CRIEPI
Central Research Institute of Electric Power Industry

欧州における産業用高温ヒートポンプの研究開発動向

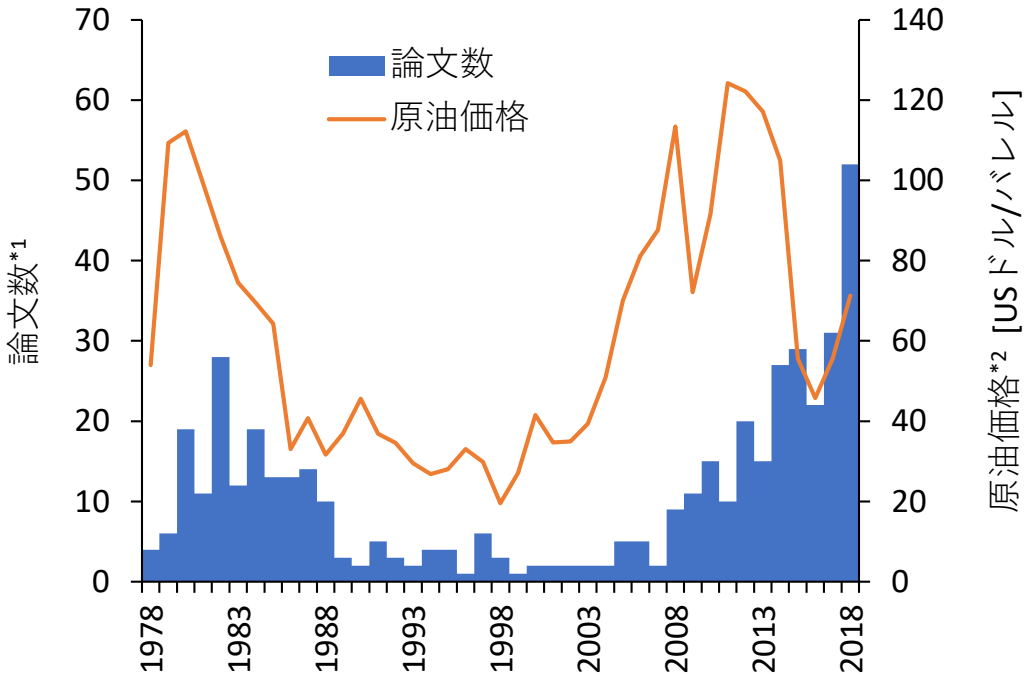
2020年12月9日｜ENEX2021

一般財団法人電力中央研究所（CRIEPI）
エネルギーイノベーション創発センター（ENIC）
甲斐田 武延

産業用ヒートポンプへの期待

論文数の推移から見る産業用ヒートポンプへの関心

- 省エネルギーから脱炭素化へ
  - 石油危機直後の1980年代に**省エネ技術**として**産業用ヒートポンプ**に関する研究活動が活発であった
  - しかし、90年代から原油価格の低下とともに関心が薄れた
  - 近年、**脱炭素化**のための**高効率な産業電化技術**という位置づけで再び活発に



*1 論文数：SCOPUS（検索語＝"industrial heat pump" or "high temperature heat pump"）

*2 原油価格：BP統計2019（物価変動を考慮した実質価格）

©CRIEPI

産業電化技術としてのヒートポンプの位置づけ

- 使用電力による区分
  - **ベースロード電化**：電源構成や時間帯などの制限はほとんどなく長時間
  - **フレキシブル電化**：安価な電力（太陽光発電による昼間の電力など）を使って短時間
- 適用場所による区分
  - **ユーティリティの電化**：プロセスへの影響なく電化（熱源転換）
  - **プロセスの電化**：プロセス自体を変更（負荷低減、生産性向上）

ベースロード電化

工場や生産工程別のソリューション（プロセス変更）

※エネルギー消費量やCO_2排出量の大幅削減のためには最重要だが、第3者がほとんど介入できず、ハードルが高い。

高COP技術

- **蒸気再圧縮（MVR）**［Power to Heat］
- **高温ヒートポンプ**［Power to Heat］

プロセスの電化 ／ **ユーティリティの電化**

デマンド・サイド・マネジメント（DSM）

- 化学品生産用の電気分解［Power to Chemical］

低COP技術

- 電気ボイラ［Power to Heat］
- 電気分解［Power to Hydrogen］
- 電磁波［Power to Heat］

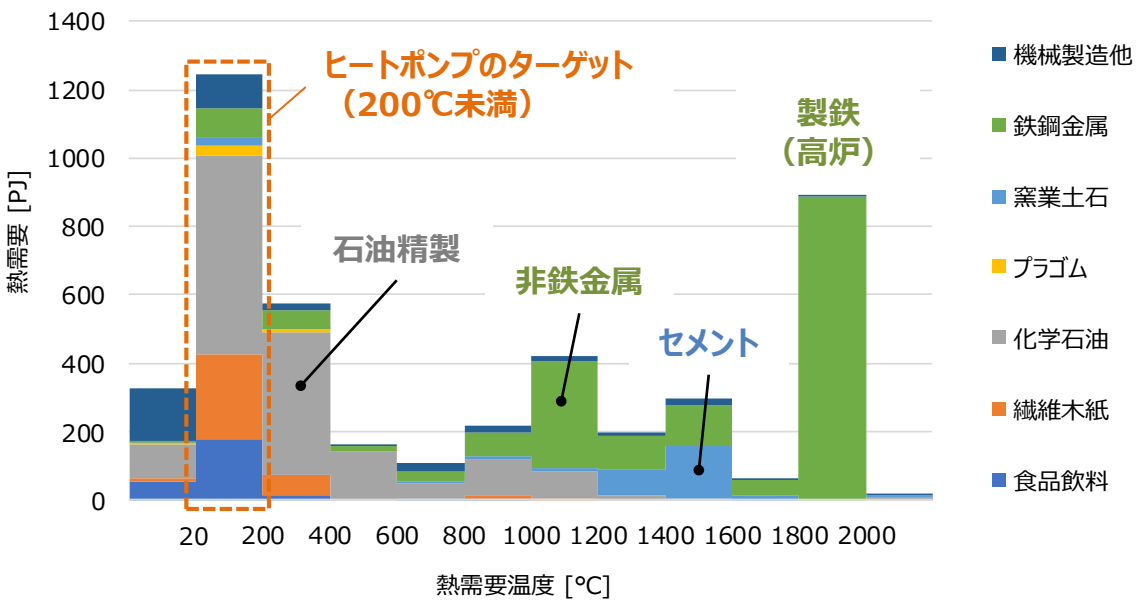
フレキシブル電化

RVO “Electrification in the Dutch process industry”（2017年2月）を基に作成

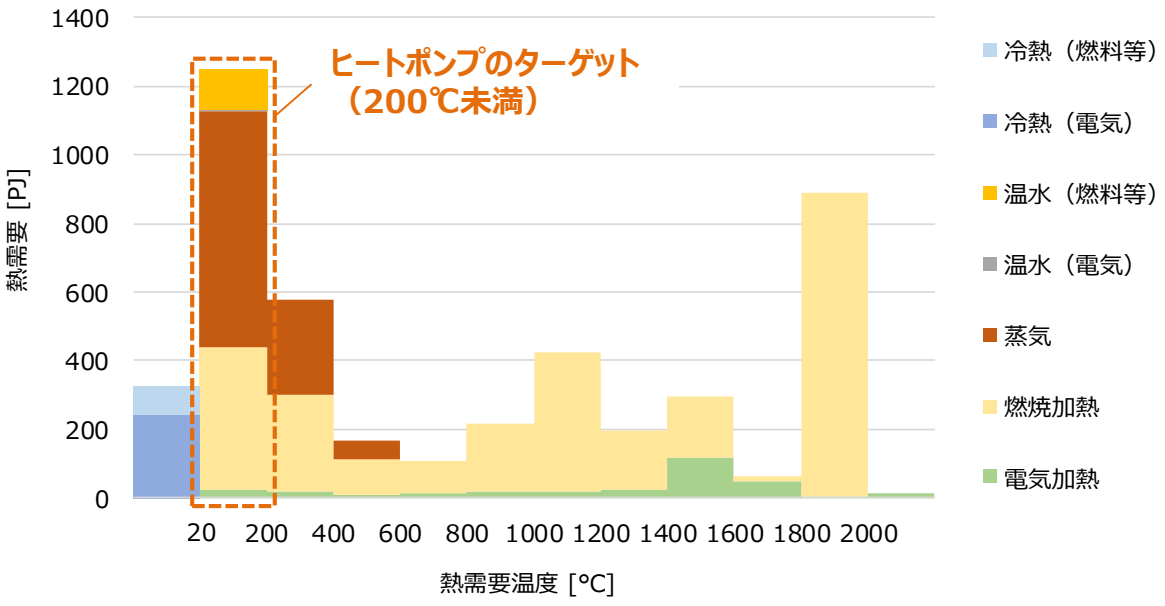
産業部門の熱需要

- 低温（200℃未満）
  - **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
  - **ヒートポンプ**のターゲットゾーン
- 高温
  - 鉄鋼・金属・セメント・化学等のエネルギー多消費型産業に限られ、燃焼加熱（バーナ）としての利用形態が多い
  - 抵抗加熱（電気ヒータ）、誘導加熱（IH）、プラズマ加熱などで電化

業種別



熱利用形態別



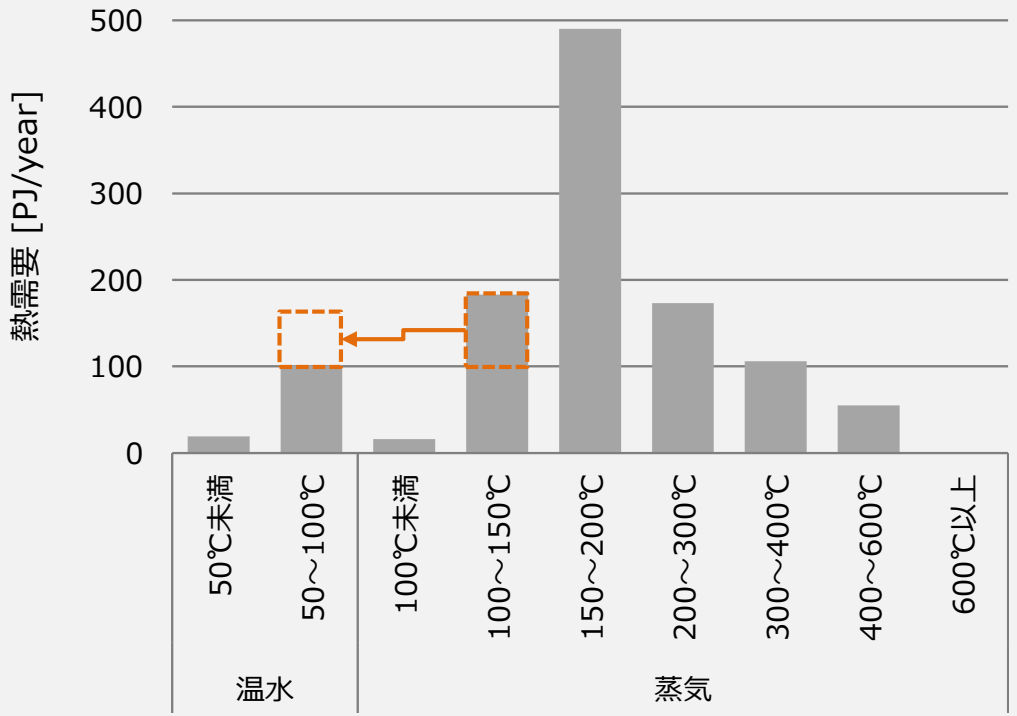
資源エネルギー庁「熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査」（2018年2月）を基に作成

©CRIEPI

産業用ヒートポンプの適用拡大に向けて

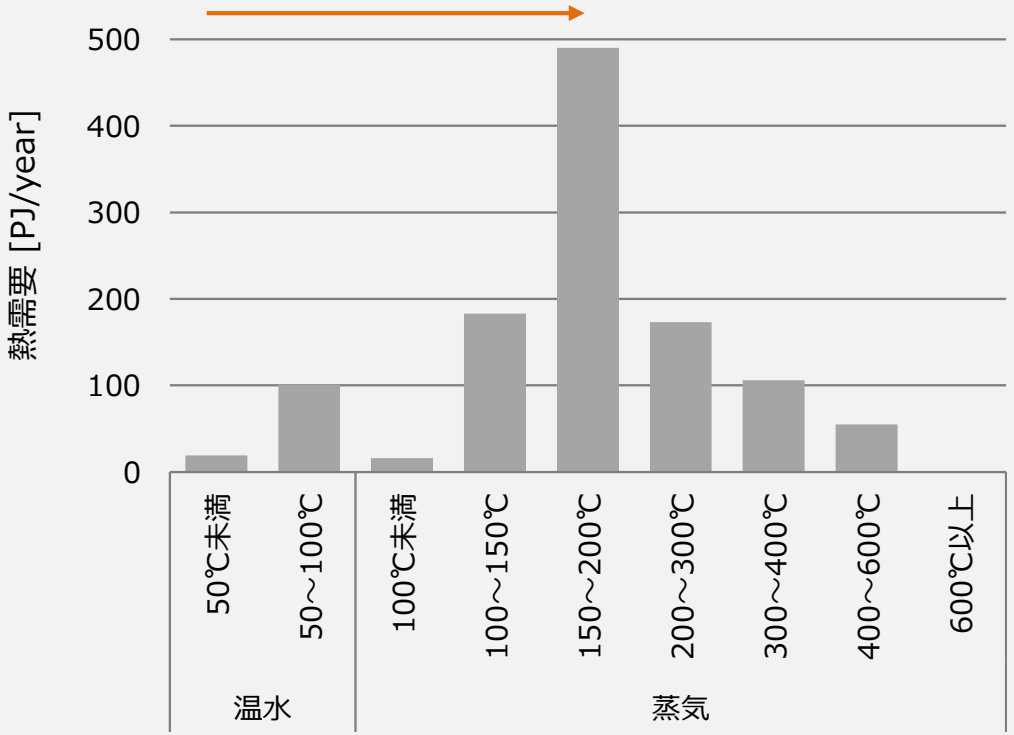
① プロセス変更等による熱需要温度の低減と温水供給ヒートポンプの適用

- 蒸気利用から温水利用への変更
  （放熱損失が削減され、熱需要が減少する効果もあり）
- 蒸留塔内圧の負圧化と温水供給ヒートポンプの適用



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

- 蒸気供給ヒートポンプや熱風供給ヒートポンプの開発と実証



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

©CRIEPI

欧州の主要研究機関による
高温ヒートポンプの研究開発動向

産業用ヒートポンプに関する欧州の主要研究機関

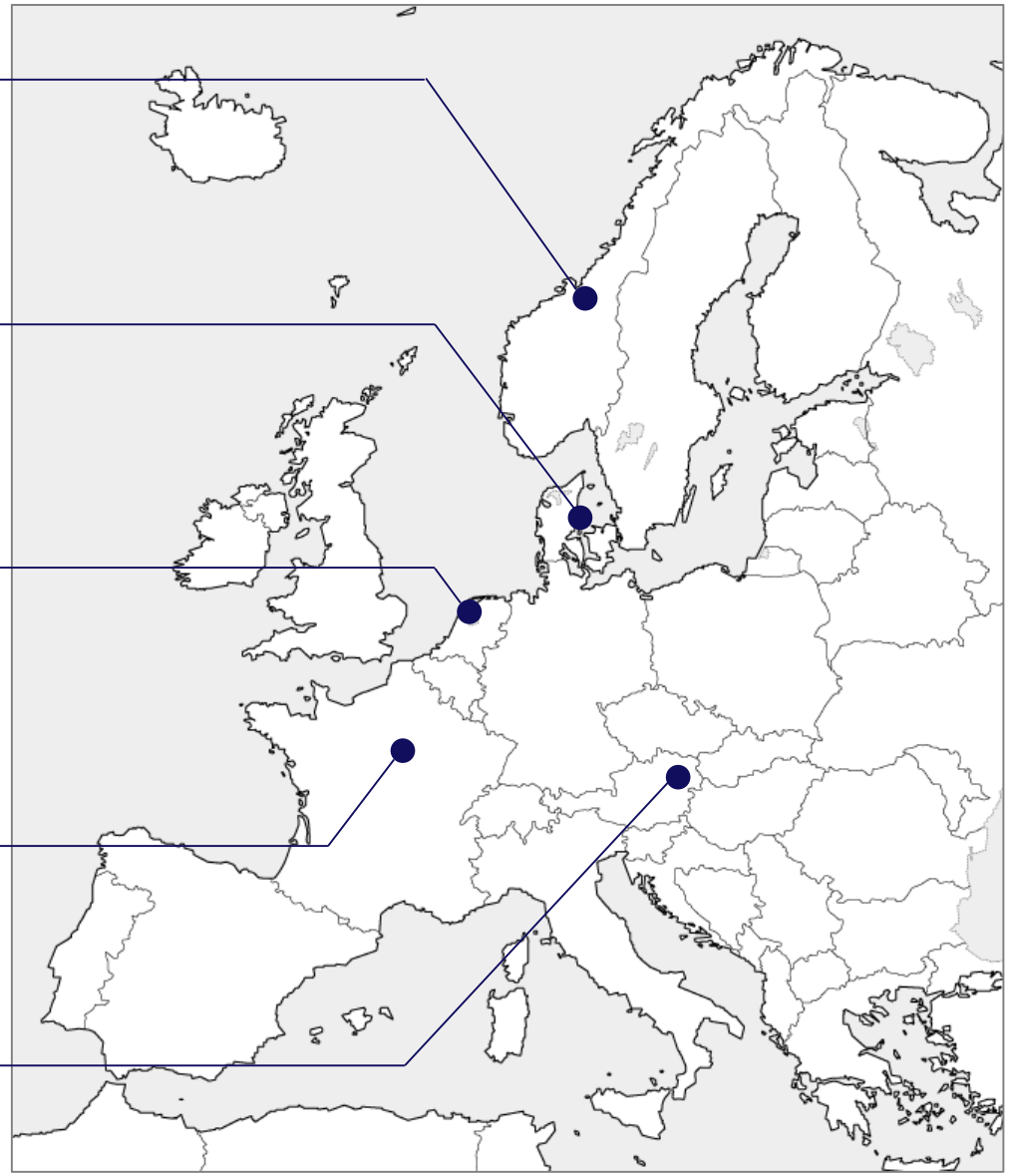
SINTEF
ノルウェー産業技術研究所

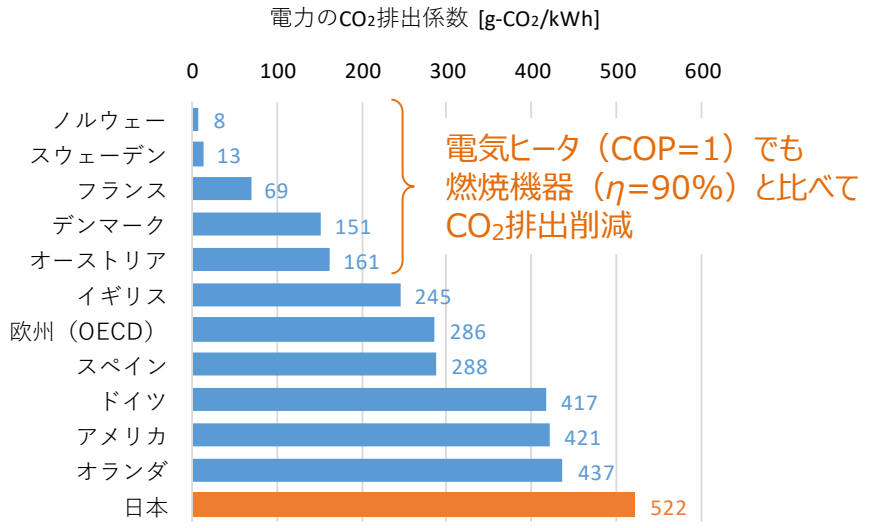
DTI
デンマーク技術研究所

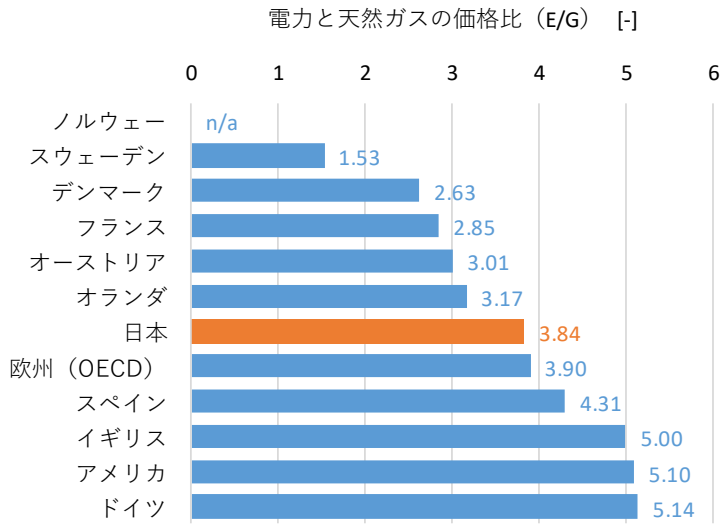
TNO
オランダ応用科学研究機構

EDF
フランス電力

AIT
オーストリア技術研究所







IEA統計（2017年データ） をもとに作成

©CRIEPI

特徴的なテーマ 1｜乾燥工程用ヒートポンプ

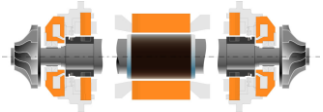
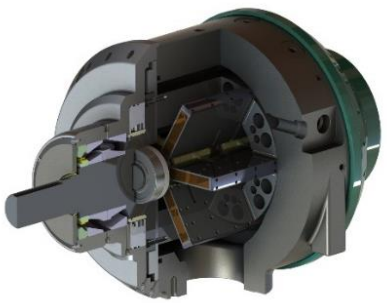
■ なぜ乾燥工程用ヒートポンプの開発が盛んか？

- 乾燥工程は、産業部門の加熱工程の中でエネルギー消費が比較的大きい（先進国では10～25%）
- 乾燥工程からの排熱は有効に活用されていないことが多い（活用されても熱交換器による顕熱回収）
- 遷臨界サイクルが適しており、比較的高いCOPで高温供給が可能

	AIT（オーストリア）	EDF（フランス）	GEA（デンマーク）	SINTEF（ノルウェー）	Frigopol（オーストリア）
プロジェクト名	DryF	TRANSPAC	n/a	SusOrgPlus	TransCrit
熱源→熱負荷	水→水	空気→空気	水→水	空気→空気	水→水
供給温度	< 160℃	< 150℃	< 135℃	n/a	< 170℃
加熱能力	200 kW	700 kW	1,500 kW	n/a	n/a
圧縮機	レシプロ / スクリュー	n/a	レシプロ	n/a	n/a
冷媒	R1336mzz(Z)	R1234ze(E)	R744（CO_2）	R744（CO_2）	R600（ブタン）
サイクル	亜臨界	**遷臨界**	**遷臨界**	**遷臨界**	**遷臨界**
進捗状況	デンプンとレンガの乾燥工程で実証試験中	実証試験サイト（製紙）の探索中	乳製品のスプレー乾燥機を対象に乾燥テストセンターで試験中	食品乾燥を対象に乾燥試験装置を構築して検証予定	機器開発中

©CRIEPI

特徴的なテーマ２｜水蒸気圧縮機

	EDF（フランス）		SINTEF（ノルウェー）	SINTEF（ノルウェー）
プロジェクト名	PACO		DryF	Free2Heat
タイプ	ターボ（2段）	スクリュー	ターボ（単段×2）	ロータリベーン
外観				
特徴	コンパクト・静粛（磁気軸受）	高温度リフト	安価（自動車用過給機の転用）	湿り圧縮に強い オイルフリー
メーカ	Johnson Controls（YORK）	SRM	Rotrex	ToCircle
蒸気流量	1,000 kg/h	n/a	750 kg/h	1,600 kg/h
圧力比（温度リフト）	3.9（40K、90→130℃）	n/a	3.7（41K、100→141℃）	3.7（52K、138℃→190℃）
進捗状況	実証試験サイト（蒸留工程）の探索中		性能マップの取得	機器開発中

©CRIEPI

特徴的なテーマ３｜圧縮式・吸収式ハイブリッドヒートポンプ

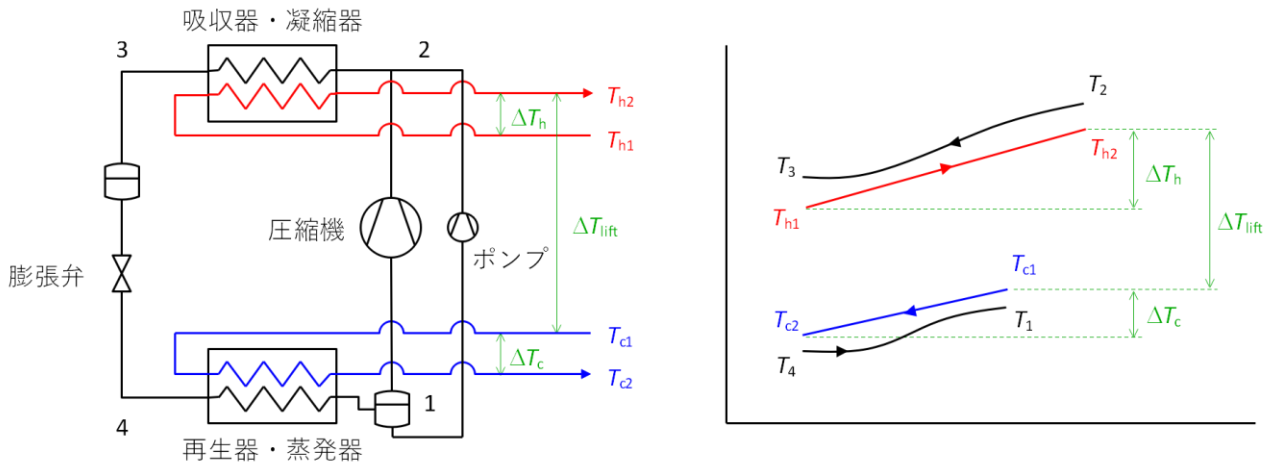
■ 概要

- R717（アンモニア）とR718（水）の混合冷媒を用いたオーゼンブルックサイクル
- 熱源と熱負荷の温度グライドが比較的大きい加熱工程で有効

■ 開発動向

- 自然冷媒推進派のノルウェーとデンマークで研究開発が盛ん
- Hybrid Energy社（ノルウェー）：120℃供給まで（加熱能力は2,000 kWまで）製品化
  ※R718との混合によって飽和圧力が低下するため、標準的なアンモニア圧縮機をそのまま活用
- DTI（デンマーク）：145℃供給までの高温化を目的として開発中

オーゼンブルックサイクルの構成概略図と温度プロファイル



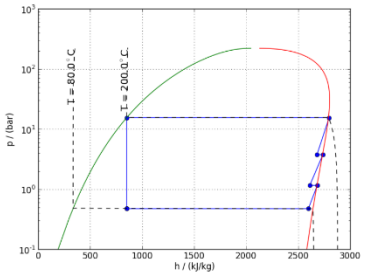
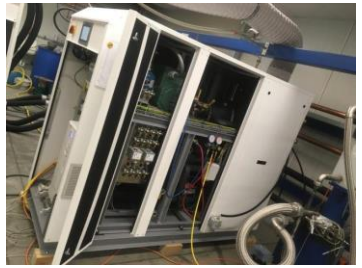
Hybrid Energy社の製品

EDFにおける産業用ヒートポンプの研究開発

	AlterECO	JC社との共研	PACO	TRANSPAC	BAMBOO（EU）
外観					
供給温度	**100℃**	**120℃**	**140℃**	**150℃**	**160℃**
冷媒	R245fa	R245fa	R718	R1234ze(E)	R1336mzz(Z)
圧縮機	スクロール	スクリュー	ターボ / スクリュー	レシプロ →（未定）	レシプロ
加熱能力	100 kW	500 kW	600 kW	30 kW →（700 kW）	200 kW
メーカ	CLAUGER	Johnson Controls	Johnson Controls	未定	Viking Heat Engines
ラボ試験	2011-2013	2011-2016	2012-2018	2013-2018	2020-2021
開発段階	2016- 実証済 （アイスクリーム工場）	2019- 実証中 （地域熱供給）	試作機 （蒸留工程の実証サイトを探索中）	原理機 （製紙工程の実証サイトを探索中）	2021-実証予定 （鉄鋼）

©CRIEPI

AITにおける産業用ヒートポンプの研究開発

	SteamUp	HotPump	HighButane	DryF（EU）	BAMBOO（EU）
外観					
供給温度	**200℃**	**130℃**	**130℃**	**160℃**	**150℃（蒸気）**
冷媒	R718	R245fa	R600	R1336mzz(Z)	R1336mzz(Z)
圧縮機	レシプロ×3段	スクリュー	n/a	レシプロ / スクリュー	レシプロ
加熱能力	n/a	170 – 750 kW	n/a	400 kW	200 kW
メーカ	LMF	Ochsner	Frigopol	AMT (Bitzer / Viking Heat Engines)	AMT (Viking Heat Engines)
研究期間	2014	2014-2016	2014-	2016-2020	2018-2022
開発段階	基礎検討	商品化	開発中	実証中 （デンプン、レンガ）	実証予定 （鉄鋼）

BrickDrying（2014）レンガの乾燥工程の分析 → **DryPump**（2015-2017）乾燥工程への適用に関する研究

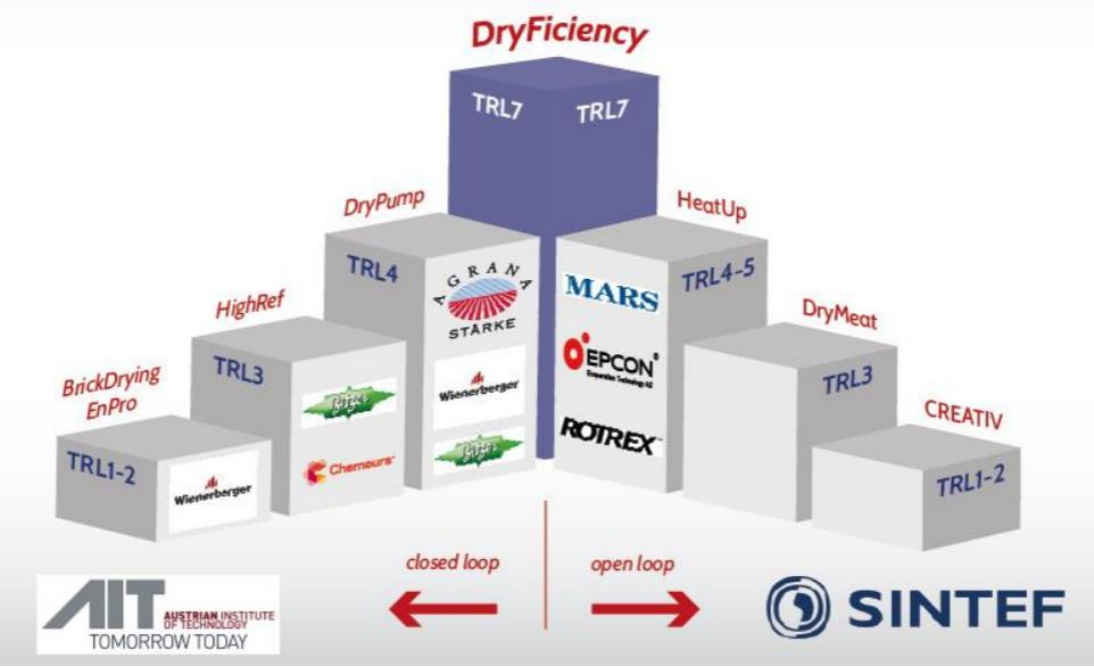
HighRef（2014-2016）R1336mzz(Z)の適用性に関する基礎試験

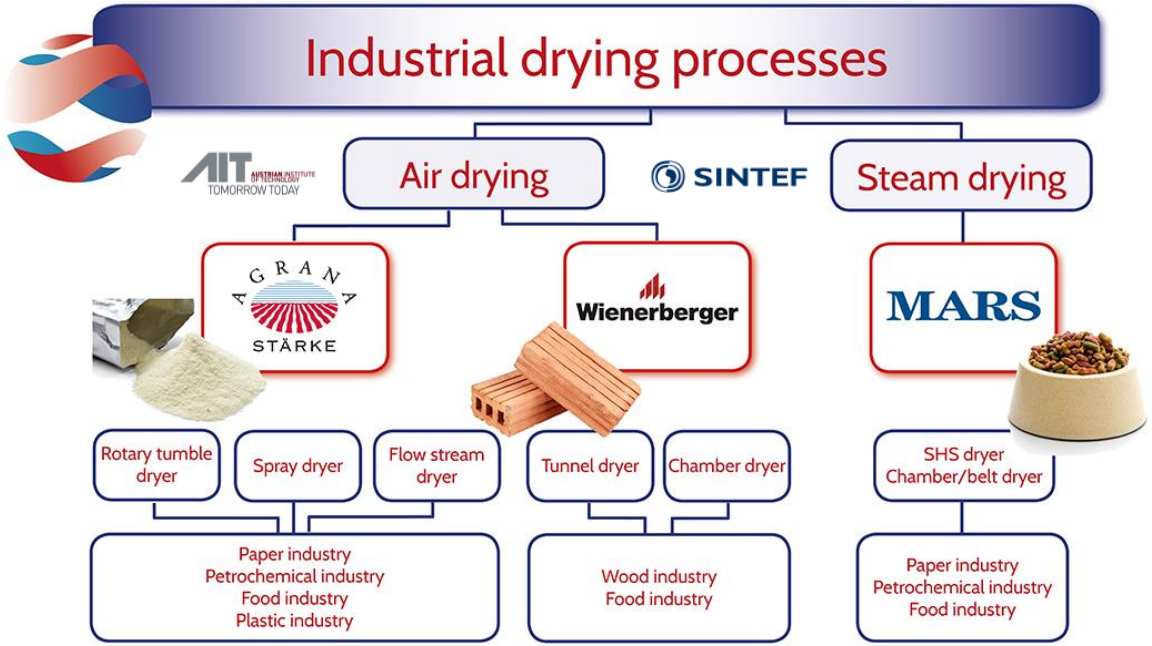
©CRIEPI

DryFiciency

■ 概要

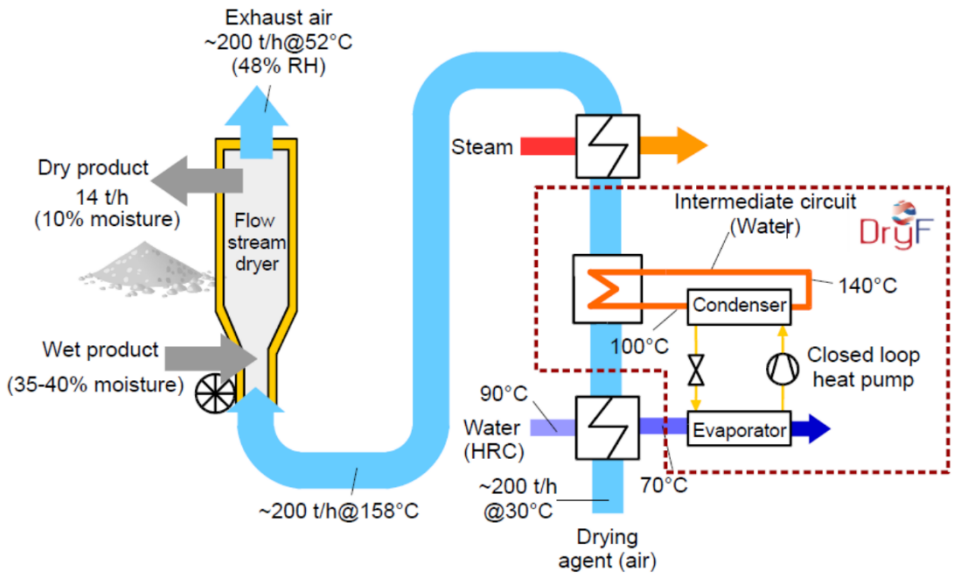
- EU Horizon 2020
- 乾燥工程用ヒートポンプの開発と実証
  - 熱風HP：レンガ（Wienerberger社、オーストリア）
  - 熱風HP：デンプン（AGRANA社、オーストリア）
  - MVR：汚泥（SCANSHIP社、ノルウェー）
    ※ペットフード（MARS社、ドイツ）から変更



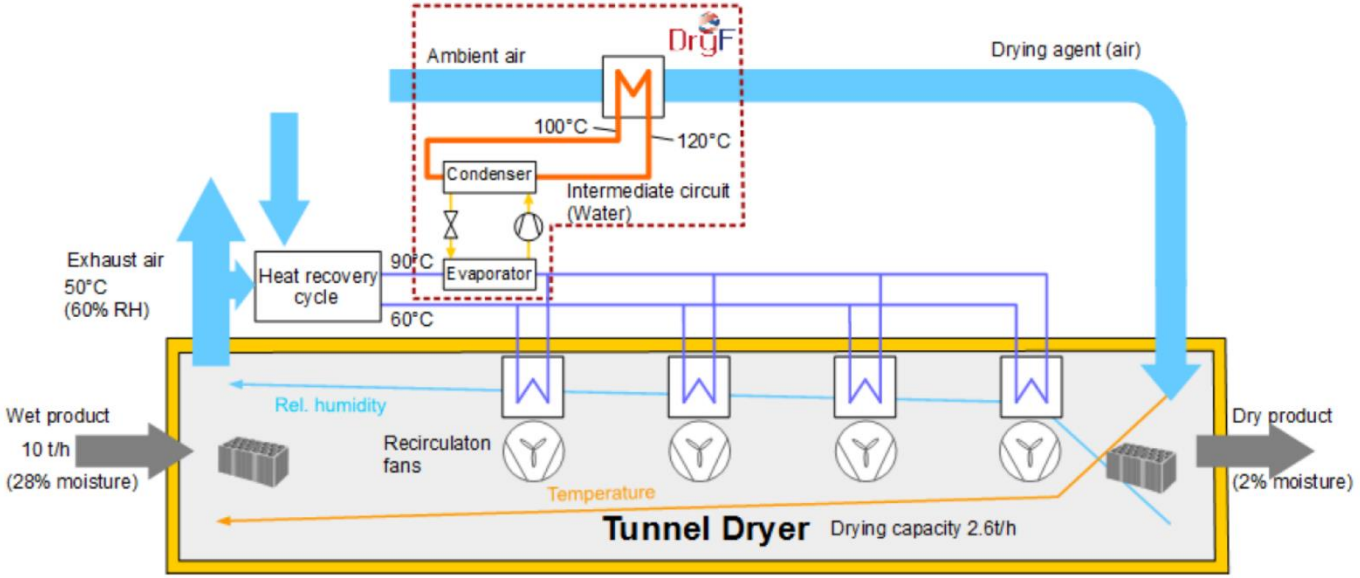


DryFiciency｜実証試験

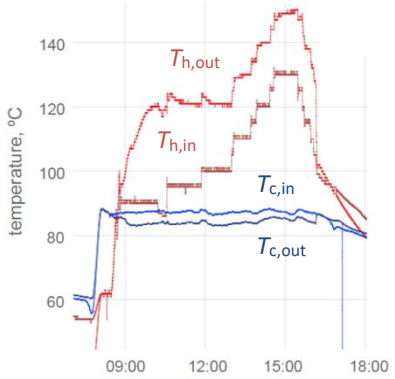
デンプンの乾燥工程

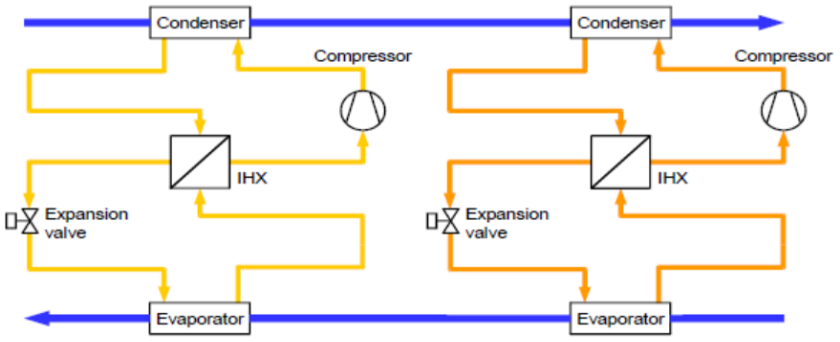


レンガの乾燥工程



レンガ乾燥工程でのコミッショニング▶





©CRIEPI

BAMBOO

■ 概要

- EU Horizon 2020
- 重工業を対象とした実証試験プロジェクト
  - 鉄鋼（ArcelorMittal社、スペイン）
  - 鉱物（Grecian Magnesite社、ギリシア）
  - 製紙（UPM社、ドイツ）
  - 石油化学（Tupras社、トルコ）

■ ArcelorMittal社での取り組み

- 燃焼効率の向上
- 排熱の有効利用
  - 蒸気供給ヒートポンプの実証

■ 蒸気供給ヒートポンプの実証

- AIT：システム検討
- AMT：EDF所有のHeatBoosterを改造
- EDF：改造した蒸気供給HPのラボ試験
- ArcelorMittal社にて実証試験

number of	condenser	intermediate circuit	flash tank	steam compression
heat exchangers	3	4	3	3
compressors	1	1	1	2
expansion valves	1	1	2	1
circulation pumps	0	1	1	0
desuperheating units	0	0	0	1
total	5	7	7	7

AITによる蒸気発生方式の検討

EDFラボに設置中の高温ヒートポンプ（改造前）

©CRIEPI

TNOにおける産業用ヒートポンプの研究開発

TNO innovation for life

TRL

実証試験

Smurfit Kappa（製紙）　DOW（化学）

LowCapEx
R1233zd(E)
スクリュー
120℃蒸気
2 MW
<100€/kW

FUSE
R601
ターボ
150℃蒸気
2 MW
<200€/kW

CRUISE
HFO
低コスト化、規格化

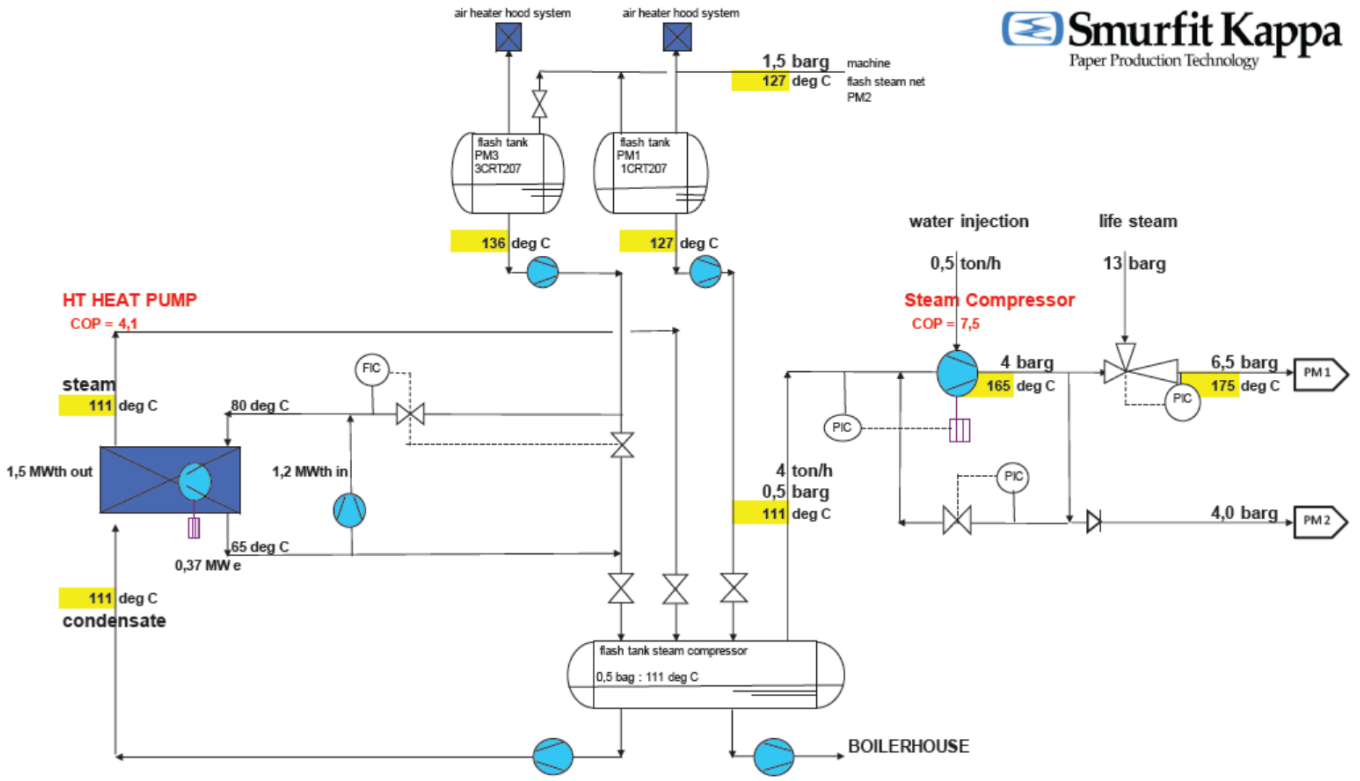
CATCH-IT
R600
レシプロ
120℃
200 kW

STEPS
R601
レシプロ
150℃
200 kW

ENCORE
新冷媒
180℃
100 kW

SPOT
R718
180℃
100 kW

温度



製紙工場へのヒートポンプと水蒸気圧縮機の導入計画

Smurfit Kappa社の要求

- 機器コスト：100€/kW未満
- 冷媒：GWP < 5
- 投資回収期間：3年未満

©CRIEPI

大容量高温ヒートポンプの試験設備

EDF（フランス電力）

- 2010年竣工
- 仕様
  - 加圧水：～700 kW、～140℃
- 主な使用目的
  - 排熱回収ヒートポンプの開発と実証
  - 市場投入前の性能評価と信頼性の確保
- 実績
  - 100℃、120℃供給ヒートポンプ｜R245fa
  - 140℃供給ヒートポンプ｜R718（水冷媒）
  - 160℃供給ヒートポンプ｜R1336mzz(Z)

TNO（オランダ応用科学研究機構）

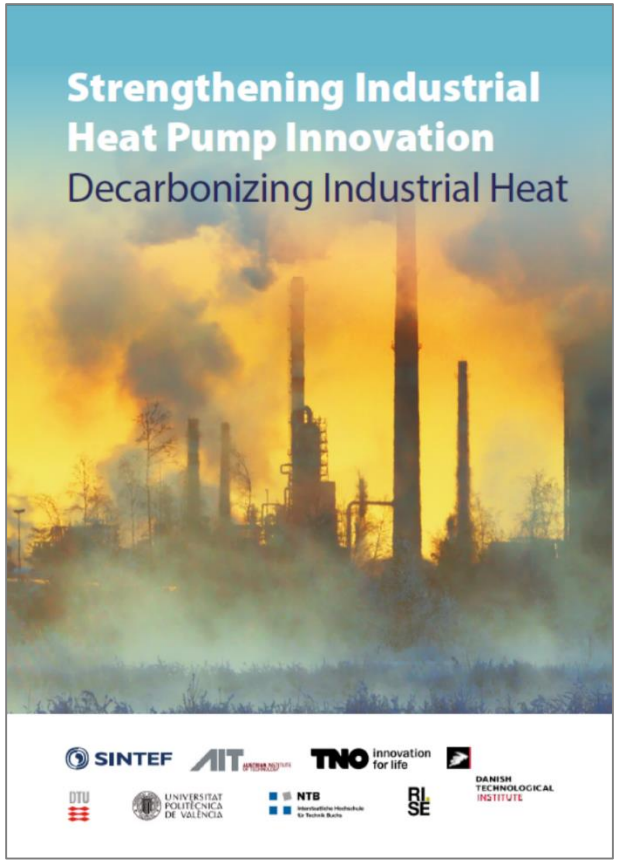
- 2020年竣工 “Carnot Lab”
- 仕様
  - 加圧水：1～1,000 kW、～160℃
  - 蒸気：1～1,000 kW、～180℃
  - 熱風：1～1,000 kW、
    湿り空気 ～100℃、乾き空気 ～1,000℃
  - オイル：1～10 kW、～250℃
- 主な使用目的
  - 各種ヒートポンプや蓄熱システムの開発と実証
  - 革新的なヒートポンプ（熱音響など）の開発

電力中央研究所

- 2013年竣工 “ヒートポンプ開発試験設備”
- 仕様
  - 温水：10～600 kW、～95℃
  - 蒸気：10～600 kW、～200℃
  - 熱風：10～200 kW、～200℃
  - 外気熱源（-20～50℃）にも対応
- 主な使用目的
  - 各種ヒートポンプの開発と実証
  - 市場投入前の性能評価と信頼性確保
- 実績
  - 蒸気供給ヒートポンプ｜R245fa+R134a
  - 高温ヒートポンプ｜R1224yd(Z)

©CRIEPI

研究開発の強化



2020年7月に発刊されたレポート

産業部門の脱炭素化に向けて、産業用ヒートポンプの役割を概説するとともに、近年の産業用ヒートポンプの導入事例や開発動向を簡単に紹介。今後のEU大での産業用ヒートポンプの開発や実証に関するプロジェクトの必要性を訴求。

野心的な目標（2020年～2025年）

- <100℃ 100℃未満の標準ヒートポンプを500機導入
- >100℃ 100～150℃供給の高温ヒートポンプを25か所で実証試験
- >150℃ 150～200℃供給の高温ヒートポンプを5か所でパイロット試験
- >200℃ 200℃以上の高温ヒートポンプの3つのコンセプトをラボ試験
- 150～250℃供給に適用可能な冷媒を3つ開発
- 150℃までの熱供給が可能なヒートポンプを販売する複数のメーカやサプライヤを揃えること
- 標準的な乾燥装置や蒸留装置などのプロセス機器にヒートポンプが統合されること
- Horizon Europe*の枠組みの中で5つのプロジェクトに関与
- 200℃以下の産業部門の熱需要に対してヒートポンプが重要技術であることの啓発
- 産業用ヒートポンプの性能評価方法に関する試験規格の整備

* **Horizon Europe**（2021年～2027年）：
Horizon 2020（2014年～2020年）の後継であり、複数の参画機関による研究開発プロジェクトを助成するEUの枠組み

©CRIEPI

まとめ

- 欧州における産業用ヒートポンプの研究開発動向
  - 高温ヒートポンプの開発が活発化（2010年代～）
    - 乾燥工程用ヒートポンプ（特に遷臨界サイクルヒートポンプ）
    - 水蒸気圧縮機、蒸気供給ヒートポンプ
  - 大容量高温ヒートポンプ試験設備の整備
    - 完成：EDF（フランス）、TNO（オランダ）
    - 予定：AIT（オーストリア）
  - フィールドでの実証試験も含めたプロジェクト

- 日本への示唆
  - 現在の日本の二次エネルギー価格比（E/G）では高温ヒートポンプの競争力はまだ高くないが、将来に備えて準備が必要
  - 世界的に開発が進むと、新たな冷媒や圧縮機も出てくる
  - 欧州との連携によって効率的な研究開発も可能に
  - R&D（Research & Development）から RD&D（Research, Development & Demonstration）へ

©CRIEPI

CRIEPI
Central Research Institute of Electric Power Industry

ご清聴ありがとうございました。

甲斐田 武延（KAIDA Takenobu）

一般財団法人電力中央研究所（CRIEPI）
エネルギーイノベーション創発センター（ENIC）
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1
kaida@criepi.denken.or.jp