

# 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

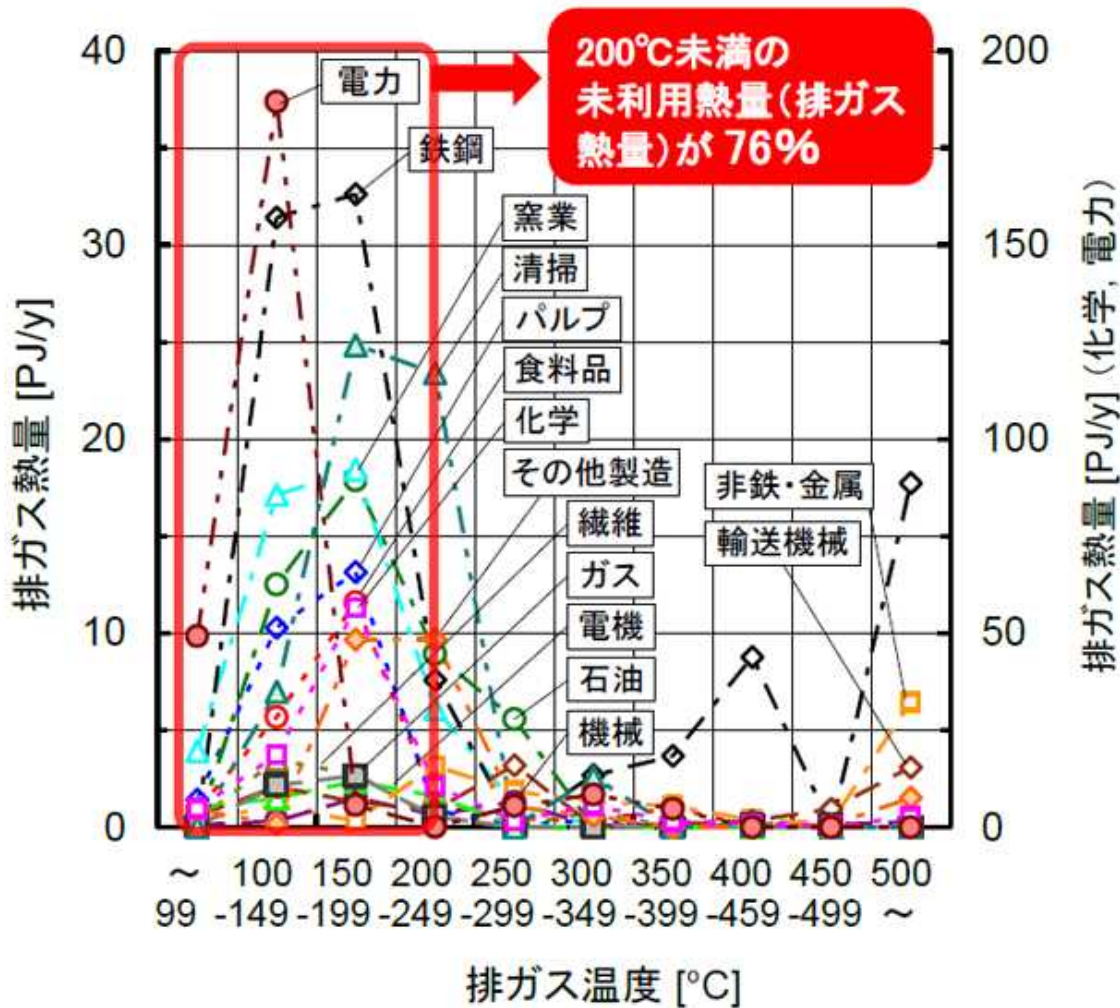
プロジェクト名：未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発

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3月



# 研究開発の背景と狙い

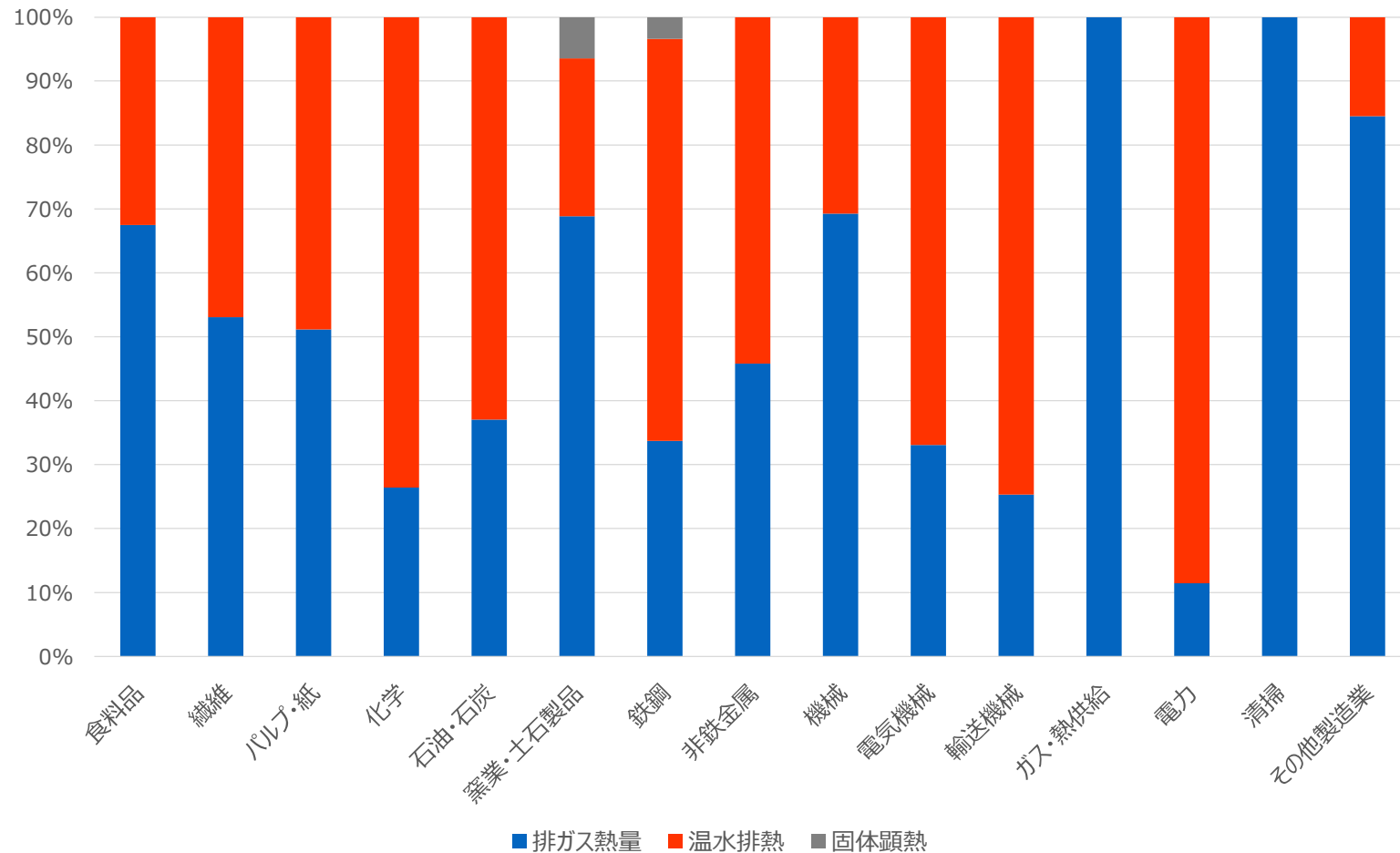


- 1273のエネルギー管理指定工場のアンケート回答に基づく、15業種の工場設備の**排熱実態調査の結果、全国で未利用の743PJ/yの排ガスが、2711PJ/yの排温水**が排出されていると推定されます。
- これらは**ヒートポンプの熱源**として活用可能な省エネポテンシャルと考えられます。
- **産業用ヒートポンプ\***を蒸気ボイラーやバーナー等の代替として導入することにより、**大幅なエネルギーコストやCO<sub>2</sub>排出の削減**が見込めます。

\***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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>排出係数を考慮しても、大幅なCO<sub>2</sub>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。

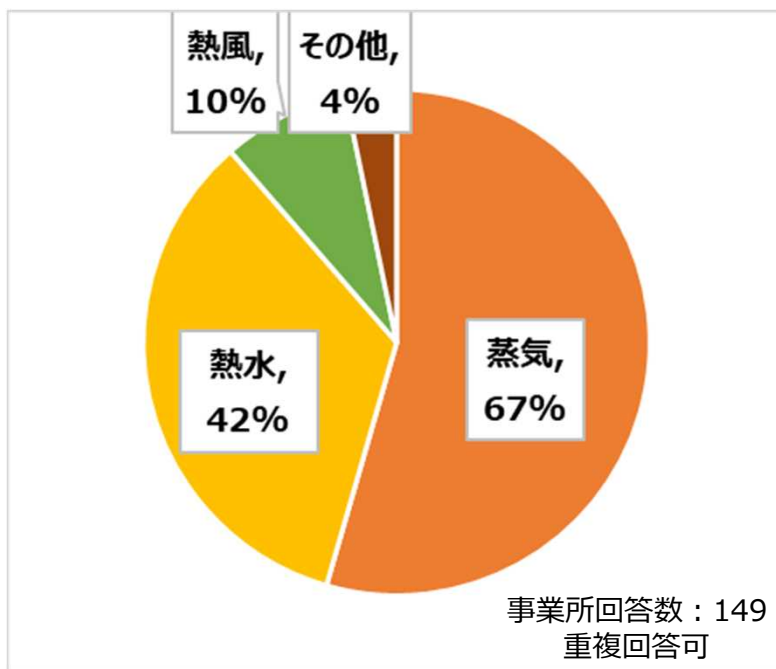
# 業種別排熱の内訳(全国推計値)



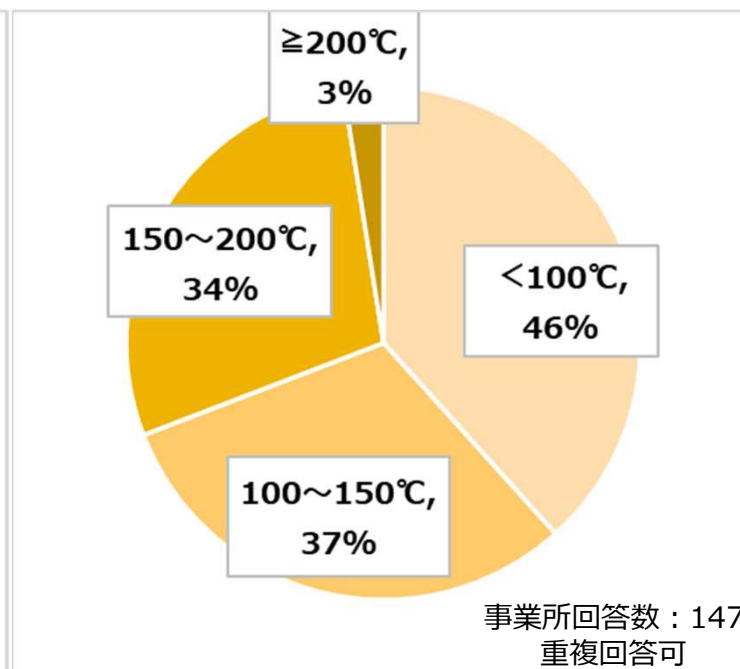
- 総排ガス熱量全国推計値：743PJ/年、総温水排熱量全国推計値：2711PJ/年、固体顕熱排熱量全国推計値：15PJ/年
  - 未利用熱発生状況に関するアンケート調査：配布4483事業所、回収1273事業所

# 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)

## 用途



## 温度帯



- 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

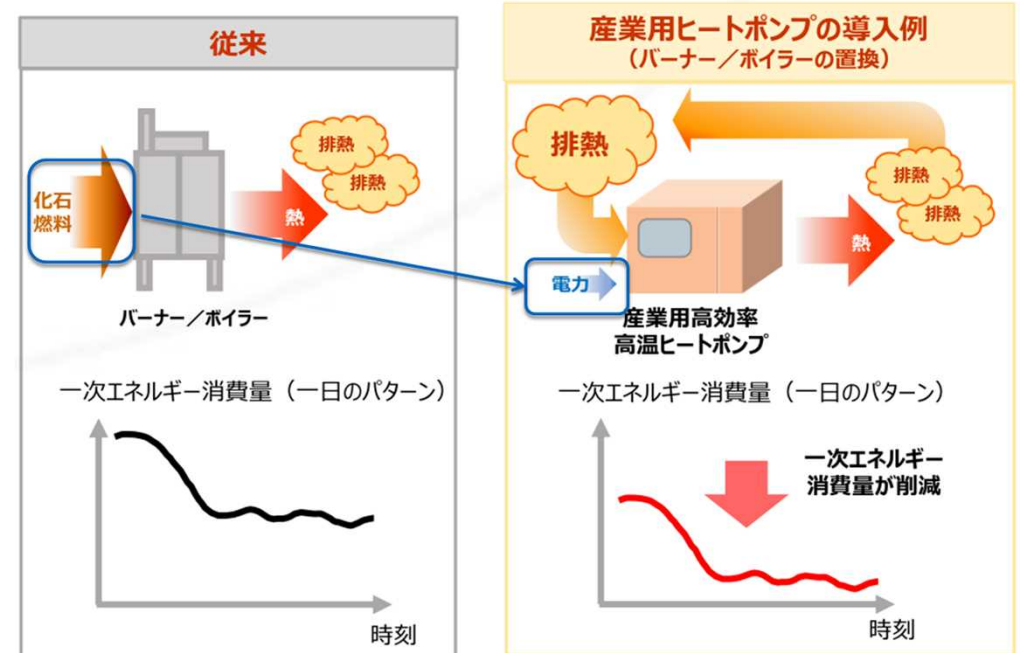
## 課題

- **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CO<sub>2</sub>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

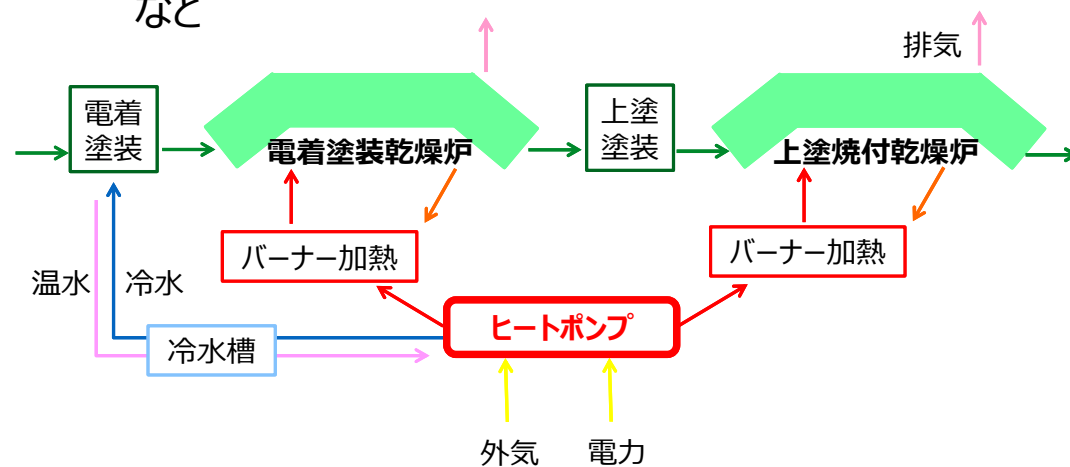
## ③ システム 設計段階

## 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・CO<sub>2</sub>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

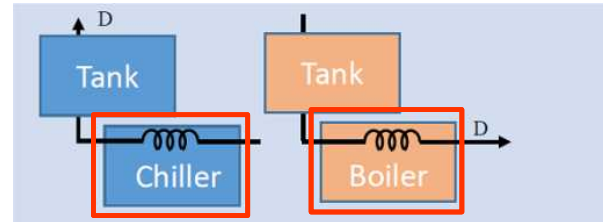


非循環加熱・予熱・冷温同時取り出しパターン④でのヒートポンプ適用検討工程例

- **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



### 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

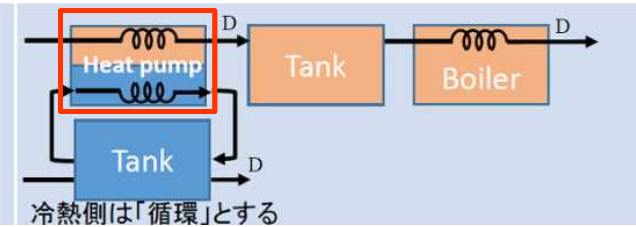
### ボイラー出力変数

- ・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

ヒートポンプ利用



### 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

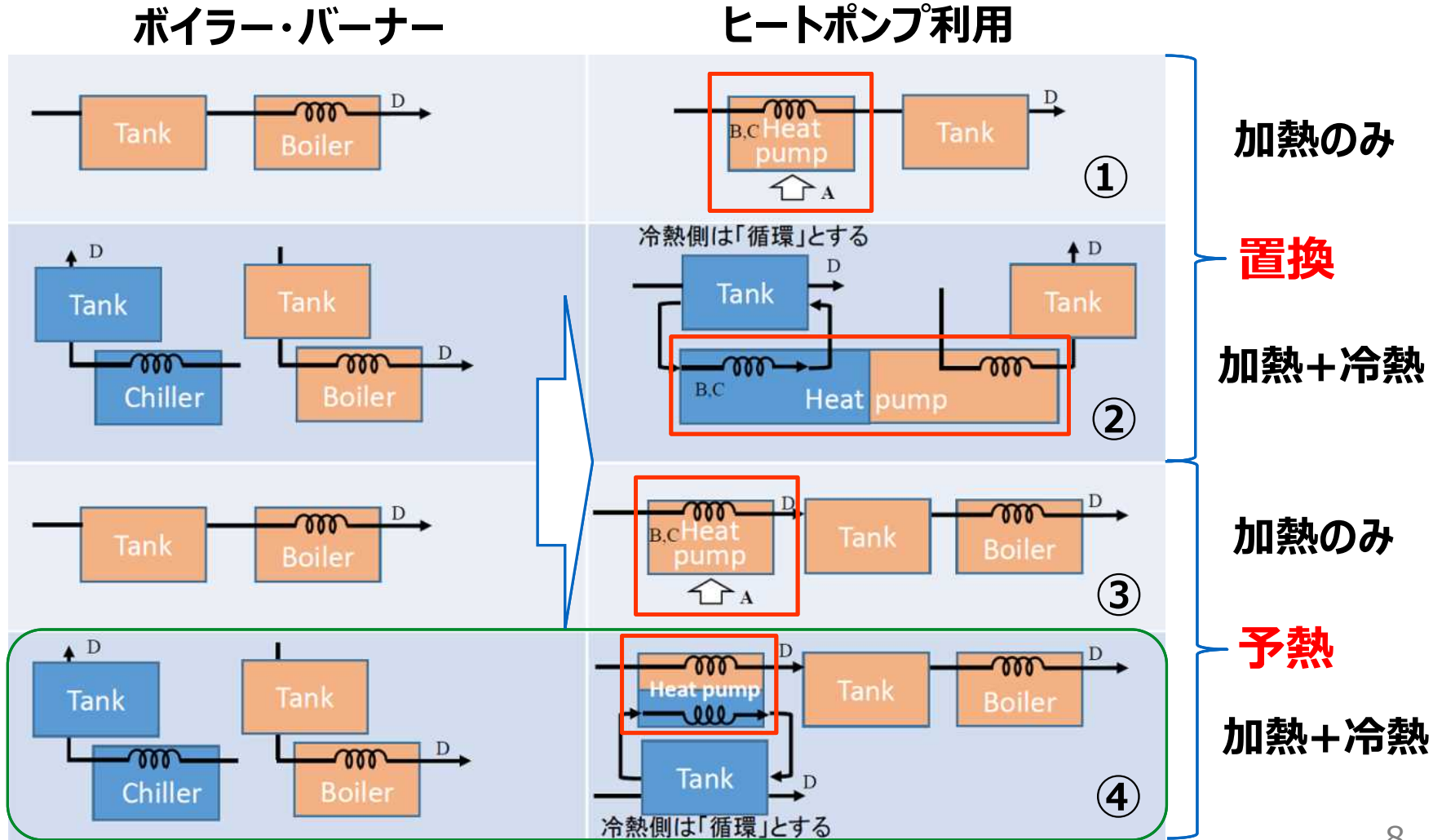
- ・消費エネルギー
- ・加熱能力
- ・負荷率
- ・消費一次エネルギー
- ・効率

# 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

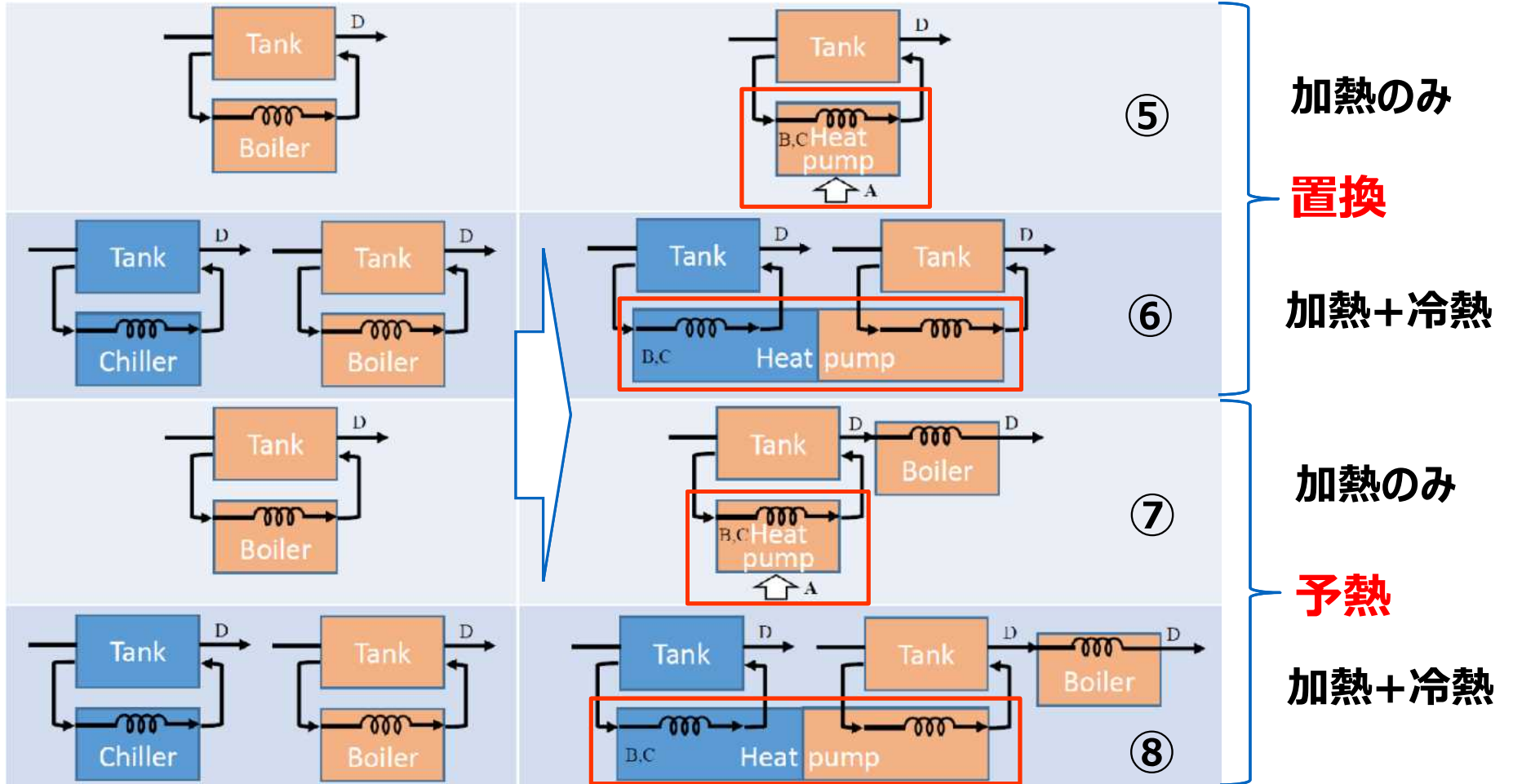




# 産業用ヒートポンプシミュレーター 計算の基本構成パターン(⑤~⑧)：循環加温)

## ボイラー・バーナー

## ヒートポンプ利用



# 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	q_rated_boiler[kW]	eta_boiler[%]	q_rated_HP[kW]	eta_ad[-]	ref_name_1	ref_name_2	ref_name_Chiller	eta_primary[%]	Condition (Higher)	Condition (Lower)	CO2burn[tCO2/kWh]	CO2elec[tCO2/kWh]	SH[°C]	SC[°C]	pinch_t_condensator[°C]	pinch_t_evaporator[°C]	Int_Hex[0:1:true]	Total Primary Energy[kWh]	Total CO2 Emissions[tCO2]
120	90	120	0.7	CO2.CSV	null	null	36.9	AIR.CSV	WATER.CSV	6.93E-08	1.39E-07	5	5	5	15	0	71453.5	0.00436				
HP Input				Boiler Input				HP Output				Boiler Output				totalW_primary[kW]	P1[kPa]					
time	t_con_out[°C]	t_con_in[°C]	g_1[kg/s]	t_eva_out[°C]	t_eva_in[°C]	g_2[kg/s]	t_boiler_out[°C]	eta_load[%]	heating_Q[kW]	W[kW]	COP	W_primary[kW]	eta_load[%]	heating_Q[kW]	W_primary[kW]	totalW_primary[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	12.2	16	2.83333	155.5	88.3099	105.972	32.7103	3.58919	88.6458	57.6824	69.218	77.8576	166.56	13433.9				
706	11:40	101.7	20.6	1.276762	12.2	16	2.98	156.4	87.0079	104.41	32.0277	3.56958	86.7959	59.0518	70.8621	77.8576	166.32	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  
ダクト内风量

# 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

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**

Language: 日本語 | 終了

Ph 線図 | TIME = 12:00

P [kPa] vs h [kJ/kg] (R410A.CSV)

冷媒選択: R410A.CSV

低温側冷媒選択: WATER.CSV

高温側冷媒選択: AIR.CSV

**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 | ボイラ/HP選択: ボイラー

右側タイプ選択: タイプ4 | ボイラ/HP選択: 単元圧縮式HP

●: Input value

●: Input value

計算開始 | 入力パラメータ編集 | 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 |  経済性評価実行 | グラフ表示

経済性評価設定 | 結果リスト表示 | 経済性評価設定 | 結果リスト表示

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] vs [h]hour (Type4 Boiler vs Type4 HP)

一次エネルギー消費量の比較

Qh[kWh] (Type4 Boiler vs Type4 HP)

一次エネルギー消費量の比較

CO<sub>2</sub>排出量の比較

tCO<sub>2</sub>/total time (Type4 Boiler vs Type4 HP)

CO<sub>2</sub>排出量の比較

項目	Type4 Boiler	Type4 HP (CO <sub>2</sub> .CSV)
一次エネルギー消費量の比較	2343.12 [kWh]	1892.3 [kWh]
CO <sub>2</sub> 排出量の比較	0.00015981 [tCO <sub>2</sub> ]	0.000116981 [tCO <sub>2</sub> ]

産業用ヒートポンプ単体シミュレーター (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

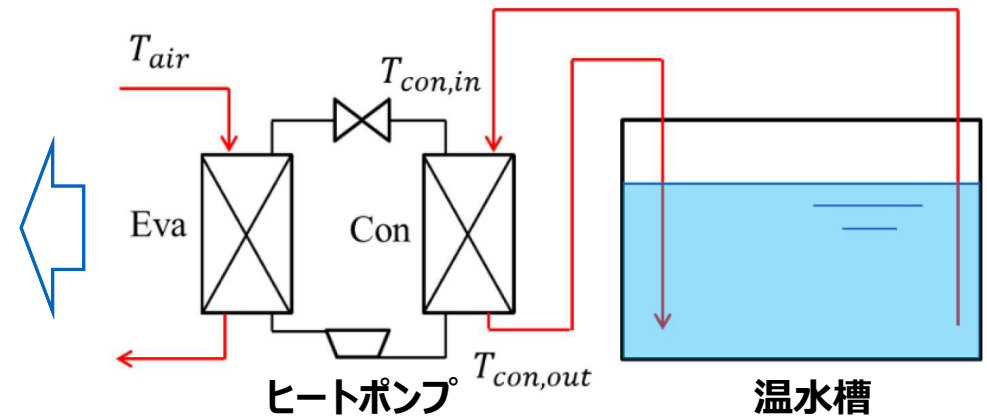
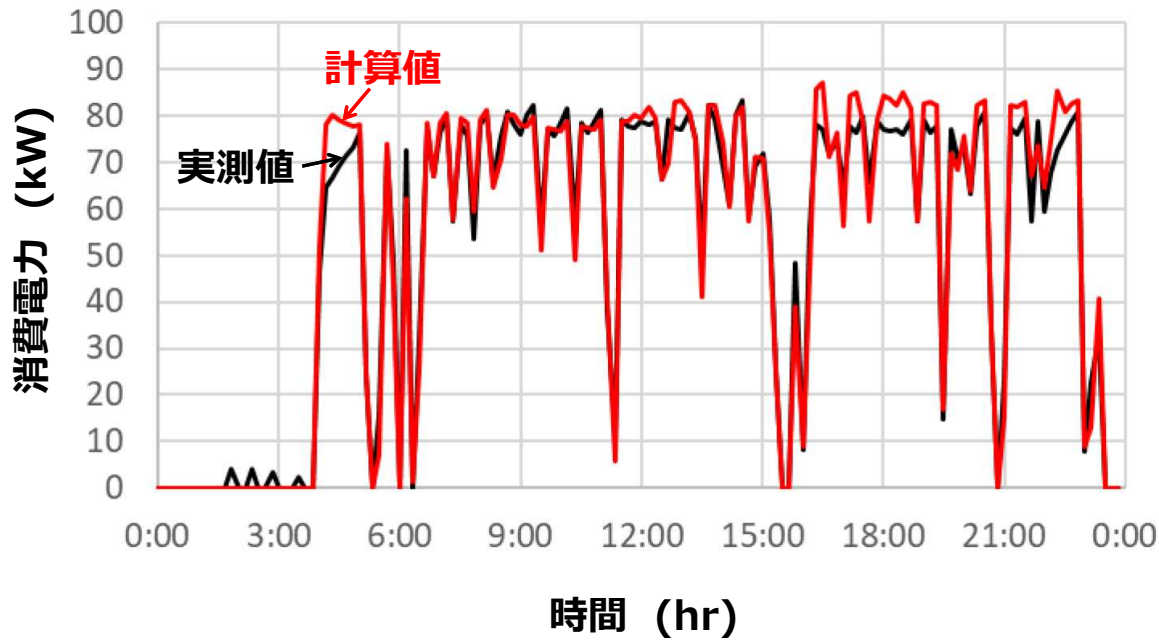
指定時刻における冷媒のP-h、T-s線図

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。

The screenshot displays the 'Economic Evaluation Calculation' software interface. It includes several key components:

- Input Parameters:**
  - High-type selection: Type 1
  - Low-type selection: Type 1
  - Boiler/HP selection: Binary Compression HP
  - Language: Japanese
- Graphs:**
  - Pressure-Enthalpy (P-h) Diagram:** Shows refrigerant cycle curves for R134A and R410A.
  - Temperature-Enthalpy (T-h) Diagram:** Shows heat exchanger and boiler/HP processes.
  - Energy Consumption (C[kWh]):** A bar chart showing energy consumption over 10 months for Type 1 HP.
  - Energy Cost (C[MWh]):** A bar chart showing energy cost over 10 months for Type 1 HP.
  - Energy Cost (円[100万]):** A stacked bar chart showing energy cost over 10 months for Type 1 HP, broken down by fuel type.
- Calculation Settings:**
  - Type: TYPE 1
  - Mode: Binary HP
  - Energy Zone: Heat Pump
  - Boiler: Fuel Oil
  - Preheater: Fuel Oil
  - Energy Cost Unit (Boiler): 75000 Yen/k
  - Energy Cost Unit (Heat Pump): 15 Yen/kWh
  - Energy Cost Unit (Preheater): 1 Yen/kWh
  - Adjustment Coefficient: 1
- Buttons:** 'CALC' (Calculate) and 'Close'.

➤ **タイプの組み合わせ、エネルギーの組み合わせを自在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<sub>2</sub>/kg)
- Adp.GWP = 冷媒による大気分解生成物のGWP(kg CO<sub>2</sub>/kg)
- AEC = 年間エネルギー消費量(kWh)
- EM = 電力kWh当たりのCO<sub>2</sub>生成量(kg CO<sub>2</sub>/kg)
- m = 製品重量(kg)
- MM = 製品材料のCO<sub>2</sub>生成量(kg CO<sub>2</sub>/kg)
- mr = リサイクル材料の重量(kg)
- RM = リサイクル材料のCO<sub>2</sub>生成量(kg CO<sub>2</sub>/kg)
- RFM = 冷媒製造による排出量(kg CO<sub>2</sub>/kg)
- RFD = 冷媒廃棄量(kg CO<sub>2</sub>/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。

CSV List

File	
2B	
2H1	
A工場HP	
A工場ボイラ	
t1h	
t1	
Type1_Boiler_Left	
Type1_HP_Right	
Type2_Boiler_Left	
Type2_HP_Right	
テスト1B	
テスト1HP1	

AEC

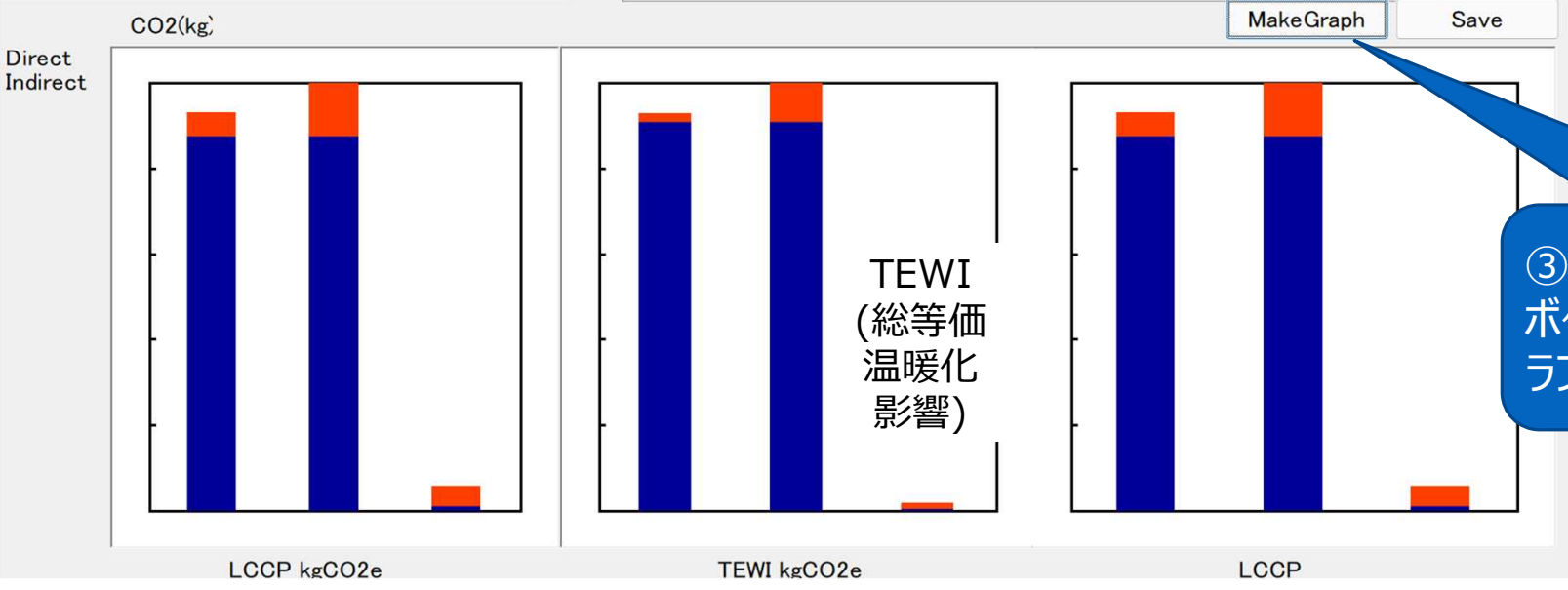
File	RFM	AEC	GWP	adpG...	Manuf...
A工場HP	R410A	23.59...	148	0	1.000...
A工場ボイラ	R134A	98.80...	148	0	1.000...
テスト1B	CO2	33.89...	1.000...	1.000...	0.000...
テスト1HP1	CO2	15.04...	1.000...	1.000...	0.000...

AEC

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...

LCCP

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
冷冷媒廃...	-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

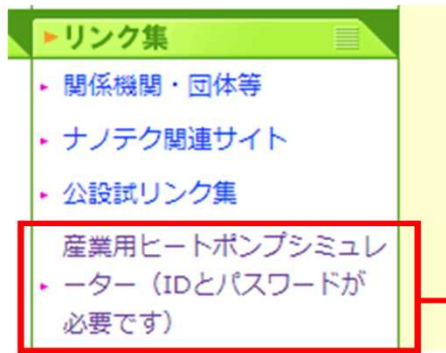


③ LCCP画面下のMakeGraphボタンをクリックすると、結果値をグラフ表示します。

# 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



② 新規登録



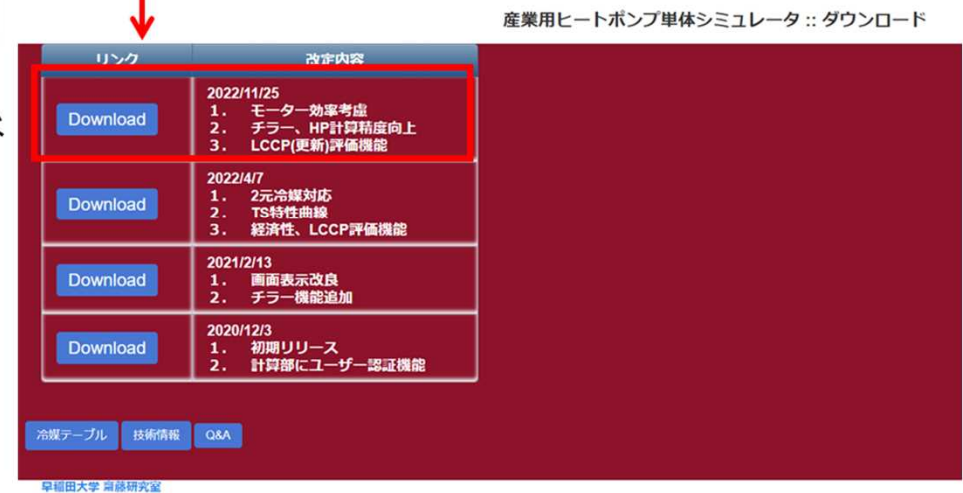
① 'シミュレーターダウンロードサイトURL  
<http://neheatpump.org/UHMS/>

④ パスワードの発行、  
ログイン  
(使用許諾条件あり)

③ アフィリエイトの入力

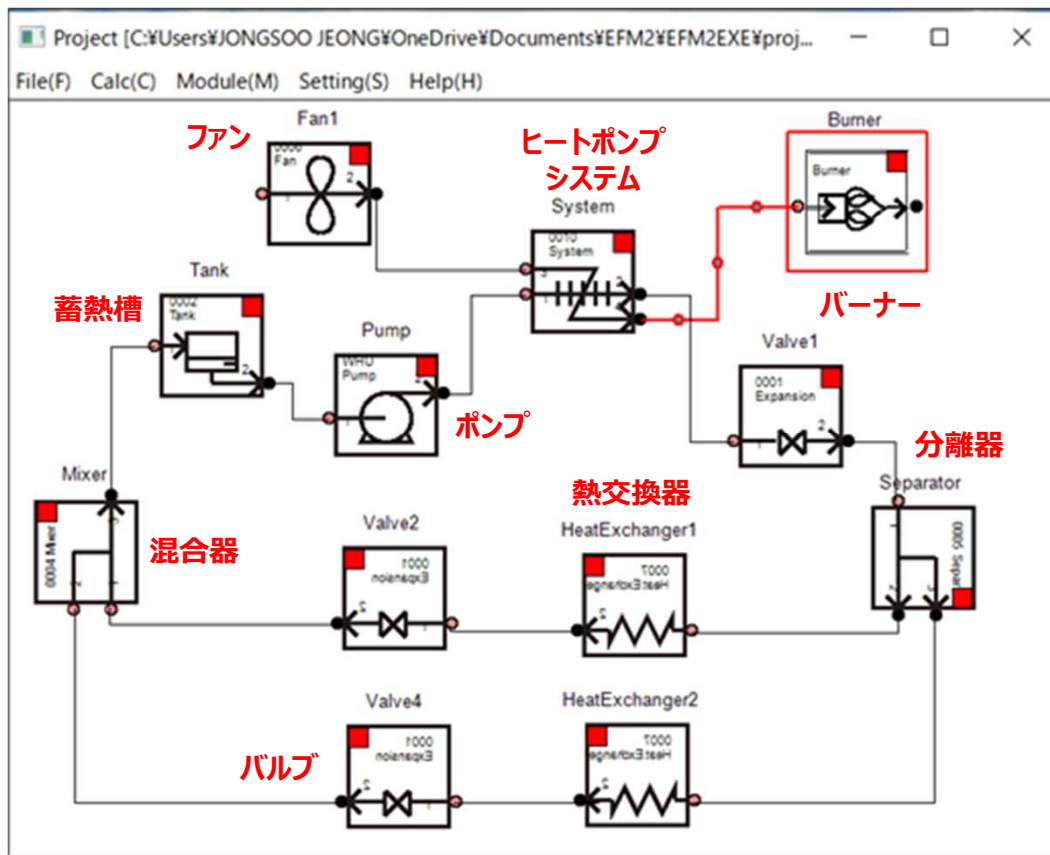


⑤ ダウンロード

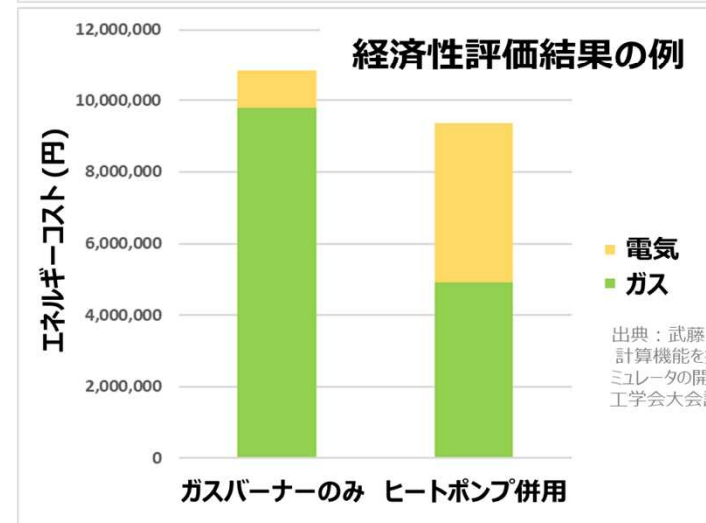
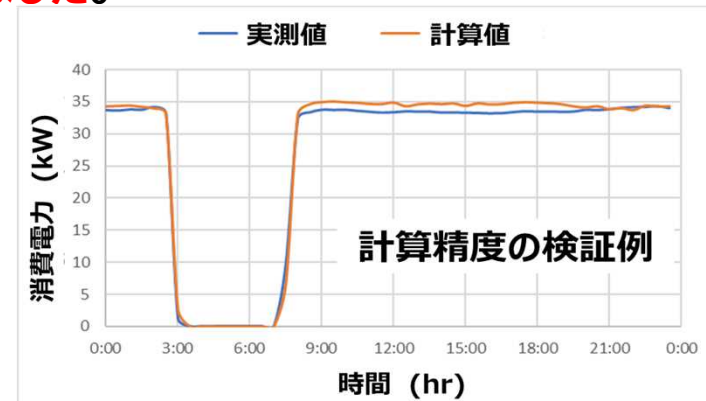


# 産業用エネルギー統合シミュレーター

- ▶ 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ー」の開発を行いました。



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

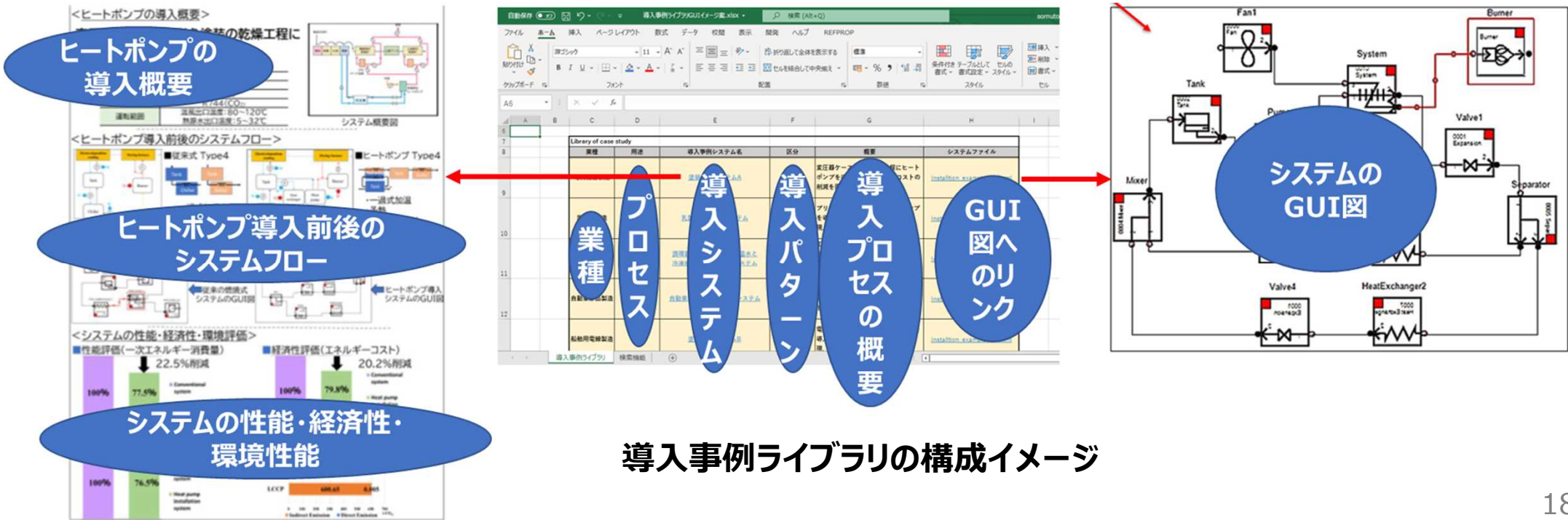


出典：武藤、鄭、宮岡、齋藤：“経済性評価計算機能を搭載した産業用エネルギー統合シミュレーターの開発” 令和4年度空気調和・衛生工学会大会講演論文集、(2022.9.14-16) G39 pp.1-4.



# NEDO 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。



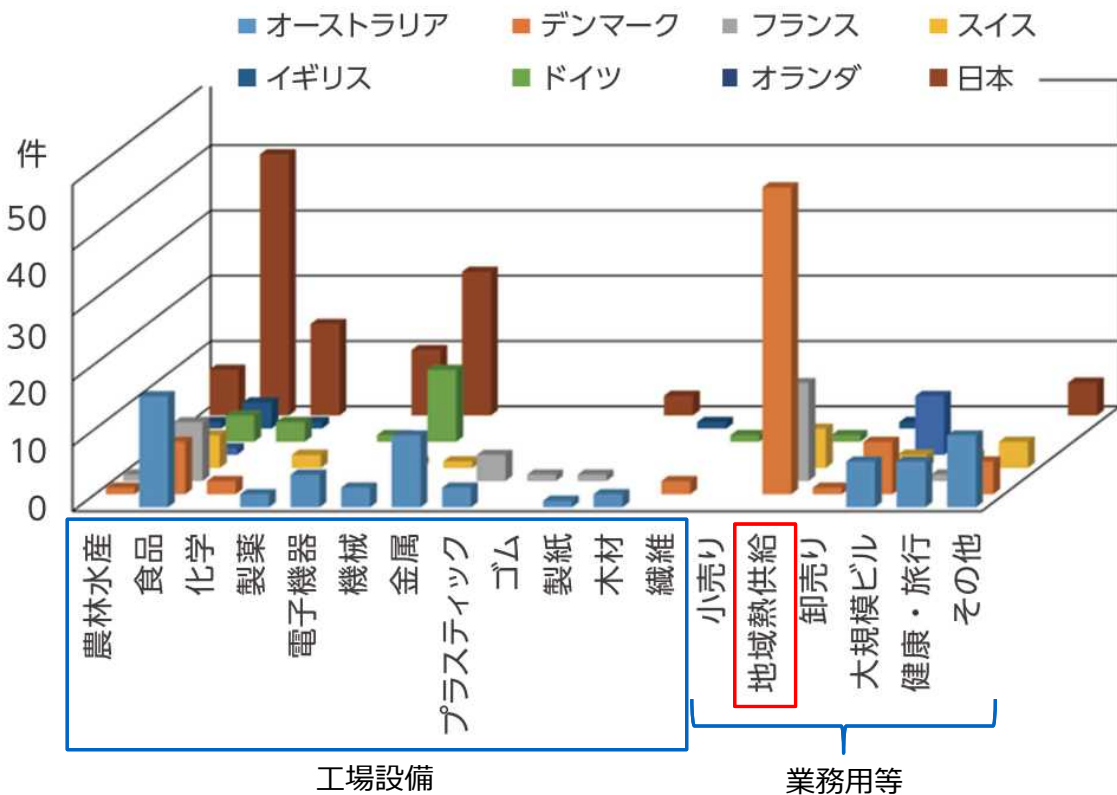
導入事例ライブラリの構成イメージ



# ＜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

Agrana社

Scanship社

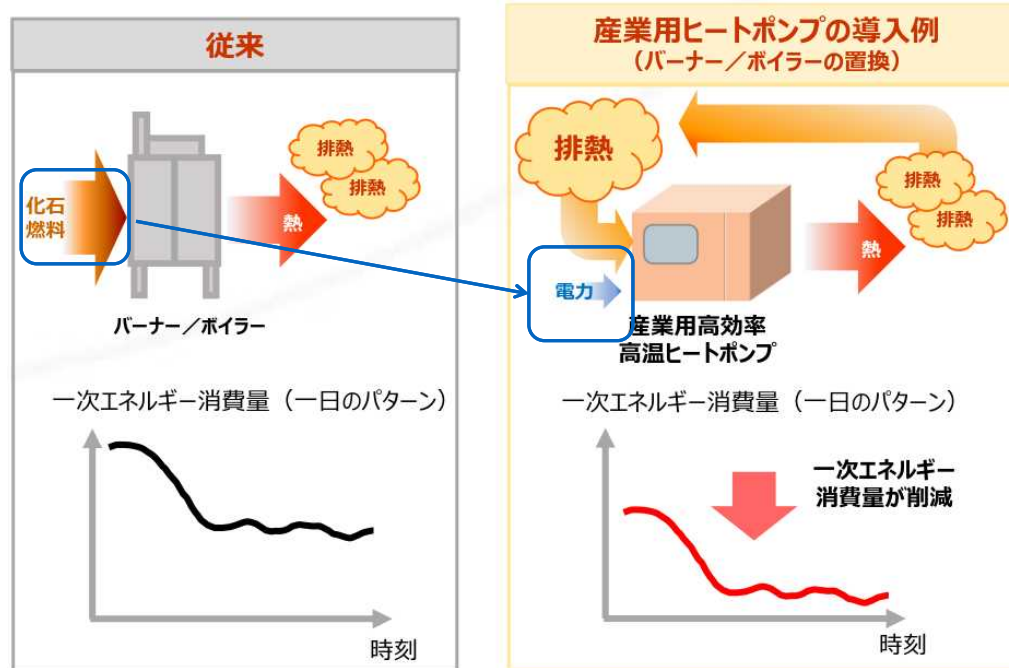
レンガ乾燥工程に導入された 閉ループヒートポンプ  
 でんぷん乾燥工程に導入された 閉ループヒートポンプ  
 生物汚泥乾燥工程に導入された 開ループヒートポンプ

出典：NEDO「できる、省エネルギー！産業用ヒートポンプ博書」  
<https://www.nedo.go.jp/content/100925495.pdf>

出典：JRCM News No.422 pp.2-6  
<https://dryficiency.eu/>

# 今後の展望

- ▶ 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ご利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**