

事業概要（冷媒開発Gr.）

＜個別事業名＞ 低GWP混合冷媒の特性評価

＜事業期間＞ 2023年4月～2028年3月

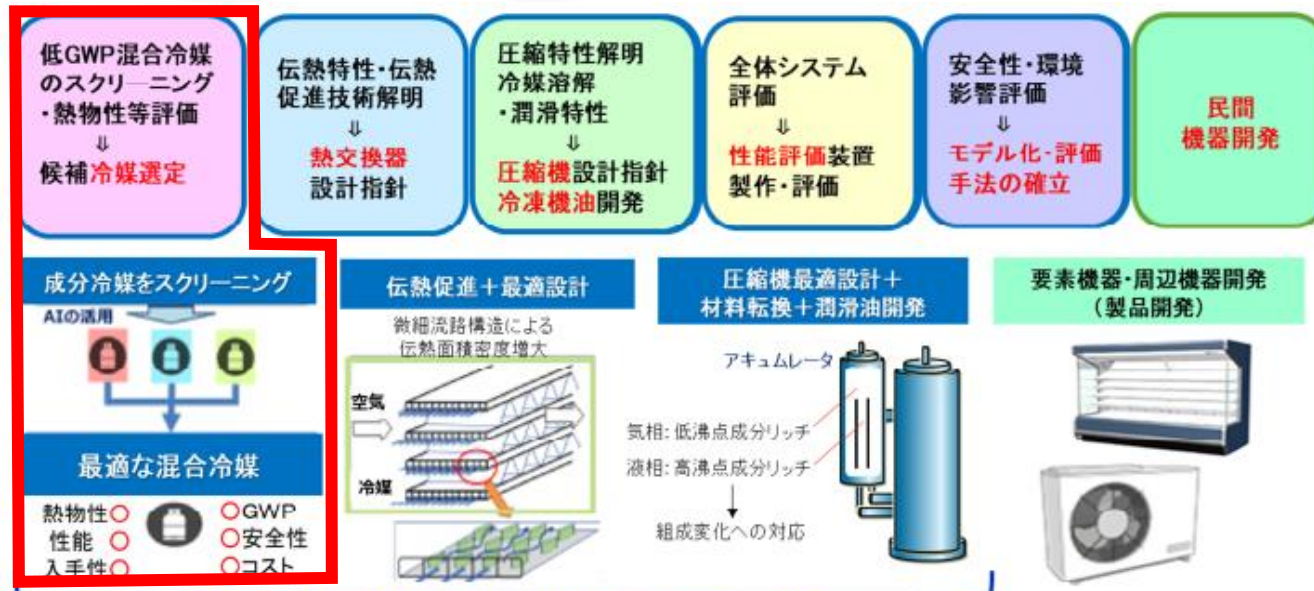
＜事業概要＞

本研究では、次世代低GWP混合冷媒の熱物性及び燃焼性の包括的評価を通して有望な候補冷媒の絞り込みを行うとともに、候補冷媒の熱力学的状態方程式を確立する。さらに、NEDOプロジェクトで新たに開発された熱交換器や圧縮機を用い、候補冷媒の基本サイクル特性評価を行うとともに、LCCP評価を実施し環境影響を評価する。

技術課題①：熱力学特性、燃焼性、安全性を高い次元で両立する低GWP混合冷媒の探索

技術課題②：国際標準となる熱力学的状態方程式や燃焼性評価手法の開発

技術課題③：基本サイクル特性評価による低GWP混合冷媒に特化した要素機器の性能向上の定量把握



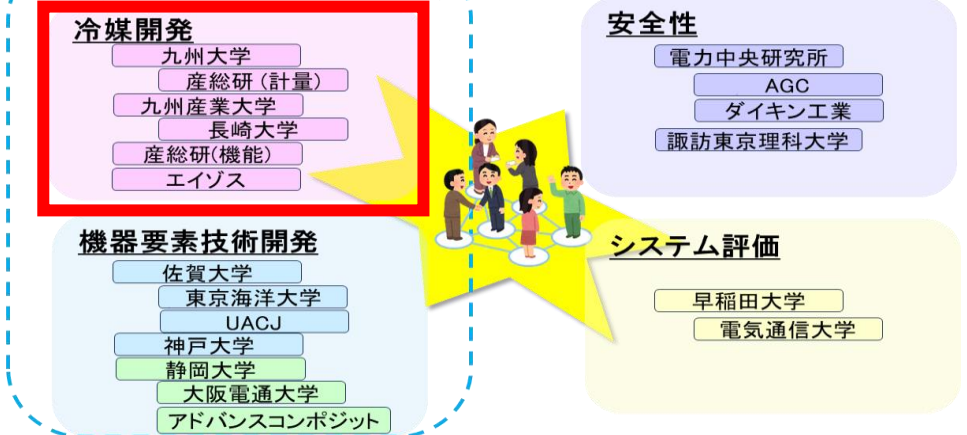
性能評価装置により全体評価を実施。結果を各研究にフィードバック

冷媒開発Gr.の事業概要

PL: 飛原 英治 (東京大学 名誉教授)

委託

SPL: 東 之弘 (九州大学 特任教授)



助成

日立空調清水

背景・目的・プロジェクトアウトカム目標との関係

●背景：

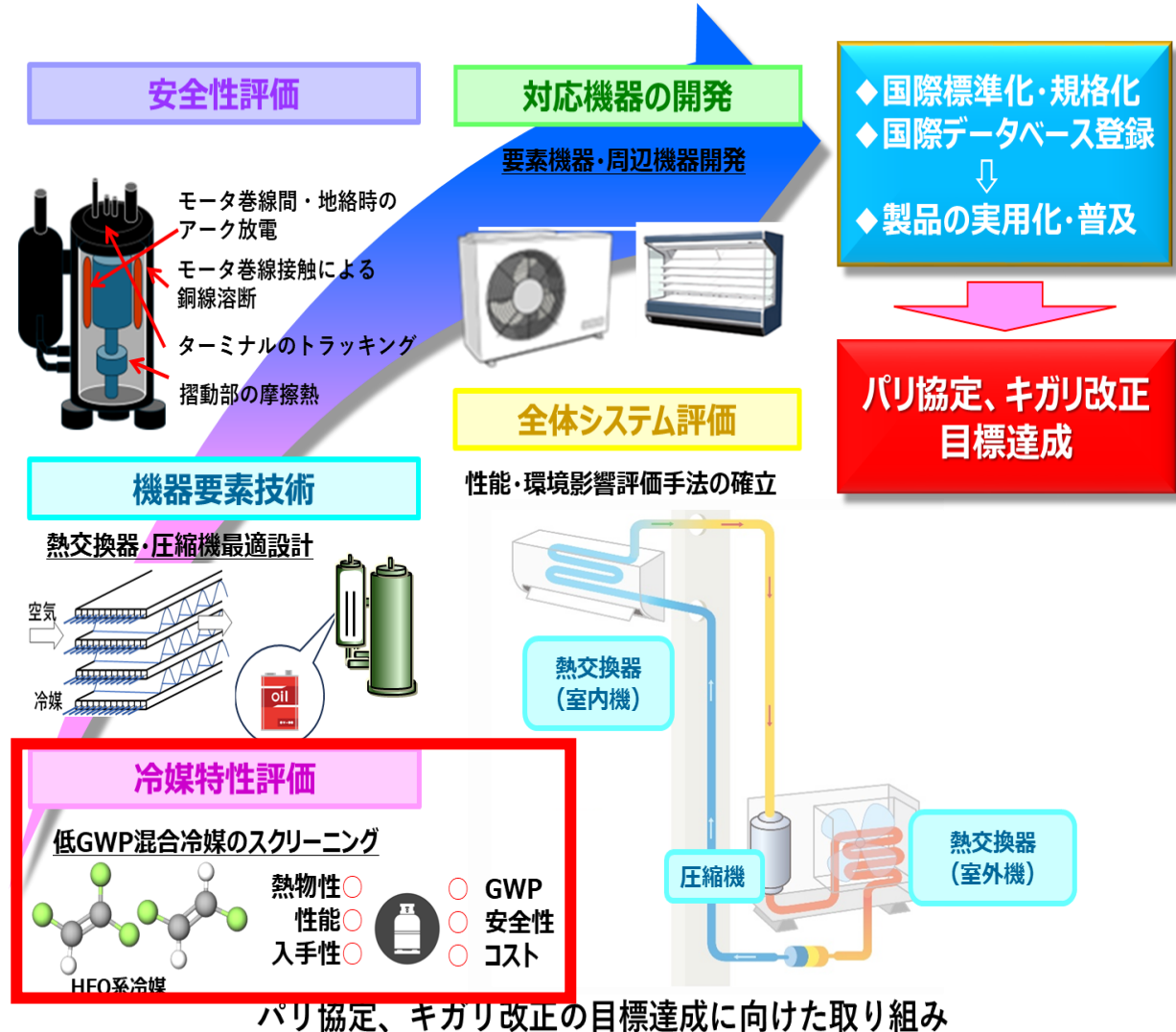
キガリ改正において我が国が課された削減義務を達成するためには、これまでのNEDO事業により得られた純冷媒の成果をさらに発展させ、家庭用空調機等に対する混合冷媒の実用化研究を積極的に推進する必要がある。

●目的：

可能性のある混合冷媒候補の絞り込み、性能評価、システム性能評価及び環境影響評価を包括的に実施し、他の事業者や国内外のステークホルダーに対する情報提供を行う。

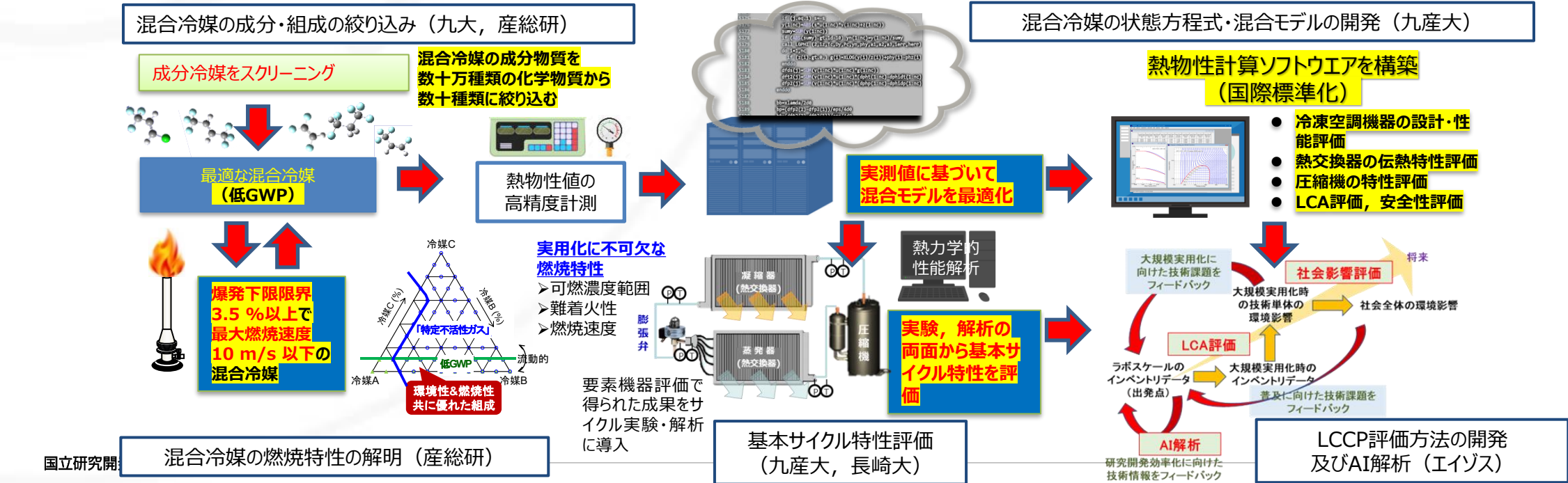
●規格・標準化・指針等との関係：

研究成果に基づいて混合冷媒に対する熱力学モデル及び燃焼性評価方法を提案し、REFPROPやASHRAEへの登録を提言する。

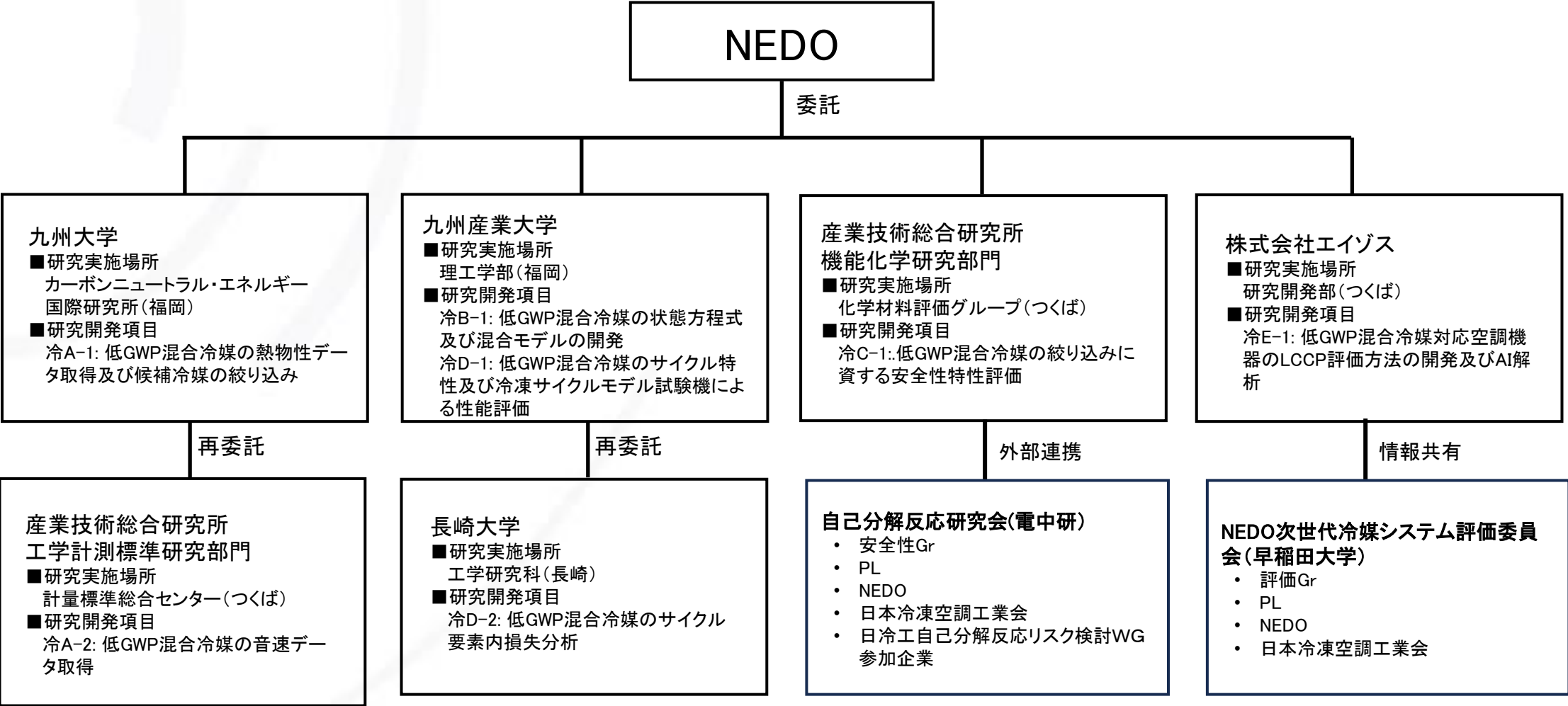


研究開発項目

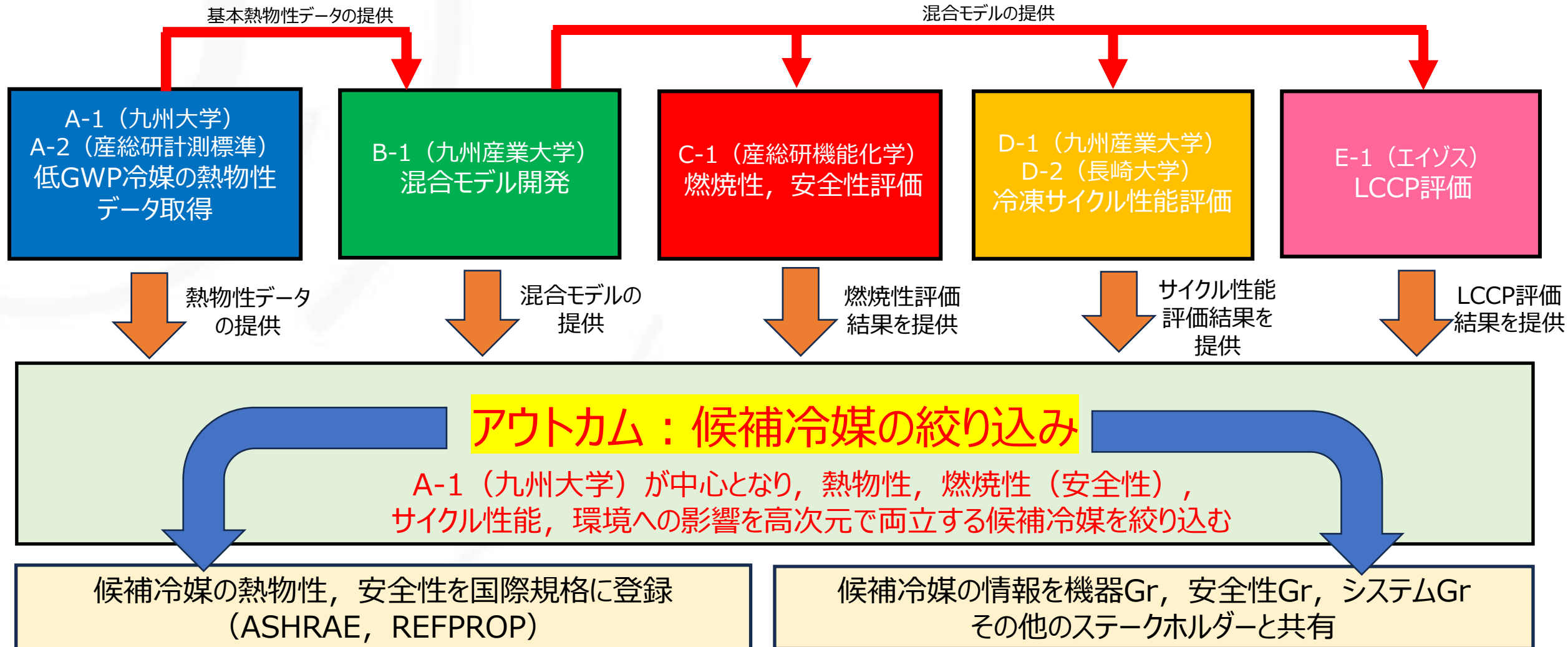
	委託	再委託	研究開発項目	事業者
冷媒G	冷A-1		低GWP混合冷媒の熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み	国立大学法人九州大学
		冷A-2	低GWP混合冷媒の音速データ取得	国立研究開発法人産業技術総合研究所工学計測標準研究部門
	冷B-1		低GWP混合冷媒の状態方程式及び混合モデルの開発	学校法人中村産業学園九州産業大学
	冷C-1		低GWP混合冷媒の絞り込みに資する安全性特性評価	国立研究開発法人産業技術総合研究所機能化学研究部門
	冷D-1		低GWP混合冷媒のサイクル特性及び冷凍サイクルモデル試験機による性能評価	学校法人中村産業学園九州産業大学
		冷D-2	低GWP混合冷媒のサイクル要素内損失分析	国立大学法人長崎大学
	冷E-1		低GWP混合冷媒対応空調機器のLCCP評価方法の開発及びAI解析	株式会社エイゾス



実施体制



アウトカム達成に向けた各研究開発項目の役割と貢献



実施概要と目標（中間・最終）と根拠

実施項目	実施内容	事業者	中間目標※	最終目標	根拠
冷媒Gr	低GWP混合冷媒の特性評価	—	・冷媒候補の絞り込み ・物性等の詳細評価を15件以上実施 ・国際データベース等への登録申請に耐え得る基本物性データの1種類以上の取得 ・燃焼特性を解明する手法の確立	・物性等の詳細評価を累計25件以上実施、基本物性データの3種類以上の取得。 ・熱物性値情報を高精度で計算できる混合モデルの開発。 ・候補冷媒の燃焼特性の解明 ・企業の速やかな製品開発に貢献する、実用化可能性の高いHFO混合冷媒を提案する。 ・国際規格等3件以上の国際標準の改正提案に必要なデータの取得。	国際規格化・標準化及び国際データベース登録には、正確な冷媒特性・燃焼性の解明が必要である。
	熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み	(国) 九州大学	HFO1123あるいはR1132(E)を主成分とし、R32、R1234yf、R290などの低GWP冷媒を混合した低GWP混合冷媒の、(1)PVTx性質、(2)気液平衡性質、(3)臨界点、(4)気液共存曲線の冷媒物性を解明する。	HFO1123あるいはR1132(E)を主成分とし、R32、R1234yf、R290、およびnon-PFAS冷媒であるCO ₂ 、R152aなどを混合した低GWP混合冷媒の(1)PVTx性質、(2)気液平衡性質、(3)臨界点、(4)気液共存曲線の冷媒物性を解明する。	GWP150以下の次世代冷媒候補を絞り込むために、GWP10以下のHFO1123及びR1132(E)を成分冷媒に用いることで実現させる。現時点でHFO1123及びR1132(E)を含む混合冷媒の熱物性データは本グループ以外からの報告はない。
	音速データ取得	(国研) 産総研 (計測標準)	R1132(E)の純冷媒、ならびにHFO1123やR1132(E)にR1234yf、R32を加えた混合冷媒について、音速データ等を取得し、状態方程式及び混合モデルの高度化に資する熱物性値情報を整備する。	HFO1123やR1132(E)を含む各種低GWP混合冷媒について、状態方程式及び混合モデルの高度化に資する音速データ等の熱物性値情報を整備する。	HFO1123やR1132(E)を含む混合冷媒の熱物性値情報はまだ十分に整備されておらず、高精度な状態方程式及び混合モデルを開発するためには、音速データ等の精密な実測値が必要となる。

実施概要と目標（中間・最終）と根拠

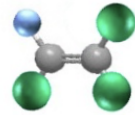
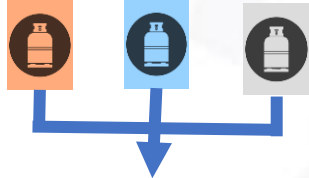
実施項目		実施内容	事業者	中間目標※	最終目標	根拠
	冷B-1	状態方程式及び混合モデルの開発	(学) 九州産業大学	従来から行われてきた混合モデルの開発手法を高度化し、より少ない実測値情報からのモデル開発を可能にする。この開発手法を用いてA-1で絞り込まれた混合冷媒のうち、1種類以上のモデルを確立する。	モデル開発をさらに進展させ、A-1で絞り込まれた混合冷媒のうち、3種類以上のモデルを確立するとともに、REFPROP等の熱物性データベースに登録する。	本研究開発項目で開発する混合モデルの最適手法は、開発効率を従来の手法よりも飛躍的に向上させるものであり、少ない実測値情報から短期間にモデルを開発することが可能である。
	冷C-1	安全性特性評価	(国研) 産総研 (機能化学)	フルオロエチレン類を主成分とする低GWP混合冷媒の燃焼諸特性の評価を行い、1種類以上の3成分系の燃焼特性を明らかにする。	1種類以上の混合冷媒候補の燃焼性について、国際標準登録申請に耐えるデータを取得する。	新冷媒の安全性の観点からの絞り込みに資するため、国内外の冷媒の安全性基準を満足するものと同様以上の高安全性となる混合組成範囲を明らかにする。
	冷D-1	サイクル特性及び冷凍サイクルモデル試験機による性能評価	(学) 九州産業大学	サイクル試験装置を用いて、現行冷媒および候補冷媒の性能試験を行う。また、性能試験結果を用いて広範囲の混合組成に対応したサイクルシミュレーションを確立する。	サイクル試験装置を用いて、現行冷媒および候補冷媒の性能試験を行う。またサイクルシミュレーションを行い、広範囲の混合組成についても検討を行う。	サイクル試験は通常、ドロップイン試験を実施するか、作成した装置1つを用いて試験を行う。しかし本試験では同一の要素機器を用いた成績係数を測定するのに特化した装置と、その要素機器の損失測定に特化した装置を2種類用いるため、要素機器の損失を把握した成績係数を取得する事が可能となる。その結果、広範囲での混合組成に対応したシミュレーションを可能とする。
		冷D-2	サイクル要素内損失分析	(国) 長崎大学	製作した評価装置を用いて、現行冷媒および候補冷媒のサイクルにおける各要素機器の損失を測定する。また、候補サイクルの損失要因を分析できる詳細計算モデルを確立する。	
	冷E-1	LCCP 評価方法の開発及びAI 解析	(株) エイゾス	日本全体における低GWP混合冷媒対応空調機器の環境影響を推計する。他の研究開発項目に対して適宜AIを用いた解析ツールを開発・活用し、研究開発効率化を支援する。	日本全体における低GWP混合冷媒対応空調機器の環境影響低減に向けた施策の検討と提言。他の研究開発項目に対して適宜AIを用いた解析ツールを開発・活用し、研究開発効率化を支援する。	新規混合冷媒を搭載した家庭用空調機のLCA/LCCP評価を行い、将来需要推計と組合せることで、将来の日本全体における環境影響を推計することを可能とする。また、AIを用いた解析により、他研究開発項目の研究を促進することを可能とする。

研究開発スケジュール

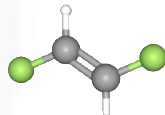
実施項目	2023	2024	2025	2026	2027
冷A-1：熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み	2成分系のデータ取得	3成分系のデータ取得	R290を含む2成分系のデータ取得	R1234ze(E)やCO2を含む2成分系のデータ取得	
冷A-2：音速データ取得	装置のセットアップ及び単成分系の音速データ取得	2成分系の音速データ取得	3成分系の音速データ取得	新たな混合系の音速データ及び低温におけるPVT _x データ取得	
冷B-1：状態方程式及び混合モデルの開発	既存モデルの高度化, 暫定モデル開発	A-1で絞り込まれた冷媒の混合モデル開発	モデル改善, データベースへの登録	新たな混合モデルの開発及び既存モデルの高度化	
冷C-1：冷媒の絞り込みに資する安全性特性評価	2成分系までの燃焼性データ取得	3成分系の燃焼性データ取得・推算法開発	A-1で絞り込まれた系の燃焼性データ取得・推算法開発	A-1で絞り込まれた燃焼データの取得, 安全性評価の実施	
冷D-1：サイクル特性及びモデル試験機による性能評価	混合冷媒の熱力学的解析 試験装置製作	直交流型熱交換器モデル構築 現行冷媒の評価	A-1で絞り込まれた冷媒の評価 (2成分)	A-1で絞り込まれた冷媒の評価 (2成分)	A-1で絞り込まれた冷媒の評価 (3成分)
冷D-2：サイクル要素内損失分析	試験装置製作	要素内計算モデル構築 現行冷媒の評価	A-1で絞り込まれた冷媒のシミュレーション	LCCP評価に活かせるデータ取得及び非共沸性の損失分析	
冷E-1：LCCP評価方法の開発及びAI解析	イベントリデータの収集, LCCP評価手法の開発等	LCA評価, AI解析の実施	環境影響を推計, AI解析の実施	安全性Grと連携した評価, AI解析及び研究開発の効率化支援	
評価時期			中間評価		終了時評価

成果と意義: [冷A-1] 熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み (九州大学)

成分冷媒をスクリーニング
(熱物性、GWP、入手性)



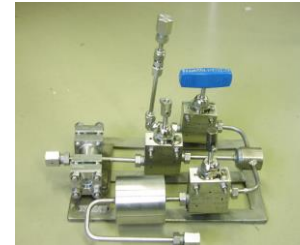
HFO1123



R1132(E)



圧力-体積-温度-組成の関係
(PVTx性質)



気液共存曲線及び飽和密度の関係
臨界点及び臨界軌跡

安全性評価に利用 (冷C)

冷凍サイクル性能評価に利用
(冷D-1、冷D-2、冷E)

安全Gr、機器Grが評価に利用

[GWP 150]

- 21.5%R32+28.0%**R1132(E)**+50.5%R1234yf(R479A)
- 21.5%R32+40.0%**HFO1123**+38.5%R1234yf
- 21.5%R32+78.5%R1234yf, 20%R32+80%**R1132(E)**

[GWP 70]

- 10.0%R32+30.0%**R1132(E)**+60.0%R1234yf
- 10.0%R32+40.0%**HFO1123**+50.0%R1234yf

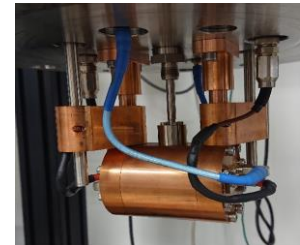
[GWP 10以下]

- **R1132(E)**+R1234yf, **HFO1123**+R1234yf
- **R1132(E)**+R290, **HFO1123**+R290
- **R1132(E)**+CO₂, **HFO1123**+CO₂

低GWP混合冷媒の高精度熱物性計測



気液平衡性質

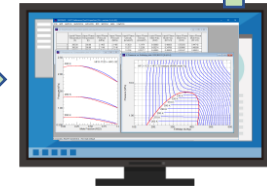


気体及び液体の音速
(冷A-2)

他グループへ
情報共有



実測熱物性値を用いた
状態方程式及び
混合モデルの作成(冷B)



NIST REFPROP
を使って熱物性計算
が利用可能

世界標準規格 (**ISO, ASHRAE**)

成果 (2026年3月末見込み)

- 低GWP次世代混合冷媒の圧力-体積-温度-組成の関係 (PVTx性質)、気液平衡性質、臨界点及び臨界軌跡、気液共存曲線及び飽和密度の関係を、8種類の2成分系混合冷媒、2種類の3成分系混合冷媒について、世界で初めて明らかにした。

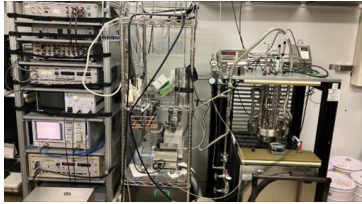
意義

- 成果を利用して、高精度で熱物性計算ができる次世代混合冷媒の混合モデルが作成できるようになった。
- 作成された混合モデルが**REFPROP**に搭載されることにより、世界中の一般ユーザーでも、次世代新冷媒の熱物性計算が可能になり、冷凍空調機器の機器設計、製品開発、性能評価が世界標準規格 (**ISO, ASHRAE**) の元で行えるようになる。

成果と意義：[冷A-2] 音速データ取得（産総研計測）

低GWP混合冷媒の熱物性計測 （冷A-1, 冷A-2）

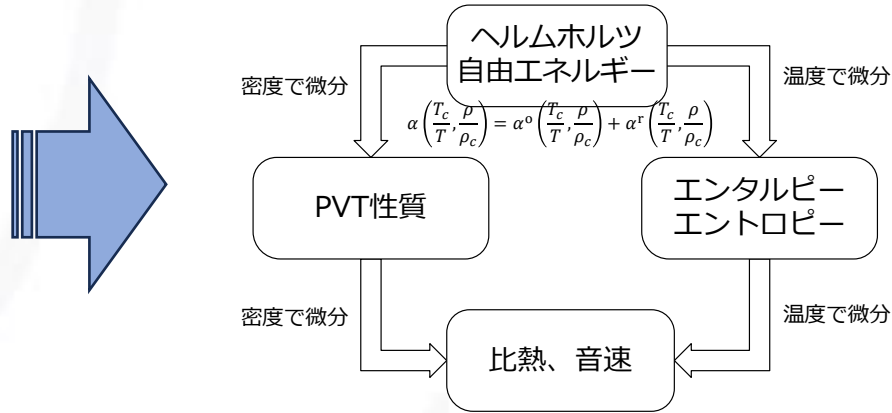
音波共鳴式気体音速測定装置



超音波パルス式液体音速測定装置

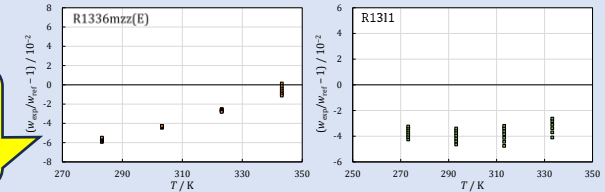


熱力学状態方程式・混合モデルの開発 （冷B）



出典：赤坂亮, Helmholtz型状態方程式, 「物性推算とその応用」

音速データの重要性



音速の推算値の
誤差は5%以上

- 音速の推算値は測定値と比較すると5 %以上の誤差が生じることがあり、比エンタルピーの計算にも5 %程度（10 kJ/kg@0℃飽和液体）の誤差が生じ得る。
- PVT性質データだけではエンタルピーや比熱などを精度よく再現するのは困難であり、冷媒の高精度な状態方程式の開発のために音速データが必要となる。

成果（2026年3月末見込み）

- R1132(E)の純冷媒
 - HFO1123+R1234yf、R1132(E)+R1234yfの二成分系混合冷媒4種類。
 - HFO1123+R1234yf+R32、R1132(E)+R1234yf+R32の三成分系混合冷媒4種類
- 上記低GWP混合冷媒について、音速データを世界で初めて取得した。

意義

- 得られた測定データが高精度な状態方程式・混合モデルの開発につながり、任意の温度・圧力条件における低GWP混合冷媒の熱物性値を求めることができる（アウトカム達成に必要な高精度混合モデルの開発に対して音速データを提供）。
- 冷凍空調分野で広く使用されるREFPROPで低GWP混合冷媒の熱物性値を計算できるようになり、正確な冷凍サイクルの設計や要素機器の技術開発を行うことができる。

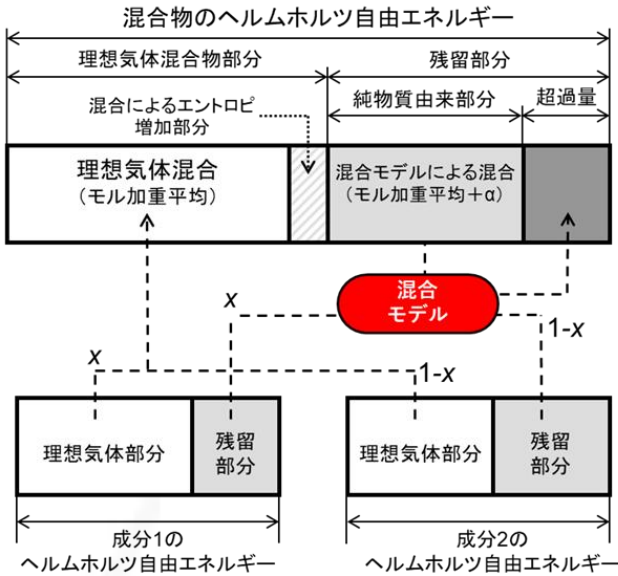
成果と意義：[冷B-1] 状態方程式及び混合モデルの開発（九州産業大学）

＜混合冷媒の熱力学モデル＞

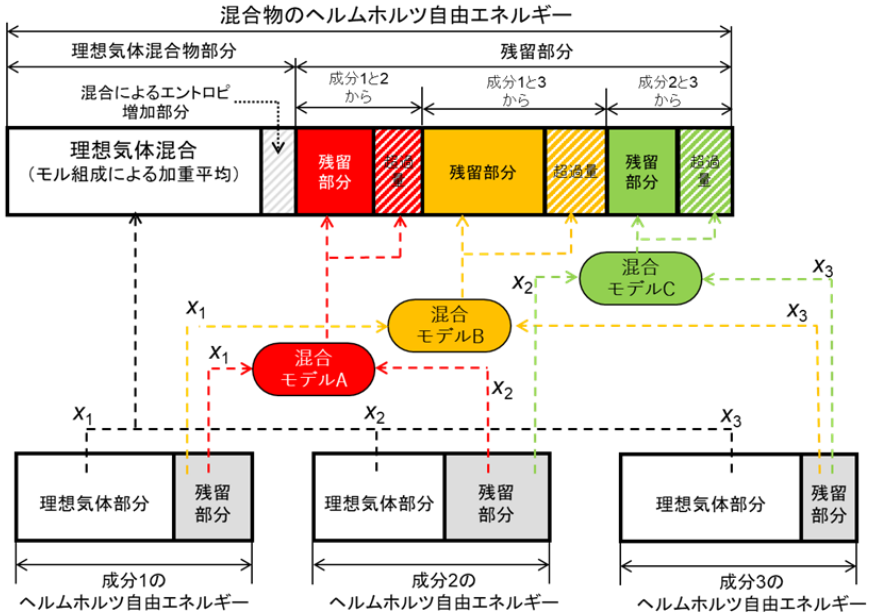
- 純冷媒の高精度状態方程式を、ヘルムホルツ自由エネルギーの混合則に基づく多流体モデル近似と組み合わせて混合冷媒の熱力学モデルを構成する。
- このようなモデルは、混合冷媒の気液平衡、PVT_x性質、音速等を精度良く再現することができる。
- REFPROP等の熱物性データベースを通して広く公開することが可能である。

混合モデルの一般的な予測精度
(実測値と計算値との相対偏差)

PVT _x (密度)	気液平衡 (沸点圧力)
液体: 0.5% 気体: 1%	1%



混合モデルの概念 (2成分系)



混合モデルの概念 (3成分系)

成果（2026年3月末見込み）

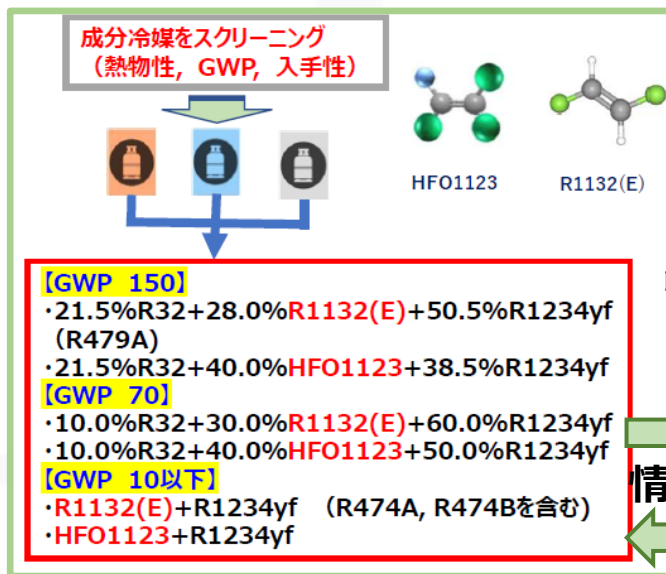
- 少ない実測値情報から信頼性が高い混合モデルを構築することができる手法を確立。
- この手法を適用して、冷A-1で絞り込まれた混合冷媒のモデルを1種類以上開発。

意義

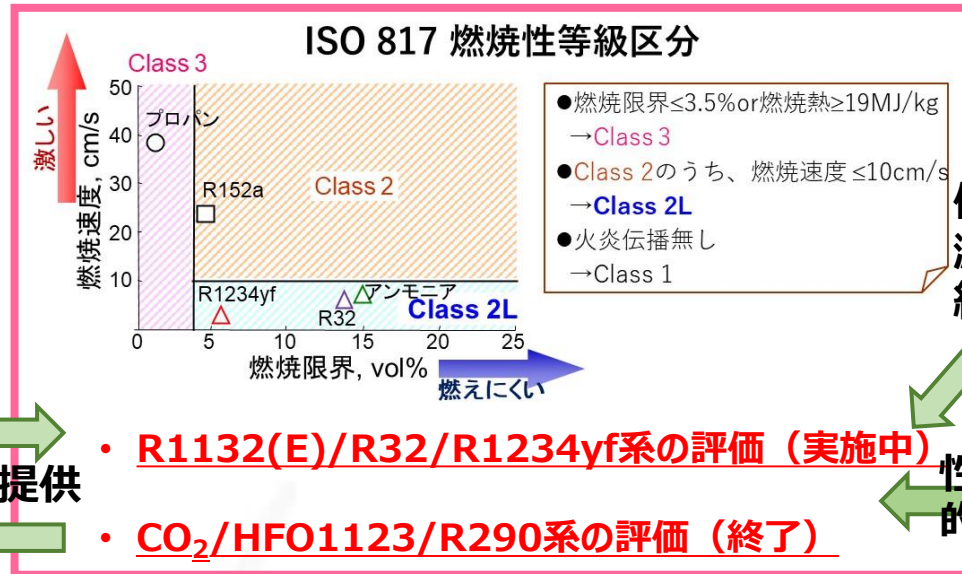
- 開発したモデルのパラメータを組み込んだREFPROPの定義ファイルをプロジェクト内で共有することにより、他の研究グループでも熱物性値の計算が可能になる（アウトカム達成に必要な熱物性データの共有）。
- さまざまな用途における熱物性値の計算結果を用いてモデルの修正を行い、完成度を高めることができる。

成果と意義：[冷C-1] 冷媒の絞り込みに資する安全性特性評価（産総研機能化）

熱物性による絞り込み（冷A-1）



安全性による絞り込み（冷C-1）

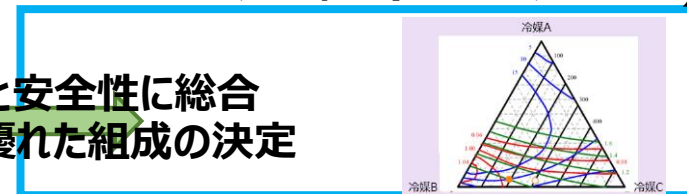


状態方程式・混合モデル作成（冷B-1）



候補冷媒の
漏洩時最悪
組成の算出

冷凍サイクル評価（冷D-1、冷D-2）



成果（2026年3月末見込み）

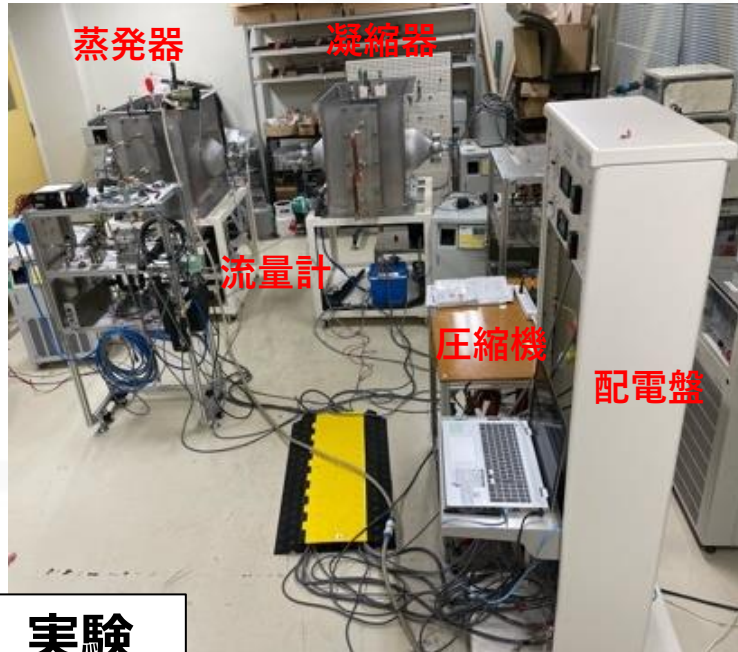
- CO₂/HFO1123/R290混合系の燃焼諸特性評価を終了し、GWP10以下冷媒の情報としてGr内で共有した。
- 冷A-1の絞り込み情報を受け、R1132(E)/R32(10wt%)/R1234yf混合系の燃焼性評価を進捗中。

意義

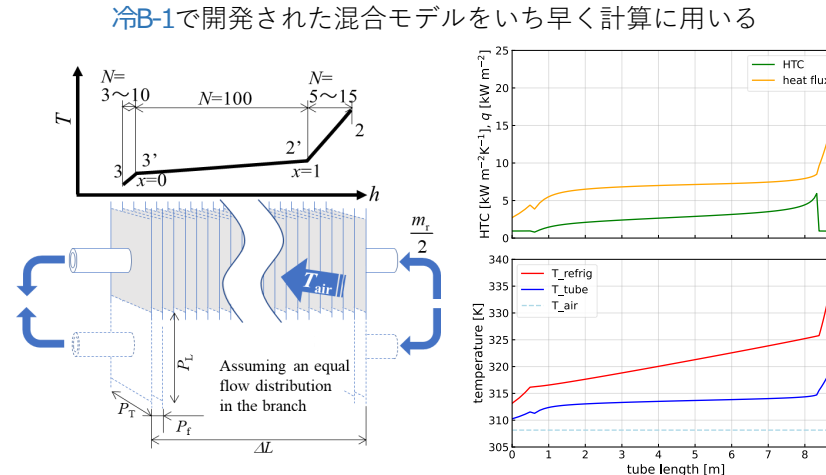
- 2005年以降、ASHRAE34、ISO817への提案や申請支援、本PJでも当該委員会の最新動向を関係者に共有。
- 2022年以降高圧ガス保安法新法で全7冷媒の燃焼限界評価を担当、「特定不活性ガス」認定を支援。
- これらの実績を基に、アウトカム達成に必要な候補冷媒の燃焼性データを提供し、国内外の標準登録申請に耐えうるデータを取得する。

成果と意義

[冷D-1] サイクル特性及びモデル試験機による性能評価（九州産業大学）
 [冷D-2] サイクル要素内損失分析（長崎大学）



実験



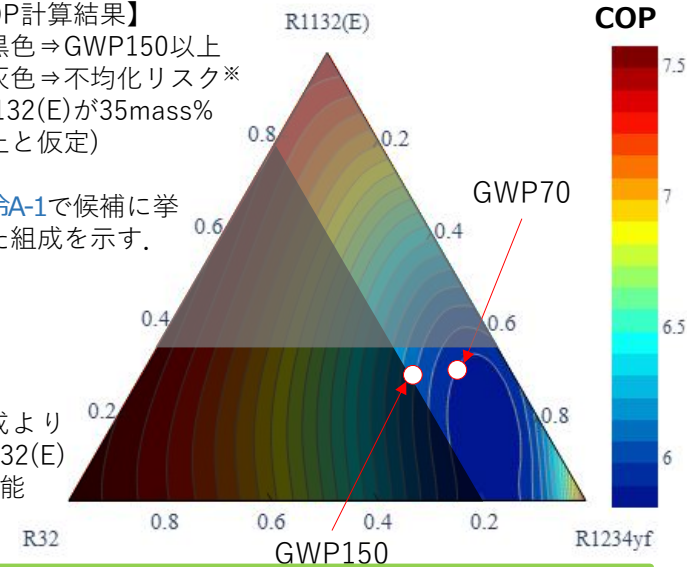
計算

検証された物性データ・実機情報に基づいた最適組成の提案

【COP計算結果】
 薄い黒色⇒GWP150以上
 薄い灰色⇒不均化リスク※
 （※R1132(E)が35mass%以上と仮定）

○は冷A-1で候補に挙げられた組成を示す。

現在の候補組成よりできる限りR1132(E)を増やす方が性能面では有利。



成果（2026年3月末見込み）

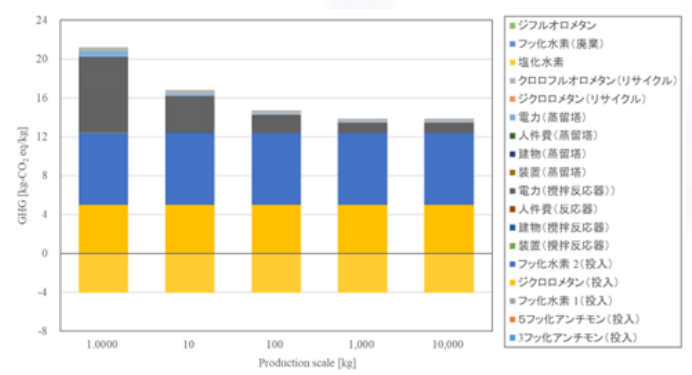
- 実機に用いられている構成要素を用いたサイクル試験結果（D-1）、構成要素内損失も明確化（D-2）
- 試験結果より広範囲の混合組成に対応したサイクルシミュレーションの確立。
- サイクル性能側から候補冷媒の最適組成を提案。

意義

- 構成要素の損失などを明確化することにより、新規冷媒に対応した機器開発に必要な情報を提供。
- 機器Grで開発された熱交換器，圧縮機の性能向上をサイクル性能の観点から定量化
- アウトカム達成のカギとなる冷媒の最適組成の選定に不可欠なサイクル性能評価を提供。

成果と意義: [冷E-1] LCCP評価方法の開発及びAI解析 (エイゾス)

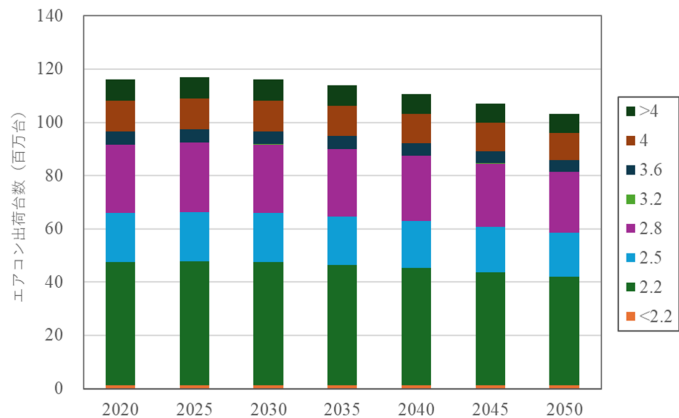
LCA/LCCP評価



冷媒1kg/家庭用エアコン 1 台
あたりの環境影響



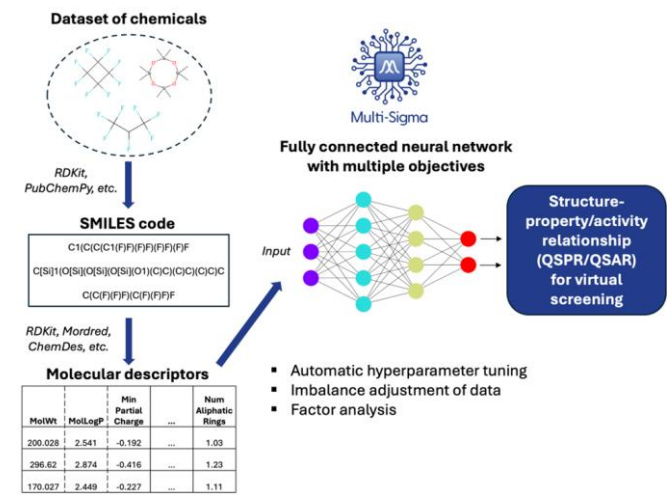
需要推計



将来の日本における家庭用
エアコンの台数

将来の日本全体の環境影響

AI解析



最適な混合冷媒の探索
最適なエアコンの設計条件

成果 (2026年3月末見込み)

- 新規混合冷媒を搭載した家庭用空調機器による将来の日本全体の環境影響の推計。
- 他の研究開発項目の研究開発効率化。

意義

- 将来の日本全体の環境影響を削減するための施策の検討。
- 冷媒の温室効果の簡易推計手法。
- プロジェクトのアウトカム達成に必要な候補冷媒の環境負荷データの提供

目標達成状況（中間年度見通し）

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

実施項目	実施内容	事業者	目標（2026年3月）	成果（2026年3月）	達成度（見込み）	達成の根拠／解決方針	
冷媒Gr	低GWP混合冷媒の特性評価	—	混合冷媒候補の絞り込み、熱物性評価、燃焼性能評価等を行い、混合冷媒を実用化するための基礎的知見を得るとともに、他の事業者や国内外のステークホルダーに対する情報提供を行う。	各研究開発項目の成果参照。	◎	全体として当初の目標の成果を達成し、一部は目標以上の成果を達成したため。	
	冷A-1	熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み	（国）九州大学	HFO1123あるいはR1132(E)を主成分とした低GWP混合冷媒の冷媒物性を解明する。	8種類の2成分系混合冷媒、2種類の3成分系混合冷媒の熱物性を解明した。	◎ 2025年内達成見込み	目標で設定した以上の混合冷媒の熱物性測定が完了しているため。
		冷A-2	音速データ取得	（国研）産総研（計測標準）	R1132(E)の純冷媒、ならびにHFO1123やR1132(E)にR1234yf、R32を加えた混合冷媒について、音速データ等を取得する。	R1132(E)の純冷媒、HFO1123を含む4種類の混合冷媒、R1132(E)を含む4種類の混合冷媒について、音速データ等を取得した。	○ （2026年3月に達成見込み）
	冷B-1	状態方程式及び混合モデルの開発	（学）九州産業大学	A-1で絞り込まれた混合冷媒うち、3種類以上の混合モデルを確立する。	高度化されたモデル開発手法により3種類以上のモデル確立を達成した。	◎ 2026年3月に達成見込み	モデル開発手法を高度化・効率化し、目標で設定した以上の混合冷媒のモデル確立を達成したため。

目標達成状況（中間年度見通し）

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

実施項目	実施内容	事業者	目標（2026年3月）	成果（2026年3月）	達成度（見込み）	達成の根拠／解決方針	
冷媒Gr	低GWP混合冷媒の特性評価	—	混合冷媒候補の絞り込み、熱物性評価、燃焼性能評価等を行い、混合冷媒を実用化するための基礎的知見を得るとともに、他の事業者や国内外のステークホルダーに対する情報提供を行う。	各研究開発項目の成果参照	◎	全体として当初の目標の成果を達成し、一部は目標以上の成果を達成したため。	
	冷C-1	安全性特性評価	（国研）産総研（機能化学）	1種類以上の混合冷媒候補の燃焼性について、国際標準登録申請に耐えるデータを取得する。	1種類以上のR1132(E)混合冷媒について、国際標準登録申請に耐えるデータを取得した。	◎ 2026年3月に達成見込み	R1132(E)混合冷媒の燃焼限界、燃焼速度の評価を開始し、いずれも順調に完了したため。
	冷D-1	サイクル特性及び冷凍サイクルモデル試験機による性能評価	（学）九州産業大学	候補冷媒の広範囲の混合組成に対して検討を実施し、最適な混合比を見出す。	候補冷媒の広範囲の混合組成に対して検討を実施し、実機に沿った三角図を示す。	◎ 2026年1月に達成見込み	三角図から得られる最適組成に基づいたシミュレーションにも着手しているため。
		冷D-2	サイクル要素内損失分析	（国）長崎大学	要素内の不可逆損失を行いD1のサイクル評価を裏付けるとともに冷媒選択の材料を提供する。	要素内不可逆損失と必要伝熱面積を様々な混合系で計算し、三角図を示す。	◎ 2026年1月に達成見込み
	冷E-1	LCCP 評価方法の開発及びAI 解析	（株）エイゾス	日本全体における低GWP混合冷媒対応空調機器の環境影響を推計する。AIを用いて、他の研究開発項目の研究開発効率化を支援する。	日本全体における低GWP混合冷媒対応空調機器の環境影響を推計結果を示す。	◎ 26年1月に達成見込み	日本全体の環境影響評価が完了しているため。

冷媒Grの成果 (アウトプット目標達成度) と意義

混合冷媒の熱物性値取得及び候補冷媒の絞り込み(冷A-1, 冷A-2)	混合冷媒の熱力学モデルの開発(冷B-1)	混合冷媒の安全性特性評価(冷C-1)	サイクル特性評価及び試験機による性能評価, 要素分析(冷D-1, 冷D-2)	LCCP評価方法の開発及びAI解析(冷E-1)
低GWP混合冷媒の熱物性解明と音速データ取得および有望冷媒の絞り込み	A-1で絞り込まれた混合冷媒の混合モデル確立(3種類以上)	混合冷媒候補の燃焼性について, 国際標準登録申請に耐えるデータの取得(1種類以上)	サイクル試験装置を用いた混合冷媒の性能評価、サイクルのシミュレーション及び損失の要因分析に対する計算モデル確立	日本全体における低GWP混合冷媒対応空調機器の環境影響推定及びAIを用いた研究開発効率化

成果 (2026年3月末見込み)

- 8種類の2成分系混合冷媒、2種類の3成分系混合冷媒の熱物性の解明。
- R1132(E)の純冷媒, HFO1123を含む4種類の混合冷媒, R1132(E)を含む4種類の混合冷媒音速データ取得。
- 高度化されたモデル開発手法により混合モデルの確立。
- R1132(E)混合冷媒に対する国際標準登録申請に耐えるデータの取得。
- 実機構成要素を用いたサイクル試験結果と構成要素内損失の明確化により、サイクル性能側からの候補冷媒の最適組成を提案。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

意義

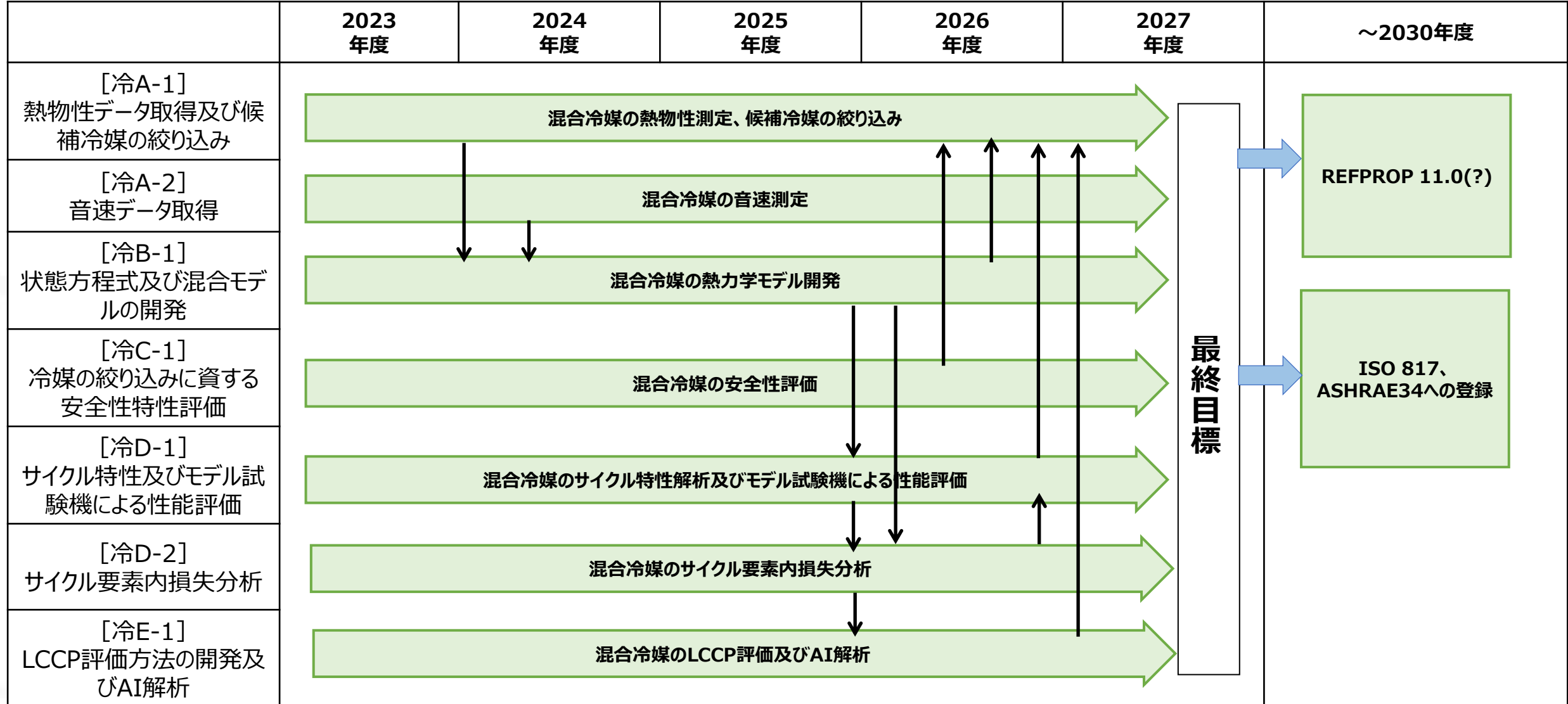
- 実用化が期待される混合冷媒を絞りこみ、その熱物性及び燃焼特性を明らかにすることで、開発の方向性を明らかにする。
- 熱物性及び燃焼特性の情報を他の事業者と共有し、要素機器開発、安全性評価及び空調機シミュレーション等の基盤情報とする。
- 熱物性及び燃焼特性のモデルを国際標準として登録する。

アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

＜ロードマップイメージ＞

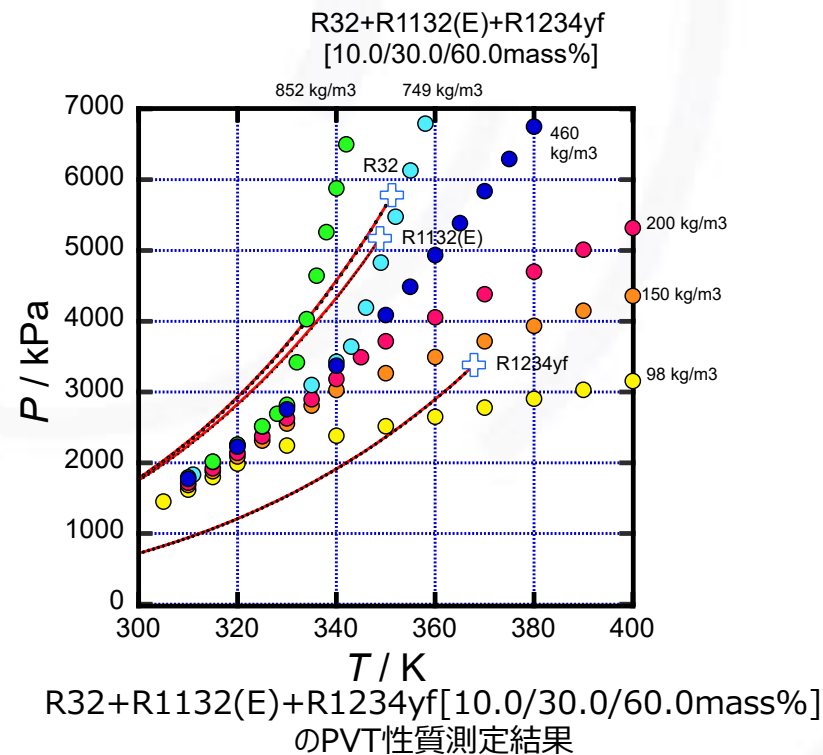
▲：基本原理確認

●：基本技術確立



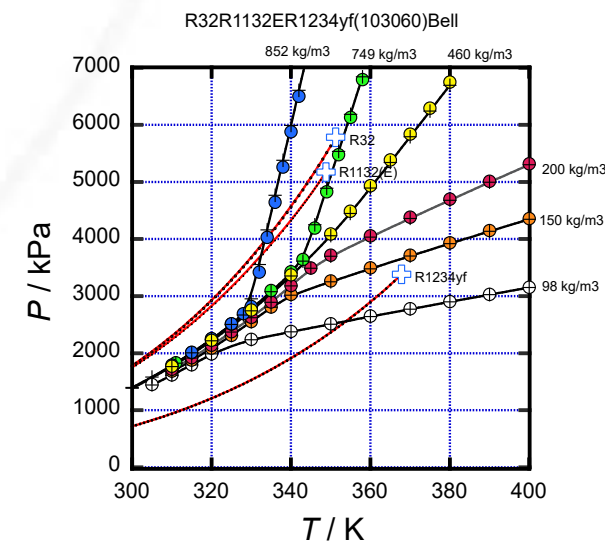
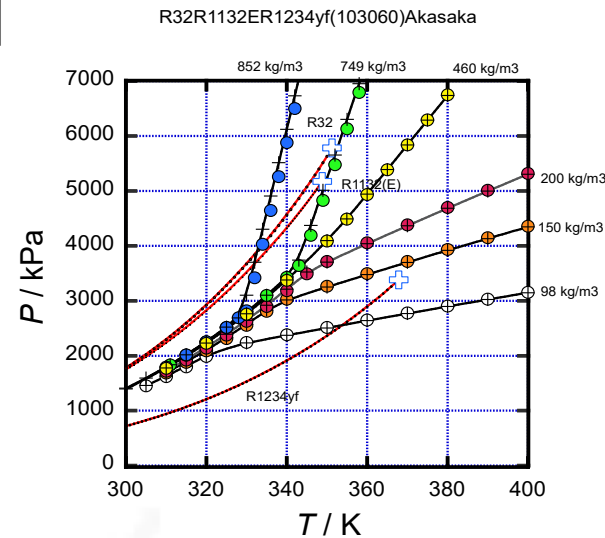
補足) 成果と意義 : [冷A-1] 熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み (九州大学)

[R32+R1132(E)+R1234yf : GWP70]

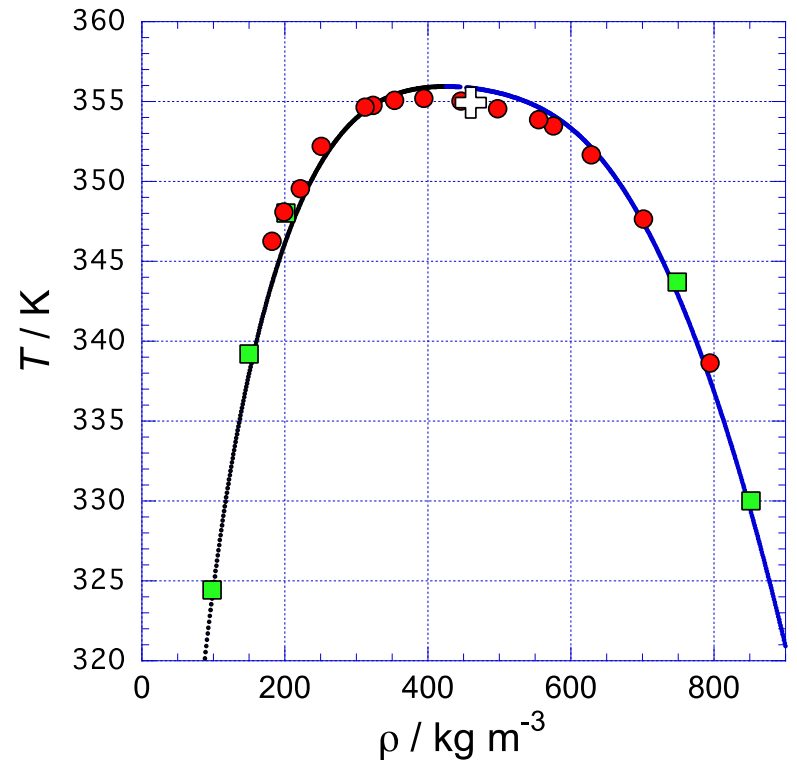


R32+R1132(E)+R1234yf
[10.0/30.0/60.0mass%]
の臨界定数

$T_c : 354.93 \pm 0.05 \text{ K}$
 $\rho_c : 460 \pm 5 \text{ kg/m}^3$
 $V_c : 183 \pm 2 \text{ cm}^3/\text{mol}$
 $P_c : 4486 \pm 3 \text{ kPa}$
 $M : 84.2576 \text{ kg/kmol}$



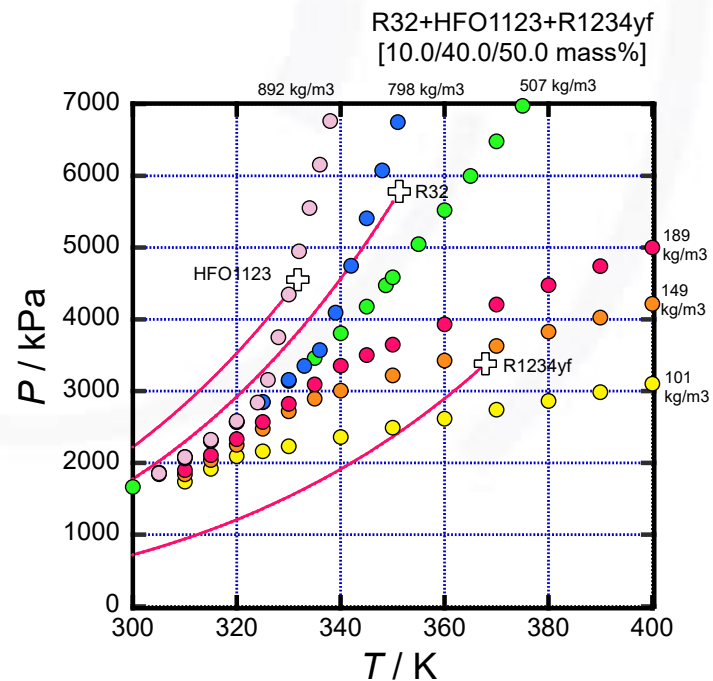
R32+R1132(E)+R1234yf [10.0/30.0/60.0. mass%]



R32+R1132(E)+R1234yf[10.0/30.0/60.0mass%]の
気液共存曲線(気液平衡密度)測定結果

補足) 成果と意義 : [冷A-1] 熱物性データ取得及び候補冷媒の絞り込み (九州大学)

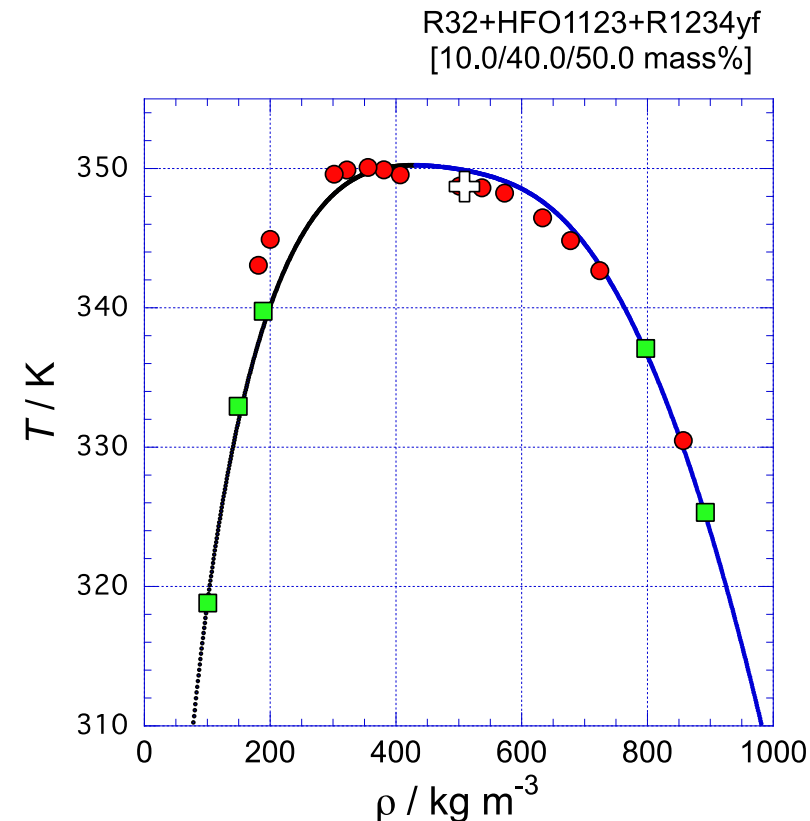
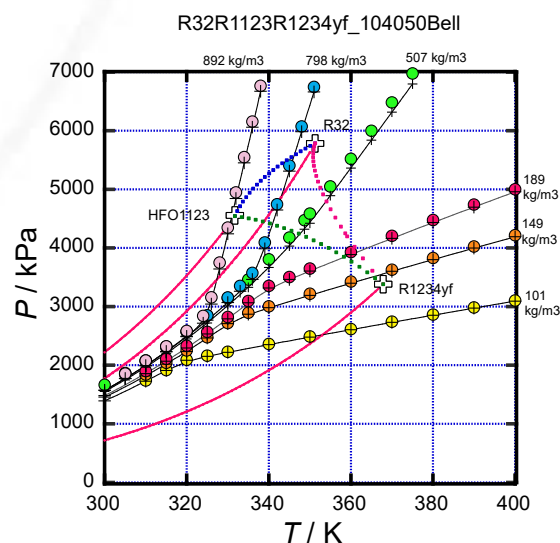
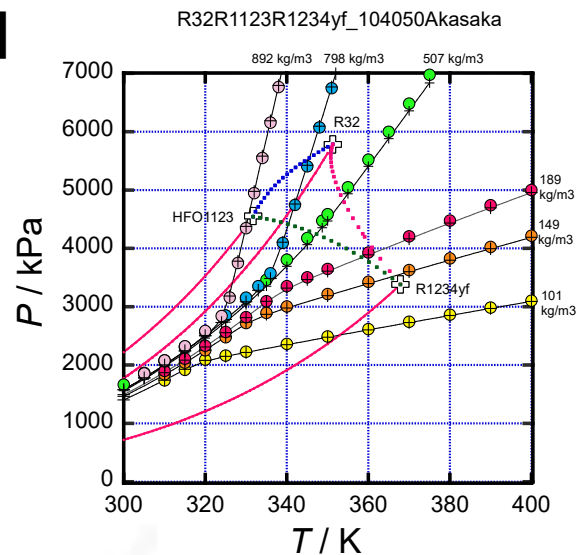
[R32+HFO1123+R1234yf : GWP70]



R32+HFO1123+R1234yf[10.0/40.0/50.0mass%]
のPVT性質測定結果

R32+HFO1123+R1234yf
[10.0/40.0/50.0mass%]
の臨界定数

$T_c : 348.70 \pm 0.05 \text{ K}$
 $\rho_c : 509 \pm 5 \text{ kg/m}^3$
 $V_c : 176 \pm 2 \text{ cm}^3/\text{mol}$
 $P_c : 4474 \pm 3 \text{ kPa}$
 $M : 89.4203 \text{ kg/kmol}$

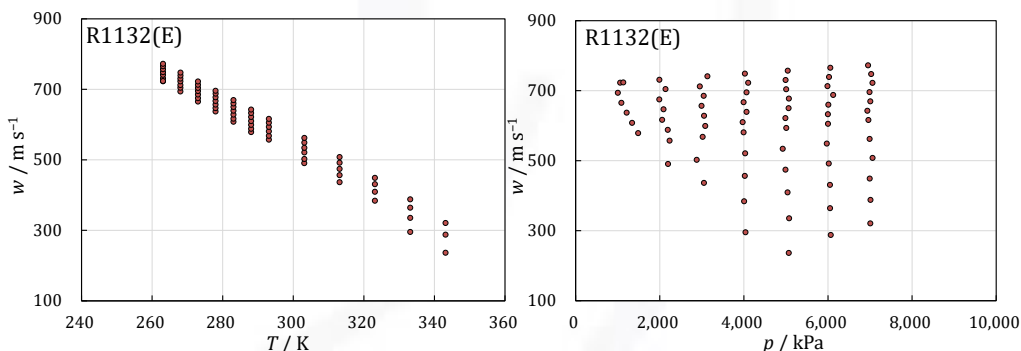


• REFPROP10.0D_V
• REFPROP10.0D_L
■ PVT
● meniscus
⊕ Critical Point

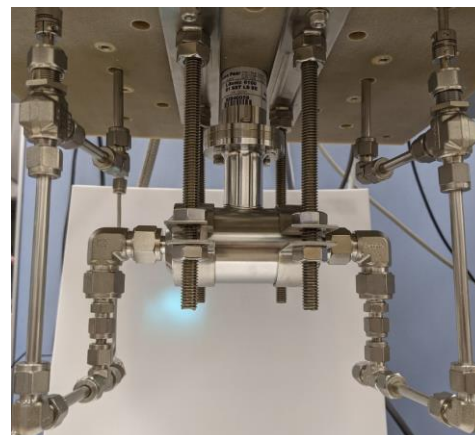
R32+HFO1123+R1234yf[10.0/40.0/50.0mass%]
の気液共存曲線 (気液平衡密度) 測定結果

補足) 成果と意義 : [冷A-2] 音速データ取得 (産総研計測)

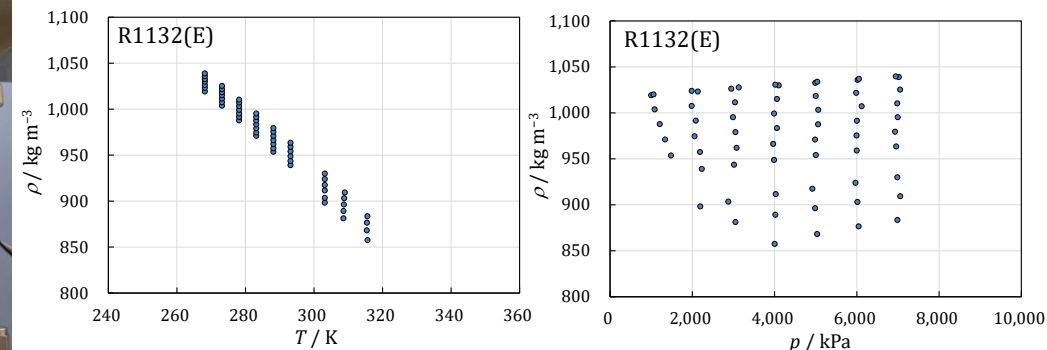
R1132(E)液体音速データ



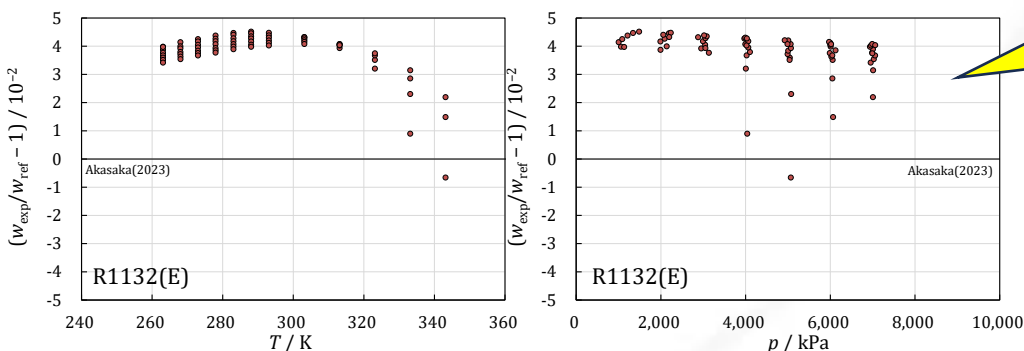
超音波パルス式液体音速測定装置



R1132(E)液体密度データ



状態式 (Akasaka, 2023) との比較

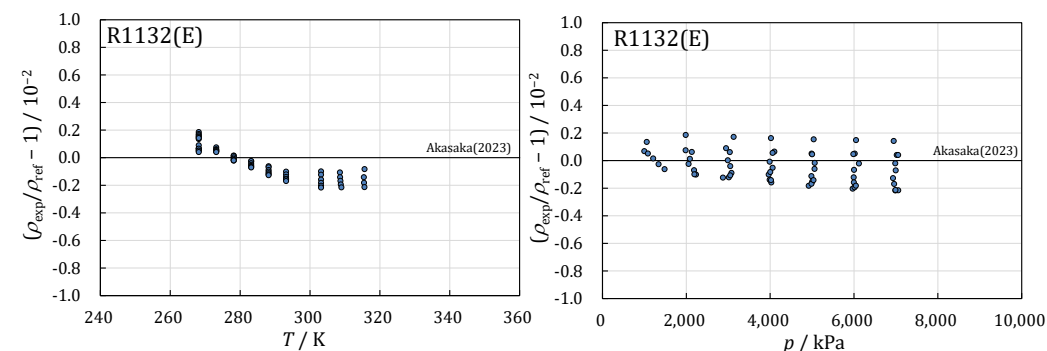


状態方程式の高度化
に資するデータ

4 %程度の系統偏差

(今後の予定)
混合冷媒の測定に向けて充填系を改良する。

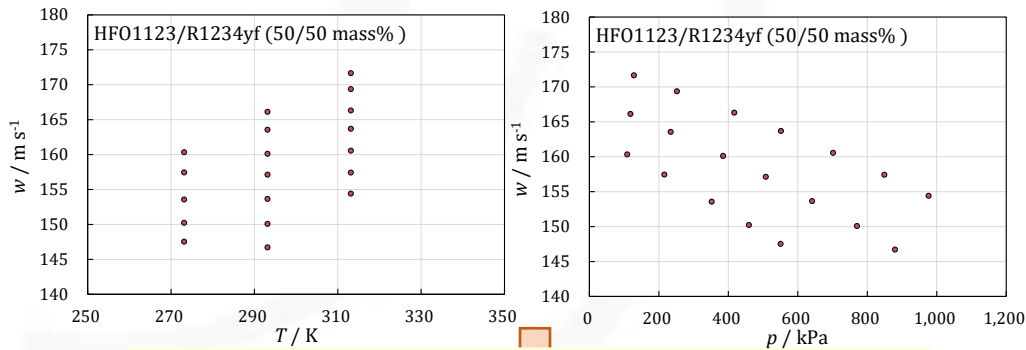
状態式 (Akasaka, 2023) との比較



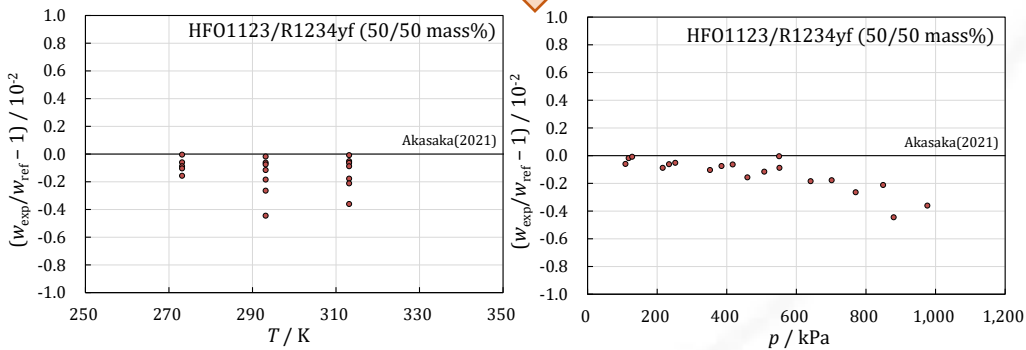
0.2 %以内で概ね一致

補足) 成果と意義 : [冷A-2] 音速データ取得 (産総研計測)

HFO1123/R1234yf (50/50 mass%)
気体音速データ

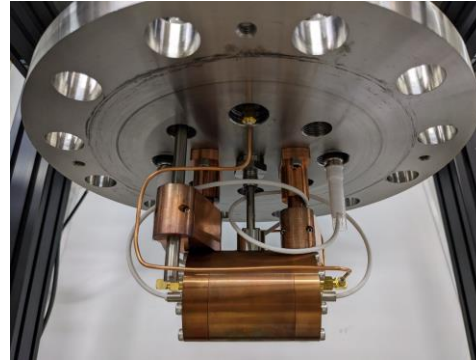


混合モデル (Akasaka, 2021) との比較

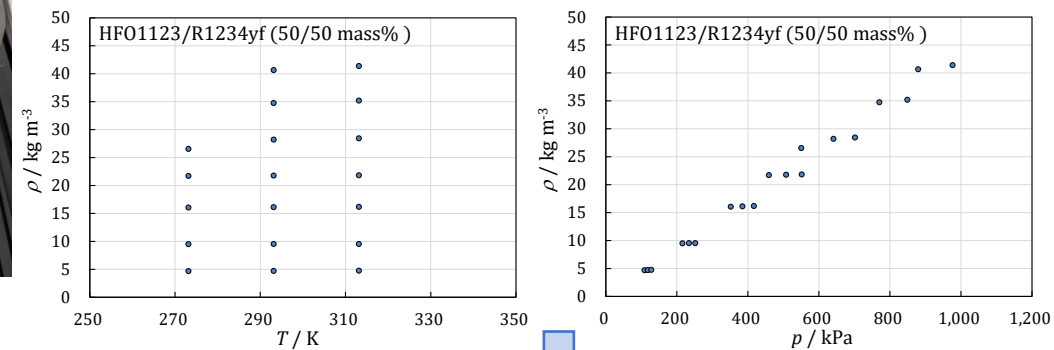


0.4 %以内で概ね一致

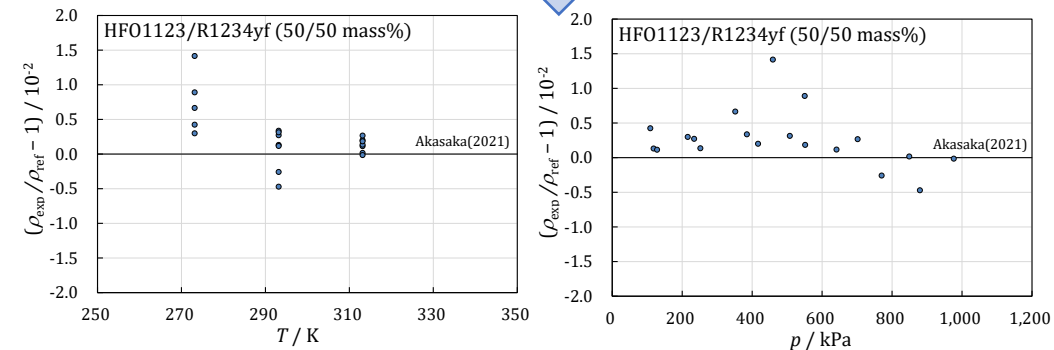
音波共鳴式気体音速測定装置



HFO1123/R1234yf (50/50 mass%)
気体密度データ



混合モデル (Akasaka, 2021) との比較



1.0 %以内で概ね一致

(今後の予定)
R1132(E)/R1234yfの測定を行う。

補足) 成果と意義: [冷B-1] 状態方程式及び混合モデルの開発 (九州産業大学)

今年度の検討内容

混合モデルの最適化において、実測値との偏差を最小化するだけでなく、実測値が存在しない領域の挙動も制御する手法を検討した。このような手法を用いることにより、少ない実測値情報から広い温度・圧力の範囲で成立するモデルを開発することが可能になる。

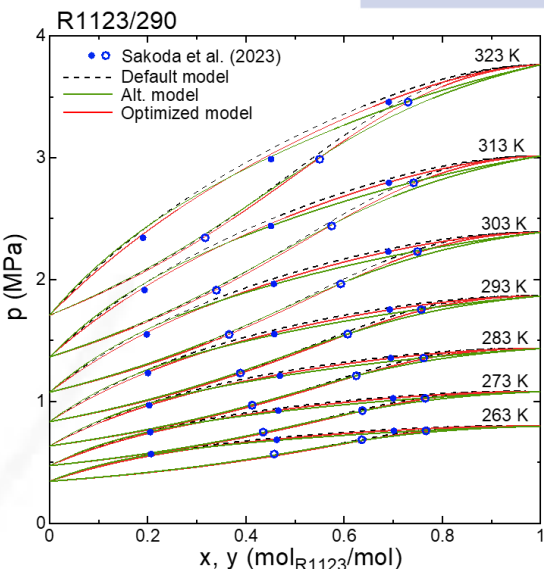
成果・課題

新たな手法をHFO1123+R290系やR32+R1132(E)系に適用し、気液平衡や密度の再現性が向上したモデルを開発した。最適化において高温・高圧域や臨界域での等温線、等圧線及び等密度の傾きや曲率を制御することにより、実測値が存在しない領域でも妥当な挙動を示すモデルが得られた。

今後の計画

今後は、他の系にもこの手法を適用して完成度を高めるとともに、純物質の状態方程式に対する開発手法の改善も並行して行う。

HFO1123+R290系 に対する計算結果



Isothermal vapor-liquid equilibrium

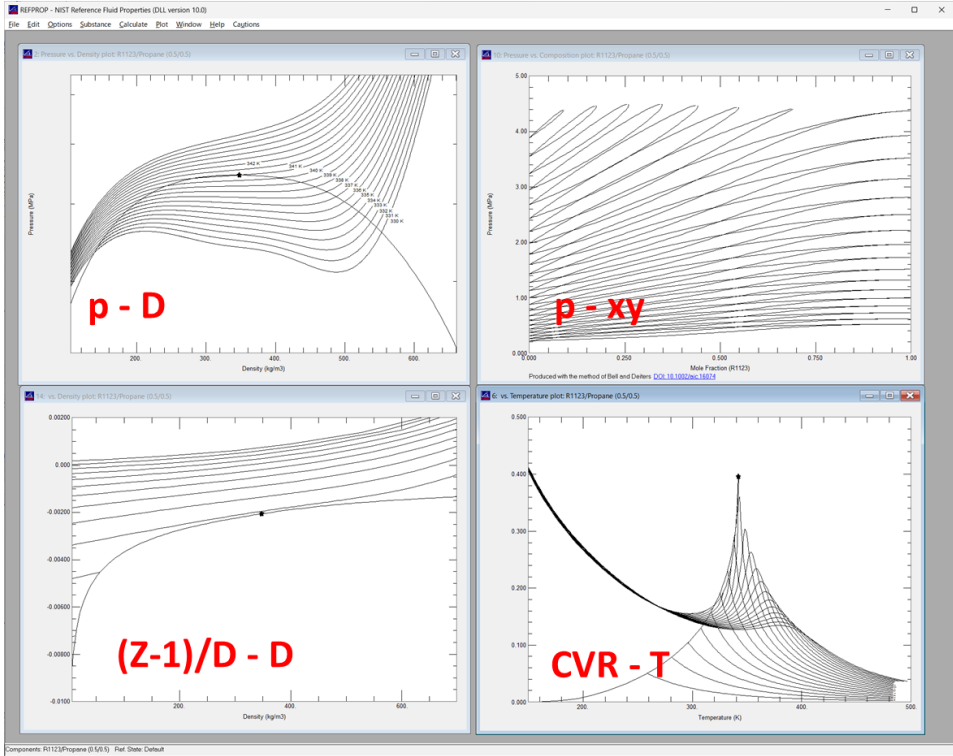
Average deviations in calculated bubble- or dew-point pressures

	Bubble (%)	Dew (%)
Default model	2.11	1.29
Alt. model	1.30	1.06
Optimized model	0.95	0.45

Mixing parameters

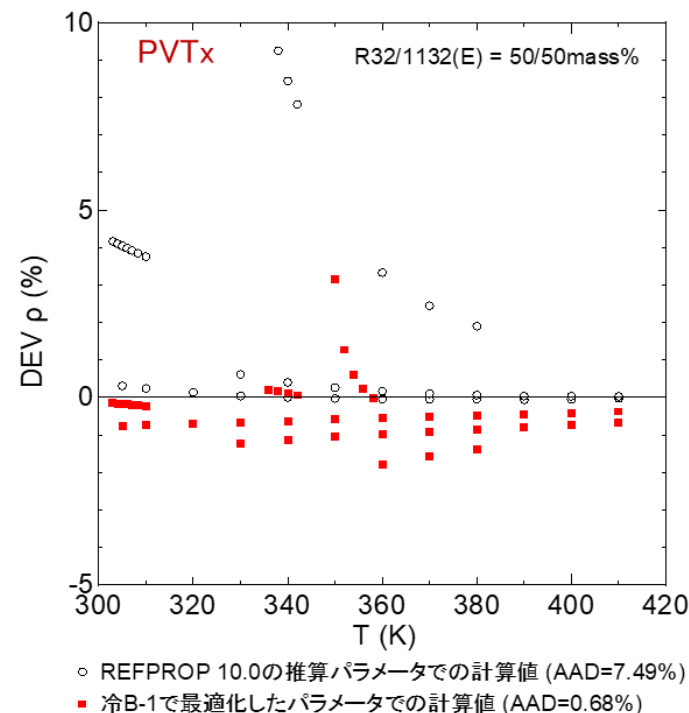
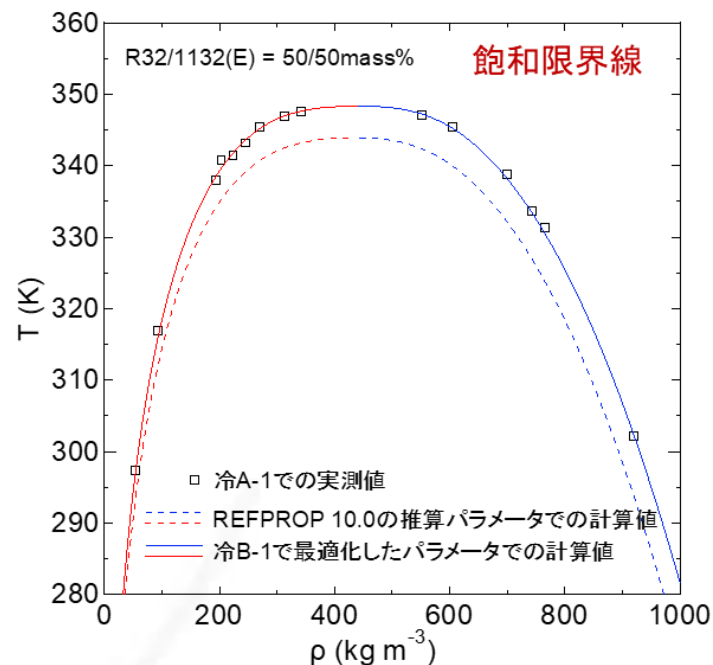
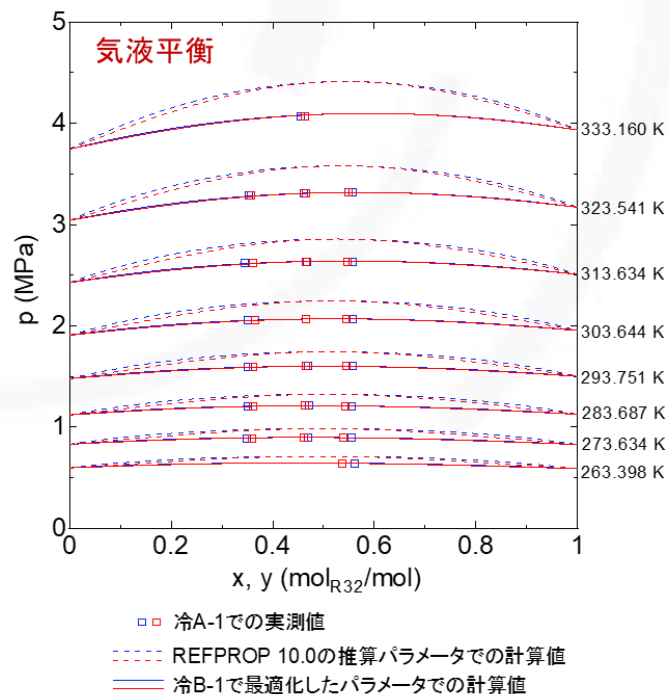
	Model	BetaT	GammaT	BetaV	GammaV	Fij
REFPROP 10.0 Default model (estimated)	XR0	1.0	0.93311	1.0	1.0036	0
REFPROP 10.0 Alt. model (R1234yf/290)	KW0	0.991523	0.937135	0.975164	1.011549	-0.030492
Optimized model	XR0	0.993493	0.934974	1.042959	1.020447	0

Behavior in the critical and extrapolated regions (equimolar mixture)



補足) 成果と意義: [冷B-1] 状態方程式及び混合モデルの開発 (九州産業大学)

R32+R1132(E)系に対する計算結果



臨界点 (50/50mass%)

	$T_c (\text{K})$	$P_c (\text{MPa})$
冷A-1 (実測値)	348.22	5.616
REFPROP 10.0 推算 (計算値)	343.95	5.5437
冷B-1 最適化 (計算値)	348.37	5.6369

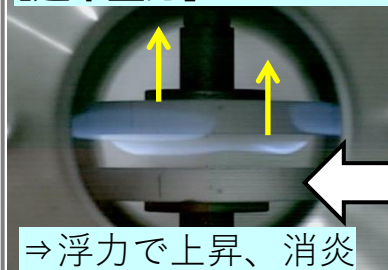
補足) 成果と意義: [冷C-1] 冷媒の絞り込みに資する安全性特性評価 (産総研機能化学)

【研究環境の整備】

- 軽量化消炎距離測定装置を製作し、微小重力装置に搭載。微小重力下でR32/1234yf混合系の測定を行い、通常重力下の評価法の微燃性の適用限界を調べた。
- 高圧用燃焼測定装置を製作し高圧消炎距離の予備試験を実施。高圧下ではPaschen's lawにより絶縁破壊に必要な電圧が増大する。高圧下でどこまで長い距離放電させられるか (= 大きい消炎距離が測定可能か)、放電限界距離を測定した。
- 今後、混合系候補の微小重力下や高圧条件下の消炎距離評価を行い、燃焼速度との相互検証を行う。

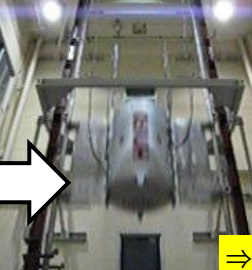
微小重力下の平行平板間消炎距離*

【通常重力】12.4mm?



⇒ 浮力で上昇、消炎距離の定量化困難

微小重力実験



【微小重力】11.3 mm

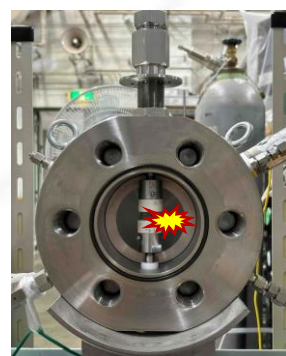


⇒ 無浮力で等方広がり、
精確に定量化

・・・微小重力消炎距離装置を新規導入。より多様な燃焼特性値との相互検証を可能にした (信頼性向上)。

*着火エネルギーや燃焼速度と相関する難着火性の指標で、安全な機器設計に有用

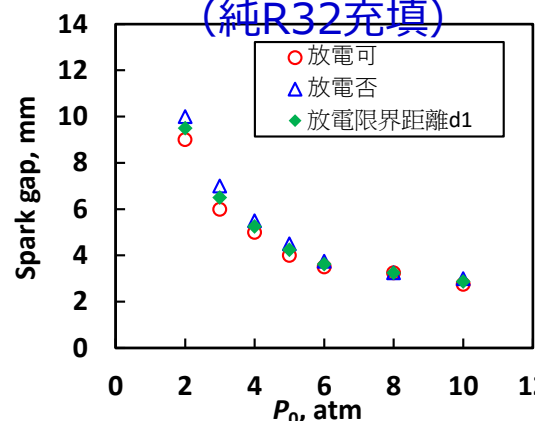
高圧消炎距離装置



耐圧20MPa

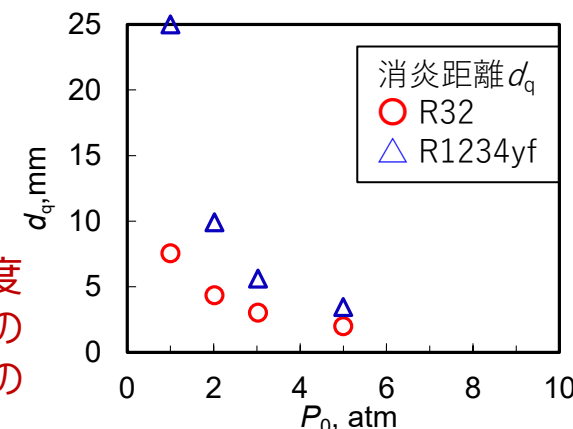
本装置の放電限界距離

(純R32充填)



⇒ R1234yf程度
のごく微燃性の
1MPa 程度の
測定は可能

高圧下での消炎距離



補足) 成果と意義: [冷C-1] 冷媒の絞り込みに資する安全性特性評価 (産総研機能化学)

【単体及び2成分系の追加取得】

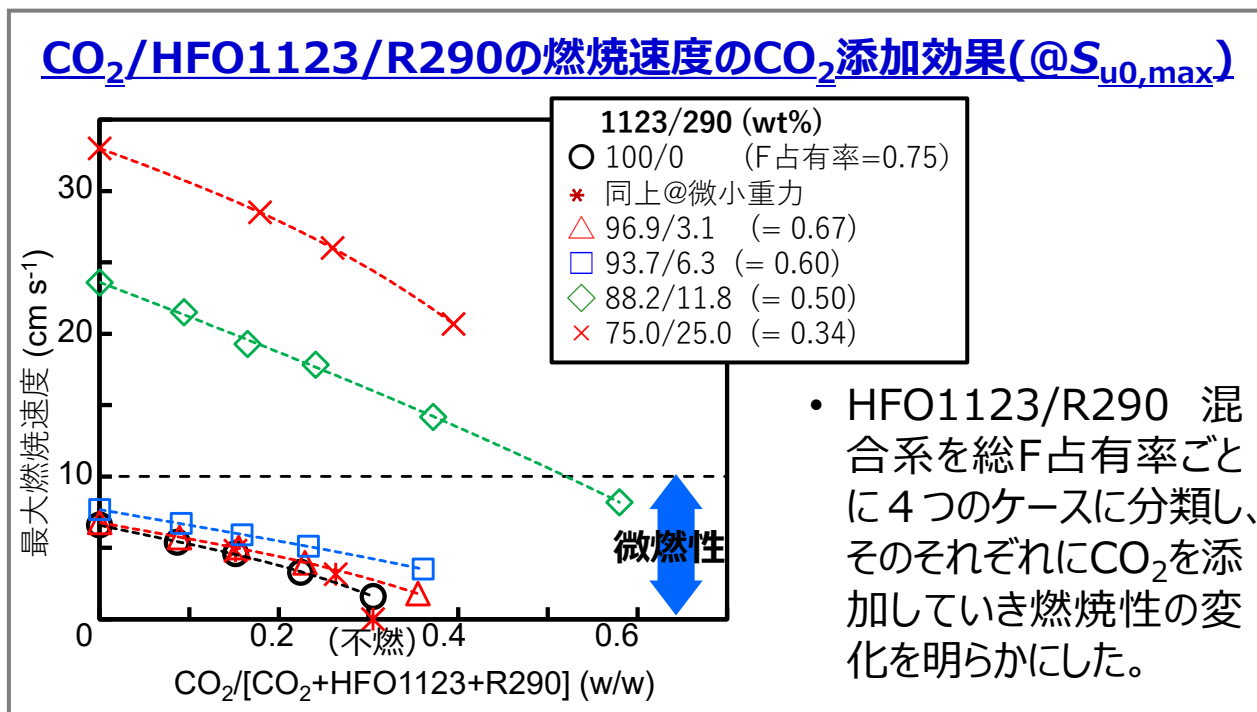
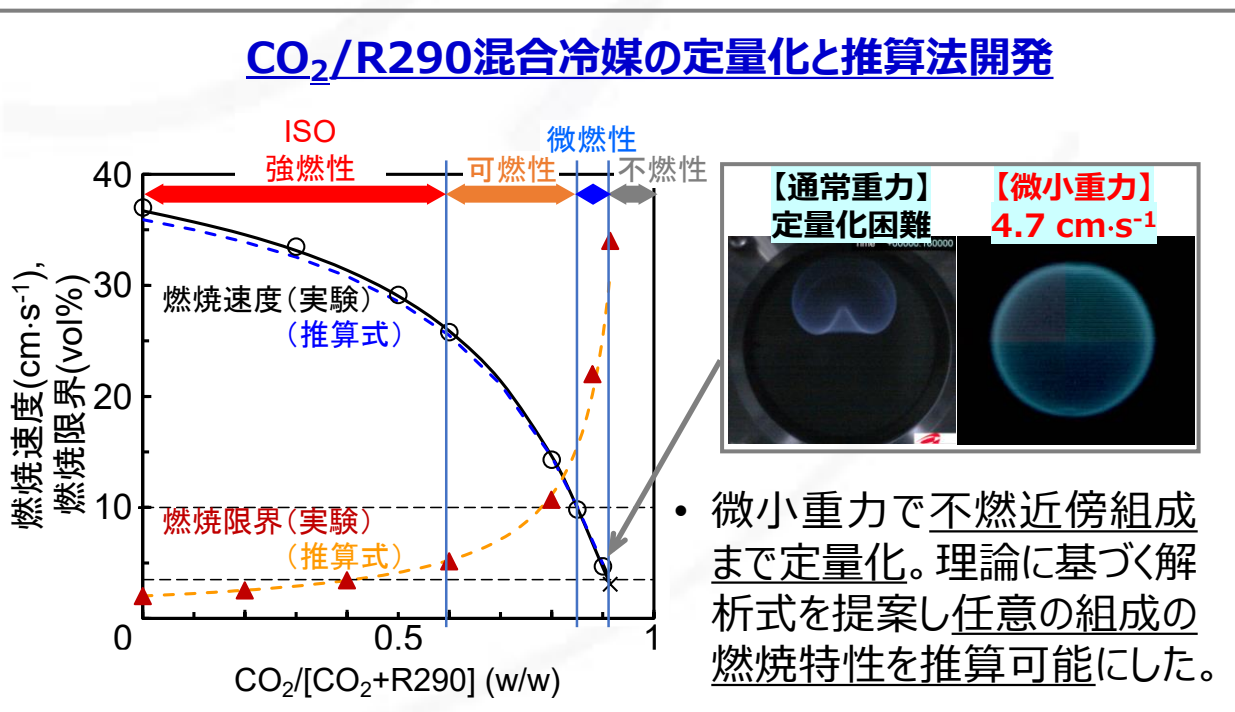
- CO₂/R290の評価は終了、論文化。CO₂/HFO1123系、HFO1123/R290系の評価は終了。

【3成分系の評価と推算】

- CO₂/HFO1123/R290混合系の燃焼速度は概ね終了。

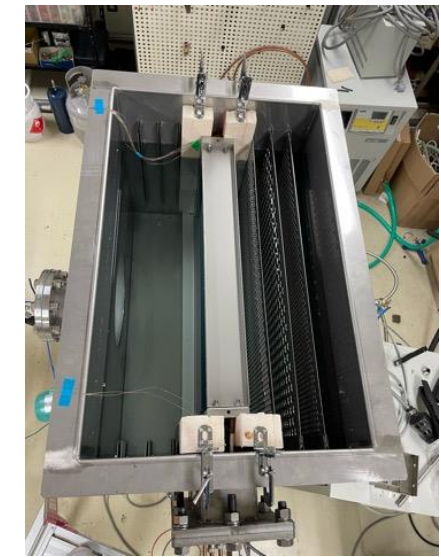
【A-1で絞り込まれた候補冷媒の評価】

- 絞り込まれた混合冷媒R1132(E)/R32(10 wt%)/1234yf混合系の評価を実施中、今後引き続き評価と推算法の開発を進める。



補足) 成果と意義: [冷D-1] サイクル特性及びモデル試験機による性能評価 (九州産業大学) [冷D-2] サイクル要素内損失分析 (長崎大学)

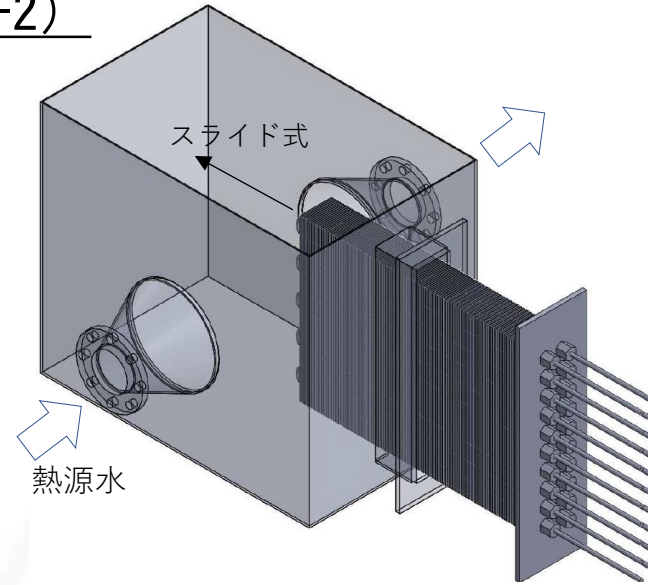
サイクル試験装置製作の進捗 (冷D-1、冷D-2)



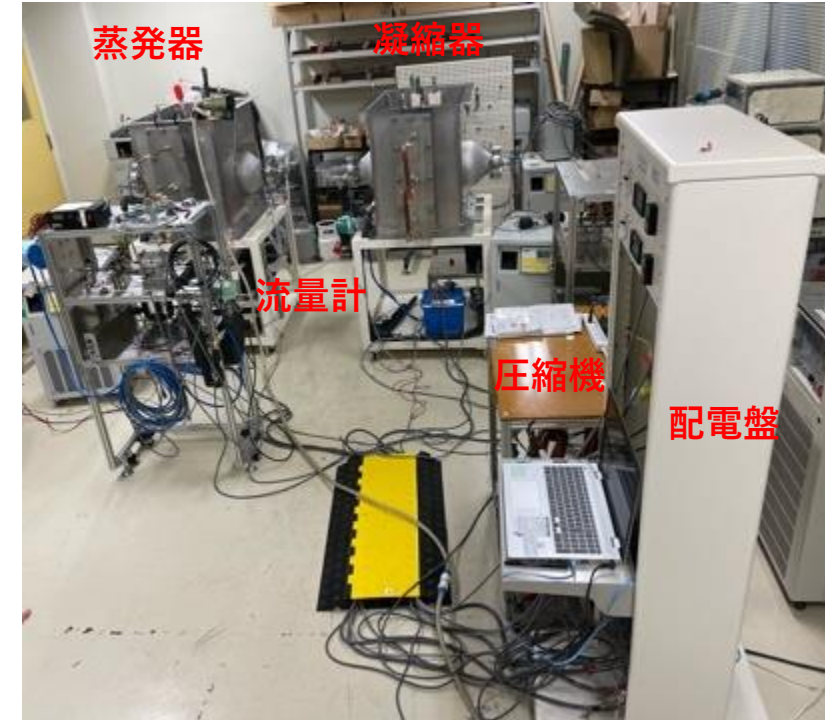
熱交換装置
(上部から)



熱交換装置 2パス凝縮器用
(前方から)



家庭用エアコンに用いられる直交流型熱交換器を作成し、混合冷媒の温度勾配の影響をとらえたサイクル性能試験装置を構築する。



装置全体

冷D-1 配管長は短い。製品により忠実。
超音波流量計を用い圧損を抑える。

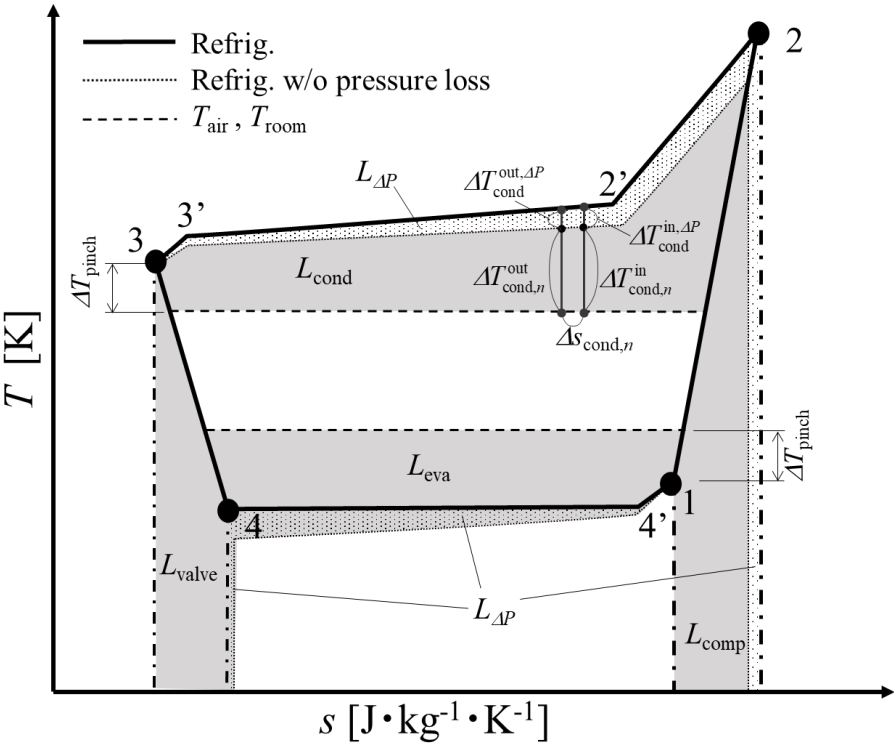
冷D-2 配管長は長い。センサや混合室が多い。

【今後の計画】 現行冷媒R23を充填し試運転を行う。2025年度には本装置で新冷媒の試験を行う。

補足) 成果と意義: [冷D-1] サイクル特性及びモデル試験機による性能評価 (九州産業大学)

計算方法: サイクル計算全体 (冷D-1)

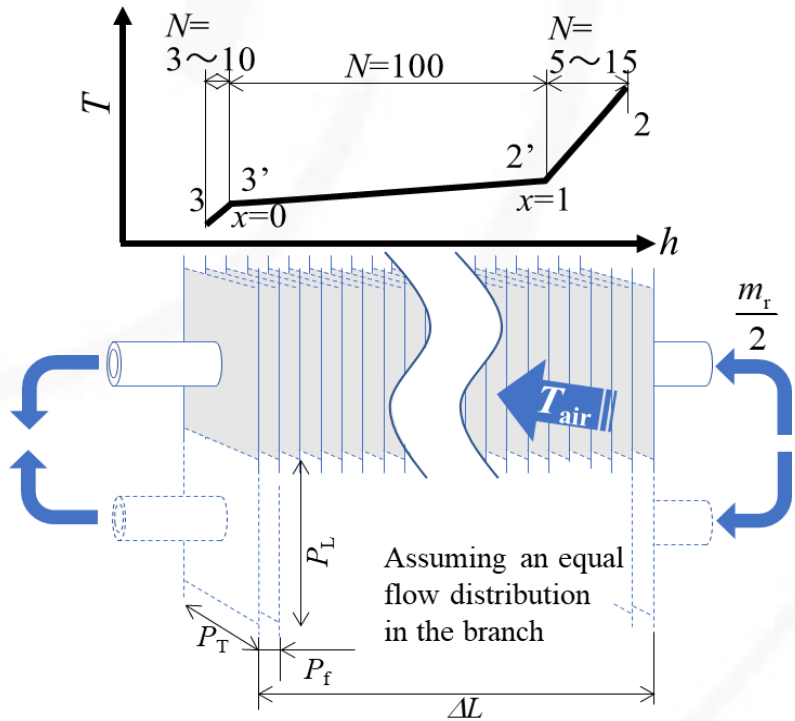
Calculation conditions			
cooling condition	outside air temp.	T_{air}	35 °C
	room air temp.	T_{room}	27 °C
	cooling capacity	Q_{cooling}	2.0 kW
heating Condition	outside air temp.	T_{air}	7 °C
	room air temp.	T_{room}	20 °C
	heating capacity	Q_{heating}	2.2 kW
pinch temp.		ΔT_{pinch}	5 K
initial condenser subcooling		ΔT_{SC}	3 K
initial evaporator superheat		ΔT_{SH}	3 K



- ❑ 2 kWクラスの家庭用空調機のサイクル性能評価を行った。ピンチ温度を固定し、必要な伝熱面積を求める手法。
- ❑ 圧縮機、膨張弁、凝縮器、蒸発器の4つの要素機器と圧力損失に起因する損失に分割してサイクルの不可逆損失も算出できるようにした。

補足) 成果と意義: [冷D-2] サイクル要素内損失分析 (長崎大学)

計算方法: クロスフィンチューブ式熱交換器モデル (冷D-2)



・N個の要素に離散化し、各要素区間の熱伝達率、圧力損失、交換熱量および伝熱管長を計算した。

Dimensions of the cross-fin-tube heat exchanger		
outer diameter	D_o	6.35 mm
equivalent inner diameter	D_i	6.00 mm
helix angle		20 °
internal area enlargement	η_A	2.00
thermal conductivity of tubes	λ_{tube}	370 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
air side heat transfer coefficient	α_{air}	100 W·m ⁻² ·K ⁻¹
heat transfer area ratio including fin efficiency	A_{air}/A_r	13

Condensation process	
heat transfer coefficient	Deng et al. (2019)
pressure drop	Yonemoto-Koyama (2007)
Evaporation process	
heat transfer coefficient	Kondou et al. (2013)
pressure drop	Kondou (2008)
Single phase heat transfer process	
heat transfer coefficient	Goto et al. (2005)
pressure drop	Carnavos (1980)

□ R1123/R32、R1123/R290、R1123/R152aのサイクル性能評価結果について、冷凍空調学会年次大会で発表した。

補足) 成果と意義: [冷D-1] サイクル特性及びモデル試験機による性能評価 (九州産業大学) [冷D-2] サイクル要素内損失分析 (長崎大学)

計算結果検証: パデュー大学のドロップイン試験結果¹⁾と比較。(冷D-1、冷D-2)

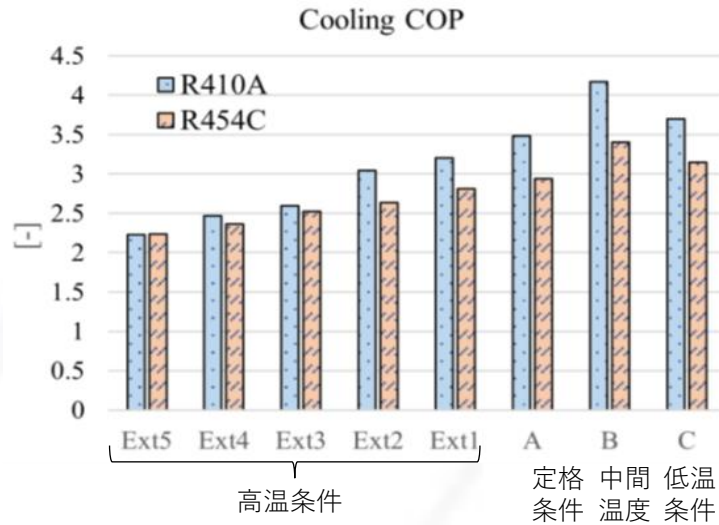
R454C A2L
R32/R1234yf
(21.5/78.5
mass%)

at 1.0 MPa

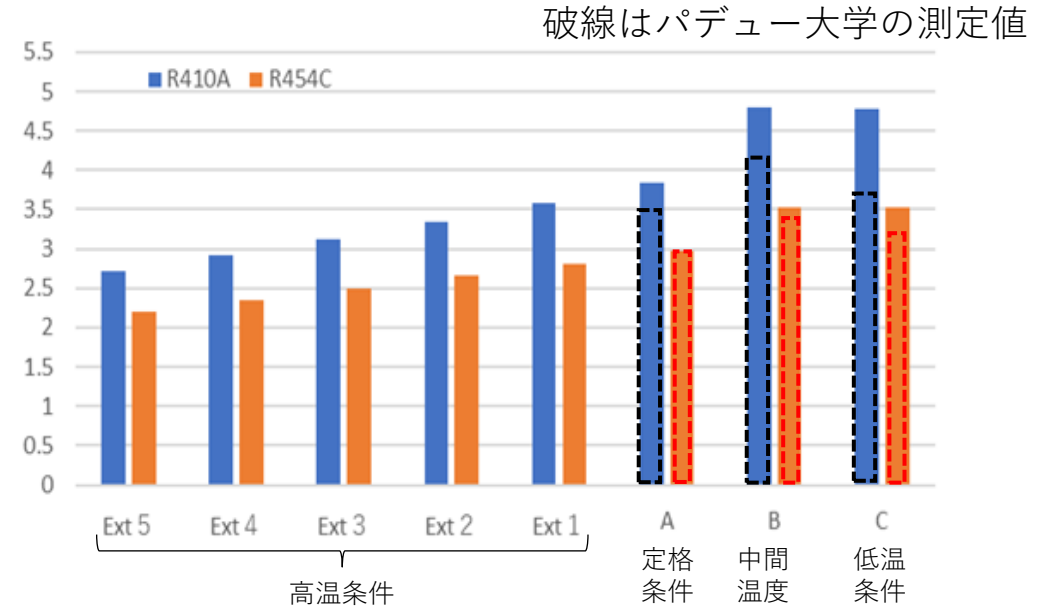
$$T_{\text{liq}} = 294.1 \text{ K}$$

$$T_{\text{vap}} = 300.9 \text{ K}$$

$$DT_{\text{glide}} = 6.8 \text{ K}$$



(a) 9 kWクラスの空気熱源ヒートポンプの実測COP



(b) 2 kWクラスを想定し、熱交換器サイズを最適化させた計算COP

本計算モデルは、温度勾配の無い場合 (R410A)、COPを幾分過大評価。空気側熱抵抗を大きくする、ピンチ温度を大きくする等の条件調整、列数の影響なども考慮する必要がある。

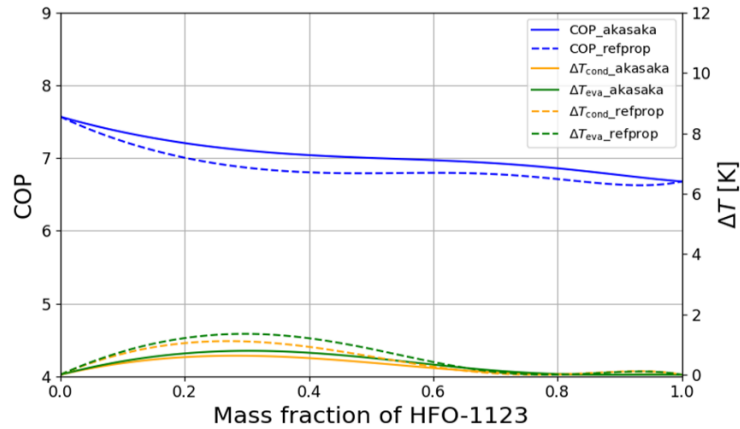
1) W., Hou; H.R., Fard, L., Burns, E.A., Groll, D., Ziviani, J.E., Braun, Experimental Investigation of R454C as a Replacement for R410A in a Residential Heat Pump Split System, International Refrigeration and Air Conditioning Conference., 2022, Paper 2482.

補足) 成果と意義: [冷D-1] サイクル特性及びモデル試験機による性能評価 (九州産業大学) [冷D-2] サイクル要素内損失分析 (長崎大学)

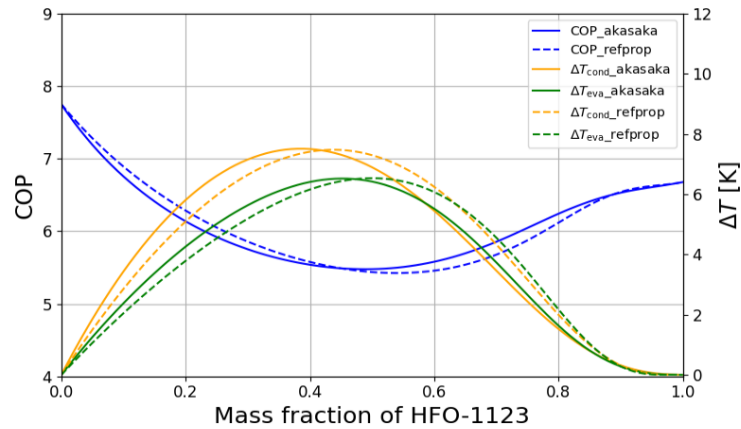
COPおよび温度勾配

体積能力

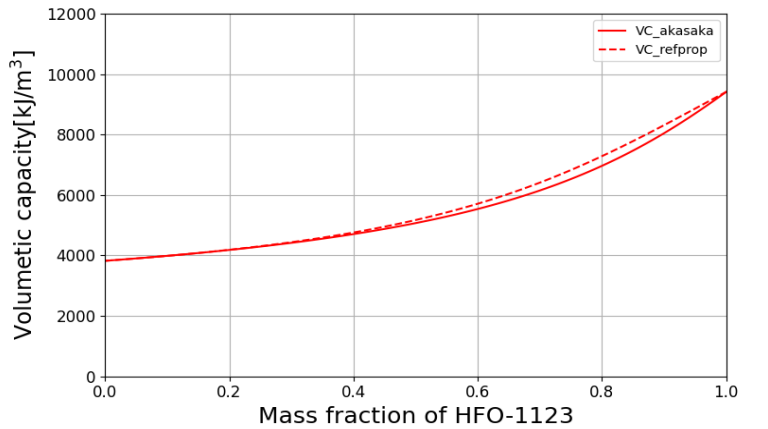
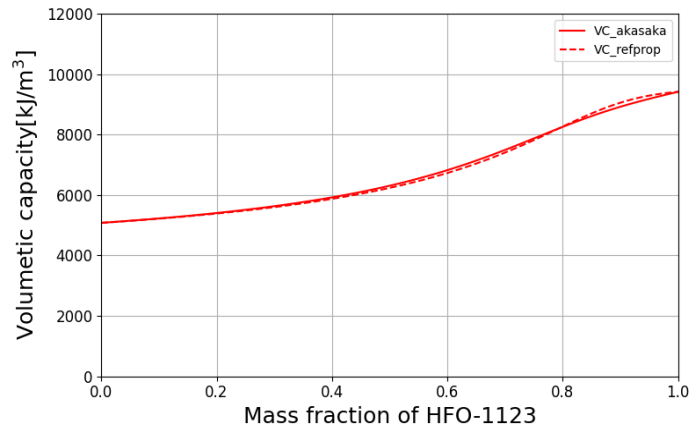
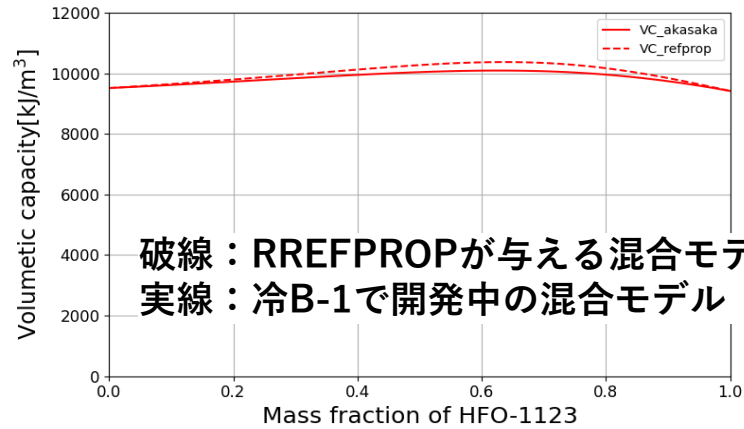
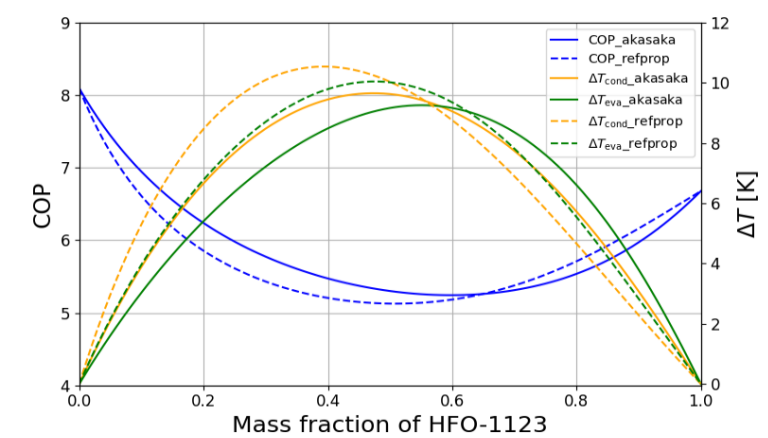
R1123/R32



R1123/R290



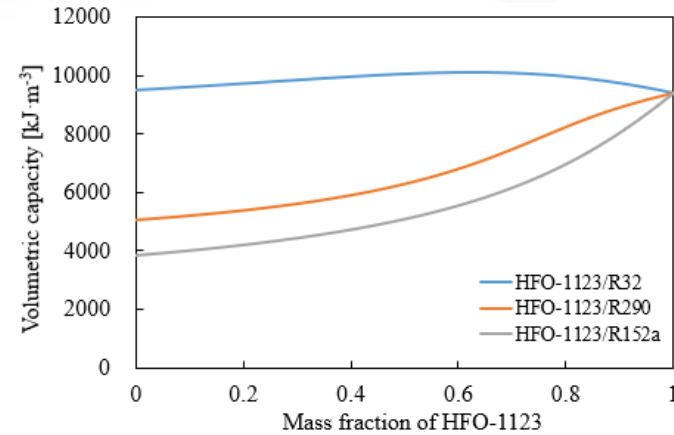
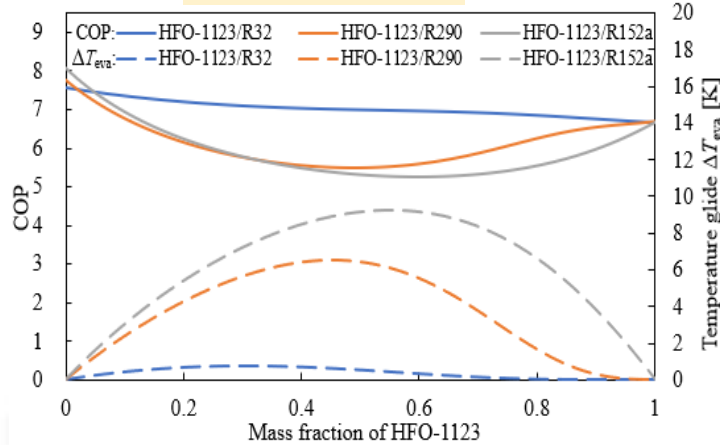
R1123/R152a



上記の確認範囲では、COPでは最大0.38、温度勾配では最大1.5 K、体積能力では4.5%の差異が生じた。物性データに基づく混合モデルでなければ、これらが計算精度の限界であるようだ。

補足) 成果と意義: [冷D-1] サイクル特性及びモデル試験機による性能評価 (九州産業大学) [冷D-2] サイクル要素内損失分析 (長崎大学)

冷房モード



HFO-1123/R32 (0.6/0.4 mass)を基準とすると

COP : 7.0

HFO-1123/R290より **1.4** 高い
HFO-1123/R152aより **1.7** 高い

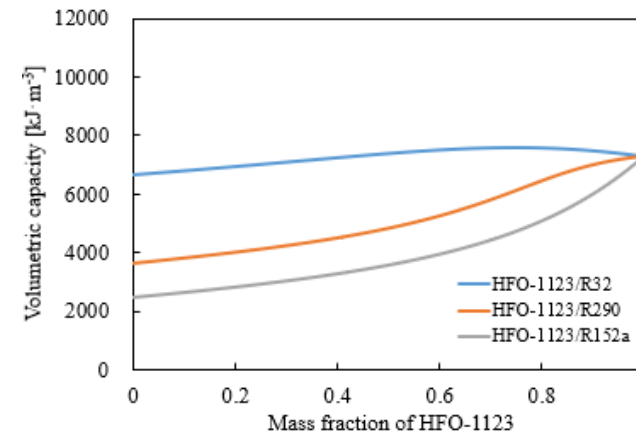
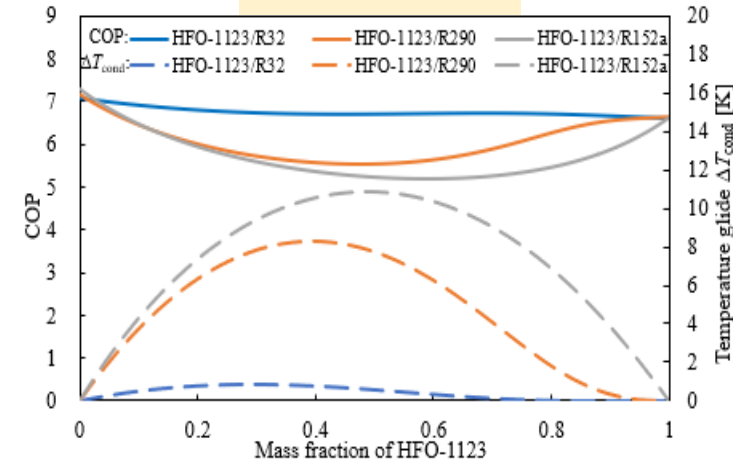
体積能力: 10087 kJ·m⁻³

HFO-1123/R290 の **1.5** 倍
HFO-1123/R152aの **1.8** 倍
⇒圧縮機回転数増

1パス当たりの蒸発器伝熱管長:

HFO-1123/R32: **6.17 m**
HFO-1123/R290: **7.48 m (121%)**
HFO-1123/R152a: **9.29 m (151%)**
⇒熱交換器サイズ増

暖房モード



HFO-1123/R32 (0.6/0.4 mass)を基準とすると

COP : 6.7

HFO-1123/R290より **1.1** 高い
HFO-1123/R152aより **1.6** 高い

体積能力: 7478 kJ·m⁻³

HFO-1123/R290 の **1.4** 倍
HFO-1123/R152aの **1.9** 倍
⇒圧縮機回転数増

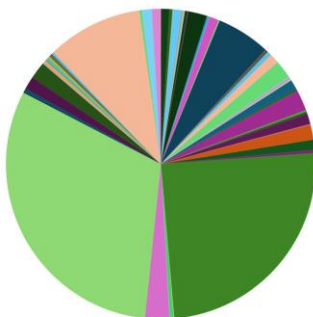
1パス当たりの蒸発器伝熱管長:

HFO-1123/R32: **7.62 m**
HFO-1123/R290: **8.41 m (110%)**
HFO-1123/R152a: **8.04 m (106%)**
⇒熱交換器サイズ増

HFO-1123/R290やHFO-1123/R152aを利用するためには、
冷媒質量循環量は約1.9倍、熱交換器伝熱面積は約1.5倍の増大が求められる。

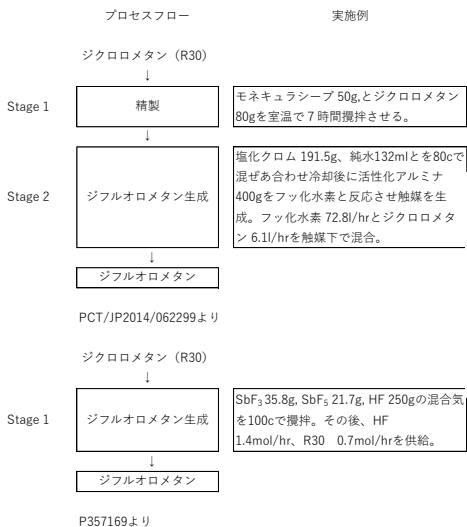
- 新規冷媒のLCAは実施済み。
- エアコンのLCA評価のデータを取得。

- 使用実態とサイクルシミュレーションに基づく家庭用空調機の消費電力推計。
- 安全性評価に関する手法・データのレビュー。

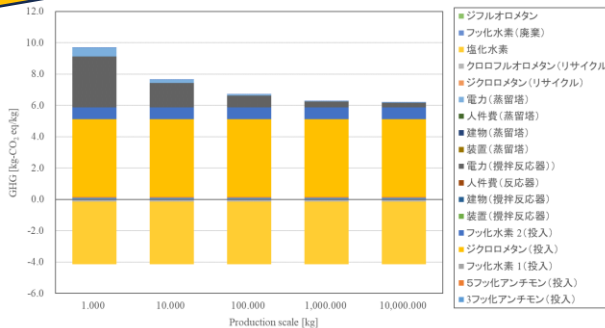
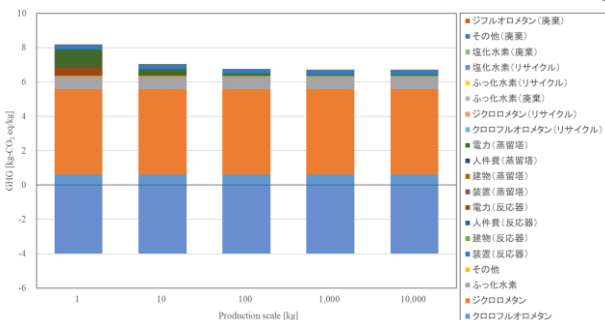
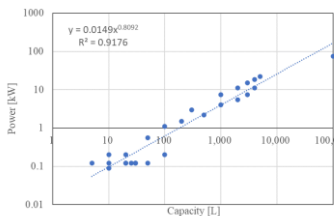


(R32, R1234yf, R1234ze(E), HFO1123, R1132(E), R290, R744)

特許情報



装置情報



		物質名	物質名(英語)	単位	使用量(基準)
ステージ1 反応	Input	クロロフロロメタン(再利用)	Chlorofluoromethane	kg	2.770000
		ジクロロメタン(投入)	Dichloromethane	kg	27.610000
		ジクロロメタン(再利用)	Dichloromethane	kg	10.330000
		ふっ化水素(投入)	Hydrogenfluoride	kg	13.110000
		フッ化水素(再利用)	Hydrogenfluoride	kg	45.920000
		その他(再利用)	Others	kg	0.260000
		装置(反応器)	Facility(Reactor)	JPY	
		建物(反応器)	Facility(Reactor)	m2	
		人件費	Labor	JPY	
		電力	Electricity	kWh	
Energy Waste	Product	その他	Others	kg	0.000000
		クロロフロロメタン	Chlorofluoromethane	kg	0.760000
		ジクロロメタン	Dichloromethane	kg	2.770000
		ふっ化水素	Hydrogenfluoride	kg	46.020000
		塩化水素	Hydrochloride	kg	23.710000
		ジフルオロメタン	Difluoromethane	kg	16.410000
		ジフルオロメタン	Difluoromethane	kg	16.410000
		クロロフロロメタン	Chlorofluoromethane	kg	2.770000
		ジクロロメタン	Dichloromethane	kg	10.330000
		ふっ化水素	Hydrogenfluoride	kg	46.020000
ステージ2 HCL-32の分離	Input	塩酸	Hydrochloride	kg	23.710000
		その他	Others	kg	0.760000
		装置(高留塔)	Equipment	JPY	
		建物(高留塔)	Facility	m2	
		人件費	Labor	JPY	
		電力	Electricity	kWh	
		クロロフロロメタン(再利用)	Chlorofluoromethane	kg	2.770000
		ジクロロメタン(再利用)	Dichloromethane	kg	10.330000
		ふっ化水素(廃棄)	Hydrogenfluoride	kg	0.100000
		ふっ化水素(再利用)	Hydrogenfluoride	kg	45.920000
Waste	Product	塩化水素(廃棄)	Hydrochloride	kg	23.710000
		その他(廃棄)	Others	kg	0.500000
		その他(再利用)	Others	kg	0.260000
		ジフルオロメタン(廃棄)	Difluoromethane	kg	0.020000
		ジフルオロメタン	Difluoromethane	kg	16.390000

補足) 成果と意義 : [冷E-1] LCCP評価方法の開発及びAI解析 (エイゾス)

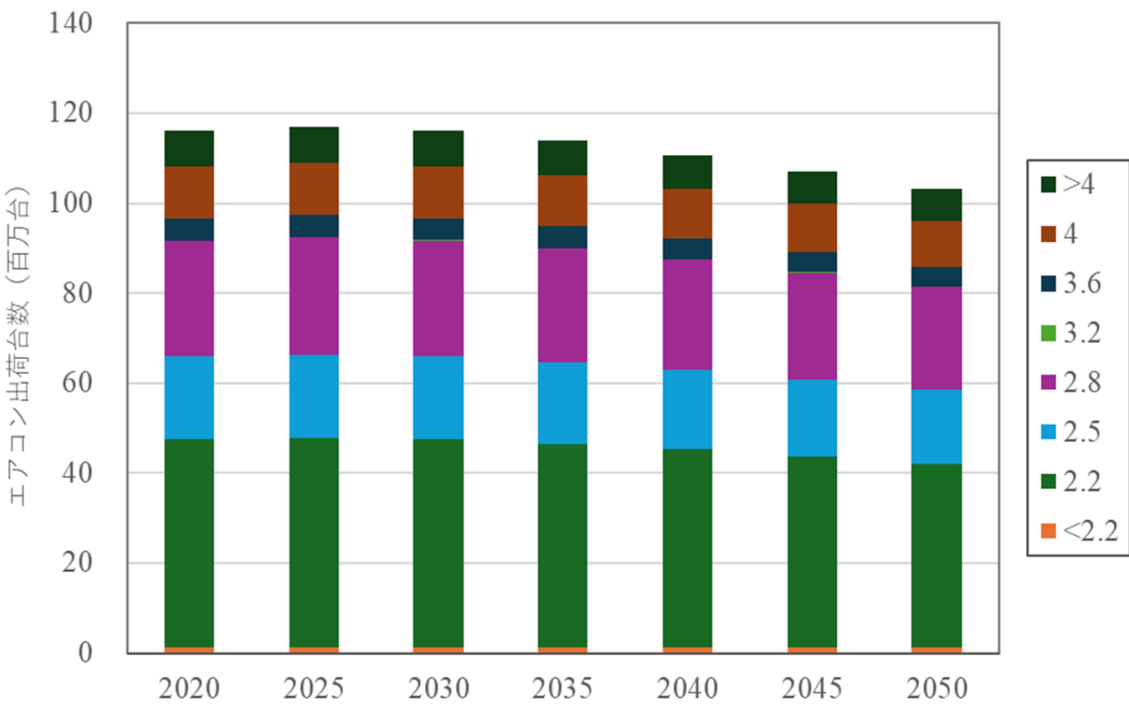
成果 :

- AIを用いた冷媒物質の温暖化係数の推計。
- 家庭用空調機の将来需要の推計。

今後の計画 :

- 混合冷媒の温暖化係数や物性値の推計。

家庭用空調機の将来需要推計



AIを用いた冷媒物質の温暖化係数の推計

IPCC AR6報告書 (207化学物質)

