



HOKKAIDO
UNIVERSITY

カルノーバッテリー技術と 高温蓄熱技術の最新動向

北海道大学大学院工学研究院 能村貴宏

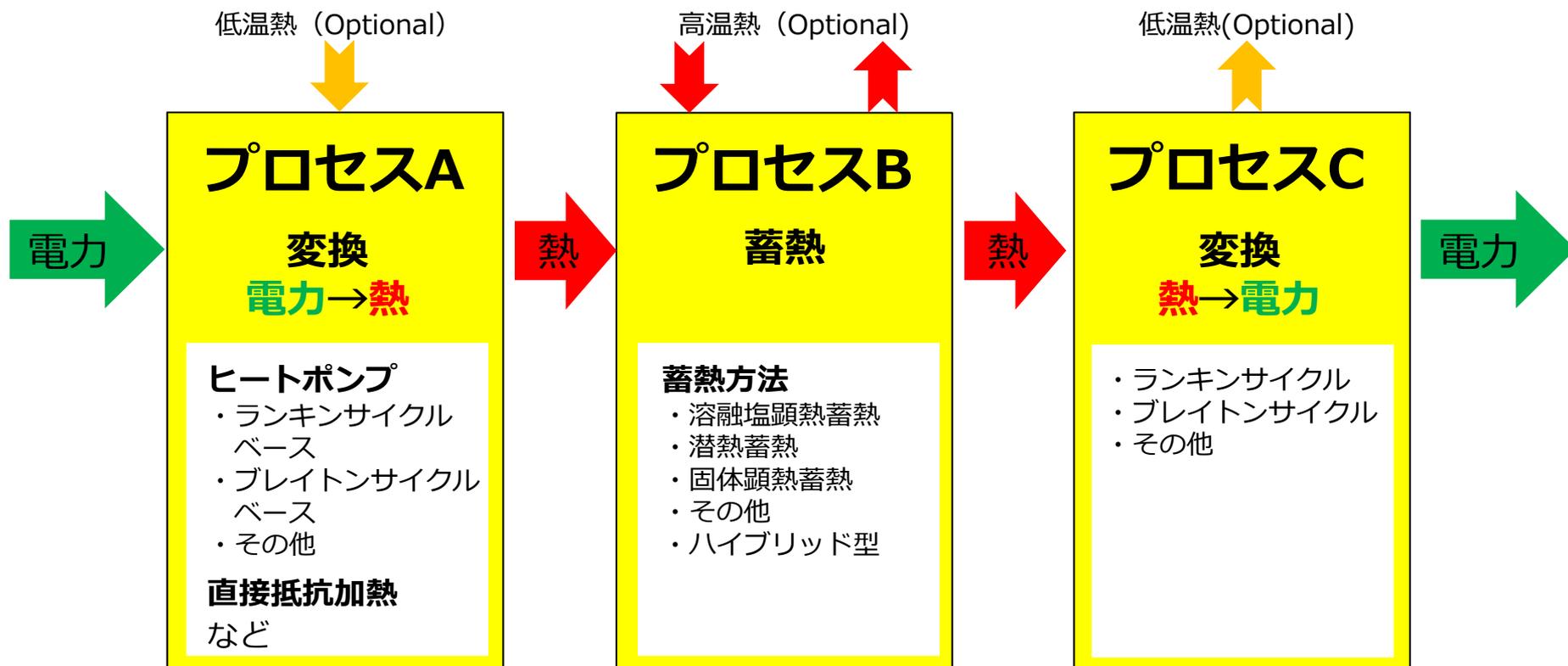
- カルノーバッテリーの基本コンセプト
- IEA Annex 36 “Carnot Batteries” の紹介
- 北海道大学 “*h*-MEPCM” の紹介

- カルノーバッテリーの基本コンセプト
- IEA Annex 36 “Carnot Batteries” の紹介
- 北海道大学 “*h*-MEPCM” の紹介

カルノーバッテリーの基本コンセプト

カルノーバッテリーは、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、それを「中規模～大規模の蓄熱システム」に一時貯蔵し、電力需要の大きい時間帯に貯蔵した熱を使って発電する“Power-Heat-Power”タイプの再生エネ安定利用法。コンセプト自体は1922年に提案されていたが、近年、蓄熱技術の進歩により実装に向けた開発が急速に進んでいる。

カルノーバッテリーの基本コンセプト

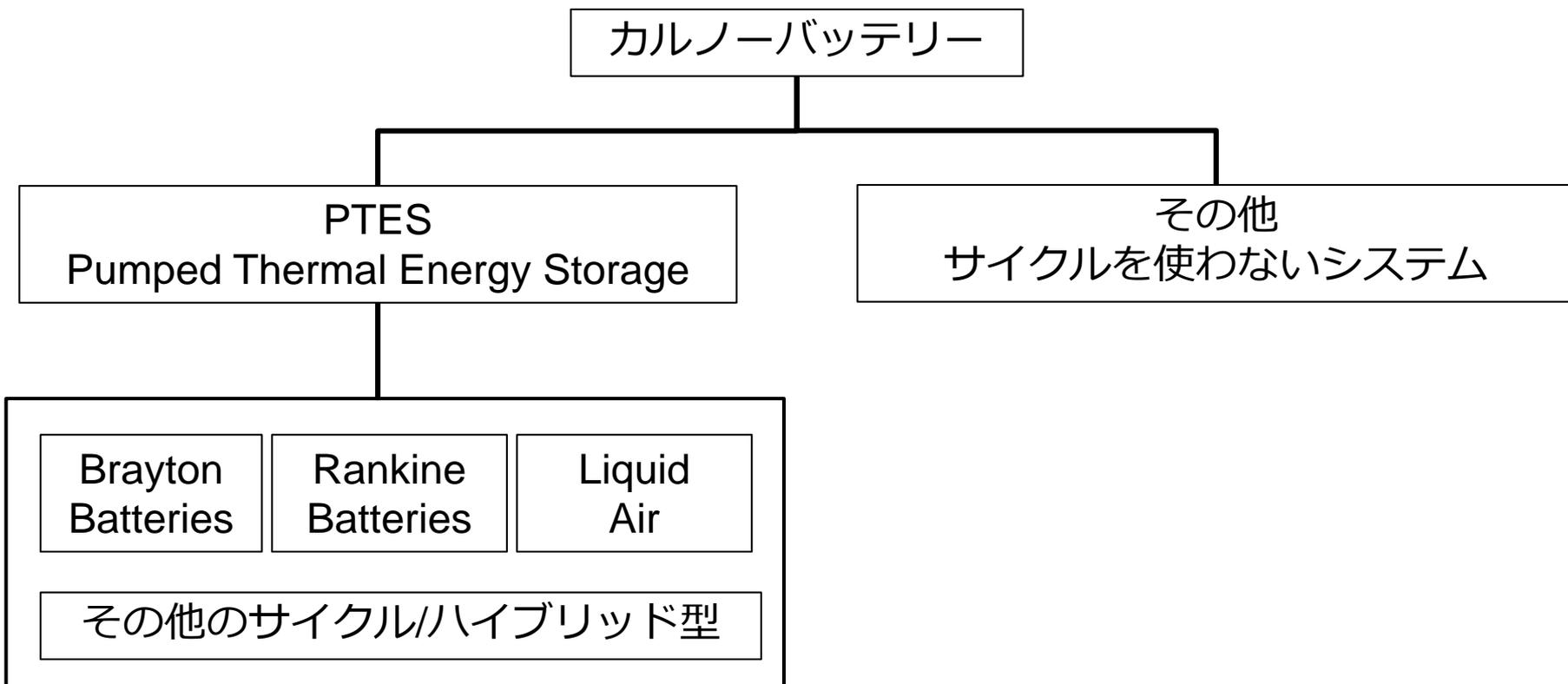


プロセスAでは電力および低温の熱を投入し、ブレイトンサイクルやランキンサイクル等の逆サイクルでヒートポンプ的に低温熱を電力で昇温（または冷却）する。電力から直接抵抗加熱で高温熱を発生させるケースも存在。

プロセスBではプロセスAで発生させた熱を蓄熱し、プロセスCでは、順サイクルで熱を電力へと変換し、供給。必ず低温熱が発生するため、地域熱供給などと組み合わせることも可能。

カルノーバッテリーの大まかな分類（未確定）

現状では、カルノーバッテリーに明確な分類・定義は確立されていない。定義やカルノーバッテリーの効率などの統一的な指標を作る国際的な連携の動きがある（[IEA Annex 36 “Carnot Batteries”](#)）。

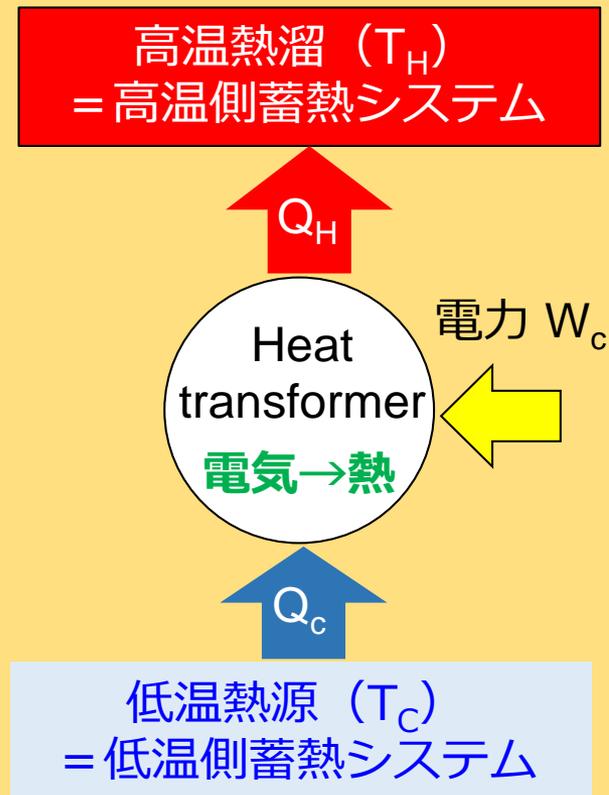


PTES(Pumped Thermal Energy Storage) 7

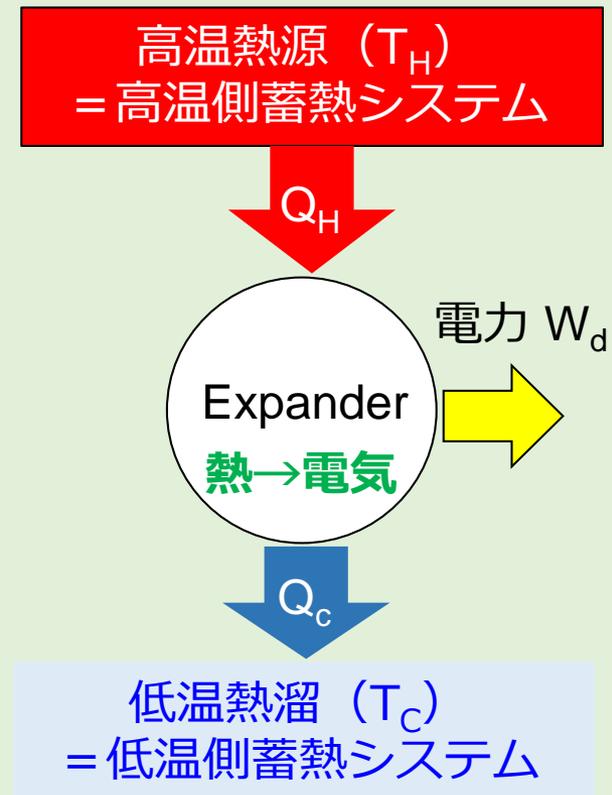
電力および低温の熱を投入し、ブレイトンサイクルやランキンサイクル等の逆サイクルでヒートポンプ的に低温熱を電力で昇温（または冷却）し、蓄熱し、順サイクルを使って発電。

PTESの原理

蓄熱/蓄電モード



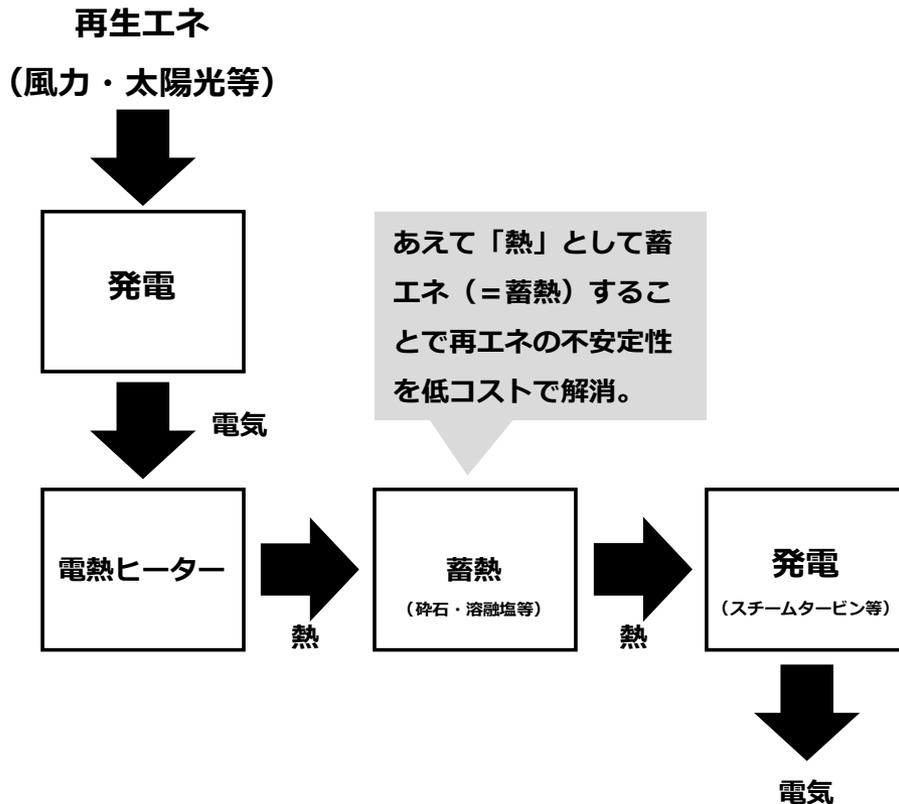
放熱/発電モード



サイクルを使わないカルノーバッテリー

例：Siemens社 Electric Thermal Energy Storage (ETES)

Siemensの碎石を利用した蓄熱システム。蓄熱温度は最高900°C程度。電気ヒーターを使って高温熱を発生させ、Airを熱媒体として蓄放熱。

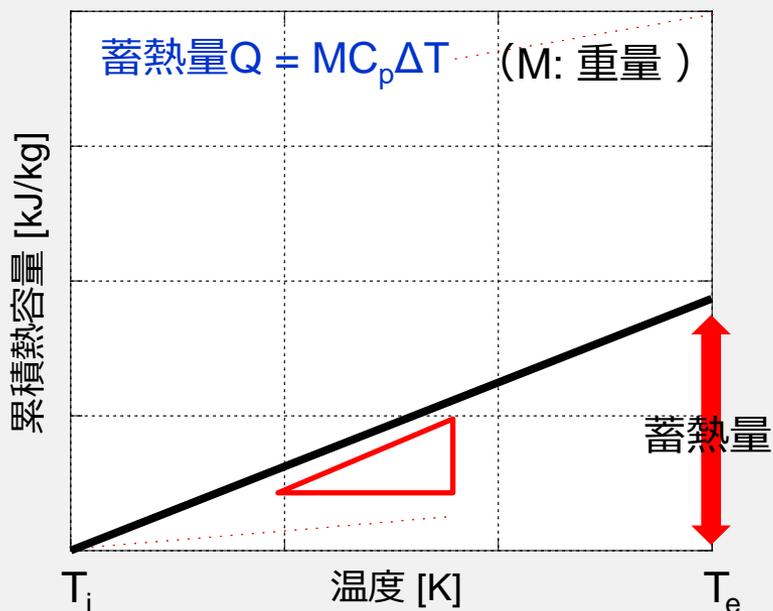


- ・ 企業：Siemens
- ・ 蓄熱体：碎石
- ・ 熱媒体：Air
- ・ 蓄熱温度：600 °C（最高900 °C）
- ・ 現在パイロットプラント試験が稼働中。
1000tonの碎石で130MhWの蓄熱量。
2022年に商業化予定。

固体顕熱蓄熱技術とその検討例

物質（＝顕熱蓄熱材料）の比熱のみを利用して蓄熱。相変化は伴わない。
基準温度との温度差が大きいほど蓄熱量は増加。

顕熱蓄熱の作動原理



蓄熱材

- ・ 砕石、火山岩、鉱物
- ・ コンクリート
- ・ セラミックス、煉瓦

システム例

Siemens社 ETES

- ・ 砕石の充填層
- ・ 空気が熱媒体
(閉ループ)
- ・ 600 °C (最高900°C)

[https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=en/pressrelease/2016/windpower-renewables/pr2016090419wpen.htm&content\[\]=WP](https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=en/pressrelease/2016/windpower-renewables/pr2016090419wpen.htm&content[]=WP)

SEA-NVE社/DTU

- ・ 砕石の充填層
- ・ 空気が熱媒体
- ・ 650°C程度までを想定

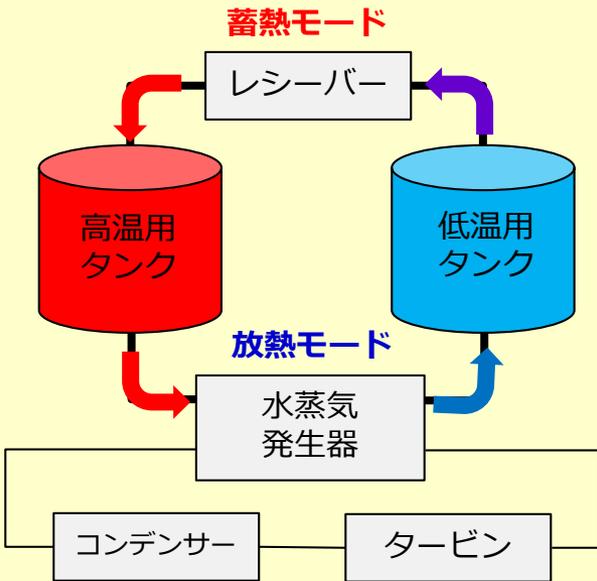
MAYTA MOSCOSO, FABRIZIO, "Experimental characterization and modeling of a vertical rock bed for high temperature thermal energy storage"

EnergyNest 社

- ・ コンクリートが蓄熱材
- ・ シェル&チューブ（鋼鉄製）
- ・ モジュール構造で拡張可能
- ・ 高温蓄熱可能

<https://energy-nest.com/company/>

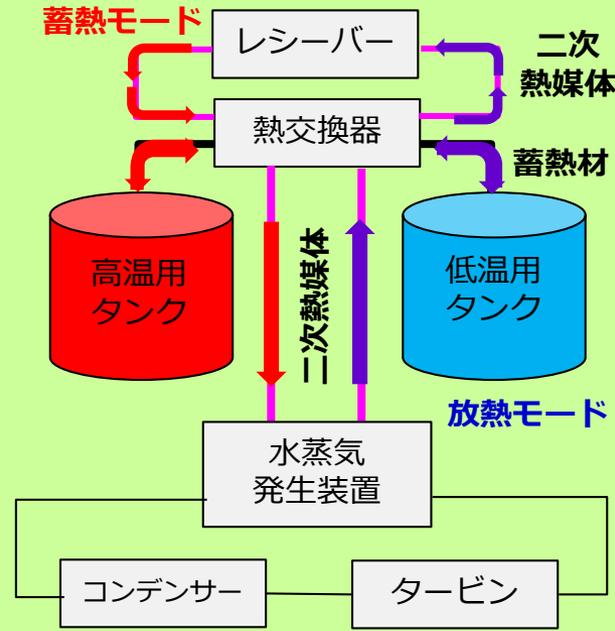
直接二槽式



材料および操業温度

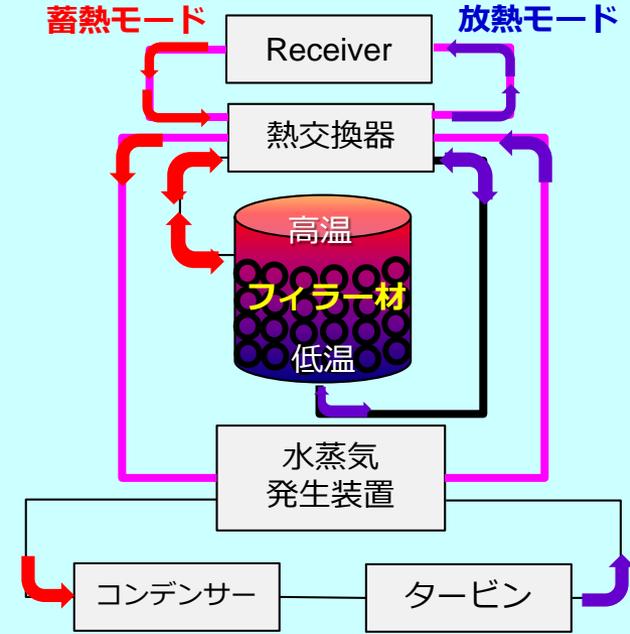
- ・ 熱媒体 = 蓄熱材 : 混合硝酸塩
- ・ 操業温度 : 300- 565 °C

間接二槽式



- ・ 熱媒体 : 熱媒油など
- ・ 蓄熱材 : 混合硝酸塩
- ・ 操業温度 : 300- 400 °C

間接単槽式



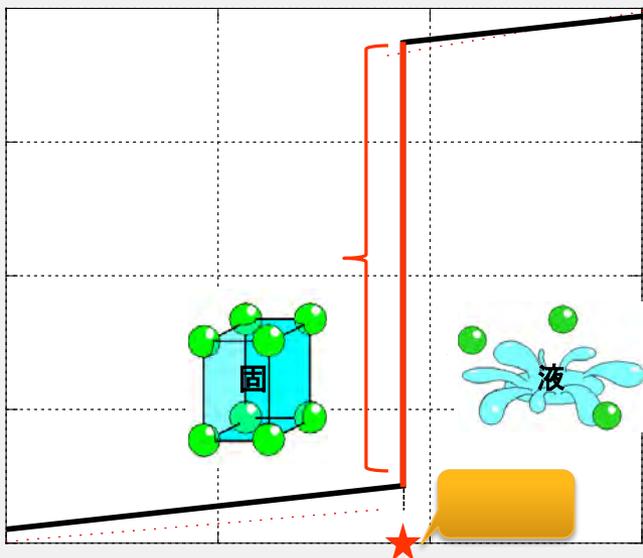
- ・ 熱媒体 : 熔融塩・熱媒油など
- ・ 蓄熱材 : 熔融塩 & 岩石等の固体 (操業温度 : 300- 565 °C)

- ・ 硝酸塩を用いた二層式の技術は太陽熱発電において確立された技術でありMalta社やRWE power 社のシステムにおいて導入が計画。
- ・ 研究開発では、単層式 (温度成層式) やより高温利用可能な熔融塩の検討が進んでいる。

潜熱蓄熱技術とその検討例

- 潜熱蓄熱= 物質の相変態潜熱（主に固液）を利用
- PCM = **P**hase **C**hange **M**aterial= 相変化物質、潜熱蓄熱材

潜熱蓄熱の作動原理



蓄熱材 (PCM)

- 糖アルコール（ $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）
- 硝酸塩、炭酸塩、塩化物
- 金属、合金

システム例

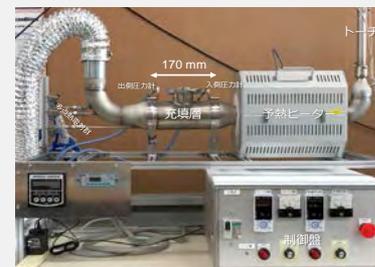
AZELIO社

- Al-Si合金PCMによる蓄熱
- 蓄熱温度 600°C 程度
- 蓄熱槽壁面を熱媒体が流れる構造
- 実証試験中

<https://www.azelio.com/technology/thermal-energy-storage/>

北海道大学（参考）

- Al系合金をコアとする潜熱蓄熱コンジット体による蓄熱
- 粒子や八ニカムの充填層を検討中。
- 蓄熱温度： $\sim 750^{\circ}\text{C}$
- NEDO先導研究にて $1\sim 2\text{kW}$ スケールで検討中



- カルノーバッテリーの基本コンセプト
- **IEA Annex 36 “Carnot Batteries” の紹介**
- 北海道大学 “*h*-MEPCM” の紹介

カルノーバッテリー技術の現状と集成に向け

- ・カルノーバッテリーはメガワット級からギガワット級まで、従来のバッテリーよりもより低コスト低環境負荷な再生可能エネルギー利用型の発電方法となる可能性がある。
- ・カルノーバッテリーの様々なコンセプトは提案されているが、包括的な技術的・経済的検討は実施されていない。
- ・カルノーバッテリーに関する実験設備・実証設備を持つ機関は少ない。
- ・現在までに、産側と学側を体系的に結び付け、最先端の研究開発をアセスメントし、将来のエネルギーシステムにおけるカルノーバッテリーの議論できる国際的なプラットフォームが確立されていない。



IEA Annex36 Carnot Batteries の設立（2020年1月）
OA: Dr. Dan Bauer（DLR）

IEA（国際エネルギー機関）エネルギー貯蔵技術協力プログラム (Energy Conservation and Energy Storage (ECES) – IEA Technology Collaboration Programme)

IEAが主催する39の技術協力プログラム（TCP's）の一つで、電力貯蔵、蓄熱、分散型エネルギー貯蔵、ボアホール蓄熱（地中熱利用）などのエネルギー貯蔵技術の普及促進を目的とする。日本では、ヒートポンプ・蓄熱センターが締結者としての指定を受け、国際共同研究活動（= Annex）を展開している。

参加国（2019年11月時点）

ベルギー、カナダ、中国、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、イタリア、日本、オランダ、ノルウェー、オーストリア、スロベニア、韓国、スウェーデン、スイス、トルコ、英国、米国の19ヶ国及び3スポンサー（ドイツ、アイルランド、スペイン）

蓄熱専門委員会 IEA蓄熱分科会

当財団は、日本政府からIEAエネルギー貯蔵技術協力プログラム（Energy Storage-IEA Technology Collaboration Programme）の締約者としての指定を受け、本プログラムに参加し、関連する国際共同研究活動を展開しております。

ホームページはこちら ⇒ 

IEA蓄熱分科会は、上記プログラムにおける日本のナショナルチームとして、各種エネルギー貯蔵技術の研究・開発・応用・設計・評価・経済性などに関する情報交換を行い、日本におけるエネルギー貯蔵技術の一層の発展と普及を目的として活動しております。

当分科会の活動としては、定例会合を年2回程度開催し、あわせて参加する各Annex（国際共同研究）毎にワーキンググループを編成し、必要に応じ会合を開催しております。

またこれらの活動は、3年毎に開催されるエネルギー貯蔵国際会議(至近では2021年スロベニアにて開催予定)と密接に連携しながら運営しております。

令和2年度において、日本が参加中および実施予定のAnnexは、以下の通りです。

1) Annex36「カルノーバッテリー（Carnot Batteries）」への参加

エネルギーの有効活用に向け、蓄熱発電（カルノーバッテリー）に関する産業界・学界の共通のプラットフォームを確立することを目的としています。

（期間：2020年1月～2022年12月終了予定。 OAはドイツ）

2) 新Annexの提案

東京大学 大同教授により「エネルギー貯蔵のスマートデザインおよび制御」に関する新Annexを提案中です。（活動決定次第、随時ご連絡します）

< 会費 > 賛助会員法人：330,000円/社・年、非賛助会員法人：385,000円/社・年 ※すべて消費税10%込

日本の参加したAnnex

- ① Annex 8：地下蓄熱の普及促進（終了）
- ② Annex 10：相変化材料と化学反応による蓄熱（終了）
- ③ Annex 13：地下蓄熱井戸およびボアホールの設計、掘削、メンテナンス技術（終了）
- ④ Annex 14：冷房用蓄熱技術（終了）
- ⑤ Annex 17：潜熱蓄熱と化学反応を応用した最新蓄熱技術—
フィージビリティスタディとデモンストレーションプロジェクト（終了）
- ⑥ Annex 18：蓄熱技術応用による熱エネルギー輸送（終了）
- ⑦ Annex 20：蓄熱によるサステナブル(持続可能)な冷房（終了）
- ⑧ Annex 21：（地中熱利用における）熱応答試験（終了）
- ⑨ Annex 24：コンパクトな蓄熱材料の開発とシステムへの適用（終了）
- ⑩ Annex 25：先進蓄熱技術を用いたCO2削減のための余剰熱有効利用（終了）
- ⑪ Annex 27：地中採熱ボアホール蓄熱における設計・施工・運転時の品質管理（2019年度終了）
- ⑫ Annex 29：蓄熱システム構築に向けたコンパクトな蓄熱材料の開発と研究（終了）
- ⑬ Annex 30：低コストで効率的なエネルギー管理とCO2削減に貢献する蓄熱材料（2018年度終了）
- ⑭ Annex 31：蓄エネルギーを組み込んだ高効率建物／高効率DHCの最適化（設計・運用）の検討（2018年度終了）

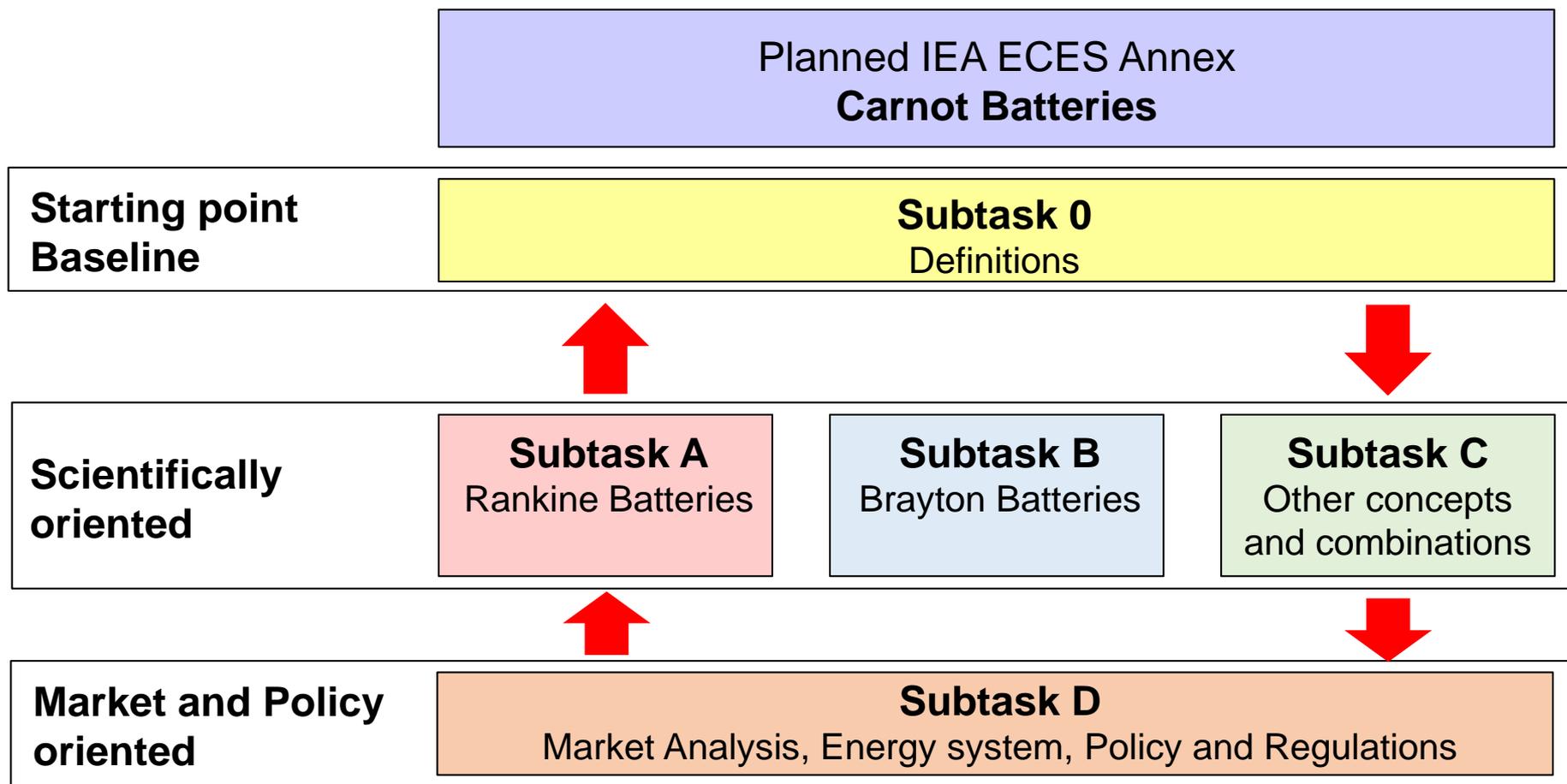
Annex36の目的

将来のエネルギーシステムにおいてカルノーバッテリーが持つポテンシャルを体系的に調査、評価、強化するために、産学両方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、以下の項目を達成する。

- ・ 主要なカルノーバッテリー技術、及びアプリケーションのマッピング
- ・ カルノーバッテリーおよびその構成要素のKPIの開発
- ・ カルノーバッテリーの技術的競争力と研究開発需要の評価
- ・ カルノーバッテリーが提供すべき/提供できるサービスを特定することにより、市場化を支援
- ・ カルノーバッテリーの利点と可能性、および展開を支援するための要件に基づいて、政策の提言および適切な規制を構築。
- ・ 研究会（ワークショップ）、白書の執筆、オープンソースのデータセットの構築及び科学技術論文の出版によって、カルノーバッテリーの国際的な普及を促進。

Annex36の枠組み：体制

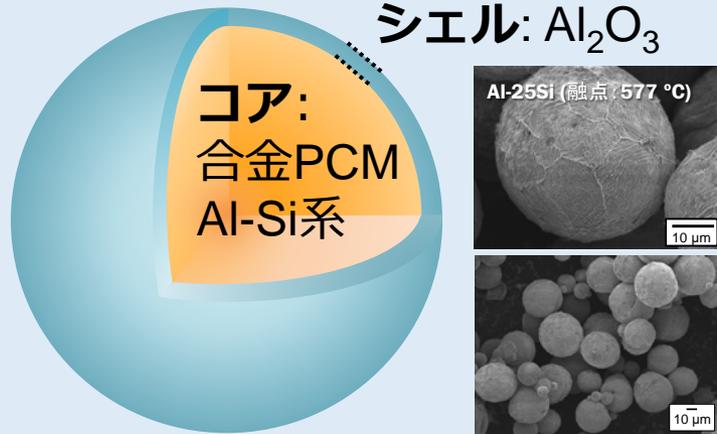
Subtask 0、Subtask A～Dの5つのSubtaskで構成。複数のSubtaskに参加する機関もあり。Subtask A、B、Cは電気→熱変換（または熱→電気）で分けられ、同じSubtaskの参加機関でも検討している温度域は様々。



- カルノーバッテリーの基本コンセプト
- IEA Annex 36 “Carnot Batteries” の紹介
- **北海道大学 “*h*-MEPCM” の紹介**

北大発 蓄熱材料 *h*-MEPCM

合金系PCMを原材料としたコア（合金系PCM）－ シェル（ Al_2O_3 ）型の蓄熱マイクロカプセルを開発。



- 固液相変化を利用した潜熱蓄熱
- 金属・合金をPCMとして使う新発想
- **1 GJ m⁻³ 級の高蓄熱密度**
- **既往蓄熱材比100倍以上の高熱伝導率**
- **優れた繰り返し耐久性 > 3000cycle**
- **優れた成型・加工性**
- 合金組成の調整により融点 = 作動温度の調整が可能 200～800 °C（研究中）

***h*-MEPCM**（模式図とSEM画像）

高蓄熱密度、高熱伝導性と容易な成型加工性を併せ持つ

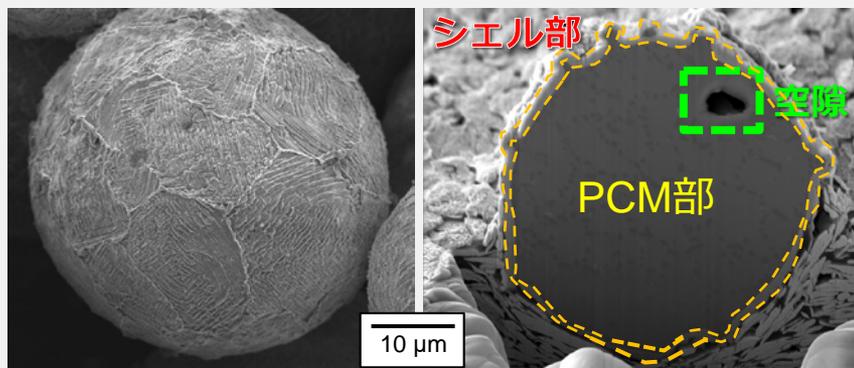
h-MEPCM :
Hokkaido Univ. 北大製
Micro-Encapsulated
マイクロカプセル化
Phase Change Material

合金系潜熱蓄熱マイクロカプセル“*h*-MEPCM”

をメインコンポーネントとした高性能蓄熱体の開発/蓄熱・熱制御モジュールのプロトタイプを設計・開発による高速かつ高密度な次世代蓄熱技術確立への基盤を構築に向けたプロジェクトがスタート（2020年6月より 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）

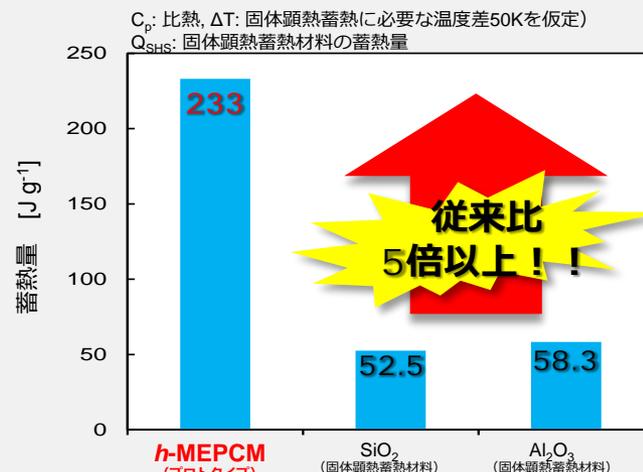
h-MEPCM の特徴

Point 1 緻密で硬いセラミックスシェル



開発MEPCMのシェルは緻密で硬いセラミックスであるため破壊されることなく加工や成型可能！

Point 2 蓄熱密度が高い (ΔT: 50K想定)



h-MEPCMは従来蓄熱材比5倍以上の高蓄熱密度！

Point 3 熱伝導率が高い

金属/合金PCM (提案)

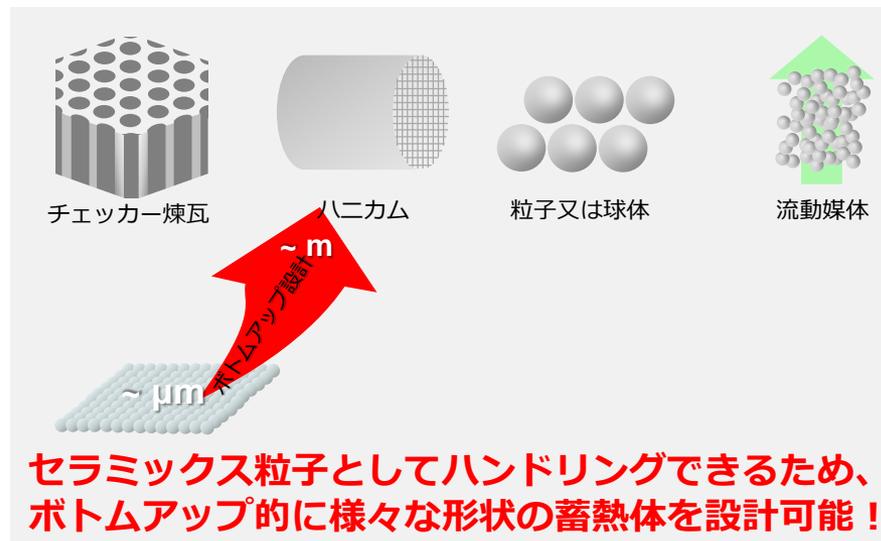
PCM	融点 [°C]	熱伝導率 (at 室温) [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Mg-Zn (49-51mass%)*	342	75
Al-Si (75-25mass%)*	580	167
Al*	660	237
Cu-Si (80-20mass%)*	804	371
Cu*	1084	398

熔融塩PCM (従来)

PCM	融点 [°C]	熱伝導率 (at 融点) [W m ⁻¹ K ⁻¹]
NaNO ₃	307	0.56
NaOH	318	0.842
KNO ₃	337	0.463
MgCl ₂	714	1.19
KCl	770	0.95
NaCl	800	1.26
Na ₂ CO ₃	858	1.84
K ₂ CO ₃	898	1.88
NaF	995	1.25

金属/合金PCMを使うことで圧倒的な高熱伝導性！

Point 4 成型・加工自由度が高い



プロジェクトの狙い

h-MEPCM応用成果を

「即」使える/用途がイメージできる具体的な形で示す。

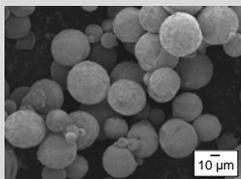
①～③を一気通貫で仕上げ、ユーザー候補のシステム導入イメージの明確化をサポート
蓄熱体の性能 GJ m^{-3} と熱交換器の性能 kW L^{-1} を明確にする

成果①：蓄熱体



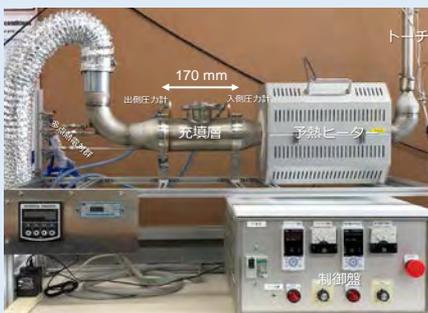
- ・「即」使える可能性
- ・この時点で実機シミュレーションも可能
- ・自社の持ち味"+a"で用途の想定を拡大可能

現状：粉



- ・「即」は使えない
- ・ものづくりが必要
- ・プロセスが見えない

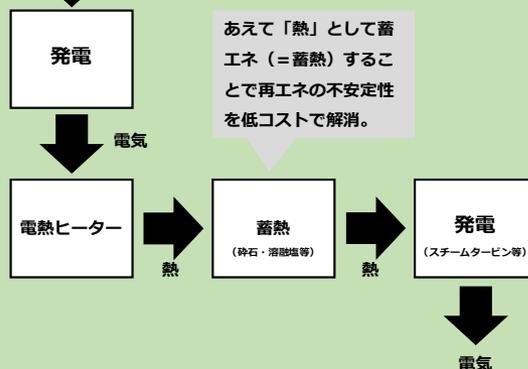
成果②：プロトタイプ熱交換器



- ・用途によっては「即」製品となる可能性
- ・実際の性能が出ており信頼性の高いシミュレーションモデルを構築可能

成果③：シミュレーション&実装検討

再生エネ
(風力・太陽光等)

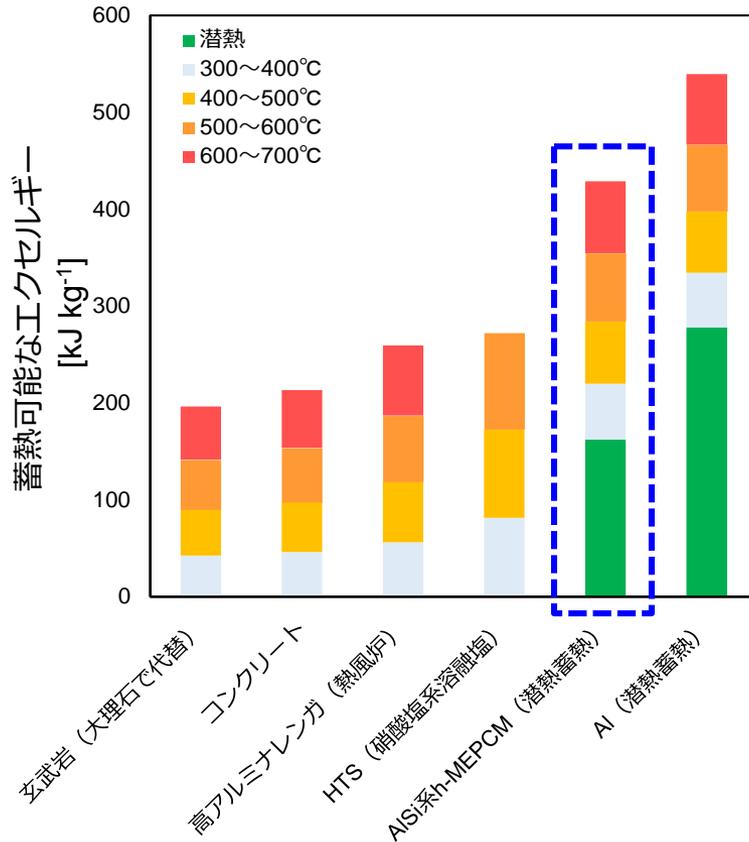


- ・実機の性能があらゆるスケールで明確化
- ・開発プロジェクトをそのまま上申可能
- ・コストイメージがあるのが理想。

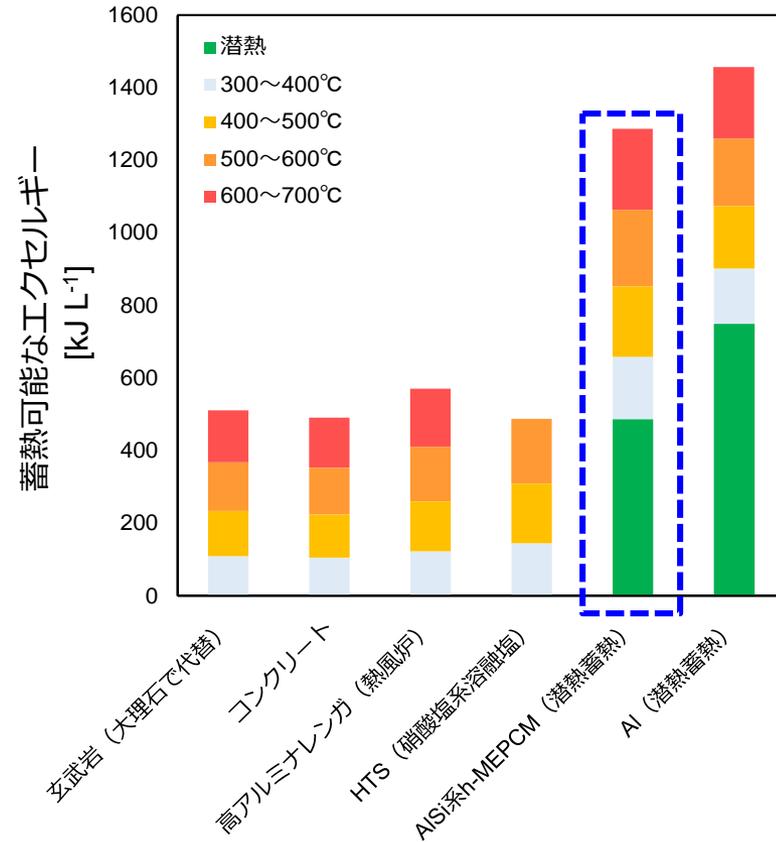
CBでの使用温度範囲を想定した蓄熱量の比較 (CB:カルノーバッテリー)

蓄熱可能なエクセルギー

重量基準 (= 蓄熱容量)



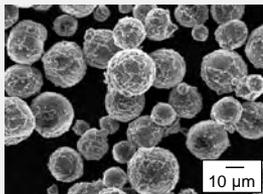
体積基準 (= 蓄熱密度)



操業時に想定される100~400 Kの温度幅を考慮しても、欧州を中心に検討が進んでいる固体顕熱蓄熱材、溶融塩よりも、*h*-MEPCMは重量基準で約2倍以上、体積基準で約3倍近くのエクセルギーを蓄熱可能であり、大きな可能性がある。

h-MEPCM のラインナップと研究開発状況

Pure Al

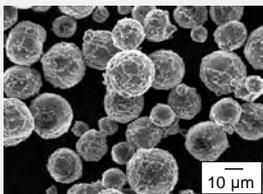


量産化検討以前

- T_m : 660°C
- L_v : 0.5~0.9 GJ m⁻³
- L_m : 150~300 J g⁻¹

T. Nomura et al., Solar Energy Materials and Solar Cells 193 (2019) 281-286

Al-Si-Cu

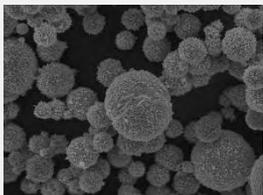


論文投稿準備中

- T_m : 520°C
- L_v : 0.7~1 GJ m⁻³
- L_m : 160~230 J g⁻¹

開発中 (T_m : 200~400 °C)

Pure Ga



2020年論文受理

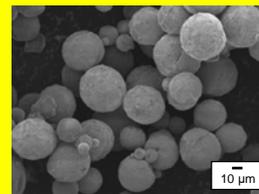
- T_m : 29.5°C
- L_v : 0.2~0.45 GJ m⁻³
- L_m : 50~80 J g⁻¹

K. Kashiya et al., Energy Storage, <https://doi.org/10.1002/est2.177>

>700 °C

開発中 ($T_m > 700$ °C)

Al-Si alloy



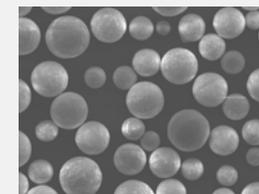
量産化試行中!

- T_m : 577°C
- L_v : 0.5~1 GJ m⁻³
- L_m : 180~350 J g⁻¹

T. Nomura et al., Scientific Reports 5, 9117 (2015)

500 °C

Zn-Al alloy

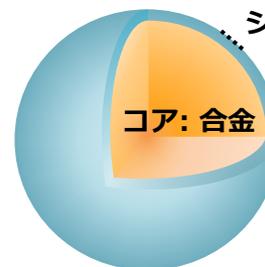


2020年論文受理

- T_m : 380-500 °C
- L_v : 0.5~0.8 GJ m⁻³
- L_m : 80~120 J g⁻¹

T. Kawaguchi et al., Applied Energy 276 (2020) 115487

100 °C

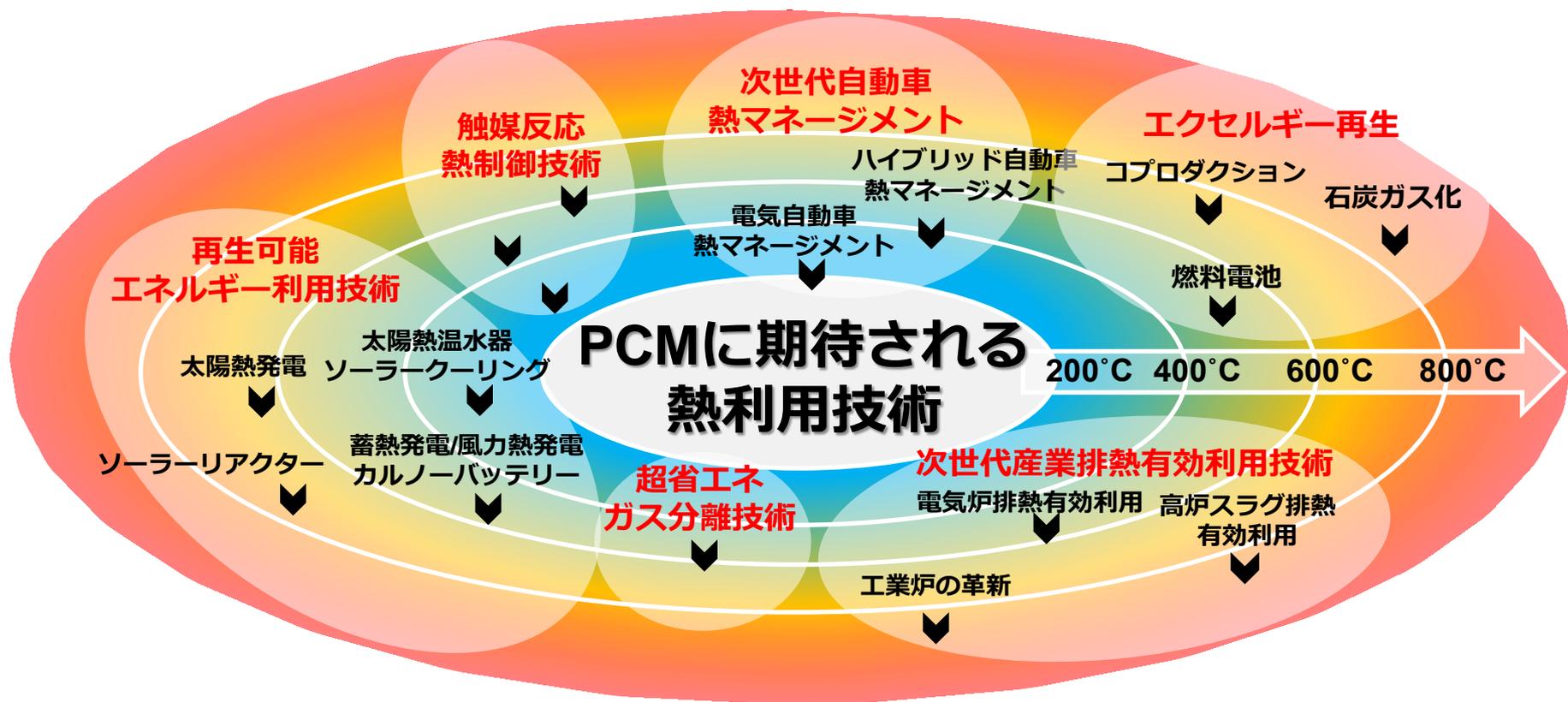


シェル: セラミックス

コア: 合金

h-MEPCM

h-MEPCMに期待される熱利用技術



- 省エネルギーから再生可能エネルギーの利用まで、様々な分野/利用温度帯においてh-MEPCMの適用が期待できる。
- 北海道大学では、その全てに適用可能な革新的蓄熱材料h-MEPCMを見出し、研究・開発している。

まとめ

- 近年、蓄エネの選択肢として蓄熱 \equiv カルノーバッテリー技術が注目されており、実装に向けた検討が加速している。
- カルノーバッテリー技術における蓄熱技術として、高温領域での蓄熱技術の開発が進んでいる。
- 北海道大学では、カルノーバッテリー技術にも適用可能な高温蓄熱材 h -MEPCMを開発した。
- h -MEPCM応用開発プロジェクトとして、2020年6月より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がスタートした。
ご注目頂けますと幸いです。

ご清聴ありがとうございました。

本発表のカルノバッテリーに関する情報の作製にあたり、
（一財）エネルギー総合工学研究所 岡崎徹様
に多大なるサポート（情報提供、添削など）を頂きました。
この場を借りて深く御礼申し上げます。