

2.1.10 熱エネルギー利用（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、研究開発を記述する。太陽エネルギーの熱としての利用を含める。主に①蓄熱技術と②熱再生利用技術を扱う。

①蓄熱技術：工場の排熱を短時間または長時間蓄えて、工場の製造プロセスの予熱に利用し、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。

②熱再生利用技術：熱を利用する際に減少するエクセルギーを再生（補充）することで、中低温領域の熱需要を満足させる技術である。これにより、従来の化石燃料の燃焼に依存して熱供給する体系を変革でき、化石燃料の消費を削減できる。ここでは、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

蓄熱、熱再生利用、化学再生、ケミカルヒートポンプ、熱エネルギー、自己熱再生、再生可能エネルギー、産業熱回収、エネルギーシステムの負荷・供給平準化、低炭素化

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

熱エネルギー貯蔵（蓄熱）技術は既往の開発が他の省エネルギー関連技術に対して劣り、将来の可能性が少ないとの指摘がある。何故、蓄熱かを俯瞰する必要がある。現在日本は最終エネルギー消費の中で直接的な電力割合は26%であり残りは化石燃料を用いた熱プロセスなどで消費されている^{1),2)}。日本が真に低炭素化を目指すとするれば、熱の有効利用を避けての目標の達成は困難であろう。

日本の製造業における未利用排熱量の調査が行われており、投入された最終エネルギー（電力を除く）量、9.1 EJ/year、に対する未利用排ガス熱量の割合は1割未満と試算されている³⁾。熱機関として熱効率9割のシステムは考えにくく、排熱の多くは現状プロセスにおいて合理的な回収が困難であり、調査で示された未利用排熱量の外に存在すると考えられる。排熱回収の未進展は経済性のある熱利用技術の少なさ、また技術進展の遅れを反映しているといえる。熱利用においては蓄熱機能が必要である。100°C以下の環境温度に近い排熱の回収、変換は従来から進んでおり、近年の社会的な技術要求は蓄熱の高密度化、熱貯蔵/出力の高速化、そして低コスト化である。これらへの対応には多分に科学技術が必要であり、開発された技術の社会、経済的意義は高いと予想される。

熱再生利用も重要である。熱を再生するか否かに関わらず、周囲環境（エクセルギーゼロ）と異なる温度状態にある物質（熱源）から別の媒体に熱移動させ、その媒体を介し、利用目的に即した効用・便益を創出する技術が研究開発の全般的な領域である。熱源は太陽熱や地熱など再生可能エネルギーの場合もあるが、ほとんどは人為的な熱生成である。基本的にはエネルギー変換システムとしてエクセルギー損失最小化の視点で設計されるが、再生される熱（被再生熱）の温度と利用したい温度によって適用技術が異なる。要素機器としては、一般的な熱交換器と同様に限定された温度差における熱移動の大フラックス化のほか、ケミカルヒートポンプの場合は材料選定とモジュール化が重要であり、高性能化のためには、材料、要素機器、適用システムのあらゆるレベルにおいて、それぞれのボトルネック課題を統合的に解決する必要がある。また、現在の人為起源の生成熱のほとんどは化石燃料由来であるため、熱再生利用によって一次エネルギーの

消費量を削減できれば、温室効果ガス排出とエネルギーコストが削減され、パリ協定の日本の定める貢献量 (Nationally Determined Contribution : NDC) の達成や収益改善などにおいて社会・経済的意義がある。

[研究開発の動向]

① 昨今の変遷

(①-a) 産業部門の蓄熱

産業分野の排ガス熱量は0.743 EJ/yearと報告されている³⁾。最終エネルギー消費13.1 EJ/yearの5.7%に相当する。先ずはこの排熱活用が重要である。熱利用においては蓄熱機能が必要である。ここ数年、蓄熱が国内外で見直されつつある。温度域は100～150℃で40%、150～250℃で37%であり、この分野の排熱回収、蓄熱が量的に大きく貢献する。一方で、250～350℃で6%、500℃以上が4%あり、エネルギーの質 (エクセルギー) の観点では、これら高温域の利用は価値が高い。例えば国内ではエネルギーネットワークへの蓄熱システムの導入検討、実証試験などの報告が見られる。また、自動車の電化に伴い車内空調向けの熱源が不足するため、蓄電によらない安価な熱供給方法として蓄熱に関心が寄せられており、従来に無い蓄熱市場が検討されている。

高温になる程、例えば一般的な顕熱蓄熱では放熱損失が大きくなるので、高温では何らかの化学変換が有効であり、化学反応を用いた蓄熱 (化学蓄熱)、さらには物質変換 (燃料改質、熱化学水素製造) により高温熱エクセルギーを高効率に回収することが検討されている。

(①-b) 化学蓄熱と高出力密度化

化学蓄熱は熱利用の時間的ミスマッチを解決する蓄熱機能、質的ミスマッチを解決するヒートポンプ機能を有することから、他の蓄熱材料より高密度に蓄熱でき、次世代の熱利用技術として期待できる。化学蓄熱は気固反応が有力であり、その出力は吸着/化学反応速度が理論上の性能限界となる。化学蓄熱は非常に複雑な熱・物質輸送同時現象を伴い、ナノからメートルまでの整合性ある気固熱・物質輸送の現象理解と促進が必要である。また、現行の蓄熱性能の概要は熱出力密度1 kW/L程度、蓄熱密度1 MJ/L程度が目安である。起動時など極めて短時間に放熱を行うサーマルキャパシターとして、出力密度2 kW/Lの達成は化学蓄熱の社会実装に重要な目標と考えられる。最近、従来の1 kW/Lに対して材料や装置の高熱伝導度化により5 kW/L程度まで数倍に向上できる見通しが示されている。

(①-c) 再生可能エネルギーむけ蓄熱

再生可能エネルギーは主用電源として期待されるが、九州電力では2018年以後に原発の再稼働に伴い不安定電源である太陽光発電の出力抑制が起きている。一方でスペインの太陽熱発電所では熔融塩を用いた顕熱蓄熱が投入され不安定太陽熱再エネを貯蔵し、夜間発電も行われ、既に社会実装されている。このように余剰電力の一次的な貯蔵として電力貯蔵 (蓄電池、揚水式) に並んで蓄熱に可能性がある。

(①-d) 熱再生利用システム

熱再生利用システムは、何らかの効用・便益の創出を目的としたメインシステムのエネルギー・物質変換過程において不可逆的に発生する熱を二次利用するサブシステム、あるいは回収してメインシステムに戻して循環利用するメインシステムとの統合化システムがある。ガスタービンを用いた発電システムを例にすれば、ガスタービンの排熱は500～600℃程度であり、事業用火力発電では通常、排熱回収ボイラ (Heat Recovery Steam Generator : HRSG) によって高温高圧の蒸気を生成し、ガスタービンと蒸気タービンによって発電するコンバインドサイクル (複合発電) を採用するが、HRSGと蒸気タービンのシステムはガスタービン排熱を熱源とした独立のシステムであり熱再生利用とは称さない。一方、自家発電等に用いられる中小

型のガスタービンには、排熱で圧縮機の出口空気を加熱して高効率化を図るシステムがあるが、これは再生サイクルと称されており、ガスタービンをメインシステムとする統合化システムによる熱再生利用の例と言える。また、都市部の給湯などのエネルギー利用の排熱である下水熱を利用したヒートポンプは、下水熱を再生して二次利用したサブシステム（この場合のメインシステムはそのエリアに分散した民生用給湯器などの熱の一次利用）と言える。複合発電の場合はトッピングサイクルの排熱のエクセルギー率を上限としたカスケード利用であるのに対し、熱再生利用は追加的なエクセルギー投入によって質を向上させる要素を必ず含んでいる。再生ガスタービンサイクルでは燃料のエクセルギー、下水熱ヒートポンプでは電力のエクセルギーがそれぞれわずかに投入されることで、被再生熱となる熱源より質の高いエネルギー、すなわちエクセルギー増進をもたらすのが熱再生利用システムである。なお、サブシステムで創出されるエクセルギーには冷熱エクセルギーも含み、吸収式・吸着式冷凍機などが挙げられる。

熱源としてエクセルギー率の高い高温域はもちろん有用だが、通常は合理的な排熱回収システムと組み合わせ、シンプルにカスケード利用されることが多い。利用先の温度と排熱との温度差が大きいほど不可逆的な熱移動に伴うエクセルギー損失が増加するため、その間の温度域に熱再生利用システムを加えることでさらなる有効利用も可能となるケースもある。中温域では大流量の顕熱のほか、液相-固相や気相-液相の相変化における潜熱も有望であり、機械式蒸気圧縮機、多重効用システムなどが該当する。また、環境に近い低温域では下水熱などの膨大な熱容量を持つ熱溜としての媒体が対象となる。なお、地中熱、温泉熱、河川熱利用ヒートポンプも技術的には全く同じであるが、熱の源泉は人為起源ではないため、本質的に再生可能エネルギーの有効利用に属する。ヒートポンプ排熱の自己熱再生利用（循環利用）において、再生可能エネルギーの加熱による熱量不足の補填など、ハイブリッド化等のシステムに研究開発の余地がある。

② 現在の技術レベル

蓄熱方法には顕熱、潜熱、化学蓄熱がある。顕熱は貯湯槽としてコジェネレーションシステムの熱エネルギー貯蔵に利用されており、家庭の温水供給用、燃料電池の排熱蓄熱から地域熱供給用の大型蓄熱までが普及しており、技術的に確立している。次に潜熱蓄熱が良く検討されている、特に環境温度付近の0°Cから30°C付近までの潜熱蓄熱が、保冷、室内温度調整等で普及している。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。顕熱蓄熱の蓄熱容量は概ね0.2 MJ/Lまで、潜熱蓄熱は概ね0.5 MJ/Lまでである。これ以上の高密度の需要が特に自動車分野で高い。そこで、化学蓄熱、概ね2 MJ/Lまでの可能性が研究レベルで進んでいる。蓄熱温度域は100°C以下の室温付近から800°Cの高温までである。化学蓄熱は高温での応用が研究され、種々の化学反応が提案、検討されている。

熱再生利用システム要素技術は熱回収の機器が中心となる。吸熱反応は温度が変化しなくてもヒートシンクとして受熱するため多少の伝熱促進効果はあるが、与熱・受熱間の熱通過における伝熱律速は充填層内の有効熱伝導率に起因することがほとんどである。このため、システムとしての性能およびコストの主な決定因子は伝熱促進にあり、この課題克服が研究開発テーマとして多く実施されている点では蓄熱技術と共通している。温度差の顕熱と相変化の潜熱以外に、吸熱反応を生じる物質による化学的なエンタルピーとして受熱する技術もあり、ケミカルヒートポンプや化学再生発電もこれに属する。低温域では吸収式および吸着式のヒートポンプや冷凍機などへの適用材料の研究開発が盛んであるが、80°C以下の低温な与熱には吸着式がリードしている。

③ 日本および他国の状況の概観

顕熱蓄熱は欧州において良く普及している、地域コジェネレーションが普及し、MW規模の大型排熱の貯蔵に顕熱蓄熱が導入されている。近年とくに再生可能エネルギーの不安定電力のエネルギー貯蔵として電力貯蔵（蓄電池、揚水式）に並んで蓄熱が検討されている。Siemens（ドイツ）は砕石への貯蔵を検討している⁴⁾。Massachusetts Institute of Technology（米国）はDOE、電力会社の支援を受けて、耐熱煉瓦を蓄熱材にした研究⁵⁾を行っている。これらは再エネのP2H2P（電力→熱→電力）を目指しており、今後の普及が考えられる。産業界への技術波及が予想される。日本はこの分野で大きく出遅れている。緊急の技術のキャッチアップと研究の国際レベルアップが必要と考えられる。

また、欧州では家庭用、住居用のまた太陽熱蓄熱による温熱供給、吸収式ヒートポンプと連携した冷熱供給も商品化が進んでいる。潜熱蓄熱材料は水、有機物、熔融塩が主であり種々の温度域に対応した製品がラインアップされ普及している。日本でも研究が小規模ながら進んでいる。化学蓄熱はフランスが1980年代に黎明期を作り、日本ではムーンライト計画（1978-1992）以後、種々の系の検討が進んでいるが、商品化の例は少ない。最近、再生可能エネルギーのP2H2Pむけとして700°C前後の高温化学蓄熱事例⁶⁾も検討されている。

熱再生利用システムでは熱回収における伝熱促進が重要である。相変化による伝熱律速の緩和策として、抵抗となる固体相の機械的な除去による方法が研究されている⁷⁾。受熱側の媒体は多様な材料が選定される。機械式ヒートポンプの場合は一般的な冷媒が用いられ、用途に応じてフロン系、有機系、自然冷媒系などがある。媒体の熱的性質のうち、熱伝導率のほか、熱容量（比熱）の大きなものが望ましい。安全で安価な液体の単相の比熱はアンモニア（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-液相で相変化する物質（Phase Change Material、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⁸⁾が開発されている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

1. 化学蓄熱システム実証⁹⁾

共同で酸化カルシウム/水系化学蓄熱システム開発し工場規模での実証に世界に先駆けて成功している。成功の第一は材料開発にあり、少量のバインダーを混合した高密度材料が作製され1000回以上の耐久性を実現している。第二には熱源・熱利用を特定したことであり、加熱炉排熱を蓄熱し、熱出力を酸溶液加熱に用いるシステム構成を見出し、CO₂排出削減80%を実現しようとしている。

2. 高温蓄熱用マイクロカプセルPCM開発¹⁰⁾

Al-Si 基合金系 PCM マイクロ粒子への化成処理と酸化処理によるコア-シェル型マイクロカプセル PCM (MEPCM: Microencapsulated PCM) 合成法が提案され、500°C以上の高温領域で使用可能なMEPCMの開発に成功している。MEPCMはシェルが化学的に極めて安定であり、これが物理/化学的なバリアー層として機能する。

3. カプセルコンポジット⁸⁾

塩化カルシウム/水系化学蓄熱の実用の上で塩化カルシウムの金属腐食性への対応が課題である。塩化カルシウムをナノ孔マイクロカプセルに内包させる方法を提案し、潮解性の改善および腐食性の改善、反応速度の向上を実現している。

4. 化学蓄熱材料の伝熱促進¹¹⁾

化学蓄熱材料の伝熱促進は装置全体の性能向上に重要である。酸化カルシウム/水系について、材料と多孔の炭化ケイ素との混合が試みられ、反応促進、伝熱促進、繰り返し耐久促進効果を示している。この混合材料を用いた充填層実験にて反応性能が従来の単体酸化カルシウム材料に対しての反応性、繰り返し耐久性の向上を実証している。

5. セラミックハニカム化学蓄熱装置への応用¹²⁾

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。充填層向け熱交換器の開発は重要な研究要素である。

6. 高温化学蓄熱⁶⁾

次世代太陽集熱システムのための650°C域の化学蓄熱を検討し、オルトケイ酸リチウム (Li_4SiO_4) / 二酸化炭素系を提案し材料開発が行われている。この化学蓄熱充填層とゼオライト充填層を接続し熱駆動での化学蓄熱、さらに790°Cまでの昇温 (ヒートポンプ) 操作を確認している。この温度域の熱駆動化学蓄熱の実施例は世界でもほとんど無い。

7. 炭素循環エネルギーシステム¹³⁾

二酸化炭素を余剰エクセルギーにて還元し一酸化炭素に変換し、工業プロセスで再利用を行う。炭素が循環利用され、 CO_2 環境排出の抜本的な削減に寄与できる。固体酸化物電気分解セルにて CO_2 高温電解の実証に成功している。新たな化学蓄エネルギー分野になると期待されている。

8. 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)¹⁴⁾ 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、COP3.5を目標にしている。

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、 CO_2 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¹⁵⁻¹⁷⁾ 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 (Mechanical Vapor Recompression : MVR) であり、高性能な機器が多数商品化されている。

10. ケミカルヒートポンプ・吸収/吸着式冷凍機

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は既に商用化している。塗布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¹⁸⁾ がTherMATで開発されるなど、小型化も注目動向の一つである。カルシウム化合物の水和脱水系による昇温可能なケミカルヒートポンプのコンパクト化や化学蓄熱効果による需要に合わせた運用法など実用化研究の進展が期待される。

11. 化学再生発電

水蒸気改質による化学的なエクセルギー再生である。化学再生ガスタービンの実証は既に完了している。高温作動燃料電池の不可逆熱化学再生を組み込んだシステムは内部改質の燃料電池発電システムは実証済み、石炭ガス化 (A-IGFC) は具体的な進展が待たれる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

• 蓄熱関連

1. 再エネ蓄熱実証プラント、Siemens Gamesa (ドイツ)⁴⁾

Power to Heat (P2H) システムを検討している。風力発電で得た電力をジュールヒーターで空気を加熱し、600℃で砕石に蓄熱し、必要時に砕石の顕熱を用いて蒸気発電を行うもので、一次電力に対する2次発電の効率50%を計画している。この装置の利点は高価なバッテリーを用いず蓄熱コストが1/10~1/100オーダーで低減できることである。すでに原理プラントでの検証を終え、ハンブルグで蓄熱発電実証設備(120MWh)が検討されている。

2. 再エネ高温蓄熱、Massachusetts Institute of Technology (米国)⁵⁾

耐熱煉瓦を蓄熱材にした1800℃顕熱蓄熱槽の研究をDOE、電力会社の支援を受けて行っている。再エネのP2H2P(電力→熱→電力)を目指しており、今後の普及が考えられる。

3. 酸化カルシウム蓄熱商用プラント、Salt X社(スウェーデン)¹⁹⁾

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、商用化に進んでいる。

4. Beayton Battery、MALTA²⁰⁾(米国)

Pumped Thermal Energy Storage (PTES) と分類される技術で、ブレイトンサイクルを利用して電気から高温熱と低温熱を発生させ蓄熱、必要時に高効率に発電する。高温側の蓄熱材として硝酸塩(概ね565℃まで)が予定されている。Novel賞受賞者のProf. Robert Laughlin、MITが開発した高効率ガスタービンを利用している。Malta社はGoogle親会社Alphabet社の有するX社(Alphabet's Moonshot Factory)にて設立された。

5. 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。コンセプト自体は1922年に提案されていたが、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。

6. 日本伝熱学会特定推進研究、研究課題“熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化”(2016-2019年)²²⁾

本研究は熱エネルギー有効利用のための、実装可能な高出力密度を有した化学蓄熱技術の検討を目的としている。蓄熱対象としては低温熱(50~100℃)程度が量的に、中温熱(100~300℃)が質的に重要である。特に起動時など極めて短時間に放熱を行うサーマルキャパシターとして、出力密度2kW/Lの高出力密度化を社会実装の目標としてその実現を検討した。

7. 日本鉄鋼協会「地球温暖化対策計画の実現に向けた鉄鋼技術検討会議(CGS)」(2019年-)

鉄鋼業として重要課題である地球温暖化対策計画の策定に向けて、幅広く学術、技術の両面から検討を行う。鉄鋼業からのCO₂排出量削減に資する、高炉法にはとらわれない技術領域を検討する。鉄鋼協会の従来の取組を踏まえて、学協会としての技術的な見解をまとめる。鉄鋼以外の領域を含めた多様な知見を調査し、共有する。

• 熱再生システム関連

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

2019年3月にNEDOとTherMATにより、熱利用量の多い15業種を対象に未利用熱の排出・活用状況に関する分析結果²³⁾が報告され、熱再生の熱源の貴重なデータベースとして活用が期待される。

9. 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²⁴⁾

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。

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

Annex43～55まで12のTCPがあり、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。アジアからは韓国その他、巨大市場を抱える中国も2019年より加入²⁵⁾しており、日本は給湯用のヒートポンプ (Annex 46)、産業用ヒートポンプ・フェーズII (Annex48)、低GWP冷媒 (Annex54) に参画している。

11. ICEF (Innovation for Cool Earth Forum)²⁶⁾

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. 大規模、低コスト蓄熱システムの開発

再生可能エネルギーの非常電力の貯蔵、高効率利用を産業界に導入できると低炭素化が促進できる。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。日本においてもこの分野での対応が必要である。

2. 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く、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。このため、装置のコンパクト化、低コスト化が必要である。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、コンパクト化が重要である。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。高い反応速度と繰り返し反応耐久性がある。また、腐食に対する蓄熱材料、容器の改良が必要である。

3. 低温駆動ヒートポンプ

0°C以下の低温の環境周囲から低エクセルギーの熱を吸収し昇温できるとヒートポンプとして利用価値が高まる。化学蓄熱では低圧力の反応性の向上が求められそのための材料開発、低温反応系の開発が必要である。

4. 熱再生システム

熱源からの熱移動の性能を決定づける排熱回収機器、高温・冷熱出力機器などは、基本構成は熱交換器であり、一般的な技術課題は共通である。すなわち、大フラックス化のための伝熱抵抗の低減や圧力損失の低減など輸送現象に基づく対策が基本となる。概して、被再生側の熱源温度が低温化するほど排熱回収機器は大きくなるため、車載など実装場所に制限がある場合はコンパクト化、高出力密度化が研究開発課題となる。ケミカルヒートポンプでは化学物質とその反応系については網羅されているが、伝熱抵抗の低減や高出力密度化などの課題に対する材料処理、製造・加工法については新たなアイデアが望まれる。

(6) その他の課題

1. 再生可能エネルギーシステムの熱エネルギー貯蔵

新たな市場として再エネの蓄熱利用が重要である。近年の急速な再エネ普及において再エネの不安定電力の効率的な受入れが重要な問題になりつつある。再エネ先進国のドイツでは再エネが電力供給の30%超を担っているが、二酸化炭素排出係数 [g-CO₂-eq./kWh] は他の欧州各国を上回っている²⁷⁾。PVなどの再生可能エネルギーの変動は秒単位であり変化する。再エネの出力変動を補う火力発電の出力変動運転が火力発電の低効率化を導き、結果としてCO₂排出を増やしている。火力発電の支援が無いと電力の質の低下を招き社会に悪影響が拡散する。このため再生可能エネルギーの大量導入に応じて出力安定化のためのエネルギー貯蔵がいよいよ重要になっている。再エネのP2H2P (電力→熱→電力) を目指しており、今後の普及が考えられる。

再生可能エネルギーの大量導入に応じて出力安定化のためのエネルギー貯蔵がいよいよ重要になっている。とくに国際電力網を持たない日本はドイツより深刻な状況が懸念される。蓄電池が期待されるが高コスト、変動への対応性の限度、低い火災安全性が課題である。これに応じて熱エネルギー貯蔵が近年世界的に検討されている。日本でもこの視点からの研究開発が必要である。

2. 市場競争力のある化学蓄熱システム

熱エネルギー貯蔵の高密度化には化学蓄熱が適当であるが材料、熱交換機能付き反応器の両方の開発が必要である。現行では系が複雑であるので、簡易で低コストの装置開発が、技術的課題である。

3. 排熱源、熱需要の見える化

例えば、産業分野の実態調査で100℃以上の排熱ポテンシャルは0.41EJ/y (13 GW) に相当する。日本再エネ導入量8.4 GWであり排熱ポテンシャルは量的には再エネに対して十分大きい。よって、排熱を中心とした熱エネルギーの有効利用は社会への低炭素化において重要である。しかし、この発生源のデータは2004年以降見られず、熱の回収、融通の見通しをたてるのが困難なままである。また、上記の排熱量は現場の申告を基準としたものであり、工学的にはその潜在量はまだまだ大きいと予測される。よって、公的な組織が主導し、排熱源、熱需要の見える化が重要である。

4. 初期投資の公的資金による助成など

自己熱再生や化学再生発電システムについては、適用したシステムにおいての運用コストの削減にメリットが生まれるため、初期投資のインセンティブがある。一方、被再生の熱源と需要において時間的・空間的なギャップがある場合、蓄熱・熱輸送の技術がセットが必要となる。低エクセルギー率の熱需要に対しては、高エクセルギー率の電力や燃料などを元にした既存システムがあれば容易に供給できるため、運用コストのみでのメリットが出にくく、初期投資の回収期間が長期化する課題がある。冷涼な欧州や北米に比べ、温熱需要の閑散期が長い日本では経済的に不利であり、初期投資の公的資金による助成やGHG排出削減などの環境負荷低減価値を評価した優遇措置など制度面でのサポートも必要と思われる。

(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	◎	↗	●北大、東工大、名古屋大などで蓄熱技術を定期的に報告している。
	応用研究・開発	△	→	●北大などで潜熱蓄熱輸送が検討されている。 ●全体的に応用研究の取り組みは少ない。

2.1 俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●電力網の負荷安定化のためPower to Gasや水からの水素製造、再生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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●電力網の負荷安定化のための再生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	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Warwick大で化学蓄熱の検討が進められている。
		応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●DLRで太陽熱、産業熱の化学蓄熱研究がされている。ZAE、Fraunhofer研究所が再生エネの潜熱蓄熱研究。
		応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●Bosh社が吸着式食器乾燥機、SolTech、InveSor社が太陽熱駆動吸着式冷房装置を市販している。 ●Siemens Gamesa社が再生エネ熱蓄熱→発電システムの基礎プラントを検討している。 ●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、再生エネ電力→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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Perpignon大などで潜熱、化学蓄熱蓄熱研究が良く進んでいる。 ●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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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	△	→	
	スペイン	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●Llleida大、Barcelona大で再生エネ、太陽熱の顕熱、潜熱研究が進められている。
		応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ●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。
	中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●上海交通大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	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ●Seoul国立大などで蓄熱、熱化学水素製造の研究が行われている。 	
	応用研究・開発	△	→		

(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	◎	→	●ケミカルヒートポンプが中心で、北大、東大、東工大、東農工大、千葉大、名大、金沢大、九大などで研究報告が常時ある。
	応用研究・開発	◎	→	●自己熱再生の用途拡大の他、高温化、ケミカルヒートポンプの車載応用などでTherMATを中心に産官学の研究プロジェクトがある。 ●水素キャリアとして有望なアンモニアから水素への転換による化学再生ガスタービンの研究例 ²⁸⁾ もある。
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	○	→	●熱化学再生のガラス溶融炉としてPRAXAIR社のOPTIMELT ²⁹⁾ 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盛ん。 【オーストリア】 ●AEE-INTECが牽引。
	応用研究・開発	○	→	【EU】 ●IEAのHPT TCP Annex 48では産業用ヒートポンプが研究されており、事例集マップが公開されている。 ●Hrizon 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。 【ドイツ】 ●余剰再エネのPower to Heatがトレンドであり、ヒートポンプを介させないケースも多い。 【フランス】 ●EDFなどでヒートポンプによる熱の電化に向けた啓発が盛んである。
中国	基礎研究	◎	↗	●論文数が多く、研究レベルも急速に上げつつある。 ●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月に済州島で開催予定である。
その他の国	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“HeCol” 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の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本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

◎：特に顕著な活動・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 ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ 熱エネルギー利用 (民生熱利用) (環境・エネ分野 2.1.11)
- ・ 地域熱供給 (地域冷暖房) (環境・エネ分野 2.1.13)

参考・引用文献

- 1) 資源エネルギー庁, 「令和元年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2020)」『資源エネルギー庁』, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/> (2020年12月28日アクセス)
- 2) 資源エネルギー庁長官官房総務課戦略企画室「総合エネルギー統計」『資源エネルギー庁』, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2 (2020年12月28日アクセス)
- 3) 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」『国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構』, <http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf> (2020年12月28日アクセス)
- 4) Siemens Gamesa, “Thermal Energy Storage : GWh scale & for different applications”, Siemens Gamesa, <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes> (2020年12月28日アクセス)
- 5) Charles W. Forsberg, et al., “Converting excess low-price electricity into high-temperature stored heat for industry and high-value electricity production”, *Electricity Journal* 30, no. 6 (2017) : 42-52, doi : 10.1016/j.tej.2017.06.009
- 6) H. Takasu et al., “Sodium Ferrite/Carbon Dioxide Reactivity for High Temperature Thermochemical Energy Storage”, *ISIJ Int'l.* 59, no. 4 (2019) : 715-220, doi : 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-182
- 7) 丸岡伸洋, 「凝固相剥ぎ取りによる超高速熱交換潜熱蓄熱システムの開発」『科研費』, <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-16K14543/> (2020年12月28日アクセス)
- 8) 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」『科学技術振興機構』, <https://projectdb.jst.go.jp/grant/JST-PROJECT-17943862/> (2020年12月28日アクセス)
- 9) 愛知製鋼株式会社, 「地球温暖化抑制に貢献する蓄熱システム」『豊田中央研究所』, <https://www.tytlabs.co.jp/cms/news/pdf/press/20191025press.pdf> (2020年12月28日アクセス)
- 10) Takahiro Nomura et al., “Al/Al₂O₃ core/shell microencapsulated phase change material for high-temperature applications”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 193 (2019) : 281-286, doi : 10.1016/j.solmat.2018.12.023
- 11) S. Funayama et al., “Thermochemical storage performance of a packed bed of calcium hydroxide composite with a silicon-based ceramic honeycomb support”, *Energy* 201 (2020) : 117673, doi : 10.1016/j.energy.2020.117673
- 12) 市瀬篤博他, 「第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集」『日本伝熱学会』, CD-ROM
- 13) Y. Numata et al., “Carbon Dioxide Reduction on a Metal-Supported Solid Oxide Electrolysis Cell”, *ISIJ Int'l.* 59, no. 4 (2019) : 628-633, doi : 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-430
- 14) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合, 「産業用高効率高温ヒートポンプの開発報告書アーカイブ」

ブ]『国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構』, http://www.thermat.jp/images/project/archive/H30/heatpump1_30.png (2020年8月7日アクセス)

- 15) 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 https://www.ihi.co.jp/ihi/technology/review_library/review/2013/_cms_conf01/_icsFiles/afieldfile/2020/04/06/2d8fa5ea09656530a6a35269bd0aa586.pdf (2021年2月5日アクセス)
- 16) 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」『日本エレクトロヒートセンター』, http://www.jeh-center.org/asset/00032/monodukurinidenki/vol6_hadanocity.pdf (2020年8月7日アクセス)
- 17) 株式会社三菱総合研究所, 「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)」『株式会社三菱総合研究所』, http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2016fy/000154.pdf (2020年8月7日アクセス)
- 18) 新エネルギー・産業技術総合開発機構他, 「塗布構造吸収器を採用した車載向け小型吸収冷凍機を開発: 2020年1月から商用車での車両評価を開始、実用化を目指す」『新エネルギー・産業技術総合開発機構』, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101274.html (2020年8月7日アクセス)
- 19) SaltX Technology, “World patented nano-technology”, SaltX Technology, <https://saltxtechnology.com/technology/> (2020年12月28日アクセス)
- 20) Malta, “Storing renewable energy in molten salt”, THE MOONSHOT FACTORY, <https://www.x.company/projects/malta/> (2020年12月28日アクセス)
- 21) IEA ECES Annex 36, “Carnot Batteries”, IEA Technology Collaboration Programmes, <https://iea-eces.org/annex-36/> (2020年12月28日アクセス)
- 22) 加藤之貴他, 「熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化」『日本伝熱学会』, <http://www.htsj.or.jp/announcement/1415.html> (2020年12月28日アクセス)
- 23) 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」『国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構』, <http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf> (2020年8月7日アクセス)
- 24) 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量35%削減目指す」『国土交通省』, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/kisya20170130.pdf> (2020年8月7日アクセス)
- 25) 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター, 「Industrial Heat Pumps - Good examples from ongoing Annex」『ヒートポンプ技術マガジン』37巻2号 (2019) : 1-33, https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/material/iea_news/documents/HPT_MAGAZINE_No45.pdf
- 26) D. Sandalow et al., “ICEF Industrial Heat Decarbonization Roadmap”, CEF, https://www.icef-forum.org/pdf/2019/roadmap/ICEF_Roadmap_201912.pdf (2020年8月7日アクセス)
- 27) electricity Map, “Understand and optimize the carbon footprint of electricity”, electricity Map, <https://www.electricitymap.org/map> (2020年8月7日アクセス)
- 28) 野勢正和他, 「CO₂フリー社会の実現に向けた水素燃焼ガスタービン」『三菱重工技報』55巻4号 (2018) : 1-7. <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/554/554180.pdf> (2021年2月5日アクセス)
- 29) M van Valburg et al., “Design and Implementation of OPTIMELT™ Heat Recovery for an

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分

- Oxy - Fuel Furnace at Libbey Leerdam”, 78th Conference on Glass Problems : *Ceramic Engineering and Science Proceedings* 39, no. 1 (2018) : Chapter 8,
<https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781119519713.ch8> (2021年2月5日アクセス)
- 30) LoT-NET, “Low Temperature Heat Recovery and Distribution Network Technologies”, LoT-NET, <http://www.lot-net.org/> (2020年8月7日アクセス)
- 31) Spot View, “Spot View on line...”, Spot View, <http://www.spotview.eu/> (2020年8月7日アクセス)
- 32) I. S. Girnik and Yu. I. Aristov, “A HeCol cycle for upgrading the ambient heat : The dynamic verification of desorption stage”, *Applied Thermal Engineering* 146 (2019) : 608-612, doi : 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.040

2.1

俯瞰区分と研究開発領域
エネルギー区分