

カーボンニュートラルに資する熱の高度利用

～未利用熱の利用可能性を広げる蓄熱・熱輸送～

菅義偉首相は2020年10月26日に行った所信表明演説において、2050年までに温室効果ガス排出量の実質ゼロ（カーボンニュートラル）の実現を目指すと言明した。

カーボンニュートラル実現には、エネルギー消費由来のCO₂排出をゼロに向かわせる必要があり、そのためには熱エネルギー消費におけるCO₂排出ゼロ（熱の脱炭素化）の取組みが不可欠となる。

本レポートでは、熱の脱炭素化に向けた課題を熱利用インフラの観点から取り上げ、熱の貯蔵・輸送に着目して今後注視すべき点について述べる。

1. 熱の脱炭素化のカギを握る未利用排熱利用

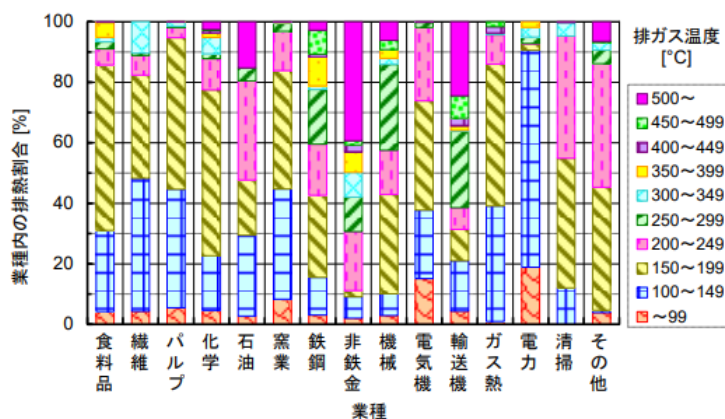
未利用排熱の現状

自動車に代表される輸送機械工業では、主に塗装による 250～300℃未満の排熱と、主に溶解炉による 500℃以上の排熱が多い。500℃以上の排熱は、エネルギーの 2 割強を占め（図 1）、エクセルギー*では約 4 割を占めている。排熱の多くが有効活用されない未利用熱と考えられる。高温の未利用熱は、熱源が脱炭素化されていない限り、その高いエネルギー又はエクセルギーに伴う量の CO₂ 発生を伴う。

したがって、熱の脱炭素化を進めるには、熱源の脱炭素化を進めること、排ガスから CO₂ を回収して放出しないこと、未利用熱を回収して有効利用すること、が重要となる。

*エネルギーからアネルギー（環境温度の熱であり仕事として取り出すことができないエネルギー。無効エネルギー）を除いたもの。有効エネルギー。

図1: 業種別・温度帯別 排ガス熱量構成割合



出所: 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)」

<http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf>

将来にわたって重要な未利用熱の回収・有効利用

熱源の脱炭素化については、電化（電源の脱炭素化が前提）のほか、水素、アンモニアや合成燃料（CO₂と水素を合成した燃料）等への熱源代替の取組みがある。また、排ガスからCO₂を回収して放出しないことについては、オンサイトでCO₂回収する取組みが始まっているほか、将来は排ガスパイプライン等によりオフサイトでCO₂回収するという考えも出てきている。いずれの動向も重要であるが、別の稿で改めて課題及び将来展望を検討したい。

本レポートでは、未利用熱の回収・有効利用を取り上げる。熱源の脱炭素化、排ガスからのCO₂回収のどちらが進展しても、エネルギー消費の大幅削減に寄与する未利用熱の回収・有効利用は将来にわたって重要であり、また、エネルギー消費削減は既に喫緊の課題と考えられるためである。

2. 未利用熱の需給ギャップを解消する熱利用インフラ

エネルギー利用は需要と供給が一致して実現する。しかし、需要に応答して生じさせるわけではない未利用熱には、需要との間に温度、時間、場所のギャップが存在する。この需給ギャップの解消が課題となる。

表1は、脱炭素化を実現する電力と熱のエネルギー利用の流れである。電力では変動性再生可能エネルギー（太陽光発電や風力発電）の大量導入に向けてインフラの見直しが進められているが、熱でも同様にインフラの見直しが不可避と考えられる。従来は高いエネルギー密度を持つ化石燃料というエネルギーキャリアを前提にすればよかったが、今後は未利用熱を含む各熱源の導入に向けて熱利用インフラを検討する必要がある。

以下では、未利用熱の需給ギャップを解消する熱利用インフラについて検討する。

表1: 脱炭素化を実現する電力・熱のエネルギー利用の流れ

	①つくる	②ためる	③はこぶ
電力	<ul style="list-style-type: none"> 原子力 再エネ 化石燃料(発電時CCS付き) 	<ul style="list-style-type: none"> 揚水発電 蓄電池 その他(キャパシタ、超電導電力貯蔵(SMES)、圧縮空気等) 	<ul style="list-style-type: none"> 送配電網
熱	<ul style="list-style-type: none"> 未利用熱 太陽熱等の再エネ熱 バイオマス 水素、アンモニア(H₂、NH₃) 合成燃料 化石燃料(使用時CCS付き) 	<ul style="list-style-type: none"> 蓄熱材を用いた蓄熱システム(貯湯槽等含む) (木質チップ等) (水素、アンモニア) (合成燃料) (化石燃料) 	<ul style="list-style-type: none"> 熱導管 蓄熱材のトラック輸送 木質チップのトラック輸送 ガス管、ガスボンベ、タンクローリー等

出所: テクノバ作成

① 温度のギャップを解消する（再利用できる熱をつくる）

熱は生成すると、同じ温度の熱として再利用することができない。排熱は熱機器投入前の熱より低温になっているからである。この温度ギャップのために、排熱は需給が一致せず捨てられ未利用熱となる。温度の需給ギャップを解消するには、排熱の昇温か、より低い温度の熱需要への供給を考えることになる。前者に自己熱再生、後者に熱のカスケード利用がある。

自己熱再生は、熱媒体（蒸気等）を断熱圧縮することで昇温し熱エネルギーを再生する。温度を戻せるので、熱の循環利用も可能となる。圧縮機の電力は必要だが、追加加熱する場合に比べ大幅な省エネになると考えられている。ただし、適用温度は現状 200℃を超える程度である。

熱のカスケード利用は、熱エネルギーを高温から低温まで順次利用する。個別に供給し個別に捨てる熱利用の非効率性を解消し、温度低下した熱を有効利用できる。

②時間のギャップを解消する（熱をためる）

熱は生成すると、時間が経つにしたがい散逸する。時間の需給ギャップを解消するには、電力等別のエネルギーへの変換か、蓄熱によるエネルギー貯蔵を考えることになる。前者には蒸気タービン、バイナリーサイクル発電や熱電変換があり（電力をすぐ使わずためる場合は化学エネルギー（蓄電池等）等にさらに変換する）、後者には種々の蓄熱材への蓄熱がある。

電力に変換し電力需要に充てるのは一つの有用な方向である。一方で、変換のエネルギー損失等を考慮すると、貯蔵したエネルギーを再度熱として利用する場合は蓄熱が望ましいと考えられる。蓄熱については次章で述べる。

③場所のギャップを解消する（熱をはこぶ）

上述の理由により、熱は蓄熱して蓄熱媒体を輸送しない限り、需要地まで運ぶことができない。パイプライン（熱導管）を利用できる場合は、蓄熱媒体（蒸気、温水等）を熱導管に沿って流すが、熱導管を利用できない場合は、蓄熱材に蓄熱してトラック等で輸送することになる。

熱導管敷設は国内では事例が少なく、対照的に欧州、特に寒冷地で熱導管は広く普及している。例えばドイツでは、化学工場から出る熱を 2km 以上離れた住宅地に供給する事例がある*。国内でも従来から熱導管敷設推進の議論があるが、既存街区で熱導管を敷設する難しさや、行政の規制が障壁となって敷設が進まないことが指摘されている。また、次のような課題もあるため、ある程度の規模がないと運用が難しい側面がある。

- ・昼夜で大きく異なる熱需要に排熱源だけで対応することが難しいため、多くの場合補助的な熱源が必要
- ・熱損失が大きいため、末端で利用可能な温度を維持するために大量の熱媒体循環が必要

現状では、熱導管の敷設推進は、政府・自治体による積極的な政策がなければ取組みが難しいと考えられる。

*ハンブルクでのアウルピス社の事例。銅生産の化学プロセスから発生する熱を2km以上離れた住宅に24時間熱供給する。同事業以前は、温度を30℃まで下げた後にエルベ川に放出していた。

3. 未利用熱利用を実現する蓄熱技術

本章では、熱の貯蔵・輸送手段として今後期待される蓄熱技術を取り上げる。蓄熱材開発の近年の研究開発事例を取り上げ、未利用熱利用の可能性を検討する。

技術開発と熱輸送事業化の動向

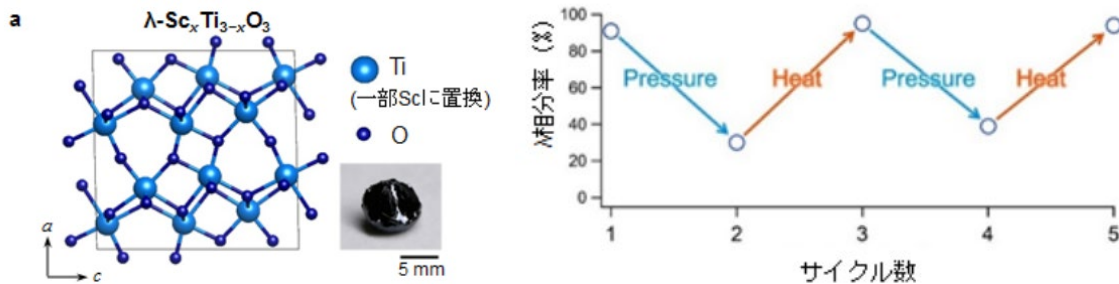
2020年発行の「工場のCO₂対策を巡る最新動向」では、200～300℃の中高温未利用熱の熱輸送を目指すタテホ化学工業（東京都千代田区）やトヨタによる水酸化マグネシウム／酸化マグネシウム系化学蓄熱材の開発事例、及び東京電力エナジーパートナー等によるHAS-Clay（非晶質アルミニウムケイ酸塩と低結晶性粘土の複合体）を用いた熱輸送（100℃程度）の事業化事例に言及した。他にも事業化事例として、三機工業（東京都中央区）による酢酸ナトリウム三水和物や糖アルコール類のエリスリールを用いた熱輸送（200℃未満）がある。

このように、概ね100℃～300℃の温度帯の蓄熱・熱輸送の開発・事業化が進展している。一方、100℃以下の低温域や300℃以上の高温域の実用化事例では、エネルギー密度が低い顕熱蓄熱が広く用いられている。顕熱蓄熱は水、砕石、レンガ、コンクリート等の温度変化を利用した蓄熱で、エネルギー密度が低い。したがって大容量の蓄熱・熱輸送が難しいため、顕熱蓄熱によらない蓄熱材の開発・実用化が求められている。そこで次に、低温域・高温域それぞれの近年の研究開発事例を取り上げる。

■ 低温域（100℃以下）

東京大学の太越慎一教授らの研究グループは 2020 年 7 月 2 日、五酸化三チタンからチタンの一部をスカンジウムに置き換えた、38～67℃の熱を永続的に蓄えることができる長期蓄熱セラミックスを発見したと発表した(図 2)。圧力をかけると結晶構造が変わって放熱する固体-固体相転移を利用した蓄熱材で、圧力によって相転移を制御できる。吸熱した後に極低温まで温度を下げても、圧力を加えるまで相変化せず熱が逃げないという。

図2:スカンジウム置換型ラムダ五酸化三チタン($\lambda\text{-Sc}_x\text{Ti}_{3-x}\text{O}_5$)の蓄熱・放熱特性



出所: 東京大学大学院理学系研究科プレスリリース「発電所・工場からの熱水排熱を蓄える長期蓄熱セラミックスの開発に成功」(2020年7月2日)
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2020/6908/>

工場等の熱水排水に伴う未利用排熱の利用可能性が広がると期待される。ただし、低温域ではヒートポンプによってエネルギー効率よく熱を生成することもできるため、より必要性が高いのは高温域での蓄熱技術となる。

■ 高温域（300℃以上）

高温域の蓄熱で注目されているものに、高温潜熱蓄熱材料(相変化物質(Phase Change Material; PCM))がある。PCMの相変化潜熱を利用して蓄熱するもので、高い蓄熱密度が期待できる。

300℃前後では硝酸塩や水酸化物(硝酸ナトリウム、硝酸カリウム、水酸化ナトリウム又はそれらの混合塩)が、500℃以上では炭酸塩等のほか金属・合金系のPCMが提案されている。

北海道大学の能村貴宏准教授によれば、金属・合金系は腐食することが課題だったが、金属・合金のコアにセラミックスシェルをコーティングする技術が開発されたことでクリアされたという。金属・合金系は高い放熱出力を持つため、熱需要への早い応答が可能。電力をためる蓄電池に対し熱をためる「熱バッテリー」というコンセプトがあり、顕熱蓄熱材で大規模な敷地のある場所で一部実現しているが、高温・高出力の蓄熱材の開発・実用化によって、小規模なスケールでも実現する可能性がある。

未利用熱利用と熱の脱炭素化

1章で述べたとおり、輸送機械工業では高温の未利用排熱が多い。高温の熱は高温のまま利用すればエネルギー損失が少ないため、熱のカスケード利用を行う際もできるだけ高い温度から利用できることが望ましい。このためには熱源温度に対応した高温の蓄熱システムが求められる。

未利用熱は、工場排熱だけでなく冷暖房等の排熱、さらに河川や地中の温度差エネルギーもあって、ポテンシャルが大きい。こうした未利用熱を回収・利用することは、エネルギー消費の大幅削減に寄与する。未利用熱は、熱の貯蔵・輸送に化石燃料というエネルギーキャリアに頼れない。熱の脱炭素化のためには、500℃以上もの高温から100℃以下の低温まで熱を有効に使い切ることができる熱利用インフラが必要であり、そのためのキーとなる蓄熱・熱輸送技術を注視すべきと考えられる。

まとめ

- カーボンニュートラルには、熱の脱炭素化が必要
- 輸送機械工業では、500℃以上の高温排熱が多く、熱利用の高度化には未利用排熱利用が課題。高温は高温のまま利用することが望ましく、有望な取組みの一つに金属・合金系PCMの蓄熱がある
- 未利用排熱を使い切るためには熱のカスケード利用が有効と考えられるため、高温から低温までの各温度帯における熱利用、蓄熱・熱輸送技術を注視すべき



参考資料

タイトル	著者・編者	出版元	出版年月
蓄熱システム/蓄熱材料の実用化技術	小林敬幸ほか	S&T 出版株式会社	2018.1
産業分野の排熱実態調査報告書	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	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合	2019.3
「発電所・工場からの熱水排熱を蓄える長期蓄熱セラミックスの開発に成功ー熱水からの熱エネルギーを吸収し、圧力を加えて放出ー」 東京大学大学院理学系研究科・理学部 2020年7月2日プレスリリース	大越 慎一・中村 嘉孝・東正樹・酒井 雄樹	東京大学大学院理学系研究科・理学部	2020.7
「蓄熱を利用する蓄エネルギー技術「カルノーバッテリー」と最新高温用蓄熱材料の紹介」 季報エネルギー総合工学第43巻第3号	能村貴宏	一般財団法人エネルギー総合工学研究所	2020.10
「蓄熱発電の可能性と世界の開発計画」 季報エネルギー総合工学第43巻第3号	岡崎徹	一般財団法人エネルギー総合工学研究所	2020.10
2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略	経済産業省	経済産業省	2020.12

電化の進展と蓄熱発電

Column

経済産業省が2020年12月25日に策定した「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では、熱需要に対する対策として「電化」、「脱炭素燃料」、「化石燃料からのCO₂の回収・再利用」が挙げられているが、中心は電化とされている。電化には、電気加熱（誘導加熱、マイクロ波加熱、アーク・プラズマ加熱、赤外線加熱等）や、電気ヒートポンプがある。

同戦略では電力部門の脱炭素化は「大前提」とされており、その主たる手段である再エネ大量導入に対応する電力インフラ整備が進められている。再エネ導入の主要課題は太陽光発電や風力発電の出力変動で、対応策としては電力系統増強やエネルギー貯蔵等がある。

欧米では従来、再エネ導入増は電力系統増強で対応できると考える傾向があったが、近年はエネルギー貯蔵も重視する姿勢が明確になってきた。その中で、電力のエネルギー貯蔵手段として蓄熱もあり得るとの認識が高まっている。

Siemens Gamesa（ドイツ）の実証事例では、風力発電で発電した電力を一時的に熱としてエネルギー貯蔵し発電量の変動を吸収、電力システムの安定化に役立てることを目的としている（図3）。こうした方式は蓄熱発電と呼ばれる。電力需要が高まったとき、蓄えた熱を電力に再変換して供給する。

エネルギー供給全体における再エネ電力の比重が高まり続ける中で、蓄熱発電は、変換のエネルギー損失を差し引いても、エネルギーシステムを安定化する仕組みとして注目されている。エネルギー貯蔵手段には蓄電池や水素もあるが、材料次第で蓄熱発電がコスト優位性を持つとされる。

図3のシステムで採用されているような蓄熱密度が低い岩石では大規模な設備にならざるを得ないが、本文で取り上げた高密度の蓄熱材料の実用化が進めば、より小規模なスケールの工場敷地等でも蓄熱発電の実現が進む可能性がある。

図3: Siemens Gamesaの蓄熱発電の概念図



出所: Siemens Gamesa
<https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes>

本レポートに関する問い合わせ先:

株式会社テクノバ エネルギー研究部 藤本 峰雄
 E-mail: [fujimoto\[a\]technova.co.jp](mailto:fujimoto[a]technova.co.jp)
 Tel: 03-3508-2280