

見 解

カーボンニュートラル時代の熱エネルギー利用の可能性と課題



令和8年（2026年）9月25日

日 本 学 術 会 議

総合工学委員会

エネルギーと科学技術に関する分科会

この見解は、日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー有効利用小委員会の審議結果を踏まえ、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会

委員長	高田 保之	(第三部会員)	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所特命教授・名誉教授、エディンバラ大学名誉教授
副委員長	岩城智香子	(連携会員)	株式会社東芝総合研究所首席技監、東京科学大学特任教授
幹事	齋藤 公児	(連携会員)	一般財団法人金属系材料開発研究センター特別研究員
	下田 吉之	(第三部会員)	大阪大学大学院工学研究科教授
	朝倉 薫	(連携会員)	日本電信電話株式会社執行役員
	伊藤 公孝	(連携会員)	中部大学客員教授・卓越教授、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所フェロー・名誉教授
	大久保泰邦	(連携会員)	地熱技術開発株式会社探査部研究主幹
	大野 恵美	(連携会員)	株式会社 IHI 技術理事・技術戦略室
	兒玉 了祐	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所長
	鈴置 保雄	(連携会員)	愛知工業大学工学部電気学科教授、名古屋大学名誉教授
	武田秀太郎	(連携会員)	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科准教授
	藤田 修	(連携会員)	北海道大学教育イノベーション機構特任教授
	宮崎久美子	(連携会員)	東京工業大学(現 東京科学大学) 名誉教授
	藤岡 恵子	(連携会員(特任))	株式会社サーマルサイエンス代表取締役、大阪大学大学院基礎工学研究科招へい教授

日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー有効利用小委員会

委員長	藤岡 恵子		株式会社サーマルサイエンス代表取締役、大阪大学大学院基礎工学研究科招へい教授
副委員長	北川 尚美	(第三部会員)	東北大学大学院工学研究科副研究科長、教授
幹事	岩城智香子	(連携会員)	株式会社東芝総合研究所首席技監、東京科学大学特任教授
幹事	古山 通久		信州大学アクア・リジェネレーション機構教授、株式会社 X-Scientia 代表取締役
	高田 保之	(第三部会員)	九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所特命教授・名誉教授、エディンバラ大学名誉教授

青柳みどり	(連携会員)	中央大学総合政策学部教授
宮崎久美子	(連携会員)	東京工業大学(現 東京科学大学) 名誉教授
木村誠一郎		一般社団法人離島エネルギー研究所代表理事
高瀬 香絵		自然エネルギー財団シニアマネージャー
能村 貴宏		北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター教授
福島 康裕		東北大学大学院環境科学研究科教授

本見解の作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	新田 浩史	参事官(審議第二担当)
	渡邊英一郎	参事官(審議第二担当)(令和8年7月から)
	角田美知子	参事官(審議第二担当)付参事官補佐
	富岡千香子	参事官(審議第二担当)付審議専門職付
調査	辻 政俊	上席学術調査員

1 作成の背景

日本で消費される一次エネルギーの約6割が、電力や動力、熱などに変換されて利用される過程で未利用の熱エネルギーとして廃棄されている。現在の技術や社会システムの下で二酸化炭素排出の大幅な削減が期待できる部門は限られている中で、産業部門だけで0.3兆kWhの廃熱があると見積もられ、廃熱量の低減や未利用熱の活用はカーボンニュートラル達成に貢献する高いポテンシャルを持っている。

熱エネルギー有効利用を拡大するためには、熱の発生と利用についてのデータに基づいた戦略的な技術開発や政策的支援の提案などと並んで、熱エネルギー有効利用拡大の可能性とそれによってもたらされるメリットを可視化して市民に示し、将来の持続可能な熱利用社会の姿を共有することが重要である。本分科会では、市民や政策決定者と科学者、技術者の間で双方向の意見交換を行う場として、2016年以降、様々な分科会と連携して6回の公開シンポジウムを開催し、社会の要請に合致した熱利用推進のための課題を検討してきた。その中での議論も踏まえ、熱エネルギーの現状と将来の持続可能な熱利用社会の姿を示すことがカーボンニュートラル実現に向けた熱利用拡大への一助になると考え、本見解をまとめた。

2 現状及び問題点

熱エネルギーが大量に廃棄されている現状は、安価な化石燃料による熱生成に比して、排熱や未利用熱を用いる際に必要となる熱の回収・貯蔵・輸送に要するコスト、利便性の低さ、熱を循環させる熱導管のようなインフラの整備、熱利用に必要な改質技術の進展が十分でなかったことに多くを帰することができる。日本では、熱利用のためのインフラや熱需給データの整備が、熱利用の先進国である欧州諸国に比べて遅れている。一方、蓄熱・熱輸送技術、ヒートポンプ技術については、世界的にも高い水準にある。日本の技術の強みを活かすと共に、インフラの未整備を補うために生まれたオフライン熱輸送のような独自の技術を将来の生産と消費のあり方と結合させて社会実装を進めることが課題である。

熱利用の形態としては、従来の熱を回収してそのまま熱として使うだけでなく、余剰の再生可能エネルギー電力を熱として蓄え必要に応じて再び電気に変換する蓄熱発電のように、再生可能エネルギー大量導入時代の蓄エネルギー手段としても実用化に向けた取組が主として欧米で進んでいる。蓄電池など他の蓄電技術よりも比較的長時間の蓄エネルギーが可能で安価であるという利点を活かして蓄電技術の幅を広げる技術である。要素技術としては完成されているので、実証試験など日本においても実用へ向けた動きを加速する必要がある。

近年では、地域内で熱を融通し合う熱の地産地消社会、発生した熱の利用を考えるのではなく未利用になる熱を出さない生産プロセスのような、技術だけでなく生産や消費のシステムから見直して、カーボンニュートラル時代の熱エネルギー有効利用を模索する提案がなされている。

3 見解の内容

熱エネルギー利用は、技術にとどまらない、ものづくりや未来の社会のあり方にも係る問題である。本見解では、多様な分野の知見を統合しうる日本学術会議の場において、社会実装に資する中立的な論点整理を行い、技術、社会、生産システムなど多様な視点を考慮し、現状とカーボンニュートラル時代の熱利用の姿と、それを達成するための課題を示した。熱エネルギー利用の推進による、脱炭素社会への移行の可能性を示すことを目的としている。

(1) 将来の熱エネルギー利用

カーボンニュートラル時代においては、国民の生活の質を充足性やウェルビーイングも踏まえて評価する価値観への転換により、必要以上の高・低温熱を使わない適温適所熱利用や産業・民生の統合設計が、新たな社会的価値を生む大きな可能性がある。将来的なエネルギー価格の上昇が想定される中、未利用熱の活用は費用負担面において優位性を持ち、持続可能な社会を支える基盤となる可能性を秘めている。

課題としては、効率や経済性のみを優先してきた従来の価値基準を社会全体で再定義し、新しい価値観への転換を促すことが求められる。また、現行の法制度には熱エネルギーの広域利用や融通を想定していない規制が多く残されており、カーボンニュートラル時代に即した抜本的な法改正や制度設計を並行して進めることが不可欠である。

(2) カーボンニュートラル時代のものづくり・消費を想定した熱利用の設計

循環型の生産・消費プロセスへの移行に伴い、従来は廃棄されていた低温排熱をリサイクルやバイオマスの乾燥工程へ活用できる可能性が拡大する。また、蓄熱発電は再生可能エネルギーの導入を促進し、産業用ヒートポンプは熱需要の電化を通じて新たな産業を創出し得る技術であり、カーボンニュートラル時代のものづくりに不可欠な選択肢となり得る。

一方で、これらの新技術を社会に普及させるためには、技術的な成熟だけでなく、日本独自の産業構造に合わせた経済性や成立性を客観的に評価することが課題である。また、需要側の変容を促すために、経済的インセンティブや行動経済学的な視点を取り入れた施策を検討し、企業の投資判断や人々のライフスタイルに働きかけていく必要がある。

(3) 地域コミュニティと共創する熱エネルギー利用システム

熱の地産地消は、地域の特性に応じた多様なエネルギー源を収穫・融通する形態として、人口減少が進む地方の縮小共同体におけるエネルギー自立を支える大きな可能性がある。特に日本で発案・発達してきたオフライン熱輸送技術は、膨大なインフラ投資を

伴わずに柔軟なセクターカップリング¹を実現し、地域内での資金循環を促す可能性を持っている。

課題は、熱輸送に関わる設備コストや人件費などの高コスト構造を解消し、投資回収期間を短縮するための技術革新と公的支援を両立させることである。技術的な成熟度のみならず、事業性や社会受容性を含めた多角的な社会的実証の場を多数設定し、地域が主体となってシステムを運用・進化させ続けられる土台を構築することが急務である。

(4) カーボンニュートラルへの動きの加速がもたらす価値観の転換と熱エネルギー利用

金融・貿易分野における脱炭素評価の加速は、熱エネルギーの有効利用を企業の生存と競争力の源泉へと押し上げる強力な追い風となる可能性がある。科学的根拠に基づく目標設定の普及は、サプライチェーン全体での熱マネジメント高度化を促し、日本企業の国際的なプレゼンスを高める機会となる。

これらの動向を確実に競争力へと繋げるためには、化石燃料への支援策の見直しや実効性のあるカーボンプライス導入など、脱炭素投資を正当化する制度的枠組みの整備が課題である。また、特定の技術に過度に依存するのではなく、国際情勢や技術開発の進展に応じて代替シナリオを柔軟に評価できる、強靱で透明性の高い移行計画の策定が求められる。

¹ 電力、熱、運輸、産業などの異なるエネルギー部門を相互に連携させ、エネルギーの変換や融通を行う考え方。

目 次

1. はじめに.....	1
(1) 何故、熱エネルギー利用か.....	1
(2) 熱エネルギーの概要.....	1
① 温度域による分類.....	1
② 発生源による分類.....	2
③ エネルギー形態による分類.....	2
(3) カーボンニュートラル社会の熱利用.....	3
(4) 熱エネルギー利用戦略.....	4
2. 将来の熱エネルギー利用.....	5
(1) カーボンニュートラルに向かう日本と世界の経済・社会の変化.....	5
(2) ビジョンと価値観の転換.....	6
① 産業部門.....	6
② 都市・地方における民生部門.....	7
③ 輸送部門.....	7
3. カーボンニュートラル時代におけるものづくり・消費を想定した熱利用の設計....	9
(1) 熱の発生と需要の変化.....	9
(2) 新たな熱利用の形態 — エネルギー貯蔵手段としての蓄熱.....	9
(3) 利用温度に即した熱供給とヒートポンプ等による熱の改質.....	10
(4) 発生する熱の形態・組成の変化を想定した技術開発と熱利用の統合.....	12
4. 地域コミュニティと共創する熱エネルギー利用システム.....	14
(1) エネルギーの地産地消.....	14
(2) 熱を循環し分かち合う社会 — 熱の融通から考える地産地消社会.....	14
(3) オフライン熱輸送.....	15
5. カーボンニュートラルへの動きの加速がもたらす価値観の転換と熱エネルギー利用	18
(1) 脱炭素は産業政策へ.....	18
(2) 気候関連財務情報開示は義務化へ.....	18
(3) TCFD/ISSB 基準の4本柱：ガバナンス・戦略・リスク管理・指標及び目標....	19
(4) カーボンプライス：国境炭素調整措置によるゲームチェンジ.....	19
(5) 市民団体/独立系シンクタンクの役割の拡大.....	19
(6) 高温熱を含む「難脱炭素化(Hard to abate)」セクターの脱炭素化におけるダイナ ミズム.....	20
6. 見解.....	22
<参考文献>.....	24
<参考資料1>審議経過.....	26
<参考資料2>シンポジウム開催報告.....	27

1. はじめに

(1) 何故、熱エネルギー利用か

カーボンニュートラル²社会の実現が求められる一方、省エネルギー化が既に進められている日本では、二酸化炭素排出の大幅な削減が期待できる分野が限られている。その状況の中で、未利用熱の活用は、未だ大きなポテンシャルが残されている施策である。産業、業務、家庭などの需要家は、石油や天然ガスなどの一次エネルギーから変換された電力、熱などの二次エネルギーを利用しており、一次エネルギーからの変換・輸送・利用の各過程で、大量の損失が生じている。例えば、2020年度の日本の一次エネルギー総供給量 17.4 EJ のうち、全体の 55%に相当する 9.6 EJ が廃熱³となり、有効利用されなかった[1]。視点を需要側に移すと、日本では電力としての需要は 30%以下にとどまり、70%以上が熱、動力、化成品原料等の用途であり、中でも主として化石燃料を用いた熱の利用が最大の比率を占める。全体としては利用されない熱が大量に生じている一方で、同じく大量の熱需要を満たすために、多くの化石資源を消費し、二酸化炭素を排出しているという構造がある。

熱エネルギーを有効利用するための鍵は、供給と需要のタイミング、場所、温度、そして速度のマッチングにある。そこで近年は、熱利用技術だけでなく、生産や消費の仕組みから見直すことで、熱エネルギーを有効利用する体質を持つ社会へと変えていく方法が模索されている。地域で発生する熱を地域内や近隣地域と分かち合いながら利用する熱の地産地消社会や、熱の発生源と需要を統合して未利用になる熱を出さない生産システムがその具体例である。熱は電力と比べて安価に長期間蓄えることができるという特長がある。この特長は、熱エネルギーの有効利用の目的だけでなく、電力を熱として蓄え必要に応じて再びその熱で発電を行って供給する蓄熱発電を導入することで、再生可能エネルギーの有効利用の目的にも合わせて活用できる。つまり、熱利用の高度化はエネルギーシステム全体のさらなる高度化をもたらすのである。なお、本見解では、カーボンニュートラルの実現に向けた移行期からその達成後の社会までを総称して「カーボンニュートラル時代」と定義する。

(2) 熱エネルギーの概要

熱エネルギーは、温度域、発生源、形態、用途、使用機器など多くの要素がある。以下に、熱エネルギーをいくつかのカテゴリーに分類して整理する。

① 温度域による分類

温度域によって分類すると、低温熱、中温熱、高温熱に大別できる。低温熱のうち、環境温度より低い熱を冷熱という。冷房や冷蔵・冷凍の用途に用いられ、温暖化の進行と共に消費量が増大すると予想される。家庭やオフィスでの熱利用は 50℃以下が

² 国際的にはネット・ゼロという語が一般的だが、本見解では日本で広く周知されているカーボンニュートラルを主として用いる。

³ 一次エネルギーが利用される過程で排出される熱を「排熱」、それが利用されることなく捨てられた熱を「廃熱」という。

ほとんどで、大量に廃棄されている低温熱でまかなうことができる温度域である。

温度域にはいくつか異なる分類法があり、表 1-1 では一般的な分類を記載した。ヒートポンプ技術においては 200℃以上を高温ヒートポンプと分類し、200℃以上を高温域として扱うこともある点には注意が必要である。

表 1-1 熱のカテゴリー分類 1（温度域による分類）

分類	低温熱	中温熱	高温熱
温度域	100℃以下	100～300℃	300℃以上
用途	家庭、業務	産業	発電、産業

（出典）各種資料を参考に小委員会で作成

② 発生源による分類

現在用いられている熱エネルギーの発生源の大部分は、化石燃料の燃焼によって得られている。熱分野の温室効果ガス削減には、再生可能エネルギー熱の活用が有効である。再生可能エネルギー熱としては、日本には世界第三位の地熱賦存量があり大きな潜在量を持つが、2024 年度の電源構成に占める地熱発電の比率は 0.3%、第 7 次エネルギー基本計画においても 2040 年の見通しは 1～2%にとどまっている。蓄熱発電の開発を促進すると共に、地熱を直接熱として利用する仕組みの確立を急がねばならない。

表 1-2 熱のカテゴリー分類 2（発生源による分類）

分類	化石燃料	再生可能 エネルギー熱	排熱	電力
種類	石油、石炭、 LNG	太陽熱、地熱、 河川熱	産業廃熱、 都市排熱	火力、水力、原子力、 太陽光、風力
機器	ボイラー、 工業炉	太陽光パネル、 地熱ボイラー	熱交換器、 冷凍空調設備	ヒーター、電気炉
用途	産業、発電	家庭、業務	家庭、業務	産業、家庭、業務

（出典）各種資料を参考に小委員会で作成

③ エネルギー形態による分類

物質の状態または物質そのものが変化する際に放出/吸収される熱エネルギーの主要な形態には、顕熱、潜熱、反応熱がある。民生用の給湯用蓄熱槽（顕熱蓄熱）や、安価な夜間電力で氷を作り、氷が解ける際に吸収される熱を利用して昼間の冷房を行

う氷蓄熱（潜熱蓄熱）はオフィスビルや商業施設などで広く利用されている。潜熱蓄熱と、化学変化に伴う発熱/吸熱現象を利用した化学蓄熱は、熱の温度を上昇/低下させる機能があるので、利用価値の低い低温排熱をより質の高い高温熱あるいは冷却に変えることが可能である。膨大な排熱があり、常に冷却を必要とするデータセンターの冷熱に適した技術として実用が期待される。

表 1-3 熱のカテゴリー分類（エネルギー形態による分類）

分類	顕熱	潜熱	反応熱
原理	物質の状態（固体・液体・気体）はそのまま、温度が変化する際に流入・流出する熱	物質の状態が固体⇄液体、液体⇄気体、固体⇄気体と変化する際に流入・流出する熱	発熱・吸熱反応に伴って放出・吸収される熱
媒体例	水、熔融塩、岩石、煉瓦	氷、糖アルコール、水和塩、熔融塩、金属	酸化カルシウム/水系

（出典）各種資料を参考に小委員会で作成

（3）カーボンニュートラル社会の熱利用

エネルギー利用に関する規範は近年急速に変化してきている。2015 年のパリ協定締結を契機に急速に拡大し、2020 年には世界の投資総額の約 36%を占めるに至った ESG 投資⁴は化石資源事業を縮小させた。2022 年の COP27 で発表された「ネットゼロ定義提案書」に基づく GHG 排出量算定基準では、グリーンウォッシュ⁵を許さない厳しいネットゼロが規定されており、企業活動に大きな影響を与え始めている。企業活動にとどまらず、政策、個人行動に至るまで二酸化炭素排出削減が、経済性と対をなす価値基準として重要性を増してくる趨勢がある。熱利用においても、これまでは経済性という価値基準だけを用いれば合理的でなかった施策についても試験的に採用し、新たな社会への対応を進めていく必要がある。

熱エネルギーを効率的に利用するために不可欠な蓄熱技術については、カーボンニュートラルに向けた動きが加速する中で進展が見られる。材料の相変化を利用して熱を蓄える潜熱蓄熱材では、有機・無機材料、金属などを複合化して、蓄熱密度の増大、適応温度の拡大（氷点下から 600℃以上の温度帯）、成形性・伝熱性能の向上が達成された。蓄熱密度は 1800～2000 MJ/m³に達し⁶、水素の燃焼エンタルピー（15 MPa に圧縮した場合）1908 MJ/m³と同等の値が既に達成されている。放熱なく長期間蓄熱できる潜熱蓄熱材の実用化は、熱の発生と利用の時間的・空間的不一

⁴ Environment（環境）、Social（社会）、Governance（ガバナンス（企業統治））を考慮した投資活動や経営・事業活動

⁵ 実際には環境負荷の低減につながっていない、またはその効果が限定的であるにもかかわらず、環境に配慮した取り組みであるかのように見せる行為。

⁶ 潜熱に加えて 300K 分の顕熱量を考慮して算出した材料ベースの蓄熱密度

致の制約を低減し、熱エネルギー利用を大きく進展させうる。また、成熟度を高めてきた地理情報システムや IoT 技術を活用して熱需給データを取得することは、熱マネジメントの高度化に有効である。

廃棄される熱を減らすための熱エネルギーの有効利用としては、従来は工場内あるいはコンビナート内での熱融通、あるいは日本の地域熱供給や欧州北部で普及している熱導管を用いたオンライン輸送が中心だった。これに加えて、未だ社会実装には至っていないが実証試験の進んでいるトラックや鉄道、船など移動体に蓄熱材を積載して輸送する「オフライン輸送」を効果的に用いた生産と消費のシステムの導入は熱利用に新しい価値を付与する。また、出力が安定ではない太陽光や風力などによるエネルギーを熱として蓄え、必要時にその熱で発電する蓄熱発電は、再生可能エネルギーの導入に伴う送電インフラの制約を緩和し、変動電源の出力平準化やレジリエンス向上に寄与する技術として再生可能エネルギーの導入を促進する効果も期待できる。これらは、カーボンニュートラル実現を前提にすればこそ選択肢となる技術である。

(4) 熱エネルギー利用戦略

EU は 2016 年に An EU Strategy on Heating and Cooling[2]、イギリスは 2012 年に Future of Heating; a strategic framework for low carbon heat in the UK[3]、2013 年には The Future of Heating; meeting the challenge[4]を策定して、熱需給の現状を俯瞰的に示し暖房の低炭素化への戦略を明らかにしてきた。寒冷地の多い欧州と日本では暖房用の化石燃料削減の重要性が異なるので単純な比較はできないが、戦略とロードマップの作成・公表、その下での一貫した政策遂行は日本においても熱エネルギー利用を拡大させるために有効だろう。

2. 将来の熱エネルギー利用

本章では、将来の熱エネルギー利用のあり方について、社会・経済の構造変化という俯瞰的な視点から展望する。第1章で定義したカーボンニュートラル時代において共有すべきビジョンを明確にした上で、産業・民生・輸送の各部門が目指すべき具体的な将来像と、それによって創出される社会的価値について整理する。

(1) カーボンニュートラルに向かう日本と世界の経済・社会の変化

カーボンニュートラルな熱エネルギー利用は、これまでの延長で達成できるものではなく、実現のためのビジョンを構築し、バックキャストとフォアキャストの複眼に基づき達成に向けたシナリオを構築して行くことが必要となる。

日本の将来を考える上で、人口減少と都市部への人口集中は考慮すべき条件である。それらの影響により過疎化が進む地域では、従来のセントラル方式、ユニバーサルサービスによる熱利用は、早晚経済的に成り立たなくなる。人口が減少した時に撤収しやすい燃料インフラやサプライチェーンの設備が重要である。そのため、集中型のインフラだけでなく分散型の活用も視野に入れるべきである。それぞれの地域で利用できる多様なエネルギー源から必要なだけのエネルギーを収穫し、地域内や隣接地域で利用する「エネルギーの地産地消」も、縮小する社会に対応したエネルギーの供給とカーボンニュートラル社会を両立することのできる将来のあり方である。

世界全体としても、カーボンニュートラルがもたらした価値観の転換がある。先進国においては、経済成長とそれを支えるエネルギーの調達を当然視することが不可能になりつつあるという見方がある。持続可能性の文脈では、「脱成長(degrowth)」の議論も行われている[5, 6]。途上国に経済成長の余地を残すため、先進国は生活の質を維持しつつ脱成長の道を探る必要がある。その方向性の一つが、生活の質を経済活動の拡大の文脈で捉えるのではなく、「充足性(sufficiency)」[7]で捉えるという考えである。新たな価値基準をもって経済を発展させる必要がある。そのためには、消費者や需要家を含む「地域」の意思決定への参加が有効である。

エネルギー分野では、例えば、ドイツのシュタットベルケ[8]など、地域の需要や生活に密着したサービスを担うコミュニティ単位のエネルギー供給システムがある。地域のエネルギーは、メイングリッドから独立しており、かつ電力だけではなく熱やガスなども合わせて供給している。自治体が出資する民間企業として運営されており、地域の公共交通や廃棄物処理などの赤字になりがちなインフラ事業を合わせて運営しエネルギー供給による利益によって経済的に支えるなど、地域住民の生活の質の維持を達成している。欧州では「熱利用」が再生可能エネルギーとして位置付けられることもあり、電力やガスだけでなく地域レベルでの熱の利用が組み込まれている点が大きな特徴である。地域レベルで運営するからこそ、輸送の難しい熱を活用できていると言えるだろう。

(2) ビジョンと価値観の転換

現在私たちは、カーボンニュートラルを実現するため、政策、企業活動、個人行動に至るまで二酸化炭素排出削減が極めて重要な価値基準となる時代に突入している。この価値観の転換は、従来の経済合理性の前提を覆しうる。燃料費が不要な再生可能エネルギーが主力となる社会では、高いエクセルギー効率⁷を指向することが、必ずしも社会実装につながらない。むしろ、効率が低くとも設備投資が軽微で済む技術が経済性向上に資する技術となり、発想の転換が必要である。

持続可能な社会を目指す上で、熱エネルギーの利活用においても、国民の生活の質や幸福度、ウェルビーイングで評価する考え方への転換が求められる。

目指すべき熱利用の姿を、部門ごとに以下に記す。

① 産業部門

産業部門では、単にエネルギー効率を追うのではなく、「循環型の生産システムそのものが新たな産業競争力になる」という価値観の転換が求められる。廃熱を徹底して再利用・再資源化することは、脱炭素時代のものづくりの基盤となる。産業部門における熱利用の将来の姿と、それが実現した時にもたらされる社会的価値を表 2-1 にまとめた。

表 2-1 産業部門における熱利用の将来の姿と創出される社会的価値

熱利用の姿	実現による効果
プロセス電化と低温熱の高度利用	化学産業の蒸留・分離や食品産業の殺菌など、200℃以下の熱が多量に利用されているプロセスにヒートポンプを適用し、製造プロセスの電化と排熱の有効利用によりカーボンニュートラル実現に貢献できる。
熱と素材生産の再編・統合	現在の化石資源利用を前提としたものづくりは、石炭を用いない製鉄、バイオマスや回収プラスチック及び回収二酸化炭素からの化学素材生産などへと転換する必要がある。カーボンニュートラルな生産プロセスの実現には、効率的な熱統合により、プロセス全体の経済性を向上させることで、既存の生産プロセスからの移行を可能とし、カーボンニュートラルな素材生産が実現できる。
産業と民生の熱統合設計	産業廃熱を地域へ供給し、地域コスト低減と食料自給（施設園芸等）の強化を両立する。これは企業と地域コミュニティの共生という新たな社会的価値を生む。

（出典）各種資料を参考に小委員会で作成

⁷ エネルギーの量だけでなく、そのエネルギーがどれだけ有効に利用できるかを考慮した効率。

② 都市・地方における民生部門

民生部門では、生活の質をエネルギー消費量ではなく「充足性（必要な時に必要なだけ満たされていること）」や「ウェルビーイング」で評価する価値観への転換が重要である。「我慢」によるカーボンニュートラルの達成ではなく、断熱や未利用熱活用が住民の真に豊かな生活を直接支える基盤となる。民生部門における熱利用の将来の姿と、それが実現した時にもたらされる社会的価値を表 2-2 にまとめた。

表 2-2 都市・地方における民生部門の熱利用の将来の姿と創出される社会的価値

熱利用の姿	実現による効果
分散協調型熱供給と地産地消	各種再生可能エネルギー、廃棄物、産業排熱など、地域で利用可能なエネルギー源を収穫し、気候や立地に応じて地域内や隣接地域と分かち合う地産地消を実現する。
縮小社会に対応した柔軟なインフラ	人口減少が顕著となる地域では、従来の集中方式が成り立たなくなる将来を見越し、集中型から分散型のインフラやサプライチェーンを前提とすべきである。分散型インフラは、猛暑や厳冬時の供給途絶リスク、激甚災害時の復旧容易性などレジリエンスの観点も考慮して設計すべきである。都市においても、年月と共に人口が増加・減少することを見越し、集中型と分散型のハイブリッド型のインフラ整備を進めるべきである。
ウェルビーイングの向上	カーボンニュートラルを達成するために、寒暖を我慢する、大幅なエネルギー価格の上昇を受け入れる、などを前提としない社会を実現するため、超高断熱化、未利用の再生可能熱の活用と、蓄熱などその実現のための新技術の社会実装を推進すべきである。これは、単なるエネルギー消費の抑制ではなく、断熱技術や未利用熱活用によって少ないエネルギーで最大限の熱的充足感を得るという、需要側の価値基準の転換を意味する。都市におけるヒートアイランドのように、排熱自体が冷房などの新たなエネルギー需要を生み出している現状から、熱の再利用によってエネルギー需要を減少させる熱利用システムの構築へと転換することで、ウェルビーイングの向上とエネルギー消費削減を両立しうる。

（出典）各種資料を参考に小委員会で作成

③ 輸送部門

輸送部門では、カーボンニュートラルに向けてパワートレインの電動化が確実に進んでいる。これは内燃機関からの排熱が減少またはなくなることを意味し、

熱利用技術の重要性が一層高まっている。熱の輸送部門における熱利用の将来の姿と、それが実現した時にもたらされる社会的価値を表 2-3 にまとめた。

表 2-3 輸送部門における熱利用の将来の姿と創出される社会的価値

熱利用の姿	実現による効果
低温熱・環境熱の高度利用	内燃機関に限らず各種機器から発生する廃熱や、環境の熱をヒートポンプによって再生し車内の空調に利用することで航続距離の延長が可能となる。結果としてパワートレインの電動化が促進され、カーボンニュートラル実現に貢献できる。
蓄熱の活用	走行中に各種機器から発生する廃熱を蓄熱したり、充電中に電気を熱へと変換して蓄熱したりして、始動時または再起動時のホットスタート、寒冷地におけるリチウムイオン電池の保温や走行時の暖房に活用することができる。これにより航続距離の延長や低温環境でも安定した性能の確保等電動車の信頼性向上が可能となり、パワートレインの電動化が寒冷地においても促進され、カーボンニュートラル実現に貢献できる。
電動車と住宅の連携	走行中に発電し車載用電池に蓄電した電気を動力として住宅用ヒートポンプを駆動させたり、車載用蓄熱システムに蓄熱した熱を住宅で利用したりすることで、作り出したエネルギーを無駄なく有効に活用することができ、カーボンニュートラル実現に貢献できる。また、災害時のレジリエンスの強化に加え、移動と居住を一体のエネルギー圏として捉えるライフスタイルの変革をもたらす。

(出典) 各種資料を参考に小委員会で作成

3. カーボンニュートラル時代におけるものづくり・消費を想定した熱利用の設計

2章(1)では、将来の社会における熱エネルギー利用について述べた。社会における利用形態だけでなく、カーボンニュートラルが実現した社会での生産のあり方も重要である。本章では、カーボンニュートラル時代における生産と消費の変容を展望し、そこで新たに現出する特性を考慮した熱設計について論じる。

(1) 熱の発生と需要の変化

カーボンニュートラル実現には、資源やエネルギーの廃棄を削減する循環型の生産と消費が不可欠である。廃棄物リサイクルやバイオマス利用には乾燥が必要で、そのための熱需要が新たに生じる。例えば、これらの乾燥には現在では有効利用の用途が少なく大量に廃棄されている 100℃以下の低温を含む排熱の利用が可能である。また、物質循環とネットゼロに寄与する CCUS⁸とその出発点となる二酸化炭素回収にも低温熱を利用できる。家庭や商業施設などは、産業に比べて比較的低温の熱を利用し、その需要量も多い。排熱の多くは産業で生まれるので、「産業施設の近くに住宅地を立地させる」ことで、付近の家庭のエネルギー消費を低減できる。このためには騒音や振動、臭気や安全対策などを大幅に高度化した小規模の産業施設を成立可能にする技術と仕組み、都市計画が必要となる。

これらのように、新たな熱の発生と需要のあり方をエネルギーの利用効率を上げる「熱統合」を前提としたものに進化させることができれば、エネルギーコストが低いカーボンニュートラル社会を構築することにつながる。

(2) 新たな熱利用の形態 — エネルギー貯蔵手段としての蓄熱

新たな熱の発生に関しては、変動性再生可能エネルギー(VRE、Variable Renewable Energy)も考慮しておく必要がある。近年、再生可能エネルギー主要電力化に向けて、VRE を安定的に利用するための蓄エネルギー技術導入の必要性が顕在化している。この中で、VRE 由来の電力を熱に変換して貯蔵し、需要に応じて再び電気に変えて送電する蓄熱発電(カルノーバッテリー)技術が、数時間～数日程度の蓄エネルギー技術の選択肢の一つとして進展している。蓄熱発電は、電力を熱に変換し貯蔵するエネルギー貯蔵技術の一種で、概念自体は 20 世紀初頭に構築された。蓄熱過程で電気は熱に変換され蓄熱システムに貯蔵し、放熱過程で熱を電気に変換して発電する。図 3-1 に、蓄熱発電と従来の蓄電池の比較を示す。電力量のみに着目した指標である充放電効率は蓄電池に劣るが、蓄熱材が圧倒的に安価で、システム全体としてのコストを抑制できる可能性がある。また、タービンと発電機を回転させて発電する方式では、回転体に蓄えられた運動エネルギーによって、系統の周波数変動を抑制できる点もメリットとして挙げられる。熱需要のある場所に導入すれば発電時の排熱は有効利用できるので低い発電効率は問題とならず、熱と電気の併給で総合効率を向上できる。将来、多くの火力設備が老朽化

⁸ CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) : 発電所や産業施設から排出される CO₂を回収し、有効利用または地下貯留することで排出削減を図る技術。利用を除いた二酸化炭素回収・貯留は CCS と略される。

により廃止となるが、燃烧炉以外は利用可能な設備が残るため、これらを有効活用し、調整力に富んだクリーンな安定電源として再構築することも可能である。蓄熱発電には、高温熱として貯蔵するタイプや冷熱として貯蔵するタイプがある。前者では発電の際に200℃程度の排熱が発生し、後者では貯蔵していた冷熱を冷熱源として利用しつつ発電する。見方を変えると、蓄熱による蓄エネルギーの選択はVREの安定利用への貢献と同時に新たな再生可能エネルギー由来熱源/冷熱源をもたらすことになる。

海外では蓄熱発電のコンセプトが数多く提案され、原理検証や実証試験⁹が行われている。しかし、試験データはほとんど公開されておらず、経済性評価も見当たらないため、技術的・経済的な成立性については不明な点が多い。実装にあたっては、充放電効率の向上や蓄熱システムのコスト低減、さらには既存の火力発電設備をどの程度転用可能かという適用条件の精査と、それによる投資コスト低減効果の客観的な評価が不可欠である。

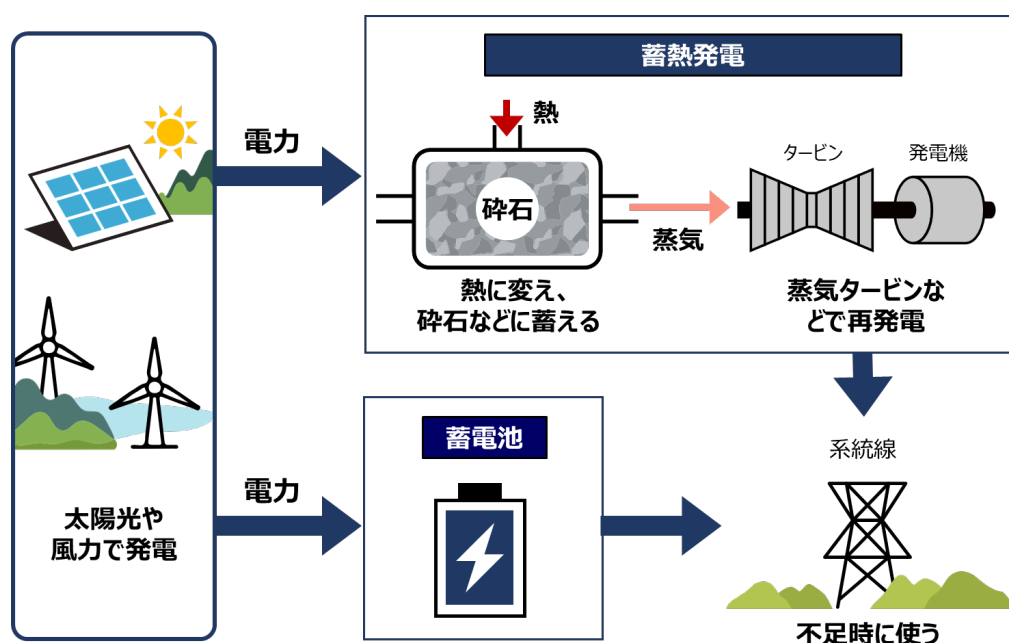


図 3-1 蓄熱発電と従来の蓄電池による蓄電

(出典) 各種資料を参考に小委員会で作成

(3) 利用温度に即した熱供給とヒートポンプ等による熱の改質

温度は熱統合の可能性を規定する重要な要因である。特にヒートポンプは、排熱をよ

⁹ 蓄熱発電はVREの導入が進んでいる欧州にて商用化に向けた開発が先行している。中でも大規模容量システムとして最も開発が進んでいるのがSiemens Gamesaで、2019年に130MWhプラントの検証試験を開始した。1GWhのパイロットプラントを経て将来的には5GWh以上の商用機を目指すとしている。既存技術による早期上市と設備投資対効果を重視し、蓄熱技術は既に活用されている顕熱蓄熱、蓄熱材には環境負荷がなく安価な火山岩碎石を使用している。一般的に顕熱蓄熱システムは大型化によって高効率化できるため、特に火力、原子力のような大型発電設備に導入するメリットが大きいと考えられる。

顕熱蓄熱を用いる蓄熱発電としては、他にもコンクリートと熱媒体流路となる複数の鋼管で構成されるモジュラー型蓄熱システムが開発されている。また、蓄熱密度に優れた潜熱蓄熱や化学蓄熱を利用した蓄熱発電システムについても、いくつかの試験プロジェクトが進行している(例えば、1414degrees、Azelio、SaltX Technology)。

り高い温度域で有効利用可能にする熱の改質の基幹技術である。例えば現状で多くの二酸化炭素を排出している化学産業における蒸留・分離や、食品産業における殺菌、機械やゴム・プラスチック産業における乾燥工程では 200℃以下の熱が多量に利用されている。この温度域の熱供給にはヒートポンプが適用可能で、産業の脱炭素化にとって不可欠な製造プロセスの電化や排熱の改質による排熱利用機会の拡大に寄与することが期待される。ヒートポンプは、エアコンに代表されるように、冷媒の相変化の際に吸収・放出される熱エネルギーを利用することで、空気中の熱や排熱等を利用し、少ない投入エネルギーでそれ以上の熱エネルギーを得る技術である。投入エネルギーに対して得られる熱エネルギーの比を成績係数（COP、Coefficient of Performance）と呼ぶが、その値が7を超える家庭用エアコンなども一般に市販されている。COP が7とは、投入した電力をそのまま熱に変換する場合に比べて、7 倍の熱を得られることを意味しており、省エネルギーの手段として注目されている¹⁰。2010 年代以降、最大加熱能力が高いヒートポンプが出現し、欧州で広く用いられている集中型熱供給（例えば、建物単位の熱供給や地域熱供給）の熱源にヒートポンプが適用される事例が増え始めた。

直近の 10 年程度の期間における産業用ヒートポンプの発展と普及は、従来、転換が難しいとされてきた産業用熱供給の仕組みを大きく変える可能性があると共に、家庭用ヒートポンプなどに比べて技術的にも発展余地が大きい。2000 年代までヒートポンプによる最高供給温度は 100℃以下が中心であった。そのため、蒸気として熱供給が必要な場合、ヒートポンプが活用される余地は少なかった。一方、2010 年前後からヒートポンプによって供給される熱の温度が 100℃を超え、蒸気の供給が可能なシステムが日本メーカーを中心に販売されるようになってきた。これに伴い、適用できる範囲が広がっていった[9]。日本製ヒートポンプの最大加熱能力は欧州製に比べて高くないものの、200℃近い領域まで加熱できる特長がある。欧州市場で見られるような大きな加熱能力を有する製品は日本製では見られない。これは、日本国内の工場等において大型のヒートポンプが適用可能なプロセスが無いということを意味しない。大型ヒートポンプは非常に高価であり、インフラとしての投資が行われにくい限り導入が難しい。日本では産業用のオンラインの熱共有インフラが整備されてこなかったために、大型ヒートポンプの出番が非常に限られていたことが、産業用ヒートポンプのラインナップが限られる原因となったと考えることが妥当だろう。今後、日本が 2050 年にカーボンニュートラルに向かう上で、熱供給における脱炭素化は避けて通れず、産業用ヒートポンプのラインナップ強化及び導入拡大は必要である。さらに、大型ヒートポンプの潜在的・顕在的ニーズが存在する温度範囲などの諸条件を標準化し、可能な限りモジュール化と個別仕様の最少化を行って、量産効果が期待できるほどの市場の創出を目指すべきである。それによって、コスト低減のみならず、熱交換器や冷媒等の周辺技術の高度化も期待できる。そのためにも、産業用ヒートポンプに関連する要素技術から設計・システム技術について成熟させるための施策や導入支援施策は必要不可欠であろう。さらに、熱需要が設備

¹⁰ 例えば、日本の地球温暖化対策計画（環境省 2021）では、産業用ヒートポンプの導入支援を進め、2030 年度までに設備容量ベースで 1,673 MW の導入を目指すとしている。

更新タイミングでヒートポンプ技術を選択できるようにするために、人材育成も含め、知識を広げるような取組も必要であると考えられる。ヒートポンプによる電化の難しい200℃以上の高温プロセスの加熱方法としては、アーク炉、電気炉、誘導炉などの電力による加熱、水素・合成燃料の燃焼とCCSの組み合わせが考えられるが、いずれも現状の化石燃料に比べて大幅に価格が上昇する。技術的な進展に加えて、効率の向上と低価格化が課題である。

日本では、地域によって熱需要の形態が大きく異なる一方、再生可能エネルギーをはじめとして熱源もまた多様である。さらに、熱を介した蓄エネルギー技術を採用することで地域共同体の条件に適した熱源/冷熱を獲得可能であり、蓄熱・熱輸送技術による地域単位での熱の融通、そしてヒートポンプによる熱の改質により熱源と熱需要を最大限に連結することが可能となる。

(4) 発生する熱の形態・組成の変化を想定した技術開発と熱利用の統合

排熱は輻射熱として発生するものと、ガスや液体を温めたり冷やしたりした形で発生するものがある。後者の排熱の利用を進めるならば、「熱を持って出てくる排ガス・排液の組成」の変化に着目することが必要である。例えば、プラスチックなどの一般廃棄物への混入はリサイクルのさらなる推進により今後大幅に減っていくようにしていかななくてはならず、これが成功すると燃焼条件が変化し、排ガス温度やその組成も変わる。また、木質バイオマスの燃焼では通常の廃棄物よりも含水率が多く、排ガス中の水分も多くなる。他にも、排ガス中の二酸化炭素の濃度を上げて利用を容易にする方法の一つに、水の電気分解による水素製造時に副生する酸素を用いて酸素富化燃焼プロセスとする方法がある。この場合の排ガス組成は窒素が減り二酸化炭素や水が増えるだろう。そのような排ガスの持つ熱を廃棄される熱としないために、様々な組成を持ちその組成比も変動しうるような系を対象とする技術開発も必要である。

一方、熱と物質の両方を考慮することでも熱統合を高度化することができる場合がある。CCUSはその好例となる。排ガスからの二酸化炭素回収利用では、多くの場合、二酸化炭素を固定した後、変換に供するために、二酸化炭素を捕捉している吸収液や吸着剤に熱を供給して脱離させなくてはならない。この熱需要と二酸化炭素を含有する排ガスの持つ熱は、効率的に熱統合できる。この熱統合については、現存する発電所や大規模工場における排熱と排ガス組成の両方を考慮して、国内の大規模排出源を対象にポテンシャルを検討した研究例がある[10]。通常、炭素回収ではセメント工場や石炭火力発電所が、排ガス中の二酸化炭素濃度が高く炭素回収に有利と考えられている。しかし、燃焼プロセスをシミュレートし、排ガスの温度も考慮して一般的な炭素固定プロセスと熱統合して計算すると、むしろ水蒸気改質による水素製造やガラス製造に用いられる天然ガス燃焼炉からの排ガスの方が大きな二酸化炭素排出削減ポテンシャルを持つという結果が示されている。

熱統合の高度化方策を数多く選択肢として持ち、それを活用できる都市計画の多様なあり方を模索し、地域に根ざしたパイロット事業を通じて、高度で多様な熱統合を実現

するビジネスエコシステムを構築すべきである。このためには、日本の地域特性や技術的強みを活かしたエネルギーの地産地消について、技術的実証のみならず、事業性、必要な法制度や規制、社会の受容性、人材育成を含めた社会的実証を行うフィールドを多数設定することが重要である。こうした実証を通じて、エネルギー地産地消社会を実現し、継続的に運用・発展させるための技術、事業、制度、社会、人材の各面における条件を明らかにする必要がある。さらに、技術的成熟度だけでなく、事業性や制度・社会的受容性、人材面を含めて評価し、地域が主体となってシステムを運用・進化させ続けられる仕組みを構築することが重要である。これらの条件が整うことで、様々な発想で新たなプレイヤーが熱を用いたビジネスに参入し、素早く社会の姿を変えていくことが可能になる。

本章で述べたような、社会の仕組みを一定期間内に大幅に変えて行くためには、熱ビジョンの構築とロードマップの策定、そしてシナリオベースの議論が有用である。熱利用には、電化や燃料転換が困難な高温熱を必要とする鉄鋼、セメント、製紙等が大きな比率を占めており、これらの産業はカーボンニュートラル時代においてもエネルギー需給構造の核となる位置を占める。これらについては、水素や合成燃料等の燃焼への既存設備の活用も含めた精緻なロードマップの検討が望まれるとともに、自社内の脱炭素化に留まらず、発生する膨大な高温排熱を地域や他部門へ供給する広域的な熱融通の拠点としての役割を将来のシステム設計に組み込み、社会全体のエネルギー効率を最大化する視点が不可欠である。

熱に関しては、2050年代には利用可能となるとも言われている[11]核融合による無尽蔵の熱生成装置が仮に2030年代に社会実装可能となれば、現状の生活と産業の延長線上でのカーボンニュートラル社会の実現、生態系の回復を描くことも可能となる。しかし、核融合による大量の熱エネルギーが利用可能となったとしても、本節で検討したような生産と需要の熱統合の追求は、新たな産業を創出し、持続可能なエネルギー利用社会実現への道をより確実にする道であり、その社会実装を大幅に加速することが求められる。

4. 地域コミュニティと共創する熱エネルギー利用システム

前章までの技術的な熱設計の議論を踏まえ、本章ではそれらを実社会へ実装するための枠組みである地域コミュニティにおける熱利用システムに焦点を当てる。エネルギーの地産地消や地域内での熱融通を可能にする輸送技術のあり方、及び社会実装に向けた課題とレジリエンスの確保について考察する。

(1) エネルギーの地産地消

風土や地域共同体の条件に適した多様なエネルギー源から必要なだけのエネルギーを収穫し、地域内や隣接地域と分かち合いながら利用するエネルギーの地産地消は、カーボンニュートラル社会のエネルギー利用のあり方の一つである。多様なエネルギー源として、太陽光、太陽熱や風力などの変動性再生可能エネルギー、廃棄物、バイオマス、地熱、そして産業排熱等が挙げられる。熱はあらゆるエネルギー変換から最終的に発生する一方、エネルギー最終消費形態の実に 50%以上が加熱・冷却用途である。よって、熱の有効利用技術、運用方法はエネルギーの地産地消の実現のための重要な要素である。

3章で述べたカルノーバッテリーは、VRE の安定利用だけではなく新たな再生可能エネルギー由来熱源/冷熱源の創出でもある。日本では、地域によって熱需要の形態が大きく異なる。工業と比べると小規模かつ分散した需要ながら農業(施設園芸)、養殖業、酪農業等の食糧生産を支える一次産業においても多様な熱需要が存在する。したがって、適切な蓄熱による蓄エネルギーの導入は、VRE 由来の分散型電源の安定利用だけではなく、地域共同体の条件に適した地産の熱/冷熱源の獲得につながり、地域共同体の特色、多様性を損なわない技術となりうる。また、域外から燃料を調達することによる資金の外部流出を防ぐことにつながり、地域の新たな雇用を生む。

(2) 熱を循環し分かち合う社会 — 熱の融通から考える地産地消社会

一方、収穫、獲得した熱源の運用には、熱の融通が必要であり、熱の需要と供給の時間的、空間的なギャップを埋めるオンラインまたはオフラインの熱輸送技術が必要となる。欧州では、熱導管を用いたオンライン熱輸送による地域熱供給が社会インフラとして 100 年もの間にわたって整備され、使われてきた経緯がある。例えば、地域熱供給のパイオニア的存在であるデンマークの熱導管ネットワークは総延長 29,000km で、総人口の 60%以上が地域熱供給に接続され、使用されている[12]。近年では、70℃程度の低温水を供給媒体とした熱損失の少ない第四世代の地域熱供給システムが稼働している。この地域熱供給システムは、熱源と複数の熱需要家を結んだ熱の融通を可能とし、廃棄物/バイオマス/産業排熱/太陽熱/余剰に発生した再生可能エネルギー由来の電力など多様な熱源を取り入れることができ、かつ大型の温水蓄熱槽を備えることから再生可能エネルギーの調整力としても機能している。日本では、熱導管総延長が 672 km とそのネットワークは欧州ほど普及、発達していない。一方、新たな都市計画の立案に地域熱供給が導入されるなど都市部にはその

事例が多数あるため、熱導管の長さ当たりの熱供給量が多く、地域熱供給の線熱密度はデンマークの約 10 倍にもなり、その導入、運用効果はむしろ高いと言えよう。また、産業プラント内においては熱導管を用いた低圧水蒸気による熱輸送網が整備されており、様々なプロセスの操業に合わせた排熱回収技術及びオンライン熱輸送技術が高度に運用されている。しかし、社会的な普及に至ったとは言い難い。いずれのシステムにおいても、熱の輸送量に対して高い設備コスト及びランニングコスト（主に人件費）、その結果としての投資回収期間の長さが課題とされている。オフライン熱輸送に関する最新の研究開発[13]においても、均等化発電原価¹¹が化石燃料のコストと同等になるには設備コストの 1/3 程度の補助が必須であることが言及されている。

(3) オフライン熱輸送

日本では、蓄熱材をトラックやローリー車に積んでバッチ輸送するオフライン熱輸送技術に関する研究開発プロジェクトが活発に行われ、セクターカップリングを熱導管の敷設無しに達成可能な技術として独自に発展してきた。オフライン熱輸送は、熱導管では輸送不可能な温度帯の熱を輸送でき、多様な温度帯の熱源、熱需要に対応可能であり、風土や地域共同体の条件に適した多様なエネルギー源から必要なだけのエネルギーを収穫し、地域内や隣接地域と分かち合いながら利用するエネルギーの地産地消の実現によく適合する。潜熱蓄熱材料（熱供給温度：約 50～120℃）、化学蓄熱材（熱供給温度：約 200～250℃）、吸着蓄熱材（熱供給温度：約 50～120℃）等を用いたオフライン熱輸送技術が検討されてきた。今までに、熱輸送の高密度化や、様々な熱源温度、熱供給温度に対応可能な蓄熱材及びシステムの開発など、性能の向上、多様化が主に志向され、それぞれ高度な技術が達成されてきた。その成果として、技術的な実証だけでなく、一部実用化に至り稼働している例もある。しかし、社会的な普及に至ったとは言い難い。いずれのシステムにおいても、熱の輸送量に対して高い設備コスト及びランニングコスト（主に人件費）、その結果としての投資回収期間の長さが課題とされている。これらの課題を解決すべくさらなる技術開発、運用方法の社会的実証が期待されている。

現在のバッチ式オフライン熱輸送は、熱源と熱需要家が 1 対 1 で対応した運用方法である。熱の地産地消のためには、域内に存在する複数の熱源と複数の熱需要家を結び、地域全体で熱を融通する運用が必要であるが、現状のオフラインシステムでは蓄熱密度と熱交換性能、運搬時の安全性などのために、特殊な熱交換器構造を持つ蓄熱槽が輸送車と一体となっているためこの実現は難しく、蓄熱材やシステムの高性能化ではなく、熱を融通する運用に適した技術開発へのシフトが必要である。熱需要サイドでの利便性を考えれば、既設の設備（例えば温水タンク）に、熱そのもの即ち蓄熱材のみを輸送、設置するのみで利用可能なシステムとなるべきである。

¹¹ ある設備（発電所・蓄電池・水素製造設備など）が、設置から廃棄に至る過程において生み出す成果 1 単位あたりの平均コストを、割引現在価値でならして表した指標。

また、この熱を需要家が使いたいときに使いたい分だけ使え、取り換えたいときに取り換えられるシステムの達成が必要である。例えば灯油やプロパンガスなどはまさにこのコンセプトが既に使われており、燃焼という化学反応を伴う熱利用法であるにも関わらず、接続するだけでユーザーは使うことができる。この実現により、オフライン熱輸送システムにおいても少数の熱輸送車の運用で、複数の熱源と複数の需要家を連結できる可能性がある。また、これらに加えて、室温で蓄熱材を輸送でき、かつ任意の時間に熱を使うことのできる長期間熱貯蔵技術が確立すれば、他の社会サービスと連携した熱輸送システムの運用が可能となり、真に地域共同体の条件に適した運用が見えてくる。

改めて、日本では、地域によって熱需要の形態が大きく異なる一方、再生可能エネルギーをはじめとして熱源もまた多様である。さらに、熱を介した蓄エネルギー技術を採用することで新たな熱源/冷熱を獲得可能である。蓄熱、熱輸送技術による熱の融通により、熱源と熱需要を最大限に連結することが可能となる。図 4-1 に示すようなオンライン・オフライン熱輸送や排熱の有効利用を統合し、日本独自のエネルギーの地産地消によりカーボンニュートラル社会を実現すべく、技術的実証のみならず社会的実証のフィールドの場を多数設定すべきである。

本章並びに 3 章では、複数の熱源と熱需要を熱輸送によって接続し、地域内で熱を融通する熱ネットワークや熱統合の高度化が熱の電化や廃棄されている熱の有効利用を拡大させる可能性について述べた。しかし平常時のみを前提としたシステムの拡大は、大規模災害やサイバー攻撃に対する脆弱性への懸念がある。今後は、熱ネットワークや熱統合による最適化に、自律分散型熱源・蓄熱装置など非常時の供給を維持するための設備設計を組み合わせ、強靱性の高い熱利用システムとしていかななくてはならない。このような、非常時の強靱性を高める設備構築は冗長性を伴い、効率性の追求とは相反することにも留意する必要がある。

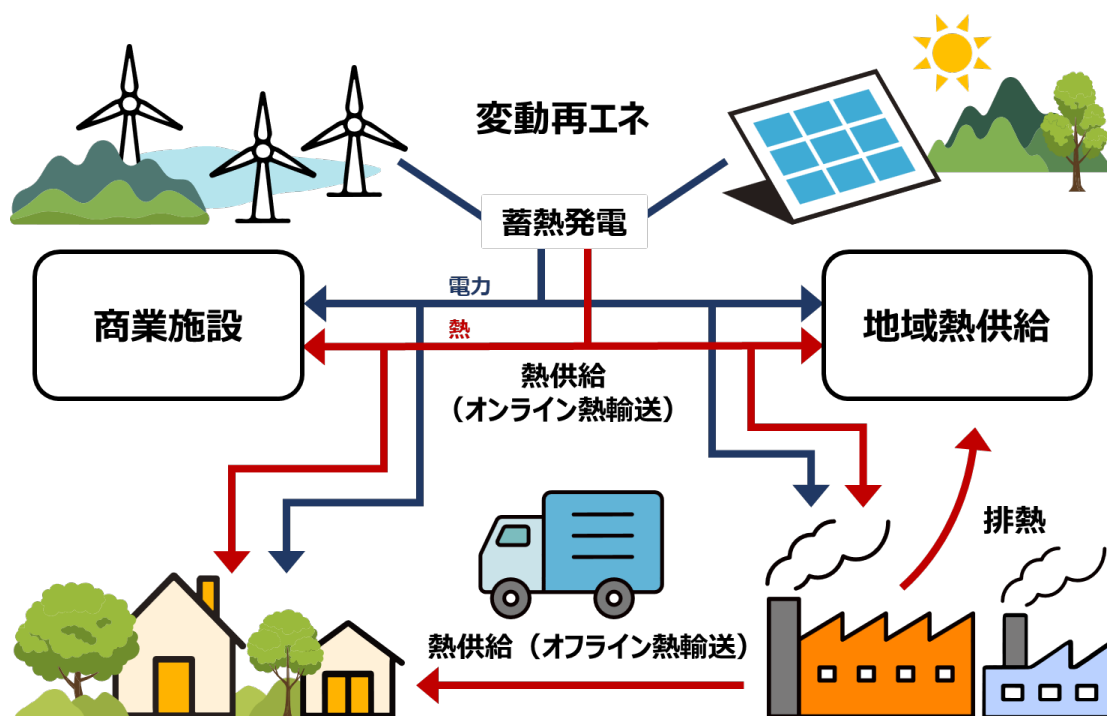


図 4-1 余剰再生可能エネルギー電力の蓄熱発電、オンライン・オフライン熱輸送、排熱有効利用統合したカーボンニュートラル社会の熱利用

(出典) 各種資料を参考に小委員会で作成

5. カーボンニュートラルへの動きの加速がもたらす価値観の転換と熱エネルギー利用

2～4章では、将来の熱エネルギー利用ビジョン、産業における熱利用システム、地域コミュニティでの熱の地産地消を描き、カーボンニュートラルへ向かう時代における熱エネルギーの利用形態とそれがもたらす新たな価値について述べてきた。これらに加えて、エネルギー利用の将来は社会のあり方とも深く関連する。本章では、産業政策、金融、企業行動、市民の意識の諸点から、カーボンニュートラル時代の価値観の転換を整理し、それらが将来の熱エネルギー利用のあり方にどのような決定的インパクトをもたらすかを考察する。

(1) 脱炭素は産業政策へ

ロシアによるウクライナ侵攻とそれに続くエネルギー危機を経て、欧州では脱炭素は安定したエネルギー供給と競争力強化を実現するための革新的な政策手段という位置付けとなった[14]。気候変動の影響も顕在化する中、脱炭素は未来の人間社会を守るために必須であり、かつ各国のエネルギー自立ももたらすことができる。

中国は国策として、太陽電池、蓄電池、電気自動車など、脱炭素やエネルギー自給の鍵となる技術の大量生産・輸出を進めている。オーストラリアや中東では、太陽光発電と蓄電池のコスト低下を背景に再生可能エネルギーの導入が急速に進んでいる。ブラジルでは、豊富な水力資源に加え風力発電が増加しており、再生可能エネルギー由来の電力を活用した水素・水素派生燃料や水素還元鉄の輸出を見据えた戦略が進められている。

脱炭素が産業競争力に直結するという価値観の転換は、従来コスト削減策と見なされていた産業排熱の回収や再利用を、企業の存続を左右する戦略的投資へと変貌させるインパクトを持つ。

(2) 気候関連財務情報開示は義務化へ

気候変動が金融リスク（と機会）であるとの認識から、気候関連財務情報開示は2015年から着々と進んでおり、多くの国において、企業の法定開示（日本の場合は有価証券報告書）へ気候関連情報を含むことが義務化されつつある。自主的取組として、国際非政府組織であるCDP（旧カーボンディスクロージャープロジェクト）が作り上げた環境情報開示の仕組みは、金融安定理事会のもと、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD、Task Force on Climate-related Financial Disclosures）提言によって、各国政府が義務化の取組をスタートした。2021年には、国際会計基準を策定するIFRS財団の中に「国際サステナビリティ基準審議会（ISSB、International Sustainability Standards Board）」が新設され、ISSB基準をもとに多くの国で気候関連財務情報開示の義務化が進められている[15]。日本でも、2027年を目処に段階的な開示義務化の方向にて、国内基準（サステナビリティ基準委員会：SSBJ、Sustainability Standards Board of Japan）が策定された。

このように、気候関連情報の開示が義務化されることで、熱利用の脱炭素化の進

捗が、企業の市場価値や金融機関からの資金調達能力を直接左右するという決定的なインパクトをもたらす。

(3) TCFD/ISSB 基準の4本柱：ガバナンス・戦略・リスク管理・指標及び目標

開示が義務化などにより進むことで、気候変動に関する取組も進んでいる。TCFD/ISSB の開示項目は、温室効果ガス排出量だけではない。気候関連を扱うガバナンス、気候リスク（と機会）を考慮した上でのシナリオ分析と移行計画を含む戦略、気候変動が起こった場合の物理的リスクや、緩和のための移行リスクと財務影響の評価、最後に温室効果ガス排出量や削減目標といった建て付けである。特に移行計画とは、「何をどうすることで」削減するのかの工程表であり、削減計画のリアリティが明らかになる。これを開示することで、投資家や NGO からの対話のベースとなる。透明性によって、社会におけるステークホルダーとの対話が進むこととなる。

特に、何をどうすることで削減するかという移行計画の提示が求められることは、熱エネルギーの管理を単なる現場の省エネ活動から、経営層が責任を持って開示すべき事業継続戦略の核心へと変貌させるインパクトを持つ。

(4) カーボンプライス：国境炭素調整措置によるゲームチェンジ

これまで単独で導入することが国際的競争力の低下につながると懸念されてきたカーボンプライス規制（炭素税や排出量制限・取引制度）について、欧州が国境炭素調整措置（CBAM、Carbon Border Adjustment Mechanism）の導入を進め、多くの国が類似の仕組み導入を検討開始していることで、位置付けが逆転した。国境炭素調整措置とは、欧州等の導入国・地域と同等のカーボンプライスが課されていない国からの輸入に対する関税をかけるものである。その場合、関税収入は措置導入国の収入となることから、同等のカーボンプライスがない国は導入国での価格上昇による販売減少だけではなく、税收機会も失うことになる。

日本でも、2026 年度から排出量制限・取引制度がスタートする。従来認識では、カーボンプライスの水準は低い方が競争力につながったが、現在はカーボンプライスが十分高くないと企業の脱炭素投資判断につながらない。上限価格や削減率の設定次第では、脱炭素による経済競争が熾烈になっている世界において、十分な競争優位を保つための投資判断につながらないことも懸念される。

カーボンプライスという前提への転換は、これまで経済的に成立しなかった大規模な蓄熱システムやオフライン熱輸送の投資回収期間を大幅に短縮し、社会実装を加速させる。

(5) 市民団体/独立系シンクタンクの役割の拡大

脱炭素の分野では、市民団体（非政府組織）や独立系シンクタンクの存在感が増している。前述の TCFD は、非政府組織の CDP（旧カーボンディスクロージャープロ

ジェクト)が基盤を築いた。企業の目標がパリ協定と整合しているかを審査する「科学に基づく目標設定イニシアチブ (SBTi、Science Based Targets initiative)」に参加する企業は、2024 年末時点で 1 万社を超え、世界の時価総額の 41%に達している。前述の ISSB や日本国内基準である SSBJ において、企業の温室効果ガス算定報告ルールとして参照されている「GHG プロトコル」は、米国独立系シンクタンクである「世界資源研究所 (WRI、World Resources Institute)」が主導している。

市民団体や独立系シンクタンクは、特定産業への忖度の必要がない、市民を代表する専門的知見を持つ第三者として信頼されており、脱炭素社会への移行において重要な役割を果たす存在として位置付けられている。

科学的根拠に基づく目標設定の普及は、自社内だけでなくサプライチェーン全体の熱利用効率化を促し、中小企業を含む製造業全体の熱マネジメント高度化を強制的に進めるインパクトがある。

(6) 高温熱を含む「難脱炭素化(Hard to abate)」セクターの脱炭素化におけるダイナミズム

電化が難しい「難脱炭素化」セクターとして、鉄鋼、セメント、化学、長距離輸送分野が挙げられる。生産方式を根本から変える必要があるこれらの分野では、いわゆる「chicken and egg (鶏が先か卵が先か)」問題となっている。つまり、需要がないと投資ができないし、投資をしないと需要は満たせない。

前述の SBTi は、企業のネットゼロ基準の大幅改定を行い企業ネットゼロ基準 2.0 を 2026 年 6 月に公表した。2027 年には改定版の運用がスタートする。新基準では、低炭素鉄・セメントなどの需要喚起となる、バリューチェーン排出量 (スコープ 3) についてのマスバランスや持続可能な航空燃料 (SAF、Sustainable Aviation Fuel) 証書の調達について、目標やその実践として認めているものとなった[16][17]。

一方で、GHG プロトコルは義務開示での活用といった役割の変化を受けて大幅改定を行なっている。調達した電力等に関わる排出量 (スコープ 2) としては、排出係数や証書は 1 時間ごとにマッチングする必要があるなど、厳格化する方向での改定案が出されている。非化石証書についても、固定価格買取制度 (FIT、Feed-in Tariff) などによってすでに広く支援を受けている電源からのものは、再生可能エネルギー消費主張にはこれまでのように使えなくなるというルールも提案されている[18][19]。SBTi においても、このルールが定まれば従う方向性が出されている。

鉄鋼生産など、脱炭素化技術がまだ十分成熟していない産業では投資を促すためのルールができてきている一方で、すでに太陽光や風力などの脱炭素技術が世界的には低コストとなった発電部門では、その効果をより高めるための要件の厳格化が行われているとも読める。

日本では、発電部門についても、再生可能エネルギーのコストを下げる政策である FIT の効果を打ち消す化石燃料ベースの発電への支援が続いている[20]。接続コストは他国と比べて大幅に高い[21]が、これは制度の工夫によって多くの国で解決

策の進化が続いている分野である。また、鉄鋼、セメント、運輸など熱需要の電化が難しい「難脱炭素化（Hard to abate）」セクターに対しては、日本が次世代エネルギー源として重視してきた水素・アンモニア利用に加えて、CCS を推進することで大きな進展が可能である。ただし、水素・アンモニアや合成燃料のコスト削減や供給網整備には大きな不確実性が伴うため、特定の技術に過度に期待するのではなく、技術開発の進展や国際情勢の変化に応じた代替導入シナリオと、それを柔軟に評価する基軸が必要である。鉄鋼生産の大幅な脱炭素化や合成燃料には安価なグリーン水素が不可欠であるし、そのためには再生可能エネルギー導入の加速が競争優位をもたらす。メガソーラー抜きでも太陽光の導入ポテンシャルは日本の電力需要全体の1.5～2.3倍あり、洋上風力だけでも8～9倍ある[22]。再生可能エネルギーこそが競争力をもたらす時代は、熱分野の脱炭素化へと焦点が移るにつれ、より明らかになる。

総じて、これらの価値基準の転換は、熱エネルギー利用をコスト削減の手段から、カーボンニュートラル時代における企業の生存と競争力の源泉へと再定義する重大な社会的インパクトをもたらすものである。化石燃料への支援策を見直し、再生可能エネルギー接続コストを下げ、地域共生のルールを導入し、意味のあるカーボンプライスを導入することが、これからの日本企業の競争力の源泉になるであろう。

6. 見解

見解1 将来の熱エネルギー利用社会についてのビジョンを共有する

本見解が掲げる将来像は、「適温適所熱利用とセクター間連携による、無駄のない熱循環社会の実現」である。これは、経済成長の多寡ではなく、充足性やウェルビーイングを価値基準として熱を分かち合う社会の姿である。

この熱エネルギー利用社会では、必要以上の高・低温熱を使わない「適温適所熱利用」や、産業と民生の熱システム統合により、二酸化炭素排出削減と地域コストの低減の両立という新たな社会的価値を創出することが可能になる。また、人口減少社会に適応した分散型熱供給システムの構築により、災害時等の供給途絶リスクを低減し、地域のレジリエンスを高めることができる。

その実現に向けては、効率や経済性のみを追うのではなく、生活の質や充足性でエネルギー利用を評価する価値観への社会全体の転換が必要である。また、高度な熱エネルギー利用を想定していない現行の規制や法制度を、カーボンニュートラル時代の実態に合わせて改正・最適化していくことが不可欠である。

見解2 カーボンニュートラル社会のものづくり・消費を想定した熱利用システムを設計する

カーボンニュートラル時代の生産と消費のプロセスにおいては、現在廃棄されている低温排熱をリサイクルやバイオマスの乾燥工程に有効利用できる大きな可能性がある。例えば、変動性再生可能エネルギーの余剰電力を熱として蓄える蓄熱発電は、電力系統の安定化と熱供給を両立させる可能性を秘めており、日本が強みを持つヒートポンプ技術を200℃程度の領域まで拡張・普及させることは、産業部門の脱炭素化を加速し、新たな産業競争力の創出につながる。

蓄熱発電などの新技術の社会実装に向けては、国内における実証データの蓄積や、技術的・経済的な成立性についての客観的かつ詳細な評価を進めることが不可欠である。大型ヒートポンプの導入拡大に向けては、量産効果を得るための仕様の標準化やモジュール化を推進すると同時に、設備の更新タイミングで適切な技術選択ができるよう、専門知識を持つ人材の育成や導入支援策を強化していくことが必要である。

見解3 地域コミュニティと共創する熱エネルギー利用システムの社会実装を推進する

熱の「地産地消」は、遠隔地への輸送が困難な熱エネルギーの特性に適しており、今後増加する地方の縮小共同体においてエネルギー自立を支える有効な解決策となり得る。地域独自の多様な熱源と需要をオフライン熱輸送などの柔軟な技術で結ぶことで、莫大なインフラ投資を伴わずに部門間連携を実現し、地域内での資金循環や新たな雇用を創出することが期待できる。

社会実装の推進にあたっては、熱輸送に関わる高い設備コストや運用に伴う人件費などの高コスト構造をいかに克服するかが大きな課題となる。単なる技術の成熟度の追求に留まらず、事業性、法制度、社会受容性といった多角的な視点から社会的実証の場を多数設

定し、地域が主体となって熱利用システムを運用・進化させ続けられる土台を構築することが重要である。

見解4 カーボンニュートラルへの動きの加速がもたらす価値観の転換を背景に一層の熱エネルギー利用拡大を図る

現在、世界的に気候関連財務情報の開示義務化が進み、脱炭素への取組が企業の市場価値や資金調達能力を左右する時代を迎えている。この価値基準の転換を背景に、熱エネルギーの有効利用を、単なるコスト削減から企業の生存と競争力の源泉へと再定義することで、これまで投資判断が難しかった大規模蓄熱や熱融通への資金流入を加速させ、産業全体の脱炭素化を加速することが期待できる。

この可能性を確実なものにするためには、化石燃料への支援策の見直しや再生可能エネルギー接続コストの低減、さらには実効性のあるカーボンプライスの導入といった、脱炭素投資を正当化するための抜本的な制度改革が急務である。あわせて、科学的根拠に基づいた透明性の高い移行計画を提示し、サプライチェーン全体で熱マネジメントの高度化を促すような、実効性のある検証・評価の枠組みを整備していく必要がある。

<参考文献>

- [1] 中田俊彦、「グリーン電力を主体とする地域エネルギーシステムのデザイン」、機械学会誌、126 巻 1251 号、30-32、2023 年
- [2] European Commission, 2016, An EU Strategy on Heating and Cooling, <https://edz.bib.uni-mannheim.de/edz/doku/wsa/2016/ces-2016-2835-en.pdf>
- [3] Gov.UK Department of Energy & Climate Change, The Future of Heating: A strategic framework for low carbon heat in the UK, <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a797b34e5274a3864fd761b/4805-future-heating-strategic-framework.pdf> (2012)
- [4] Gov.UK Department of Energy & Climate Change, The Future of Heating: Meeting the challenge, https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7ae926e5274a34770e7fc6/16_04-DECC-The_Future_of_Heating_Accessible-10.pdf (2013)
- [5] Demaria, F. et al., What is Degrowth? From an Activist Slogan to a Social Movement, Environmental Values, 2013, Vol. 22, No. 2, 191-215
- [6] Hickel, J. and Kallis, G., Is Green Growth Possible?, New Political Economy, 2020, Vol. 25, No. 4, 469-486
- [7] Cabeza, L. F. Et al., 2022: Buildings. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, S. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- [8] 小谷将之、土屋依子、朝日ちさと、山腰司、「インフラ・公共サービスの効率的な地域管理に関する研究」国土交通政策研究第 159 号、2021 年
<https://www.mlit.go.jp/pri/houkoku/gaiyou/kkk159.html>
- [9] 甲斐田武延、「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」、電力中央研究所、2023 年
- [10] Yagihara, K., et al. Analyzing flue gas properties emitted from power and industrial sectors toward heat-integrated carbon capture, Energy, Vol. 250, 123775, (2022)
- [11] 岡野邦彦、「核融合開発を前倒しするための一考察」、NPO 法人 国際環境経済研究所 <https://ieei.or.jp/2022/07/exp1220711/>
- [12] 「第 4 世代地域熱供給：資料編」、認定 NPO 法人環境エネルギー政策研究所、2019 年 7 月
<https://www.isep.or.jp/wp/wp-content/uploads/2019/07/c2c7445ed42dfa82e0509acc72b69451.pdf>
- [13] 研究代表者：藤井祥万、環境研究総合推進費 終了研究成果報告書「廃棄物処理にお

- ける未利用熱を近隣産業で回生する蓄熱輸送技術の出熱過程実証」事業期間：令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
https://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/db/pdf/end_houkoku/3RF-2101.pdf
- [14] 後藤恵陸、「脱炭素を軸とした競争力戦略の展開 欧州の産業政策の方向と GX 政策への示唆」、2025 年 7 月
<https://www.renewable-ei.org/activities/reports/20250709.php>
- [15] IFRS, “Use of IFRS Sustainability Disclosure Standards by jurisdiction”
<https://www.ifrs.org/ifrs-sustainability-disclosure-standards-around-the-world/use-by-jurisdiction/> (2025)
- [16] 高瀬香絵、「SBTi の新しい企業ネットゼロ基準スコープ 3 算定を超え、脱炭素が事業価値になる世界へ」、2026 年
- [17] SBTi, “The new Corporate Net-Zero Standard Version 2.0” (June, 2026)
- [18] 高瀬香絵、「GHG プロトコルスコープ 2」、2025 年
<https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20251001.php>
- [19] GHG Protocol, “Public Consultation - Scope 2” (October, 2025)
<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2025-10/GHG-Protocol-Scope2-Public-Consultation.pdf>
- [20] 高瀬香絵、「物価高に強い日本経済をつくるには」、2025 年
<https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20251104.php>
- [21] IRENA, “Renewable Power Generation Costs in 2024” (2025)
<https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- [22] IEA, “Offshore Wind Outlook 2019” (2019)
<https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>

＜参考資料1＞審議経過

2024 年

- 7 月 30 日 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用小委員会（第 1 回）
役員の選出、今後の進め方について
- 10 月 1 日 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用小委員会（第 2 回）
意思の表出について
- 12 月 12 日 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用小委員会（第 3 回）
意思の表出について

2025 年

- 2 月 26 日 総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第 26 期・第 4 回）
意思の表出の申出書について
- 4 月 21 日 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用小委員会（第 4 回）
意思の表出について、シンポジウム企画について
- 5 月 9 日～19 日 総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第 26 期・第 5 回）メール審議
シンポジウム企画案の承認について
- 6 月 27 日 カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用小委員会（第 5 回）
意思の表出について、シンポジウム企画について
- 8 月 4 日 意思の表出についての意見交換会
- 8 月 7 日 長野県の地域主導型自然エネルギー推進について、長野県ゼロカーボン推進課長・平林高広氏にヒアリング
- 8 月 20 日 総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第 26 期・第 8 回）
意思の表出について
- 9 月 11 日 静岡県の地下水熱利用について、静岡県環境衛生科学研究所班長・神谷貴文氏にヒアリング
- 12 月 1 日 総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会（第 26 期・第 9 回）・
カーボンニュートラル実現に向けた熱エネルギー利用小委員会（第 6 回）合同会議
意思の表出について

＜参考資料２＞シンポジウム開催報告

「カーボンニュートラル時代の熱エネルギー ―革新議論と社会実装―

1. シンポジウム概要

日時：2023 年 5 月 12 日（金）

場所：日本学術会議講堂

主催：エネルギーと科学技術に関する分科会、触媒化学・化学工学分科会、環境科学・環境工学分科会

共催：公益社団法人化学工学会

参加人数：476 名（現地参加者 47 名、オンライン参加者 429 名）

2. 講演

(1) 能村貴宏氏（北海道大学）

「相変化材料の開発と広義のサーマルマネジメント技術への展開」

(2) 村上陽一氏（東京工業大学）

「共有結合性有機骨格への相変化材の導入とその特性 ― 新規な蓄熱材開発を目指して」

(3) 則永行庸氏（名古屋大学）

「冷熱を利用する大気中 CO₂ 直接回収プロセスの研究開発」

(4) 甲斐田武延氏（電力中央研究所）

「産業分野の脱炭素化に資する高温ヒートポンプ」

(5) 花村克悟氏（東京工業大学）

「断熱/放熱およびふく射輸送制御」

(6) 近藤良夫氏（日本ガイシ）

「波長選択ふく射加熱炉」

3. 総合討論

司会：藤岡恵子（日本学術会議連携会員(特任)、株式会社ファンクショナル・フルイッド）

総合討論に向けた話題提供：高瀬香絵（自然エネルギー財団）

「熱も含めた早期のネットゼロに向けた競争が始まっている」

パネリスト：能村貴宏、村上陽一、則永行庸、甲斐田武延、花村克悟、近藤良夫、高瀬香絵

「カーボンニュートラルに向けた熱エネルギー分野の展望」

1. シンポジウム概要

日時：2025 年 12 月 1 日（月）

場所：日本学術会議講堂

主催：エネルギーと科学技術に関する分科会、触媒化学・化学工学分科会、環境科学・環境工学分科会、循環経済を活かし自然再興と調和する炭素中立社会への移行に関する検討委員会

共催：公益社団法人化学工学会

参加人数：371 名（現地参加者 74 名、オンライン参加者 297 名）

2. 講演

(1) 中垣隆雄氏（早稲田大学）

「カーボンニュートラル時代に向けた部門間の熱バリューチェーンの提案」

(2) 岩城智香子（東芝総合研究所）

「岩石蓄熱およびエネルギーマネジメント技術を用いたプラント実証試験」

(3) 神谷貴文（静岡県環境衛生科学研究所班長）

「静岡県における地下水熱利用の普及に向けた取組」

(4) 藤井実（国立研究開発法人国立環境研究所社会システム領域システムイノベーション研究室室長）

「廃棄物の特性に合わせた焼却熱の効率的な産業利用」

(5) 佐土原聡（横浜国立大学名誉教授／学長特任補佐）「地域エネルギーシステムの基盤となる地域冷暖房の変遷と現状、今後の展望」

3. 総合討論

司会：藤岡恵子（日本学術会議連携会員（特任）、株式会社ファンクショナル・フルイッド）

総合討論に向けた話題提供：木村誠一郎（一般社団法人離島エネルギー研究所代表理事）

「総合討論における論点の提示～熱エネルギーのコモディティ化の可能性～」

パネリスト：中垣隆雄、岩城智香子、神谷貴文、藤井実、佐土原聡、木村誠一郎