

産業用ヒートポンプへの期待

— 欧州における最新動向と日本への示唆 —

一般財団法人 電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センター主任研究員

甲斐田 武 延

1. はじめに

2020年10月に菅義偉総理大臣が「2050年カーボンニュートラル」（2050年までに温室効果ガス排出実質ゼロ）を目指すことを宣言したことを受け、今後脱炭素化に向けた取り組みがさらに加速することが予想される。脱炭素化に向けて、まずはエネルギー需要の電化と電源の脱炭素化を進めることが肝要である。ただし、電化が困難なエネルギー需要についてはカーボンフリーの水素や合成燃料を利用し、それでも排出が避けられないCO₂は回収し、再利用または地中に貯留することが求められる。

未電化のエネルギー需要の多くは熱需要であり、特に産業部門の熱需要が大きい。図-1に産業部門の温度帯別熱需要を示す。大別すると、200℃以上の高温熱需要の多くは鉄鋼・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。一方、200℃未満の熱は、産業部門全体の熱需要の27%を占め、さまざま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ことがわかる。この温度帯での適用が期待される

技術がヒートポンプである。

本稿では、産業用ヒートポンプの有用性を概説するとともに、欧州における最新動向を紹介しながら、日本での普及拡大に向けた課題を示す。

2. 産業用ヒートポンプの特徴

(1) 産業用ヒートポンプとは

ヒートポンプ（本稿では最もよく利用されている電力駆動の蒸気圧縮式ヒートポンプを対象とする）は、比較的少量の電力を投入することによって熱をくみ上げる技術である。身近なものとして、エアコン暖房やヒートポンプ式給湯機などに活用されている。

このような民生用ヒートポンプはヒトにとっての快適性を得るために用いられるが、産業用ヒートポンプは生産工程で所定の品質を得るためにモノの加熱に用いられるヒートポンプである。モノの加熱には、洗浄・殺菌・乾燥・蒸留・濃縮などのさまざまな用途があり、さらに乾燥といってもモノによって必要な温度は大きく異なる。したがって、産業用ヒートポンプにはさまざまな用途に適用できるように幅広い仕様（供給温度や加熱能

力）、製品ラインナップが要求される。

(2) 冷温同時利用と排熱回収

図-2を用いて、ヒートポンプの性能（COP）と、産業用ヒートポンプに特有な「冷温同時利用」と「排熱回収」の2つの特徴を説明する。

ヒートポンプの性能は、投入した電力量に対して得られる熱量の比で定義される、COPで表現される。冷凍機（図中“Ref”）では、投入電力量1に対し、3の冷却熱量が得られる場合、そのCOPは3である。なお、投入電力量と得られた冷却熱量とを合わせた4の熱量は外気に放出される。一方、外気熱源の給湯用ヒートポンプ（図中“HP”）は、投入電力量1と外気からの採熱量3を合わせた熱量4が水を温める熱量となり、COPは4となる。すなわち、同じ温度差（＝温度リフト）をくみ上げる場合、一般に冷却よりも加熱のほうがCOPは高い。

次に、給湯よりも熱需要温度が高い殺菌の場合を考える。熱源が同じ外気温度の場合、温度リフトが大きくなる殺菌のほうが給湯よりもCOPは低くなる。しかし、温度リフトが大きくなり、加熱COPが2.5であっても、熱源側を冷却に活用

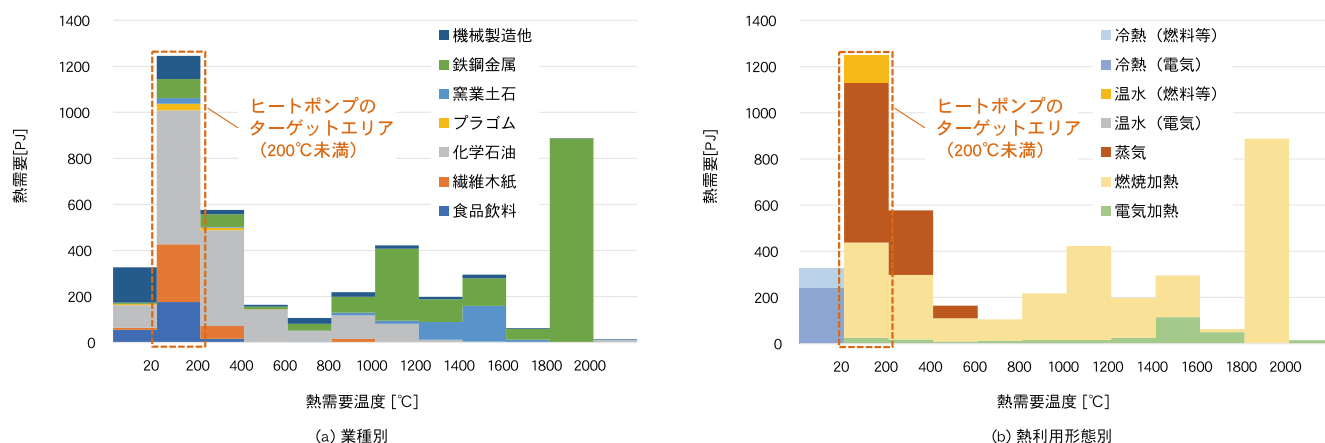


図-1 産業部門の温度帯別熱需要（資源エネルギー庁調査資料¹⁾を基に作成）

することができれば、冷却 COP の 1.5 を加えて、総合 COP が 4 のシステムを構築できる。工場では加熱と冷却の需要が同時に存在する場合があります、ヒートポンプによる冷温同時利用を効果的に活用できる。

殺菌よりもさらに熱需要温度が高い乾燥を外気熱源のヒートポンプで行おうとすると、COP は低くなる。しかし、多くの乾燥工程では乾燥後の排気をそのまま外気に放出していることが多く、それを熱源として活用できれば、比較的低い温度リフトとなり、COP が 4 のシステムも構築できる。すなわち、外気よりも高い温度の排熱を回収することで良好な COP での高温供給も可能となる。

(3) 要求される COP

ここで、ヒートポンプに要求される

COP について説明する。要求 COP は、①経済性、②省エネ性、③ CO₂ 排出削減の 3 つの観点から定まる。多くの国で要求 COP の高い順に①>②>③であり、経済性で決定されるのが現状である。

図-3 に主要国における産業部門の電力と天然ガスのエネルギー価格比 (E/G) と電力の CO₂ 排出係数を示す。なお、電力料金とガス料金には税金や再エネ賦課金等も考慮されている。

天然ガスを燃料とする燃焼機器からヒートポンプに代替する場合、E/G に燃焼機器の効率を掛けた値がエネルギーコスト面で要求される COP である。スウェーデンやデンマークでは、COP が 3 を下回っても経済的に成立する。これらの国では電力自体が比較的安価であることに加え、比較的高い炭素税が課されていることによる。一方、アメリカやドイ

ツでは、5 以上の COP が要求され、ヒートポンプ導入のハードルは高い。アメリカはシェールガス革命によってガス料金が安価になったこと、ドイツは再エネ導入に伴う賦課金の増加によって電力料金が増加したことが主な要因である。日本も再エネ導入に伴う賦課金の増加によって、電力料金が相対的に高くなり、E/G は増加傾向にある。現状として、日本では 4 以上の COP を要求される場合が多い。

COP が 4 の場合、熱効率が 90 % の天然ガス燃焼機器から置き換えた場合の CO₂ 排出削減効果は、日本では 35 % 削減 (最新の 2019 年度の CO₂ 排出係数 444 g-CO₂/kWh⁴⁾ に基づくと 45 % 削減、デンマークでは 81 % 削減、ノルウェーでは 99 % 削減となる。なお、CO₂ 排出削減のみに着目すれば、日本では COP が 2.6 (2019 年度データに基づく 2.2)

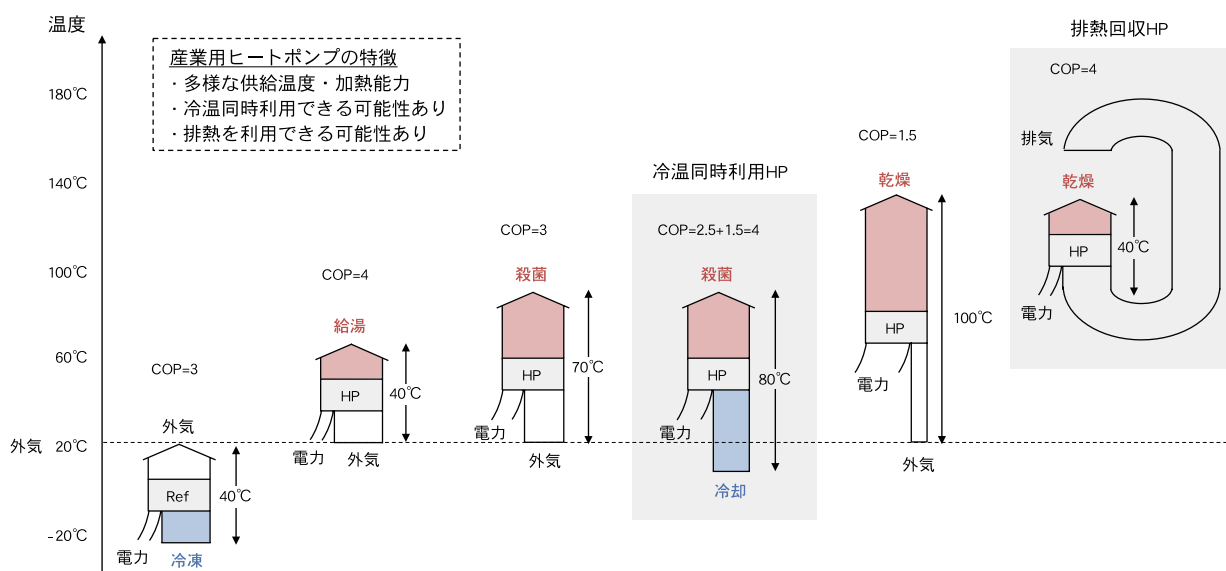


図-2 産業用ヒートポンプの特徴

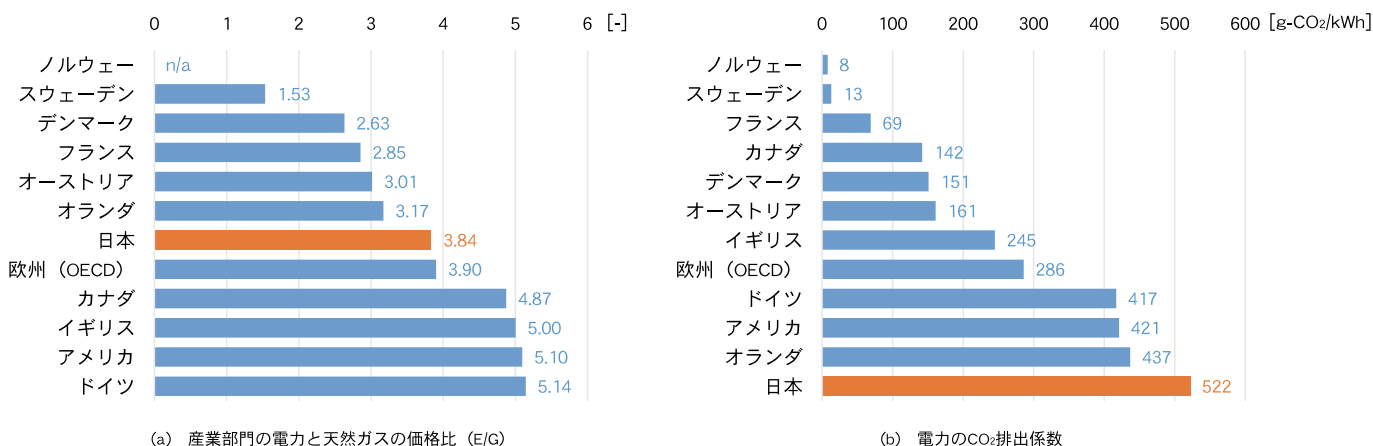


図-3 要求COPに関連する重要な2つのファクター (IEA統計の2017年データ^{2, 3)}を基に作成)

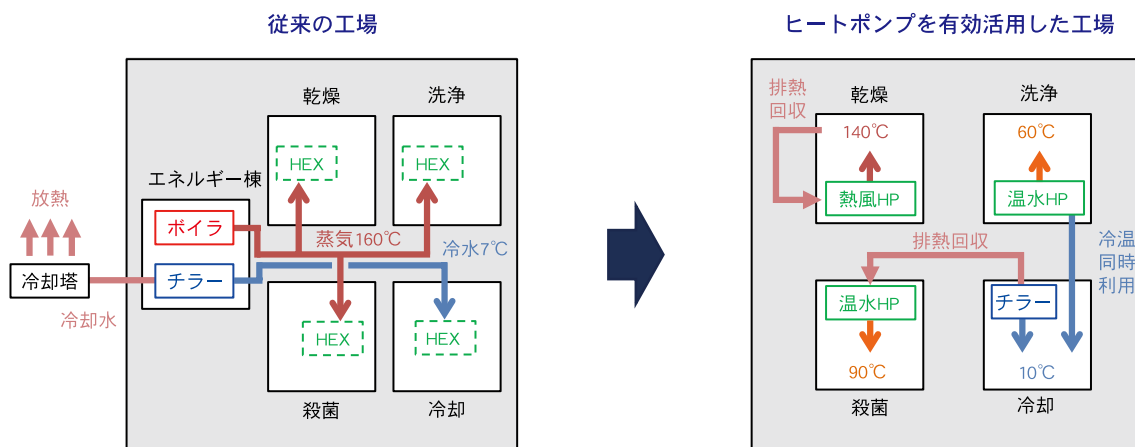


図-4 ヒートポンプの分散配置による排熱回収と冷温同時利用

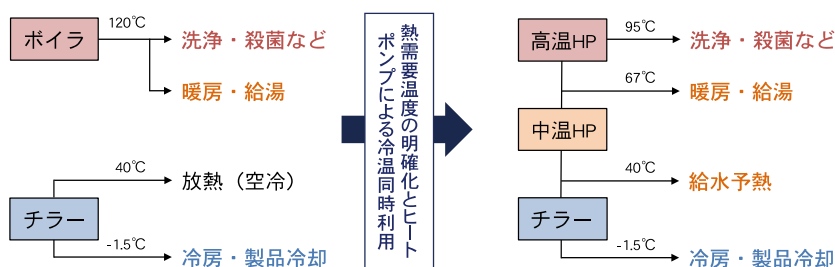


図-5 ノルウェーの乳製品工場におけるヒートポンプ導入事例

利用していた。

乳製品工場の新設にあたって、各工程の熱需要温度を見直し、-1.5℃、40℃、67℃、95℃の4つの温度レベルに整理されることが判明した。そこで、それぞれの温度レベルに蓄熱槽を設け、それらをチラーと中温ヒートポンプ、高温ヒートポンプで結合するシステムを構築した。チラーと中温ヒートポンプの冷媒はアンモニア、高温ヒートポンプにはアンモニアと水の混合冷媒、すなわちすべての冷凍機とヒートポンプに自然冷媒を採用した。なお、冷却需要に対し、加熱需要が比較的大きくなる場合には、ヒートポンプのヒートバランスによる制約によって高温の熱供給量が不足するため、高温ヒートポンプの後流に設置した電気ヒータを補助熱源として使用する。

このように工場のすべての熱需要をヒートポンプと電気ヒータで賄い、その電源には水力発電比率が高いノルウェーの系統電力に加え、工場建屋の屋上に設置した太陽光パネルによる自家発電も使用し、脱炭素電源によるオール電化を達成している。このようなヒートポンプの導入方法は日本でも参考になるであろう。

産業用ヒートポンプの導入にあたっては、工場のエネルギー利用状況を詳細に分析し、ヒートポンプを効果的にプロセスに統合することが求められる。欧州では、プロセスとヒートポンプ両方の知見を有するコンサルティング会社やエンジニアリング会社がこれらを担っている事例が多く見られる。一方、日本ではメーカーが主導していることが多いのが現状であり、プロセスに効果的にヒートポンプを組み込むための情報が不足している場合が多く見られる。産業用ヒートポン

以上が要求 COP となる。

(4) ヒートポンプの有効活用イメージ

図-4に従来の工場とヒートポンプを有効活用した工場を比較したイメージ図を示す。従来の工場では、加熱にボイラ、冷却にチラーが用いられており、設備管理の点から1箇所にとまとめて設置されていることが多い。そのため、離れたところにあるボイラから必要以上に高い温度の蒸気を供給し、各工程で熱交換（図中“HEX”）して温度調節が行われている。蒸気配管が長くなることで配管からの放熱が大きくなり、ボイラの機器効率でなく蒸気供給システム全体で見ると、その効率は5割程度に留まっている⁵⁾。この蒸気供給システムの効率は蒸気配管が長いほど低い傾向にある。また、各工程からの排熱とチラーからの排熱が大量に大気へ放出されている。

ヒートポンプ（図中“HP”）を分散配置することで、各工程に適した温度で熱供給することができ、配管からの放熱が削減され、またヒートポンプを高いCOPで運転することができる。排熱回収が可能となり、大気への放熱が削減され、またヒートポンプによる高温供給が可能と

なる。ヒートポンプによる冷温同時利用によってチラー台数を削減することもできる。

3. 産業用ヒートポンプの最新動向

(1) 導入事例（100℃未満）

2016年4月から2019年3月までの期間で実施したIEA HPT(国際エネルギー機関のヒートポンプ技術協力プログラム) Annex48（産業用ヒートポンプ）の活動の中で、日本、デンマーク、オーストリア、フランス、スイス、ドイツ、イギリス、オランダの8か国における産業用ヒートポンプの導入事例を調査し、300以上の事例を収集した。それらのほぼすべてはヒートポンプ供給温度が100℃未満であった。

業種別に見ると、食品・飲料での事例が多く、冷温同時利用の形態での事例が多く見られた。ここでは一例として、ノルウェーの新設乳製品工場における導入事例を紹介する（図-5）。

従来の乳製品工場では、洗浄や殺菌などの加熱工程にボイラで120℃の蒸気を供給していた。また、この蒸気と熱交換し、建屋の暖房や給湯の熱需要も賄っていた。一方、製品の冷却などにチラーを

表－１ 欧州における乾燥工程用ヒートポンプの開発動向

主な実施者	AIT オーストリア	EDF フランス	GEA社 デンマーク	SINTEF ノルウェー	Frigopol社 オーストリア
供給温度	< 160℃	< 150℃	< 135℃	不明	< 160℃
加熱能力	400 kW	700 kW	1,500 kW	不明	30 kW（試作）
圧縮機	レシプロ/スクリー	未定	レシプロ	不明	レシプロ
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
開発状況	デンプンとレンガの 2つの乾燥工程で 実証試験中	製紙工場での実証 試験に向けて実証 機を製作中	粉ミルクのスプレー 乾燥機を対象に 機器開発中	食品乾燥を対象に 乾燥試験装置を 構築予定	機器開発中

プの普及拡大のためには、工場とメーカーとの間で活動できるプレイヤーが求められる。

（２）開発動向（100℃以上）

日本、欧州ともに、ヒートポンプ供給温度が100℃未満の製品ラインナップは充実し、導入事例も報告されるようになった。ヒートポンプの適用範囲を拡大するためには、ヒートポンプ供給温度の高温化が必要となる。現在、日本では165℃、欧州では160℃供給が可能なヒートポンプも製品化されているが、さまざまな加熱工程に導入していくためには製品ラインナップを拡充する必要がある。

高温化に向けては、冷媒や冷凍機油、圧縮機などの要素技術の開発、高効率なヒートポンプサイクルの構築などが求められる。近年、欧州では高温用途の中でも特に乾燥工程用ヒートポンプの開発と実証が精力的に行われている。表－１にその動向を整理したものを示す。実用化への段階が近いと考えられる順に左から並べている。

オーストリア技術研究所（AIT）が主体となって実施しているプロジェクト（DryF）では、近年新たに開発された、高温用途に適した冷媒 R1336mzz（Z）を用いたヒートポンプを開発し、現在デンプンとレンガの2つの乾燥工程で実証試験中である。それ以外のプロジェクトでは、給気温度から乾燥温度までの昇温幅（温度グライド）が大きい加熱に適した遷臨界サイクルが採用されている。なお、いずれの冷媒も大気放された場合の温室効果が極めて低く（低GWP冷媒）、環境に優しい冷媒である。

これらを含め、欧州における産業用

ヒートポンプの研究開発プロジェクトでは開発段階からユーザーが参画する事例が見られる。一方、日本では機器開発までのR&D（Research & Development）が主流である。産業用ヒートポンプの普及拡大のためには、プロセス統合方法の確立も必要であるため、開発段階からユーザーも参画した、実証試験を含めたRD&D（Research, Development & Demonstration）プロジェクトが求められる。

４．おわりに

産業用ヒートポンプは、数多く提案されている脱炭素化技術の中でも、技術的成熟度が高く、その高効率性によって経済的成立性も比較的高い。熱需要温度の低いところから順に産業用ヒートポンプを導入し、技術開発等によってその適用範囲を拡大させていくことで産業部門の脱炭素化を着実に進めていくことができる。

（一助）電力中央研究所は産業用高温ヒートポンプの性能評価が可能な試験設備とエネルギー解析技術を有している。今後も当所でのラボ試験や工場でのフィールド試験を通して、技術開発や性能評価、プロセス統合方法の構築などを進め、産業用ヒートポンプの普及拡大による脱炭素化に貢献していきたい。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) IEA, Statistics: Energy Prices and Taxes for OECD Countries, 2019
- 3) IEA, Statistics: CO₂ Emissions from Fuel Combustion, 2019
- 4) 電気事業低炭素協議会：2019年度CO₂排出実績（確報値）について、2021年1月29日
- 5) 日本エレクトロヒートセンター：産業用ヒートポンプ活用ガイド、2017年3月