

安価な粘土鉱物由来熱電材料で 高温排熱を電力に変換

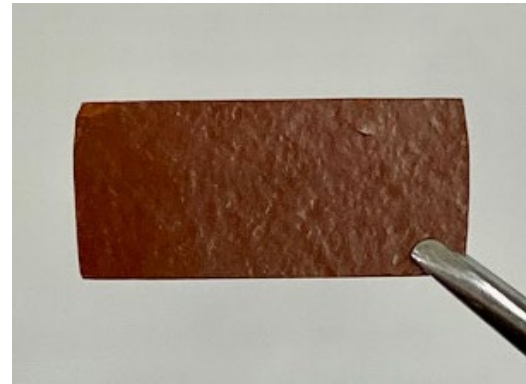
日本原子力研究開発機構

パイオニアラボ

本田未来粘土材料研究開発ラボ

ラボリーダー 本田 充紀

2026年6月11日



- 本田充紀 博士(理学)
- 日本原子力機構開発機構(JAEA)
- 本田未来粘土材料研究開発ラボ

専門

- ✓ 粘土鉱物材料
- ✓ 熔融塩プロセス
- ✓ 高温熱電変換
- ✓ 熱電モジュール化
- ✓ X線構造解析

捨てる**熱**を、未来の**電力**へ

天然粘土鉱物を活用した
高温熱電変換技術を開発

- ZT=0.29達成
- 発電実証済み
- 特許登録2件
- 出願特許1件
- 共同研究2件

日本のエネルギー自給率

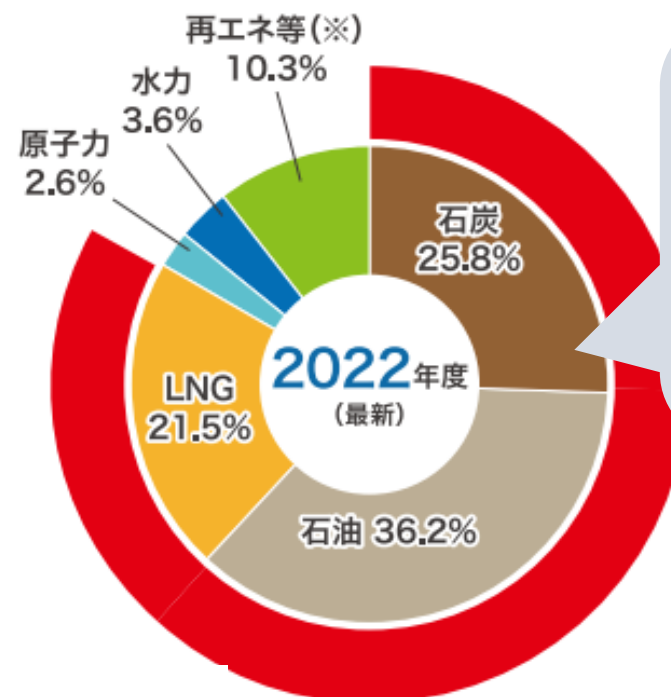
自給率

13.3%

(OECD38か国中37位)

日本のエネルギー自給率は他のOECD諸国と比べて低い水準

1次エネルギー供給構成



化石燃料依存度

83.5%

(石油・石炭・LNG)

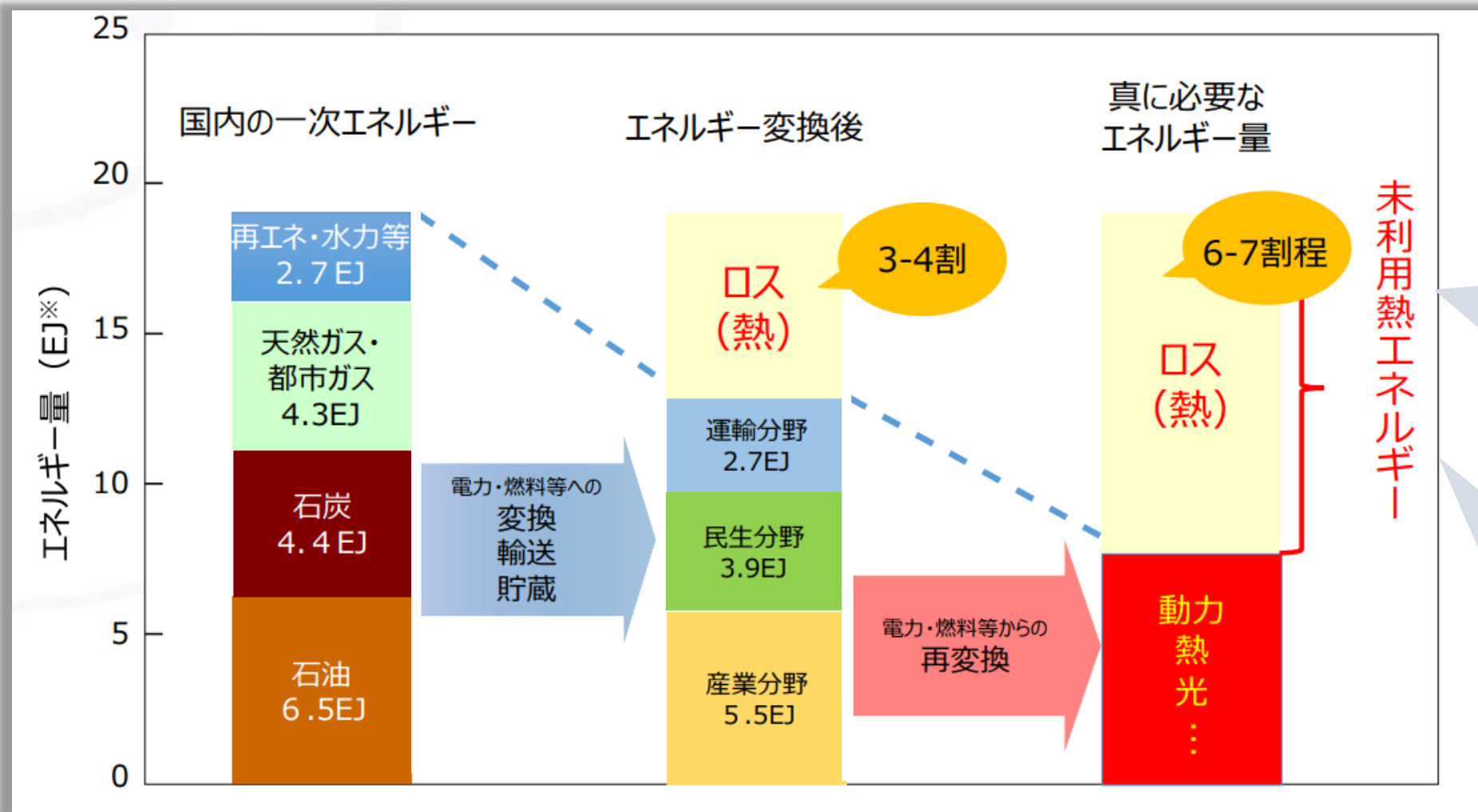
出展:資源エネルギー庁HPより引用

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/>

※再エネ等は未活用エネルギーを含む

日本のエネルギーは、**約9割**が海外に依存しています

投入エネルギーの約7割が未利用熱



年間
約1兆kWh

未利用熱
の内訳：
200℃以上
約25%

出展: 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
「ここまで来た熱利用～脱炭素社会を切り拓く熱の3R」
※ EJ=10¹⁸ ジュール

未利用熱は、重要な未活用エネルギー資源です

概要：安価な粘土鉱物由来熱電材料で高温排熱を電力へ変換

社会課題

大量の未利用熱が放出されている

- 日本はエネルギーの約9割を海外依存
- 投入エネルギーの約6-7割が未利用熱
- 高温排熱は2500億kWh/年

エネルギーの多くが捨てられている…

課題

高温排熱利用が進まない理由

- 熱電材料は高価
- 希少元素に依存
- 有害元素を含む
- 高温安定性に課題

代表的な熱電材料



BiTe
(ビスマステルル)



SiGe
(シリコンゲルマ)

コスト・資源・環境の課題で普及が進まない

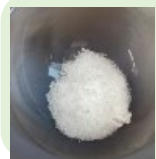
解決策(本技術)

粘土鉱物を高温熱電材料へ



風化黒雲母

↓



KCl-CaCl₂ 溶融塩処理

↓



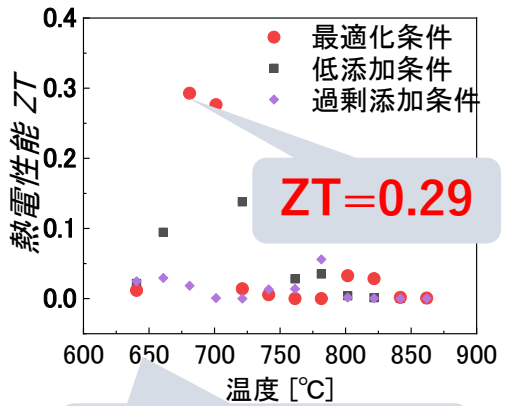
高温熱電材料
(600-900℃で利用可能)

低コスト・非毒性・豊富

実績

発電実証まで到達

- ZT=0.29(667℃)
- 2024年比約20倍の向上
- 発電確認
- 特許出願
- 共同研究実施中



熱電性能 ZT

温度 [°C]

最適化条件
低添加条件
過剰添加条件

ZT=0.29

発電を確認

求める連携

社会実装を加速するパートナーを募集

求める企業・分野

- セラミック
- 自動車
- 焼却炉

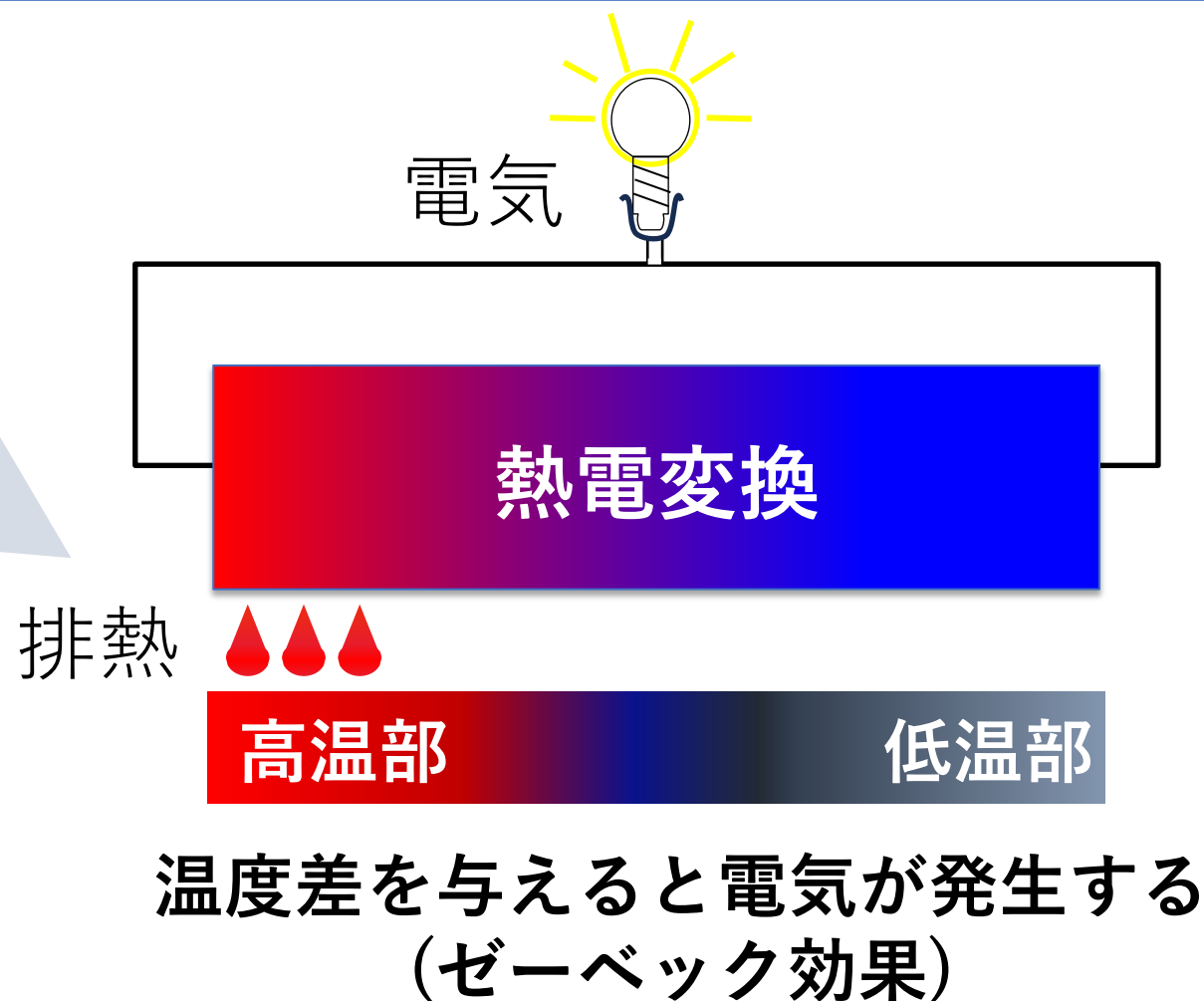
求める企業・分野

- 素子化技術
- 量産化技術

高温排熱の有効活用で脱炭素社会に貢献

捨てる熱を、未来の電力へ
粘土鉱物の力で高温排熱利用を実現

- 鉄鋼
- 焼却炉
- 自動車
- 工業炉
- 化学プラント



捨てられている熱を直接電力として回収可能

既存熱電材料は高価・希少元素依存である

既存材料との比較				
材料	Bi ₂ Te ₃	PbTe系	Si _{1-x} Ge _x 系	本研究
希少元素	必要(Te)	必要(Te)	必要(Ge)	不要
高温安定性	△ (～300℃)	△ (～600℃)	○ (～700℃)	◎ 600-900℃
コスト	高	高	高	低コスト
毒性・安全性	一部あり	鉛を含む	安全	非毒性
資源性	限定的	限定的	中程度	豊富

既存熱電材料(数万円から数十万円)



天然に豊富な粘土鉱物(数百円～数千円)



- ✓ 天然に豊富に存在
- ✓ 低コストで安定供給可能
- ✓ 環境負荷が小さい

高温排熱利用に**必要な条件を満たす材料**が求められている

高温排熱利用の鍵は「低コスト×高温安定性」

熱電材料のポジショニングマップ

高温安定性 高

SiGe系

- ✓ 高温で安定
- × 高コスト
- × 希少元素依存

本研究 粘土鉱物

- ✓ 600-900℃で利用可能
- ✓ 天然に豊富
- ✓ 低コスト・非毒性

コスト 低

高

BiTe系

- × 低温でのみ安定
- × 希少元素依存
- × 高コスト

PbTe系

- △ 中温域まで
- × 有害元素含有
- × 高コスト

低

粘土鉱物の強み



資源豊富



低コスト
数百～千円



非毒性



高温安定
(600-900℃)

粘土鉱物は「低コスト×高温安定性」を両立する有望な材料
産業界の高温排熱を大規模に活用する新しい選択しとなりえる

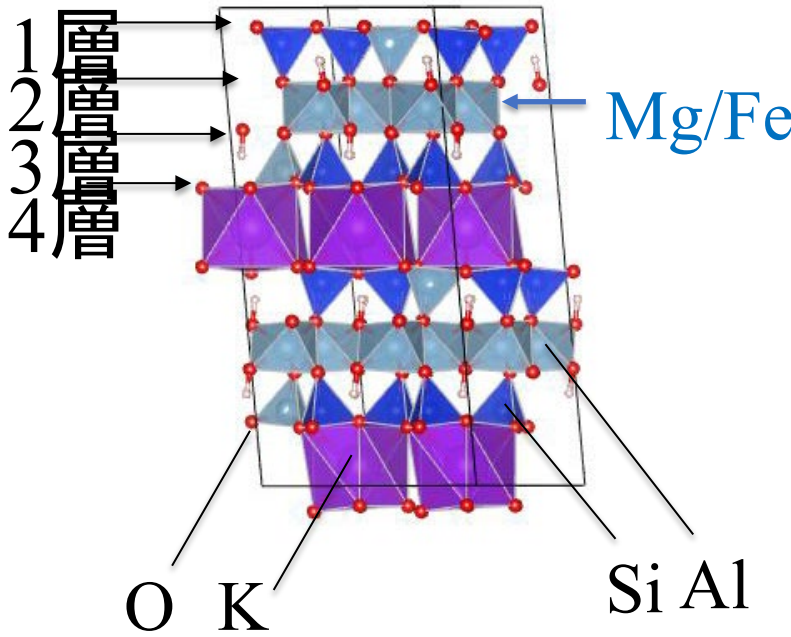
なぜ風化黒雲母なのか？天然に豊富、Fe・Mgを含む層状構造

風化黒雲母とは

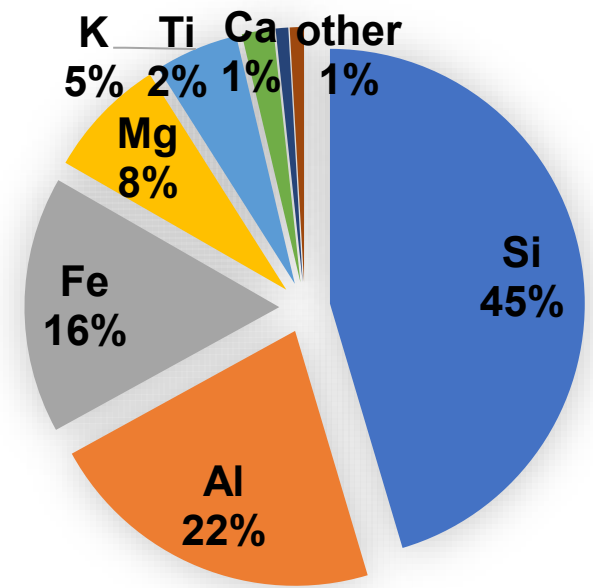


- 風化黒雲母(Biotite)の特徴
- 黒雲母が風化・変質を受けた鉱物
- 層状構造を保持し、FeやMgを含む

層状構造と元素の特徴



元素組成



- 豊富な元素(Si, Al, Fe)が主成分：地殻上位8元素により構成
- 耐熱・耐放射性を有する

風化黒雲母は、低コスト・非毒性・高温安定性を兼ねそろえた**天然資源**である



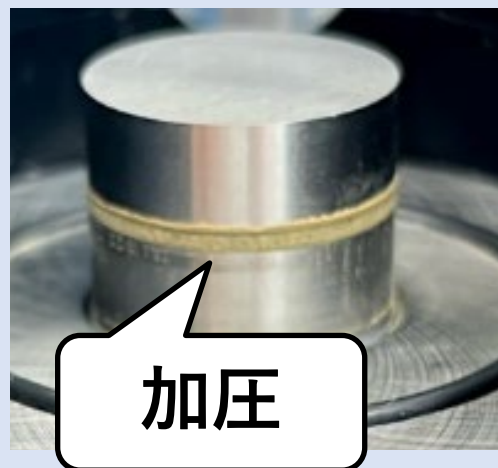
溶融塩処理により構造を制御
高性能化の実現

① 試料調整



工程①
粘土鉱物とアルカリ塩
を混合し熔融塩処理

② 熔融塩処理



工程②
混合材料を加圧成型

③ 焼成



工程③
成型後に焼成

④ 材料の完成



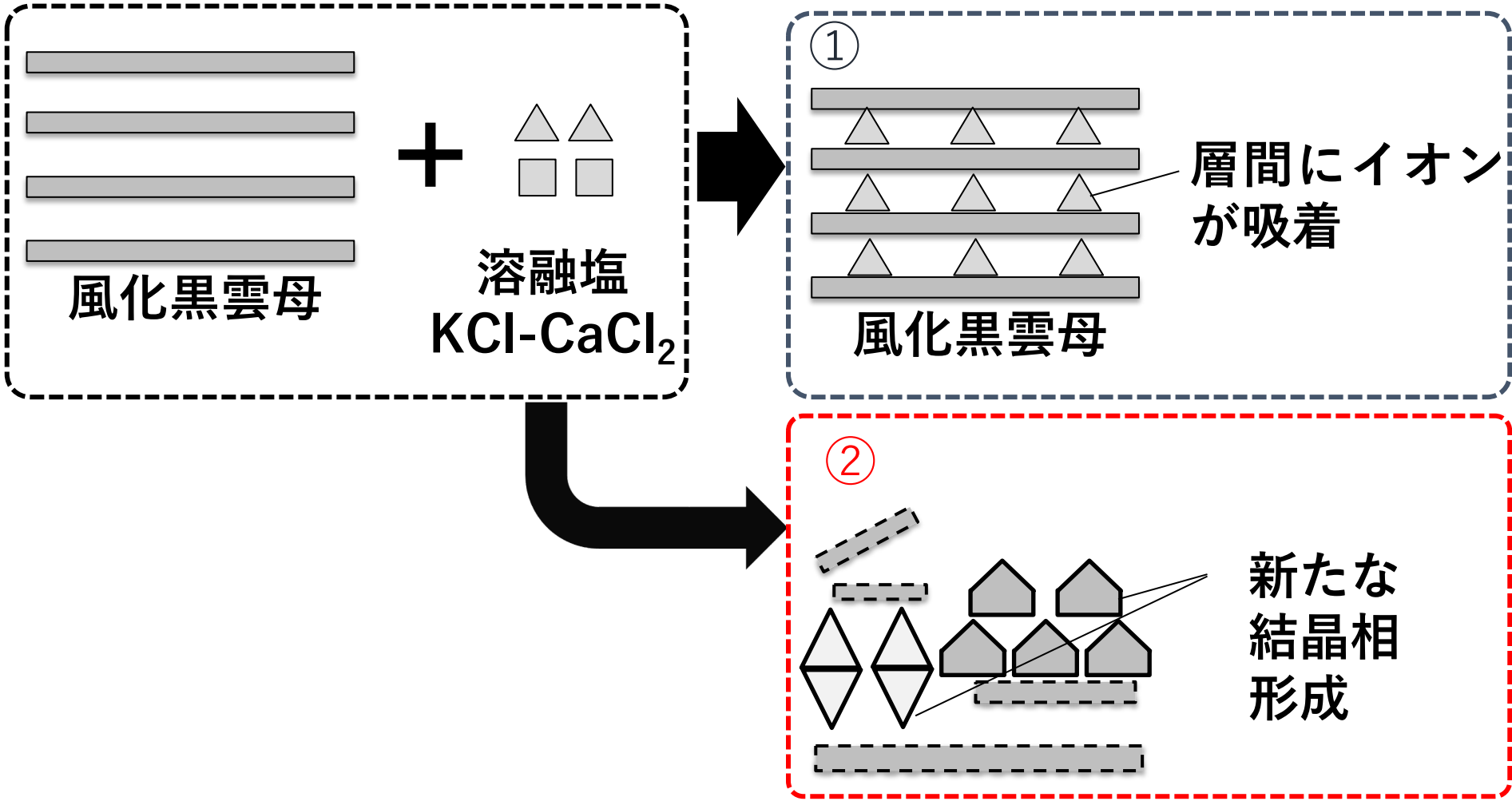
完成
熱電材料が
取得可能

特願2025-005197「熱電変換材料の製造方法」

特願2025-154549「熱電変換材料及び熱電変換材料の製造方法」

熔融塩処理により層間構造を制御し、**熱電特性**を引き出す！

熔融塩反応により何が起こるのか？

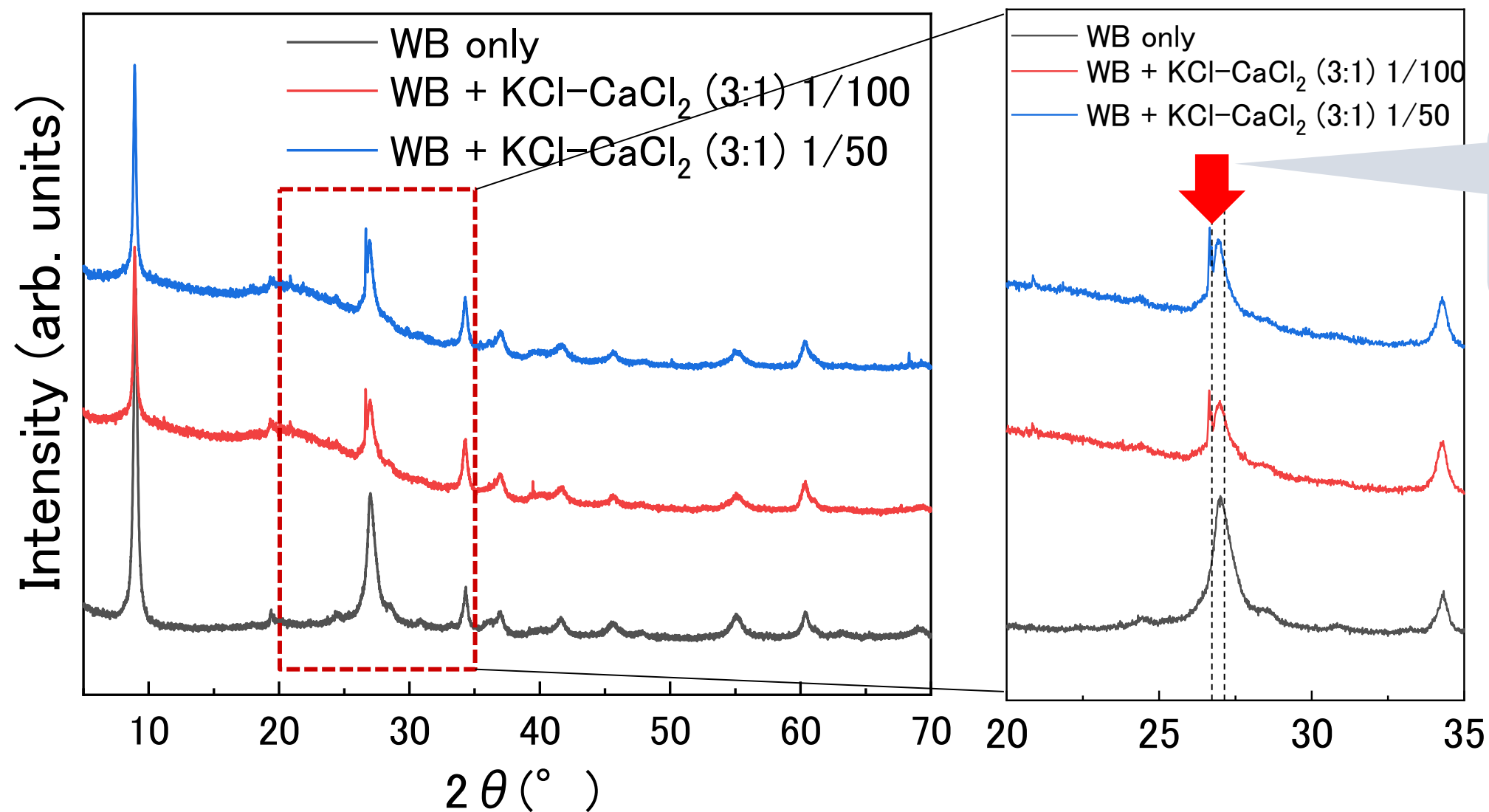


熔融塩の役割

✓層間構造制御
 ✓イオン交換
 ✓結晶相変化
 ✓高温で電気が流れやすくなる

熔融塩法は単なる混合ではなく、粘土鉱物の構造を制御し、
 熱電特性を引き出す技術

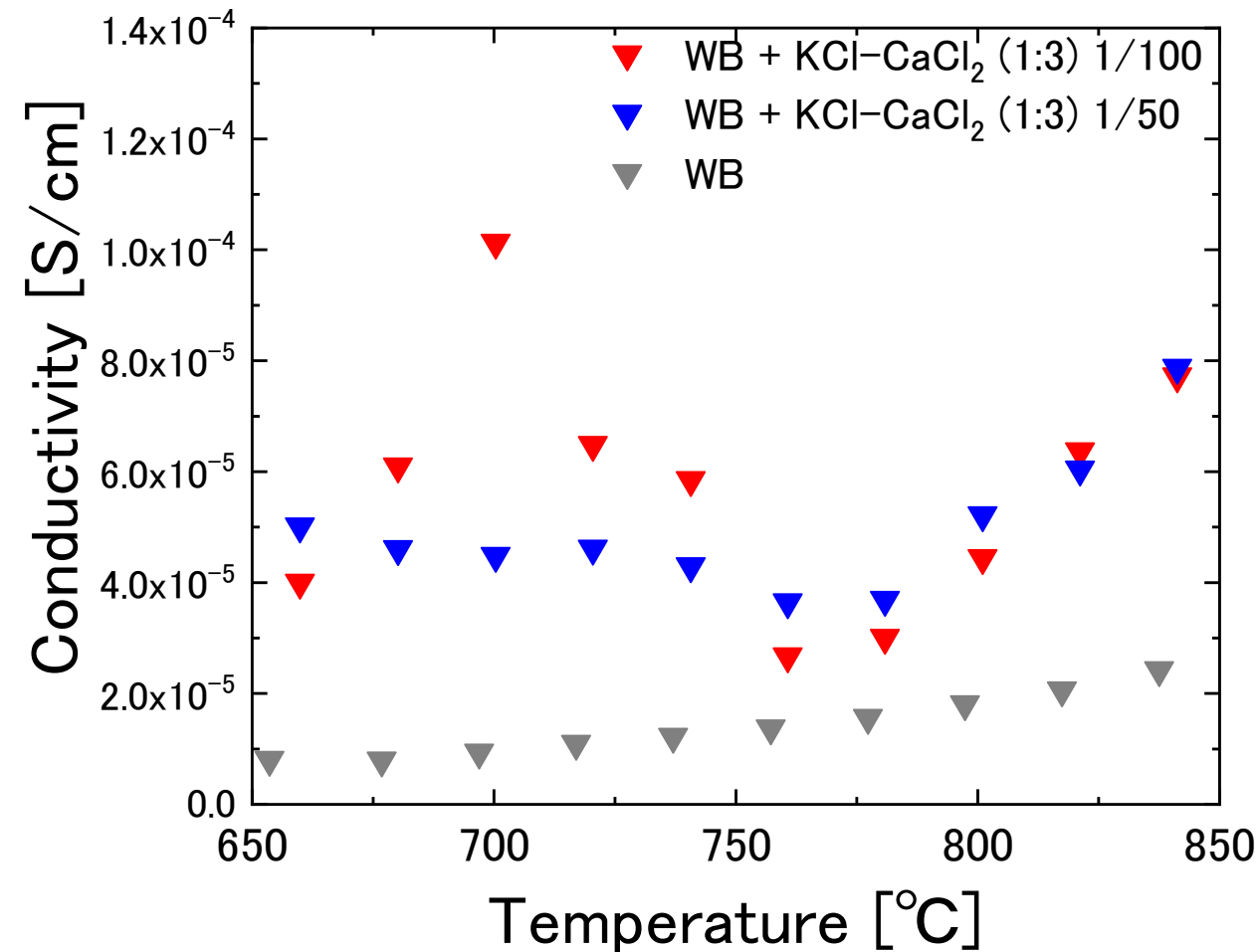
熔融塩による構造変化



新規ピーク
出現

風化黒雲母構造を保持しながら新たな結晶相が形成

構造変化により電気伝導率が向上

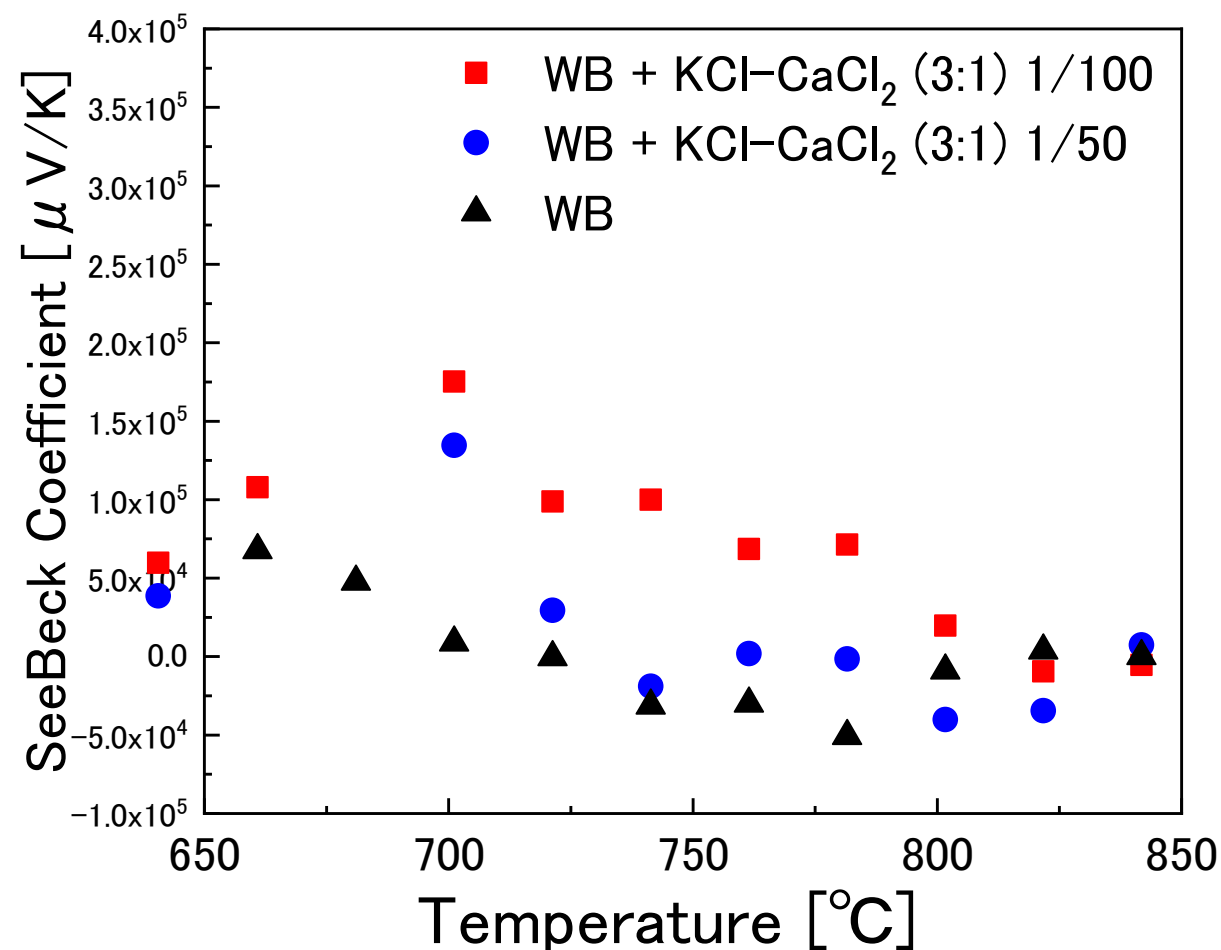


熔融塩処理の効果

- ✓WB構造を保持
- ✓新規結晶相形成
- ✓電気伝導率が最大約10倍向上
- ✓構造変化と電気伝導率向上に相関

熔融塩処理により構造を制御し、高温電気伝導率を向上

電気伝導率向上とゼーベック係数の両立

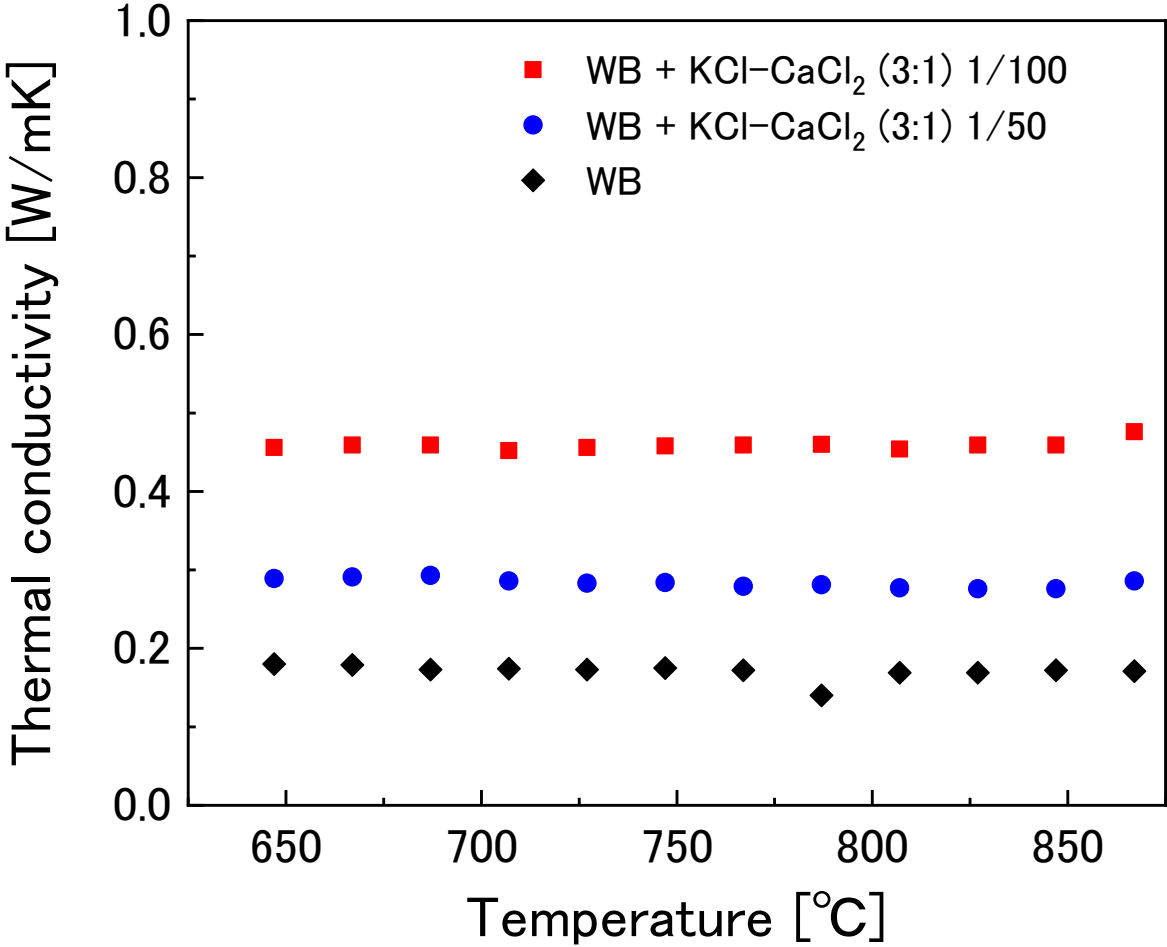


溶融塩処理の効果

- ✓ゼーベック係数を維持
- ✓高温域でも熱起電力を保持
- ✓電気伝導率向上との両立
- ✓熱電性能向上に有利

高いゼーベック係数を維持しながら電気伝導率を向上

熱電性能に有利な低熱伝導率を維持



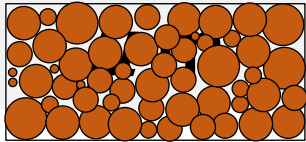
熔融塩処理の効果

- ✓ 650-850°Cで低熱伝導率を維持
- ✓ 熔融塩処理後も熱を逃しにくい構造を保持
- ✓ 電気伝導率向上との両立を実現

熱を逃がさず、電気を流しやすくすることで熱電性能を向上

従来の考え方

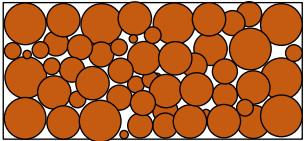
$D_{50}=16.7$



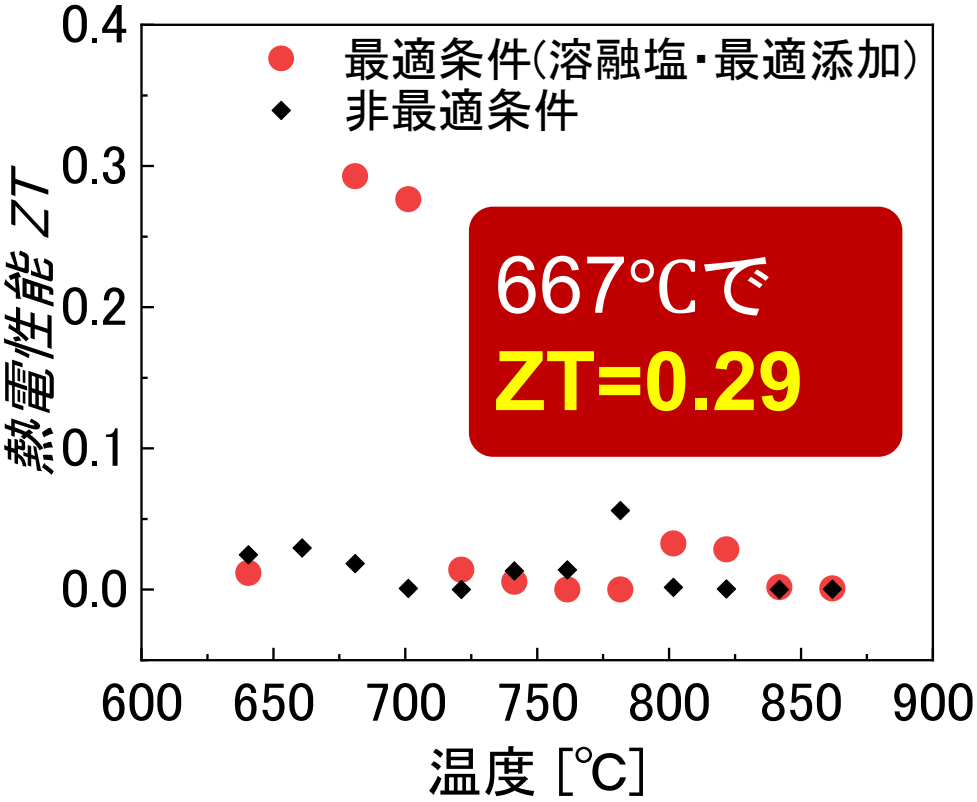
→ 界面増
→ 粒界増

本研究の発想

45-75 μm



→ 接触改善
→ 性能向上



ZT=0.29(667°C)
性能約20倍向上

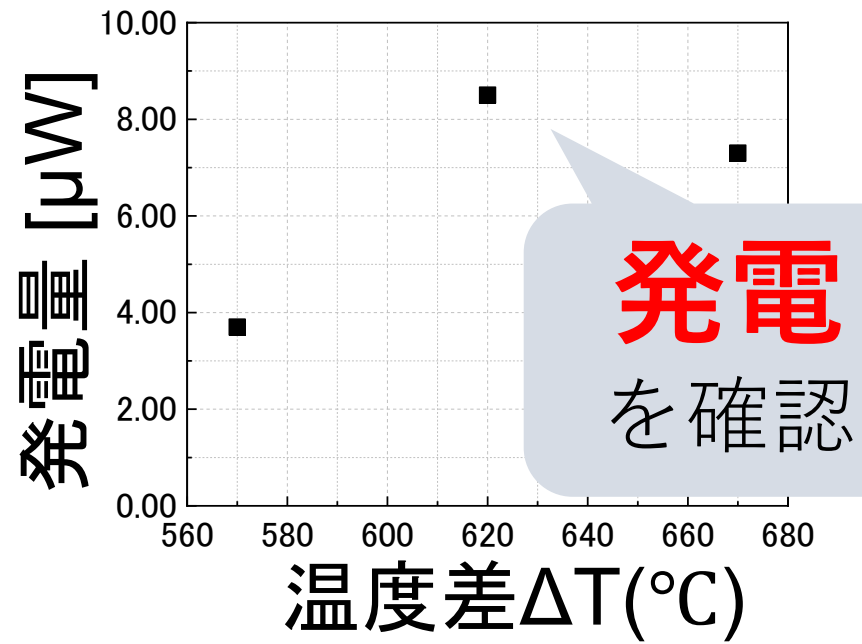
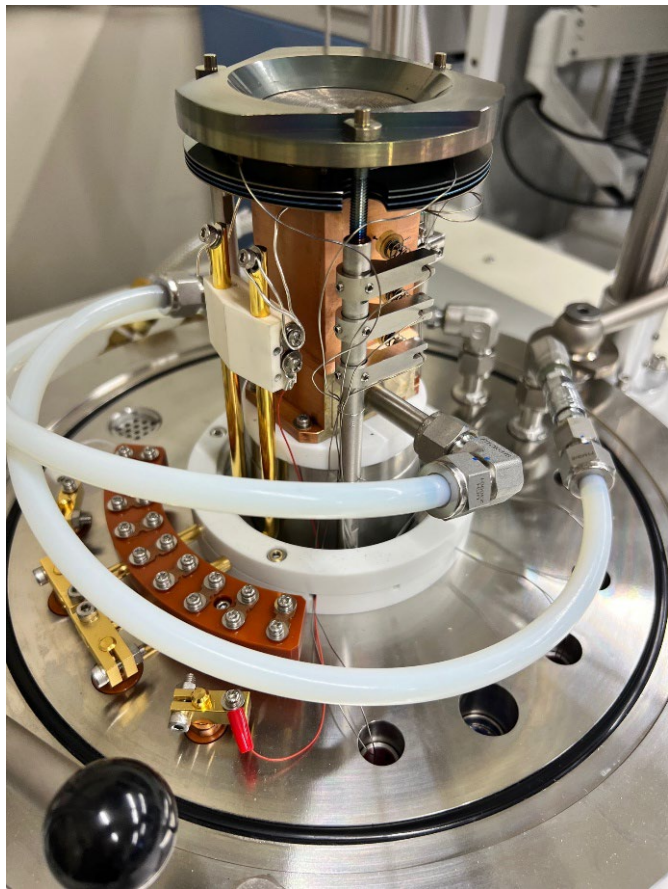
粒径制御

密度制御

熔融塩の最適化

焼結条件の最適化

粘土鉱物で熱電発電



作製した熱電発電素子
単素子・基礎検証段階

現在の到達段階

- ✓ 基礎研究
- ✓ 材料開発(ZT向上)
- ✓ 素子試作・評価
- ✓ **発電実証**
- モジュール化検討中



・特許出願



・論文発表



・国際学会発表



・共同研究(企業・大学)

発明の概要

- ① 天然粘土鉱物を原料とした高温熱電材料の製造方法
- ② 天然粘土鉱物を原料とした高温熱電材料およびその製造方法

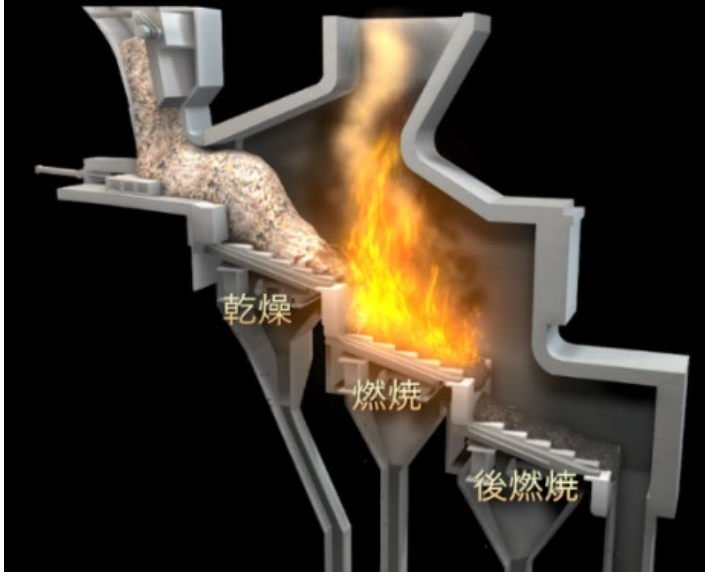
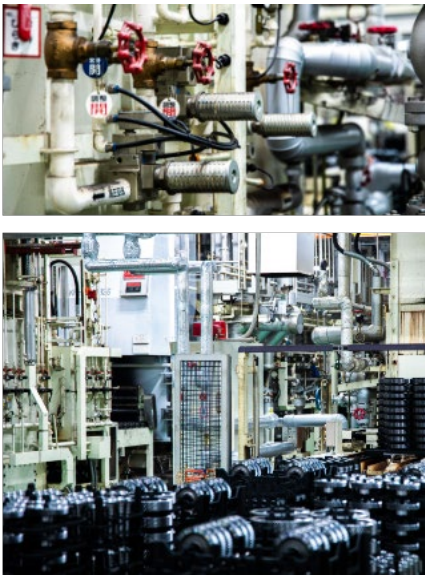
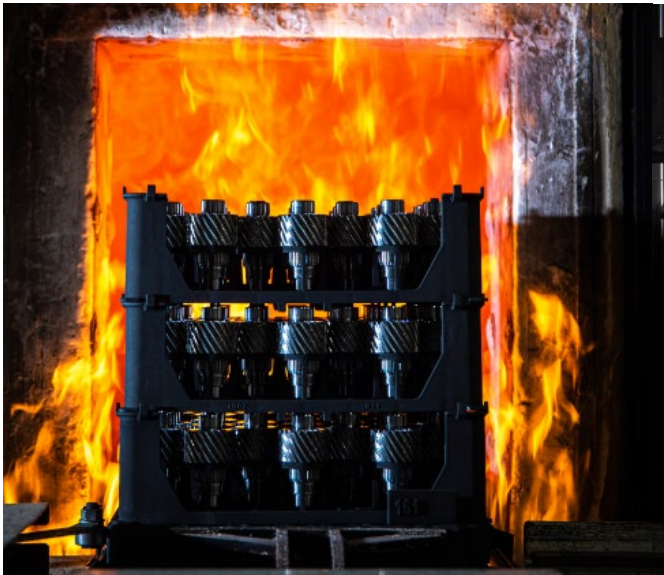
出願情報

- ①発明の名称：
熱電変換材料の製造方法
出願番号：特願2025-005197
出願日：2025年1月15日
出願人：
国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構
- ②発明の名称：
熱電変換材料及び熱電変換材料の製造方法
出願番号：特願2025-154549
出願日：2026年9月17日
出願人：
国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構

権利範囲

- ・ 粘土鉱物由来熱電材料
- ・ 熔融塩処理技術

本技術は知的財産権により保護されており、
共同研究・ライセンス契約等に対応可能



引用: トヨタ自動車北海道様HP
(<https://www.tmh.co.jp/manufacturing/process01.html>)

自動車産業
600-1000℃

引用: 大同特殊鋼様HP
(<https://www.daido.co.jp/products/machinery/index.html>)

鉄鋼産業
600-1200℃

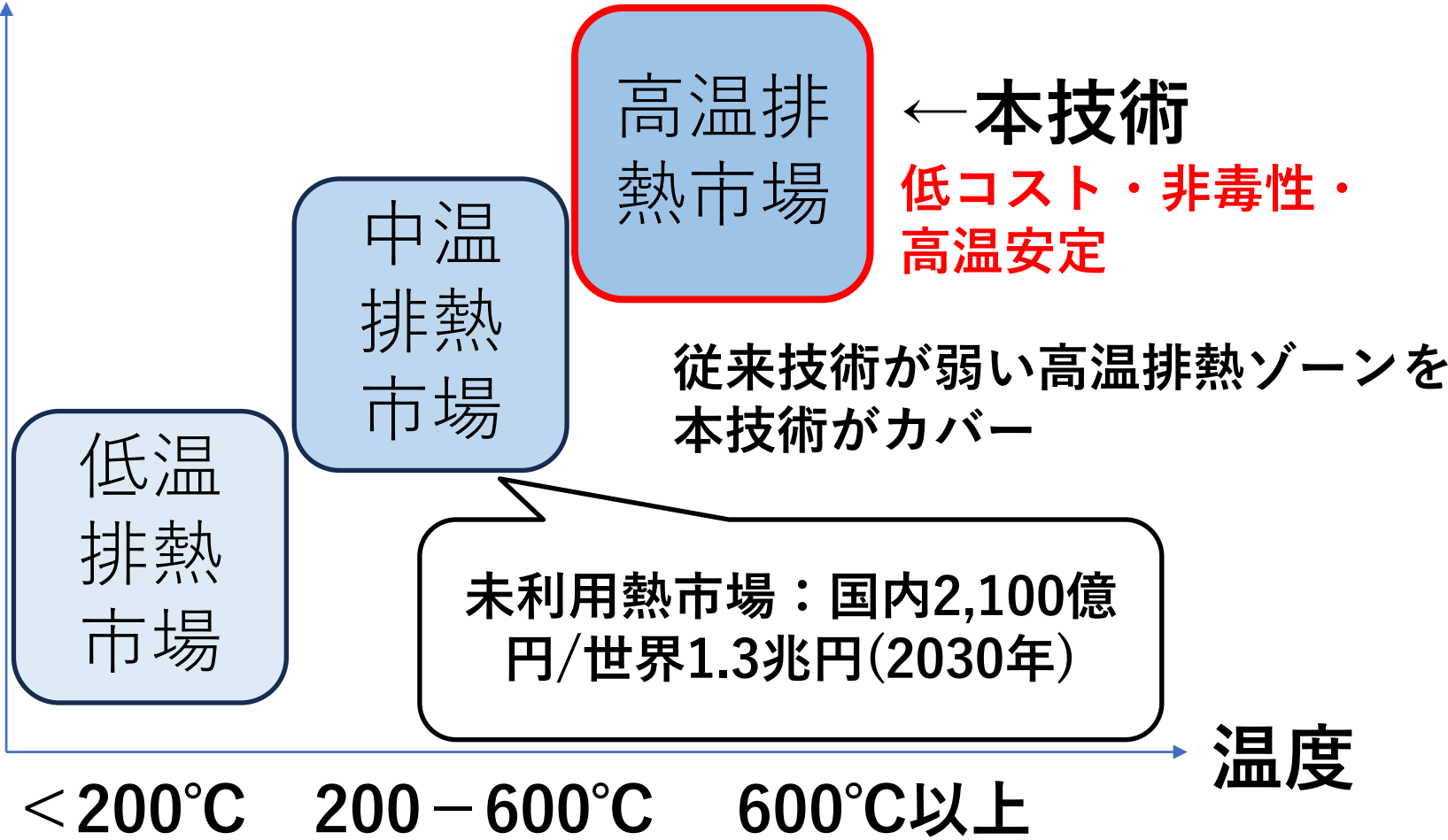
引用: ごみ焼却炉HP
(https://kankyou.hn-kouiki.jp/?page_id=373)

焼却炉
～900℃

幅広い産業で、脱炭素とエネルギー効率向上に貢献

高温産業設備における排熱回収対象例

市場ポテンシャル



(参考)
※1 「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」 (中間報告) NEDO
※2 「産業分野の廃熱実態調査 報告書」 (2019 年3 月 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合)
※3 高温領域では適用材料が限定されることから、採用率は一般的な新材料よりも高く20%程度と仮定

実用化への課題

✓ 材料開発

✓ 性能向上

✓ 発電実証

モジュール化

実排熱実証

社会実装

課題①

モジュール化技術

- 高温電極形成技術
- 素子間の接合
- 配線・絶縁設計
- 熱応力の検討
- モジュール構造設計

課題②

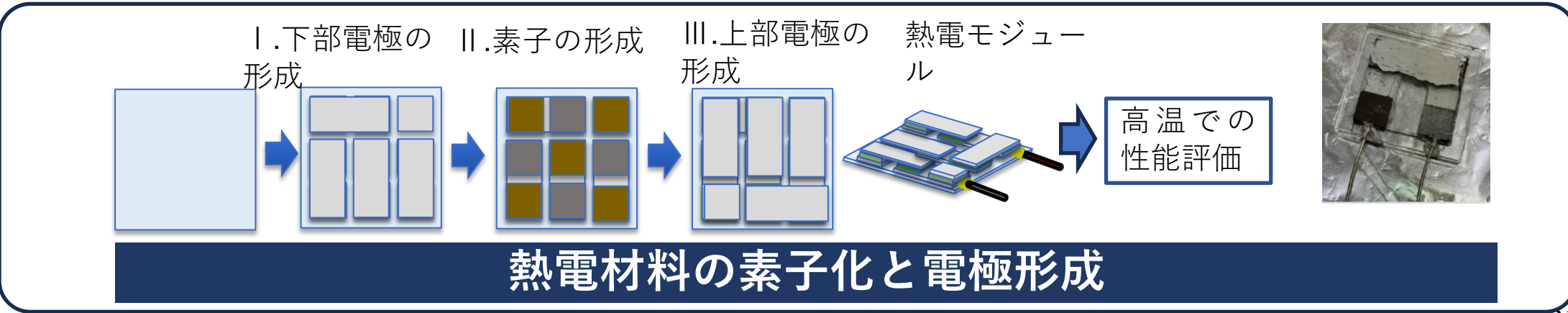
量産技術

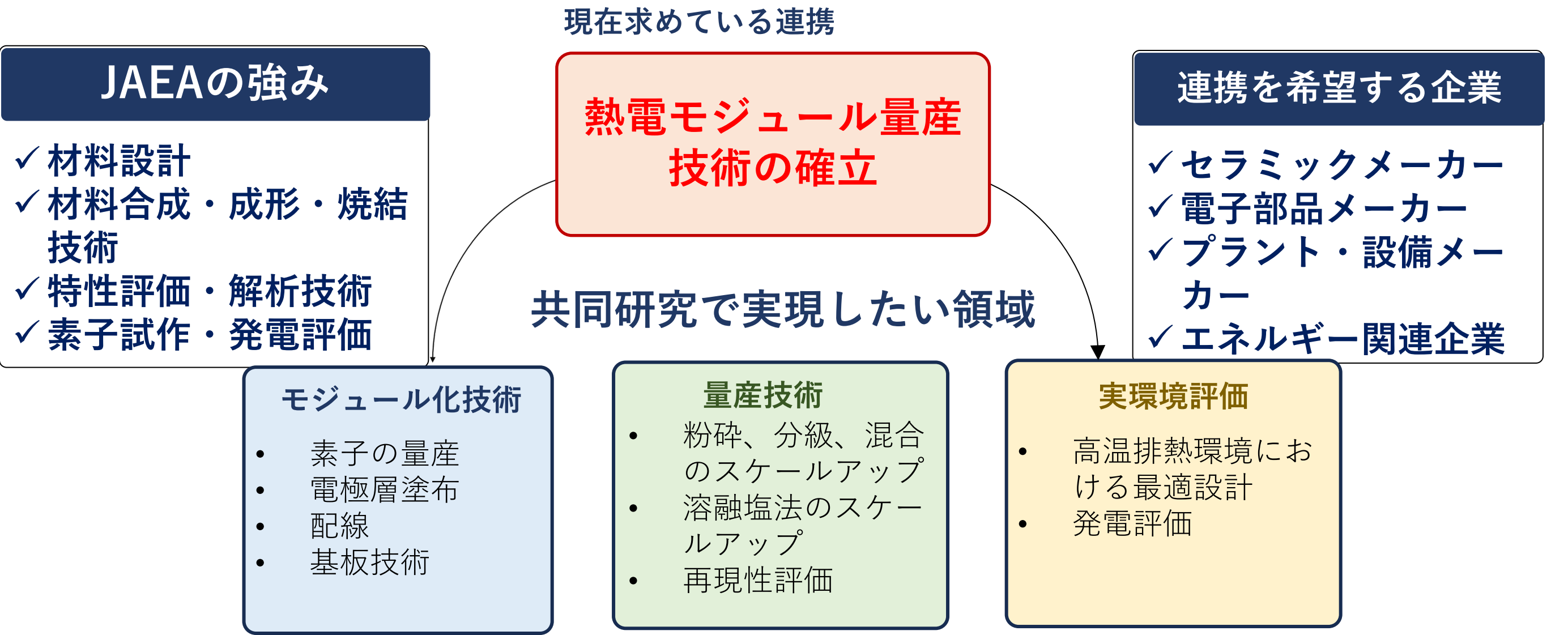
- 大型成型プロセス
- 量産焼結プロセス
- コスト低減
- 品質の安定化
- 歩留まりの向上

課題③

実環境評価

- 高温排熱環境での評価
- 温度差設計
- 耐久性評価
- システム実装評価
- 各種排熱源での検証

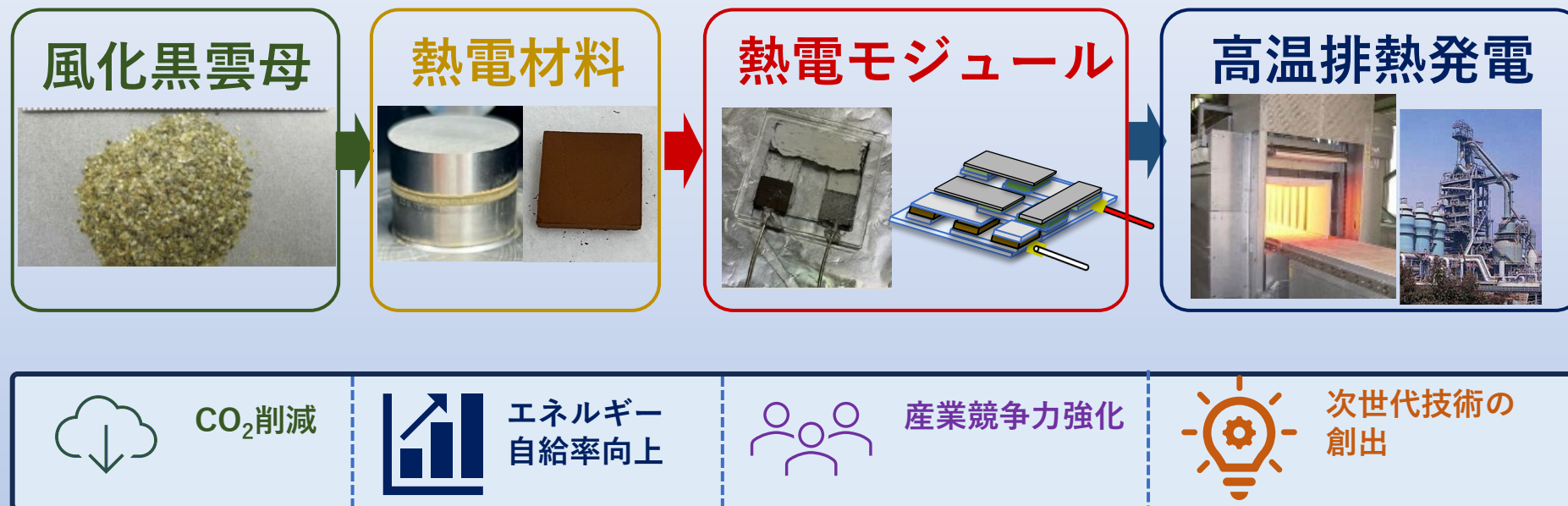




粘土鉱物から高効率な熱電発電を実現し、脱炭素社会に貢献します

まとめ：捨てる熱を、未来の電気へ

- ✓ 天然粘土鉱物から高温熱電材料を創製
- ✓ $ZT=0.29(667^{\circ}\text{C})$ を達成
- ✓ 発電実証に成功
- ✓ 高温排熱市場への適用を目指す
- ✓ モジュール化・量産化・実廃熱実証を推進中



共同研究パートナーを募集しています

- ✓ セラミック量産技術
- ✓ 熱電モジュール設計
- ✓ 高温排熱実証フィールド

材料開発からモジュール実装へ。ともに社会実装を目指す
パートナーを募集しています！

連絡先



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
研究開発推進部

seika.riyou@jaea.go.jp

<https://forms.office.com/r/bzJtKYzcDk>