



放射性廃棄物を資源に変える革新技術

～「ニュークリア×リニューアブル」の実現に向けた新たな価値の創造～



令和6年2月15日

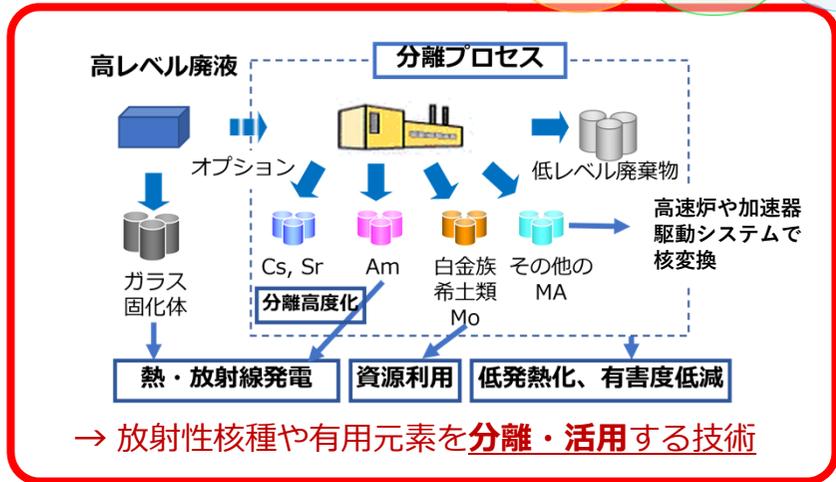
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

理事 大井川 宏之

- 原子力科学研究部門が取り組む 4 本の柱の概要
- 放射性廃棄物を有用な資源に変える革新技术
 - ・ 有用元素の分離技術
 - ・ ウランレドックスフロー蓄電池の開発
 - ・ 熱・放射線発電技術の開発
- 今後の取り組み

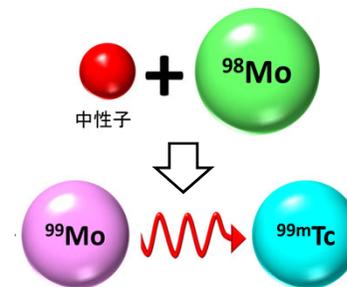
放射性廃棄物を資源へ

Pursuing nuclear-renewable Synergy
Making nuclear energy Sustainable
Making nuclear technology Ubiquitous



RI製造の推進

Making nuclear technology Ubiquitous



→ JRR-3を活用した **Mo-99/Tc-99mの製造**と民間と連携したサプライチェーンの構築

GXに貢献するN4R*)の推進

Pursuing nuclear-renewable Synergy
Making nuclear technology Ubiquitous

→ 中性子による**燃料電池セル内の水分分布観測**など

デジタルツインの推進 (DX化)

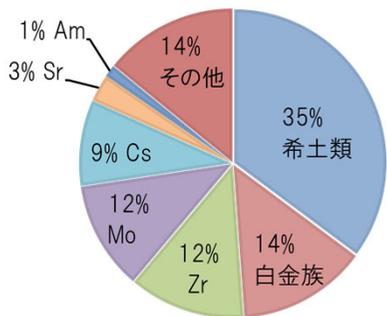
Making nuclear energy Sustainable

仮想空間シミュレーション ↔ 実空間データ取得

→ 大規模試験施設の利用をミニマムとし、**設計に要するコスト、時間を大幅低減**。また、ATF開発のDX化により**安全性向上と経済性向上の両立**が期待。

*) Nuclear for Renewable

バリュー 放射性廃棄物等を熱源、電源、RIとして**有用な資源**に変える**技術**を確立し、原子力、産業・宇宙分野等に提供する。



使用済燃料中の金属元素の割合
(U及びPuを除く)

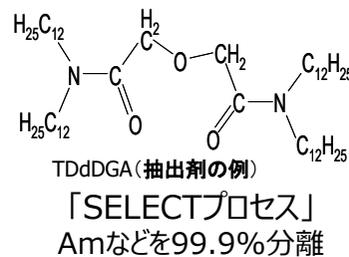
(ご参考)

- 使用済燃料 1 トン当たり、核分裂生成核種は約46kg（そのうち放射性核種は約11%）
- 希土類の**含有量が多い**（約10kg/トン）
- 白金族元素の含有率が自然鉱石よりも高い**
 自然鉱石：1～10g/トン
 使用済燃料：数kg/トン
- 使用済燃料800トン进行处理した場合
 白金族：年間国内需要の最大約15%
 （約300億円）に相当



機構の持つ強み

- ✓ 分離変換技術の研究で培った分離試薬・分離プロセス等の研究実績
- ✓ 多様なRI取扱試験施設（ホット施設）



多様なホット施設

➤ 達成目標

JAEAが開発した分離手法※1を改良及び高度化し、高レベル放射性廃液から有用元素※2を分離できる技術として、2028年までに社会に提供する。

※1 「SELECTプロセス」— これまで主に有害度の高いAm等の分離に注力してきた。

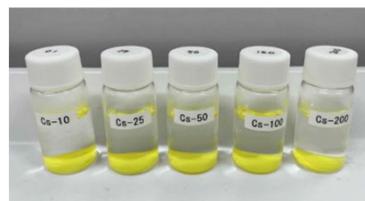
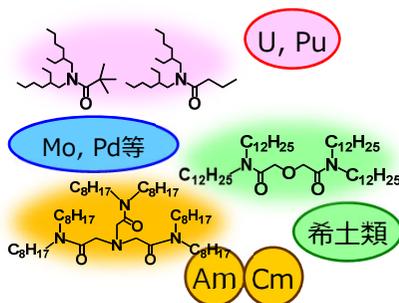
※2 例えばSrやCsを熱源・電源として利用すること、および白金族元素を触媒やメッキ材として利用することを検討中。

➤ 取り組み状況（溶媒抽出法による分離）

● 「SELECTプロセス」の高度化

白金族やレアアースの分離性能向上に取り組中

- ✓ 試薬、分離条件の選定
- ✓ 単段・多段の抽出試験
- ✓ スケールアップ等



共沈試験の状況

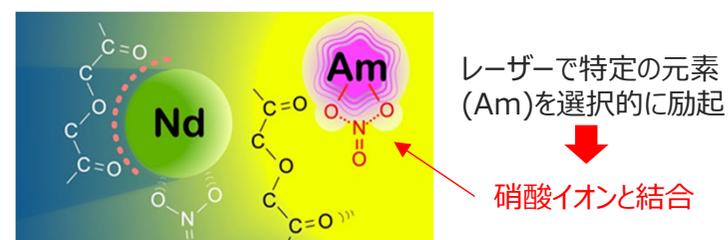


Am/軽Ln分離試験の様子

● 萌芽的取り組み

「レーザーアシスト法」の原理実証

～溶媒抽出法+レーザー照射による新手法～



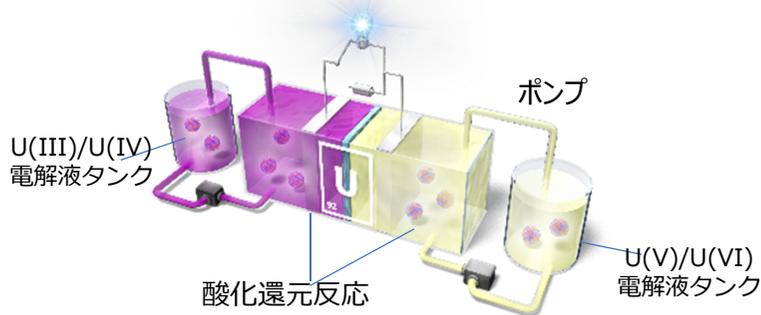
化学的性質が類似の希土類(Nd)とアメリシウム(Am)をきれいに分離できることを確認。

(令和4年5月プレス発表)

バリュー 国内外に大量に存在する**劣化ウランの資源価値を創出**する取り組みの一つとして、ウランレドックスフロー(URF)蓄電池※を開発する。

※ レドックスフロー蓄電池 — 溶液をポンプ循環し、酸化還元反応を進行させて充放電を行う蓄電池（特徴：長寿命、化学的安全性、大容量化が可能）。国内では住友電工がバナジウムを用いて世界最大規模（6万kWh）の電池を実証済。

URF蓄電池の概念図



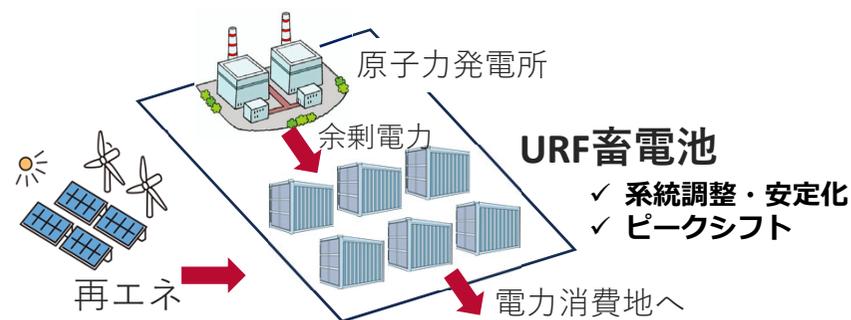
- ✓ ウランの持つ**特殊な化学性質**※¹に着目
- ✓ 劣化ウランを**管理**※²しながら蓄電
- ✓ タンクを増やすことにより**大容量**※³の蓄電が原理的に可能

<ご参考>

- ※ 1 3価 (U³⁺), 4価 (U⁴⁺), 5価 (UO₂⁺), 6価 (UO₂²⁺) の酸化状態をとる。
- ※ 2 ウラン235を取った残りのウランは将来の高速炉での利用に備えて貯蔵
- ※ 3 **約16,000トンの劣化ウランが貯蔵** (2021年時点)

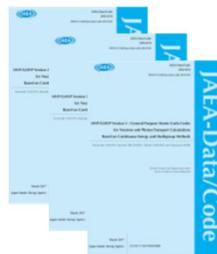
ウラン650トンのURF1基で3万kWh(3000世帯/日分)
(16000トンは74万kWhに相当)

原子力施設および再エネとのシナジーを演出



機構の持つ強み

- ✓ **ウランなど、特殊な元素に関する化学的な知見**
- ✓ **多様なRI取扱試験施設（ホット施設）**



コンクリートセル



グローブボックス

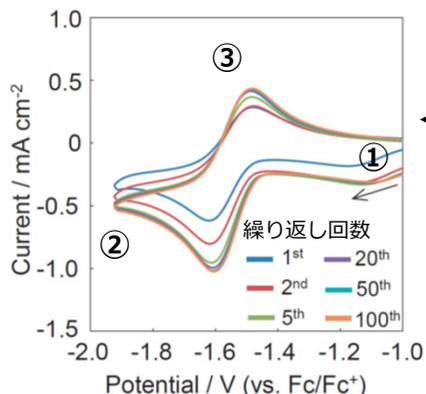
➤ 達成目標

2028年度までに、小規模（5kWh級）のウランドックスフロー電池を開発し、再生可能エネルギーとの連動を実証する（世界的にU電池の構築例はない）。実証後は産業界へ技術移転を目指す。

➤ 取り組み状況

✓ 技術的課題の抽出・対策検討

- 水溶液中でU(III)とU(V)が不安定
- イオン液体は粘度が高くポンプでの送液が困難



非水溶液を用いた新手法

酸化状態変化を繰り返し行っても安定性を維持。

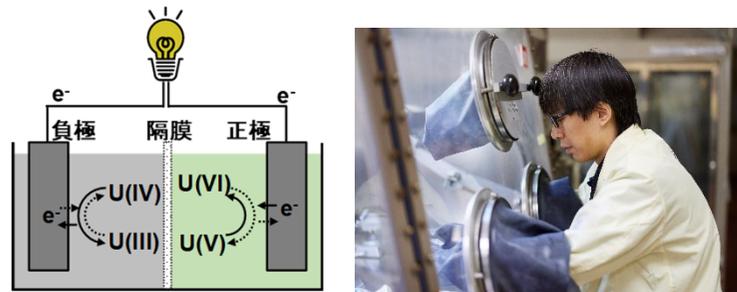
K. Ouchi et al. *Chem. Lett.*, 2021, 50, 1169–1172.

- ① 充電開始: U(IV)
- ② 充電 : U(III)に変化
- ③ 放電 : U(IV)に変化

→ 非水溶液による安定化技術を考案

✓ 原理実証試験（今年3月～）

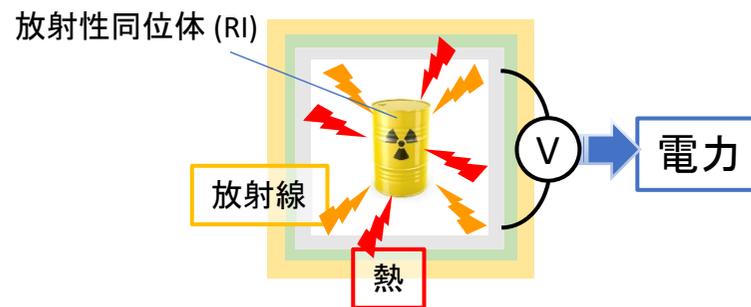
- 世界初のチャレンジ
- 試験環境準備・装置類の整備完了



専用グローブボックス内に装置類を設置している様子
(性能評価試験へ向けた準備作業)

→ ミニチュアモデルの作成へ

バリュー 放射性廃棄物からエネルギー源としての価値を創出する。——放射性物質から生じる熱や放射線を利用して、人が容易に近づけない環境下（地層・宇宙等）に不可欠な**半永久・メンテナンスフリー電源**を提供する。



宇宙探査

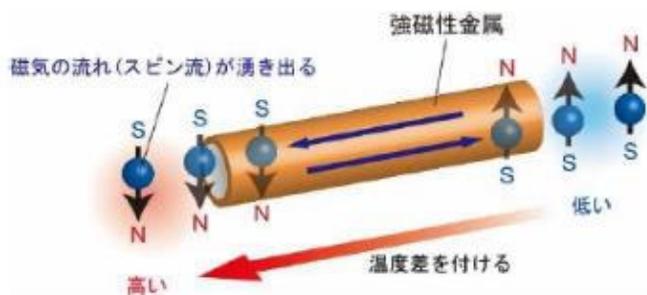


深海探査



孤立集落・極地

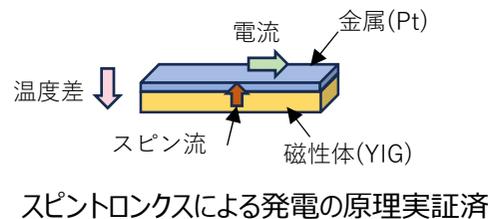
✓ 通常の熱電素子に加え、**“スピントロニクス”**の応用を視野に



エレクトロニクス (電子の流れ)	スピントロニクス (磁気の流れ)
半導体素子が直列で結合 → 一部の損傷で性能劣化	金属と磁性体で構成 → 耐放射線性が高い

機構の持つ強み

- ✓ 熱電素子やスピントロニクスに関する基礎研究の実績
- ✓ スピントロニクス材料として期待されるハイエントロピー合金の知見や作成に関わる技術
- ✓ 多様な放射線施設（研究炉、加速器、RI施設など）



スピントロニクスによる発電の原理実証済



研究炉(JRR-3)



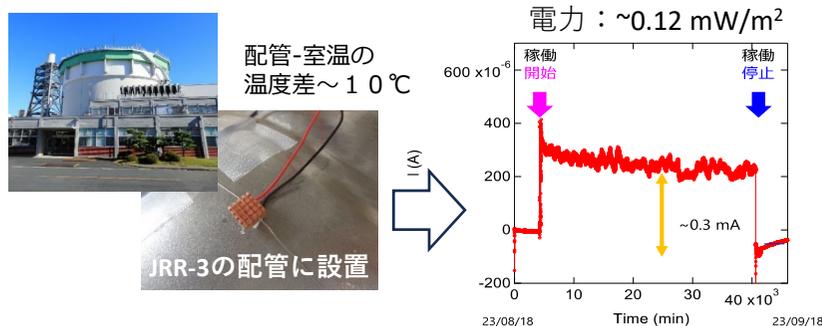
タンデム加速器

➤ 達成目標

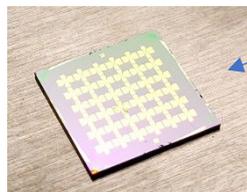
熱・放射線発電の組み合わせで、ガラス固化体1本（熱2kW、放射線0.4kW）あたり100W相当の電力を連続的に得るMGyクラスの照射量で発電効率の劣化が生じないエネルギー変換素子を開発する。

➤ 取り組み状況

● BiTe系熱電素子を用いて前試験を開始



● スピン熱電素子の試作品を作成



強磁性ハイエントロピー合金薄膜を用いたスピン熱発電素子の試作品が完成

→ 発電実証試験へ

● 萌芽的取り組み

土壌粘土鉱物からの熱電変換材料
(特願 2023-101148)



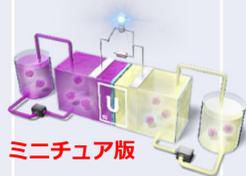
福島環境回復へ向けたCs除去に関する基礎研究から派生した成果

- 「熱電変換鉱物」の作製に成功
- 無毒・豊富・安価かつ高温で安定
- 耐放射線性が期待

達成目標と年度スケジュール

(ゴールド下線：実現できれば世界初)

技術移転

達成目標	2023	2024	2025	2026	2027	2028	~2035
高レベル廃液から様々な有用元素の分離を可能にする		少量のAmを分離 (RI電池実証用)		<u>数十gの燃料溶解液で達成</u>		<u>数百gの実廃液で達成</u>	<u>数kgの実廃液で達成</u>
URF電池を開発する	<u>URF電池の原理実証</u>	URF電池の設計		<u>5Wh級蓄電(ウラン100g規模)</u>	 ミニチュア版	<u>5kWh級蓄電(ウラン100kg規模)</u>	<u>MWh級蓄電(ウランton規模)を達成し、再生可能エネルギーと連動</u>
過酷な環境で使用可能な耐放射線性に優れ、高効率の ・熱電素子 ・放射線発電素子を開発する	RI等を用いた発電実証		<u>放射性廃棄物や使用済燃料を用いた発電実証</u>		<u>RI電池と合体した試作品の完成</u>	<u>W級発電を達成し原子炉施設等で発電実証</u>	<u>kW級発電を達成</u>

「ニュークリア×リニューアブル」の実現に向けた改革



加速度的に計画を推進

- 目標達成を加速するべくプロジェクト志向型の新組織を立ち上げ予定 (R6年度~)
- 各テーマ毎に若手・中堅を中心としたチームを組織
- 部門内の各組織に捕らわれない柔軟な体制 (横串連携の推進)
- 現場研究者・技術者と経営層・所長等が一体となった戦略立案・進捗管理

原子力科学研究所に新たにNXR開発センターを設置
国内外の研究者・技術者と連携し、目標達成に向けたプロジェクトを機動的に実施

施設・装置
供用

人材育成・確保

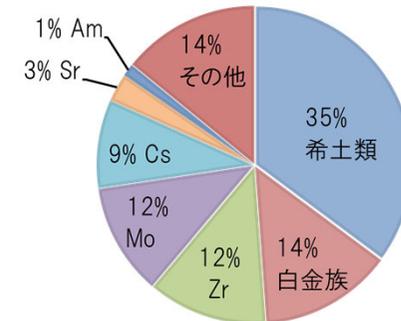
最先端の施設・分析装置
/人材育成

電力等事業者、プラント・燃料メーカー、大学・研究機関

參考資料

➤ 放射性廃棄物からの元素分離・利用を取り巻く動向

- 使用済燃料には白金族、希土類などが含まれており、**適切な分離手法の開発により貴重な資源**となる。
- レアメタルは**調達リスク**を抱えており、**供給源の多様化が必要**。
（希土類の92%を中国、パラジウムの43%をロシアから輸入）
- 仏国CEAでも白金族の分離に取り組んでいる。



使用済燃料中の金属元素の割合 (U及びPuを除く)

➤ 放射性廃棄物から発熱元素を分離・使用する未来

- 分離変換技術との併用により、**地層処分面積は1/8、埋設コストは1/2**に縮小[※]。
- 熱・放射線発電素子の活用により、極限環境での電力の供給。

高レベル廃棄物の処分負荷の軽減、遠隔地での電源問題の解決

※ JAERI-Review 2005-043

➤ 放射性廃棄物から白金族元素・レアアースを分離・使用する未来

- 800トンの使用済燃料中の白金族の価値は**300億円**、**年間国内需要の最大15%**。
- RIを含有する元素は原子力発電所等のホット施設の触媒や素材等に使用する。

原子力鉱山を有用元素の鉱物資源として活用

	用途	量 ^{*1}	供給割合 ^{*2}	金額 ^{*3}
Ru ルテニウム	触媒	2.4 t/年	15%	46億円
Rh ロジウム	メッキ、 触媒	0.5 t/年	7%	201億円
Pd パラジウム	触媒、 歯科材	0.8 t/年 ^{*4}	2%	51億円

*1: 1年に800tの使用済燃料を処理した場合の量

*2: 国内の年間需要に対する割合

*3: 2023/4/28時点の単価で計算

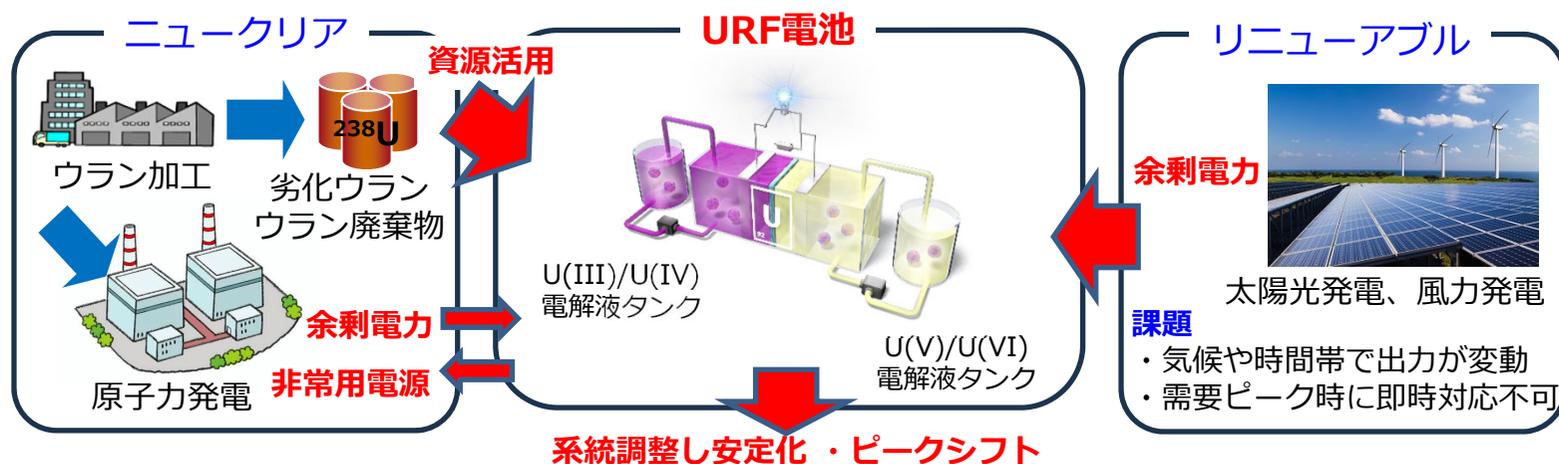
*4: 同位体の偶奇分離 (ImPACT藤田プログラム成果) を行い、偶数核だけを利用と想定

➤ 大容量蓄電池を取り巻く動向

- 太陽光や風力発電の電力需給を安定化するには、速やかな追加電力を供給可能な大容量電池が不可欠
- 大容量電池としてNAS電池（日本ガイシ）の実績が多いが、コストの高さと高温動作（300℃）が課題
- 安価かつ室温動作が可能な電池としてバナジウムドックスフロー（RF）電池（住友電工）
⇒ 原材料であるバナジウムは完全海外依存

➤ 何故、ウランなのか？

- **使用予定のない劣化ウラン16,000万トン^{※1}** 「管理」を「管理しながら蓄電」へ
- 大容量 : U 650トンのURF1基で3万kWh^{※2}(3000世帯/日分)
- 低ランニングコスト：充放電による性能劣化がほとんどなくCO₂排出ゼロ
- 純国産 : 原材料は我が国で100%調達可能な劣化U
- 現在までUを利用する電池は、シミュレーション研究^{※3}にとどまっており、U電池は実現されていない



※1 2021年時点 ※2起電力0.5 V, 効率80%の場合

※3 T. Yamamura et al. *J. Phys. Chem. C*, 2007, 111, 50, 18812–18820.

➤ 蓄電池の種類（ご参考）

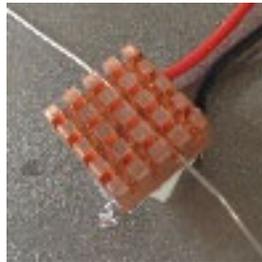
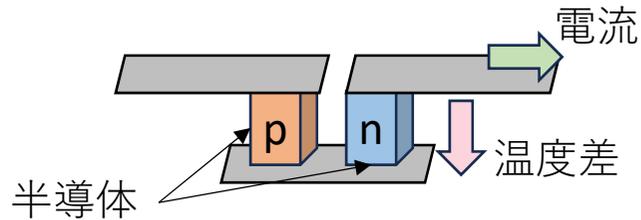
電池の種類	鉛	ニッケル水素	リチウムイオン	NAS※	レドックスフロー
大容量化	～MW級	～MW級	～1MW程度	MW級以上	MW級以上
充電状態の監視	△	△	△	△	◎
安全性	○	○	△	△	◎
資源	○	△	○	◎	△ (バナジウムの場合)
運転時の加温	なし	なし	なし	必要 (≧300℃)	なし
寿命 (サイクル数)	17年 3150回	5-7年 2000回	6-10年 3500回	15年 4500回	要評価 制限なし

※負極（マイナス極）にナトリウム（Na）、正極（プラス極）に硫黄（S）、両電極を隔てる電解質にファインセラミックスを用いて、硫黄とナトリウムイオンの化学反応で充放電を繰り返す蓄電池（二次電池）

[1] 蓄電池戦略、経済産業省蓄電池戦略プロジェクトチーム、(H24/7)より

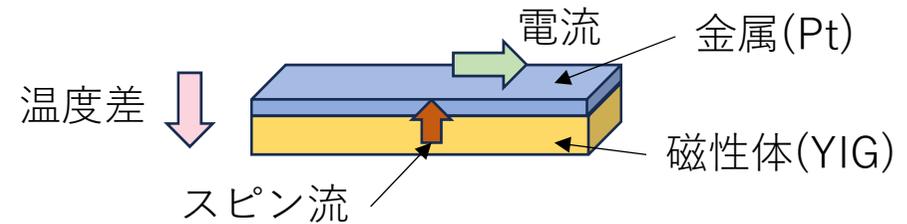
➤ 既存の熱電素子とスピン熱電素子の比較

既存の熱電素子



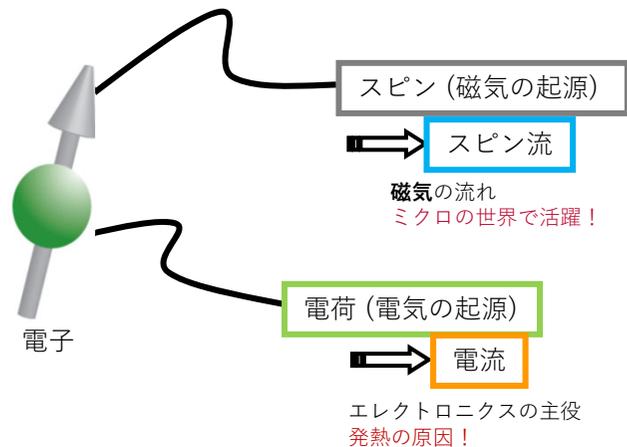
- 多くの分野で利用
- 電力は素子の数に比例
- 半導体素子が直列で繋がっており、一部の損傷で性能劣化

スピン熱電素子



- スピントロニクスに基づく新しい技術
- 電力は薄膜の幅に比例
- 金属と磁性体で構成されるため、**耐放射線性が高い**

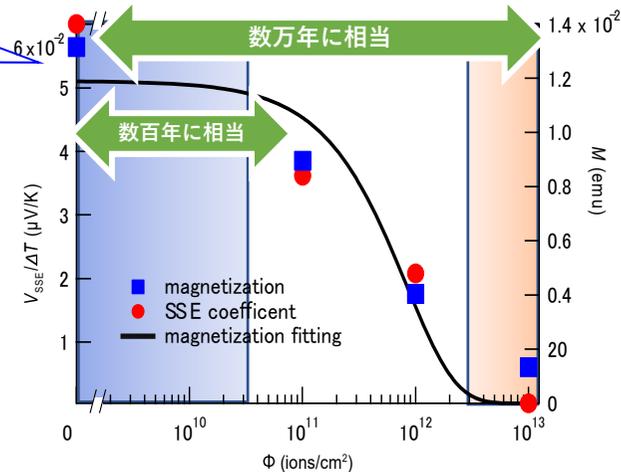
スピントロニクス



イオンビーム実験により、**耐放射線性**を実証済み (2020年にプレス発表)

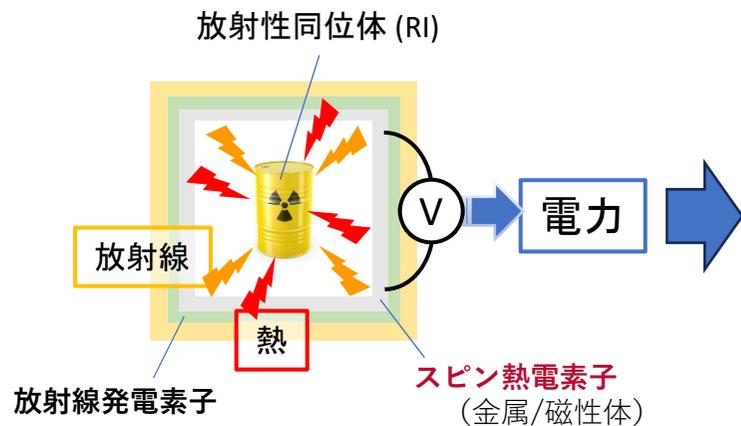


タンデム加速器

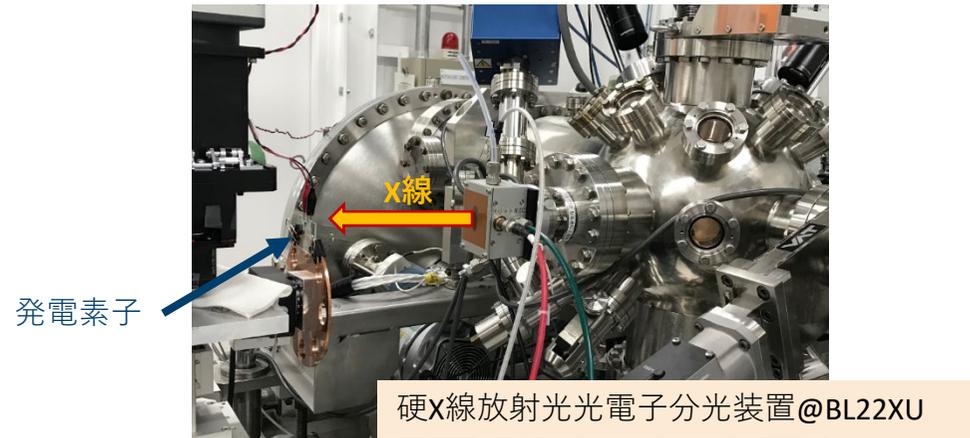
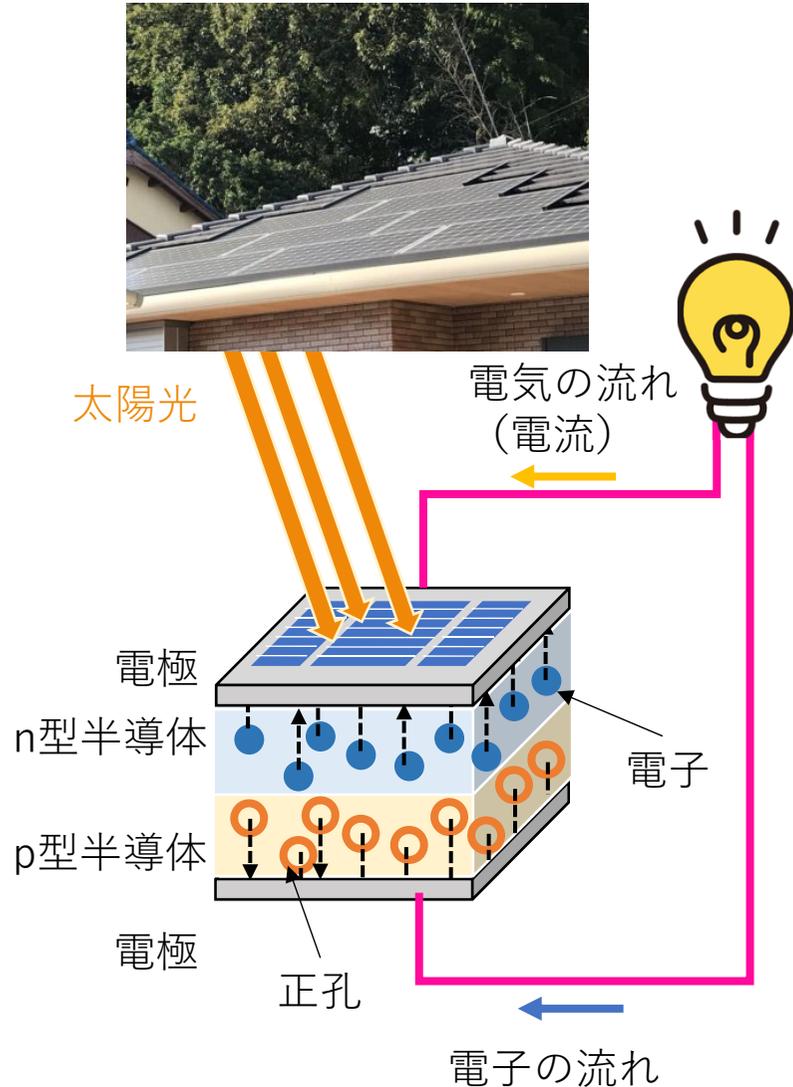


→ 長期にわたるスピン熱電素子の耐放射線性の確認

原子力施設における応用の可能性



➤ 放射線を直接利用した発電実証の試み



- 太陽光がガンマ線になったのが、ガンマ線発電
- SPring-8 の放射光をガンマ線と見立て、**Ni/SiCを用いて原理実証済み**

【米国・カナダ】

- 米国では種々の放射性核種を用いた電池開発の取り組みが行われている。
- カナダ(CNL)ではトリチウムを用いた放射線電池の基礎研究を実施中。

【欧州】

- 英国(NNL)や仏国(CEA)においては、MA分離の研究開発を長年行われており、非常に高い人的及び施設のポテンシャルを有している。
- 蓄電池（亜鉛-臭素蓄電池）や放射線発電に関しては基礎研究の段階。
- 英国ではアメリシウム等を用いた電池の開発も行われている（NNLがAmを分離するための新しい施設を整備中）。
- 仏国(CEA,CNRS)が探索的優先研究プログラムとして、スピントロニクス研究を開始（ごく最近の話題）

【豪州】

- ANSTOが輩出したベンチャー企業(entX社)が極地利用を目的としたRI電池の開発に着手。

【中国】

- 鉄-亜鉛系レドックス蓄電池を開発中。
- 放射性物質(Ni-63等)を使った半永久電源の開発に取り組んでいる。