

記 録

文書番号	S C J 第 25 期 050908-25550400-090
委員会等名	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熱エネルギーの社会実装基盤小委員会
標題	公開シンポジウム開催記録
作成日	令和5年（2023年）9月8日

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意思の表出ではない。掲載されたデータ等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

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	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学名誉教授
副委員長	山地 憲治	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) 理事長
幹事	岩城智香子	(連携会員)	東芝エネルギーシステムズ株式会社エネルギーシステム技術開発センターシニアフェロー
幹事	齋藤 公児	(連携会員)	日鉄総研株式会社シニアフェロー
	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任教授・名誉教授、エディンバラ大学名誉教授
	朝倉 薫	(連携会員)	日本電信電話株式会社研究企画部門担当部長
	伊藤 公孝	(連携会員)	中部大学先端研究センター特任教授、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
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
	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)	Managing director IHI POWER SYSTEM MALAYSIA SDN BHD
	兒玉 了祐	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所長
	近藤 駿介	(連携会員)	原子力発電環境整備機構理事長
	笹尾真実子	(連携会員)	東北大学大学院名誉教授、同志社大学研究開発推進機構 嘱託研究員
	鈴置 保雄	(連携会員)	愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻教授、名古屋大学名誉教授
	藤田 修	(連携会員)	北海道大学大学院工学研究院教授
	三間 罔興	(連携会員)	日本原子力研究開発機構敦賀総合研究センター客員研究員、大阪大学レーザー科学研究所招聘教授、大阪大学名誉教授
	宮崎久美子	(連携会員)	立命館アジア太平洋大学国際経営学部 教授、東京工業大学名誉教授
	矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長、東京大学名誉教授、東洋大学名誉教授
	和田 元	(連携会員)	同志社大学理工学部教授
	藤岡 恵子	(連携会員(特任))	株式会社ファンクショナル・フルイッド代表取締役社長

熱エネルギー利用の社会実装基盤小委員会

委員長	藤岡 恵子	(連携会員(特任))	株式会社ファンクショナル・フルイッ ド代表取締役社長
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化学工学専 攻反応プロセス工学分野教授
幹事	岩城智香子	(連携会員)	東芝エネルギーシステムズ株式会社エ ネルギーシステム技術開発センター シニアフェロー
幹事	古山 通久		信州大学先鋭材料研究所教授、株式会 社 X-Scientia 代表取締役
	青柳みどり		国立環境研究所社会環境システム研究 センター主席研究員
	加藤 之貴		東京工業大学科学技術創成研究院ゼロ カーボンエネルギー研究所所長、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
	小林 敬幸		名古屋大学大学院工学研究科化学シス テム工学専攻准教授
	高瀬 香絵		自然エネルギー財団シニア・コーデ イナー
	福島 康裕		東北大学大学院環境科学研究科先端環 境創成学専攻環境グリーンプロセス学 分野教授

本記録の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

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
域研究センターエネルギーメディア変換材料分野准教授

目 次

I. はじめに.....	1
II. 公開シンポジウム報告.....	2
1 公開シンポジウム「カーボンニュートラルに向けた 熱エネルギー利用の可能性と課題」開催報告.....	2
(1) シンポジウム概要.....	2
(2) プログラム.....	2
(3) 講演.....	3
(4) 総合討論.....	7
2 公開シンポジウム「カーボンニュートラル時代の熱エネルギー ー革新技術と社会実装」開催報告.....	10
(1) シンポジウム概要.....	10
(2) プログラム.....	10
(3) 講演.....	11
(4) 総合討論.....	19
3 公開シンポジウム報告のまとめ.....	24

I. はじめに

日本は GDP あたりエネルギー消費量が世界最小レベルである省エネルギー先進国だが、それでも一次エネルギーの 1/2 以上が有効利用されず、工場や都市施設などでは多量の熱エネルギーが排出され廃棄されている。また、太陽熱、地中熱などの再生可能エネルギー熱の利用にも大きな余地を残している。未利用の熱エネルギーの有効利用は、一次エネルギー消費量の大幅削減につながると期待されているが、未利用熱の温度や形態は多様で広く分布しており、供給と需要の間の時間的・空間的な不一致や温度域の違いが利用推進を妨げている。したがって、未利用熱の有効活用には、発生する熱と利用側の時間、場所の相違を繋げるための熱エネルギーの回収、貯蔵、輸送、変換技術の高効率化が不可欠である。これに関する技術シーズは数多く存在しているが、個々の技術開発が未利用熱活用を大きく進めるには至っていない。その原因の一つは、熱需給の総合的なデータや将来的に形成が期待される熱市場の要請に応えるための要となる技術やシステムが明確でない点にある。

この問題を解決するために、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会熱エネルギー利用の社会実装基盤小委員会では、個別に開発された熱エネルギー利用技術の集約と市場ニーズの統合について議論し、熱エネルギー利用促進に必要な社会基盤について検討すると共に、カーボンニュートラルと熱エネルギーをテーマとした 2 回のシンポジウムを開催してきた。カーボンニュートラル実現に向けて熱エネルギー有効利用の推進が重要性を増してきている今、シンポジウムの開催報告を示して、熱エネルギー利用について広く知ってもらい、今後の活動に繋げるために本「記録」を作成した。

II. 公開シンポジウム報告

熱エネルギーの有効利用を進めるには技術開発やインフラ整備、政策支援などとともに、科学者・技術者が熱エネルギー利用の現状と将来の持続可能なエネルギー利用社会を可視化して、広く市民、産業界、自治体等と共有することも重要である。この考えに基づき、多くの学問分野の研究者・技術者が情報や見解を分かりやすく伝え意見を交換できる場を設けることを目的として、第25期にカーボンニュートラルと熱エネルギーをテーマとする2回の公開シンポジウムを開催した。

2021年11月の公開シンポジウム「カーボンニュートラルに向けた熱エネルギー利用の可能性と課題」では、未利用熱の活用、再生可能エネルギー導入拡大のための蓄熱、生産プロセスにおける熱の脱炭素化、政策的取組を取り上げ、熱エネルギー利用の現状と課題をテーマとした。2023年5月の公開シンポジウム「カーボンニュートラル時代の熱エネルギーー革新技术と社会実装ー」では、2021年のシンポジウムを発展させるものとして、熱利用進展にとって重要ないくつかの領域で一步先の熱利用技術を取り上げ、革新的な技術によって拡大が期待される熱利用の新分野を紹介し、これらの技術を社会実装するための方策を議論した。

以下では、この2つの公開シンポジウムの講演と総合討論の要約を報告する。

1 公開シンポジウム「カーボンニュートラルに向けた熱エネルギー利用の可能性と課題」開催報告

(1) シンポジウム概要

日時：2021年11月6日（土）

場所：早稲田大学リサーチイノベーションセンター

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、環境科学分科会

共催：公益社団法人化学工学会、早稲田大学理工学術院総合研究所

参加人数：207名（現地参加者28名、オンライン参加者179名）

(2) プログラム

13:00 開会挨拶 所 千晴（日本学術会議第三部会員、早稲田大学総合理工学院教授）

13:05 趣旨説明

藤岡 恵子（株式会社ファンクショナル・フルイッド代表取締役社長）

13:20 講演「未利用熱エネルギーの現状とカーボンニュートラルへの展望」

小原 春彦（国立研究開発法人産業技術総合研究所執行委員・エネルギー環境領域領域長）

13:50 講演「産業分野のカーボンニュートラル化に求められる熱利用」

川村 公人（アサヒクオリティードイノベーションズ株式会社社長）

付顧問)

14:30 講演「再生可能エネルギー導入拡大に貢献する蓄熱発電とその工業利用」

岡崎 徹 (一般財団法人エネルギー総合工学研究所)

15:00 講演「カーボンニュートラルと熱の脱炭素化に向けた取組」

茂木 正 (経済産業省・省エネルギー・新エネルギー部長)

15:40 総合討論 司会: 藤岡 恵子、

パネリスト: 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センター准教授)、

講演者

17:10 閉会挨拶

岩城 智香子 (日本学術会議連携会員、東芝エネルギーシステムズ株式会社エネルギーシステム技術開発センターシニアフェロー)

(3) 講演

① 小原春彦氏 (産業技術総合研究所)

「未利用熱エネルギーの現状とカーボンニュートラルへの展望」

○ カーボンニュートラル実現に向けた対策と政府の方針

政府のグリーンイノベーション戦略推進会議で検討されている、カーボンニュートラルに向けた対策を俯瞰すると、電力分野のCO₂削減を行い同時に電力分野、非電力分野ともに省エネルギーによってエネルギー消費量を減らすことが基本で、本シンポジウムのテーマである熱エネルギー利用はまさに省エネルギーで、非常に重要であると考えている。省エネルギーに関しては、第6次エネルギー基本計画において、2030年度の目標として原油換算6,200万キロリットルの、非常に高い値が示されている。その達成のためには、産業、家庭、運輸など様々な分野で、国として総力で推進して行かねばならない。一方で完全に排出量をゼロにはできないので、ネガティブエミッション技術¹も注目されている。

○ 産業分野の排熱実態

2015年に、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)と未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合(TherMAT)によって、熱利用量の多い15業種を対象に、2000年以来15年ぶりに大規模な産業排熱実態調査が行われた。調査結果を業種別に見ると、非鉄金属や機械産業から500℃以上の高温熱、紙・パルプや化学では200℃近辺、食品や繊維ではもっと低温の熱が多く排出されている。こういった排熱の実態を知り、それに適した方針を持たないと熱利用は進まない。設備別に見ると、排熱全体の80%近くを占める100℃~200℃の温度域はほとんどボイラーから

¹ DAC(大気中からのCO₂直接回収)や生物機能利用(新規植林など)と、貯留または固定化等を組み合わせることにより、正味としてマイナスのCO₂排出量を達成する技術

の排熱で、ボイラーの効率向上やヒートポンプへの置き換えによって削減するなど、ケースバイケースの対応が必要である。

○ 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発

TherMAT に参画する企業や国立研究機関などによって、2013 年度～2022 年度までの期間で革新的な熱利用技術の研究開発が行われている。研究開発テーマは、要素技術としては(a)熱需給の時間的ミスマッチを解消する蓄熱、(b)熱需要を減らす断熱・遮熱、(c)高品位な熱として再利用するヒートポンプ、(d)熱を電気に変換する排熱発電・熱電変換である。またこれらの各要素を統合する技術として(a)熱マネージメント²、(b)テーマ間を横断する基盤技術がある。日本は先進国の中でもエネルギー利用効率が高く、これ以上の省エネルギーは非常に難しい状況だが、要素技術の開発を進め、熱マネージメントによってこれらを統合して、熱効率を上げて行くことは可能だろう。カーボンニュートラルに向けた動きが加速する中で、産業界を中心として省エネルギー技術の一層の浸透が期待される。

② 川村公人氏（アサヒクオリティードイノベーションズ株式会社）

「産業分野のカーボンニュートラル化に求められる熱利用」

○ 生産現場での環境問題への取組

アサヒグループの取組に即して、生産現場での多様な環境、CO₂ 削減、省エネルギー技術を紹介すると、(a)商用車の CO₂ 排出量の 70%を占める大型トラックからの排出を燃料電池トラックによって削減する物流における CO₂ 削減対策、(b)工場内に設置した太陽光発電による電力で水素を製造し、燃料電池で発電して供給する太陽光発電エネルギー蓄電技術、(c)温度域によって CO₂ を吸収/放出する吸収液を用いてボイラーの排ガスから CO₂ を回収し、将来的には液化炭酸ガス等へ変換して利用することを目指すボイラー系排ガス CO₂ 回収技術、(d)ビール工場の排水に由来するバイオメタンガスを利用した燃料電池による発電などがあり、いずれも現在、実証試験を行っている。

○ 熱に関する課題と方向性

アカデミアの課題として断熱・蓄熱・創熱の基盤技術の構築、ユーザーとアカデミアが協力して進めるべき課題として(a)コージェネレーション運用に最適な熱電ポートフォリオの構築、(b)余剰未利用熱・排熱を用いた冷温熱獲得技術開発、(c)再生可能な熱源を獲得し利用する技術開発がある。具体的には、(a)今後予想される省エネルギーに伴うコージェネレーションの熱電バランスの変化に応じて、エネルギーポートフォリオを見直し発電時の損失を最小化する、(b)化学蓄熱材などを用いて、一つの温度の熱源からより高温の熱と冷熱を同時に生成する技術を構築し、加熱プロセスの排熱を質的に価値の高い熱として利用拡大を図る、(c)太陽熱など再生可能熱を効果的に集熱・送熱する技術を開発する、という課題である。

○ 今後の課題

² 熱利用技術を効率的に活用するために、関連するプロセス全体の熱の流れを可視化あるいは予測し、課題の抽出・解決方針の策定を行う技術

企業のCO₂排出削減活動では、電力に関しては再生可能エネルギー発電技術の進展により一定の技術的進歩が確認できるが、熱エネルギーの回収・活用など熱に関する技術開発には、蓄熱、熱媒体、伝熱などにおいて社会実装を進める上で多くの課題が残っており、アカデミア、メーカー、ユーザーが協力しての技術開発を急ぐ必要がある。

③ 岡崎徹氏（一般財団法人エネルギー総合工学研究所）

「再生可能エネルギー導入拡大に貢献する蓄熱発電とその工業熱利用」

○ 蓄熱発電の概要とその経済性

蓄熱発電は、岩石や煉瓦、金属、無機塩化合物などの蓄熱体に系統線からの電力を熱に変えて蓄熱し、必要に応じて熱を再び電気にして供給する技術である。タービンなどの発電設備は、稼働終了した発電所の設備を用いることで低コスト化できる。

○ 蓄エネルギーの必要性

九州など再生可能エネルギー発電が普及している地域で、送電線の容量不足による稼働停止が多発している。蓄熱発電が実用化されることで蓄エネルギー技術のオプションが広がり、再生可能エネルギーの導入拡大に寄与する。

○ 世界の蓄熱発電開発状況

主としてヨーロッパ、アメリカで大手電力会社などによって多数の蓄熱発電技術開発や実証試験が、100℃～2500℃の様々な温度で進められている。発電だけでなく熱の工業利用としても試行が行われている。

○ 今後の展望

再生可能エネルギーはCO₂を排出しないが需要に合わせた発電ができないため、何等かの調整が必要である。蓄熱発電は効率が非常に低くて調整手段として現実的ではないと考えられていたが、再生可能エネルギー発電コストの急速な低下によって、再生可能エネルギーを蓄える場合には、蓄エネルギー効率の高低にはあまり意味がない、との認識が広がり始めている。エネルギー貯蔵技術には揚水、電池、圧縮空気、蓄熱などの種類があり、貯蔵できる期間や出力の応答性が異なる。これら多様な特性の技術を組み合わせることで、最適なシステムを構築できる。蓄熱発電自体も、発電設備構成、需要形態、規模、立地など様々な観点から、最適な技術な技術を選択することが重要である。

④ 茂木正氏（経済産業省）

「カーボンニュートラルと熱の脱炭素化に向けた取組」

○ 政策の基本

政府のカーボンニュートラルへの政策の方向性は、(a)全部門を通じた省エネルギーの徹底、(b)電力の脱炭素化、(c)産業・民生・運輸（非電力）部門での電化推進、(d)熱需要には水素やCO₂回収・炭素除去技術による脱炭素、である。経済産業省や資源エネルギー庁では、エネルギーに関してサプライサイドから入るのが通

常の方法だが、熱利用は需要家サイドの問題で政策としてはこれまであまり取り上げられていない。第5次エネルギー基本計画では熱に関して、(a)工場排熱等の未利用熱エネルギーの活用のための技術開発や実用化支援、(b)熱供給設備の導入、(c)複数の需要家群で熱を面的に融通する取組みへの支援、が記載されている。

○ 産業部門の熱利用の実態と熱需要の脱炭素化に向けた課題

業種別、温度帯別、供給方法（冷熱、温水、蒸気など）別の産業部門の熱利用のデータから、以下の実態が見えてくる。(a)直接加熱は広範な温度帯で実施されており（全体の7割）、蒸気による加熱は低温を中心に2割を占める。(b)鉄鋼業・窯業土石は高温、食品飲料、繊維木紙、機械製造は低温、化学工業は広い温度域の熱需要がある。(c)高温帯が必要な業種の熱需要は電気への切り替えは経済的・熱量的に難しい。(d)未利用の工場排ガスだけで7000PJ以上あり、その内76%は200℃未満の低温排熱である。

○ 熱エネルギー政策の課題と対応

政策は、(a)熱利用の高効率化（省エネルギー）と、(b)熱の脱炭素転換の二つから成る。(a)熱利用の高効率化では、省エネルギーやコージェネレーションのため設備投資の促進（補助金）、実証試験支援、省エネ法³による制度的支援など、(b)熱の脱炭素転換では投資支援、水素・アンモニア燃料の混焼・専焼実証、カーボンニュートラル合成燃料の開発などが対応の基本である。その他の政策として、サプライチェーン連携による省エネルギーの最適化や、荷主間連携による物流効率化が可能になる連携省エネルギー計画の認定制度や、未利用熱の事業者間融通を再生可能エネルギー取組みとして評価する制度など、この数年の間に省エネルギーと未利用熱活用促進を図る省エネ法改定が行われた。

○ 熱需要の脱炭素化に向けた取組

熱・燃料に関する脱炭素化技術は、電化、バイオマス活用、水素化（メタネーション）、アンモニア化で、コスト削減が共通した課題であり、メタネーションでは高温化・大型化に向けた技術開発も重要な課題である。水素政策としては、(a)電解装置、(b)国際水素サプライチェーン、(c)輸送部門、(d)大規模水素発電、(e)産業部門での燃料・原料利用、の5つの分野に対して、技術開発、導入支援・制度整備、インフラ整備、規制改革・国際標準化などの政策ツールを最大限投入する必要がある。

○ 今後の展望

2021年6月に策定された「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、次世代熱エネルギー産業のカーボンニュートラル化について、合成メタンの注入（2030年に1%、2050年に90%）による供給されるガスの脱炭素化が基本とされている。その他には、カーボンリサイクル燃料として、航空機燃料、車両向け合成燃料、グリーンディーゼル燃料など、それぞれの分野でプロジェクトが始

³ 「エネルギーの使用の合理化及び非化石エネルギーへの転換等に関する法律」

動している。

(4) 総合討論

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

パネリスト：小原春彦、川村公人、岡崎徹、茂木正、能村貴宏（北海道大学）

○ 総合討論に向けた話題提供

最初に能村貴宏氏より、再生可能エネルギーを主力エネルギーとして、蓄熱による蓄エネルギー、オンライン熱輸送による地域熱供給、施設園芸・酪農・水産養殖など多様な熱利用を駆使した、「熱エネルギーを循環し分かち合える社会」のビジョン、再生可能エネルギー社会の実現には電気・熱・水素の3つの柱の強連成が必要であること、熱利用はエネルギー技術を横ぐしで貫く技術となり得ることが示され、蓄熱材・熱輸送媒体の近年の新展開が紹介された。

○ 経済性と効率

・企業の立場からの熱利用を拡大する上での経済性を考えると、少なくとも設備導入コストと運転コストを評価して、それを上回るメリットが必要である。システム全体で見てどこがネックになっているのか課題抽出し、そこにフォーカスして課題を解決しないと社会実装には至らない。周辺技術（熱交換器構成、熱ロス抑制など）でクリアするか、別の運用性などの視点で価値向上するのか、といったトータルシステムとして解決すべく幅広い課題の洗い出しが必要と思う。

・新型ヒートポンプの導入では、装置自体のコストだけではなく、周辺の配管や設備も含めた全体コストが高く、経済性が厳しくなる懸念がある。これに対しては、講演で紹介した「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」プロジェクトで、工場の熱需要や排熱状況を場所レベルでインプットして、そこに機器を導入した時の経済効果を調べるシミュレーターが開発されているので、これを利用して事前に経済性の検討をするのも導入を進める一つの方法になる。

・蓄熱発電について、熱から電気に変換する効率が30～40%、太陽光発電の効率を20%とするとトータルの効率は非常に低いのではないかと、あるいは電力を熱に変換して蓄えるのはエクセルギー⁴の低下だが、カーボンニュートラルではCO₂排出を削減するだけでなくエントロピーを最小化する視点が必要ではないかと、という質問に対し、岡崎徹氏より以下の回答があった。トータルのコストを効率ではなく効率+設備稼働損料で計算したら、経済的に成り立つ場合も多い。地球に降り注ぐ太陽エネルギーは、ほとんどが利用されず熱になっている。再生可能エネルギーはタダで、それをいかに使えるものにするかと考えると、エクセルギー効率は必ずしも重要ではない。化石燃料でエネルギーを得る時の効率の重要性と、再生可能エネルギーを利用する時は切り

⁴ ある系が周囲と平衡状態に達するまでに取り出すことのできる最大の仕事量（エネルギー）のことで、エネルギーの質を考慮した定量的な指標。有効エネルギーとも呼ばれる。

替えて考える必要がある。

- ・北海道を例にとると、送電線への接続を待っている再生可能エネルギー電源だけでも、道内の電力需要の1.5倍以上ある。再生可能エネルギー電力はその場で消費するか、蓄えるか、あるいは大需要地まで送電線を建設するしかない。効率は無視できないが、運営費用の安い再生可能エネルギー発電については、視点を変える必要がある。

- ・今までの、既存の設備に新規の技術を導入することを基本にした省エネルギーを忘れないと、効率が数十倍になるプロセスはできない。既存の工場を潰して新しい設備に置き換えるような試みで、革新的なプロセスを構築することが重要ではないか。

- ・政府の省エネルギー政策は、石油ショック時に化石燃料をどうやって有効利用するかが発端になっており、今までの設備をより効率良く使うための支援なので、省エネルギー補助金は既存の設備の改善にしか使えない。今後、カーボンプライシングなどコストのかかる問題が出てくる中で、企業は設備に投資して一定の期間の中で回収しなければならない。このサイクルで持続的に企業が成長できる水準まで技術が達すると、再投資も行われ、現状から変わってゆくだろう。

- ・省エネ法では年1%のエネルギー消費効率改善が義務づけられている。一方で破壊的イノベーションが起きていて、10%や20%の改善が現実的になっている。企業は限られた人材で対処しているので、1%ではなく破壊的イノベーションを目指したい。欧米との技術革新や制度の違いもあり、企業が省エネルギーを考える背景が変わってきている。

○ 熱需給についての情報

- ・熱利用拡大のための課題の一つとして情報の問題がある。排熱実態調査のようなサプライ側の排熱データがないと、需要側はどのように利用できるか考えられないし、サプライ側にとっても需要側の条件を知る必要がある。両者をマッチングして熱需給を可視化できれば、もっと需要が生まれてビジネスになるものも出てくるのではないか。

- ・排熱実態調査では、個別の工場・事業所からのデータを排熱量という形で、かつ業界で丸めて公表している。個々の工場・事業所の排熱の温度帯や出所などのデータは企業にとって秘匿性の高い情報なので、可視化は難しい。公的研究機関や中立の団体が間に入って、供給サイドと需要サイドの橋渡しはできないかと思う。

- ・排熱実態調査のデータでは、公表されているデータと実際の排熱の在り方は違う場合もある。例えば最終的には80°Cの冷却水が排出されていても、その手前のプロセスでは600°Cや800°Cの排熱だが、冷却しないとダストが出るなどの問題があって、最終的に低温排熱となっていることもあるだろう。個別に検討すると、もっと有効に回収・再利用できるのではないかという観点も重要である。

- ・供給と需要をマッチングさせるための市場を作ってはどうか。熱についての情報を出したくない企業は市場に参加せず、排熱を買ってほしい企業は情報を提供して市場に参加するというシステムにする。

- ・政府が主導して熱需給情報の市場を作るのは、難しい。むしろ任意で研究開発や要素技術の開発をするためにデータを出し、オープンソースで技術開発を求めるといっ

た方向はあり得る。

- ・熱の値段は安いので、企業としてはデータを公開してまでビジネスには考えないかもしれないが、政府が熱の FIT（固定価格買取制度）のような制度を作れば、捨てている熱を市場に出して活用することが可能になるかもしれない。

- ・熱利用の最大の問題は、発生地で消費するのが基本になっており、それ以外の場所に流通するための要素技術として蓄熱技術や輸送技術はあるが、十分に開発が進んでいないことにある。熱利用は、次のようなレベルに分けて考える必要がある：(a) 要素技術の積み上げがどれだけあるか、(b) 実際の工場単位での熱利用の方法とコスト、(c) 複数工場間や地域、(d) コンビナート単位での熱利用、(e) 地域熱供給など。それぞれのレベル毎に実証プロジェクトなどで検討する必要がある。

○ 技術開発動向

- ・ヒートポンプの冷媒では、日本のメーカーが協力して新規冷媒開発に成功している事例があり、従来の欧米先行の状況が変わる可能性がある。ボイラー代替のヒートポンプ開発では、今まで以上に高温で動作する冷媒が必要であり、産学共同・オールジャパンで取り組んで進展がある。こういった近年の技術開発の背景に、マテリアルズ・インフォマティクス⁵など新たな手法を用いた材料開発の加速があり、今後も新展開が期待できる。

- ・蓄熱体については、200～300℃の熱を長期保存できる、セラミックの新しい材料が開発されている。従来の蓄熱材のように温度差ではなく、刺激や圧力を加えることで放熱する特性があり、この点でも用途・利便性の拡大が可能になる。

- ・一般の蓄熱では放熱によって温度が下がり、長く蓄えられない。しかし温度が低下しても、化学反応を利用して蓄熱や温度の変換を行うケミカルヒートポンプを用いて昇温することで、蓄熱発電などの全体の効率を上げることができる。再生可能エネルギーには蓄エネルギーが必須で、蓄電池は基本だが長期保存できないので、別のオプションが多くあった方がよい。蓄熱技術は蓄熱材、装置設計、パッケージング技術などの総合で、日本が優れた技術を持つ分野である。

- ・ケミカルヒートポンプは実用化には至っていないが、温度を変えることができるという利点を活かして、一つの温度の熱源から異なる温度の熱エネルギーを取り出せるサーマルトランジスタが提案されている。熱利用において量的な回収だけでなく、質的な向上（利用価値の高い温度への変換）が重視されてきている。

⁵ 膨大な論文や材料データを AIなどで解析し、期待する性能が出せそうな化学構造や組成を設計する手法

2 公開シンポジウム「カーボンニュートラル時代の熱エネルギー—革新技術と社会実装—」開催報告

(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：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、環境学委員会環境科学分科会、化学委員会・総合工学委員会・材料工学委員会合同触媒化学・化学工学分科会

共催：公益社団法人化学工学会、

後援：公益社団法人日本化学会、一般社団法人日本機械学会、一般社団法人日本鉄鋼協会、一般社団法人触媒学会、公益社団法人日本伝熱学会、一般社団法人日本エネルギー学会、一般社団法人エネルギー・資源学会

協賛：公益社団法人石油学会

参加人数：488名（現地参加者59名、オンライン参加者429名）

(2) プログラム

13：30 開会挨拶 菱田 公一（日本学術会議第副会長、第三部会員、明治大学研究・知財戦略機構特任教授）

北川 尚美（日本学術会議第三部会員、東北大学大学院工学研究科教授）

13：40 趣旨説明

藤岡 恵子（株式会社ファンクショナル・フルイッド代表取締役社長）

14：00 講演 「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」
能村 貴宏（北海道大学准教授）

14：20 講演 「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」

村上 陽一（東京工業大学科学技術創成研究院ゼロカーボンエネルギー研究所教授）

14：50 講演 「冷熱を利用する大気中CO₂直接回収プロセスの研究開発」

則永 行庸（名古屋大学未来社会創造機構脱炭素社会創造センター教授）

15：10 講演 「産業分野の脱炭素化に資する高温ヒートポンプ」

甲斐田 武延（一般財団法人電力中央研究所グリッドイノベーション研究本 ENIC 研究部門主任研究員）

15：30 講演 「断熱/放熱およびふく射輸送制御」

花村 克悟（日本学術会議連携会員、東京工業大学工学院教授）

16：00 講演 「波長選択ふく射加熱炉」

近藤 良夫（日本ガイシ株式会社 NV 推進本部ビジネスインキュベーションライフサイエンスマネージャー）

- 16 : 30 総合討論 司会：藤岡恵子、
パネリスト：高瀬香絵（自然エネルギー財団シニア・コーディネーター）、
講演者
- 17 : 30 閉会挨拶 阿尻 雅文（日本学術会議連携会員、東北大学材料科学高等
研究所教授）
岩城 知香子（日本学術会議連携会員、東芝エネルギーシ
ステムズ株式会社エネルギーシステム技術開発
センターシニアフェロー）

(3) 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」

○ 蓄熱技術とは何か

ほとんど全てのプロセスから熱が発生し、受け入れるシステムがなければ環境へ捨てられて廃熱になる。蓄熱とは熱を貯めて運んで使う技術で、時間と空間の差異を超えて需要サイトに熱を運んで利用できるようにする。

○ 蓄熱技術の種類

顕熱利用型、潜熱利用型、化学反応利用型の3つのタイプがあり、顕熱型は0℃以下から800℃程度まで、潜熱型は0℃以下から百数十℃、化学反応型は0℃以下から100℃未満の温度域で実用化されている。潜熱型や化学反応型は高性能な蓄熱技術として、近年中高温領域においても開発が進んで来ているが、普及に至っていない。高温になるほどコストがかかり、蓄熱でどれだけ省エネルギーできたかのみで評価されると実用化が難しい。そこで、蓄熱だけを目的とするのではなく+ α の付加価値、もしくは蓄熱から想定される機能を創出し、多種多様なサーマルマネジメントへの応用可能な材料開発、システムの設計へ発想の転換が必要と考える。

○ 潜熱利用型蓄熱材

潜熱蓄熱とは、物質の相変態潜熱（主に固液の相変化）を利用した蓄熱技術で、この蓄熱に使われる材料は相変化物質（Phase Change Material、以下「PCM」という。）と呼ばれている。融点温度で固体から液体に変わる際の融解潜熱で蓄熱する。液体から固体に変わる際の凝固潜熱で放熱する。代表的な例としては、氷蓄熱がある。PCMの特性は以下の通り。(a)従来型の顕熱に比べて高密度に蓄熱できる。(b)一定温度（融点）で熱が出入するので一定温度の熱を供給でき、断続的に発生する排熱や未利用熱も一定温度の熱源にできる。(c)一定温度で蓄放熱を繰り返して熱を制御できる機能に繋がる。

○ マイクロカプセル化PCMの開発

当研究室では金属や合金とPCMを原材料として、コアが合金PCMで外殻をアルミナ等のセラミックスで覆った、中高温用の相変化マイクロカプセルを開発した。マイクロカプセルは20 μ mから100 μ m程度の粒子で、コアがアルミ合金やスズ

などの金属のPCM、その外殻をアルミナ等のセラミックスで覆っている。カプセルの中でPCMは固体から液体、液体から固体への変化を繰り返す。

○ マイクロカプセル化PCMの特長

(a)多様な作動温度が可能であること：コアとなるPCMの組成を変えると、蓄熱温度を変えることができる。様々な温度レベルで出てくる未利用熱に対応できる。基礎開発としては、800℃程度の領域なら銅・シリコン、660℃ならアルミニウム、640℃ならアルミ・ニッケル、570℃ならアルミ・シリコン、380℃亜鉛・アルミニウムと、合金の種類を変えることによって、違う温度で作動する材料の調製に成功している。(b)高い蓄熱密度：従来の顕熱蓄熱材と比べて、潜熱分の蓄熱量が加わるので、2～3倍の高蓄熱密度を持ち、装置がコンパクトになる。(c)ハンドリングの容易さ：セラミックス外殻を持つマイクロカプセル化PCMは、ハニカム状、ペレット、グレインなどの形状に自由に成形できる。この形状は実用されている顕熱蓄熱材と同じで、既往の顕熱蓄熱システムにそのまま導入するだけで性能を改善できる。潜熱蓄熱材の液体になった時の扱いにくさという問題も、カプセル化によって解決できた。

○ マイクロカプセル化PCMに期待される熱利用技術と社会実装に向けた展望

再生可能エネルギー利用、触媒、次世代自動車マネージメント、エクセルギー再生、すなわち、省エネルギーから再生可能エネルギー安定利用のための蓄熱技術まで、様々な分野/利用温度帯において熱利用技術への適用が期待される。多様な温度域に適応でき既存の設備にも導入可能なマイクロカプセル化PCMはポテンシャルニーズはあるが蓄熱材料として今あるものではないので、企業と共に大量生産できるように、また個別連携だけでなく包括プロジェクトを用いて一貫通貫で新たな熱技術の基盤としてニーズを創生できないかと考えている。

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」

○ 糖アルコールを相変化材とした蓄熱材

エリスリトール、キシリトール、マンニトールなどの糖アルコールは、工業的に重要な100℃-200℃の温度域に融点を持つという長所がある。また、天然由来なので廃棄が容易、難燃性で安全、無毒性なので安心、非腐食性でシステム設計が容易、食品産業の廃棄物から豊富に入手できてコスト的に安定で大量使用を想定できる等、社会実装の必要要件を満たしている。2012年以降、研究例が増加している。

○ 課題

一方で、糖アルコールには、酸化や脱水による劣化が起りやすく耐久性に乏しく、過冷却が大きく凝固温度に再現性が乏しいという不利な特性もある。また、蓄熱/放熱時に、粒子状である固体と隙間がなく稠密な液体の間で形状変化するので、粒子状の材料を充填して粒子間に気体を流通させる、固定床や流動床のような応用先には適さない。

○ 共有結合性有機骨格

共有結合性有機骨格 (Covalent Organic Framework、以下「COF」という。)は、ジャングルジムのような骨格とその間のナノサイズの空隙から成る多孔体で、活性炭やシリカゲルとは異なりシャープな孔径分布を持つ。COFを構成する分子を選択する際にその機能を盛り込んでおけば、骨格の性質と孔サイズのデザインが可能である。またCOFはC、H、O、N等の軽元素からできているので、使用後燃やす、埋め立てるなどで廃棄でき、高い熱安定性、高い環境親和性を持つ。COFはセラミックやナノチューブと同レベルの材料の基礎分類なので、応用の対象範囲が広い。半導体、触媒、ガス分離、エネルギー貯蔵、物質輸送等に利用できる。

○ COFの構造と合成

一次元、二次元、三次元のCOFがあり、ジャングルジムのような構造を持つのは三次元COFである。三次元COFは骨格の間にナノサイズの孔があるので、孔の中に分子やイオンを取り込んで複合体となる、ホスト・ゲスト系の物質も作ることができる。単分子間の結合エネルギーが小さい氷やミョウバン等は結晶生成が容易だが、結合(共有結合)エネルギーが大きいCOFは結晶性向上が難しい。微小な結晶しか作れないので、長い間、構造や物性の解析ができなかったが、当研究室は結晶核成長の制御因子を発見して、大サイズの単結晶生成を容易にし、様々な形状の新COFを創出し、次世代のCO₂吸着材や全固体電池などへの適用を研究開発している。結晶の大きさだけでなく、合成できる量も増大し、工業的評価に必要な量が得られるようになった。

○ COF結晶への糖アルコールを導入した蓄熱材

大きい単結晶生成が容易になったので、COFに糖アルコールを導入した蓄熱材を作り、熱拡散率などの特性を測定できるようになった。糖アルコール蓄熱材の課題だった、過冷却が大きく凝固温度に再現性が乏しいという問題は、COFへの導入によって過冷却がほぼ無くなり、同じ温度で再現性良く溶解と凝固が起きるようになった。また、蓄熱材の形態安定性を付与することができ、溶けているのに粒の形状を維持し、固定床や流動床での利用に適した蓄熱材になった。

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」

○ カーボンニュートラルに不可欠なCO₂直接回収

IEA (国際エネルギー機関) のネットゼロシナリオによると、ネットゼロを達成するには2050年には、世界全体で76億トンのCO₂を回収しなければならない。現在のCCS⁶によるCO₂回収の実績値は4000万トンにすぎず、2050年にかけて2桁増やさなくてはならない。そのために重要な要素となり得るのが、大気中からのCO₂直接回収 (Direct Air Capture、以下「DAC」という。) で、2050年には現在の日本

⁶ Carbon dioxide Capture and Storage、二酸化炭素を回収・貯留する技術

の排出量にほぼ相当する 9.8 億トンの CO₂ を大気から回収すると想定されている。

○ 化学吸収法による CO₂ 補足

DAC にはいくつかの方法があるが、その中で最も成熟した技術である化学吸収法による大気中 CO₂ 直接回収プロセスは以下のとおり。装置は CO₂ を吸収する吸収塔と CO₂ を放散する再生塔から成り、その中で吸収液が循環する。通常の化学吸収法では、再生塔の下部から熱を供給して液温度を上昇させて CO₂ 溶解度を下げ、吸収液から分離してくる CO₂ を回収する。このプロセスは、多量の熱エネルギーを消費することが問題である。また、ポンプを用いて再生塔内の圧力を下げて、吸収液から分離した CO₂ の圧力を下げて分離過程が円滑に進むようにするので、ポンプ動力も必要である。

○ LNG を利用した CO₂ 回収 (Cryo-DAC)

熱供給は最小限にして、再生塔内の CO₂ を冷やしてドライアイスにすれば、気体の CO₂ が固体のドライアイスになる際の大きな体積減少によって、ポンプを使わずに再生塔内の圧力を下げることができる。従来は低温で CO₂ を吸収させ、高温で放出させていたのを、圧カスイングによって高い圧力で吸収させ、低い圧力で放出させる。日本は年間 7500 万トンの LNG を輸入している。これを気化して発電や都市ガスの原料として利用するが、LNG が気化する際には -160℃ で周囲から熱を奪う。これを CO₂ 回収に利用することで、未利用熱を活用した省エネルギーの DAC 技術となる。

○ プロセス面での改良

想定される圧力変動巾で大きな溶解度の差を持ち、かつ低蒸気圧の吸収液を開発し、再生塔に水素を吹き込んで再生を促進しより低エネルギーでの回収を可能にするなど、プロセス面からの性能向上も行っている。

○ Cryo-DAC の性能

プロセス解析による評価では、2.1GJ のエネルギー (熱) で CO₂ を 1 トン回収できることが分かった。回収される CO₂ の純度 97.7% とかなり高い。海外で先行する DAC は基本的に温度スイングで、再生温度は高いもので 900℃、低いものでも 100℃ 程度だが、Cryo-DAC は常温での再生が可能で環境熱や低レベルの廃熱を利用できるため、燃料費実質ゼロのプロセスを目指せるポテンシャルがある。

○ 研究開発体制と開発スケジュール

基盤技術を担う「学」、社会実装を担う「産」(CO₂ を回収してメタンを作る等、事業の中に CO₂ 回収を考えて行かねばならない会社やガス会社)、ユーザー企業、エンジニアリング会社のチームで研究開発体制を進めている。2020 年から吸収液の性能やコスト試算などの原理検証を行い、次のフェーズとしてベンチプラント (1 トン/年) 設計をほぼ完了している。今後それを建設・運転に向かわせようとしている。それが成功したら、次の段階は数十トン/年クラスのパイロットプラント設計・建設・運転という予定で進みたい。

④ 甲斐田武延氏 (一般財団法人電力中央研究所)

「産業分野の脱炭素化に資する高温ヒートポンプ」

○ CO₂排出量の削減とヒートポンプ

日本の全温室効果ガス排出量の約 85%がエネルギー起源で、電力（発電）が4割、非電力（加熱や自動車の燃料等）が約6割を占める。したがって、仮に電力だけを脱炭素化できたとしても4割削減までにしかならない。残りの6割の削減方法としては、まず省エネルギー（消費量を減らす）、次いでCO₂排出原単位を下げることである。そのためには、電力は再生可能エネルギーや原子力、燃料は天然ガス、水素、バイオ、CCUS⁷など検討されている。電源の方がCO₂排出原単位を下げやすいので、併せて電化を進めることが有効ではないだろうか。ヒートポンプは、省エネルギーと電化の二つに貢献する技術である。

○ ヒートポンプ技術

ヒートポンプは熱をくみあげる技術で様々な種類があるが、ここでは通常エアコンなどに使われている、電力駆動式の圧縮式ヒートポンプを対象として説明する。ヒートポンプは、エアコンなら外気、産業用なら工場排熱などから熱を回収して、電力で圧縮して高温にして暖房、給湯、乾燥などの用途に用いる。

○ 他の技術との比較

現在の電力1 kWhあたりのCO₂排出量は440g程度（2020年度）で、熱供給装置で得られる熱量あたりのCO₂排出量は装置によって異なるが、都市ガスボイラと比べるとヒートポンプはCOP（投入した電力と回収した熱量の和を投入電力で割ったもので効率を表す指標）が2.2程度あればほぼ同じ排出量、2.2を超えれば現在でもCO₂削減に寄与する。更に電源のCO₂排出係数が下がるにしたがってこの効果は大きくなり、COPが高いほど効果は大きくなる。ヒートポンプのCOPはくみ上げる温度差に依存するが、温度差60°Cで3程度である。

○ ヒートポンプの適用温度帯とプロセスへの統合

産業部門の熱需要は、200°C以上は主に製鉄、セメント、非鉄金属、石油精製など素材産業に集中している。200°C未満は色々な産業で需要があり、全需要の27%を占める。ここをヒートポンプのターゲットとしている。利用されている熱を形態別にみると、蒸気の利用が多い。ただし、この熱需要はプロセスの熱需要ではなく、ユーティリティ（工場の運転に必要な電気、水、圧縮空気、燃料、窒素などを供給する設備）の供給温度である点に注意が必要である。工場で蒸気を作って供給されている温度が必ずしも必要でない場合もある。例えば、デンマークでの調査結果では、チーズ工場で170°Cの蒸気を供給しているが、この工場のプロセス中の最高温度は120°C程度で、工場内の全熱エネルギーの内、大半（95%）の熱需要は100°C未満だった。ヒートポンプを導入する際にプロセスの熱需要を明確にできれば、COPが向上して実現性が増す。

⁷ Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage、回収・分離・貯留した二酸化炭素を化学原料の製造などに利用する技術

○ 産業用ヒートポンプの適用拡大に向けた2つの考え方

(a) プロセス温度の明確化やプロセス変更による熱需要温度の低減：蒸気利用から温水利用に変更でき、現在のヒートポンプ技術が適用できる。(b) ヒートポンプの供給温度の高温化による適用範囲の拡大：技術的には可能になってきているが、くみあげる温度差を大きくするほど COP は下がる。エネルギー情勢によって電力と燃料の経済性が変わり得るので、将来的にはあり得るかもしれない。現在は(a)から進めるべきで、将来的には(b)の高温ヒートポンプも開発して行く必要がある。

○ 産業用ヒートポンプの社会実装に向けて

これまで日本の産業用ヒートポンプ開発は、大型プロジェクトであっても大学・研究機関と機器メーカーの二者の産学連携だけで、要素技術などを開発するというプロジェクトだった。EU のプロジェクトでは、エンドユーザーやエネルギー会社も最初から組み込んで、工場で実証する所まで行うものがほとんどである。すでに商用化している技術であっても、それをどうやって様々な産業工程に組み込んで行くかの手法を構築するプロジェクトもある。機器開発は大事だが、研究者とメーカーだけではなく、エンドユーザー、エンジニアリング会社、エネルギーサービス会社など様々なプレイヤーを巻き込んで行く必要があるだろう。

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」

○ 熱技術の社会実装とふく射熱輸送

熱技術の社会実装に向けて、どれだけふく射熱輸送からアプローチできるかは、大変難しいが重要な課題である。ふく射熱輸送のすべてを網羅はできないので、ここでは赤外線熱輸送に絞って述べる。

○ 産業の排熱

ガスの状態で排出される産業の排熱を業種別、温度別にみると、200℃未満の排熱が多く 76%を占める。業種の中では電力と化学は、他よりも5倍程度排熱量が多い。高温域では、鉄鋼、非鉄金属からの排熱が多く、400℃～500℃の高温排熱も多量にある。

○ 鉄鋼業のふく射放熱

製鉄所の加熱炉から出てくる赤熱した板状の鋼（高温スラブ）の表面温度は1400℃の高温で、スラブ加熱炉から圧延に向かって搬送され、工程の最後に300℃程度の平たいロール状の鉄板にするまでの間、熱ふく射によって大気中に熱が放出される。鉄鋼業では、投入されたエネルギー量から約8割を占める還元に使われるエネルギーを除いた、残りの20%のエネルギーの約半分は熱ふく射による放熱と言われている。

○ 射出成型のふく射放熱

射出成型によるプラスチックの加工は、熱を入れて熱を奪うという、熱マネジメントからすると「無駄な」工程が多量にある。装置の各所に断熱機構が組み込まれているが、表面からの自然対流はもとより、低温での寄与は小さいと思われがち

のふく射放熱も、自然対流とほぼ同じくらいある。

○ 輸送機械

輸送機械分野では、内燃機関における熱管理も進んでいるが、消費した燃料の半分くらいは排熱として捨てられている。現在 GI（グリーンイノベーション基金）事業では、エンジンに供給された燃料の持つエネルギー量に対する有効に使われた出力の割合を表す正味熱効率を重量車で 55%、乗用車で 60%とする目標を設定している。すでに実験室レベルでは、乗用車で 53%を達成している。シリンダー内の温度制御で、水を噴霧して壁面近くの温度を下げる熱制御が施されている。すると排気温度が 300°Cまで下がる。この時の触媒温度の制御がかなり難しいので、ここにも熱マネジメントが関わってくる。

○ 民生機器

1973 年から 2017 年の間に、産業部門のエネルギー消費量が減少している一方で、家庭部門と業務部門では約 2 倍に増大した。主として家庭部門、業務部門で使われる民生機器に関わる技術としては、断熱が進展している。例えば冷蔵庫の断熱性が向上しているが、これは真空断熱材の開発による。通常の断熱材はウレタンやグラスウールを入れた内部に空気層を作るが、真空断熱材ではその中から空気を抜いて、真空断熱で断熱性を高めている。飲料の真空ボトルのように金属であれば容易にできるが、フレキシブルな断熱パネルで真空にしているのが特徴で、ここ 10 年くらいで普及してきた。熱伝導率は空気が 0.24W/m・K であるのに対し、真空断熱パネルは熱伝導率 0.004 W/m・K で空気の 1/6、消費電力は 1/5~1/6 になる。この試算をもとに冷蔵庫の消費電力を計算すると、平均で 30W 程度、LED ライトのわずか 3 個分である。

○ 製鉄所のふく射熱輸送制御

高温スラブの 1400°Cの表面からは、熱が半球状に放射される。日常的に経験している太陽光は平行で入ってくる。この違いが、放射された赤外線を利用する時に問題となる。解決法の一つが、メタサーフェスと呼ばれる構造化された表面を持つ材料の薄層で、例えば、絶縁体の両面に合金-絶縁体-合金の構造体を作ると、特徴的な透過を示すようになり、放射状に放出された赤外線に指向性を与え、屈折率、反射率をこの表面 1 枚で制御できる。ただし、構造が複雑なので、現状は数十テラヘルツ程度までが限界で、可視光や近赤外線に適用できるものは完成していない。もう一つの方法は、積層石英ガラスフィルターによる波長選択透過である。波長選択して有効な波長部分だけ TPV（熱光起電力）電池に送り発電に使う。

○ ソーラーTPV 発電システムにおける波長制御

太陽のエネルギーをいったん吸収体で吸収し波長選択して、ソーラーTPV 発電システムの光起電力セルに放射する。その時にカーボンナノチューブを使うと、特定の波長のみが放射される。

○ ふく射熱輸送の理解の普及

ふく射熱輸送は理論や現象が難解であるが、波長制御による排熱の低減や有効利用技術を効果的に導入するには、その理解の普及が必要である。

⑥ 近藤良夫氏（日本ガイシ株式会社）

「波長選択ふく射加熱炉」

○ 乾燥炉

乾燥炉は工業製品の製造過程で用いられる加熱装置の一つで、部品や部材を加熱してその中に含まれる溶媒や水分を除去する。リチウムイオン電池の製造を例にとると、リチウム酸化物、溶剤、バインダーの混合物を塗布し乾かして電極を作っている。乾燥に用いる炉には赤外線ヒーター式と熱風式があるが、9割以上が熱風式で50mの長さの炉内に数百 m³/min という多量の熱風を流して乾燥を行うため、多大なエネルギーを消費する。そこで、乾燥炉に赤外線を導入してプロセスの高効率化を図った。

○ 従来の赤外線加熱炉の問題

赤外線加熱炉では、炉上部に設置した近赤外線ランプヒータ、あるいは遠赤外線セラミックヒータを300℃～800℃に加熱する。問題の一つは、有機溶剤が炉内で揮発しヒータに付着して発火の恐れがあることである。もう一つは、乾かしたい溶剤の吸収度は波長の選択性が高いが、特定波長域を選択できないので、ヒータから放射されたエネルギーの多くがロスになってしまうことである。

○ 波長制御システム

従来のヒータの一つは、タングステンフィラメントを石英管で包んだ構造で、石英は波長3.5μm以上の遠赤外線の多くを吸収し、波長3.5μm以下の近赤外線も透過させる特性がある。しかし使用しているうちに長波長側を吸収して温度が上昇し、遠赤外線を二次放射するようになり、選択性がなくなる。これに対し石英管を二重にして、いったん石英が吸収した長波長側のエネルギーをエア冷却によって除去する。これによって、近赤外線だけを放射するヒータとなる。管の表面温度は150℃以下に低下したが、炉内の乾燥効果は維持された。搬送速度は熱風炉の2倍になり、省エネルギー効果も確認できた。この他に、長波長側を透過するタイプ、任意の波長を透過するタイプを開発し、社会実装を目指している。

○ 炉内への実装

従来型の多くのように気密性が高いと、起動から時間が経って定常状態になると、温度均一性が高くなり平衡系を形成する。すると、炉内の波長スペクトルが温度のみに依存するようになって選択性が失われ、波長制御が困難になる。これに対して、断熱を薄くして、あえて非平衡性を高めることでスペクトルの任意性を保つことができる。メインとなる波長は処理用途に応じて設定する。例えば、水やアルコールが溶媒の場合には、O-H伸縮振動を選択的に励起し乾燥を促進する。

○ 波長制御システムを用いたプロセス効率化。

有機溶剤の乾燥システムは多くあり、その工程を見直すことでCO₂削減の可能性がある。従来法では有機溶剤の乾燥には、ボイラーで蒸気を作りそれによって空気を加熱して熱風を得ている。乾燥炉の排気には有機溶剤が含まれているので、これを除く過程でもCO₂が排出される。今後は、赤外線を使い、熱源を蒸気から電気へ、

溶剤を有機系から水系に変換することによって、水の乾燥と親和性の高い近赤外線ヒータを用いて省エネルギーを目指す。有機溶剤を使った場合の脱臭系は相当な大きさの装置で、水系にしてこれが不要になる効果は大きい。

○ 今後の展望

波長制御熱ふく射の導入が各種プロセスで実現しつつあり、乾燥プロセスの低温化、膜のレベリング効果などを確認している。これまでは、いかに早く温度を上げることが問題だったが、いかに温度を上げずに処理するか、への発想の転換が重要である。温度を上げることによる製品劣化などの弊害をなくすことにもつながった。波長の概念を持ち込むことで、赤外線熱処理プロセスは飛躍的に高効率・省エネルギーになる。

今後は、一企業でできることは限られているので、産学連携、分野横断型研究の重要性が拡大するだろう。

(4) 総合討論

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

パネリスト：高瀬香絵（自然エネルギー財団）、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

① 総合討論に向けた話題提供

高瀬香絵氏（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」

○ 世界の動向と日本の現状

日本以外の G7 各国では、すでに大幅な電力部門の脱炭素化に向けて競争が始まっている。中でもフランスは原子力の比率が高いため、原子力と再生可能エネルギーを合わせて脱炭素発電量が 9 割を超えているが、日本は 22% の再生可能エネルギーと 6% の原子力で、G7 各国と比べて脱炭素への道のりは長く目標も低い。

○ 金融機関のネットゼロ誓約

多くの金融機関が投融资先を含めたネットゼロ、すなわちネットゼロを誓約していない所には投資しないと表明している。欧米だけでなく、日本の 3 メガバンクも入っている。

CO₂ 削減技術や自然エネルギーをもっともっとスピーディに入れて行かないと、日本の経済に影響が出るのではないかと懸念されている。

○ バリューチェーン全体のネットゼロ誓約

企業の誓約は、企業自体だけではなく、バリューチェーン全体のネットゼロを約束するものである。バリューチェーン全体とは、材料の購入先の上流まで含む。アメリカ政府も 2021 年 5 月に、サプライヤーに対して、GHG 排出量と気候関連の財務リスクを公開し、科学的根拠に基づく削減目標の設定を求める大統領令を出した。GHG 排出量ネットゼロを加速しないと、日本企業が選ばれなくなる時代がくる

のでは、と懸念している。今日紹介された技術がもっと加速して導入され、日本企業のネットゼロが進展することを期待している。

② 総合討論-1

社会実装に必要と考える条件、目指す実装時期

○ 能村貴宏氏

・今までの蓄熱技術は、材料開発のような個別の技術に終始していた。しかし実用には、材料だけでなく、材料の次にはデバイス、次いでシステムが必要で、ユーザーのニーズや条件も取り入れなければならぬ。この一連を一気通貫でやれば行かなければ、社会実装は難しい。

・蓄熱では省エネルギー技術として研究開発が進んでいたが、効率を高めれば省エネルギーになるので、今まで蓄熱がなくても産業や民生は成り立っていた。再生可能エネルギーが大量導入される時代には、蓄エネルギー技術によって変動を平準化しエネルギーの価値が向上することも起こる。こういった変化を見据えながら、社会実装に向かわなくてはならない。

・蓄熱材が社会実装される時期は、材料の種類によるが、少なくとも3年後にはその材料が実用化できるか否か判断したいという案件がいくつもある。カルノーバッテリーのような大規模システムになると、国として一丸となってやらねばならないプロジェクトなので、2030年、2040年ターゲットだろうか。

○ 村上陽一氏

・大学の基礎研究と社会実装の間には、ギャップがあることを認識する必要がある。企業から短期で成果を求められることは、社会実装の加速にならない。社会制度や補助金制度、政策制度まで考えなくては机上の空論になる。

・アメリカのトップ校では、共同研究に日本に比べて多額の研究費が企業から支払われ、大学院生の人件費が賄われる。基礎研究と事業化の間にあるギャップを埋めるためのギャップファンドも日本よりも多額である。この違いを見ずに社会実装を求めても実現は難しい。

・ギャップファンドの次の段階として、スタートアップから始まるシステムがある。大学発の研究には、技術的・原理的にかなり難しいものもある。ファンディングに、技術を評価できる「目利き」が必要である。

○ 則永行庸氏

・化学工学分野は成り立ちから実学、ニーズ指向なので、研究テーマの設定時から、何の役に立つのか、どういう企業と共同できるかを考えている。シーズを社会実装につなげる上では、一定の貢献ができていないのではないかと思う。

・カーボンニュートラル技術を加速する必要がある。アメリカは今年度末に1基あたりのCO₂回収量が100万トン以上の、大型のDACのハブを4か所設ける。そういったスピード感をもって、失敗も許しながらの技術開発、スピード感を持った投資が必要だ。

○ 甲斐田武延氏

・ヒートポンプ自体はエアコンなどで使われていて、産業用ヒートポンプは材料や加工技術の進展とともに作動温度を上げて、適用範囲を広げてきた。高温になるほど、実際に工場などへ導入するハードルが高いが、100℃未満はかなり入ってきている。社会実装に向けては、まずは100℃未満レベル、技術的に信頼性あり、かつ経済的にも成立しやすいものを入れて行く。そのためには、工場内のプロセスの熱需要をちゃんと見えるようにする必要があるが、その情報がまだ不十分である。

・産業用の難しい所は、工場の加熱プロセスの温度情報などが表に出せないのも、エンドユーザー、ヒートポンプの機器メーカーの間で情報のやりとりがしにくいことだ。今後普及を加速するためには、エンドユーザーとヒートポンプの機器メーカーの間に立って、加熱工程の情報を分析し適正なヒートポンプの選定を行う、プロセス統合の担い手が出てくるのが重要である。

・産業用は生産プロセスによって加熱の熱需要が異なるので、その情報を把握できるようにすることが導入を加速する。これに加えて、どう組み込んだら効果的か、そのためのプロセス統合手法も必要で、学術的にもまだやることはある。そのためには国の制度、技術開発であれば研究開発だけでなくエンドユーザー、エンジニアリング会社、エネルギーサービス会社なども加えて推進する必要がある。

○ 花村克悟氏

・未利用熱エネルギーの中でも赤外線をどう扱うかについては、ふく射の輸送そのものが理解されていない。四方へ放射されるエネルギーをどうとらえて、利用できるようにするか、熱電発電でも光電池でも、これがネックになる。理解を深めることが第一歩だ。真空断熱のように普及しているものでは、銀やすずの膜が張られて入射量を減らす工夫がある。

・デバイスが開発され実用化されるためには、価格とそれに見合うパフォーマンスがあるかが重要である。太陽電池と比べて赤外線を電力に変える電池はやや高価なので、そこを補填できる効果が求められている。

・宇宙放射を利用した冷却は一部商品化されているが、実際に使おうとすると別の規制が入る。例えば太陽光を遮るために屋根に貼るには10年保証が必要で、そこがハードルになる。光電池は効率が上がってきた。高い性能が実用化を加速する。

・今日紹介した技術のいくつかは、数年で社会実装を進めることができる。ここ5年がキーである。

○ 近藤良夫氏

・近赤外ヒータは、量産工程で実用化されている。これは石英という多く流通している材料を使っていたからだ。講演で紹介した波長制御システムを用いた乾燥法を導入するには、現状ではかなり綿密な事前実験が必要で、1～2年かけて条件を検討しようという顧客のみが良い結果を得ている。花村氏の言ったような赤外線技術の理論を含めた、知見の把握、基礎技術の認知が大きく寄与する。

・一方で、どれだけ優れた技術ができて、安定的に生産する責任を担っている熱プロセスの生産現場からすると、装置を変えたくない。トップダウン型の働きかけが必要な場合もある。

③ 総合討論-2

参加者からの質問、意見に対するパネリストの回答

○ 高瀬香絵

チャットに記入された意見、「省エネルギーやリサイクルまでは良いが、それ以上は高くなって逆に経済が壊れるのではないか」に対して。

・少し前ならその可能性があったかも知れないが、今では社会実装が進んで再生可能エネルギーが一番安い発電技術になっている。トランプ政権は石炭に回帰するとしたが、実際には再生可能が一番多く導入された。これは市場原理であって、市場原理では再生可能エネルギーが一番安いというのが現状だ。したがって、省エネルギー、リサイクルに加えて、再生可能エネルギーは逆に経済的に有利である。ただ、季節間貯蔵などの技術が問われる時代に入ってきた。

・カーボンプライシングについては、制度・規制として入っている国も、入っていない国も、日本ように大変低いカーボンプライスを入れている国もあるという状況である。それに対してヨーロッパでは、ヨーロッパに入ってくる鉄やセメントなどに対しては、輸出国で相当のカーボンプライスを入れている場合は、その分の証書を買わなくてはならないという、国境炭素調整措置を2026年に導入する予定である。脱炭素はもう経済に直結している。

・炭素税は税収で、それを使って経済が回って行くから、経済の質は変わっても経済縮小にはならない、というのが応用一般均衡モデルの人の一般常識だ。供給サイドの人はコストが上がると大変だと思いがちだが、炭素税収を何に使うかによって経済の質も変わる。

・社会実装については、各講師の意見に加えて、もう一つ大変重要なのが透明性とガバナンスだ。もっと透明性を上げながらガバナンスを強めて行き、選択と集中を行う。

○ 会場参加者から

社会実装に有効な方法として、技術が見えるような場を設けてはどうだろうか。技術をショーケースする場を一時的ではなく常設で作り、技術や実証を一般に公開する場が広がると、色々なステークホルダーの目にもまれて社会実装が加速され、資金を集める仕組みに繋がって行くのではないか。啓蒙と共に、逆に一般の目からのインプットを得る場ともなり、もっとシステムティックに力を集めて動くことができるかもしれない。

○ 会場参加者から

シーズの発見、応用研究、実証研究と進んで産学連携などの手段で社会に届けるという、リニア型で社会実装を目指すような意見が多かったが、今はそれでは社会実装には行かないという世界に到達している。社会実装の議論では、Problem Solution Fit (PSF、顧客が抱えている問題・課題を解決する製品・技術を提供している状態)をまず考えることが必要だろう。シーズからではなく、顧客がどんなにお金を払っても取り除きたい問題に焦点を当てて、試作品の提供とそこからの

フィードバックによる社会実装をスタートする議論をするのが、最近の定石ではないだろうか。その後、PSFの次の段階であるProduct Market Fit（顧客の課題を満足させる製品・技術・サービスを提供し、それが適切な市場に受け入れられている状態）をやって行くべきではないだろうか。そうでなければ、従来のようにゆっくりとした社会実装にしか行かないかという感想を持った。

○ 藤岡恵子

社会実装に向けては今の会場からの意見のような様々なアプローチがあつて、非常に大事な視点だが、それは決してシーズの重要性と相反するものではなく、せつかくのシーズが生きるようなアプローチを考ようという貴重な指摘と考える。

3 公開シンポジウム報告のまとめ

2021年11月の「カーボンニュートラルに向けた熱エネルギー利用の可能性と課題」では、カーボンニュートラルに向けた政府の政策の概要と其中での熱に関する施策、産業排熱の実態データ、産業界の野心的な取組みに関する講演と議論を通して、熱利用の現段階が明示された。カーボンニュートラル実現にとって熱利用の推進が不可欠であり、再生可能エネルギー大量導入時代に蓄熱が重要な技術となることについて共通の認識を確認できたと考える。一方で、積極的な政府の政策的支援を得るには技術的な成熟が十分でないこと、熱利用を拡大するための熱需給市場の形成にとって情報開示の困難さや経済性が見通しなど課題も示された。要素技術や材料の開発は進んでおり、それらを統合するシステムの構築を急がなくてはならない。

2023年5月の「カーボンニュートラル時代の熱エネルギー-革新技术と社会実装-」では、2021年のシンポジウムを発展させるものとして、今後の熱エネルギー利用の要となる蓄熱材料、未利用冷熱、ヒートポンプ、ふく射熱輸送に関する先端技術に焦点を当て、これらの技術によって新たな熱エネルギー有効利用や省エネルギーの新しい分野と、技術を社会実装するための道筋や課題について議論した。革新技术の社会実装には、研究者や機器製造企業だけでなく、エンドユーザー、エンジニアリング会社、エネルギーサービス会社等、将来の市場形成に不可欠な機関と連携して研究開発に取り組むことの重要性、効果的な新技术導入には技術の基礎となる原理の理解が必要であること、2021年のシンポジウムでも議論された熱需給データの情報開示は、効率の高い熱プロセス設計のためにも重要であることを確認できた。

2023年のシンポジウムでは、2021年の2倍以上の500名近い参加者があった。カーボンニュートラルと熱エネルギー利用への関心の高まりを反映している、と言えるだろう。今後も日本学術会議をはじめとして市民、企業、研究者と共に考える場を作って行きたい。