

事業概要（機器Gr.）

＜個別事業名＞ 混合冷媒に対応する要素機器開発

＜事業期間＞ 2023年4月～2028年3月

＜事業概要＞

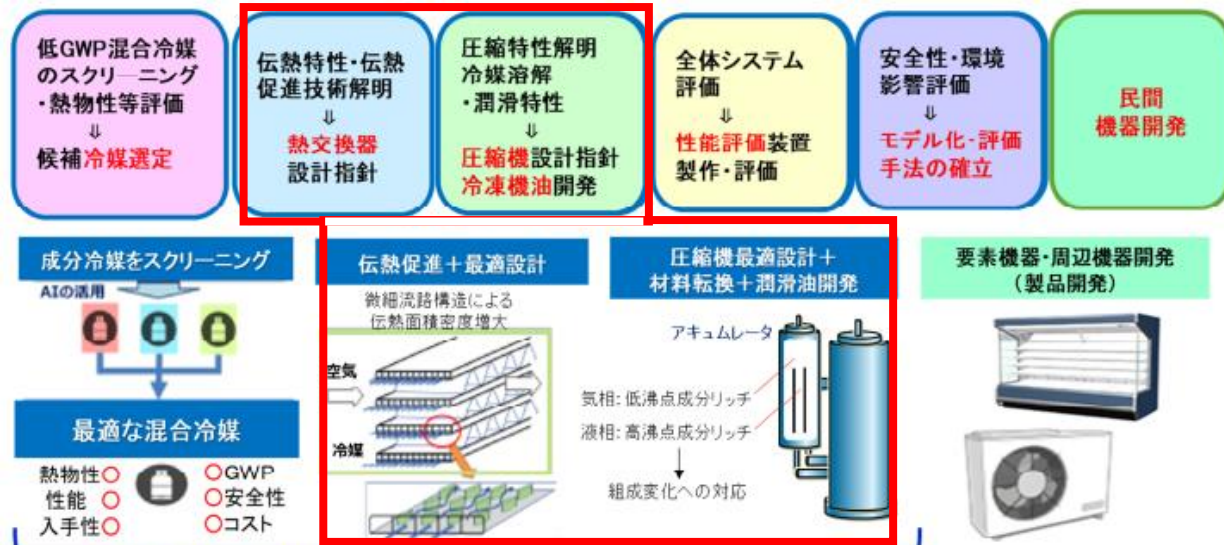
本研究では、次世代低GWP混合冷媒の熱流動メカニズムを解明して伝熱劣化を抑制し、伝熱促進技術を開発するとともに、20%の軽量化と冷媒充填量30%削減を可能とする高性能熱交換器を開発する。そのために必要な冷媒の輸送性質の測定及び伝熱データベースの開発も行う。また、低GWP混合冷媒に対する冷凍機油の溶解挙動や返油特性及び潤滑特性の変化を明らかにするとともに、圧縮機構部での摩擦・摩耗・潤滑特性を分析して設計指針を確立する。加えて、低GWP混合冷媒の圧縮機に適した金属複合材料を開発する。

技術課題①：混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱劣化を抑制する技術及び伝熱促進技術の探索

技術課題②：混合冷媒に適した冷媒-空気熱交換器の開発

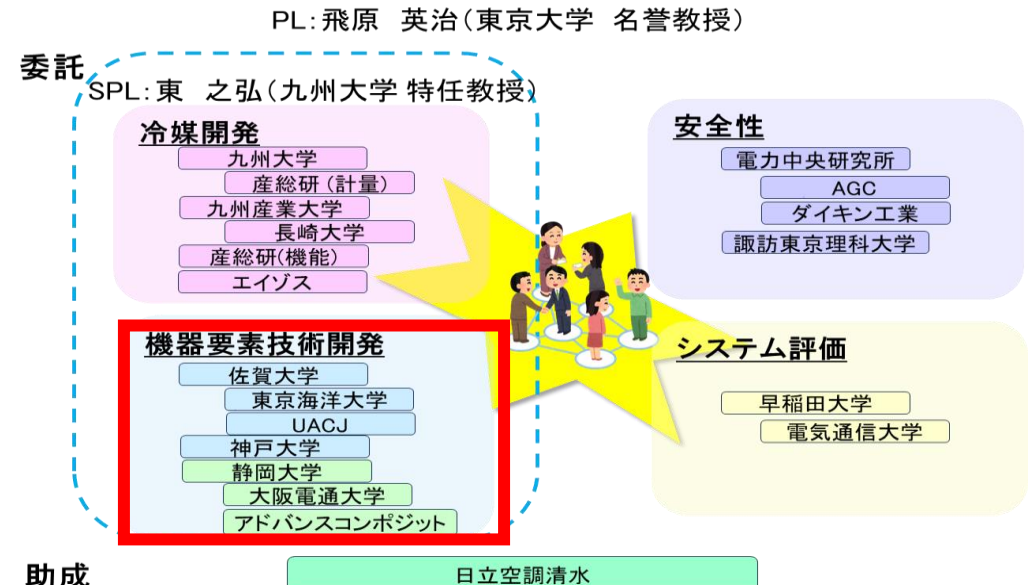
技術課題③：冷凍機油の混合冷媒溶解挙動の解明と適合性評価

技術課題④：混合冷媒圧縮に適した金属複合材料と摩擦・摩耗・潤滑特性に基づく機械効率向上



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

国産低GWP冷媒の開発・実用化に向けた技術開発の推進



背景・目的・プロジェクトアウトカム目標との関係

●背景：

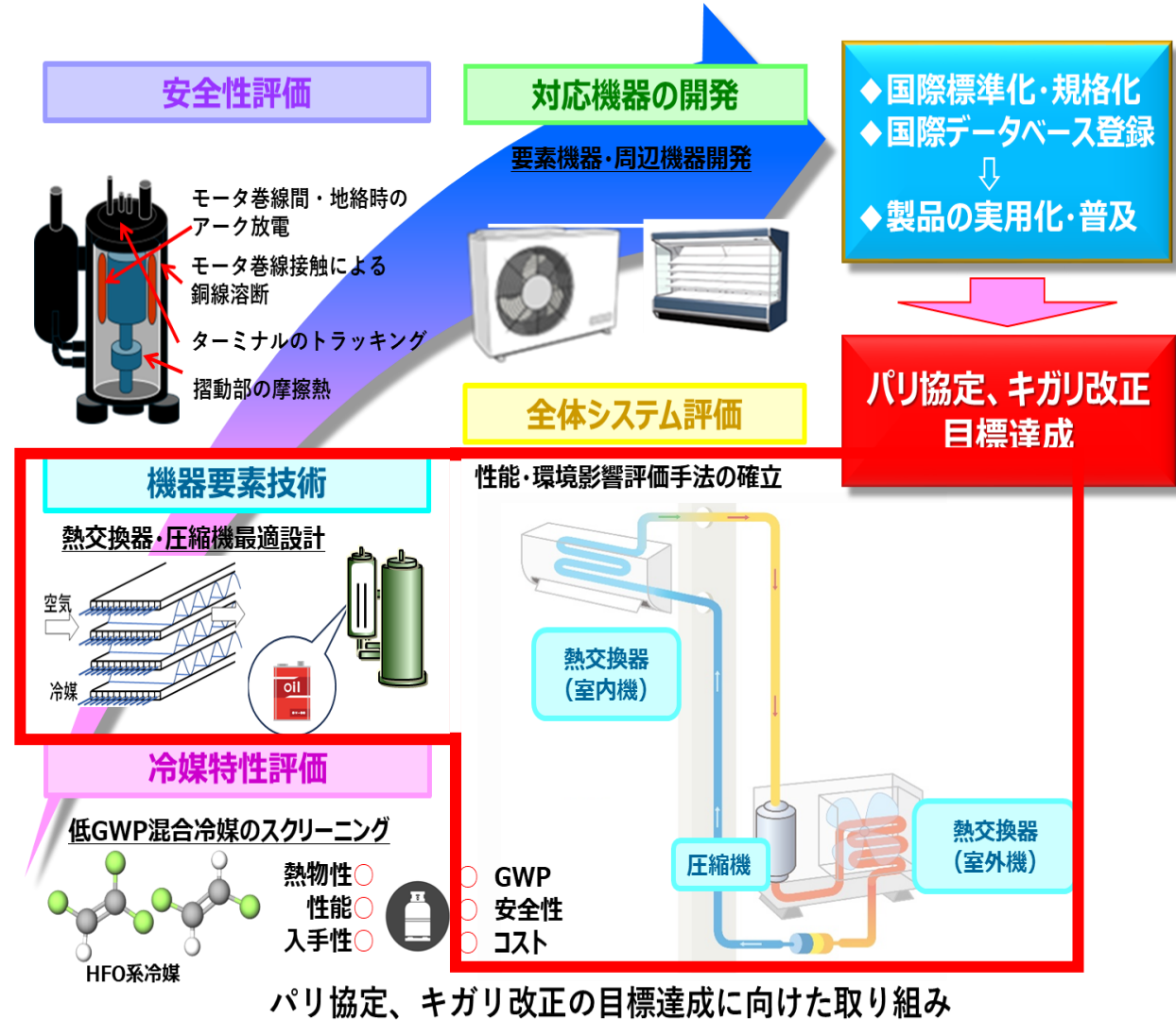
低GWP混合冷媒が次世代冷媒候補となっているが、温度グライドに起因する熱交換器の性能劣化が大きな課題である。また、各種混合冷媒を高効率で圧縮するとともに長期運転における信頼性の高い圧縮機が要求される。

●目的：

熱交換器の性能評価、混合冷媒への適合性改善、及び混合冷媒の圧縮特性の解明及び潤滑特性評価などの応用面での冷媒適合性評価を行うことで、新たな混合冷媒を使いこなす熱交換器や圧縮機の研究開発を行う。

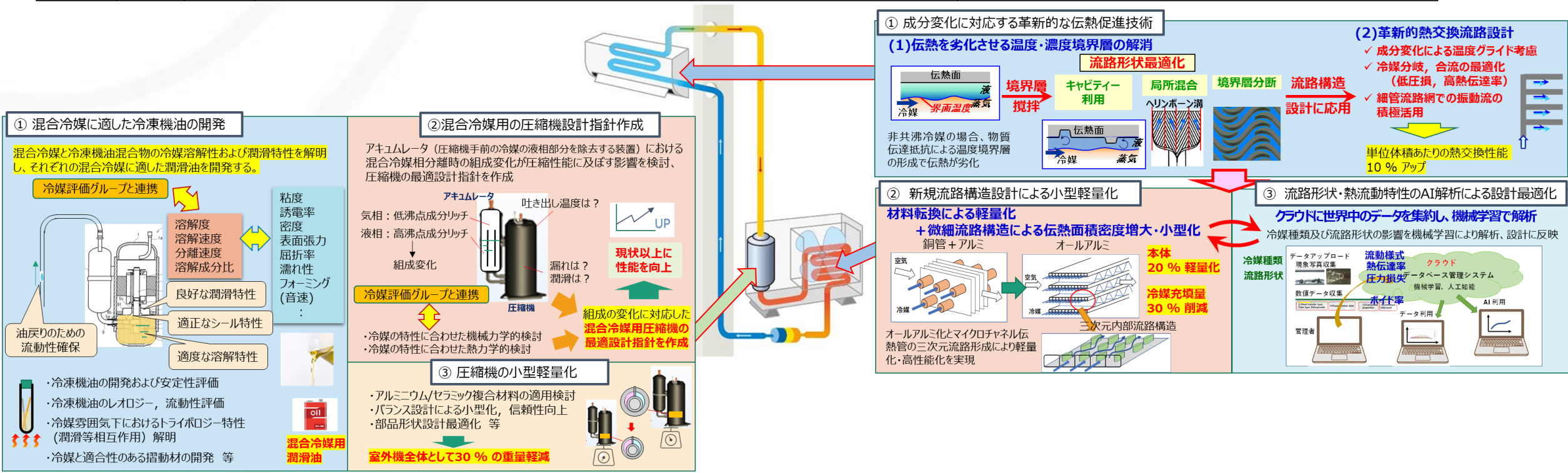
●規格・標準化・指針等との関係：

熱交換の実験値や予測式等は、論文などで公開した後にWeb上で公開する伝熱データベースを介して提供する。粘度及び熱伝導率の測定値と予測モデルは、論文やREFPROPを介して公開する。これらの情報が規格標準化に貢献する。

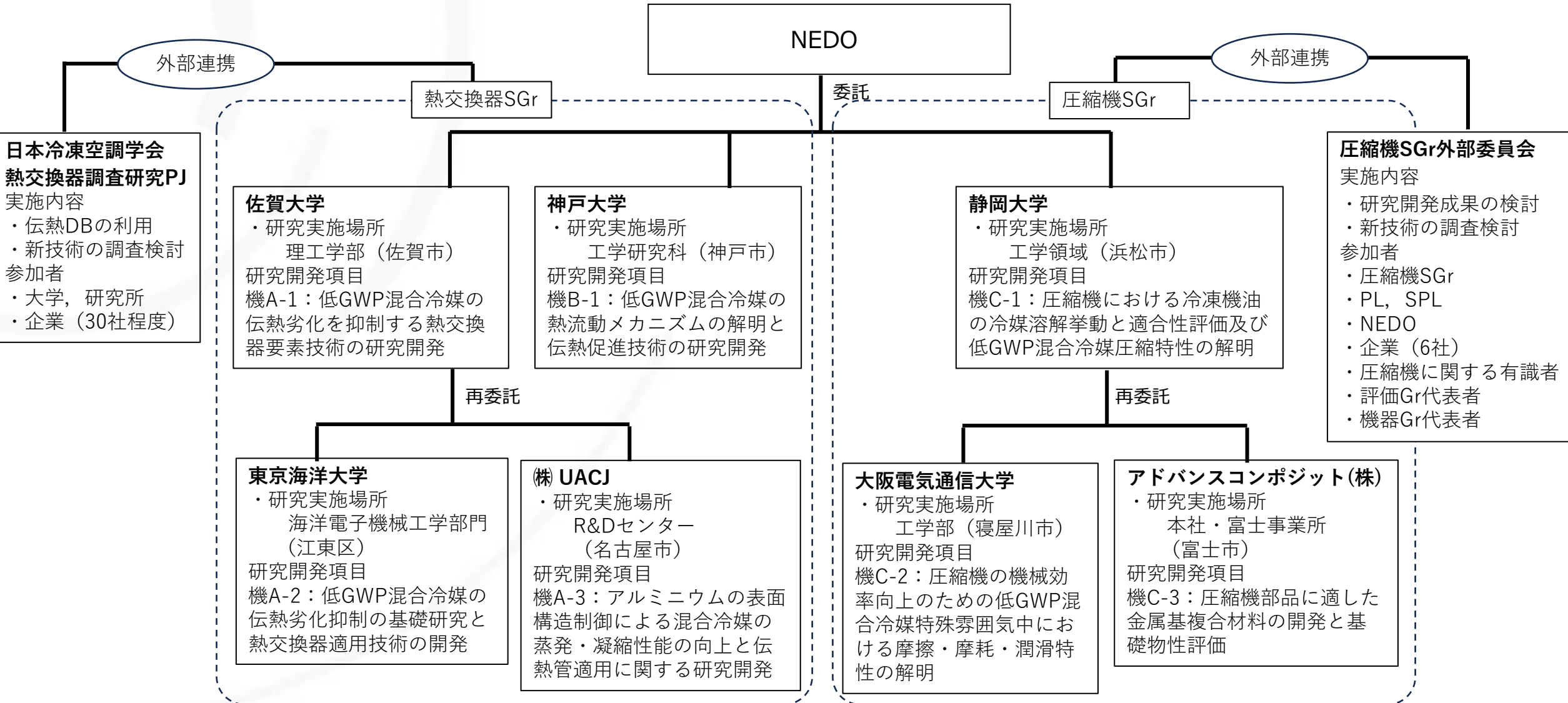


研究開発項目

	委託	再委託	研究開発項目	事業者
機械G	機A-1		低GWP混合冷媒の伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発	国立大学法人佐賀大学
		機A-2	低GWP混合冷媒の伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発	国立大学法人東京海洋大学
		機A-3	アルミニウムの表面構造制御による混合冷媒の蒸発・凝縮性能の向上と伝熱管適用に関する研究開発	株式会社UACJ
	機B-1		低GWP混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発	国立大学法人神戸大学
	機C-1		圧縮機における冷凍機油の冷媒溶解挙動と適合性評価及び低GWP混合冷媒圧縮特性の解明	国立大学法人静岡大学
	機C-2	機C-2	圧縮機の機械効率向上のための低GWP混合冷媒雰囲気中における摩擦・摩耗・潤滑特性の解明	学校法人大阪電気通信大学
		機C-3	圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価	アドバンスコンポジット株式会社



実施体制



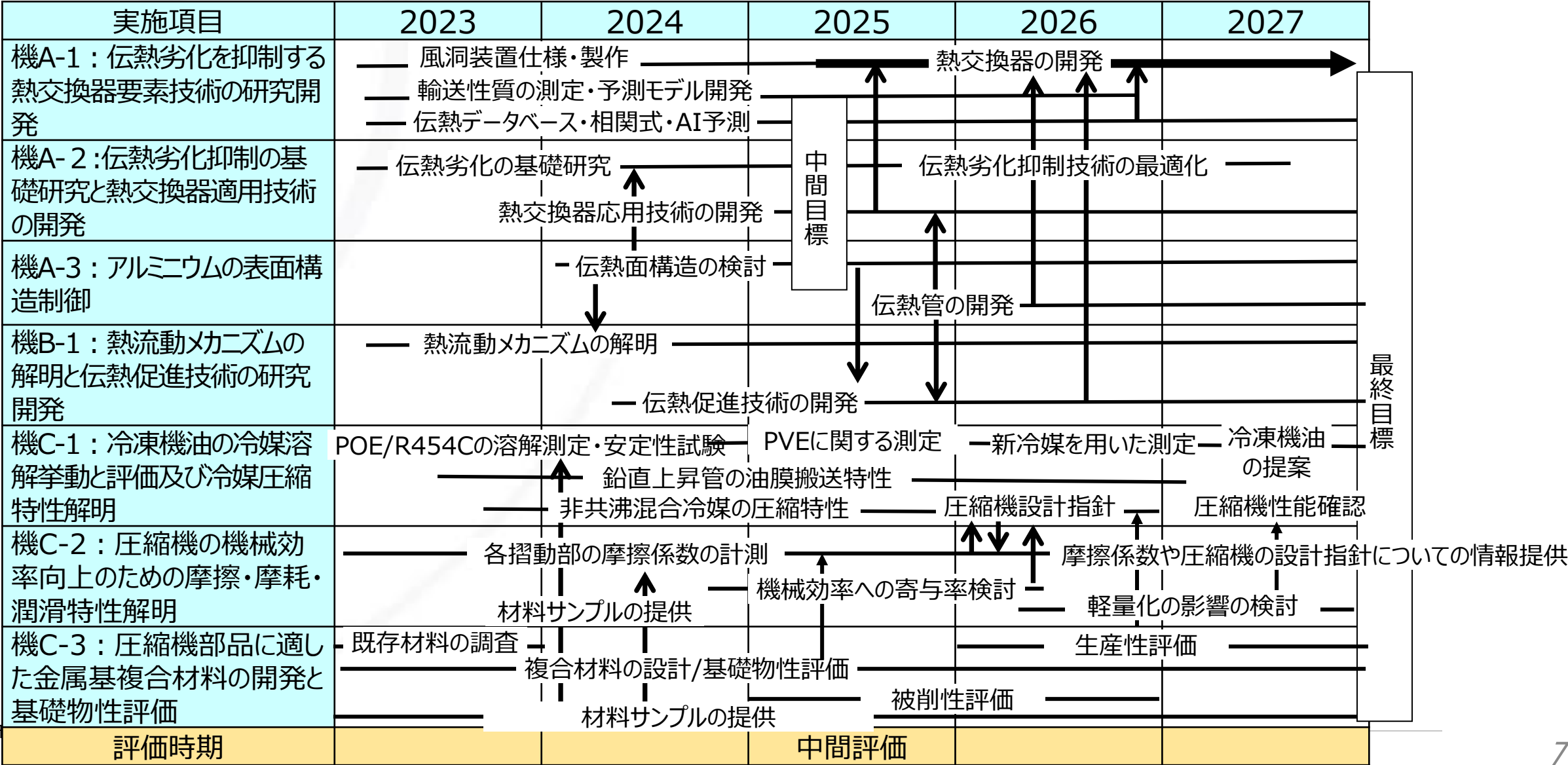
実施概要と目標（中間・最終）と根拠

実施項目	実施内容	事業者	中間目標※	最終目標	根拠	
機器Gr	混合冷媒に対応する要素技術開発	—	伝熱特性の解明と伝熱促進技術の開発 冷媒の圧縮特性の解明 冷媒の溶解・潤滑特性の解明	熱交換器の設計指針の確立 圧縮機の設計指針の確立 冷凍機油の提案	従来と異なる混合冷媒に対応する機器要素技術を確立することは、企業の速やかな製品開発に必要不可欠である。	
	機A-1	伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発	(国) 佐賀大学	1)候補混合冷媒1種類以上の熱交換器性能評価実験 2)2種類以上の候補混合冷媒の粘度及び熱伝導率の測定と予測モデル 3)3万点以上のデータの蓄積及びAI予測の基本機能確立	1)3種類の混合冷媒にについて3種類以上の熱交換器を用いて評価 2)粘度及び熱伝導率の測定と予測モデル 3)4万点以上のデータ蓄積，10種類以上の相関式を評価，AI予測	1)混合冷媒の伝熱特性を明らかにし、最適な熱交換器の開発に繋がる。 2) 粘度と熱伝導率の計算を可能になり、熱交換器設計に貢献する。 3)実験値の直接検索、相関式評価、熱伝達率のAI予測が可能になる。
	機A-2	伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発	(国) 東京海洋大学	R1234yfと同程度の伝熱性能を示す伝熱劣化抑制技術の開発	低GWP混合冷媒に対応する熱交換器開発指針の獲得	非共沸混合冷媒は蒸発、凝縮過程で伝熱性能が低下するため、伝熱劣化抑制が重要となる。高性能熱交換器の開発のためには、混合冷媒に対応する表面処理および流路形状による伝熱劣化抑制、伝熱促進手法が必要である。
	機A-2	アルミニウムの表面構造制御	(株) UACJ	混合冷媒に対する伝熱性能劣化を低減する表面構造作製法の確立と実機適用可能性検討	候補冷媒の伝熱劣化メカニズムに基づく流路構造の最適化、伝熱劣化抑制効果のある表面処理を施した伝熱管を搭載した改良型熱交換器の試作	混合冷媒による伝熱性能劣化の対策として、伝熱管内面への表面処理による沸騰促進が有効と考えられる。また伝熱管内面への処理と熱交換器への搭載について技術確立の必要がある。

実施概要と目標（中間・最終）と根拠

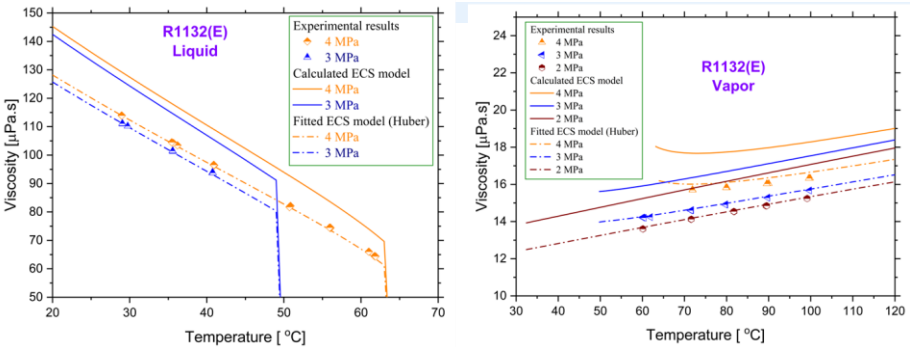
実施項目	実施内容	事業者	中間目標※	最終目標	根拠	
機器Gr	混合冷媒に対応する要素技術開発	—	(前頁に記載)	(前頁に記載)	(前頁に記載)	
	機B-1	熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発	(国) 神戸大学	水力等価直径が1mm程度の円形及び非円形管を対象として、冷媒気液二相流の気液界面構造を評価可能なプラットフォームを構築する。これを用いて低GWP冷媒の熱流動現象を明らかにするとともに熱交換器に適用可能な混合方法を開発する。	細径流路内気液二相流の攪拌手法は冷媒の流動条件、流路形状（円形／非円形）、運用条件（質量速度、蒸気乾き度）に依存すると考えられる。低GWP混合冷媒に適用可能な攪拌手法を積極的に応用した熱交換器を開発する。	非円形細管内気液二相流の液膜構造を明らかにすることが伝熱性能改善の近道となる。 安定した定常流では非共沸冷媒による性能低下は明らかであり、非円形細管に適用できる振動流を引き起こすような伝熱促進法が必要である。
	機C-1	冷凍機油の冷媒溶解挙動と評価及び冷媒圧縮特性解明	(国) 静岡大学	非共沸混合冷媒に対する冷凍機油の溶解特性、物性値、油膜流動特性を明らかにするとともに、冷媒組成を考慮した圧縮特性を明らかにする。低GWP冷媒に対して使用可能な冷凍機油の評価を行う。	新たな低GWP冷媒に対して適用可能な冷凍機油の特性を明らかにし、使用可能な冷凍機油を提案する。また、非共沸混合冷媒用圧縮機の設計指針を示す。低GWP混合冷媒用圧縮機の性能を確認する。	低GWP混合冷媒用圧縮機の性能と信頼性を確保するためには、低GWP混合冷媒に適した冷凍機油の開発・評価、および非共沸混合冷媒の圧縮特性の把握が重要となる。
	機C-2	圧縮機の機械効率向上のための摩擦・摩耗・潤滑特性解明	(学) 大阪電気通信大学	2種の冷凍機油および3種の材料を用い、ベーン・固定溝間およびベーン・ローリングピストン間の摩擦特性を明らかにする。	機械損失に大きく関わる圧縮機構部での摩擦・摩耗・潤滑特性を詳しく調べ、高性能圧縮機の設計指針を明らかにする。 さらに、圧縮機本体の質量を約10%軽量化した際の効率を明らかにする。	圧縮機本体に複合材を使用し、軽量化すること検討している。そのため、複合材料を使用した場合の圧縮機構内摺動部の摩擦特性を把握しておく必要がある。軽量化が効率に及ぼす影響についても検討する必要がある。
	機C-3	圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価	アドバンスコンポジット(株)	アルミ基複合材料の強化材違いを用いた新たな複合材料の設計・試作を行う	圧縮機本体の質量10%の軽量化を図る	鉄系比重：7.2～7.6g/cm ³ 複合材料比重：2.7～3.3g/cm ³ 比重差で約4g/cm ³

研究開発スケジュール



成果と意義：〔機A-1〕～低GWP混合冷媒の伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発～（国立大学法人佐賀大学）

- 混合冷媒対応熱交換器の開発
- 低GWP混合冷媒を用いた熱交換器の特性に関する実験（準備中）
- 扁平多孔管内面にアルマイト処理を施した熱交換器の開発を検討
- 低GWP混合冷媒の温度グライドに対応する熱交換器の冷媒及び空気側流路を検討
- 次世代冷媒の粘度及び熱伝導率の測定
- R1132(E) の粘度及び熱伝導率の測定を完了し、予測モデルを作成
- R454系混合冷媒の測定と混合冷媒の予測モデルを作成（予測モデルは作成途中）
- 伝熱データベースの開発
- 冷媒の沸騰及び凝縮に関する 7万点以上の伝熱データを蓄積
- 相関式の選定及び評価、Web上での相関式評価機能の追加（Web機能は作成途中）
- 熱伝達率の AI予測に関する機械学習などの確率



インターネット上で利用できる伝熱データベース RECDB (<https://www.recdb.org/ht/>) の開発

現在までに7万点以上のデータが蓄積されている

Webブラウザ上でのデータ検索や表示

ダウンロードしたデータを用いた解析

データ収集・蓄積

Web上でのデータ検索・特性評価

ダウンロードデータの解析 ⇒ 相関式の作成

ダウンロードデータの解析 ⇒ AI予測 (検討中)

Web上でのAI予測 (検討中)

2024年11月20日時点のデータ収集状況:

データ点数: 62012, 文献調査: 441, 物質: 57

- ## 成果
- 低GWP混合冷媒の熱交換器特性（取得見込）
 - R1132(E)、R454系混合冷媒の輸送性質測定
 - 7万点の伝熱データ、相関式評価、AI予測モデル開発

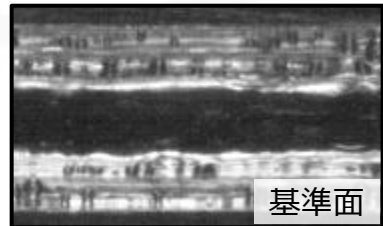
- ## 意義（副次的成果や波及効果）
- 低GWP混合冷媒の温度グライドに対応した熱交換器の開発
 - 予測モデルを確立することで熱交換器の設計に貢献
 - Web上で実験値の検索、相関式評価、AI予測が可能

成果と意義：【機A-2】～低GWP混合冷媒の伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発～（国立大学法人 東京海洋大学）

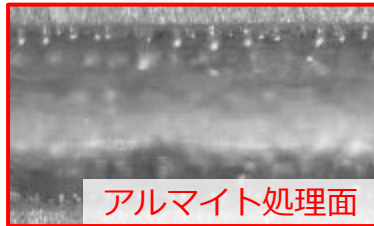
低GWP冷媒に対応する熱交換器の開発のために、混合冷媒の沸騰・凝縮伝熱性能の評価と伝熱劣化を抑制する要素技術の開発を目指す。

【成果及び意義（副次的成果や波及効果）】

- 混合冷媒の沸騰・凝縮伝熱特性および流動様相・液膜構造の可視化
- 入手可能な現行冷媒を用いた熱伝達特性の評価（R454C）
- 伝熱面への表面処理、新規流路形状による伝熱劣化の抑制効果の検証

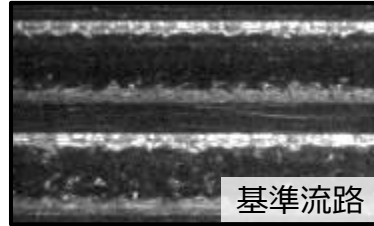


基準面

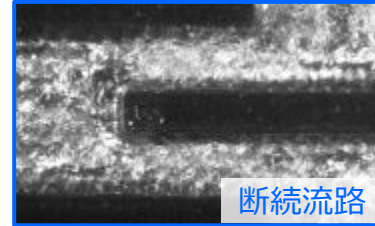


アルマイト処理面

表面処理による核沸騰熱伝達の促進効果を確認

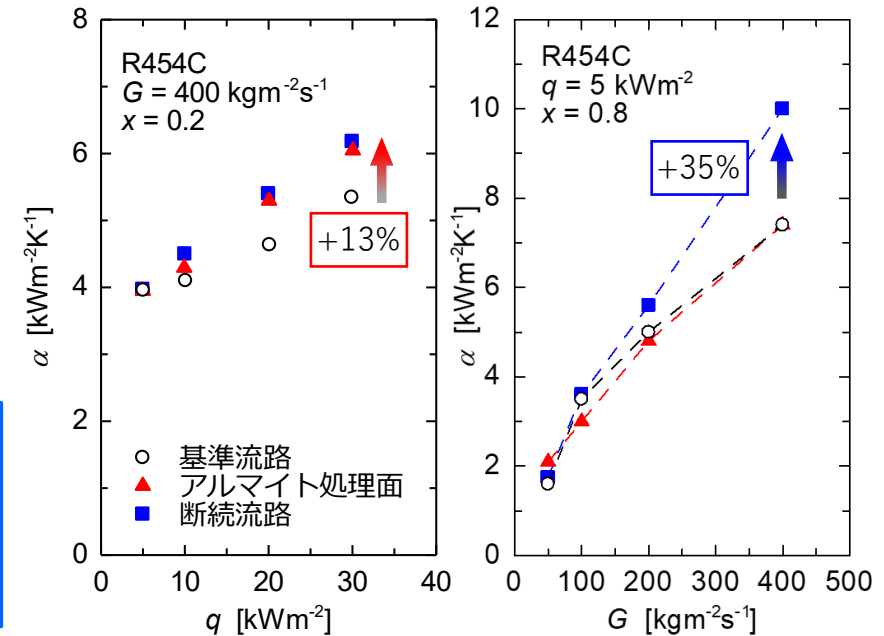


基準流路



断続流路

断続流路による流れの攪拌効果を確認



伝熱実験に基づく伝熱促進効果の検証

成果

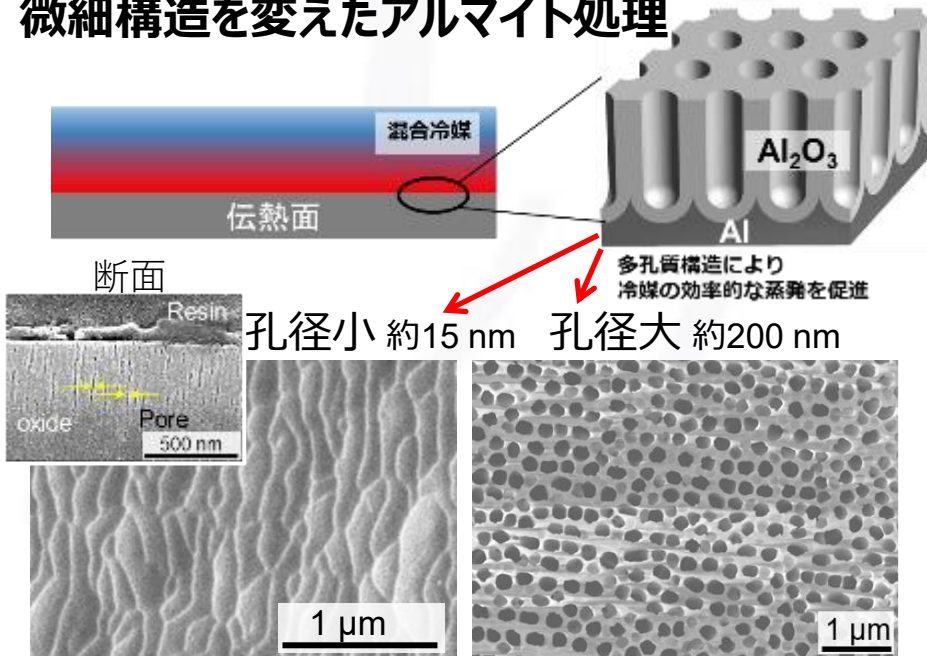
- 蒸発流および液膜構造の詳細な高速度撮影を実施
- 伝熱面への表面処理（アルマイト処理）の効果検証
- 流路形状による伝熱劣化の抑制効果の検証

意義（副次的成果や波及効果）

- 伝熱面への表面処理、新規流路形状による伝熱劣化の抑制効果について検証し、効果の期待できる熱流束、流量条件を確認

成果と意義：「機A-3」～アルミニウムの表面構造制御による混合冷媒の蒸発・凝縮性能の向上と伝熱管適用に関する研究開発～（株式会社UACJ）

微細構造を変えたアルマイト処理



微細構造を変えた伝熱面で評価。傾向を確認中。

成果

- R454C中でアルマイト面での沸騰様相の変化（気泡の微細化）を確認
- 押出管内面へ処理について、ビーカーレベルで課題を抽出

多穴管内面処理の予備実験

- ・ 多穴管内面へのアルマイト処理の予備検討を、ビーカースケールにて実施。
- ・ 多穴管外面側と内面側で酸化皮膜の厚さが異なり、内面側は皮膜が薄くなる傾向。
→ 付き回り性を考慮した製造法の検討が必要。

今後の見込み（～'25年）

- ① 最適な表面構造の解明（平板TP）
 - ・ 微細構造をさらに大きく変えた表面
 - ・ より実態に近い押出材表面への処理
- ② 伝熱管内面への実装方法の検討
 - ・ 長尺材へのラボ処理トライ
 - ・ 穴形状を変えた伝熱管の試作とラボ処理
→ 工業的な実現可能性の見極め

意義（副次的成果や波及効果）

- 表面処理に気泡生成形態の変化を直接確認（協業効果）

成果と意義：〔機B-1〕～低GWP混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発～（国立大学法人 神戸大学）

熱交換器軽量化のためには、流路細径化による伝熱面積密度増大は必要不可欠

流路細径化で気液二相流の流動特性が変化

⇒ 環状流の液膜構造が蒸発熱伝達特性に強い影響を及ぼす

低GWP化と機器性能向上（省エネ）のためには非共沸混合冷媒が不可避

環状流の蒸発熱伝達率が劣化，液膜が厚いほど伝熱性能は低下

⇒ 液膜内での核沸騰促進が伝熱性能改善のカギ

圧力損失低減のため冷媒流路の並列化は不可避

濃度境界層の攪拌のため，積極的に振動流を起こしたい

ボイド率，圧力損失特性



沸騰開始過熱度の低減

振動流の積極利用

成果

- 非円形細管内気液二相流動を明らかにする実験プラットフォームを構築した
 - ⇒ 非円形流路のボイド率特性を明らかにした
- 沸騰開始過熱度を定量評価する実験装置を構築した
 - ⇒ 表面処理で過熱度を低減できることを示した
- 水平並列流路での振動流発生条件を明らかにした
 - ⇒ 入口湿り蒸気の場合，振動流が発生しなかった

意義（副次的成果や波及効果）

- 液膜構造を知ることによって伝熱劣化の要因，解決法が明らかとなる
- ボイド率の情報によって熱交換器内の冷媒量を推定できる
- 非円形細管内冷媒蒸発流について，伝熱促進の方針が得られる
- 非円形細管の冷媒流路で構成されるコンパクト熱交換器の実現に向けて，非共沸混合冷媒を用いた場合の設計指針が得られる

成果と意義：【機C-1】～圧縮機における冷凍機油の冷媒溶解挙動と適合性評価及び低GWP混合冷媒圧縮特性の解明～（国立大学法人 静岡大学）

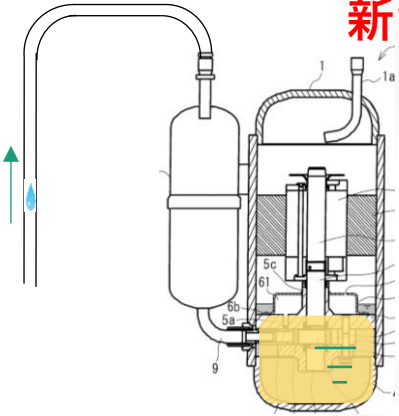
新たな冷媒用の圧縮機がなければ冷凍空調システムは実現しない！

圧縮機の性能と信頼性を確保するためには、冷媒に適合する冷凍機油の選定が最も重要

- ・冷媒と冷凍機油との溶解性は適当か？
- ・冷凍機油／冷媒混合物の安定性、材料適合性は大丈夫か？
- ・非共沸混合冷媒は、どのような成分比で冷凍機油に溶解するのか？
- ・吸い込み配管における油戻りに問題はないか？油戻りを予測したい。
- ・非共沸混合冷媒の成分比が変わると、圧縮機の性能はどうなるか？

冷媒油の適合性や諸特性を明らかにする

**新たな冷媒用
圧縮機の実現**



成果

- 非共沸混合冷媒と冷凍機油混合物の溶解特性を測定した。二相分離状態を含む溶解モデルを構築予定
- 冷凍機油に対する非共沸混合冷媒の溶解成分の変化を明らかにした。
- 非共沸混合冷媒用冷凍機油の安定性を確認した。
- 圧縮機吸い込み配管における油膜計測技術を開発した。今後油膜状態を測定し、油戻りを定式化予定。
- 圧縮特性計算モデルを構築した。今後は混合冷媒の成分変化を考慮して圧縮特性を検討することで、非共沸混合冷媒に対する設計指針を得る予定。

意義（副次的成果や波及効果）

- 非共沸混合冷媒に対する冷凍機油の適合性や安定性を示すことにより、企業における圧縮機設計（冷凍機油選定）が可能となる。
- 非共沸混合冷媒を用いた場合の、冷媒の冷凍機油への溶解やアキュムレータにおける気液分離による冷媒組成変化が圧縮機性能に及ぼす影響を明らかにすることにより、非共沸混合冷媒用圧縮機の設計指針が得られる。
- 圧縮機吸い込み配管での油膜の流動特性を明らかにすることにより、圧縮機の信頼性（油戻り）に対する設計指針が得られる。

成果と意義：【機C-2】～圧縮機の機械効率向上のための低GWP混合冷媒雰囲気中における摩擦・摩耗・潤滑特性の解明～（学校法人 大阪電気通信大学）



目的

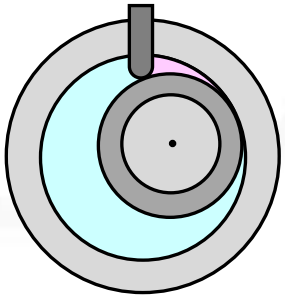
圧縮機の寸法を大型化せず大容量化するために軽量化を検討

<軽量化>

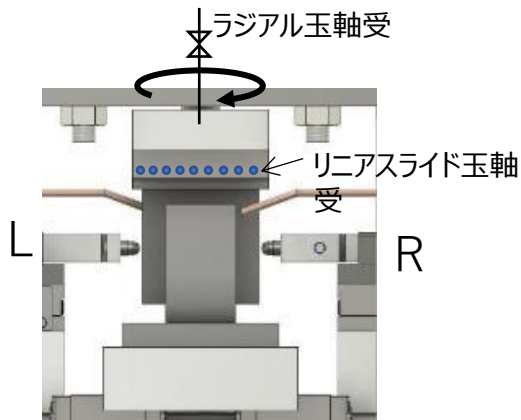
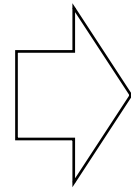
- ・圧縮機の軽量化のためには、複合材料の適用が有効と考えられる。
- ・そのために、複合材料の摩擦特性を評価する必要がある。

<高効率化>

- ・摩擦損失を低減し、機械効率を上げたい。
- ・そのためには、圧縮機全体ではなく、各摺動部の摩擦をそれぞれ正確に評価する必要がある。



実施内容



ベーン・固定溝間の摩擦の計測

- ①ベーンと固定溝間
- ②ベーン先端とローリングピストン間の摩擦を評価するための実験装置を作成，計測方法を確立した。

摺動 2 部品がともに鋳鉄，ともに複合材料，鋳鉄と複合材料の組み合わせの場合について摩擦特性を明らかにした。

成果

- ベーン・固定溝間の摩擦の有効な評価方法を確立した。
- ベーン先端・ローリングピストン間の摩擦の有効な評価方法を確立する予定。
- 機C-3にて開発の複合材を圧縮機として使用した際の摺動部摩擦を把握できる予定。

意義（副次的成果や波及効果）

- 摺動部ごとの摩擦損失が明らかになる。それによって損失の割合が明らかになるので，圧縮機の効率を改善するための基本指針を示すことができる。

成果と意義：【機C-3】～圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価～（アドバンスコンポジット株式会社）

これまで

- ・強度を上げるためには、強化材の体積率をあげる方法が最適とされていた。

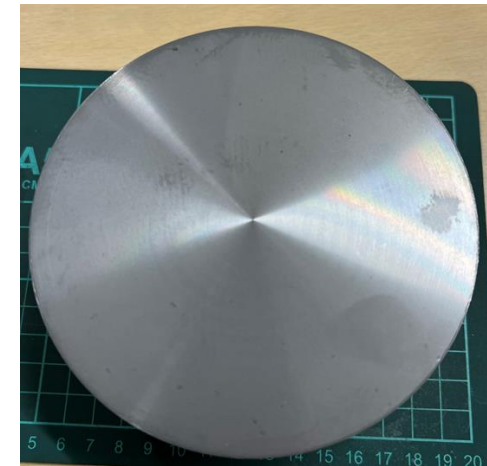
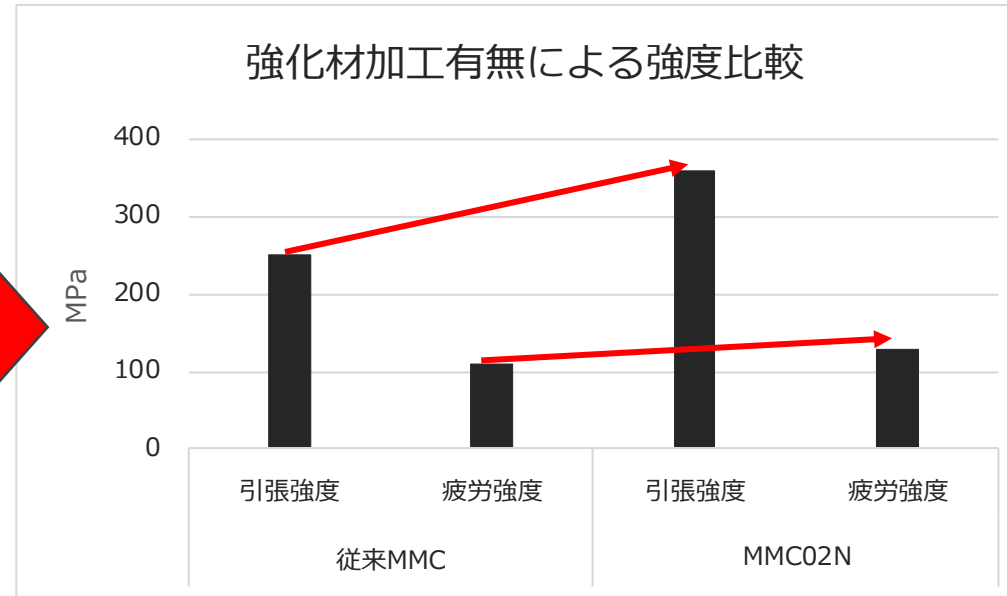
その結果・・・

- ・複合化しにくい(含浸不良)
- ・加工性が悪くなる
- ・コストが僅かに高くなる

開発品コンセプト

- ・体積率はそのままVf40%
- ・粒子形状/粒子径を調整する
- ・加工性も維持する

開発結果



MMC02N写真

成果

- 引張強度45%向上
- 疲労強度18%向上
- 比重2.78g/cm³
- 熱膨張係数12～13ppm/k
- 上記機械的物性値を得られる成型方法を高圧鑄造技術で確立した。

意義（副次的成果や波及効果）

- 従来品程度の強度で良い場合は、体積率を減らすことにより同等の強度を得ることが出来る。つまり、コストと直結する。
- 粒子径/粒子形状を揃えることにより、材料の信頼性も向上すると考えられる。

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		
機器Gr	混合冷媒に対応する要素技術開発	—	・混合冷媒に対応する伝熱面構造及びその作製方法の試行 ・実機への適用方法を検討 ・設計に利用できるデータベースの確立 ・対象冷媒に対する冷凍機油の溶解特性や流動特性、材料の摩擦特性の解明 ・新たな複合材料の試作	・特殊構造を有する伝熱面を試作し、実験的に混合冷媒伝熱特性を実験的に検討 ・7万点の伝熱データを蓄積 ・冷凍機油の溶解特性や流動特性、摩擦特性を実験的に検討し、一部は学会で発表 ・試作した複合材料の特性を測定	○:2026年3月に全ての項目で達成見込	・各研研究機関で当初の目標を達成できる成果が得られている。 ・熱交換器実験が若干遅れているが、自動制御機能を追加することで加速できる。		
	機A-1	伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発	(国) 佐賀大学	1)混合冷媒熱交換器の評価 2)輸送性質の測定と予測モデル 3)データ蓄積とAI予測基本機能	1)混合冷媒1種類の性能評価 2)候補冷媒2種類の予測モデル 3)3万点のデータ蓄積とAI予測	○:2026年3月達成見込 ◎:2026年3月達成見込 ◎:2026年3月達成見込	1)自動制御を追加し加速 2)順調に開発が進行中 3)予定以上のデータを蓄積	
		機A-2	伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発	(国) 東京海洋大学	・候補冷媒について伝熱劣化抑制効果の評価 ・R1234yfと同程度の伝熱劣化抑制技術の検討	・候補冷媒に対する伝熱劣化抑制効果の評価を実施 ・R1234yfと同程度の伝熱劣化抑制の指針の獲得	○ 2026年3月に達成見込み	評価装置は構築済みであり、概ね予定とおり伝熱劣化抑制効果の評価を進めている。
		機A-2	アルミニウムの表面構造制御	(株) UACJ	混合冷媒に対する伝熱性能劣化を低減する表面構造作製法の確立と実機適用可能性検討	・最適な表面構造の解明 ・伝熱管内面への実装方法の検討	○ 2026年2月に達成見込み	現時点で概ね予定通りのため

目標達成状況（中間年度見通し）

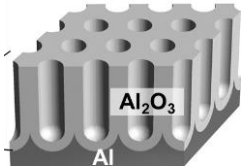
◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 一部未達、× 未達

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		
機器Gr	混合冷媒に対応する要素技術開発	—	（前頁に記載）	（前頁に記載）	（前頁に記載）	（前頁に記載）		
	機B-1	熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発	（国） 神戸大学	微細流路内冷媒気液二相流の気液界面構造を評価するプラットフォームを構築する。低GWP冷媒の熱流動現象を明らかにするとともに熱交換器に適用可能な混合方法を開発する。	細管内気液二相流のボイド率，沸騰開始過熱度の低減のデータは確認された。伝熱面改質，リブ形状操作による伝熱改善法を開発する。	○ 2026年3月に達成見込み	実験プラットフォームは構築済みであり，表面改質面の沸騰開始過熱度の評価も予定通り進められている。並列管振動流について振動流と熱伝達の相関を得ている。	
	機C-1	冷凍機油の冷媒溶解挙動と評価及び冷媒圧縮特性解明	（国） 静岡大学	非共沸混合冷媒に対する冷凍機油の特性を明らかにするとともに、冷媒組成を考慮した圧縮特性を明らかにする。低GWP冷媒に対して使用可能な冷凍機油の評価を行う。	非共沸混合冷媒に対する、冷凍機油の適合性、油膜流動特性、圧縮特性を明らかにする。低GWP冷媒に対して使用可能な冷凍機油の特性を明らかにする。	○ 2026年3月に達成見込み	実験装置、方法はほぼ確立できたため、今後試験が進むと予想しており、達成と評価	
		機C-2	圧縮機の機械効率向上のための摩擦・摩擦・潤滑特性解明	（学）大阪電気通信大学	2種の冷凍機油および3種の材料を用い、ベーン・固定溝間およびベーン・ローリングピストン間の摩擦特性を明らかにする	ベーン・固定溝間およびベーン・ローリングピストン間の摩擦特性を明らかにする。	○ 2026年3月に達成見込み	目標の摩擦特性を明らかにできたため達成と評価
		機C-3	圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価	アドバンスコンポジット（株）	圧縮機部品に適した軽量高剛性金属基複合材料を設計し基礎物性を明らかにする	実施計画書 P23 表2に記載8項目の機械的物性値・他	○ 2026年3月に達成見込み	2種類の複合材料を設計試作し1種類は目標の物性値を概ね達成している。

成果と意義（中間年度見通し）

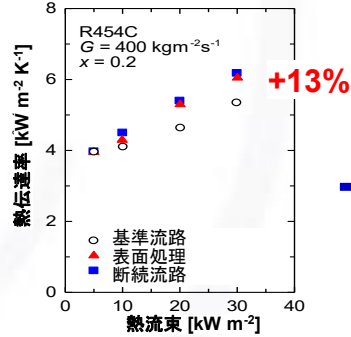
熱交換器

機A-3 素材開発



伝熱面表面処理で
気泡微細化を確認
⇒ 多孔管内面に適用

機A-2 伝熱劣化抑制



表面処理，断続流路で
伝熱促進効果を確認

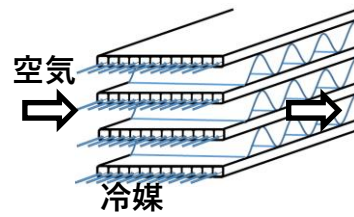
機B-1 熱流動メカニズム

ボイド率計測
1mm 非円形流路では，
通常管より10%低下

伝熱促進と振動流応用

沸騰開始過熱度の低減効果を
プール沸騰で評価した
基準流路で振動流は発生せず

機A-1 熱交換器開発



性能試験用風洞を構築
冷媒の温度グライドを考
慮した流路設計を検討

熱伝達率のAI予測

伝熱データベース
(7万点以上) を利
用した 熱伝達率の
AI予測モデルを構築
した

圧縮機

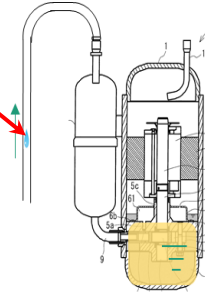
機C-1 冷凍機油の冷媒溶解挙動と 適合性評価

非共沸混合冷媒と冷凍機油の溶解
特性を計測した ⇒ 溶解モデル構築
冷凍機油への非共沸混合冷媒の溶
解成分を明らかにした

油膜計測技術を開発
⇒ 油戻り量を定式化

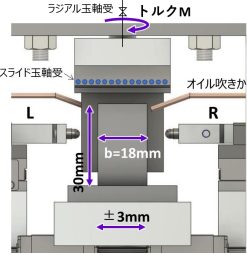
非共沸混合冷媒圧縮 特性の解明

圧縮特性計算モデルを構築



機C-2 機械効率向上

ベーン・固定溝
間の摩擦評価
法を確立した
ベーン先端・ロー
リングピストン間
の摩擦評価法
を確立した



機C-3 金属基複合材料の開発

強化材の体積率をそのまま
引張強度**45%向上**
疲労強度**18%向上**

成果

- 低GWP混合冷媒の伝熱劣化特性や流動メカニズムを明らかにして伝熱促進技術を開発する。
- 伝熱データベースを用いて相関式評価、AI予測を行う。
- 低GWP混合冷媒に適合する冷凍機油を開発するとともに、圧縮機の軽量化を行う。また設計指針を確立する。

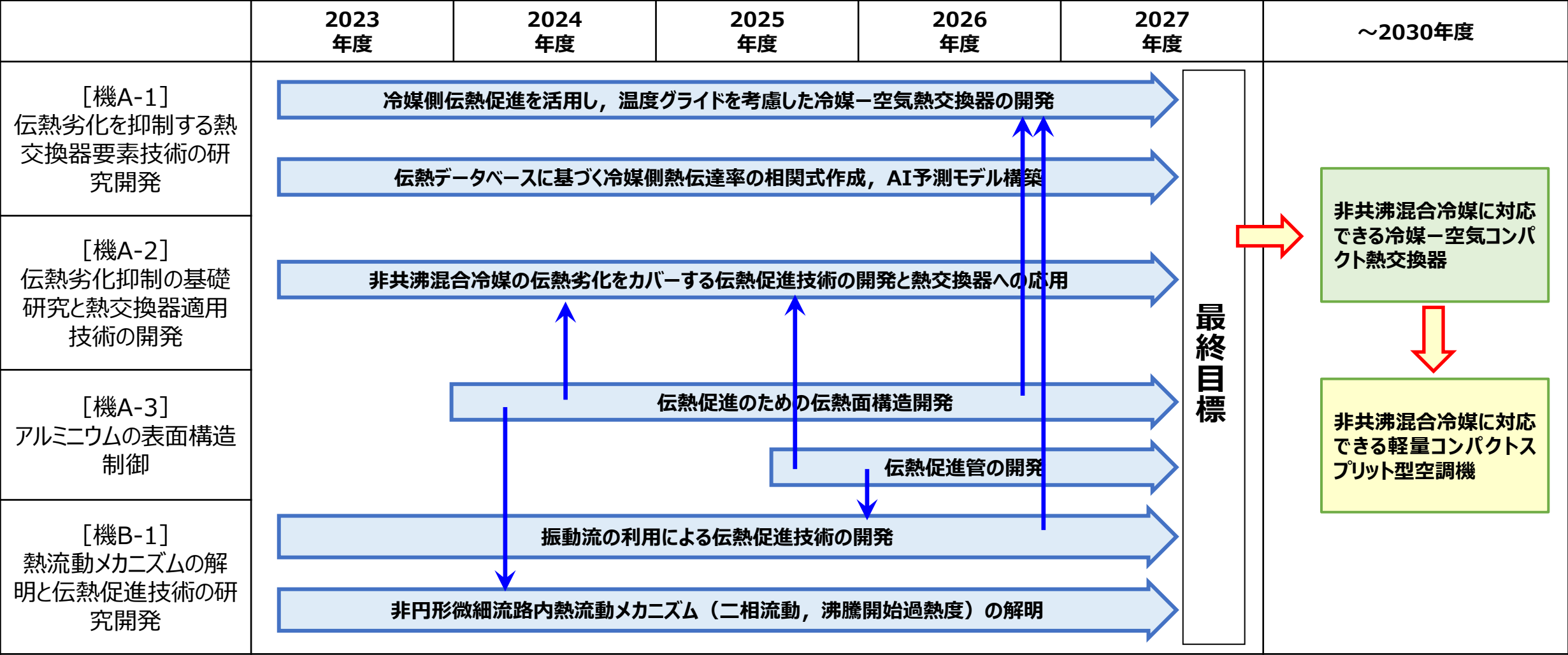
意義（副次的成果や波及効果）

- 開発した伝熱促進技術を実機の熱交換器に応用し、加えて温度グライドに対応することで高性能熱交換器の開発が可能になる。
- AI技術により低GWP混合冷媒の熱伝達率の予測が可能になる。
- 低GWP混合冷媒に対応した圧縮機的设计が可能になるとともに、圧縮機の軽量化を可能とし、最適な冷凍機油を選定できる。

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> **熱交換器**

▲：基本原理確認 ●：基本技術確立

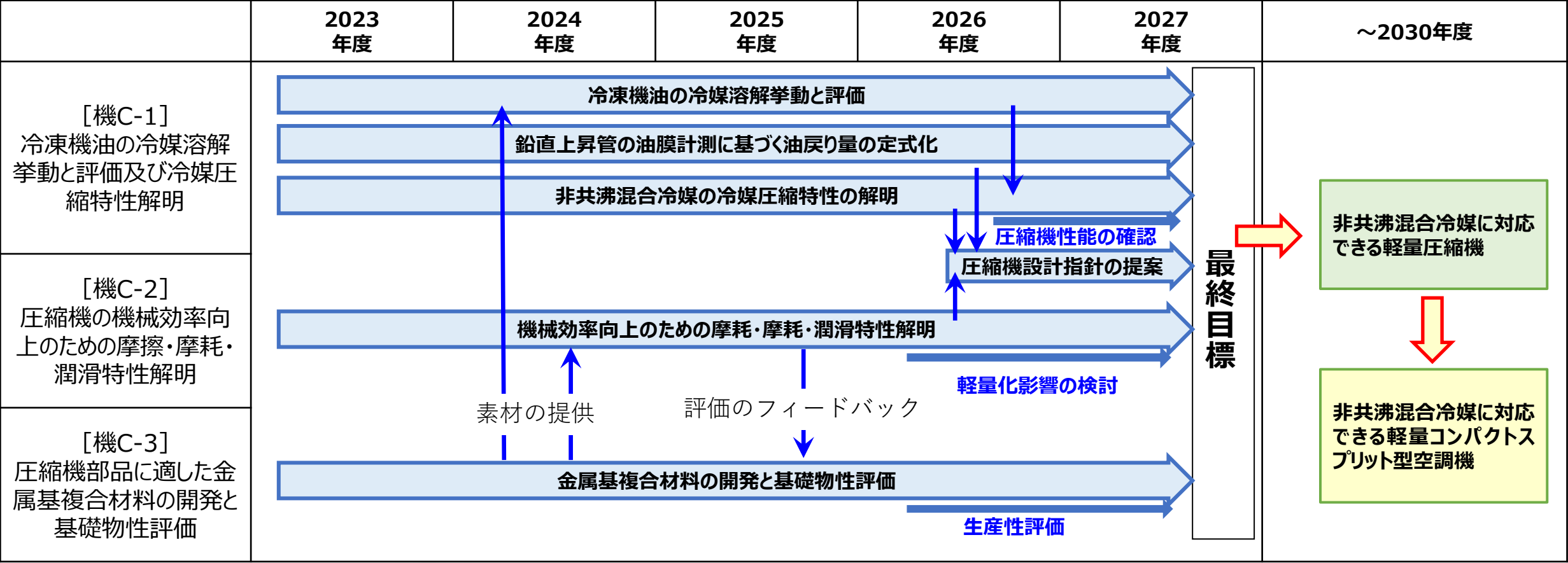


アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

<ロードマップイメージ>

圧縮機

▲：基本原理確認
 ●：基本技術確立



補足) 成果と意義：【機A-1】～低GWP混合冷媒の伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発～（国立大学法人佐賀大学）

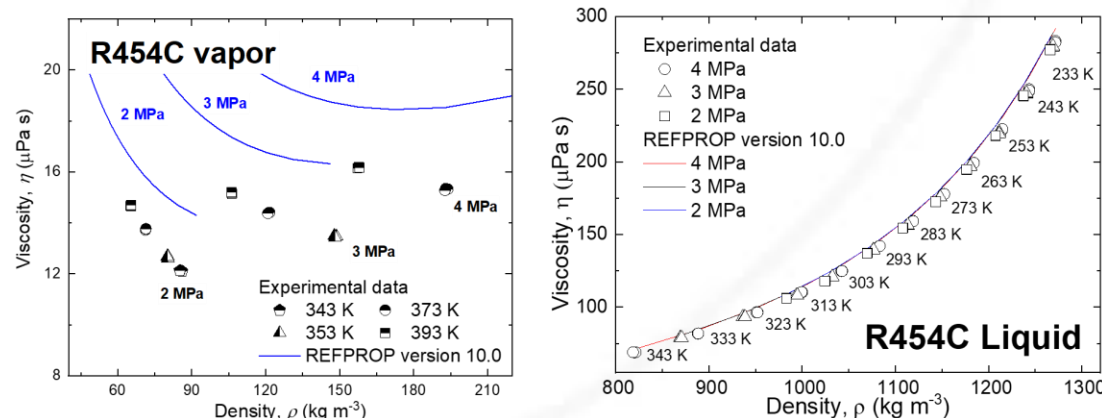
【2024年度の成果と課題】

＜低GWP混合冷媒対応熱交換器の開発＞

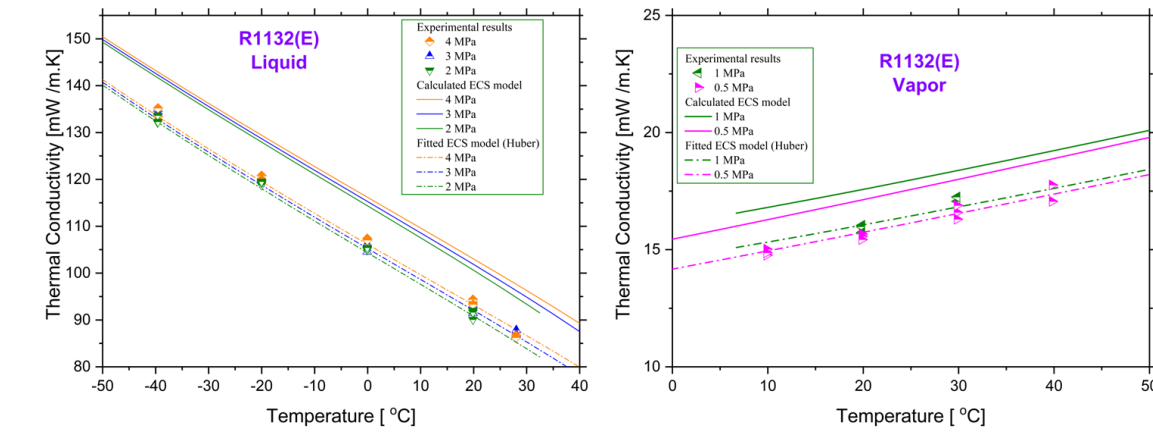
混合冷媒対応熱交換器の性能試験準備を進めている段階であり、
 今後は風洞の自動制御化を行い、実験を加速する。

＜次世代冷媒の粘度及び熱伝導率の測定および予測モデル開発＞

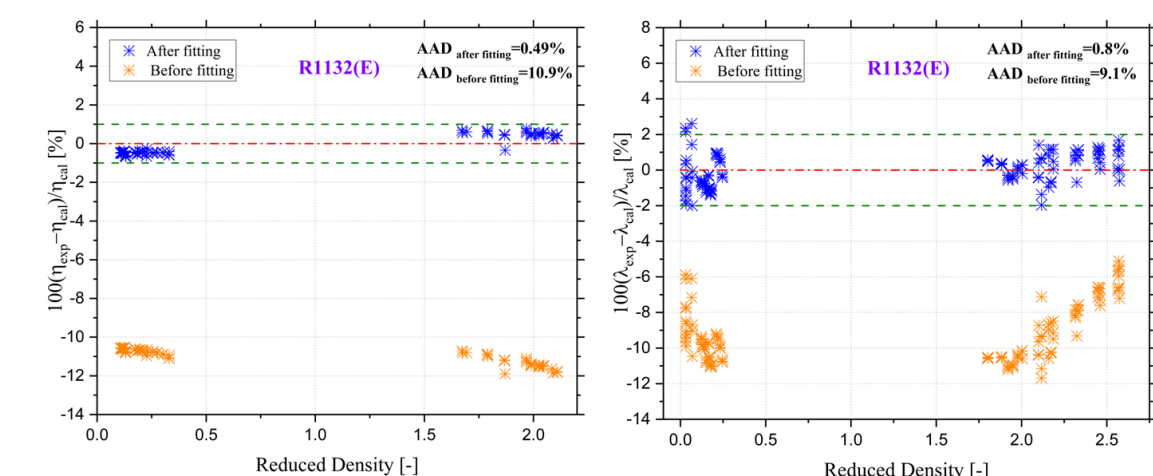
次世代候補冷媒のR1132(E) の粘度及び熱伝導率を測定し、予測モデルを開発した。R454系混合冷媒の実験値とREFPROPの予測値との間に差があるので、原因の調査と混合モデルの開発を計画。



混合冷媒R454Cの液相及び蒸気相の粘度



R1132(E)の液相及び蒸気相の熱伝導率



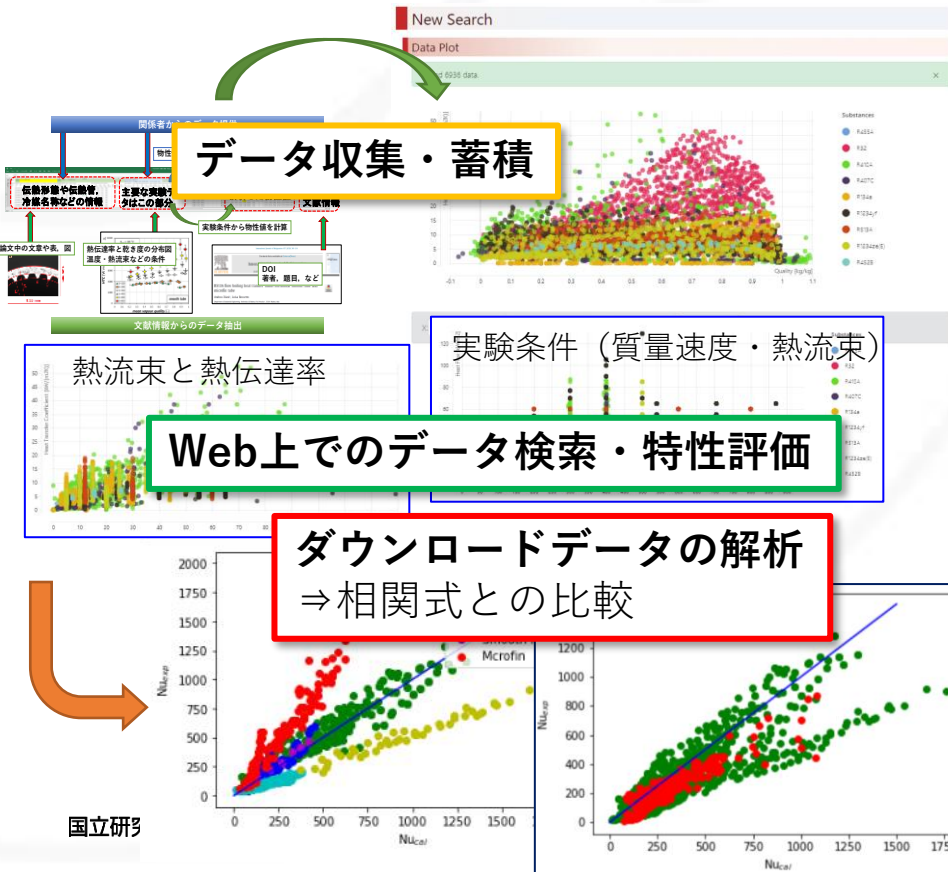
パラメータ調整前後のR1132(E)の粘度及び熱伝導率の予測値と実験値の差

補足) 成果と意義：〔機A-1〕～低GWP混合冷媒の伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発～（国立大学法人 佐賀大学）

〔2024年度の成果と課題〕

＜伝熱データベースの開発＞

現在までに 7万点以上のデータを蓄積
Web機能の追加を検討

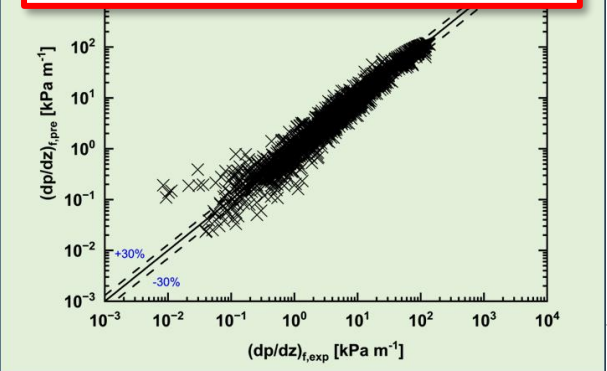


円管内の沸騰／凝縮

純冷媒／組成比既定混合冷媒				混合冷媒(成分物質指定)			
冷媒種類	沸騰	凝縮	断熱	冷媒種類	沸騰	凝縮	断熱
R1224yd(Z)	7	0	0	R1123	117	267	0
R123	0	386	0	R1123	117	267	0
R1234yf	1380	189	165	R123	0	756	0
R1234ze(E)	612	6	600	R1234yf	1170	0	0
R125	72	168	0	R1234ze(E)	0	24	0
R134a	1461	496	634	R134a	60	816	0
R14	0	228	0	R141b	834	0	435
R141b	100	0	50	R152a	0	96	0
R161	160	0	0	R170	0	123	0
R170	0	266	0				
R22	1186	1195	0				
R236ea	0	34	0				
R245fa	559	89	90	R50	0	129	0
R290	143	0	0				
R32	1918	103	93				

2024年11月20日時点のデータ収集状況：
データ点数: **62012**, 文献調査: **441**, 物質: **57**

ダウンロードデータの解析
⇒ 相関式の評価・作成



扁平多孔管

純冷媒／組成比既定混合冷媒			
冷媒種類	沸騰	凝縮	断熱
R12	0	63	0
R1233zd(E)	75	0	0
R1234yf	6	178	0
R1234ze(E)	70	0	0
R1336mzz(Z)	84	0	0
R134a	190	156	0
R22	0	22	0
R245fa	70	0	0

ダウンロードデータの解析
⇒ AI予測 (検討中)

混合冷媒(成分物質指定)			
冷媒種類	沸騰	凝縮	断熱
R1123	0	1005	0

Web上でのAI予測 (検討中)

プレート式

純冷媒／組成比既定混合冷媒			
冷媒種類	沸騰	凝縮	断熱
R1233zd(E)	63	127	0
R1234ze(E)	209	173	0
R124	0	95	0
R134a	279	107	0
R245fa	10	0	0
R410A	52	108	0

補足) 成果と意義：【機A-1】～低GWP混合冷媒の伝熱劣化を抑制する熱交換器要素技術の研究開発～（国立大学法人佐賀大学）

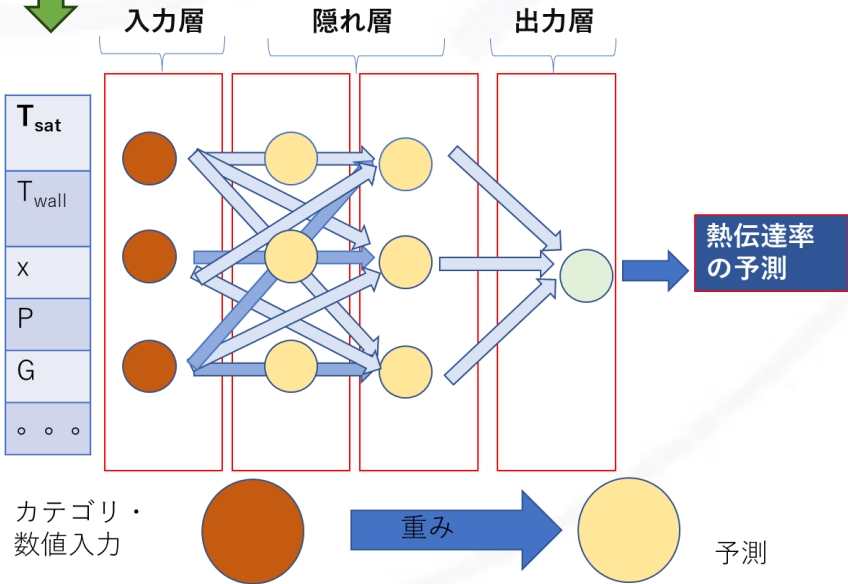
【2024年度の成果と課題】

<伝熱データベースを利用したAI予測の開発>

AI 予測モデル作成

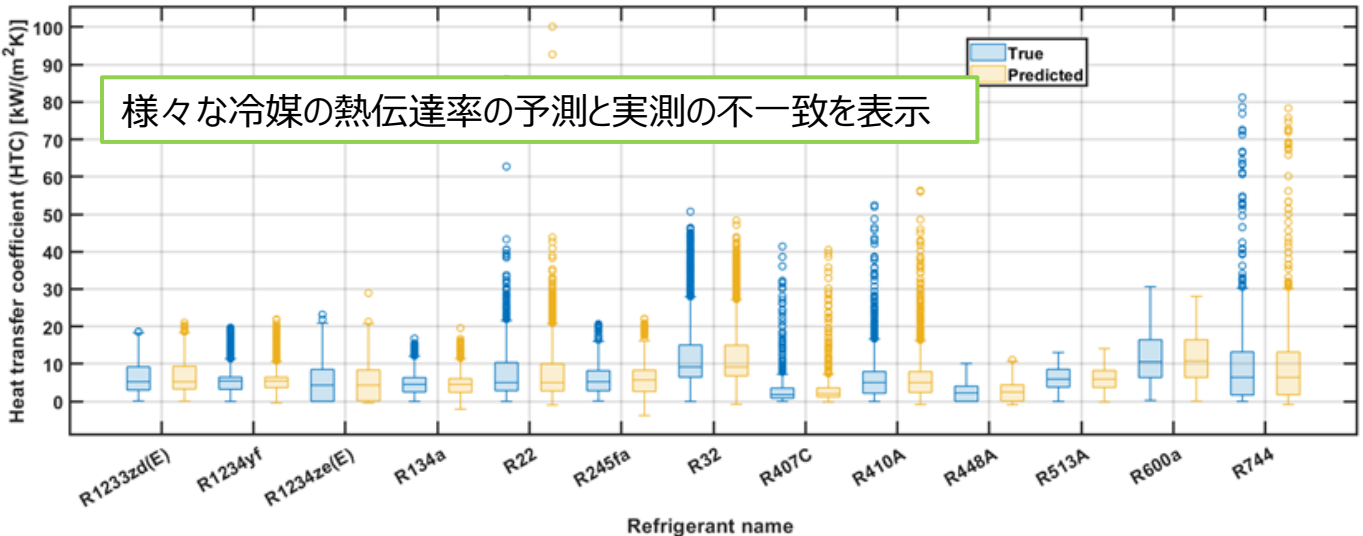
Ts	HTC	Tw	TVb	P	x	G	qr	dP/dz	dP/dzF	ASHRAE	Heat_Trans	Heat_Exc	Tube_type	DOI	Note-1	Note-2	flow_dir
[C]	[kW/(m²K)]	[C]	[C]	[MPa]	[kg/kg]	[kg/(m²s)]	[kW/m²]	[kPa/m]	[kPa/m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
9.45	5.270399	11.25	0	1287.35	0.29	197.721	9.481	1.675	0	R1123/R3: Boiling	Round Tu	Microfin	10.1080/23744731.2019.164209	Horizon			
9.45	5.475149	11.21	0	1286.17	0.319	200.432	9.676	1.715	0	R1123/R3: Boiling	Round Tu	Microfin	10.1080/23744731.2019.164209	Horizon			
9.52	6.259238	11.09	0	1286.01	0.392	197.62	9.808	2.051	0	R1123/R3: Boiling	Round Tu	Microfin	10.1080/23744731.2019.164209	Horizon			

生データファイルからパラメータを選択



AI 予測モデル結果

熱伝達率の予測 wide neural network



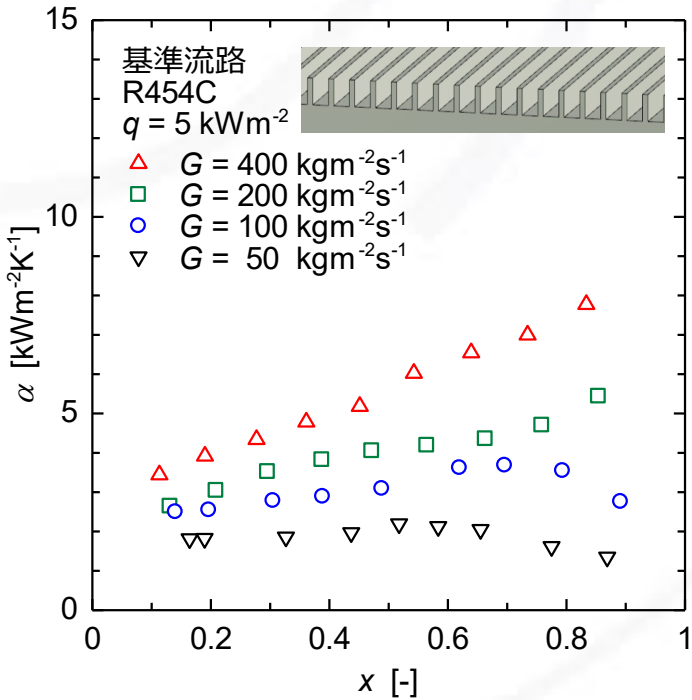
- ✓ モデルは概ね傾向を捉えている。
- ✓ 冷媒による精度のばらつきがある。
- ✓ 予測能力向上のため改良が必要である。
- ✓ データ量とパラメータを調整することで、モデル全体の精度を向上させる。

補足) 成果と意義：【機A-2】～低GWP混合冷媒の伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発～（国立大学法人 東京海洋大学）

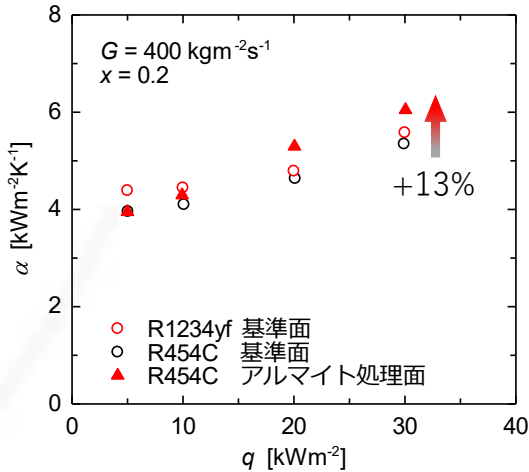
【2024年度の成果と課題】

<伝熱面への表面処理の効果検証>

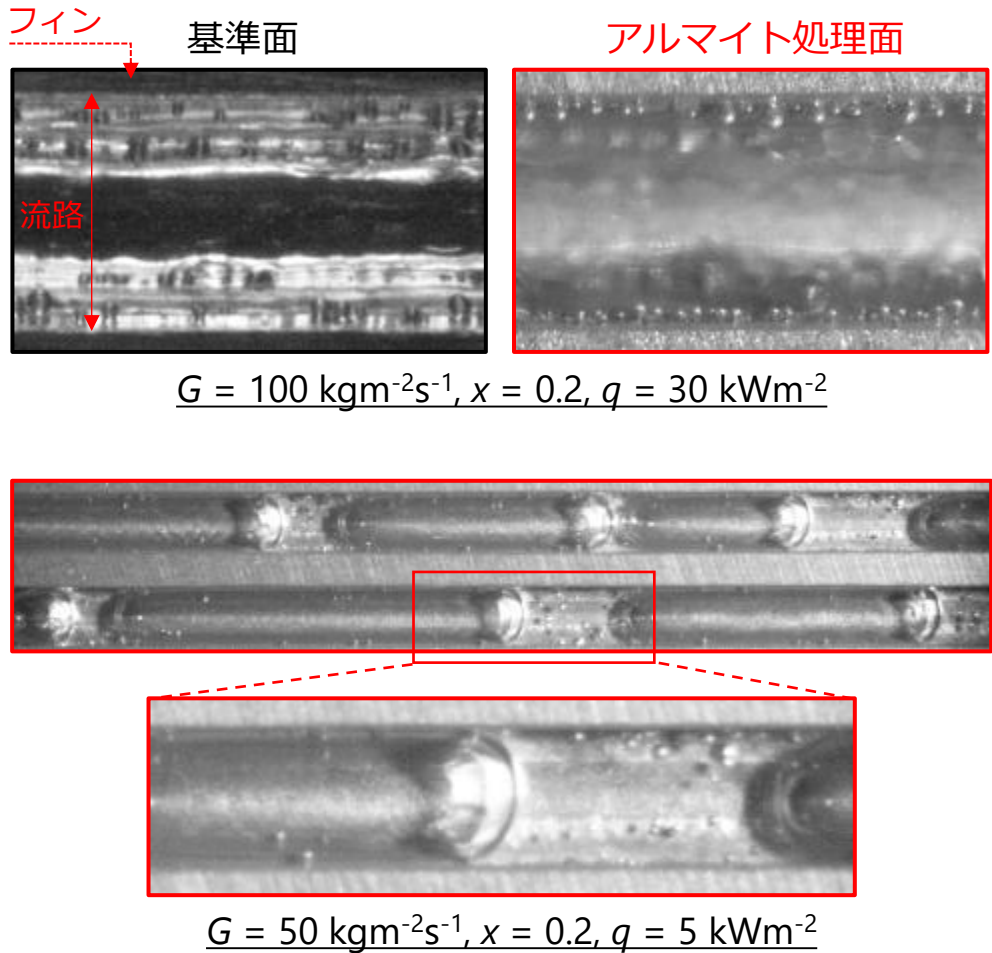
現行の混合冷媒R454Cを用いて、伝熱特性および流動様相への表面処理の効果を実験的に検証・評価した。



R454Cの熱伝達基本特性



高熱流束条件において、
アルマイト処理面の熱伝達率は
+13%（基準面R454C）
+8%（基準面R1234yf）



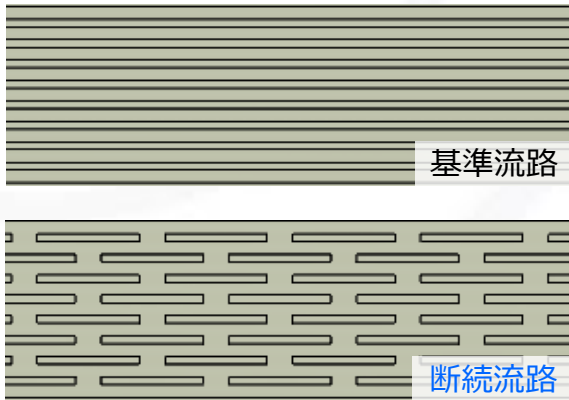
表面処理による核沸騰熱伝達の促進効果を確認

補足) 成果と意義：【機A-2】～低GWP混合冷媒の伝熱劣化抑制の基礎研究と熱交換器適用技術の開発～（国立大学法人 東京海洋大学）

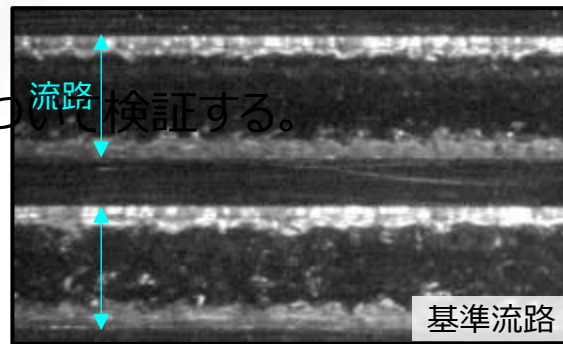
【2024年度の成果と課題】

＜流路形状の効果検証＞

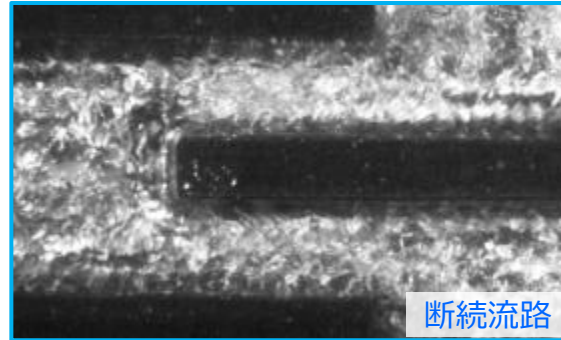
入手可能な現行の冷媒R454Cを用いて、伝熱特性および流動様相に及ぼす流路形状の影響を実験的に評価するとともに、伝熱劣化抑制、伝熱促進効果について検証した。



について検証する。

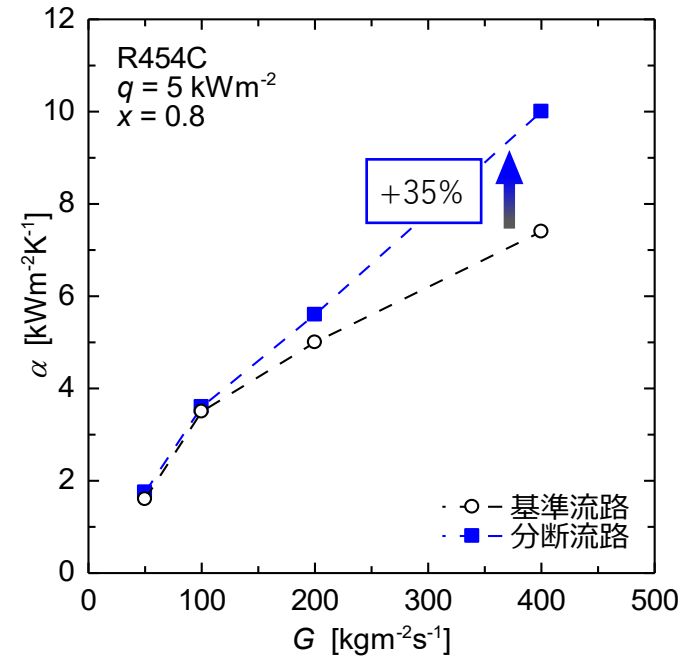


基準流路



断続流路

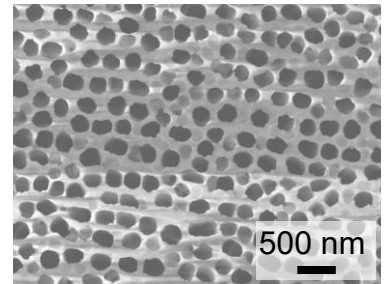
$$G = 400 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}, x = 0.8, q = 5 \text{ kWm}^{-2}$$



断続流路による流れの攪拌

【今後の計画】

- ・ 新たな表面処理面での伝熱促進効果について検証する。
- ・ 次世代候補冷媒1種類について、表面処理および流路形状による伝熱劣化抑制効果について検証する。



補足) 成果と意義：[機B-1] ～低GWP混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発～（国立大学法人 神戸大学）

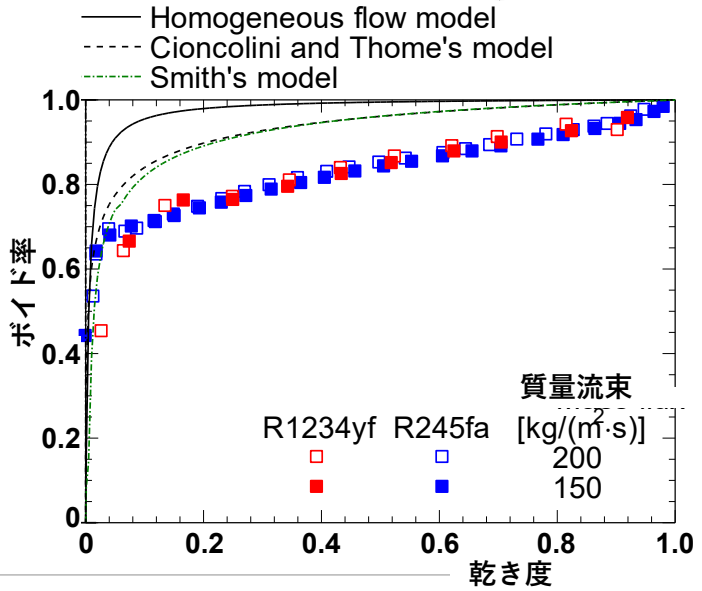
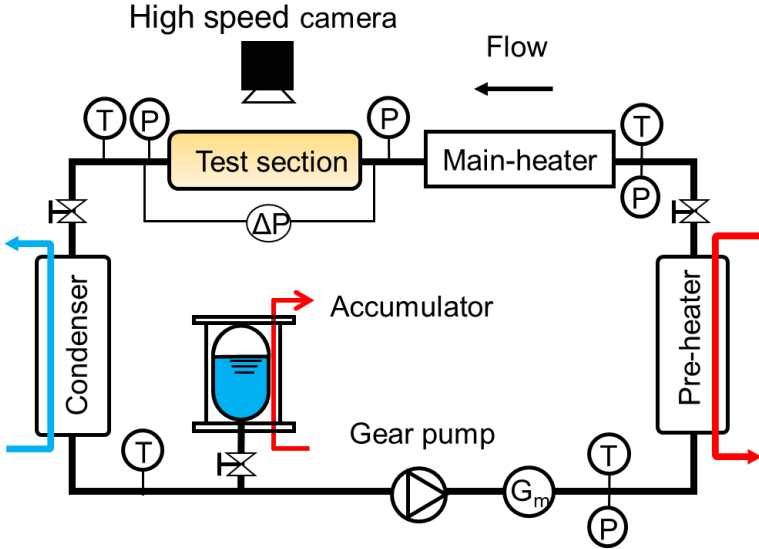
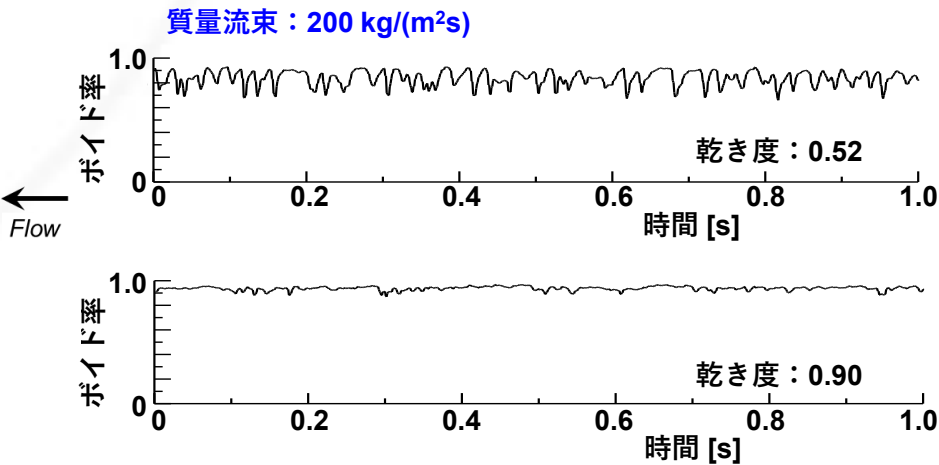
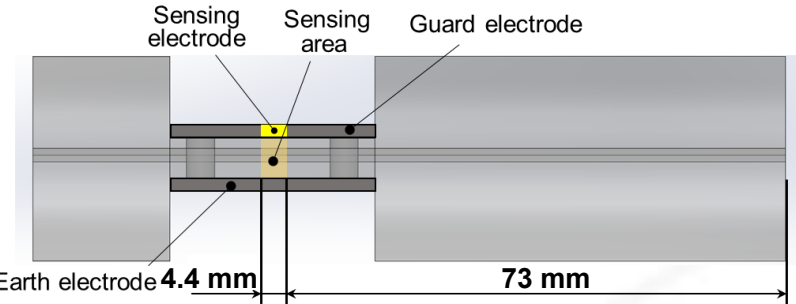
微細非円形流路内気液二相流実験プラットフォームの構築

水力等価直径が1 mm程度の円形及び非円形管の単流路を対象として、気液二相流の気液界面構造を評価可能な微細単流路実験プラットフォームを構築した。

ボイド率計測

気液二相流での気相体積割合であるボイド率を知ることで、環状流の場合には液膜厚さを推定することができる。さらには、断面平均ボイド率の値によって気液二相流での気液各相の断面平均速度を推定できる。この値によって、気液間の速度差に基づく気液界面での熱伝達率や摩擦損失の整理につなげることができる。

高耐圧対応のポリカーボネート樹脂製静電容量センサを製作し、スチレン樹脂棒を液相に見立てた校正と純冷媒二相流でのボイド率計測を行った。低圧冷媒での計測結果とほぼ同じであり、環状流において従来の相関式より約10%低い値であった。



補足) 成果と意義：[機B-1] ～低GWP混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発～（国立大学法人 神戸大学）

プール沸騰実験による沸騰開始過熱度の評価

扁平多穴管内蒸発熱伝達計測において、低乾き度での沸騰遅れによる伝熱劣化が顕著であったことから、プール沸騰実験での沸騰開始過熱度の詳細計測に着手した。

プール沸騰実験装置を構築、純冷媒での実験によって計測結果の妥当性を確認した。

次に、表面改質伝熱面の試験のためアルミチップを銅製伝熱面にはんだ付けする方法を提案、伝熱面設置および計測法を開発した。

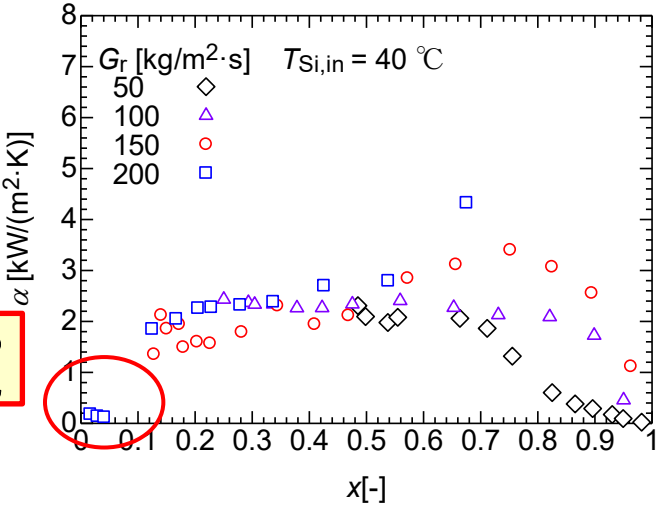
沸騰開始過熱度の計測

沸騰開始は熱流束の時間変化の影響を受けるため、過熱度近傍の熱流束条件で、熱流束の変化量を小さくした計測を実施し、沸騰開始条件を計測した。

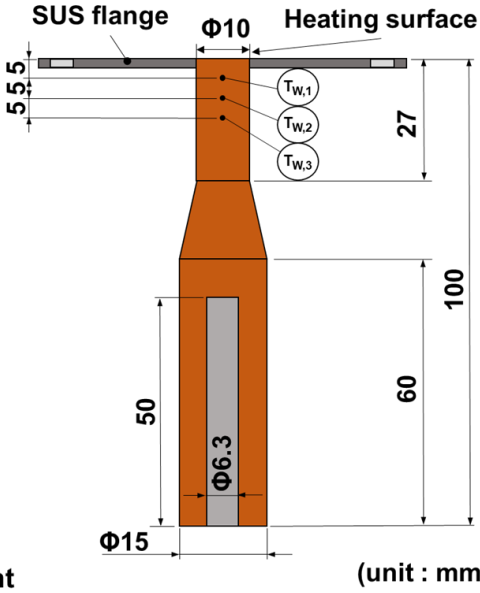
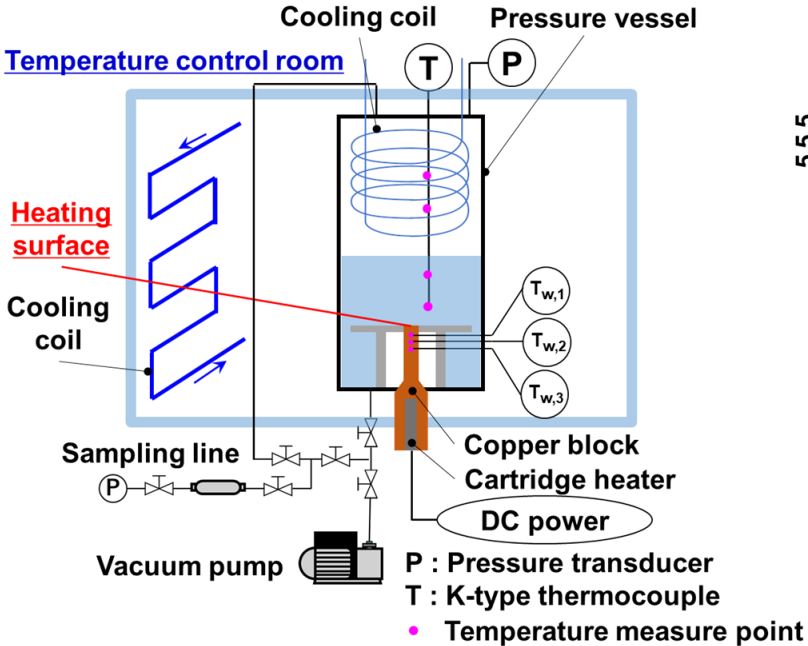
沸騰開始過熱度低減のため、アルマイト処理およびCAST（Carbon-nanotube Added Surface Treatment）処理の表面改質を施した伝熱面で試験を実施する。CAST処理では沸騰開始遅れによる壁面のオーバーシュートは確認されない結果を得た。

沸騰開始過熱度（ $T_{sat}=20^{\circ}\text{C}$ ）

	R1234yf/R32	R1234yf	R134a
q	63.59 kW/m ²	53.99 kW/m ²	38.43 kW/m ²
ΔT_{wall}	19.45 K	18.94 K	13.65 K



沸騰遅れによる
伝熱劣化



補足) 成果と意義：【機B-1】～低GWP混合冷媒の熱流動メカニズムの解明と伝熱促進技術の研究開発～（国立大学法人 神戸大学）

微細並列流路での振動流実験

ポンプ駆動ループによる振動流実験装置を構築した。

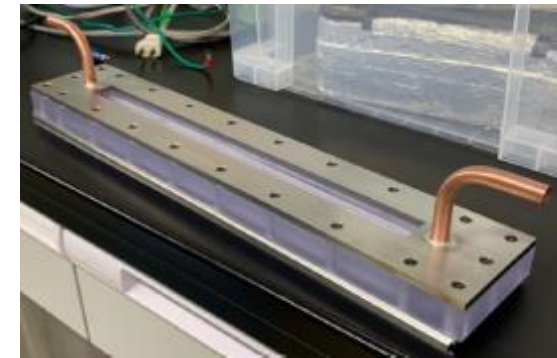
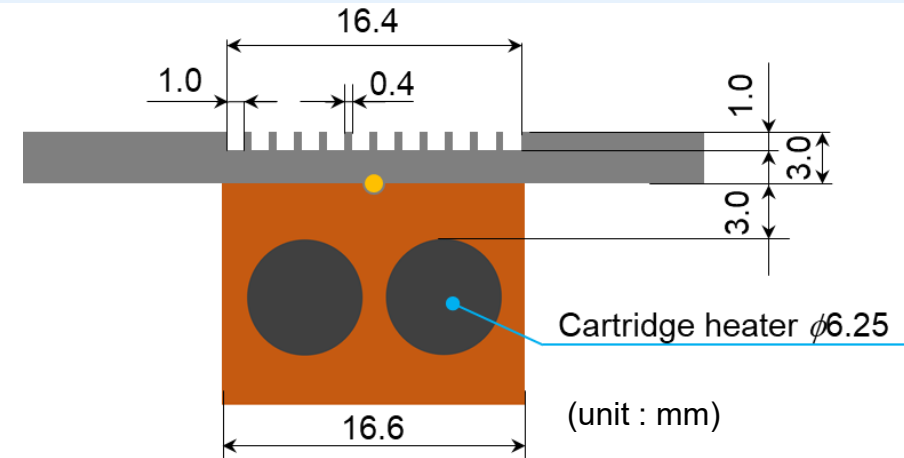
ポンプには、ポンプヘッドに依存せず回転数の自律制御で定流量供給が可能なメカニカルギアポンプを使用した。入口ヘッダーには流量の均一分配のため多孔質板を挿入した。

□ 1.0 mm×10パスの試験部における実験

加熱区間 200 mm（前後に25 mmの非加熱区間）の試験部に対し、純冷媒 R1234yfによる蒸発流実験を行った。

入口单相流の場合は、沸騰開始点の遅れによる振動流が確認されたが、入口湿り蒸気とした場合には振動流は確認されなかった。

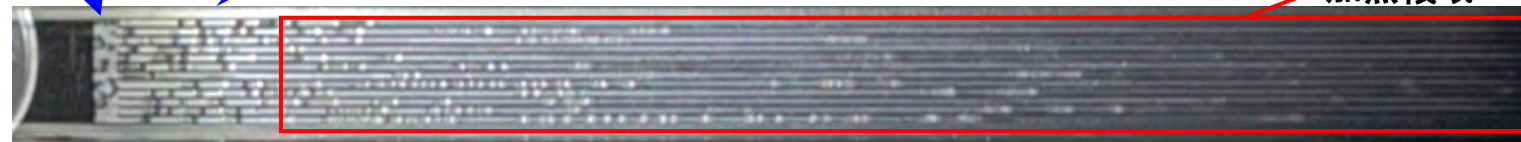
並列流路の流入口に多孔質板を設置する場合、多孔質板端面から並列流路入口までの距離を、0 mm, 2 mm, 4 mmと変化した実験を行ったが、流入口ヘッダの大きさの影響は見られなかった。



振動流生成の試み

- ✓ 核沸騰開始過熱度を低減できる表面処理を冷媒流路に対し不均一に施す。
- ✓ 入口圧力を一定とした流動実験を実施する。

入口乾き度 0.074, 質量流束 $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 熱流束 $20 \text{ kW}/\text{m}^2$



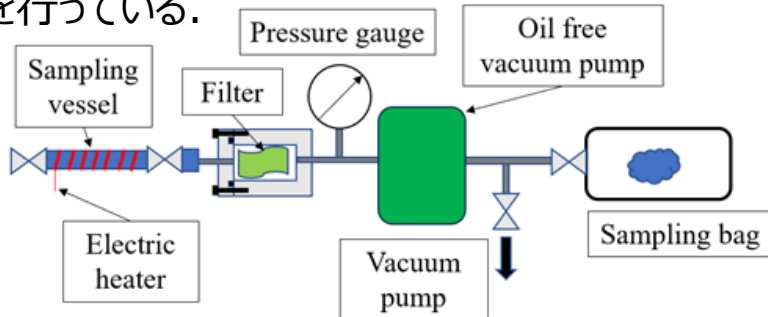
補足) 成果と意義：【機C-1】～圧縮機における冷凍機油の冷媒溶解挙動と適合性評価及び低GWP混合冷媒圧縮特性の解明～（国立大学法人 静岡大学）

POE/R454C混合物の物性測定

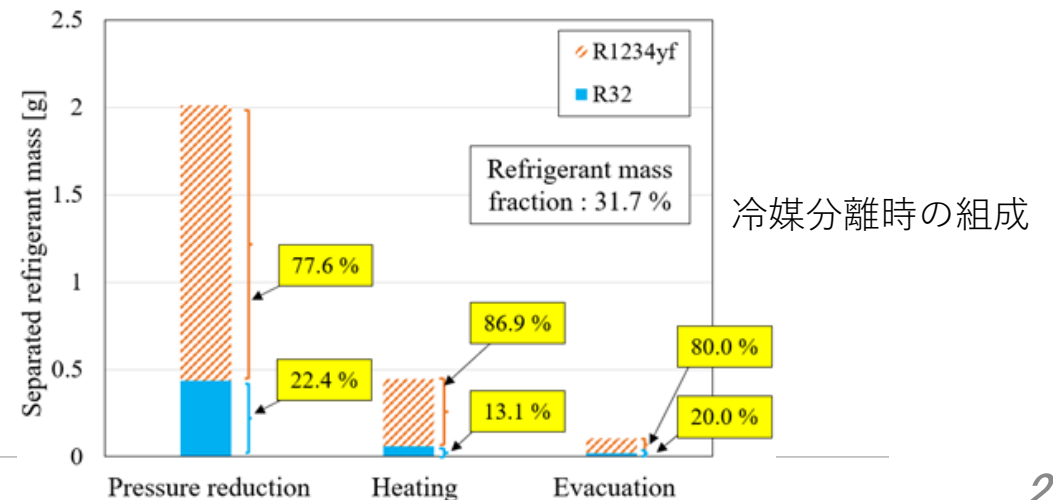
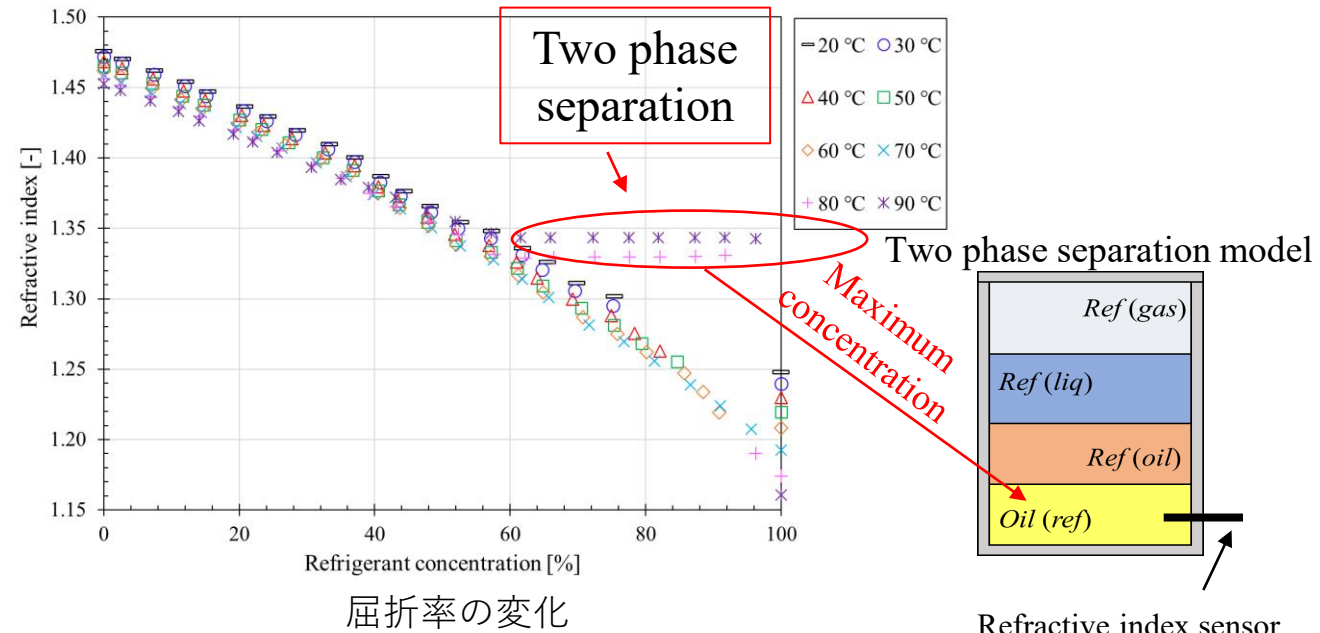
冷媒溶解度、混合物の温度を変化させ、屈折率と比誘電率の測定を行った。溶解状態においては屈折率及び比誘電率は冷媒濃度に対してほぼ直線的な変化が得られた。80℃以上の高温域で二相分離が確認され、二相分離状態を含む冷媒溶解モデルを構築する必要性が示された。現在PVE/R454Cについて測定を行っている。

冷凍機油に溶解している冷媒の組成の測定

冷凍機油/冷媒混合物をサンプリングし、サンプリングした試料から分離した冷媒の成分をガスクロマトグラフィにかけて溶解冷媒組成を測定した。減圧に伴う冷媒分離は、低沸点成分であるR32から分離する。油の種類によってはR1234yfが多く冷凍機油に溶解して気相の組成変化により圧力が変化する場合もあるが、試験で使用したPOEでは試験範囲において、油に溶解している冷媒組成は、溶解初期から飽和溶解状態まで冷媒自体の組成とほぼ同じであった。現在PVE/R454C混合物について測定を行っている。



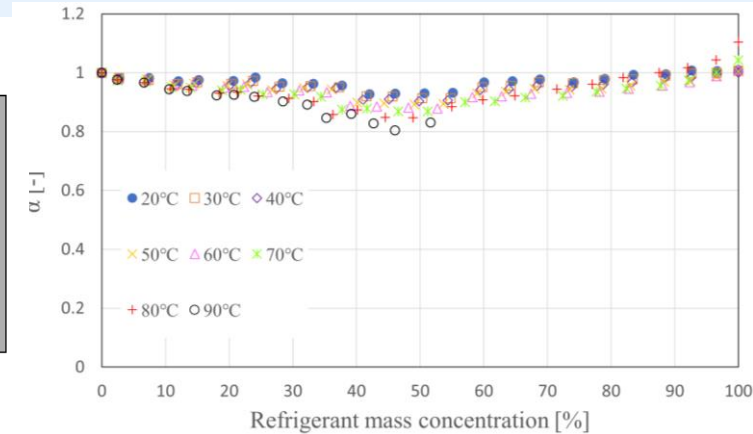
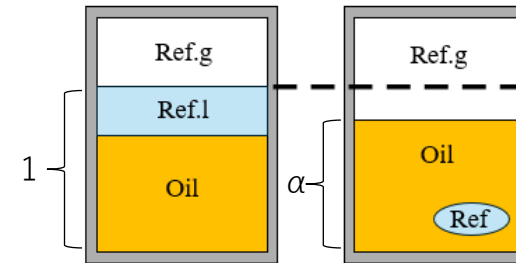
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構



補足) 成果と意義：【機C-1】～圧縮機における冷凍機油の冷媒溶解挙動と適合性評価及び低GWP混合冷媒圧縮特性の解明～（国立大学法人 静岡大学）

冷媒溶解時の冷凍機油／冷媒混合物の密度変化に対する検討

冷凍機油に冷媒が溶解した混合物の体積は、溶解している冷媒を液冷媒とした体積と冷凍機油の体積の和より小さくなるため、冷媒溶解時の冷凍機油の体積を実験的に調査して、その体積変化及び密度変化を明らかにした。

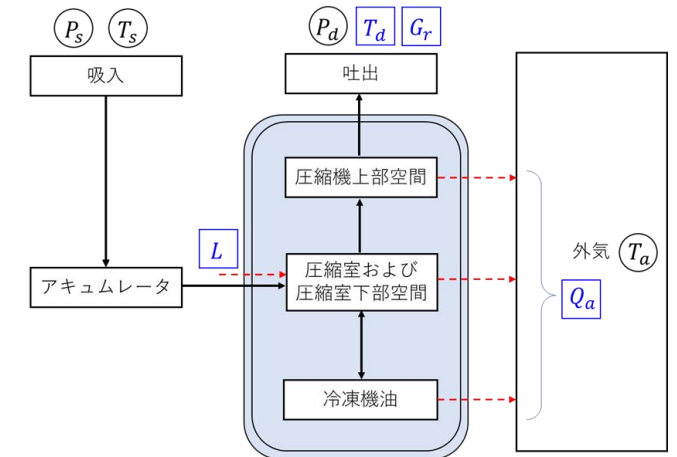


冷媒組成変化と圧縮特性の関係を検討するための圧縮機モデルの開発

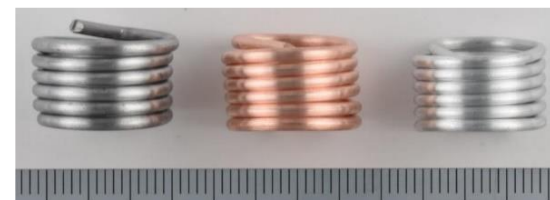
純冷媒に対する基本的な圧縮機モデルの構築を行い、解析例として圧縮回転数に対する冷媒流量や圧縮機吐き出し温度を得た。今後は冷凍機油への冷媒の溶解や非共沸混合冷媒への対応を進め、冷媒組成比がずれた場合の性能予測を行う。

冷凍機油の安定性試験

POE／R454C混合物とPVE／R454C混合物の安定化試験をオートクレーブ試験により行った。アドバンスコンポジット(株)のアルミ／セラミック複合材との適合性も合わせ、触媒の外観及び質量、冷凍機油の酸価、色相、夾雑物に特に問題は見られなかった。



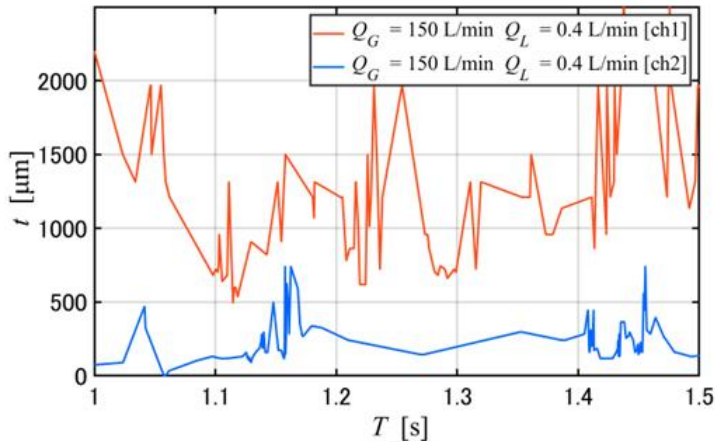
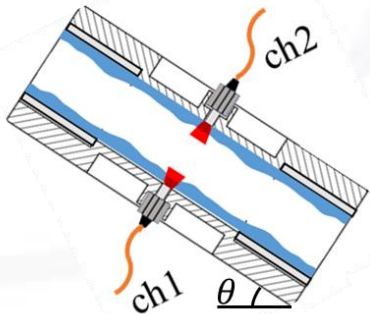
冷凍機油の色相及び触媒の外観検査
PVE/R454C 50:50混合物
150℃ 336時間



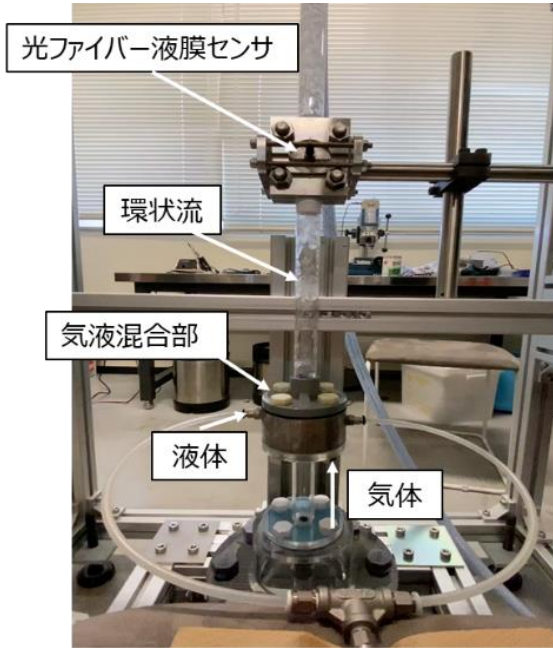
補足) 成果と意義：[機C-1] ～圧縮機における冷凍機油の冷媒溶解挙動と適合性評価及び低GWP混合冷媒圧縮特性の解明～（国立大学法人 静岡大学）

吸い込み配管における油膜流動特性評価

光ファイバースコープを用いた液膜厚さ測定装置を開発し、グリセリン水溶液-空気二相流による環状流において、油膜特性を把握することができた。

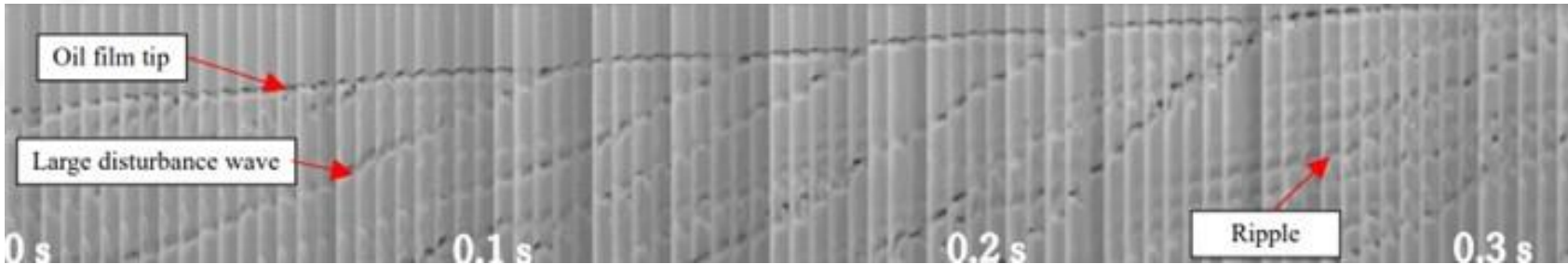
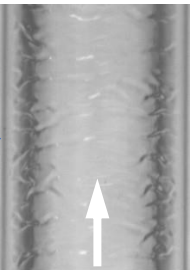
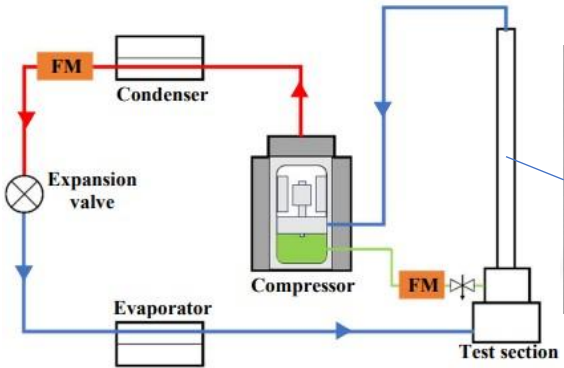


$\theta = 30^\circ$ における上下の油膜厚さ変化



冷凍サイクルの吸い込み配管における油膜観察

冷凍サイクルの吸い込み上昇配管を可視化した。 今後は、開発した光ファイバースコープの組み込み及び油膜測定を行っていく。



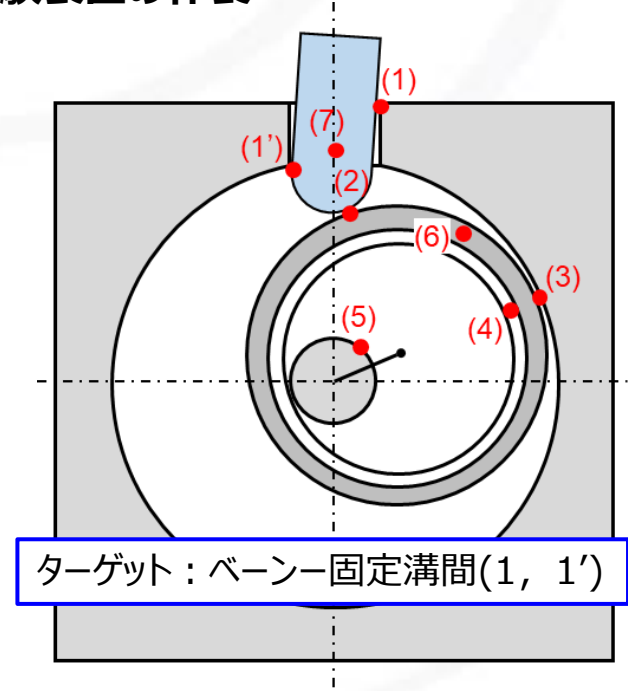
じょう乱波とリップル移動の連続写真（OCR0.84%）

補足) 成果と意義：[機C-2] ～圧縮機の機械効率向上のための低GWP混合冷媒 雰囲気中における摩擦・摩耗・潤滑特性の解明～（学校法人 大阪電気通信大学）

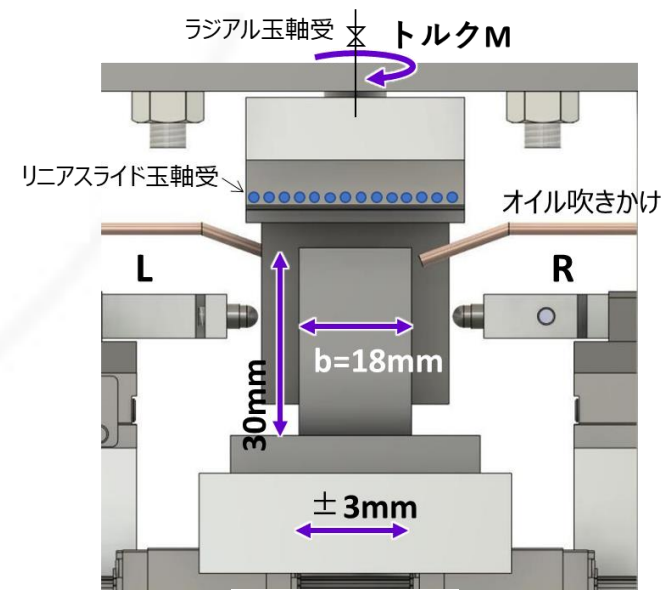
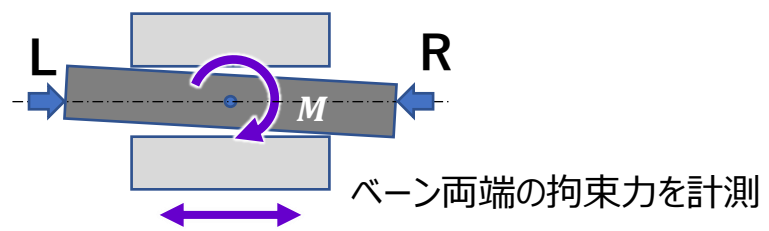
＜今年度の検討内容と成果と課題＞

ロータリ圧縮機のベーン・固定溝間について、摩擦・摩耗試験部を作製し、摩擦特性を計測する。ベーンの固定溝内での往復運動を再現した試験装置を作製し、摺動部の摩擦力を計測する。得られた摩擦力と摩擦係数の特性を整理する

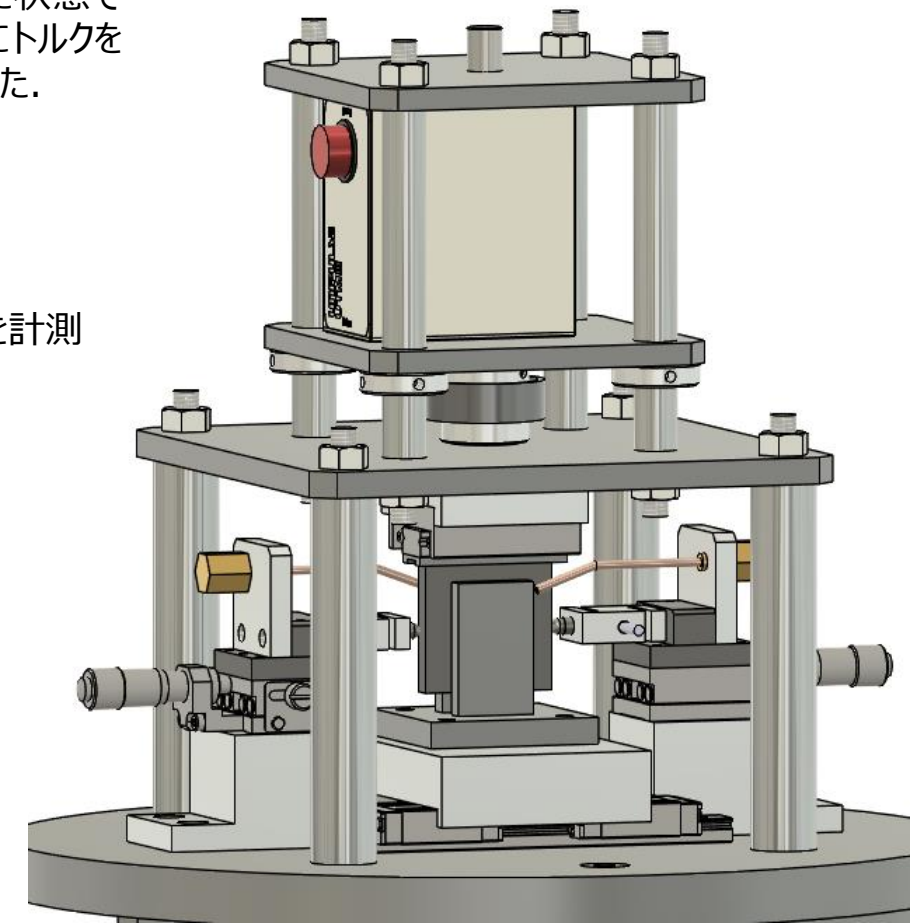
試験装置の作製



実機では、固定溝に対してベーンが傾いた状態で往復運動するが、試験装置では、ベーンにトルクをかけた状態で支持し、溝側を往復運動させた。



試験機詳細

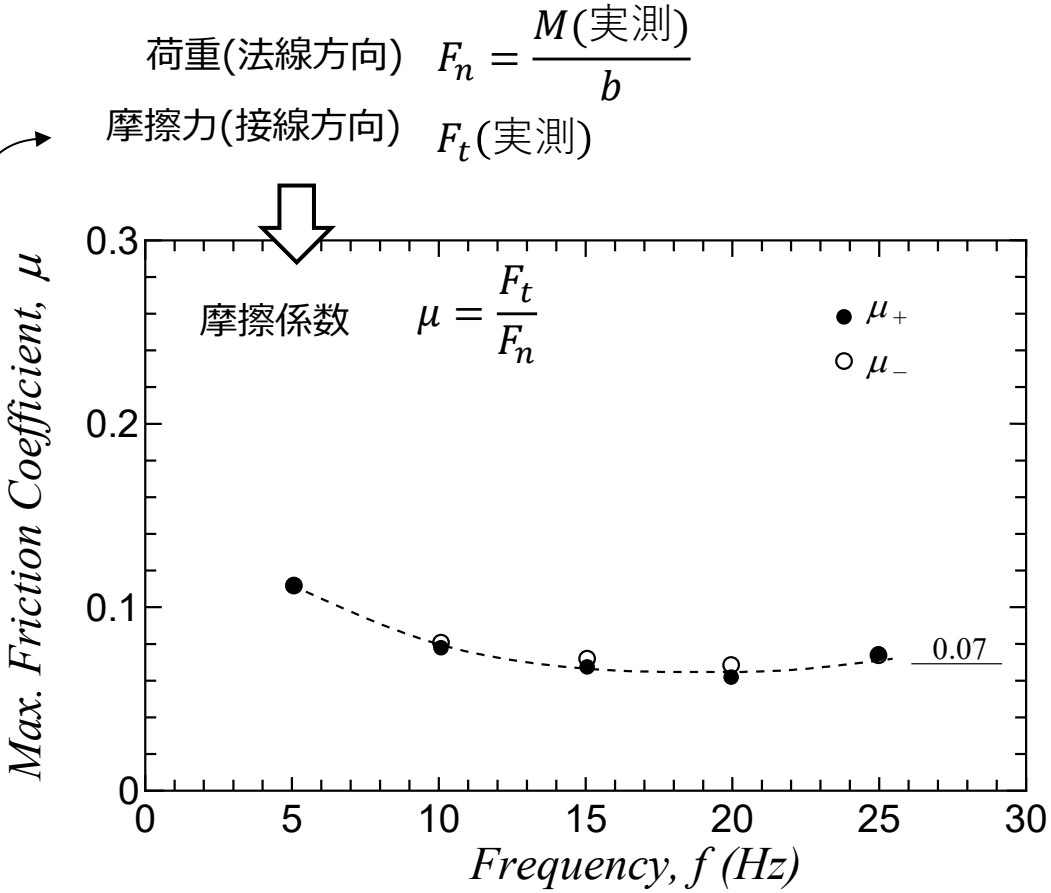
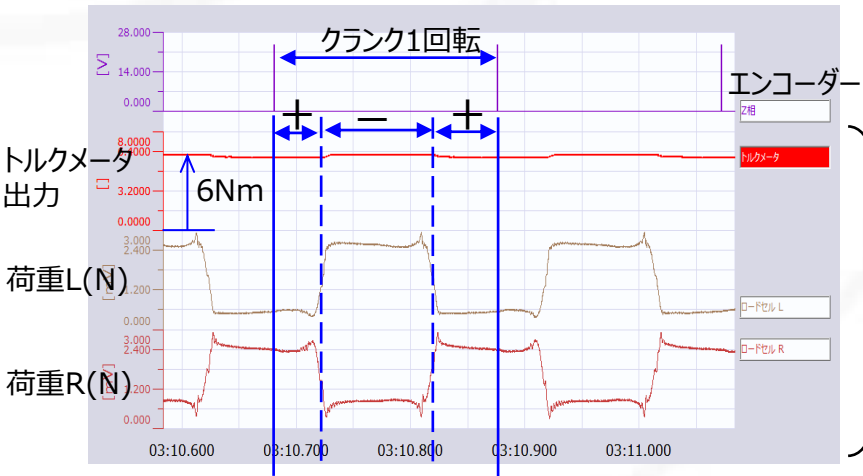
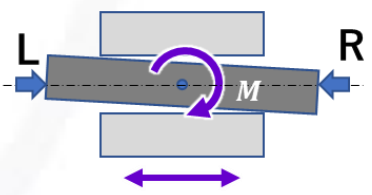


往復質量のバランスをとるため、バランサー(部分釣合わせ)を設計し軸に取付けている
→30Hzまでの範囲で問題となる振動は生じない

補足) 成果と意義：[機C-2] ～圧縮機の機械効率向上のための低GWP混合冷媒 雰囲気中における摩擦・摩耗・潤滑特性の解明～（学校法人 大阪電気通信大学）

拘束力の計測と摩擦係数

ガス：AIR (40℃)
 オイル：POE; VG68; 0.1L/min (40℃)
 ベーン材質：鋳鉄 (FC250)
 コの字溝材質：鋳鉄 (FC250)
 負荷トルク：6Nm
 ベーンと溝の隙間：片側10μm



<今後の計画>

- ・冷媒雰囲気中 (R454C) での実験を進める
- ・ベーンおよび固定溝の材料(組み合わせ)を変える
- ・実機運転状態の摩擦係数を推定できるよう軸受定数等を用いて整理する

補足) 成果と意義：【機C-3】～圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価～（アドバンスコンポジット株式会社）

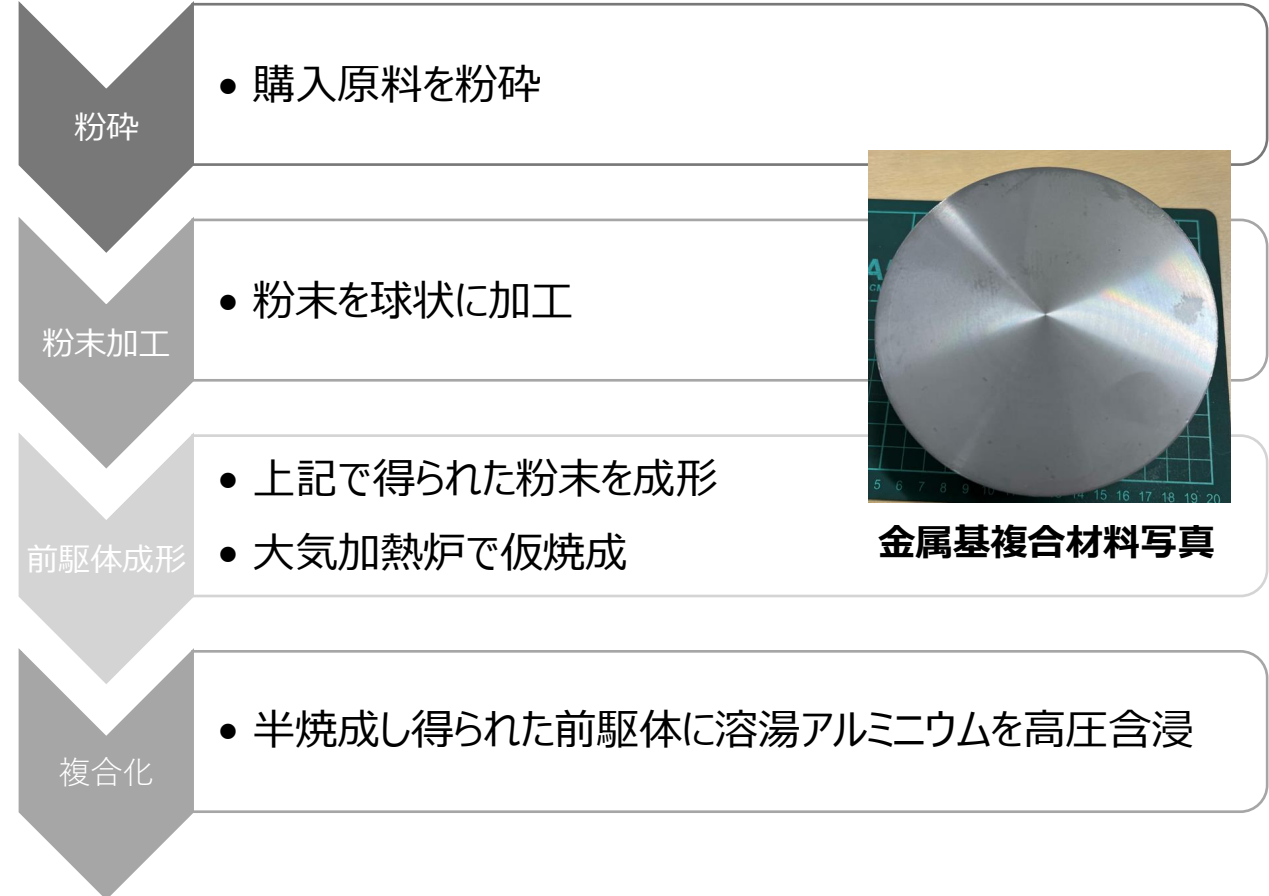
2024年度は、強化材として用いるセラミックスを2種類で試作し評価した。
 その際、加工特性を生かすことを念頭に置いてセラミックス粉末を加工した。
 セラミックス粉末を加工することによるメリットを以下に示す。

● 期待する効果

- ① セラミックス粒子を加工することにより、素材加工時の工具摩耗を抑制する。
- ② セラミックス粉末の粒子形状、粒子径を一定の範囲で制御することにより、複合化時に発生するメタルフロー(アルミリッチな筋状の模様)を抑制することが出来る。
- ③ 機械的物性値の安定性と強度UP。

上記の期待される効果を得るために右図のプロセスで金属基複合材料を作製した。

複合化プロセス



補足) 成果と意義：[機C-3] ～圧縮機部品に適した金属基複合材料の開発と基礎物性評価～（アドバンスコンポジット株式会社）

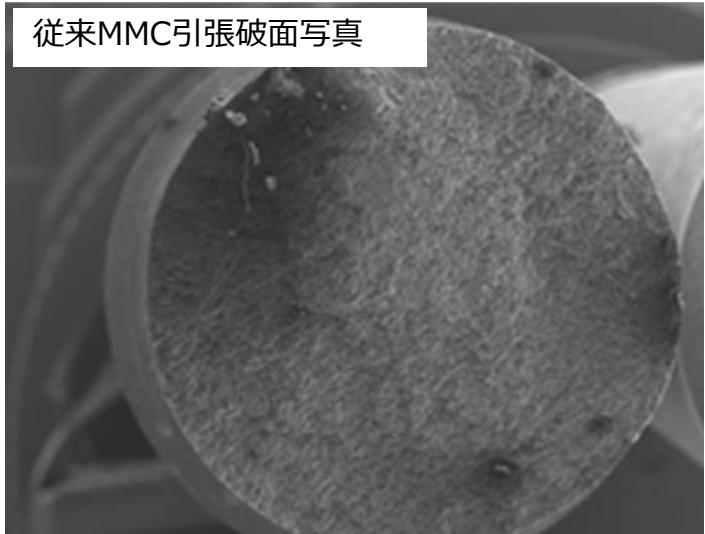
項目	単位	FC200 ベンチマーク材料	MMC01 弊社保有複合材料	MMC02N	MMC03N
密度	g/cm ³	7.3	2.83	2.73	3.277
引張強度	MPa	200以上	250	360	284
ヤング率	GPa	95～120	110～120	110～120	169
熱膨張係数	ppm	11.5～12.0	12.0～13.0	12.0～13.0	10.0～11.0
疲労強度	MPa	120	110	130	未計測
硬度	HBW	223以下	190	171～178	未計測

- ・ 開発品のMMC02Nにおいて、いずれの機械的物性値については達成した.
- ・ 引張強度/疲労強度については、強度が向上した.

今後の計画

- ・ セラミックス粉末の加工において、加工条件を引き続き検討を継続する.
- ・ 摺動特性なども、Gr内の関係者と意見交換し明らかにする.
- ・ 金属基複合材料の切削特性を調査する.

従来MMC引張破面写真



MMC02N 引張破面写真

