

配布版

研究開発テーマ

「再生エネの低コスト蓄エネむけ 高温ケミカルヒートポンプ」

加藤之貴

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
yukitaka@zc.iir.isct.ac.jp



NEDO先導研究プログラム
RFI情報提供者によるVIP(ビジョナリー・インキュベーション・プログラム)ワークショップ
省エネルギー分野
2025/5/23 10:15～10:35 JA共済ビル9F(ハイブリッド開催)

達成すべき技術課題、技術開発の必要性: 再生エネと低コスト蓄エネ

再生エネ普及のための出力制御の克服

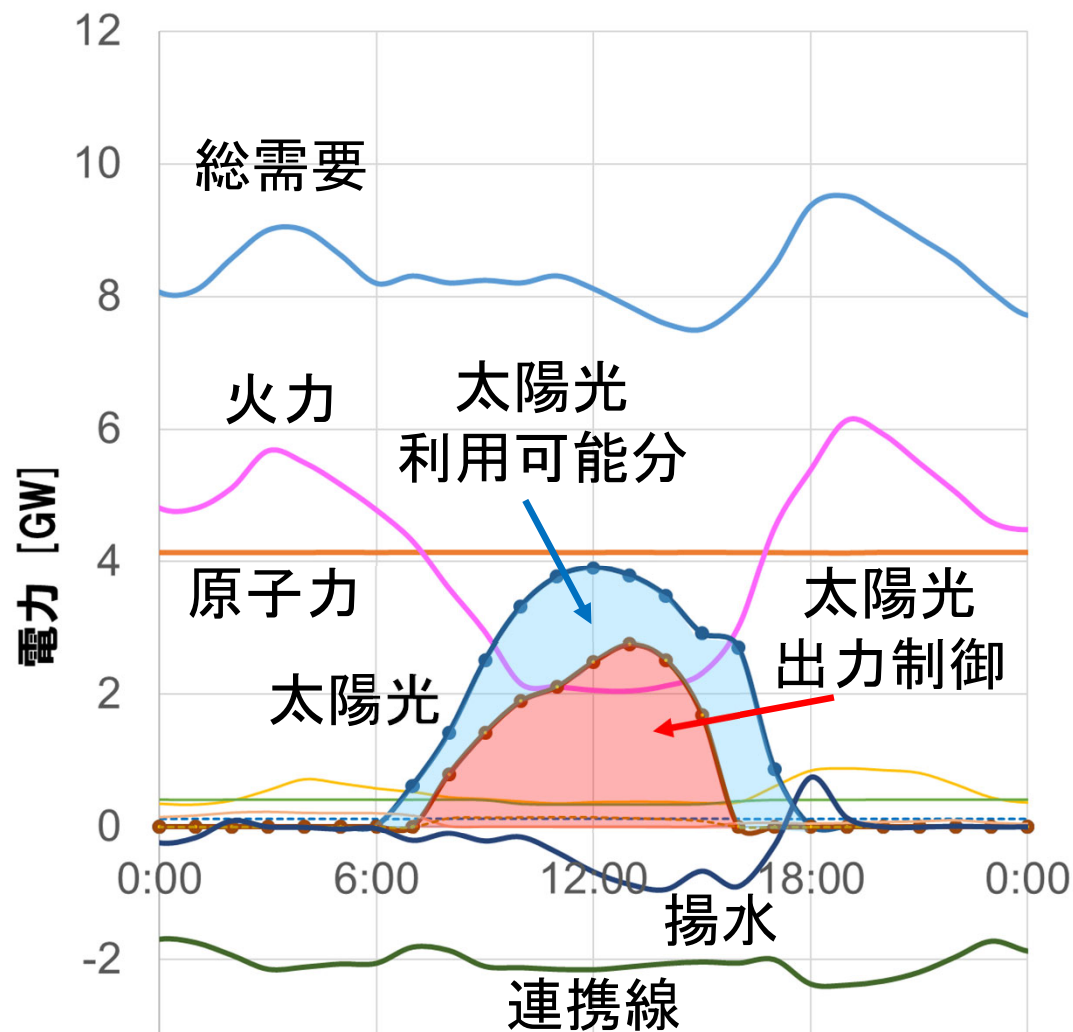


Fig. 国内の太陽光発電の出力抑制例^[1],
2020年3月

- ✓ 再エネ普及には余剰再エネの出力制御の回避が必須
- ✓ 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

太陽光発電の**出力制御**が増大（九州、四国、中国、北海道。九電は2024年で 総電力6.1%, 10億kWe, 電力約200億円相当）^[2]

- ◆再エネ利用が困難
- ◆タービンが担ってきた**慣性力の不足**による電力の質の低下^[4]
- ◆**再エネ=蓄エネ**
- ◆電池以外、かつ**慣性力を有した低コストエネルギー貯蔵**の研究

[1] 九州電力、https://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0254/3848/area_jyukyu_jisseki_2019_4Q.csv

[2] METI, 再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について, 2024/03/11

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/050_01_00.pdf

✓ 蓄熱技術を導入した低コスト・安全蓄エネ

P2H2X: Power to
Heat to Power/Heat

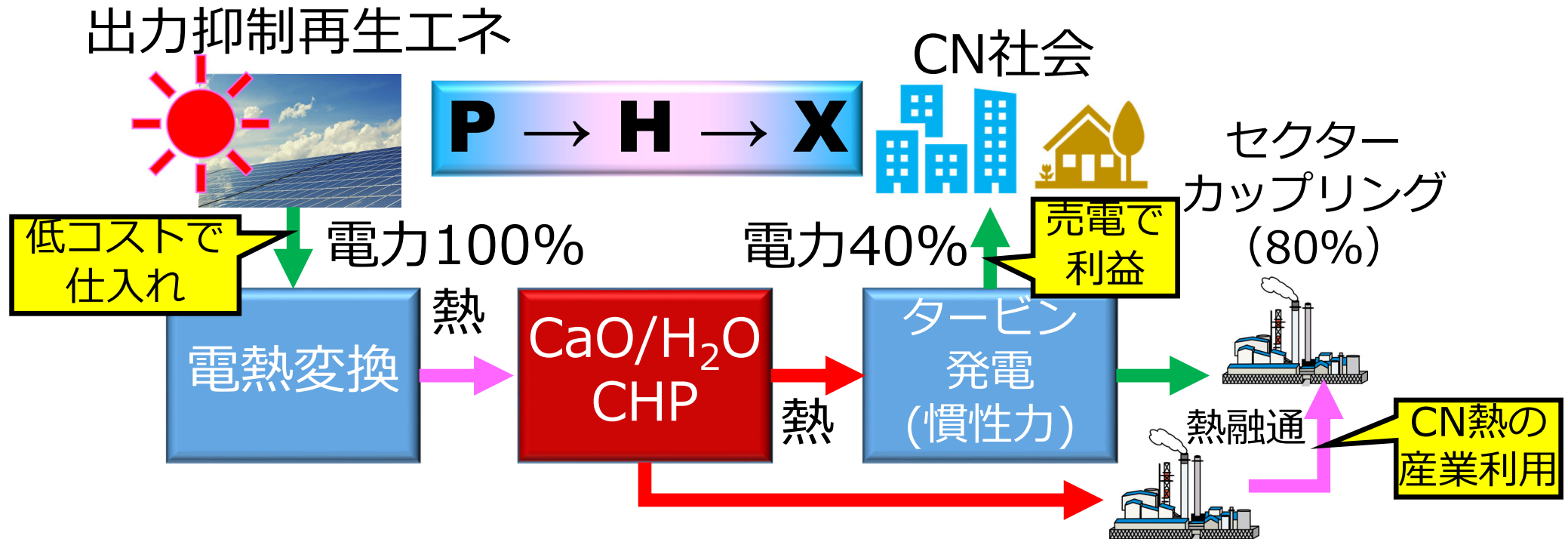


図1 電力蓄熱発電システム(P2H2P)の基本構成

CHP: Chemical Heat Pump

1. 出力制御再生エネを低コストで仕入れ、需要時に売電できる。再生エネ活用を促進。
2. 蓄電池より**低コスト、安全、大規模向け**にスケールアップが容易な蓄エネ発電システム
3. タービン発電を有するため、電力供給に**慣性力がある**。
4. **高温熱の産業直接利用**による高効率利用、セクターカップリング利用。

✓第7次エネルギー基本計画で、「蓄熱」の電力貯蔵、コージェネに向けての必要性が示された。

第7次エネルギー基本計画(2025/02)[1]

(5) 次世代電力ネットワークの構築

③系統・需給運用の高度化

(イ) 蓄電池・デマンドリスポンス(DR)の活用促進

今後、製造事業者等に対して目標年度までにDR ready機能を具備した製品の導入を求める仕組みの導入、スマートメーターのIoTルートを利用したDR実証、蓄電・蓄熱等を活用した電力貯蔵システムやコージェネ、負荷設備、蓄熱層等のDERを活用したアグリゲーションビジネスの促進等を行い、DRの更なる普及を図ることが必要である。

[1] METI, 第7次エネルギー基本計画, 18 Feb, 2025

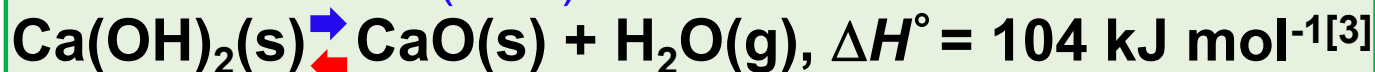
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf

**技術開発の概要、優位なポイント、技術開発は
どの段階（TRL等をご参考）にあるか：
高温ケミカルヒートポンプの開発**

CaO/H₂Oケミカルヒートポンプ

酸化カルシウム/水(CaO/H₂O)系 化学蓄熱・ケミカルヒートポンプ^[1,2]

脱水反応(吸熱)

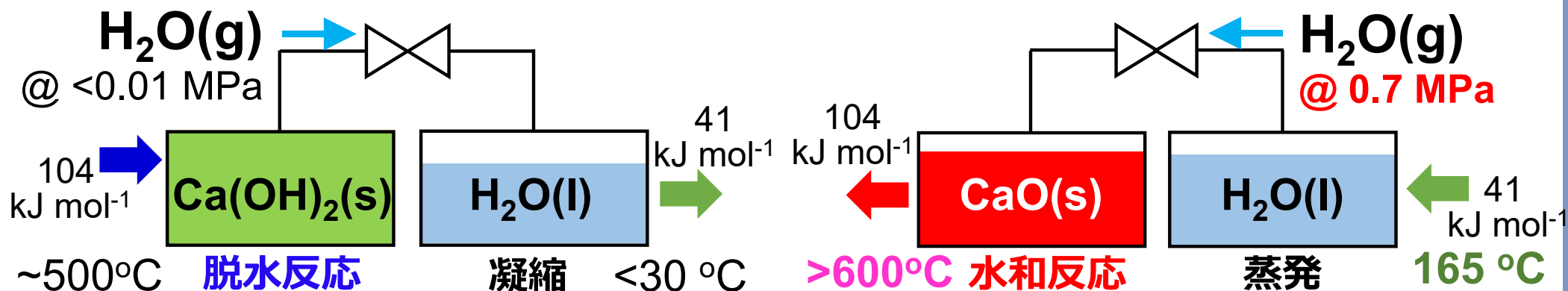


水和反応(発熱)



CaO資源分布[7]

蓄熱過程



1. 蓄熱: 400-600 °C^[4]、蓄熱密度: 1.4 MJ / kg-Ca(OH)₂^[5] → 岩石蓄熱の4倍以上
2. ヒートポンプ: 500°C熱を600°C以上に昇温 (ヒートポンプ) して出力
3. 長所: 材料コスト小(19 円/kg-Ca(OH)₂^[6]), 反応性高, 環境負荷小

[1] Ervin, G., *J. Solid State Chem.*, 22(1977), 51-61, [2] Kanzawa, A., Arai, Y., *Sol. Energy*, 27(1981), 289-94, [3] Halstead, P. E., Moore, A. E., *J. Chem. Soc.*, 1957, 3873-5, [4] Carrillo et al. *Chem. Rev.* 119(2019), 4777-816. [5] André L et al., *Renew. Sustain Energy Rev.*, 64(2016), 703-15. [6] 経済産業省生産動態統計 2024年6月分確報. [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Karst>

繰り返し反応耐久性を有したCaO材料

1. 反応層中CaO材料のさらなる凝集抑制
2. CaO粒子に対しナノメートルオーダーのSiO₂表面処理を行い、CaO粒子間の凝集抑制を行う*。0.6 wt%の添加で高い繰り返し反応性を実証^[1]。
3. 材料の反応速度論的解析を行うため熱天秤システムで検討。
4. 500回までの繰り返し耐久性実証を目指す。

* 表面処理は有機溶媒に分散させたテトラエトキシシラン（TEOS）とシランカップリング剤（bis(3-triethoxysilylpropyl) pertetrasulfide）をCaCO₃粒子表面に修飾

[1] Rui Guo, Kato, *Energy Storage*, 2021;3:e232.

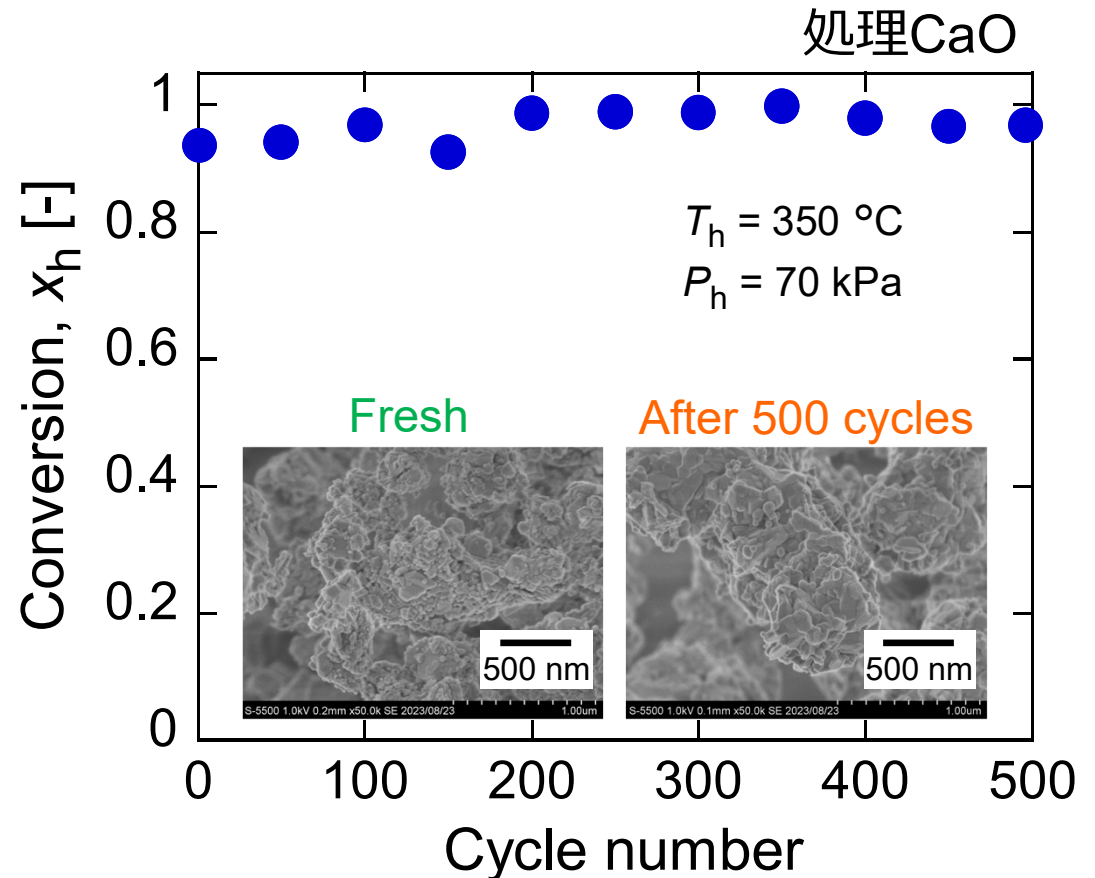
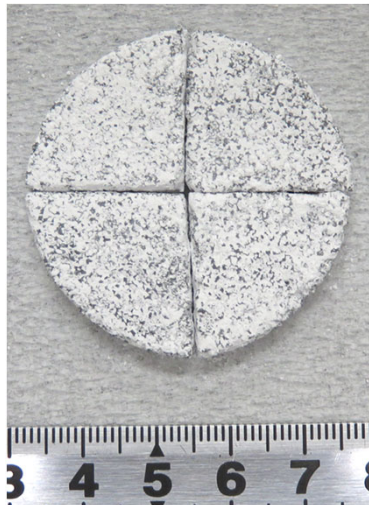
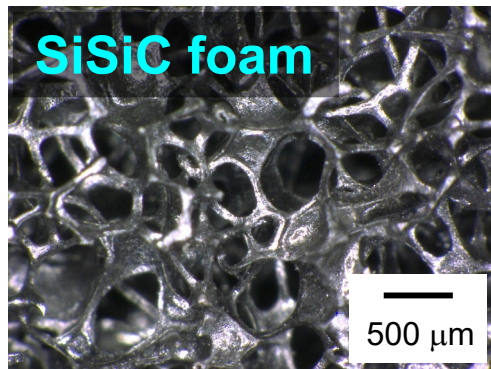


図 繰り返し500サイクル実験の水和転化率推移

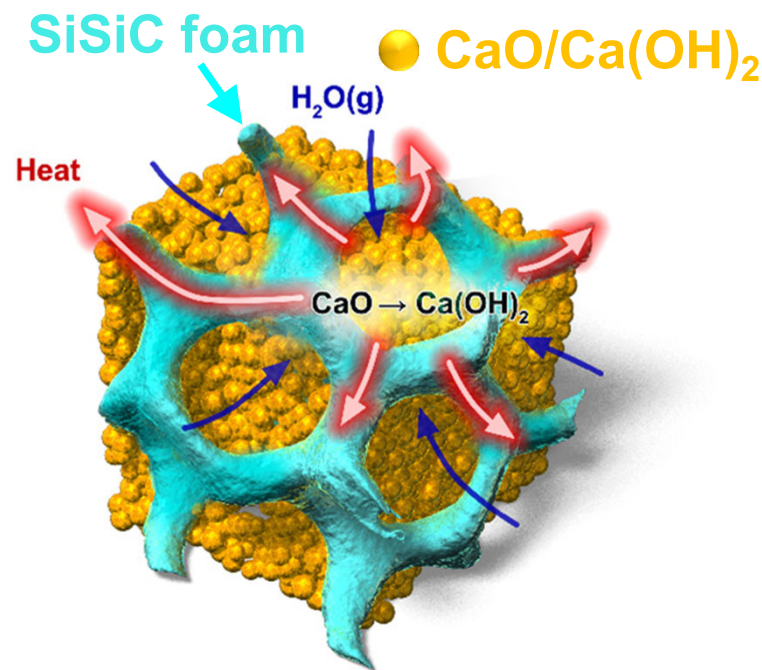
➤ 熱天秤を用いた脱水・水和500サイクル実験により、高い反応性が維持されることが示された

SiC/CaO複合蓄熱ブロックの開発

1. シリコン含浸炭化ケイ素(SiSiC)フォーム及びハニカムとCaOの複合化
 - ✓ 高熱伝導度、材料の高い繰り返し耐久性、高反応性、高出力化。
 - ✓ 体積膨張・凝集塊形成をSiSiC内で抑制



複合材料 [1]



Ca(OH)₂+SiSiC foam複合材料^[2]

[1] Funayama, Kato, *et al.*, *Energy Storage*, 1, e53 (2019).

[2] Funayama, Kato, *et al.*, *Appl. Therm. Eng.*, 220 (2023), 119675.



図1 小型充填層型化学蓄熱実験装置^[2]

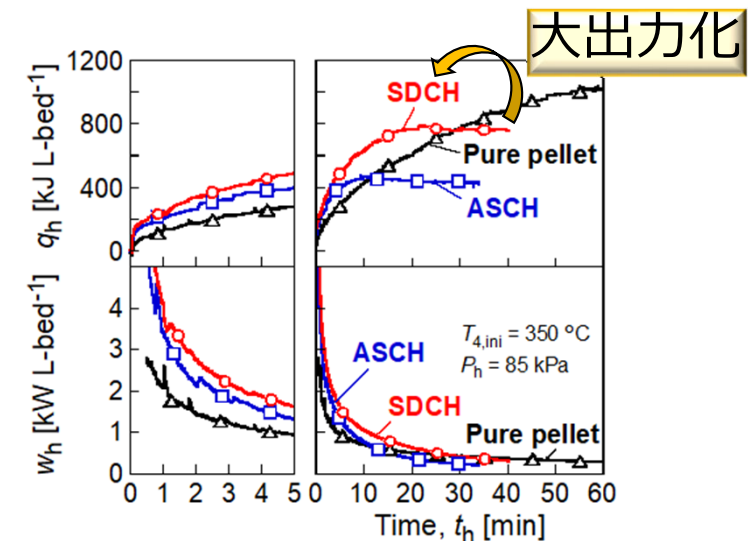


図2 複合化学蓄熱ピースの熱出力速度. 比較参照材料として単体CaOペレットを使用^[1]

複合蓄熱ブロックと化学蓄熱反応器

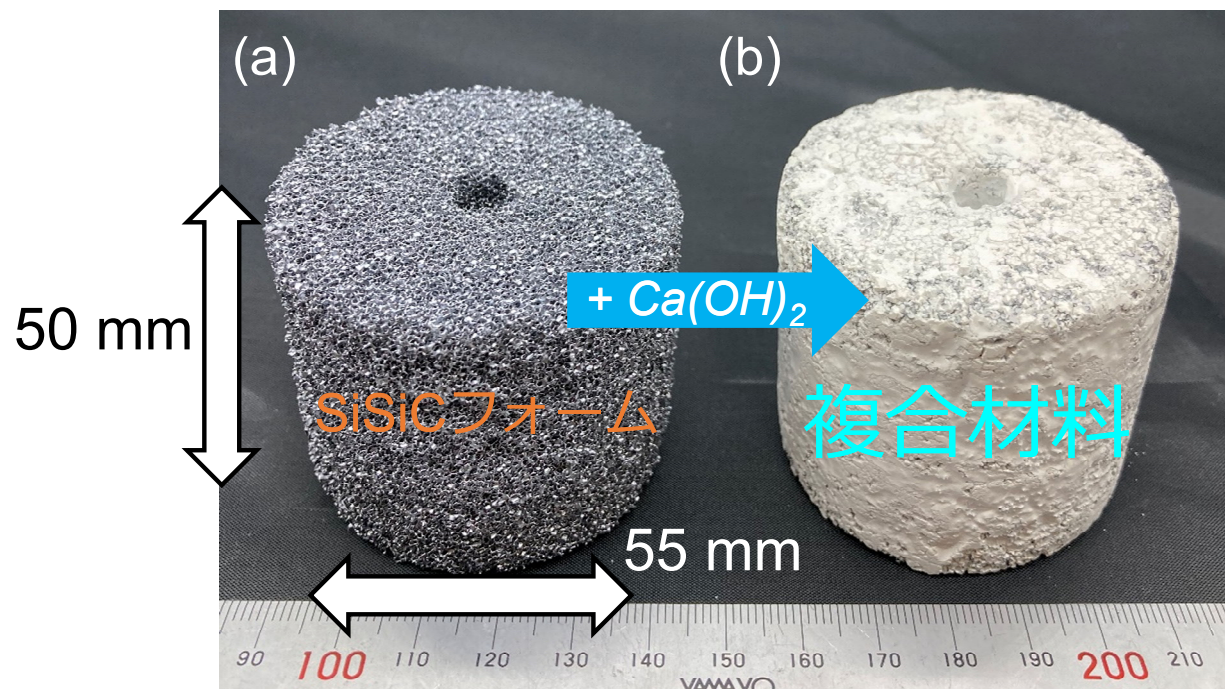
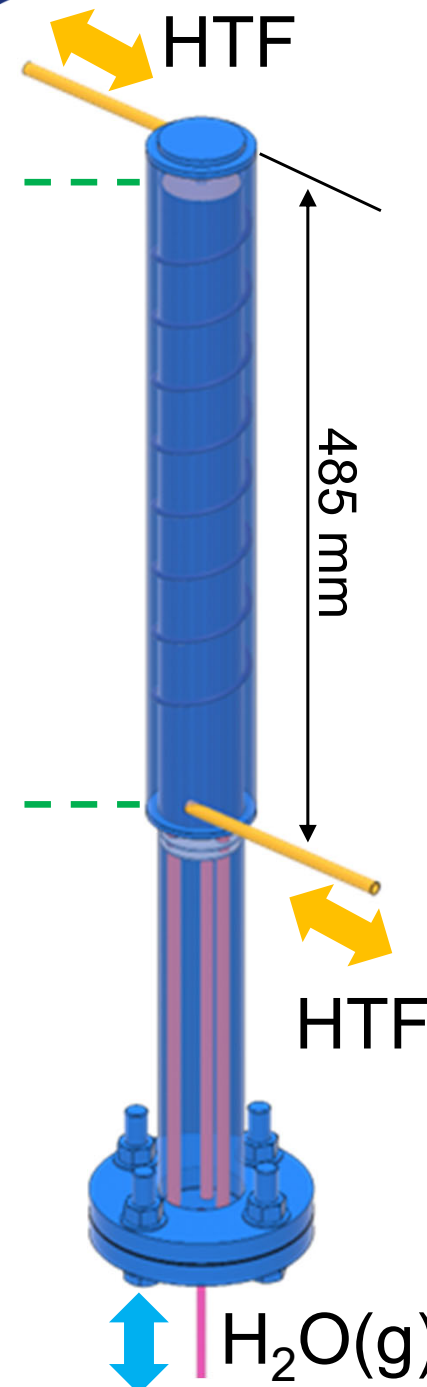


図1 材料写真: (a) SiSiCフォーム担体;
(b) 複合材料ブロック

1. 高熱伝導率($180 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)のSiSiCフォームとの複合化
2. 低粘度 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ スラリーを真空含浸によりフォーム内に導入
3. 蓄熱密度: $1.06 \text{ MJ L}_{\text{material}}^{-1}$ を達成

複合材料10ブロック



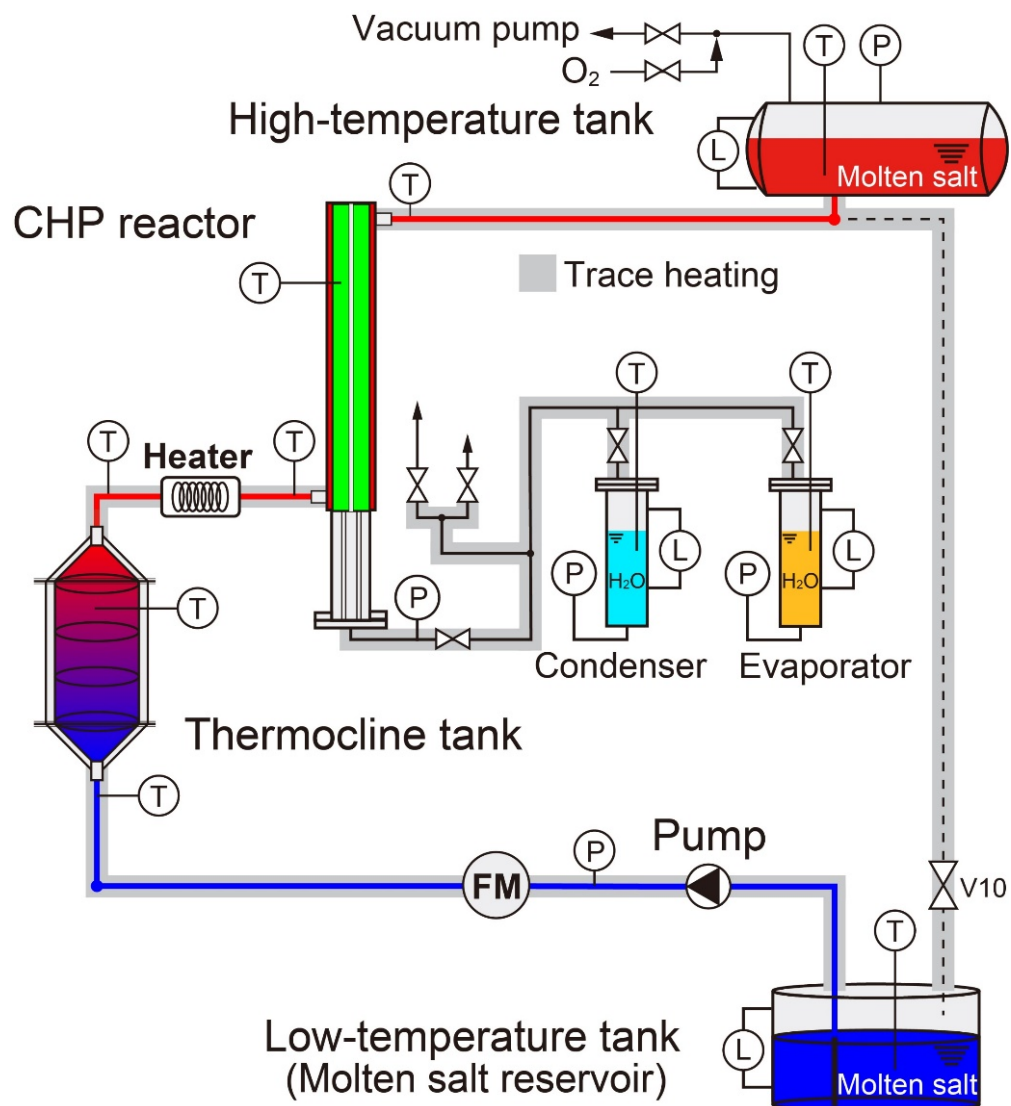


図1 システムフロー図

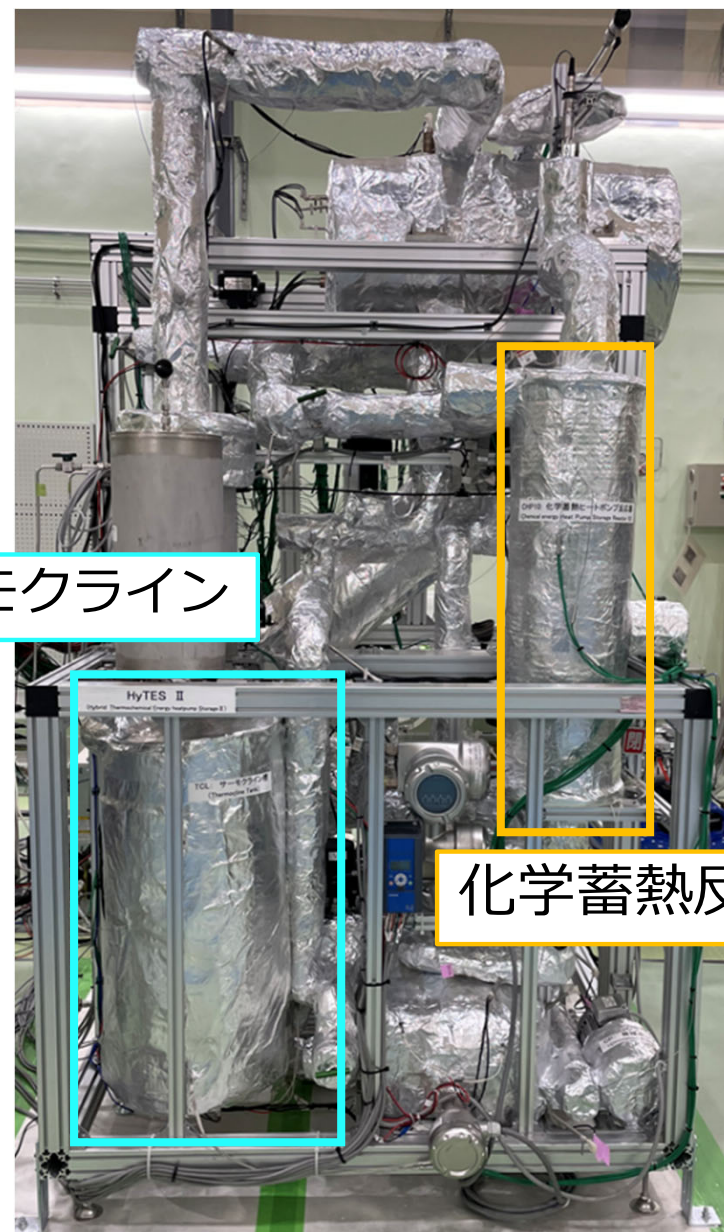


図2 装置外観

CHP反応器の2D数値解析例

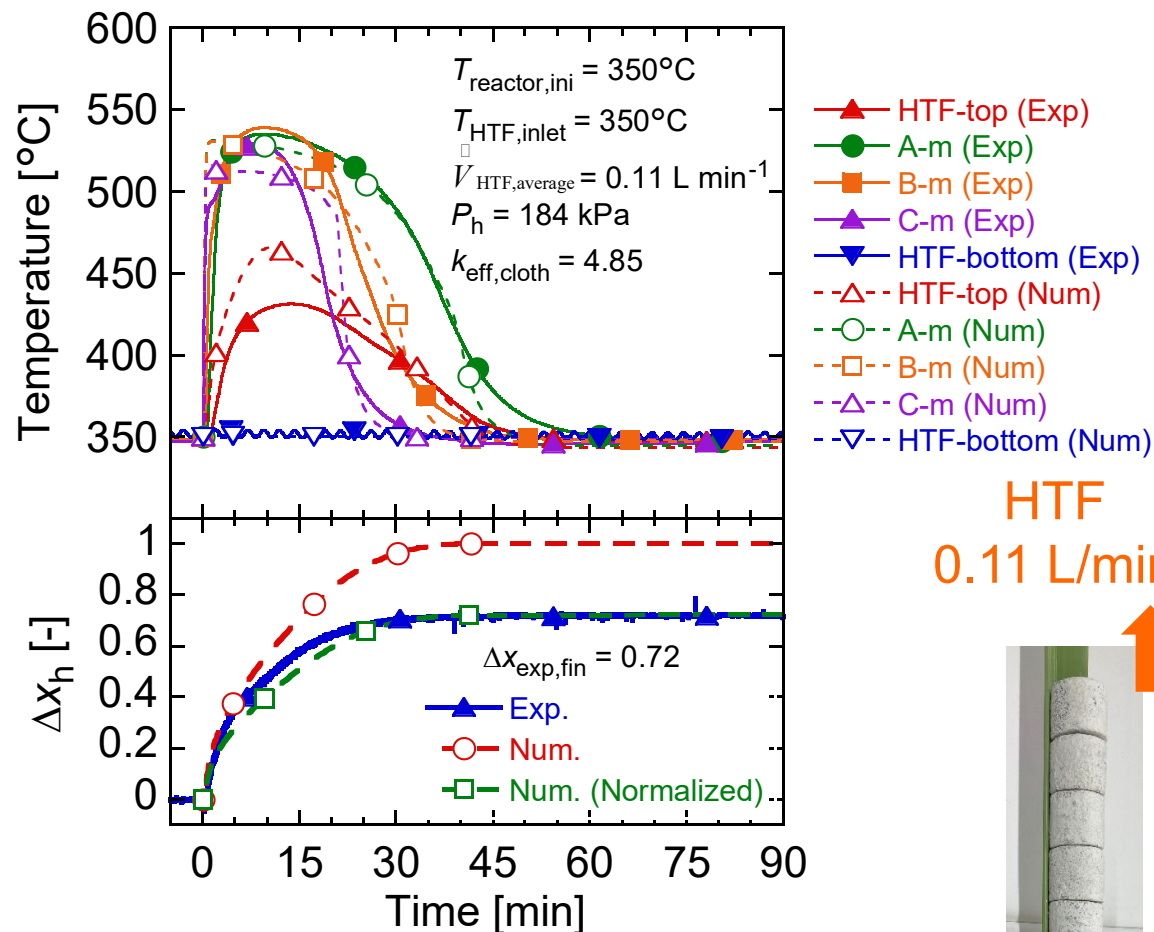


図1 水和反応の数値解析結果

数値解析結果は実験結果と良い一致を示し、**数値モデルの妥当性を確認**

水和転化率

温度

時間=0 min

HTF
0.11 L/min

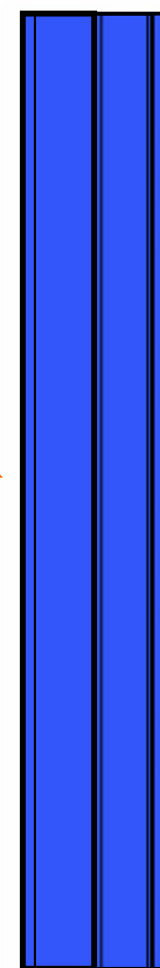
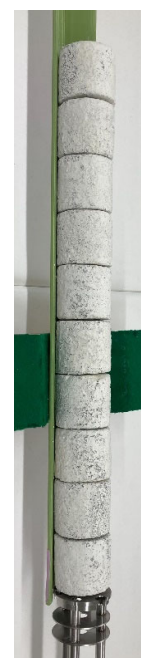


図2 水和反応の数値計算例

世界初

(1)反応層温度出力600 °C以上、昇温幅100 °C以上のケミカルヒートポンプ操作が可能（世界一）。(2)顕熱蓄熱からの変動出力温度を高温で一定で出力できる。→(3)P2H2Pのエネルギー変換効率が向上

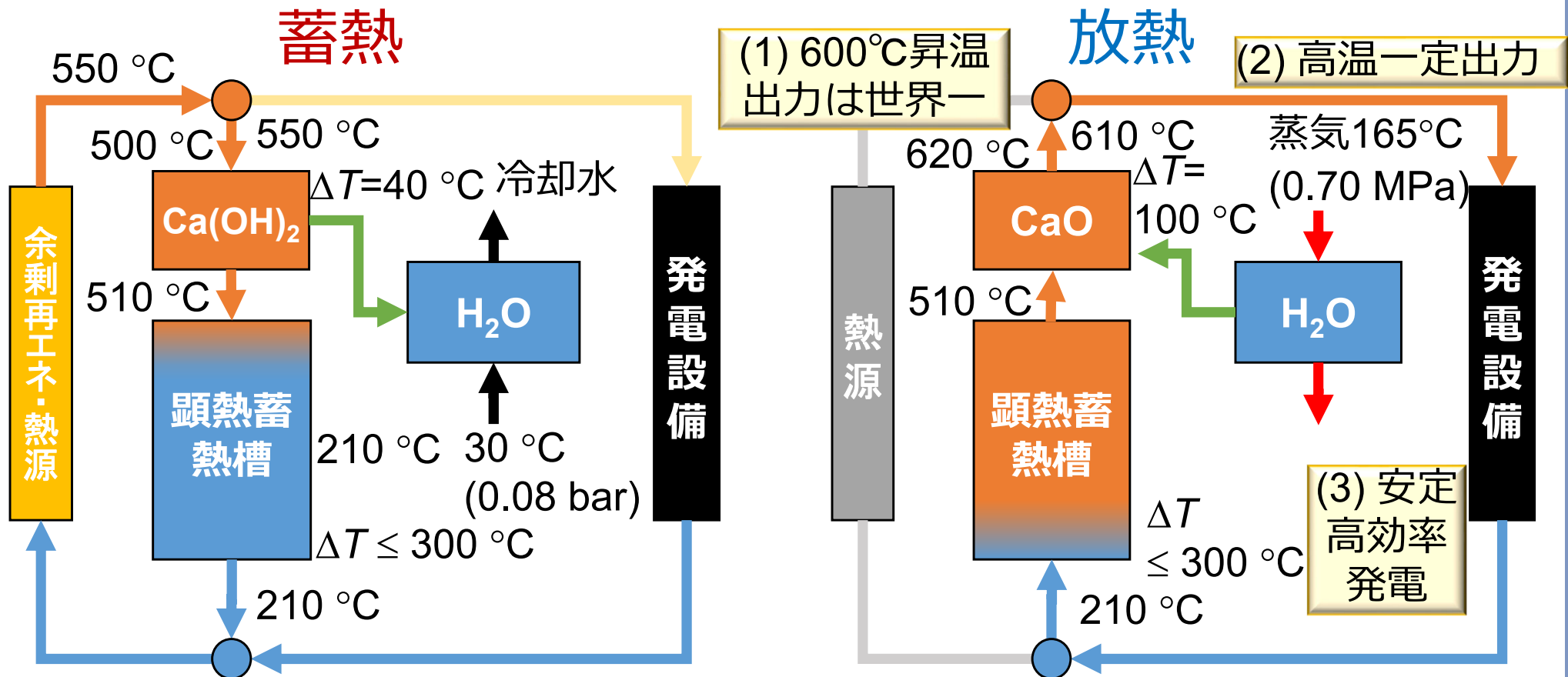


図 Hybrid thermal energy storage system, HyTES

目指すべき社会像（社会実装のイメージ、シナリオ、ロードマップ等）：
波及効果、インパクトの試算

敷地面積基準で、顕熱蓄熱はNAS蓄電池の半分以下

顕熱蓄熱

溶融塩タンク(H14m x
D36 m)、2基と蒸気
タービン発電

375 MWh

5,600 m²

(= 40 x 140 m)

太陽熱発電プラント(50
MWe)の溶融塩顕熱蓄熱
+蒸気発電システム,
Andasol, Spain[1]

蓄電池

顕熱蓄熱

NAS電池

NAS電池のコンテナ収
容による設置

300 MWh

14,000 m²

(= 100 x 140 m)

NAS大型蓄電システム,
九州電力[2]

NAS電池、50 MWe、300 MWh-
e/day、180億円(6万円/kWh、
2020家庭用目標価格)

図 NAS電池大型システムと顕熱蓄
熱発電システムの敷地面積の比較

[1] NREL, Andasol 1 CSP Project, <https://solarpaces.nrel.gov/project/andasol-1>

[2] 九州電力株式会社, 豊前蓄電池変電所における大型蓄電システムによる需給バランス改善実証の成果について, (2018)

http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/180320/180320_3.pdf

表 大規模再エネに対する蓄エネ技術比較

蓄エネ手法	蓄電池	蓄熱	水素
蓄電	充電	加熱	水電解
貯蔵形態	電池	蓄熱材	圧縮水素
発電	放電	蒸気タービン	燃料電池
コスト	270 \$/kWhe[1]	100 \$/kWhe[2]	312 \$/kWhe[1]
慣性力	×	◎	×
貯蔵安全性	△	◎	×
大規模化	○	◎	△
装置製造国	×海外輸入	◎国産	◎国産

1. 蓄熱はコスト、発電の慣性力、安全性で大規模蓄エネに適している
2. 蓄熱は電気・熱両利用（セクターカップリング）を行うことで熱利用効率がより高く、社会実装性が高い

[1] Mongird et al., 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment, Technical report, U.S. Department of Energy, <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>

[2] 藤井祥万, 試算報告

表 広域系統長期方針での系統増強の費用便益評価^[3]

分析項目	シナリオ	需要立地誘導シナリオ	ベースシナリオ
系統増強の投資額※1 (NW増強コスト※2)		約6.0～6.9兆円 (約0.55～0.64兆円/年)	約6.0～7.0兆円 (約0.55～0.64兆円/年)
費用便益比 (B/C)		0.6 ～ 1.2	0.7 ～ 1.5
年間便益 (純便益 (B-C))		約3,200 ～ 5,800億円/年 (約▲3,200～300億円/年)	約4,200 ～ 7,300億円/年 (約▲2,200～1,800億円/年)
燃料費・CO2コスト削減		約3,200 ～ 6,100億円/年	約4,100 ～ 7,400億円/年
送電ロス		約▲590～▲350億円/年	約▲430～▲250億円/年
アデカシー便益※3		約330億円/年	約310億円/年
CO2削減量		約870万t/年	約2,430万t/年
再エネ比率※4		49% (50%)	47% (50%)
再エネ出力制御率※4 (増強後、太陽光・風力)		10% (7%)	12% (7%)

✓日本の2050年長期展望シナリオでは、電源構成に再エネ50%導入。
 ✓再エネ出力制御が12%程度,72 TWh,まで見込まれ。出力制御の克服はCO₂排出量3100万ton-CO₂/yの削減, 電気料金(家庭向け)2.4兆円/yの発電相当の環境・経済効果が予測される。

- 太陽光発電の出力制御が増大（九州、四国、中国、北海道。九電は2024年で 総電力6.1%, 1 TWh(10億 kWh), 電力約200億円相当) ^[2]

[1] 九州電力、https://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0254/3848/area_jyukyu_jisseki_2019_4Q.csv

[2] METI, 再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について, 2024/03/11

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene/shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/050_01_00.pdf

[3] 参考：OCTO, 広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）概要, 2023/03/29,

https://www.occto.or.jp/kouikikeitou/chokihoushin/files/chokihoushin_23_01_03.pdf

METI, 広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）（案）、2023/02/09

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/049_s03_00.pdf

1. 低炭素社会実現に向けて再生可能エネルギーの主電源化には。大量の余剰電力を電池より安価，安全に貯蔵する技術が求められ，熱貯蔵（蓄熱）に可能性がある。化学蓄熱・ケミカルヒートポンプは高密度かつ熱損失少なく蓄熱ができ候補である。
2. 酸化カルシウム/水系を用いた高温蓄熱・ケミカルヒートポンプ技術を開発し、小型充填層反応器にて、500℃温熱の蓄熱、600℃以上への昇温をするヒートポンプ熱出力を世界初で実証した。
3. 材料は国産で賄え、蓄電池に対して安価，安全で、設置面積も半減できる。
4. 開発では反応器のスケールアップ実証を行い、社会実装に向けた高効率な反応器，ケミカルヒートポンプ再生エネ蓄熱システムの実用化を目指す。
5. 蓄電池，水素電解・発電システムに対して低コスト・安全で、産業プラントに広く適用できる。日本の2050年の推定出力制御量70TWh／年、電気料金2兆円／年相当への対策となり、再エネ活用による産業プラントのカーボンニュートラル化に貢献できる。

ご指導ご鞭撻よろしくお願い致します。

加藤 之貴、東京科学大学

E-mail: yukitaka@zc.iir.isct.ac.jp

Phone: 03-5734-2967