

ビジョン実現に向けたNEDO先導研究プログラムの技術課題検討に係る調査
ワークショップVIP①B_エネルギー・熱 (蓄熱, 熱交換器)

高効率電炉排熱

回収・利用技術の開発

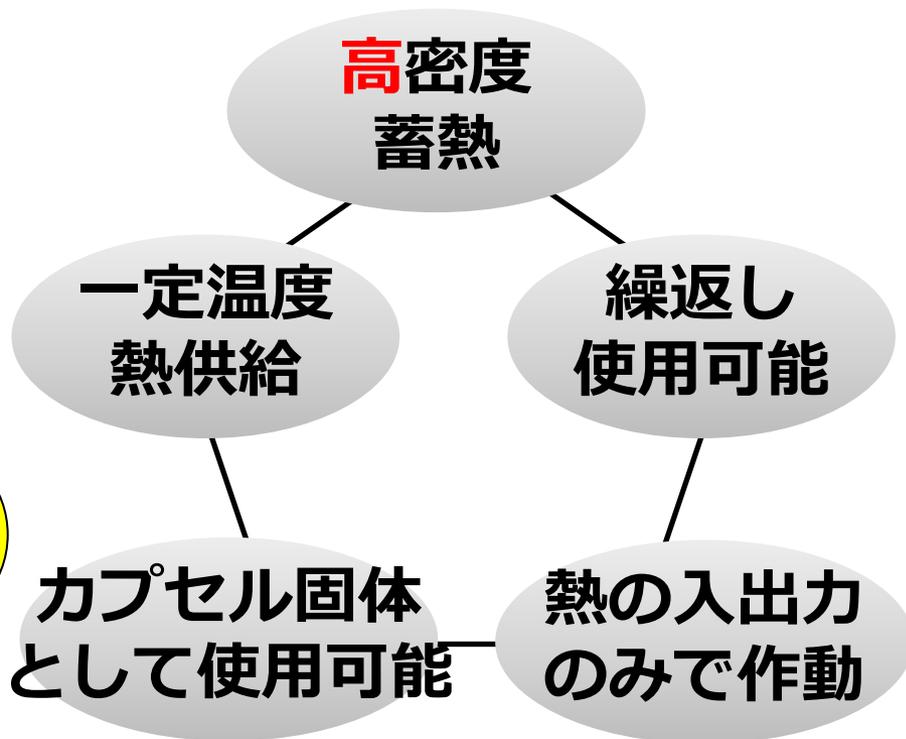
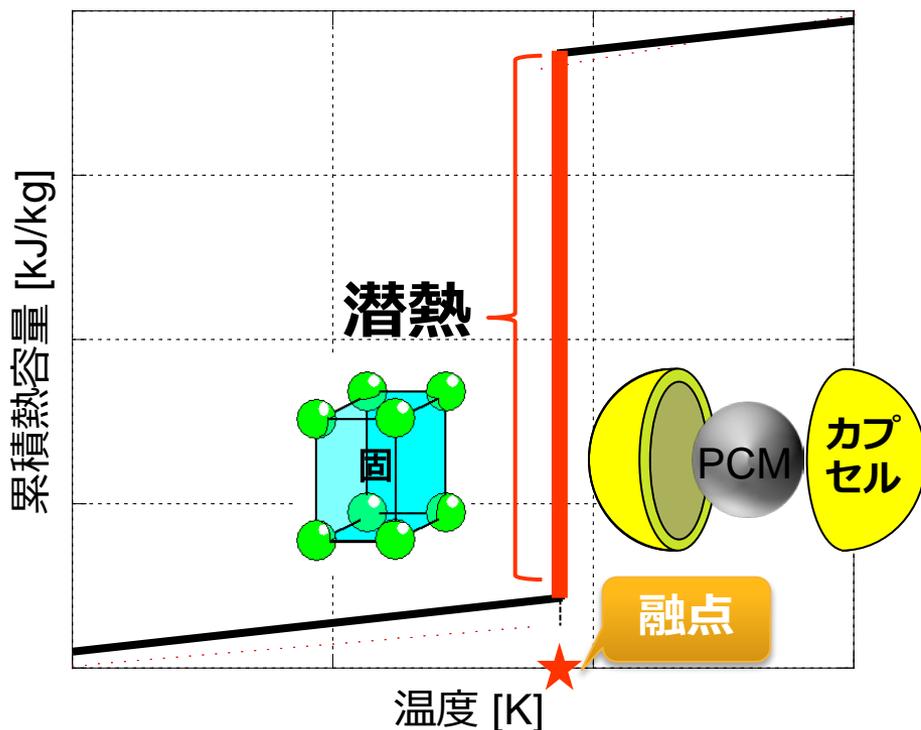
北海道大学大学院工学研究院 ○能村貴宏



HOKKAIDO
UNIVERSITY

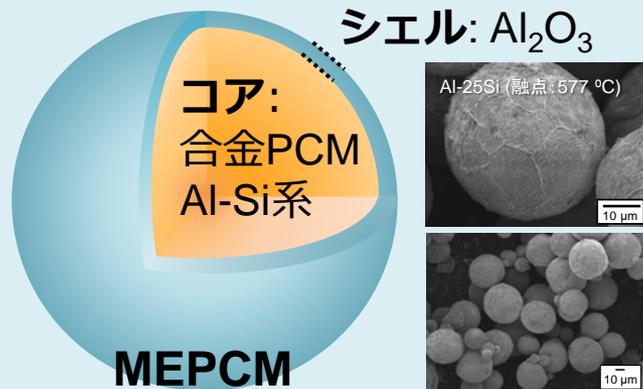
- 潜熱蓄熱= 物質の相変態潜熱（主に固液）を利用
- PCM = **P**hase **C**hange **M**aterial= 相変化物質，潜熱蓄熱材

PCMの作動原理



次世代蓄熱材料MEPCMの概要

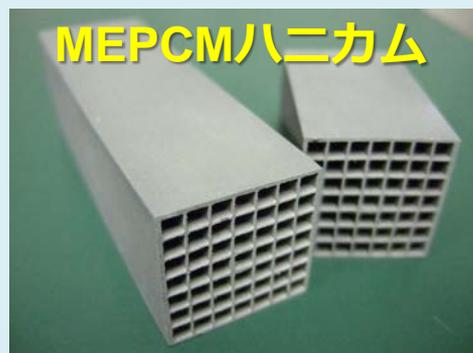
合金系PCMを原材料としたコア（合金PCM） - シェル（ Al_2O_3 ）型の
中高温用潜熱蓄熱マイクロカプセル。



- MEPCM: Micro-Encapsulated Phase Change Material
- 溶融PCMによる「腐食問題」の克服
- 作動温度：200°C～800°C
- 高い潜熱蓄熱密度：1 GJ m⁻³@T_m
- 高い顕潜熱蓄熱密度：2 GJ m⁻³@ΔT=300K (=15MPa圧縮水素同等)
- 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 > 10000cycle

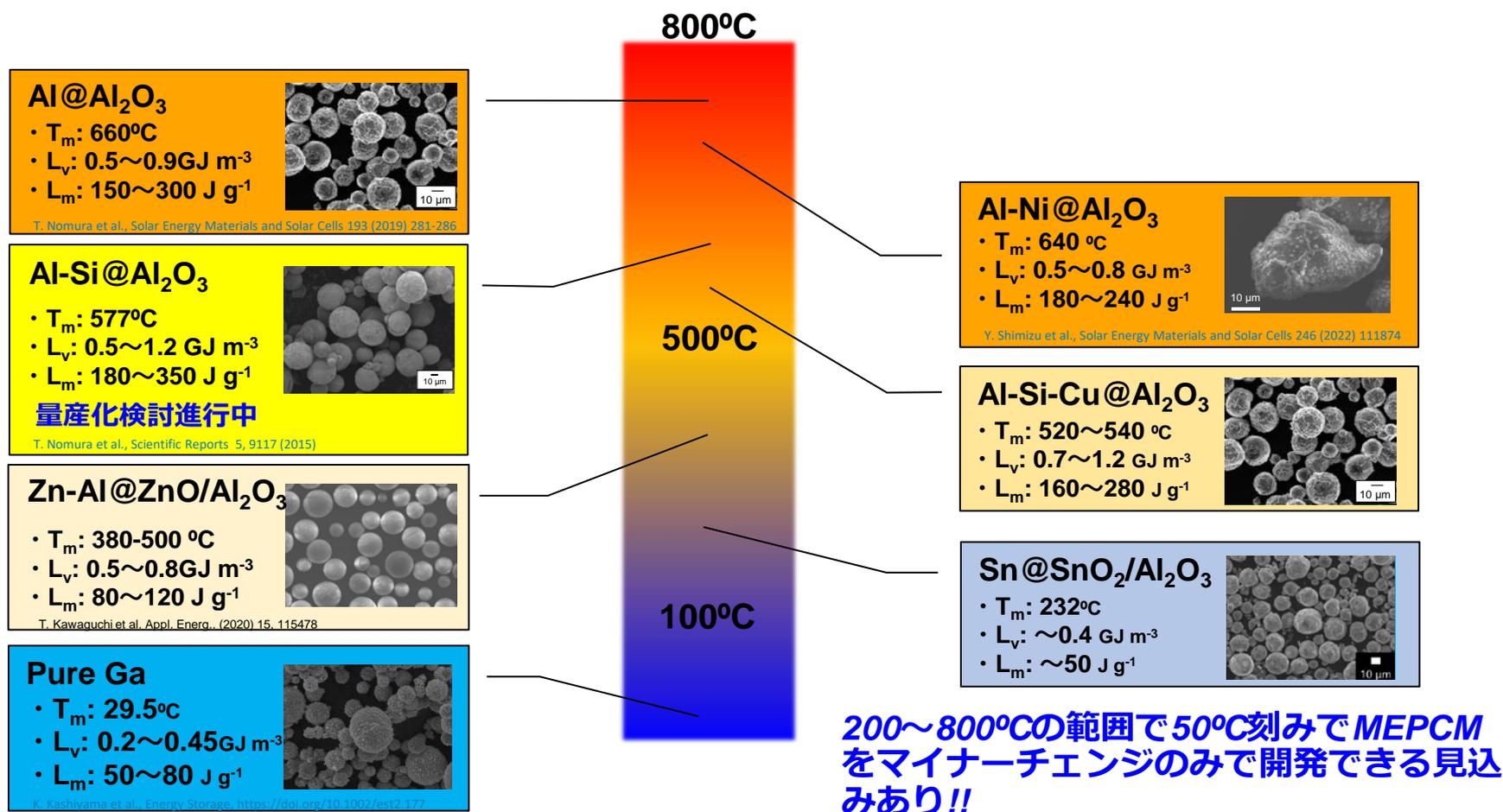
「ものづくり」開発の成果 「合金系潜熱蓄熱マイクロカプセルを基盤とした高速かつ高密度な蓄熱技術の研究開発 2020～2022」

MEPCMをメインコンポーネントとした様々な蓄熱体の開発が可能！！



- mm～mスケールの蓄熱体を作製可能
- 固体顕熱蓄熱体と同様にハンドリング可能（≒既往プロセスを代替&グレードアップ可能）
- 高い熱交換性能が期待

作動温度 = 蓄放熱温度のラインナップ



MEPCMは、既往の**低温排熱**回収技術とは一線を画す
中高温排熱回収・熱利用に特化した新技術！！

- CO₂排出量は高炉法の1/4 !! (スクラップを原材料とした場合) ¹⁾

1) 日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050(2021年3月30日) https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf

- 変動性再生可能エネルギー大量導入時代におけるディマンドレスポンス (DR) 機能への期待！！²⁾

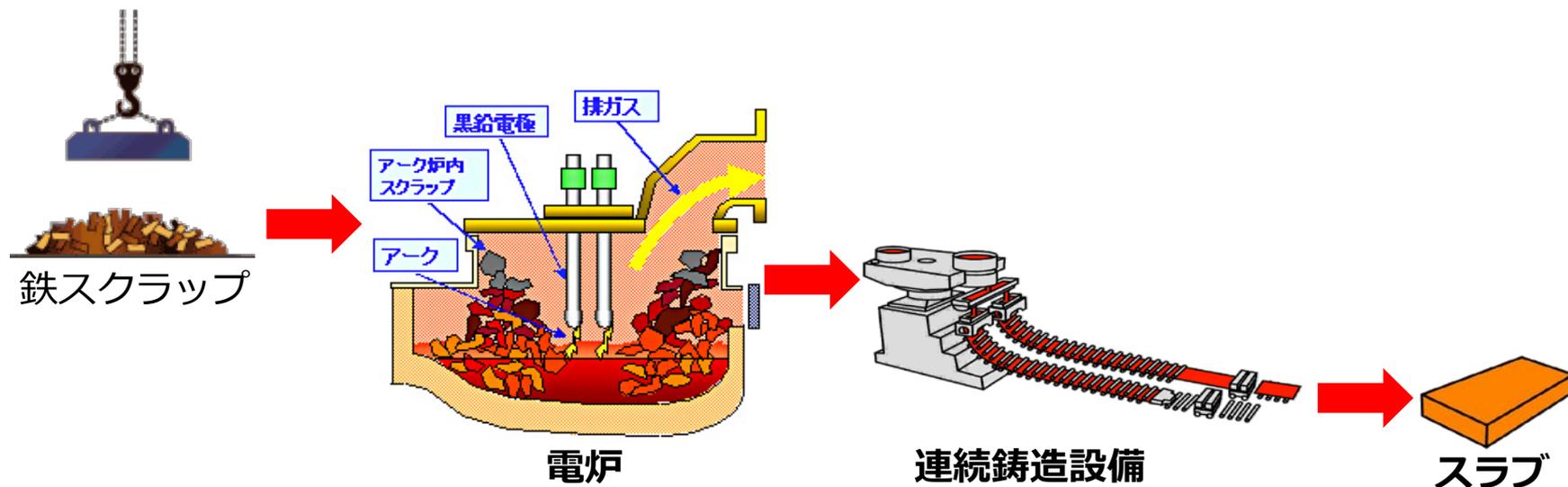
2) 「上げDR」の取組について(2021年11月25日九州電力株式会社) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/034_02_00.pdf

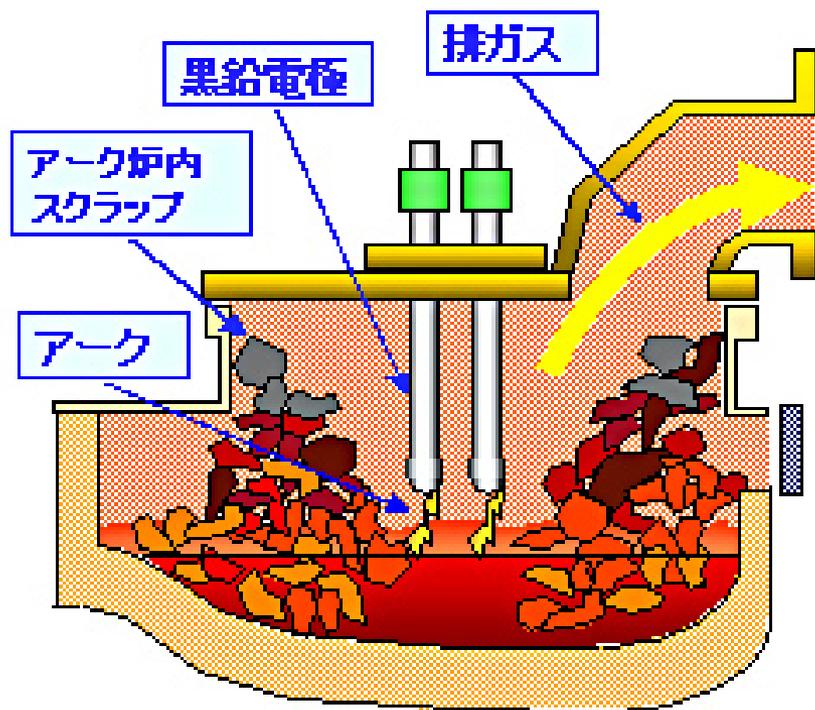
- 高炉による粗鋼生産 → 直接水素還元シャフト炉への転換³⁾

*直接水素還元シャフト炉の場合、「電炉」がセット。

3) 日本製鉄 NEWS RELEASE (2022年6月15日) https://www.nipponsteel.com/news/20220615_100.html

今後CO₂削減，再エネ大量導入，水素製鉄技術の進展の観点から電炉設備の導入が急拡大する可能性 (現状 粗鋼生産の30%)





未回収高温電炉排ガス

- ・ 温度：1000°C～
- ・ 組成¹⁾：4.4%CO₂, 16.8%O₂, N₂

1) 福代ら 空気調和・衛生工学論文集 No.164 2010

2) B. Lee and IL Sohn, JOM, Vol. 66, No. 9 (2014)

電炉排ガスは投入エンタルピーの20%相当を持つにも関わらず、エネルギー回収が行われないまま集塵機を通過してガスを大気へ排出。 * ECOARC等一部のシステムを除く。

問題1：排ガス温度の激しい変動

- ・ バッチ毎（～30min程度）で排ガス温度は急変動
- ・ 熱回収機器の損傷・低寿命，熱回収効率の低下が懸念

1) C. Brandt et al., Applied Thermal Engineering 66 (2014) 333

問題2：多量の電炉ダストの随伴

- ・ ～17 kg/粗鋼1ton²⁾ ・ 亜鉛や鉄が主成分の微粒子²⁾
- ・ 熱回収機器の損傷，目詰まり，伝熱性能低下が懸念

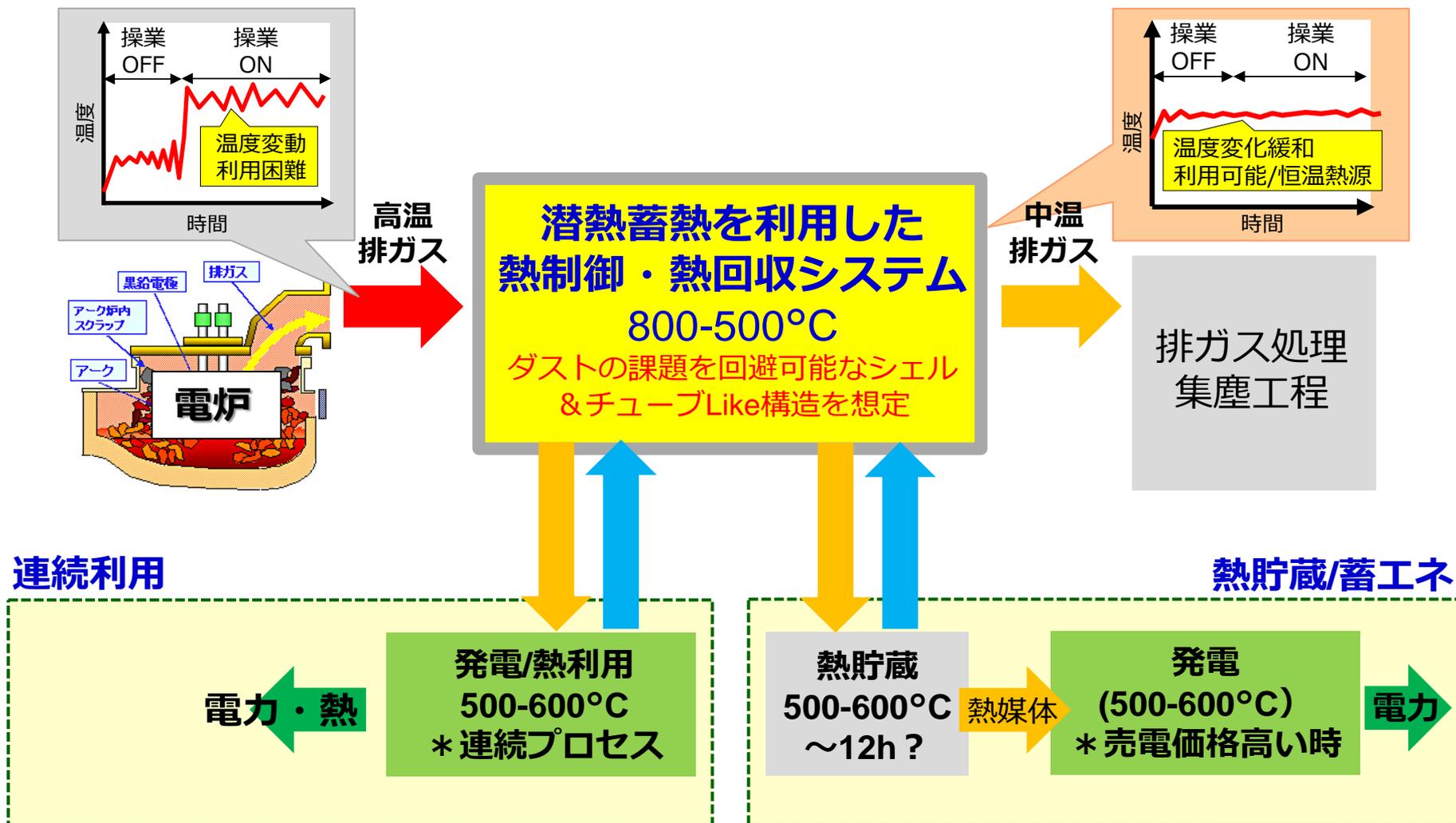
2) <https://www.jst.go.jp/pr/info/info1414/index.html>

問題3：費用対効果&熱利用先？

- ・ 低圧蒸気として回収すると費用対効果は低い
- ・ 熱の利用先に課題

電炉の省エネルギー化には、**温度変動が激しくダーティな高温ガス排熱を高温のまま高効率に回収，有効利用する技術の確立**が不可欠！！

解決策：潜熱蓄熱/熱制御による高効率電炉排熱回収

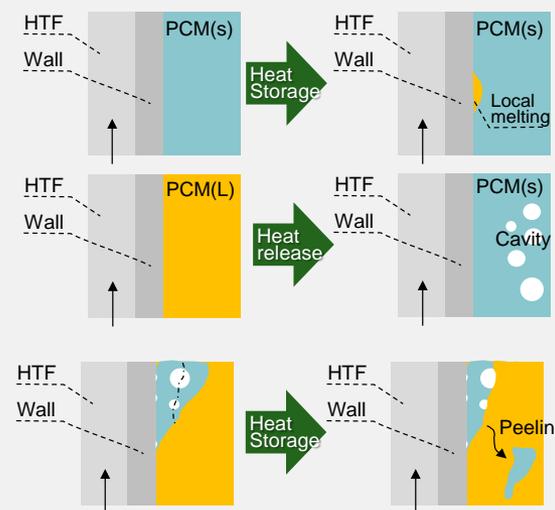


- ・ 潜熱蓄熱/熱制御システムの導入により、ダーティ排熱 → クリーン恒温熱源化。
- ・ 熱媒体のみを介した連続利用，熱貯蔵システムを介した蓄エネ型も可能！！
- ・ ユーザーの操業理念に適したシステムを提供できる可能性あり。

潜熱蓄熱による電炉排熱利用はコンセプトが報告されている一方、実施（ラボスケールの実験含む）に至った例はない。その主たる原因として、**溶融PCMの腐食などの材料工学的課題**、**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部的に融解すると、PCMの固液相変化による体積膨張で伝熱管が破損。
- 固液相変化に伴う膨張収縮により、PCM内部に「引け巣」が発生し、伝熱を著しく阻害。
- 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。

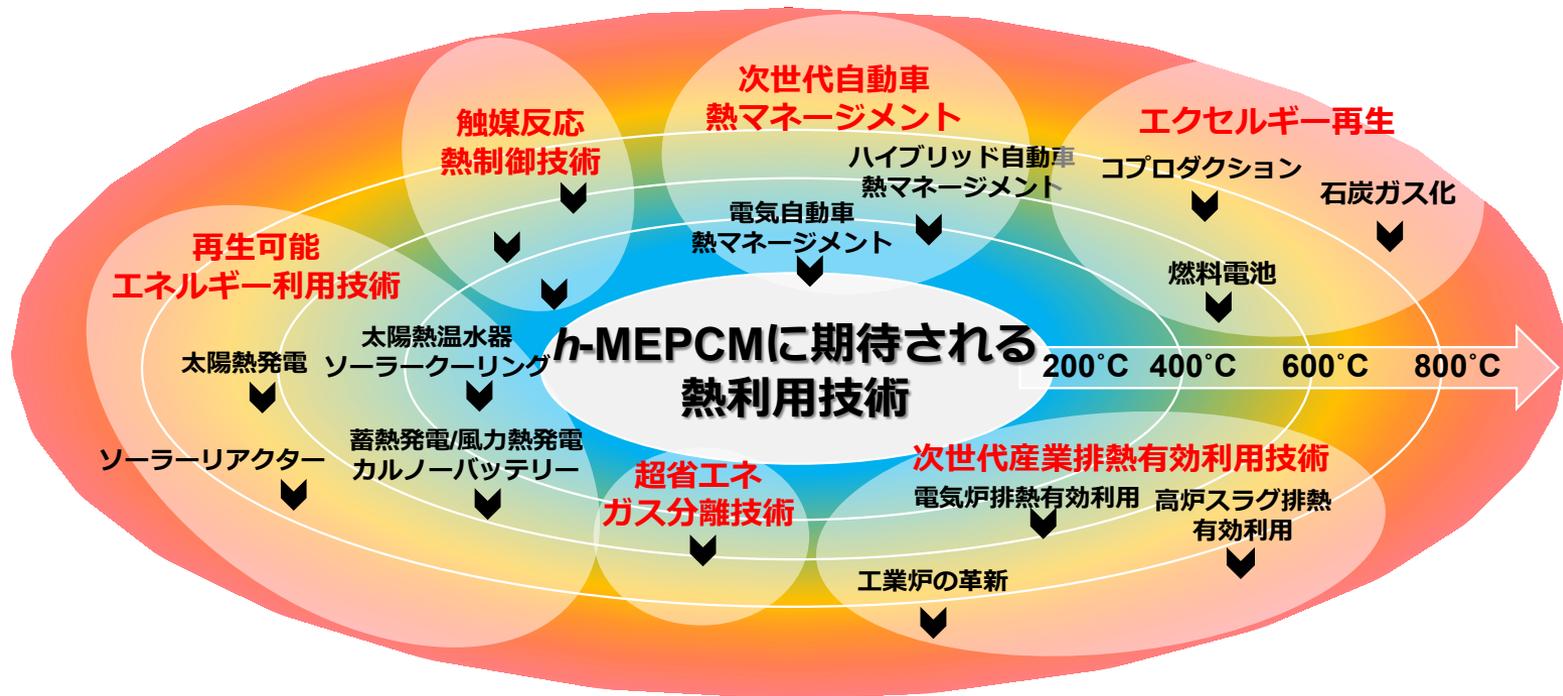


MEPCMはこれら課題そのものがない！蓄熱/熱制御の機能のみを抽出した新材料。
熱源に対応したMEPCMが開発できていれば、フレキシブルにプロセスを設計、
開発することが可能！！（電炉排熱に対応したMEPCMは開発済み！！）

「ダーティかつ温度変動の激しい高温電炉排ガスをクリーンな恒温熱源に変換可能な潜熱蓄熱/熱制御プロセスの開発」

- 高温電炉排ガス回収に適したMEPCMの開発
- 各種熱媒体とMEPCMの化学的安定性の調査
- MEPCM蓄熱体構造の最適化検討
- ラボスケール潜熱蓄熱/熱制御モジュールによるコンセプト実証
- 数値シミュレーションモデルの開発とスケールアップ検討
- 電炉への潜熱蓄熱/熱制御プロセス導入の試設計と導入効果の検討

*共通技術基盤となるため複数の電炉メーカーの参入（共同研究先/研究開発推進委員）を想定



- 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のポテンシャルニーズは確実にある。
- 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。

ご清聴ありがとうございました。

Hokkaido University



Associate Professor
Dr. Eng.

Takahiro Nomura

E-mail: nms-tropy@eng.hokudai.ac.jp

**Center for Advanced Research of
Energy and Materials. Kita 13
Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-
8628 Japan**

