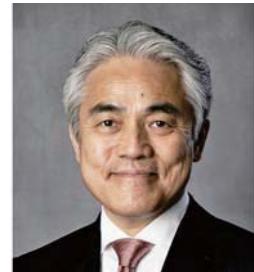


## [卷頭論説]

# GX ビジョンに基づく CN 向けた エネルギー貯蔵および炭素循環システム

東京科学大学総合研究院  
ゼロカーボンエネルギー研究所 所長/教授 加藤之貴



## 1. はじめに

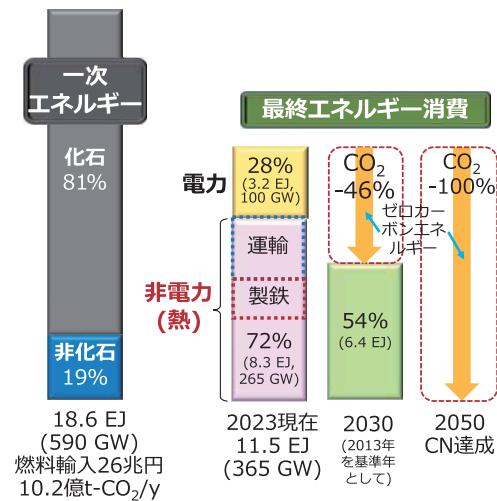
人類史のわずか最近の 300 年ほどでの化石エネルギー消費にともなう大量の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) 排出と、最近の気候変動の激甚化との関係性がより顕在化しつつある<sup>1)</sup>。 $\text{CO}_2$ 排出削減は環境保護と同時に社会の持続的な発展、経済的な繁栄、エネルギー供給安全保障の観点から必須である。カーボンニュートラル (Carbon Neutrality, CN) (あるいは脱炭素、Net-Zero) の実現には努力と時間を要するが、エネルギー利用の変化として対応が必要である。日本政府は 2022 年にグリーン・トランスマネーション (GX) 実行会議を設置し、GX を「産業革命以来の化石燃料中心の経済・社会、産業構造をクリーンエネルギー中心に移行させ、経済社会システム全体を変革すべく、エネルギーの安定供給・経済成長・排出削減の同時実現を目指す」と定義し、国をあげて CN 向けの GX を推進している<sup>2)</sup>。その一方で、例えば米国は 2025 年 1 月の政権交代にともない、地球温暖化対策の国際枠組み「パリ協定」の 2026 年離脱を表明し、化石燃料の増産に転じている。社会は常に動搖し短期的には不安定であるが、現状を長期的に俯瞰して CN 社会のあるべき姿を展望し、その実現のための具体的な課題技術を抽出し、その技術の実現が必要である。この実現は個人、一組織で成し得るものではなく、社会全体の連携と協力が必要である。

筆者らは、東京科学大学グリーン・トランスマネーション・イニシアティブ (Science Tokyo GXI, GXI) 事業を展開し、産官学が連携した CN 実現を目指している<sup>3)</sup>。本稿では、GXI の示す 2050 年を目指した GX ビジョンの紹介と GX 技術の新たな展開事例としてエネルギー貯蔵、炭素循環システムについて示す。

## 2. 日本における CN 展望

GX を検討するにあたり日本のエネルギー系統の現状を俯瞰する。図 1 に日本のエネルギーの流れを基としたカーボンニュートラル達成のための量的関係 (2023 年度基準) を示す<sup>4)</sup>。一次エネルギーの 81% は化石燃料であり、ほぼ全量が輸入である。この部分が  $\text{CO}_2$  発生源であり 10.2 億 t- $\text{CO}_2$ /年排出と約 26 兆円/年の購入費用をともなっている。非化石エネルギーは 19% であり、そのうち再生可能エネルギー (再エネ) が 8%，水力発電が 4%，原子力発電 (原発) は再稼働がはじまり 4% 程度である。今後、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り、太陽光発電 (PV)，風力発電のさらなる導入、原発の利用増大が必要である。

利用側の最終エネルギー消費は電力と非電力に分類される。熱量基準で電力は 28% に過ぎず、非電力が大半である。現在 CN 向け電源構成が活発に議論されているが、対象が主に電力分野に限られており、非電力分野の検討が後手になっている傾向がある。非電力は燃料の熱エネルギーを運輸、鉄鋼など日本の基幹産業で利用し、国富を得ている。例えば非電力の運輸部門 (同 24%) の電動化が技術的に可能になったと



(参考文献 4 を基に執筆者にて作成)

図 1 日本の CN 達成にむけたエネルギーの量的推移の関係 (2023 年度基準)

しても必要な電力供給には、現状の日本の全電力量にほぼ相当する発電設備を新規に準備する必要がある。日本は 2030 年度に温室効果ガス 2013 年度比 46% 削減を目指しており、2030 年において電力の完全な非化石化に加えて他部門の非化石化も実現する必要がある。このためには早急に非電力分野にもゼロカーボンエネルギーの導入と GX が必要である。

### 3. Science Tokyo GXI

Science Tokyo GXI は、文部科学省ミッション実現加速化経費事業として旧東京工業大学科学技術創成研究院ゼロカーボンエネルギー研究所を本部とし、2022 年から活動を進めている。2024 年 10 月 1 日に東京工業大学は東京医科歯科大学と統合し東京科学大学 (Science Tokyo) が誕生した。大学名の変更にともない呼称を Tokyo Tech GXI から Science Tokyo GXI へと変更している。GXI の組織構成を図 2 に示す。GXI で

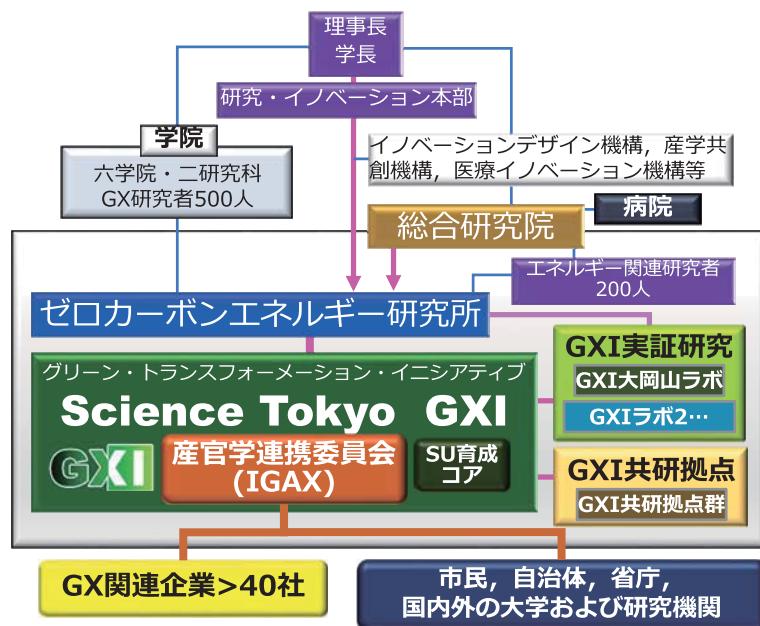


図 2 Science Tokyo GXI のオープンイノベーションネットワーク

はエネルギー関連企業、行政、自治体とともに産官学連携委員会（IGAX, The Industry-Government-Academia Collaboration Committee for GX）を組織し、その組織はGX関連企業会員約40社が参画する我が国随一のGX産官学連携組織と判断される。IGAXを起点に産官学・社会が連携し、新しいGX技術創成をオープンイノベーションにより進めている。2024年度はEPRI（Electric Power Research Institute, 米国電力研究所）、BASF（ドイツの総合化学メーカー）などもメンバーとなり国際連携も進んでいる。

CN達成にはゼロカーボンエネルギーである再生可能エネルギー、原子力を一次エネルギーとしたエネルギーシステムが必要である。特に日本は他国とエネルギー環境が異なり、他国の事例の模倣だけでは達成困難であることの意識共有が必要である。また、GXIではゼロカーボンエネルギーを駆動源とした社会のCN化をGXと定義し、事業を進めている。GXIではGXビジョンを描き、GX技術開発によるCN実現を目指し、IGAXを通して産官学、さらに地域、社会が連携したオープンイノベーションで検討を進めている。

#### 4. GXI VISION 2050

CN実現には従来の化石燃料依存のエネルギー社会からの応用的な達成は困難であり、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。GXIではCN実現のためのGXのあるべき姿=グランドデザイン構想を産官学、社会が密に連携し立案、解決を目指している。GXIのGXグランドデザインとして提案するグリーン社会ビジョンを図3に示す<sup>5)</sup>。日本では一次エネルギーにおける化石燃料利用の削減にともない、ゼロカーボンエネルギー（ZCE）としてPVなどの変動性再エネ（VRE）の主電源化が検討されている。VREは天候に依存し、出力変動が大きく稼働率が低い点が課題である。そのため、蓄電池のみならず安価で大量のエネルギー貯蔵として、熱貯蔵や燃料変換（エネルギーキャリア製造）が必要となる。また電気供給であれば、周波数、電圧の整った質の高い電力供給が必要となるため、各蓄エネから出力される電力の高品位な調整力が必要である。一方、利用側では合成炭化水素で在来エンジンを駆動しつつ排出CO<sub>2</sub>を回収し、再度、合成炭化水素を再生する炭素循環エネルギー系統も新たなGX技術分野となる。

これまでのGXIにおける産官学連携活動において日本企業・大学の有する技術は優れており、その社会貢献ポテンシャルは国際基準で非常に大きいことが確認されている。そこで上記の状況を鑑み、GXIの活動を基礎として日本政府の第7次エネルギー基本計画の立案に際し（その後、2025年2月に閣議決定）、2050年を見据えてのポジションペーパーを2024年9月にWebページにおいて日本語版、英語版にて表明した<sup>5)</sup>。

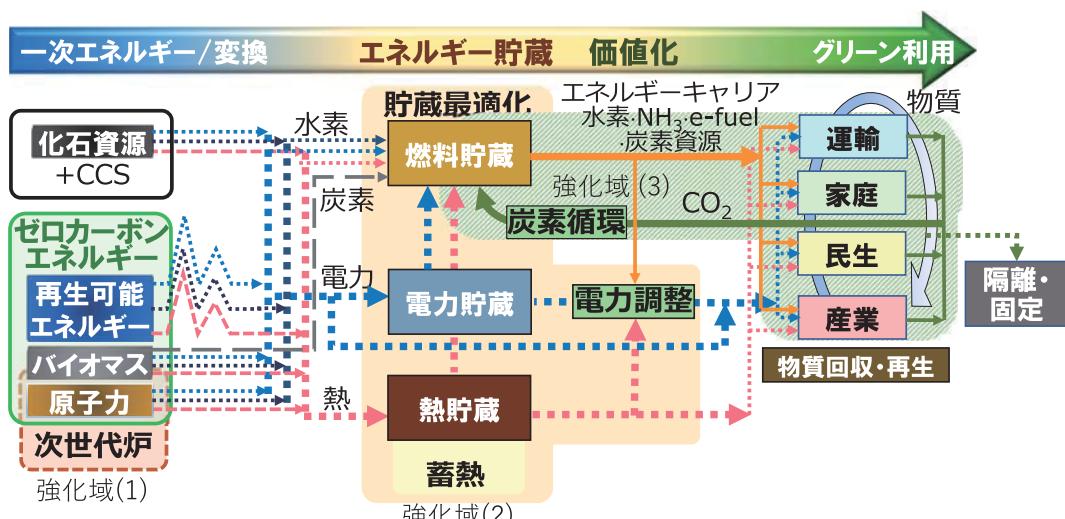


図3 CN達成のためのScience Tokyo GXIが目指すグリーン社会ビジョンと、その実現に向けたGXI VISION 2050で提案する技術強化域<sup>5)</sup>

ペーパーは「社会的慣性<sup>†</sup>を見越したアフォーダブル<sup>‡‡</sup>な移行でカーボンニュートラルを達成」を主張点として 2050 年に向けた GX 技術展開のビジョンを提示した。著者グループが GX 実現に向けて日本の産官学が連携して取り組むべき必要な GX 技術を 9 か月にわたり検討した結果、次の三点を主張したものである。

- (1) 十分なゼロカーボンエネルギーの確保
- (2) エネルギー貯蔵システムの合理的な大容量化と調整力の確保
- (3) 炭素循環による GX 強化

図 3 に上記三点に応じた技術強化域が示されている。

強化域（1）：日本では一次エネルギーにおける化石燃料利用の削減にともない、ゼロカーボンエネルギーとして VRE の主電源化が検討されているが、VRE は天候に依存し、出力変動が大きく稼働率が低い点が課題である。そのため、十分なゼロカーボンエネルギーの確保には安全な次世代原子炉の計画的な利用普及が必要である。

強化域（2）：近年、余剰の VRE 発電を抑止するための出力制御が頻発している。VRE 導入が進むほどに出力制御は増え、VRE が 2050 年に 50% 程度のシェアとなった場合の出力制御は 70 TWh/年程度と予測され、2 兆円/年規模の経済損失に相当する。そのため出力制御の克服に向け、安価で大量のエネルギー貯蔵として熱貯蔵や燃料変換貯蔵としてのエネルギーキャリア製造技術が必要となる。VRE 電力から水の電気分解で得られるグリーン水素が VRE のエネルギーキャリアの候補である。ただし、水素は低密度のため、産業排出される CO<sub>2</sub> とグリーン水素から合成される炭化水素燃料 e-fuels に変換されて貯蔵される可能性がある。持続可能なエネルギーといわれる航空燃料（SAF）と e-fuels は水素のエネルギーキャリアであり、これらの活用は水素による CN に貢献する。そして需要側には高品質なエネルギーの同時同量の供給が求められ、そのためには製造エネルギーの価値化とそれを実現する調整力の確保が必要である。

強化域（3）：エネルギー需要側は多くの分野で炭化水素燃料を必要としている。製鉄業やディーゼルエンジンから電動化への代替が困難な大型移動体、重機械、船舶などの候補対象がある。そこで、在来の鉄還元やエンジン使用を許容し、還元材や燃料に e-fuels を用い、排出される CO<sub>2</sub> を回収し、ゼロカーボンエネルギーで再度 e-fuels に変換して循環再利用する炭素循環が望まれる。

## 5. CN のためのエネルギー貯蔵

### 5.1 VRE のための蓄エネ

前述のとおり VRE 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課題である。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] の削減が進んでいない<sup>6)</sup>。PV、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、すなわち安定した周波数と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。なぜなら、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ととなり、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、PV を計画的に停止する出力抑制が頻発しつつある。例えば、九州電力管内では 2021 年度に出力抑制が 82 日間おこなわれている<sup>7)</sup>。この現象は日本の

<sup>†</sup> 社会的慣性（social inertia）：質量に比例する力学的な慣性とのアナロジーで、長期利用を前提としたインフラ、巨額な生産設備、複合的で総体的に巨大なサプライチェーンなど、さまざまな要因で急激な変化が困難なことを表す。

<sup>‡‡</sup> アフォーダブル（affordable）：手頃で十分受容可能な、の意味。単純に安価や導入のハードルの低さだけを追求しない姿勢のこと。

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。2025年4月28日にスペイン、ポルトガルにおいて大規模停電(31GW程度)が発生したが、これは系統電圧の上昇が直接の原因とされ、非同期電力であるVREの導入(8.5GW)が進み同期電力の不足が原因と示唆されている<sup>8)</sup>。これらの課題に対して、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蓄エネのGX技術が今後求められると予想される。再エネの蓄エネとしては電池が候補の一つであるが、原料、製品の海外依存とそれにともなう高コストのリスクがあるため、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。以下では蓄エネ分野のGX技術と期待される熱エネルギー貯蔵、炭素循環エネルギーシステムの開発動向を示す。

## 5.2 热エネルギー貯蔵

変動電力に対して、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(蓄熱およびケミカルヒートポンプ(CHP)機能)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出力する。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35%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ない長所である。すなわちP2H2Pは慣性力を有しているため、負荷追従運転向けの火力発電を代替でき、CO<sub>2</sub>排出なしで調整力を有した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るため、P2H2Pからの直接熱供給により、産業間の熱融通をおこなうとセクターカップリングが可能になり、さらに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%程度まで期待でき、産業の低炭素化に貢献可能である。

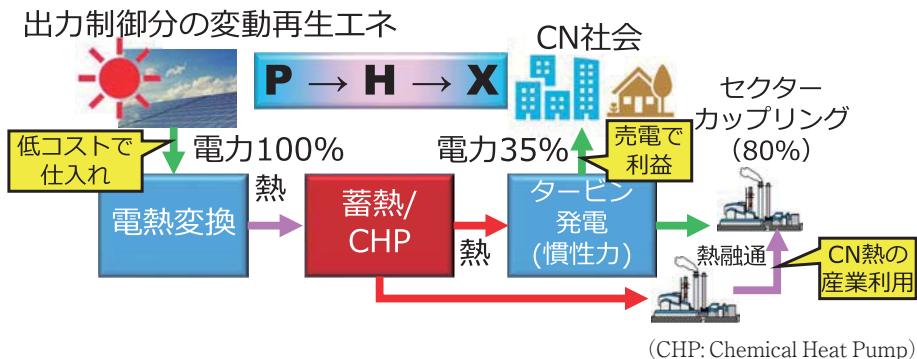
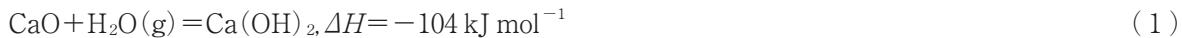


図4 P2H2P（電力蓄熱発電）の構成

### 5.2.1 化学蓄熱・ケミカルヒートポンプ

P2H2P向けの蓄熱方法には顕熱、潜熱、化学蓄熱がある。蓄熱密度は概ね高い順に化学蓄熱（電池と同程度）、潜熱、顕熱となる。現在普及している顕熱、潜熱蓄熱の課題は性能が物性に強く依存するため広温度域化、高蓄熱密度化には限界があり、また装置からの放熱により長期間の蓄熱が困難な点である。これに対し、化学蓄熱は相対的にエネルギー密度が高く、反応条件の選択で幅広い温度域に対応できる。化学蓄熱は可逆的な化学反応を利用し吸熱反応で蓄熱、発熱反応で温度変換をともなう熱出力がおこなわれる。P2H2Pシステムにおいては高温の蓄熱技術が望まれ、装置容器を金属とすれば最高温度は600°C程度が現実的である。現在の碎石などを用いた顕熱蓄熱や潜熱蓄熱に比べて、より高密度な酸化カルシウム/水/水酸化カルシウム系(CaO/H<sub>2</sub>O/Ca(OH)<sub>2</sub>)化学蓄熱が一候補である<sup>9)</sup>。



この系は (i) 材料が安全で安価、(ii) 資源制約がなく、(iii) 蓄熱密度が、顯熱、潜熱蓄熱の蓄熱密度 500 kJ/kg 前後に比べて 1,850 kJ/kg-CaO 程度と高く、かつ、(iv) 反応物質として長期間蓄熱が可能である。図 5 に化学蓄熱の操作原理を示す。(a) 蓄熱操作では 500°C の温熱 ( $T_d$ [°C]) で水酸化カルシウム脱水反応をおこなう。発生水蒸気を水容器 ( $T_c$ ) 内に水として保存する。(b) 热出力操作で  $T_c$  より高温の  $T_e$  の水蒸気を発生させると水蒸気圧  $P_e$ [Pa] は  $P_c$  より高圧になり、酸化カルシウム水和反応は 500°C より高温 ( $T_h$ ) (600°C 程度) で熱出力できる。蓄熱温度より熱出力温度を高くできる昇温機能がケミカルヒートポンプ (CHP) であり、ほかの蓄熱方法にない長所である。機械式ヒートポンプが電力を必要するのに対し、CHP は熱だけで昇温でき、機械的 COP を極めて大きくできる利点がある。さらに反応圧力で反応温度が一意にきまるため、反応圧力の制御だけで任意の温度で温度一定の出力ができる、下流の利用側プロセスの安定稼働に貢献できる。

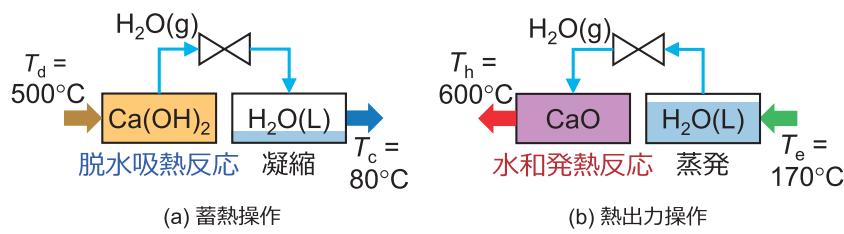
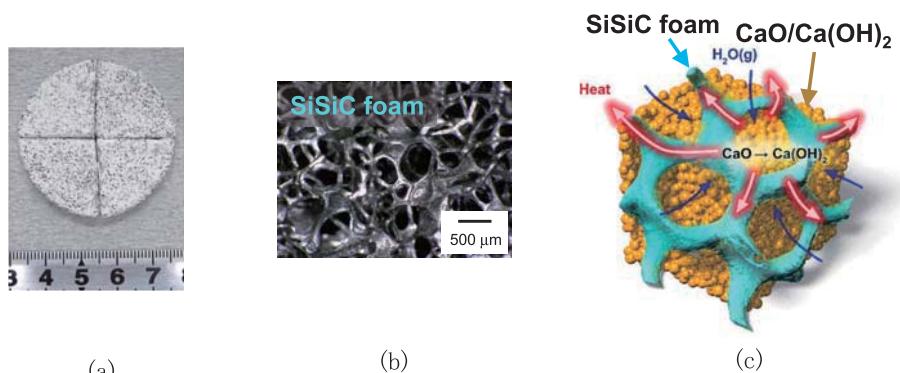


図 5 CaO/H<sub>2</sub>O/Ca(OH)<sub>2</sub> 系化学蓄熱・ケミカルヒートポンプの作動原理

### 5.2.2 化学蓄熱の材料開発

化学蓄熱は材料に課題がある。CaO 系では繰り返し反応で粒子同士が凝集し、水蒸気の移動が遅くなり反応速度が下がること、また、材料の熱伝導性が悪く短時間での迅速な蓄熱、熱出力ができない課題があつた。これに対して近年、材料研究が進められ、凝集性の少ない CaO 材料とケイ素含浸炭化ケイ素 (SiSiC) の多孔性フォーム材料を混合した、複合化学蓄熱材料が開発されている<sup>9,10)</sup> (図 6(a))。熱伝導性が高く堅牢である SiSiC を、フォーム空間直径 300 μm 程度で多孔フォーム化する技術 (図 6(b)) が開発されており、水酸化カルシウムをスラリー化してこの SiSiC フォーム内に充填し、乾燥することで複合化学蓄熱材料を得る (拡大イメージが図 6(c)) 技術である。この複合材料は蓄熱、熱出力速度が従来材料より 2 倍以上高く、かつ繰り返し反応においても反応性が維持され、実用性が向上している。

化学蓄熱については開発材料を充填した充填層反応器の合理的な設計、そして P2H2P システムとしての最適化が必要である。充填層反応器は伝熱律速になることが多く、材料および反応器の伝熱促進およびシス



(a) 開発された複合化学蓄熱材料、(b) SiSiC フォーム、(c) 複合化学蓄熱材料拡大イメージ

図 6 SiSiC/CaO 複合化学蓄熱材料<sup>9,10)</sup>

テムのコンパクト化が不可欠であり、この実現にはセラミックス材料の開発が求められる。今後、各種の温度域での化学蓄熱材料、システムの開発が進むことで蓄熱の適用範囲が拡大することが期待できる。

### 5.2.3 化学蓄熱システム、HyTES

筆者は SiSiC/CaO 複合化学蓄熱材料を活用した P2H2P 向け CHP システム (HyTES, chemical heat pump and sensible heat storage Hybrid Thermal Energy System) を開発した (図7)。HyTES (図7(a)) では熱輸送に溶融塩を用い、気体熱輸送よりコンパクトで高効率な熱輸送をおこなう。表記温度は HyTES 装置 (図7(b)) を用いた研究に基づく値である<sup>10)</sup>。蓄熱過程では、VRE を電熱変換し、得られた高温熱は化学蓄熱で貯蔵し、出口の低温熱を顯熱蓄熱で貯蔵する。先行普及している顯熱蓄熱は熱出力過程の後半で温度の降下が不可避である。これに対して、HyTES では開発した複合化学蓄熱材料により 500°C の低温熱を CHP で 600°C に昇温し発電、プロセス熱として利用でき、その CHP 機能は反応平衡を利用し反応圧力により熱駆動で出力温度を自由にかつ一定温度で出力できる。さらに、産業プラント毎の需要に応じた電気・熱供給が実現でき、機械式ヒートポンプに比べ装置がシンプルで温度調整が可能である。この CHP 技術は世界最高水準である上に、P2H2P は国産原料で製造でき、環境 LCA 基準ではリチウムイオン電池 (LIB) に比べ環境影響が一桁小さい。さらにコストは電池の 1/2、水素システムの 1/3 と見積もられる。蓄熱は一見古典的な技術に見えるが、コスト、材料の国産性、安全性、社会実装性が極めて高く、ほかの蓄エネシステムに対して多くの利点があることが見い出されている。

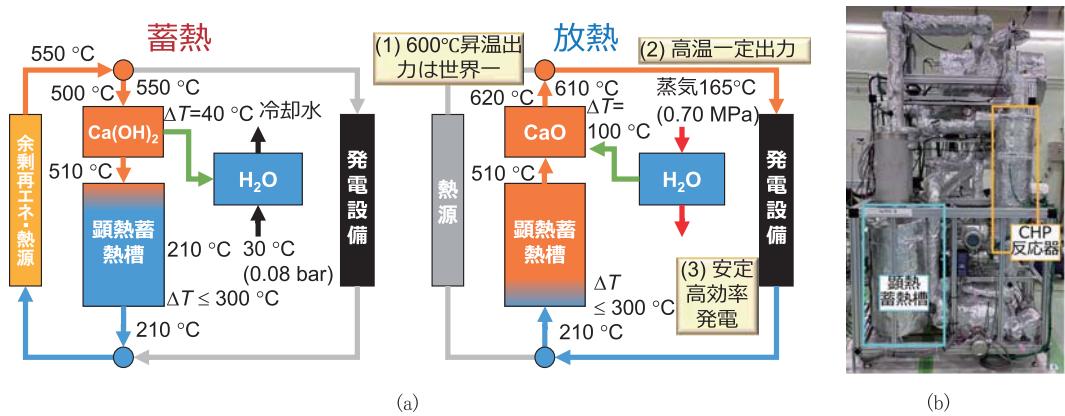


図7 (a) CaO/H<sub>2</sub>O CHP と顯熱蓄熱槽を連携した HyTES を用いた P2H2P システム、(b) HyTES 装置外観<sup>10)</sup>

## 5.3 炭素循環エネルギーシステム

### 5.3.1 能動的炭素循環エネルギーシステム、ACRES

CN 化に向けては、一次エネルギーの非化石化、そしてエネルギーキャリアとして水素、アンモニアなどが検討されている。産業面においては、炭素から非化石エネルギーへエネルギーキャリアに代替できないプロセス、または代替すると効率が下がるプロセスが多くある。そこで、ゼロカーボンエネルギーを用いて CO<sub>2</sub> を資源化し、炭素を循環利用する炭素循環産業システムの構築が望まれる。これも蓄エネ技術の重要な手段といえる。

図8にCN社会に向けての炭素の道筋を示す。CO<sub>2</sub>回収貯留 (CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CCS) は貯留用地が明確でなく、また、CCS 実施に必要なエネルギーは炭素が有するエネルギーの 30% 程度に相当するため、効率性、経済性の面で課題が残る。他方、CO<sub>2</sub>回収利用 (CO<sub>2</sub> Capture and Utilization, CCU) として CO<sub>2</sub> のメタン、e-fuel への変換利用が検討されている。しかし、CCU で製造された合成メタンを火力発電等で利用すれば二次的な CO<sub>2</sub> が発生し、最終的な CO<sub>2</sub> 大気放出は半減に留まる。そこで、究極の CN のためには

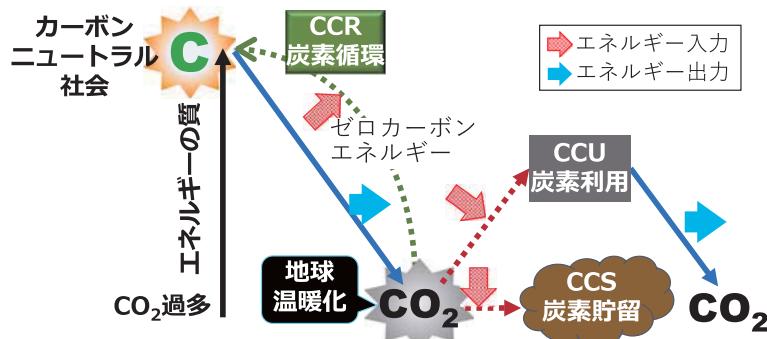


図8 CN社会に向けての炭素の道筋とACRES

CO<sub>2</sub>回収循環 (CO<sub>2</sub> Capture and Recycling, CCR) が望まれる。すなわち炭素利用プロセスで発生する CO<sub>2</sub>を回収し、ゼロカーボンエネルギーを用いて炭素材料に再生し、エネルギーキャリアとして循環利用することで CO<sub>2</sub>を排出せざかつ炭素が利用できるシステムが成立する。このプロセスは能動的炭素循環プロセス (ACRES, Active Carbon Recycling Energy System) と定義され検討がおこなわれている<sup>11)</sup>。ACRESを製鉄業、輸送分野などに応用することで炭素の利用が許容され、在来技術を生かせる革新的な CN 産業システムの構築が期待できる。

### 5.3.2 ACRES の産業応用

ACRESを鉄鋼分野へ応用した炭素循環製鉄システム (iACRES, smart Ironmaking based on ACRES) を図9に示す<sup>12)</sup>。現製鉄プロセスでは、原料鉄の酸素分を除く（還元）ために炭素材料、主に一酸化炭素 (CO) が用いられ、純鉄の製造時に CO<sub>2</sub>が発生する。iACRESはゼロカーボンエネルギーを駆動源として CO<sub>2</sub>を回収し、CO などに資源化し循環利用して CO<sub>2</sub>の大気放出なく鉄を還元する究極の CN 技術である。iACRESではゼロカーボンエネルギーが炭素材料、さらに鉄製品へとエネルギー貯蔵されることから、変換された GX 技術とみなすことができる。この技術概念は移動体やほかのエネルギー消費型製造プロセスにも応用可能である。

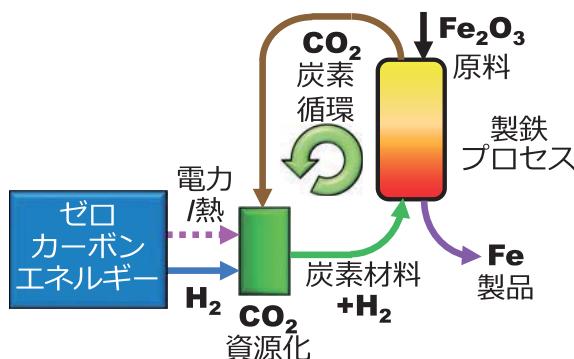


図9 炭素循環製鉄 iACRES の構成

鍵となる GX 要素技術は CO<sub>2</sub>資源化である。さまざまなオプションがある中、ゼロカーボンエネルギーを用いた CO<sub>2</sub>電気分解



が熱力学的に効率的な手段であり、固体酸化物電気分解セル (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC) で実現が可能である。電力を印加することでカソード、アノードから CO, O<sub>2</sub>を個別に製造でき、生成物を iACRES で活用できる。

一方で、課題は大面積化である。構成材料がセラミックス支持のため熱応力に脆弱で面積拡大が困難である。

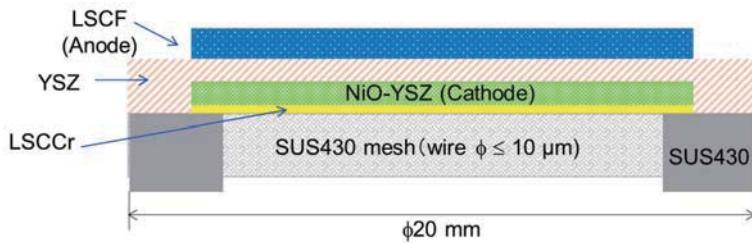


図10 金属基盤支持形固体酸化物電気分解セル (MS-SOEC) の断面構成例

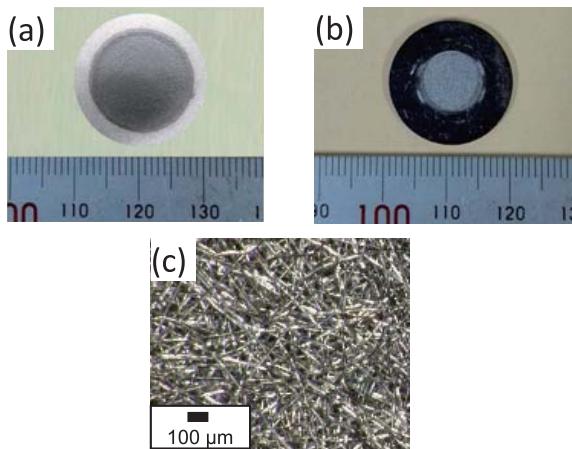


図11 金属基盤支持形固体酸化物電気分解セル (MS-SOEC) 外観

り、最新技術を用いても100mm四方程度が上限である。そこで、金属支持基盤上にSOECを形成した金属基盤支持SOEC (MS-SOEC, Metal Supported-SOEC) が検討されている<sup>13)</sup>。MS-SOECの断面構成を図10に示す。適切な金属材料選択と溶射技術で800°C域までの利用でもセラミックス面が安定的に維持されたCO<sub>2</sub>分解が実証されており、今後セルの大面積化実証が予定されている。作製されたMS-SOEC向けセルを図11に示す。セルの最適化には電極層での物質移動、熱移動、電子移動の最適化を図ることがポイントであるのでセラミックス技術の応用展開が重要である。

## 6. ま と め

CNの実現には、求められる社会ビジョンを構築し、課題を合理的に示し、課題解決のためのGX技術の提示と技術開発が必要である。CNエネルギーの主力電源であるVREの大量導入には、非定常出力を有効に貯蔵するエネルギー貯蔵が重要である。エネルギー貯蔵の一つである蓄熱は、安価で大規模な貯蔵ができる蓄熱温度域が広い化学蓄熱、CHPに可能性がある。その実用化に向けては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不可欠である。さらに、能動的炭素循環エネルギーシステム、ACRESもVREの産業利用のための新たなGX技術である。その炭素循環に必要なCO<sub>2</sub>資源化のためのSOECにはセル材料の高性能化、物質移動・伝熱移動の促進が重要である。MS-SOECに可能性があり、製鉄業、化学産業さらにe-fuels合成などにも活用できる。

GX技術は材料およびその利用システムの最適化が基本である。日本の有する技術は優れており、GX技術への貢献ポテンシャルは国際基準で極めて高く、今後の日本発のGX技術のさらなる進展が期待される。

## 参考文献

- 1) 国際連合広報センター：気候変動についての「思い込み」を検証する  
[https://www.unic.or.jp/activities/economic\\_social\\_development/sustainable\\_development/climate\\_change/un/mythbusters/](https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/climate_change/un/mythbusters/) (2025年8月15日確認)
- 2) 経済産業省：GX（グリーン・トランスフォーメーション）  
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/global\\_warming/index.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/index.html) (2025年4月26日確認)
- 3) 東京科学大学：Science Tokyo GXI  
<https://www.gxi.iir.titech.ac.jp/> (2025年8月15日確認)
- 4) 資源エネルギー庁：令和5年度（2023年度）エネルギー需給実績（確報）（令和7年4月25日公表）  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total\\_energy/pdf/honbun2023fykaku.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/honbun2023fykaku.pdf) (2025年8月15日確認)
- 5) 東京科学大学：Science Tokyo GXI, GXI VISION 2050, “社会的慣性を見越したアフオーダブルな移行でカーボンニュートラルを達成” (2024年9月24日公開)  
<https://www.gxi.iir.titech.ac.jp/research/gxi-vision-2050/> (2025年8月15日確認)
- 6) 電気事業連合会：CO<sub>2</sub>排出実績の分析・評価, CO<sub>2</sub>排出係数（発電端）の各国比較  
[https://www.fepc.or.jp/resource\\_sw/20\\_environment\\_02.gif](https://www.fepc.or.jp/resource_sw/20_environment_02.gif) (2025年8月15日確認)
- 7) 日本経済新聞：太陽光で広がる「電気余り」東北電など出力抑制 (2022年5月6日),  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC0258P0S2A500C2000000/> (2025年8月15日確認)
- 8) 永田真幸, 電力中央研究所, イベリア半島における大規模停電 —— 判明していること・解明が期待されること —— (2025年6月3日)  
<https://criepi.denken.or.jp/koho/seminar/250603/pdf/report.pdf> (2025年8月15日確認)
- 9) S. Funayama, Y. Kato, *et al.*, Maximization of thermal discharge power density of composite foam for thermochemical energy storage using calcium hydroxide and silicon-impregnated silicon carbide, *Appl. Therm. Eng.*, 274 (2025) 126575
- 10) S. Funayama, Y. Kato, *et al.*, Hybrid thermal energy storage system using thermochemical energy storage with calcium hydroxide and molten salt thermocline storage, *Appl. Therm. Eng.*, 238, 121947 (2024)
- 11) Y. Kato, "Carbon recycling for reduction of carbon dioxide emission from iron-making process, *ISIJ Int'l*, vol. 50, No. 1, pp. 181–185 (2010)
- 12) Y. Kato, *et al.*, "Application of Carbon Recycling Iron-making System in a Shaft Furnace", *ISIJ Int'l*, vol. 55, No. 2, pp. 359–364 (2015).
- 13) H. Takasu, Y. Maruyama, Y. Kato: "Development of Metal Supported SOEC for Carbon Recycling Iron Making System", *ISIJ Int'l*, vol. 60, No. 12, pp. 2870–2875 (2020)