

～カーボンニュートラル時代の熱エネルギー－革新議論と社会実装－～



相変化材料の開発と 広義のサーマルマネジメント技術への展開

熱利用による熱利用（≡省エネ）以上の機能/価値創出
を見据えた技術展開を！！

北海道大学大学院工学研究院 准教授 能村貴宏

蓄熱技術（TES: Thermal Energy Storage）とは

2

蓄熱とは・・・熱を**貯めて**、**運んで**（時間的-空間的）、**使う**技術。



受入れるシステム
が無ければ
環境へ捨てられる
（＝廃熱）

蓄熱技術（TES: Thermal Energy Storage）とは

3

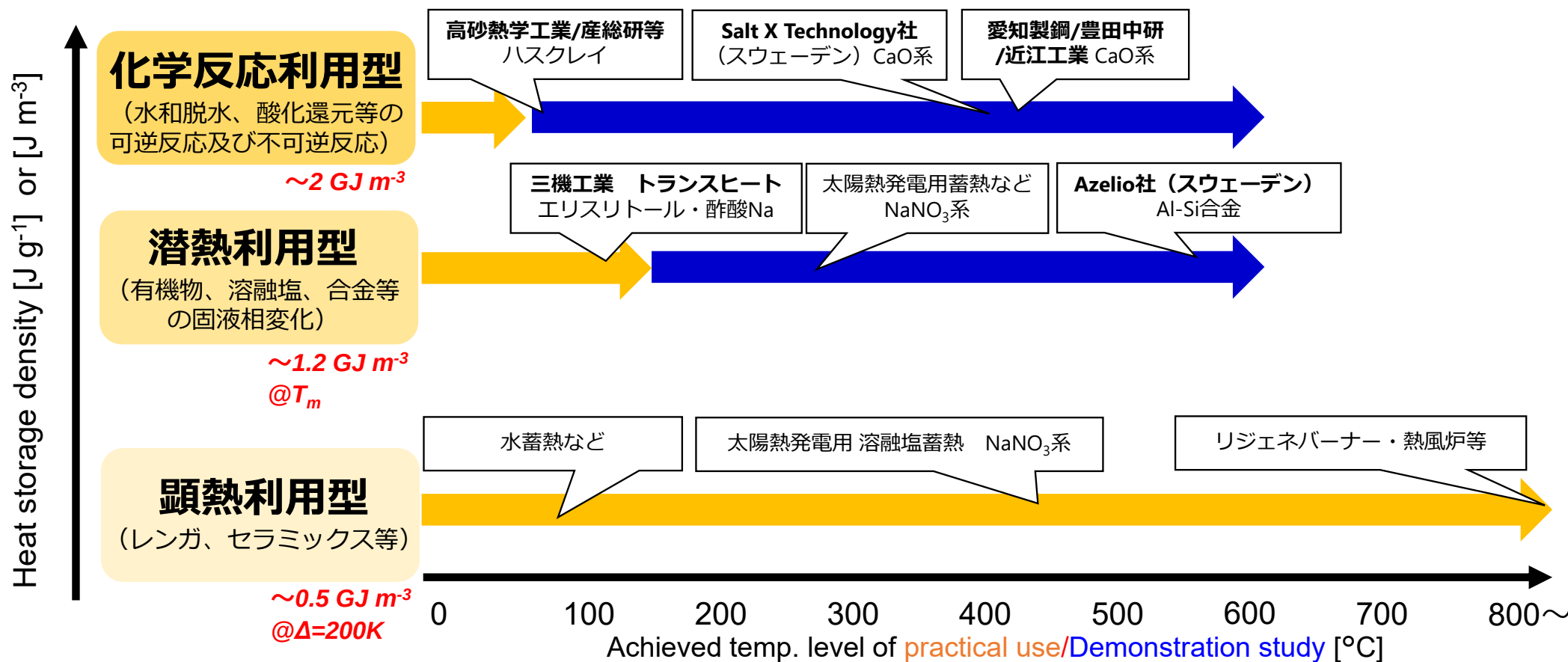
蓄熱とは・・・熱を**貯めて**、**運んで**（時間的-空間的）、**使う**技術。



- ・ 貯める時間はsec～daysまで幅広い。運ぶ距離も μm ～kmまで幅広い。
- ・ 数secや数 μm なら蓄熱というより「熱制御」のイメージ。
- ・ 時間と距離のスケールをフレキシブルに考えることで蓄熱以外の付加価値を創出可能。

蓄熱技術の分類と実用/実用検討温度領域

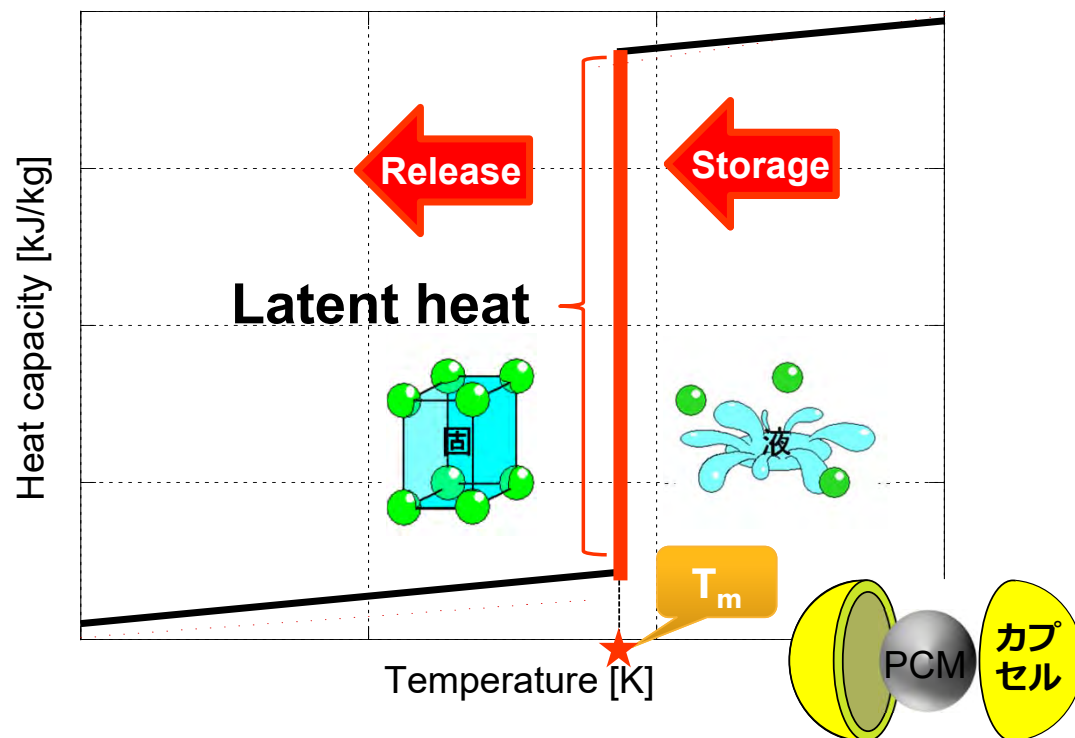
4



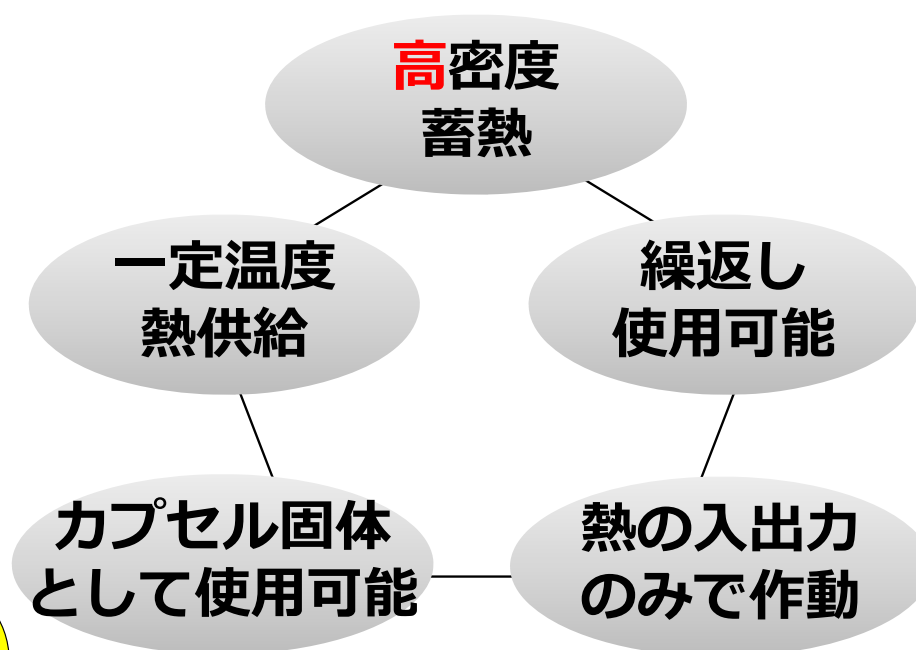
- ・ 中高温領域において高性能な化学・潜熱蓄熱の開発が進んでいるが「普及」に至った例は無い。
- ・ 蓄熱のみを目的とするのではなく「 $+\alpha$ の付加価値または機能」を創出し、多種多様なサーマルマネジメントへ応用可能な材料の開発/思考の転換

- 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

PCMの作動原理



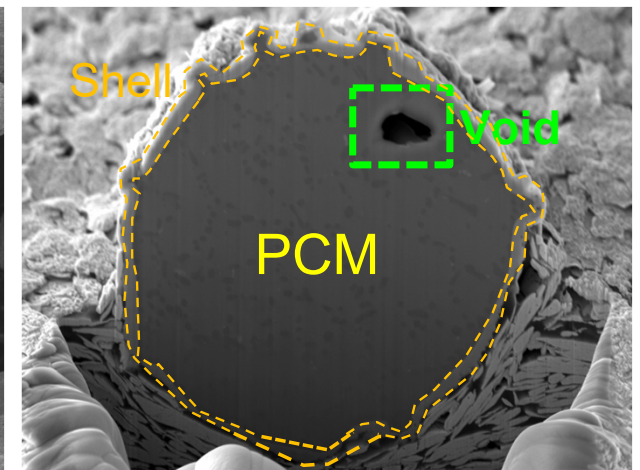
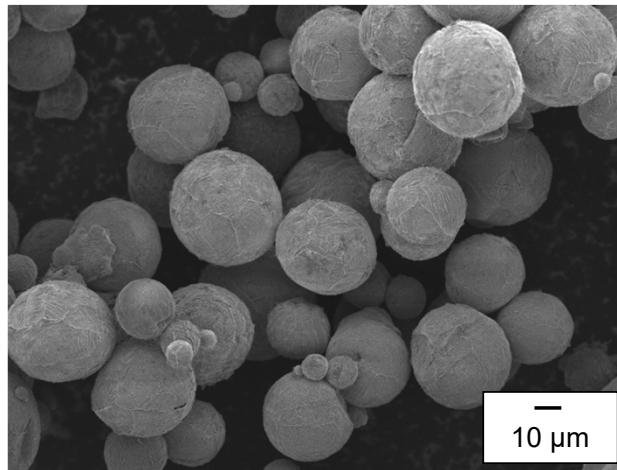
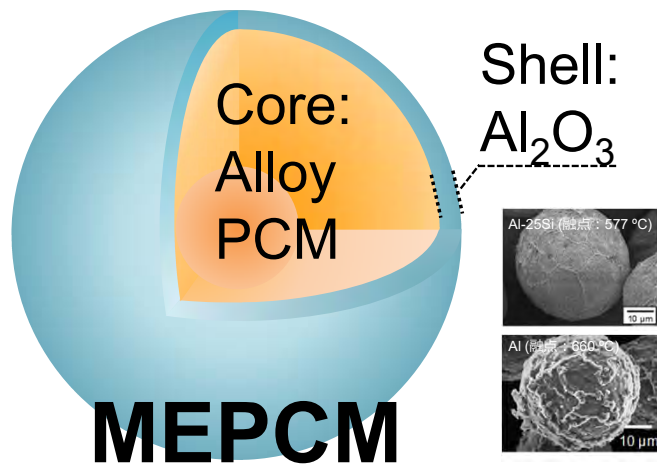
PCMの特徴・長所



合金系相変化マイクロカプセル : MEPCM

6

- ・ 金属/合金をPCM/原材料として利用し、化成被膜/酸化熱処理の簡易な二段階プロセスで製造
- ・ コア（合金PCM） – シェル（ Al_2O_3 ）型の中高温用相変化マイクロカプセル

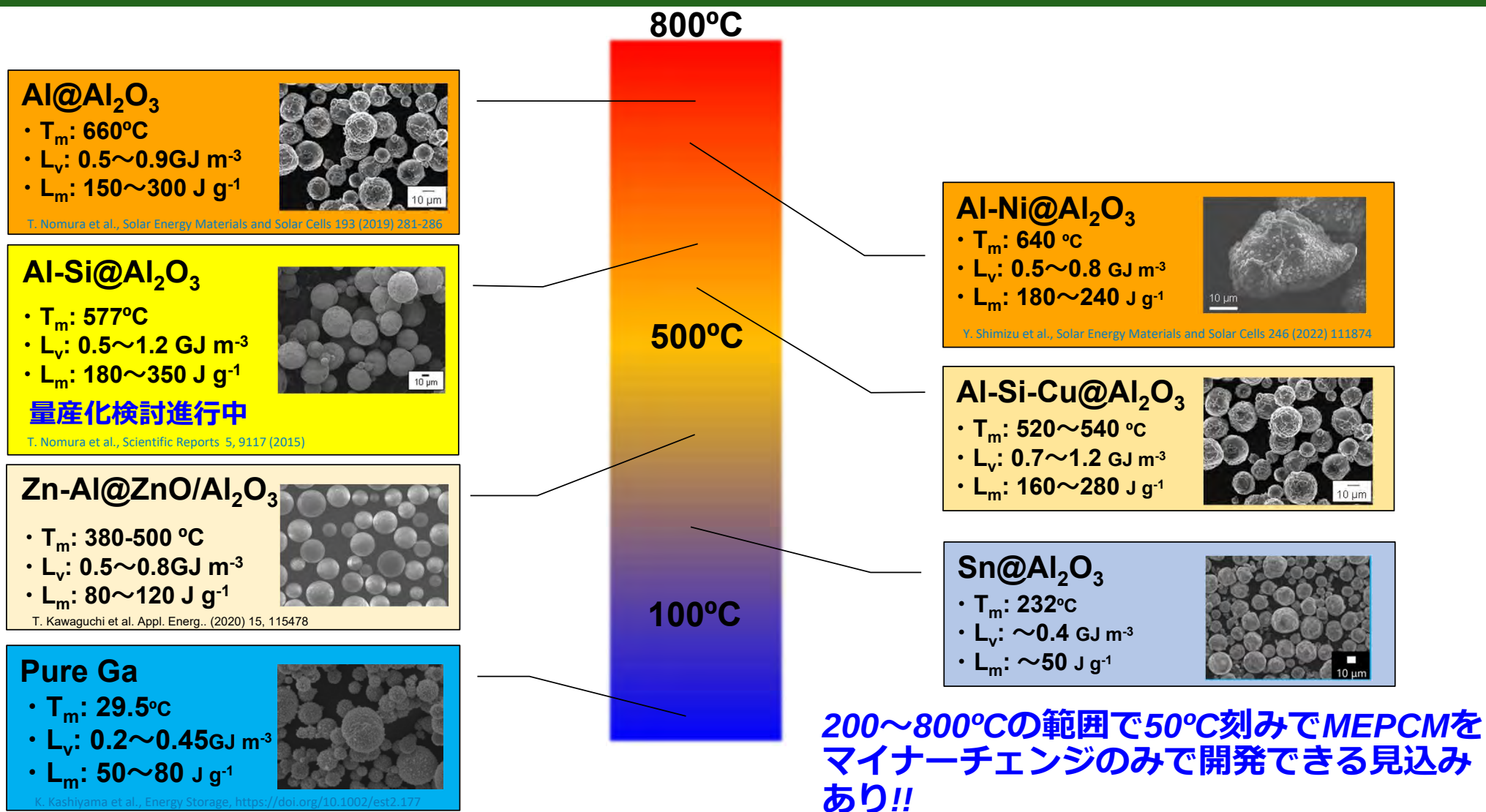


T. Nomura et al., Sci. Rep. (2015) 5, 9117

MEPCM: Micro-Encapsulated Phase Change Material

- ・ 高い潜熱蓄熱密度 : $1 \text{ GJ m}^{-3} @ T_m$
- ・ 高い顕潜熱蓄熱密度 : $2 \text{ GJ m}^{-3} @ \Delta T = 300 \text{ K}$
- ・ 既往潜熱蓄熱材比100倍以上の高熱伝導率
- ・ 優れた繰り返し耐久性 > 3000 cycle
- ・ セラミックスシェルのため熱/化学/機械的に安定
- ・ マイクロ粒子 (20~100µm程度)
- ・ 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

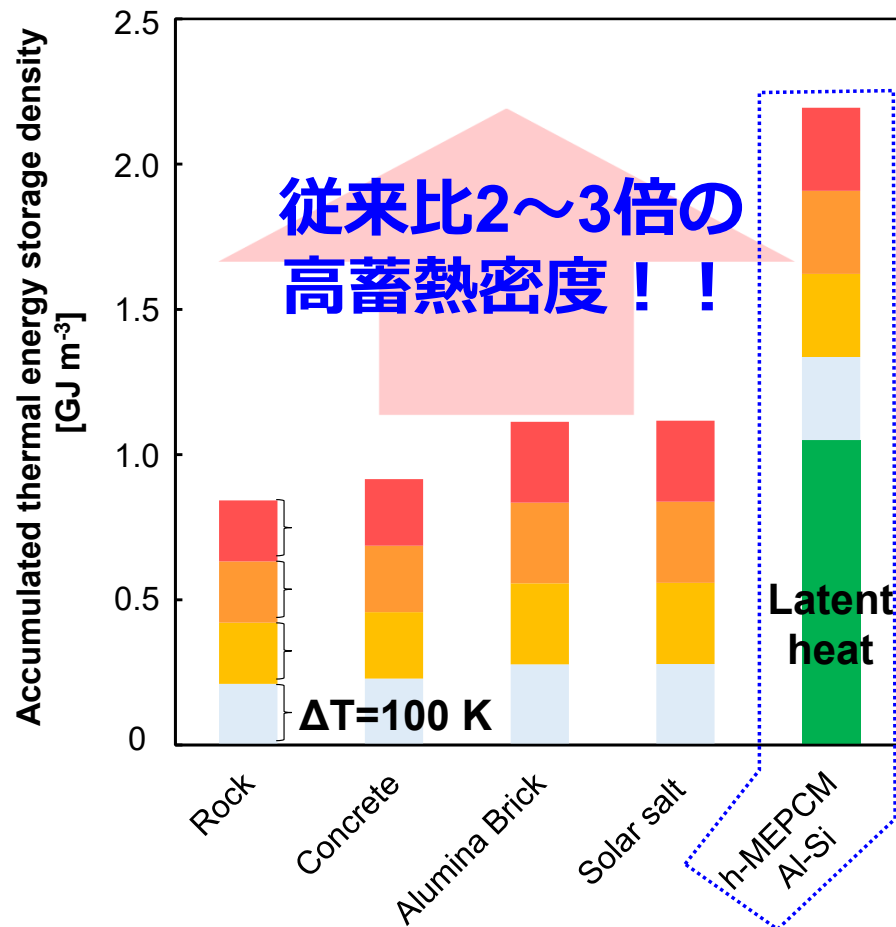
特徴①：多様な作動温度



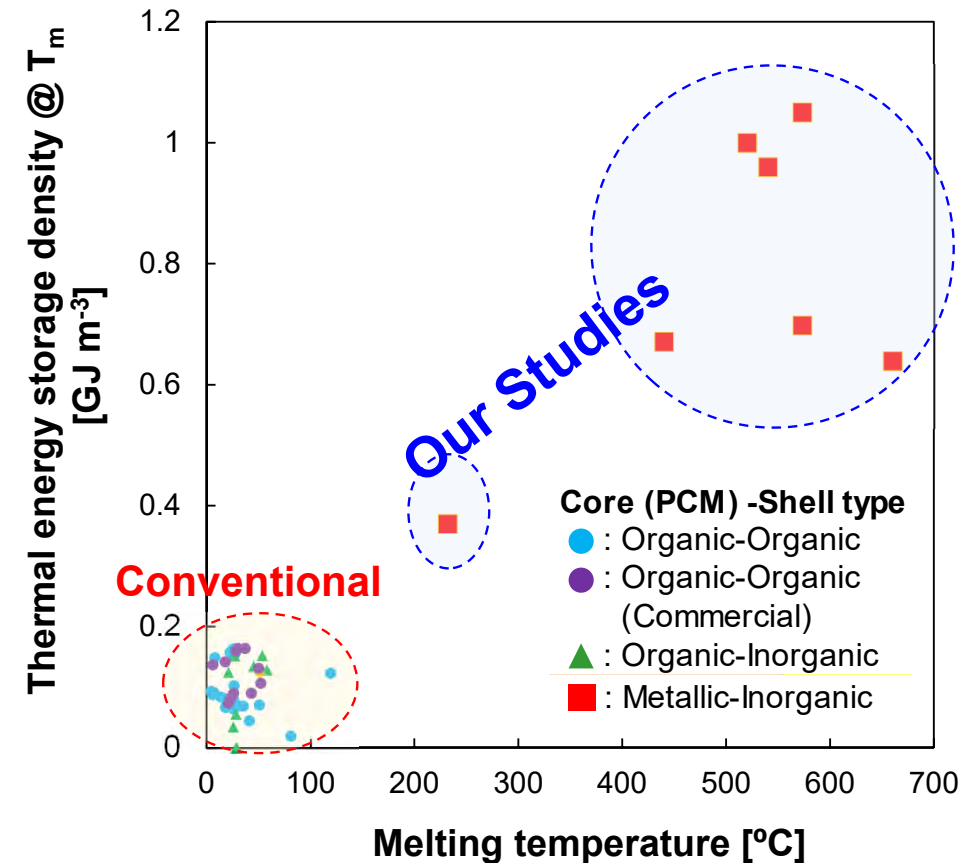
特徴②：高い蓄熱密度 (従来比数倍 $\equiv$ H_2 @15MPaの燃焼エンタルピー相当)

8

MEPCM vs 従来顕熱蓄熱材 (顕熱分含む $\Delta T=100\sim 400\text{K}$)



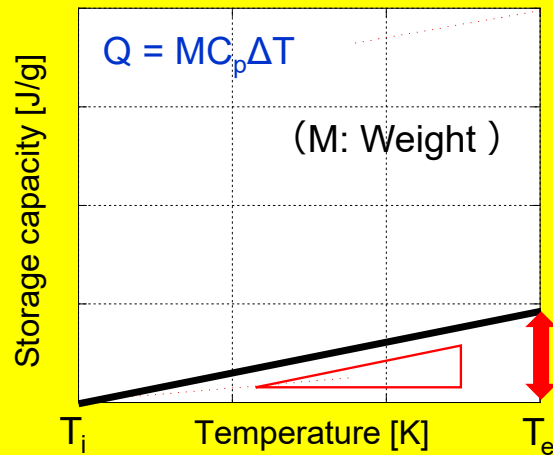
北大MEPCMs vs 既往MEPCM (潜熱分のみでの比較)



特徴③：固体顕熱蓄熱材×潜熱蓄熱材 = MEPCM

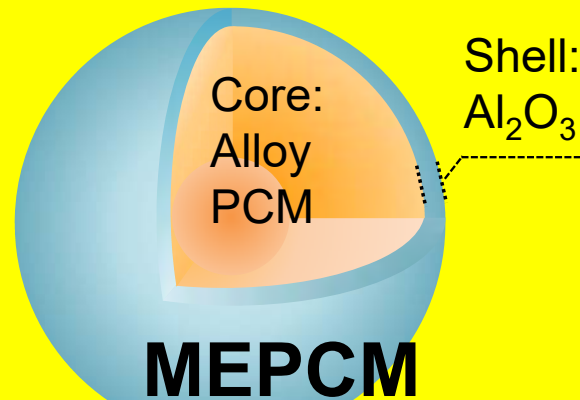
9

顕熱蓄熱



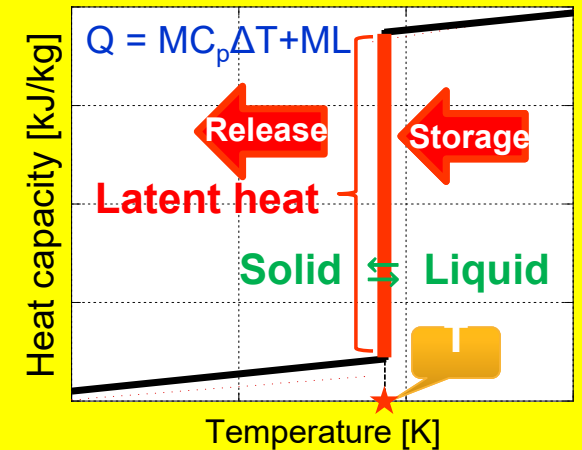
- ◎ ハンドリング容易
- ◎ 自由に成型可能
- ◎ 高い技術成熟度

- ◎ 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

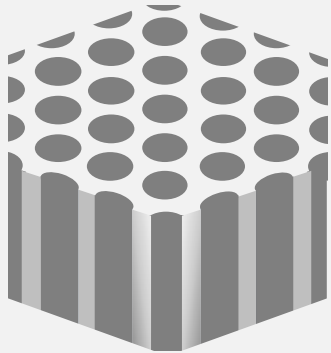
潜熱蓄熱



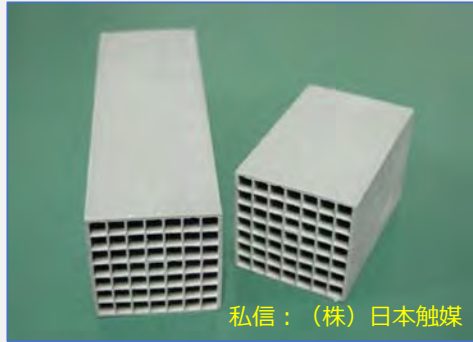
セラミックスシェルを持つ**MEPCM**は、固体顕熱蓄熱（セラミックス、煉瓦など）と潜熱蓄熱両方の長所を併せ持つハイブリッド蓄熱材料

特徴③：固体顕熱蓄熱材×潜熱蓄熱材 = MEPCM

10



Checker brick



私信：(株) 日本触媒

Honeycomb



Pellets

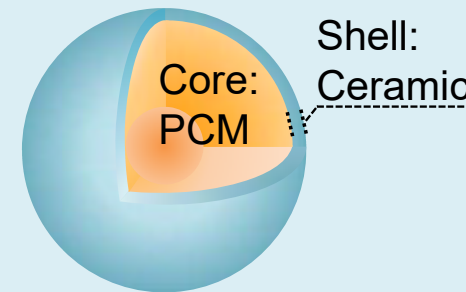
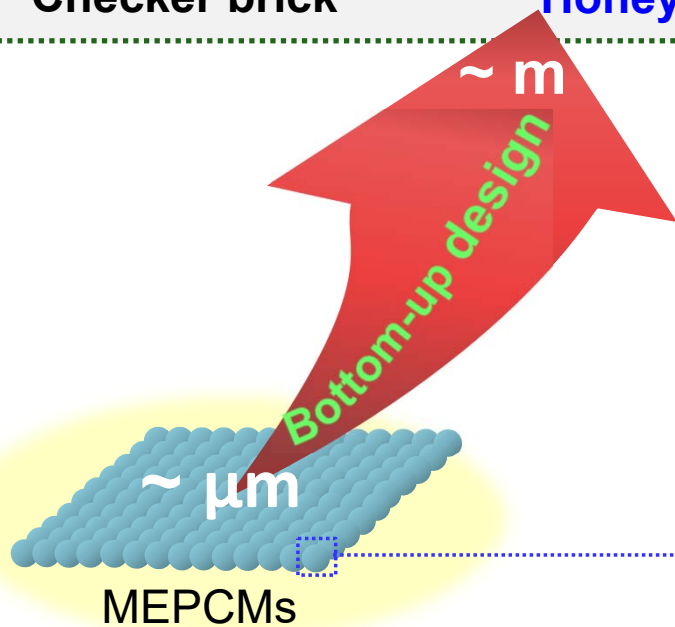


Grains or balls

固体顕熱蓄熱材料と同様に利用可能!!

= 既往顕熱蓄熱システムにレトロフィットして性能のみ改善可能!!

MEPCM as a raw material



MEPCM

Shell:
Ceramic

Core:
PCM

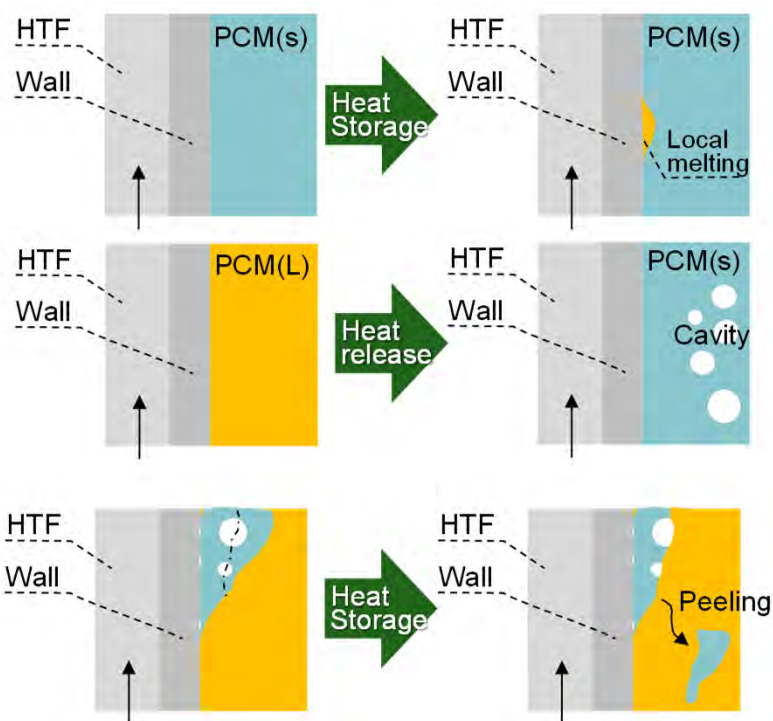
Key-point

h-MEPCMはセラミック
シェルで覆われているため
よってセラミックス粒子
としてハンドリング可能

潜熱蓄熱の「技術的な難しさ」からの脱却

11

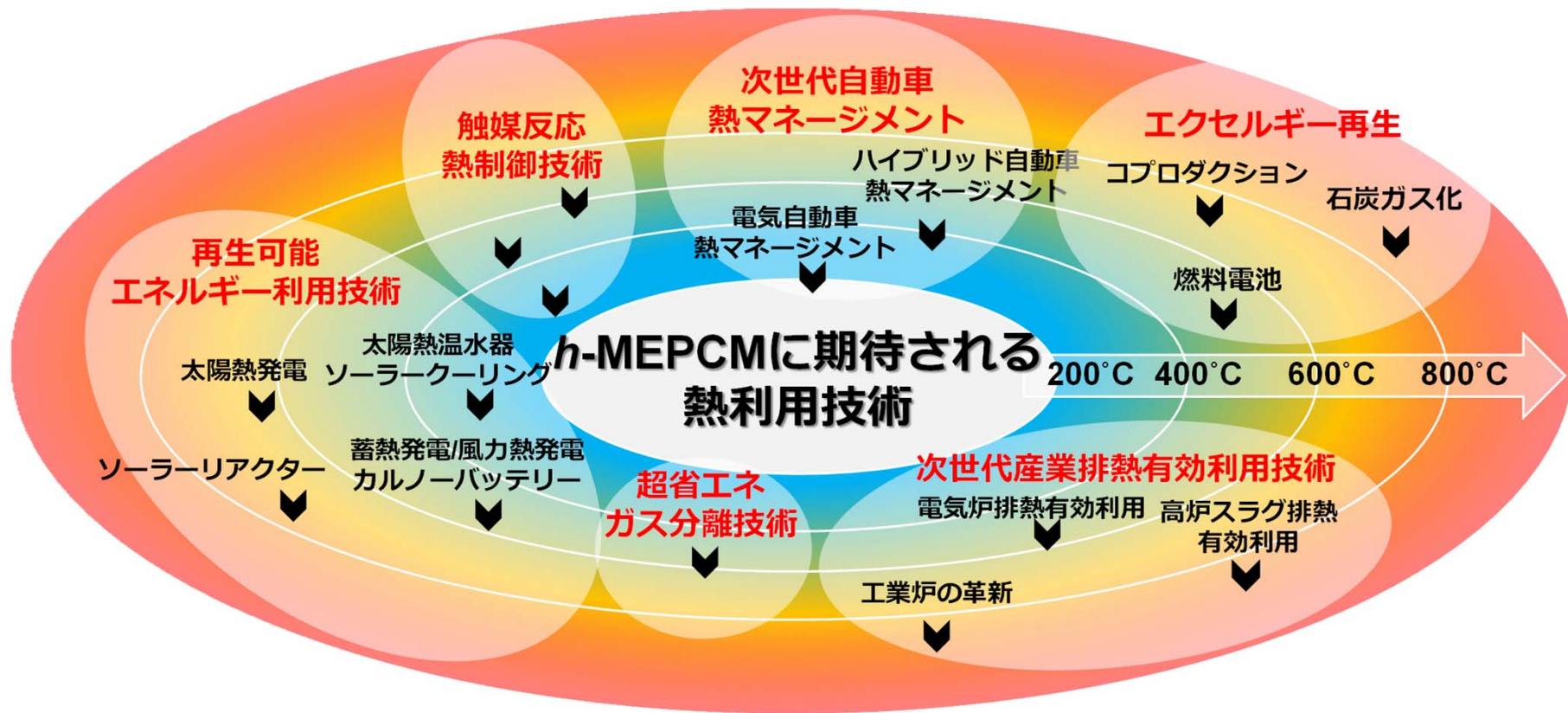
潜熱蓄熱技術は“先進的”な蓄熱技術として“長年”研究開発が進められてきた一方、氷蓄熱技術を除いて実用化に至った例は多くない。その主たる原因として、**熱伝導、対流、相変化を伴う伝熱あるいは物質伝達等が複合されて発生することに伴う伝熱工学的な技術課題や、実用的な意味においての難ハンドリング性**などがある。



難ハンドリング性の例

- 伝熱壁において固体PCMに囲まれたある一点で局所的に融解すると、PCMの固液相変化による体積膨張で伝熱管が破損する可能性がある。
- 固液相変化に伴う膨張収縮により、PCM内部に「引き巣」が発生し、伝熱を阻害する可能性がある。
- 伝熱壁に接触し保持されていた固体PCMが剥がれ、液相PCM中に移動する可能性がある。

**MEPCMではこれら課題そのものがない！
蓄熱/熱制御/熱輸送の機能のみを抽出した
新たな相変化材料（≠物質）**



- 省エネから再エネ安定利用のための蓄エネ技術まで、様々な分野/利用温度帯においてMEPCMの適用が期待。
- 熱を貯めて使う用途と熱を制御/輸送する用途に大きく分類。蓄熱+αの価値 or 機能がキーとなる。

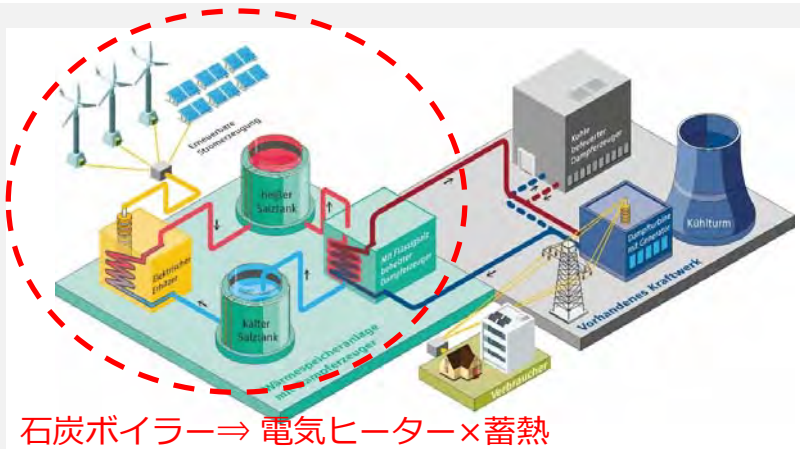
熱を貯めて使う～蓄熱を用いた蓄エネ「カルノーバッテリー」

コンセプト

中規模～大規模の蓄熱システムを利用したPower to Heat to Power の再生可能エネルギー電力安定利用法



Thermal power plantをThermal **storage** power plantへ

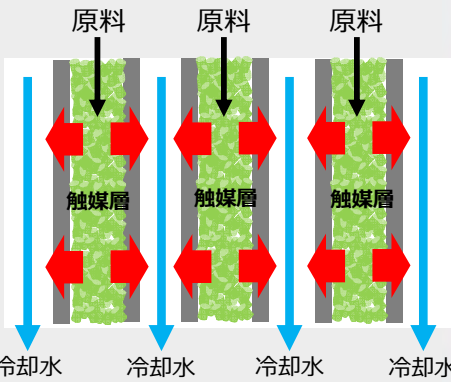
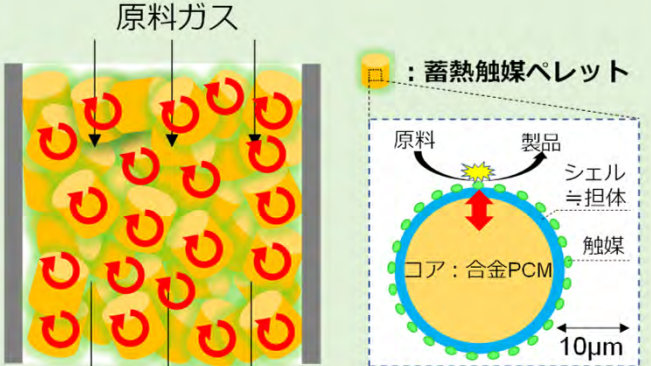
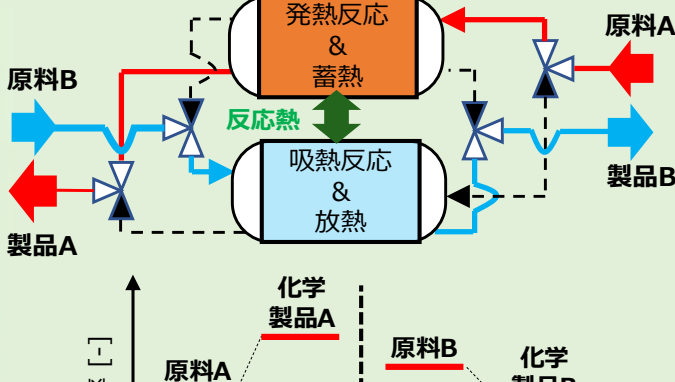


プロジェクト例：RWE（エル・ヴェー・エー）Power 社

- ・石炭ボイラー部のみを、電気ヒーター（またはヒートポンプ）& 高温蓄熱システムに置き換え、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。
- ・蓄熱体：溶融塩（予定）
- ・蓄熱温度：～565℃

同様のプロジェクトが欧州を中心に多数展開されており、
2028 or 2029年には標準仕様が決まると目されている。

熱を制御/輸送する～蓄熱触媒を用いた化学プロセスの効率化～ 14

技術	従来：熱交換器	提案：蓄熱触媒利用（熱交換器レス）	
イメージ	 原料 原料 原料 触媒層 触媒層 触媒層 冷却水 冷却水 冷却水 冷却水 ・多管式熱交換器 ・触媒ペレットを反応管内に充填 ・冷却水/熱媒体にて反応熱を除去	コンセプト  原料ガス 蓄熱触媒ペレット 原料 製品 シェル≒担体 触媒 コア：合金PCM 10μm ・触媒/担体/MEPCMが一体化した「蓄熱触媒ペレット」を充填 ・反応熱をその場で高密度に蓄熱制御	システムイメージ  原料B 原料A 製品A 製品B 発熱反応 & 蓄熱 吸熱反応 & 放熱 反応熱 化学製品A 化学製品B 原料A 原料B 排熱 熱 プロセス排熱の循環利用 発熱プロセス 吸熱プロセス プロセス エクセルギー [J]
熱制御距離	cm	μm	
触媒との熱交換方式	間接接触 触媒ペレット⇔伝熱壁⇔熱媒体	直接接触/熱交換器レス 触媒/担体⇔MEPCM	発熱反応と吸熱現象を半連続で繰返し、蓄放熱機能により反応熱を一定温度で循環利用・化学エクセルギー再生コプロダクション

* JST未来社会創造事業（2021-2022）にて検討後、2022年度カーボンリサイクルファンド研究助成にて継続検討中

熱を制御する、輸送する～SORCの熱マネ～

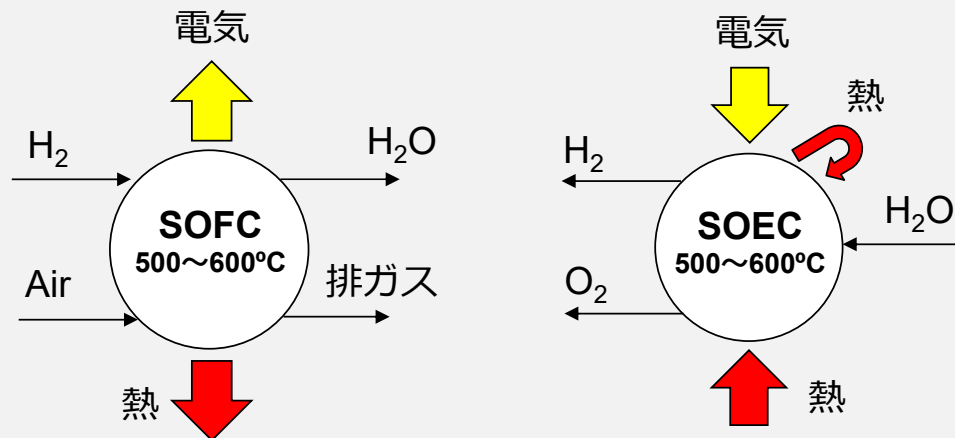
15

SORC：可逆作動型固体酸化物燃料電池。SOECとSOFCのいずれのモードでも作動可能。
h-MEPCMの導入による、反応熱の循環と温度制御による高効率化 & 安定運転が期待。

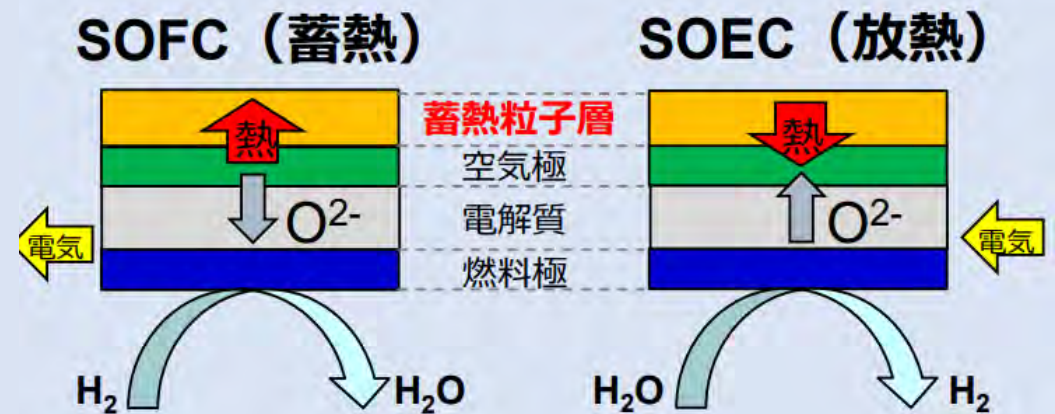
*NEDO 燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業にて九州大学石原研と共同研究中

SORCにおける熱マネのニーズ

h-MEPCMによるSORCの熱マネのイメージ



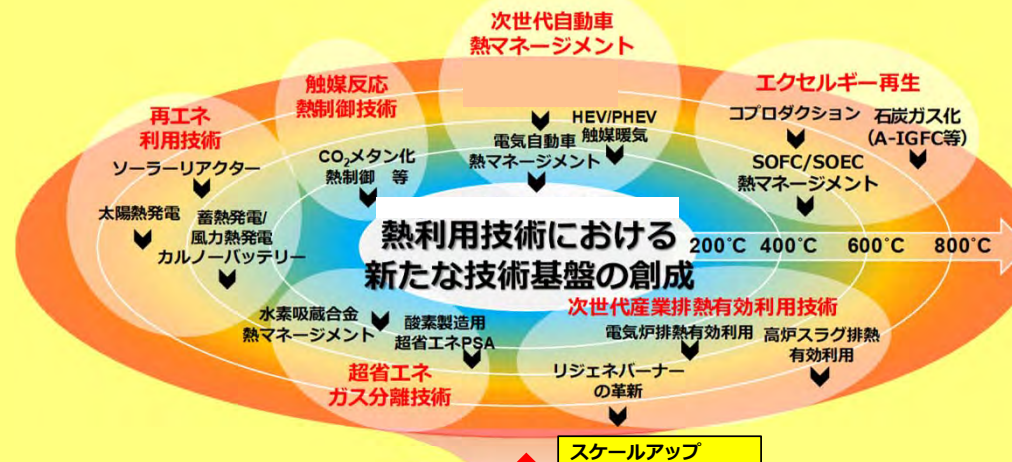
- ・エクセルギー的には排熱を高温のまま使用したい。
- ・排熱をSOECモードの熱源として使用したい。
- ・モード切替間の温度低下を抑制したい。
- ・再生可能エネルギーで吸熱分の熱を補償したい。
- ・SOFCモードの排熱を熱源として使用したい。
- ・モード切替間の温度低下を抑制したい。



- ・ SORCの空気極側にMEPCMを充填し、SOFC/SOECモード時に発生する熱をその場で蓄熱/放熱。
- ・ モード切替時もMEPCMが潜熱を放熱するため、セルは一定温度に保持される。

実装に向けた展望

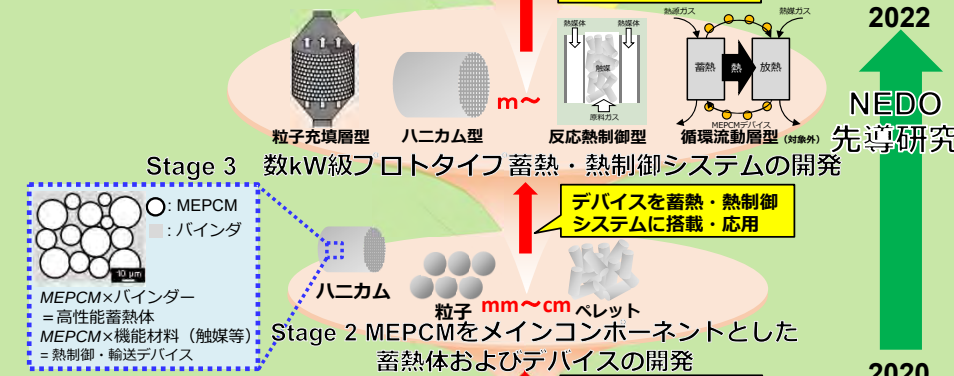
省エネから再エネまで
様々な分野/利用温度帯
においてh-MEPCMの
適用が可能。
「蓄熱」だけでなく、
熱の制御や循環利用、
または他の機能・価値
を同時に発現するプロ
セス開発が重要。



～2030
個別連携研究
or
包括プロジェクト

実装に向けた応用研究（現在）

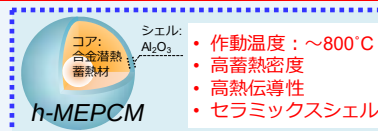
キーテクノロジーとなる
h-MEPCMを用いた
蓄熱・熱交換プロトタイプ
の試作と評価、実証研究に
向けた課題の抽出



2022
NEDO
先導研究
2020

2022
MEPCM開発
* 平行して推進
・ MEPCM作動温度域の拡大。
・ 連携企業の拡大。
・ 量産体制整備完了。
2020

基礎研究の進展 (2020年6月段階)



Stage 1 MEPCM製造技術の確立

・ Al合金系で製造法を確立。
・ 量産化試行中。

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。