

2.2.4 産業熱利用

(1) 研究開発領域の定義

熱エネルギー利用のうち、産業部門での熱の有効利用に関する科学、技術、研究開発について記述する。主に、蓄熱技術と熱再生利用技術を扱う。

蓄熱技術は、排熱あるいは変動型再生可能エネルギー由来の熱などを蓄え、製造プロセスの予熱、加熱、温度維持等に利用し、化石燃料消費量の削減を図るものである。ここでは、蓄熱材とそれを用いた蓄熱システムを対象とする。

熱再生利用技術とは、熱需要における投入エクセルギー量を最小化するために、主として利用後の排熱を回収して、材料やプロセス流体を予熱あるいは予冷することで、エクセルギーを無駄にせず再生する技術である。これにより、化石燃料の消費を大幅に削減できる。ここでは、排熱に限らず環境熱等も熱源に含め、熱が持つエクセルギー率を高める熱再生技術の理論、およびその要素技術として、熱交換、熱輸送、ヒートポンプ（機械方式、化学方式）技術を対象とする。

(2) キーワード

熱再生、温度差、蓄熱、ヒートポンプ、再生可能エネルギー、電化

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、太陽光発電や風力発電等の変動型再生可能エネルギー（VRE）を最大限活用するために、熱需要においても電化が求められている。家庭や業務といった民生部門では、熱の電化は着実に進展していくものと予想されるが、電化が困難とされている産業部門の特に高温の熱需要については、今後大きな技術革新が求められている。また、昨今の国際情勢の変化によりエネルギーセキュリティの重要性が再確認されており、その中でも省エネルギーの重要性があらためて見直されている。このように、電化が困難な Hard to abate 部門における熱利用技術の電化と省エネが極めて重要となっている。VRE 電力を用いて熱の電化を進める上では、電力で貯蔵することはもちろん有望なオプションであるが、熱で利用するのであれば蓄熱することにも十分合理性がある。また、熱需要を全て電化することは現実的ではなく、水素、アンモニア、合成燃料等の燃焼も少なからず残ることが予想される。この場合は、熱再生による省エネルギーが第一義的に重要となってくる。

VRE が大量導入されると、余剰電力価格がゼロとなる時間帯が大幅に増えてくることから、この膨大な余剰エネルギーを熱需要に合わせて蓄熱する技術が今後大きく進展すると予想される。民生用の 100°C 以下の蓄熱技術は水を中心に従来から進んでいる。近年の社会的な要求は、蓄熱の高温化、高密度化、高出力化、そしてもちろん低コスト化である。電気による加熱としては、ヒートポンプ、抵抗加熱、誘導加熱、誘電加熱、赤外加熱、マイクロ波加熱等様々な技術があるが、VRE 由来の場合は電力の高いエクセルギーを失わないように、可能な限り高温で蓄熱するニーズが高まるとみられる。

熱再生は断熱と並んで熱の省エネルギーの基本である。熱再生の熱源としてここでは、対象とする系からの排熱に限らず、環境熱、再生可能エネルギー熱、未利用熱等も含める。規模、温度や対象とする流体の条件（液体、気体、腐食性、汚れ等）によって適用技術は千差万別であるが、いずれもこれまでの安価な素材燃料価格を前提として発展してきており、今後の資源・エネルギー安全保障の観点から、あらためて技術を再構築する必要性に迫られている。

[研究開発の動向]

日本の産業分野の排ガス熱量は 0.743 EJ/年と報告されている¹⁾。最終エネルギー消費 13.1 EJ/年の 5.7%

に相当する。排ガスの温度域は各産業、各プロセスにおいて様々だがエンタルピーベースでは100～250℃で総熱量の約77%を占めることが報告されている。日本では、熱の3R (Reduce、Reuse、Recycle) を理念として2015年に発足した「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」プロジェクト²⁾における研究開発など、この低温排熱の有効利用をターゲットとした研究開発が精力的に行われてきた。一方、欧州では、再生可能エネルギーの安定利用に向けた蓄エネルギー技術として、中高温の蓄熱技術の開発が精力的に実施されてきた。これらの中高温蓄熱技術は、集光型太陽熱発電用に開発されたものが基盤にあると考えられるが、近年、蓄熱技術を介したPower to Heat to Power型の蓄エネルギー技術であるカルノーバッテリー (蓄熱発電) へと急速な展開を見せている。

熱再生は系から排出される熱を回収して系に戻すことで、エネルギー投入量を減らす技術である。本報告書では、広義の意味で環境熱を熱源とするヒートポンプも熱再生技術の一つとして位置付ける。ガスタービンの再生サイクル、蒸気タービンとのコンバインドサイクルなども熱再生システムである。熱機関以外にも、工業炉等におけるレキュペレータやレジェネレーティブバーナなどがある。どこまで熱再生するかは、ひとえに投入エネルギーコストの削減量と増加するイニシャルコストの費用対効果のバランスにかかっている。燃料価格の高騰は、ランニングコストの影響が相対的に高まるので省エネ機器の導入にプラスに働くが、一方で素材価格も高騰しておりイニシャルコストアップも同時に進行している。燃料転換だけでなく、ありふれた素材への転換、それに伴う製造方法の改善や信頼性の担保といった、従来技術の延長線上にない研究開発が求められている。熱源の多様化も課題である。廃污水や腐食性ガスからの熱再生や寒冷地向けヒートポンプ等においては、ファウリング、腐食、着霜によって機器の普及が阻まれている。また、電化が困難な用途においては、高価な水素、アンモニア、合成燃料等の消費削減が重要であり、これまで以上に広い温度範囲での熱再生が必要となる。例えば、金属の使えない1000℃以上まで余熱可能な高温再生熱交換器が求められる。

蓄熱方法には顕熱、潜熱、化学蓄熱がある。顕熱蓄熱は、民生用では給湯用蓄熱槽、地域熱供給用の大型蓄熱槽等が普及しており、技術的に確立している。産業用においては、固体顕熱蓄熱材を使った熱風炉やリジェネレーティブバーナーなどとして、省エネルギーに大きく貢献している。また、再生可能エネルギー分野においても、集光太陽熱発電用の蓄熱システムとして、熔融塩顕熱蓄熱技術が商用化されている。潜熱蓄熱もまた幅広い温度範囲、様々な用途で検討されている。産業用の氷蓄熱システム「エコアイス」や、家庭用の「エコアイス・mini」などは、夏季のピークカットやピークシフトに貢献してきた。また、環境温度付近の0℃から30℃付近までの潜熱蓄熱が、保冷、室内温度調整等で普及しており、建築材料への適用も進んでいる。冷感グッズとしての潜熱蓄熱材料 (相変化材料: PCM) が猛暑日に話題になったのは記憶に新しい。自動車用には室内に潜熱材パッケージが置かれ環境温度の急激な温度変化の緩和に利用されている。また、省エネ運転としてアイドリングストップ機能があるが、1分程度のエンジン停止時に追加エネルギー無しでの冷熱、温熱供給にも潜熱蓄熱は有用である。中高温領域においては、集光太陽熱発電用の蓄熱システムへの硝酸塩系PCMの適用が広く検討されたが、実用には至っていない。一方で近年、さらに高温の600℃に融点を持つAl合金をPCMとして利用した出力10 kW程度の小型蓄熱モジュールの商用生産が開始した³⁾。化学蓄熱も100℃以下の室温付近から800℃の高温まで、幅広い温度域で検討が進められている。1970年代から検討が始まって以来、反応時の体積膨張と収縮による蓄熱材の粉化や劣化、粉体層特有の有効熱伝導率の低さに起因する伝熱の課題から商品化例は少なかったが、近年、中高温領域の熱源を回収可能なCaO-H₂O系の産業用化学蓄熱システムの実証や商用化が一部達成された。また、化学蓄熱は2 MJ/L級の高い蓄熱密度を有することから車載用の蓄熱システムとしての検討が進んでおり、近年高速出力化が開発のトピックとなっている。

日本では、先述したように「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」プロジェクト等において、低温排熱の有効利用をターゲットとした研究開発が精力的に行われてきた。この中で、蓄熱材料の高付加価値化 (高密度蓄熱材料、長期蓄熱材料) の研究開発が実施されるとともに、産業分野、民生分野の排熱実態調査などの統計データや、熱関連材料のデータベースなどが再整備された。また、100℃以下の低温廃熱

2.2

産業・運輸部門のゼロ
エミッション・炭素循環利用

を利用可能なコンパクト型高性能蓄熱システムの構築を目的として、低コスト型高性能蓄熱材（ハスクレイ）の量産製造技術の確立やハスクレイを用いた蓄熱システムの開発⁴⁾、およびオフライン熱輸送システムの実証試験が行われてきた⁵⁾。一方、欧州では、再生可能エネルギーの安定利用に向けた蓄エネルギー技術として中高温の蓄熱技術の開発が精力的に実施されてきた。これらの中高温蓄熱技術は、集光型太陽熱発電に向けた研究開発が技術基盤にあると考えられるが、近年、蓄熱技術を介した Power to Heat to Power 型の蓄エネルギー技術であるカルノーバッテリー（蓄熱発電）へと急速な展開を見せている。中高温の蓄熱技術として、硝酸塩を利用した熔融塩顕熱蓄熱技術は太陽熱発電用として既に社会実装されている。新たに岩石を固体顕熱蓄熱技術として利用する岩石蓄熱が低コストの観点から注目され開発が進んでいる。また、先端的な蓄熱技術の位置づけであった中高温の潜熱蓄熱や化学蓄熱においても、近年大規模蓄熱用途としての実用化に一部目処が立ちつつある。蓄熱技術は蓄エネルギー技術の重要なオプションの一つとして、再生可能エネルギーの負荷変動性に対応した石炭火力発電や、原子力発電のレジリエンス機能の向上策としても期待され⁶⁾、蓄熱技術が担う役割は拡大している。また、これらの技術においても、総合効率を向上させるためには、熱利用を介した産業及び民生とのセクターカップリングが必須となる。ここに、低温排熱の回収技術や熱輸送システムなど多様な蓄熱技術の展開が期待される。

熱再生利用システムでは熱回収におけるコスト削減が重要である。そのためには、大量生産技術の転用、安価な材料への転換、そして伝熱促進を同時並行で進めることが肝要である。また、昇温や降温機能としてのヒートポンプに大きな期待がかかるが、温暖化係数の小さい冷媒への転換が求められている。用途に応じて、合成冷媒系（ハイドロフルオロカーボン、ハイドロフルオロオレフィン、ハイドロクロロフルオロオレフィン）、自然冷媒系（二酸化炭素、アンモニア、炭化水素系、水）などが検討されている。媒体の熱的性質のうち、熱伝導率に加え熱容量（比熱）の大きなものが望ましい。安全で安価な冷媒で、液単相の比熱がアンモニア（4.8 kJ / (kg·K)、20°C）や水（4.2 kJ / (kg·K)、20°C）より大きなものはないため、水などに固相一液相で相変化する物質（PCM）の封入されたマイクロカプセルを混合した混相流媒体によって比熱増大を図る技術⁷⁾等が開発されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

1. 中高温用相変化マイクロカプセルの開発と応用

金属・合金系 PCM マイクロ粒子への化成処理と酸化処理によるコア（金属 PCM）-シェル（ Al_2O_3 ）型マイクロカプセル PCM（MEPCM）合成法が提案され、200°C 以上の中高温領域で使用可能な MEPCM の開発が進められている。NEDO 先導研究プログラム「合金系潜熱蓄熱マイクロカプセルを基盤とした高速かつ高密度な蓄熱技術の研究開発（2020～2021年度）」⁸⁾では、MEPCMを原料としたハニカムやペレット等の蓄熱体や、プロトタイプ蓄熱モジュールの開発が実施された。中高温域の産業排熱回収用蓄熱システムによる省エネルギー用としてだけでなく、触媒反応熱制御への利用、可逆作動型燃料電池の熱マネジメントへの適用、蓄エネルギーシステムへの利用など、新たなサーマルエンジニアリングマテリアルとしての展開が期待されている。

2. 蓄熱セラミックス⁹⁾

永続的に熱エネルギーを保存できるセラミックス“蓄熱セラミックス（Heat storage ceramics）”という新概念の物質が発見され、研究開発が進んでいる。この蓄熱セラミックスの先駆けは、ストライプ型-ラムダ-五酸化三チタンと呼ばれる物質で、230 kJ L⁻¹程度の蓄熱密度を持つ。熱を加える以外にも電流の印加、光の照射などによっても蓄熱可能であり、60 MPa程度の弱い圧力を加えることで相転移による放熱することができる。長期間蓄熱でき、任意の時間に放熱できることから産業排熱の回収や自動車排熱の回収への適用が期待されている。

3. セラミックスカプセル構造蓄熱体¹⁰⁾

Al₂O₃などのセラミックスを直径数十mm程度のセラミックカプセルに射出成型し、このカプセルに金属PCM球を内包したセラミックスカプセル構造蓄熱体が開発されている。金属PCMとして、Al-SiやCu等の高温作動が可能な材料が適用可能であり、工業炉への応用等が模索されている。

4. 硬殻マイクロカプセル化蓄熱材¹¹⁾

中空かつシェルにナノ孔を有するSiO₂マイクロカプセルに無機水和物等の潜熱蓄熱材を含浸担持した後、封孔処理をした硬殻マイクロカプセル潜熱蓄熱材が開発され、室温以上の熱を輸送する潜熱輸送システムが検討されている。既往の水による熱輸送と比べると、ポンプ動力を大幅に削減でき、伝熱特性の改善に寄与する。また、マイクロカプセル内に潜熱蓄熱材ではなく化学蓄熱材（塩化カルシウム）を担持させ、コンポジット化させたケミカルヒートポンプセルも開発されている。化学蓄熱材特有の課題であった潮解性がなく、反応速度が10倍になるなどのメリットが確認されている。また、反応熱を利用して冷水と高温熱を同時に生成するサーマルトランジスタへの適用が検討されている。

5. Al合金系潜熱蓄熱システム¹²⁾

Azelio社（スウェーデン）は、600°Cに融点を持つAl合金をPCMとして利用した10 kW程度の蓄熱モジュールの量産化、商用化に成功している。蓄熱槽の外壁を熱媒体が流れて熱交換する特殊な構造で、蓄熱槽の内壁にアルミナなどのセラミックスをコーティングすることで、熔融Al合金の蓄熱槽に対する腐食を防止している。10 kW程度の蓄熱槽を連結することで、大容量化も可能とされている。

6. セラミックハニカムの化学蓄熱装置への応用¹³⁾

SiCセラミックハニカムと塩化カルシウムを複合した化学蓄熱材料を調製し、この材料を用いた塩化カルシウム/水系化学蓄熱装置が開発された。このハニカムは耐蝕性、伝熱性に優れ、化学蓄熱システムの実用性を高めることに成功している。また、SiCセラミックハニカムと酸化カルシウムを複合した車載用ヒートバッテリーもまた開発され、デモンストレーションが行われている。

7. 酸化カルシウム蓄熱商用プラント：Salt X社（スウェーデン）¹⁴⁾

再生可能エネルギー余剰電力の蓄熱向けに酸化カルシウム/水系化学蓄熱システムを開発した。耐久性のある材料、移動層型蓄熱システムを開発し、商用化している。今後、流動層型への移行も検討されている。

8. 高温ヒートポンプ

水系の熱源を用いた160°C程度の出熱が可能なヒートポンプは既に商用化されているが、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）では、遷臨界サイクルを用い、100°Cの熱源を200°Cに再生する産業用の高温ヒートポンプを開発しており、エネルギー消費効率（COP）3.5を目標としている¹⁵⁾。

9. 自己熱再生

自己熱再生技術は、蒸留塔を中心とした化学工業、CO₂分離回収、乾燥工程、海水淡水化に応用され、多数研究、実用化¹⁶⁾⁻¹⁸⁾されている。潜熱損失の大幅削減に資する自己熱再生システムの主機は、少量のエクセルギー投入源である機械式の蒸気圧縮機（MVR）であり、高性能な機器が多数商品化されている。

10. 吸収/吸着/収着剤による調湿

シリカゲルや合成ゼオライトの水蒸気の吸脱着による冷熱エクセルギーの生成システムが既に商用化している。また、大量に水を吸収し低温で脱着できる高分子収着材を用いた調湿機能を有する空調機が商品化され

ている¹⁹⁾。また、吸収液を塗布する構造吸収器を採用した車載可能な吸収式冷凍機の試作機¹⁵⁾が TherMAT で開発されるなど、小型化も注目動向の一つである。

11. セラミックス熱交換器

工業炉のラジアントチューブバーナー用の炭化ケイ素 (SiC) 製再生熱交換器が提案されている²⁰⁾。3D プリンターで製造されたらせん状の流路により、高い熱交換効率が実現されている。最高 1350°C という高温まで使用可能であり、金属の使えない高温まで空気を予熱することが可能となっている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

1. 国際エネルギー機関 (IEA) ECES Annex 36 “Carnot Batteries”²¹⁾ (2020～2022年)

カルノーバッテリーは、再エネ由来の余剰かつ使用困難な電力を一旦「熱」に変換し、それを「中規模～大規模の蓄熱システム」に一時貯蔵し、電力需要の大きい時間帯に貯蔵した熱を使って発電する “Power-Heat-Power” タイプの再生エネ安定利用法である。このコンセプト自体は 1922 年に提案されていたが、先述の通り近年、蓄熱技術の進歩により、実装に向けた開発が進んでいる。このグループでは将来のエネルギーシステムにおいてカルノーバッテリーが持つポテンシャルを体系的に調査、評価、強化するために、産学両方の専門家から成るプラットフォームを確立することを目指している。近年、カルノーバッテリーに関する様々な総説がこのグループの活動の一環として報告されている。

2. 岩石蓄熱技術 (2021年～ 環境省)

変動性再生可能エネルギーを高温の熱に変換し、中～大規模の蓄熱システムに貯蔵し、貯蔵した熱を熱源として熱機関を使って発電する Power to Heat to Power タイプの蓄エネルギー技術として、カルノーバッテリー (蓄熱発電) に関する検討が国内でも開始されている。Siemens Gamesa Renewable Energy 社 (ドイツ) の熱による電力貯蔵 (ETESe) が先駆的だが、日本国内においては環境省「令和 4 年度岩石蓄熱技術を用いた蓄エネルギー技術評価・検証事業委託業務」事業で中部電力、東芝エネルギーシステムズが数 cm の岩石を顕熱蓄熱材として利用した検討を開始している。

3. 再生可能エネルギー源からの圧縮熱エネルギー貯蔵エネルギー (CHESTER) プロジェクト、システム²²⁾

ドイツ航空宇宙センター (DLR) などを中心として Horizon 2020 で開発が進められてきたランキンサイクルをベースとした Pumped Thermal Energy Storage CHEST システムは、循環媒体として水/水蒸気を用い、高温ヒートポンプ、高温側蓄熱システム、低温側蓄熱システムおよび有機ランキンエンジンから構成される。高温側蓄熱システムは、顕熱と潜熱蓄熱システムのハイブリッド型が想定されている。潜熱蓄熱システムとして 7 wt% KNO₃ - 33 wt% LiNO₃ (融点 133°C、潜熱量 167 kJ kg⁻¹) を PCM として用いたシェル&チューブシステムが、顕熱蓄熱システムとしては高圧水を蓄熱材とした 2 タンクシステムが検討されている。蓄熱/充電時は、低温熱源からの熱を多段階で圧縮し、高温の熱を得る。低温側の蓄熱システムは発電時の低温溜として機能するだけでなく、太陽熱やバイオマス、廃熱などを熱源として受け入れ、セクターカップリングすることで地域熱供給システムとしても機能することが大きな特徴である。

4. 金属潜熱蓄熱⁶⁾

再生可能エネルギー伸長に呼応した電力レジリエンス機能の向上策として、潜熱蓄熱システムを火力発電所のタービンバイパス系統他に組み込むシステムが提案されている。600°C 近くの高温で蓄熱する蓄熱材料として Al 合金系 PCM が選定され、蓄熱槽材料との腐食性や腐食防止コーティング材の検討および全体システムの試設計が実施されている。

5. 「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」NEDO (2015年度～2022年度)²⁾

NEDOとTherMATにより、最高200℃過熱を実現する産業用高効率高温ヒートポンプの開発が行われている。使用する冷媒を自然冷媒のR600 (ブタン) から低GWPのハイドロフルオロオレフィン (HFO) 系冷媒に変更し、磁気軸受けを使用してオイルフリーとしたターボ圧縮機の設計・製作・単体性能試験を行い、このターボ圧縮機を搭載して、80℃を熱源として80℃から180℃まで昇温するヒートポンプで、最終目標の加熱COP (加熱能力/消費電力) 3.5を達成する目的を得た。

6. 下水道革新的技術実証事業「B-DASHプロジェクト」、国土交通省²³⁾

平成29年より自己熱再生型のヒートポンプによる下水汚泥乾燥技術の実証研究を実施しており、中小下水道事業における汚泥処理費の35%削減を目指している。

7. ヒートポンプ技術に関する技術協力プログラム (TCP HPT)、IEA²⁴⁾

IEAヒートポンプ技術協力プログラム (IEA TCP HPT) は、第二次オイルショックのあった1978年に設立され、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、イタリア、日本、韓国、オランダ、ノルウェー、スウェーデン、スイス、英国、米国の17か国が参加している。現在、Annex53～61までのプロジェクト活動が行われており、それぞれ数か国の参加国で構成され、オペレーティングエージェント国がリーダーを務めている。日本は、地球温暖化係数 (GWP) の低い冷媒ヒートポンプシステム (Annex 54)、高温ヒートポンプ (Annex58)、低GWP冷媒 (Annex54) およびポジティブエネルギー地域 (PED) (Annex61) に参画している。

8. クールアースフォーラム (ICEF)²⁵⁾

2019年のICEFでは、Industrial Heat Decarbonization Roadmap11が示され、産業用熱生成の電化による脱炭素化におけるヒートポンプの役割についてChapter 2で述べられている。

(5) 科学技術的課題

1. Power to Heat to Power型の蓄エネルギー技術に向けた大規模、低コスト蓄熱システムの開発

欧米を中心にMWh、GWhオーダーの大規模、低コスト蓄熱の検討が急速に進んでいる。蓄エネルギー技術としての蓄熱技術は、再生可能エネルギーの負荷変動性に対応した石炭火力発電や原子力発電のレジリエンス機能の向上策としても期待でき、日本においてもこの分野での対応が必要であると考えられる。

2. 高温駆動ヒートポンプの開発

低温廃熱再資源化やカルノーバッテリーのPower to Power効率の向上に向けて、高温駆動ヒートポンプの開発が重要である。低温廃熱再資源化では到達温度が200℃程度、カルノーバッテリーにおいては到達温度500℃程度の高温駆動ヒートポンプが求められている。

3. 腐食性および汚れ温排ガスからの熱回収

電炉製鋼等に代表される材料の溶融を伴う高温プロセスからは高温排ガスが多量に発生しているが、ダストなどを多量に含むダーティなガスであり、集塵のために冷却、低温で排熱されている。また、このような高温排熱はバッチプロセスから排出されることが多く、バッチ間の激しい温度変動を伴うことが熱回収機器の低寿命化を助長する。このエクセルギー率の高い高温排ガスを高温のまま回収可能な技術の開発が求められる。また、硫黄分を含む燃料排ガスからの酸露点以下の熱回収技術が求められる。

4. 化学蓄熱装置の高性能化

化学蓄熱は蓄熱密度が高く室温およそ1000°Cまでの貯蔵が可能であり、潜在的な応用先は多い。しかしながら反応性能が不十分であり、熱交換器を含めた装置が大きい。また、他の蓄熱方法に比べ複雑であることが市場化を妨げている。特に反応層は伝熱律速になることが多く、反応層の伝熱促進が重要である。さらに熱交換機能を有する反応器の伝熱促進、コンパクト化、各種の温度域での反応が可能な化学蓄熱材料の開発が必要である。また、腐食に対する蓄熱材料、容器の改良も求められる。

5. 熱再生システム

熱再生利用システムの要素技術においては、熱交換器の低コスト化、コンパクト化が鍵を握る。特に、熱伝達率の小さい気相の伝熱促進は、空気、排気、プロセスガス等の熱交換において重要になる。また、スケール、霜、腐食といった課題によって熱再生が困難であった用途においても、今後更なる適用拡大が望まれる。一方、銅やニッケル等の価格高騰を受け、より安価なアルミニウム、鉄、樹脂等への転換が今後急速に進むと推察される。素材転換に際しては、3Dプリンティング等の製造方法の革新や、信頼性の評価があわせて必要となり、個別の小規模な活動だけでは実現することのハードルが高い。業界の壁を超えて共同で共通基盤技術を育成する体制や仕組みが欠かせない。研究開発投資の規模が大きい自動車分野、これに次ぐ規模の空調分野で既に発展してきた技術をカスタマイズして転用することも有効であると考えられる。

(6) その他の課題

1. 蓄熱システム全体での統一的な評価プロセス、評価指標の構築

日本では様々な蓄熱材料、システムに関する基礎研究が進んでいる一方、他の熱利用機器と比較して統一的な評価プロセス、評価指標がないことが一貫通貫の蓄熱技術開発を妨げている。

2. 熱需要（媒体、温度、圧力、流量）の可視化

産業分野における排熱の実態調査データは存在するが、この数値は最終的に廃棄されている排熱の温度と量であり、実際のエクセルギー損失は、それよりも上流のプロセスにおける熱交換温度差によって発生している。すなわち、実際のプロセスにおいてエクセルギー損失が発生する実態や条件（媒体、温度、圧力、流量）を、上流から下流まで明らかにする必要がある。公的な組織が主導し、定量的な熱需要の見える化が重要である。

3. 共通基盤技術および人材の育成

社会構造の変化に伴って、現在は熱技術にも大きな変革が求められる転換期にあると言える。これまで日本は、熱技術に関わる研究開発で他国を圧倒していたが、近年では各国から激しく追い上げられている。海外では熱技術に関する研究開発投資が近年大変旺盛になってきており、特に中国においては熱分野においても産学連携活動が非常に活発である。これを打破するためには、個々に小規模に独立して研究開発するのではなく、数値シミュレーション、機械学習、最先端計測技術、信頼性評価といった共通基盤技術を協力して開発し、共有する仕組みが求められる。またそのような活動を通じて、熱技術を化石燃料社会からカーボンニュートラル社会に即したものに変革できる人材を育成することが重要である。

(7) 国際比較

(7-1) 蓄熱関連

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など	
日本	基礎研究	◎	↗	●北海道大学、東京工業大学、名古屋大学などで蓄熱技術を定期的に報告している。	
	応用研究・開発	△	↗	●愛知製鋼、名古屋大学などで化学蓄熱の実証が検討された。 ●蓄エネ技術としての岩石蓄熱技術の検討が開始された。 ●全体的にエンジニアリングを含めた全体システムの取り組みは少ないが検討が開始されている。	
米国	基礎研究	◎	↗	●電力網の負荷安定化、停電対応のためMIT、DOE、電力会社などが検討している。 ●MALTAなどのベンチャー企業が積極的に研究している。	
	応用研究・開発	○	↗	●産業プロセスの高効率化のためのプロトタイプ蓄熱検討がDOEなどで検討されている。	
欧州	EU	基礎研究	◎	↗	●電力網の負荷安定化のためPower to Gasや水からの水素製造、再エネの蓄熱が検討されている。 ●IEA Annexで地蓄熱技術が検討されている。
		応用研究・開発	◎	↗	●電力網の負荷安定化のための再エネの蓄熱が研究されている。 ●Salt X社が化学蓄熱を商用化している。
	英国	基礎研究	△	→	●Warwick大学で化学蓄熱の検討が進められている。
		応用研究・開発	○	→	●Sunanp社の潜熱蓄熱システムが路線バス等に搭載利用されている。
	ドイツ	基礎研究	◎	→	●DLRで太陽熱、産業熱の化学蓄熱研究がされている。ZAE、Fraunhofer研究所が再エネの潜熱蓄熱研究を推進。
		応用研究・開発	◎	↗	●Bosch社が吸着式食器乾燥機、SolTech社、InveSor社が太陽熱駆動吸着式冷房装置を市販。 ●Siemens Gamesa社が再エネ熱蓄熱→発電システムの基礎プラントを検討。 ●Volkswagen社らが共同で電力網の負荷安定化のためのPower to Gas組合を作り、再エネ電力から水素プラントの応用研究が進行している。
	フランス	基礎研究	◎	→	●Perpignon大学などで潜熱、化学蓄熱蓄熱研究が順調に進行。余剰電力を用いた電気分解水素製造が検討されている。
		応用研究・開発	○	→	●Areva社で余剰電力を用いた電気分解水素製造の販売を行っている。
	オランダ	基礎研究	○	→	●TNO (旧ECN) 自動車用吸着式蓄熱、化学式蓄熱の実証研究が行われている。
		応用研究・開発	△	→	●特段の応用研究報告は見当たらない。
	スペイン	基礎研究	◎	↗	●Llleida大学、Barcelona大学で再エネ、太陽熱の顕熱、潜熱研究が進められている。
		応用研究・開発	◎	→	●Andasols社で太陽熱の顕熱貯蔵+水蒸気発電システムが商用稼働している。
	スウェーデン	基礎研究	◎	→	●KTHなどで顕熱蓄熱、潜熱蓄熱、化学蓄熱の研究が進められている。
		応用研究・開発	◎	↗	●Salt X社やAzelio社などが先進的な蓄熱システムの商用化に至っている。
	デンマーク	基礎研究	◎	→	●DTUなどで岩石蓄熱のパイロットスケール試験が実施されている。
		応用研究・開発	◎	↗	●Andel社などが積極的な投資を行っている。

中国	基礎研究	◎	↗	●上海交通大学で吸着式ヒートポンプ、蓄熱が広範に検討されている。
	応用研究・開発	◎	↗	●Broad社等で吸着式ヒートポンプ、潜熱蓄熱装置が市販されている。
韓国	基礎研究	○	→	●Seoul国立大学などで蓄熱、熱化学水素製造の研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	●特段の応用研究報告は見当たらない。

(7-2) 熱再生関連

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	●冷凍空調技術については、東京大学、早稲田大学、東京海洋大学、静岡大学、福井大学、九州大学、九州工業大学、長崎大学などで研究報告が常時ある。
	応用研究・開発	◎	→	●企業の製品開発を中心に、多くの応用研究が実施されている。また、TherMATを中心に産官学の研究プロジェクトがある。 ●HFC規制（モントリオール議定書キガリ改正）により、脱HFCの研究開発がNEDOを中心に産官学で実施されている。
米国	基礎研究	△	→	●冷媒の研究発表の多いASHRAEでも熱再生の基礎研究報告はあまり見当たらない。
	応用研究・開発	○	→	●Saint-Gobain社において、高温セラミック熱交換器が商用化されている。
欧州	基礎研究	○	→	【EU】 ●EUのHorizon 2020において、ヒートポンプの基礎研究がなされている。 【ドイツ】 ●ZAE Bayernが中心的存在。 【英国】 ●4大学が参画するLoT-NET（低温熱回収の研究ネットワーク）30）でケミカルヒートポンプを含む研究が活発化。 【オーストリア】 ●AEE-INTECが牽引。
	応用研究・開発	○	→	【EU】 ●IEAのTCP HPT Annex 58では高温ヒートポンプが研究されている ²⁵⁾ 。 ●Horizon 2020のSpot Viewプロジェクトの中で鉄鋼・紙パルプ工場排熱のケミカルヒートポンプによる熱再生実証事業 ³¹⁾ がある。 ●オーストリア技術研究所において、“DryFiciency”という名称の研究プロジェクトが2021年度までに実施された。これは、乾燥に伴う排熱の80%を回収するために、高温空気乾燥（澱粉の乾燥およびレンガの乾燥）と過熱水蒸気による乾燥（バイオマスの乾燥）の140℃から160℃の高温産業用ヒートポンプシステムを実証した。このプロジェクトには、エネルギー効率と革新的な行動のための基金“European Union’s Horizon 2020 Programme”に基づき、ノルウェー、デンマーク、ベルギー、ドイツ及びオーストリアの5か国が参加し、コンソーシアムには12の企業・研究所が参加した ³³⁾ 。 【ドイツ】 ●余剰再エネのPower to Heatがトレンドであり、ヒートポンプを介在させないケースも多い。 【フランス】 ●EDF（フランス電力社）などで家庭用温水ボイラー代替としての空気熱源ヒートポンプの推奨が盛んである。
中国	基礎研究	◎	↗	●発表論文数が多く、研究レベルも急速に上がっている。 ●化学再生発電システムの研究報告は中国が多く、他国ではあまり見られない。

	応用研究・開発	○	↗	●これまで輸入が多数だったが自国開発による生産へ急速にシフトしている。
韓国	基礎研究	△	→	●特段の基礎研究報告は見当たらない。
	応用研究・開発	△	→	●日本のTherMATのような動きはない。IEAの第13回Hear Pump Conferenceは1年延期され2021年4月に済州島で開催され、20か国から207件の発表があった。
その他の国・地域	基礎研究	○	→	【ロシア】 ●ノボシビルスク大にて活性炭へのメタノール吸着を使った低温熱利用のヒートポンプ研究“ <i>HeCol</i> ” ³²⁾ がある。
	応用研究・開発	—	—	—

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・ 太陽熱発電・利用 (環境・エネ分野 2.1.8)

参考・引用文献

- 1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター「産業分野の排熱実態調査 報告書 (2019年3月)」未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 (TherMAT), <http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf>, (2023年1月15日アクセス)。
- 2) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 (TherMAT), <http://www.thermat.jp/>, (2023年1月15日アクセス)。
- 3) Torbjörn Lindquist *et al.*, “A novel modular and dispatchable CSP Stirling system: Design, validation, and demonstration plans,” *AIP Conference Proceedings* 2126, no. 1 (2019) : 060005., <https://doi.org/10.1063/1.5117591>.
- 4) 鈴木正哉, 前田雅喜, 犬飼恵一「高性能吸着剤ハスクレイ[®]の開発: 粘土系ナノ粒子による省エネシステム用吸着剤の開発展開」『*Synthesiology*』9巻3号 (2016) : 154-164., https://doi.org/10.5571/synth.9.3_154.
- 5) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100039.html, (2023年1月15日アクセス)。
- 6) 山本健次郎「再生可能エネルギー時代の高効率電力レジリエンス蓄熱システム」『*三菱重工技報*』57巻1号 (2020) : 14-22.
- 7) 鈴木洋「新規マイクロカプセル化蓄熱材による低炭素社会の実現」国立研究開発法人科学技術振興機構, <https://projectdb.jst.go.jp/grant/JST-PROJECT-17943862/>, (2023年1月15日アクセス)。
- 8) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「NEDO先導研究プログラム 2020年度: 合金系潜熱蓄熱マイクロカプセルを基盤とした高速かつ高密度な蓄熱技術の研究開発」45, <https://www.nedo.go.jp/content/100927780.pdf>, (2023年1月15日アクセス)。

- 9) 東京大学「永続的に熱エネルギーを保存できる“蓄熱セラミックス”を発見：蓄えたエネルギーを弱い圧力によって放出する新概念の素材」 https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/a_00401.html, (2023年1月15日アクセス) .
- 10) 北英紀, 吉田将也, 山下誠司「セラミックカプセル型高エネルギー密度蓄熱体の開発」『日本エネルギー学会大会講演要旨集』22 巻 (2013) : 230-231.
- 11) 鈴木洋「硬殻マイクロカプセル化蓄熱材がもたらす超低炭素社会の実現」新技術説明会, https://shingi.jst.go.jp/pdf/2021/2021_mirai_3.pdf, (2023年1月15日アクセス) .
- 12) Azelio, “Building a renewable future: Thermal Energy Storage. Power On Demand,” <https://www.azelio.com/the-solution/technology/>, (2023年1月15日アクセス) .
- 13) 市瀬篤博他「H133 SiCセラミックスハニカムを用いる塩化カルシウム化学ヒートバッテリーの放熱」『第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集』(日本伝熱学会, 2018).
- 14) Salt X Technology, <https://www.saltxtechnology.com/>, (2022年1月15日アクセス) .
- 15) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「省エネルギーへのフロンティア：未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」 <https://www.nedo.go.jp/content/100927351.pdf>, (2023年1月15日アクセス) .
- 16) 村本知哉他「圧縮機を利用した化学プロセスの省エネ化：蒸留, 乾燥, 分離プロセスへの適用」『IHI 技報』53 巻 2 号 (2013) : 42-47.
- 17) 一般社団法人日本エレクトロヒートセンター「秦野市浄水管理センター「自己熱再生型ヒートポンプ」技術を応用した高効率な下水汚泥乾燥技術を開発」 https://www.jeh-center.org/asset/00032/monodukurinidenki/vol6_hadanocity.pdf, (2023年1月15日アクセス) .
- 18) 三菱総合研究所「平成27年度石油産業体制等調査研究（製油所における精製プロセス等の改善に係る技術の可能性に関する調査）報告書（概要版）(2016年3月31日)」国立国会図書館, https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11279607_po_000154.pdf?contentNo=1&alternativeNo=, (2023年1月15日アクセス) .
- 19) パナソニック「ルームエアコン エオリア LXシリーズを発売」パナソニックホールディングス, <https://news.panasonic.com/jp/press/jn210921-3>, (2023年1月15日アクセス) .
- 20) Saint-Gobain, “HeatCor and Silit Recuperators,” <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/products/products-application/heating-systems/heatcor-and-silit-recuperators>, (2023年1月15日アクセス) .
- 21) Dan Bauer, “Carnot Batteries,” International Energy Agency (IEA), <https://iea-es.org/task-36/>, (2023年1月15日アクセス) .
- 22) Compressed Heat Energy Storage For Energy From Renewable Sources (CHESTER), “Detailed design of the high temperature TES laboratory prototype,” https://www.chester-project.eu/wp-content/uploads/2019/10/CHESTER_D3.3_Detailed-design-of-the-high-temperature-tes-laboratory-prototype.pdf, (2023年1月15日アクセス) .
- 23) 国土交通省 国土技術政策総合研究所「廃熱循環による高効率汚泥乾燥実証施設の稼働：中小下水道事業経営改善へ汚泥処理費35%削減目指す」 <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20170130.pdf>, (2023年1月15日アクセス) .
- 24) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター「IEAヒートポンプ技術協力プログラム (IEA HPT TCP)」 <https://www.hptcj.or.jp/tabid/1481/Default.aspx>, (2023年1月15日アクセス) .
- 25) David Sandalow *et al.*, “ICEF Industrial Heat Decarbonization Roadmap,” Innovation for Cool Earth Forum (ICEF), https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2019_roadmap.pdf, (2023年1月15日アクセス) .