

ヒートポンプの導入効果を定量評価できる 産業用ヒートポンプシミュレーターの開発

プロジェクト名：未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発

プロジェクト実施者：一般財団法人 金属系材料研究開発センターJRCM (TherMAT)

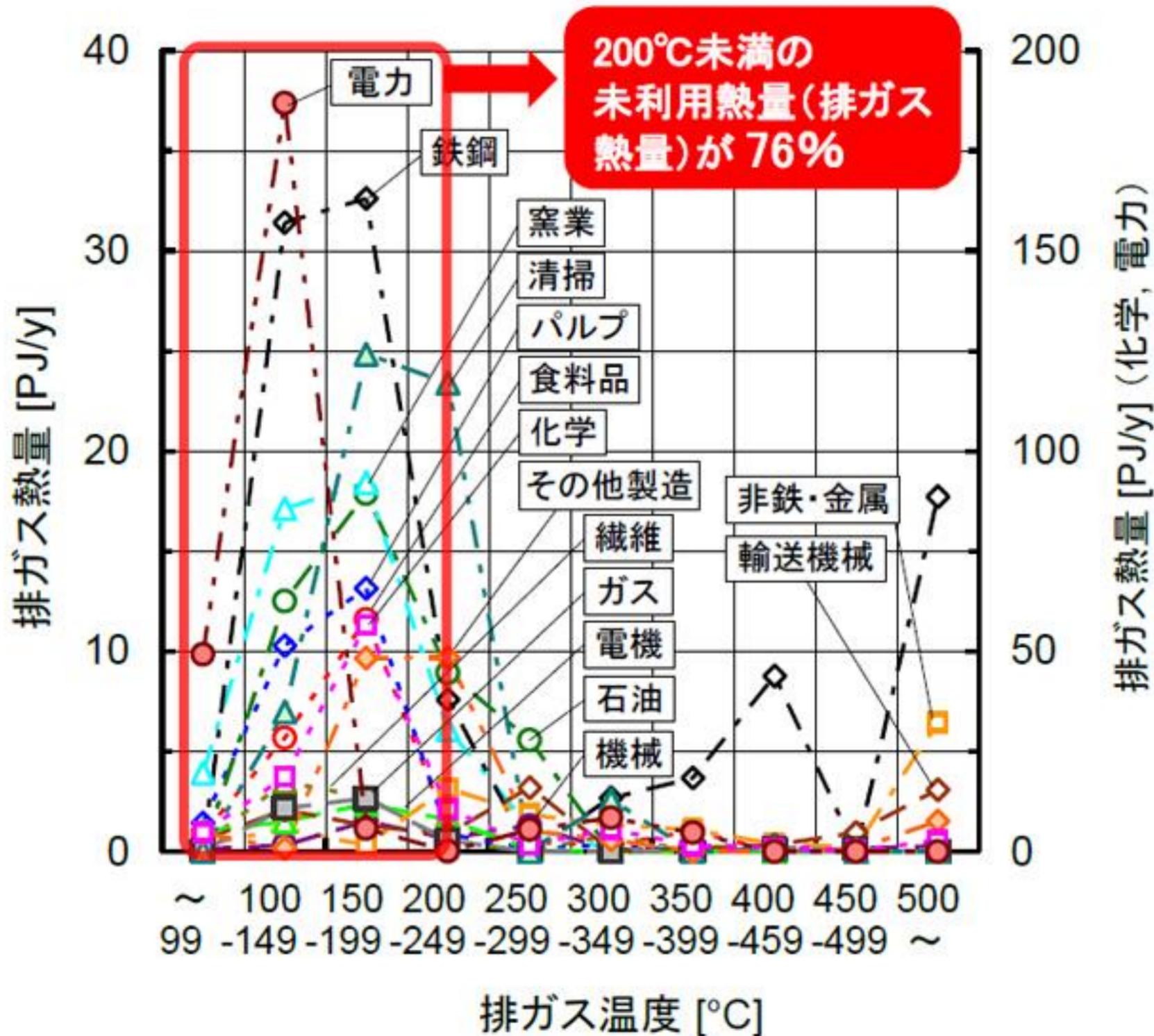
株式会社 前川製作所 (TherMAT)

早稲田大学 (共同実施)

プロジェクト実施期間：2013年10月～2023年2月



研究開発の背景と狙い



- 1273のエネルギー管理指定工場のアンケート回答に基づく、15業種の工場設備の**排熱実態調査の結果**、**全国で未利用の743PJ/yの排ガス**が、**2711PJ/yの排温水**が排出されていると推定されます。
- これらは**ヒートポンプの熱源**として活用可能な省エネポテンシャルと考えられます。
- **産業用ヒートポンプ***を蒸気ボイラーやバーナー等の代替として導入することにより、**大幅なエネルギーコストやCO₂排出の削減**が見込めます。

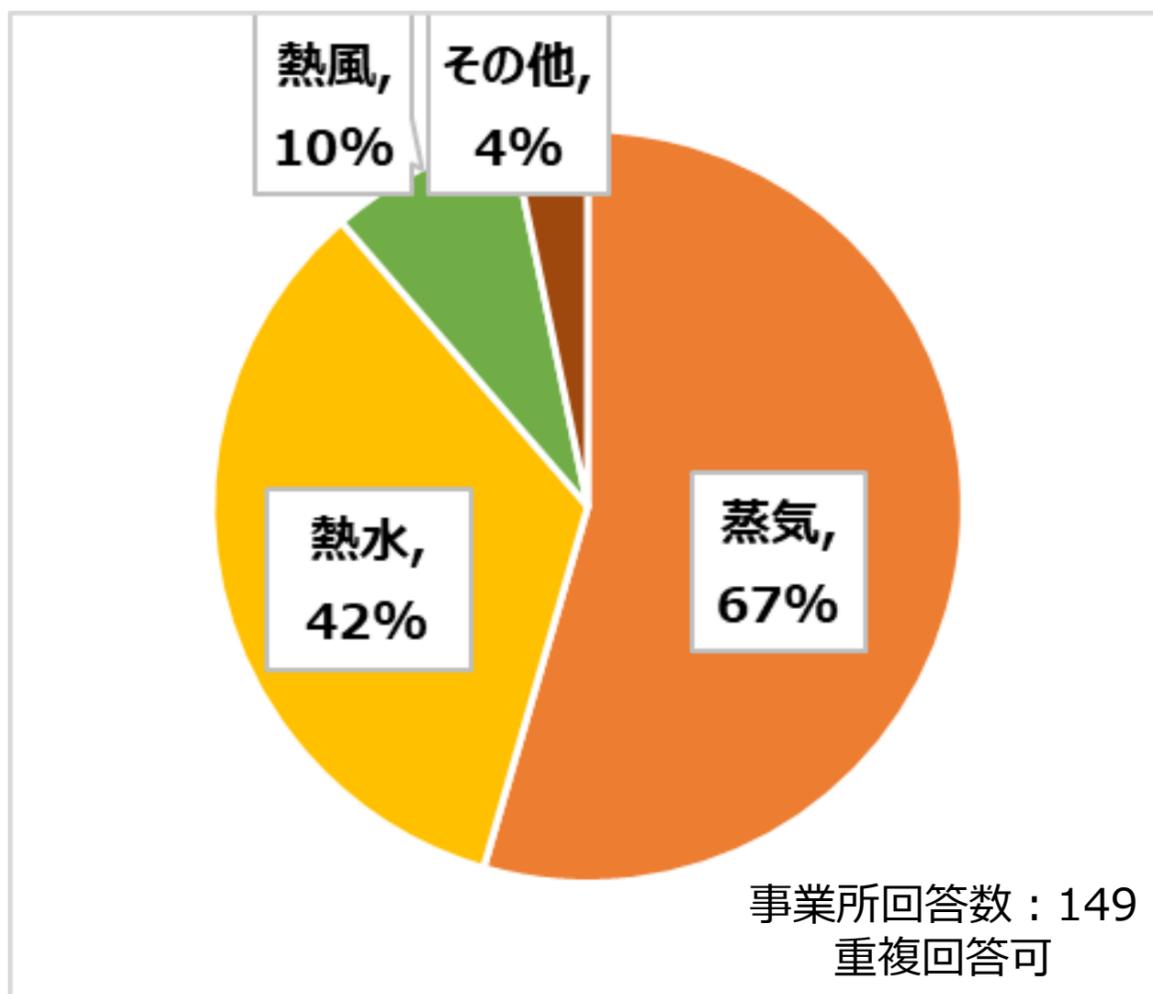
***産業用ヒートポンプ** (しくみと導入の狙い) ...

- ✓ 産業用ヒートポンプは冷凍・冷却・空調などの冷熱用途と加熱用途に大別されます。
- ✓ 冷熱用途と加熱用途いずれも冷媒の、圧縮→凝縮→膨張→蒸発→圧縮の繰り返しサイクルを利用し、加熱用途では凝縮時に温熱を取り出し利用します。
- ✓ **加熱用ヒートポンプによる方法では、例えば成績係数COP=3.5の場合、加熱に必要な圧縮の仕事(エネルギー)量は、必要な熱需要エネルギーの1/3.5でよく、これを系統電力で賄った場合、工場サイトでのCO₂の排出量は0となります。**
- ✓ 冷媒を圧縮するための仕事以外のエネルギーは、プロセスの未利用排温水や排熱などから賄われます。
- ✓ 電力のCO₂排出係数を考慮しても、大幅なCO₂排出の削減が見込めます。
- ✓ また高効率で消費エネルギーが少ないため、ランニングコストの大きな削減も期待できます。

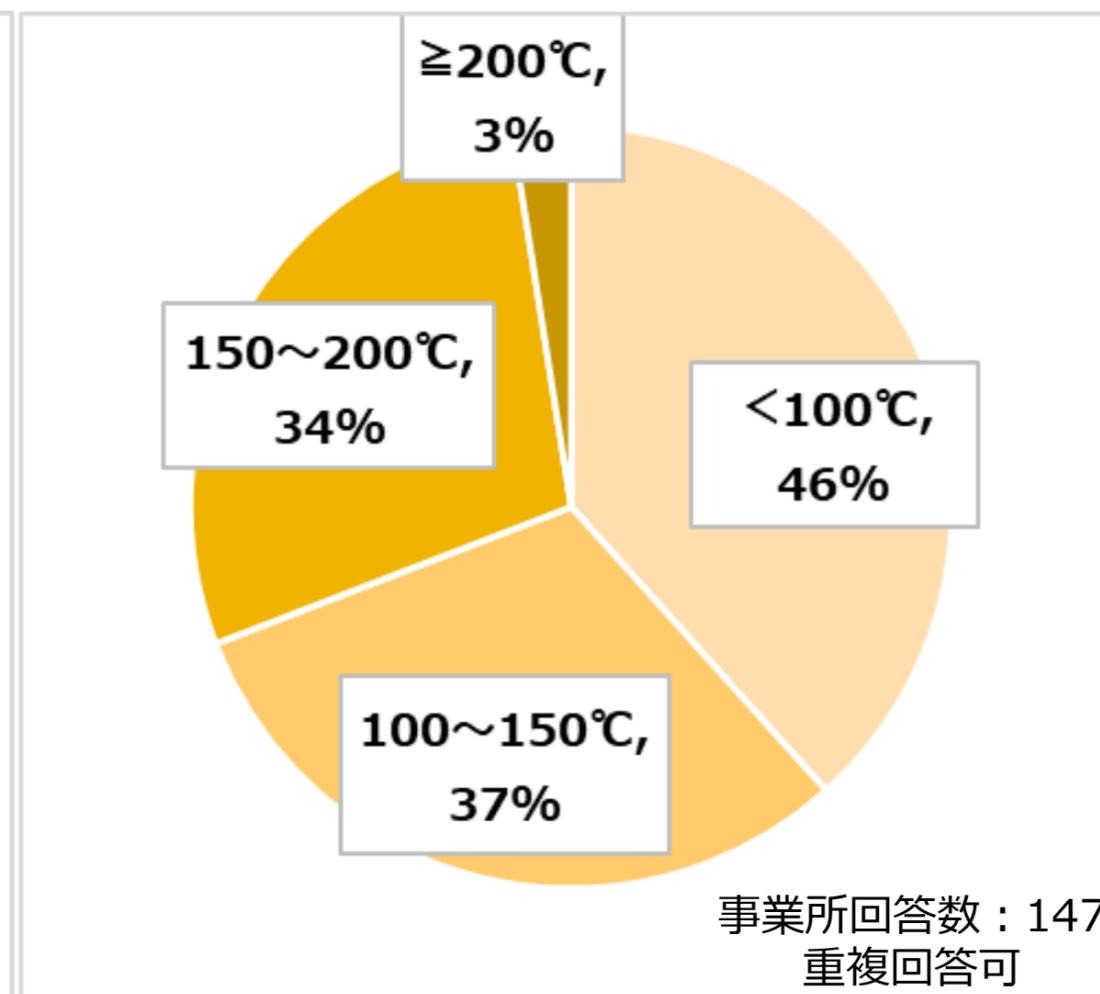
ヒートポンプを既存のボイラーから代替する場合の用途、温度帯 (アンケート結果)

- 代替用途は蒸気、熱水、熱風の順
- 200℃までの温度帯の代替ニーズが高い

用途

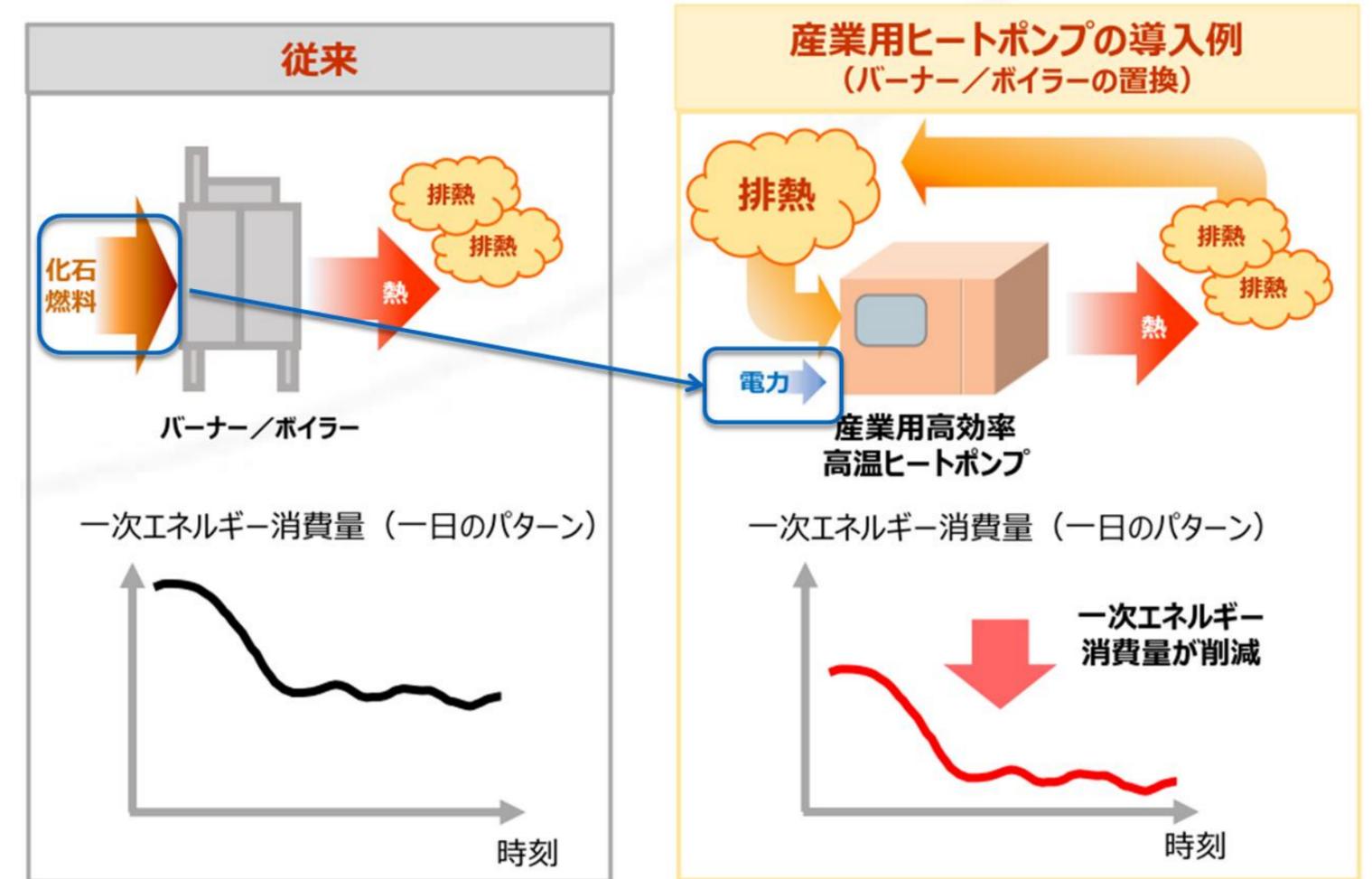


温度帯



課題

- **産業分野**では、生産工程・プロセスによって熱の使い方が様々で、家庭やビルの空調や給湯のように**定型化された設計・エンジニアリングが困難**という課題あり
- **産業用のヒートポンプの導入検討時にはさまざまデータを取得する必要**があり、導入検討のための時間とコストが多大となることが、**産業用ヒートポンプ導入の大きな障壁**となっていた



開発の概要

- 産業用ヒートポンプの**導入効果を定量評価**できる「産業用ヒートポンプシミュレーター」を開発
- 本シミュレーターは、簡単な入力と操作で、**工場に産業用ヒートポンプを導入した場合の一次エネルギー消費量とCO₂排出量を短時間で高精度に試算でき**、産業用ヒートポンプの導入検討のための時間とコストを大幅に削減

① 省エネ方針 検討段階

- エネルギー消費目標値の設定
 - 感度分析など

② 省エネ対策 決定段階

- プロセス仕様検討
- 各構成でのエネルギー消費比較検討など

産業用エネルギー
統合シミュレーター

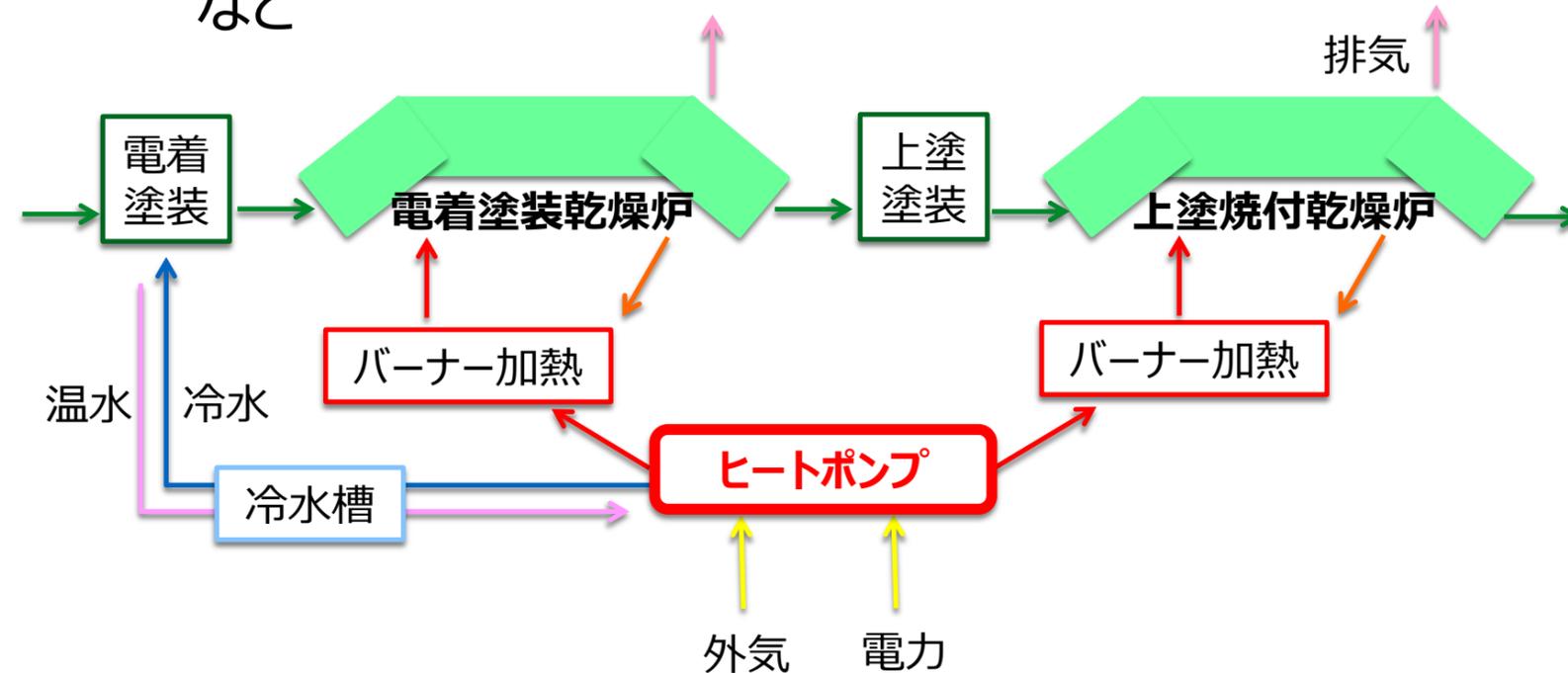
③ システム 設計段階

産業用ヒートポンプ
単体シミュレーター

- 工場に導入予定のヒートポンプについて、利用パターンを選択し、定格加熱能力・給水温度・流量・冷媒等を入力することで、1次エネルギー消費量・CO₂排出量等の導入効果を①、②、③などの段階に応じて、詳細な熱計測を行わなくてもシミュレーターで短時間で高精度に試算できるようにします。

➤ 適用検討対象工程（例）：

- 機械器具製造業
 - 塗装乾燥・塗装焼付け・洗浄工程
 - 化学工業、繊維工業
 - 乾燥・濃縮・蒸留・熱架橋・煮絨工程
 - 食品・飲料製造業
 - 加熱・乾燥・洗浄工程
 - ゴム製品製造業
 - 混合・加硫工程
- など



非循環加熱・予熱・冷温同時取り出しパターン④でのヒートポンプ適用検討工程例

産業用ヒートポンプシミュレーター

計算の基本構成パターン(①~④ : 非循環加温)

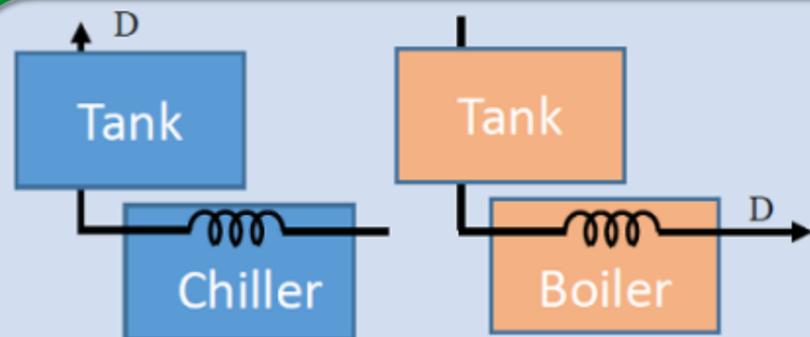
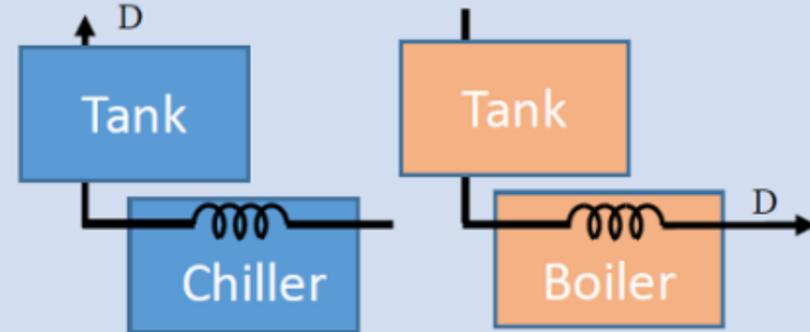
➤ ヒートポンプシステムの導入パターンを

- ・「加温方式」
(非循環、循環)
- ・「ヒートポンプの導入用途」
(置換、予熱)
- ・「冷温同時取り出し」
(無、有)

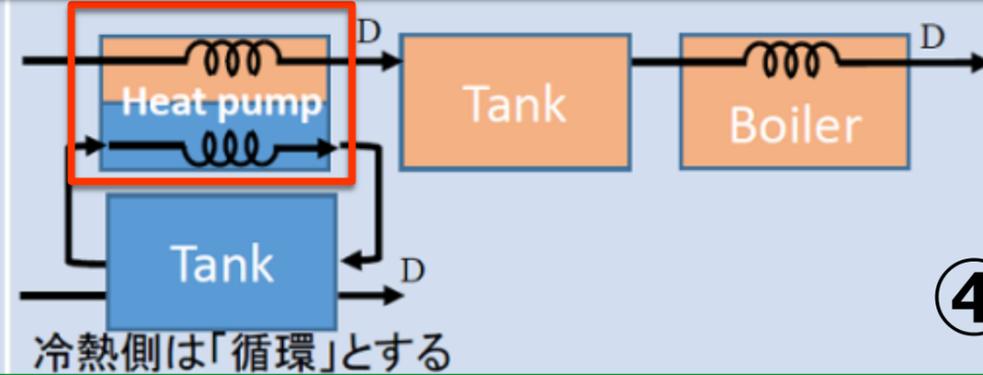
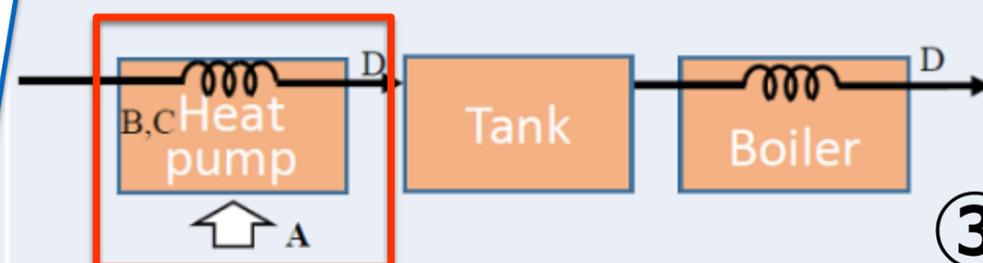
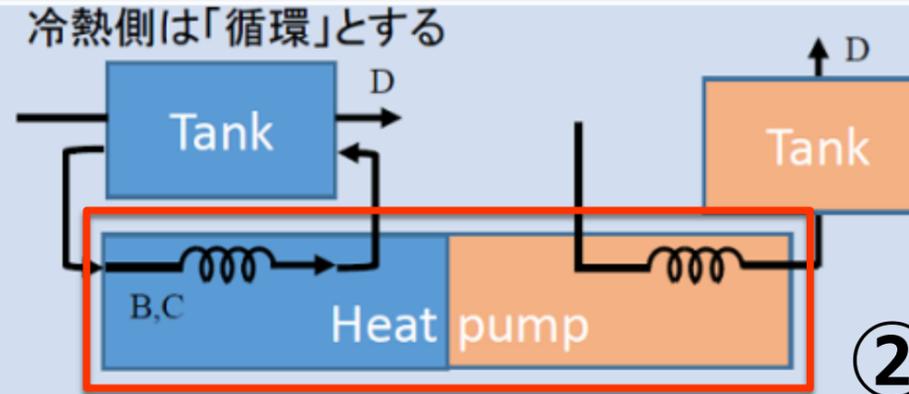
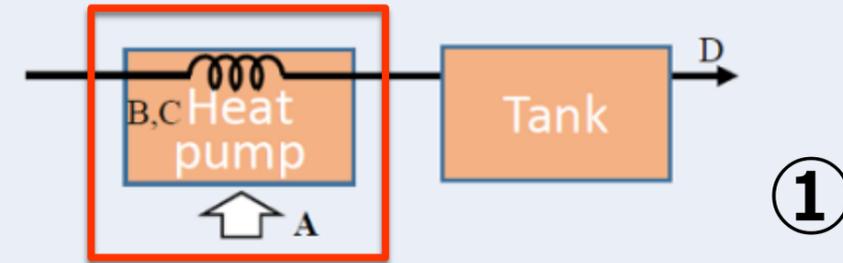
これら3つの組合せの基本
8パターンより選択し、

ボイラー・バーナータイプ (従来) と比較します

ボイラー・バーナー



ヒートポンプ利用



加熱のみ

置換

加熱+冷熱

加熱のみ

予熱

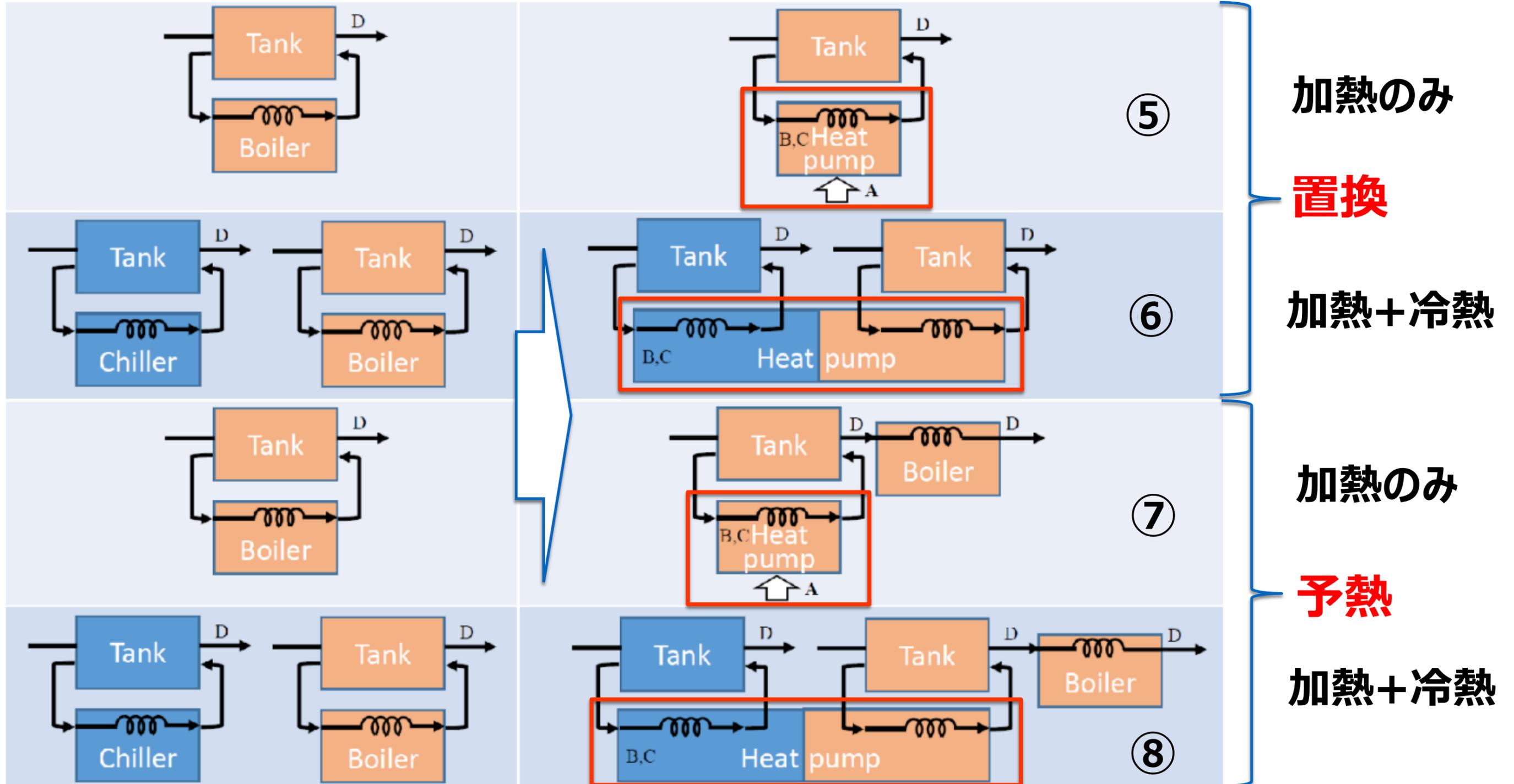
加熱+冷熱

産業用ヒートポンプシミュレーター

計算の基本構成パターン(⑤~⑧ : 循環加温)

ボイラー・バーナー

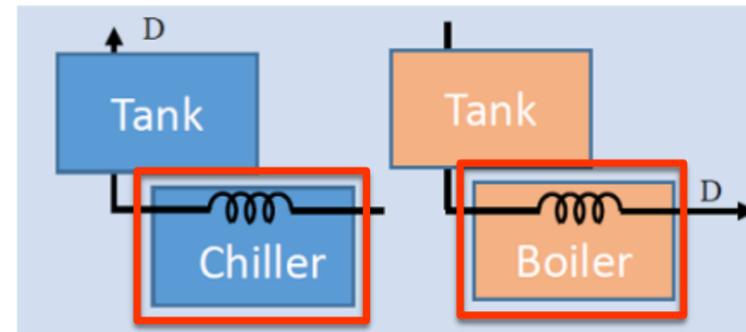
ヒートポンプ利用



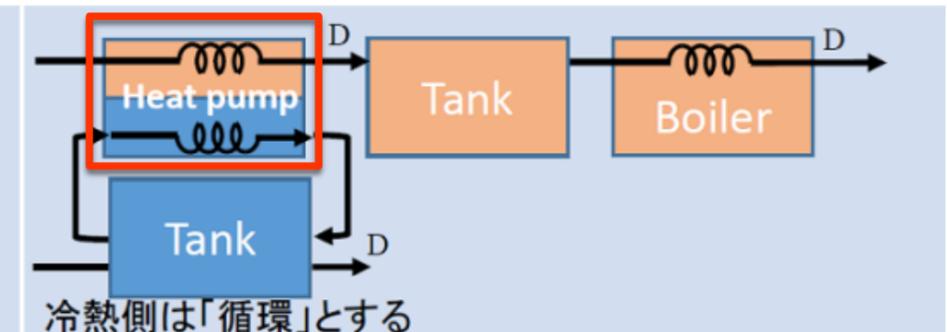
- **モジュラー解析手法**：システムを構成する要素ごとに**数理モデルを構築**し、これらを接続することによりシステム全体の数値解析を実施⇒圧縮式ヒートポンプは、圧縮機、熱交換器（凝縮器、蒸発器）、膨張弁などの構成要素ごとに計算
- 様々なシステムの構成と運転条件下で**年間性能を精度の信頼性を持ちつつ評価**するため、連続方程式、エネルギー方程式、圧力損失に対応する運動方程式をベースとした**汎用解析理論**に基づく
- 冷媒や空気、水などの**物性値はREFPROPがベース**⇒予めcsv形式のデータベース化⇒地球温暖化係数の低い冷媒を探索するために、**冷媒を変更した場合の比較が容易**
- まず単段圧縮機に絞りモデルを構築⇒**2元冷媒サイクルの計算ロジックを構築**し、シミュレーターとしての汎用性の拡張を実施
- 計算には年間性能評価のため十分な妥当性を確保しつつ速度も重視した**ピンチ温度による数理モデルを採用**⇒熱交換器の設定が容易
- プログラミング言語：C++

パターン④非循環加熱・予熱・冷温同時取り出しでの入出力変数例

ボイラー・バーナー、冷凍機



ヒートポンプ利用



ボイラー入力変数

- ・ボイラー効率
- ・定格加熱能力
- ・ボイラー入/出口温度
- ・ボイラー流量

冷凍機入力変数

- ・定格冷凍能力
- ・蒸発器入/出口温度
- ・蒸発器流量
- ・冷水温度
- ・冷媒
- ・断熱効率
- ・凝縮器/蒸発器ピンチ温度
- ・一次換算効率

ボイラー出力変数

- ・消費一次エネルギー
- ・加熱能力
- ・負荷率

冷凍機出力変数

- ・消費エネルギー
- ・冷凍能力
- ・負荷率
- ・消費一次エネルギー
- ・効率

ヒートポンプ入力変数

- ・定格加熱能力
- ・凝縮器・蒸発器入/出口温度
- ・凝縮器・蒸発器流量
- ・冷媒
- ・断熱効率
- ・凝縮器/蒸発器ピンチ温度
- ・一次換算効率

ヒートポンプ出力変数

- ・消費エネルギー
- ・加熱能力
- ・負荷率
- ・消費一次エネルギー
- ・効率

ヒートポンプ(パターン④)

入力定数																	出力定数		
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
TYPE4He atpump	10																	Total Primary Energy[k Wh]	Total CO2 Emission s[tCO2]
q_rated_ boiler[kW]	eta_boiler [%]	q_rated_ HP[kW]	eta_ad[-]	ref_name 1	ref_name 2	ref_name _Chiller	eta_prim ary[%]	Condition (Higher)	Condition (Lower)	CO2burn[tCO2/kW h]	CO2elec[tCO2/kW h]	SH[°C]	SC[°C]	pinch_t_ condenso r[°C]	pinch_t_ evaporato r[°C]	Int_Hex[0 :false, 1:true]			
120	90	120	0.7	CO2.CSV	null	null	36.9	AIR.CSV	WATER.CS	6.93E-08	1.39E-07	5	5	5	15	0	71453.5	0.00436	
HP Input				Boiler Input				HP Output				Boiler Output							
time	t_con_ou t[°C]	t_con_in[°C]	g_1[kg/s]	t_eva_out [°C]	t_eva_in[°C]	g_2[kg/s]	t_boiler_o ut[°C]	eta_load[%]	heating_ Q[kW]	W[kW]	COP	W_primari y[kW]	eta_load[%]	heating_ Q[kW]	W_primari y[kW]	totalW_pr imary[kW]	P1[kPa]		
700	11:34	101.7	20.6	1.281692	12.4	15.5	2.99	157.1	87.3439	104.813	32.3622	3.52754	87.7025	60.0409	72.0491	80.0545	167.757	13319.5	
701	11:35	100.3	20.6	1.322848	11.5	15.4	2.996667	157.2	88.5884	106.306	32.6471	3.61717	88.4745	63.6418	76.3701	84.8557	173.33	13150.4	
702	11:36	102	20.6	1.267917	12.1	15.8	2.99	156.7	86.7256	104.071	32.0536	3.59479	86.8663	58.6448	70.3737	78.193	165.059	13380.8	
703	11:37	102.1	20.6	1.275647	11.9	15.8	2.986667	156	87.3618	104.834	32.3042	3.6088	87.5454	58.1373	69.7647	77.5164	165.062	13392.5	
704	11:38	102.4	20.6	1.303043	12.2	16	2.986667	155.4	89.5673	107.481	33.082	3.59485	89.6532	58.3932	70.0718	77.8576	167.511	13445.7	
705	11:39	102.4	20.6	1.284749			33333	155.5	88.3099	105.972	32.7103	3.58919	88.6458	57.6824	69.2189		56	13433.9	
706	11:40	101.7	20.6	1.276762			2.98	156.4	87.0079	104.41	32.0277	3.56958	86.7959	59.0518	70.8621		32	13363.3	

入力変数

出力変数

ヒートポンプ出口
ダクト内風温

ヒートポンプ入口
ダクト内風温

ヒートポンプ出口
ダクト内風量

産業用ヒートポンプ単体シミュレーター： ユーザーインターフェース画面の例

未利用熱シミュレーター

左側Ph線図

入力部分

両タイプ選択 タイプ5

左側タイプ選択 タイプ5 ボイラ/HP選択 ボイラー

右側タイプ選択 タイプ5 ボイラ/HP選択 ヒートポンプ

Tank
Boiler

Tank
Heat pump

パラメータ編集 パラメータ編集

計算開始 グラフ表示 結果リスト表示 計算開始 グラフ表示 結果リスト表示

右側Ph線図

指定時刻における
冷媒の飽和曲線データ

冷媒選択 R134A.FLD

冷媒選択 CO2.FLD

一次消費エネルギーの比較

一次エネルギー消費量の比較

69%削減

CO2排出量の比較

77%削減

一次エネルギー消費量の比較

Type5 Boiler
60671.1 [kWh]
Type5 HP (R134A.FLD)
18804.2 [kWh]

CO2排出量の比較

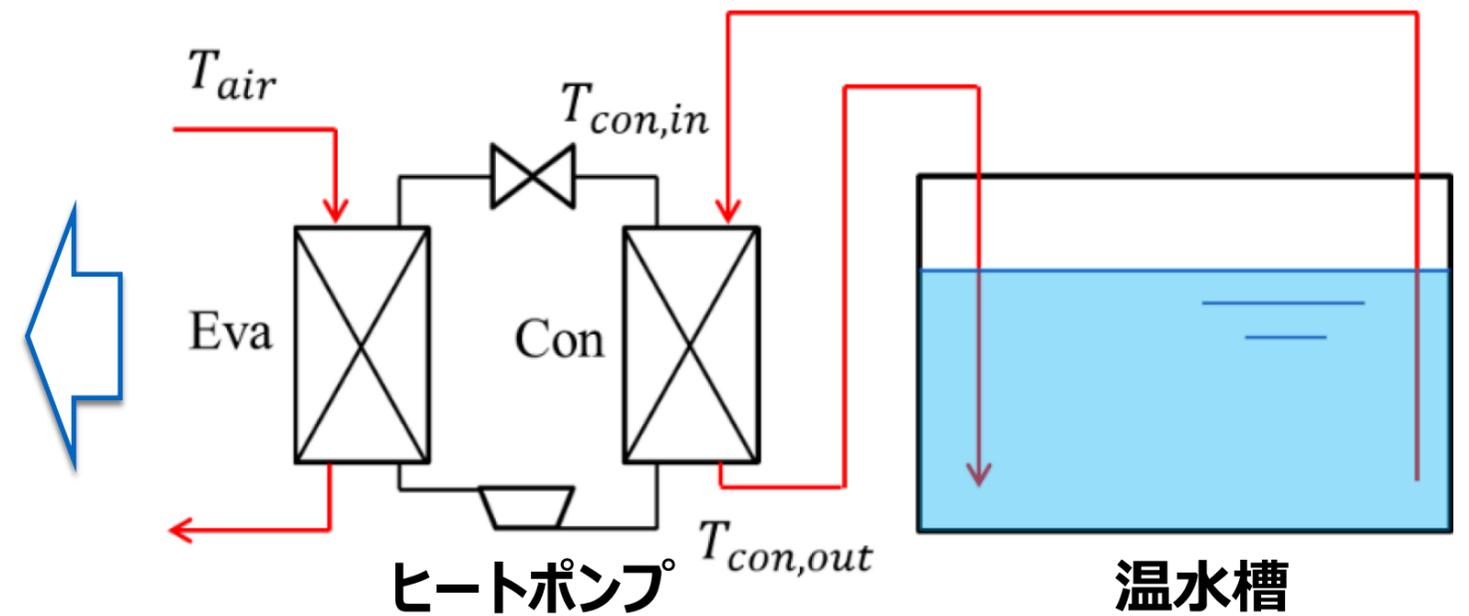
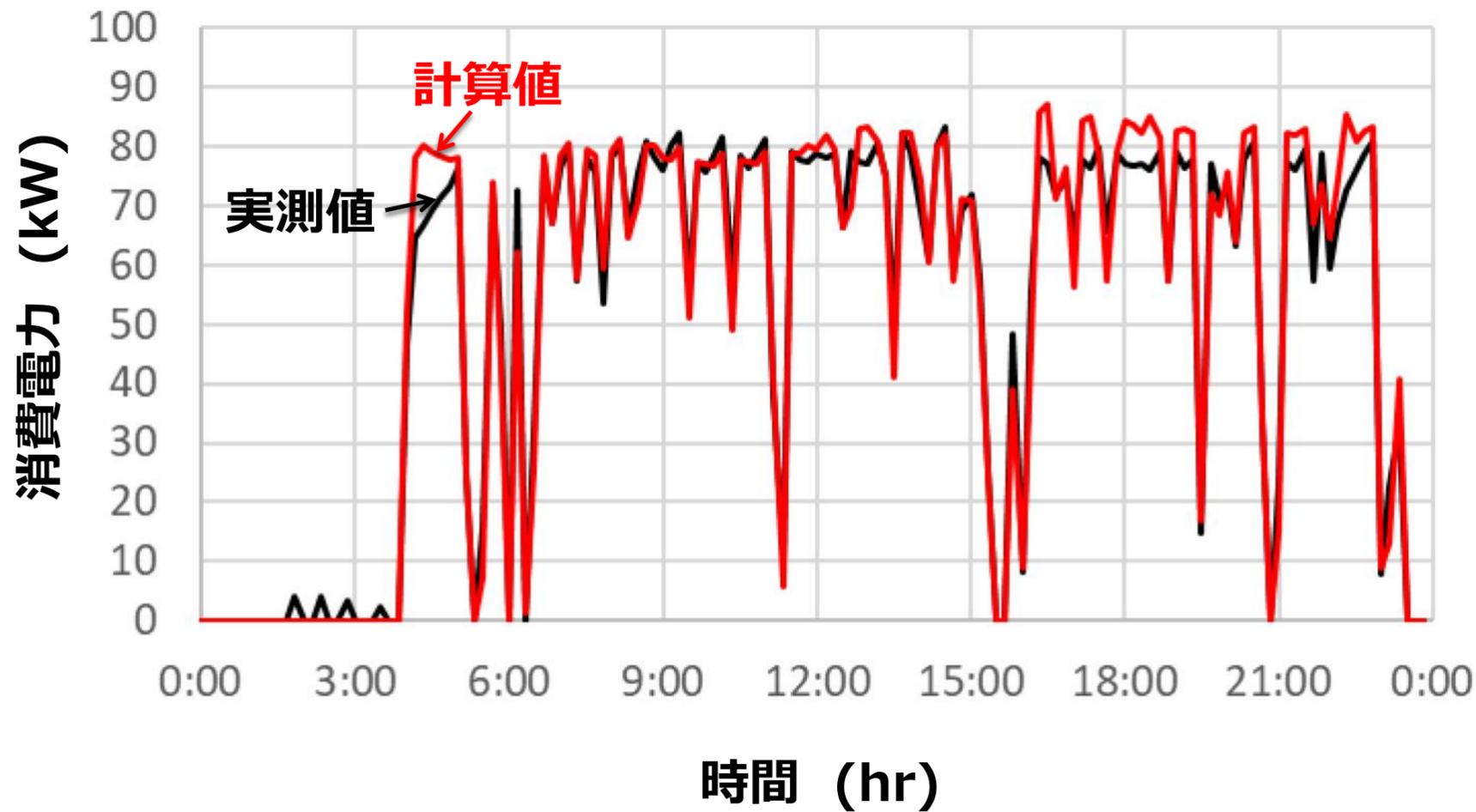
Type5 Boiler
0.0042045 [tCO2]
Type5 HP (R134A.FLD)
0.000964484 [tCO2]

一次エネルギー消費量

CO₂排出量

終了

- 開発シミュレーターの計算精度を、洗浄用温水生成システムや、熱風での塗装乾燥プロセスでの実測データを用いて確認しました。



出典：市川、鈴木、鄭、宮岡、齋藤：“産業用ヒートポンプシステムの統合シミュレーション技術の構築第2報：「産業用ヒートポンプ単体シミュレータ」の開発” 日本冷凍空調学会講演論文集、(2020.9.9-11) D234 pp.1-6.

産業用ヒートポンプ単体シミュレーター：ダウンロードの要領

- 簡単な入力と操作で産業用ヒートポンプの導入効果を定量評価できる「産業用ヒートポンプ単体シミュレーター」を開発し、**Webよりダウンロードできるようにしました。**

① JRCMホームページ リンク集

リンク集

- 関係機関・団体等
- ナノテク関連サイト
- 公設試リンク集
- 産業用ヒートポンプシミュレーター (IDとパスワードが必要です)**

② 新規登録

産業用ヒートポンプ単体シミュレーター

USER(email):

PASSWORD:

Login

新規登録

④ パスワードの発行、ログイン
(使用許諾条件あり)

③ アフィリエイトの入力

例：株式会社ABC

例：研究開発

例：東京都千代田区大手町1丁目1番地

例：日本太郎

例：12-3456-7890

例：name@company.co.jp

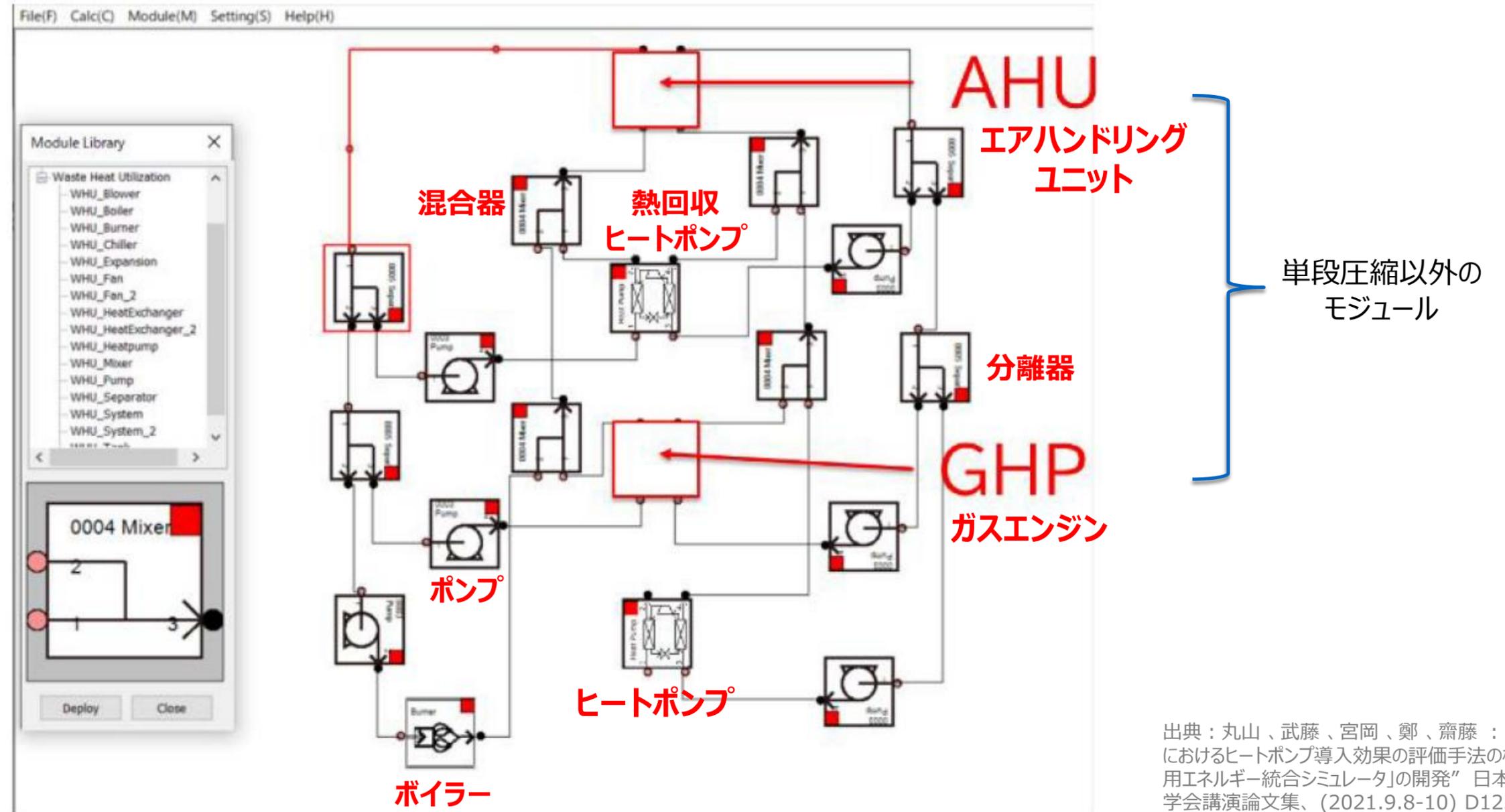
登録要請

⑤ ダウンロード

リンク	改定内容
Download	2021/2/13 1. 画面表示改良 2. チャー機能追加
Download	2020/12/3 1. 初期リリース 2. 計算部にユーザー認証機能

冷媒テーブル | 技術情報 | Q&A

- 単体シミュレーターで構築したパターンやロジックを基に、ヒートポンプやボイラー、ポンプ、タンク、弁などの補機等のモジュールをGUI上で接続してフロー図を作成しシステムの性能評価計算を行う「産業用エネルギー統合シミュレーター」の開発を行いました。



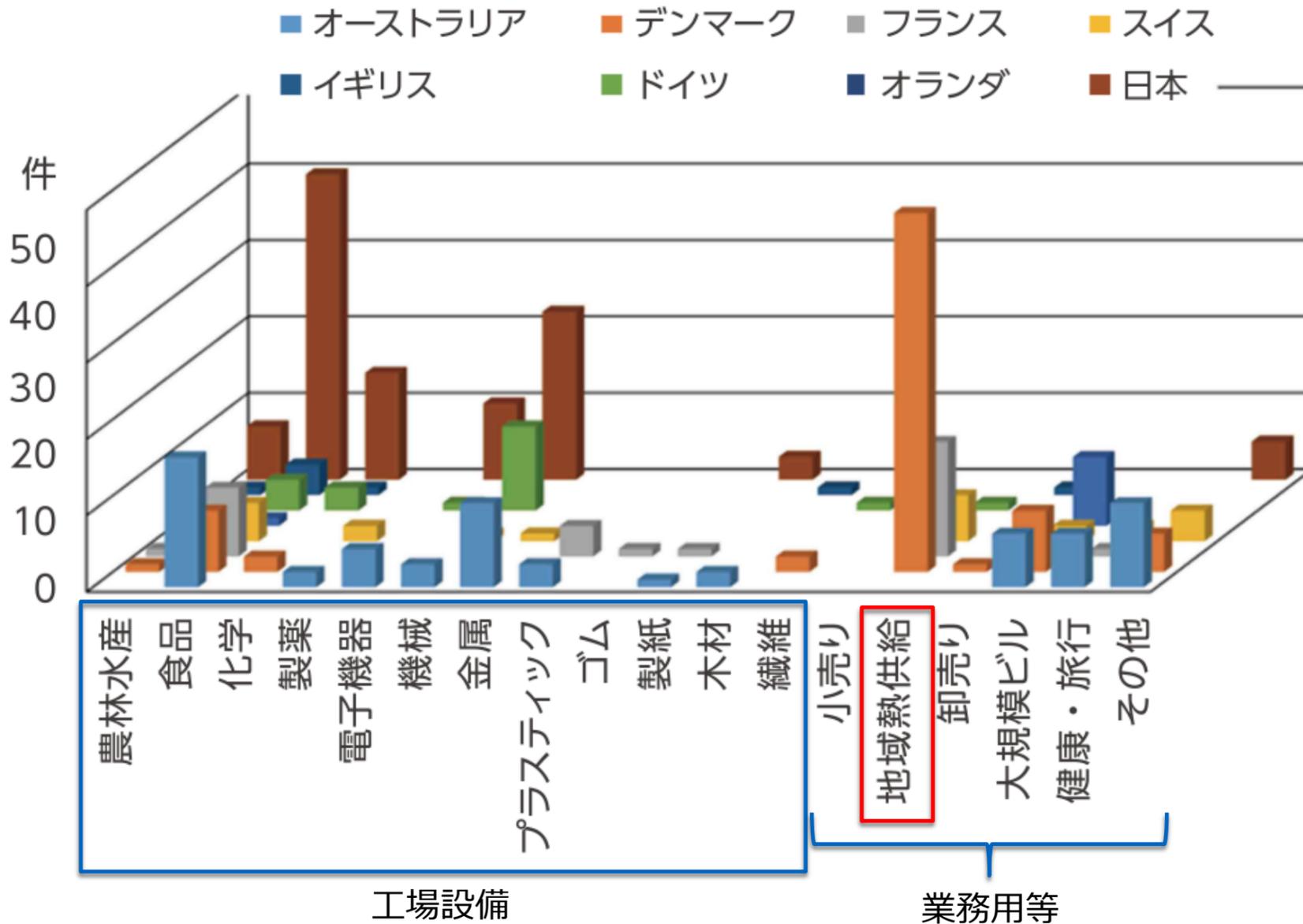
出典：丸山、武藤、宮岡、鄭、齋藤：「産業分野におけるヒートポンプ導入効果の評価手法の構築と「産業用エネルギー統合シミュレーター」の開発」日本冷凍空調学会講演論文集、(2021.9.8-10) D123 pp.1-6.

産業用エネルギー統合シミュレーターのシステムフロー図*のGUIの例

*大阪府狭山池博物館

➤ 欧州と日本の産業用ヒートポンプの導入事例

IEA HPT TCP ANNEX 48における342件の紹介事例を整理



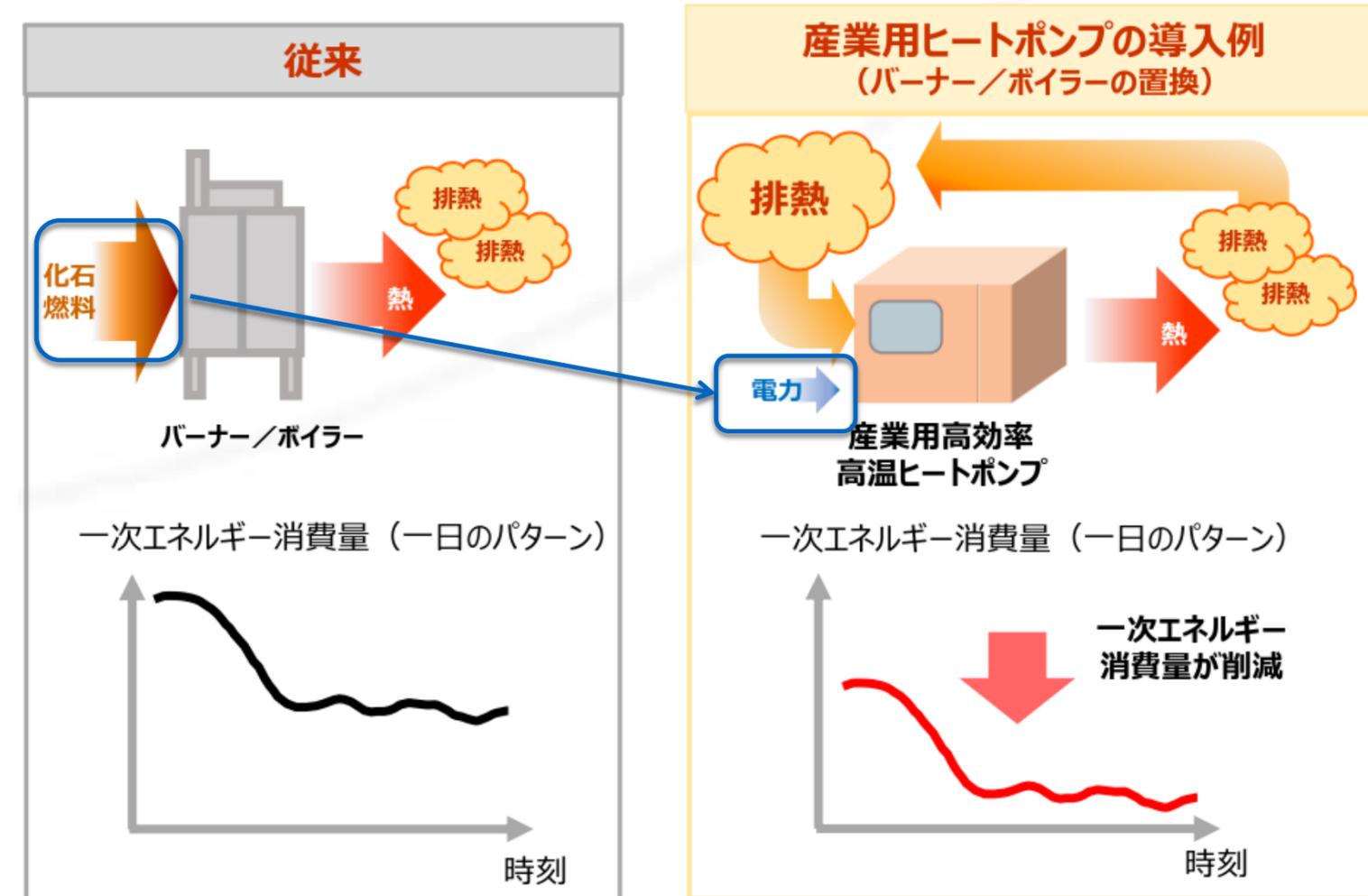
➤ 欧州では現在推計約18,000台の産業用ヒートポンプが稼働
(加熱能力：50～5,000kW)

➤ 欧州DryFiciencyプロジェクトで実証試験に供された高温ヒートポンプの外観 (~160°C)



<p>Wienerverger社 レンガ乾燥工程に導入された 閉ループヒートポンプ</p>	<p>Agrana社 でんぷん乾燥工程に導入された 閉ループヒートポンプ</p>	<p>Scanship社 生物汚泥乾燥工程に導入された 開ループヒートポンプ</p>
--	---	---

- **具体的な事例における産業用ヒートポンプの導入効果**（一次エネルギーやCO₂排出量の削減など）について本シミュレーターを用いて示してゆきます。
- **ポンプ・タンク・弁などの生産プロセス全体の設計やエンジニアリングを可能とする「産業用エネルギー統合シミュレーター」を高度化してゆきます**（経済性評価を含む）。
- **これらシミュレーターの一般公開と標準化を進めます。**



ご清聴ありがとうございました

お問い合わせ：
(一財)金属系材料研究開発センターJRCM 担当：豊田
メールアドレス：stoyoda@jrcom.jp
URL:<http://www.jrcom.or.jp/>