

産業分野の脱炭素化に資する高温ヒートポンプ

日本学術会議 公開シンポジウム

「カーボンニュートラル時代の熱エネルギー ～革新技術と社会実装～」

2023年5月12日

一般財団法人 電力中央研究所

甲斐田 武延

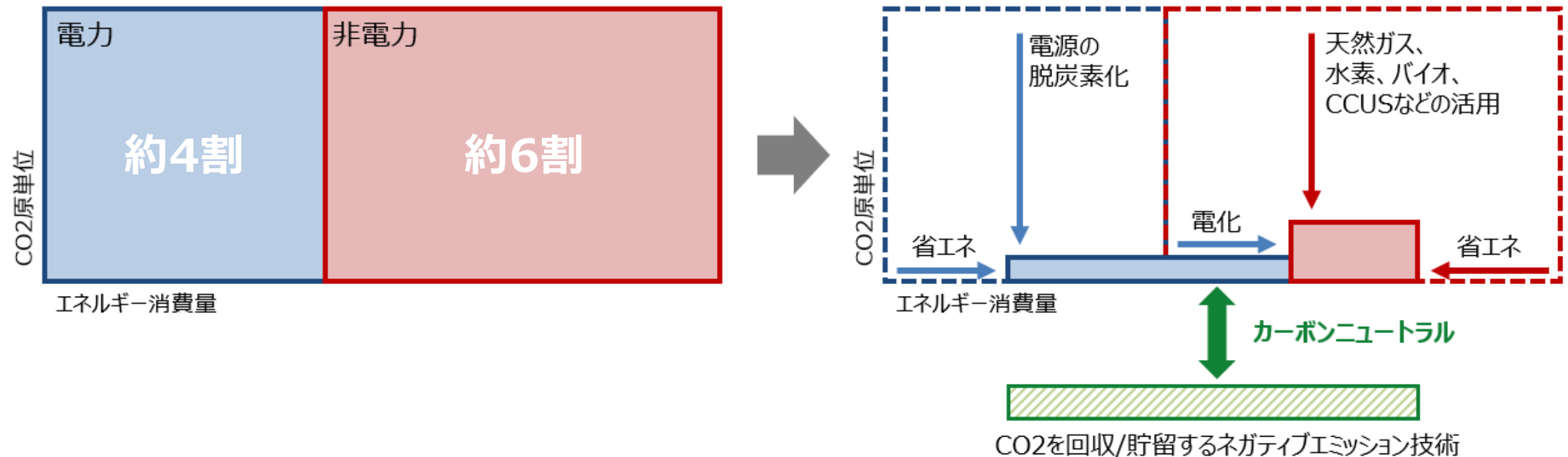
カーボンニュートラルへの転換イメージ

■ エネルギー起源CO₂排出量 = CO₂原単位 × エネルギー消費量

- 日本の全温室効果ガス排出量の約85%

■ どうやって削減していくか？

- ① 省エネ
- ② CO₂排出原単位の低減（再エネ・原子力などのゼロエミッション技術の活用）
- ③ 非電力部門の電化（電気自動車や電気加熱技術などへのエネルギー利用側の転換）
- ④ ネガティブエミッション技術の活用



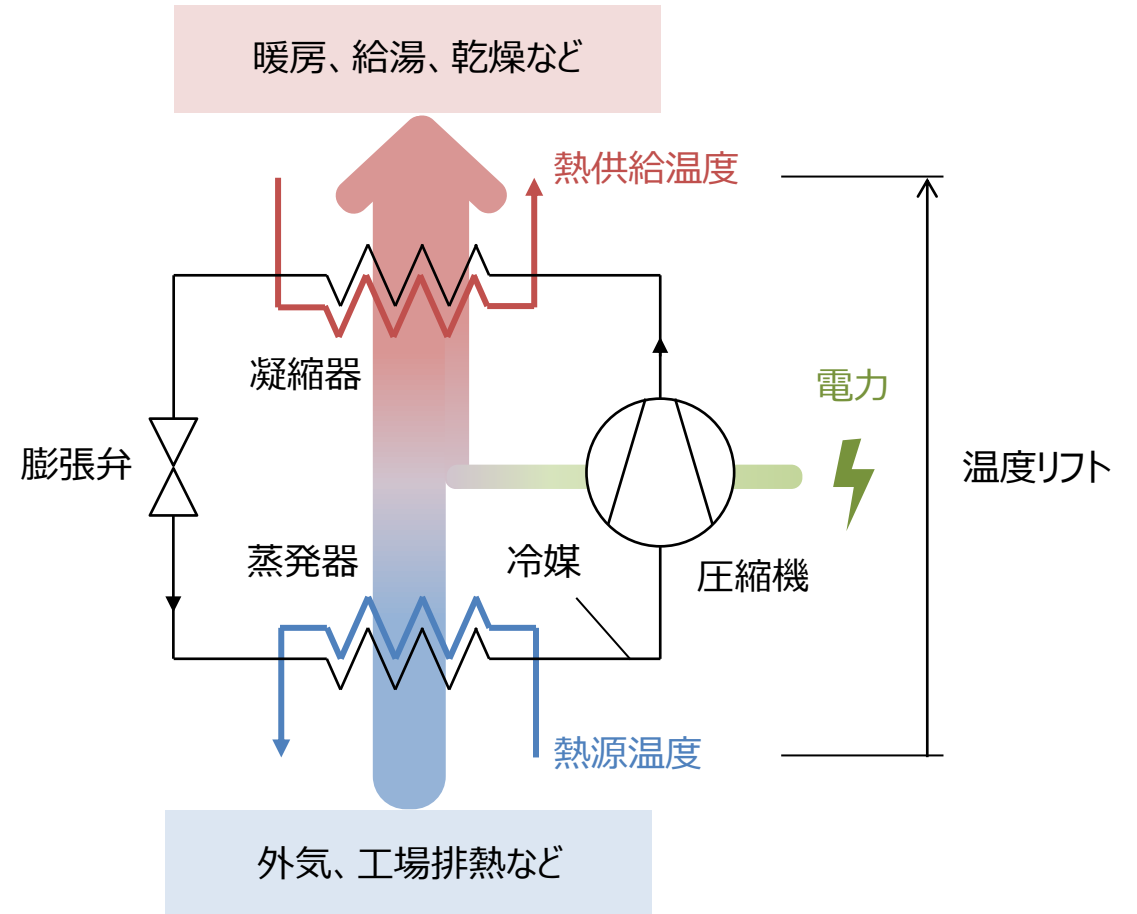
ヒートポンプは省エネかつ電化技術

■ ヒートポンプとは？

- 熱をくみ上げる技術
- くみ上げる際に電力を使用（電化技術）
- 投入する電力以上の熱を利用可（省エネ技術）

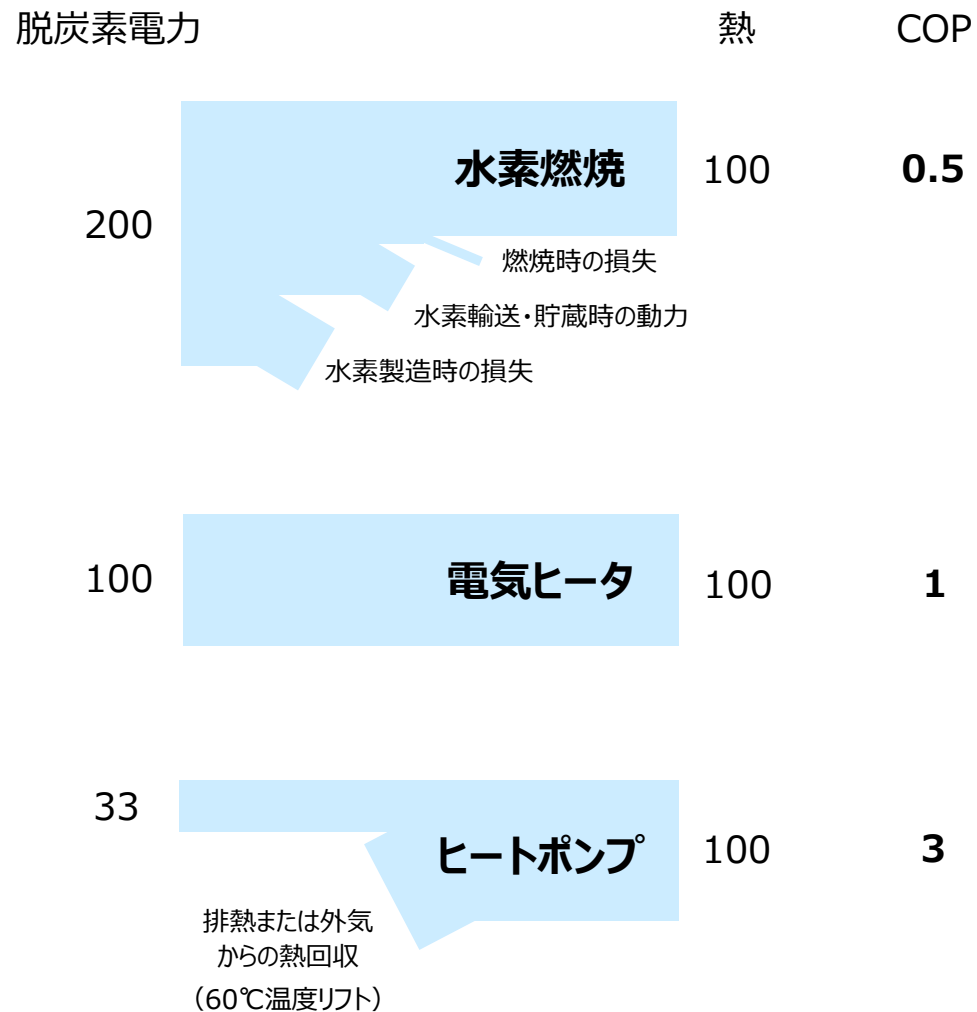
■ ヒートポンプの性能は？

- $COP = \frac{\text{加熱量}}{\text{消費電力量}}$
 $= \frac{\text{採熱量} + \text{消費電力量}}{\text{消費電力量}}$
 > 1
- くみ上げる温度差（=温度リフト）が小さいほど高COP
- 温度リフト60℃でCOPは3程度

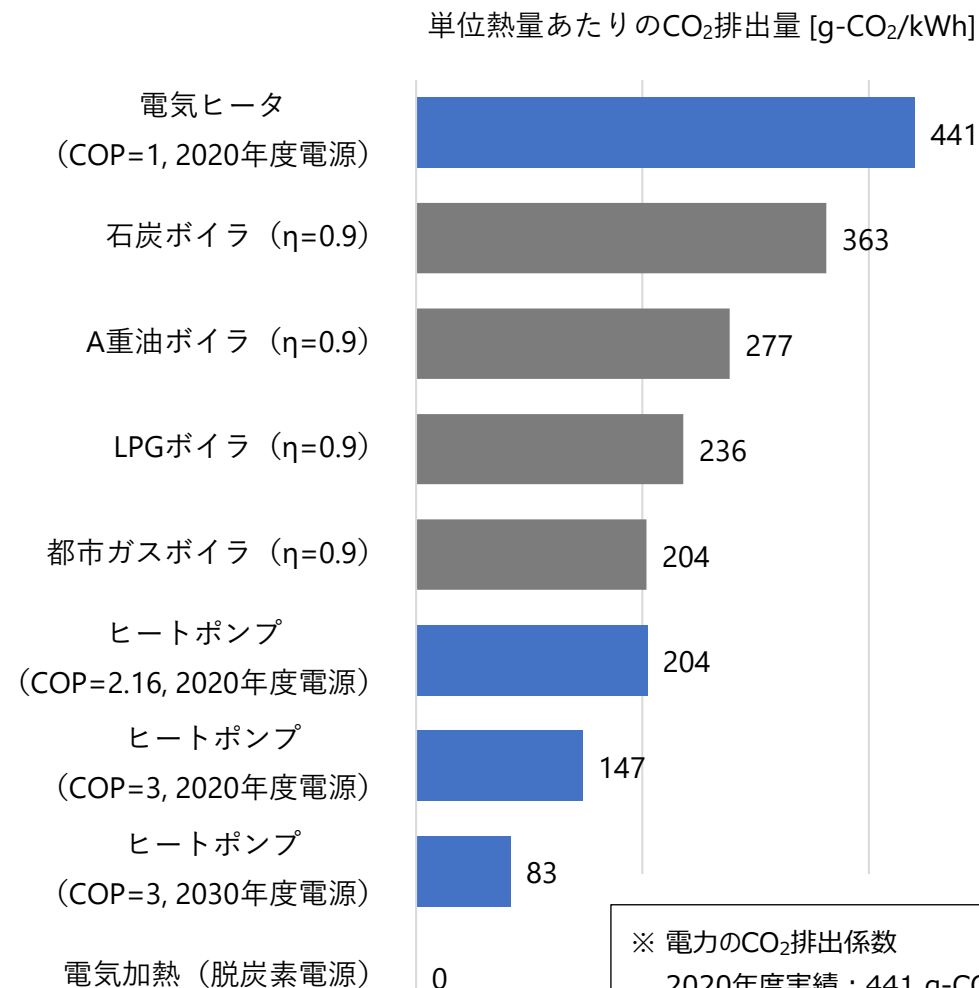


他の技術と比べると？

将来（電源の脱炭素化達成後）



足元

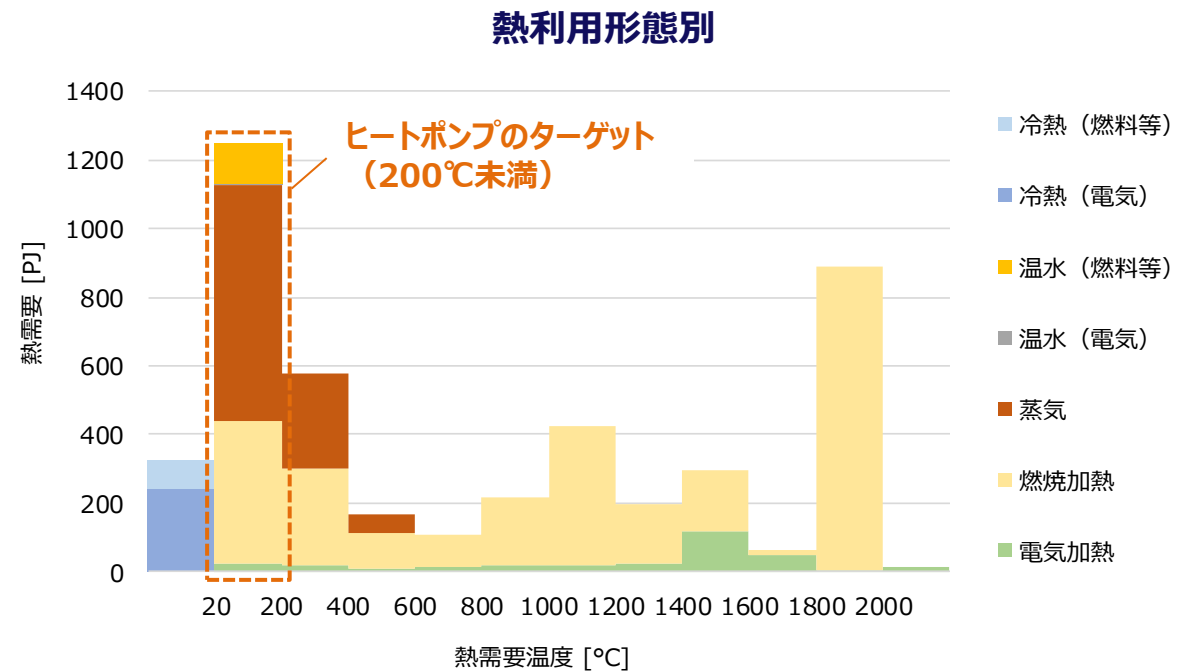
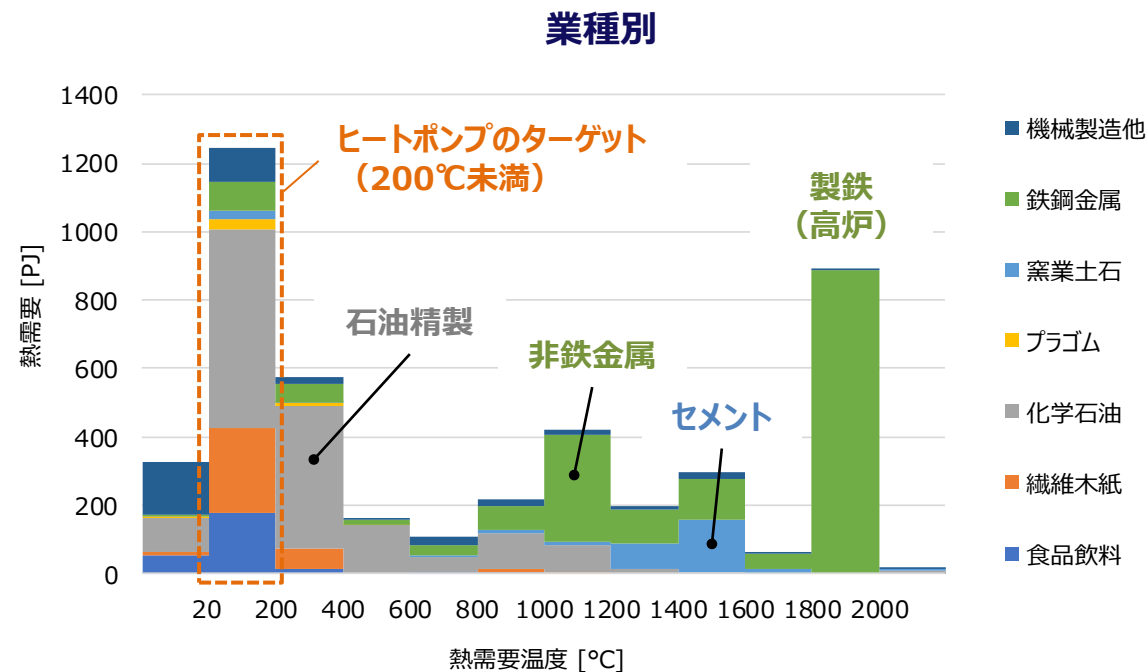


※ 電力のCO₂排出係数
2020年度実績：441 g-CO₂/kWh
2030年度目標：250 g-CO₂/kWh

ヒートポンプの適用温度帯

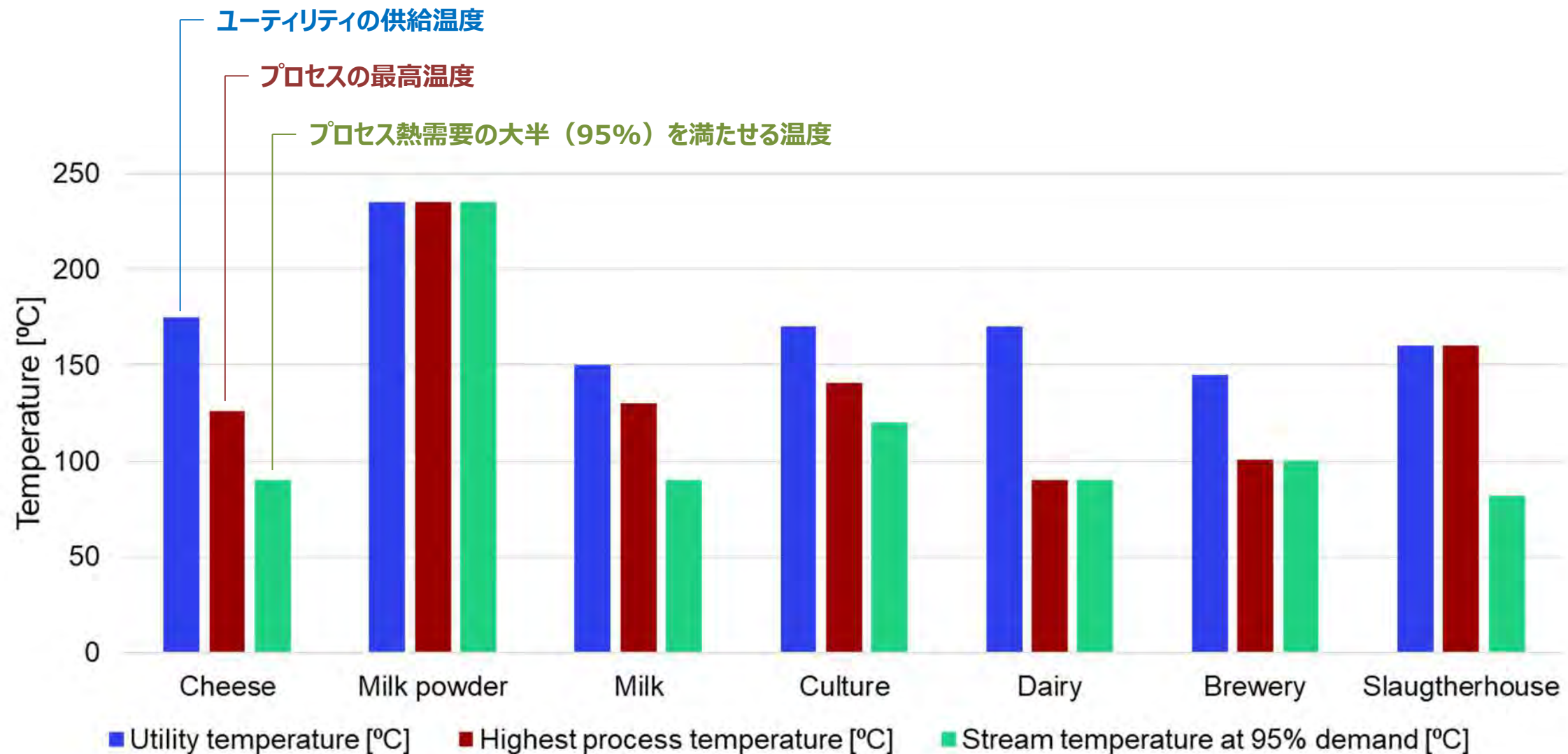
■ 低温熱需要

- **200℃未満**の熱需要が産業部門全体の熱需要の**27%**
- **様々な産業**で需要があり、**蒸気加熱**（ボイラ）としての利用形態が多く、**ヒートポンプ**のターゲットゾーン
- ただし、この熱需要はプロセスの熱需要ではなく、ユーティリティの供給温度であることに注意！



出典：資源エネルギー庁「熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査」（2018年2月）を基に作成

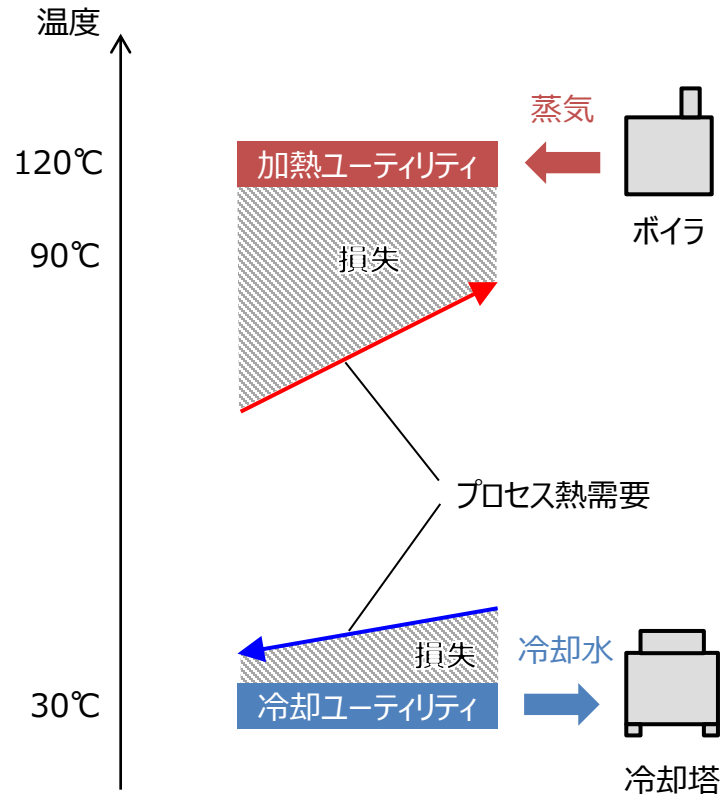
ユーティリティ供給温度とプロセス熱需要温度のギャップ



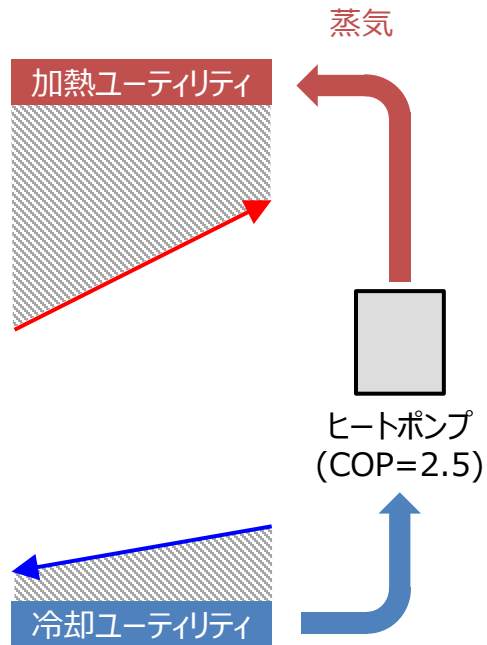
出典：SuPrHeatプロジェクト（デンマーク）

産業用ヒートポンプの統合レベル

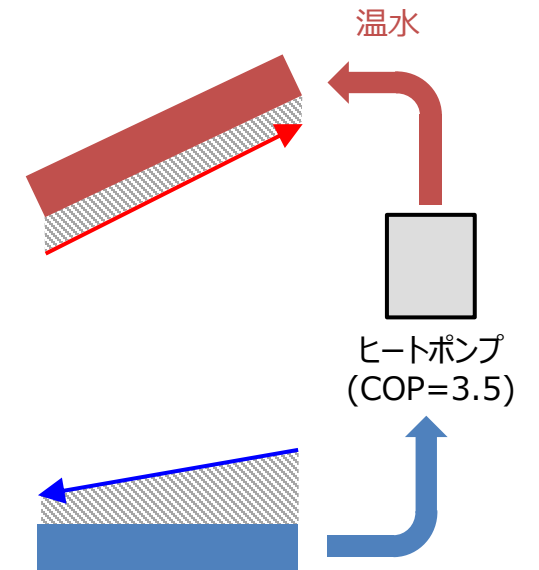
従来システム



ヒートポンプの活用 (ユーティリティ統合)



ヒートポンプの活用 (プロセス統合)

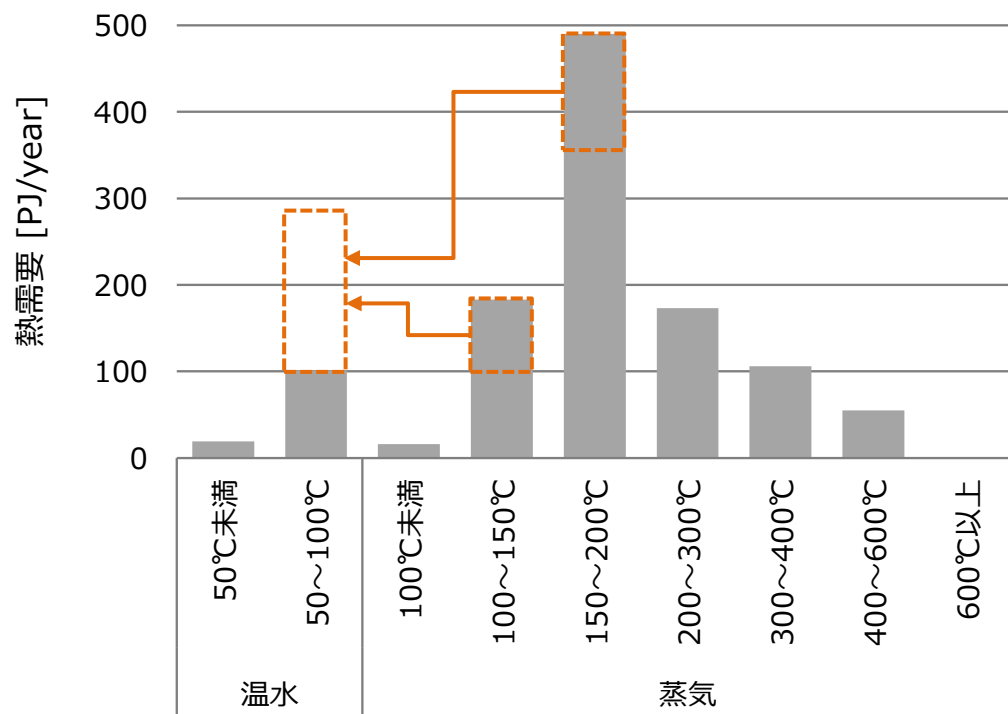


※上図は冷却需要が周囲温度より高い場合を想定。
冷却需要が周囲温度より低い場合には、冷却ユーティリティとして
冷凍機による冷水やブライン等が利用される。

産業用ヒートポンプの適用拡大に向けて

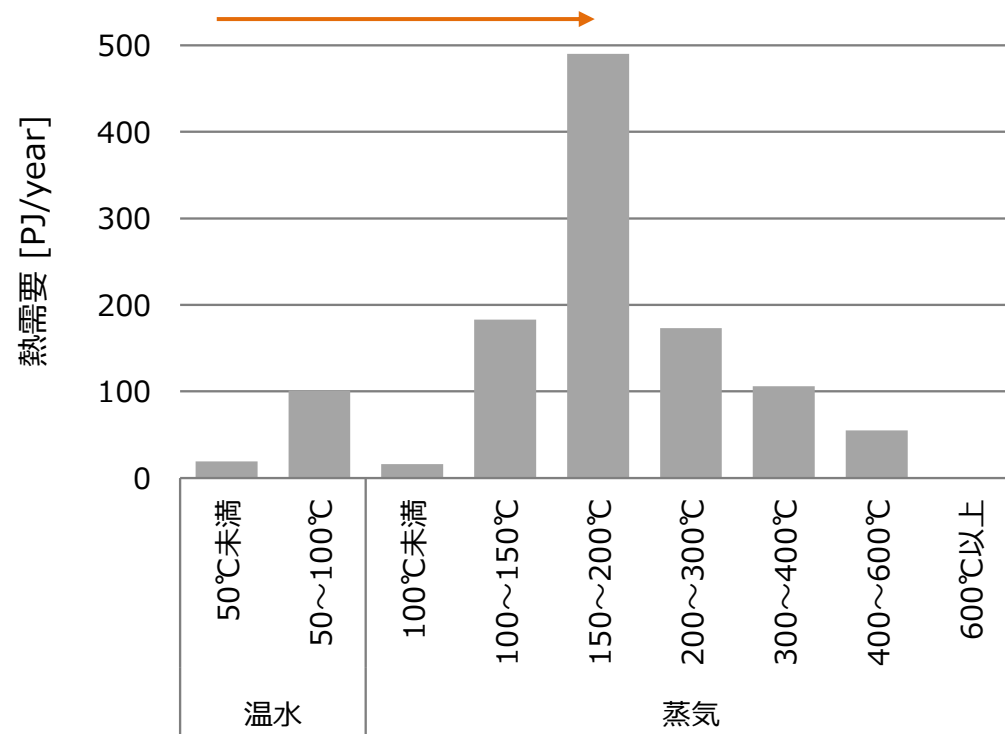
① プロセス温度の明確化やプロセス変更による熱需要温度の低減

- 蒸気利用から温水利用への変更
(ユーティリティ統合からプロセス統合へ、またはプロセス変更)
- プロセス変更を伴う場合は品質確保等を確認する必要あり



② ヒートポンプ供給温度の高温化による適用範囲の拡大

- 100°C以上の高温供給が可能なヒートポンプの開発と実証
(蒸気供給ヒートポンプ、熱風供給ヒートポンプ)
- 適切な温度リフト・温度グライドの仕様にする必要あり



事例1 | プロセス熱需要の明確化

■ ノルウェーの新設乳製品工場での導入事例

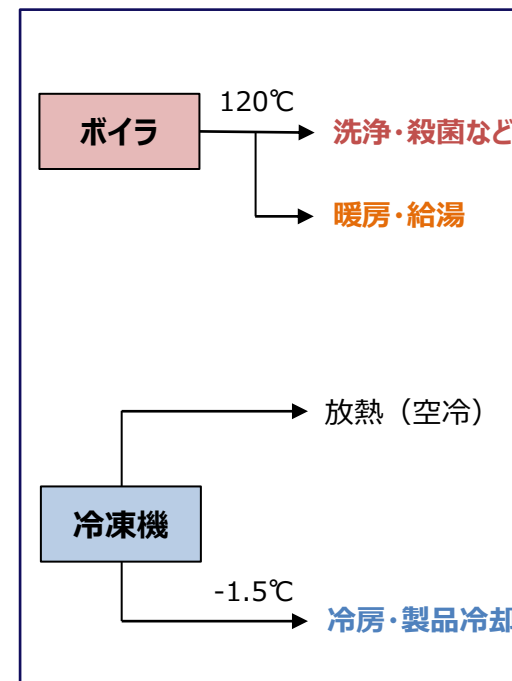
- 脱炭素電源による**オール電化**
 - ノルウェーの豊富な水力発電
 - 太陽光（屋根上 6,000 m²）による自家発電
- ヒートポンプによる**冷温同時利用と排熱回収**
- ヒートポンプの冷媒はすべて**自然冷媒**
 - 低温・中温ヒートポンプ：R717（アンモニア）
 - 高温ヒートポンプ：R717+R718（アンモニア+水）



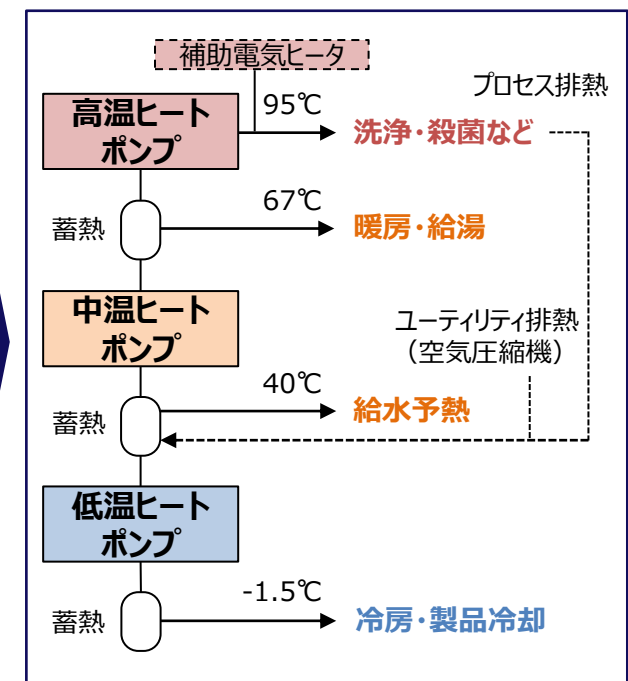
新設工場の概要

- 2019年竣工 @ベルゲン
- 敷地面積：
18,000 m²
- 製造品目：
ミルク、ジュース、クリーム
- 製造能力：
300,000 L-milk

従来の乳製品工場



新設の乳製品工場



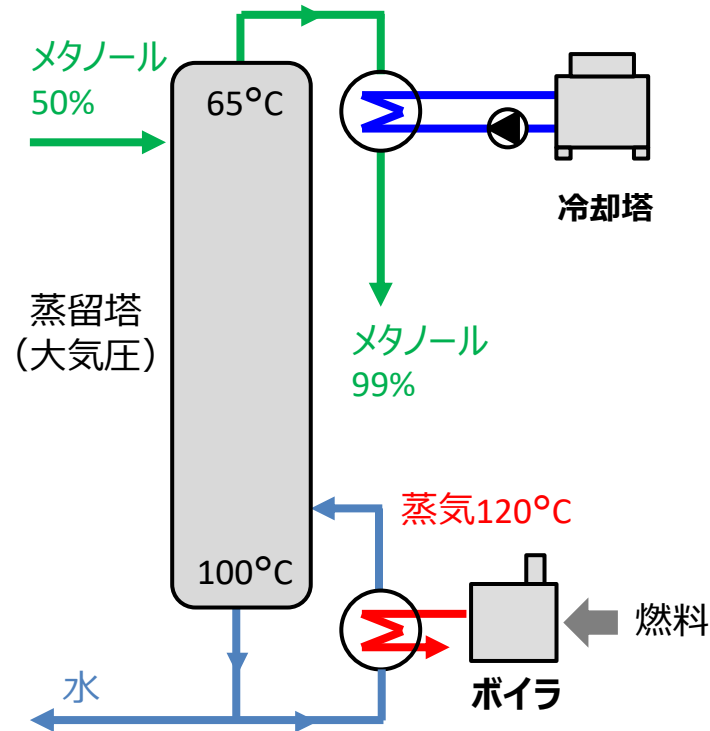
- プロセス熱需要を明確化することで、当該工場では100°C以上の熱は必要ないことが判明し、ボイラのない工場を実現。
- 冷却需要に対して加熱需要が多い時期（主に冬期）は、冷温同時利用のヒートポンプだけでは熱量バランスが取れないため、電気ヒータ（抵抗加熱）を補助熱源として使用。

事例2 | プロセス変更

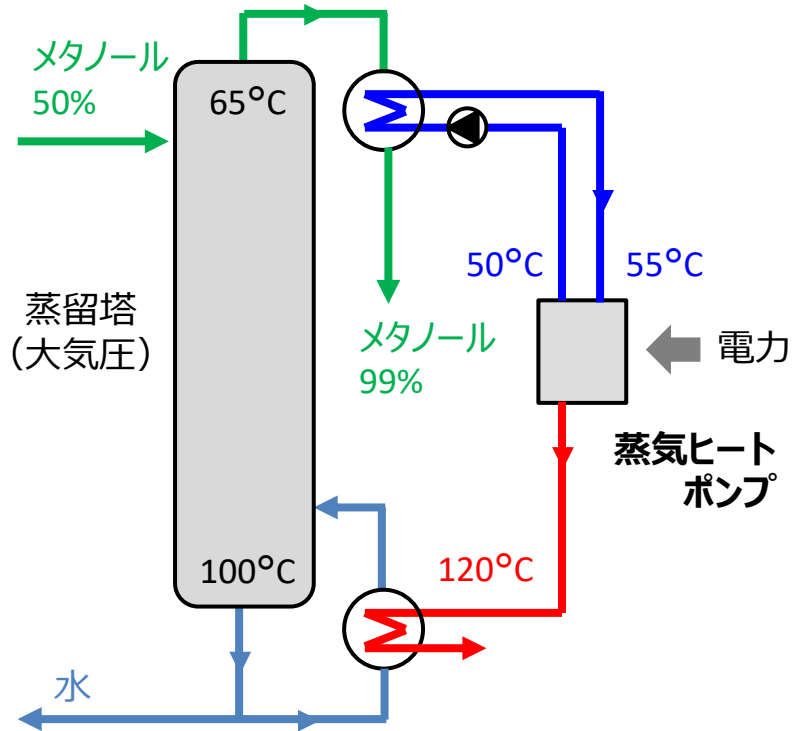
■ 蒸留塔の減圧

- 熱需要温度を下げることによって、標準仕様のヒートポンプの適用が可能

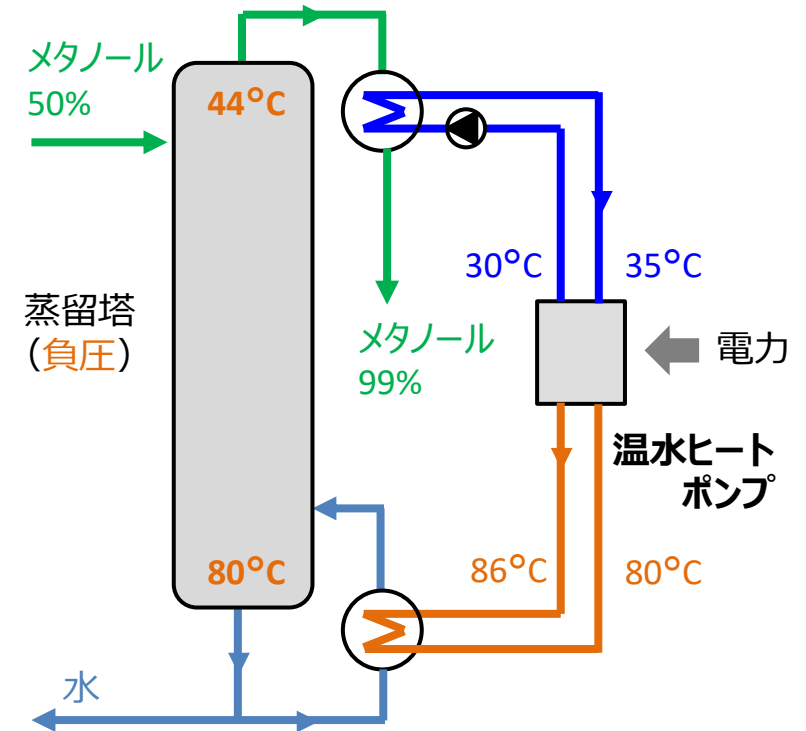
従来



変更案1 (蒸気ヒートポンプ)



変更案2 (蒸留塔の減圧 + 温水ヒートポンプ)



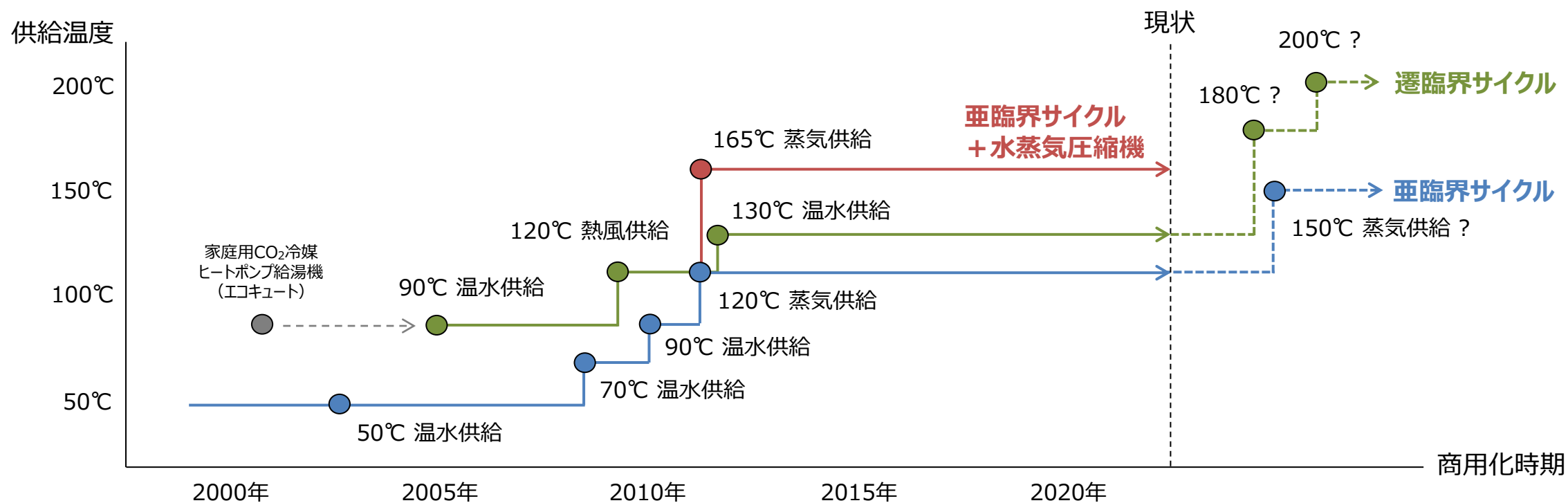
産業用ヒートポンプの高温化

■ これまでの推移

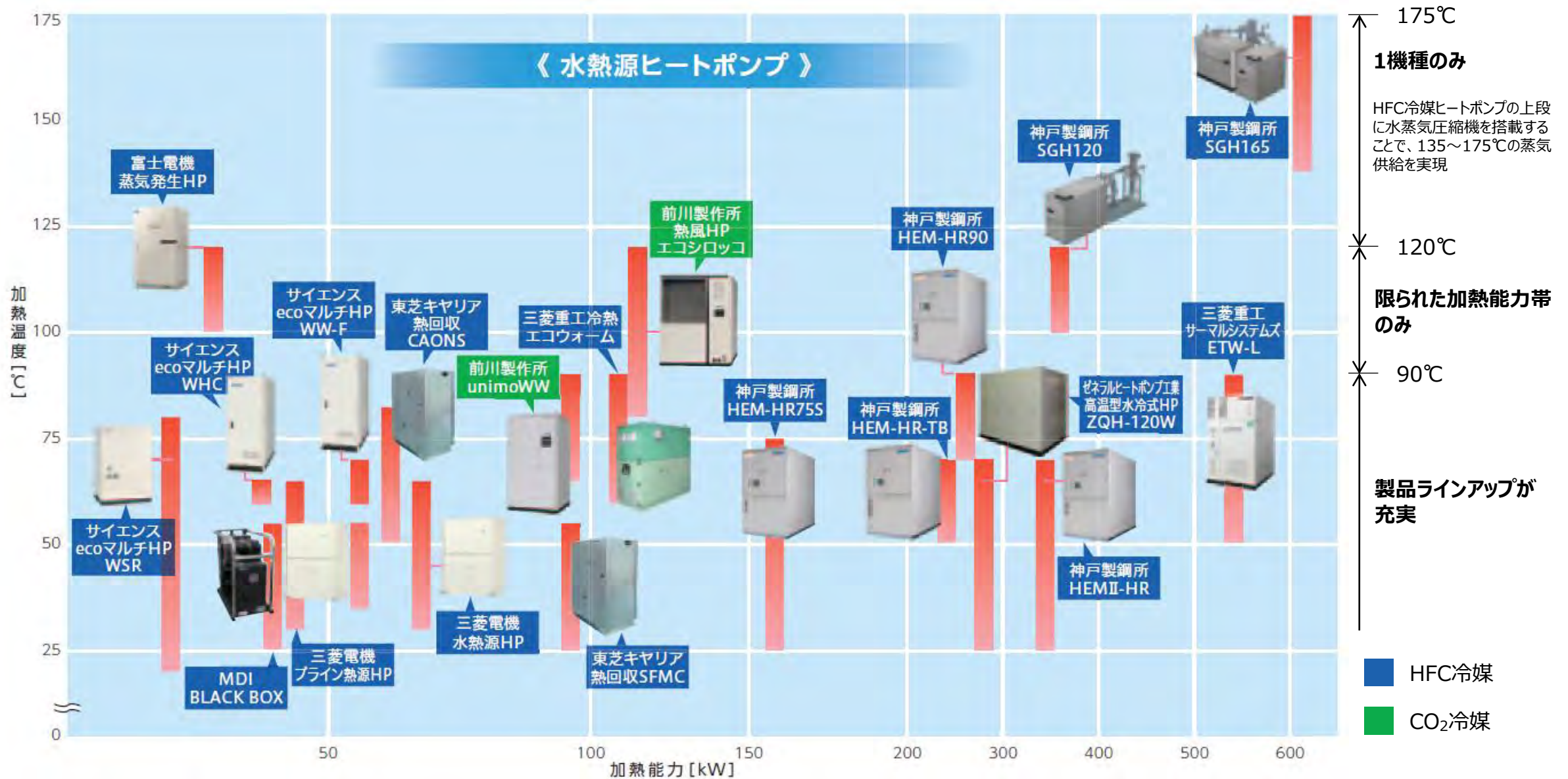
- 2000年代後半（東日本大震災前）に特に高温化の技術開発が活発であった

■ 今後の展望

- 技術開発が進展中であり、数年以内に200℃供給が可能なヒートポンプも上市される可能性あり



産業用ヒートポンプの製品一覧



冷媒

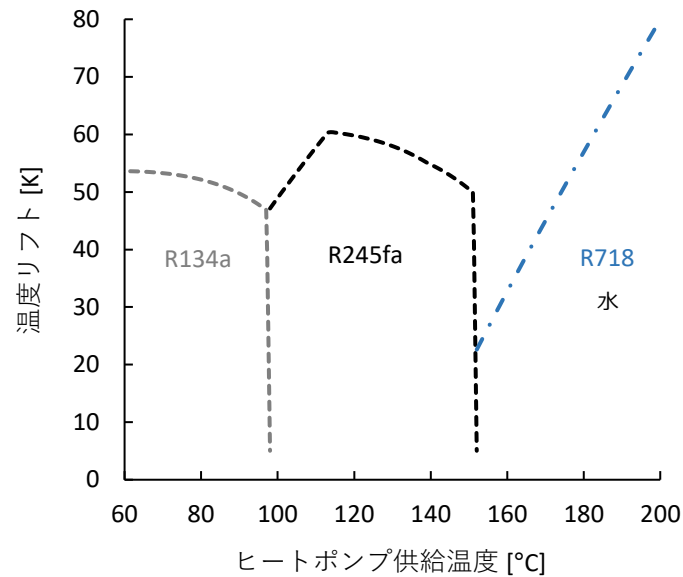
■ この10年間での変化

- HFO・HCFO系冷媒の開発によって、選択肢が広がった
- 低GWP化のための単なる代替だけでなく、適用温度も広がった

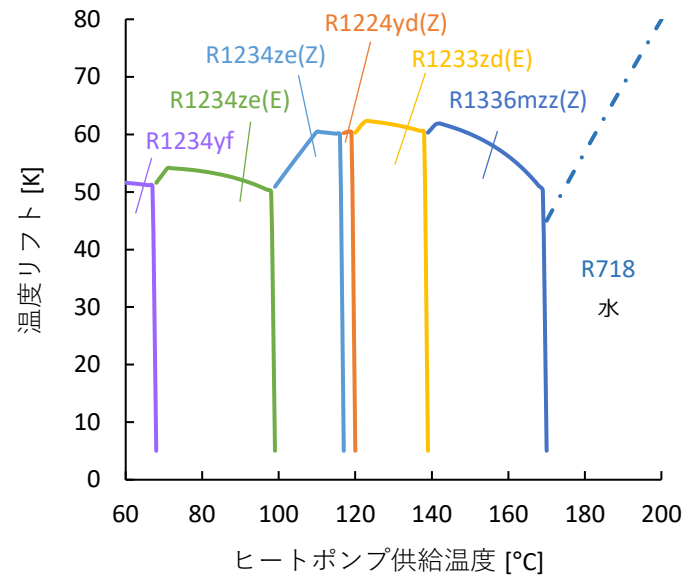
作動領域分析結果

(二段圧縮エコマイザサイクル, 温度グライド = 5 K, COP ≥ 4, VHC ≥ 2 MJ/m³)

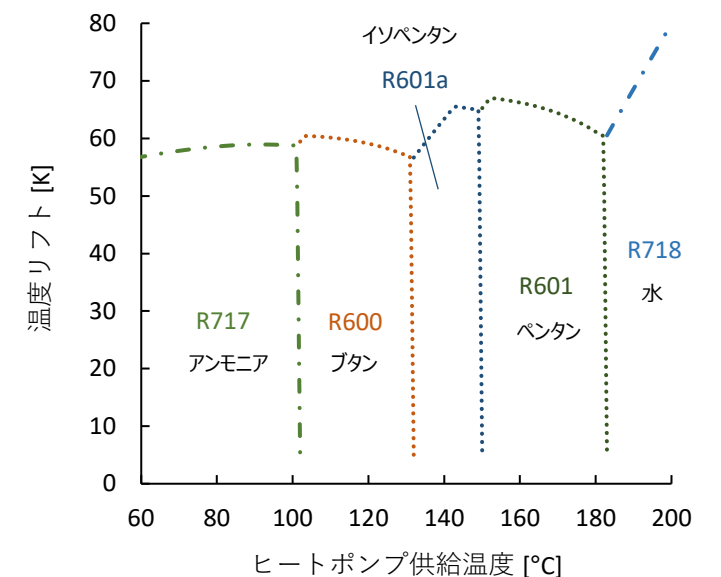
比較的安全な冷媒から選択
<約10年前>



低GWPかつ比較的安全な冷媒から選択
<現在>



自然冷媒から選択
<安全性の面で受け入れられれば>



IEA HPT Annex 58 (高温ヒートポンプ)



■ 実施期間

- 2021年1月～2023年12月

■ 運営者

- Benjamin Zühlsdorf氏 (デンマーク技術研究所)

■ 参加国

- オーストリア、ベルギー、カナダ、中国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、日本、韓国、オランダ、ノルウェー、スイス、米国

■ 目的

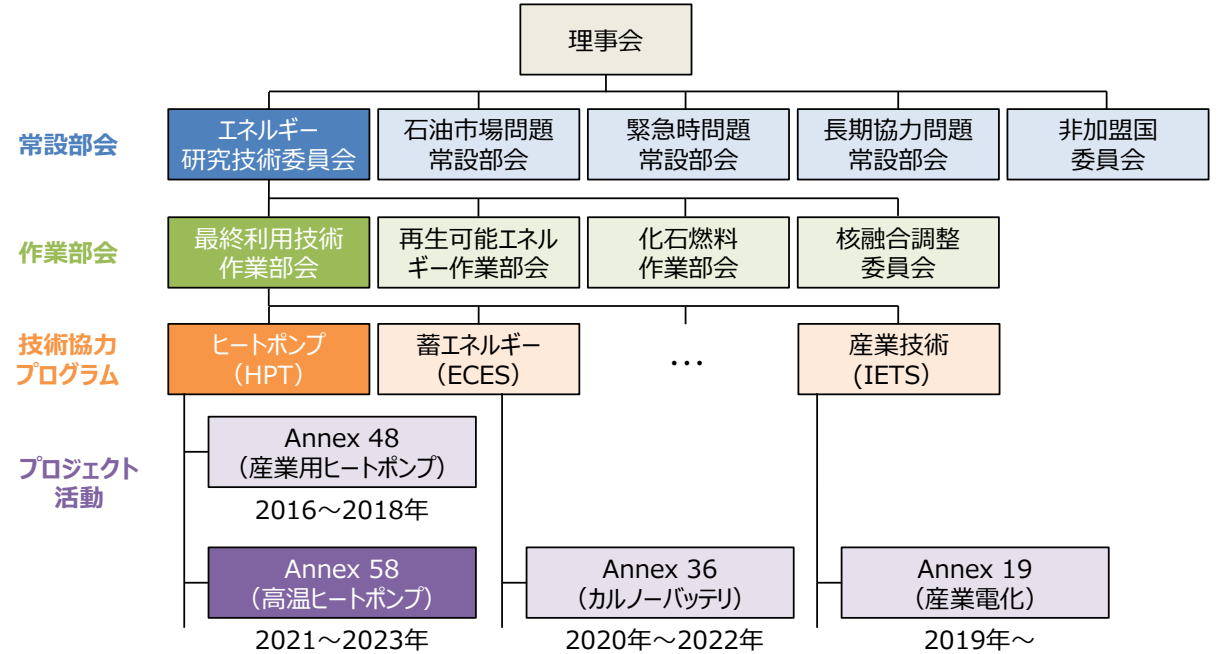
- **高温ヒートポンプ (供給温度100℃以上)** の技術的可能性や適用先に関する情報、ヒートポンプへの転換戦略を提供
- エンドユーザ、メーカ、エンジニアリング会社、コンサルティング会社、エネルギーサービス会社、政策立案者などに提供

■ 活動内容

- Task 1 : **技術動向の整理と技術課題の抽出**
- Task 2 : **プロセス統合コンセプトの構築**
- Task 3 : **導入戦略の作成**
- Task 4 : **性能評価方法に関するガイドラインの提案**

<https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/>

IEA HPT Annex 58 の位置づけ



製品 (+ 開発段階)

導入事例 (+ 実証試験)

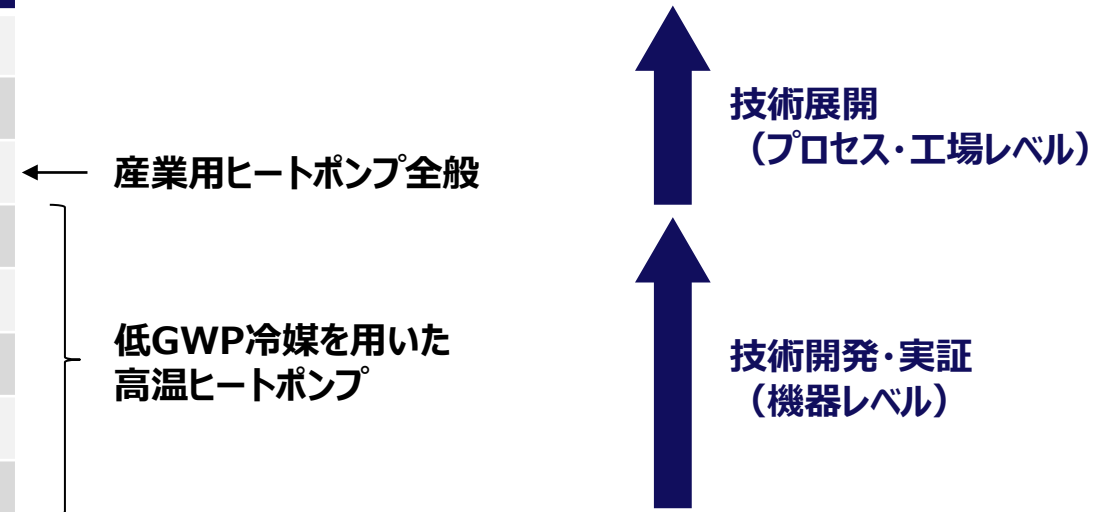


産業用ヒートポンプの技術成熟度

■ TRL (Technology Readiness Level)

- 1970年代にアメリカ航空宇宙局 (NASA) が開発し、9段階にレベル分け
- 国際エネルギー機関 (IEA) は**商用済みの技術**をさらに3段階 (TRL 9, 10, 11) に分類し、**導入障壁を解消する取り組みが必要**であることを明確化 → 特に普及展開が必要な需要サイド技術に対して有効
- **産業用ヒートポンプ全般**としては**TRL9** (導入初期段階) に位置づけられ、ネットゼロに向けた重要度はとても高い
- ただし、**低GWP冷媒を用いた高温ヒートポンプ**のTRLは**4~8**が現状

段階	TRL	説明
商用済み/ 普及展開 <i>Deployment</i>	11	技術成熟 (安定的に市場拡大)
	10	導入初期 (プロセス統合などが必要)
	9	導入初期 (高効率化などが必要)
実証 <i>Demonstration</i>	8	商用化初期 (フィールド実証)
	7	商用化前の実証 (ラボ実証)
試作 <i>Prototype</i>	6	プロトタイプシステムの検証
	5	改良プロトタイプの開発 (要素技術検証)
	4	初期プロトタイプの開発
概念 <i>Concept</i>	3	技術コンセプトに対するニーズの検証
	2	技術コンセプトの形成
	1	初期アイデア



出典：IEA ETP 2020 Special Report on Clean Energy Innovation (2020年7月) を基に作成

産業用ヒートポンプの導入状況

■ 地球温暖化対策計画のフォローアップ

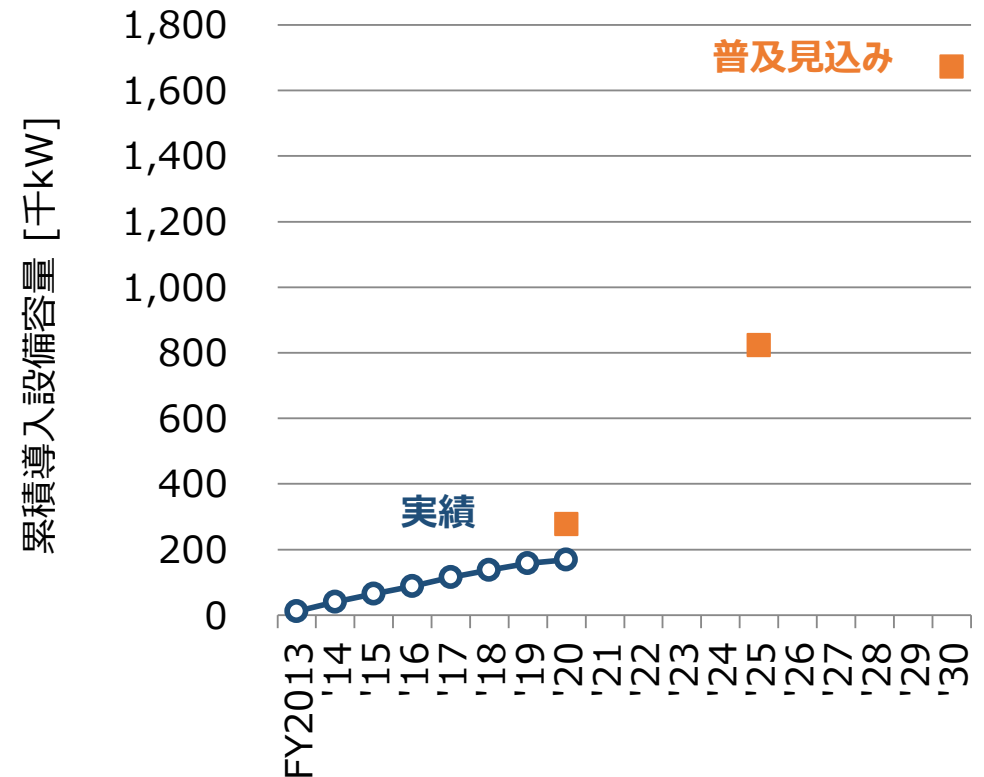
- 政策の指標として活用
(2030年度までに2013年度比46%削減の内訳)
- 限られたメーカ、製品
(日本冷凍空調工業会調べ)
- 総設備容量のみ

■ 日本エレクトロヒートセンターの自主的調査

- 普及促進のための基礎資料として活用
- 対象範囲（メーカ、製品）が広く、
蒸気再圧縮機も含む
- 対象機器ごとの設備容量・台数、
適用先の業種・工程に関する情報も含む

<https://www.jeh-center.org/20200127ihpdata.html>

地球温暖化対策計画のフォローアップ
(産業用ヒートポンプの導入)



「一定の進捗は認められるものの、見込みを下回っているため、
目標達成に向けて更なる取組が必要」

産業用ヒートポンプの社会実装強化に向けて

■ 技術開発から技術展開へ

- これまでの日本政府の取り組みは、技術開発支援と設備投資支援
- 産業用ヒートポンプの機器だけにフォーカスしても導入は進まない
- すでに技術的には確立している機器であっても、それを生産プロセスに組み込む手法（プロセス統合手法）を構築し、その担い手を育成するための取り組みが必要ではないか？

日本と欧州の産業用ヒートポンプに関する代表的なプロジェクトの比較

段階	参画機関	TherMAT (日本)	BAMBOO (EU)	DryF (EU)	SuPrHeat (デンマーク)	LEAP (オーストリア)
研究 Research	研究機関 大学	✓	✓	✓	✓	
開発 Development	ヒートポンプ機器メーカー	✓	✓	✓	✓	
実証 Demonstration	エンドユーザ エンジニアリング会社		✓	✓	✓	✓
展開 Deployment	エネルギーサービス会社 コンサルティング会社				✓	✓
発信 Dissemination	ヒートポンプ協会など			✓		

まとめ

■ 産業用ヒートポンプへの期待

- カーボンニュートラル実現に向けて、省エネかつ電化技術であるヒートポンプの優先順位は高い

■ 産業用ヒートポンプの現状と課題

- 産業用ヒートポンプの製品ラインアップ（特に供給温度100℃未満）は充実してきている
- 徐々に導入が進展しているものの、普及速度を上げる必要がある

■ 100℃未満のヒートポンプの技術展開

- プロセス熱需要を明確化できれば、100℃未満のヒートポンプを効果的に適用できる可能性がある
- プロセス熱需要を把握し、プロセス統合手法を構築するとともに、その担い手を育成することが必要

■ 100℃以上の高温ヒートポンプの技術開発・実証

- 国内外で高温ヒートポンプの開発・実証が活発化
- 数年内に多様な製品が市場に登場する可能性があり、技術オプションが拡大中