



熱風乾燥工程の給気予熱への ヒートポンプの適用検討

一般財団法人電力中央研究所

甲斐田 武延

東京大学 第24回 ESIシンポジウム「熱のハイブリッド技術」

2025年8月21日

 電力中央研究所

産業用ヒートポンプの基礎

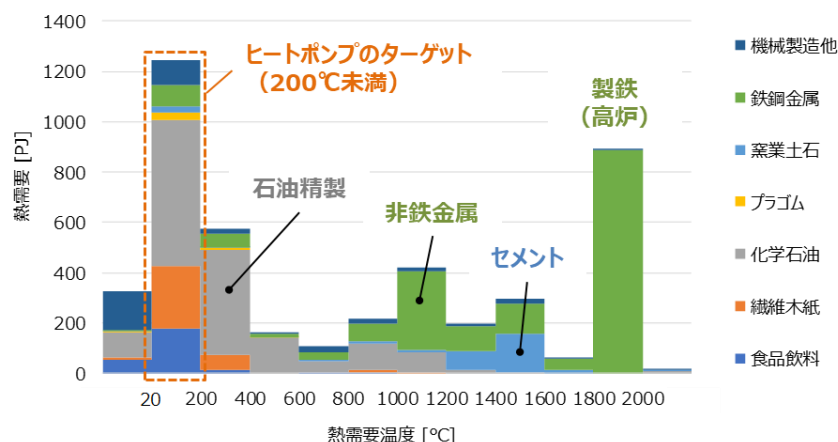
産業用ヒートポンプの適用温度帯

● 産業部門の200℃未満の熱需要

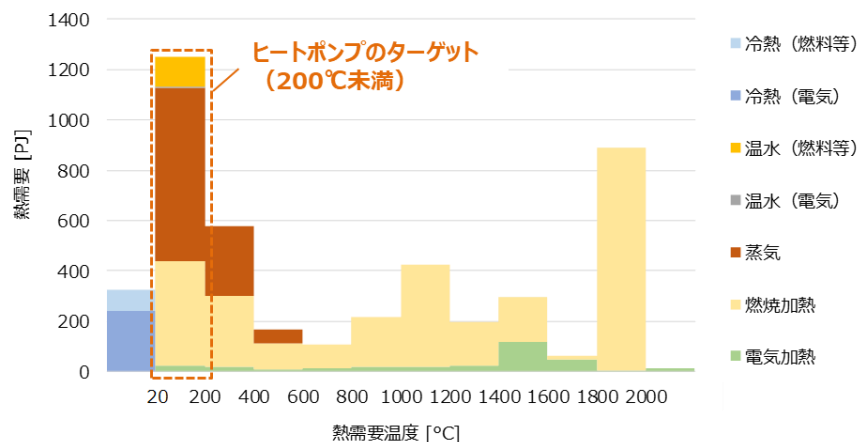
- 産業部門全体の熱需要の**27%**（100℃未満が8%，100～200℃が19%）
- **様々な産業**で需要があり，**蒸気加熱**（ボイラ）としての利用形態が多い

※ 蒸気加熱の場合は，プロセスの熱需要温度ではなく，ユーティリティの供給温度。
プロセスの熱需要温度が100℃未満であっても，100℃以上にカウントされている可能性があることに留意。

産業部門の温度帯別熱需要（業種別）



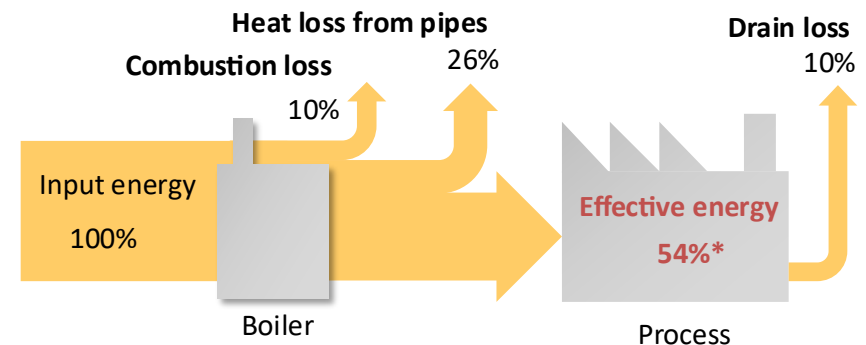
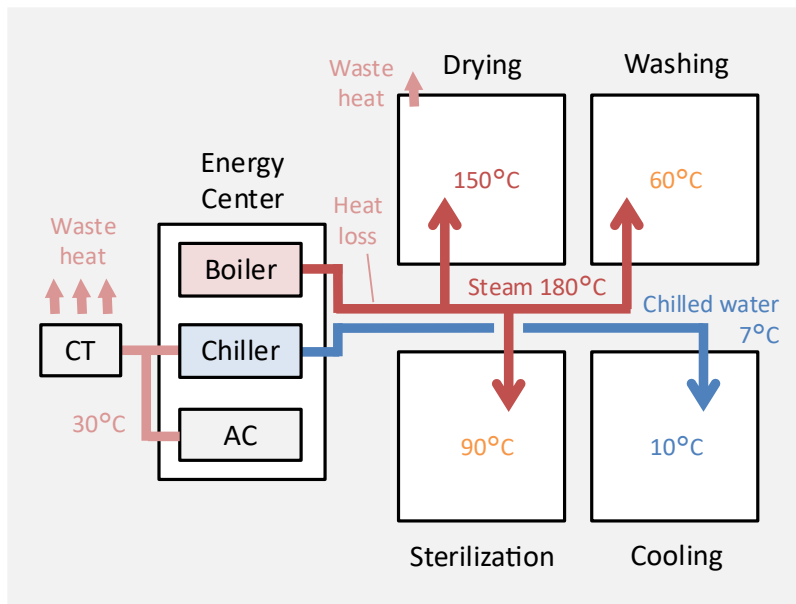
産業部門の温度帯別熱需要（熱利用形態別）



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

従来の工場における熱供給システム

- 生産プロセスから離れたところにあるボイラから蒸気を供給
 - 不必要に高温の蒸気を供給（ユーティリティ供給温度 > プロセス熱需要温度）
 - 低い蒸気利用効率（50%程度）



* Averaged value of 29 factories by actual survey

ヒートポンプの原理と特徴

■ ヒートポンプとは？

- 熱をくみ上げる技術

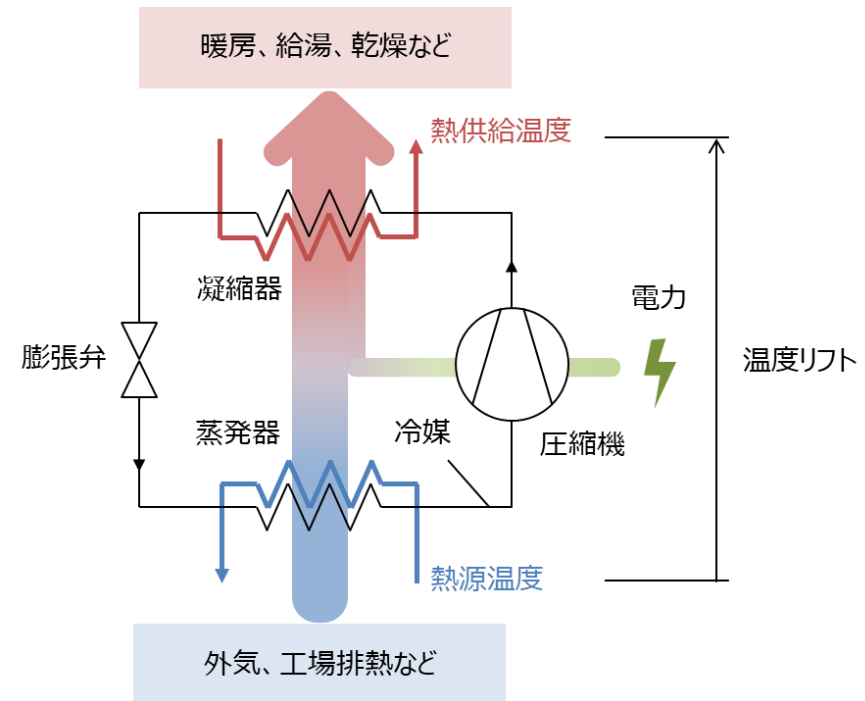
■ ヒートポンプの3つの側面

- 排熱等を有効利用
(熱回収技術)
- くみ上げる際に電力を使用¹⁾
(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？

- $COP = \text{加熱量} / \text{消費電力量} (> 1)$
- 温度リフト²⁾が小さいほど高COP
- 温度リフト60℃差でCOPは3くらい

ヒートポンプの原理

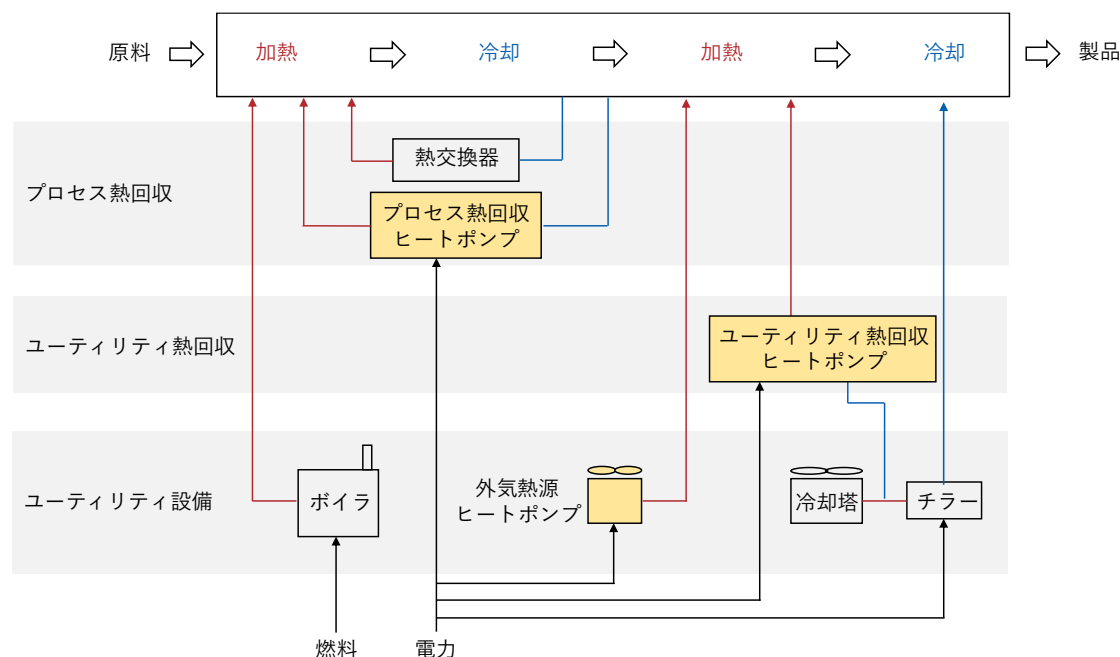
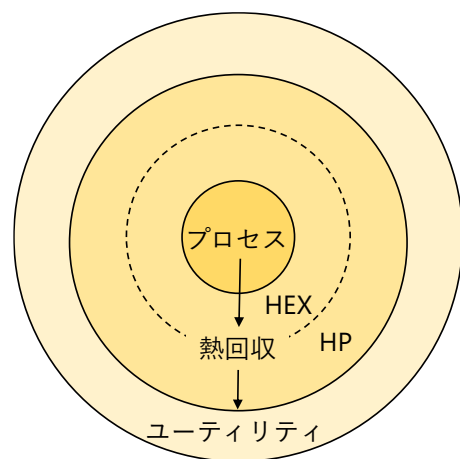


1) ヒートポンプは熱をくみ上げる技術の総称で様々な原理のものがあるが、本講演では広く普及している電力駆動式のヒートポンプのみを対象

2) 温度リフト：ヒートポンプがくみ上げる熱の温度差，すなわち熱供給温度と熱源温度の差

ヒートポンプの効果的な活用

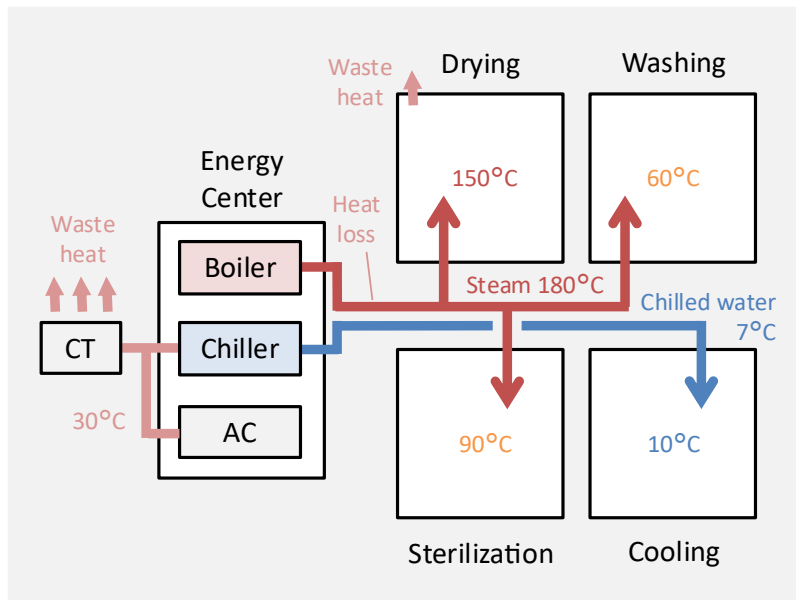
- ヒートポンプの前に熱交換器で最大限に熱回収
- ヒートポンプは温度リフトが小さくなるように導入するのが肝要



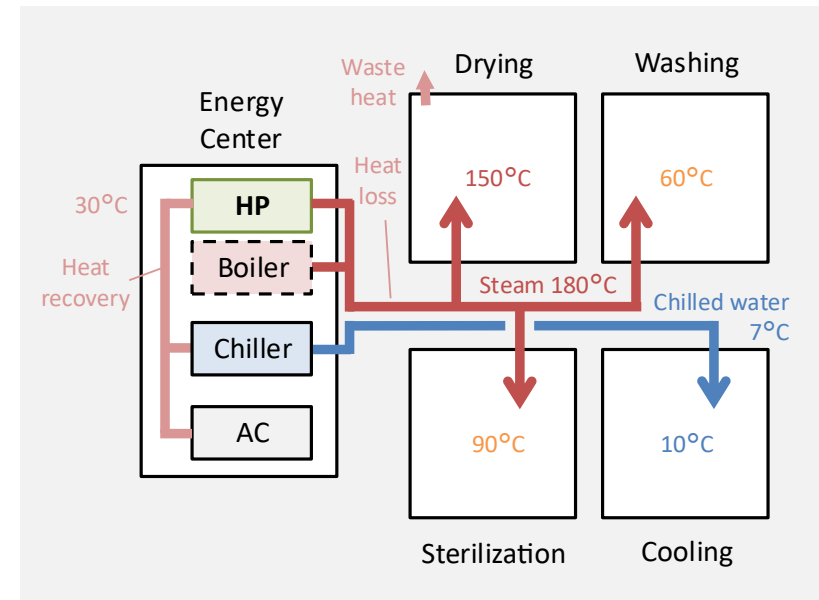
ヒートポンプの統合レベル ①ユーティリティレベル

- エンジニアリング面では比較的容易
- 温度リフトが大きい（現在の日本では競争優位性が低い）
- 依然として、蒸気配管から放熱，プロセスから廃熱あり

従来の熱供給システム



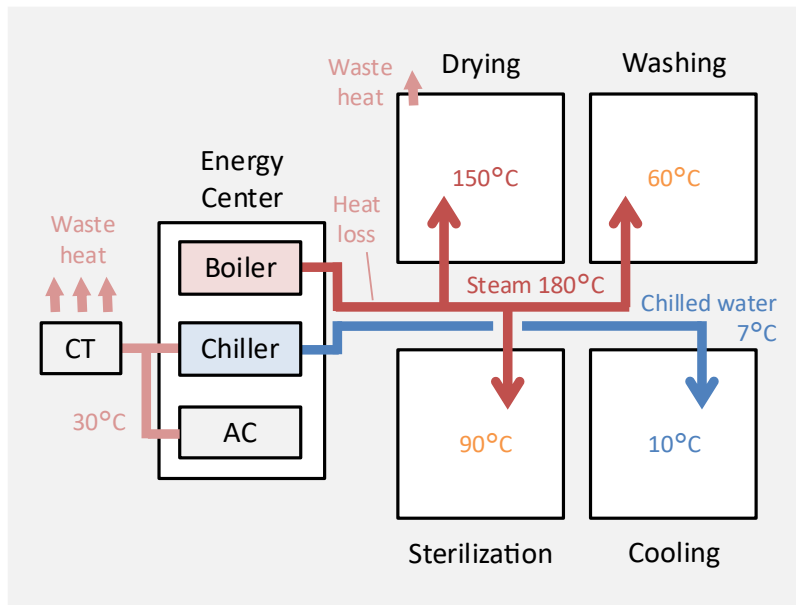
ヒートポンプの活用（ユーティリティレベル）



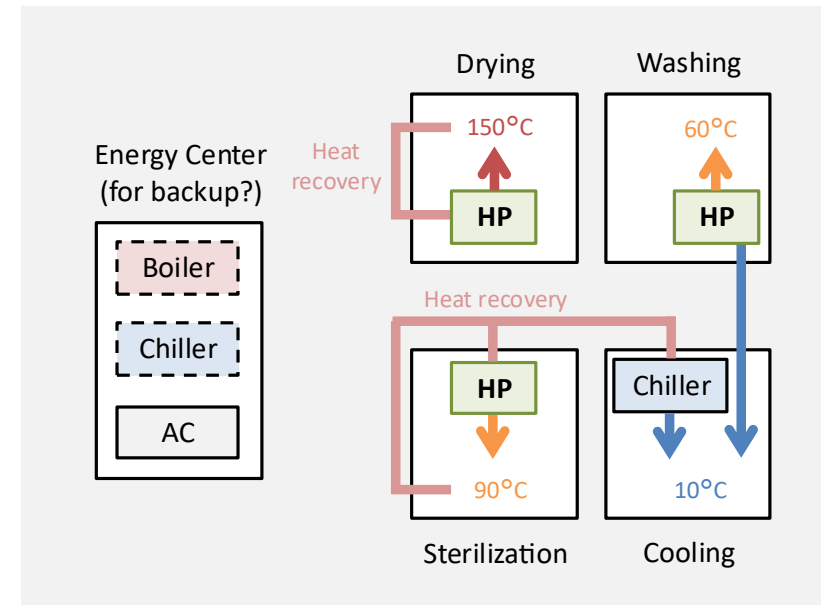
ヒートポンプの統合レベル ②プロセスレベル

- 温度リフトが小さく高効率
- 蒸気配管からの放熱を低減し、プロセス排熱を利用可
- 高度なエンジニアリング・スキルが必要
- プロセスの稼働時間、ヒートポンプの設置スペースを考慮する必要あり

従来の熱供給システム

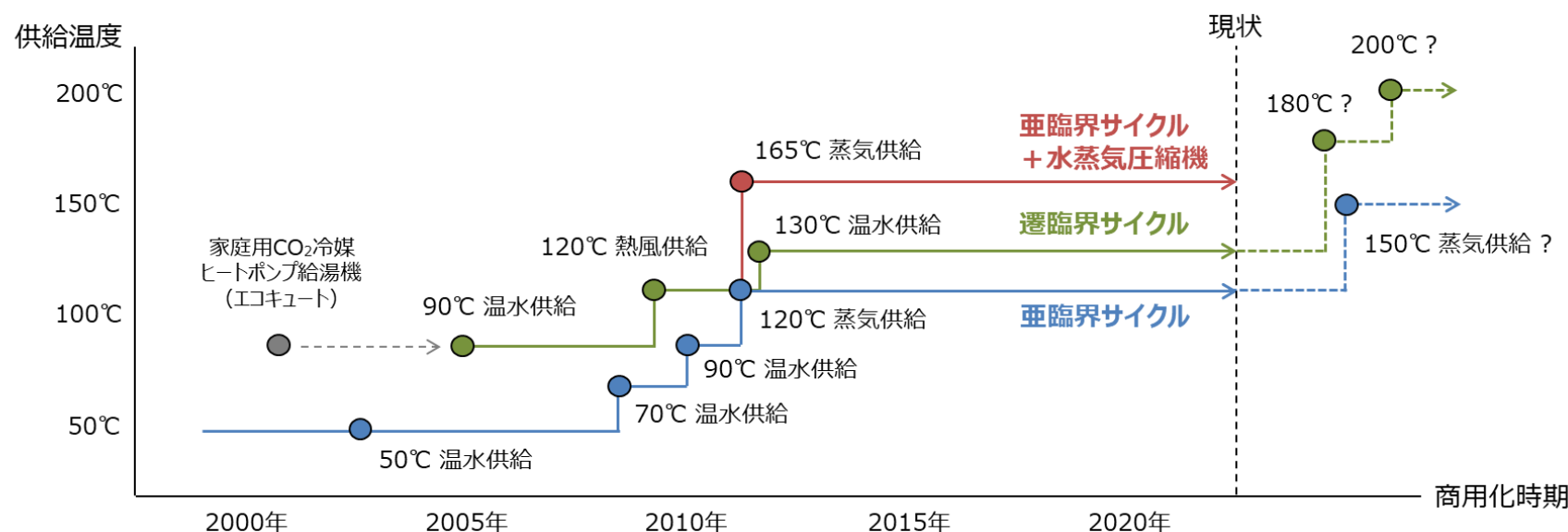


ヒートポンプの活用（プロセスレベル）



日本における産業用ヒートポンプ高温化の技術動向

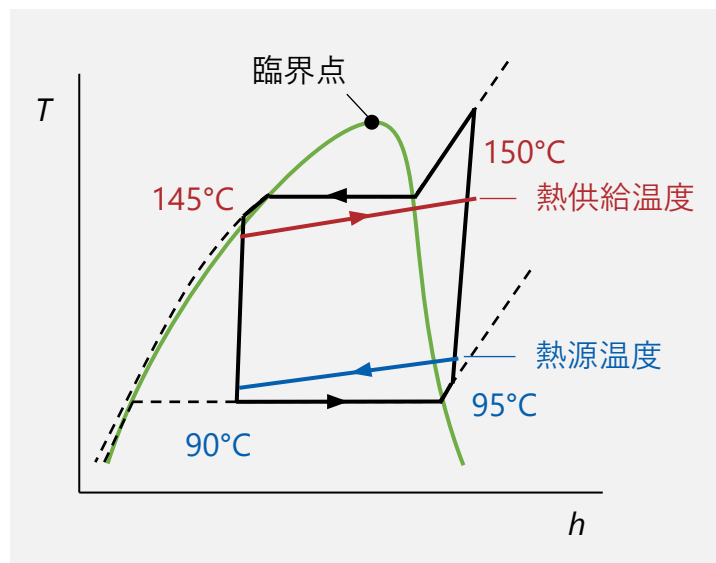
- 2000年代後半～2010年代前半は高温ヒートポンプの技術開発・商用化が活発であった
- 2013年頃から、二次エネルギー価格比の上昇によって市場競争力が低下したため、高温（大温度リフト）ヒートポンプの商用化は停滞
- ただし、将来を見据えて、高温化に向けた地道な技術開発は継続中



遷臨界サイクルヒートポンプ

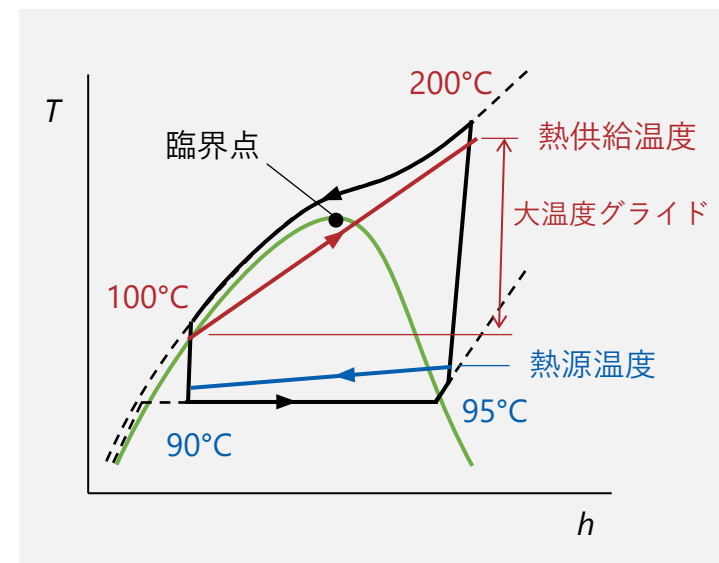
- 顕熱供給であれば、比較的高いCOPで高温の熱供給が可能
- 熱風乾燥プロセスなどでの利用に期待
- 前川製作所がNEDOプロジェクトで開発に取り組んだ
※ NEDO「未利用熱エネルギーの革新的技術研究開発」（2013~2022年度）

亜臨界サイクル（潜熱供給）



どちらも
COP \approx 3.5

遷臨界サイクル（顕熱供給）



乾燥プロセスへのヒートポンプ適用

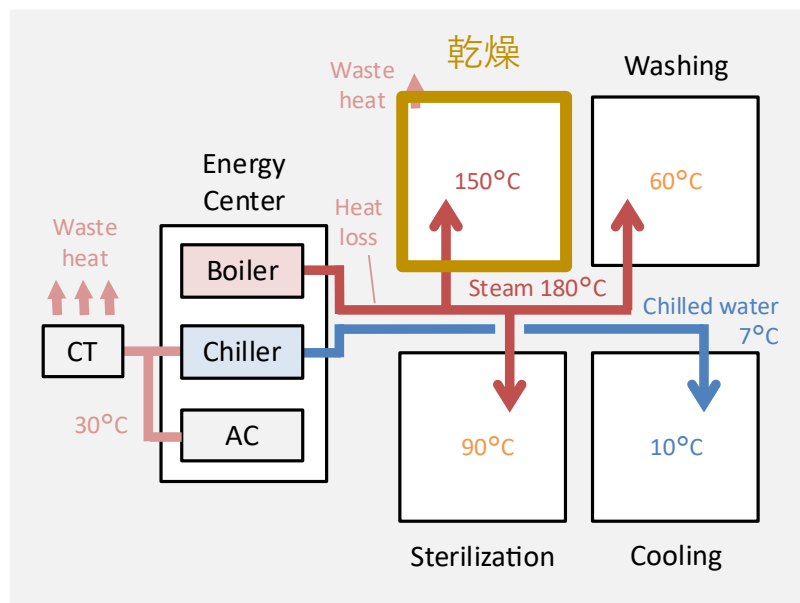
フランス電力（EDF）との産業用ヒートポンプに関する研究連携の一環として取り組んだ内容

T. Kaida, Y. Beucher, F. de Carlan, J-M. Fourmigue,
“Analysis of Heat Pump integration into Drying Process for Decarbonization in Industry”,
ECEEE Industrial Efficiency 2020, September 2020

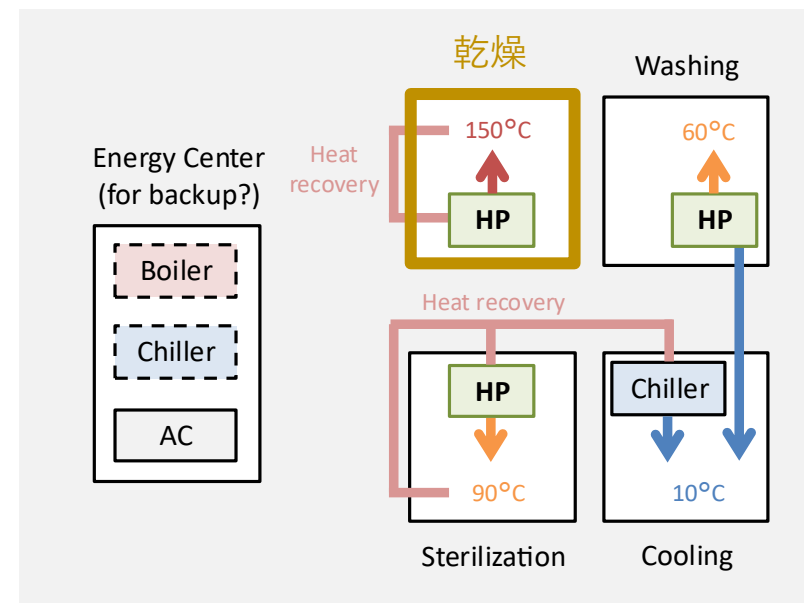
乾燥プロセス

- エネルギー消費量が多い加熱プロセス（多くの先進国で産業部門全体の10~25%）
- 乾燥プロセスからの排熱（排気）はほとんど有効活用されていない
- 遷臨界サイクルヒートポンプが適しており，比較的高効率にヒートポンプを活用可

従来の熱供給システム

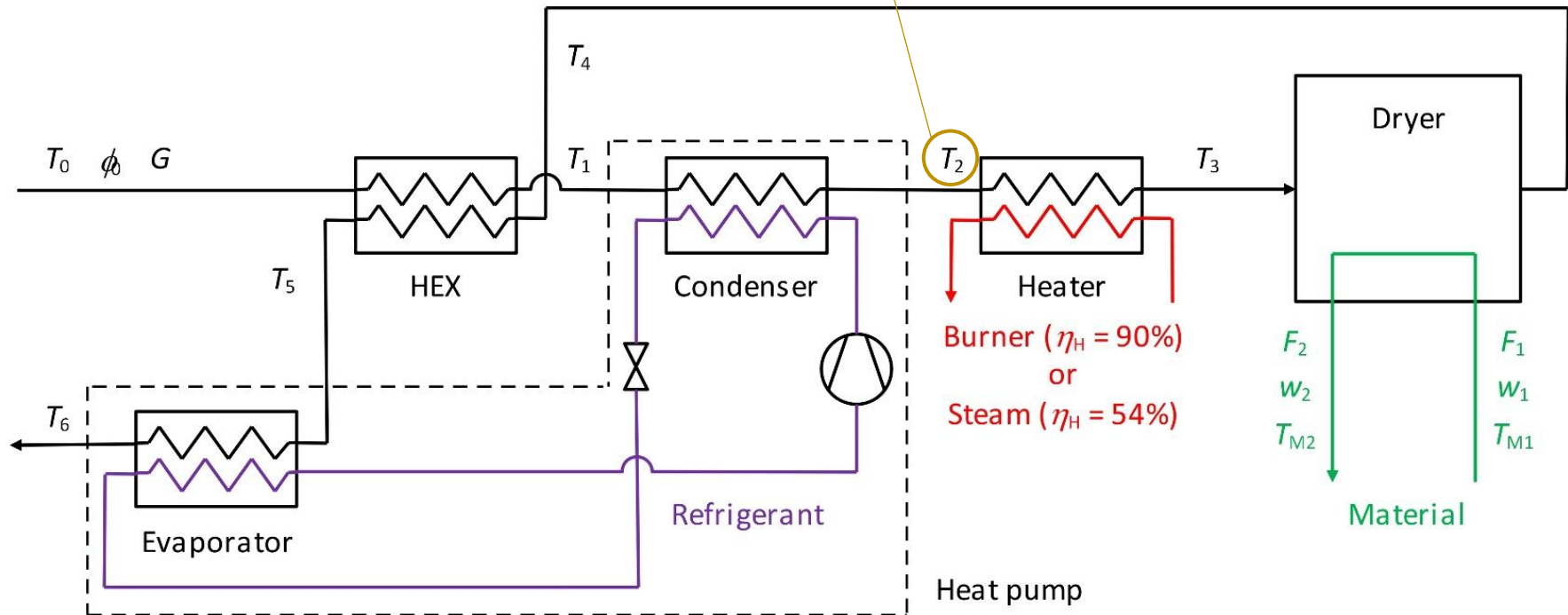


ヒートポンプの活用（プロセスレベル）



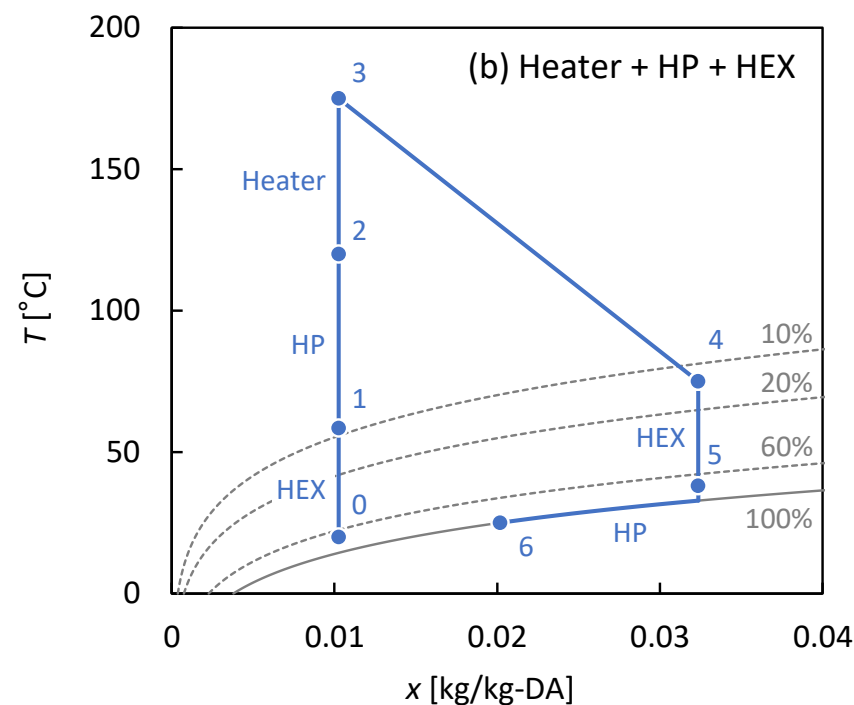
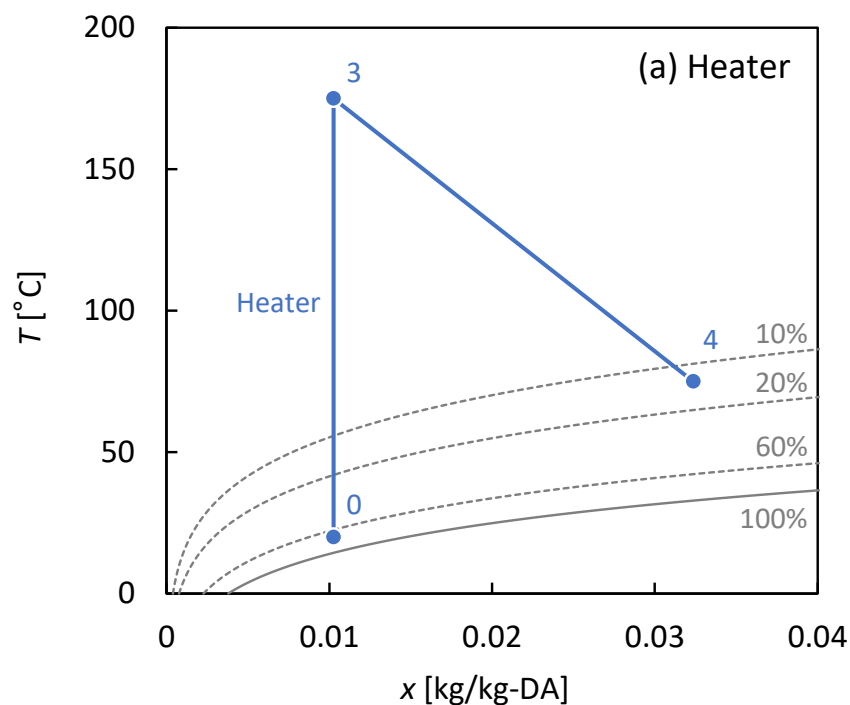
システムのモデル化

- 排熱回収熱交換器と排熱回収ヒートポンプを統合した熱風乾燥システムをモデル化
- エネルギーコストが最小となるヒートポンプ供給温度を明らかにする



湿り空気線図

- 熱交換器 (HEX) による顕熱回収
- ヒートポンプ (HP) による潜熱回収



※デンプン乾燥（乾燥温度175°C、排気温度75°C）でヒートポンプ供給温度が120°Cのときの一例

計算条件 ①乾燥条件

Product	ABS resin	PVC resin	Organic residue	Starch	Glutamic acid	Nori seaweed
Feed material F_1 [kg/h]	500	2,000	1,100	2,000	400	170
Water content of material ω_1 [%W]	30	17	38	42	17	13
Water content of material ω_2 [%W]	2	1	10	13	1	8
Product temperature T_{M2} [°C]	47	50	55	45	60	80
Hot air supply temperature T_3 [°C]	140	140	150	175	180	180
Hot air exhaust temperature T_4 [°C]	70	70	75	75	80	120
Hot air supply flow rate G [kg-DA/h]	10,200	18,000	30,000	30,000	3,600	2,700

計算条件 ②境界条件

Region or country		EU	France	Japan
CO ₂ emissions factor [kg-CO ₂ /kWh]	Natural gas	0.22	0.23	0.18
	Electricity	0.30*	0.06*	0.46
CO ₂ emissions factor ratio [-]	E/G	1.4	0.3	2.6
Primary energy factor [kWh/kWh]	Natural gas	1.1	1	1
	Electricity	2.1	2.58	2.71
Primary energy factor ratio [-]	E/G	1.9	2.6	2.7
Energy unit price [€/MWh]	Natural gas	28	37	39
	Electricity	102	99	136
Energy unit price ratio [-]	E/G	3.6	2.7	3.5

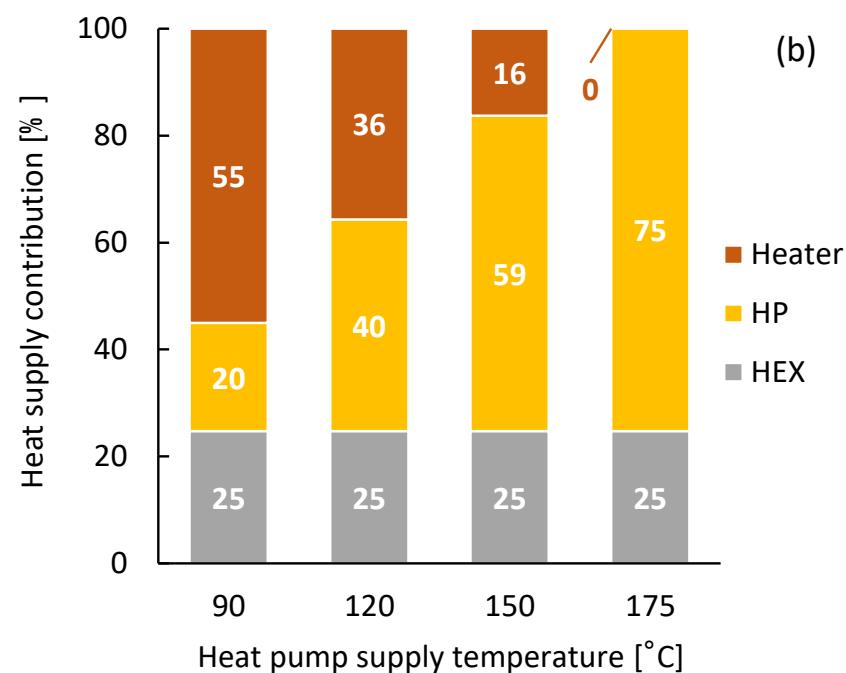
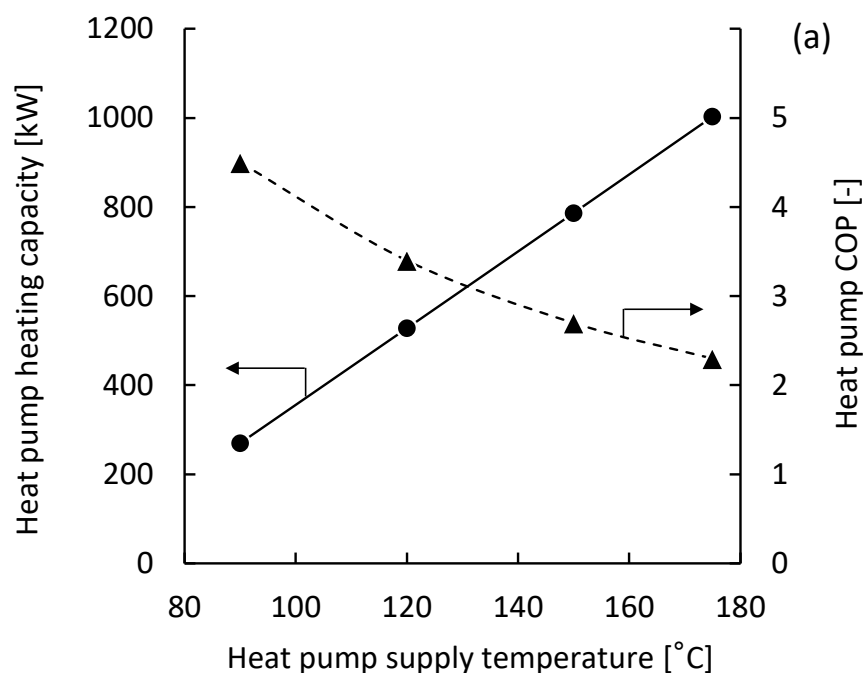
* The CO₂ emissions factors of EU and France are taken from statistical data for 2016. The other factors are taken for 2018.

注1) 2018年のデータ

注2) エネルギー単価はIEA統計を参照

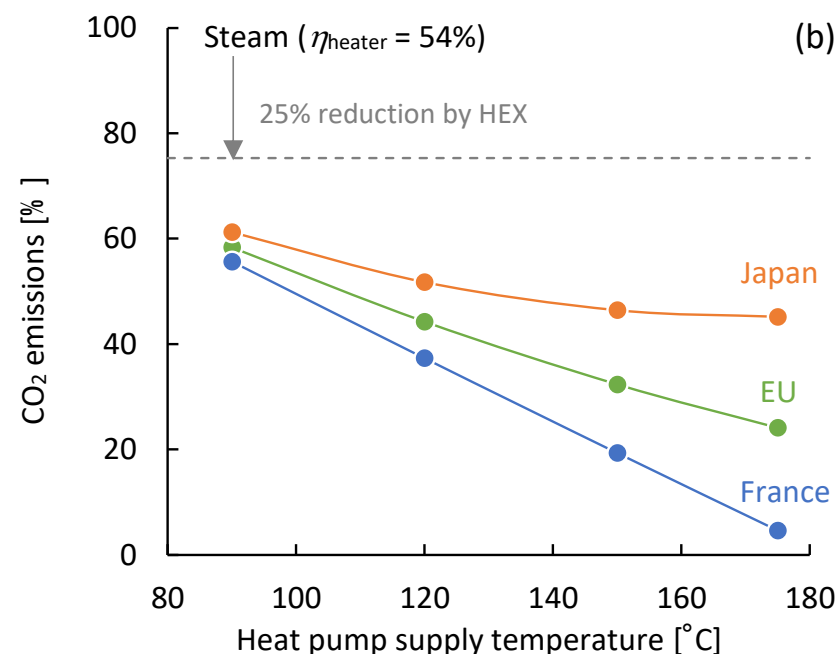
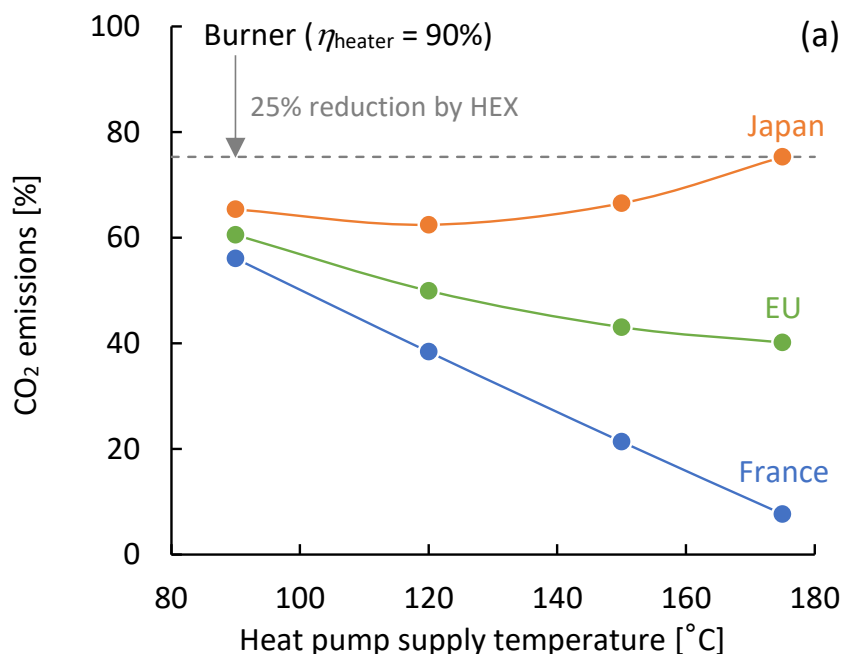
計算結果

- ヒートポンプ供給温度を上げると、・・・
 - － ヒートポンプの熱供給貢献度は増加
 - － ヒートポンプのCOPは低下
- エネルギーコストが最小となる
最適温度が存在



計算結果

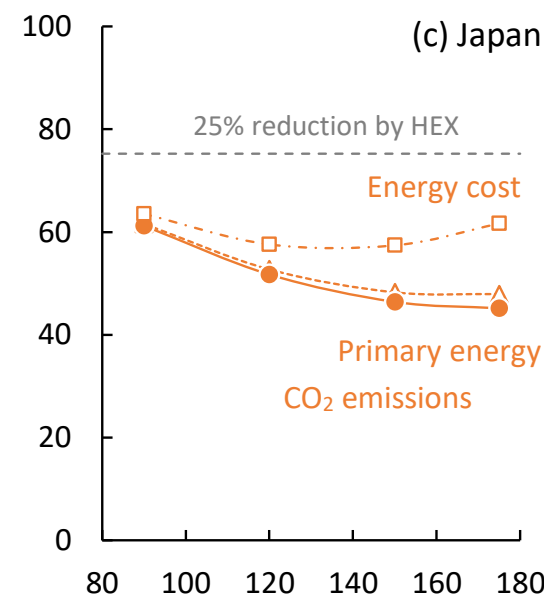
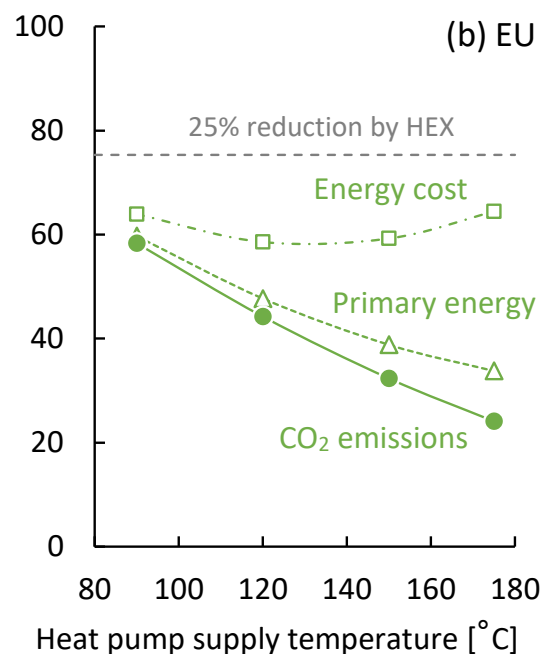
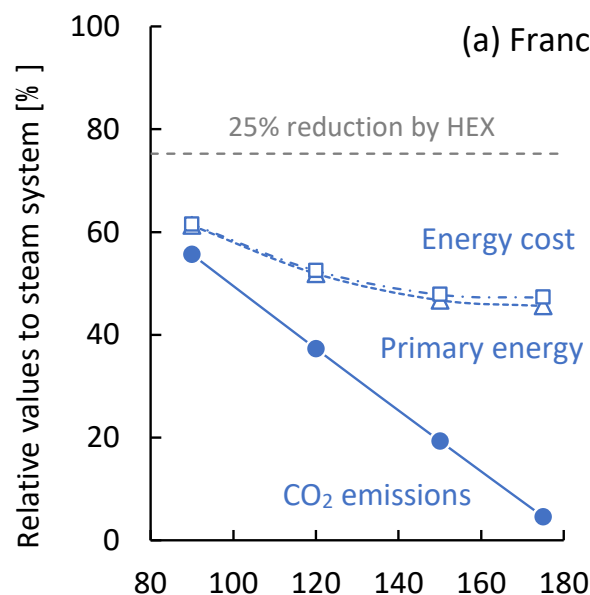
- 従来システムとのCO₂排出量の比較
 - 排熱回収熱交換器で25%削減
 - 電力のCO₂排出係数が低いフランスで削減量が多い
 - 従来システムがバーナの場合，日本では175℃供給ヒートポンプは効果的ではない



計算結果

● 既存システムがボイラの場合

- | | | |
|--------|-----------------|---------|
| – フランス | 最適温度175℃（オール電化） | 95%排出削減 |
| – EU | 最適温度130℃ | 60%排出削減 |
| – フランス | 最適温度130℃ | 50%排出削減 |



まとめ

■ ヒートポンプの効果的活用

- ヒートポンプの前に熱交換器での熱回収を検討
- ユーティリティレベルの前にプロセスレベルでのヒートポンプ統合を検討
- ヒートポンプの供給温度を上げると、適用可能な加熱プロセスが拡大（またはヒートポンプの熱供給貢献度が増加）するが、COPは低下
- 境界条件に応じて、最適なヒートポンプ供給温度が存在

※本発表ではエネルギー効率の面で「熱のハイブリッド」について検討したが、エネルギー効率以外にも考慮すべきことがあることに注意。