

「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」  
中間評価報告書

2021年1月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

2021年1月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
理事長 石塚 博昭 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会 委員長 小林 直人

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。



「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」  
中間評価報告書

2021年1月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

## 目 次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
評価概要	4
研究評価委員会委員名簿	6
研究評価委員会コメント	7
第1章 評価	
1. 総合評価	1-1
2. 各論	1-4
2. 1 事業の位置付け・必要性について	
2. 2 研究開発マネジメントについて	
2. 3 研究開発成果について	
2. 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	
3. 評点結果	1-15
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録及び書面による質疑応答	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1
参考資料3 評価結果の反映について	参考資料 3-1

## はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「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」の中間評価報告書であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条に基づき、研究評価委員会において設置された「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」（中間評価）分科会において評価報告書案を策定し、第63回研究評価委員会（2021年1月8日）に諮り、確定されたものである。

2021年1月  
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

## 審議経過

### ● 分科会（2020年10月6日）

#### 公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

#### 非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. 全体を通しての質疑

#### 公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他、閉会

### ● 第63回研究評価委員会（2021年1月8日）

「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」

中間評価分科会委員名簿

(2020年10月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	しかぞの なおき 鹿園 直毅	東京大学生産技術研究所 教授
分科会長 代理	なかじま ひであき 中島 英彰	国立環境研究所 地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室 主席研究員
委員	あさおか たつり 浅岡 龍徳	信州大学 学術研究院工学系 工学部 機械システム工学科 准教授
	ささき なおえ 佐々木 直栄	日本大学 工学部 機械工学科 教授
	ささき まさのぶ 佐々木 正信	東京電力エナジーパートナー株式会社 販売本部 副部長
	みうら ひさし 三浦 尚志	建築研究所 環境研究グループ 主任研究員
	わくい てつや 涌井 徹也	大阪府立大学 大学院工学研究科 機械系専攻 機械工学分野 准教授

敬称略、五十音順

## 評価概要

### 1. 総合評価

明確な研究開発計画を、充実した実施体制の下で意欲的に進め、いずれの課題も目標に向かって着実に良い成果が出ており、進捗状況も良好である。

一方、現時点では、モントリオール議定書キガリ改正の目標を達成できそうな決定的な冷媒の候補はまだ見つかっておらず、残り2年間で引き続き有望な冷媒候補の発掘と、その特性評価、国際規格化・標準化、製品化に向けた一層の取り組みを期待したい。特に、空調機器についての次世代冷媒をどうすべきかについては、性能面・安全性からもまだ多くの議論が必要かと考えられ、次世代冷媒の安全性を担保した上で普及させるために、安全性・リスク評価の成果を基に、産学間の関係強化をより一層進め、日本が主導的に次世代冷媒の国際規格への提案を図り、国際規格化・標準化に貢献するよう、さらに研究を進められることを期待する。

### 2. 各論

#### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

モントリオール議定書キガリ改正に基づく生産・消費量の段階的削減目標を達成するためには、GWP（地球低温暖化係数）が低い新規冷媒開発は喫緊の課題であり、次世代冷媒およびその適用機器の開発は急務であることから、NEDOとして進める本事業の目的は妥当なものである。

また、当該研究内容は、先行きが不透明な中で市場からの強い要望があり、公共性が高い事業であること、民間企業単独ではリスクが大きく、研究機関と民間企業の連携を要すること、冷媒産業の国際競争力を大きく左右すること等から、NEDO事業としても適当である。さらに、投じた研究開発費と比較して、十分に有意義な成果が得られることが期待される。

#### 2. 2 研究開発マネジメントについて

冷凍空調分野における有力な低GWP冷媒候補に対しては、物性・性能評価だけでなく、安全性・リスク評価が不可欠であることから、2つの研究開発項目を並行して実施することは極めて戦略的な目標設定である。特に、現状フロン品と同等以上の性能を実現する技術の達成見通しを得るために、委託事業では、成果の国際規格・国際標準への提案と国際データベースへの登録申請を具体的に目標としていること、助成事業では、現状市販フロン品と同等以上の性能を実現するために個別に目標を定める等、達成度を判定できる明確な目標を設定している点は、評価できる。

また、多岐に渡る研究開発に対して、プロジェクトリーダーとサブプロジェクトリーダーによる事業進捗マネジメントが適切に行われ、事業が順調に進んでいる点も評価できる。

委託事業である物性評価・安全性評価においては、継続的な研究が重要であり、知見集積、人材育成、状況変化への対応は必要である一方、研究リソースは限られることから、今後の

研究内容については優先順位を精査し、必要な研究はさらに加速化して行っていただきたい。

### 2. 3 研究開発成果について

いずれのテーマも、設定していた中間目標を達成できる見込みにあることは、高く評価できる。また、委託事業では、国際規格化・標準化および国際データベースへの登録を視野に3年間継続的に成果発表が実施されているだけでなく、一般向けの伝熱データベースの公開準備も進めていること、助成事業では、事業化に向けて必要な知的財産権の確保を戦略的に進めていることは、評価できる。

一方、キガリ改正に対する課題解決のための冷媒候補としては、不均化反応や燃焼性、毒性の問題で解決しなければならない課題が残っており、本研究開発の後半2年間で着実に開発していくことを期待したい。また、安全性・リスク評価の研究成果は重要であり、当該研究成果を踏まえて、産学間の関係強化をより一層進め、合理的なリスクマネジメント対策についても検討して頂くのが望ましく、安全性検討に際しては、実態に即した合理的な評価結果を一般にも解りやすい形で情報提供をして頂きたい。

### 2. 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

委託事業については、国際規格化・標準化および国際データベース REFPROP に積極的に情報提供し、登録を視野に入れて研究が実施されてきており、学会および事業者団体を含めたワーキンググループを構築し、規制・規格などの動向についての情報共有、ならびに次世代冷媒の安全性・リスクについての意見交換が進められていることは評価できる。

また、補助事業についても、いずれもプロジェクト終了後の事業化に向けた戦略および計画が明確に立てられており、機器開発に関しては想定する市場・ニーズ規模により経済効果を期待することができる。

今後は、実運転性能評価装置を用いた次世代空調機器の様々な性能評価を推進し、次世代冷媒の安全性を担保した上で、安全性・リスク評価の成果に基づいて、複数件の国際規格への提案をすることで、国際規格化・標準化に貢献して行っていただきたい。

加えて、研究成果のデータベースなどを一般向けに公開していくことを推進していただきたい。

## 研究評価委員会委員名簿

(2021年1月現在)

	氏 名	所属、役職
委員長	こばやし なおと 小林 直人	早稲田大学 参与・名誉教授
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	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 研究アドバイザー
	あたか たつあき 安宅 龍明	先端素材高速開発技術研究組合 (ADMAT) 専務理事
	かわた たかお 河田 孝雄	株式会社日経 BP 日経バイオテック編集 シニアエディター
	ごないかわ ひろし 五内川 拡史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	さくま いちろう 佐久間 一郎	東京大学 大学院工学系研究科 教授
	たからだ たかゆき 宝田 恭之	群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 特任教授
	ひらお まきひこ 平尾 雅彦	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻 教授
	まつい としひろ 松井 俊浩	情報セキュリティ大学院大学 情報セキュリティ研究科 教授 国立研究開発法人産業技術総合研究所 名誉リサーチャー
	やまぐち しゅう 山口 周	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
	よしかわ のりひこ 吉川 典彦	東海国立大学機構名古屋大学 名誉教授
よしもと ようこ 吉本 陽子	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部 経済政策部 主席研究員	

敬称略、五十音順



## 研究評価委員会コメント

第63回研究評価委員会(2021年1月8日開催)に諮り、本評価報告書は確定された。  
研究評価委員会からのコメントは特になし。

## 第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

## 1. 総合評価

明確な研究開発計画を、充実した実施体制の下で意欲的に進め、いずれの課題も目標に向かって着実に良い成果が出ており、進捗状況も良好である。

一方、現時点では、モントリオール議定書キガリ改正の目標を達成できそうな決定的な冷媒の候補はまだ見つかっておらず、残り 2 年間で引き続き有望な冷媒候補の発掘と、その特性評価、国際規格化・標準化、製品化に向けた一層の取り組みを期待したい。特に、空調機器についての次世代冷媒をどうすべきかについては、性能面・安全性からもまだ多くの議論が必要かと考えられ、次世代冷媒の安全性を担保した上で普及させるために、安全性・リスク評価の成果を基に、産学間の関係強化をより一層進め、日本が主導的に次世代冷媒の国際規格への提案を図り、国際規格化・標準化に貢献するよう、さらに研究を進められることを期待する。

### <肯定的意見>

- ・ いずれの課題も目標に向かって着実に良い成果が出ていると思います。中間評価として、全く問題ないと考えます。
- ・ 各大学・研究機関での新規 GWP 冷媒候補に関する基礎データ取得と、それら新規冷媒候補を実際に用いた各メーカーによる新規機器開発が有機的に結びついて行われており、本研究開発の成果の最大化に向けた取り組みがなされている。
- ・ 研究開発計画が明確で、実施体制も充実している。どのグループも意欲的に検討を進めており、優れた成果が得られている。中間目標をおおむね達成しており、進捗状況も良好である。
- ・ 「事業の位置付け・必要性」、「研究開発マネジメント」、「研究開発成果」および「実用化・事業化に向けての見通し及び取組み」について、大きな問題はないと評価できる。
- ・ 低 GWP 冷媒の採用と高 COP 機器の両立は困難だが、両立させるべき課題であり、当該機器の開発が必要とされている。よって、本プロジェクトによる取り組みは極めて重要である。
- ・ 物性評価、安全性評価は地道な取り組みが必要であり、本プロジェクトの精力的な取り組みにより、多くの成果を上げていることを評価。
- ・ 燃焼特性を持つ冷媒使用は不可避であり、実社会でどのように合理的に安全に活用するかの方法論確立は極めて重要なテーマである。当該研究分野で、日本が先導的な取り組みを進めることは大きな国際貢献であり、当該知見を活用して安全な製品を上市することは極めて重要である。また、各国とも最終解が見いだせていない状況であることから、日本の NEDO プロジェクトで支援するテーマとしても相応しいテーマである。
- ・ 世界的な冷媒規制に対する背景を的確に捉えた問題設定がなされていると思われる。
- ・ 国際的な規制を背景として次世代冷媒およびその適用機器の開発が急務になっている中で、次世代冷媒・冷凍空調機器の基本的特性の解明と安全性・リスクの評価を行う本事業は極めて必要かつ効果の高い事業であると評価する。
- ・ 2020 年は新型コロナウイルス感染拡大の影響で多くの制限があるにも関わらず、いずれ

の事業も設定していた中間目標を達成できる見込みにあることは極めて高く評価できるものであり、実施者の皆様に深く敬意を表します。

- ・ 次世代冷媒は基本的特性の解明と安全性・リスク評価の2軸を並行して進める必要があり、広範囲に渡る研究を行うことになるが、PJリーダー、サブPJリーダーの適切な指導、マネジメントの元で着実に成果を出されていることは極めて高く評価できる。
- ・ 日本製品の競争力強化のためにも次世代冷媒を用いた製品開発は不可欠であり、事業化までを視野に入れた機器および冷媒開発が着実に進んでいることは極めて高く評価できる。

#### <改善すべき点>

- ・ いくつかの低GWP冷媒候補は本研究開発で出てきてはいるが、いずれも不均化が起こらない最適混合比率や、可燃性の問題などがクリアされておらず、決定的な冷媒候補はまだ見つかっていない。また、ASHRAEへの冷媒番号登録に向けた毒性試験も行って、冷媒登録を行い、国際的に使われる国産の低GWP新規冷媒の開発を本研究開発で行ってほしい。
- ・ 従来の冷媒転換時の経験を活かして、国外の技術動向や国際競争力の状況について、綿密な情報収集の継続、臨機応変な対応が必要。
- ・ 産業界への効果として、ルームエアコンの世界市場（約4兆円/年）における日本企業のシェア拡大が期待されているが、具体的な戦略が必要。
- ・ 産学間の関係強化をより一層進めるべき。
- ・ 国際規格に反映するために必要な、優先順位が高い追加的データ収集は加速化すべきだし、海外のキーパーソンとのコミュニケーションも積極的に図るべき。
- ・ 概ね順調である。

前述したとおり、日本特有の災害時対応等も考慮した、実行的なリスク評価を期待する。今後、冷媒の効率を評価するにあたり、定格運転点での評価だけではなく低負荷運転時の効率評価、発停を伴う断続運転時の評価についても考慮頂きたい。

#### <今後に対する提言>

- ・ 空調やショーケース用途では、まだ決め手となるような代替冷媒を絞り込めていない中で、今後空調技術は大きく変革する可能性があると思います。これをリスクではなく好機とすることができるように、引き続き良い成果を上げていただければと思います。
- ・ 現時点では、モントリオール議定書キガリ改正の2029年70%削減を達成できそうな決定的な冷媒の候補はまだ見つかっておらず、残り2年間で引き続き有望な冷媒候補の発掘と、その特性評価、国際標準化、製品化に向けた一層の取り組みが期待される。
- ・ さらに発展的な成果を期待しています。
- ・ 成熟した実施体制であるがゆえに、技術的ノウハウの伝承を確実に進め、次代の体制作りも着々と進めておく必要があるのでは？
- ・ 新たなプレイヤー（これまで間接的に関与してきた素材メーカーや関連異分野研究者な

ど)を探索して、体制に取り込んでいくことも必要では？

- 次のステップとして、ルームエアコンの世界市場における日本企業のシェア拡大の具体的な戦略立案が必要では？
- 新冷媒の開発，冷媒番号の取得および世界市場展開に期待したい。
- 物性計測や安全性に関する研究は継続性が重要であり、関連大学を産総研や物質・材料研究機構などが束ねる継続的な体制構築が必要なのではないか。  
また、冷房運転や除湿運転など、欧州で想定される運転条件とは異なるアジア特有の評価について取り組んで頂き、日本の優れたヒートポンプ技術の海外展開を後押しするため、国際的評価に反映させる等の働きかけを期待する。
- 次世代冷媒の安全性を担保した上で普及させるために、安全性・リスク評価の成果が国際規格の提案に活用されることを期待しております。
- 空調機器についての次世代冷媒をどうするべきか、性能面からも安全性からもまだ多くの議論が必要かと考えます。是非、日本が主導的に次世代冷媒の選定指針を提案できるように、さらに研究を進められることを期待しております。

## 2. 各論

### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

モントリオール議定書キガリ改正に基づく生産・消費量の段階的削減目標を達成するためには、GWP（地球温暖化係数）が低い新規冷媒開発は喫緊の課題であり、次世代冷媒およびその適用機器の開発は急務であることから、NEDOとして進める本事業の目的は妥当なものである。

また、当該研究内容は、先行きが不透明な中で市場からの強い要望があり、公共性が高い事業であること、民間企業単独ではリスクが大きく、研究機関と民間企業の連携を要すること、冷媒産業の国際競争力を大きく左右すること等から、NEDO事業としても適当である。

さらに、投じた研究開発費と比較して、十分に有意義な成果が得られることが期待される。

#### <肯定的意見>

- ・ HFC 冷媒の代替化は空調分野における大きな課題であり、その選定は当該産業の国際競争力を大きく左右するため、国としての支援は妥当だと思います。先行きが不透明な中、民間企業単独ではリスクが大きな課題が支援されており、NEDO事業としても適当だと思います。
- ・ モントリオール議定書キガリ改正による HFC の段階的削減スケジュールで、日本として 2029 年に対応しなければならない 70%削減のために低 GWP の新規冷媒開発は喫緊の課題であり、NEDOとして進める本事業の目的は大変妥当なものである。
- ・ 世界に先駆けた検討であり、市場からの強い要望に応える事業である。公共性が高い事業であり、研究機関と民間企業の連携を要することから、NEDOの事業とする意義が強く感じられる。投じた研究開発費と比較して、十分に有意義な成果が得られることが期待される。
- ・ 2016 年のキガリ改正採択により、我が国を含む先進国は 2036 年までに HFC の生産・消費量を 85%削減する目標が示された今、次世代冷媒を対象とした本事業の必要性は高く、その目標の高さから判断すると、民間活動のみでは対応できない可能性があり、NEDO事業としての妥当性も高いと評価できる。
- ・ 我が国の温室効果ガス排出削減目標として最も大きな割合を示す「エネルギー起源 CO<sub>2</sub>」排出量削減に貢献する冷凍空調技術の効率改善対策立案においても、次世代冷媒の基本特性の早期把握が重要となるものと評価できる。
- ・ キガリ改正による日本国内対応を達成するためには、残された時間は少なく、基礎的研究と製品開発を両輪で推進することが必要であり、NEDOプロジェクトとして加速化させることが必要である。
- ・ グローバル市場を考えると、欧州市場が F-gas 規制により、先進国で一番厳しい規制となっている。メーカー各社は欧州市場に対応した製品を開発する必要があり、欧州市場で競争力を持ったメーカーが、将来のグローバル市場で競争力を持つことになる。国内

メーカーが将来も事業継続できるかどうかは、当該分野の技術開発成否にかかっており、NEDO プロジェクト費用との比較においても十分な効果が期待できる。

- ・ 国内企業は欧米の大手化学企業のような資金力がないため、冷媒開発を助成事業により支援することは妥当。
- ・ 詳細な物性計測および安全性評価を民間企業が実施することは困難であり、NEDO プロの委託事業として実施することが必要。
- ・ 国際的なフロン規制に対する動向を的確に捉えた課題設定がなされている。また、冷媒の物性把握に関する課題は基礎的試験の積み重ねが重要であり、産官学の取り組みを推進するうえでNEDOの事業としての妥当性は適切である。
- ・ 地球温暖化対策において代替フロン（HFC）の排出量削減目標が掲げられ、また、キガリ改正に基づく生産・消費量の段階的削減目標を達成するためには、低GWP冷媒への切り替えが不可欠であり、次世代冷媒およびその適用機器の開発は急務である。事業目的の妥当性は極めて高い。
- ・ 冷凍空調分野での有力な低GWP冷媒候補を明らかにするためには、多くの企業、大学、研究機関が連携して物性・性能評価および安全性・リスク評価を行う必要があり、その成果が我が国の産業競争力強化に大きく寄与することからNEDO事業としての妥当性は極めて高い。

#### <改善すべき点>

- ・ 改善ということではありませんが、海外の動向を含め、ポストHFCの動きはまだまだ流動的かと思えますので、状況の変化があれば適切に対応していただければと思います。
- ・ 現時点では決定的にこれで行けそうだという冷媒の候補はまだ見つかっておらず、残り2年間で引き続き有望な冷媒候補の発掘と、その特性評価、国際標準化に向けた取り組みが期待される。
- ・ 従来の冷媒転換時の経験を活かして、国外の技術動向や国際競争力の状況は刻々と変化するものと捉えて、綿密な情報収集を継続し、臨機応変な対応が必要と考えられる。
- ・ 産業界への効果として、ルームエアコンの世界市場（約4兆円/年）における日本企業のシェア拡大が期待されているが、今回の事業が世界的なシェア拡大にどのようなつながるのかが明確でないため、費用対効果に関しては明確に判断できない。
- ・ CO<sub>2</sub>排出削減量を排出権取引した場合の換算価格として表示できれば、効果を明確に判断できるのではないか？
- ・ 安全性については世界共通の課題でもあり、世界的な新型コロナウイルス流行下ではあるが、海外への安全性評価の研究結果発信も国際貢献として積極的に実施して頂きたい。
- ・ 新冷媒におけるエネルギー効率の評価にあたっては、ISOやJISで定められる定格運転時の評価だけでなく、例えば冷房運転時あるいは高湿環境における除湿運転など、欧州で想定される運転方法とは異なる日本・東南アジア独特の気候を考慮し、アジア圏の海外諸国への輸出産業の強化に資するように、より実行的な効率評価および、そのような評価軸に対して国際的な認知度を向上させる活動を行って頂きたい。
- ・ わが国での次世代冷媒およびその適用機器の開発は、2040年以降に厳しい規制が求め

られる途上国での更新需要の拡大に対しても、大きなアドバンテージになると考えられる。国際貢献の観点からも事業目的の妥当性が高いことをさらに強調することを希望します。



## 2. 2 研究開発マネジメントについて

冷凍空調分野における有力な低 GWP 冷媒候補に対しては、物性・性能評価だけでなく、安全性・リスク評価が不可欠であることから、2つの研究開発項目を並行して実施することは極めて戦略的な目標設定である。特に、現状フロン品と同等以上の性能を実現する技術の達成見通しを得るために、委託事業では、成果の国際規格・国際標準への提案と国際データベースへの登録申請を具体的に目標としていること、助成事業では、現状市販フロン品と同等以上の性能を実現するために個別に目標を定める等、達成度を判定できる明確な目標を設定している点は、評価できる。

また、多岐に渡る研究開発に対して、プロジェクトリーダーとサブプロジェクトリーダーによる事業進捗マネジメントが適切に行われ、事業が順調に進んでいる点も評価できる。

委託事業である物性評価・安全性評価においては、継続的な研究が重要であり、知見集積、人材育成、状況変化への対応は必要である一方、研究リソースは限られることから、今後の研究内容については優先順位を精査し、必要な研究はさらに加速化していただきたい。

### <肯定的意見>

- ・ いずれの事業も適切な事業者が選定されていると思います。
- ・ GWP<150 となる新規冷媒の開発と特性評価、それを用いた家庭用・業務用空調機器、小型業務用冷凍・冷蔵機器の開発は、キガリ改正 2029 年問題クリアーのために不可欠な課題であり、本研究開発課題で知的財産を含めて開発していこうとしている戦略は大変理にかなったものである。
- ・ 研究開発計画が丁寧につくられており、実施体制も適切で充実している。進捗は順調であり。おおむね予定通りに進んでいる。知的財産や国際標準化に関する戦略は妥当である。
- ・ 内外の技術動向を踏まえた目標設定になっていると評価する。従来 of の取組みでは小型のルームエアコンの研究開発を目標に掲げることが多かったような印象を持つが、今回は比較的大型の冷凍冷蔵システムに軸足を置いているところが戦略的な特徴と評価できる。
- ・ 研究開発の実施体制は、経験豊かな組織やメンバーにより構成されており、研究開発計画も無理のない内容になっていると評価できる。
- ・ 現時点の状況を踏まえた、適切な目標と研究開発計画が設定されている。
- ・ 研究進捗に応じて、一部研究の前倒しを実施していることを評価。
- ・ 研究テーマに対し、十分に実現可能な事業者が選定されている。
- ・ 国際標準化の実現に向けて、適切なエビデンスを積み重ねていることを評価。
- ・ 新型コロナウイルス流行下においても、臨機応変に研究を進めたことを評価。
- ・ 短期的な研究と中長期的な研究のバランスが取れた、次世代冷媒・冷凍空調技術に関する

る包括的な研究となっていることを評価。

- ・ 国内外の技術動向を的確に把握していると言える。
- ・ 研究開発計画もテーマごとに配慮されている。
- ・ 実施体制・進捗状況についても妥当である。
- ・ 冷凍空調分野において有力な低 GWP 冷媒候補は物性・性能評価だけでなく、安全性・リスク評価が不可欠であることから、2 つの委託事業を並行して実施することは極めて戦略的な目標設定である。また、現状フロン品と同等以上の性能を実現する技術の達成見通しを得るために、補助事業を実施することは国際的な産業競争力の強化に大きく寄与しうる。
- ・ 委託事業では、成果の国際規格・国際標準への提案と国際データベースへの登録申請を具体的に目標としていること、また、補助事業では現状市販フロン品と同等以上の性能を実現するために個別に目標を定めており、達成度を判定できる明確な目標を設定している。最終目標の達成を見据えた 2020 年度における中間目標ならびにそれまでの研究開発計画が具体的に設定されている。
- ・ 多岐に渡る研究・開発に対して、PJ リーダーとサブ PJ リーダーによる事業進捗マネジメントが適切に行われ、事業が順調に進んでいる。
- ・ キガリ改正発効、オゾン層保護法施行を受けて、低 GWP 冷媒およびその適用機器の開発・導入を推進するために、2019 年度より助成事業を新たに追加したことは社会情勢変化への適切な対応として評価できる。
- ・ 委託事業は国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録を視野に、公共的な知的財産を蓄積するために、成果を積極的に外部に公表する戦略を取っており、NEDO 事業の成果公開方法として高く評価できる。
- ・ 委託事業では国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録に向けて、学会および事業者団体を含めたワーキンググループを構築し、情報共有ならびに意見交換の枠組みを構築していることは高く評価できる。

#### <改善すべき点>

- ・ 達成度については、自身に辛めの評価のものがあつた気がしますが、見かけ上目標達成が困難ではないかとの余計な心配をすることになるので、より実態に合った数字にしていただければと思います。
- ・ ASHRAE の冷媒番号登録のために必要な毒性試験が、助成事業の冷媒開発メーカーの取り組みに任されている。本研究で開発された低 GWP の最も有望な冷媒に関して、ASHRAE 登録のために必要最低限な毒性試験に関しても、助成事業でなく、本研究の一環として行うことが望まれる。
- ・ 研究開発の進捗管理は問題ないと評価されるが、遅延が生じる可能性がある項目の予測やその対応策についても提示してもらえれば、より大きな信頼が得られるのではないか？
- ・ 知的財産等に関する妥当性に関しても問題ないと評価されるが、その戦略が不明のため、

明確には判断できなかつた。

- ・ 委託事業である物性評価研究・安全性評価においては、継続的な研究が重要であり、知見集積、人材育成、状況変化への対応が必要である。一方、研究リソースは限られることから、今後の研究内容については優先順位を精査し、必要な研究はさらに加速化すべき。

#### <今後に対する提言>

- ・ 科学的根拠に基づいて国際標準に貢献することは、我が国の技術力のアピールになると思いますので、ぜひ標準化されることを期待しています。
- ・ 本研究開発の範囲外ではあるが、旭硝子株式会社が AMOLEA シリーズという HFO-1123/HFC-32/HFO-1234yf 混合の新規冷媒を開発している。ただしこの物質には自己分解反応があり、毒性評価もまだなので、ASHRAE 冷媒番号にも登録されていない。できればその冷媒に関しても、本研究開発で特性評価だけでなく、毒性試験が行われれば、国産の新規冷媒開発につなげることができると期待される。
- ・ 成熟した実施体制であるがゆえに、技術的ノウハウの伝承を確実に進め、次代の体制作りも着々と進めておく必要があると考える。
- ・ 新たなプレイヤー（これまで間接的に関与してきた素材メーカーや関連異分野研究者など）を探索し、体制に取り込んでいくことも必要と考える。
- ・ 中間目標の達成状況は順調であるが、最終目標の確実な達成に向けて綿密なマネジメントが必要。
- ・ 知的財産の確保についてもう少し整理して頂き報告頂ければよかった。また、新冷媒について知見の蓄積を行うことで国際的な学術的意義があることは十分理解したが、日本国としての新規開発メリットについての説明が欲しい。本分野で国際的競争力を確保するための計画・配慮がなされることを今後期待する。

## 2. 3 研究開発成果について

いずれのテーマも、設定していた中間目標を達成できる見込みにあることは、高く評価できる。また、委託事業では、国際規格化・標準化および国際データベースへの登録を視野に3年間継続的に成果発表が実施されているだけでなく、一般向けの伝熱データベースの公開準備も進めていること、助成事業では、事業化に向けて必要な知的財産権の確保を戦略的に進めていることは、評価できる。

一方、キガリ改正に対する課題解決のための冷媒候補としては、不均化反応や燃焼性、毒性の問題で解決しなければならない課題が残っており、本研究開発の後半2年間で着実に開発していくことを期待したい。また、安全性・リスク評価の研究成果は重要であり、当該研究成果を踏まえて、産学間の関係強化をより一層進め、合理的なリスクマネジメント対策についても検討して頂くのが望ましく、安全性検討に際しては、実態に即した合理的な評価結果を一般にも解りやすい形で情報提供をして頂きたい。

### <肯定的意見>

- ・ いずれの事業もしっかりと実施されており、国際的に見ても高い成果が出ていると思います。
- ・ 新しい組成の低GWP冷媒の基礎特性評価を着々と進めており、導出された状態方程式がISO817やNISTのREFPROP10.0などの国際標準式にも採用されるなど、国際的な成果を着実に上げていることは高く評価できる。また各メーカーによる新規空調・冷凍・冷蔵機器の開発も、着実に成果を上げつつある。
- ・ 成果は中間目標をおおむね達成しており、世界的に高い水準の成果が得られている。知的財産に関しても順調である。
- ・ 成果は中間目標を達成できており、最終目標を達成できる見通しもあり、明確なスケジュールリングが出来ているものと評価できる。
- ・ 国内外への本プロジェクト成果の発信手段が確立しており、企業における実用化の戦略に沿って、知的財産権の出願が行われているものと評価できる。
- ・ 中間目標の達成状況は順調であり、最終目標の達成見通しも妥当。
- ・ 研究成果について、知財出願や論文発表を適切に実施している。
- ・ 中間目標・成果の最終目標の達成の可能性は十分であると感じた。
- ・ 2020年は新型コロナウイルス感染拡大の影響でいずれの事業者も多くの活動制限があると拝察されるが、そのような状況下でいずれの事業も設定していた中間目標を達成できる見込みにあることは極めて高く評価できる。
- ・ 「①基本特性評価」事業において、HFO系冷媒を含む混合冷媒および高沸点HFO系冷媒の多様な熱物性、伝熱特性、およびヒートポンプサイクル特性を複数の大学および研究機関の連携の元で評価・解明した成果は世界でも類が無く、極めて高く評価できる。
- ・ 「①基本特性評価」事業において開発された複数の冷媒の状態方程式が国際標準熱物性データベースであるNIST REFPROPに搭載され、また、今後のアップデート版に搭載予定であることは極めて高く評価できる。

- ・ 「①基本特性評価」事業において、HFO 系冷媒を含む混合冷媒および高沸点 HFO 系冷媒の伝熱特性評価を、データベース化を視野に入れて実施していることは高く評価できる。
- ・ 「①基本特性評価」事業において、HFO 系冷媒を含む 3 成分混合冷媒を用いたヒートポンプサイクル特性を熱力学的解析および実験的評価により解明したことは極めて高く評価できる。
- ・ 「①基本特性評価」事業において、低 GWP 混合冷媒の燃焼限界、燃焼速度、および消炎特性の解明を国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録に寄与することを視野に進めていることは評価できる。
- ・ 「①基本特性評価」事業において、次世代空調機器の性能評価ツールとして、数値性能解析技術、性能評価技術、シミュレーター開発を多面的に進めていることは高く評価できる。特に、ハイブリッド実運転性能評価装置を開発したことは、次世代空調機器の性能評価を効率的に進めていく上で極めて高く評価できる。
- ・ 「②安全性・リスク評価」事業において、強燃性冷媒の安全性・リスク評価を複数の大学および研究機関の連携の元で実施した成果は世界でも類が無く、極めて高く評価できる。
- ・ 「②安全性・リスク評価」事業において、強燃性冷媒が漏洩した時の拡散挙動を解析および実験により解明し、燃焼に関わる安全性とリスクの評価を実施したことは、強燃性冷媒の最大許容充填量の指針を提示する上で極めて高く評価できる。
- ・ 「②安全性・リスク評価」事業において、強燃性冷媒の各種着火源によるフィジカルリスクの実験的評価、および HFO1123 冷媒に抑制剤を添加した時の自己分解反応の抑制機構の解明は世界でも類が無く、極めて高く評価できる。
- ・ 「②安全性・リスク評価」事業において実施した実規模での点火能評価を含めたフィジカルハザード評価の成果は極めて高く評価できる。
- ・ 「③冷媒・機器開発」事業において、次世代冷媒を用いた冷凍機器の開発が順調に進んでいることは高く評価できる。
- ・ 「③冷媒・機器開発」事業において、GWP10 以下の空調機用微燃性冷媒の開発については、世界に先駆けた成果であり、極めて高く評価できる。
- ・ 2020 年は新型コロナウイルス感染拡大の影響で成果の対外的な発表の機会が減少しているが、国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録を視野に 3 年間継続的に成果発表が実施されている。
- ・ 成果を国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録に貢献させるだけでなく、一般向けの伝熱データベースの公開準備も進めている点は評価できる。
- ・ 補助事業では事業化に向けて、必要な知的財産権の確保を戦略的に進めている。

#### <改善すべき点>

- ・ 特許出願されていない助成事業者におかれては、積極的に特許出願をお願いします。
- ・ キガリ改正 2029 年問題を解決するための冷媒候補としては、不均化や燃焼性、毒性の

問題で解決しなければならない課題が残っており、本研究開発の後半2年間で着実に開発していくことが期待される。

- 産学間の関係強化をより一層進めるべきと考える。
- 安全性・リスク評価の研究成果は重要であり、当該研究成果を踏まえて、合理的なリスクマネジメント対策についても検討して頂くのが望ましい。
- 実用化を評価するにあたって、エネルギー効率の評価方法が重要となってくる。エネルギー効率の評価をするにあたり、定格点での評価のみならず、実運用での頻度が高い低負荷運転時の評価、あるいは発停を伴う断続運転時の評価についてもぜひ配慮頂きたい。

#### <今後に対する提言>

- また助成事業であっても、積極的に社外発表して社会にアピールされることを期待します。
- 現段階ではいくつかの低GWP冷媒候補に関して、基礎特性評価や燃焼性評価、機器開発などを並行して進めている状況であるが、本研究開発プロジェクトでは決め手となる冷媒候補を見出すのが研究開発目標となっている。プロジェクトの後半では見込みの薄い冷媒候補に関する研究開発は中断し、資金と研究開発力の選択と集中も図っていく必要があるように思われる。
- 次のステップとして、ルームエアコンの世界市場における日本企業のシェア拡大の具体的戦略立案が必要と考える。
- 安全性検討に際しては、実態に即した合理的な評価結果を一般にも解りやすい形で情報提供をして頂きたい。
- 日本のヒートポンプ技術を海外展開するような取り組み・働きかけをぜひ行って頂きたい。また、そのための、知的財産の保有、海外規格化への戦略についても今後考慮し、整理・報告頂きたい。

## 2. 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

委託事業については、国際規格化・標準化および国際データベース REFPROP に積極的に情報提供し、登録を視野に入れて研究が実施されてきており、学会および事業者団体を含めたワーキンググループを構築し、規制・規格などの動向についての情報共有、ならびに次世代冷媒の安全性・リスクについての意見交換が進められていることは評価できる。また、補助事業についても、いずれもプロジェクト終了後の事業化に向けた戦略および計画が明確に立てられており、機器開発に関しては想定する市場・ニーズ規模により経済効果を期待することができる。

今後は、実運転性能評価装置を用いた次世代空調機器の様々な性能評価を推進し、次世代冷媒の安全性を担保した上で、安全性・リスク評価の成果に基づいて、複数件の国際規格への提案をすることで、国際規格化・標準化に貢献していただきたい。加えて、研究成果のデータベースなどを一般向けに公開していくことを推進していただきたい。

### <肯定的意見>

- ・ いずれも技術的な完成度が高く、状況が整えば製品化に近いレベルにあると思います。
- ・ 早稲田大学環境エネルギー技術総合評価センターが設立され、わが国初の外部検定機関の認定を受け、より実際の運転条件に近い COP や冷房能力の測定が可能となり、実用化・事業化に向けた着実な取り組みがなされている。
- ・ 実用化に向けた戦略は明確であり、具体的な成果が得られている。
- ・ 実用化・事業化の考え方、見通しおよび波及効果は明確であると評価できる。
- ・ 各研究の実用化見通しは妥当。
- ・ 「性能評価シミュレーターの開発」は新規機器開発支援ツールとして有用である。理想としては、当該ツールの活用により「少ない環境試験室計測点」から、適切な年間平均効率が推定できるようになると望ましい。
- ・ 国際的な標準 DB でもある REFPROP に積極的に情報提供し、NEDO プロジェクトの成果が採用されていることを評価。
- ・ 的確に成果が整備され新冷媒の物性値が REFPROP 等の基盤評価に反映されれば産業界への貢献は極めて大きいと思われる。
- ・ 委託事業については、国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録を視野に入れて研究が実施されてきており、今後、研究成果のデータベースを進めることで知的基盤・標準の整備および活用が適切に計画されている。
- ・ 委託事業では国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録に向けて、学会および事業者団体を含めたワーキンググループを構築し、規制・規格などの動向についての情報共有ならびに、次世代冷媒の安全性・リスクについての意見交換が進められていることは評価できる。
- ・ 委託事業については、提案予定の国際規格・国際標準が明確化されており、提案に至るスケジュールが適切に計画されており、利用の見通しが十分立っている。
- ・ 補助事業については、いずれも PJ 終了後の事業化に向けた戦略および計画が明確に立

てられており、機器開発に関しては想定する市場・ニーズ規模より経済効果を期待することができる。

- ・ 補助事業については、既存の市販フロン品と同等以上の性能を実現するために個別に目標を定めており、性能面で優位性を確保する見通しが立てられていると判断する。

#### <改善すべき点>

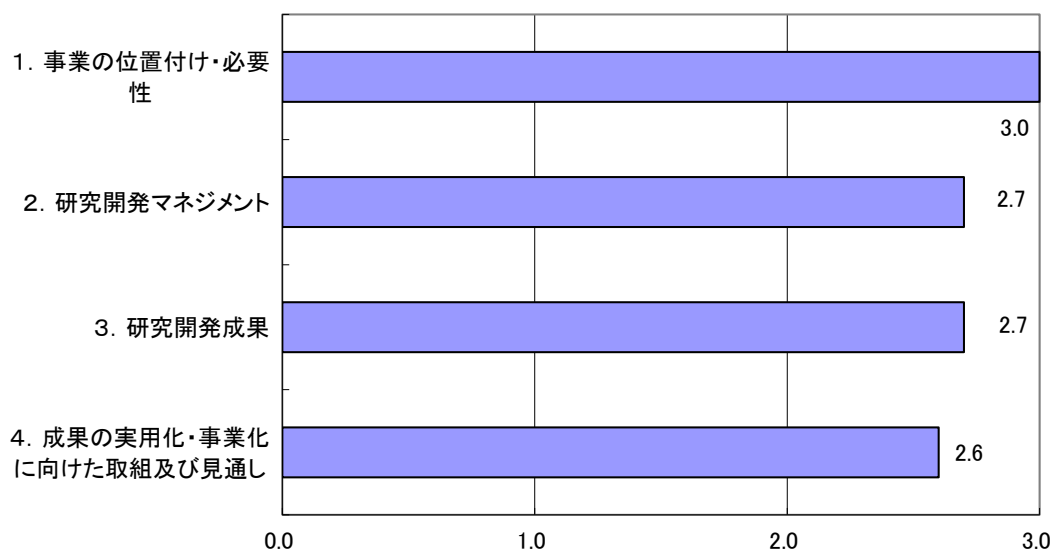
- ・ ASHRAE の冷媒番号登録のために必要な毒性試験が、助成事業の冷媒開発メーカーの取り組みに任されている。本研究で開発された低 GWP の最も有望な冷媒に関して、ASHRAE 登録のために必要最低限な毒性試験に関しても、助成事業でなく、本研究の一環として行うことが望まれる。
- ・ 対象技術分野の国内市場規模だけが示されているが、効果として「世界市場におけるルームエアコンのシェア拡大」をプロジェクトの効果として謳っている以上は、世界市場規模も視野に入れるべきでは？
- ・ 機器開発研究について、一部研究成果を早期適用し、安全性と低 GWP 冷媒を両立した製品を欧州市場に先行投入することも検討すべきではないか。
- ・ 他国と比して災害の多い我が国において、冷媒漏洩リスクに対する考えについて、もう一度の考察を要する。特に災害発生に伴う停電時に対し、漏洩気体の拡散を促進するファンの作動が期待できない可能性がある等のリスクについて、海外規格への対応と実質的な日本国内におけるリスク評価とは分けて、少しずつこんだ整理をお願いしたい。

#### <今後に対する提言>

- ・ コスト目標についてもぜひ達成していただき、ビジネスとして成功させてください。
- ・ ルームエアコンや業務用ショーケースに低 GWP 冷媒の R290（プロパン）を用いた場合、ファンで攪拌することで従来の国際規格に比べ大幅に増加した量の冷媒を充てん可能であることが本研究開発で示された。このような商品が実際に利用可能となるよう、冷媒漏洩時にファンが必ず作動するような標準規格の策定が期待される。
- ・ 新冷媒の開発、冷媒番号の取得および世界市場展開に期待する。
- ・ 安全性・リスク評価に関する研究成果の情報発信の際には、知識が少ない受け手の誤解を招かないように、丁寧に情報発信する必要がある。
- ・ 海外の同種の研究分野にコミットし、成果を海外規格等に反映できるように努力して頂きたい。
- ・ 実運転性能評価装置を用いた次世代空調機器の様々な性能評価を推進していただき、是非国際標準化・国際規格化に貢献していただきたい。
- ・ 次世代冷媒の安全性を担保した上で普及させるために、安全性・リスク評価の成果に基づいて、複数件の国際規格への提案を是非実施していただきたい。
- ・ 国際規格化・国際標準化および国際データベースへの登録に加えて、研究成果のデータベースなどを一般向けに公開していくことを推進していただきたい。



### 3. 評点結果



評価項目	平均値	素点 (注)						
		A	A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.7	A	B	A	A	B	A	A
3. 研究開発成果について	2.7	A	B	A	A	A	B	A
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	2.6	B	B	A	A	A	B	A

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算出。

〈判定基準〉

- |                    |                              |
|--------------------|------------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について                |
| ・非常に重要 →A          | ・非常によい →A                    |
| ・重要 →B             | ・よい →B                       |
| ・概ね妥当 →C           | ・概ね妥当 →C                     |
| ・妥当性がない、又は失われた →D  | ・妥当とはいえない →D                 |
| 2. 研究開発マネジメントについて  | 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 |
| ・非常によい →A          | ・明確 →A                       |
| ・よい →B             | ・妥当 →B                       |
| ・概ね適切 →C           | ・概ね妥当 →C                     |
| ・適切とはいえない →D       | ・見通しが不明 →D                   |

## 第2章 評価対象事業に係る資料

## 1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「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

<b>I. 事業の位置付け・必要性について</b> .....	<b>I-1</b>
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
<b>II. 研究開発マネジメントについて</b> .....	<b>II-1</b>
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
<b>III. 研究開発成果について</b> .....	<b>III-1</b>
1. 事業全体の成果.....	III-1
2. 研究開発項目毎の成果.....	III-8
<b>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</b> .....	<b>IV-1</b>
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><b>【中間目標】</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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<sup>*</sup>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></li> <li>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。</li> </ol> <p><b>【最終目標】</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>		

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"> <li>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</li> <li>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</li> </ul> <p><u>2019 年度</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> <li>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</li> </ul> <p><u>2020 年度</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>					

		<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><b>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」</b></p> <p><b>(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】</b></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"> <li>① 臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定（担当：九州大学）</li> <li>② 気液平衡性質の測定（担当：富山県立大学）</li> <li>③ 高温PVT<sub>x</sub>性質及び定圧比熱の測定（担当：日本大学理工学部）</li> <li>④ 表面張力の測定（担当：長崎大学）</li> <li>⑤ 音速の測定（担当：産業技術総合研究所）</li> <li>⑥ 状態方程式の開発（担当：九州産業大学）</li> <li>⑦ 輸送的性質の測定及びモデル化（担当：佐賀大学）</li> </ol> <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"> <li>① プレート式熱交換器内の伝熱特性評価（担当：佐賀大学）</li> <li>② 扁平多孔管内の伝熱特性評価（担当：東京海洋大学）</li> <li>③ 円管内の伝熱特性評価（担当：長崎大学）</li> <li>④ 水平円管外の伝熱特性評価（担当：九州産業大学）</li> <li>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）</li> </ol> <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"> <li>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）</li> </ol>	



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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>x</sub> 性質及び定圧比熱の測定	PVT <sub>x</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> : 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> :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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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る、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 CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> ）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 CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub>冷媒の普及を促進することを目的とする。

CO<sub>2</sub>冷凍機の普及が促進されない要因には、業界の CO<sub>2</sub>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のが挙げられる。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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 冷凍機の大出力化 [2]高外気温度対応 [3]CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 冷媒の特性を活かした未利用熱利用	
CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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"> <li>・ COP, APF において R410A 比で 90%以上</li> <li>・ 機器開発課題を明確化</li> </ul>	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 <sub>6</sub> (六フッ化硫黄)、NF <sub>3</sub> のこと。 (代替フロン等3ガスは、HFC、PFC、SF <sub>6</sub> 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 <sub>2</sub> 、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<sup>\*1</sup>

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 <sup>*2</sup>
CFC	R12	CFC12	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	10900	1	A1
HCFC	R22	HCFC22	$\text{CHClF}_2$	1810	0.055	A1
HFC	R32	HFC32	$\text{CH}_2\text{F}_2$	675	0	A2L
	R125	HFC125	$\text{CHF}_2\text{CF}_3$	3500	0	A1
	R134a	HFC134a	$\text{CH}_2\text{FCF}_3$	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	$\text{C}_3\text{H}_8$
プロピレン	R1270	$\text{C}_3\text{H}_6$
ブタン	R600	$\text{C}_4\text{H}_{10}$
イソブタン	R600a	$\text{CH}(\text{CH}_3)_3$
二酸化炭素	R744	$\text{CO}_2$
アンモニア	R717	$\text{NH}_3$
水	R718	$\text{H}_2\text{O}$



# 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、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>）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) (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 <sub>6</sub> <small>(六フッ化硫黄)</small>	NF <sub>3</sub> <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 (NF <sub>3</sub> は2013年より)			
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 (約10,000)	大きい (数百～約2,000)	大きい (数百～約4,000)※2	極めて 大きい (約6,000～ 9,000)	極めて 大きい (約23,900)	極めて 大きい (約17,200)
主な用途	・ <b>冷凍空調機器の冷媒</b> ・洗浄剤、溶剤等 <small>(95年以降全廃済み)</small>	・ <b>冷凍空調機器の冷媒</b> ・洗浄剤、溶剤等 <small>(2020年全廃予定)</small>	・ <b>冷凍空調機器の冷媒</b> ・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CO<sub>2</sub>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<sup>※</sup>。

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月のモントリオール議定書第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。

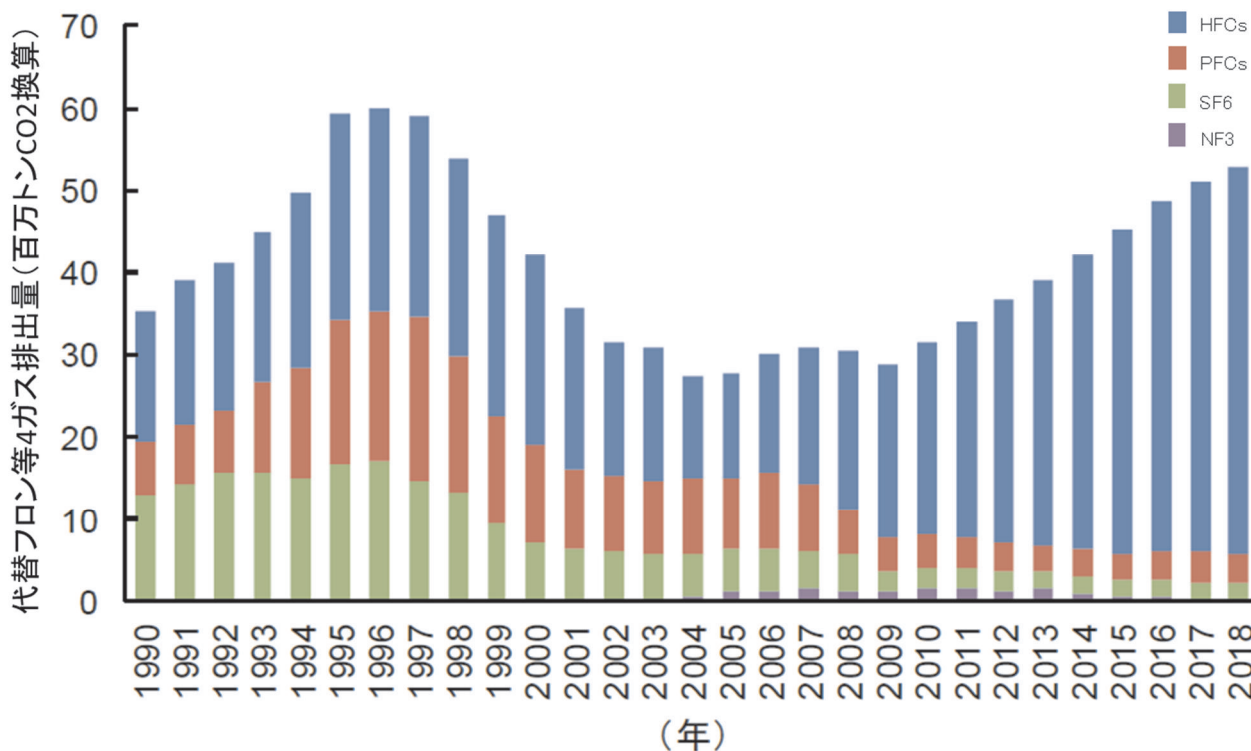
我が国においては、フロン排出抑制法に基づく国の「フロン類使用見通し」（2015年策定）から、2020年は4,340万CO<sub>2</sub>-t、2025年度は3,650万CO<sub>2</sub>-tとなっており、2029年以降の目標達成には新たな対策が必要となる（図1.2-5）。2020年2月には、キガリ改正におけるHFCの生産量及び消費量の削減目標を達成するための「フロン類の使用見通し（案）」を踏まえた今後の削減シナリオが示された（図1.2-6）。フロン類対策における現在までの国際規制と国内政策等の対応を図1.2-7に示す。

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。

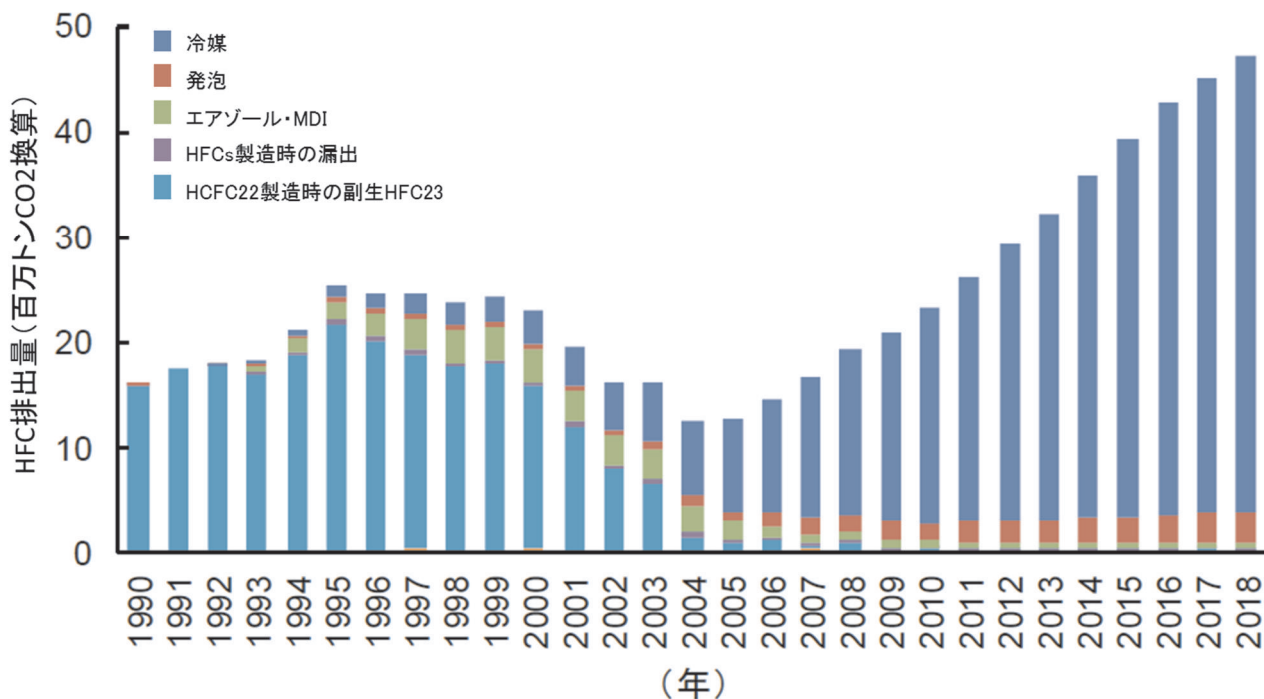
※「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」（フロン排出抑制法）抜粋：

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

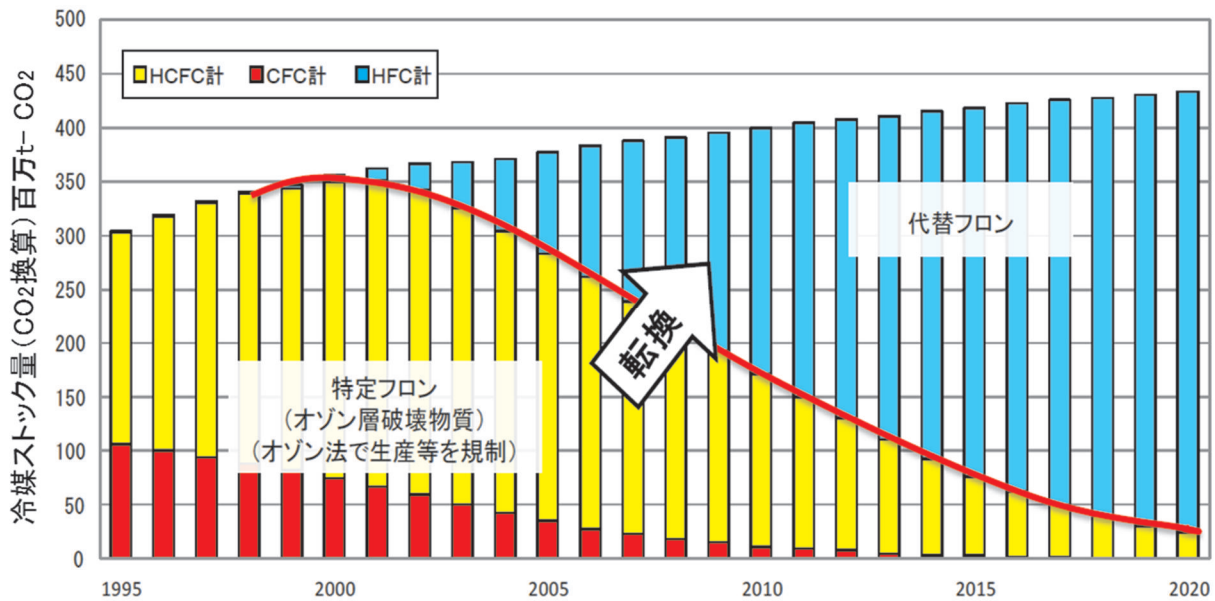
図 1.2-1 代替フロン等4ガス排出量の推移



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

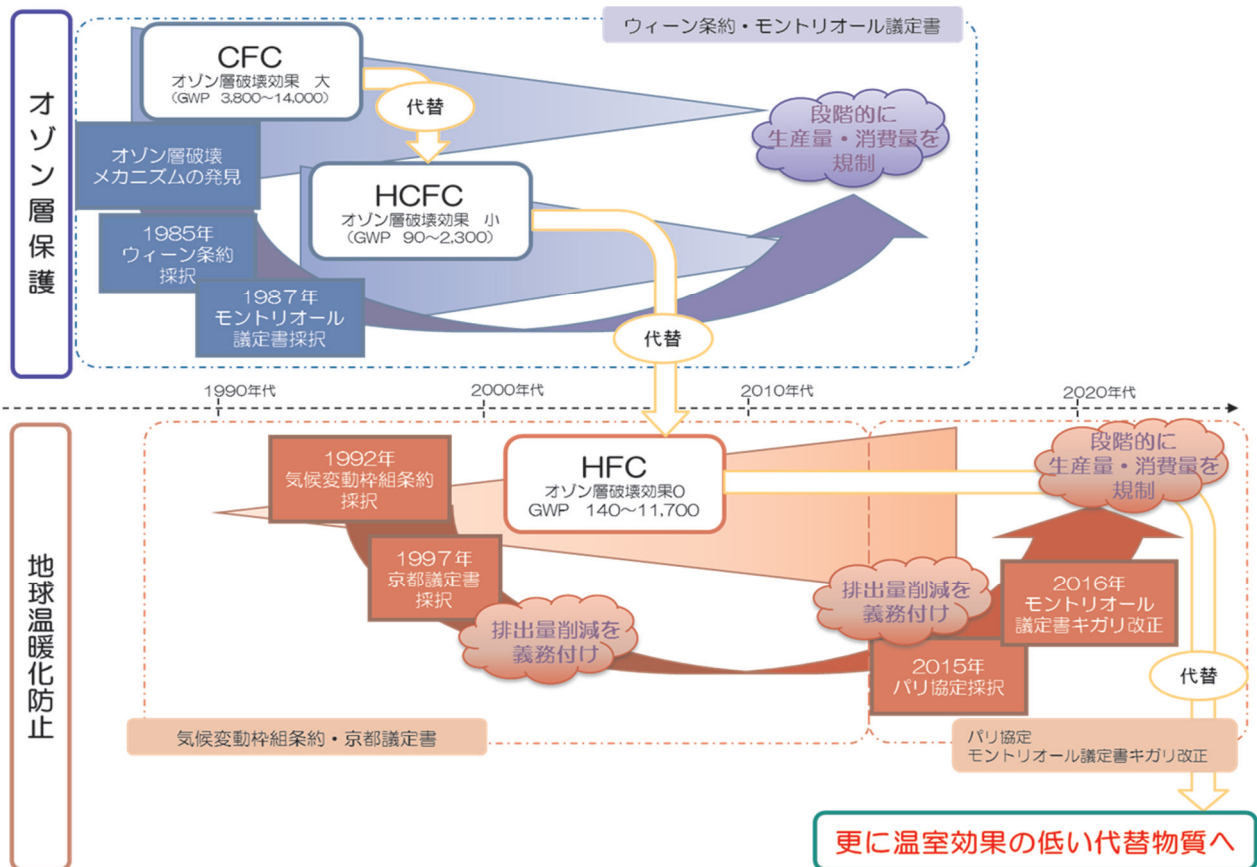
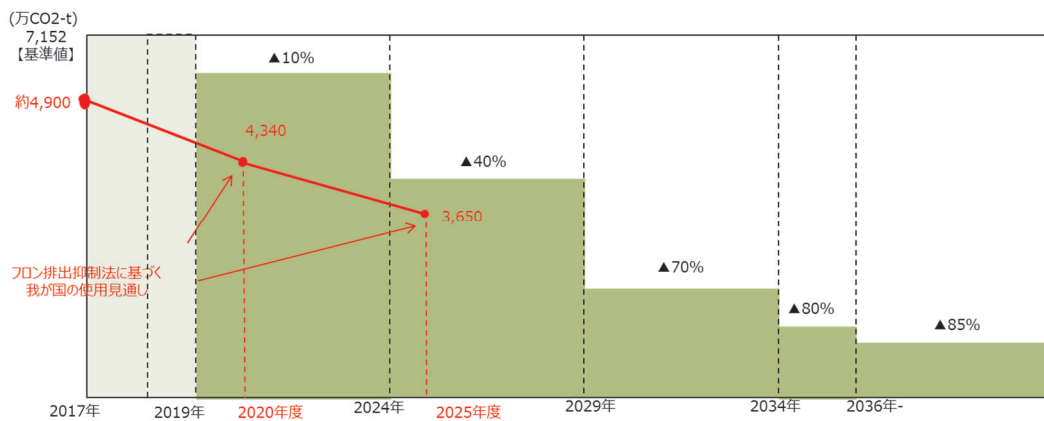


図 1.2-4 フロン対策を巡る規制と対策の流れ

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

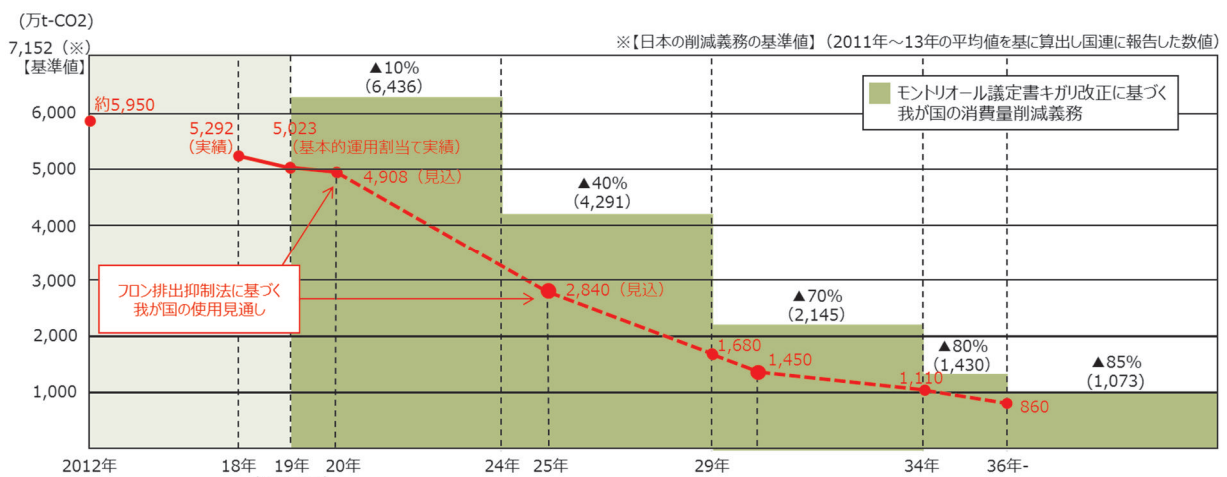
	2013年 (百万t-CO <sub>2</sub> )	2030年 (百万t-CO <sub>2</sub> )	2013年総排出 量比 (%)
エネルギー起源 CO <sub>2</sub>	1235	927	▲21.9
非エネルギー起源 CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、 N <sub>2</sub> O	134.4	123.5	▲0.8
<b>代替フロン等4ガス (HFC、PFC、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>)</b>	<b>38.6</b>	<b>28.9</b>	<b>▲0.7</b>
温室効果ガス吸収源 (森林吸収等)	—	(▲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

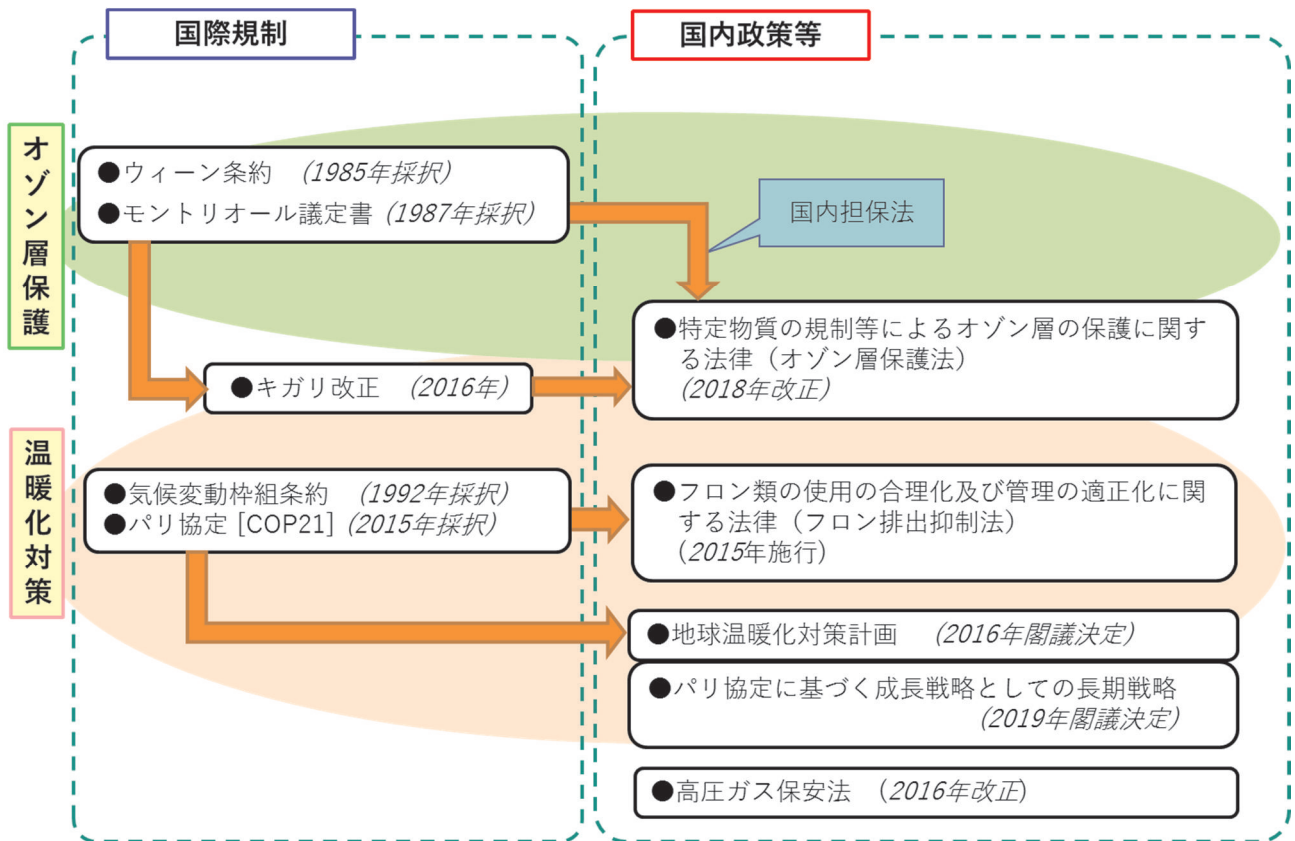


図 1.2-7 フロン類対策における現在までの国際規制と国内政策等の対応

### 1.3 フロン類に対する世界の動向

欧州では、2006年に、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>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CO<sub>2</sub>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庫機器等に対しては、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、業務用冷凍冷蔵庫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。

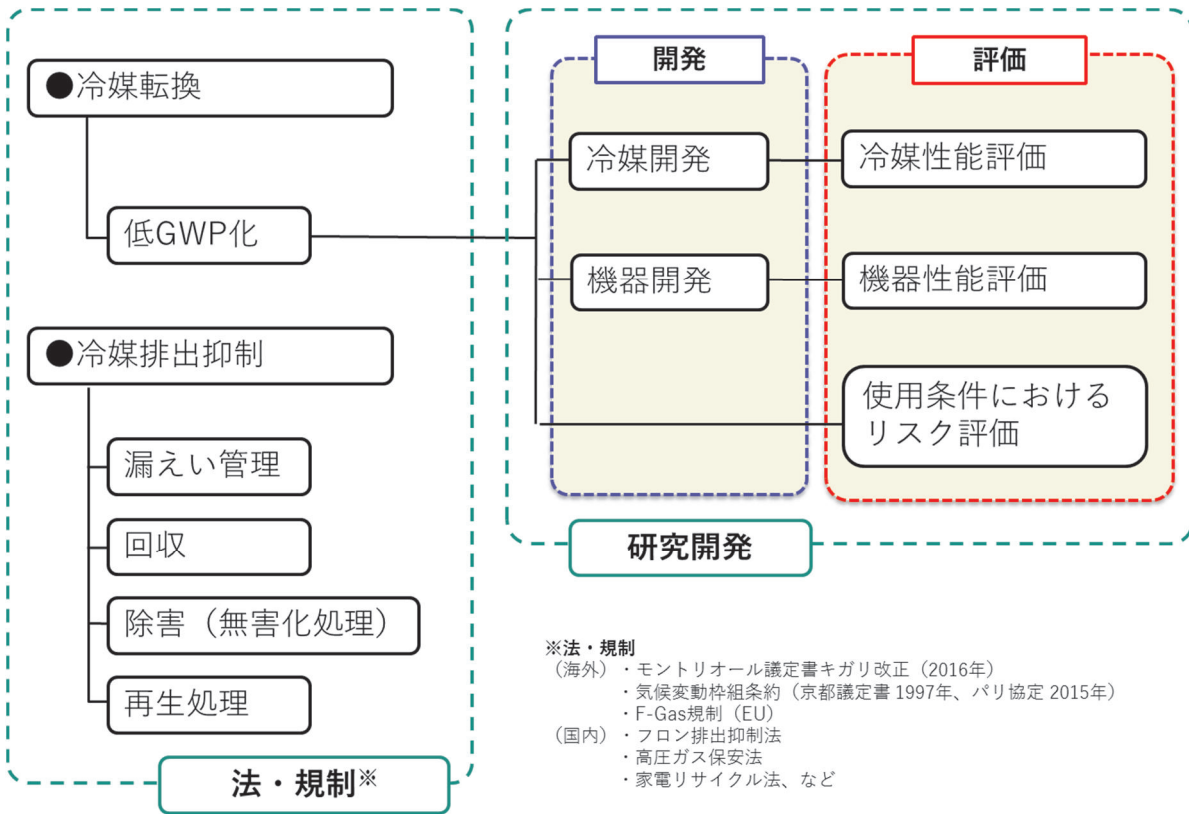
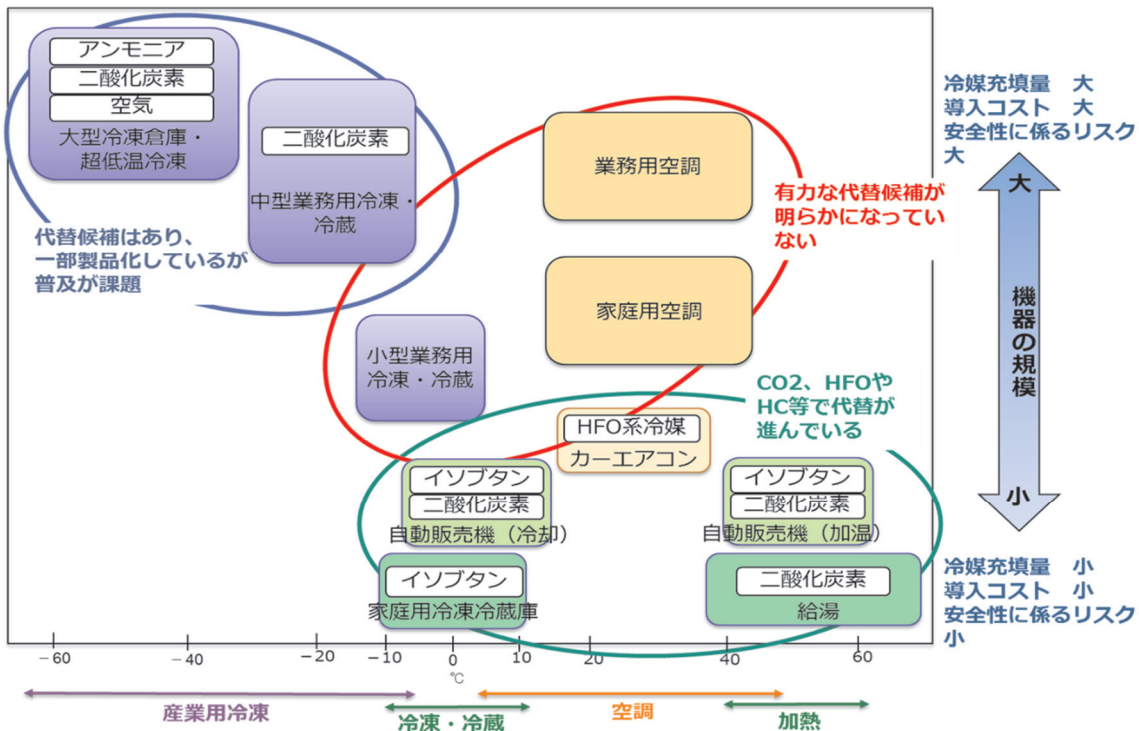


図 1.4-1 HFC 排出抑制へ向けた対策の方向性



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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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「微燃性等級」、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 CO<sub>2</sub> 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-CO<sub>2</sub> 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。

CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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。

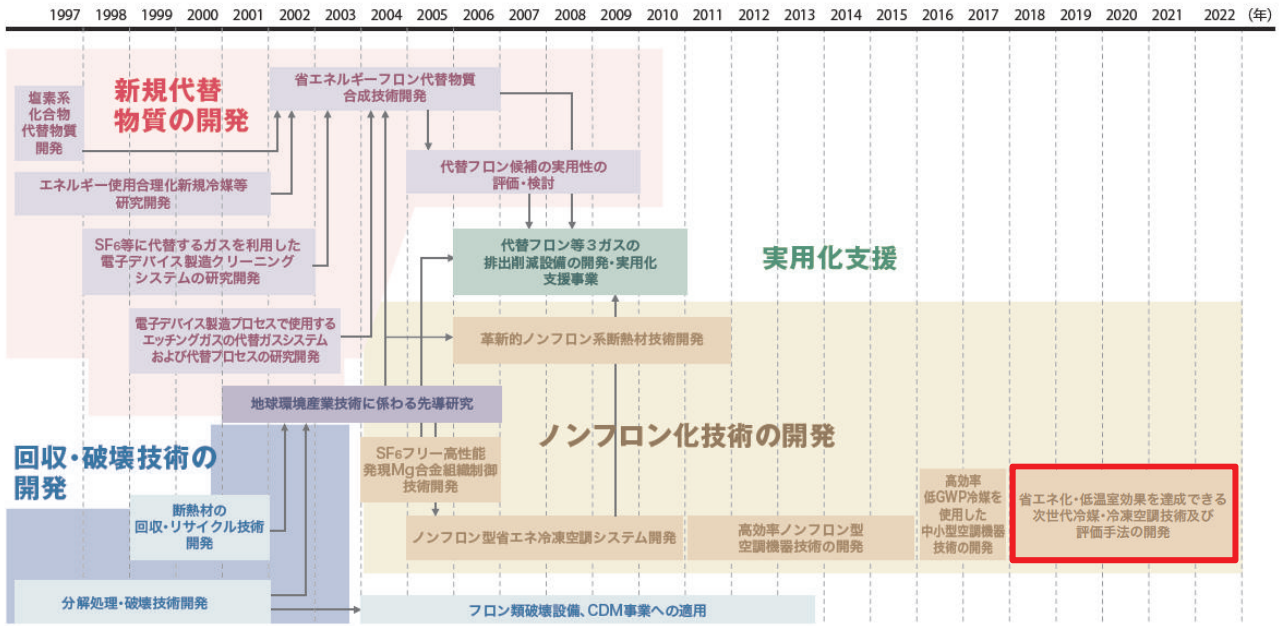
「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷媒・冷凍空調技術及び評価手法の開発」（2018～2022年度）においては、業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器を主とする中小型規模の冷凍空調機器に使用する低温室効果冷媒の安全性・リスク評価手法の開発、さらに低温室効果冷媒適用機器の普及を妨げる技術課題を克服するための冷媒開発・機器開発を実施している。安全性・リスク評価手法を確立し、国内安全基準の策定や国際規格化・標準化を実現することで、低温室効果冷媒適用機器等の開発を支援する。

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
<b>【分解・破壊技術】</b>		
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 <sub>2</sub> 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
<b>【新規代替物質開発】</b>		
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 <sub>6</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>3</sub> I、COF <sub>2</sub> などの低 GWP 値・新規化合物の工業的合成技術開発
<b>【ノンフロン化技術】</b>		
SF <sub>6</sub> 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 <sub>6</sub> 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
<b>【共通の技術開発】</b>		
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CO<sub>2</sub>排出量削減効果は2029年度に最大で572万CO<sub>2</sub>-t/年<sup>※</sup>）。

※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CO<sub>2</sub>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<sup>\*</sup>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-CO<sub>2</sub>、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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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。

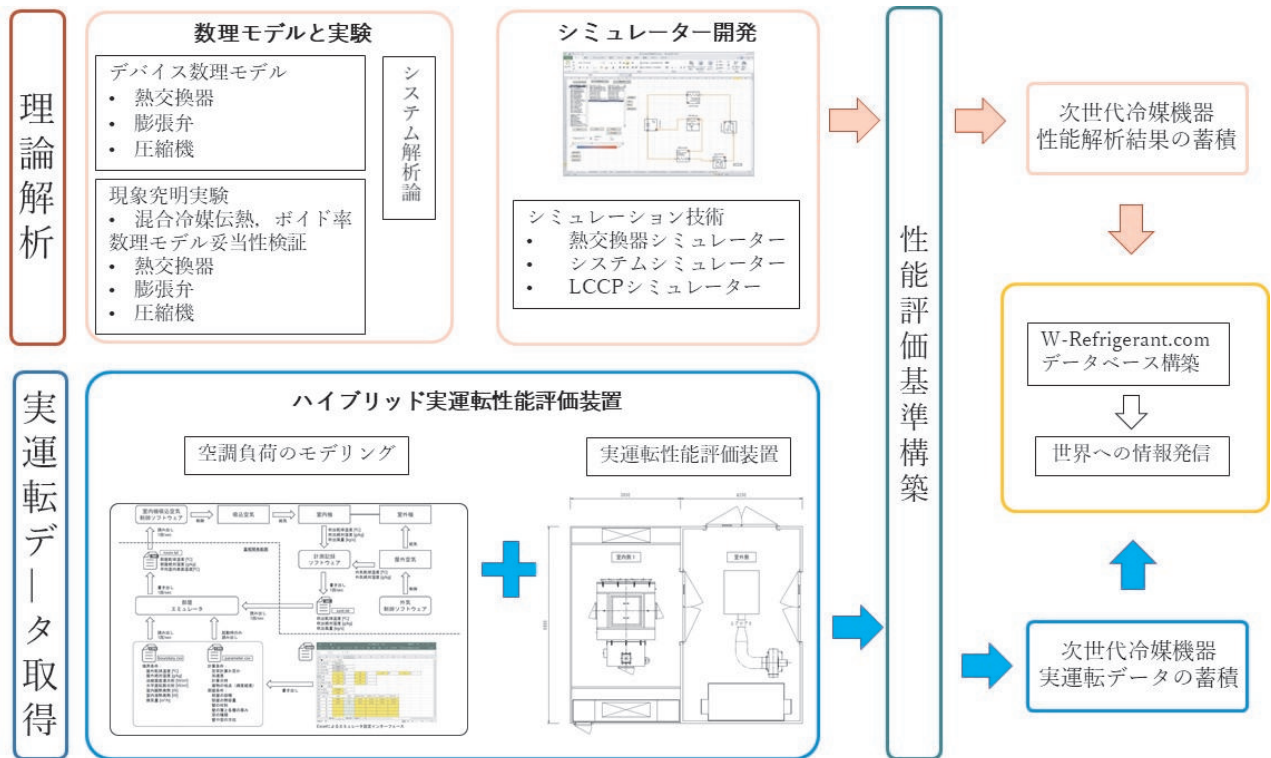


図 1.1.3.1 研究全体の流れ

### 【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な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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 冷媒の普及を促進することを目的とする。

CO<sub>2</sub> 冷凍機の普及が促進されない要因には、業界の CO<sub>2</sub> 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] CO<sub>2</sub> 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] CO<sub>2</sub>冷媒の特性を活かした未利用熱利用；  
CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> 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+CO<sub>2</sub>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%CO<sub>2</sub>)について、臨界定数及び臨界点近傍における飽和密度、PVT<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub>性質及びPVT<sub>x</sub>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CO<sub>2</sub>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<sub>x</sub>測定をおこなう。定圧比熱については、HFC32+HFO1234yf+CO<sub>2</sub> 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<sub>x</sub>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<sub>x</sub>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<sub>x</sub>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CO<sub>2</sub>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<sub>x</sub>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+CO<sub>2</sub>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+CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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+CO<sub>2</sub>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+CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> 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+CO<sub>2</sub>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+CO<sub>2</sub>系及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系の実験的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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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
<b>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</b>				
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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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)の測定	低温域測定用に装置改造	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用ファイル作成	HFC32+HFO1234yf+HFO1123の状態方程式作成	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	低温域測定用に装置改造	低温域測定及び予測精度の検証	
<b>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>				
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)				
<b>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</b>				
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 <sub>2</sub> 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
<b>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</b>				
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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> の測定			
<b>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>				
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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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	
<b>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</b>				
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 <sub>2</sub> 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					
1. 性能解析技術研究開発	1-2	現象究明実験	システム	早稲田		解析構築, 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					
			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					
			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					
1. 性能解析技術研究開発	1-3	モデルの妥当性検証	熱交換器	早稲田			新評価装置での評価					
			システム定常	早稲田			新評価装置での評価					
			システム非定常	早稲田			新評価装置での評価					
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					
			性能評価装置開発	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. 性能評価技術研究開発	2-2	性能評価装置開発	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					
				早稲田		GUI開発, コーディングの見直し	GUIとコードの接続					
				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ャに外注する。

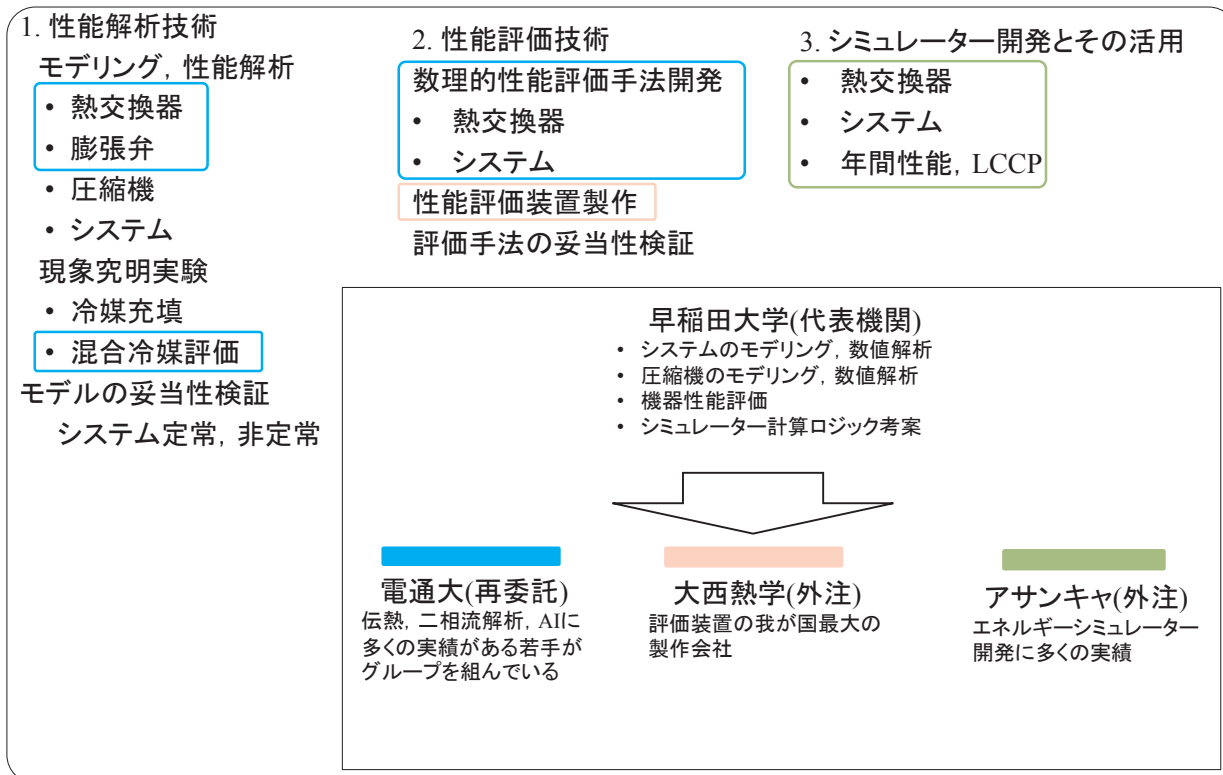


図 2. 1. 1. 3. 1 研究体制

## 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 <sup>-4</sup> 超	頻発する	C	B3	A1	A2	A3
	4	10 <sup>-4</sup> 以下 ~10 <sup>-5</sup>	しばしば発生する	C	B2	B3	A1	A2
	3	10 <sup>-5</sup> 以下 ~10 <sup>-6</sup>	時々発生する	C	B1	B2	B3	A1
	2	10 <sup>-6</sup> 以下 ~10 <sup>-7</sup>	起りそうにない	C	C	B1	B2	B3
	1	10 <sup>-7</sup> 以下 ~10 <sup>-8</sup>	まず起りえない	C	C	C	B1	B2
	0	10 <sup>-8</sup> 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(周辺焼損)	火災	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。



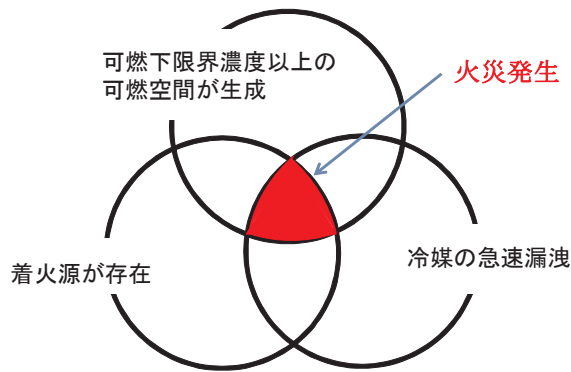


図 2.1.2.1-2 火災事故発生の条件

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。

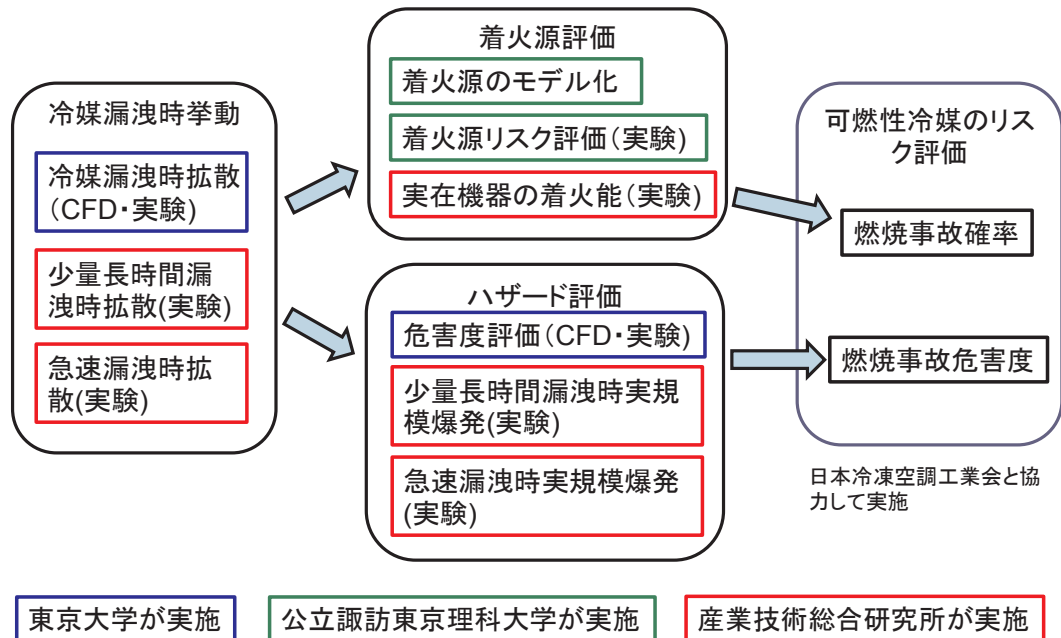


図 2.1.2.1-3 プロジェクトの研究のながれ

### 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、CF<sub>3</sub>I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ものが想像される、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。



年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
<b>研究開発項目</b>				
<b>①冷媒の探索と選定</b> (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				
<b>②冷媒物性値の把握</b> (1) 冷媒入手 (2) 大学への測定依頼 (3) 物性式入手				
<b>③性能・エネルギー把握</b> (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				
<b>④信頼性把握</b> (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				
<b>⑤安全性検討</b> (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				
<b>⑥基礎フィールド試験</b> (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				
<b>⑦実店舗フィールド試験</b> (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				
<b>⑧開発完了</b>				

### 2.1.3.3 低温機器における CO<sub>2</sub> 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] CO<sub>2</sub> 冷凍機の大出力化；

CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 冷凍機の適用分野の拡大を図る。

[課題 2] 高外気温度対応；

CO<sub>2</sub> 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] CO<sub>2</sub> 冷媒の特性を活かした未利用熱利用；

CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 冷凍機の大出力化				→
課題2. 高外気温度対応			→	
課題3. CO <sub>2</sub> 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	2	3	4	1	2	3	4	
① 温暖化係数と安定性評価	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	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	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	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。

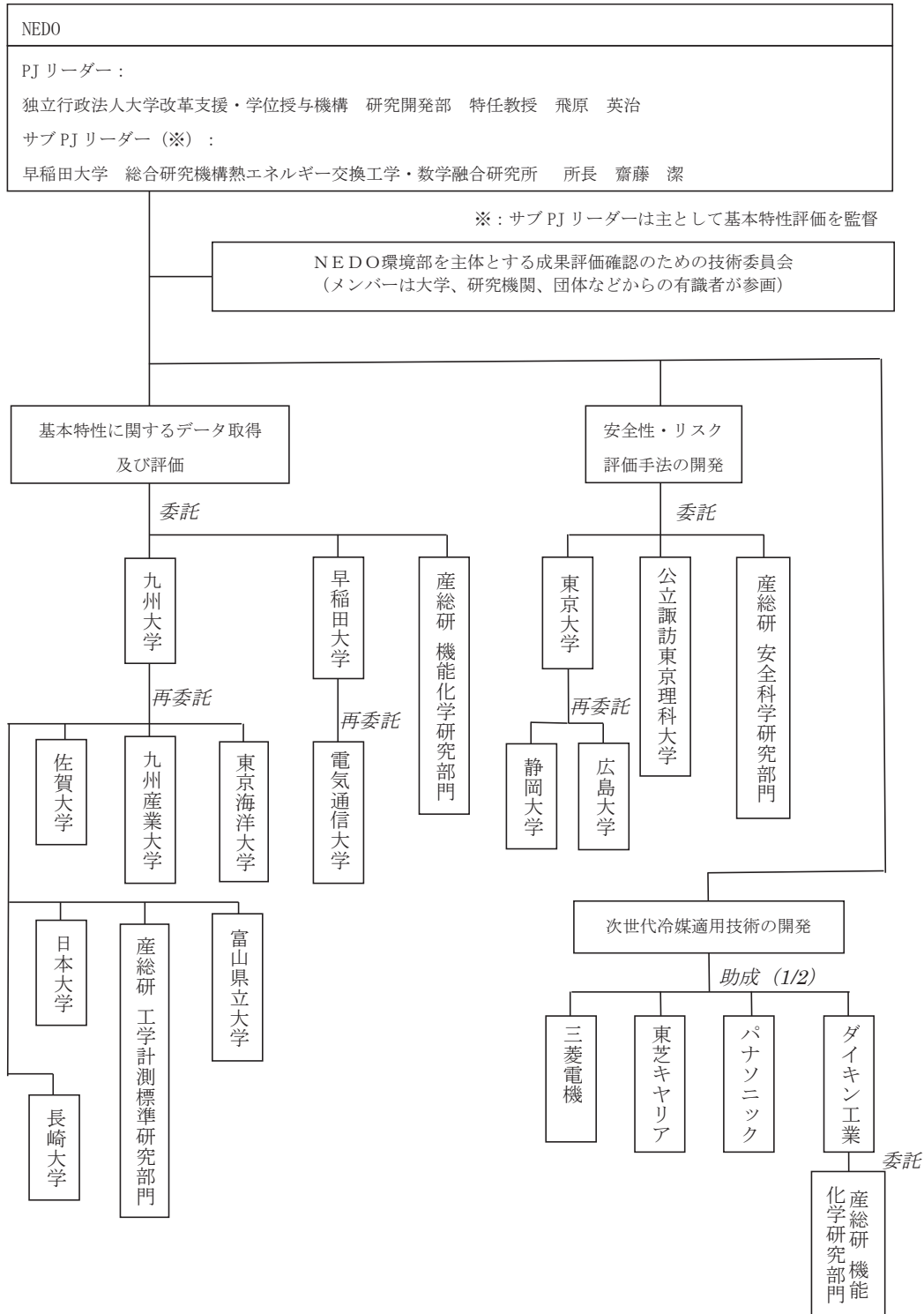


図 2.2-1 事業実施体制の全体図

## 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+CO<sub>2</sub>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<sub>x</sub> 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+CO<sub>2</sub> 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<sub>x</sub> 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<sub>2</sub> 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/CO<sub>2</sub>: 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 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]数理的な性能評価手法, [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 CO<sub>2</sub> 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】

CO<sub>2</sub> 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] CO<sub>2</sub> 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] CO<sub>2</sub>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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 冷媒を使用した省エネ冷	コンビニエンスストア、スー	CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 冷凍機の大出力化	[1]CO <sub>2</sub> 冷凍機の大出力化、[2]高外気温度対応、[3]CO <sub>2</sub> 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>パーマーケット、物流倉庫、食品加工工場のCO<sub>2</sub>冷凍機システム</p>	<p>[2]高外気温度対応 [3]CO<sub>2</sub>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 <sub>2</sub> 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 <sub>x</sub> 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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<sub>2</sub> 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。</li> <li>・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。</li> <li>・PVT<sub>x</sub>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<sub>2</sub> 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。</li> <li>・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<sub>2</sub>: 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。</li> <li>・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。</li> <li>・HFC32+HFO1234yf+CO<sub>2</sub> 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。</li> <li>・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。</li> </ul>	○
(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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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<sub>2</sub> の凝縮熱伝達特性を評価し</li> </ul>	○

	<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"> <li>・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/CO<sub>2</sub>: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。</li> <li>・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。</li> </ul>	
(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"> <li>・HFO1234yf+HFC32+CO<sub>2</sub> 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。</li> <li>・3 成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO<sub>2</sub> 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。</li> </ul>	○

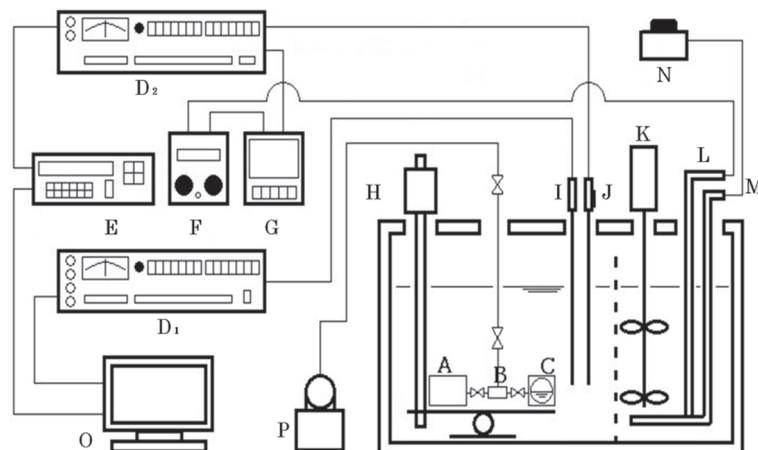
【 ◎:計画以上、○:計画通り(目標達成又は達成見込み)、△:ほぼ計画通り(一部未達)、×:目標未達 】

## 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; (D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>) 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/CO<sub>2</sub>; 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。

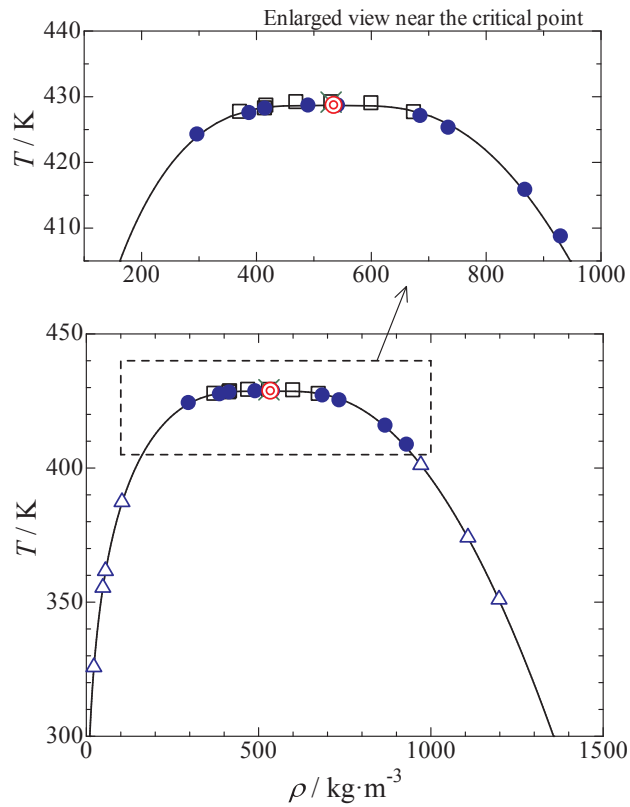


図 2.1.1.1.1-a2 HCFO1224yd(Z) の臨界点近傍における飽和密度。  
 ●: メニスカスの消滅から決定した本実測値、△: PVT 測定  
 の等容線の折れ曲がりから決定した飽和密度、◎: 臨界点、  
 実線: 本プロジェクトで赤坂により作成された状態式からの計算結果。

HFO1336mzz(E)に関しては、温度範囲 391.785 K~403.527 K、密度範囲 218.0 kg/m<sup>3</sup>~802.3 kg/m<sup>3</sup> 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。

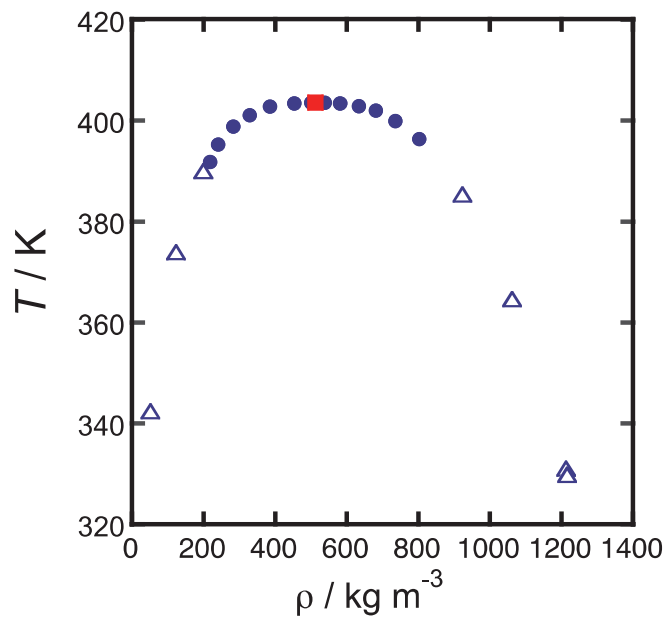


図 2.1.1.1.1-a3 R455A の臨界点近傍における飽和密度。  
 ●: メニスカスの消滅から決定した本実測値、△: PVT 測定  
 の等容線の折れ曲がりから決定した飽和密度、■: 臨界点、  
 ◎: 状態式からの計算結果。

3成分系混合冷媒 R455A [HFC32/HFO1234yf/CO<sub>2</sub>; 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/m<sup>3</sup> ~ 813.2 kg/m<sup>3</sup> 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。

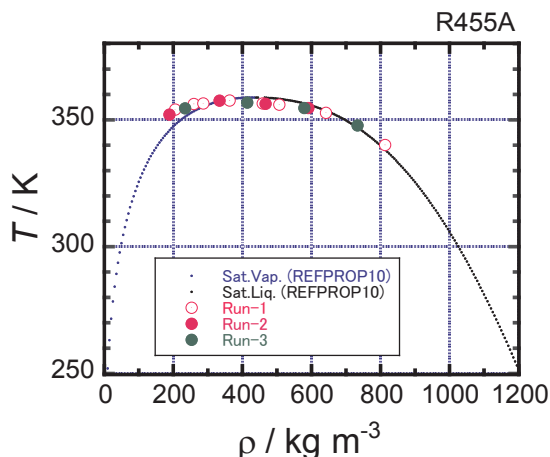


図 2.1.1.1.1-a4 R455A の臨界点近傍における飽和密度の実測値

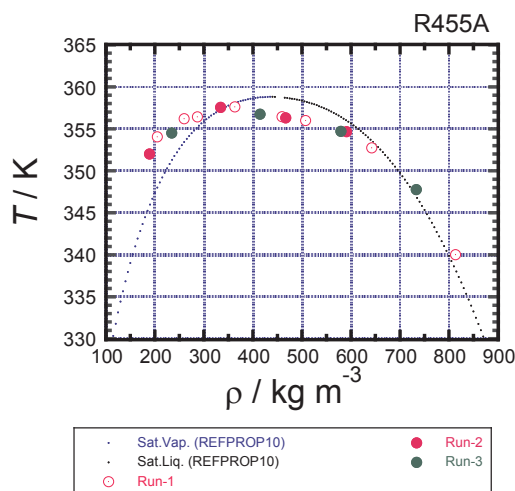


図 2.1.1.1.1-a5 R455A の臨界点近傍における飽和密度(T = 300 K 以上の温度)

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/m<sup>3</sup> ~ 862.4 kg/m<sup>3</sup> 及び 227.4 kg/m<sup>3</sup> ~ 901.0 kg/m<sup>3</sup> 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。

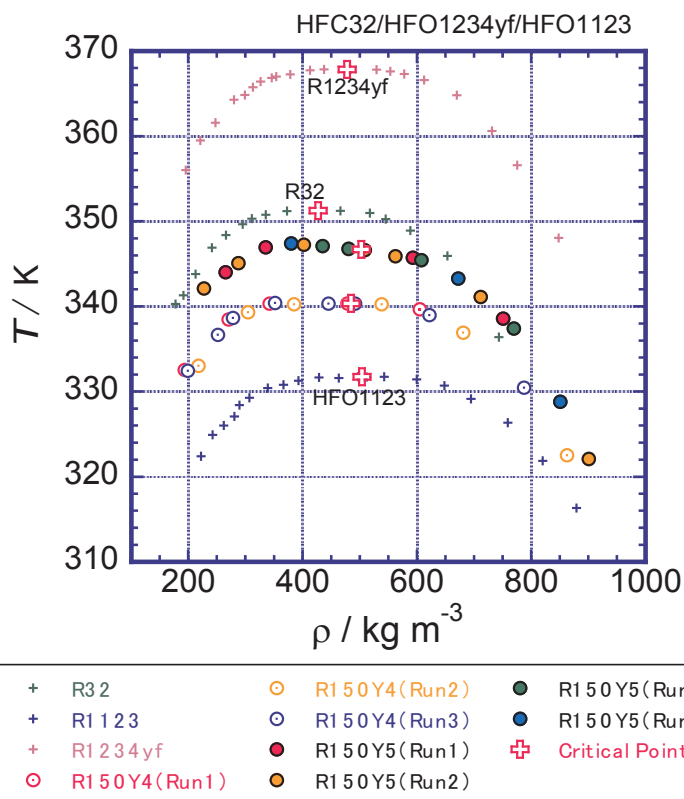


図 2.1.1.1.1-a6 HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系混合冷媒の臨界点近傍における飽和密度の実測値

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/CO<sub>2</sub>; 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。

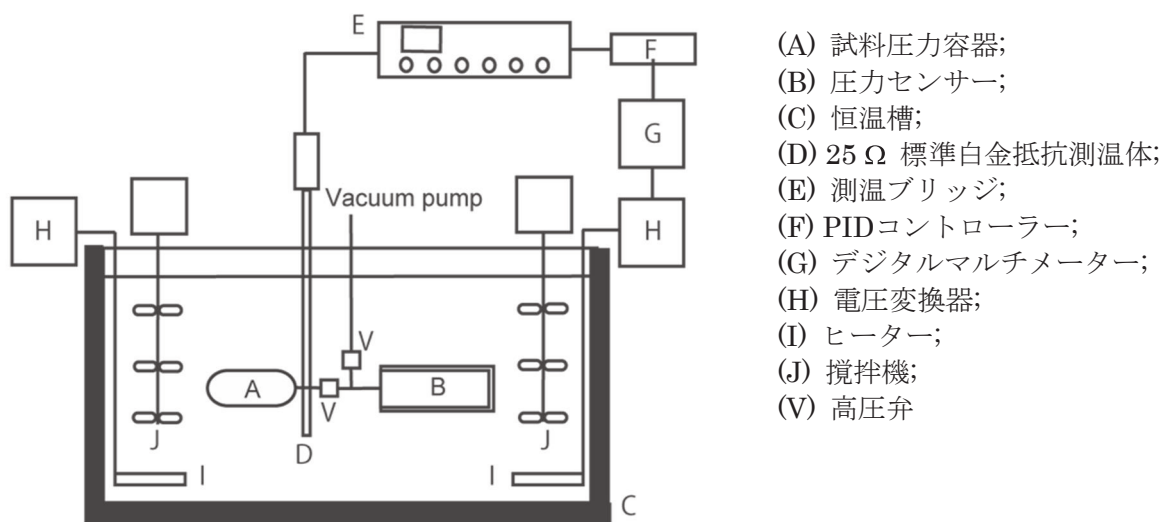


図 2.1.1.1.1-b1 等容法による PVT(圧力-密度-温度)性質測定装置

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/m<sup>3</sup> から 1198 kg/m<sup>3</sup>、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。

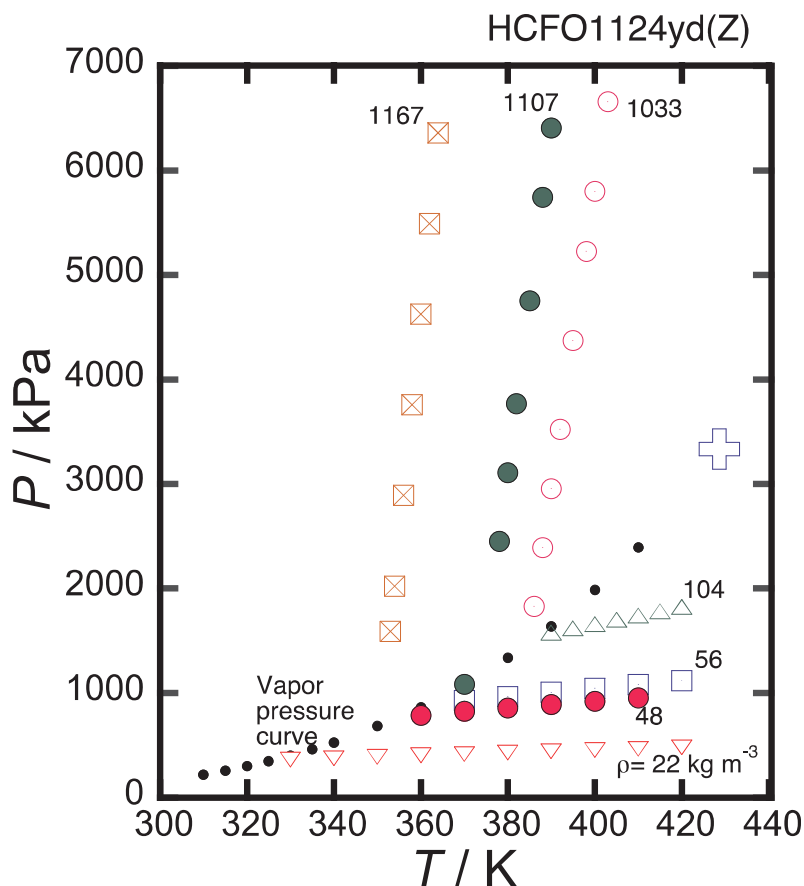


図 2.1.1.1.1-b2 HCFO1124yd(Z) の PVT 性質実測値の分布

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/m<sup>3</sup> から 1215 kg/m<sup>3</sup>、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。

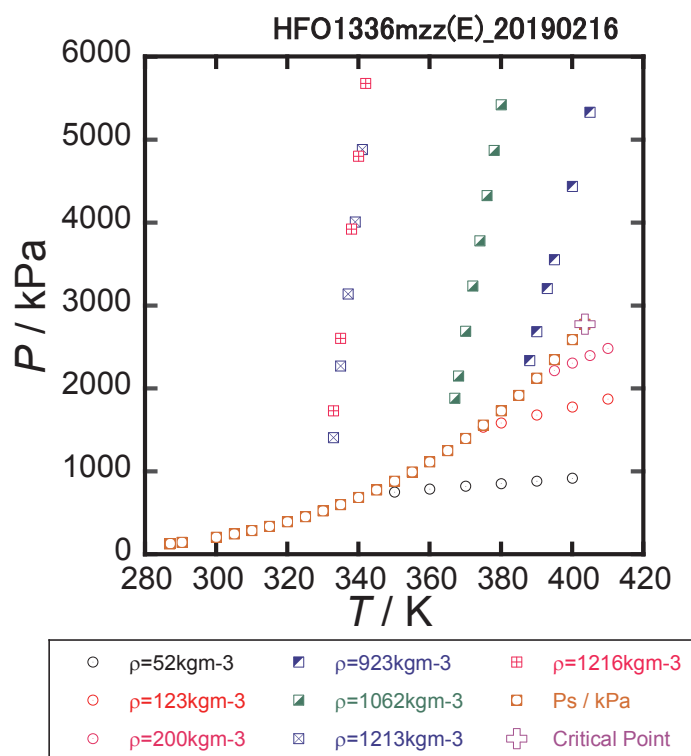


図 2.1.1.1.1-b3 HFO1336mzz(E) の PVT 性質実測値の分布

R455A[HFC32/HFO1234yf/CO<sub>2</sub>; 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/m<sup>3</sup> から 917 kg/m<sup>3</sup>、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。

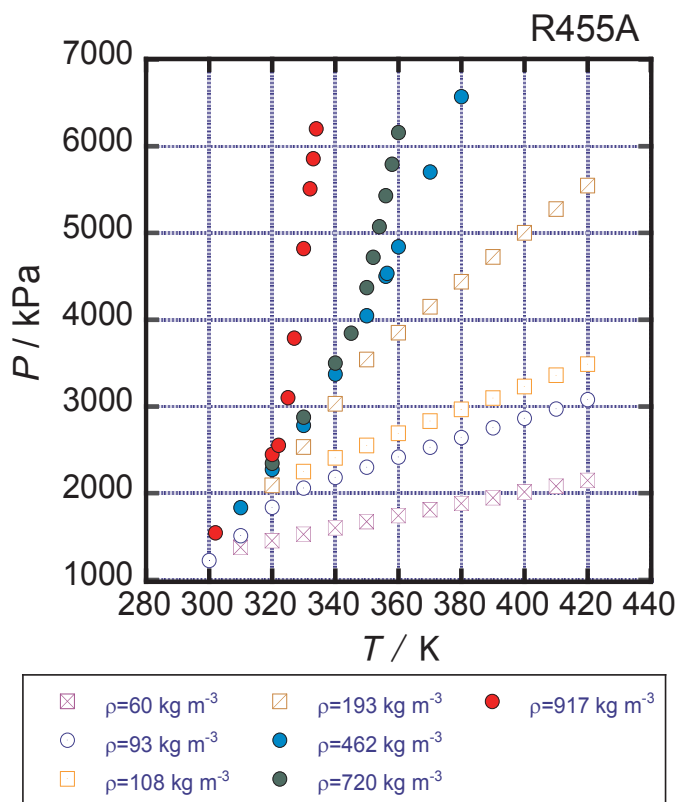


図 2.1.1.1.1-b4 R455A[HFC32/HFO1234yf/CO<sub>2</sub>; 21.5/75.5/3.0 mass%] の PVT 性質実測値の分布

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。

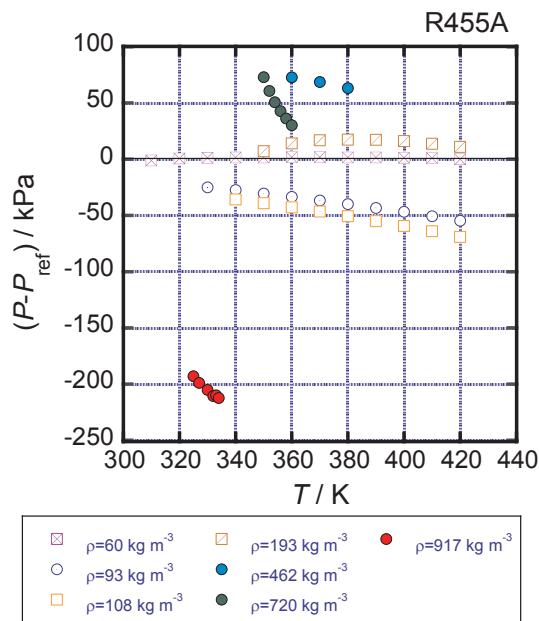


図 2.1.1.1.1-b5 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

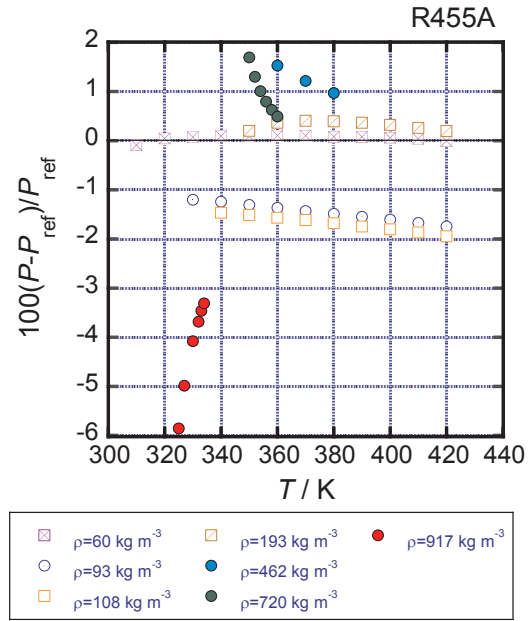


図 2.1.1.1.1-b6 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

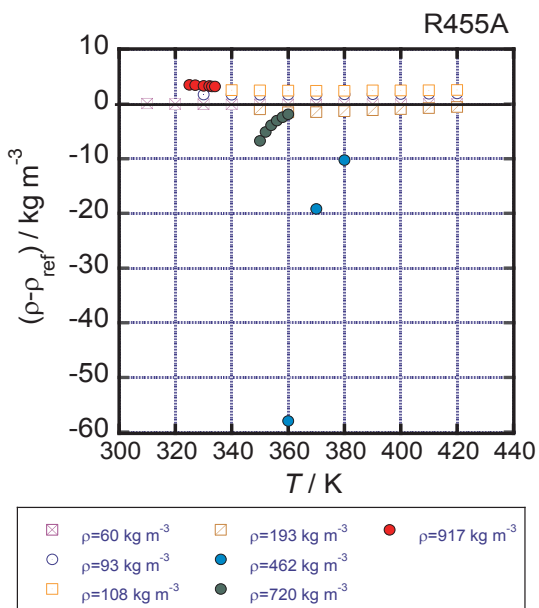


図 2.1.1.1.1-b7 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

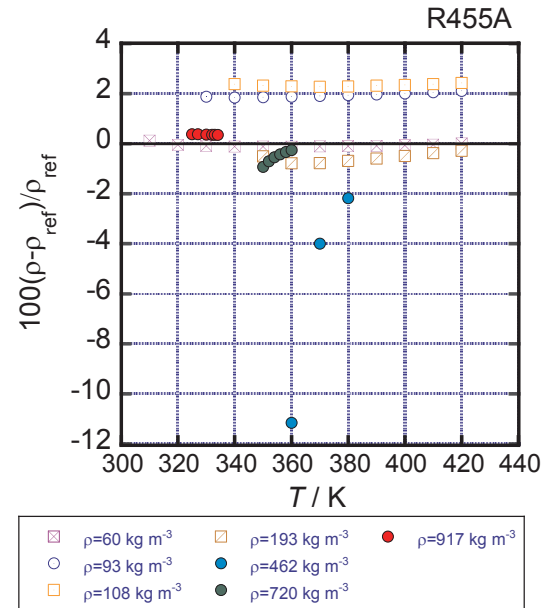


図 2.1.1.1.1-b8 R455A における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

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/m<sup>3</sup> から 906 kg/m<sup>3</sup>、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。

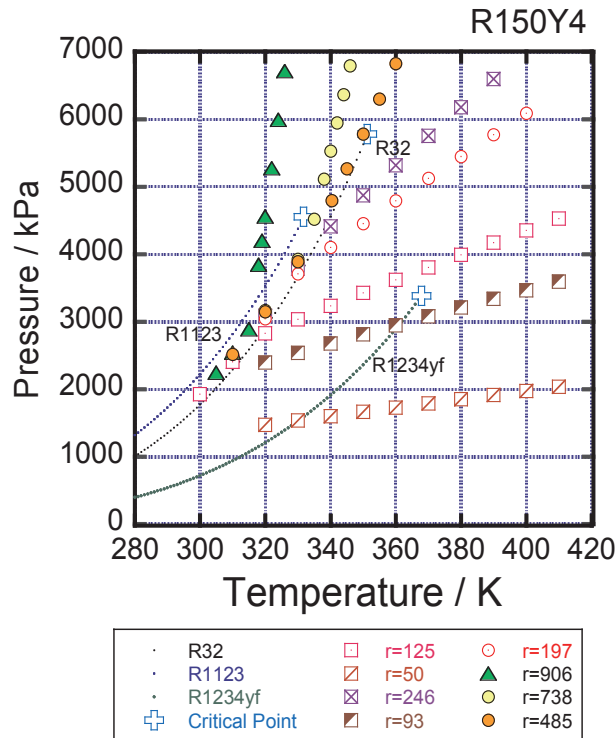


図 2.1.1.1.1-b9 Amolea R150Y4 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/19.3/59.5 mass%] の PVT 性質実測値の分布

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。

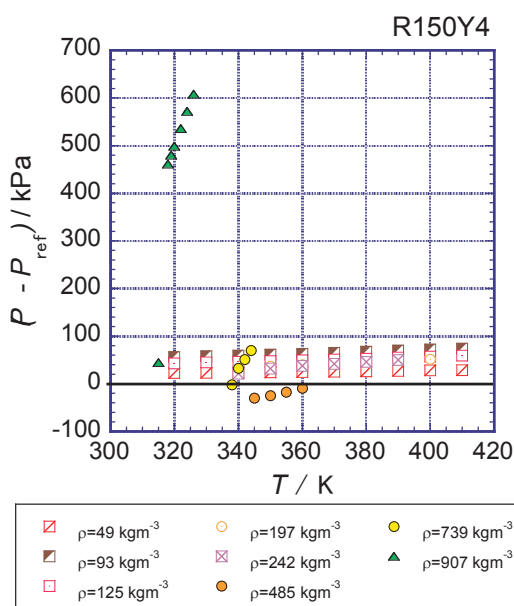


図 2.1.1.1.1-b10 Amolea R150Y4 における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

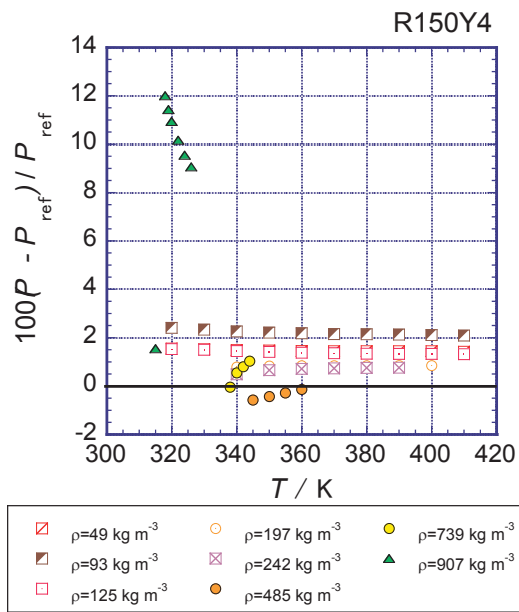


図 2.1.1.1.1-b11 Amolea R150Y4 における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

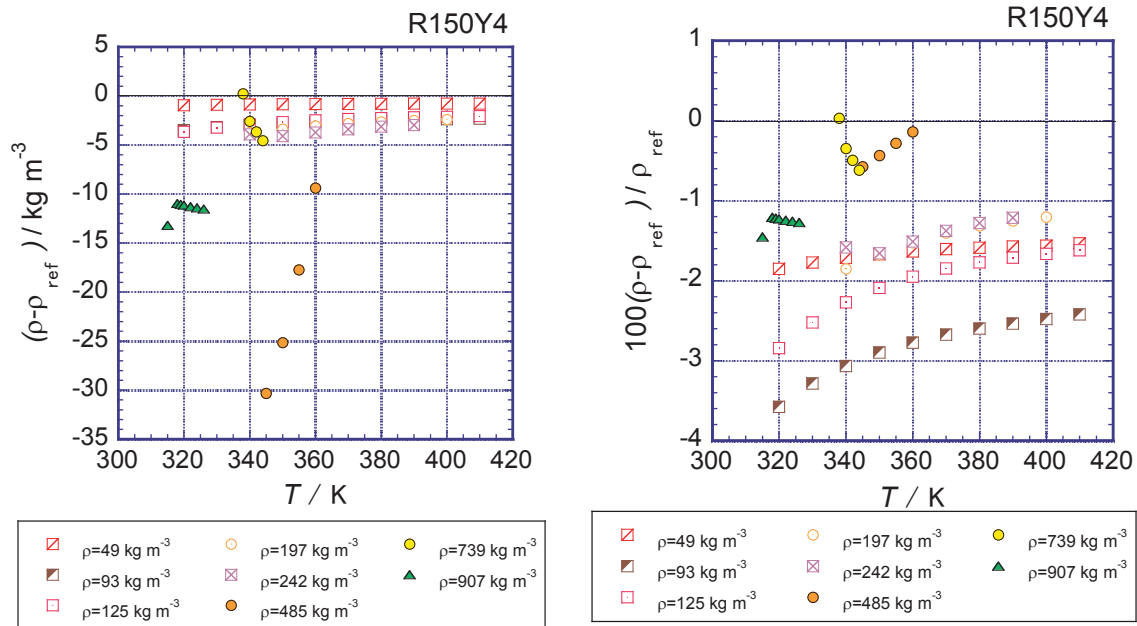


図 2.1.1.1.1-b12 Amolea R150Y4 における  
本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対密度偏差

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/m<sup>3</sup> から 880 kg/m<sup>3</sup>、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。

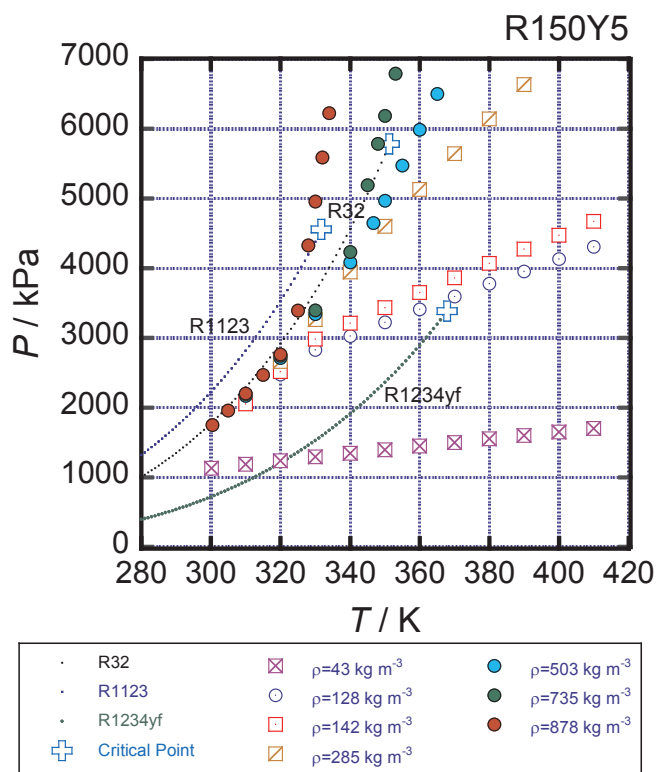


図 2.1.1.1.1-b14 Amolea R150Y5 [HFC32/HFO1234yf/HFO1123; 21.2/38.5/40.3 mass%]の  
*PVT* 性質実測値の分布



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-b15 から図 2.1.1.1-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 の熱物性の説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ため、まだまだ状態式にも改善の余地があると言える。

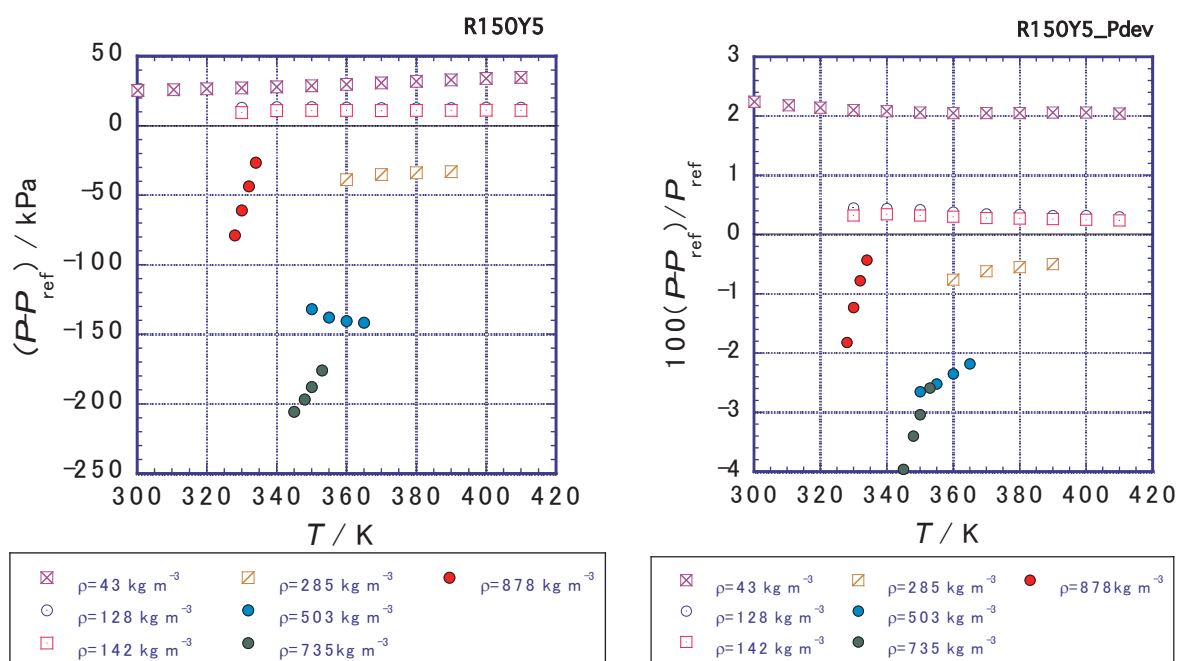


図 2.1.1.1-b15 Amolea R150Y5 における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対圧力偏差

図 2.1.1.1-b16 Amolea R150Y5 における本実測値の REFPROP 10.0 からの相対圧力偏差

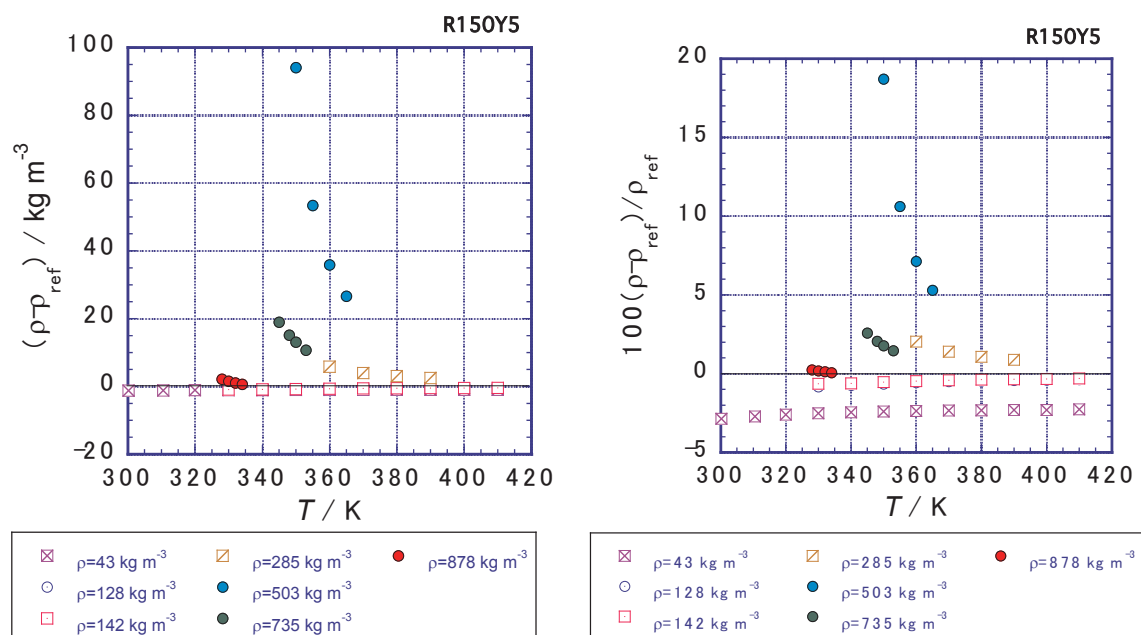


図 2.1.1.1-b17 Amolea R150Y5 における本実測値の REFPROP 10.0 からの絶対密度偏差

図 2.1.1.1-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。

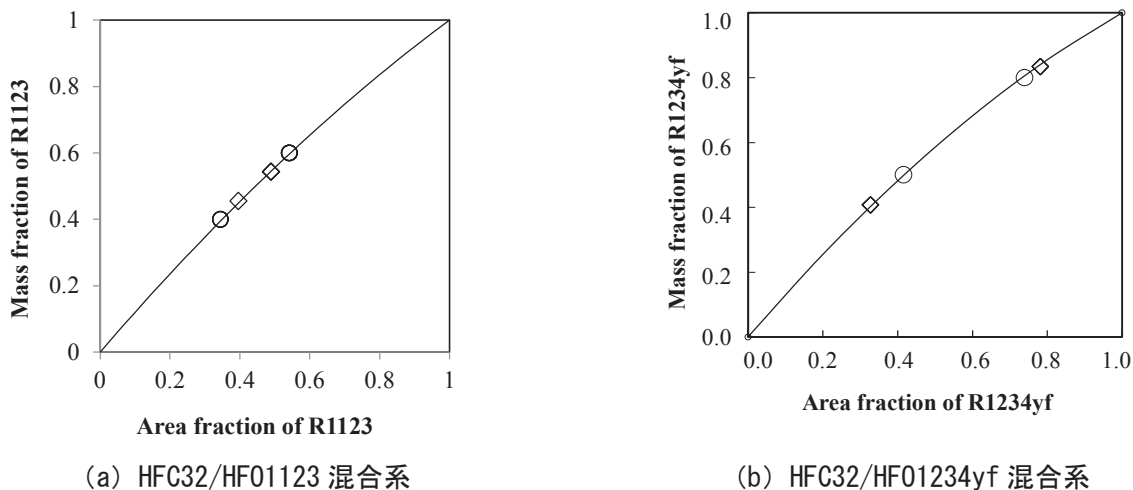
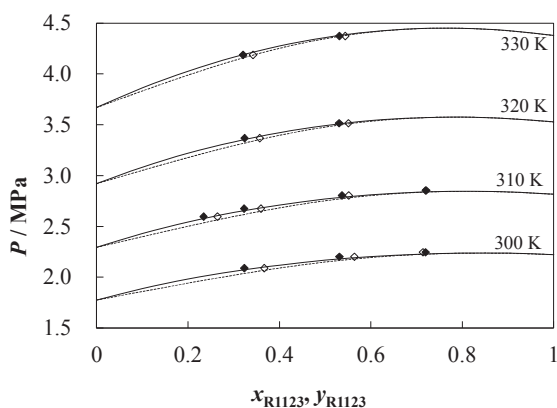


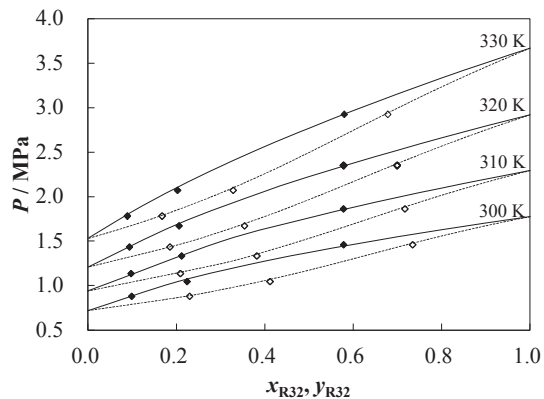
図 2.1.1.1.2-1 本研究で作成した検量線および校正値の分布. ◇ : 本実測値、○ : 九州大学

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

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。

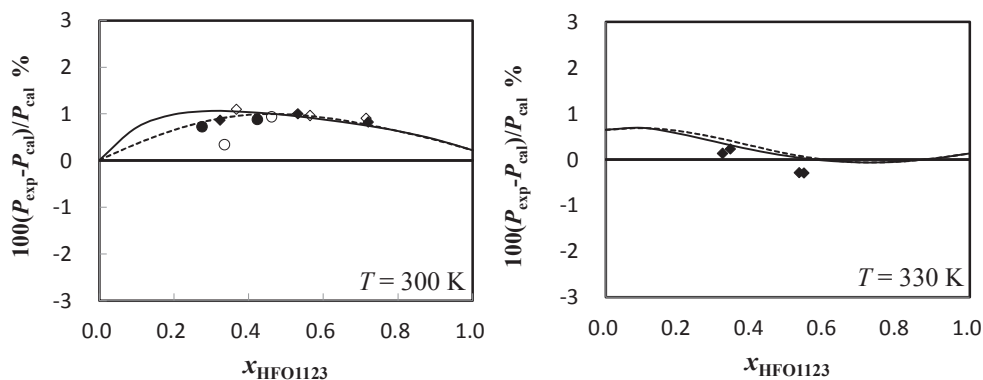


図 2.1.1.1.2-3 HFC32+HF01123 混合系の沸点および露点圧力実測値に対する Akasaka model<sup>[1]</sup> (REFPROP 10.0) からの相対圧力偏差. ◆◇: 本実測値、●○: 九州大学、  
—、--: 本研究で相関した PR-MC 状態方程式

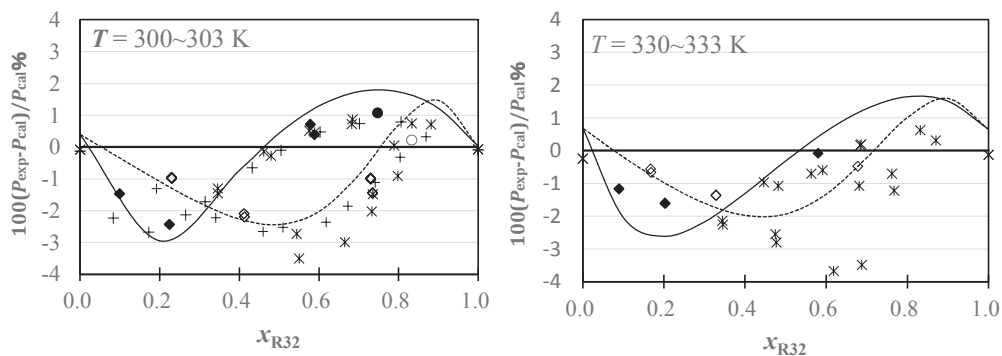


図 2.1.1.1.2-4 HFC32+HF01124yf 混合系の沸点および露点圧力実測値に対する Akasaka model<sup>[2]</sup> (REFPROP 10.0) からの相対圧力偏差. ◆◇: 本実測値、●○: 九州大学、\*: Kamiaka et al.<sup>[3]</sup>、  
-: Raabe<sup>[4]</sup>、+: Hu et al.<sup>[5]</sup>、—、--: 本研究で相関した PR-MC 状態方程式

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<sup>[6]</sup> 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<sub>x</sub> 性質及び定圧比熱の測定 (担当: 日本大学工学部)

##### (a) 高温 PVT<sub>x</sub> 性質

図 2.1.1.1.3-1 に高温用 PVT<sub>x</sub> 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に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。

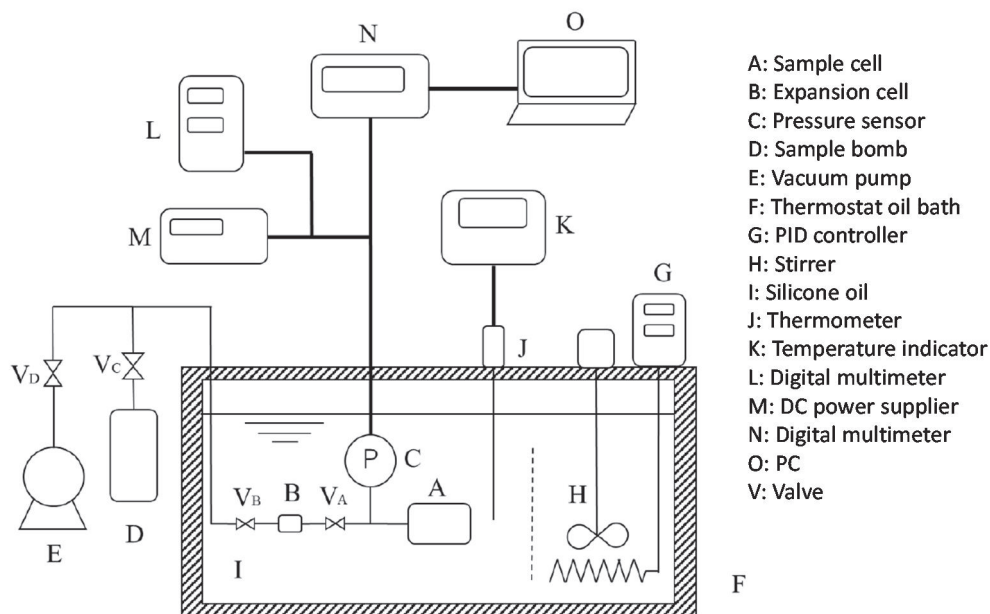


図 2.1.1.1.3-1 高温用  $PVT_x$  性質測定装置概略図

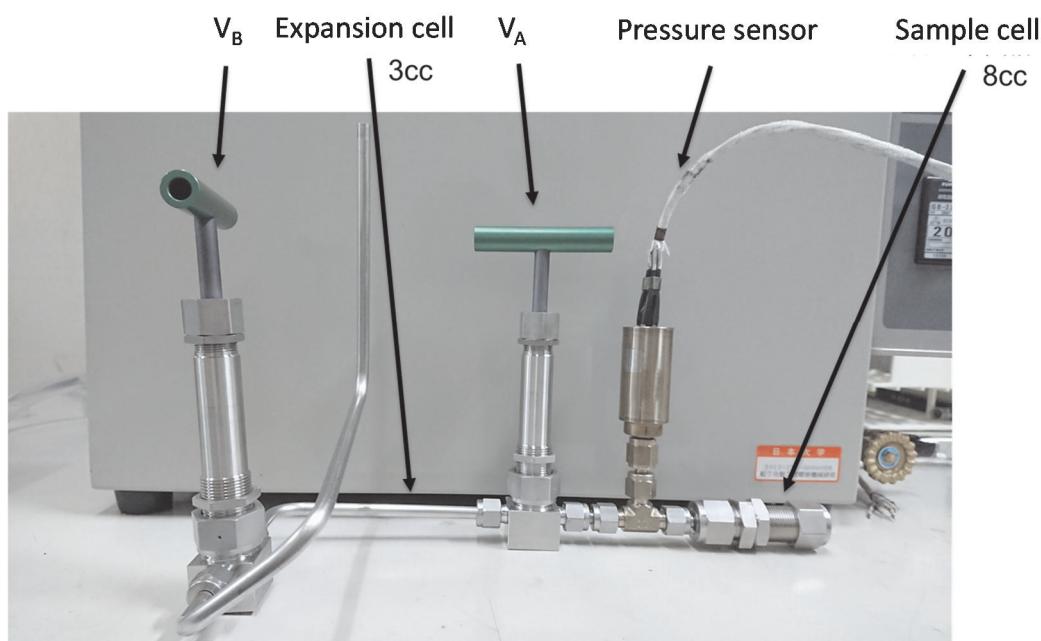


図 2.1.1.1.3-2  $PVT_x$  性質測定装置の圧力容器部の写真

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/m<sup>3</sup>、411 kg/m<sup>3</sup>、270 kg/m<sup>3</sup>、178 kg/m<sup>3</sup>)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/m<sup>3</sup>、468 kg/m<sup>3</sup>、306 kg/m<sup>3</sup>、197 kg/m<sup>3</sup>)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/m<sup>3</sup>、411 kg/m<sup>3</sup>、270 kg/m<sup>3</sup>、178 kg/m<sup>3</sup>)に沿って 48 点のデータを得た。

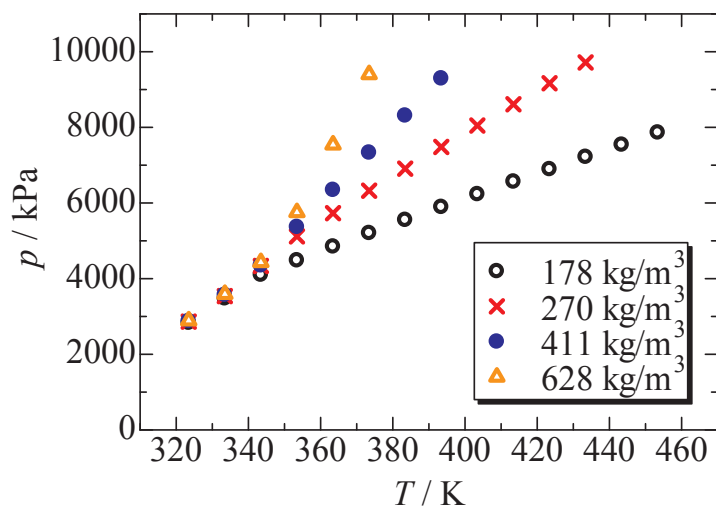


図 2.1.1.1.3-3 37.57mass%HFO1234yf+62.43mass%HFC32 の測定結果

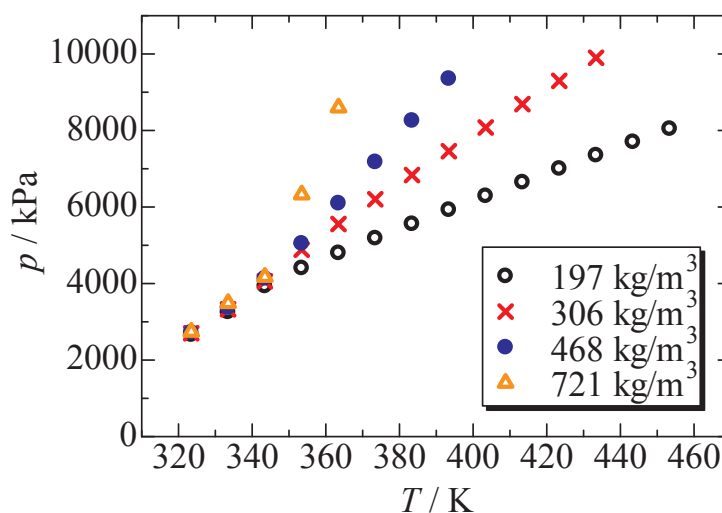


図 2.1.1.1.3-4 48.90mass%HFO1234yf + 51.10mass%HFC32 の測定結果



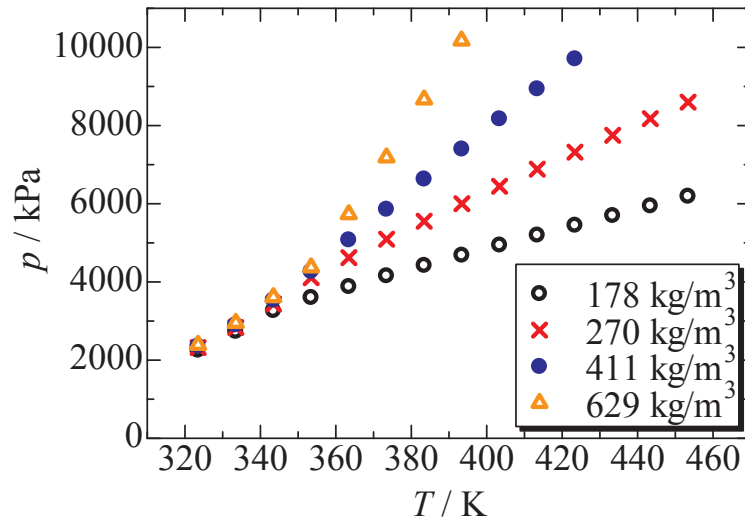


図 2.1.1.1.3-5 68.53mass%HF01234yf + 31.47mass%HFC32 の測定結果

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/m<sup>3</sup>、87kg/m<sup>3</sup>、124kg/m<sup>3</sup>、210kg/m<sup>3</sup>、346kg/m<sup>3</sup>、395kg/m<sup>3</sup>、524kg/m<sup>3</sup>、650kg/m<sup>3</sup>、719kg/m<sup>3</sup>、841kg/m<sup>3</sup>、980kg/m<sup>3</sup>、1038kg/m<sup>3</sup>、1148kg/m<sup>3</sup>、1252kg/m<sup>3</sup>、1272kg/m<sup>3</sup>、1278kg/m<sup>3</sup>、1280kg/m<sup>3</sup>)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。

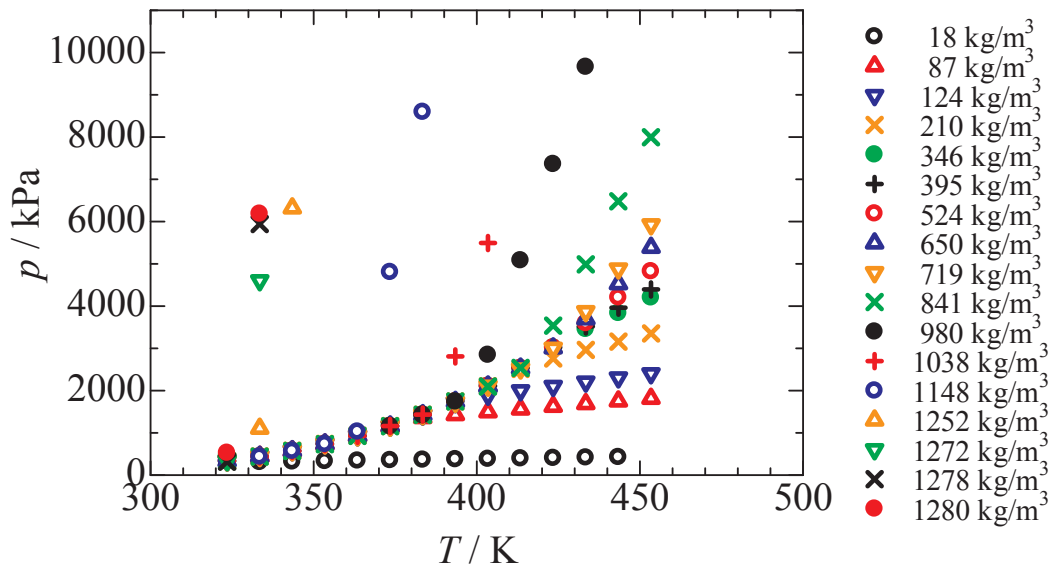


図 2.1.1.1.3-6 HCFO1224yd(Z)の測定結果( $PT$ 線図)

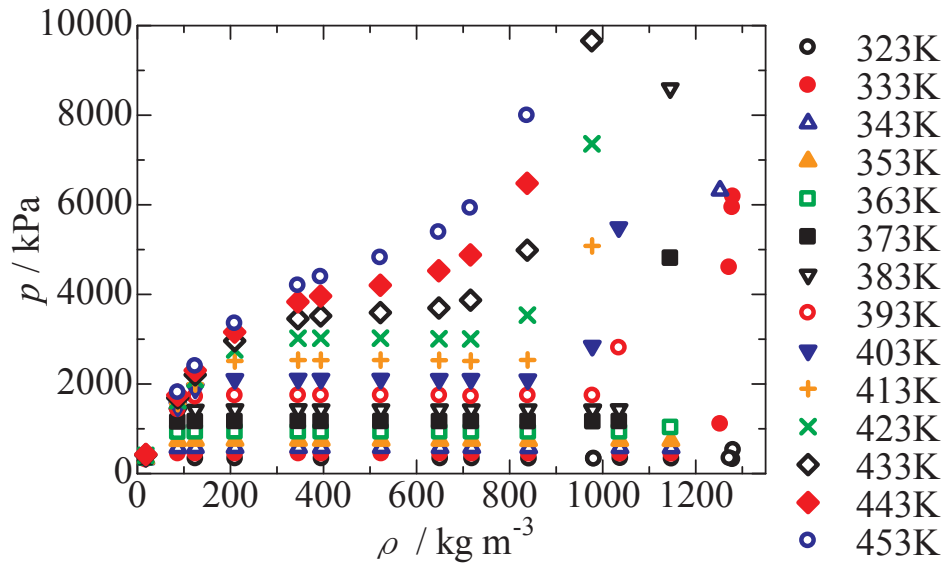


図 2.1.1.1.3-7 HCFO1224yd(Z)の測定結果 ( $P\rho$ 線図)

HFO1234yf+HFC32+CO<sub>2</sub> 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% CO<sub>2</sub> 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%CO<sub>2</sub> の  $PT$ (圧力・温度)線図を示す。

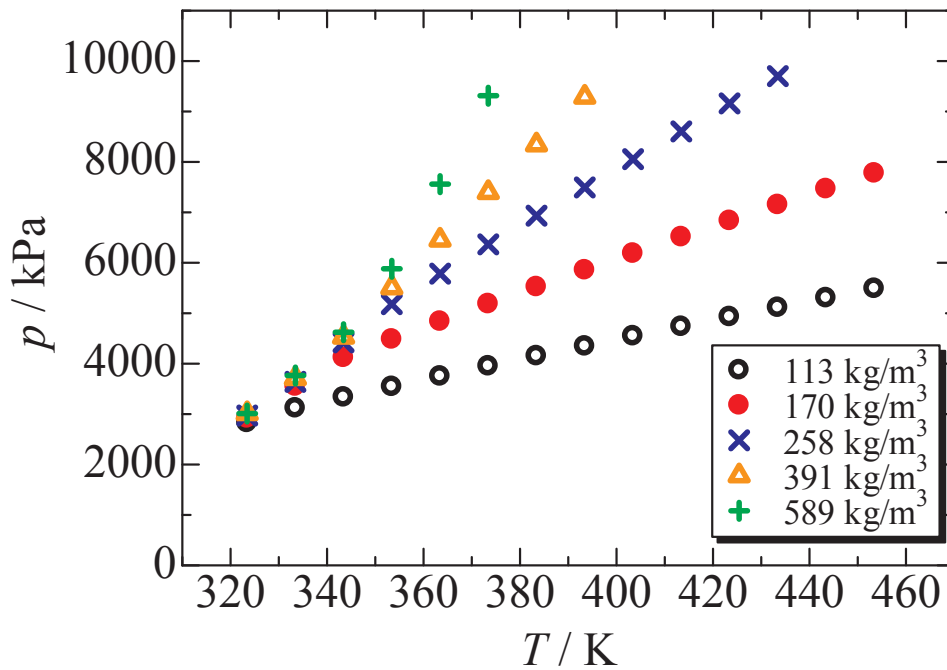


図 2.1.1.1.3-8 60.93wt%HFC32+37.12wt%HFO1234yf+1.95wt%CO<sub>2</sub> の測定結果

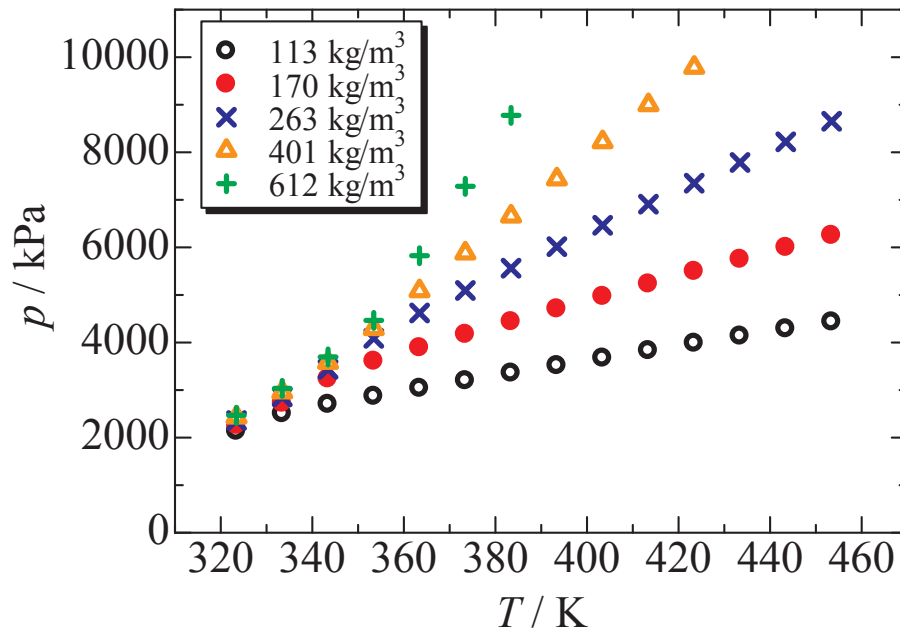


図 2.1.1.1.3-9 30.16wt%HFC32+67.86wt%HF01234yf+1.98wt% CO2 の測定結果

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。

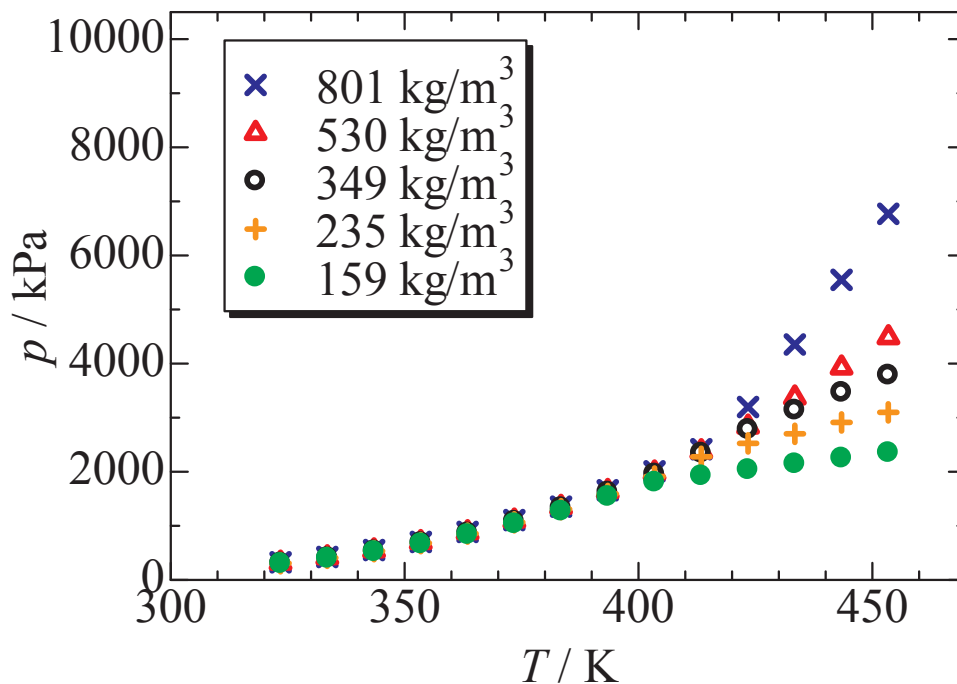


図 2.1.1.1.3-10 43.80wt%HF01336mzz(E)+56.20wt%HF01336mzz(Z) の測定結果

## (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。

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

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

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、

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

式(2.1.1.1.3-3)を $c_p$ について整理すると

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

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。

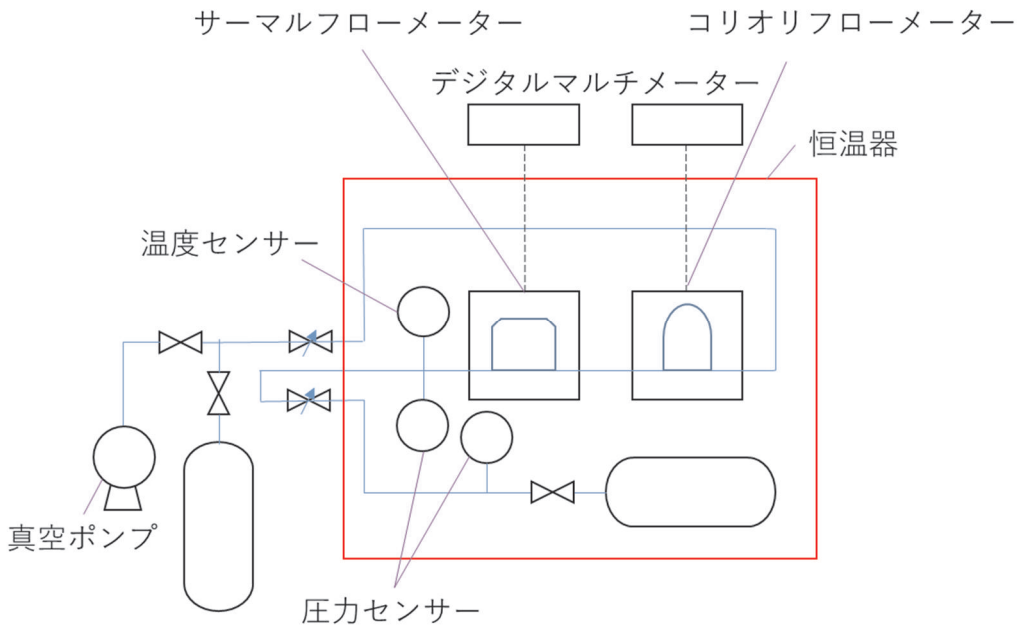


図 2.1.1.1.3-11 定圧比熱測定装置概略図



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。

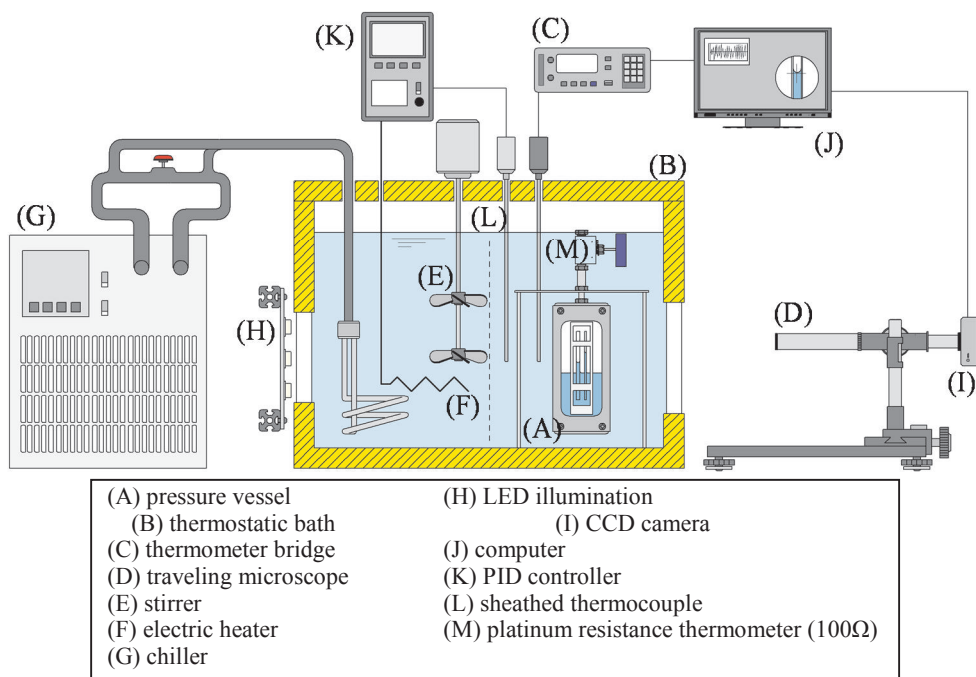


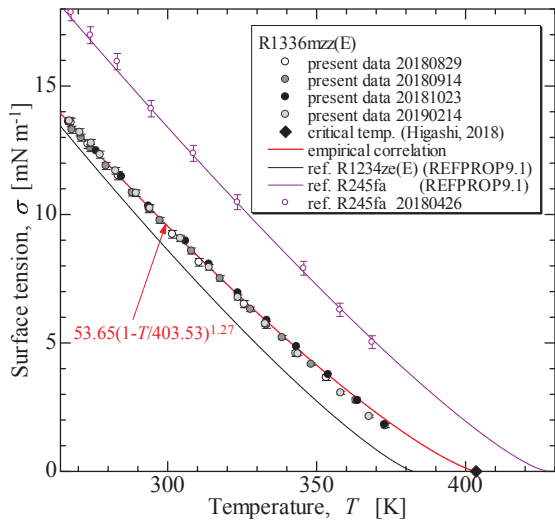
図 2.1.1.1.4-1 示差毛管法による表面張力測定装置

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。

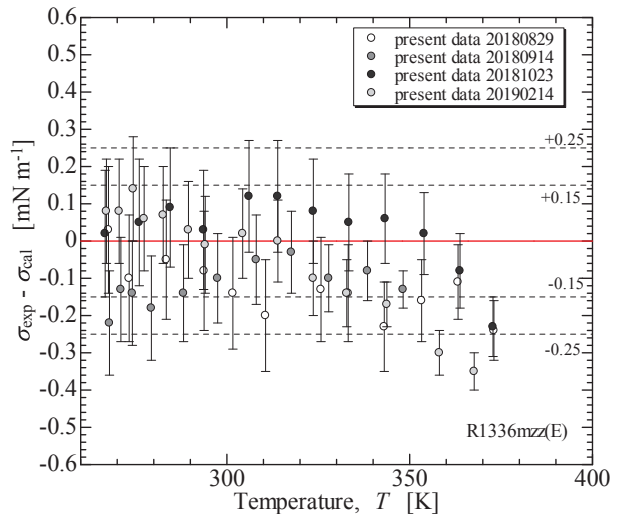
HFO1336mzz(E)の表面張力を温度範囲 265 K～ 375 K の範囲で高精度に測定し、測定結果に基づいた van der Waals 型の相関式を提案した。図 2.1.1.1.4-2 は HFO1336mzz(E)測定結果、および相関式からの偏差を示す。推定した 95% 包括度の測定誤差は  $\pm 0.15 \text{ mN m}^{-1}$  であり、相関式からの偏差はこの誤算範囲以内に収まっている。また、測定された表面張力は 273.15 K で  $12.8 \text{ mN m}^{-1}$  であることから、HFO1234ze(E)と比較的近い値であることが分かっ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

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。



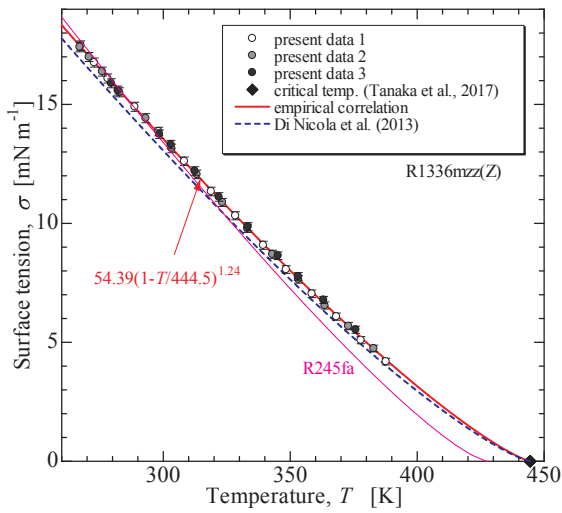


(a) 測定結果および相関式

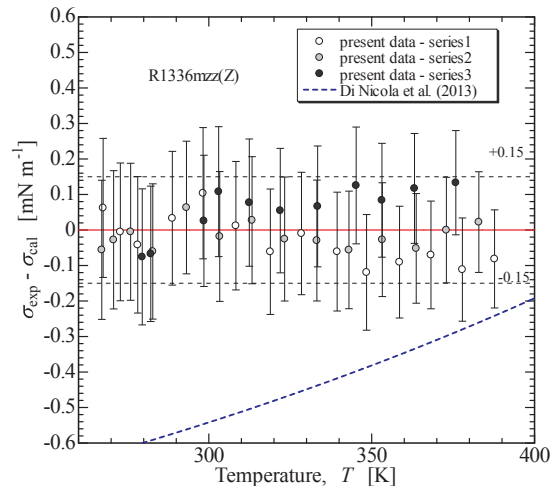


(b) 相関式からの偏差

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。

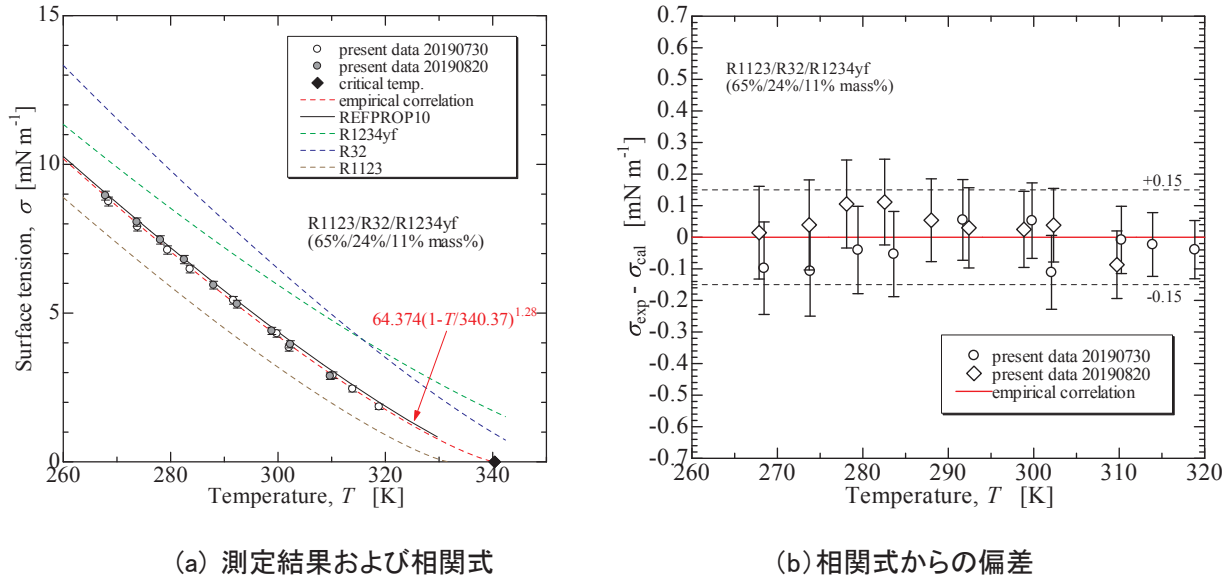
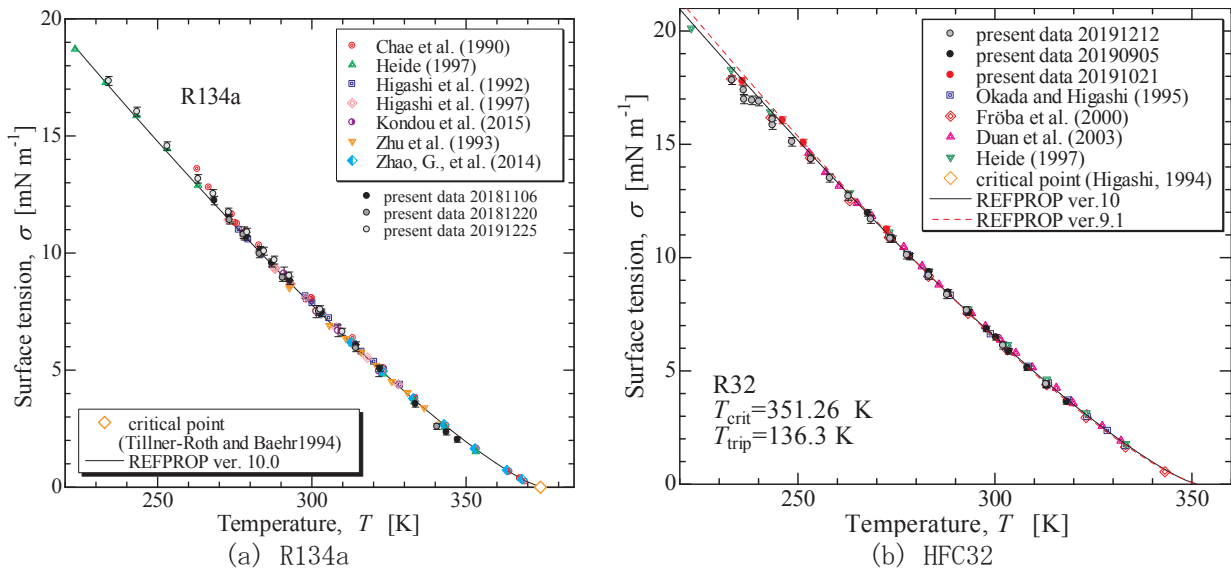


図 2.1.1.1.4-4 HFO1123/HFC32/HFO1234yf(65/24/11 mass%)の表面張力の測定結果

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 $-40^{\circ}\text{C}$ 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、 $-6^{\circ}\text{C}$ 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。



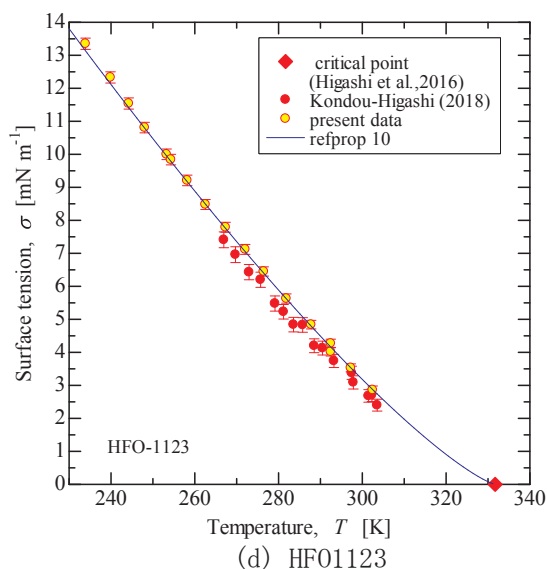
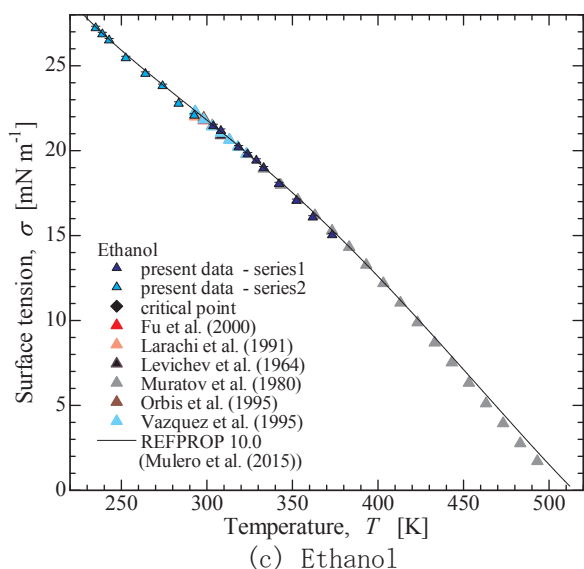
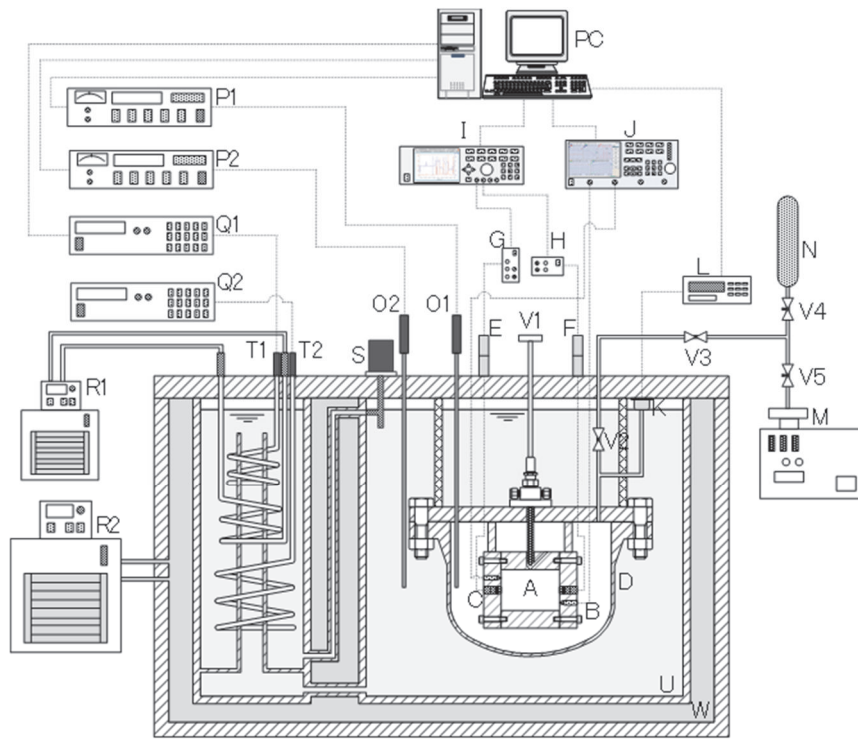


図 2.1.1.1.4-5  $-40^{\circ}\text{C}$ までの低温域の測定精度の確認

### 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。受信用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、受信用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 $\pm 5\text{ mK}$ 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。

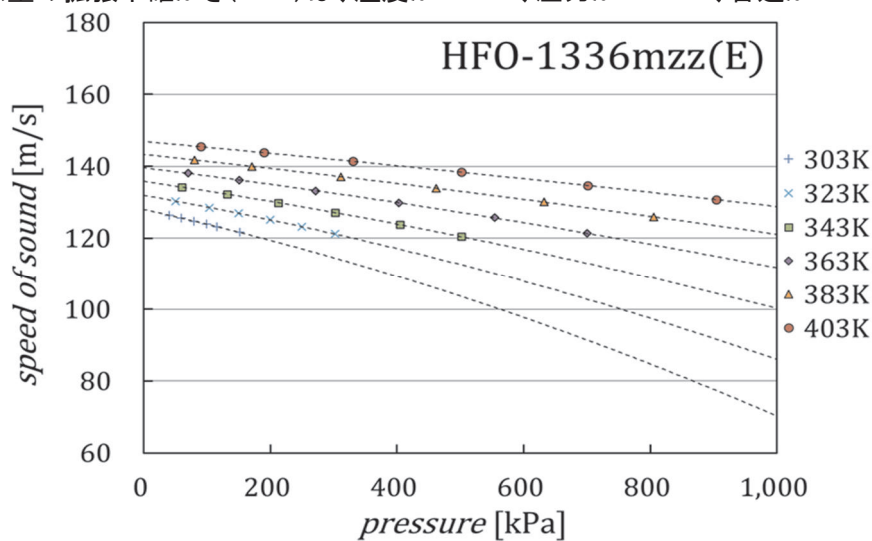


図 2.1.1.1.5-2 HFO-1336mzz (E) の音速測定結果

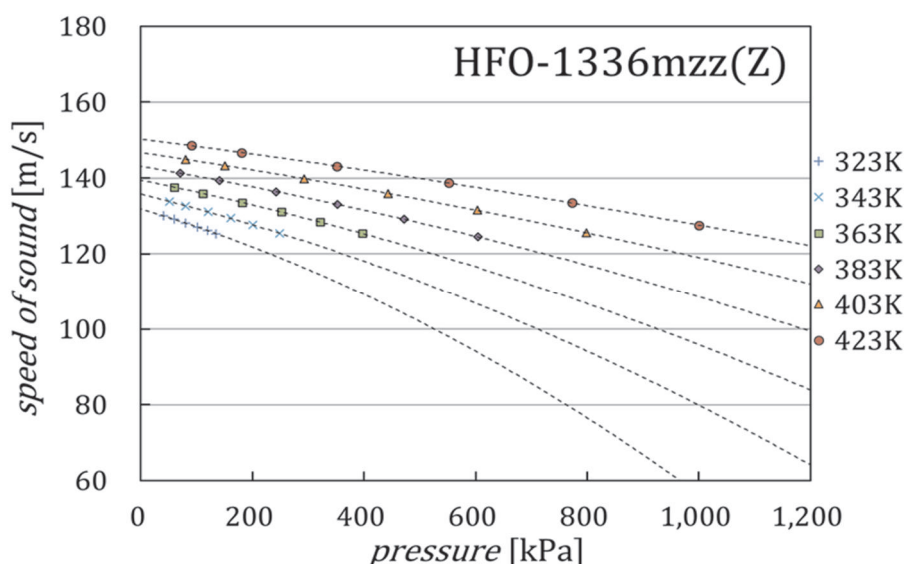


図 2.1.1.1.5-3 HFO1336mzz(Z)の音速測定結果

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。

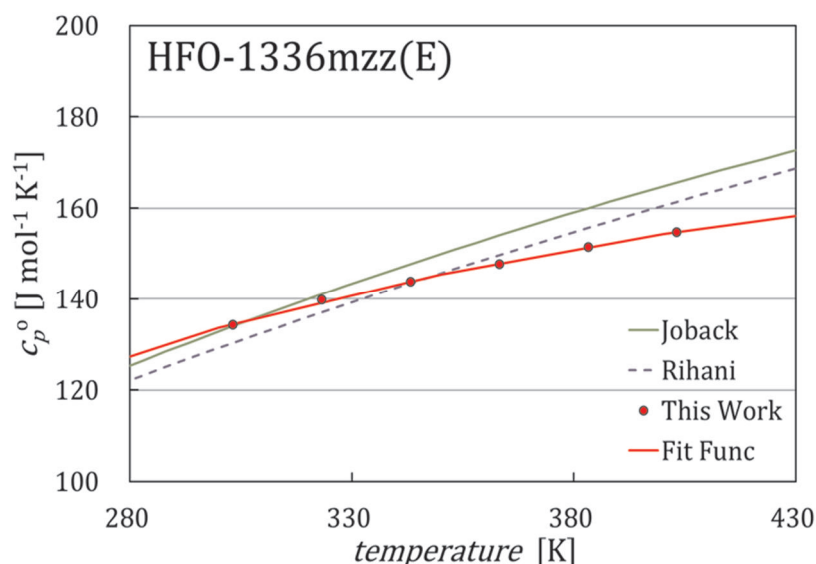


図 2.1.1.1.5-4 HFO1336mzz(E)の理想気体状態の定圧比熱導出結果

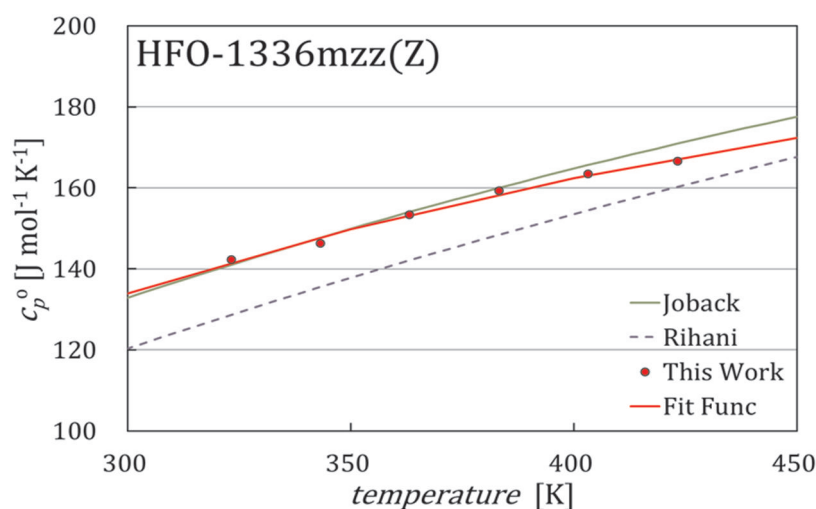


図 2.1.1.1.5-5 HFO1336mzz(Z)の理想気体状態の定圧比熱導出結果

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
$d_1$	$8.493 \times 10^0$	$3.889 \times 10^0$
$d_2$	$1.058 \times 10^1$	$1.889 \times 10^1$
$u_1$	$4.918 \times 10^2$	$4.533 \times 10^{-1}$
$u_2$	$9.005 \times 10^2$	$9.875 \times 10^2$

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。



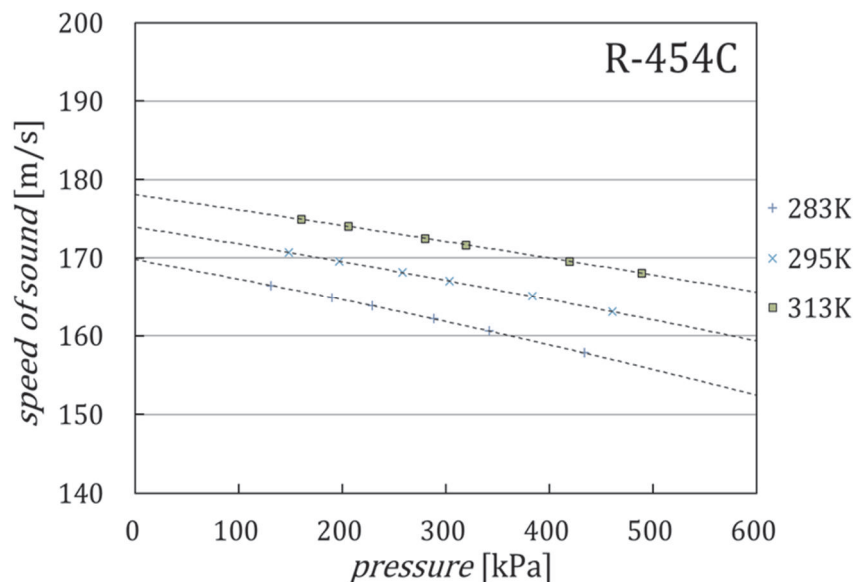


図 2.1.1.1.5-6 R-454C の音速測定結果

#### 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。

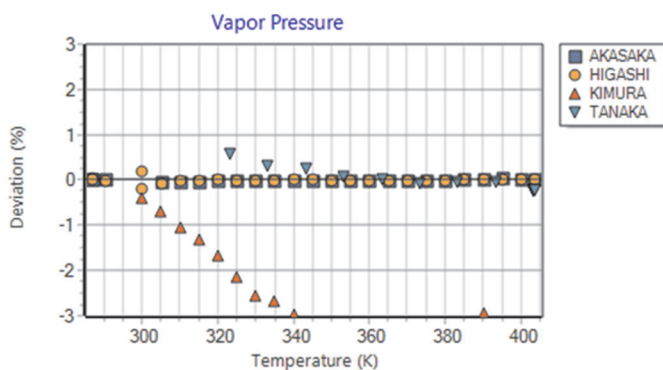


図 2.1.1.1.6-1: 本プロジェクトで測定された HF01336mzz (E) の飽和蒸気圧 (HIGASHI) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

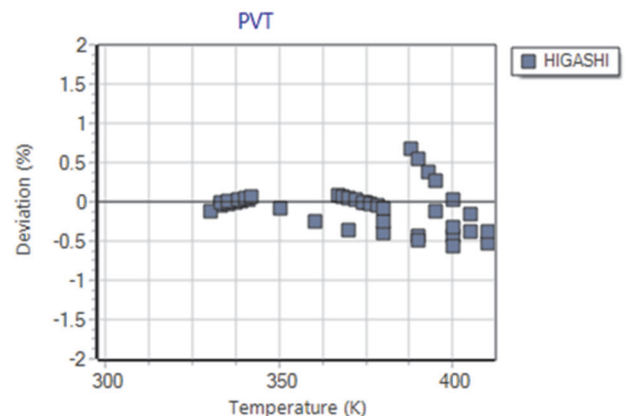


図 2.1.1.1.6-2: 本プロジェクトで測定された HF01336mzz (E) の密度 (HIGASHI) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

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。

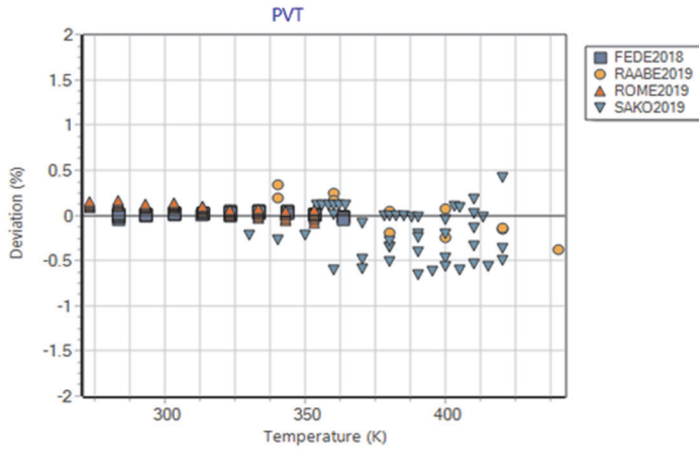


図 2. 1. 1. 1. 6-3: イタリアの研究機関に測定を依頼した HCF01224yd(Z) の液密度 (FEDE2018, ROME2019) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

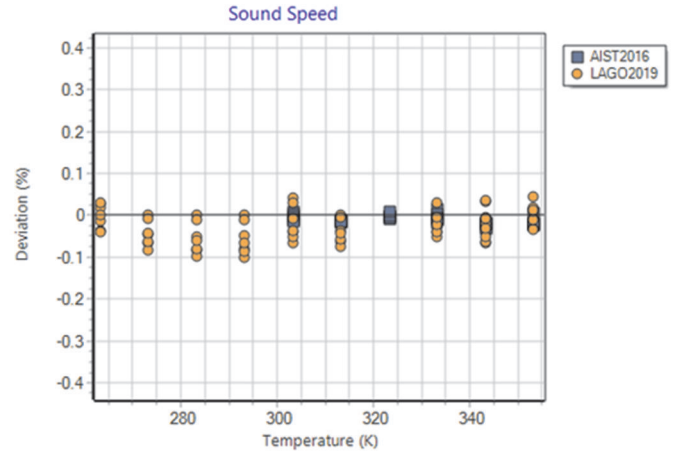
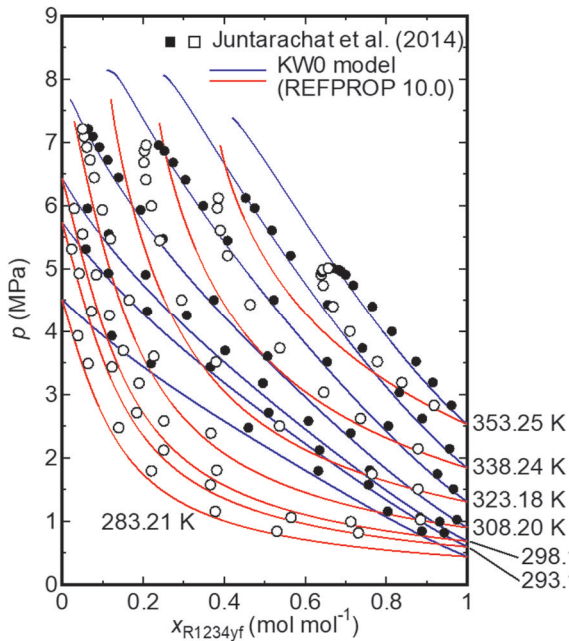
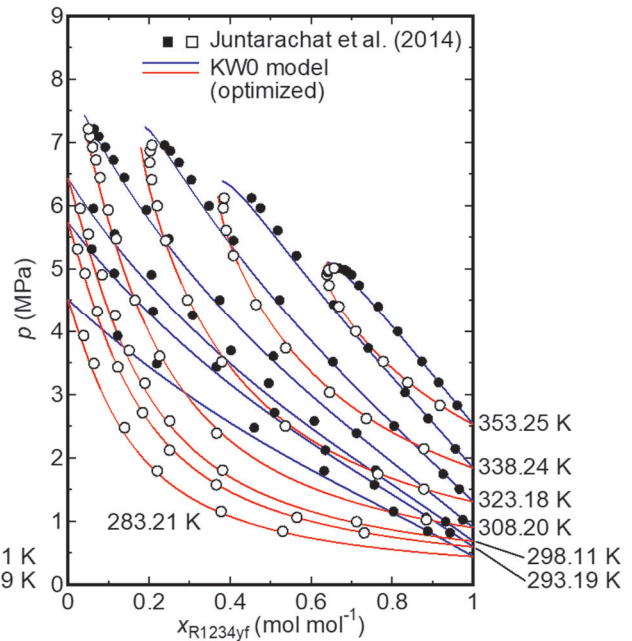


図 2. 1. 1. 1. 6-4: イタリアの研究機関に測定を依頼した HCF01224yd(Z) の液音速 (LAGO2019) と状態方程式を用いた計算値との相対偏差

さらに、HFC32+HFO1234yf+CO<sub>2</sub> 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+CO<sub>2</sub> 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+CO<sub>2</sub> 系の最適化モデルを組み込んで計算した HFC32+HFO1234yf+CO<sub>2</sub> 系の気液共存曲線を図 2.1.1.1.6-7 に示す。



(a) REFPROP 10.0 の標準モデル



(b) 最適化モデル

図 2. 1. 1. 1. 6-6: HFO1234yf+CO<sub>2</sub> 系の等温気液平衡

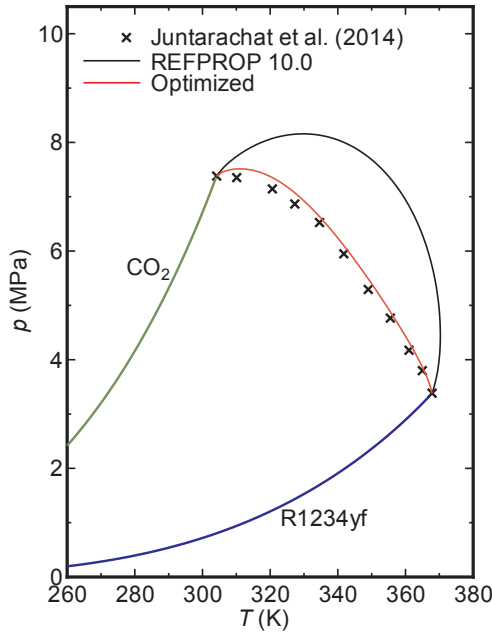


図 2.1.1.1.6-6: HF01234yf+CO<sub>2</sub>系の臨界軌跡

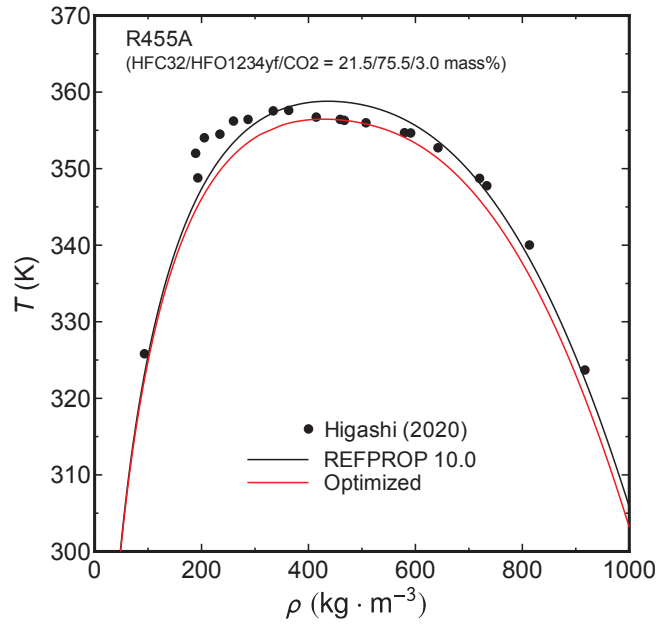


図 2.1.1.1.6-7: HFC32+HF01234yf+CO<sub>2</sub>系 (R455A) の気液共存曲線

#### 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、 $\lambda$  は測定冷媒の熱伝導率、 $\alpha$  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  $\lambda$  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。

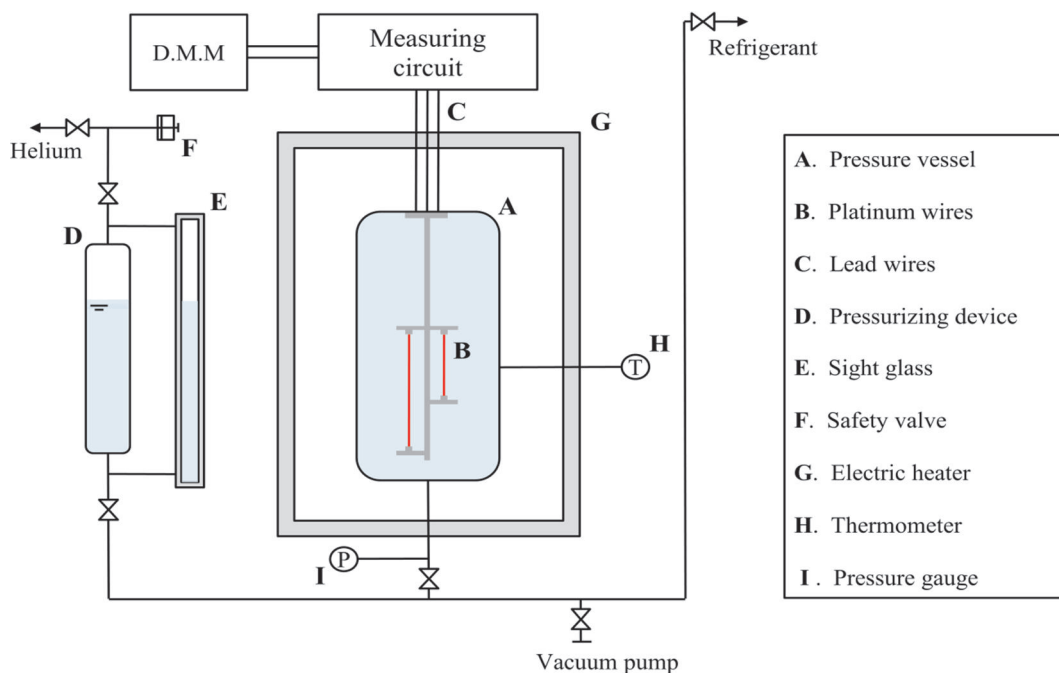


図 2.1.1.1.7-1 熱伝導率測定装置概略

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。

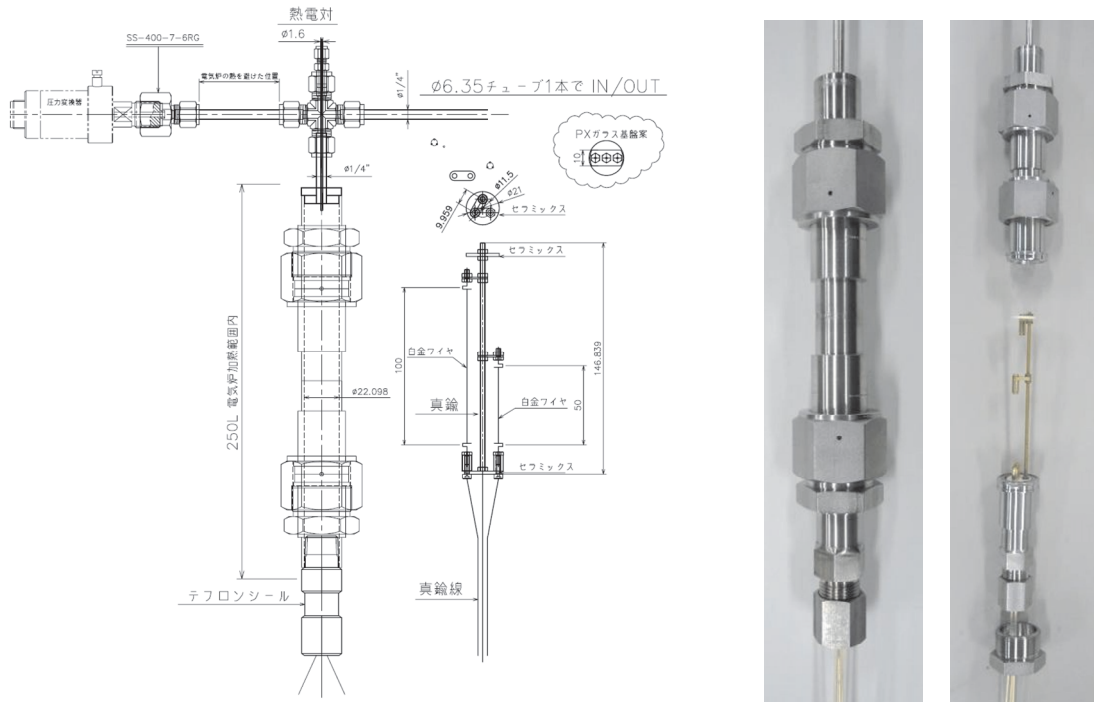
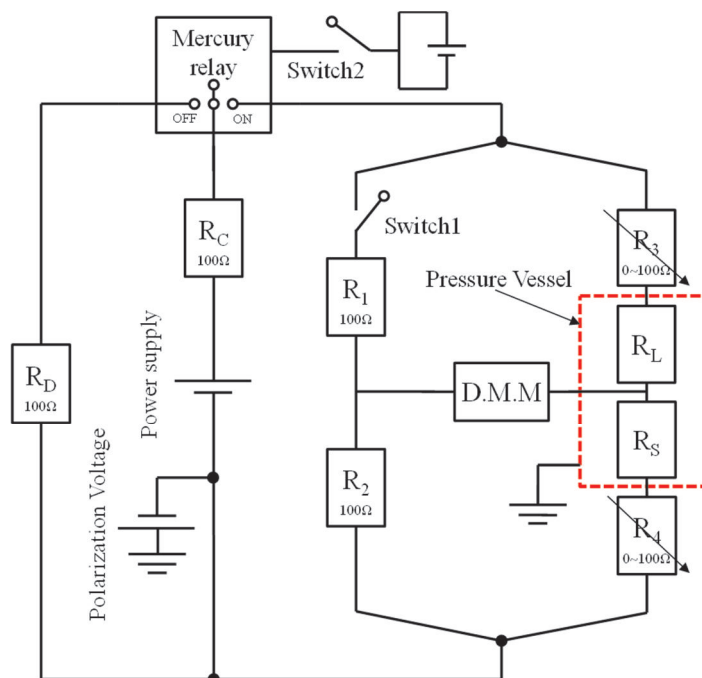


図 2.1.1.1.7-2 測定セル



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 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub> (横河電気株式会社製 2792A06) および 0~100 Ω の可変抵抗 R<sub>3</sub>、R<sub>4</sub> (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<sub>D</sub> (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<sub>D</sub> 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 R<sub>3</sub> 及び抵抗 R<sub>4</sub> 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<sub>L</sub>: Long Pt wire, R<sub>S</sub>: Short Pt wire, R<sub>1</sub>: Resistor(100Ω),  
R<sub>2</sub>: Resistor(100Ω), R<sub>3</sub>: Resistor(0~100Ω), R<sub>4</sub>: Resistor(0~100Ω),  
R<sub>C</sub>: Resistor(100Ω), R<sub>D</sub>: Resistor(100Ω)

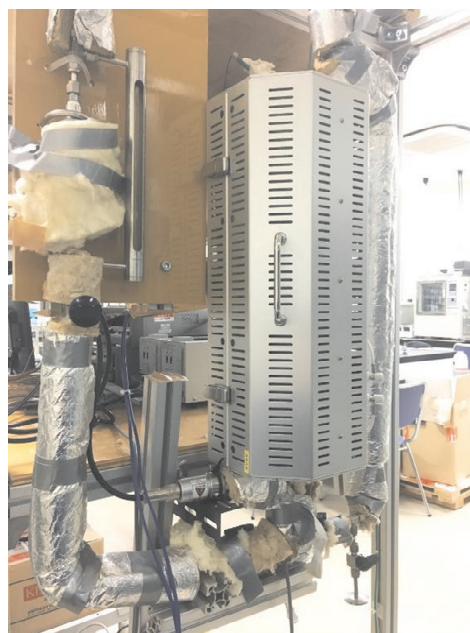
図 2.1.1.1.7-3 測定回路



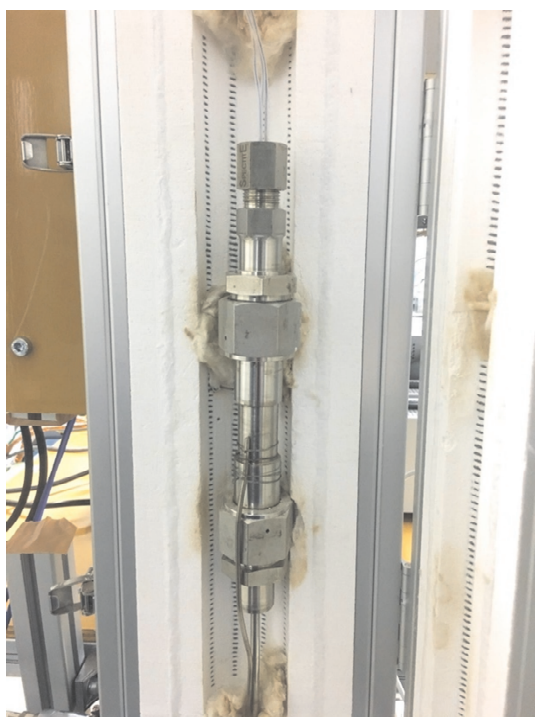
本熱伝導率測定装置の測定可能温度範囲は室温 +10 °C ~ 220 °C、測定可能圧力は5 MPa までであり、本測定装置による不確かさは2.3% 未満である。  
本研究で作製された熱伝導率測定装置の外観写真を図 2.1.1.1.7-4 に示す。



(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。

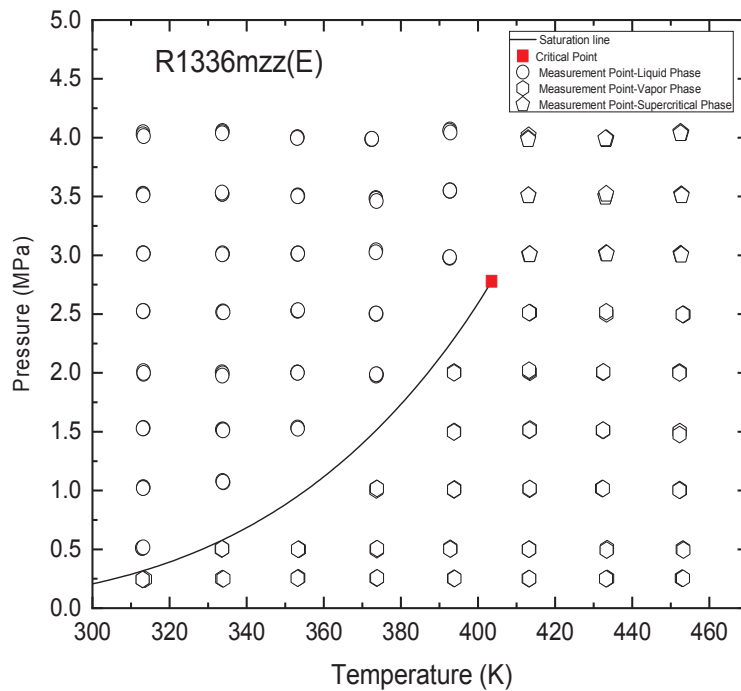


図 2.1.1.1.7-5 測定条件

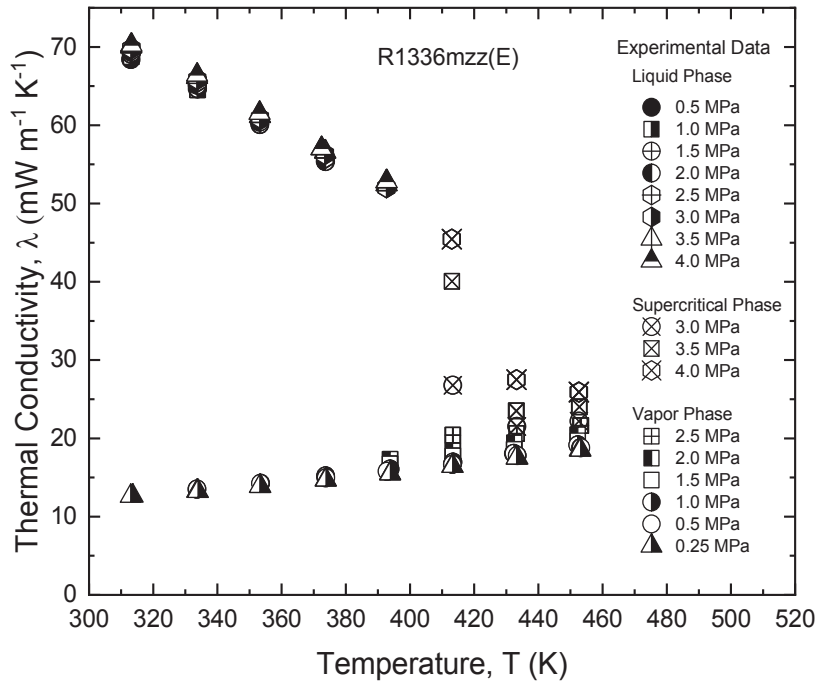
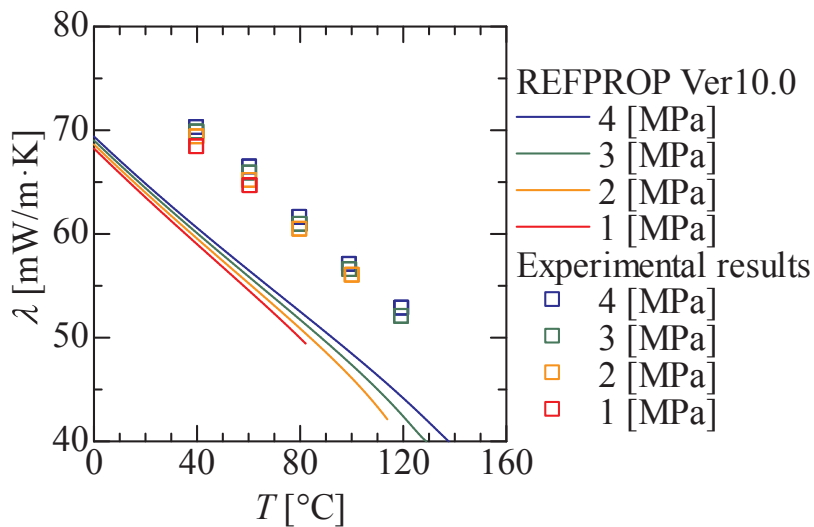
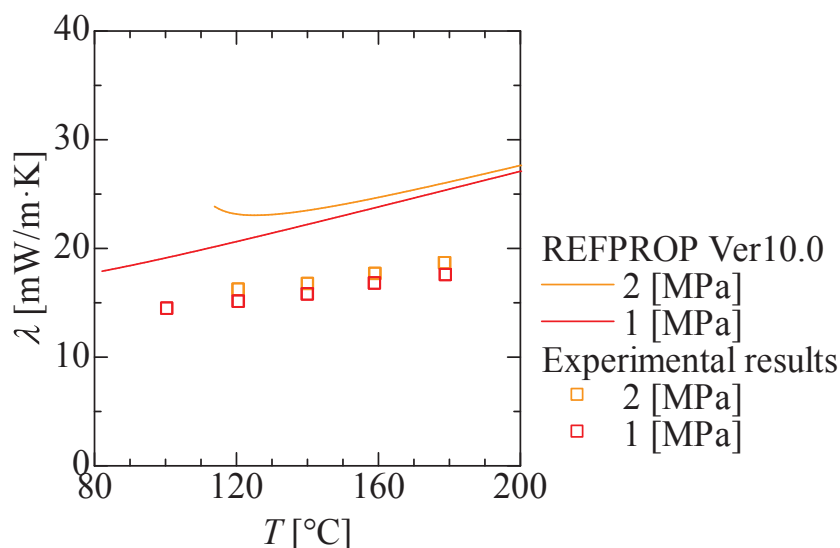


図 2.1.1.1.7-6 測定結果

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  $\eta$  と圧力損失  $\Delta p$  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。

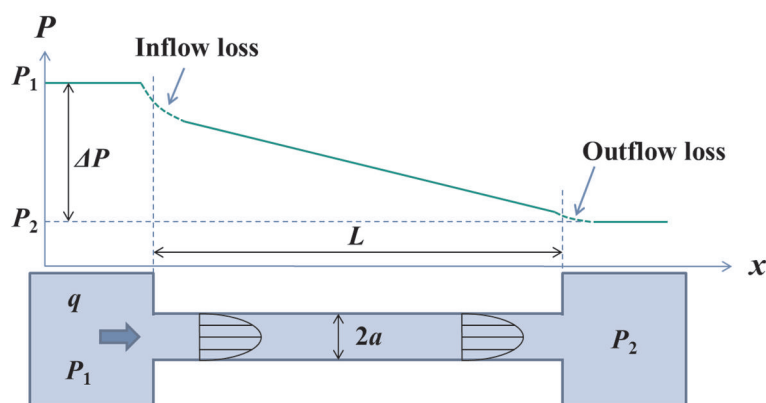


図 2.1.1.1.7-8 単一細管の圧力損失概略

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。

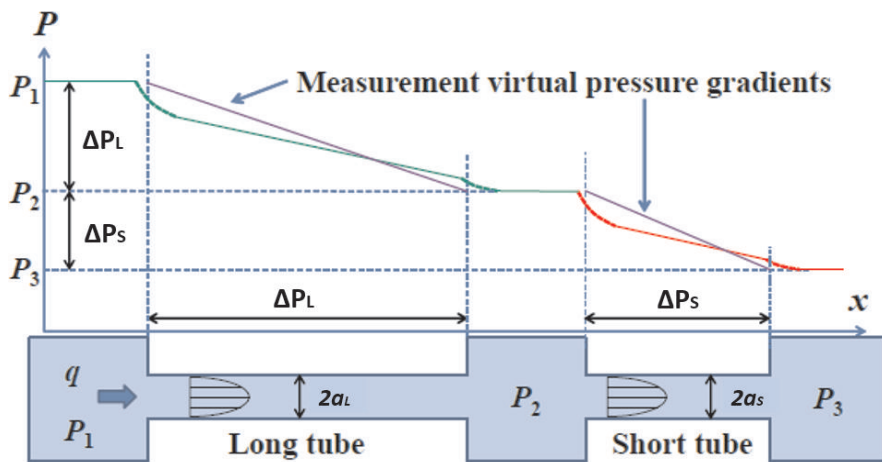


図 2.1.1.1.7-9 タンデム型細管の圧力損失概略

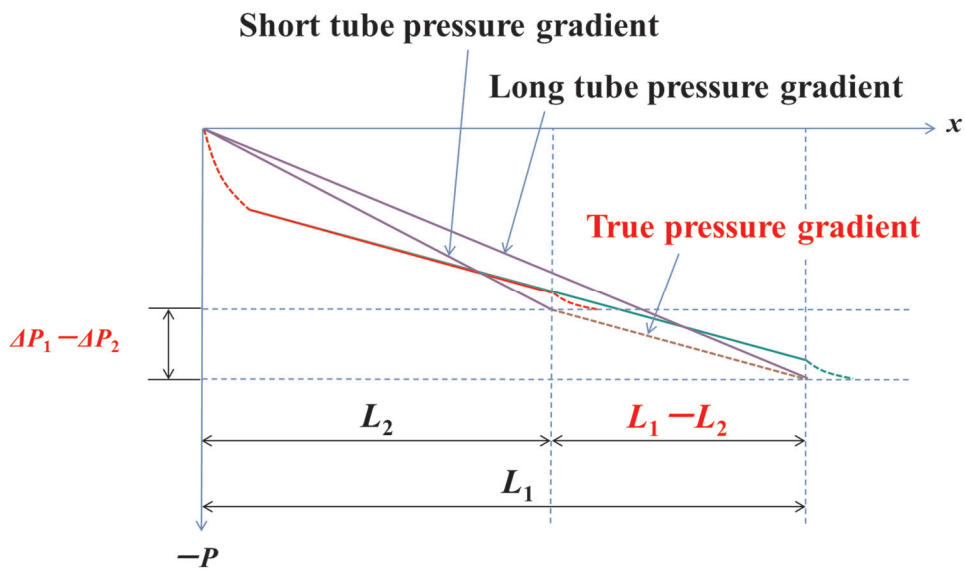


図 2.1.1.1.7-10 圧力分布の重ね合わせによる管端部損失の除去

(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  $\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  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。

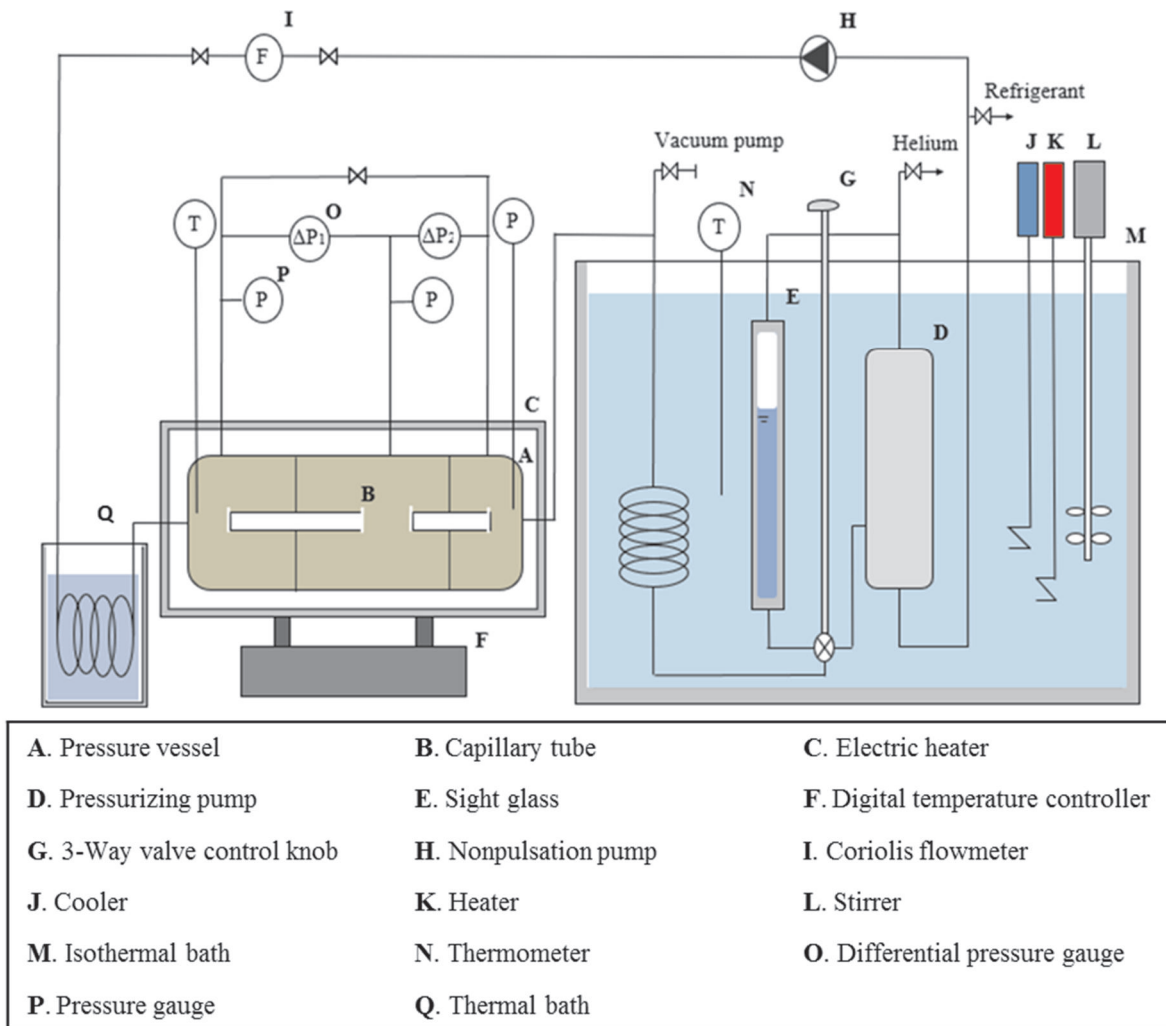


図 2.1.1.1.7-11 粘度測定装置概略



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。 $\rho_{Hg}$  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。

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

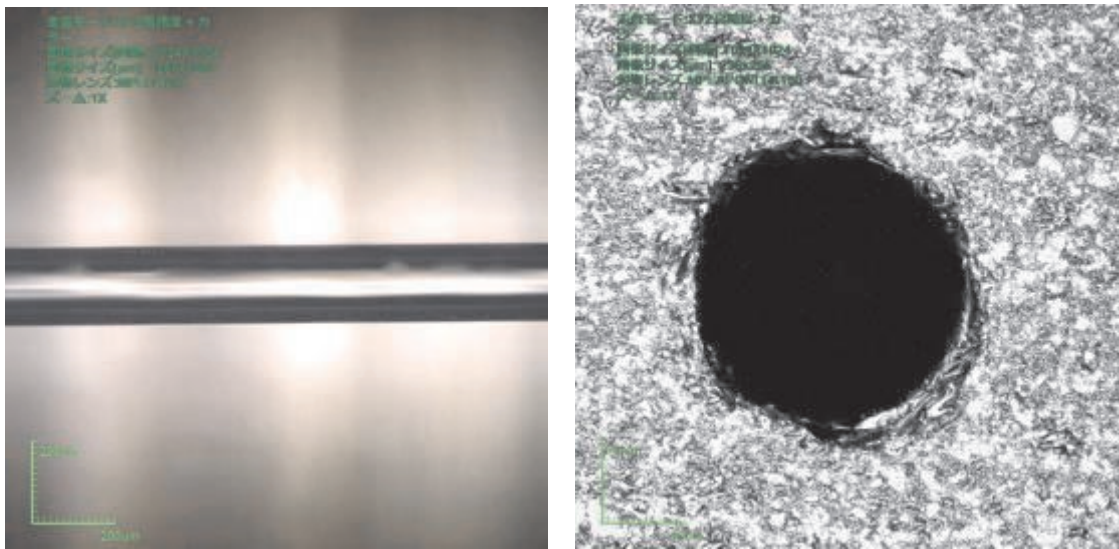


図 2.1.1.1.7-12 細径管側面および端面

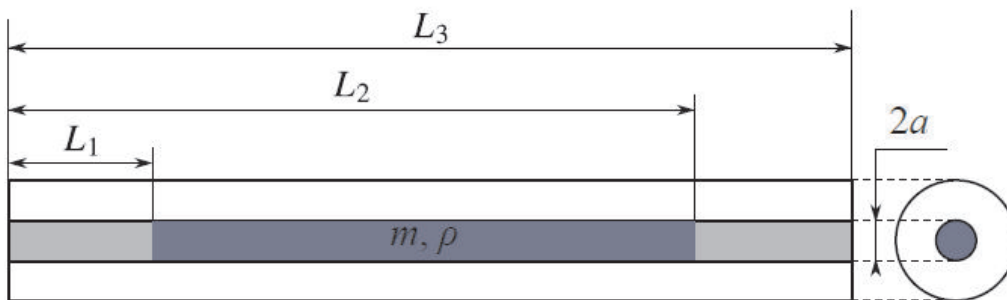
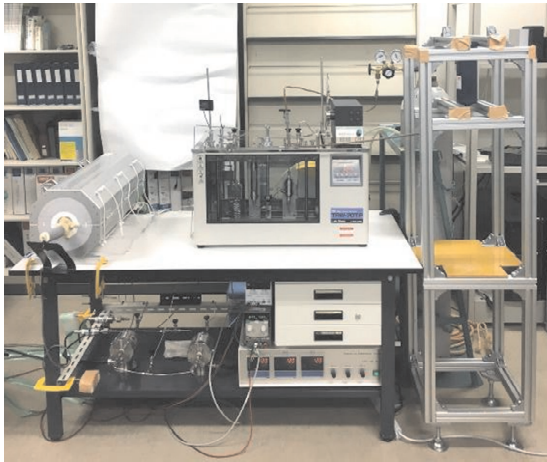


図 2.1.1.1.7-13 細管内径測定概略

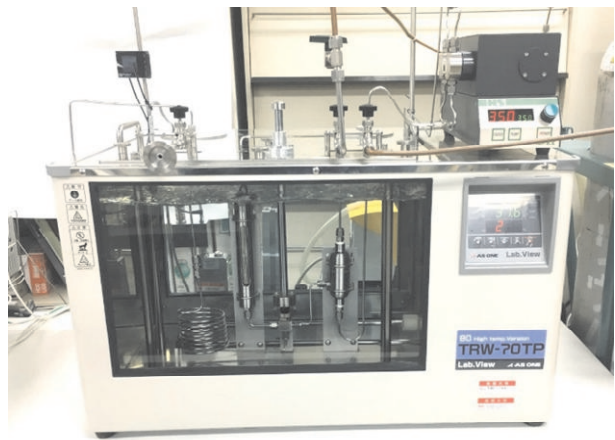
表 2.1.1.1.7-2 細管内径および長さ

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

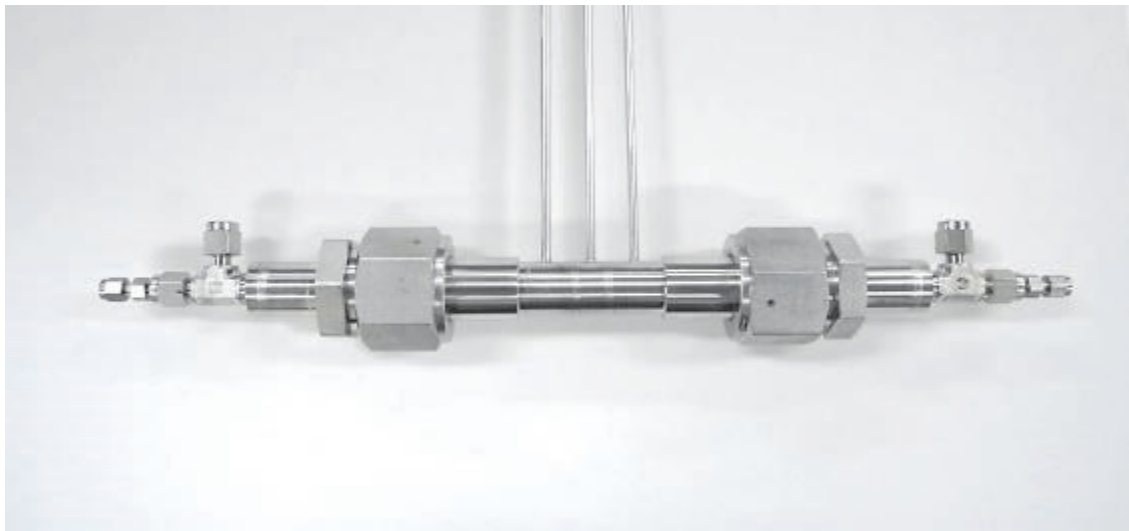
本研究で作製された粘度測定装置の測定可能温度範囲は室温+10℃ ~ 220℃、測定可能圧力は 5 MPa までであり、本測定装置の不確かさは約 3 %であると算出された。  
本研究で用いた粘度測定装置の写真を図 2.1.1.1.7-14 に示す。



(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。

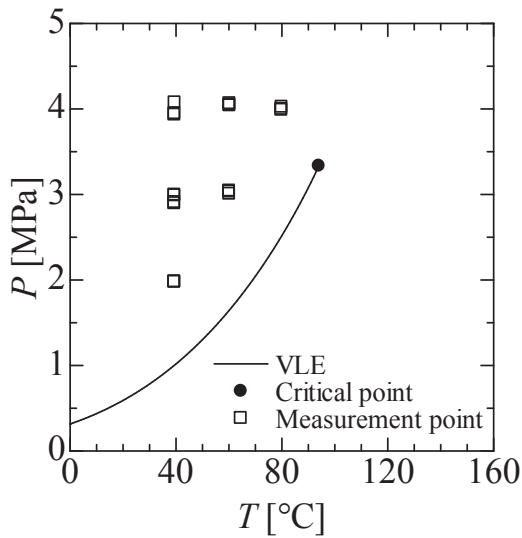


図 2.1.1.1.7-15 圧縮液粘度測定条件

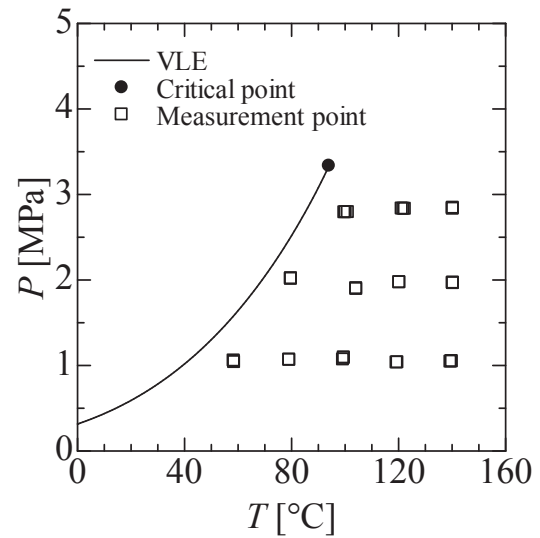


図 2.1.1.1.7-16 過熱蒸気測定条件

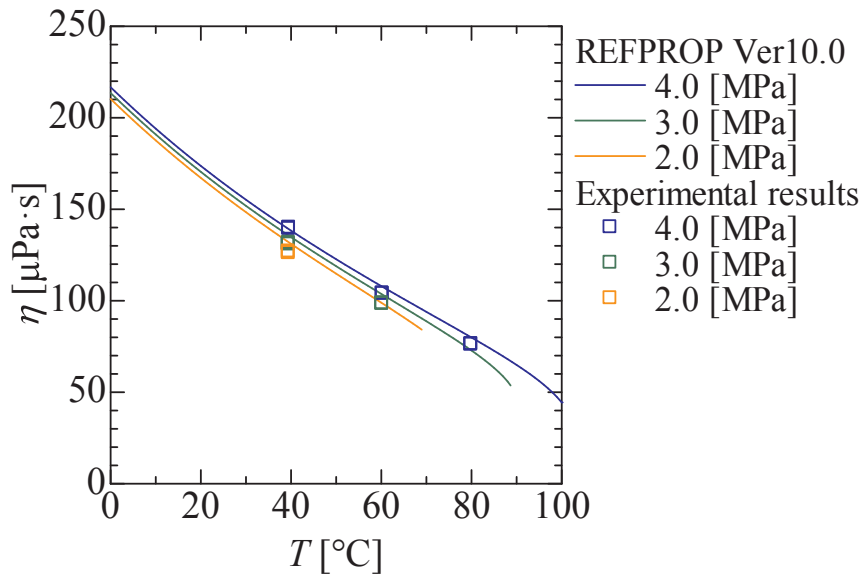


図 2.1.1.1.7-17 圧縮液粘度測定結果

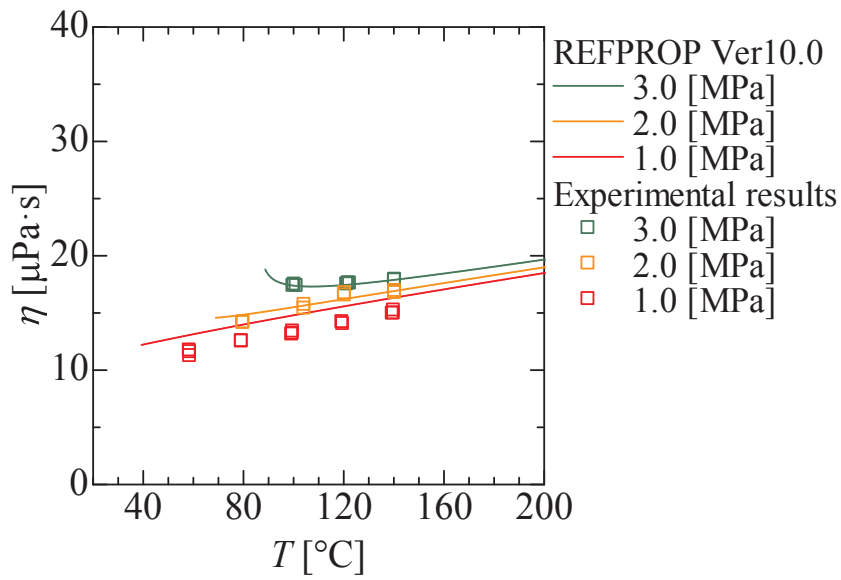


図 2.1.1.1.7-18 過熱蒸気粘度測定結果

## 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 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。

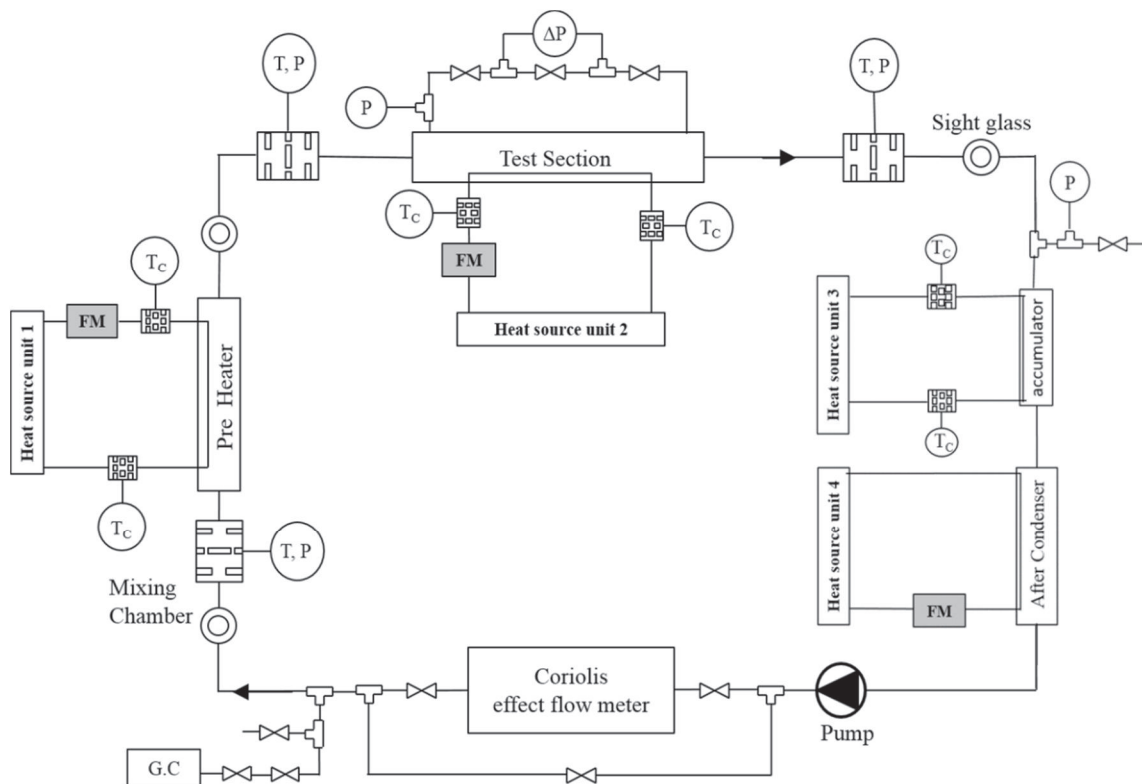


図 2.1.1.2.1-1 実験装置概略

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。



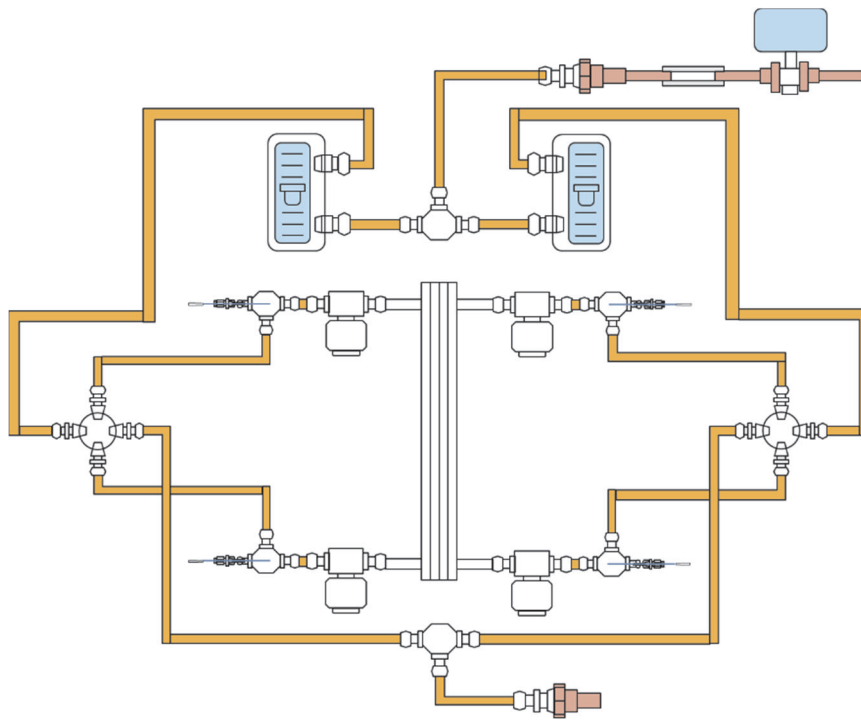
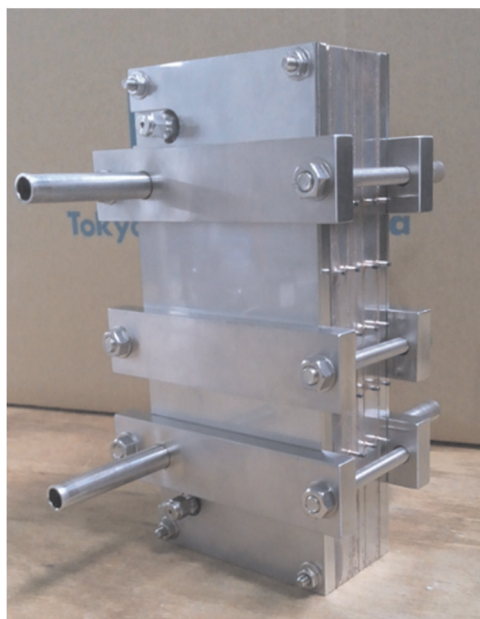


図 2.1.1.2.1-2 テストセクションへの熱源配管図

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 枚のプレートの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。



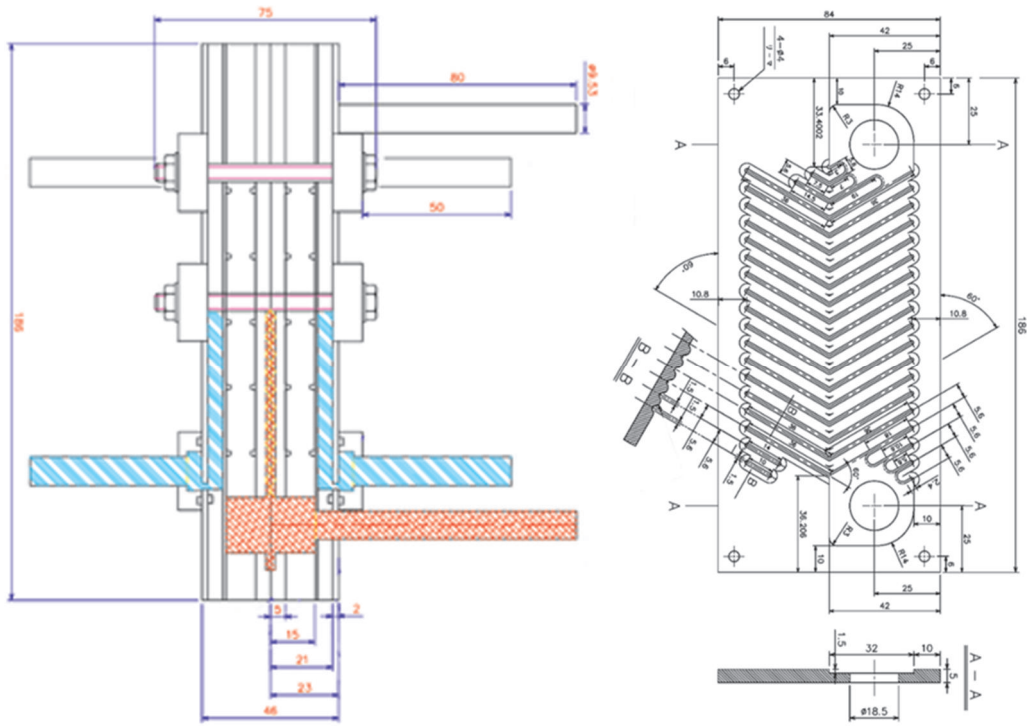


図 2.1.1.2.1-3 テストセクション

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 <sup>2</sup> )	0.0075
Chevron angle $\beta$ (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。

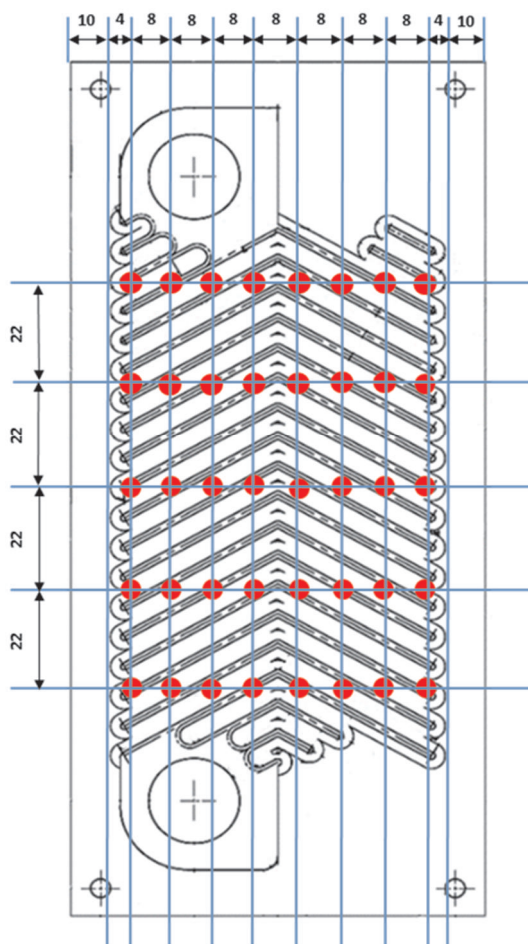


図 2.1.1.2.1-4(a) 温度測定位置 (正面)

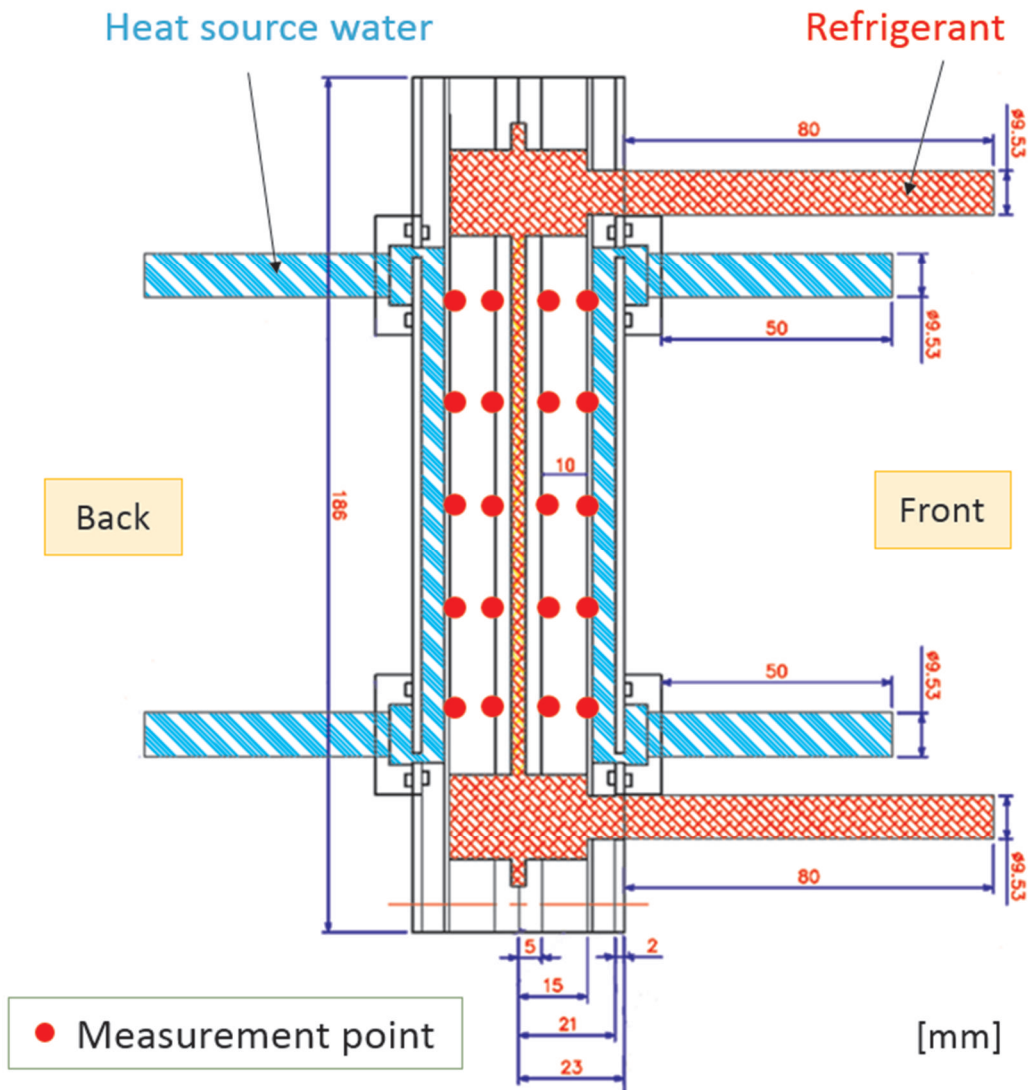


图 2.1.1.2.1-4 (b) 温度测定位置 (断面)

(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、 $\lambda$  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。

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

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。

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

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

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。



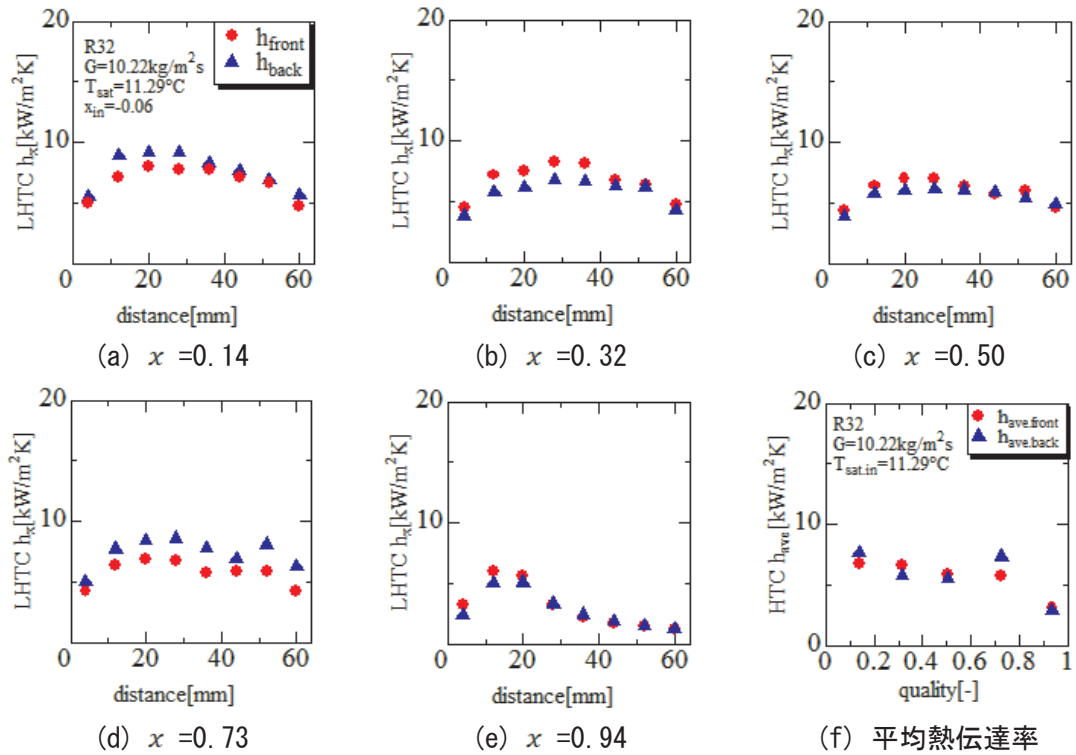


図 2. 1. 1. 2. 1-5 HFC32 の局所蒸発熱伝達率分布及び平均蒸発熱伝達率分布  $G=10$

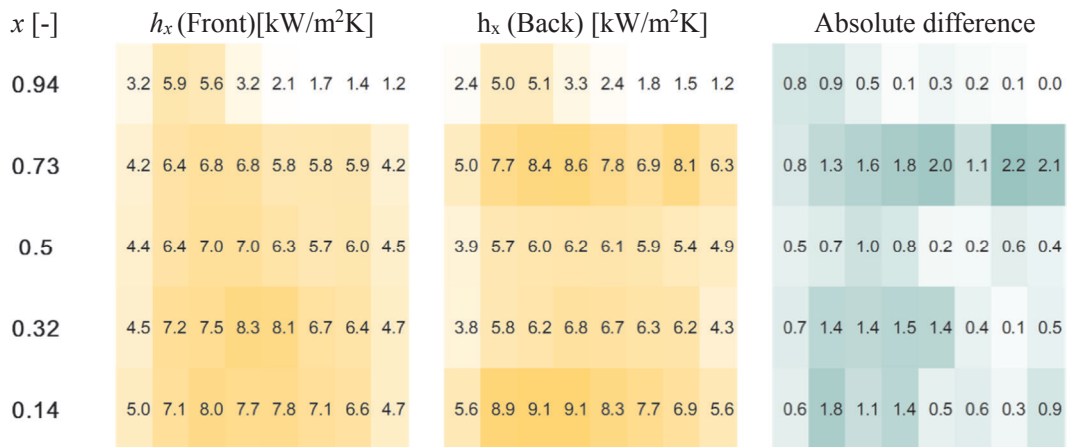


図 2. 1. 1. 2. 1-6 Front 側から見た局所蒸発熱伝達率分布表

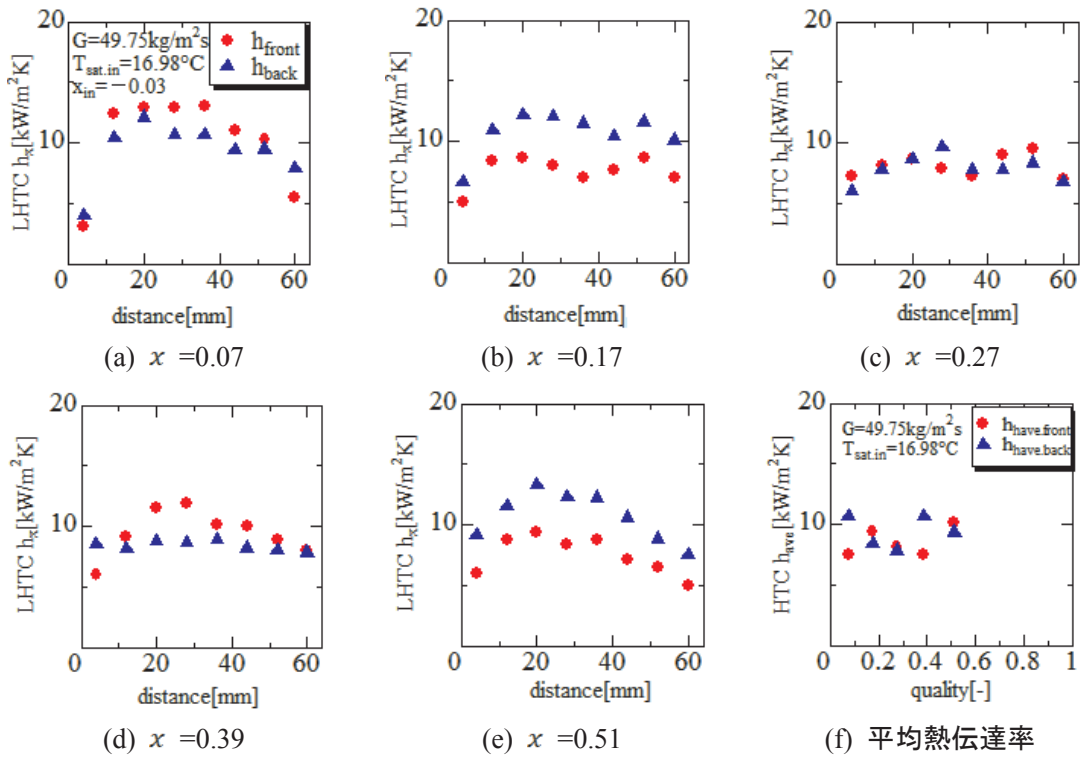


図 2. 1. 1. 2. 1-7 HFC32 の局所蒸発熱伝達率分布及び平均蒸発熱伝達率分布  $G=50(1)$

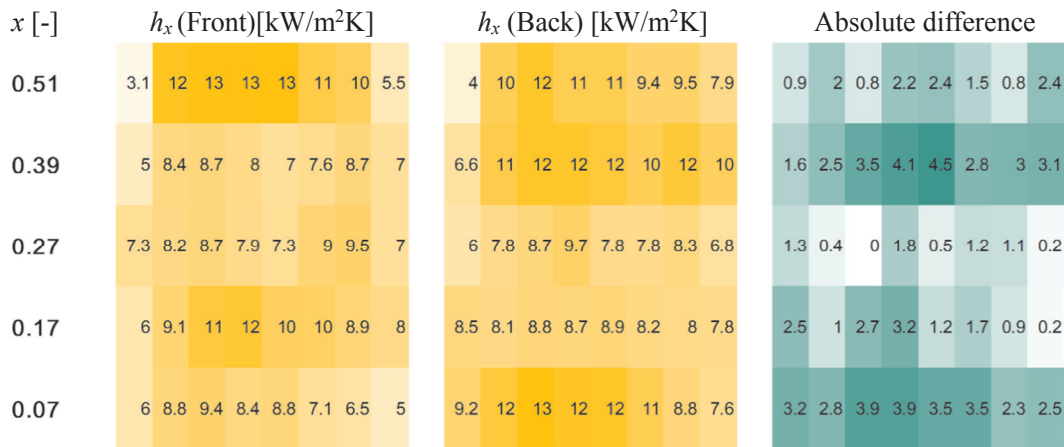


図 2. 1. 1. 2. 1-8 Front 側から見た局所蒸発熱伝達率分布表

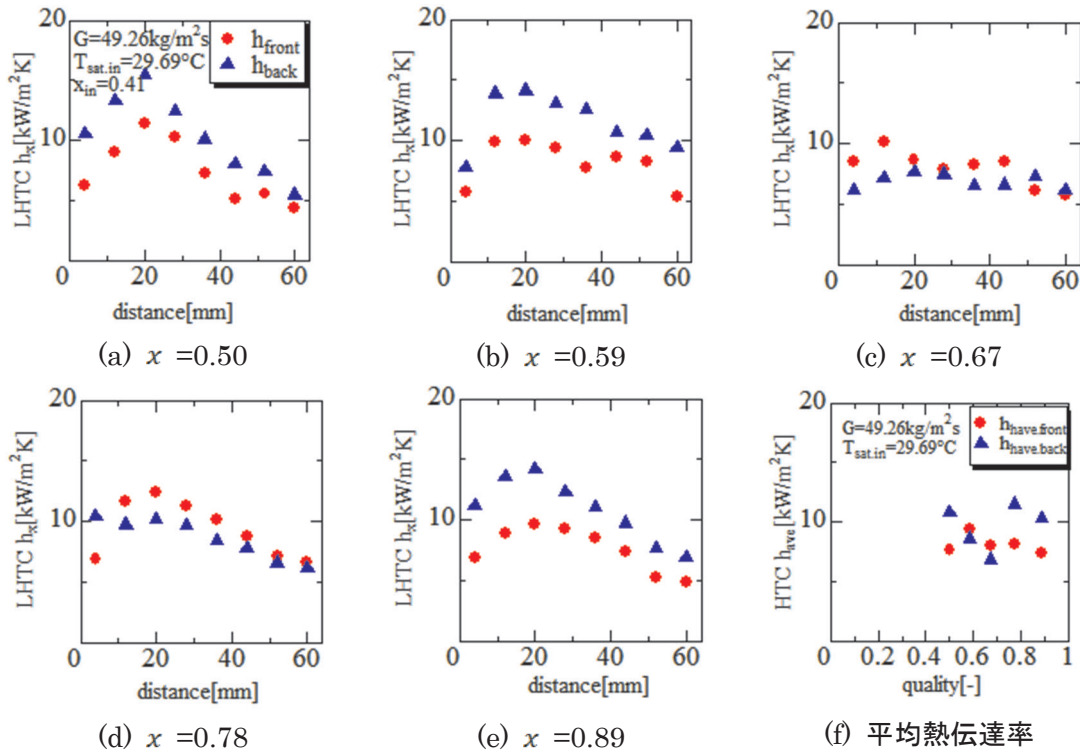


図 2. 1. 1. 2. 1-9 HFC32 の局所蒸発熱伝達率分布及び平均蒸発熱伝達率分布  $G=50(2)$

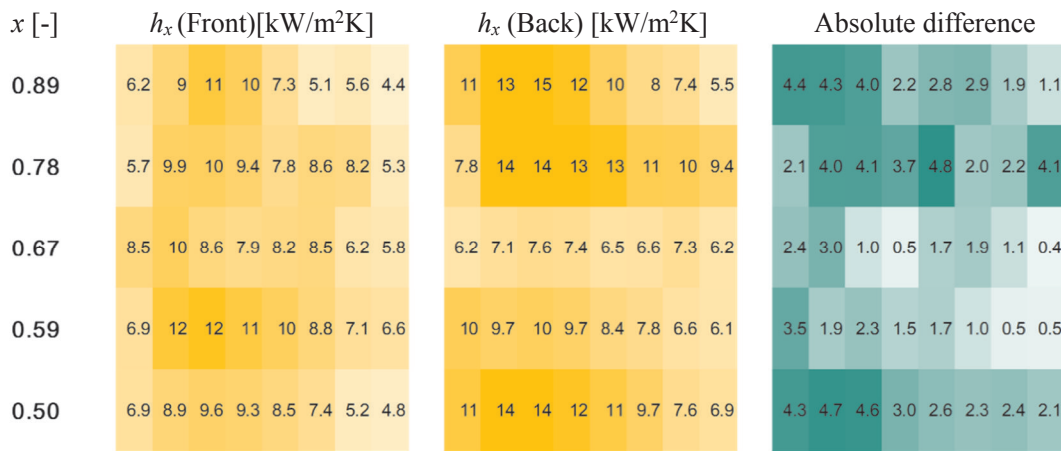


図 2. 1. 1. 2. 1-10 Front 側から見た局所蒸発熱伝達率分布表

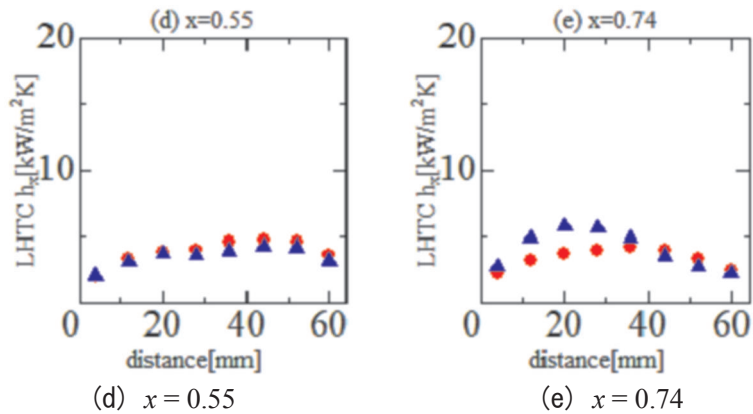
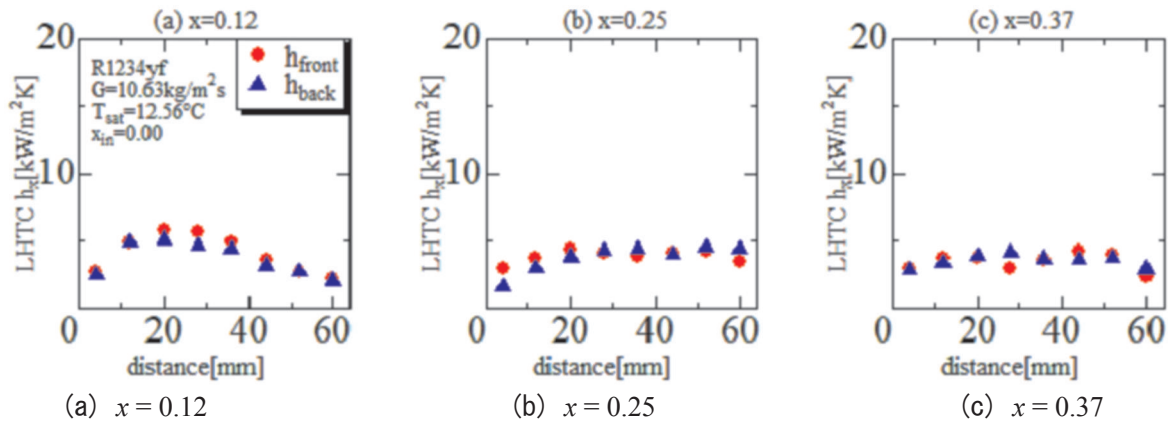


図 2.1.1.2.1-11 HF01234yf の局所蒸発熱伝達率分布 ( $G=10$ )

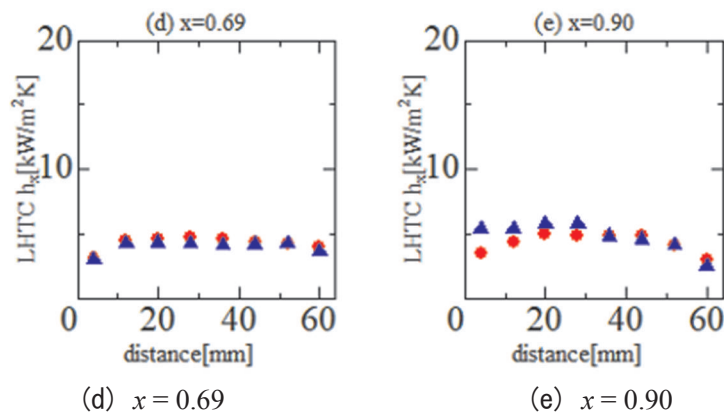
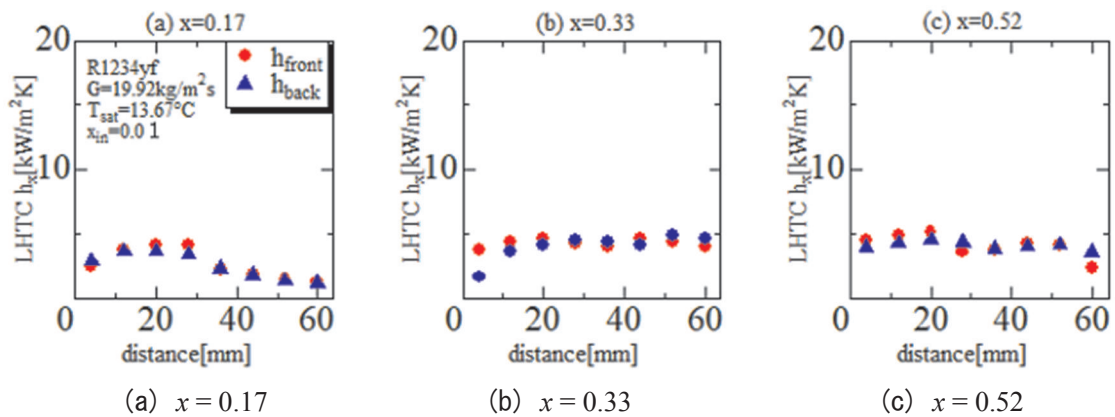


図 2.1.1.2.1-12 HF01234yf の局所蒸発熱伝達率分布 ( $G=20$ )

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。

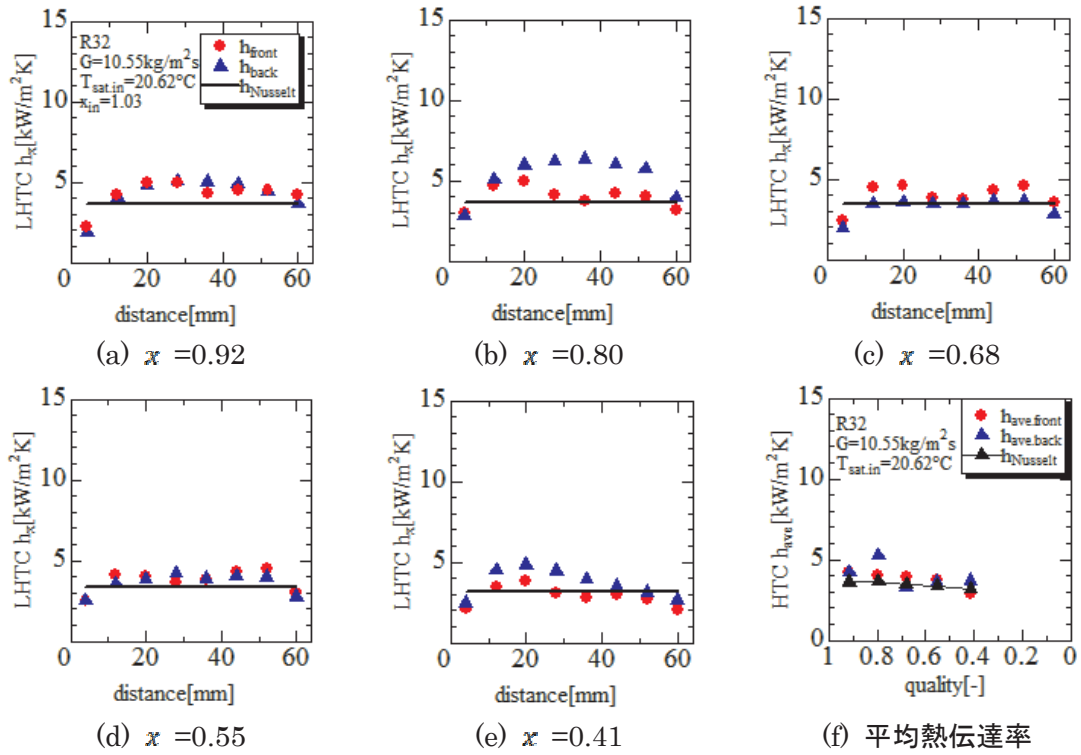


図 2.1.1.2.1-13 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均熱伝達率分布  $G=10$

$x$ [-]	$h_x$ (Front) [kW/m <sup>2</sup> K]	$h_x$ (Back) [kW/m <sup>2</sup> 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



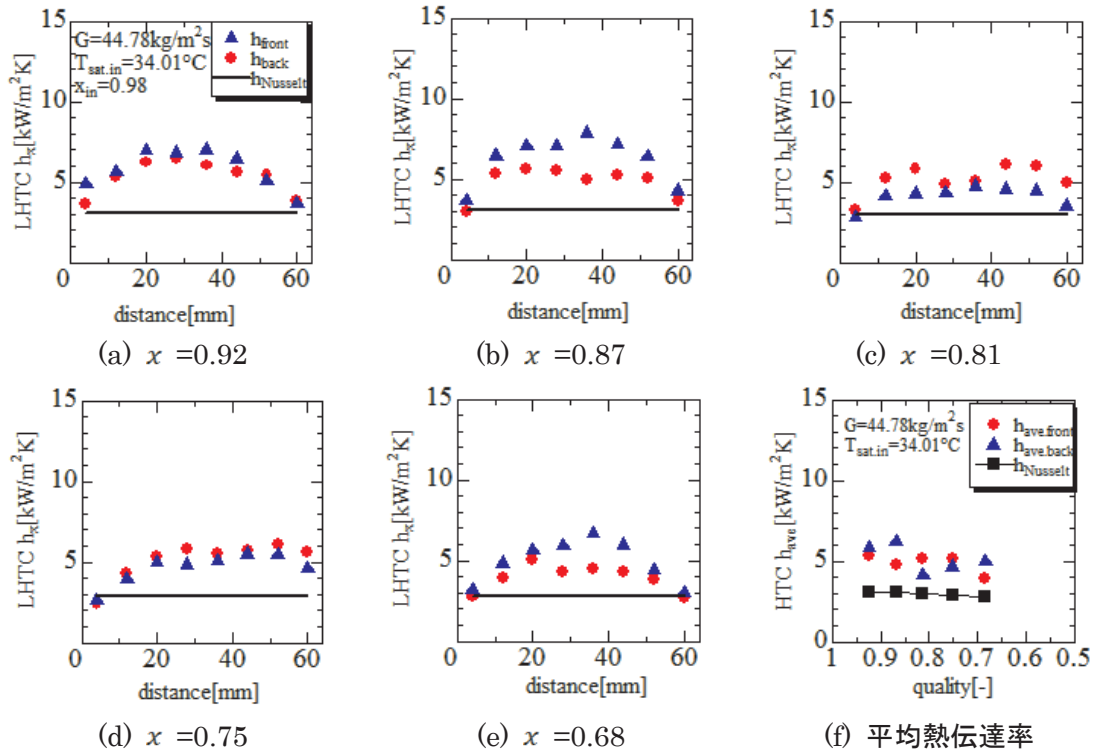


図 2. 1. 1. 2. 1-15 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布  $G=50(1)$

$x [-]$	$h_x(\text{Front})[\text{kW}/\text{m}^2\text{K}]$	$h_x(\text{Back}) [\text{kW}/\text{m}^2\text{K}]$	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

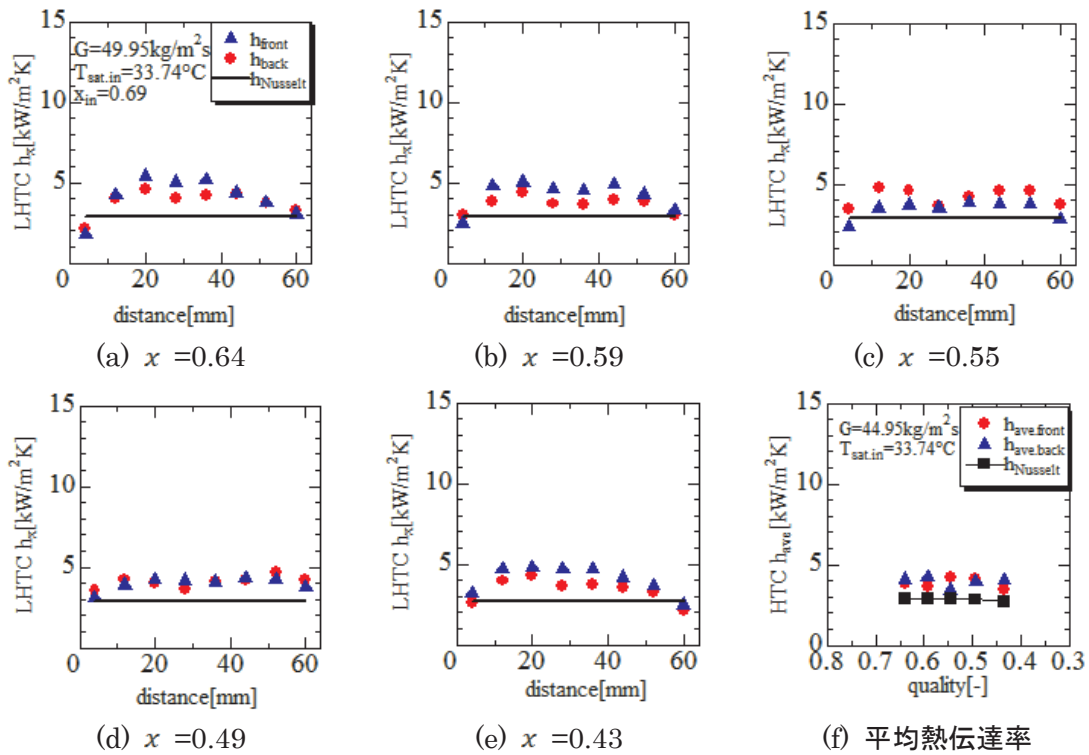


図 2. 1. 1. 2. 1-17 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布  $G=50$  (2)

$x$ [-]	$h_x$ (Front) [kW/m <sup>2</sup> K]	$h_x$ (Back) [kW/m <sup>2</sup> 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

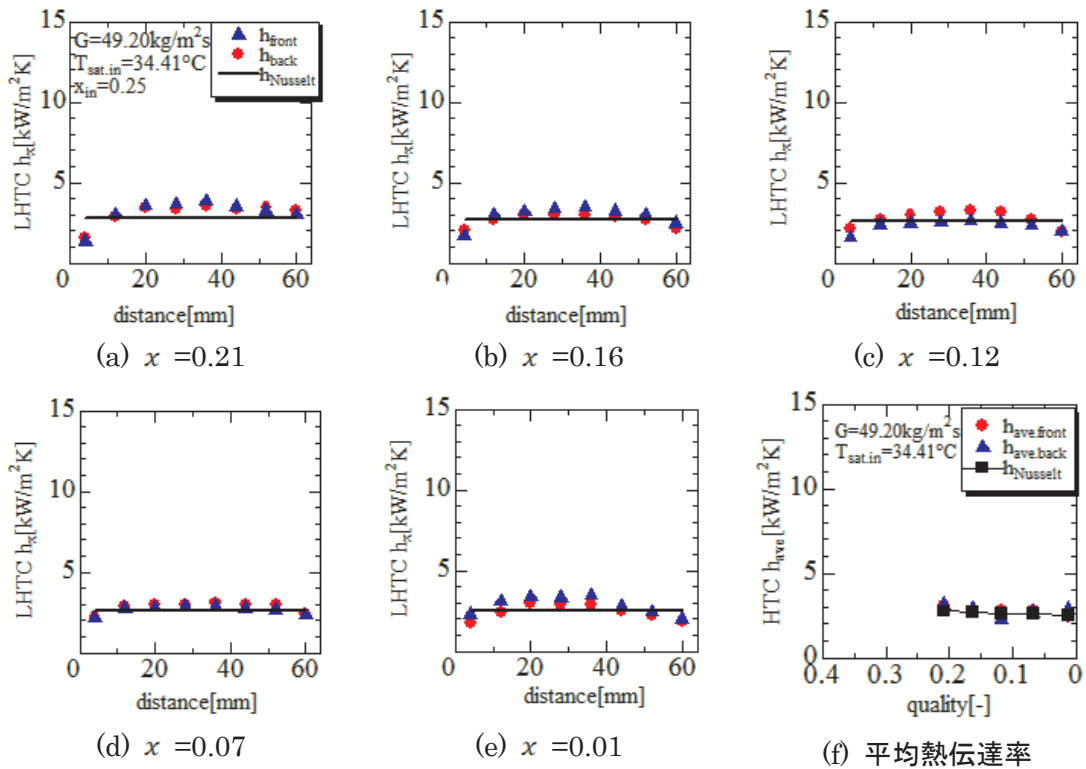


図 2. 1. 1. 2. 1-19 HFC32 の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布  $G=50$  (3)

$x$ [-]	$h_x$ (Front) [kW/m <sup>2</sup> K]	$h_x$ (Back) [kW/m <sup>2</sup> K]	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

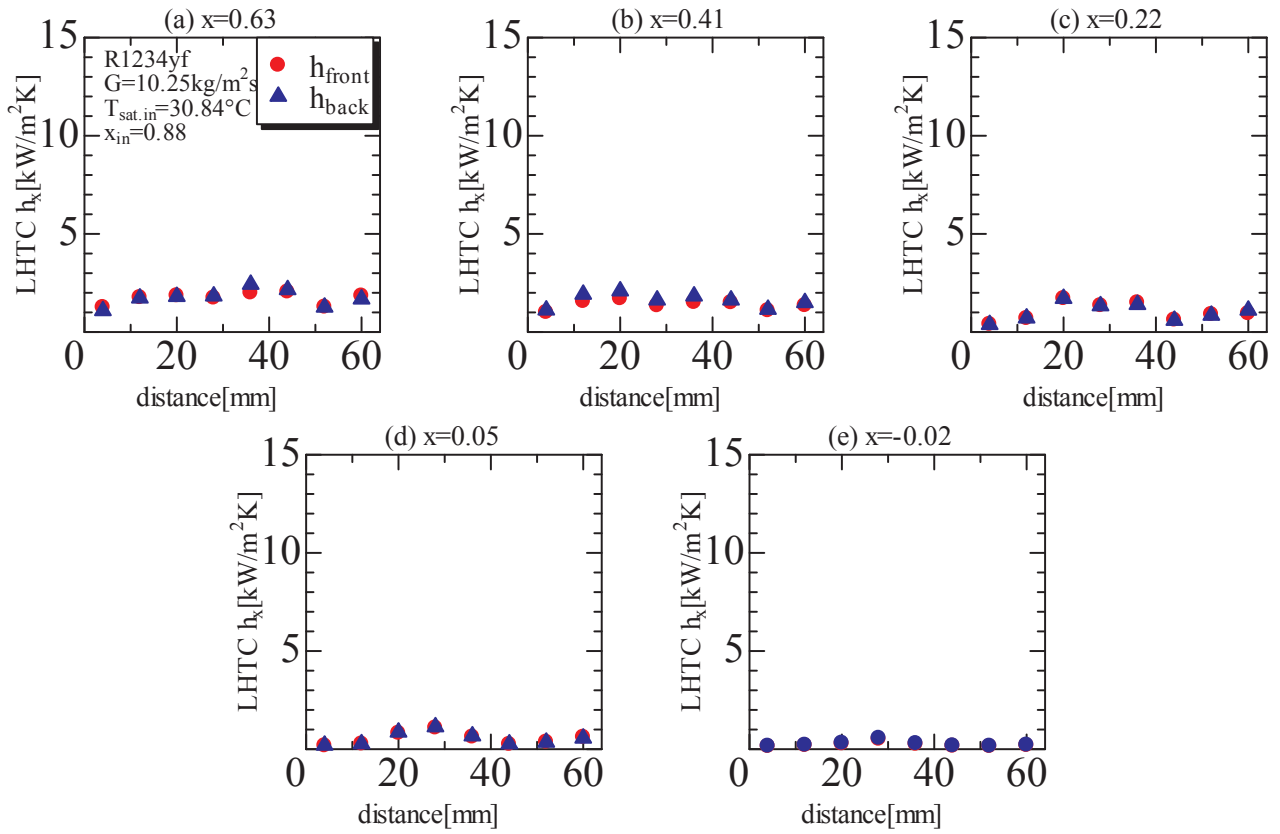


図 2. 1. 1. 2. 1-21 HF01234yf の局所凝縮熱伝達率分布及び平均凝縮熱伝達率分布 ( $G=10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ )

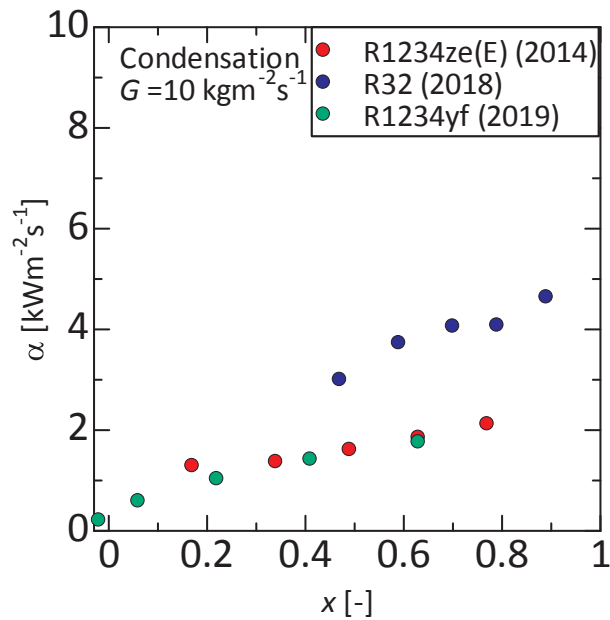


図 2. 1. 1. 2. 1-22 凝縮熱伝達率データの比較

## 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+CO<sub>2</sub>) 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 型シーチ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。

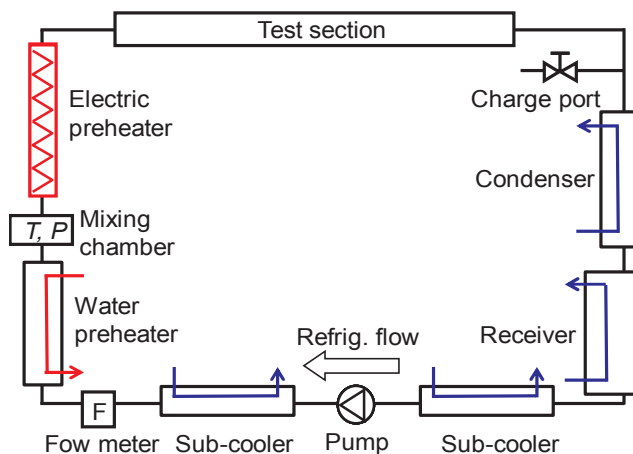


図 2.1.1.2.2-a1 実験装置

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。

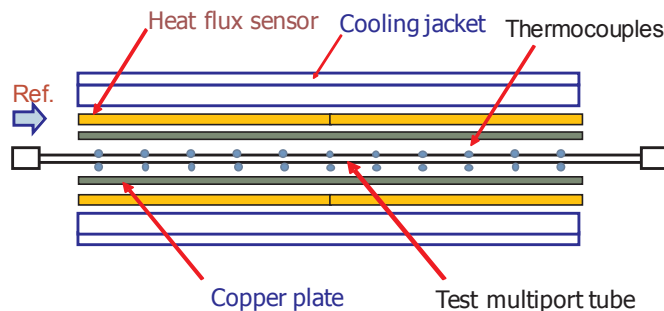


図 2.1.1.2.2-a2 凝縮実験用テストセクション

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 型シーチ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。

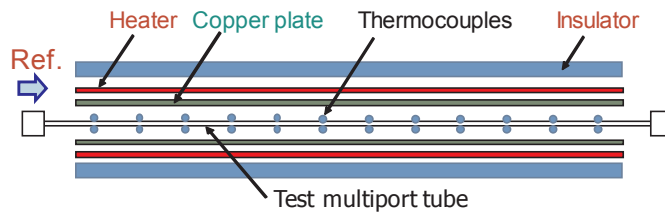


図 2.1.1.2.2-a3 蒸発実験用テストセクション

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+CO<sub>2</sub>) 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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> ではプラグ流及びスラグ・環状流、質量速度 400 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> の結果に着目すると、熱流束 5 kWm<sup>-2</sup> 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<sup>-2</sup> では、5 kWm<sup>-2</sup> 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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> の結果に着目すると、熱流束 5 kWm<sup>-2</sup> 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<sup>-2</sup> 以上では、熱流束 5 kWm<sup>-2</sup> 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。



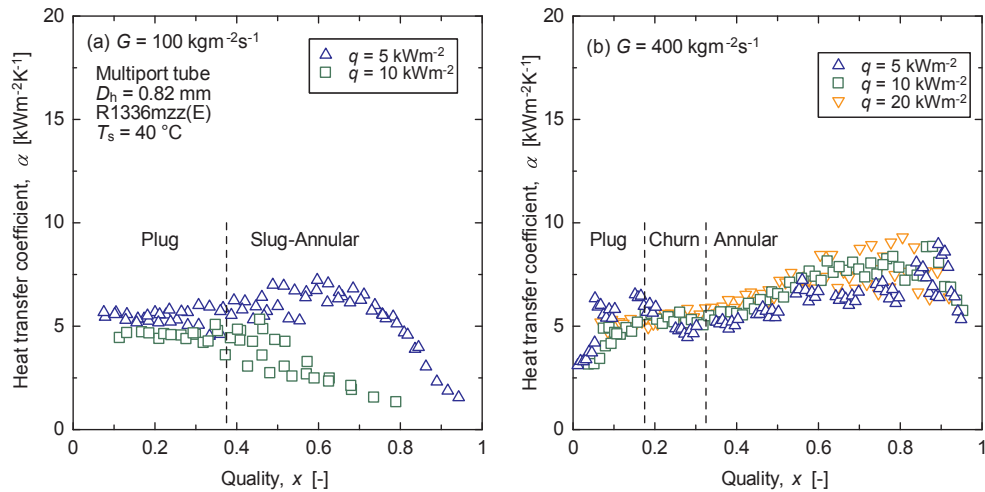


図 2.1.1.2.2-b1 HFO1336mzz(E)の沸騰熱伝達特性

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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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  $F_{\text{dp}}$  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  $x_{\text{di}}$  and  $x_{\text{de}}$  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。

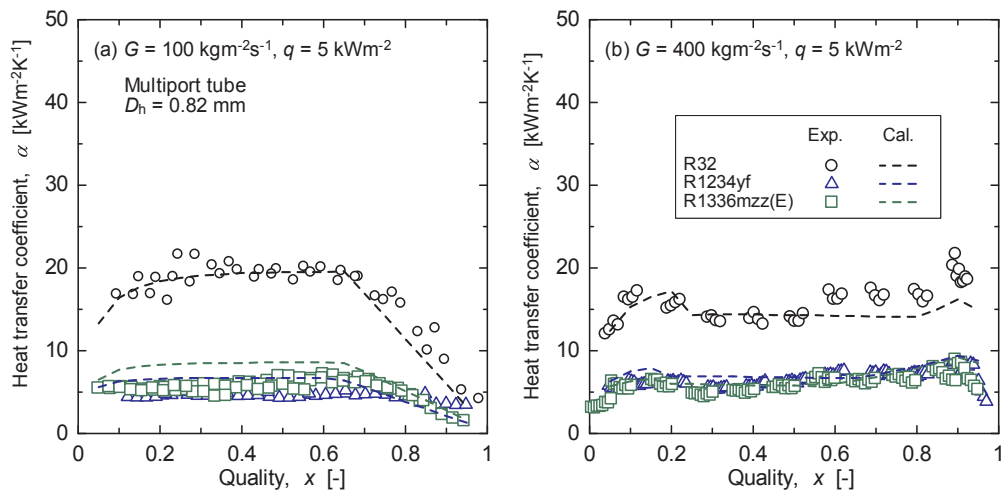


図 2.1.1.2.2-b2 HFC32、HFO1234yf 及び HFO1336mzz(E) の沸騰熱伝達特性

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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> および 400 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> では同程度、質量速度 400 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> 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。

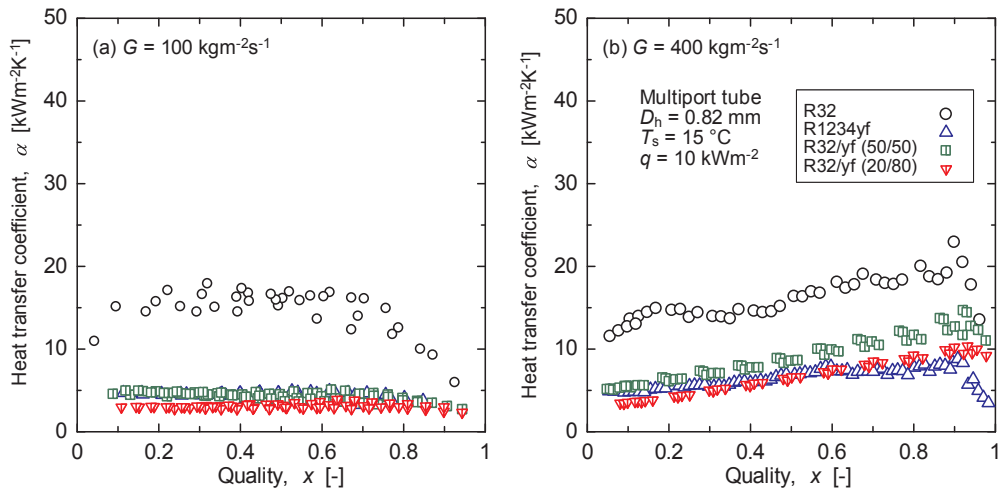


図 2.1.1.2.2-b3 HFC32、HFO1234yf 及び HFC32+HFO1234yf 混合冷媒の沸騰熱伝達特性

(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、管内流速が大きいいため、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。

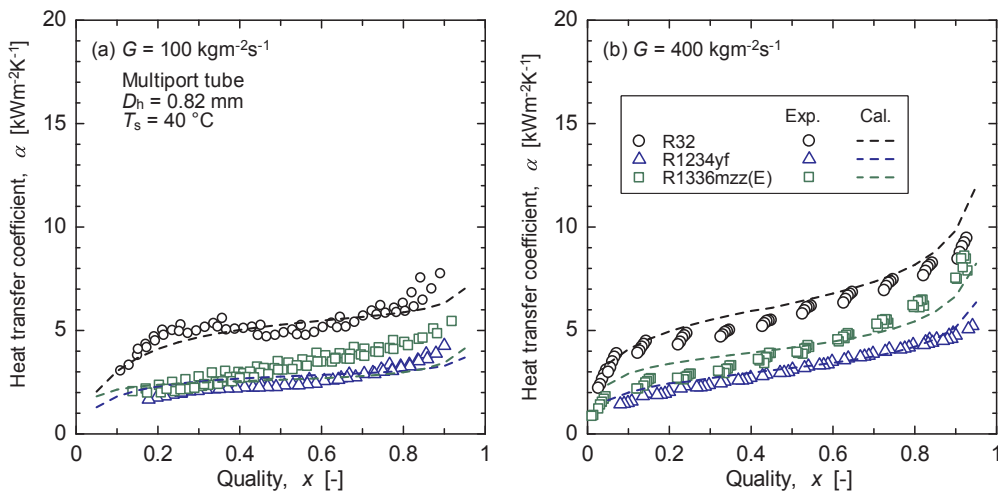


図 2.1.1.2.2-c1 HFC32、HFO1234yf 及び HFO1336mzz(E)純冷媒の凝縮熱伝達特性

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 +CO<sub>2</sub>)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。

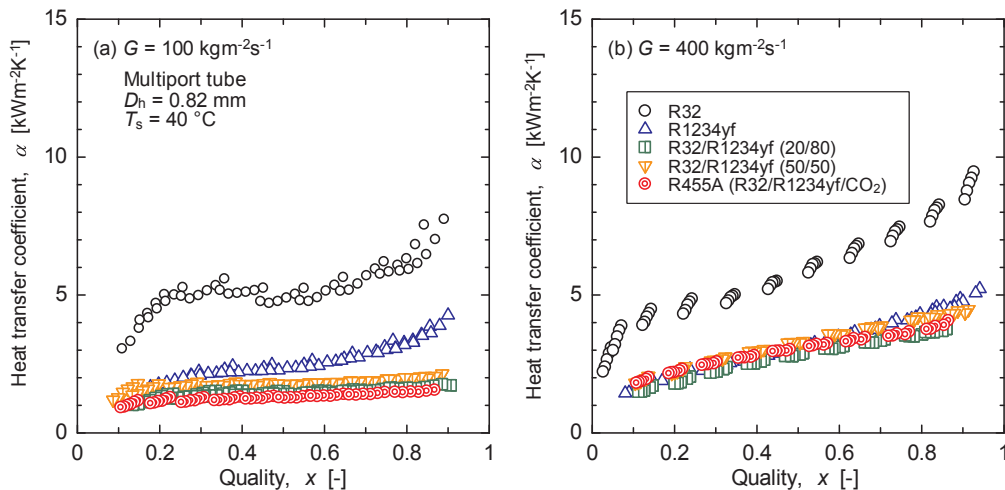


図 2.1.1.2.2-c2 HFC32+ HFO1234yf 混合冷媒及び R455A 混合冷媒の凝縮熱伝達率

(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  $\text{CO}_2$  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。

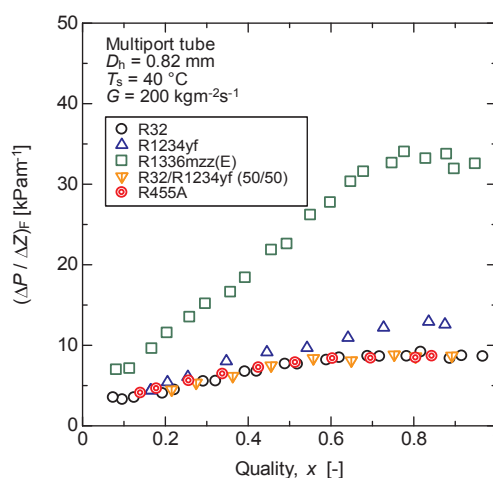


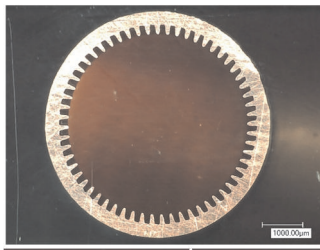
図 2.1.1.2.2-d1 扁平多孔管内における HFC32、HFO1234yf、HFO1336mzz(E)、HFC32+ HFO1234yf 混合冷媒及び R455A の摩擦圧力損失

<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）

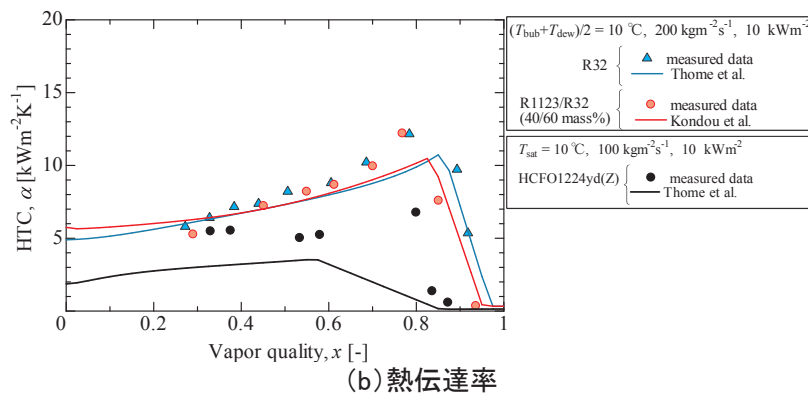
外径 6.03 mm、ねじれ角 18 度、フィン数 60 のらせん溝付管内を流れる HCFO1224yd(Z)および R455A の熱伝達率および圧力損失を測定した。図 2.1.1.2.3-1 へ、試験に用いたらせん溝付き管の断面写真である。テストセクションの有効伝熱区間長さは 414 mm で二重管式となっており、水との熱交換量からこの区間の平均熱伝達率を算出した。



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 $\gamma$ [-]	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。





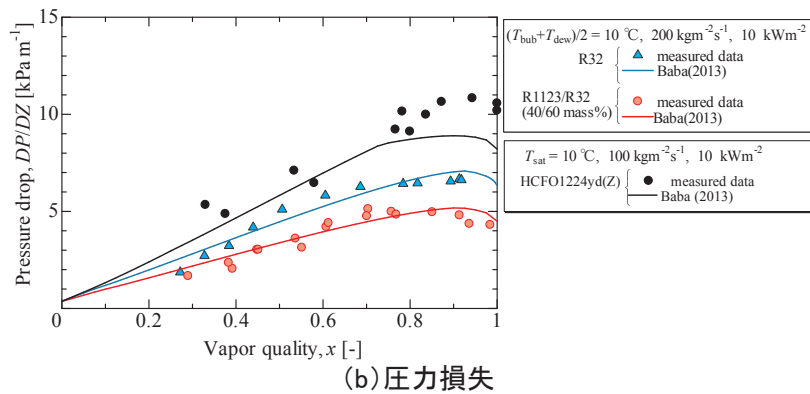


図 2.1.1.2.3-2 HCFO1224yd(Z)の溝付管内蒸発過程熱流動特性

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<sup>-2</sup>、質量流速 200 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>、300 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>、400 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>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<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>と 300 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>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。

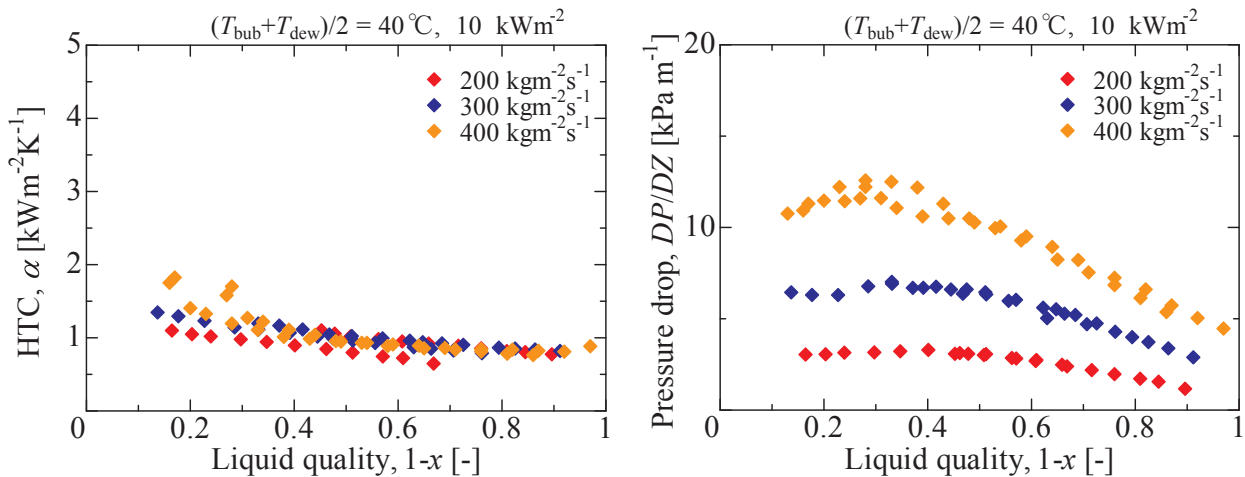


図 2.1.1.2.3-3 R455A の溝付管内凝縮過程の熱伝達率および圧力損失

図 2.1.1.2.3-4 は、平均飽和温度40°C、熱流束 10 kWm<sup>-2</sup>、質量流速 200 kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>、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。



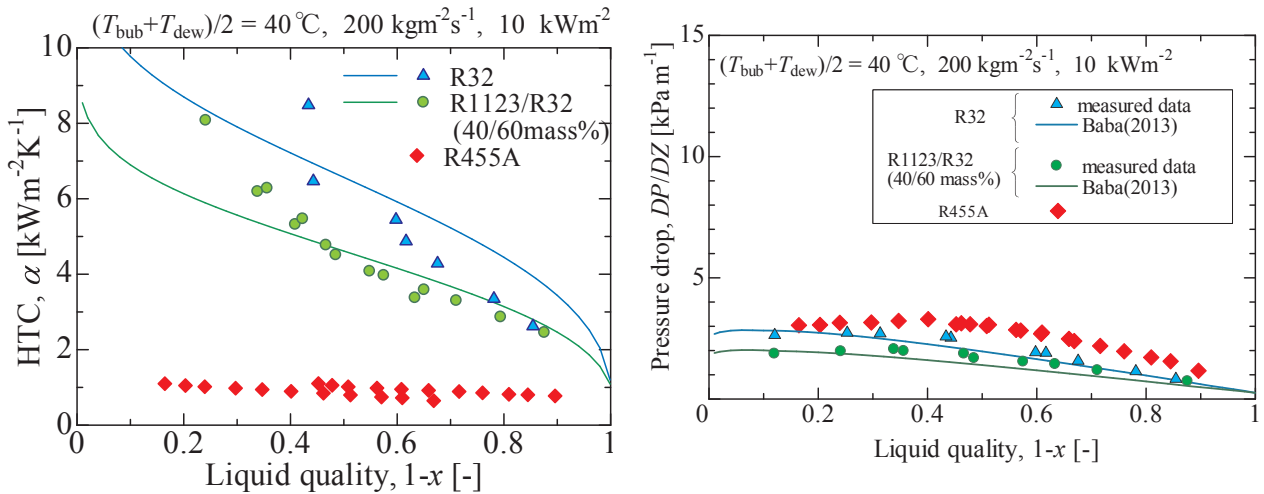


図 2.1.1.2.3-4 R455A と HFC32 および Amolea400X との溝付管内凝縮特性の比較

図 2.1.1.2.3-5 は、平均飽和温度  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熱流束  $10\text{ kWm}^{-2}$ 、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。

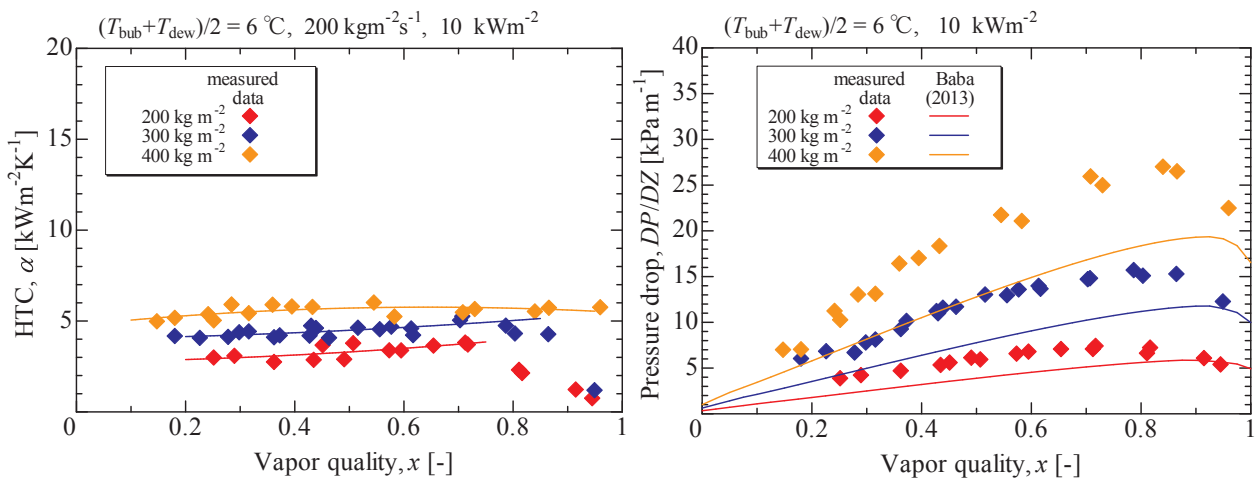


図 2.1.1.2.3-5 R455A の溝付管内蒸発過程の熱伝達率および圧力損失

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  $10\text{ kWm}^{-2}$ 、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  $10\text{ K}$  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。

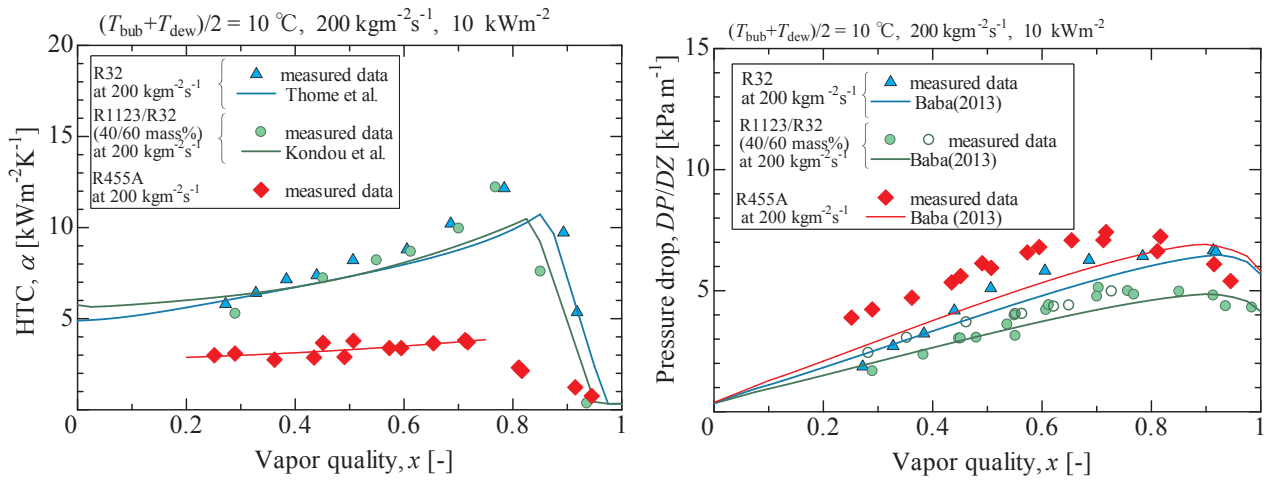


図 2.1.1.2.3-6 R455A と HFC32 および Amolea400X との溝付管内蒸発特性の比較

#### 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。

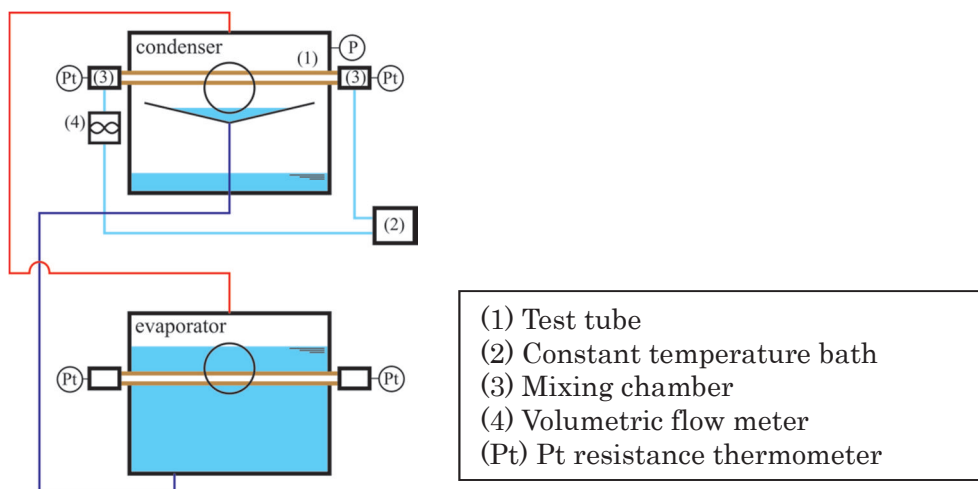


図 2.1.1.2.4-1 実験装置

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

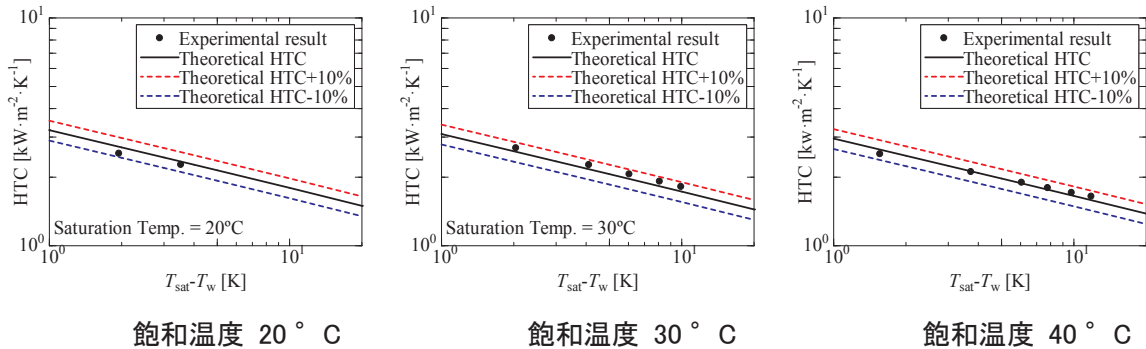


図 2.1.1.2.4-2 R134a を用いた装置の健全性の確認

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

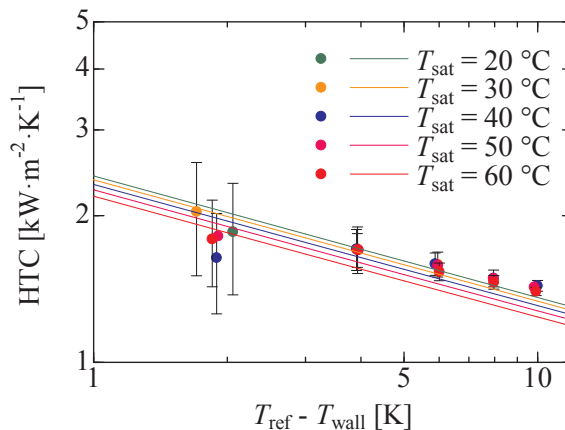


図 2.1.1.2.4-3 HFO1336mmz(E)の試験結果およびヌセルトの式との比較

### 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+CO<sub>2</sub>系混合冷媒において、凝縮温度40℃、蒸発温度-3℃、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/CO<sub>2</sub>; 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。

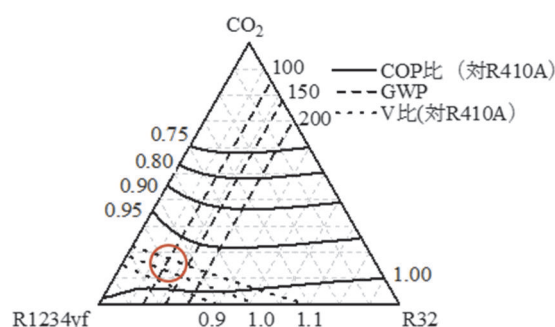


図2.1.1.3.1-1 HFO1234yf+HFC32+CO<sub>2</sub>系混合冷媒における熱力学的解析

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℃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℃の結果である。凝縮温度が高くなると、CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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、℃	蒸発温度、℃	過熱度、K	過冷度、K
HFO1124yf	20	-3	3	0
HFC32	30			
CO <sub>2</sub>	40			

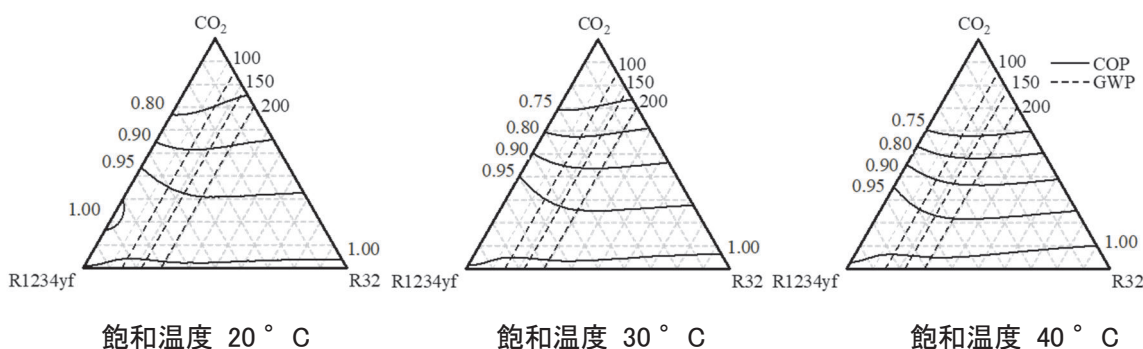


図2.1.1.3.1-2 凝縮温度条件がCOPに及ぼす影響(HFO1234yf+HFC32+CO<sub>2</sub>系混合冷媒)



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。

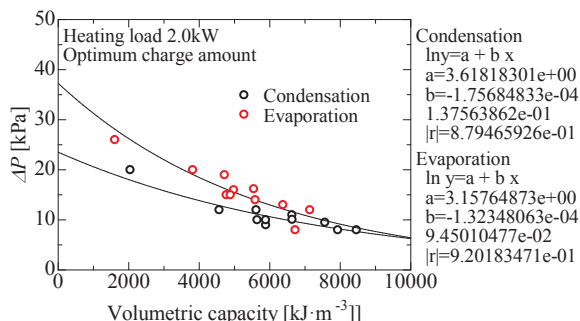


図 2.1.1.3.1-3 体積能力と圧力損失の関係

### 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  $\text{CO}_2$  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。

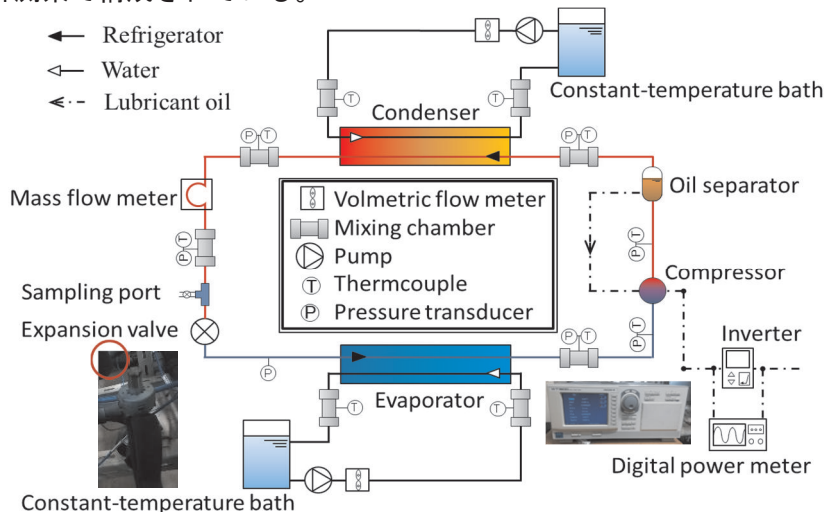


図 2.1.1.3-1 実験装置

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/CO<sub>2</sub> (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/CO<sub>2</sub>(22/72/6mass%)
- HFC32/HFO1234yf/HFO1123(21.2/38.5/40.3mass%)
- ▽ HFC32/HFO1234yf/HFO1123(17.2/51.6/31.2mass%)

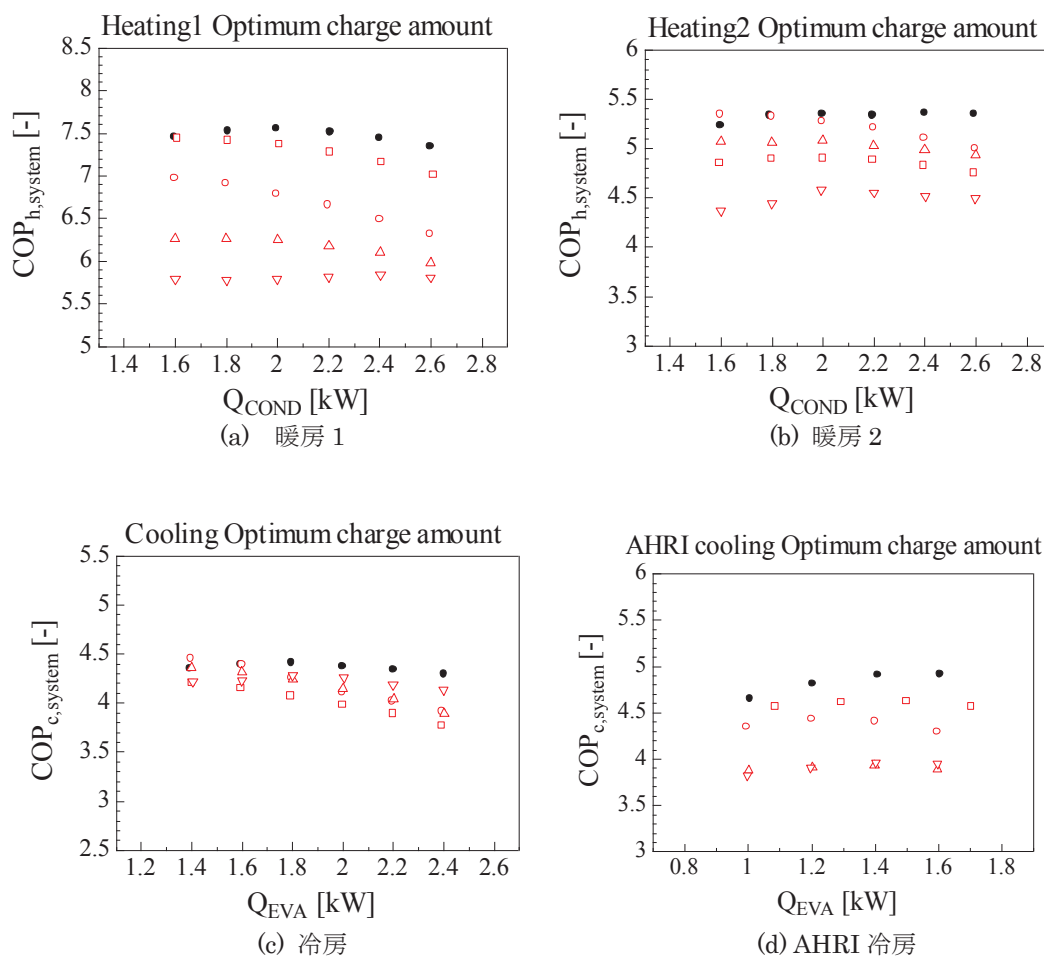


図 2.1.1.3-2 システム COP の比較

実験の結果、GWP が約 150 となる HFC32/HF01234yf/CO<sub>2</sub> (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、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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	$\Delta P$ ratio					$\Delta P$ 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 <sub>4</sub>	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  $(LFL_{各評価法}/LFL_{大規模容器} - 1) \times 100 (\%)$ 。

(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  $(UFL_{各評価法}/UFL_{大規模容器} - 1) \times 100 (\%)$ 。

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、 $H_2O/sample$  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。

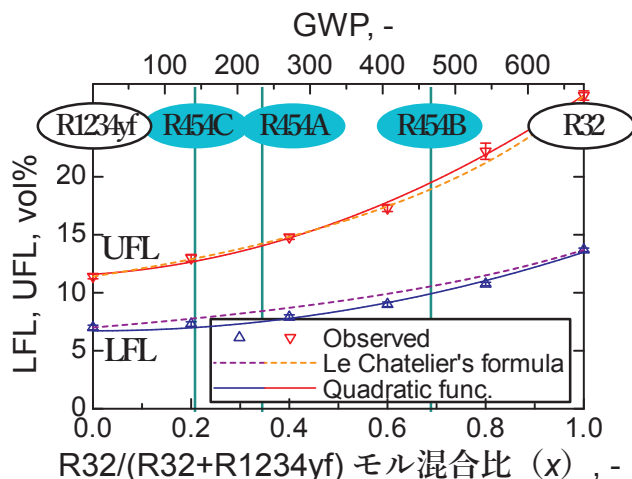


図 2.1.2-1 R32/1234yf 混合系の燃焼限界の混合比依存性（温度 25°C、湿度ゼロ）

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。

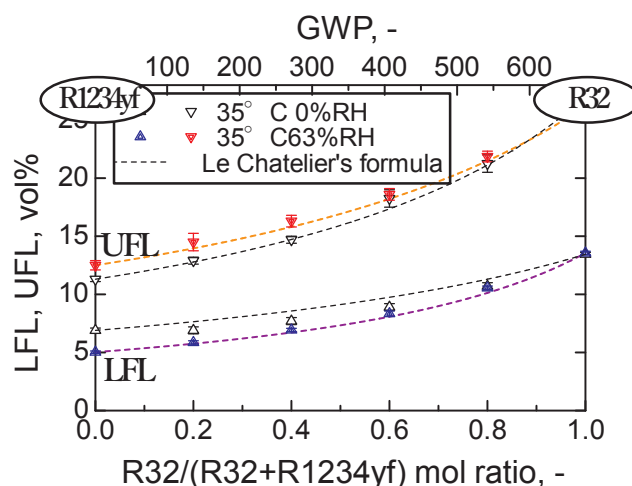


図 2.1.2-2 R32/1234yf 混合系の燃焼限界の湿度影響評価

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。

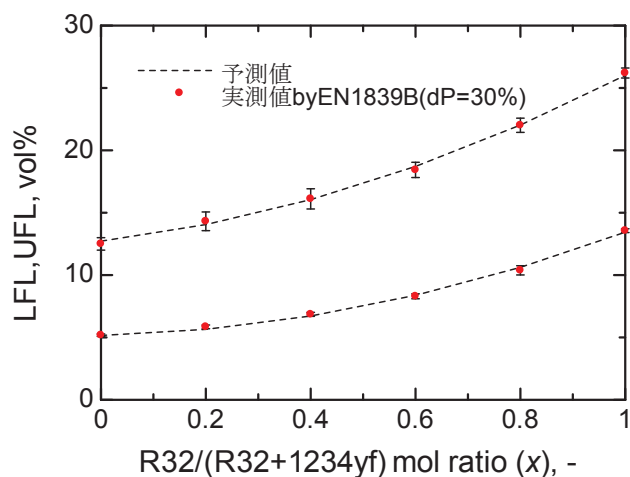


図 2. 1. 2-3 R32/1234yf 混合系の湿度 50%RH における燃焼限界の予測値と実測値の比較

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。

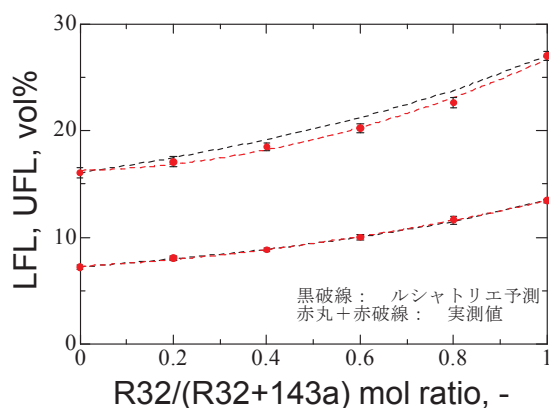


図 2. 1. 2-4 R32/143a 混合系の燃焼限界の混合比依存性 (温度 35°C、湿度ゼロ)

## 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。

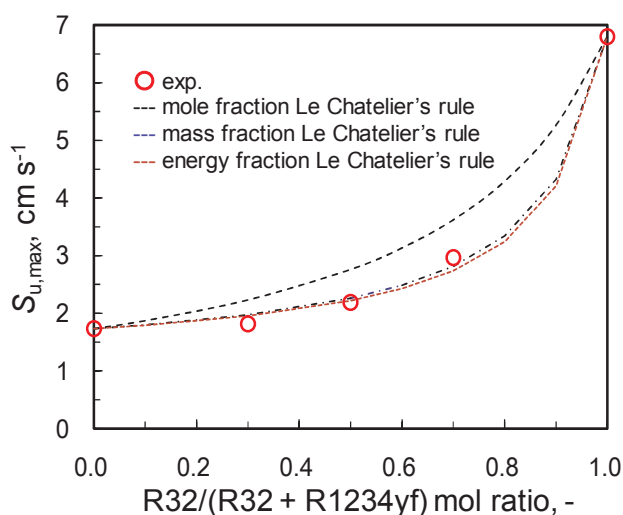


図 2.1.2-5 R32/1234yf 混合系の最大燃焼速度の混合比依存性（1 気圧、湿度ゼロ）

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<sup>-1</sup> 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。

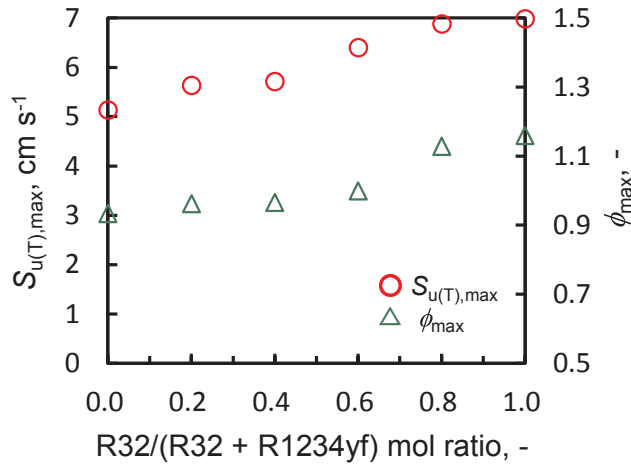


図 2.1.2-6 R32/1234yf 混合系（湿度条件）の最大燃焼速度の混合比依存性  
 (35°C、1 気圧、湿度 63%RH)

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。

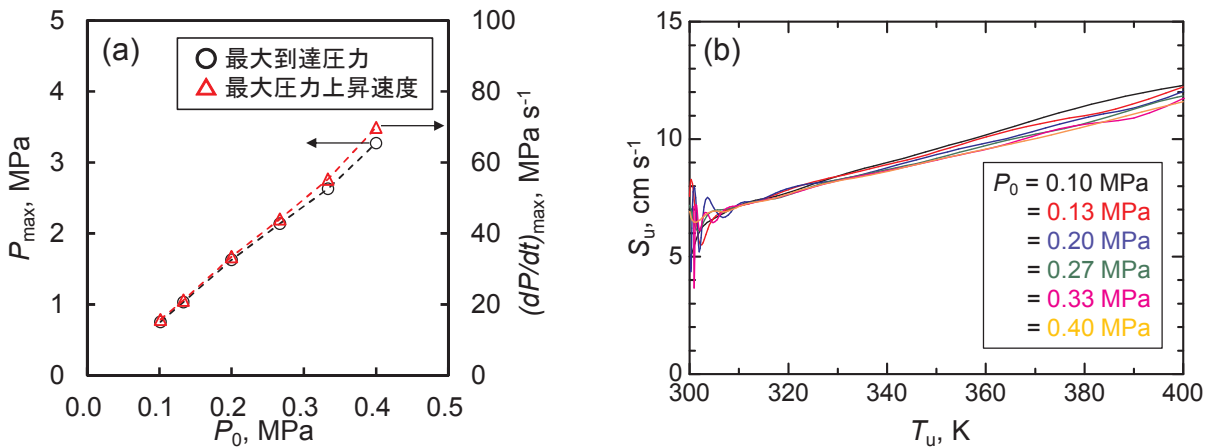


図 2.1.2-7 HF0-1123 の燃焼挙動の圧力影響  
 (a) 最大到達圧力と最大圧力上昇速度、(b) 燃焼速度の圧力影響

### 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。

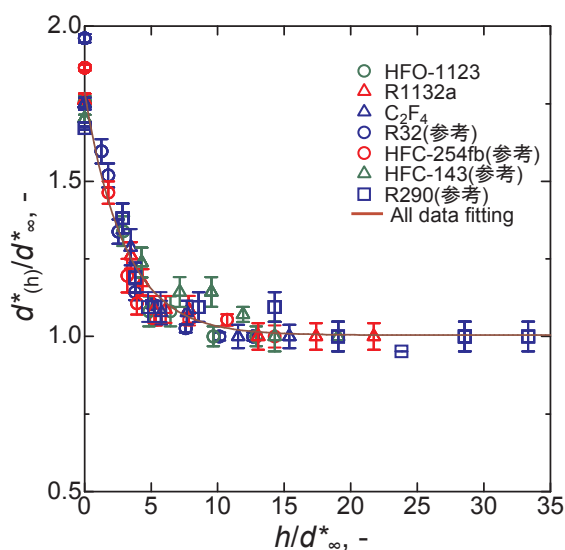


図 2.1.2-8 消炎直径の着火源—円孔間距離 ( $h$ ) 依存性

各記号は 7 化合物の実測値で、それぞれ  $d^*_\infty$  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 H<sub>2</sub>O が希釈剤となることに対応していると考えられる。

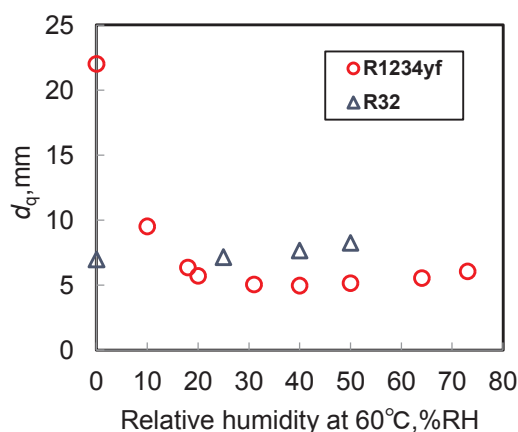


図 2.1.2-9 R32 及び R1234yf 単体の  $d_q$  の湿度依存性 (1 気圧、60°C)

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。

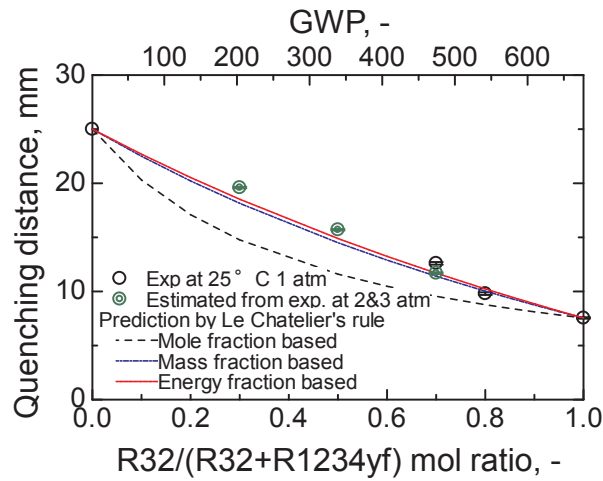


図 2.1.2-10 高圧 R32/1234yf 混合系の  $d_0$  の混合比依存性 (0.3 MPa, 25°C, 湿度ゼロ)

<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)



## 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】

### <研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
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。	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		
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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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にする。2022年度まで継続予定。</li> <li>・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。2020年まで継続予定。</li> <li>・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。</li> </ul>	○
【2】性能 評価技術 研究開発		
次世代冷媒の性能の良し悪しを比較分析可能な評価方法をシミュレーション、実験の両面で確率する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が複雑で多様な構造を取るため、最も性能評価が難しい熱交換器に対して最適性お保証した構造での性能評価手法を明確化する。</li> <li>・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評価装置を開発する。</li> </ul>	○
【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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・寝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。</li> </ul>	○

【 ◎：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】性能解析技術研究開発

### [1-1]モデリング, 性能解析

#### [1-1-1]伝熱性能予測

##### <概要>

冷凍空調機の熱交換器の最適設計の為に、管内の相変化熱伝達整理式が必要である。そこで、現在、各研究者から提案されている沸騰熱伝達率整理式についてまず精度を確認する。評価のデータサンプルは他研究者から集められた物として客観性を持たせて、平等に評価している。しかし現状では精度の問題があることが明らかになったため、物性の全く違う混合冷媒になった場合に、評価できる術がなくなるという問題に陥る。つまり熱交換器の最適設計が不可能となることから、本プロジェクトを達成するに当たり、極めて重要な問題である。ましてや世界基準となるようなものなので、社会的な役割として本格的な取り組みが必要となる。そこで、我々のグループにおいて解決する手段を検討したので、現状を報告する。

##### <データサンプルについて>

自然冷媒や HF0 冷媒, そしてフロンについてデータベースを構築した。表 1-1-1.1 にデータベースセット一覧を示す。管径は 0.5mm - 4mm 程度と今後冷凍空調分野の熱交換器としてあり得る範囲で集めた。また、水平流だけでなく、上昇流や下降流のデータも含まれる。全 1388 点である。

物性の一覧は表 1-1-1.2 に示す、以下の通りである。表にはデータセットの最大値と最小値を示しているが、自然冷媒が含まれるため、物性は各々でかなりの差がある。つまり、整理式が一般化されていなければ、上手く熱伝達率は表現できない。

##### <評価に使用した整理式>

評価に使用した整理式は、以下の 10 の熱伝達整理式について、一度に熱伝達率整理式の各特徴と信頼性を抽出できるように、Excel 上で物性値計算ソフトウェア Refprop10 を連携させた VBA プログラムの開発を行った。

以上、取り上げた 10 の整理式は、実験条件の入力のみで自動計算および比較が可能となっている。具体的な比較としては、各々の整理式の比較が可能でグラフとして可視化でき、また実験値との比較の場合については、標準偏差  $SD$  と全体の実験値に対して予測精度が 20 % , 30 % 以内の割合をパーセンテージ表記として出力し、それぞれの整理式の特徴と比較が可能となっている。

表 1-1-1.1

	Saturation pressure $P_{sat}$ MPa	Critical pressure $P_{crit}$ MPa	Critical temperature $T_{crit}$ K	Vapor density $\rho_v$ kg/m <sup>3</sup>	Liquid density $\rho_L$ kg/m <sup>3</sup>	Ratio of V-L density $\rho_v/\rho_L$ -	Vapor viscosity $\mu_v$ μPa·s	Liquid viscosity $\mu_L$ μPa·s
Max	5.00	11.33	487.21	156.67	1492.63	$189.38 \times 10^{-3}$	16.81	469.23
Min	0.10	3.38	304.13	3.46	638.57	$3.97 \times 10^{-3}$	9.06	75.6
Ave.	0.90	5.34	392.14	33.67	1125.24	$32.12 \times 10^{-3}$	11.75	204.45

	Vapor thermal conductivity $\lambda_v$ mW/(m·K)	Liquid thermal conductivity $\lambda_L$ mW/(m·K)	Specific heat at const. $P$ $C_{pL}$ J/(kg·K)	Specific heat at const. volume $C_{vL}$ J/(kg·K)	Surface tension $\sigma$ mN/m	Latent heat $\Delta h_v$ kJ/kg	Thermal diffusivity $\alpha_L$ m <sup>2</sup> /s	Prantl number $Pr_L$ -
Max	27.32	559.20	4616.54	2800.29	26.30	1262.24	$18.97 \times 10^{-8}$	6.71
Min	9.82	62.26	918.02	610.63	2.07	133.73	$3.34 \times 10^{-8}$	1.40
Ave.	14.40	142.43	1841.10	1068.92	11.23	316.18	$6.85 \times 10^{-8}$	3.10

表 1-1-1.2

Source	Fluid	Saturation pressure MPa (Temperature °C)	Inside diameter mm	Flow direction	Mass flux $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Heat flux $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$	<i>N</i>
Lazarek and Black <sup>7)</sup>	R 113	0.17 (64)	3.15	Upward	502	114, 178	3
	R 113	0.17 (64)	3.15	Downward	502	64 - 178	11
Wambsganss et al. <sup>8)</sup>	R 113	0.13 - 0.16 (55 - 62)	2.92	Horizontal	50 - 300	8.8 - 90.8	72
Tran et al. <sup>9)</sup>	R 12	0.83 (34)	2.46	Horizontal	66.3 - 300	7.5 - 59.4	59
Kew and Cornwell <sup>10)</sup>	R 141b	0.10 (32)	2.87, 3.69	Horizontal	188, 212	9.7 - 90	67
Bao et al. <sup>11)</sup>	R 11	0.29 - 0.47 (57 - 76)	1.95	Horizontal	167 - 560	52 - 125	81
	R 123	0.35 - 0.51 (67 - 82)	1.95	Horizontal	167 - 452	39 - 125	80
Kuwahara et al. <sup>12)</sup>	R 134a	0.88 (35)	0.84	Horizontal	525	15.6	15
Sumith et al. <sup>13)</sup>	H <sub>2</sub> O	0.10 (100)	1.45	Upward	23.4 - 152.7	36 - 391	65
Saitoh et al. <sup>14)</sup>	R 134a	0.41 (10)	0.51, 1.12, 3.1	Horizontal	150, 300	12 - 29	75
Yamashita et al. <sup>15)</sup>	CO <sub>2</sub>	5.00 (14)	1.02	Horizontal	300 - 1000	30 - 50	62
Miyata et al. <sup>16,17)</sup>	R 410A	1.09 (10)	1.00	Upward	30 - 200	1 - 16	170
	R 410A	1.09 (10)	1.00	Downward	30 - 200	1 - 16	206
Li et al. <sup>18)</sup>	R 32	1.28 (15)	2.00	Horizontal	200	6 - 24	44
	R 1234yf	0.51 (15)	2.00	Horizontal	100 - 400	6 - 24	91
Enoki et al. <sup>5)</sup>	R 410A	1.09 (10)	1.00	Horizontal	30 - 400	2 - 24	287

(参考文献)

1. **Chen (1966)**, Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow, *Ind. Engng. Chem. Proc. Des. Dev.* 5, 322–329
2. **Lazarek and Black (1982)**, Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113. *Int. J. Heat Mass Transfer* 25, 945–960
3. **Jung et al. (1989)**, A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures. *Int. J. Heat Mass Transfer* 32, 1751–1764
4. **Liu and Winterton (1991)**, A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation. *Int. J. Heat Mass Transfer* 34, 2759–2766
5. **森ら(1999)**, 冷媒の水平平滑蒸発管内熱伝達係数の予測式の修正, *Trans. JSRAE* 16, 177–187, in Japanese
6. **Sumith et al. (2003)**, Saturated flow boiling water in a vertical small diameter tube. *Experimental Thermal Fluid Science* 27, 789–801
7. **Kandlikar and Balasubramanian (2004)**, An extension of the flow boiling correlation to transition, laminar, and deep laminar flows in minichannels and microchannels. *Heat Transfer Engineering* 25, 86–93
8. **Zhang et al. (2004)**, Correlation for flow boiling heat transfer in mini-channels. *Int. J. Heat Mass Transfer* 47, 5749–5763
9. **Saitoh et al. (2007)**, Correlation for boiling heat transfer of R-134a in horizontal tubes including effect of tube diameter. *Int. J. Heat Mass Transfer* 50, 5215–5225
10. **榎木ら(2015)**, 微細流路内沸騰熱伝達の整理式の修正, *Trans. JSRAE* 32, 275–284, in Japanese

<各整理式の精度>

図 1-1-1.1 に榎木ら以外の 9 つの整理式の精度を、図 1-1-1.2 に榎木らの精度を、横軸に実験値、縦軸に各研究者の計算結果を示すことで、予測精度を示す。

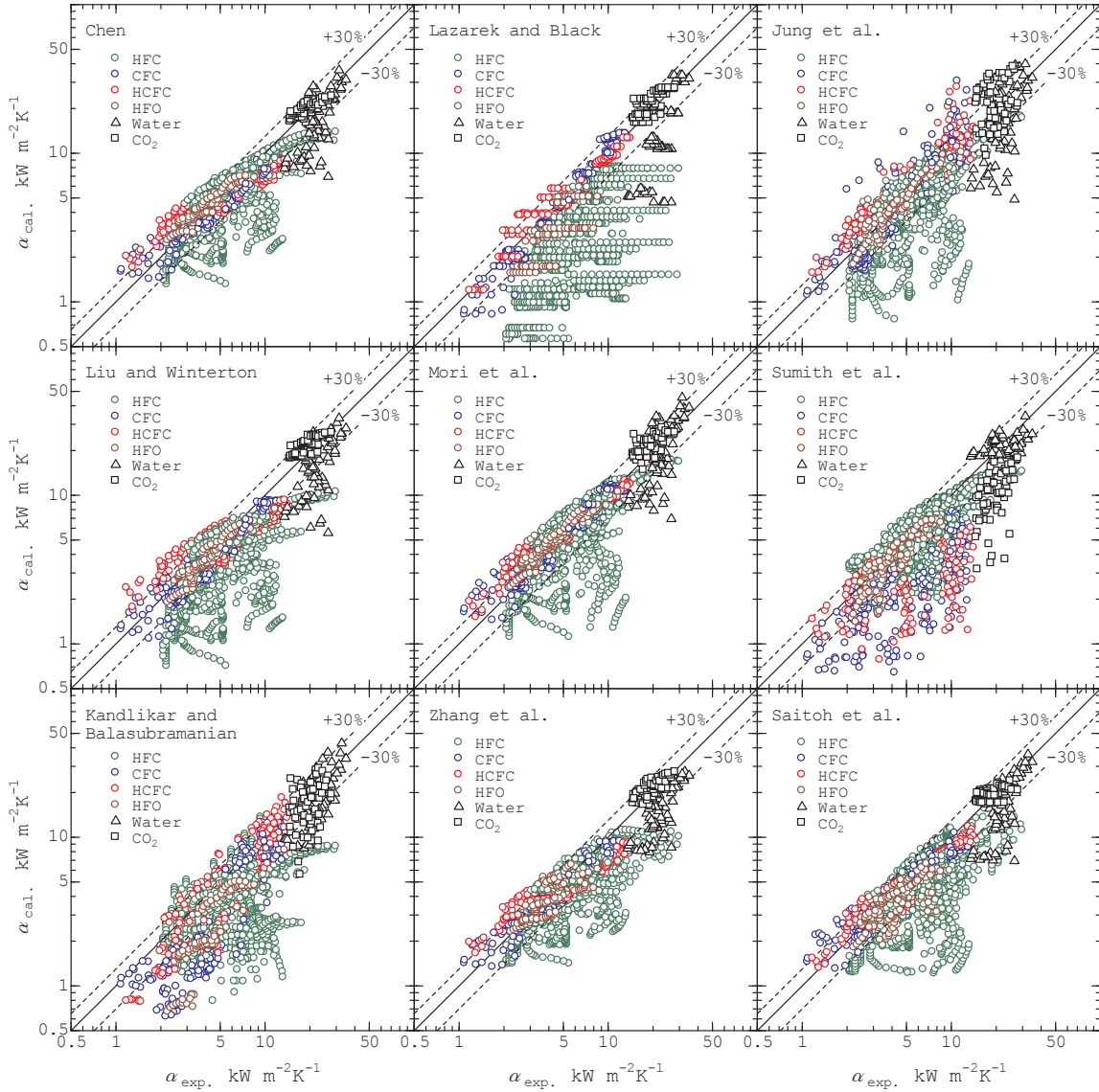


図 1-1-1.1 榎木ら以外の 9 研究者データについての沸騰熱伝達率予測精度



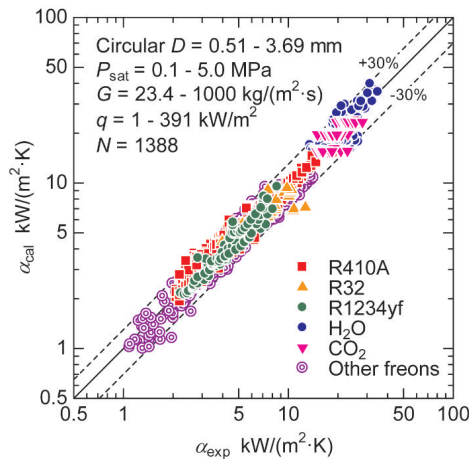


図 1-1-1.2 榎木らの沸騰熱伝達率予測精度

整理式の精度の特徴としては、精度 100 %を示す、斜め 45 度の線よりも下側、つまり計算値は実験結果を低く見積もる傾向がある。これは微細管の特徴である、薄い液膜による熱伝達率の上昇について表現できていないものと考えられる。

図 1-1-1.2 に再委託先研究代表の電気通信大学の榎木らの精度については、他の整理式と比較して、極めて良好である。これは、宮田らが提案した簿液膜の熱伝導蒸発項を線形和として足し込み、近年の冷媒や、水平流に特有の流動様相観察結果をもとにしているからと考えられる。

ただし、これらは流路が円形の場合にのみ適用可能な式で、近年の伝熱管にみられる一般的な流路形状の矩形流路には適用できない。さらに、今後の混合冷媒による複雑な沸騰現象も検討すれば、伝熱面の局所の物性変化は、蒸発熱伝達をとまなう微細流路伝熱管にとって、どんな伝熱管形状でどんな冷媒でも適用できる一般式というものがないことは熱交換器開発にとって大きな問題となる。

つまり、どんな冷凍空調機の熱交換器にでも使用可能な整理式というのは、現状では存在しないことが問題であることは明確である。

そこで、本プロジェクトにおいては、熱交換器の最適設計について明確な道しるべを示すことが最重要課題としてあるとの認識で、以下の検討を行っている。

まずは、再委託先の電気通信大学が過去に人工知能 AI を使った相変化熱伝達は予測できるのかということを検討している。その結果、可能であるとの判断にいたった。しかし、ブラックボックスであるという問題点があったため、現時点でだした新しい手法について、以下に報告する。

その次に、低 GWP 冷媒の相変化熱伝達は、共沸の場合とのメカニズムの差異を物性レベルから可視化レベルまで検討し、諸問題を潰していく。プロジェクト終了時点では、熱交換器の最適設計方法を報告できるように開発研究を遂行する。

## [1-1-2] 人工知能 AI を用いた沸騰熱伝達率の予測について

### <概要>

人工知能 (AI) の技術は多くの分野で広く利用されている。しかし、単相・二相流に関わらず、伝熱係数の予測に AI 技術を用いた研究は非常に少ない。そこで、研究が盛んに行われている流動ミニチャネル内の水平流沸騰熱伝達について、AI 手法の中で最も有望なディープニューラルネットワーク (深層学習とも呼ばれる) を用いて、その有用性を確認した。ミニチャネルは、従来の大口径管に比べて表面張力の影響が大きく、その後の伝熱機構が非常に複雑になる。このため、既存の研究に基づく予測結果の精度は高くない。また、既存の手法を用いた場合、予測された伝熱係数の不確かさを知ることができない。本研究では、深層学習とガウス過程回帰を組み合わせた新しい予測機構を提案し、伝熱係数だけでなく、予測された伝熱係数の不確かさも高精度に予測することができることを示した。

### ＜背景技術＞

本研究で利用する深層学習及びガウス過程回帰について述べる。

深層学習とは、人間の脳の学習機能を計算機上で模擬して、情報処理を行うために開発されたニューラルネットワークの中でも、層の数が多いネットワークを指す。深層学習は多数に結合されたニューロンを計算機上で模擬し、各ニューロンの結合状態を数式的なモデルで表現し、そのモデルを状況に応じて変化させることで、目的に合ったネットワークモデルを創り出す。

ガウス過程回帰(GPR)は完全な確率モデルであり、様々な分野で利用されている。GPRは教師付き学習にも利用できる。さらに、GPRは予測値の対応する不確かさを返すこともできる。例えば、真の関数が  $y=5*x$  であり、標準偏差が 0.2 である正規分布から発生する誤差を含むデータがサンプリングされたと想定し、このサンプリングデータから GPR を用いて真の関数を予測することを考える。GPRは真の関数を予測すると同時に、その予測の程度も出力することができる。

図 1-1-2.1 は、'x' で表されるサンプリングされたデータ、'Mean' の線で表される GPR が予測した関数、及び、'Confidence' で表される予測の確信度を示している。サンプリングデータが多いところは予測の確信度が高く、サンプリングデータが少ないところは予測の確信度が低いことが分かる。

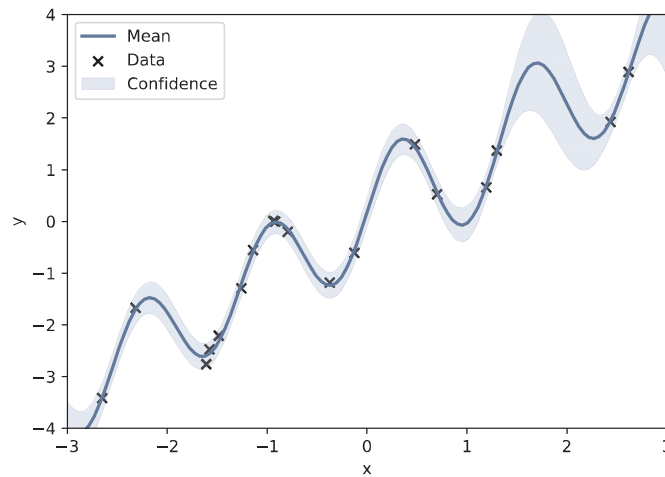


図 1-1-2.1 GPR の出力例

### ＜提案手法＞

深層学習は予測精度が高いものの、一般にその確信度を導出することはできない。一方、GPRは深層学習と比べると予測精度は低いですが、予測の確信度を導出することができる。提案手法では、この両者を組み合わせることで、精度の高い予測と、予測の確信度導出の両者と同時に実現する。

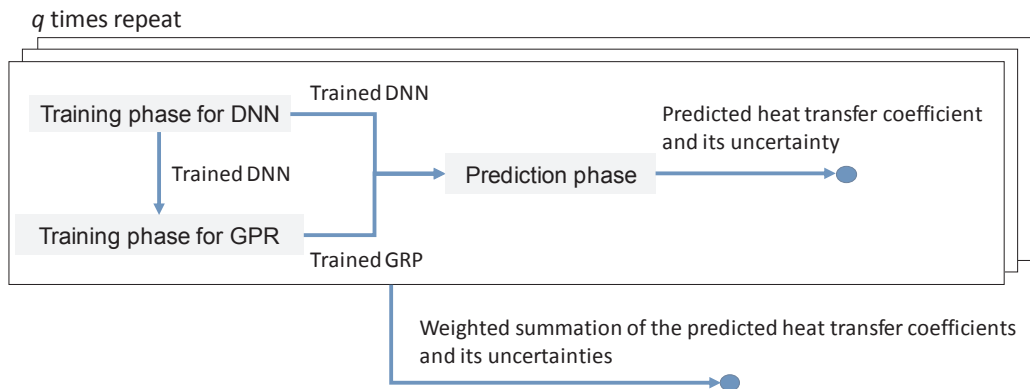


図 1-1-2.2 提案手法の全体像



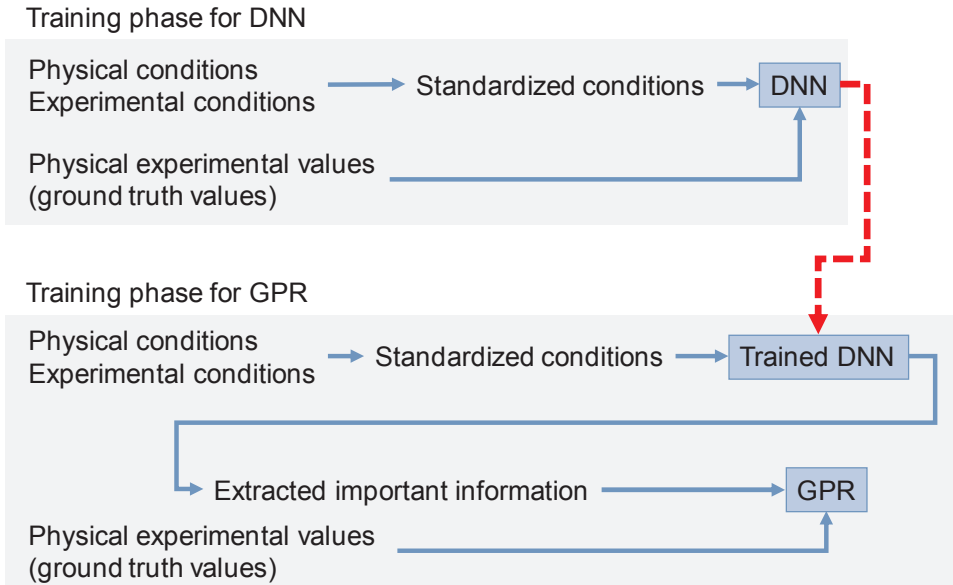


図 1-1-2.3 訓練フェーズの詳細

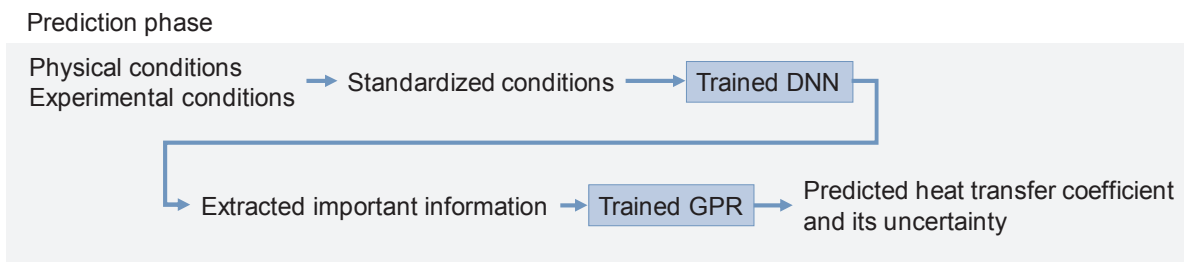


図 1-1-2.4 予測フェーズの詳細

図 1-1-2.2~1-1-2.4 に提案手法の概要を示す。提案手法では、深層学習を用いてデータの特徴量を抽出する。深層学習が実施することは特徴量の抽出までであり、伝熱係数の予測は行わない。抽出された特徴量を基に、GPR が伝熱係数の予測とその確信度の導出を行う。

さらに、アンサンブル学習を行うことで予測精度を高める。各予測値の確信度を基に重み付けを行い、最終的な予測結果を出力する。

<データサンプルについて>

今回は、新手法の適用性を検討するにあたり、流路方向を近年の熱交換器の主流である水平流に限定する代わりに、表 1-1-1.1 のデータに加え NH<sub>3</sub> や R 1234ze(E) そして R 600a などを用いて様々なヒートポンプサイクルに使用されている冷媒に対して検討した。それを表 1-1-2.1 に示す。

表 1-1-2.1

Source	Fluid	Quality	Saturation Pressure MPa	Inside Diameter mm	Mass Flux kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	Heat Flux kW·m <sup>-2</sup>	N
Wambsganss et al. [14]	R113	0.01-0.71	0.12-0.16	2.92	50-300	8.8-90.8	72
Tran et al. [15]	R12	0.20-0.77	0.83	2.46	66.3-300	7.5-59.4	59
Kew and Cornwell [16]	R141b	0.00-0.90	0.10	2.87, 3.69	188, 212	9.7-90	67
Bao et al. [17]	R11	0.01-0.64	0.29-0.47	1.95	167-560	52-125	81
	R123	0.01-0.68	0.35-0.51	1.95	167-452	39-125	80
Kuwahara et al. [18]	R134a	0.01-0.66	0.88	0.84	525	15.6	15
Saitoh et al. [19]	R134a	0.22-0.91	0.41	0.51, 1.12, 3.1	150,300	12-29	75
Yamashita et al. [20]	CO <sub>2</sub>	0.01-0.85	5.00	1.02	300-1000	30-50	62
Li et al. [21]	R32	0.28-0.86	1.28	2.00	200	4-24	44
	R1234yf	0.22-0.92	0.51	2.00	100-400	6-24	91
Enoki et al. [4]	R410A	0.05-0.95	1.09	1.00	30-400	2-24	287
Yokoyama et al. [22]	NH <sub>3</sub>	0.03-0.78	0.43	1.00	100	20	132
Wu et al. [23]	R32	0.13-0.65	1.28	2.00	300	10	14
Longo et al. [24]	R1234ze(E)	0.11-0.74	0.31	4.00	200	20	15
Sempértegui-Tapia et al. [25]	R600a	0.06-0.26	0.55	1.10	400	35	5
	R1234ze(E)	0.04-0.29	0.60	1.10	500	25-35	12
						Total	1111

評価の指標は、SD, R20, R30であり、上述の評価方法と同様である。

ここで、 $\alpha_{cal}$  は予測値、 $\alpha_{exp}$  は実験値で得られた値である。データセットへの予測精度の評価比較に用いたものは、沸騰熱伝達のモデルで精度の榎木ら、Saitoh ら、Zhang ら、そして、深層学習単体 AI のみと今回提案した深層学習とガウス過程回帰モデルである。

結果を表 2.1.3-4 に示す。ここで各研究者によって取得された実験値に対する予測精度について、各種法について、一番良い精度となるものを赤で、二番目に良い精度となるものを青で示している。

ガウス過程回帰を用いた本手法は、既存手法と比べてほぼすべてのデータセットに対して高い予測精度を実現していることが分かる。なお、'DNN' は深層学習単体で予測した結果を表している。つまり、深層学習だけでなくガウス過程回帰を組み合わせた手法が良い結果を示すことがわかった。

次に、図と表が前後するが表 1-1-2.2 予測結果の確信度についての結果を図 1-1-2.5 に示す。表の 'Variance' は提案手法の出力内容であり、値が大きいほど確信度が低い。Variance が大きいほど、Mean Squared Error で表される、予測値と正解値との差が大きいことが分かる。

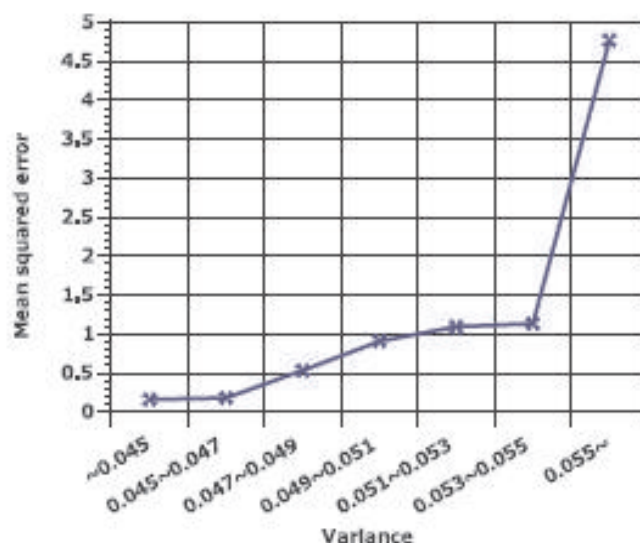


図 1-1-2.5 確信度と予測誤差の関係

表 1-1-2.2 予測精度の評価方法

Source	<i>N</i>	%	Zhang	Saitoh	Enoki	AI	Proporsal
Wambsganss		<i>SD</i>	21.1	27.1	17.7	<b>8.6</b>	<b>8.4</b>
2.92 mm	72	<i>R20</i>	55.6	55.6	68.1	<b>95.8</b>	<b>98.6</b>
R 113		<i>R30</i>	83.3	75.0	94.4	<b>100.0</b>	<b>98.6</b>
Tran		<i>SD</i>	17.0	17.1	6.2	<b>6.0</b>	<b>5.9</b>
2.46 mm	59	<i>R20</i>	71.2	66.1	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
R 12		<i>R30</i>	96.6	98.3	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Kew		<i>SD</i>	32.7	22.8	15.6	<b>8.0</b>	<b>6.7</b>
2.87-3.69 mm	67	<i>R20</i>	35.8	62.7	82.1	<b>100.0</b>	<b>98.5</b>
R 141b		<i>R30</i>	56.7	82.1	98.5	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Bao		<i>SD</i>	25.1	21.1	<b>15.8</b>	<b>4.7</b>	<b>4.7</b>
1.95 mm	81	<i>R20</i>	32.1	48.1	<b>79.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
R 113		<i>R30</i>	72.8	<b>91.4</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Bao		<i>SD</i>	27.6	<b>15.1</b>	16.7	<b>4.0</b>	<b>4.0</b>
1.95 mm	80	<i>R20</i>	25.0	<b>86.3</b>	71.3	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
R 123		<i>R30</i>	67.5	<b>96.3</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Kuwahara		<i>SD</i>	24.3	27.2	23.4	<b>9.6</b>	<b>9.2</b>
0.84 mm	15	<i>R20</i>	53.3	33.3	26.7	<b>100.0</b>	<b>93.3</b>
R 134a		<i>R30</i>	73.3	80.0	<b>93.3</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Saitoh		<i>SD</i>	18.8	18.8	10.9	<b>5.8</b>	<b>5.1</b>
0.51-3.1mm	75	<i>R20</i>	73.3	76.0	<b>93.3</b>	<b>100.0</b>	<b>93.5</b>
R 134a		<i>R30</i>	85.3	<b>89.3</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Yamashita		<i>SD</i>	16.0	13.7	12.3	<b>11.3</b>	<b>9.9</b>
1.02 mm	62	<i>R20</i>	74.2	87.1	<b>90.3</b>	<b>93.5</b>	<b>93.5</b>
CO <sub>2</sub>		<i>R30</i>	95.2	<b>96.8</b>	<b>96.8</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Li		<i>SD</i>	22.8	35.5	<b>14.6</b>	<b>12.8</b>	<b>11.3</b>
2 mm	44	<i>R20</i>	59.1	40.9	90.9	<b>96.9</b>	<b>93.2</b>
R 32		<i>R30</i>	81.8	52.3	93.2	<b>95.5</b>	<b>97.7</b>
Li		<i>SD</i>	19.3	22.9	11.9	<b>5.6</b>	<b>4.8</b>
2 mm	91	<i>R20</i>	65.9	68.1	91.2	<b>98.9</b>	<b>100.0</b>
R 1234yf		<i>R30</i>	<b>84.6</b>	78.0	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Enoki		<i>SD</i>	34.9	28.5	9.3	<b>7.8</b>	<b>5.5</b>
1 mm	287	<i>R20</i>	22.3	58.2	<b>97.2</b>	96.9	<b>99.0</b>
R 410A		<i>R30</i>	50.5	70.0	<b>99.7</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Yokoyama		<i>SD</i>	30.9	47.8	18.9	<b>11.8</b>	<b>8.3</b>
2 mm	132	<i>R20</i>	31.8	0.0	65.9	<b>92.4</b>	<b>99.2</b>
NH <sub>3</sub>		<i>R30</i>	48.5	8.3	87.9	<b>99.2</b>	<b>100.0</b>
Wu		<i>SD</i>	44.6	13.1	17.2	<b>8.5</b>	<b>5.8</b>
2 mm	14	<i>R20</i>	0.0	85.7	78.6	<b>92.9</b>	<b>100.0</b>
R 32		<i>R30</i>	0.0	<b>100.0</b>	<b>85.7</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Longo		<i>SD</i>	18.3	19.0	18.7	<b>8.1</b>	<b>9.7</b>
4 mm	15	<i>R20</i>	80.0	53.3	60.0	<b>100.0</b>	<b>93.3</b>
R 1234ze(E)		<i>R30</i>	86.7	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Sempértegui		<i>SD</i>	16.8	15.2	12.9	<b>11.9</b>	<b>8.8</b>
1.1 mm	5	<i>R20</i>	80.0	80.0	80.0	<b>89.4</b>	<b>100.0</b>
R 600a		<i>R30</i>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
Sempértegui		<i>SD</i>	22.4	18.0	17.4	<b>10.1</b>	<b>7.0</b>
1.1 mm	12	<i>R20</i>	50.0	66.7	75.0	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
R 1234ze(E)		<i>R30</i>	91.7	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>
		<i>SD</i>	27.8	27.8	14.0	<b>8.3</b>	<b>7.0</b>
Total	1111	<i>R20</i>	42.8	56.2	84.2	<b>96.8</b>	<b>100.0</b>
		<i>R30</i>	67.7	72.8	97.3	<b>99.7</b>	<b>100.0</b>

赤は最高値, 青は次点値

### 〈まとめと今後の予定〉

深層学習とガウス過程回帰を組合せた、伝熱係数予測モデルを構築した。既存手法よりも高い精度で予測できるとともに、その予測の確信度についても、高い精度で出力できることが評価実験により確認できた。

このことは、今後の解析に大きな意味をもつ。人工知能 AI 単体のみでは出力値はブラックボックスで、なぜそのように精度高くモデルを評価できるかは人間には分からない。しかし、今回の手法でガウス過程回帰によって、科学的な信頼性を定量的に評価できるという点が最大の特徴である。図 1-1-2.6 には、各研究者のデータセットを訓練から外した場合の新手法の確信度を示して、右に行くほど不確かさが大きいことを示す。つまり、Yokoyama らの NH<sub>3</sub> や Yamashita らの CO<sub>2</sub> のデータについて、外して深層学習させた場合は、学習セットが不十分で信頼性にかけ始めることを意味する。例えば気液二相流の熱伝達で非常に重要となってくる、気液密度比を横軸に整理して図 1-1-

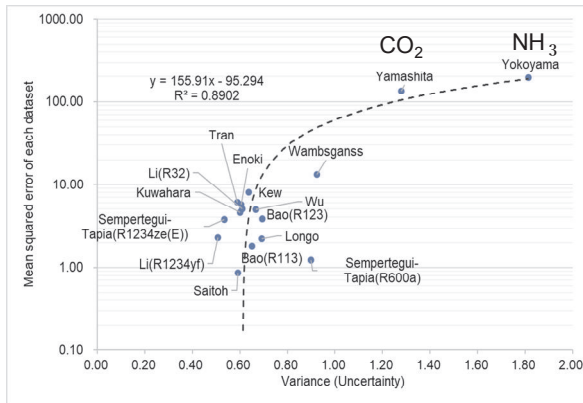


図 1-1-2.6 各研究者のデータセットを訓練から外した場合の新手法の確信度

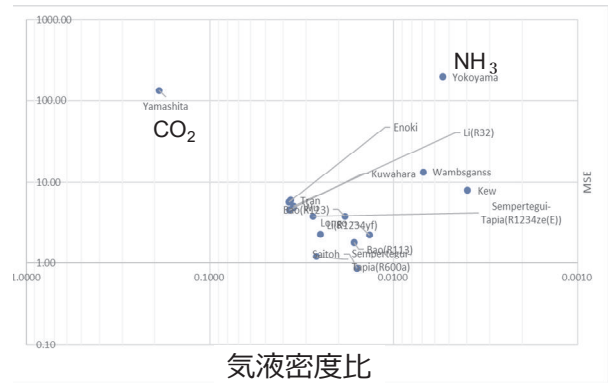


図 1-1-2.7 冷媒の物性値である気液密度比を横軸にした場合の新手法の確信度

2.7 に示すが、信頼性の欠ける要素となるのは物性で言うと、気液密度比が非常に大きな NH<sub>3</sub> や CO<sub>2</sub> であることがわかる。

これは、今後の研究者が大量のデータからどのようなデータを用いて整理式を構築していけば良いかの指標となる。つまり、一般化された整理式を構築するために必要となる、確かなデータを新手法では提案することが可能であるため、例えば今回であれば、気液密度比が非常に熱伝達に及ぼす影響が大きいことを示すデータとして使い、物理現象の把握と整理式の構築に役立てていくことが可能となる。最終的には人間と人工知能が協力しあって伝熱整理式や圧力損失の整理式を構築する時代が到来する日も近いかもしれない。

### [1-1-5] 圧縮機

圧縮機は、システムとしての解析を行うレベルでは、断熱効率や体積効率で簡易に示されることが多い。このような係数を用いていると次世代冷媒のように動作流体が次々と変更される場合にはそのたびに多くの実験をして対応せざるを得ない状況である。もちろんメーカーは、詳細なデータを取得することとなるが、取得されたデータを公開することはあり得ない。このため、汎用的な世界的標準シミュレーションコードの構築を目指すためには、システムシミュレーターにも具体的な圧縮過程や冷媒の漏れ、圧縮機内での熱移動現象、オイルによる冷媒の寝こみ現象等を詳細に解析できるコードを搭載することが必要不可欠である。

ただし、圧縮機的设计レベルまでの数値解析まで導入しようとするれば、システム解析は計算時間を考えても実行不可能となってしまう。そこで、圧縮機的设计者とともに十分なディスカッションを進め、次世代冷媒導入に際しても定性的な性能について比較分析できるレベルの数理モデルを決定した。対象とする圧縮機は、中間評価までは、まずはスクロール圧縮機とするが、ロータリー圧縮機等も順次モデル化を進める。

対象とするスクロール圧縮機は、図 1-1-5.1 に示すように単段であり、インボリュート曲線によって形成される固定スクロールと旋回スクロール、軸受、モーター、インバーター等からなる一般的なものである。冷媒は、閉鎖された吸い込み室、圧縮室、吐出室を通して圧縮がなされる。圧縮機では、



この過程で高圧サイドから低圧サイドへの冷媒の漏れがあるが、これはきちんと考慮することとする。当然オイルの効果も検討するものとする。

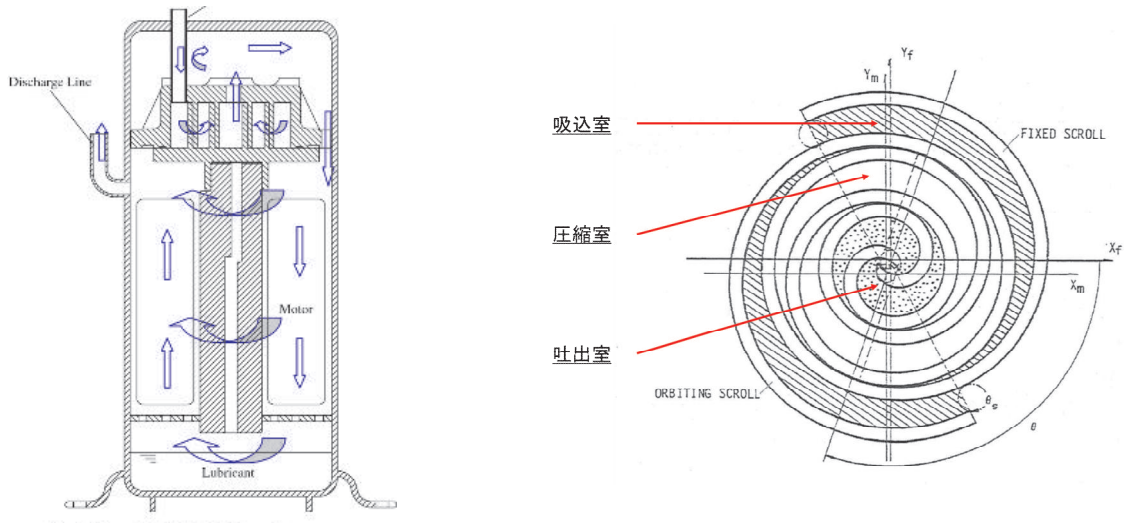


Fig. 1. Schematic of the high-side scroll compressor.

図 1-1-5.1 対象とする圧縮機

圧縮機のモデリングにおいては、圧縮機内の熱流体的特性と軸受けや摺動部の機械的特性、インバーターやモーターの電気的特性を考慮する必要がある。冷媒の性質に左右される部分は、圧縮機内部で圧縮される冷媒の熱流体特性であるため、この部分のモデリングが主たるものとなる。他の機械的特性、電気特性については、冷媒によって差が生じる部分ではないので、従来と同様に効率等を用いて簡易に表すものとする。図 1-1-5.2 に圧縮機の構成を示す。

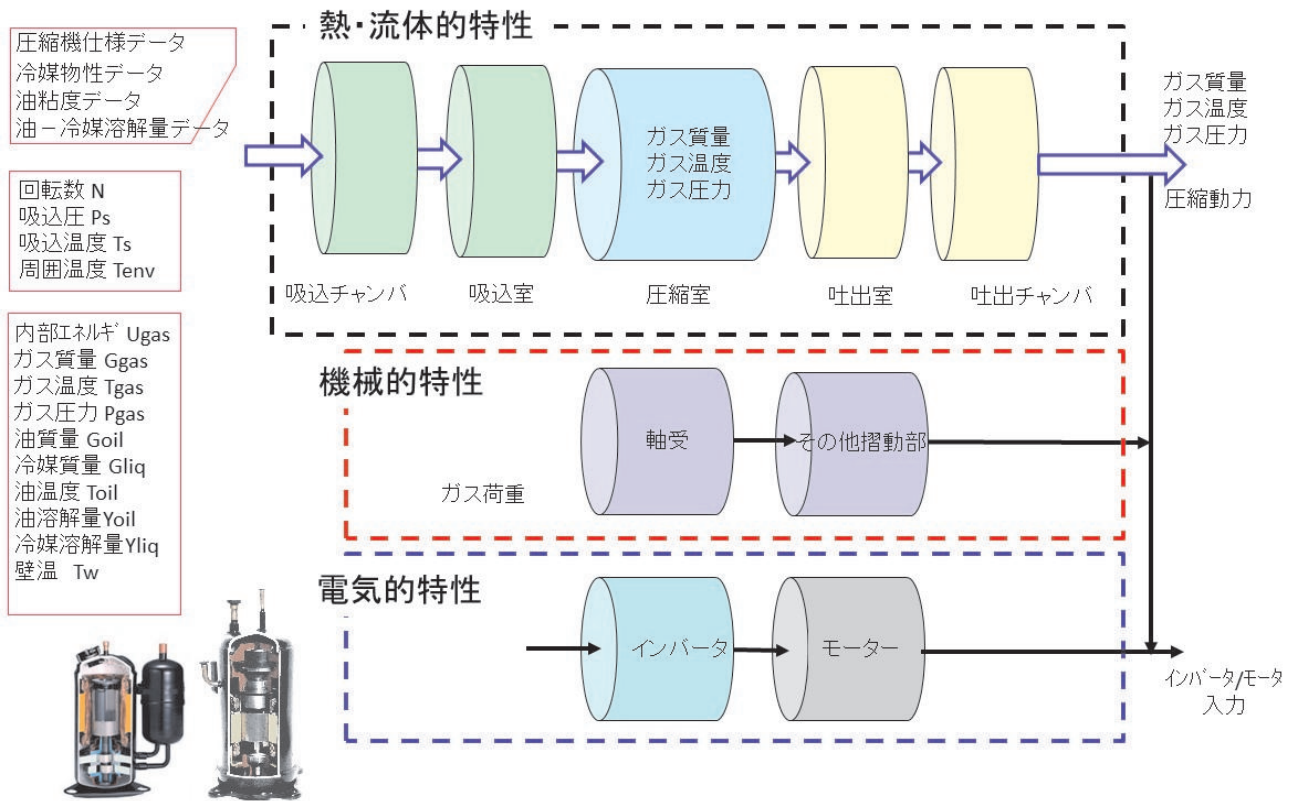


図 1-1-5.2 圧縮機の構成

旋回スクロールの解析結果を図 1-1-5.3 に示す。この結果は動画として表示するようにし、その動きをきちんと解析できていることを確認している。

固定スクロール外側 $(x_{fo}, y_{fo})$ ,内側 $(x_{fi}, y_{fi})$   
 旋回スクロール外側 $(x_{mo}, y_{mo})$ ,内側 $(x_{mi}, y_{mi})$   
 $\lambda$ :伸開角, $\theta$ :旋回角, $a$ :基礎円半径,  $\varepsilon$ :  
 旋回半径, $t=\pi a - \varepsilon$ :ラップの厚さ, $\beta$ : $t/a$

$$\begin{aligned} x_{fo} &= a\{\cos(\lambda + \pi) + \lambda \sin(\lambda + \pi)\} \\ y_{fo} &= a\{\sin(\lambda + \pi) - \lambda \cos(\lambda + \pi)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{fi} &= a\{\cos(\lambda + \pi) + (\lambda - \beta) \sin(\lambda + \pi)\} \\ y_{fi} &= a\{\sin(\lambda + \pi) - (\lambda - \beta) \cos(\lambda + \pi)\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{mo} &= a\{\cos \lambda + \lambda \sin \lambda\} + \varepsilon \cos(-\theta) \\ y_{mo} &= a\{\sin \lambda - \lambda \cos \lambda\} + \varepsilon \sin(-\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{mi} &= a\{\cos \lambda + (\lambda - \beta) \sin \lambda\} + \varepsilon \cos(-\theta) \\ y_{mi} &= a\{\sin \lambda - (\lambda - \beta) \cos \lambda\} + \varepsilon \sin(-\theta) \end{aligned}$$

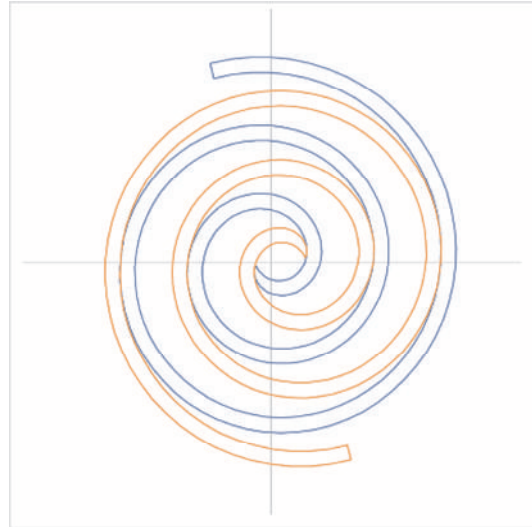


図 1-1-5.3 対象とする圧縮機の固定／旋回スクロール（インボリュート曲線）

回転方向の圧縮室の構造変化式と具体的な冷媒の関係式，オイルの関係式，冷媒の漏れの式として下記の関係式を解析することとした。これにより，オイルによる潤滑の影響や冷媒ガスのもれの検討が可能となる。なお報告書作成段階では，オイルと非定常の熱的遅れは，考慮できていないが，本年度中には，その影響も解析が可能となる予定である。

冷媒の連続方程式とエネルギー方程式は次のようになる。

$$\frac{dM_g}{dt} = \dot{M}_{g,in} - \dot{M}_{g,out} \quad \dots (1-1-5.1)$$

$$\frac{dM_g u_g}{dt} = \dot{M}_{g,in} h_{g,in} - \dot{M}_{g,out} h_{g,out} - P \frac{dV}{dt} + P(\dot{V}_{o,in} - \dot{V}_{o,out}) - K_a(T_g - T_o) - K_b(T_g - T_w) \quad \dots (1-1-5.2)$$

オイルについては，次のとおりである。

$$\frac{dM_o}{dt} = \dot{M}_{o,in} - \dot{M}_{g,o} \quad \dots (1-1-5.3)$$

$$\frac{dM_o u_o}{dt} = \dot{M}_{o,in} h_{o,in} - \dot{M}_{o,out} h_{o,out} - K_a(T_{o,in} - T_g) \quad \dots (1-1-5.4)$$

ガスの漏れ量は音速到達時の閉塞まで考慮し，次のように表すものとする。

$$\dot{M} = cA \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa-1} P_{in} \rho_{in} \left\{ \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right\}} \quad \frac{P_{out}}{P_{in}} \geq \left( \frac{\kappa}{\kappa-1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \dots (1-1-5.5)$$

$$\dot{M} = cA \sqrt{P_{in} \rho_{in} \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \quad \frac{P_{out}}{P_{in}} \leq \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad \dots (1-1-5.6)$$

このモデルを用いてまずは定常的な数値解析を実施した結果を図 1-1-5.4 に示す。この結果には，スクロールが回転しながら，各種次世代冷媒も含めて冷媒の圧縮が進むにつれて体積，圧力，温度の変化が詳細に示されている。冷媒による過圧縮の状態までよく表れているのが分かる。



## 圧縮室間の冷媒漏れを再現した.

### Volume

- Suction process

$$V_{pi} = \alpha a^2 h \left[ \frac{1}{2} \theta_s (2\lambda_{so} - \theta_s + \alpha) - \left\{ \lambda_{so} \sin \theta_s + \frac{1}{4} \alpha \sin 2\theta_s - (1 - \cos \theta_s) \right\} \right]$$

- Compression process

$$V_{pi} = \alpha a^2 h \{ 2(\lambda_{pi} - \pi) + \alpha \}$$

- Discharge process

### Pressure

$$P_{pi} V_{pi}^\gamma = \text{const.}$$

### Temperature

$$T_{pi} V_{pi}^{\gamma-1} = \text{const.}$$

$V_{pi}$ : 圧縮室体積,  $P_{pi}$ : 圧縮室圧力,  $T_{pi}$ : 圧縮室温度,  
 $\lambda_{pi}$ : 圧縮室伸開角,  $\theta_s$ : 吸込開始角からの回転角  
 $a$ : 基礎円半径,  $\varepsilon$ : 旋回半径,  $\alpha$ :  $\varepsilon/a$ ,  $h$ : ラップの高さ,  
 $\lambda_{so}$ : ラップの巻き始め角,  $\gamma$ : 比熱比,  $S_0$ : 補正項

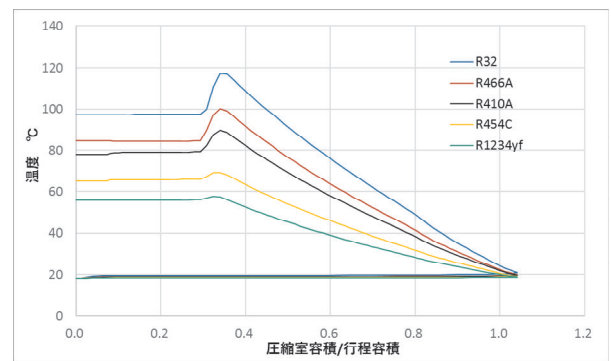
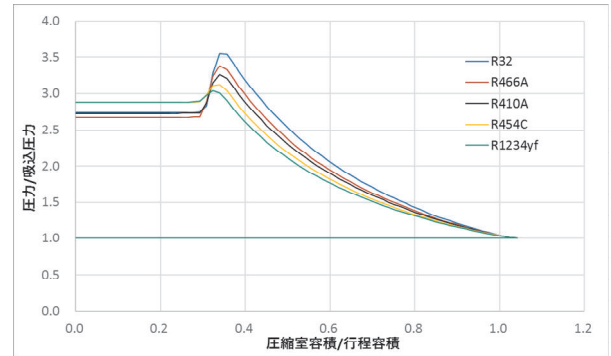
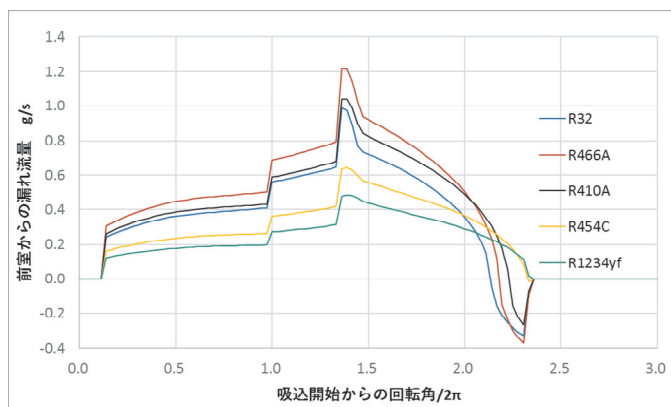


図 1-1-5.4 回転角と体積／圧力／温度の変化

また、上記のようにスクロールの回転による圧縮の状態が解析できるため、図 1-1-5.5 隣接する圧縮室間の冷媒の漏れをも解析できている。各種冷媒に対して体積効率が若干高めに解析されているようである。これは、まだ考慮すべきファクターが出そろっていないためである。もちろん圧縮機の実験も進めていくので妥当性検証も進められていく。



	断熱効率	図示効率	体積効率
R410A	85.9	90.1	95.4
R32	80.7	87.0	92.8
R466A	84.6	88.6	95.5
R454C	89.2	92.2	96.7
R1234yf	84.6	88.6	95.5

図 1-1-5.5 圧縮室間の冷媒の漏れ

## [1-1-6] 膨張弁

### <概要>

膨張弁は高圧の冷媒液を低圧雰囲気へ解放し、減圧沸騰にともなう断熱膨張による温度低下をもたらす。また冷凍・空調機を運転する条件の負荷に合わせた流量調整機能がある。膨張弁の流量は摩擦損失とともに流体の急激な膨張による加速損失が大きな要素を占め、弁開度・圧力差・冷媒温度について複雑な関数になる。膨張弁流量を予測するためには、膨張弁における冷媒気液二相流の熱流動の取り扱いが必要である。

ここでは、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実用機レベルにおいてまで評価できるシミュレーション手法の確立を目的とする。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モデル、数値解析手法を確立する。その基盤技術として二相流解析技術整備を進めている。

膨張弁の解析は十分な実験結果を得られた上で整備するため、今回はまず冷媒の微細流路内における流動様相を高精度に数理解析モデル化できかの検討をしたので報告する。

その後、膨張弁解析について、現状の結果を報告する。

### <コードシステム>

気液二相流の数値解析技術は対象とする多様な流動現象に対応する必要がある、解析技術は評価する目的により二流体モデルと界面追跡法があり、また圧縮性を考慮する必要の有無から圧縮性解法と非圧縮性解法に分けられる。冷凍空調機器の性能評価において気液二相流の関わる重要な課題として次の項目をあげることができる。

#### (1) 伝熱管内の流動様式

熱交換器伝熱管の熱伝達率や圧力損失に関わる

#### (2) 膨張弁の流量

膨張弁開度による流量制御に関わる

#### (3) 分岐管による二相流分配

伝熱管群への流量及びクオリティ分配に関わる

本報告は上記(1)の伝熱管内流動様式の評価を取り扱う。

### <VOF 法の基礎式と数値計算法>

流動様式は界面が重要な役割を持つため、界面追跡法を用いた。ここでは VOF (Volume of Fraction) 法を採用した。相変化のない非圧縮性二相流を対象とし、連続の式を満たす。

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1-1-6.1)$$

ここで  $\mathbf{u}$  は気液混合速度 [m] である。水率 (水の占める体積比)  $H$  はこの速度で輸送される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla H \mathbf{u} = 0 \quad (1-1-6.2)$$

数値計算では界面形態輸送計算の精度を上げるため流れ方向の界面勾配を考慮する PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) 法を用いた。運動方程式は

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla P = \mathbf{F} \quad (1-1-6.3)$$

ここで  $\rho = (1 - H)\rho_g + H\rho_l$  は密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $P$  は圧力 [Pa] である。外力  $\mathbf{F}$  [N/m<sup>3</sup>] は粘性、壁摩擦、表面張力、重力が寄与する力から構成される。数値計算法は有限体積法による離散化に基づき SIMPLE (Semi-implicit Pressure Linked Equations) 法を二相流に拡張した。VOXEL 格子を用いたが、格子サイズを変えることで複雑な流路形状にも対応できる。

### <実験の概要>

近年、空調機用熱交換器の高性能化のために、冷媒の流路を細径化する傾向にあり、その最適設計のために再委託先研究代表の榎木らは、微細管内における沸騰熱伝達と圧力損失の特性を明らかにする実験を実施した。微細円管流路における圧力 1.09MPa、温度 10℃の冷媒 R 410A の垂直上昇流と下降流さらに水平流の流動様相の観察を行い、流動様相と流動様式に及ぼす流路形状と流動方向の影響を検討した。試験部は外径 6mm のガラス円柱の中の直径 1.03mm 長さ 126mm の流路であり、流動様式の観察には高速度カメラを用い、定常状態を確認した後、2000 - 40000 fps の撮影速度でガラス管流路軸方向中央部を撮影した。

微細円管であるが多様な流動様式を観察することができた。物性で決まる特徴長さ  $L$  [m] を次のように仮定する。

$$L = \frac{\Delta\rho v_l^2}{\sigma} \quad (1-1-6.4)$$

$\Delta\rho$ は気液密度差 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $v_l$ は液の動粘性係数 [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $\sigma$ は表面張力 [ $\text{N}/\text{m}$ ]である。この値は常温常圧の空気-水系では 1.09MPa の R 410A の蒸気-液系の約 6 倍である。この試験は水力的に空気-水系の内径 6mm 程度の配管の試験に対応する可能性がある。

#### <解析条件>

解析領域は直径 1.03mm の円形断面を持ち試験体より短い 20mm 長の円管流路とし、出口境界条件は圧力境界とした。入口境界では冷媒蒸気の一様流入とし流路壁から冷媒液の流入により冷媒の気液二相流を形成する。格子サイズは  $50\mu\text{m}$  であり、全格子数は約 15 万である。タイムステップ幅は  $0.25\mu\text{s}$  である。計算した流動現象の時間は約 0.1s である。解析結果のグラフィック表示にはレイトレーシング描画ソフト POV-ray を用いた。

#### <流動様式の解析結果と実験との比較>

垂直上昇管および水平管における流動様式の高速度カメラ画像および数値計算結果のグラフィック表示の比較をそれぞれ図 1-1-6.1 と図 1-1-6.2 に示す。各流動様式の冷媒蒸気の体積速度  $J_g$  [ $\text{m}/\text{s}$ ]と液の体積速度  $J_l$  [ $\text{m}/\text{s}$ ]を図中に記入した。

#### <垂直上昇管の解析結果について>

スラグ気泡が自然に形成されるのは長い発達区間が必要であるが、解析領域が短いため本解析では気液合わせた体積流量を保ちつつ間欠的に蒸気流量を供給した。環状流の条件では液流が蒸気流に押し流されて液膜が形成されにくいので、壁面上の薄膜は吸着のため液膜が移動しにくい設定とした。実験で観察された液膜波は計算できなかった。チャーン流の流動様式の解析結果は実験とよく対応しているが、浮遊する液滴のサイズは格子サイズとほとんど同じであり、解析の分解能について今後の検討を要する。

#### <水平管の解析結果について>

水平管の上下分離流から界面波が成長してスラグ化する過程を解析することができた。スラグの形状や連続的なスラグの形成について実験と解析とは相違があり課題を残している。他の流動様式と同様に、チャーン流、環状流について実験と解析との対応を定量的に示すことは困難である。複雑な流動様式を数値化する統計理論あるいは複雑系による標準的な評価手法の整備が望ましい。

#### <数値シミュレーションにおける流動様相解析の今後の展望>

本解析の解析領域と時間(流路長さ 20mm, 流動現象の時間 0.1s)は流動様式の発達や定常状態への到達という観点から十分ではない。今後さらに大規模な解析を実施し、実験との詳細な比較検討が必要である。実用的な意味ではボイド率や圧力損失および熱伝達などの予測の信頼性の確立が必要である。今回は対象としなかった矩形管や下降流などの流動様式の解析も手法の汎用性を確認する上で重要である。

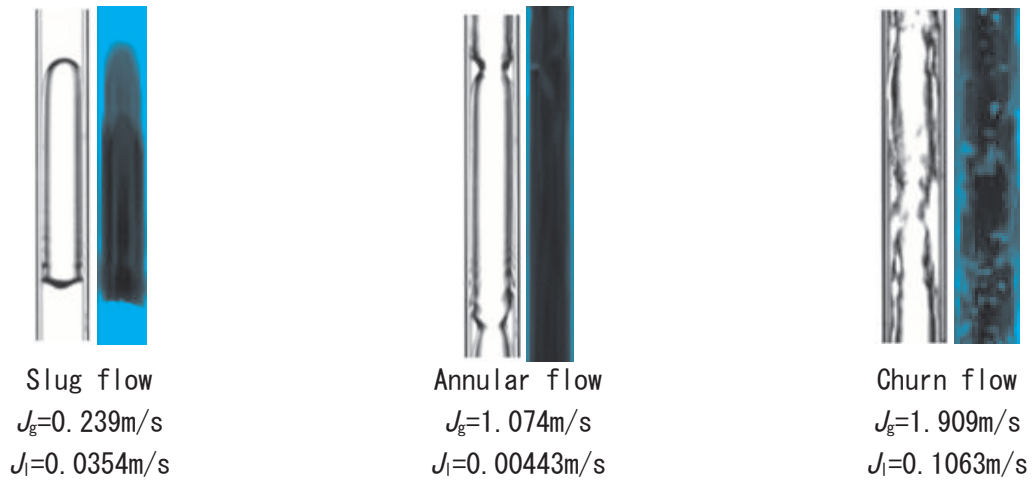


図 1-1-6.1 上昇流の解析結果と榎木らの流動様相観察結果の比較（右が解析結果）

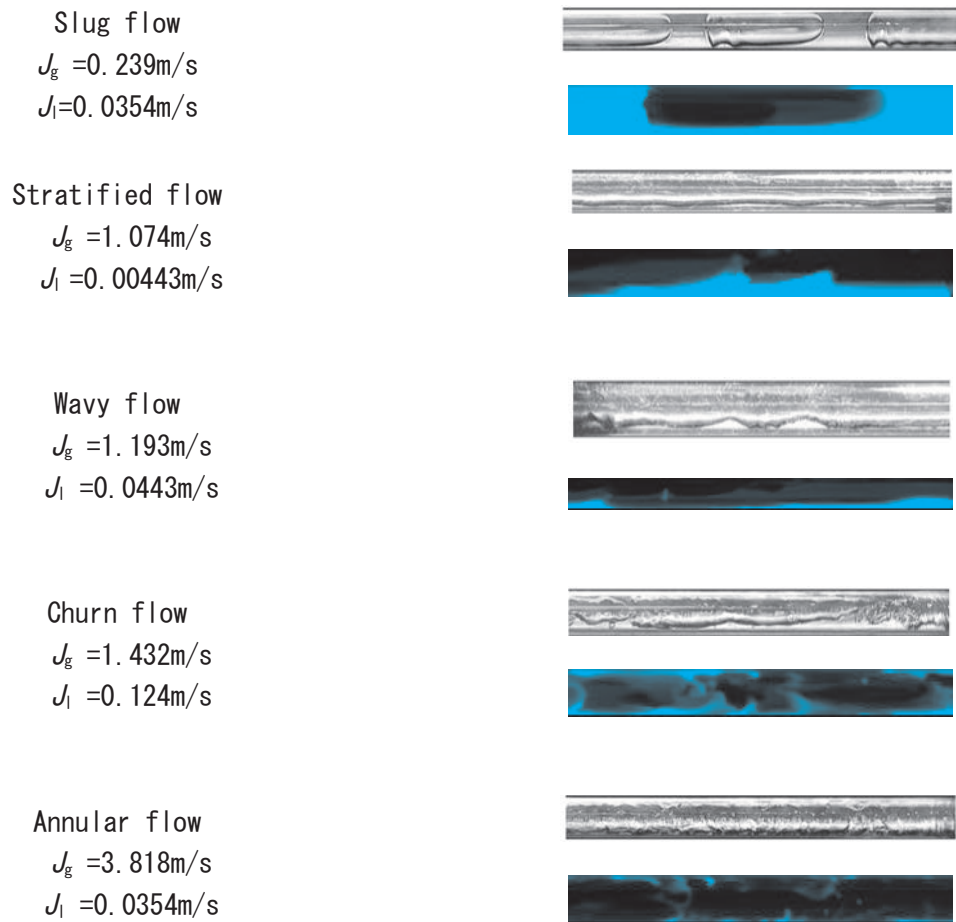


図 1-1-6.2 水平流の解析結果と榎木らの流動様相観察結果の比較（下が解析結果）

<システム数値解析結果>

1) ドロップインにおける低 GWP 冷媒の性能予測

本研究は、R410A 用のルームエアコンを対象とし、低 GWP 冷媒をドロップインした際の冷房性能の変化をシミュレーションし、冷房能力と消費電力の関係から低 GWP 冷媒の評価を行う。なお、シミュレーションには開発したシミュレーターを用いた。

2) 対象とするシステム

本研究で対象とするルームエアコンの機器構成を図 1-1-7.1 に示す。一般的な単段蒸気圧縮式ヒートポンプを対象としており、定格冷房能力は 2.5kW である。圧縮機、室内外熱交換器、膨張弁、四方弁、アキュムレータ、配管から構成されている。冷房運転時の制御は、圧縮機回転数と膨張弁開度により、冷房能力と蒸発器出口過熱度を制御するものとし、室内・室外のファン回転数は定格回転数で一定とする。

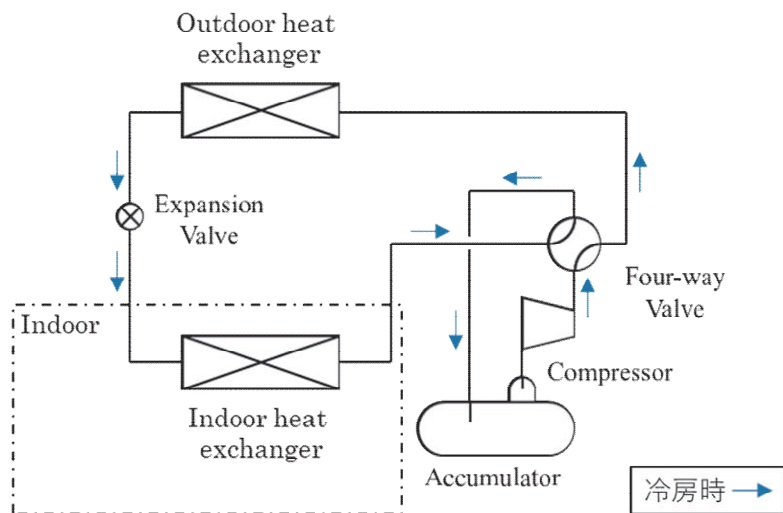


図 1-1-7.1 ルームエアコンのシステムフロー

3) 対象とする冷媒

本研究でドロップインによる性能評価を行う対象の冷媒とその物性を表 1-1-7.1 に示す。本研究では低 GWP 冷媒として実績のある R32 に加えて、低 GWP として近年注目を集めている R466A, R454C を選択し、これらの冷媒に対してドロップイン評価を行う。シミュレーションを行う際の冷媒の物性値は NIST REFPROP Ver. 10 をベースとしている。また、R466A の物性は混合則により算出した。

表 1-1-7.1 対象となる冷媒と物性

冷媒	R410A (基準冷媒)	R32	R466A	R454C
組成	R32/R125 =50/50wt%	R32=100wt% (単一成分)	R32/R125/GF3I =49/11.5/39.5wt%	R32/R1234yf =21.5/78.5wt%
GWP	2090	675	733	148
ODP	0	0	0.008	0
安全性分類	A1	A2L	A1	A2L
沸点	-51.1	-51.7	-53.5	-41.3
温度グライド	0.1	0	1.5	7.8



#### 4) シミュレーションの方法

ルームエアコンの仕様を表 1-1-7.2 に、室内外の空気条件を表 1-1-7.3 に示す。

表 1-1-7.2 ルームエアコンの仕様

Cooling capacity	[kW]	2.5	
Compressor	Rotational speed	[rps]	46.1
	Adiabatic efficiency	[-]	0.75
	Volumetric efficiency	[-]	0.90
	Inverter efficiency	[-]	0.95

表 1-1-7.3 室内外の空気条件

Indoor unit fan mass flow rate	[kg/s]	0.214
Outdoor unit fan mass flow rate	[kg/s]	0.406
Indoor unit temperature	[°C]	27 (dry) / 19 (wet)
Outdoor unit temperature	[°C]	35 (dry) / 24 (wet)

ドロップインする冷媒の充填量を決定する際には、膨張弁による過熱度制御、圧縮機は定格回転数で定速運転、ファン回転数は定格回転数で一定の状態のもと、冷媒充填量を変化させてサイクル計算を行い、COP が最大となる値を冷媒充填量と決めた。

#### 5) シミュレーションの結果

圧縮機回転数を変化させることで冷房能力を変化させた場合の各冷媒の性能比較を行った。シミュレーション条件を表 1-1-7.4 に示す。

表 1-1-7.4 シミュレーション条件

操作量	運転方法
膨張弁開度	蒸発器出口過熱度が 5K となるように操作
圧縮機回転数	一定
室外風量・室内風量	定格の 100% で固定

まず、図 1-1-7.2 の圧縮機回転数と能力と COP の関係に着目すると、R32、R466A は圧縮機定格回転数に比較的近い回転数で、定格冷房能力を発揮できることがわかる。これに対し、R454C は定格冷房能力 2.5kW を発揮するためには圧縮機回転数を 160rps 程度にする必要があり、これは定格回転数 46.1rps の約 4 倍に相当する。

次に、図 1-1-7.3 の冷房能力と COP と消費電力の関係に着目する。同じ冷房能力で比較すると、R32、R410A、R466A、R454C の順で COP が高いことがわかる。R454C は全ての冷房能力において COP が最も低く、また冷房能力が大きくなるほど R410A との COP の差が大きくなっている。また、EFPROPver. 9 と ver. 10 では COP で 6% 程度の差があることがわかった。



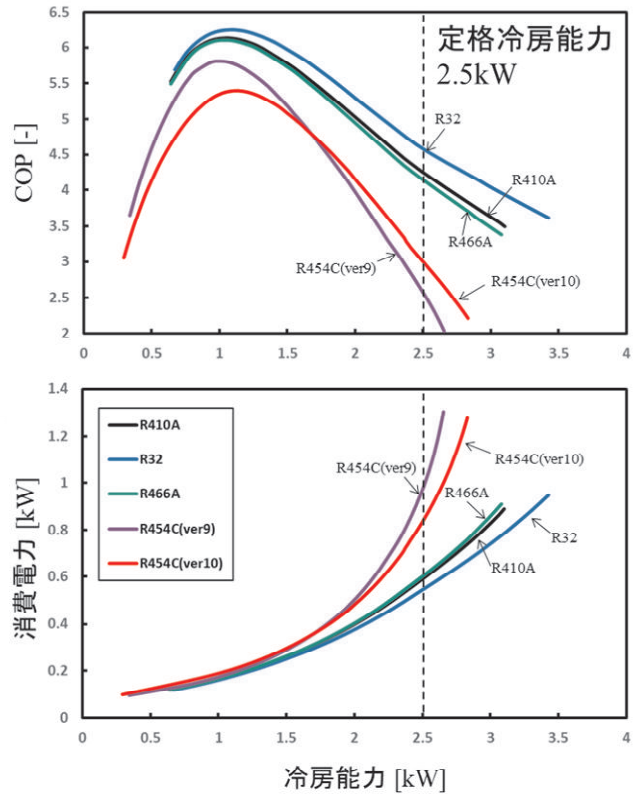
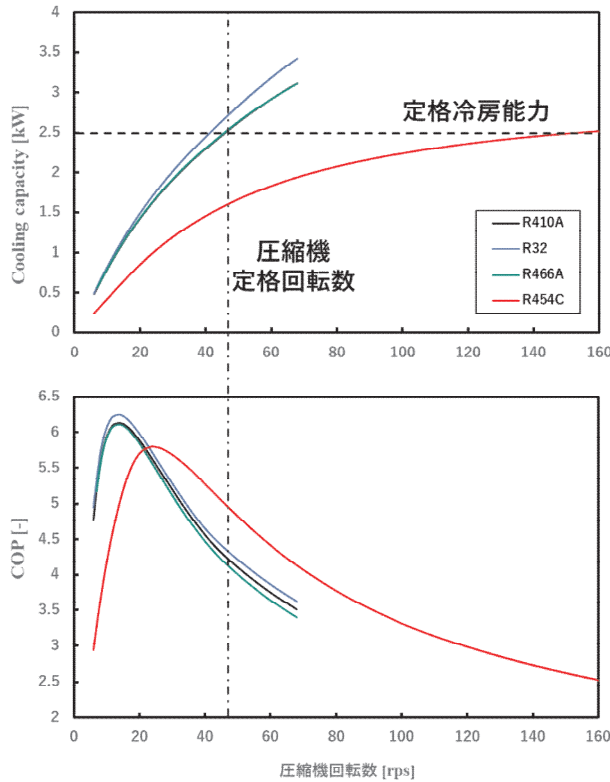


図 1-1-7.2 圧縮機回転数と能力・COP の関係性 図 1-1-7.3 冷房能力と COP, 消費電力の関係

6) 圧縮機回転数を定格回転数で運転させた場合の各冷媒の性能比較

各冷媒の COP, 冷房能力, 消費電力を解析した結果を図 1-1-7.4 に示す。ただし、図中のグラフの縦軸は、基準冷媒である R410A の結果を 100% として無次元化したものを示す。

圧縮機を定格回転数で運転した場合において R410A と比較すると、R32 をドロップインした場合には COP が 3% 増加し、冷房能力は 8% 増加した。R466A をドロップインした場合には COP が 2% 低下し、冷房能力は 0.5% 増加した。R454C をドロップインした場合には COP が 17% 増加し、冷房能力は 36% 低下した。

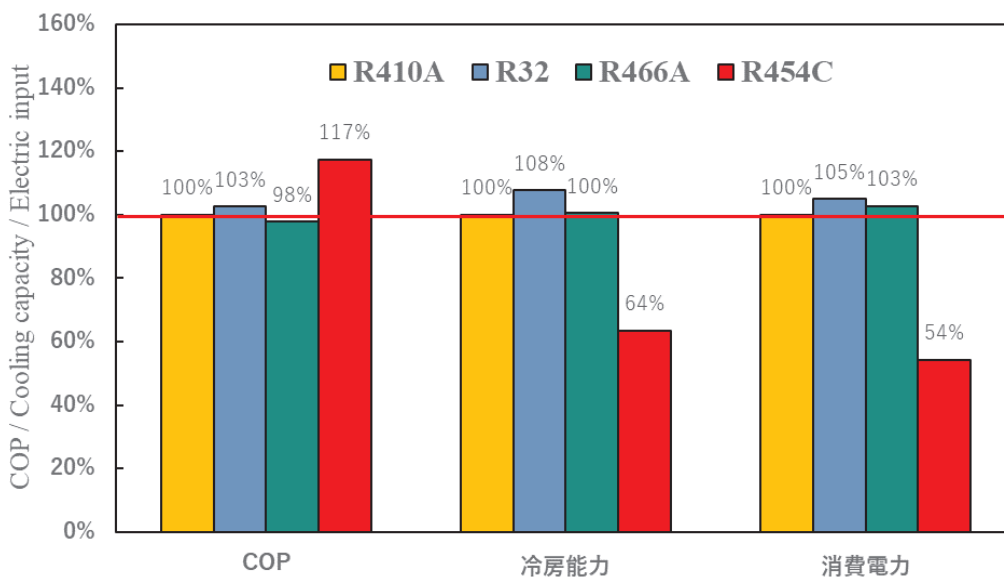


図 1-1-7.4 圧縮機定格回転数における性能の比較

次に、圧縮機を定格回転数で運転した場合、冷媒物性や運転条件が冷房能力にどのような影響を与えているか考察する。冷房能力は、蒸発器入口出口における比エンタルピー差と圧縮機吸い込み密度の二つの物性から決定され、これらの積が大きいほど冷房能力も大きいことがわかる。冷媒ごとの、冷房能力を支配する物性を図 1-1-7.5(a)に示す。グラフの縦軸は、基準冷媒である R410A の物性を 100%として無次元化したものを示す。

R454C は冷房能力が著しく低下している。低下要因の一つとして、圧縮機吸い込み密度が低いことが挙げられる。これにより、冷媒循環量が不足し、冷房能力が低下した。R454C の COP は基準冷媒より 17%高いが、これは冷房能力が低いため、相対的に冷房能力あたりの熱交換器の体格が大きくなり、十分に熱交換が行え、蒸発温度と凝縮温度が近づいたためであると考えられる。

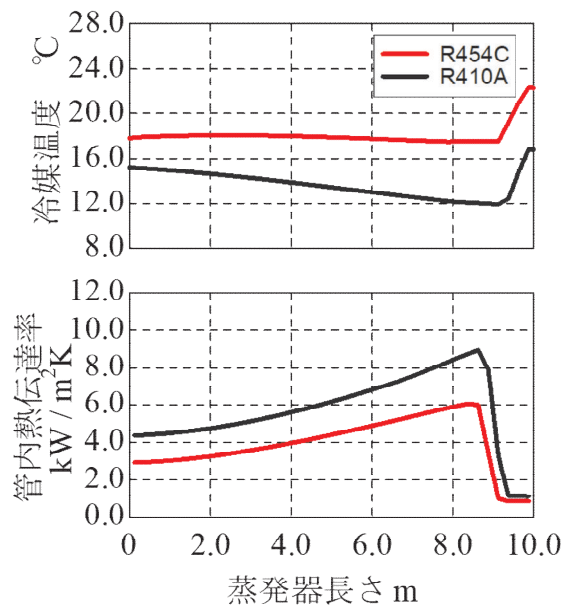
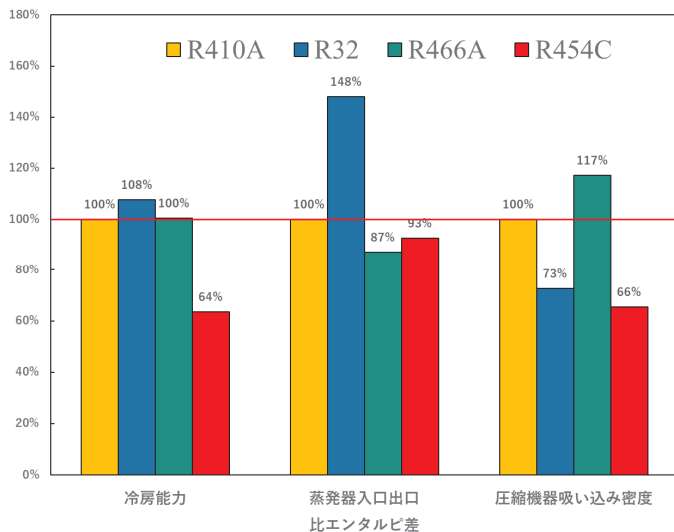
R32 は圧縮機吸い込み密度が低いにも関わらず、冷房能力は 8%高くなっている。これは、R32 の蒸発器入口出口における比エンタルピー差、すなわち蒸発潜熱が高くなっているためである。これにより、R32 は少ない循環量でも基準冷媒より大きい冷房能力を発揮できたと考えられる。R466A は圧縮機吸い込み密度が基準冷媒より高いが、潜熱は小さいため、冷房能力は基準冷媒とほぼ同等になった。

最後に、冷媒の温度グライドの冷房能力に与える影響について考察する。冷房能力は、蒸発器における熱コンダクタンスと温度差の積で与えられる。冷媒により冷媒側の熱伝達率は多少異なったとしても、伝熱性能は空気側が支配的であるため、熱コンダクタンスはほぼ同程度であることがわかる。

そこで、冷媒と空気の温度差に着目する。低 GWP 冷媒の候補の中で最も温度グライドの大きい R454C と、基準冷媒である R410A の蒸発器における温度分布を比較することで、温度グライドを持つことが能力にどのような影響を与えるかを考察する。両者の冷媒の蒸発器における温度分布・熱伝達率の分布を図 1-1-7.5(b)に示す。

R410A の温度分布に着目すると、二相域において蒸発温度が低下していることがわかる。これは圧力損失に伴い、蒸発温度が低下するためである。R410A は非共沸冷媒であるため温度グライドを持つが、極僅かである。これに対し、大きな温度グライドを持つ R454C は、圧力損失による蒸発温度低下と、温度グライドによる蒸発温度増加の両方が同時に発生している。これにより、R454C と R410A を比較すると、R454C の方が空気（熱交換器入口温度 27°C）との温度差が小さいことがわかり、これが冷房能力の低下を招いたといえる。このように、温度グライドを持つことが、R454C の冷房能力が低下した 2 つ目の要因であるといえる。

以上のようにシミュレーションによって各種次世代冷媒のシステム解析も実施が可能となってきている。



(a) 冷房能力，比エンタルピー差，圧縮機吸い込み密度

(b) 蒸発器温度分布，伝熱性能

図 1-1-7.5 冷房能力を支配する冷媒物性，伝熱特性

## 冷媒充填量評価(ボイド率評価装置)

### 〈全体装置〉

次世代冷媒は、可燃性を有することが圧倒的に多くなることが予想されている。このため、できる限り冷媒充填量を削減することが求められている。しかし、日本冷凍空調工業会の冷媒評価WGでも議論されてきたが、各社とも冷媒充填量を予測するための解析技術を構築しているが、大きく予測がずれていることが指摘されている。このため、現状の評価方法、解析方法では、冷媒充填量の予測は不可能であるとの認識に立ち、上記に述べたように数理モデルの再検討を始めるとともに、実験的にも流動状態を可視化しながら冷媒の充填量を評価できる装置を新たに開発した。

その特徴は、冷媒充填量を測定するために必要不可欠なボイド率の測定方法として静電容量式ボイド率系を用いて測定する手法を活用することにより、冷媒充填量の予測モデルの妥当性の検証を進めることにある。図1-2-1.1に構築した評価装置、図1-2-1.2には、評価装置のフローを示している。

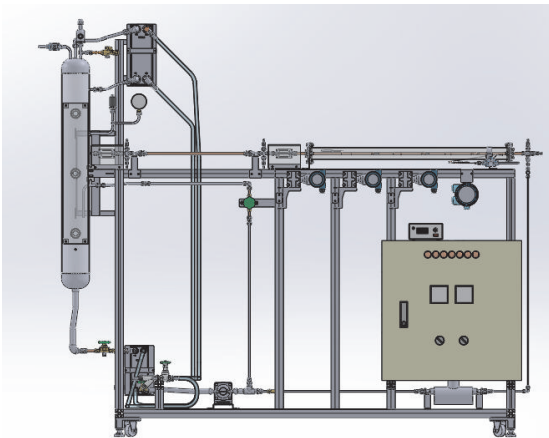


図 1-2-1.1 冷媒充填量評価装置

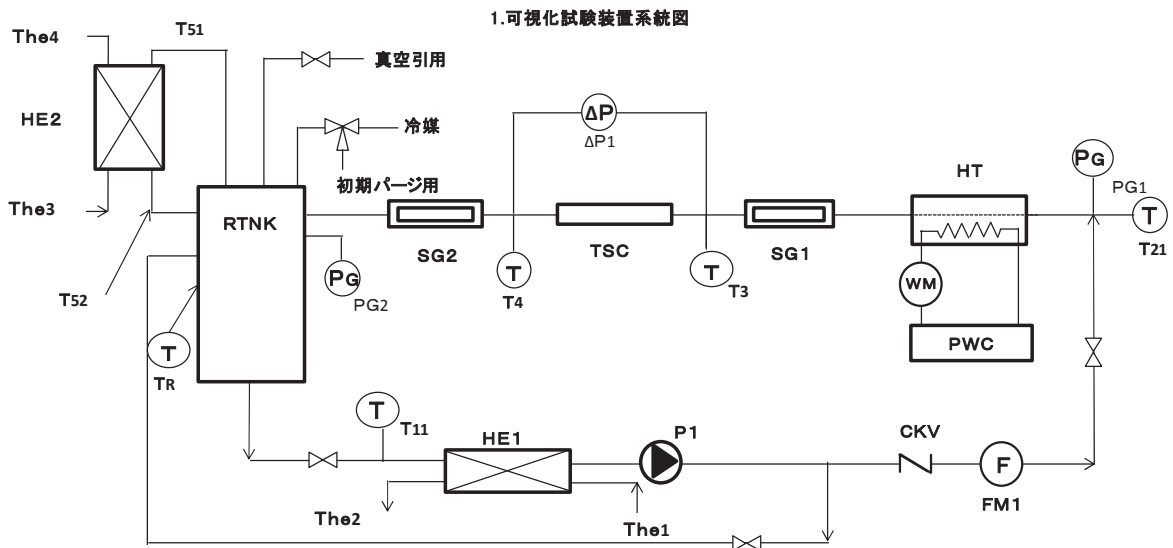


図 1-2-1.2 冷媒充填量評価装置フロー

(参考文献)

[1] Yuki Sakamoto, Tetsuya Sato, and Hiroaki Kobayashi. Development study of a capacitance void fraction sensor using asymmetrical electrode plates. Journal of Fluid Science and Technology, 11(2):JFST0008-JFST0008, 2016.

[2] Yuki Sakamoto, Hiroaki Kobayashi, Yoshihiro Naruo, Yuichiro, Takesaki, Yo Nakajima, Atsuhiko Furuichi, Hiroki Tsujimura, Koki Kabayama, and Tetsuya Sato. Investigation of the void fraction-quality correlations for two-phase hydrogen flow based on the capacitive void fraction measurement. International Journal of Hydrogen Energy, 44(33):18483-18495, 2019.

[3] Richard C., Cavestri, Ph.D., “Compatibility of Refrigerant and Lubricants with Engineering Plastics” 1993.

[1-3]モデルの妥当性検証

[1-3-1]熱交換器

熱交換器モデルとシステムの定常、非定常解析の妥当性の検証は、[2-2]で開発されるハイブリッド実運転性能評価装置を用いて極めて高精度に取得されたデータを用いて実施される。本年度は、そのデータ取得までが予定されているが、ハイブリッド実運転性能評価装置の開発は、加速しながら進めてきたため、当初計画の通り9月に完成予定である。

[1-3-2]膨張弁

<概要>

ヒートポンプに用いられている膨張弁は、そのシステムの制御において重要なデバイスである。膨張弁の数理モデル、つまり流量、圧力、弁開度の関係を表す関係式としては、これまでに様々なものが提案されてきた。しかし、システム制御の観点から考えると、これらは実際のシステムの複雑で多様な運転条件を十分に考慮できていないのが現状である。

例えば、システム起動・停止時や低負荷での断続運転時において、膨張弁前後の圧力の急激な変化や、膨張弁入口状態の二相域への急激な遷移など状況を十分に再現できておらず、システムの最適制御検討において大きな障害となっていた。

本研究では、システムの詳細な制御検討に利用するのに十分な精度をもち、かつ大規模なシステムの計算にも適用可能な簡便さを持った、膨張弁の数理モデルを構築することが目的である。

研究の構成としては、下図のように、実験、理論検討、CFD解析を行い、これらによって得られた知見を融合して新たな数理モデルを構築する。

<b>実験</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可視化可能な単純な構造の弁を対象に、膨張過程を可視化する。</li> <li>・実際の電子膨張弁で、実制御を十分に考慮した条件範囲でのデータの取得。</li> <li>・CFDおよび理論検討の妥当性検証。</li> </ul>
<b>理論検討</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最終的に構築する数理モデルの式の形を決定する。</li> <li>・現象の物理的説明。</li> </ul>
<b>CFD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実験では可視化できない情報を顕在化させ、モデル構築への知見を得る。</li> <li>・実験ではできなかったより広範囲な条件でのデータを取得する。</li> </ul>



<b>実制御を十分に考慮した広範囲な条件に適用可能な簡便な膨張弁数理モデルの構築</b>
<b>システムシミュレーションへの実装と制御検討</b>



### <実験>

本報告においては、実際の膨張弁を対象に行った特性評価実験について説明する。図 1-3-2.1, 1-3-2.2 に本実験で用いた電子膨張弁の断面写真を示す。また、実験装置のフロー図と写真を図 1-3-2.3 に示す。

本実験装置はヒートポンプサイクルによって構成されており、膨張弁前後にはさまざまな条件で実験ができるような工夫が加えられている。具体的には、膨張弁入口過冷却度を任意に設定できるようにサブクーラーを設けてあり、また、膨張弁出口圧力を任意に設定できるように、膨張弁下流にもう一つ調節用膨張弁が設けられている。さらに膨張弁の出口に可視化部を設け、その内部の流動を観察できるようにした。用いた冷媒は R410A である。

また、表 1-3-2.1 に実験条件を、図 1-3-2.6 に実験条件である冷媒の入口出口状態を P-h 線図上に示す。今回の実験においては、膨張弁入口圧力、膨張弁出口圧力、膨張弁入口過冷却度をパラメータとし、流量、流量係数との関係を明らかにした。

ここで、流量係数は次式における  $C_d$  として定義される。この式はベルルーイの定理より導かれる流量と差圧の関係を表しており、従来のシステムシミュレーションなどでは、流量係数  $C_d$  を定数として膨張弁の簡単なモデルとして用いられことが多かった。しかし、上述のように、実際のヒートポンプの複雑な運転においてはこの式が適用できないような条件があることが知られている。本報告ではこの式より得られる流量係数  $C_d$  を様々な条件で明らかにする。

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)} \quad (1-3-2.1)$$

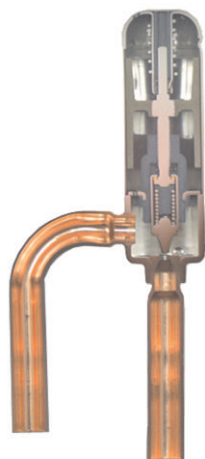


図 1-3-2.1 電子膨張弁の内部構造

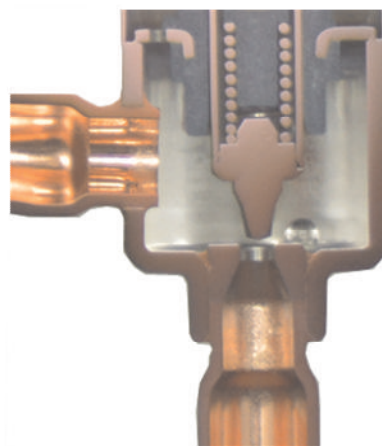


図 1-3-2.2 電子膨張弁の拡大写真

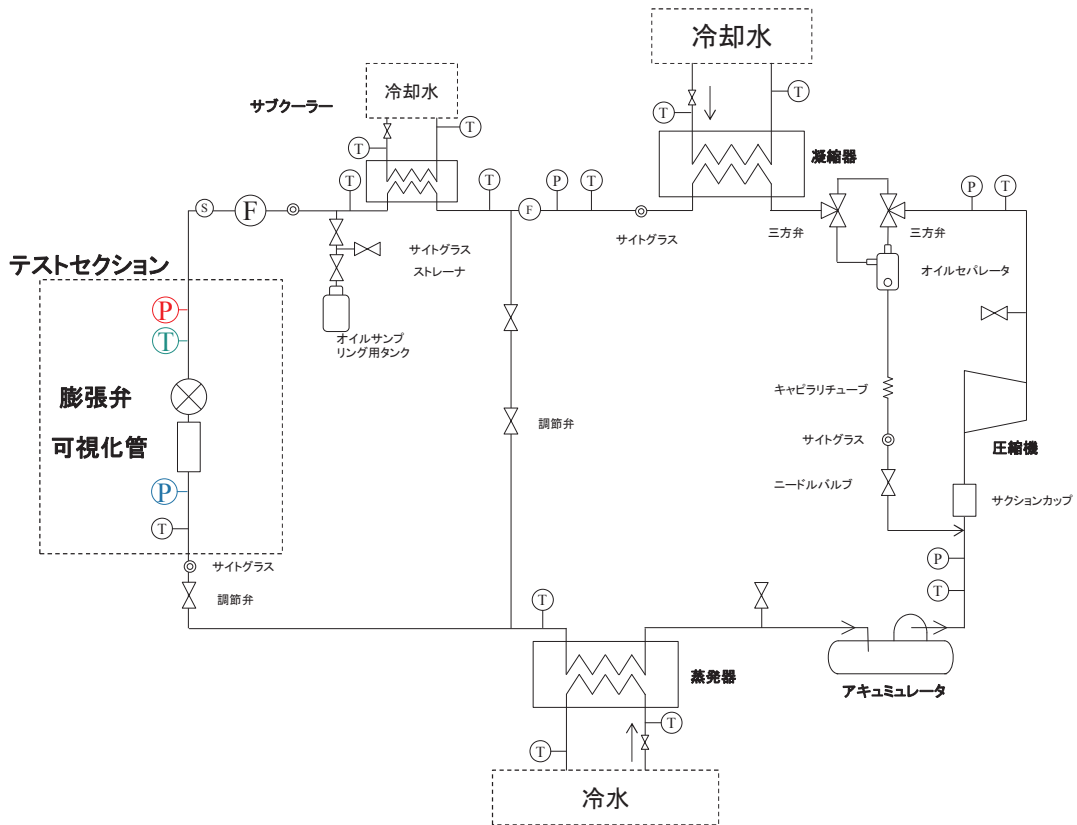


図 1-3-2.3 膨張弁の制御特性評価実験のための実験装置のフロー図



図-3-2.4 実験装置の写真



図 1-3-2.5 膨張弁及び可視化部

表 1-3-2. 1 実験条件

	Reference	Range
Inlet pressure, MPa (Saturation temperature, deg. C)	3.0 (49)	2.0 - 3.3 (32 - 53)
Outlet pressure, MPa (Saturation temperature, deg. C)	1.5 (21)	1.1 - 2.7 (10 - 44)



Inlet subcool, K	10, 15	0 - 15
Valve opening, % (Minimum area, mm <sup>2</sup> )	14 (0.58)	14 (0.58)

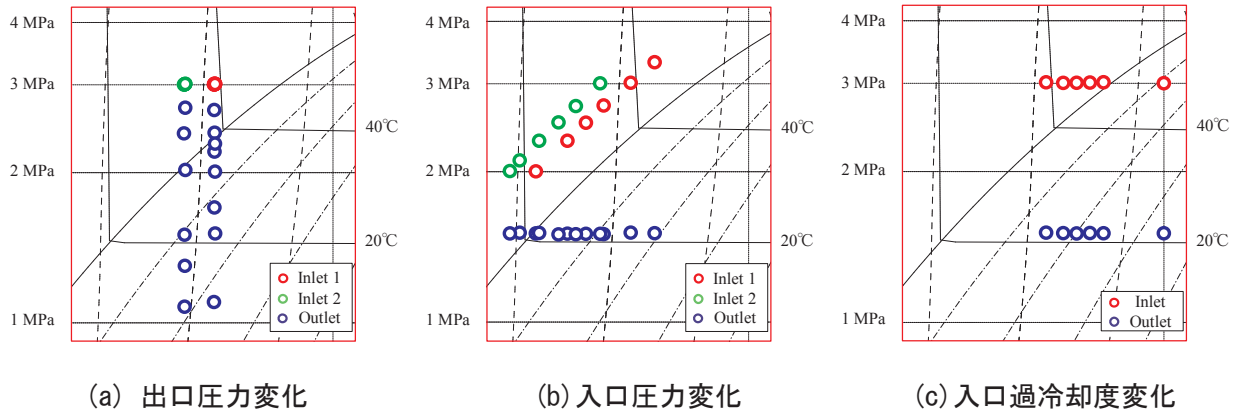


図 1-3-2.6 P-h 線図上での実験条件（膨張弁入口出口状態）

### <結果>

まず、対象とした膨張弁の固有特性として、入口圧力 3Mpa、出口圧力 1.5Mpa としたときの弁開度に対する流量の関係を明らかにした。図 1-3-2.7 に固有特性を示す。これよりこの膨張弁は弁開度 10%以上において概ね線形的な固有特性を持つことが分かった。

図 1-3-2.8 に、出口圧力が流量及び流量係数  $C_d$  に与える影響を示す。表 1-3-2.1、図 1-3-2.6(a) のように、入口圧力 ( $P_{in}=3\text{Mpa}$ ) と弁開度 (14%) は固定している。また、入口過冷却度は 10K の場合と 15K の場合を併記している。結果より、出口圧力が低くなると流量は緩やかに増加していくことが分かる。また、出口圧力が低下していくと、流量係数  $C_d$  は低下していくが、 $C_d=0.4$  付近に漸近していくように見える。これは圧力差がある程度の大きさになると  $C_d$  を定数とみなせることを示唆している。

次に、図 1-3-2.9 に入口圧力が流量及び流量係数  $C_d$  に与える影響を示す。入口圧力を変化させる場合には、実験条件の図 1-3-2.6(b) に示すように、入口の過冷却度が一定 (10K, 15K) となるようにした。閥下より、入口圧力が低くなると流量は減少していくことが分かる。また、流量係数  $C_d$  は入口圧力が高いほど低くなる傾向があるが、ある程度入口圧力が高くなると  $C_d=0.4$  近傍に収束していくことが分かる。これは、上述の出口圧力を変化させた場合と同様の傾向であり、このことから本実験で対象とした電子膨張弁では、入口出口圧力差が大きい場合、 $C_d=0.4$  程度で一定の流量係数となると言える。

図 1-3-2.10 に入口過冷却度が流量及び流量係数  $C_d$  に与える影響を示す。実験条件の図 1-3-2.6(c) から分かる通り、入口過冷却度が変化した場合には、圧力が降下し飽和状態に達する点が異なると考えられる。しかし結果より、過冷却度が変化しても流量はあまり変化しないことが分かる。また、流量係数についても概ね一定であることが分かった。

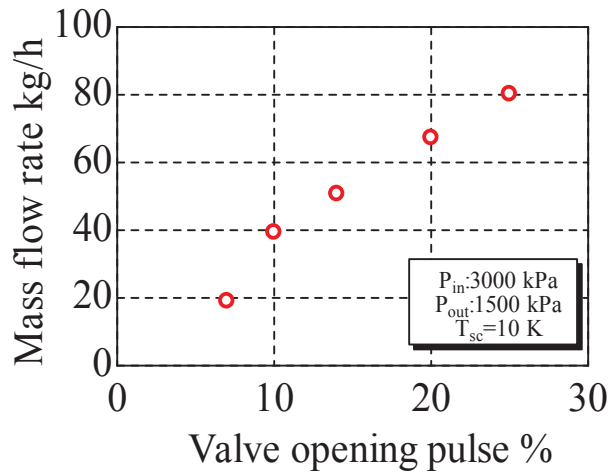


図 1-3-2.7 対象とした膨張弁の固有特性 ( $P_{in}=3\text{Mpa}$ ,  $P_{out}=1.5\text{Mpa}$ )

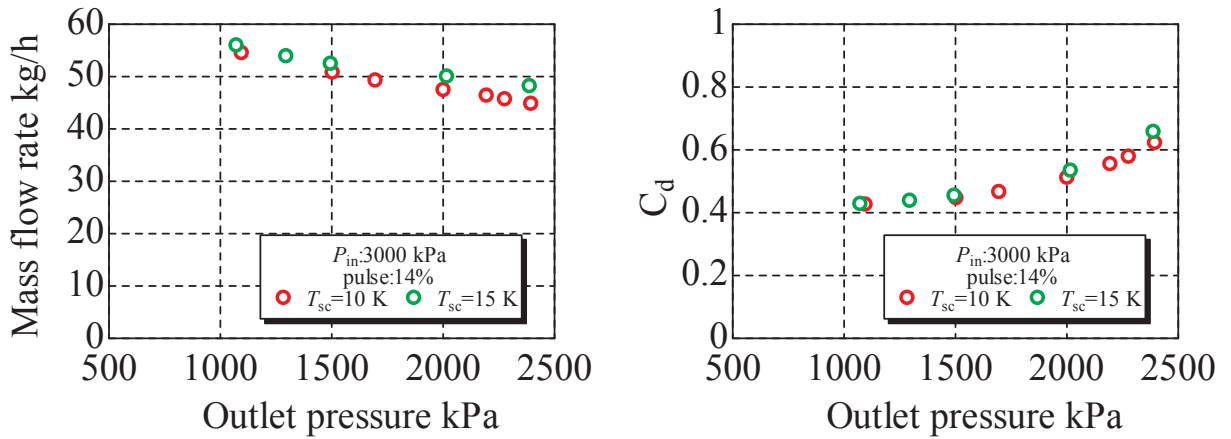


図 1-3-2.8 出口圧力が流量と流量係数に与える影響

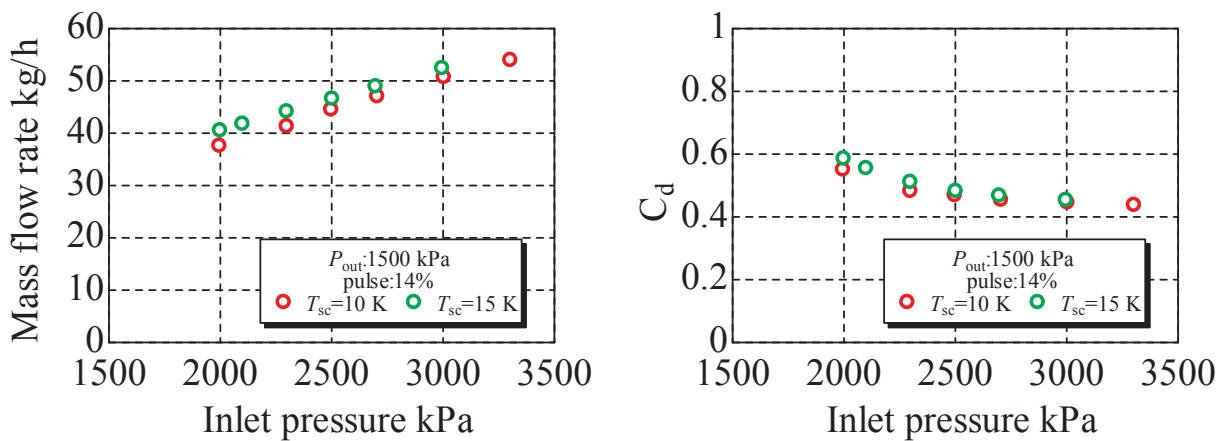


図 1-3-2.9 入口圧力が流量と流量係数に与える影響

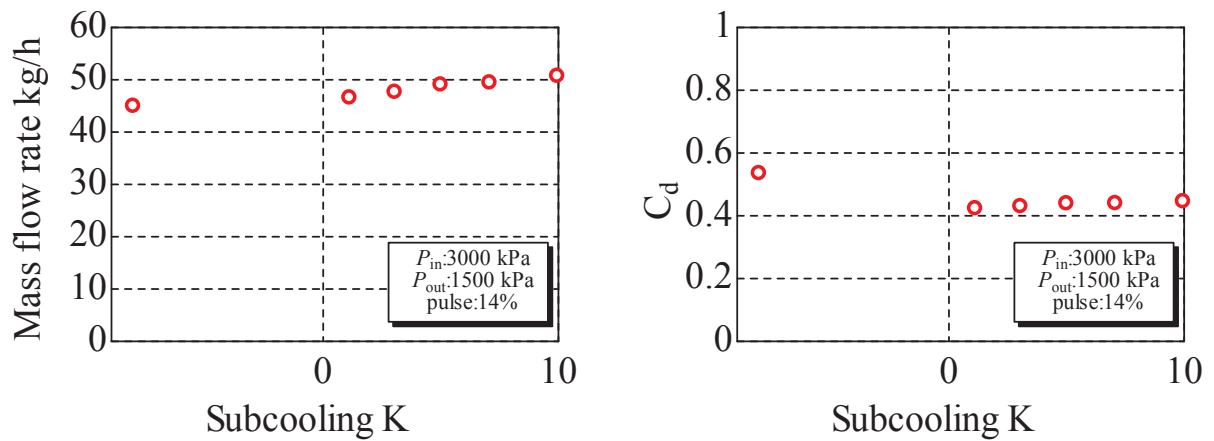


図 1-3-2.10 入口過冷却度が流量と流量係数に与える影響

[1-3-3] 圧縮機

圧縮機試験については、このプロジェクトでは、特に計画していなかったが、実験を行うことの必要性を感じた。そこで、以下で示すように膨張弁と同様の試験装置を用いて、試験を行う予定である。

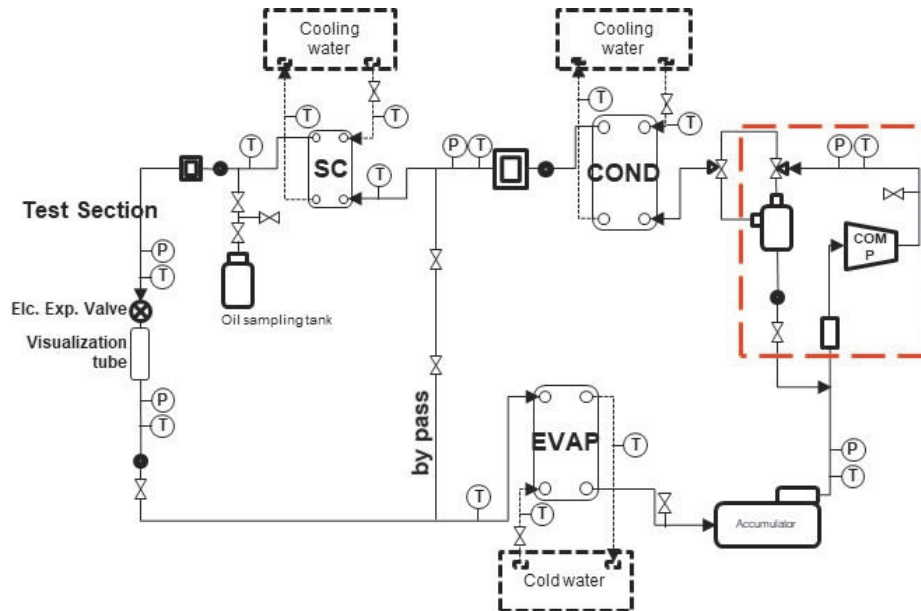


図 1-3-3.1 圧縮機試験装置 (膨張弁試験装置と同様のもの)

## 【2】性能評価技術開発

### [2-1] 数理的性能評価手法開発

#### [2-1-1] 熱交換器性能評価基準

熱交換器の冷媒分配方法を一般化することには、非常に困難を伴う。例えば、図 2-1-1.1 に示すようにたった 4 本の熱交換器でも流路の方向と流動の有無を考えていくと冷媒の流路は、729 通りにもなってしまう。このため、この流路の取り方をマトリックスとして一般化するとともにそもそも物理的に不可能な流路を排除するための一般化手法を確立してきた。また、二相流でもその解析は可能となることが分かった。

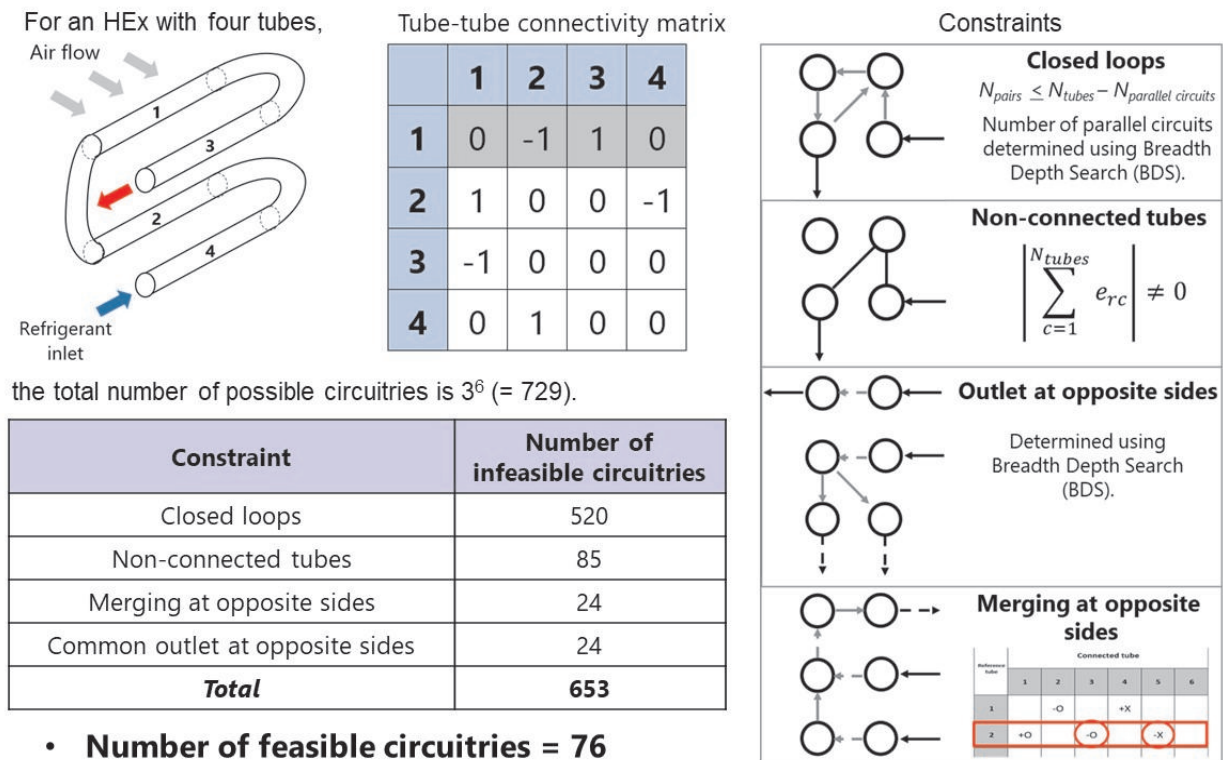
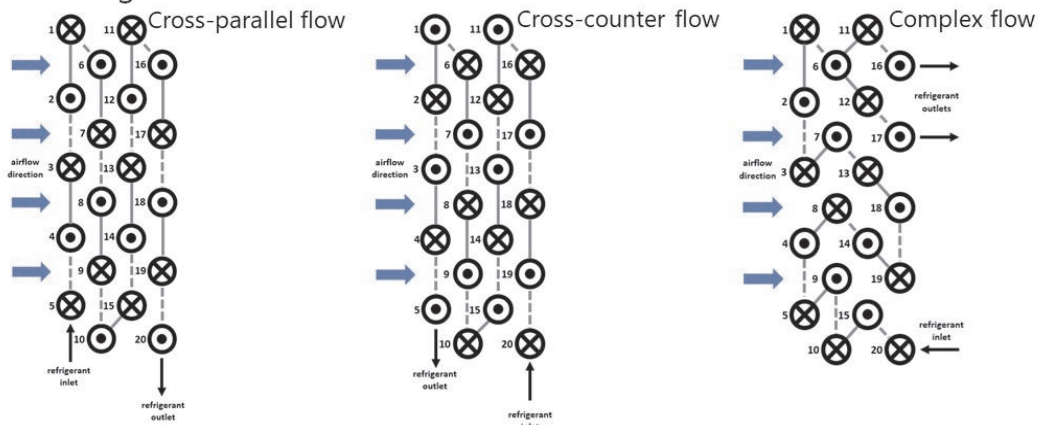


図 2-1-1.1 分配方法の一般化

図 2-1-1.2 は二相流で流動経路が相当複雑な場合も含めて様々な流動状態で熱交換器の計算が実施できている様子が示されている。これが冷媒流路の最適化計算には必要不可欠である。

#### • Heat Exchanger Circuitries



		Kandlikar	Gungor-Winterton	Liu-Winterton	Shah
$\dot{Q}/DP$ (kW/kPa)	Parallel	0.8672	0.8753	0.8786	0.8269
	Counter	0.9105	0.9244	0.9267	0.8653
	Complex	1.0559	1.0827	1.0853	1.0092

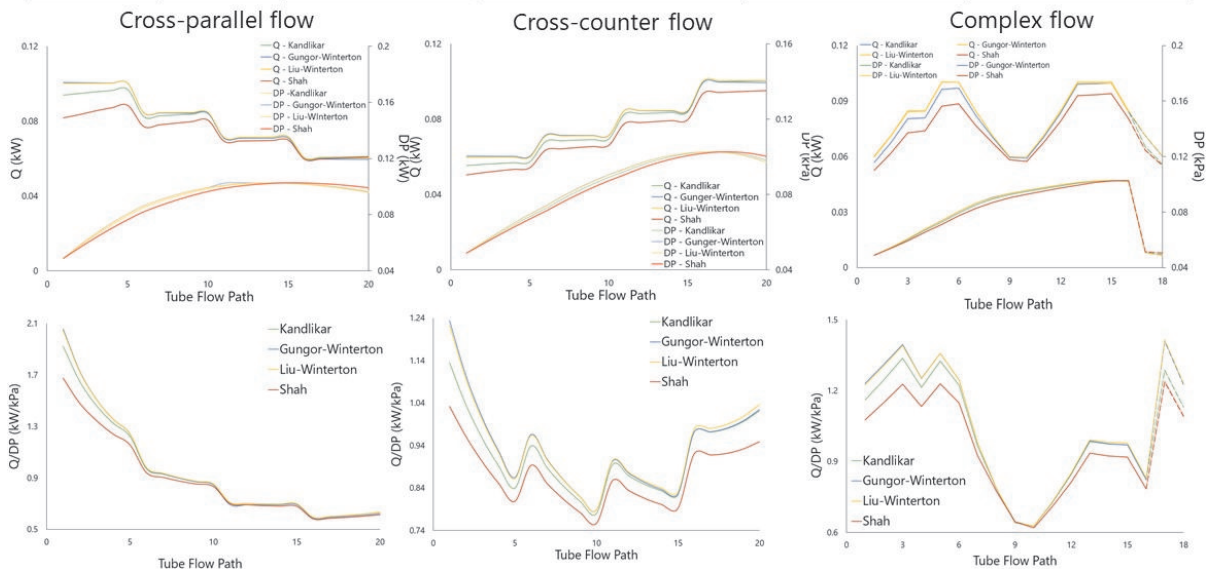


図 2-1-1.2 多様なフローパターンの数値解析

## [2-2] 性能評価装置開発

### [2-2-1] 新装置の概要, オリジナリティー等, 位置づけ

冷凍空調機器の評価手法に関しては、定格の COP をベースとした評価手法から、期間性能評価手法へと進化が遂げられてきた。これにより、単なる定格性能から年間性能へと性能評価が可能となり、より実際の運転に近い性能が評価されるようになったわけである。一方で、この期間性能評価手法も現実的には、圧縮機の回転数を固定して測定した数点の運転データから年間の性能を予測しているに過ぎない。これはすなわち、機器がインバーターで高効率に制御されるようになったにもかかわらず、その制御性能は、評価されていないことになる。このため、ここ数年、ヨーロッパを中心にユーザーサイドから性能評価の見直しが強く求められており、圧縮機の回転数を固定することなく、機器が自らの制御で自動運転される状況下での性能を測定することが求められている。このような評価は、従来とは根本的に異なるものであり、機器の本質的な性能が評価されることになる。

性能評価が大きく変わろうとする中でも当然冷媒の低 GWP 化は待たなしの状況であり、次世代低 GWP 冷媒が次々と提案されてきている。その多くは、HF0 系冷媒を中心としたものであり、HF0 系の純冷媒では、可燃性が大きくなったり、R32 冷媒をはじめとする従来の純冷媒の性能が得られなかったりするため、混合冷媒を用いることが主流となりつつある。混合冷媒の可燃性や熱力学的性質については、研究が進みかなりのところまで明らかになりつつありつつある。一方、混合冷媒を用いた場合に機器の実運転性能については、ドロップインによる比較検討が進められているが、多様な条件での運転がなされるインバーター機器が普及した中で本質的な性能は明確になっていないのが現状である。

例えば、混合冷媒が非共沸であれば、熱交換器では、温度グラインドが生じるため、熱交換器の最適形状が大きく異なることとなるがどのように設計すべきかについては、不明なままである。また、空調機器では、近年低負荷運転化が進んでいるが、その際に発生する断続運転では、低沸点媒体が優先的に蒸発し、結果として蒸発器の過度な低圧化をもたらす、大幅な性能低下をもたらすことやスロリークや冷媒の不適切な充填によって混合冷媒の組成が変化した場合に大きな性能低下が発生する等様々な課題についても指摘されている。

従来のような圧縮機を固定した数点の運転データからの簡易な期間性能予測法の中では明らかとはならなかった様々な課題が、ダイナミックテストを通じた多様な運転条件での性能評価によって多くの課題が表面化する可能性を十分に秘めており、いち早く評価手法の確立が求められる。このような新たな評価手法の確立には、NEDO プロジェクトを通じて公的機関である早稲田大学が実施することは極めて有効なこととなる。



[2-2-2]新たに製作するハイブリッド実運転性能評価装置概要

空調機器の性能は、次のように与えられた温湿度条件に空調負荷量を熱平衡させ機器の交換熱量を測定する平衡式室形熱量法や供試機に供給された空気の状態を測定することにより機器による交換熱量を測定する空気エンタルピー法が用いられている。このような試験装置は、基本的には、圧縮機の回転数を固定してJIS規格に基づいた非常に高精度機器の性能を図ることを目的としている。

機器はインバーターとなり、自身の制御機能によって空調負荷の変化に対しても圧縮機の回転数をうまく制御しながら運転されるにもかかわらず、JISでは、そのような制御性は考慮されることなく機器の年間性能が評価されてきた。これが、実運転性能とカタログ性能の乖離を発生させていることが徐々に浮き彫りになりつつある。

一方で、エアコンの実運転性能を測定しようとする試みもなされている。この場合には、全天候型環境試験室で計測がなされることが多い。これは、ちょうど建物を二重にして、建物の外部の環境をも制御することによって室内の空気の状態を再現するものである。これにより、外気条件までコントロールしながら、室内環境を作ることができるため、同一装置であれば、再現性のある機器の実運転性能を計測することができるため、究極の評価装置とも言える。

これに対して、早稲田大学が提案するハイブリッド実運転性能評価装置は、図2-2-2.1(1)のフロー図に示すように供試機へ供給する空気の条件を条件発生器で生成して供給することにより、機器の性能を測定する。この際、供試機からの吹き出し空気の状態を計測し、その情報からコンピューターで仮想的に室内条件を計算する。この空気を条件発生器で生成し、供試機に供給することを継続する。このようにすれば、低価格で機器の実運転非常定性能を測定することが可能となる。「ハイブリッド」とは、実運転性能とコンピューターによる空調負荷の仮想的計算を同時利用する意味で他の評価装置を区別するために付けたものである。図2-2-2.1(2)が基礎実験用に開発した小型のダクト型原型機の外観を示す。

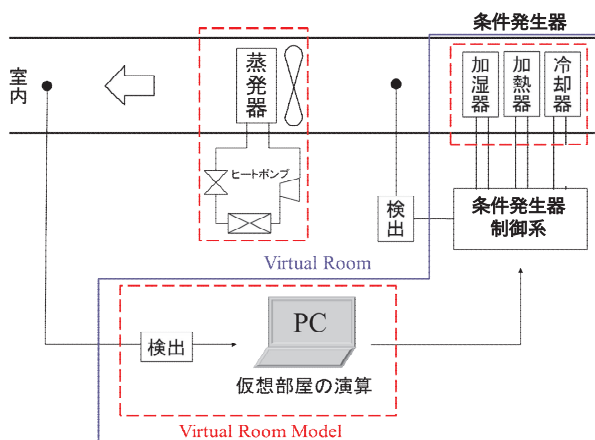


図2-2-2.1(1) 評価装置の概念図



図2-2-2.1(2) ダクト原型機の外観



[2-2-3] 評価装置設計の経緯

1) 2018 年度当初計画

2018 年度申請当初の実施計画では、2019 年度から検討を始めることとしていたが、早稲田大学において新たな建物（120 号館）の建設が計画されたことから、ここへの設置の可能性を検討するために、予定よりも先行して、2018 年度から装置の大きさやレイアウト、概算費用等の基本的な検討を進めた。

原型機とは異なり、ルームエアコンクラス（空調能力 1 馬力程度）の実機の測定を可能とするために、新たな建物である 120 号館の実験室の大きさに合わせた設計検討を行った。検討は、室外機室と室内機室を上下 2 段積みにしたケースと室外機室と室内機室を並列配置したケースの 2 種類を行った。検討したそれぞれのケースの装置概念図を図 2-2-3.1 と図 2-2-3.2 に示す。検討の結果、測定部分の空間があまりにも小さすぎると空気の温湿度状態の変動が激しくなり、条件発生器による条件生成が極めて困難となることが判明し、120 号館への設置は断念した。すなわち、ハイブリッド実運転性能評価装置においては、室内機をダクトレベルにまで小さくすると安定的な空気の供給ができないことが判明したことが大きな成果となった。

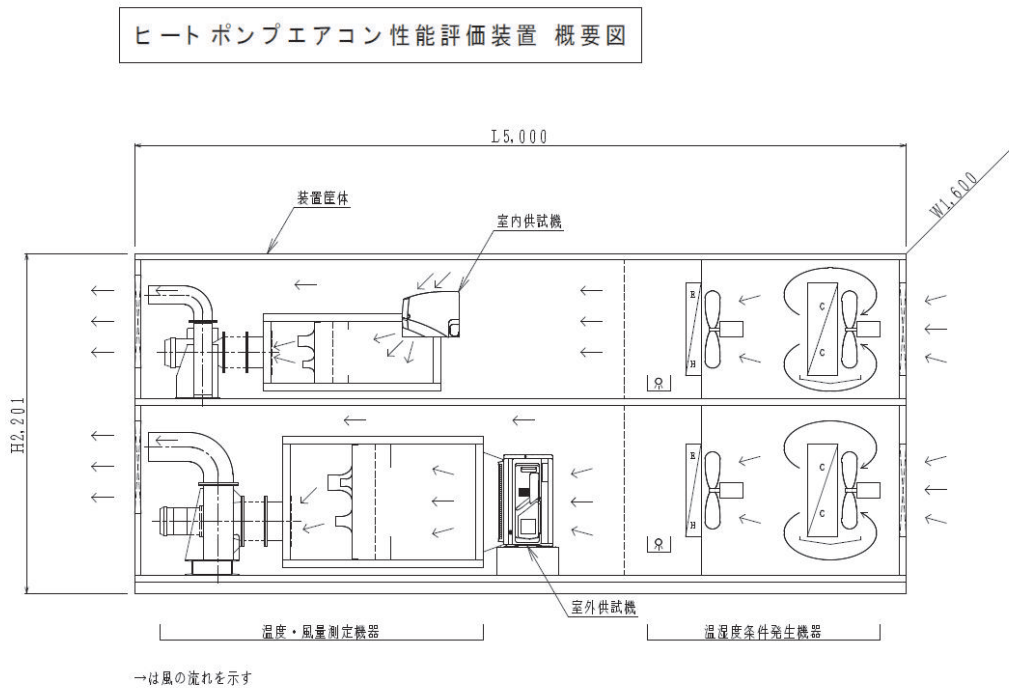


図 2-2-3.1 検討した評価装置の概要図（室外機室と室内機室を上下 2 段積みにしたケース）



<特長>

- ・実運転を模擬した試験ができる
- ・室内環境の影響を受けない再現性のあるデータが採れる
- ・温度変化だけでなく湿度変化も可能である
- ・防爆構造としており、可燃性冷媒の試験も可能である
- ・ショーケースの性能評価が可能のように横風を吹かせることができる

<仕様>

- ・防爆仕様（可燃性冷媒の試験可能）
- ・室内機側 横風風速 0.2m/s±0.1m/s（ショーケースのJIS試験可能）
- ・能力 5HP(14kW)相当まで計測可能
- ・外気温度 -7℃～46℃に対応
- ・空気エンタルピー法に基づく試験装置（ルームエアコン、パッケージエアコンのJIS試験可能）

性能評価装置の試験室数と特徴について表 2-2-3.1 に示す。また、図 2-2-3.3 に建物外観図、図 2-2-3.4 に 140m<sup>2</sup> を有する設置場所を示す。

表 2-2-3.1 性能評価装置の試験室数と特徴

室外機用 試験室数	室内機用 試験室数	室外機の 能力測定	特徴
1	1	有	・室内機と室外機が1対1の機器の試験が可能。 ・空調能力は5馬力(14kW)まで

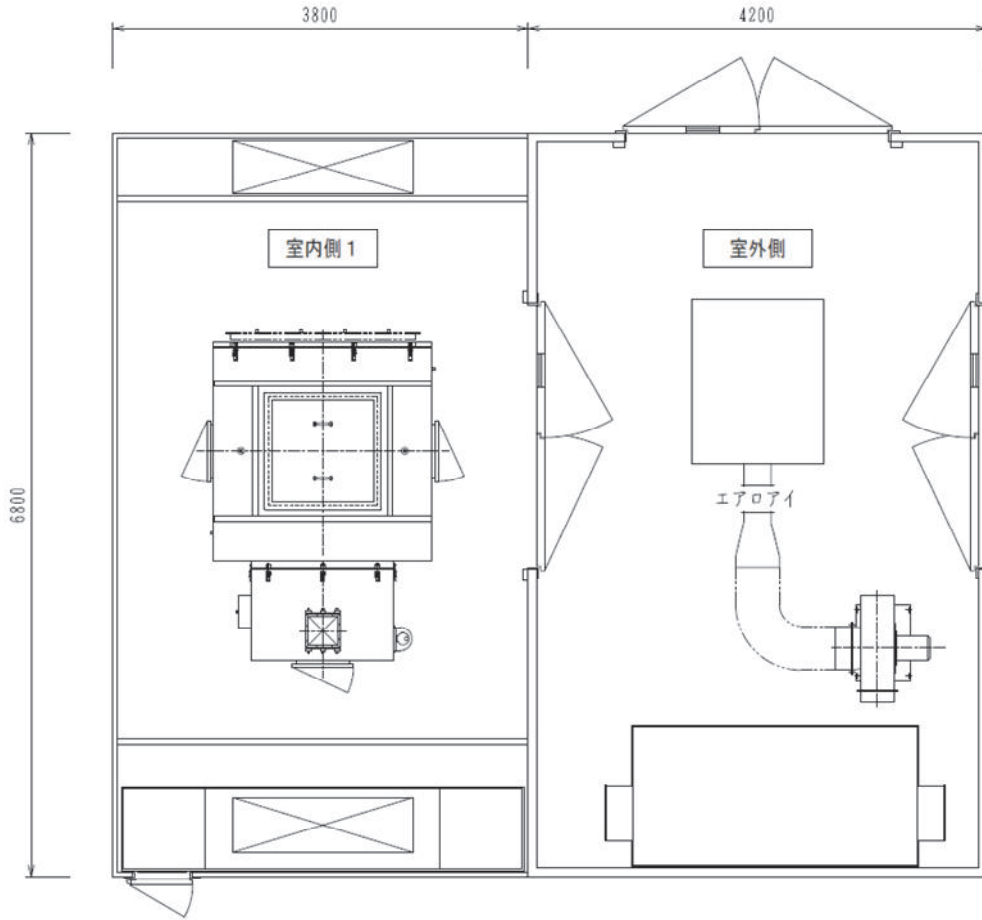


図 2-2-3.3 建物外観図

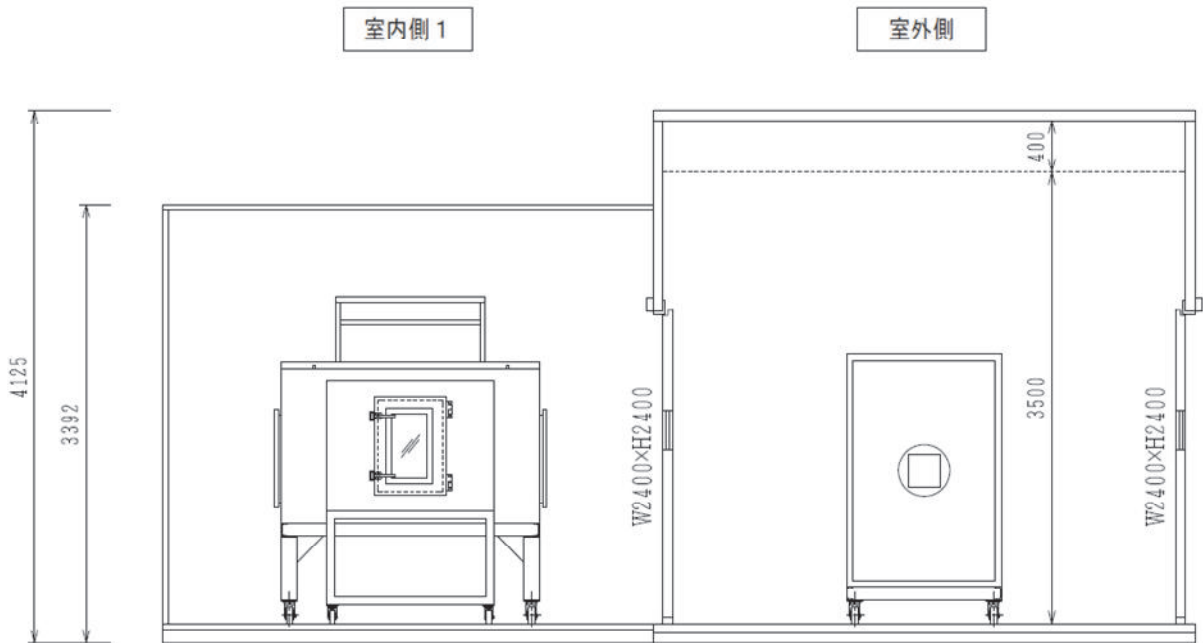


図 2-2-3.4 設置場所

開発するハイブリッド実運転性能評価装置について、図 2-2-3.5(1)に平面図、図 2-2-3.5(2)に側面図をそれぞれ示す。なお、将来、VRFにおける室内負荷バランスが崩れた場合の性能評価が可能となるよう、建物内には室内機側の試験室を1部屋増築できるスペースを確保している。



(1) 平面図



(2) 側面図

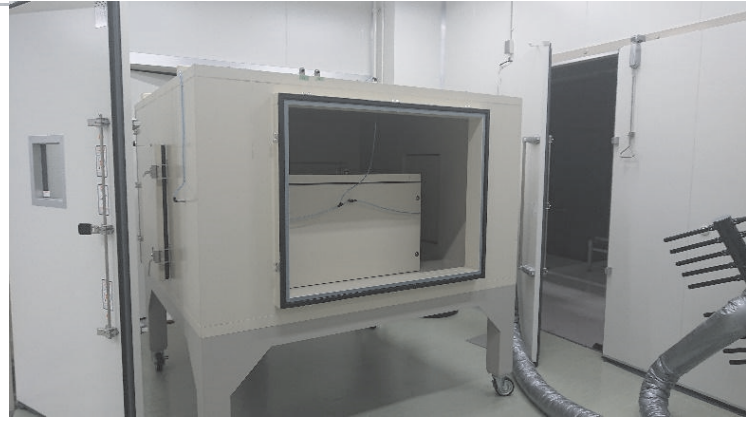
図 2-2-3.5 評価装置の図面

評価装置は 2020 年 9 月の完成予定を目指し、現在、建設工事中である。また、防爆構造とすることにより HC 冷媒を採用したショーケースも評価可能である。開発したハイブリッド実運転性能評価装置の外観を図 2-2-3.6 に示す。





(1) 室外機室外観



(2) 室内機受風室外観



(3) 動力盤外観



(4) 監視盤外観

図 2-2-3.6 開発した新評価装置外観

さらに、ISO などの国際規格に提案・反映できる基盤として、信頼性あるデータ取得が必須であることから装置完成後の 2020 年度には、評価装置自体の精度検証を第三者機関である日本空調冷凍研究所（以下、「日空研」と略す）に委託し、実施することとしている。これにより、装置は、日空研の試験設備と同等として運用する（サテライトラボ化）ことが実現する予定である。

<参考>

日空研は、1978 年に日本冷凍空調工業会の機器性能検定所として設立された。2011 年には、日本冷凍空調工業会から独立し、第三者機関として公平、公正な立場で機器の性能評価を続けており、対象機器は、家庭用空調機（ルームエアコン）から業務用空調機（パッケージエアコン）、ヒートポンプ給湯機にまで拡大している。

日空研では、最先端の試験設備を用いて世界最高レベルの精度で機器の性能を計測することが可能である。継続的な高精度計測を可能とするために、徹底した試験装置の保守点検や人材育成にも努めており、2004 年 10 月に前身の(社)日本冷凍空調工業会試験センターが、日本で唯一となる「ISO/IEC 17025」の認定を取得している。これにより、企業あるいは事業所の品質管理システムを認証する ISO/IEC 9001 シリーズの審査に加え、対象物の試験や試験結果も技術審査して取得できる。この認定により、日空研が提供するデータは、その認定範囲において国際的にその信頼性が保証され、日本国内のみならず世界各国間の相互認証を得ることができる。

### 【3-1】 シミュレーター開発とその活用

#### [3-1-1] 熱交換器シミュレーター

次世代冷媒になった場合に最も課題となるのが熱交換器である。非共沸混合冷媒となると熱交換器内で温度グライドが生じるため、熱交換器の構造の変更が必要となる。それにもかかわらず、それぞれの冷媒での性能比較が従来の純冷媒や共沸冷媒(疑似を含む)用に設計した熱交換器にドロップインして比較されているが、これでは、全く比較にならない。それにもかかわらずほとんどの場合の一次的な性能比較では、このようなドロップインで性能比較がなされてしまっていることは、大きな問題である。

そこで、次世代冷媒の性能がきちんと比較できる熱交換器シミュレーターを開発することとした。このシミュレーターの特徴は、ユーザーは図 3-1-1.1 に示すように GUI 上で熱交換器の接続条件を与えることによって容易に熱交換器全体のシミュレーションを実施することが可能となることである。また、AI を使って混合冷媒において温度グライドが生じた場合に特に重要となる熱交換器への冷媒の流動方法を最適化させることも可能となっている。

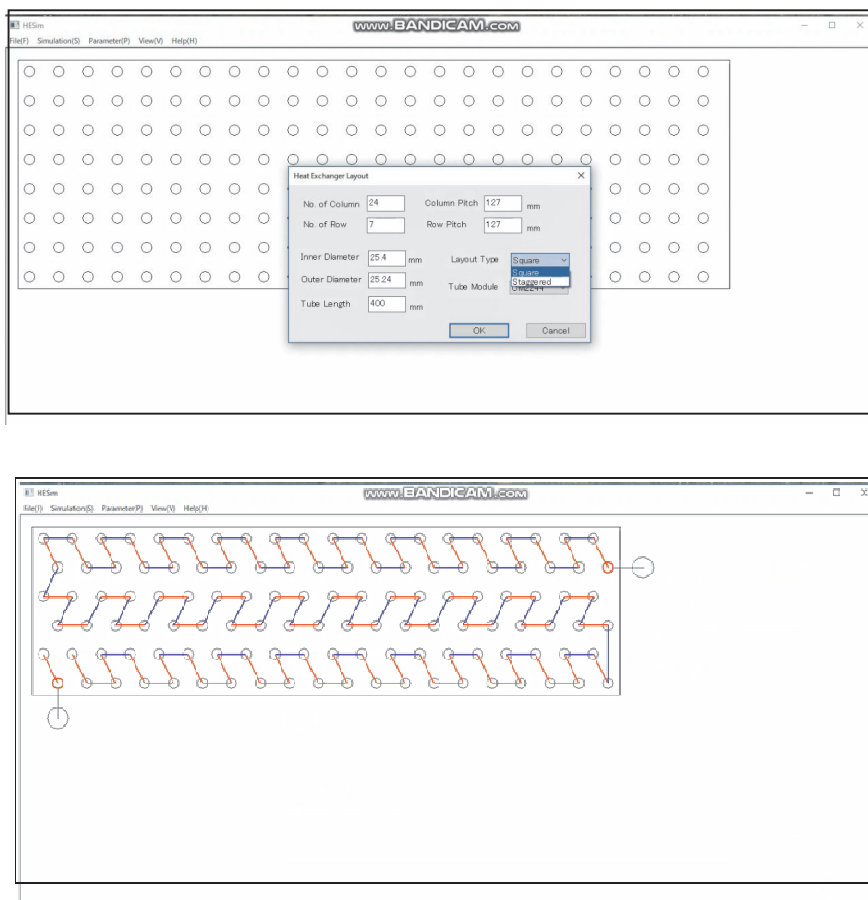


図 3-1-1.1 熱交換器シミュレーターGUI

#### [3-1-2] システムシミュレーター

今後多くの次世代冷媒が開発される中で、それがシステムとしてどのような性能を発揮するかを多様な冷媒について実験的にすべてを検証していくとは不可能である。このため、シミュレーション技術とともに分析を進めることが有効となる。これまで、早稲田大学のグループでは、Energy flow+M なる汎用エネルギーシステム解析シミュレーターを開発してきた。そして、日本冷凍空調工業会における標準コードと認定いただいて様々な冷媒の評価に活用されてきた。しかし、このコードの活用を進めていただいている日本冷凍空調工業会内に設置された冷媒評価ワーキングからシミュレーターの使い勝手が悪く GUI や計算手法に対して、多くの修正点が提示された。修正点の例としては次のとおりである。

- ・ 熱交換器部の GUI が複雑すぎ、伝熱管の接続方法を設定するだけでも莫大な時間を要してしまう。
- ・ VRF システムのようにシステムが複雑になると一気に計算が遅くなり、収束できなくなる事態も多



発する。

- ・ 制御計算の場合、定常計算であるにもかかわらず非定常計算を行わなければならない、多くの計算時間が必要となる。

また、このシミュレーターを使っている研究員や学生からも次の声が出ている。

- ・ エクセルをベースとしているため、これ以上モジュールを増やすのには限界がある。
- ・ コードがきちんと構造化されていないため、プログラム複雑に相互影響してしまっているため、モジュールを変更するたびにコード全体としての変数の再定義等が余儀なくされるため、研究員や学生には新しいモジュールの追加すらできない。
- ・ 次世代冷媒としての混合冷媒の解析時にローカルな混合冷媒の内部状態等をきちんと計算することができず、平均値を用いざるを得ない。

このようないち早く修正が迫られる致命的な課題を受けて、本事業で次の開発を進めているところである。なお、そもそもシステム解析論にも修正すべき課題があり、それについても同様にこのプロジェクトの中で進めている。これについては、システム解析論の確立ところで述べたとおりである。

- ・ 計算コア部では、システム解析部、モジュール解析部、収束計算部、冷媒物性部等が独立し、修正や追加が容易なコード
- ・ GUI 構造として、完全なるツリー構造とするとともに、熱交換器では新たな GUI を構築することによって、システムのフローの入力時間の大幅な短縮を図る。
- ・ 新しい収束計算法を取り入れ、高速化を図る。
- ・ 最新の REFPROP に基づいた冷媒物性情報を入力するとともに、冷媒をマップ化することにより、精度向上、高速化を図る。

これらについては、年内にはプロトタイプを完成し、当初の予定のとおり 2021 年に完成予定である。

#### <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	0	0	0
2019FY	0	0	0	4	3	0
2020FY	0	0	0	3	2	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 2.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

### 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】

#### <研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
可燃性冷媒の燃焼に係る安全性とリスク評価の研究 【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] 可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。	○
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。	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。	○
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		
<p>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。</p>	<p>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。</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 】

## 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】

### ①「可燃性冷媒の燃焼に係る安全性とリスク評価の研究」

#### 1-1) 家庭用ルームエアコンからの冷媒漏洩

##### 【数値流体解析の方法】

実験室モデルについての概要をF図 2.2.1.1-1 にまとめた。計算モデルは後述する冷媒漏洩実験のために建設した実験室と同等のサイズである。大きさは 3800 mm×2400 mm×2550 mm で、エアコンの対面に、φ100 mm の排気口とドア下隙間 900 mm×7 mm を設けた。メッシュは境界近傍が細くなるようにした。漏洩速度は、IEC 60335-2-40:2018 に基づき 4 min で全量室内に放出するようにしている。冷媒に関しては、通常の計算では R290 と R32 を対象とした。また、冷媒漏洩実験との比較の際には、R290 の代わりに R744 を用いた。これは、R290 の試験は着火の危険があるため、物性値の近い R744 で代替したからである。

壁掛け式室内機と床置き式室内機はどちらも吸い込み口と吹き出し口をもっている。境界条件として、吸い込み口では自由流出条件を与え、吹き出し口では一様流速条件を設定している。室内機内部は計算を行っていない。冷媒漏洩後に室内空気を攪拌するために室内機ファンを稼働させる。

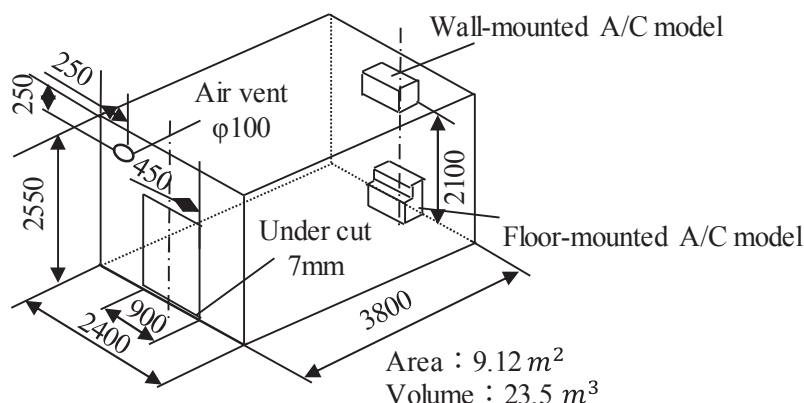


図 2.2.1.1-1 モデルルーム

##### 【数値計算による可燃性冷媒の最大許容充填量の検討】

計算対象としては、壁掛け式エアコン及び床置き式エアコンとした。可燃性冷媒の最大充填量の規制値は、IEC 60335-2-40:2018 に規定されている式

$$m_{max} = 2.5 \times LFL^{(5/4)} \times A^{1/2} \times h_0 \quad (2.2.1.1-1)$$

冷媒漏洩時に空調機のファンを稼働させることを前提とする可燃性冷媒の最大許容充填量に関する式

$$m_{max} = F \times LFL \times A \times 2.2 \quad (2.2.1.1-2)$$

の評価を行った。

##### 【壁掛け式室内機からの漏洩】

シミュレーション結果から時々刻々変化する可燃ガス体積 $V_{FL}$ の算出を行った。冷媒充填量が少ないときには漏洩終了後(240 s)ただちに可燃ガス体積が消滅するが、充填量が増えると漏洩終了後も可燃ガス体積が存続する。その限界の冷媒充填量を最大許容充填量として床面積毎に求め、式(2.2.1.1-8)及び式(2.2.1.1-9)との比較を R290, R32 それぞれ行った結果を図 2.2.1.1-2 に示す。図中のシンボル○は、冷媒漏洩が終了するとすぐに可燃ガスが消滅する最大充填量である。このシンボル以上の量を漏洩すると、冷媒漏洩終了後も可燃ガスが残ることを意味する。図 2.2.1.1-2 から R290 も R32 も計算値が式(2.2.1.1-1)を上回り、式(2.2.1.1-1)は妥当な見積もりをしていることが分かった。式(2.2.1.1-2)について評価すると、R32 の場合はすべての広さで安全側に見積もる。しかし、R290 については、7.5 m<sup>2</sup> 以上の面積では危険な見積もりとなることが分かった。したがって、この時には室内機ファンによる攪拌が必須となる。



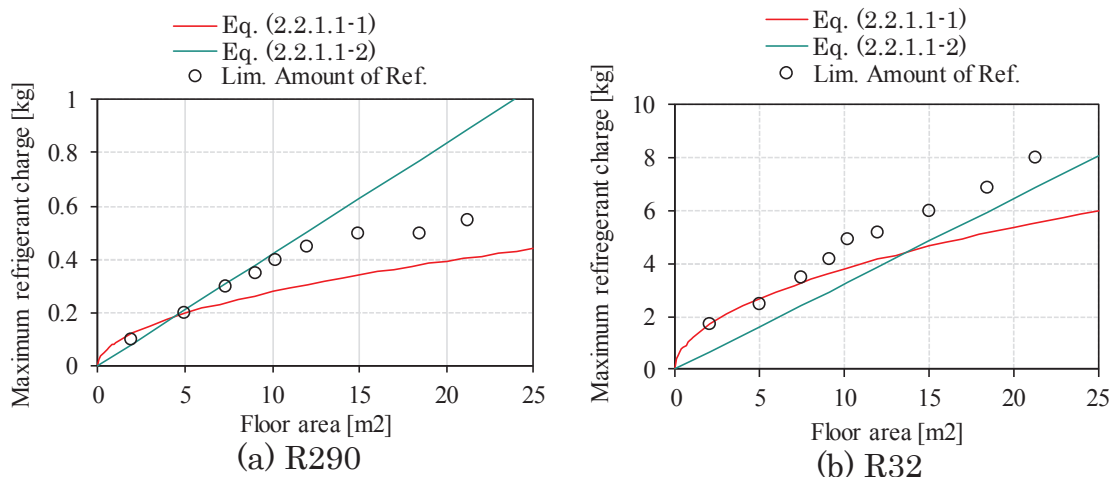


図 2.2.1.1-2 最大許容冷媒充填量の比較  
(壁掛け式ルームエアコン)

【床置き式室内機からの漏洩】

床置きエアコンについても、計算により最大許容充填量を床面積毎に求め、式(2.2.1.1-1)及び式(2.2.1.1-2)との比較を R290, R32 について行った結果を図 2.2.1.1-3 に示す。R290 について計算結果を式(2.2.1.1-1)と比較すると、式(2.2.1.1-1)はほぼ妥当な推定を与えている。R32 については、式(2.2.1.1-1)は全ての面積において計算値を下回るという結果となり安全が確認された。式(2.2.1.1-2)は、R290, R32 ともに計算値より大幅に上回っているものが多く、危険であることが分かった。

以上のことを踏まえ、R290 と R32 の各面積におけるファンによる可燃濃度域の攪拌の影響を計算により求めた。室内機ファンが稼働すると、可燃ガス体積は徐々に減少していくが、壁掛けエアコンのときとは異なり、減少に時間を要した。R290 に関しては 5 m<sup>2</sup> 及び 9.12 m<sup>2</sup> のとき、R32 に関しては 12 m<sup>2</sup> 以下のとき、可燃ガスはファンの攪拌により完全に消滅する。しかし、R290 が 15 m<sup>2</sup> 以上のとき、R32 が 21.28 m<sup>2</sup> のときには冷媒は冷媒漏洩終了後も可燃ガスは少し残ることあるが、その量は多くない。

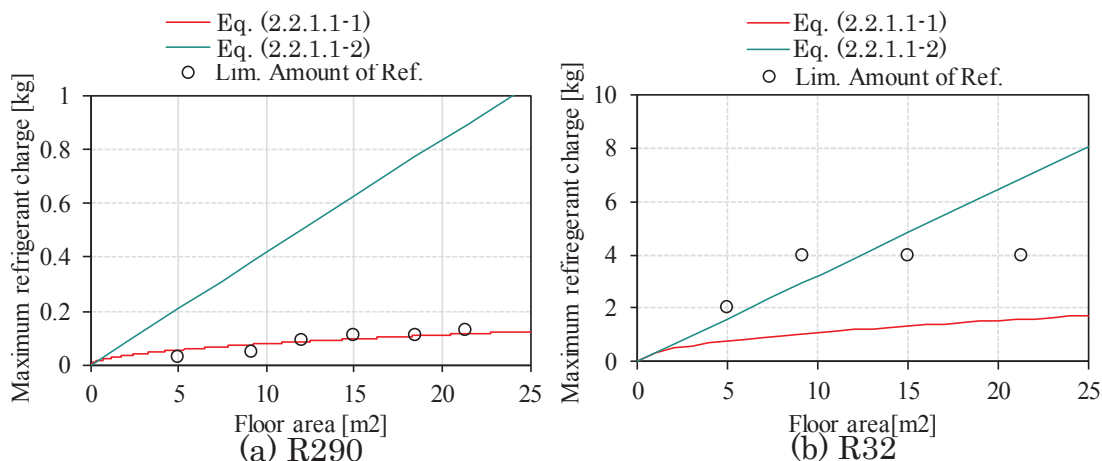


図 2.2.1.1-3 最大許容冷媒充填量の比較  
(床置き式ルームエアコン)

【まとめ】

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。本研究から得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 本研究にて用いた数値流体解析手法は、R744 及び R32 を用いて行った冷媒漏洩実験の結果の比較から濃度分布の再現性が高いことが示され、計算手法の妥当性が確認された。



- 2) 最大許容充填量式(2.2.1.1-1)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。
- 3) 最大許容充填量式(2.2.1.1-2)について、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に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。

#### 1-2) 業務用ショーケースからの冷媒漏洩

##### 【数値流体解析の方法】

実験室モデルについて、部屋の概要を図 2.2.1.1-4 に示す。計算モデルは後述する冷媒漏洩実験のために建設した実験室と同等のサイズである。大きさは 5600 mm × 3800 mm × 2550 mm で、ショーケース模型を設置した壁の側面の壁にφ100 mm の排気口と、ショーケースモデルの対面にドア下隙間 2200 mm × 7 mm を設けた。ショーケースが設置される店舗においては、必ず扉があり扉の下には隙間があるとともに、換気口があるからである。メッシュは境界近傍が細くなるようにした。室内の初期条件は、ゲージ圧力を 0 Pa、温度は 300 K とし、ショーケース庫内には充填量と庫内体積から計算し求められた冷媒濃度を適宜設定している。換気口とドア下隙間には、圧力境界を設定した。また、冷媒漏洩実験との比較の際には、R290 の代わりに R744 を用いた。

業務用ショーケースモデルの詳細を図 2.2.1.1-5 に示す。ショーケースには 2 枚の扉が設けられており、漏洩試験においては、2 枚両方が開く。冷凍機はショーケースの下部、あるいは上部に設置されており、運転中は冷凍機に付属する凝縮器ファンが動く。冷媒に関しては、通常の計算では R290 を対象とした。スウィング扉の回転速度は、国際規格に基づき 3 秒で 60° 回転するようにしている。冷媒漏洩後に室内空気を攪拌するために凝縮器ファンを稼働させる時には、ファンの風速をパラメータとした。ファンの稼働開始時刻は漏洩開始 30 s 後とした。

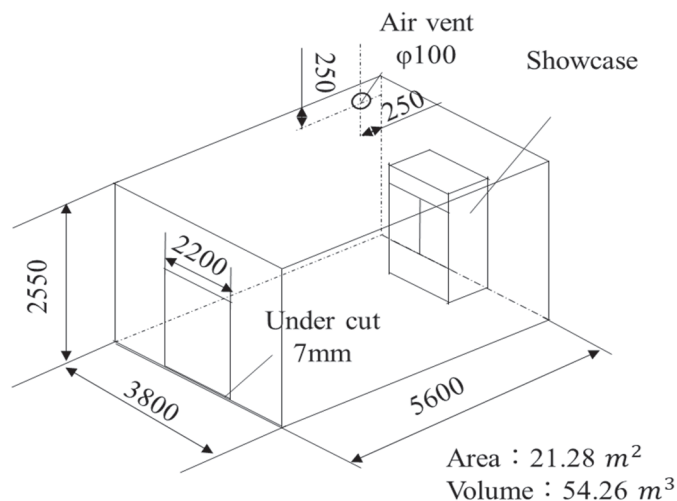


図 2.2.1.1-4 モデルルーム

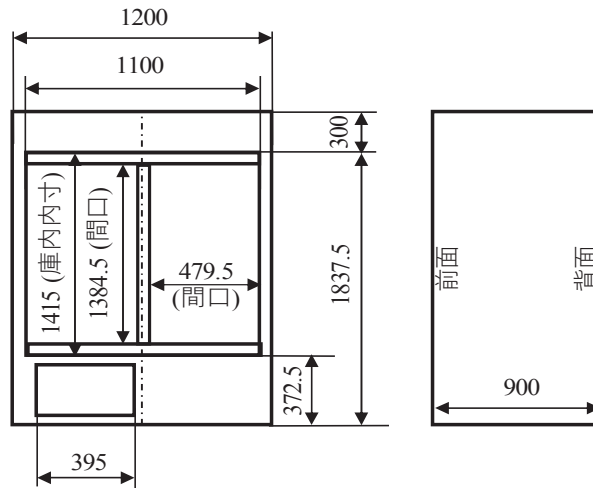


図.2.2.1.1-5 ショーケースの詳細

【数値計算による可燃性冷媒の最大許容充填量の検討】

旧 IEC 60335-2-89 では、補助的な安全機器を動作させなくても安全が確保される条件として、 $m_{max}=150g$  とされていたが、2019 年に改正され、IEC 60335-2-89:2019 では冷媒漏洩時に空調機のファンを稼働させることを前提とする可燃性冷媒の最大許容充填量に関する式が決まっている。

$$m_{max} = 13 \times LFL \quad (2.2.1.1 - 3)$$

R290 の LFL は  $0.038 \text{ kg/m}^3$  なので、最大冷媒充填量は  $494g$  となる。本研究では式(2.2.1.1-3)の評価を行った。IEC60335-2-89:2019 によれば、定められた測定点すべてにおいて、5 分間は LFL の 50%の濃度を超えてはならないとなっている。床面積  $21.28 \text{ m}^2$  の冷媒量毎の測定点 No. 1~No. 8 の濃度分布についての評価を行い、まとめたものを 図 2.2.1.1-6 に示す。また、図中には 5 min (300 s) と LFL の 50%の濃度を記した。図から、漏洩量が  $300 \sim 500 \text{ g}$  のとき、漏洩開始から 5 min 後 LFL の 50%を No. 1~No. 6 の測定点で上回っている。それに対し、漏洩量が  $200 \text{ g}$  のとき、No. 1~No. 6 は LFL の 50%近傍の値を示している。これらの結果から、ファンが稼働しないときには、可燃性冷媒の最大充填量は  $150 \text{ g}$  が妥当な指標であることが分かった。

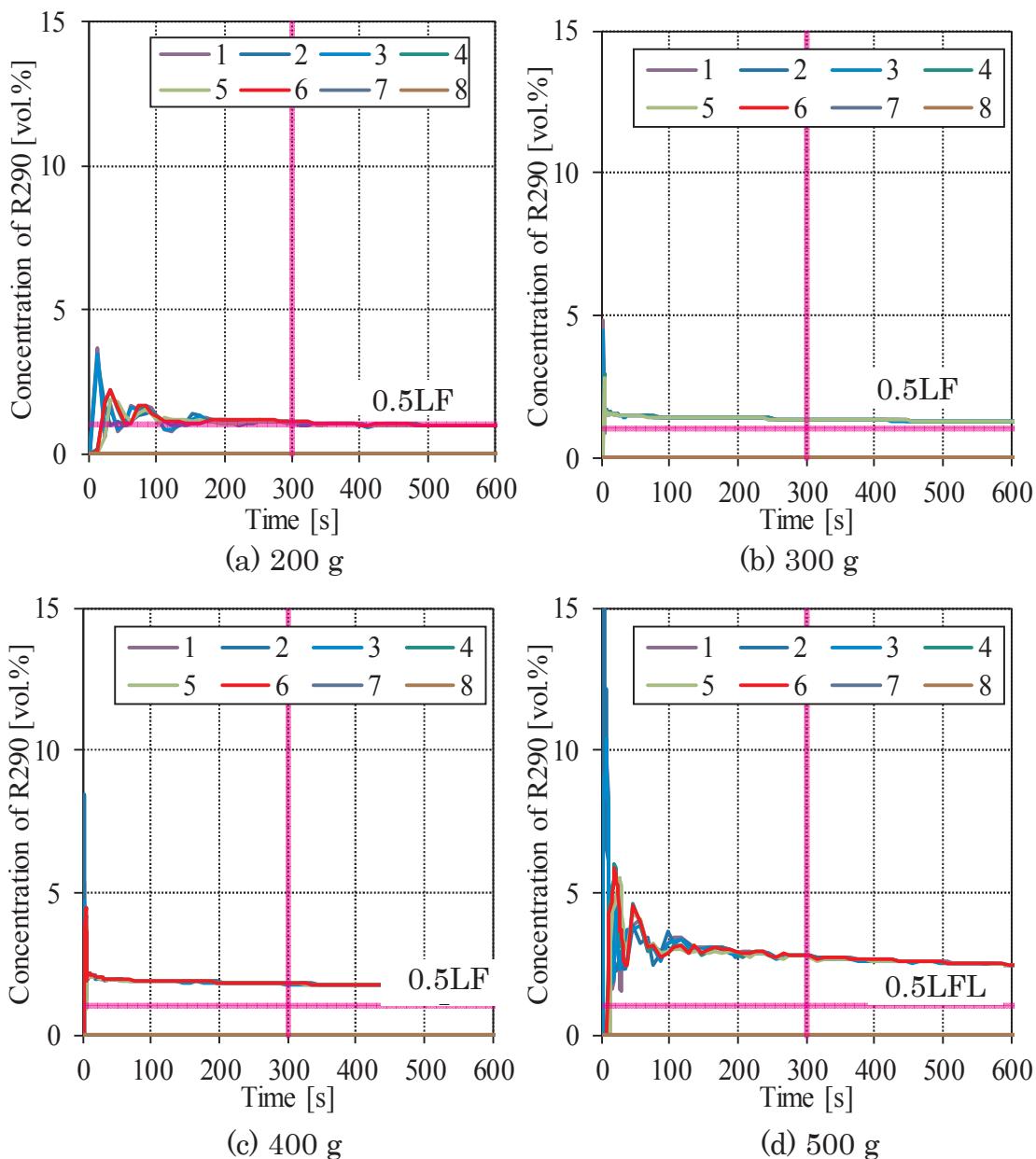


図 2.2.1.1-6 濃度拡散のシミュレーションと実験の時間変化の結果(R290, A=21.28 m<sup>2</sup>)

これまでの検討から、凝縮器のファンが動いていない状態では、ショーケースシステムに充填する冷媒量を多くすると危険であることが分かった。そこで、ファンによる攪拌の効果について検討する。業務用ショーケースでは凝縮器の設置個所は上下 2 箇所が想定されるため、上ユニットと下ユニットの両方を対象とした。床面積 21.28 m<sup>2</sup>にて、R290 を 500 g 充填したときの可燃ガス体積の時間変化を図 2.2.1.1-7 に示す。図 2.2.1.1-7(a), (b)は凝縮器ユニットがそれぞれ下部、上部にある場合の結果である。下部にファンがある場合には、ファン速度が上昇するにしたがって、可燃ガス体積の消滅は早まることがわかる。しかし、上部にファンがある場合には、低風速では攪拌効果が小さく、可燃ガスの消滅は早まらない。ファン風速が 2.4m/s 以上になると、ファンの風が対面の壁に到達し、戻ってくる流れなどにより有効な攪拌をするようになる。

以上の結果から、漏洩時のリスクを低減するには、凝縮器ファンの効果がおおきいことが分かった。当然、凝縮器ファンが下部に設置されているほうが、攪拌効果は大きくなる。床面積 21.28 m<sup>2</sup> でファン風速  $v > 2.5$  m/s の時には、凝縮器を上部においても下部においても攪拌効果の差異は小さいことが分かった。しかし、上部に凝縮器ファンを設置するときには、ショーケースの周りにおかれた他の冷凍空調機器がファンの流れを阻害する可能性もあるので、攪拌効果は削減される。安全のためには、凝縮器ユニットは下部設置に限定するほうがよい。

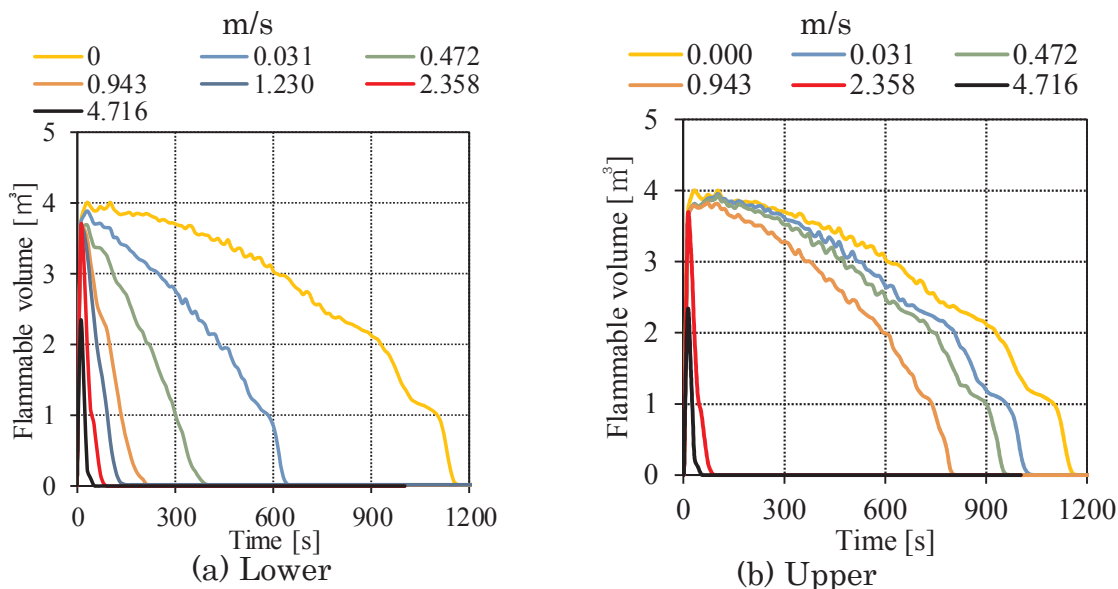


図 2.2.1.1-7 可燃ガス体積の変化

#### 【まとめ】

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リスクアセスメントをする為、数値流体解析により国際規格の最大充填量評価をおこなった。本研究から以下のような知見が得られた。

- 1) 本研究にて用いた数値流体解析手法の妥当性の検証のために、ショーケース模型を床面積 21m<sup>2</sup> の部屋に設置し、R744 を用いて冷媒漏洩実験を行った。扉を開放することによりショーケース内に充填した冷媒を漏洩させ、濃度の変化を実測し、シミュレーション結果と比較した。その結果、シミュレーションの濃度分布の再現性が高いことが示された。
- 2) 凝縮器ファンが稼働していないときの冷媒漏洩シミュレーションを行い、可燃ガス体積の時間積分値と可燃ガス体積の消滅時間について調査した。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。
- 3) 凝縮器ファンの効果を検討するために、凝縮器がショーケース上部に設置されている場合と下部に設置されている場合について、ファン風量を変化させて、可燃ガス体積の時間積分値と可燃ガスの消滅時間を計算した。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。当然のことながら、凝縮器をショーケース下部に設置する方が少ないファン風量で可燃ガスを早期に消滅させることができる。凝縮器をショーケース上部に設置する場合には、攪拌専用のファンを下部に設置すべきである。

#### 1-2) 可燃性冷媒が室内で着火したときの危害度の研究

可燃性冷媒が燃焼するときのリスク評価は、燃焼事故の発生確率と危害度から評価され、それらの関係をリスクマップと称している。危害度が大きい事故については発生確率を極めて低く抑えなければならないのに対し、危害度が小さい事故については、ある程度の事故発生が許容される。可燃性冷媒が空調冷凍機から漏洩して着火、燃焼する事故のリスク評価を正確に行うためには、危害度評価がされなければならない。

人体への危害度を評価するにあたって指標となりうる項目としては、ISO6184-2 や NFPA68 に定められている爆発強度指数  $K_G$  があり、式(2.2.1.1-4)のように定義される。

$$K_G = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} \quad (2.2.1.1 - 4)$$

これは圧力上昇速度の最大値を基にした指標で、ここでの  $V$  は空間の容積である。

この  $K_G$  について、過去の NEDO プロジェクトにおいて、容器体積が  $K_G$  に与える影響についての検討が行われ、R32 や R1234yf については、 $0.01\text{m}^3 \sim 1\text{m}^3$  程度の範囲においては影響があまりないといった報告がなされている。

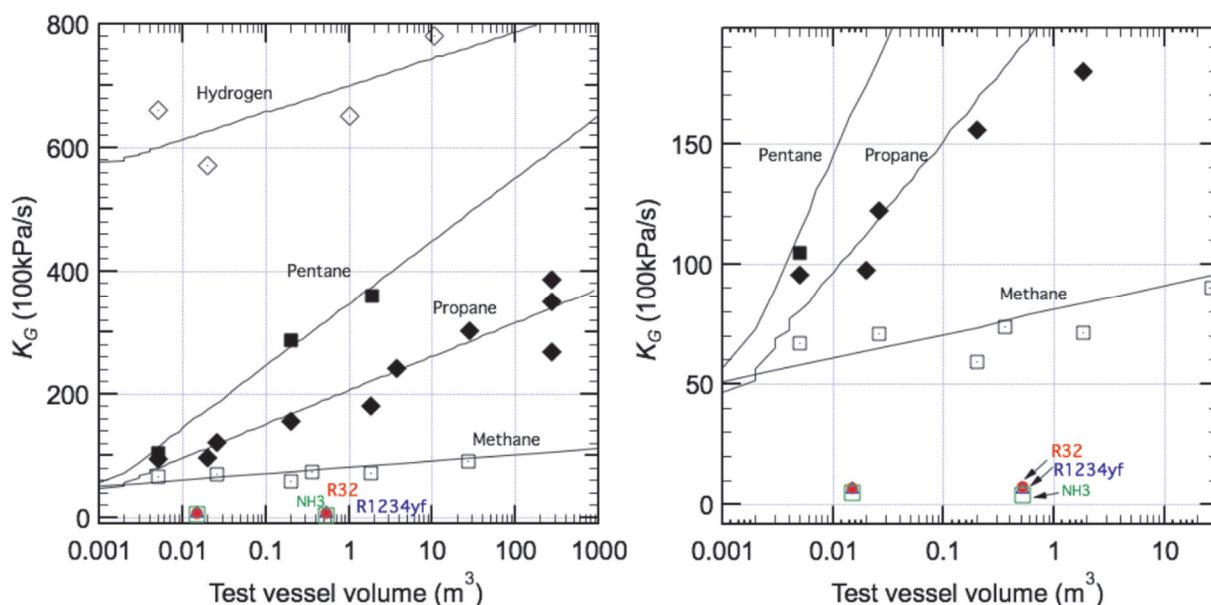


図 2.2.1.1-8  $K_G$  に対する球形容器体積の影響

本研究では燃焼事故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い、燃焼性の影響、スケール則を明らかにすることを目的としている。具体的には、小型容器内で炭化水素、可燃性フルオロカーボン冷媒が燃焼するときのシミュレーションを行い、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ことを目標としている。

#### 【小型容器における燃焼実験】

燃焼実験を行うため、小規模容器を作成した。これは圧力上昇や火炎伝播を直接計測するだけでなく、後述の燃焼シミュレーションとの比較検討を行うことも目的としている。

装置の概略図・写真を 図 2.2.1.1-9 に示す。容器は内径 310mm、内寸高さ 400mm の円筒形状（容積:30.2L）をしており、底面から 150mm の高さの側面に、放電点火用の電極、圧力計、高速度カメラによる撮影用の窓を設置している。実験の際は、真空引きした容器内に、マスフローコントローラーを用いて冷媒および空気を導入し混合する。容器天面には排気ポートが設けられており、排気はフッ化水素等を除去するスクラバーを介して外部に放出される。これにより、燃焼によるガスの膨張によって容器に過剰な圧力がかかることを避けている。

また、燃焼の反応生成物として生じる水分にフッ化水素が溶け込み、容器などを腐食させることを避けるため、底面に排水ポートを設け、排水や洗浄ができるようにしている。



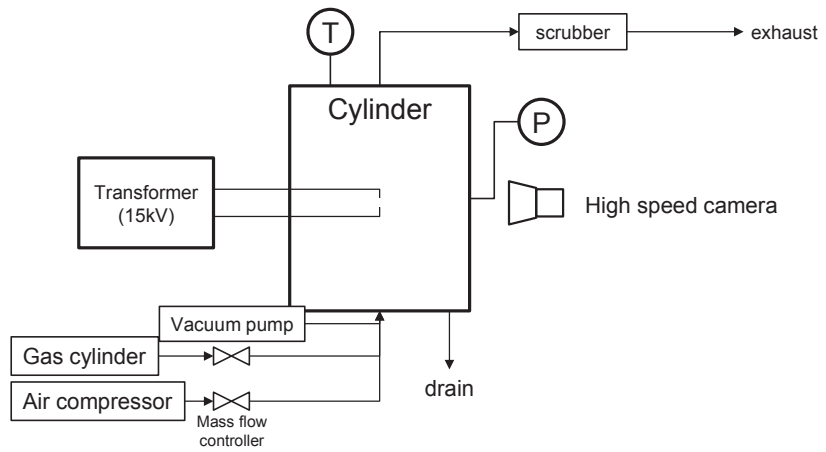
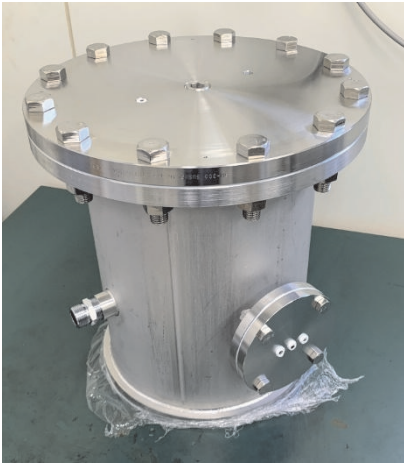


図 2.2.1.1-9 小規模燃焼試験装置

計測については、高速度カメラの輝度解析による温度計測およびそれによる燃焼モデルの検討、GC-MS 等による燃焼後の組成分析などを行っている。

【燃焼現象のシミュレーション】

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ている。そのため、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ている。

燃焼性評価については、燃焼速度などの 0~1 次元の現象について、CHEMKIN などの反応解析ソフトウェアにおいて用いられる、素反応データの調査や評価が行われている。これらは多数の素反応についての反応速度を、温度などの関数として表す関数のパラメータ群である。R290 に類似の炭化水素類については、Lawrence Livermore National Laboratory や National University of Ireland によりデータベースとして公表されており、またフルオロカーボン類の一部についても P.Papas らや D.Burgess らにより評価や実験値との比較が行われている。例としては、図 2.2.1.1-10 に示す通り、R32 と空気の混合比を変えた場合の燃焼速度の変化について、複数の反応モデルの検討が行われている。

R32 の素反応データを CFD と統合し、3 次元空間に適用するにあたっては、CFD ソフトウェアの機能を用いて、通常 CFD で行われる圧力や伝熱、物質移動についての式に、0-D と同様の反応速度計算による組成の変化の式を加えた連立方程式を CFD の各セルに対して設定し、収束計算を行うことでシミュレーションを行っている。

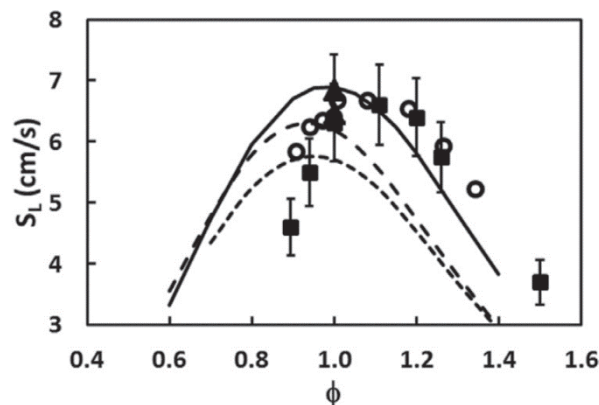


図 2.2.1.1-10 R32 の空気混合比に対する層流燃焼速度の実験値と予測値と関係



### 1-3) ルームエアコンのポンプダウン時のディーゼル爆発の抑制

冷凍空調機器の圧縮機の潤滑に用いられる潤滑油の性状は、潤滑の基本特性である潤滑性、冷媒との共存や長期間の油の安定性などが求められ、その機能を維持するために油(ベースオイル)に添加剤が加えられている。添加剤には目的に応じて、酸化防止剤、安定剤、耐摩耗剤などの種類がある。これまでの研究により、油(ベースオイル)の燃焼が冷媒に伝播しさらに圧力が上昇することがわかっている。潤滑油の燃焼を抑止できれば、圧縮機の爆発事故の被害を小さく、あるいは防止することができる。油の着火は、ラジカルを生成し酸化の連鎖反応を引き起こして持続的な燃焼に至ると考えられる。添加剤はラジカルを捕捉することにより連鎖反応を抑制することが期待されることから、これまでフェノール系酸化防止剤(A1)、エポキシ系安定化剤(A2)の入った潤滑油(POE)で実験を行った。そして、添加剤は燃焼抑制効果があり、圧縮機の爆発の確率を低下させると報告している。本研究では、燃焼抑制効果について、フェノール系酸化防止剤(A1)とリン系耐摩耗剤(P1)に注目し、添加剤の濃度、添加剤と冷媒との組み合わせによる影響をそれぞれ実験的に調べた。

#### 【実験装置と実験条件】

図 2.2.1.1-11 は、エアコンのポンプダウン時に発生するコンプレッサー爆発事故時の様子を模擬した実験装置である。装置は主に冷媒圧縮機と駆動する系、冷媒を供給する系、空気を供給する系、潤滑油を供給する系と計測と制御系から成っている。冷媒圧縮機と駆動システムについては、冷媒圧縮機は小型模型エンジン(ENYA R155-4C 改造エンジン)で模擬し(以後、「模擬圧縮機」と呼ぶ。)、エンジนครランクシャフトに直接接続された電気モーター(三菱電機 AC 汎用 AC サーボ HP-JP203)で駆動した。

冷媒を供給する系については、マスフローコントローラで流量制御された冷媒は冷媒ポンペから配管を通じて模擬圧縮機に供給される。空気を供給する系については、空気圧縮機から供給される圧縮空気をマスフローコントローラ(コフロック製 MODEL8550MC-0-0-1-1)で制御し、除湿機を介して配管から模擬圧縮機に供給している。冷媒と空気は管路途中で合流し、電気ヒータにより所定の温度に上昇し模擬圧縮機に供給される。潤滑油を供給する系は、タンクから供給された潤滑油を油圧ポンプで昇圧し、オイル噴射システム(FC デザイン、燃料噴射システム)のインジェクタから模擬圧縮機の吸気管に噴射する。エンコーダとストロークセンサでピストンの位相を読み取り、ピストンの位相角が  $90^\circ$  (吸気の上死点位置を  $0^\circ$ ) の時にオイルを噴射した。当量比 ( $\phi$ ) は、実際のオイルの質量とエンジンの行程容積の空気と完全燃焼するオイルの質量の比で定義されている。理論空燃比はエンジンの行程容積の空気とオイルの CHO 質量分率から求めた。オイル噴射圧力は 100MPa であり、オイル噴射時間とオイル質量の関係は予め実測して校正した。モーターの制御はパソコンによりサーボアンプを介して行った。エンジン内の圧力は圧電式圧力センサ(キスラー6045A)で電気信号に変換し、排ガス温度は排気管に設置した K 型シース熱電対(0.5mm-OD)で電気信号に変換した。圧力、温度の電気信号とオイル噴射装置の信号(エンコーダ、ストロークセンサ、オイル噴射信号)はデータロガーを介してパソコンに記録した。

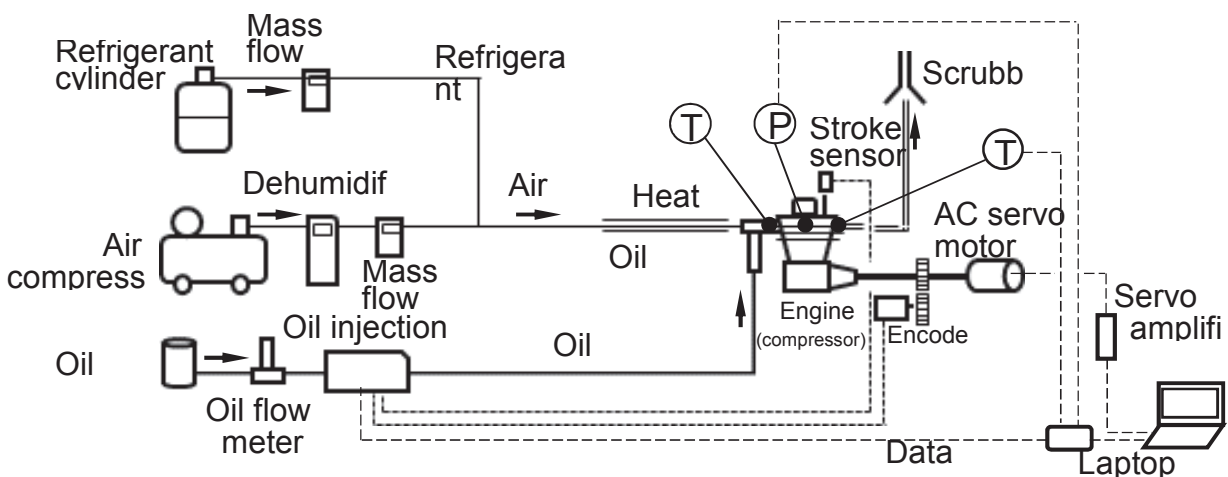
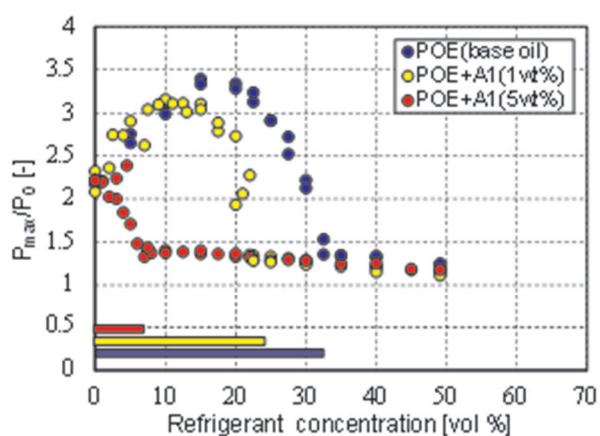


図 2.2.1.1-11 実験システム

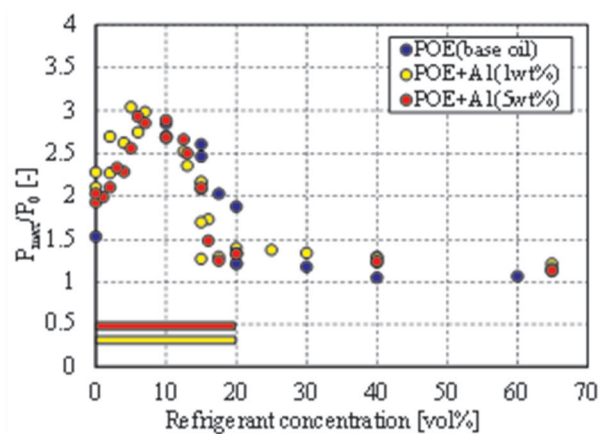
実験は次の順序で行った。エンジンの回転数 50rpm で運転しながら、指定の空気量を模擬圧縮機に供給する。模擬圧縮機入口の空気温度が所定の温度になるまでパイプに巻かれた電気ヒータの電圧を上げ、温度が安定した後に所定の冷媒量を流す。模擬圧縮機回転数を 1500rpm に変更した後、オイル噴霧システム稼働してオイルを噴射する。オイルが噴射し数秒後にパソコンでデータを収録し始める。実験は、異なる冷媒、添加剤とその濃度、当量比(φ)1 の潤滑油(POE)で行った。

#### 【フェノール系酸化防止剤(A1)を添加する場合】

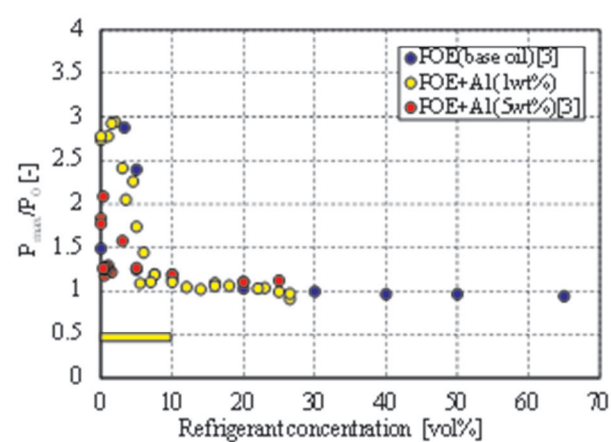
図 2.2.1.1-12 (a)-(d)に添加剤濃度をパラメータにして、それぞれ R22, R32, R1234yf, R290 の冷媒濃度に対する無次元最高圧力を示した。これまでの実験結果より、低冷媒濃度で無次元圧力が約 1.5 以上の高圧領域は自己着火燃焼が起こっている。図 2.2.1.1-12 (a)において、R22 の燃焼範囲の上限の冷媒濃度を比較すると、添加剤無し(0wt%は base oil)は 32vol%, そして添加剤(A1)の 1wt%と 5wt%はそれぞれ 22vol%と 5vol%であり、添加剤濃度の増加と共に上限値は低下する。添加剤濃度が増加すると燃焼範囲は顕著に小さくなるが分かる。また、0wt%の添加剤(A1)のときの無次元最高圧力は 3.4, 1wt%のときは 3.2, 5wt%のときは 2.3 であり、最高圧力は添加剤濃度の増加と共に低下している。R32 の燃焼範囲の冷媒濃度は 0-20vol%で R22 の 0-30vol%により狭く、R1234yf の 0-6vol%より広い、つまり燃焼範囲は冷媒により異なる。R32 と R1234yf において、添加剤濃度の影響ははっきりしないが燃焼範囲のわずかな縮小が見て取れる。R290 においては、燃焼範囲は 0-2.5vol%で小さく、無次元最高圧力は 0wt%の添加剤で 3.3, 1wt%で 2.7, 5wt%で 2.4 より、最高圧力は添加剤濃度の増加と共に低下している。ところで、燃焼範囲と圧力波形変化の範囲を添加剤 1wt%で比較してみると、R22 の燃焼の上限と圧力変化の上限は 22vol%と 25vol%であり、R32 では 15vol%と 20vol%, そして R1234yf では 6vol%と 10vol%である。つまり、圧力波形の変化は燃焼範囲より高冷媒濃度に現れる。実際のポンプダウンでは、圧縮機入口の冷媒濃度は徐々に低くなることから、圧力波形の変化は燃焼の前兆となる。前兆をとらえることにより事故を未然に防止することが期待される。



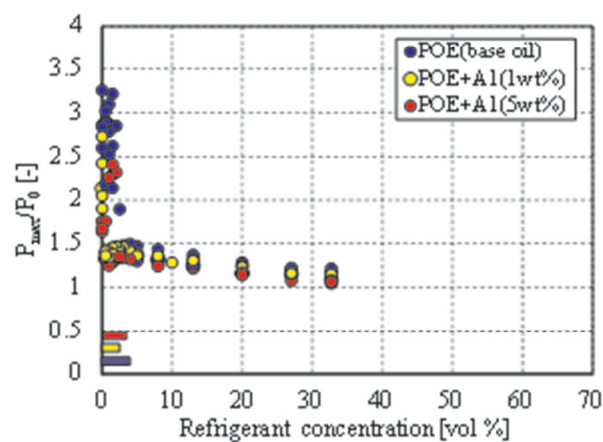
(a) R22



(b) R32



(c) R1234yf



(d) R290

図 2.2.1.1-12 燃焼ガスの最大圧力と冷媒濃度の関係 (A1 の場合)

【リン系摩耗抑制剤(P1)を添加する場合】

図 2.2.1.1-13(a)-(c)に添加剤(P1)を添加した場合の実験結果を示した。燃焼に対する添加剤(P1)濃度の影響は添加剤(A1)と同様な傾向を示した。冷媒 R22 において、添加剤の濃度別に燃焼範囲の上限を比較すると、添加剤無し(0wt%, base oil)は 32vol%, そして添加剤(P1)の 1wt%と 5wt%はそれぞれ 25vol%と 20vol%であり、それらの上限と無次元最高圧力は添加剤濃度の増加と共に低下した。しかしながら、添加剤(P1)による燃焼および圧力の抑制効果は添加剤(A1)のそれより小さい。R32とR290について、添加剤(P1)による燃焼および圧力の抑制効果は添加剤(A1)とほぼ同程度である。

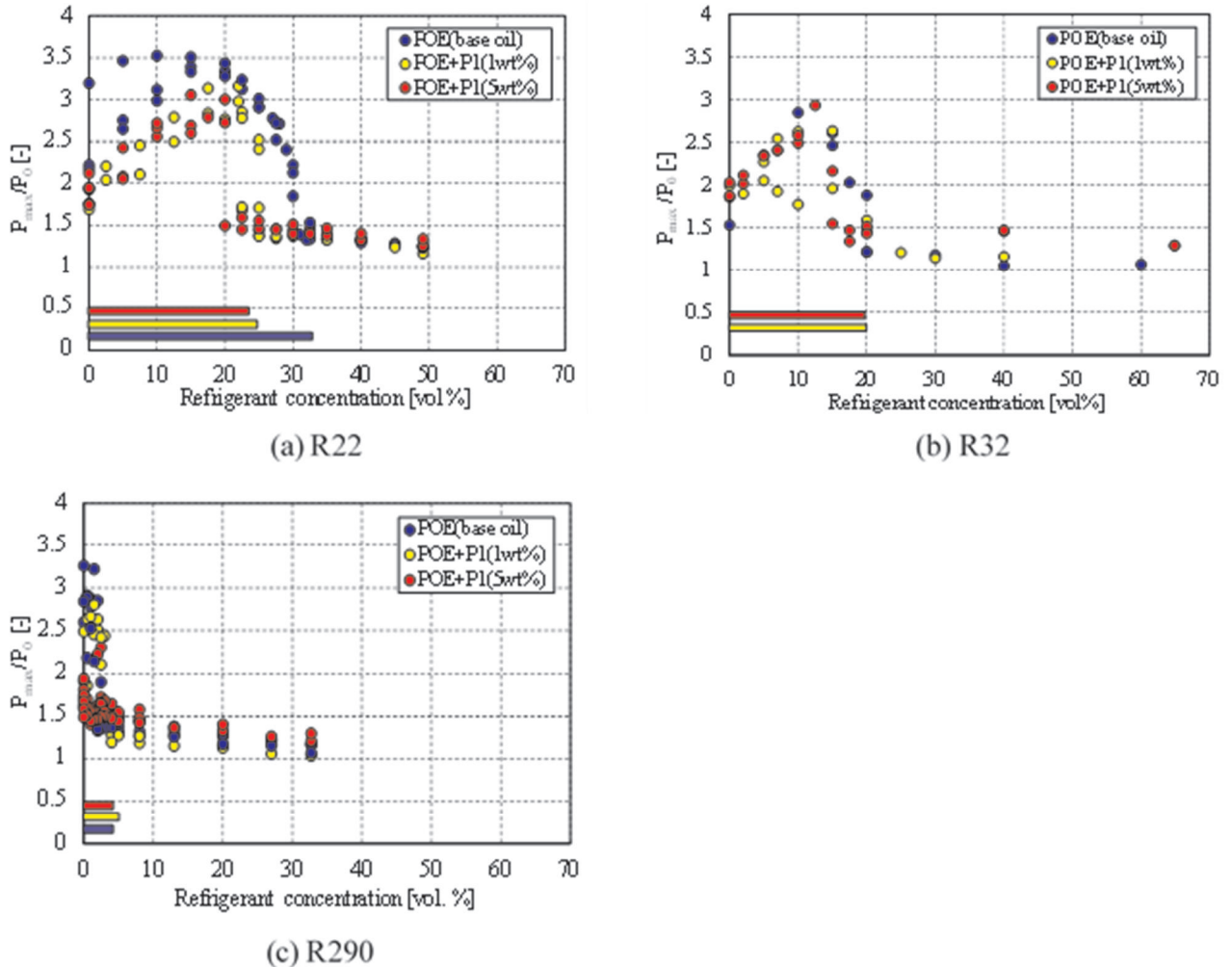


図 2.2.1.1-13 燃焼ガスの最大圧力と冷媒濃度の関係(P1 の場合)

【まとめ】

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。実験結果より以下の知見が得られた。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 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。

添加剤は多くの種類がある。燃焼抑制効果は、冷媒と添加剤の組み合わせにより異なることから、さらに他



の添加物との組み合わせによる研究が望まれる。

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

HFO-1123 (CF<sub>2</sub>CHF)は分子内部に炭素の二重結合があるので大気中での寿命が短いため、非常に低いGWPを持っている。したがって、冷凍および空調の分野の次世代冷媒として期待されている。しかしながら、HFO-1123は高温高圧条件下でEq.(2.2.1.1-5)のような不均化反応を起こすことが知られている。機器の故障によりエネルギーが投入されると、生成した火炎が伝播して、生成熱によって圧力と温度が著しく上昇する可能性がある。これは酸素を必要とする燃焼反応ではなく、自己分解反応である。



このように、不均化反応が生じれば危険であるため、HFO-1123 を実用化するためには、不均化反応が起こる条件を明らかにするとともに、反応を抑制する必要がある。それには反応抑制物質を添加することが有効である。物質添加によるHFO-1123の不均化反応の抑制のメカニズムは以下の二種類が考えられる：

- (1) 不活性なガスを混合することによる熱希釈効果。
- (2) 反応の中間生成物のラジカルをトラップすることにより不均化反応の伝播を止める。

本研究では、図 2.2.1.1-14 の三角図に示されているように HFO-1123 に二種類の抑制剤を混合した場合の不均化反応の発生条件を実験で調べた。試験ガスの組成をまとめて表 2.2.1.1-1 に示す。R32 の混合量は、混合ガスの GWP が 150 になるように選んだ。試験ガスの初期温度を 150°C に固定し、初期圧力を変えて不均化反応が伝播するかどうかを判定した。初期圧力が低圧の時は火炎は伝播せず、ある圧力を超えると、伝播するようになる。圧力が上がって HFO-1123 分子の密度が大きくなると、反応は継続的に進み、火炎は伝播するのである。この火炎が伝播する境界の圧力を調べた。反応抑制剤のメカニズムを検討するために、火炎温度の計測、GC-MS による反応後ガスの定性分析を行った。

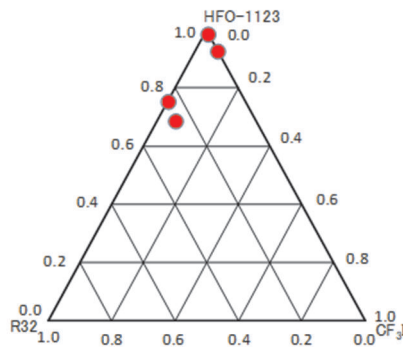


図 2.2.1.1-14 混合ガスの三次元プロット

表 2.2.1.1-1. 試験ガスの組成

Case	HFO-1123	R32	CF <sub>3</sub> I
1	100	0	0
2	78	22	0
3	95	0	5
4	72.4	22	5.6

### 【実験方法】

HFO-1123 の不均化反応を観察し、不均化反応が伝播する圧力境界を調査するための実験装置を図 2.2.1.1-15 に示す。実験装置はステンレス鋼製圧力容器、着火源、真空ポンプ、冷媒容器、および安全弁からなる。圧力容器に充填するガスの圧力と温度を設定して安定化させた後にエネルギーを投入し、不均化反応が開始し、それが伝播するかどうかを圧力変化から判定する。それと同時に、実験容器に設置されている上下2つの観察窓から火炎の動きを観察することができる。

これまではモリブデン細線を溶断することで実験容器内へエネルギーを投入していたが、本研究ではアーク放電法に切り替えた。その理由は、アーク放電は実際のエアコンのコンプレッサーのモーター内で起きるレイヤーショートに近いからである。アーク放電法は高電圧で電極の間に不連続な絶縁破壊を発生させる火花放電と違って、低電圧で電極の間に連続な大電流を発生させる放電法である。

本実験では銅製の二つの渦巻電極の一部を軽く重ね、電極の間に直流 220V を 1.5ms 印加することで渦巻電極の間にアーク放電を発生させ、実験容器内へエネルギーを投入した。投入エネルギーは電圧、電流の変化を時間積分してその積から計算した。

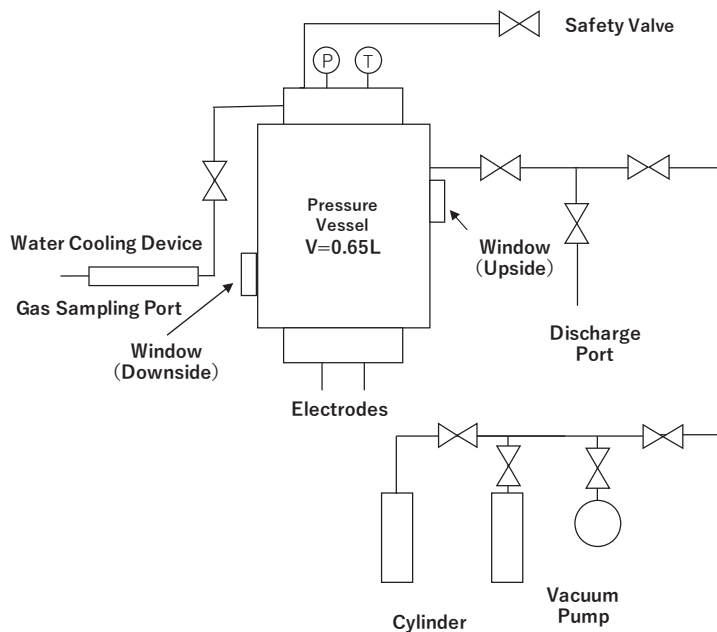


図 2.2.1.1-15 実験装置の概要

### 【純冷媒 HFO-1123 の圧力境界線】

HFO-1123 純冷媒について、温度を 150°C 一定に保ち、不均化反応が伝播する圧力境界を実験で調べた。電圧を印加した後の圧力変化を図 2.2.1.1-16 に示す。圧力変化を見ると、圧力波形が急激に上昇するケースと緩やかに上昇する二つのケースに分かれていることが分かった。溶断法の時では不均化反応が伝播しないと考えられていた条件(例えば 150°C、0.70~0.76MPa)でも放電法の場合は圧力上昇が観測された。

図 2.2.1.1-17 は放電法による圧力境界と溶断法による圧力境界を比較した結果を示す。放電法の場合は初期圧力が 0.772MPa の時には確率的に圧力がピークをもって立ち上がり、初期圧力が 0.770MPa の時には確率的に緩やかに立ち上がる傾向があり、不均化反応が伝播する圧力条件は 0.770MPa の近傍にある。これは溶断法の圧力境界である 0.780MPa に近い結果となった。



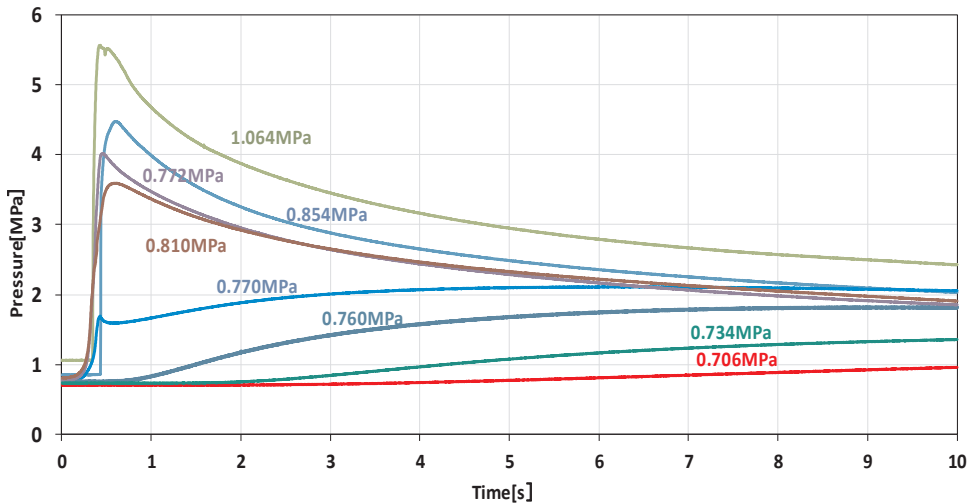


図 2.2.1.1-16. 着火後の圧力変化(HFO-1123)

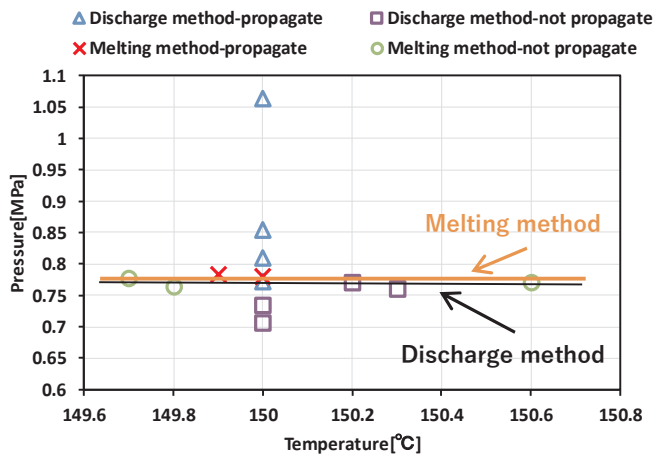


図 2.2.1.1-17. 反応伝播に関する圧力境界

【22wt%R32-78wt%HFO-1123 混合ガスの圧力境界】

冷媒 R32 を混合することで、HFO-1123 の分圧を低下させるとともに不均化反応の反応熱を希釈する効果が期待される。混合する量は GWP150 を目指し、GWP 値が 675 である R32 を 22wt%まで混合するように設定した。

初期圧力と圧力上昇の結果をFi図 2.2.1.1-18 に示す。圧力境界は 1.0MPa の付近である。

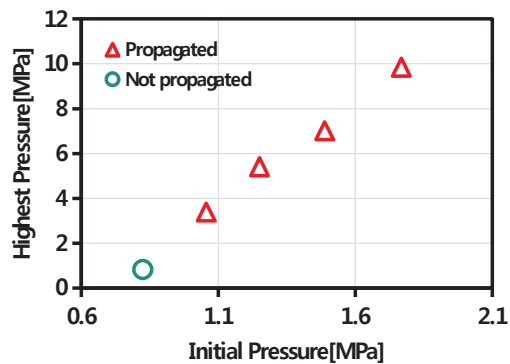


図 2.2.1.1-18 圧力の上昇値(22 wt% R32 / 78wt% HFO-1123)

### 【5wt%CF<sub>3</sub>I-95wt%HFO-1123 混合ガスの圧力境界】

CF<sub>3</sub>I は代表的な燃焼抑制剤で消火剤としてよく使われおり、Honeywell が開発した不燃性冷媒 R466A でも混合されている。CF<sub>3</sub>I 分子中のヨウ素が、不均化反応中に生成するラジカルをトラップすることが期待される。少量の添加でも抑制効果があるのではないかと期待されるため、5wt%の混合量とした。判定結果を図 2.2.1.1-19 に示す、結果から CF<sub>3</sub>I を 5wt%混合した場合、境界圧力条件は 0.921MPa の付近にあることが明らかになり、劇的な反応抑制効果はないことが分かった。

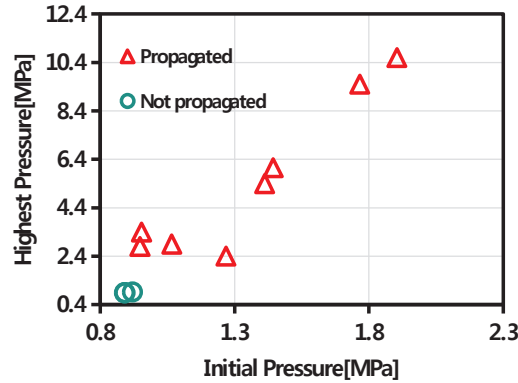


図 2.2.1.1-19 圧力の上昇値 (5 wt% CF<sub>3</sub>I / 95wt% HFO-1123)

### 【5.6wtCF<sub>3</sub>I-22wt%R32-72.4wt%HFO-1123 混合ガスの圧力境界】

二種類の抑制メカニズムの抑制剤を純冷媒 HFO-1123 と混合した二成分の混合ガスで実験を行った結果、抑制効果は期待していた程大きくなかったため、二種類の抑制剤を同時に混合した三成分の混合ガスで実験を行った。不均化反応伝播の判定結果を図 2.2.1.1-20 に示す。圧力境界は 1.539MPa と 1.606MPa の間にある可能性が高い。結果から二種類の抑制メカニズムをもつ抑制剤を同時に混合した場合、相乗効果が得られることが分かった。

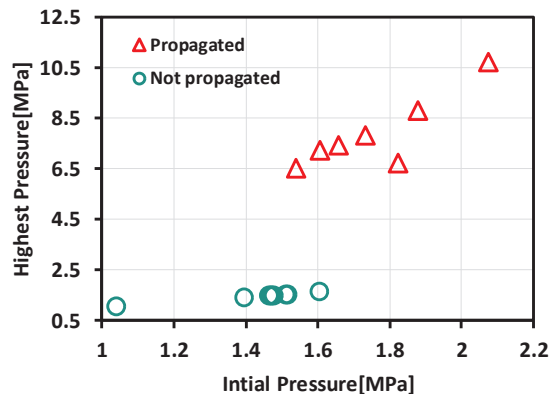


図 2.2.1.1-20. 圧力の上昇値 (5.6 wt% CF<sub>3</sub>I / 22 wt% R32 / 72.4wt% HFO-1123)

### 【まとめ】

本研究では、初期温度を 150°C に固定し、純粋 HFO-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 CF<sub>3</sub>I 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)

### 【冷媒圧縮機内のレイヤーショートと不均化反応】

低 GWP 冷媒の 1 つである HFO-1123 は、加圧条件下で高い着火エネルギーを与えると不均化反応が発生し、冷媒圧縮機内で不均化反応が発生すると圧縮機の破壊を引き起こす。冷媒圧縮機内のモータの絶縁破壊による巻線間でのショート(レイヤーショート)は圧縮機における不均化反応の発生要因になりうるが、経年劣化などで発生する通常運転時におけるレイヤーショートは発生頻度がわずかであり、レイヤー短ートの発生メカニズムやレイヤーショート時の発生エネルギーなどについては不明である。本研究では、冷媒圧縮機内においてレイヤー短ートを意図的に発生させ、レイヤーショートが発生したときの電流および電圧を計測することにより、レイヤー短ートの発生の仕方の違いによる通電エネルギーの違いを明らかにすることを目的とする。1 年目及び 2 年目は、ショート発生機構を組み込んだロータリ圧縮機を製作し、圧縮機の 3 つのターミナルに繋がるリード線をショートさせた際の、保護回路の動作、電流、電圧およびモータコイルの温度変化を計測し、ショート時に発生する火花の様子を高速度カメラで観察する実験を行った。

### 【実験方法】

本研究では、冷媒圧縮機運転中において圧縮機内のモータコイルのショートを実現するために、ショート発生機構を組み込んだロータリ圧縮機を作成した。図 2.2.1.1-21 に、本研究で製作した圧縮機及びショート発生機構の概略図を示す。

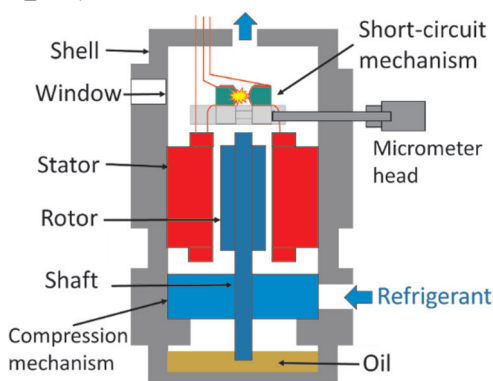


図 2.2.1.1-21 実験用冷媒圧縮機

この冷媒圧縮機は、圧縮機外部に取り付けられたマイクロメータヘッドによってショート発生機構を操作し、予め絶縁被膜を剥がした任意のリード線 2 本を、圧縮機運転中に任意のタイミングでショートさせることができる。また、圧縮機シェルにはガラス窓が設置されていて、ショートした際のリード線の接触部分を圧縮機外部から観察することができる。実験で使用した冷凍サイクルはガスサイクルであり、安全面から冷媒は R410A を使用した。

図 2.2.1.1-22 に実験で使用した圧縮機の駆動回路図を示す。

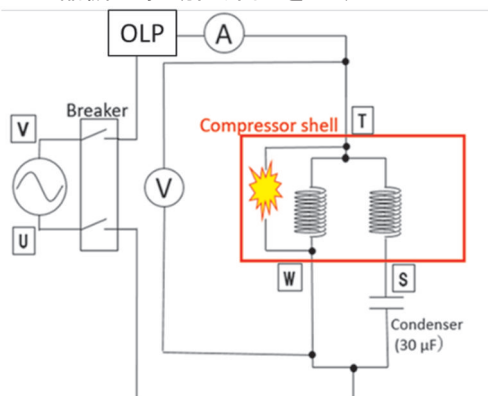


図 2.2.1.1-22 実験回路 (W-T ショート)

モータは 200 V の単相誘導モータ(コンデンサ方式)であり、ブレーカ(配線用遮断器)は定格 20 A、OLP(Over Load Protector: 機器保護用遮断器と温度ヒューズにより構成)は定格 15 A のものを用いた。図中の W、T、S はモータコイルのリード線と圧縮機外部の駆動回路を繋ぐターミナルの端子を表して

いる。図 2.2.1.1-22 は端子 W と端子 T のそれぞれに繋がるリード線を、ショート発生機構を用いてショートさせた場合の回路図である（このショートを W-T ショートと呼ぶ）。電流はショートさせる 2 本のリード線の接触部を流れる電流、電圧はそれらのリード線間の電圧を計測した。また、モータコイル（コイルエンド）の 2 か所において、モータ巻線の温度を熱電対で計測した。

【W-T ショート】主巻き線両端のショート

W-T 間のショートは、電源をショートさせることになり、W-T 間をショートさせると大きな火花が発生し、ブレーカと OLP が作動してモータが停止した。また、ショート後のエナメル線は溶断していた。W-T ショート発生時の電流、電圧および出力の変化を図 2.2.1.1-23 に示す。

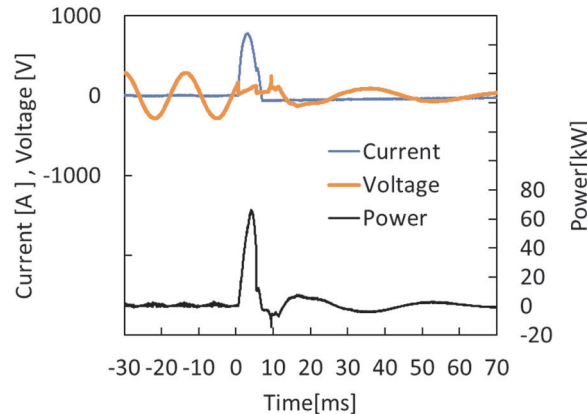


図 2.2.1.1-23 電流、電圧、電力（W-T ショート）

通電エネルギーは、電流と電圧の積を短絡時間（大電流が流れている時間）で積分して求めた。この時の最大電流は 812A、通電エネルギーは 168J であり、HF0-1123 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。そのため、圧縮機内における HF0-1123 の不均化反応を防ぐためには、W-T 間のショートは避けなければならない、物理的にショートが起こらないような構造とする必要がある。

図 2.2.1.1-24 に、W-T 間のショート実験を複数回行った結果（電流最大値、通電エネルギーおよび短絡時間）を、ショート発生時の電圧位相角に対して示す。図中の IN は、W-T 間のショートを圧縮機シェル内部でショート発生機構を用いて発生させた結果であり、OUT は圧縮機外部においてナイフスイッチにより W-T 間のショートを発生させた場合の結果である。

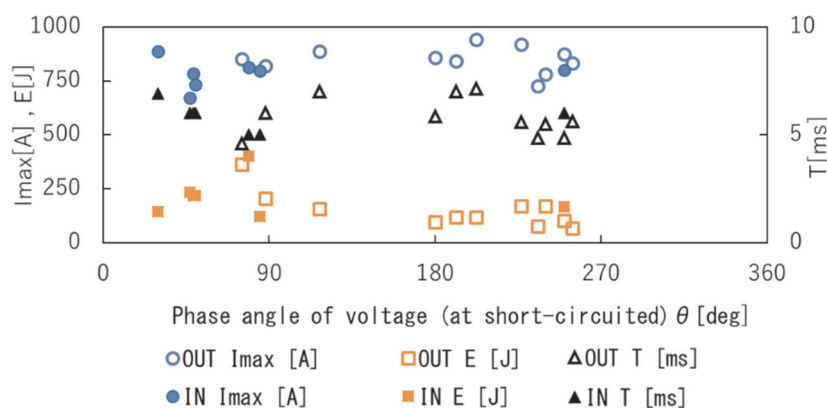


図 2.2.1.1-24 電圧位相角と最大電流、通電エネルギー、短絡時間の関係

図より、ショートは電圧の位相角が 0-90° および 180-270° のときに発生することが多いことがわかる。また、完全にリード線がショートする場合には、ショートが圧縮機の内部で発生しても外部で発生しても、通電エネルギー等には大きな違いは見られなかった。

【W-S ショート】主巻き線と副巻き線の並列回路を形成

W-S 間をショートさせると、微小な火花が発生し、OLP が作動して圧縮機が停止した。また、エナメル線が軽く溶着したが、溶断することはなかった。図 2.2.1.1-25 に W-S ショート発生時の電流、電圧の変化を示す。

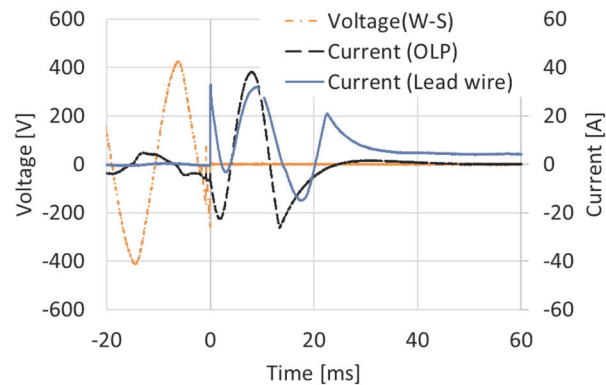


図 2.2.1.1-25 電流、電圧 (W-S ショート)

OLP を流れる電流が 40 A 付近に達したおよそ 5 ms 後に OLP が作動した。また、ショート発生後のリード線接触部を流れる電流の最大値は 30 A 程度、通電エネルギーは 1 J 程度であった。

【S-T ショート】主巻き線とコンデンサの並列回路を形成

S-T 間をショートさせると、微小な火花が発生したが、OLP は作動せず、モータが停止した状態で通電が続き、モータコイルの急激な温度上昇が発生した。図 2.2.1.1-26 に S-T ショート発生時の電流、電圧の変化を示す。

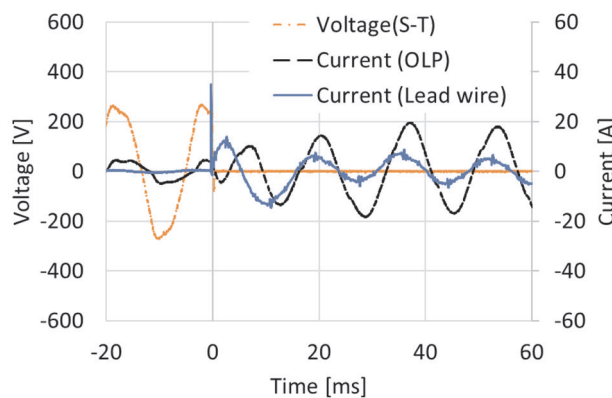


図 2.2.1.1-26 電流、電圧 (S-T ショート)

S-T ショートが発生すると、S-T 間の電圧がほぼ 0 V まで下がると同時にリード線接触部に振幅 5 A 程度、OLP に振幅 18 A 程度の電流が流れた。図 2.2.1.1-27 に、S-T ショートが発生した場合のモータコイルエンドにおけるモータ巻線の温度変化を示す。

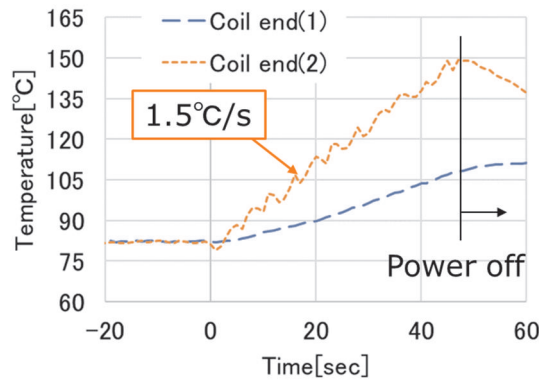


図 2.2.1.1-27 モータ巻線温度 (S-T ショート)

S-T ショートが発生して圧縮機が停止すると、モータ巻線に流れる電流が大きくなり、モータ巻線の温度が上昇し始める。図において、モータ巻線の温度が 150°C に達した時点で、巻線の保護のために圧縮機の電源は OFF にしている。温度上昇の速度は、コイルエンド (1) において 1.5 °C /s であり、このまま通電が続けば、モータコイルの温度はさらに上昇し、巻線の絶縁劣化によるレイヤーショート発生の要因となりうる。

この問題を解決するために、OLP を定格電流の小さなもの (10 A) に変更して実験を試みたが、モータ起動時には通常運転時より大きな電流が流れるため、起動時に OLP が作動してしまい、圧縮機を起動することができなかった。通常運転での起動時 (時刻 0 で起動) の電流、電圧の変化を図 2.2.1.1-28 に示すが、起動時には電流の振幅が定常運転時の約 4~5 倍となっていることが分かる。

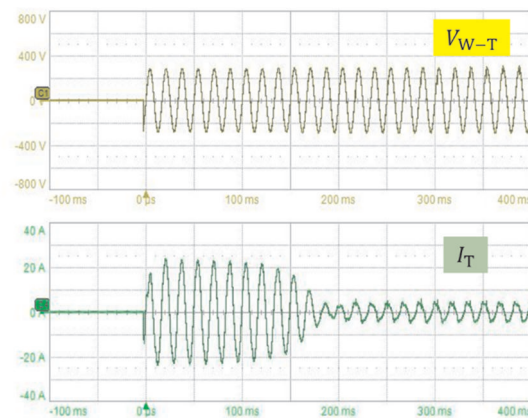


図 2.2.1.1-28 起動時の電流と電圧 (通常運転)

そこで、図 2.2.1.1-29 に示すように、OLP にバイパス (ナイフスイッチ) を並列に接続し、起動時に OLP をバイパスすることで、定格 10 A の OLP を設置した状態でも圧縮機を起動することができ、通常運転も可能となった。定格 10A の OLP を適用した場合には、S-T ショート時にも OLP が作動して圧縮機への電流供給は遮断され、モータコイルの急激な温度上昇を防ぐことが可能となった。

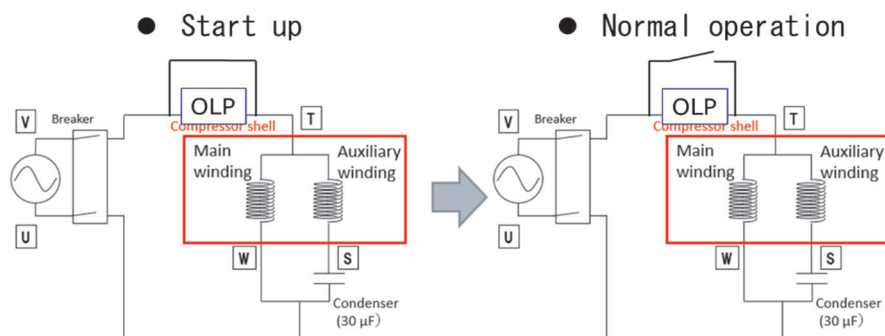


図 2.2.1.1-29 OLP にバイパスを接続するときの駆動回路



## 【まとめ】

冷媒圧縮機運転中にモータ巻き線のショートを用意的に発生させることができる圧縮機を製作し、レイヤーショートの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。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、定格15Aのオーバーロードプロテクタ(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。

## 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】

### 2.2.1.2.1 着火源の抽出と着火能力の評価手法

日冷工にて実施されている、家庭用空調機器及び業務用冷凍冷蔵機器へのプロパン導入に係るリスクアセスメントにおいて、着火リスクをさらに詳細に検討する必要があるとして挙げられた機器を、まず大項目としてその本質的な着火機構から「電気スパーク」「高温面」「裸火」などの大分類に区分し、それぞれ着火機構を検討した。これを受けて、着火源候補となる電気機器や現象等を各大分類の下に紐づけ、大分類の着火機構モデルに基づいて着火性を評価することとした。表2.2.1.2.1-1に評価対象とした着火源の一覧を示す。

表 2.2.1.2.1-1 本研究で抽出した実環境下で想定される着火源候補の一覧

大分類	中分類	小分類
電気スパーク	有接点リレー	冷蔵庫、洗濯機、ドライヤー、炊飯器、電子レンジ、除湿機、掃除機、電気カーペット、オーブンレンジ、扇風機、テレビ、プリンター、エアコン、AV 機器、電話、ファックス
	サーモスタット	冷蔵庫、電気ストーブ、オーブントースター、電気ポット、電気こたつ、アイロン、ドライヤー
	人的操作	プラグ抜き差し、照明スイッチ
	ブラシモータ	掃除機、ドライヤー、電気カミソリ
	帯電	プリンター、静電気放電
高温表面		電気ヒーター、ホットプレート、たばこ
裸火		たばこ及びライター、ろうそく

可燃性ガスの着火性を議論するには、一般的にはエネルギー供給源周囲に可燃性混合気形成されるかどうか、そのエネルギー供給源が可燃性混合気を着火させるだけのエネルギーを有しているかどうかで評価できる。前者は燃焼範囲、後者は（最小）着火エネルギーという物理量を用いて評価される。ここで、（最小）としたのは、着火エネルギーは可燃性混合気の濃度に依存するので、最小着火エネルギーのみで評価すると、過大に着火しやすいと評価してしまう可能性があるためである。一般に最小着火エネルギーは、静穏な可燃性ガス中で容量性火花放電を用いて測定されることが多い。例えば Lewis and Elbe[1]は、火花放電の継続時間を  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  s と見積もっている。Strehlow[2]は、最小着火エネルギーの実験的な決定に際して、空気コンデンサを用いた自発放電では、貯蔵エネルギーの最高 90 %程度が  $10^{-5}$  s 以内に火花として放出されるとしている。例えば、可燃性ガス/空気混合気では、静電気のような数 mJ のエネルギーで着火するが、これと同じ熱量をニクロム線のジュール熱として与えても、着火は見られない。また、容器内の灯油や木片などには電気スパークでは一般に着火できない。これらは見かけの着火過程が異なるからであるが、本質的な着火過程[3, 4]は概ね以下の通りで共通である。

着火は持続的な燃焼反応の開始であり、燃焼反応は連鎖反応によって構成されるので、燃焼場には連鎖担体である OH や H などの活性化学種が多数存在する必要がある。可燃性混合気にエネルギー（熱）が与えられて温度上昇するとこの活性化学種の数が増加する。それと同時に、可燃性混合気から周囲へ熱や活性化学種が失われる。つまり発熱の速度と熱損失の速度のつりあいによって活性化学種の数が決まることになる。反応による発熱速度は一般にアレニウス式

$$\dot{q}_1 = QVC^n B \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.2.1.2.1-1)$$

で与えられる。ここで、 $V$ は反応系の体積 ( $m^3$ )、 $Q$ は反応体積の物質の発熱量 ( $kJ/m^3$ )、 $C$ は反応速度の濃度項、 $C$ は単位体積中のモル数 ( $mol/m^3$ )、 $n$ は反応次数、 $B$ 以下は速度定数であり  $E$ は活性化エネルギー ( $kJ/mol$ )、 $R$ はガス定数 ( $kJ/molK$ )、 $T$ は温度 ( $K$ )である。

一方、熱損失速度はニュートンの冷却則より

$$\dot{q}_2 = hS(T - T_0) \quad (2.2.1.2.1-2)$$

で与えられる。ここで、 $h$ は熱伝達率 ( $kW/m^2K$ )、 $S$ は系の境界の面積 ( $m^2$ )、 $T$ は系内部の温度 ( $K$ )、 $T_0$ は系の境界の温度 ( $K$ )である。この両式を温度に対してプロットすると図 2.2.1.2.1-1 のようになる。つまり  $\dot{q}_1 > \dot{q}_2$  であれば系の温度は際限なく上昇するので必ず着火し、 $\dot{q}_1 < \dot{q}_2$  であれば放熱のほうが大きいので温度が上昇せず着火しない。電気スパークのように瞬間的に局所的な高温が形成される場合（反応や放熱作用が無視できる場合）は、火炎核と生じる高温ガス塊が電極間に形成され、この火炎核が定常的な火炎伝播に十分なエネルギーを持っている場合に着火に至ると考えられる。

一方ホットプレートなどのように、混合気が徐々に加熱される場合は、放熱の影響を無視できないし、初期の低温の段階では反応による発熱はほとんどない。したがって、着火には外部から供給される加熱エネルギー（またはパワー）が支配的となり、要するエネルギーは電気スパークによる最小着火エネルギーよりもけた違いに大きくなる。すなわち、熱面着火においては、上述の定義の最小着火エネルギーとの比較で着火性を論じるのは適当ではない。

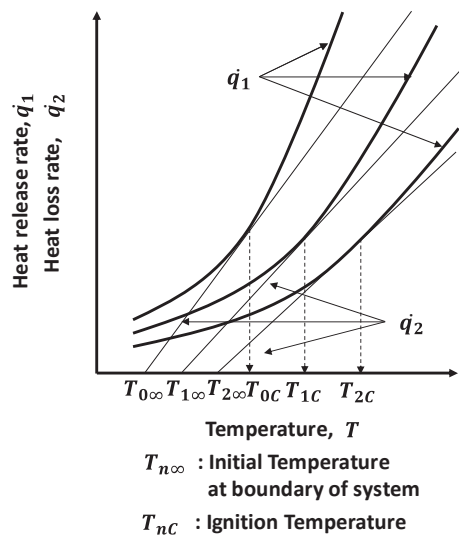


図 2.2.1.2.1-1 発熱速度と放熱速度のつり合いによる着火の概念図

## 2.2.1.2.2 有接点リレーで生じる電気スパークによる着火性の評価

### 2.2.1.2.2.1 着火モデル

有接点リレーで生じる電気スパークの場合においても、本質的には先に述べた通り着火は発熱速度と放熱速度のつりあいによって決まるので、放電時間の大小が着火エネルギーを大きく左右することになる。すなわち、エネルギー供給開始からある時間までは熱損失の影響を無視できる特性時間が存在し、その時間内で生じたエネルギーが燃焼反応継続に十分なエネルギー（最小着火エネルギー）であれば着火できる、と考えることができる。木下[5]はこの時間を”臨界着火時間”とよび、およそ  $100 \mu s$  ( $10^{-4} s$ )としている。その根拠として Strehlow[2]が示しているプロパン-空気混合気の火炎のシュリーレン撮影結果から、火花放電が生じてから相当時間（約  $10^{-4} s$ ）経過してなお、エネルギーがある臨界値以上であれば、火花放電で生じた初期火炎は真の火炎に発達し、それ以下であれば初期火炎からの熱は電極へ損失して、火炎伝播が中断され消滅したという結果を挙げている。これ以外にも、燃焼を支配する連鎖担体である OH ラジカルの時定数が  $100 \mu s$  程度という報告が、燃焼とは独立に放電

のメカニズムを調べた研究も含めて多数報告されている[6-10]。

しかし家電製品に使用されている有接点リレーでは、放電エネルギーの放出に $10^{-3}\sim 10^{-2}$  s程度かかるとされている[5]ことに対して、最小着火エネルギーは $10^{-8}\sim 10^{-7}$  sの放電時間[1]である容量性放電を用いて測定されていることが多い。放電時間が長ければそれだけ放熱量も大きくなるから、有接点リレーでの放電における着火は、最小着火エネルギーよりもかなり大きなエネルギーが必要になると推測されるが、ここではまず最悪状況を想定した簡易評価のために、有接点リレーの接点間で生じた放電エネルギーのうち100  $\mu$ s以内に放出されるエネルギーが最小着火エネルギーより大きい場合に着火の可能性が高いとして、評価を進めることとした。

#### 2.2.1.2.2.1.1 既往文献による着火性の評価

鳳ら[11]は、電話用リレー、カーボンランプ（抵抗性負荷）、DC 48 V電源からなる回路を用いた実験により、アークエネルギーを計測している。これによると、接点電流が1.4 A未満の場合、アーク継続時間は概ね100  $\mu$ s以下となるので、放電エネルギーはほぼすべて着火に寄与すると考えられる。このとき、接点材質にも依存するが概ね0.6 A以上の接点電流であれば、プロパン/空気混合気の最小着火エネルギーを超えるエネルギー（ $\sim 0.5$  mJ）が生じる。ただし電気スパークによる着火エネルギーは燃料濃度に対して下に凸の曲線を描くので、この値であれば、燃焼範囲のすべての濃度にわたって着火できるわけではなく、着火可能なプロパン/空気混合気の燃料濃度範囲はせいぜい3.0-6.9 vol%の範囲に限られる。

制御電流が2 A超となるパワーリレーや電磁コンタクタについても、文献[12-14]の電圧電流測定結果をもとに、放電開始後100  $\mu$ s以内に生じるエネルギーを求めたところ、約6-7 mJとなる場合がみられた。燃焼下限及び上限での着火エネルギーは約4 mJであるから、この場合はプロパン/空気混合気の燃焼範囲すべてにわたって着火可能となる。

以上のことから、電気部品の接点部でアーク放電が生じた場合、放電エネルギーだけでみれば着火の可能性を否定できず、特に制御容量2 A以上の場合は燃焼範囲全体にわたって着火可能となる。

これらの結果をもとに、日常生活で用いられているいくつかの電気機器によるプロパンの着火性を、実機の分解調査及びWeb上に掲載されている分解写真をもとに評価した。その結果は以下のとおりである。

##### ① インクジェットプリンター

市販のインクジェットプリンター（EPSON, EP-806AR）を分解し、先に述べた着火源となりうる電気部品の調査を行った。プリンター内には紙送りのブラシモータが2個、インクカートリッジを動かすためのブラシモータが1個見つかった。インク吐出制御と紙送り制御のために2個の電子基板があったが、いずれにも接点リレーは使用されていない。以上のことから、インクジェットプリンターの場合、ブラシモータが存在することによる着火の可能性があると考えられる。

##### ② 扇風機

市販の扇風機（三菱電機製, Summer life R30C-W）を分解し、着火源となりうる電気部品の調査を行った。機器内部にはブラシレスモータが用いられており、ブラシレスであることからこれによる着火の可能性は小さい。操作スイッチ部には接点があり、ここでは電磁コンタクタあるいは接点リレーと同様の放電が生じると考えられるので、これによる着火の可能性は否定できないとみられる。なお、今回分解調査したものは古い年式のものであるが、これと異なり扇風機の動作を電子制御するものが現在では広く流通している。この場合、電子基板を内蔵しているものと思われ、ここで接点リレーが使用されていれば、これを放電源として着火が生じる可能性は否定できないと考えられる。

##### ③ 電子レンジ

市販の電子レンジ（SANYO, EM-LP1）を分解し、着火源となりうる部品の調査を行った。まずターンテーブル駆動用のモータを発見したが、このモータは6 rpm定格であり、この回転数ではアーク放電は発生しないと考えられる。また、モータはプラスチック製の歯車に直結されているため、この点から見ても着火性の放電が生じるとは考えにくい。これとは別に、庫内にはサーモスタットが使用されていた。サーモスタットはバイメタルを使用した接点スイッチであり、過去にエチルエーテルがサーモスタットからの火花によって引火した事例が報告されている。また、そのほかにも庫内からは接点部品が見つかった。これらのことから、電子レンジについては、サーモスタットの存在によりプロパンの着火源となる可能性は否定できないと考えられる。

##### ④ 掃除機



市販の掃除機（TWINBIRD, FW3K167）を分解し、着火源となりうる部品の調査を行った。供試掃除機にはユニバーサルモーターが使用されていた。これは整流子とブラシを持つため、アーク放電や機械火花を生じる。実際にこのユニバーサルモーターを動作させたところ、空気中における放電の発生が確認できた。また、インターネット上に掲載されていた別の掃除機の分解写真[15]を調べたところ、基板上にリレーが使用されていた。この基盤はモーター付近に設置されており、密閉性は低い。以上のことから、ブラシモーターで生じるアーク放電や、基板上のリレーで生じる放電等により、プロパンを着火させる可能性は否定できないと考えられる。

⑤ 洗濯機

インターネット上に掲載されていた洗濯機の分解写真[16]（TOSHIBA AW70DG, National NA-F50Z8）から、使用されていた電気電子部品を推定した。いずれも電子基板が操作パネルの下にあり、そこに接点リレーが用いられていたが、洗濯機は漏電防止のために基板上に樹脂を充てんして防水加工が施されている。インターネット上の写真からは、電気部品が樹脂によって完全に覆われているわけではないものの、密閉性は高いものと推測される。したがって洗濯機に使用されている接点リレーは着火源にはなりにくいものと推測される。

⑥ 除湿機・空気清浄機

インターネット上に掲載されていた除湿機（CORONA, CD-J107X）の分解写真[17]及び空気清浄機（SHARP KC-Y65, KC-B50, Panasonic f-vxe60）を実際に分解した結果から、使用されていた電気電子部品を推定した。洗濯機と同様、操作パネルの下に電子基板があり、有接点・無接点リレーともに使用されているようである。洗濯機とは異なり防水加工があまり施されていない。したがって基板部分の有接点リレーによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

⑦ ドライヤー

インターネット上に掲載されていたドライヤーの分解写真[18, 19]（National EH534, Nobby NB1902）から、使用されていた電気電子部品を推定した。基板は持ち手の内部に存在し、接点リレーの存在も確認された。ブラシモーターも確認された。以上により、ドライヤーによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

⑧ 電気ポット

インターネット上に掲載されていた電気ポットの分解写真（タイガー PDK-G）から、使用されていた電気電子部品を推定した。基板は製品の底部に存在し、接点リレーの存在も確認された。電気ポットやケトルの底面は密閉性が低いものが多く、また、サーモスタットやサーミスタ等も使用されている可能性がある。以上により、電気ポットによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

⑨ 電気炊飯器

インターネット上に掲載されていた電気炊飯器の分解写真[20]（National SR-SS18A, タイガー JAQ-A550）から、使用されていた電気電子部品を推定した。基板は製品の側面下部に存在し、接点リレーの存在も確認された。以上により、電気ポットによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

⑩ 電気カーペット

一般に電気カーペットは操作部が床に設置されることが多く、インターネットに掲載されていた写真[21]では、操作部にリレーが組み込まれていたものも存在した。熱線によってカーペット全体を暖めているため、回路全体の抵抗が大きく、接点部での放電が起こりやすいと考えられる。また、サーモスタットによって温度を管理しているものが多く、サーモスタットによる可燃性気体の火災事例も存在するため、電気カーペットによる着火の可能性は否定できないと考えられる。

⑪ レーザープリンター

プリンターやCD・DVD再生機器等に用いられているレーザーも、着火源として懸念されている。レーザーは可視光線であり、その波長はDVDプレーヤーで650 nm、ブルーレイプレーヤーで405 nmとされている[22]。これに対しプロパンの吸収帯[23]は3370 nm（吸収率90.6%）、6800 nm（吸収率19.7%）であるから、レーザー照射部に可燃範囲のプロパン／空気混合気が存在していたとしても、そのエネルギーを吸収することはない。よって、レーザーは着火源にはならないと考えられる。印刷部以外はインクジェットプリンターと同じ機構であるので、ブラシモーターが使用されていると考えられる。したがって、ブラシモーターから生じるアーク放電によっては、着火源となる可能性は否定できないと考えられる。これ以外に、感光ドラムを帯電させるためのコロナワイヤー及びレーザーが着火源になる可能性が考えられるが、コロナワイヤーで生じるコロナ放電のエネルギーは

0.1 mJ 未満[24]と考えられるので、プロパンの最小着火エネルギーに満たず、着火の可能性は小さいと考えられる。また先述の通りプロパンはレーザーの波長帯に吸収帯を持たないので、基本的にレーザーでの着火の可能性はない。プリンター内のレーザーはレンズで集光されるので、通常のレーザーよりもエネルギーが大きくなるが、それでも約 0.1 MW/cm<sup>2</sup> 程度[25]なので、レーザーブレイクダウン閾値 (100 GW/cm<sup>2</sup>[26]) よりも小さい。このためレーザーでの着火の可能性は極めて小さいが、ブラシモータのアーク放電により着火する可能性がある。

#### 2.2.1.2.2.2 有接点リレーの放電エネルギーの実測

前項までの調査結果を立証するため、実験を実施した。

##### (1) 実験概要

市販の 2 種類の有接点リレー (OMRON MK2P, G7J) を用いた。負荷を接続し、接点閉成時及び開離時のそれぞれについて接点両端の電圧と回路を流れる電流をそれぞれプローブで計測し、チャートレコーダに記録した。回路図及び装置写真を図 2.2.1.2.2.2-1 に示す。使用した負荷はドライヤー 2 種、電動ドライバー 2 種、LED 電球 1 種である。実験条件として負荷種類及びリレー種類を表 2.2.1.2.2.2-1 に示すように変化させた。実験実施場所の交流電源周波数が 60 Hz であることから、1 つの負荷種類・リレー種類の組み合わせにおいて、60 回の計測を実施した。

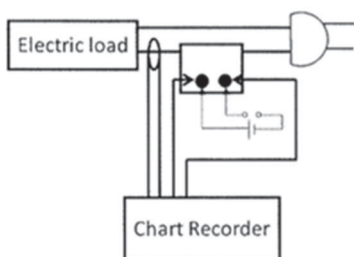


図 2.2.1.2.2.2-1 実験装置の概要

表 2.2.1.2.2.2-1 使用した家電製品の諸元

Type of relay	Type of Electrical Load			Consumption Power (W)
Type 1	Inductive & Resistance	Hair dryer	Type A HIGH	840
			MIDDLE	440
			LOW	40
	Capacitive & Resistance	Screwdriver	Type B HIGH	1050
			MIDDLE	1000
			LOW	700
Resistance	Electric bulb		50	
Type 2	Inductive & Resistance	Hair dryer	Type A HIGH	840

##### (2) 結果

いずれの負荷を使用した場合も、100  $\mu$ s 間で放出される放電エネルギーは全て最小着火エネルギーよりも大きな値を示した。特にリレー閉成時に開離時よりも大きなエネルギーを示す傾向があった。放電エネルギーは消費電力の増加に伴って増加する傾向が認められた。負荷のインダクタンス・キャパシタンス・抵抗が及ぼす影響については、完全ではないものの、放電エネルギーは抵抗にはあまり依存せず、インダクタンスが小さくキャパシタンスが大きいほど大きくなる傾向がみられた。

#### 2.2.1.2.2.3 ブラシモータで生じる電気スパークによる着火性の評価

ブラシモータで生じる電気スパークの場合においても、有接点リレーと同様の考え方で着火が支配されると考えることができる。ブラシモータの放電波形を測定した一例として、伊里[27]が実施した直流モータの高速回転時の整流現象とブラシ摩耗に関する研究がある。本研究では電流電圧波形を観測し、その結果をもとにアーク継続時間、アーク電圧、残留電流と回転速度の関係がまとめられている。アーク継続時間及び残留電流は、回転速度 3000 rpm 付近で最小値をとったのち増加に転じ、アーク電圧は回転速度に対してほぼ一定である結果が報告されている。そこで、最もエネルギーが小さいと思われる、回転速度 3000 rpm での電流・電圧・アーク継続時間を読み取ると、それぞれ 17 V, 0.55 A, 37  $\mu$ s であったので、これよりエネルギーは 0.35 mJ となる。アーク継続時間が 100  $\mu$ s であることから、このエネルギーはすべて着火に寄与すると考えられるので、先述のパワーリレーや電磁コンタクタほどではないが、濃度によってはプロパンを着火させる可能性があると考えられる。

#### 2.2.1.2.2.4 照明スイッチの操作で生じる電気スパークによる着火性の評価

##### (1) 概要

ここでは、電気スパークによる着火の可能性のある想定事故シナリオの 1 つとして、家庭用空調機器からプロパン冷媒が漏洩し、室内で可燃性混合気が形成された環境下で、壁面スイッチにより照明を点灯あるいは消灯させた場合を考える。壁面スイッチは図 2.2.1.2.2.4-1 に示すように接点を有す

るので、その周囲においてアーク放電を生じ、これにより着火する恐れがある。そこで実験により、この動作による着火性を定性的・定量的に評価することとした。また、日本やアメリカでは 100～110V の電圧が使用されているが、主要 20 か国において、200～230V を使用している国は 16 か国ある 3-19) ことから、供給電圧を AC 100 V 及び AC 230 V に設定して実験を実施した。





図 2.2.1.2.2.4-1 供試照明スイッチの外観写真。上段：スイッチ筐体，中下段：接点部  
左列：Type A，右列：Type B

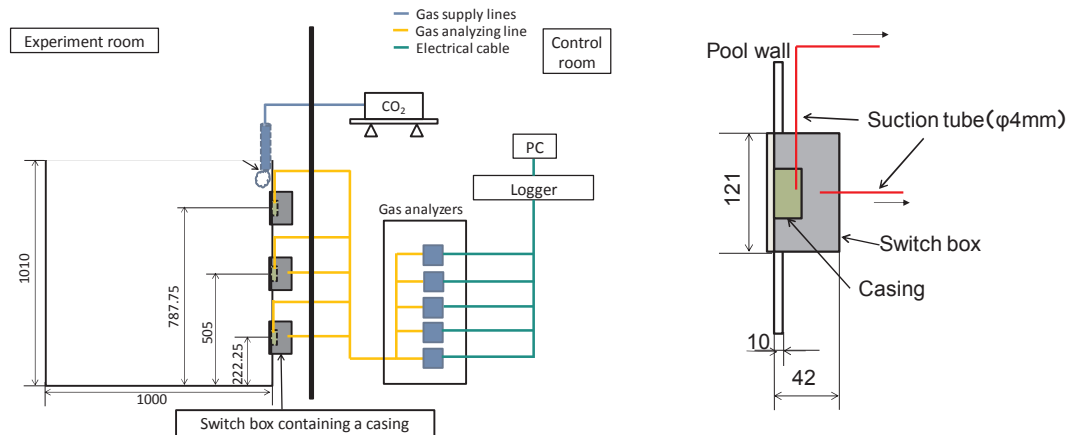
## (2) 研究の流れ

まず、着火源と想定されるスイッチ接点付近で可燃範囲のプロパン／空気混合気が形成されるか否かを確認するために、試験空間内及び接点が格納されたケーシング（以下、“接点ケーシング”）内のプロパン濃度を測定した（実験 A）。次いで、空気雰囲気下でスイッチを動作させ、接点間両端の電圧及び回路電流を計測して放電エネルギーを求め、着火能力の評価を行った（実験 B）。これらの結果を踏まえて、試験空間内にプロパン／空気の可燃性混合気を形成させてスイッチを動作させる着火実験を実施し、接点周囲の放電及び着火挙動を視覚的に観測するとともに、放電エネルギー及び発光部の距離を計測することにより、着火の有無との関係を定量的に検討した（実験 C）。

## (3) 実験の概要

### 1) 実験 A（濃度計測実験）

図 2.2.1.2.2.4-2 に示すように、一辺 1 m の立方体形状の亚克力製プールを製作し、その壁面に穴をあけて、接点ケーシングを含むスイッチ本体とこれを支持するスイッチボックスを取り付けた。使用したスイッチは図 2.2.1.2.2.4-1 に示す 2 種類（Type A: Panasonic, WNP5101MW, Type B: Panasonic, WTP50011WP）で、両者を合わせた国内シェアは 90 %以上と推定される。スイッチの取り付け位置はプール底面から 787.75, 505, 222.25 mm の高さとした。これらの位置はそれぞれおよそ 3/4H, 1/2H, 1/4H（H はプール高さ：1000 mm）の高さに相当するので、本報告書では以後この表記でスイッチの位置を表すものとする。このプール内に、鉛直下向きにプロパンを漏洩させて、プール内のプロパン濃度を高さ方向に異なる 5 地点で、超音波式ガス濃度計（第一熱研製 US-II-T-S）を用いて計測した。漏洩地点の床面からの高さは 0, 100, 300, 500, 1000 mm の 5 地点としてそれぞれ濃度計測を行った。漏洩速度は 10 g/min とし、漏洩量は 41 g 及び 87 g とした。これは全量がプール内に漏洩して均一拡散した場合に、プール内のプロパン濃度がそれぞれ燃焼下限界（LFL, 2.1 vol%）及び燃焼上限界（9.5 vol%）になる量である。ただし、安全性の観点から、プロパンと分子量がほぼ同じであることから漏洩挙動がよく似ていると推測される二酸化炭素を、プロパンの代わりに漏洩させた。プロパン濃度は、超音波式ガス濃度計によってあらかじめ測定した二酸化炭素濃度とプロパン濃度の校正曲線に基づき求めた。



(a) 濃度測定装置全体図 (b) スイッチボックス拡大図 (単位: mm)  
 図 2.2.1.2.2.4-2 スイッチケーシング内プロパン濃度の計測装置図

### 2-1) 実験 B-1 (放電エネルギー計測実験: 100V)

図 2.2.1.2.2.4-3 に示す装置を用いて、照明スイッチ接点における放電エネルギーを測定した。負荷には抵抗性負荷の白熱電球 (40, 60, 100 W) 及び LED 電球 (60 W) を使用した。照明スイッチと負荷との間にカレントモニターを設置して通電時の電流波形を観測するとともに、オシロスコープにてスイッチ両端の電圧を計測した。スイッチ動作は治具を電動スライダーに取り付けて遠隔操作で実施した。接点ケーシング内の接点の様子を観察するためにケーシングに穴をあけ、鉛直下方から高速カメラにて放電の様子を撮影した。なお、接点周囲は空気雰囲気とし、スイッチ押下動作は 1 つの負荷について 10 回実施した。得られた電流及び電圧波形の積を時間積分し放電エネルギーを求めた。

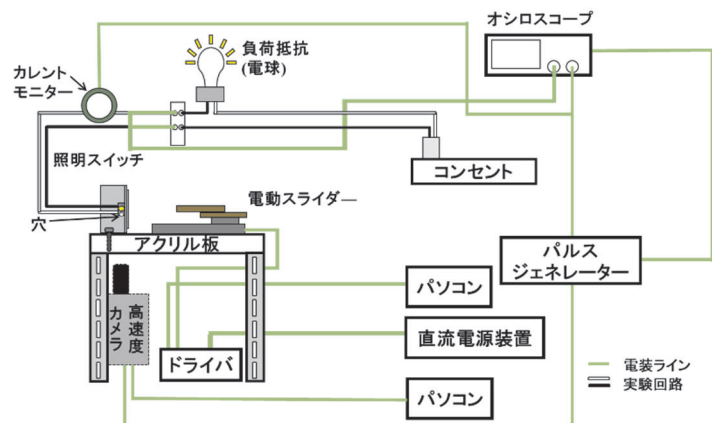


図 2.2.1.2.2.4-3 照明スイッチ接点での放電エネルギーの計測装置

### 2-2) 実験 B-2 (放電エネルギー計測実験: 230 V)

実験 B-1 と同様の回路を用いて、照明スイッチ接点における放電エネルギーを測定した。負荷には抵抗性負荷の白熱電球 6 種類 (40, 60, 95 W 各 1 種類及び 100 W 3 種類) 及び Hf 蛍光灯 (32 W) を使用した。印加電圧は 100 V 及び 230 V とし、使用するスイッチは、図 2.2.1.2.2.4-1 の Type A とした。スイッチの接点雰囲気は空気とし、スイッチ押下動作は 1 つの負荷について 60 回実施した。放電エネルギーは実験 B-1 と同様にして求めた。

### 3-1) 実験 C-1 (着火実験: 100V)

用いた着火実験装置は実験 B-1 と同じである。安全のため、プロパンはスイッチボックス内のみ導入した。実験 A での濃度計測結果から、スイッチボックス内と接点ケーシング内はほぼ同等の濃度を示したので、スイッチボックス内に可燃濃度範囲のプロパン/空気混合気が存在すれば、接点ケーシングの穴を通してケーシング内へプロパンが流入すると考えた。あらかじめ所定量のプロパンをシリンジに測りとり、これをスイッチボックスに取り付けた導入ポートから導入した。導入量は全量がスイッチボックス内に拡散した場合にボックス内濃度が LFL 及び化学量論濃度となる量として、それぞれ 12 mL, 21 mL とした。本実験では回路負荷は白熱電球 (60 W) のみとし、スイッチタイプは Type

Bのみとした。着火の有無はビデオカメラ及び目視観察によった。照明スイッチの閉成及び開離に伴う放電エネルギーは実験 B-1 と同様に求めた。

### 3-2) 実験 C-2 (着火実験 : 230V)

着火実験に使用した燃焼容器は、厚さ 10mm のアクリル板で製作した、内容積 150×150×150 mm のプールである。容器上面はアルミホイルで封じており、燃焼時にはこれが破れて圧力を放散するようになっている。プール内には小型のファンを設置した。スイッチのコンセント部は容器外壁に沿って鉛直に取り付けられており、スイッチ接点のケーシングがプール内側に位置している。回路構成は実験 B と同じである。スイッチの電極間にプロパンガスが流入するよう、接点ケーシング部に開口部を設けた。アクリルプール内にプロパンガスを導入し、濃度を均一にするため小型ファンにより 1 分間攪拌した。プール内のプロパンガス濃度は化学量論濃度となる約 4 % に設定した。高速度カメラを用いて、接点ケーシング下部にあけた穴より放電の様子を撮影した。負荷は、実験 B-2 で放電エネルギーが大きかった 100 W 白熱電球及び Hf 蛍光灯 (32W) とし、印加電圧は 230V とした。スイッチ押下動作は 1 つの負荷について 50 回実施した。放電エネルギーは、実験 B-2 と同様に求めた。

#### (4) 結果及び考察

##### 1) 接点ケーシング内への可燃性混合気の流入

Type A, Type B とともに、いずれの漏洩高さの場合も、1/2H 及び 1/4H の高さに設置されたスイッチの接点ケーシング内への、可燃範囲内の組成をもつプロパン/空気混合気の流入が認められた。プロパンはスイッチのプレートとスイッチ本体の間隙からスイッチボックス内に流入し、接点ケーシングにある穴を通して内部へ流入したものと推測される。

##### 2) 接点での放電エネルギー

実験の結果、以下の知見が得られた。

- ① 1 回のスイッチ動作で複数回の放電が生じる場合があった
- ② 実験 B-1 (プロパン導入量 21 mL) の接点間放電エネルギーから明らかなように、回路開離時のほうが回路閉成時よりも大きな放電エネルギーを示した。ただし、回路開離時は回路閉成時よりも放電時間自体が長くなったので、臨界着火時間内の放電エネルギーに限ると回路閉成時のほうが大きな値を示した。しかしいずれも最小着火エネルギーよりも大きなエネルギーを示す場合が認められた。
- ③ 交流の場合、一般的に位相が 90° 付近でアーク放電の電圧は最大値となる。しかし、印加電圧に関係なく、蛍光灯では位相が 20~90° の範囲で大きな電圧が得られた。これは、蛍光灯器具内の安定器の影響と考えられる。放電エネルギーは 100 V の場合に比べて 230V の場合の方が大きくなった (実験 B-2 の結果より)。
- ④ 上記の傾向は負荷の種類に依存しなかった。

これらのことから、照明スイッチの接点付近に可燃組成のプロパン/空気混合気が形成される可能性と、最小着火エネルギーを上回る放電エネルギーが接点において生じる可能性は否定できず、したがって着火の可能性を否定できないことが示された。

##### 3) 着火実験

以上を踏まえ着火実験を実施したが、各濃度条件において 60 回 (100 V) 及びプロパンガス濃度約 4 % で 200 回 (230 V) のスイッチ動作の繰り返しのうち、着火が認められたケースは 1 度もなかった。放電時の様子を撮影した高速度カメラ画像から発光部の距離を読み取ると、おおむね 0.1-0.4 mm 程度であった。これは、プロパンの消炎距離 (1.7 mm [28]) に比べて 1/10-1/4 程度の値である。接点の径は約 2.0 mm 程度で、これも接点間距離に比して 1 桁大きい。したがって、本実験で着火が認められなかったのは、放電核の大きさが消炎距離未満であったために、接点との接触によって熱損失を受け、持続可能な火炎に成長できなかったためと考えられる。

しかしながら一般にスイッチ接点の技術基準として、IEC 規格 [29] に 3 mm ギャップと呼ばれる基準が存在する。したがって接点間には最低でも 3 mm の間隔が存在することになるので、このギャップ長全体にわたって放電が生じて火炎核が形成されていれば、火炎はギャップを通り抜けて全体に伝播することになる。

そこで、ギャップ長と絶縁破壊電圧の関係について検討した。気体中で絶縁破壊 (すなわち放電) が生じる電圧  $V_s$  は、気体の圧力  $p$  と電極間隔  $d$  の積の関数となり、次式で表される (パッシェンの法則)。

$$V_s = \frac{Bpd}{K + \ln(pd)}, K = \ln \left\{ \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right\} \quad (2.2.1.2.2.3-1)$$

ここでB, Kは定数で,  $\gamma$ は陰極の二次電子放出係数であり, 空気の場合は $\gamma = 0.01$ とみなせる。一般に空気の絶縁破壊電圧は330 Vとされているので, 式(3-3)からこれに対応するギャップ長dを大気圧の下で求めると0.01 mmとなる。ギャップ長3 mmでは12 kV超, 消炎距離となるギャップ長1.7 mmでは約7.8 kVとなる。照明スイッチの動作ではこれだけの電圧は生じないと思われるので, 放電時のギャップ長は最大でも消炎距離未満になると推測される。よって照明スイッチの接点でのアーク放電による着火の可能性は無視できると考えられる。

#### 2.2.1.2.2.5 電源プラグの抜き差しで生じる電気スパークによる着火性の評価

##### (1) 研究の概要

コンセントへの電源プラグの抜き差し(主に引き抜き)時に生じる電気スパークによる着火性については, 電気スパークのエネルギー等の基礎的知見のみでは評価困難であり, また, このような研究報告はほとんど見当たらない。そこで, これを再現した実験により, 着火性を評価することとした。なお本検討結果の一部は2019年度に口頭発表している[30]。

##### (2) 研究の流れ

コンセントを取り付けた燃焼容器内に所定濃度のプロパン/空気混合気を導入し, 負荷の電源プラグを挿入して, 着火の有無を高速度撮影により観測した。抜き差し時の電流及びプラグ両端電圧の変動を計測し, 着火挙動の定量的評価を試みた。

##### (3) 実験の概要

図2.2.1.2.2.5-1に示すように, 上面をアルミホイルで封じた一辺150 mmの容器内に, 図2.2.1.2.2.5-2に示す市販のAタイプコンセントを鉛直に取り付けた空間で着火実験を実施した。コンセント筐体内部と挿入口との間に仕切りはなく, 挿入口からガスが進入した場合, 筐体内部全体に拡散・滞留する構造となっている。①電源プラグの抜き差しを200回繰り返した場合(実験①)と, ②コンセントの引き抜き動作のみを100回繰り返した場合(実験②)の2パターンの実験を実施した。実験①では, 容器内に導入したプロパンは着火が認められるたびに交換するものとし, 一方実験②では着火の有無にかかわらず毎回交換した。いずれの実験でも, 最も厳しい評価をするために, 最小着火エネルギーを示すとされる5.18 vol%のプロパン濃度を対象とした。電源プラグ両端の電圧と回路電流をそれぞれプローブで計測し, チャートレコーダに記録した。使用した負荷は表2.2.1.2.2.5-1に示す仕様の市販の家電製品(ドライヤー・電動ドライバー・掃除機)である。

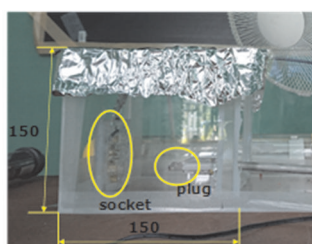


図 2.2.1.2.2.5-1 実験装置の概要

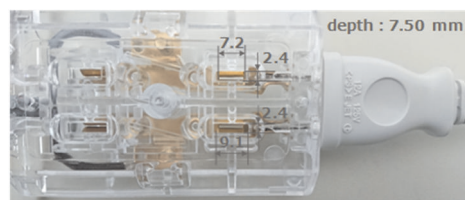
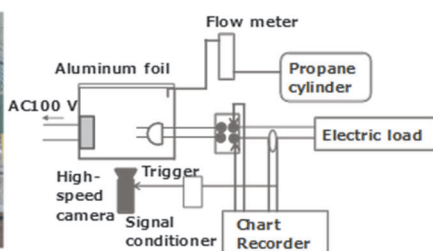


図 2.2.1.2.2.5-2 供試コンセントの外観

表 2.2.1.2.2.5-1 供試家電製品の消費電力

Type of Electrical Load				Consumption Power (W)
Inductive & Resistance	Hair dryer	Type A	HIGH	810
			MIDDLE	420
		Type B	HIGH	1040
			MIDDLE	700
Capacitive & Resistance	Screwdriver	Type A	200	
		Type B	80	
Inductive & Capacitance	Vacuum cleaner	Type A	1000	
		Type B	970	



#### (4) 結果及び考察

##### 1) 着火確率

いずれの負荷を使用した場合も、実験②では着火が1度も認められなかった。このことから、何度かのプラグの抜き差しの繰り返しが必要であると考えられる。着火確率は概ね消費電力が大きくなるにしたがって大きくなる傾向がみられた。

##### 2) 着火及び火炎伝播機構

図 2.2.1.2.2.5-3 はドライヤー Type B を負荷とした場合のコンセント周囲のカラー高速撮影写真である。図中の  $t$  は放電が開始したと思われる発光がみられてからの経過時間である。図 2.2.1.2.2.5-3(a) と (b) はよく似た挙動を示している。いずれも、放電時間（この発光の継続時間）は 4.3-4.5 ms であり、プラグがコンセントから抜けてから約 100-130 ms 後に、プラグが接続されていた場所とは異なるコンセント口（上部）から火炎が噴出している。このときの放電エネルギーは約 4.5 mJ であったので、エネルギー的には着火可能である。コンセントのプラグ挿入口の隙間は約 2.4 mm であるのに対してプロパン火炎の消炎距離は 1.70 mm であることも併せて考えると、抜き差し動作の繰り返しによって、コンセント外のプロパン/空気混合気がコンセント筐体内に侵入し、これにコンセント引き抜き時のスパークで着火して、コンセント上部から噴出したものと考えられる。

これに対して、図 2.2.1.2.2.5-3(c) では若干その様相が異なる。コンセント内での発光の後、図 2.2.1.2.2.5-3(a) と (b) よりも有意に早期の段階で、プラグ刃付近に火炎の発生が認められ、これが約 6 ms のうちに同心円状に伝播している。プラグ刃付近からコンセント方向へ火炎の伝播が認められることから、このケースの着火機構は図 2.2.1.2.2.5-3(a) と (b) とは異なり、コンセント外で着火してこれが容器内の未燃混合気に伝播したと考えられる。その着火要因は、抜き差しの繰り返しにより容器内の塵を巻き上げてプラグ刃との間で静電気放電が生じたか、あるいは抜き差しによりコンセント内部から連行されてきた金属粉などとプラグ刃の間での静電気放電によるものと考えられるが、今回の実験のみでは確証は得られなかった。また、インダクタンス、キャパシタンス、抵抗といった負荷条件が着火に及ぼす明確な影響は認められず、上述のように主として消費電力のみに依存した。

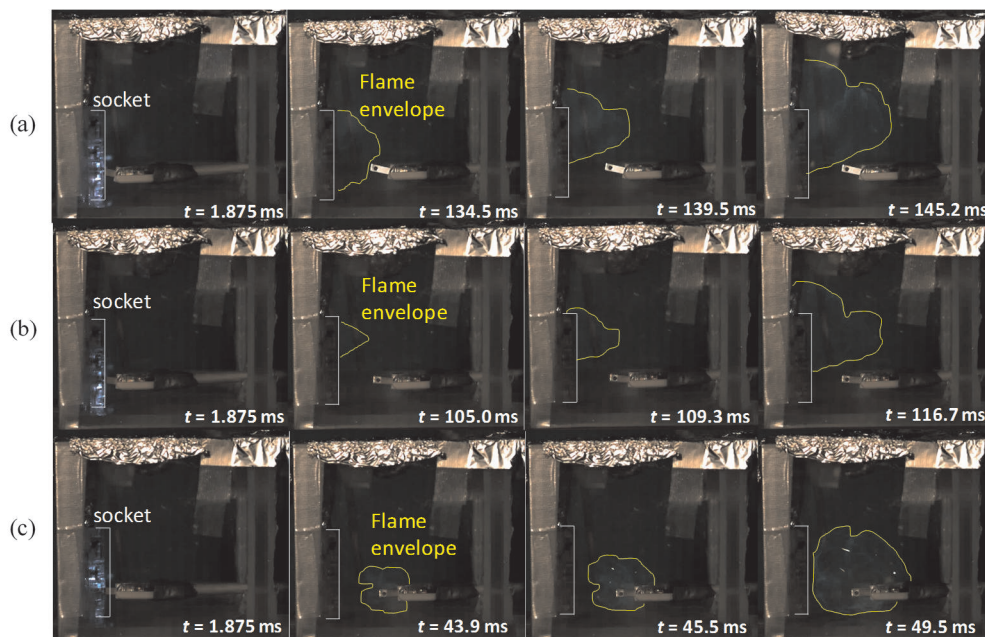


図 2.2.1.2.2.5-3 コンセント抜き差しによるプロパン/空気混合気の着火挙動

#### 2.2.1.2.3 静電気による着火性の評価

##### (1) 概要

静電気スパークによる着火性を評価するため、日常生活における帯電シナリオ及び人体からの放電シナリオを、日冷工で実施されているリスクアセスメントと共同して検討し、これに基づいて帯電電位、エネルギー及びこれらに及ぼす湿度の影響を文献等により推測した。シナリオ構築にあたっては放電場所と可燃性混合気濃度の位置関係や放電の生じる確率などを総合的に勘案する必要があるが、ここではこれらについては触れない。



(2) 評価の概要と結果

(a) 帯電シナリオ

日常生活における人体への帯電事例としては、歩行・摺り足歩行、ソファ・イスからの起立、衣服の脱衣、毛布の折り畳み、整髪、などが考えられる。これらにより帯電した人体からの放電シナリオとして、①ドアノブを触って放電する場合と、②衣服を脱ぐ際に放電する場合を取り上げる。

(b) 放電種類と着火能力の学術的分類

静電気放電の形態には、主として火花放電、コロナ放電、ブラシ放電、沿面放電、コーン放電、雷状放電などがある。それぞれの特性は以下のとおりである[31]。

- ① 火花放電：導体間で起きる放電であり、放電エネルギーは  $E = (1/2)CV^2$  ( $C$ ：静電容量(F),  $V$ ：電圧(V)) で与えられ、比較的高い。最小着火エネルギーが 100 mJ 以下の可燃性ガスを着火させようというガイドラインもあり、着火源となりうる。帯電電位と静電容量の関係は図 2.2.1.2.3-1 に示されるとおりである。導体の最大帯電電位が 330 V よりも大きいときに火花放電の発生の可能性があると考えられている。

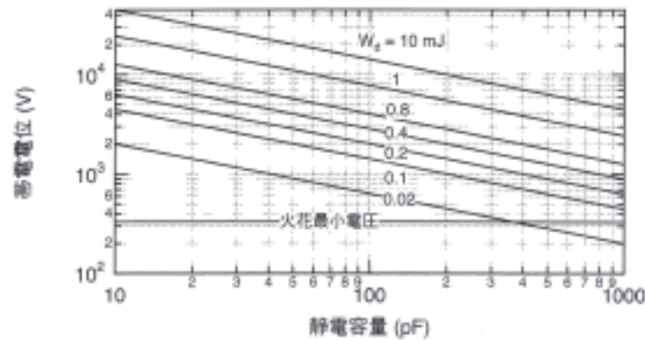


図 2.2.1.2.3-1 火花放電の帯電電位と静電容量及び静電エネルギーの関係[31]

- ② コロナ放電：先のとがった針電極、細線電極や曲率半径の極めて小さい電極の近傍に不平等電界場が形成され、この局所的に高くなった電界により生じる放電である。一般に曲率半径が 5 mm 以下で起こる。ただし、放電エネルギーが比較的小さいので、水素のように極めて小さい着火エネルギーを持つ可燃性ガス以外には、一般に着火性はない。
- ③ ブラシ放電：主に絶縁物が帯電し、曲率のある接地金属、指先などが近づくときに起きる。正極性の放電のほうが着火性が高いことが知られている。ブラシ放電のエネルギーは 1~3 mJ までで、4 mJ を超えることはないが、可燃性ガスの着火源となりうる。絶縁体表面の平均電位とブラシ放電の放電エネルギーとの関係は図 2.2.1.2.3-2 に示されるとおりである（接地導体球の半径を 20 mm とする場合）。
- ④ 沿面放電：絶縁物の厚さが薄くなると絶縁物の表裏に電気二重層が形成されるので、さらに大きな表面電荷を保持できるようになる。このような絶縁物の表面に沿って起きる放電が沿面放電である。放電エネルギーは 10 J 程度になることもあり可燃性ガスの着火源となりうるが、図 2.2.1.2.3-3 に示すように絶縁物の厚さが 8 mm 以下でかつ絶縁層の電位が 4 kV 以上ないと生じない。
- ⑤ コーン放電：絶縁性の粉体を空気輸送する際に、帯電粉体が堆積するコーン状のフィード表面で生じる放電のことである。
- ⑥ 雷状放電：サイロなどへの粉体の投入や搬入、タンク内でのジェット洗浄などにおいて、帯電粉体あるいはミストが気相空間中を浮遊し空間電荷雲を形成し、これから設置されたサイロやタンク壁に向かって生じる雷のような放電。しかし 500 kV/m もの高電界を要するため通常は生じない。

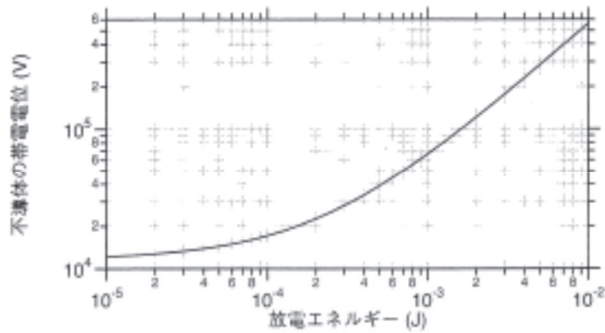


図 2.2.1.2.3-2 ブラシ放電の帯電電位と放電エネルギー[31]

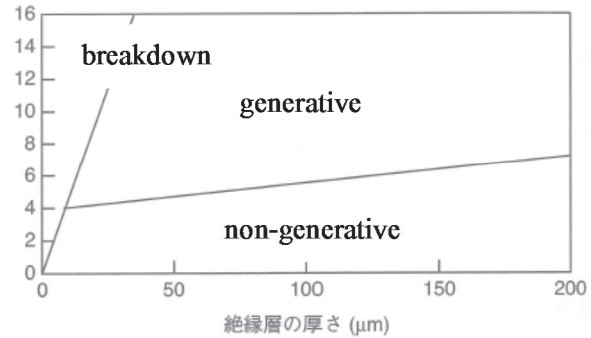


図 2.2.1.2.3-3 沿面放電の電位と絶縁層の厚さの関係[31]

(c) ドアノブ接触時の放電による着火性

この場合の放電は上記(b)の火花放電に該当する。放電の発光が確認できるのは人体帯電電位が4 kV以上であるとされ、この電位では“針で深く刺された感じを受け、指がかすかに痛む”電撃の強さに相当するとされている[31]。これは一般的な生活環境での静電気の感覚に合致すると思われるので、ここでは帯電電位を4 kVと見積もることとする。人体の静電容量は一般に100 pFとされていることが多い。これらをもとに火花放電のエネルギーを見積もると $E = 0.80$  mJとなり、単純にエネルギーだけで見れば着火の可能性は否定できない。

(d) 衣服脱衣時の放電による着火性

この場合の放電は上記(b)のブラシ放電に相当する。衣服脱衣時の帯電電位は文献によるとおよそ4.0-5.0 kVとされている。この場合図2.2.1.2.3-2から、放電エネルギーは $10^{-5}$  J未満のオーダーとなるから、プロパン/空気混合気を着火させるには至らない。よって、衣服脱衣時の静電気放電による着火性は無視できると考えられる。

2.2.1.2.4 高温熱面による着火性の評価

(1) 研究の概要及び流れ

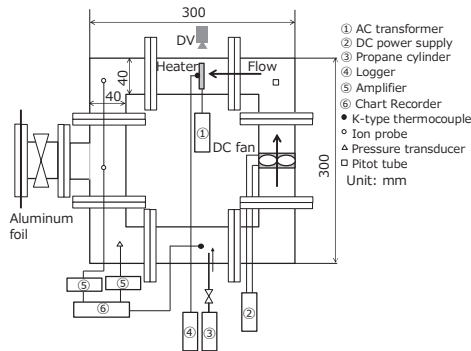
前節までは主に電気スパークによる着火性について述べたが、ここではたばこの火や電気ヒーター(電気ストーブ)、ホットプレートなど的高温熱面による着火性について実験的に検討した結果を述べる。まず、加熱壁面に対してある流速を有した可燃性ガスが接触する状況を再現できる装置を製作し、濃度、加熱壁面への印加電圧、流速を変化させて着火の有無、着火時の温度、加熱開始から着火までに要する時間を計測した。2.2.1.2.1節で示した着火のメカニズムをもとに供給電圧と着火エネルギーの間に成り立つ関係を導き実験結果を説明するとともに、最小着火エネルギーの存在及びこれを与える供給電力の流速・濃度依存性を明らかにした。なお本節の内容については文献[32-34]に詳細な記載があるので参考にされたい。

(2) 実験の概要

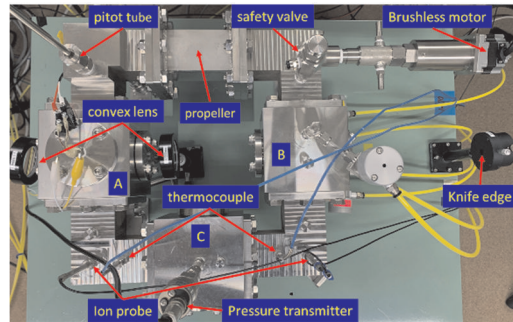
本実験では、図2.2.1.2.4-1(a)に示すアクリル製および図2.2.1.2.4-1(b)に示すステンレス製のループ型燃焼容器(管路断面40 mm角、管路長340 mm角)を用いた。2つの容器を用いた理由は、はじめ内部視認の容易さからアクリル製容器を使用していたが、加熱に伴い容器が容易に劣化するので、ステンレス製容器を用いることとしたものである。いずれの容器を用いた場合も、その他の装置仕様および寸法は同じであり、実験条件が異なる。可燃性混合気の流れは容器内に設置したブラシレスファンによって生じさせた。容器内には一辺25 mm角の正方形セラミックヒーターが流れに対向するように設置されており、スライダックにより所定の電圧を印加して加熱面とした。加熱面の温度はヒーター内蔵のR型熱電対にて計測した。加熱面周囲の着火挙動は、ステンレス容器を用いた実験においては容器に取り付けた直径20 mmの観測窓からシュリーレン法により高速度撮影した。アクリル容器の実験では常速度デジタルビデオカメラにて撮影した。

実験条件として流速を0.0-4.0 m/s(アクリル容器)及び0.0-2.0 m/s(ステンレス容器)、プロパン濃度を2.1 vol% (アクリル容器) および2.1-9.5 vol% (ステンレス容器)、電圧を50-90 Vの範囲で変

化させた。着火は、加熱面周囲の視覚的変化、容器の圧力上昇、イオンプローブの応答、温度上昇等から総合的に判断した。加熱時間を最大 10 分間、実験回数は 1 つの流速・電圧・濃度の組み合わせについて最大 10 回とし、この間に 1 度でも着火した場合はその条件は着火と判定した。また、着火が認められた最小の電圧を最小着火電圧と定義した。



(a) アクリル製燃焼容器



(b) SUS 製燃焼容器

図 2. 2. 1. 2. 4-1 高温表面着火実験装置の概要

### (3) 実験結果及び考察

#### (a) 供給電力と着火電圧の関係

本実験の系においては、可燃性混合気の正味の発熱速度  $q_{net}$  (加熱壁面から未燃混合気へ熱伝導で与えられる熱流束  $q_w$  と化学反応による内部発熱による熱流束  $q_r$  の和と熱損失  $q_l$  との差、いずれも単位は  $W/m^2$ ) に反比例して着火時間  $t_{ig}$  (s) が決まる。供給電力を  $P$  (W)、加熱面面積を  $A$  ( $m^2$ ) としたとき、 $t_{ig}$  は以下の式で書ける。

$$t_{ig} \propto \frac{1}{q_{net}} = \frac{1}{q_w + q_r - q_l} \quad (2.2.1.2.4-1)$$

ここで、化学反応による熱流束  $q_r$  は反応直前の微小時間内にしか発生しないので無視できるものとし、温度が加熱時間に対して単調に上昇する時間帯では  $q_w \propto P/A$  で近似できるとすると、式 (2.2.1.2.4-1) から、 $t_{ig}$  は  $P/A$  が大きくなるほど短縮し、逆に  $q_l$  が大きくなれば延長されることがわかる。 $q_l$  が無視できるほど  $P/A$  の値が大きくなると、 $t_{ig}$  は  $P/A$  のみに反比例する。 $q_l$  は流速に比例するから、 $P/A$  が  $q_l$  に比べて十分大きい場合、流速の大小によらず  $P/A$  の値に応じて  $t_{ig}$  が決まることを表す。このことは実験からも認められた。

#### (b) 着火エネルギー

着火までに要したエネルギー  $E_{ig}$  (J) は、着火時間  $t_{ig}$  と供給電力  $P$  の積で与えられるとすると、式 (2.2.1.2.4-1) を考慮して以下の式で与えられる。

$$\frac{E_{ig}}{A} = t_{ig} \cdot \frac{P}{A} \propto \frac{(P/A)}{(P/A) + q_r - q_l} \quad (2.2.1.2.4-2)$$

いま  $q_r$  は無視できるので、 $P/A$  が  $q_l$  に比較して十分大きい場合、 $E_{ig}/A$  は式 (2.2.1.2.4-2) から一定値をとることになる。このとき、供給された電力は見かけ上損失なく着火に寄与することになるから、一定値となる  $E_{ig}/A$  は最小着火エネルギーに相当する。実験結果から、 $P/A$  の値が大きくなるほど  $E_{ig}/A$  が小さくなって流速の影響がなくなり、最終的に  $E_{ig}/A$  が一定値に近づいた。すなわち、 $P/A$  がある値以上の範囲においては、上述の最小着火エネルギーで着火するので、加熱面の面積と供給電力の値から着火時間を予測可能であること、 $P/A$  の値によって着火するか否かを評価可能であることが示された。今後、たばこ等の日常的着火源について上記の整理結果が適用可能か、実験等により検証する予定である。

#### (参考文献)

- [1] Lewis, B. and von Elbe, G.: "Combustion, Flame and Explosions of Gases", p.346, Academic Press, New York and London, 1961.
- [2] Strehlow, R.A., 水谷幸夫訳: "基礎燃焼学", pp.211-215, 森北出版, 1972.
- [3] 平野敏右: "燃焼学—燃焼現象とその制御—", 海文堂, pp.93-140, 1986.
- [4] 新岡嵩, 河野通方, 佐藤順一編: "燃焼現象の基礎", pp.121-149, オーム社, 2001.



- [5] 木下勝博：“電気による火花や加熱に起因する火災に関する研究”，工学院大学学位論文，1987.
- [6] チャング ジェン シー：“大気圧プラズマの物理と化学”，プラズマ・核融合学会誌，82(10)，pp.682-692，2006.
- [7] 渡邊正人，堀田栄喜，田上公俊，牛丸浩二，窪山達也，森吉泰生：“繰り返しナノパルス放電プラズマ中のラジカル計測と点火特性”，プラズマ・核融合学会誌，89(4)，pp.229-233，2013.
- [8] Lou, G., Bao, A., Nishihara, M., Keshav, S., Utkin, Y.G., Rich, J.W., Lempert, W.R., Adamovich, I.V.: “Ignition of Premixed Hydrogen-Air Flows by Repetitively Pulsed, Nanosecond Pulse Duration Plasma”, Proc. Combust. Inst., 31(2), pp.3327-3334, 2007.
- [9] 田上公俊，牛丸浩二，菅雅裕，窪山達也，森吉泰生，渡邊正人，堀田栄喜：“繰り返しナノパルス放電プラズマの点火特性に関する研究—非平衡プラズマの点火特性—”，日本燃焼学会誌，56(175)，pp.59-66，2014.
- [10] Cathey, C.J., Wang, H., Gunderson, M.A., Carter, C., Ryan, M.: “OH Production by Transient Plasma and Mechanism of Flame Ignition and Propagation in Quiescent Methane-Air Mixtures”, Combustion and Flame, 154(4), pp.715-727, 2008.
- [11] 鳳誠三郎，渡部泰昭：“接点开離時のアーク放電について”，電気学会雑誌，81，pp.1331-1337，1961.
- [12] 早田和也，池上知顯：“リレー間の接点間アークの計測”，平成 17 年度電気関係学会九州支部連合大会予稿集，p.138，2005.
- [13] 董学博：“電気接点の諸特性に与える周囲気体と圧力の影響”，日本工業大学研究報告，47(1)，pp.105-108，2016.
- [14] 富士通株式会社 Web サイト：“リレー技術解説”，  
<http://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fcl/relays/relay-technology.pdf>, 2019.
- [15] [http://kenshi.air-nifty.com/ks\\_memorandom/2009/04/post-9deb.html](http://kenshi.air-nifty.com/ks_memorandom/2009/04/post-9deb.html) (2020.6.25 閲覧).
- [16] <https://blog.alphawave.co.jp/eng/index.php?itemid=1744> (2020.6.25 閲覧)
- [17] <http://d.hatena.ne.jp/tomtom1ono/20130128/1359321525> (2020.6.25 閲覧)
- [18] <https://rifle.blog.so-net.ne.jp/2014-02-18> (2020.6.25 閲覧)
- [19] <http://www.tabogami.tokyo/archives/1284> (2020.6.25 閲覧)
- [20] <https://incomprehensiveness.blogspot.com/2014/09/sr-ss18a-nationalpanasonic-ih.html> (2020.6.25 閲覧)
- [21] <https://insertyourname.blog.so-net.ne.jp/2015-04-09> (2020.6.25 閲覧)
- [22] <https://www.sony.jp/bd/about/technology/index.html> (2020.6.25 閲覧)
- [23] 佐野尊，竹花立美，関根和喜：“レーザーと赤外線カメラを用いた LP ガス漏洩検知システムの研究”，圧力技術，42(1)，pp.36-47，2004.
- [24] 児玉勉：“静電気による爆発とその防止対策”，電気設備学会誌，29(8)，pp.624-627，2009.
- [25] [https://jp.ricoh.com/kouken/science\\_caravan/QandA/science/qanda6\\_5.html](https://jp.ricoh.com/kouken/science_caravan/QandA/science/qanda6_5.html) (2020.6.25 閲覧)
- [26] 高橋栄一，古谷博秀：“レーザー着火研究の基礎と最新動向”，日本燃焼学会誌，57(180)，pp.112-119 (2015).
- [27] 伊里賢行：“DC モータの高速回転時の整流現象とブラシ摩耗に関する研究”，日本工業大学研究報告，47(1)，pp.154-157，2017.
- [28] JSRAE: “Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants Final Report 2016, Table 2-9, p.41, 2017.
- [29] IEC60947-1: Low-voltage switchgear and controlgear- Part 1: General rules, 2007.
- [30] 今村友彦，青木幹尚，春山智成：“コンセントプラグの抜き差しによる滞留プロパンの着火性状”，第 52 回安全工学研究発表会講演予稿集，pp.173-176，2019.
- [31] 独立行政法人労働安全衛生総合研究所：労働安全衛生総合研究所技術指針 静電気安全指針 2007，JNIOOSH-TR-No.42，pp.18-39,2007.
- [32] 中澤誠人，苅谷優行，下村蓮，桑名一徳，今村友彦：“循環するプロパン／空気混合気の加熱壁面による着火のエネルギーと燃料濃度の影響”，2020 年度日本火災学会研究発表会概要集，2020.
- [33] 飯塚洋行，桑名一徳，今村友彦：“加熱壁面に衝突する予混合淀み流の着火条件”，日本火災学会論文集，70(1)，pp.1-8，2020.
- [34] Imamura, T., Uehara, K., Nakata, K., Maruyama, S., Kuwana, K.: “Quasi-steady Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heated Surface”, Fire Safety Journal, in press.

### 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】

#### 2.2.1.3.1 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

現在日本国内では可燃性の自然冷媒を用いたルームエアコンは販売されておらず、漏洩事故事例もほとんど報告されていないため、漏洩条件を決定するために微燃性冷媒を使用した室内機での漏洩条件を参考とした。微燃性冷媒を使用したビル用マルチエアコンのリスク評価報告には、R32を用いたビル用マルチエアコンの漏洩箇所、漏洩箇所形態、相当径が記載されている。報告されているうち最も相当径が大きい、家庭用室内機熱交換器伝熱管での全面腐食での相当径は0.174 mmであり、63 °Cの液漏洩での漏洩速度は67 g min<sup>-1</sup>と急速漏洩のリスク評価に用いられている4分全量放出の放出速度と同程度である。また報告されている漏洩箇所は熱交換器伝熱管と電子膨張弁がほとんどである。そこで本研究では家庭用ルームエアコンの室内機における急速漏洩の漏洩条件として、充填量の全量を4分間で放出する条件と、配管の破断に相当する口径から30 °Cでの自圧で放出する2通りの放出速度を採用した。また漏洩箇所として、熱交換器の中央部分、熱交換器と接続配管の継ぎ目付近、室内機内で冷媒配管を取りまわす際の配管継ぎ手部分の3か所を採用した。

#### 2.2.1.3.2 可燃濃度域内に存在する実在の機器類の点火能評価

評価対象機種は、諏訪東京理科大学が担当している機器使用時に問題となる着火源のスクリーニングによる部品検討の結果や日本冷凍空調工業会によるA3冷媒のリスク評価から決定した。今年度は、レーザープリンター、ヘアードライヤー、電気掃除機の評価を行った。

実際の機器類の動作によって、周囲に充満したプロパン-空気予混合が着火を起こした場合、機器類の一部が爆発により飛散する可能性があるため、実験は産総研爆発ピット内にアクリル容器を設置して行った。1.00 m×1.00 m×1.00 mのアクリル製容器に、プロパンガス、プロパン-空気混合気を濃度、流量を調整しながら導入し、プロパン濃度を5.2 vol%に保った。機器類はアクリル容器内に固定し、エアアクチュエーターによりスイッチ類を爆発ピット外から遠隔操作した。

レーザープリンター、ヘアードライヤー、電気掃除機は、構造が一般的と考えられる機種の中から使用電力の大きい機種を選定し、各2台の新品個体を使用した。ヘアードライヤーはブラシモーターを用いた機種を選定した。電気掃除機は紙製のごみ袋を内蔵するタイプを選定した。

レーザープリンターの実験では、2台の個体についてカラー両面印刷を250枚ずつ行ったが、いずれでも異常は見られなかった。

ヘアードライヤーの実験では、2台の個体とも、温風送風開始数秒後にプロパン-空気混合気に着火し爆発が起きた。(図 2.2.1.3.2-1)

電気掃除機の実験の1個体では、7秒間「強」運転、5秒間停止を5、6回繰り返した後、発煙した。実験の都合上、窒素によるプロパン-空気混合気の希釈作業を発煙10秒程度後から開始したが、それまでにプロパン-空気混合気の爆発は起こらなかった。電気掃除機の実験のもう1個体では、7秒間「強」運転、5秒間停止を500回繰り返しても、5分間の連続「強」運転を行っても異常は見られなかった。発煙した個体の内部はモーター部から排気口にかけてプラスチック部品の焦げや溶解が見られた。(図 2.2.1.3.2-2)

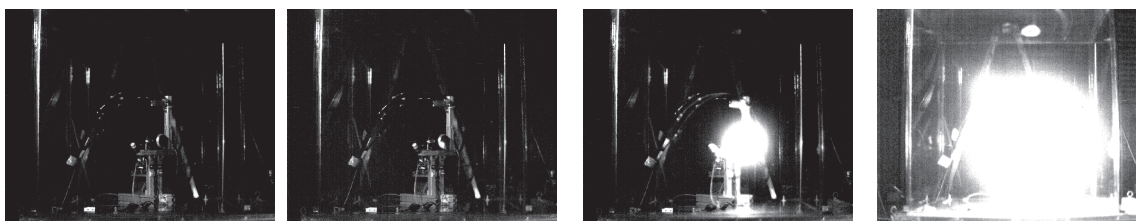


図 2.2.1.3.2-1 赤外線高速カメラで撮影されたドライヤーによる着火爆発の様子





図 2.2.1.3.2-2 発煙した電気掃除機の様子

### 2.2.1.3.3 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

労働安全衛生総合研究所配管等爆発実験施設の屋内大空間に、2.7 m × 5.4 m × 高さ 2.4 m の木製模擬室を設置し、内壁を設置することで 2.7 m × 2.7 m × 高さ 2.4 m との 2 通りの広さで計測を行った。2.7 m × 5.4 m 空間の短辺側中央に下面が床面から 2.00 m となる位置にルームエアコン室内機を設置した。室内機は部屋の広さに対し一般的なサイズであり、送風機構も日本国内で一般的に採用されているものとした。2.7 m × 2.7 m の空間にそれぞれ 1 つずつ計 2 つの扉下隙間 800mm × 4mm を設置し、使用しない場合はアルミテープで塞ぐことによって濃度分布時間履歴に与える影響を調べた。Fig. 4-1 に模擬室と濃度センサーの配置を示す。センサー位置に示した色は濃度変化時間履歴グラフに対応している。プロパン濃度センサーは接触燃焼式センサーを用い、エアコン室内機直下と床面、床上 25cm までには計測範囲 0-6.6 vol% のセンサーを 14 点、それ以外には計測範囲 0-2.2 vol% のセンサーを 14 点の計 28 点を設置した。

プロパンの放出量は、IEC60335-2-40 : 2018 に採用されている片岡の式 (2.2.1.3.3-1) を用いて求めた送風などの安全対策のない場合の最大許容充填量と、今後採用が検討されている十分な風量での送風を前提とした許容充填量 (2.2.1.3.3-2) を用いた。2.7 m × 2.7 m × 高さ 2.4 m の模擬室では、およそ 230g と 340g、2.7 m × 5.4 m × 高さ 2.4 m の模擬室では、およそ 330g と 680g になる。

$$m_{max} = 2.5 \times LFL^{5/4} \times A^{1/2} \times h_0 \quad (\text{式 2.2.1.3.3-1})$$

$$m_{max} = 0.5 \times LFL \times V \quad (\text{式 2.2.1.3.3-2})$$

$m_{max}$  : 最大許容充填量,  $LFL$  : 燃焼下限界,  $A$  : 床面積,  $h_0$  : 機器下面高さ,  $V$  : 室内容積

これらの充填量を 4 分で全量放出する場合には、プロパンを封入した 20kg ボンベを 30 °C に湯浴し、ガス取りしたプロパンガスをニードルバルブで流量調整し、マスフローメーターで流量を確認しながら室内機の放出配管から放出した。また圧縮され液化した状態で漏洩する場合を模擬するためには、30 °C に調整した恒温槽内に 5kg ボンベに封入された最大許容充填量のプロパンを設置して液取りし全量を放出した。

実験における放出動作等はすべて大空間外の計測室から、安全監視用ビデオカメラや濃度センサー指示値で安全を確認しながら遠隔操作して行った。

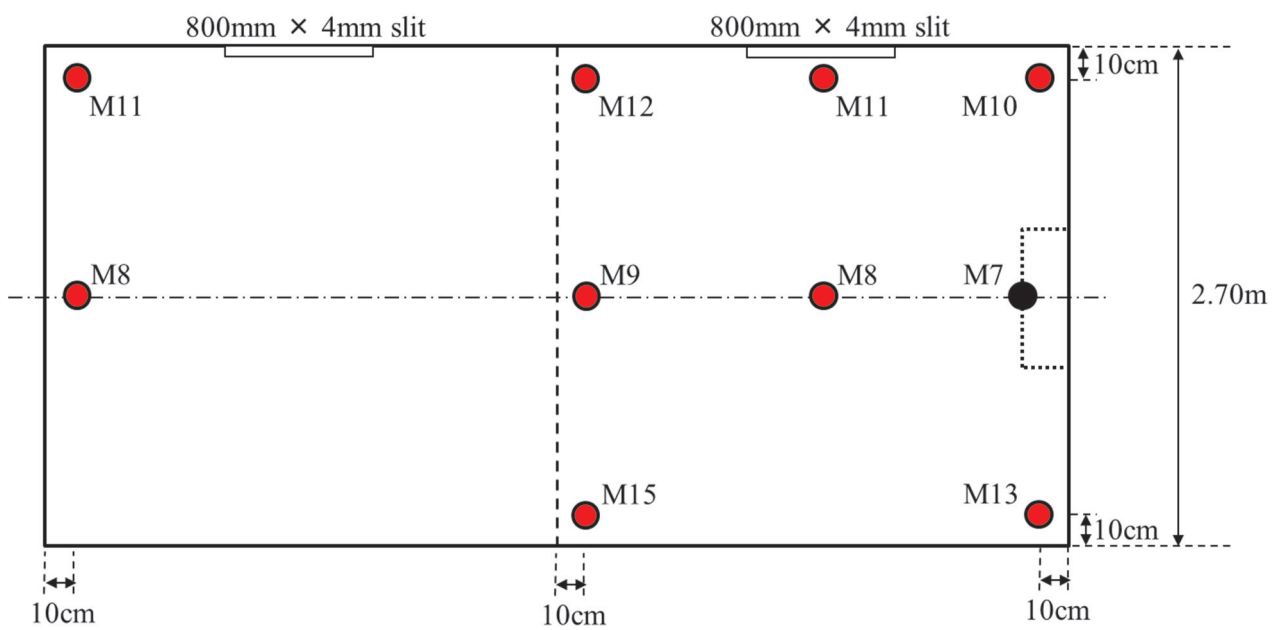
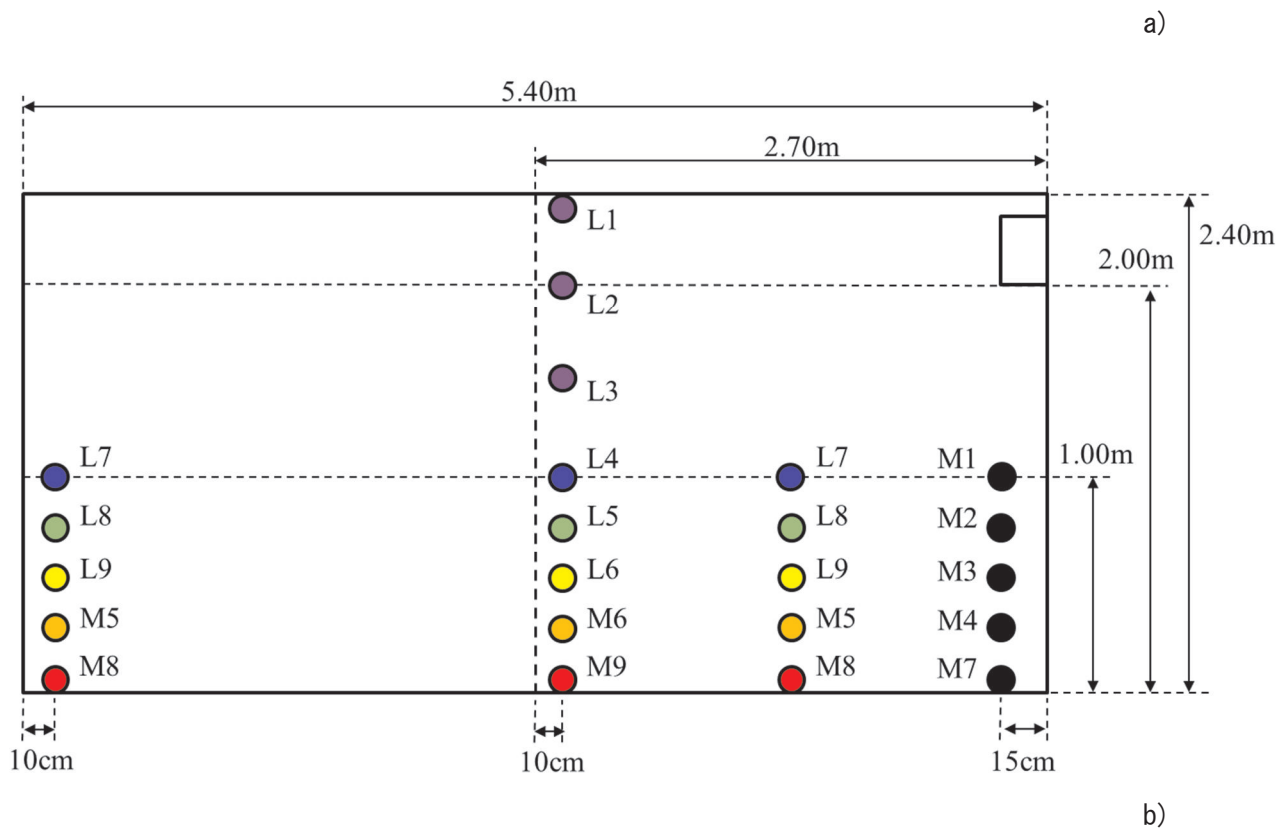


図 2.2.1.3.3-1 センサー配置図  
a) 垂直断面図 b) 平面図 L- : 0-2.2 vol% センサー, M- : 0-6.6 vol% センサー

室内空間の広さ，放出量（想定充填量），放出位置，放出速度，エアコン送風の条件，扉下隙間の有無の条件を変えながら実験を行い，条件が濃度分布時間履歴に与える影響を観察し，点火実験による燃焼爆発影響評価を行う条件を検討した。

図 2.2.1.3.3-2 から図 2.2.1.3.3-10 に計測されたプロパン濃度の時間履歴を示す。

(1) 2.7 m×2.7 m×h2.4 m 空間における放出量の影響

この空間広さでは，式 (2.2.1.3.3-1) と式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量は，230g と 340g であり差が小さいため濃度分布にも大きな違いは見られなかった。放出量 230g の場合と，放出量 340g で送風を行った場合には，計測した位置で 2.2 vol% の下限界を超える可燃濃度域は形成されなかった。

(2) 2.7 m×2.7 m×h2.4 m 空間における放出位置，放出形態の影響

放出量 340g で送風を行わなかった場合でも放出位置によっては，可燃濃度域がほとんど形成されなかった。熱交換器中央でガス状態 4 分全量放出の場合，(図 2.2.1.3.3-2 a) 床面付近に 10 分程度可燃濃度域が形成された。熱交換器と配管接続部分に設置した 1.5mm 径ピンホールから液状で 30 °C の自圧で放出させた場合，(図 2.2.1.3.3-2 c) 放出中のエアコン直下と放出開始後 5 分間程度の間の床面に可燃濃度域が形成された。

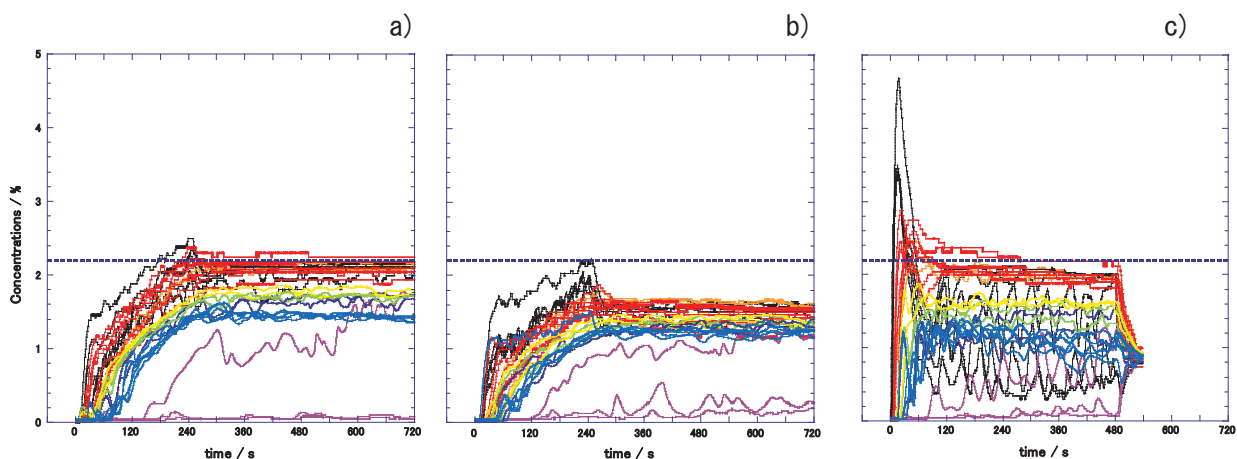


図 2.2.1.3.3-2 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×2.7 m×h2.4 m, 340g プロパン, 送風なし, 扉下隙間なし.

a) 熱交換器中央, ガス取り 4 分全量放出.

b) 室内機内部配管継ぎ手, ガス取り 4 分全量放出.

c) 熱交換器-配管接続部 1.5mm ピンホール, 液取り.

(3) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出量の影響 1

この空間広さでは、式 (2.2.1.3.3-1) と式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量は、330g と 680g で差が倍以上であるため濃度分布も大きな違いが見られた。放出量 330g の場合は、放出終了後には室内に可燃領域は見られなかった。

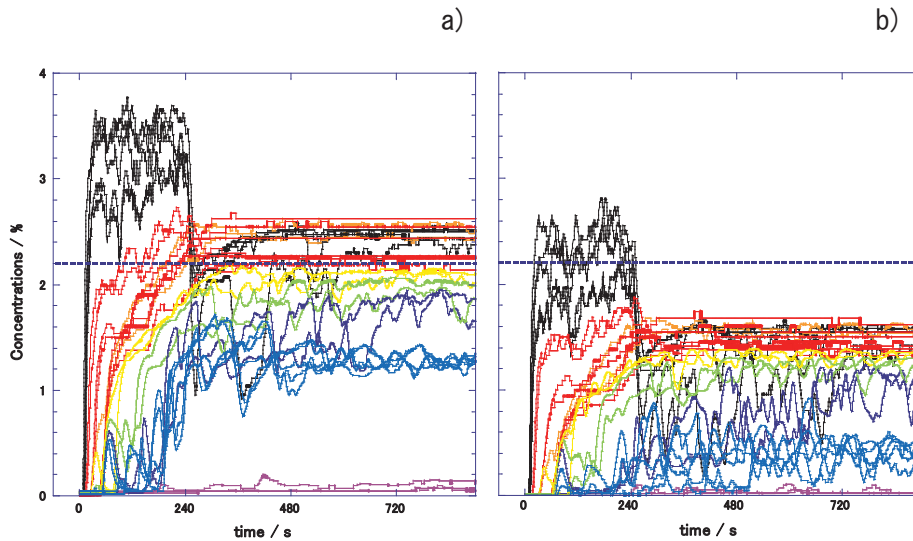


図 2.2.1.3.3-3 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, ガス取り 4 分全量放出.  
a) 680g. b) 330g プロパン.

(4) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出位置の影響

式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量 680g を放出し送風を行わなかった場合には、熱交換器中央、熱交換器-配管接続部、室内機内配管接続部のいずれの放出位置で放出した場合も、漏洩中のエアコン直下には高濃度の可燃領域が形成された。また熱交換器中央から放出された場合は、床面付近に 1 時間以上可燃領域が形成され続けた。これは、熱交換器中央付近は室内機の吸気口と排気口が大きく開いており、室内機内のプロパンが低線流速で室内機外に放出され室内の攪拌が起こりにくかったためだと考えられる。

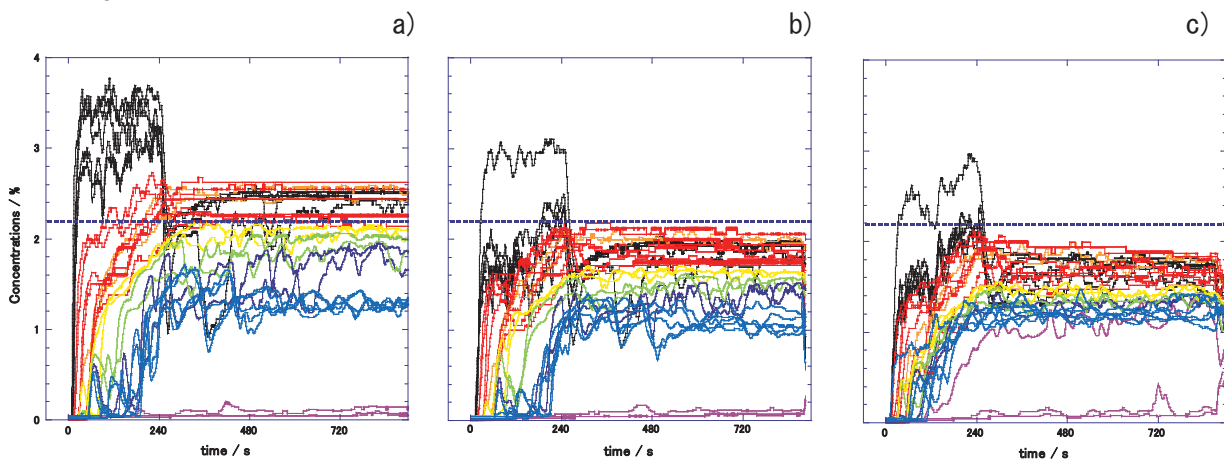


図 2.2.1.3.3-4 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 680g プロパン, 送風なし, 扉下隙間なし, ガス取り 4 分全量放出.  
a) 熱交換器中央放出, b) 熱交換器-配管接続部放出. c) 室内機内部配管継ぎ手位置放出.

(5) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m空間における扉下隙間の影響

式 (2.2.1.3.3-2) から計算される充填量 680g を放出し送風を行わなかった場合, 扉下隙間の有無, 個数は放出中や放出直後の濃度にほとんど影響を与えない. これは床面高さに設置された扉下隙間から室外に押し出されるプロパン-空気混合気の体積は, 室内に放出された濃度 100 %のプロパンと同体積であり, 濃度は計測されている 2-3 vol %程度だからである. しかし, 床面に可燃濃度域が存在する時間は, 扉下隙間が増えると短くなる.

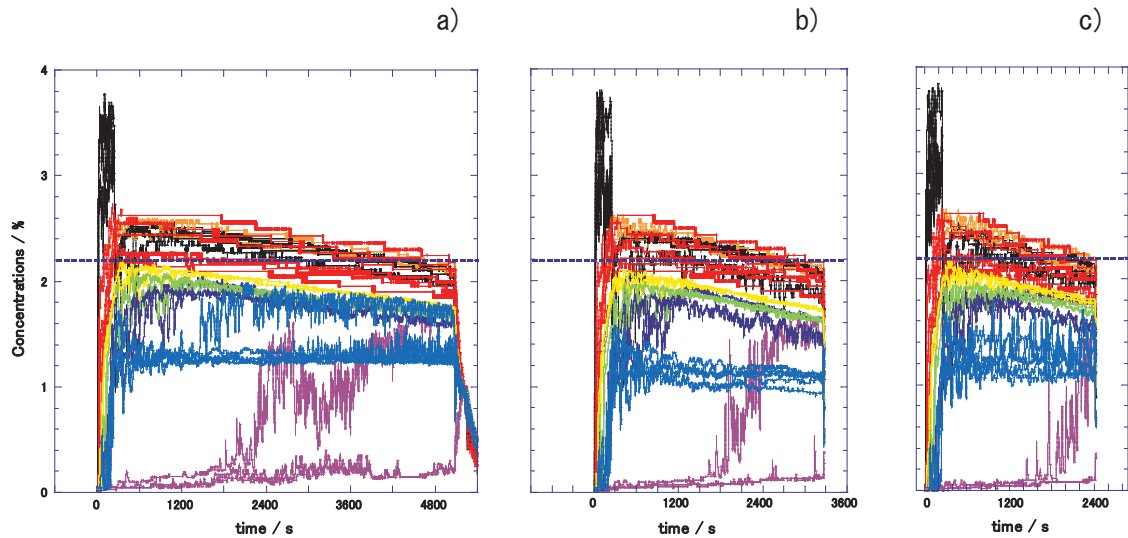


図 2.2.1.3.3-5 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン ガス取り 4 分全量放出.

a) 扉下隙間なし. b) 扉下隙間 1 か所. c) 扉下隙間 2 か所.

(6) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m空間におけるエアコン送風の影響 1

図 2.2.1.3.3-6 b) の計測では, プロパン放出開始前から最も弱い風速で水平向きにエアコン送風を連続運転した. 送風により 4 分間の放出中にも放出終了後も室内に可燃領域は観測されなかった.

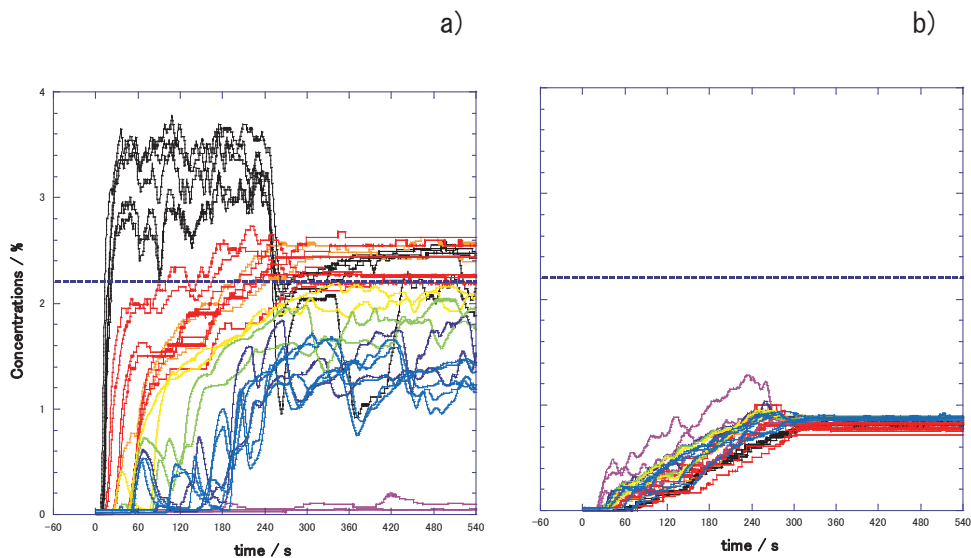


図 2.2.1.3.3-6 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン ガス取り 4 分全量放出.

a) 送風なし. b) 送風あり(水平・最弱風)



(7) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m空間におけるエアコン送風の影響 2

いずれの計測でも、下向きに最も強い送風をプロパン放出開始から a)では30秒後、b)では1分後、c)では2分後に開始した。(送風なしの条件は図 2.2.1.3.3-6 a) 送風開始直後からエアコン直下・床面とも濃度が低下し、可燃領域が消滅していく様子が観測された。

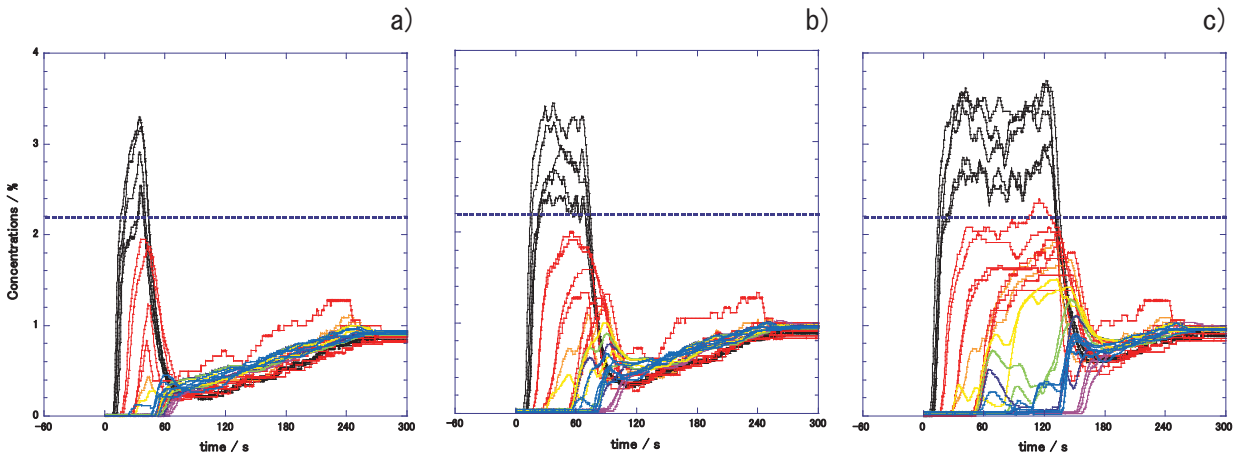


図 2.2.1.3.3-7 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン ガス取り4分全量放出.  
送風あり(プロパン放出後に下向・最強風速) a) 30秒後. b) 1分後. c) 2分後

(8) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m空間における放出形態の影響

図 2.2.1.3.3-8 b) の計測では、1/4 インチの L 字型継ぎ手から、プロパン 30 °Cの蒸気圧である 0.95 MPa (ゲージ圧) で液取りのプロパンを放出した。これは、室外機で圧縮された液化プロパンが室内機までほとんど気化せずに到達し完全に破断した配管から漏洩するシナリオを模擬した、単位時間あたりの漏洩量として想定される最悪の条件だと考えられる。放出直後はエアコン直下と床面に比較的に高濃度の可燃領域が観測されるが、放出 4 分後はガス状態 4 分全量放出での濃度とほぼ同様である。また 10 分後以降は可燃領域が消滅し可燃領域の存在時間は 4 分全量放出より短い。

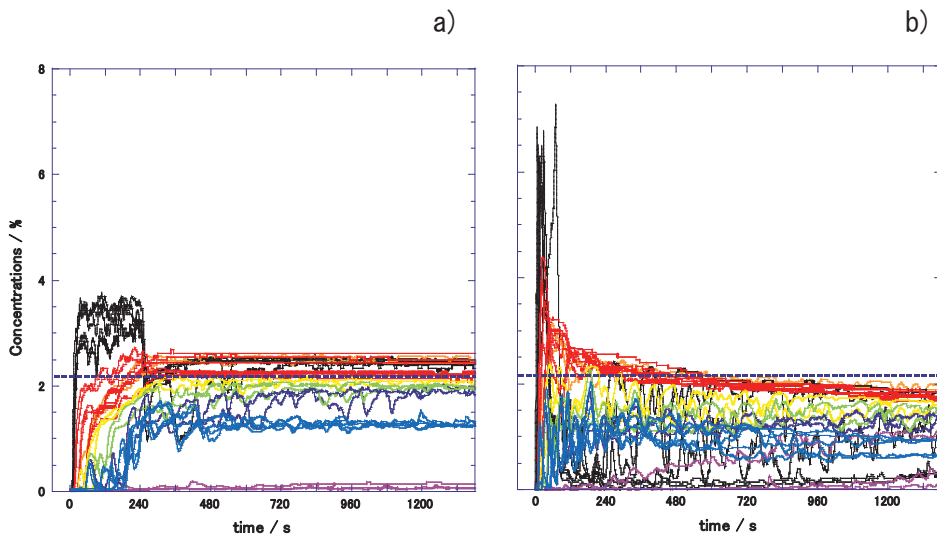


図 2.2.1.3.3-8 プロパン濃度時間履歴

2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出, 680g プロパン  
a) ガス取り4分全量放出. b) 液取りφ4 mm, 0.95 MPa(G).

(9) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間における放出量の影響 2

0.95 MPa (ゲージ圧) で液取りのプロパンを放出した場合でも、片岡の式から計算した放出量 330g では、放出終了数十秒後には室内に可燃領域は見られなかった。

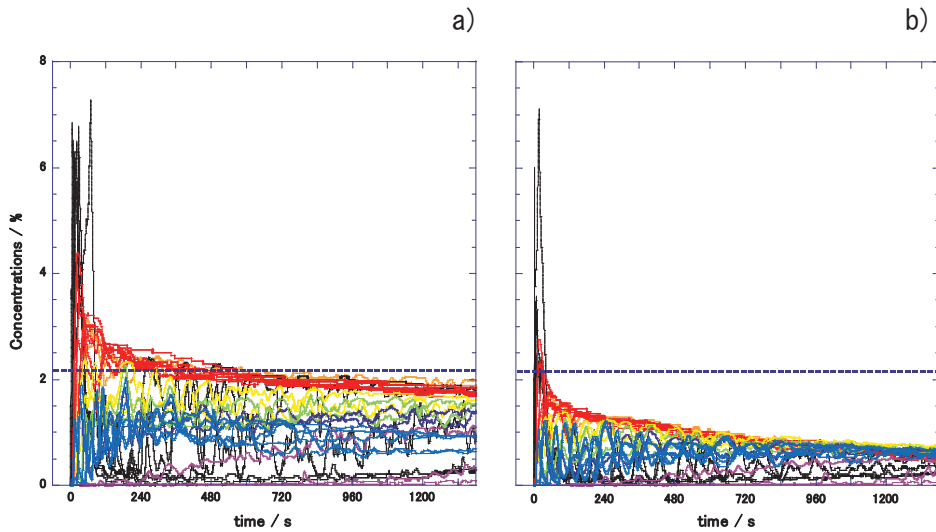


図 2.2.1.3.3-9 プロパン濃度時間履歴  
2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 送風なし, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出,  
液取りφ4 mm, 0.95 MPa(G). a) 680g. b) 330g プロパン.

(10) 2.7 m×5.4 m×h2.4 m 空間におけるエアコン送風の影響 3

0.95 MPa (ゲージ圧) で液取りのプロパンを 680g 放出した場合でも、放出開始前から最も弱い風速で水平向きに連続運転するか、下向きに最も強い送風をプロパン放出開始から 30 秒後に開始すると、放出開始 2 分後には可燃領域が消滅する様子が観測された。

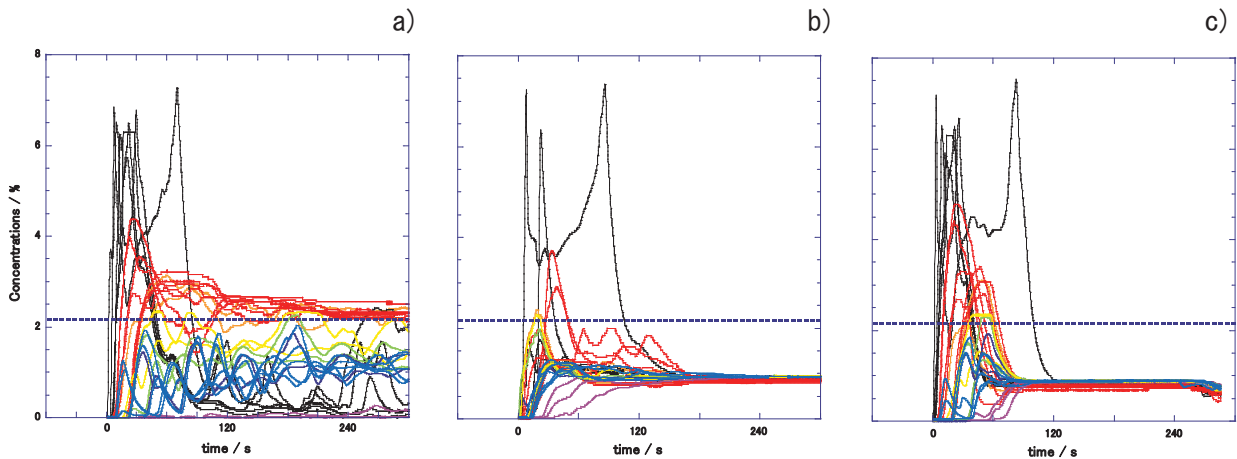


図 2.2.1.3.3-10 プロパン濃度時間履歴  
2.7 m×5.4 m×h2.4 m, 扉下隙間なし, 熱交換器中央放出,  
680g プロパン 液取りφ4 mm, 0.95 MPa(G).  
送風 a) なし. b) あり (水平・最弱風・連続運転) c) あり (放出 30 秒後に下向・最強風)

<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				1件		
2019FY				2件	7件	
2020FY				1件		

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

1件

## 2.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

### 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】

#### <研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
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、CO2)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。	○

【 ◎: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] 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、CO2）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。また、高元側冷媒にはR1234yfを選定した。
- [2] 安価かつ高効率実現のための高元側サイクルの開発として、オールアルミ熱交換器（PFC熱交換器）、アキュムレータ、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できた。低元側高圧部の圧力抑制することにより、システムコストは現行R404A機に対し現状で140%程度を達成した。
- [3] 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。高元サイクルのCOPは基礎試験結果から理論値同等を確認し、低元システムも理論値同等とした場合の二元システムCOPは、目標（現行R404A機同等以上）に対し、100%以上達成見込みであることを確認した。
- [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）  
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を進める。
- [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）  
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（低元高圧抑制とデフロスト性能が課題）、またその実証試験機評価を進める。

<特許、論文、外部発表等の件数>

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	
2019FY	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	1	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)



## 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】

### <研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
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。	○

【 ◎: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. 冷媒の探索と選定 >

HF0 混合冷媒の冷媒物性値に関しては、物性計測そのものが低温域で行われておらず、また、複数のショーケースでの使用を考えた場合、ショーケース間での混合冷媒の成分比率の変動などが考えられることから、その物性推算式の精度把握が重要となる。検討により、HF0 混合冷媒の中には、構成する 2 成分間の混合物性に関し、精度が低い推算式が使用されていることが判明し、その精度改善に取り組んだ。

### < 2. 冷媒物性値の把握 >

候補冷媒として絞り込んだ HF0 混合冷媒の冷媒物性推算値の精度向上を目的に、物性値計測と物性値推算式の修正について検討した。冷媒物性推算に使用する Refprop では、2 成分混合冷媒の混合モデルに関し、一部物性推算精度が低いものが含まれていると予想される。また、混合冷媒での成分比率が局所的に変動した場合の冷媒物性推算精度にも課題が残っていることが想定される。そこで、本研究では候補冷媒種の低温域物性値計測、および同冷媒種の REFPROP における物性データ精度の現状評価を行うこととした。物性値計測については、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 >

非共沸冷媒採用するための性能リカバリー策として、図 2.3.2-1、図 2.3.2-2 のような内部熱交換器および過冷却熱交換器の改善効果を冷凍サイクルシミュレーションにより試算した結果、過冷却熱交換器ではどの冷媒種においても概ね 5%程度の改善効果が見込めることが分かった。従って、過冷却熱交換器を組み込んだ性能評価試験機を製作することとした。また、サイクル制御最適化検討を実施し、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）を 2020 年度末までに確定予定である。なお、定格機器性能だけでなく部分負荷性能まで含めた年間消費電力量を表 2.3.2-1 の試算条件に従って試算した結果、1 次概算ではあるが現行機種に対して約 8%の改善効果が期待できることがわかった。今後、試作機での機器性能評価を進め、年間消費電力量（対現行機種）5%改善可能な機器仕様を確定していく。

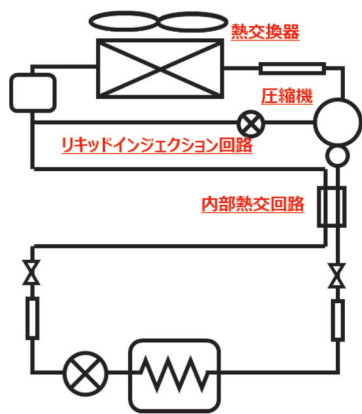


図 2.3.2-1 内部熱交換器回路

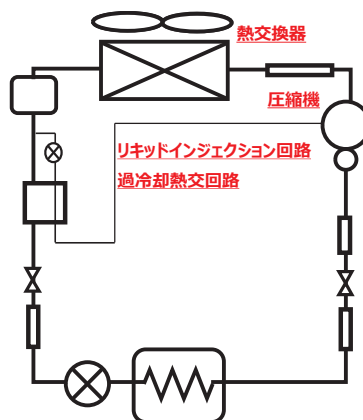


図 2.3.2-2 過冷却熱交換器回路

表 2.3.2-1 年間消費電力量試算条件

季節		夏季		中間季		冬季	
想定日数		92日		122日		151日	
運転想定条件	状態	日中	夜間	日中	夜間	日中	夜間
外気温度		32℃	25℃	20℃	18℃	10℃	7℃

< 4. 信頼性把握 >

コンデンシングユニット長期信頼性確保を目的として、図 2.3.2-3 信頼性評価計画に従って、弊社設計寿命を満足するための評価試験を開始した。評価項目は、表 2.3.2-2 の通りである。冷凍機油と対象冷媒種との安定性評価、電気絶縁性評価、相溶性評価と潤滑性評価を耐久評価試験として実施する。

研究開発項目		19年度	20/1Q	20/2Q	20/3Q	20/4Q	21年度
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						■

①安定性評価  
 ②電気絶縁性評価  
 ③相溶性評価  
 ④潤滑性評価

図 2.3.2-3 信頼性評価計画

表 2.3.2-2 信頼性評価項目

検討項目	内容
安定性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、主に圧縮機構成部品の材料適合性評価を行う。
電気絶縁性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、圧縮機モータからの漏えい電流評価を行う。
相溶性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、相溶性確認試験を行い、圧縮機吐油特性、および圧縮機への油戻り特性評価を行う。
潤滑性評価	候補冷媒と冷凍機油の組み合わせにおいて、冷凍機油への冷媒溶解度に対する粘度特性評価を行う。また、弊社基準に従い、圧縮機耐久試験での摩耗量評価にて採用判断する。

< 5. 安全性検討 >

選定した冷媒種はいずれも燃焼性を有するため、図 2.3.2-4 安全性検討計画、および表 2.3.2-3 検討項目に従い、漏えいシミュレーションを実施した。また、漏えい時の店舗内冷媒濃度分布のシミュレーション結果妥当性を確認するため、代替え冷媒（CO2）漏えい試験も実施した。その結果に応じ、漏えい検知器設置場所の選定などの安全対策を取り入れた対応制御ソフト実装までを 2020 年度実施予定である。

研究開発項目		19年度	20/1Q	20/2Q	20/3Q	20/4Q	21年度
⑤ 安全性検討	(1) 可燃性情報入手			▼ガス密度、可燃濃度等			
	(2) 冷媒漏えいシミュレーション				▼安全対策要否		
	(3) 漏えい試験装置試作						
	(4) 漏洩試験						
	(5) 評価						▼リスク評価
	(6) 漏えい検知器の検討						

図 2.3.2-4 安全性検討計画表

表 2.3.2-3 安全性検討項目

検討項目	内容
● 可燃性情報入手	2019年度に選定した冷媒の可燃情報を調査する。
● 冷媒漏えい挙動の把握 (冷媒漏えいシミュレーション)	冷媒漏洩シミュレーションによる可燃域の生成の様相を把握し、可燃域を許容レベル以下にするための安全対策の立案を行う。
● 冷媒漏えい実験	シミュレーションの精度確認のため、漏洩実験を行う。
● 安全対策0次ソフトウェア製作	漏えいセンサー出力値に対する、圧縮機の動作制御、漏えい報知動作制御などの安全性対応ソフトウェアを製作する。
● 漏えい検知器の検討	候補冷媒用漏えい検知器、およびその設置場所の選定を行い、漏えい検知可否評価を行う。

< 特許、論文、外部発表等の件数 >

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	
2019FY	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.3.3 低温機器における CO<sub>2</sub> 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】

<研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ：低温機器における CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 冷凍機の大出力化 [2]高外気温度対応 [3]CO <sub>2</sub> 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	[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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 冷媒の特性を活かした未利用熱利用		
CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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。	○

【 ◎: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 】



### 2.3.3.1 CO<sub>2</sub>冷凍機の大出力化

2019年度は、試作した水冷40HP冷凍機を用いて試運転を行い、圧縮機の合計運転周波数における冷凍能力の変化を確認した。

図2.3.3.1-1に圧縮機の合計運転周波数における冷凍能力の変化を示す。また、合計運転周波数が30～60rpsは圧縮機1台運転、60～120rpsは圧縮機2台運転、120～240rpsは圧縮機4台運転を示す。

図2.3.3.1-1より、運転台数切り替え時(○印)に能力階段が発生しており、リニアな冷凍能力変化を実現する制御検討が必要であることを確認した。

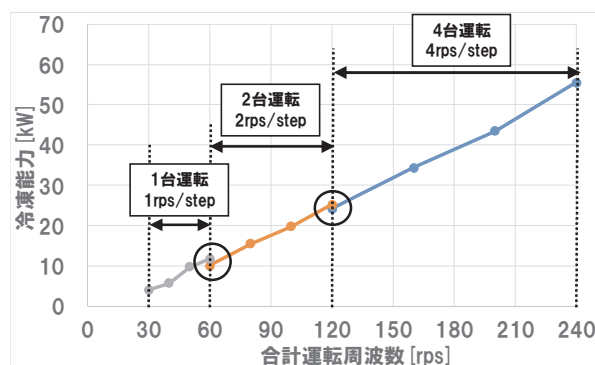


図 2.3.3.1-1 合計運転周波数における冷凍能力

2020年度は、上記リニアな冷凍能力変化を実現する制御を含む圧縮機運転出力の適正制御、低騒音・低振動連結技術を開発し、実証実験を実施する。

### 2.3.3.2 高外気温度対応

2019年度は、現行のHFC冷媒用リモートコンデンサを用いて、散水による吸込み空気温度の変化について予備評価を実施した。表2.3.3.2-1に示すように、散水により、散水マット入口の空気温度29.3℃、相対湿度59.7%（湿球温度23.9℃）に対して、散水マット出口の空気温度は25.1℃（湿球温度との差1.2K）まで低下する結果が得られた。

表 2.3.3.2-1 散水による空気温度の変化

	単位	目標値	散水あり	散水なし
散水マット吸込み空気温度	℃	30.0	29.3	29.8
散水マット吸込み空気相対湿度	RH%	60.0	59.7	59.4
散水マット吸込み空気湿球温度	℃	23.9	23.9	23.9
散水温度	℃	25.0	24.9	-
散水マット出口空気温度(全12点平均)	℃		25.1	29.4
湿球温度との差 (散水マット出口空気温度(全12点平均)-散水マット吸込み空気湿球温度)	K	3以下	1.2	5.5

2020年度は、間接散水制御ロジック及び空冷ファンと冷却水循環ポンプによる放熱量制御ロジックを開発し、実証実験を実施する。

### 2.3.3.3 CO<sub>2</sub>冷媒の特性を活かした未利用熱利用

#### 2.3.3.3.1 排熱給湯技術

水冷冷凍機の排熱を利用した給湯システムを開発中である。本研究開発の排熱給湯システムの特長は、高温出湯を可能とする排熱回収ガスクーラーと、冷凍能力の維持を可能とする過冷却ガスクーラーの二つのガスクーラーと、冷却水の流し方にある。

2019年度は、市場での使用方法を考慮して、冷凍能力優先モードと給湯能力優先モードの二つの運転モードを設定することとし、各運転モードに対する冷却水の流し方を考案した。

冷凍能力優先モードにおける性能評価の結果、目標としていた「冷凍能力同等、COP2倍以上」を達成した。

2020年度は、給湯能力優先モード（出湯量最大）における性能評価を行い、実証実験を実施する。

#### 2.3.3.3.2 排熱空調技術

冷凍機の排熱を利用した空調システムを開発中である。

2019年度は、試作機の仕様を検討し、一次試作機が完成した。2020年度は、試作機を用いて性能評価及び改良検討を行い、排熱空調技術を完成させる。

<特許、論文、外部発表等の件数>

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	
2019FY	3	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 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】

### <研究開発成果概要>

目 標	研究開発成果	達成度
テーマ： GWP10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 > 20,000 ppm。 ・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		
・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。	○

【 ◎: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 】

#### 2.3.4.1 温暖化係数と安定性評価

##### 2.3.4.1.1 次世代冷媒の成分物質の安定性評価

次世代冷媒の成分物質について、水、空気、金属存在下での安定性試験を実施した。冷凍機油中で R1234yf と比べて酸価が若干上昇する結果になったが、冷凍機油の開発検討により使用可能と考えられる。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。

##### 2.3.4.1.2 重合反応性の抑制検討

次世代冷媒の成分物質について、保存安定性試験を行った。HF0-1123 は試験後、使用したサンプルの約 80% がポリマーとして析出したのに対し、次世代冷媒の成分物質はポリマー析出がなく、ガス成分にも変化がなかった。

##### 2.3.4.1.3 次世代冷媒の成分物質の分解生成物および環境影響評価【産総研 機能化学研究部門 担当】

次世代冷媒の成分物質の大気中における分解生成物の解析を行った。分解生成物を含む GWP は 1.41 より小さく、環境影響は小さいことが明らかとなった。

##### 2.3.4.1.4 次世代冷媒の成分物質の熱分解開始温度および生成物解析【産総研 機能化学研究部門 担当】

次世代冷媒の成分物質の分解は 500°C 前後から認められた。

##### 2.3.4.1.5 直膨型空調機に適した次世代冷媒候補の選定

次世代冷媒の成分物質を含む混合冷媒を数種検討し、GWP<10 で、ASHRAE 燃焼性クラス 2L の R410A 同等の性能が確保できる試算になった。

#### 2.3.4.2 燃焼性評価

##### 2.3.4.2.1 次世代冷媒の成分物質の燃焼範囲データ取得

次世代冷媒の成分物質の燃焼限界 (LFL) の測定を実施した。

##### 2.3.4.2.2 次世代冷媒の成分物質の燃焼速度のデータ取得

次世代冷媒の成分物質単体の最大燃焼速度と燃焼速度、混合組成での燃焼速度を測定し、ASHRAE 安全性区分 2L の基準である 10cm/sec 以下になることを確認した。

##### 2.3.4.2.3 次世代冷媒の成分物質の着火/消炎特性の評価【産総研 機能化学研究部門 担当】

温度 25°C、圧力 1atm、湿度ゼロでの次世代冷媒の成分物質/空気混合気の消炎距離測定を行い、濃度 7vol% から 15vol% までの消炎距離の測定を行った。

#### 2.3.4.3 毒性評価

##### 2.3.4.3.1 急性毒性の評価

次世代冷媒の成分物質の急性毒性試験を行い、LC50 が 100,000ppm 以上であることを確認した。

##### 2.3.4.3.2 14日間 反復毒性の評価

次世代冷媒の成分物質について 14日間 反復吸入毒性試験を実施した。

#### 2.3.4.4 冷媒性能評価

##### 2.3.4.4.1 次世代冷媒候補の冷凍サイクルシミュレーション評価

GWP<10 の次世代冷媒候補の冷凍サイクルシミュレーション評価を行い、ASHRAE クラス 2L の混合冷媒組成物において、R410A 同等の冷房/暖房性能が確保できる試算になった。

2.3.4.4.2 次世代冷媒候補のドロップイン試験による性能初期評価

R32 用 RAC 機 (4KW クラス、ダイキン工業社製 E シリーズ) にてドロップイン評価を実施した。

システム	ダイキン工業社製 R32 機 E シリーズ	室内機	R40VTEP
		室外機	F40VTEP-W
冷媒	R32, R410A, 次世代冷媒候補①, 次世代冷媒候補②		

ドロップイン試験の結果、次世代冷媒候補①の冷房／暖房の定格・中間条件での COP、APF で 90%以上となり R410A 同等の結果を得た。また、次世代冷媒候補②では、冷房定格・中間条件での COP は R410A 比 90%未滿なつた。圧力損失の影響に対して機器を改良すれば使用できる可能性があることを確認した。

<特許、論文、外部発表等の件数>

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	
2019FY	4	1	1	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)



#### 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

キガリ改正及びパリ協定の削減目標を達成するためには、産業・民生分野でエネルギー消費の比較的大きく、かつ冷媒利用の HFC の排出量が多い冷凍空調分野での対策が重要である。地球温暖化は、国全体、地球全体の喫緊の課題であること、また、これらの製造している企業にとっては対策コストが高く、投資が進まないことを考慮すると国が主導的に研究開発を行うことが必要である。さらに、冷凍・空調機器は食品の流通、我々の居住空間の改善に必須であり、国民生活に不可欠なものである。よって、生活の利便性を可能な限り維持しつつ、温室効果の高い HFC からグリーン冷媒をはじめとする温室効果の低い物質への転換の実現へ向けて、次世代冷媒及びその適用機器開発は国の支援を得て産学の持つ技術を集結して当たる必要がある。

本プロジェクトの成果は、事業者・研究者の技術力向上ひいては国内業界レベル、および国際競争力の向上に大きく貢献することが期待される。また、新たな産業の構築や研究開発のシーズの開拓が考えられる。

対象技術毎の成果の実用化・事業化の見通しを下表に示す。

研究開発項目	対象等	実用化・事業化見通し
①基本特性	低 GWP 冷媒評価(基本特性)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本研究開発を通して取得した成果について、低 GWP 冷媒の社会実装に必要な国際規格（IEC60335-2-40、IEC60335-2-89）の改定および国際データベース（REFPROP）への登録に向け、積極的に情報を提供し、効果的に低 GWP 冷媒の実用化の支援に貢献。</li> </ul>
②安全性・リスク評価	低 GWP 冷媒評価(安全性・リスク)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・講演・論文・投稿等を通じた成果の周知や、冷凍空調業界団体等を通じての PR、および規格・法整備に係る働きかけを内外に広く展開していくことにより、低 GWP 冷媒適用の環境整備に寄与する。</li> </ul>
③冷媒・機器開発	低 GWP 冷媒・適用機器開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本助成事業において、個々のテーマ毎に実用化へ向けた要素技術等の技術的な課題は明確化され、解決の見込み。</li> <li>・一部の機器開発においては、本事業期間中にフィールド試験を実施し、本事業終了後速やかに事業化フェーズへ移行が可能。</li> <li>・新冷媒の開発においては、規格等の取得を含め、市場展開への検討を進める。</li> </ul>

次に、研究開発テーマ毎の成果の実用化・事業化へ向けた取組及び見通しについて示す。

## 1. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて

本事業における「実用化」の考え方：

冷媒の性能、安全性・リスク評価に係る公共的な知的基盤が整備され、社会的利用（規格化、標準化、データベース、アセスメント等への利用、産業界における研究開発への利用、他の研究開発への利用等）に供されること。

### 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】

本研究開発では、以下の点において実用化に向けての見通しを得ることができ、実用化に向けての取り組みを行った。

- (1) 単一冷媒である HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)に関しては、基本的熱物性である熱力学的性質及び輸送性質を明らかにし、信頼できる熱物性計算が可能となる状態方程式及び相関式を作成した。さらに、これらの冷媒熱物性を、熱物性データベースを NIST の REFPROP 上で計算できるように、FLD ファイルを構築した。この2物質に関しては、実用化に必要となる冷媒評価の情報の提供には見通しが立ったと考えられる。この結果は、REFPROP の次のバージョンアップにおいて、成果的に公開されるべく、NIST と連携して準備を進めている。本プロジェクトの成果を REFPROP 上で発信することは、日本で開発された HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)の冷媒熱物性値情報が国際標準値として位置付けられることを意味するとともに、本熱物性値が、世界中で共通した製品研究開発に利用されることになり、公開前から利用できる、わが国の冷凍空調機器開発においても、優位性を確保できることになる。
- (2) 現冷媒メーカーから市場に数多く提案されている冷媒の大半は混合冷媒であり、ほとんどが挑戦的な混合冷媒ばかりといっても過言ではない。そのために、新しい混合冷媒の信頼できる熱力学的性質や輸送性質の実験データは、ほとんど皆無な状態であり、冷凍空調機器の研究開発に用いる冷媒物性は、アメリカの NIST が提供している熱物性ソフトウェア REFPROP(最新版が Ver.10.0)を用いるケースが大半である。新たな混合冷媒に関しては、その計算精度(推算精度)は保証されていないのは致し方なく、熱物性計算の精度を向上させるためには、実験的な情報に基づいて、状態方程式や相関式の精度を向上させるしかない。本研究開発で行なった結果は、繊細に行われた測定の積み重ねが大半であり、根気強く、時間をかけての作業の繰り返しであるが、いずれも高精度で、世界的に評価される情報ばかりである。そのため、今回測定した2種類の3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO<sub>2</sub> (R455A を含む)及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系(Amorea を含む)に関する冷媒物性の信頼性は高く、冷凍空調機器の研究開発における性能評価の信頼性を保証するものである。
- (3) さらに、現時点の世界状況を見た場合、混合冷媒に限らず単一冷媒においても冷媒熱物性データを高精度で実測できる研究機関は、日本の本グループ以外には、アメリカ、イタリア、フランス、中国の限られたグループしかない。そして、中国以外の研究機関との間には、本プロジェクトを実施している九州大学の NEXT-RP として密接な連携関係を有している。さらに、冷媒開発の主流となるグローバルな冷媒メーカーとも NEXT-RP は連携をとって情報交換を進めているので、新しい冷媒を開発のリアルタイムで入手できるのは、本プロジェクトしかない。この後も、研究開発のスキームを確立した本システムを活用して、新たに対象として考えられる混合冷媒の性能評価を進めていくことで、より幅広い実用化に貢献できると考えられる。
- (4) 図 1.1.1-1 及び図 1.1.1-2 に九州大学が考える、次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーンを示す。冷凍機器性能が良く、GWP 値が比較的小さい HFC32 を許容範囲で活用し、GWP が一般的に小さい HFO 系冷媒を組み合わせるものが、今後の利用が考えられる近未来的に地球温暖化防止対策用となる混合冷媒の主流として考えられる。しかし、近年開発が進んでいる HFO 系冷媒に関しては、市場に流通している冷媒はまだまだ限られている。一歩先に市場流通が進んでいる HFO 系冷媒が HFO1234yf と HFO1234ze(E) であるので、第一段階では HFC32+HFO1234yf 及び HFC32+HFO1234ze(E) の2成分系混合冷媒が、混合冷媒探索の柱となるだろう。この2種類の混合冷媒に関する研究開発は、九州大学と NEDO において、2009 年度から 2010 年度、及び 2011 年度から 2015 年度の2つの NEDO プロジェクト内ですでに実施してきた。さらに、2016 年度から 2017 年度では、同じ NEDO のプロジェクトで開発された HFO1123 と HFC32 の混合冷媒に着目し、性能評価を実施した。今回のプロジェクトでは、さらなる延長線上の研究として、中小型規模冷凍空調機器用冷媒としての利用

を考えた、HFC32+HFO1234yf 混合冷媒に CO<sub>2</sub> や HFO1123 を添加した3成分系混合冷媒に関して、研究開発の基盤データとなる熱物性評価、伝熱性能評価及びサイクル特性評価を行なったわけであり、本研究開発で得られた成果は、同じ NEDO プロジェクト内の他の研究項目で研究開発を進めているグループや民間企業とも、情報共有を行い、一部は公開前の情報として提供している。信頼できる基盤となる情報を、事前に、リアルタイムで入手できるという体制構築は、機器開発で用いるシミュレーションや、機器開発の製品評価に直接つながることであり、実用化にとっては非常に大きな利点であると考えられる。

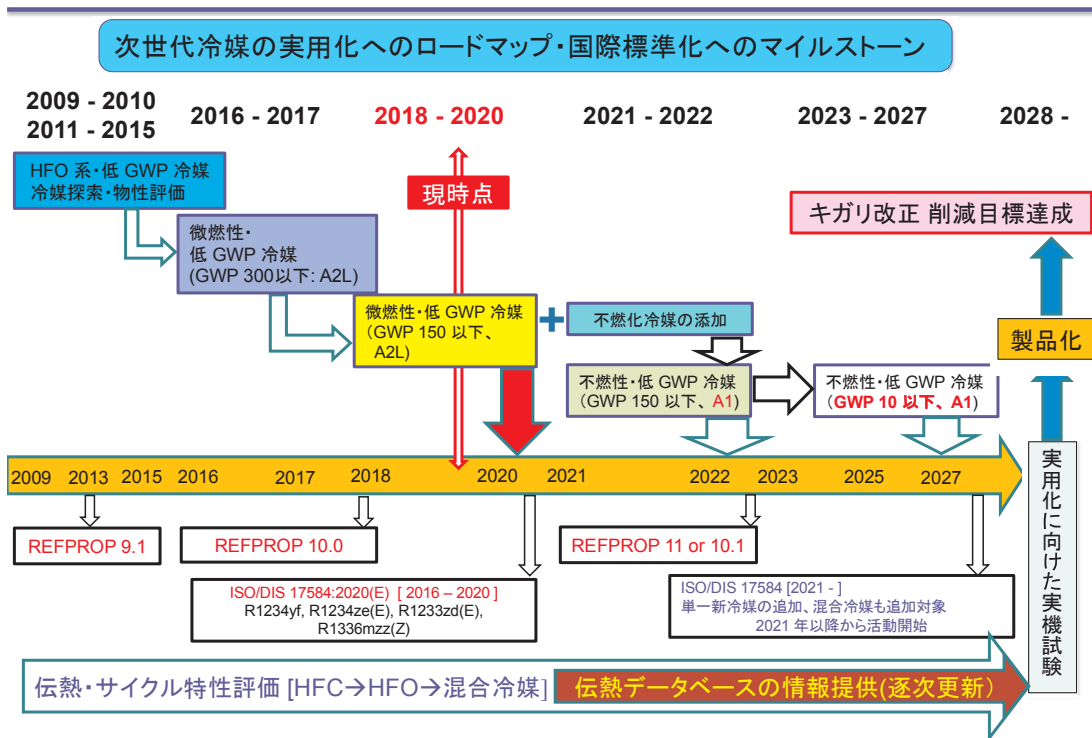


図 1.1.1-1 次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン(基本方針)

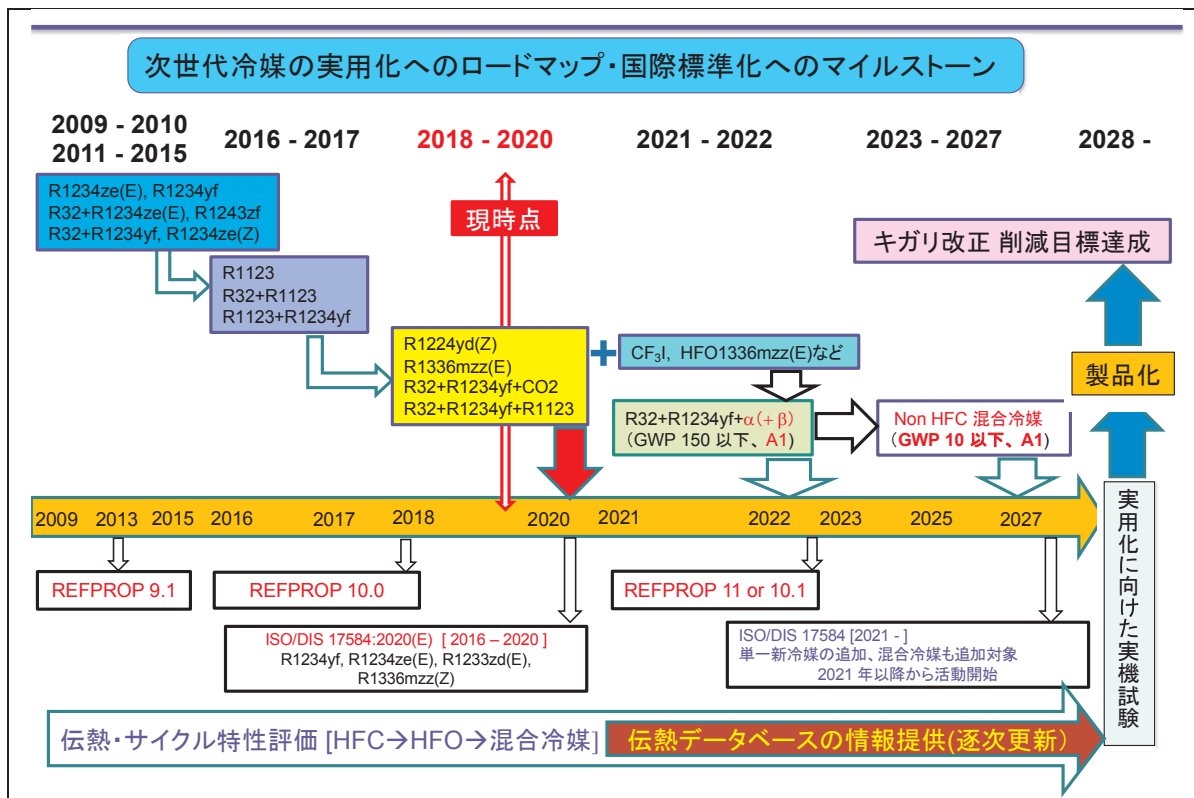


図 1.1.1-2 :次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン  
(具体的な冷媒の取り組み)

## 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】

本研究開発では、低GWP低燃焼性混合冷媒の信頼性の高い燃焼性評価を実施することにより、冷媒メーカーや冷凍空調機器メーカーが、安全性を向上した低GWP冷媒及び機器を迅速に実用化することを支援することを目的としている。その目的のため、本研究開発の成果である混合冷媒の燃焼特性評価データ及び評価方法が、ISO817やANSI/ASHRAE Standard 34等の国際標準、高圧ガス保安法、及びISO817冷媒一覧表等データベース等への利用に供されることを想定している。この成果の反映の取り組みとして、通常半年に1度開催されるASHRAE SSPC34委員会等へ、代表的な混合冷媒の燃焼特性の基準となるデータの提供や、燃焼特性評価方法の見直しとして規格改定に係る提案を主導することにより、その審議に適切に対処していく。

## 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】

本研究開発では、大きく5つの項目での実用化を目指している。

- ・ 【解析技術の標準化】
- ・ 【シミュレーターの標準化と国際規格提案】
- ・ 【実運転評価技術の標準化と国際規格提案】
- ・ 【低GWP冷媒データベースの構築】
- ・ 【データベースの国際情報発信】

これらについては、ロードマップを図1.1.3.1に示している。また、国際データベースについては、データを取得するだけでなく、シミュレーションコードや評価装置を用いて解析した各次世代冷媒のサイクル性能や年間性能の解析データや取得した実運転性能データをデータベース化し、すでに次世代冷媒の情報発信基地として構築している「W-Refrigerant.com」上に掲載し、国際的な周知を図っていく。

### 【解析技術の標準化】

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、数理解析技術を導入することとする。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モデル、数値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ス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、実験結果を活用しながら、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する。冷凍空調技術のシミュレーション技術を総合的に取り扱ったハンドブックはこれまでに世界的に見ても見当たらない。これを学術的な成果として世の中に発信し、冷凍空調技術解析の標準化を目指す。

### 【シミュレーターの標準化と国際規格提案】

このプロジェクトで開発するシミュレーターは、混合冷媒も含む低GWP冷媒を採用した機器性能の高精度予測が可能となる。また、今回開発する評価手法により、機器性能がより実運転性能に近い形で評価されるため、今後より省エネ性能高い製品開発等につなげられる。さらに、ユーザーが扱いやすいGUIを搭載した熱交換器シミュレーター、システムシミュレーター、年間性能・LCCPシミュレーターによって、デバイスから機器の年間性能までを一貫して、比較的容易に公平・公正な立場から解析が可能となる。これにより、技術者、研究者、さらには、行政関係者等に広く活用されることが期待できる。

本研究開発で開発するシミュレーターは、わが国の標準コードとして国家戦略構築やアカデミックな研究に活用いただくことが主たる目的として、日本冷凍空調工業会のメンバー企業や日本冷凍空調学会、日本機械学会の学会員に公開部分を無償で活用いただく。すでに日冷工ではあるWGの標準解析コードととして活用いただいている。



図 1.1.3.2 に示すように 2018～2020 年度には、シミュレーションに関する研究結果を適宜日冷工側の解析にも反映し、2019/9 日冷工として、高外気温地域向けの A2L ルームエアコンの性能シミュレーションの解析結果を日本冷凍空調学会年次大会で発表している。また、日冷工で、内蔵 SC に A2L 及び A3 冷媒を導入時の性能シミュレーション解析実施し、IEC 60335-2-89 への A2L 冷媒の最大冷媒量緩和（1.2 kg→13×LFL）に繋げるための漏えい解析の解析条件である A2L 冷媒の必要冷媒量を算出。間接的に IEC 規格の緩和に貢献している。

引き続き、2021 年度以降は、シミュレーションに関する研究結果を適宜日冷工側の解析にも反映する。そして、2021/10 には、日冷工が内蔵ショーケースへの A2L・A3 冷媒適用の性能解析結果を神戸シンポにて発表予定である。2021/9・2021/10 には、日冷工として、高外気温地域向けのルームエアコンでの A3 冷媒と A2L 冷媒の性能解析結果の比較を日本冷凍空調学会年次大会及び神戸シンポで発表予定である。このように日冷工が本シミュレーターを活用して、規格提案を進めている。

#### 【実運転評価技術の標準化と国際規格提案】

すでに述べた通り、今後従来の定常データをベースとした機器の年間性能評価から実運転ベースの性能評価方法に大きく変わろうとしている中で、早稲田大学としては、そのような評価手法に対応可能なハイブリッド型性能評価装置を新たに構築する。この評価装置は、このままでは単なる早稲田大学の学生実験用設備となってしまいが、これを我が国で唯一のエアコンの性能検定試験場として検定試験だけでなく、エアコンへの性能保証ラベルの発行も行っている日本冷凍空調研究所（厚木）のサテライトラボとして認定予定である。日本冷凍空調研究所では、複数の国と同一の製品の性能を比較するラウンドロビンテストを実施し、国際的性能検定機関として認知されている。ここに認められた場合には、当然国際的性能評価機関としての一翼を担うこととなる。

#### 【国際データベースの構築と情報発信】

今回の NEDO プロジェクトによってシミュレーターと機器の実運転性能評価装置が開発されたことにより、多様な次世代冷媒を採用した機器の運転性能が測定されとともにシミュレーションが実施され、多くのデータを蓄積することができる。その結果をデータベース化することが可能である。すでに早稲田大学では、次世代冷媒の情報発信基地としての「W-Refrigerant.com」を立ち上げ、次世代冷媒に関連する情報発信を進めている。図 1.1.3.3 に示すようにここに今回の NEDO プロジェクトで収集したデータを掲載し、機器性能のデータベースを構築する。これを世界に向けて発信する。すなわち、自ら国際データベースを構築することにより、状本発信を進める。

もちろん、アカデミックな論文として発信したり、さらにはそれらの継続によって国連等へ発信したりする。これによって、政府のロードマップや規格策定に役立てたり、企業にとってこのようなデータベース作成に貢献することによって、企業の社会的価値創造に役に立てたり、国際的に高性能な機器の普及促進に役立てたりすることを目指す。

図 1.1.3.1 実用化に向けた課題、スケジュール、マイルストーン

	2020	2021	それ以降
数値解析の国際標準化	<p>ドライアウトモデル, ポイド率モデル, 沸騰モデル, AI伝熱モデル, 伝熱実験, ポイド率実験</p> <p>オイル考慮モデル, 冷媒液こみモデル</p> <p>3次元解析, システム解析定式化, 基礎実験</p>	<p>熱交換器(蒸発器, 凝縮器)モデルの高度化</p> <p>圧縮機モデルの高度化</p> <p>膨張弁モデルの高度化</p> <p>システム解析論完成</p>	<p>2022</p> <p>書籍出版による国際標準化</p>
シミュレータの国際標準化	<p>熱交換器シミュレーター開発</p> <p>東南アジア大学との共同による標準化</p> <p>冷凍サイクルシミュレーター開発</p> <p>LCCPシミュレーター開発</p>	<p>コンソーシアムへの公開による標準化</p> <p>日冷工への公開による国際的発表</p>	
評価装置の国際標準化と試験結果の国際規格提案(次ページ参照)	<p>ハイブリッド評価装置の完成</p> <p>HCショークテスト性能評価</p>	<p>日冷工のサテライトラボ化による国際的標準化</p> <p>バックケージ性能評価(定常・非定常)</p> <p>熱交換器性能評価</p>	<p>2022</p> <p>国際規格への提案</p>
低GWP冷媒のデータベース化		<p>低GWP冷媒定常性能集構築</p> <p>熱交換器最適化性能集構築</p> <p>低GWP冷媒動的性能集構築</p>	
国際データベースの国際情報発信	<p>2019年度 "W.Refrigerant.com" の立ち上げ</p> <p>早稲田大学次世代ヒートポンプ技術戦略研究コンソーシアム立ち上げ</p>	<p>次世代冷媒ドロップイン結果国際データベース公開</p> <p>次世代冷媒最適化結果国際データベース公開</p>	<p>次世代冷媒非定常結果国際データベース公開</p>



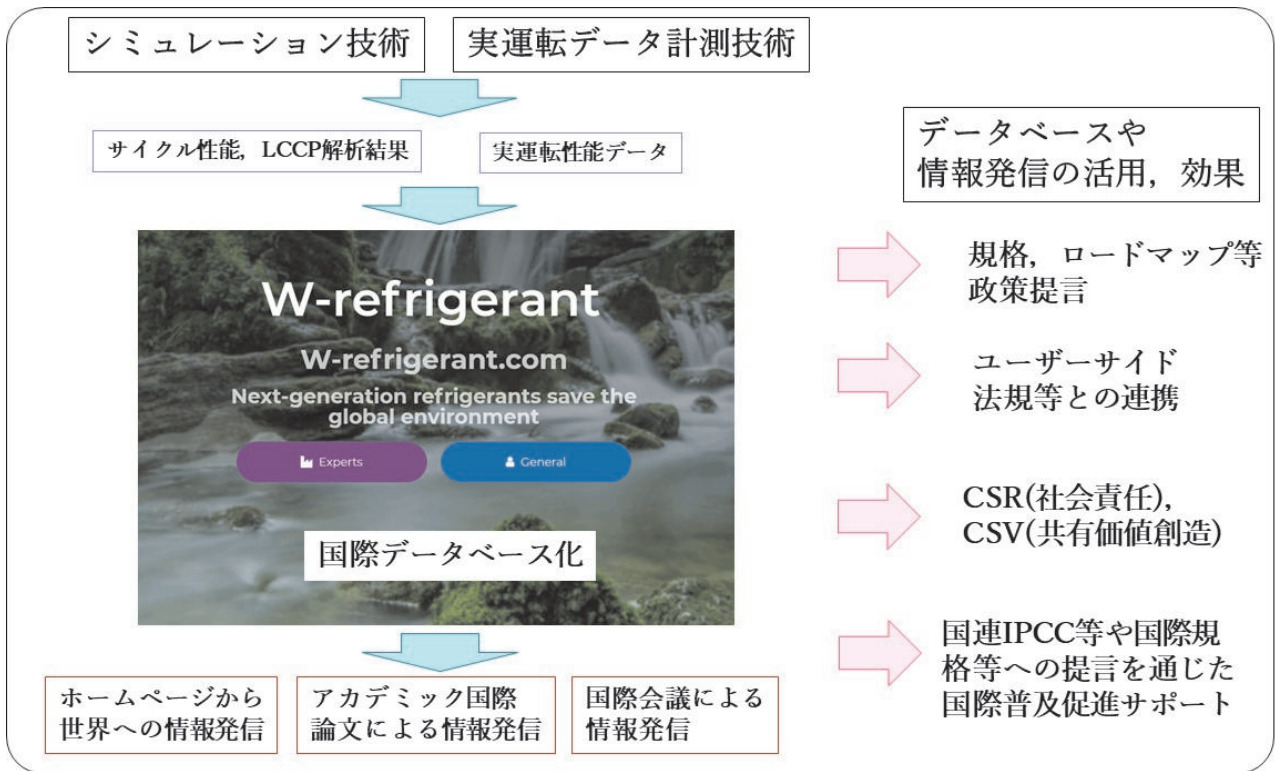


図 1.1.3.3 国際データベースの構築その活用

## 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 ルームエアコンの国際規格や国内規格への貢献

ルームエアコンに可燃性冷媒を充填するときの国際規格 IEC60335-2-40 を改定するための WG16 は、空調機における A3(強燃性)冷媒の早期安全使用を実現することを目的として設立されたことから、その検討範囲を限定して活動していくことが決められた。本事業での安全性検討が IEC60335-2-40 の改訂に対しての貢献は、下記となる。

##### (1)充填冷媒量に関するもの(東京大学、産総研)

次期 Edition7.0 にて新規記載される A3 冷媒の許容冷媒充填量の緩和概念の妥当性の検証に貢献している。本事業にて要所を抑え実施された検証により、短期間で妥当なものであると結論づけることができた。

##### (2)ディーゼル爆発に関するもの(東京大学)

2018 年 6 月に開催された WG16 のブリージュ会議にて、ディーゼル爆発の安全性が検討された。審議を行うのに際し、2018 年 GL 会議で発表された東京大学のディーゼル爆発に関する論文が取り上げられ、爆発に関しては、A3 冷媒の場合は濃度範囲が狭いとの本事業での結果に基づき、その発生確率が小さいと判断され、規定を記載する必要がないとの結論となった。

##### (3)今後の予定

Edition7.0 は、CDV を発行する段階であるが、幾つかの課題もある。日冷工の規格を含めた国内規格および残課題解決を軸とした国際規格への提案が考えられる。

充填冷媒量に関しては、冷媒量緩和の一手段であるファン攪拌に関する必要風量に関して、今後、本事業の検討結果をベースに整合性のある案が提案できれば、Edition 7.0 以降の国際規格への反映が期待される。

着火源に関しては、Edition7.0 以降では、検討範囲になると考えられる。着火源から除外可能な電気部品の電圧電流条件や負荷条件を整理、理論化することや、高温表面温度の着火性に関して対流要件や放熱メカニズムが整理、理論化できれば、Edition 7.0 以降での反映が可能である。

#### 1.2.1.2 業務用内蔵ショーケースの国際規格や国内規格への貢献

##### (1)公立諏訪東京理科大学の貢献

2018～2020 年度については、各種着火源の評価及び着火有無判定結果の提示を行い、適宜日冷工のリスクアセスメントに反映された。2021 年度以降は、引き続き、日冷工のリスクアセスメントに反映される予定。

##### (2)東京大学の貢献

2018～2020 年度については、内蔵ショーケースにおける R290 漏えい測定及び解析での合わせこみ結果の提示し、これは日冷工が兼ねてより主張していた、IEC 60335-2-89 のリーチインショーケースに関する規定の危険性についての検証結果となった。上記を踏まえ日冷工規格の妥当性が検証され、2021 年 1 月発行予定の日冷工規格(JRA 4078・JRA GL-21)に反映された。2021 年度以降は、IEC 60335-2-89 の次期バージョンに提案される予定の R290 最大冷媒量の増量に対する安全性評価に繋げる予定である。



## 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

本事業における「実用化・事業化」の考え方：

実用化とは、現状市販フロン製品と同等以上の性能を実現する技術を確立し、その技術に基づく試作品等の社会的利用（顧客への提供等）が開始されることであり、事業化とは、当該研究開発に係る商品、製品等の販売や利用により、企業活動（売り上げ等）に貢献すること。

### 2.1 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

#### 2.1.1 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】

下記の通り、事業化を予定している。

表 2.1-1 事業化のスケジュール

年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度
製品設計	基本技術設計 ならび基礎試験	← 基本技術設計および構造設計 →	フィールドテスト機を想定した工場での検証試験	← フィールドテスト機実施 →		
量産検討 設備投資					← 量産設備検討 → 量産準備	
販売					← 施工対応マニュアル準備 → アフターサービス準備	
収益発生						← 量産および収益発生は → 2024 年度以降

#### 2.1.2 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】

本助成事業において、現行冷媒 R404A より実用上の性能を向上させ、市場に受け入れられるコンデンシングユニットの実用化を目指す。これまでの検討で冷媒特性としては候補冷媒のいずれもが低温側領域で現行冷媒よりも性能低下することがわかった。今後、コストアップをできる限り抑制して性能向上できる施策を見出す予定である。また、燃焼性を有する冷媒の使用については、業界のコンセンサスと施工/サービスなどでの様々な課題への対応が必要である。本事業においては、リスクアセスメントなど安全検討を進め、市場で燃焼性を有する冷媒が受け入れ可能な用途を明確にすることでターゲットを絞り込む予定である。また、HFC 規制の動向に合わせて、冷媒メーカーや業界団体への働きかけを行うとともに、業務用冷凍冷蔵機器利用者や中間業者の認知浸透度やニーズなど、情報収集を図り、必要な啓蒙や対応を検討していく。その上で、環境整備の進行、需要等のタイミングを計って事業化を推進していく。

### 2.1.3 低温機器における CO<sub>2</sub> 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】

各業界のユーザーの中には、環境保護への対応として、補助金を得ながら、CO<sub>2</sub> 冷媒を使用した冷設機器の導入を推進されているユーザーも多い。一方で、補助金が適用されない範囲では、未だ HFC 冷凍システムが導入されており、CO<sub>2</sub> 冷凍システムの低コスト化が導入促進の鍵となると考えられる。また、HFC 冷凍システムでは成し得ない総合エネルギー効率の高い排熱利用システムの提供により、CO<sub>2</sub> 冷凍機システムの適用範囲拡大に繋がると考えられる。

事業化については、各課題に対する研究開発終了後に順次量産化していく予定である。

### 2.1.4 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】

GWP10 以下の直膨型空調機の冷媒としては、CO<sub>2</sub> やプロパンが検討されているが、CO<sub>2</sub> は圧力と低臨界温度による機器コストアップ、プロパンには安全性の課題がある。本事業において、開発する次世代冷媒は、CO<sub>2</sub> やプロパンに比べて、現行の R410A、R32 機器に最も近い仕様になり、円滑な普及が期待できる。

グローバルへの展開を図るため、ASHRAE34 規格、ISO817 規格等の取得、新冷媒の成分物質の製造を同時に検討しながら、早期に事業化できるよう準備を進めていく。

### 3. 波及効果

本研究開発の目標を達成し実用化されれば、国の環境行政に大きく寄与するものである。また我が国の国際的な環境に対する責務を果たすことに大きく寄与する。

さらに、世界に先駆けた次世代冷媒技術の開発は我が国産業の競争力強化につながる。

対象技術毎の波及効果について次に示す。

研究開発項目	対象	技術的波及効果	対象技術分野の国内市場規模※1	対象技術分野の冷媒推計排出量※2	社会的波及効果
①基本特性	HC系冷媒、HFO系冷媒の安全性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低 GWP 冷媒基礎データの普及による実用化研究開発の促進</li> <li>・リスクアセスメントの推進</li> </ul>	—	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・内外の規格・法規整備の提言(高圧ガス保安法、ISO等)、国際データベース等への登録</li> <li>・次世代冷媒適用冷凍空調機器の実用化推進</li> </ul>
②安全性・リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低 GWP 冷媒の物性データ取得</li> <li>・低 GWP 冷媒の燃焼性評価</li> <li>・性能評価シミュレーターの開発</li> </ul>		—	—	
③冷媒・機器開発	低 GWP 冷媒・適用機器開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高効率化(圧縮機、熱交換器等)及び他用途(広範囲の冷凍空調機器等)への展開</li> </ul>	・約 8,090 億円	・約 4,090 万 t-CO <sub>2</sub> ※3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・世界に先駆けた次世代冷媒技術の開発による我が国産業の競争力強化</li> </ul>

※1: 「ヒートポンプ 温水・空調市場の現状と将来展望 2017 (株式会社富士経済, 2017)」に基づき、NEDO 環境部で業務用冷凍空調機器及び家庭用空調機器を対象に 2025 年時点の予測値を算出。

※2: 2018 年度の推計排出量。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

※3 業務用冷凍空調機器及び家庭用空調機器を対象として算出。

### 3.1 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価

#### 3.1.1 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】

本研究開発では、以下の点において実用化に向けての見通しを得ることができ、実用化に向けての取り組みを行った。

- (5) 単一冷媒である HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)に関しては、基本的熱物性である熱力学的性質及び輸送性質を明らかにし、信頼できる熱物性計算が可能となる状態方程式及び相関式を作成した。さらに、これらの冷媒熱物性を、熱物性データベースを NIST の REFPROP 上で計算できるように、FLD ファイルを構築した。この2物質に関しては、実用化に必要となる冷媒評価の情報の提供には見通しが立ったと考えられる。この結果は、REFPROP の次のバージョンアップにおいて、成果的に公開されるべく、NIST とも連携して準備を進めている。本プロジェクトの成果を REFPROP 上で発信することは、日本で開発された HCFO1224yd(Z)及び HFO1336mzz(E)の冷媒熱物性値情報が国際標準値として位置付けられることを意味するとともに、本熱物性値が、世界中で共通した製品研究開発に利用されることになり、公開前から利用できる、わが国の冷凍空調機器開発においても、優位性を確保できることになる。
- (6) 現冷媒メーカーから市場に数多く提案されている冷媒の大半は混合冷媒であり、ほとんどが挑戦的な混合冷媒ばかりといっても過言ではない。そのために、新しい混合冷媒の信頼できる熱力学的性質や輸送性質の実験データは、ほとんど皆無な状態であり、冷凍空調機器の研究開発に用いる冷媒物性は、アメリカの NIST が提供している熱物性ソフトウェア REFPROP(最新版が Ver.10.0)を用いるケースが大半である。新たな混合冷媒に関しては、その計算精度(推算精度)は保証されていないのは致し方なく、熱物性計算の精度を向上させるためには、実験的な情報に基づいて、状態方程式や相関式の精度を向上させるしかない。本研究開発で行なった結果は、繊細に行われた測定の結果が大半であり、根拠強く、時間をかけての作業の繰り返しであるが、いずれも高精度で、世界的に評価される情報ばかりである。そのため、今回測定した2種類の3成分系混合冷媒 HFC32+HFO1234yf+CO<sub>2</sub> (R455A を含む)及び HFC32+HFO1234yf+HFO1123 系(Amorea を含む)に関しての冷媒物性の信頼性は高く、冷凍空調機器の研究開発における性能評価の信頼性を保証するものである。
- (7) さらに、現時点の世界状況を見た場合、混合冷媒に限らず単一冷媒においても冷媒熱物性データを高精度で実測できる研究機関は、日本の本グループ以外には、アメリカ、イタリア、フランス、中国の限られたグループしかない。そして、中国以外の研究機関との間には、本プロジェクトを実施している九州大学の NEXT-RP として密接な連携関係を有している。さらに、冷媒開発の主流となるグローバルな冷媒メーカーとも NEXT-RP は連携をとって情報交換を進めているので、新しい冷媒を開発のリアルタイムで入手できるのは、本プロジェクトしかない。この後も、研究開発のスキームを確立した本システムを活用して、新たに対象として考えられる混合冷媒の性能評価を進めていくことで、より幅広い実用化に貢献できると考えられる。
- (8) 図 3.1.1-1 及び図 3.1.1-2 に九州大学が考える、次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーンを示す。冷凍機器性能が良く、GWP 値が比較的小さい HFC32 を許容範囲で活用し、GWP が一般的に小さい HFO 系冷媒を組み合わせるものが、今後の利用が考えられる近未来的に地球温暖化防止対策用となる混合冷媒の主流として考えられる。しかし、近年開発が進んでいる HFO 系冷媒に関しては、市場に流通している冷媒はまだ限られている。一歩先に市場流通が進んでいる HFO 系冷媒が HFO1234yf と HFO1234ze(E) であるので、第一段階では HFC32+HFO1234yf 及び HFC32+HFO1234ze(E) の2成分系混合冷媒が、混合冷媒探索の柱となるだろう。この2種類の混合冷媒に関する研究開発は、九州大学と NEDO において、平成 21 年度から平成 22 年度、及び平成 23 年度から平成 27 年度の2つの NEDO プロジェクト内ですでに実施してきた。さらに、平成 28 年度から平成 29 年度では、同じ NEDO のプロジェクトで開発された HFO1123 と HFC32 の混合冷媒に着目し、性能評価を実施した。今回のプロジェクトでは、さらなる延長線上の研究として、中小型規模冷凍空調機器用冷媒としての利用を考えた、HFC32+HFO1234yf 混合冷媒に CO<sub>2</sub> や HFO1123 を添加した3成分系混合冷媒に関して、研究開発の基盤データとなる熱物性評価、伝熱性能評価及びサイクル特性評価を行なったわけであり、本研究開発で得られた成果は、同じ NEDO プロジェクト内の他の研究項目で研究開発を進めているグループや民間企業とも、情報共有を行い、一部は公開前の情報として提供している。信頼できる基盤となる情報を、事前に、リアルタイムで入手できるという体制構築は、機器開発で用いるシミュ

レーションや、機器開発の製品評価に直接つながることであり、実用化にとっては非常に大きな利点であると考えられる。



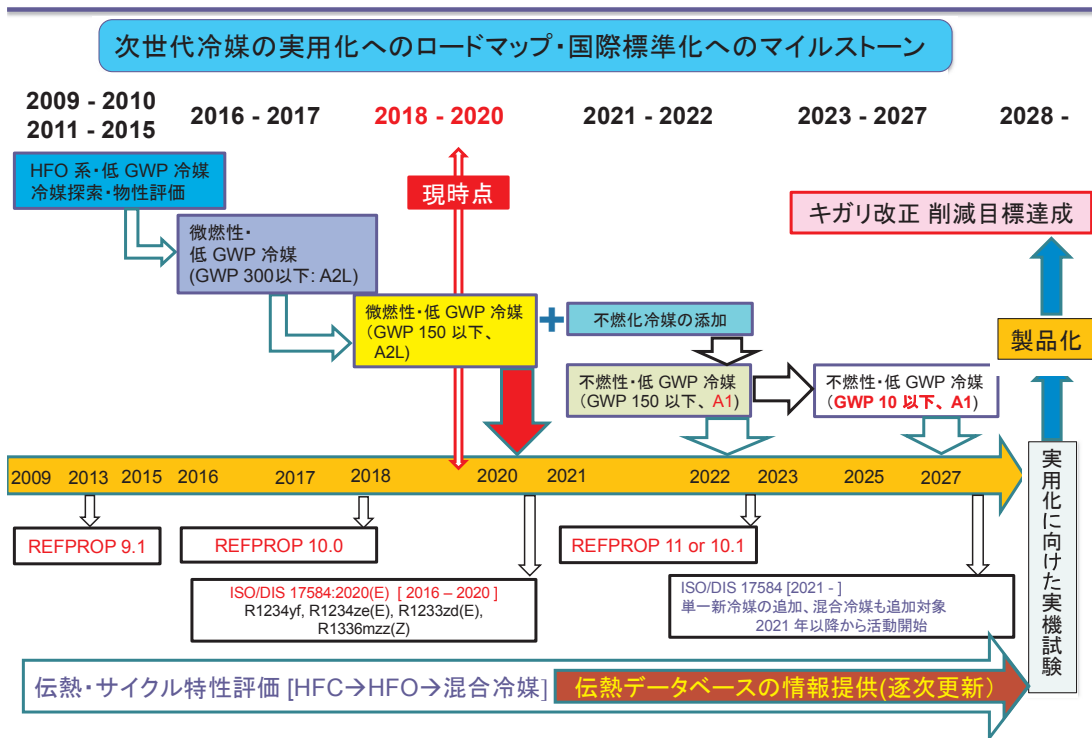


図 3.1.1-1 次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン(基本方針)

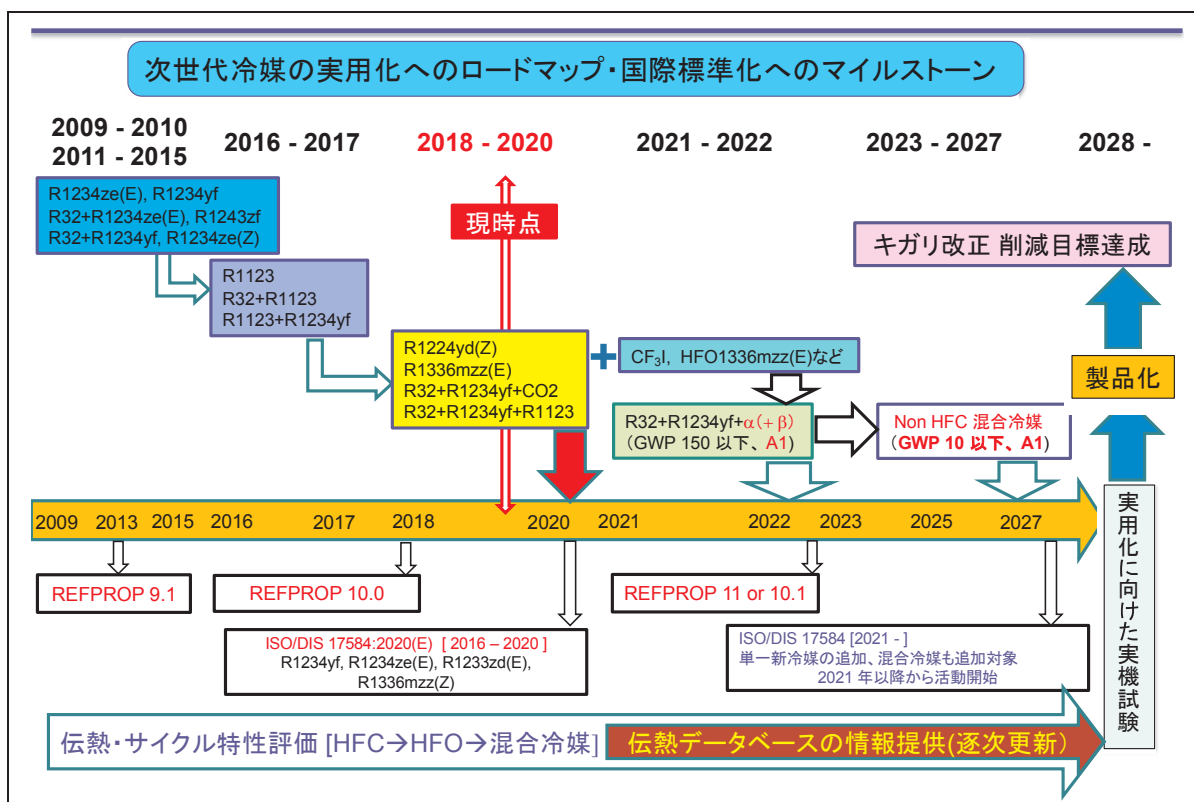


図 3.1.1-2 :次世代冷媒の実用化へのロードマップ及び国際標準化へのマイルストーン  
(具体的な冷媒の取り組み)

### 3.1.2 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】

新冷媒を広く実用化するためには、まず ISO817 や ANSI/ASHRAE Standard34 による新冷媒の登録が必要となる。また、登録された冷媒の燃焼特性データ及び燃焼性等級は、ISO 5149（冷凍システムの安全性及び環境要求）や IEC 60335-2-40（エアコン等の安全要求）に適用されることから、新冷媒の国際規格登録が進まないことは新冷媒及びそれを使用した冷凍空調機器の開発・普及にとって大きな障害となる。逆に、ISO817 において新冷媒が R32 等の微燃性冷媒と同等以下の燃焼性であることが認められれば、過去の微燃性冷媒のリスク評価の結果から、冷凍空調機器の規格や高圧ガス保安法において自動的に優遇措置が受けられることが期待される。本研究開発で実施した代表的な混合冷媒の燃焼特性の混合組成依存性やその評価方法が標準化されることにより、新規混合冷媒の研究開発、混合冷媒の規制緩和及び普及の迅速化、及びそれを用いた冷凍空調機器の実用化が期待される。

### 3.1.3 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】

本研究成果である、冷凍空調機器の評価手法やシミュレーターは、すでに述べた通り、産業界、学術界でできる限り無償で広く普及させ、日本の冷凍空調技術の発展に貢献するものである。このため、市場規模に対する市場シェアのような考え方をすることは困難であるが（例えばルームエアコンは国内市場で9百万台500,000百万円規模、世界では8千万台3,000,000百万円規模）、研究開発期間終了後5年以内には、少なくとも国内においては、冷凍空調工業分野における唯一の標準シミュレーターとなることは確実である。

本プロジェクトを実施していることもあり、早稲田大学に2020年4月よりわが国初のヒートポンプ関連のコンソーシアム「次世代ヒートポンプ技術戦略研究コンソーシアム」を立ち上げることができた。ここには、我が国の主要冷凍空調機器メーカーも参加しており、ここでシミュレーターを標準コード化したり、ハイブリッド実運転性能評価装置により我が国の冷凍空調機器の実運転性能を把握したりすることにより、その運転データをデータベースとして世界に発信することによって日本製品の普及へ大きく貢献できる。

今回開発する手法は、海外においても利用可能なものであるため、東南アジアにおける大学からまず普及促進を図る。現在、わが国のヒートポンプ機器のアジアへの普及戦略を始めており、この際、このシミュレーターもそのまま普及させる予定である。さらに、相手国政府機関との交流も計画しており、ここでもこの活用を強く推進する予定である。これにより、東南アジアにおける標準シミュレーターとなることも目指す。

## 3.2 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発

### 3.2.1 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】

東京大学が分担した研究課題に関しては、本研究開発を通し、炭化水素系冷媒のリスク評価にかかわるデータを提供することができた。こうした成果は、新冷媒の開発・実用化の指標となり、安全性の基準作り、新規混合冷媒の選定、および可燃性冷媒を安全に使用するための機器の構造設計等に大いに役立つものと考えられる。

公立大学法人公立諏訪東京理科大学が分担した研究課題に関しては、1.2.1.2 で記載の通り、本件研究成果は業務用冷凍冷蔵機器及び家庭用空調機器冷媒の低GWP化の達成及び世界に先駆けた技術普及をめざしたIEC規格の更新に資すると期待されている。これまでに本研究で実施した、主として電気系着火源及び高温熱面着火源候補の着火性の実験的評価結果は、従来着火能力が不明であった着火源の絞り込みに大きく資しており、この評価手法のさらなる一般化を今後強力に進めていくことで、より幅広い着火シナリオのリスク評価につなげられると期待される。

産業総合技術研究所安全科学研究部門が分担した研究課題に関しては、実規模実験をもとに安全性を確認された機器類が普及することで、被漏洩空間に対して充填量の上限を規制できる機器類への冷媒としてのプロパンの利用が進めば、地球温暖化ガスの放出低減に大きく寄与することができると考えられる。

### 3.3 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

#### 3.3.1 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】

本システムが製品化でき、市場展開された場合の地球温暖化防止効果の試算として機器封入冷媒のCO<sub>2</sub>削減量は以下となる。(年間台数 31 台、延長配管 20m)

表 3.3.1-1 実用化時の CO<sub>2</sub> 削減量

	1台当たり			年間(31台当たり)		
	冷媒量kg	CO <sub>2</sub> -t	削減量 (CO <sub>2</sub> -t)	冷媒量kg	CO <sub>2</sub> -t	削減量 (CO <sub>2</sub> -t)
R404A機	54	212	-	1674	6,562	-
二元サイクルシステム機	49	0.05	212	1519	1.5	6,561

#### 3.3.2 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】

現在、我が国には、キガリ改正に基づく段階的な HFC 使用量の削減が義務付けられている。HFC 使用量は、CO<sub>2</sub>換算量で評価されるため、業務用冷凍冷蔵機器利用者は、必然的に GWP が低い冷媒への移行が進んでいくとの認識を持ちつつも、規制による最終削減量と現在使用量の差があまりに大きいため、使用冷媒が数回にわたり変化し、機器をたびたび買い替えなければならないとの懸念が、産構審などで表明されており、さらなる転換が必要でない GWP を持つ冷媒の使用が望まれる。それゆえ、本事業で開発される機器は、このことを念頭においた機器であり、コンデンシングユニット市場全体の低 GWP 冷媒への転換を後押しできるものであると考えられる。一般に機器からの CO<sub>2</sub> 排出量は、冷媒の GWP に起因する直接効果と、機器稼働によって消費される電気量に起因する間接効果に振り分けることができるが、本事業は、両方の効果で CO<sub>2</sub> の削減が可能であり、結果、コンデンシングユニット市場全体の大幅な CO<sub>2</sub> 量削減につながるものである。

一方、本事業で得られた技術は、空調分野への適用も可能である。現在、入手可能な混合冷媒は大きな温度勾配を持つものもあり、機器性能へ悪影響を及ぼすため、とりわけ空調分野では、これまで、ほぼ温度勾配のない R22、R410A、R32 が、主要冷媒として選択されてきた。空調機器と冷凍冷蔵機器では、温度勾配に対する機器性能への影響度が異なるため、本事業と同一の冷媒を用いることは困難であるが、温度勾配対応技術は適用可能であり、現状よりも GWP が低い冷媒、すなわち多少の温度勾配を持つ冷媒の使用を実現し、CO<sub>2</sub>削減の効果を得ることができる。

#### 3.3.3 低温機器における CO<sub>2</sub> 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】

本研究開発により、当社の CO<sub>2</sub> 冷凍機のラインナップ拡充及び機能付加価値のアップ、さらに冷媒規制により市場における CO<sub>2</sub> 冷媒の付加価値がアップすることで、CO<sub>2</sub> 冷凍機の国内市場構成比の拡大(普及)が見込めると考える。また、これに伴い、CO<sub>2</sub> 排出削減効果も期待される。

#### 3.3.4 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】

本事業により GWP 10 以下の微燃性冷媒および高効率な直膨型空調機が開発されれば、国内だけに留まらず、グローバル規模で広く普及することが期待される。

開発中の新冷媒の成分物質を使用した混合冷媒は、混合組成を変えることにより、直膨用空調機器だけでなく幅広い用途に使用することができる。冷凍冷蔵用に使用されている R404A 代替や、カーエアコン冷媒の用途への展開も期待される。

## 論文リスト(1/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
1	Kondou, C. Koyama, S.	長崎大学 九州大学	Heat Transfer and Pressure Drop of R1123/R32 Flow in Horizontal Microfin Tubes During Condensation and Evaporation	17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Paper no. 164	有	2018,7	①
2	Kondou, C. Matsuzono, T. Higashi, Y.	長崎大学 長崎大学 九州大学	Surface Tension Measurement of Low GWP Refrigerant Mixture HFO-1123/HFC-32 and HFO-1234ze(E)/HFC-32	17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, Paper no. 165	有	2018,7	①
3	Righetti, G. Longo, G. A. Zilio, C. Akasaka, R. Mancin, S.	Univ. of Padova Univ. of Padova Univ. of Padova 九州産業大学 Univ. of Padova	R1233zd(E) Flow Boiling inside a 4.3 mm ID Microfin Tube	Int. J. Refrig., 91, 69-79	有	2018,7	①
4	Higashi Y. Sakoda N.	九州大学 九州大学	Measurements of PvT Properties, Saturated Densities, and Critical Parameters for 3,3-Trifluoropropene (HFO1243zf)	J. Chem. Eng. Data, 63, 3818-3822.	有	2018,9	①
5	Akasaka, R. Higashi, Y. Koyama, S.	九州産業大学 九州大学 九州大学	Development of the Equation of State for HCFO-1224yd(Z): Detailed and Extensive Evaluation of the Current Equation and Outlook for a New Equation	1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants	有	2018,9	①
6	Kondou, C. Koyama, S.	長崎大学 九州大学	Evaporation Heat Transfer of HFC-32/HFO-1123 (60/40 mass%) Flow in a Horizontal MmicrofinTube	1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants, Paper no. 1129,	有	2018,9	①
7	Kondou, C. Matsuzono, T. Higashi, Y.	長崎大学 長崎大学 九州大学	Surface Tension Measurement for Low GWP refrigerants HFO-1123 and HCFO-1224yd(Z)	1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants, Paper no. 1126	有	2018,9	①
8	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	Speed of Sound and Dielectric Constant Measurements for a Mixture of HFO-1123 and R-32 in the Gas Phase	Proc. 1st IIR International Conference on the Application of HFO Refrigerants, 1145, Birmingham, UK, 2018.	有	2018,9	①
9	近藤智恵子 東之弘	長崎大学 九州大学	低GWP混合冷媒R32/R1234yf および R744/R32/R1234yfの表面張力測定	第88回マリンエンジニアリング学術講演会, no.207	無	2018,10	①
10	Miyara, A. Alam, Md. J. Yamaguchi, K. Kariya, K.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Development and Validation of Tandem Capillary Tubes Method to Measure Viscosity of Fluids	日本冷凍空調学会論文集, Vol.36, No.1, pp.1-6	有	2019,3	①
11	岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 九州大学	示差毛管上昇法による新規低GWP作動媒体R1336mzz(Z)およびR1336mzz(E)の表面張力測定	第53回空気調和・冷凍連合講演会 no.24	無	2019,4	①
12	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	地球温暖化係数の小さい新規冷媒の音速・誘電率測定	第53回空気調和・冷凍連合講演会講演資料、6、東京、2019.	無	2019,4	①
13	Takezato, K. Senba, S. Thu, K. Miyazaki, T. Takata, N. Higashi, Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Heat Pump Cycle using Refrigerant Mixtures of HFC32 and HFO1234yf	International Conferences on Polygeneration (ICP2019)	有	2019,5	①
14	Miyara, A. Kariya, K.	佐賀大学 佐賀大学	Expanded Study on Heat Pump and Refrigeration Systems for Low GWP Refrigerants	Proceedings of the 5th International Conference on Polygeneration (ICP 2019), pp.17	有	2019,5	①
15	Miyara, A. Kariya, K. Wakasugi, S.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Two Phase Flow and Heat Transfer in a Channel of Plate Heat Exchanger	Proceedings of 10th International Conference on Multiphase Flow, (ICMF 2019), Rio de Janeiro, Brazil	有	2019,5	①
16	Tanaka, K.	日本大学.	Development of the Apparatus for Measuring pvTx Relationships to Obtain VLE data	International Conference on Properties & Phase Equilibria for Process & Product Design 2019	無	2019,5	①



## 論文リスト(2/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
17	Kyaw T. Takezato K. Senba S. Perera U.C.A Takata N. Higashi Y. Miyazaki T.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Heat Pump Cycle Performance using Low GWP Ternary Mixture of R32, R1234yf and R744	International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019)	有	2019.6	①
18	Righetti G. Akasaka R. Bobbo S. Brown J.S. Fedele L. Higashi Y. Longo G.A. Mancin S. Zillio C.	Univ. of Padova 九州産業大学 CNR-ITC Catholic Univ. America CNR-ITC 九州大学 Univ. of Padova Univ. of Padova Univ. of Padova	Effect of Refrigerant Properties Estimation on the Prediction Capabilities of Well-Established Two-Phase Heat Transfer and Pressure Drop Models for New Refrigerants	37th UIT Heat Transfer Conference	有	2019.6	①
19	Higashi, Y.	九州大学	Thermodynamic Property Measurements of New Refrigerants and Their Mixtures (Invited)	International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019)	無	2019.6	①
20	Hashimoto, M. Otsuka, T. Fukushima, M. Okamoto, H. Hayamizu, H. Ueno, K. Akasaka, R.	AGC AGC AGC AGC AGC AGC 九州産業大学	Development of New Low-GWP Refrigerants-Refrigerant Mixtures Including HFO-1123	Science and Technology for the Built Environment, 25(6), 776-783	有	2019.7	①
21	Sakoda N., Higashi Y.	九州大学 九州大学	Measurements of PvT Properties, Vapor Pressures, Saturated Densities, and Critical Parameters for cis-1-Chloro-2,3,3,3-tetrafluoropropene (R1224yd(Z))	J. Chem. Eng. Data, 64, 3983-3987.	有	2019.8	①
22	Sakoda N. Shiheng J Nakazaki M. Takata Y. Higashi Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Thermodynamic Properties of Binary Mixtures of Trifluoroethene (HFO1123)+2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene(HFO1234yf)	25th IIR International Congress Of Refrigeration (ICR2019)	有	2019.8	①
23	Kondou, C.	長崎大学	Heat Transfer and Pressure Drop of R1123/R32 (40/60 mass%) Flow in Horizontal Microfin Tubes during Condensation and Evaporation	Science and Technology for the Built Environment, 25 (6) 1281-1291	有	2019.8	①
24	Kondou, C. Elabbadi, J. Houriez, C. Masella, M. Higashi, Y., Coquelet, C.	長崎大学 MINES ParisTech MINES ParisTech CEA Saclay 九州大学 MINES ParisTech	Surface Tension Measurement and Modeling Work for New Low GWP Working Fluids	The 25th IIR Int. Cong. Refrig., paper no. 059	無	2019.8	①
25	Akasaka, R. Lemmon, E. W.	九州産業大学 NIST	Fundamental Equations of State for cis-1,3,3,3-Tetrafluoropropene [R-1234ze(Z)] and 3,3,3-Trifluoropropene (R-1243zf)	J. Chem. Eng. Data, 64(11), 4679-4691	有	2019.8	①
26	Kariya, K. Miyara, A.	佐賀大学 佐賀大学	Condensation and Evaporation Heat Transfer Characteristics of Pure and Binary-Mixture HFO Refrigerants Inside a Plate Heat Exchanger	The 25th IIR International Congress of Refrigeration (ICR2019), 1363, Montreal, Canada	有	2019.8	①
27	迫田直也 東之弘	九州大学 九州大学	HFO1336mzz(Z)およびHFC1336mzz(E)の飽和蒸気圧測定	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019.9	①
28	岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 九州大学	HFO系低GWP純冷媒の表面張力測定結果と相関式の評価	2019年度 日本冷凍空調学会年次大会, D141 p. 1-6	無	2019.9	①
29	三ヶ尻 直樹 菊池 省吾 地下 大輔 井上 順広	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	水平扁平多孔管内におけるHFO1336mzz(E)の沸騰熱伝達に関する実験的研究	2019年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, A111 (6pages).	無	2019.9	①
30	Kikuchi, S. Mikajiri, N. Jige, D. Inoue, N.	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	Experiments on Flow Boiling Characteristics of HFO1234yf and HFC32 in a Multiport Tube with Rectangular Minichannels	Proceedings of the 2019 Energy and Refrigerating Air-Conditioning Conference, Paper Number:ERAC2019-IS002 (2019), TAIWAN.	無	2019.10	①

## 論文リスト(3/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマNo.※
31	Mondal, D. Hori, Y. Kariya, K. Miyara, A.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Measurement of Vapor Viscosity of R1123/R32 Mixture Refrigerant by a Tandem Capillary Tubes Method	The 12th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC2019), Xi'an, China	無	2019,10	①
32	Tanaka, K.	日本大学	PVT Property of HCFO-1224yd(Z)	12th Asian Thermophysical Properties Conference	無	2019,10	①
33	迫田直也 東之弘	九州大学 九州大学	次世代冷媒R1233zd(E)の蒸気圧の測定	第40回日本熱物性シンポジウム	無	2019,10	①
34	不動勇心 中村琢夢 岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 長崎大学 長崎大学 九州大学	低GWP作動流体の三重点測定	第40回日本熱物性シンポジウム	無	2019,10	①
35	菊池 省吾 三ヶ尻 直樹 地下 大輔 井上 順広	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	次世代低GWP冷媒の扁平多孔管内における沸騰熱伝達特性	第89回(平成31年度)マリンエンジニアリング学術講演会, OS2-5, 167-168.	無	2019,10	①
36	田中 勝之	日本大学	HCFO-1224yd(Z)の臨界点におけるPVT測定	第40回日本熱物性シンポジウム	無	2019,10	①
37	沼館拓弥 岩崎俊 城島有基 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 長崎大学 長崎大学 九州大学	示差毛管上昇法による新規低GWP混合冷媒R448Aの表面張力測定	第89回マリンエンジニアリング学術講演会講演会, OS2-8, p. 173-174	無	2019,10	①
38	東之弘	九州大学	キガリ改正の約束を実現するための地球温暖化係数の低い次世代冷媒の開発と熱物性計測	日本法科学技術学会第25回学術集会(基調講演)	無	2019.11	①
39	Thu, K. Takezato, K. Senba, S. Perera, U. A. Takata, N. Miyazaki, T. Higashi, Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	The Exergetic Analysis of a Mechanical Vapour Compression System using a Ternary Mixture (R32/R1234yf/R744) for Low GWP Applications	日本冷凍空調学会年次大会	無	2019,11	①
40	Tanaka, K.	日本大学	Measurements of PVTx Properties for Refrigerant Mixtures R32/R1234yf	The 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference	無	2019,12	①
41	Jige, D. Kikuchi, S. Eda, H. Inoue, N.	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	Flow Boiling in Horizontal Multiport Tube: Development of New Heat Transfer Model for Rectangular Minichannels	International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 144, 118668	有	2019,12	①
42	Miyara, A. Kariya, K.	佐賀大学 佐賀大学	Measurement of Local Heat Transfer Characteristics and Flow Behavior of Two Phase Flow in a Complex Channel	The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC), 2KL14, Maui, Hawaii, USA	無	2019,12	①
43	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	Speed of Sound and Dielectric Constant Measurements for HFO-1335mzz(E) in the Gas Phase	Proc. 2nd Pacific Rim Thermal Engineering Conference, 24041, Hawaii, USA, 2019.	有	2019,12	①
44	Tomassetti, S. Perela, U. A. Di Nicola, G. Pierantozzi, M. Higashi, Y. Thu, K.	Marche Polytech. Univ. 九州大学 Marche Polytech. Univ. Marche Polytech. Univ. 九州大学 九州大学	Two-Phase and Vapor Phase Thermophysical Property (pvTz) Measurements of the Difluoromethane + trans-1,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene Binary System	J. Chem. Eng. Data, 65, 1554-1564.	有	2020	①
45	岩崎俊 近藤智恵子 東之弘	長崎大学 長崎大学 九州大学	新規低GWP純冷媒の表面張力およびパラコールの測定	日本冷凍空調学会論文集, 37(1), 73-80	有	2020,2	①
46	McLinden, M.O. Akasaka, R.	NIST 九州産業大学	Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-hexafluorobutene [R-1336mzz(Z)]: Vapor Pressure, (p, ρ, T) Behavior, and Speed of Sound Measurements and Equation of State	J. Chem. Eng. Data(掲載決定)	有	2020,3	①
47	粥川洋平 迫田直也 赤坂亮	産業技術総合研究所 九州大学 九州産業大学	オレフィン系低GWP冷媒の熱物性に関する研究動向	日本冷凍空調学会論文集, 37(1), 1-44	有	2020,3	①
48	Fedele, L. Bobbo, S. Scattolini, M. Zilio, C. Akasaka, R.	CNR-ITC CNR-ITC CNR-ITC CNR-ITC 九州産業大学	HCFO Refrigerant cis-1-Chloro-2,3,3,3-tetrafluoropropene [R1224yd(Z)]: Experimental Assessment and Correlation of the Liquid Density	Int. J. Refrig.(掲載決定)	有	2020,5	①

## 論文リスト(4/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
49	Mondal, D. Hori, Y. Kariya, K. Miyara, A. Alam, Md. J.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Measurement of Viscosity of a Binary Mixture of R1123 + R32 Refrigerant by Tandem Capillary Tube Method	International Journal of Thermophysics, Vol.41, No.6(2020.6)	有	2020.6	①
50	東之弘	九州大学	地球温暖化係数の低い新冷媒の熱物性測定と状態方程式の開発	化学工学、84(7)	無	2020.7	①
51	Sakoda, N. Higashi, Y. Akasaka, R.	九州大学 九州大学 九州産業大学	Measurements of Vapor Pressures for trans-1-Chloro-3,3,3-trifluoropropene(R1233zd(E)) and cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-nutene (R1336mzz(Z))	J. Chem. Eng. Data(掲載決定)	有		①
52	Takezato, K. Senba, S. Miyazaki, T. Takata, N. Higashi, Y. Thu, K.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Heat Pump Cycle using Refrigerant Mixtures of HFC32 and HFO1234yf	Heat Transfer Engineering(掲載決定)	有		①
53	Thu, K. Takezato, K. Takata, N. Miyazaki, T. Higashi, Y.	九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Performance Evaluation of a Heat Pump System using a Binary Blend of HFC32 and HFO1234yf with GWP below 150	Applied Thermal Engineering(査読中)	有		①
54	三好克弥 Mondal, D. Tuhin, A. R. 仮屋圭史 宮良明男	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	HFO冷媒R1336mzz(E)の熱伝導率測定	2020年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、講演申し込み	無		①
55	Tun, T. Yoshida, K. Kariya, K. Miyara, A.	佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学 佐賀大学	Simulation Aided Measurement of Local Heat Transfer Coefficient of Plate Heat Exchanger	The10th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, Hangzhou China	有		①
56	狩野祐也 粥川洋平 藤田佳孝	産業技術総合研究所 産業技術総合研究所 産業技術総合研究所	Dipole Moment and Heat Capacity in the Ideal Gas State Derived from Relative Permittivity and Speed of Sound Measurements for HFO-1123 and HCFO-1224yd(Z)	Int. J. Refrig.(査読中)	有		①
57	Akasaka, R. Higashi, Y. Sakoda, N. Fukuda, S. Lemmon, E. W.	九州産業大学 九州大学 九州大学 九州産業大学 NIST	Thermodynamic Properties of Trifluoroethene (HFO1123): (p, ρ, T) Behavior and Fundamental Equation of State	Int. J. Refrig.(掲載決定)	有		①
58	Miyamoto, H. Saito, T. Sakoda, N. Perera, U. A. Ishi, T. Thu, K. Higashi, Y.	富山県立大学 富山県立大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学 九州大学	Measurement of the Vapor-Liquid Equilibrium Properties of the Binary Low GWP Refrigerant R32/R1123	Int. J. Refrig.(掲載決定)	有		①
59	三ヶ尻 直樹 菊池 省吾 地下 大輔 井上 順広	東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学 東京海洋大学	扁平多孔管内における3成分混合冷媒R455Aの凝縮熱伝達に関する実験	2020年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、講演申し込み	無		①
60	滝澤賢二、五十嵐直治、徳橋和明、近藤重雄	産業技術総合研究所	On simple method for predicting burning velocities for lower flammability refrigerants using quenching distance measurement	International Journal of Refrigeration	有	2020	②
61	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Theoretical Formulation of Two-phase Flow Distribution in Microchannel Heat Exchangers using Electric Circuit Analogy	International Workshop on Environmental Engineering 2019	有	2019, 6	③
62	Seiichi YAMAGUCHI	早稲田大学	Development of finned-tube heat exchanger simulator for heat pumps	International Workshop on Environmental Engineering 2019	有	2019, 6	③
63	宮岡洋一	早稲田大学	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-一次世代低GWP冷媒のサイクル性能評価研究の概要と2018年度の取り組み-	2019年日本冷凍空調学会年次大会D132	無	2019, 10	③

## 論文リスト(5/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
64	榎木 光治	電気通信大学	膨張弁における混合冷媒流れの数値解析)	2019年日本冷凍空調学会年次大会D133	無	2019, 10	③
65	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Numerical Simulation of Finned-Tube Heat Exchangers with Arbitrary Connectivity and Flexible Set of Input Conditions	The Fifth International Symposium on Innovative Materials and Processes in Energy Systems, IMPRES2019	有	2019, 10	③
66	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Semi-Theoretical Formulation of Annular Flow Void-Fraction	IMAT 2019: The 11th International Meeting on Advances in Thermofluids	有	2019, 11	③
67	榎木 光治	電気通信大学	AI技術の活用事例 ～管内沸騰熱伝達率の整理～	西日本地区技術セミナー 日本冷凍空調学会主催	無 (招待)	2020, 2	③
68	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Prediction of two-phase flow distribution in microchannel heat exchangers using artificial neural network	International Journal of Refrigeration Volume 111 March 2020, P 53-62	有	2020, 5	③
69	榎木 光治	電気通信大学	相変化熱伝達予測への人工知能の適用について ～人工知能の基礎と特性を理解した上での利用方法～	第6.5回相変化界面研究会 日本機械学会主催	無 (招待)	2020, 5	③
70	湊明彦	電気通信大学	次世代空調細管の二相流数値解析	2020年度混相流シンポジウム	無	2020, 8	③
71	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Formulation of steady-state void fraction through the principle of minimum entropy production	JSME Journal of Thermal Science and Technology	有	2020, 8	③
72	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	Semithoretical formulation of annular flow void fraction using the principle of minimum entropy production	International Journal of Thermal Sciences, Elsevier	有	2020, 8	③
73	和田 瑛里花	早稲田大学	低GWP冷媒の実用化に向けたシミュレーションによる圧縮機の性能評価第1報:漏れと熱伝達を考慮したスクロール圧縮機モデル	2020年日本冷凍空調学会年次大会A131	無	2020, 9	③
74	荻原 拓視	早稲田大学	低GWP冷媒をドロップイン冷媒としたR410A用ルームエアコンの冷房運転及び暖房運転における	2020年日本冷凍空調学会年次大会B343	無	2020, 9	③
75	松井 隼	早稲田大学	蒸気圧縮式ヒートポンプの非定常特性の解明と制御検討	2020年日本冷凍空調学会年次大会B344	無	2020, 9	③
76	宮岡 洋一	早稲田大学	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 研究開発第2報:2019年度の取り組みと成果	2020年日本冷凍空調学会年次大会A321	無	2020, 9	③
77	鄭 宗秀	早稲田大学	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 研究開発第3報:シミュレーター開発	2020年日本冷凍空調学会年次大会A322	無	2020, 9	③
78	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	ADVANCES IN NUMERICAL SIMULATION OF FINNED-TUBE HEAT EXCHANGERS WITH ARBITRARY TUBE CONNECTIVITY	ISTP31, Honolulu (USA)	有	2020, 10	③
79	和田 瑛里花	早稲田大学	Evaluating Compressor Performance by Simulation for practical use of low-GWP refrigerants	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
80	荻原 拓視	早稲田大学	Performance Evaluation in Cooling Operation and Heating Operation of Low GWP Refrigerant as a Drop-in Replacement for R 410A in Room Air Conditioner	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
81	松井 隼	早稲田大学	Study on Unsteady-state Characteristics and consideration of control of Vapor Compression Heat Pumps	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
82	宮岡 洋一	早稲田大学	Construction of a hybrid type air conditioner performance evaluation equipment under actual use conditions	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③

## 論文リスト(6/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマ No.※
83	鄭 宗秀	早稲田大学	Development of a practical evaluation simulator for low GWP refrigerants	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
84	榎本光治	電気通信大学	The characteristics of the local heat transfer on surface property changes of low GWP mixing-refrigerants.	IEA HEAT PUMP CONFERENCE 2020	無	2021, 4 発表 準備中	③
85	Niccolo GIANNETTI	早稲田大学	A variational formulation of minimum entropy production principle for dissipative two-phase flows	Entropy 2021: The Scientific Tool of the 21st Century	有	2021, 5	③
86	Makoto Ito, Naoya Kurokawa, Chaobin Dang, Eiji Hihara	University of Tokyo	Disproportionation Reaction of HFO-1123 Refrigerant	International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, 9-12, July, 2018, Purdue University, USA	有	2018, 7	④
87	Tomohiro HIGASHI, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yuji SHITARA	University of Tokyo	Combustion suppression effect of additives for lubricating oil during Diesel explosion at pump-down of air conditioner	25th IIR International Congress of Refrigeration	有	2019, 8	④
88	Makoto Ito, Zhihua Zhang, Chaobin Dang, Eiji Hihara	University of Tokyo	Disproportionation Reaction of HFO-1123 Refrigerant	25th IIR International Congress of Refrigeration	有	2019, 8	④
89	芦原 直也, 伊藤 誠, 党 超鋌, 飛原 英治	東京大学	次世代冷媒の空調機から室内への漏洩に関する研究	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019, 9	④
90	斎藤 静雄, 東 朋寛, 党 超鋌, 飛原 英治	東京大学	エアコンポンプダウン時の圧縮機のディーゼル燃焼特性に関する潤滑油添加剤の影響	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019, 9	④
91	張 之華, 伊藤 誠, 党 超鋌, 飛原 英治	東京大学	HFO-1123 の不均化反応の解明及び反応抑制剤の評価	2019年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2019, 9	④
92	Makoto ITO, Naoya ASHIHARA, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yu CHEN	University of Tokyo	Numerical Simulation of Strongly Flammable Refrigerant Leakage from a Split Air Conditioner	14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants	有	2020, 12 発表予定	④
93	Shizuo SAITOH, Tomohiro HIGASHI, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yu CHEN, Yuji	University of Tokyo	Effect of lubricating oil additives on compressor explosion accident in pump-down operation of an air conditioner	14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants	有	2020, 12 発表予定	④
94	張 之華, 伊藤 誠, 党 超鋌, 飛原 英治, 陳 昱	東京大学	HFO-1123の不均化反応の反応抑制剤の評価	2020年度日本冷凍空調学会年次大会	無	2020, 9 発表予定	④
95	Shizuo SAITOH, Tomohiro HIGASHI, Chaobin DANG, Eiji HIHARA, Yu CHEN, Yuji	University of Tokyo	Effect of additive concentration on diesel combustion in pump-down operation of an air conditioner	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
96	Naoya Ashihara, Makoto Ito, Chaobin Dang, Yu Chen, Eiji Hihara	University of Tokyo	Safety study on leakage of strongly flammable refrigerant from a split household air conditioner	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
97	Naoya Ashihara, Makoto Ito, Chaobin Dang, Yu Chen, Eiji Hihara	University of Tokyo	Safety study on leakage of strongly flammable refrigerant from a commercial refrigeration display case	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
98	Zhihua Zhang, Makoto Ito, Chaobin Dang, Yu Chen, Eiji Hihara	University of Tokyo	Suppression of disproportionation reaction of HFO-1123 by adding inhibitor	International Journal of Refrigeration	有	投稿 準備中	④
99	Mitsuhiro Fukuta, Hideyuki Fujimoto, Masaaki Motozawa	Shizuoka University	Study on layer short mechanism and discharge pattern in refrigerant compressor for refrigerants with disproportionation reaction like HFO-1123	13th IEA Heat Pump Conference	有	2021.4 発表予定	④



論文リスト(7/7)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月	テーマNo.※
100	今村友彦, 上原航祐, 中田啓太, 丸山将也, 桑名一徳	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	Quasi-Steady Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heated Surface	Fire Safety Journal (in Press, Available Online)	有	2020,5	④
101	今村友彦, 上原航祐, 中田啓太, 丸山将也, 桑名一徳	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	Quasi-Steady Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heated Surface	Proceedings of 13th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS2020)	有	2021,4	④
102	今村友彦, 青木幹尚, 春山智成	公立諏訪東京理科大学	コンセントプラグの抜き差しによる滞留プロパンの着火性状	第52回安全工学研究発表会予稿集, pp.173-176	無	2019,11	④
103	中澤誠人, 苅谷優行, 下村蓮, 桑名一徳, 今村友彦	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	高温表面による流動プロパンの着火特性	第57回燃焼シンポジウム, (ダウンロード配布)	無	2019,11	④
104	今村友彦, 白旗恭平, 成澤弘明	公立諏訪東京理科大学	電気部品による次世代家庭用空調機冷媒の着火性評価	2019年度日本冷凍空調学会年次大会, (USB配布)	無	2019,9	④
105	今村友彦, 白旗恭平, 成澤弘明	公立諏訪東京理科大学	家庭用空調機器へのプロパン冷媒搭載を想定した一般家電の着火リスク評価	安全工学シンポジウム2019, pp.356-359	無	2019,9	④
106	今村友彦, 白旗恭平, 成澤弘明, 山本宗一郎, 上矢恭子	公立諏訪東京理科大学	Manuscript-Experimental Evaluation on Ignition Possibility of Propane by Operation of Wall Switch	日本冷凍空調学会論文集	有	(2020) 発表準備中	④
107	今村友彦, 中澤誠人, 桑名一徳	公立諏訪東京理科大学, 山形大学	Transient Characteristics of Flowing Propane/Air Mixture Ignited by a Heating Surface	Fire Safety Journal	有	(2020) 発表準備中	④

※テーマNo.

- 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【九州大学】
- ②: 低GWP低燃焼性混合冷媒の安全性評価【産業技術総合研究所(機能化学)】
- 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【早稲田大学】
- ④: 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発【東京大学・産業技術総合研究所(安全科学)・諏訪東京理科大学】
- ⑤: 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】
- ⑥: 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】
- ⑦: 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】
- ⑧: GWP11以下の直膨型空調機器用 微燃性冷媒の開発【ダイキン工業】

## 「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」

## 基本計画

環境部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

## (1) 研究開発の目的

## ①政策的な重要性

特定フロン（CFC、HCFC）等のオゾン層破壊物質は、オゾン層保護の観点から、モントリオール議定書により生産の段階的な廃止が義務付けられている。この特定フロンの代替として開発され、オゾン層破壊のおそれがない代替フロン等4ガス（HFC、PFC、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>）は、その優れた特性から、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・排出量が増加しつつある。一方で、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、かつ極めて高い温室効果を有する化合物であることから、京都議定書及びパリ協定において排出削減対象ガスに指定され、排出削減のための対策が進められているところである。また、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な対策としては、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。特に、代替フロン（HFC）が使用されている冷凍空調機器は、一旦市場に出荷されれば十数年にわたり排出源として温暖化に悪影響を及ぼすため、一刻も早く冷媒転換技術を開発し、市場投入を図ることが不可欠である。

さらに、HFCについては、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規制対象外であったが、2016年10月ルワンダの首都キガリにおいて開催されたモントリオール議定書第28回締約国会合（MOP28）において、新たにHFCの生産及び消費量の段階的削減義務を定める旨のモントリオール議定書の改正（以下「キガリ改正」という。）が採択された。本改正で先進国は、HFC生産・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ており、既存冷媒物質の継続使用ではこの目標を達成できないことが予想されている。このことから、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器の早期開発が必須の状況となっている。

## ②我が国の動向

我が国は、京都議定書に対する目標達成計画において、第1約束期間中（2008年～2012年）に代替フロン等の大幅な排出抑制に努め、温室効果がより小さい代替物質の開発・普及と設備等の導入を推進してきた。また、2016年11月に発効したパリ協定における我が国の温室効果ガス排出削減目標では、代替フロン等4ガス排出量を2013年に比べ、2030年までに約25%削減すること（HFCについては約32%削減）としており、今後、更なる長期的・継続的な排出削減対策の実施が求められている。

この対策の一つとして、2015年4月に「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<sup>※</sup>）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。

こうした状況の中、これまで、冷凍空調分野に対しては「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」事業（2011～2015年度）において、大型である業務用空調機器分野等を対象として冷媒転換の技術開発を行った。また、「高効率低GWP冷媒を使用した中小型空調機器技術の開発」事業（2016～2017年度）では、家庭用空調機器を対象として、高効率を実現しつつ低温室効果冷媒及び適用空調機器の基盤要素技術開発を実施した。

さらに、2019年1月のキガリ改正発効によるHFCの生産量・消費量の削減義務の履行を国内で担保するため、HFCの製造及び輸入を規制する等の措置を講じた「オゾン層保護法」が改正、公布されている。本法では、HFCの生産量・消費量の限度を定めて段階的削減を推進していくとしている。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次世代冷媒を活用した機器の開発・導入を促すこととされている。

※ GWP:地球温暖化係数（Global Warming Potential）の略。CO<sub>2</sub>の温室効果の大きさを基準（1.0）として、同量・同期間における温室効果の大きさを相対比較した値。

## ③世界の動向

欧州では、2006年に、HFC、PFC、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>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CO<sub>2</sub>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。

さらに、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。

こうした世界的なHFC削減意識の高まりの一方で、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、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・リスク評価の標準的な評価手法が確立していないことが大きな原因の一つである。

#### ④本事業のねらい

世界的な次世代冷媒への転換意識の高まりの中、キガリ改正の結果、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、この目標を達成するのは困難と考えられる。

そのため、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が、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は確立されていない。したがって、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。

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庫等に対しては、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冷媒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。

こうした状況をふまえ、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市場投入に貢献することをねらいとして、業務用冷凍冷蔵庫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・リスク評価手法を確立する研究開発を実施する。

さらに、新たな技術が普及する期間を考慮すると、キガリ改正の目標達成のためには、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に対し、新しいシーズ技術を踏まえた幅広い対策を実施し、多方面から可能な限り迅速な普及を後押しする技術開発を行うことが重要である。普及を妨げる技術課題に対して技術開発を進め、効率の向上・適用範囲の拡大を通して普及を促進していくことが必要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する。

## (2) 研究開発の目標

### ①アウトプット目標

#### 【中間目標】

- 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<sup>\*</sup>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。

※ 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。

- 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<sup>\*</sup>）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。

※ COP:成績係数（Coefficient Of Performance）の略。冷暖房器具のエネルギー消費効率を示す係数で、消費電力 1kW に対しての機器の冷却能力、暖房（加熱）能力を表したものの。



APF: 通年エネルギー消費効率 (Annual Performance Factor) の略。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 1kW あたりの冷房・暖房能力を表したものの。

#### 【最終目標】

- 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。

なお、中間目標、最終目標等については、研究開発費の確保状況、研究開発の進捗状況、産業への波及効果等を総合的に勘案し、適宜見直しを行う。

#### ②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、モント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-CO<sub>2</sub>、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。

### ③アウトカム目標達成に向けての取り組み

本事業では、国内審議団体、業界団体及び企業の標準化関係者との積極的かつ緊密な情報・意見交換の場を設けたうえで、ロードマップを策定し、次世代冷媒の特性データの国際データベースへの登録や、開発した次世代冷媒の安全性・リスク評価手法を国際規格化・国際標準化に結びつける。

上記の取り組みの結果、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器の実用化に大きく貢献することとなり、現在市販されている冷凍空調機器と同等の安全性が担保された次世代冷媒適用冷凍空調製品が国内に普及し、我が国のパリ協定及びモントリオール議定書のキガリ改正の目標達成に寄与する。また、現在市販されている冷凍空調機器と同等の安全性を担保した国際標準等を満たした次世代冷媒適用冷凍空調機器が、世界市場に普及することに繋がる。

## (3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために以下の研究開発項目について、別紙 1 の研究開発計画及び別紙 2 の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施する。

### 【委託事業】

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

上記研究開発項目は、次世代冷媒及び次世代冷媒適用冷凍空調機器の安全性評価手法の確立を目的としており、我が国の冷凍空調産業界全体にとって高い共通基盤性を有する研究であり、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うことが見込めない「公共財の研究開発」事業として、委託事業を実施する。

### 【助成事業（助成率：1/2）】

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

上記研究開発項目は、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について、ユーザーサイドのニーズをくみ取ることにより開発終了後の事業化計画を明確にして、実用化及び普及化の研究を行う。本開発終了後、数年以内に製品化を

想定できるものを対象とする。これらは、助成事業（助成率：1/2）として実施する。

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、プロジェクトマネージャー（以下「PM」という。）にNEDO環境部 阿部 正道を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理を実施させる。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効果の最大化を推進させる。

NEDOは公募により研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは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 英治氏を研究開発責任者（プロジェクトリーダー（以下「PL」という。））、早稲田大学総合領域研究機構熱エネルギー変換工学・数学融合研究所 所長 齋藤 潔氏を副研究開発責任者（サブプロジェクトリーダー（以下「SPL」という。））とし、各実施者はPLの下で研究開発を実施する。

### (2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

#### ① 研究開発の進捗把握・管理

PMは、PL・SPLや研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

具体的には、四半期に一回程度 PL・SPL等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受け、必要に応じて、NEDOに設置する技術検討委員会等を開催し、外部有識者の意見を参考として、選択と集中により優秀な技術を短期間に育成するマネジメント

トを行う（例えば、成果が得られた時点で、標準化事業など次ステップへの転出を奨励する。反面、期間内に成果が見込めないと判断された事業は研究開発途中であっても中止するなど。）

## ②技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査の効率化の観点から、必要に応じて本プロジェクトにおける委託事業として実施する。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成30年度から平成34年度までの5年間とする。

## 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。

評価の時期は、中間評価を平成32年度、事後評価を平成35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。

また、中間評価を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

## 5. その他重要事項

### (1) 研究開発成果の取り扱い

#### ① 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の広範な普及を促進する。

#### ② 標準化施策等との連携

得られた研究開発の成果については、データベースへのデータの提供、規格・標準の提案等に積極的に活用する\*と共に、内容を公開し国内外の基準（標準）形成に資することとする。

※ 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IS05149（機器）、IS0817（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。

### ③ 知的財産権の帰属、管理等取扱い

研究開発委託事業の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。なお、基盤技術の研究開発段階から、事業化を見据えた知財戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

### ④ 知財マネジメントに係る運用

本事業は、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」適用対象とする（研究開発項目①、②のみ）。

## （2）プロジェクト基本計画の見直し

PMは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

## （3）根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1号二、第3号及び第9号に基づき実施する。

## （4）その他

本事業の実施を通じて、イノベーションの担い手として重要な若手研究員及び女性研究員の育成等を支援することとする。

## 6. 基本計画の改訂履歴

### （1）平成30年2月、制定。



- (2) 平成 31 年 1 月、研究開発項目の追加による改訂。
- (3) 2020 年 6 月、プロジェクトリーダーの所属先、役職及びサブプロジェクトリーダーの所属先名称の変更による改訂。

## (別紙1) 研究開発計画

### 1. 研究開発の必要性

昨今の地球温暖化防止への具体的貢献が求められる情勢の下、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。）への転換が模索されている。しかし、次世代冷媒の多くは、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、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・リスク評価の標準的な評価手法が確立していないことが大きな原因の一つである。特に、温室効果の大きさと燃焼性とは反比例する性質があることから、燃焼性を有する冷媒を受け入れていかなければ、冷凍空調機器の分野での低炭素社会構築は難しく、燃焼性のある冷媒を安全に使用するための研究開発が重要となっている。

こうした状況の中、冷凍空調機器のうち、次世代冷媒への転換の可能性が高いと考えられている業務用小型冷凍冷蔵機器や、冷媒の市中冷媒ストック量が格段に多く、大気中への漏えい源としての影響が大きい家庭用空調機器を主とする中小型冷凍空調機器においては、次世代冷媒を冷凍空調機器に適用するにあたって、安全性・リスク評価手法を確立し、その後の次世代冷媒適用冷凍空調機器の実用化及び普及促進を支援することが求められている。

一方で、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技術的課題があることで全体の普及に至っていない領域があることが明らかになってきている。例えば、自然冷媒のCO<sub>2</sub>を用いた業務用冷凍冷蔵機器では、温室効果は低いものの運転圧力が高く、使用可能な温度領域が限定されること等からコストや適用範囲の拡大に課題を有している。また、ユーザー側からは、次世代冷媒に転換する際に、設置期間の短縮や既存設備の利用等で施工性を向上させる要求も高まってきている。このように、次世代冷媒の実用化や普及化を妨げている技術課題に対して、新たな技術開発によりいち早く解消することが次世代冷媒を適用した冷凍空調機器の普及を促進する上で必要不可欠であって、実用化及び普及促進に向けた多面的な技術開発が求められている。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### 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」

次世代冷媒について、数値計算や室内実験により、基本特性の評価試験（沸点、蒸気圧、GWP、毒性、熱物性、反応性、燃焼性、伝熱特性、ヒートポンプサイクル性能等）を行う。さらに、実用化評価試験（実環境を加味した冷媒特性評価、混合冷媒比率の最適

化等)に関するデータ取得及び評価を実施する。必要に応じ、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」へデータ提供を行うなどして、連携を図る。

また、取得した基本物性データ及び評価結果について、国際規格化・国際標準化及び国際データベース等<sup>\*</sup>への登録に取り組む。

#### 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」

次世代冷媒の安全性・リスク評価について、評価項目(事故シナリオの検討・抽出、漏洩時挙動評価、着火時の挙動、爆発影響評価、フィジカルハザード評価、実験環境模擬実験、冷媒充填量の許容量の把握等)を検討し、数値計算や室内実験・室外実験等により、安全性・評価手法を確立する。

また、産官学連携により効率的に次世代冷媒の安全性・リスク評価手法を検証することを目的とした研究会を設置し、本研究会を通して安全性・リスク評価手法の開発の成果(着火源評価、リスクアセスメント、フィジカルハザード評価等)を国内外に公表及び発信する。

また、次世代冷媒の安全性・リスク評価手法等について、国際規格化・国際標準化に取り組む<sup>\*</sup>。

※ 次世代冷媒の社会実装に関する国際規格、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。

なお研究開発項目①及び②の成果を踏まえ、産官学の外部有識者と連携の上、次世代冷媒の安全性・リスク評価手法に関する成果を、業界の実用的な安全基準や、国際規格化・国際標準化等に効果的に結び付けるためのロードマップを策定する。なお、このロードマップは、必要に応じ、有識者との検討や標準化動向等を踏まえて見直しを図り、更新する。

#### 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」

次世代冷媒の実用化や普及化を妨げている技術課題に対して、新たな技術開発により技術課題を解決して次世代冷媒や次世代冷媒を適用した冷凍空調機器の実用化および普及化を図る。

### 3. 達成目標

#### 【中間目標】

#### 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」

- 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）を実施する。
- 2) 取得した基本物性データ及び評価結果に関して、国際規格化・国際標準化や国際データベース等への登録に必要なデータについて整理し、取得を進める。

#### 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」

- 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、安全性・リスク評価（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。

なお、研究開発項目①及び②の成果を踏まえ、産官学の外部有識者と連携の上、本事業で得られた低温温室効果次世代冷媒の評価手法に関する成果を、業界の実用的な安全基準や、国際規格・国際標準等への提案に効果的に結び付けるためのロードマップを策定する。

また、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件以上行う目途を得る。

#### 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」

- 1) 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<sup>※</sup>)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。

※ COP:成績係数 (Coefficient Of Performance) の略。冷暖房器具のエネルギー消費効率を示す係数で、消費電力1kWに対しての機器の冷却能力、暖房(加熱)能力を表したもの。

APF: 通年エネルギー消費効率 (Annual Performance Factor) の略。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1kWあたりの冷房・暖房能力を表したもの。

## 【最終目標】

### 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」

- 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」

- 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、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。

なお、研究開発項目①及び②の成果を踏まえ、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、業界団体等を通して、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。

以上



(別紙2) 研究開発スケジュール

	H30	H31	H32	H33	H34	H35
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」						
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」						
評価時期			中間評価			事後評価



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

Vol. **6**

## 地球環境対策（フロン）分野の 技術戦略策定に向けて

2015年10月

<b>1</b> 章 地球環境対策（フロン）技術の概要 .....	2
<b>2</b> 章 地球環境対策（フロン）技術の置かれた状況 .....	3
2-1 規制の動向 .....	3
2-2 技術開発の動向 .....	9
2-3 産業競争力（諸外国との比較） .....	11
<b>3</b> 章 地球環境対策（フロン）分野の技術課題 .....	14
<b>4</b> 章 おわりに .....	15

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## 1章 地球環境対策(フロン)技術の概要

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、オゾン層破壊効果を有する物質である特定フロン(CFC(クロロフルオロカーボン)及びHCFC(ハイドロクロロフルオロカーボン))について、生産及び消費を規制する「モントリオール議定書」が1987年に採択され、先進国においては2020年までに実質全廃となる見通しである。その後、地球温暖化防止に関して、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取組を開始した。1992年には「気候変動枠組条約」が採択され、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。

特定フロンの代替物質として利用が進んだ代替フロン等3ガス<sup>\*1</sup>はODP<sup>\*2</sup>がゼロである一方、大気中に長期間にわたって安定に存在し、かつ極めて強力な温室効果を有することから、京都議定書において排出削減対象ガスに指定されている。2013年には新たにNF<sub>3</sub>(三フッ化窒素)が指定され、これを加えた代替フロン等4ガスについて、排出削減対策が検討されている(図1、表1)。

代替フロンの主用途は冷凍空調機器の冷媒であり、HFCガスが利用されている。今後、同機器の利用は世界各国で継続し、また、途上国を中心に増加の見通しである。一方、冷媒の利用においては地球温暖化防止との両立が重要な前提条件であることから、更なる低GWP<sup>\*3</sup>冷媒の利用を促進することが望まれる。

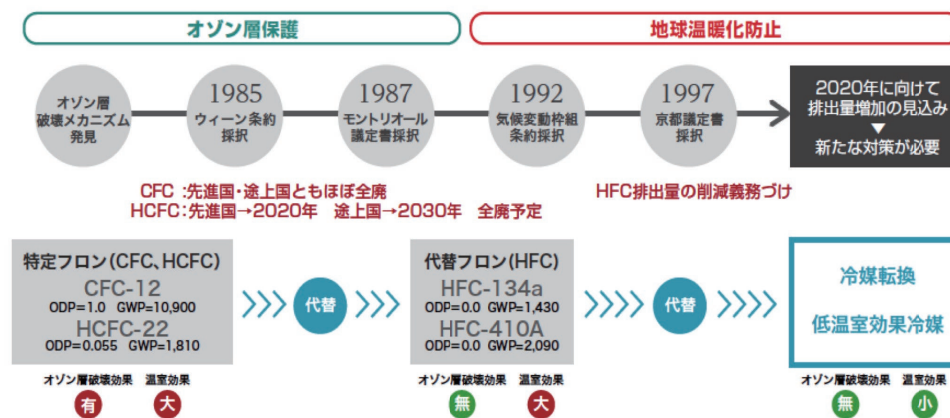


図1 フロン類を巡る規制と対策の流れ  
出所: NEDO 環境部作成 (2015)

表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			
	CFC (クロロフルオロカーボン)	HCFC (ハイドロクロロフルオロカーボン)	HFC (代替フロン) (ハイドロフルオロカーボン)	PFC (パーフルオロカーボン)	SF <sub>6</sub> (六フッ化硫黄)	NF <sub>3</sub> (三フッ化窒素)
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		京都議定書対象物質 (NF <sub>3</sub> は2013年より)			
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)	極めて大きい (約10,000)	大きい (数百~約2,000)	大きい (数百~約4,000 <sup>**</sup> )	極めて大きい (約6,000~9,000)	極めて大きい (約23,900)	極めて大きい (約17,200)
主な用途	・冷凍空調機器の冷媒 ・洗浄剤、溶剤等 (95年以降全廃済み)	・冷凍空調機器の冷媒 ・洗浄剤、溶剤等 (2020年全廃予定)	・冷凍空調機器の冷媒 ・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

出所: 各種公開資料を基に NEDO 環境部作成 (2015)

※1 HFC(ハイドロフルオロカーボン)、PFC(パーフルオロカーボン)、SF<sub>6</sub>(六フッ化硫黄)の三種のフッ素化合物の総称  
 ※2 ODP:オゾン層破壊係数(Ozone Depletion Potentialの略であり、CFC-11を1.0として、オゾン層に与える破壊効果の強さを表す値。)

※3 GWP:地球温暖化係数(Global Warming Potentialの略であり、CO<sub>2</sub>を基準(1.0)として、同量、同期間における温室効果の大きさを相対比較した値。本稿では100年間の影響を考えた場合の数値を示す。)

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## 2章

### 地球環境対策(フロン) 技術の置かれた状況

#### 2-1

#### -1 規制の動向

##### (1) 温室効果ガス排出削減における政府方針

京都議定書第一約束期間(2008～2012年)における我が国の温室効果ガスの排出削減目標は基準年(1990年)比で-6%である。この目標達成のため、CO<sub>2</sub>(二酸化炭素)、CH<sub>4</sub>(メタン)、N<sub>2</sub>O(亜酸化窒素)とともに代替フロン等3ガスも排出削減目標が設定され、-6%のうちの-1.6%を担うこととなった。

フロン類の排出量削減のため、使用済みとなった機器からのフロン類の回収・破壊等については、「フロン回収・破壊法」、「家電リサイクル法」、「自動車リサイクル法」等の施行により対策が行われている。さらにフロン類の回収率向上を図るため、「フロン回収・破壊法」の改正が行われ、2007年に施行されている。

その後、フロン類の製造から廃棄までのライフサイクル全体を見据えた包括的な対策実施を目的として、「フロン回収・破壊法」が全面改正され、「フロン排出抑制法」が2015年に施行されている。

さらに、2015年12月のCOP21において、2020年以降の国際枠組みが合意されることとなっており、我が国の約束草案は、2030年度に2013年度比-26.0%(2005年度比-25.4%)の水準にすることを目標としている。代替フロン等4ガスについては、2013年度比-25.1%(2005年度比+4.5%)の水準にすることを目標としている。これは総排出量比で-0.7%に相当する。

##### (2) 国内における温室効果ガスの排出状況

###### ① 温室効果ガス排出量

我が国の2013年度の温室効果ガス排出量は14億800万トン(2005年度比+0.8%、1990年度比+10.8%)である(図2)。2005年度と比べて温室効果ガス排出量が1,100万トン増加している要因としては、エネルギー起源CO<sub>2</sub>の排出量増加のほか、特定フロンから代替フロンへの転換に伴い、冷媒使用機器からのHFCガスの排出量が増加したことなどが挙げられる。

###### ② 代替フロン等4ガスの排出量の推移

代替フロン等4ガスの排出量は、2004年度までに大幅に減少したが、その後は増加傾向にある。2013年度の代替フロン等4ガス排出量の内訳としてはHFCが最も大きく、全体の8割以上を占める。HFCは2005年度から排出量が大きく増加している(図3)。

さらにHFCの排出量を用途別にみると、HCFC-22を製造する際の副生成物であるHFC-23の排出量が1995年をピークに大幅に減少している一方、エアコン等の冷媒からの排出量は、オゾン層破壊物質であるCFC、HCFCからオゾン層を破壊しないHFCへの冷媒転換に伴って増加を続けており、2005年度以降大幅に増加している(図4)。また、冷凍空調機器に利用されているHFCにおいては、使用中の漏れによる排出量が冷凍空調全体の排出量の約半分であることがわかる(表2)。

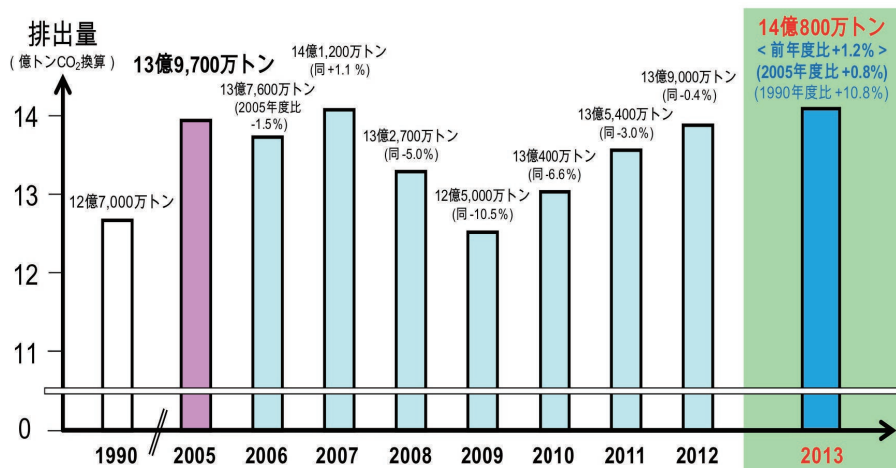


図2 我が国の温室効果ガス排出量

出所: 2013年度(平成25年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について(環境省, 2015)

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

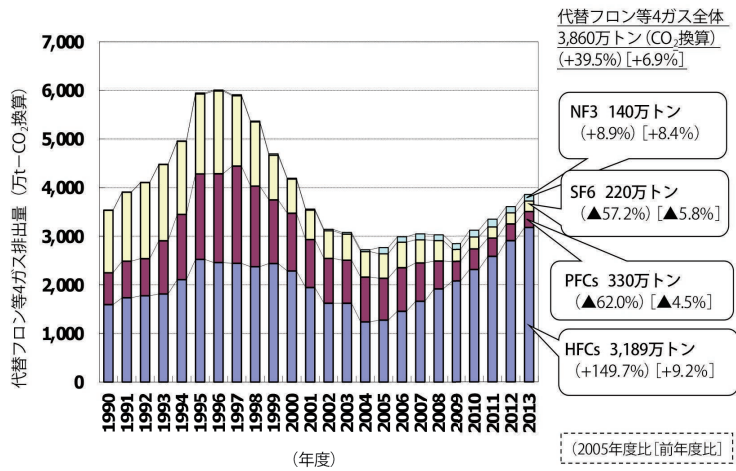


図3 代替フロン等4ガスの排出量の推移

出所: 2013年度(平成25年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について(環境省, 2015)を基にNEDO環境部作成

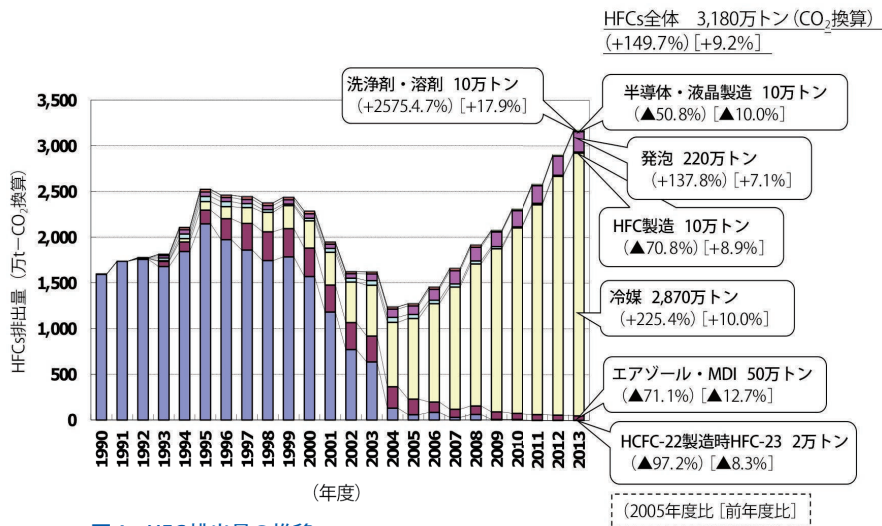


図4 HFC排出量の推移

出所: 2013年度(平成25年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について(環境省, 2015)を基にNEDO環境部作成

表2 冷凍空調機器の使用時におけるHFC冷媒漏えい割合

機種 (内は代表的冷媒、下段は1台辺り冷媒充填量)	推計市中稼働台数 (台)	毎年の漏えい割合		使用時HFC漏えい量 (2020年BAU推計) (百万t-CO <sub>2</sub> )
		従前	現在	
小型冷凍冷蔵機器 (内蔵型業務用冷蔵庫等) (R-404A, HFC-134a 等) 数百g~数kg	約760万台	0.01 ~0.02%	2%	0.1
別置型ショーケース (R-404A, R-407C 等) 数十~数百kg	約140万台	0.7%	16%	9.6
その他中型冷凍冷蔵機器 (除く別置型冷凍冷蔵ショーケース) (R-404A, R-407C 等) 数kg~数十kg	約130万台	1~9%	13~17%	1.8
大型冷凍機 (HFC-134a, R-404A 等) 数百kg~数t	約0.8万台	2%	7~12%	0.9
ビル用PAC (R-410A, R-407C 等) 数十kg~数百kg	約100万台	0.9%	3.5%	2.2
その他業務用空調機器 (R-410A, R-407C 等) 数kg~数十kg	約950万台	0.9~4.4%	3~5%	3.1
家庭用エアコン (R-410A 等) 約1kg程度	約1億台	0.2%	2%	3.5
推計市中稼働台数 計	約1億2000万台	使用時漏えい量 計 ※冷凍空調全体の排出量 39.9		21.2

\* BAU 推計: BAUとは Business As Usualの略。一般的には対策を取らなかった場合の推計を示すこともあるが、本資料においては現状の対策を継続した場合の推計を示す。

出所: 冷凍空調機器の冷媒管理のための政策のあり方について(経済産業省資料, 2012)



# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## (3) 代替フロン等4ガスに関する法規制

### ①フロン排出抑制法

2002年に「フロン回収・破壊法」が施行されている。この法律では、オゾン層破壊物質であるCFCとHCFCのみならず、オゾン層を破壊しないものの強い温室効果をもつHFCを対象として、業務用の冷凍・冷蔵・空調機器からの冷媒フロン類(CFC、HCFC、HFC)の回収・破壊を義務づけている。

さらに、「フロン回収・破壊法」が全面的に改定され、2015年4月

に「フロン排出抑制法」が施行された。これはフロン類の排出量削減を目的とし、冷凍空調関連では5区分の製品を指定製品として環境影響度の目標値と目標年度が決められている。このうち目標年度の最も早いものは家庭用エアコンであり、2018年度に目標年度、目標値が定められている(表3、図5)。また、この法律においては、我が国におけるフロン対策に関する研究開発の推進がうたわれている<sup>※4</sup>。

なお、図5中のHFO(ハイドロフルオロオレフィン)とは、HFC冷媒の高GWP対策として登場した冷媒である。

表3 フロン排出抑制法における指定製品の区分抜粋

指定製品の区分	現在使用されている主な冷媒 <sup>※5</sup> (GWP)	環境影響度の目標値	目標年度
家庭用エアコンディショナー (マルチ型を除く)	R410A (2090) R32 (675)	750	2018
店舗・オフィス用エアコンディショナー (床置型等を除く)	R410A (2090)	750	2020
自動車用空調機器 (乗用自動車(定員11名以上のものを除く)に搭載されるものに限る)	R134a (1430)	150	2023
コンデンシングユニット及び定置式冷凍冷蔵ユニット (圧縮機の定格出力が1.5kW以下のものを除く)	R404A (3920) R410A (2090) R407C (1774) CO <sub>2</sub> (1)	1500	2025
中央方式冷凍冷蔵機器 (5万㎡以上の新設冷凍冷蔵倉庫向けに出荷されるものに限る)	R404A (3920) アンモニア (一桁)	100	2019
硬質ウレタンフォーム (現場発泡用のうち住宅建材用に限る)	R245fa (1030) R365mfc (795)	100	2020
ダストブロー (可燃性を要する用途のものを除く)	R134a (1430) R152a (124) CO <sub>2</sub> (1)、DME(1)	10	2019

■ 冷凍空調分野

出所: フロン排出抑制法の概要(経済産業省, 2015)を基にNEDO環境部作成(2015)

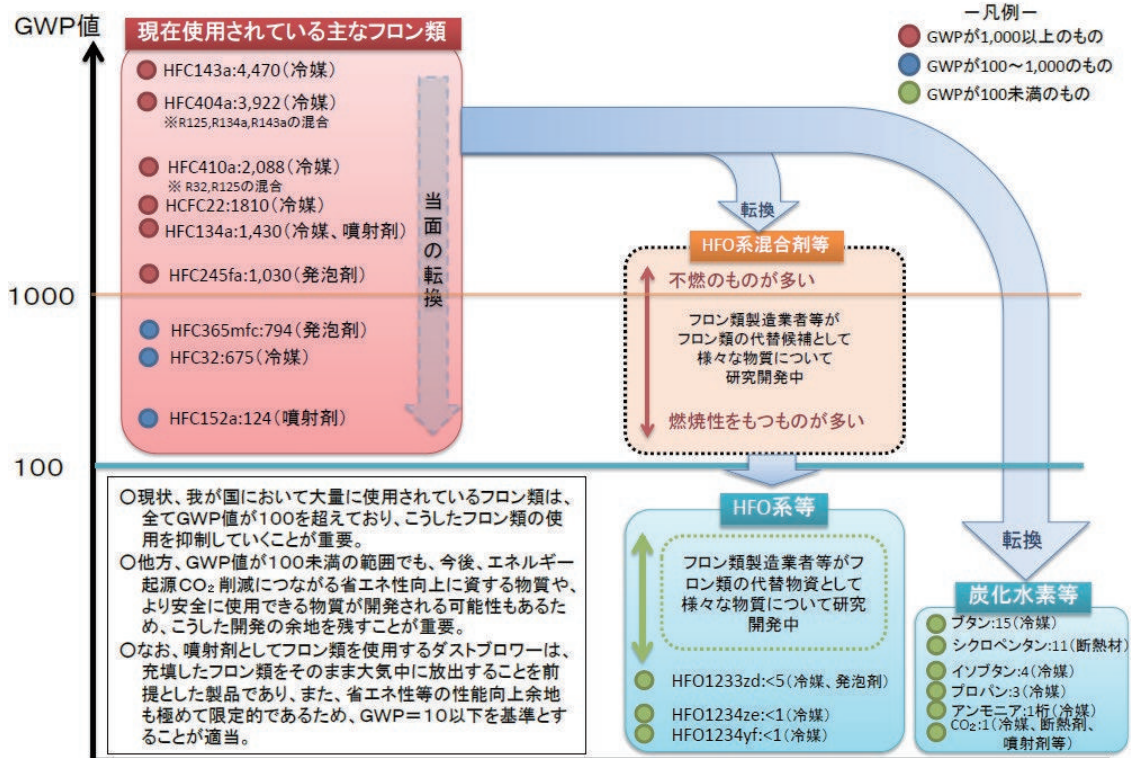
※4 フロン排出抑制法「フロン類の使用の合理化及び管理の適正化に関する法律」(研究開発の推進等)

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。

※5 冷媒の「R」表記: Rで始まる番号はISO817で定められた冷媒番号。RはRefrigerant(冷媒)の頭文字、千の位は不飽和炭化水素に対する不飽和炭素結合の数、百の位は炭素原子の数-1、十の位は水素原子の数+1、一の位はフッ素原子の数、「A」等の添え字は構造異性体、又は混合物における組成を区別する。ただしこの規則は、混合冷媒である400番台や500番台には適応されない。



# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて



※ GWP 値は基本的に全て IPCC Fourth Assessment Report (AR4) の値を採用している。ただし、HFO 系物質は AR4 に GWP 値の掲載がないため、IPCC Fifth Assessment Report (AR5) の値を採用している。

図5 フロン類使用製品が最終的に目指すべきGWP値について

出所: フロン排出抑制法の概要(経済産業省, 2015)

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## ②高圧ガス保安法

現行の冷媒は不燃性で、高圧ガス保安法の中では不活性ガスとして第1グループに掲名されている。一方、温暖化対策の観点から転換が望まれる低温室効果冷媒の多くは微燃性を有するため、不活性以外のガスとして第2グループに属する可能性がある。仮に第2グループに属することになると、特に商業用の冷凍空調機器において、より厳しい規制区分(図6の注参照)が適用されるなどの様々な制約を受けることとなる(図6)。

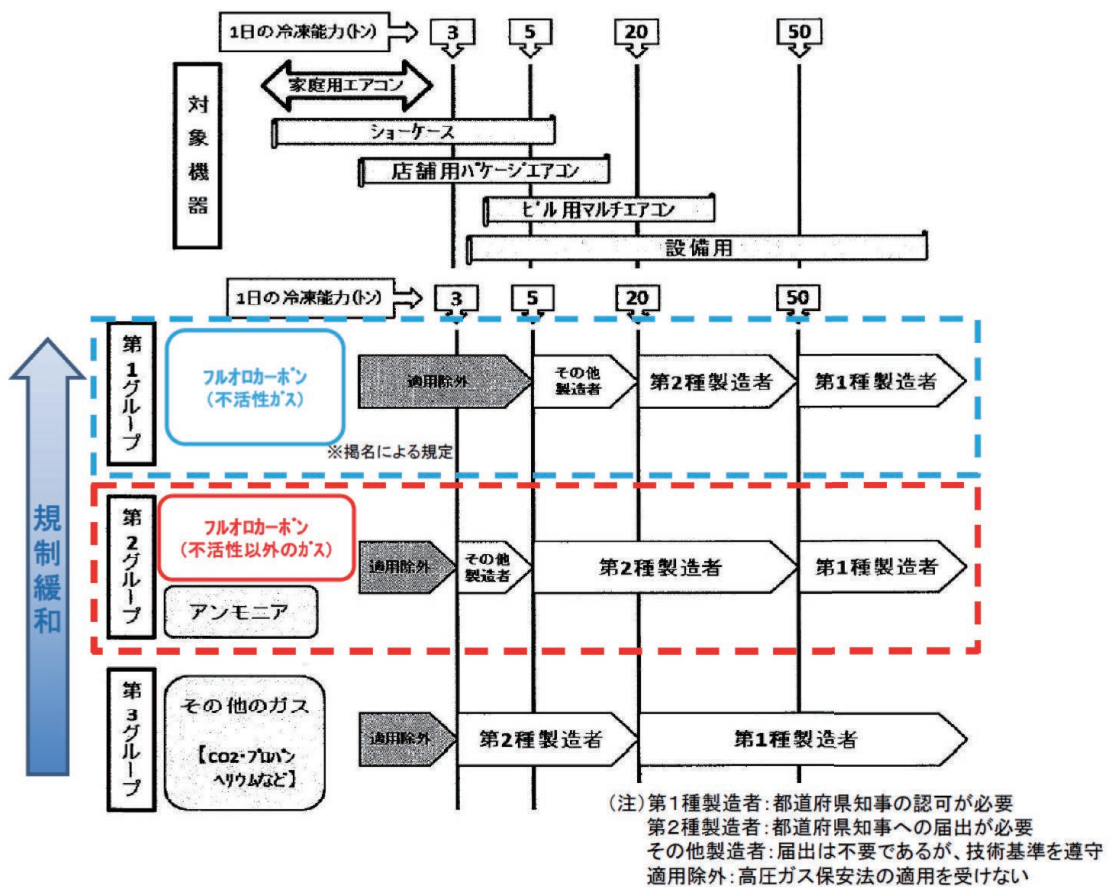


図6 高圧ガス保安法 冷凍保安規則の規制体系の概要

出所: 産構審地球温暖化防止対策小委員会・中間審査フロン類等対策小委員会 第3回合同会議参考資料(2012/8)を基に NEDO 環境部作成(2012)

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## (4) 欧米の動向

欧州における定置用冷凍空調機器についての規制は、F-gas (フッ素化ガス) 規制 Regulation (EC) No842/2006 と呼ばれている。この規制は、冷凍空調機器からの冷媒漏えいを削減することに重点が置かれており、適切な機器管理、作業者の研修、F-gas を使用している機器のラベリング、F-gasを生産・輸入・輸出している事業者の報告義務を課している。

本規制による効果の検証、制度の見直しが進められ、2012年11月に規制の強化案が欧州委員会から提案された。この提案では、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、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指しており、また、これらを実現するために、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CO<sub>2</sub>量)の削減を2015年から開始し、2030年には現状の1/5にまで削減するスケジュール案が示された。本案に基づき、2013年12月に欧州委員会、理事会、議会の間で定置用冷凍空調機器に対するF-gas規制の合意形成がなされている。

また、今後、途上国を中心にHCFCからHFCへの転換が急速に進むことを踏まえ、2009年に北米3カ国から、HFCの生産・消費規制を導入すべき旨のモントリオール議定書改正提案が提出された(図7)。これに対して、我が国は2012年7月に賛成を表明している。2013年10月のモントリオール議定書締約国会合においては、議論を進めるためのディスカッショングループが設置され、代替技術や財政面の課題等についての議論が行われ、検討が継続されている。

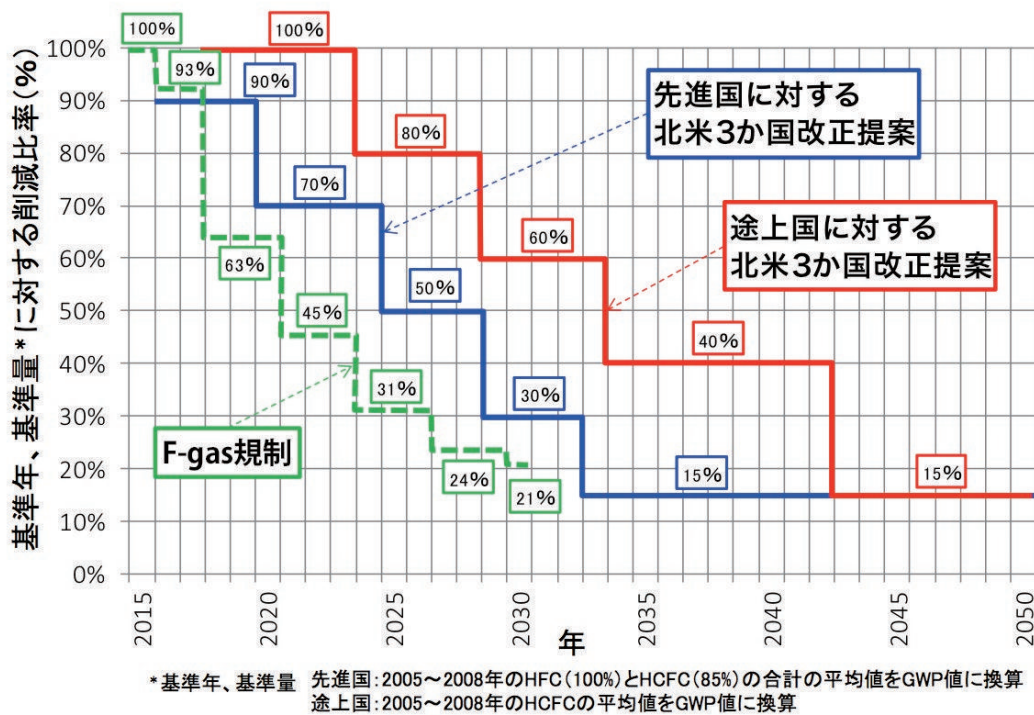


図7 モントリオール議定書北米3か国改正提案、F-gas規制(EU)の温室効果ガス削減スケジュール  
出所: 平成26年度成果報告書「次世代冷凍空調に関する今後の技術開発に向けた可能性調査」(NEDO, 2015)を基にNEDO環境部作成(2015)



# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## 2 -2 技術開発の動向

### (1) 冷媒

家庭用空調機器の冷媒には従来 HCFC-22 (R22) が使用されていたが、前述のとおり、1987年のモントリオール議定書における、HCFCを含む特定フロンの先進国での生産及び消費を2020年までに実質全廃とする決定を受けて、HFC-410A (R410A) が使用されるようになった。さらにその後、1997年の京都議定書の採択により、自然冷媒や低GWPフロン冷媒への転換が検討されている。

#### ①フロン冷媒の開発

HFC冷媒の高GWP対策として登場してきた冷媒として、HFO冷媒が挙げられる(図8)。

各種冷媒の機器への適用可否は冷媒の物性に大きく依存する。HFO冷媒の中には、HFC冷媒と似通った物性をもっていることから、既存冷媒の代替が可能なものもある。例えばHFO-1234yf<sup>※6</sup>は、現在カーエアコンに使用されているHFC-134aの転換冷媒として評価が高いため、各社によって精力的に開発が進められている。しかし、動作圧力の違い等の理由から、業務用空調機器及び家庭用空調

機器に対しては適さないとされている。

NEDOの「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」で開発中のHFO-1123は、他のHFO冷媒と比べて沸点が-56℃と低く、R410Aの沸点(-51℃)に近いことから、使用中の不安定性という課題はあるものの、ルームエアコン等に適用可能な次世代の冷媒として期待されている。

また近年、冷媒としての性能がよく、GWPが低いことからR22やR410Aの代替冷媒として注目されているものがR32である。R32はGWPがR410Aの1/3ほどの675であり、作動効率が比較的良好で、安全性、経済性にも優れていることから、2012年に発売されたルームエアコンに使用されている。

ただし、HFO-1123やR32には、わずかな燃焼性(微燃性)を有するという課題がある。国内では、高圧ガス保安法において、不燃性のフロン冷媒に比べて微燃性冷媒には利用に多くの制約が課せられるとともに、製造工程の防爆対策が必要となる。これまで、特に家庭用や業務用の空調機器への使用は避けられる傾向にあったが、近年、実際の冷媒使用状況下におけるリスクを詳細に評価し直し、その安全性を明確にした上で使用できるようにする検討が行われている。

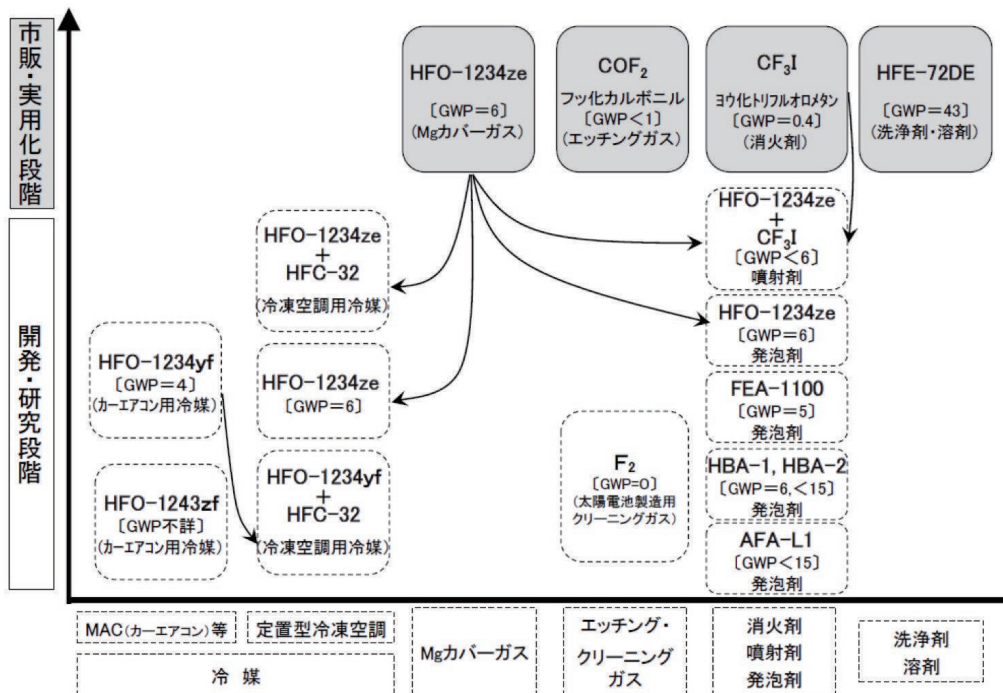


図8 国内外のフロン代替物質の適用分野と開発状況

出所: 産構審地球温暖化防止対策小委員会・中間審査フロン類等対策小委員会第3回合同会議(経済産業省, 2010)を一部改変

※6 DuPont(米国)、Honeywell(米国)が製造、販売

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## ②自然冷媒の利用

国内及び欧州を中心に自然冷媒（アンモニア、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、プロパン・ブタンなどの炭化水素等）の冷凍空調機器への採用の検討も進んでいる。

業務用冷凍空調機器のうち中・大型機器について、過去には冷却性能がフロン冷媒より優れるアンモニアが利用されていたが、アンモニア冷媒は可燃性及び毒性を有するため、その利用には高压ガス保安法等に基づき一定の管理体制を要する。また、アンモニアの毒性と特有の臭気から、住宅地や商業地に設置し難いなどの立地上の制約が生じるため、現在ではアンモニア冷媒機を熱源とした間接冷却式が推奨されている。間接冷却式とは、アンモニアを一次冷媒として用い、二酸化炭素やブライン液（不凍液）を二次冷媒として用いる冷却方式であり、アンモニアが二次冷媒を冷やし、二次冷媒が冷房や冷凍庫などのための冷気を作り出す。安全性と性能を同時に向上させた機器といえるが、初期導入コストが高いことが課題である。

自然冷媒を利用している冷凍空調機器のうち、出荷台数が多い機器は、ヒートポンプ給湯器（CO<sub>2</sub>）、家庭用冷蔵庫（イソブタン）及び飲料用の自動販売機（CO<sub>2</sub>、イソブタン）である（（ ）内は冷媒）。なかでも、家庭用ヒートポンプ給湯器のエコキュートは、2000年に初めて実用化された製品であり、2001年の発売後、2014年12月末までの累計での出荷台数は約450万台に達している。

このように、CO<sub>2</sub>冷媒に関しては、家庭用ヒートポンプ給湯機において実用化されており、家庭用エアコンへの導入も検討されている。しかし、CO<sub>2</sub>の特性上、エアコンが作動する温度域では効率が著しく低下するという課題がある。また、CO<sub>2</sub>はHFCに比べて圧力損失が大きいため、膨張動力の回収等、機器の大幅な改善が必要である。これまでにCO<sub>2</sub>冷媒を適用したエアコンが欧州でテスト販売された実績はあるが、現在のところ量産化には至っていない。

また、プロパンをはじめとする炭化水素系冷媒に関しては、これをエアコンにフロン冷媒と同量使用することにより、優れた冷却性能を発揮することがわかっている。ただし、炭化水素系冷媒は強い可燃性をもつため、普及においては安全性に課題が残る。

## (2) 機器

### ①圧縮機の開発

冷凍機用のオイル（潤滑油）は圧縮機の潤滑性を確保するために必要であるが、オイルに冷媒が溶け込むことにより、圧縮機起動

時に圧縮機損傷を招く可能性がある。さらに、冷媒を含んだオイルが熱交換器内部に付着すると、熱交換性能の低下につながる。冷媒の3割近くが圧縮機内に留まっているという例も報告されており、特に自然冷媒等のオイルに溶け込みやすい冷媒の使用においては課題が残る。

この根本的な解決策として圧縮機のオイルフリー化、すなわち、冷媒圧縮機構部にオイルを使用しないタイプの圧縮機が検討されている。現在、一般的に使用されている圧縮機のうちオイルフリー構造が可能なのはスクリー式、ターボ式等である。

### ②熱交換器の開発

カーエアコン以外の冷凍空調で使用される空気と冷媒の熱交換器は、数十年以上にわたりほぼ全てがフィン&チューブ熱交換器であったが、近年、冷媒量の削減が可能なマイクロチャネル熱交換器の開発が精力的に進められており、実際の機器への採用も始まったところである（図9）。マイクロチャネル熱交換器は熱交換特性に優れることから、熱交換器の小型化、軽量化が実現できるため、1980年代頃よりカーエアコン用にフィン&チューブ熱交換器に代わるサーペンタイン型等の新たな熱交換器が採用され始めた。カーエアコン以外の冷凍空調機器にも、数年前からマイクロチャネル熱交換器が採用されている。熱交換特性が良く小型化が可能であり、材料にアルミニウムを用いることができるため、コスト削減が可能となる。

2013年頃から、業務用パッケージエアコン等の屋外機にマイクロチャネル熱交換器が採用され始めている。現在、マイクロチャネル熱交換器については屋外機用の熱交換器としての利用が多いが、今後、屋内機側にも採用できるようになれば、更に冷媒使用量の削減が可能となる。

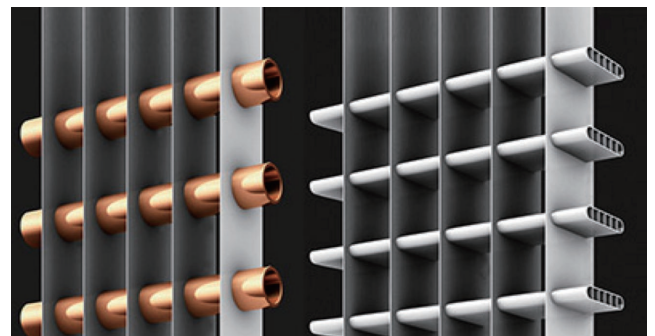


図9 フィン&チューブ熱交換器(左)とマイクロチャネル熱交換器(右)  
出所:平成26年度成果報告書「次世代冷凍空調に関する今後の技術開発に向けた可能性調査」(NEDO環境部,2015)

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## 2-3 産業競争力(諸外国との比較)

### (1) 市場規模(国内・海外)

ここでは、冷媒の主用途である冷凍空調機器のうち、ルームエアコンについての市場動向を示す。

米国、欧州等の先進国においてエアコン市場は成熟している一方、2014年の時点で世界最大の中国エアコン市場(図10)は、先進国より高い経済成長が見込まれることもあり、今後も同様の規模が維持されるとみられる。今後の市場拡大が見込めるのは、現在は普及率が低いアジア諸国、中南米等の新興国と考えられ(2012年時点の普及率<sup>※7</sup>: ブラジル13.3%、トルコ12.8%、インド9.6%、インドネシア7.6%)、これらの国々では経済発展とともに、また、気候の面からもエアコンの導入が進展する余地が大きい。また、エアコンの寿命は約10年であることを加味すると、導入された機器の買い替え需要が常に存在するといえる。ルームエアコン市場の主要なプレイヤーは、中国系企業(Glee

Electric、Midea、Haier)、日系企業(パナソニック、ダイキン工業)、韓国系企業(LG Electronics)であり、中でも、中国系企業が世界最大の中国国内市場を獲得している。

「ヒートポンプ 温水・空調市場の現状と将来展望 2015(富士経済, 2014)」によると、2015年のルームエアコン市場は、金額で約3兆1,193億円、台数で約8,600万台と推計されており、2020年には金額で3兆6,165億円、台数で1億200万台規模に成長すると予測されている(図11)。

なお、ヒートポンプは、ルームエアコンのキーテクノロジーの一つであり、エアコン(空調)だけではなく、エコキュート(給湯)、冷蔵・冷凍庫、乾燥機能つき洗濯機など、さまざまな機器に利用されている。冷凍空調機器を含むヒートポンプ市場全体における、日本企業のシェアは世界市場の約30%であり、高い割合を占めている(図12)。このことから、我が国が強みとするヒートポンプのような先進技術を活用したグローバル展開を強化する取組が期待される。

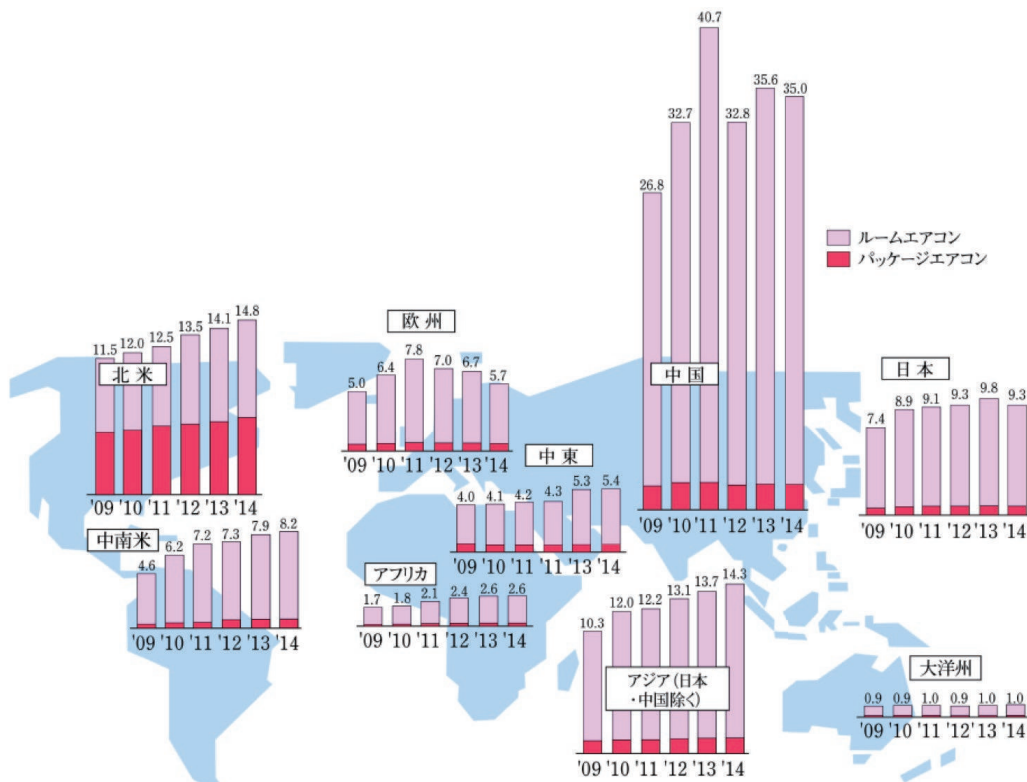


図10 地域別のエアコン需要推移(単位:百万台)  
出所: 世界のエアコン需要推定(日本冷凍空調工業会, 2015)

※7 通商白書(経済産業省, 2013)



# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

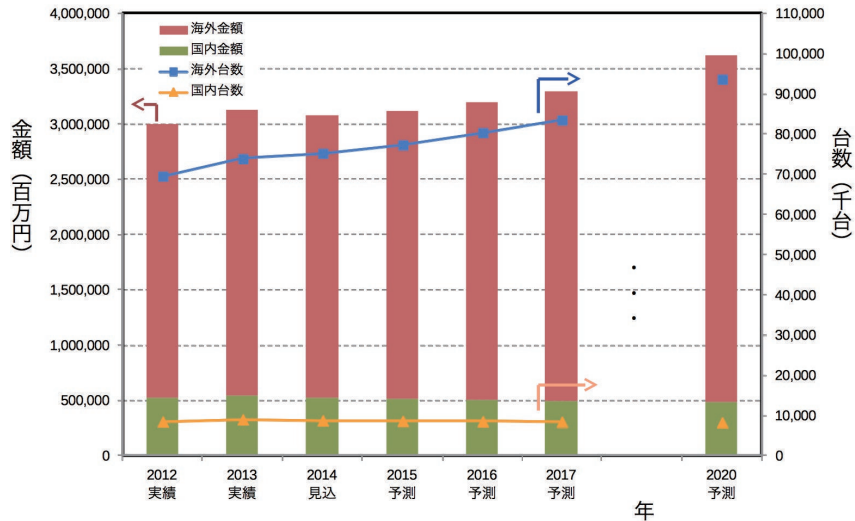


図11 ルームエアコンの市場推移と予測

出所: ヒートポンプ 温水・空調市場の現状と将来展望 2015 (富士経済, 2014) を基に NEDO 環境部作成 (2015)

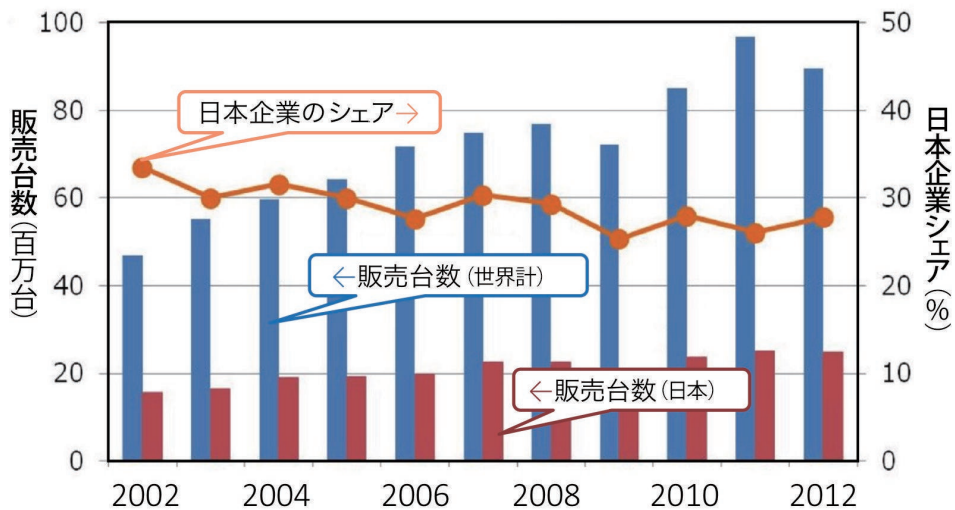


図12 世界のヒートポンプ市場における日本企業のシェア

出所: IEA HEAT PUMP CENTRE NEWSLETTER Vol.32 - No.1/2014 (IEA Heat Pump Centre, 2014) を基に NEDO 環境部作成 (2015)

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## (2) 論文・特許件数等

### ①冷媒

低GWP冷媒に関する論文は増加傾向にあり、投稿件数は米国・中国が常にリードしている。近年ではイタリアやドイツなどの欧州諸国、インドや韓国などのアジア諸国が積極的に研究開発を行っている。直近5年間で日本の論文投稿数は世界で第4位である(図13)。

世界を視野に入れた冷媒開発を積極的に展開している主要企業としては、Honeywell(米国)、DuPont(米国)が挙げられる。同社らは、自国ばかりでなく近隣諸国やアジア圏にも事業を拡大しているとともに、新冷媒に係る特許を積極的に出願し、結果として競合他社の技術開発可能な範囲を限定的にしている。これらの特許は実質的な用途をもった化学物質自体に与えられる物質特許である。物質特許の権利は強く、その物質に関する限り、どのような製法で製造されても、どのような用途で使用されても、特許権の効力が及ぶことになる。

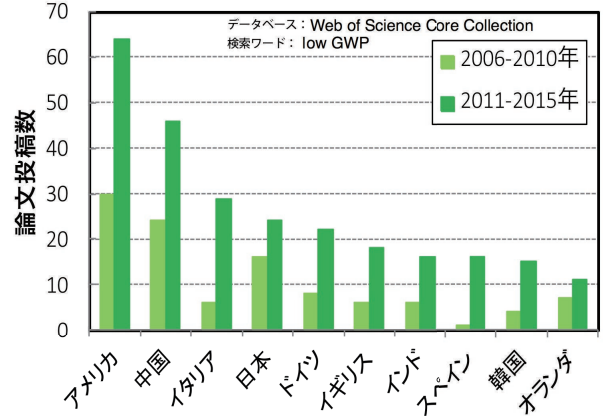


図13 「低GWP冷媒」に関する世界の論文発表数の経年変化  
出所: NEDO環境部作成(2015)

### ②機器(エアコン)

図14は、国際特許分類F24F(空気調節;空気加湿;換気;しゃへいのためのエアカーテンの利用)に関する、出願人国籍が日本、中国、韓国、欧州、米国の特許出願件数を、出願先国別に示したものである。日本国籍の出願人は2003年からの10年間に、他地域と比

較して非常に多くの自国特許を出願している。また、図に示した全ての地域で自国特許に次いで件数が多いのは、日本国籍の出願人による特許出願である。

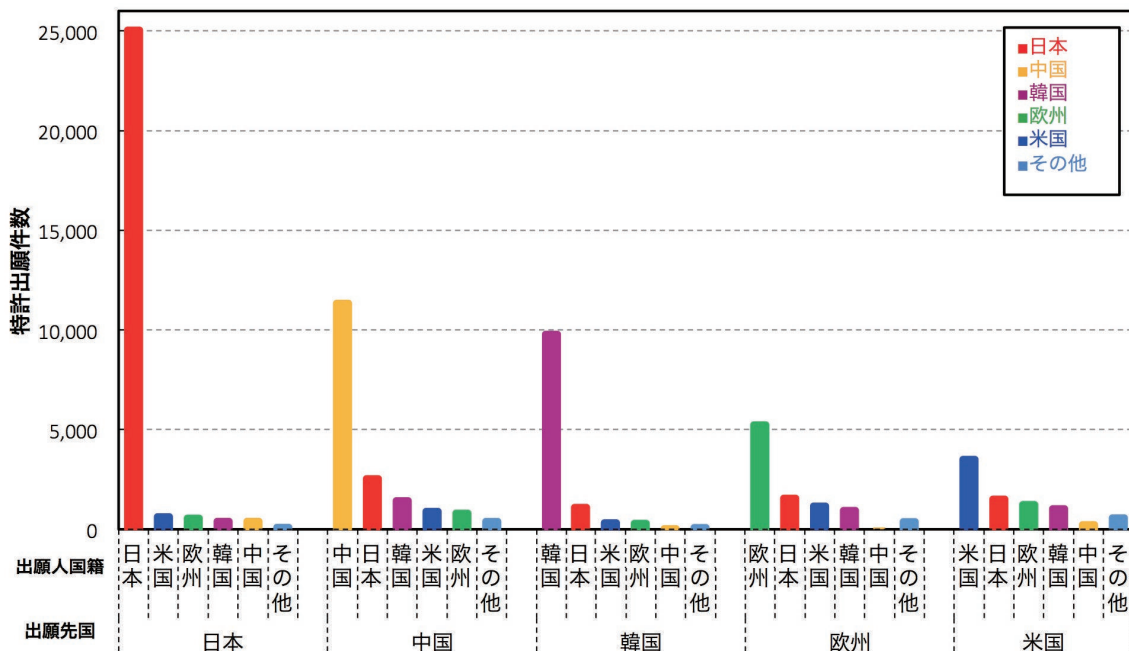


図14 出願人国籍別及び出願先国別(日米欧中韓)のエアコンに関する特許出願件数  
(出願年〔優先権主張年〕: 2003~2012年)

出所: 平成26年度特許出願技術動向調査報告書(概要) 空気調和機(エアコン)(特許庁, 2014)を基にNEDO技術戦略研究センター作成

# 地球環境対策(フロン)分野の技術戦略策定に向けて

## 3章 地球環境対策(フロン)分野の技術課題

前述のように、冷媒の利用における地球環境対策上の基本課題は、オゾン層保護と地球温暖化防止の二つの側面がある。これらのうちオゾン層保護については、オゾン層を破壊する塩素を含む冷媒からODPがゼロの冷媒への転換を進めることにより既に対策が行われた。一方、地球温暖化防止については、温室効果が小さいHFC系などの低GWP代替冷媒への転換により対策が行われてきたものの、現状使用されているものよりも更にGWPが低い冷媒が要求されている状況にある。

地球温暖化対策を主眼とする、冷媒の利用に関する技術的な対策は、図15に示すように低GWP冷媒への転換と、既に導入済みの冷媒の排出抑制の二つに分けられる。

冷媒転換においては、冷媒の種類ごとに沸騰温度、凝縮温度、熱伝達率、燃焼性などの特性が異なるため、冷媒の物性値などを正確に把握することが必要である。また、GWP値が低い冷媒には燃焼性を有するものが多いため、冷媒の循環量(以下「冷媒量」という。)については少量であることが安全性の観点から望ましい。ただし、冷媒量を削減すると、一般に機器性能は低下する傾向にあるため、このような燃焼性を有する冷媒への転換においては、冷媒量を可能な限り少量化できる機器の開発が望まれる。

機器開発に係る主な技術課題は、転換冷媒の物性と循環量に応じた圧縮機、熱交換器、膨張機といった基本構成機器の新規開発である。これを冷暖房性能等に関する詳細な機器性能評価と組合せながら進めることにより、冷媒量が少量であっても高効率化が図れる基本構成機器を開発し、更には機器としてのエネルギー消費効率の向上にも結びつけることが必要である。また、冷媒種によっては潤滑油に溶け込む性質があることから、潤滑油を使用しないスクリープ式あるいはターボ式などのオイルフリー圧縮機を開発を進めることも技術課題の一つである。

また、機器の普及においては、単に高効率であるだけでなく、機器の使用時における高い安全性が確保されていることが重要である。特に、燃焼性や毒性を有する冷媒を利用しようとする際には、上述した基本構成機器の開発とともに、冷暖房性能等に関する機器性能評価、冷媒の安全性評価のほか、実際の使用条件におけるトラブル等を想定したシナリオに基づくリスク評価を含めた総合的な評価を行い、機器使用における効率と安全を両立することが必要である。

他方、冷媒排出抑制については、機器等の廃棄処分時に漏えいなく冷媒を回収することが重要である。回収された冷媒は、燃焼などによる無害化処理後にクリーンなガスとして大気へ排気されるか、又は再生処理によって再び冷媒などの原材料として使用される。したがって、転換冷媒の種類に応じた適切かつ効率的な除害処理技術、又は再生処理技術が必要となる。

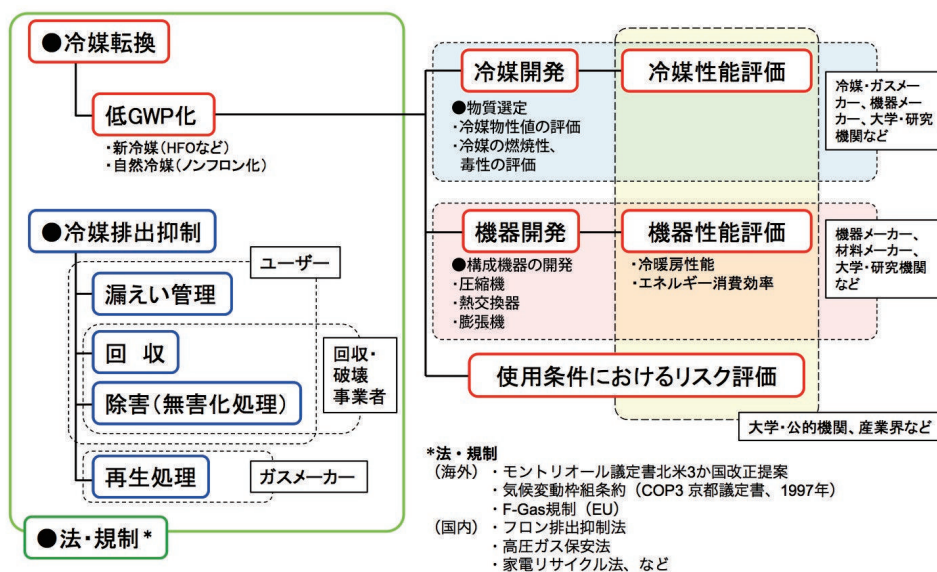


図15 地球温暖化対策(フロン)に係る技術等の体系  
出所: NEDO 環境部作成 (2015)

## 4章 おわりに

気候変動枠組条約締約国会議COP21(2015年12月)での合意に向け、主要7か国首脳会議(G7サミット、2015年6月)では、2050年までに温室効果ガス排出量を2010年と比較して40%から70%削減することを目指すこととしている。

冷凍空調機器の冷媒については、特定フロンからHFCへの転換が進行していることにより、HFCの排出量は今後急増が見込まれることから、これを減少に転換させることにつながる方策の展開が期待される。特に、空調機器は一旦市場に出荷されれば十数年にわたり排出源として温暖化に悪影響を及ぼすため、低GWP冷媒、及びこれに対応した機器の開発が進むことが望まれる。

研究開発事業に係る技術評価書(事前評価) (経済産業省)						
事業名	省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発			推進課室名	化学物質管理課オゾン層保護等推進室	
事業開始年度	平成30年度	事業終了(予定)年度	平成34年度	主管課室名	化学物質管理課オゾン層保護等推進室	
事業の目的	昨年10月のモントリオール議定書キガリ改正において、オゾン層を破壊しないが温室効果の高い代替フロン(HFC)が規制対象物質に追加されたことにより、我が国を含む先進国は、2036年までにHFCを85%削減する必要がある。この目標は、既存の冷媒物質の利用では達成困難であるため、代替物質への転換が必要となる。本事業において、エネルギー効率を向上させつつ、低温室効果を実現できる次世代冷媒を使用した省エネルギー型冷凍空調機器等の開発基盤を整備することで、2036年までのHFC85%削減目標を達成する。					
事業概要	別紙記載のとおり。					
平成30年度概算要求額	250 (百万円)					
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	国際標準等に提案、反映等を行った件数		目標値	件	- 年度	41 年度
根拠として用いた統計・データ名(出典)	日本冷凍空調学会年次報告、微燃性冷媒リスク評価研究会プログレスレポート					
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	キガリ改正の最終目標年度(2036年度)に冷媒由来で削減できる温室効果ガスの量(CO2換算)		目標値	万CO2t	- 年度	41 年度
根拠として用いた統計・データ名(出典)	空調機器国内出荷実績(台数:日本冷凍空調工業会)					
成果目標(アウトカム)	成果指標		単位	中間目標年度	目標最終年度	
	成果の対外発表、講演、論文数		目標値	件	32 年度	34 年度
根拠として用いた統計・データ名(出典)	掲載された論文誌、予稿集					
横断的な施策に係る成果目標及び成果実績(アウトカム)	成果指標		分類	単位	中間目標年度	目標最終年度
	目標・指標	1t当たりCO2削減コスト	目標値	円/t-CO2	- 年度	41 年度
地球温暖化対策関係	算出方法	事業に係る予算予定総額/冷媒転換によるCO2削減相当量	直接効果	目標値	円/t-CO2	-
活動指標(アウトプット)	活動指標			単位	30年度活動見込	
	本研究の対象として評価を行った冷媒数			当初見込み	件	4
事業所管部局による点検・改善						
	項目			評価	評価に関する説明	
国費投入の必要性	事業の目的は国民や社会のニーズを的確に反映しているか。			○	モントリオール議定書キガリ改正におけるHFCを2036年までに85%削減する目標については、既存の冷媒物質の利用では達成困難であり、既存冷媒に比べて低温室効果を有し、かつエネルギー効率の高い次世代冷媒及びそれに対応した冷凍空調機器等のリスク評価手法の確立及び実用環境下での評価が必要不可欠。	
	地方自治体、民間等に委ねることができない事業なのか。			○	次世代冷媒のリスク評価手法の確立や実用環境下での評価については、産業界全体の共通的な基盤であり、また安全性等の評価については、中立性の担保も必要であるため、国が主体となって実施することが必要。	
	政策目的の達成手段として必要かつ適切な事業か。政策体系の中で優先度の高い事業か。			○	モントリオール議定書キガリ改正目標の達成に向けては、次世代冷媒・冷凍空調機器等の開発期間を考慮すると、その開発加速のための共通基盤を早急に整備する必要があるため、国の支援が不可欠。	
	競争性が確保されているなど支出先の選定は妥当か。			○		
	一般競争契約、指名競争契約又は随意契約(企画競争)による支出のうち、一者応札又は一者応募となったものはないか。			無	公募形式で中立な評価者による評価を経て選定される。	
	競争性のない随意契約となったものはないか。			無		



事業の効率性	受益者との負担関係は妥当であるか。		○	次世代冷媒のリスク評価手法の確立や実用環境下での評価については産業界全体の共通の基盤であるため、産業界からも知見を求める予定であり、また、安全性等の評価については、中立性を担保するために国が主体となって実施することが必要な事業であることから、妥当である。
	単位当たりコスト等の水準は妥当か。		○	過去の類似の事業を参考としつつ、事業の内容について専門家へのヒアリングを踏まえ単価を設定しており、妥当である。
	資金の流れの中間段階での支出は合理的なものとなっているか。		-	-
	費目・使途が事業目的に即し真に必要なものに限定されているか。		○	NEDO内の評価委員会による事業の事前評価を受けており、また事業の実施途中においても中間評価を受けた上で事業の見直しを行うことにより、真に必要なものに限定されるような仕組みを取る予定。
	利用率が大きい場合、その理由は妥当か。(理由を右に記載)		-	-
	繰越額が大きい場合、その理由は妥当か。(理由を右に記載)		-	-
	その他コスト削減や効率化に向けた工夫は行われているか。		○	事業のコスト削減や効率化を図るため、事業の進捗や社会情勢、NEDO内の評価委員会による中間評価を踏まえた事業の見直しを行う予定。
事業の有効性	成果実績は成果目標に見合ったものとなっているか。		-	-
	事業実施に当たって他の手段・方法等が考えられる場合、それと比較してより効果的あるいは低コストで実施できているか。		-	-
	活動実績は見込みに見合ったものであるか。		-	-
	整備された施設や成果物は十分に活用されているか。		-	-
関連事業	関連する事業がある場合、他部局・他府省等と適切な役割分担を行っているか。(役割分担の具体的な内容を各事業の右に記載)		-	-
	所管府省名	事業番号	事業名	-
	0	0 - 0000 - 00	0	
	0	0 - 0000 - 00	0	
	0	0 - 0000 - 00	0	
	0	0 - 0000 - 00	0	
点検・改善結果	点検結果	-		
	改善の方向性	-		
<b>外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見【技術評価】</b>				
次世代空調機器開発の基盤技術として、評価手法の開発及び標準化は国が世界をリードして取り組むべき課題である。国際標準獲得を実現するためには、冷媒の性能と安全性を広く世界に認知させ、支援国を増やすことが鍵であり、その目的を踏まえて目標をより具体的に設定する必要がある。さらに、世界市場シェア獲得に至るまでの道筋を明確にするためには、次世代空調機器の事業戦略にまで踏み込んだ検討をするべきである。(NEDO研究評価委員会における事前評価結果を抜粋。原文はNEDOのWeb上で公開。)				
<b>外部有識者(産業構造審議会評価WG等)の所見を踏まえた改善点等</b>				
市場獲得に対して実効性のある安全性・リスク評価の項目を選定し、4つの研究テーマとしている。さらに、標準化・規格化の進め方や評価結果の効果的な普及について業界団体等との連携を図るため、事業体制や想定事業者以外の協力関係等を検討している。				

# 省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調 技術の最適化及び評価手法の開発

平成30年度概算要求額 **2.5億円（新規）**

## 事業の内容

### 事業目的・概要

- 平成28年10月のモントリオール議定書締約国会議において、代替フロン（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が決議されました。
- 本改正では、先進国は2036年までにHFCを85%削減することが合意されました。この目標は、既存の冷媒物質では達成困難であり、代替物質への転換が避けられません。
- 新たな冷媒への転換に向けては、エネルギー効率と低温室効果の両立が鍵となりますが、次世代の冷媒候補物質については、可燃性を有するなどの課題があり、実用化にあたってのリスク評価が必要不可欠です。
- このため、次世代の冷媒候補物質について、冷媒として使用した場合のリスク評価手法を確立し、合わせて実環境下での評価を行うことにより、新たな冷媒に対応した省エネルギー型冷凍空調機器等の開発基盤を整備します。

### 成果目標

- 平成30年度から平成34年度までの5年間の期間で、次世代冷媒のリスク評価手法を確立し、国際標準化を目指すことで、省エネルギー・低温室効果を実現する次世代冷媒・冷凍空調機器等の開発加速を支援します。

### 条件（対象者、対象行為、補助率等）

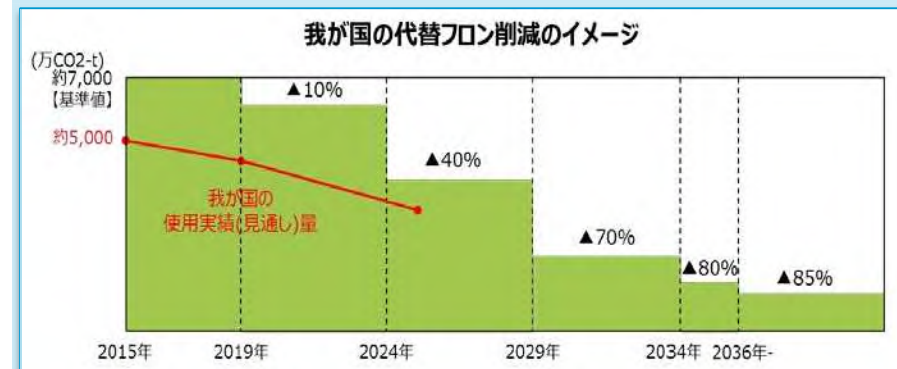


## 事業イメージ

- 次世代の冷媒候補物質について、従来以上のエネルギー効率と低温室効果を両立させ、それに対応した省エネルギー型冷凍空調機器の開発を促進するため、次世代冷媒候補物質及び冷凍空調機器の評価手法を確立し、実用環境下における評価を合わせて行います。
- 具体的には、低温室効果を有する次世代冷媒候補物質について、これを冷凍空調機器に使用した場合の物質挙動（燃焼条件・安定性等）やリスク（実用環境下での着火リスク、漏えい時のリスク等）について、基盤となる評価手法を確立し、国際標準化を目指します。

### （主な技術開発課題）

- ・低温室効果を有する次世代冷媒の物質挙動やリスクの評価手法の確立、及び次世代冷媒を用いた省エネルギー型冷凍空調機器の実用環境下での評価。



**「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発 基本計画（案）」に対する  
パブリックコメント募集の結果について**

平成30年2月21日  
NEDO  
環境部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。  
貴重なご意見をいただき、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間  
平成 30年 1月 29日～平成 30年 2月 13日
2. パブリックコメント投稿数<有効のもの>  
計 1 件
3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画・技術開発課題への反映
1. 研究開発の目的		
(3) 研究開発の内容		
<p>[意見1] (1件) 次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価には、現在想定されている内容だけでなく、冷媒の摩擦特性への影響に関する技術開発も効果的だと考える。冷媒は潤滑油に混入し、その性能に大きく影響するため、冷媒の最適化には潤滑油も含めた摩擦特性評価と性能向上も重要。</p>	<p>ご意見いただきました研究開発の内容につきましては、現在の基本計画における冷媒特性評価に含まれるものと考えます。 今後実施を予定しております研究開発の公募におきまして同内容の提案が応募された場合には、採択審査において本プロジェクトの目的を達成するために最適かつ優先度の高い内容と判断された場合には実施することとなります。</p>	<p>特になし。</p>

以上

## 2. 分科会公開資料

次ページより、プロジェクト推進部署・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

「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」  
(中間評価)

プロジェクトの概要 (公開)

2020年10月6日

NEDO環境部

1 / 49

「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」



公開

I. 事業の位置付け・必要性

NEDO

II. 研究開発マネジメント

III. 研究開発成果

PL

IV. 成果の実用化・事業化に向けた  
取組及び見通し

2 / 49



# I. 事業の位置付け・必要性について

## II. 研究開発マネジメントについて

## III. 研究開発成果について

## IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

### I. 事業の位置付け・必要性

#### (1) 背景 ～特定フロンと代替フロン等4ガスについて～

- 冷凍空調機器の冷媒等に使用されてきた特定フロンはオゾン層破壊物質としてモントリオール議定書の規制対象になり、オゾン層を破壊しない代替フロン等4ガスへの転換が進んでいる。
- 一方で、代替フロン等4ガスは**温室効果が大きい点が問題**となっている。

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 (クロロフルオロカーボン)	HCFC (ハイドロクロロフルオロカーボン)	HFC (代替フロン) (ハイドロフルオロカーボン)	PFC (パーフルオロカーボン)	SF <sub>6</sub> (六フッ化硫黄)	NF <sub>3</sub> (三フッ化窒素)
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 (NF <sub>3</sub> は2013年より)			
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 (約10,000)	大きい (数百～約2,000)	大きい (数百～約4,000)※2	極めて 大きい (約6,000～ 9,000)	極めて 大きい (約23,900)	極めて 大きい (約17,200)
主な用途	・冷凍空調機器 の冷媒 ・洗剤、溶剤 等 (95年以降全廃済み)	・冷凍空調機器 の冷媒 ・洗剤、溶剤等 (2020年全廃予定)	・冷凍空調機器の 冷媒 ・断熱材の発泡剤等	・半導体、液晶 製造 ・洗剤、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

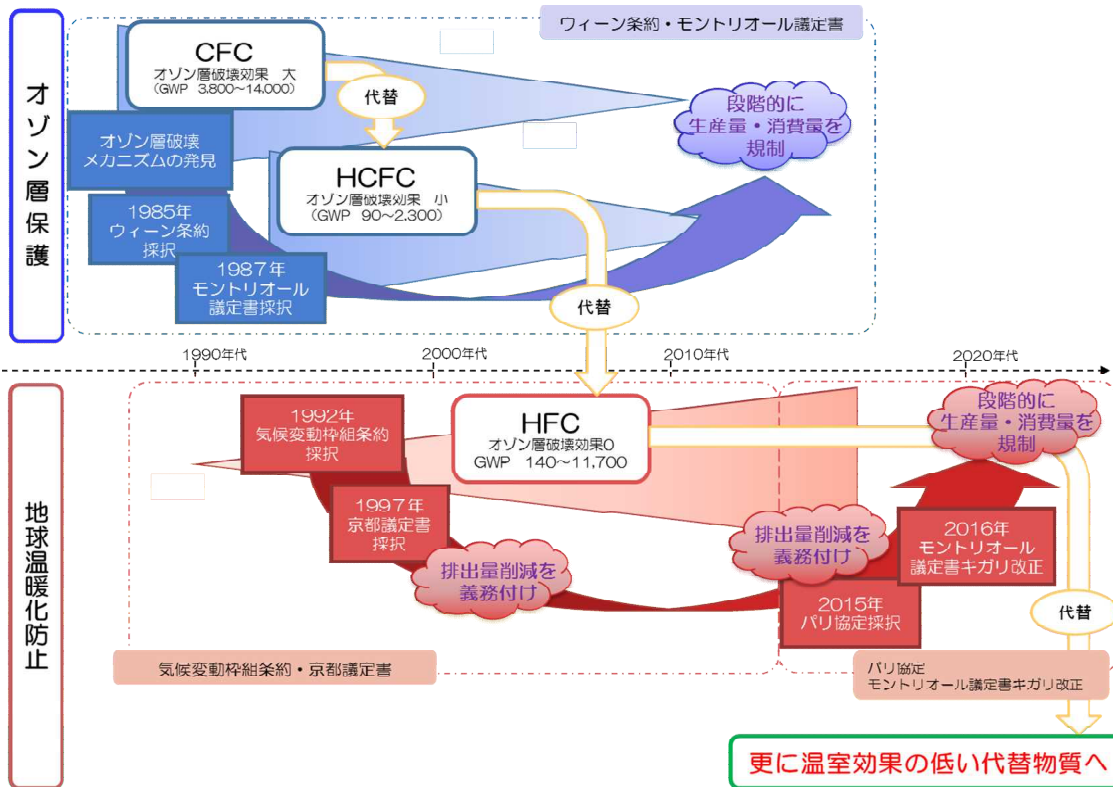
※1 GWP: 地球温暖化係数(CO2の何倍の温室効果を有するか表す値)

※2 主な冷媒種としての値

# I. 事業の位置付け・必要性

公開

## (1) 背景 ~フロン類を巡る規制と対策の流れ~

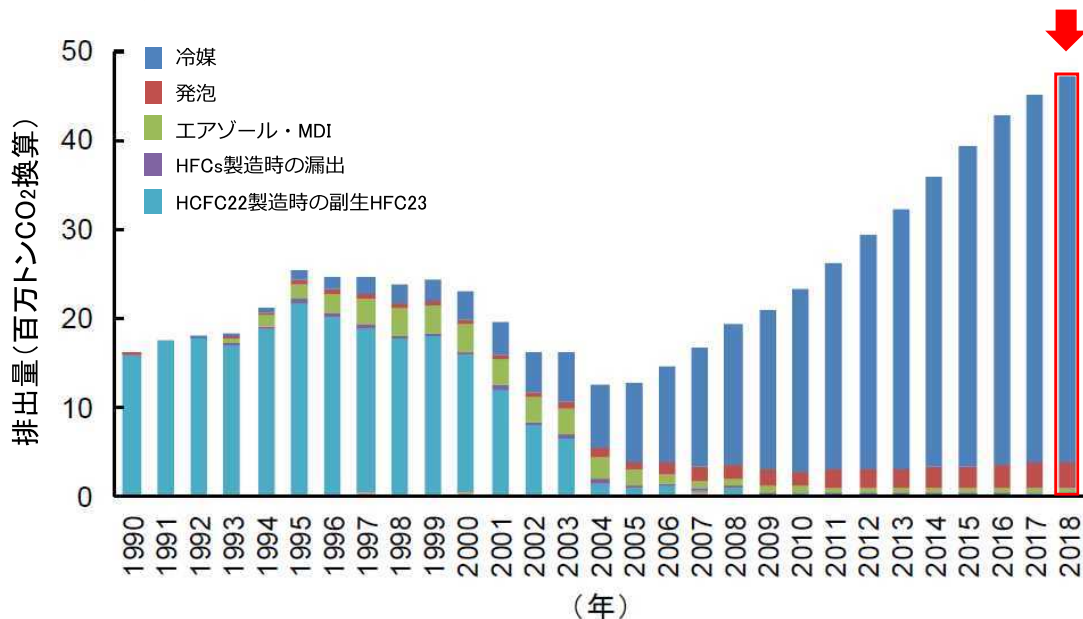


# I. 事業の位置付け・必要性

公開

## (1) 背景 ~冷凍空調分野におけるHFC(代替フロン)の排出量推移~

- HFCの排出源として、冷媒転換に伴ってエアコン等の冷媒が増加しており、2018年度はHFC排出量全体の約90%を占める。

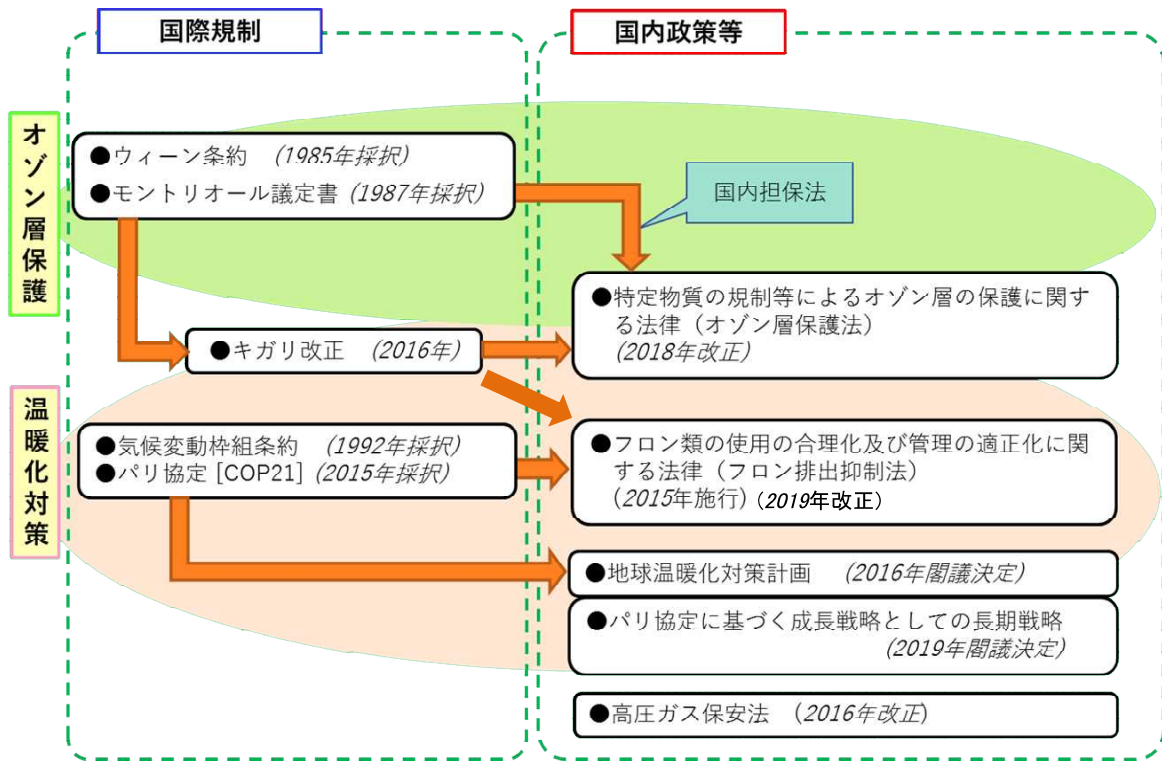


HFC排出量の推移

## I. 事業の位置付け・必要性

公開

(1) 背景 ～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～



7/49

## I. 事業の位置付け・必要性

公開

(1) 背景 ～パリ協定と地球温暖化対策計画(2016年5月閣議決定)～

- 「日本の約束草案」に基づき、国内の排出削減・吸収量の確保により、2030年度において、2013年度比26.0%減の水準にする。
- 代替フロン等4ガスのみでは、2030年において、2013年度比25.1%減。(総排出量で0.7%減。)

パリ協定における我が国の排出削減目標の内訳

	2013年 (百万t-CO <sub>2</sub> )	2030年 (百万t-CO <sub>2</sub> )	2013年総排出 量比 (%)
エネルギー起源 CO <sub>2</sub>	1235	927	▲21.9
非エネルギー起源CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、 N <sub>2</sub> O	134.4	123.5	▲0.8
<b>代替フロン等4ガス (HFC、PFC、SF<sub>6</sub>、NF<sub>3</sub>)</b>	<b>38.6</b>	<b>28.9</b>	<b>▲0.7</b>
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。

8/49

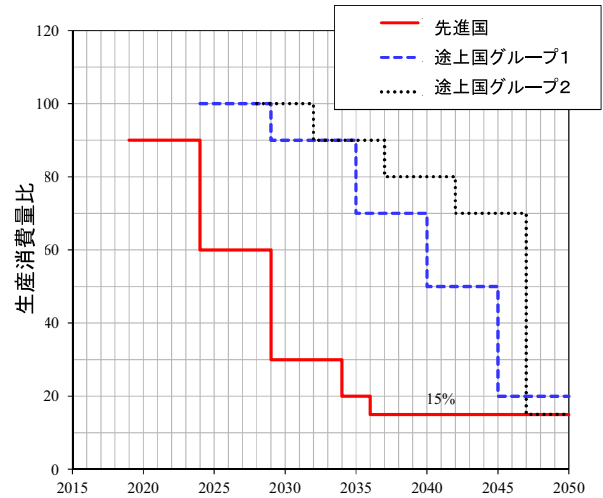
## I. 事業の位置付け・必要性

### (1) 背景 ～代替フロン(HFC)の生産・消費量の段階的削減義務～

公開

- 代替フロン(HFC)の生産・消費量の段階的削減義務等を定めるモントリオール議定書のキガリ改正が2016年に採択、2019年に発効した。
- モントリオール議定書のキガリ改正は、国全体のHFCの生産量及び消費量を一定の水準以下に抑えることが主な内容。
- 先進国は、2036年までにHFCの生産量及び消費量を段階的に85%削減する目標が示された。
- 先進国グループに属する我が国は2019年から段階的な削減が求められ、特に2029年以降、基準値比で約70%以上の大幅な削減が求められる。

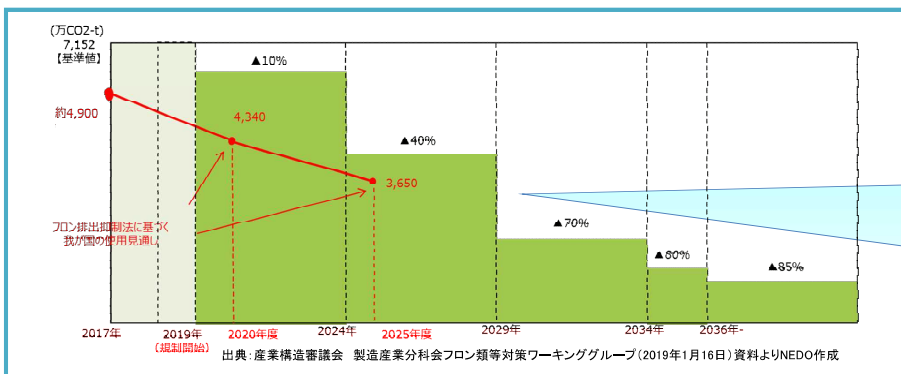
モントリオール議定書キガリ改正によるHFCの削減スケジュール



## I. 事業の位置付け・必要性

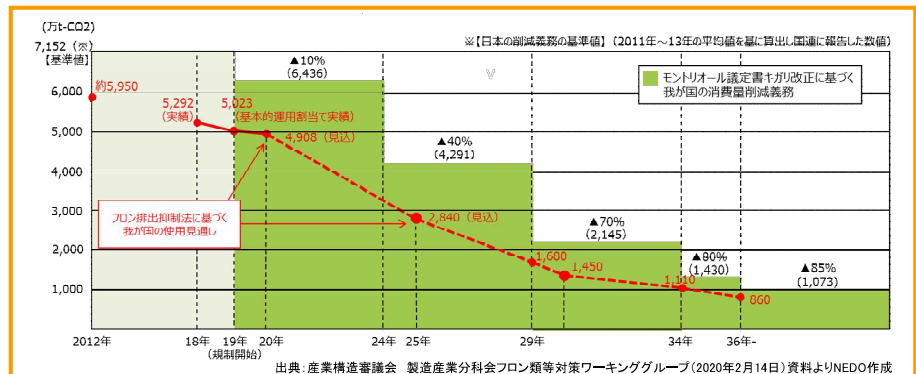
### (1) 背景 ～代替フロン(HFC)の生産・消費量の段階的削減義務～

公開



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)では、2020年は4,340万CO<sub>2</sub>-t、2025年度は3,650万CO<sub>2</sub>-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。

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)」(2020年2月)を踏まえた今後の削減シナリオ



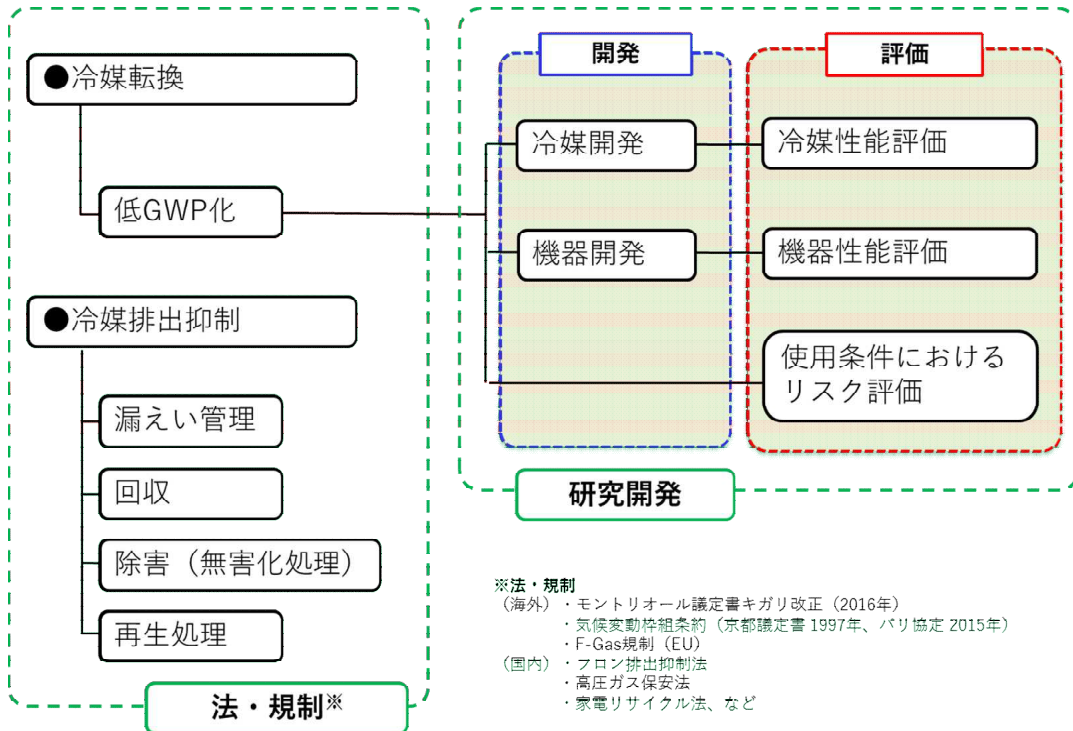


# I. 事業の位置付け・必要性

公開

(1) 背景 ~事業の位置づけ・ターゲット~

## ■ 冷凍空調分野におけるフロン対策に係る技術等の方向性



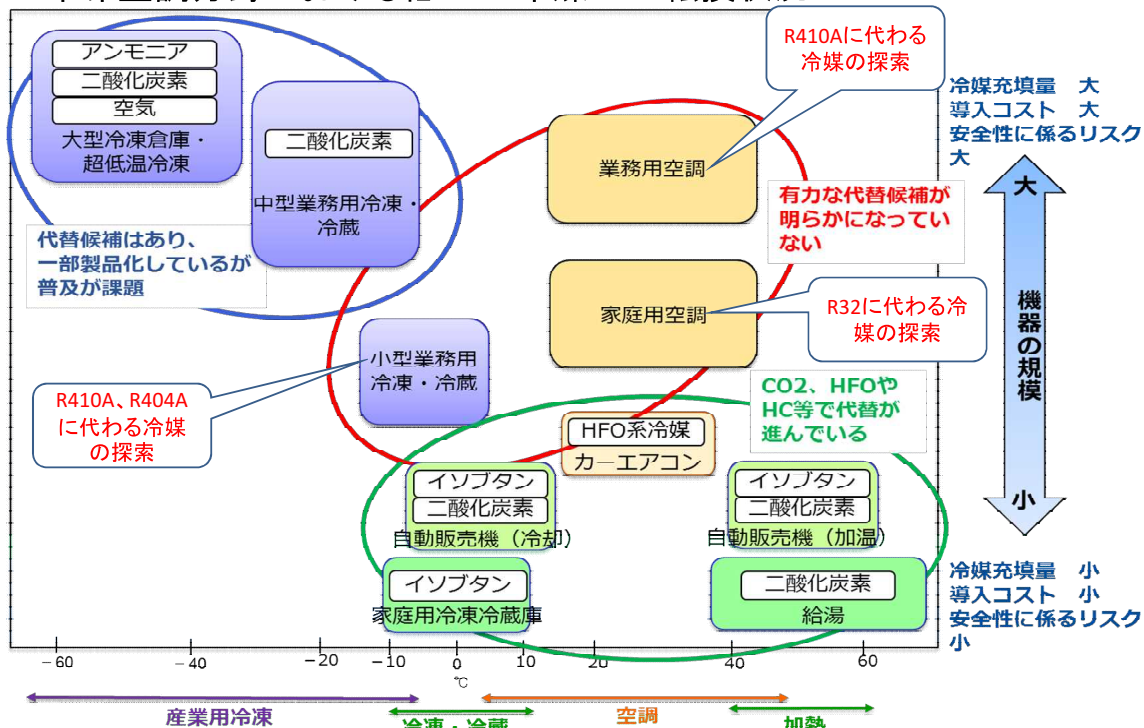
NEDO環境部作成(2018)

# I. 事業の位置付け・必要性

公開

(1) 背景 ~事業の位置づけ・ターゲット~

## ■ 冷凍空調分野における低GWP冷媒への転換状況



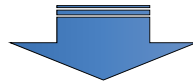


## I. 事業の位置付け・必要性

公開

### (2) NEDOが関与することの意義

- 地球温暖化対策は国内外における緊要であり、HFC排出削減は急務
- キガリ改正における目標の達成(2036年までにHFCの生産及び消費量を85%削減)には、より一層低GWP冷媒への転換が必須
- 「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)」及び「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、フロン類の削減に向けたイノベーション創出を推進
- 次世代冷媒の物性評価、安全性・リスク評価については、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あり、高度な研究開発マネジメントのもと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が重要
- 我が国産業の競争力強化のためにも、世界に先駆けた次世代冷媒及びその適用機器の開発が急務



NEDO事業としての妥当性は極めて高い

NEDOのミッション  
「エネルギー・地球環境問題の解決」  
「産業技術力の強化」

13 / 49

## I. 事業の位置付け・必要性

公開

### (3) 実施の効果

<b>&lt;プロジェクト予算総額&gt;</b> (NEDO負担額)	<b>30億円(予定)</b> (5年間)
--	--------------------------

#### <産業界への効果>

- 冷媒の低GWP化が困難な機器分野に、産学官の英知を集中させ、安全性が担保された次世代冷媒及び冷凍空調機器の開発・製品化を推進
- ルームエアコンについて、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

#### <費用対効果>

- 本プロジェクトによるCO<sub>2</sub>排出量削減効果は2029年度に最大で572万CO<sub>2</sub>-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。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。

14 / 49

## I. 事業の位置付け・必要性について

## II. 研究開発マネジメントについて

## III. 研究開発成果について

## IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

## II. 研究開発マネジメントについて

### (1) 事業概要

#### 概要

次世代冷媒の基本特性評価及び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・リスク評価手法を開発するとともに、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、普及を妨げる技術課題の技術開発を行う。

- ① 次世代冷媒の基本的特性に関するデータ取得及び評価
- ② 次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発
- ③ 次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発

#### 期間

2018年度 ～ 2022年度（5年間）

#### 予算

総額	約30億円 (5年総額予定)	研究開発項目毎配分		
		①基本特性 評価	②安全性・ リスク評価	③冷媒・機器開発
2018年度	2.5億円	65%	35%	—
2019年度	6.53億円	57%	28%	15%
2020年度	7.0億円	48%	25%	27%
2021年度	- 億円	—	—	—
2022年度	- 億円	—	—	—

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

公開

### (2) 研究開発項目および目標

#### ■ 基本計画目標

研究開発項目	中間目標	最終目標
①次世代冷媒の基本的特性に関するデータ取得及び評価 【基本特性評価】 ②次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発 【安全性・リスク評価】	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 冷凍空調機器の性能と省エネ性を両立しうる次世代冷媒について、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。</li> <li>■ 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、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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 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。</li> <li>■ 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。</li> <li>■ 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・国際基準への提案を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。</li> </ul>
③次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発 【冷媒・機器開発】	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 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。</li> </ul>

17/49

公開

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

### (3) 研究開発計画～プロジェクト参画テーマ～

#### ■ 公募により、8テーマを採択

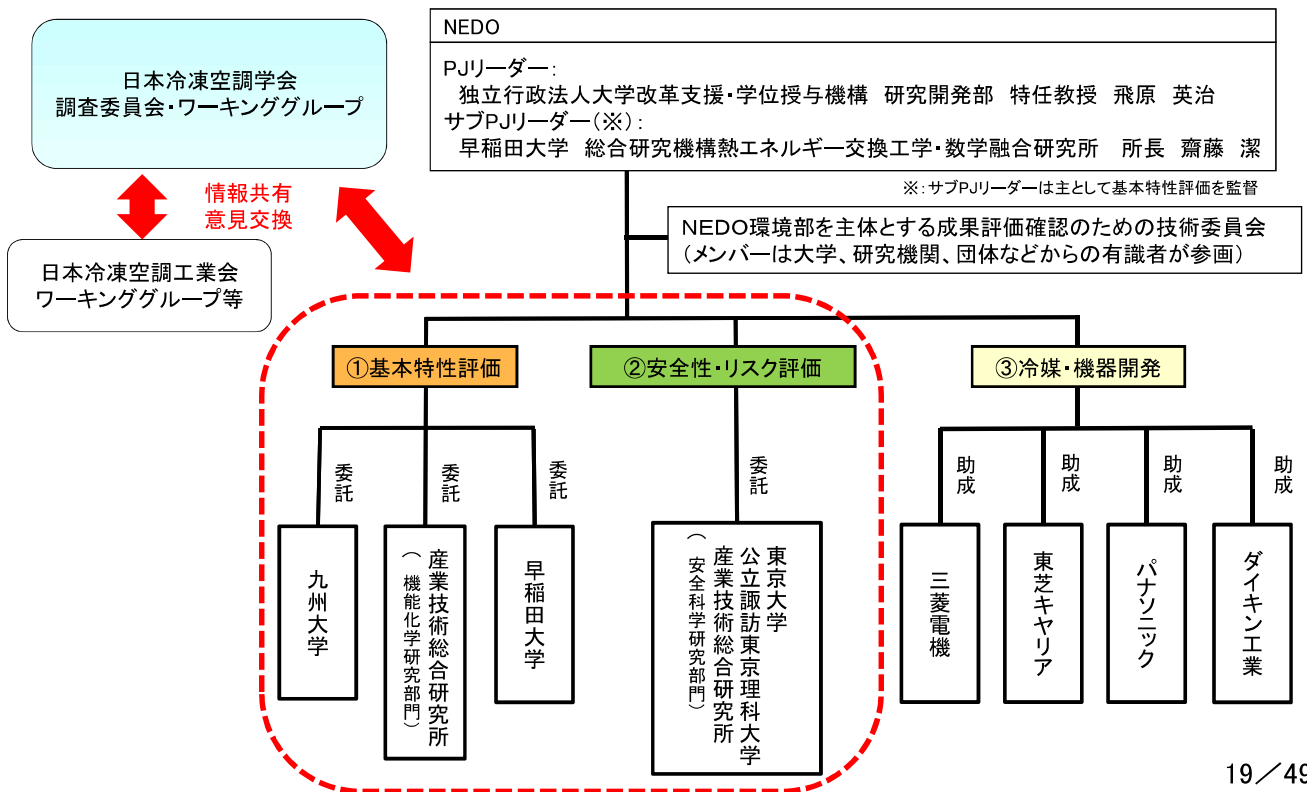
研究開発項目	テーマ	事業者名	委託/助成	契約期間	対象
①基本特性	中小型規模の冷凍空調機器に使用する次世代冷媒の熱物性、伝熱特性および基本サイクル性能特性の評価研究	九州大学 (再委託:富山県立大学、日本大学、長崎大学、産業技術総合研究所、九州産業大学、佐賀大学、東京海洋大学)	委託	2018-2020	HFO系混合冷媒の物性データ取得
	低GWP低燃焼性混合冷媒の安全性評価	産業総合技術研究所 機能化学研究部門			HFO系混合冷媒の燃焼性評価
	低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の実用化評価に関する研究開発	早稲田大学 (再委託:電気通信大学)			性能評価シミュレーションの開発
②安全性・リスク評価	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			HC系冷媒、HFO系冷媒の安全性評価
③冷媒・機器開発	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	三菱電機株式会社	助成 (1/2)	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
	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	東芝キヤリア株式会社			【機器開発】 コンデンシングユニット
	低温機器におけるCO <sub>2</sub> 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			【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 <sub>2</sub> 冷凍機システム
	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			【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)

18/49

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

公開

### (5) 研究開発の実施体制



## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

公開

### (6) 運営管理

#### ■ 研究開発計画・予算の最適化

- (1) 月例報告 (委託先/助成先より研究進捗報告書(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
- (1)(2)による進捗管理 (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)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)

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。

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
2018			委託事業開始	NEDO及びPLによる進捗把握							PLヒアリング(第1回)		技術検討委員会
2019	助成事業開始				PLヒアリング(第1回)				PLヒアリング(第2回)				
2020			技術検討委員会(※)		PLヒアリング(第1回)				PLヒアリング(予定)			技術検討委員会(予定)	
	NEDO及びPLによる進捗把握												

※コロナウイルス感染症拡大の為、2019年度委員会(2/28予定)を2020年度に延期して実施。

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

公開

### (6) 運営管理

#### ■ 技術検討委員会 委員

##### 委員長

亀山 秀雄(国立大学法人東京農工大学 名誉教授)

##### 委員(50音順)

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)

- 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。

21 / 49

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

公開

### (7) 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

#### ■ 研究開発成果の実用化・事業化へ向けたアプローチ

- ・ 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。
- ・ 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。

#### ■ 知的財産戦略に関して

- ・ 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。)
- ・ 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。(出願件数については後述)

22 / 49



## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

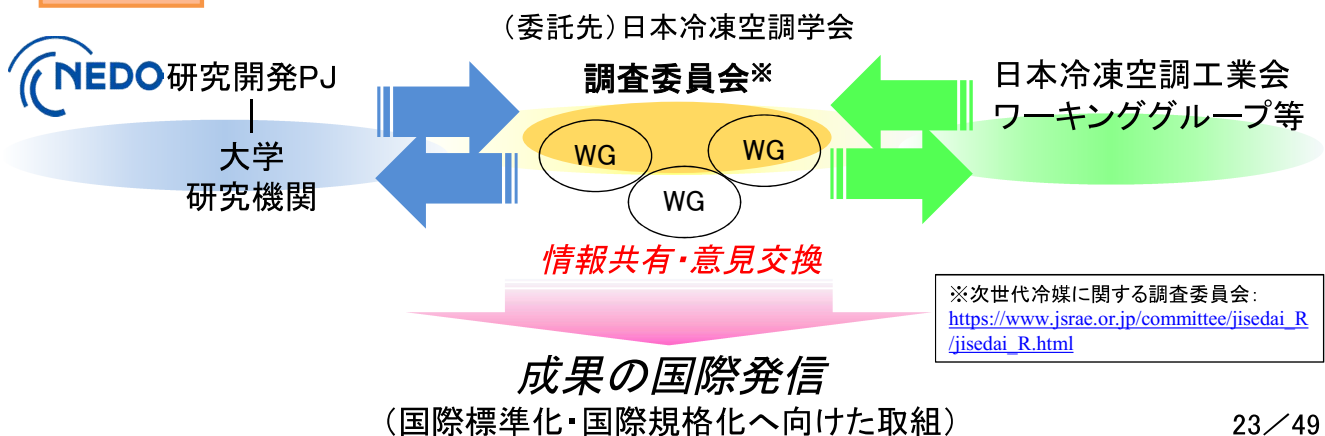
### (7) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

公開

#### ■ 標準化戦略・標準化活動

- 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。

#### 実施体制



## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

### (8) 情勢変化への対応

公開

- モントリオール議定書キガリ改正のHFC生産・消費量の削減目標の達成へ向けて、2019年度より次世代冷媒及び適用技術の開発(助成事業)を開始した。

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023
情勢変化	キガリ改正発効 (2019年1月)	オゾン層保護法施行 (2019年1月)				
研究開発項目1 【委託】	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 【委託】	次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発					
研究開発項目3 【助成】	次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発					

キガリ改正に示されたHFC削減目標達成へ向けて、一層の低GWP冷媒への転換が急務

- 国内外の規制等の動向と連携しつつ、研究開発を実施していく。

#### ● 国内の規制動向

- ・ 高圧ガス保安法
- ・ フロン排出抑制法

#### ● 国内の政策動向

- ・ パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略
- ・ 革新的環境イノベーション戦略

#### ● 国外の規制動向

- ・ 国際規格・国際標準

< 想定される規格・標準 >

- 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)等

I. 事業の位置付け・必要性について

II. 研究開発マネジメントについて

III. 研究開発成果について

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

III. 研究開発成果

(1)各テーマの達成目標(事業者による自己評価)

研究開発項目	テーマ名	対象	目標(中間目標)	成果	達成度(2020年度末)
① 基本特性評価	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	HFO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(HCFO1224yd(Z), HFO1336mzz(E))及び3成分系混合冷媒(HFC32+HFO1234yf+CO <sub>2</sub> 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	HFO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。	2020年度下半期には、代表的な混合冷媒を選定し、国際標準化やリスク評価に必要となる燃焼特性指標(燃焼限界、燃焼速度、消炎距離)を評価が完了する見込み。	○
	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。	2020年度下半期には、評価ツールに係る要素技術(モデリング・性能解析、数値的性能評価手法、性能評価装置開発等)が完成見込み。	○
② 安全性・リスク評価	次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発	HC系冷媒、HFO系冷媒の安全性評価	次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の確立を目指し、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。	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等、安全性・リスク評価手法の確立に向けた共通基盤的な情報を提供している。 また、国際規格(IEC60335-2-40、IEC60335-2-89)への登録に向けて、積極的に情報提供を行った。	○

### Ⅲ. 研究開発成果

公開

#### (1)各テーマの達成目標(事業者による自己評価)

研究開発項目	テーマ名	対象	目標(中間目標)	成果	達成度 (2020年度末)
③冷媒・機器開発	自然冷媒および超低GWP冷媒を適用した大型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	従来機器(60馬力R404A冷凍機)と比べ、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%以下を達成するため、冷媒選定及び高元側サイクルの要素技術を完成させる。	2020年度下半期には、冷媒選定、高元側サイクルの要素技術(オーラルミ熱交換器、アキュムレータ、カスケード熱交換器等)が完成見込み。	○
	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	低GWP冷媒を使用したコンデンシングユニットの開発へ向けて、定格機器性能 対従来比100%を達成する冷媒種の選定し、コンデンシングユニットの仕様を決定する。	2020年度下半期には、冷媒候補の選定を完了し、従来機種に対して同等の定格機器性能を達成する機器仕様(冷凍サイクル構成、サイクル制御)を確定する見込み。	○
	低温機器におけるCO <sub>2</sub> 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	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 <sub>2</sub> 冷凍機システム	CO <sub>2</sub> 冷凍機の普及に求められる、CO <sub>2</sub> 冷凍機の大出力化、高外気温度対応、CO <sub>2</sub> 冷媒の特性を活かした未利用熱利用、中高温領域への利用範囲拡大について、実用化へ向けた装置群の技術的な目途付けを行う。	2020年度下半期には、装置群(冷凍機、熱交換器ユニット、排熱空調ユニット)の開発を完了し、実証実験へ進む見込み。	○
	GWP10以下の直膨型空調機器用 微燃性冷媒の開発	冷媒、直膨型空調(家庭用エアコン、業務用エアコンの一部)	次世代冷媒の成分物質を用いて、直膨型空調機器に適したGWP10以下の次世代冷媒の組成を決定する。	2020年度下半期には、新冷媒の成分物質について、初期の性能評価(現行冷媒に対しCOP、APFが90%以上)、燃焼性・毒性に関する基礎データを取得し、次世代冷媒の組成を決定する見込み。	○

◎ 大きく上回って達成、○達成見込み、△一部達成、×未達

### Ⅲ. 研究開発成果

公開

#### (3)成果の意義

研究開発項目	対象	成果の意義
①基本特性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>低GWP冷媒の物性データ取得</li> <li>低GWP冷媒の燃焼性評価</li> <li>性能評価シミュレーターの開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低GWP冷媒及び低GWP冷媒適用冷凍空調機器の特性データについて、国際基準値としての情報を発信</li> <li>内外の規格・標準・法規整備への提言のための知見の取得と発信</li> <li>低GWP冷媒実用化のために、IEC規格などの改正に際して共通基盤的な知見の提供</li> </ul>
②安全性・リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>HC系冷媒、HFO系冷媒の安全性評価</li> </ul>	
③冷媒・機器開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>低GWP冷媒を使用した冷凍冷蔵機器開発</li> <li>低GWP冷媒開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状市販フロン品と同等以上の性能を有し、低GWP冷媒を用いる機器の開発</li> <li>直膨型空調機について、性能・安全面で従来冷媒と代替する可能性のある新規低GWP冷媒の開発</li> </ul>

### Ⅲ. 研究開発成果

#### (4) 成果の普及について (5) 知的財産権の状況

公開

研究開発項目 区分	成果の発表			計
	①基本特性評価 (3テーマ)	②安全性・リスク評価 (1テーマ)	③冷媒・機器開発 (4テーマ)	
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
区分	特許出願			計
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

- 公共的な知的基盤整備を目的とする研究開発項目①、②(委託事業)においては、論文投稿、講演発表等を多く実施。
- 新型コロナウイルス感染症の影響で、多くの国際会議、学会が中止あるいは順延され、成果発表の機会が減っている。
- 製品開発を目的とする研究開発項目③(助成事業)においては、各事業者毎の企業戦略に沿った特許出願を実施。

29 / 49

### Ⅲ. 研究開発成果

#### (4) 成果の普及について

公開

#### ■ 国際会議等における本プロジェクト成果の発信実績

##### 事業者の発信

- 日本冷凍空調学会2019年度年次大会でのワークショップ「次世代低GWP冷媒の安全性・物性・サイクル性能評価」の開催
- 調査委員会プロGRESSレポート  
⇒成果の発信を目的として、調査事業全般の紹介、各WGの成果を年度ごとにレポート(和文)を作成し、2018年度版、2019年度版を日本冷凍空調学会ホームページにて公開。今後、英文版も公開の予定。

##### NEDOの発信

- Meeting of the Open-ended Working Group of the Parties to the Montreal Protocol; OEWG)におけるワークショップ「Japan's F-gas policy and current status of measures to curb greenhouse gas emissions and to enhance energy efficiency products in RACHP sector」, Bangkok, Thailand
- Meetings of the Parties to the Montreal Protocol (MOP)におけるワークショップ「Japan's F-gas policy and current status of measures to curb greenhouse gas emissions and to enhance energy efficiency products in RACHP sector」, Rome, Italy



国内外へ本プロジェクト成果を積極的に発信

30 / 49

### Ⅲ. 研究開発成果

#### (6) 成果の最終目標の達成可能性

公開

■ 中間目標はいずれも達成の見込みであり、最終目標は達成される見通し。

研究開発項目	最終目標(2022年度末)	現状の進捗状況	達成の見通し
①基本特性評価 ②安全性・リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 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、<u>国際規格・国際基準への提案を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</u>行う。</li> <li>■ 次世代冷媒使用にあたっての<u>実用的な安全基準(業界規格等)の策定に資するデータ</u>や<u>評価結果を提供</u>する。</li> <li>■ 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、<u>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</u>する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <u>基本特性データの取得、性能評価ツールの開発とも最終目標を予定通り達成見込み。</u></li> <li>■ 安全性、リスク評価手法に係る各種評価は中間目標を予定通り達成見込み。</li> <li>■ <u>国際規格(IEC等)の改正、国際データベース(REFPROP等)への登録へ向けて、積極的に情報提供を実施。</u></li> </ul>	○
③冷媒・機器開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 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、<u>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。</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <u>各テーマについて、技術的課題を明確化し、解決の見込み。</u></li> <li>■ 各テーマで最終目標を達成する見込み。</li> </ul>	○

◎ 大きく上回って達成、○達成見込み、△一部達成、×未達

### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目①における実施例の紹介

公開

## ①基本特性評価における実施例の紹介

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

委託先：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)

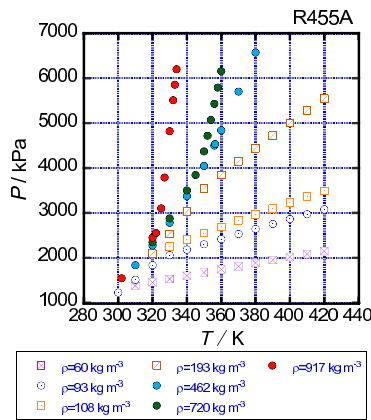


### Ⅲ. 研究開発成果

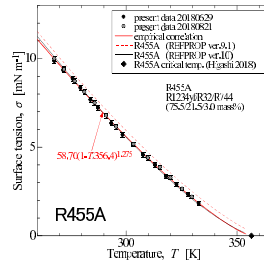
#### ◆研究開発項目①における実施例の紹介

#### a. HFO系冷媒を含む混合冷媒および高沸点 HFO系冷媒の熱物性評価

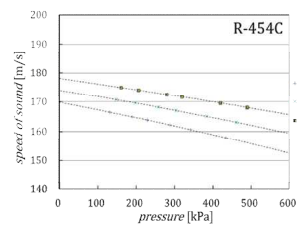
臨界点近傍を含む熱力学的性質の測定



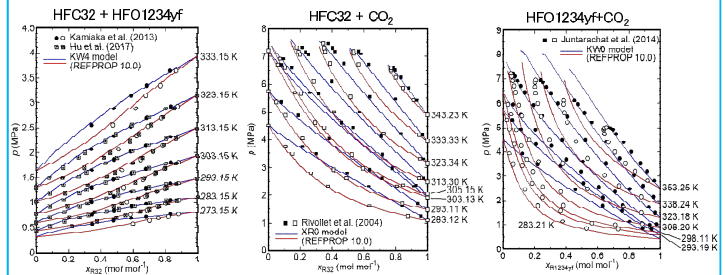
表面張力の測定



音速の測定



状態方程式の作成 (2成分系混合冷媒気液平衡の計算)



NEDO プロジェクトの成果が採用された ISO 17584 及び NIST REFPROP 10.0 の冷媒物性国際標準化

● ISO 17584 (冷媒物性)

R1233zd(E), R1234yf, R1336mzz(Z)

● NIST REFPROP 10.0

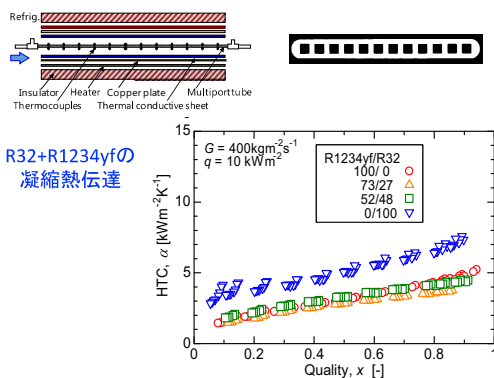
(搭載済み) R1123, R1224yd(Z), R1234ze(Z), R1243zf (10.1 版にて搭載予定) R1336mzz(E), R32/R1123, R1123/R1234yf, R1234yf/CO<sub>2</sub>

### Ⅲ. 研究開発成果

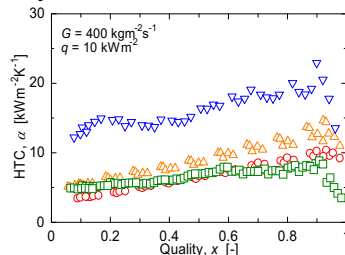
#### ◆研究開発項目①における実施例の紹介

#### b. HFO系冷媒を含む混合冷媒および高沸点 HFO系冷媒の伝熱特性評価

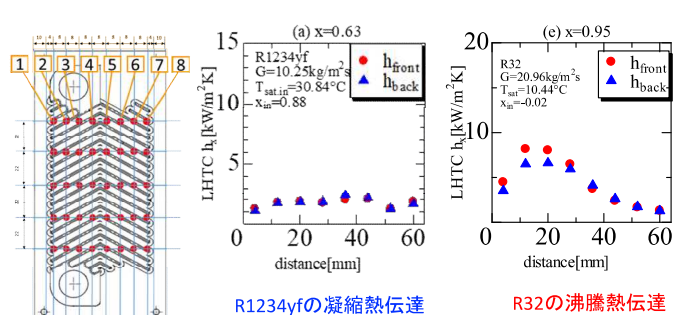
扁平多孔管内の伝熱特性評価



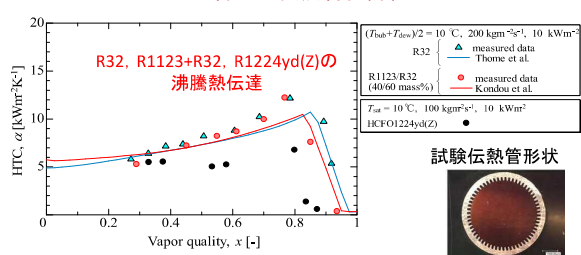
R32+R1234yfの沸騰熱伝達



プレート式熱交換器内の伝熱特性評価



円管内の伝熱特性評価



### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目①における実施例の紹介

公開

## ①基本特性評価における実施例の紹介

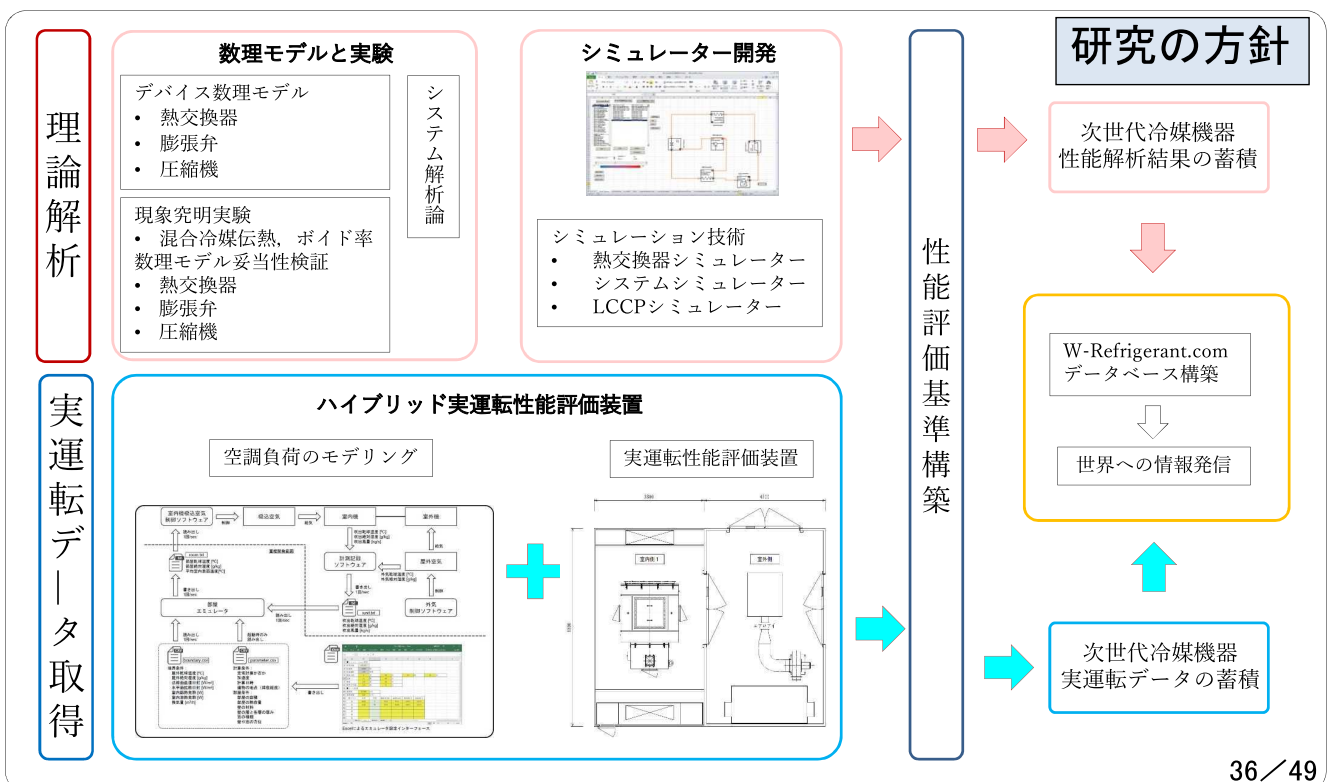
### 低GWP冷媒を採用した次世代冷凍空調技術の 実用化評価に関する研究開発

委託先：早稲田大学  
(再委託：電気通信大学)

### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目①における実施例の紹介

公開



### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目②における実施例の紹介

公開

## ②安全性・リスク評価における実施例の紹介

### 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

産業総合技術研究所(安全科学研究部門)

(再委託：静岡大学、広島大学)

37 / 49

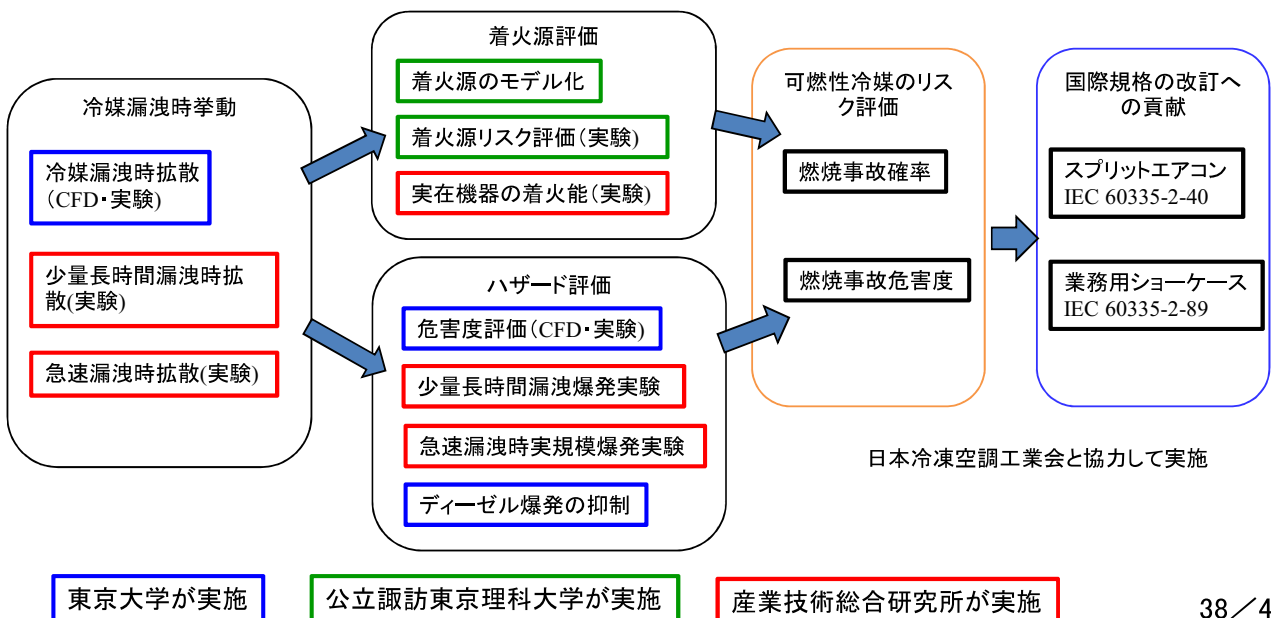
### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目②における実施例の紹介

公開

### 冷媒燃焼時のリスク評価の概要

- ・ 前プロジェクトで**微燃性冷媒**のリスク評価を実施し、国際規格、国内法規、業界規格の改訂に貢献した。
- ・ 本プロジェクトでは、3機関が協力して**強燃性冷媒(プロパンなど)**のリスク評価を実施している。



38 / 49

### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目②における実施例の紹介

公開

#### 東京大学：可燃性冷媒漏洩時のリスクの研究

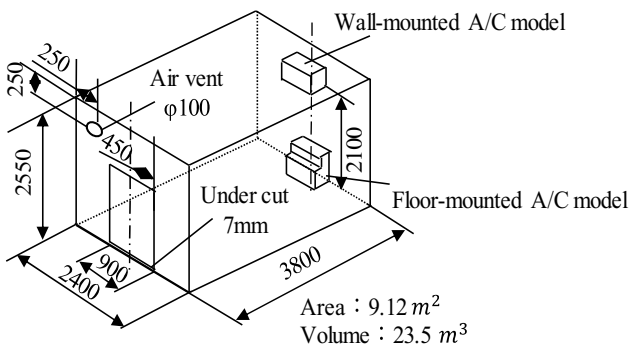
##### 研究目的

次世代冷媒として期待されているR290(プロパン)の室内漏洩時のリスク評価

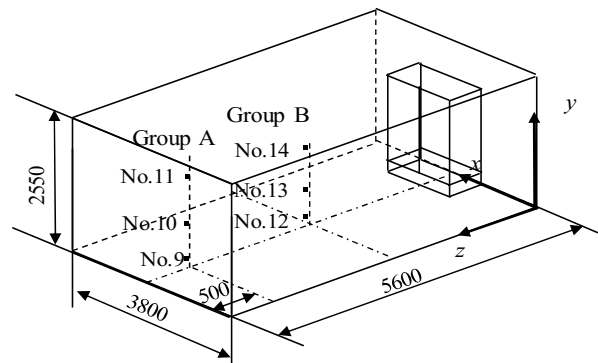
- 家庭用エアコン(IEC 60335-2-40)
- 業務用ショーケース (IEC 60335-2-89)

##### 研究手法

- 実験装置を製作し、実験結果を使って、シミュレーションモデルの妥当性を担保
- シミュレーションを使って、国際規格の**最大充填量規制の評価**の評価を行っている
- 冷媒漏洩時の安全対策として、**室内機のファン駆動の妥当性**の検討をおこなっている



ルームエアコン室内機からの漏洩



業務用ショーケースからの漏洩

### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目②における実施例の紹介

公開

#### 公立諏訪東京理科大学

#### (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

- NEDO調査委員会WG2に出席、進捗報告及び意見交換を実施
- ➔ 着火源の精査、着火機構の妥当性検討を進めた

#### (2) 各種着火源による次世代冷媒のリスク評価

##### ①電気系着火源の着火性評価

- 1) 有接点スイッチの操作による着火性評価  
➔ 着火しなかった。接点への熱損失により火炎核が持続形成できなかったためとみられる
- 2) 人的操作(コンセント抜き差し)による着火性評価➔着火が認められた。
- 3) 静電気による着火危険性➔文献調査の結果をもとに評価した
- 4) 現在市販流通しているリレー接点での放電による着火性評価  
➔ドライヤー、掃除機等の一般家電製品を負荷として計測した放電エネルギーから評価した

##### ②高温表面(加熱壁面)による着火性評価

着火に要するエネルギーと供給電力の関係を明らかにし、これにより着火までに要する時間を予測可能とした

### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目③における実施例の紹介

公開

## ③機器、冷媒開発における実施例の紹介

### 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

助成先：三菱電機(株)

41 / 49

### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目③における実施例の紹介

公開

### 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

#### 【研究回路の概要】

- ①二元回路にて低元回路(と負荷)にCO<sub>2</sub>冷媒を採用
- ②高元側に高性能かつ低コストを実現できる低GWP冷媒と回路を検討

#### 【当社60馬力R404A冷凍機比で、】

- ①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
- ②機器販売価格が140%以下

#### 【研究開発成果】

- ① 高元側はシミュレーション計算により、最適な冷媒、PFC熱交など必要な仕様を明確化した。高元側冷媒にはR1234yfを選定。実測でR404Aに対しR1234yfのCOP比は105%と向上し、ほぼ理論値(106%)同等を確認
- ② 低元側CO<sub>2</sub>のCOPも理論値同等となる見込みで、二元システムCOPは、目標(現行R404A機同等以上)に対して131%で達成の見込み
- ③ システムコストは現行R404A機に対し、開発機は圧力抑制で空調と共通部品流用で142%まで低減、目標140%のほぼ達成見込みを得た。
- ④ システム制御は「二元サイクルにおける制御安定性」「リバーズ除霜制御」に対し、机上での制御構築は2020年度中に完了見込み

42 / 49



### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目③における実施例の紹介

公開

## ③機器、冷媒開発における実施例の紹介

### GWP10以下の直膨型空調機用 微燃性冷媒の開発

助成先:ダイキン工業(株)

43 / 49

### Ⅲ. 研究開発成果

#### ◆研究開発項目③における実施例の紹介

公開

### GWP 10以下の直膨型空調機用 微燃性冷媒の開発

■背景: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化が求められている。

■概要:直膨型空調機において、市販フロン品と同等以上の性能(COP、APF等)を示すGWP 10以下の冷媒を開発し、直膨型空調機への適用可能性を評価して機器開発を検討する。

■目標:

(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、要素部品の基本仕様を確立する。

開発項目	目標
① 温暖化係数及び安定性評価	・GWP 10以下の冷媒組成を提案する。
② 燃焼性評価	・微燃性(ASHRAE区分:2L)。 ・冷媒充填の許容量の把握。
③ 毒性評価	・LC50>2万ppm。ASHRAE区分: Aの見通しを示す。
④ 冷媒性能評価	・COP、APFにおいてR410A比で90%以上。 ・機器開発における課題の抽出。

44 / 49

I. 事業の位置付け・必要性について

II. 研究開発マネジメントについて

III. 研究開発成果について

## IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

45 / 49

### IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

◆本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

研究開発項目	実用化・事業化の考え方
①基本特性評価 ②安全性・リスク評価	冷媒の性能、安全性・リスク評価に係る公共的な知的基盤が整備され、社会的利用（規格化、標準化、データベース、アセスメント等への利用、産業界における研究開発への利用、他の研究開発への利用等）に供されること。
③冷媒・機器開発	実用化とは、現状市販フロン製品と同等以上の性能を実現する技術を確立し、その技術に基づく試作品等の社会的利用（顧客への提供等）が開始されることであり、事業化とは、当該研究開発に係る商品、製品等の販売や利用により、企業活動（売り上げ等）に貢献すること。

46 / 49

## IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

公開

### (1) 成果の実用化・事業化の見通し

研究開発項目	成果の実用化・事業化の見通し
①基本特性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>講演・論文投稿等を通じた成果の周知※</li> <li>新規冷媒物性に関しては、国際データベース(REFPROP)への登録に向けた積極的な情報提供</li> <li>強燃性冷媒のリスク評価に関しては、国際規格(IEC60335-2-40、IEC60335-2-89)の改定へ向けて、業界団体と連携し、積極的に情報を提供</li> <li>冷凍空調業界団体等を通じて、冷媒評価法の改善、国際標準化を推進</li> </ul>
②安全性・リスク評価	
③冷媒・機器開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>キガリ改正、フロン排出抑制法に対応するのが困難な製品分野に、低GWP冷媒を搭載した機器の開発を促進、新規低GWP冷媒の開発を推進。</li> <li>本助成事業において、個々のテーマ毎に実用化へ向けた要素技術等の技術的な課題は明確化され、解決の見込み。</li> <li>一部の機器開発においては、本事業期間中にフィールド試験を実施し、本事業終了後速やかに事業化フェーズへ移行が可能。</li> <li>新冷媒の開発においては、冷媒番号の取得を含め、市場展開への準備を進める。</li> </ul>

※ 成果の公表に関しては、新型コロナウイルス感染症の影響で、多くの国際会議、学会が中止あるいは順延され、成果発表の機会が減っている。

## IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

公開

### (1) 成果の実用化・事業化の見通し

#### ■ 国際規格化・国際標準化、国際データベース等への登録に向けたロードマップの対応例

対象	規格の内容	—	2018	2019	2020	2021	2022
【国際規格】 IEC60335-2-40	空調機器における可燃性冷媒の使用に関する規格(スプリットエアコン)	規格の動き	Edition6.0が発行(A2L冷媒の規定が記載)	国際会議(※1) 日本冷凍空調工業会が代表		Edition7.0が発行予定(A2/A3冷媒の規定が記載)	
		本事業のインプット	安全性・リスク評価 ・着火源検討 ・不均化現象と対策 ・実機着火試験 他	性能評価 ・新冷媒物性測定 ・新冷媒性能解析 他		学術会議(※2)	次期改定
【国際規格】 IEC60335-2-89	密閉式業務用冷凍冷蔵機器における可燃性冷媒の使用に関する規格(冷蔵冷凍ショーケース)	規格の動き		Edition3.0(A2/A3冷媒の規定が記載)		国際会議(※3) 日本冷凍空調工業会が代表	Edition4.0(改定版)発行予定
		本事業のインプット		・着火源検討 ・内蔵ショーケース漏洩試験 ・実機着火試験 他			
【国際データベース】 REFPROP	NISTの作成する冷媒熱物性データベースソフトウェア	DBの動き					REFPROP 11 or 10.5 リリース
		本事業のインプット		燃焼性・低GWP冷媒の性能評価	不添加冷媒の添加 不燃性・低GWP冷媒の性能評価		

## IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

公開

### (2) 波及効果

研究開発項目	対象	技術的波及効果	対象技術分野の国内市場規模※1	対象技術分野の冷媒排出量推計※2	社会的波及効果
①基本特性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低GWP冷媒の物性データ取得</li> <li>・低GWP冷媒の燃焼性評価</li> <li>・性能評価シミュレーターの開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低GWP冷媒基礎データの普及による実用化研究開発の促進</li> <li>・世界に先駆けた強燃性冷媒のリスクセサメントの推進</li> </ul>	—	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・内外の規格・法規整備の提言(高圧ガス保安法、ISO等)、国際データベース等への登録</li> <li>・次世代冷媒の適用を促進し、わが国の産業力を強化する</li> </ul>
②安全性・リスク評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・HC系冷媒、HFO系冷媒の安全性評価</li> </ul>		—	—	
③冷媒・機器開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低GWP冷媒を使用した冷凍冷蔵機器開発</li> <li>・低GWP冷媒開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高効率化(圧縮機、熱交換器等)及び他用途(広範囲の冷凍空調機器等)への展開</li> </ul>	約8,090億円	約4,090万t-CO <sub>2</sub> ※3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・キガリ改正によるHFC削減に大きく貢献</li> <li>・世界に先駆けた次世代冷媒技術の開発による我が国産業の競争力強化</li> </ul>

※1:「ヒートポンプ 温水・空調市場の現状と将来展望 2017(株式会社富士経済, 2017)」に基づき、NEDO環境部で業務用冷凍空調機器及び家庭用空調機器を対象に2025年時点の予測値を算出。

※2:2018年度の推計排出量。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

※3業務用冷凍空調機器及び家庭用空調機器を対象として算出。

## 参考資料 1 分科会議事録及び書面による質疑応答



## 研究評価委員会

「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」

(中間評価) 分科会

議事録及び書面による質疑応答

日 時：2020年10月6日(火) 9:35～16:10

場 所：NEDO 川崎 23階 2301、2302、2303 会議室 (オンラインあり)

出席者 (敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長	鹿園 直毅	東京大学生産技術研究所 教授
分科会長代理	中島 英彰	国立環境研究所 地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室 主席研究員
委員	浅岡 龍徳	信州大学 学術研究院工学系 工学部 機械システム工学科 准教授
委員	佐々木 直栄	日本大学 工学部 機械工学科 教授
委員	佐々木 正信	東京電力エナジーパートナー株式会社 販売本部 副部長
委員	三浦 尚志	建築研究所 環境研究グループ 主任研究員
委員	涌井 徹也	大阪府立大学 大学院工学研究科 機械系専攻機械工学分野 准教授

<推進部署>

田中 秀明	NEDO 環境部 部長
藤垣 聡	NEDO 環境部 統括研究員
阿部 正道	NEDO 環境部 主任研究員
牛腸 誠	NEDO 環境部 主査
高橋 辰彦	NEDO 環境部 専門調査員
二関 洋子	NEDO 環境部 主任

<実施者>

飛原 英治 (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
齋藤 潔 (SPL)	学校法人早稲田大学 総合研究機構 熱エネルギー変換工学・数学融合研究所 所長
福原 啓三	三菱電機株式会社 冷熱システム製作所 冷熱システム製造部 冷凍機技術第一課 課長

野本 宗	三菱電機株式会社 住環境研究開発センター 空調冷熱技術部 次長
山下 浩司	三菱電機株式会社 空調冷熱システム事業部 空調冷熱技術部 主席技師長
佐藤 全秋	東芝キャリア株式会社 技術統括部コアテクノロジーセンター 部長
木口 行雄	東芝キャリア株式会社 技術統括部コアテクノロジーセンター 参事
馬場 敦史	東芝キャリア株式会社 技術統括部コアテクノロジーセンター グループ長
山口 広一	東芝キャリア株式会社 技術統括部コアテクノロジーセンター シニアプロフェッショナル
三原 一彦	パナソニック株式会社 アプライアンス社 技術本部 エアコン・ワールドチェーン開発センター 開発第3部 部長
金城 賢治	パナソニック株式会社 アプライアンス社 技術本部 エアコン・ワールドチェーン開発センター 開発第3部 課長
田部井 聡	パナソニック株式会社 アプライアンス社 ワールドチェーン事業部 商品技術部 冷凍機カテゴリー 課長
栗田 文彦	パナソニック株式会社 アプライアンス社 ワールドチェーン事業部 商品技術部 冷凍機カテゴリー カテゴリーリーダー
山田 康夫	ダイキン工業株式会社 化学事業部 商品開発部 研究員
小松 雄三	ダイキン工業株式会社 化学事業部 商品開発部 主任技師
徳野 敏	ダイキン工業株式会社 テクノロジーイノベーションセンター 技師長
藤本 悟	ダイキン工業株式会社 CSR・地球環境センター 室長
東 之弘	九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 熱科学研究部門 教授
宮良 明男	国立大学法人 佐賀大学 大学院工学系研究科 教授
赤坂 亮	九州産業大学 理工学部機械工学科 教授
滝澤 賢二	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 機能科学研究部門 主任研究員
水門 潤治	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 グループ長
宮岡 洋一	早稲田大学 総合研究機構 主任研究員
ジャンネットィ・ニコロ	早稲田大学 高等研究所 講師

陳 昱	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 教授
覚 超鋌	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 准教授
今村 友彦	公立大学法人 公立諏訪東京理科大学 工学部 機械電気工学科 准教授
椎名 拓海	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 主任研究員
久保田 士郎	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 グループ長

<オブザーバー>

川内 拓行	経済産業省 製造産業局 化学物質管理課 オゾン層保護等推進室 課長補佐
清田 将吾	経済産業省 製造産業局 化学物質管理課 オゾン層保護等推進室 係長
徳岡 麻比古	NEDO TSC 統括調査員

<評価事務局>

森嶋 誠治	NEDO 評価部 部長
塩入 さやか	NEDO 評価部 主査
笹川 克義	NEDO 評価部 専門調査員

## 議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
  - 5.1 事業の位置付け・必要性について、研究開発マネジメントについて
  - 5.2 研究開発成果について、成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて
  - 5.3 質疑応答

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
  - 6.1 「次世代冷媒及び次世代冷媒適用技術の開発」
    - 6.1.1 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
    - 6.1.2 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
    - 6.1.3 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
    - 6.1.4 GWP 10 以下の直膨型空調機器用 微燃性冷媒の開発
  - 6.2 「次世代冷媒の基本特性に関するデータ取得及び評価」
    - 6.2.1 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
    - 6.2.2 低 GWP 低燃焼性混合冷媒の安全性評価
    - 6.2.3 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
  - 6.3 「次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」
7. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

## 議事内容

(公開セッション)

### 1. 開会、資料の確認

- ・開会宣言（評価事務局）
- ・配布資料確認（評価事務局）

### 2. 分科会の設置について

- ・評価委員会の設置について、資料1に基づき説明。（評価事務局）
- ・出席者の自己紹介（評価委員、推進部、事務局）

分科会長とプロジェクト推進部および実施者は少人数で会場にて対面参加。その他、リモートでの参加者はスクリーン上で紹介。

### 3. 分科会の公開について

### 4. 評価の実施方法について

- ・資料1～8のうち、資料6、7が非公開、それ以外は公開であるとして説明
- ・非公開資料については会議終了後、回収する旨の周知。
- ・議題3と4は事前に印刷資料およびスライドにて質疑応答済みで、事前説明の通りとする
- ・公開議題の質疑応答は公開され、非公開議題の内容は公開されない。（事務局）

### 5. プロジェクトの概要説明

#### 5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント

推進部署より資料5に基づき説明が行われた。

#### 5.2 研究開発成果、成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

引き続き、推進部署より資料5に基づき説明が行われた。

#### 5.3 質疑応答

推進部署からの5.1および5.2の説明に対し、以下の質疑応答が行われた。

**【鹿園分科会長】** どうもありがとうございました。

それでは、事前にも質問とかいただいていると思います。回答もいただいていると思いますけれども、追加で何かご質問とか、ご意見ございますでしょうか。

技術検討委員会は開催できたのですか。これは、コロナでできたのでしょうか。

**【阿部 PM】** そうですね。毎年1回、年度末にやるということになっていまして、昨年度分のものが、コロナの影響で、ちょっと延期して開催したという形になってございます。

**【鹿園分科会長】** 6月にやられたと。

**【阿部 PM】** そうですね。

**【鹿園分科会長】** 分かりました。

何かご意見、委員の先生方は、何かご意見ございますでしょうか。



よろしいでしょうか。

もし特になければ、では、先に進めさせていただきます。

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明

省略

7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

8. まとめ・講評

**【鹿園分科会長】** では、議題7を終了して、また事務局にお返しします。

議題8に進んでいいですかね。それでは、以降はまた再び公開となりますのでここから先の皆様のご発言は公開として議事録にも記載されますのでご注意ください。

それでは議題8、最初のご挨拶の逆の順ということで涌井先生から始めて三浦先生、佐々木先生、佐々木先生、浅岡先生、その後、中島先生、私という順番でよろしいですかね。

それでは涌井先生、よろしくお願いいたします。

**【涌井委員】** はい。大阪府立大学の涌井です。

本日1日貴重な研究成果のご報告をいただきましてありがとうございました。非常にフロンに対する規制が強い中で、皆さん新冷媒を開発していただかなければいけないという制約の中で、それぞれの性能を確保しながらかつ安全性を担保しようと努力をされているということが非常によくわかりました。また、複数の研究グループで協力して研究を進められていることが大変印象深く感じました。

また、これまでに3年間研究・開発をやられているということですが、特にこの1年間、今年はコロナウイルス下で非常に皆さんやりにくい、研究開発のやりにくい環境だと思うのですが、その中でも精力的に進められていることに深く敬意を表したいと思います。

伺ったお話でも、詳細な検討をされて、今後の展望のロードマップを明確に示していただきましたので、このまま研究開発を続けていただき、成果の公表をすることによって、規格や標準化に繋がったり、開発機器が市場に先行投入されて市場拡大に寄与するのだと思っておりますので、今後のさらなる研究開発を期待したいと思います。ありがとうございました。

**【鹿園分科会長】** ありがとうございました。

では、三浦先生お願いいたします。

【三浦委員】 はい。建築研究所の三浦です。

私は研究分野が建築ですので、あまり詳しくない分野ではあったのですが、非常に面白く、フロン分野で規制が厳しくなっている中で色々と研究をされていて、ここにたくさんの研究開発余地があるのだなと思って聞かせていただきました。先生がおっしゃいましたが、コロナ下で大変な中で、非常に素晴らしい研究だなと思いました。

今回、NEDO の評価委員会ですので、経済産業省管轄であり、技術開発を促進するという側面があるということ想定すると、日本だけにとどまらず世界に輸出とか、そういうことを推進していくのだと思うのですが、空調の安全性とかは私専門外ですけど、COP とかのエネルギー効率の評価で申し上げますと、やはりこれまで定格能力や中間能力だけで評価されてきましたが、実際は低負荷運転のウエイトは非常に高いとか、試験方法と実際との乖離があったりとかですね、あと例えば、これは想像でしゃべってますけど、欧州とかの運転条件と違い、日本あるいは東南アジアへの輸出とか考えると、かなり多湿な地域での運転、場合によっては暖房しないというような地域もあるので、日本の気候はエアコンの運転条件として非常にバラエティーが多いと思っております。

夏が厳しくて冬も厳しい日本ならではの感覚っていうのは、おそらく世界であまりないでしょうから、規格で決まっているからこの中で性能評価を行うという発想だけではなくて、実際に地域に展開したときに、本当はこういう運転がいいよね、みたいな方向で話を発展させ、さらにそれが規格化され、輸出強化につながったら良いなと思って聞いておりました。

場違いな言葉かもしれないですが、大変楽しく聞かせていただきました。ありがとうございました。

【鹿園分科会長】 はい、どうもありがとうございました。

次は、佐々木正信委員にご挨拶お願いいたします。

【佐々木正信委員】 はい、東電、佐々木です。

今回貴重な発表いろいろ教えていただいてありがとうございました。

この事業ですね、機器開発から基礎的な研究まで、幅広く内包しております、なかなかのコントロールというか全体管理も大変だと思いますけど、両方やっているということが重要だと思いますので、必要で有益だと考えます。

当然冷媒のですね、GWP の低い冷媒探索というところは大事ですけども、当然高効率な機器を実現するっていうことも必要ですので、その両立は簡単ではないですけど、知恵を尽くして努力しなければいけないと思います。

基礎的な研究内容は継続が大事だと思っていて、今回 HF01234YF+HF01123 は試料冷媒入手が間に合わなかったため試験できなかったが、今後の試験は必要かと思う。一方、リソースが限られる中で、こういう基礎的な内容をどこに絞るべき

かは思案のしどころかなと思っています。

また微燃性とか強燃性の、安全使用についての様々な研究はとても重要だと思っている。こういった研究は、特にフィールド試験とかも含めてやる形が必要だと思いますが、日本の国内規制反映とか国内で取り入れるだけでなく、海外に発信することもとても重要かと思しますので、引き続きそちらの方もよろしくお願ひしたいと思っています。以上です。

【鹿園分科会長】 はい、どうもありがとうございました。

次、日大の佐々木直栄委員、お願ひしたいのですが。

【佐々木直栄委員】 はい。今日は、午後から校務のためにどうしても都合がつかず、前半を主体に聞いていたのですが、私、大昔ちょうど R410A や R407C が出た頃に、各エアコンメーカーさんのお手伝いで熱交換器材料の開発をやった経緯がありまして、非常に大変だった思いがあったものですから、今回こういう立場で参加させていただくにあたって、大変なのだろうなと思っていたんですけども、各メーカーさんは非常に経験を積まれていて、十分に準備ができている状況を確認できて、安心しました。

やはり日本らしいきめ細かなデータの収集と分析をされていて、これからも日本が世界のトップランナーを走るんじゃないかという期待を持たせていただきました。

後半部分では、飛原先生のお話を聞かせていただきましたが、海外と国内とのギャップを埋めることが今後の課題なんだなあと思いました。最新の情報に触れることが出来て、非常に勉強になりました。ありがとうございました。

【鹿園分科会長】 はい、どうもありがとうございました。

それでは浅岡委員お願ひ致します。

【浅岡委員】 はい。どの研究グループも非常に安全性とか COP とか制約が多い中で、ノウハウを出してアイデアも非常にいいアイデアがあつて、いい研究をされているなと思いました。

また非常に幅広く、基本的な冷媒の開発の話から安全性の評価まで非常に幅広く検討が行われていて、全体としてこのプロジェクトがいいなと思ったのと、最終的に全てが完成したときには非常にまとまりよく収まるんじゃないのかなと思って感心いたしました。

はい、以上です。

【鹿園分科会長】 どうもありがとうございます。

それでは中島委員お願ひいたします。

【中島委員】 はい。今日はどうも 1 日それぞれが非常に興味深いいろんな研究発表、どうもありがとうございました。

着実に進んでいることが、各グループの発表でわかることができました。本プロジェクト新規冷媒の基礎的な実験ですとか特性評価から始まって、それを REFPROP と

かの国際標準にも採用されてきておりますし、ASHRAE の冷媒登録に向けたり、あるいはエアコンの国際規格の IEC とかの改正提案にも繋がるといったような、非常に国際的にも評価できる成果を着実に上げておられることは高く評価したいと思います。

またそれらの様々な新規冷媒を使った製品開発をですね、各メーカーさんが着実に進めておられて、しかもいろんな方式ですとか、いろんな冷媒を使ったようなそれぞれ住み分けができたような製品開発がされておられるとか、あるいはダイキンさんのような、さらに将来に向けた GWP が低い冷媒を、開発も進めておられるということですね、非常に幅広い研究開発をされていることに非常に感銘を受けました。ただしですね、ここぞという決め手になるような、これだというような冷媒は、まだ1本に絞りきれしていないのかなっていうように感じました。ちょっとこれはどうしても仕方がないのかもしれませんが、その中でも可燃性の問題ですとか、あるいは分解性の問題に関して解決できそうなような研究開発もされているということですね、それにも非常に期待したいと思います。

あと2年間あると思いますので、更にですね、着実に成果を上げられて、メーカーさんは商品化、できれば非常にコストも下げることができれば、死の谷を越えて自分で世の中に売っていけるような、キガリ改正の2029年問題というのを乗り越えるためにもですね、あるいはさらに先にインドとかの途上国にも日本の製品がですね、行き渡るような世界が将来的に来るように、開発を期待したいと思います。

本日はどうも、ありがとうございました。

**【鹿園分科会長】** どうもありがとうございました。

私からご挨拶を申し上げますけども、今日中間評価ということで、プロジェクト自体については、何と言いますか順調に進んでいて、何ら問題ないという風に感じました。いろんな工法がある中で、やっぱりなかなか絞り込めないのですかね、絞り込みきれないみたいなどころがあると思うのですが、ここでやはり日本のこういう産業が潰れないように、ぜひ戦略的にといいますか、なかなか自分たちだけで決められないのかもしれませんが、強行的にトップダウンに規制が動いてる、先程の飛原先生のご説明のような話がある、あと、やっぱりいろんな新興国があるとかですね、そういう中でどうやって生き延びるのかみたいなどころ、本当に是非、日本の産業が生き残れるように頑張っていたきたいなと思っております。非常に変化しそうな雰囲気ですごくする中で、私自身もどうするのが一番いいのか全然よくわからないのですが、今までもう2、30年エアコンとかは、あんまり変わってないような気がします。けれども、なんとなく急に変わりそうな心配がしますので、ぜひ頑張っていたいただければと思っております。

以上でございます。また、事務局にお返しします。

**【事務局】** どうもありがとうございました。

それでは最後に田中環境部長および飛原プロジェクトリーダー、斎藤サブプロジェクトリーダーから一言お願いいたします。

**【田中環境部長】** 環境部長の田中でございます。本日は朝早くから、ほぼ丸一日、この中間評価の委員会にご参加いただき、様々なご意見等をいただきまして誠にありがとうございました。

このプロジェクト、最初にご説明させていただいた通り、2年前から始まっていて今ちょうど3年目で、中間評価というタイミングになります。これをやった背景としては、冷媒を低いGWPにしていこうという国際的なキガリ改正という動きがあり、それは規制ですけど、それを踏まえてどうやっていくかと、そうした中でこれまでの延長線上の取り組みでは約束が守れないという中で、それを研究開発を通じて何とか乗り越えたいということで進めてきたプロジェクトでございます。元々は委託研究で基盤的なところをやっていましたが、去年からは、それに加えてメーカーさんの機器開発も補助金の形で支援するという形でウィングを広げて、プロジェクトを進めてまいりました。

今日発表していただいた通り、この2年か3年間の間に、着実に進んでいるということかと思っております、そういう点で、最後の講評の中で、各委員の先生方から、進捗しているのではないかというコメントをいただいて非常に心強い思いがございます。もちろんこの取り組みはまだ中間評価の段階ですので、この後さらに2年あると思っておりますので、しっかり最終的な目標に達成できるように、プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダーの飛原先生、斎藤先生と一緒に、しっかりこのプロジェクトを前に進めていきたいと考えております。

また、外国の動きや、日本の中での規制といったところも当然密接に関係してくる話ですので、今日経産省の方からもオブザーバー出席いただいておりますけれども、政府の方ともよく協力連携しながら、このプロジェクトをいい形進めるように、引き続きNEDOとしても取り組んでまいりたいと考えております。

この日本の約束はどうしても守らなければいけないというところがありますので、そこに何としてもこの技術の力で貢献し、最後に日本の産業が生き残るようというご指摘も委員長からもございましたけれども、我々としてもしっかり産業をどうやって残すかという観点も含めながら、この課題に対応していきたいと考えております。

いずれにいたしましても引き続きしっかり取り組んでいきたいと考えておりますので委員の先生方におかれましては、引き続きこのプロジェクトについて、様々な点から、ご支援、見守っていただくと非常にありがたいと思っております。

今日は本当に長い時間どうもありがとうございました。以上です。

**【飛原 PL】** 飛原でございます。今日は長時間にわたりまして各事業者の説明をお聞きいただき、また質問、コメント等いただきましてどうもありがとうございました。

もうすでに説明がありましたようにモントリオール議定書のキガリ改正によって、全冷凍空調分野において冷媒の低 GWP 化が迫られてきているわけでありまして、それに対応する形で国内ではフロン排出抑制法が強化されて、様々な規制が、様々な構成員、消費者、冷媒生産者、機器生産者に対して規制が課せられているという状況でございます。

キガリ改正の 2029 年問題は、まだ解決されておられません。それをどう乗り越えていくかを考えますと、プロジェクトの重要性がより一層高まっているということでございます。その 2029 年問題を解決するには、二つの分野にどう対応していくかというのが重要でありまして、一つは、今日もお話がありましたような業務用の冷凍冷蔵関係の分野、そしてもう一つは空調機分野ですね。空調機には家庭用、ビル用などいろいろありますけれど、以上の二つの分野で低 GWP 化を図っていかないと、2029 年問題はなかなか解決できないだろうと言われております。

その二つの分野での冷媒の低 GWP 化がこのプロジェクトの中でフォーカスされていて、様々な立場の人たちがそれに立ち向かっているという状況であります。まだまだ達成できるかはわからない、2029 年問題をクリアできるかどうかわからない状況でありますけれども、このプロジェクトが成功裏に終わって、解決の兆しが見えてくることを私は希望しております。

いずれまた事後評価のときにお会いすることになるかもしれませんが、そのときに期待して聞いていただければと思います。これはちょっと余計なことだったかもしれませんが、今後もよろしく願いいたします。

今日はありがとうございました。

**【齋藤 PL】** ありがとうございます。本当に今日は 1 日長い時間、貴重なアドバイスをいただきまして大変ありがとうございました。

今日もいろいろな冷媒も出てきましたが、かなり難しい冷媒も採用しなければいけない状況になるのだらうと改めて感じているところです。メーカーに対してはこのような難しい冷媒を採用する中でもどのような条件下でもきちんと性能が出るような機械を開発してもらおうということが、重要だと思っております。

私どもアカデミックの役割は、メーカーの皆様がいち早く低 GWP 冷媒を採用した製品が開発できるように、必要なデータを収集し、一般化をして、メーカーが設計に活用できるように基本的なデータベースとして積み上げていくことだと思っております。

いずれにしても世界的には低 GWP 化の動きが非常に早いので、それに日本としても乗り遅れないように NEDO の皆さんと私どもアカデミックが協力して進めていきたいと思っておりますので、また引き続きどうぞよろしくお願いいたします。

**【鹿園分科会長】** はい、どうもありがとうございました。それでは以上で議題 8 を終了とさせていただきます。



それではですね最後に、議題 9 として事務局から今後の予定等含めて事務連絡と NEDO 評価部の森嶋部長からご挨拶をお願いしたいと思います。

9. 今後の予定

10. 閉会

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する

質問票

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答	委員氏名 (敬称略)
【公開資料】 資料 5 10/49 ページ	将来的に HFC の量規制に加えて、GWP の重みを加味した規制が入る可能性や見通しについて、もしご存じであれば教えてください。	改正オゾン層保護法において規制する HFC の生産量・消費量は、GWP を加味して CO <sub>2</sub> 相当量に換算した数値となっております。また、本法の運用においては、低温温室効果製品の出荷等を行う事業者へのインセンティブ付与として、消費量の追加的割当てをすることとしており、対象とする低温温室効果製品の具体的な確認項目に従来製品と比べた GWP の低減効果等が含まれております。	鹿園 直毅
【公開資料】 資料 5 4～14/49 ページ	「事業の位置付け・必要性」の説明スライドで国際競争力の観点からの本事業の目的をご説明頂きたいと存じます。	キガリ改正(2016年)では、先進国は2036年までにHFCの生産及び消費量を85%削減する目標が示され、途上国においても2040年以降厳しい規制を求めています。一方、世界の冷凍空調機器市場では、途上国の経済水準の上昇により、市場が堅調に拡大すると予想されるとともに、途上国においては上記のキガリ改正のHFC生産・消費量削減目標の達成に当たり、2040年代以降に現行フロン製品からの更新需要が拡大すると見込まれます。その中で、日本において環境対応と安全性を兼ね備えた低GWP冷媒適用機器をいち早く開発して上市することで、新規購入・買い替えの際に日本製品の優位性が期待	涌井 徹也

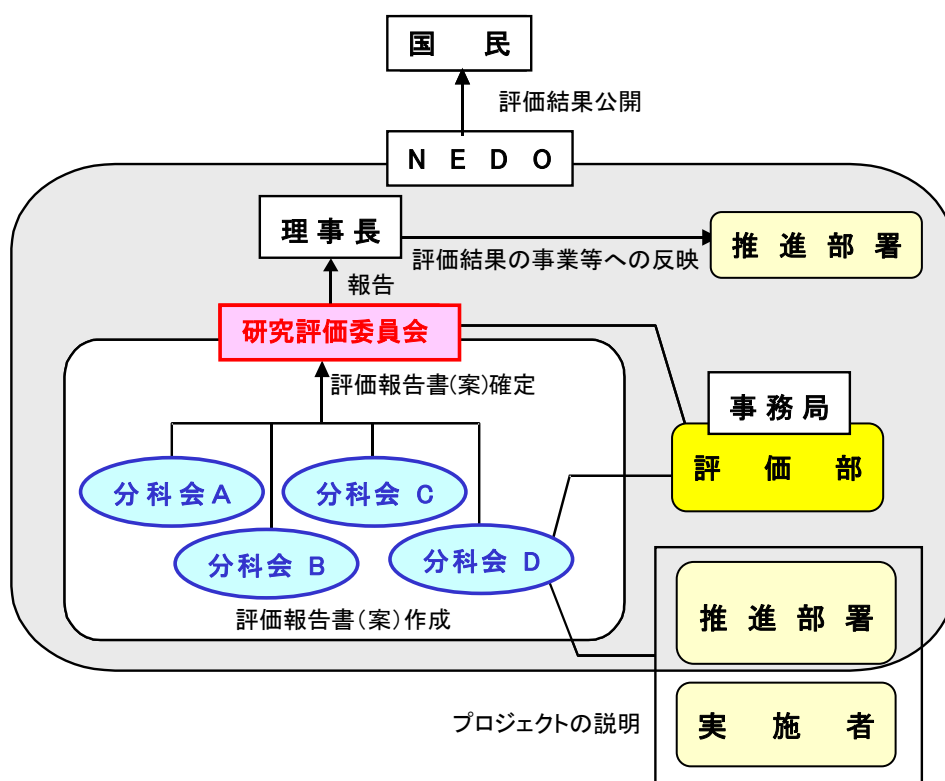
		できると思料いたします。	
事業原簿【公開】 I-12 ページ	2.1 については、NEDO が関与することの意義を明確にすることが目的だと思われませんが、2.1.2.3.3 では「そのような状況の中、当社では、逸早く・・・」と事業者側からの記述になっております。表現が適切かご確認していただきたいと存じます。	ご指摘の箇所は「2.1.2 分野別の対応状況」として、各テーマにおける課題と技術開発の必要性を、各テーマの実施者の立場で記載している部分となるため事業者側からの記述となっております。これを受けて、「2.1.3 技術的な課題と NEDO の関与する意義」において、NEDO で実施する意義を NEDO の立場から記載しております。	涌井 徹也
事業原簿【公開】 II-29 ページ	研究開発項目①, ②, ③では、複数の事業者に再委託を行っておりますが、事業者と再委託事業者間での連携はどのように行われておりますでしょうか。	事業者の実施するテーマにおいて、研究開発を効率的に実施し、かつ成果を最大化することを目的として、研究開発内容の一部を再委託先が担当しております。その観点から、研究開発の各段階において事業者及び再委託事業者間で、定期的なミーティング等で密な情報共有を行いながら、効率的な研究開発の実施を図っております。また、PL ヒアリング及び技術検討委員会等において、事業者、再委託事業者出席のもと、PL、NEDO による連携状況の確認や指導を行っております。	涌井 徹也
【公開資料】 資料 5 26～27, 31/49 ページ	これらの達成度および達成の見通しを見ると、何の問題もないように見えます。 リスクマネジメントの観点から、予測される懸念事項がありましたら、お教え願います。	助成事業では、3 年度目以降フィールド実証試験へ向けた研究開発段階へ進みます。フィールド実証において、試作検討段階で確認されなかった技術的課題が見つかった場合、実用化へ向けた開発スケジュールに遅れが発生することが懸念されます。	佐々木 直栄

## 参考資料 2 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて実施する。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)における研究評価では、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



## 1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
  - 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む
  - 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する
- としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

## 2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員は、以下のような観点から選定する。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、委員を分科会委員名簿の通り選任した。

なお、本分科会の事務局については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

## 3. 評価対象

「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」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。



#### 4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリング及び実施者側等との議論を行った。それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

#### 5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDOが定める「標準的評価項目・評価基準」をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

評価対象プロジェクトについて、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての取組や見通し等を評価した。

# 「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」に係る評価項目・評価基準

## 1. 事業の位置付け・必要性について

### (1) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献可能性等の観点から、事業の目的は妥当か。
- ・ 上位の施策・制度の目標達成のために寄与しているか。

### (2) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされると期待される効果は、投じた研究開発費との比較において十分であるか。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### (1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標を設定しているか。
- ・ 達成度を判定できる明確な目標を設定しているか。

### (2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール及び研究開発費（研究開発項目の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術の開発は網羅されているか。
- ・ 計画における要素技術間の関係、順序は適切か。

### (3) 研究開発の実施体制の妥当性【「事業化」は研究開発項目③にのみ適用】

- ・ 技術力及び事業化能力を有する実施者を選定しているか。
- ・ 指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能しているか。
- ・ 成果の実用化（・事業化）の戦略に基づき、実用化（・事業化）の担い手又はユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために実施者間の連携が必要な場合、実施者間の連携関係は明確であり、かつ機能しているか。

### (4) 研究開発の進捗管理の妥当性

- ・ 技術の取捨選択や技術の融合、必要な実施体制の見直し等を柔軟に図っているか。
- ・ 研究開発の進捗状況を常に把握し、遅れが生じた場合に適切に対応しているか。
- ・ 社会・経済の情勢変化、政策・技術の動向等を常に把握し、それらの影響を検討し、必要に応じて適切に対応しているか。

### (5) 知的財産等に関する戦略の妥当性

- ・ 知的財産に関する戦略は、明確かつ妥当か。
- ・ 知的財産や研究開発データに関する取扱についてのルールを整備し、かつ適切に運用しているか。
- ・ 国際標準化に関する事項を計画している場合、その戦略及び計画は妥当か。

### 3. 研究開発成果について

#### (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

- ・ 成果は、中間目標を達成しているか。
- ・ 中間目標未達成の場合、達成できなかった原因を明らかにして、解決の方針を明確にしているか。
- ・ 成果は、競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、汎用性等の顕著な成果がある場合、積極的に評価する。
- ・ 設定された目標以外の技術成果がある場合、積極的に評価する。

#### (2) 成果の最終目標の達成可能性

- ・ 最終目標を達成できる見通しはあるか。
- ・ 最終目標に向けて、課題とその解決の道筋は明確かつ妥当か。

#### (3) 成果の普及 【「事業化」は研究開発項目③にのみ適用】

- ・ 論文等の対外的な発表を、実用化（・事業化）の戦略に沿って適切に行っているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザーに向けて、成果を普及させる取組を実用化（・事業化）の戦略に沿って適切に行っているか。
- ・ 一般に向けて、情報を発信しているか。

#### (4) 知的財産権等の確保に向けた取組 【「事業化」は研究開発項目③にのみ適用】

- ・ 知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化（・事業化）の戦略に沿って国内外で適切に行っているか。
- ・ 国際標準化に関する事項を計画している場合、その計画は順調に進捗しているか。

### 4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて 【研究開発項目①、②に適用】

#### 「実用化」の考え方

冷媒の性能、安全性・リスク評価に係る公共的な知的基盤が整備され、社会的利用（規格化、標準化、データベース、アセスメント等への利用、産業界における研究開発への利用、他の研究開発への利用等）に供されること。

#### (1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・ 知的基盤・標準の整備及び活用の計画は、明確かつ妥当か。

#### (2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・ 知的基盤・標準を供給・維持するための体制の検討は進んでいるか。

### (3) 成果の実用化の見通し

- ・ 整備する知的基盤・標準について、利用の見通しはあるか。
- ・ 顕著な波及効果（技術的・経済的・社会的効果、人材育成等）を期待できる場合、積極的に評価する。

## 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 【研究開発項目③に適用】

### 「実用化・事業化」の考え方

実用化とは、現状市販フロン製品と同等以上の性能を実現する技術を確立し、その技術に基づく試作品等の社会的利用（顧客への提供等）が開始されることであり、事業化とは、当該研究開発に係る商品、製品等の販売や利用により、企業活動（売り上げ等）に貢献すること。

### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

- ・ 成果の実用化・事業化の戦略は、明確かつ妥当か。
- ・ 想定する市場の規模・成長性等から、経済効果等を期待できるか。

### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

- ・ 実用化・事業化に取り組む者について検討は進んでいるか。
- ・ 実用化・事業化の計画及びマイルストーンの検討は進んでいるか。

### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 実用化・事業化に向けての課題とその解決方針は明確か。
- ・ 想定する製品・サービス等は、市場ニーズ・ユーザーニーズに合致する見通しがあるか。
- ・ 競合する製品・サービス等と比較して性能面・コスト面等で優位を確保する見通しはあるか。
- ・ 顕著な波及効果（技術的・経済的・社会的効果、人材育成等）を期待できる場合、積極的に評価する。

## 「プロジェクト」の中間評価に係る標準的評価項目・基準

※「プロジェクト」の特徴に応じて、評価基準を見直すことができる。

「実用化・事業化」の定義を「プロジェクト」毎に定める。以下に例示する。

### 「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することをいう。

なお、「プロジェクト」が基礎的・基盤的研究開発に該当する場合は、以下のとおりとする。

- ・「実用化・事業化」を「実用化」に変更する。
- ・「4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて」は該当するものを選択する。
- ・「実用化」の定義を「プロジェクト」毎に定める。以下に例示する。

### 「実用化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることをいう。

## 1. 事業の位置付け・必要性について

### (1) 事業の目的の妥当性

- ・内外の技術動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献可能性等の観点から、事業の目的は妥当か。
- ・上位の施策・制度の目標達成のために寄与しているか。

### (2) NEDO の事業としての妥当性

- ・民間活動のみでは改善できないものであること又は公共性が高いことにより、NEDO の関与が必要とされる事業か。
- ・当該事業を実施することによりもたらされると期待される効果は、投じた研究開発費との比較において十分であるか。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### (1) 研究開発目標の妥当性

- ・内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標を設定しているか。
- ・達成度を判定できる明確な目標を設定しているか。

### (2) 研究開発計画の妥当性

- ・目標達成のために妥当なスケジュール及び研究開発費(研究開発項目の配分を含む)となっているか。
- ・目標達成に必要な要素技術の開発は網羅されているか。
- ・計画における要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・継続または長期の「プロジェクト」の場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んで活用を図っている

か。【該当しない場合、この条項を削除】

(3) 研究開発の実施体制の妥当性

- ・技術力及び事業化能力を有する実施者を選定しているか。
- ・指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能しているか。
- ・成果の実用化・事業化の戦略に基づき、実用化・事業化の担い手又はユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・目標達成及び効率的実施のために実施者間の連携が必要な場合、実施者間の連携関係は明確であり、かつ機能しているか。【該当しない場合、この条項を削除】
- ・目標達成及び効率的実施のために実施者間の競争が必要な場合、競争の仕組みがあり、かつ機能しているか。【該当しない場合、この条項を削除】
- ・大学または公的研究機関が企業の開発を支援する体制となっている場合、その体制は企業の取組に貢献しているか。【該当しない場合、この条項を削除】

(4) 研究開発の進捗管理の妥当性

- ・研究開発の進捗状況を常に把握し、遅れが生じた場合に適切に対応しているか。
- ・社会・経済の情勢変化、政策・技術の動向等を常に把握し、それらの影響を検討し、必要に応じて適切に対応しているか。

(5) 知的財産等に関する戦略の妥当性

- ・知的財産に関する戦略は、明確かつ妥当か。
- ・知的財産に関する取扱(実施者間の情報管理、秘密保持及び出願・活用ルールを含む)を整備し、かつ適切に運用しているか。
- ・国際標準化に関する事項を計画している場合、その戦略及び計画は妥当か。【該当しない場合、この条項を削除】

3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

- ・成果は、中間目標を達成しているか。
- ・中間目標未達成の場合、達成できなかった原因を明らかにして、解決の方針を明確にしているか。
- ・成果は、競合技術と比較して優位性があるか。
- ・世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、汎用性等の顕著な成果がある場合、積極的に評価する。
- ・設定された目標以外の技術成果がある場合、積極的に評価する。

(2) 成果の最終目標の達成可能性

- ・最終目標を達成できる見通しはあるか。
- ・最終目標に向けて、課題とその解決の道筋は明確かつ妥当か。

(3) 成果の普及

- ・論文等の対外的な発表を、実用化・事業化の戦略に沿って適切に行っているか。
- ・成果の活用・実用化の担い手・ユーザーに向けて、成果を普及させる取組を実用化・事業化の戦略に沿って適切に行っているか。



・一般に向けて、情報を発信しているか。

(4) 知的財産権等の確保に向けた取組

- ・知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化・事業化の戦略に沿って国内外に適切に行っているか。
- ・国際標準化に関する事項を計画している場合、その計画は順調に進捗しているか。【該当しない場合、この条項を削除】

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 【基礎的・基盤的研究開発の場合を除く】

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

- ・成果の実用化・事業化の戦略は、明確かつ妥当か。
- ・想定する市場の規模・成長性等から、経済効果等を期待できるか。

(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

- ・実用化・事業化に取り組む者について検討は進んでいるか。
- ・実用化・事業化の計画及びマイルストーンの検討は進んでいるか。

(3) 成果の実用化・事業化の見通し

- ・実用化・事業化に向けての課題とその解決方針は明確か。
- ・想定する製品・サービス等は、市場ニーズ・ユーザーニーズに合致する見通しがあるか。
- ・競合する製品・サービス等と比較して性能面・コスト面等で優位を確保する見通しはあるか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて 【基礎的・基盤的研究開発の場合】

(1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・成果の実用化の戦略は、明確かつ妥当か。

(2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・実用化に向けて、課題及びマイルストーンの検討は進んでいるか。

(3) 成果の実用化の見通し

- ・想定する製品・サービス等に基づき、市場・技術動向等の把握は進んでいるか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

【基礎的・基盤的研究開発の場合のうち、知的基盤・標準整備等を目標としている場合】

(1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・知的基盤・標準の整備及び活用の計画は、明確かつ妥当か。

(2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・知的基盤・標準を供給・維持するための体制の検討は進んでいるか。

(3) 成果の実用化の見通し

- ・整備する知的基盤・標準について、利用の見通しはあるか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

### 参考資料 3 評価結果の反映について

「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」（中間評価）の評価結果の反映について

評価のポイント	反映（対処方針）のポイント
<p>① 委託事業である物性評価・安全性評価においては、継続的な研究が重要であり、知見集積、人材育成、状況変化への対応は必要である一方、研究リソースは限られることから、今後の研究内容については優先順位を精査し、必要な研究はさらに加速化して行っていただきたい。</p> <p>② キガリ改正に対する課題解決のための冷媒候補としては、不均化反応や燃焼性、毒性の問題で解決しなければならない課題が残っており、本研究開発の後半2年間で着実に開発していくことを期待したい。</p> <p>③ 安全性・リスク評価の研究成果は重要であり、当該研究成果を踏まえて、産学間の関係強化をより一層進め、合理的なリスクマネジメント対策についても検討して頂くのが望ましく、安全性検討に際しては、実態に即した合理的な評価結果を一般にも解りやすい形で情報提供をして頂きたい。</p>	<p>① 事業者ヒアリング及び技術検討委員会において事業進捗を確認し、プロジェクトリーダー、技術検討委員等の意見を踏まえ、研究リソースの選択と集中によりプロジェクト成果の最大化へ向けたマネジメントを実施する。</p> <p>② 冷媒・機器開発テーマについては、実施事業者との密なコミュニケーションに基づき、成果を最大化するための着実なマネジメントを引き続き実施していく。また、次世代冷媒の基本特性評価や安全性・リスク評価手法の開発成果についても、冷媒・機器開発に資することを念頭に、積極的に公表していくようマネジメントしていく。</p> <p>③ 実態に即した合理的な安全性・リスク評価と、それを踏まえたリスクマネジメント対策の検討に資するべく、本プロジェクトの参画研究機関と業界団体等との産学間での連携を推進し、その連携のもとで得られた成果を一般へ効果的に発信することを目的とした調査事業を実施中であり、引き続き着実にマネジメントしていく。</p>

評価のポイント	反映（対処方針）のポイント
<p>④ 実運転性能評価装置を用いた次世代空調機器の様々な性能評価を推進し、次世代冷媒の安全性を担保した上で、安全性・リスク評価の成果に基づいて、複数件の国際規格への提案をすることで、国際規格化・標準化に貢献していただきたい。</p> <p>⑤ 研究成果のデータベースなどを一般向けに公開していくことを推進していただきたい。</p>	<p>④ 業界団体等との連携を強力に進めることで、国際標準化・国際規格化等への提案に資するよう研究成果を最大化するマネジメントを引き続き実施していく。</p> <p>⑤ 熱交換器の設計に有用な伝熱データベースの作成や国際データベース (REFPROP) への成果の反映など、次世代冷媒の基本特性評価で得られたデータの積極的な公開を図っていくようマネジメントしていく。</p>

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部

部長 森嶋 誠治

担当 笹川 克義

\* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

([https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu\\_index.html](https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html))

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5160 FAX 044-520-5162