

特別奨学生セッション 37

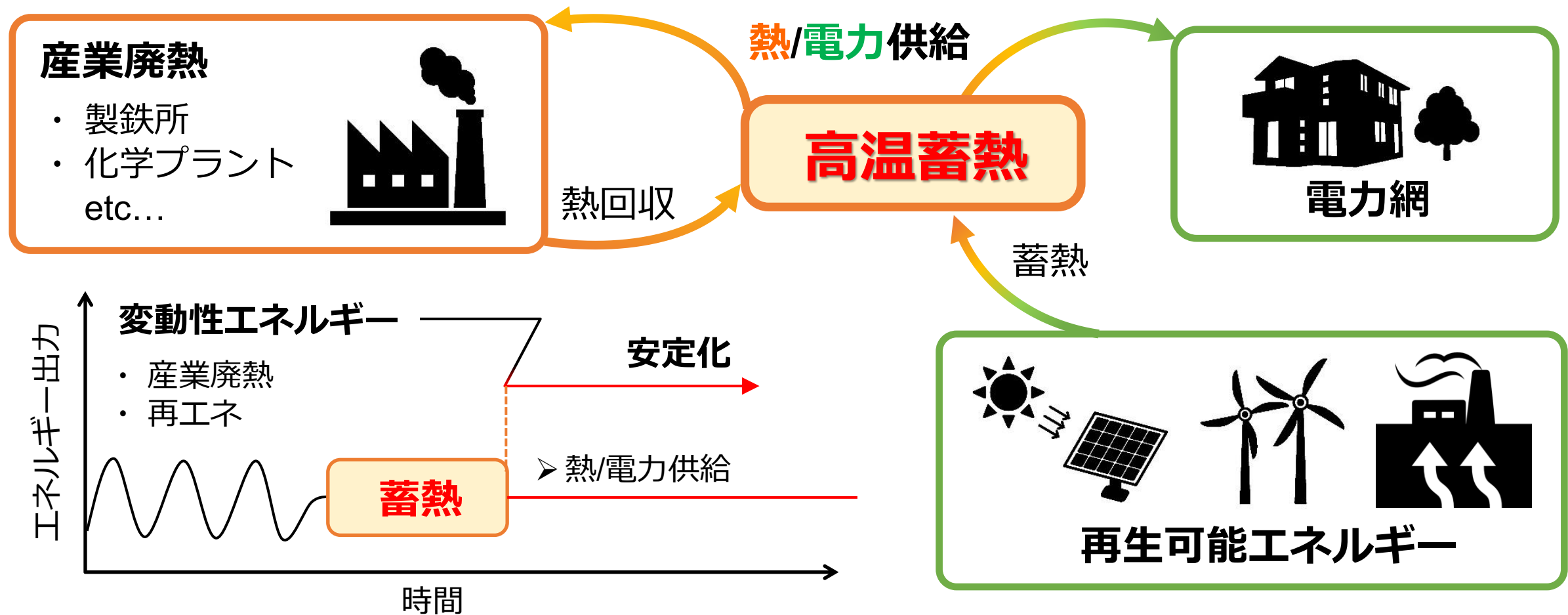
アルミニウム基相変化マイクロカプセル の開発とその過冷却現象の調査

Development of aluminum-based microencapsulated phase change materials and their supercooling phenomena

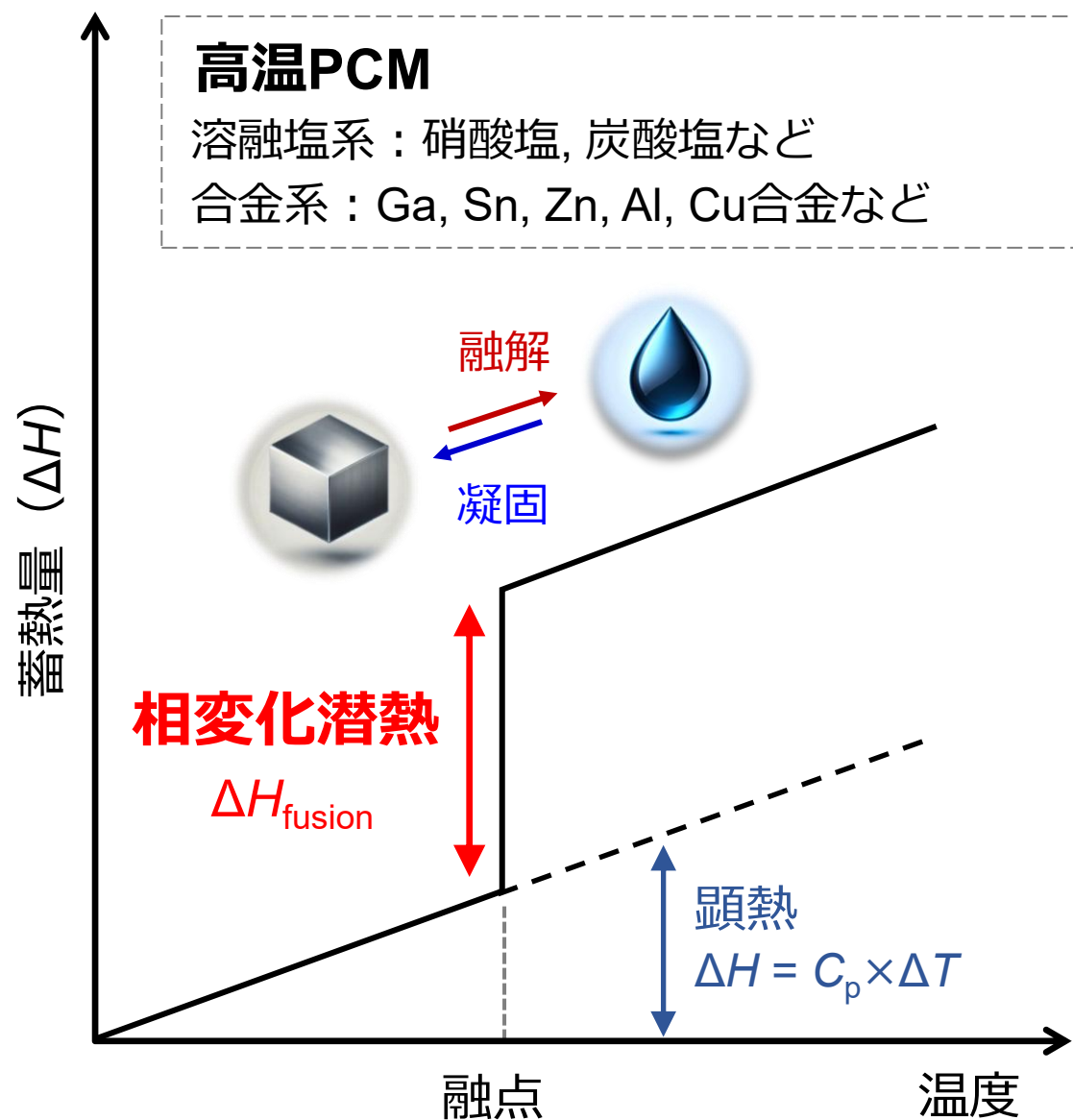
北海道大学 (D3) 清水友斗, 棚橋慧太, Melbert Jeem, 能村貴宏



HOKKAIDO
UNIVERSITY



- ✓ 産業部門における最終エネルギー消費量のうち、**74%が「熱」**である^[1]
- ✓ 脱炭素社会の実現に向けて、**再生可能エネルギーを活用した産業の電化**が求められる
- ✓ エネルギー需給間の時間的・空間的ギャップを解消する技術として蓄熱が注目されている



■ 潜熱蓄熱 (Latent heat storage : LHS)

相変化物質 (Phase Change Material : PCM)

の潜熱を利用する蓄熱。主に固液相変化。

- ✓ 高蓄熱密度
- ✓ 融点一定温度での熱供給・制御
- ✓ 熱の入出のみで作動

■ PCMの分類

低温 (～200℃)

- ・有機系 (パラフィン、糖アルコール系)

高温 (200℃～)

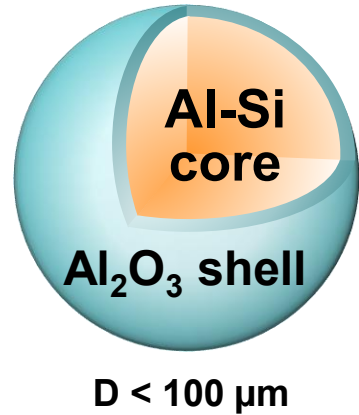
- ・溶融塩系 (硝酸塩、炭酸塩など)

- ・ **金属/合金系** ○ 高熱伝導率 ○ 低熱膨張率

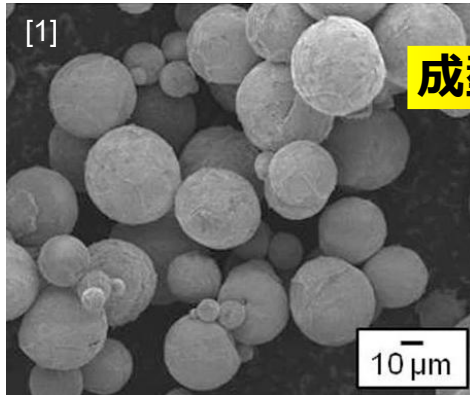
有機系・溶融塩系の数十～数百倍

- × 融解漏れ
- × 高い腐食性

合金系相変化マイクロカプセル (Micro-encapsulated PCM: MEPCM)



MEPCM



成型



充填層

Composite (~mm, ~cm)



Al-Si系

- 融点 577°C (共晶)
- 潜熱量: 約1 GJ m⁻³
- 10,000回の融解凝固後も蓄熱性能維持^[2]

MEPCMの特徴

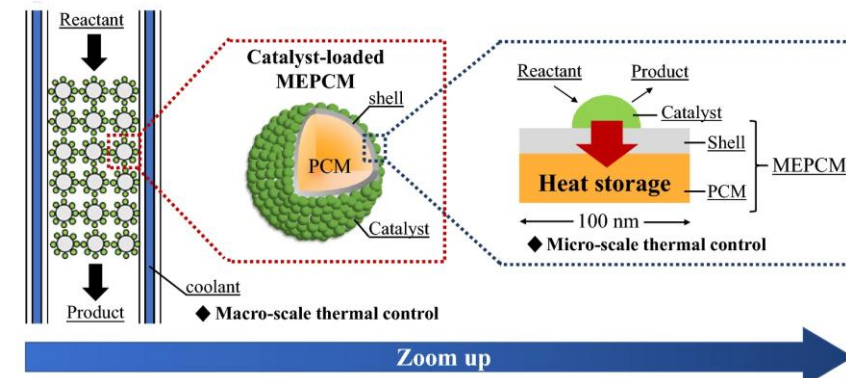
- ✓ 腐食/漏出を抑制
- ✓ セラミックス粉として利用可能
- ✓ 成型性に優れる

■ 熱制御への応用

例) 蓄熱×触媒

- ✓ MEPCM表面に触媒担持
- ✓ パッシブな熱制御
- ✓ 反応熱を循環利用

Exothermic reaction with shell & tube reactor



CO₂メタネーションの熱制御研究例^[3]

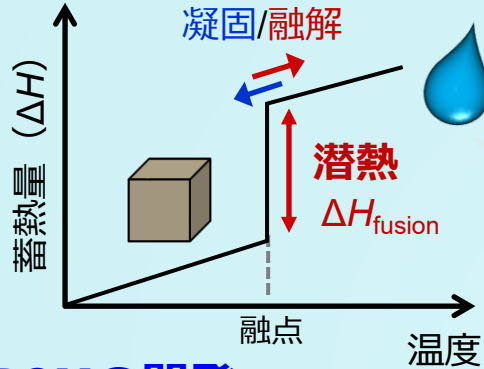
➤ 金属/合金系MEPCMは固体粒子と同等のハンドリング性を持つ次世代蓄熱/熱制御材料として有望！

◆ 金属/合金系潜熱蓄熱

相変化物質 (PCM: Phase Change Material)の潜熱を利用

- 利点**
- ✓ 高蓄熱密度
 - ✓ 熱のみで作動
 - ✓ 融点一定での熱供給・制御

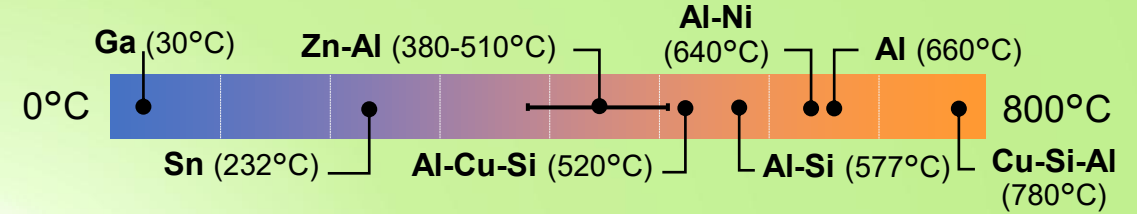
- 課題**
- × 融解漏れ
 - × 高い腐食性



➤ 新たな作動温度のPCMの開発

◆ 相変化マイクロカプセル(MEPCM: Microencapsulated PCM)

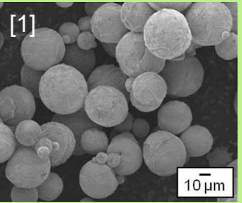
➤ 主に金属/合金コアと酸化物シェルから構成



低温～高温域まで開発進行中

- ✓ 様々な温度域の熱利用に対応可能

➤ 金属・合金系MEPCMの開発



◆ MEPCMを用いた蓄熱コンポジット

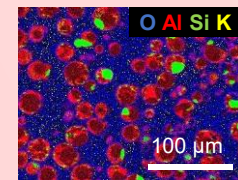
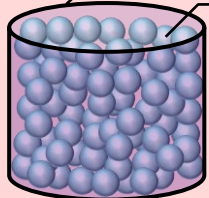
コンポジット化

充填層



溶融塩系蓄熱材

MEPCM



既往の液体蓄熱材と混合した新規蓄熱材

- ✓ MEPCMの特徴

- ◎成型性 ◎熱・化学的安定性 ◎ハンドリング性

▶ 機械的強度の懸念や粒子間空隙が課題

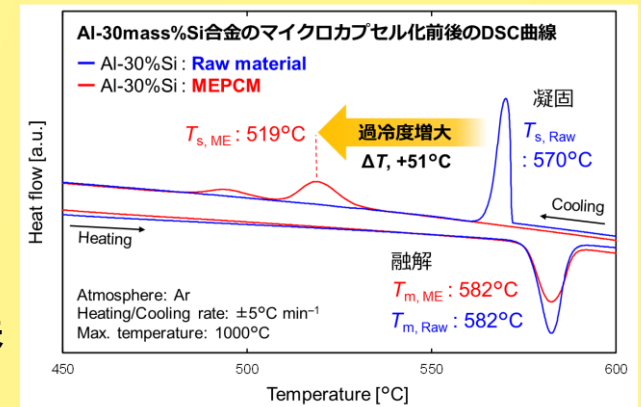
➤ MEPCMを用いた蓄熱複合材料の開発・検討

◆ MEPCMにおける過冷却促進現象

Al-Si系MEPCM
DSC測定例 ➡

- ✓ MEPCMでは同じ組成のバルクよりも過冷却が増大する現象例の報告例が多数
- ✓ 潜熱蓄熱のエクセルギー損失や定温熱制御能欠陥の課題

➤ MEPCMにおける過冷却促進現象の解明



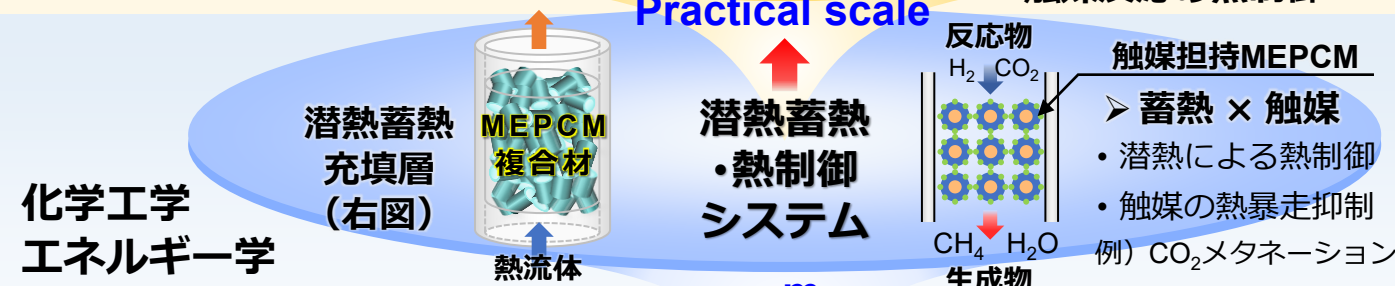


➤ 産業排熱の回収/利用・再生可能エネルギーの貯蔵

➤ 次世代サーマルマネジメントへの応用

✓ 潜熱蓄熱による温度変動プロセスの熱制御

◆ **MEPCMを基盤に開発される新たな熱利用技術**



◀ MEPCM複合材を用いた蓄熱複合材を充填

➤ 潜熱蓄熱充填層の実験的研究

◆ MEPCMによる潜熱蓄熱・熱制御に関する研究

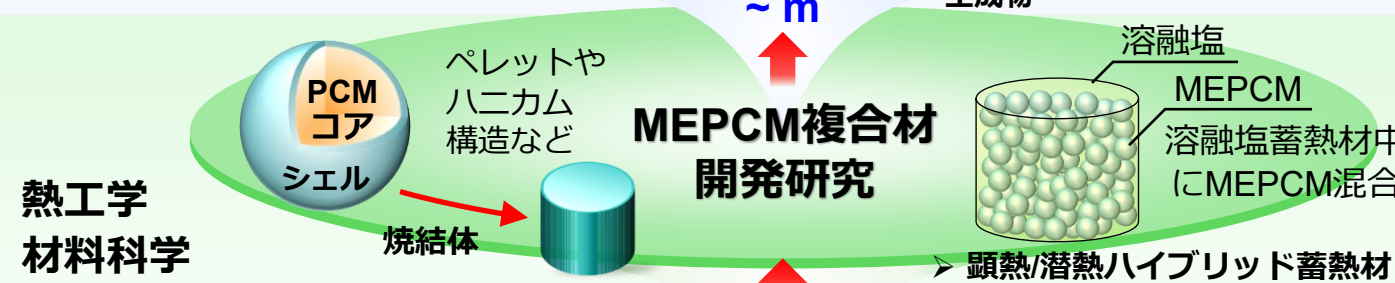
◆ MEPCMを応用した蓄熱複合材料の開発・検討

✓ 焼結によるペレット状MEPCM複合材開発

✓ 溶融塩蓄熱材とのハイブリッド化

・ Y. Shimizu et al., *J. Mater. Chem. A*, **13** (2025), 30382-30398.

・ Y. Shimizu et al., *Chem. Eng. J.*, **508** (2025), 160832.

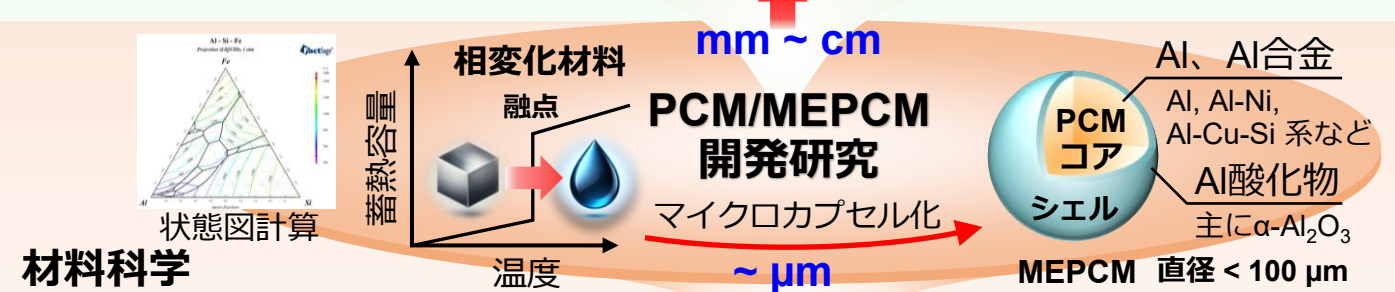


◆ 次世代蓄熱/熱利用に寄与するPCM/MEPCMの開発

✓ 新規合金系PCMの開発

✓ 新規合金系MEPCMの開発

・ Y. Shimizu et al., *J. Alloys Compd.*, **1017** (2025), 179006.

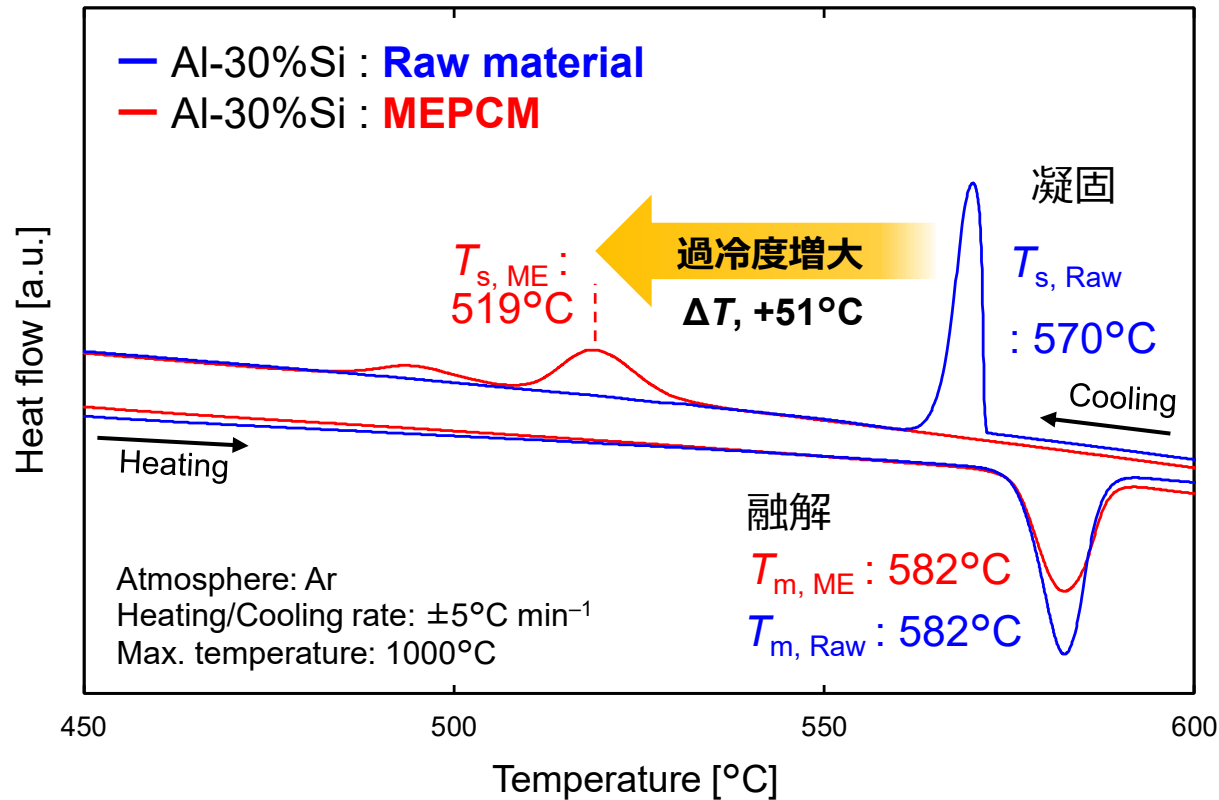


✓ MEPCMに生じる過冷却促進現象

◆ MEPCM利用技術全体に影響する過冷却促進現象に関する研究

■ MEPCMの過冷却に関して先行研究で報告されている3つのポイント

Al-30%Si合金のMEPCM化前後のDSC測定例



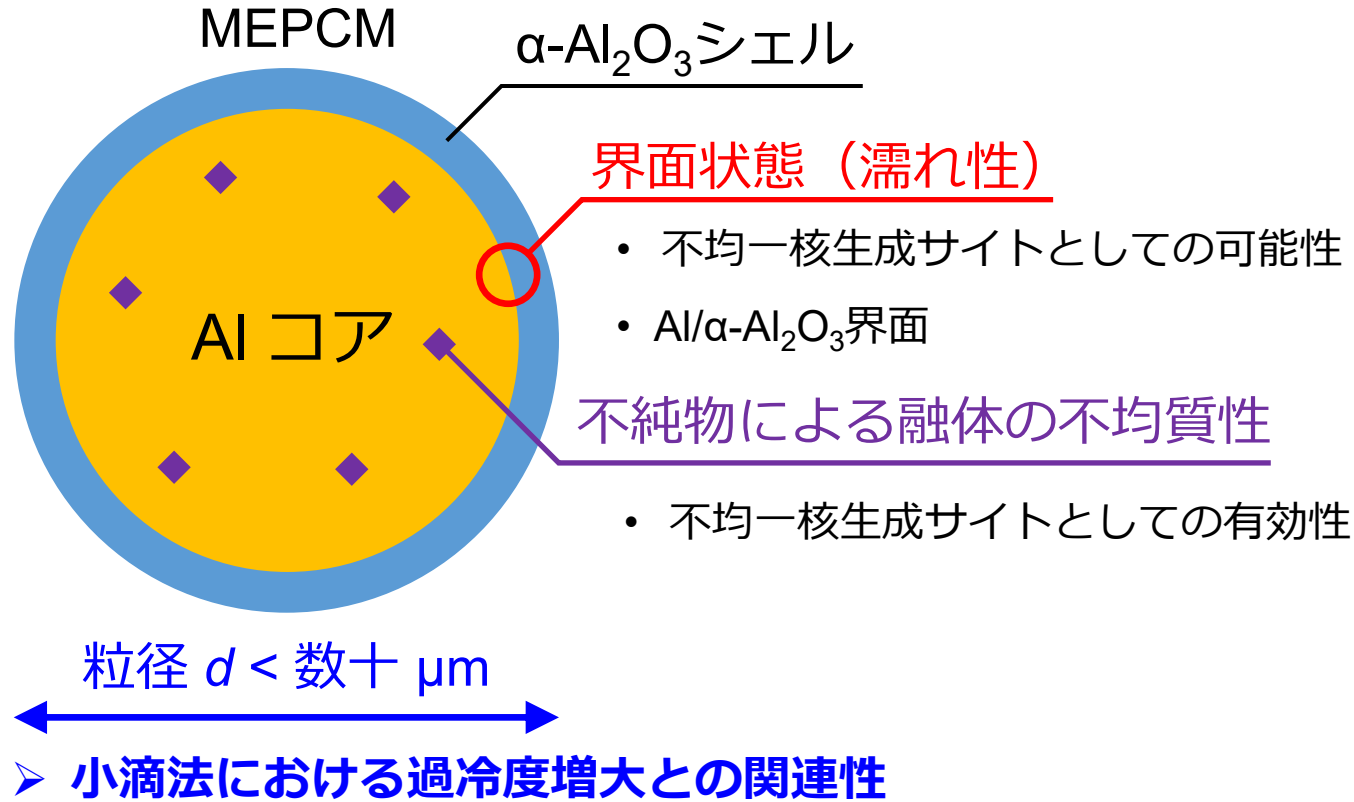
- ① MEPCMではバルクよりも過冷却が増大し、その過冷却は冷却開始温度に影響される^[1]
- ② 純AlコアMEPCMは他の合金系MEPCMよりも比較的過冷却が小さい^[2]
➡ 過冷却の報告例は組成により様々
- ③ 有効な核生成サイトとなり得る添加材によって過冷却を抑制する研究が進みつつあり、過冷却課題の克服に寄与^[3]

[1] H. Sakai et al., J. Energy Storage, 87, (2024) 111261.

[2] T. Nomura et al, Sol. Energy Mater. and Sol. Cells, 193 (2019) pp.281-286

[3] J.C. Mba et al., J. Energy Storage, 94, (2024) 112066.

➤ MEPCMでは過冷却がどのような場合に、どの程度生じるのか、“なぜ生じるのか” が不明



② AI基MEPCMの不純物と冷却開始温度の影響

先行研究において過冷度が様々なことは、純度と冷却開始温度の2つの要素が関与したものではないか？

➡ 低純度のAIを用いて検討

冷却開始温度の過冷度への影響は蓄熱/熱制御性能に直結する重要な現象

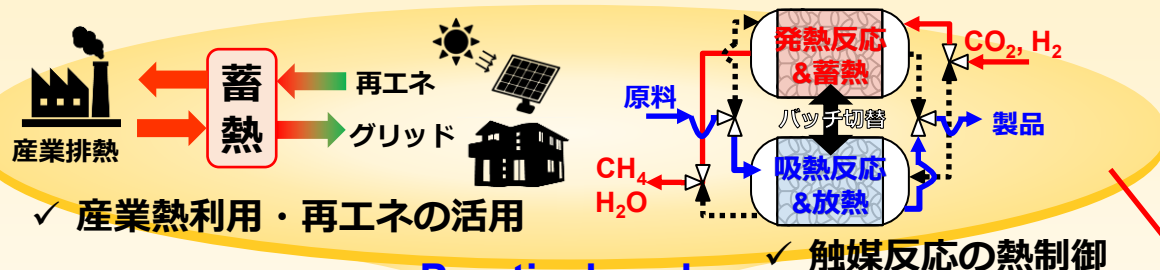
➡ 冷却開始温度の過冷却への影響を調査

目的：

純度99.8%のAI-MEPCMの過冷却挙動および冷却開始温度の影響を評価

① AI基MEPCMの過冷却

目的：最もシンプルな構造を持つAlコア/ Al_2O_3 シェル型MEPCMを高純度な原料から作製し、過冷却挙動を調査



➤ 産業排熱の回収/利用・再生可能エネルギーの貯蔵

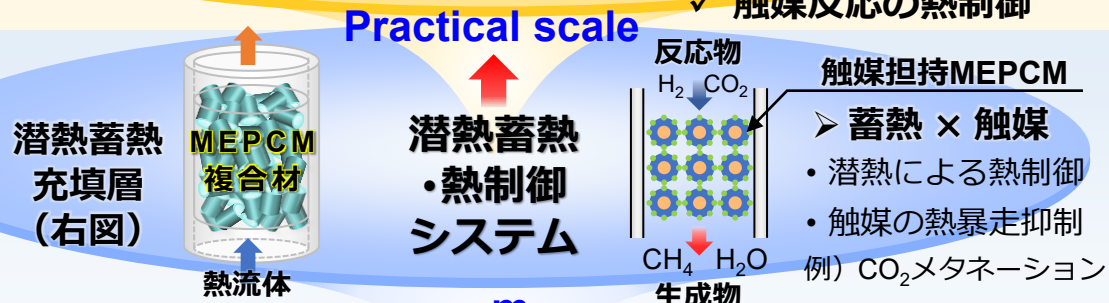
➤ 次世代サーマルマネジメントへの応用

✓ 潜熱蓄熱による温度変動プロセスの熱制御

◆ MEPCMを基盤に開発される新たな熱利用技術

社会実装

化学工学
エネルギー学



◀ MEPCM複合材を用いた蓄熱複合材を充填

➤ 潜熱蓄熱充填層の実験的研究

◆ MEPCMによる潜熱蓄熱・熱制御に関する研究

◆ MEPCMを応用した蓄熱複合材料の開発・検討

✓ 焼結によるペレット状MEPCM複合材開発

✓ 溶融塩蓄熱材とのハイブリッド化

・ Y. Shimizu et al., *J. Mater. Chem. A*, **13** (2025), 30382-30398.

・ Y. Shimizu et al., *Chem. Eng. J.*, **508** (2025), 160832.

◆ 次世代蓄熱/熱利用に寄与するPCM/MEPCMの開発

✓ 新規合金系PCMの開発

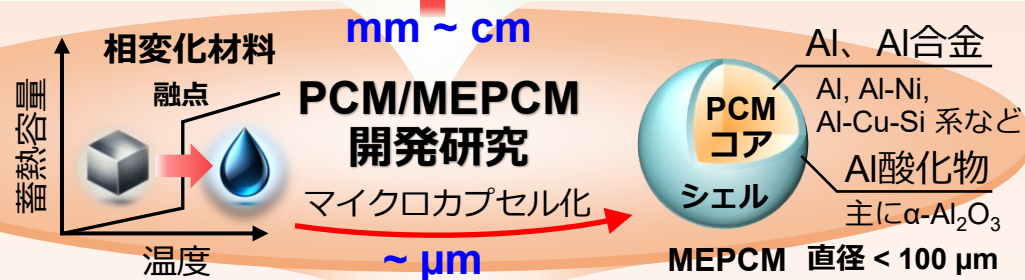
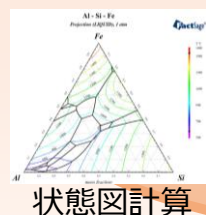
✓ 新規合金系MEPCMの開発

・ Y. Shimizu et al., *J. Alloys Compd.*, **1017** (2025), 179006.

熱工学
材料科学



材料科学



凝固工学

✓ MEPCMに生じる過冷却促進現象

➤ 本研究ではMEPCM利用技術全体に影響する過冷却促進現象に関する重要な知見を得た

謝辞

本研究は公益財団法人東洋アルミ軽金属みらい財団の特別奨学生研究費補助およびJSPS科研費JP23KJ0050の助成を受けて行われました。
ここに深い感謝の意を表します。