

カーボンニュートラルに向けたエネルギー  
貯蔵技術研究会  
報告書

令和6年7月

一般社団法人 日本機械学会

動力エネルギーシステム部門

カーボンニュートラルに向けたエネルギー

貯蔵技術研究会

## 目次

委員リスト	ii
カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスの ための提言(2024年)	iv
1. 緒言	1-1
2. エネルギー貯蔵技術の調査	2.1-1
2.1 蓄熱発電	2.1-1
2.2 高温蓄熱材料技術	2.2-1
2.3 潜熱蓄熱マイクロカプセル	2.3-1
2.4 潜熱蓄熱伝熱促進	2.4-1
2.5 水素吸蔵合金を用いた蓄熱	2.5-1
2.6 化学蓄熱	2.6-1
2.7 高効率ヒートポンプ	2.7-1
3. エネルギー貯蔵技術の利用に関する調査	3.1-1
3.1 蓄電池	3.1-1
3.2 余剰再エネの活用	3.2-1
3.3 産業分野への蓄エネ利用	3.3-1
3.4 スマートシティネットワーク	3.4-1
3.5 バイオ炭素長期備蓄型循環型社会	3.5-1
3.6 原子力の機動性	3.6-1
3.7 蓄熱を組み合わせた高温ガス炉	3.7-1
3.8 蓄熱を組み合わせた高速炉	3.8-1
3.9 欧米における蓄熱技術導入状況	3.9-1
4. エネルギーストレージベストミックスの検討	4.1-1
4.1 エネルギー貯蔵の必要性	4.1-1
4.2 経済性の観点から蓄エネルギー技術の役割	4.2-1
4.3 エネルギー貯蔵システムの役割	4.3-1
4.4 エネルギー貯蔵技術の比較	4.4-1
4.5 蓄熱技術におけるライフサイクル設計	4.5-1
4.6 エネルギー貯蔵システムを組み合わせた再エネと原子力の経済性評価	4.6-1
4.7 核燃料サイクルのカーボンニュートラルへの貢献	4.7-1
5. 結言	5-1
付録A 開催実績	付A-1
付録B 報告書執筆主担当	付B-1
付録C 本研究会に関連した外部発表	付C-1
付録D 日本機械学会環境工学部門との意見交換	付D-1
付録E 日本電気学会との意見交換	付E-1

## 委員リスト

	氏 名	所 属
主査 幹事	加藤 之貴	国立大学法人東京工業大学
	山野 秀将	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	高野 和也	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
	上遠野 健一	株式会社日立製作所
	岩城 智香子	東芝エネルギーシステムズ株式会社
	近藤 浩夫	三菱重工業株式会社
委員	小宮山 涼一	国立大学法人東京大学
	藤井 祥万	国立大学法人東京大学
	竹下 健二	国立大学法人東京工業大学
	奈良林 直	国立大学法人東京工業大学
	木倉 宏成	国立大学法人東京工業大学
	高橋 秀治	国立大学法人東京工業大学
	能村 貴宏	国立大学法人北海道大学
	丸岡 伸洋	国立大学法人東北大学
	児玉 竜也	国立大学法人新潟大学
	Selvan Bellan	国立大学法人新潟大学
	郷右近 展之	国立大学法人新潟大学
	大川 富雄	国立大学法人電気通信大学
	小泉 安郎	国立大学法人電気通信大学
	武田 哲明	国立大学法人山梨大学
	伊藤 啓	国立大学法人京都大学
	守田 幸路	国立大学法人九州大学
	森 昌司	国立大学法人九州大学
	中垣 隆雄	学校法人早稲田大学
	松尾 雄司	学校法人立命館 立命館アジア太平洋大学
	斉田 愛子	国立研究開発法人産業技術総合研究所
	岡崎 徹	一般財団法人エネルギー総合工学研究所
	木野 千晶	一般財団法人エネルギー総合工学研究所
小竹 庄司	日本原子力発電株式会社	
梅沢 修一	東京電力ホールディングス株式会社	
高橋 良太	三菱重工業株式会社	
井手 章博	三菱重工業株式会社	
定廣大輔	富士電機株式会社	
上田 洋二	大成建設株式会社	

小林 政徳	小林政徳 技術士事務所
堀 雅夫	原子力システム研究懇話会
早船 浩樹	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
ヤン ジングロン	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大野 修司	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大滝 明	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
天野 嘉春	学校法人早稲田大学
柴田 貴範	国立大学法人岩手大学
西村 顕	国立大学法人三重大学
井田 民男	学校法人 近畿大学
小倉 裕直	国立大学法人千葉大学
中神 靖雄	NPO 法人 NSF
松田 圭司	学校法人松山大学
麓 耕二	学校法人青山学院大学
中村 雄史	独立行政法人海技教育機構 海技大学校
浅野 等	国立大学法人神戸大学
中澤 亮	株式会社 IHI
白川 昌和	東芝エネルギーシステムズ株式会社
堀川 英知	ダイハツ工業株式会社
石川 温士	株式会社 IHI
服部 康男	一般財団法人電力中央研究所
中川 二彦	国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学
寶山 登	三菱重工業株式会社
深田 利昭	一般財団法人電力中央研究所
香川 澄	学校法人早稲田大学
菊地 隆司	国立大学法人東京大学
島屋 進	大成建設株式会社
大久保 雅章	大阪公立大学
高須 大輝	国立大学法人東京工業大学
船山 成彦	国立大学法人東京工業大学
加藤 敬	国立大学法人東京工業大学
原田 琢也	国立大学法人東京工業大学
Massimiliano Zamengo	国立大学法人東京工業大学

合計 67 名（敬称略・順不同）

期間： 2021 年 11 月～2024 年 3 月

# カーボンニュートラル達成に向けたエネルギー ストレージベストミックスのための提言(2024年)

日本機械学会動力エネルギーシステム部門  
2024年度(第102期)部門長 大川 富雄

2023年2月、日本政府は「GX(グリーントランスフォーメーション)実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～」をとりまとめ、「気候変動問題への対応に加え、ロシア連邦によるウクライナ侵略を受け、国民生活及び経済活動の基盤となるエネルギー安定供給を確保するとともに、経済成長を同時に実現」するための取組を発表した。将来にわたり社会全体でGXを実現するためには、再生可能エネルギー(再エネ)と原子力発電といった脱炭素技術を最大限活用し、加えて、エンタルピー基準で日本のエネルギー消費の7割(約9 EJ)<sup>1</sup>を占める産業・民生・運輸といった非電力部門の電化を進め、エネルギー危機に耐え得る強靱なエネルギー需給構造に転換していく必要がある。また、非電力部門のエネルギー消費は熱エネルギーが大部分を占めており、社会全体でエネルギー利用効率を考える必要がある。グリーン社会へ転換するためには、脱炭素技術、熱エネルギーの有効活用、炭素循環、エネルギーストレージ(貯蔵)・輸送・変換が大きな役割を果たす。2023年6月、日本政府は「水素基本戦略」を改定し、水素社会の早期実現に向けた国家の意志を表すものとして取り組み方針を明示した。しかし、取組み量は数GW相当レベルであり、我が国の総需要13 EJ(2019年時点)に対して効果が限定的である。これに対して、例えば余剰の再エネを変換、貯蔵するといった調整力の役割を果たすものは水素以外にもあり、再エネ導入拡大に貢献できる。また、排熱量の賦存量は多く、この活用は産業の省エネルギー、カーボンニュートラル化への量的な貢献が大きく、エネルギーストレージが重要である。

日本機械学会動力エネルギーシステム部門「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」は、学術専門家集団として、関連技術の実現可能性、事業性等にかかる科学的見地に基づいた望ましい2050年カーボンニュートラル達成に向けた最適なエネルギーストレージ技術を検討し、以下の提言にまとめた。

---

<sup>1</sup> [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/xls/stte/stte\\_jikeiretu2022fykaku.xlsx](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/xls/stte/stte_jikeiretu2022fykaku.xlsx)

【提言 1】 変動性再エネ主力電源化に対応したエネルギーストレージベストミックスの確立を図るべき

【提言 2】 ゼロカーボンエネルギーによるグリーン社会への転換を図るべき

【提言 3】 産業・民生部門における蓄熱技術の更なる有効活用を図るべき

【提言 4】 2050 年以降のカーボン・ネガティブ・エミッションの実現を目指したエネルギーストレージ戦略を構築すべき

【提言 1】 では、電力部門において、カーボンニュートラルを達成するため、主力電源化される再エネの変動性に対応できるエネルギーストレージ技術を適切に組み合わせる必要があることを述べる。【提言 2】 では、グリーンエネルギー社会へ転換するため、安定電源のゼロ・エミッション化が必要であることを述べる。【提言 3】 では、非電力部門において、熱エネルギーを有効活用するため、蓄熱技術を活用する必要性を述べる。【提言 4】 では、2050 年以降にあるべき姿として、長期的なエネルギー確保を見据えながら、カーボン・ネガティブ・エミッションを実現する必要性を述べる。

本提言が「第 7 次エネルギー基本計画」へ反映されることを期待したい。また、エネルギー産業を支える人材育成が活発化されることを期待したい。

## 提言 1: 変動性再エネ主力電源化に対応したエネルギーストレージベストミックスの確立を図るべき

(提言 1-1) 再エネの最大限導入とそれを補完するエネルギーストレージによるエネルギー安定供給を図るべき

**再エネの変動性に対応したエネルギーストレージの拡大：**2050 年カーボンニュートラルを達成するためには、変動性再エネは経済的合理性を確保しながら最大限導入されることが期待される。ただし、日中の変動性(昼間の余剰電力と夕方の不足電力等)に対応するため、需要に応じた出力調整が可能な安定電源の割合を確保するとともに、エネルギーストレージの拡大を図るべきである。現在、我が国の発電量の約 8 割をカバーする火力発電(約 150 GW)<sup>2</sup>の出力調整と、揚水発電(約 27 GW)<sup>3</sup>や大容量蓄

<sup>2</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/pdf/074\\_10\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/074_10_00.pdf)

<sup>3</sup> <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/yousuihatuden.html>

電池（1 GW 以下）が活用されているが、今後、ますます変動性再エネが導入され主力電源化されることを考えれば、安全性を向上させた CO<sub>2</sub> を排出しない原子力発電による出力調整可能な割合を増やすとともに、適地は限られるものの炭素回収貯留（CCS）を前提とした火力発電による出力調整が不可欠である。これとともに、希少資源が必要で高コストになる大容量蓄電池や、開発規模が限界に近づいている揚水発電だけでなく、大規模で低コストエネルギーストレージ技術が必要である。

**余剰再エネの出力制御（出力抑制）の回避：**近年では、再エネの導入が進んだことにより、需要が少ない時期などには、火力発電の出力の抑制や地域間連系線の活用等により需給バランスを調整した上で、それでもなお電気が余るおそれがある場合に再エネの出力制御を行っている。九州電力では、太陽光発電の出力制御は 2021 年に 82 日<sup>4</sup>も実施しており、総発電量の 4.2%（5.1 億 kWh）<sup>5</sup>、10 円/kWh 換算で約 51 億円の損失になっている。これは今後ますます増加傾向にあると考えられる。今後、太陽光発電が増加することを考えて、地域間連系線の増強が計画されているが、そのための費用や期間を考えると、タービンが担ってきた慣性力<sup>6</sup>（発電を一定に維持する力）の不足に陥る可能性がある。蓄電池増量だけでなく、慣性力を有した低コストエネルギーストレージ技術が必要である。出力制御は 2023 年度に東京電力管内以外の全国で発生しており、早晚東京電力管内でも発生されると予測される。現在固定価格買取制度で 4 兆円/年<sup>7</sup>が再エネ発電に使われており設備利用率の低下による経済的な損失も看過できない。よって、早急なエネルギーストレージ対策が必要である。

**エネルギーストレージ技術の確立：**変動性再エネを最大限導入するにあたっては、系統安定化や調整力の確保が課題となる。2050 年も現在の電力需要並みと想定すれば、変動性再エネによる発電量で 40%確保し、出力調整可能な安定電源で残りの 60%の発電量を確保できる場合でも、朝夕の不足電力発生に伴って停電に至らないように、1 年間に数十日程度は 100GWh 規模<sup>8,9</sup>（1 日当たりの最大の不足電力）の電力貯蔵量

---

<sup>4</sup> [https://www.occto.or.jp/oshirase/shutsuryokuyokusei/2022/files/220629\\_kouhei\\_kenshokekka.pdf](https://www.occto.or.jp/oshirase/shutsuryokuyokusei/2022/files/220629_kouhei_kenshokekka.pdf)

<sup>5</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/shin\\_energy/keito\\_wg/pdf/036\\_02\\_09.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/036_02_09.pdf)

<sup>6</sup> 火力発電機などの発電機は、回転子を回転させて発電するため、自らの回転子を一定回転に維持しようとする慣性を持ち、電気的な瞬時の変化に耐えることができる。

<sup>7</sup> <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/saiene/saienecost.html#:~:text=固定価格買取制度導入>

<sup>8</sup> <https://www.jsme.or.jp/pes-files/Research/A-TS08-12/210906.pdf>

<sup>9</sup> <https://www.jsme.or.jp/pes-files/Research/A-TS08-12/Y2021-2.pdf>

が必要となる。この貯蔵量として、CO<sub>2</sub>を排出しない形での蓄電（電気自動車等の利活用等）、蓄熱発電といったエネルギーストレージ技術の確立と低コスト化のための技術開発が急務である。

**水素技術の課題：**水素価格は現状 80～100 円/Nm<sup>3</sup>程度であるが、2050 年時点で 20 円/Nm<sup>3</sup>、2000 万トン/年程度の導入を目指している<sup>10,11</sup>。しかしながら、水素価格 20 円/Nm<sup>3</sup>は、カロリーベースで 1.6 円/MJ に相当する。これは、現状のアンモニアの 2.4 円/MJ、LNG の 1.8 円/MJ より低い価格である<sup>12</sup>。太陽光発電を用いた水電解で水素を生成した場合、電解効率を 87%程度、生成水素の液化効率を 80%程度、さらに水素を用いた発電効率を 65%程度とすると、入力電気から出力電気へのトータル変換効率は 40%超と見積もられる。しかしながら実際の液化効率を用いるとトータル変換効率はより低くなる<sup>13,14</sup>。また、各工程で、イオン交換膜を用いた水電解、極低温技術（もしくは、水素改質技術）、水素燃焼、水素貯蔵、防爆等の開発技術が引き続き必要である。それらがコストに相当に反映されることを考えると、将来における水素のコストを低減させるためには、革新的な技術の開発に加えて、技術の大規模な普及や政策・制度面での強力な後押しなどが必要となり、その実現には課題があることを認識すべきである。水素やそれを変換した他の物質は、長期のエネルギーストレージが可能になることから、季節間における需給調整への適用が考えられる。

**エネルギーストレージベストミックス：**大規模エネルギーストレージ技術には、揚水、蓄電池、水素、蓄熱等が挙げられる。揚水は約 27GW の容量を有し<sup>15</sup>、現在の主力蓄電装置であるが、我が国の国土制約により適地が限られ、現状施設利用からの大幅な増加は期待できない。蓄電池は、蓄電効率の高さから今後期待される分野であるが、蓄エネルギー密度、火災リスクの特徴から小規模利用の方が適している。また、蓄電池は、レアメタルを海外依存しており、市場価格や国外情勢に影響を受けやすい。我が国は強靱なサプライチェーン構築を目指しているが、過度な海外依存度は低減すべきである。水素は、外国で生産したものを輸送することが考えられているが、国内生

---

<sup>10</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/safety\\_security/suiso\\_nenryo/pdf/013\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/safety_security/suiso_nenryo/pdf/013_05_00.pdf)

<sup>11</sup> 日本経済新聞 HP: “<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA044K70U3A400C2000000/>”

<sup>12</sup> 一般社団法人資源プラ協会, “【なごやラボだより】アンモニア価格の推移から分かる事”, 2023.2.1

<sup>13</sup> <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220411/pdf/20220411.pdf>

<sup>14</sup> [https://jstage.jst.go.jp/article/randi/30/0/30\\_201/\\_pdf/-char/ja](https://jstage.jst.go.jp/article/randi/30/0/30_201/_pdf/-char/ja)

<sup>15</sup> <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/yousuihatuden.html>

産では、変動型再エネ発電による系統の余剰電力を水の電気分解により水素に転換して貯蔵し、それを系統が必要とする時にタービン/燃料電池などで発電して系統へ戻す水素電力貯蔵システムも期待されている。ただし、この方式には設備の費用や電力貯蔵の効率などを総合したコストに課題があり、コスト低減を図った水素製造技術が必要である。蓄熱は、現在は我が国で大規模な技術導入はされていないが、最近になって諸外国で蓄熱技術の導入が活発になっている。蓄熱は、入力電気から出力電気へのトータル変換効率で36%程度（蓄熱効率90%、発電効率40%とした場合）であり、水素と同程度またはより高い可能性がある。しかも、ほぼ既存技術で実現可能で、コスト・技術の両面で水素よりも優位である。さらに、発電の慣性力、安全性の観点で、大規模エネルギーストレージ技術に適している。これらのエネルギーストレージ技術をうまく組み合わせてエネルギー安定供給を図っていくことが必要であり、エネルギーストレージについて最適な技術ミックス、すなわち、エネルギーストレージベストミックスを目指すべきである。

## （提言1-2）エネルギーストレージ技術の社会実装を図るべき

**エネルギーストレージミックスの経済合理性：**カーボンニュートラルを目指す代償として変動性再エネの大量導入に伴うエネルギーコストの上昇が挙げられる。それを抑えるためには、経済合理性を十分に考慮した上で、さまざまな技術オプションを適切に組み合わせたエネルギーシステムを構築することが必要である。この観点から、エネルギーストレージベストミックスを目指すことが望ましい。数時間～数日程度の比較的短期の自然変動に対しては、サイクル効率の高いリチウムイオン電池等の蓄電池によって対応することが適切である一方で、より長期間（数週間程度）の変動に対応するためには、サイクル効率では劣るものの貯蔵量当りのコストが安く安全性が高い蓄熱などの技術を用いることが経済合理的である。さらに、より長期（数か月～数年）のストレージのためには、現在の国家石油ガス備蓄に加えて、自己損失率の低い水素やアンモニア、e-fuel（グリーン水素から合成されたメタン、メタノールなど）などのエネルギーキャリアに変換してのストレージ等の技術を用いることが望ましい。このように、経済合理性の観点から、時間スケールに応じて最適な技術が異なるため、変動性再エネ比率の高い将来のエネルギーシステムにおいては、多様な技術を組み合わせたストレージミックスの実現が望ましいものとなる。その上で、それぞれのストレージ技術のコスト、特にエネルギー貯蔵量当りの設備コストの低減に向けた技術開

発を促進し、早期の社会実装を図ることが必要である。

**国産技術開発とサプライチェーン構築：**エネルギーイノベーションの結果、新たな産業・新たな技術が導入され得るものと考えられるが、これらを国産技術とし、国内産業のサプライチェーンが構築される必要がある。蓄電池の場合、原材料であるバッテリーメタル（リチウム、ニッケル、コバルト）の埋蔵量、生産量ともに特定国（豪州、南米、コンゴ民主共和国、インドネシア等）に偏在しており、中流の精錬工程は製造コストの安い中国に集中している。また、燃料電池で使われる白金や PEM（固体高分子膜）型水素製造装置で用いられるイリジウムなども偏在しており、今後、蓄電池や水素のエネルギー利用が広がると、資源の価格上昇や囲い込みなどを引き起こし、資源の安定供給ひいては我が国のエネルギーの安定供給が妨げられる恐れがある。これらに対応するため、鉱山権益への出資による上流資源の確保とともに、偏在する資源に頼らない多様なエネルギーストレージ技術の開発が重要である。そして、開発した技術を国産技術とするべく、特定国資源に頼らない国内産業のサプライチェーンを構築すべきである。また、低コスト化に向けた研究開発への積極的な支援が行われる必要がある。

**投資環境の整備：**エネルギーインフラ構築に産業界が参入しやすくするための投資環境を整備すべきである。日本はエネルギーストレージに関わる優れた要素技術を数多く有するものの、それらを統合して様々なニーズに応えるシステムとして実現すること、またその効果や運用性を検証するためのフィールドでの実証試験が諸外国に比べて少ない。実証試験によって要素技術及びシステム全体の課題を抽出し、それに対する改良といったフィードバックを重ねることで技術が完成し社会実装に繋がる。この過程を一企業のみで実施することは不可能なため、産官学の連携のみならず、これを遂行するための政府からの資金面での支援が求められる。また、産業界にとって市場性・事業性を見出し、エネルギーストレージに関する投資を促すために、カーボンニュートラルへの貢献に応じたインセンティブ付与など、一層の制度面の整備を期待する。

### （提言 1-3）エネルギーストレージ技術の開発を支援すべき

**次世代技術開発支援：**社会実装を進めることと並行して、次世代技術の開発を促進し

て、エネルギーストレージ技術で世界を先導していく必要がある。例えば、蓄熱技術については、従来の顕熱技術による低コスト化だけでなく、効率を向上させた潜熱蓄熱や化学蓄熱といった技術開発は日本が主導できる可能性を有している。

## 提言 2：ゼロカーボンエネルギーによるグリーン社会への転換を図るべき

### (提言 2-1) 調整力に富んだクリーンな安定電源を確立すべき

**水力発電の出力調整機能：**水力発電は安定電源としての役割だけでなく、揚水発電によって調整力としての役割を担ってきた。しかしながら、我が国の国土条件の制約により限界があり、2030 年までにほぼ限界に近い発電量になると予想されるが<sup>16</sup>、できるだけ増やしていくことが重要である。

**火力発電の出力調整機能：**火力発電は慣性力を有しており、変動性再エネ大量導入により電力システムの同期化力の低下が懸念される中、クリーンな火力発電技術の確立はシステムの安定性を維持する上でも重要である。再エネの変動性に対応した調整力として役割を果たしてきた火力発電は蓄熱技術を導入して調整力として柔軟性を持たせるよう検討が進められている<sup>17</sup>。蓄熱発電で火力発電の蒸気タービン発電機が活用できるため、蓄熱発電の低コスト化が期待される<sup>18</sup>。また、火力発電の最大の課題は CO<sub>2</sub> 排出量をゼロにすることであるが、高効率化による低排出化、水素、アンモニアやバイオマス等の低炭素燃料化を図り、炭素回収・再生循環利用・貯留 (CCUS) と併せ運用することでこの課題に対処する。限られた我が国の国土で CCUS 設備をより多く確保し、貯留負荷の削減を伴った経済的なカーボンニュートラルを実現していく必要がある。蓄熱利用は、そうした火力発電のカーボンニュートラル化のための CCUS 併

---

<sup>16</sup> 2030 年における再生可能エネルギーについて、資源エネルギー庁 (2021 年 4 月 7 日)

[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/saisei\\_kano/pdf/031\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/031_02_00.pdf) (82 ページ)。大水力と揚水は 2030 年における導入見込み量は現時点から増加無し。中小水力は現時点 977 万から政策強化した場合 1,044.8 万 kw に増加。

<sup>17</sup> 再生可能エネルギー時代の高効率電力レジリエンス蓄熱システム, 三菱重工技報 Vol.57 No.1(2020)

(<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/571/571040.pdf>)

<sup>18</sup> [脱炭素社会に向けて開発進む蓄熱発電](#)

[https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2021/03/02/2102m\\_inada.pdf](https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2021/03/02/2102m_inada.pdf)

設や、低炭素燃料転換（水素・アンモニア）のコスト改善、また、CO<sub>2</sub>分離回収プロセスや燃料改質プロセスの省エネ・運用効率化に寄与する。

**原子力発電の出力調整機能**：我が国では既に水力発電、バイオマス発電、地熱発電等の出力調整可能な安定再エネが開発されているが、これらによる発電量は、総発電量の15%程度が限界と考えられている<sup>19</sup>。このため、2050年までのカーボンニュートラルを実現するには、安定電源として必要な60%の残りの45%<sup>20</sup>をゼロ・エミッション電源である原子力とCCS付き火力を活用していく必要がある。原子力発電は、新たな安全メカニズムを組み込んだ新設炉により安全性向上が図られている。また、火力同様慣性力を有し、出力調整能力（負荷追従運転）があり、仏国・カナダ等において既に実施されている<sup>21</sup>。より経済的に変動性再エネを補完するために、負荷追従の際に原子炉出力を低下させずに、発電負荷のみを追従させた際に生ずる余剰の熱エネルギーを蓄熱や水素製造等に利用することが可能である。米国では、負荷追従ではなく、原子炉出力を低下させずに蓄熱するナトリウム冷却高速炉に熔融塩蓄熱を結合したシステムの開発が進められている<sup>22</sup>。このシステムは売電価格の変動に対応して発電する柔軟性・経済合理性に優れ、仏国等の諸外国でも関心が高まっている。我が国においても、蓄電・蓄熱技術の開発と並行して、このような経済性を向上させた熱エネルギーストレージを併用する革新軽水炉や高速炉を開発し、安定電源を構築していくべきである。

## （提言2-2）予見性のある適正な市場環境を確立すべき

**安定なエネルギー市場の確立**：新たな技術に事業者が参入する上で、事業者が適正な市場競争の下で取引ができる安定なエネルギー市場が存在することが必要不可欠となる。民間の投資判断に予見可能性を与えるためにも、国の意思と方針を明確に打ち出し、過渡期にある電力システム改革をしっかりと検証し、安定化させるための制度設計を行うとともに、エネルギーインフラ構築に産業界が参入しやすくするための投資環境を整備すべきである。このためには、発電コストのみならず送配電や系統安定

<sup>19</sup> [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/54/2/54\\_91/\\_pdf/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaesjb/54/2/54_91/_pdf/-char/en)

<sup>20</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/pdf/066\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/066_05_00.pdf)

<sup>21</sup> [https://www.jaif.or.jp/cms\\_admin/wp-content/uploads/2015/12/sp\\_necg\\_1208-12.pdf](https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/12/sp_necg_1208-12.pdf)

<sup>22</sup> <https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/>

化のコストを適切に分析し、電力システム全体としての収益性を評価する必要がある。競争市場の予見性が低下し、投資の回収性にかかる不確実性が増せば、新規の電源への投資がなされず、単に市場にその経済を委ねるだけでは安定供給が維持できず、ひいては再エネの導入も遅延させる事態に陥りかねないため、変動性再エネが大量に導入される将来のエネルギー市場において、慣性力を有する蓄熱発電などの調整力を担う電源の収益の安定化は重要な課題である。国が適切な将来のビジョンを示し、「GX 経済移行債」等を活用した大胆な先行投資支援、カーボンプライシングによる GX 投資先行インセンティブ、新たな金融手法の活用などを含む「成長志向型カーボンプライシング構想」により<sup>23</sup>、そのビジョンに向けて強力な施策を推進することが必要である。

### 提言 3：産業・民生部門における蓄熱技術の更なる有効活用を図るべき

#### （提言 3-1）蓄熱技術を用いた熱エネルギー利活用を図るべき

**熱エネルギー利活用：**我が国の最終エネルギー消費の熱エネルギー割合は電力 3 割程度、運輸・産業といった非電力（熱）7 割程度である<sup>24</sup>。非電力分野での熱エネルギーの利活用は重要である。2030 年時点で CO<sub>2</sub> を 2013 年度比 46%減にするためには非電力分野の低炭素化が急務である。再エネの変動出力を安価、かつ高効率にエネルギーストレージが可能な技術として、蓄熱を活用した P2H2P（Power-to-Heat-to-Power、電力蓄熱発電）が検討されている。産業界では、P2H2P から電力のみならず直接熱供給が可能である。また、産業間の熱融通を行うセクターカップリングによりエンタルピーベースの熱効率はコジェネレーションと同程度とすれば 80%程度<sup>25</sup>は期待でき、産業の低炭素化に貢献可能である。さらに、熱エネルギーの利用にあたっては、蓄熱システムを熱需要の近くに設置し、地域での熱利用が重要である。従来から排熱の熱回収は検討されているが、その利用拡大には熱需給マッチングのため蓄熱システムの導入が必須である。以上から、蓄熱技術を用いた熱エネルギー利活用を図るべきである。

<sup>23</sup> <https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20231225/231225energy04.pdf>

<sup>24</sup> [https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/xls/stte/stte\\_jikeiretu2022fykaku.xlsx](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/xls/stte/stte_jikeiretu2022fykaku.xlsx)

<sup>25</sup> [https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/other/cogeneration/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/other/cogeneration/)

**蓄熱技術のポテンシャル：**蓄熱技術は、他のエネルギーストレージ技術と同じく不安定および安定的なエネルギー源からエネルギー供給を受け、需要に応じたエネルギーを供給することが可能である点であることを前提としたうえで、システムの慣性力維持や産業熱の脱炭素化といった機能を有することが特徴的である。高温かつ不安定な熱源としては、海外で既に実用化されている集光型太陽熱発電 CSP (Concentrating Solar Power) に設置される溶融塩蓄熱を代表とする太陽熱、もしくは P2H2P や P2H (Power to Heat) に活用可能な、余剰な変動性再エネ（我が国では主に出力制御がかかっている電源）があげられる。これらの熱源は時間変動があるものの、蓄熱技術を介すことにより売エネルギー価格や需要に応じた熱出力を可能とするため、現在主に火力発電が担っている負荷追従運転の一部を担うことも可能となる。また、民生分野の小規模な利用に加えて、産業用の高温熱の間接的な電化の手段としても欧州を中心に検討が進んでいる<sup>26</sup>。特に高温高圧蒸気が生成可能であることから、産業で消費される熱媒の形態を変更する必要がないため、蓄熱技術の導入による熱消費側での大きな設備変更なしで脱炭素化が可能なポテンシャルがある。

**高効率ヒートポンプの拡大：**アナログ的な冷凍空調技術が多いヒートポンプもデジタル技術によって、高度なエネルギーマネジメントによって多様な機器の統合や連携運用が進んでゆく。例えば、情報通信技術により構築されたシステムによって、センシング技術やヒートポンプと蓄熱を組み合わせた技術により、高度再エネ・蓄エネ利用技術が運用され、デマンド・レスポンス（再エネ余剰電力・逼迫対応）の要求に対してタイムリー且つスムーズに対応できることなど、一連の統合・連携機能の拡充が重要となる。しかし、個別のデバイスでの性能向上が限界に近づき、そして、ヒートポンプの冷媒には環境規制により地球温暖化係数(GWP)の低い物質が求められる中で、用途に合わせて冷媒を開発・選定し性能向上を図ることも同時に考えておく必要がある。低 GWP 冷媒は従来冷媒よりも熱力学的性質が劣ることも想定される中で、いかにヒートポンプの性能向上を図るかがポイントとなる。また、低 GWP 冷媒の中には可燃性や毒性を有するものもあり、冷媒充填量を低減する必要がある。

### （提言 3 - 2）次世代エネルギー産業を支援すべき

**蓄熱技術を導入した次世代産業：**容量に制限がなく、可搬型のエネルギーストレージ

---

<sup>26</sup> IEA Energy Storage Task 36 –Carnot Batteries, <https://www.eces-a36.org/>

として P2G (Power to Gas) /P2C (Power to Chemicals) があり、グリーン水素や合成燃料をはじめとするエネルギーキャリアへの転換は既にグリーンイノベーション基金等で研究開発と実装に向けた支援がなされている。一方、電力、エネルギーキャリア以外の第 3 の形態として安価な蓄熱技術に対する注目度は低いと言わざるを得ない。蓄熱技術自体は耐熱煉瓦などへの蓄熱による熱風炉など、1000°C超の高温の産業用火炉への用途をはじめ、600°C温度域の溶融塩による CSP やセラミック系潜熱蓄熱材、400°C~200°C中低温域の化学蓄熱材など、産業における技術開発と利用は限定的である。原子力としては、高温ガス炉が有望な技術の一つであり、発電のみならず、熱の直接利用と水素製造にも寄与できる<sup>27</sup>。余剰再エネ由来のグリーンサーマルエネルギーの利用範囲を拡大するための蓄熱輸送技術も、次世代の産業と民生とのセクターカップリングにおいて時空を超えて熱を操るためには必要な技術であると言える。

#### **提言 4：2050 年以降のカーボン・ネガティブ・エミッションの実現を目指したエネルギーストレージ戦略を構築すべき**

##### **(提言 4-1) ネガティブ・エミッションを実現するバイオ炭素長期備蓄型循環型社会の構築**

**2050 年以降のカーボン・ネガティブ・エミッション**：2018 年に IPCC (気候変動に関する政府間パネル) が公表した「1.5°C特別報告書」は、「2050 年実質ゼロ」に加えて、それ以降はさらなる吸収 (マイナス排出) の必要性を謳っている。2050 年以降にカーボン・ネガティブ・エミッション社会を実現するためには、2050 年以前からこれに備えた取組みを行う必要がある。

**ネガティブ・エミッション技術**：木質バイオマス等の導入が可能な地方においては、現在でも、地域でのバイオマス熱利用等の活用が冬場の電力ピークを緩和する再エネとして重要な位置づけを持つ。今後、バイオマスによる炭化土中貯留がネガティブ・エミッション技術として重要になる可能性がある。100~200 年後に訪れる無化石資源時代を鑑み、高密度反応固形バイオ燃料による電力向け微粉炭燃料代替のための同

---

<sup>27</sup> 文部科学省, “次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する提言”, 令和 5 年 3 月 28 日  
[https://www.mext.go.jp/content/20230328-mxt\\_genshi-000028687\\_01.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20230328-mxt_genshi-000028687_01.pdf)

等機能発現、鉄鋼産業向け石炭コークスからの脱却のためのバイオ固体燃料溶解炉を開発し、再生可能エネルギーによる持続可能な新しいバイオ炭素循環システムを構築する必要がある。

#### **（提言 4-2）持続可能な脱炭素化に向けた核燃料サイクルの早期実用化**

**高速炉と核燃料サイクルによる究極のエネルギーストレージ**：世界の主要国は 2050 年の脱炭素化に向けて「再エネ＋原子力」を主流にした電源構成とする方針を打ち出している<sup>28</sup>。このため、21 世紀後半には、世界的な軽水炉の利用拡大に伴うウラン価格の高騰が懸念される<sup>29</sup>。また、軽水炉でのプルサーマル利用により、今後使用済混合酸化物（MOX）燃料が蓄積されていくことも考慮すれば、2050 年以降の持続的な原子力利用のためには、使用済燃料をリサイクル利用し、天然ウラン資源に依存せず、放射性廃棄物の減容等を実現できる高速炉と燃料サイクルを早期に実用化すべきである。そのための技術開発を着実に進めていくとともに、核燃料サイクルについて多様な視点で議論を深めていく必要がある<sup>30</sup>。なお、高速炉と燃料サイクルが実用化すれば、数千年のエネルギーを確保することができ<sup>31</sup>、究極のエネルギーストレージ技術である。

---

<sup>28</sup> [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/cop28\\_genshiryoku.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/cop28_genshiryoku.html)

<sup>29</sup> Uranium 2022: Resources, Production and Demand, OECD 2023 NEA No.7634

<sup>30</sup> 日本原子力学会 原子力アゴラ調査専門委員会「持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会」最終報告書（2024 年 3 月） [https://www.aesj.net/uploads/com\\_agora\\_sustainable202404.pdf](https://www.aesj.net/uploads/com_agora_sustainable202404.pdf)

<sup>31</sup> 高速炉戦略ロードマップ、

[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku\\_kakuryo\\_kaigi/dai10/siryoku1-2.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/genshiryoku_kakuryo_kaigi/dai10/siryoku1-2.pdf)

## 1. 緒言

2020年10月、日本政府は「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言した。そして、2021年4月、2030年に向けた温室効果ガスの削減目標について、2013年度に比べて46%削減することを目指すことを表明した。第6次エネルギー基本計画（2021年10月）では、2030年度エネルギーミックスとして、再生可能エネルギーを36～38%に倍増する野心的な見通しを示すとともに、化石電源（LNG、石油、石炭）を86%（2019年）から41%に半減させる計画を示した。さらに、2023年2月、日本政府は「GX（グリーン・トランスフォーメーション）実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～」をとりまとめ、「気候変動問題への対応に加え、ロシア連邦によるウクライナ侵略を受け、国民生活及び経済活動の基盤となるエネルギー安定供給を確保するとともに、経済成長を同時に実現」するための取組を発表した。

太陽光や風力を中心とした変動型再生可能エネルギー（再エネ）の普及拡大は電力供給を不安定化させないように大規模なエネルギー貯蔵技術を必要とする。これまでは火力発電（化石電源）が需給調整を担ってきたが、化石電源割合が低下するにつれて需給調整が困難になっており再エネの出力制御が全国で発生している。余剰となった再エネのエネルギー貯蔵（蓄エネ）が再エネの普及に必須である。エネルギー貯蔵としては大規模蓄電池が有望視されているが、電気自動車の急速な普及を想定すると、原料資源を持たない我が国は将来的には蓄電池の不足や価格高騰が懸念される。2050年のカーボンニュートラルに向けて高効率で低コストのエネルギー貯蔵技術を開発するイノベーションが必要である。

そこで、日本機械学会動力エネルギーシステム部門は「A-TS08-13 カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」（2021年10月～2024年3月）を設置した。本研究会では、熱エネルギー貯蔵を含む様々な蓄エネ技術を整理分析し、再エネの変動性に対応する蓄エネ技術および発電システムに関連する国内外の報告書・文献等を広く調査した。これらを起点に広範囲な領域で様々な角度から活発な議論を行い、産学官で取り組むべき課題等を整理し、動力エネルギーシステムに関係する研究者や技術者に広く使われるよう報告書としてまとめることを目的とした。また、2024年度に改定が見込まれる「第7次エネルギー基本計画」の検討に資するべく、関係省庁にて技術開発を促進できるように技術開発の進め方についても提言することを目的とした。

本研究会では活動を基に提言すべき内容の本質を「カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックス」として見出し、これをゴールとしてその必要性和技術展望を提言した。本報告書は、2年半にわたる本研究会活動として、エネルギー貯蔵技術の調査、エネルギー貯蔵技術の利用に関する調査、及び目的とするエネルギーストレージベストミックスの検討をまとめたものである。

この提言および報告書は国際的にも先進的かつ重要であると自負をしている。また、日本機械学会動力エネルギーシステム部門を中心とした技術者集団が課題克服のリーダー

として貢献が期待できる。本報告書が世界のカーボンニュートラルに貢献することを祈念する。

なお、本委員会活動、報告書作成にあたり外部研究者、日本機械学会、動力エネルギーシステム部門関係者のご協力、ご教示に記して委員会一同から深く謝意を表する。

## 2. エネルギー貯蔵技術の調査

### 2.1 蓄熱発電

#### (1) 蓄熱発電の概要

蓄熱発電とは、電力を熱に変えて蓄熱し、必要時に蒸気タービンで熱を電力に変えて発電するものである。概念そのものは1800年代からあったが、エネルギー密度が高く、安価な化石燃料が利用できる状況では全く必要とされなかった。しかし、脱炭素社会に向かう今、化石燃料は使えなくなり、そもそもの前提条件が変わった。

その脱炭素社会でのエネルギー源は、主力電源化が進む再生可能エネルギー（以下、再エネ）か、原子力である。前者は需要に合わせた運転ができず、後者は経済性の観点から一定出力運転が望ましい。需要の方を供給（発電）側に合わせるのも、大規模・広域となるとセキュリティの課題もあり、あまり望ましくない。そこで、発電側と需要側の間には蓄エネルギーが必要となる。その蓄エネルギーとしては、揚水発電が考えられるが、日本での増設は既に難しい。蓄電池もありうるが、4時間程度しかエネルギーを貯められず、中長期のエネルギー貯蔵が必要である。そこに、蓄熱発電が適合する。

蓄熱発電の最大の欠点は、蒸気タービンを利用する点で、投入した電力の40%程度しか電力として戻せない。しかし、蓄熱コストが極めて安く、効率の悪さを補ってあまりある条件がある。世界では表2.1-1に示すように、電力会社、大手メーカ、ベンチャーなど多数の企業が様々な方式での開発を公表している<sup>[2.1-1]</sup>。

表 2.1-1 世界の民間蓄熱発電開発計画

(赤字は電力会社、斜字は液化等も利用する。また、『Web 確認』はWeb上で存在を確認できたもの)

	研究段階	パイロット	技術的に完成
発電専用	MALTA/Duke Energy Energy-Dome(LAES) 中部電力/東芝 三菱重工	Siemens-Gamesa Seas-nve HighView/Enlisa(斜字)(LAES) HighView/住友重機 EPRI/Southern Co. Brenmiller/NYPA	硝酸塩2タンク RWE (以下原子力の蓄熱部として) MOLTEX, TerraPower, Seaborg, 富士電
電熱併給	Blossom(日) ESREE(日)	1414degrees Azelle EnergyNest/Siemens-Energy Eco-Tech-Ceram SaltX/Vattenfall TEXEL	STORASOL(蓄熱部)
Web確認	247Solar, aalborgCSP, AES Andes, AGL, Airthium, Almina, Antora, Bornholms, Brayton, Build to zero, Caldera, CCT, Cheesecake, CHESTER, CsolPower, E2S, Echogen, Ecovat, Element16, Electrified Thermal, ENEL, ESPL, Fourth, Graphite, Hyme, KELVIN, KYOTO, LEAG, Lumenion/Vattenfall, MAN/ABB, Magaldi, MGA, Pintail, Rondo, Seaborg, Ceramic, Silbat, SOLID, Stiesdal, Stolect, Storenergy, Storworks, Terrafore, Thermal Battery, Thermophoton, Westinghouse(Echogen)		

2016年時点での蓄熱発電開発は、Siemens-Gamesa社しか公表していなかった。当時も電力システム用蓄電池の開発が盛んで、蒸気タービンを使うため蓄電池と比べて半分以下の蓄エネルギー効率となる蓄熱発電は、非常識と捉える人々も多かった。しかし、条件次第では蓄電池よりも経済性がある、と理解した人々も存在し、2023年現在、上表のように様々な開発計画が動いている。日本ではベンチャー2社が開発を開始した。ただし、先鞭をつけたSiemens-Gamesa社は本業での品質不良問題から、開発を停止している。Azelio社も経営破綻しており、淘汰が始まっている。

## (2) 蓄熱発電の経済性・PV電力の夜間利用

蓄熱発電の経済性を示すために、簡単な条件での試算を行った。PV（太陽電池）の電力を夜間に利用する場合の電力コストである。そのコストは次の簡単な式で表される。

$$\text{夜間電力コスト} = \text{充電コスト} / \text{効率} + \text{設備コスト} / \text{寿命}$$

充電コストは変数なので、これを横軸にグラフ化したものを図2.1-1に示す。縦軸が夜間電力コストとなる。実際には、これにさらに利益が載せられる。蓄電池は6万円/kWh、3千回寿命とし、蓄熱発電は2千円/kWh、寿命は1万回とした。明らかに、蓄電池は初期コストが高いためにゼロ円の充電コストでも25円以上負担しないと経済的に成り立たない。一方、蓄熱発電は設備単価が安いので、充電電力が安い間は蓄電池より経済性に優れる。蓄電池は将来、設備コストが半分にになると見込まれているが、7円/kWh以下の充電コストであれば蓄熱発電の方が有利になる。2030年には再エネ発電コストは7円/kWh以下になっていると思われ、現状技術の蓄熱発電の方が将来の蓄電池より有利であると言える。コジェネなど熱利用併用も考えると、蓄熱発電がさらに有利になる。

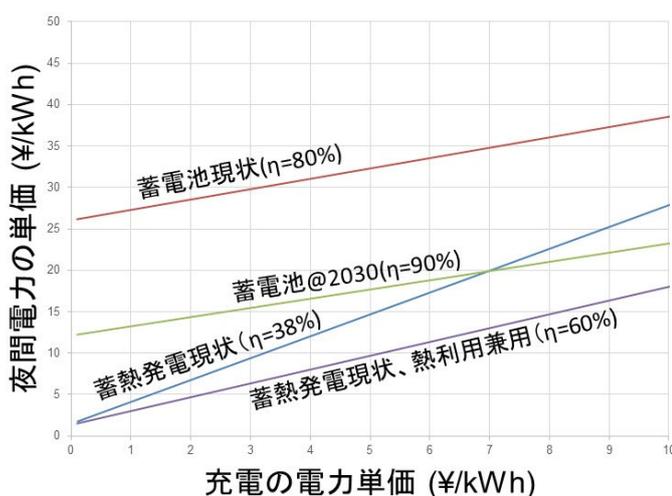


図 2.1-1 PV 電力の夜間使用時における電力の単価<sup>[2.1-2]</sup>

ただし、蓄熱発電で熱電変換に蒸気タービンを利用する場合は、大規模でないとこの条件は成り立たない。概ね、数十 MW 以上の規模で無いと蒸気タービンの効率は悪くなり、経済性が落ちてくる。この規模感以下では蓄電池の方が有利となり、技術的に棲み分けられる。

### (3) 蓄熱方法

蓄熱技術は多種多様である。温度差を利用する顕熱蓄熱、物質の相変化（固体から液体など）を利用する潜熱蓄熱、化学反応を利用する化学蓄熱などが代表的なものである。この中で商用化されているものは、硝酸塩 2 タンク型蓄熱である。硝酸塩は使用可能温度が蒸気タービンと相性が良く、毒性・危険性も無く、安価なため利用されている。図 2.1-2 にその動作を示す。蓄熱時には図左上の様に、熔融した硝酸塩が入っている 290℃の低温タンクからヒータを通して加熱し、高温タンクに移す。高温タンクが満杯になれば蓄熱終了である。放熱時は右下の様に高温タンクから硝酸塩を取り出し、熱交換器で高温高圧蒸気を作り、蒸気タービンを回す。この蓄熱部分は太陽熱発電で完全に商用化しており、耐久性等も確認されている。ただ、商用化されているため、今後の大きなコストダウンは見込みにくい。

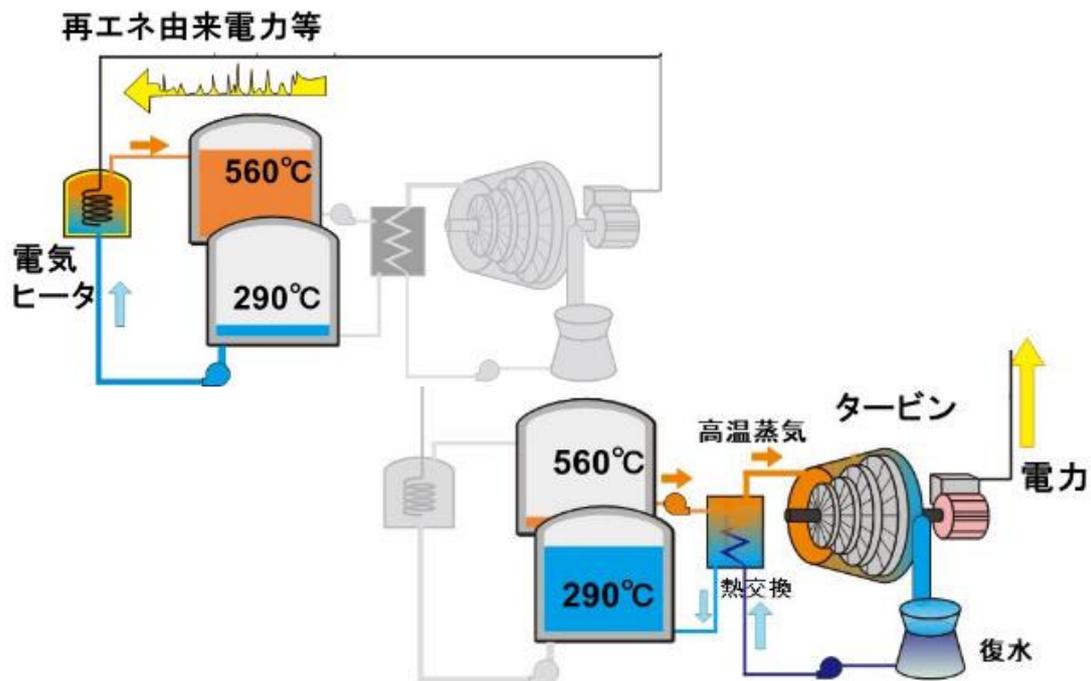


図 2.1-2 硝酸塩 2 タンク型の蓄熱・放熱動作

硝酸塩 2 タンク型と比べて大きく蓄熱材料コストを下げたのが固体蓄熱とか碎石蓄熱と呼ばれるものである。原理は図 2.1-3 のとおりで、断熱容器内の碎石に熱い空気を通すことで行う。蓄放熱で空気の流れ方向が逆になるのが一つの特徴で、長手方向に生じる温度勾配が左右に動く。温度勾配があるのでサーモクライン型とも呼ぶ。

放熱の際に出てきた熱い空気は、コンバインドサイクルガスタービン発電の排熱回収ボイラに通すことで高温高圧蒸気を作り、発電する。碎石など単価の安いものを使うが、一方、

使用する蓄熱材料全てを蓄熱動作に利用出来ない欠点もある。また空気を通すための圧損が大きく所内動力が大きくなる可能性もある。

他に潜熱蓄熱はほぼ上記と同様な原理で蓄熱するが、固体蓄熱よりも蓄熱密度が高く、出力温度もより一定に近づくと期待されている。固体蓄熱と潜熱蓄熱を組み合わせるものも提案されている。

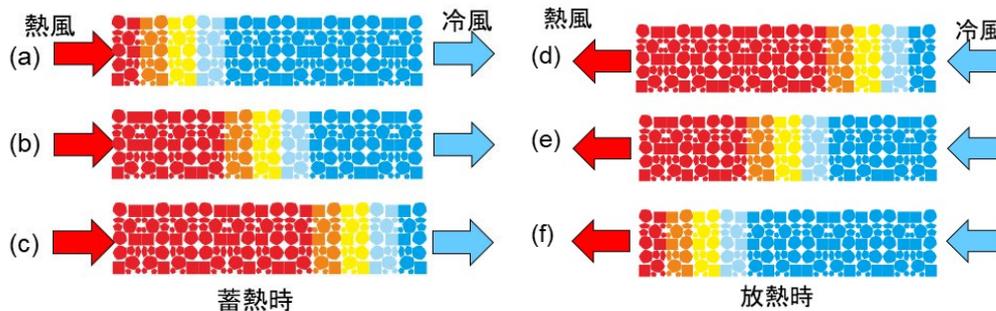


図 2.1-3 固体蓄熱の蓄放熱動作

#### (4) 電熱変換低コスト化の重要性

再エネの主力電源化と同時に電力自由化も進んでいる。その中で蓄熱発電の事業性をより高めるためには、電熱変換、すなわちヒータの低コスト化も重要である。再エネの大量導入の影響により、日本卸電力市場の九州地区では、2023年には年間13%強の時間が1¥/kWh以下で取引されている<sup>[2.1-3]</sup>。他の地域も図2.1-4の様に1¥/kWh以下の時間が増加しつつある。この時間中に再エネの発電抑制が起こっており、再エネ導入量の低下につながっている。発電抑制を低減することと、蓄熱発電の事業性を上げるため、この時間内で大量に電力を熱に変換すれば経済性が向上する。そのためには電熱変換設備の容量を大きくすることが必要である。しかし、この部分の設備稼働率はかなり低くなってしまふ。そのため可能な限り電熱変換の設備コストを低減することが事業性向上に繋がる。従来のシーズヒータ（鞘管に入れたニクロム線ヒータ）などの実績がある技術の革新や、空気加熱ヒータの採用などの工夫が必要である。さらに誘導加熱などの応用も考えられる。

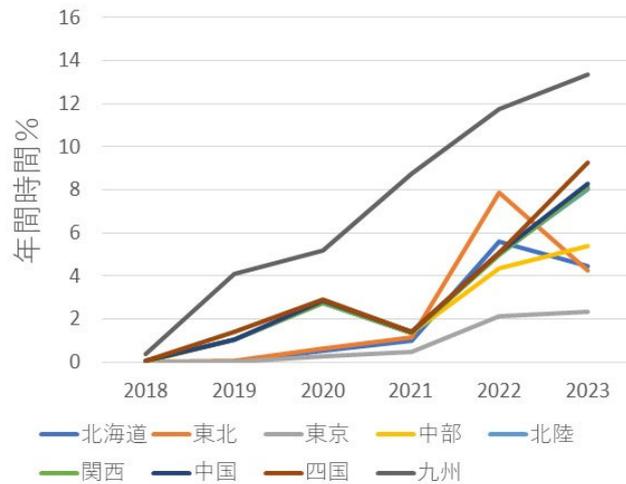


図 2.1-4 日本卸電力市場にて 1¥/kWh 以下で取引された時間の割合

(5) 熱電変換の高効率化

蓄熱発電開発では、蒸気タービンの他に、より高効率化を目指したプロジェクトも動いている。例えばグーグルのムーンショットプログラムからスピニアウトした MALTA 社のシステムは、ブレイトンサイクルの正転逆転により、50%を優に超える効率での蓄エネルギーを目指している。超臨界二酸化炭素タービンもこれに近い効率を目指している。熱電変換技術は 300 年以上の歴史を持つ成熟技術であるが、まだ改良・革新の余地が残っている。

(6) まとめ

脱炭素社会の実現のため、世界では蓄熱発電に注目が集まっている。既存の要素技術の組み合わせで構成でき、蓄電池では難しい中・長期の蓄エネルギーに向いている。ただ蓄熱発電として実用化された例は無く、最適構成を実現するため世界の各所で開発が進められている。また、要素技術も開発の余地があり、画期的なものまで様々な取り組みがなされている。

(7) 参考文献

[2.1-1] Toru Okazaki, Electric thermal energy storage and advantage of rotating heater having synchronous inertia, Renewable Energy, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.051>

[2.1-2] 岡崎徹、他「蓄熱発電所と風力熱発電」電気学会論文誌 B, Vol, 138 No. 4 pp. 303-308 (2018)

[2.1-3] <https://www.jepx.jp/electricpower/market-data/spot/>

## 2.2 高温蓄熱材料技術

### (1) 太陽熱発電における蓄熱技術

太陽日射が豊富なアフリカ、中東、北米・南米、南欧等の海外のサンベルト地域では、太陽エネルギーの熱的貯蔵を付帯した集光型太陽熱発電（Concentrated Solar Power、CSP）プラントの建設が進み、商用運転が行われている<sup>[2.2-1]-[2.2-2]</sup>。代表的な CSP プラントの概要を図 2.2-1 に示す。図 2.2-1 (a) はパラボラトラフ型 CSP プラントの模式図である。Andasol 3 CSP はスペインのグラナダ州に設置された 3 番目の太陽熱発電所として、発電所の建設工事は 2008 年に開始され、2011 年に完了している。高地と気象特性のおかげで、この位置は年間の直接日射量が高い立地条件にある。直達太陽日射が Solar field と呼ばれるに湾曲した反射鏡群で反射され、集熱部に配管された太陽熱吸収管で熱回収される。吸収管の内部には熱輸送媒体と呼ばれる鉱物油（～400℃程度）が流通しており、隣接する溶融塩ループと熱交換することにより蓄熱する。このプラントでは高温タンク（386℃）と低温タンク（282℃）の二つの溶融塩の温度差  $\Delta T$  = 約 100℃の太陽熱を顕熱蓄熱し、隣接する水蒸気ループで熱交換、水蒸気タービン（出力 49.9MW）で発電する仕組みである<sup>[2.2-3]</sup>。集熱温度を高め、発電効率向上目的で開発された CSP プラントが集中タワー型 CSP プラントである（図 2.2-1 (b)）。ヘリオスタットと呼ばれる平面状反射鏡により集中タワー頭頂付近に太陽日射を集光し、1000℃以上の高温太陽熱を得る。Gemaspolar CSP プラントでは 15 時間の蓄熱（565℃、120MWth）を可能とすることから、24 時間の操業が行われている<sup>[2.2-4]</sup>。このように CSP プラントは日中に得た過剰な高温熱を夕方や夜間に利用する手段として、溶融塩による蓄熱システムが採用され、運転実績を積んでいる。

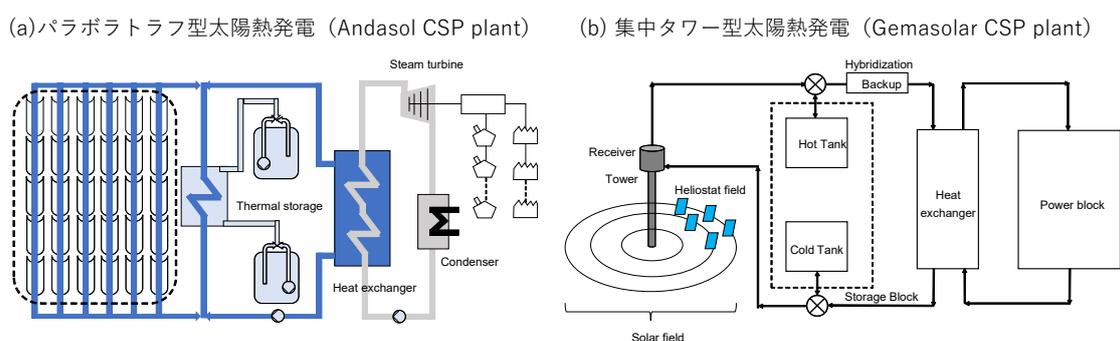


図 2.2-1 集光型太陽熱発電プラント概要図 ((a) 間接 2 タンクシステム (熱輸送媒体と蓄熱媒体が異なる)、 (b) 直接 2 タンクシステム (熱輸送媒体と蓄熱媒体が同じ))

### (2) 次世代太陽熱発電における高温蓄熱技術

CSP プラントの更なる発電効率向上とコスト削減を目指して、米国・欧州・豪州主導で次世代 CSP プラントの開発が進展している。米国・エネルギー省は 2030 年までに CSP コスト

目標\$50/MWhを掲げ、温度700°Cを超える熱伝達流体によりCSPプラントの効率を高め、CSPシステムのコスト削減を目指した研究開発を進めている<sup>[2.2-5]</sup>。熱輸送媒体として、気体材料系はヘリウムや超臨界二酸化炭素等、液体材料系は金属ナトリウムや塩化物系溶融塩等、固体材料系は固体粒子等が検討されている。

液体材料による主な顕熱蓄熱媒体を表2.2-1に示す。硝酸系溶融塩は大気雰囲気では560°C程度が上限温度であるが、近年、閉鎖系による雰囲気制御により600°Cまで使用上限が向上する可能性が報告されている<sup>[2.2-6]</sup>。また、塩化物系や炭酸塩系溶融塩は700°C以上での使用が期待されることから、コーティング等による高温下での防食研究が進められている。

表 2.2-1 液体系の顕熱蓄熱材料

Molten Salt	Chemical Composition (wt%)	T <sub>mp</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	Heat Cap. Cp (kJ/kg K)	Density ρ (kg/L)	Visc. (cP)	Estimated cost (\$/kg)
Solar salt (NaNO <sub>3</sub> /KNO <sub>3</sub> )	0.60/0.40	238	585	1.55	1.71	1.03	800
NaNO <sub>3</sub>	1	306	520	1.62	1.82	-	680
KNO <sub>3</sub>	1	224	600	1.4	1.78	-	1000
KCl/MgCl <sub>2</sub>	0.625/0.375	426	> 800	1.03	1.94	1.88	350
MgCl <sub>2</sub> /NaCl/KCl	0.550/0.245/0.205	385	> 800	1.14	1.93	-	220
ZnCl <sub>2</sub> /NaCl/KCl	0.606/0.313/0.081	200	> 800	0.92	2.08	4.5	800
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.345/0.334/0.321	398	800	1.79	2.01	10.7	2500

固体粒子系の顕熱蓄熱材料として、砂漠のけい砂、かんらん石、ボーキサイト等の固体粒子が報告されている。固体粒子は低コスト(1\$~2\$/kg)が魅力であり、~1000°C以上の高温蓄熱が可能である。固体充填層によるモジュール式蓄熱ユニット化することによりトラックでの輸送が可能である。熱輸送媒体としても利用する場合について、粒子の高温凝集、配管との摩擦による微粉化や環境中への飛散に係る影響・調査研究が進められている。

固液相変化による潜熱蓄熱材料は、顕熱蓄熱よりエネルギー密度が高く、一定温度の熱が蓄熱・放熱可能である。硝酸系や塩化物系溶融塩が候補材料となるが、熱伝導率の低さ(<1.0 W/mK)が問題点であり、グラファイトとの複合化や金属フィンの挿入など多くの研究事例があるが、タワー型CSPにおける潜熱蓄熱システムの本格導入は研究開発中である<sup>[2.2-7]</sup>。一方で金属合金の潜熱蓄熱利用については30年以上前から提案されており、主に固体/液体相変化材料(phase change material、PCM)を用いる金属系PCMによる潜熱蓄熱材料・蓄熱システムについても研究開発が進められている。金属・合金は、一般に、無機系溶融塩の約10~100倍の高い熱伝導率を有することから、迅速な熱応答が期待される。さらに、制御可能な相変化温度、高い蓄熱密度(容量)、および高い熱再現性と信頼性は、太陽集光に伴う熱衝撃、太陽日射の経時変動、および放射過渡現象の緩和が期待される。また、プラントの起動時間の短縮にも適していることが報告されている<sup>[2.2-7]-[2.2-9]</sup>。

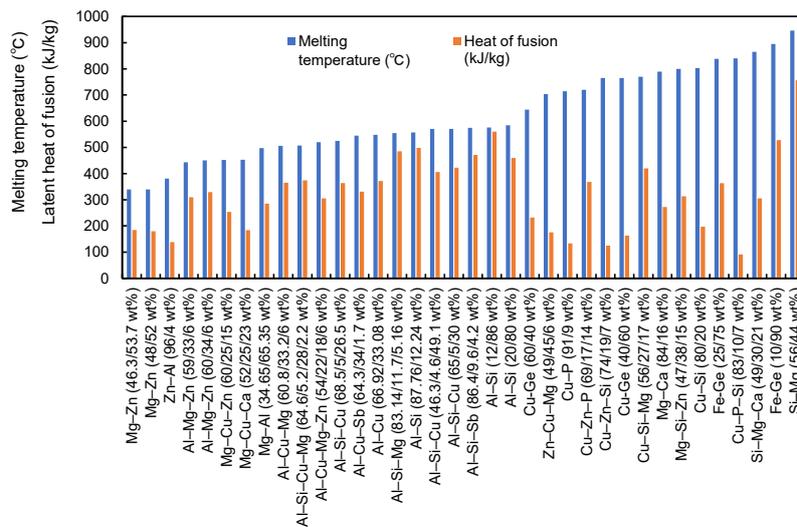
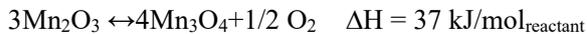


図 2.2-2 金属系の潜熱蓄熱材料

固体粒子系の化学蓄熱は可逆的な化学反応を利用した蓄熱のため、潜熱より高密度な蓄熱が可能となる。候補材料の金属酸化物として、反応温度、サイクル反応性、高い蓄熱密度、環境・安全性の観点からプレスクリーニング（表 2.2-2）が行われ、下記の酸化還元系が有力候補とされた<sup>[2.2-10]</sup>。



現在は作動温度（～1000℃）における熱物性・熱耐久性・環境や健康への影響の観点から、マンガン/酸化鉄<sup>[2.2-11]-[2.2-12]</sup>やペロブスカイト酸化物<sup>[2.2-13]</sup>による高温化学蓄熱システムによる 12 時間のエネルギー貯蔵が検討されている。発電は 620℃での超臨界水蒸気/CO<sub>2</sub>タービンが想定されている。化学蓄熱では、顕熱蓄熱と比べて、高温・高蓄熱密度が可能となり、蓄熱タンクの小型化による建設・貯蔵コストの削減が期待され、技術経済評価が現在進行中である。

表 2.2-2 反応温度 600℃以上の化学蓄熱材料候補

Thermochemical Reaction	Temperature (°C)	Thermal storage density (kJ/mol)	Theoretical gravimetric energy density (kJ/kg)
BaO <sub>2</sub> /BaO	880	73.258	432.6
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /CoO	935	196.532	816.1
Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Rh <sub>2</sub> O	970	249.276	982.1
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	915	90.038	190.1
CuO/Cu <sub>2</sub> O	1115	64.446	810.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1360	232.613	485.6
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /V <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1710	176.594	970.9
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /MnO	1700	194.63	850.6

### (3) まとめ

太陽熱発電は1980年代から米国カリフォルニアで商用運転の実績があり、パラボラトラフ型は比較的成熟した技術である。次世代太陽熱発電では発電効率の向上と発電コスト低減のため、様々な蓄熱材料の利用が想定されており、～700°Cの運転温度を想定した蓄熱材料・システムの開発研究が活発化している。現在、世界中で建設中のCSPプラントは蓄熱設備を有し、蓄熱材料・システムとも最適な要素技術構成を模索する研究開発が進められている。

### (4) 参考文献

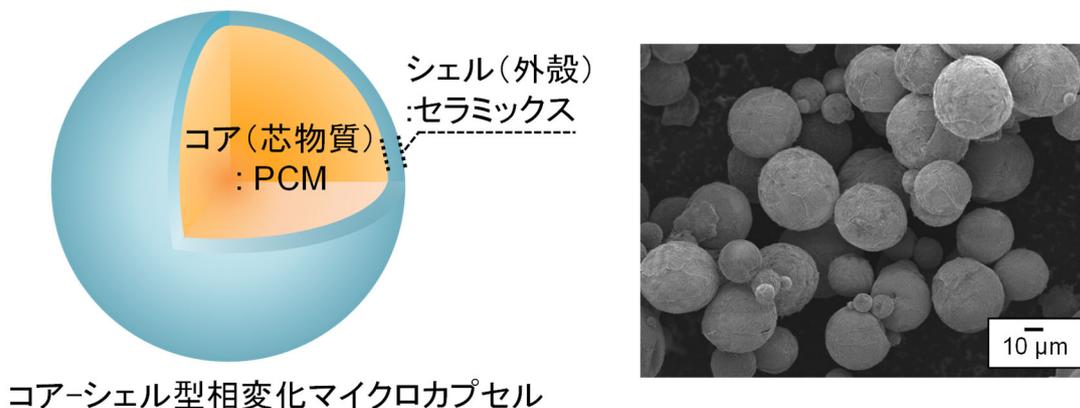
- [2.2-1] NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版 再生可能エネルギー普及拡大に向けた克服すべき課題と処方箋, 第5章太陽熱発電・太陽熱利用
- [2.2-2] N. Gokon, Progress in concentrated solar power, photovoltaics, and integrated power plants towards expanding the introduction of renewable energy in the Asia/Pacific region, *Current Sustainable Renewable Energy Reports* (2023) 1-14.
- [2.2-3] F. Dinter, D. Mayorga Gonzalez, Operability, reliability and economic benefits of CSP with thermal energy storage: first year of operation of ANDASOL 3, *Energy Procedia* 49 (2014) 2472 – 2481.
- [2.2-4] Gemasolar Concentrated Solar Power, Seville, <https://www.renewable-technology.com/projects/gemasolar-concentrated-solar-power-seville/> (access 2023/12/14)
- [2.2-5] Generation 3 Concentrating Solar Power Systems (Gen3CSP) <https://www.energy.gov/eere/solar/funding-opportunity-announcement-generation-3-concentrating-solar-power-systems-gen3csp> (access 2023/12/19)
- [2.2-6] C. S. Turchi, J. Vidal, M. Bauer, Molten salt power towers operating at 600–650 °C: Salt selection and cost benefits, *Solar Energy* 164 (2018) 38–46.
- [2.2-7] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 2118– 2132.
- [2.2-8] N. Gokon, S. J. Chew, Y. Nakano, T. Kodama, S. Bellan, H.S. Cho, Thermal charge/discharge performance of iron–germanium alloys as phase change materials for solar latent heat storage at high temperatures, *Journal of Energy Storage* 30 (2020) 101420.
- [2.2-9] N. Gokon, S. J. Chew, Y. Nakano, S. Okazaki, T. Kodama, T. Hatamachi, S. Bellan, Phase change material of copper-germanium alloy as solar latent heat storage at high temperatures, *Frontiers in Energy Research, section Solar Energy* 9 (2021) 696213.
- [2.2-10] H. B. Dizaji, H. Hosseini, A review of material screening in pure and mixed-metal oxide thermochemical energy storage (TCES) systems for concentrated solar power (CSP) applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98 (2018) 9–26.
- [2.2-11] N. Gokon, K. Hayashi, H. Sawaguri, F. Ohashi, Long-Term Thermal Cycling Test and Heat-

- Charging Kinetics of Fe-Substituted  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  for Next-Generation Concentrated Solar Power Using Thermochemical Energy Storage at High Temperatures, *Energies* 15(13) 4812 (2022).
- [2.2-12] N. Gokon, F. Ohashi, H. Sawaguri, K. Hayashi, Comparative Study of Heat-Discharging Kinetics of Fe-Substituted  $\text{Mn}_2\text{O}_3/\text{Mn}_3\text{O}_4$  Being Subjected to Long-Term Cycling for Thermochemical Energy Storage, *Energies* 16(8) 3367 (2023).
- [2.2-13] N. Gokon, T. Yawata, S. Bellan, T. Kodama, H.S. Cho, Thermochemical behavior of perovskite oxides based on  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-x}(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co})\text{O}_{3-\delta}$  and  $\text{Ba}_y\text{Sr}_{1-y}\text{CoO}_{3-\delta}$  redox system for thermochemical energy storage at high temperatures, *Energy* 171 (2019) 971-980.

## 2.3 相変化マイクロカプセル

### (1) はじめに

潜熱蓄熱は相変化物質 (Phase Change Material、PCM) の相変化潜熱 (おもに固液相変化) を利用する蓄熱法である。潜熱を利用するため、相変化温度近傍で高い蓄熱密度、一定温度での熱供給が可能となる。300°C 以上の中高温領域で利用可能な PCM として、熔融塩や金属・合金などが報告されているが、その利用には熔融した PCM の高い腐食性から派生する技術的課題を克服する必要がある。また、固液相変化を利用するために、低温領域の PCM 同様、形状維持ができない等の実用的な難ハンドリング性の課題も存在する。近年、これらの課題への対応策として、金属・合金系 PCM マイクロ粒子をコア (芯物質)、セラミックス皮膜をシェル (外殻) とするコア-シェル型相変化マイクロカプセル (MicroEncapsulated PCM、MEPCM) の基礎検討が進んでいる。図 2.3-1 は MEPCM の概略図および SEM 像<sup>[2.3-1]</sup>を示す。ここでは、MEPCM 開発の概要と大規模蓄エネシステムへの適用可能性について記す。



コア-シェル型相変化マイクロカプセル

図 2.3-1 コア-シェル型 MEPCM の概略図 (左) と SEM 像 (右) <sup>[2.3-1]</sup>

### (2) マイクロカプセル化の手法

金属・合金系 PCM のマイクロカプセル化の手法として、①室温近傍での MEPCM の前駆体形成と②融点以上での熱・酸化皮膜処理を段階的に実施する方法が報告されている。前駆体形成法は大きく分けて湿式法<sup>[2.3-1]</sup>と乾式法<sup>[2.3-2]</sup>の二つの手法がある。いずれの手法においても、続く熱・酸化被膜処理において原料となる PCM の融点以上にて PCM 自身の酸化を伴う酸化物シェルを形成させることで、コア-シェル型の MEPCM を製造できる。これらの手法で製造した MEPCM は、コアが PCM 由来の酸化物シェルで構成されるために熔融 PCM への耐腐食性に優れる。また、PCM が最も体積膨張した液相状態で最終的なカプセル化が達成されるため固相状態のコア部には空隙が形成される。この空隙が固液相変化時の体積膨張と収縮のバッファとなり、蓄放熱時も  $\text{Al}_2\text{O}_3$  シェルが破壊されず高い蓄放熱繰り返し耐久性を実現することができる。

### (3) マイクロカプセルの性能

表 2.3-1 <sup>[2.3-1][2.3-5]</sup>は、現在までに報告されている MEPCM の組成、作動温度領域、単位重量あたりの潜熱量を示す。特に、500~650°C 程度に作動温度を持つ Al 系合金を原料とした

MEPCM が多数報告されている。

図 2.3-2 は、最も報告例の多い代表的な MEPCM (コア : Al-Si 合金 融点 577°C) と、蓄熱発電などで導入が検討されている顕熱蓄熱材料の蓄熱密度の比較 (顕熱分+潜熱分) を示す。操業における蓄放熱の温度範囲の影響も考慮するため、100 K ずつ  $\Delta T=400$  K までの顕熱分を考慮した。開発した MEPCM はより小さな温度範囲での作動の方がより高蓄熱密度の効果は大きいものの、400 K の温度範囲においても、既往蓄熱材の 2~3 倍の高蓄熱密度を持つ。また、MEPCM の潜熱と 400 K 分の顕熱を考慮した時の蓄熱密度は  $2 \text{ GJ m}^{-3}$  となり、15MPa まで圧縮した水素のエンタルピーに匹敵する値となる。

表 2.3-1 MEPCM の組成、作動温度領域、単位重量あたりの潜熱量の例

コア	シェル	融点 [°C]	潜熱量 [J g <sup>-1</sup> ]	文献
Cu-Si-Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	776	210	[2, 3-2]
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	660	273	[2, 3-3]
Al-Ni	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	640	241	[2, 3-4]
Al-Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	577	250	[2, 3-1]
Al-Cu-Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	517	353	[2, 3-5]

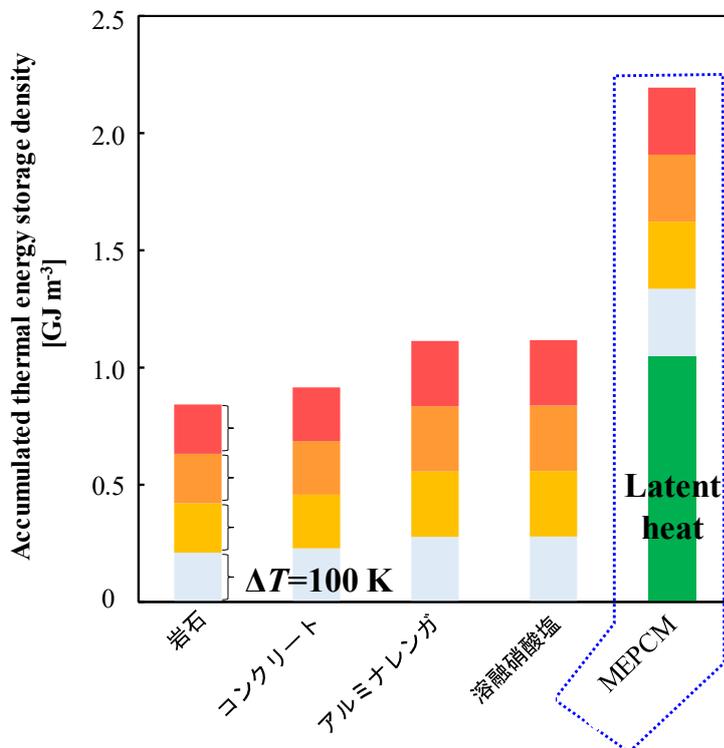


図 2.3-2 MEPCM (コア : Al-Si 合金 融点 577° C) と顕熱蓄熱材料の蓄熱密度の比較 (顕熱分+潜熱分)

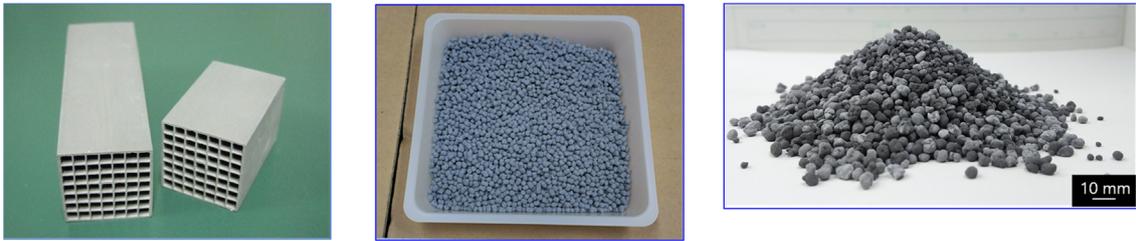


図 2.3-3 MEPCM 蓄熱体の作製例

#### (4) MEPCM を母材とした蓄熱体製造

MEPCM のシェルは酸化物を中心としたセラミックスであるため、セラミックスマイクロ粒子同様のハンドリングが期待できる。この特徴を利用して、MEPCM を母材としたさまざまな形状の蓄熱体が開発されている。図 2.3-3 はその一例を示す。粒子やペレット<sup>[2,3-6]</sup>等の単純な形状だけではなく、ハニカム<sup>[2,3-7]</sup>等の複雑な構造の成型も可能である。用途や機能に応じた成型の自由度は固体顕熱蓄熱材のアドバンテージだが MEPCM 蓄熱体はこのアドバンテージを同様に有すると共に、より高密度な蓄熱性能を持ち一定温度の出力温度が期待できる蓄熱体として利用できる。

#### (5) 大規模蓄熱システムにおける MEPCM の適用イメージ

先述した様に、MEPCM を母材としたミリ～メートルスケールの蓄熱体を成形可能であり、固体顕熱蓄熱同様に運用することが可能である。大規模蓄熱システムにはペレット、球状、または塊状の MEPCM 蓄熱体の充填層や、MEPCM ハニカム充填型等の適用が予想される。MEPCM 蓄熱体は固体顕熱蓄熱システムや液体顕熱蓄熱システムいずれとも共存することは技術的に可能であり、ハイブリットシステムとしての運用も想定できる。

#### (6) まとめ

金属・合金系 PCM をセラミックスシェルでコーティングした MEPCM の概要について記した。MEPCM は固体としてハンドリング可能であり、MEPCM を母材とした蓄熱体の製造により、蓄エネ用大規模高温蓄熱システムへの適用も可能となる。今後、この材料の性能を最大限に活用可能な利用法が検討されることが期待される。

#### (7) 参考文献

- [2.3-1] Takahiro Nomura, Chunyu Zhu, Nan Sheng, Genki Saito & Tomohiro Akiyama. Microencapsulation of Metal-based Phase Change Material for High-temperature Thermal Energy Storage. *Scientific Reports*.  
[https:// DOI: 10.1039/D3MA00788J](https://doi.org/10.1039/D3MA00788J)
- [2.3-2] Masahiro Aoki, Melbert Jeem, Yuto Shimizu, Takahiro Kawaguchi, Minako Kondo, Tomokazu Nakamura, Chihiro Fushimi and Takahiro Nomura. High-temperature ternary Cu–Si–Al alloy as a core–shell microencapsulated phase change material: fabrication via

dry synthesis method and its thermal stability mechanism, *Material Advances*.

[https:// DOI: 10.1038/srep09117](https://doi.org/10.1038/srep09117)

- [2.3-3] Takahiro Nomura, Julalak Yoolerd, Nan Sheng, Hiroki Sakai, Yuta Hasegawa, Miki Haga, Tomohiro Akiyama. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> core/shell microencapsulated phase change material for high-temperature applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12>.
- [2.3-4] Yuto Shimizu, Takahiro Kawaguchi, Hiroki Sakai, Kaixin Dong, Ade Kurniawan, Takahiro Nomura. Al–Ni alloy-based core-shell type microencapsulated phase change material for high temperature thermal energy utilization. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111874>
- [2.3-5] Yuto Shimizu, Shunsuke Cho, Takahiro Kawaguchi, Keita Tanahashi, Kaixin Dong, Tomokazu Nakamura, Ade Kurniawan, Melbert Jeem, Takahiro Nomura. Novel microencapsulated ternary eutectic alloy-based phase change material. *Journal of Energy Storage*.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109535>
- [2.3-6] Hiroaki Koide, Ade Kurniawan, Tatsuya Takahashi, Takahiro Kawaguchi, Hiroki Sakai, Yusuke Sato, Justin NW. Chiu, Takahiro Nomura. Performance analysis of packed bed latent heat storage system for high-temperature thermal energy storage using pellets composed of micro-encapsulated phase change material. *Energy*.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121746>
- [2.3-7] 日本触媒（株）. "テクノアメニティレポート 2021"  
[https://www.shokubai.co.jp/ja/sustainability/library/file/technoamenity\\_report2021.pdf](https://www.shokubai.co.jp/ja/sustainability/library/file/technoamenity_report2021.pdf)

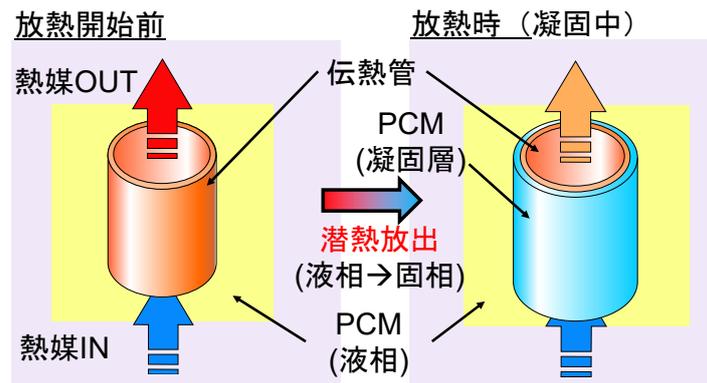
## 2.4 潜熱蓄熱伝熱促進

### (1) はじめに

地球温暖化解決のため世界的に脱炭素の流れが加速している。脱炭素社会実現のためには、再生可能エネルギーの主力電源化に加え、各種プロセスの高効率化、エネルギーのカスケード利用による 1 次エネルギー消費削減などが必要で、熱エネルギーの高度利用技術の開発は急務の課題である。再生可能エネルギーのひとつである太陽光や風力は時間変動を伴うエネルギー源のため、安定供給のためには蓄エネルギー（蓄エネ）により平準化する必要がある。蓄エネは電池が従来から用いられているが、近年は熱として貯蔵（蓄熱）することで電池と比較して安価に平準化を行う「カルノーバッテリー」<sup>[2.4-1]</sup>が注目を浴びている。また、工業排熱等の未利用熱も変動する熱エネルギー源であるうえ、利用先の熱需要との時間的・空間的ギャップを埋めるために「蓄熱」は欠かせない技術である<sup>[2.4-2]</sup>。蓄熱に求められる機能として、蓄熱温度や単位体積や重量当たりの蓄熱量（蓄熱密度）に加え、熱源－蓄熱材、蓄熱材－熱媒体の間の熱交換速度は重要で、大量の熱を高速にかつ安定して出し入れできることは実用化に欠かせない。本節では、相変化物質（Phase Change Material、PCM）の固液変態時の融解潜熱を利用する「潜熱蓄熱」の伝熱速度の高速化技術の一つである、伝熱面に生成する凝固層を連続的に剥ぎ取ることで潜熱蓄熱の伝熱促進を可能にした「伝熱面の機械的更新による高速熱交換器／潜熱蓄熱槽の開発」について説明する。

### (2) 潜熱蓄熱システムの放熱速度の問題点

潜熱蓄熱(Latent Heat Storage)は物質の固液変態を利用して「比熱×温度差+融解潜熱」分の蓄熱が可能な技術である。つまり、顕熱蓄熱より単位体積（または重量）当たりの蓄熱量が大きく、高密度蓄熱が可能である。水－氷（融点 0℃）、酢酸ナトリウム 3 水和物（融点 58℃）やエリスリトール（融点 119～122℃）等が実用化されており、工業排熱を蓄熱し輸送する「トランスヒート」<sup>[2.4-3]-[2.4-6]</sup>がその代表例で、溶融凝固を伴う蓄熱媒体を相変化物質（Phase Change Material、PCM）と呼ぶ。蓄熱システムとして用いるには、潜熱蓄熱材への熱供給、または熱放出が必要で、熱媒体（水や油など）および、熱の入出力を行う伝熱面が必要である。図 2.4-1 に潜熱蓄熱の放熱イメージを示す。放熱開始前（蓄熱完了時）、PCM は液相で存在する。図 2.4-1 左のように液相 PCM 中に伝熱管を配置し、伝熱管の内側に PCM より低温の熱媒を供給することで PCM から熱媒に熱移動させると、PCM の放熱が進行する。放熱にともない PCM は伝熱面で凝固を開始し、図 2.4-1 右のように伝熱面が凝固層に覆われる。有機系や無機塩系 PCM は熱伝導率が低いため、この伝熱面を覆う凝固層が著しい伝熱抵抗を示し、実用的な伝熱速度を得ることが極めて難しい。さらに取り出せる温度、熱量は時間とともに低下するのが実態である。この問題を解決するため、伝熱面にフィンを付けて伝熱面積を増加させる方法、潜熱蓄熱材に炭素繊維や金属フィラーなどを分散させることで熱伝導率を向上させるなど種々の研究が進められている。



放熱時：伝熱管表面にPCMが凝固。  
 → 強い伝熱障害。低放熱速度、低放熱率

図 2.4-1 潜熱蓄熱システムにおける凝固層付着による放熱障害

伝熱面に凝固層が付着した時の伝熱壁近傍の温度プロファイルを図 2.4-2 に示す。伝熱壁を介して溶融 PCM から低温熱媒に熱移動する際に、伝熱壁の PCM 側に凝固層が付着した状態を表している。このとき、総括の伝熱抵抗は PCM 側の境膜抵抗 ( $R_H$ )、PCM 凝固層 ( $R_{PCM}$ )、伝熱壁境膜抵抗 ( $R_{Wall}$ )、および低温側の境膜抵抗 ( $R_C$ ) の 4 種で定義出来る。この中で、 $R_{PCM}$  が放熱時に PCM の凝固により生成する項で、伝熱障害の主要因で、わずか 1mm の付着でも伝熱性能が著しく低下することが知られている[2.4-7]。

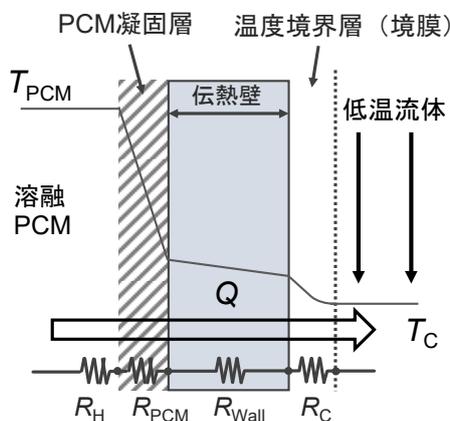


図 2.4-2 凝固層付着時の伝熱面の温度プロファイル

(3) 伝熱面の機械的更新による高速熱交換器／潜熱蓄熱槽の開発

上述のとおり、潜熱蓄熱システムにおいて放熱時の凝固層の伝熱面被覆は、伝熱速度の著しい低下を引き起こすため改善が必要で、著者らは図 2.4-3 に示す「伝熱面の機械的更新による高速熱交換器／潜熱蓄熱槽」<sup>[2.4-8]-[2.4-9]</sup>を提案・開発してきた。溶融した PCM を満たした蓄熱槽内に円筒形状の伝熱管を設置した。円筒伝熱管を回転させ、固定羽根 (ス

クレーパー) を伝熱管に接触させることで、伝熱管表面に生成する PCM 固相を剥ぎ取る機構を有する。この機構により伝熱面に生成した凝固層を連続的に剥ぎ取ることが出来る。

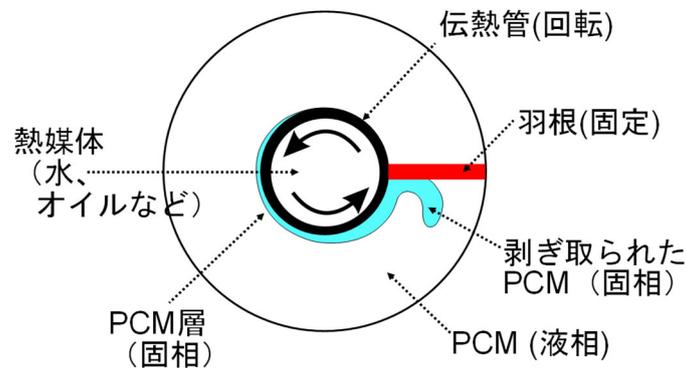


図 2.4-3 伝熱面の機械的更新による高速熱交換器／潜熱蓄熱槽のコンセプト

開発した固相生成制御型潜熱蓄熱装置を図 2.4-4 に示す。上下を軸受けで保持した円筒伝熱管を回転可能な構造を持つ。伝熱管の外側に PCM 蓄熱槽および固定羽根を配置した。約 1 kg の酢酸ナトリウム三水和物を PCM 槽にいれ、完全溶融させた後、伝熱管に 40℃ の水道水を流通させて、伝熱管の回転有無による凝固過程の違いを観察した。

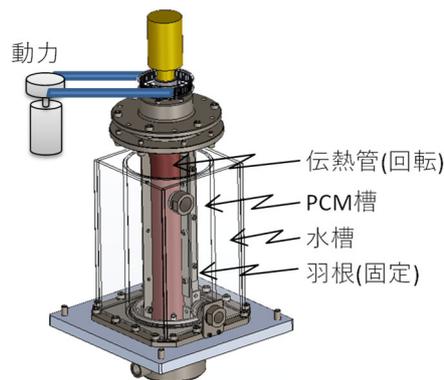


図 2.4-4 固相生成制御型回転式熱交換器を搭載した潜熱蓄熱装置の 3D イメージ

従来の熱交換器に相当する無回転の場合、放熱初期は PCM は全域にわたり液相で存在した。伝熱管に低温熱媒を流通させると伝熱管表面に PCM 凝固層が生成し、少しずつ径方向に成長していく様子が観察された。この条件では 2 時間経過後も PCM 槽の外側は液相で存在しており、PCM 全域の放熱は完了しなかった。

一方、提案機構により伝熱管を回転させた場合は、低温熱媒流通により伝熱管表面には無回転同様に PCM の凝固層が生成するが、回転により固定羽根に押し当てられ、瞬時に剥ぎ取られ、周囲の液相 PCM に分散し、PCM 槽全域にわたりスラリーを形成しながら凝固する様子が観察された。このとき、わずか 10 分程度で放熱は完了し、無回転と比較して高速熱に交換できることが明らかになった。

固相生成制御型熱交換器による伝熱性能向上効果を図 2.4-5 に示す。縦軸は総括伝熱係数、横軸は PCM の総蓄熱容量のうち放熱した割合を示す放熱率である。従来の熱交換器に相当する回転数が 0 rpm の場合は総括伝熱係数は著しく小さい。これは前述の通り伝熱管表面に凝固層が生成し、伝熱を阻害するため、放熱率がほぼ 0%にも関わらず、総括伝熱係数は著しく小さな値を示した。一方、提案した凝固層剥ぎ取り式熱交換法では、無回転と比較して 100 倍以上高い総括伝熱係数を発現した。さらに放熱の初期から放熱率が約 80%に達するまでその高い伝熱性能を維持しており、安定した熱出力を保持できることが明らかになった。

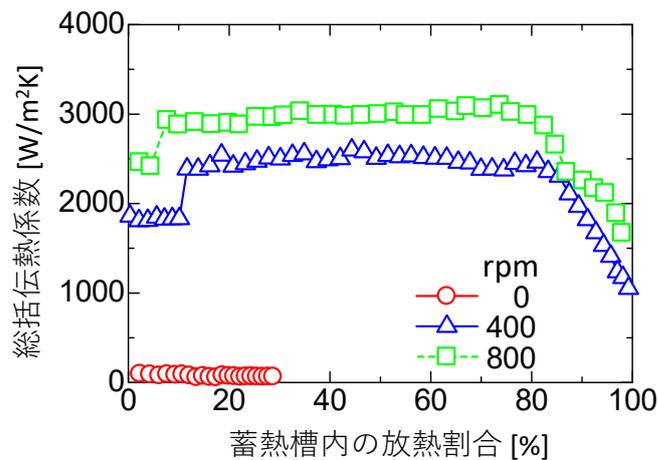


図 2.4-5 固相生成制御型熱交換器による伝熱性能向上効果<sup>[2.4-6]</sup>。

#### (4) 潜熱蓄熱を活用した太陽熱蓄熱の実証事業

固相生成制御型熱交換器を搭載した蓄熱システムの実証事業を 2022 年度から開始した<sup>[2.4-10]-[2.4-11]</sup>。ここでは、日中に太陽熱を集熱し、固相生成制御型回転式熱交換器を搭載した潜熱蓄熱システムで蓄熱し、施設園芸（トマト）の夜間の熱源として利用する（図 2.4-6 参照）。化石燃料に依存しない施設園芸により、食料自給率向上への貢献を目指している。本実証事業は(株)深松組・(株)東北開発コンサルタント・東北大学多元物質科学研究所の共同研究事業で、令和 4-5 年度みやぎ二酸化炭素排出削減支援事業補助金（研究開発等事業）計画認定事業として仙台市若林区の「アクアイグニス仙台」の農業ハウスで実施しており、2024 年 2 月に稼働を開始した。

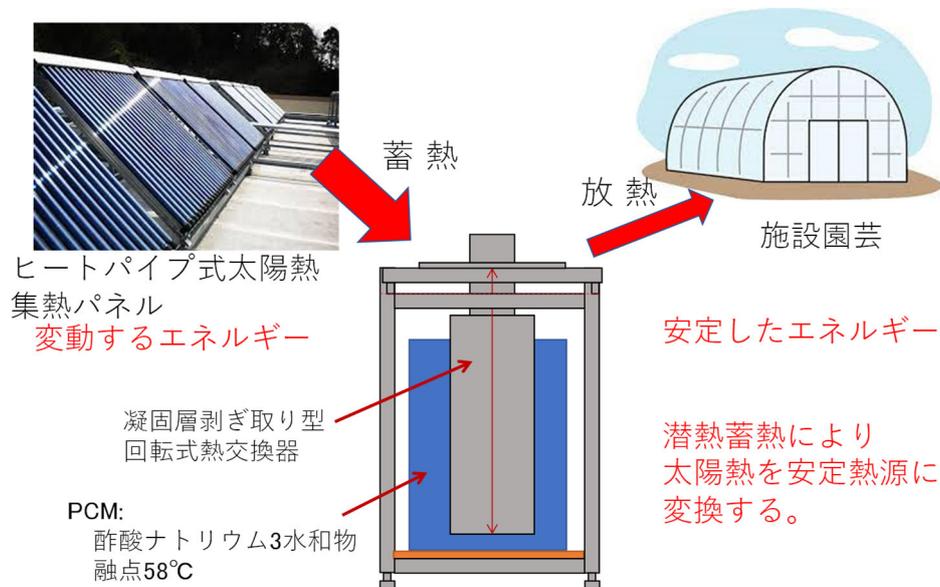


図 2.4-6 潜熱蓄熱による太陽熱利用型施設園芸（実証事業）

(5) まとめ

本節では、「伝熱面の機械的更新による高速熱交換器／潜熱蓄熱槽の開発」を紹介した。ここで用いられている熱交換器は、伝熱面への固相付着による熱交換速度の低下抑制の可能性を秘めた「固相生成制御型回転式熱交換器」で、伝熱面に回転円筒を採用し、隣接する固定羽根で伝熱面を掻く構造により、伝熱面を機械的に更新する「アクティブ」な熱交換器である。また、この機構により潜熱蓄熱の伝熱特性を従来比 100 倍以上に向上させるラボ実験結果を得ており、現在太陽熱蓄熱～施設園芸への適用実証試験を進めている。また、本機構は伝熱面への固相の生成・付着・堆積が問題になる環境下で伝熱特性の改善が期待できる。例えば、温泉との熱交換時には湯の花（温泉スケール）の析出を伴うため、頻繁なメンテナンスが必要である。著者らは同原理の熱交換器を用いた温泉熱回収試験<sup>[2.4-12]</sup>も手がけており、安定した熱交換を実現している。このように、固相生成制御型熱交換器は様々な用途へ展開が期待できる熱交換器で、脱炭素社会実現の一助になると考えている。

(6) 参考文献

- [2.4-1] Okazaki, T., et al., *Thermal Energy Storage Station and Wind-powered Thermal Energy System*. IEEJ Transactions on Power and Energy, 2018. **138**(4): p. 303-308.
- [2.4-2] Maruoka, N. and T. Akiyama, *Heat recovery of LDG by utilizing latent heat and reaction heat for producing methanol*. Isij International, 2002. **42**(11): p. 1189-1195.
- [2.4-3] Kaizawa, A., et al., *Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system*. Heat and Mass Transfer, 2008. **44**(7): p. 763-769.

- [2.4-4] Kaizawa, A., et al., *Technical feasibility study of waste heat transportation system using phase change material from industry to city*. Isij International, 2008. **48**(4): p. 540-548.
- [2.4-5] Kaizawa, A., et al., *Thermal and flow behaviors in heat transportation container using phase change material*. Energy Conversion and Management, 2008. **49**(4): p. 698-706.
- [2.4-6] 河合, 篤., et al., 213 潜熱蓄熱搬送システム「トランスヒートコンテナ」による熱輸送実験(熱回収・熱利用,資源循環・廃棄物処理技術). 環境工学総合シンポジウム講演論文集, 2006. **2006.16**: p. 181-183.
- [2.4-7] Tsutsumi, T., et al. *Development of Latent Heat Storage System with High Heat Release Rate by Scraping Solidified Layer of PCM*. in *1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry*. 2017. Japan, Kobe.
- [2.4-8] 丸岡伸洋, et al., 潜熱蓄熱装置. 2019: 日本.
- [2.4-9] Maruoka, N., et al., *Heat release characteristics of a latent heat storage heat exchanger by scraping the solidified phase change material layer*. Energy, 2020. **205**: p. 118055.
- [2.4-10] 丸岡伸洋, アクアイグニス仙台 農業ハウス栽培用自然エネルギー利用熱源システム開発. 東北大学環境報告書 2023. 2023. 39.
- [2.4-11] 月刊「省エネルギー」編集部, 凝固層剥ぎ取り型潜熱蓄熱を社会実装へ カーボンニュートラルな施設園芸に期待, in 月刊「省エネルギー」. 2023: 省エネルギーセンター. p. 58-61.
- [2.4-12] Maruoka, N., et al. *Long-term experiment of hot spring heat recovery using a rotary heat exchanger by controlling precipitation*. in *The First Symposium on Carbon Ultimate Utilization Technologies for the Global Environment, CUUTE-1*. 2021. Nara, Japan: Iron and Steel Institute of Japan.

## 2.5 水素吸蔵合金を用いた蓄熱

### (1) はじめに

本項では水素吸蔵合金を用いた蓄熱技術について紹介する。水素吸蔵合金と呼ばれる金属と水素との可逆反応を利用する、化学蓄熱の一種であり、他の化学蓄熱と同様に、反応物質を隔離することにより長期間の蓄熱が可能である。化学蓄熱に利用される反応の中でも反応速度が大きいことが知られており<sup>[2.5-1]</sup>、熱需要に対する高い応答性が期待できる。また、幅広い温度域に反応系が存在するために、広範囲の熱需要に対応することが可能である。まず水素吸蔵合金の特性について概説し、次いで蓄熱技術に適用された事例を紹介する。

### (2) 水素吸蔵合金の特性

水素吸蔵合金とは、金属水素化物を生成する合金のうち、使用する条件の下で水素の吸蔵・放出の反応が速く、その可逆性の高い合金を指す<sup>[2.5-2]</sup>。水素化物中の水素密度が圧縮水素や液体水素よりも大きいことから、安全かつ高密度に水素を貯蔵する材料として注目され、燃料電池自動車用の水素貯蔵タンク、定置用の大容量水素貯蔵システム、ニッケル水素電池の負極などの用途のために開発されてきた。本項では合金に限定せず、同様の特性を持つ金属単体も含めて水素吸蔵合金と呼ぶ。

水素吸蔵合金 (M) が水素 (H<sub>2</sub>) と反応し金属水素化物 (MH<sub>n</sub>) を生成する反応は、次式で表される。



水素化物の生成は水素吸蔵、分解は水素放出と呼ばれ、それぞれ発熱反応、吸熱反応である。このとき、水素化物の多くは金属の結晶格子内に原子状の水素が入り込んだ侵入型水素化物となる。そのため材料内部まで水素が入り込み、高い水素化物収率が得られる。気固反応により共有結合性あるいはイオン結合性の化合物を生成する際には、反応が固相深部まで進行しないことがしばしば問題になるが、侵入型水素化物ではこの問題は抑制される。

水素吸蔵合金を一定温度において水素に曝露すると、水素圧力に応じて水素化が進行する。水素吸蔵は発熱反応であり、ファンツホッフの式に従って反応温度  $T$  が高いと平衡水素圧力  $P$  も高く、反応温度が低いと平衡水素圧力も低くなる。反応温度と平衡水素圧力の相関は次式で表される。

$$\ln P = 2 \Delta H^\circ / nRT - 2 \Delta S^\circ / nR \quad (2.5-2)$$

なお、 $R$  は気体定数である。 $\Delta H^\circ$  および  $\Delta S^\circ$  は水素化物生成の標準エンタルピー変化および標準エントロピー変化であり、各合金に固有の値となる。式 2.5-2 は  $\ln P$  と  $1/T$  に直線関係があることを意味しているが、図 2.5-1 に示すように実際に多くの水素吸蔵合金でこの相関が確認されている<sup>[2.5-3]</sup>。

### (3) 水素吸蔵合金を用いた蓄熱システムの開発例

図 2.5-1 では  $-50^\circ\text{C}$  から  $1000^\circ\text{C}$  までの温度帯にプロットが存在することが分かる。すなわ

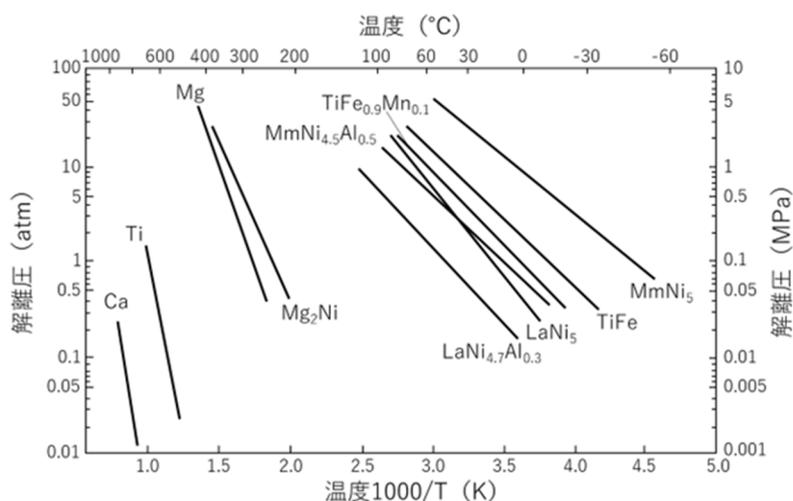


図 2.5-1 水素吸蔵の反応温度と水素圧力 ([2.5-3]に基づいて作成)

ち、適切な合金系を選択すれば、種々の温度帯で吸蔵・放出、すなわち発熱・蓄熱を行うことができる。

蓄熱システムの基本構成は、図 2.5-2 に示すような水素吸蔵合金槽（蓄熱槽）と水素貯槽から成る。水素吸蔵合金から水素を放出させ、水素貯槽に蓄えておく。この状態が蓄熱状態である。必要に応じて水素貯槽から水素吸蔵合金槽に水素を導入し、合金に水素を吸蔵させて発熱させる。水素貯槽はガスタンクを用い、圧縮機を通し圧縮した高压水素を蓄える。また、より高密度に水素を貯蔵するために水素吸蔵合金を用いる場合もある。水素貯槽用の水素吸蔵合金もまた、水素を放出時に吸熱するため、熱を与える必要がある。室温近傍で反応する合金であれば大気中の熱を吸収して水素を放出させることが可能である。また、蓄熱槽あるいは熱需要側の排熱を利用することも可能である。いずれにせよ、水素貯槽用には蓄熱槽の合金よりも低温で吸蔵放出する合金を選定することが重要である。

表 2.5-1 に国内の水素吸蔵合金を用いた蓄熱システムの開発例を示す。温度範囲は室温から 500°C まで、用途は家屋の暖房用や工場排熱の有効利用など、多岐に渡る。開発は 1970～1980 年代に活発に行われ、その背景としてはオイルショックを契機に再生可能エネルギーや省エネルギー技術の開発が促進されたことが挙げられる。近年では、特に海外において

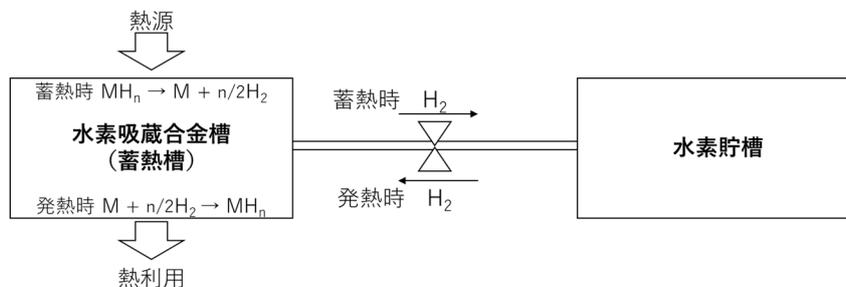


図 2.5-2 水素吸蔵合金を用いた蓄熱システムの基本構成

表 2.5-1 水素吸蔵合金を用いた蓄熱システムの基本構成

[2.5-3]p410~416 に記載の内容に基づいて作成

開発者	システムの名称・形式	蓄熱槽	水素貯槽	容量・効率	作動温度帯	用途・目的
化学技術研究所	水素化熱型蓄熱装置	Mg <sub>2</sub> Ni約10kg		蓄熱容量 2000kcal	300~500°C	工場廃熱の利用
東海大学 航空宇宙技術研究所 川崎重工業	蓄放熱装置	MmNi <sub>5</sub> 10kg	TiFe0.9Mn0.1 5.46kg	水素貯蔵量380.6ℓ		太陽熱や風力から得られた熱エネルギーの利用
金属材料技術研究所 航空宇宙技術研究所 川崎重工業 東海大学	風力蓄熱システム	FeTi <sub>1.15</sub> O <sub>0.02</sub> 2.4トン	ガスタンク	供給熱量53Mcal 放熱効率75%	蓄熱150°C 放熱40°C	農業施設・家屋の暖房や融雪などに利用
三洋電機	太陽熱長期蓄熱システム	CaNi <sub>5</sub> 10kg	LaNi <sub>5</sub> 10kg	蓄熱容量1000kcal	蓄熱90°C 放熱70°C	太陽熱の有効利用
		CaNi <sub>5</sub> 150kg	LaNi <sub>5</sub> 150kg	5Mcal規模 蓄熱効率約85%		
電子技術総合研究所 東京農工大学	熱輸送システム	MmNi <sub>4.5</sub> Al <sub>0.5</sub> 126kg および Zr <sub>0.5</sub> Ti <sub>0.5</sub> 120kg			-4~36°C	太陽熱発電システムのための熱輸送実験

は、太陽熱発電の開発の一環として、より高温の熱を蓄えるシステムの開発が進められている。

米国サバンナリバー国立研究所は、太陽熱発電用として水素吸蔵合金 Ca/CaH<sub>2</sub> を用いた蓄熱システムの経済性評価を行っている。溶融塩を用いた蓄熱（顕熱蓄熱）のシステムコストが 32 \$/kWh<sub>th</sub>（2013 USD）であるのに対し、Ca/CaH<sub>2</sub> システムのコストは 32.4\$/kWh<sub>th</sub> と同程度となっている<sup>[2.5-4]</sup>。その後、Ca を主成分とし 600°Cにて水素を吸蔵放出する合金 CaAl<sub>2</sub> を新たに開発するなど取り組みを進め<sup>[2.5-5]</sup>、開発した蓄熱技術を TEXEL Energy Storage 社（スウェーデン）に独占的にライセンス供与している<sup>[2.5-6]</sup>。試算の詳細は明らかにされていないが、リチウムイオン電池と比べても遜色ないシステムコストを示唆している。Ca 系と同様に 600°Cまたはそれ以上の高温で作動する水素吸蔵合金としては Ti があり、米国パシフィックノースウェスト国立研究所<sup>[2.5-7]</sup>や産業技術総合研究所<sup>[2.5-8]</sup>が蓄熱システムへの適用に取り組んでいる。

#### (4) 今後の展望

蓄熱技術は、再生可能エネルギーの導入拡大や省エネルギーの推進といった社会の要請に沿って研究開発が進められてきた。出力が変動する再生可能エネルギーの貯蔵に対応するため、また、より高効率なエネルギーの貯蔵・利用を実現するために、より高温での蓄熱の重要度が高まっている。水素吸蔵合金を用いた蓄熱技術を含め、化学蓄熱のニーズは高まっており、さらなる研究開発の進展が期待される。

海外では、太陽熱発電プラントに設置する蓄熱システムを想定して、蓄熱システムに要求される性能の目標値を明示しており、研究開発事業の指標として役立てている。我が国においても必要とされるエネルギー貯蔵・蓄熱技術を整理し、最適な技術を検討し研究開発を進めていくことが重要である。

(5) 参考文献

- [2.5-1] 秋谷 鷹二、川崎 成武「新しい熱利用技術『ケミカルヒートポンプ』」日本海水学会誌、40 巻 3 号(1986)159-173
- [2.5-2] 日本産業規格「水素吸蔵合金用語」JIS H 7003:2007
- [2.5-3] 大角 泰章「新版 水素吸蔵合金—その物性と応用—」アグネ技術センター(1999)
- [2.5-4] Patrick A. Ward et al. “Technical challenges and future direction for high-efficiency metal hydride thermal energy storage systems” Applied Physics A (2016)122:462
- [2.5-5] Patrick A. Ward et al. “High temperature thermal energy storage in the CaAl<sub>2</sub> system” Journal of Alloys and Compounds, Vol. 735 (2018) P2611-2615
- [2.5-6] TEXEL Energy Storage 社ホームページ「New report released by U.S. National Laboratory on game-changing grid-scale battery technology」  
<https://news.cision.com/texel-energy-storage/r/new-report-released-by-u-s-national-laboratory-on-game-changing-grid-scale-battery-technology,c3277168> (CET 2021/2/2 9:15 公開、掲載確認日 JST 2024/2/16 10:00)
- [2.5-7] Ewa C. E. Rönnbro et al. “Metal Hydrides for High-Temperature Power Generation” Energies 2015, 8, 8406-8430
- [2.5-8] 産業技術総合研究所広報 <https://www.youtube.com/watch?v=3cHuwYt81Rw>  
(掲載確認日 JST 2024/2/16 10:00)

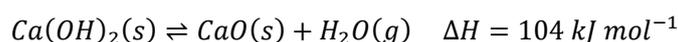
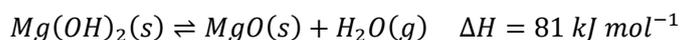
## 2.6 化学蓄热

### (1) Introduction

Chemical heat storage (CHS) is an advanced method for efficiently storing and using heat energy, crucial across industries, homes, and renewable energy. It employs reversible chemical reactions to capture and store thermal energy, offering higher energy density than other storage types, fitting well for long-term use and applications like seasonal storage or grid balancing. Challenges in material selection, system design, and cost-effectiveness persist, prompting ongoing research for new materials and enhanced performance.

### (2) Reaction for CHS

The reaction materials for CHS include mainly solid-gas chemical reactions<sup>[2.6-1]</sup>. In this report it will be shown the examples related to Magnesium hydroxide ( $Mg(OH)_2$ )<sup>[2.6-2]</sup> and Calcium hydroxide ( $Ca(OH)_2$ )<sup>[2.6-3]</sup>:



These reactions, occurring above 350°C and 450°C, involve dehydration (towards the right) for heat storage (endothermic) and hydration (towards the left) for heat output (exothermic). Controlling water vapor pressure allows precise temperature adjustment, achieving heat output temperatures surpassing the initial storage temperature—a concept known as the "chemical heat pump." Figure 2.6-1 illustrates these processes.

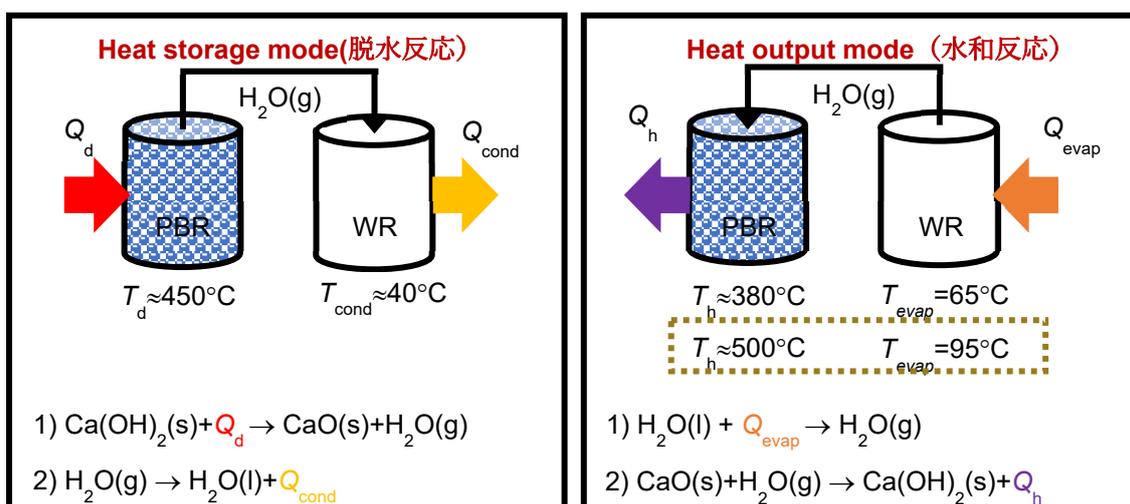


Figure 2.6-1 Chemical heat storage system requires a packed bed reactor (PBR) and a water reservoir (WR). Depending on the pressure-temperature equilibrium, it is possible to shift from the heat storage or output mode. Temperature upgrade of heat is possible by selection of evaporation temperature during the output mode.

### (3) Bottlenecks and direction of research

Effective heat transfer in chemical heat storage materials, crucial for practical application, often faces challenges due to limitations in heat and mass transfer within packed bed materials. The packed bed's low effective thermal conductivity ( $\sim 0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), hinders efficient heat penetration unless the heat exchanger wall temperature significantly exceeds the dehydration temperature. Similarly, during the output reaction, heat removal from the bed is impeded, resulting in low reaction rates and output power. Furthermore, issues arise from poor contact between packed bed materials and the surface for heat exchange, especially when using powders or pellets, leading to gap formation hindering heat diffusion. Effective paths for water vapor distribution are also vital for appropriate vapor distribution or collection involved in the reactions. To address these challenges, the development of new composite materials with increased thermal conductivity, suitable gas permeability, and enhanced thermal conductance at the heat exchange surface is necessary. This suggests the exploration of just-to-fit consolidated blocks. Figure 2.6-2 illustrates these concepts for the dehydration reaction, applicable similarly to the hydration reaction.

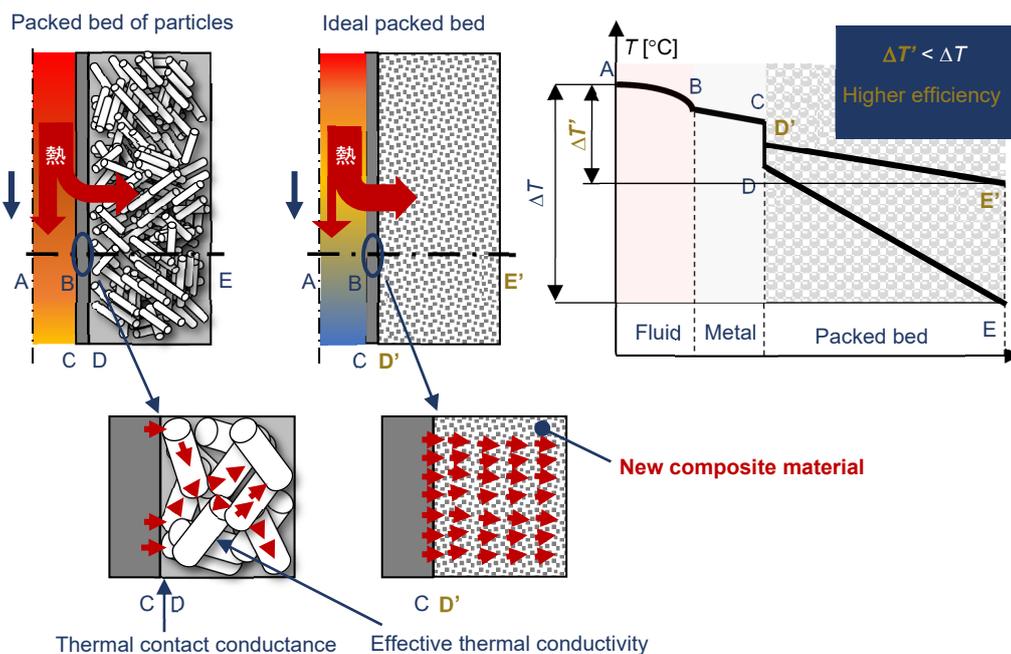


Figure 2.6-2 Schematic showing the demand of heat-transfer-enhanced materials and optimal contact with the heat exchanger's surface in order to maximize heat transfer rate during the chemical reactions.

### (4) Advances in the development of composite materials

The development of composite materials for chemical heat storage was successfully accomplished for  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . In case of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  it was possible to utilize expanded graphite to fabricate pellets<sup>[2.6-4]</sup> or consolidated blocks<sup>[2.6-5]</sup>. The measurement of thermal conductivity showed that the

employment of expanded graphite could enhance thermal conductivity of a packed bed of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  from  $0.16$  to  $1.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  [2.6-6]. A similar approach was conducted for  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  by using Si-SiC in form of foam (CF8) [2.6-7] or honeycomb (CH27, CH45) [2.6-8]. Of utmost importance is the fact that the same amount of energy could be stored or released at higher rates, overperforming the packed bed of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  pellets or  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  powder, as summarized in Fig. 2.6-3. Remarkably, a molten-salt thermochemical energy storage were recently combined [2.6-9]. Temperature boosting was achieved using a thermochemical storage reactor: the composite material exhibited a volumetric energy density of  $790 \text{ MJm}^{-3}$  the reactor had a flexible discharge power density of up to  $250 \text{ kWm}^{-3}$ .

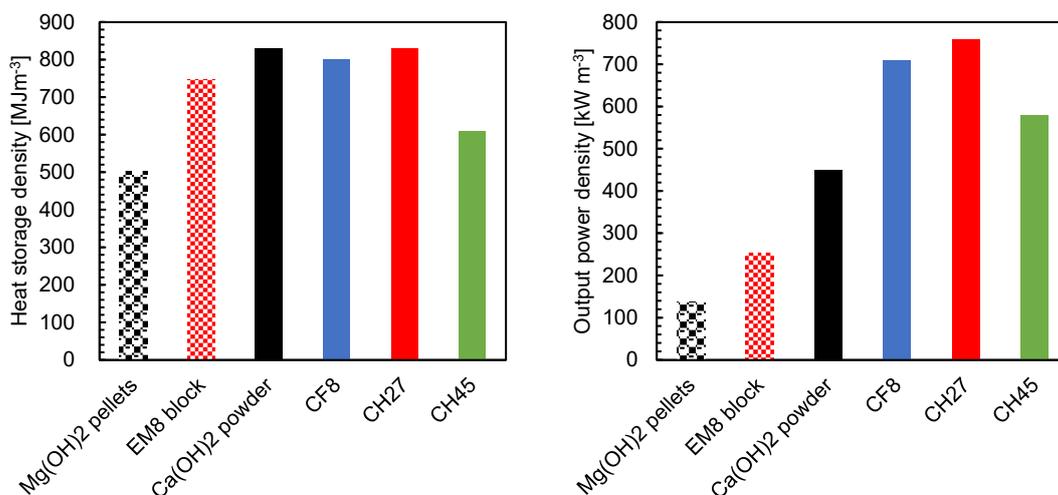


Figure 2.6-3 Summary of heat storage/output performances for  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  and  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  based composite materials for CHS.

### (5) Considerations on optimization of materials and reactor design

Material optimization often involves a time-consuming trial-and-error process, which can be costly and unsuitable for scaling up reactors due to numerous influencing factors. Figure 2.6-4 illustrates key parameters affecting chemical reactions in packed beds, such as thermal conductivity and interface contact conductance [2.6-10]-[2.6-11]. Numerical screening helps in understanding these factors. The numerical and experimental data can be compiled into a database and used to train surrogate models, which approximate the real system's behavior. Genetic algorithms can then be applied to these models for multi-objective optimization of materials and reactor designs, aiming to maximize heat storage and output performance [2.6-12].

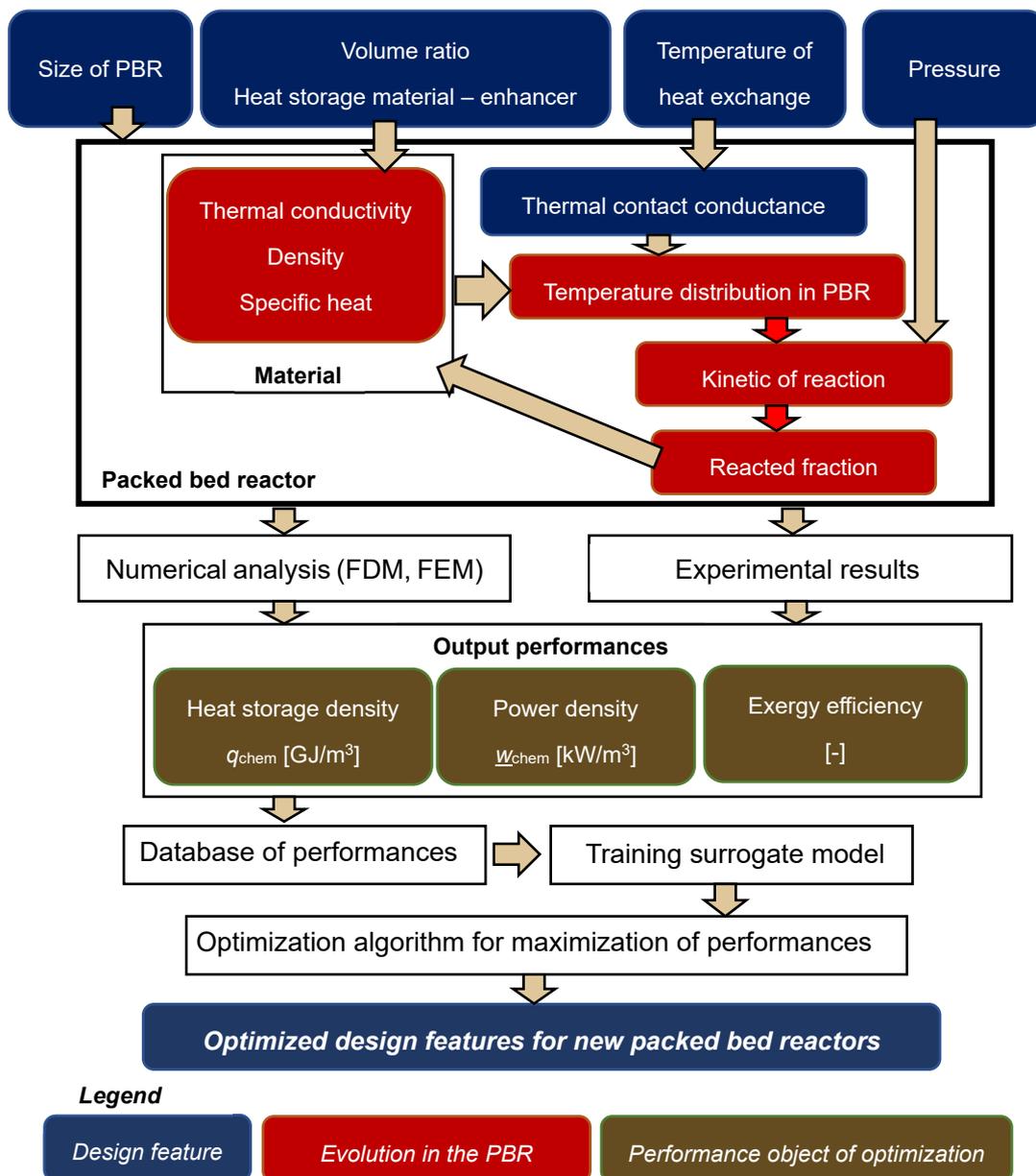


Figure 2.6-4 The influence of design features on the evolution of chemical reactions and materials in the packed bed reactor for CHS.

### (6) Summary

CHS materials hold immense potential in supporting the green transition and decarbonization of society. They serve as valuable energy buffers, accumulating substantial heat from surplus electricity generated by renewable sources and industrial waste heat. Improving heat transfer has shown promise, surpassing performance limitations of precursor materials in packed beds. Integrating numerical modeling and optimization algorithms is crucial for swift development and design of advanced composites and reactors. Combining numerical analysis, experimental data, and multi-objective optimization can maximize performance, meeting specific practical utilization requirements.

## (7) References

- [2.6-1] T. Yan, R.Z. Wang, T.X. Li, L.W. Wang, I. T. Fred, A review of promising candidate reactions for chemical heat storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 13-31
- [2.6-2] M. Zamengo, J. Ryu, Y. Kato, "Magnesium hydroxide - expanded graphite composite pellets for a packed bed reactor chemical heat pump", *Applied Thermal Engineering*, 61 (2013), p.853
- [2.6-3] S. Funayama, H. Takasu, M. Zamengo, J. Kariya, S. T. Kim, Y. Kato, Performance of thermochemical energy storage of a packed bed of calcium hydroxide pellets, , *Energy Storage*, Vol. 1(2), 2019, e40
- [2.6-4] M. Zamengo, J. Ryu, Y. Kato, "Thermochemical performance of magnesium hydroxide-expanded graphite pellets for a packed bed reactor chemical heat pump", *Applied Thermal Engineering*, 64 (2014), p. 339:
- [2.6-5] M. Zamengo, J. Ryu, Y. Kato, "Composite block of magnesium hydroxide - expanded graphite for chemical heat storage and heat pump", *Applied Thermal Engineering*, 69 (2014), p. 29
- [2.6-6] M. Zamengo, J. Tomaškovíc, J. Ryu, Y. Kato, "Thermal Conductivity Measurements of Expanded Graphite-Magnesium Hydroxide Composites for Packed Bed Reactors of Chemical Heat Storage/Pump Systems", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 49-3 (2016), p. 261
- [2.6-7] S. Funayama, H. Takasu, M. Zamengo, J. Kariya, S. T. Kim, Y. Kato, Composite material for high-temperature thermochemical energy storage using calcium hydroxide and ceramic foam, *Energy Storage*, Vol. 1(2), 2019, e53
- [2.6-8] S. Funayama, M. Schmidt, K. M. Linder, H. Takasu, Y. Kato, Calcium hydroxide and porous silicon-impregnated silicon carbide-based composites for thermochemical energy storage, *Applied Thermal Engineering*, 220 (2023), 119675
- [2.6-9] S. Funayama, T. Kato, S. Tamano, K. Mochizuki, M. Zamengo, T. Harada, H. Takasu, Y. Kato, Thermal energy storage with flexible discharge performance based on molten-salt thermocline and thermochemical energy storage, *Applied Thermal Engineering*, Available online 10 November (2023), 121947
- [2.6-10] M. Zamengo, J. Ryu, Y. Kato, "Numerical Analysis of Chemical Heat Storage Units for Waste Heat Recovery in Steel Making Processes", *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 55-2 (2015), p. 473
- [2.6-11] M. Zamengo, S. Funayama, H. Takasu, Y. Kato, J. Morikawa, "Numerical analysis on the effect of thermal conductivity and thermal contact conductance on heat transfer during dehydration reaction in a fixed packed bed reactor for thermochemical heat storage", *ISIJ International*, 2022 Vol. 62, No. 12
- [2.6-12] M. Zamengo, S. Wu, R. Yoshida, J. Morikawa, "Multi-objective optimization for assisting the design of fixed type packed bed reactors for chemical heat storage", *Applied Thermal Engineering*, 218, (2023), 119327

## 2.7 高効率ヒートポンプ

### (1) はじめに

高効率ヒートポンプの開発、普及は冷凍空調分野に限らず広い分野においてカーボンニュートラルへの貢献が期待されている。熱を低温から高温に効率よく汲み上げることができ、ヒートポンプはエネルギー蓄熱技術と組み合わせることで、さらに効率を向上させ、エネルギーの有効活用を可能にする。例えば、ヒートポンプ給湯器では昼間に得られた再生エネの余剰分を使用してヒートポンプを駆動し、給湯器に蓄熱することで家庭用では主に夜間に、業務用では昼間・夜間にそれぞれ温熱を利用することができる。ヒートポンプおよびこれに蓄熱機能を加えたシステムの普及によって、発電に使われている化石燃料の消費を減らすことができる（例えば図 2.7-1 東京都における家庭部門の用途別エネルギー消費量のうち給湯用、暖房用）。さらに、直接燃焼熱による暖房（灯油・ガスヒーター）に使われる灯油などの化石燃料の使用を減らすことを可能にできる（例えば図 2.7-2 地域別年間エネルギー種別のうち暖房給湯に用いられる分）。

また、ヒートポンプを応用して再生エネによる余剰電力を地中・躯体や水槽・氷槽に蓄熱し、この熱を用いて室内や空間の温調することができる。あるいは、再生エネによる余剰電力を熱変換して蓄熱し、さらに産業分野から発生している厩大な排熱を蓄熱して、これら蓄熱エネルギーをヒートポンプにより温度を上昇させて熱機関や冷凍機空調機の駆動、または熱輸送で利用することが可能である。

この二酸化炭素の低減に貢献するヒートポンプの熱効率率は冷凍空調分野における技術革新とともに年々向上しているが、カーボンニュートラルを目指す上でさらに効率向上を目指す必要がある。



図 2.7-1 東京都における家庭部門の用途別エネルギー消費量<sup>[2.7-1]</sup>

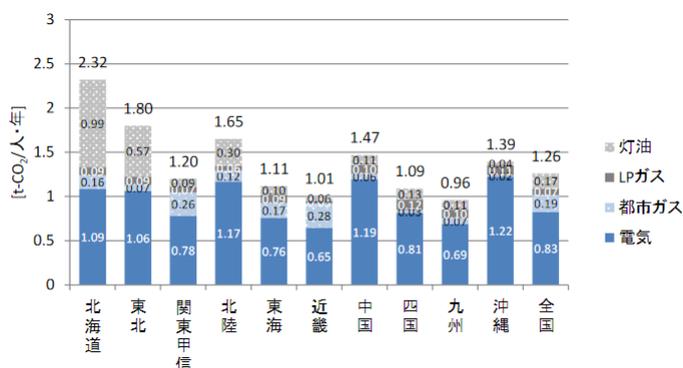
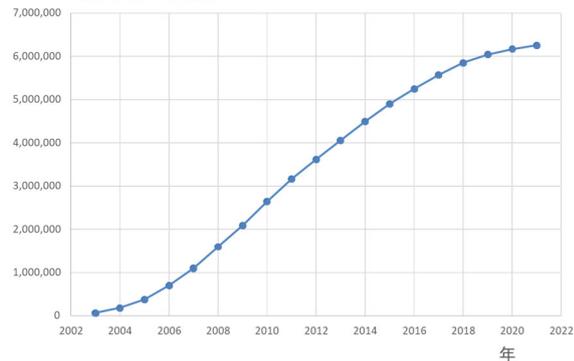


図 2.7-2 地域別年間エネルギー種別 (2020 年度)<sup>[2.7-2]</sup>

(2) ヒートポンプ給湯器

平成 27 年 7 月に策定された長期エネルギー需給見通しでは、2030 年度までに家庭用ヒートポンプ給湯器（通称エコキュート）の 1,400 万台の普及を目標としている。なお、エコキュートは 2022 年度には 70 万台出荷されていて（年度最多記録）、現在の設置台

家庭用エコキュートの設置台数の推定数



日本冷凍空調工業会資料に基づき作成

図 2.7-3 エコキュートの設置台数の推移

表 2.7-1 ヒートポンプ給湯機の運転方法の変更によるマクロ影響量 [2.7-3]

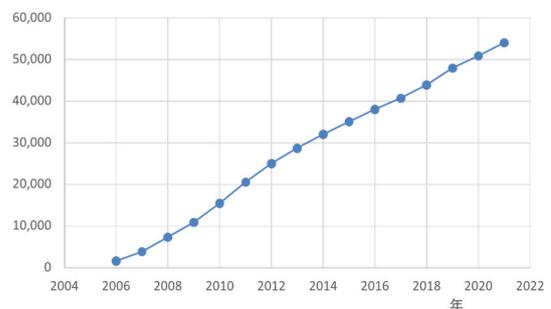
	世帯人員	普及世帯数	CO <sub>2</sub> 変化量① [kt-CO <sub>2</sub> /年]	CO <sub>2</sub> 変化量② [kt-CO <sub>2</sub> /年]	一次エネ変化量 [PJ/年]	自家消費変化量 [GWh/年]	原油換算変化量(二次基準) [万 kL/年]
最適制御運転	4人	370万	▲165 (▲172~▲137)	▲221 (▲230~▲184)	▲4.4 (▲4.5~▲3.6)	2,375 (+1,548~+3,272)	▲4.1(▲4.3~▲3.4) [▲0.4%(▲0.4%~▲0.3%)]
昼間蓄熱運転 【参考】	4人	370万	▲186 (▲220~▲148)	▲249 (▲295~▲198)	▲4.9 (▲5.8~▲3.9)	2,050 (+1,427~+2,755)	▲4.7(▲5.5~▲3.7) [▲0.4%(▲0.5%~▲0.3%)]
最適制御運転	3人以上	1,028万	▲459 (▲477~▲381)	▲615 (▲640~▲511)	▲12.1 (▲12.6~▲10.1)	6,604 (+4,305~+9,097)	▲11.5(▲12.0~▲9.6) [▲1.0%(▲1.0%~▲0.8%)]
昼間蓄熱運転 【参考】	3人以上	1,028万	▲517 (▲613~▲411)	▲693 (▲821~▲551)	▲13.6 (▲16.2~▲10.8)	5,700 (+3,96~+7,661)	▲13.0(▲15.4~▲10.3) [▲1.1%(▲1.3%~▲0.9%)]

注 1) CO<sub>2</sub> 変化量①は 0.37kg-CO<sub>2</sub>/kWh、CO<sub>2</sub> 変化量②は 0.469kg-CO<sub>2</sub>/kWh  
 注 2) 普及世帯数は普及対象外であるその他の給湯設備を除く値  
 注 3) 変化量算出のベースは夜間蓄熱運転  
 注 4) 丸括弧内は最大、最小  
 注 5) 原油換算変化量の角括弧内は家庭部門の削減目標である 1160 万 kL で除した値

数を見積もると約 700 万台になる (図 2.7-3)。太陽光発電 (PV) の余剰分でエコキュートを駆動して蓄熱を利用する効果をシミュレーションすると、年間あたりの二酸化炭素排出量を大幅に減少できることが示されている

[2.7-3]。また、蓄熱せずに売電のみとした PV 余剰量と比較してもエコキュートの蓄熱量の割合はあまり高くなりならず、売電による家計収入に殆ど影響しない。なお、この PV 余剰分による蓄熱量は年間の世帯当たりの太陽光発電量 ( PV 設置容量 4kW とし) に換算すると 50~60 万世帯に相当する。したがって、近年の太陽光連携機能付きエコキュートの普及促進が再エネを蓄熱

業務用エコキュートの設置台数の推定値



日本冷凍空調工業会資料に基づき作成

図 2.7-4 業務用給湯器の設置台数の推移

する給湯システムの一層の普及が期待される。

一方、業務用ヒートポンプ給湯器の普及はエコキュートほど多くないが、設置台数は年々増加している（図 2.7-4）。このほぼ一定の増加率からすると 2030 年には、家庭用の 1/5～1/3 の再生エネ量を貯蔵することが可能である。

### (3) 地中・躯体（含む水槽・氷槽）蓄熱利用ヒートポンプ

蓄熱式空調システムとは、冷暖房に必要な熱を夜間に蓄え、この蓄熱を昼間の冷暖房に利用する空調システムであり、建物内に蓄熱槽を設置し、冷温水や氷、地中、躯体に熱（再エネヒートポンプによる冷熱を含め）を蓄えるものである。一般的な事務所ビルの空調は主に昼間運転であり、深夜の空調需要は少ない。また、建物の空調需要は季節や時間帯によって負荷が大きく変動していて、空調システム（ヒートポンプ）側も負荷を変動に対応した運転を繰り返すために効率が低下する。そこで、蓄熱式空調システムを用いると負荷変動の影響を殆ど受けずに夜間や再エネの余剰電力を利用して一定の負荷で運転可になる。水槽・氷槽蓄熱空調システムは国内に約 33,000 件あって、ピークシフト効果として約 210 万 kW を蓄熱できる<sup>[2.7-4]</sup>。スカイツリーおよびその周辺では蓄水槽および地中熱ヒートポンプ(クローズドシステム)を用いて小規模な地域冷暖房を行うと共に、災害時の給水システムとしての機能を持つ。

地中熱利用ヒートポンプ 地中熱利用ヒートポンプは、欧米では 1980 年代から普及し始め、米国ではすでに 2,000 万 kWt 以上が利用されている（家庭用ヒートポンプ標準出力 12 kWt の 167 万台に相当）。欧米諸国や中国では、エネルギー政策で地中熱が取り上げられていて、平成 23 年度からは経産省の補助金制度もあって、今後の普及促進が期待されている。現在国内では 22.6 万 kWt の地中熱が利用されている。なお、再生エネの蓄熱を行いやすい帯水層蓄熱（オープンループ式）はその約 1/10 程度である<sup>[2.7-5]</sup>。

帯水層蓄熱システム 広く普及している空調用エアコンでは冷暖房の排熱を大気に放出するが、帯水層蓄熱ではその排熱を帯水層に蓄える<sup>[2.7-6]</sup>。冷房運転時には冷熱井から冷たい地下水を揚水して冷房に利用し、排熱利用によって温まった地下水を温熱井に注入して蓄熱する。一方、暖房運転時は温熱井から温かい地下水を揚水して暖房に利用し、排熱利用によって冷めた地下水を冷熱井に注入して蓄熱する。この操作を季節間で繰り返すことで、夏期に排出される温熱を冬期の暖房熱源に、冬期に排出される冷熱を夏期の冷房熱源として利用可能になる。

### 躯体蓄熱

余剰再生エネでヒートポンプを駆動し躯体蓄熱する躯体蓄熱（基礎や構造体）が提案されている。一般的な住宅の床下と天井裏の蓄熱空間は、断熱された外壁の内部通気層と間仕切り壁の通気層とで結ばれて空気が循環している。冬季はこの空気循環サイクルに太陽

熱による集熱システムや再エネ利用ヒートポンプを導入し、天井裏から引きこまれる空気は暖められ、床下に送られる。暖められた空気の熱は床下に蓄熱できると共に壁・天井を温め、壁表面温度の低下を抑えることができる。夏場は再可能エネルギーを利用してヒートポンプで蓄熱空間に冷熱を蓄えることも提案できる。

なお、躯体蓄熱を余剰再生エネとヒートポンプの組み合わせによりアクティブ化できる。窓から差し込む日射熱を熱容量の大きな床や壁等の蓄熱体に蓄え、夜間や曇天時に放熱させて暖房効果を得る。躯体の材質の違いやその厚み等により蓄熱効果は異なるが、熱容量が大きいほど室内温度はより安定する。また、RC 壁等の構造物外側を断熱施工して壁・床・屋根に蓄熱するシステムがあり、暖房時太陽依存率は 70%程度になる。

#### (4) 排熱貯蔵・エネルギー変換技術（未利用の排熱の回収）

現在の製造関連工場ではボイラ室等に設置した蒸気ボイラで重油等を燃焼させて高压の蒸気を発生させているが、

その際に発生する 100～300℃程度の低温排熱の多くは十分に活用されずにその大半は利用されず廃棄されている。また、蒸気配管を介して蒸気の圧力を下げながら各建屋内のプロセス設備へと供給するので、熱需要の近傍にヒートポンプ熱源機器を個別分散設置する

ことで、配管ロスの削減を図ることができ、個々の製造プロセスの稼動状況や必要温度に合った効率的な熱供給が可能になる。

#### (5) ヒートポンプを用いた熱エネルギー循環型社会の提案

高温にして利用する技術によって熱源を選ばない高熱効率のランキンサイクルやスターリングエンジンの利用可能になる（図 2.7-6）。なお、熱機関や排熱を出すシステムの上流・中流・下流それぞれ

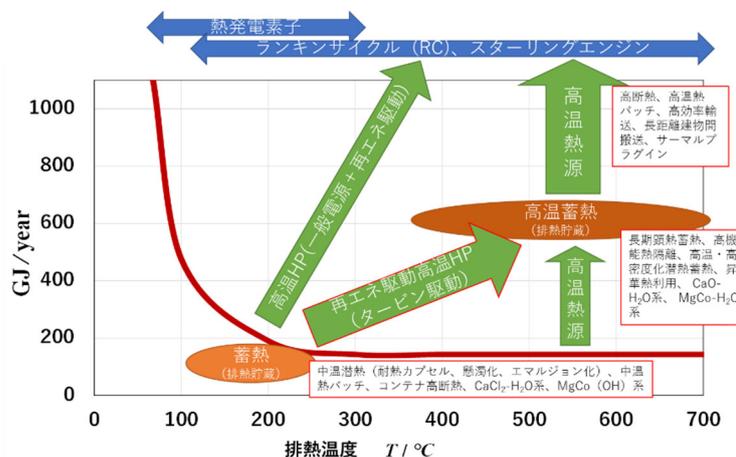


図 2.7-5 温度帯による排熱量と高温ヒートポンプの利用（熱機関の駆動）

- ・熱機関や排熱を出すシステムの上流・中流・下流それぞれの段階での対策が必要
- ・各段階ごとに温度レベルが異なるため、多くの高度技術を利用・開発することが求められる

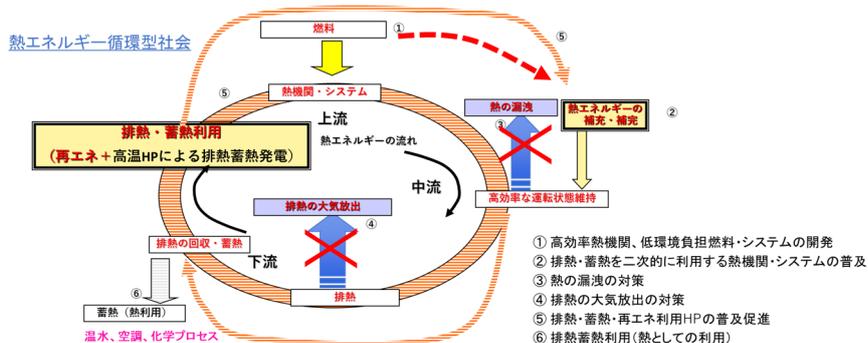


図 2.7-6 熱エネルギー循環型社会の提案

それぞれの段階での対策が必要になり、また、各段階で温度レベルが異なるので、高度技術が必要となる。

#### (6) まとめ

ヒートポンプと再生エネ蓄熱システムを組み合わせることで、カーボンニュートラルに貢献できる。なお蓄熱の温度帯によってヒートポンプの開発技術は異なる。現在のヒートポンプが主に利用できる温度用途は暖房、給湯用であり、その需要量は非常に多い。より高温の温度帯を利用するには 200 °C以上が得られる高温ヒートポンプの開発および普及が必要である。以下に分野別に蓄熱利用ヒートポンプシステムの現状と課題を整理する。

「産業用分野」の高温ヒートポンプは供給温度の高温化によって、その適用範囲を拡大させ、更に蓄熱技術等を応用して高温・高出力化、熱利用方法の高効率化を図り、排熱を利用することで更に省エネ・CO<sub>2</sub> 排出量削減を促進する。将来的には高温ヒートポンプによって回収された加熱プロセス排熱を蓄熱応用して、熱機関の駆動等への利用も検討する。

「業務・家庭用分野」では冷暖房・給湯一体型、冷暖房・冷蔵一体型等のヒートポンプにより熱回収の最大化と機器排熱のカスケード利用により省エネ・CO<sub>2</sub> 排出量削減を促進する。なお、複合システムでの品質や高効率を確保するため、IoT を活用した運転最適化と故障予知機能、および機器売りからサービス型ビジネス（サブスク等）へ転換、IoT 利用による遠隔管理、AI 利用による制御・運用の最適化が必要である。

「分野共通」項目として電気需要最適化の推進に当たり、時期・時間に応じて、太陽光発電などの再エネ余剰電力が発生している時に需要を拡大（上げ DR）し、需給逼迫時等に需要を抑制（下げ DR）する機能をヒートポンプに持たせる。また、更なる効率向上は個別のヒートポンプ機器開発のみでは限界になっていて、井水や地中熱、下水熱等の未利用熱利用と建物（躯体蓄熱含め）との融合など、二次側などを含めたシステム全体として、業界をまたがる対応が必要である。加えて、高温多湿な日本の気候に適した潜熱・顕熱分離空調の高度化や、省エネに寄与できる容量最適化に向けたシステム設計も重要となる。

#### (7) 参考資料

[2.7-1] <https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/home/energy.html>

[2.7-2] 環境省 「令和2年度、家庭部門 CO<sub>2</sub> 排出実態統計調査結果の概要（速報値）」  
<https://www.env.go.jp/content/900446757.pdf> (2021.3)

[2.7-3] 一般財団法人ヒートポンプ・蓄熱センター 「卒FITに向けた余剰電力の自家消費におけるヒートポンプ給湯機の有用性の評価報告書（ヒートポンプ給湯機の有効活用検討会）(2019.11)

[2.7-4] ヒートポンプ・蓄熱センター 「Heat Pump & Thermal Storage System Data Book 2022」  
<https://www.hptcj.or.jp/Portals/0/data0/material/handbook/databook2022/2022DataBook.pdf> (2022)

[2.7-5] [https://www.env.go.jp/water/jiban/post\\_96.html](https://www.env.go.jp/water/jiban/post_96.html)

[2.7-6] 環境省 「帯水層蓄熱の利用にあたって～熱エネルギーを大地に蓄熱 大規模施設の冷暖房に活かす技術～」  
<https://www.env.go.jp/content/900542334.pdf>

### 3. エネルギー貯蔵技術の利用に関する調査

#### 3.1 蓄電池

##### (1) はじめに

蓄電池は、電気自動車等のモビリティの動力源、太陽光・風力等の再生可能エネルギーの主力電源化のための出力変動調整力、5G 通信基地局やデータセンター等の重要施設のバックアップ電源など、様々な用途で利用され、電化社会・デジタル社会に不可欠な最重要物質とされる。本項では蓄電池に関する最新動向や課題等について調査した結果を要約して示す。詳細は参考文献（[3.1-1]-[3.1-3]）による。

##### (2) 蓄電池の最新動向

蓄電池の一種であるリチウムイオン電池は、リチウムイオンが正負極材料結晶中の原子の間に入り出す性質を利用し、充電時に正極から負極へ、放電時に負極から正極へとイオンが移動する性質を利用している。両極とも結晶構造を維持したままイオンの移動だけで充放電が進むため、鉛蓄電池やニッケル水素電池など、充放電により電極の構造が変化する従来の二次電池に比べ、劣化が少なく充放電効率が良く、エネルギー密度が高いなどの特徴を有する。

リチウムイオン電池は主に車載用・定置用蓄電池として使用されており、世界的に需要が拡大し、投資競争が激化している。車載用蓄電池は主にEV（電気自動車）やPHEV（プラグインハイブリット車）のモーターを駆動させるための駆動用蓄電池として用いられる。定置用蓄電池は据え置き型で、家庭用（住宅向けに供されるもの）、業務・産業用（工や公共施設等に併設されるもの）、系統用（電力系統に接続し、系統安定化や周波数調整等に使用されるもの）等に細分化される。家庭用蓄電池や業務・産業用蓄電池は、主に再生可能エネルギーの自家消費率向上やピークカットに活用されるほか、災害対応・レジリエンス強化等の目的で導入が進んでいる。系統用蓄電池については、2050年のカーボンニュートラル達成のためには再生可能エネルギーの導入を加速化させる必要があり、天候等の影響により発電量が変動する再生可能エネルギーに対する調整力として、電力の安定供給に活用されることが期待されている。

蓄電池市場は、各国におけるカーボンニュートラル達成に向けた再生可能エネルギー導入に伴い、車載用・定置用ともに拡大する見通しであり、2050年の市場規模は約100兆円（2019年市場規模は約5兆円）になると見込まれている。

蓄電池は、今後益々、国民生活・経済活動が依拠する重要な物資となることから、その供給が途絶する場合には国民生活・経済活動に大きな影響を生じさせることが危惧されている。それに対して、日本の蓄電池生産のシェアは年々低下しており、また、蓄電池原材料が特定国に偏在するなど、蓄電池の安定供給に関しては課題があるとされる。以下に蓄電池や原材料の供給に関する課題を記載する。

### (3) 蓄電池の安定供給に関する課題

#### ① 蓄電池

蓄電池生産の世界市場における日本のシェアは、車載用蓄電池が2015年51.7%から2020年21.1%に、定置用蓄電池が2016年27.4%から2020年5.4%に低下している状況にある。日本国内において、車載用蓄電池については特定国に過度に依存する状況にはないが、今後、EVやPHEVの生産拡大に伴い蓄電池の調達量が増加することで、必要な供給能力を国内に整備しない限り、将来的に特定国に過度に依存するおそれがある。定置用蓄電池については、国内で出荷された家庭用蓄電池に搭載されている電池の内、国内製は約3割にとどまり、特定国の製品が約7割を占めている状況にあり、過度に依存する状況にある。特定国からの供給途絶が発生した場合には、他国からの代替輸入が想定されるが、今後、世界的に蓄電池需要が急拡大する中で、需給がひっ迫することが予想され、代替輸入は困難との見通しである。

このような状況に対し、蓄電池産業戦略<sup>[3.1-2]</sup>において、蓄電池産業の競争力強化に向け、2030年までに国内で150 GWh/年の製造能力の確立を目標に掲げている。その目標達成に向けて、国内製造基盤強化のための大規模投資や上流資源の確保、次世代電池の開発、人材育成等を総合的に推進することとしている。

#### ② 蓄電池原材料と部素材

リチウムイオン電池の正極の原料となるリチウム・ニッケル・コバルトの生産量(2019年)と埋蔵量を図3.1-1~3に、負極の原料となる黒鉛の生産量(2019年)と埋蔵量を図3.1-4に示すが、リチウム、ニッケル、コバルトの埋蔵量、生産量ともに特定国(豪州、南米、コンゴ民、インドネシア等)に偏在している。また、中流の精錬工程は製造コストの安い中国に集中しており、資源ナショナリズムの観点から、原料についても供給途絶のおそれがあり、かつ代替が困難である。

また、蓄電池生産に必要な材料又は部材(部素材という)には、海外がコスト面で競争力を持ち、品質面でも日本を追い上げてきているものも多く、多くの蓄電池部素材で日本のシェアは低下している。技術とコスト競争力の向上を図らなければ、サプライチェーンの他国依存の傾向が強まるおそれがある。

蓄電池のサプライチェーンを確立する上で、上流資源の確保は重要であり、鉱山権益の確保を念頭に、支援スキームの強化や関係国との連携強化を進めることが必要とされる。

#### (4) まとめ

蓄電池は電化社会・デジタル社会に不可欠な最重要物質であり、今後、その重要性は高まることが予想される。その一方で、日本の蓄電池の生産シェアは年々低下している状況にある。また、蓄電池の原材料であるリチウム、ニッケル、コバルトの埋蔵量、生産量ともに特定国に偏在しており、中流の精錬工程は製造コストの安い国に集中していることから、今後、蓄電池の利用が広がると、資源の価格上昇や囲い込みなどを引き起こし、蓄電池の安定供給については日本のエネルギー安定供給が妨げられる恐れがある。これらに対応するためには、

蓄電池の上流資源を確保しサプライチェーンを確立すること、並びに国内製造基盤強化が必要である。併せて、蓄熱など偏在する資源に頼らない多様なエネルギーストレージ技術の開発も重要であり、特定国資源に頼らない国内産業のサプライチェーンを構築することが必要と考えられる。

(5) 参考文献

- [3.1-1] 大規模電力貯蔵用蓄電池 電気化学学会エネルギー会議電力貯蔵研究会 2011年3月28日初版日
- [3.1-2] 蓄電池産業戦略 経済産業省蓄電池産業戦略検討官民協議会 2022年8月31日
- [3.1-3] 蓄電池に係る安定供給確保を図るための取組方針 経済産業省 令和5年1月19日
- [3.1-4] Mineral Commodity Summaries 2020, U.S. Geological Survey (USGS)
- [3.1-5] Mineral Commodity Summaries 2021, U.S. Geological Survey (USGS)

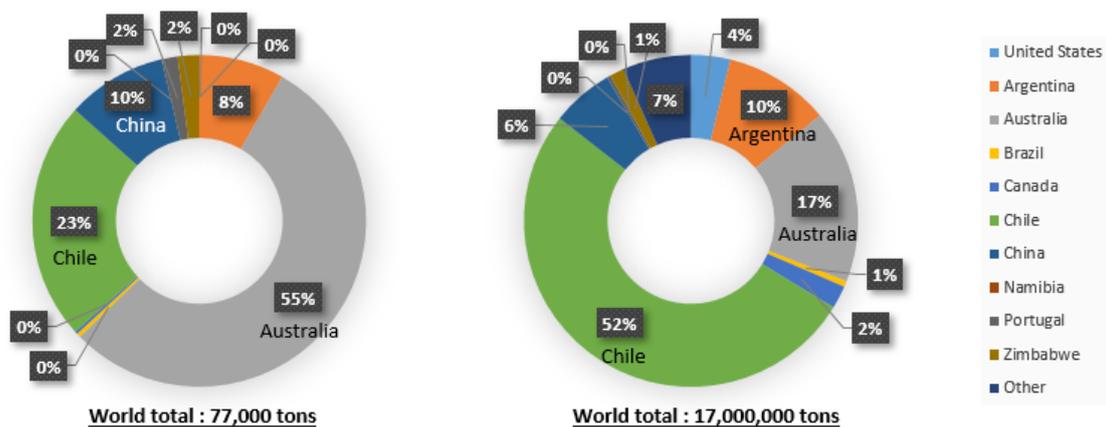


図 3.1-1 リチウムの生産量（2019年）と埋蔵量<sup>[3.1-4]</sup>

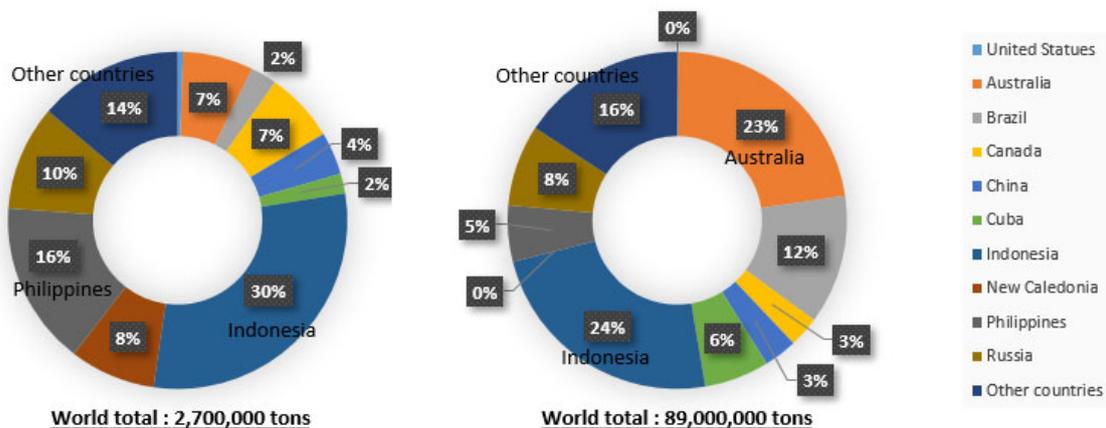


図 3.1-2 ニッケルの生産量（2019年）と埋蔵量<sup>[3.1-4]</sup>

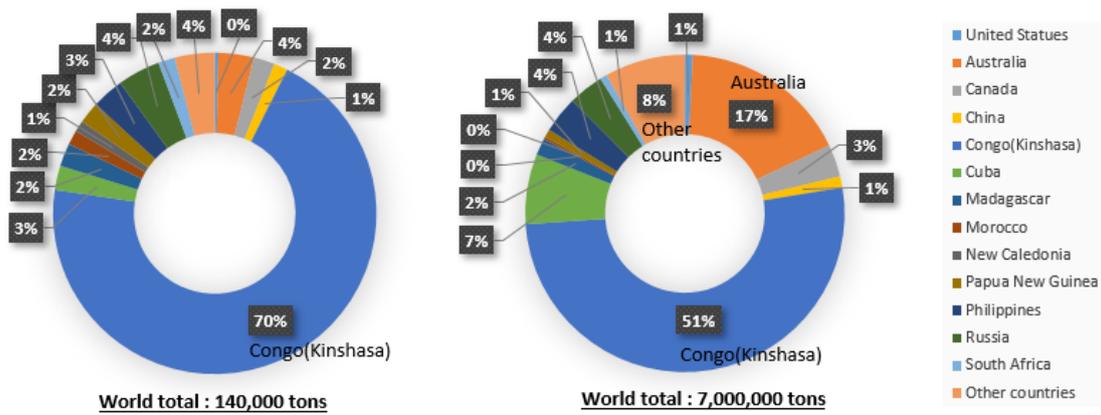


図 3.1-3 コバルトの生産量（2019年）と埋蔵量<sup>[3.1-4]</sup>

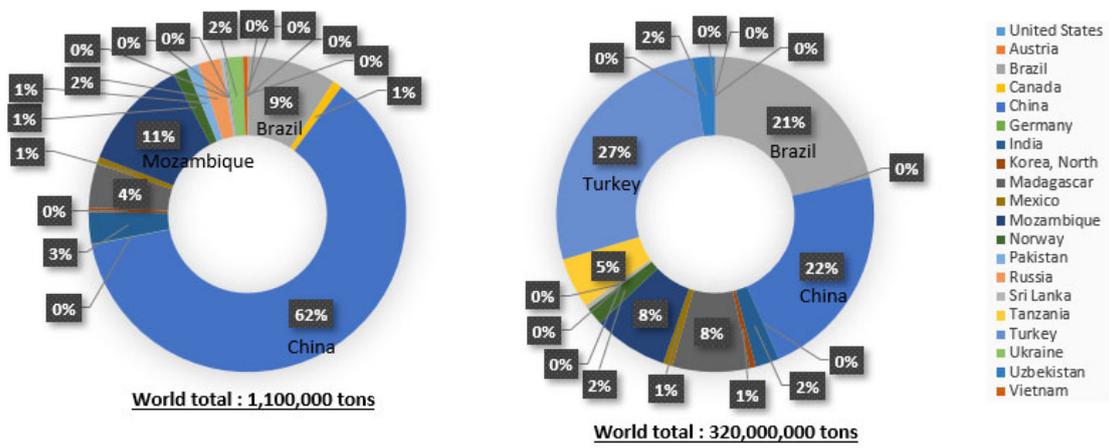


図 3.1-4 黒鉛の生産量（2019年）と埋蔵量<sup>[3.1-5]</sup>

## 3.2 余剰再エネの活用

### (1) はじめに

再生可能エネルギー（以下、再エネ）は設置に適した地域と電力消費地が異なることが多く、送電網を活用して発電電力を送電している。今後、自然変動要素を伴う再エネ（太陽光発電や風力発電）の導入が拡大する見通しであるが、その場合、送電網の容量不足や調整用火力の不足が、技術面及び経済効率性の面から発生することが想定される。実際、2018年10月に九州電力で初めての再エネの出力制御が実施され、その後九州電力内では毎年発生している。その他のエリアでは、2022年度には、北海道・東北・中国・四国・沖縄と多くのエリアでの再エネの出力抑制の実施が記録され、2023年4月の中部電力内の出力制御に加え、北陸電力・関西電力においても出力制御を記録し、東京電力を除くすべてのエリアで再エネの出力制御が実施されている。ここでは、日本国内における、余剰再エネ利活用に向けた研究開発の状況、及び、事業者における検討事例を公開資料ベースに纏める。

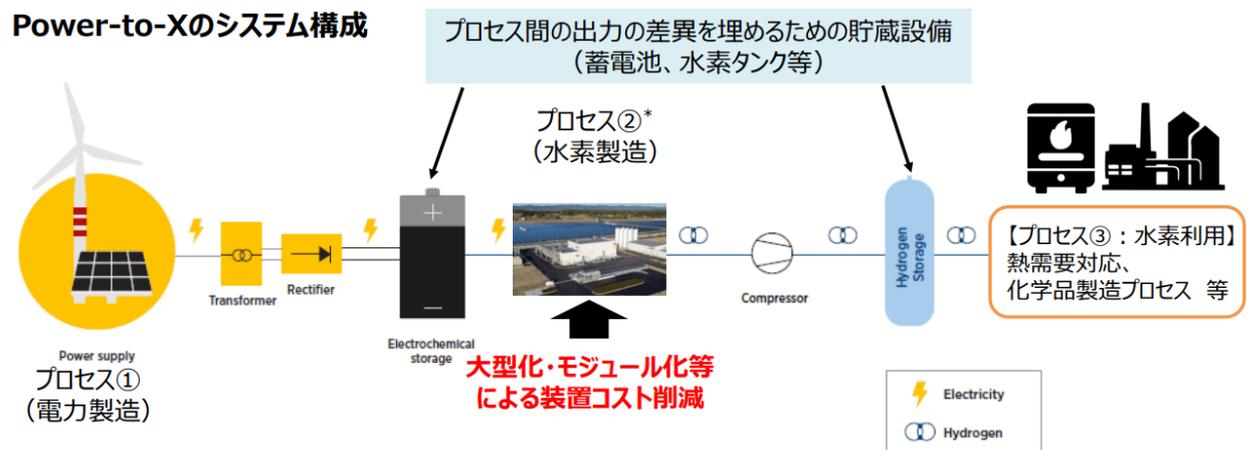
### (2) 余剰再エネ利活用に向けた研究開発の状況

ここでは、NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）が実施している事業・プロジェクト<sup>[3.2-1]</sup>から、「余剰再エネの利活用」「蓄熱」という観点から研究開発に取り組んでいる事業をリストアップした。

- 脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム  
低温排熱・余剰電力を使った蓄熱発電システムの調査  
再エネ熱と空調機のダブル蓄熱空調システムの実現可能性調査
- 水素社会構築技術開発事業  
研究開発項目Ⅰ：「水素エネルギーシステム技術開発」
- クリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業  
革新的高温蓄熱技術の国際共同研究開発  
革新的高性能熱電発電デバイスと高度評価技術の国際共同研究開発
- グリーンイノベーション基金事業  
再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造プロジェクト  
研究開発項目1 水電解装置の大型化技術等の開発、Power-to-X大規模実証  
研究開発項目2 水電解装置の性能評価技術の確立

ここで「グリーンイノベーション基金事業」とは、2020年10月に宣言された「2050年カーボンニュートラル」を踏まえ、経済と環境の好循環につなげるための日本の新たな成長戦略として「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定され、企業の野心的な挑戦を後押しすべく NEDO に創設された、過去に例のない規模（2兆円）の基金である。その中で、リストアップしたプロジェクトでは、余剰再エネ等を活用した国内水素製造

基盤の確立や、先行する海外の水電解市場獲得を目指すべく、複数のタイプの水電解装置（アルカリ型、PEM型）の大型化やモジュール化、膜等の優れた要素技術の実装、水素利用と一体での Power-to-X システム実証等を強力に後押しし、早期コストの一層の削減（現在の最大 1/6 程度）を目指しているものである（図 3.2-1）。



**水電解装置の開発と合わせて、ボイラー等の熱関連機器や基礎化学品の製造プロセスとを組み合わせ、再エネ電源等を活用した非電力部門の脱炭素化に関するシステム全体を最適化する実証を行う予定**

\*写真は福島水素エネルギー研究フィールド (イメージ)

図 3.2-1 再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造プロジェクトで検討されている Power-to-X システム構成の概要<sup>[3.2-2]</sup>

現在実施されている NEDO 事業・プロジェクトから、余剰再エネ利活用に向けた開発の多くは Power to Gas で、水素製造と絡めたものがほとんどであることが確認できる。これは、国として水素社会を目指す方向性が出されていることに加えて、水素関連技術の成熟度はまだ高くないため、技術開発に対する予算が配分されやすいためであると考えられる。一方、技術の成熟度が比較的高い蓄熱関連技術に関しては、技術開発の提案がしにくく、予算が配分されにくい状況になっていると考えられることから、蓄熱技術の社会実装をタイムリーに進めていくためには、何らかの仕組みが必要と考える。

(3) 事業者における余剰再エネ利活用の検討事例

(a) 岩石蓄熱技術を用いた蓄エネルギーサービス事業に関する技術開発・実証<sup>[3.2-3]</sup>

蓄エネルギー技術は、再エネ大量導入に伴い生ずる電力需給ギャップを埋めるための重要な鍵であり、その中でも環境性、経済性および設備信頼性において優位性が見込まれる岩石蓄熱技術に着目し、熱容量 100kWh 以上の試験設備としては国内初となる熱容量約 500kWh の岩石蓄熱試験設備を用いた熱挙動特性評価手法等を確立させ、熱エネルギーを効率的に制御できるシステムを開発し社会実装可能な技術としての確度を高める開発を進めている。特徴的な点としては、高温（700℃以上）蓄熱が可能な試験設備とすることで、顕熱蓄熱材（碎石、煉瓦、熔融塩、コンクリート、セラミックス等）として比較的高い蓄熱密度を達成でき、蓄熱層の小型化を可能としている点である。（図 3.2-2）

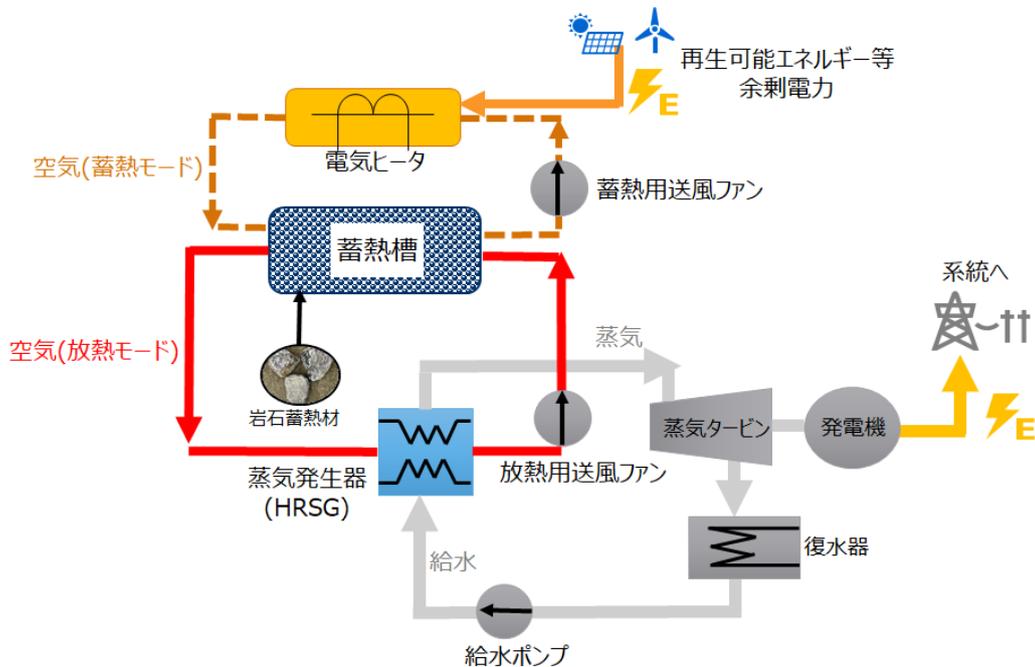


図 3.2-2 蓄熱発電の構成例<sup>[3.2-3]</sup>

なお、蓄熱発電システムのコストに関しては、海外の事例ではあるが Simens Gamesa 社は約 100€/kWh<sup>[3.2-4]</sup>としており、火力発電や蓄電池と比較しても十分な競争優位性を有するポテンシャルがあると考えられる。

(b) 再エネ余剰電源で化学品生産<sup>[3.2-5]</sup>

太陽光や風力発電からの出力が高まり、電力供給量が需要を上回った場合、化学メーカーが代表的な工業薬品であるカセイソーダを増産して余った電力を活用し、逆に電力供給量が需要を下回ると減産して使用電力を減らす、デマンドレスポンスの取り組み事例であり、製造業の生産設備を送配電網に組み込み、電力調整に活用するのは国内初の取り組みである

(図 3.2-3)。余剰時は再生エネを捨てずに活用でき、不足時は火力調整を少なくできる。調整代となる化学品（カセイソーダ）が市場で供給に対応できるか、また、適切な売値となるかがビジネス上の課題となる可能性がある。

電力の需給調整という観点では、需給調整用の電力を取引する「需給調整市場」では、2024年度から一次調整力の取引が始まる。現状、想定されているのは火力発電や蓄電池の電力だが、経済産業省はこのような実証試験を踏まえ、カセイソーダや水素などの製造装置についても一次調整力として取引できるよう、要件を見直すことも視野に入れている。実現すれば火力発電所が急停止した際などに電力使用量を抑制するための調整弁としても活用することが期待され、また、電力市場からのマネタイズによるビジネスモデルを構築することが可能となる。

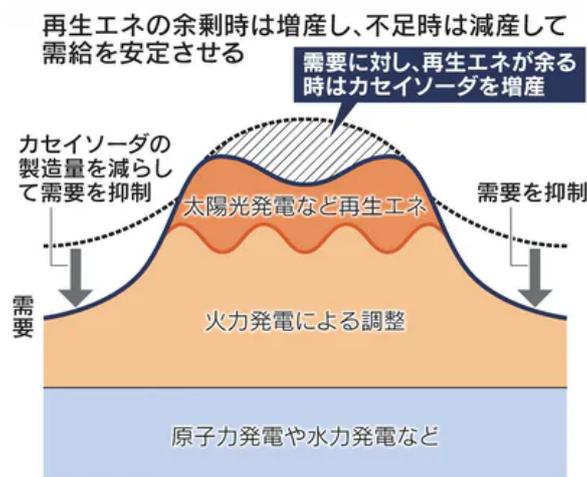


図 3.2-3 カセイソーダ製造によるデマンドレスポンスの例<sup>[3.2-5]</sup>

(c) 「太陽光発電追従型コンテナ型データセンター」による再エネの有効活用に関する実証<sup>[3.2-6]</sup>

こちらでもデマンドレスポンスの事例となるが、再エネの連系待ちおよび出力制御に伴う再エネ導入の機会損失回避に向け、柔軟に電力需要を創出可能な分散エネルギーリソース（DER）として、分散コンピューティングの一種である「ビットコイン・マイニング」に着目し、「追従型マイニングコントロール」（Adaptive Mining Control）システムを搭載したコンテナ型データセンターを構築し、1日の中で刻一刻と変化する太陽光発電量をリアルタイムで監視し、その発電量に追従しながら、ビットコイン・マイニング装置の稼働台数（負荷容量）を遠隔で自動制御することにより、太陽光電力を系統に逆流させることなく、自家消費で全量活用を実現する取り組みが始まっている。「太陽光発電追従型コンテナ型データセンター」は、ビットコイン・マイニングに留まらず、AI/ディープラーニングやグラフィックのためのレンダリング処理など、様々な DER 技術を再エネと掛け合わせて制御する、未来のデジタル社会を支えるテクノロジー基盤を目指した開発が進められている。

(4) 参考文献

- [3.2-1] NEDO HP (部門別事業一覧)、<https://www.nedo.go.jp/activities/bumonbetsu.html>  
(参照日：2023年12月21日)
- [3.2-2] 経済産業省資料、  
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/gifund/pdf/gif\\_04\\_summary.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/pdf/gif_04_summary.pdf) (参照日：2023年12月21日)
- [3.2-3] 東芝エネルギーシステムズ株式会社ニュースリリース (2022年11月21日)、  
<https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2022/11/news-20221121-01.html>  
(参照日：2023年12月21日)
- [3.2-4] Siemens Gamesa HP、  
<https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise> (参照日：2023年12月21日)
- [3.2-5] 向野峻 (2023年2月21日)「東京電力、再エネ余剰電源で化学品生産 需給の調整弁に」日本経済新聞、  
URL:<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC103XE0Q3A110C2000000/> (参照日：2023年12月21日)
- [3.2-6] 株式会社アジャイルエナジーX ニュースリリース (2023年12月6日)、  
<https://agileenergyx.co.jp/2023/12/06/poc-nasushiobara/> (参照日：2023年12月21日)

### 3.3 産業分野への蓄エネ利用

#### (1) はじめに

日本のエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量(2021 年度)は、電気・熱配分後（最終消費部門の電力及び熱の消費量に応じて消費者側の各部門に配分）においては、産業部門からの排出が最も大きく（35.1%）、業務その他部門（17.9%）、運輸部門（17.4%）、と続く<sup>[3.3-1]</sup>。また、産業部門からのエネルギー起源 CO<sub>2</sub> 排出量(2020 年度)を業種別に見ると、鉄鋼業からの排出が最も大きく（37%）、次いで化学工業(15%)、機械製造業(11%)、窯業・土石製品製造業(8%)、パルプ・紙加工品製造業(6%)、食品飲料製造業(5%) となり、この6業種で全体の82%を占める<sup>[3.3-2]</sup>。産業界では、1997 年の「経団連環境自主行動計画」発表以降、各業界団体が温室効果ガス削減目標を設定し、省エネを主体とする対策により CO<sub>2</sub> 削減実績をあげてきた。現在は、CN 実現のための手段として、エネルギー貯蔵にも注目が高まりつつある。

#### (2) 産業界の CN 実現のための取り組み

産業界では CN の実現に向けて、業界毎にビジョン、ロードマップを策定して中長期的な取り組みが行われている。上述のとおり CO<sub>2</sub> 排出量の多い鉄鋼業では、水素エネルギー利用とプロセスの電化が CO<sub>2</sub> 排出削減方策として提案されている。2030 年までに、製鉄所内水素等を活用した高炉における水素還元技術および CO<sub>2</sub> 分離回収技術などにより、製鉄プロセスからの CO<sub>2</sub> 排出量を 30%以上削減、2050 年までに、CO<sub>2</sub> フリー水素による水素還元製鉄へ転換する計画となっている<sup>[3.3-3]</sup>。また製紙業界では、自家発設備において化石エネルギーが大きな比率を占めているのが現状である。そこで長期ビジョンとして、バイオマス燃料化技術、各工程でのエネルギー転換に関する革新的技術、CO<sub>2</sub> 分離回収技術の導入等が挙げられている<sup>[3.3-4]</sup>。

しかしながら、いずれの技術についても技術的・コスト的な困難度は高く、目標値の達成は簡単ではないと言える。

#### (3) 産業分野の未利用熱エネルギー

我が国のエネルギー供給過程では一次エネルギーの約 6 割が有効利用されずに未利用熱として排出されている<sup>[3.3-5]</sup>。CN の実現には、これら未利用熱を有効活用する技術を開発し社会実装することが求められる。

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<sup>[3.3-6]</sup>。調査結果によると、業種別では非鉄金属や機械産業で 500℃以上の高温熱、紙・パルプや化学で 200℃近辺、食品や繊維でさらに低い温度が排熱されている。このように、未利用熱エネルギーの温度帯は業種毎に異なり、熱利用のニーズも様々である。よって、排熱と熱利用をマッチングして、それを実現する要素技術を適切に組み合わせてシステムを構築することが求められる。また温度帯としては、

鉄鋼業等で排出される質の高い高温の未利用熱と、全体の約8割を占める200℃以下の未利用熱に、更なる有効利用の余地がある。

また同報告書によると、アンケートの「新技術を導入する際に絶対に必要な条件」に関して、「対投資効果」は全ての回答者の97%が選択しており最上位である。コストが設備導入の際の最大の障害になっていると言える。熱利用関連技術の高性能化や低コスト化のための技術開発に加え、設備導入促進の政府支援が期待される。

#### (4) 産業分野での蓄エネの動向

世界ではCN実現に向けた動きが活発化しており、脱炭素への取り組みで投資家や取引先が企業を選別する動きもある。日本でも製造業の現場では、省エネの活動が加速している。特に、エネルギーマネジメントシステム(EMS)の導入により、エネルギーの使用状況を可視化・分析することで設備や運用を改善する取り組みが進められている。分析結果から策定された設備更新提案に基づき、高性能機器への更新、ヒートポンプ、太陽光発電、蓄電池、水素型燃料電池等の新規導入が行われている。近年ではさらに、このEMSをIoTとAIを活用することで高度に連携・制御する取り組みが行われている。熱利用の促進においては、需要と供給の時間的・空間的なミスマッチを克服する必要がある。今後は、時間と空間を超えた熱利用のためのエネルギーマネジメントの構築が求められる。

一方、電力貯蔵においては、従来の電力負荷の昼夜の変動を克服することにとどまらず、再エネの主力電源化に向けて、余剰電力を貯めることで不安定な出力を平準化する調整力としての期待が高まっている。電力貯蔵分野の蓄エネ技術としては、蓄電池、揚水式水力、水素、空気(圧縮・液化)、フライホイール等があり、NEDOにより各方式の原理と特徴が整理されている<sup>[3.3-7]</sup>。また、電力貯蔵技術の各方式が出力・放電時間の二軸でマッピングされている。各方式に長所・短所がありどれか一つの方式ではCNの実現には十分でなく、出力・放電時間の要求仕様に応じて適切な方式を選択し組み合わせる必要がある。ここには現状、蓄熱が電力貯蔵分野の蓄エネ方式として含まれていないが、海外では既に出力100MW、放電時間数週間の実績があり、季節間蓄熱は1990年代から検討されている。今後の計画も踏まえ、出力GW規模、季節間季節間までを上限とする、広い範囲をカバーすると言える(図3.3-1)。近年では欧米を中心に、電池より経済的で環境負荷の小さい「カルノーバッテリー」に関する国際プラットフォームが構築されている<sup>[3.3-8]</sup>。今後はこのような国際的な枠組みにも参画するなどにより認知と理解を促進し、日本においても蓄熱が電力貯蔵の選択肢の一つとして検討されるべきである。

#### (5) 蓄熱技術と産業分野への実装における課題

蓄熱に関する研究は古く、様々な要素技術が開発されている。蓄熱技術によって作動温度帯が異なり、蓄熱密度や応答性などの特性も変わるため、用途によって適切な技術が選択され用いられている。日本においては、室温レベルでは特に空調分野において、冷水、温水、氷、地中熱などが、普及促進のための種々の制度、国の税制や金融上の助成等もあって導入

が進んできた。しかしながら、温度レベルが上がると、低中温域では蒸気アキュムレータ、高温域では太陽熱発電で硝酸塩系混合溶融塩等の実績があるものの、実用例は著しく限定される。

温度レベルが高くなると、システムの複雑化、蓄熱槽や周辺機器を含む高コスト化などの課題が生じ、社会実装への困難度が高まる。高温に対応する要素技術の開発や、それらの要素技術を統合・最適化し、技術と経済性の両面で合理性のあるシステムの構築が求められる。また、社会実装の加速には、実証プロジェクトにてシステム全体の有効性の検証を行う必要があるが、日本では蓄熱に関してはほとんどない。産官学の連携体制の構築と、大型プロジェクト遂行における政府の支援が必要である。

(6) まとめ

産業分野では、従来から CO<sub>2</sub> 削減のために省エネを主体とする様々な取り組みが行われてきたが、近年では CN の実現に向けて蓄エネが注目されている。産業分野の未利用熱については、特に高温領域では新たな蓄熱技術の活用で更なる CO<sub>2</sub> 削減が期待される。また、蓄熱は経済的で環境負荷の小さいというメリットから、再エネ力電源化に向けた調整力としての期待も高まっている。電力貯蔵のための大規模蓄熱の社会実装においては、システムのコストや運用性から全体最適化をし、その有用性を検証する必要がある。このためには、産官学の連携と政府の支援が望まれる。

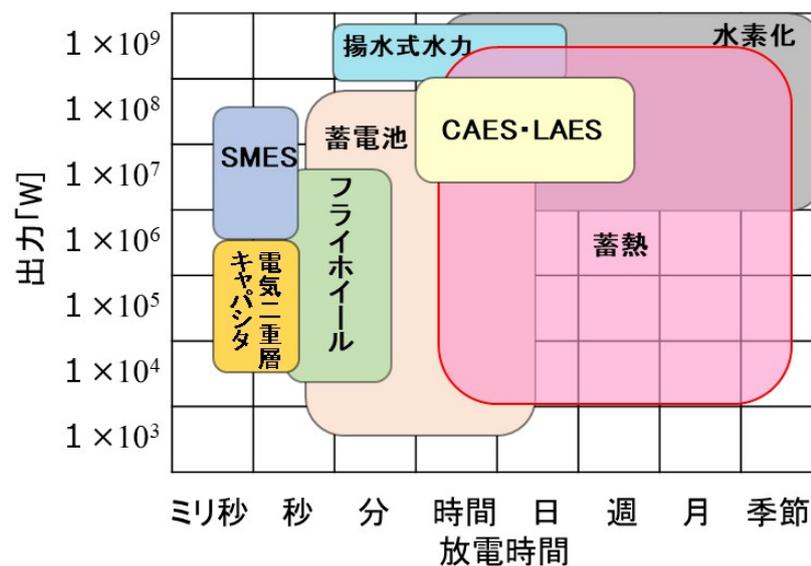


図 3.3-1 電力貯蔵技術の各方式の出力・放電時間  
 ([3.3-7]を基に本研究会が蓄熱を追加して作成)

(7) 参考文献

- [3.3-1] 環境省 HP、[https://www.env.go.jp/press/press\\_01477.html](https://www.env.go.jp/press/press_01477.html)
- [3.3-2] 環境省 HP、<https://www.env.go.jp/content/900445401.pdf>
- [3.3-3] 日本鉄鋼連盟 HP、<https://www.carbon-neutral-steel.com/vision/>
- [3.3-4] 日本製紙連合会、<https://www.jpa.gr.jp/file/topics/20210119062903-1.pdf>  
2021年1月20日
- [3.3-5] 小原春彦、INCHEM TOKYO 2019 講演資料  
<https://www.nedo.go.jp/content/100902069.pdf>
- [3.3-6] NEDO 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」 2019年3月
- [3.3-7] NEDO 技術戦略研究センターレポート「電力貯蔵分野の技術戦略策定に向けて」  
2017年7月
- [3.3-8] IEA Energy Storage Task 36 -Carnot Batteries, <https://www.eces-a36.org/>

### 3.4 スマートシティネットワーク

#### (1) 再エネの普及状況・将来予測

国際的な再エネの普及状況に関して、2021年時点において燃料別の発電シェアは20%強<sup>[3.4-1]</sup>であるが、2024年には全電源の5割程度（約45億kW）になる見通しである<sup>[3.4-2]</sup>。これは、2050年のCO<sub>2</sub>実質排出ゼロに向けて各国が再エネ導入を加速したのに加えて、ロシアのウクライナ侵攻で化石燃料の輸入依存の危機感が強まったのが要因である。しかしながら、我が国の再エネ比率は2021年度時点において20%で、世界的に見ると比率は低い<sup>[3.4-3]</sup>。国際エネルギー機関（IEA）の予測によると、日本の2023年の発電能力は1千万kWに留まる<sup>[3.4-2]</sup>。第6次エネルギー基本計画によると、2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と対応のポイントとして温室効果ガス排出の8割以上を占めるエネルギー分野の取り組みが重要とされ、再エネは主力電源として最優先の導入を原則としている。再エネの導入に際し、地域と共生する形での適地確保が具体的な取り組みとして挙げられ、再エネを社会インフラに効果的、積極的に組み込むスマートシティネットワークの実現がますます重要になっている。

#### (2) スマートシティネットワーク実現に向けて（社会実装モデルの提案）

再エネ普及のため風力発電や太陽光発電の大量導入を目指す際に懸案となるのが、再エネポテンシャルの高い地域がエネルギー消費地から遠く離れている点である。また、風力発電や太陽光発電は時間変動性を有するため、上記した需要と供給の距離的ミスマッチとともに時間的ミスマッチも生じる。そこで、著者は風力発電や太陽光発電で得た電力を水電解にて水素に変換して消費地まで輸送し、適宜発電もしくは移動体の燃料として利用するスマートシティネットワークを提案した<sup>[3.4-4]-[3.4-5]</sup>。水電解にて得られた水素をそのまま輸送するのは体積的に非効率であるため、各種水素キャリア（圧縮水素、液化水素、圧縮メタン、液化メタン、有機ハイドライド、液化アンモニア）に変換して輸送することを検討した。そして、どの水素キャリアがエネルギー効率的、CO<sub>2</sub>削減量的に優れるか評価した。その際に、現在有効活用されていないLNG気化時の冷熱排熱を液化水素製造の補助熱源として活用することを提案した<sup>[3.4-4]-[3.4-5]</sup>。三重県の四日市および川越にはLNG火力発電所が複数あり、十分な冷熱排熱のポテンシャルがある。さらには、水素は蓄電池と比べて長期保存に優位性を有するため、災害対応用の備蓄燃料としても期待できる。本評価では、四日市近郊に風力発電を3GW導入することとし、得られた電力を水素キャリアに変換後、輸送する大消費地として名古屋と京都を想定した。また、比較対象として四日市（地産地消；輸送ゼロ）についても評価した。その概念図を以下に示す。本検討では、エネルギー変換および輸送時のエネルギーロスを考慮したエネルギー変換効率（エネルギー損失割合）、CO<sub>2</sub>排出量（排出抑制効果）、ならびに2世帯住宅の消費電力を災害時にどの程度賄えるかについて評価した。

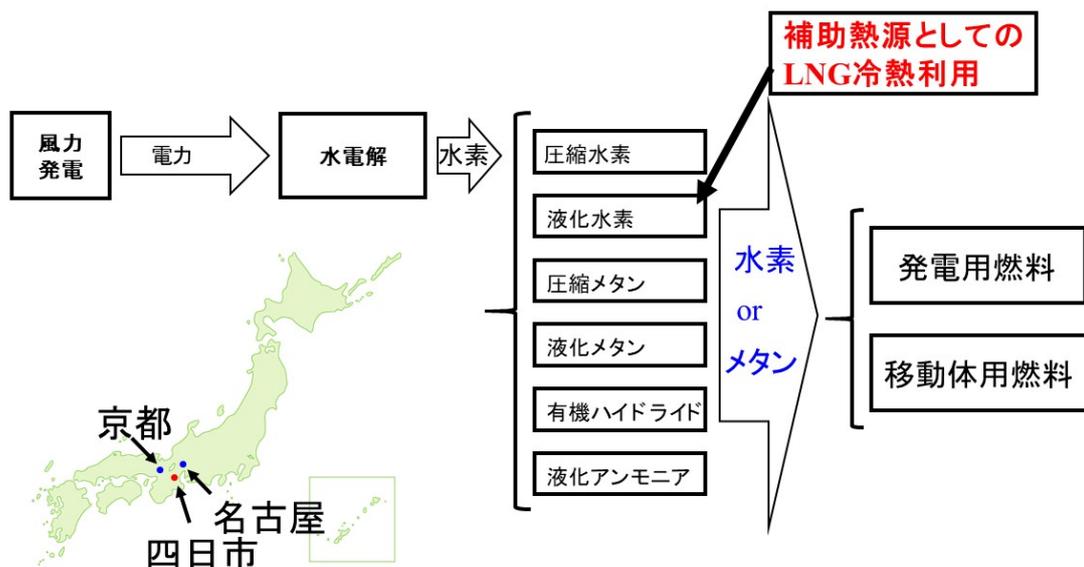


図 3.4-1 提案するスマートシティネットワークモデルの概念図

### (3) 提案スマートシティネットワークモデルの評価結果

各種水素キャリアの中で輸送過程の消費エネルギー、CO<sub>2</sub>排出量が少ないのは液化メタンとなった。これは輸送に必要な輸送車両（LNG タンクローリー）台数が他の水素キャリアと比べて少ないためである。その他の水素キャリアでは液化アンモニアの消費エネルギー、CO<sub>2</sub>排出量が少なくなった。これは液化アンモニアの輸送に使用することを想定した軽トラックの燃費がその他の水素キャリアと比べて相対的に良いためである。

輸送後の水素キャリアについて、1 GW 級水素専焼ガスタービンの燃料利用で得られた発電電力量（圧縮メタンと液化メタンを除き、 $1.01 \times 10^6$  MWh/year となった。ちなみに、圧縮メタンは  $1.03 \times 10^6$  MWh/year、液化メタンは  $1.08 \times 10^6$  MWh/year である。）を LNG 火力発電で得た場合の CO<sub>2</sub> 排出量、すなわち水素利用による CO<sub>2</sub> 排出抑制量を見積もった。その結果、CO<sub>2</sub> 排出抑制量は圧縮メタンと液化メタンを除き、 $4.18 \times 10^8$  kg-CO<sub>2</sub>/year となった。ちなみに、圧縮メタンは  $3.61 \times 10^8$  kg-CO<sub>2</sub>/year、液化メタンは  $3.78 \times 10^8$  kg-CO<sub>2</sub>/year となった。

上記 1 GW 級水素専焼ガスタービンで得られた発電電力量に基づき、2 人世帯の電力需要を満たすことが可能な供給時間を試算した。その結果、圧縮メタンと液化メタンを除く水素キャリアは、 $2.64 \times 10^5$  h/year となった。これは、30.2 世帯の電力需要を 1 年間満たすことと同義である。ちなみに、圧縮メタンは  $2.70 \times 10^5$  h/year、液化メタンは  $2.83 \times 10^5$  h/year となった。

輸送後の水素キャリアを燃料利用した FCV での走行距離を求め、同一距離をガソリン自動車、ハイブリッド自動車、ディーゼル自動車で行った場合の CO<sub>2</sub> 排出量を算出した。すなわち、水素利用による CO<sub>2</sub> 排出抑制量を見積もった。また、FC バスの燃料として利用した場合の走行距離も併せて求め、同一距離をディーゼルバスで行った場合の CO<sub>2</sub> 排出抑制量も見積もった。その結果、ディーゼルバス ( $1.50 \times 10^8$  kg-CO<sub>2</sub>/year)、ハイブリッド自動車

( $3.04 \times 10^8$  kg-CO<sub>2</sub>/year)、ディーゼル自動車 ( $7.70 \times 10^8$  kg-CO<sub>2</sub>/year)、ガソリン自動車 ( $1.13 \times 10^9$  kg-CO<sub>2</sub>/year) の順に CO<sub>2</sub> 排出抑制量が大きくなった。さらに、輸送後の各水素キャリアを FC バスよりも FCV の燃料として利用した方が CO<sub>2</sub> 排出抑制量は大きくなった。

エネルギー損失割合を比較すると、輸送距離によらず最もエネルギー損失割合の小さくなったのは LNG 冷熱利用を考慮した液化水素となった。水素の液化冷却に必要なエネルギーの LNG 冷熱利用による支援割合は 64.3% であった。これより、水素の液化について LNG 冷熱利用によるエネルギー損失割合の大幅低減がもたらされたと考えられる。逆に、エネルギー損失割合の最も大きい水素キャリアは有機ハイドライドになった (LNG 冷熱利用を考慮した液化水素と比較して、名古屋輸送時は 22 倍、京都輸送時は 14 倍になった)。これは、有機ハイドライドから水素を放出する際のエネルギーの影響が大きいためである。また、圧縮メタンと液化メタンを除く水素キャリアについてエネルギー損失割合への輸送距離の影響が認められた。特に、圧縮水素について輸送距離が長くなるとエネルギー損失割合に及ぼす輸送距離の影響が大きくなった。これは、圧縮水素は他の水素キャリアと比べて輸送過程の輸送車両 (トレーラー) 台数が多く、輸送距離が長くなるにつれて輸送過程の燃料消費量が多くなるためである。なお、圧縮メタンと液化メタンについて、エネルギー損失割合に及ぼす輸送距離の影響は認められなかった。これは、圧縮メタンに関しては既存の天然ガスパイプラインを使用することを想定し、輸送過程の消費エネルギーを無視できると仮定したためである。また、液化メタンに関しては輸送過程の輸送車両台数が他の水素キャリアと比べて相対的に少ないためである。

#### (4) まとめ

再エネを社会インフラに効果的、積極的に組み込むスマートシティネットワークの社会実現のため、未利用排熱を有効活用する組み込んだ社会実装モデルを提案し、解析的に検証した結果を紹介した。スマートシティネットワークの 1 モデルとして、再エネ、水素、熱利用の組み合わせが有効であることを示した。

#### (5) 参考文献

- [3.4-1] 日経新聞電子版 (2022 年 12 月 7 日朝刊)
- [3.4-2] 日経新聞電子版 (2023 年 6 月 2 日朝刊)
- [3.4-3] 日経新聞電子版 (2022 年 11 月 23 日朝刊)
- [3.4-4] 西村頭、LNG 冷熱を利用した風力発電電力由来水素サプライチェーンの有効性評価、化学工学論文集、Vol. 48、No. 5、pp. 182-189、2022
- [3.4-5] 西村頭、太陽光発電由来水素サプライチェーンの実装可能性評価 (LNG 気化冷熱利用の有効性評価)、化学工学論文集、Vol. 48、No. 3、pp. 109-119、2022

### 3.5 バイオ炭素長期備蓄型循環型社会

#### (1) はじめに

石炭コークスを代替できる固体バイオ燃料の開発は、グリーンスチールへの鉄鋼業界の喫緊の課題である。我が国が取り組む、水素による還元製法を開発しても、溶解エネルギーは必要となるジレンマを抱えている。再生可能エネルギー、特に固体バイオエネルギーによる溶解炉の開発は、持続性のある社会基盤を築く上で最重要課題である。約 1300 年前に我が国に登場した木炭エネルギー資源による「たたら製法」から、約 280 年前に石炭コークスによる溶解製法が出現し、戦後まもない約 60 年前に国策として開始された原子力の平和利用としての原子力電力エネルギーを活用した電気炉溶解製法に至り、鉄及び石炭資源の枯渇の危機、国際政情の不安定さらには自国優先主義の台頭による世界各国の思惑が激しく交差するカオスな時代に突入しようとしているなか、カーボンニュートラルな性質を持ち、我が国でエネルギー自立できるバイオ炭素資源によるグリーンスチールの開発が急務となる<sup>[3.5-1]-[3.5-2]</sup>。

#### (2) 化石炭素からバイオ炭素への転換

2021 年経済産業省が進めるグリーンイノベーション基金事業による 2030 年に向けた業種別の CO<sub>2</sub> 排出量では、国内排出量約 11 億トン（2019 年推計）のうち、主な石炭からの CO<sub>2</sub> 排気量は、発電等が 39.1%でこのうち 1/3 が石炭火力により約 13%、鉄鋼分野において石炭コークス等で約 12%が排気されているので全体の約 25%に相当する<sup>[3.5-3]</sup>。なかでも、パリ協定の目標達成に必要なバイオエネルギーによる二酸化炭素削減量は、2050 年で 35 億トン/年と目標設定されている。これを炭素換算 (C/CO<sub>2</sub>) すると、約 9.52 億トン/年の化石資源からの炭素の削減が必要になる。さらに、この化石資源炭素をバイオマスに換算 (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>/C) すると、約 142.8 億トン/年の正味のバイオマス資源の導入が必要であり、含水率 50%とする生バイオマスで試算すると、約 285.6 億トン/年の持続性かつ循環性が確保されたバイオマス資源が必要となる。林野庁によれば、我が国の森林面積は、約 2,512 万 ha あり、森林資源量は、約 20 億 2 千万トンが蓄積されており、生長量は約 4 千万トン/年と試算されている。我が国が誇る森林資源をもってしても、2050 年カーボンニュートラルな社会を実現するには、蓄積量で年間 10 倍、生長量からは約 714 倍のバイオマス資源の確保が必要となる膨大な石炭資源を現在、消費していることが再認識できる。

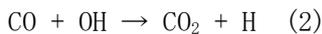
#### (3) バイオ炭素による CN 社会への取り組み例

2021 年に栗本鐵工所の技術報告として日本鑄造工学会において「キュポラにおけるバイオコークスの実用的運用方法の開発」が掲載された<sup>[3.5-4]</sup>。着目すべき試験結果は、溶解能力である。すべてのバイオコークス（バイオ炭素から形成される固体バイオ燃料）燃焼試験において、通常石炭コークス操業時に比して、性能が向上していることが分かる。燃焼特性が影響していることは明白であるが、石炭コークスに比して揮発成分と固定炭素成分の割

合が大きく異なることが、バイオコークス燃焼試験を実施した企業からの懸念事項として報告されている。このバイオコークスからの揮発成分は、燃焼工学から考察するとバイオマス(主たるC<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>)から、主に一酸化炭素(CO)と水蒸気(H<sub>2</sub>O)と微量の水素(H<sub>2</sub>)が生成される。石炭コークス燃焼では、チャー燃焼と部分ガス化される一酸化炭素(CO)のみなので、大きく異なるのは、揮発成分を含む水蒸気の存在である。しかも、この水蒸気が約 1200~1500°Cの高温水蒸気として生成される点にある。つまり、高温水蒸気は、炉内で



の反応により OH ラジカルを生成し、



により、熱源となる素反応が生じることになる。通常のキュポラ操業においても石炭コークスの保管状況あるいは梅雨時期など湿気における操業変化に対策を実施してきた。これまで高効率燃焼を念頭に排除してきた水蒸気に対して揮発成分を含む高温水蒸気が炉内に存在するなかで、一酸化炭素を熱源として有効利用する概念を再考するものである。この考察に至る理由として、アーク炉でのバッチ式溶解で顕著な結果が計測(試験結果は未公表)されており、出鋼温度が高く熱源として効果があることから推察できる。R. A. YETTERらにより、CO/H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>素反応が解明され、約 1300°C以上でこの(1)反応が先行し、(2)反応が連動して生じることが分かった<sup>[3.5-5]</sup>。

#### (4) バイオ炭素によるエネルギー長期備蓄

エネルギー資源は、ストック(備蓄量)とフロー(消費量)のバランスにより、その循環性が担保される。太陽エネルギーを起源とし、その関係は、光合成に起因する炭素循環や体内での消化活動に起因する窒素循環など地球システムの一環を形成していることから、そのストックの重要性が理解できる。再生可能かつ持続可能なエネルギー開発においては、この備蓄が重要な焦点となる。

すなわち、化石資源を掘り出し、エネルギー資源として経済成長してきた現代社会から、如何に第1次産業での生産活動に入り込んで再生可能エネルギーを自然システムから取り出し、持続可能な再生可能エネルギーの安定供給ができるかが共生への鍵となる。資源枯渇まで100~200年と差し迫っている。1973年オイルショックの危機的な反省から我が国のエネルギー備蓄は、石炭備蓄はなく、ほぼ原油だけの約250日分を確保している状況である。資源に乏しい我が国が平和裏にエネルギーを安定的に確保し、持続可能な社会を担保するには、エネルギーの長期、大量の備蓄しかない。

一般的に固体材料は、長期間保管・使用により、様々な内的要因(晶形、表面積、放射性崩壊等)および外的要因(酸素、熱、水、光、薬品、放射線、微生物等)のほか、電気的および機械的要因が関与した複雑なメカニズムにより劣化すると考えられている。最新の研究成果では、バイオコークスを温度的に安定した293K(20°C)付近の地下に貯蔵することを

前提とすると、約 700 年の半減期が示されている<sup>[3.5-6]</sup>。

#### (5) まとめ

図 3.5-1 に化石資源社会から備蓄型再生可能エネルギー社会への転換を実現する地球環境再生とバイオ炭素資源循環同時解決の道へのイメージを示す。左から右へ時間と共に再生可能エネルギー社会から化石資源社会を辿って、循環型再生可能エネルギー社会への道筋を示す。既に化石資源は枯渇に向かい、争奪の対象となっている。この局面を打開するには、再生可能エネルギーによる備蓄しかない。国内のエネルギー消費の3年以上を備蓄できれば、ローリングストック法により、循環型の完全資源循環システムを構築でき、世界情勢リスクをある程度、回避でき、平和な安心できる社会を実現することができる。

バイオ炭素が目指すエネルギー未来は、これらの非可食部かつ未活用なバイオマスを生固形バイオ原料とし、長期備蓄可能かつ電力/鉄鋼分野で活用可能な次世代固形バイオ燃料を開発するところである。

バイオ炭素の循環システムからは、バイオマスの生合成による固定化が安全であり、石炭/石炭コークス代替可能な革新的なバイオ固形燃料への転換が必要不可欠である。フローエネルギーだけの化石資源利用の反省からバイオマス資源を燃焼利用/処分することなく備蓄することにより、化石資源燃焼を維持しながら、大気中への二酸化炭素削減を同時に実現できる。近い将来、化石資源が枯渇状態に陥ったときには、この備蓄から化石資源代替燃料として取り出しながら、ストックとフローを制御し、地球環境を持続的に保全することが必要と考える。

#### (6) 参考文献

[3.5-1] 中江秀雄, 鑄造工学, 85-8, 2013, pp. 534-540

[3.5-2] 本末珠磯, 電気学会雑誌, 92-5, 1972, pp. 432-435

[3.5-3] [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green\\_innovation/pdf/001\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/pdf/001_04_00.pdf), 2021

[3.5-4] 堤親平, 太田慧, 柳澤宏興, 日本鑄造工学会, 93-7, 2021, pp. 414-418

[3.5-5] R. A. YETTER et al., Combustion Science and Technology, 79-1-3, 1991, pp. 97-128

[3.5-6] 鈴木隆, 中村俊介, 井田民男, 実験力学, 19-3, 182-187

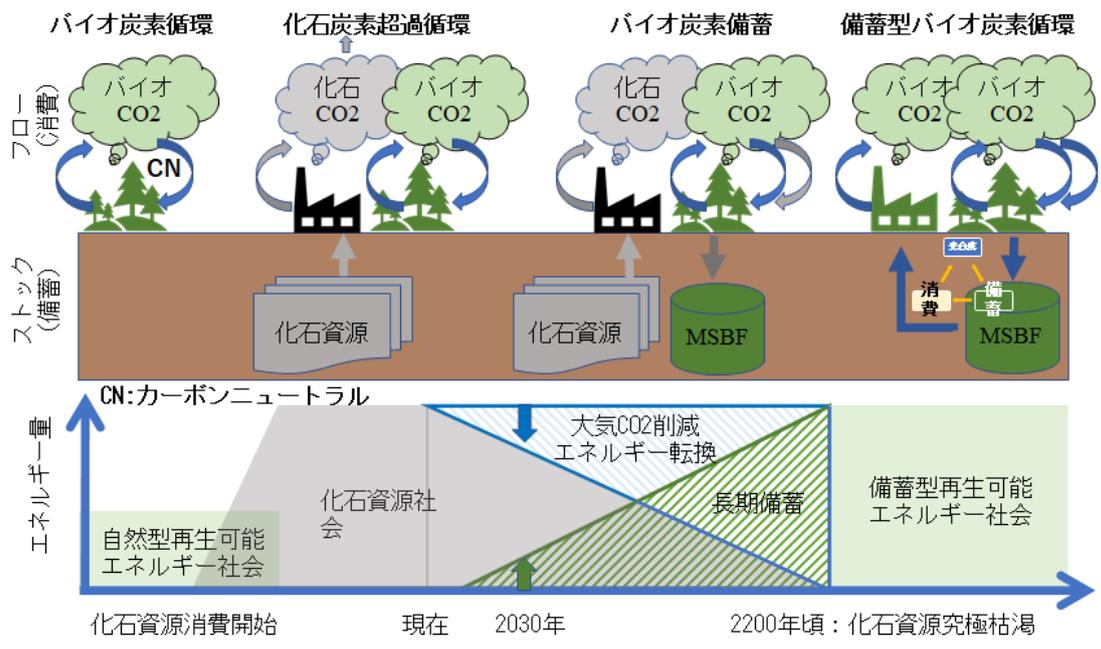


図 3.5-1 化石資源社会からバイオ炭素長期備蓄循環型社会への転換への道筋

### 3.6 原子力の機動性

#### (1) 原子力の機動性

2021年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画では、2030年には再エネによる発電量を36～38%とすることを目標に掲げている(図3.6-1)。再エネの中でも、電力需要に応じて発電できる水力、バイオマス、地熱は「安定再エネ」と言われ、電力の安定供給に貢献できる。しかし、これらの安定再エネは我が国の地理的な条件等から、今後導入拡大できる規模には限界がある。一方、太陽光や風力は、導入拡大が可能であるが、エネルギー密度が小さく発電コストが高い(政府補助金が必要)ことや年間の設備利用率も小さい。図3.6-2に過去6年間の我が国での太陽光と風力の実績値を示すが、年間平均の設備利用率は太陽光14%、風力24%である。更に、これらの発電出力は気象条件で決まるため、これらの発電容量を増大させていくと、需要に応じた発電出力の調整が難しくなる。

国際エネルギー機関(IEA)は、変動性再生可能エネルギーの導入拡大に伴う電力システムへの影響について2018年1月に報告書をまとめている。(System Integration of Renewables An update on Best Practice、IEA,2018 NEDOから翻訳版「再生可能エネルギーのシステム統合—ベストプラクティスの最新情報」)。その中で、変動性再エネによる発電量が総発電量の割合が約10～25%になると、電力供給に対して重大な課題が発生すると指摘している。「変動性再エネの出力変動の影響は、システム全体の運用にも他の発電所にも及ぶ。この割合の段階では、電力システムの柔軟性が重要になる。ここで述べる柔軟性とは、需給調整における不確実性と変動性の増加に対応する電力システムの能力に関連する。これに対応する2つ能力とは、「出力調整が可能な発電所」と「送電網での調整」である。これらに加えて、揚水発電が大容量蓄電池の役割を果たすこともある。このような国、地域として、ドイツ、イタリア、九州(日本)、英国、EUなどが該当する」としている。

特に、太陽光による発電量が多い地域・国では、その発電量が総発電量の10%を越える段階で、発電量が電力需要を上回り、出力制御が必要となる(図3.6-3)。太陽光発電は、発電出力の変動量が風力よりも格段に大きく、正中前後に最大出力を発生させ需要を上回る発電を行うが、夕刻には一斉に太陽光による発電量が減少するために発電量が電力需要を満たせなくなる可能性がある。変動性再エネによる発電量が20%を越えるようになると、太陽光発電が脱落する夕刻や、発電出力が小さくなる冬季早朝の時間帯に、発電量不足が発生する可能性が想定される。この結果、安定電源による調整力だけでは電力需要を賄うことができなくなり、揚水発電の拡大や大容量蓄電池システムを加えた電力供給が必要となる。

このような電力需給の不安定性については、過去5年間の太陽光と風力発電の設備利用率の実績データをもとに、今後導入される太陽光及び風力発電の設備量を想定して実施した電力需給計算によって検討された<sup>[3.6-1]-[3.6-2]</sup>。この試算から明らかになったことは、変動性再エネによる発電量が20%を越えると、安定電源の負荷追従運転と既存の揚水発電に

よる給電だけでは、出力変動を調整することは困難になり、再エネの出力制御や電力不足が発生するようになる。この傾向は、変動性再エネによる発電量を増やしていくと一層厳しくなり、出力制御量や電力不足量も増加するようになる。この試算は、国内での電力融通に制約がない 1 点集中モデルを用いているが、それでも、変動性再エネによる発電量が 40%になり、残りの 60%を安定電源で発電しても、それらの発電出力の調整だけでなく、200GWh の揚水発電と 100GWh の大容量蓄電池システムを活用しないと電力の安定供給は見通せないとの結果が得られた。現実的には、地域間での送電制限があるため、発電量と需要量の合致だけを評価する 1 点集中モデルでは、出力制御や電力不足をかなり小さく評価することに留意する必要がある。

原子力発電は、2030 年までに 20~22%程度の発電量が求められているが、この程度では安定電源は水力等と合わせても 35~37%と、現在の火力発電で約 80%近くを賅っている半分に満たない調整力ではしか得られない。変動性再エネの発電量を総発電量の 40%程度まで拡大していく場合には、残りの 25~23%は CCS 付き火力あるいは原子力で賅い、安定電源の割合を増やしていく必要がある。

我が国の火力発電による CO<sub>2</sub> 排出係数 (LNG、石油、石炭の発電量比率を考慮) を用いると、現在の総発電量の 5%を火力発電で賅うとすれば、その際、1 年間に約 3000 万 ton の CO<sub>2</sub> が排出される。これを分離・回収して、海水帯水層に貯留するには、1 億トン規模の貯留場所を日本列島周辺にかなりの数、整備していく必要がある。

CCS の実用化が遅れた場合あるいは貯留場所を十分確保できない場合には、原子力を安定電源として大規模に導入していく必要がある。2010 年までに、総発電量の 35%を原子力で供給してきた実績を考えると、2050 年及びそれ以降のカーボンニュートラルを実現するには、原子力による発電量を 20~22%に固定せず、可能な限り拡大していくことが重要である。技術的実現性ととも、発電に必要となる経済性、そしてエネルギー自給率の向上の観点からも、原子力発電に期待することは大きい。

安定電源の出力を調整して、変動性再エネの出力変動と整合させる「負荷追従運転」は、燃料費が発電コストを支配する火力では合理的であるが、燃料費の割合が少ない原子力では有利な方法ではない。しかし、原子力が年間発電量の約 75%を占めているフランスでは、図 3.6-4 に示すように、2008 年頃から定格出力の 30~100%の範囲内で軽水炉の負荷追従運転が日常的に実施されている。また、風力発電の導入量が拡大しているドイツでも、電力価格がマイナスになる時間帯に、軽水炉出力を定格の 50%程度まで下げた負荷追従運転が行われている。しかし、日本の既設軽水炉は、現状ベースロード電源として運用されているため負荷追従運転は行われていないが、将来的に変動性再エネによる発電量が増加し、これを調整する火力発電が減少し、原子力発電で一定程度の調整ができることが必要になる可能性がある。その場合は、欧州電力要求 (EUR) と同様の負荷追従能力を発揮できるよう、許認可と設備対応を行うことが望まれる。

将来的には、原子炉出力を変動させず、発電出力だけを変動させる方法や電気分解による水素製造等に用いる方が合理的である。高温熱利用による水素製造を行う可能性もある

ものの、昨今の常温電気分解技術の効率向上により、実用化技術としては、常温電気分解の方が優れており、かつ水素需要のある地域で電力系統線を用いて水素製造と利用ができるので有利である。

原子炉の設備利用率は、燃料交換や定期検査の期間を考慮しても、年間 80%前後を達成でき、連続運転期間の長期化を実施している米国等では 90%を越える高い利用率を実現している。1 年間で、変動性再エネだけで電力需要を賄える時間帯が 1 年の 2、3 割もあれば、その間は熱貯蔵あるいは水素製造を行い、電力が不足する時間帯に、これらの熱や水素を使って発電量を増やす運用をすることが期待できる。この場合、原子炉の設備利用率 90%を実現できれば、その 2、3 割は約 18~27%に相当し、これによって得られる売電収入を、熱貯蔵や水素製造施設の建設費償還や運用費に回すことができる。つまり、経済的にも見合うことが期待でき、原子力は熱貯蔵や水素製造との連携において柔軟性がある。(巷間、変動性再エネの出力調整を行うのではなく、余剰となった変動性再エネで蓄熱や水素製造を行う意見が散見されるが、余剰となる日が年間 2、3 割では、年間の設備利用率が 14%の太陽光では約 3~4%、同 25%の風力でも 5~8%にしかない。これらの短時間の発電量では、原子力の 1/3 から 1/6 となり、経済的に見合うようにすることは難しい。)

既に米国で開発が進められているナトリウム冷却高速炉(Natrium 炉)で考えられている。原子炉出力は電気出力 34.5 万 kW であるが、蓄熱システムを併設することで、最大電気出力を 50 万 kW と、定格出力の 1.45 倍(継続時間は 5.5 時間以上)に増加できるように設計されている。ナトリウム冷却高速炉は、冷却材温度が 400℃~550℃前後の高温システムで熱効率が高く、実用化段階では長期運転サイクル炉心とすることで、軽水炉を越える高い設備利用率(90%超)を実現可能であること等、第 4 世代炉として優れた魅力がある。しかしながら、ロシアを除く諸国では、ナトリウム冷却高速炉は経済的な実証がなされておらず、開発段階にある。わが国では、東京電力福島第一原子力発電所事故の影響で、高速炉の実用化開発は停滞していたが、昨年の革新炉ワーキング及び今年 2 月の GX 実行会議にて、高速実証炉の開発ロードマップが提示され、2050 年までの運転開始を目指した開発が開始されている。この実用化開発の中では、開発目標の 1 つに「柔軟性・その他市場性」が掲げられ、高速炉を用いた蓄熱システムや水素製造の研究開発を進めていくことが示されている。

我が国では、高速炉に併設する熱貯蔵システムの実用化は 2050 年以降となるが、その前には、変動性再エネによる発電出力の調整電源となるよう、軽水炉で日負荷追従運転ができるように改良していくことや、揚水発電を増やしつつ連携して蓄電量を増加させる取り組み等を進めていくことが重要である。併せて、欧米露で取り組まれているように、原子炉の熱を用いた蓄熱システムや、電気を用いた水素製造システムの研究開発を進め、高速炉と併設できる可能性を追求していくことが望まれる。

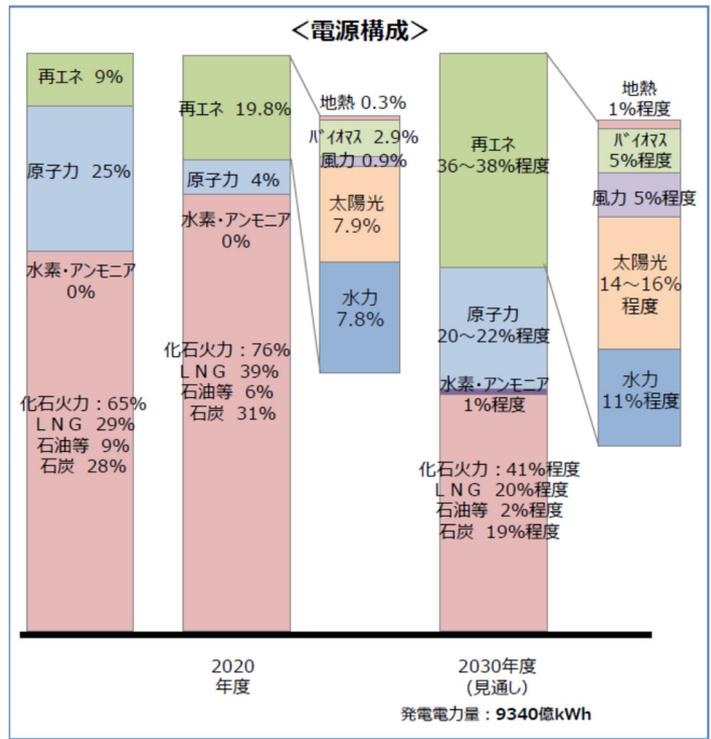
従来、原子力発電はベースロード電源として、定格出力で運転されることが基本であった。しかし、太陽光等の変動性再エネが増加していく今後は、太陽光による発電量で需要

を賄える昼間は、発電出力を低下させて炉心の発生熱を熱貯蔵するか、水素製造設備に給電する等の対応を行い、その一方、太陽光発電が脱落していく夕方以降には貯蔵した熱や水素で電力供給を行い、その後は需要に応じて穏やかに発電出力を低下させていく運用が求められる。

カーボンニュートラルの実現に向けて、今後の原子力に求められる機動性には、設備利用率が高く、送配電システムに接続される発電システムの特長を生かし、変動性再エネによる発電出力の増大に対応した負荷追従運転の能力だけでなく、熱貯蔵や水素製造と連携し、経済的な方法で変動性再エネの出力を調整できる能力を一層高めていくことが求められる。

## (2) 参考文献

- [3.6-1] 機械学会・動力エネルギー部門「原子力・再生可能エネルギー調和型エネルギーシステム研究会」報告書（2021年7月）
- [3.6-2] An energy mix to reach carbon neutral in the electric power generation toward 2050 - Based on the recent four years records of VRE power generation and electricity demand data in Japan-, S. KOTAKE, K. SATO et al, Proceedings of the International Conference on Power Engineering-2021 (ICOPE-2021) October 17 - 21, 2021, Kobe, Japan



出典) 総合エネルギー統計(2020年度確報値)等を基に資源エネルギー庁作成

図 3.6-1 新たな「エネルギーミックス」実現への道のり、国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等の算定委員会の論点案、2022年10月 資源エネルギー庁

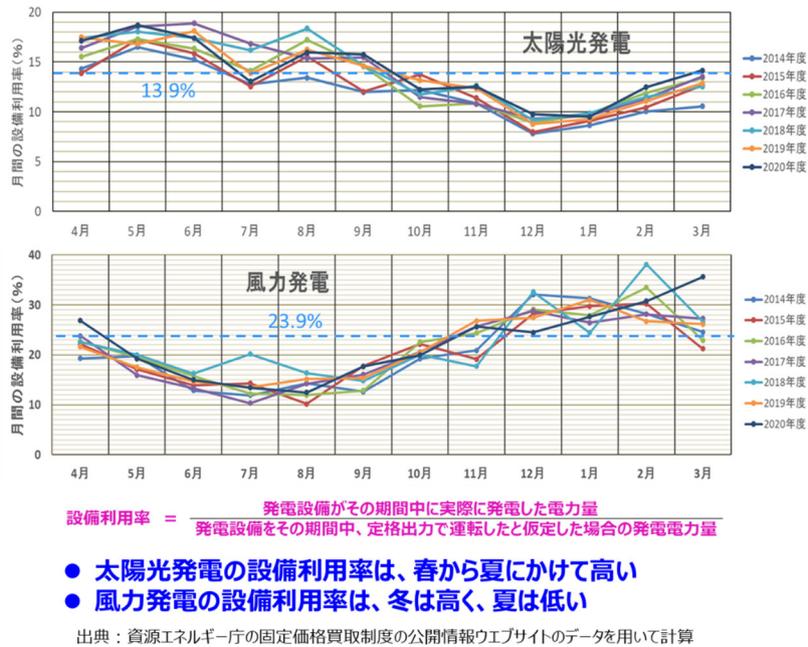


図 3.6-2 2014~2020年度の太陽光と風力発電の設備利用率の季節変動

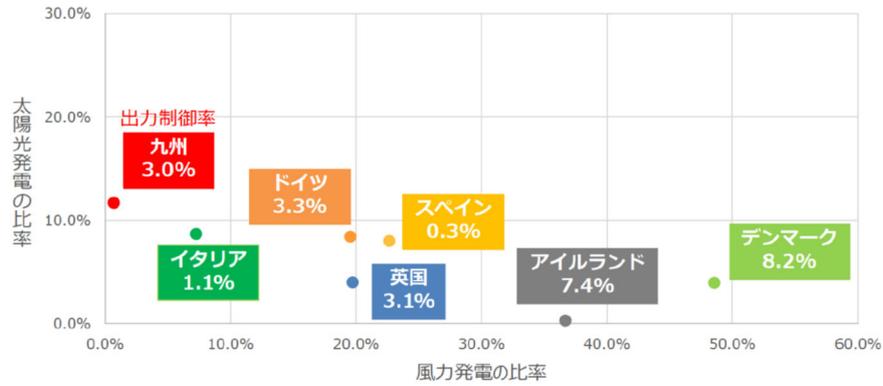


図 3.6-3 各国の太陽光発電と風力発電の発電量比率と出力制御率  
 出典：Production of electricity and derived heat by type of fuel(Eurostat)、  
 供給計画の取りまとめ（電力広域的運営推進機構）、令和4年度諸外国における再生  
 可能エネルギー政策等動向調査（資源エネルギー庁）

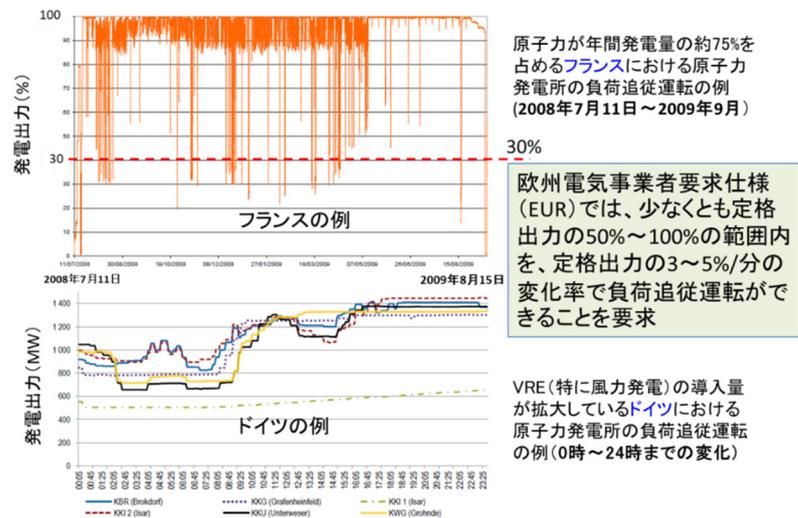


図 3.6-4 原子力発電所の負荷追従運転(欧州での実績)

出典：Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants, Nuclear Development, OECD/NEA, June 2011

### 3.7 蓄熱を組み合わせた高温ガス炉

#### (1) はじめに

2050年のカーボンニュートラルに向け、原子力は第6次エネルギー基本計画等において「実用化段階にある脱炭素電源」と位置付けられ、安定供給とカーボンニュートラル実現の両立に向け、脱炭素のベースロード電源として重要性が高まっている。一方で、更なる安全性の向上や、再生エネルギー比率の拡大に対する電力系統の安定化への寄与、エネルギー源としての多目的利用等、原子力に対しても多様性の要請が高まっている。

このような背景のもと、原子力イノベーション創出を目的に2019年度から『社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業』（NEXIP イニシアチブ、Nuclear Energy × Innovation Promotion）が進められている。

NEXIP 事業では、2019～2022 年度に蓄熱を組合せた高温ガス炉システムが提案・検討されている。高温ガス炉は安全性の高い原子炉システムであるとともに、発電以外にも高温ガスによる熱利用や水素製造への活用等、多目的利用が可能である。高温ガス炉に蓄熱システムを組み合わせた発電システムは、再生エネルギーとの共存を可能とでき、より機動性の高い原子炉システムとして期待できる。

#### (2) 蓄熱システムを組み合わせた高温ガス炉プラントの概要と特徴

蓄熱システムを組み合わせた高温ガス炉プラント概念を、図 3.7-1～2 に示す<sup>[3.7-1], [3.7-2], [3.7-4]</sup>。本システムでは、高温ガス炉と蒸気タービン系の間に蓄熱システムを設置し、原子炉出力は一定のまま、蒸気タービン系への蓄熱材の供給を調整する。これによって、原子炉システムの稼働率を下げることなく、発電量の調整を可能としている。

蓄熱システムは、太陽熱発電で実用化されている硝酸系溶融塩を熱媒体とした顕熱蓄熱とし、低温蓄熱槽(290℃)と高温蓄熱槽(565℃)の2タンク方式<sup>[3.7-3]</sup>を採用しており、早期に実用化が可能である。

太陽熱発電での蓄熱温度(溶融塩温度)は約 390℃と約 565℃の実績があるが、高温ガス炉は原子炉出口冷却材温度が高く(750℃)、他の原子炉システムに比べ高温溶融塩温度(565℃)との整合性が高い。また、蓄熱温度の高温化は、蒸気温度を高めることも可能であり、発電効率の向上に寄与するとともに、蓄熱槽のコンパクト化も可能である。現状概念では、蓄熱温度は太陽熱発電での実績を踏襲して 565℃としているが、最新動向では 600℃までの高温化が進められており、更なる蓄熱効率の向上も期待できる。

本システムは、高温ガス炉及び蓄熱システムともに、既存技術を活用したものであるが、He-溶融塩及び溶融塩-蒸気の熱交換器(及び蒸気発生器)はこれまで国内での実績はなく、伝熱特性や流動安定性等のモックアップが必要と考えられる。

また、原子炉システムと非原子力システムの組合せに対しては、両者の分離に関する安全基準を策定する等の安全シナリオの構築が必要である。

(3) まとめ

原子力発電は、従来ベースロード電源と位置付けられ、基本的には一定出力で安定的な電力供給を行ってきた。蓄熱システムを組み合わせることにより、従来の運転(一定出力)を維持したまま、需要に応じた電力供給が可能となり、再生可能エネルギー比率の増加に対しても柔軟な運用が期待できる。

(4) 参考文献

- [3.7-1] 鈴木哲, 田邊賢一, “原子力イノベーションを支える最新の新型炉開発の状況 2. 早期実用化と機動的運用が可能な蓄熱型小型モジュール高温ガス炉”, 日本原子力学会誌, Vol. 64, No. 2 (2022)
- [3.7-2] 鈴木哲, 神保昇, 藤原斉二, 田邊賢一, 田澤勇次郎, 定廣大輔, “原子力イノベーションを支える最新の新型炉開発の状況 (2) 早期実用化と機動的運用が可能な蓄熱型小型モジュール高温ガス炉”, 2021 年日本原子力学会, 新型炉部会セッション
- [3.7-3] NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版 第5章 太陽熱発電・太陽熱利用 <https://www.nedo.go.jp/content/100544820.pdf>
- [3.7-4] 藤原斉二, 浅野和仁, 高山智生, “多目的な利用が可能な高温ガス炉”, 東芝レビュー Vol. 78 No. 3 (2023年5月)

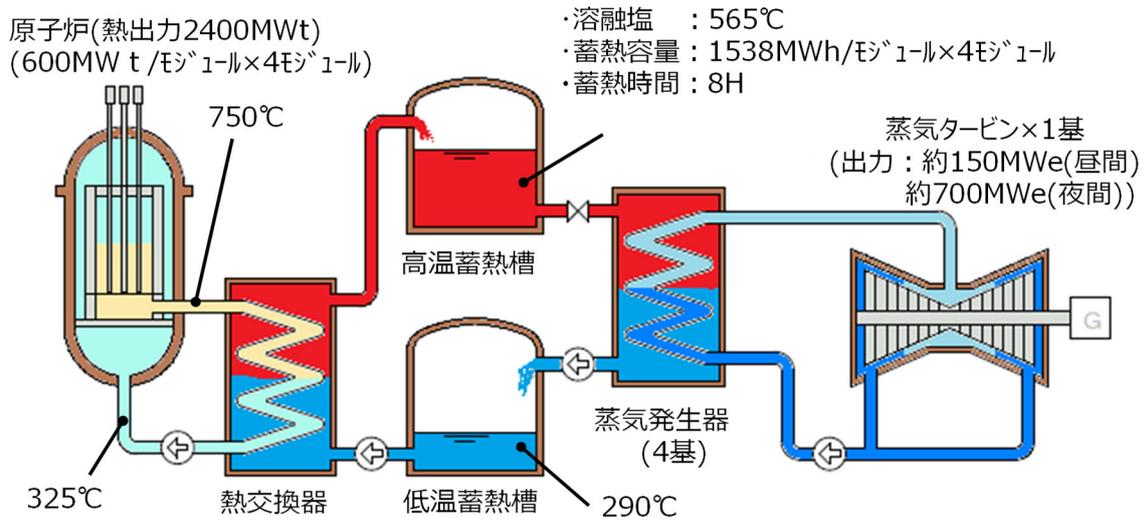


図 3.7-1 蓄熱システムを組み合わせた高温ガス炉プラント概念<sup>[3.7-1]-[3.7-2]</sup>

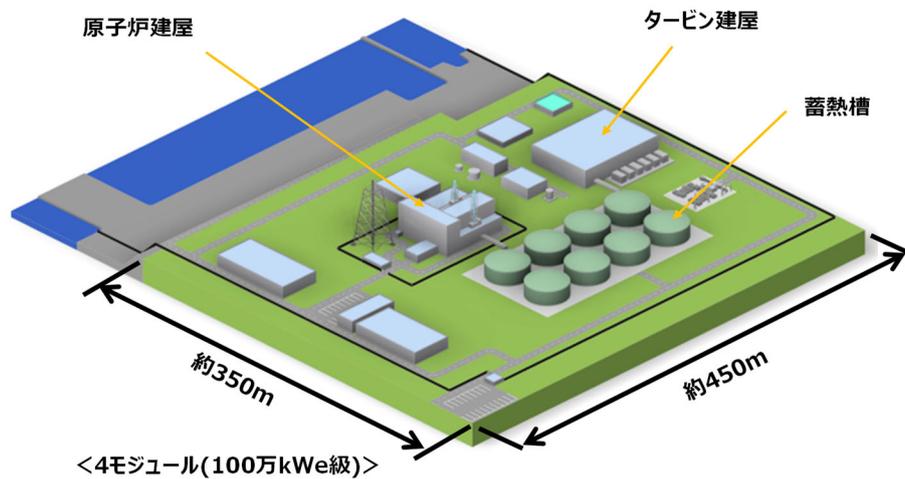


図 3.7-2 蓄熱システムを組み合わせた高温ガス炉プラントの鳥観図<sup>[3.7-4]</sup>

### 3.8 蓄熱を組み合わせた高速炉

#### (1) はじめに

2019年7月に米国マサチューセッツ工科大学を中心に、第4世代炉に接続した熱貯蔵システムに関するワークショップが開催された<sup>[3.8-1]</sup>。変動性再生可能エネルギーの導入拡大に伴う需給ギャップを解消するため、原子力発電は定格運転するが、需要に応じて一部は蓄熱することを推奨された。2020年に米国エネルギー省により支援が決定された Sodium 炉は2030年頃までに運転開始を目指して開発が進められており、熱利用として硝酸系溶融塩を有した蓄熱システムを備えている（定格345MWeに対して500MWeで5.5hrへの増大を実現する蓄熱が可能）<sup>[3.8-2]</sup>。蓄熱技術そのものは硝酸系溶融塩を熱媒体とした顕熱蓄熱技術が国外の太陽熱発電（500℃前後の温度範囲）等で既に実用化されており、技術開発の余地は小さい<sup>[3.8-3]</sup>。仏国でも溶融塩蓄熱を備えた高速炉開発に着手すると2023年3月に発表された<sup>[3.8-4]</sup>。我が国でも、2023年3月に次世代革新炉に必要な研究開発基盤として新たな高速中性子照射場を提案しており、蓄熱システムとの組合せによる再生可能エネルギーを補完する調整電源としての役割に期待が高まっている<sup>[3.8-5]</sup>。

#### (2) 蓄熱式高速炉の特徴

図3.8-1に示すように、高速炉と溶融塩蓄熱発電を組み合わせたエネルギー供給システムは、高い蓄熱性を有する溶融塩のタンクに原子炉で発生した熱を溜めておき、再生可能エネルギーによる発電量が少ない夜間等の時間帯にタンク内の高温溶融塩を蒸気発電設備へ送り発電することによって、再生可能エネルギーの出力変動性を補う概念である<sup>[3.8-6]</sup>。また、その特長として、原子炉出力を変えずに発電量の調整が可能になることに加え、従来の高速炉発電プラントに対する安全上の課題とされてきた蒸気発生器におけるナトリウム-水反応の排除を目指している点が挙げられる。

蓄熱式高速炉に特有の開発要素は、ナトリウムと溶融塩の熱交換器部分である。また、蓄熱式高速炉の安全設計及び安全評価の考え方は整理されていない。特に、熱媒体である硝酸系溶融塩又は金属ナトリウムが漏洩した場合、これら双方の接触反応が生じるおそれがあるが、ナトリウムと硝酸系溶融塩との化学反応特性は明らかになっておらず、蓄熱システムの安全性に対する定量的評価のための知見が不足していることが本技術実用化のボトルネックとなっている。そこで、蓄熱式高速炉の熱交換技術及び安全設計技術の開発が2022年から進められている<sup>[3.8-7]-[3.8-8]</sup>。

規格基準について、ナトリウム-溶融塩熱交換器は既往規格を用いることで設計は可能である。これは現在の日本機械学会 発電用設備規格 設計・建設規格 第II編 高速炉規格の設計評価法は基本的に冷媒に依存しないものであるからである。ただし、環境効果として、硝酸塩系溶融塩を用いることによる腐食を考慮する必要がある、設計における腐食評価方法を構築する必要がある。

ナトリウム-溶融塩熱交換器の特に伝熱管の検査や漏えい検知については、研究開発を行

い、設計方針の整理が必要である。

熔融塩蓄熱システムを日本で設置するための規格基準について、「もんじゅ」では蒸気発生器出口ノズルより先は火力発電用設備規格が適用されていることを参考にすると、ナトリウム-熔融塩熱交換器の熔融塩出口ノズルより先は、太陽熱発電プラントの熔融塩蓄熱システムの設計・建設で適用されている規格を準用することが想定される。米国では ASME TES-1[3.8-9]が制定されており、それを参考にできると考えられる。

### (3) まとめ

熔融塩蓄熱システムを接続したナトリウム冷却高速炉は日米欧で開発が進められている。原子炉は一定出力で運転しながら再生可能エネルギーの変動性に対応できる調整力を持ったエネルギーシステムであり、柔軟性に優れている。蓄熱システムは太陽熱発電プラントで実用化済みの技術であり、技術開発課題は唯一ナトリウムと熔融塩の熱交換器部分だけであり、今後、その技術開発が進展され、蓄熱式高速炉が実用化されることが期待される。

### (4) 参考文献

- [3.8-1] Forsberg, C., Sabharwall, P., Gougar, H.D., Heat Storage Coupled to Generation IV Reactors for Variable Electricity from Base-load Reactors: Workshop Proceedings: Changing Markets, Technology, Nuclear-Renewables Integration and Synergisms with Solar Thermal Power Systems, INL/EXT-19-54909 Revision 0 (Sep. 2019).  
[https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort\\_20500.pdf](https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_20500.pdf)
- [3.8-2] Natrium™ Reactor and Integrated Energy Storage,  
<https://www.terrapower.com/our-work/natriumpower/>
- [3.8-3] NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版 第5章 太陽熱発電・太陽熱利用  
<https://www.nedo.go.jp/content/100544820.pdf>
- [3.8-4] <https://www.cea.fr/english/Pages/News/cea-presents-two-nuclear-startups-hexana-and-stellaria.aspx>
- [3.8-5] 文部科学省, “次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する提言”, 令和5年3月28日 [https://www.mext.go.jp/content/20230328-mxt\\_genshi-000028687\\_01.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20230328-mxt_genshi-000028687_01.pdf)
- [3.8-6] <https://www.jaea.go.jp/04/sefard/ordinary/2022/2022090901.html>
- [3.8-7] 山野秀将、栗坂健一、高野和也、菊地晋、近藤俊樹、梅田良太、白倉翔太「ナトリウム-熔融塩熱交換器を有する蓄熱式高速炉の安全設計技術開発：プロジェクト全体概要」日本機械学会第27回動力・エネルギー技術シンポジウム、東京(2023年9月20日～21日) A241.
- [3.8-8] Hidemasa Yamano, Kenichi Kurisaka, Kazuya Takano, Shin Kikuchi, Toshiki Kondo, Ryota Umeda, Shota Shirakura, Masaaki Hayashi, “Development of

Safety Design Technologies for Sodium-Cooled Fast Reactor Coupled to Thermal Energy Storage System with Sodium-Molten Salt Heat Exchanger,” Proceedings of the 8th International Conference on New Energy and Future Energy Systems (NEFES2023), Matsue, Japan (Nov. 21-24, 2023), FES-2986.

[3.8-9] ASME TES-1 Safety Standard for Thermal Energy Storage Systems: Molten Salt (2020).

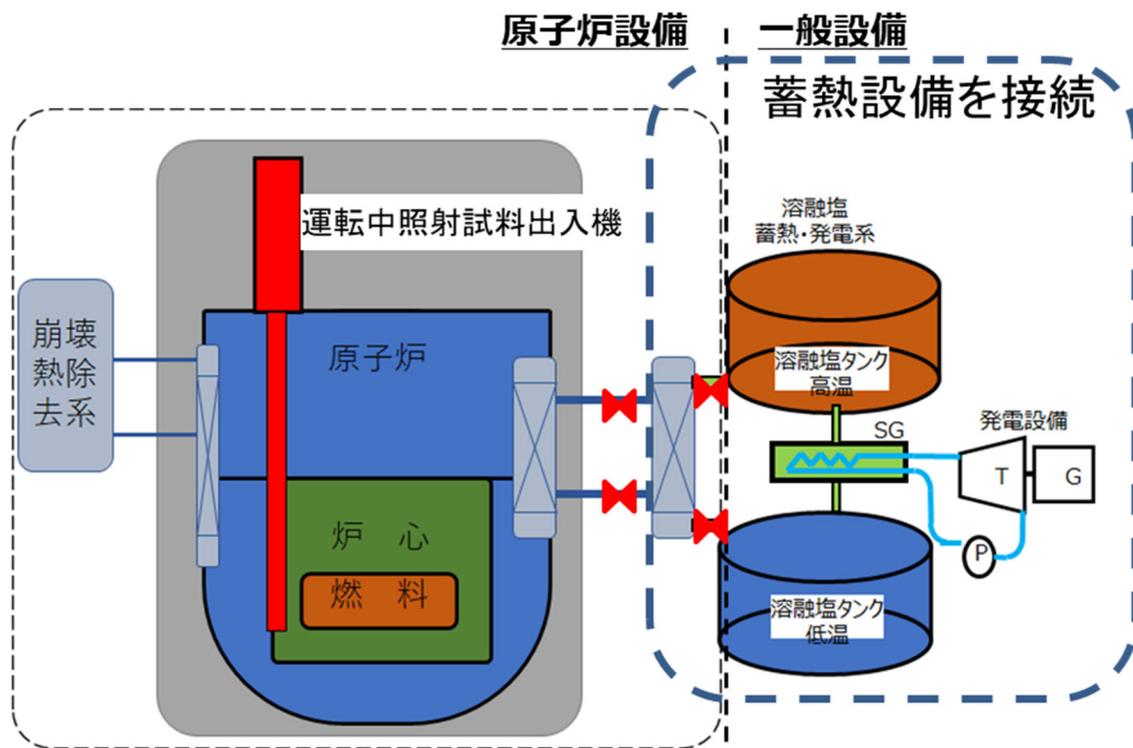


図 3.8-1 熔融塩蓄熱システムと接続した高速炉概念 (高速中性子照射炉構想)

出所：第 7 回文科省次世代革新炉研究開発基盤検討会研究会 (2023/2/15)

[https://www.mext.go.jp/content/20230215-mxt\\_genshi-000027578\\_2.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20230215-mxt_genshi-000027578_2.pdf)

### 3. 9 欧米における蓄熱技術導入状況

#### (1) はじめに

IRENA (International Renewable Energy Agency)がリリースした Innovation outlook: Thermal energy storage 2020<sup>[3.9-1]</sup>では、発電、産業、建物などの分野別に蓄熱システムの導入状況、開発状況、および 2030 年、2050 年の開発目標が示されている。表 3.9-1 は上記の文献を元にまとめた各部門別の蓄熱技術の導入/開発状況を示す<sup>[3.9-2]</sup>。コールドチェーン部門を除くほぼすべての部門および温度領域で、何らかの顕熱蓄熱技術、顕熱蓄熱システムが実装に至っていることがわかる。潜熱蓄熱技術は氷蓄熱がコールドチェーン、地域熱供給等の部門で実装に至っているものの、他の PCM (すなわち水/氷以外の潜熱蓄熱材) は特殊な例を除いて研究段階、開発段階である。化学蓄熱においても、現状は全ての領域で研究開発段階である。これらの状況は欧米と日本を比較しても大差は無い。むしろ、平成 7 年度に創設された氷蓄熱式空調システム普及促進融資制度<sup>[3.9-3]</sup>によりエコアイス等のシステムを戦略的に導入した日本において導入が進んでいる領域もある。一方、大規模な蓄熱技術、さらに地域熱供給をはじめとする熱導管を介した中長距離の熱輸送に関する技術、インフラストラクチャーは欧州においてその導入と進化が進んでいる。これらの蓄熱技術、熱輸送技術、およびそれらを運営する社会システムは、蓄熱発電やカルノーバッテリー等の系統安定化を目的とした大規模蓄エネルギーシステムとしての蓄熱技術の導入における基盤となり得る。以下の項目では、大規模蓄熱システムを中心に欧米における蓄熱技術の導入状況についてそれぞれ概観する。また、蓄熱発電/カルノーバッテリーは社会実装には至っていないものの、蓄エネルギーを志向する蓄熱に関するプロジェクトや国際的な連携が多数設立されている。これらの現状もまた概観する。

表 3.9-1 蓄熱技術の各部門における開発状況

蓄熱技術		発電部門	産業部門	コールド チェーン部門	地域熱供給 部門	建造物部門
顕熱	TTES, WTES	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	Solid-state	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	Molten salts	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	UTES	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
潜熱	Ice	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	Sub-zero PCMs	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	Low-temp PCMs	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	High-temp PCMs	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
熱化学	Chemical looping	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	Salt hydration	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	Absorption	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
機械熱力学	CAE	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial
	LAES	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial	Commercial

Commercial
Demonstration
Prototype
Applied research
None

## (2) 地域熱供給システム

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であるデンマークの熱導管ネットワーク総延長は29000kmで、総人口の60%以上が地域熱供給に接続され、使用している<sup>[3.9-4]</sup>。近年では、70°C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。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することが見込まれている。Power to Heat to Power 型の蓄エネシステムでは、最終的に熱機関を用いて発電するため、Power to Power の効率は40%程度であり、残り60%は低温の排熱となる。これらの低温排熱を有効利用することで、システム全体のエネルギー効率は90%以上に達し、リチウムイオン電池など他の蓄エネシステムとも遜色のない総合エネルギー効率を達成できる。よって、既設の地域熱供給のインフラ、運営するシステムがあることは、蓄熱発電/カルノーバッテリーを導入する上で極めて有利な基盤となる。また、石炭火力発電所や工場等の排熱を熱源として接続されている地域熱供給は、これらの休止に伴い熱源を喪失することになる。ここに、蓄熱発電/カルノーバッテリーを新たに導入することは、再エネ電力の安定化だけでなく地域における熱源創出を意味する。このような背景から、石炭火力発電所跡地へのカルノーバッテリー/蓄熱発電の導入計画が多数提案されている。

## (3) 帯水層蓄熱システム

帯水層蓄熱とは、帯水層から地下水を汲み上げ、その地下水熱を熱源/冷熱源としてヒートポンプを使って温熱または冷熱を発生させて熱源利用したのちにその全量を地中に戻す蓄熱システムである。地下水の全量を直ちに地中へ戻すため、地盤沈下リスクを最小限に抑えることができる。また、帯水層を巨大な蓄熱槽と見立てて冷房時の温排熱、暖房時の冷排熱を貯め、温排熱を暖房に、冷排熱を冷房に季節をまたいで利用することができる<sup>[3.9-5]</sup>。オランダでは、国策として導入が進められ、現在2800件を超える帯水層蓄熱に関するプロジェクトが稼働しており、その件数は全世界の85%に相当する。導入されている帯水層蓄熱の蓄熱容量は全世界で2.5TWh以上に相当すると報告されている<sup>[3.9-1]</sup>。

## (4) 太陽熱発電

太陽熱発電とは、太陽熱により作った蒸気を用いてタービンを回し、発電するシステムである。太陽熱発電プラントへの蓄熱システムの導入は、系統電力の発電コストが高い時間帯に合わせて発電・売電することにより、コスト競争力を高められる点においても有効である<sup>[3.9-6]</sup>。太陽熱発電プラント用として、熔融硝酸塩を液体顕熱蓄熱媒体として利用する大規模蓄熱システムが普及している。2019年の時点で21GWhの蓄熱容量に相当する熔融硝酸塩蓄熱システムが導入されており、導入量はスペイン、アメリカが導入量の第一位と第二位であ

る。また、2030年までには少なくとも74GWhの蓄熱容量に達すると予想されている<sup>[3.9-1]</sup>。太陽熱発電プラントにて普及している直接二槽型の熔融塩顕熱蓄熱システムは、技術的に確立された中高温蓄熱技術として、カルノーバッテリー/蓄熱発電への適用検討が盛んに進められている。

#### (5) カルノーバッテリー/蓄熱発電導入に向けた動き

カルノーバッテリー/蓄熱発電のための大規模蓄熱システムは、実装には至っていないものの、現在数多くのプロジェクトが稼働している。また、様々なプロジェクトの情報集約や提言に向けた国際的な連携も加速している。

カルノーバッテリーの可能性を体系的に調査、評価するための産業界、学术界の専門家から成るプラットフォームを確立することを主意として、国際エネルギー機関（IEA）エネルギー貯蔵技術協力プログラム（ECES、Energy Conservation and Energy Storage- IEA Technology Collaboration Programme）の国際共同研究活動（Annex）の1つ、Annex36 Carnot Batteriesが2020年1月に発足した。このエネルギー貯蔵技術協力プログラムでは、（一財）ヒートポンプ・蓄熱センターが日本の締結者に指定されている。Annex 36には、49機関（2020年9月の時点）が参加し、2022年12月にその活動を終えた。欧州を中心に実施されているカルノーバッテリー/蓄熱発電に関するプロジェクトのFact sheetなどの有用な情報が多数含まれている報告書は一般公開されていないが、その公表成果として、Carnot Batteries（日本語ではカルノーバッテリー）に関するWikipediaページの創設や、メンバーによるカルノーバッテリーに関するReview論文などがある。その一例として、図3.9-1は現在進行しているカルノーバッテリー/蓄熱発電プロジェクトにおいて商用時に想定されている出力と蓄エネ容量（左図）と蓄エネ時間（右図）をまとめた結果である<sup>[3.9-7]</sup>。出力としては100 MW前後、蓄エネ時間としては10 h前後を想定している傾向があることがわかる。このようなカルノーバッテリーに関する情報がAnnex 36より発信されている。

長期エネルギー貯蔵の導入を促進することで脱炭素を推進するNPOであるLDES（Long duration Energy storage）CouncilがCOP26で発足した。現在、約20カ国、50以上の企業が参加している。この団体から公開されているレポートでは、LDESの市場予測や、様々なケーススタディが報告されており、LDESにおける蓄熱技術の有意性が明らかとなっている<sup>[3.9-8]</sup>。

また、カルノーバッテリーの実装と普及を促進するための情報のプラットフォームとして、2018年よりカルノーバッテリー技術に特化した国際会議、International Workshop on Carnot Batteries (IWCB)が設立されている。2年毎に開催され、直近2023年に開催された3rd IWCBでは、コロナ禍の影響が残っているにも限らずオンサイト開催で約100名程度の参加があった。基調講演では、特に欧州各国のプロジェクトが紹介され、2028年末を目途としてカルノーバッテリーの標準仕様が決まるなどの報告があった。2024年9月に第四回目が開催される予定である。

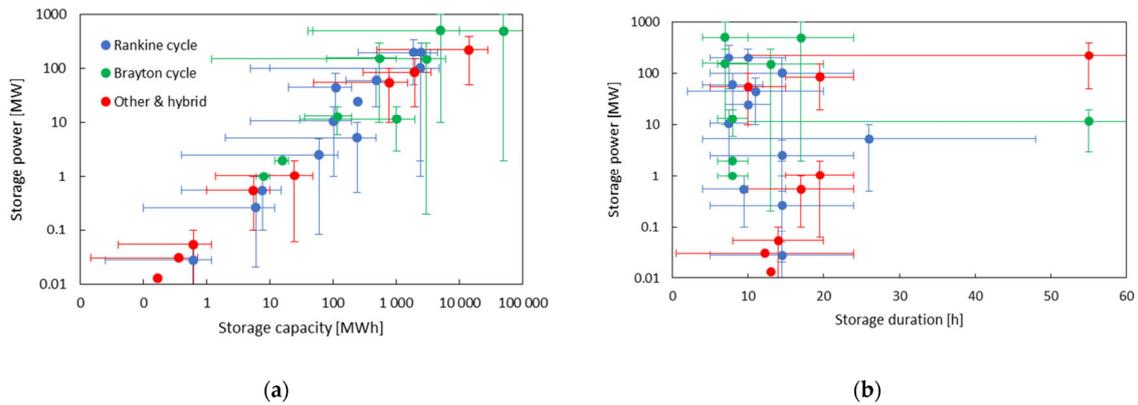


図 3.9-1 現在進行しているカルノーバッテリー/蓄熱発電プロジェクトにおいて商用時に想定されている出力と蓄エネ容量（左図）と蓄エネ時間（右図）<sup>[3.9-7]</sup>.

#### (5) まとめ

本節では、大規模蓄熱システムを中心に欧米における蓄熱技術の導入状況についてそれぞれ概観した。また、蓄熱発電/カルノーバッテリーに関するプロジェクトや国際的な連携の現状を概観した。

#### (6) 参考文献

- [3.9-1] IRENA. INNOVATION OUTLOOK THERMAL ENERGY STORAGE. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA\\_Innovation\\_Outlook\\_TES\\_2020.pdf?rev=6950b7b9792344b5ab28d58e18209926](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf?rev=6950b7b9792344b5ab28d58e18209926)
- [3.9-2] ムーンショット型研究開発事業 新たな目標検討のためのビジョン策定 「マルチスケールなエネルギー収穫・貯蔵システムによる適度な分散社会の可能性に関する調査研究」 調査研究報告書（2021）  
[https://www.jst.go.jp/moonshot/program/millennia/pdf/report\\_16\\_nomura.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/millennia/pdf/report_16_nomura.pdf)
- [3.9-3] 石田司. 冷熱減の貯蔵. 電気学会誌  
<https://doi.org/10.1541/ieejjournal.117.434>
- [3.9-4] 認定 NPO 法人 環境エネルギー政策研究所「第 4 世代地域熱供給：資料編」  
<https://www.isep.or.jp/wp/wp-content/uploads/2019/07/c2c7445ed42dfa82e0509acc72b69451.pdf> (2023 年 1 月 11 日アクセス)
- [3.9-5] 崔 林日, 坂井 正頌, 二階堂 智, 山口 徹, 上田 憲治. 未利用エネルギーを用いた低 GWP ターボヒートポンプの 帯水層蓄熱システム. (2021) 三菱重工技報 Vol. 58 No. 2.
- [3.9-6] NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版—再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋—

<https://www.nedo.go.jp/content/100544820.pdf>

- [3.9-7] Vaclav Novotny, Vit Basta, Pert Smola, Jan Spale. Review of Carnot Battery Technology Commercial Development. Energies.

<https://doi.org/10.3390/en15020647>

- [3.9-8] THE JOURNEY TO NET-ZERO: AN ACTION PLAN TO UNLOCK A SECURE, NET-ZERO POWER SYSTEM.

<https://www.ldescouncil.com/assets/pdf/journey-to-net-zero-june2022.pdf>

## 4. エネルギーストレージベストミックスの検討

### 4.1 エネルギー貯蔵の必要性

#### (1) はじめに

2021年度気候変動枠組条約締約国会議（COP26）を基に締約国には温暖化対策1.5℃努力目標（パリ協定）達成に向け気候変動対策が求められている。2022年になりロシアのウクライナ侵攻により各国のエネルギー安全保障が脅かされる中であっても、石炭火力発電、石炭利用からのフェーズアウトが検討されている。多くの国が2050年前後を目指したカーボンニュートラル（Carbon Neutrality、CN）を目指すことを表明している。目標としては正しいが実現は大変困難と思われる。将来のエネルギーシステムを予測し、CN実現のための正しいボトルネックの抽出とその解決のためのグリーン・トランスフォーメーション（緑転、Green Transformation、GX）が必要である。特に再生可能エネルギー（再エネ）の主力電源化が進む中、再エネのGWオーダーで変動する非定常出力を安定的に利用することが課題である。これに応じて大規模で安価なエネルギー貯蔵技術が必要になると考えられる。エネルギー貯蔵手段は一つではなく、各技術の特性を生かした混合利用、すなわちエネルギー貯蔵（Energy Storage、ES）をエネルギーシステムに組み込み、ESの最適化、高度化が必要である。

#### (2) エネルギー貯蔵最適化の必要性

CN達成には種々のエネルギー貯蔵技術がエネルギー全体システムにおいて適材適所に配置し、かつ高効率に連携し有効利用ができるように全体が最適化されたエネルギー貯蔵最適化システム（Energy Storage Mix Optimized System、ESMOS）が必須であることを以下に示す。

CN達成には化石燃料の大幅な低減とそれを代替するための非化石エネルギー、すなわちゼロカーボンエネルギーが必要である。ゼロカーボンエネルギーとして太陽電池（PV）、風力発電、地熱、水力、バイオマスなどの更なる導入、原子力発電の利用拡大も量的に必要である。CN実現には従来の化石燃料依存の技術の改良、応用による達成は困難であり、非線形な技術的、社会的改革としてのGXが求められると予想される。CN社会（グリーン社会）ビジョンの一案を図4.1-1に示す<sup>[4.1-1]</sup>。従来社会では一次エネルギーは化石エネルギーが主力であり、安価に大量に購入が可能であった。エネルギー利用に伴うCO<sub>2</sub>排出に制限が無く、低コストのエネルギー利用社会が形成され、結果として地球温暖化を引き起こした。この課題を克服するには一次エネルギーのゼロカーボンエネルギー化と社会のエネルギーのCN利用（グリーン利用）が必要である。そのためには新たにエネルギー貯蔵と変換が重要でありESMOSまた炭素循環機能が必要であり、これを実現するGX技術の創造が求められる。

エネルギー貯蔵は現在、電池分野が先行しているが資源制約にリスクがあり他のオプションも必要と予測される。リチウムイオン電池は原料のリチウムのみならず、コバルト、ニッケルさらに銅の資源の偏在、高コストのリスクがあり、電池以外のエネルギー貯蔵技術が

必要となろう。そこで大量で低コストの貯蔵技術として熱貯蔵（蓄熱）に可能性がある。さらに再エネを活用した電気分解による水素製造さらにエネルギーキャリアとしてアンモニアまた合成メタン、メタノール等の e-fuel 製造もエネルギー貯蔵として重要である。種々のエネルギー貯蔵技術が全体システムにおいて適材適所に配置した ESMOS の確立が重要であるといえる。

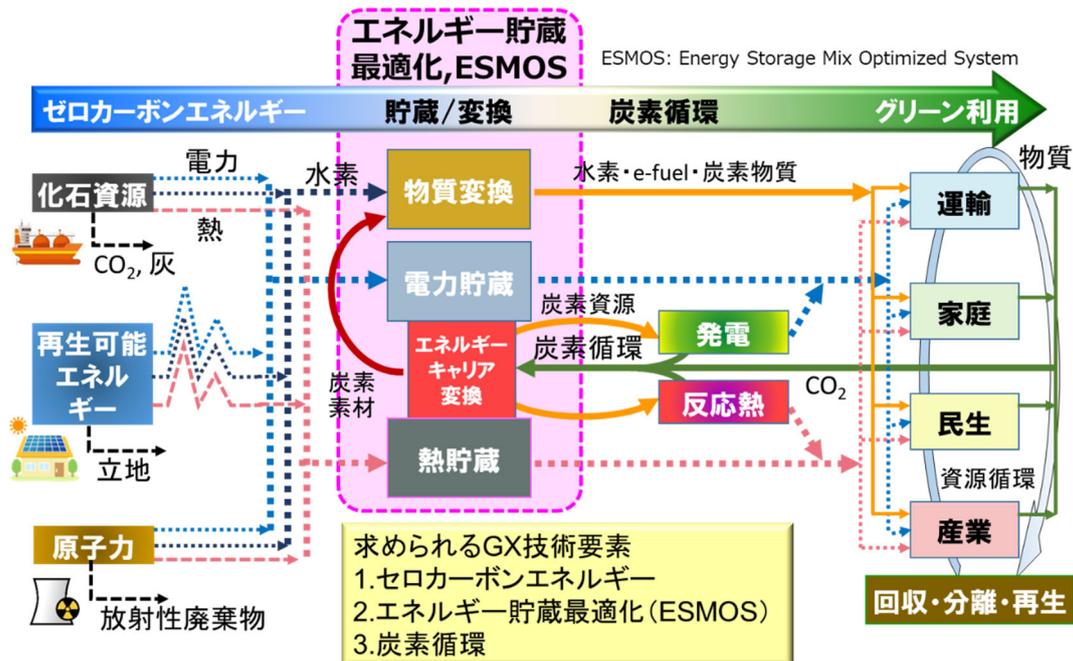


図 4.1-1 CN のためのグリーン社会ビジョンとエネルギー貯蔵最適化の関連<sup>[4.1-1]</sup>

### (3) 再エネ＝蓄エネ

再エネは主力電源として大量導入が進んでいる。導入において再エネの不安定電力の効率的な受入れが重要な問題である。ドイツなどで再エネの普及が進んでいるが CO<sub>2</sub> 排出係数 [g-CO<sub>2</sub>-eq. / kWh] の削減と必ずしも一致していない<sup>[4.1-2]</sup>。PV 発電、風力発電などの再エネは秒単位で変化する非同期電力である。電力利用側の電気の質の保証即ち安定した周波数、電圧の維持は電力供給、需要の変動に関わらず一定であることが近代社会の必須要件である。再エネの出力変動を補うには現在の所、火力発電により再エネ出力に追従した運転調整が現実的な対策である。火力発電はタービン発電による慣性力を有した同期電力であり、電力変動に対して電気の質を物理的に保持できる機能を有しているためである。発電出力変動および待機運転では発電効率の低下を招く。この火力発電の追従運転が CO<sub>2</sub> 排出を増やし、ドイツなどの排出係数の高さの一因となっている。一方、近年、再エネ普及が過剰に進み、需要側が再エネ電力を受けきれない余剰発電のリスクが高まっている。このため、太陽電池パネルでの発電を計画的に停止する出力抑制が頻発しつつある。九州電力管内では 2021 年度この出力抑制が 82 日間行われている<sup>[4.1-3]</sup>。この現象は日本の各地域のみならず欧米など再エネ先進国においても発生している。よって、再エネの有効利用には GWh オーダーの余

剰電力を貯蔵できる ESMOS が求められる。

#### (4) 熱エネルギー貯蔵

再エネの蓄エネとして電池が候補であるが、原料、製品の海外依存とそれに伴う高コストのリスクがある。国産化率を高めた低コストの蓄エネの普及が重要である。

変動出力を安価、かつ高効率に対応できるエネルギー貯蔵技術として、P2H2P (Power-to-Heat-to-Power、電力蓄熱発電) の実用検討が進んでいる。図 4.1-2 に構成例を示す。再エネの余剰発電分を電熱変換し熱として貯蔵 (蓄熱) し、必要時に蓄熱エネルギーを蒸気に変換しタービン発電で電力を社会に供給する。タービンは発電所などの施設を利用することも想定できる。入力余剰電力からタービン発電電力への変換効率は 40%程度であり、電池を用いた蓄電方式の 90%程度に対して効率が劣る。しかし、近年の再エネ電力卸価格は大きく変動し、再エネ余剰電力発生時にはその価格はゼロ近くまでに低下している。再エネ価格が安価な際に蓄熱し、電力価格が高くなった段階で売電することで経済性が担保できる。また、タービン発電を用いることで電力供給に対して物理的に慣性力を有しており、電力幹線に同期した高質な電力が供給できる点は電池に無い長所である。すなわち P2H2P は慣性力を有しており負荷追従運转向けの火力発電の代替を、CO<sub>2</sub> 排出無しで実現できるグリーン同期電源となることが重要な利点といえる。

また、産業界では大量の熱需要があり、P2H2P から直接熱供給し、産業界間の熱融通を行うとセクターカップリングが可能になりエンタルピーベースの熱効率はコジェネレーションと同程度とすれば 80%程度までが期待でき、産業の低炭素化に貢献可能である。蓄熱は ESMOS のための量的に重要な機能といえる。

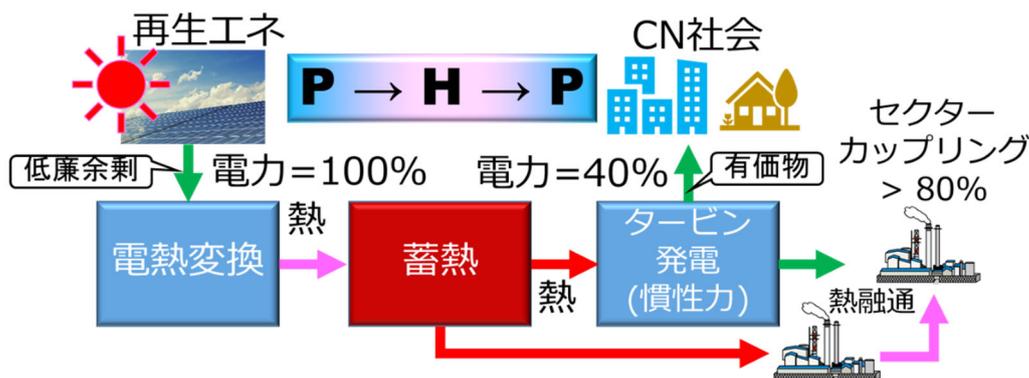


図 4.1-2 P2H2P の構成

#### (5) まとめ

CNの実現には再生可能エネルギーの大量導入が必要である。再エネの非定常出力を活用するにはエネルギー貯蔵最適化システム、ESMOS、が重要である。蓄熱は安価で大規模な貯蔵ができ量的な貢献ポテンシャルが高く将来的に重要であるが未着手の部分が多い。例えば蓄熱温度域が広い化学蓄熱に可能性がある。反応耐久性と伝熱促進が重要であり、これ

を克服する複合材料開発が重要である。蓄熱を含む様々な蓄エネ材料およびその利用システムの最適化が ESMOS のために重要である。この分野で日本は技術ポテンシャルが高いことから、日本において蓄熱分野の世界に貢献できる研究開発環境作りと技術の実現が望まれる。

(6) 参考文献

[4.1-1] Overview of Laboratory for Zero-Carbon Energy, Tokyo Tech (2022),  
[http://www.zc.iir.titech.ac.jp/jp/events/publications/files/Overview\\_ZC\\_2021.pdf](http://www.zc.iir.titech.ac.jp/jp/events/publications/files/Overview_ZC_2021.pdf)

[4.1-2] 原子力・エネルギー図面集、CO2 排出係数（発電端）の各国比較（2019）、  
<http://www.ene100.jp/www/wp-content/uploads/zumen/2-1-18.pdf>

[4.1-3] 日本経済新聞、2022/5/6、  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQ0UC0258POS2A500C2000000/>

## 4.2 経済性の観点からみた蓄エネルギー技術の役割

### (1) エネルギーシステムにおける蓄エネルギー技術の役割とその経済性

今後、エネルギー利用の脱炭素化に向けて再生可能エネルギー、特にそのうち自然変動性を有するもの（太陽光及び風力）の比率が大幅に拡大することが予想され、その中で蓄エネルギー技術は大きな役割をもつ。これらの電源が大量に導入された場合、晴れた昼間や風の強い時間帯は電力需要を大きく上回る量の発電が行われることが想定され、他方で夜間や日が照らない時間帯、もしくは風の吹かない時間帯には発電量は小さくなると想定される。ここで、発電量が電力需要を上回る場合、その余剰分の電力を全て貯蔵、もしくは有効利用することは多くの場合非効率であり、制度設計上の課題はともかく、エネルギーシステムの観点からは、無制限に出力抑制を許容することが効率的である<sup>[4.2-1]</sup>。仮にその場合に問題となるのは、電力の余剰よりもむしろ不足であり、数日間にわたって日照及び風況が悪い日が継続した際の電力供給途絶リスクを回避することが、蓄エネルギーシステムの大きな役割となる<sup>[4.2-1]</sup>。

ここでは、時間スケールによって必要な蓄エネルギーシステムの在り方が異なる。即ち、短期（数日単位）の出力変動に対処するためには、サイクル効率（貯蔵される電力量に対する放出される電力量の比）が高いシステムを高い稼働率で利用することが必要になるのに対し、長期（数週間～数か月単位）の変動に対処するためには、なるべく大量のエネルギーを安価で貯蔵することが重要となる。一般的には前者が蓄電池、後者がガス体貯蔵もしくは蓄熱に相当すると考えられる。変動性再生可能エネルギーが大量に導入された場合には、上記の通り、比較的稀に発生する電力供給途絶リスクに向けて長期にわたってエネルギーを貯蔵することが必要となり、このため蓄熱等の重要性はより高まると考えられる。

### (2) 2050年の脱炭素化に向けた蓄熱技術の導入に関するシミュレーション

本項では、2050年の脱炭素化に向けた日本のエネルギーシステムの中での蓄熱技術の役割に関するモデル分析結果例を示す。ここで用いたモデルは IEEJ-NE\_Japan モデルと称する最適化型のエネルギー技術導入モデルであり、日本政府の審議会における報告等にも使用されている<sup>[4.2-2]-[4.2-3]</sup>。このモデルでは線形計画法に従い、所与の前提条件のもと、CO<sub>2</sub>排出制約（ここでは2050年にエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出量がゼロになると想定）を最小コストで達成するためのエネルギー関連技術の最適な導入・利用量が計算される。

ここでは、既往報告<sup>[4.2-3]</sup>に従って2050年に至るまでの前提条件を設定した。即ち、化石燃料の価格は国際エネルギー機関（IEA）の”World Energy Outlook 2021”における「持続可能な開発シナリオ」（Sustainable Development Scenario、SDS）<sup>[4.2-4]</sup>に従って推移すると想定、また、原子力発電所は順次60年まで運転期間を延長し、2050年には25.5GWとなると想定した。また太陽光発電や風力（特に洋上風力）発電は日本国内にも十分なポテンシャルが存在するとし、2050年まで導入拡大に伴うコスト低減を見込んでいる。

ここで、蓄熱設備は蓄熱設備から放出された熱は再び電気に変換され、利用されること

を想定している。即ち、蓄熱設備は蓄電設備（ここでは揚水発電とリチウムイオン電池を想定した。但し揚水発電は今後大きく増加はしないと想定し、今後は主にリチウムイオン電池の導入量が拡大するとしている）と類似した役割をもつことになる。なお、この試算ケースでは 2050 年に再生可能エネルギーが発電量全体の 51%を占め（残りは原子力及びゼロ・エミッション火力）、そのうち 25%分が太陽光、14%分が風力となっている。

リチウムイオン電池と蓄熱設備の諸元は表 4.2-1 の通り想定した。

表 4.2-1 リチウムイオン電池と蓄熱設備の想定

	リチウムイオン電池	蓄熱設備
稼働年数	10年	30年
自己放電（放熱）	0.05%/時	1%/日 (0.042%/時)
サイクル効率	85%	45%
C-rate	1.0	1.0

蓄熱設備がリチウムイオン電池と比較して最も大きく劣る点はそのサイクル効率であり、リチウムイオン電池の 85%に対し、蓄熱設備では 45%と想定している。このデメリットと安価な設備というメリットを踏まえて、蓄電・蓄熱設備がそれぞれ使い分けられることとなる。

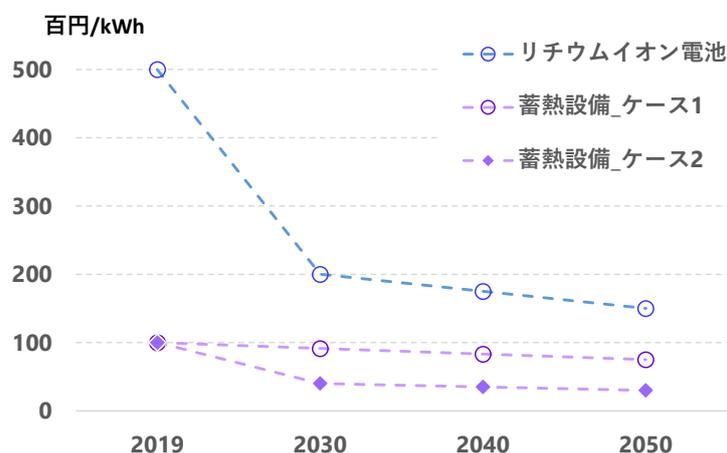


図 4.2-1 リチウムイオン電池・蓄熱設備のコスト想定

ここで、リチウムイオン電池のコストは 2050 年におよそ 15,000 円/kWh 程度まで低下する一方で、蓄熱設備については以下のように設定した（図 4.2-1）。

ケース0：蓄熱設備の導入なし

ケース1：2050年に蓄熱設備のコストが7,500円/kWhまで低下

ケース2：2050年に蓄熱設備のコストが3,000円/kWhまで低下

それぞれのケースにおける蓄熱設備の導入量は図4.2-2の通りとなる。ケース1・ケース2ともに2040年から蓄熱設備の大規模な導入が行われ、2050年にはケース1で96GWh、ケース2で97GWh（ともに全国計）が導入される。これに対し、リチウムイオン電池はケース0の23GWhに対し、ケース1では18GWh、ケース2では9GWhと導入量が低下する。代替した際に蓄熱設備の方が導入容量が遥かに大きい（ケース0のリチウムイオン電池導入量23GWhに対しケース2の蓄熱設備導入量97GWh）のは、蓄熱設備の方が低いサイクル効率によってエネルギーロスが大きく、また、より長期にわたるエネルギー貯蔵が必要となるためである。地域別にみると変動性再生可能エネルギーが大量に導入される北海道、東北及び九州において大量の蓄熱設備導入が見られる。

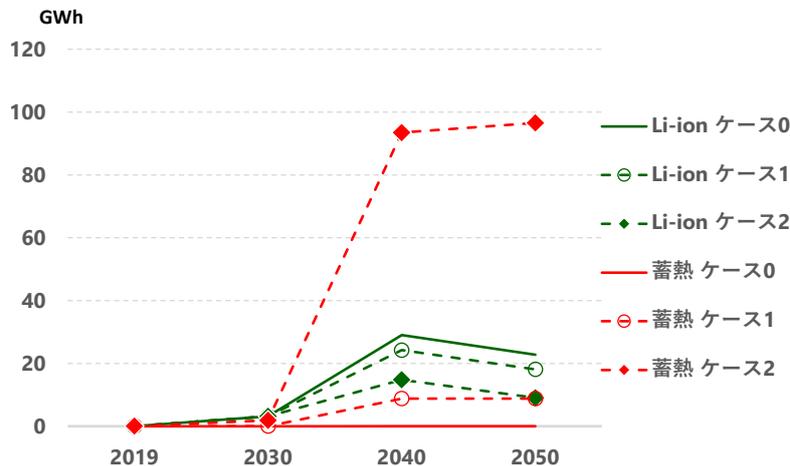
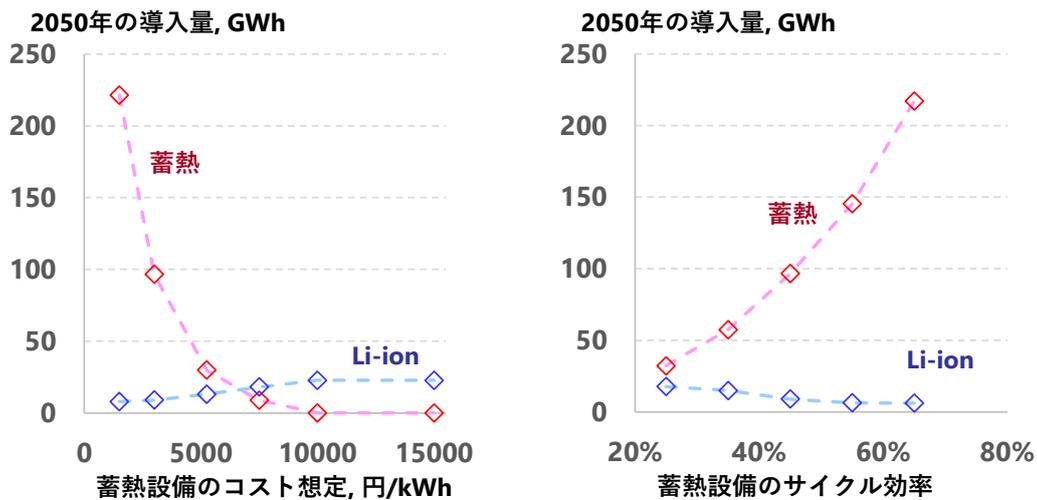


図4.2-2 蓄熱設備の導入量（全国計）

図4.2-3に蓄熱設備のコスト（左）とサイクル効率（右）を変化させた場合のリチウムイオン電池と蓄熱設備の導入代替を示す。リチウムイオン電池のコスト15,000円/kWhに対し、蓄熱設備のコストが10,000円/kWhを上回ると殆ど導入されなくなり、逆に安くなればなるほど最適な導入量は急速に増大する。また、サイクル効率が（仮に）65%まで上昇すると最適な導入量は200GWhを超え、サイクル効率の向上が蓄熱設備の導入促進のためには重要であることが伺える。



註：左図ではサイクル効率は45%、右図では蓄熱設備のコストは3000円/kWhと想定

図 4.2-2 蓄熱設備のコスト・サイクル効率に関する感度解析

### (3) まとめ

今回示されたように、今後エネルギーシステムの脱炭素化のために蓄エネルギー技術の重要性が高まる中、蓄エネルギー技術の中でも用途に応じてある程度の使い分けがなされるものと考えられる。但し、ここで蓄熱技術が用いられるためには、そのコスト（蓄熱容量あたりの設備単価）が蓄電池よりも相当程度安価であることが必要である。今回は蓄電池のコストが2050年に15,000円/kWhとなると想定したが、この前提条件が変化すれば、その分経済合理性をもつ蓄熱設備の幅も変化することとなる。一般的には、将来の不確実性に対処するために多様な技術オプションを保持することが重要であり、その中で有望な技術のコスト低減に向けた技術開発を進めることが求められる。

### (4) 参考文献

- [4.2-1] Matsuo et al., Investigating the economics of the power sector under high penetration of variable renewable energies, *Applied Energy*, 113956, (2020).
- [4.2-2] 松尾雄司, 大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 水野有智, 森本壮一, 2050年カーボンニュートラルのモデル試算, 第44回基本政策分科会, (2021).
- [4.2-3] 松尾雄司, 遠藤聖也, 尾羽秀晃, 森本壮一, 柳澤明, 大槻貴司, 2030年・2050年の脱炭素化に向けたモデル試算, 第50回基本政策分科会, (2022).
- [4.2-4] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2021*, (2021).

### 4.3 エネルギー貯蔵システムの役割

#### (1) エネルギー貯蔵はカーボンニュートラル達成の手段

本研究会では、蓄エネルギー、すなわちエネルギー貯蔵システムの必要性について主張しているが、そもそも達成すべき目標は2050年カーボンニュートラルの達成と、それに伴う成長戦略におけるグリーントランスフォーメーション（GX）の実現である。GXはグリーン化をドライバーとした社会変容であるから、一次エネルギーの脱化石化が基本の方針であり、実態として再生可能エネルギーの大量導入はもちろん、既存の原子力発電の最大利用や新型炉、例えば高温ガス炉等の受動的な安全炉の新設も検討すべきである。また、同時に回収困難なCO<sub>2</sub>の分散排出源となる燃焼を伴う輸送、民生熱需要等の効用・便益の電力化率向上も両輪としてあり、これらは既に経済産業省および環境省ともに政策ペーパーに記載されている。

#### (2) カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵システムの役割

エネルギー貯蔵システムの介在によって、エネルギーのキャリアとして電力・燃料・熱などがどのように需給に関与するのか、その構造の全体像を図4.3-1にまとめた。前述の通り、起点となるのはカーボンニュートラルなエネルギー源であり、変動性再エネ（VRE）や原子力発電からの電力が系統電力網を介して産業・民生・輸送部門の需要地に届けられ、残余負荷（需給バランス）が火力発電を中心とした慣性・同期化力を持つ調整力電源によって供給されることで、一定の周波数に安定的に維持されている。家庭用ソーラー発電のように、VREは需要地で自家消費される電力もあるが、需給バランスの調整力容量には限界があるので、大量導入されるVREには余剰と不足が、さまざまな時間と場所で必然的に発生する。余剰VREは直流の電力が多いことから、エネルギー貯蔵として出し入れの往復効率の高い蓄電池を介して電力需要に応じるのが理想的ではある。しかしながら、自然エネルギー財団<sup>[4.3-2]</sup>によれば、2021年の全世界での定置型エネルギー貯蔵（主に蓄電池と記載）の容量は、55.9GWhであり、そのうち日本のシェアは9.6%=5.37GWhで、定格出力は原発2基分の2.33GW=2.3時間分相当程度に過ぎず、現在の電力のエネルギー貯蔵システムとしては容量のほとんどが揚水発電（既設設備容量27GW、最大で定格8時間程度の設計として216GWh、往復で70%程度の効率）である。このように、2023年の現在において、コンベンショナルな電力のエネルギー貯蔵システムの容量とその増加ペースの一層のギアチェンジには、蓄電池だけでなく大容量で安価な電力のエネルギー貯蔵システムおよび変換技術の開発と、それらの早期社会実装が必要となる。季節間など長周期の変動吸収も対象となれば、容量は格段のスケールアップが必要となり、可搬性の化学的ストレージとして水素やその派生のカーボンニュートラル燃料への変換が次の候補となる。水素は海外からの輸入も必要だが、経済性はもちろん、エネルギー自給率の向上によるエネルギーセキュリティ確保にも寄与する内製化も重要な視点である。水素およびその派生のカーボンニュートラル燃料は、電気事業・熱供給事業などのエネルギー転換部門だけでなく、輸送部門や民生部門の需要にも対応できるため、既存のインフラを最大活用したサプライチェーンの構築が重要となる。

ここまでの技術はエネルギー基本計画などの政策ペーパーにも記載があり、グリーンイノベーション基金などの公的資金が既に投じられている。しかしながら、再生可能エネルギーが50%以上のシェアを占め、その余剰電力を需要に応じて利用するには、第3の技術カテゴリとして蓄熱の必要性が高まってくる。蓄熱は、大きなエクセルギー損失が避けられない欠点があるが、新規の設備導入における経済的とTRLでは比較的優位である。容量と温度帯によって適用可能な蓄熱技術は異なるが、同図に示す通り、媒体が水顕熱、化学蓄熱・潜熱蓄熱、固体系顕熱蓄熱の順で100℃以下から1200℃超まで幅広く対応可能である。蓄エネルギーと出力エネルギーのリンクでは破線が未開発であり、一般に欠けた視点であると言える。大容量が期待される岩石蓄熱発電など、熱機関を用いた発電では電力→蓄熱→電力の効率がカルノー支配の温度依存であり、蓄電池などに比べてエクセルギー損失は大きい、「大量の余剰VREの貯蔵先」として必ずしもエクセルギー効率のみを指標としないエネルギー変換のパラダイムも変わることになる。蓄熱によるエネルギー貯蔵には、キャリアが質量を伴う物理媒体のため、可搬性に劣る欠点もある。スチームネットのように、コンビナート内での熱導管による熱融通は産業界で既になされている。さらに今後、余剰VREだけでなく近隣の未利用の産業熱の地産地消に寄与する部門間連携として、蓄熱輸送による民生部門の熱需要へのサプライチェーンの構築も重要となる。

2050年までにGX実現とCN達成 ⇒ 一次エネルギーの脱化石化+効用・便益の電力化 ※青文字は実装すべき技術

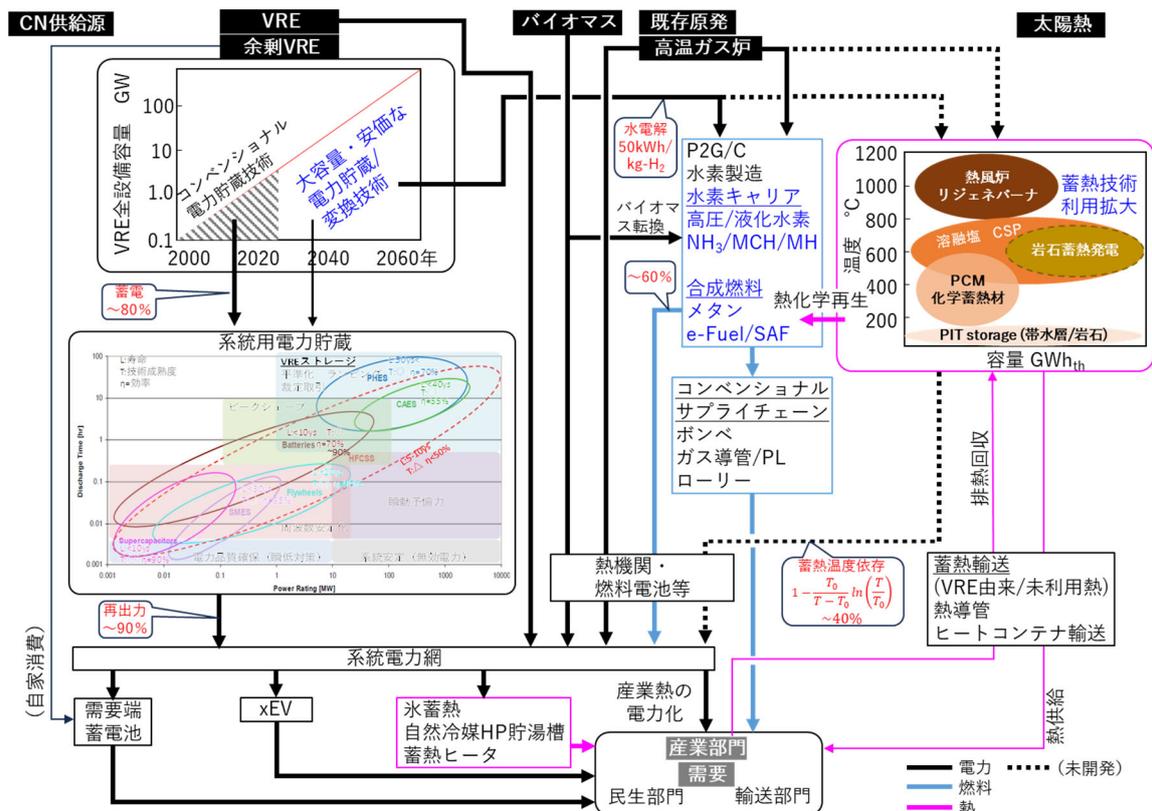


図 4.3-1 エネルギー貯蔵システムの介在による需給構造<sup>[4.3-1]</sup>

(3) 参考文献

- [4.3-1] 中垣、「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵システムの役割」、エネルギーと動力、第300号（2023年春季号）
- [4.3-2] 自然エネルギー財団、蓄電池が自然エネルギーを推進、（2023）、  
[https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI\\_BatteryStorage\\_JP.pdf](https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_BatteryStorage_JP.pdf)、（2023年11月28日アクセス）

## 4.4 エネルギー貯蔵技術の比較

### (1) はじめに

CO<sub>2</sub> 排出削減が必須となっている中、太陽光や風力といった再生可能エネルギーの大幅増加が進められている。天候や時間帯で発電量が大きく変化する VRE の大量導入により、電力の需給バランスを保つことがより難しくなる。2050 年のカーボンニュートラル達成に向け、エネルギー貯蔵技術の重要性が増している。そこで、この章では、エネルギー貯蔵に関する技術について、説明する。

### (2) エネルギー貯蔵の期間・容量によるカテゴリー分け

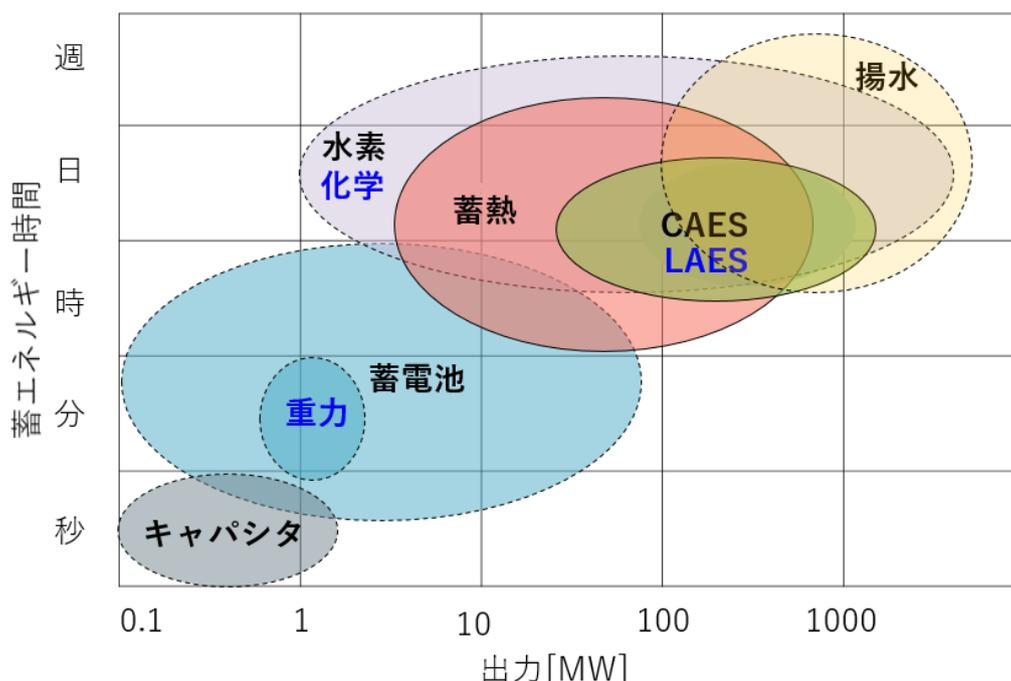


図 4.4-1 各エネルギー貯蔵方式の期間・容量によるカテゴリー分け

図 4.4-1 に、川村ら文献<sup>[4.4-1]</sup>を基に、今回、新たにいくつかの蓄エネルギー方式を追加したものを示す。蓄熱は比較的長期間・大容量にカテゴリー分けされる。以下の項目で、個別のエネルギー貯蔵方式について説明する。

### (3) 蓄電池

電力余剰時に、太陽光発電等により蓄電池に充電し、電力需要が大きい時に放電する。充放電効率は 80% 程度と高い。その一方で、国内価格は、経済産業省の示す値で 10 万円/kWh 程度<sup>[4.4-2]</sup>と近年のレアアースの値上がりで、低下傾向がみられない。この価格で試算すると、例えば、買電と売電の価格差が 20 円/kWh の場合でも回収年数は 20 年程度かかる。

#### (4) 蓄熱発電

太陽光発電・風力発電等の再生可能エネルギーの余剰時に、電気ヒータ等を用いて蓄熱し、電力需要時に、その熱で蒸気を生成し、蒸気タービンで発電する方式である。効率は再生可能エネルギーから蓄熱で90%、蓄熱からタービンによる発電で45%とすると、トータル効率が40%程度となる。蓄熱材は、実績のある溶融塩（潜熱型・顕熱型）の他、破碎コンクリート、高性能新蓄熱材がある。EPRIの報告書では、コストメリットは高く評価されている。既設の蒸気タービンと組み合わせることにより、さらなるコスト削減が可能である。

#### (5) 化学蓄エネルギー

吸熱反応・発熱反応を用いたエネルギー貯蔵方式で、水酸化カルシウムの吸熱によって酸化カルシウムへ変化する化学反応等がある。蓄エネルギー期間は1週間かそれ以上である。発熱温度は400℃程度で、蓄エネルギー効率は熱-熱で60-90%程度である。SaltX、東工大<sup>[4.4-3]</sup>で研究開発が進められている。

#### (6) 揚水発電

揚水発電は、電力余剰時に、その電力によってポンプを動かし、下流から上流に水を汲み上げ、電力不足時に、上流から下流に水を流し発電する。トータル効率は7割程度<sup>[4.4-4]</sup>であり、高い稼働率で運用されている。再生可能エネルギーが普及する前は、電力余剰時間帯は夜間であったが、再生可能エネルギーが普及後は、昼間にシフトしている。揚水発電の課題は、上流と下流に貯水池・ダムが必要で、新規に建設できる場所は極めて限られている点である。また、揚水発電所だけでは再生可能エネルギーが大量導入された後の需給調整は量的に十分でない。

#### (7) 水素利用

太陽光発電を用いた水電解で水素を生成し、液化（もしくは、アンモニア等のキャリア化）・輸送し、その水素（もしくは、キャリアから改質した水素）を用いて発電する方式である。太陽光発電を用いた水素製造の実証試験が山梨県米倉山で行われている。そして、水素やアンモニアを用いた発電方式も三菱重工やIHIで開発中である。

太陽光発電を用いた水電解による水素製造で70%、液化（もしくは、キャリア化）<sup>[4.4-5]</sup>・輸送でさらに50%程度<sup>[4.4-6]</sup>、さらに水素を用いた発電で50%程度となり、入力電気から出力電気へのトータル変換効率は $70\% \cdot 50\% \cdot 50\% = 18\%$ 程度であり、将来における効率向上、水素のコストダウンが課題である。水素は、長期のエネルギー所蔵に適することから、季節間における需給調整への適用が考えられる。

#### (8) 圧縮空気エネルギー貯蔵 (Compressed Air Energy Storage, CAES)

ガスタービンにおいて、圧縮機部で圧縮した空気を貯蔵し、必要時に取り出し、燃焼器を経て、タービン部で発電するものである。CAESでは、圧縮空気の貯蔵に大規模な施設が必

要であり、地上タンクでは高コストとなるために、地下の岩盤層の空間を利用するのが一般的である。東京湾沿岸には適する岩盤層は無い。2012年から、北海道・苫小牧でCCSの大規模な実証実験が行われている<sup>[4.4-7]</sup>。

#### (9) 液化空気エネルギー貯蔵 (Liquid Air Energy Storage、LAES)

ガスタービンにおいて、電力余剰時に、圧縮機部で空気を圧縮・液化し、電力需要の大きい時に液化空気を気化し、燃焼器を経て、タービン部で発電する。空気を液化した場合は体積が1/70となるため、設備容積は圧倒的に小さい。ただし、液化温度は、窒素は約-196℃、酸素は約-183℃のため、高度の断熱が必要である。また、空気圧縮時に発生する熱を蓄えて、膨張時に利用し、気化時に発生する冷熱は別に蓄えて、液化時に利用する、再生熱のシステムがLAESの充放電効率向上の鍵であり、蓄熱を利用しない場合の充放電効率が20-30%程度であるのに対し、再生システムにより50-60%まで向上する。

Highview Power社は、2011年イギリスのロンドンにて容量2.5 MWh、2018年マンチェスターにて容量15 MWhのLAESの実証運転を行った。

#### (10) 重力を用いたエネルギー貯蔵技術 (Advanced Rail Energy Storage)

地理的に元々存在する傾斜面の高低差を利用した位置エネルギーによるエネルギー貯蔵で、アメリカで、レールと貨車を用いた実証装置が存在する<sup>[4.4-8]</sup>。その蓄エネルギー量は下記で表される。経済性はきびしいと試算される。

$$\begin{aligned} \text{蓄エネルギー量} &= m (\text{質量}) \cdot g (\text{重力加速度}) \cdot h (\text{高さ}) \\ &= 300,000\text{kg}/\text{台} \times 25 \text{台} \times 9.8\text{m/s}^2 \times 300\text{m} = 2.2 \times 10^{10} \text{ Joule} = 6,250 \text{ kWh} \end{aligned}$$

#### (11) まとめ

カーボンニュートラル達成に向け、再生可能エネルギーの大量導入が進む中、電力需給調整力(蓄エネルギー)が重要となる。蓄エネルギーの分野で、代表的な方式について、上述した。注目される蓄電池、水素は、現状コスト等で課題がある。蓄熱発電(カルノーバッテリー)は、既存技術(蒸気タービン、蓄熱材)を活用でき、コスト的にも優位なる可能性があり、注目すべき方式と考える。

#### (12) 参考文献

- [4.4-1] 川村ら, “多様性を増す蓄エネルギー技術”, 季報エネルギー総合工学, (2021)
- [4.4-2] <https://www.eco-hatsu.com/battery/190/>
- [4.4-3] 船山 成彦, 高須 大輝, 加藤 之貴, 水酸化カルシウム蓄熱材料を用いた充填層熱伝導率の蓄熱性能への影響, 日本機械学会産業・化学機械と安全部門研究発表講演会 (2018) <https://doi.org/10.1299/jsmeicm.2018.autumn.GS-2>
- [4.4-4] <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/yousuihatuden.html>
- [4.4-5] <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220411/pdf/20220411.pdf>

- [4.4-6] 常定 健, 児子英之, 永山則之, 名取 隆, 物質・エネルギー収支からみた輸入水素の輸送効率に関する比較研究, Japan Society for Research Policy and Innovation Management.
- [4.4-7] <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccus.html>
- [4.4-8] <https://aresnorthamerica.com/>

## 4.5 蓄熱技術におけるライフサイクル設計

### (1) はじめに

欧州グリーンディール<sup>[4.5-1]</sup>やサーキュラーエコノミー<sup>[4.5-2]</sup>、タクソノミ<sup>[4.5-3]</sup>など資源循環や気候中立に向けた動きが世界的に加速する中、すべてのアクションにはライフサイクル (LC) での視点が求められている。持続可能な社会への変革に向けて様々な技術やサービスが検討されており、特に蓄熱などのエネルギーストレージ技術においては蓄熱材などのマテリアル研究、それらの材料を利用した装置のコンポーネント研究、シナリオ分析やライフサイクルアセスメント (LCA)、産業連関分析といったシステム研究など、スケールの異なる研究が実施されている。しかしマテリアル、コンポーネントの研究ではそれぞれ独自の評価指標を設定しており、必ずしも LCA などのシステム研究に反映できるようなデータを成果として公表しているわけではない。他方、システム研究では、文献情報などから技術情報を反映しようと試みているが、限られた情報のみで推算するしかなく、設計へのフィードバックに耐えうる十分な技術パラメータを反映した評価、設計へのフィードバックができていない<sup>[4.5-4]</sup>。すなわち、目標を達成するために改善する必要があるのは、材料なのか、装置なのか、その中でも何を改善すればよいのか、システム目線からシームレスにフィードバックすることが困難であり、システム研究とマテリアル・コンポーネント研究との間のデスバレーの解消が求められる。

以上より、未利用熱融通による資源循環を事例に研究のスケールをマテリアル (nm~mm レベル)、コンポーネント (mm~m レベル)、システム (m~km レベル) と切り分け、すべてのスケールをシームレスに接続し、ボトムアップで技術情報をシステム評価に反映させるフォアキャストと、各技術開発項目の設計にフィードバックするバックキャストを繰り返すことで新興技術の社会実装を加速させる「先制的 LC 設計評価手法」<sup>[4.5-5]</sup>を実施していく必要があり、ゼオライトを用いた蓄熱輸送システムにおけるマテリアルからシステムまでを繋いだ事例を報告する。

### (2) それぞれのスケールでの実験および解析<sup>[4.5-6]-[4.5-7]</sup>

廃棄物処理由来の未利用熱をゼオライトに蓄熱し、熱需要までトラックで輸送、熱需要地で既設ボイラの蒸気を吸着し、発生した吸着熱で吸着量以上の蒸気を送出することで既設ボイラの燃料削減を狙った蓄熱輸送システム対象事例とした。

#### 【①マテリアルレベル】

複数の商用ゼオライトの蓄熱材としての特性 (吸着特性、吸着速度、水熱劣化特性等) を等温条件下で試験可能な希釈充填層試験装置<sup>[4.5-8]</sup>を用いて取得し、試験結果を用いて吸着等温モデルを選定し、その未定係数を取得した。さらに物質・化学種 (蒸気) 保存式を連成した数値解析モデルを開発し、吸着速度モデルを規定した。また、充填層伝熱試験装置を用いて<sup>[4.5-9]</sup>吸着の有無いずれにおける場合においても伝熱現象を測定するとともに円筒 2 次

元数値解析モデルを開発してゼオライト充填層に適用可能なモデルを選定した。以上により装置設計に反映可能な平衡・速度論モデル、伝熱モデルを定義した。

### 【②コンポーネント<sup>[4.5-10]</sup>】

蓄熱装置、出熱装置ともに移動床型装置を想定し、蓄熱装置は向流接触型、出熱装置は間接熱交換方式を採用した。商用スケール(ゼオライト流量0.1~数t/hスケール)に対して、ゼオライト流量5~20kg/hスケールの小規模実証試験設備を製作して試験し、蓄熱装置においては目標蓄熱量に達したゼオライトが連続的に排出されること、出熱装置においては0.2MPaの乾き飽和蒸気が連続的に生成できることを確認した。また、①マテリアルレベルで取得した情報を組み込んだ熱・物質移動・化学種(蒸気)・運動量保存式を連成した数値解析モデルを開発、試験結果と比較することで数値解析モデルの妥当性を確認、適宜修正した。開発した数値解析モデルを用いて商用スケールの性能を予測し、各種ゼオライト種に応じて設計変数の最適化(蓄熱装置においては蓄熱の所要動力の最小化、出熱装置においては燃料削減最大化)を実施し、商用スケールの基本設計を実施した。

### 【③システムレベル<sup>[4.5-10]</sup>】

②コンポーネントレベルで出力された商用スケールの性能の結果を用いて各ゼオライト種によるコスト構造の違いやライフサイクルでの環境影響(温室効果ガス排出量および一部資源消費量)を評価し、ゼオライト種による違いや装置設計変更による影響を考察した。

以上の①~③を繰り返すことで蓄熱輸送システムにおいて、ライフサイクルでの環境影響を低減する方策として、ゼオライト種の入替え、装置の熱交換器設計の修正といった、スケールの違う改善策を並行して議論することが可能であることを確認した。また、特に②コンポーネントにおける材料レベルのデータをシステムレベルまでつなげるための小規模実証試験から商用スケールへのスケールアップを可能とする機械工学が重要であることも確認した。①~③までの接続をまとめた図を図4.5-1に示す。

### (3) まとめ

蓄熱輸送システムを事例とした先制的ライフサイクル設計評価を実施した結果、材料の情報とシステム(社会システムを含む)を接続する機械設計が極めて重要であり、エネルギー分野において機械工学が中心となって他分野をまとめてリードしていくことが重要であることが示唆された。

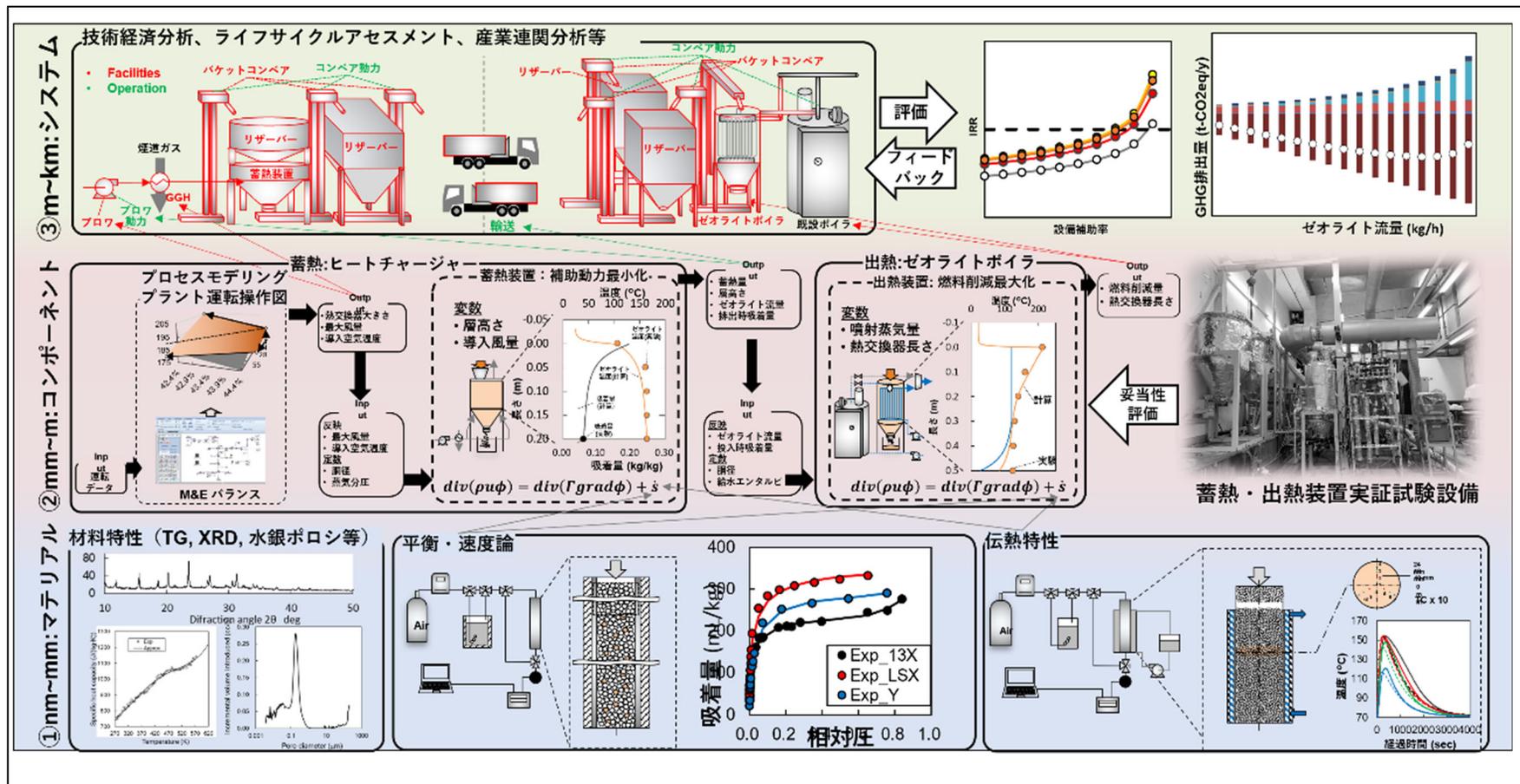


図 4.5-1 蓄熱輸送システムにおける nm-km (マテリアル-システム) の接続事例

(4) 参考文献

- [4.5-1] European Commission, 2019. The European Green Deal.
- [4.5-2] European Commission, 2020a. A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe.
- [4.5-3] European Commission, 2020b. Taxonomy Report: Technical Annex.
- [4.5-4] Thonemann, N., Schulte, A. and Maga, D., "How to Conduct Prospective Life Cycle Assessment for Emerging Technologies? A Systematic Review and Methodological Guidance", Sustainability, Vol.12, Issue 3 (2020), pp.1192
- [4.5-5] 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業さきがけ 地球環境と調和しうる物質変換の基盤科学の創成、[https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/project/1112107/1112107\\_2022.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/project/1112107/1112107_2022.html) (アクセス日 2023年11月22日)
- [4.5-6] Fujii, S., Kanematsu, Y. and Kikuchi, Y., "Integration of experimental study and computer-aided design: A case study in thermal energy storage", Computer Aided Chemical Engineering, Vol.49, (2022), pp. 2095-2100,
- [4.5-7] Fujii, S., Kanematsu, Y. and Kikuchi, Y., "Lifecycle assessment and design by seamless analysis from material to system -Case study of material selection of thermal energy storage system- (Poster)", International Symposium on Industrial Ecology ISIE2023, Leiden (Netherland), Jul. 2023
- [4.5-8] Fujii, S., Horie, N., Nakaibayashi, K., Kanematsu, Y., Kikuchi, Y. and Nakagaki, T., "Design of zeolite boiler in thermochemical energy storage and transport system utilizing unused heat from sugar mill", Applied Energy, Vol. 238 (2019), pp.561-571,
- [4.5-9] 堀江直之, 藤井祥万, 中垣隆雄, ゼオライト粒子とボイラ管壁間の熱伝達における吸着熱の影響, 第55回日本伝熱シンポジウム, C222, 札幌, 2018年5月
- [4.5-10] Fujii, S., Nakagaki, T., Kanematsu, Y. and Kikuchi, Y., "Prospective life cycle assessment for designing mobile thermal energy storage system utilizing zeolite", Journal of Cleaner Production, Vol. 365 (2022), 132592,

## 4.6 エネルギー貯蔵システムを組み合わせた再エネと原子力の経済性評価

### (1) はじめに

近年、再生可能エネルギー（以下、再エネ）大量導入に伴い、蓄熱技術の発電システムへの導入が注目されている<sup>[4.6-1]</sup>。特に再エネ余剰電力を熱として貯蔵し、需要に応じて電力に再換する P2H2P (Power to Heat to Power) である“Carnot Batteries”<sup>[4.6-1]</sup>や P2H (Power to Heat) である産業への熱供給による熱の電化<sup>[4.6-2]</sup>、再エネ導入に伴い出力変動性が求められる。小型モジュール炉 (Small Modular Reactor、以下 SMR) への熔融塩蓄熱適用<sup>[4.6-3]</sup>などが検討事例として挙げられる。蓄熱技術の発電システムへの適用に関しては、コンセプトや使用する材料、熱媒の違いによるサイクル効率、適用温度域などはよく議論されているが、発電システムとしての年間シミュレーションによる検討は限定的である。蓄熱技術のような新興技術はライフサイクル思考に基づき先制的に設計されるべきであり、年間シミュレーションによる検討は他のエネルギーストレージ技術との比較や最適な組み合わせを検討するうえで必須といえる。

そこで本報告では SMR や再エネなどの熱源にケーススタディとして熔融塩を用いた蓄熱技術を導入し、スポット市場価格に応じて売電する場合の年間シミュレーションを実施し、その効果や実現可能性を検討することを目的とする。

### (2) 蓄熱技術を導入した年間シミュレーション

蓄熱方式としては熔融塩を直接熱媒とし用いる二槽式とした。SMR は蓄熱技術を適用せずに使用した場合の定格発電出力を 200 MW とした。蓄熱技術を適用する場合、SMR 由来の一定熱出力により熔融塩を 550 °C まで加温し高温タンクに貯蔵し、需要に応じて高温タンクからの熔融塩と熱交換で圧力 12.6 MPa の蒸気を生成し、蒸気タービンを駆動するシステムとした。蒸気生成器出口の熔融塩温度 260 °C とした。なお蓄熱技術を適用した場合、需要やスポット市場価格に応じて蓄熱発電システムからの出力を変化させるため、タービンの最大出力は SMR 単体での出力に対し 25% 増大させた 250 MWe とし、最低負荷は 20% とした。また、負荷率に応じて蒸気タービンの熱消費率が変化するモデルを組み込んだ。需要については、スポット市場価格に応じて発電量を調整するモデルを新たに構築した。入熱と出熱のバランスを取るサイクル時間を戦略的放熱期間と定義し、その期間内に蓄熱した全熱量を期間内においてスポット市場価格に応じて出熱するモデルとした。制約条件としてはタンクの上限・下限、タービンの最大負荷・最低負荷を考慮した。

また、再エネについては東京電力管内の太陽光発電<sup>[4.6-4]</sup>の 3.5% を入熱として投入し、SMR と同様のモデルを適用した。

### (3) 年間シミュレーションの結果

入熱対象を SMR、熔融塩量 25,000 ton、戦略的放熱期間を 12 時間としたとき、および入熱対象を太陽光、熔融塩量 50,000 ton、戦略的放熱期間を 168 時間 (1 週間) としたときの

2021年4月2日から1週間分のスポット市場価格<sup>[4,6-5]</sup>および入熱量、出熱量（発電量）の結果を図4.6-1に、年間シミュレーションによる高温タンク、低温タンク内の熔融塩量の変化の結果を図4.6-2に示す。図4.6-1(a)よりSMRの炉熱回収用の熔融塩による入熱量（図4.6-1(a)中Input）は一定であるにもかかわらず、発電量（図4.6-1(b)中Output）はスポット市場価格に応じて変化していることがわかる。太陽光の場合も同様であり、図4.6-2(a)のように太陽光の入熱が周期的に日中に発生していることに対して最低限の負荷を維持したうえで、スポット市場価格に応じて発電していることがわかる。

SMR単体で運転する場合は200 MWe一定で発電することになり、タービン熱消費率が最大の条件での運転が可能である。蓄熱技術を導入すると蒸気タービンの低負荷運転の期間がSMR単体で運転する場合に対して増大し、年間での平均負荷率は80.2%となった。その結果、200 MWeで一定出力させた場合の年間発電量（1757 GWh）と比較して蓄熱技術を導入すると年間発電量は1742 GWhにわずかに減少したものの、スポット市場価格に応じて売電することが可能であるため、売電収入はSMR単体で運転し、一定出力をスポット市場価格に応じて売電した場合と比較して約5%増大することがわかった。

また、太陽光については入熱時の平均スポット市場価格が11.8円/kWh、出熱時の平均スポット市場価格が15.6円/kWhとなり、価格が低いときに入熱し、高いときに出熱するメカニズムは確認できるものの、熱機関の効率を考えると現段階における価格差では事業としては成立しないことがわかった。現段階では初期的な検討であるが、今後拡大すると見込まれる変動性再エネの出力抑制分を蓄熱する、慣性力の維持に対する価値づけをする、などの対策が必要であることが示唆された。

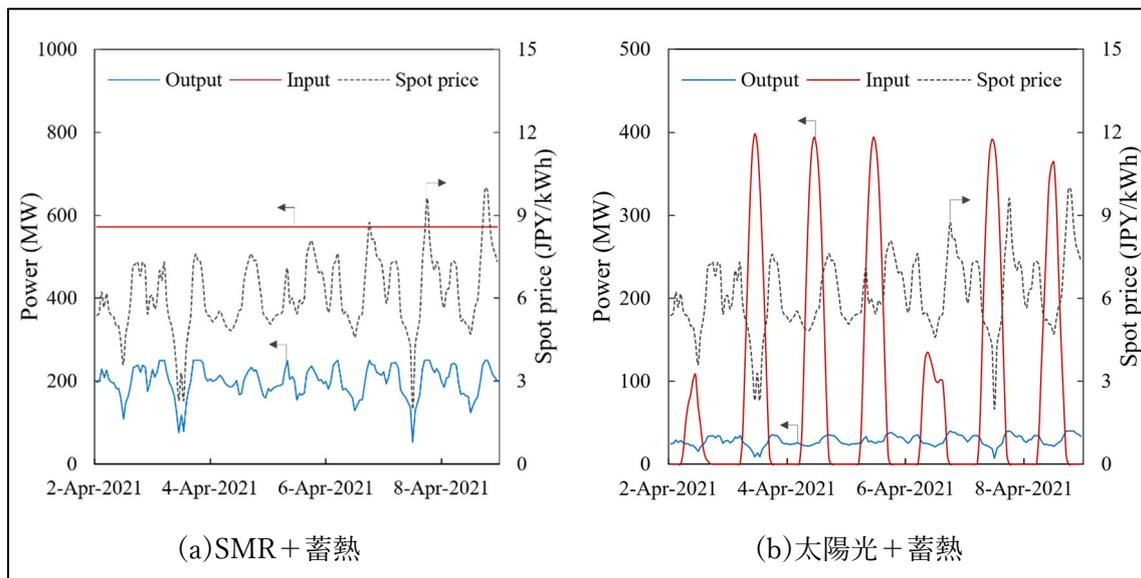


図4.6-1 4日間のシミュレーション結果

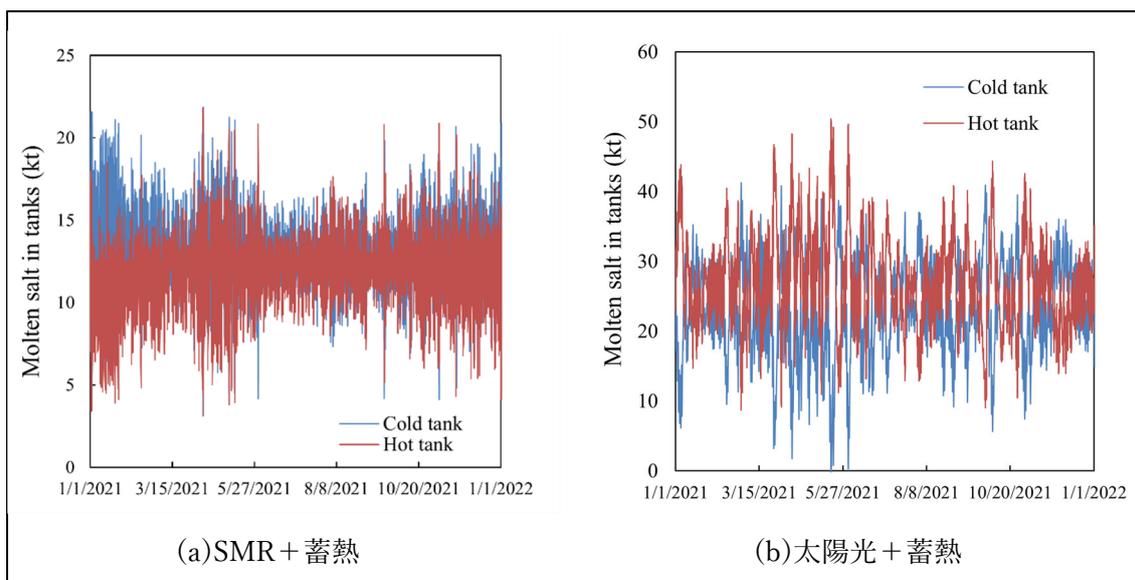


図 4.6-2 年間のシミュレーション結果

#### (4) まとめ

発電システムに蓄熱技術を導入した年間シミュレーションの事例として、SMR に熔融塩蓄熱を適用した場合の解析を実施した。その結果 SMR のみで、一定出力で発電した場合と比較して蓄熱技術を適用した場合はスポット市場価格に応じた発電が可能になるため、SMR 単体で運転するよりも売電収入を増大させる可能性があることがわかった。また、変動性再生可能エネルギーを入熱源とする場合は、価格が低いときに入熱し、高いときに出熱するメカニズムは機能するものの、事業として成立させるためにはさらなる検討も必要であることが示唆された。

今回の検討ではタービンの負荷変動の制約や蒸気流量が変動したときの熱交換器熔融塩出口の温度変化、タンク内での温度分布など、考慮していない点もあり、今後検討に加えていく必要がある。

#### (5) 参考文献

- [4.6-1] Novotny, V., Basta, V., Smola, P., and Spale, J., "Review of Carnot Battery Technology Commercial Development", *Energies*, Vol. 15, No. 2 (2022), pp. 64. 6.
- [4.6-2] Trevisan, S., Buchbjerg, B and Guedez, R., "Power-to-heat for the industrial sector: Techno-economic assessment of a molten salt-based solution", *Energy Conversion and Management*, vol. 272 (2022), pp. 116362.
- [4.6-3] Frick, K., Misenheimer, C. T., Doster, J. M., Terry, S. D., and Bragg-Sitton, S. "Thermal energy storage configurations for small modular reactor

load shedding”, Nuclear Technology, Vol. 202, No. 1 (2018), pp. 53-70.

[4.6-4] 自然エネルギー財団, 電力需給チャート：全国, <https://www.renewable-ei.org/statistics/electricity/#demand> (アクセス日 2023 年 7 月 23 日)

[4.6-5] 一般社団法人日本卸電力取引所, 取引市場データ, <https://www.jepx.jp/electricpower/market-data/spot/> (アクセス日 2023 年 7 月 23 日)

## 4.7 核燃料サイクルのカーボンニュートラルへの貢献

### (1) はじめに

「GX 実現に向けた基本方針」に基づき、「今後の原子力政策の方向性と行動指針」が 2023 年 4 月に、原子力関係閣僚会議で決定された<sup>[4.7-1]</sup>。この「行動指針」の最も意義深い点のひとつは、原子力の開発・利用にかかる基本原則を定めたことである。その基本原則は、安全を最優先とすることを第一に掲げ、さらにエネルギー供給の自給率を向上させ、エネルギー・経済安全保障を確保し、GX を牽引すること、すなわち、非化石エネルギーの利用の促進と、エネルギー供給に係る自律性の向上を原子力の価値として定めた。

短期的な観点からは、既設軽水炉の再稼働並びに最大限活用、中期的な観点からは、安全性を向上させた革新軽水炉の新增設あるいはリプレース、そして、廃炉を決定した軽水炉の廃止措置プロセスの円滑な推進が必要である。2050 年以降を見据えた長期的な持続性の観点からは、閉じた核燃料サイクルを完成させて、エネルギー資源の確保と放射性廃棄物の負担軽減を同時解決していく必要がある<sup>[4.7-2]</sup>。

### (2) 持続的な原子力利用

世界の主要国は 2050 年の脱炭素化に向けて「再エネ+原子力」を主流にした電源構成とする方針を打ち出している。このため、21 世紀後半には、世界的な軽水炉の利用拡大に伴い、ウランの需要が拡大することが予想されることから、ウラン価格の高騰が懸念される。このような国際的な原子力導入拡大の動向を踏まえれば、将来のウラン需給の問題への配慮と備えが必要である。軽水炉の使用済燃料を再処理してプルトニウムを回収し、燃料として利用することはその解決策の一つとなる。つまり、資源利用効率の高い高速中性子炉の特性を活かせば、飛躍的な核燃料の有効活用が可能となり、将来的には、海外からのウラン調達や国内外でのウラン濃縮への依存度を低減させた（準）国産エネルギーとなりうる。これにより、数千年の（準）国産エネルギーを確保することができる。言い換えれば、核燃料サイクルは我が国にとって究極のエネルギーストレージ技術となり、カーボンニュートラルそしてエネルギー供給安全保障へ大きく貢献する。

一方、高レベル放射性廃棄物に関する、現世代並びに将来世代の負担をできるだけ低減する必要がある。再処理ならびに高速炉技術の実用化により閉じた核燃料サイクルを達成すれば、資源の有効活用に加え、高レベル放射性廃棄物の減容化・潜在的有害度の低減を実現し、将来世代の負担軽減が期待できる。

### (3) まとめ

2050 年以降の持続的な原子力利用のためには、使用済燃料をリサイクル利用し、天然ウラン資源に依存せず、放射性廃棄物の減容等を実現できる高速炉と燃料サイクルを早期に実用化すべきである。そのための技術開発を着実に進めていくとともに、核燃料サイクルについて多様な視点で議論を深めていく必要がある。

(4) 参考文献

[4.7-1] <https://www.meti.go.jp/press/2023/04/20230428005/20230428005.html>

[4.7-2] 日本原子力学会 原子力アゴラ調査専門委員会「持続的な原子炉・核燃料サイクル検討・提言分科会」最終報告書（2024年3月）

## 5. 結言

研究会活動中にも我が国のカーボンニュートラルへの取組みが進展した。2023年2月、日本政府は「GX（グリーン・トランスフォーメーション）実現に向けた基本方針～今後10年を見据えたロードマップ～」をとりまとめ、2023年12月、我が国のGX実現に向けて、分野別投資戦略と先行5か年のアクションプランがGX実行会議において取りまとめられた。

本研究会が「カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックス」の必要性と技術展望を世界に先駆け提言したことは日本および世界のカーボンニュートラル達成に向けて有用と判断される。日本機械学会動力エネルギーシステム部門は、正しくこのような将来のエネルギー社会を構築する電力システム関連技術の開発を実現できる学術専門家集団である。2050年に向けてエネルギー安定供給と二酸化炭素排出量大幅削減を実現していくには、二酸化炭素をほとんど排出しない再生可能エネルギーや原子力エネルギーといった脱炭素一次エネルギー供給技術を最大限活用するとともに、非電力部門の電化を進め、エネルギー危機に耐え得る強靱なエネルギー需給構造に転換していく必要がある。グリーン社会へ転換のためにエネルギーストレージベストミックスは今後いよいよ必須となる技術分野である。再エネの普及に向けた蓄エネ技術として熱エネルギーの有効活用、炭素循環、エネルギーストレージ（貯蔵）・輸送・変換の最適導入が大きな役割を果たす。

現在、地政学リスクが高い状況が続いているが、世界全体で脱炭素のに向けた議論も着実に深化しており、今後のエネルギー安定供給と脱炭素に向けた取組みを両立させる政策が必要である。また、政府は、10年間で20兆円規模の経済移行債を発行することとしており、GX経済移行債を活用した投資戦略と市場創造に向けた規制・制度の見通しを示したうえで、民間企業による産業競争力強化・経済成長と温室効果ガス排出削減のいずれも実現できるようにする必要がある。このような中、電力システム関連技術の開発に取り組む学術専門家が集結した学会において研究会が設置され、精力的な活動成果としての本報告書の意義は大きく、将来の施策立案に向けての検討の一助になれば幸いである。

本報告書はエネルギー貯蔵技術の調査、エネルギー貯蔵技術の利用に関する調査を基に世界的にも先進的なエネルギーストレージベストミックスの提案がまとめられた。これらは2年半にわたり計13回の会合を行い、議論及び意見集約を図った成果である。また、本研究会の成果は、日本機械学会のみならず関連学会等において随時報告され、経済産業省資源エネルギー庁にも報告された。さらに、2024年5月、「カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言」を公表した。本研究会で得られた成果は、「第7次エネルギー基本計画」検討にそして世界のカーボンニュートラル実現に向けて有用なものになることを期待する。

なお、本委員会活動、報告書作成にあたり外部研究者、日本機械学会、動力エネルギーシステム部門関係者のご協力、ご教示に記して委員会一同から深く謝意を表す。

令和6年7月

一般社団法人 日本機械学会 動力エネルギーシステム部門

「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」

主査 加藤 之貴

付録A 開催実績  
「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」

	2021年度				2022年度								2023年度								2024年度													
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4~5	6~7	8~9		
研究会			▲ (1/17) 第1回		▲ (3/24) 第2回			▲ (6/17) 第3回				▲ (10/4) 第4回		▲ (12/13) 第5回			▲ (3/23) 第6回		▲ (5/18) 第7回		▲ (7/19) 第8回	▲ (8/28) 第9回			▲ (11/1) 第10回	▲ (12/2) 第12回								
幹事会		▲ (12/3)		▲ (3/7)		▲ (5/31)				▲ (9/21)			▲ (12/7)			▲ (3/22)		▲ (5/9)	▲ (6/6)	▲ (7/6)	▲ (8/3)			▲ (10/23)	▲ (11/24)	▲ (12/18)		▲ (2/16)						
その他	▲ (11/1) 設置承認												▲ (12/27) エネ庁と意見交換			▲ (3/23) 他部門との意見交換					▲ (8/28) 他学会との意見交換	▲ (9/21) エネ庁と意見交換			▲ (部門審議)	▲ (1/15) 動エネ部門意見書としてWeb公表	▲ (2/9) エネ庁と意見交換	▲ (3/14) 蓄エネ研セミナー	▲ (4/19) 理事会提言承認	▲ (5/7) 提言公表	▲ (6/17) 動エネシンポ	▲ (6/17) 報告書公開	△ (9/9) 機械学会年会セッション	

研究会 (※敬称略)						
第1回：2022/1/17 ・趣旨確認 ・進め方の検討	第2回：2022/3/24 ・関連研究の動向調査： 蓄エネの必要性 (加藤、小宮山、小竹、松尾)	第3回：2022/6/17 ・関連研究の動向調査： 蓄エネ技術の必要性 (岡崎、井田、藤井、定廣)	第4回：2022/10/4 ・関連研究の動向調査： 蓄エネ技術 (中垣、丸岡、能村、郷右近、香川)	第5回：2022/12/13 ・関連研究の動向調査： 蓄エネ技術、水素、 ヒートポンプ (梅沢、浅野、西村、斉田、Zamengo)	第6回：2023/3/23 ・環境工学部門との意見交換 (加藤、井田)	第7回：2023/5/18 ・関連研究の動向調査： 経済性評価、蓄電池、 余剰再エネの活用 (松尾、近藤、上遠野)
第8回：2023/7/19 ・関連研究の動向調査： 産業分野への蓄エネ利用 (岩城) ・提言ドラフトの検討 ・報告書目次と執筆担当の 検討	第9回：2023/8/28 ・電気学会との意見交換 ・蓄熱設備導入に係る仮試算 (松尾) ・提言ドラフト改訂の確認 ・報告書目次と執筆担当の 決定	第10回：2023/11/1 ・提言ドラフト改訂の 確認 ・報告書ドラフトのレ ビュー	第11回：2023/11/27 ・提言(意見書)の承認 ・報告書ドラフトのレ ビュー	第12回：2023/12/22 ・報告書ドラフトのレ ビュー	第13回：2024/2/19 ・提言案の審議結果の反 映方針の確認 ・提言案のパブコメ反映 版の方針確認 ・報告書ドラフトのレビ ュー	

付録 B 報告書執筆主担当  
「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」

監修：加藤(之)

章番号	内容	担当
1	緒言	山野
2	エネルギー貯蔵技術の調査	
2.1	蓄熱発電	岡崎
2.2	高温蓄熱材料技術	郷右近
2.3	潜熱蓄熱マイクロカプセル	能村
2.4	潜熱蓄熱伝熱促進	丸岡
2.5	水素吸蔵合金を用いた蓄熱	斉田
2.6	化学蓄熱	Zamengo
2.7	高効率ヒートポンプ	香川
3	エネルギー貯蔵技術の利用に関する調査	
3.1	蓄電池	近藤
3.2	余剰再エネの活用	上遠野
3.3	産業分野への蓄エネ利用	岩城
3.4	スマートシティネットワーク	西村
3.5	バイオ炭素長期備蓄型循環型社会	井田
3.6	原子力の機動性	小竹
3.7	蓄熱を組み合わせた高温ガス炉	定廣
3.8	蓄熱を組み合わせた高速炉	山野
3.9	欧米における蓄熱技術導入状況	能村
4	エネルギーストレージベストミックスの検討	
4.1	エネルギー貯蔵の必要性	加藤(之)
4.2	経済性の観点から蓄エネルギー技術の役割	松尾
4.3	エネルギー貯蔵システムの役割	中垣
4.4	エネルギー貯蔵技術の比較	梅沢
4.5	蓄熱技術におけるライフサイクル設計	藤井
4.6	エネルギー貯蔵システムを組み合わせた再エネと原子力の経済性評価	藤井
4.7	核燃料サイクルのカーボンニュートラルへの貢献	山野
5	結言	加藤(之)

※敬称略

## 付録 C 本研究会に関連した外部発表

### 1. 講演等

- Journée technique Internationale Tecnea-Cemafroid 2023 (2023/6/29)
  - (1) N. Kagawa, “JSRAE “Carbon Neutral 2050” Activities”
  
- 環境工学国際ワークショップ 2023 (2023/7/25-28)
  - (1) T. Nomura, “Development of middle- to high-temperature latent heat storage technology and its application to thermal management in a broad sense”
  
- 環境と新冷媒 国際シンポジウム 2023 (2023/11/16-17)
  - (1) PS112, “カーボンニュートラル 2050 に向けて” (日本冷凍空調学会委員会の報告), 香川 澄 (早稲田大学 理工学術院総合研究所), 神戸 雅範 (前川製作所), 繁永 昌弥 (ダイキン工業)
  
- カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会報告会 (蓄エネ研セミナー) (2024/3/14) (<https://www.jsme.or.jp/pes/research-activity/>)
  - (1) “カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言”, エネルギー貯蔵技術研究会 主査 加藤 之貴 (東京工業大学)
  - (2) “カーボンニュートラル実現に向けたエネルギー貯蔵への期待”, 小宮山 涼一 (東京大学)
  - (3) “エネルギーストレージミックスの経済合理性”, 松尾 雄司 (立命館アジア太平洋大学)
  - (4) “エネルギー貯蔵システムの役割”, 中垣 隆雄 (早稲田大学)
  - (5) “エネルギー貯蔵システムを組み合わせた設計”, 藤井 祥万 (東京大学)
  
- 第 28 回 動力・エネルギー技術シンポジウム (2024/6/17-18)
  - (1) C141, “カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言 その 1 (エネルギーストレージベストミックスの構築)”, 加藤 之貴 (東京工業大学), 山野 秀将 (JAEA)
  - (2) C142, “カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言 その 2 (ゼロカーボンエネルギーによるグリーン社会への転換)”, 加藤 之貴 (東京工業大学), 山野 秀将 (JAEA)
  - (3) C143, “エネルギーストレージミックスの経済合理性”, 松尾 雄司 (立命館アジア太平洋大学)
  - (4) C144, “エネルギー貯蔵システムの役割”, 中垣 隆雄 (早稲田大学)

- 日本機械学会 2024 年度年次大会 (2024/9/8-11)  
(カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会報告)
  - (1) W081-1, “カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言”, 加藤 之貴 (東京工業大学)
  - (2) W081-2, “蓄熱技術を導入した次世代産業とセクターカップリング”, 中垣 隆雄 (早稲田大学)
  - (3) W081-3, “エネルギーストレージミックスの経済合理性”, 松尾 雄司 (立命館アジア太平洋大学)

## 2. 提言・活動報告

- 動力エネルギーシステム部門, 2024 年度 (第 102 期) 部門長 大川 富雄, “カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージベストミックスのための提言 (2024 年)”  
(<https://www.jsme.or.jp/about/about-jsme/proposal/teigen202404/>)
- 「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」活動報告  
(<https://www.jsme.or.jp/pes/research-activity/>)

## 付録D 日本機械学会環境工学部門との意見交換

### 1. 意見交換会概要

本研究会において、検討を進めている提言内容について、環境工学部門としての視点や論点、主張について議論、共有し、提言内容に反映すべく、部門間での横断的な意見交換会を2023年3月23日に開催した。

### 2. 環境工学部門からの見解の集約

- (1) カーボンニュートラルの達成に向けて、蓄熱技術による熱利用が重要となる点については環境工学の観点からも完全に同意する。その際、蓄熱技術の導入、普及にあたっては立地、すなわち蓄熱出力を利用する場所の側に蓄熱設備を設置することが重要となると考えるが、この点について我が国の状況を明確に把握する必要がある。
- (2) 2050年に再エネが大量に導入された際の余剰電力の使い方について、東大先端電力エネルギー環境技術教育研究アライアンスにおいて将来ビジョンに対する提言を2021年に実施している。その中でも、エネルギー貯蔵は多量に必要であることが分かり、再エネと原子力で将来の電力を供給する仮定では、40～50TWhの電力貯蔵が必要と試算された。その電力貯蔵要求に対し、蓄電池だけで実現するのは困難であり、エネルギー貯蔵のミックスが重要であると提言している。エネルギーストレージミックスと蓄熱の必要性については同意するところであり、研究開発の必要性がある。
- (3) 蓄エネ技術としての水素利用は、ガスタービンによる発電利用を想定されているが、燃料電池として活用する方ことも検討する必要がある。また、水素ではなくアンモニアやメタノールでの利用についても長期的な視野から研究開発の必要性がある。
- (4) 家庭用コージェネシステムは、温水を貯めずに使用時にお湯を沸かすような形での利用が多い。家庭においても温水だけではなく、低温での利用価値もある。100℃以下での利用も想定して、温熱と冷熱を一緒に組み込んで利用する必要性がある。
- (5) 余剰の太陽光発電で得られる電力を水素製造に回し、得られた水素を製鉄所に供給し、水素還元鉄の製造を行うと、かなり大量に消費されるのではないかと。また、製鉄所にオンサイトで水素製造設備をおくことで、水素により生成した電力は送電網による水素輸送を検討する必要がある。
- (6) 電力利用の末端の家庭や小事業所のエネルギー消費の半分くらいは熱需要と考える。需要末端において余剰電力によりヒートポンプを動かし、温水と冷水の両方を同時に作り、これを蓄熱して需要に応じて利用するシステムが検討されている。上流での蓄熱とこのような末端での蓄熱の比較評価は既に行われているか。上流で余剰電力を使うと設備利用率は数%以下になるため、末端での利用を検討する必要がある。

### 3. まとめ

我が国の世界最高水準の環境技術を基盤とし、顕在化する地球規模の環境問題への対応、資源やエネルギーの先進利用など、革新的環境技術創成のための、SDGs やサーキュラーエ

コノミーなど国際的なフレームへ対応していくとともに、部門間での交流から積極的な情報発信を行い、革新的な環境技術の創成や学術的課題の解決、顕在化する地球規模の環境問題への対応などの解決手法を提言することに環境工学部門として賛同頂くとともに、提言内容の取り纏めに引き続き協力を進めていくこととした。

## 付録 E 日本電気学会との意見交換

### 1. 意見交換会概要

本研究会において、検討を進めている提言内容について、日本電気学会としての視点や論点、主張について議論、共有し、提言内容に反映すべく、学会間での横断的な意見交換会を2023年8月28日に開催した。

### 2. 日本電気学会からの講演

日本電気学会から加藤丈佳教授に「再エネ発電有効活用のための電力需給の時間的・空間的柔軟性の拡充」として、電力需給簡易解析と地域エネルギー需給評価結果とそれに基づく知見について講演頂いた。太陽光発電(PV)余剰電力によるカーボンニュートラル燃料(CNF)供給と需要のバランスは様々で、市区町村間での輸送が必要となること、電力余剰時にCNF製造するためには非常に大きな貯蔵設備が必要なため運用や容量の最適化が必要なこと、送配電の拡張が必要であることについてご説明頂いた。

### 3. 日本電気学会からの見解の集約

- (1) カーボンニュートラル実現のため、再生可能エネルギー発電への期待は高い。再エネ発電の大量導入のためには、電力需要に対する時間的・空間的ミスマッチに対応するための調整力の増強が必要。
- (2) 海外からのCNF調達量を削減するためには、再エネ発電の電力をそのまま電力として使い切ることが重要。
- (3) PVが余剰電力の大部分を占める場合、それが配電システムに入る際には変電所がボトルネックになる可能性がある。大規模電源となるにつれシステムに接続する条件も厳しくなることが課題の一つ。
- (4) 講演資料では、電力エリア毎にどこがボトルネックになるかを計算し、北海道や東北エリアの風力を利用するには関係線容量を増強しないといけないということを示した。風力は融通できるが、PVはそれほど地域間の差もないのでどこでも余る。それを各ローカルエリアにどのように導入していくべきかが課題の一つ。

### 3. まとめ

カーボンニュートラル実現に向けては、産業プロセスなどにおいて熱プロセスから発生する未利用熱の活用に熱エネルギー貯蔵技術が必要であること、再エネに対応した大規模・低コストの蓄エネ技術も重要であり電力貯蔵とともに熱エネルギー、化学エネルギー貯蔵に可能性があること、貯蔵エネルギーを用いた発電、熱利用システム技術の準備が必要であること含め、本研究会が主張するエネルギーストレージミックスと蓄熱の必要性について、学会間で認識を共有するとともに、提言内容の取り纏めに向けて引き続き協力を進めていくこととした。