

※ 本仮訳は、駐日英国大使館主催ウェビナーシリーズのために用意されたものです。
原文をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

THE ROYAL SOCIETY

気候変動：科学と解決策 | 報告 3

低炭素加熱・冷却 世界で最も重要なネットゼロの課題の一つを克服 する

概要

加熱・冷却（熱エネルギー）は、脱炭素化の優先課題とすべきである。なぜなら、加熱・冷却は世界最大のエネルギー最終用途形態であり、電力および輸送との比較において最大の炭素排出源だからである。全世界のすべての地域において、住宅、商業施設、工業施設での加熱・冷却用にさまざまな低炭素ソリューションを利用することができる。その中には導入されたばかりでスケールアップを要するものもあれば、まだ実証段階で集中的な研究開発・導入（RD&D）が必要なものもある。この報告書では、エネルギー効率の向上、化石燃料による加熱・冷却に代わる技術的選択肢の採用、熱エネルギーの貯蔵・輸送におけるイノベーションを通じて、排出を削減するための道筋を検討する。

知見

- 一般家庭、工業、商業施設での加熱・冷却は主たる二酸化炭素排出源である。よって、ネットゼロ戦略において、この排出源に特化した独自の目標を設け、優先的に取り組む価値がある。
- 各国の状況と受け継がれてきたものはそれぞれ異なるため、加熱・冷却による二酸化炭素排出を低減するためにはさまざまなアプローチが必要となるが、国際的な協力とネットワーク形成を広げる余地も存在する。
- 断熱、熱反射その他の手段を改良することで、建物の冷暖房に使用するエネルギーを減らすことを、あらゆる脱炭素化計画の第一の目標とすべきである。
- 化石燃料ベースのシステムと比べて、低炭素加熱・冷却方式の多くはまだ初期の段階にあり、相対的なコストパフォーマンスをテストするために数多くの実証と導入を必要とする。
- 低炭素加熱・冷却全般にわたる研究開発・導入の主な分野としては、ヒートポンプ、電気ヒーター、地域システム、再生可能エネルギー熱、水素が挙げられる。
- 必要な熱エネルギーをある場所で生成し、別の場所で貯蔵し使用先に輸送する。その場所で電気から熱への変換（またはその逆）が行われる場合もある。そのような加熱・冷却の効果を証明する新しい方法を開発するための興味深い選択肢が登場しつつある。

1. 加熱・冷却と気候変動

全世界の熱の約 50%が工業部門で使用される。さらに 46%は建物で消費される。

熱・冷熱エネルギー（総称して「熱エネルギー」）は、空間、水、調理、工業プロセス、空調、冷凍のための加熱・冷却を提供する。この部門は、世界の最終用途エネルギーのほぼ半分、そしてエネルギーに関連する世界の二酸化炭素（CO₂）排出量の 40%を占める¹。熱供給の中心は化石燃料であり、バイオマスを除く再生可能エネルギーは世界需要の約 10%を満たすに過ぎない²。全世界の熱の約 50%が工業部門で使用される。46%は建物、主に室内暖房と給湯に使用される。国際エネルギー機関（IEA）の予想によれば、効率改善、化石燃料の代替、発電の脱炭素化の導入により、2030 年までに室内暖房による排出を 30%削減できる³。

「特段の対策を講じない（BAU）」シナリオの場合、2010～2050 年にかけて住宅と商業ビルの冷暖房は約 80%増加すると予想される⁴。気候変動により暖房の予想需要は低減し、冷房の予想需要は増大すると考えられる⁵。2060 年までには室内暖房より室内冷房のほうが世界のエネルギー需要に占める割合が多くなるとする予想もある⁶。

電力は集中化された大型発電施設と配電システムを使用するが、これと違って熱エネルギーの生成と用途は多岐にわたり、高度に分散されているため、冷暖房の脱炭素化は難しい。冷暖房は、（暖炉で）火を焚くという単純なものからガス焚きボイラーや空調ユニットまで多様な方法で供給される。一般家庭では独立型の製品として、またオフィス街や工場では大型のシステムで設置されるのが一般的だが、冬期はガス暖房、夏期は電気冷房というふうになんらかの異なるソリューションが同時に使用されることが多い。熱の生成と使用は、家庭用ボイラーから工業用高温熱に至るまで、同一の場所で行われる傾向にある。

ただし、地域熱供給（熱を一カ所でまとめて生成し、導管を通じて建物に供給する）は例外で、北欧ではほとんどの熱がこの方法で家庭に供給されている。オーストリアやデンマークなどの国では、低温熱が導管により最大 80 km 離れた場所に送られている⁷。

工業用の熱生産は、世界の CO₂ 排出量の 20%を占めると推定される⁸。工業でどのような加熱方式を選ぶかは、工程パラメータ（制御、温度、清浄度など）、必要な熱の量、コストなど、いくつかの要因によって決まる。例えば、溶解、乾燥、焼き付け、クラッキング（分子の分解）、再加熱などである。工業生産では一般に電力、化石燃料またはバイオマスを使い、必要な時に必要な場所で熱を生成する。従って、さまざまなゼロカーボン加熱法が必要とされる。

加熱・冷却の分野の低炭素移行は、新しい技術とインフラのイノベーション、それらをスケールアップするための投資、星の数ほどある家庭用・工業用ユニットの転換を必要とする。

2. 研究・開発・導入に必要なアクション

熱の問題は、ネットゼロへの道を阻む厄介な障害のように見えるかもしれないが、世界のどの地域にも、使用可能な多数のソリューションが存在する。その中にはすでに確立されてはいても依然としてクリアすべき課題があるものもあれば、まだ初期の段階のものもある。これらのソリューションの例としては、熱エネルギーの高効率利用、加熱・冷却用代替ゼロカーボン技術、熱の貯蔵と熱源から使用地点への移送のための新技術の使用などが挙げられる。

2.1 熱を失わないために — エネルギー効率の向上

熱を脱炭素化する一番簡単な方法は、エネルギー効率向上、断熱強化、そして排熱回収・利用を通じて熱の使用量を減らすことである。多くの国で、床面積当たりの住宅熱強度（エネルギー消費量）が著しく改善されている。フィンランド、フランス、ドイツ、韓国では 2000 年以降、30%以上の削減が見られる⁹。

これまでの取組みの多くは住宅と商業ビルに重点を置いてきた。工業プロセスとエネルギー変換プロセスによる熱損失への取組みはあまり効果を上げておらず、重要な研究分野となっている。

2.2 炭素を出さない加熱・冷却

2.2.1 家庭での加熱・冷却の脱炭素化

エネルギー効率の向上によって需要を低減させることは可能だが、家庭がさらに求めるゼロカーボン加熱・冷却を提供するためには新たな選択肢が必要である。

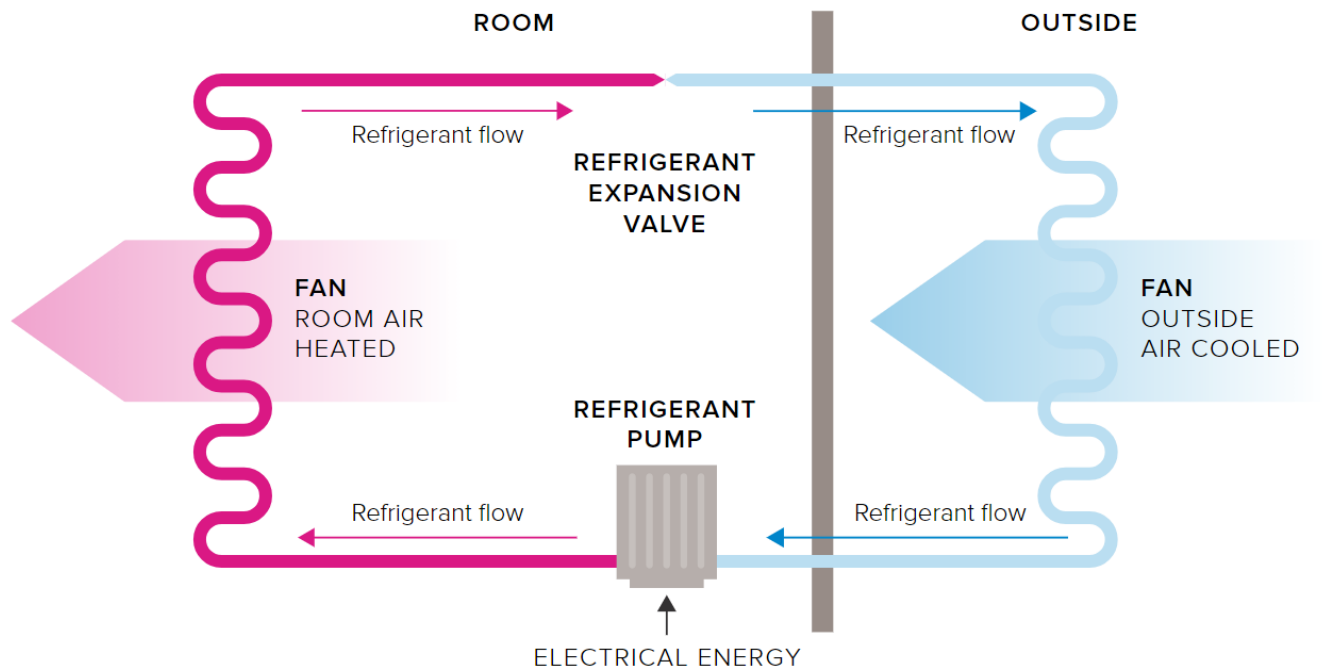
加熱の電化

電気抵抗加熱器は世界の多くの場所で今も使われている。低炭素電力で供給されるならば、低コストで設置できる低炭素の選択肢になりうる。ただし、さらに幅広く利用されるとすれば、新たな発電容量と電力網の強化が必要だろう¹⁰。最新の蓄熱ヒーターで、熱エネルギーの貯蔵・放出にセラミックレンガを使用するもの（Dimplex Quantum ヒーター等）や複合相変化材料モジュールを使用するもの（Jinhe PCM ヒーター等）は、オフピーク電力や余剰電力を使用することで電力網補強の必要性が低減されるため、費用対効果の高い選択肢になりうる¹¹。

代案として、低炭素電力で駆動するヒートポンプを使用することもできる。主として、熱を生成するのではなく移動させる仕組みであるため、直接電気加熱より消費電力が少ないからである¹²。ヒートポンプは基本的に冷蔵庫と逆の働きをする（図 1）。似たようなテクノロジーを使用するが、空間を冷却するのではなく暖める。蒸発器が建物の外の大気、水または地面から低温の熱を集め、圧縮プロセスにより凝縮器（コンデンサー）内でその熱を昇温し、建物の暖房に用いる。ヒートポンプの性能は、成績係数（COP）と呼ばれるパラメータで測定する。これは供給される加熱・冷却能力と消費電力量の比率である。COP は一般に 2~5 で、COP が高いほど効率が良い。リバーシブル型ヒートポンプでも空調機で冷房が行えるが、住宅で夏期にこの方法を用いた場合、電力使用量が増加する可能性がある。

図 1

空気熱源ヒートポンプの図解。冷媒液を使って熱が建物の外から中に運ばれる。



例えば、米国では現在、新築住宅の約40%がヒートポンプを備える。

ヒートポンプは有力な低炭素ソリューションとして広く認識されている。例えば、英国は2030年までに550万基¹³、2050年までには可能性として2,100万基の利用を見込んでいる¹⁴。2019年の時点で、ヒートポンプは全世界で住宅用熱需要の5%を満たすに過ぎない状態だったが、一部の地域では導入がハイペースで進んでいる。例えば、米国では現時点で新築住宅の40%がヒートポンプを装備し¹⁵、EU市場では年間約12%の割合で導入が増え続けている¹⁶。米国の気候が穏やかで電力料金が安い地域では、空気熱源ヒートポンプのコストパフォーマンスがガスボイラーに近づきつつある¹⁷。逆に、寒冷・高湿な条件下では、空気熱源ヒートポンプを使用することが難しい。熱が最も必要とされる時期に効率が最低になるためである¹⁸。調査の結果、電力網を大幅に拡充する必要があることに加えて、初期購入コストと電力価格が最大の障害になっていることも判明した¹⁹。

研究者たちは、性能を高める方法として、新しいコンデンサーの考案²⁰や、空気熱源ヒートポンプ用ターミナルとして低温度差ファンコイルユニットを使用する方法²¹などを検討している。

天然ガスの代替

ガス供給網の天然ガスを低炭素または炭素ゼロの代替ガスに切り替えることは、インフラの観点でも非常に魅力的である。

一つの過渡的な選択肢として、天然ガスと、有機廃棄物から生成される再生可能バイオメタンを混合する方法がある。欧州は再生可能バイオメタンを世界で最も多く生産している。現時点ではガス供給の構成のごく僅かな部分を占めるにすぎず、5,140億立方メートル(514 BCM)の規模を持つ市場の中で、2019年の供給量は2 BCMにとどまるが、調査結果によれば2030年にはガスの3%を供給するまでに成長する可能性がある²²。

²³。

一部の国で検討されている低炭素型ガス焚き暖房は、電気分解を使って再生可能エネルギーから生成される「グリーン」水素、または二酸化炭素回収・貯留（CCS）を使って天然ガスから生成される「ブルー」水素でガス供給網の天然ガスの一部または全量を代替するというものだが、この選択肢にはいくつかの課題がある。現時点でグリーン水素とブルー水素のコストは、化石燃料由来水素に太刀打ちできない²⁴。ボイラー交換に高額な費用がかかる。例えば、英国では一世帯当たり 2,000～4,000 ポンドに達すると推定される。同時に、水素は従来型の鉄・鋼鉄製ガス配管の脆化を招くおそれがある²⁵。ただし、これらのガス管を水素に適したプラスチック製ガス管に交換することは可能である^{26, 27}。安全面での一般市民の受容も検討する必要がある。2020 年代の実証プロジェクトで、こうした課題が克服可能かどうかを示さねばならない。英国では、数百万世帯に 100% 水素を供給する「H21」と呼ばれる大規模プロジェクトが計画されている。オランダの小規模な「アーメラントの水素・天然ガス混合」プロジェクトでは、配ガス網にグリーン水素を最大 20% 混合する実証を行った²⁸。（「報告 4：ネットゼロの課題に対処するために水素とアンモニアが果たす役割」を参照。）さらに、水素は熱源供給システム（CHP）の燃料電池でも使用できる。日本では、国家水素基本戦略により、2030 年までに家庭用 CHP ユニット（エネファーム）530 万台の設置が計画されている²⁹。これにより分散型発電と同時に熱が利用できる。

太陽熱利用システム

EU や中国など一部の地域では、化石燃料焚きボイラーを部分的に代替するために中温（80～150℃）の太陽熱利用システムが使われている。太陽熱利用システムは、家庭の温水用小規模設備から集中型システム用の大規模太陽熱プラントまで幅広い。電力消費量を 30% 以上削減する可能性があることから、冷却回路に太陽熱パネルを使用するソーラークーリング（太陽熱利用冷房）も同様に普及しつつある³⁰。

集中型加熱・冷却

給湯と暖房または冷房のための集中型または地域熱供給は、多くの国で用いられており、特にすでに導入され、脱炭素化が可能な場合は低炭素のものが用いられている³¹。これらを都市部の新築住宅に装備することも考えられる。UAE では地域冷房が冷房負荷の 23% を占める³²。熱電併給ユニットを使用する供給網は、低炭素「第五世代」型に道を譲りつつある。第五世代では、必要に応じてヒートポンプで低熱を昇温し、例えば、スーパーマーケットでの冷却が住宅街区に熱を供給するというふうに、加熱と冷却を釣り合わせる³³。

集中型加熱は複数のゼロカーボン供給源を使用する。地球の地殻からの熱を利用する地熱エネルギーが全世界の加熱に占める割合はごく僅かだが、エルサルバドル、ニュージーランド、ケニア、フィリピンなど、火山活動が活発で温泉が豊富な国では地熱が役に立っている³⁴。アイスランドでは、2016 年の時点で、地熱エネルギーが、電力の約 27% を含め、一次エネルギーの約 65% を供給していた³⁵。原子力発電所は大量の熱を発する（一般に約 3.4GW）。この熱は従来、発電に使われている。廃熱（約 60%）は地域熱供給に使用できる。また、生成された熱（300～800℃ になる）を大規模地域熱供給に直接使用したり、工業プロセス用に使用したりできる³⁶。

表 1 は、英国の典型的なガスセントラルヒーティング付き住宅（3 寝室）で使用されるゼロカーボン家庭用暖房設備のおよその設置費用、エネルギー源、長所、短所を示したものである。

UAE では地域冷房が冷房負荷の 23% を占める。

表 1

家庭用暖房システム設置費用³⁷、エネルギー源、長所、問題点。

暖房のタイプ	概算設置費用	エネルギー源	長所	問題点
ヒートポンプ	10,000 ポンド程度	クリーン電力、屋外熱エネルギー	電力のエネルギー消費効率（COP）が >1 。熱出力 1kWh 当たりの消費電力が少なく、既存の電力供給網を使用。必要とされる補強／新規発電能力が小さい。	地中熱源／水熱源ヒートポンプの場合は大きな面積が必要。大気の手度が低いと空気熱源ヒートポンプの性能が落ちる。得られる温度が比較的低い。家庭用セントラルヒーティングシステム用としては変更が必要。
水素ボイラー	3,000 ポンド程度	化学エネルギー（グリーン水素）	既存ガス供給網とセントラルヒーティングシステムの部分利用（新しいボイラーが必要）。	大規模なグリーン水素供給、高圧輸送／導管の増大が必要、材料互換性の問題、安全性と市民の受容の問題。
蓄電ヒーター	2,000 ポンド程度	クリーン電力エネルギー	既存の電力網を使用する既知のテクノロジー。電気負荷のタイムシフト（時間をずらすこと）に使用できる。	柔軟性／即時性に欠ける。セントラルヒーティングシステムの交換を要する場合がある。
電気ヒーター（蓄電なし）	～1,000 ポンド程度	クリーン電力エネルギー	既存の電力供給網を使用し、家庭の屋内配線の変更が最小限で済む既知の単純なテクノロジー。	電力供給にさらなる負荷が加わる。発電能力の増強と配電網の補強が必要となる可能性が高い。需要急増が生じる。

2.2.2 工業加熱の脱炭素化

工業において化石燃料使用を代替できるかどうかは用途によって大きく異なる。主な低炭素の選択肢を以下に挙げる。必要なエネルギーの大きさから考えて、重工業で使用する熱の脱炭素化は特に困難である。一つの道筋として、化石燃料を使い続けながら、二酸化炭素回収・貯留（CCS）で CO₂ 排出の一部を除去する方法がある。（「報告 5：二酸化炭素回収・貯留」を参照。）

低炭素電力

低炭素電気加熱技術は十分に発達しているが、他の化石燃料代替技術（下記参照）は概ね実証のごく初期段階である。電気加熱は制御が容易な成熟した技術であり、温度範囲が広い。例としては、くず鉄精錬用誘導炉が 1,000°C 以上で稼働する製鋼用アーク炉が挙げられる。ただし、セメント、ガラス、セラミック生産などの用途で電気加熱を使用する方法は、他の方法と比べてコストがかかる可能性がきわめて高い。エネルギーの価格が今後も重要となる。

水素

低炭素水素は超高温で燃焼するため、鉄鋼、セメント、ガラス、化学薬品などの工業に適した熱源になりうる。しかしながら、水素は工業加熱による排出を削減する技術的可能性を持つとはいいながら、CO₂ 価格が CO₂ 換算トン当たり 100 ドル

(\$100/tCO₂) に達したとしても、バイオエネルギーに代わる技術としてはコストがかかりすぎる³⁸。（「報告 4：ネットゼロの課題に対処するために水素とアンモニアが果たす役割」を参照。）

バイオマス

バイオマスは高温加熱に使用可能だが、資源の可用性とコストの面で制約がある³⁹。全世界のセメント生産用熱エネルギー総量の 6% をすでにバイオマスが供給している⁴⁰。バイオマスは、製糖、木材加工、パルプ、製紙など、熱需要の充足にバイオマス残渣を使用できる産業でも使われている。バイオマスは、CCS が導入されていない限りゼロカーボンではなく、せいぜい低炭素としか見なせない。

代替的熱源

太陽熱技術はすでに、繊維製品、食品、製紙などの産業において、250°C 以下の乾燥・洗浄・殺菌などの機能に小さな規模で使用されている⁴¹。しかし、初期段階の商業プロジェクトは見られるものの、製造プロセスの太陽エネルギー利用加熱は依然として概ね研究・実証段階である⁴²。現在、全世界の研究者たちが、超高温製造プロセス用の集光型太陽熱発電（CSP）を研究している。例えば、欧州では、ある企業がおよそ 500 枚の可動鏡を使ってセラミック粒を最大 1000°C に熱する技術を開発した。イタリアのあるパスタ工場パイロットプラントが建設されている⁴³。上述の通り、原子炉の熱も、水素生産のような化学プロセスを直接促進するために使用できる。

比較的低温の加熱では、家庭用だけでなく工業用としてもヒートポンプを応用できる可能性がある。研究の結果、製紙、食品、化学薬品といった産業で使用できる可能性があることが明らかになった⁴⁴。もう一つ

の低温加熱法は、風力熱発電（WTES）を使用することにより、風力エネルギーを直接加熱に利用する方法である。WTES は制動装置のような機構により、回転エネルギーを熱に変換する。

2.3 未来の熱エネルギー貯蔵・輸送・供給 — 熱エネルギーの時間的・空間的移动

暖房と工業加熱の方法としては、今後も主に消費される場所で加熱・冷却を行うという様式が続く一方、熱・冷熱が生成された時と場所から、必要な時と場所に移す可能性を検討する研究が急速に広がっている。工業プロセスでどうしても生じてしまう廃熱や余剰熱を回収し、化石燃料による加熱の代替に使用できる場面では、これは特に重要である。

廃熱は回収して直接、またはヒートポンプで昇温した上で使用することができる。現在、全世界で工業廃熱を再利用するプロジェクトが進行中である⁴⁵。例えば、スウェーデンでは住宅街への地域熱供給の 9% が工業廃熱回収で賄われている⁴⁶。英国が助成するプロジェクトでは、相変化材料

（PCM）を用いて「尖頭」負荷発電所の廃熱を貯蔵し、地元の建物への熱供給に使用する⁴⁷。Tata Steel 社はスウォンジー大学と協力し、同社のポータルボット製鋼所の廃エネルギーを回収・再利用している。これにより、毎年 100 万トン以上の二酸化炭素排出をオフセットできる可能性がある⁴⁸。

2.3.1 熱エネルギーの貯蔵

熱エネルギー貯蔵とは、熱または冷熱の形でエネルギーを貯蔵し、時間が経ってから（数時間後、数日後、数週間後あるいは数か月後に）加熱・冷却や発電に利用できるようにすることである。システムは、よく知られている家庭用温水タンクや蓄熱ヒーターから、現在実証段階の斬新な PCM、研究が進められている熱化学的方法まで幅広いが⁴⁹、社会的、文化的な障壁がこの技術の導入に影響を与える可能性がある⁵⁰。以下に、多数の選択肢の中からいくつかの例を挙げる。

ある企業が、
およそ 500 枚
の可動鏡を使
ってセラミッ
ク粒を最大
1000°C に熱す
る技術を開発
した。

ドイツでハンブルグの電力網を支援するために蓄熱 (130MWh) / 蓄電 (30MW) の高温岩貯蔵所が建設された。

化学反応による熱の貯蔵

熱エネルギーは可逆的化学反应によって貯蔵することができる。例えば、化石燃料に近いエネルギー密度を持つ金属鉄を輸送し、次に空気や水などの物質を使って酸化させて熱を生じさせることが可能である。これは、エネルギー密度が高く、低コストのソリューションになりうる⁵¹。工業用に酸化させた鉄は水素を使って再生できる。こうして脱炭素のサイクルが生まれる可能性がある (図 2)⁵²。

太陽熱の貯蔵

近年、超大型の集光型太陽熱発電施設が造られているが、これらの施設は電力を生産するだけでなく、十分な量の熱も貯蔵する。例えば、アリゾナ州のソラナ発電所 (発電容量 280 メガワット) は、長さ 400 フィートの鏡 3,000 枚を備える。これらの鏡を使って、伝熱流体 (HTF) を満たした管に太陽光を反射させると HTF は 400°C 前後まで熱せられる。一部の HTF は発電用蒸気生産に使われる。残った HTF を熔融塩貯蔵タンクに流し込むと、タンクが熱を保つ。太陽光がないときにこの熱を電力に変換する⁵³。

カルノーバッテリー

「カルノーバッテリー」は、再生可能発電の余剰エネルギーを岩石、相変化材料または熔融塩中に熱の形で蓄える。この技術は、ポンプ式蓄熱または電熱式蓄電とも呼ばれることもある。この熱は必要なときに再び電力に戻すことができるので、再生可能エネルギー主体の電力網において電力を貯蔵するための選択肢になる。このシステムには、さまざまな材料と変換法を使って温熱、冷熱または電気

を貯蔵する柔軟性が期待できるが、どの変換法を使ったとしてもエネルギー損失が生じてしまう点に注意が必要である。熱を保存して直接利用したり、加熱・冷却・発電を並行して行うために利用したりすることが可能だが、現時点では、ヒートポンプを使って温度を高温に引き上げると成績係数 (COP) が下がるという問題がある。いくつかの試作品と実証用システムが構築されており、ドイツでハンブルグの電力網を支援するために建設された蓄熱 (130MWh) / 蓄電 (30MW) 高温岩貯蔵所はその一つである⁵⁴。

低温エネルギー貯蔵

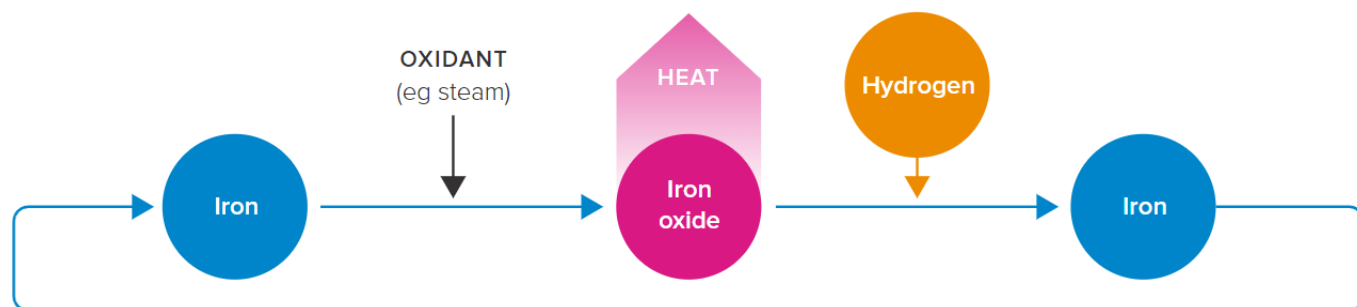
EU の「CryoHub」などのプロジェクトでは、再生可能エネルギーを液体空気 (−196°C) などの低温液体として貯蔵する方法を研究している。この液体は工業施設の冷却に使用できるだけでなく、貯蔵しておくことも、沸騰させて作った蒸気でタービンを回して発電することも可能である⁵⁵。

コールドチェーン向けの新たな選択肢

PCM は加熱用のみならず冷却用としても実証されている。冷凍「コールドチェーン」供給のためのあるプロジェクトでは、英国の科学者らと中国の鉄道車両会社「CRRC Shijiazhuang」が、冷熱の貯蔵に塩水和物ベースの PCM を利用する世界初の輸送コンテナを開発した。生鮮食料品輸送に使用されるコンテナを約 2 時間充電し、再充電を行いながら、さまざまな気候帯において陸上輸送では 5~12°C を最長 190 時間 (35,000 km)、鉄道輸送では 1,000 km 維持することができた⁵⁶。

図 2

鉄の熱ループ。水素還元プロセスへのエネルギー供給。



コラム 1

氷床コア積み荷の冷却：南極の氷試料輸送のためのグリーン・ソリューション

気候変動調査のために南極の氷床から切り出した氷の円柱を、欧州の研究所まで運ぶ道程の間、画期的なゼロカーボン冷却技術により凍結状態のまま維持する。英国南極調査局（BAS）の研究には、グリーンランドおよび南極大陸での氷床コアの掘削・梱包・移し替え・貯蔵、そして英国で分析を行うための輸送が必要となる（図 3）。

しかしながら、ディーゼルエンジン式冷凍コンテナに入れた断熱容器でこの積み荷を輸送しなければならないという点が大きな難題であった。だが現在、BAS は英国の大学と協力し、氷床コアを輸送するための排出ゼロのコールドチェーン・システムを開発中である。中心となる技術は複合相変化材料（cPCM）である。これを真空断熱と組み合わせると、氷床コアのすべての部分を 20 時間以上にわたって -45°C 未満に保つことができる（図 4）。

図 3

南極大陸から欧州への氷床コア輸送

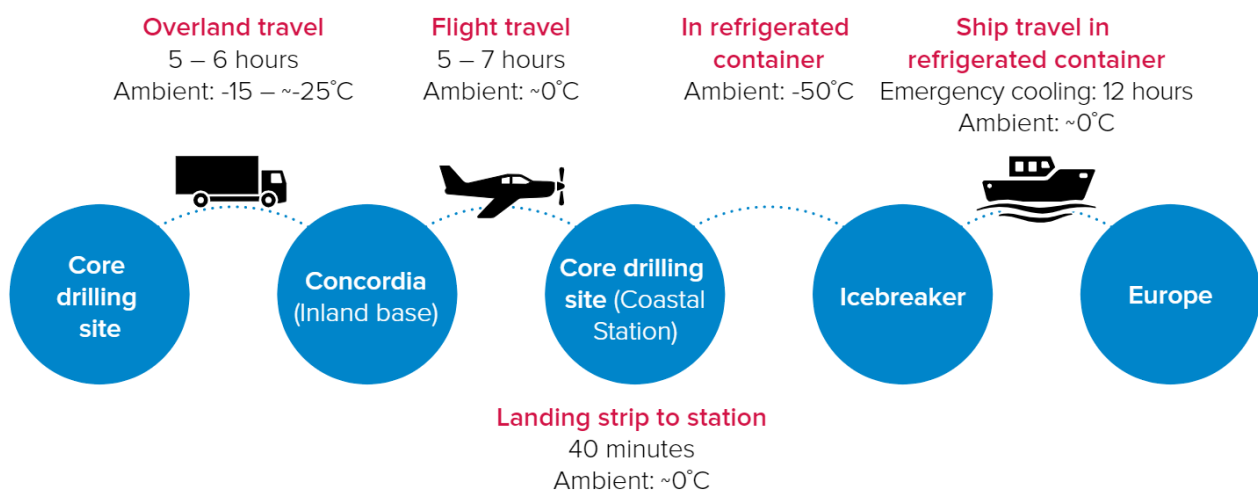
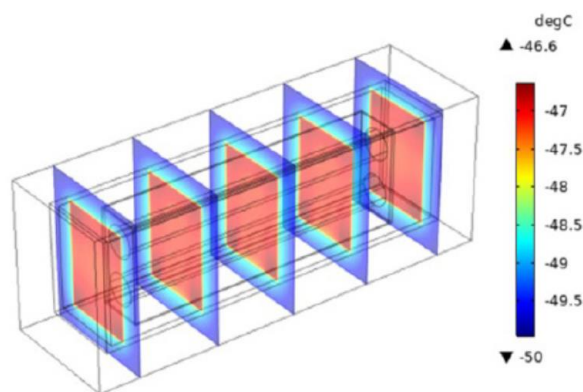


図 4

氷床コア貯蔵の熱断面図



2.3.2 熱の分布

PCM や化学蓄熱材料などの材料による熱・冷熱の貯蔵・輸送が可能になれば、低炭素熱エネルギーの新たな入手方法、貯蔵方法、輸送方法、取引方法、使用方法が広がる。

原理上、未来の給油所は水素とバイオ燃料用のポンプ、電気自動車用の充電スポットだけでなく、自動車や家庭で使用する熱エネルギーや冷熱エネルギーのパックも提供できるようになる可能性がある。自動車の場合は、これらのパックを専用のコンパートメント（熱・冷却タンク）にセットすれば、バッテリー充電中にエネルギーが注入されるようになるかもしれない。寒冷気候では、車内暖房に使用される電力で電気自動車（EV）の航続距離が 50% 前後短くなると推定される⁵⁷。低温下での空調は電力を熱エネルギーに変換する際の COP が低いいため、EV バッテリーを使用するより独自のエネルギー源を持たせたほうがよい。家庭では、これより大きなモジュールを家屋の暖房または冷房に使用し、毎週交換して再充

電することができる。医療サービスでは、ワクチンなどの医薬品を必要な温度で維持するために同様の技術を利用できる。

2.3.3 蓄熱・給熱ネットゼロへの道

2030 年までには、世界各地で新たな熱エネルギー貯蔵部門が誕生しているはずである。概ね、給油所などの既存エネルギーインフラをマルチベクトル型（複数の手法を組み合わせた）エネルギー拠点に転換したり、給配電インフラを持たない地域での新たな加熱・冷却方式を提示することがその基盤となるだろう。

2050 年までには、全く新しい熱エネルギー供給チェーンがネットゼロを支えている可能性がある。熱エネルギー貯蔵技術を用いて、現地で温熱・冷熱を生成できない地域に効率的にこれらのエネルギーを運搬する供給チェーンである。消費者は、現地のエネルギー供給ポイントで自動車用、家庭用の温熱・冷熱を日常的に入手できるようになるかもしれない。

3. 結論

加熱・冷却技術の専門家は、再生可能電力やバッテリーなどの分野で見られるような形で協働を促進する必要性を認識している。これらの分野では、研究開発と導入の進展を加速するための取組みの中で、全国的、国際的な協力関係が形成されてきた。

「多様な国やステークホルダー」がともに行動する必要があると IEA は提言している。新技術を一定の規模で展開し、未来の低炭素加熱・冷却部門を形成するにあたっては、国際協力を拡大し、世界最大の炭素排出源に対する解決策の構築を促進することが極めて重要と言えるだろう。

この報告資料は、排出ネットゼロを実現させ、気候変動に適応するための世界的な取り組みを、科学と技術がいかに後押しできるかを検討する一連の資料の一つである。この報告資料集は、各国が 2050 年までのネットゼロに向けた自国のロードマップを策定するにあたり、科学的情報が状況の理解とアクションを助けることができる 12 の課題に関して全世界の政策決定者に情報を提供することを目的としている。

全資料をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

この著作物の文章は、クリエイティブ・コモンズ表示ライセンスの条件のもとで認可されています。原作者および出所のクレジットが表示される限り、無制限の使用が認められます。

ライセンス入手先：creativecommons.org/licenses/by/4.0

発行：2021 年 5 月 DES7287_8 © The Royal Society

参考文献

1. The IEA. 2019. Energy-related CO₂ emissions 2019. Heat 40%. Power 35%. Transport 25% (provided by email 28 April 2021)
2. The IEA. 2019 Renewables 2019: Heat. See <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/heat> (accessed 15 April 2021)
3. The IEA. Heating. See <https://www.iea.org/reports/heating> (accessed 15 April 2021)
4. Lucon O. *et al.* 2014: Buildings. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. See https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf (accessed 15 April)
5. Arent, D.J. *et al.* 2014: Key economic sectors and services. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. See https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap10_FINAL.pdf Accessed 15 April 2021)
6. Isaac M, van Vuuren D. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change *Energy Policy* **37** 507-521 (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051>)
7. Euroheat & Power and Austrian Institute of Technology. 2020. The barriers to waste heat recovery and how to overcome them? See https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/20200625_discussion_paper_v2_final.pdf (accessed 15 April 2021).
8. The IEA. 2019. Renewables 2019: Heat. See <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/heat> (accessed 15 April 2021)
9. The IEA, 2020, Energy Efficiency Indicators. See <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-overview> (accessed 15 April 2021)
10. Ofgem. 2016. Future Insights Series: The Decarbonisation of Heat. See https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2016/11/ofgem_future_insights_programme_-_the_decarbonisation_of_heat.pdf (accessed 15 April 2021)
11. Darby, S.J. Smart electric storage heating and potential for residential demand response. *Energy Efficiency* **11**, 67–77 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9550-3>
12. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Heat Pump Systems. See <https://www.energy.gov/energysaver/heat-and-cool/heat-pump-systems>. (accessed 15 April 2021)
13. The Climate Change Committee. 2020 Sixth Carbon Budget. See <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/> (accessed 15 April 2021)
14. The Climate Change Committee. 2021. Development of trajectories for residential heat decarbonisation to inform the Sixth Carbon Budget (Element Energy). See <https://www.theccc.org.uk/publication/development-of-trajectories-for-residential-heat-decarbonisation-to-inform-the-sixth-carbon-budget-element-energy/> (accessed 15 April 2021)
15. National Association of Home Builders. 2019. Air Conditioning and Heating Systems in New Homes. See <https://eyeonhousing.org/2019/12/air-conditioning-and-heating-systems-in-new-homes-4/> (accessed 15 April 2021)
16. The IEA. 2020. Heat Pumps tracking report. See <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (accessed 15 April 2021)
17. Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA. 2019. Decarbonizing space heating with air source heat pumps <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/decarb-onizing-space-heating-air-source-heat-pumps> (accessed 15 April 2021)
18. Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA. 2019. Decarbonizing space heating with air source heat pumps <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/decarb-onizing-space-heating-air-source-heat-pumps> (accessed 15 April 2021)
19. Center on Global Energy Policy at Columbia University SIPA. 2019. Decarbonizing space heating with air source heat pumps <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/decarb-onizing-space-heating-air-source-heat-pumps> (accessed 15 April 2021)
20. Byeongsu Kim, Sang Hun Lee, Dong Chan Lee, Yongchan Kim. Performance comparison of heat pumps using low global warming potential refrigerants with optimized heat exchanger designs. *Applied Thermal Engineering* **171** (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114990>)
21. Liu D., Li P.K., Zhai X.Q., Wang R.Z., Liu M. (2017) Small Temperature Difference Terminals. Handbook of Energy Systems in Green Buildings. Springer (https://doi.org/10.1007/978-3-662-49088-4_23-2) Byeongsu Kim, Sang Hun Lee, Dong Chan Lee, Yongchan Kim. Performance comparison of heat pumps using low global warming potential refrigerants with optimized heat exchanger designs. *Applied Thermal Engineering* **171**. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114990>.)
22. Wood Mackenzie. 2020. Can biomethane decarbonise Europe's gas market? See <https://www.woodmac.com/news/opinion/can-biomethane-decarbonise-europes-gas-market/> (accessed 15 April 2021)
23. European Biogas Association. Biomethane with bright opportunities towards the 2030 target See <https://www.europeanbiogas.eu/biomethane-bright-opportunities-towards-2030-target/> (accessed 15 April 2021)
24. European Commission. 2020. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. See https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf (accessed 15 April 2021)
25. The Climate Change Committee. 2018. Hydrogen in a low carbon economy. See <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy-CCC-2018.pdf>. (accessed 15 April 2021)
26. Energy Networks Association. 2020. Replacing Britain's old gas pipes and laying the foundations of a zero-carbon gas grid. See <https://www.energynetworks.org/newsroom/replacing-britains-old-gas-pipes-from-safeguarding-the-public-to-laying-the-foundations-of-a-zero-carbon-gas-grid> (accessed 15 April 2021).
27. The European Plastic Pipe and Fittings Association. Plastic pipe data around Europe. See

- <https://www.teppfa.eu/media/reference-projects/french-gas-company/> (accessed 15 April 2021).
28. Kiwa Technology. 2012. Management Summary "Hydrogen blending with Natural Gas on Ameland" See https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Waterstof_56_7c0ff368de.pdf (accessed 15 April 2021).
 29. METI. 2019. The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells. See https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312_002b.pdf (accessed 15 April 2021).
 30. XiaoZhi Lim. How heat from the Sun can keep us all cool. *Nature* **542**. (<http://doi.org/10.1038/542023a>)
 31. C40 Cities Climate Leadership Group. How to decarbonise your city's heating and cooling systems. See https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-decarbonise-your-city-s-heating-and-cooling-systems?language=en_US (accessed 15 April 2021).
 32. IRENA. 2017. Renewable energy in district heating and cooling a sector roadmap for remap. See <https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Renewable-energy-in-district-heating-and-cooling> (accessed 26 April 2021)
 33. Millar, M.-A.; Elrick, B.; Jones, G.; Yu, Z.; Burnside, N.M. Roadblocks to Low Temperature District Heating. *Energies* **2020**, **13**. (<https://doi.org/10.3390/en13225893>)
 34. International Renewable Energy Agency. See <https://www.irena.org/geothermal> (accessed 16 April 2021)
 35. Government of Iceland. See <https://www.government.is/topics/business-and-industry/energy> (accessed 16 April 2021)
 36. Royal Society. 2020. Nuclear Cogeneration: civil nuclear in a low-carbon future. See <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/nuclear-cogeneration>. (accessed 16 April 2021)
 37. Delta Energy and Environment, 2018. The Cost of Installing Heating Measures in Domestic Properties. BEIS Research Paper Number: 2020/028Final
 38. The IEA. 2019. The Future of Hydrogen. See <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (accessed 16 April 2021)
 39. The IEA. 2018. Clean and efficient heat for industry. See <https://www.iea.org/commentaries/clean-and-efficient-heat-for-industry> (accessed 16 April 2021)
 40. The Global CCS Institute. 2019. Bioenergy and carbon capture and storage. See https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_18-March.pdf (accessed 16 April 2021)
 41. IEA-ETSAP and IRENA.2015. Solar Heat for Industrial Processes. See <http://www.inship.eu/docs/sh5.pdf> (accessed 16 April 2021)
 42. IEA-ETSAP and IRENA.2015. Solar Heat for Industrial Processes. See <http://www.inship.eu/docs/sh5.pdf> (accessed 16 April 2021)
 43. Hiflex project. An Innovative Renewable Energy System. See <http://hiflex-project.eu/> (accessed 16 April 2021)
 44. Kosmadakis, G. Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries, *Applied Thermal Engineering*, **156**. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082>)
 45. van de Bor D, Ferreira, C, Kiss, A. Low grade waste heat recovery using heat pumps and power cycles. *Energy*. **89**. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.030>.)
 46. Euroheat & Power and Austrian Institute of Technology. 2020. The barriers to waste heat recovery and how to overcome them? See https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/20200625_discussion_paper_v2_final.pdf (accessed 15 April 2021).
 47. Amp Clean Energy. 2019. AMP Clean Energy and The University of Birmingham to develop ground-breaking heat storage solution. See <https://www.ampcleanenergy.com/news/amp-clean-energy-and-the-university-of-birmingham-to-develop-ground-breaking-heat-storage-solution> (accessed 15 April 2021).
 48. Swansea University. Decarbonising the steel industry. See <https://www.swansea.ac.uk/business-and-industry/business-partnerships/tata-steel/research-collaborations/decarbonising-the-steel-making-process/> (accessed 30 April 2021)
 49. Dept. Business Energy and Industrial Strategy. 2016. Evidence Gathering: Thermal Energy Storage (TES) Technologies. See https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/545249/DELTA_EE_DEC_C_TES_Final_1_.pdf (accessed 16 April 2021)
 50. Simó-Solsona M, Palumbo M, Bosch M, Fernandez AJ. Why it's so hard? Exploring social barriers for the deployment of thermal energy storage in Spanish buildings. *Energy Research & Social Science*. **76**. 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102057>).
 51. Zhongliang Yu *et al.* Iron-based oxygen carriers in chemical looping conversions: A review, *Carbon Resources Conversion*, **2**. (<https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.11.004>)
 52. Swinkels Family Brewers. 2020. See <https://swinkelsfamilybrewers.com/content/bcorporate/en/media/persberichten/tu-e-demonstrates-iron-fuel-at-brewery-bavaria--a-new-circular-a.html> (accessed 16 April 2021)
 53. Power Technology. Solana Solar Power Generating Station, Arizona, USA. See <https://www.power-technology.com/projects/solana-solar-power-generating-arizona-us/> (accessed 16 April 2021)
 54. Siemens Gamesa Renewable Energy GmbH & Co. See <https://www.siemensgamesa.com/en-int/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/hybrid-power-and-storage/etes/siemens-gamesa-etes-ad-teaser-industrial-decarbonization.pdf> (accessed 16 April 2021)
 55. Cryohub. Cryogenic Energy Storage for Renewable Refrigeration and Power Supply. See <https://cryohub.info/en-gb/> (accessed 16 April 2021)
 56. University of Birmingham. 2018. UK and China scientists develop world-first cold storage road/rail container. See <https://www.birmingham.ac.uk/news/latest/2018/12/scientists-develop-world-first-cold-storage-roadrail-container.aspx> (accessed 16 April 2021)
 57. Zhang, Ziqi & Wang, Dandong & Zhang, Chengquan & Chen, Jiangping. Electric vehicle range extension strategies based on improved AC system in cold climate – a Review. *International Journal of Refrigeration*. **88**. (<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.12.018>)