

事業概要 (評価Gr.)

〈個別事業名〉 低GWP混合冷媒のシステム評価手法開発

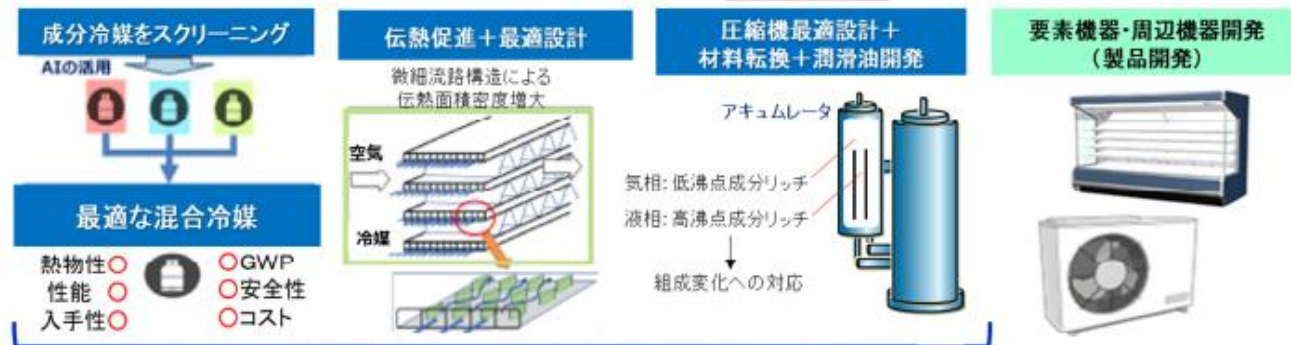
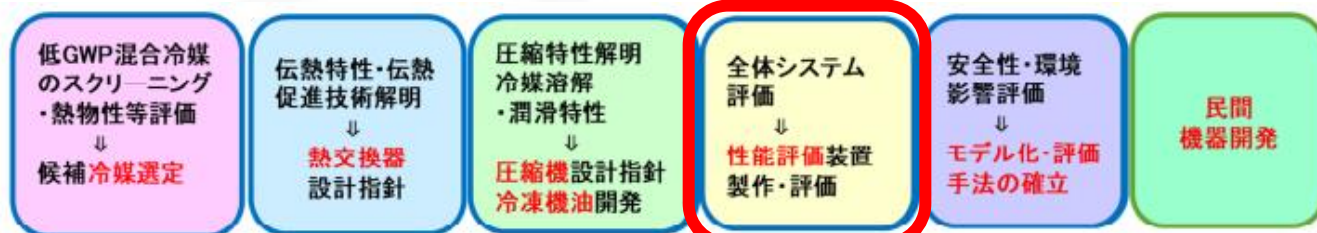
〈事業期間〉 2023年4月～2028年3月

〈事業概要〉 本研究では、空調機器のシミュレーション技術にデバイスモデルの追加や高精度化、最適化技術を加えて高度化し、次世代低GWP混合冷媒を採用した機器性能を実機レベルで比較分析が可能な技術へと発展させる。これらは、最適化検証装置によって妥当性検証がなされる。さらに、精度向上がなされた実運転性能試験装置を含め、ドロップイン試験などではなく、公平な評価基準の中で次世代冷媒機器を理論と実機の両面から性能評価が可能な体制を整える。

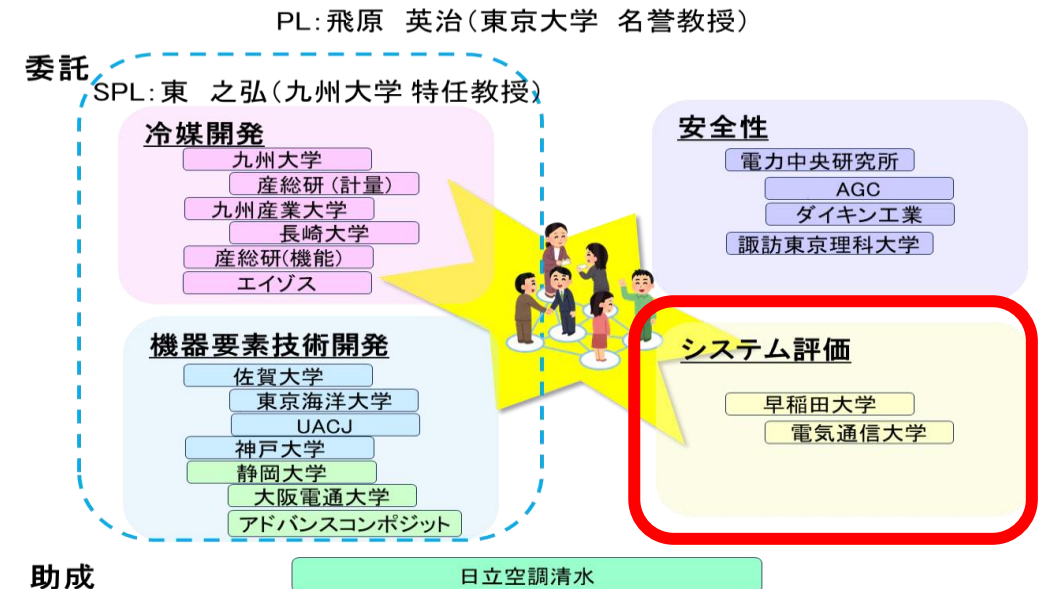
技術課題① : 実機レベルで性能評価が可能なシミュレーション技術 (冷凍サイクル実機シミュレーション技術研究開発)

技術課題② : 実機レベルで想定される製造上の制約条件を加味した最適化技術 (冷凍サイクルシミュレーターの最適化技術研究開発)

技術課題③ : 次世代冷媒機器の性能面からの評価が可能な冷凍サイクルシステム評価技術 (冷凍サイクルシステム評価技術研究開発)



性能評価装置により全体評価を実施。結果を各研究にフィードバック

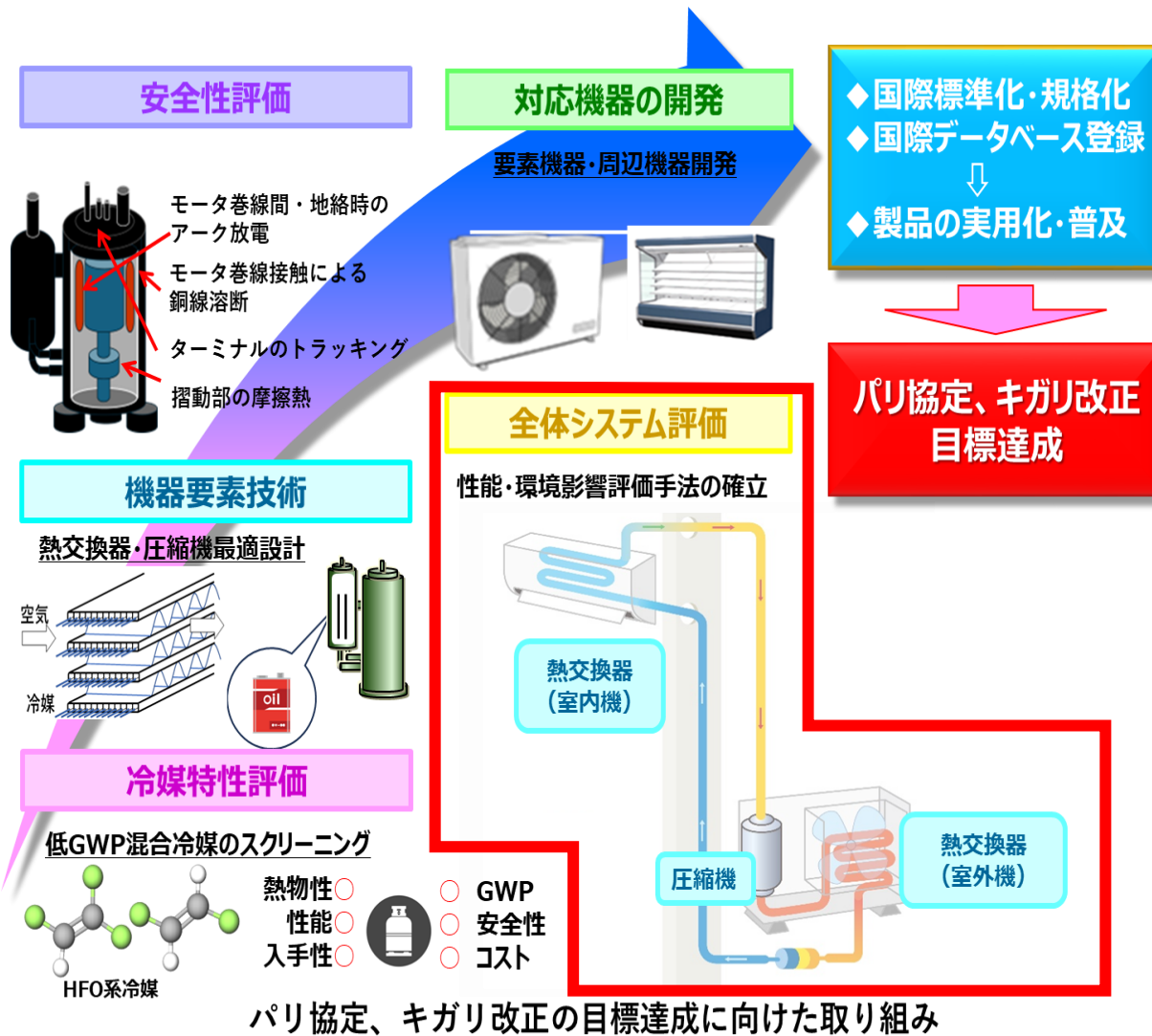


背景・目的・プロジェクトアウトカム目標との関係

● **背景**：未だ次世代冷媒候補が見つからない家庭用・業務用空調機に対する低GWP冷媒の選定には、それら冷媒を導入した機器の性能を公平に評価する必要がある。しかし、製品もまだ開発されていない現状では、評価条件次第でいかような結果も得られてしまう状況である。

● **目的**：次世代冷媒導入機器を含め、実機レベルでの機器性能を評価可能なシミュレーション技術、高精度実運転評価技術を確立することによって、公平公正に次世代冷媒の機器性能を評価できる体制を構築し、高性能な次世代冷媒導入機器の早期上市に貢献。

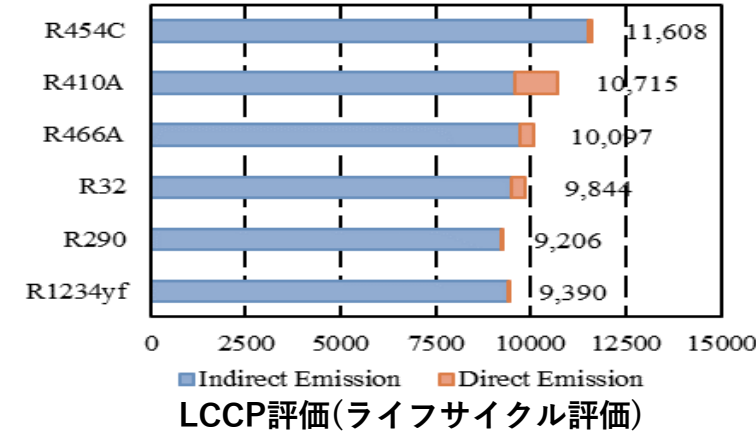
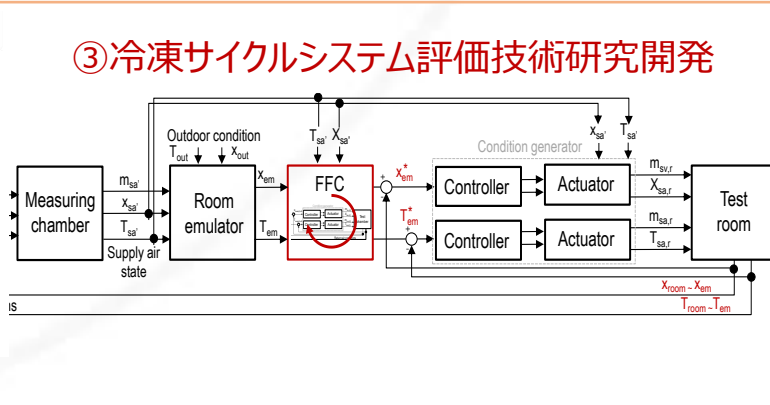
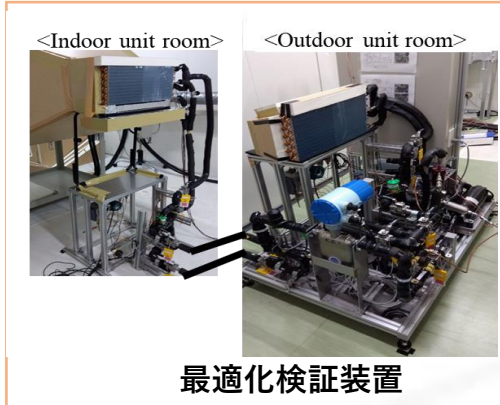
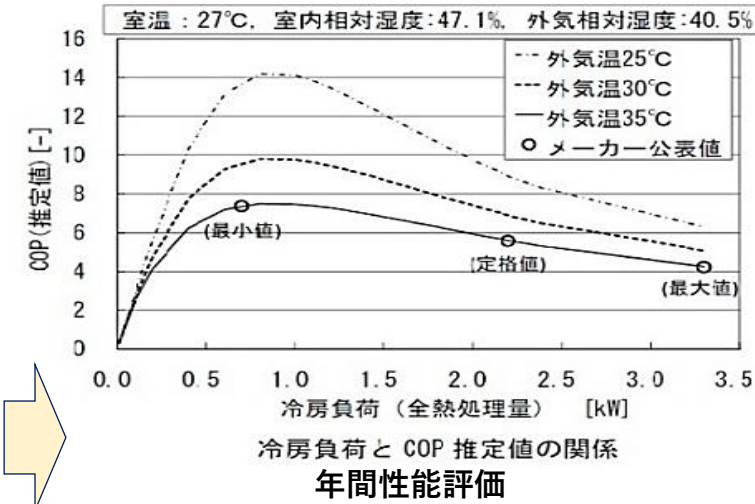
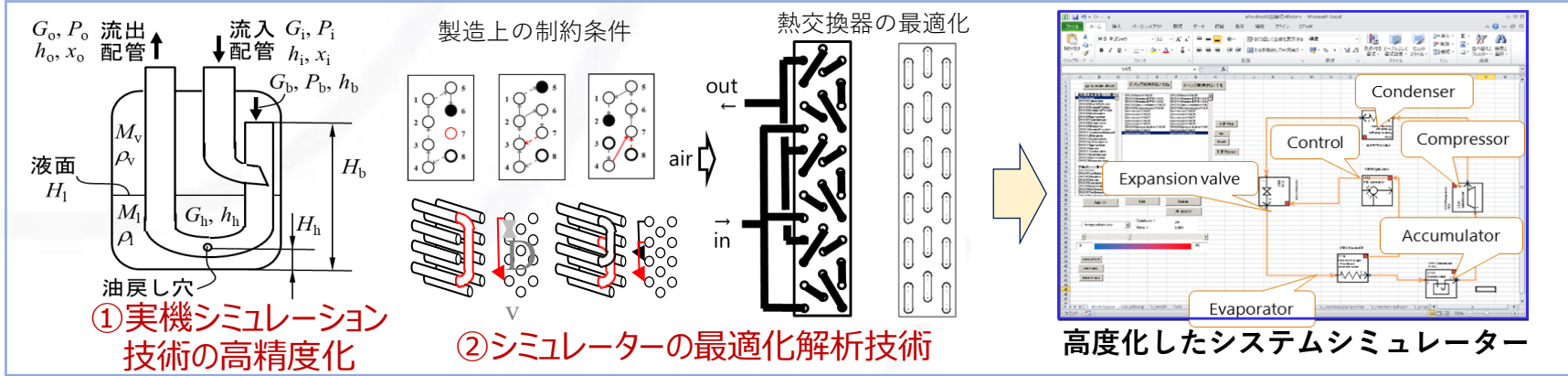
● **規格・標準化・指針等との関係**：
多様な冷媒に対し機器の性能が高精度に評価できる理論としてのシミュレーション技術、実機評価技術を開発することによって性能評価技術の国際標準化や規格化を目指す。



研究開発項目

	委託	再委託	研究開発項目	事業者
評価G	評A-1		次世代冷媒を採用した冷凍サイクルの性能評価研究開発	学校法人早稲田大学
		評A-2	冷凍サイクルシミュレーター用AI最適化アルゴリズムの開発	国立大学法人電気通信大学

<実施内容>：シミュレーション技術や機器性能評価技術をさらに高度化することによって、公平な評価基準の中で次世代冷媒機器を理論と実機の両面から性能面から評価可能な体制を整える。



実施体制

NEDO



早稲田大学

研究実施場所：
理工学術院（西早稲田キャンパス、早稲田キャンパス、喜久井町キャンパス）

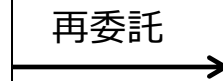
研究開発項目：
評A-1: 次世代冷媒を採用した冷凍サイクルの性能評価研究開発

評A-1-1 冷凍サイクル実機シミュレーション技術研究開発

評A-1-2 冷凍サイクルシミュレーターの最適化技術研究開発

評A-1-3 冷凍サイクルシステム評価技術研究開発

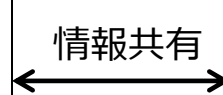
評A-1-4 他事業者・外部との連携、国際標準化・規格化への取り組み



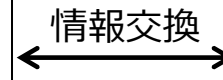
電気通信大学

研究実施場所：
調布キャンパス(調布)

研究開発項目：
評A-2 冷凍サイクルシミュレーター用AI最適化アルゴリズムの開発



日本冷凍空調工業会、エイゾス
NEDO次世代冷媒システム評価委員会（早稲田大学主催）



日本冷凍空調工業会
冷媒評価WG（日冷工主催）
LCCPWG（日冷工主催）
次世代エアコン性能規格検討分科会（日冷工主催）

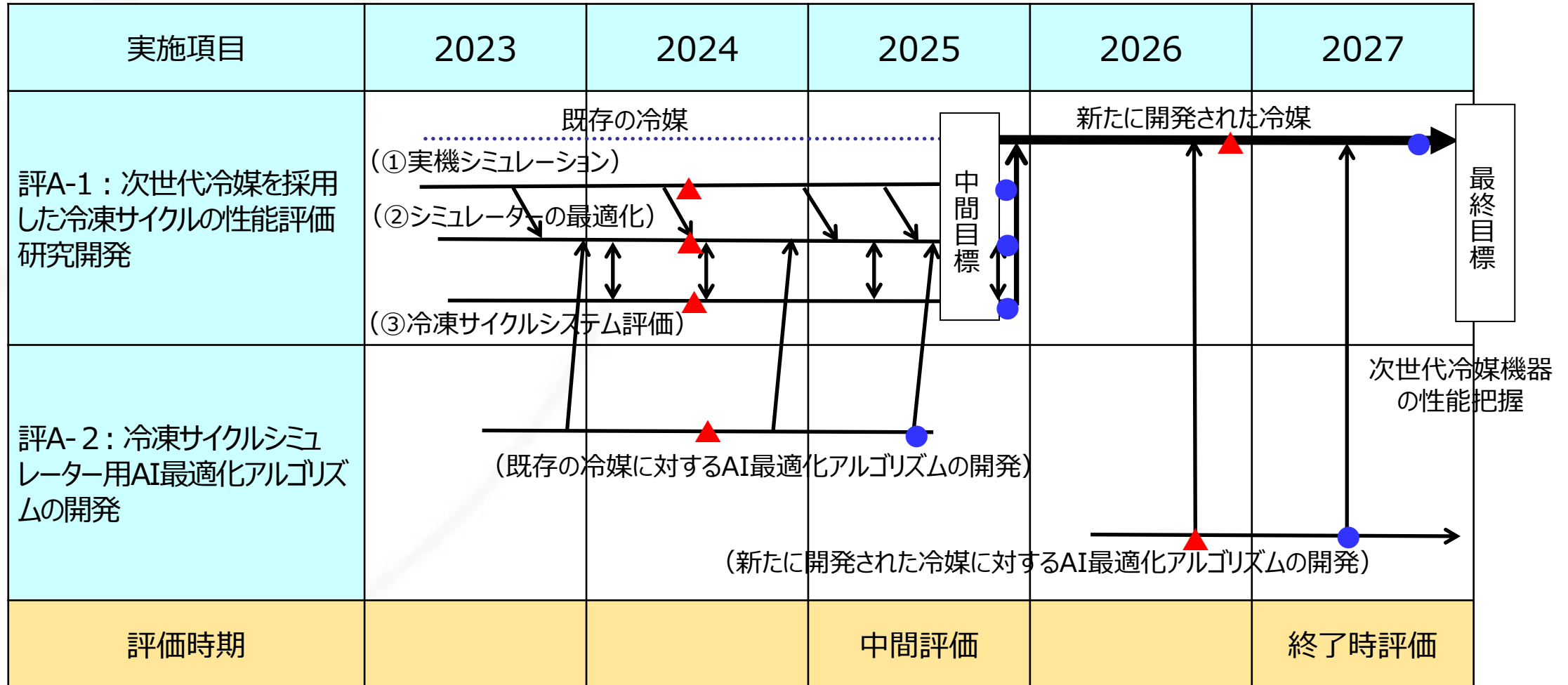
実施概要と目標（中間・最終）と根拠

実施項目	実施内容	事業者	中間目標	最終目標	根拠
評価Gr	低GWP混合冷媒のシステム評価手法開発	—	物性が整備されている従来冷媒を主たる対象として実機レベルの機器性能をシミュレーションと性能評価装置にて検証し、5%程度の精度で実現	各Grが開発した次世代冷媒に対して本Grが開発したシミュレーターや性能評価装置にて検証し、5%程度の精度で実現（各Grにフィードバックしながら改善）	最適化された熱交換器シミュレーターと候補冷媒の選定の上では環境影響評価も含めて総合的な判断が必要である。 対応機器の開発加速化のためには、実用に即した評価手法の確立が必要である。
	次世代冷媒を採用した冷凍サイクルの性能評価研究開発	(学) 早稲田大学	<ul style="list-style-type: none"> 最適化熱交換器シミュレーター開発 高度システムシミュレーター開発 妥当性検証装置の開発と妥当性確認実験 	物性が整備された次世代冷媒も対象として実機レベルの機器性能を予測可能とし、冷媒性能の比較検討を実施する。	実機としての評価が可能となるシミュレーターや評価装置を開発することによって、いち早い機器性能評価を可能とする。。
	冷凍サイクルシミュレーター用AI最適化アルゴリズムの開発	(国) 電気通信大学	熱交換器最適化に対して、実際に製造する工程における各種の制約条件を考慮した新アルゴリズムの構築	製作上実現可能な条件下での熱交換器の最適化を実現するアルゴリズムの開発、改良	実機として実現性ある熱交換器分析が可能となるように、熱交換器シミュレーターに搭載する熱交換器の最適化を実現するアルゴリズムの実現。

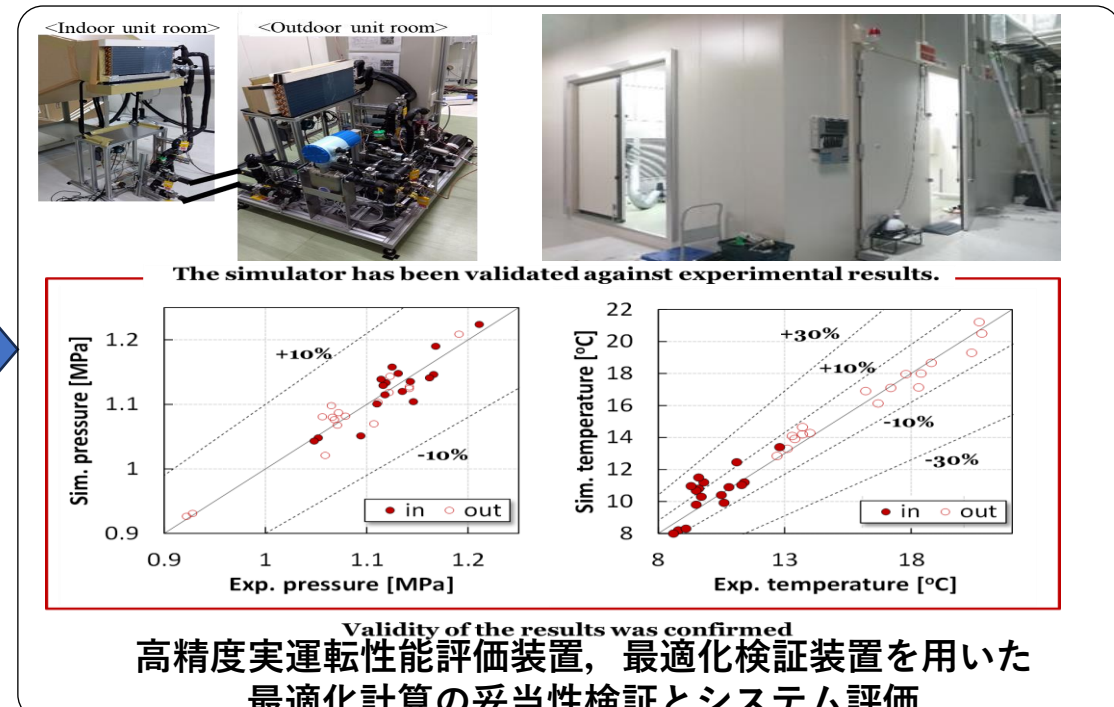
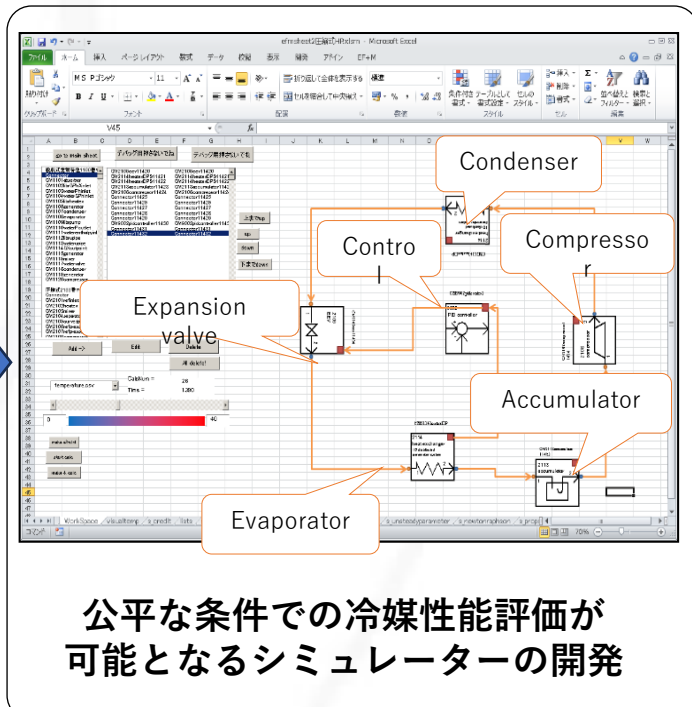
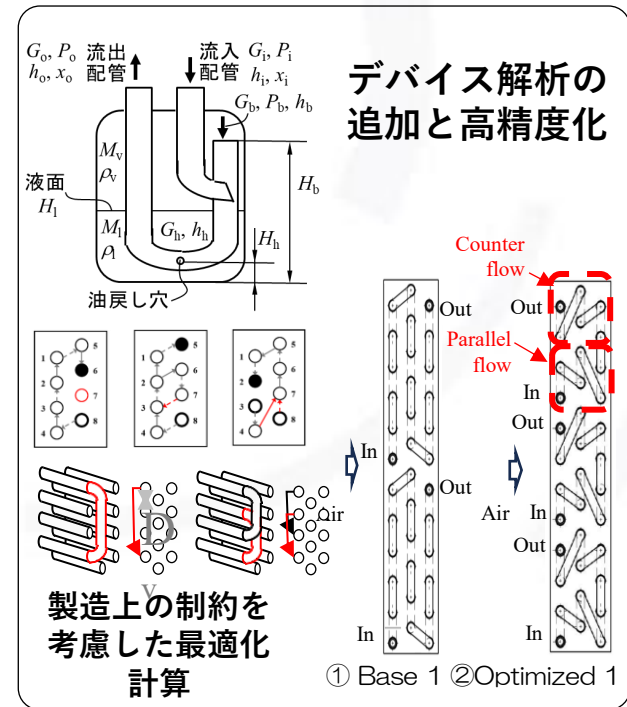
研究開発スケジュール

▲ : 基本原理確認

● : 基本技術確立



成果と意義：【評A-1】次世代冷媒を採用した冷凍サイクルの性能評価研究開発



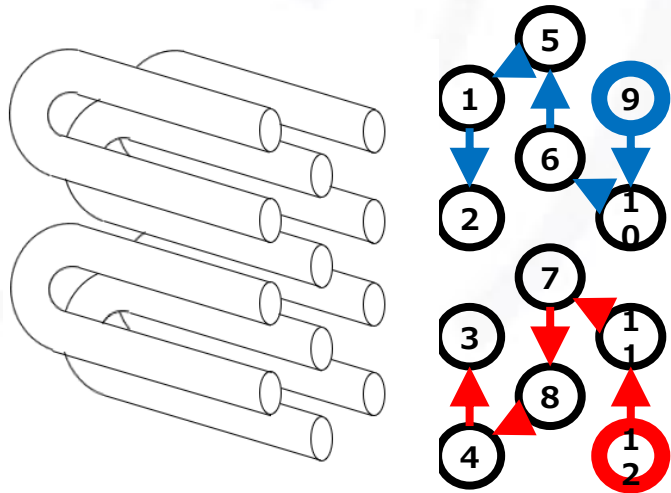
- ## 成果
- アキュムレーターやプレート熱交換器モデルの改良や拡充によるシステムシミュレーターの高度化
 - 妥当性が確認された中でもしかも製作が可能な条件下でシミュレーターによる機器性能の分析実現
 - 非共沸を含む各種冷媒の性能比較(既存冷媒)

- ## 意義
- 実機として製作が可能な実現性あるなかでの最適化を実現
- 各種冷媒ごとに最適化された機器による公平な条件での機器性能の評価や比較が可能
 - 日本冷凍空調工業会における標準ツール化
 - システム性能評価法の国際規格化

成果と意義：【評A-2】冷凍サイクルシミュレーター用AI最適化アルゴリズムの開発

評A-2 AI最適化アルゴリズムの開発

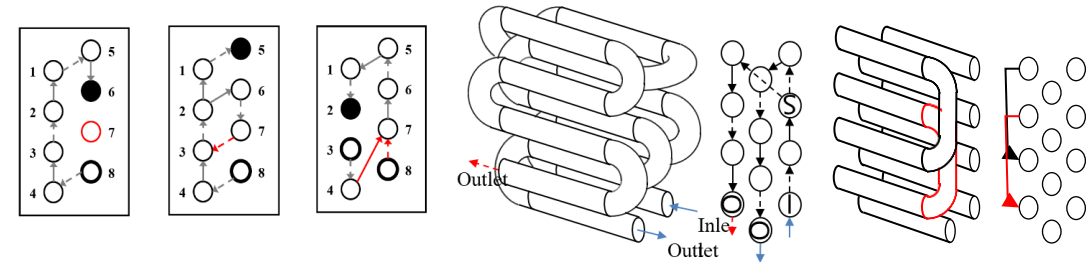
熱交換器のベント管に対する製造上の物理的制約条件をAI最適化アルゴリズムへ反映



制約を入れることにより、実現不可能な最適化結果になる可能性が減少するとともに、最適化対象の探索範囲が大幅に縮小
→ 最適化に必要な時間短縮が見込まれる

制約条件については、日冷工と情報交換により集約

＜制約条件の例＞



成果

- AI最適化アルゴリズムを開発した
- 熱交換器を実際に製造する工程における各種の制約条件について網羅的に洗い出した。
- 日冷工と情報交換により、最終的に10の制約（1つは必須、9つはオプション）を整理した。

意義

- 評A-1-2に、開発したアルゴリズムを実装することによって実機製作上の制約を考慮した熱交換性能を解析できる熱交換器シミュレーターが実現
- 既存の低GWP冷媒ごとに最適化した冷凍空調機器による公平な条件での冷媒性能評価が可能

目標達成状況（中間年度見通し）

◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 一部未達、× 未達

実施項目	実施内容	事業者	目標（2026年3月）	成果（2026年3月）	達成度（見込み）	達成の根拠／解決方針
評価Gr	低GWP混合冷媒のシステム評価手法開発	—	<ul style="list-style-type: none"> ■ 最適化検証装置の製作とこれを用いた最適化計算の妥当性検証 ■ 最適化した熱交換器を用いたLCCP等の評価 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 物性が整備されている従来冷媒を主たる対象として実機レベルの機器性能を5%程度の精度で実現。 	○ 2026年3月達成見込み	<ul style="list-style-type: none"> ■ 当初目標を達成。 ■ 国際規格化も順調に進めている
	次世代冷媒を採用した冷凍サイクルの性能評価研究開発	（学）早稲田大学	物性が整備されている従来冷媒を主たる対象として実機レベルの機器性能を5%程度の精度で予測可能とする	物性が整備されている従来冷媒を主たる対象として実機レベルの機器性能を5%程度の精度で予測可能を実現	○ 2026年3月達成見込み	目標通りのため達成と評価
	冷凍サイクルシミュレーター用AI最適化アルゴリズムの開発	（国）電気通信大学	熱交換器最適化に対して、実際に製造する工程における各種の制約条件を考慮した新アルゴリズムを構築する	熱交換器最適化に対して、実際に製造する工程における各種の制約条件を考慮した新アルゴリズムの構築	○ 2026年3月達成見込み	目標通りのため達成と評価

成果と意義 (中間年度見通し)

G_o, P_o, h_o, x_o 流出配管
 G_i, P_i, h_i, x_i 流入配管
 G_b, P_b, h_b
 M_v, ρ_v, H_1
 M_l, ρ_l, H_h
 液面
 油戻し穴

デバイス解析の追加と高精度化
 ① Base ② Optimized
最適化計算
 製造上の制約を考慮した最適化アルゴリズム

Condenser
 Compresso
 Accumulator
 Evaporator
 Expansion valve
 Contro

公平な条件での冷媒性能評価が可能となるシミュレーターの開発

<Indoor unit room> <Outdoor unit room>

The simulator has been validated against experimental results.

Sim. pressure [MPa] vs Exp. pressure [MPa]
 Sim. temperature [°C] vs Exp. temperature [°C]

Validity of the results was confirmed
高精度実運転性能評価装置、最適化検証装置を用いた最適化計算の妥当性検証とシステム評価

- ### 成果
- 実機が存在しない中でも、実機レベルの評価を可能とするシステムシミュレーター実現に向けた改良や拡充
 - 妥当性が確認された中でもしかも製作が可能な条件下でシミュレーターによる機器性能の分析実現
 - 非共沸を含む各種冷媒の性能比較(既存冷媒)

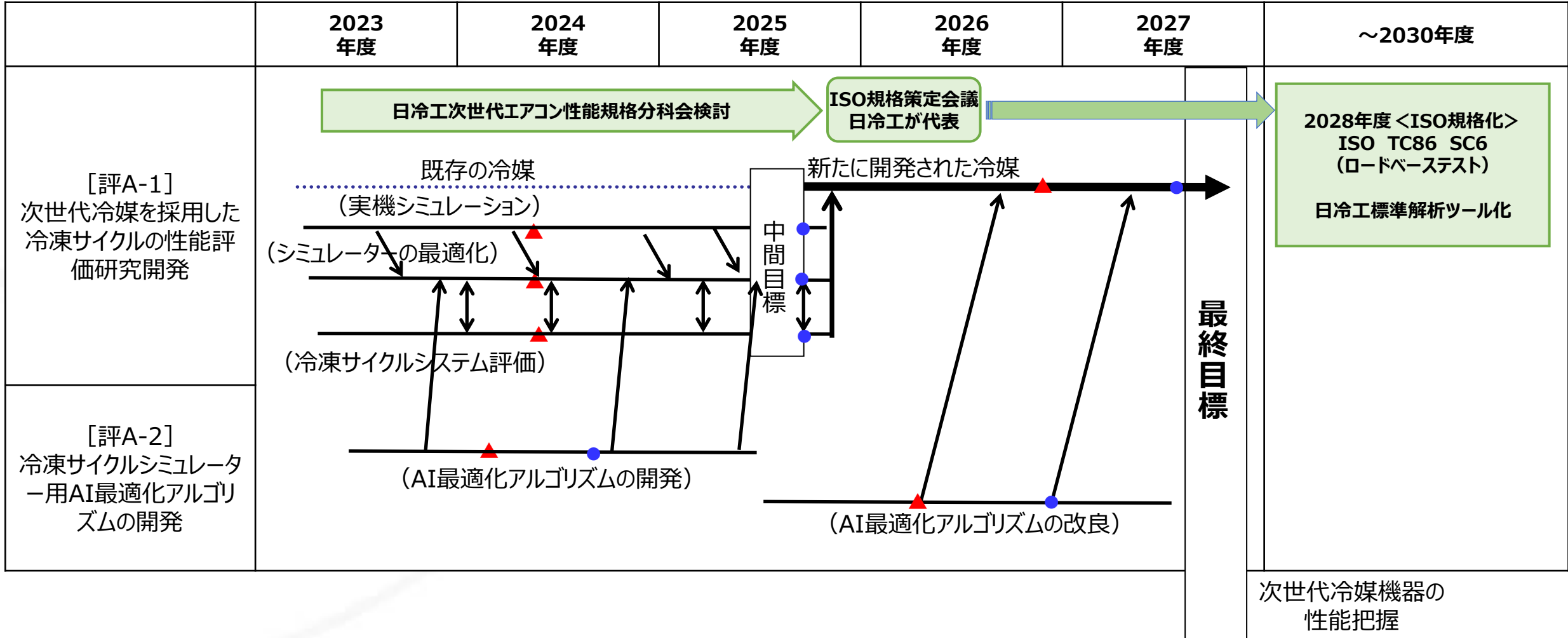
- ### 意義
- 実機として製作が可能な実現性あるなかでの最適化を実現
 - 各種冷媒ごとに最適化された機器による公平な条件での機器性能の評価や比較が可能
 - 日本冷凍空調工業会における標準ツール化
 - 機器評価法の国際規格化

アウトカム達成に向けた戦略・具体的取組

＜ロードマップイメージ＞

▲：基本原理確認

●：基本技術確立



補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

評A-1-2 最適化技術 (最適化計算)

<各年度の目標>

- **2023年度目標** : 最適化熱交換器シミュレーターの構築
- **2024年度目標** : 実機製作上の制約を考慮した熱交換器シミュレーターの開発

達成状況 : 実機製作上の制約を考慮した熱交換器シミュレーターを開発

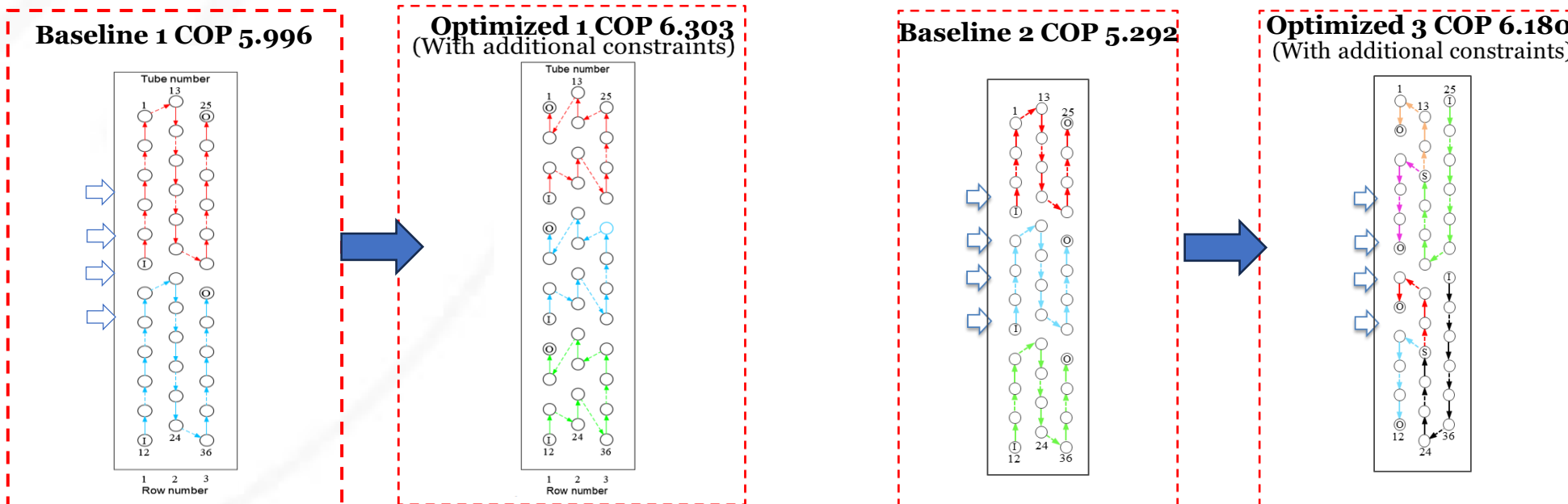
(現在までに解析した冷媒は、R410A、R32、R454C. 各パラメーターをチェック中)

<達成状況>

解析結果例

R32 (4kW) ($T_{\text{cond}} = 35^{\circ}\text{C}$, $\eta_{\text{ad}} = 0.72$)

R454C 4kW ($T_{\text{cond}} = 35^{\circ}\text{C}$, $\eta_{\text{ad}} = 0.72$)



<2025年度の計画>

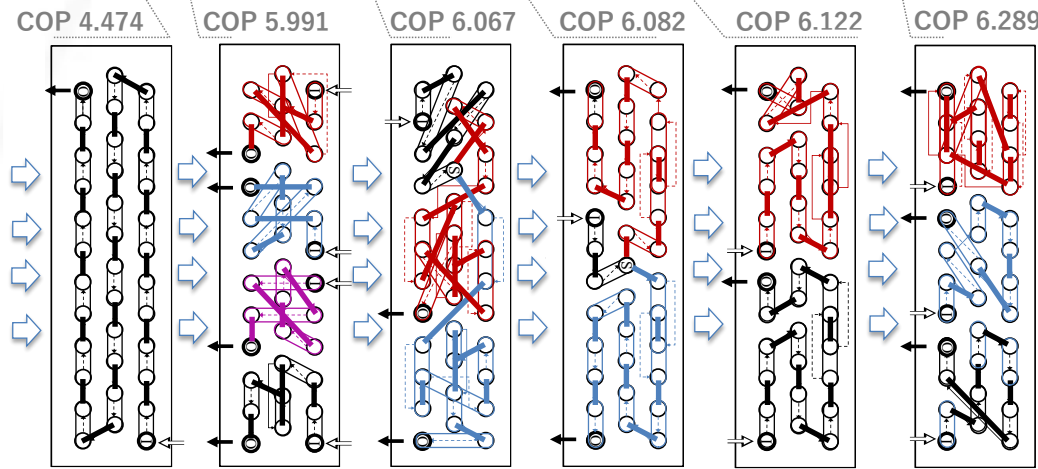
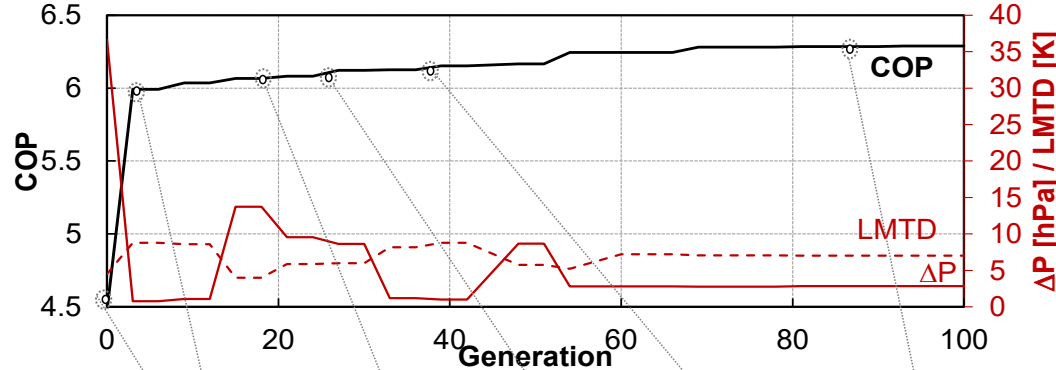
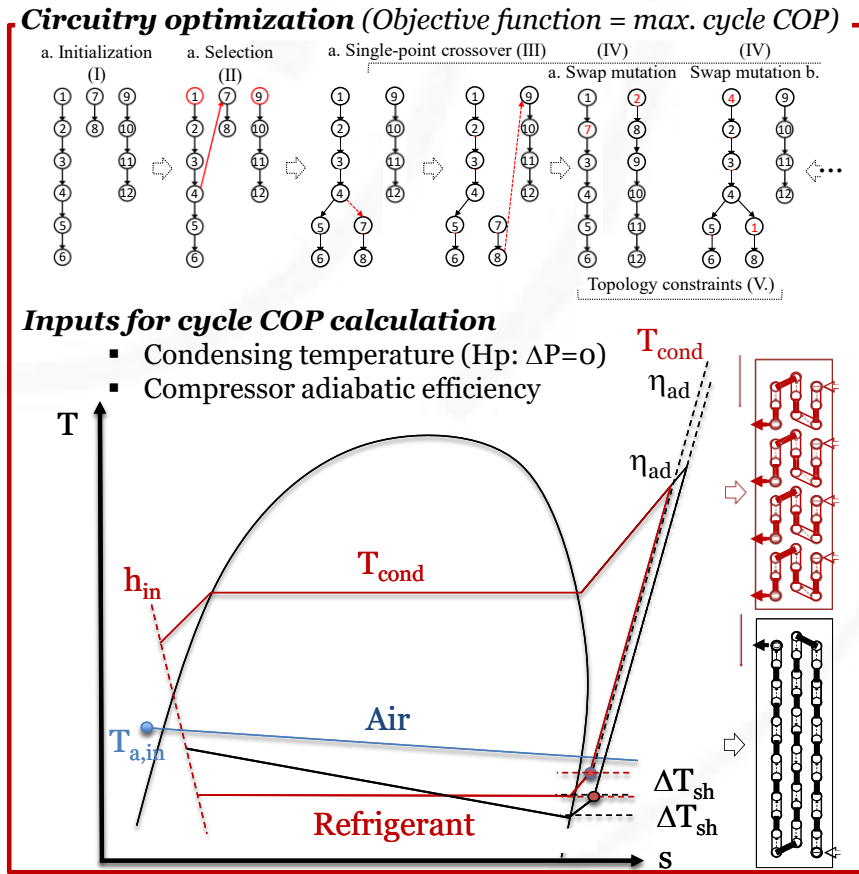
さらに最適化の妥当性検証を進める。

熱交換器シミュレーターで実機製作上の制約を考慮して最適化されたパス形状における熱交換器の効率向上効果が確認できた。

補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

<達成状況詳細>

熱交換器最適化アルゴリズムを搭載したシミュレーターの探索世代による冷媒パスとCOPの推移 (例)



探索世代の進展により、冷媒パスが整理されつつあり、かつ、COPが向上していきることがわかる。

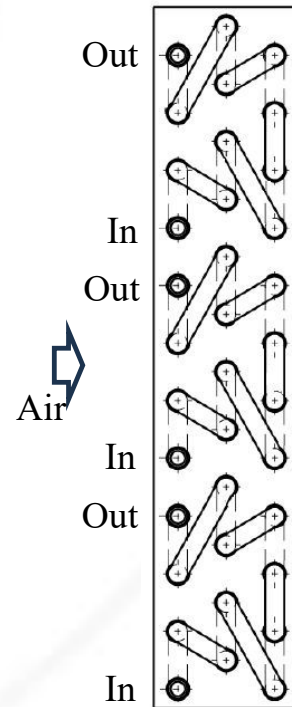
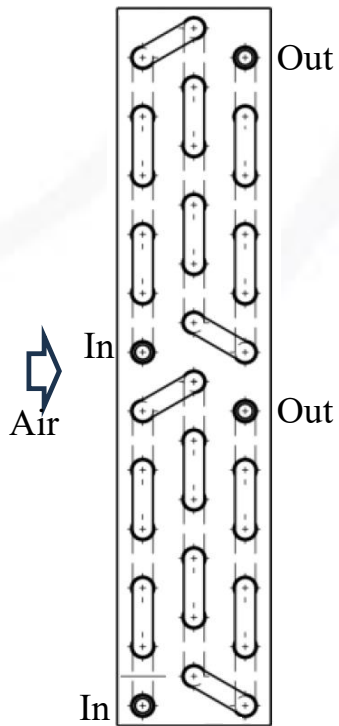
補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

<達成状況詳細：シミュレーション結果>

The benefit of optimized circuitries was verified experimentally supporting the validity of the algorithm

Exp 3.1 (base) Q 3.95kW

Exp 5.1 (Opt.) Q 4.01kW

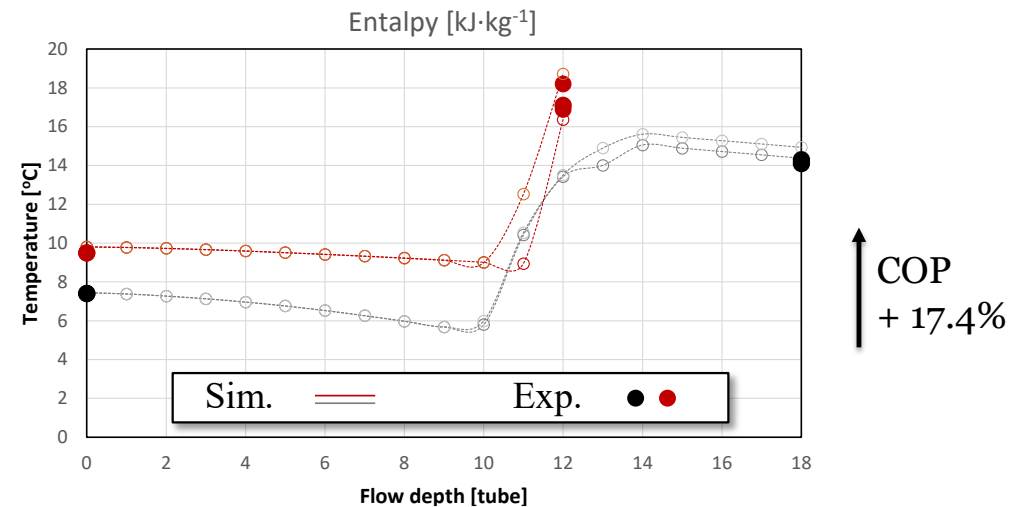
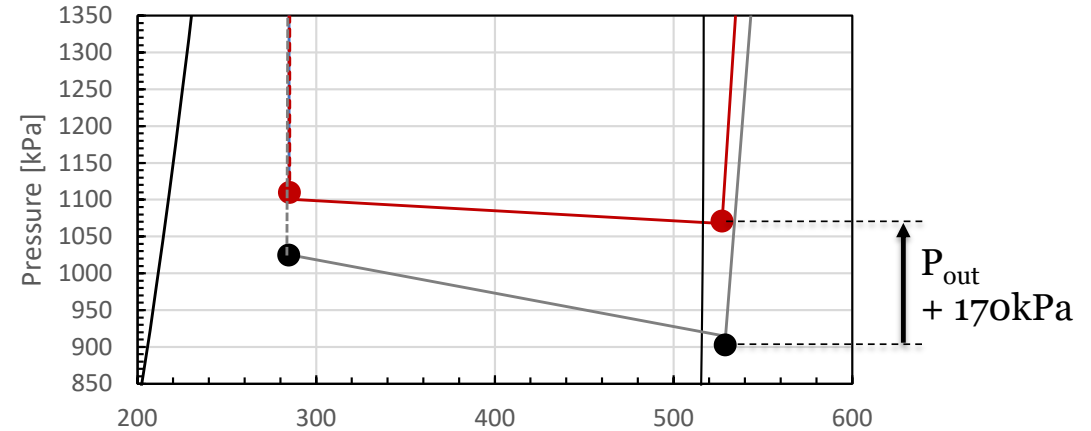


T_{cond} 52.5 °C
SC 7.9K

SH 10.9K
 V_{air} 2.08m/s

T_{cond} 52.1 °C
SC 7.4K

SH 8.3K
 V_{air} 2.11m/s



補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

評A-1-3 冷凍サイクルシステム評価 (妥当性検証)

<各年度の目標>

- **2023年度目標** : 妥当性検証のための最適化検証装置の構築
 - **2024年度目標** : 熱交換器シミュレーターで得られた結果に対する妥当性検証の実施
- 達成状況** : 熱交換器シミュレーターで得られた結果に対する妥当性検証を実施した (R32で3種類、R454Cで2種類の熱交換器の試験をする)

<達成状況>

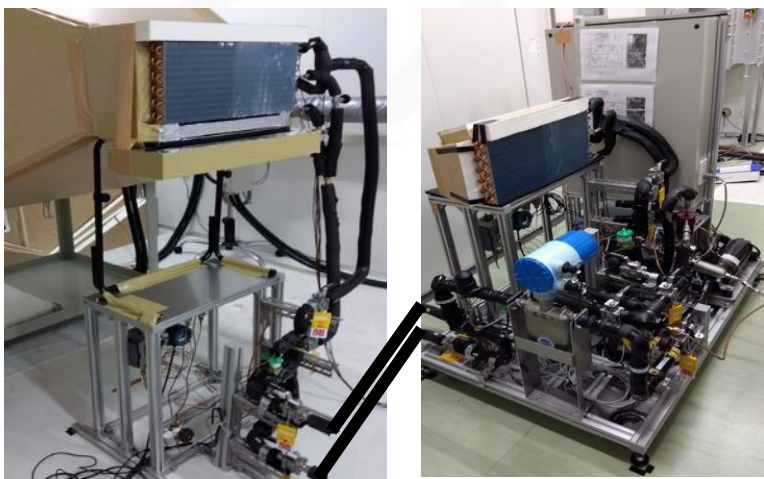
最適化検証装置を用いて、製作した熱交換器の評価を実施。

<Indoor unit room>

<Outdoor unit room>

R32 : ① Base 1、②Optimized 1、③Optimized 2

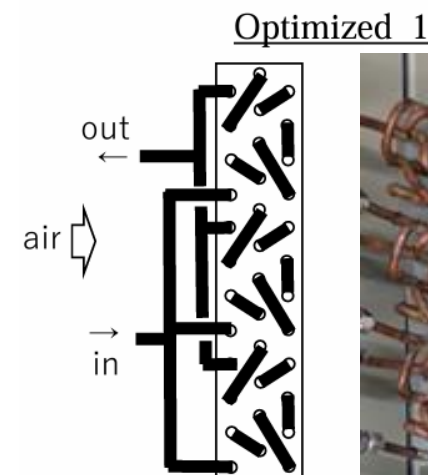
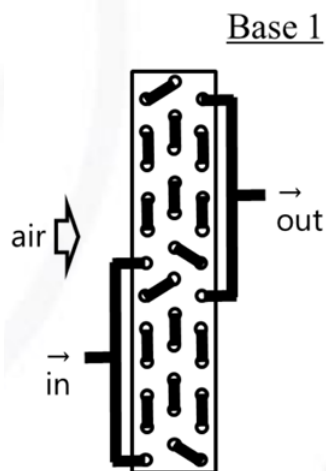
R454C : ①Base 2、②Base 2 -C、 (③Optimized 3)



2023年度に構築した最適化検証装置

<2025年度の計画>

R32, R454Cを対象として、妥当性検証のための実験を実施



補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

＜達成状況詳細：実験結果＞

測定データのうち凝縮器出口過冷却度がほぼ同じデータを比較する。いずれも、環境条件は、室内DB27℃/WB19℃、室外DB29℃/WB19℃である。

Item	Base 1		Optimized 1	
Cooling capacity (kW)	3.950	3.052	4.008	3.038
Compressor discharge pressure (MPa)	3.366	2.966	3.390	2.897
Degree of subcooling (°C)	7.9	8.5	7.4	7.0
Evaporator differential pressure (kPa)	118.0	53.4	34.5	18.8
Evaporator inlet enthalpy (kJ/kg)	284.7	272.3	285.0	273.5
Evaporating temperature (°C)	5.4	9.3	9.5	10.8
Degree of superheat of evaporator outlet (°C)	10.9	4.5	8.3	8.3
Compressor suction pressure (MPa)	0.858	1.038	1.038	1.106
Compressor rotational speed (rps)	63.0	40.0	53.5	37
Refrigerant mass flow rate (kg/h)	58.20	43.86	59.56	43.06
Air velocity of evaporator (m/s)	2.08	1.64	2.11	1.63

(冷媒：R32)

Cooling capacity		4.0 kW	3.0 kW
COP	①Base 1	3.213	4.608
	②Optimized 1	3.869	5.025
	Improvement rate	+20.5%	+9.1%

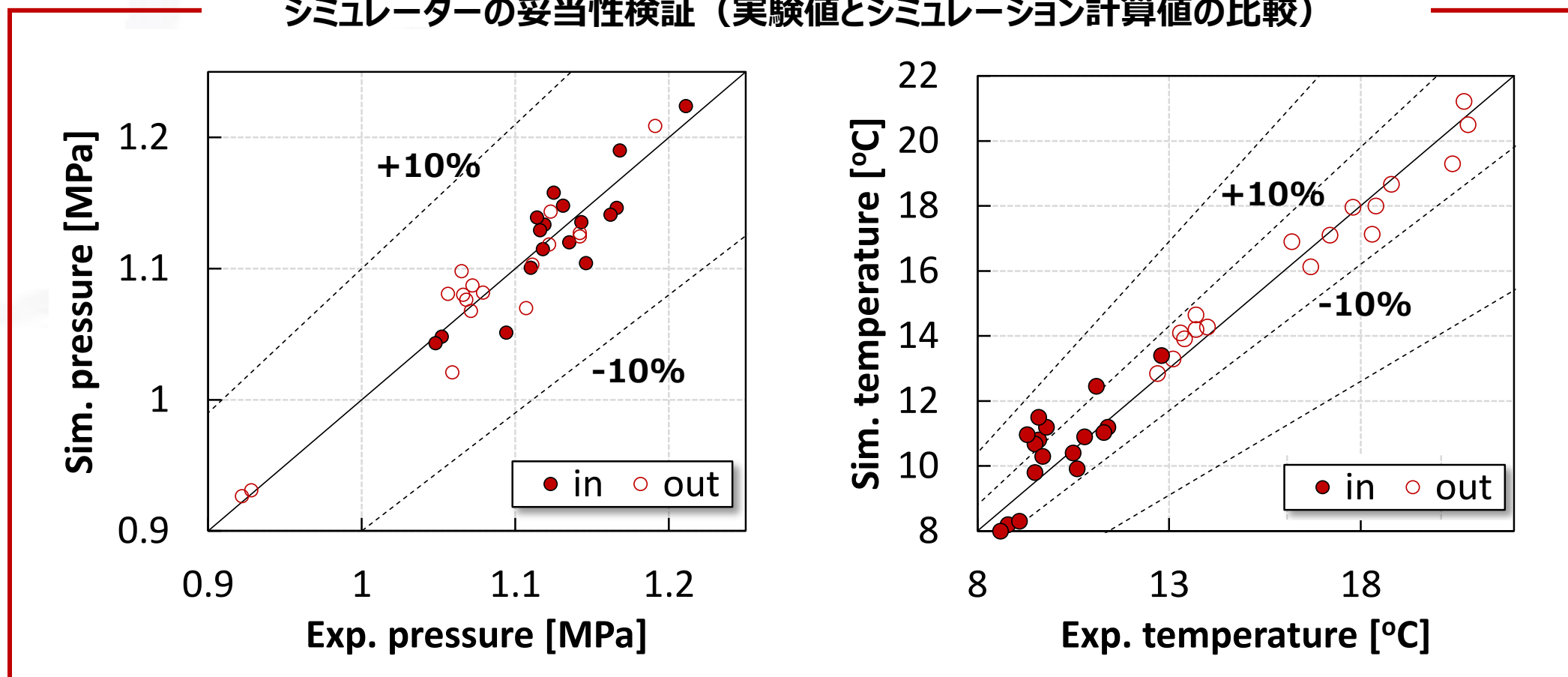
熱交換器シミュレーターで最適化された形状による熱交換器の性能向上が確認でき、熱交換器シミュレーターの妥当性が検証できた。

Optimized 1はBase 1に対して、差圧が小さく、蒸発温度が高くなっている。差圧・蒸発温度の改善度合いは3.0 kWよりも4.0 kWの方が大きい。

補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

<達成状況詳細>

シミュレーターの妥当性検証 (実験値とシミュレーション計算値の比較)



実験値とシミュレーション計算値は概ね5~10%の精度で合っており、妥当性が検証できた。

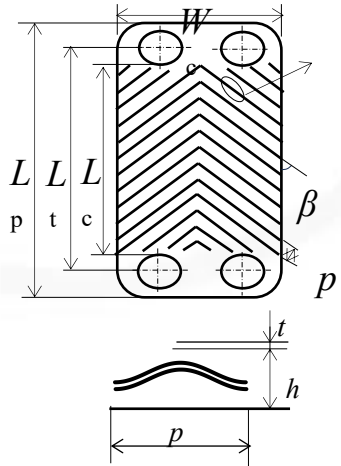
補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

評A-1-1 冷凍サイクル実機シミュレーション (モデル高度化)

<各年度の目標>

- **2023年度目標**：既存の低GWP冷媒を解析できるアキュムレーターのモデリングを実施
 - **2024年度目標**：既存の低GWP冷媒の熱交換性能を解析できる熱交換器シミュレーターの開発
- 達成状況**：アキュムレーターとプレート熱交換器の計算が可能となるモデルを構築

<達成状況>



- L : プレート長さ (m)
- W : プレート幅 (m)
- t : プレート厚さ (m)
- p : 波形ピッチ (m)
- β : 波形角度 ($^{\circ}$)
- h : 波形深さ (m)
- δ : プレート間隔 (m)
- n : プレート枚数 (-)
- A : プレート1枚当たりの(m²)
伝熱面積
- D_{eq} : 相当直径 (m)
- ϕ : 面積拡大率 (-)

単相・二相の熱伝達率・圧力損失の汎用的なモデル (波形角度 β と面積拡大率 ϕ の両方が含まれている式) を調査・抽出した。

単相熱伝達率 … Muley-Manglikの式, Martinの式のいずれかを使用

Muley-Manglik's equation:

$$Nu = (0.2668 - 6.967 \cdot 10^{-3} \cdot \beta + 7.244 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2) \cdot (20.78 - 50.94 \cdot \phi + 41.16 \cdot \phi^2 - 10.51 \cdot \phi^3) \cdot Re^{0.728 + 0.0543 \cdot \sin\{(\pi\beta/45) + 3.7\}} \cdot Pr^{1/3} \cdot (\mu/\mu_{wall})^{0.14}$$

Martin's equation:

$$Nu = \phi \cdot 0.122 \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{wall}}\right)^{1/6} \cdot \left[\xi \cdot \left(\frac{Re}{\phi}\right)^2 \cdot \sin(2 \cdot \beta)\right]^{0.374}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\xi}} = \frac{\cos \beta}{\sqrt{0.18 \cdot \tan \beta + 0.36 \cdot \sin \beta + \xi_0 / \cos \beta}} + \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{3.8 \cdot \xi_{1.0}}}$$

$$\xi_0 = \frac{64 \cdot \phi}{Re} \quad (Re < 2000), \quad \xi_0 = \left(1.8 \cdot \log_{10} \frac{Re}{\phi} - 1.5\right)^{-2} \quad (Re \geq 2000)$$

$$\xi_{1.0} = \frac{597 \cdot \phi}{Re} + 3.85 \quad (Re < 2000), \quad \xi_{1.0} = \frac{39}{(Re/\phi)^{0.289}} \quad (Re \geq 2000)$$

<2025年度の計画>

圧縮機モデルの高度化

単相摩擦損失 … Muley-Manglikの式, Martinの式のいずれかを使用

$$\Delta P = 2 \cdot f \cdot \frac{G^2 \cdot L}{\rho \cdot D_{eq}}$$

Muley-Manglik's equation:

$$f = (2.917 - 0.1277 \cdot \beta + 2.016 \cdot 10^{-3} \cdot \beta^2) \cdot (5.474 - 19.02 \cdot \phi + 18.93 \cdot \phi^2 - 5.341 \cdot \phi^3) \cdot Re^{-[0.2 + 0.0577 \cdot \sin\{(\pi\beta/45) + 2.1\}]}$$

Martin's equation:

$$f = \phi \cdot \xi / 4, \quad \frac{1}{\sqrt{\xi}} = \frac{\cos \beta}{\sqrt{0.18 \cdot \tan \beta + 0.36 \cdot \sin \beta + \xi_0 / \cos \beta}} + \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{3.8 \cdot \xi_{1.0}}}$$

$$\xi_0 = \frac{64 \cdot \phi}{Re} \quad (Re < 2000), \quad \xi_0 = \left(1.8 \cdot \log_{10} \frac{Re}{\phi} - 1.5\right)^{-2} \quad (Re \geq 2000)$$

$$\xi_{1.0} = \frac{597 \cdot \phi}{Re} + 3.85 \quad (Re < 2000), \quad \xi_{1.0} = \frac{39}{(Re/\phi)^{0.289}} \quad (Re \geq 2000)$$

凝縮熱伝達率 … 岡崎らの式

$$Nu = \phi \cdot 1.172 \cdot Pr^{1/3} \cdot \left[\xi \cdot \left(\frac{Re}{\eta}\right)^2 \cdot \sin(2 \cdot \beta)\right]^{0.28}, \quad \frac{1}{\sqrt{\xi}} = \frac{\cos \beta}{\sqrt{0.18 \cdot \tan \beta + 0.36 \cdot \sin \beta + \xi_0 / \cos \beta}} + \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{3.8 \cdot \xi_{1.0}}}$$

$$\xi_0 = \frac{64 \cdot \phi}{Re} \quad (Re < 2000), \quad \xi_0 = \left(1.8 \cdot \log_{10} \frac{Re}{\phi} - 1.5\right)^{-2} \quad (Re \geq 2000)$$

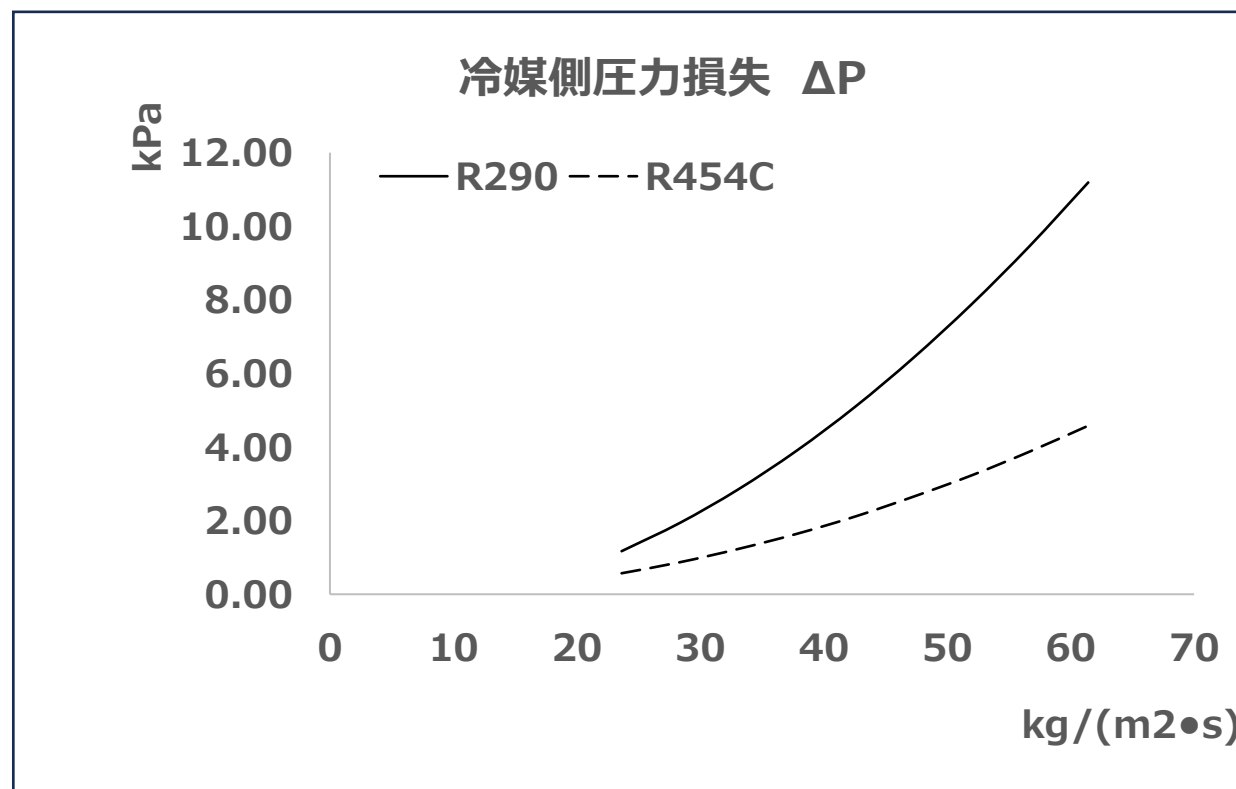
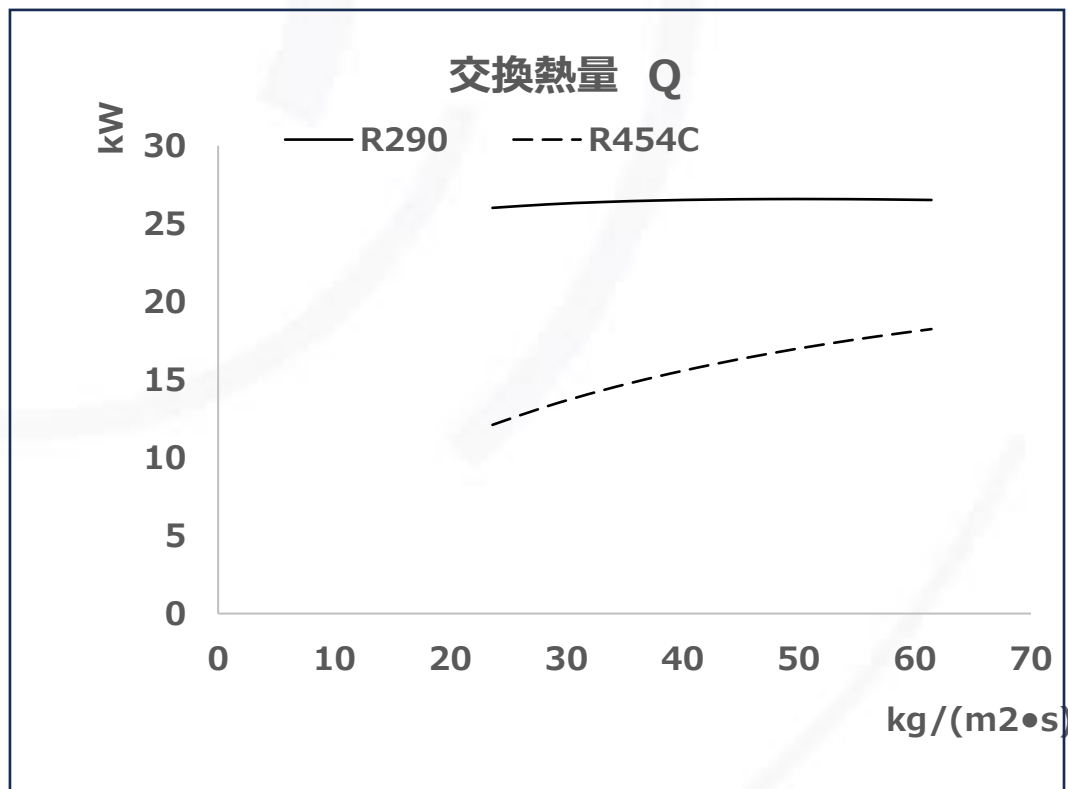
$$\xi_{1.0} = \frac{597 \cdot \phi}{Re} + 3.85 \quad (Re < 2000), \quad \xi_{1.0} = \frac{39}{(Re/\phi)^{0.289}} \quad (Re \geq 2000)$$

蒸発熱伝達率

波形角度 β と面積拡大率 ϕ の両方が含まれているモデルは見当たらないため、実験を行って検討する。

補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

<達成状況詳細> 凝縮器の計算例



②冷媒の流量変化計算例：冷媒側の質量流量を変化させて、プレート熱交換器における交換熱量と冷媒側の圧力損失を計算
 水入口流量：40L/min, 水入口温度：40℃, 水入口圧力：1000kPa, 冷媒飽和ガス温度：50℃, 冷媒入口状態：飽和ガス

補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

「AI最適化アルゴリズムの開発」

<各年度の目標>

- **2023年度目標** : AI最適化アルゴリズムの構築
- **2024年度目標** : 2023年度に考案したAI最適化アルゴリズムの検証及び改良

達成状況 : AI最適化アルゴリズムを考案すると共に、検証と改良を実施

<達成状況>

2023年度の基本最適化アルゴリズムの検証を行うとともに、熱交換器を実際に製造する工程における制約条件1つずつに対して、その制約を確実に満たす最適化アルゴリズムの実装を進めている。

制約X

基本最適化アルゴリズム (進化計算)

<2024年度の内容>

9のオプション制約それぞれについてON/OFFを可能にできるようにするため、合計 $2^9=512$ 通りの最適化シナリオが想定される。効率的なアルゴリズム実装に向けての検討を行い、2024年度中にはどの最適化シナリオに対しても、指定された全ての制約を確実に満たす設計を出力できるアルゴリズムを実装した。

必須制約

制約1

制約2

制約3

制約4

...

制約9

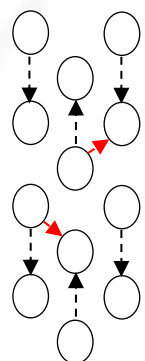
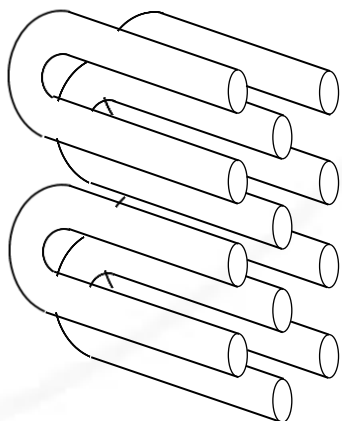
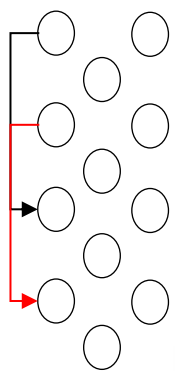
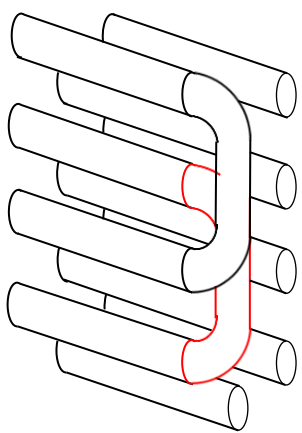
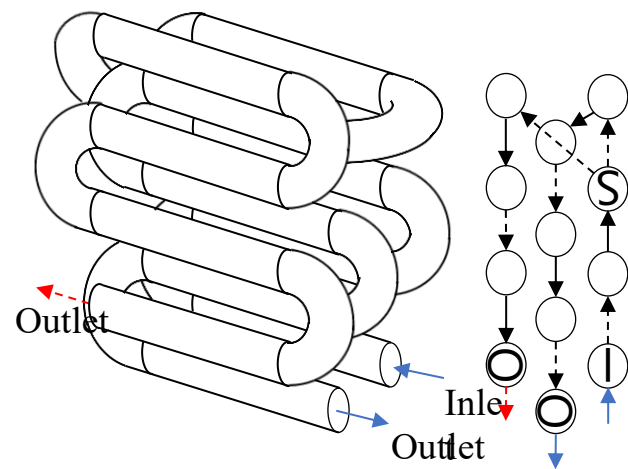
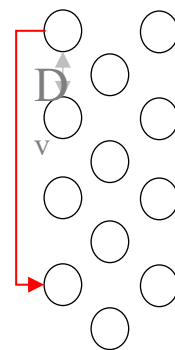
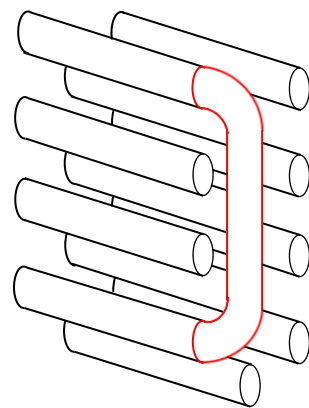
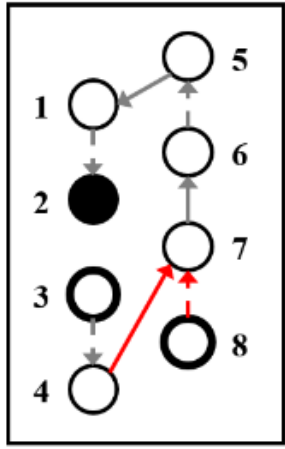
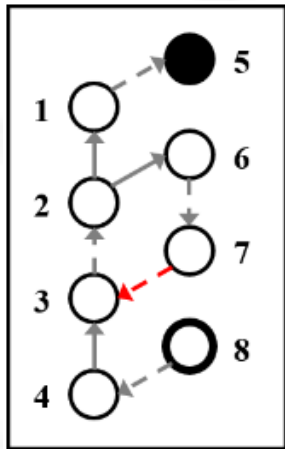
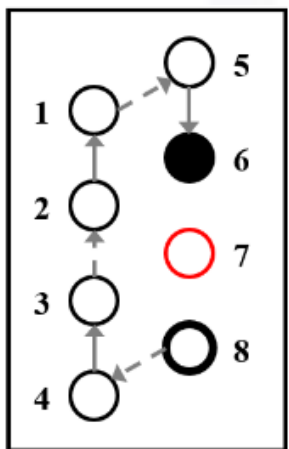
<2025年度の計画>

2025年度は、AIによる最適化性能を向上させる改良を行う。

基本最適化アルゴリズム (進化計算)

補足) 23、24年度の成果と課題、25年度の計画

＜日冷工殿から提示のあったベント管の物理的制約条件＞



g

