

放射線に強い熱電発電をめざして — スピン熱電素子を用いた廃熱利用と原子力電池 —

日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門 先端基礎研究センター

スピン-エネルギー変換材料科学研究Gr

主席研究員 岡安 悟

2021年9月2日

自己紹介

理学博士(筑波大学) : 低温屋

日本原子力研究所 高温超伝導体の照射効果の研究に従事

量子ビーム(重イオン・中性子・電子線・ガンマ線)を利用した物性改質

○「超伝導磁束状態の物理」(門脇和男編、裳華房)

「照射欠陥をもつ超伝導体」の項目を執筆 磁束量子のピン止め、磁束量子系の物理

○超伝導体MgB₂を用いた中性子検出器の開発

特開2008-134153 発明の名称「中性子検出装置及びその使用方法」

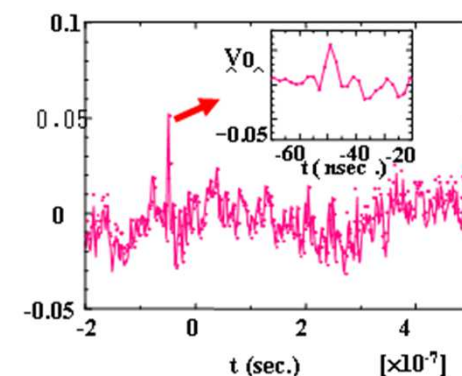
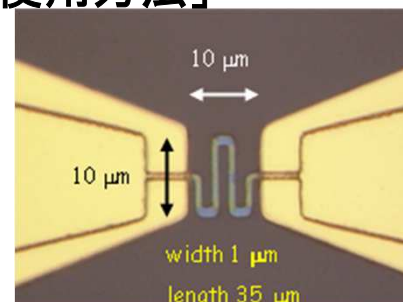
(共願: 科学技術振興機構、大阪府立大学)

超伝導体の転移端を利用した固体検出器

高電圧不要、高速応答

既存の³He検出器は

ガスで扱いが面倒、高圧必要、応答遅い

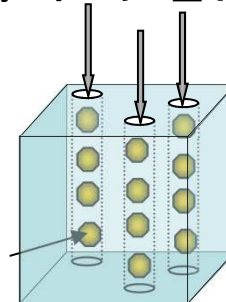


デメリット: 低温が必要~40K

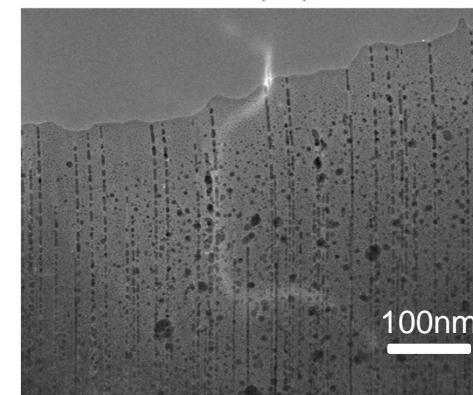
○粒子線照射によるゼオライトのナノ加工

特許第5505609号 発明の名称「ゼオライト及びその製造方法」

高エネルギー重イオン



金属クラスター



現在:

スピントロニクス材料の原子力応用

Summary

本発明は放射線環境下でも利用可能な熱電技術である。

そもそもの発端は福島第1原発事故。

モニタリングすらできない。熱源はあるのに利用できない。

従来の熱電技術は放射線に弱い

→本発明は放射線下の「スピン熱電素子」の可能性を拡大

想定される用途

- ・原子力電池 ⇒ 線源の制限をなくせる
- ・使用済み核燃料キャスクに取り付け発電⇒非常用電源

現在の問題点

従来技術に比べ発生電圧が小さい $0.1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ cf. BiTl $0.4\text{mV}/^\circ\text{C}$

長尺化で対応 ⇒ 長尺化をしてくれる人を募集中

物質開発 ⇒ 低コスト化・シート化(可撓性)してくれる人も

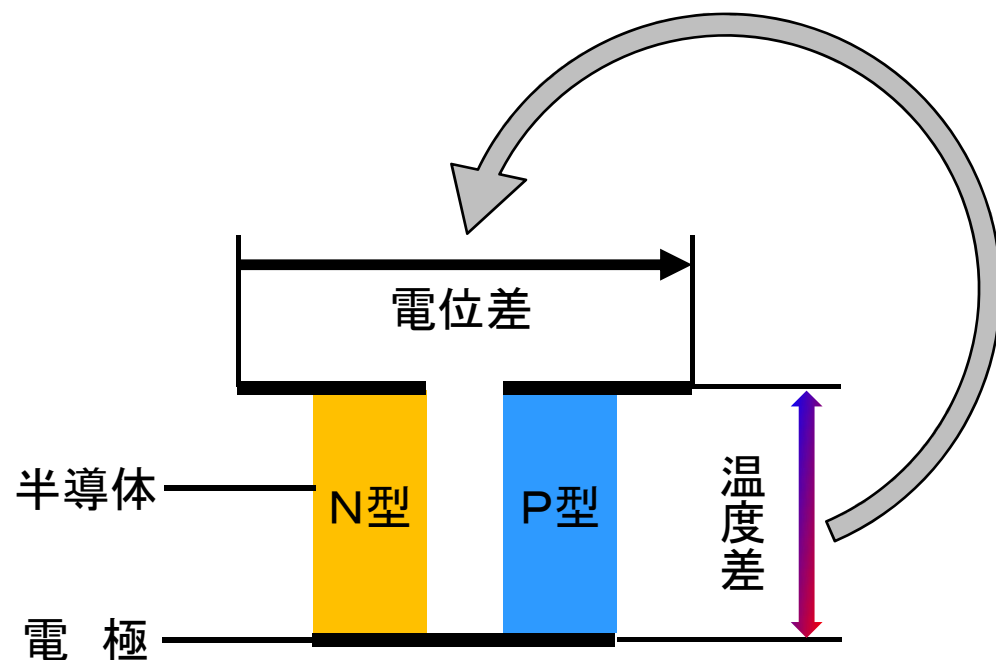
当方の提供可能な技術

照射および特性評価

熱電発電とは？

- ・熱を電気に変換する仕組み
- 2種類の半導体(金属)の接合
- 熱電対
- 接合に温度差を与える
- 電圧が発生(Seebeck効果)
- 回路にする
- 電流が流れる

||
熱電素子



熱電素子の使い道

- ・自動車や工場の**廃熱利用発電**

- ・IoTセンサー、時計などの**微小電源**



citizen
エコドライブサーモ
2268対の「熱電対」
(1999年11月)

- ・放射性同位元素と組み合わせた**原子力電池**

⇒ 宇宙探査機用電源

(例) NASA火星探査機を駆動する原子力電池



 Idaho National Laboratory

出典：<https://inl.gov/mars-2020/>

RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator)

放射性同位体熱電転換器(原子力電池の一種)

(重量45 kg、電気出力110 W(打ち上げ時)、燃料Pu-238(PuO₂) 4.8kg)

原子力電池の熱源核種（放射性同位体）

名前 & モデル	使用	最大出力		放射性同位体	最大燃料 (kg)	質量 (kg)
		電気 (W)	熱 (W)			
ASRG*	試作（打上げなし）, <u>ディスカバリー計画</u>	< 140 (2×70)	< 500	²³⁸ Pu	< 1	< 34
MMRTG	<u>キュリオシティ</u>	< 110	< 2000	²³⁸ Pu	< 4	< 45
GPHS-RTG	<u>カッシーニ</u> (3), <u>ニュー・ホライズンズ</u> (1), <u>ガリレオ</u> (2), <u>ユリシーズ</u> (1)	300	4400	²³⁸ Pu	7.8	55.9 - 57.8 ^[32]
MHW-RTG	LES-8/9, <u>ボイジャー1号</u> (3), <u>ボイジャー2号</u> (3)	160 ^[32]	2400 ^[33]	²³⁸ Pu	< 4.5	37.7 ^[32]
SNAP-3B	Transit-4A (1)	2.7 ^[32]	52.5	²³⁸ Pu	?	2.1 ^[32]
SNAP-9A	Transit-4A (1)	2.7 ^[32]	52.5	²³⁸ Pu	< 1	12.3 ^[32]
SNAP-19	Neutronics (1)	2.7 ^[32]	52.5	²³⁸ Pu	< 1	13.6 ^[32]
modified SNAP-19	パルサー (1)	2.7 ^[32]	52.5	²³⁸ Pu	< 1	15.2 ^[32]
SNAP-27	アルファ (1)	2.7 ^[32]	52.5	²³⁸ Pu ^[34]	3.8	20
Buk (BES-5)**	<u>RORSAT</u> (1)	3000	100,000	²³⁵ U	30	< 1000
SNAP-10A***	SNAP-10A (1)	600 ^[35]	30,000	濃縮ウラン		431

本発明では²³⁸Pu以外の他核種を使用可能
(例えばCs等)
それにより炉法規制外で原子力電池を作製可能
高エネルギー宇宙線にも耐性あり

ほぼ ²³⁸Pu → 利点：遮蔽が容易(α線のみ放出)
欠点：燃料確保・取扱に障壁

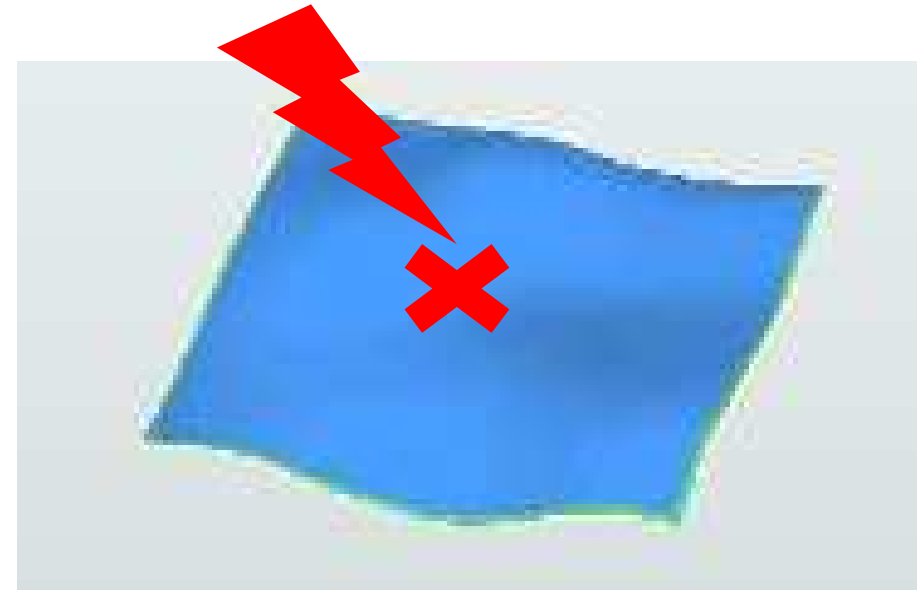
新技術の特徴・従来技術との比較

- スピン熱電素子

金属/磁性体の二層膜界面で発電

耐放射線特性が高い

構造が簡単で製造コスト低

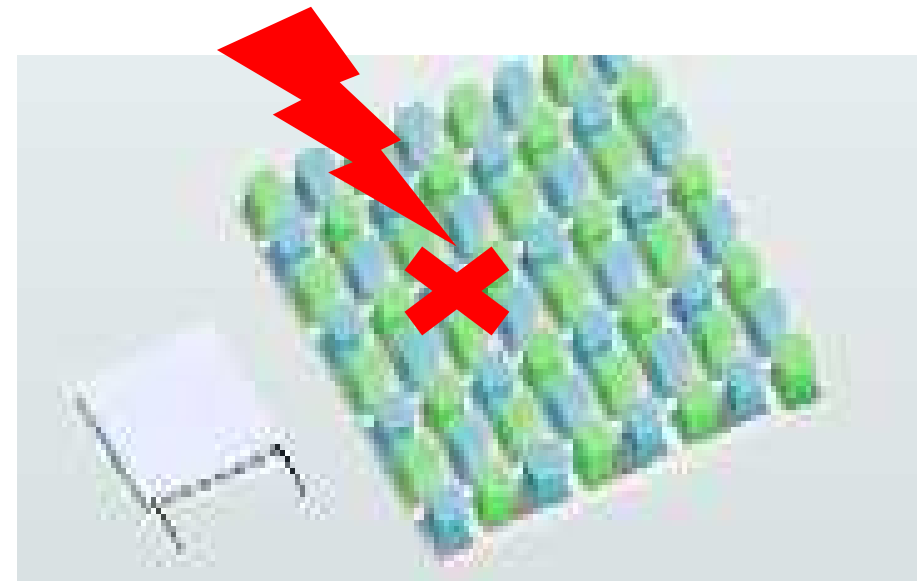


- 従来のゼーベック素子

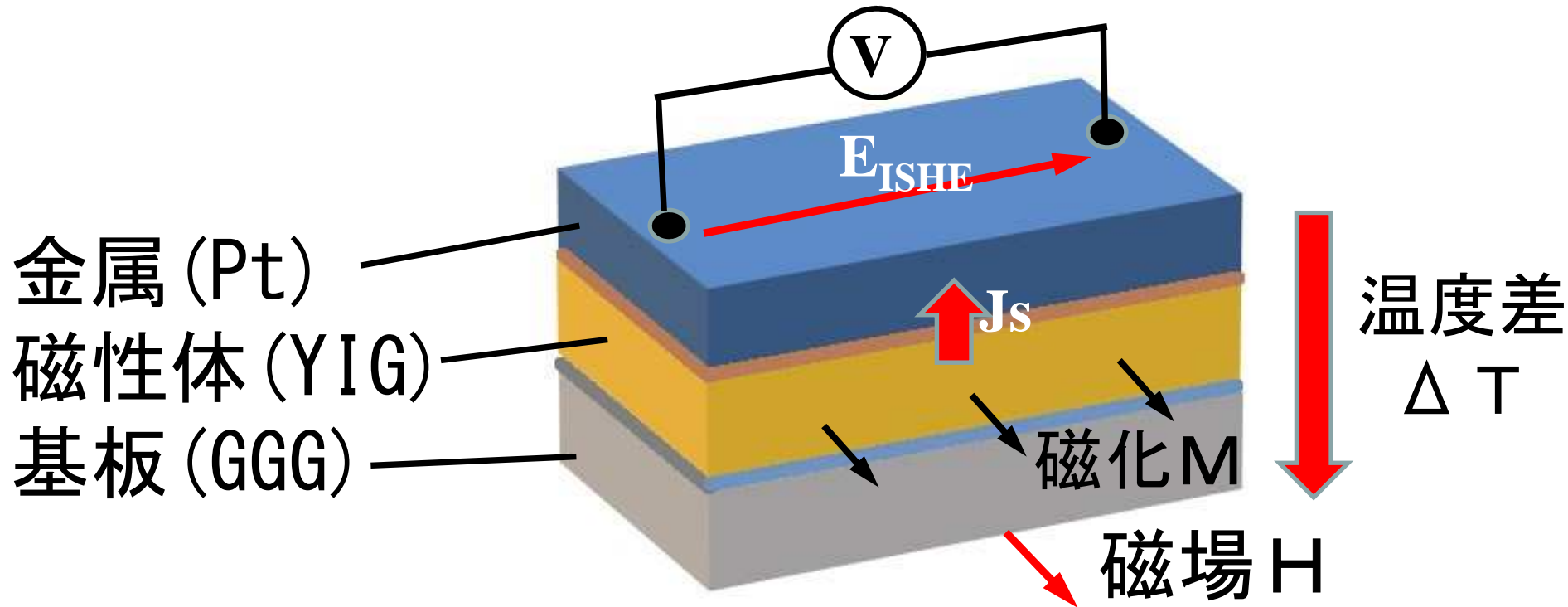
直列に回路を組む必要

耐放射線特性が低い

構造が複雑で製造コスト高

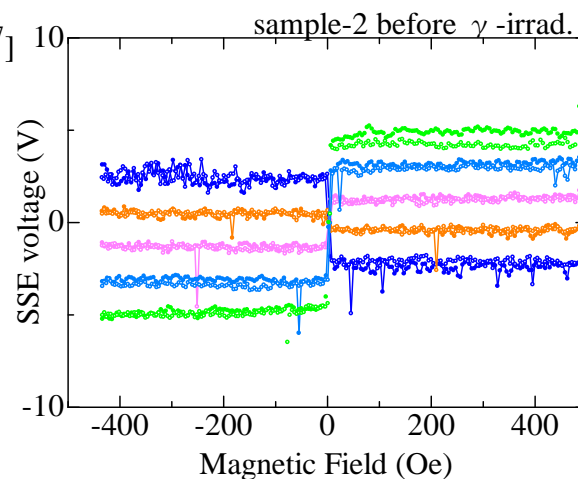


スピン熱電発電



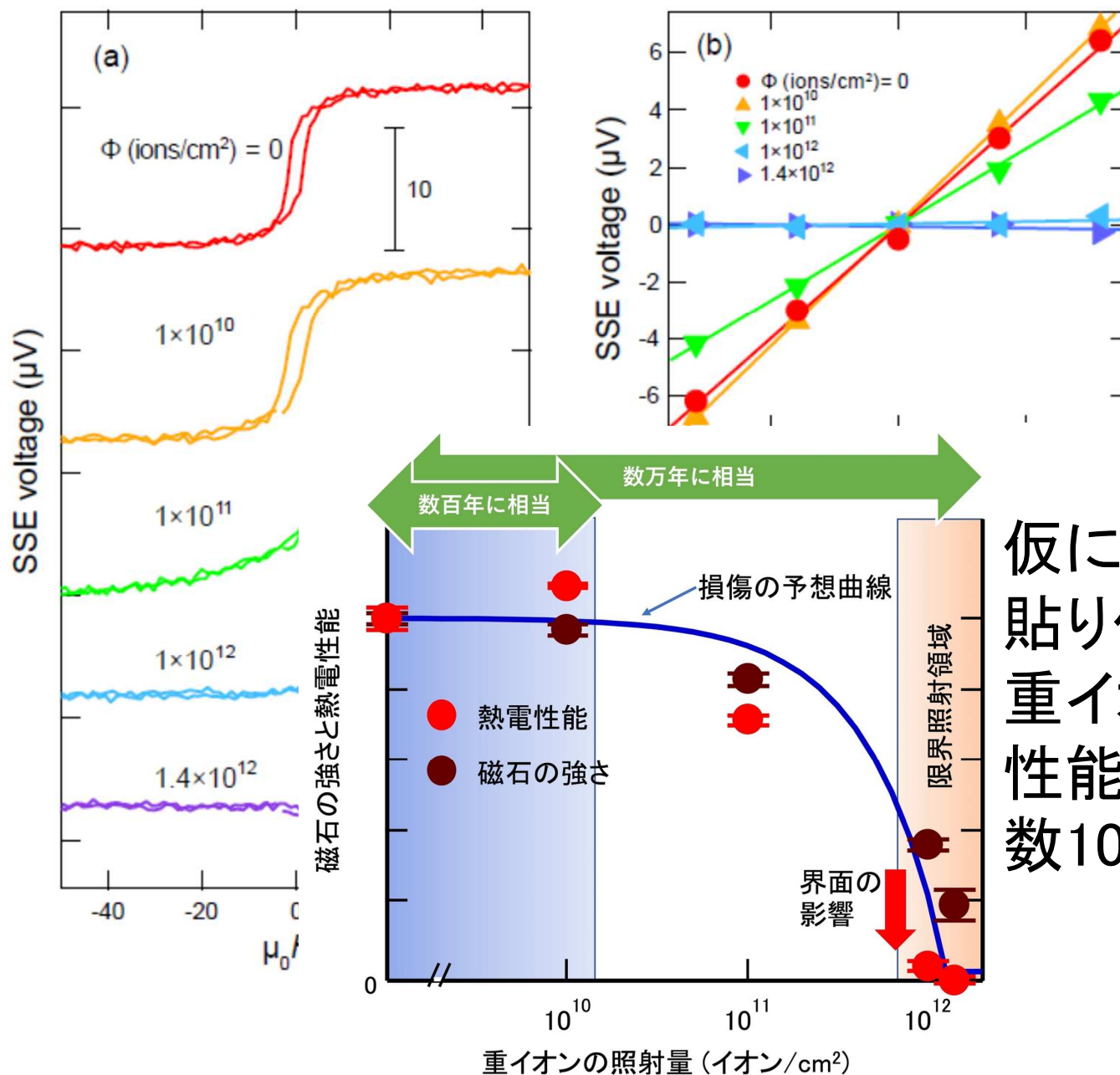
スピンゼーベック効果

Spin Seebeck Effect (SSE)



SSE信号の例

SSE素子の耐放射線特性を実証

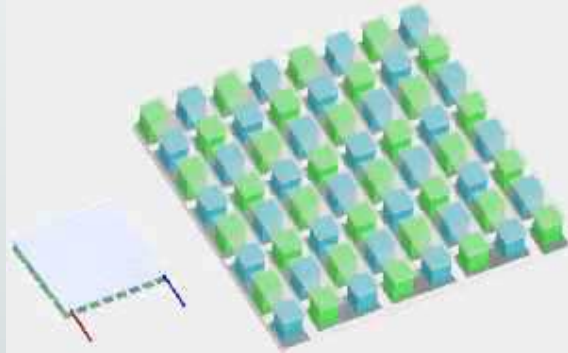


重イオンでマイクロな穴をあけて無理矢理試料を壊しても、温度依存性の直線性は保たれることから、試料の耐放射線特性は担保される。

仮にキャスクに貼り付けたとしても重イオンによる性能低下は数100年は問題なし

熱電変換技術の特徴と課題

従来のゼーベック熱電変換技術



【特徴】

- ・ 数度の温度差でも発電

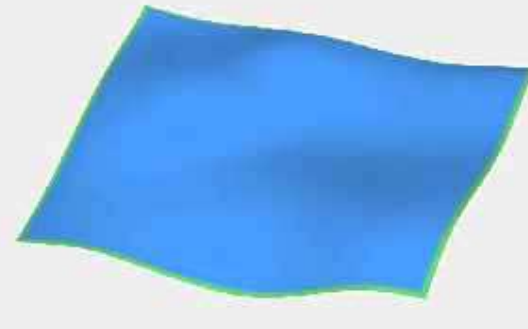
【発電用途の市場】

- ・ 深宇宙探査機用発電機
- ・ 軍用機器向け発電機

【課題】

- ・ 低コスト化による市場拡大

スピンを使った熱電変換技術



【特徴】

- ・ 数度の温度差でも発電
- ・ シンプルな構造
- ・ コスト、耐久性
実装の自由度に利点

【発電用途の市場】

- ・ 未開拓 → **原子力分野への応用**

【課題】

- ・ 変換効率の大幅向上

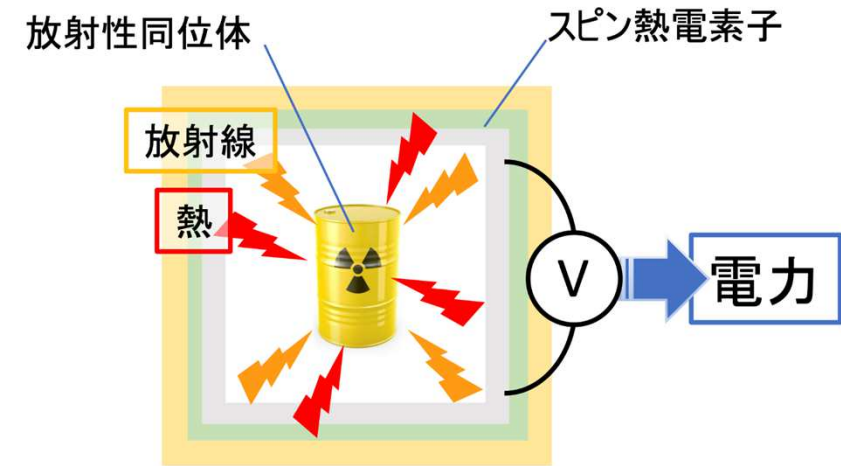
想定される用途

○原子力電池への応用

太陽電池の使えない場所での利用
熱電素子と熱源の組み合わせで発電
(半導体熱電対→ γ 遮蔽が必要、Pu)

本素子→**ガンマ線遮蔽が不要**

Pu以外の核種が熱源の候補に！



○その他崩壊熱の利用による電源確保

使用済み燃料棒キャスクへの貼り付け

実用化に向けた課題と企業への期待

- スピン熱電素子の課題

○従来素子に比べ発生電圧が小さい

→長尺化で補える(スケールアップ)

シート上への磁性体成膜

○金属薄膜の選定

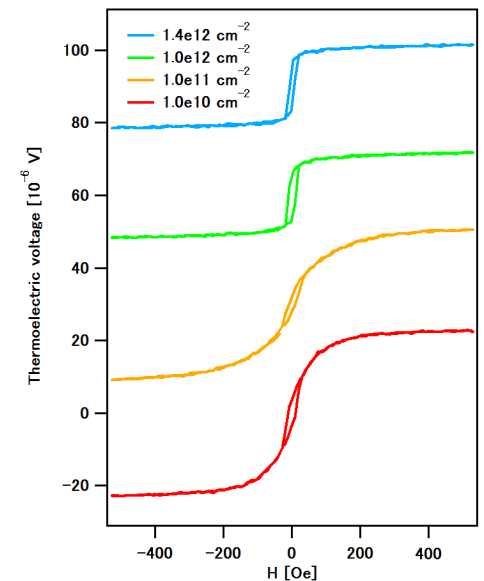
プラチナは高効率であるが高価

⇒Niで代替(SSEはPtの半分だがANEで補完)

(SSE:スピンゼーベック効果、ANE:異常ネルンスト効果)

○高温+蒸気に弱い?

何らかの保護膜を工夫する必要



本技術に関する知的財産権

発明の名称: 熱電変換システム、熱電変換方法

公開番号: 特開 2021-086942

出願人 : 日本原子力研究開発機構

発明者 : 岡安悟、針井一哉、家田淳一

発明の名称: 原子力電池、原子力電池システム

公開番号: 特開 2021-085774

出願人 : 日本原子力研究開発機構

発明者 : 岡安悟、針井一哉、家田淳一

お問い合わせ先

国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構
研究連携成果展開部

TEL 029-284-3420

e-mail seika.riyou@jaea.go.jp