

NEDOプロジェクト

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」

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 成果報告

2023年2月27日（月）

一般財団法人 金属系材料研究開発センター-JRCM
株式会社 前川製作所
早稲田大学（共同実施）

目次（報告内容）

（1）開発の狙い

- 業種別排熱の内訳
- 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

（2）開発目標

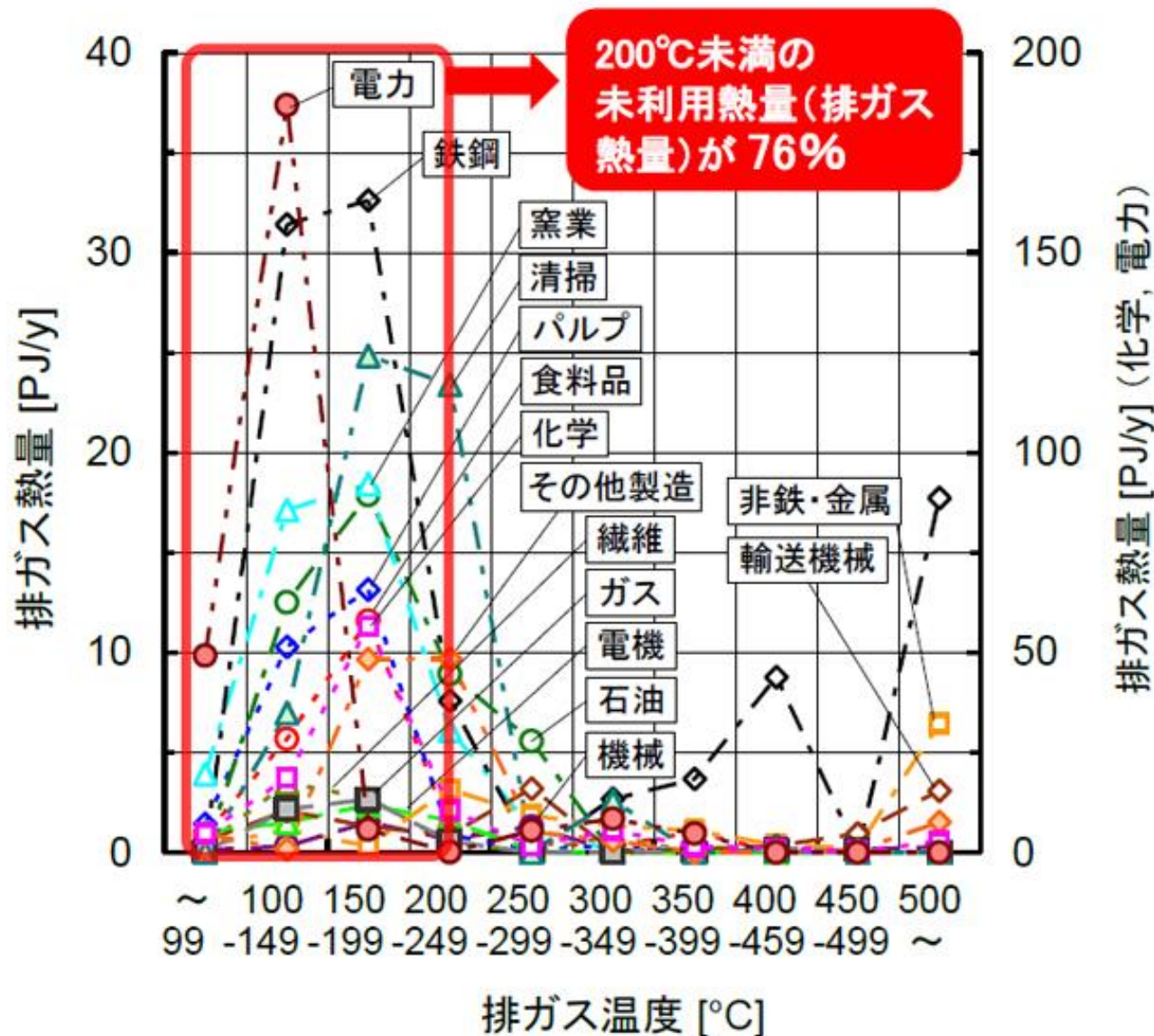
- シミュレーターの使われ方の想定

（3）成果

- シミュレーターの数理モデルと解析手法
- 計算の基本構成パターン
- 単体シミュレーター：入出力画面の例、
ユーザーインターフェース画面の例、計算精度の検証例
- 経済性評価計算例、LCCP (製品寿命気候負荷)評価計算例
- ダウンロードの要領
- 産業用エネルギー統合シミュレーター
- 欧州の産業用ヒートポンプの導入事例、取り組み例

（4）今後の展望

1. 開発の狙い (産業用ヒートポンプシミュレーターの開発)

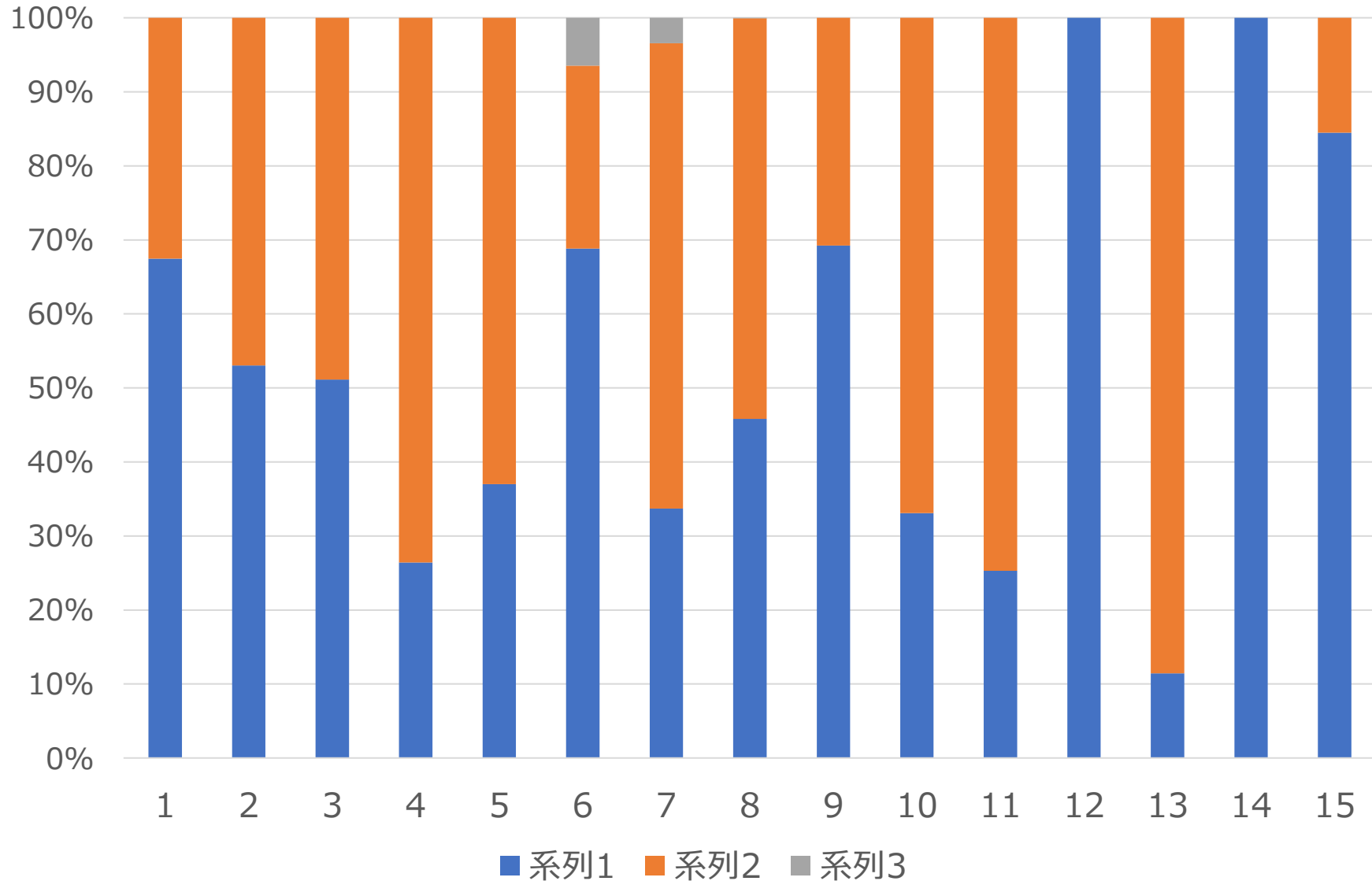


- 1273のエネルギー管理指定工場のアンケート回答に基づく、15業種の工場設備の**排熱実態調査の結果**、**全国で未利用の743PJ/yの排ガスが、2711PJ/yの排温水**が排出されていると推定されます。
- これらは**ヒートポンプの熱源**として活用可能な省エネポテンシャルと考えられます。
- **産業用ヒートポンプ***を蒸気ボイラーやバーナー等の代替として導入することにより、**大幅なエネルギーコストやCO₂排出の削減**が見込めます。

***産業用ヒートポンプ** (しくみと導入の狙い) ...

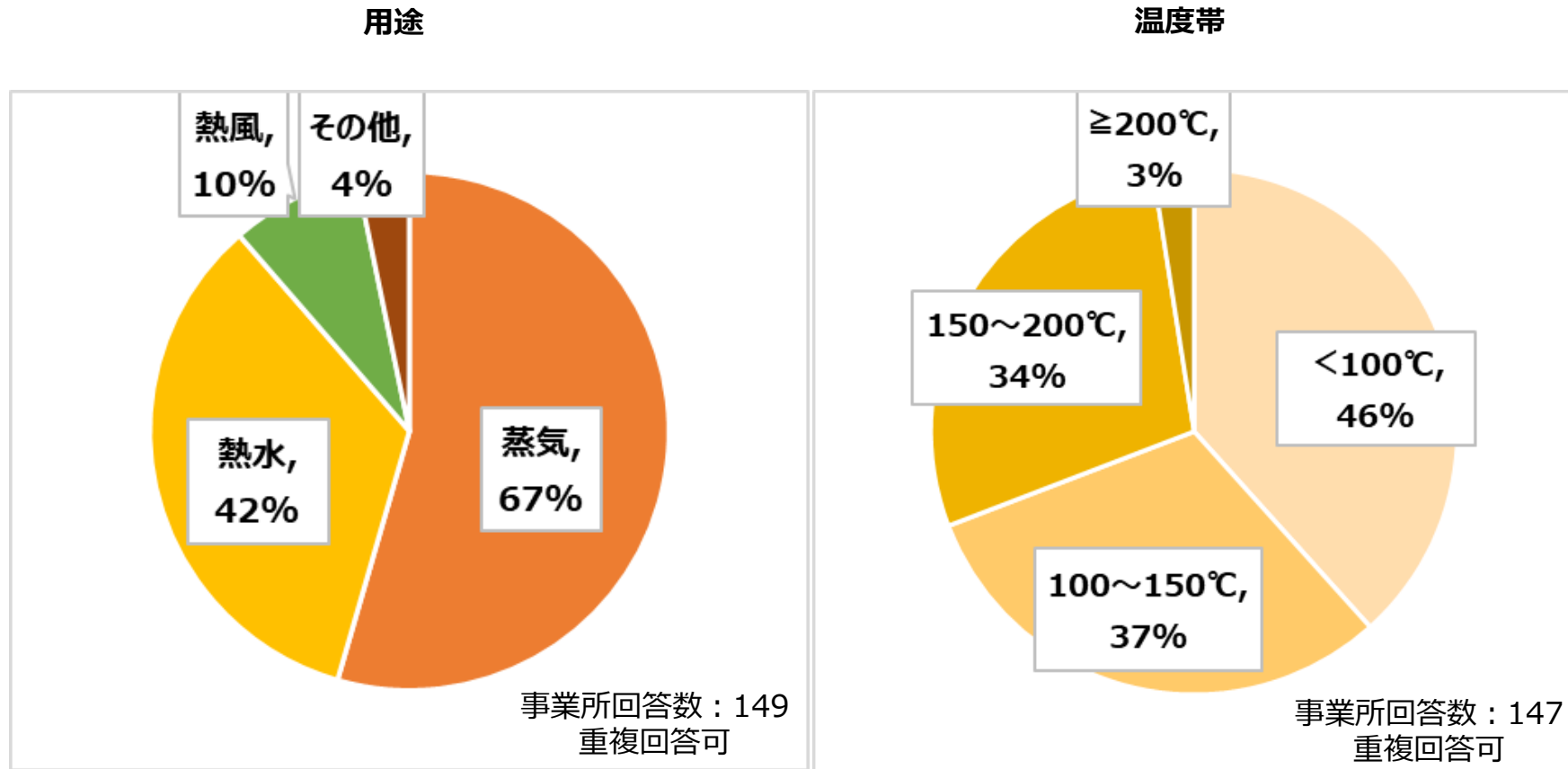
- ✓ 産業用ヒートポンプは冷凍・冷却・空調などの冷熱用途と加熱用途に大別されます。
- ✓ 冷熱用途と加熱用途いずれも冷媒の、圧縮→凝縮→膨張→蒸発→圧縮の繰り返しサイクルを利用し、加熱用途では凝縮時に温熱を取り出し利用します。
- ✓ **加熱用ヒートポンプによる方法では、例えば成績係数COP=3.5の場合、加熱に必要な圧縮の仕事(エネルギー)量は、必要な熱需要エネルギーの1/3.5でよく、これを系統電力で賄った場合、工場サイトでのCO₂の排出量は0となります。**
- ✓ 冷媒を圧縮するための仕事以外のエネルギーは、プロセスの未利用排温水や排熱などから賄われます。
- ✓ 電力のCO₂排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。

業種別排熱の内訳(全国推計値)



- 総排ガス熱量全国推計値：743PJ/年、総温水排熱量全国推計値：2711PJ/年、固体顕熱排熱量全国推計値：15PJ/年
- 未利用熱発生状況に関するアンケート調査：配布4483事業所、回収1273事業所

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)

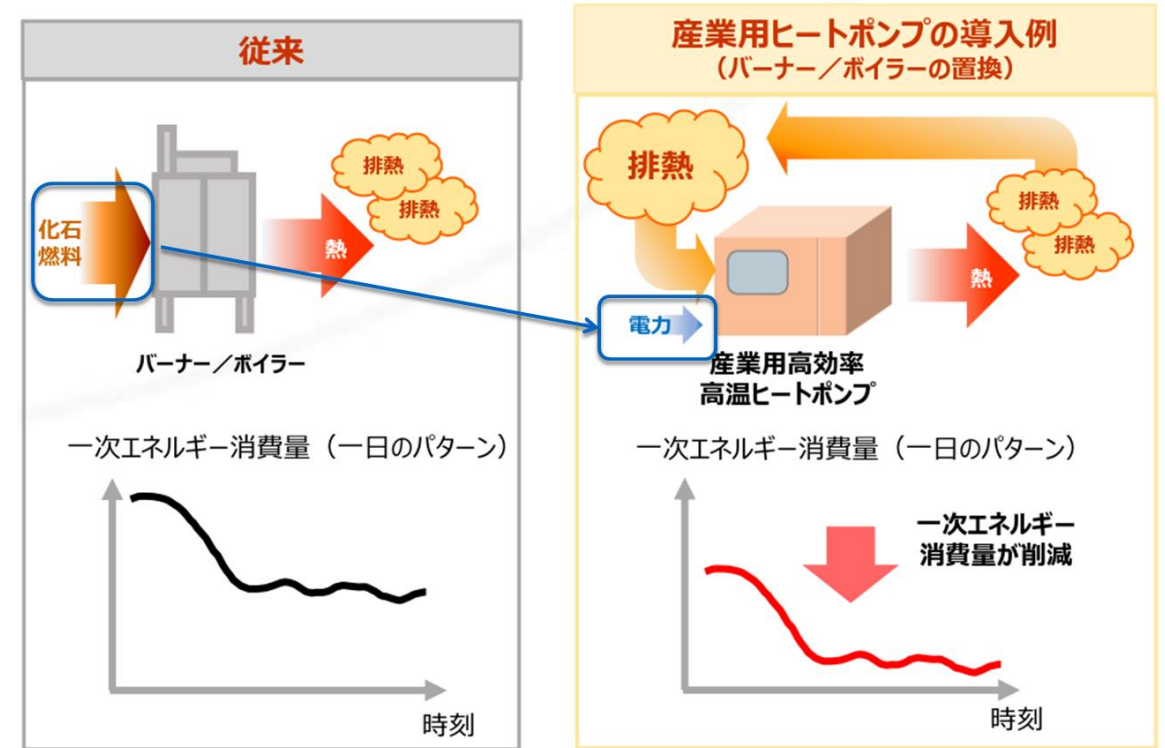


- 代替用途は蒸気、熱水、熱風の順
- 200°Cまでの温度帯の代替ニーズが高い

2. 開発目標（産業用ヒートポンプシミュレーターの開発）

課題

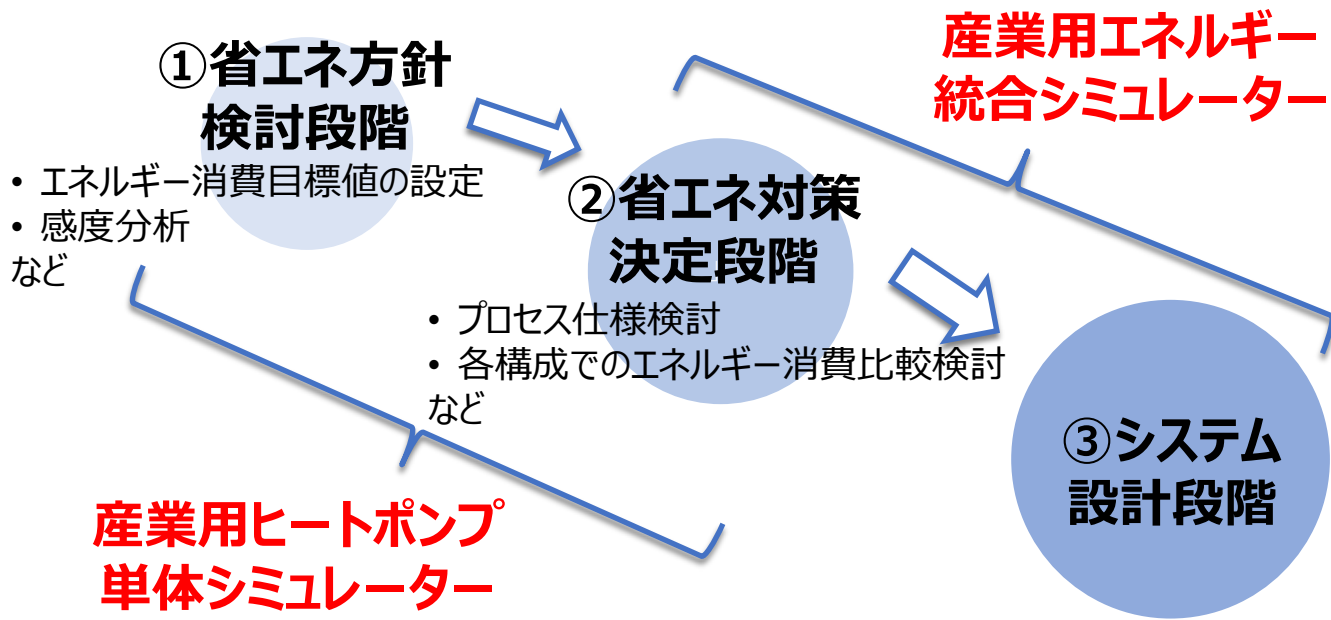
- **産業分野**では、生産工程・プロセスによって熱の使い方が様々で、家庭やビルの空調や給湯のように**定型化された設計・エンジニアリングが困難**という課題あり
- **産業用のヒートポンプの導入検討時にはさまざまデータを取得する必要**があり、導入検討のための時間とコストが多大となることが、**産業用ヒートポンプ導入の大きな障壁**となっていた



開発の目標

- **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

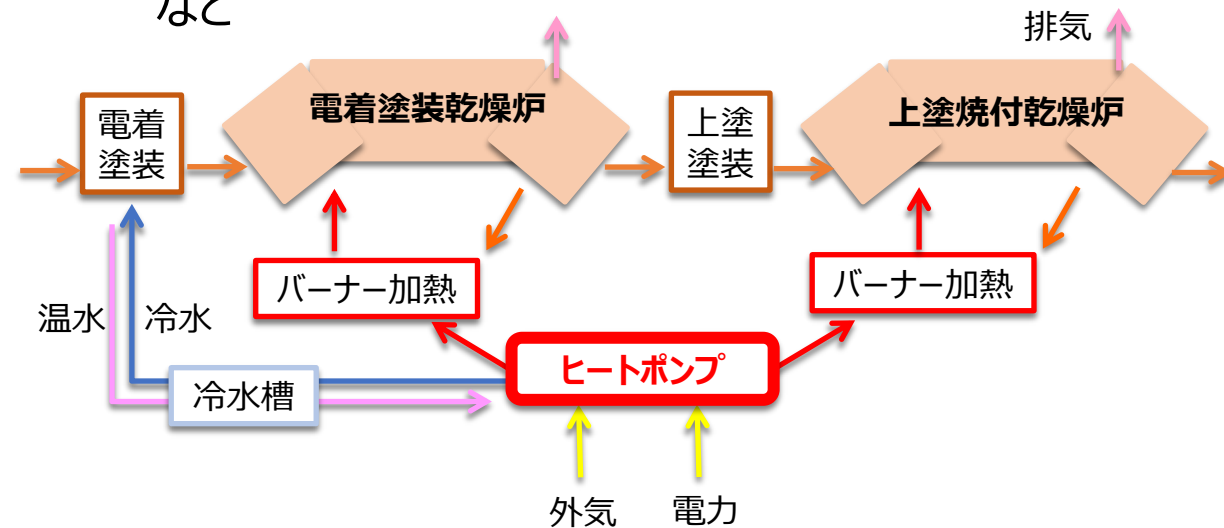
シミュレーターの使われ方の想定



➤ 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

3. 成果：シミュレーターの数値モデルと解析手法

➤ **モジュラー解析手法**：システムを構成する要素ごとに数値モデルを構築

➤ **汎用解析理論に基づき年間性能を精度の信頼性を持ちつつ評価**

➤ **物性値はREFPROPがベース**

➤ **冷媒を変更した場合の比較が容易**

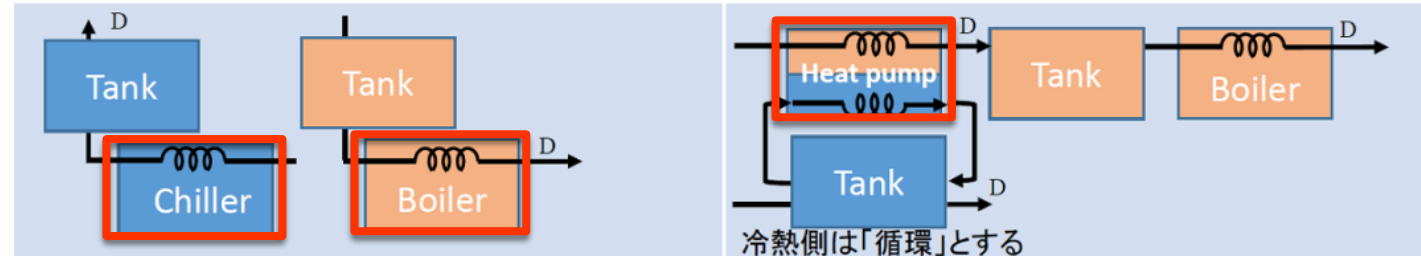
➤ **2元冷媒サイクルの計算ロジックを構築**

➤ **ピンチ温度による数値モデルを採用**

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

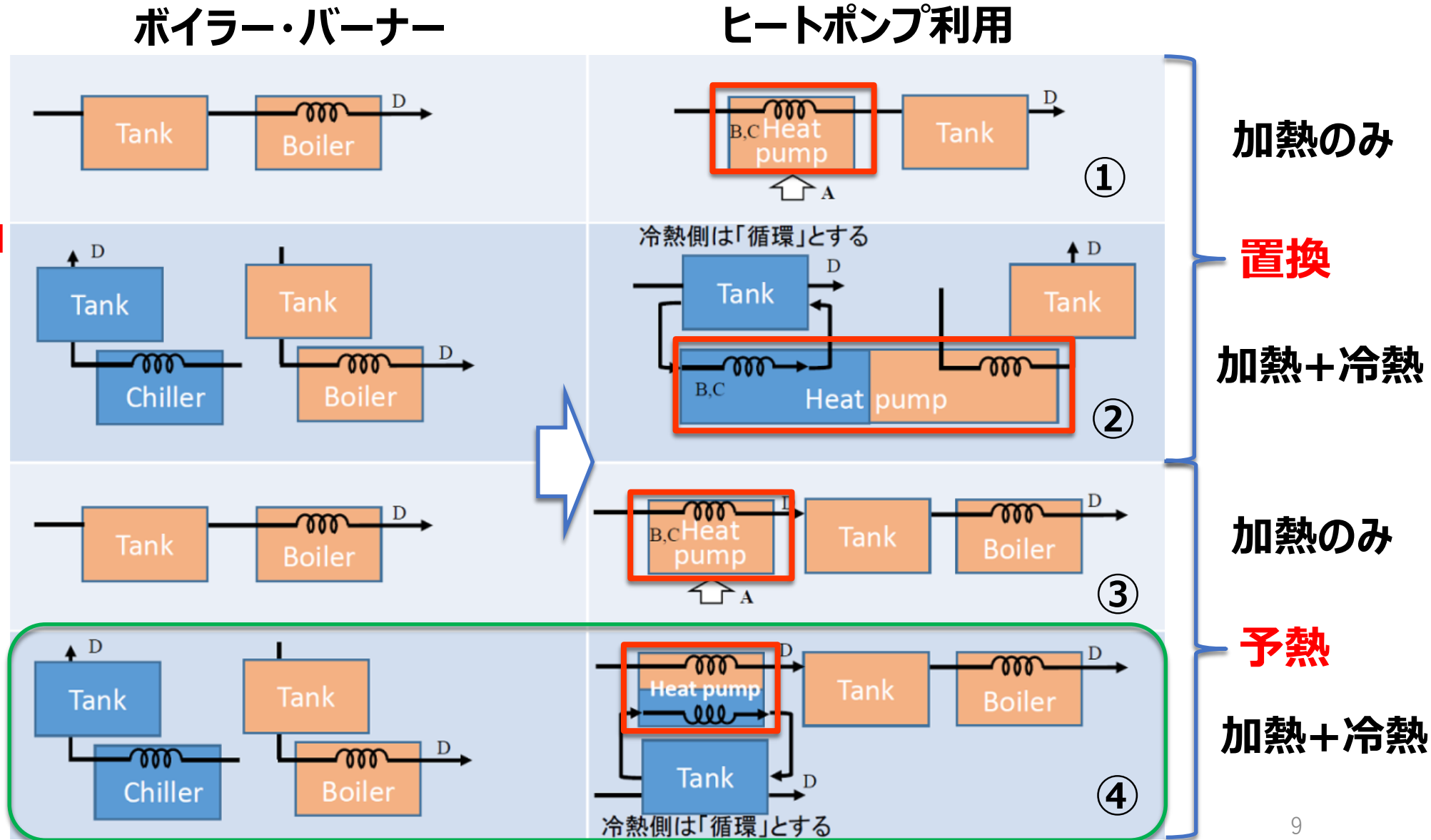
- ・消費エネルギー
- ・加熱能力
- ・負荷率
- ・消費一次エネルギー
- ・効率

計算の基本構成パターン(①~④)：非循環加温

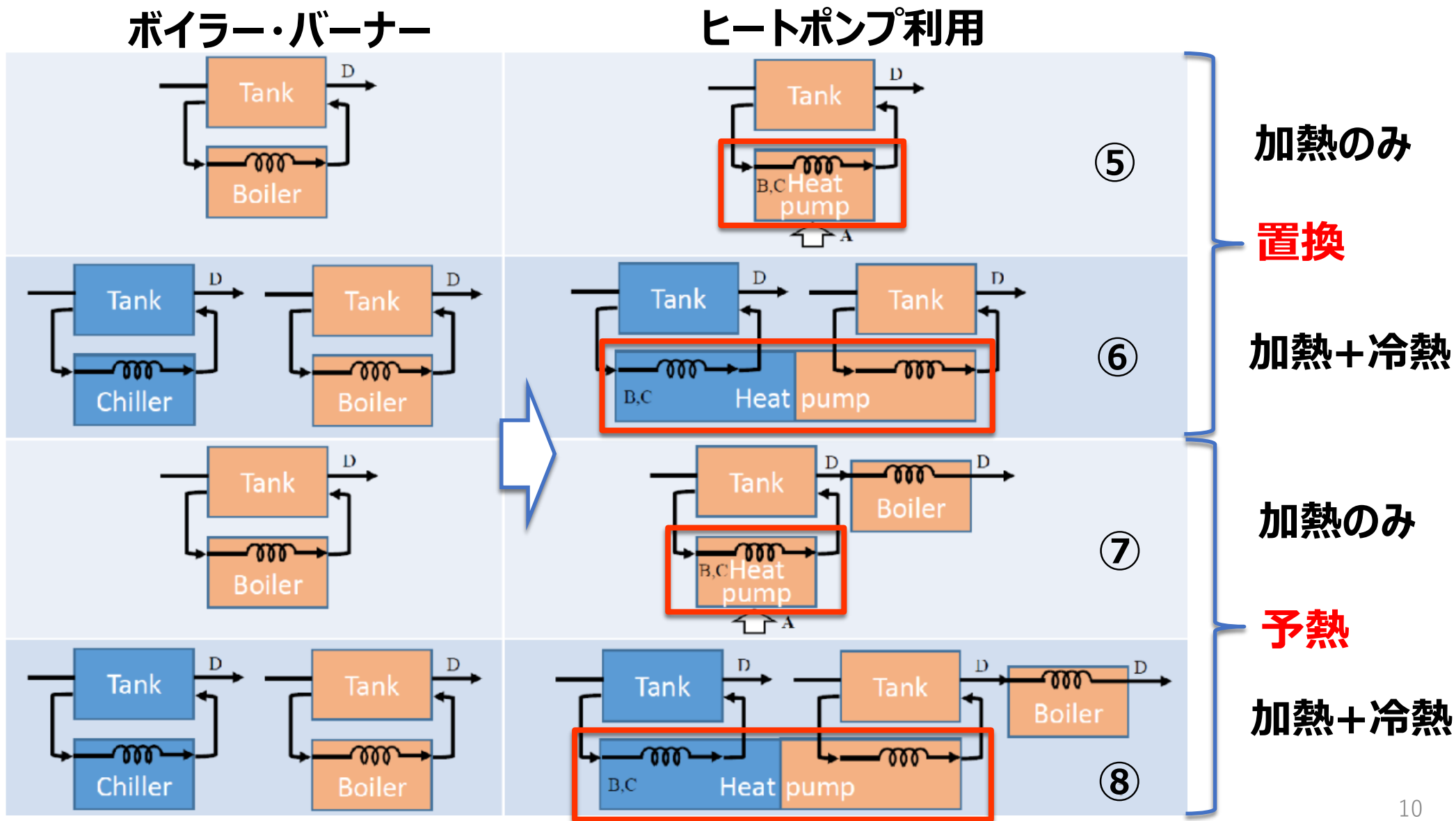
▶ ヒートポンプシステムの導入パターンを

- ・「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



計算の基本構成パターン(⑤~⑧)：循環加温



産業用ヒートポンプ単体シミュレーター：入出力画面の例

ヒートポンプ(パターン④)

入力定数																	出力定数		
TYPE	4He	atpump	10															Total Primary Energy[kWh]	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/kWh]	CO2elec[tCO2/kWh]	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.C	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_primar y[kW]	eta_load[%]	heating_ Q[kW]	W_primar 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			3.3333	155.5	88.3099	105.972	32.7103	3.58919	88.6458	57.6824	69.218		166	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		132	13363.3	

入力変数

出力変数

ヒートポンプ
定格加熱能力

断熱
効率

ヒートポンプの
冷媒名

CO₂排出
係数

過熱度/
過冷却度

ピンチ
温度

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

ユーザーインターフェース画面の例

タイプ④非循環・予熱・冷温同時取り出しの場合

未利用熱単体シミュレータ

日本語/英語選択
Language 日本語 終了

入力部分

両タイプ選択 タイプ4 解析概要

左側タイプ選択 タイプ4 ポイラ/HP選択 ボイラー

右側タイプ選択 タイプ4 ポイラ/HP選択 単元圧縮式HP

Ph線図 TIME = 12:00

R410A.CSV

P [kPa] 10000 1000 100 10

h [kJ/kg] 0 100 200 300 400 500

冷媒選択
Chiller内冷媒選択 R410A.CSV
低温側冷媒選択 WATER.CSV
高温側冷媒選択 AIR.CSV

計算開始 入力パラメータ編集

経済性評価実行 グラフ表示

経済性評価設定 結果リスト表示

指定時刻における冷媒のP-h、T-s線図

冷媒選択 CO2.CSV

内部熱交換器

一次消費エネルギーの比較

Q[kW] Type4 Boiler Type4 HP

0 4 8 12 16 20 24 [h]hour

一次エネルギー消費量の比較

Qh[kWh] Type4 Boiler Type4 HP

一次エネルギー消費量の比較

CO₂排出量の比較

tCO₂/total time Type4 Boiler Type4 HP

CO₂排出量の比較

一次エネルギー消費量の比較

Type4 Boiler 2343.12 [kWh]
Type4 HP (CO2.CSV) 1892.3 [kWh]

CO₂排出量の比較

Type4 Boiler 0.00015981 [tCO₂]
Type4 HP (CO2.CSV) 0.000116981 [tCO₂]

産業用ヒートポンプ単体シミュレータ (2019, 2020年 早稲田大学齋藤研究室)

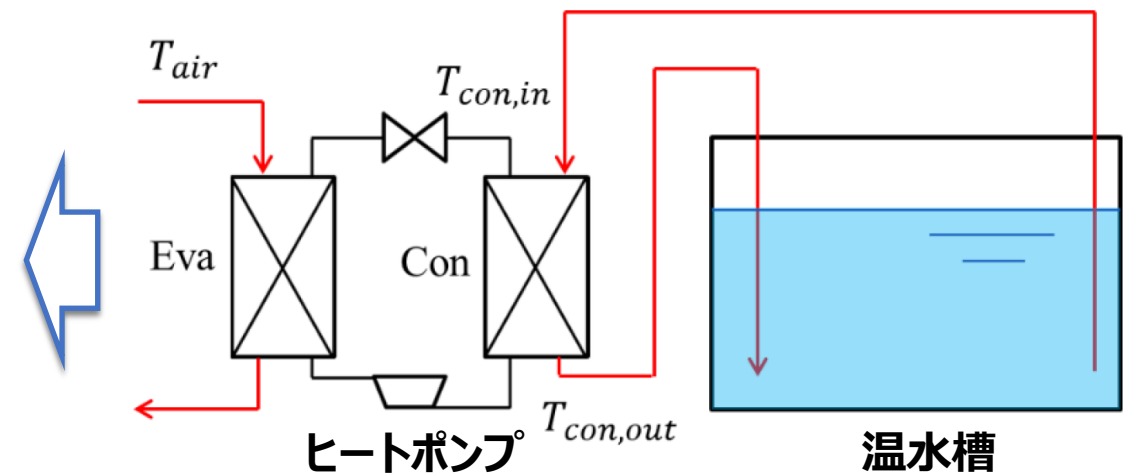
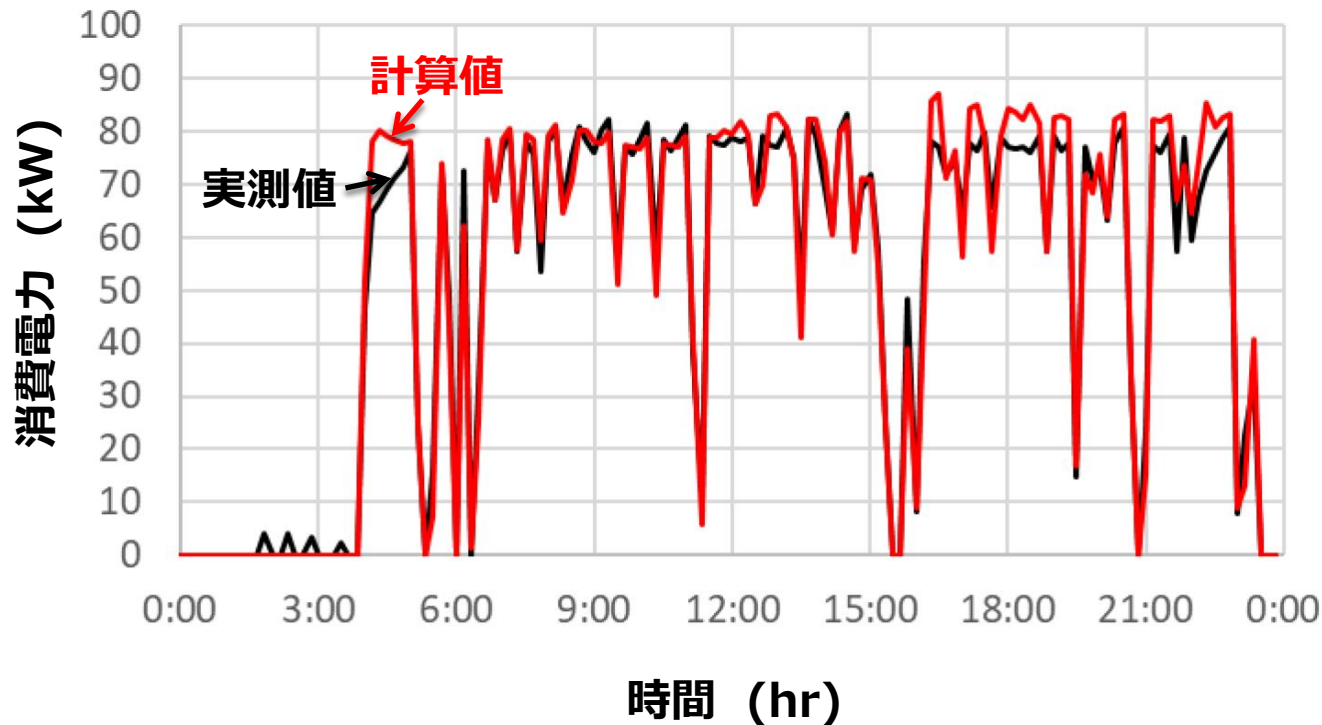
LCCPへ転送 LCCP起動 タイプ分類指標 全タイプ分類 動作環境

一次消費エネルギーのトレンド表示

LCCP(製品寿命気候負荷)計算機能

計算精度の検証例

- 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.

経済性評価計算例

- 左右を同一タイプ、同一機種(この例ではHP)に設定。
- 使用する燃料を異なるものとし計算実行。

未利用熱媒体シミュレータ

高タイプ選択: タイプ1 | 解析概要 | Language: 日本語 | 終了

左側タイプ選択: タイプ1 | ボイラ/HP選択: 二元圧縮式HP | 右側タイプ選択: タイプ1 | ボイラ/HP選択: 二元圧縮式HP

Ph 線図 | TIME = 12:00 | R134A.CSV, R410A.CSV

Ph 線図 | TIME = 12:00 | R134A.CSV, R410A.CSV

経済性評価グラフ

エネルギー消費量<計測時系列> | エネルギー消費量 | エネルギー料金

タイプ: TYPE 1 | TYPE 1

モード: 二元HP | 二元HP

エネルギー区分: ボイラー, チャー, HeatPump, Preheater

エネルギー料金単価 (ボイラー): 75000 円/k | 15 円/kWh

エネルギー料金単価 (PreHeater): 1 | 1

調整係数: 1 | 1

CALC | Close

➤ **タイプの組み合わせ、エネルギーの組み合わせを自由に設定して計算できます。**

LCCP(製品寿命気候負荷)評価計算の定義式

$$\text{LCCP} = \text{Direct Emissions} + \text{Indirect Emissions}$$

$$\text{Direct Emissions} = C * (L * \text{ALR} + \text{EOL}) * (\text{GWP} + \text{Adp. GWP})$$

直接影響 = 冷媒充填量 × (使用年数 × 年間漏洩率 + 廃棄時の冷媒放出率) × GWP値

$$\text{Indirect Emissions} = L * \text{AEC} * \text{EM} + \sum(m * \text{MM}) + \sum(\text{mr} * \text{RM}) + C * (1 + L * \text{ALR}) * \text{RFM} + C * (1 - \text{EOL}) * \text{RFD}$$

間接影響 = 消費電力量 + 製品製造 (材料) + 材料リサイクル + 冷媒製造 + 冷媒廃棄

C	=	冷媒充填量(kg)
L	=	使用年数(年)
ALR	=	年間漏洩率(%充填量に対する割合)
EOL	=	排気時の冷媒放出率(%充填量に対する割合)
GWP	=	地球温暖化係数(kg CO ₂ /kg)
Adp.GWP	=	冷媒による大気分解生成物のGWP(kg CO ₂ /kg)
AEC	=	年間エネルギー消費量(kWh)
EM	=	電力kWh当たりのCO ₂ 生成量(kg CO ₂ /kg)
m	=	製品重量(kg)
MM	=	製品材料のCO ₂ 生成量(kg CO ₂ /kg)
mr	=	リサイクル材料の重量(kg)
RM	=	リサイクル材料のCO ₂ 生成量(kg CO ₂ /kg)
RFM	=	冷媒製造による排出量(kg CO ₂ /kg)
RFD	=	冷媒廃棄量(kg CO ₂ /kg)

rate	100
C	0.6
m	100
L	15
AEC	328.55
EM	0.453
GWP	148
adpGW	0
ALR	4
EOL	15
MM	2.40774
RM	0.0562
mr	50
RFM	0.7096
RFD	0.7095

LCCP画面右下にこれらの値が表示され、必要に応じて対話で変更できます。

LCCP (製品寿命気候負荷)評価計算例

② AEC画面の中からLCCP計算をさせたいものをさらに選択して、右の矢印をクリックすると、LCCP計算を行って、LCCP画面に計算結果を表示します。

① CSV_Listから計算したいデータを選択して、矢印ボタンをクリックするとAEC画面に選択されたデータがリストアップされます。

File	RFM	AEC	GWP	adpG...	Manuf...
A工場HP	R410A	23.59...	148	0	1.000...
A工場ボイラ	R134A	98.80...	148	0	1.000...
テスト1B	CO2	33.89...	1.000...	1.000...	0.000...
テスト1HP1	CO2	15.04...	1.000...	1.000...	0.000...

項目	A工場HP	A工場ボイラ	テスト1HP1
運転CO2	160.348029	671.380913	102.245466
機器製造C...	240.774000	240.774000	240.774000
リサイクルC...	2.810000	2.810000	2.810000
冷媒製造C...	0.425760	0.425760	0.425760
冷媒廃棄...	-5.959800	-5.959800	-5.959800
Direct	6660.0000...	6660.0000...	90.000000
Indirect	423.943589	934.976473	365.841026
LCCP	7083.9435...	7594.9764...	455.841026
IIR LCCP g...			
TEWI Direct	6660.0000...	6660.0000...	45.000000
TEWI Indir...	160.348029	671.380913	102.245466
TEWI	6820.3480...	7331.3809...	147.245466

CO2(kg)

MakeGraph

Save

TEWI(総等価
温暖化影響)

③ LCCP画面下のMakeGraphボタンをクリックすると、結果値をグラフ表示します。

LCCP kgCO2e

TEWI kgCO2e

LCCP

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単体シミュレーター (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

① 'シミュレーターダウンロードサイトURL <http://neheatpump.org/UHMS/>

④ パスワードの発行、 ログイン (使用許諾条件あり)

③ アフィリエーションの入力

所属組織名(会社名)
例: 株式会社ABC

所属部署名
例: 研究開発

住所
例: 東京都千代田区大手町1丁目1番地

氏名
例: 日本太郎

電話番号
例: 12-3456-7890

E-mail
例: name@company.co.jp

登録要請

⑤ ダウンロード

産業用ヒートポンプ単体シミュレーター :: ダウンロード

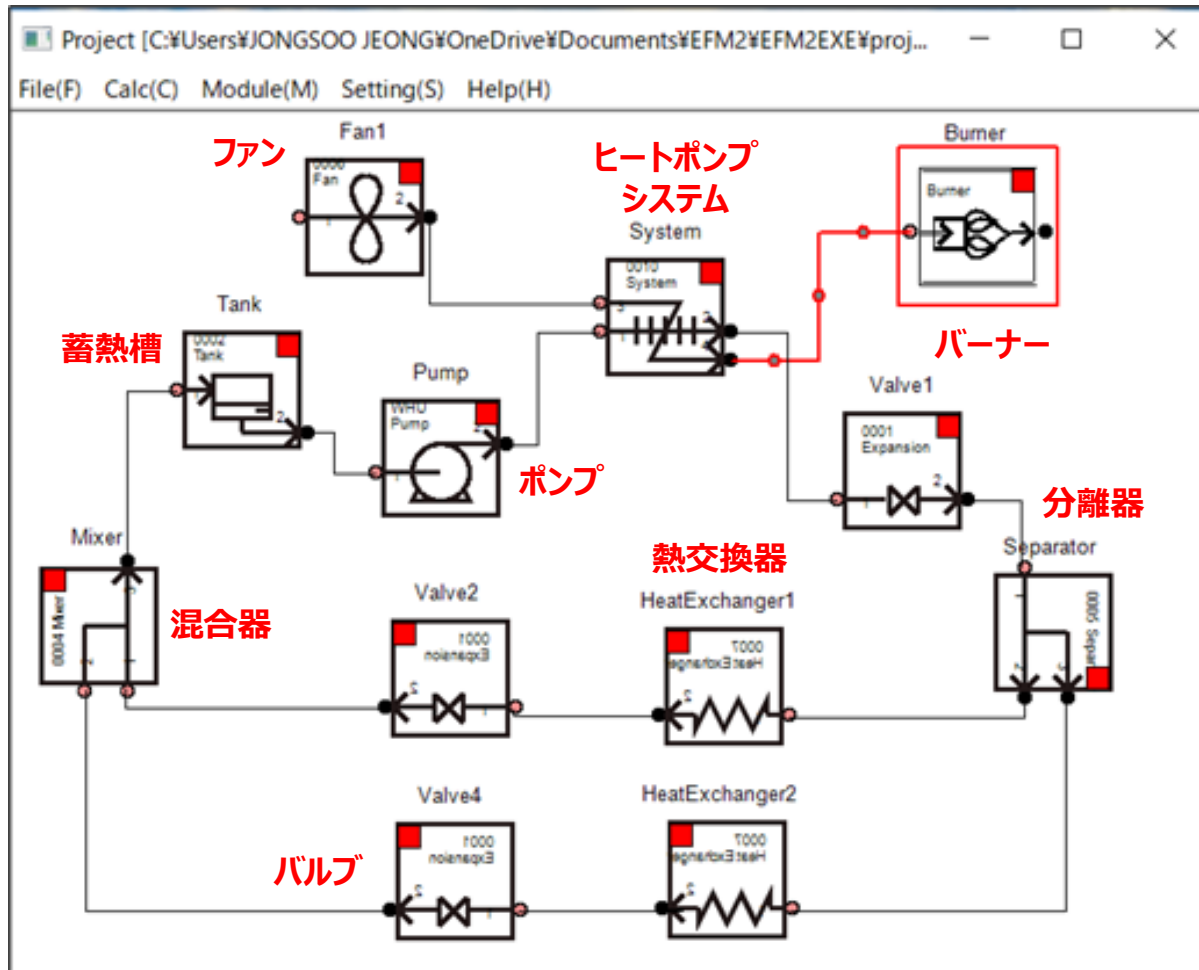
リンク	改定内容
Download	2022/11/25 1. モーター効率考慮 2. チラ-、HP計算精度向上 3. LCCP(更新)評価機能
Download	2022/4/7 1. 2元冷媒対応 2. TS特性曲線 3. 経済性、LCCP評価機能
Download	2021/2/13 1. 画面表示改良 2. チラ-機能追加
Download	2020/12/3 1. 初期リリース 2. 計算部にユーザ-認証機能

冷媒テーブル 技術情報 Q&A

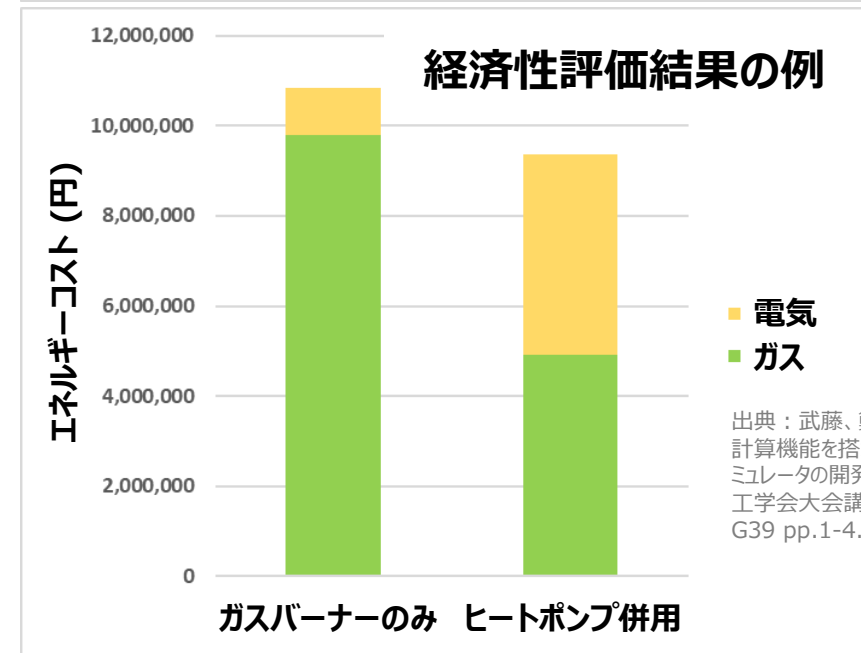
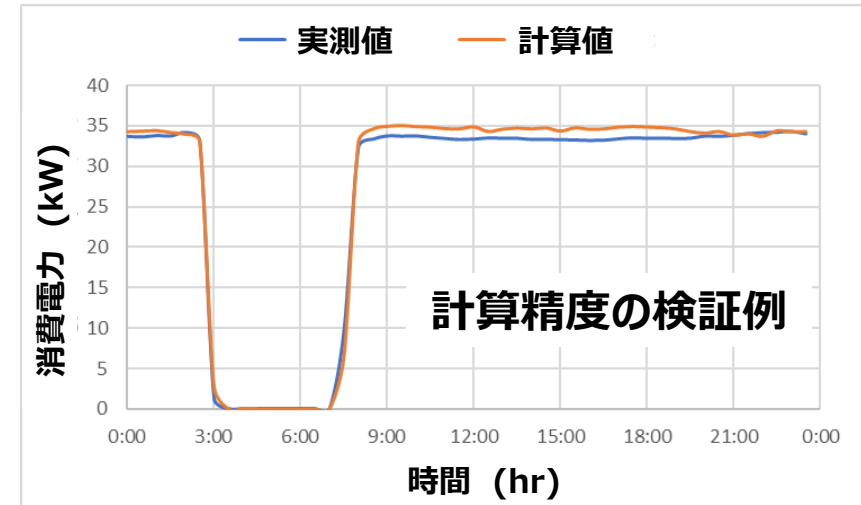
産業用エネルギー統合シミュレーター

➤ 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」の開発しました。



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



出典：武藤、鄭、宮岡、齋藤：“経済性評価計算機能を搭載した産業用エネルギー統合シミュレータの開発” 令和4年度空気調和・衛生工学会大会講演論文集、(2022.9.14-16) G39 pp.1-4.

統合シミュレーターのシステム構築・計算支援ツール「導入事例ライブラリ」

- 産業用ヒートポンプ統合シミュレーターは、システム全体の性能・環境性・経済性の3つの指標から分析できるため、より具体的なヒートポンプ導入検討が可能となります。
- 一方、統合シミュレーターを使用する際には、GUI上にモジュールを配置する必要がありますが、システムフロー図を基に配置するモジュールの接続や入力条件を工夫して構築する必要があり、ユーザーのシステム構築や計算を支援するためのツール「導入事例ライブラリ」を作成しました。
- ヒートポンプ導入事例のシステム概要、システムフロー図、GUI図、入力条件、解析結果が参照可能。

The image shows a screenshot of a spreadsheet titled 'Library of case study' with several blue callouts and arrows pointing to specific data points and interface elements. The callouts are:

- ヒートポンプの導入概要 (Heat pump introduction overview)
- ヒートポンプ導入前後のシステムフロー (System flow before and after heat pump introduction)
- システムの性能・経済性・環境性能 (System performance, economic, and environmental performance)
- 業種 (Industry)
- プロセス (Process)
- 導入システム (Introduction system)
- 導入パターン (Introduction pattern)
- 導入プロセスの概要 (Overview of the introduction process)
- GUI図へのリンク (Link to the GUI diagram)

The spreadsheet table contains the following data:

業種	用途	導入事例システム名	区分	概要	システムファイル
製紙	製紙	製紙工場A	製紙	製紙工場A	Installation example
製糖	製糖	製糖工場B	製糖	製糖工場B	Installation example
製油	製油	製油工場C	製油	製油工場C	Installation example
製粉	製粉	製粉工場D	製粉	製粉工場D	Installation example
製氷	製氷	製氷工場E	製氷	製氷工場E	Installation example
製氷	製氷	製氷工場F	製氷	製氷工場F	Installation example
製氷	製氷	製氷工場G	製氷	製氷工場G	Installation example
製氷	製氷	製氷工場H	製氷	製氷工場H	Installation example
製氷	製氷	製氷工場I	製氷	製氷工場I	Installation example
製氷	製氷	製氷工場J	製氷	製氷工場J	Installation example

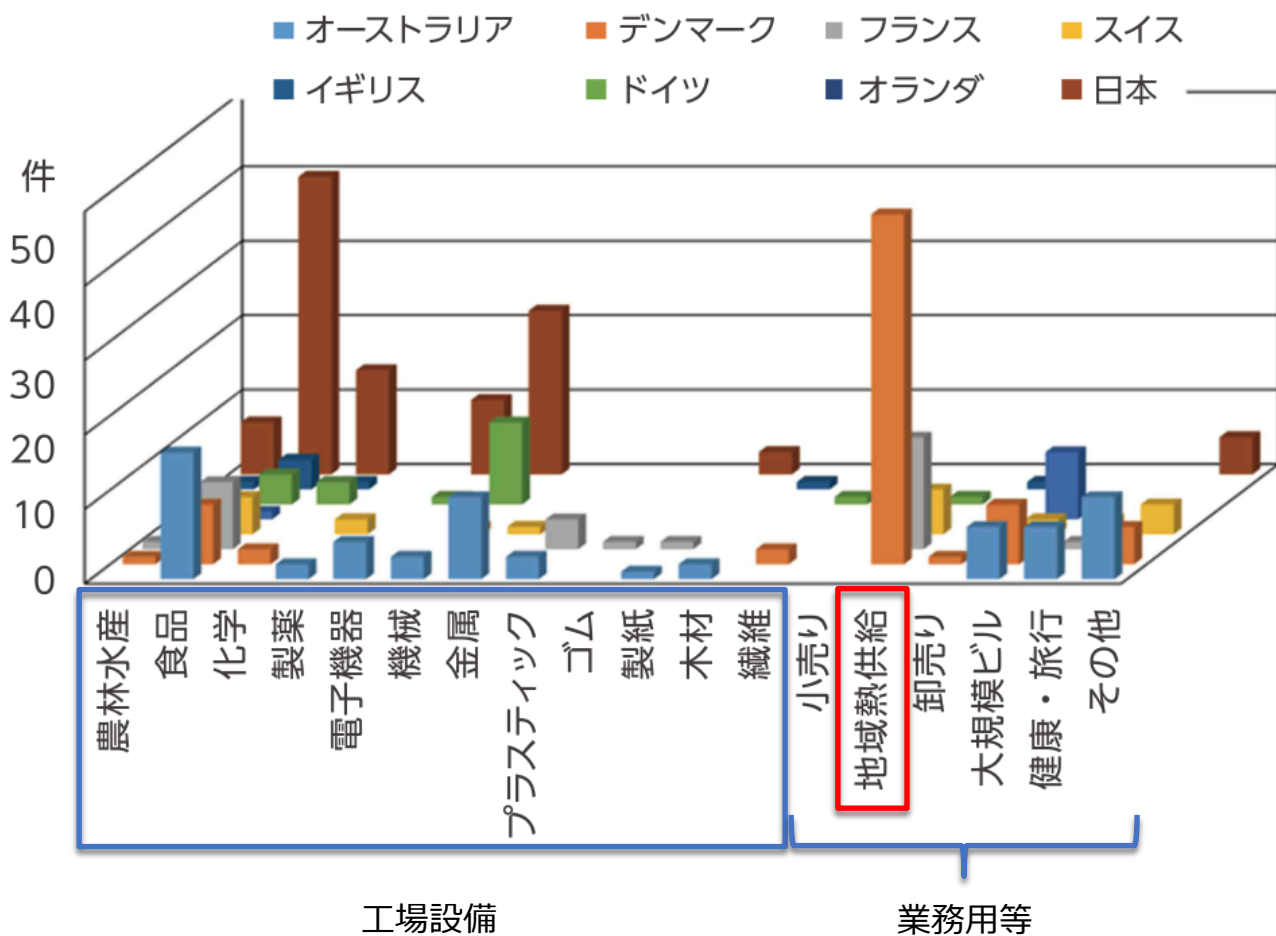
On the right side of the image, there is a schematic diagram of a system with components like Fan1, Burner, Tank, Mixer, Valve1, Separator, Valve4, and HeatExchanger2. A large blue circle labeled 'システムのGUI図' (System GUI diagram) is overlaid on the diagram, with a red arrow pointing from the spreadsheet to it.

導入事例ライブラリの構成イメージ

<参考> 欧州の産業用ヒートポンプの導入事例、取り組み例

➤ 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℃)



Wienerberger社

レンガ乾燥工程に導入された
閉ループヒートポンプ

Agrana社

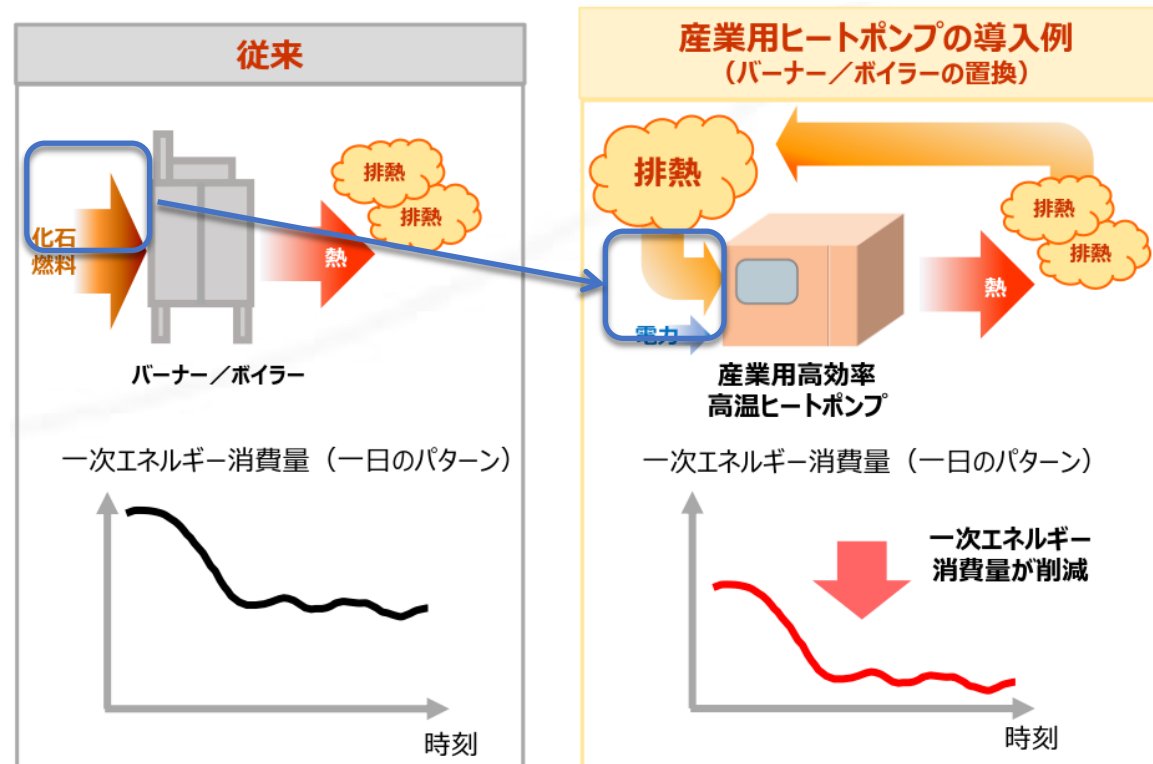
でんぷん乾燥工程に導入された
閉ループヒートポンプ

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

4. 今後の展望（産業用ヒートポンプシミュレーターの開発）

- 具体的な事例における産業用ヒートポンプの導入効果について本シミュレーターを用いて示すとともに、
- 今後はより多くの関係事業者の皆様に活用いただけるよう本シミュレーターの実用化に向けた取り組みを進め、ヒートポンプの導入効果の見える化を目指していきます。



ご清聴ありがとうございました