らせん溝付き円管内における、HFO1224yd(Z)の蒸発熱伝達特性、そして R455A (HFO1234yf/HFC32/CO₂:75.5/21.5/3.0 mass%)の凝縮・蒸発熱伝達特性を測定し、以前取得した HFC32 と HFO1123/HFC32(40/60mass%)の結果と比較を行った。 ・HFO1336mmz(E)の 管外凝縮熱伝達率を測定し、ヌセルトの液膜理論より算出した理論値と比較を行い、状態方程式の妥当性を検討した。 	
(3)HFO 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HFO 系冷媒のヒートポンプサイクル性能評価		
<p>①ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析 ②ヒートポンプサイクル特性の実験的評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・HFO1234yf+HFC32+CO₂ 系混合冷媒の熱力学的解析を実施した。また、解析に圧力損失および熱交換器性能を導入中である。 ・3 成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO₂ 及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 について GWP が約 150 となる混合比、ならびに GWP が約 120 となる HFC32+HFO1234yf+HFO1123 の混合比について実験を実施し、COP 等の性能指標を計測した。その結果、冷暖房熱負荷及び熱源運転条件がサイクル性能に与える影響を明らかにした。各要素機器の特性がサイクル性能に与える影響について 2020 年度中に整理する予定である。 	○

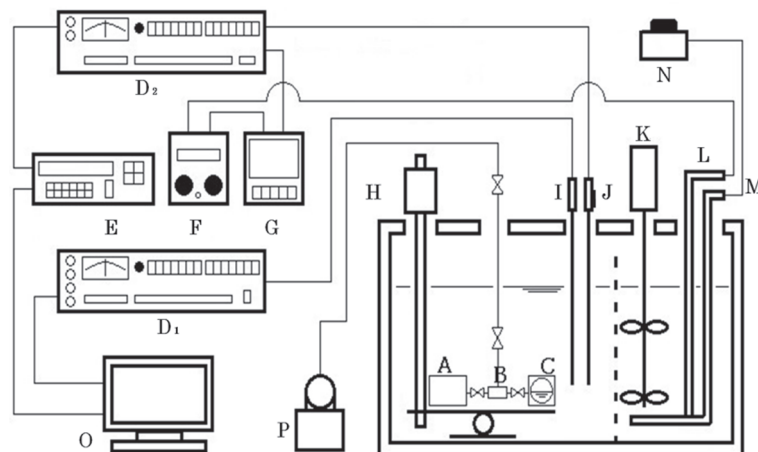
【 ◎:計画以上、○:計画通り(目標達成又は達成見込み)、△:ほぼ計画通り(一部未達)、×:目標未達 】

2.1.1.1 HF0 系冷媒を含む混合冷媒及び高沸点 HF0 系冷媒の熱物性評価

2.1.1.1.1 臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定(担当:九州大学)

(a) 臨界域における飽和液体および飽和蒸気密度の測定

本実験では、臨界域近傍の飽和液体密度および飽和蒸気密度を、メニスカス(気液界面)の消滅を肉眼で直接観察して決定する方法で行った。測定装置概要図を図 2.1.1.1.1-a1 に示す。



- (A) 試料供給容器; (B) 膨張容器; (C) 窓付き圧力容器; (D₁, D₂) 交流測温ブリッジ;
(E) デジタルマルチメーター; (F) 電圧変換器; (G) PID コントローラー (H) 揺動装置;
(I, J) 25Ω 標準白金抵抗測温体; (K) 攪拌機; (L) 300W ヒーター; (M) 1.5 kW ヒーター;
(N) 電圧調整器; (O) コンピュータ; (P) 真空ポンプ。

図 2.1.1.1.1-a1 メニスカスの消滅の観察による飽和密度測定および臨界定数測定装置概要図

測定装置主要部は、純物質及び混合物を初期充填するための SUS 314 製円筒形の試料供給容器、同じく SUS 314 製円筒形の圧力容器で、密度設定を変更するときに試料を膨張して密度を変化させることができるように付加された膨張容器、そして試料のメニスカスの消滅の挙動が外部から観察できるように、パイレックスガラス製の覗き窓を設けた圧力容器から構成される。3つの圧力容器は配管と高圧弁で接続され、揺動装置に設置された状態で、シリコンオイルを熱伝熱媒体に用いた液体恒温槽内に設置される。3つの圧力容器の内容積は、配管部および高圧弁の接続部まで含めて、純水を用いて測定されており、その値はそれぞれ $77.575 \pm 0.016 \text{ cm}^3$ 、 $8.949 \pm 0.003 \text{ cm}^3$ 、 $11.638 \pm 0.008 \text{ cm}^3$ である。液体恒温槽は、高温での温度制御に用いる 1.5 kW ヒーターと、放熱量の補充を目的とした 300 W ヒーターで加熱され、300W ヒーターには PID 制御機構が導入されている。温度測定は 25Ω 標準白金抵抗測温体(チノー製 R800-2)を用いて行い、ITS-90 に準拠して算出した。温度測定誤差は、白金抵抗測温体の確度及び測定温度安定時の温度のばらつきを考慮して、 $\pm 10 \text{ mK}$ 以内と推定した。密度の値に関しては、3つの圧力容器のそれぞれの内容積の値と試料質量から、膨張システムを組み合わせる方法により、計算から求めた。設定密度の値は、膨張回数が増すほど、密度測定精度が低下するので、最大でも 0.3 % 以上の不確かさが生じないように、膨張回数で制限を加えて実施した。

本研究における測定対象冷媒は、単一冷媒の HCFO1224yd(Z)[AGC 社製、純度 99.25 %]及び HFO1336mzz(E) [Chemours 社製、純度 99.9 %]、そして3種類の3成分系混合冷媒の R455A[Honeywell 社製、HFC32/HFO1234yf/CO₂; 21.5/75.5/3.0 mass%]、Amolea R150Y4 [AGC 社製、HFC32/HFO1234yf/ HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%]、Amolea R150Y5 [AGC 社製、HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.3/38.5/ 40.2 mass%]である。

HCFO1224yd(Z)に関しては、温度範囲 408.745 K~428.690 K、密度範囲 $297.0 \text{ kg/m}^3 \sim 930.0 \text{ kg/m}^3$ で 10 点の実測値を得ることができた。測定結果を図 2.1.1.1.1-a2 に示す。

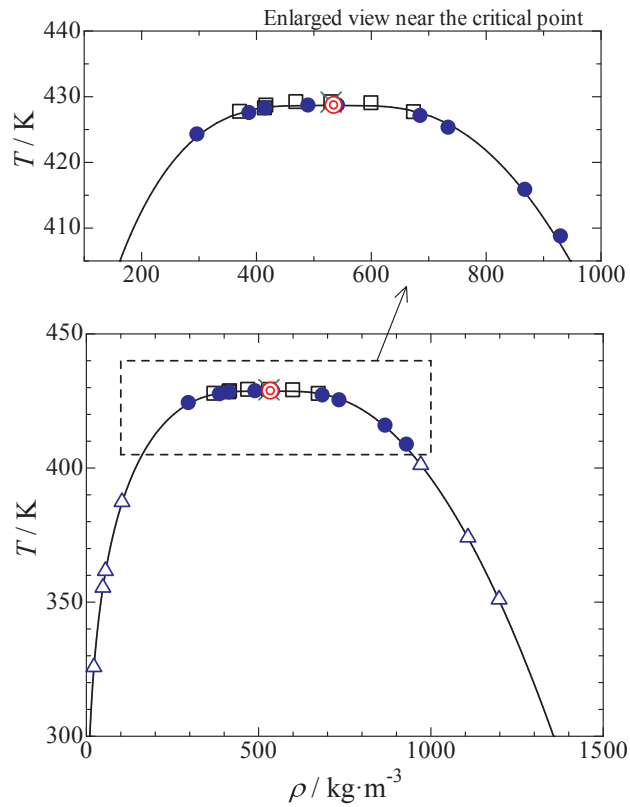


図 2.1.1.1.1-a2 HCFO1224yd(Z) の臨界点近傍における飽和密度。
 ●: メニスカスの消滅から決定した本実測値、△: PVT 測定の
 等容線の折れ曲がりから決定した飽和密度、◎: 臨界点、
 実線: 本プロジェクトで赤坂により作成された状態式からの計算結果。

HFO1336mzz(E)に関しては、温度範囲 391.785 K~403.527 K、密度範囲 218.0 kg/m³~802.3 kg/m³ で 14 点の実測値を得ることができた。測定結果を図 2.1.1.1.1-a3 に示す。

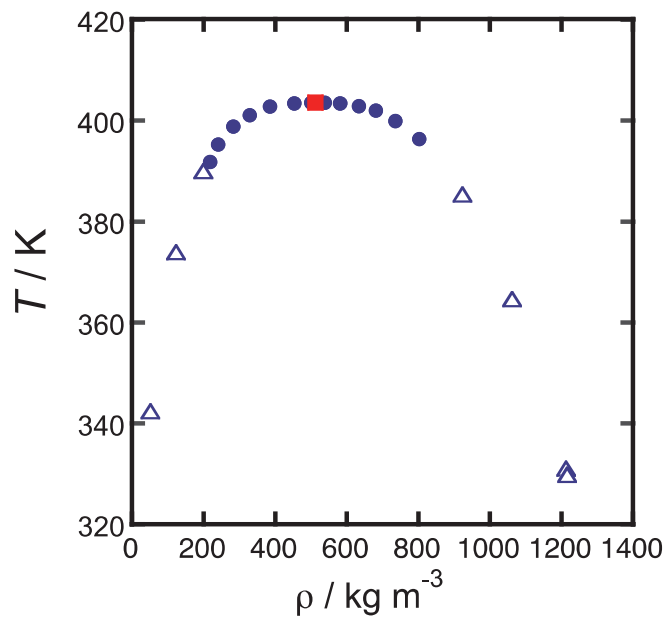


図 2.1.1.1.1-a3 R455A の臨界点近傍における飽和密度。
 ●: メニスカスの消滅から決定した本実測値、△: PVT 測定の
 等容線の折れ曲がりから決定した飽和密度、■: 臨界点、

3成分系混合冷媒 R455A [HFC32/HFO1234yf/CO₂; 21.5/75.5/3.0 mass%]に関しては、温度範囲 340.024 K ~ 357.608 K, 密度範囲 188.9 kg/m³ ~ 813.2 kg/m³ で 16 点の実測値を得ることができた。測定結果を図 2.1.1.1.1-a4 及び図 2.1.1.1.1-a5 に示す。

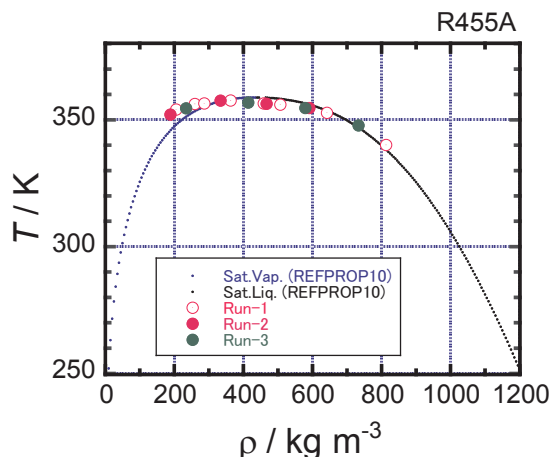


図 2.1.1.1.1-a4 R455A の臨界点近傍における飽和密度の実測値

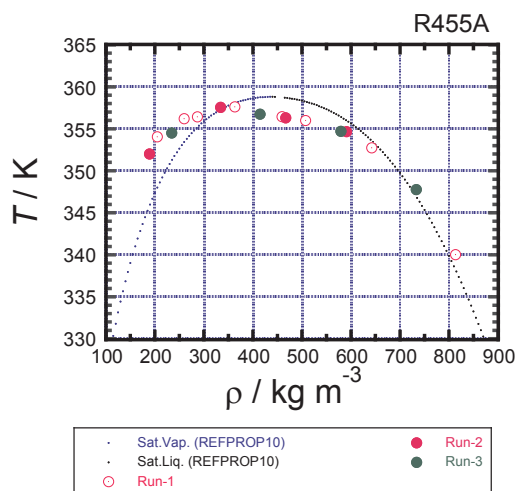


図 2.1.1.1.1-a5 R455A の臨界点近傍における飽和密度(T = 300 K 以上の温度)

3成分系混合冷媒 Amolea R150Y4 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%] 及び Amolea R150Y5 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.3/38.5/ 40.2 mass%]に関しては、温度範囲がそれぞれ 332.546 K ~ 340.399 K 及び 322.087 K ~ 347.392 K, 密度範囲 193.4 kg/m³ ~ 862.4 kg/m³ 及び 227.4 kg/m³ ~ 901.0 kg/m³ で 20 点及び 18 点の実測値を得ることができた。測定結果の分布を、この2つの冷媒は成分が同じで、組成が異なる3成分系混合冷媒なので、図 2.1.1.1.1-a6 に1つの図としてまとめて示す。

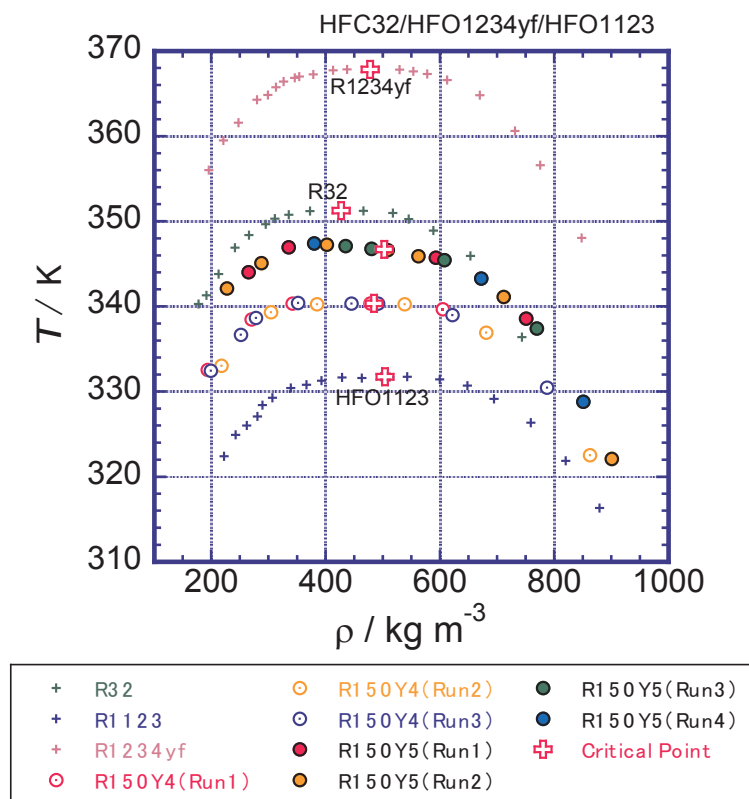


図 2.1.1.1.1-a6 HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系混合冷媒の臨界点近傍における飽和密度の実測値

これらの実験において、メニスカスの消滅位置及び臨界タンパク光の着色の様子から、臨界温度と臨界密度を決定した。臨界圧力に関しては、後述する PVT 測定結果を利用し、臨界密度に設定して試料充填した PVT

性質測定装置において、臨界温度における圧力を実測して測定した。この方法で、単一冷媒のみならず、多成分系混合冷媒の臨界定数も実験から決定できる。現状、混合冷媒の臨界定数を実測する測定装置は、世界中で本測定装置のみである。HCFO1224yd(Z)、HFO1336mzz(E)、R455A、Amolea R150Y4、Amolea R150Y5 の臨界定数の値を以下に示す。

【HCFO1224yd(Z)の臨界定数】

$$T_c = 428.69 \pm 0.02 \text{ K}, \quad (2.1.1.1.1-1)$$

$$\rho_c = 535 \pm 5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, \quad (2.1.1.1.1-2)$$

$$P_c = 3331 \pm 3 \text{ kPa}. \quad (2.1.1.1.1-3)$$

【HFO1336mzz(E)の臨界定数】

$$T_c = 403.53 \pm 0.01 \text{ K}, \quad (2.1.1.1.1-4)$$

$$\rho_c = 513 \pm 3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, \quad (2.1.1.1.1-5)$$

$$P_c = 2779 \pm 2 \text{ kPa}. \quad (2.1.1.1.1-6)$$

【R455A [HFC32/HFO1234yf/CO₂; 21.5/75.5/3.0 mass%]の臨界定数】

$$T_c = 356.40 \pm 0.05 \text{ K}, \quad (2.1.1.1.1-7)$$

$$\rho_c = 460 \pm 3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, \quad (2.1.1.1.1-8)$$

$$P_c = 4536 \pm 5 \text{ kPa}. \quad (2.1.1.1.1-9)$$

【Amolea R150Y4 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%]の臨界定数】

$$T_c = 340.36 \pm 0.01 \text{ K}, \quad (2.1.1.1.1-10)$$

$$\rho_c = 485 \pm 3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, \quad (2.1.1.1.1-11)$$

$$P_c = 4796 \pm 2 \text{ kPa}. \quad (2.1.1.1.1-12)$$

【Amolea R150Y5 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.3/38.5/40.2 mass%]の臨界定数】

$$T_c = 346.48 \pm 0.02 \text{ K}, \quad (2.1.1.1.1-13)$$

$$\rho_c = 503 \pm 5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}, \quad (2.1.1.1.1-14)$$

$$P_c = 4647 \pm 5 \text{ kPa}. \quad (2.1.1.1.1-15)$$

(b) 飽和蒸気圧及び PVT(圧力-密度-温度)性質の測定

単一冷媒に関する飽和蒸気圧、単一冷媒及び混合冷媒に関する PVT(圧力-比体積[逆数は密度]-温度)性質は、等容法により測定した。実験装置概要図を図 2.1.1.1.1-b1 に示す。

配管系を含めた内容積の値を、標準流体として HFC32 および R134a を用いて事前に正確に測定した試料圧力容器に、質量を測定した試料を充填する。充填質量の値と容器の内容積から流体の密度を算出し、その時の温度と、その温度に対応する圧力をそれぞれ精密に計測することで、PVT 性質が等容線として測定できる。圧力は水晶共振式圧力センサー (Paroscientific 社製 42K-101)で、温度は 25 Ω 標準白金抵抗測温体 [チノー製 R800-2]で測定した。密度に関しては、前述のとおり、温度変化に対応する補正を考慮した容器内容積と、試料質量から算出した。なお、冷媒試料の質量は天秤では直接測定できないので、あらかじめ別な圧力容器に目標とする量の冷媒試料を充填し、秤量する。その冷媒試料を、測定装置本体に接続する試料圧力容器に液体窒素を用いて凝集し、空体になった圧力容器を秤量し、凝集前後の差をもって充填された冷媒試料の質量を算出した。本研究における温度測定精度は、白金抵抗測温体の確度が 1mK 以内、温度安定を十分確保して測定した時の恒温槽内の熱媒体の温度分布のばらつきが 3 mK 以内であることを考慮し、5 mK ($k=2$)

以内と見積もった。圧力測定に関しては、測定時の圧力のばらつきが±0.3 kPa 以内に十分安定させたのち測定しており、圧力センサーの振動数を圧力に変換する相関式の信頼性も考慮して、総合して 1kPa ($k=2$)以内と見積もった。充填質量と内容積から算出する密度に関しては、事前に行う内容積の決定精度がもっとも影響し、少し大きめに推定して± 0.15 % 以内とした。なお、本研究で使用した冷媒試料は、臨界域における飽和密度測定で使用した試料と同じである。

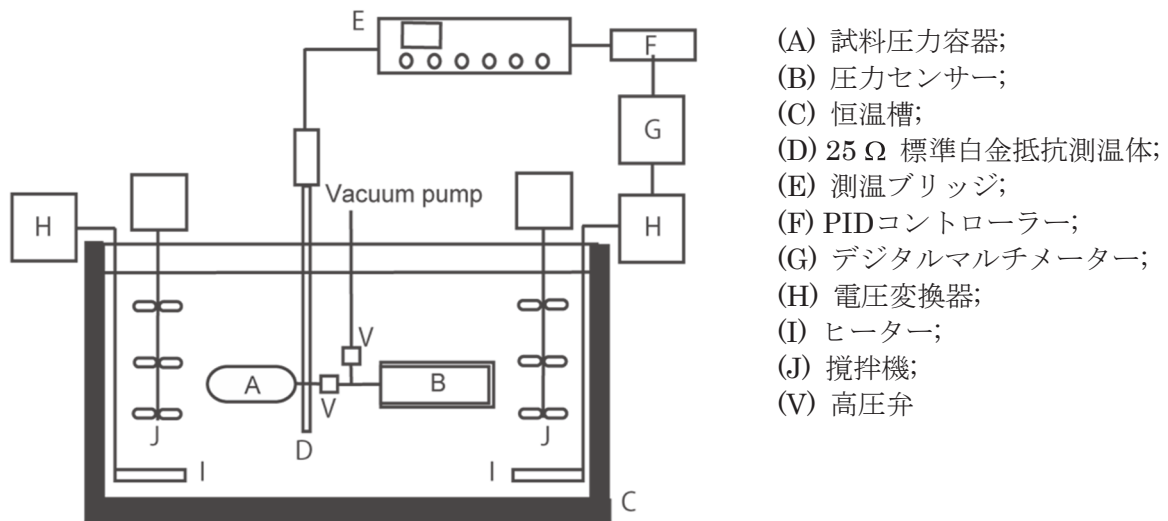


図 2.1.1.1.1-b1 等容法による PVT(圧力-密度-温度)性質測定装置

HCFO1224yd(Z)の飽和蒸気圧に関しては、温度 310.000 K から 410.000 K の範囲で、15 点の実測値が得られた。得られた実測値から、本研究で決定した臨界温度の値を用いて、飽和蒸気圧相関式を以下の温度の関数式として作成した。

$$\ln P = \ln P_c + (T_c/T)(A\tau + B\tau^{1.5} + C\tau^{2.5} + D\tau^5) \quad (2.1.1.1.1-16)$$

ここで、臨界温度 T_c は式(2.1.1.1.1-1)の値である 428.69 K を用いた。臨界圧力 P_c に関しては、臨界密度に設定して試料充填した PVT 性質測定装置において、臨界温度における圧力を実測して測定した値 $P_c = 3331$ kPa を用いた。これらの臨界定数を用いて、式 (2.1.1.1.1-16) に本実測値をフィッティングした。式 (2.1.1.1.1-16) の最適パラメータとしての係数値は、HCFO1224yd(Z)に関しては $A = -7.58327$, $B = 1.6846$, $C = -2.5296$, $D = -4.6136$ である。

HCFO1224yd(Z)の PVT 性質に関しては、温度範囲 330.000 K から 420.000 K、密度範囲 22 kg/m³ から 1198 kg/m³、圧力範囲 6407 kPa 以下で 7 本の等容線に沿って、合計 46 点の実測値を得ることができた。実測値の分布は P - T 線図上で図 2.1.1.1.1-b2 にまとめた。

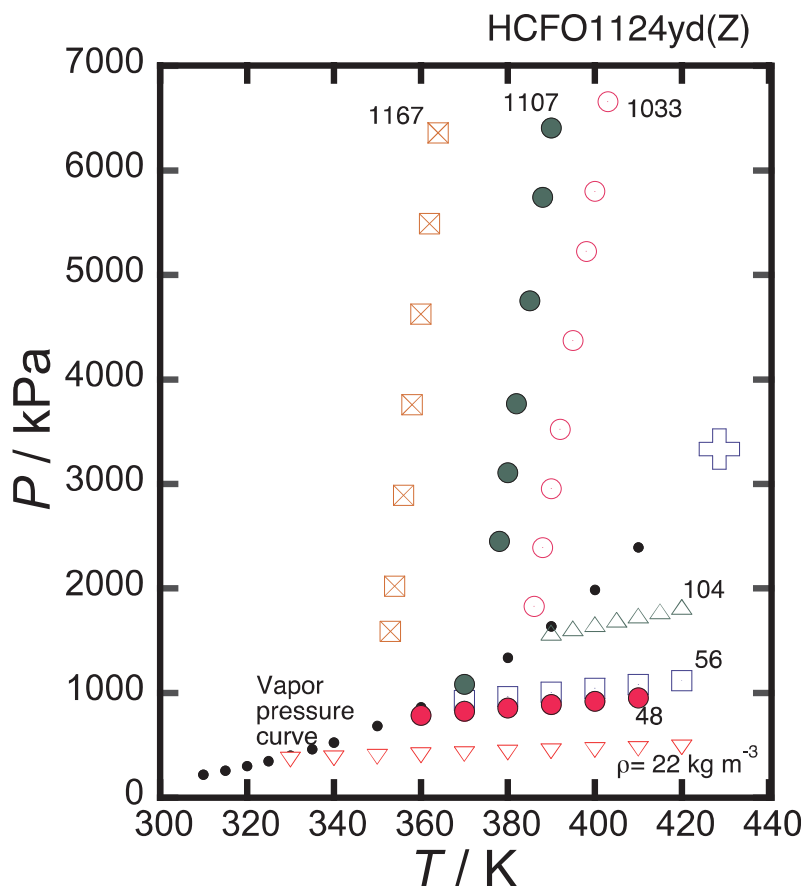


図 2.1.1.1.1-b2 HCFO1124yd(Z) の PVT 性質実測値の分布

HFO1336mzz(E)の飽和蒸気圧に関しては、温度 286.923 K から 403.530 K (=臨界温度) の範囲で、26 点の実測値が得られた。得られた実測値及び本研究で決定した臨界温度の値を用いて、飽和蒸気圧相関式を、前述の式 (2.1.1.1.1-16) と同じく、温度の関数として作成した。HFO1336mzz(E)に関する式 (2.1.1.1.1-16) の係数は、 $A = -8.0615$ 、 $B = 1.9843$ 、 $C = -3.59496$ 、 $D = -3.2263$ であり、臨界温度 T_c は式 (2.1.1.1.1-1) の値である 403.53 K を用いた。臨界圧力 P_c に関しては、臨界密度に設定して試料充填した PVT 性質測定装置において、臨界温度における圧力を実測して測定した値 $P_c = 2779$ kPa を用いた。これらの臨界定数を用いて、式 (2.1.1.1.1-16) に本実測値をフィッティングし、式 (2.1.1.1.1-16) において使用する最適パラメータを決定している。

HFO1336mzz(E)の PVT 性質に関しては、温度範囲 333.000 K から 410.000 K、密度範囲 52 kg/m³ から 1215 kg/m³、圧力範囲 5680 kPa 以下で、7 本の等容線に沿って、合計 39 点の実測値を得ることができた。実測値の分布は、P-T 線図上で図 2.1.1.1.1-b3 にまとめた。

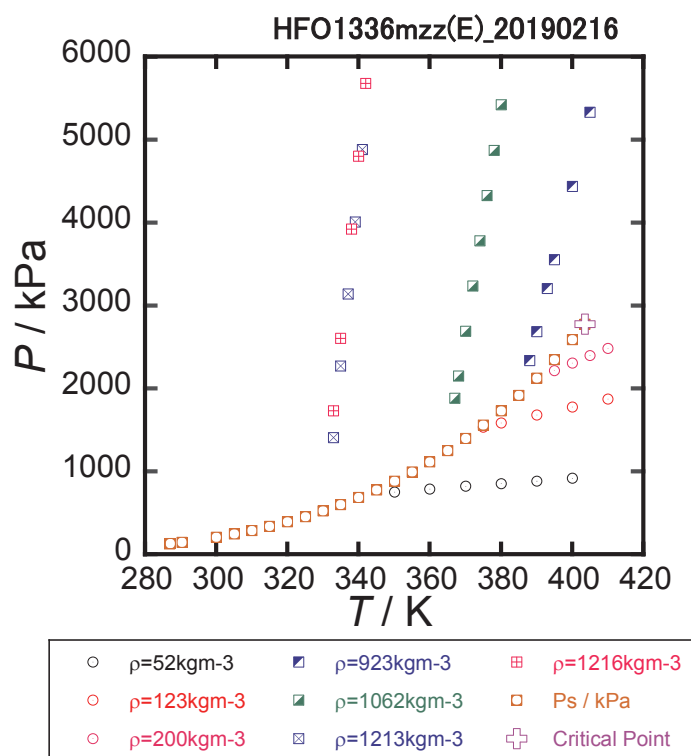


図 2.1.1.1.1-b3 HFO1336mzz(E) の PVT 性質実測値の分布

R455A[HFC32/HFO1234yf/CO₂; 21.5/75.5/3.0 mass%]の PVT 性質に関しては、1相域、2相域合わせて、温度範囲 300.000 K から 420.000 K、密度範囲 60 kg/m³ から 917 kg/m³、圧力範囲 6571 kPa 以下で 7 本の等容線に沿って、合計 75 点の実測値を得ることができた。実測値の分布は、P-T 線図上で図 2.1.1.1.1-b4 にまとめた。

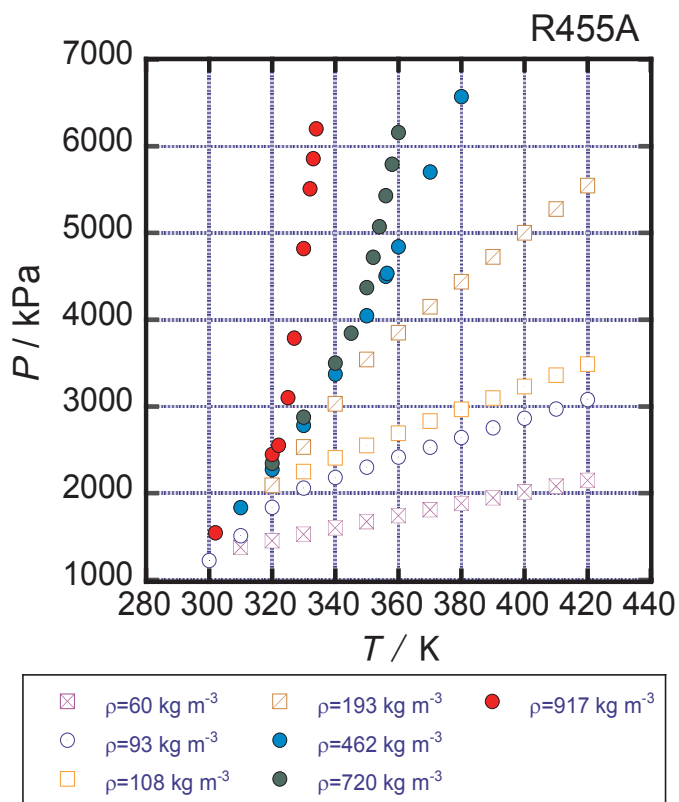


図 2.1.1.1.1-b4 R455A[HFC32/HFO1234yf/CO₂; 21.5/75.5/3.0 mass%] の PVT 性質実測値の分布

近年、混合冷媒の利用が増えてきているが、実験的に高精度の熱物性計測はほとんど行われていない。現状、混合冷媒の計算における国際標準となってきた NIST の熱物性計算ソフトウェア REFPROP（最新版が Version 10.0）での計算に頼っている場合が多く、実際の計算においても、基本的には2成分系混合物の気液平衡データに合わせて最適化されたものか、2成分系混合物の気液平衡データが存在しない混合系では、完全に推算値となっている。そのため、今回の測定結果は、REFPROP の評価を行うことも重要なテーマであり、まさに国際基準を確立するための研究となっている。

REFPROP 10.0 の計算結果を基準に取り、本実測値の絶対圧力偏差、相対圧力偏差、絶対密度偏差、相対密度偏差を、図 2.1.1.1.1-b5 から図 2.1.1.1.1-b8 に示す。圧力偏差に関しては高密度データ、密度偏差に関しては臨界点近傍のデータにおいて、偏差が大きくなるのは物理的に仕方ないと考えられる必要がある。なお、REFPROP での計算に関しては、最新版での計算が推奨される。

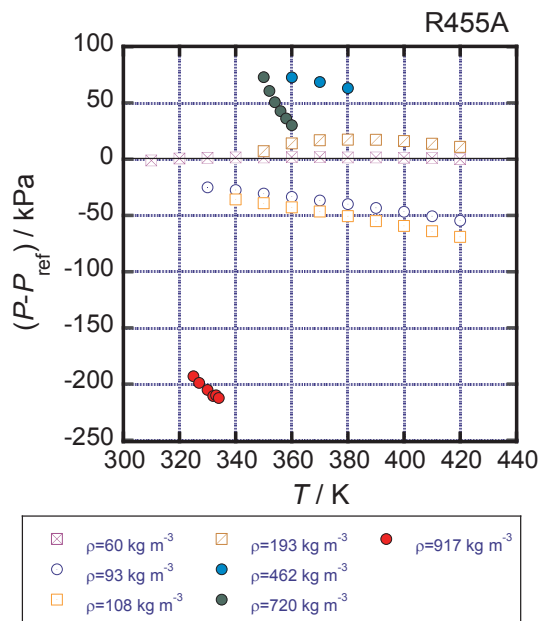


図 2.1.1.1.1-b5 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

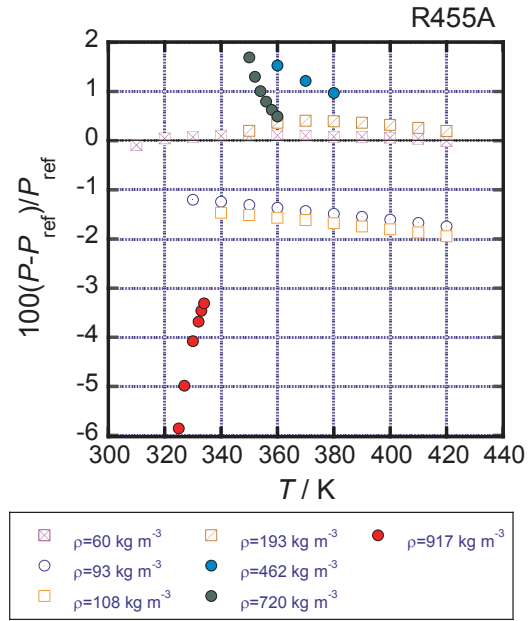


図 2.1.1.1.1-b6 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

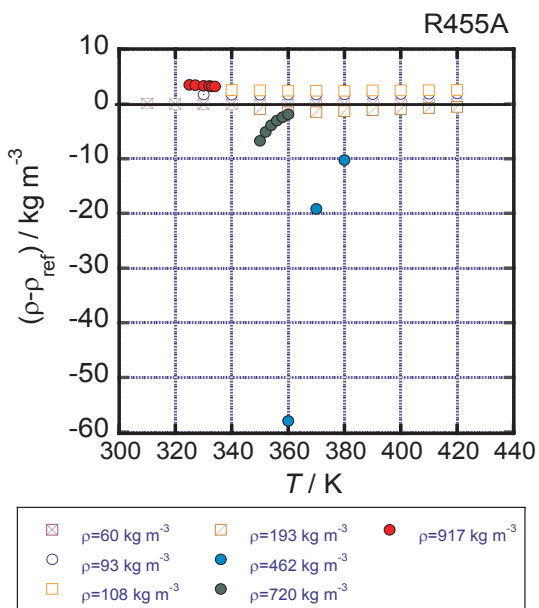


図 2.1.1.1.1-b7 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

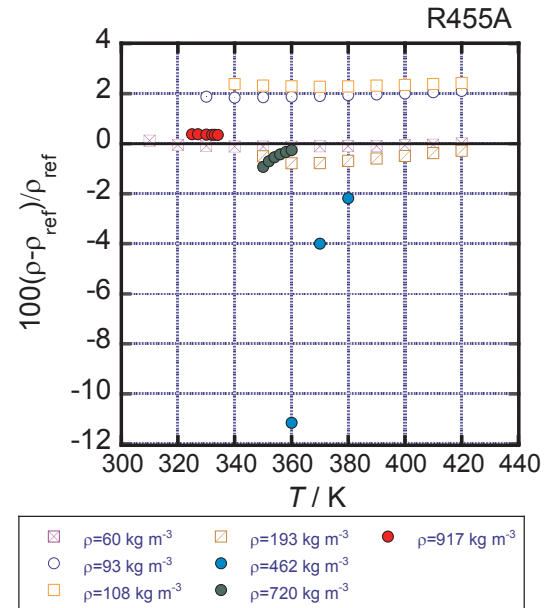


図 2.1.1.1.1-b8 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

Amolea R150Y4 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%]のPVT性質に関しては、1相域、2相域合わせて、温度範囲 300.000 K から 410.000 K、密度範囲 49 kg/m³ から 906 kg/m³、圧力範囲 6825 kPa 以下で8本の等容線に沿って、合計74点の実測値を得ることができた。実測値の分布は、P-T線図上で図2.1.1.1.1-b9にまとめた。

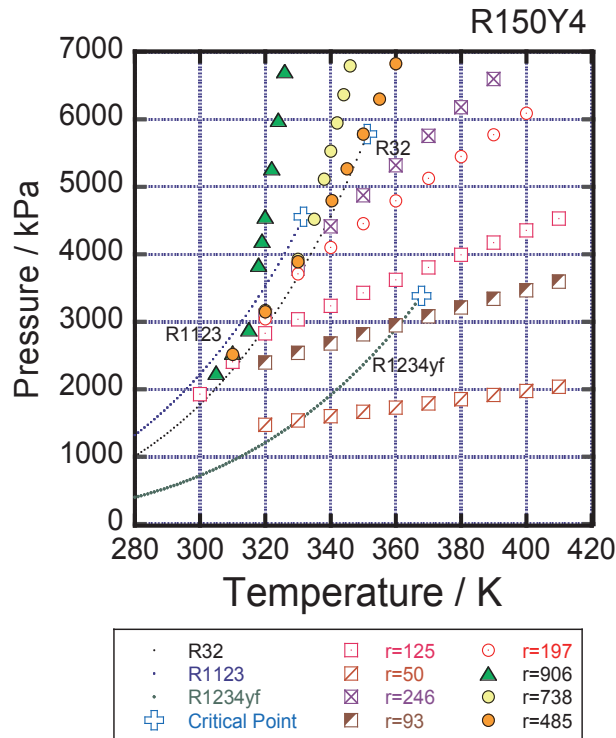


図 2.1.1.1.1-b9 Amolea R150Y4 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%] の PVT 性質実測値の分布

REFPROP 10.0 の計算結果を基準に取り、Amolea R150Y4 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%]に関する本実測値の絶対圧力偏差、相対圧力偏差、絶対密度偏差、相対密度偏差を、図 2.1.1.1.1-b10 から図 2.1.1.1.1-b13 に示す。全体的に正の圧力偏差、負の密度偏差という偏った偏差の傾向が出ており、その絶対値のかなり大きい。HFO1123 の熱物性の解明がまだ完全とは言えず、気液平衡データも不足しているので、まだまだ状態式にも改善の余地があると言える。

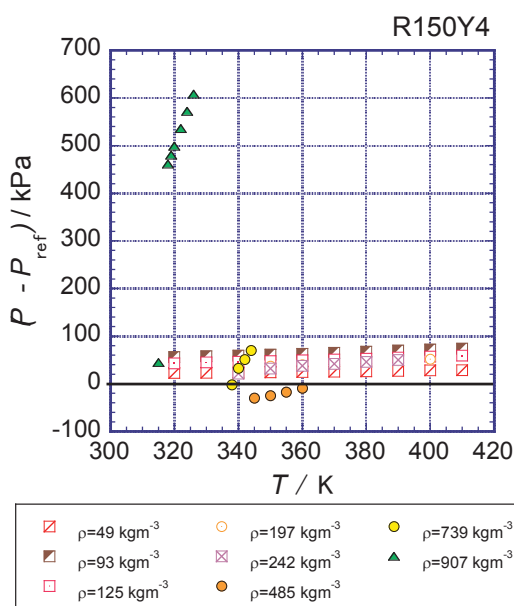


図 2.1.1.1.1-b10 Amolea R150Y4 における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

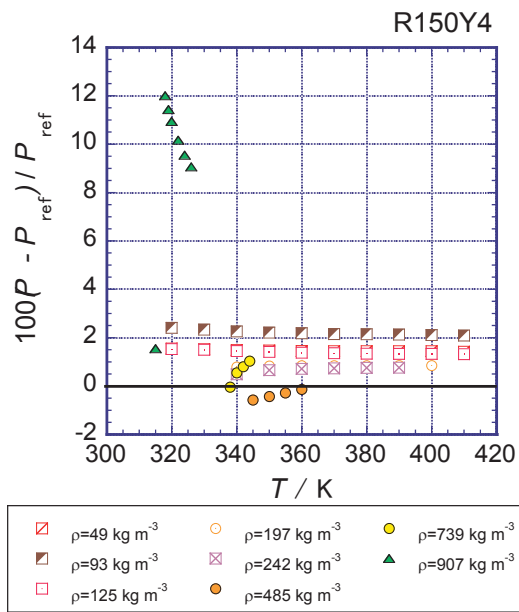


図 2.1.1.1.1-b11 Amolea R150Y4 における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

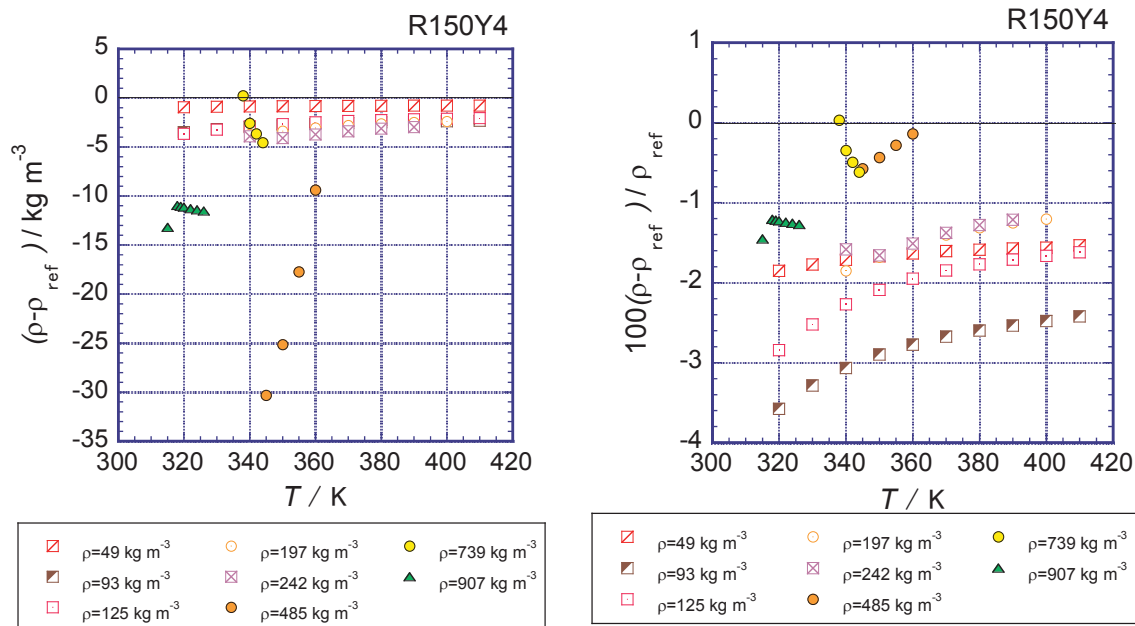


図 2.1.1.1.1-b12 Amolea R150Y4 における
本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対密度偏差

図 2.1.1.1.1-b13 Amolea R150Y4 における
本実測値の REFPROP 10.0 からの相対密度偏差

Amolea R150Y5 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/38.5/40.3 mass%]の PVT 性質に関しては、1相域、2相域合わせて、温度範囲 300.199 K から 410.000 K、密度範囲 43 kg/m³ から 880 kg/m³、圧力範囲 6790 kPa 以下で 7 本の等容線に沿って、合計 68 点の実測値を得ることができた。実測値の分布は、P-T 線図上で図 2.1.1.1.1-b14 にまとめた。

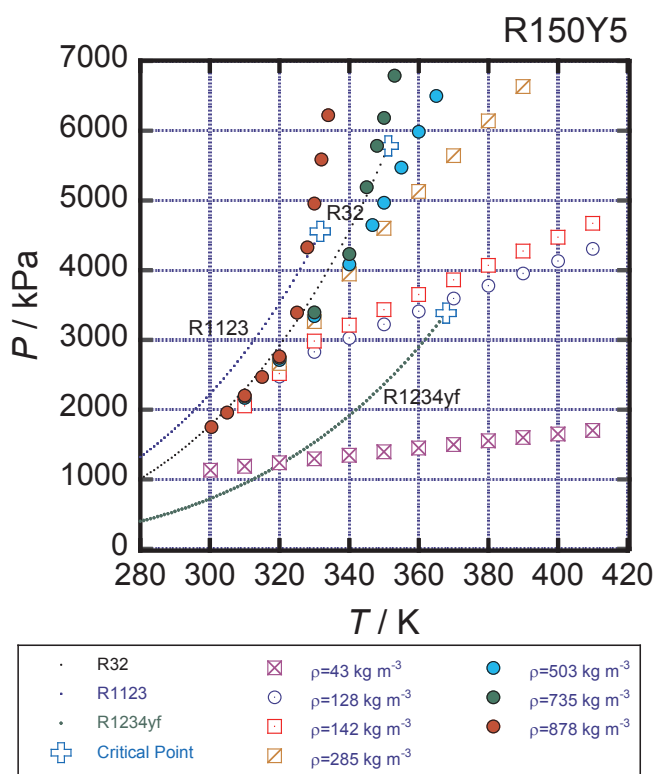


図 2.1.1.1.1-b14 Amolea R150Y5 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/38.5/40.3 mass%]の
PVT 性質実測値の分布

REFPROP 10.0 の計算結果を基準に取り、Amolea R150Y4 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%]に関する本実測値の絶対圧力偏差、相対圧力偏差、絶対密度偏差、相対密度偏差を図 2.1.1.1.1-b15 から図 2.1.1.1.1-b18 に示す。全体的に正の圧力偏差、負の密度偏差という偏った偏差の傾向が出ており、その絶対値のかなり大きい。HFO1123 の熱物性の解明がまだ完全とは言えず、気液平衡データも不足しているので、まだまだ状態式にも改善の余地があると言える。

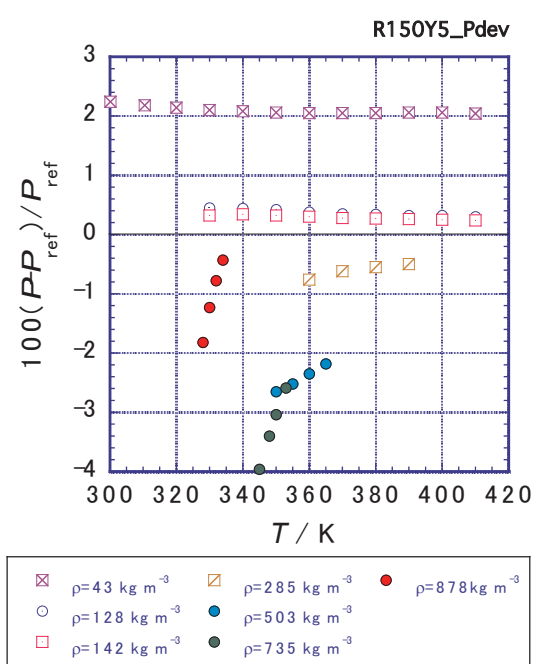
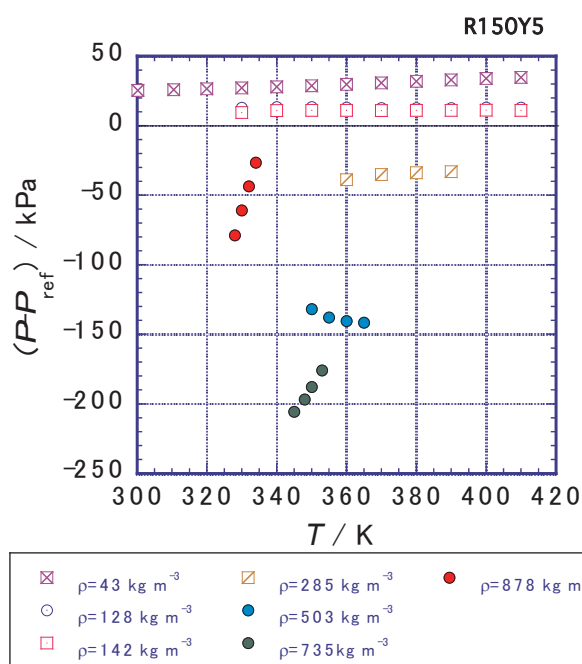


図 2.1.1.1.1-b15 Amolea R150Y5における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

図 2.1.1.1.1-b16 Amolea R150Y5における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

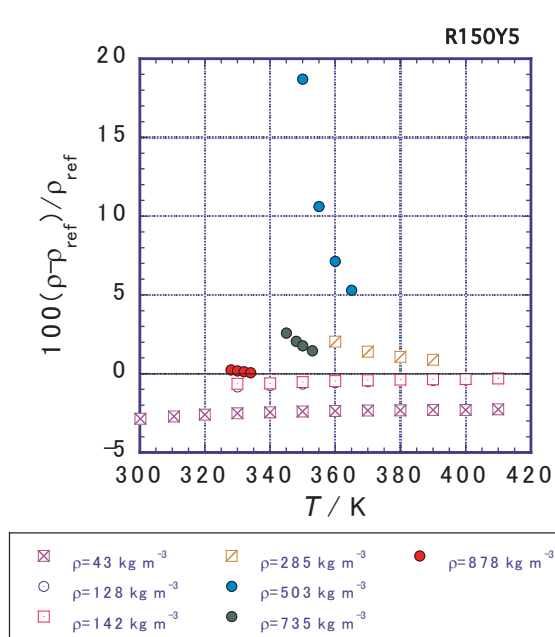
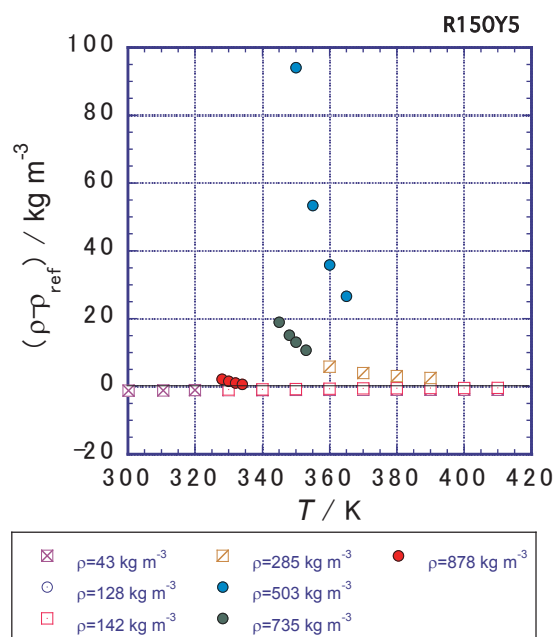


図 2.1.1.1.1-b17 Amolea R150Y5における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対密度偏差

図 2.1.1.1.1-b18 Amolea R150Y5における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対密度偏差

2.1.1.1.2 気液平衡性質の測定 (担当：富山県立大学)

これまでの成果としては、予定していた 2 成分系混合物 (HFC32+HFO1123*、HFC32+HFO1234yf、および HFO1123+HFO1234yf、*HFC32+HFO1123 混合系については本研究による精度向上後の再測定結果) の気液平衡性質測定を計画通り実施し、高精度な気液平衡性質実測値を得た。続いて、本実測値と既存の Helmholtz 関数型状態方程式 (REFPROP ver. 10.0 の標準式) との系統偏差を明らかにした。

さらに、本実測値に修正型 Peng-Robinson 状態方程式 (Mathias と Copeman によるアルファ関数を適用、以後 PR-MC 式と略記) を相関した。2020 年度には、PR-MC 式を上記すべての 2 成分系混合物について完成させるとともに、3 成分系混合物の推算結果から適切な実験計画を立案し、計画通り 3 成分系混合物 (HFC32+HF01234yf+HF01123) に関する気液平衡性質および付随する $P\rho T x$ 性質を、状態方程式の開発に必要な領域について実施する予定である。

詳細を以下に報告する。はじめに本予算を活用し、本測定で用いる再循環型気液平衡性質測定装置 (AKICO 社製) の改良を行い、温度測定精度について約 20 倍、圧力測定精度について約 10 倍の精度向上が達成できた。続いてモル分率測定について、校正に不可欠な検量線を、自前でサンプルを調合して得た数点の校正値に基づき作成し、信頼性を確立した。検量線データの一部を図 2.1.1.1.2-1 に、作成した検量線の式を式 (2.1.1.1.2-1) に、それぞれ示す。独立して得られた九州大学の実測値と、極めて良好に一致していることが、確認できる。

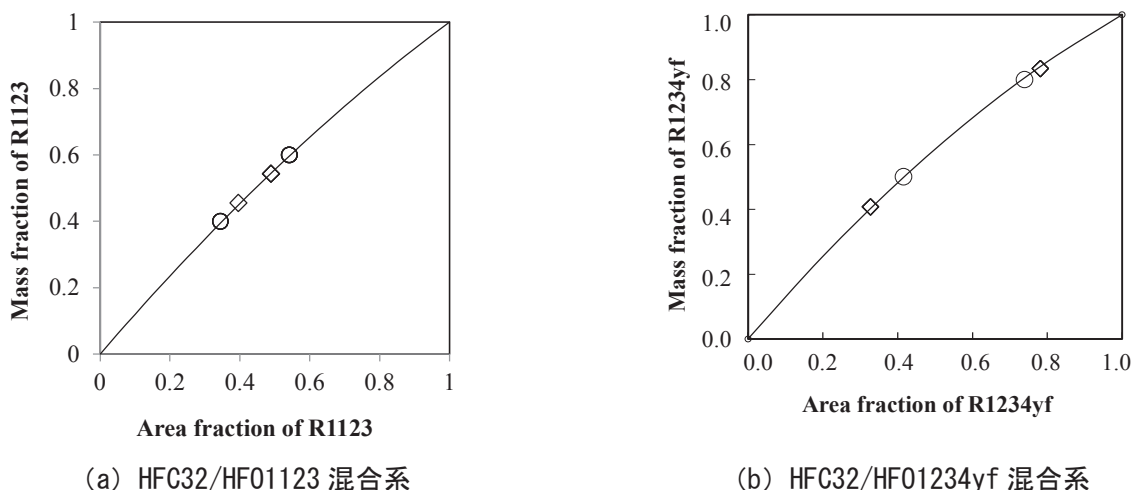
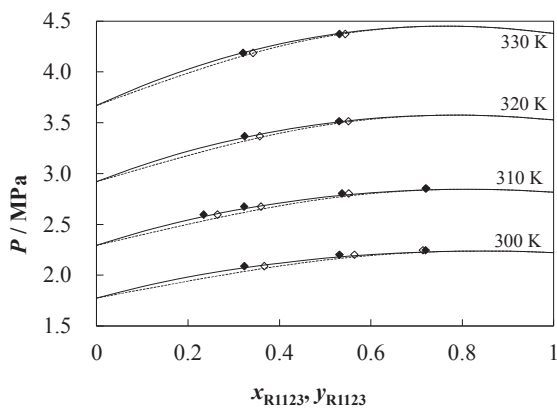


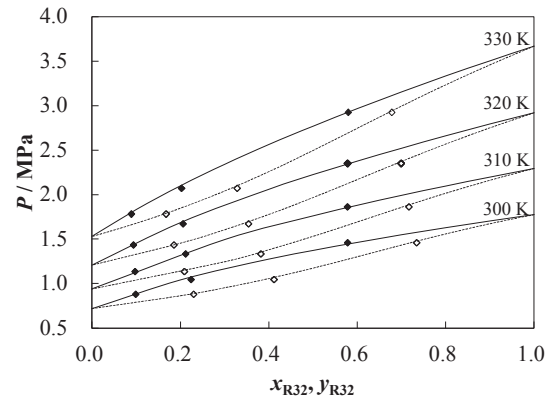
図 2.1.1.1.2-1 本研究で作成した検量線および校正値の分布. ◇ : 本実測値、○ : 九州大学

$$M_{\text{comp } 1} = A_{\text{comp } 1} + a \times A_{\text{comp } 1} (1 - A_{\text{comp } 1}) \quad (2.1.1.1.2-1)$$

続いて、気液平衡性質の測定結果を報告する。本研究ではこれまでに、HFC32+HF01123 混合系について温度 300~330 K、圧力 2.0~4.4 MPa、およびモル分率 0.3~0.8 (HFC32) の範囲において計 28 点、HFC32+HF01234yf 混合系について温度 300~330 K、圧力 0.9~2.9 MPa、およびモル分率 0.1~0.9 (HFC32) の範囲において計 56 点、および HF01123+HF01234yf 混合系について温度 300~330 K、圧力 1.3~3.3 MPa、およびモル分率 0.2~0.6 (HF01234yf) の範囲において計 32 点の実測値を得た。なお、拡張不確かさ ($k=2$) は、いずれも温度測定について 0.03 K、圧力測定について 1.4 kPa、およびモル分率測定について 0.007 であった。本実測値を図 2.1.1.1.2-2 に示す。図 2.1.1.1.2-2 (a) より、本実測値が HF01123 高組成側で共沸の挙動を示しており、Helmholtz 関数型状態方程式からの計算結果と一致する傾向が確認できる。また図 2.1.1.1.2-2 (b) より、本実測値が、HFC32+HF0124yf 混合系で GWP 値 150 以下が達成できるモル分率 0.38 (HFC32) 以下 (質量分率 0.22 (同) 以下) で、多くの実測値が取得できていることが確認できる。



(a) HFC32+HF01123 混合系



(b) HFC32+HF01124yf 混合系

図 2.1.1.1.2-2 本研究で得られた気液平衡性質実測値の分布. ◇: 本実測値、○: 九州大学、実線: Helmholtz 関数型状態方程式による沸点および露点圧力曲線 (REFPROP ver. 10.0 を用いて算出)

続いて、本実測値と既存の Helmholtz 関数型状態方程式との偏差図の一部を、図 2.1.1.1.2-3 及び 図 2.1.1.1.2-4 に示す。

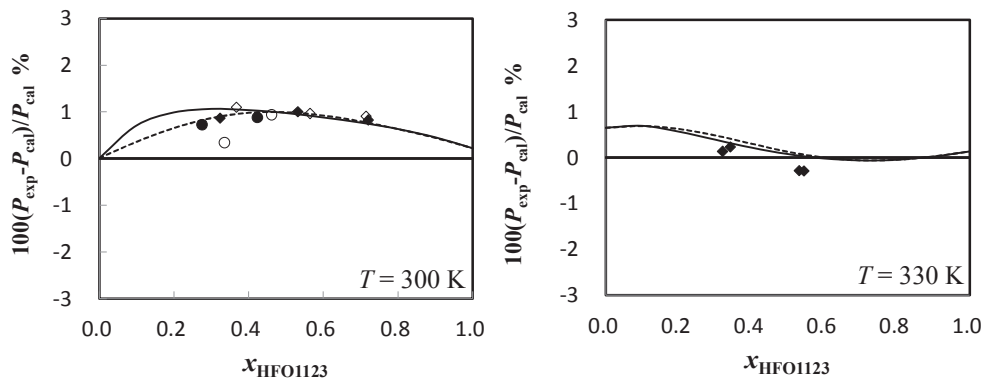


図 2.1.1.1.2-3 HFC32+HF01123 混合系の沸点および露点圧力実測値に対する Akasaka model^[1] (REFPROP 10.0) からの相対圧力偏差. ◆◇: 本実測値、●○: 九州大学、
—、--: 本研究で関連した PR-MC 状態方程式

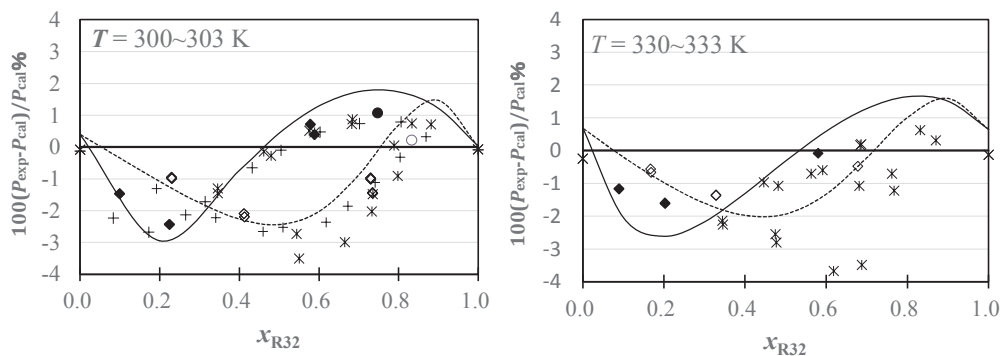


図 2.1.1.1.2-4 HFC32+HF01124yf 混合系の沸点および露点圧力実測値に対する Akasaka model^[2] (REFPROP 10.0) からの相対圧力偏差. ◆◇: 本実測値、●○: 九州大学、*: Kamiaka et al.^[3]、
-: Raabe^[4]、+: Hu et al.^[5]、—、--: 本研究で関連した PR-MC 状態方程式

図 2.1.1.1.2-3 および図 2.1.1.1.2-4 のベースラインである Akasaka model (REFPROP ver. 10 の標準モデル) は、本実測値が存在しないときに作成された式であることから、本実測値との間に系統偏差が見受けられる。その偏差は、例えば 300 K において、HFC32+HF01123 混合系では 1%程度、HFC32+HF01234yf 混合系については、特に HFC32 のモル分率が低い領域において 2%程度であることが、両図から確認できる。

続いて、本実測値を良好に再現し、3 成分系の測定を支援する目的で、修正 Peng-Robinson 状態方程式 (PR-MC 状態方程式) を回帰した。この状態方程式を以下に示す。

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)} \quad (2.1.1.1.2-2)$$

$$a_i = 0.45724 a_i \frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}} \quad b_i = 0.07780 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \quad (2.1.1.1.2-3)$$

ここで、式 (2.1.1.1.2-3) におけるアルファ関数、 $\alpha_i(T)$ 、には Mathias と Copeman^[6] による以下の関数を採用した。

$$\alpha_i(T) = \left[1 + c_1 \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) + c_2 \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right)^2 + c_3 \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right)^3 \right]^2 \quad (2.1.1.1.2-4)$$

また、混合則は以下に示す通りである。

$$a = \sum_i \sum_j x_i x_j a_{ij}, \quad a_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{a_i a_j} \quad (2.1.1.1.2-5)$$

$$b = \sum_i x_i b_i \quad (2.1.1.1.2-6)$$

図 2.1.1.1.2-3 および図 2.1.1.1.2-4 に、HFC32+HF01123 および HFC32+HF01234yf 混合系についての式 (2.1.1.1.2-2) の計算結果を、沸点について実線 (—)、露点について破線 (---) でプロットした。両図において、本状態方程式が本実測値を良好に再現していることが確認できる。なお、これまでに得られた実測値および上記の PR-MC 状態方程式については、国際誌への投稿論文を現在作成中である。

一方で、研究加速予算を受け、今後の 3 成分系混合物の測定に活用予定のペローズ式気液平衡・密度測定装置についても、温度および圧力制御の操作性を大幅に向上させることに、成功した。今後の各種の混合系についての新たなデータ取得に向けて、高精度測定の準備を実施中である。

<参考文献>

- [1] R. Akasaka, The 11th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC), (2016), Yokohama, Japan.
- [2] R. Akasaka, Fluid Phase Equilib., Vol. 358, No. 25, (2013) 98–104.
- [3] T. Kamiaka, C. B. Dang, E. Hihara, Int. J. Refrig., 36(3), (2013) 965–971.
- [4] G. Raabe, Science and Technology for the Built Environment, 22(8), (2016).
- [5] X. Hu, T. Yang, X. Meng, S. Bi, J. Wu, Fluid Phase Equilib., 438, (2017) 10–17.
- [6] P. M. Mathias, T. W. Copeman, Fluid Phase Equilib., 13, (1983) 91–108.

2.1.1.1.3 高温 PVT_x 性質及び定圧比熱の測定 (担当: 日本大学工学部)

(a) 高温 PVT_x 性質

図 2.1.1.1.3-1 に高温用 PVT_x 性質測定装置概略図を示す。本測定装置は、一定の容積を持つ容器に圧力センサーが備えられ、任意の充填質量による等密度下で、恒温槽を用いて任意の温度において、圧力を測

定する等容法を採用している。特に圧力センサーは、高温域においても測定可能なセンサーを用いており、さらに測定前に圧力が調整された窒素ガスを用いてセンサーの圧力依存性を校正して使用している。等容法は、試料の充填量を変えることによって、密度が変わり、複数の等密度線に沿ってデータが得られるが、混合冷媒を測定対象とするため、試料の充填する際には、組成比も調整する必要があるが、その操作を少なくし、測定の迅速化や同組成の測定を実現するために膨張容器を備えている。特に、膨張時には高温下になることが多くなるため、ベローズ弁を用いて工夫している。図 2.1.1.1.3-2 に PVT_x 性質測定装置の圧力容器部の写真を示す。圧力センサーを備えた圧力容器の容積は約 8cc であるが、実際には、密度が良く知られている HFC134a などの純成分の冷媒を用いて容積を決定し、その温度依存性を考慮している。膨張容器は、約 3cc であり、一度あたりの膨張で、組成比が一定のまま圧力容器内の試料の質量(すなわち密度)を膨張前に比べて約 4 分の 1 程低い値に設定することができる。測定温度範囲は、323K から 453K であり、圧力は 10MPa までである。

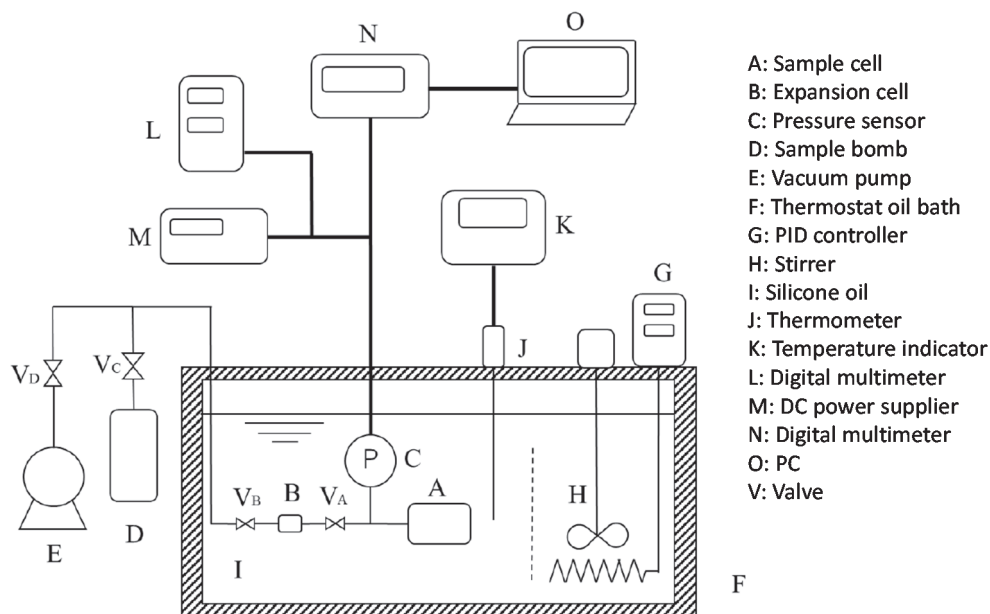


図 2.1.1.1.3-1 高温用 PVT_x 性質測定装置概略図

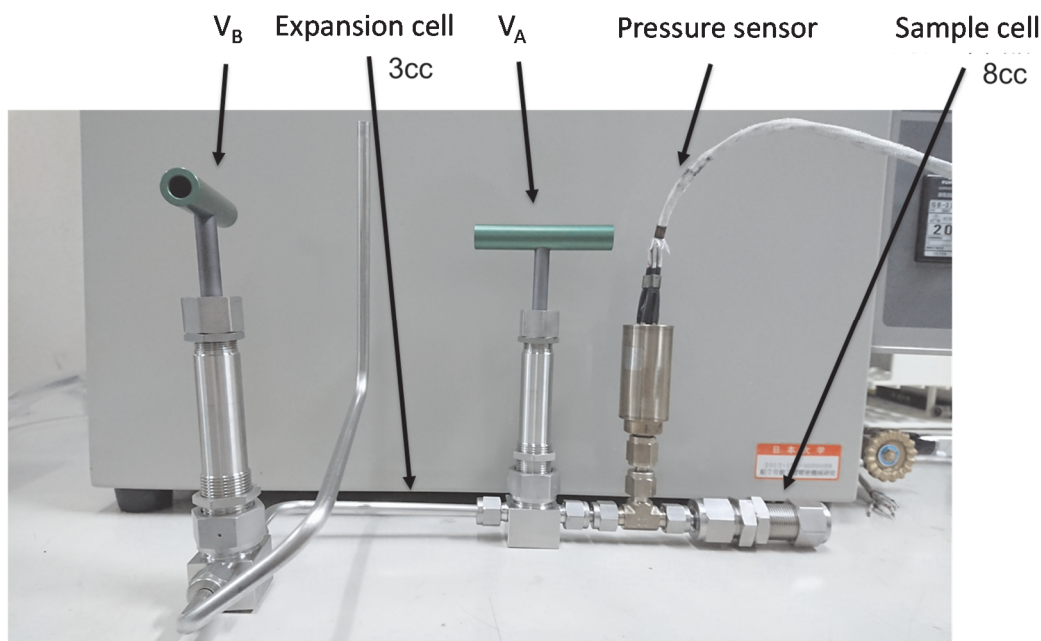


図 2.1.1.1.3-2 PVT_x 性質測定装置の圧力容器部の写真

HFO1234yf+HFC32 系混合冷媒の PVT_x 性質を 3 組成において、それぞれ4本の等密度線に沿って測定した。図 2.1.1.1.3-3 に 37.57mass%HFO1234yf+62.43mass%HFC32 の測定結果を示す。323K から 453K、10MPa の範囲において、4 本の等密度線(628 kg/m³、411 kg/m³、270 kg/m³、178 kg/m³)に沿って 40 点のデータを得た。図 2.1.1.1.3-4 に 48.90mass%HFO1234yf +51.10mass%HFC32 の測定結果を示す。323K から 453K、10MPa の範囲において、4 本の等密度線(721 kg/m³、468 kg/m³、306 kg/m³、197 kg/m³)に沿って 39 点のデータを得た。図 2.1.1.1.3-5 に 68.53mass%HFO1234yf/31.47mass%HFC32 の測定結果を示す。323K から 453K、10MPa の範囲において、4 本の等密度線(629 kg/m³、411 kg/m³、270 kg/m³、178 kg/m³)に沿って 48 点のデータを得た。

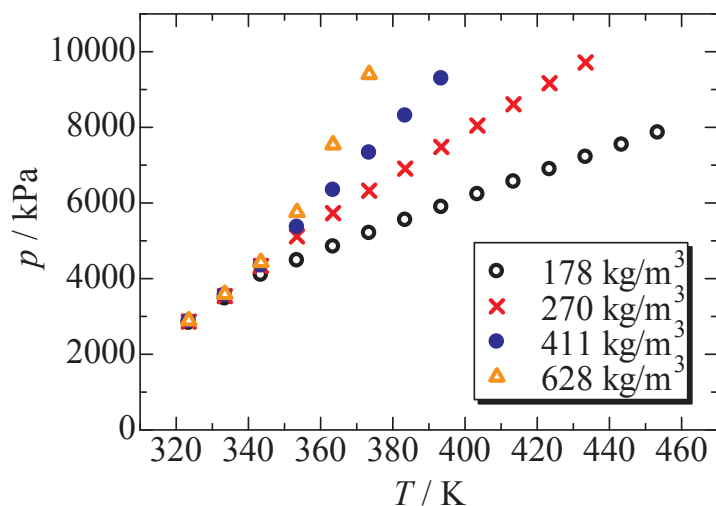


図 2.1.1.1.3-3 37.57mass%HFO1234yf+62.43mass%HFC32 の測定結果

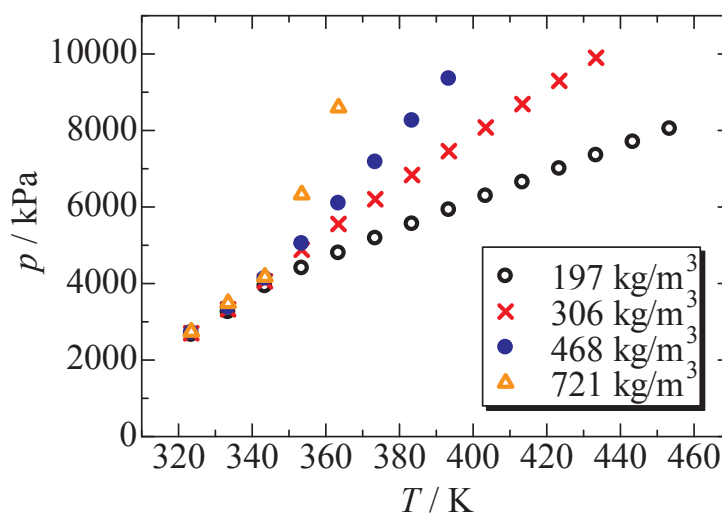


図 2.1.1.1.3-4 48.90mass%HFO1234yf + 51.10mass%HFC32 の測定結果

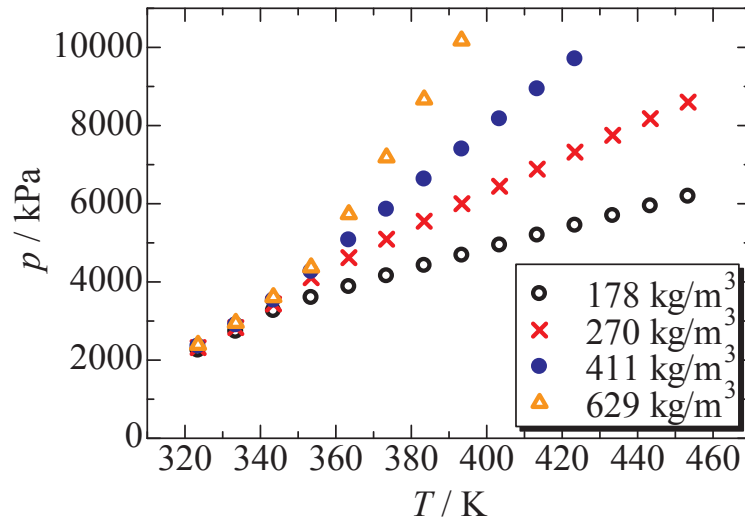


図 2.1.1.1.3-5 68.53mass%HF01234yf + 31.47mass%HFC32 の測定結果

高沸点冷媒 HCFO1224yd(Z)の PVT 性質測定をおこない、323K から 453K、10MPa の範囲において、17 本の等密度線(18 kg/m³、87kg/m³、124kg/m³、210kg/m³、346kg/m³、395kg/m³、524kg/m³、650kg/m³、719kg/m³、841kg/m³、980kg/m³、1038kg/m³、1148kg/m³、1252kg/m³、1272kg/m³、1278kg/m³、1280kg/m³)に沿って 169 点のデータを得た。また、得られたデータを用いて、14 本の等温線を得た。

図 2.1.1.1.3-6 に等密度線に沿った測定結果を、図 2.1.1.1.3-7 に等温線に整理した結果を示す。

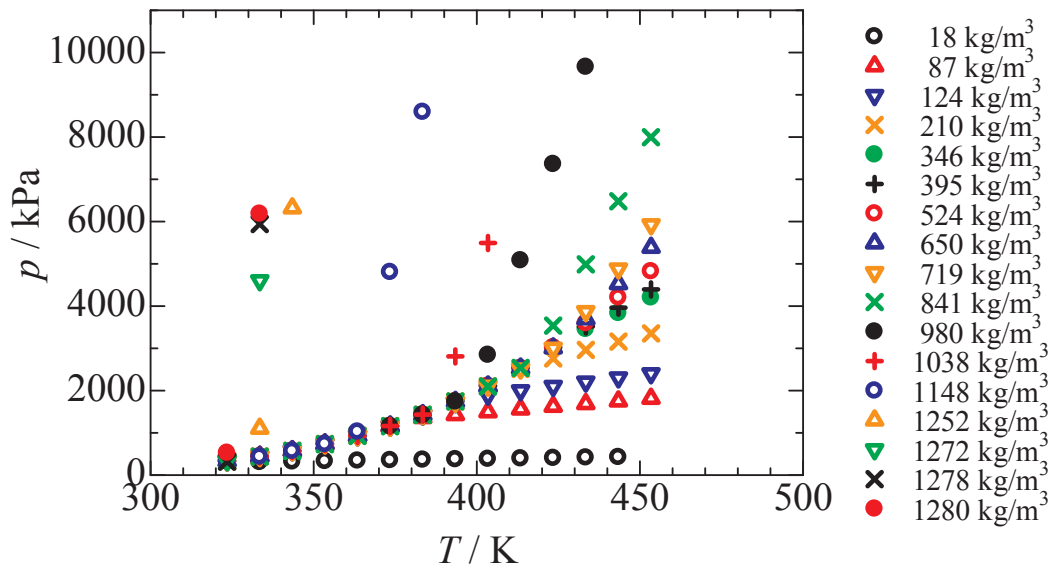


図 2.1.1.1.3-6 HCFO1224yd(Z)の測定結果(PT 線図)

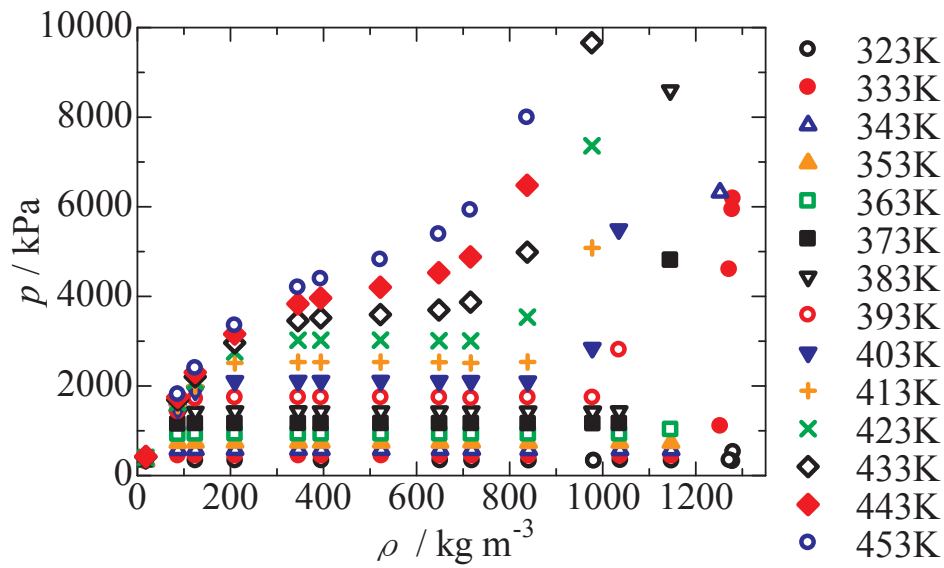


図 2.1.1.1.3-7 HCFO1224yd(Z)の測定結果 ($P\rho$ 線図)

HFO1234yf+HFC32+CO₂ 混合系に関して、2 組成において 10 本の等温線に沿って 114 点の測定結果を得た。図 2.1.1.1.3-8 に 60.93wt%HFC32+37.12wt%HFO1234yf+1.95wt% CO₂ の PT (圧力・温度)線図を、図 2.1.1.1.3-9 に 30.16wt%HFC32+67.86wt%HFO1234yf+1.98wt%CO₂ の PT (圧力・温度)線図を示す。

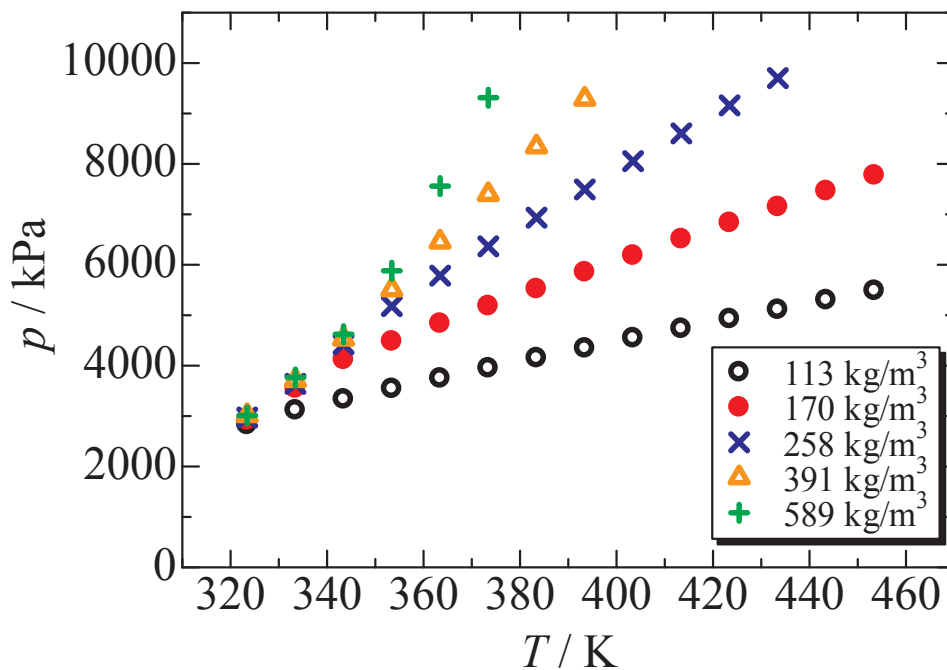


図 2.1.1.1.3-8 60.93wt%HFC32+37.12wt%HFO1234yf+1.95wt%CO₂ の測定結果

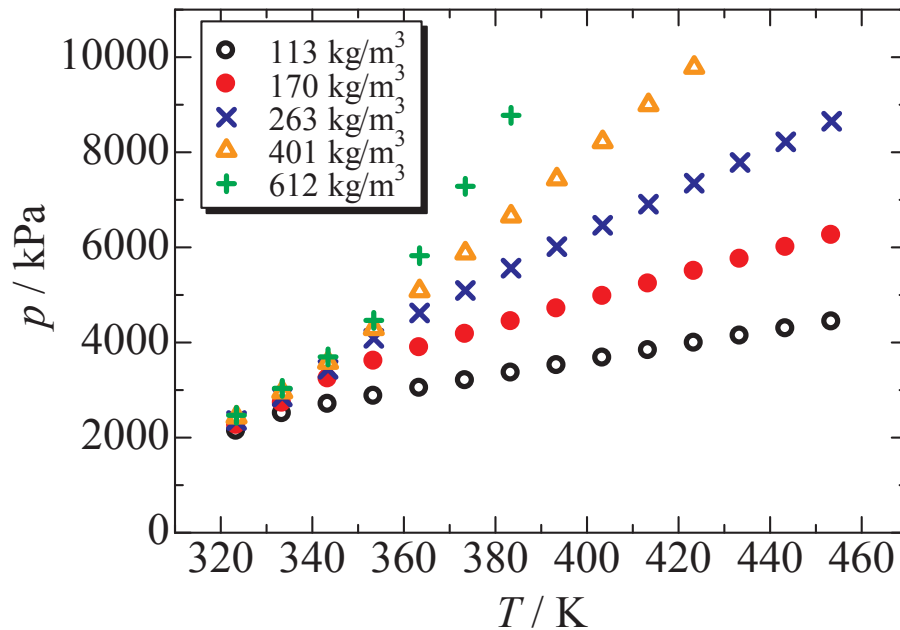


図 2.1.1.1.3-9 30.16wt% HFC32 +67.86wt% HF01234yf +1.98wt% CO_2 の測定結果

HF01336mzz(E)+HF01336mzz(Z)混合系に関して、1 組成において 3 本の等温線に沿って 42 点の測定結果を得た。図 2.1.1.1.3-10 に 43.80wt% HF01336mzz(E) +56.20wt% HF01336mzz(Z) の PT (圧力・温度) 線図を示す。

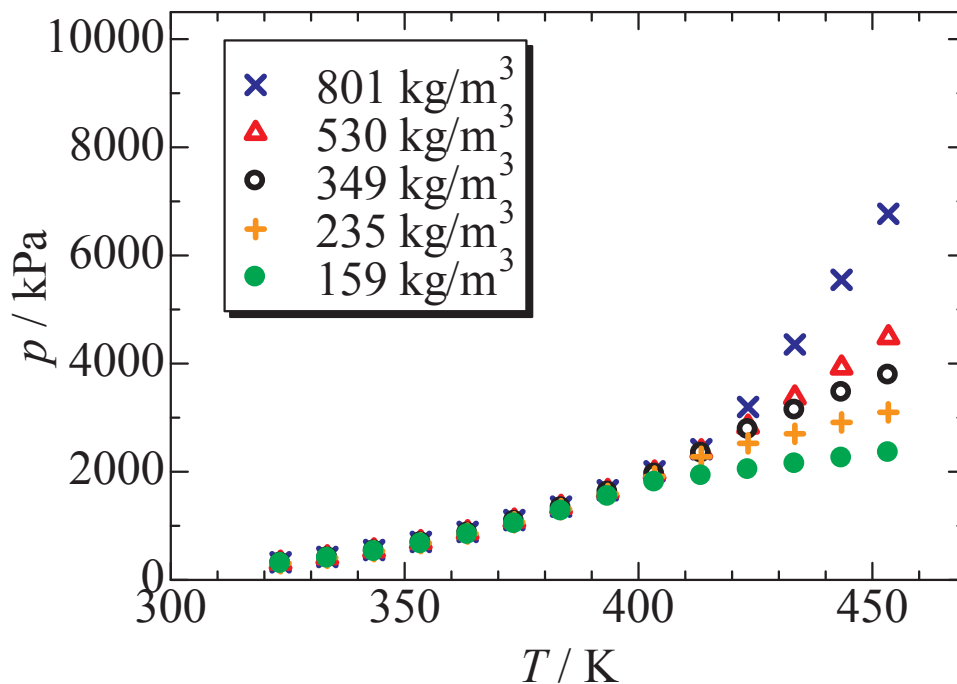


図 2.1.1.1.3-10 43.80wt% HF01336mzz(E) +56.20wt% HF01336mzz(Z) の測定結果

(2) 定圧比熱

図 2.1.1.1.3-11 に定圧比熱測定装置概略図を示す。試料は、恒温器内の試料容器から恒温器外の試料容器に流通されるフロー式熱量計である。装置は、熱量計として用いるサーマルフローメーターと質量流量測定に用いるコリオリフローメーターを中心に構成されており、フローメーターからの出力は、デジタルマルチメーターで測定される。サーマルフローメーターからの出力 V_T は、式(2.1.1.1.3-1)に示すように温度差に対する供給熱流量の比であり、質量流量と比熱の積に比例している。また、コリオリフローメーターからの出力 V_C は、式(2.1.1.1.3-2)に示すように質量流量に比例している。

$$V_T = A \frac{dQ}{dT} = A \dot{m} c_p \quad (A \text{ は比例定数}) \quad (2.1.1.1.3-1)$$

$$V_C = B \dot{m} \quad (B \text{ は比例定数}) \quad (2.1.1.1.3-2)$$

2)

式(2.1.1.1.3-1)と式(2.1.1.1.3-2)を \dot{m} で整理すると、

$$\dot{m} = \frac{V_T}{A c_p} = \frac{V_C}{B} \quad (2.1.1.1.3-3)$$

式(2.1.1.1.3-3)を c_p について整理すると

$$c_p = \frac{B V_T}{A V_C} = K \frac{V_T}{V_C} \quad (\text{定数 } A \text{ と } B \text{ を } K \text{ でまとめた}) \quad (2.1.1.1.3-4)$$

式(2.1.1.1.3-4)より、比熱は2つのフローメーターからの出力比と比例定数 K から求めることができる。なお、比例定数 K は、あらかじめ比熱が良く知られている物質の測定から決定しておく。測定する温度は、恒温器で設定し、圧力は、流路の流量調整弁によって設定する。恒温器は、10°Cから50°Cまで設定することができる。圧力は、試料が凝縮しないように低圧で設定する。図2.1.1.1.3-12に製作した装置外観図を示す。

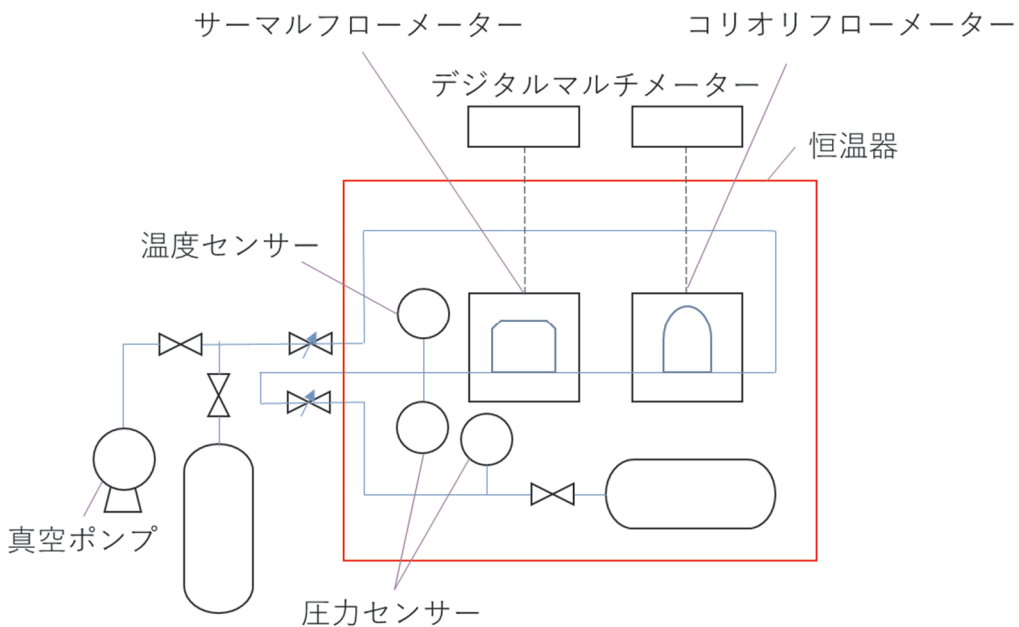


図 2.1.1.1.3-11 定圧比熱測定装置概略図



图 2.1.1.1.3-12 定压比热装置外观

2.1.1.1.4 表面張力の測定（担当：長崎大学）

図 2.1.1.1.4-1 は表面張力を示差毛管上昇法によって測定するための装置図である。圧力容器中には、内半径 $0.4222 \pm 0.0009\text{mm}$ 、 $0.7526 \pm 0.0009\text{mm}$ および $0.2480 \pm 0.0020\text{mm}$ の 3 本のガラス管が設置されており、下端を液冷媒へ浸し、メニスカス上昇高さの差から冷媒の表面張力を算出するものである。

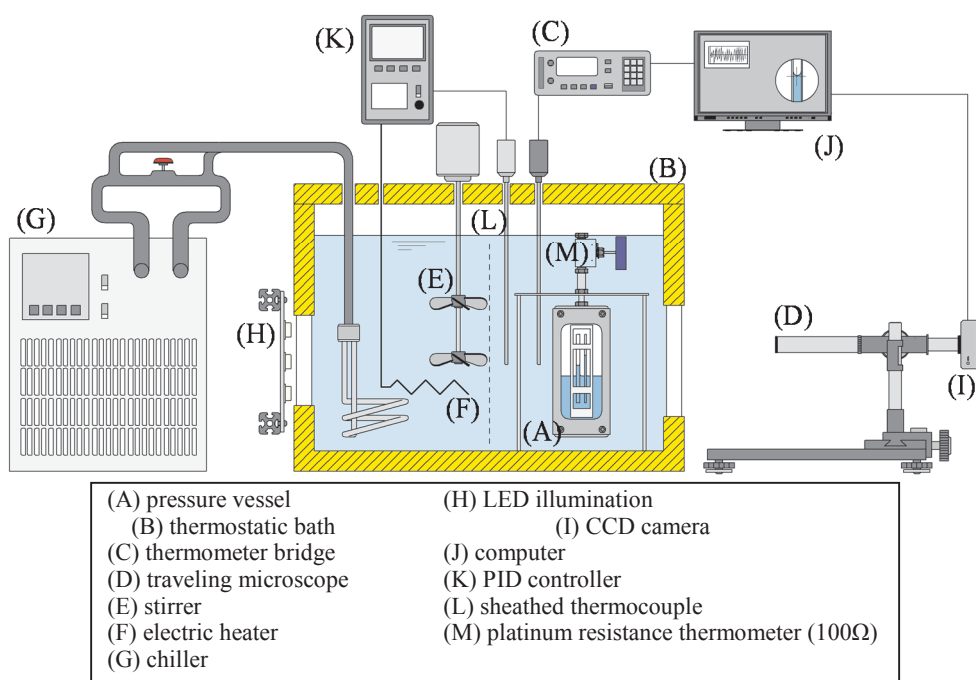
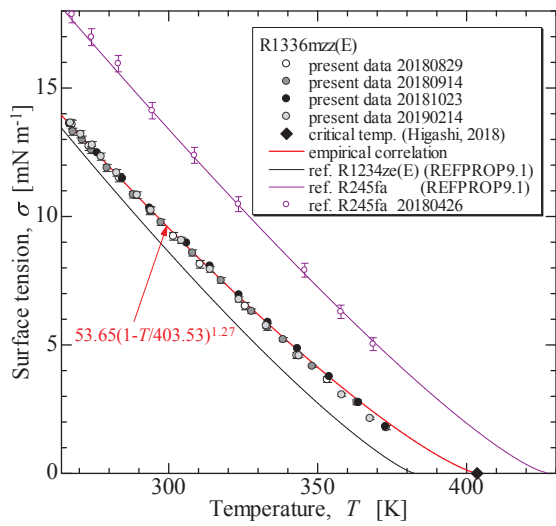


図 2.1.1.1.4-1 示差毛管法による表面張力測定装置

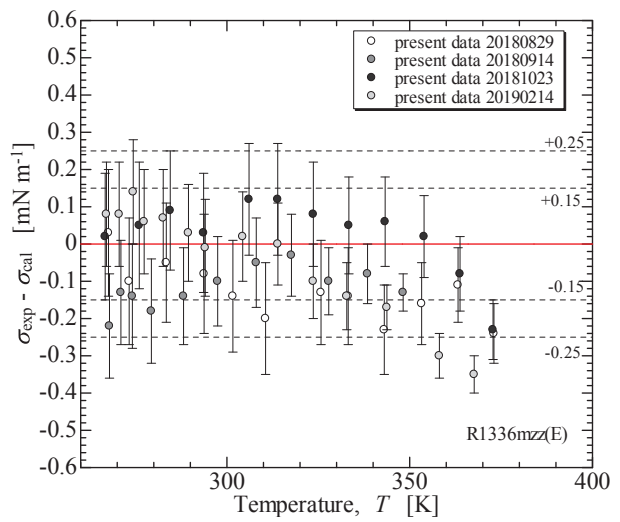
本実験により HFO1336mzz(E)、HFO1336mzz(Z)、および R455A の表面張力を測定した。いずれの表面張力の測定データは、本プロジェクトにより世界に先駆けて測定されたものである。

HFO1336mzz(E)の表面張力を温度範囲 265 K～ 375 K の範囲で高精度に測定し、測定結果に基づいた van der Waals 型の相関式を提案した。図 2.1.1.1.4-2 は HFO1336mzz(E)測定結果、および相関式からの偏差を示す。推定した 95% 包括度の測定誤差は $\pm 0.15 \text{ mN m}^{-1}$ であり、相関式からの偏差はこの誤算範囲以内に収まっている。また、測定された表面張力は 273.15 K で 12.8 mN m^{-1} であることから、HFO1234ze(E)と比較的近い値であることが分かった。

HFO1336mzz(Z)の表面張力を温度範囲 265 K～ 390 K の範囲で測定し、測定結果に基づいた van der Waals 型の相関式を提案した。図 2.1.1.1.4-3 は HFO1336mzz(Z)測定結果、および相関式からの偏差を示す。温度 230 K 以上では Di Nicola ら (2013) の予測式と良く一致している。図中赤線で示す測定結果より、265 K～ 390 K の範囲で適用できる相関式を提案した。

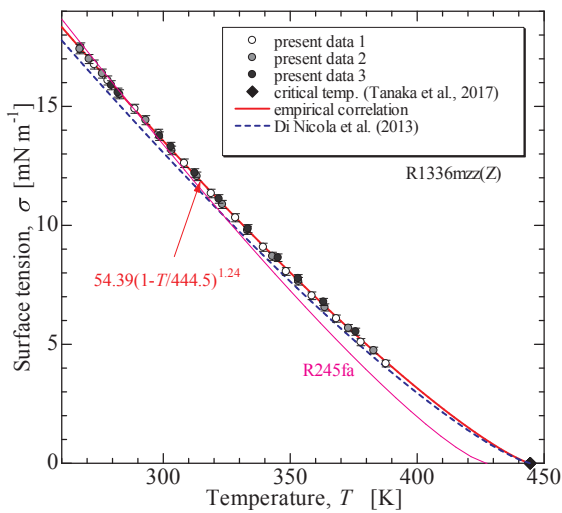


(a) 測定結果および相関式

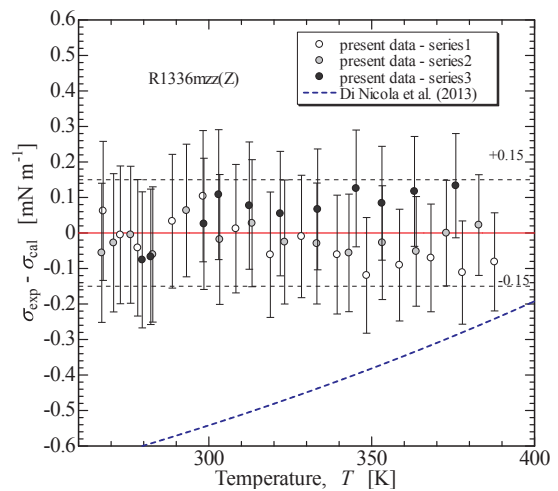


(b) 相関式からの偏差

図 2.1.1.1.4-2 HFO1336mzz(E)表面張力の測定結果



(a) 測定結果および相関式



(b) 相関式からの偏差

図 2.1.1.1.4-3 HFO1336mzz(Z)表面張力の測定結果

さらに HFO1123/HFC32/HFO1234yf(65/24/11 mass%)の表面張力を測定した。図 2.1.1.1.4-4 はその測定結果、および相関式を基準とした測定値の偏差、ならびに Parachor による予測結果の偏差を示す。REFPROP 内部では Parachor 法を用いて混合冷媒の表面張力を計算していると考えられ、両者の値は計算の打ち切り誤差程度で良く一致する。一方、測定値とは見積もられる誤差範囲内で良く一致しており、内包される Mixing Parameter により十分な精度で予測できることが確認できた。

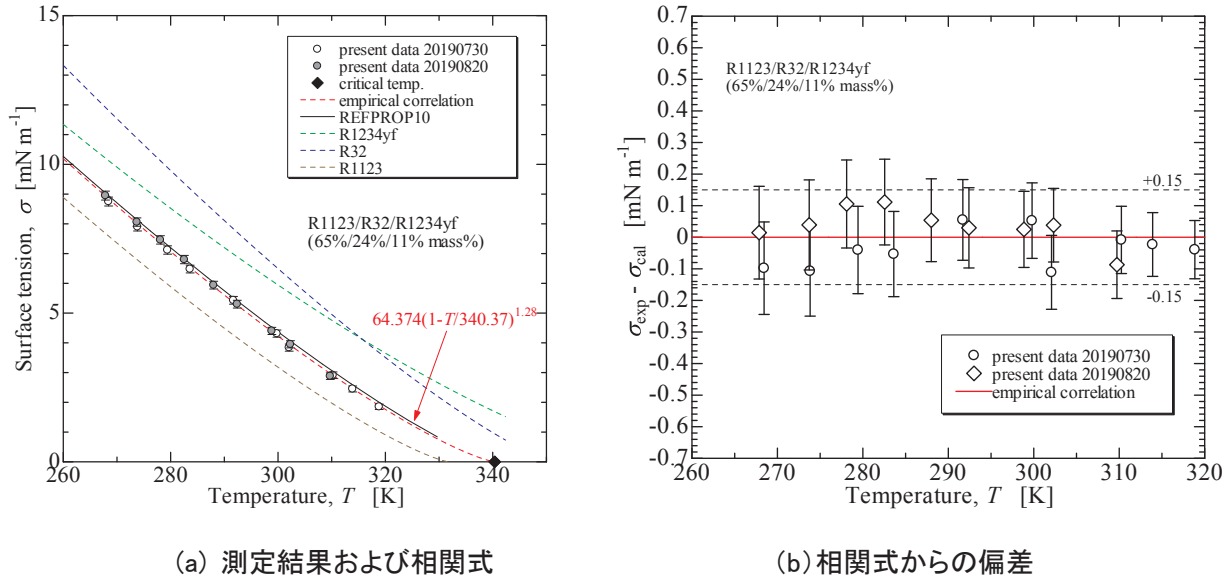
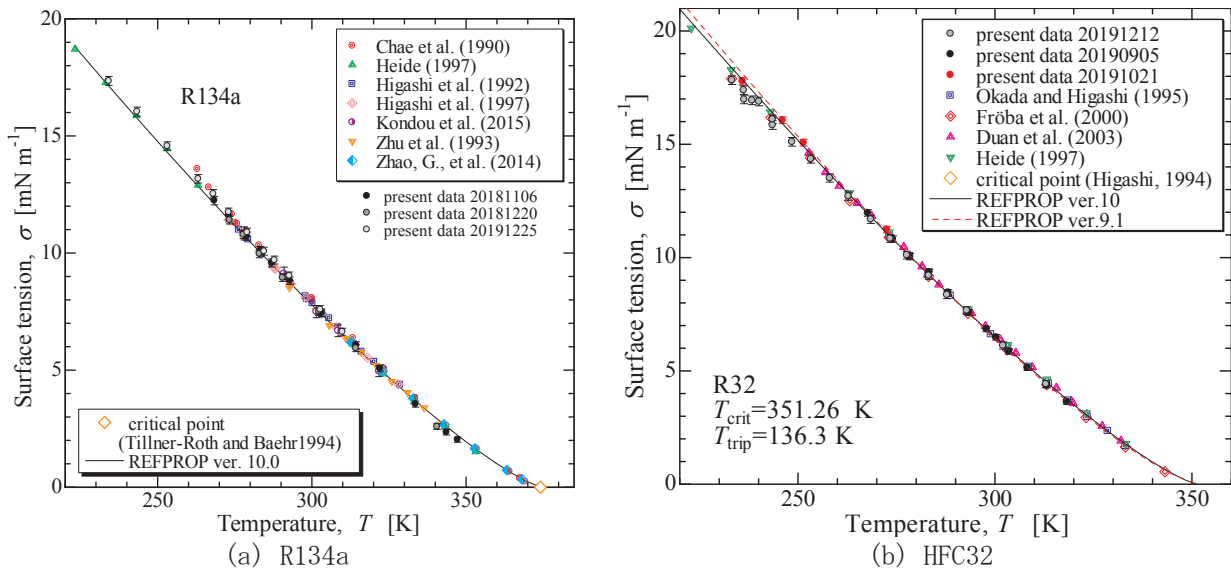


図 2.1.1.1.4-4 HFO1123/HFC32/HFO1234yf(65/24/11 mass%)の表面張力の測定結果

2019 年度後半には図 2.1.1.1.4-1 に記載の装置に組み込まれているチラー(G)を -40°C まで温度制御可能なチラーへと取り換え、再構築した。図 2.1.1.1.4-5 へ、HFC134a、HFC32、Ethanol、および HFO1123 の再構築後に測定した結果を示す。HFC134a および HFC32 の測定では低温域の報告がある Heide のデータと良く一致していることが確認できた。Ethanol も Mulero の計算式と良く一致しておおり、低温域の測定健全性は十分であると判断した。HFO1123 について、 -6°C 以下のデータが存在していなかったが、装置の改造により、より低温域の測定データを得ることができ、相関式の適用範囲を広げることができるようになった。



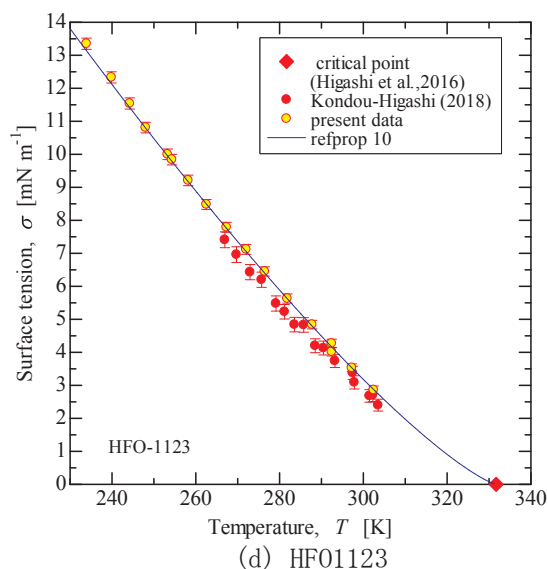
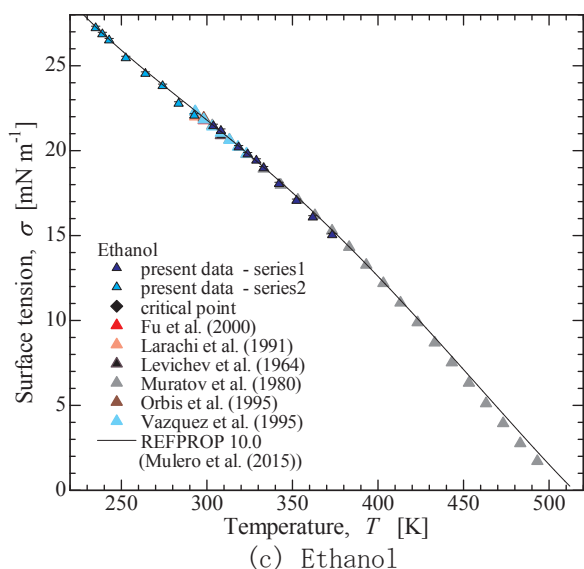
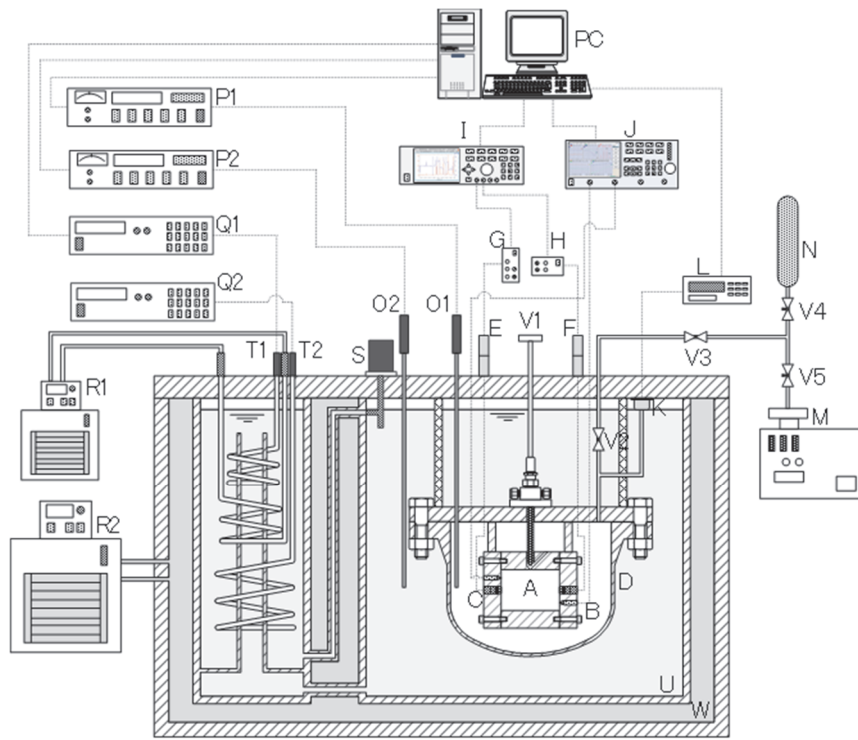


図 2.1.1.1.4-5 -40°Cまでの低温域の測定精度の確認

2.1.1.1.5 音速の測定（担当：産業技術総合研究所）

図 2.1.1.1.5-1 に示すような円筒型音波・電磁波共振器を用いた音速測定装置により、冷媒サンプルの気相域における音速測定を行った。円筒型共振器は熱伝導度および電気伝導度が良い無酸素銅製で、キャビティ長さ約 50 mm、キャビティ直径約 24mm である。サンプルガス圧力による共振器形状の変形を抑えるため、共振器内外の圧力が等しくなるように SUS316 製の圧力容器内に格納されている。サンプルガスは圧力容器上部から配管を通して圧力容器内に導入され、円筒型共振器の側面位置に空いているサンプル導入口より共振器内に充填される。なお、音波共鳴測定時にはキャビティ形状を理想的な円筒形状に近付けるため、バルブ機構によりサンプル導入口を閉じることができるような機構が設けてある。円筒型キャビティ内の音波共鳴は、共振器両端の中心軸上に取り付けられた 2 つのコンデンサマイクロホンを用いて計測する。受信マイクロホンに取り付けるプリアンプおよび送信用マイクロホンに取り付けるトランスミッタアダプタは恒温槽外の室温雰囲気下に設置されており、圧力容器に取り付けたハーメチックフィードスルーを介して三重同軸ケーブルでそれぞれのマイクロホンと接続している。周波数応答アナライザからの出力信号を周波数を掃引しながら駆動アンプにより増幅して送信用マイクロホンに伝送し、受信マイクロホンで検出した電気信号をパワーモジュールを介して周波数応答アナライザの入力信号として測定することで音波共鳴周波数特性を得る。また、円筒型共振器のキャビティ寸法を計測する目的で、共振器両端に取り付けられた 2 つのアンテナを用いて電磁波共振周波数特性も測定している。アンテナは銅製セミリジッド同軸ケーブルの端面を平坦に切断して製作し、キャビティ内面と端面がフラットになるように取り付けられている。アンテナに接続する信号ケーブルには高周波用低損失ケーブルを用い、圧力容器に取り付けたハーメチックフィードスルーを介してネットワークアナライザと接続し、共振器中での電磁波共振周波数特性を測定する。円筒型共振器を格納した圧力容器は、液体恒温槽内で温度変動±5 mK 以内で精密に温度制御される。サンプルガス温度は ITS-90 に準拠した標準白金抵抗温度計および精密測温ブリッジを用いて測定する。サンプルガス圧力は水晶共振式圧力計により直接測定しており、サンプルの温度勾配を小さくするために、圧力計は恒温槽内のヘッドスペースに設置している。



A: cylindrical acoustic-microwave cavity, B: antennae, C: microphones, D: pressure vessel, E: transmitter adapter, F: preamplifier, G: actuator amplifier, H: microphone power supply, I: frequency response analyzer, J: vector network analyzer, K: quartz pressure transducer, L: digital pressure computer, M: vacuum pump, N: sample bomb, O1-2: thermometers (SPRTs), P1-2: thermometer bridges, Q1-2: programmable power supply, R1-2: circular type thermostats, S: circulator pump, T1-2: heat exchanger coils, U: internal thermostat, V1-5: valves, W: external prethermostat

図 2.1.1.1.5-1 円筒型共振器を用いた音速測定装置の概略図

上記の音速測定装置を用いて、HFO1336mzz(E)および HFO1336mzz(Z)の純物質冷媒について気相域の音速測定を実施した。HFO1336mzz(E)については図 2.1.1.1.5-2 に示す通り、温度 303~403 K、圧力 40~900 kPa の範囲において、計 36 点の音速測定データが得られた。また、HFO1336mzz(Z)については図 2.1.1.1.5-3 に示す通り、温度 323~423 K、圧力 40~1000 kPa の範囲において、計 36 点の音速測定データが得られた。なお、各測定状態量の拡張不確かさ($k=2$)は、温度が 10 mK、圧力が 0.4 kPa、音速が 0.04%と見積もられる。

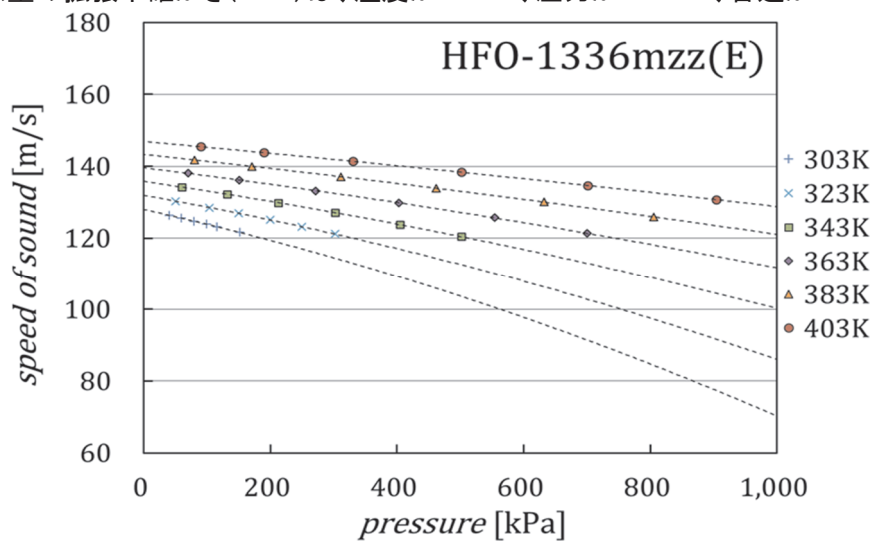


図 2.1.1.1.5-2 HFO-1336mzz (E) の音速測定結果

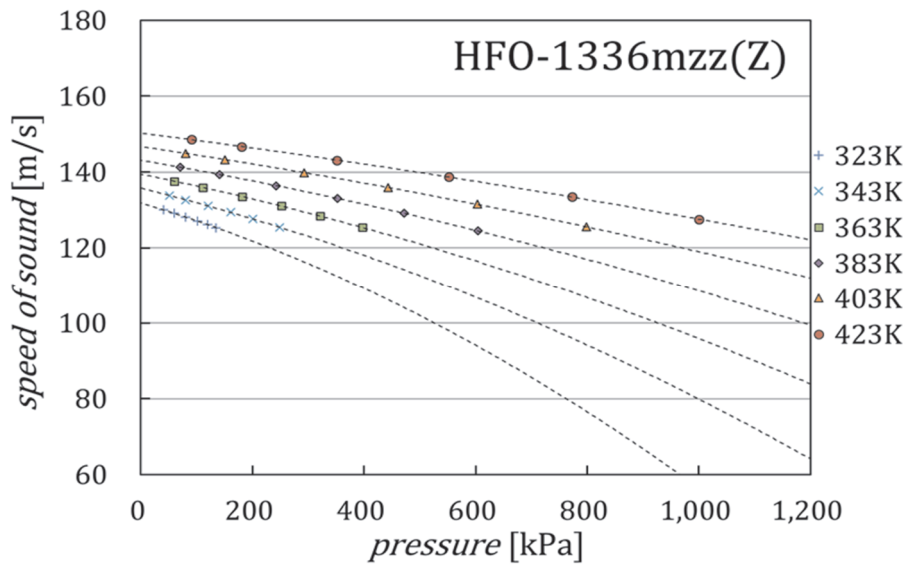


図 2.1.1.1.5-3 HFO1336mzz(Z)の音速測定結果

得られた HFO1336mzz(E)および HFO1336mzz(Z)の音速データに基づき、音響ビリアル状態式にフィッティングして圧力ゼロの理想気体状態への外挿値を調べることで、理想気体状態の定圧比熱を求めた。HFO1336mzz(E)については図 2.1.1.1.5-4 に示す通り、温度 303~403 K の範囲において計 6 点の理想気体比熱値が得られた。また、HFO1336mzz(Z)については図 2.1.1.1.5-5 に示す通り、温度 323~423 K の範囲において計 6 点の理想気体比熱値が得られた。図 2.1.1.1.5-4 を見てわかる通り、本研究で得られた HFO1336mzz(E)の理想気体比熱値と原子団寄与法による推算値を比較すると、低温側では比較的よく一致しているが、高温側では 7 %程低い値となることが分かった。同様に図 2.1.1.1.5-5 に示す通り、本研究で得られた HFO1336mzz(Z)の理想気体比熱値についても高温側では原子団寄与法による推算値より 3 %ほど低い値になることが分かった。HFO1336mzz(E)および HFO1336mzz(Z)についての高精度な状態式開発のため、本研究で得られた理想気体比熱値を再現する式(2.1.1.1.5-1)に示す新たな温度相関式を作成した。

$$\frac{c_p^0}{R} = 4 + \sum_{i=1}^2 d_i \frac{(u_i/T)^2 \exp(u_i/T)}{[\exp(u_i/T) - 1]^2}$$

(2.1.1.1.5-1)

式(2.1.1.1.5-1)の各係数を表 2.1.1.1.5-5 にまとめる。図 2.1.1.1.5-4 および図 2.1.1.1.5-5 に示す通り、式(2.1.1.1.5-1)および表 2.1.1.1.5-1 に示す温度相関式は、本研究で得られた理想気体比熱値を HFO1336mzz(E)について 0.2 %以内、HFO1336mzz(Z)について 1 %以内で良好に再現している。

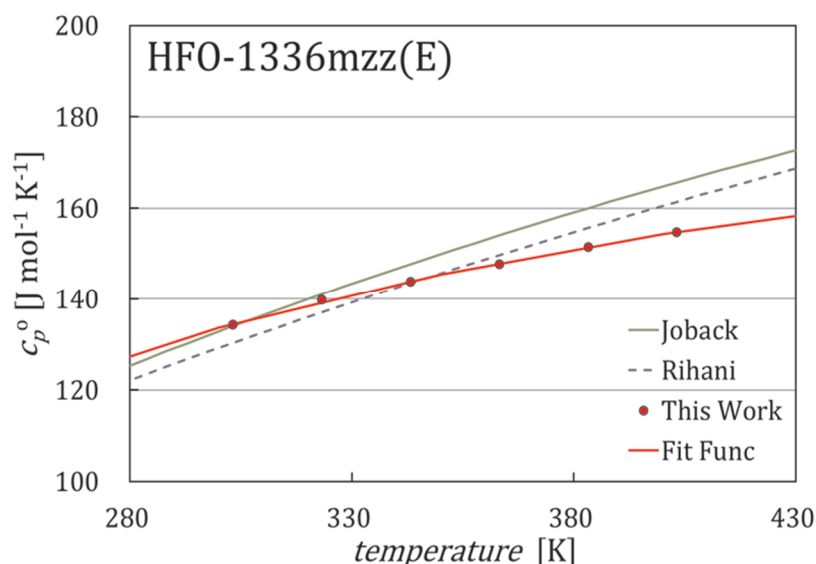


図 2.1.1.1.5-4 HFO1336mzz(E)の理想気体状態の定圧比熱導出結果

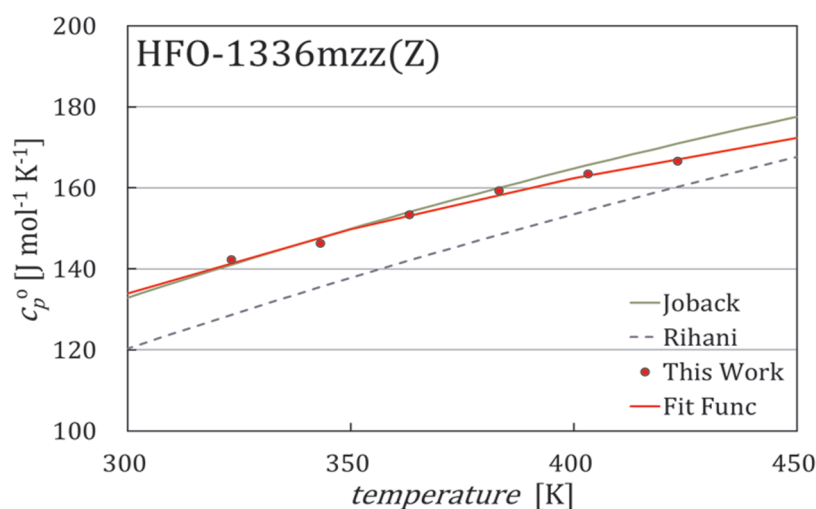


図 2.1.1.1.5-5 HFO1336mzz(Z)の理想気体状態の定圧比熱導出結果

表 2.1.1.1.5-1 理想気体比熱の温度相関式の係数

式 (2.1.1.5-1) の係数	HFO1336mzz (E) の値	HFO1336mzz (Z) の値
d_1	8.493×10^0	3.889×10^0
d_2	1.058×10^1	1.889×10^1
u_1	4.918×10^2	4.533×10^{-1}
u_2	9.005×10^2	9.875×10^2

さらに、同様の音速測定装置を用いて、2成分系混合冷媒 R454C (HFC32/HF01234yf : 21.5/78.5 mass%) について気相域の音速測定を実施した。測定結果は図 2.1.1.1.5-6 に示す通り、温度 283~313 K、圧力 130~490 kPa の範囲において、計 18 点の音速測定データが得られた。なお、各測定状態量の拡張不確かさ ($k = 2$) は、温度が 10 mK、圧力が 0.4 kPa、音速が 0.04 %、組成比が 0.1 mass%と見積もられる。

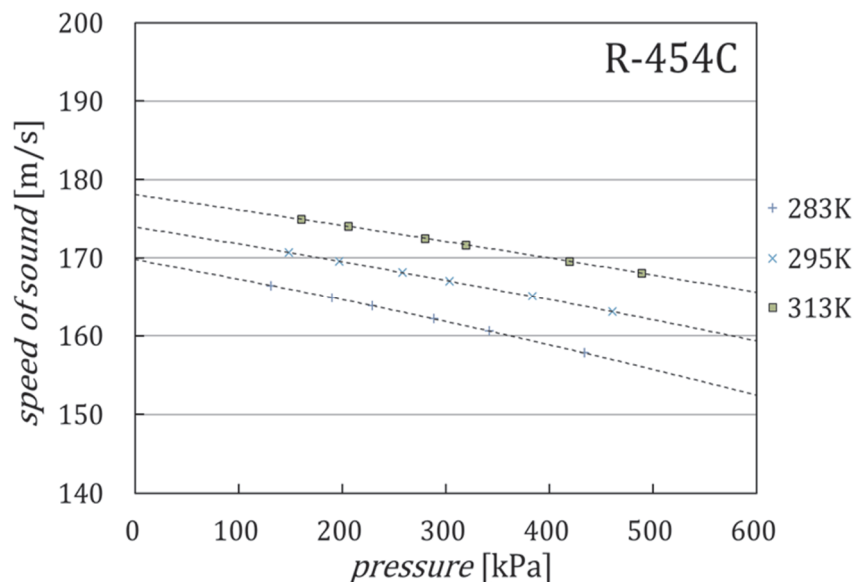


図 2.1.1.1.5-6 R-454C の音速測定結果

2.1.1.1.6 状態方程式の開発（担当：九州産業大学）

HF01336mzz (E) について、本プロジェクトで測定された実測値に基づき新たなヘルムホルツ型状態方程式を開発した。図 2.1.1.1.6-1 および図 2.1.1.1.6-2 は飽和蒸気圧および密度の実測値と状態方程式からの計算値との相対偏差である。平均偏差は飽和蒸気圧に対して 0.05%、液体密度に対して 0.1%、気体密度に対して 0.3% である。なお、本プロジェクトで測定された気体音速に対する平均偏差は 0.02% である。

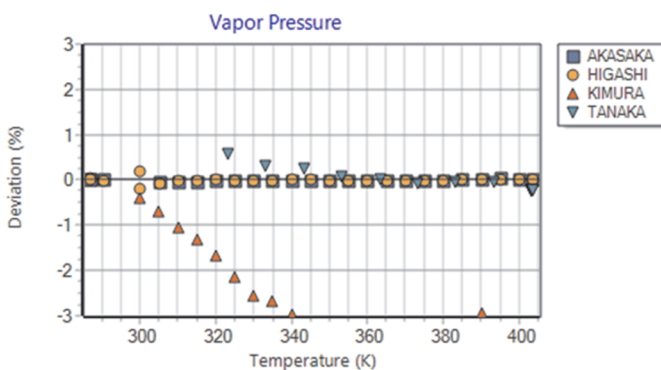


図 2.1.1.1.6-1: 本プロジェクトで測定された HF01336mzz (E) の飽和蒸気圧 (HIGASHI) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

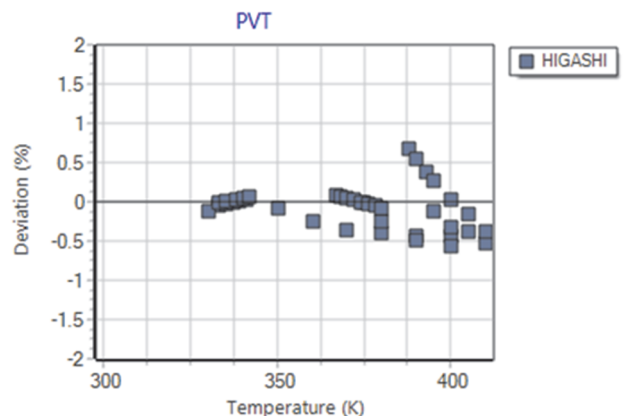


図 2.1.1.1.6-2: 本プロジェクトで測定された HF01336mzz (E) の密度 (HIGASHI) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

また、HF01123 および HCF01224yd (Z) について、最新の実測値情報を用いて既存状態方程式の更新を行った。HF01123 の式では特に飽和蒸気圧および液密度の再現性が向上している。HCF01224yd (Z) の式では適用可能な圧力の上限が 30MPa までとなり、特に液密度の再現性が向上している。図 2.1.1.1.6-3 および図 2.1.1.1.6-4 に HCF01224 (Z) の密度および音速の実測値と新しい状態方程式による計算値との相対偏差を示す。

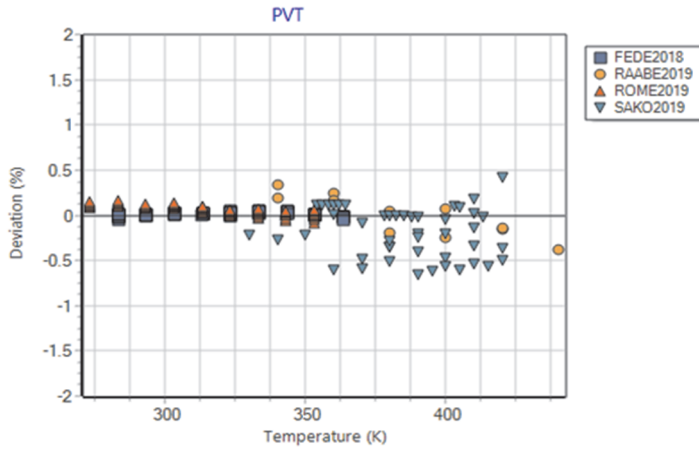


図 2. 1. 1. 1. 6-3: イタリアの研究機関に測定を依頼した HCF01224yd(Z) の液密度 (FEDE2018, ROME2019) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

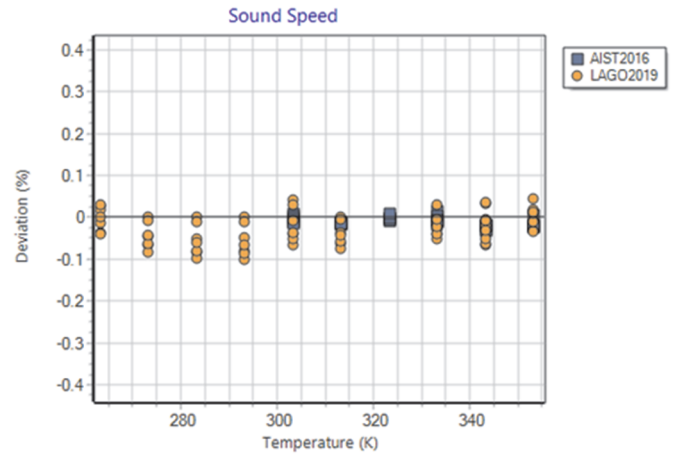


図 2. 1. 1. 1. 6-4: イタリアの研究機関に測定を依頼した HCF01224yd(Z) の液音速 (LAGO2019) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

さらに、HFC32+HFO1234yf+CO₂ 混合冷媒について、各 2 成分系の評価を行い、再現性が劣ることが判明した HFO1234yf+CO₂ 系に対する混合モデルの最適化を気液平衡データに基づいて行った。図 2.1.1.1.6-5 に REFPROP 10.0 の標準混合モデルおよび最適化モデルによる等温気液平衡の計算結果を、図 2.1.1.1.6-6 に標準混合モデルおよび最適化モデルによる臨界軌跡をそれぞれ示す。また、HFO1234yf+CO₂ 系の最適化モデルを組み込んで計算した HFC32+HFO1234yf+CO₂ 系の気液共存曲線を図 2.1.1.1.6-7 に示す。

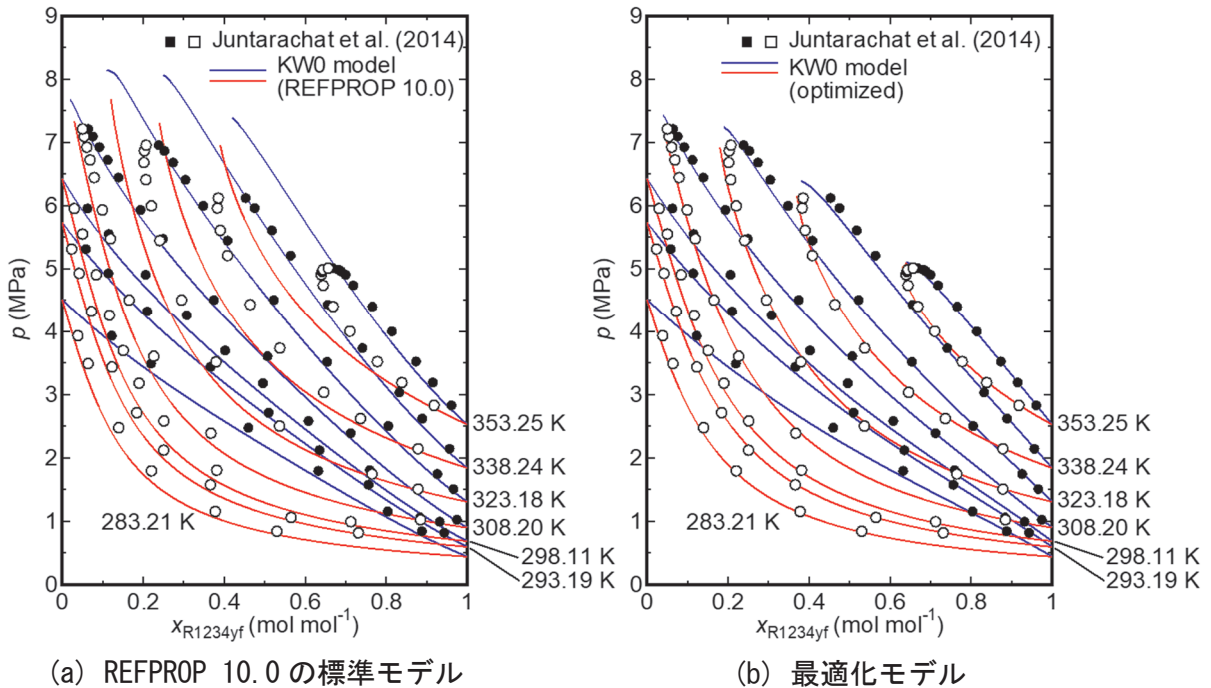


図 2. 1. 1. 1. 6-6: HFO1234yf+CO₂ 系の等温気液平衡

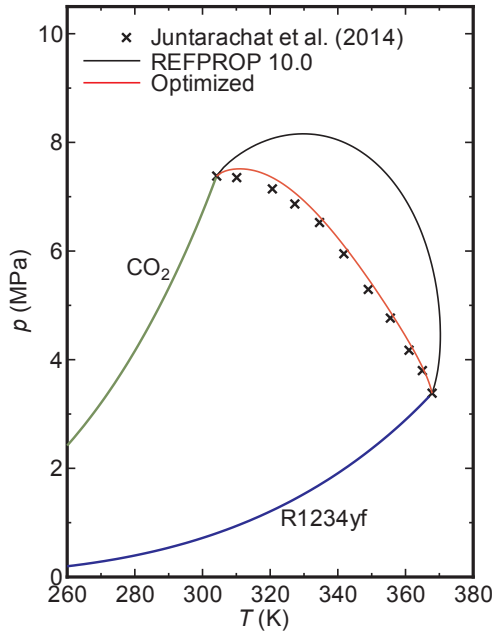


図 2.1.1.1.6-6: HF01234yf+CO₂系の臨界軌跡

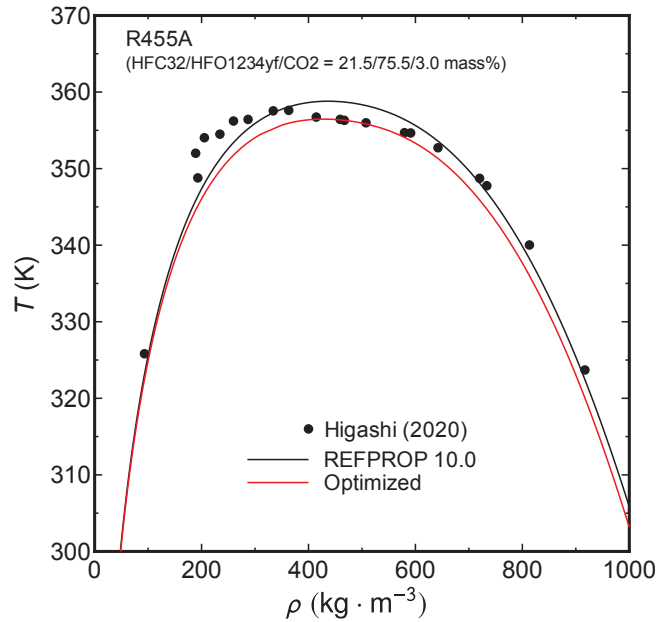


図 2.1.1.1.6-7: HFC32+HF01234yf+CO₂系 (R455A) の気液共存曲線

2.1.1.1.7 輸送の性質の測定及びモデル化 (担当: 佐賀大学)

本項目では、HFO系冷媒の輸送性質（熱伝導率および粘度）の測定を実施した。また、冷媒物性値計算ソフトウェア REFPROP Ver.10 にも採用されている、拡張対応状態原理（Extended Corresponding States model、ECS モデル）による物性値予測計算を行い、その精度を確認した。測定対象の冷媒は下記の通りである。以下に詳細を示す。

- HF01234yf
- HF01336mzz (E)
- HFC32+HF01234yf
- R455A

(a) 熱伝導率測定

(a-1) 測定原理

本実験では、熱伝導率の測定を非定常細線法により行っている。非定常細線法は試料冷媒中に鉛直に張った金属細線を通電加熱し、この時の金属細線の発熱量と温度応答により、金属細線周りの試料冷媒の熱伝導率を測定するものである。この方法で使われている金属細線は発熱体であるとともに温度センサー（測温抵抗体）の役割もある。測温抵抗体は電気抵抗から温度を求める温度計（抵抗温度計）であり、予め温度と電気抵抗の関係を検定により把握した金属細線の抵抗を測定することで温度を求める。本実験ではこの金属細線に白金を採用した。流体は加熱されると密度が小さくなり、温度分布に依存した自然対流が発生するが、非定常細線法では自然対流が発生する前の温度変化を用いて熱伝導率を求めることができる。したがって、流体が静止した状態、つまり固体と同じ状態での理論解析に基づいて、測定結果から熱伝導率を計算する。以下に非定常細線法の計算方法を示す。

非定常細線法の基礎式は一次元円柱座標系非定常熱伝導問題より以下のように表される。

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0 = \left(\frac{q}{4\pi r \lambda} \right) \ln \left(\frac{4\pi r C t}{r^2 C} \right) \quad (2.1.1.1.7-1)$$

ここで、 $\Delta T(t)$ は細線の温度上昇、 T_0 は通電加熱前の細線の初期温度、 q は単位長さあたりの細線の

発熱量、 λ は測定冷媒の熱伝導率、 α は熱拡散率、 t は通電加熱後の経過時間、 r は細線半径、 C は定数で $\ln C$ はオイラー定数と呼ばれる。 $\ln C = 0.5772$ であり、 $C=1.781\cdots$ である。

式(1)を $\ln(t)$ で微分し熱伝導率 λ についてまとめると式 (2) となる。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{d\Delta T}{d \ln t} \quad (2.1.1.1.7-2)$$

上式(2)に示されている通り、熱伝導率算出には細線加熱量 q および温度変化勾配 $\frac{d\Delta T}{dt}$ の測定が必要となる。

(a-2) 実験装置

本実験で使用した非定常細線法を用いた熱伝導率測定装置の概略を図 2.1.1.1.7-1 に示す。本実験に使用した実験装置は、電気ヒーターG(アサヒ理化製作所製管状炉)により測定温度の制御を行っており、測定セル、加圧装置、測定回路(ブリッジ回路)、デジタルマルチメーター(D.M.M)から構成されている。圧力容器 A(V-TECH 製)の中に測定セルと試験冷媒が封入されており、電気ヒーターによって温度管理がなされている。測定セル内に張られた長さの異なる 2 本の白金細線 B に通電加熱を行うことによって、試験冷媒の熱伝導率の測定を行う。デジタルマルチメーター(Agilent 社製 34410A)は測定回路内に生じる電位差を検出するためのもので、測定セル内の白金細線の通電加熱による抵抗値の変化を非平衡電位差として計測する。測定回路の詳細は後述する。

測定セル内の長短 2 本の白金細線 B はそれぞれ測定回路(ブリッジ回路)に組み込まれており、電気ヒーター内に置かれた圧力容器 A に設置した測温抵抗体 H(山里産業製 Pt100)と圧力容器内の白金細線抵抗値により、実験温度条件が定常状態に達していることを確認して圧力容器内温度を決定している。測定セルへの冷媒封入後、ヘリウムガスにより加圧することで高温高压での測定を行うことができる。加圧時は冷媒とヘリウムガスの境界面をサイトグラス E(V-TECH 製)によって確認することで、測定セルにヘリウムガスが混入していないことを確認する。

本装置では安全弁 F により過加圧を防止し、装置に 5MPa を超える圧がかかった場合、ヘリウムガスが抜けるように設定している。

加圧装置により加圧をおこなった後、測定セル下部に設置された圧力計 I(共和電業製 PG-100KU)により実験条件圧力が定常状態に達していることを確認して測定セル内圧力を決定している。定常状態が確認された後、測定セル内の冷媒の対流を防ぐため測定セル下部のバルブを閉じて測定準備状態とする。

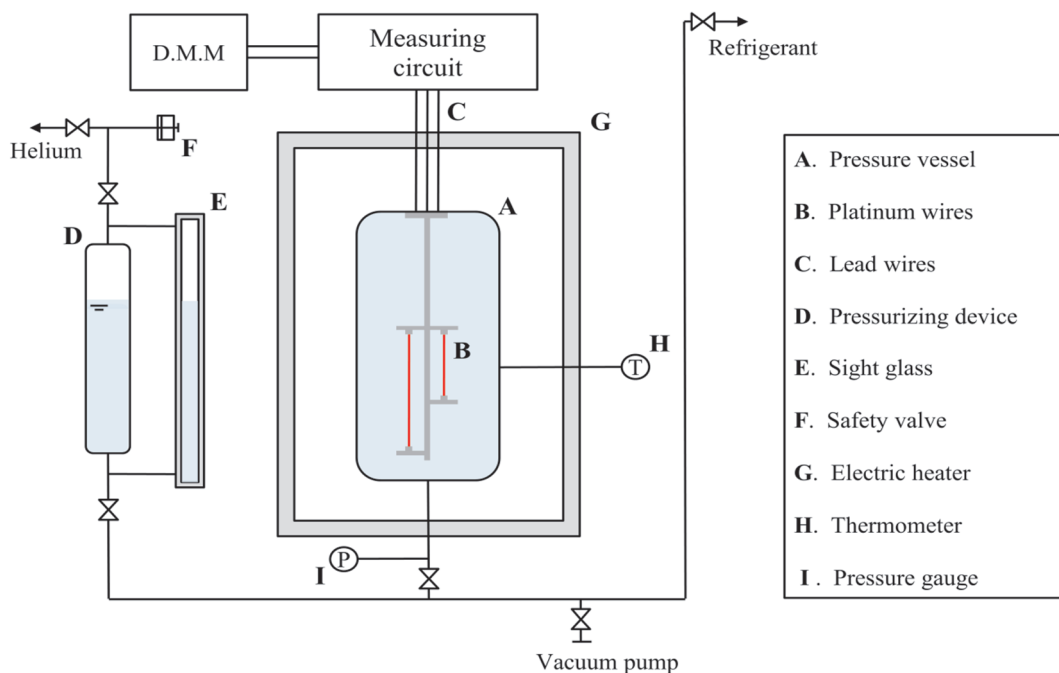


図 2.1.1.1.7-1 熱伝導率測定装置概略

図 2.1.1.1.7-2 に本実験で使用した熱伝導率測定装置における圧力容器の図面および写真を示す。圧力容器(V-TECH 製 SUS304 耐圧 10MPa)には試験冷媒と写真に示しているような熱伝導率測定セルが収められている。測定セル内には熱伝導率測定のための白金細線 ($\phi 15\mu\text{m}$) が垂直に張ってある。白金細線端部は同素材の白金製フックにスポット溶接することで接続している。また白金細線端部の影響を除去するために、本実験では長さの異なる 2 本の白金細線(Long:93.46mm、Short:44.89mm)を使用して熱伝導率の測定を行う。これら 2 本の白金細線は加熱源であるとともに測温抵抗体(抵抗温度計)の役割も果たしている。フックの支持棒は真鍮で作成されており Long、Short とともにフックの位置の調節が可能である。真鍮支持棒端部はセラミックス製の板によって固定されている。

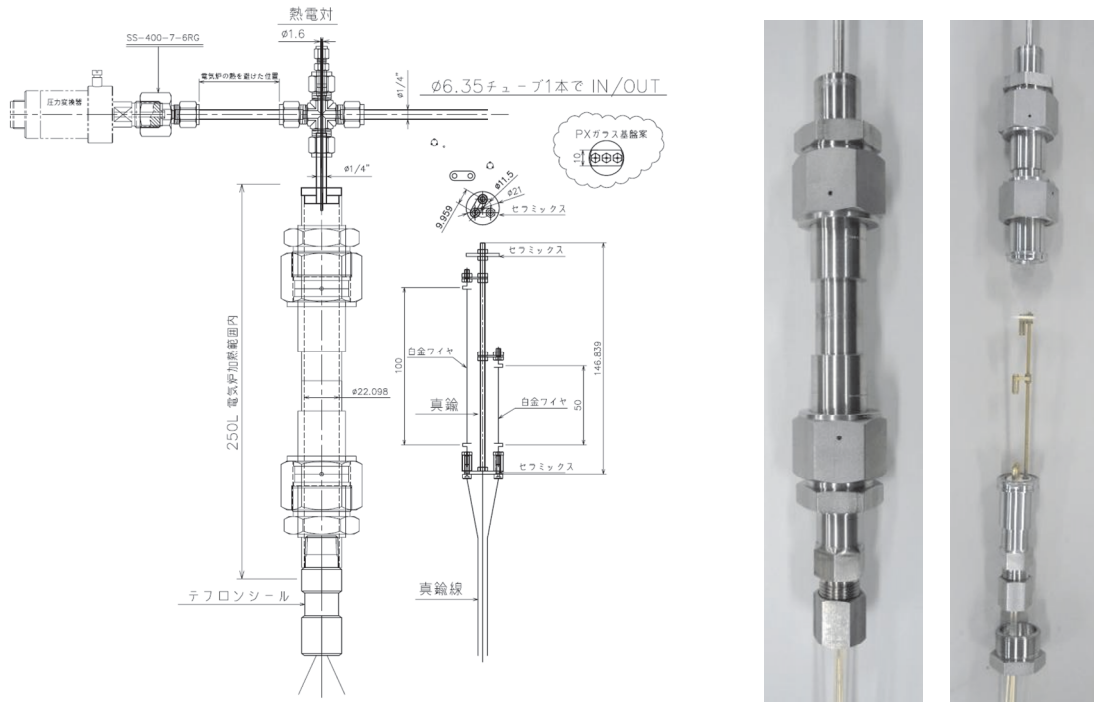
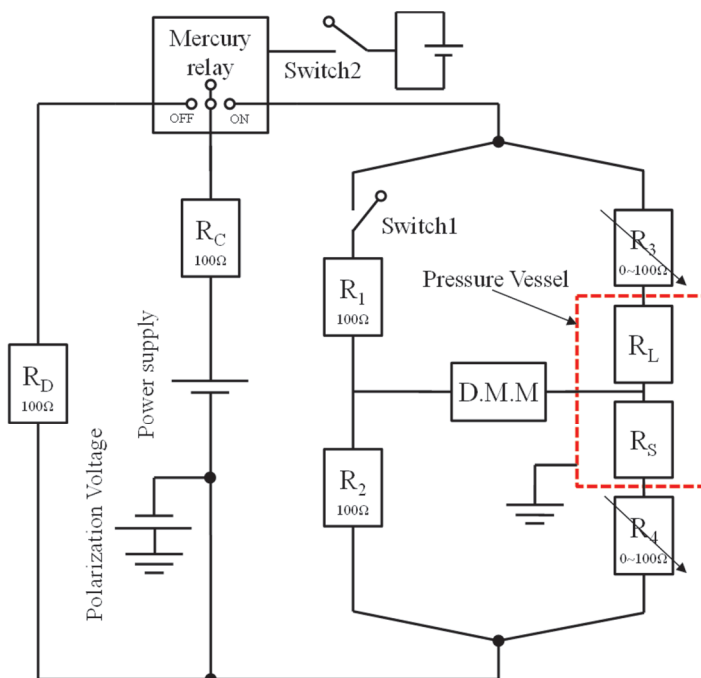


図 2.1.1.1.7-2 測定セル

図 2.1.1.1.7-3 に本実験で使用した測定回路の概略を示す。測定セル内には細線端部の影響を除去するための長短 2 本の白金細線が用いられている。長短 2 本の白金線はそれぞれブリッジ回路に組み込まれている。ブリッジ回路は長短 2 本の白金細線 (Long、Short)、100 Ω の固定抵抗 R1、R2 (横河電気株式会社製 2792A06) および 0~100 Ω の可変抵抗 R3、R4 (アルファ・エレクトロニクス株式会社製 ADR-6104M) から構成されている。測定前に直流安定化電源の電流を安定させるため、あらかじめ抵抗 R_D (横河電気株式会社製 2792A06) から構成されるダミー回路に電流を流しておき、測定開始時にブリッジ回路への切り替えを行う。なお、測定時の抵抗 R_D からブリッジ回路への切り替え部にはチャタリングを防止するために水銀リレー (沖田製作所製 MTP-102N) を使用する。チャタリングとは、リレー機構やスイッチ機構の接点が切り替わった際に、微細で非常に速い機械的振動によって、電気信号が断続を繰り返す現象である。つまりブリッジ回路への ON、OFF が瞬間的に複数回繰り返される現象のことである。抵抗 R3 及び抵抗 R4 は温度によって変化する白金細線の抵抗のバランスをとるための可変抵抗器である。測定温度条件が定常状態になった後、可変抵抗を調整することにより、白金細線の抵抗と可変抵抗との合計値が 100 Ω となるよう設定し、ブリッジ回路内の平衡をとっておく。測定を開始すると白金細線が通電により発熱し、温度が上昇することによって白金細線の抵抗が増加する。するとブリッジ回路の平衡が崩れ、非平衡電位差が生じる。

この非平衡電位差の時間変化をデジタルマルチメータで測定し、前述した式(2.1.1.1.7-2)を用いて熱伝導率を算出する。



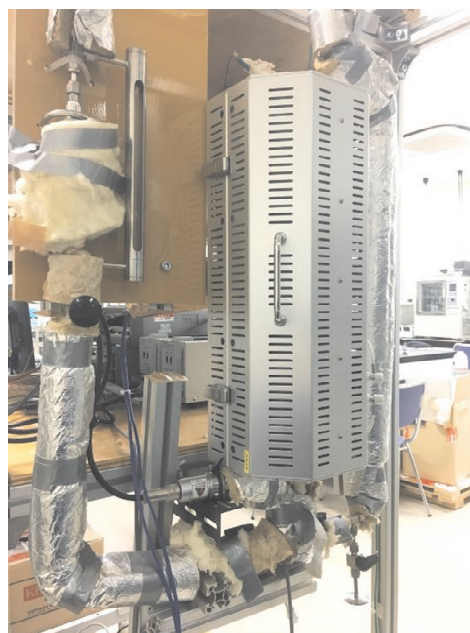
R_L: Long Pt wire, R_S: Short Pt wire, R1: Resistor(100Ω),
R2: Resistor(100Ω), R3: Resistor(0~100Ω), R4: Resistor(0~100Ω),
Rc: Resistor(100Ω), Rd: Resistor(100Ω)

図 2.1.1.1.7-3 測定回路

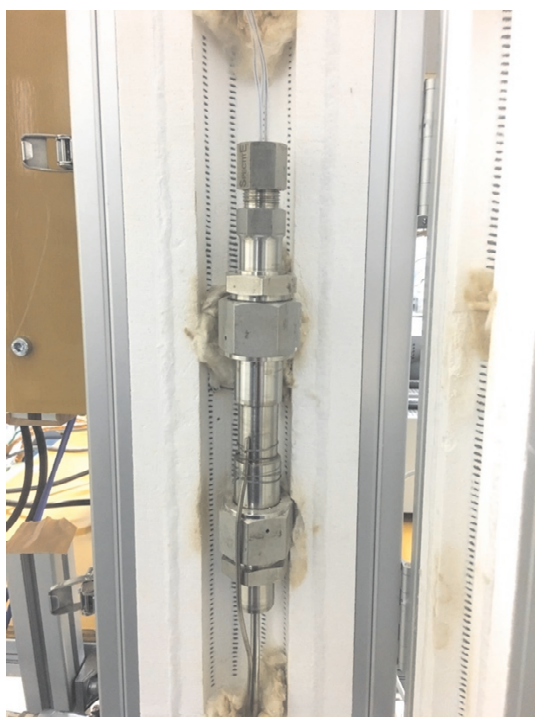
本熱伝導率測定装置の測定可能温度範囲は室温 +10 °C ~ 220 °C、測定可能圧力は5 MPa までであり、本測定装置による不確かさは2.3% 未満である。
本研究で作製された熱伝導率測定装置の外観写真を図 2.1.1.1.7-4 に示す。



(a) 装置外観



(b) 加熱容器および加圧装置



(c) 測定セル

図 2.1.1.1.7-4 測定装置外観写真

(a-3) 実験結果および考察

測定に先立ち、白金細線の電気抵抗と温度の関係を、測定セルに挿入された白金測温抵抗体 (pt100、測定精度±0.05℃) を真の温度とし、その時の白金細線の電気抵抗を測定した。本実験に使用された白金細線の抵抗と温度の関係は、定常温度状態に1時間以上保たれた後、压力容器内にある白金細線の Long、Short の抵抗値をそれぞれ 40℃から 170℃まで 10℃間隔で測定を行った。白金線細線の抵抗と温度の関係の測定結果より、測定セル内の白金細線の抵抗 R [Ω]と温度 T [K]の関係は次式により表される。

$$R = a + b(T - 273.15) \quad (2.1.1.1.7-3)$$

表 2.1.1.1.7-1 係数 a および b の値

	a	b
Long [Ω]	59.9724	0.2042
Short [Ω]	26.7147	0.1011

図 2.1.1.1.7-5 に HF01336mzz (E) の測定範囲を示す。図のように、圧縮液から過熱蒸気までの幅広い条件での測定を実施した。測定結果を図 2.1.1.1.7-6 にまとめる。図より、HF01336mzz (E) の熱伝導率は、一般的な冷媒と同様に、圧縮液領域においては温度上昇に伴い低下し、過熱蒸気域においては温度上昇に伴い上昇する。また、圧力への依存性は圧縮液においては小さく、過熱蒸気域においては熱伝導率は圧力の上昇に伴い増加する。

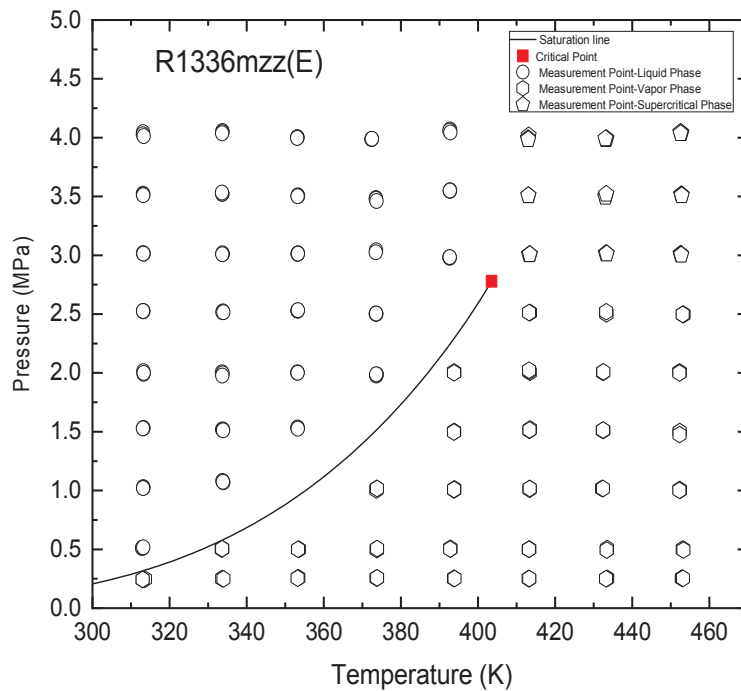


図 2.1.1.1.7-5 測定条件

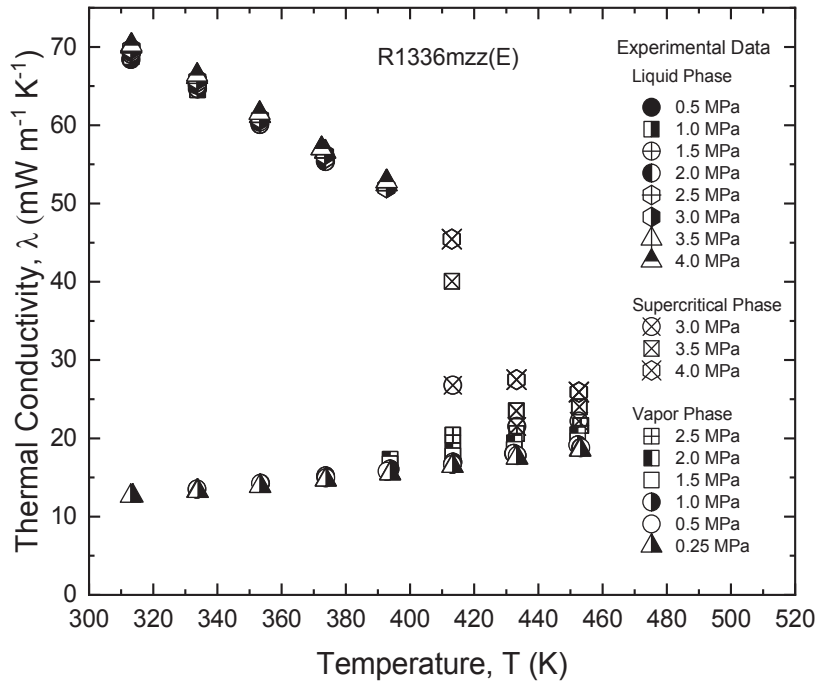
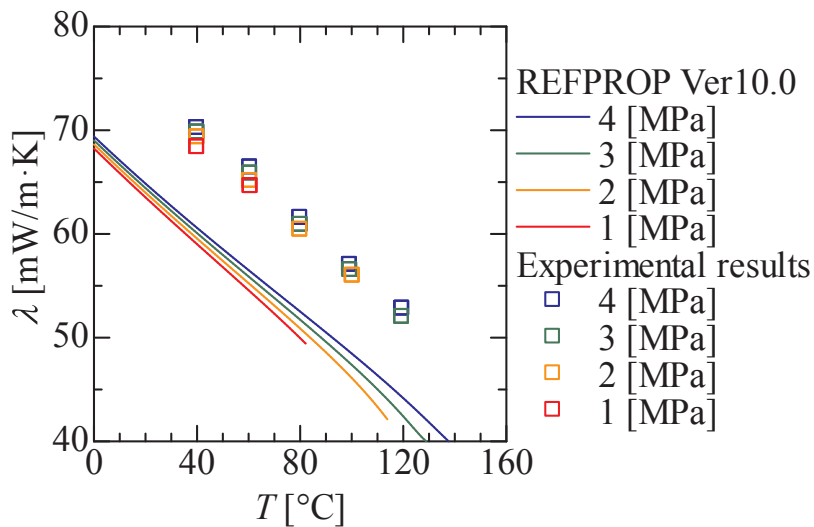
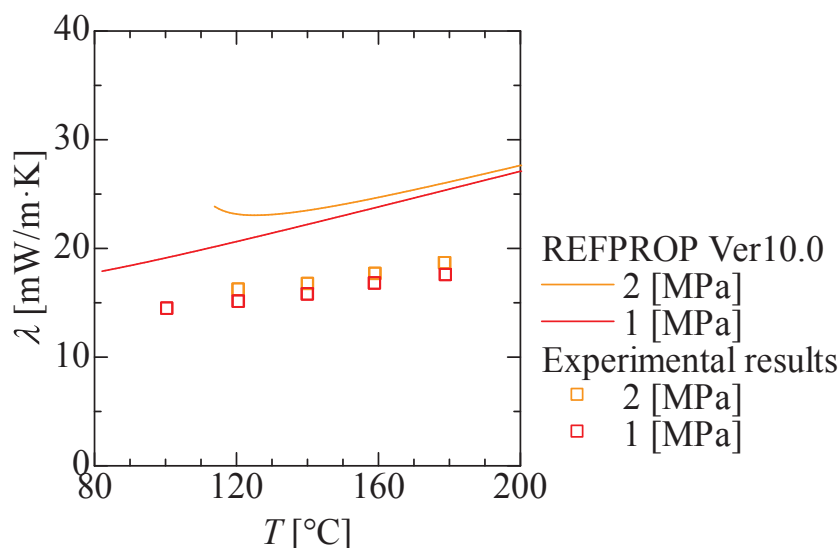


図 2.1.1.1.7-6 測定結果

図 2.1.1.1.7-7 に、本実験による測定値と REFPROP Ver. 10.0 による推算値との比較を示す。なお、REFPROP Ver. 10.0 の推算値は拡張対応状態原理に基づいた計算結果で、実験値に基づいたパラメータフィッティングは行われてない。液相における熱伝導率の推算値は実験値より約 10% 低い値を示し、気相における熱伝導率の推算値は実験値より約 20% 高い値を示している。



(a) 液相



(b) 気相

図 2.1.1.1.7-7 測定値と REFPROP Ver. 10.0 の推算値との比較

(b) 粘度測定

(b-1) 測定原理

本実験では粘度の測定をタンデム型細管法により行った。細管法は、細管内を層流状態で流れる試料の圧力変化の測定値から粘度を求める方法であり、ハーゲン・ポアズイユの理論式をベースとする最も確立した測定法の一つである。なお、単一細管を用いる一般的な方法では管端部における損失を考慮する補正係数を与える必要があるが、タンデム型ではそれらの損失を消去した測定が可能となる。

図 2.1.1.1.7-8 に示すような細管内を層流状態で流れる流体の粘度 η と圧力損失 Δp の関係はハーゲン・ポアズイユの式より次式で表される。

$$\eta = \frac{\pi a^4 \Delta p}{8Lq} \quad (2.1.1.1.7-4)$$

ここで a は細管内径、 L は細管長さ、 q は体積流量である。しかし実際には細管端面において流体が出入りする際に図 2.1.1.1.7-8 に示されているような圧力損失が生じるため、細管内である区間における圧力損失を厳密に測定するのは難しく、測定値は管壁摩擦損による圧力差よりも大きくなる。

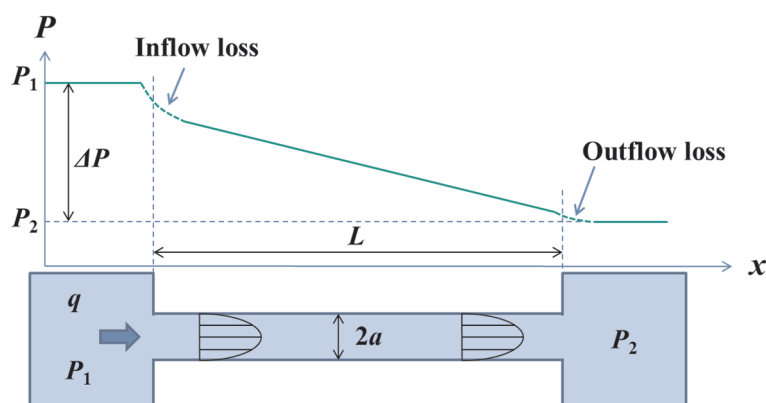


図 2.1.1.1.7-8 単一細管の圧力損失概略

本研究では、2本の細管を図 2.1.1.1.7-9 に示すように直列に設置したタンデム型の細管式粘度測定法を考案した。この場合の圧力分布は図に示すようになり、測定される2つの圧力差はいずれも十分に発達した層流区間の圧力損失に加えて、出入口での圧力損失を含んでいる。これらの圧力変化を図

2.1.1.1.7-10に示すように重ね合わせると、 L_L-L_S の長さを持つ仮想的な細管の出入口流路急縮小および拡大の損失を除去した摩擦圧力損失を得ることができ、したがって次式により粘度を求めることができる。

$$\eta = \frac{\pi a^4 (\Delta p_L - \Delta p_S)}{8q(L_L - L_S)} \quad (2.1.1.1.7-5)$$

また、2本の細管の内径が異なる場合、その違いを考慮した式として次式が得られる。

$$\eta = \frac{\pi(a_L^4 \Delta p_L - a_S^4 \Delta p_S)}{8q(L_L - L_S)} \quad (2.1.1.1.7-6)$$

ここで、 L_L および L_S はそれぞれ Long および Short 管の長さを表しており、 a_L および a_S はそれぞれ Long および Short 管の内径を表している。

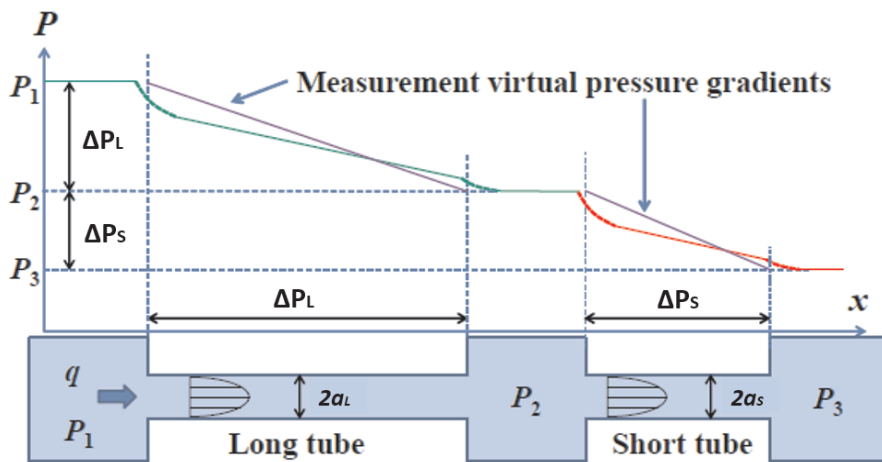


図 2.1.1.1.7-9 タンデム型細管の圧力損失概略

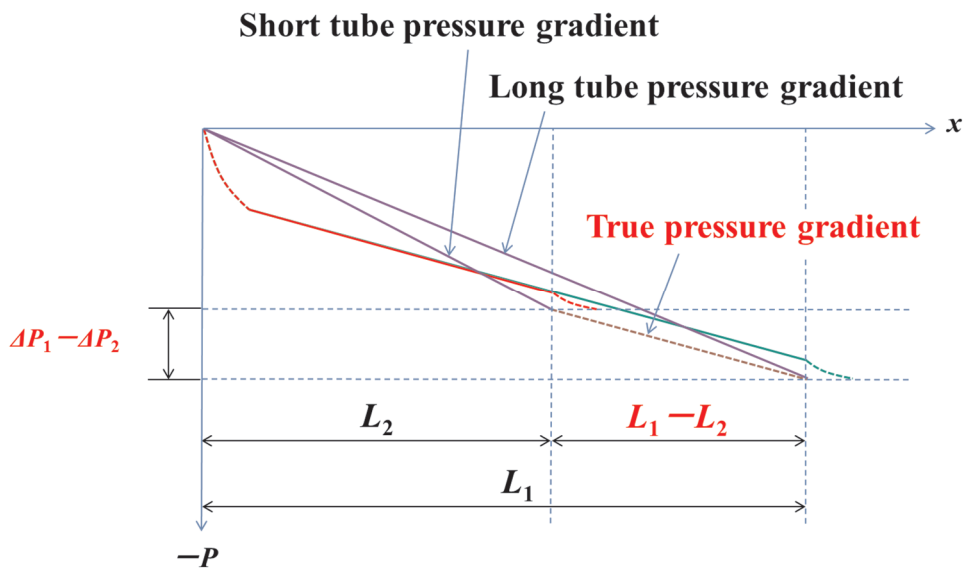


図 2.1.1.1.7-10 圧力分布の重ね合わせによる管端部損失の除去

(b-2) 実験装置

本実験で用いた細管式粘度測定装置の概略を図 2.1.1.1.7-11 に示す。粘度測定用圧力容器 A (V-TECH 製) は電氣管状炉 C (アサヒ理科製作所製 ARF3-700-600KC) 中に、加圧容器 D (V-TECH 製) 及びサイトグラス E (V-TECH 製) は恒温槽 M (アズワン株式会社製ラボ・ビュー TRW-70TP) 中にそれぞれ設置されており、測定時には定常温度に保たれる。電氣管状炉 C はデジタル温度コントローラ F (アサヒ理化学製作所製 AMF-9P-Ⅲ-THV 型) により温度を制御され、試験冷媒の温度はデジタル温度コントローラ F により設定される。また、加圧容器 D 内には試験冷媒とヘリウムガスが入っており、ヘリウムガスによる加圧で冷媒の圧力を設定できる。さらに流量はポンプ H (日本精密株式会社製ミニケミカル無脈流ポンプ NP-KX-200 型) により設定される。粘度測定用圧力容器 A 内には同径で長さの異なる長短 2 つのパイレックス細管 B が水平に設置されており、両端における差圧 ΔP_1 、 ΔP_2 を差圧変換器 O (共和電業製 PDU-50KP) で測定している。また、コリオリ式流量計 I (ブロンコストジャパン株式会社製 M12-AAD-11-0-S)、白金側温抵抗 N (山里産業製 Pt100)、圧力変換器 P (共和電業製 PG-100KU) により試験冷媒の流量、温度、圧力の安定性の確認を行った。

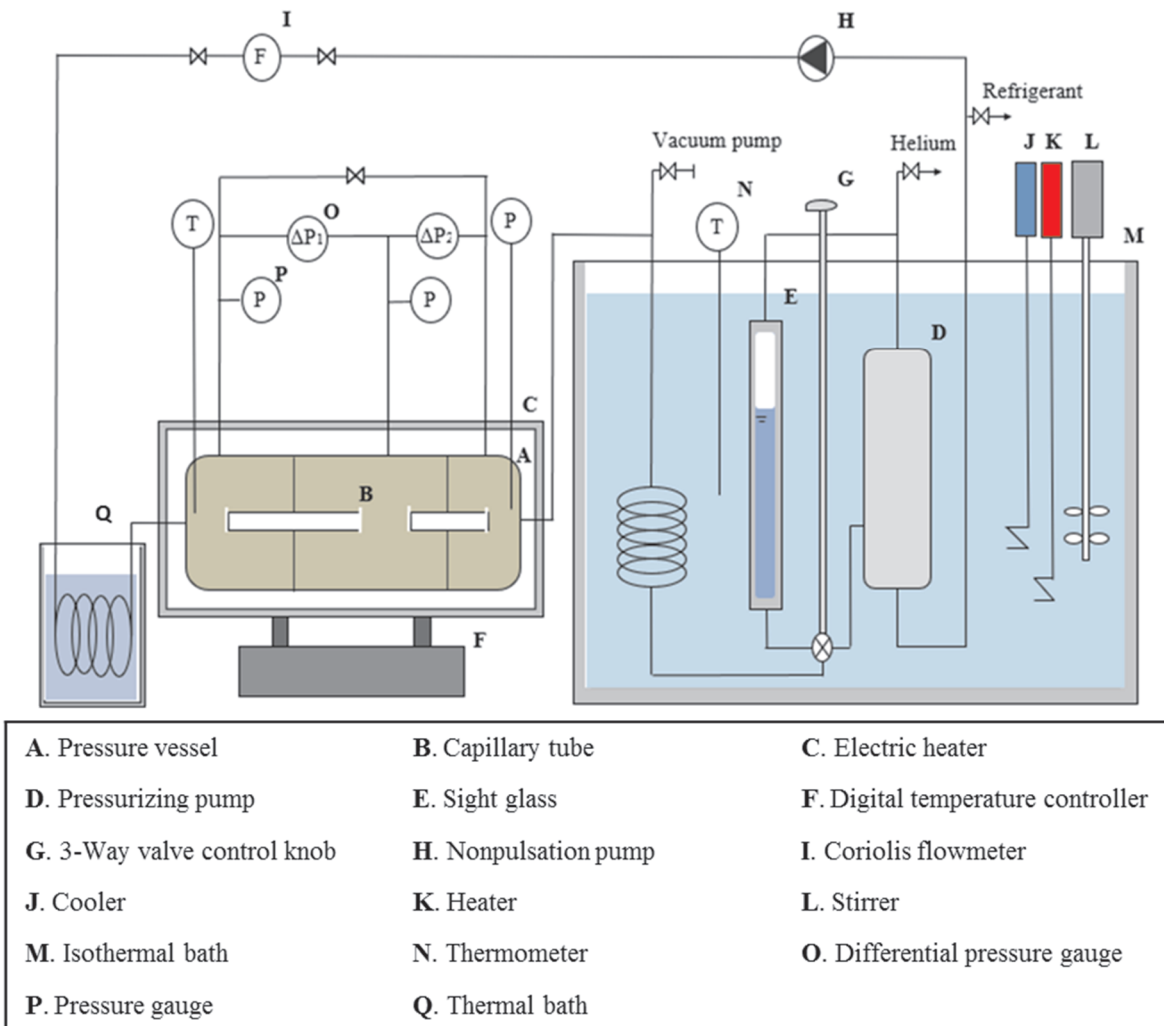


図 2.1.1.1.7-11 粘度測定装置概略

図 2.1.1.1.7-12 に本実験で用いたガラス細管と同等の予備品をマイクروسコープにより撮影した側面、端面の画像を示す。粘度の測定精度は細管の内径の測定精度により大きく左右される。そのため細管の内径の測定は厳密に行う必要がある。そこで水銀を用いて本実験で使用するパイレックスガラス製細管の内径及び長さの測定を行った。図 2.1.1.1.7-13 に示すように水銀を注入し、水銀柱の長さ、重さから内径を算出する。また、細管は周囲との温度が定常となっている状態を考える。これは水銀を細管に注入する際に伝わった体温によって水銀の密度や水銀柱の長さが変動するのを防ぐためである。細管内径の算出式を式(2.1.1.1.7-7)に示す。図 2.1.1.1.7-12 の L_3 は細管の長さ、式(2.1.1.1.7-6)の $(L_2 - L_1)_{Hg}$ は水銀柱の長さである。それぞれの長さは顕微鏡を用いて目視で 1/100[mm]精度で測定し、質量 m_{Hg} は高精度重量計によって 1/100 mg 精度で測定した。 ρ_{Hg} は水銀の密度であり、理科年表 2013 より抜粋した。今回の実験で使用した細管の測定結果を以下の表 2.1.1.1.7-2 に示す。

$$\alpha = \sqrt{\frac{m_{Hg}}{\pi \rho_{Hg} (L_2 - L_1)_{Hg}}} \quad (2.1.1.1.7-7)$$

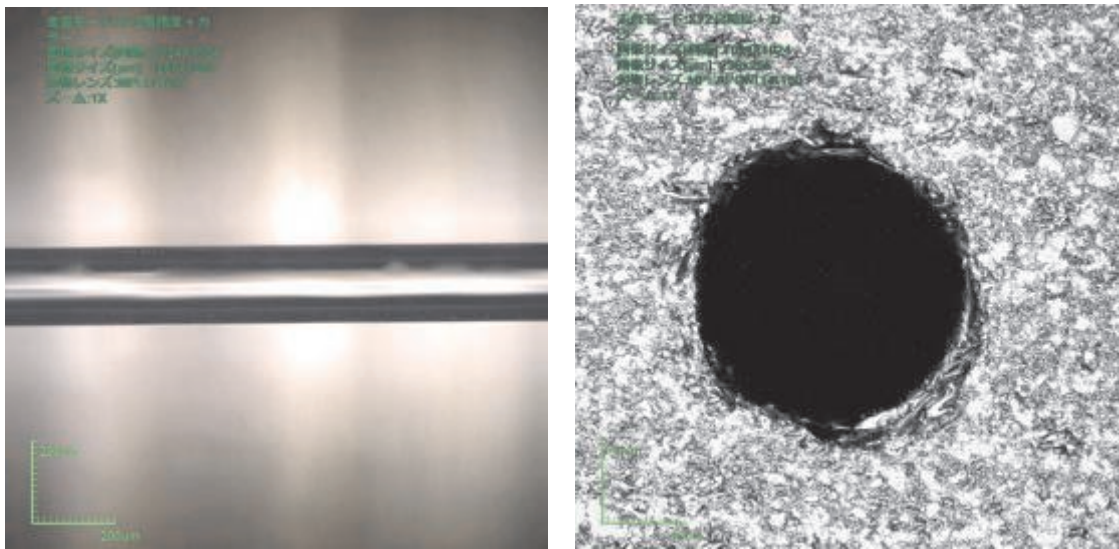


図 2.1.1.1.7-12 細径管側面および端面

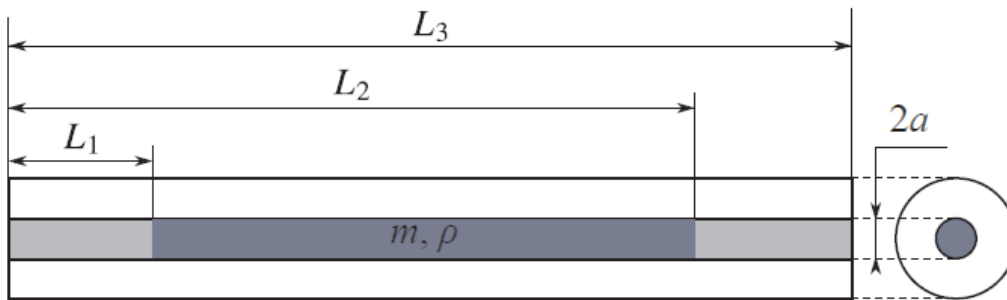
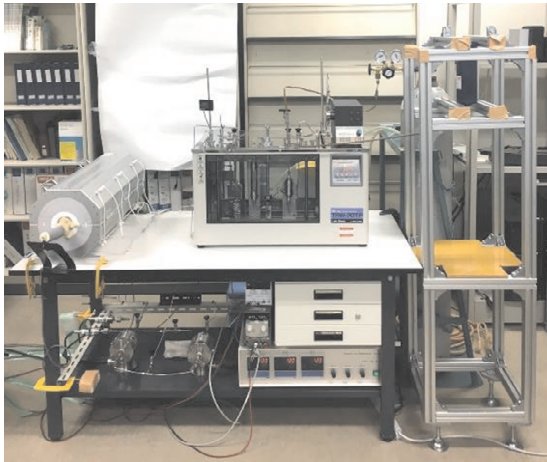


図 2.1.1.1.7-13 細管内径測定概略

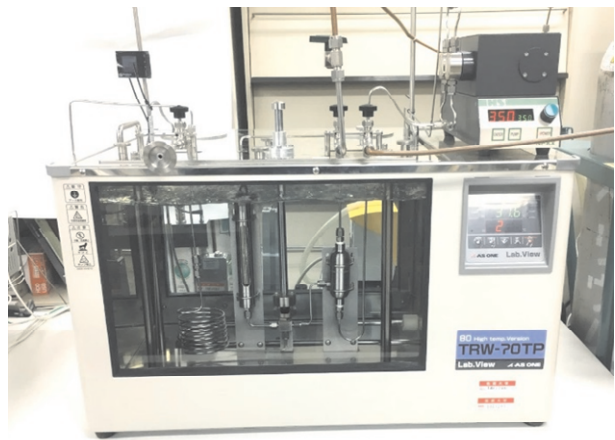
表 2.1.1.1.7-2 細管内径および長さ

	長さ[mm]	内径[mm]
Long	99.983	0.12785
Short	49.923	0.12790

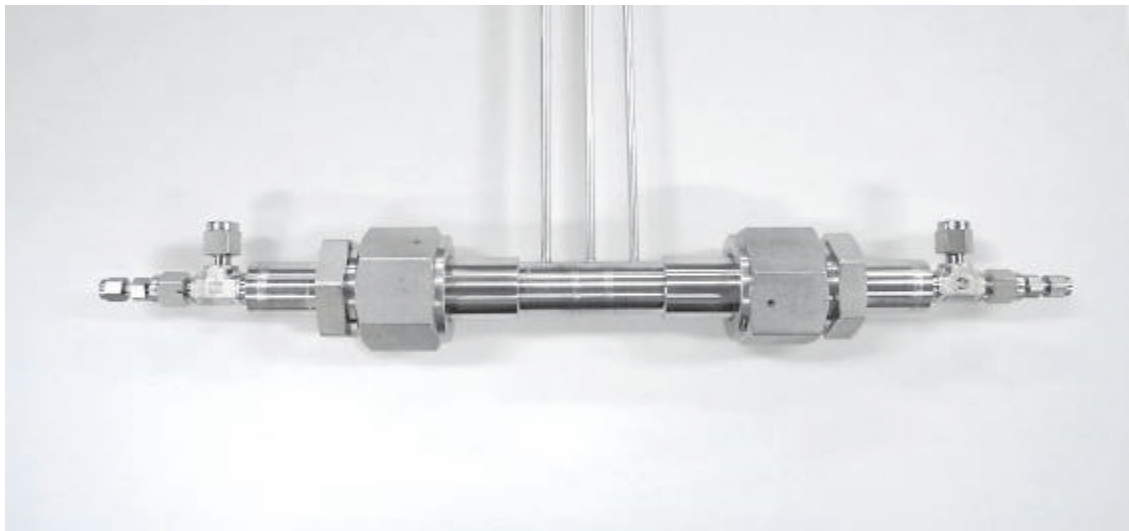
本研究で作製された粘度測定装置の測定可能温度範囲は室温+10℃ ~ 220℃、測定可能圧力は 5 MPa までであり、本測定装置の不確かさは約 3 %であると算出された。
本研究で用いた粘度測定装置の写真を図 2.1.1.1.7-14 に示す。



(a) 装置外観



(b) 恒温水槽



(c) 測定セル

図 2.1.1.1.7-14 実験装置写真

(b-3) 実験結果

図 2.1.1.1.7-15 および図 2.1.1.1.7-16 にそれぞれ HFO1234yf の圧縮液、蒸気における粘度の測定点を示す。HFO1234yf の圧縮液における粘度測定は温度 40°C~80°C、圧力 2.0 MPa~4.0 MPa の範囲で行われ、蒸気については温度 60°C~140°C、圧力 1.0 MPa~3.0 MPa の範囲で行った。また、図 2.1.1.1.7-17 および図 2.1.1.1.7-18 に圧縮液および過熱蒸気条件における測定結果を示す。両図には REFPROP ver10 による計算値も実線により併せて示している。

図 2.1.1.1.7-17 より、圧縮液の粘度は温度が上昇するにしたがって減少しており、圧力が上昇するにしたがって増加していることが分かる。また、温度が上昇するにつれて実験値が計算値よりもわずかに減少していく傾向が見られたものの、計算値は実験値を良好に再現していることが確認できる。

図 2.1.1.1.7-18 より、過熱蒸気の粘度は圧力および温度が上昇するにしたがって粘度測定値は上昇していることが分かる。また、圧力条件 3.0 MPa、2.0 MPa においては計算値は実験値とほとんど一致していることが分かる。ただし、圧力条件 1.0 MPa においては計算値よりも実験値の偏差が平均で約 14.8%小さい値が得られており、モデルの修正が必要であると考えられる。

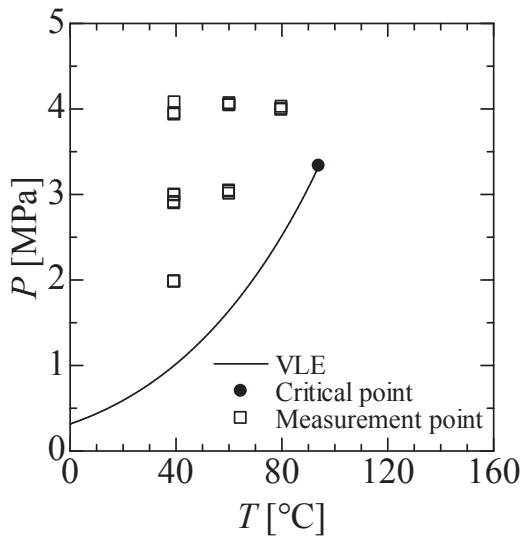


図 2.1.1.1.7-15 圧縮液粘度測定条件

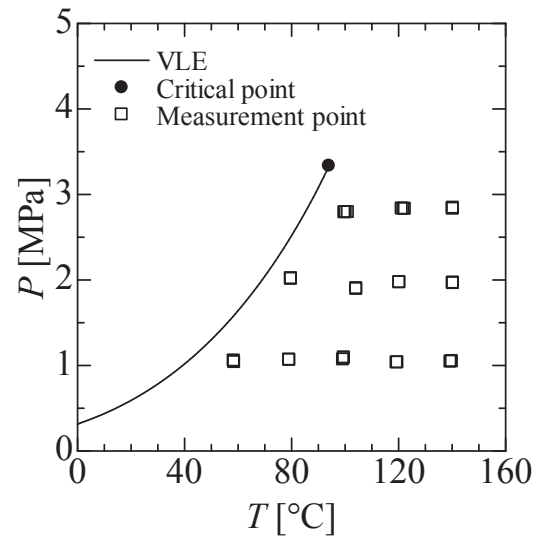


図 2.1.1.1.7-16 過熱蒸気測定条件

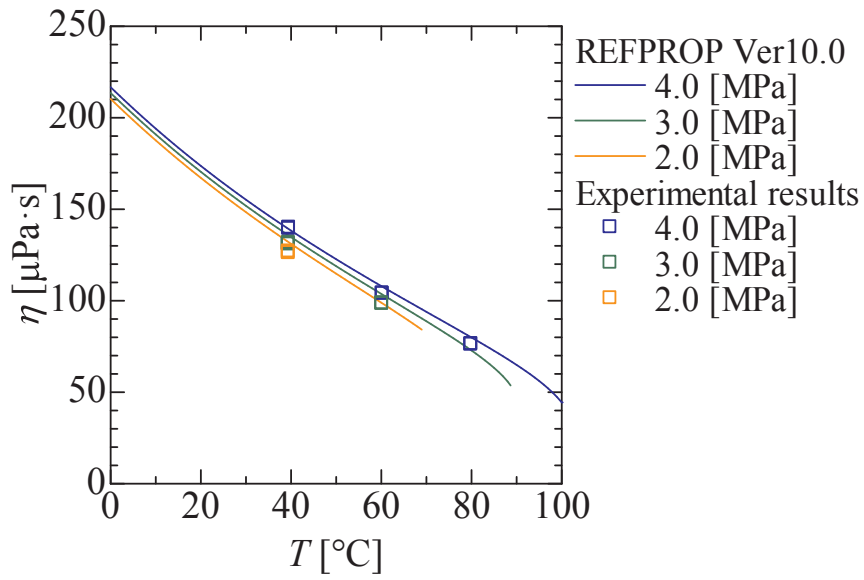


図 2.1.1.1.7-17 圧縮液粘度測定結果

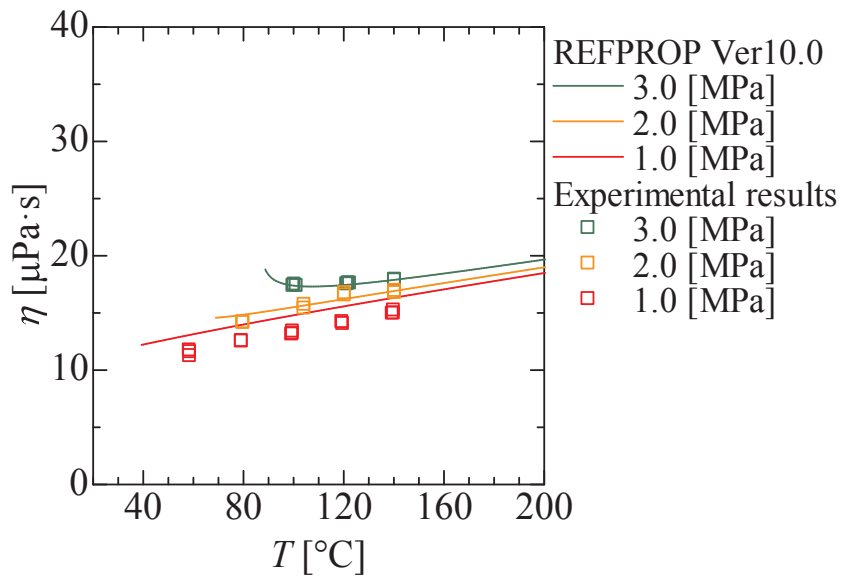


図 2.1.1.1.7-18 過熱蒸気粘度測定結果

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

2.1.1.2.1 プレート式熱交換器内の伝熱特性評価（担当：佐賀大学）

本項目では、HF0 系冷媒のプレート式熱交換器内部における蒸発・凝縮熱伝達率の測定を実施した。測定対象の冷媒は下記の通りである。以下に詳細を示す。

- HF01234yf
- HFC32
- HFC32+HF01234yf（2020 年度実施予定）
- R455A（2020 年度実施予定）

(a) 実験装置

熱伝達率実験装置の概略を図 2.1.1.2.1-1 に示す。この実験装置は液だめ（アキュムレータ）、コリオリ式流量計（東京計装株式会社 MASSMAX3300C）、電磁流量計（東京計装株式会社 EGM1100C）、熱源ユニット（Lauda 社製プロセス用循環恒温水槽インテグラル T、EYELE 社製、トーマス科学機械株式会社製循環式低温恒温槽）、サイトグラス、混合室、マイクロポンプ（中央理化学工業株式会社製 GC-M23-PV5）、プレヒーター（日阪製作所 BXC-006-45NU-50）、アフターコンデンサー（日阪製作所 BXC-006-45NU-50）、テストセクションから構成される。

マイクロポンプから出た冷媒は、コリオリ式流量計で質量流量を計測された後、プレヒーターで加熱される。その後、混合器で圧力と温度が計測され、テストセクションへ入る。テストセクション内には熱電対が挿入されており、内部の壁面温度が測定される。テストセクションを出た冷媒は液だめ、アフターコンデンサーで冷却されマイクロポンプへ戻る。以上がサイクルの構成である。テストセクションにおける冷媒と熱原水の流れ方向（上昇流、下降流）は四方バルブで切り替えることができる。また、ポンプ後方とテストセクション前後に設置されたサイトグラスによってサイクル内の冷媒の状態を観察することができる。冷媒流量はマイクロポンプの回転数によって調節され、圧力はプレヒーター入口、テストセクション入口・出口、差圧計前で圧力変換機を用いて測定される。熱電対、圧力変換機、コリオリ式流量計の出力値の読み込みにはデータロガー（ケースレーインストルメンツ株式会社製 スイッチング機能付 DMM3706 型）を用いている。

本実験では冷媒として HFC32 および HF01234yf を使用し、熱原水としてプレヒーター、液だめ、テストセクションには水、アフターコンデンサーには凍結防止のため水-グリコール混合液を使用している。

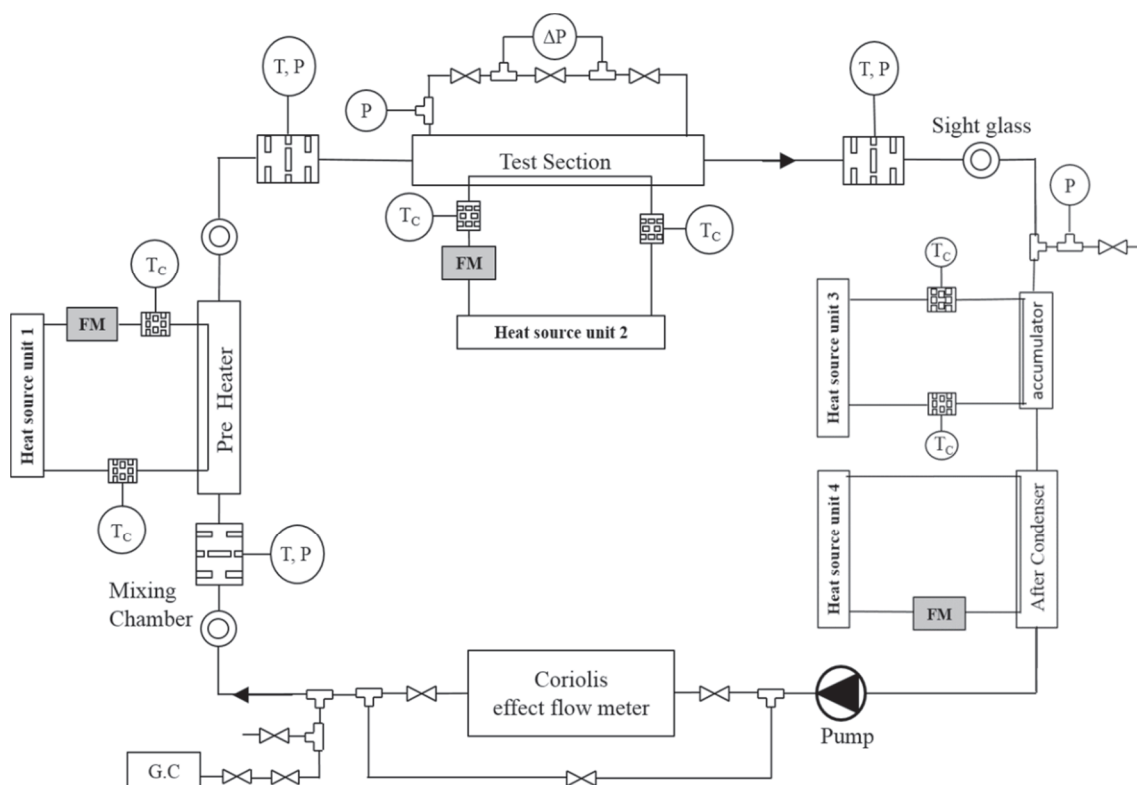


図 2.1.1.2.1-1 実験装置概略

テストセクションに供給する熱源水の配管流路を図 2.1.1.2.1-2 に示す。テストセクションの水配管は熱源ユニット、電磁流量計、面積式流量計 (COFLOC 製)、四方バルブ、フィルター、熱電対から構成される。熱源ユニットを出た熱源水はホースを通り、電磁流量計に入り流量を測定した後、ホース、HT 管、銅管を通り T 字継手によって二手に分岐される。分岐した熱源水は面積式流量計で流量を調節され、四方バルブを通りテストセクションへと流入する。テストセクションへと流入する熱源水は四方バルブによって上部流入と下部流入に切り替えることができる。テストセクション出入口前後にフィルターと T 型熱電対が設置されており、フィルターにより混合された熱源水の温度を測定している。

プレヒーターおよびアフターコンデンサー側の配管は、熱源ユニット、フィルター、電磁流量計、熱電対、ニードルバルブから構成される。熱源ユニットを出た熱源水はホース (トヨシリコンホースチューブ) を介して電磁流量計を通り、耐熱性塩化ビニル管 (HT 管) および銅管を通してプレート式熱交換器で熱交換を行う。熱交換器前後にフィルターと T 型熱電対が設置されており、フィルターで混合された水の温度を計測している。熱交換器を通過した後、再び銅管、HT 管、ホースを通り熱源ユニットへと水が流れ、循環している。なお、アフターコンデンサーに関しては熱交換器内を流れた水は液だめに流入し、銅管、HT 管、ホースを通り熱源ユニットへと流れ水が循環している。流量調節はプレヒーター、アフターコンデンサーともにニードルバルブで行われる。

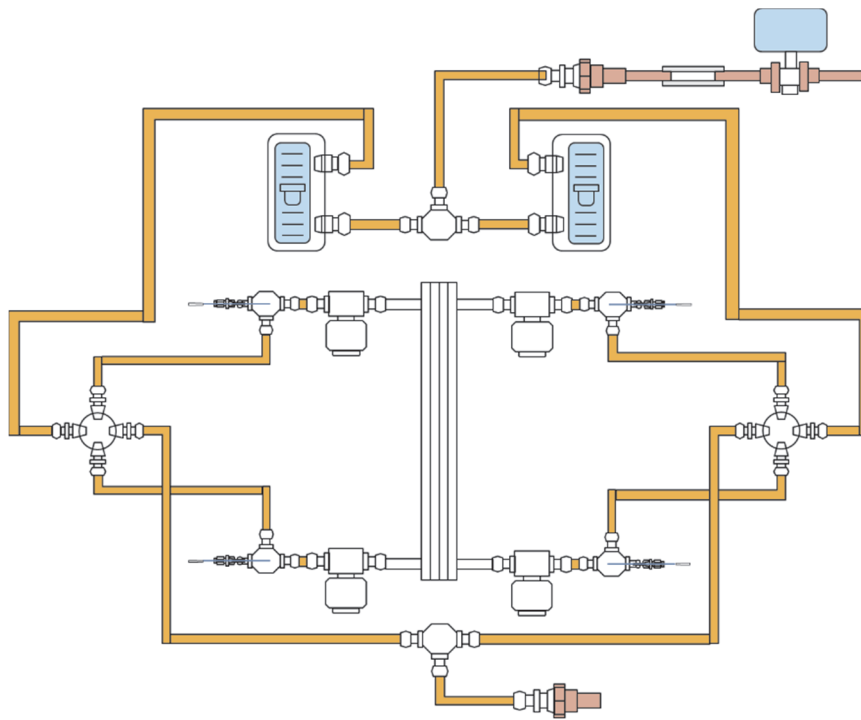
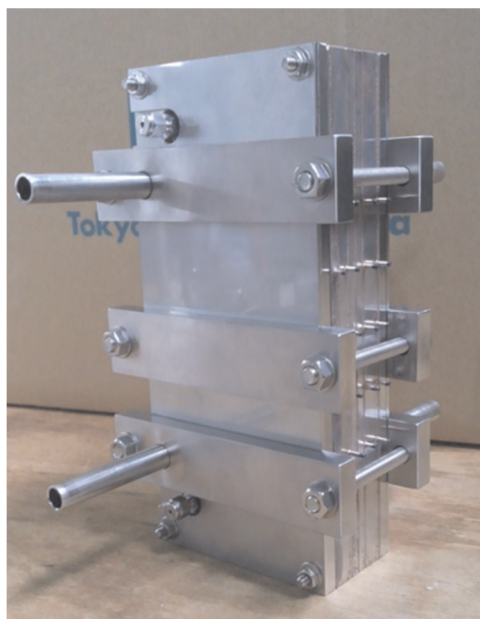


図 2.1.1.2.1-2 テストセクションへの熱源配管図

図 2.1.1.2.1-3 に本実験で用いたテストセクションの写真および詳細図を示す。テストセクションはロウ付けされた 8 枚のプレートとヘッダーによって構成される。中心部には幅 1.5mm、深さ 1.5mm のヘリボーン型の溝が形成された 2 枚のプレートが使用されている。このヘリボーン型プレートの 2 枚の内 1 枚を逆向きにして重ね合わせることで制作されている。冷媒は 3/8 インチのステンレス管からこの 2 枚のプレート間に形成された流路にプレート左側から流入する。冷媒流路を形成するプレートの外側には厚さ 10 mm のプレートが重ねあわされており、プレートの両面には水平方向に直径 1.6 mm の溝が形成されている。テストセクションはこのプレートに形成された溝に外径 1.6 mm のステンレス管が差し込まれた状態でロウ付けされており、実験時にはこのステンレス管内に直径 0.5 mm のシース K 型熱電対を差し込む。このプレートの外側には深さ 5 mm のくぼみが付いた厚さ 6 mm のプレートが重ね合わされており、ヘッダーに取り付けられたステンレス管から流入した熱源水がその内部を流れる。プレート流路諸元を表 2.1.1.2.1-1 に示す。



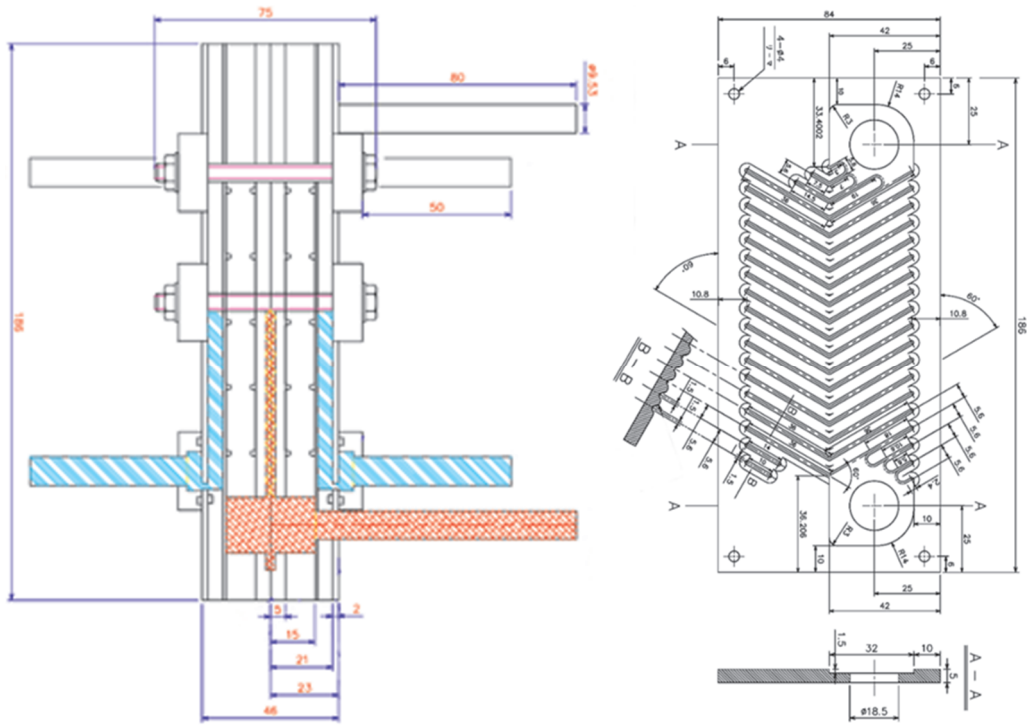


図 2.1.1.2.1-3 テストセクション

表 2.1.1.2.1-1 テストプレート諸元

Corrugation type	Chevron
Fluid flow plate length H (mm)	117.5
Plate width W (mm)	64
Area of the plate (m ²)	0.0075
Chevron angle β (deg)	60
Corrugation pitch P (mm)	5.6
Corrugation depth (mm)	1.5
Hydraulic equivalent diameter (mm)	2.6
Inlet and outlet pipe	same side

テストセクションの壁温計測にはK型シース熱電対を使用した。図2.1.1.2.1-4(a)、(b)に8点計測実験時の温度測定位置(テストセクションの正面図と断面図)を示す。図4(a)はテストセクションを正面から見た場合の測定位置、同(b)は熱電対の挿入位置である。テストセクションの水平方向に8点、垂直方向に5点を4セットで合計160点の壁温を測定する。なお、水平方向の測定位置はプレートの中心部を基準とし、左右対称に各測定点の間隔を8mmとし、合計8点とする。

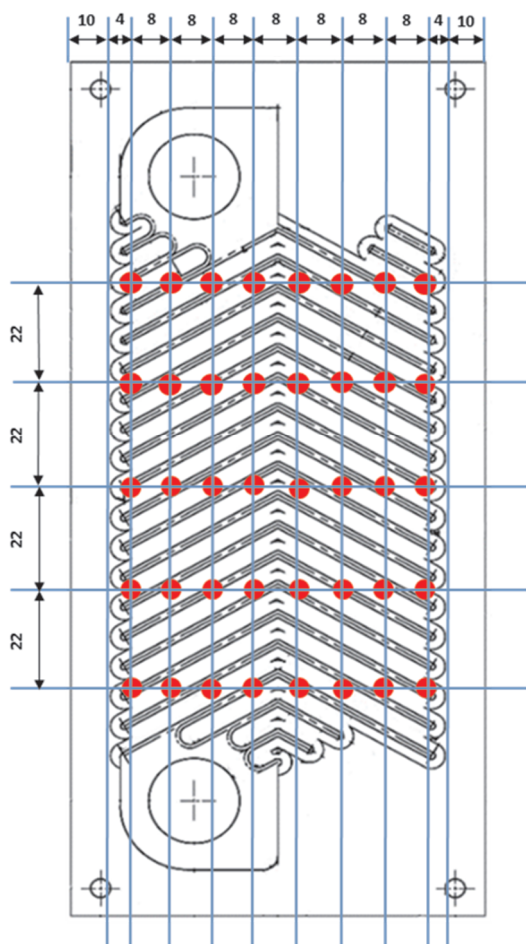


図 2.1.1.2.1-4(a) 温度測定位置 (正面)

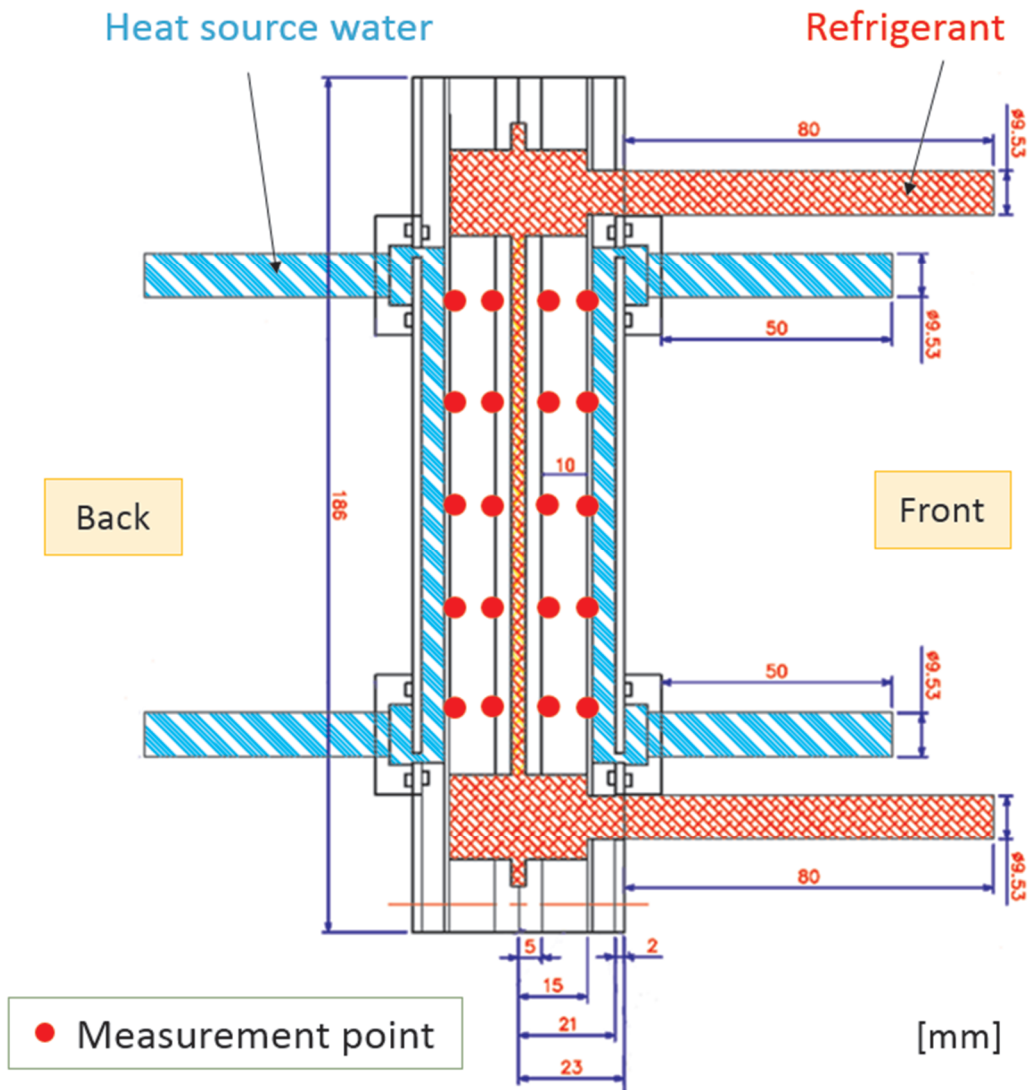


图 2.1.1.2.1-4 (b) 温度测定位置 (断面)

(b) 実験データの整理手法

局所熱伝達率を求めるため、テストセクション内の局所熱流束 q_x を一次元定常熱伝導の仮定のもと次式から求めた。

$$q_x = \lambda \frac{|T_{w,ref} - T_{w,water}|}{L_1} \quad (2.1.1.2.1-1)$$

ここに、 $T_{w,ref}$ は冷媒側ステンレスブロック温度（位置は図4に示している）、 $T_{w,water}$ は同水側温度、 L_1 は冷媒側および水側温度測定位置間の距離、 λ はステンレスブロックの熱伝導率である。冷媒側の内壁温を外挿により下式で求める。

$$T_{w,x} = T_{w,ref} \pm \frac{q_x L_2}{\lambda} \quad (2.1.1.2.1-2)$$

L_2 は冷媒側ステンレスブロックとプレート内表面間の距離である。また、上式(2)の符号は、凝縮試験においては和を、蒸発試験では差をとる。

局所熱伝達率は下式により求める。

$$\alpha_x = \frac{q_x}{|T_{wall,x} - T_{sat}|} \quad (2.1.1.2.1-3)$$

ここで T_{sat} はテストセクション入口の圧力変換器から得られた圧力を用いて求めた飽和温度[°C]である。ただし上式は純冷媒の場合のみ適用できる。

テストセクション入口の比エンタルピー h_{in} は、プレヒーターでの冷媒熱交換量 Q_{ph} およびヒートロス Q_{loss} またはヒートゲインにより、下式により求める。

$$\dot{h}_m = \dot{h}_{p,in} + \frac{Q_{ph} - Q_{loss}}{m_{ref}} \quad (2.1.1.2.1-4)$$

ここに、 m_{ref} は冷媒の質量流量である。配管でのヒートロスの見積もりは、円筒座標系一次元熱通過を適用し、配管材（ステンレス）および断熱材の熱伝導率、Dittus-Boelter から見積もられる冷媒側熱伝達率および外気自由対流熱伝達率を用いて算出する。

テストセクション入口から i 番目の断面平均比エンタルピー h_i および断面平均クオリティ x_i は、式(1)により算出されるテストセクション局所熱流束から局所伝熱量を求めることにより下式により得られる。

$$\dot{h}_i = \dot{h}_{i-1} + \frac{1}{m_{ref}} \sum_{k=1}^i q_{n,i-1} A \quad (2.1.1.2.1-5)$$

$$x_i = \frac{\dot{h}_i - \dot{h}^r}{\dot{h}^s - \dot{h}^r} \quad (2.1.1.2.1-6)$$

ここに、 A は局所伝熱面積である。

(c) 実験結果および考察

実験条件を表 2.1.1.2.1-2 に示す。実用の観点から、蒸発試験は上昇流、凝縮試験は下降流で行った。質量速度、飽和温度がパラメータであり、蒸発試験においては飽和液でテストセクションへ流入し、出口で完全に飽和蒸気となるよう、また、凝縮試験では飽和蒸気で流入し、飽和液で流出するように冷却水側流量および温度を調整している。 $G=50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の高流量条件においては上記の条件が困難であったため、入口乾き度を何通りかに分け、複数回にわたって測定を行うことにより、全乾き度領域でデータ取得を行った。

表 2.1.1.2.1-2 実験条件

	冷媒の種類	冷媒流れ方向	質量速度 $G \text{ [kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	飽和温度 [°C]	冷媒乾き度
蒸発試験	HFC32, HF01234yf	上昇流	10-50	10-30	0.0-1.0
凝縮試験	HFC32, HF01234yf	下降流	10-50	20-30	0.0-1.0

図 2.1.1.2.1-5 の (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) に、HFC32 の質量流束 $G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の各乾き度 ($x=0.14, 0.32, 0.50, 0.73, 0.94$) における局所熱伝達率分布、及び乾き度変化における平均熱伝達率分布を示す。図より、同断面の局所熱伝達率は、いずれの乾き度においても、プレート両端が比較的小さく、冷媒の出入口のある 20mm 程度の位置において最大となることが確認できる。また、図 (f) より、断面平均熱伝達率は、乾き度の増加に伴いわずかに減少し、高乾き度の $x=0.94$ において急減がみられる。これはドライアウトによるものと考えられる。図 2.1.1.2.1-6 は局所熱伝達率分布を示している。色が濃いほど熱伝達率が高い。図より、最終断面を除きおおむね均一の熱伝達率であることが視覚的に確認できる。

図 2.1.1.2.1-7 および 8 は HFC32 の質量流束 $G=50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の乾き度 0~0.5 程度の局所熱伝達率の測定結果を示しており、2.1.1.2.1-9 および 10 は同質量速度における乾き度 0.5~1.0 程度の測定結果である。定性的には質量速度 $G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ における測定結果と同様であるが、熱伝達率の値は $G=50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の方が高くなっているが、その差異は 30%程度であり、強制対流にもかかわらず流量の影響は小さいといえる。

図 2.1.1.2.1-11 および 12 はそれぞれ HF01234yf の質量流束 $G=10$ および $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ における局所熱伝達率分布である。特性は HFC32 の熱伝達率分布と同様であるが、熱伝達率の値は HFC32 の熱伝達率より 30%程度小さいことがわかる。

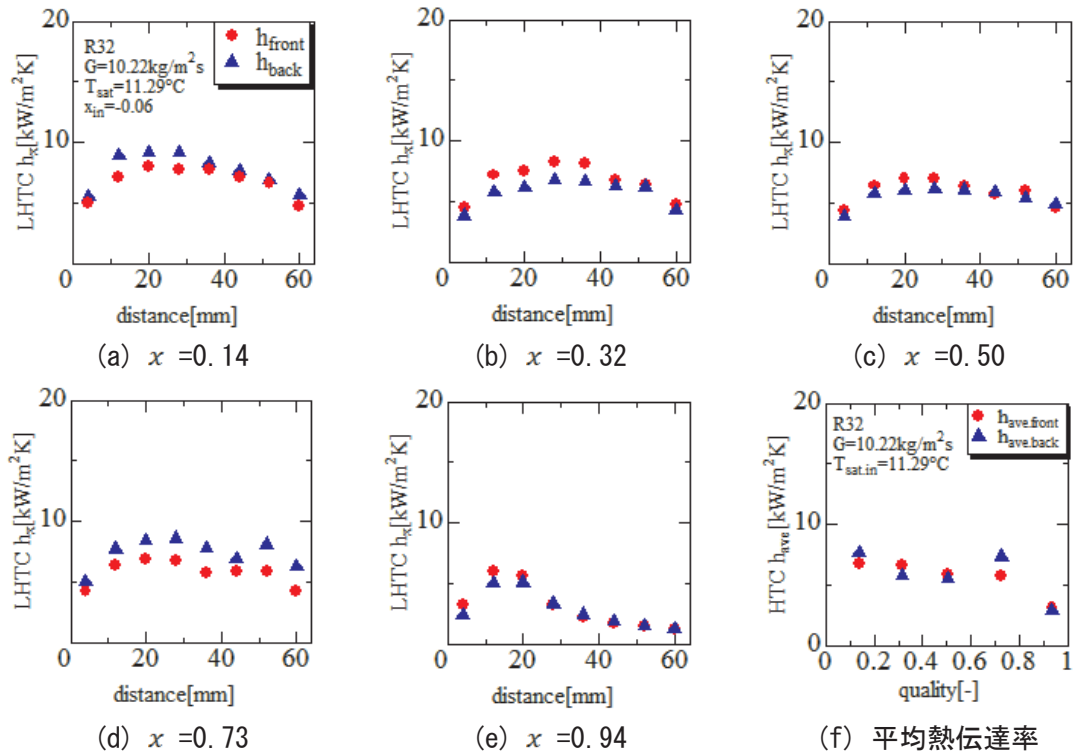


図 2. 1. 1. 2. 1-5 HFC32 の局所蒸発熱伝達率分布及び平均蒸発熱伝達率分布 $G=10$

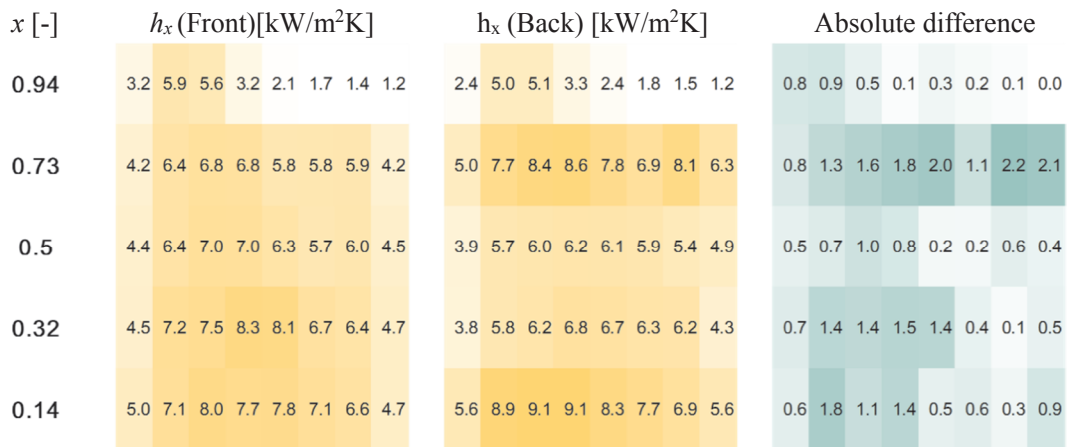


図 2. 1. 1. 2. 1-6 Front 側から見た局所蒸発熱伝達率分布表

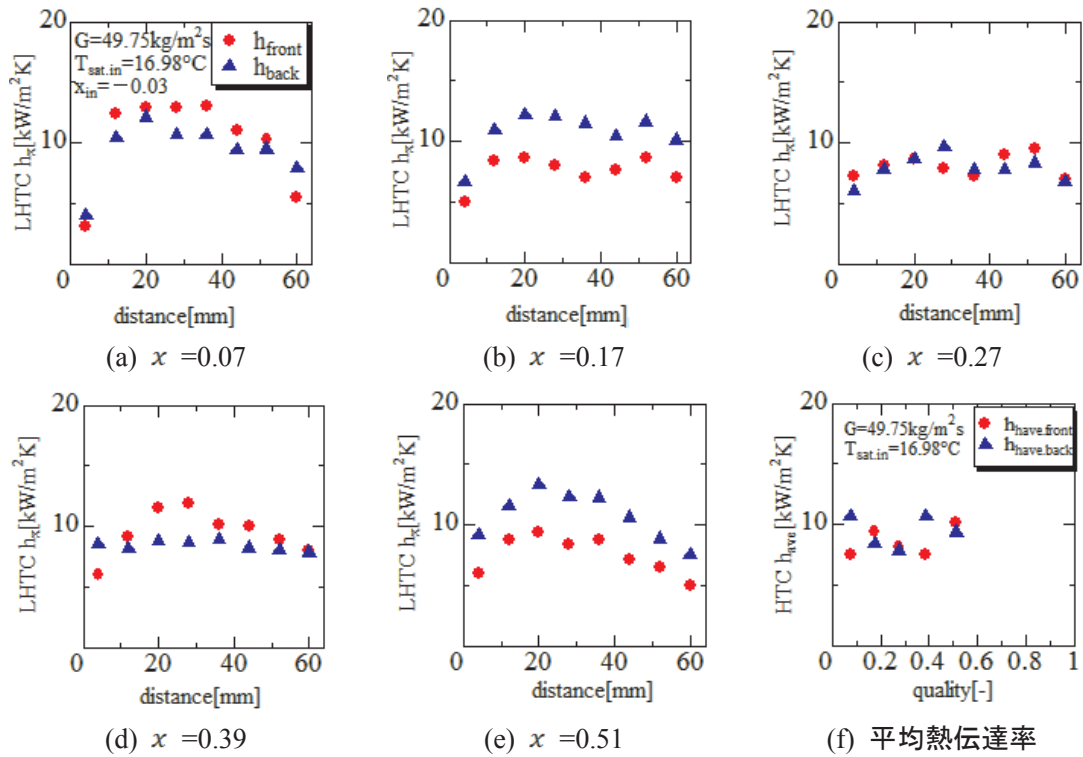


図 2. 1. 1. 2. 1-7 HFC32 の局所蒸発熱伝達率分布及び平均蒸発熱伝達率分布 $G=50(1)$

x [-]	h_x (Front) [kW/m ² K]	h_x (Back) [kW/m ² K]	Absolute difference
0.51	3.1 12 13 13 13 11 10 5.5	4 10 12 11 11 9.4 9.5 7.9	0.9 2 0.8 2.2 2.4 1.5 0.8 2.4
0.39	5 8.4 8.7 8 7 7.6 8.7 7	6.6 11 12 12 12 10 12 10	1.6 2.5 3.5 4.1 4.5 2.8 3 3.1
0.27	7.3 8.2 8.7 7.9 7.3 9 9.5 7	6 7.8 8.7 9.7 7.8 7.8 8.3 6.8	1.3 0.4 0 1.8 0.5 1.2 1.1 0.2
0.17	6 9.1 11 12 10 10 8.9 8	8.5 8.1 8.8 8.7 8.9 8.2 8 7.8	2.5 1 2.7 3.2 1.2 1.7 0.9 0.2
0.07	6 8.8 9.4 8.4 8.8 7.1 6.5 5	9.2 12 13 12 12 11 8.8 7.6	3.2 2.8 3.9 3.9 3.5 3.5 2.3 2.5

図 2. 1. 1. 2. 1-8 Front 側から見た局所蒸発熱伝達率分布表

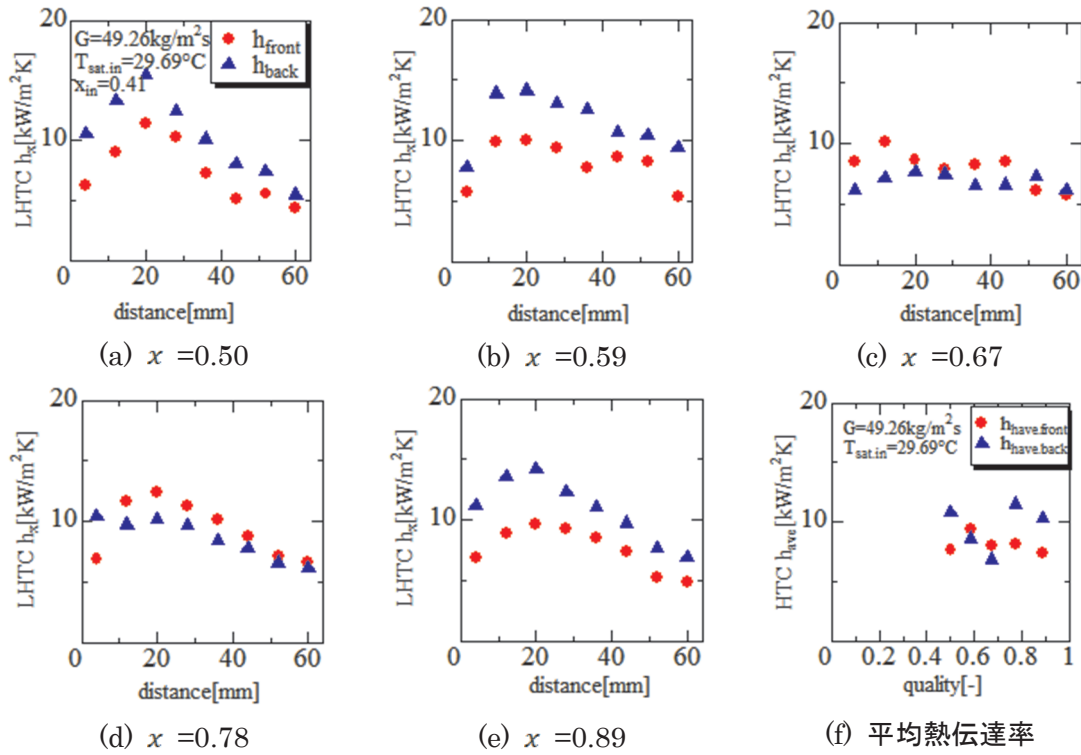


図 2. 1. 1. 2. 1-9 HFC32 の局所蒸発熱伝達率分布及び平均蒸発熱伝達率分布 $G=50(2)$

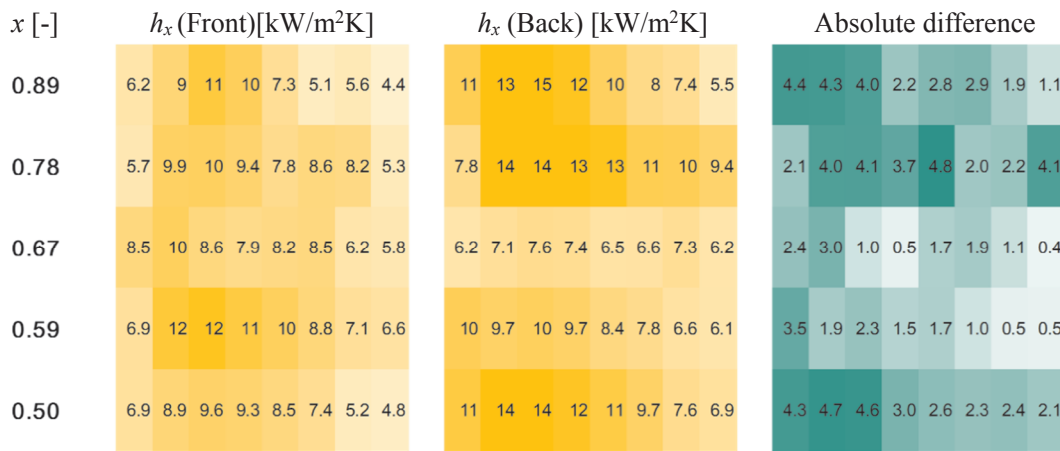


図 2. 1. 1. 2. 1-10 Front 側から見た局所蒸発熱伝達率分布表

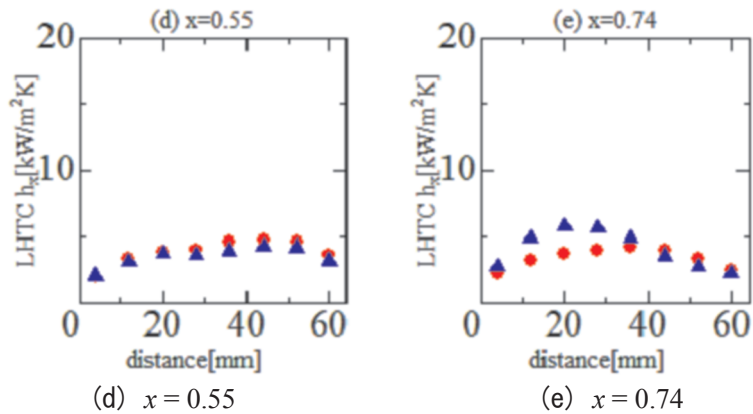
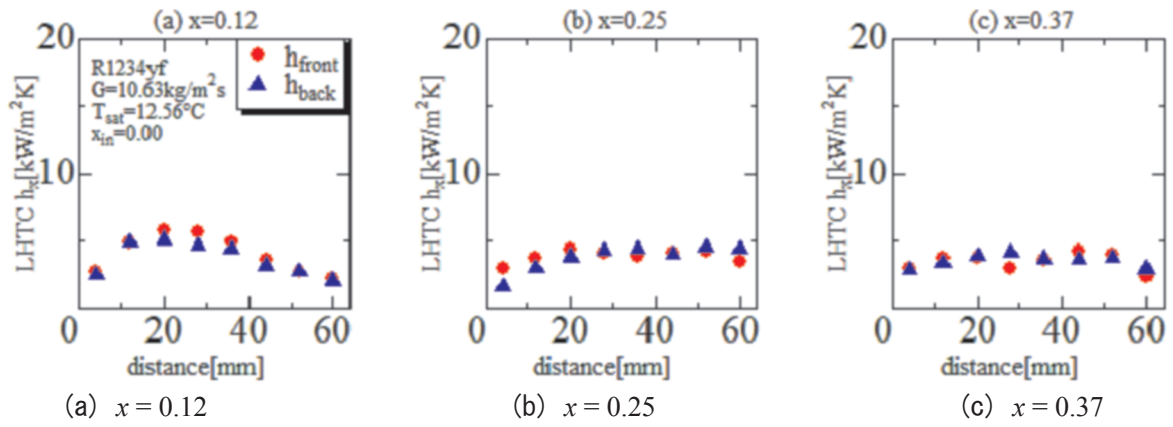


図 2.1.1.2.1-11 HF01234yf の局所蒸発熱伝達率分布 ($G=10$)

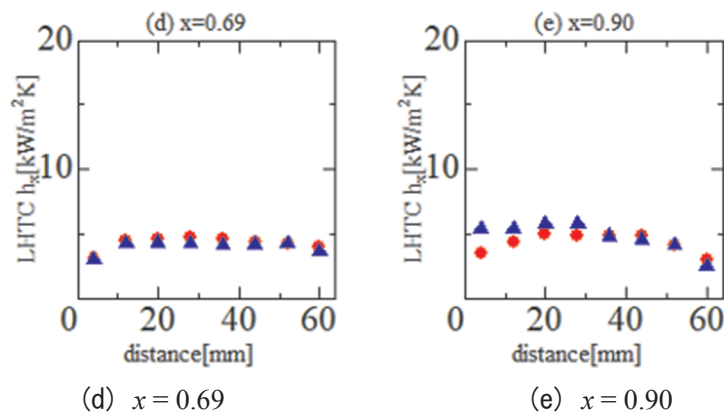
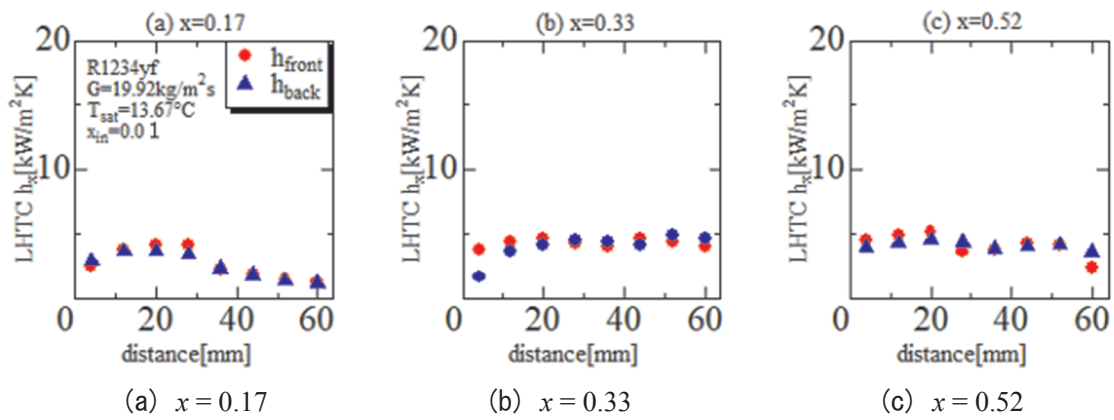


図 2.1.1.2.1-12 HF01234yf の局所蒸発熱伝達率分布 ($G=20$)

図 2.1.1.2.1-13 の(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)に、HFC32 の質量流束 $G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ の各乾き度 ($x=0.92、0.80、0.68、0.55、0.41$) における局所熱伝達率分布、及び乾き度変化における平均熱伝達率分布を示す。図より、同断面の局所熱伝達率は、いずれの乾き度においても、蒸発の場合と同様にプレート両端が比較的小さく、冷媒の出入口のある 20 mm 程度の位置において最大となることが確認できる。また、図 (f) より、断面平均熱伝達率は、凝縮の進行に伴いわずかに減少する。図 2.1.1.2.1-14 は局所熱伝達率分布を示している。色が濃いほど熱伝達率が高い。図より、蒸発の場合と同様におおむね均一の熱伝達率であることが視覚的に確認できる。

図 2.1.1.2.1-15-20 は HFC32 の質量流束 $G=50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ の乾き度 0-1.0 程度の局所熱伝達率の測定結果を示している。 $G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ の場合と同様に、両端の熱伝達率が比較的小さいことがわかる。また、凝縮の進行に伴いわずかに熱伝達率が低下する傾向がみられる。

図 2.1.1.2.1-21 は HF01234yf の質量流束 $G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ における局所熱伝達率分布である。特性は HFC32 の熱伝達率分布と同様であるが、熱伝達率の値は HFC32 の熱伝達率の 50% 以下である。

図 2.1.1.2.1-21 は、本プロジェクトで取得した $G=20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ におけるデータと、過去に関連プロジェクトで取得した HF01234ze(E) の凝縮熱伝達率データとの比較を示している。図より、HF01234ze(E) と HF01234yf の凝縮熱伝達率は同程度の値であり、HFC32 は他冷媒の 2 倍程度の高い熱伝達率を示していることが確認できる。

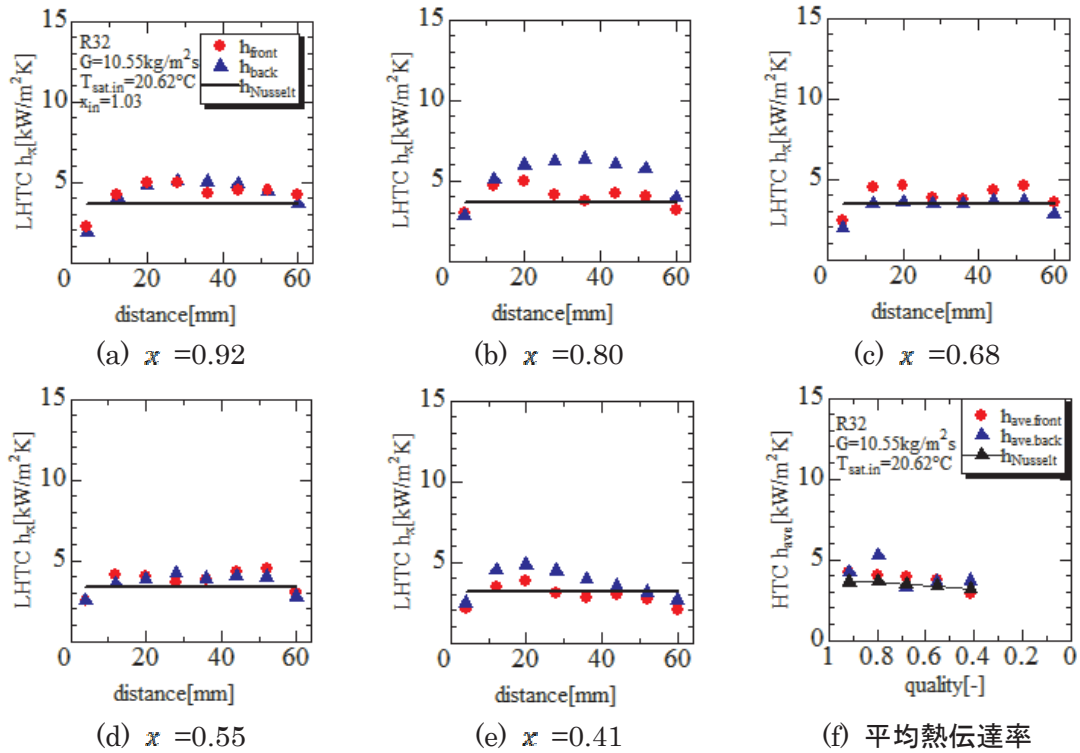


図 2.1.1.2.1-13 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均熱伝達率分布 $G=10$

x [-]	h_x (Front) [kW/m ² K]	h_x (Back) [kW/m ² K]	Absolute difference
0.92	2.3 4.2 5.0 5.0 4.3 4.5 4.5 4.2	1.9 4.1 4.9 5.1 5.0 4.9 4.4 3.6	0.4 0.2 0.1 0.1 0.7 0.4 0.0 0.6
0.80	2.9 4.7 5.0 4.1 3.8 4.2 4.0 3.2	2.8 5.1 6.0 6.2 6.4 6.0 5.8 3.9	0.1 0.4 1.0 2.1 2.6 1.9 1.7 0.8
0.68	2.4 4.5 4.6 3.8 3.7 4.3 4.6 3.5	2.0 3.5 3.6 3.5 3.5 3.7 3.6 2.8	0.5 1.0 1.0 0.3 0.2 0.6 1.0 0.7
0.55	2.5 4.1 4.0 3.6 3.8 4.3 4.4 3.0	2.5 3.6 3.8 4.2 3.9 4.1 4.0 2.8	0.0 0.5 0.2 0.6 0.1 0.2 0.5 0.2
0.41	2.1 3.4 3.8 3.1 2.8 3.0 2.7 2.0	2.5 4.5 4.8 4.5 4.0 3.5 3.1 2.7	0.4 1.1 1.0 1.4 1.1 0.5 0.4 0.7

図 2.1.1.2.1-14 Front 側から見た局所凝縮熱伝達率分布表

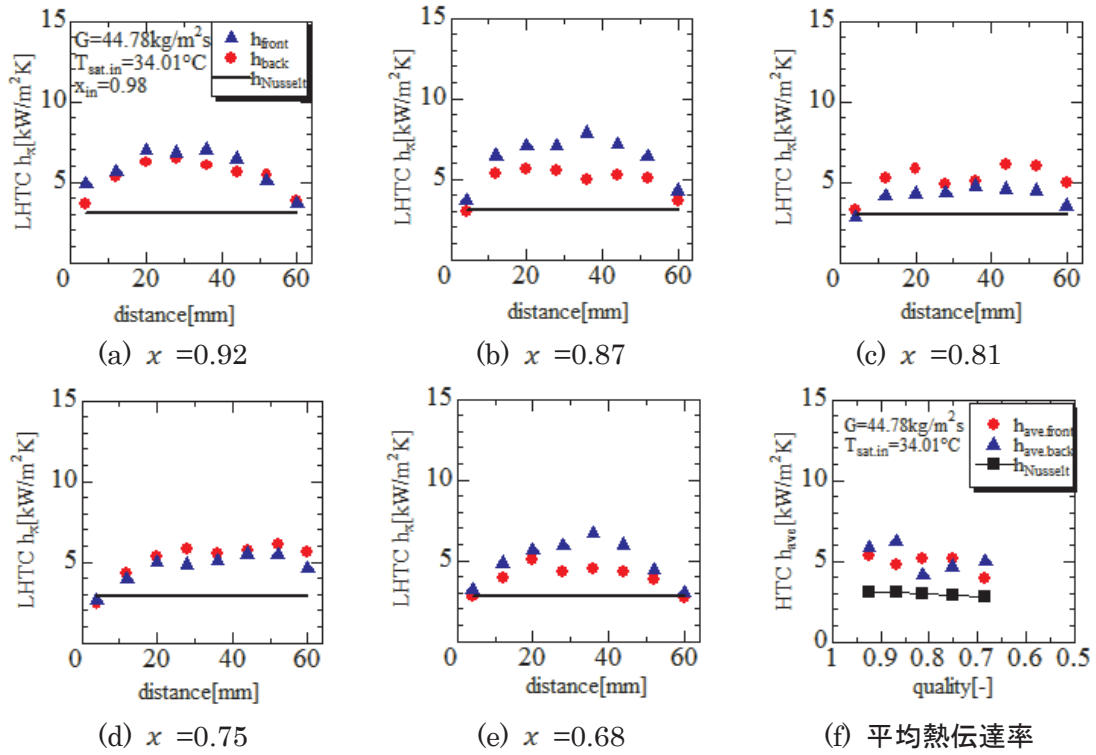


図 2. 1. 1. 2. 1-15 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布 $G=50(1)$

$x [-]$	h_x (Front) [kW/m ² K]	h_x (Back) [kW/m ² K]	Absolute difference
0.92	3.7 5.3 6.2 6.5 6.0 5.6 5.4 3.9	4.9 5.7 7.0 6.8 7.0 6.5 5.1 3.6	1.2 0.4 0.7 0.3 1.0 0.9 0.3 0.2
0.87	3.0 5.4 5.7 5.5 5.0 5.3 5.0 3.6	3.7 6.4 7.1 7.0 7.9 7.2 6.4 4.3	0.7 1.1 1.4 1.5 2.9 1.9 1.4 0.7
0.81	3.2 5.3 5.8 4.9 5.0 6.1 6.0 5.0	2.8 4.1 4.3 4.3 4.7 4.6 4.5 3.5	0.4 1.1 1.5 0.6 0.3 1.5 1.5 1.5
0.75	2.4 4.3 5.3 5.8 5.6 5.7 6.1 5.6	2.6 4.0 5.0 4.9 5.1 5.5 5.5 4.6	0.3 0.4 0.3 1.0 0.5 0.2 0.6 1.0
0.68	2.7 3.9 5.0 4.3 4.5 4.3 3.8 2.7	3.2 4.8 5.7 6.0 6.7 6.0 4.4 3.0	0.5 0.9 0.6 1.6 2.2 1.6 0.6 0.3

図 2. 1. 1. 2. 1-16 Front 側から見た HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布表

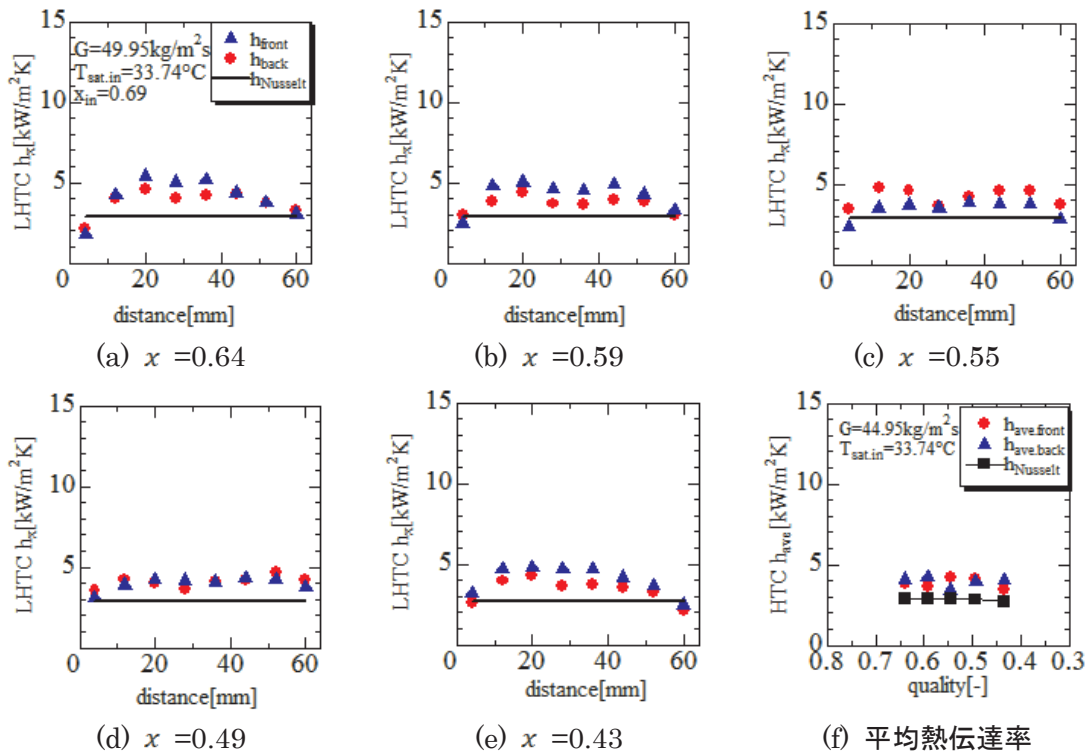


図 2. 1. 1. 2. 1-17 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布 $G=50$ (2)

x [-]	h_x (Front) [kW/m ² K]	h_x (Back) [kW/m ² K]	Absolute difference
0.64	2.1 4.0 4.6 4.0 4.2 4.3 3.8 3.3	1.8 4.2 5.4 5.0 5.2 4.4 3.8 3.1	0.4 0.2 0.9 1.0 1.0 0.1 0.0 0.2
0.59	3.0 3.8 4.4 3.7 3.6 3.9 3.8 3.0	2.5 4.8 5.0 4.6 4.5 4.9 4.3 3.3	0.5 1.0 0.7 0.9 0.9 1.0 0.5 0.3
0.55	3.5 4.8 4.6 3.6 4.2 4.6 4.6 3.7	2.4 3.5 3.7 3.5 3.9 3.7 3.8 2.8	1.1 1.2 0.9 0.1 0.3 0.8 0.8 0.9
0.49	3.6 4.3 4.0 3.7 4.1 4.2 4.7 4.2	3.1 3.9 4.2 4.2 4.1 4.3 4.2 3.7	0.4 0.4 0.2 0.5 0.0 0.1 0.5 0.5
0.43	2.6 4.0 4.3 3.7 3.8 3.6 3.2 2.2	3.2 4.7 4.8 4.7 4.7 4.2 3.7 2.5	0.6 0.7 0.5 1.0 0.9 0.6 0.4 0.3

図 2. 1. 1. 2. 1-18 Front 側から見た HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布表

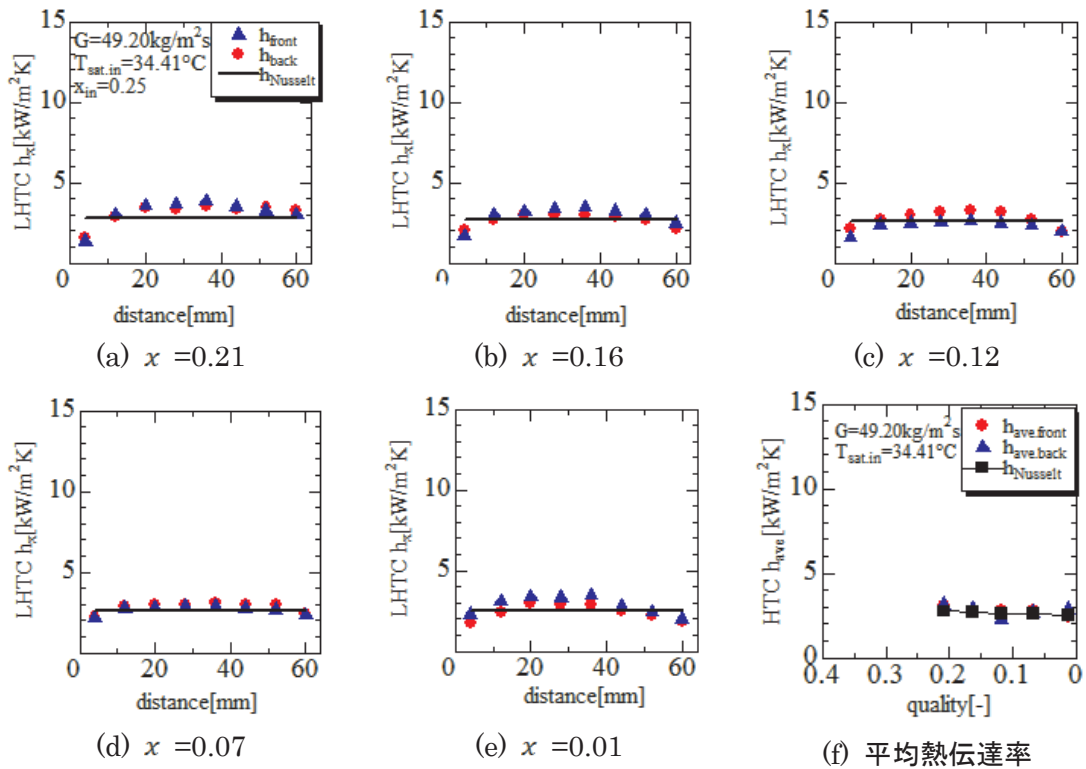


図 2.1.1.2.1-19 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布 $G=50$ (3)

x [-]	h_x (Front) [kW/m²K]	h_x (Back) [kW/m²K]	Absolute difference
0.21	1.6 2.9 3.5 3.4 3.5 3.3 3.5 3.3	1.5 2.5 2.7 3.0 3.9 3.9 3.9 3.4	0.1 0.3 0.8 0.3 0.4 0.5 0.5 0.0
0.16	2.0 2.7 3.0 3.0 3.0 2.9 2.7 2.1	1.8 2.5 2.7 3.1 3.1 3.2 3.7 2.8	0.2 0.2 0.3 0.1 0.1 0.3 1.0 0.6
0.12	2.1 2.7 3.0 3.2 3.3 3.2 2.7 1.9	1.5 2.3 2.5 2.6 2.4 2.2 2.2 1.9	0.6 0.5 0.5 0.6 0.9 0.9 0.5 0.0
0.07	2.2 2.9 3.0 3.0 3.1 2.9 3.0 2.4	1.8 2.7 2.8 2.9 2.6 2.8 2.8 2.0	0.5 0.2 0.2 0.1 0.5 0.1 0.2 0.5
0.01	1.7 2.4 3.0 2.9 2.9 2.5 2.2 1.9	2.0 3.3 3.6 3.5 3.1 2.8 2.5 2.2	0.2 0.9 0.7 0.6 0.2 0.3 0.2 0.4

図 2.1.1.2.1-20 Front 側から見た HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布表

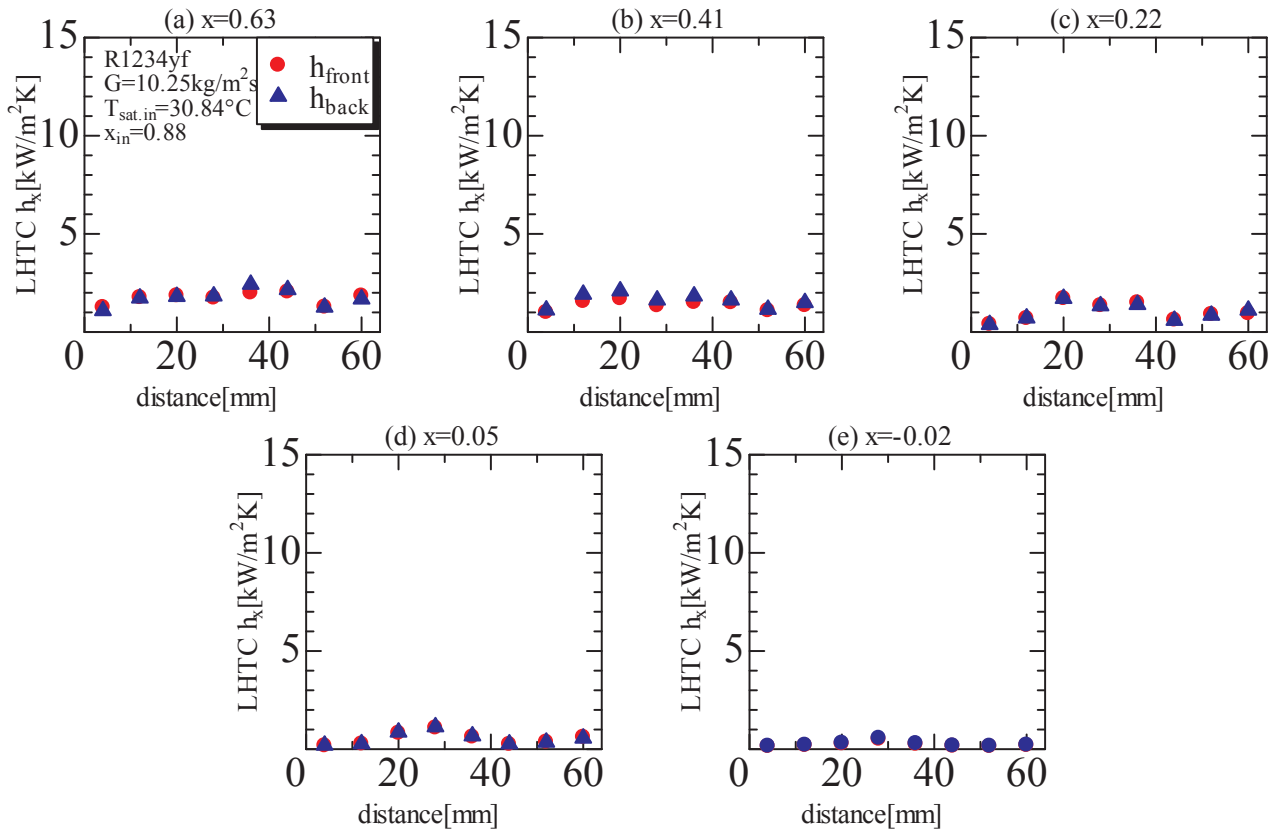


図 2. 1. 1. 2. 1-21 HF01234yf の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布 ($G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$)

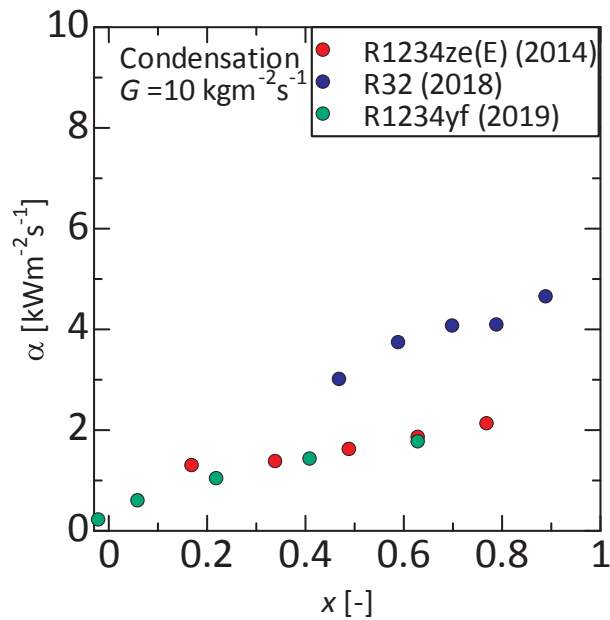


図 2. 1. 1. 2. 1-22 凝縮熱伝達率データの比較

2.1.1.2.2 扁平多孔管内の伝熱特性評価（担当：東京海洋大学）

(a) 実験装置及びデータ整理方法

本研究では、水平扁平多孔管内での HFO 系純冷媒、2 成分混合冷媒 HFC32+HFO1234yf 及び 3 成分混合冷媒 R455A (HFC32+HFO1234yf+CO₂) の伝熱特性の評価を行った。図 2.1.1.2.2-a1 に実験ループの概略を示す。実験ループは、冷媒ポンプ、水熱交換器、電気予熱器、テストセクション、凝縮器、過冷器及びレシーバから構成される。冷媒の温度及び圧力は、電気予熱器前とテストセクション前に設けた冷媒混合器において、K 型シーース熱電対及び圧力変換器を用いてそれぞれ測定した。冷媒流量はコリオリ式質量流量計を用いて測定した。冷媒の質量流量及び圧力は、それぞれポンプの回転数及び凝縮器での熱交換量により調整した。

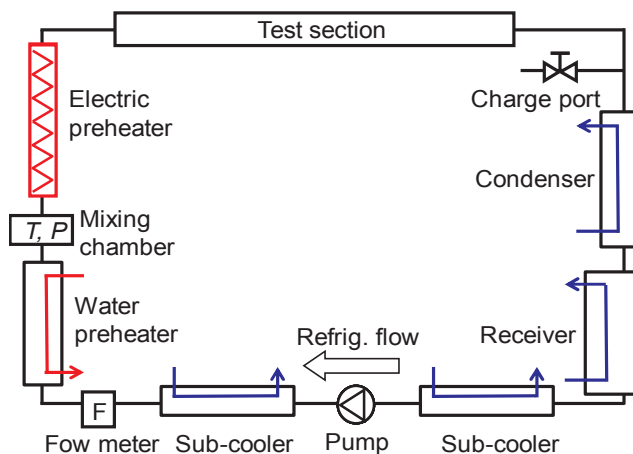


図 2.1.1.2.2-a1 実験装置

本研究では凝縮伝熱実験及び蒸発伝熱実験でそれぞれ 2 つのテストセクションを切り替えて実験を行った。図 2.1.1.2.2-a2 に凝縮伝熱実験用のテストセクションを示す。テストセクションは上下対称であり、試験伝熱管は上下から冷却ジャケットに挟まれ冷却される。伝熱管と冷却ジャケットの間には、均熱板及び熱流束センサーが上下に挿入されており、試験伝熱管上下面を通過する熱流束が測定される。

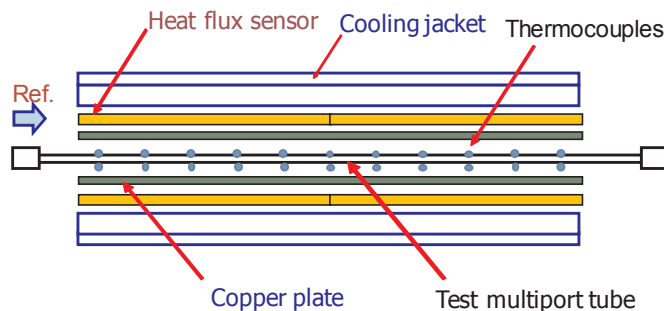


図 2.1.1.2.2-a2 凝縮実験用テストセクション

図 2.1.1.2.2-a3 に蒸発伝熱実験に使用したテストセクションを示す。テストセクションは上下対称であり、試験伝熱管、均熱板及び面状ヒーターから構成される。試験伝熱管は上下に設置した面状ヒーターによって所定の熱流束条件下で加熱される。凝縮伝熱実験及び蒸発伝熱実験ともに、試験伝熱管の外壁面温度は、管外表面に上下壁面に取り付けられた K 型熱電対により測定した。冷媒温度はテストセクション出入口に設置した冷媒混合室にて K 型シーース熱電対により測定した。テストセクション入口での冷媒圧力及びテストセクション出入口での差圧は、テストセクション出入口に設けた圧力測定ポートにて、絶対圧変換器及び差圧変換器を用いて、それぞれ測定した。

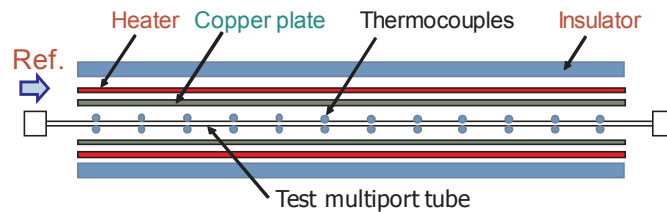


図 2.1.1.2.2-a3 蒸発実験用テストセクション

図 2.1.1.2.2-a4 に試験伝熱管に用いた扁平多孔管の流路断面図を示す。試験伝熱管は 12 の矩形流路から構成され、管厚さは 1.51mm、管幅は 16.0mm、水力直径は 0.82 mm である。



図 2.1.1.2.2-a4 試験扁平多孔管の断面図

テストセクション入口のクオリティ x は、電気予熱器前に設けた冷媒混合器で測定した冷媒のバルク温度及び圧力から求めた比エンタルピーを基準に、電気予熱器での加熱量から算出した。沸騰熱伝達率は次式で求めた。

$$\alpha = \frac{q}{T_w - T_r} \quad (2.1.1.2.2-1)$$

ここに、 q は管内実伝熱面積基準の熱流束、 T_w は管内壁面温度、 T_r は冷媒温度である。管内壁面温度は測定した管外壁面温度から一次元熱伝導を仮定して求めた。凝縮熱伝達率は次式で求めた。

$$\alpha = \frac{q}{T_r - T_w} \quad (2.1.1.2.2-2)$$

これまでに、比較対象とするために HFC32 及び HFO1234yf の沸騰・凝縮熱伝達率及び圧力損失を測定し、基本的な伝熱特性を明らかにするとともに、装置の健全性の確認を行った。次に、HFO1336mzz(E)及び 2 成分混合冷媒 HFC32+HFO1124yf の沸騰・凝縮熱伝達率及び圧力損失及び圧力損失の評価を行った。また、3 成分混合冷媒 R455A (HFC32+HFO1124yf+CO₂) の凝縮熱伝達率及び圧力損失についても評価を行った。

(b) 扁平多孔管内における沸騰熱伝達の評価

図 2.1.1.2.2-b1 に、質量速度 100 及び 400 kgm⁻²s⁻¹ における HFO1336mzz(E) の沸騰熱伝達率の測定値を示す。図中には、水平扁平多孔管に対して提案されている流動様式の遷移境界線[1]による流動様式の判別をあわせて示す。流動様式は質量速度 100 kgm⁻²s⁻¹ ではプラグ流及びスラグ・環状流、質量速度 400 kgm⁻²s⁻¹ ではプラグ流、チャーン流及び環状流であると推定される。微細矩形流路を有する扁平多孔管では、プラグ流域で良好な熱伝達率を示すことが報告されている[2]。これは、蒸気プラグ部周りに伝熱に優れる薄液膜が形成されるためである。HFO1336mzz(E)についても、プラグ流域で良好な熱伝達率を示すことが確認された。質量速度 100 kgm⁻²s⁻¹ の結果に着目すると、熱流束 5 kWm⁻² では比較的高クオリティまで良好な熱伝達率を示した。しかしながら、クオリティが 0.7 以上ではクオリティの増大に伴い熱伝達率はゆるやかに減少しており、これは微細矩形流路の流路断面辺部にドライパッチが生じたためと考えられる。また、熱流束 10 kWm⁻² では、5 kWm⁻² に比べてより低いクオリティから熱伝達率の減少がみられた。これは、質量速度に対して熱流束が高くなったことでより低いクオリティからドライパッチが発生したためと考えられる。質量速度 400 kgm⁻²s⁻¹ の結果に着目すると、熱流束 5 kWm⁻² において熱伝達率はプラグ流域で極大値を示し、チャーン流域への遷移にともない一旦減少した。チャーン流は流路壁面に擾乱を伴う比較的厚い液膜が形成される流動様式であり、プラグ流において支配的であった薄液膜を介した熱伝達が抑制されるため、流動様式の遷移により熱伝達率が低下したと考えられる。また、熱流束 10 kWm⁻² 以上では、熱流束 5 kWm⁻² においてみられた低クオリティ域での熱伝達率の極大値はみられなかった。これは、高質量速度条件においても熱流束が大きい場合には、プラグ流域においてドライパッチが発生したためと考えられる。一方、高クオリティ・高質量速度条件では流動様式は環状流であり、クオリティの増大に伴い熱伝達率が増大し、熱流束の影響は小さく、強制対流が支配的であると考えられる。

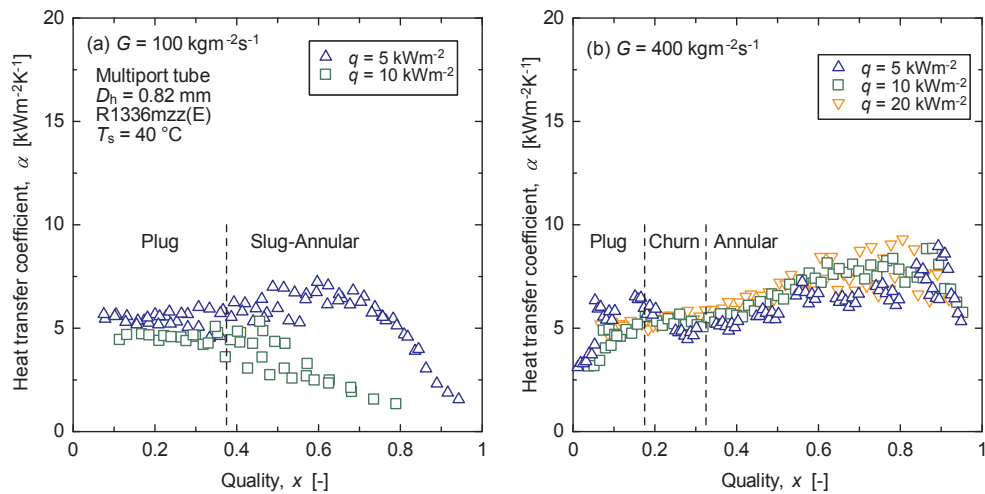


図 2.1.1.2.2-b1 HFO1336mzz(E)の沸騰熱伝達特性

図 2.1.1.2.2-b2 に、HFO1336mzz(E)、HFC32 及び HFO1234yf の沸騰熱伝達率の比較を示す。図中には、水平扁平多孔管における沸騰熱伝達率の予測式[3]による熱伝達率の計算値を破線で示す。HFO1336mzz(E)は飽和温度 40°C、HFC32 及び HFO1234yf は飽和温度 15°Cでの結果である。いずれの質量速度条件で、HFC32 の熱伝達率が最も高く、HFO1336mzz(E)の熱伝達率は HFO1234yf と同程度の値を示した。扁平多孔管では薄液膜を介した伝熱の影響が大きいいため、HFC32 の液熱伝導率が HFO1336mzz(E)、HFO1234yf に比して 2 倍程度と高いことが強く影響していると考えられる。質量速度 400 kgm⁻²s⁻¹ では冷媒間の熱伝達率の差異は減少しており、これは沸点の高く、蒸気密度の小さい HFO1234yf 及び HFO1336mzz(E)において強制対流の影響が増大したためと考えられる。

図中の破線は、扁平多孔管内での HFC32 および HFO1234ze(E)の沸騰熱伝達率の結果を基に提案した沸騰熱伝達率の予測式であり、核沸騰、強制対流蒸発及び薄液膜蒸発に加え、流動様式およびドライアウト開始クオリティが考慮されている。提案した予測式の概要を表 2.1.1.2.2-b1 に示す。

表 2.1.1.2.2-b1 扁平多孔管内における純冷媒の沸騰熱伝達率の予測式

Heat transfer correlation

$$\alpha = (\alpha_{nb}^5 + \alpha_{cb}^5)^{1/5}$$

a) Nucleate boiling

$$\alpha_{nb} = 10 \frac{\lambda_L}{D_b} \left(\frac{q D_b}{\lambda_L T_s} \right)^C \left(\frac{P_s}{P_{crit}} \right)^{0.1} \left(1 - \frac{T_s}{T_{crit}} \right)^{-1.4} \left(\frac{\mu_L C_{pL}}{\lambda_L} \right)^{-0.25}$$

$$C = 0.855 \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.309} \left(\frac{P_s}{P_{crit}} \right)^{-0.437}, \quad D_b = 0.511 \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)}}$$

b) Convective boiling

$$\alpha_{cb} = \max(\alpha_{fc}, \alpha_{if})$$

b-1) Forced convection

$$\alpha_{fc} = (1 + 1.3/X_{tt})\alpha_L$$

$$\alpha_L = 0.023 \frac{\lambda_L}{D_A} \left[\frac{G(1-x)D_A}{\mu_L} \right]^{0.8} \left(\frac{\mu_L C_{pL}}{\lambda_L} \right)^{0.4}$$

where X_{tt} is Lockhart-Martinelli parameter.

b-2) Thin liquid film evaporation

For annular and churn flows:

$$\alpha_{if} = \beta \frac{\lambda_L}{\delta_e}$$

$$\delta_g/D_h = 0.014Ca^{0.1}, \beta = \frac{x}{x + (1-x)\rho_V/\rho_L}$$
 where Ca is capillary number.

For plug and slug-annular flows:

$$\alpha_{\text{liquid}} = F_{\text{dp}} \left(\beta \frac{\lambda_L}{\delta_g} \right) \frac{\delta_g}{D_h} = 0.005Ca^{0.05} \left(\frac{\rho_L}{\rho_V} \right)^{0.2}$$
 where F_{dp} is deterioration factor of drypatch.

c) Flow regime transition

$We_L/Co = 2.3 \times 10^{-4} (We_V/Co)^{3.7}$ (plug-transition)
 $We_V/Co = 75$ (transition-annular)

The transition flow regime is subdivided into churn flow at $We_{L0} \geq 4$
 and slug-annular flow at $We_{L0} < 4$.

d) Correlation for dryout region

$$\alpha = \alpha_{x_{\text{di}}} - \frac{x - x_{\text{di}}}{x_{\text{de}} - x_{\text{di}}} (\alpha_{x_{\text{di}}} - \alpha_{x_{\text{de}}})$$
 where x_{di} and x_{de} are dryout inception and completion qualities.

図より、低質量速度で HFO1336mzz(E) および HFO1234yf の熱伝達率を 30% 程度過大に予測しているものの、HFO1336mzz(E)、HFC32 及び HFO1234yf の熱伝達率をおおむね精度よく予測できていることがわかる。

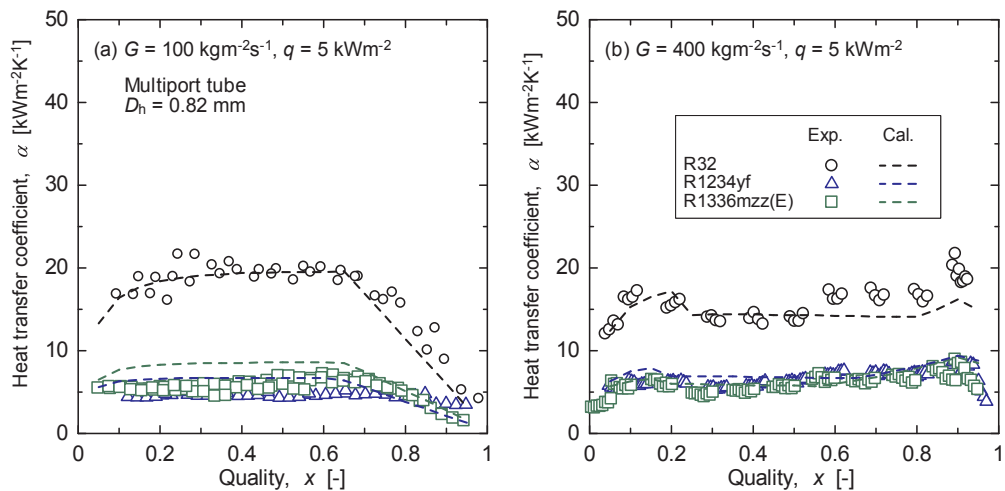


図 2.1.1.2.2-b2 HFC32、HFO1234yf 及び HFO1336mzz(E) の沸騰熱伝達特性

図 2.1.1.2.2-b3 に、平均飽和温度 15°C、質量速度 100 及び 400 kgm⁻²s⁻¹ における 2 成分混合冷媒 HFC32+ HFO1234yf の沸騰熱伝達率の測定値を示す。図中には、比較のために純冷媒 HFC32 及び HFO1234yf の熱伝達率をあわせて示す。一般に、非共沸混合冷媒の沸騰熱伝達率は、非共沸性に起因する物質拡散抵抗により、純冷媒と比べ低くなることが知られている。本実験においても同様の傾向がみられ、いずれの質量速度においても HFC32+ HFO1234yf 混合冷媒は HFC32 に比して低い熱伝達率を示した。HFO1234yf と比較すると、HFC32/ HFO1234yf (20/80mass%) 混合冷媒の熱伝達率は質量速度 400 kgm⁻²s⁻¹ の中・高クオリティでは同程度の値を示すものの、質量速度 100 kgm⁻²s⁻¹ および 400 kgm⁻²s⁻¹ の低クオリティ域では低い値を示した。また、HFC32/ HFO1234yf (50/50mass%) 混合冷媒の熱伝達率は質量速度 100 kgm⁻²s⁻¹ では同程度、質量速度 400 kgm⁻²s⁻¹ では混合冷媒の方が高い値を示した。これは、低質量速度条件では物質拡散抵抗による熱伝達率の低下が大きいものの、質量速度の増加に伴い対流拡散が促進され、物質拡散抵抗が低減したため HFC32 及び HFO1234yf の中間の熱伝達率を示したと考えられる。

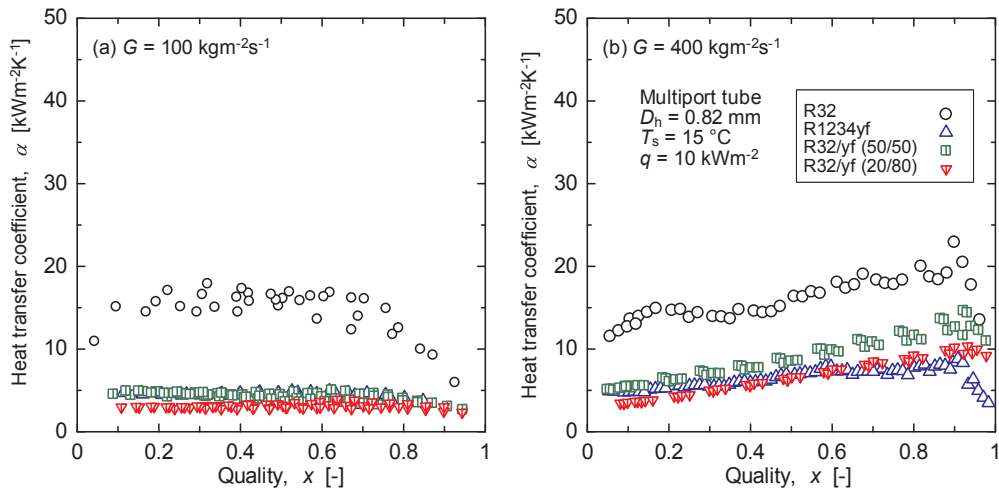


図 2.1.1.2.2-b3 HFC32、HFO1234yf 及び HFC32+HFO1234yf 混合冷媒の沸騰熱伝達特性

(c) 扁平多孔管内における凝縮熱伝達の評価

図 2.1.1.2.2-c1 に、飽和温度 40°C、質量速度 100 及び 400 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ における HFC32、HFO1234yf 及び HFO1336mzz(E)の凝縮熱伝達率の測定値を示す。図中には、扁平多孔管内における凝縮熱伝達率の予測式 [4]による計算値を破線で示す。従来径の平滑円管内の凝熱伝達特性と同様、凝縮熱伝達率は凝縮開始点で最大値を取り、凝縮の進行にともない低下した。一方、HFC32 及び HFO1234yf の凝縮熱伝達率は、クオリティ 0.3 から 0.7 において熱伝達率の減少が緩やかになっており、表面張力の影響が増大する微矩形流路特有の凝縮熱伝特性がみられた。すなわち、微細矩形流路の場合、表面張力の影響により凝縮液膜が流路断面隅部に引き付けられ、流路断面辺部に熱抵抗の小さい薄液膜が形成される。この流路辺部の薄液膜が比較的低いクオリティまで維持されるため、熱伝達率の低下が抑制されたものと考えられる。一方、質量速度 100 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ において HFO1336mzz(E)の凝縮熱伝達率は単調に変化している。これは、HFO1336mzz(E)は HFC32 及び HFO1124yf に比べて蒸気密度が小さく、管内流速が大きいと、強制対流の影響がより顕著にみられたためと考えられる。

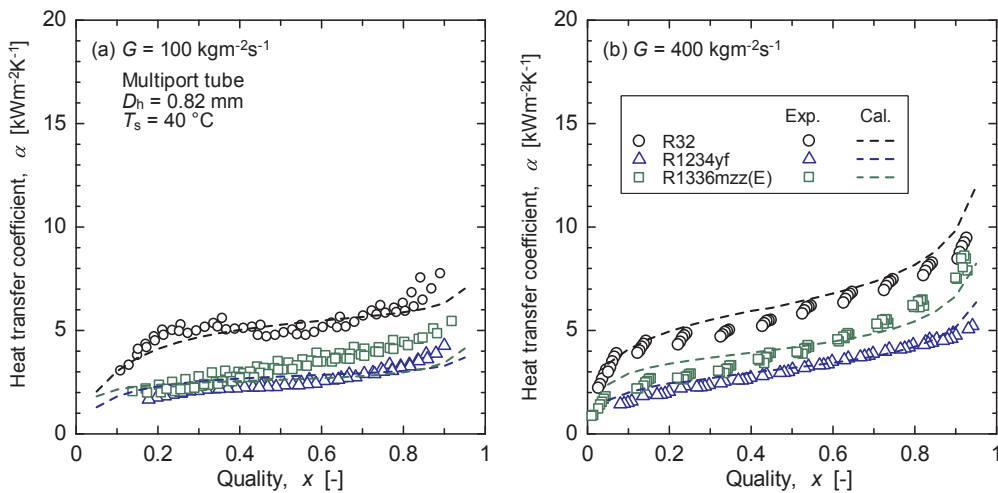


図 2.1.1.2.2-c1 HFC32、HFO1234yf 及び HFO1336mzz(E)純冷媒の凝縮熱伝達特性

図 2.1.1.2.2-c2 に、平均飽和温度 40°C、質量速度 100 及び 400 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ における 2 成分混合冷媒 HFC32+HFO1234yf 及び 3 成分混合冷媒 R455A (HFC32+ HFO1234yf +CO₂)の凝縮熱伝達率を示す。図中には、比較のために純冷媒 HFC32 及び HFO1234yf の凝縮熱伝達率をあわせて示す。一般に、非共沸混合冷媒の凝縮熱伝達率は、非共沸性に起因する物質拡散抵抗により純冷媒と比べ低くなることが知られている。本実験においても同様の傾向がみられ、R455A の熱伝達率は HFC32 及び HFO1234yf の熱伝達率に対して低い値を示した。質量速度 100 $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ では HFC32 に比して 80%程度、HFO1234yf に比して 50%程度低い値を示した。矩形微細流路内における凝縮熱伝達は、低質量速度では流路辺部に形成される薄液膜を介した熱伝達の寄与が

大きく、表面張力の影響を強く受けることが知られている。液膜を介した熱伝達に大きく影響する液熱伝導率に着目すると、R455A、HFC32 及び HFO1234yf の液熱伝導率は、それぞれ 0.073 、 0.115 及び $0.059 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ であり、R455A の液熱伝導率は HFC32 の 54%程度と小さい。したがって、液膜の熱抵抗が HFC32 に比して増大するため、R455A は低い熱伝達率を示すものと考えられる。加えて、非共沸性に起因する物質拡散抵抗により伝熱に有効な温度差が減少したことで液熱伝導率の差以上に低い熱伝達率を示したと考えられる。一方、質量速度 $400 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ では、R455A は HFC32 の 50%程度の値を示すものの、HFO1124yf と同程度の熱伝達率を示した。これは、質量速度の増大にともない対流により物質拡散抵抗が低減され、質量速度 $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に比して非共沸性に起因する熱伝達率の低下が減少したためと考えられる。

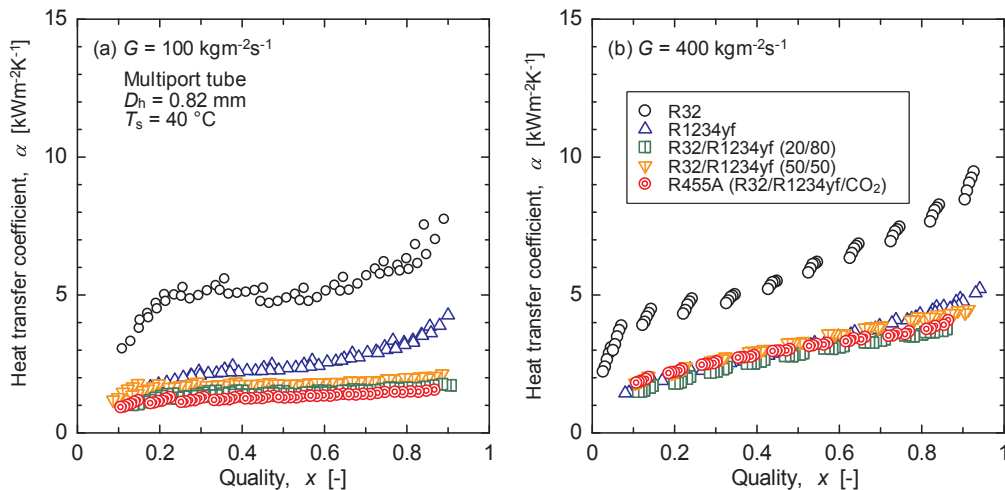


図 2.1.1.2.2-c2 HFC32+ HFO1234yf 混合冷媒及び R455A 混合冷媒の凝縮熱伝達率

(d) 扁平多孔管内における圧力損失の評価

図 2.1.1.2.2-d1 に、扁平多孔管内における HFC32、HFO1234yf、HFO1336mzz(E)、HFC32+ HFO1234yf 混合冷媒及び R455A の摩擦圧力損失を示す。混合冷媒に関しては、露点と沸点の平均温度が 40 度となる圧力条件で実験した。摩擦圧力損失は、比較した冷媒の中で最も沸点の高い HFO1336mzz(E)が、他の冷媒に比べ高い値を示した。これは、HFO1336mzz(E)の蒸気密度が小さく、同じ質量速度・クオリティ条件で比較して、蒸気速度が大きいためである。HFC32/HFO1234yf (50/50mass%)および R455A の摩擦圧力損失は、HFO1234yf 純冷媒よりも小さく、HFC32 と同程度の値を示した。HFC32/ HFO1234yf (50/50mass%)と比較すると、R455A における HFO1234yf の組成比は 75.5%と高いものの、蒸気密度の高い CO_2 が混合されることで HFC32 および HFC32/ HFO1234yf (50/50mass%)と同程度の圧力損失を示したと考えられる。

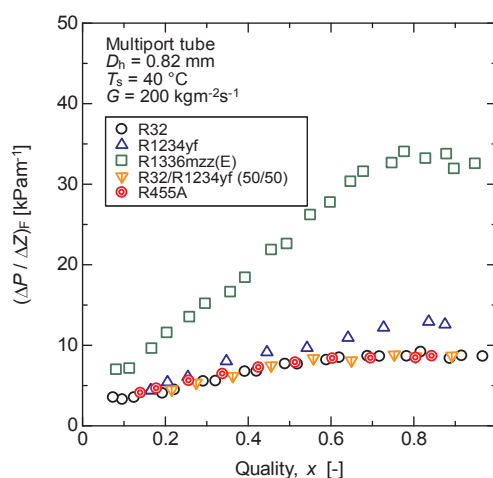


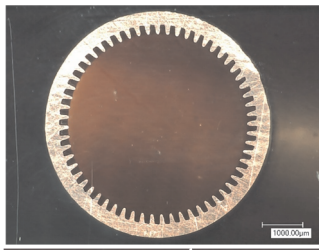
図 2.1.1.2.2-d1 扁平多孔管内における HFC32、HFO1234yf、HFO1336mzz(E)、HFC32+ HFO1234yf 混合冷媒及び R455A の摩擦圧力損失

<参考文献>

- [1] D. Jige, S. Kikuchi, H. Eda, N. Inoue and S. Koyama, Two-phase flow characteristics of HFC32 in horizontal multiport minichannels: flow visualization and development of flow regime map, *Int. J. Refrigeration*, 95, 156–164, 2018.
- [2] C. Tanaka, C. Dang, E. Hihara, Characteristics of flow boiling heat transfer in rectangular minichannels. *Proc. of the 15th International Heat Transfer Conference IHTC-15*. Kyoto, Japan, IHTC15-9589, 2014.
- [3] D. Jige, S. Kikuchi, H. Eda, N. Inoue, Flow boiling in horizontal multiport tube: Development of new heat transfer model for rectangular minichannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144, 118668, 2019.
- [4] D. Jige, N. Inoue, S. Koyama, Condensation of refrigerants in a multiport tube with rectangular minichannels, *International Journal of Refrigeration*, 67, 202–213, 2016.

2.1.1.2.3 円管内の伝熱特性評価（担当：長崎大学）

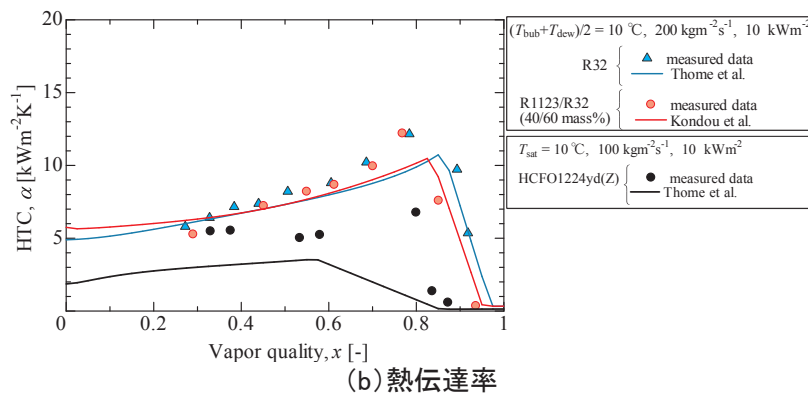
外径 6.03 mm、ねじれ角 18 度、フィン数 60 のらせん溝付き管内を流れる HCFO1224yd(Z)および R455A の熱伝達率および圧力損失を測定した。図 2.1.1.2.3-1 へ、試験に用いたらせん溝付き管の断面写真である。テストセクションの有効伝熱区間長さは 414 mm で二重管式となっており、水との熱交換量からこの区間の平均熱伝達率を算出した。



外径 [mm]	6.03
等価内径 d_{eq} [mm]	5.21
フィン高さ h [mm]	0.269
ねじれ角 $[\circ]$	18
山頂角 $[\circ]$	15
フィン数 N_{fin} [-]	60
面積拡大率 η [-]	2.62

図 2.1.1.2.3-1 試験管の断面写真

HCFO1224yd(Z)の蒸発熱伝達率および圧力損失を測定し、HFC32 および HFO1123/HFC32(40/60mass%)との比較を行った。図 2.1.1.2.3-2 へその結果を示す。飽和温度 10°C、質量流束 $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ における HCFO1224yd(Z)の熱伝達率は、質量流束 $200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ における HFC32 よりも明確に低い一方、圧力損失は HFC32 に比して約 1.5 倍であることが分かった。この温度帯で使用するためには、圧力損失によるエネルギー損失を抑えられるよう、伝熱管径を大きくするなどの工夫を要する。



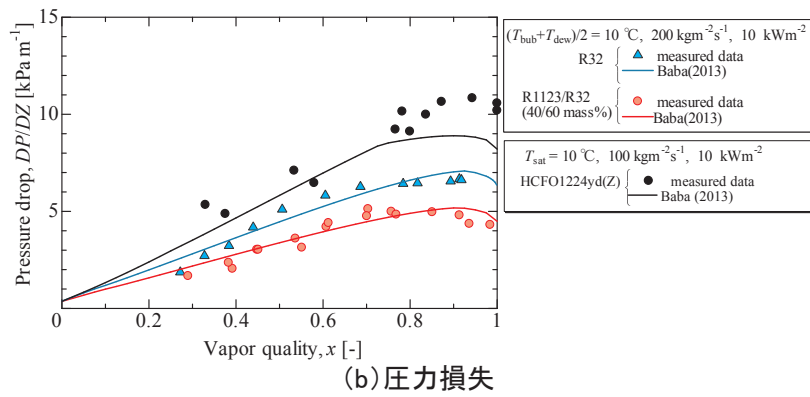


図 2.1.1.2.3-2 HCFO1224yd(Z)の溝付管内蒸発過程熱流動特性

R455A の熱伝達特性および圧力損失特性を評価した。図 2.1.1.2.3-3 は、平均飽和温度40°C、熱流束 10 kWm⁻²、質量流速 200 kgm⁻²s⁻¹、300 kgm⁻²s⁻¹、400 kgm⁻²s⁻¹における熱伝達率および圧力損失の結果である。熱伝達率に対する質量流速の影響が小さいことは、他の冷媒と共通するが、質量流速 200 kgm⁻²s⁻¹と 300 kgm⁻²s⁻¹でわずかに値が上昇しており、流速増加によって攪拌され、物質伝達抵抗が緩和されているというこれまでの知見で説明が可能である。圧力損失の測定結果では、乾き度 0.8 程度に変曲点が見られ、それより高い乾き度で直線的に増加している、この変化は、乾き度が 1 を超えるときに特徴的な変化であり、測定時のエンタルピー誤差が大きいのか、潜熱の見積もりに大きな誤差が生じていることなどが考えられる。

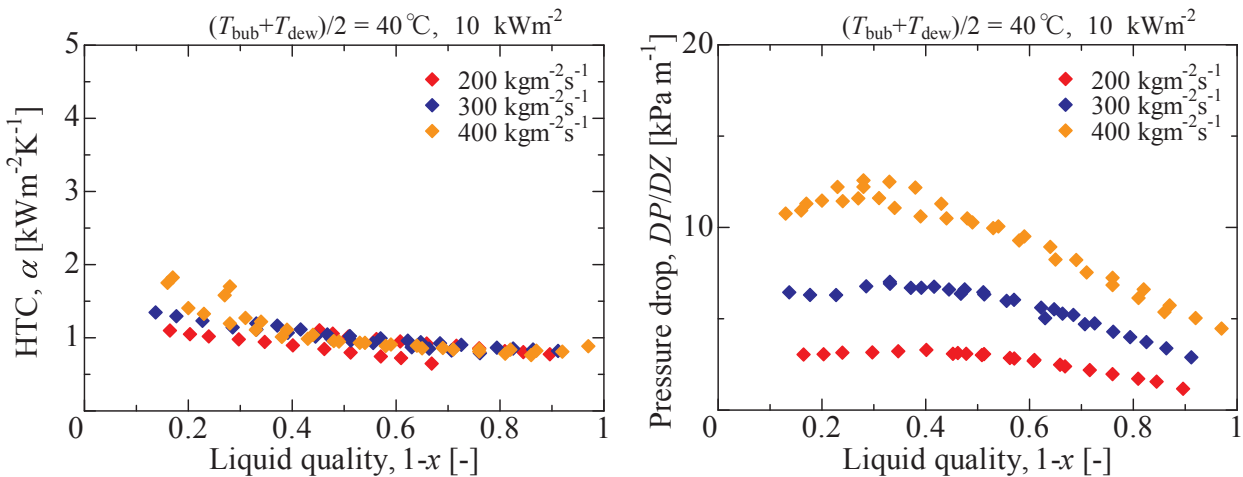


図 2.1.1.2.3-3 R455A の溝付管内凝縮過程の熱伝達率および圧力損失

図 2.1.1.2.3-4 は、平均飽和温度40°C、熱流束 10 kWm⁻²、質量流速 200 kgm⁻²s⁻¹、において、凝縮過程の熱伝達率と圧力損失を HFC32 および Amolea400X(HFO1123/ HFC32;40/60mass%)と比較するものである。単一物質である HFC32 では物質伝達抵抗が無いため、熱伝達率は最も高い。次いで、混合冷媒ではあるものの、温度勾配が 1 K と小さく、非共沸性が小さい HFO1123/HFC32(40/60mass%)が HFC32 よりもわずかに低い値を示す。一方温度勾配が 11 K と大きい R455A の熱伝達率は著しく低く、熱伝達率の観点からは他の冷媒に劣り、物質伝達抵抗緩和のための工夫が必要である。

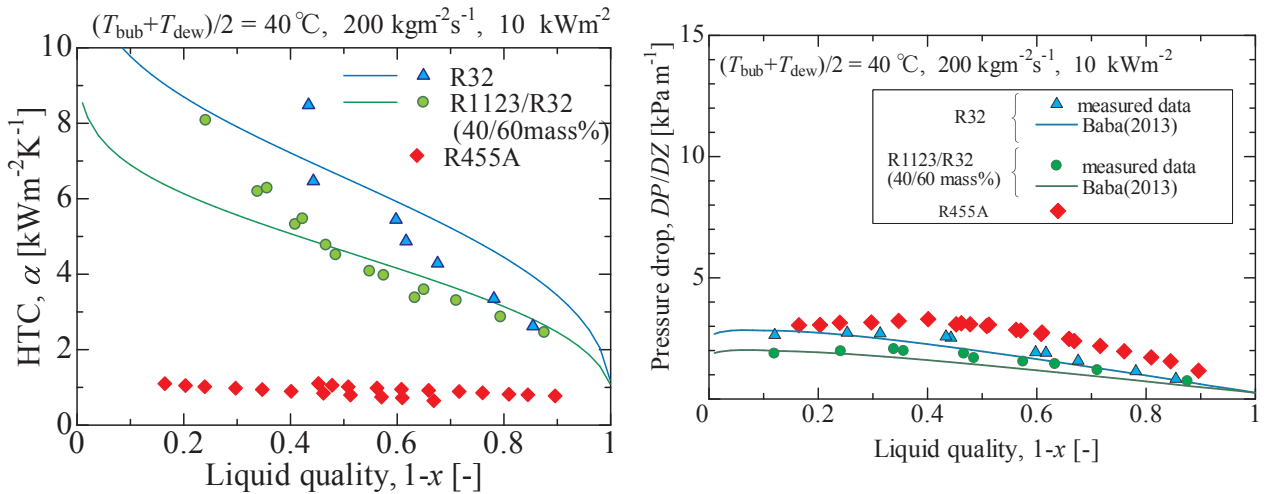


図 2.1.1.2.3-4 R455A と HFC32 および Amolea400X との溝付管内凝縮特性の比較

図 2.1.1.2.3-5 は、平均飽和温度 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熱流束 10 kWm^{-2} 、質量流速 $200\text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $300\text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、 $400\text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ における熱伝達率および圧力損失の結果である。凝縮過程より顕著に、質量流速増加によって熱伝達率が増加する傾向にある。物質伝達抵抗緩和は凝縮過程のほうが容易であるようである。

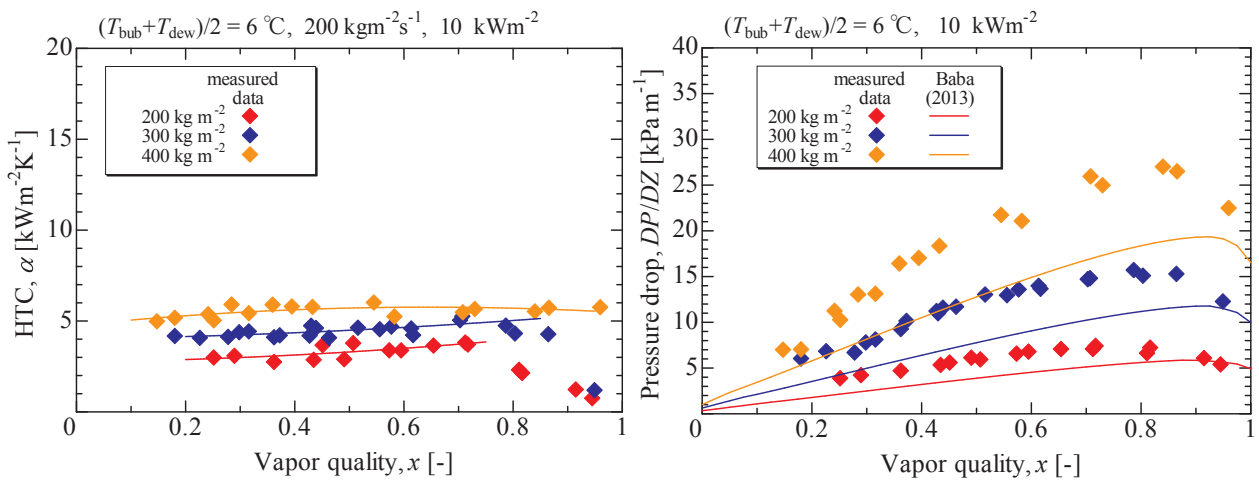


図 2.1.1.2.3-5 R455A の溝付管内蒸発過程の熱伝達率および圧力損失

図 2.1.1.2.3-6 は平均飽和温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熱流束 10 kWm^{-2} 、質量流速 $200\text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、において、凝縮過程の熱伝達率と圧力損失を HFC32 および Amolea400X(HFO1123/ HFC32;40/60mass%)と比較するものである。混合冷媒 Amolea400X(HFO1123/HFC32;40/60mass%)の熱伝達率は、単一物質である HFC32 の熱伝達率と遜色ない。これは表面張力がより小さく核沸騰しやすい物質の HFO1123 を含むことにより、物質伝達抵抗の影響を相殺しているためである。しかし、温度勾配が 10 K と大きい R455A の熱伝達率は他の 2 冷媒の半分ほどと、凝縮過程ほどではないが顕著な劣化が見られる。

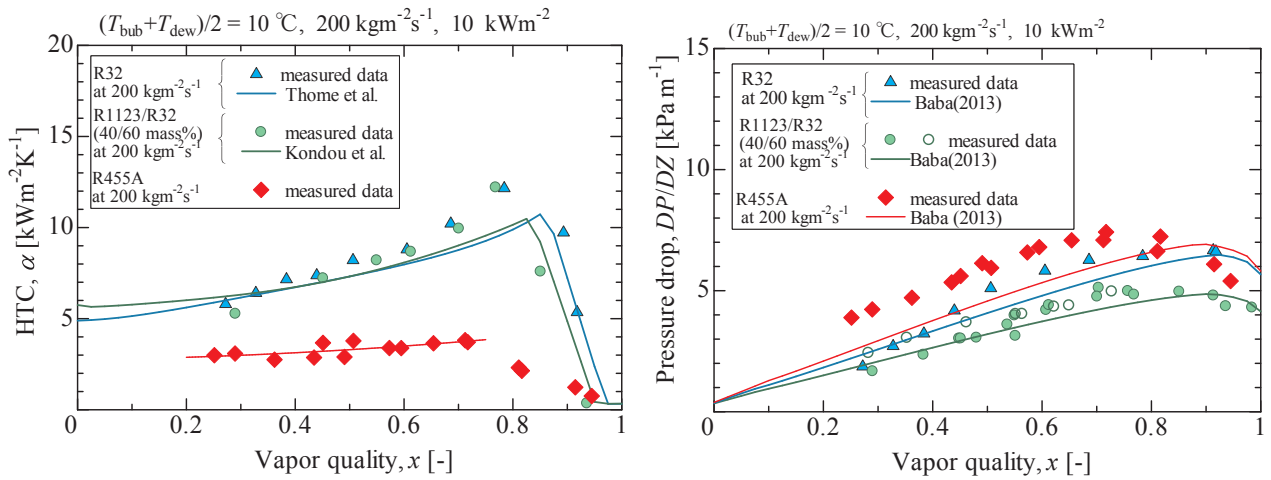


図 2.1.1.2.3-6 R455A と HFC32 および Amolea400X との溝付管内蒸発特性の比較

2.1.1.2.4 水平円管外の伝熱特性評価 (担当：九州産業大学)

本実験装置は研究を開始した当初に九大より移設を行った。そのため、まず初めに装置の健全性の確認を行った。図 2.1.1.2.4-1 に実験装置の概略を示す。本実験装置は、主に凝縮器、蒸発器、冷媒循環ループおよび熱源水ループから構成される。凝縮器内で凝縮した液冷媒は重力によって流下して蒸発器内を満たし、蒸発器内で蒸発した蒸気冷媒は凝縮器へと戻る、自然循環式ループである。凝縮器内には、試験伝熱管が水平に設置されており、伝熱管内には恒温槽(2)から熱源水が供給される。熱源水の混合平均温度は、試験伝熱管入口および出口に設置された混合室(3)内で白金測温抵抗体(Pt)を用いて計測され、熱源水の体積流量は試験伝熱管出口側に設置された体積流量計(4)によって計測される。凝縮器内冷媒圧力は試験伝熱管近傍に設置された絶対圧力計(P)により測定され、試験伝熱管壁温度は電気抵抗法により測定される。表 2.1.1.2.4-1 に実験条件を示す。実験はヌセルトの液膜理論と比較を行うため、銅製の平滑管を用い、冷媒は物性が明確になっている R134a を用いた。飽和温度は 20、30 および 40 ° C、壁面過冷却度(飽和温度－壁面温度)は 2~12 K で 2 K 刻みで測定を行った。壁面過冷却度については、凝縮管を流れる熱源水の温度下限のため測定可能な温度で実験を行ったため、各飽和温度により測定点数が異なる。図 2.1.1.2.4-2 に本実験装置により測定した R134a の結果を示す。実線がヌセルトの液膜理論より算出した理論値、赤および青の破線がそれぞれ理論値から±10%の値であり、縦軸が熱伝達率、横軸が過冷却度(飽和温度－壁面温度)である。実験結果は飽和温度 20、30 および 40 ° C すべての条件で理論値と概ね±5 以内となっており、本実験装置の健全性が確認された。

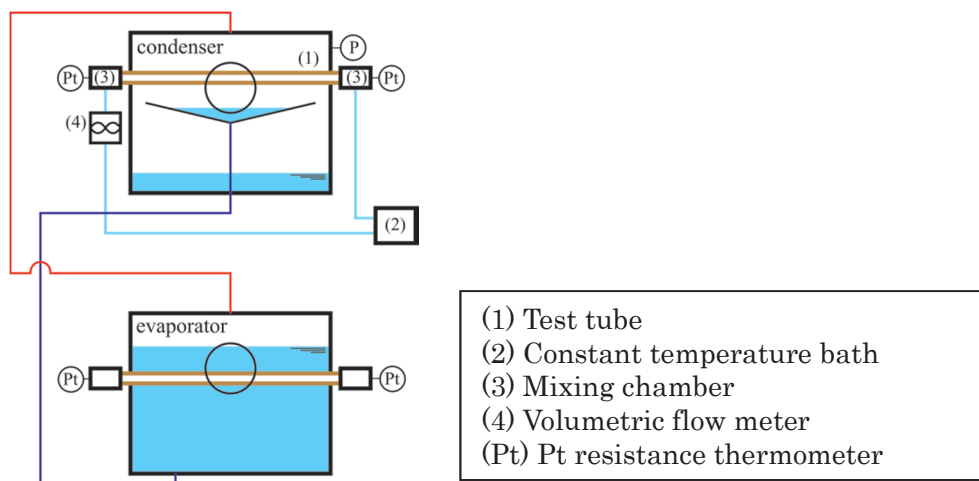


図 2.1.1.2.4-1 実験装置

表 2.1.1.2.4-1 実験条件(R410A)

試験方式	平滑管を用いた管外凝縮実験
冷媒	R134a
飽和温度	20, 30, 40 °C
壁面過冷却度	2, 4, 6, 8, 10, 12 K

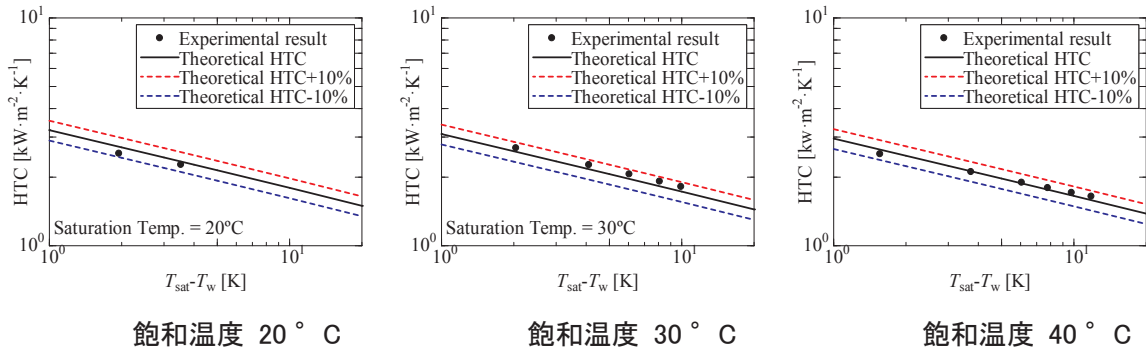


図 2.1.1.2.4-2 R134a を用いた装置の健全性の確認

次に健全性が確認された装置を用いて、HFO1336mmz(E)の凝縮試験を行い、実験結果をヌセルトの液膜理論と比較を行うことにより、2.1.1.1.6「状態方程式の開発」にて開発された HFO1336mzz(E)の状態方程式の妥当性を検討する。表 2.1.1.2.4-2 に実験条件を示す。図2.1.1.2.4-3 に健全性が確認された本実験装置にて HFO1336mmz(E)を測定した結果である。緑、黄、青、桃および赤のプロットがそれぞれ飽和温度 20、30、40、50 および 60 ° C の結果、それぞれの色の実線がヌセルトの液膜理論より算出した理論値であり、縦軸が熱伝達率、横軸が過冷却度(飽和温度－壁面温度)である。プロットのバーは測定機器の誤差より算出したエラーバーである。測定誤差が大きい低壁面過冷却度の除き、実験結果はヌセルトの式から算出した値にと良い相関を示している。よって2.1.1.1.6「状態方程式の開発」にて開発された HFO1336mzz(E)の状態方程式の妥当性が証明された。しかしながら、HFO1336mzz(E)の粘度はまだ反映されていないため、測定が終了した後に再度比較を行う。

表 2.1.1.2.4-2 実験条件(R410A)

試験方式	平滑管を用いた管外凝縮実験
冷媒	R133mmz(E)
飽和温度	20, 30, 40, 50, 60 °C
壁面過冷却度	2, 4, 6, 8, 10 K

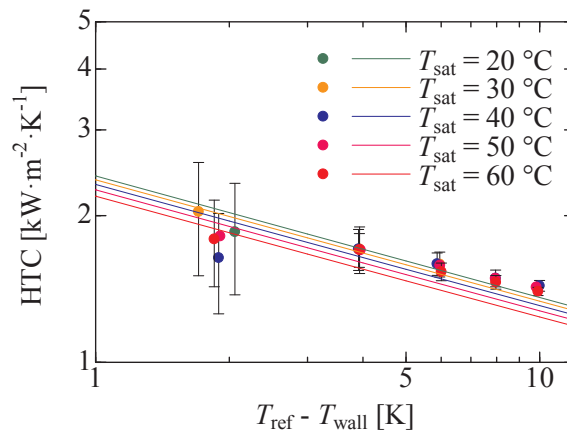


図 2.1.1.2.4-3 HFO1336mmz(E)の試験結果およびヌセルトの式との比較

2.1.1.2.5 伝熱データベースの構築（担当：佐賀大学、長崎大学、東京海洋大学）

伝熱データベースは、本プロジェクトの伝熱特性評価で得られた円管、扁平多孔管およびプレート式熱交換器に関する実験データを集約し、総合的に整理して研究開発者や技術者が利用できることを目的としている。プロジェクト3年目に実施するデータベース構築に向けて、データベースの構成に関する検討を進めた。

表 2.1.1.2.5-1 は、公開用伝熱データベースの案であり、①～⑥をプルダウンメニューにより条件を選択することで、(1)～(4)の情報が表示されるようなものを検討している。

表 2.1.1.2.5-2 は、伝熱データベースの基となる実験データ群のイメージ（案）を示したものである。一つの熱伝達率の値に対して、熱交換形式や冷媒種類、温度、圧力、質量速度、乾き度などの実験条件が紐づけされている。このデータ群を基盤として、有効に使えるデータベースを構築する計画を進めている。

表 2.1.1.2.5-1 公開用伝熱データベース（案）

① 管の種類	② 蒸発/ 凝縮	③ 冷媒	④ 飽和 温度	⑤ 流量	⑥ 熱流束, 過冷度	(1) 直径, 諸元	(2) 熱伝達率定義 (熱流束算出方法)	(3) データ (グラフ)	(4) 論文リ ンク
平滑円管							内径,		
溝付円管							相当直径, 平均内径, など		
扁平管							相当直径, 平均熱流束, など		
PHE							投影面積, 実面積, など		

表 2.1.1.2.5-2 伝熱データベースの基データのイメージ（案）

HEX type	Data source	Evap/Cond	Refrigerant	Sat. Temp	Mass valocity	Heat flux/ Subcooling	Quality	HTC	Hyperlink
Multiple, Grooved, PHE	-	-	-	°C	kg/m2s	kW/m2	-	kW/m2K	if any
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.1	4.80	
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.2	5.25	
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.3	5.50	
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.4	5.60	
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.5	5.62	
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.6	5.70	
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.7	5.71	
PHE	佐賀大学	Evap	R1234yf	20	10	13.2	0.8	5.24	

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

2.1.1.3.1 ヒートポンプサイクル基本特性の熱力学的解析 (担当：九州産業大学)

冷媒を混合して用いる場合は、組成比の選択に多数の組み合わせが存在する。そこで熱力学的解析を行うことによって、組成の決定を行う。解析方法としては、冷媒の凝縮、蒸発時の飽和温度と凝縮器出口過冷度と蒸発器出口過熱度を決めてサイクル計算を行う。しかしながら、混合冷媒は温度すべり(露点沸点温度差)が存在するため飽和温度を沸点と露点の平均値が決定した温度になるように計算を行う。また、算出したCOPおよび体積能力は、既存冷媒であるR410Aを基準にしてCOP比および体積能力比を算出する。図2.1.1.3.1-1にHFO1234yf+HFC32+CO₂系混合冷媒において、凝縮温度40°C、蒸発温度-3°C、蒸発器出口過熱度3K、凝縮器出口過冷却度0Kで熱力学的解析の結果を示す。図中の実線、破線および点線はそれぞれCOP(R410A比)、GWPおよび体積能力(R410A比)を示す。解析結果よりGWPが100以下、COPおよび体積能力がR410Aと同程度組成としては、図中赤丸付近(HFO1234yf/HFC32/CO₂; 72/12/16 mass%)となった。なお、この結果では温度すべりは考慮していない。

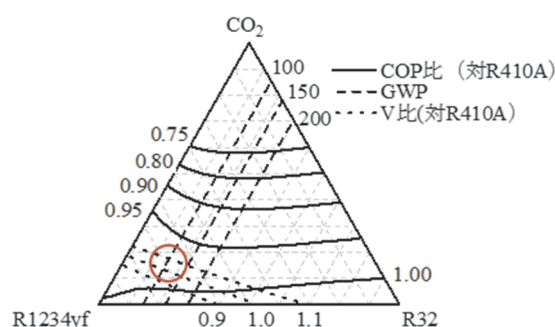


図2.1.1.3.1-1 HFO1234yf+HFC32+CO₂系混合冷媒における熱力学的解析

次に実験条件におけるCOPの変化を確認するために凝縮温度を変化させて計算を行った。表2.1.1.3.1-1に計算条件を示す。蒸発温度、過熱度および過冷度は条件が一定で、凝縮温度を20、30、40°Cと変化させて、計算を行った。図2.1.1.3.1-2に計算結果を示す。左図、中央図および右図がそれぞれ凝縮温度20、30および40°Cの結果である。凝縮温度が高くなると、CO₂の比率が高い領域のCOPが低下していくことが分かる。これは凝縮温度が上がるほどCO₂の臨界温度に近づくためである。このように凝縮温度を変化させることにより、COPが変化するため、使用条件に合わせた条件にて組成比を決定する必要がある。

表 2.1.1.3.1-1 計算条件

冷媒	凝縮温度、°C	蒸発温度、°C	過熱度、K	過冷度、K
HFO1124yf	20	-3	3	0
HFC32	30			
CO ₂	40			

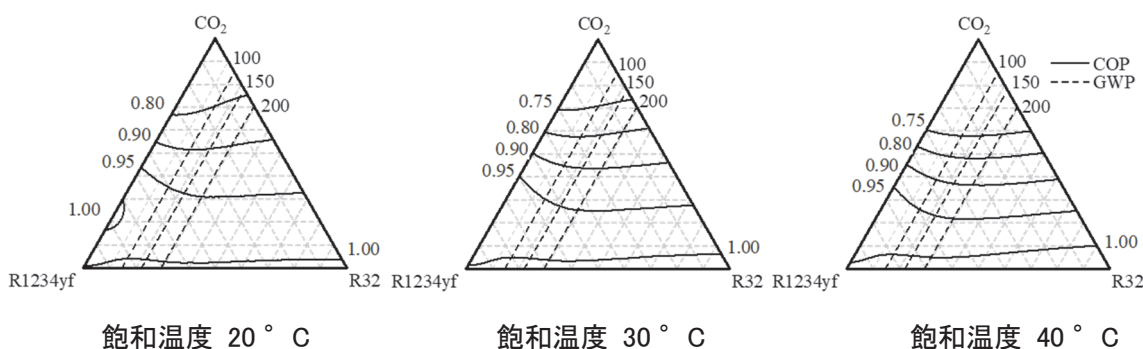


図2.1.1.3.1-2 凝縮温度条件がCOPに及ぼす影響(HFO1234yf+HFC32+CO₂系混合冷媒)

さらに、実機での COP は温度すべりの影響大きく受ける。したがって、より実機条件に近づけるため、熱力学的解析に圧力損失および熱交換器性能を導入する。圧力損失の導入にはこれまで九州大学にて測定されたサイクル実験における圧力損失と体積能力の関係を用いる。図 2.1.1.3.1-3 に圧力損失と体積能力の関係および決定した相関式を示す。また、熱効果器性能の導入に関しては、熱交換器の種類・形状に大きく影響を受けるため、熱通過率 K および熱交換器伝熱面積 A の積が一定となるように計算を行うこととした。以上、圧力損失と熱交換器性能を導入したサイクル計算は現在、プログラムの作成中である。

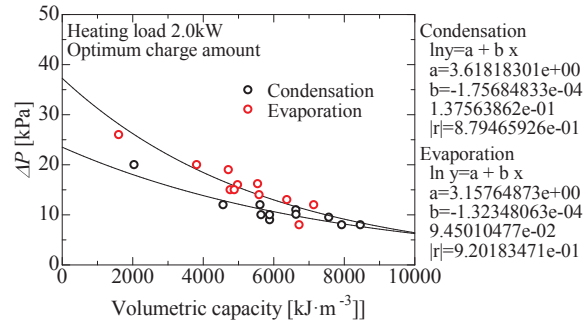


図 2.1.1.3.1-3 体積能力と圧力損失の関係

2.1.1.3.2 ヒートポンプサイクル特性の実験的評価（担当：九州大学）

HFC32+HF01234yf 系混合冷媒に CO₂ や HF01123 を添加した三成分混合冷媒について、既設の水熱源容積圧縮式ヒートポンプサイクル試験装置によるサイクル性能実験を実施し、冷暖房熱負荷及び熱源運転条件がサイクル性能に及ぼす影響を明らかにした。実験装置の概略図を図 2.1.1.3-1 に示す。実験装置は、ヒートポンプの基本構成要素である蒸発器、圧縮機、凝縮器、膨張弁に加え、蒸発器、凝縮器の熱源水を供給する恒温水循環装置、圧縮機のインバータおよび電力計、その他流量計、圧力センサー、熱電対等の計測系で構成されている。

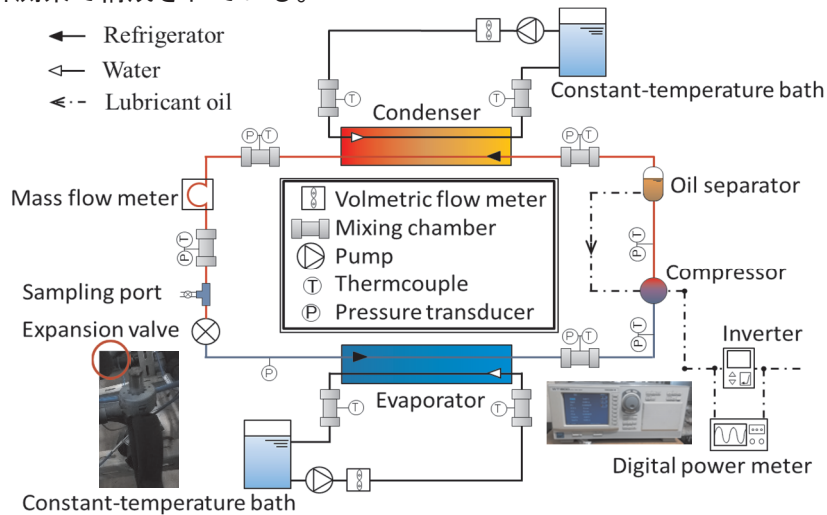


図 2.1.1.3-1 実験装置

設定した 4 つの実験条件を表 2.1.1.3-1 に示す。暖房 1 と暖房 2 はそれぞれ暖房低負荷時と暖房高負荷時の設定であり、凝縮器の熱源水出口温度が異なる。暖房 1、2 および冷房は中・小型の空冷式空調機を想定した条件であるが AHRI 冷房条件は、米国冷凍空調暖房工業会が示す水冷式冷凍機の標準条件である。本実験装置は、安定した熱源温度条件でサイクル性能を評価するために水熱源方式を採用している。そこで、実験装置自体の性能評価のために AHRI 冷房条件を加えて実験を実施した。全ての実験条件において、蒸発器出口の過熱度が $4\text{K} \pm 1\text{K}$ となるように制御されている。また、冷媒の充填量によって性能に差が生じるため、冷媒充填量をパラメータとした実験を行い、COP が最大となる充填量を求めた。

表 2.1.1.3-1 実験条件

	熱源水温度 [°C]		熱負荷 [kW]	過熱度 [K]
	凝縮器入口→出口	蒸発器入口→出口		
暖房 1	20 → 30	15 → 9	1.6 ~ 2.6	4 (±1)
暖房 2	20 → 45	15 → 9	1.6 ~ 2.6	
冷房	30 → 45	20 → 10	1.4 ~ 2.4	
AHRI 冷房	30 → 35	12 → 7	1.0 ~ 1.6	

地球温暖化係数 (GWP) が約 150 となる組み合わせとして、3成分混合冷媒 HFC32/HFO1234yf/CO₂ (22/72/6 mass%)、及び、HFC32/HFO1234yf/HFO1123 (21.2/38.5/40.3 mass%)、ならびに、GWP が約 120 となる HFC32/HFO1234yf/HFO1123 (17.2/51.6/31.2 mass%) についてシステム COP を計測した。その結果を図 2.1.1.3-2 に示す。システム COP は、熱源水側で計測した熱交換量と圧縮機インバータへの投入電力で定義した COP である。比較のため、R410A、HFC32 及び重量比の異なる 2 成分混合冷媒の結果を同図に示した。

- R410A
- HFC32/HFO1234yf(22/78mass%)
- △ HFC32/HFO1234yf/CO₂(22/72/6mass%)
- HFC32/HFO1234yf/HFO1123(21.2/38.5/40.3mass%)
- ▽ HFC32/HFO1234yf/HFO1123(17.2/51.6/31.2mass%)

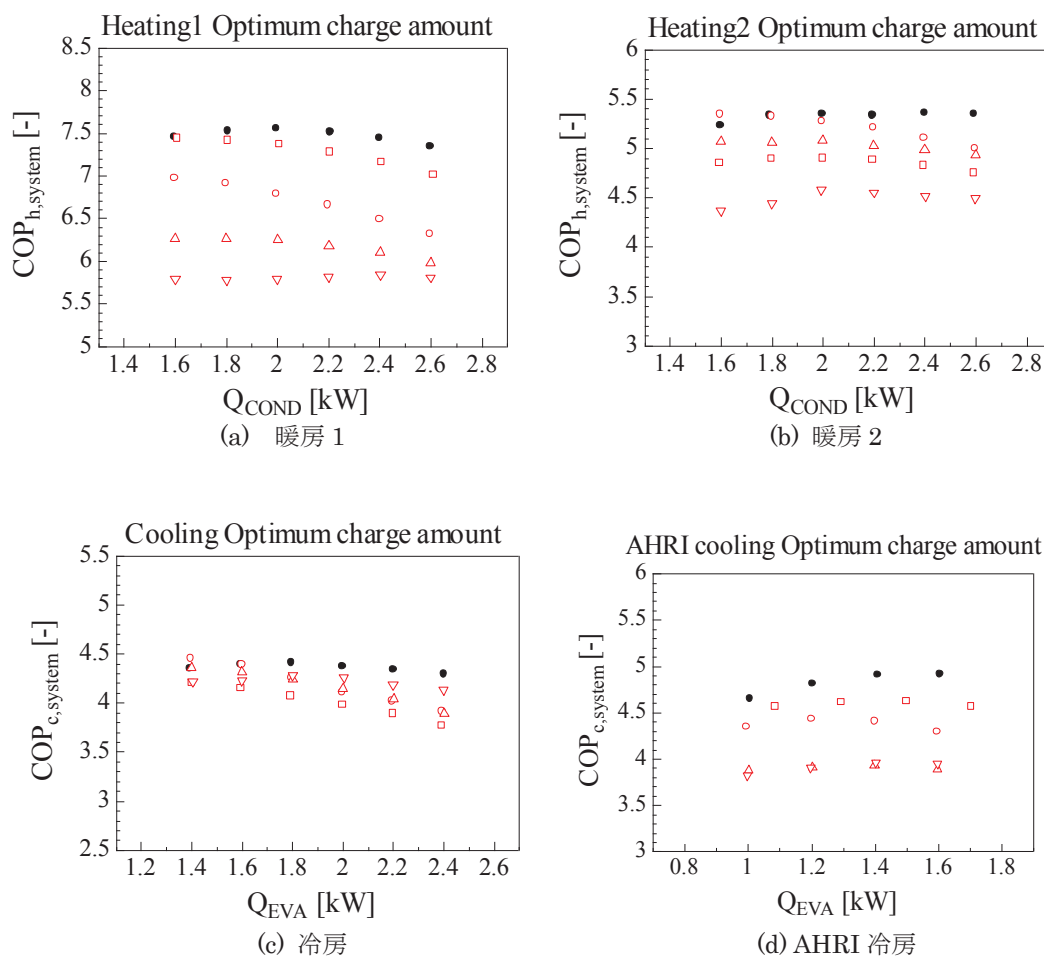


図 2.1.1.3-2 システム COP の比較

実験の結果、GWP が約 150 となる HFC32/HF01234yf/CO₂ (22/72/6 mass%) 三成分混合冷媒の COP は R410A に及ばないことがわかった。特に、低負荷暖房条件（暖房 1）において差が大きい。HF01123 を添加した 3 成分混合冷媒の場合は、GWP150 の混合比 (21.2/38.5/40.3 mass%) において低負荷暖房条件における COP が改善されており、特に負荷の小さい 1.6kW の場合には R410A と同等の COP となった。一方、高負荷暖房条件（暖房 2）では、GWP150 の HF01123 添加 3 成分混合冷媒の COP は、CO₂ 添加三成分混合冷媒の COP を下回っている。また、GWP が約 120 となる HF01123 添加 3 成分混合冷媒（混合比 17.2/51.6/31.2 mass%）の COP は低負荷、高負荷共に暖房条件においては COP が最も低いが、冷房条件及び AHRI 冷房条件においては、CO₂ 添加 3 成分混合冷媒と同等もしくは同等以上の COP となった。このように、熱源温度条件によって COP の大小関係が変わるのは、熱源水の温度勾配と混合冷媒の露点-沸点温度差の関係に強く影響されているためと考えられる。今後、熱交換過程における不可逆損失等について解析し、露点-沸点温度差の観点から最適な冷媒選択の指針を検討する。

<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	0	0	0	9	1	
2019FY	0	0	0	17	20	
2020FY	0	0	0	2	1	

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.1.2 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】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ： 低GWP低燃焼性混合冷媒の安全性評価		
産学官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、およ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。そのために低 GWP 混合冷媒の安全性評価、実用上の安全性評価を実施する。	低 GWP 低燃焼性混合冷媒の対象として、国内外で開発中の代表的な混合系を選定し、冷媒の国際標準において必要な燃焼限界、燃焼速度や、実用化の検討において重要な消炎特性について評価した。また、混合系の実用上の燃焼特性として、温度湿度影響の評価を実施中である。燃焼限界測定法は、種々の標準法を実用上の火災に近い大規模容器での測定結果と比較検証した。	○
(1)低 GWP 混合冷媒の安全性評価		
① 安全特性の混合比依存性の評価 ② 不活性化条件の明確化	①評価対象として、R32/1234yf 混合系を選定し、標準条件における燃焼限界、燃焼速度の混合比依存性を明らかにし、消炎距離については高圧条件からの推算も行い混合比依存性を明らかにした。 ②特定不活性ガスである R32、R1234yf 単体よりも燃焼性が低いことを示した。	○
(2)低 GWP 混合冷媒の実用上の安全性評価		
① 実用条件下での安全特性の混合比依存性の評価 ② 濃度分布を有する条件における評価法の検討	①評価対象として、R32/1234yf 混合系を選定し、燃焼限界の温度湿度依存性を明らかにし、数式化した。燃焼速度及び消炎距離の温度湿度影響を評価中である。 ②大規模容器での均一混合系の燃焼性評価を可能にした。冷媒の濃度分布を測定するための計測系を用意した。	○

【 ◎: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 燃焼限界の評価

我が国の含フッ素化合物の燃焼限界（可燃濃度範囲）の測定法は、1968年の高圧ガス保安法通達（以下、「保安法A法」）で定められているが、その方法は我が国独自の方法であり、データの信頼性の問題及び国際整合化の観点から見直しが必要と考えられてきた。そのため2016年度から2018年度まで、高圧ガス保安協会の委員会において燃焼限界測定法の見直しの検討を行ったところである。一方、現在国際標準に規定されている燃焼限界の測定法としては、ISO10156及びEN1839T法で定められたガラス円管を用いる方法、ISO817及びANSI/ASHRAE34で定められたガラスフラスコを用いる方法、及びEN1839B法で定められた耐圧密閉容器を用いる方法がある。燃焼限界は装置に依存する値であるため、測定法が異なれば燃焼限界値も異なる。本研究開発を進めるにあたり、測定法をひとつに決定する必要があることから、まず種々の標準的測定方法によって代表的な化合物の燃焼限界値がどのように変化するか、またそのうちの測定方法が実環境での燃焼限界を最も良く表しているか調べた。

表2.1.2-1に、代表的な冷媒である8化合物の燃焼限界の測定結果をにまとめて示す。表の化合物のうち本研究開発で実施したものは、R32及びR1234yfの大規模容器及び5L容器（EN1839B法）の値を除く全てである。次に、実環境での燃焼限界を最も良く表現する値として、内容積520L（内径1m）の大規模球形密閉容器を用いた燃焼限界の測定値を採用し、この値と種々の測定方法との値の差異を調べた。表2.1.2-2にその結果をまとめて示す。表から、下限界（LFL）値、上限界（UFL）値とも、ISO817法は化合物によらず常に緩め（LFLは高く、UFLは低い）の結果を与え、我が国の保安法A法及びEN1839B法の圧力上昇 $\geq 5\%$ 判定（R143a 下限界値を除く）は常に厳しめ（下限界は低く、上限界は高い）の結果を与えることが明らかになった。また、EN1839B法で圧力上昇 $\geq 30\%$ 判定とした場合が大規模容器の結果に最も近い結果を与えることが明らかになった。この結果に基づき、本研究開発における燃焼限界の評価はEN1839B法の圧力上昇 $\geq 30\%$ 判定で実施することとし、もしそれ以外の測定方法での評価が必要になった場合には、個別に検討することとした。

表 2.1.2-1 代表的な冷媒化合物の種々の評価法による燃焼限界測定値 (vol%)

		520L(d=1/4", $\Delta t=0.4s$)	5L(d=5mm, $\Delta t=0.2s$)					2L(0.3ΦPt)			ASHRAE	$T_{ad,L}$, K
		observation	ΔP ratio					ΔP ratio			90°	
			0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	0.1	0.2	0.3		
R290	LFL	2.02±0.02	1.97	2.03	2.03	2.04	2.05	1.88	1.89	1.90	2.09±0.04	1500
	UFL	9.75±0.15	11.0	10.7	10.3	10.0	9.45	-	10.6	10.5	9.2±0.5	1251
R600a	LFL	1.642±0.010	1.63	1.65	1.66	1.67	1.68	-	1.56	1.58	1.725±0.02	1552
	UFL		8.9	8.2	7.9	7.7	7.37	8.7	8.6	8.5	6.9±0.3	1254
CH ₄	LFL	4.95±0.15	4.50	4.73	4.92	5.03	5.20	4.26	4.65	4.70	5.05±0.10	1487
	UFL	15.8±0.2	16.6	16.2	16.15	16.1	16.08	22.2	19.0	17.5	15.1±0.3	1670
R152a	LFL	4.33±0.10	4.29	4.32	4.37	4.40	4.40	-	4.1	4.2	4.5±0.1	1592
	UFL	17.1±0.3	18.6	18.2	17.6	17.1	16.46	18.5?	18.3?	18.1	16.5±0.7	1296
R143a	LFL	7.25±0.05	7.3	7.5	7.5	7.55	7.55	7.0	7.1	7.2	7.55±0.15	1891
	UFL		18.3	17.8	17.1	16.6	15.85	19.7	19.3	19.0	16.5±0.5	1438
R32	LFL	13.58±0.10	13.3	13.5	13.6	13.7	13.70	12.9	13.2	13.3	14.1±0.3	1958
	UFL	27.6±0.3	27.7	27.4	27.2	27.0	26.76	30.5	29.5	29.3	26.6±0.5	1746
R717	LFL	15.8±0.2	14.4	14.8	15.4	15.8	16.14	7.7	9.6	11.7	16.1±0.3	1690
	UFL	29.7±0.4	32.0	31.1	30.3	29.8	29.8	62.0	55.7	49.3	29.0±0.3	1744
R1234yf	LFL	6.86±0.20	6.3	6.5	6.6	6.75	n.a.	6.1	6.2	6.3	7	1965
	UFL	11.2±0.2	12.8	12.4	11.8	11.45	11.21	14.7	14.0	13.7	10	1937

測定条件は温度 25℃、圧力 1 気圧、湿度ゼロ。520L：大規模容器による測定、5L：EN1839 B 法、但し可燃判定基準として圧力上昇が初期圧力比 0.05、0.1、0.2、0.3、及び 0.5 となった場合の値。2L：保安法 A 法、但し可燃判定基準として圧力上昇が初期圧力比 0.1、0.2、及び 0.3 となった場合の値。ASHRAE：ISO817 法の測定。

表 2.1.2-2 種々の評価法と大規模容器の燃焼限界測定値の差異
(a) 燃焼下限界 (LFL) 値

	EN1839 B method		保安法A法	ISO817
	Δ P ratio>0.05	Δ P ratio>0.3	Δ P ratio>0.3	Flame angle >90
R290	-2.48	0.99	-5.94	3.47
R600a	-0.73	1.71	-3.78	5.05
R50	-9.09	1.62	-5.05	2.02
R152a	-0.92	1.62	-3.00	3.93
R143a	0.69	4.14	-0.69	4.14
R32	-2.06	0.88	-2.06	3.83
R717	-8.86	0.00	-25.95	1.90
R1234yf	-8.16	-1.60	-8.16	2.04

数値は (LFL_{各評価法}/LFL_{大規模容器} - 1) × 100 (%)。

(b) 燃焼上限界 (UFL) 値

	EN1839 B method		保安法A法	ISO817
	Δ P ratio>0.05	Δ P ratio>0.3	Δ P ratio>0.3	Flame angle >90
R290	12.82	2.56	7.69	-5.64
R600a				
R50	5.06	1.90	10.76	-4.43
R152a	8.77	0.00	5.85	-3.51
R143a				
R32	0.36	-2.17	6.16	-3.62
R717	7.74	0.34	65.99	-2.36
R1234yf	14.29	1.79	22.32	-10.71

数値は (UFL_{各評価法}/UFL_{大規模容器} - 1) × 100 (%)。

多くの混合冷媒の主要成分である R32 及び R1234yf 各々単独ガスについて燃焼限界の温度湿度影響を明らかにするため、まず、温度影響の測定を実施した。15～120℃までの評価を行った結果、実用上の温度範囲 15～35℃において、燃焼限界はほとんど変化しないことが分かった。高温域での燃焼限界の変化は低温域よりも顕著になる傾向が現れた。R1234yf の LFL は、White 則に基づく予測の温度依存性と異なる結果が得られた。次に、R32 及び R1234yf 単体の燃焼限界の湿度変化について測定を実施した。燃焼限界を相対湿度に対して関数化するほかに、H₂O/sample モル比の関数として表現することができた。

次に、低 GWP 混合冷媒の代表例の一つとして、「R454」系として国内外の企業によって開発されている R32/1234yf 混合系を選定し、混合比 (モル及び総 GWP) に対する燃焼限界の温度依存性を測定した (温度 15℃及び 25℃、湿度ゼロ)。

図 2.1.2-1 に、25°C乾燥空気中における燃焼限界の混合比（総 GWP）による変化を測定した結果を示す。単体の場合と同様、温度 15°Cと 25°Cでは、燃焼限界に殆ど変化が見られないことが分かった。混合比に対する常温乾燥空気中での燃焼限界の変化は、上下限界とも概ねル・シャトリエ式に従い、また簡単な 2 次式によって良好な近似が得られることが判明した。これにより、室温周辺、湿度ゼロの条件では、任意の混合組成における R32/1234yf 混合系の燃焼限界を良好に予測することが可能になった。

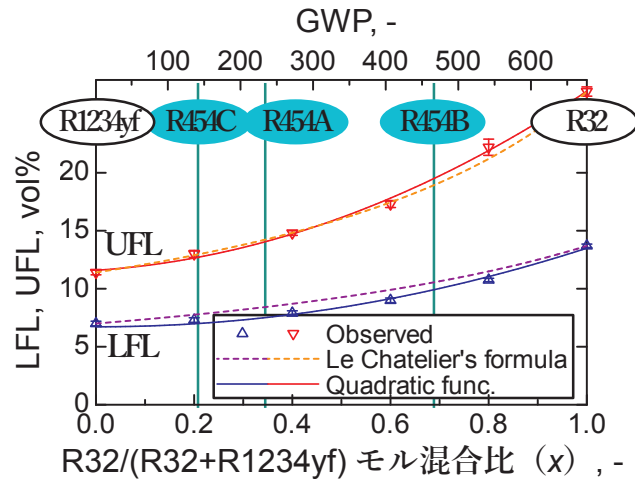


図 2.1.2-1 R32/1234yf 混合系の燃焼限界の混合比依存性（温度 25°C、湿度ゼロ）

次に、R32/1234yf 混合系について、燃焼限界に対する湿度の影響を調べた。図 2.1.2-2 に、結果の一部を示す。測定温度は全て 35°C、また、LFL、UFL 共に最高の相対湿度は 63%RH（IEC60335-240 が要求する高湿度条件である 27°C露点に相当する湿度）である。高湿度条件において燃焼範囲は広がるが、その変化量は R1234yf 単体に比べて小さいことが分かった。また、測定値はほぼル・シャトリエ則に従うことが分かった。

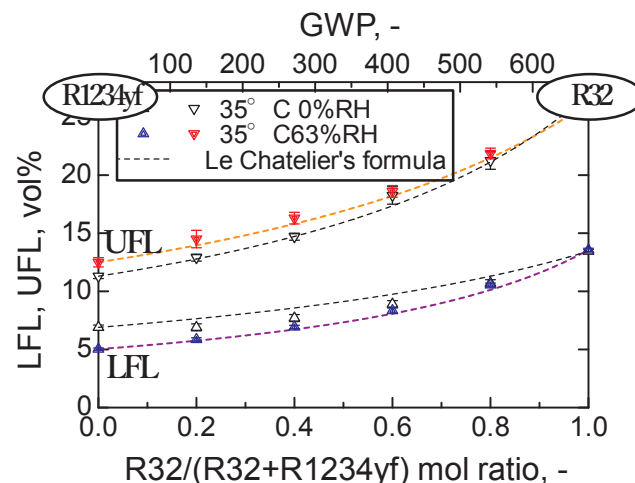


図 2.1.2-2 R32/1234yf 混合系の燃焼限界の湿度影響評価

上述のとおり、温度 35°Cで湿度条件各一定（35°C換算で 0%、10%、35%、及び 63%RH）にて燃焼限界を測定してきた。いずれの場合も、燃焼限界測定値 (y) は R32 モル比 (x) に対して $y = ax^2 + bx + c$ の形の 2 次式で良好な近似が可能であることが判明した。LFL、UFL のそれぞれについて得られた係数 a、係

数 b、係数 c の値をそれぞれ最小二乗法により相対湿度 ($r = \%RH/100$) に対する 2 次式として得た。こうして得られた式に、例えば $r = 0.50$ を代入すれば、相対湿度 50%RH における任意の組成に対応する LFL 及び UFL の予測値が得られると期待できる。それを検証するために、得られた係数 a、b、c の値を用いて各組成の LFL 及び UFL の値を予測し、実測値と比較した。図 2. 1. 2-3 に示したように、予測値は基本的に誤差範囲内で実測値と一致した。以上のように、R32/1234yf 混合系について、予測値は基本的に誤差範囲内で測定値と一致し、R32/1234yf 混合系については任意の混合比及び湿度、及び実用の温度範囲において、燃焼限界を予測できる可能性が示された。

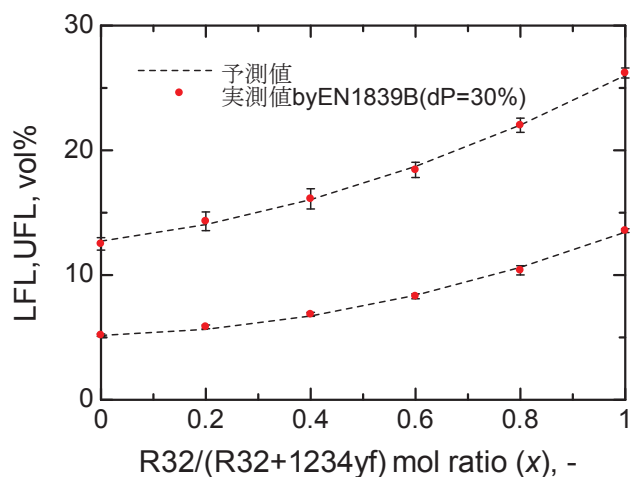


図 2. 1. 2-3 R32/1234yf 混合系の湿度 50%RH における燃焼限界の予測値と実測値の比較

低 GWP 混合冷媒の燃焼限界との比較のため、従来型の混合冷媒の代表例として R32/143a 混合系を選び、燃焼限界の混合比依存性を評価した。図 2. 1. 2-4 に、温度 35°C、湿度ゼロにおける結果を示す。その結果、R32/143a 混合系の LFL はル・シャトリエ式により予測可能であり、UFL は混合の度合いが深まると実測値は予測値よりもわずかながら低下する傾向があることが分かった。

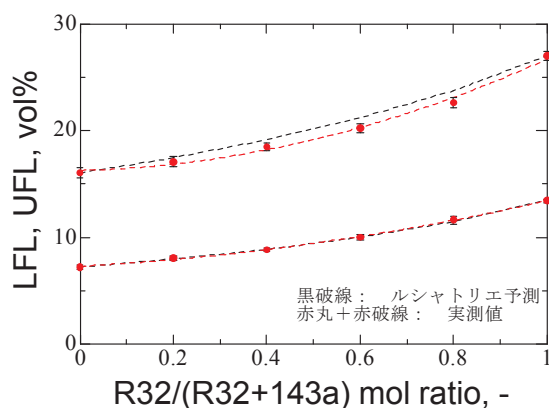


図 2. 1. 2-4 R32/143a 混合系の燃焼限界の混合比依存性 (温度 35°C、湿度ゼロ)

② 燃焼速度の評価

微燃性低 GWP 混合冷媒の燃焼速度の温度・湿度影響の評価をより正確に行うことを目的に、シュリーレン可視化法に使用する燃焼反応容器を新規に製作した。従来の容器より内容積を大きく内径と長さを等しくした。また攪拌羽根を容器底部に取付け、着火用放電電極を容器中心で対向させる方式に加えて容器下部でも対向させることを可能にした。これらの改良により、浮力で上方伝播する火炎の燃焼挙動や添加した水蒸気の均一化が器壁等の影響をより受けにくくすることが可能となった。本容器をシュリーレン光学系に組み込み、まず R1234yf 単体の温度 35°C、相対湿度 63%RH の燃焼速度を測定した。その結果、燃焼速度の濃度依存性は従前の容器を用いた測定結果とほぼ一致することを確認した。そこで、本容器を用いて種々の冷媒化合物のシュリーレン可視化法による燃焼速度測定を行った。

R32/1234yf 混合系（湿度ゼロ）の混合比全域について燃焼速度をシュリーレン法によって得た。

温度 25°C 及び 35°C の測定を行い、両者の最大燃焼速度の差が小さいことを確認した。図 2.1.2-5 に示したとおり、本混合系の最大燃焼速度は、モル分率のル・シャトリエ則では定量的に良く表現できず、重量分率又はエネルギー分率のル・シャトリエ則でより良好に表現できた。

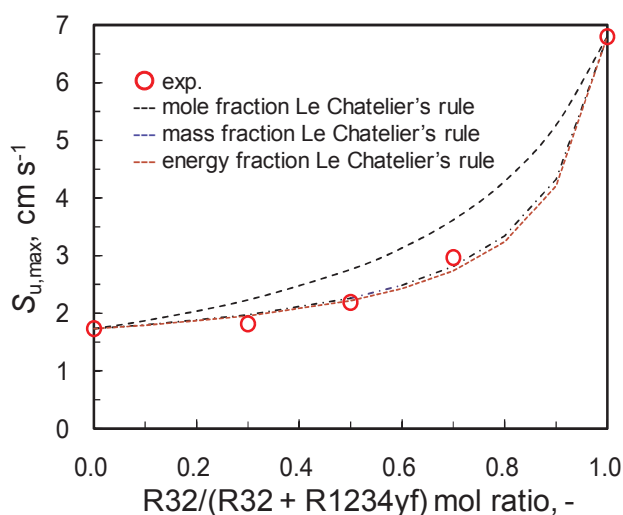


図 2.1.2-5 R32/1234yf 混合系の最大燃焼速度の混合比依存性（1 気圧、湿度ゼロ）

次に、燃焼限界と同様、35°C において燃焼速度の湿度影響評価を開始し、相対湿度 63%RH において混合比全域における最大燃焼速度を得た。

図 2.1.2-6 に示した通り、R32/1234yf 混合系の最大燃焼速度は 5~7 cm s⁻¹ であり、この温度湿度条件によって燃焼速度は増加するものの、任意の混合比において R32 単体よりも低いことが明らかになった。今後、更にいくつかの湿度条件について燃焼速度の評価を追加し、R32/1234yf 混合系の混合比及び湿度依存性についてまとめる。

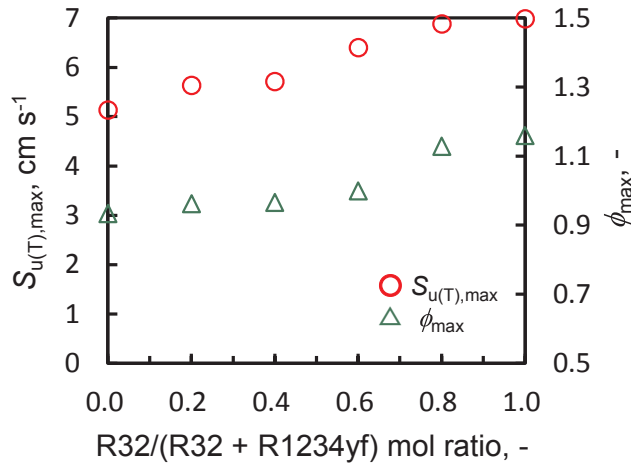


図 2.1.2-6 R32/1234yf 混合系（湿度条件）の最大燃焼速度の混合比依存性
 (35°C、1 気圧、湿度 63%RH)

新規フルオロオレフィン冷媒候補 HF0-1123 は、単独高温高压下で特異な反応を起こすことが知られている。HF0-1123 の燃焼においても高温高压下で特異な現象が見られるかどうか調べるため、燃焼速度の温度・圧力依存性の評価を行った。評価に関しては、定容燃焼条件で圧力上昇から球状伝播火炎モデルを用いて求める方法（球形容器法）を用いた。その結果を図 2.1.2-7 に示す。図 2.1.2-7(a)のとおり、初期圧力 P_0 が 0.4 MPa 程度までは、燃焼に伴う圧力上昇及び圧力上昇速度に異常な傾向は認められなかった。また、図 2.1.2-7(b)のとおり、未燃ガス圧力が常圧から約 0.9 MPa までの範囲において、燃焼速度の圧力影響はほぼゼロであり、通常のフルオロアルカンと同様の傾向を示すことが分かった。

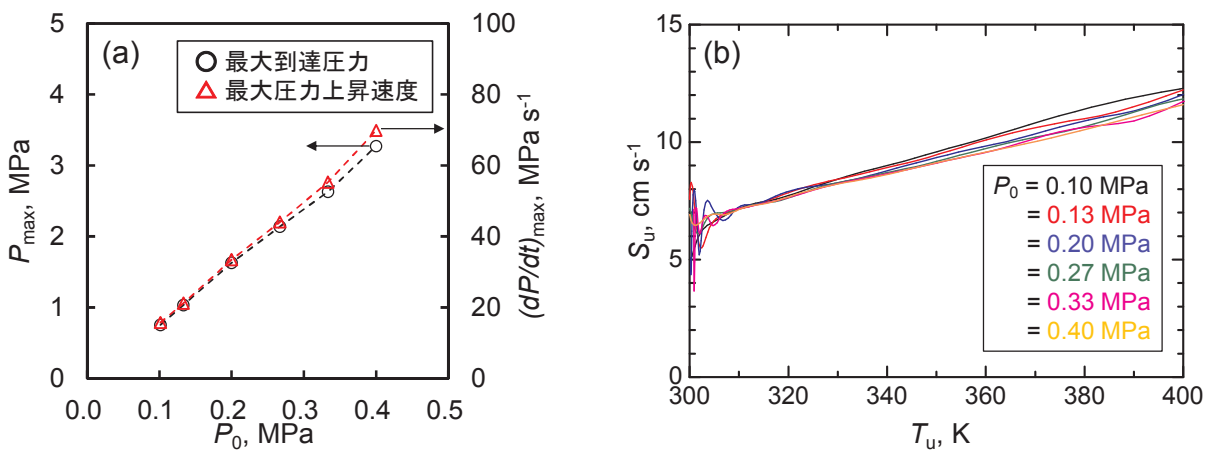


図 2.1.2-7 HF0-1123 の燃焼挙動の圧力影響
 (a) 最大到達圧力と最大圧力上昇速度、(b) 燃焼速度の圧力影響

③消炎特性の評価

低 GWP 混合冷媒の火炎の消炎特性として、消炎距離と消炎直径の評価を行った。消炎距離 d_q は火花放電によって生成した火炎核が平行平板間で成長し伝播火炎に至ることが出来る最小の平板間距離であり、ASTM E582 法を微燃性冷媒評価用に改良した装置を用いて測定した。消炎直径 d^* は伝播火炎を所定の距離離れたところに置いた間隙によって消炎に至らせる最大の間隙直径であり、電磁開閉器やブレーカー等の電気部品の安全隙間を評価する目的でこれまでに設計した方法を用いた。

まず、新規フルオロオレフィン HF0-1123 及び R1132a 単体の消炎特性の評価を行った。その結果を図 2.1.2-8 に示す。図には、比較のため代表的な微燃性 (2L) 冷媒 R32 及び微燃性等級の境界にある HFC-254fb も併せて示した。 $h = 0$ の値は消炎距離を表し、それ以外は消炎直径である。HF0-1123 の消炎直径は着火点から円孔までの距離 h がいくつであっても、常に HFC-254fb の値よりも大きく、消炎特性の観点から微燃性であることが示された。一方、R1132a の消炎直径は常に HFC-254fb よりも小さく、消炎特性の観点から微燃性より強い燃焼性を有することが示された。図 2.1.2-8 に示した通り、これらの化合物の消炎直径の h 依存性は、他の冷媒と同様に火炎球の成長に対応する $d^*(h) = d_q - (d_q - d^*_\infty) \{1 - \exp(-h/b)\}$ の形の関数によってほぼ表現できることが分かった。この式を用いることで任意の冷媒について、消炎距離 d_q のデータを基に任意の h における消炎直径を推算できることが分かった。

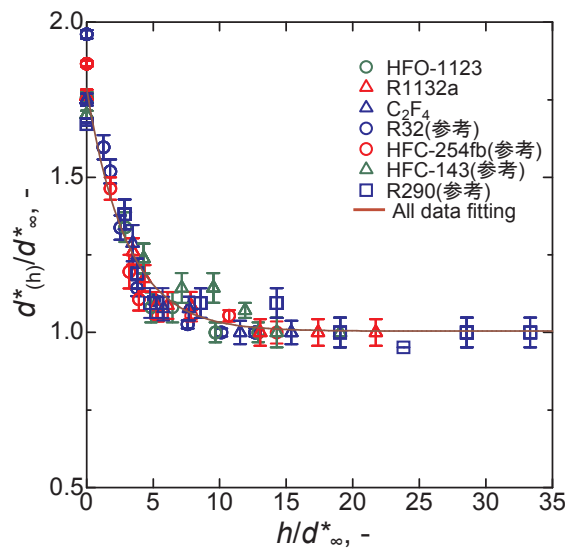


図 2.1.2-8 消炎直径の着火源—円孔間距離 (h) 依存性

各記号は 7 化合物の実測値で、それぞれ d^*_∞ で規格化された値。曲線は、全ての实測値を減衰曲線で最小二乗近似したもの。

本研究開発が対象とするごく微燃性の消炎距離 d_q を測定する場合、火炎伝播に及ぼす浮力の影響が大きく、加えて平行平板間距離が大きいため、直接的に測定するためには微小重力実験など浮力を取り除く特殊な装置が必要となる。これまで得た知見として、消炎距離は温度・圧力の上昇に伴い小さくなることが分かった。つまり、消炎距離の温度・圧力依存性を利用して、消炎距離を小さくし体積力である浮力の影響を小さくすることにより、通常の装置でも定量化できると期待される。消炎距離自体の重要性、消炎直径の推算目的に加え、ごく微燃性の消炎距離の推算の観点から、消炎距離の温度・圧力依存性の測定及び解析を行った。まず、消炎距離の初期圧力依存性の測定を行った。

微燃性の R32 単体においては、初期圧力の増加に対して概ね $P_0^{-\beta}$ の形で減少し、0.5 MPa の消炎距離は大気圧の約 1/4 に減少した。ごく微燃性の R1234yf 単体においては、圧力の増加に対して消炎距離は激減し、通常重力下でも測定可能となった。初期圧力依存性は、R32 の傾向に比べて低圧域で大きくずれているが、0.2 MPa 以上ではほぼ一致することが認められた。測定した種々の圧力における消炎距離 $d_{q(T,P)}$ と、既に公表した消炎距離と燃焼速度 $S_{u,max(T,P)}$ の相関式を使って、標準条件の燃焼速度 $S_{u0,max}$ を見積もった。この方法によって、R32 の $S_{u0,max} = 6.7 \text{ cm s}^{-1}$ 、R1234yf の $S_{u0,max} = 1.5 \text{ cm s}^{-1}$ が得られ、この推算値はこれまで報告された燃焼速度の値と概ね一致しており、高圧条件の消炎距離の測定値も消炎距離と燃焼速度の相関式を良く満足していることが確認できた。

また、R32 及び R1234yf 単体の消炎距離の湿度影響についても評価した。図 2.1.2-9 に、温度 60°C における、消炎距離の湿度依存性の結果を示す。相対湿度 18%RH 以上で R1234yf の消炎距離は R32 と逆転することが分かった。また、冷媒/湿潤空気混合気中の総 H/F 比が 1.0 を超えると消炎距離は微増に転じるが、これは余剰の H₂O が希釈剤となることに対応していると考えられる。

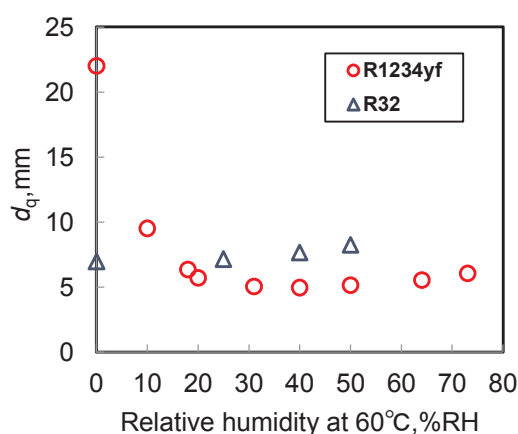


図 2.1.2-9 R32 及び R1234yf 単体の d_q の湿度依存性 (1 気圧、60°C)

次に、ごく微燃性の R32/1234yf 混合系の測定を行い、前述の各単体の結果から消炎距離の推算が可能か検証を行った。まず、R32/1234yf 混合系の初期圧力 0.2、0.3 MPa における消炎距離の混合比の影響について評価した（測定温度は 25°C、湿度はゼロ）。この結果を基に、初期圧力 0.1MPa の消炎距離を前述の方法で推算した。図 2.1.2-10 に、直接測定した結果、高圧条件から推算した結果、及び種々のル・シャトリエ則による推算結果を示す。混合系の消炎距離は、各単体の結果を用いたモル分率のル・シャトリエ則とは傾向が異なり、重量分率又はエネルギー分率のル・シャトリエ則で良好に表現できた。このように、高圧条件を利用することでごく微燃性の消炎距離についてもかなり精度良く測定、推算でき、混合比依存性の傾向も燃焼速度と同様に推算可能であることが分かった。今後、いくつかの湿度条件について消炎距離の評価を実施し、R32/1234yf 混合系の混合比及び湿度依存性についてまとめる。

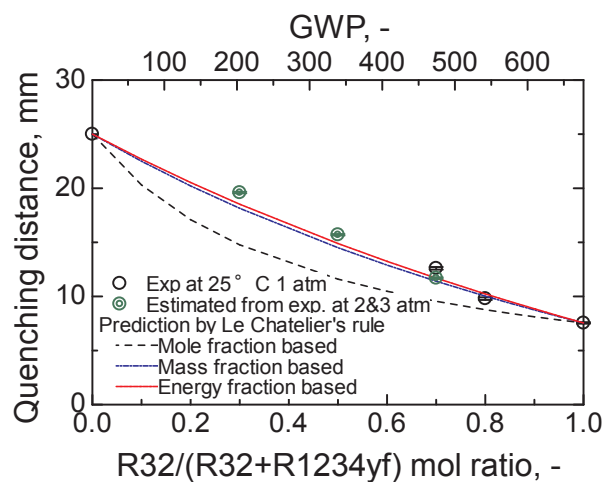


図 2.1.2-10 高圧 R32/1234yf 混合系の d_0 の混合比依存性 (0.3 MPa, 25°C, 湿度ゼロ)

<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	0	0	0	0	0	5
2019FY	0	0	0	0	0	4
2020FY	0	0	0	1	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)