次世代低ＧＷＰ冷媒の実用化に向けた高効率冷凍空調技術の開発

第１分冊

プロジェクト概要

＜2023～2025 年度進捗報告＞

2026 年 7 月

（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）

目次

1. 背景と政策的意義 1

1.1 背景 1
1.2 冷媒転換をめぐる選択肢と課題 2
1.3 本プロジェクトの政策的意義 3
1.4 本プロジェクトの特徴 3

2. 基本計画概要 4

2.1 プロジェクトの基本情報 4
2.2 研究開発の基本方針 5
2.3 委託事業と補助事業の役割分担 5
2.4 研究開発項目の構成 5
2.5 プロジェクトの位置づけ 6

3. 研究開発目的とアウトカム 7

3.1 研究開発の目的 7
3.2 解決すべき主要技術課題 7
3.3 アウトプット（研究開発成果） 8
3.4 アウトカム（社会的・産業的効果） 8
3.5 アウトプットからアウトカムへの展開 9

4. 研究開発体制 10

4.1 体制の基本構造 10
4.2 委託事業における研究グループ構成 10
4.3 補助事業の位置付け 11
4.4 技術課題と体制の対応関係 12
4.5 分野横断的連携の特徴 12

5. プロジェクト研究例 14

5.1 NEDO で開発されている冷媒の自己分解反応 14
5.2 低 GWP 混合冷媒の基本性能 15

6. まとめと今後の展開 17

1. 背景と政策的意義

1.1 背景

本プロジェクトの背景には，冷媒転換が「環境問題」ではなく「産業構造の選択」であるという本質がある．冷凍空調分野で広く用いられてきたハイドロフルオロカーボン（HFC）冷媒は，オゾン層破壊係数（ODP）がゼロであることから，かつて CFC・HCFC の代替冷媒として普及してきた．しかしその一方で，HFC は地球温暖化係数（GWP）が高く，温室効果ガスとしての影響が大きい．このため，HFC 冷媒の使用削減と，より低 GWP の冷媒への転換は，冷凍空調分野における重要課題となっている．

2016 年に採択されたモントリオール議定書キガリ改正では，先進国に対し，HFC の生産・消費量を 2011～2013 年平均比で 2036 年までに 85%削減することが求められている．日本国内においても，フロン排出抑制法に基づく指定製品制度やオゾン層保護法の運用を通じて，冷媒の低 GWP 化と HFC 使用量の段階的削減が進められている．さらに，2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて，HFC 排出抑制の重要性は一層高まっている．Figure 1.1-1 は経済産業省によって報告された，わが国のキガリ改正による HFC 冷媒の供給・需要の制限値と HFC 類のオゾン層保護法による割当量（2025 年まで）と今後の HFC 類需要見通し（2025 年以降）を比較したものである．2029 年，2034 年のキガリ改正の制限値をかろうじてクリアすることができる予測であるが，そのためには，キガリ改正基準値から 1 割程度を留保することを前提に，指定製品の目標値を全て達成した上で，NEDO プロジェクト等で開発中のグリーン冷媒への代替が進むことを見込むとともに，資源の有効利用の観点から，大気放出の抑制対策・回収を徹底した上で，再生冷媒を最大限活用することが必要としている．

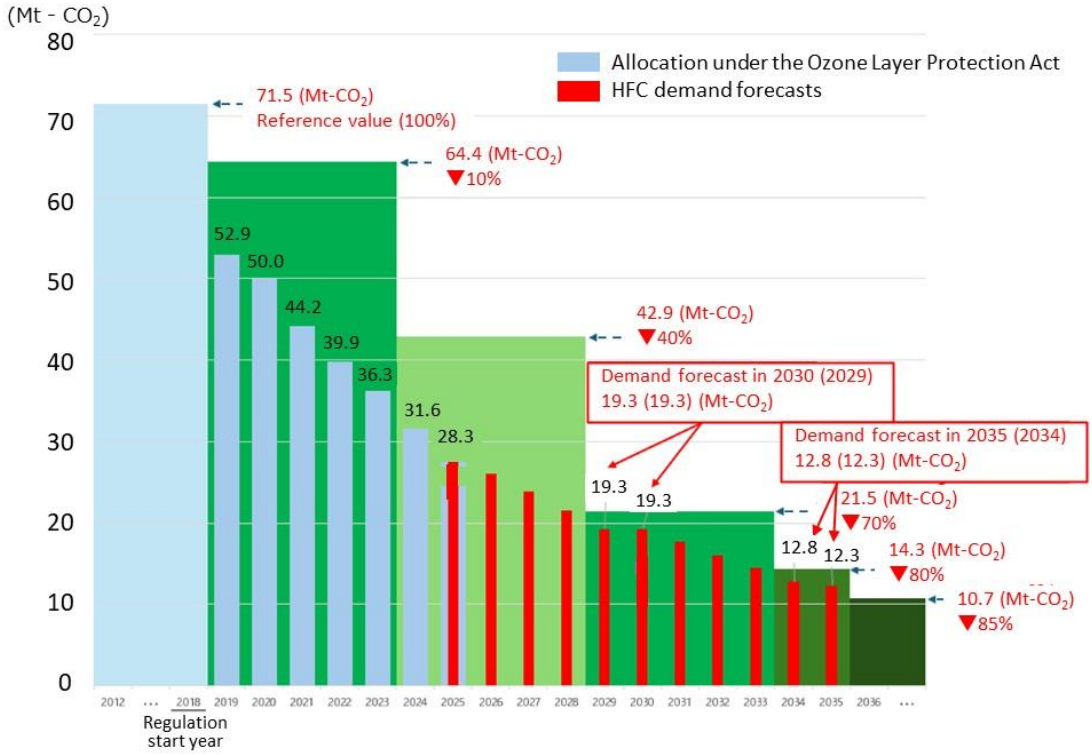


Figure 1.1-1 Comparison of regulatory limits based on the Kigali Amendment and HFC demand forecasts

日本では，HFC が CO_2以外の温室効果ガス排出量の 90%以上を占めている．Figure 1.1-2 は，日本における 4 大フッ素系温室効果ガス（HFC，パーフルオロカーボン（PFC），六フッ化硫黄（SF_6），三フッ化窒素（NF_3））の排出傾向を示している．近年，PFC，SF_6，NF_3の排出量は大幅に減少しているが，HFC の排出量は依然として高いままである．HFC 排出量の約 83%は冷凍・空調機器に由来し，これらのシステムに充填された冷媒のうち, 使用後に回収されるのは約 13%に過ぎない. 回収とリサイクルの難しさを考えると，作動流体の GWP を削減することが重要な緩和策となる．しかし，次世代冷媒候補は，既存の HFC ベースのシステムと同等の性能を達成するには大きな技術的課題に直面しており，可燃性や化学的不安定性によってしばしば阻害されている．とりわけ冷凍空調分野では，機器の使用期間が長く，一度市場に投入された機器が十数年にわたり排出源となる．このため，現時点での冷媒選択は，中長期の温室効果ガス排出に大きな影響を及ぼす．したがって，HFC 冷媒から次世代低 GWP 冷媒への転換を早期に進めることは，単なる技術課題ではなく，国際条約への対応と国内制度運用の双方に関わる政策課題である．

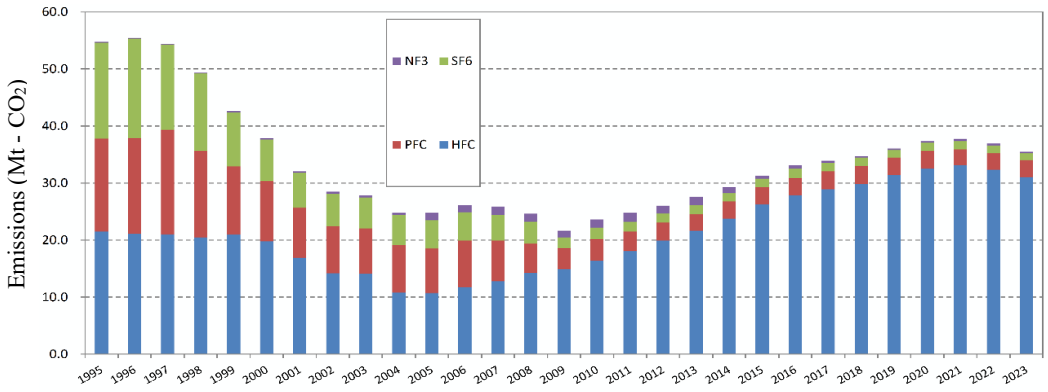


Figure 1.1-2 Annual emissions of four greenhouse gases (HFC, PFC, SF6, NF3) in Japan

1.2 冷媒転換をめぐる選択肢と課題

HFC 削減のための冷媒転換に当たっては，自然冷媒を中心とする選択肢と，HFO 系冷媒を中心とする選択肢が考えられる．自然冷媒は一般に GWP が極めて低い一方で，用途によっては強い燃焼性，毒性，腐食性，高圧化，効率低下などの課題を有しており，冷凍空調機器のすべての用途にそのまま適用できるわけではない．例えば，プロパンは低 GWP 冷媒として有力であるが，強燃性であることから適用上の制約が大きいと整理されている．

一方で，日本の冷媒メーカーが開発を進めている HFO-1123 や R-1132(E)などの国産 HFO 系冷媒は，極めて低い GWP を実現し得る候補であり，混合冷媒として適切に設計することにより，既存の冷凍空調機器技術との連続性を保ちながら，低 GWP 化と高性能化の両立を目指せる可能性がある．本プロジェクトにおいても，こうした国産 HFO 系冷媒を核とした混合冷媒の実用化が重要な方向性として位置付けられている．

しかしながら，この選択肢には明確な技術的ハードルが存在する．第一に，HFO-1123 や R-1132(E)は高温高圧条件下で自己分解反応を起こす可能性があり，安全性の観点から実用化を阻む大きな要因となっている．第二に，HFO 系混合冷媒では，温度グライドや熱物性の違いにより，現行の HFC 冷媒機器と比較してヒートポンプ性能が低下するおそれがある．したがって，低 GWP であることのみでは十分でなく，自己分解反応の抑制とヒートポンプ性能の向上を同時に実現しなければ，実用化には至らない．

1.3 本プロジェクトの政策的意義

本プロジェクトの第一の政策的意義は，モントリオール議定書キガリ改正をはじめとする国際的な HFC 削減要請に対し，日本として現実的かつ戦略的な技術的対応を図る点にある．冷凍空調分野では，既存の HFC 冷媒を継続使用したままでは，将来的な削減目標の達成が困難であることが基本計画においても明確に示されている．本プロジェクトは，こうした制約の下で，家庭用空調機等を主な対象として，低 GWP 混合冷媒の候補探索から適用機器の開発・評価までを一気通貫で進めることにより，次世代冷媒への転換を加速しようとするものである．

第二の政策的意義は，単なる規制対応にとどまらず，国内冷媒産業および冷凍空調産業の国際競争力の維持・強化を目指している点にある．冷媒転換において自然冷媒，とりわけプロパンへの全面的な依存が進んだ場合，既存の国内産業が有する冷媒開発力，機器設計力，関連技術の蓄積が十分に生かされず，国際市場における競争優位が低下する可能性がある．これに対し，国産 HFO 系混合冷媒を実用化できれば，国内冷媒メーカーの技術的蓄積を活かしつつ，機器メーカーと連携した新たな低 GWP 機器技術の確立につながる．基本計画においても，本事業は日本企業の世界市場におけるシェア拡大への貢献をアウトカムとして位置付けている．

第三の政策的意義は，単独の材料開発や単独の機器開発ではなく，冷媒・安全性・機器・システム評価を統合した研究開発を行う点にある．国産 HFO 系冷媒の実用化には，物性データの整備，安全性評価手法の確立，熱交換器・圧縮機等の要素技術の開発，さらには LCCP を含むシステム全体の評価手法が必要である．本プロジェクトは，これらを個別最適ではなく相互連関の中で推進することにより，実用化可能な技術体系の構築を目指している．

1.4 本プロジェクトの特徴

以上を踏まえると，本プロジェクトの特徴は，次のように整理できる．

第一に，本プロジェクトは新規研究テーマの探索を目的とするものではなく，国際条約および国内制度が課す冷媒転換の要請に対して，日本としてどの技術ルートを選択し，どのように社会実装へ結び付けるかを扱う政策対応型・戦略型の研究開発プロジェクトである．

第二に，その技術ルートとして，自然冷媒への単純な全面転換ではなく，国産 HFO 系混合冷媒の実用化を通じて国内産業の競争力維持・強化を図るという，産業政策的な視点を明確に持っている．

第三に，その実現のために，国産 HFO 系冷媒の最大の弱点である自己分解反応と，混合冷媒適用時のヒートポンプ性能低下という二つの本質的課題を正面から扱い，冷媒開発から機器設計・評価までを一体的に進める統合型プロジェクトである．

本プロジェクトは，このように，国際規制対応，国内産業戦略，技術課題解決を同時に担う点に，その大きな意義がある．

2. 基本計画概要

本プロジェクトは, 低 GWP 冷媒の実用化およびそれに対応する冷凍空調機器技術の確立を目的として, NEDO により 2023 年度から実施されている国家プロジェクトである.

本プロジェクトは，モントリオール議定書キガリ改正に基づく HFC 削減義務への対応を前提としつつ，国内冷媒メーカーおよび機器メーカーの技術基盤を活かした低 GWP 冷媒・機器の実用化を目指すものであり，冷媒の候補探索から機器適用技術の確立，さらには評価手法の整備に至るまでを一体的に推進する点に特徴を有する.

2.1 プロジェクトの基本情報

本プロジェクトの基本的な枠組みは以下のとおりである.

- 実施期間：2023 年度から 2027 年度までの 5 年間
- 実施主体：NEDO（サーキュラーエコノミー部（旧 環境部））
- 対象分野：家庭用空調機を中心とした冷凍空調分野
- 実施形態：委託事業および補助事業の併用

本プロジェクトは，冷媒の開発から機器適用までに一般的に 10 年程度を要する技術開発期間を短縮し，国際的な規制動向に対応した早期の実用化を図ることを目的としている.

Figure 2.1-1 は次世代冷媒の開発状況を示している．横軸は機器の温度領域，縦軸は機器の能力の大きさを示している．緑色の機器はすでに低 GWP 冷媒が広く普及している．紫色で示されている冷蔵倉庫や中規模の業務用冷凍機器については，HFO 冷媒や二酸化炭素などの冷媒が開発されており，普及のためにフロン排出抑制法の指定製品制度により低 GWP 化が進められている．そして，茶色で塗られた空調機や小型業務用冷凍機器については，現在は R-32 が使用されているが，一層の低 GWP 化が求められている．これら分野の次世代冷媒として，強燃性の炭化水素が候補として挙がっており，その安全な利用が可能か考慮する必要がある.

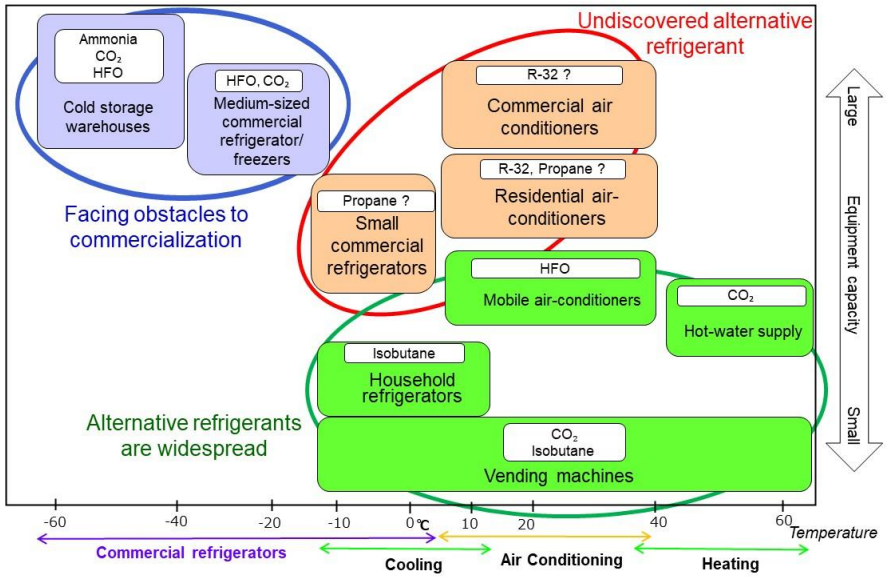


Figure 2.1-1 Development status of low-GWP refrigerant by application

2.2 研究開発の基本方針

本プロジェクトでは，低 GWP 冷媒の実用化に必要な要素を分離して扱うのではなく，以下の観点に基づき統合的に研究開発を推進する．

第一に，冷媒の環境性，安全性および性能の三要件を同時に満たす技術の確立を目指す．低 GWP 化のみでは実用化には至らず，安全性および機器性能を含めた総合的な技術成立性が求められる．

第二に，冷媒単体の開発にとどまらず，熱交換器，圧縮機等の機器要素技術およびシステム評価を含めた一体的な技術開発を行う．これにより，混合冷媒特有の性能課題を機器側の技術と組み合わせて解決する．

第三に，物性データ，安全性評価手法，LCCP 評価等の共通基盤技術を整備し，国際標準化および産業界での活用を可能とする．

このように，本プロジェクトは，冷媒・機器・評価の三位一体による実用化志向型の研究開発を基本方針としている．

2.3 委託事業と補助事業の役割分担

本プロジェクトの特徴の一つは，委託事業と補助事業を組み合わせた構造にある．

委託事業では，冷媒物性，安全性評価，システム評価等の基盤技術を整備し，産業全体で共有可能な知見を蓄積する．一方，補助事業では，これらの成果を活用し，企業が主体となって具体的な機器開発および製品化に取り組む．

このように，

- 委託事業：基盤技術（協調領域）
- 補助事業：製品開発（競争領域）

という明確な役割分担により，効率的な研究開発と実用化の加速を図っている．なお，本プロジェクトにおいては，補助事業は限定的な構成となっており，プロジェクト全体としては委託事業が中核を担っている．

2.4 研究開発項目の構成

本プロジェクトは，大きく 2 つの研究開発項目から構成される．

2.4.1 低 GWP 混合冷媒の開発および評価（委託事業）

本項目では，主として大学および公的研究機関を中心に，低 GWP 混合冷媒の候補探索および評価を実施する．

具体的には，

- 混合冷媒の候補選定
- 熱物性測定および状態方程式の構築
- 燃焼性および自己分解反応に関する安全性評価
- 冷凍サイクル特性および性能評価
- ライフサイクル影響（LCCP）の評価

等を実施し，冷媒の基礎特性からシステム性能に至るまでの評価基盤を整備する．

本項目は，個別企業に依存しない共通基盤技術の確立（協調領域）として位置付けられる．

2.4.2 低 GWP 冷媒対応機器の開発（補助事業）

本項目では，主として企業が主体となり，低 GWP 冷媒に対応した冷凍空調機器の開発を実施する．

具体的には，

- 混合冷媒に適合した圧縮機および熱交換器の設計
- 冷凍サイクルの最適化
- 実機性能評価および信頼性評価
- 実環境下での運転検証

等を通じて，実用化に向けた機器技術の確立を目指す.

本項目は，企業による事業化を前提とした競争領域の研究開発として位置付けられる.

2.5 プロジェクトの位置づけ

本プロジェクトは，これまでの NEDO における冷媒関連研究開発（2011 年度以降の複数プロジェクト）を基盤として，その成果を踏まえつつ，実用化段階に向けた技術開発を加速するものである.

従来のプロジェクトでは，低 GWP 冷媒の基礎特性や機器適用可能性の検討が進められてきたが，本プロジェクトではこれを一歩進め，

- 実用化可能な冷媒候補の提示
- 安全性評価手法の確立
- 機器設計指針の構築

を目標とする点に特徴がある.

したがって，本プロジェクトは，基礎研究段階から実用化段階への橋渡しを担う中核的プロジェクトとして位置付けられる.

3. 研究開発目的とアウトカム

3.1 研究開発の目的

本プロジェクトは，モントリオール議定書キガリ改正に基づく HFC 削減義務への対応を前提として，低 GWP 冷媒の実用化およびそれに対応する冷凍空調機器技術の確立を目的とする．

特に本プロジェクトでは，自然冷媒への単純な転換ではなく，国内冷媒メーカーが開発を進める HFO-1123 および R-1132(E)等を基盤とした国産 HFO 系混合冷媒の実用化を主軸とする．このアプローチは，低 GWP 化と機器性能の両立を図るとともに，国内産業の技術基盤を維持・発展させる観点から重要な意義を有する．

しかしながら，これらの冷媒は単独では実用化に至っておらず，以下の本質的課題を有している．

- 高温高圧条件下における自己分解反応の発生可能性
- 混合冷媒特有の温度グライドに起因するヒートポンプ性能の低下
- HFO 混合冷媒の基本物性の未整備

したがって，本プロジェクトの目的は，単に低 GWP 冷媒を開発することではなく，これらの課題を克服し，安全性・性能・環境性を同時に満たす実用化可能な冷媒・機器技術体系を確立することにある．

3.2 解決すべき主要技術課題

本プロジェクトにおける研究開発課題は，以下の四つに大別される．

3.2.1 HFO 系混合冷媒の基本物性の整備

HFO 混合冷媒の基本物性においては以下のような手順が必要となる．

- 期待される HFO 混合冷媒の基本物性の測定
- 物性に基づく状態方程式の整備
- NIST の REFPROP で使用可能なように，国際データベース化に貢献

3.2.2 自己分解反応の解明と抑制

HFO 系冷媒に特有の自己分解反応は，圧縮機内部の高温・高圧条件や電気的要因により発生する可能性があり，実用化における最大の障壁の一つである．このため，

- 反応発生条件の特定
- 反応機構の解明
- 安全性に関する国際規格化を促進するために，安全性評価方法の確立

を通じて，安全に使用可能な条件を明確化する必要がある．

3.2.3 ヒートポンプ性能の確保・向上

HFO 系混合冷媒は，温度グライドや熱物性の違いにより，従来の HFC 冷媒と比較して性能が低下する場合がある．このため，

- 熱交換器の伝熱特性の改善
- 圧縮機の適合設計
- 冷凍サイクルの最適化

を通じて，現行機器と同等以上の性能を実現することが求められる．

3.2.4 評価手法および設計基盤の確立

冷媒の実用化には，物性データ，安全性評価，環境影響評価を統合した評価基盤が不可欠である．このため，

- 状態方程式および物性データの整備
- 安全性評価手法の確立
- LCCP 評価を含むシステム評価手法の高度化

3.3 アウトプット（研究開発成果）

本プロジェクトにより創出される主なアウトプットは，以下のとおりである．

第一に，有望な低 GWP 混合冷媒候補の選定およびその特性の体系的把握である．これにより，実用化に向けた冷媒選択の基盤が整備される．

第二に，冷媒の熱物性データおよび状態方程式の構築であり，これにより高精度な性能予測および機器設計が可能となる．

第三に，自己分解反応を含む安全性評価手法の確立であり，これは国際規格への展開を視野に入れた重要な成果となる．

第四に，熱交換器および圧縮機に関する設計指針の構築であり，混合冷媒に適合した機器設計の基盤を提供する．

第五に，冷凍空調システムにおける性能評価および LCCP 評価手法の確立であり，冷媒選定から機器設計，環境影響評価までを統合的に扱うことが可能となる．

これらのアウトプットは，個別企業の製品開発を支えるだけでなく，産業全体で共有される共通基盤技術としての性格を有する．

3.4 アウトカム（社会的・産業的効果）

本プロジェクトの成果は，時間軸に応じて以下のアウトカムをもたらす．

3.4.1 短期的アウトカム（プロジェクト期間中～終了直後）

- 実用化に向けた冷媒候補の明確化
- 機器設計に必要な基盤技術の確立
- 安全性評価および標準化に向けた技術データの整備

3.4.2 中期的アウトカム（2030 年前後）

- 低 GWP 冷媒対応機器の製品化および市場投入
- フロン排出抑制法等の制度に適合した製品の普及
- 冷凍空調分野における温室効果ガス排出削減の進展

3.4.3 長期的アウトカム（2036 年以降）

- キガリ改正に基づく HFC 削減目標の達成への貢献
- 2050 年カーボンニュートラルの実現への寄与
- 低 GWP 冷媒および関連機器分野における国際競争力の強化

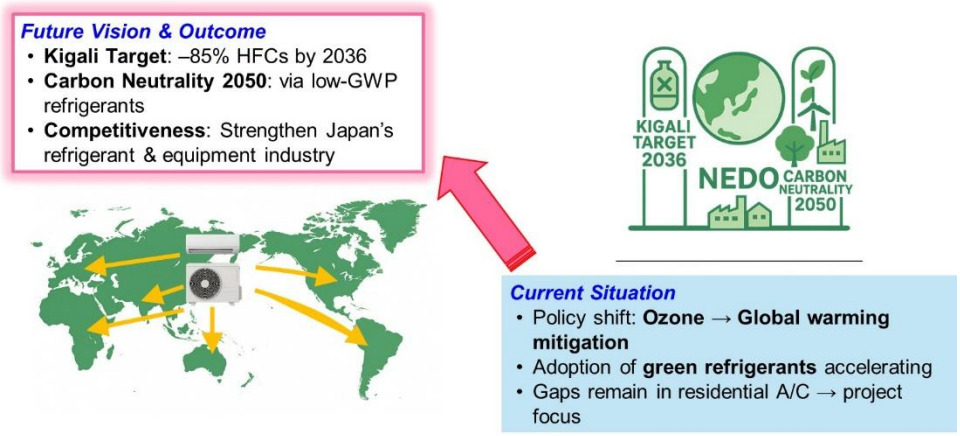


Figure 3.4-1 Desired future vision and outcomes

3.5 アウトプットからアウトカムへの展開

本プロジェクトでは，冷媒特性の把握から機器設計，システム評価，実用化に至るまでのプロセスを段階的に進めることにより，研究開発成果を確実に社会実装へと結び付ける．Figure 3.5-1 は本プロジェクトの研究開発成果（アウトプット）からアウトカムへの道筋を示している．2030 年前後から本プロジェクトで開発された新冷媒を用いる機器が本格的に市場へ普及してゆくことを想定している．

特に，

- 冷媒の物性・安全性の理解
- 機器性能の確保
- システムレベルでの総合評価

を統合的に達成することで，単なる研究成果にとどまらず，実用化可能な技術体系の確立を実現する．

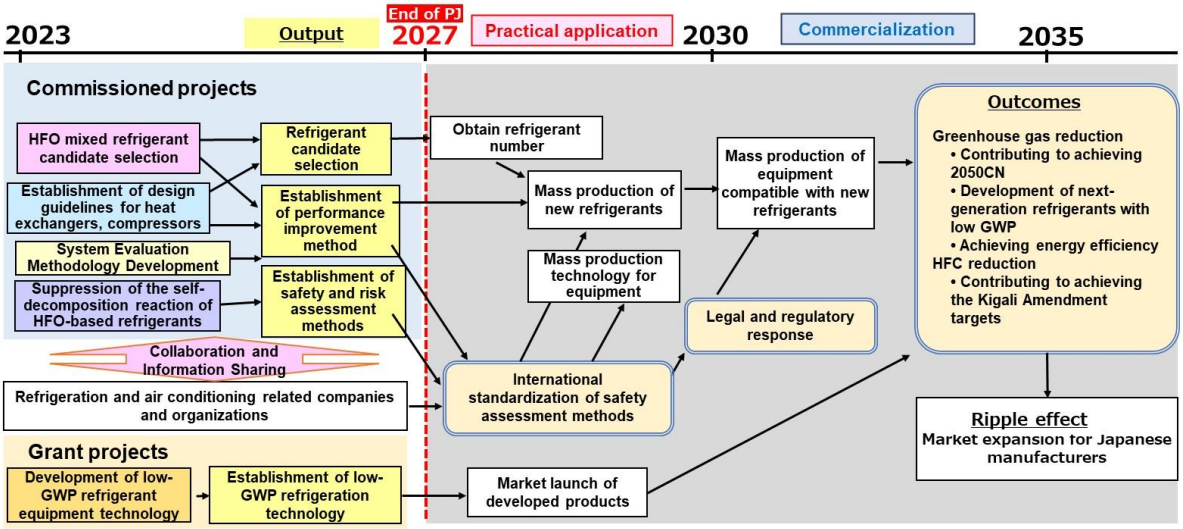


Figure 3.5-1 Path from research output to outcome achievement

4. 研究開発体制

本プロジェクトは，低 GWP 冷媒の実用化に必要な複合的課題に対応するため，新エネルギー・産業技術総合開発機構のもとで，大学，公的研究機関および企業が連携する形で実施されている．全体はプロジェクトマネージャーの統括の下，プロジェクトリーダーおよびサブプロジェクトリーダーが研究開発の推進を担う体制となっている

4.1 体制の基本構造

本プロジェクトは，委託事業（基盤研究）と補助事業（実用化開発）を組み合わせた二層構造を採用している．

- 委託事業：冷媒・安全性・機器・評価に関する基盤技術の確立
- 補助事業：企業による機器開発および実用化の推進

この構造により，研究開発成果を段階的に実用化へと接続することを可能としている．

4.2 委託事業における研究グループ構成

委託事業では，技術領域ごとに以下の 4 つの研究グループが設置されている．Figure 4.2-1 にプロジェクトの体制図を示す．また，各グループの研究内容の抜粋を Table 4.2-1 に示す．

4.2.1 冷媒グループ

九州大学，九州産業大学，長崎大学，産業技術総合研究所（AIST），およびエイゾス株式会社からなる冷媒特性評価グループは，候補冷媒の熱物性値を測定し，状態方程式を定式化し，NIST の REFPROP データベースへの実装のための検証済みデータを提供する．同グループは，可燃限界や燃焼速度の測定に加え，冷媒混合物の挙動を記述する混合則についても研究している．ライフサイクル全体にわたる環境影響を評価することで，次世代冷媒として有望な組成を特定し，改良している．

4.2.2 安全グループ

電力産業中央研究所，諏訪理科大学，AGC 株式会社，ダイキン工業株式会社からなる安全評価グループは，ISO 817 などの国際安全規格に安定性評価手法を組み込むことを目指している．同グループは，自己分解反応の試験手順を研究し，高温高圧圧縮機条件下での誘電放電の可能性を含め，実際の空調・冷凍システムのリスク評価を実施している．これらの成果は，次世代冷媒の信頼性の高い安全基準の確立に貢献する．日本冷凍空調工業会と協力し，自己分解反応を抑制した HFO 系冷媒のリスク評価を実施しており，実用化の可否を左右する安全性課題への対応を担う中核的な役割を有する．

4.2.3 機器グループ

機器要素技術グループは，佐賀大学，神戸大学，東京海洋大学，株式会社 UACJ，静岡大学，大阪電気通信大学，アドバンスト・コンポジット株式会社で構成されている．このグループは，混合冷媒の温度グライドに起因する伝熱劣化を抑制する技術や高性能熱交換器の開発に取り組んでいる．圧縮機に関して，圧縮機における冷媒の溶解挙動を解明し，圧縮機部品に適した軽量複合材料の開発を進め，圧縮機の高速化に取り組んでいる．

4.2.4 評価グループ

早稲田大学と電気通信大学からなるシステム性能評価グループは，様々な低 GWP 冷媒を用いたシステ

ム性能を予測するための包括的なシミュレーションプラットフォームを開発している．このシミュレーターは，新たに提案された冷媒組成の LCCP 解析を可能にし，実用化に向けて最も有望な候補を特定するのに役立つ．冷凍サイクルの性能解析およびシステム評価手法の高度化を行い，シミュレーション技術および LCCP 評価を通じて，冷媒・機器の統合的な評価基盤を構築する．

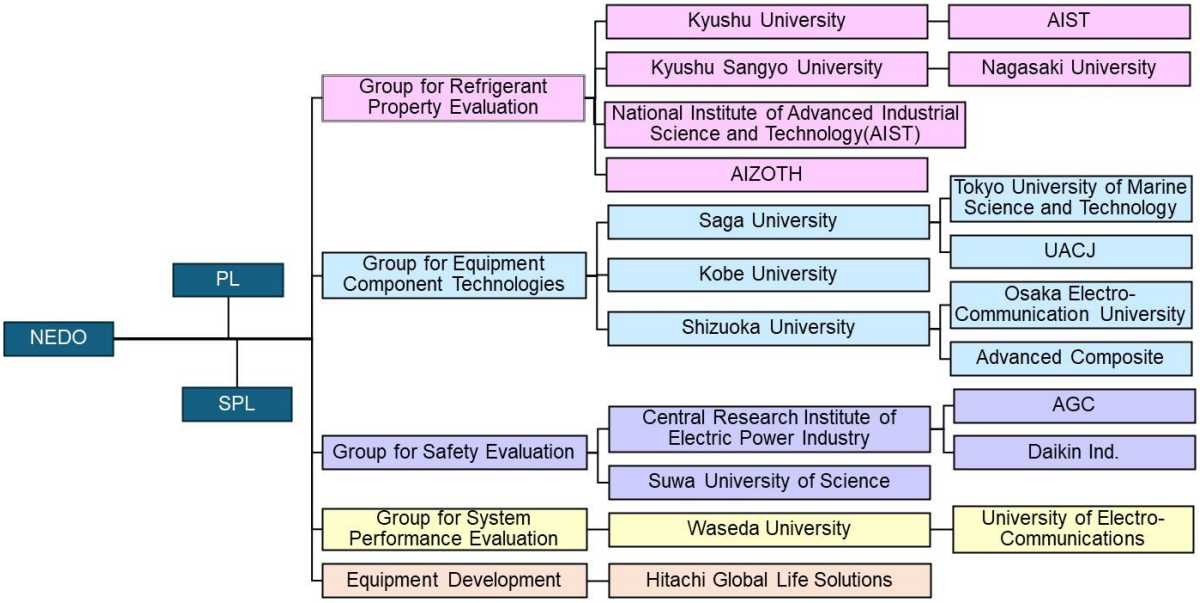


Figure 4.2-1 Project structure

Table 4.2-1 Project implementation themes and contents

Theme	Contents
■ Commissioned project (Development of low-GWP refrigerants suitable for residential air conditioning, etc.)	
Group for Refrigerant Property Evaluation	• Acquisition of thermophysical property data and narrowing down of candidate refrigerants • Developing equation of state and mixing model for use in NIST's REFROP
Group for Equipment Component Technologies	• Regarding heat exchangers, development of technology to suppress heat transfer deterioration of mixed refrigerants and high-performance heat exchangers • Regarding compressors, clarifying the refrigerant dissolution behavior in compressors and developing lightweight composite materials suitable for compressor parts
Group for Safety Evaluation	• Development of evaluation method for HFO refrigerant self-decomposition reaction and low GWP refrigerant mixture composition
Group for System Performance Evaluation	• Development of system evaluation methods and AI optimization algorithms for refrigeration cycle simulators
■ Subsidized project (Development of equipment using low-GWP refrigerants)	
Equipment Development	• Development of a condensing unit using low-GWP refrigerants

4.3 補助事業の位置付け

補助事業では，企業が主体となり，低 GWP 冷媒に対応した機器の開発および性能検証が実施される．本プロジェクトにおいて補助事業の規模は限定的であるが，

- 委託事業で得られた基盤技術の実機適用
- 実用化に向けた性能・信頼性の検証

を担う重要な役割を有しており，研究開発成果を社会実装へと接続する機能を果たしている．

4.4 技術課題と体制の対応関係

Figure 4.4-1 は，R-1132(E)系冷媒におけるシステム性能と混合組成の関係を示す概念図である．概念図に示された定性的な傾向は，熱力学的性能計算，特に冷媒組成と温度グライド効果に対する成績係数（COP）の依存性から導き出されたものである．横軸は R-1234yf と R-1132(E)の混合比を表す．R-1234yf または R-1132(E)の純冷媒の COP は R-32 純冷媒の COP とほぼ同等であるが，R-1234yf と R-1132(E)，R-32 の混合によって COP は急激に低下する．この原因は混合冷媒の温度グライドによるものである．

R-1132(E)の混合比を大きくすることによって，COP は向上することが分かっているので，安全グループの研究により，自己分解反応が発生する危険がない範囲で R-1132(E)組成を上げることが期待されている．また，R-32 を混合することで性能を部分的に回復できるものの，全体的な効率は純粋な R-32 よりも低いままである．R-32 を混合すれば GWP が大きくなるので，R-32 の混合比を大きくすることには限界がある．

現在の R-32 系冷凍空調機器と同等のシステム性能を達成するには，構成部品，特に熱交換器と圧縮機の技術改良が必要である．機器グループでは，温度グライドが大きい冷媒の伝熱性能を向上させる熱交換器の開発が期待されている．R-1234yf の欠点として蒸気の比容積が大きいことが知られている．R-1234yf と R-1132(E)混合冷媒蒸気の比容積が R-32 に比べて大きく，単位体積能力が小さい欠点がある．この解決のためには圧縮機の大型化が対応策の一つであるが，本プロジェクトでは圧縮機の可動部を軽量化して高速化をすることが検討されている．

Figure 4.4-1 に示すように，冷媒の GWP，安全性および性能はトレードオフ関係にあり，単一分野での最適化では解決が困難である．このため，本プロジェクトでは分野横断的な研究体制が不可欠となっている．

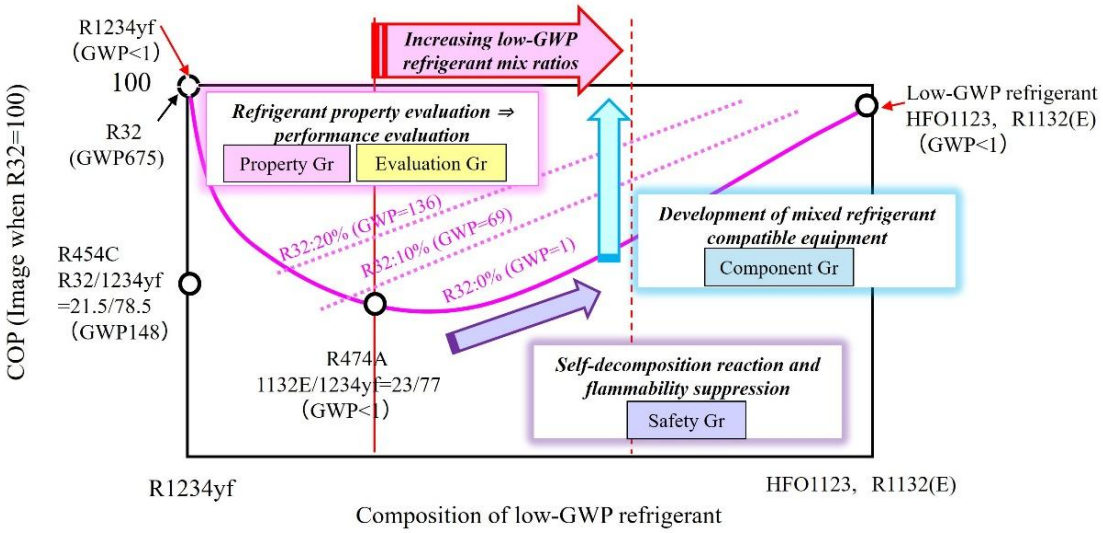


Figure 4.4-1 Conceptual relationship between refrigerant composition and system performance

4.5 分野横断的連携の特徴

本プロジェクトでは，各研究グループの成果が循環的に統合されることにより，冷媒・機器・評価の一体的最適化が図られている．

例えば，

- 冷媒グループの物性データは，機器設計およびシステム評価に活用される

- 安全グループの知見は，機器設計条件および運転条件の設定に反映される
- 評価グループの解析結果は，冷媒選定および機器設計にフィードバックされる

このような分野横断的連携により，単独の技術領域では解決困難な課題に対して，統合的に対応することが可能となっている．

5. プロジェクト研究例

5.1 NEDO で開発されている冷媒の自己分解反応

空調用途の分野で現在主流となっている冷媒は R-32 である．次世代冷媒候補として，地球温暖化係数が低く，安全性が高い冷媒が長年求められている．そこで，本プロジェクトでは，エチレン中の水素原子をフッ素原子に置換することで得られる R-1132(E)と HFO-1123 に着目した. これらの物質の特性を Table 5.1-1 に示す．これらの化合物は，炭素-炭素二重結合を特徴とするハイドロフルオロオレフィン（HFO）ファミリーに属す．しかし，このような不飽和フッ素化合物は，高温高圧条件下で自己分解する傾向があることが知られており，潜在的な安全上のリスクから，これまで実用化には至っていない．

これらの冷媒の自己分解は，式(5.1-1)および(5.1-2)に示すように，酸素のない環境下でも起こり得る．

For HFO-1123: $2CF_2 = CHF \rightarrow CF_4 + 3C + 2HF$ (5.1-1)

For R-1132(E): $CHF = CHF \rightarrow 2C + 2HF$ (5.1-2)

これらの反応は強い発熱反応であり，酸素が存在しない場合でも進行し，高温高圧条件下では副生成物として炭素とフッ化水素を生成する．

Table 5.1-1 Thermodynamic properties of low-GWP refrigerants

Refrigerant	HFO-1123	R-1132(E)
Formula	$CHF=CF_2$	trans-CHF=CHF
Critical Temperature [°C]	58.6	75.7
Critical Pressure [MPa]	4.54	5.17
Boiling Point [°C]	-59.1	-52.6
Lower Flammability Limit [vol%]	6.3	4.4
Burning Velocity [cm･s-1]	6.5	30.5
Safety Class	-	A2

Figure 5.1-1 は，HFO の自己分解経路の概念図を示している．この図は，自己分解の 2 つの主要なモード，すなわち中温で起こる不均化反応と，高温または放電条件下で起こる熱分解反応を示している．境界線は，不均化反応から完全な熱分解への移行を表している．圧縮機内部で故障が発生した場合，HFO 冷媒は高温高圧状態になり，電気的短絡や放電を引き起こし，自己分解を誘発する可能性がある．反応温度は 1000℃を超え，熱分解を引き起こす．

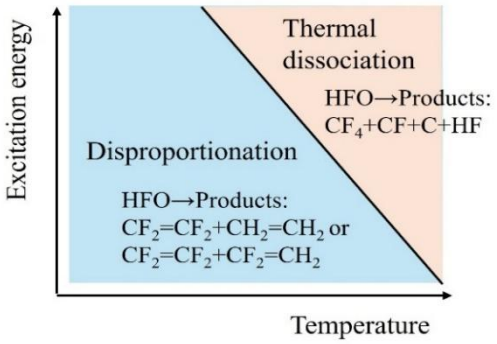


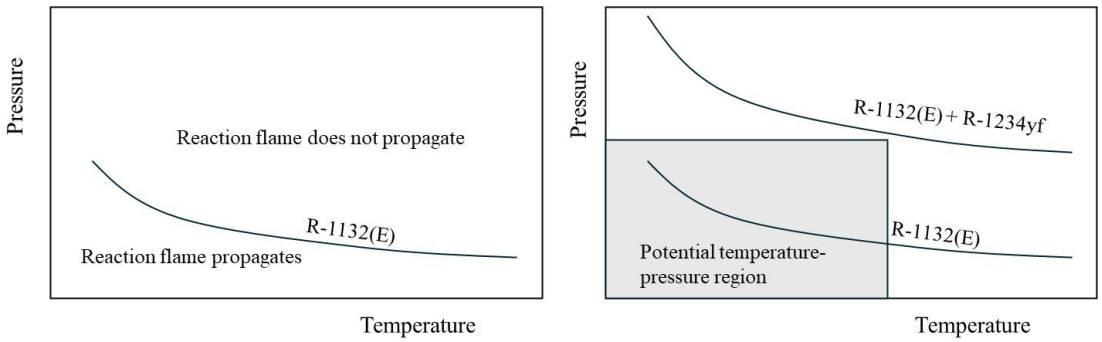
Figure 5.1-1 Self-decomposition pathways of HFOs

この反応は非常に発熱性が高いため，圧縮機内部で着火すると火炎伝播が促進され，ケーシング破裂などの壊滅的な故障につながる可能性がある．この現象を抑制するには，反応中間体を吸収または中和する不活性成分または安定化成分を冷媒に混合する必要がある．検討された潜在的な抑制剤の中で，R-1234yf と R-32 は，得られる混合物が上記の基準も満たす限り，有望な候補として特定されている．

Figure 5.1-2(a)は，R-1132(E)の自己分解反応が伝播する境界条件を示す圧力-温度図の概略図である．温度と圧力が上昇すると，分解火炎はより容易に伝播する．境界線より上では，反応は自己持続的になり，潜在的な危険をもたらすが，境界線より下では，伝播は抑制され，冷媒は安定した状態を保つ．Figure 5.1-2(b)は，冷凍および空調システムで遭遇する典型的な運転圧力と温度範囲を灰色で示している．純粋な R-1132(E)の安定性境界はこの領域内にあり，機器運転中の特定の高温高圧条件下では自己分解が発生する可能性があることを示唆している．反応抑制剤として R-1234yf を添加すると，境界はより高い温度と圧力の方へシフトし，安全な運転範囲が拡大する．R-1132(E)/R-1234yf 混合物の安定性境界が灰色で網掛けされた領域から完全に外れている場合，冷媒は通常のシステム条件下

で熱的に安定しているとみなすことができる．

国際的に登録されている R-1132(E)ベースの混合物の熱物性および環境特性を Table 5.1-2 にまとめた．R-474 は R-1132(E)と R-1234yf の混合物を表し，R-479 はさらに R-32 を含む．R-32 の添加はシステムの性能を向上させるが，地球温暖化係数も増加させる．



(a) R-1132(E) (b) R-1132(E) / R-1234yf

Figure 5.1-2 Propagation boundary of the self-decomposition flame for the R-1132(E)/R-1234yf mixture

Table 5.1-2 Thermophysical and environmental properties of R-1132(E) mixtures

Refrigerant		R-474A	R-474B	R-479A	R-479B
Composition	R-1132(E) [mass%]	23	31.5	28	23
	R-1234yf [mass%]	77	68.5	50.5	33
	R-32 [mass%]	-	-	21.5	44
Physical Property	Boiling Point [°C]	-43.4	-45.8	-50.5	-51.9
	Critical Temp. [°C]	87.8	85.2	80.5	78.1
	Critical Pres. [MPa]	4.05	4.22	4.81	5.23
GWP(AR4)		< 1	< 1	147	299
Safety Class		A2L	A2L	A2L	A2L

5.2 低 GWP 混合冷媒の基本性能

非共沸冷媒混合物は温度グライドを示すため，純粋冷媒の場合と比較してサイクル性能が低下する可能性がある．そこで，REFPROP バージョン 10 を用いて熱力学的性能を計算した結果の一部を示す．冷凍サイクル計算の結果を示す前に，R-32/HFO-1123/R-1234yf 系の蒸発器側温度グライドを示す．計算は Figure 5.2-1 を参考にして，以下のように計算する．

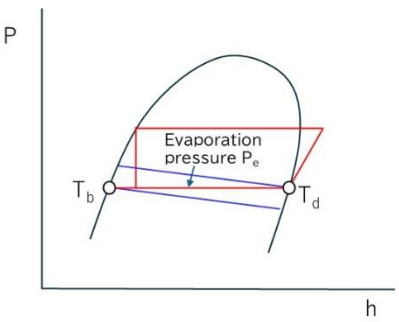


Figure 5.2-2 Definition of temperature glide

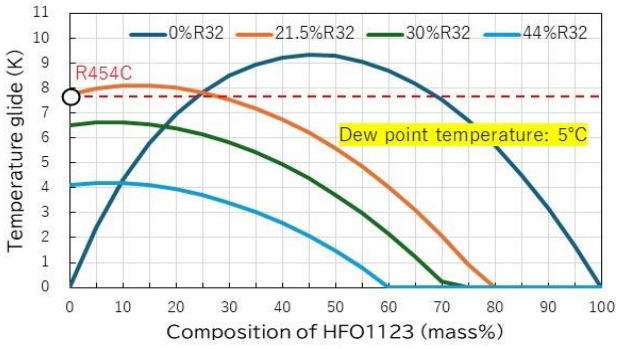


Figure 5.2-1 Temperature glide with a dew point of 5°C

- 蒸発器出口（露点温度：T_d）を基準として定義する
- 露点温度から蒸発圧力を求める： P_e
- 蒸発圧力の気泡点温度を求める：T_b
- 温度グライド：$\Delta T_e = T_d - T_b$

露点温度が 5℃の時の R-32/ HFO-1123/R-1234yf 系の温度グライドを Figure 5.2-2 に示す. R-32 の濃度は，0，21.5，30，44mass%としている．参考のために R454C の温度グライドも示している．

次に，冷凍サイクルの性能を示す．計算条件は以下のとおりである．蒸発器の代表温度は 5℃，圧力は等圧，過熱度は 5℃とする．温度グライドによる熱交換器性能の低下を考慮するため，蒸発器圧力は $Pe = (1 - \alpha) Pb + \alpha Pd$ と定義する．ここで，Pb と Pd は 5℃における沸点圧力と露点圧力である．

凝縮器の代表温度は 40℃，圧力は等圧，過冷却度は 5℃とする．凝縮器圧力は $Pc = \beta Pb + (1 - \beta) Pd$ と定義する．圧縮過程の断熱効率は 0.75 とする．

$\alpha = \beta = 0.5$ と設定すると，温度グライドによる熱交換器の性能低下が無視されるが，$\alpha = \beta = 1$ と設定すると，最大の劣化が表される．Figure 5.2-3 は，$\alpha = \beta = 1$ と仮定した場合の R-32/ HFO-1123/R-1234yf システムの冷却 COP を示している．GWP は R-32 濃度によって決まるため，R-32 の質量分率は 0，20，30，または 44 % に固定されている．R-32 が 0% の場合，二成分 HFO-1123/R-1234yf 混合物の COP は純粋な冷媒の COP よりも大幅に低く，この低下は R-32 を追加することで緩和される．Figure 5.2-4 は，α と β を 1 から 0.5 に減らしたときの HFO-1123/R-1234yf システムの熱交換器の性能のシミュレーションによる改善を示している．熱交換器の性能向上により，COP が向上する可能性がある．

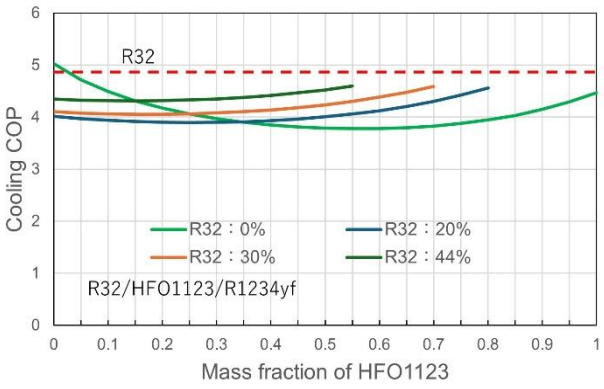


Figure 5.2-3 Cooling COP of R-32/ HFO-1123/R-1234yf mixture

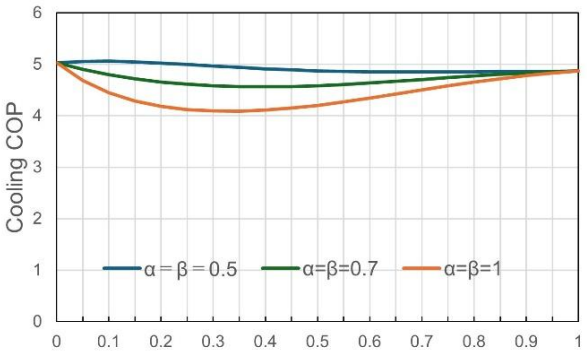


Figure 5.2-4 Effect of pressure on cooling COP of HFO-1123/R-1234yf mixture

6. まとめと今後の展開

本プロジェクトは，モントリオール議定書キガリ改正に基づく HFC 削減義務への対応を背景として，低 GWP 冷媒の実用化およびそれに対応する冷凍空調機器技術の確立を目的として推進されている．特に，自然冷媒への単純な転換ではなく，国産 HFO 系混合冷媒の実用化を軸とする点において，環境対応と産業競争力の両立を志向した研究開発である点に本プロジェクトの特徴がある．

これまでの取組により，冷媒物性，安全性，機器要素技術およびシステム評価に関する基盤技術が段階的に整備されつつあり，低 GWP 冷媒の実用化に向けた技術体系の構築が着実に進展している．特に，自己分解反応の解明およびヒートポンプ性能確保に向けた研究が進められており，実用化の可否を左右する主要課題に対する理解が深化しつつある．

本プロジェクトの意義は，単なる技術開発にとどまらず，冷媒転換という政策的要請に対して，日本としてどの技術ルートを選択し，どのように社会実装へ結び付けるかを具体化する点にある．すなわち，本プロジェクトは，規制対応，技術開発および産業戦略を統合した形で推進される実用化志向型の研究開発であり，今後の冷凍空調分野における技術選択の方向性を示すものと位置付けられる．

今後の展開としては，まずプロジェクト期間内において，冷媒候補の最適化，安全性評価手法の確立および機器設計指針の整備を進め，実用化に必要な技術基盤の完成度を高めていく必要がある．特に，自己分解反応に関する知見の体系化と，それを踏まえた安全設計の確立は，国際標準化および市場導入の前提条件となる重要な課題である．

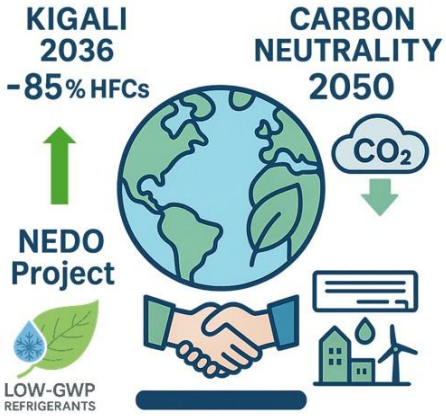


Figure 6.1-1 Outcomes of the project

さらに，プロジェクト終了後においては，企業による製品開発および量産化の推進，ならびに規格・制度との整合を図りつつ，低 GWP 冷媒対応機器の市場導入を加速することが求められる．この過程において，本プロジェクトで整備される物性データ，安全性評価手法および設計指針は，製品開発および国際標準化の基盤として活用されることが期待される．

また，冷媒転換は一国のみで完結するものではなく，国際的な標準化および市場動向との整合が不可欠である．本プロジェクトにより得られる成果を国際的な枠組みへ展開し，日本発の技術および評価手法を国際標準として確立していくことが，今後の重要な課題となる．本プロジェクトの成果を社会実装へと確実に結び付けるため，国際的な情報発信および人材育成の観点から，以下の取組を計画している．

- 2028 年度に国際シンポジウムを開催し，本プログラムで開発された冷媒や機器技術について，広く国際的に発信してゆく．
- 本プログラムが終了した 2029 年度に NEDO 特別講座を開催し，大学関係者，機器メーカーの若手技術者などを対象として，本プログラムで開発された冷媒や機器技術について講習する予定である．

最終的には，本プロジェクトの成果が，キガリ改正に基づく HFC 削減目標の達成および 2050 年カーボンニュートラルの実現に寄与するとともに，低 GWP 冷媒および関連機器分野における我が国の国際競争力の強化につながることが期待される．