



# 蓄エネルギー技術としての 蓄熱技術の新展開

北海道大学大学院工学研究院  
附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター  
能村貴宏

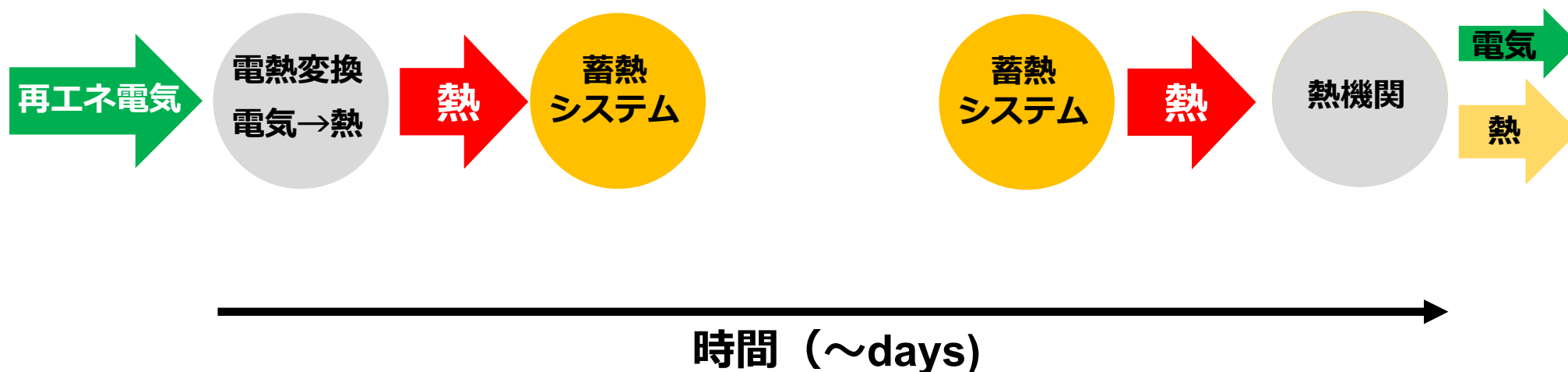
- 蓄エネ技術としての蓄熱技術～カルノーバッテリー/蓄熱発電～
- 国外の技術開発動向
- 国内の技術開発動向
- 日本での開発促進、早期実装、普及促進に向けて
- 北海道大学における先進的蓄熱研究
- まとめ

- 蓄エネ技術としての蓄熱技術～カルノーバッテリー/蓄熱発電～
- 国外の技術開発動向
- 国内の技術開発動向
- 日本での開発促進、早期実装、普及促進に向けて
- 北海道大学における先進的蓄熱研究
- まとめ

蓄熱とは、熱を貯めて、運んで（時間的 or 空間的）、使う技術。



蓄エネ技術としての蓄熱とは、  
変動性再エネ電気を「熱」として貯めて、運んで（時間的）、使う技術。



## 「蓄熱」がエネルギー基本計画に初めて記載された 2025年は21世紀における「蓄熱元年」！

### 第七次エネルギー基本計画

#### V. 2040年に向けた政策の方向性

##### 3. 脱炭素電源の拡大と系統整備

##### (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

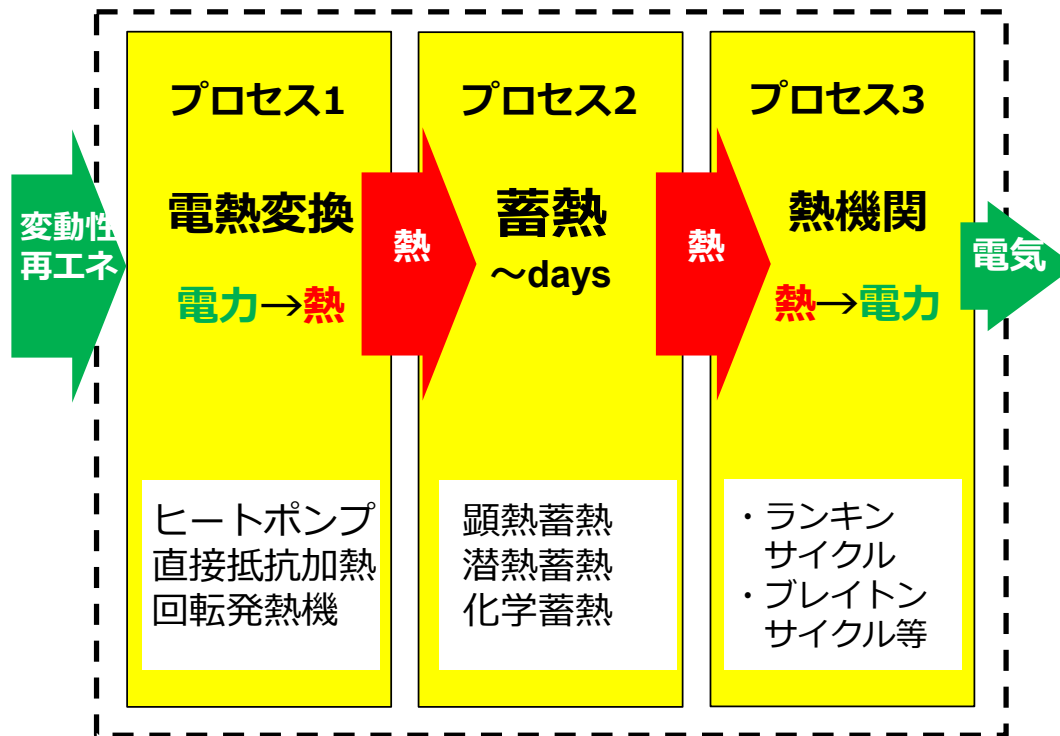
蓄電池やヒートポンプ給湯機、コージェネレーション等の分散型エネルギーリソース（DER30）の普及等に伴い、これらを活用したDRも進展している。今後、製造事業者等に対して目標年度までにDR ready機能を具備した製品の導入を求める仕組みの導入、スマートメーターのIoTルートを利用したDR実証、蓄電・蓄熱等を活用した電力貯蔵システムやコージェネレーション、負荷設備、蓄熱槽等のDERを活用したアグリゲーションビジネスの促進等を行い、DRの更なる普及を図ることが必要である。また、DERの活用にあたっては、地産地消による効率的なエネルギー利用や災害時のレジリエンス強化等にも資する地域マイクログリッドが重要である。今後は、一部の地域で見込まれる系統混雑の緩和等に向けて、技術的な実現可能性を追求していく。

# カルノーバッテリー/蓄熱発電～蓄エネ技術としての蓄熱～

7

再エネ由来の余剰かつ使用困難な「電力を一旦、熱に変換」し、「中～大規模の蓄熱システムにて貯蔵＝蓄熱」し、貯蔵した熱を使って「熱機関にて発電」する“Power-Heat-Power”タイプの蓄エネ技術。

カルノーバッテリーの基本構成



カルノーバッテリー（デモ）の構成例

出典：J. R. Eggers, et al., *Journal of Energy Storage*, 55, 2022, 105780. (Copyright No.: 6082120958397)

# カルノーバッテリーのための蓄熱技術

8

| 蓄熱技術                                                          | 原理等 | 特徴                                                                                                          | 蓄熱材料                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>顕熱蓄熱</b><br><b>(固体/液体)</b><br>$\sim 0.5 \text{ GJ m}^{-3}$ |     | <ul style="list-style-type: none"> <li>産業（固体顕熱）や太陽熱発電（熔融塩顕熱）で実績あり</li> <li>原料が極めて安価</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>固体系<br/><b>岩石、砂、煉瓦等</b></li> <li>液体系<br/><b>熔融硝酸塩</b></li> </ul>                           |
| <b>潜熱蓄熱</b><br>$\sim 2 \text{ GJ m}^{-3}$                     |     | <ul style="list-style-type: none"> <li>高蓄熱密度</li> <li>一定温度での高温熱供給</li> <li>原料が安価</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Al-Si合金</b>など</li> </ul>                                                                |
| <b>化学蓄熱/</b><br><b>吸着蓄熱</b><br>$\sim 2 \text{ GJ m}^{-3}$     |     | <ul style="list-style-type: none"> <li>高蓄熱密度</li> <li>原料が極めて安価</li> <li>長期間の熱貯蔵可能<br/>* 季節間蓄熱も可能</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><b>CaO</b>など<br/><math>\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca(OH)}_2</math></li> </ul> |

圧倒的  
資源優位性

基本材料は  
存在/開発済

システム開発  
が最重要

# カルノーバッテリー/蓄熱発電の優位性

9

## カルノーバッテリー（CB）の主な特徴\*

- **LDESに適した貯蔵期間** : 8 to 72<sup>+</sup> hours
- **立地制約がない**
- **スケールメリット大（性能&コスト）**
- **低コスト** : < \$ 100/kWh<sub>e</sub>も視野  
(単位蓄エネ容量あたりのCAPEX)
- **長期耐用年数** : > 30 years
- **慣性力** : 「熱機関」を利用することに起因する最大のメリット
- **出力(kW) と貯蔵量 (kWh) を独立に設計可**
- **熱電併給（コジェネレーション）が可能**

## CBとLIBの諸特性比較\*

|                 | CB                              | LiB        |
|-----------------|---------------------------------|------------|
| P2P効率           | ≤ 40% (ETES*)<br>≤ 65% (PTES**) | ≥ 85%      |
| 総合効率<br>(熱利用含む) | ≥ 90%                           | ≥ 85%      |
| 蓄エネ期間           | 8 - 72 <sup>+</sup> h           | 0-6 h      |
| スケール効果          | 顕著に大                            | 小          |
| 寿命              | ≥ 30年<br>*別用途で実績あり              | 10-15年程度   |
| 高温環境下での稼働       | ○                               | ×          |
| 慣性力             | ○                               | △          |
| ブラックスタート        | ×                               | ○          |
| 熱利用             | ○                               | ×          |
| 資源リスク           | 無し                              | Li/Co/Rhなど |

\*ETES: Electro-thermal energy storage (電熱変換にヒーター使用)

\*\*PTES: Pumped thermal energy storage (電熱変換にヒートポンプ使用)

- 蓄エネ技術としての蓄熱技術～カルノーバッテリー/蓄熱発電～
- 国外の技術開発動向
- 国内の技術開発動向
- 日本での開発促進、早期実装、普及促進に向けて
- 北海道大学における先進的蓄熱研究
- まとめ

# カルノーバッテリー/蓄熱発電に関連する国際的な動き

11

## IWCB (International Workshop on Carnot Batteries)

- CBに特化した国際会議
- CB開発の機運が高まった  
2018年から二年毎に開催
- **2028/29年にはCB標準仕様が決まる**との発言も。

参考：3rd IWCB 発表資料など



Prof. Thess  
CBの提唱者

AGENDA

TUESDAY, September 27, 2022

WEDNESDAY, September 28, 2022

## LDES (Long duration energy storage) 協議会

- LDESに関する協議会。  
COP26で発足
- 蓄熱は**LDESの最重要技術として位置づけ**
- LiBやH<sub>2</sub>に対して**8~150hの蓄エネで優位との試算も**



50+機関、19カ国の参加

参考：LDES Council ホームページ/3rd IWCB 発表資料より <https://www.ldescouncil.com/> (2023年8月27日アクセス)

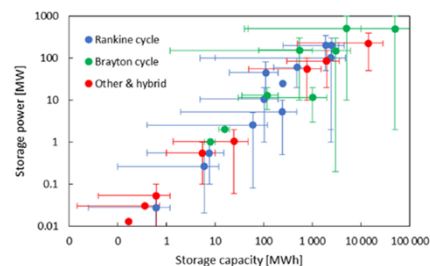
## IEA ES Task 36 (2020-2022)

~Carnot Batteries ~

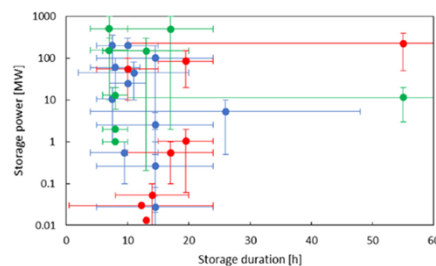
- IEAエネルギー貯蔵協カプログラムの国際共同研究活動
- CBに関する技術情報プラットフォーム確立の試み

### 世界のCB関連プロジェクトのまとめ例

Storage Power [MW] vs Storage Capacity [MWh]



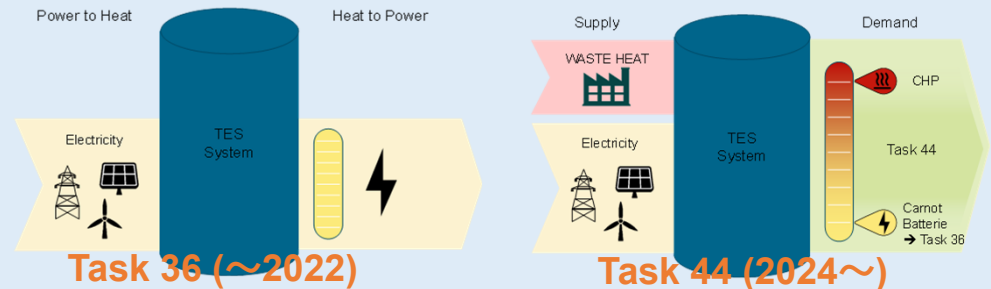
Storage Power [MW] vs Storage Duration [h]



## IEA ES Task 44 (2024-)

~Power-to-Heat & Heat integrated Carnot Batteries  
FOR (Industrial) Heat and power Supply~

- P2Hにもフォーカス。Use caseの良否を定量的に評価可能なモデルを開発予定。

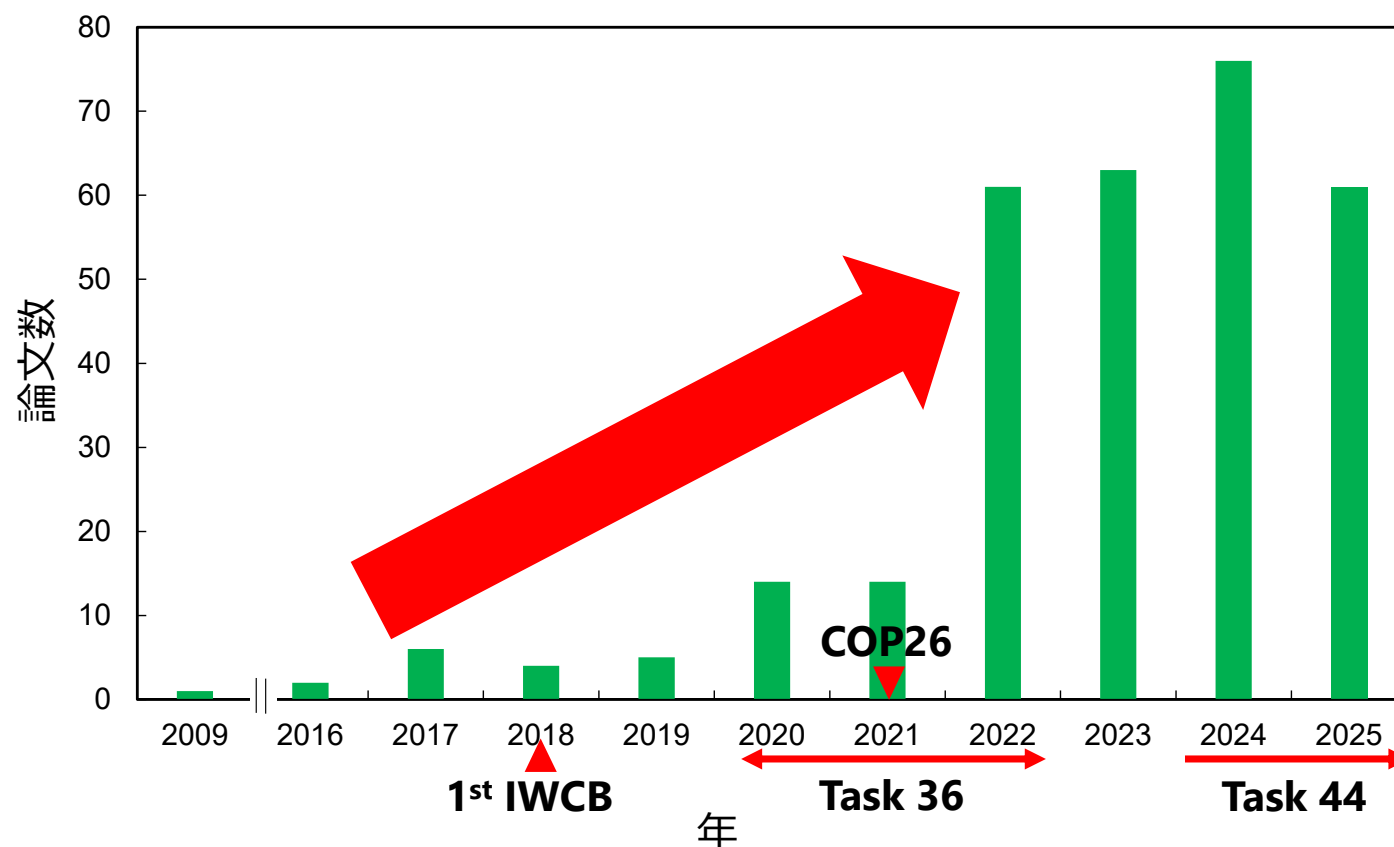


# カルノーバッテリー/蓄熱発電関連論文の推移

12

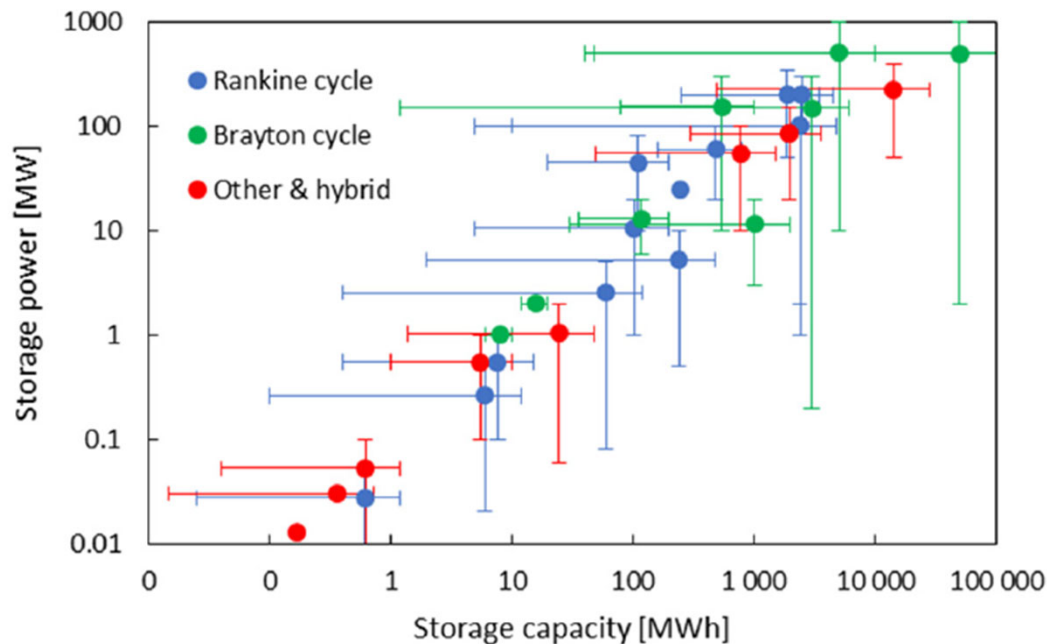
2022年以降、関連論文が急激に増加。蓄熱関連のHot topicとして世界中で認知。

\* Web of Science にて“Carnot Battery” “Carnot Batteries” “Pumped thermal energy storage” “Electro-thermal energy storage”をOR検索。

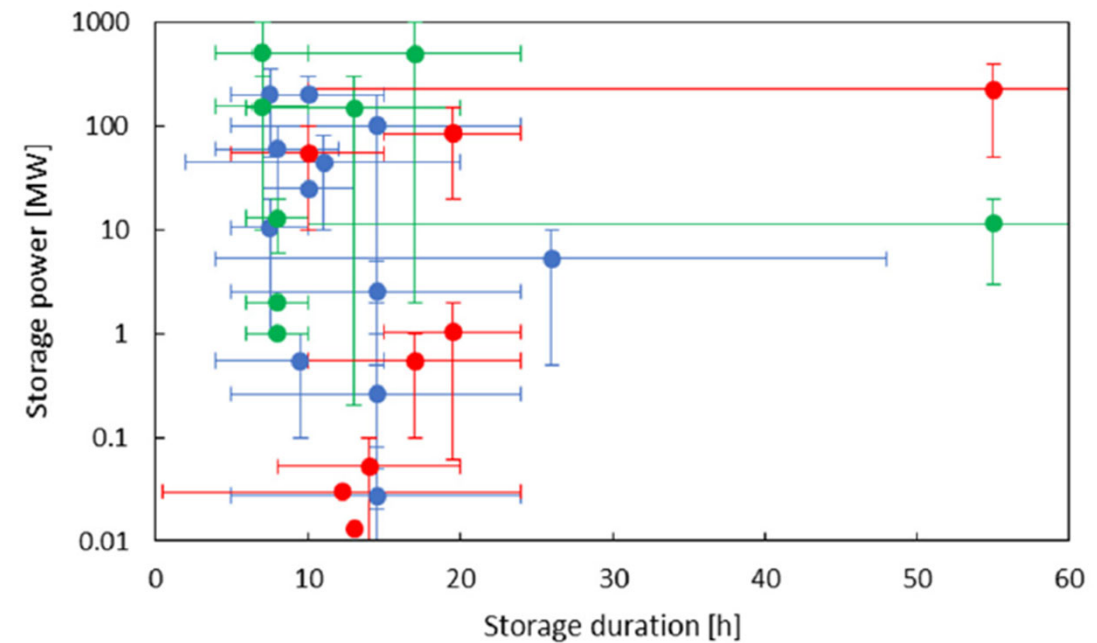


## 実機で想定（またはPJで実施）されている出力/容量/蓄エネ時間

出力[MW] vs 容量[MWh]



出力[MW] vs 蓄エネ時間 [h]



- 100 MW程度の出力を狙った開発PJ多数。
- 蓄エネ時間として、現状は10～20 h程度にホットスポット。24 hを超える計画も。

# 世界のカルノーバッテリー関連プロジェクト

## MALTA Inc.

| システムの概要 |                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------|
| システムタイプ | ヒートポンプによる電熱変換<br>Pumped thermal Energy Storage (PTES) |
| 現状      | 開発中                                                   |
| 蓄熱方式    | 顕熱蓄熱（高温/低温）                                           |
| 蓄熱材/熱媒体 | 高温側：溶融硝酸塩<br>低温側：冷媒または水                               |
| 蓄熱温度    | 550°C                                                 |
| 発電出力    | 50-500MW（想定）                                          |
| 貯蔵容量    | 8 h以上（想定）                                             |

出典：<https://www.maltainc.com/assets/pdf/Replacing%20Fossil-Fueled%20Combined%20Heat%20and%20Power%20Plants%20with%20Malta%E2%80%99s%20Pumped%20Heat%20Energy%20Storage%20Technology.pdf>

- 溶融塩顕熱蓄熱/低温顕熱蓄熱を用いたPTES（昇温型蓄熱発電）。
- スペインにおける14MWh<sub>e</sub>の商用/実証プラント建設を計画中（2025年6月時点）。

## KYOTO GROUP

| プロジェクトの概要 |                    |
|-----------|--------------------|
| システムタイプ   | ヒーターによる電熱変換        |
| 現状        | 商用                 |
| 蓄熱方式      | 顕熱蓄熱               |
| 蓄熱材/熱媒体   | 溶融硝酸塩              |
| 蓄熱温度      | < 約550°C（推算）       |
| 放熱速度      | <14MW              |
| 貯蔵容量      | 39-104 MWh（モジュール式） |

4 R. Guedez and S. Trevisan  
"I-UPS: Innovative high temperature heat pump for flexible industrial systems"  
IWCB2024 講演資料より

- 溶融塩顕熱蓄熱を利用したPower to Heatシステム。モジュール式で容量増大可能。
- 2022年にKALL Ingredients, Hungaryに導入された。

## Rondo Energy

| プロジェクトの概要 |                                |
|-----------|--------------------------------|
| システムタイプ   | ヒーターによる電熱変換                    |
| 現状        | 実証試験中                          |
| 蓄熱方式      | 固体顕熱蓄熱                         |
| 蓄熱材       | 煉瓦                             |
| 熱媒体       | 空気                             |
| 蓄熱温度      | 最高 1500°C                      |
| 蓄熱速度      | RHB100: < 20MW、RHB300: < 70MW  |
| 放熱速度      | RHB100: 7 MW、RHB300: 20 MW     |
| 蓄熱容量      | RHB100: 100MWh、RHB300: 300 MWh |

- 煉瓦と電気ヒーターによる高温蓄熱。2024年までに200億円以上の資金調達。
- 11件の商用開発プロジェクトを発表。

## ANTORA Energy

\*正確にはカルノーバッテリーとは定義が異なる技術

### プロジェクトの概要

|              |                                           |
|--------------|-------------------------------------------|
| システムタイプ      | ①炭素ブロックの通電加熱による電熱変換<br>②熱光起電力による発電（オプション） |
| 規模/技術成熟度 TRL | Factory tested                            |
| プロジェクト期間     |                                           |
| 蓄熱方式         | 固体顕熱蓄熱                                    |
| 蓄熱材          | 炭素ブロック                                    |
| 熱媒体          | 不活性ガス                                     |
| 蓄熱温度         | 昇温可能な温度/目標：～2400℃<br>現状：100～400℃          |
| 放熱速度         | 460 kW                                    |
| 蓄熱容量         | -                                         |

- 炭素ブロックを蓄熱材に採用。現状100～400℃程度の出力で産業熱利用を想定。
- モジュールを連結することで大容量化も可能。

# 参考：世界のカルノーバッテリー関連プロジェクト

18

## 直接抵抗加熱型

### H to P: Rankine Cycle (RC)

| Company, System      | Charging Method           | TES                                | Discharging Method  | Power Output     | Storage Capacity/ Duration | Roundtrip Efficiency | State                | Ref.    |
|----------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|---------|
| Siemens Gamesa, ETES | Resistance heaters to air | Volcanic rock bed~600 °C           | steam Rankine cycle | units to 100s MW | 24 h                       | 25% to >40%          | Demo                 | [32-34] |
| RWE, Store2Power     | Resistance heaters        | molten salt                        | steam Rankine cycle | 100s MW          | hours                      | ~40%                 | n.a.                 | [35]    |
| E2S Power            | Resistance heaters        | Graphite-aluminium alloy at 700 °C | steam Rankine cycle | 1-100s MW        | hours                      | 25-40%               | lab proof of concept | [36]    |

Low P to P efficiencies  
( < 50% )

Middle-high temp. (< 700°C)  
SHS/LHS are being developed for RC.

High or Ultra high temp,  
SHS/LHS are being developed for BC.

Mostly using steam as a working fluid for RC.  
Various fluid are considered for BC.

### H to P: Brayton Cycle (BC)

| Company, System                | Charging Method             | TES                                              | Discharging Method                                             | Power Output    | Storage Capacity/ Duration | Roundtrip Efficiency | State                                     | Ref.    |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------------------|---------|
| 247Solar, Heat2Power Turbine   | Electric resistance heaters | Silica sand                                      | Gas turbine (Brayton cycle)                                    | 200 kWe-100s MW | 6-20 h                     | 30%                  | Concept, design                           | [89,90] |
| 1414Degrees, TESS              | Electric resistance heaters | Silicon based alloy, melting temperature 1414 °C | Gas turbine (also steam turbine, Stirling engine, direct heat) | 10 MW-GW        | n.a.                       | n.a.                 | Demos (done) Planning grid scale pilot    | [91]    |
| Peregrine Turbine Technologies | Electric resistance heaters | Graphite-aluminium alloy (MGA), 800 °C           | CO <sub>2</sub> Brayton cycle                                  | 1 MW            | 8 MWh                      | 45%                  | CO <sub>2</sub> turbine/ compressor tests | [92]    |

100s MW is seemed as standard?

Several hours duration/capacity.  
Depending on applications.

Low P to P efficiencies  
( < 50% )

## PTES（昇温型蓄熱発電）：Rankine Batteries

| Company, System                      | Charging Method                                        | TES                                   | Discharging Method              | Power Output           | Storage Capacity/ Duration | Roundtrip Efficiency | State                            | Ref.       |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------------|------------|
| Spilling                             | Steam compression & liquefaction                       | Saturated water (steam accumulators)  | Steam expander (steam engine)   | up to MW               | hours                      | n.a.                 | n.a.                             | [37,38]    |
| GE, AMSESS                           | CO <sub>2</sub> Brayton + el. heating                  | Molten salt, water tank               | Steam cycle with extraction     | 20–100 MW              | 8 h                        | 42–62%               | Concept                          | [39]       |
| Consortium CHESTER                   | Heat pump (organic fluid)                              | PCM and water                         | ORC                             | MW scale (8 kW exper.) | hours to days              | n.a.                 | lab proof of concept             | [40]       |
| Climeon                              | Heat pump (organic fluid)                              | water (e.g., district heating system) | ORC                             | 80 kW to MW            | hours                      | 25–60%               | concept with existing ORC        | [41]       |
| TC Mach                              | Heat pump (organic fluid)                              | Stone dust TES                        | ORC                             | kW                     | hours                      | n.a.                 | construction of proof of concept | [42]       |
| Future Bay                           | Heat pump (organic fluid)                              | water (hot) and PCM (cold)            | ORC                             | 10s kW                 | hours                      | n.a.                 | Demo                             | [43]       |
|                                      |                                                        |                                       |                                 |                        |                            |                      |                                  |            |
| Highview                             | Air liquifaction                                       | Liquid air + other TES                | Vaporization, expansion turbine | 50–350 MW              | about 6                    | 60–70%               | Pilot, full scale construction   | [44–46]    |
| MAN/ABB, ETES                        | CO <sub>2</sub> heat pump                              | 120 °C water + cold (ice) storage     | CO <sub>2</sub> Rankine cycle   | several MWe            | ~5 h                       | ~45%                 | lab demo                         | [31,47–49] |
| Echogen, ETES                        | CO <sub>2</sub> heat pump, fluidized bed heat exchange | Sand (hot) and ice (cold)             | CO <sub>2</sub> Rankine cycle   | 25 MW                  | 250 MWh                    | ~60%                 | design                           | [50–54]    |
| Energysdome, CO <sub>2</sub> battery | CO <sub>2</sub> compression & liquefaction             | Liquid CO <sub>2</sub> + other TES    | Vaporization, expansion turbine | 10–80 MW modules       | 20–200 MWh                 | 77%                  | Pilot construction               | [55,56]    |

A typical type is ORC using organic fluid as working fluid. Another type is CO<sub>2</sub> Rankine cycle.

Low temperature TES (< 200°C) was considered due to temp. limitation of heat pump.

Almost all project considered < 100MW. This is also limitation of heat pump.

Several hours duration/capacity. Depending on applications.

Better P to P efficiencies than the electrical heating systems

## その他のコンセプト

| Company, System                           | Charging Method                         | TES                                                          | Discharging Method                    | Power Output   | Storage Capacity/ Duration    | Roundtrip Efficiency | State                                        | Ref.      |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|-----------|
| Azelio                                    | Electric resistance heaters             | Aluminium based PCM (600 °C)                                 | Stirling engine                       | 13 kW          | 13 h                          | ~30%                 | Multiple pilots, production line, commercial | [115]     |
| CCT Energy Storage                        | Electric resistance heaters             | Silicon based PCM (1400 °C)                                  | Stirling engine                       | 5–100 kW       | up to 1.2 MWh per module      | n.a.                 | Pilot                                        | [116,117] |
| TEXEL Energy Storage                      | Electric resistance heaters             | Metal hydrides (MH)/metal carbonates                         | Stirling engine                       | 30 kW          | 15–720 kWh                    | 40%                  | commercial installation effort               | [118]     |
| Kraftlagn München                         | Electric resistance heaters/ waste heat | Ceramic system (1000 °C)                                     | Stirling engine and ORC               | 60 kW (demo)   | 1.4 MWh <sub>th</sub> (demo)  | n.a.                 | demo                                         | [119]     |
| NREL ENDURING LDES (GE, PEL, Allied)      | Electric resistance heaters             | Fluidized packed bed with solid materials (1100 °C)          | Combined Brayton and Rankine cycle    | 50–400 MW      | 10–100 h                      | 50–55%               | Components prototypes, demo preparation      | [120]     |
| Pintail Power, Liquid Salt Combined Cycle | Electric resistance heaters             | molten salt                                                  | Combustion combined cycle integration | from dozens MW | 24 h                          | 82–96% (+ fuel)      | Patented concepts                            | [121]     |
| Pintail Power, Liquid Air Combined Cycle  | Compressor for air liquefaction         | liquid air                                                   | Combustion combined cycle integration | from dozens MW | 24 h                          | 118% (+ fuel)        | Patented concepts                            | [122]     |
| Antora Energy                             | Electric resistance heaters             | Graphite blocks (1500 °C)                                    | Thermophotovoltaic cell               | 0.1–1 MW       | 10 MWh <sub>e</sub>           | 40%                  | Proof of concept                             | [123]     |
| NaCompEx                                  | Compressed heat followed by desorption  | NaOH-H <sub>2</sub> O solutions via concentration difference | Expansion followed by absorption      | 10–100 MW      | 60 kWh/m <sup>3</sup> storage | 80%                  | Concept, design                              | [124,125] |

Various types TES such as SHS/LHS/TCS are being developed.

Stirling engine is another option for H2P.  
Relatively lower output scale

Combined cycles and combustion assisted cycles are other options.  
Relatively larger scale concept.

Small scale types ( $\approx 10$ s kW) have been already commercially available.

- 蓄エネ技術としての蓄熱技術～カルノーバッテリー/蓄熱発電～
- 国外の技術開発動向
- **国内の技術開発動向**
- 日本での開発促進、早期実装、普及促進に向けて
- 北海道大学における先進的蓄熱研究
- まとめ

# カルノーバッテリー/蓄熱発電に関連する国内の動きの一例 22

## 日本学術会議 公開シンポジウム 「CNに向けた熱エネルギー利用の可能性と課題」

- ・ 2021年11月6日開催
- ・ 産官学からCNに向けた省エネ/再エネ利用技術としての熱利用を議論

- ・ 蓄エネ技術としての蓄熱技術（蓄熱発電）の重要性、必要性について認知されるに至った



## 日本伝熱学会主催 蓄熱の科学と工学に関する国際シンポジウム2022



- ・ 2022年9月開催
- ・ 蓄熱を用いた蓄エネ技術に関して議論
- ・ 一部：日本の蓄熱研究動向
- ・ 二部：欧州の蓄熱開発動向
- ・ 国内外から約100名が参加。

## 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

- ・ 2021年10月～2024年3月
- ・ 主査：加藤之貴教授（東京科学大学）
- ・ 産学からなる合計 67 名のメンバーで構成
- ・ エネルギーストレージベストミックスにおける蓄熱技術の必要性、重要性を議論
- ・ 産業・民生部門における蓄熱技術の更なる有効活用、蓄熱を伴う蓄エネ技術などの推進を提言＊

\*<https://www.jsme.or.jp/about/about-jsme/proposal/teigen202404/>

## 第七次エネルギー基本計画 2025年2月。蓄エネにおける蓄熱の重要性に言及。

### 第七次エネルギー基本計画

#### V. 2040年に向けた政策の方向性

##### 3. 脱炭素電源の拡大と系統整備

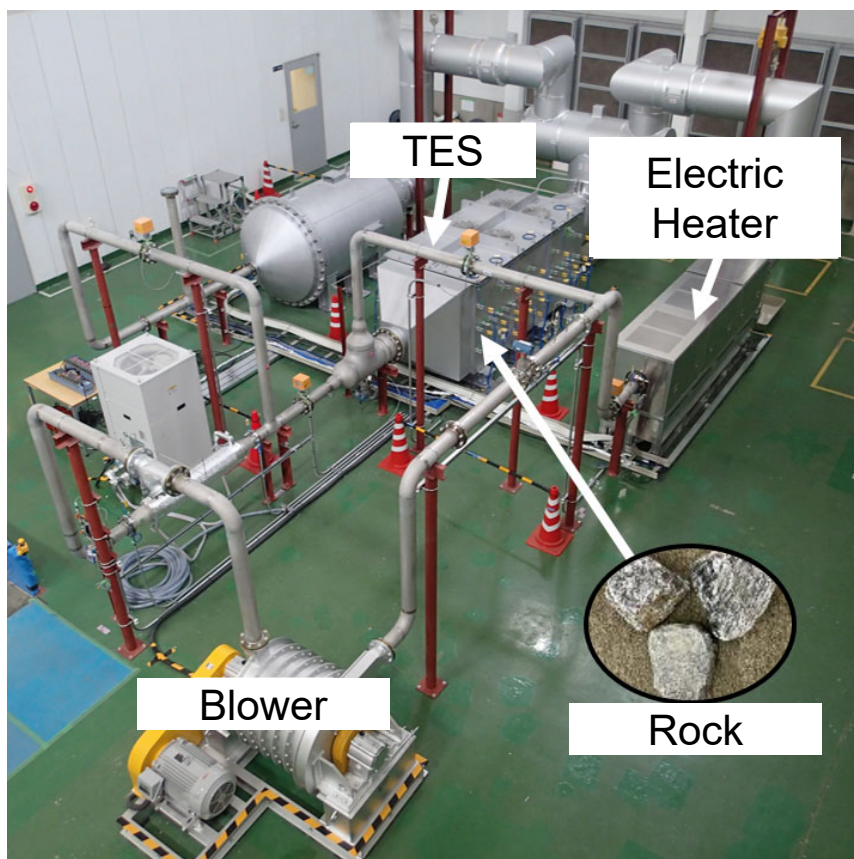
##### (5) 次世代電力ネットワークの構築

##### ③ 系統・需給運用の高度化

##### (イ) 蓄電池・ダイヤモンドリソース（DR）の活用促進

蓄電池やヒートポンプ給湯機、コージェネレーション等の分散型エネルギーリソース（DER30）の普及に伴い、これらを活用したDRも進展している。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利用を促進した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レーション、負荷設備、蓄熱槽等の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。また、DERの活用にあたっては、地産地消による効率的なエネルギー利用や災害時のレジリエンス強化等にも資する地域マイクログリッドが重要である。今後は、一部の地域で見込まれる系統混雑の緩和等に向けて、技術的な実現可能性を追求していく。

エネルギー基本計画 令和7年2月より該当箇所を抜粋



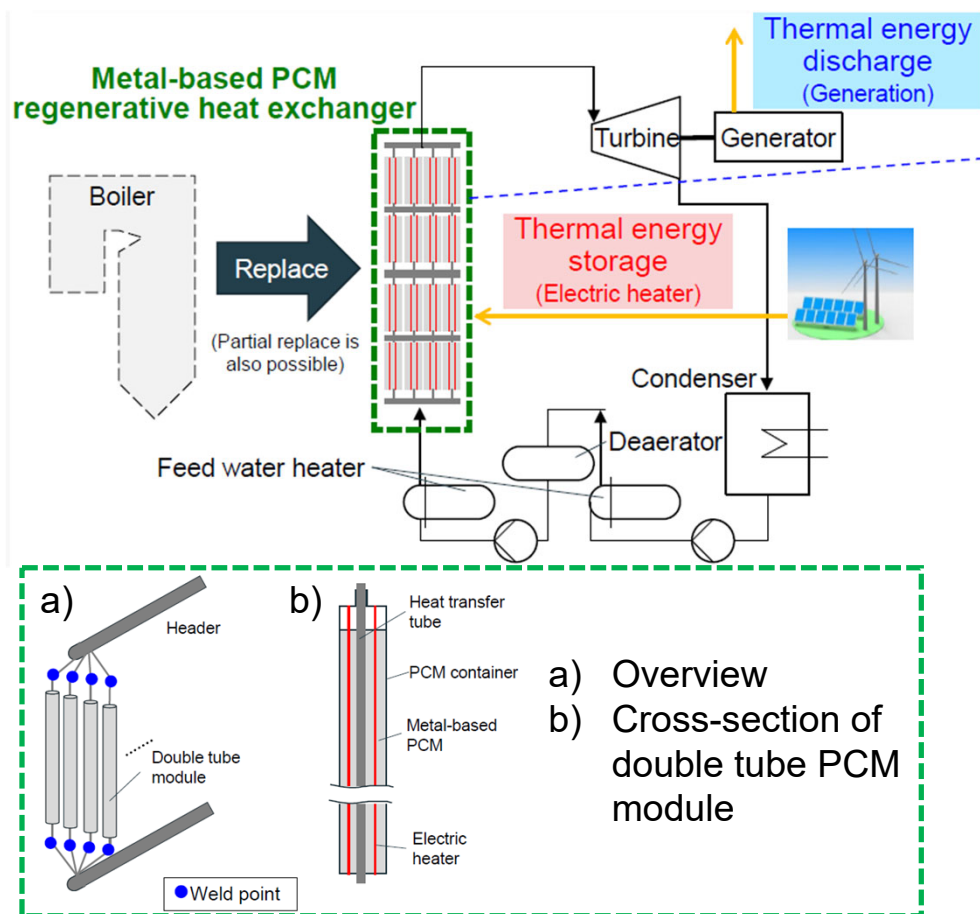
## プロジェクトの概要

|              |                   |
|--------------|-------------------|
| システムタイプ      | ヒーターによる電熱変換（ETES） |
| 規模/技術成熟度 TRL | モックアップスケール/5-6    |
| プロジェクト期間     | 環境省/2022～         |

## 蓄熱システムの概要

|          |                                   |
|----------|-----------------------------------|
| 蓄熱方式     | 固体顕熱蓄熱（岩石の充填層）                    |
| 蓄熱材      | 岩石（20-50 mm）                      |
| 熱媒体      | 空気                                |
| 蓄熱温度     | > 700°C                           |
| 蓄熱（充電）速度 | 60 kW <sub>th</sub> （ヒーター/当該PJにて） |
| 蓄熱容量     | 500 kW <sub>th</sub> h（当該PJにて）    |

- 高温蓄熱可能な点で欧州の岩石蓄熱PJに対して優位性あり。
- 2024年より、数10MWh級の岩石蓄熱エネマネ設備の実証事業がスタート。



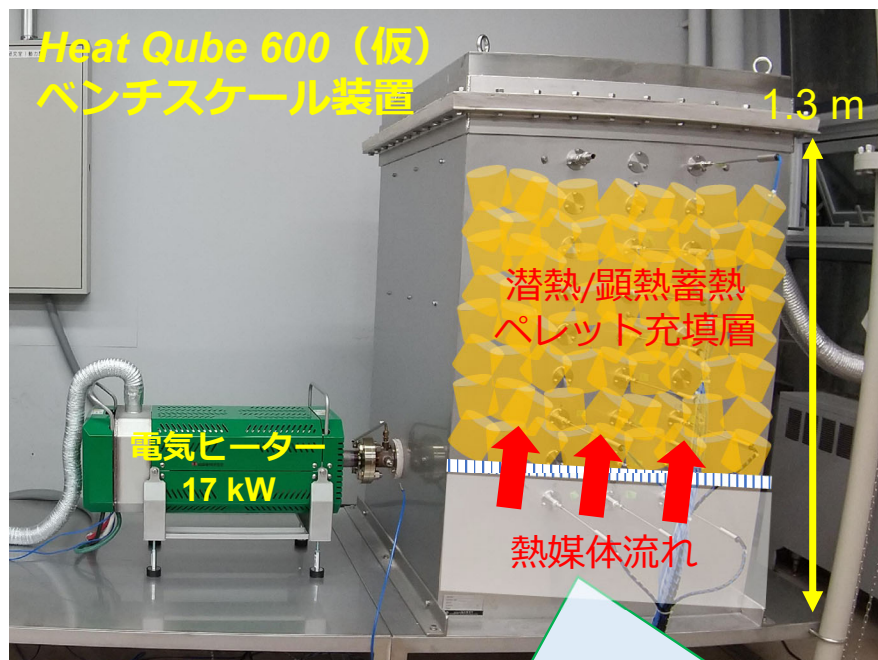
## プロジェクトの概要

|              |                    |
|--------------|--------------------|
| システムタイプ      | ヒーターによる電熱変換 (ETES) |
| 規模/技術成熟度 TRL | コンセプト/2            |
| プロジェクト期間     | NEDO/2019～2024     |

## 蓄熱システム (コンセプト) の概要

|              |                                                                     |
|--------------|---------------------------------------------------------------------|
| 蓄熱方式         | 二重管モジュール構造型潜熱蓄熱<br>直接蒸気発生                                           |
| 蓄熱材          | Al-Si 合金潜熱蓄熱材 ( $T_m$ : 577°C)<br>Al-Si-Fe 合金潜熱蓄熱材 ( $T_m$ : 620°C) |
| 熱媒体          | 水/水蒸気                                                               |
| 蓄熱温度         | < 620°C                                                             |
| 蓄熱容量         | 5600 kW <sub>e</sub> h (Target)                                     |
| 出力           | 700 MW <sub>e</sub> (Target)                                        |
| 発電効率 (P2P効率) | 約 40 % (Target)                                                     |

- 石炭火力発電所の既存設備を転活用するコンセプト。合金系潜熱蓄熱材の活用を検討。
- ①概略敷地面積の検討, ②放熱特性の検証, ③蓄熱材の侵食対策などを実施。



## 潜熱蓄熱ペレット

- ・ Al/Si/Oのみで構成
- ・ 600°Cの熱を貯蔵/出力
- ・ 超高蓄熱密度：2 GJ m<sup>-3</sup>

## プロジェクトの概要

|              |                    |
|--------------|--------------------|
| システムタイプ      | ヒーターによる電熱変換 (ETES) |
| 規模/技術成熟度 TRL | ベンチスケール/4-5        |
| プロジェクト期間     | NEDO/2020～         |

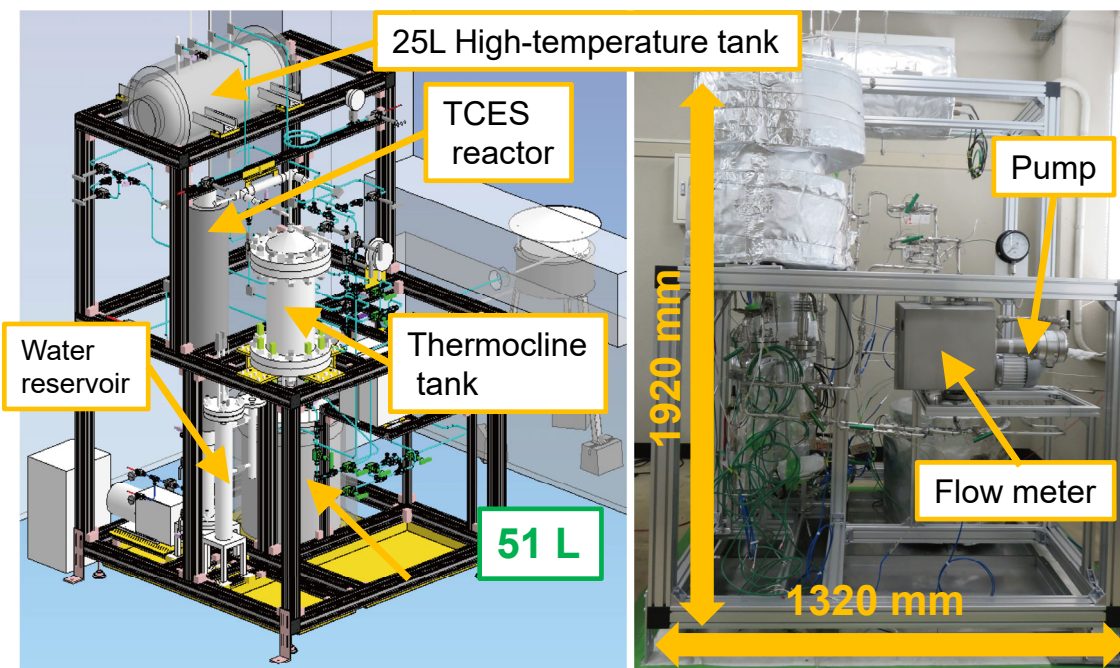
## 蓄熱システムの概要

|       |                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------|
| 蓄熱方式  | 潜熱蓄熱/固体顕熱蓄熱 (充填層)                                            |
| 蓄熱材   | Al-Si 合金系潜熱蓄熱ペレット ( $T_m$ : 577°C)                           |
| 熱媒体   | Air                                                          |
| 蓄熱温度  | < 800°C                                                      |
| 蓄熱容量  | ～120 kW <sub>th</sub> h (当該PJ)                               |
| 蓄熱密度  | 300 kW <sub>th</sub> h m <sup>-3</sup> ( $\Delta T = 300K$ ) |
| 蓄放熱効率 | > 95%                                                        |

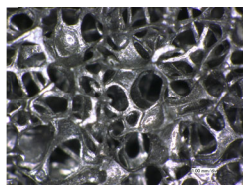
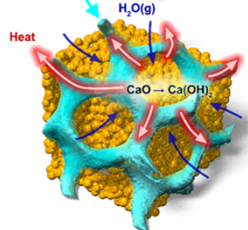
- ・ 固体顕熱蓄熱同様の利用方法 (充填層) で、潜熱蓄熱の高蓄熱密度・高温熱供給機能を実現。
- ・ 実験データと整合性のある数値モデルが開発され、実機レベルの性能が検証可能に。

# 高温ケミカルヒートポンプ～東京科学大学 加藤之貴教授～

26



SiSiC foam ● CaO/Ca(OH)<sub>2</sub>



**Left:**  
Ca(OH)<sub>2</sub> + SiSiC foam  
composite  
**Right:**  
SiSiC foam

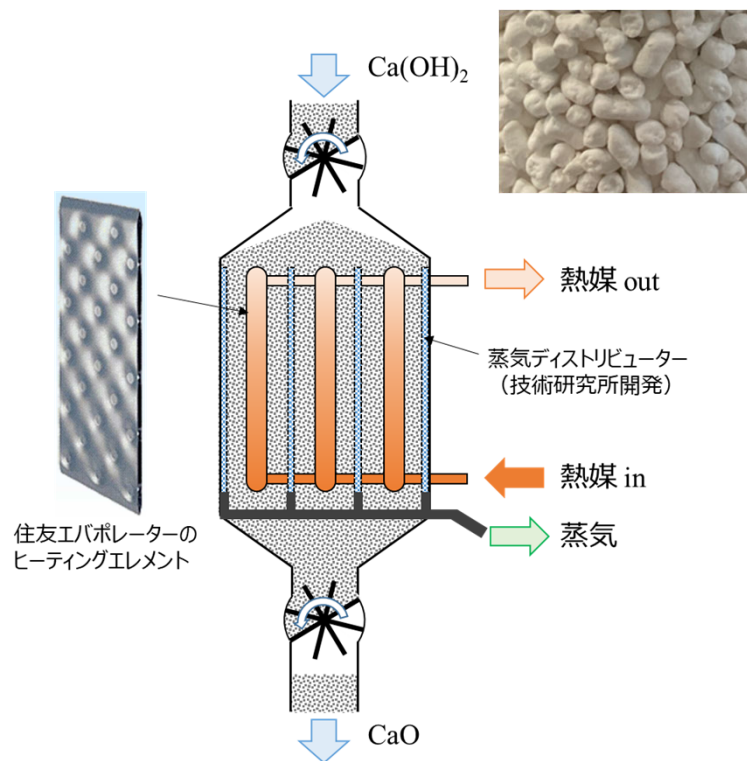
## プロジェクトの概要

|          |                    |
|----------|--------------------|
| システムタイプ  | ヒーターによる電熱変換 (ETES) |
| 規模/TRL   | ベンチスケール/3-4        |
| プロジェクト期間 | JST未来社会創造事業/2022～  |

## 蓄熱システム (コンセプト) の概要

|      |                        |
|------|------------------------|
| 蓄熱方式 | ケミカルヒートポンプ/<br>溶融塩顕熱蓄熱 |
| 蓄熱材  | SiCハニカム支持型CaO<br>溶融硝酸塩 |
| 熱媒体  | 溶融硝酸塩                  |
| 出力温度 | 600°C (Maximum: 620°C) |
| 蓄熱容量 | -                      |

- CaO系ケミカルヒートポンプ/溶融塩顕熱のハイブリッド技術として世界から注目。
- 長期間の熱貯蔵、 $\leq 620^{\circ}\text{C}$  への昇温、世界最高温度での溶融硝酸塩利用を実現。
- CaO蓄熱は純国産で、製造でき、自国で再エネ出力制御が抑制でき、日本のエネルギー安全保障に適合



10kW 試験機

## Overview of project

|                    |                  |
|--------------------|------------------|
| System Type        | 廃熱貯蔵・輸送（電力熱貯蔵も可） |
| Maturity/TRL       | ベンチスケール/4-5      |
| Project and period | 2023～            |

## Thermal Energy Storage System

|                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| Type                | 移動層型化学蓄熱             |
| Storage medium      | ペレット型CaO             |
| Heat transfer fluid | 空気                   |
| Inlet temperature   | 700°C（試験は電気ヒーター使用）   |
| Rated Input         | 10kW <sub>th</sub>   |
| 連続運転                | 蓄熱運転38時間実証           |
| 総合効率                | 熱一熱 50%（目標） ※理論上限74% |

- 移動層型化学蓄熱システムを開発中
- ヒーターにより再エネ電力の熱的貯蔵からプラント熱供給（Power to Heat）にも応用可能

## **ESREE Energy（2023年創業）**

ヒートポンプサイクルによる電熱変換（Pumped Thermal Energy Storage）をベースとしたカルノーバッテリーを開発している日本で唯一の企業。

<https://esree.co.jp/>

## **Blossom Energy（2022年創業）**

黒鉛を蓄熱体として用いるユニークな蓄熱ボイラーを開発。2024年にプロトタイプを発表。

<https://www.blossom-energy.biz/>

## **愛知製鋼（株）**

2019年、CaOを蓄熱材として利用した高温化学蓄熱システムの実証装置を開発し、世界で初めて工場に設置、実証。 [https://www.aichi-steel.co.jp/news\\_item/20191025\\_news.pdf](https://www.aichi-steel.co.jp/news_item/20191025_news.pdf)

## **（株）日本触媒**

北海道大学の開発した高温潜熱蓄熱材の成型技術を確認、2025年より安価大量生産に向けたプロジェクト（NEDO 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）を始動

<https://www.nedo.go.jp/content/800025982.pdf>

- 蓄エネ技術としての蓄熱技術～カルノーバッテリー/蓄熱発電～
- 国外の技術開発動向
- 国内の技術開発動向
- **日本での開発促進、早期実装、普及促進に向けて**
- 北海道大学における先進的蓄熱研究
- まとめ

# 蓄エネ用蓄熱技術の課題 1 : 電熱変換技術

30

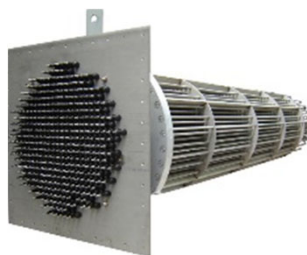
電熱変換部がCAPEXの極めて大きな割合（30%程度）を占める。  
今後、低コスト化技術の進展が重要。

## ・抵抗ヒーター

既存技術だが100MW級の事例無し

現状高コスト（5万円/kW～）\*

\*2021年11月6日 日本学術会議 公開シンポジウム 岡崎徹氏 資料  
<https://www.scj.go.jp/ja/event/pdf3/316-s-1106-1c.pdf>



## ・高温ヒートポンプ (Pumped Thermal Energy Storage: PTES)

200～600°C級の開発進むが未確立（DLR、Malta等）

COP: 1.6 ?\*

日本では開発事例極小（例：ESREE Energy\*\*社）

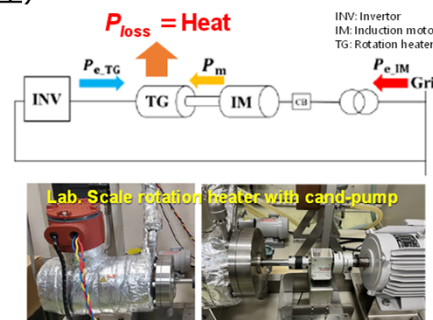
\*<https://www.maltainc.com/assets/pdf/Malta-Data-Sheet-2025.pdf>  
\*\*ESREE Energy社ホームページ <https://esree.co.jp/>

## ・回転発熱機\*

\*私信 岡崎徹氏

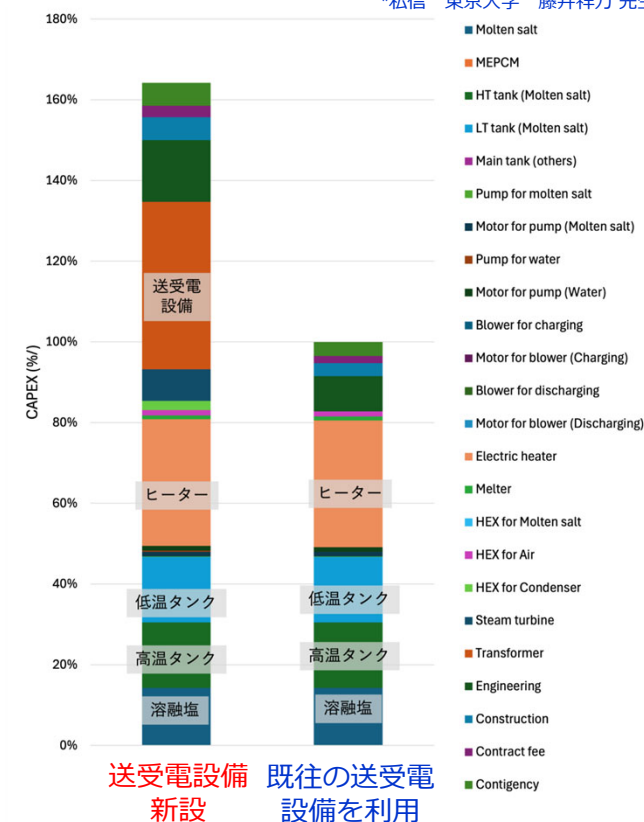
日本発（エネルギー総合工学研究所・富士電機）

POCを達成。低コスト化の期待



## 溶融塩蓄熱発電におけるCAPEX内訳\*

\*私信 東京大学 藤井祥万 先生

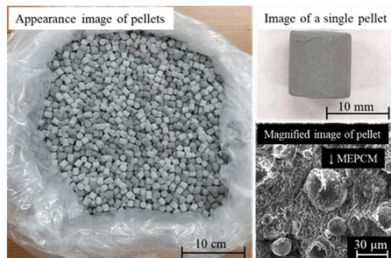


# 蓄エネ用蓄熱技術の課題 2 : スケールアップ&プラント化 31

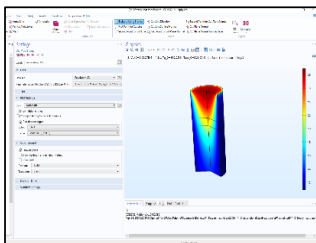
- 単なる要素技術開発では実用化・社会実装には至らない&他技術とのベストミックスが議論できない
- システム思考を持った技術開発、スケールアップを見越した開発が必要

\*私信 東京大学 藤井祥万 先生

## 技術開発



## 材料開発

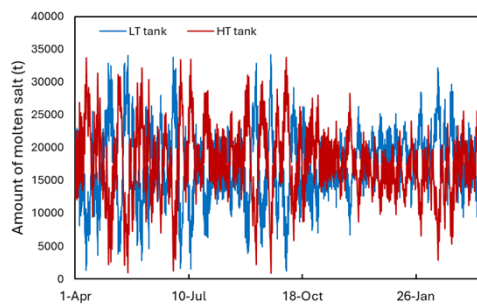
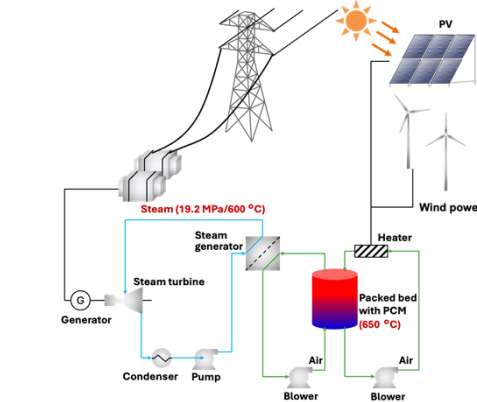


## 装置設計

## プロセス評価

技術情報の反映

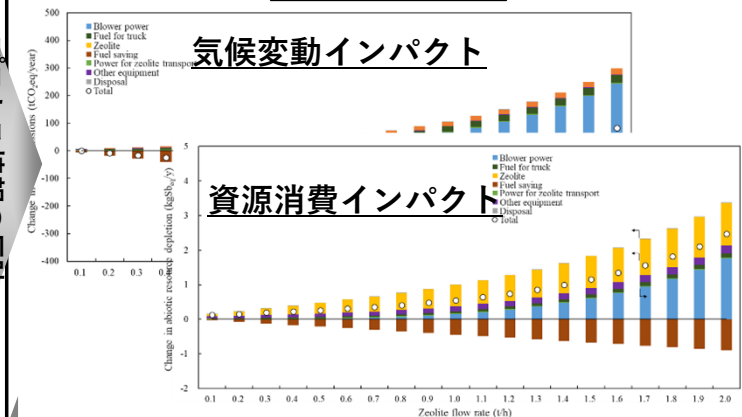
フィードバック



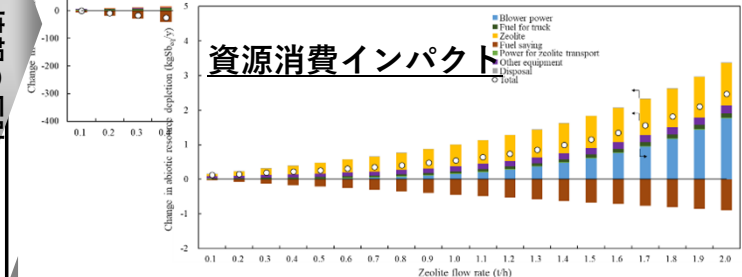
## 年間運用シミュレーションなど

## システム評価

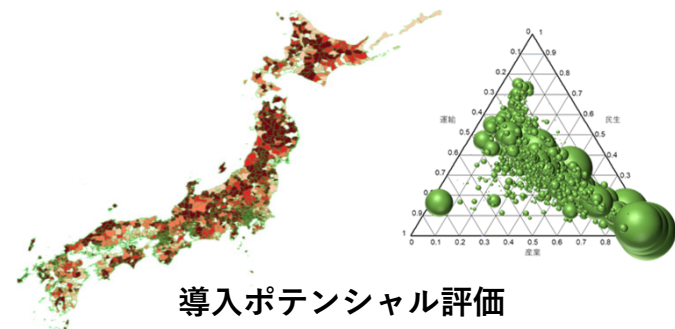
## 気候変動インパクト



## 資源消費インパクト



## ライフサイクルアセスメントやコスト評価



# 蓄エネ用蓄熱技術の課題3：ベストマッチする適用先の選定 32

「熱」として貯蔵する/「熱機関」を使う/「熱電併給」が可能なカルノーバッテリーは、他の選択肢には無い観点からベストマッチする適用先がある。

## ・ Point 1

**既存のアセットを利用できる立地**

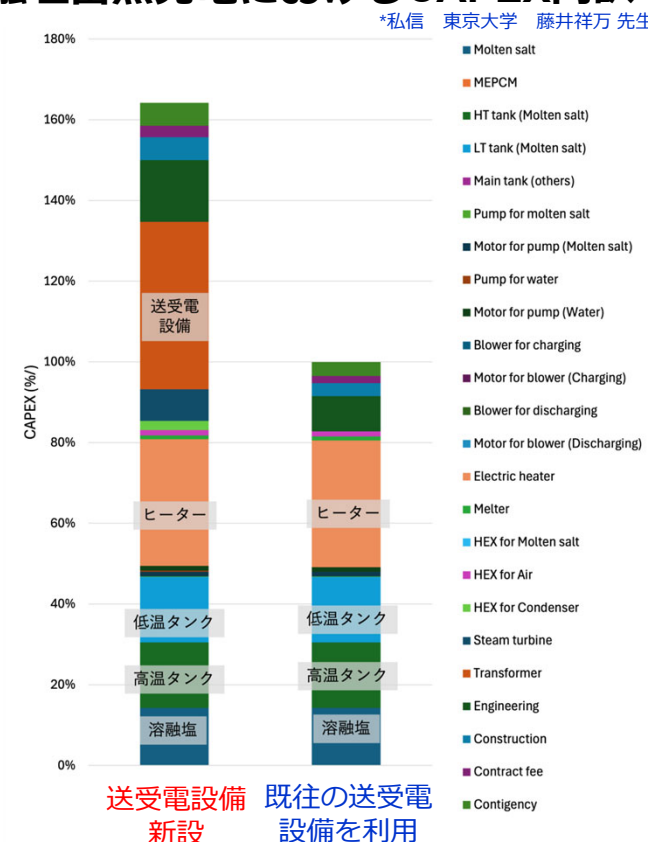
→熱機関/変電設備/熱導管等を転活用可能  
火力発電の代替（設備転活用）も視野に

## ・ Point 2

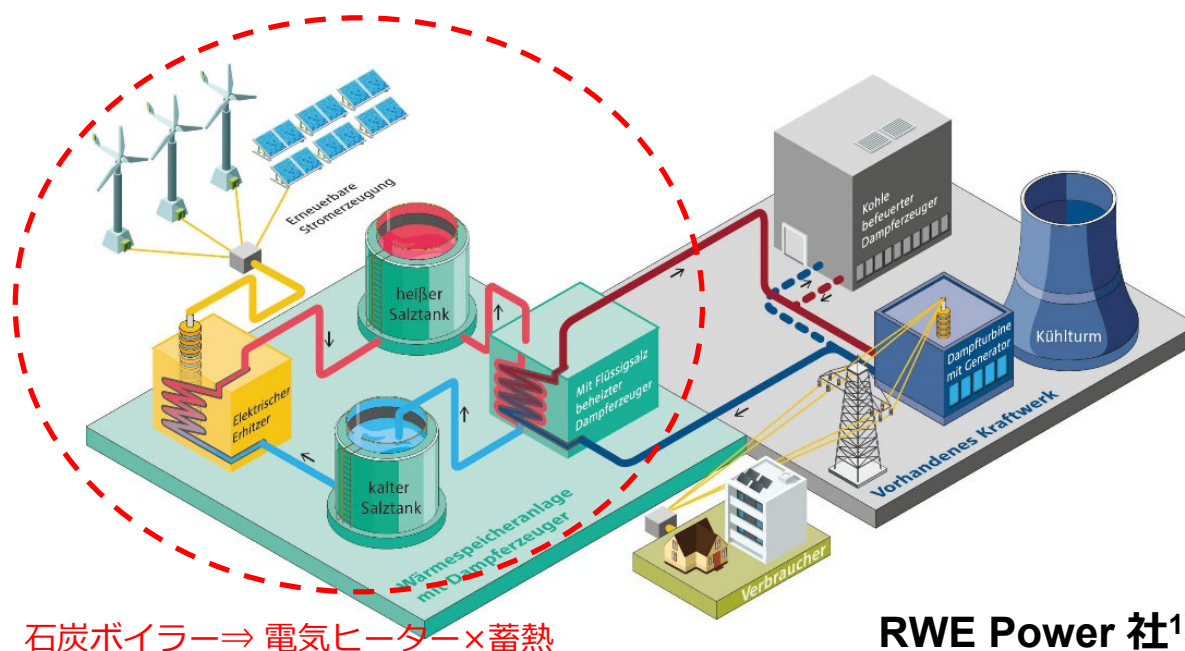
**熱需要がある立地**

→発電効率 40% + 熱利用 50% = 総合効率 90%  
熱利用のみ(P2H)も重要なオプション  
熱としてエネルギーを消費する各種産業プラント  
への適用はベストマッチの可能性

溶融塩蓄熱発電におけるCAPEX内訳\*



## 石炭火力発電所を蓄熱発電所へ



石炭火力発電所の**石炭ボイラー部**のみを、**電気ヒーター&高温蓄熱システム**に置きかえ、タービンシステムなどその他の火力発電所のシステムをそのまま利用。

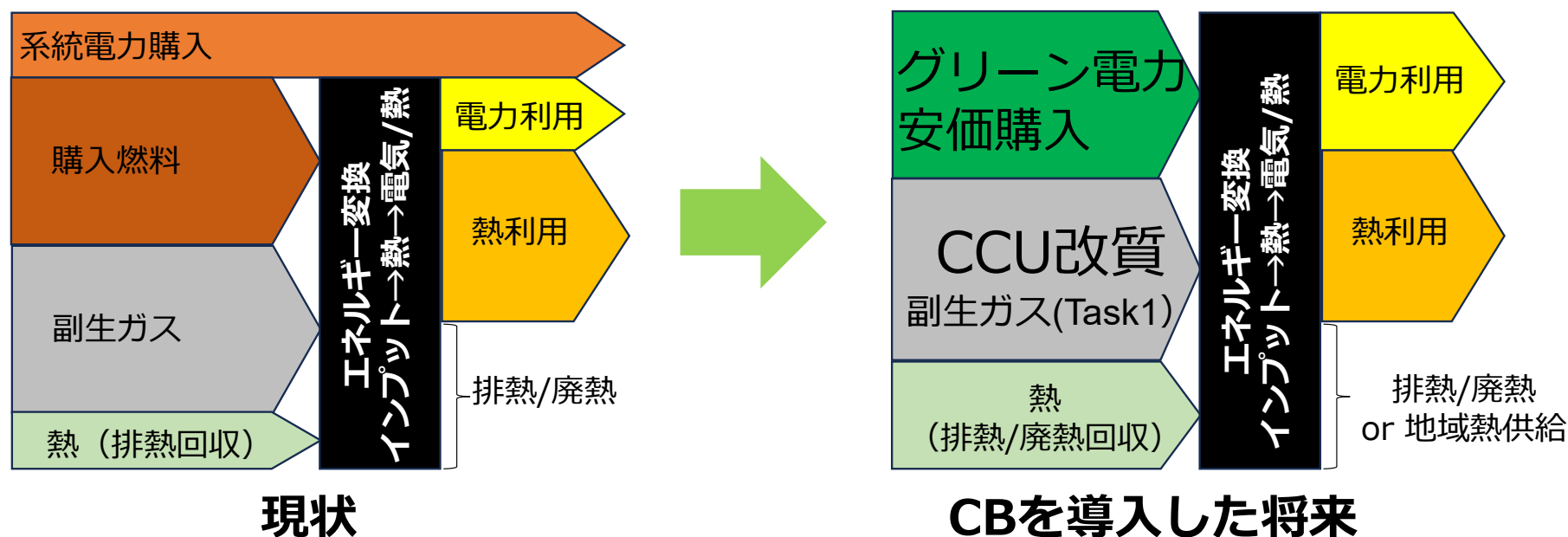
1) <https://www.en-former.com/en/coal-fired-power-plant-as-large-heat-storage-facility/>

### 地域熱供給とのカップリング

参考\*<https://seas-nve.dk/erhverv/>

カルノーバッテリーと**地域熱供給と組み合わせた熱電併給**により総合エネルギー効率90%以上(リチウムイオン電池)が可能。

## 熱を利用する産業への導入（例：製鉄所）



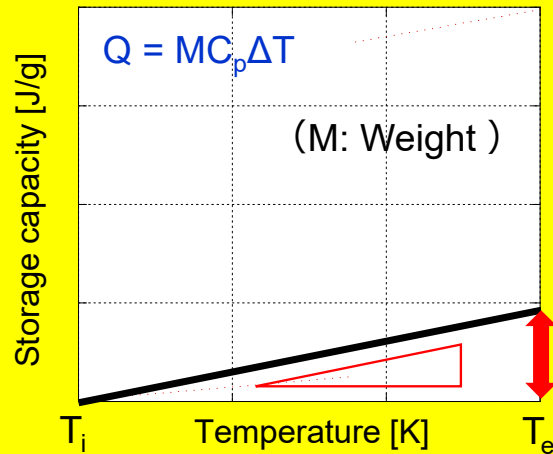
カルノーバッテリーは、製鉄所内のインフラ（発電所、蒸気導管、所内外への電力需給/供給ネットワーク）を全て利用でき、経済合理性のある蓄エネなる可能性！！鉄鋼協会にて「鉄鋼CNのための蓄熱技術研究会」を設立し、検討中。

- 蓄エネ技術としての蓄熱技術～カルノーバッテリー/蓄熱発電～
- 国外の技術開発動向
- 国内の技術開発動向
- 日本での開発促進、早期実装、普及促進に向けて
- **北海道大学における先進的蓄熱研究**
- まとめ

# 固体顕熱蓄熱材 × 潜熱蓄熱材 = MEPCM (MicroEncapsulated Phase Change Material)

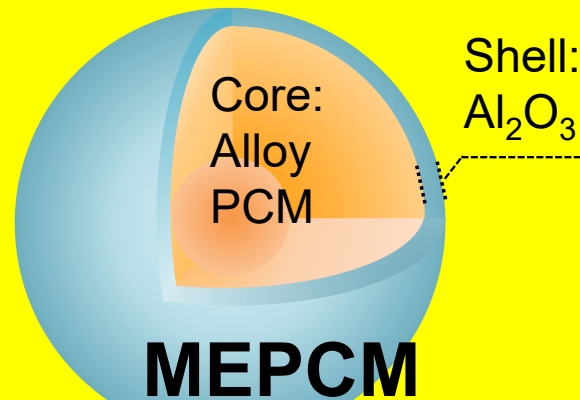
37

## 顕熱蓄熱



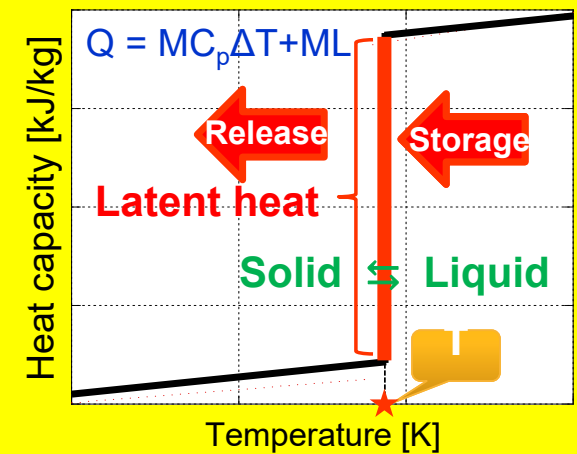
- ◎ ハンドリング容易
- ◎ 自由に成型可能
- ◎ 高い技術成熟度

- ◎ 高蓄熱密度
- ◎ 一定温度での熱供給/熱制御

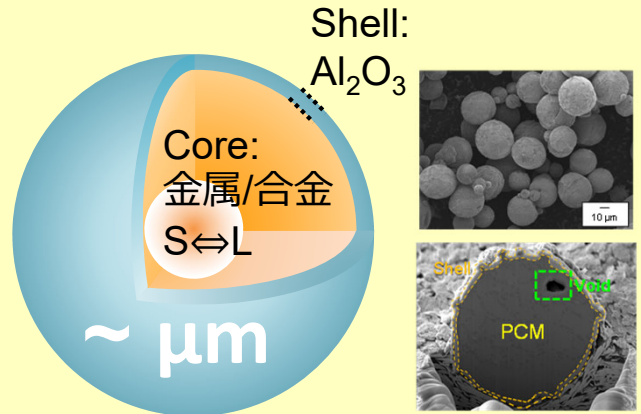


シェル：顕熱蓄熱 — コア：潜熱蓄熱

## 潜熱蓄熱



固体顕熱蓄熱（セラミックス、煉瓦など）と潜熱蓄熱両方の長所を併せ持つハイブリッド蓄熱材料**MEPCM** (MicroEncapsulated Phase Change Material) を開発（2014～）。



- ・ 資源 : AlとSiとOのみ
- ・ 600°Cの熱を蓄放熱
- ・ 蓄熱密度:  
約560MWh m<sup>-3</sup>\*  
\*単位体積あたりのH<sub>2</sub>@15MPaの  
燃焼エンタルピー相当
- ・ 10000cycle以上の  
耐久性を確認

- ◆ Al-Si合金の相変化潜熱を利用
- ◆ マイクロカプセル型蓄熱材



10mm



mm~m

私信 : (株) 日本触媒

- ◆ 使いやすい形に自在に成形することが可能
- ◆ 「固体」としてのハンドリングが可能

~ μm

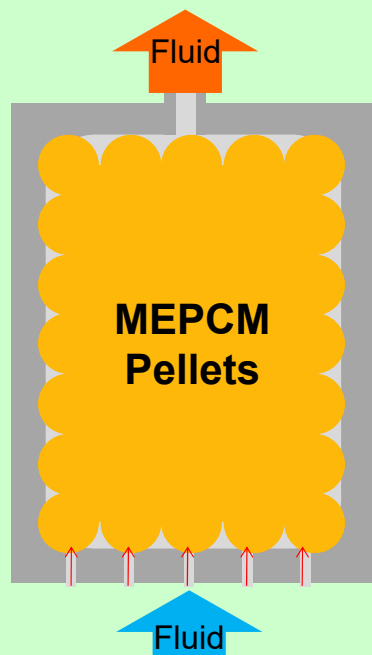
MEPCM

安価大量生産に向けた開発がスタート (2025年度NEDO脱炭素省エネ事業/日本触媒) !!

# MEPCMの使い方～蓄熱熱交換器～

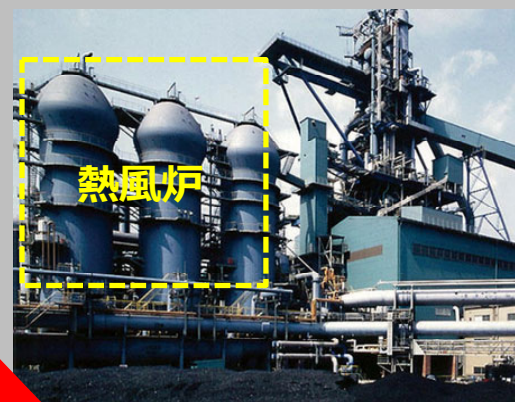
39

## 充填層またはハニカム型熱交換器



固体状態を常に維持する潜熱蓄熱体（ボール、ハニカム、チェッカーレンガ）と流体の直接接触式の熱交換。

## 既往の固体顕熱蓄熱技術



私信) 中外炉工業資料

固体蓄熱体（ボール、ハニカム、チェッカーレンガ）と流体の直接接触式の熱交換。

**Same technical basis !!**

既往の固体顕熱蓄熱技術にレトロフィット＆同様のエンジニアリングにて、MEPCMは利用可能（場合によってはMEPCMを投入すればすぐに使える）。

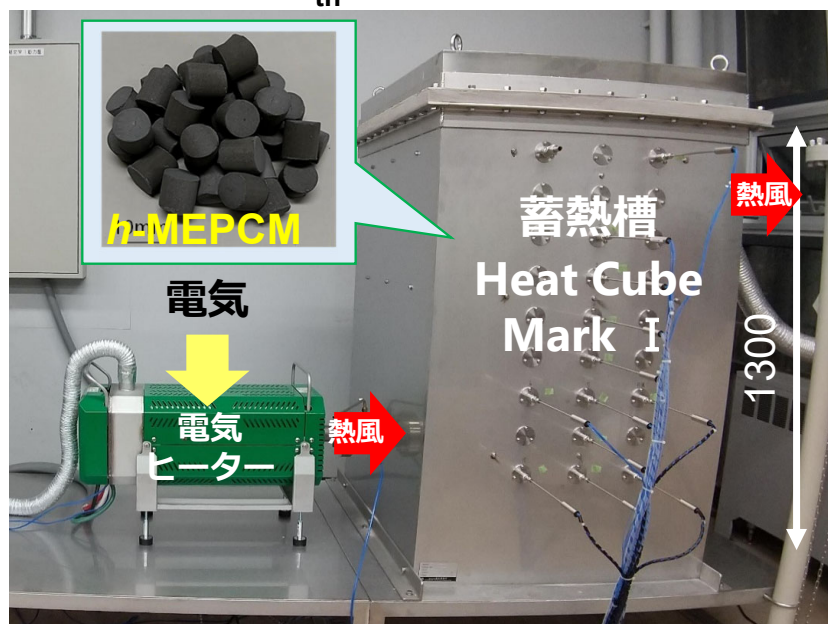
# NEDO新革新事業\*（2021～2024年）での成果

40

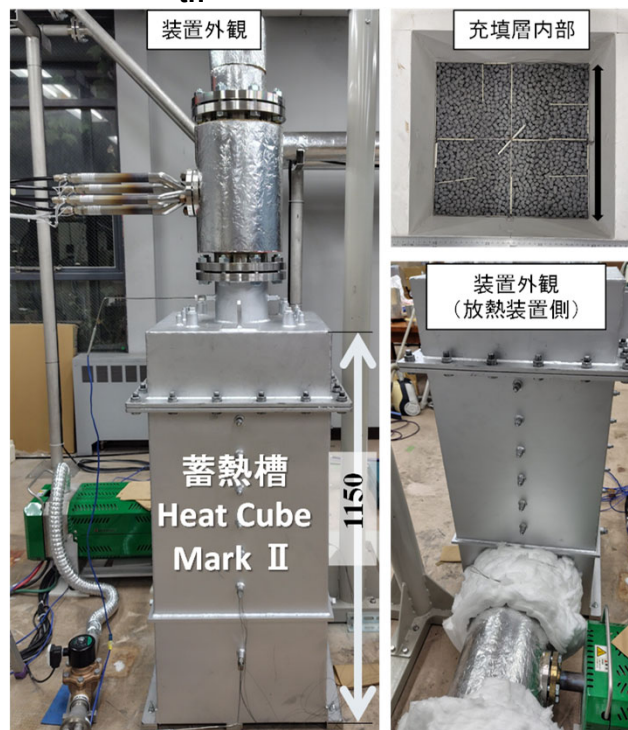
ベンチスケール蓄熱モジュールのMark I（ $120 \text{ kW}_{\text{th}}$  h）、Mark II（ $\sim 50 \text{ kW}_{\text{th}}$  h）を開発、基礎データ取得。高い熱交換速度、ハンドリングが容易な**充填層型高温潜熱蓄熱システムは世界初**。**IWCB2024\*にて“カルノーバッテリー分野でゲームチェンジと成り得る技術”との評価**。

\*International Workshop on Carnot Batteries：カルノーバッテリーに関する専門の国際会議。“Carnot Batteries”を提唱したAndre Thess博士からのコメント

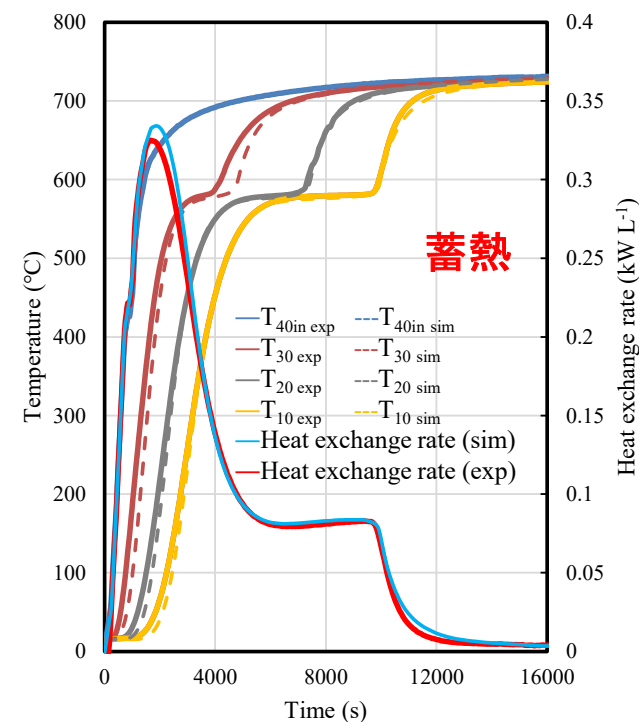
**Mark I**  
( $120 \text{ kW}_{\text{th}}$  h ワンスルー型)



**Mark II**  
( $50 \text{ kW}_{\text{th}}$  h 市販蓄熱槽 向流型)



**Mark II の蓄熱操作データとモデルの比較**



- ・ 他の競合技術と比べて、蓄熱密度、熱交換速度で圧倒的優位性。
- ・ 温度チューニングが可能、省エネ技術への転用も可能（複数社と共同研究中）。

| 開発企業等                                                   | MEPCM利用型                       | Siemens Gamesa     | Andasol<br>(太陽熱発電)  |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------|
| 蓄熱法                                                     | 顕熱/潜熱蓄熱                        | 顕熱蓄熱               | 顕熱蓄熱                |
| 蓄熱材                                                     | MEPCM                          | 岩石                 | 熔融塩                 |
| 蓄熱温度 [°C]                                               | 650°C<br>(可変可能)                | 650                | 565                 |
| 蓄熱密度 (蓄熱層内容積基準)<br>[MWh <sub>th</sub> m <sup>-3</sup> ] | 約0.34<br>*充填率0.6想定             | 約0.1               | 約0.1                |
| 熱交換速度<br>[MW <sub>th</sub> m <sup>-3</sup> ]            | 0.01~4<br>min~day/1cycle       | 0.01<br>day/1cycle | ~0.01<br>day/1cycle |
| 温度平準化機能                                                 | あり                             | なし                 | なし                  |
| 作動温度<br>バリエーション                                         | チューニング可<br>室温~850°C            | 不可能                | 不可能                 |
| 省エネ技術への転用                                               | 可能 (試行中)                       | 意味無し               | 不可能                 |
| 備考                                                      | ベンチ<br>(~50kW <sub>th</sub> h) | デモ (終了)            | 商用                  |

- 蓄エネ技術としての蓄熱技術～カルノーバッテリー/蓄熱発電～
- 国外の技術開発動向
- 国内の技術開発動向
- 日本での開発促進、早期実装、普及促進に向けて
- 北海道大学における先進的蓄熱研究
- **まとめ**

- 蓄エネ技術としての蓄熱技術「カルノーバッテリー/蓄熱発電」は、  
低コスト、大容量かつ慣性力を持ち、導入の早い蓄エネ技術として有望である。
- カルノーバッテリー/蓄熱発電の開発が欧米を中心に急速に進行し、普及に向けた実証事業が多数実施されている。
- 我が国においても要素技術の開発は十分進んでいる。一方、大規模なシステム構築、実証は一部を除いて「これから」であり、**今まさに、チームジャパンで一丸となって進めるべき時！！**
- カルノーバッテリー/蓄熱発電の開発にあたり、単なる要素技術開発ではなく、**システム思考を持った技術開発、スケールアップを見越した開発が必須**である。また、ベストマッチする適用先の検討もまた重要である。

# Thank you for kind attentions



## Acknowledgement

本発表の一部は、NEDO先導研究プログラム／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム（2020～22）、  
NEDO 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（2021～）、  
2022年度カーボンリサイクルファンド研究助成（2022～）、JST未来社会創造事業（2021-2022）の成果です。