

産業用ヒートポンプの社会実装強化に向けた考察 —技術開発から技術展開へ—

Consideration for Strengthening Social Implementation of Industrial Heat Pumps:
From Technology Developments to Deployments

キーワード：産業用ヒートポンプ、支援策、プロセス統合

甲斐田 武延

要旨

産業部門の脱炭素化に向けて、高効率な電化技術でありかつ技術成熟度の高い、産業用ヒートポンプへの期待は大きい。一方、その導入が期待されているほど進展していないのが現状であり、適切な対策を施すことが求められている。本稿では、産業用ヒートポンプの導入状況や技術動向を概観するとともに、導入が進展しない課題として、①技術の適合性、②経済性、③信頼性、④導入検討を担う人材の不足を指摘した。その上で、近年産業用ヒートポンプの技術開発・実証が活発化している欧州の取り組みと比較しながら、今後の普及拡大に向けた方策について考察した。これまで実施されてきた技術開発支援や設備導入支援だけでは不十分であり、今後は技術実証事業や技術展開事業を強化し、ヒートポンプを生産プロセスに統合する手法を構築するとともに、その担い手を育成していくことが重要であることを示した。

1. はじめに

産業部門の熱需要を温度帯別に見ると、200°C未満の熱需要が産業部門全体の熱需要の27%を占めるとの報告がある（三菱総合研究所，2018）。この温度帯ではガスや重油等を燃料に用いたボイラから供給する蒸気によって加熱していることが多く、その脱炭素化が求められている。

2022年5月に発表されたクリーンエネルギー戦略の中間整理（経済産業省，2022）において、この200°C以下の温度域については、ヒートポンプへの転換が有力な選択肢として、また足元から取り組むべき事項として挙げられており、産業用ヒートポンプへの期待は大きい。一方、同資料の中で、①適用温度域が限定的であること、②事例の横展開が進んでいないこと、③設備費用が高額であることなどが課題として挙げられており、これらの課題を整理した上で、適用温度域拡大に向けた高温ヒートポンプの開発実証や導入拡大に向けた設備投資支援を行うことが示されている。

本稿では、産業用ヒートポンプの現状を概観し課題を明らかにするとともに、近年産業用ヒートポンプの技術開発・実証が活発化している欧州の取り組みと比較しながら、今後の普及拡大に向けた方策について考察する。

2. 産業用ヒートポンプの現状

産業用ヒートポンプの普及拡大に向けて、まずはその現状を認識することが重要である。ここでは、産業用ヒートポンプの導入状況と技術動向の概要を述べ、普及拡大に向けた課題を明らかにする。

2.1. 導入状況

産業用ヒートポンプの導入状況については、日本冷凍空調工業会（JRAIA）と日本エレクトロヒートセンター（JEHC）がそれぞれ調査している情報が公開されている。JEHC調べ（日本エレクトロヒートセンター，2021）の方が調査対象とするメーカー数が多く、より実態に即した数値であると考えられるが、ここ

では地球温暖化対策計画の対策評価指標に使用されているJRAIA調べ（環境省，2022）を参照する。

図1に示すように、産業用ヒートポンプの導入状況は、一定の進捗は認められる一方で、現在の導入速度では2030年度における普及見込みを下回る。この普及見込みは、パリ協定への対応として2030年度における日本の温室効果ガス排出量を2013年度比で26%削減することを目指し、その削減量の根拠として、2016年5月に閣議決定された値である。その後、2021年4月に日本政府は、2030年度における日本の温室効果ガス排出量を2013年度比で46%削減することを目指すこと、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けることを表明し、2021年10月に地球温暖化対策計画が改訂された。しかし、産業用ヒートポンプの普及見込みについては修正されていない。2030年度までのこの普及見込みに達するためには、2020年代の10年間で毎年の導入設備容量を現在の5倍程度に上昇させる必要があり、普及拡大に向けた取組強化が喫緊の課題となっている。

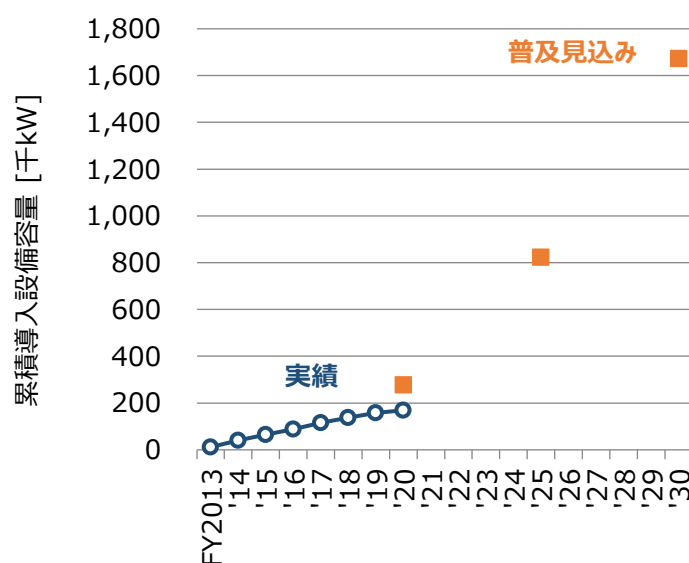


図1 産業用ヒートポンプの導入状況（地球温暖化対策計画の進捗状況より）

2.2. 経済的制約

ヒートポンプは熱回収技術としての側面があり、熱をくみ上げる温度差（温度リフト＝熱供給温度－熱源温度）が小さいほど高い効率（COP＝供給熱量／消費電力量）で運用できるが、逆に温度リフトが大きいくほど適用先は広がる。COPは省エネ効果やCO₂排出削減効果、エネルギーコスト削減効果に影響する。導入検討の際には、特に経済性の観点から要求COPが決定されるのが現状である。

経済性が成立するかは、それぞれの工場でのエネルギー利用状況やエネルギー契約形態、要求する投資回収期間などにも依るが、現在の日本のエネルギー価格の状況では、概して少なくとも3以上のCOPが要求される。一方、電気料金が安価な国では日本よりも要求COPが低く、例えばノルウェーのようにCOPが2～2.5程度でも経済的に成立する国もある。

2.3. 技術動向

産業用ヒートポンプの開発・製品化に際して、その技術仕様（特に温度リフト）は、上述の経済的制約を受けながら設定される。例えば、外気を熱源として、120℃の蒸気を供給するヒートポンプを造ることは可能だが、大きな温度リフトとなり、現状では燃焼機器と比べて市場競争力に劣るため、開発・製品化されていない。

国内で製品化されている産業用ヒートポンプのリストは、JEHCが取りまとめている（日本エレクトロヒ

ートセンター, 2022)。供給温度に着目すると、100°C未満の製品ラインアップは充実してきている。また、100°C以上の熱供給が可能な高温ヒートポンプも複数製品化されている。これらは、欧州でも同様の状況である（甲斐田, 2021）。

供給温度が100°C以上の高温ヒートポンプについては、近年新たに高温供給に適した冷媒が開発され、技術的ポテンシャルが拡大しつつある（甲斐田, 2020）。国際エネルギー機関（IEA）ヒートポンプ技術協力プログラム（HPT）Annex 58で調査したところ、現在国内外で約30の高温ヒートポンプ技術が開発・実証中であり、150～200°C供給のものが多い（IEA, 2022）。このうち、日本においても、150°C蒸気供給が可能で蒸気ボイラの代替として適用が期待されるものや、200°Cまでの顕熱加熱が可能で乾燥工程等での適用が期待されるものなど、新たに5つの高温ヒートポンプ技術が開発中である。これらの技術は2020年代半ばから後半にかけて製品化される計画である。

このように、産業用ヒートポンプの技術面では、適用温度域が拡大中の状況にある。

2.4. 課題整理

2.3節で述べたように、産業用ヒートポンプの技術成熟度（TRL）は向上してきており、IEAのエネルギー技術展望では産業用ヒートポンプ全般としてTRL9（商用化初期段階）に位置づけられている（IEA, 2020）。開発が進行中である、供給温度が100°C以上の高温ヒートポンプについては現時点でTRL 5～8の段階のものが多いが（IEA, 2022）、2020年代半ば頃からTRL9に達する見込みである。

産業用ヒートポンプに関する取り組みとしては、今後はTRL9から11（安定的なシェア拡大）へ進めていくことが肝要である。その場合、導入を阻害している要因を明確にし、適切に対応することが求められる。

向井による事業所へのアンケート調査によると、導入に至らない理由として、「設備費用が高い」、「投資回収期間が長い」といった経済性の面での課題や、「追加導入場所がない」、「エンジニアリング人材の不足」、「既存生産設備の変更に対する不安」といった生産プロセスへの統合（プロセス統合）に関する課題が大きいことが示されている（向井, 2023）。一方、ヒートポンプ技術の省エネ性やCO₂排出削減効果については満足している事業所が多い様子である。

この結果を参考としながら、想定される課題とその解決策について整理したものを表1に示す。導入にあたっては、技術の適合性、経済性、信頼性（生産プロセスへの影響など）が事前に精査される。表1の(a)～(c)に、この順にそれぞれの検討段階で有効だと考えられる方策を列記している。また、これら3点は適切に事前検討を進めることができた場合の課題であるが、そもそもこのような事前検討を担う人材が不足していることも課題として挙げられる。表1の(d)にこの点を整理している。

表1 産業用ヒートポンプの普及拡大に向けた課題整理

課題	導入に至らない理由	考えられる方策
(a) 技術の適合性	製品化されている技術の中では適した仕様のものがない。	工場のニーズにマッチした技術を開発する必要があり、工場のニーズがヒートポンプ機器メーカーに伝わるようにすること（ 情報共有 ）。ニーズを満足するために技術的向上（高温化など）を必要とする場合には、 技術開発支援 が有効。
(b) 経済性	技術的には適しているが、経済性の面で満足できない。	ヒートポンプの省エネ性によって運用費用の削減が見込まれるものの、設備費用の高さが主な導入障壁である場合には、 設備投資支援 が有効。
(c) 信頼性	技術的にも経済的にも満足しているが、生産プロセスへの影響を懸念して導入に至らない。	技術実証事業 などを通じて、ヒートポンプ機器及びエンジニアリング技術の信頼性を向上させること。
(d) 人材の不足	技術的・経済的に成立するかの事前検討も含め、導入に向けた社内の知見が不足している。	技術展開事業 などを通じて、ヒートポンプの選定や生産プロセスへの統合手法を確立するとともに、その担い手を育成すること。

これまでの日本政府による産業用ヒートポンプへの助成事業は、表1の(a)や(b)に対応した、技術開発支援と設備導入支援が主であった。冒頭で述べたように、クリーンエネルギー戦略の中間整理においても、この2つが今後の支援策として示されている。

しかし、このような取り組みの延長では、2.1節で述べたように一定の進捗はあっても大幅な導入速度の向上は期待できない。今後は、(c)や(d)に対応した、技術実証事業や技術展開事業の強化が必要になると考えられる。

3. 今後の普及に向けた方策

産業用ヒートポンプの実証事業や展開事業の強化に向けて、近年の欧州の取り組みを紹介しながら、今後の日本における方策を考察する。

3.1. プロジェクトのあり方

表2に国内外における産業用ヒートポンプに関する代表的なプロジェクトを示す。ここで、技術段階に応じた取り組みとして、研究 (Research)・開発 (Development)・実証 (Demonstration)・展開 (Deployment)・発信 (Dissemination) の5つを設定し、それぞれのプロジェクトが対象とする技術段階を識別している。

表2 産業用ヒートポンプに関する代表的なプロジェクト

技術段階に応じた 取り組み	参画団体	代表的なプロジェクト				
		TherMAT 日本	BAMBOO EU	DryF EU	SuPrHeat デンマーク	LEAP オーストリア
研究 Research	大学 研究機関	○	○	○	○	
開発 Development	メーカ	○	○	○	○	
実証 Demonstration	エンドユーザ エンジニアリング会社		○	○	○	○
展開 Deployment	コンサルティング会社 小売電気事業者など				○	○
発信 Dissemination	ヒートポンプ協会など			○		

3.1.1. 技術実証事業の必要性

日本では、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発 (2015～2022年度) の枠組みの中で高温ヒートポンプの研究開発が進められてきた (TherMAT, 2022)。メーカと大学・研究機関が参画し、技術の「開発」に焦点が当てられている。このように、これまでの日本のプロジェクトはR&D (Research and Development) に留まるものが多かった。

一方、欧州ではこのようなR&Dプロジェクトもあるが、開発の段階から参画機関にエンドユーザ候補 (以降、単にエンドユーザと記述) やエンジニアリング会社等も加わり、技術の「実証」までを含んだRD&D (Research, Development and Demonstration) プロジェクトが多く見られる (甲斐田, 2021)。代表的なものとして、欧州連合 (EU) Horizon 2020のBAMBOOプロジェクトの中で2018～2023年に実施の蒸気供給ヒートポンプの開発・実証が挙げられる (BAMBOO, 2022)。エンドユーザとして鉄鋼大手のArcelorMittal社が参画している。オーストリア技術研究所 (AIT) が蒸気生成を含めたヒートポンプシステムを概念設計し、エンジニアリング会社であるAMT社がヒートポンプシステムを構築する。フランス電力 (EDF) の研究所

にてラボ評価後、ArcelorMittal社の製鉄所にて実証試験を実施する。

また、同じHorizon 2020の枠組みで2016～2021年に、DryFという乾燥工程用ヒートポンプの開発・実証プロジェクトが実施され、13団体が参画した。ここでも、研究機関とメーカーに加え、エンジニアリング会社やエンドユーザが当初から参画していた。実証先として、Wienerberger社（レンガ）、Agrana社（デンブ）、Scanship社（排水処理）が参画し、それぞれの乾燥工程で実証試験が実施された。さらに、欧州ヒートポンプ協会（EHPA）も参画し、得られた成果や産業用ヒートポンプの活用に関する情報「発信」も積極的に行われた。

このような研究開発・実証事業はEUレベルだけでなく、オーストリアやデンマーク、フランス、オランダ、ノルウェーなど、国レベルのプロジェクトでも見られる。実工場での実証を当初から組み込むことで、ヒートポンプ技術の信頼性向上だけでなく、ニーズの把握やエンジニアリングの担い手の育成にも貢献する。

3.1.2. 技術展開事業の必要性

近年、産業用ヒートポンプの生産プロセスへの統合（プロセス統合）手法の構築やその担い手の育成、さらに新しいビジネスモデルの創出を目的とした、「展開」事業も見られるようになった。ここでは、デンマークのSuPrHeatプロジェクト（SuPrHeat, 2022）とオーストリアのLEAPプロジェクト（LEAP, 2022）を紹介する。

SuPrHeatプロジェクトは、2020～2024年の期間で16団体が参画し、自然冷媒を用いた高温ヒートポンプの研究開発から実証・展開までを含んだRDD&D（Research, Development, Demonstration and Deployment）プロジェクトである。デンマーク技術研究所（DTI）がリーダーを務め、ヒートポンプ機器メーカーに加え、エンドユーザとして食品・飲料を製造・販売する企業が4社（Arla Foods社、Danish Crown社、Chr. Hansen社、Royal Unibrew社）、食品分野に強いエンジニアリング会社（GEA Process Engineering）、工場のエネルギー分析やプロセス統合手法の構築を担うコンサルティング会社（Viegand Maagøe社）が参画している。食品産業を対象を絞り、複数の工場のプロセスとユーティリティのデータを分析し、産業用ヒートポンプのプロセス統合手法を構築していく。

LEAPプロジェクトは、2021～2024年の期間で4団体が参画し、低圧蒸気供給ヒートポンプの実証・展開プロジェクトである。このプロジェクトの中でヒートポンプを新たに開発せず、開発済みの技術を用いる。AITがリーダーを務め、Austrotherm社（断熱材）とLenzing社（繊維）の2社がデモンストレータとして参画している。このプロジェクトは、ユーティリティ（低圧蒸気）ラインへの蒸気供給ヒートポンプの統合手法を構築することを目的とし、排熱を最大限に有効活用するために必要な情報をデモンストレータが提供するように設計されている。低圧蒸気は様々な産業で使用されているため、この2つのデモンストレータをロールモデルとし、蒸気供給ヒートポンプを展開していく狙いである。

3.1.3. 今後のプロジェクトへの示唆

産業用ヒートポンプは、機器を開発するだけでは不十分であり、生産プロセスに統合されるような技術にしなければ、社会への実装は進みにくい。そのため、今後新たにプロジェクトを立ち上げる際には、従来の研究開発をメインとしたR&Dプロジェクト（主にTRL 6までが目標）から、実証も含んだRD&Dプロジェクト（TRL 8までが目標）、さらには展開と発信も含めたRDDD&Dプロジェクト（TRL 11までが目標）に移行していくことが重要である。あるいは、日本ではすでに多くの産業用ヒートポンプ技術が開発されているため、LEAPプロジェクトのように実証と展開に重点を置いたプロジェクト（TRLを9から11に向上させることが目標）も有効であると考えられる。プロジェクトの参画団体については、大学や研究機関、メーカーだけでなく、エンドユーザ、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（小売電気事業者など）、情報発信団体（日本エレクトロヒートセンターやヒートポンプ・蓄熱センター）なども当初から加え、これらの幅広い団体が協力して取り組んでいくことが求められる。

3.2. プロセス統合の担い手の必要性

産業用ヒートポンプは、熱源（主に外気）と熱供給先（暖房や給湯）が定まっている民生用ヒートポン

プと異なり、導入にあたって生産工程の熱需要や排熱を精査し、適切なヒートポンプを選定する必要がある。そのためには、生産プロセスとヒートポンプの両方の知識を兼ね備える必要がある。生産プロセスの情報を把握しているエンドユーザが自らヒートポンプを選定することが望ましいが、エンドユーザの多くはヒートポンプに関する知識や経験が不足している。一方、生産プロセスの情報は一般的に非公開であるため、メーカーにとってはヒートポンプに要求される技術仕様を把握することが困難である。

そこで、図2に示すような、エンドユーザとメーカーの間で活動し、工場データの分析から適正なヒートポンプの選定までを担える、プロセスインテグレータの存在が重要になる。プロセスインテグレータの役割が確立されれば、エンドユーザにとっては、情報をやり取りする窓口が一本化され、自社工場の情報管理が容易くなる。一方、メーカーにとっては、ヒートポンプに要求される仕様の調査までを担う必要がなくなるため、ヒートポンプ機器の開発に専念することができる。

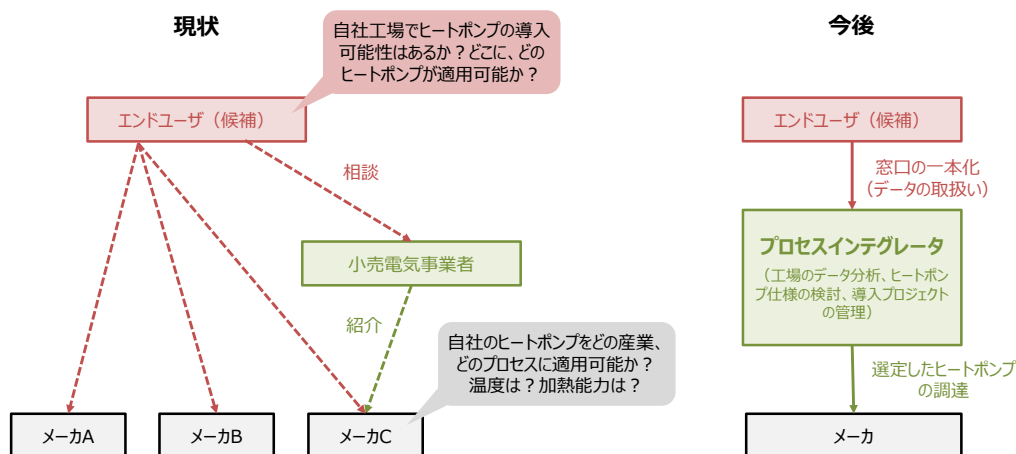


図2 プロセスインテグレータの役割

図3に示すように、近年デンマークではこのようなプロセスインテグレータの役割を担うコンサルティング会社が登場してきた。例えば、上述したSuPrHeatプロジェクトにも参画しているViegand Maagøe社やInnoterm社、Rambøll社などが挙げられる。フランスでは、EDFグループ（小売電事業部門とその子会社であるDalkia社との連携）が、コンサルティングからエンジニアリングまでを手掛けようとしている。

日本では従来小売電気事業者が工場の省エネ診断等を通して産業用ヒートポンプの導入に貢献してきた。しかし、ユーティリティレベルの分析（例えば、蒸気配管システムの放熱損失の分析など）に留まっていたことが多い。ヒートポンプをより効果的に活用するためにも、今後はプロセスレベルの分析もできるようにエンジニアリング力を強化していくことが求められる。

今後は小売電気事業者に限らず、エネルギー管理システムを提供している計測器メーカーやエンジニアリング会社などもプロセスインテグレータとしての役割が期待される。また、蒸留塔や蒸発・濃縮設備、一部の乾燥機など、運転時間が比較的長く、熱需要と排熱が安定している単一プロセスについては、プロセス自体に初めからヒートポンプを一体型として組み込むことも有効である。この場合は、プロセス機器メーカー（兼プロセスエンジニアリング会社）がプロセスの情報を熟知しているため、ヒートポンプに要求される仕様を検討しやすい。

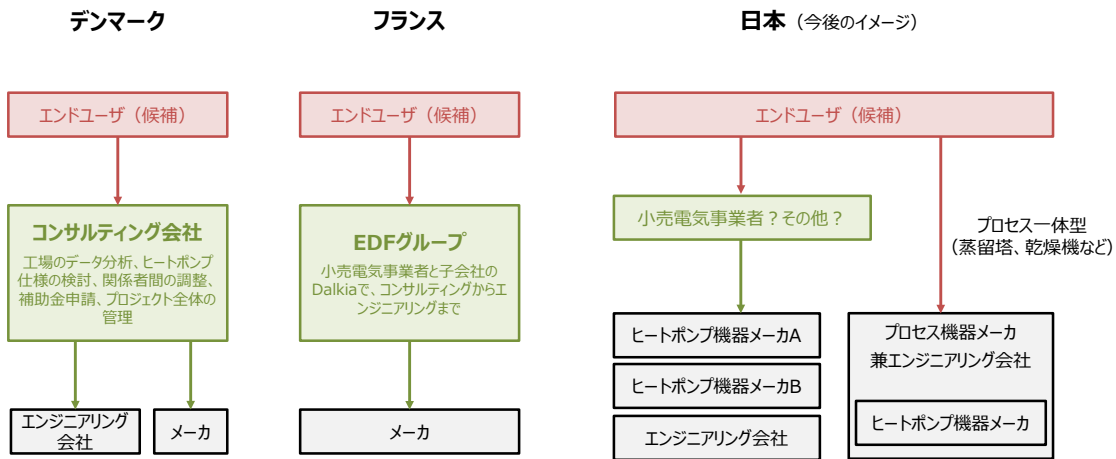


図3 プロセスインテグレータの動向

3.3. プロセス統合手法の構築

今後、例えば小売電気事業者がプロセスレベルの分析を実施していくためには、その分析手法を構築していくことが必要である。産業用ヒートポンプに関する研究は、これまでヒートポンプ機器を対象とした「開発」がほとんどであったが、今後はプロセス統合手法の構築など「展開」のための研究を推進していくことが求められる。

具体例として、プロセスを起点とした熱回収の分析手法であるピンチ解析を産業用ヒートポンプに応用し、その方法論を構築していくことが挙げられる（甲斐田，2022）。ピンチ解析は、熱交換器による熱回収の最大化を目的として発達してきたが、実際に活用されている事例は石油化学プラント等に限られている。熱交換器だけでなく、別の熱回収技術である産業用ヒートポンプの製品化が進み、カーボンニュートラル実現に向けて様々な産業における熱回収や電化が重要になった現在、その有用性を再考し、さらに発展させる意義は大きいと考えられる。

あるいは、「開発」であってもヒートポンプ機器単体ではなく、プロセス一体型ヒートポンプ（ヒートポンプ式蒸留塔、ヒートポンプ式蒸発・濃縮設備、ヒートポンプ式乾燥機など）の開発を推進することが期待される。

4. おわりに

本稿では、産業用ヒートポンプの現状を概観し、その技術成熟度は向上してきているものの、期待されているほどには導入が進展していないことを確認した。また、導入が進展しない課題として、①技術の適合性、②経済性、③信頼性、④導入検討を担う人材の不足を挙げ、これらを解決するためには、これまでに日本で実施されてきたヒートポンプ機器の技術開発支援や設備導入支援だけでは不十分であることを示した。

普及拡大に向けた今後の方策として、すでに市場で入手可能な技術を用いて実工場（あるいはパイロット設備）での導入実績を積みながらエンジニアリングの担い手を育成する技術実証事業や、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技術展開事業を強化していくことが期待される。さらには、それらで培った知見を技術ガイド等に取りまとめ、適切な情報を発信していくことも重要である。

参考文献

- BAMBOO (2022) Boosting new approaches for flexibility management by optimizing process off-gas and waste use.
<http://bambooproject.eu/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- DryF (2022) Waste heat recovery in industrial drying processes.
<https://dryficiency.eu/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- IEA (2020) Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation.
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- IEA (2022) HPT Annex 58 (High-Temperature Heat Pumps) Task 1 (Technologies), Preliminary results.
<https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- LEAP (2022) Low pressure steam heat pump.
<https://projekte.ffg.at/projekt/3849152> (アクセス日: 2022年12月22日)
- SuPrHeat (2022) Sustainable process heating with high-temperature heat pumps with natural refrigerants.
<http://www.suprheat.dk/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- TherMAT (2022) 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発.
<http://www.thermat.jp/> (アクセス日: 2022年12月22日)
- 甲斐田武延 (2020) 「熱力学的分析に基づく高温ヒートポンプサイクルの設計指針—冷媒および高効率化技術の選択に向けた一提案—」 電力中央研究所報告 C20002.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=C20002>
- 甲斐田武延 (2021) 「欧州における産業用ヒートポンプの市場概観と開発動向」 電力中央研究所報告 C20005.
<https://criepi.denken.or.jp/hokokusho/pb/reportDetail?reportNoUkCode=C20005>
- 甲斐田武延 (2022) 「産業用ヒートポンプのプロセス統合: ピンチ解析を用いたヒートポンプの選定法の概案」 2022年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集.
- 環境省 (2022) 「2020年度における地球温暖化対策計画の進捗状況」 2022年6月17日.
<https://www.env.go.jp/press/111120.html>
- 経済産業省 (2022) 「クリーンエネルギー戦略: 中間整理」 2022年5月19日.
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/20220519_report.html
- 日本エレクトロヒートセンター (2021) 「2021年度版 産業用ヒートポンプ導入量把握調査結果 報告書」 2021年10月.
https://sangyo-hp.jeh-center.org/asset/00032/library/IHP_hokoku_2021.10.pdf
- 日本エレクトロヒートセンター (2022) 「産業用ヒートポンプ活用ガイド 第2版」 2022年3月.
<https://www.jeh-center.org/untitled47.html> (アクセス日: 2022年12月22日)
- 三菱総合研究所 (2018) 「平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査(熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査) 調査報告書」 2018年2月.
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H29FY/000018.pdf
- 向井登志広 (2023) 「産業部門における電化バリアと課題—国内製造業を対象としたアンケート調査—」 電力経済研究 No. 69.
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/periodicals/no69.html>

甲斐田 武延 (Takenobu Kaida)

電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部