



## 放射性廃棄物を資源に変える技術革新

-サステナブルな原子力利用への鍵-

令和5年11月15日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター

研究主幹 菅原 隆徳



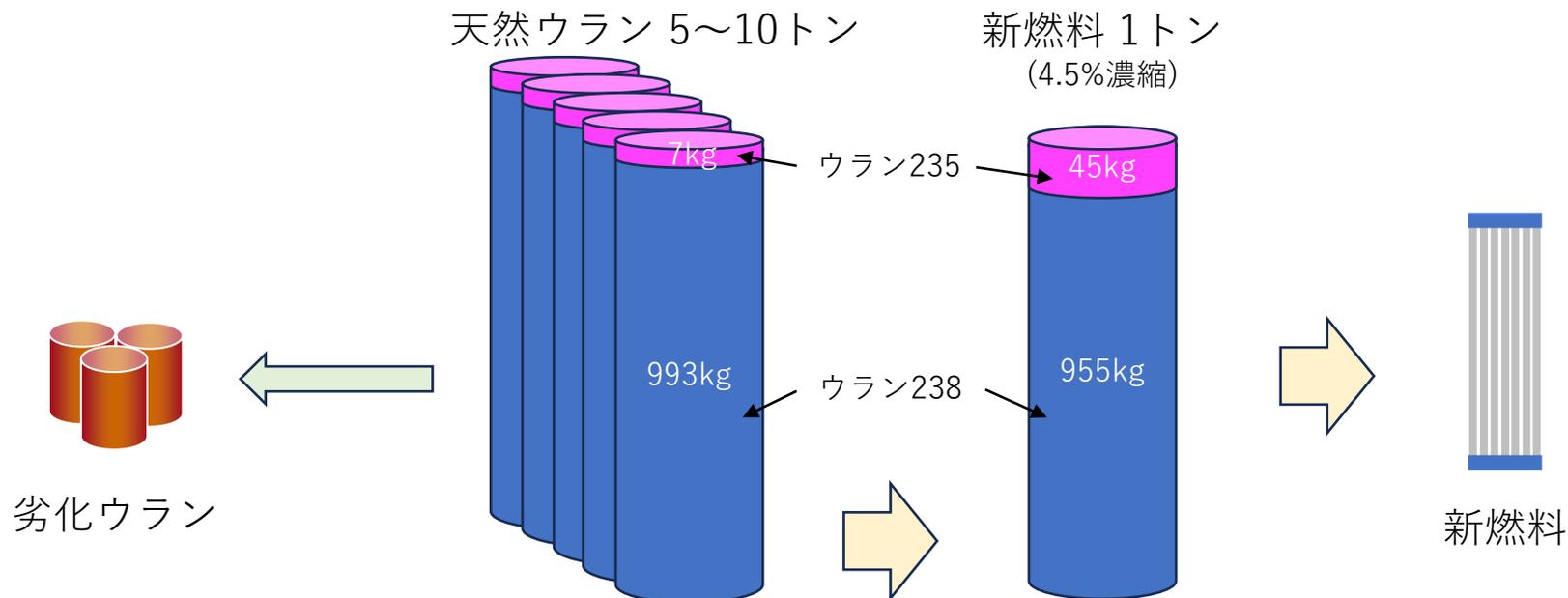
- ニュークリア × リニューアブルの相乗効果  
(**Synergy**)
- 原子力自体を **Sustainable** にする
- 原子力利用の多様化 (**Ubiquitous**)



1. 燃えないウランの蓄電池利用  
(**Synergy, Ubiquitous**)
2. 使用済燃料内の元素利用  
(**Sustainable**)
3. 熱・放射線による発電  
(**Ubiquitous**)

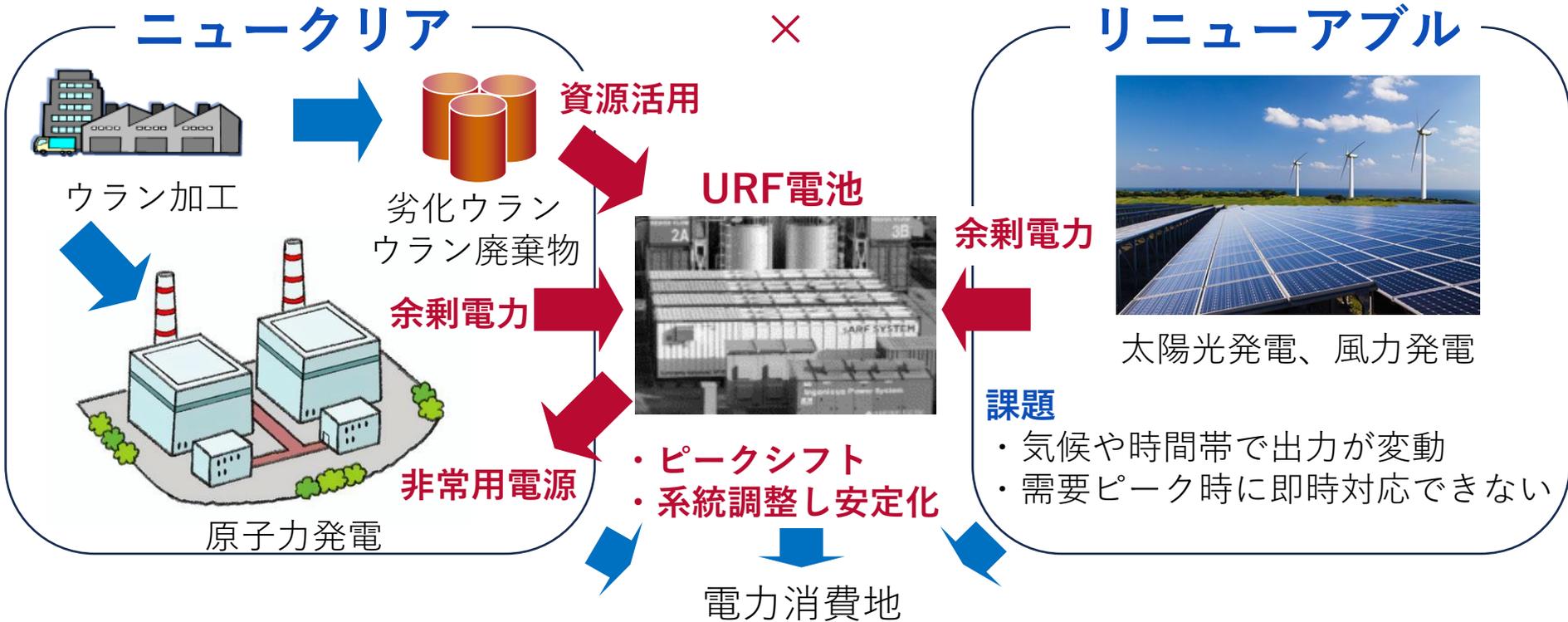
16,000 トン

# 背景：燃えないウランの蓄電池利用



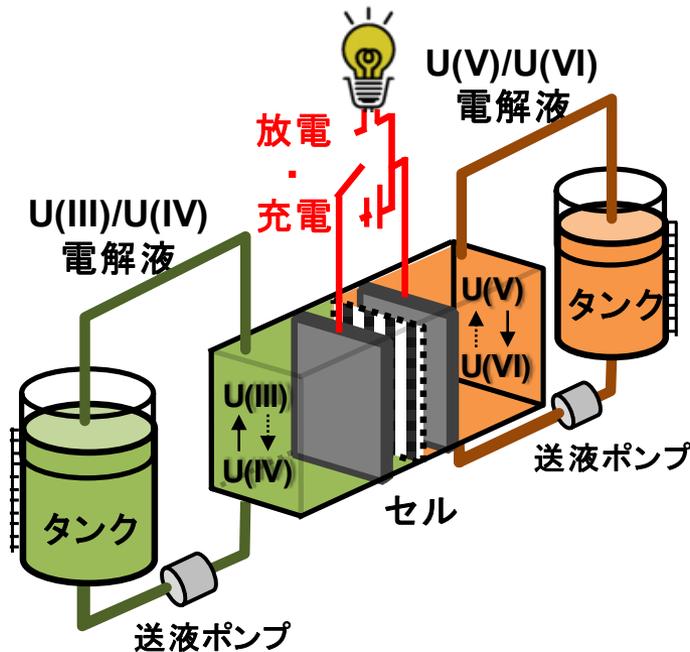
- 原子力発電所で使われる新燃料は濃縮ウラン
- ウラン235を取った残りのウランは将来の高速炉での利用に備えて貯蔵
- **約16,000トンの劣化ウランが貯蔵 (2021年時点)**

# 目的



- ウランを用いたレドックスフロー電池（URF電池）を開発し、燃えないウランを資源化
- 再生可能エネルギーや原子力発電の余剰電力を蓄電し、**ピークシフト、系統安定化に資する**

# URF電池とは



- イオンの酸化還元反応をポンプ循環により進行させて、充電・放電を行う蓄電池
- ウランの酸化・還元反応に着目 (3価 ( $U^{3+}$ ), 4価 ( $U^{4+}$ ), 5価 ( $UO_2^+$ ), 6価 ( $UO_2^{2+}$ ) の酸化状態を利用)

- |                      |   |
|----------------------|---|
| <b>大容量</b>           | : ウラン650トンのURF1基で3万kWh※(3000世帯/日分)<br>(16000トンは74万kWhに相当) |
| <b>低ランニングコスト</b>     | : 充放電による性能劣化がほとんどなくCO <sub>2</sub> 排出ゼロ                   |
| <b>準国産</b>           | : バッテリー源は我が国で100%調達可能なウラン                                 |
| <b>再資源化&amp;有効利用</b> | : 燃えないウランの「貯蔵」を「貯電」に                                      |

# ウランを用いる利点/欠点

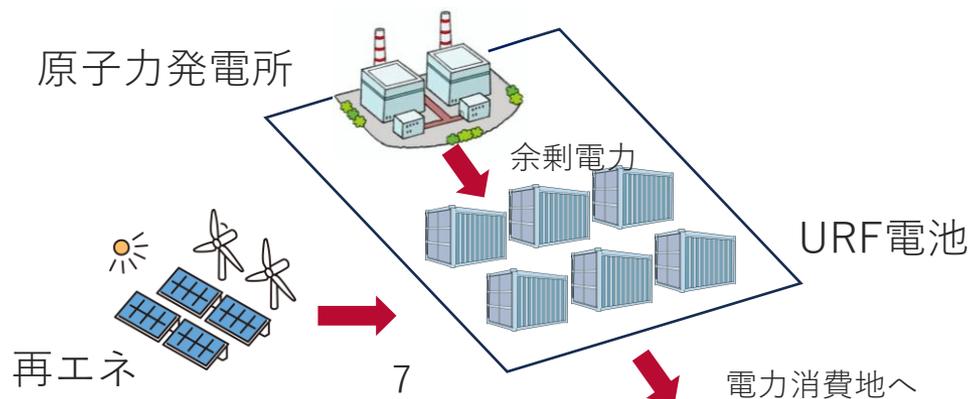


## • 利点

- 実用化されているRF電池はバナジウムで構成
  - バナジウムは完全に海外依存
- 劣化ウランを用いることで**準国産化**
- バナジウムよりも**効率が良い**  
(充電ロス：バナジウム20%, ウラン3%)

## • 欠点

- 水分の混入によりウランの価数が不安定化  
→ 電解液の調製で**安定化が可能**
- 核燃料物質であるウランの扱い  
→ **原子力発電所敷地内などへの配置**





- 2007年に報告\*1があって以降、URF電池に関する報告は日本（JAEA、東工大）\*2,3からのみ
- ウランを活物質とした小規模な電池を構築し動作確認  
→ 原理実証ができれば**世界初の成果**

達成目標	2023/R5	2024/R6	2025/R7	2026/R8	2027/R9	2028/R10	~2035
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>		<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>

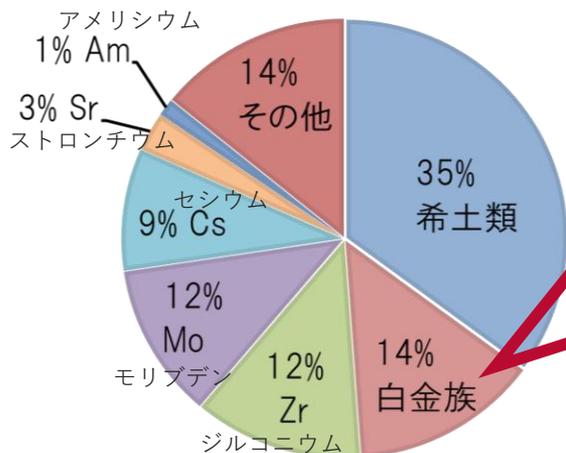
**ボールド下線：世界初**

\*1: T. Yamamura et al., J. Phys. Chem. C, 2007, 111, 50, 18812–18820.

\*2: K. Ouchi et al., Chem. Lett., 2021, 50, 1169–1172.

\*3: K. Takao, Dalton Transactions, 2023, 52, 9866.

300億円



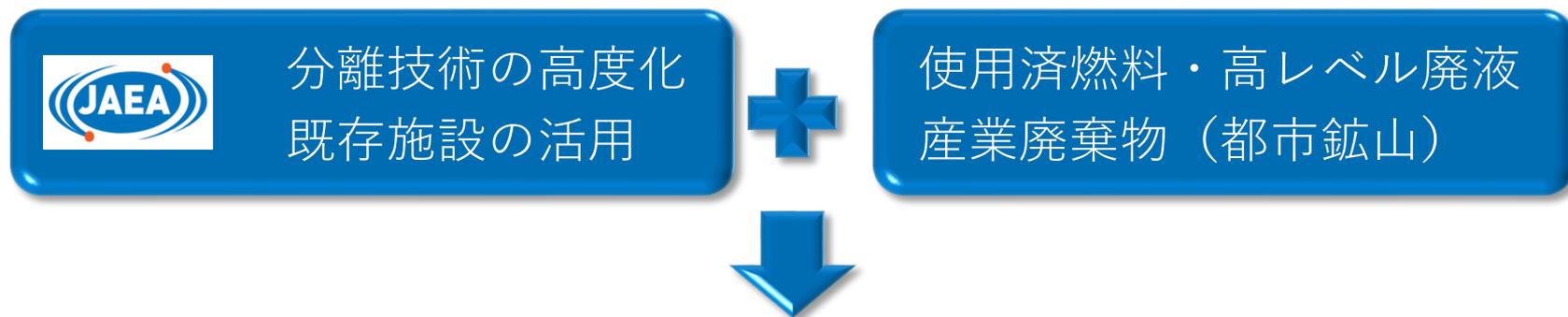
使用済燃料中の金属元素の割合  
(U及びPuを除く)

	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

白金族だけで**約300億円/年**の価値を含んでいる

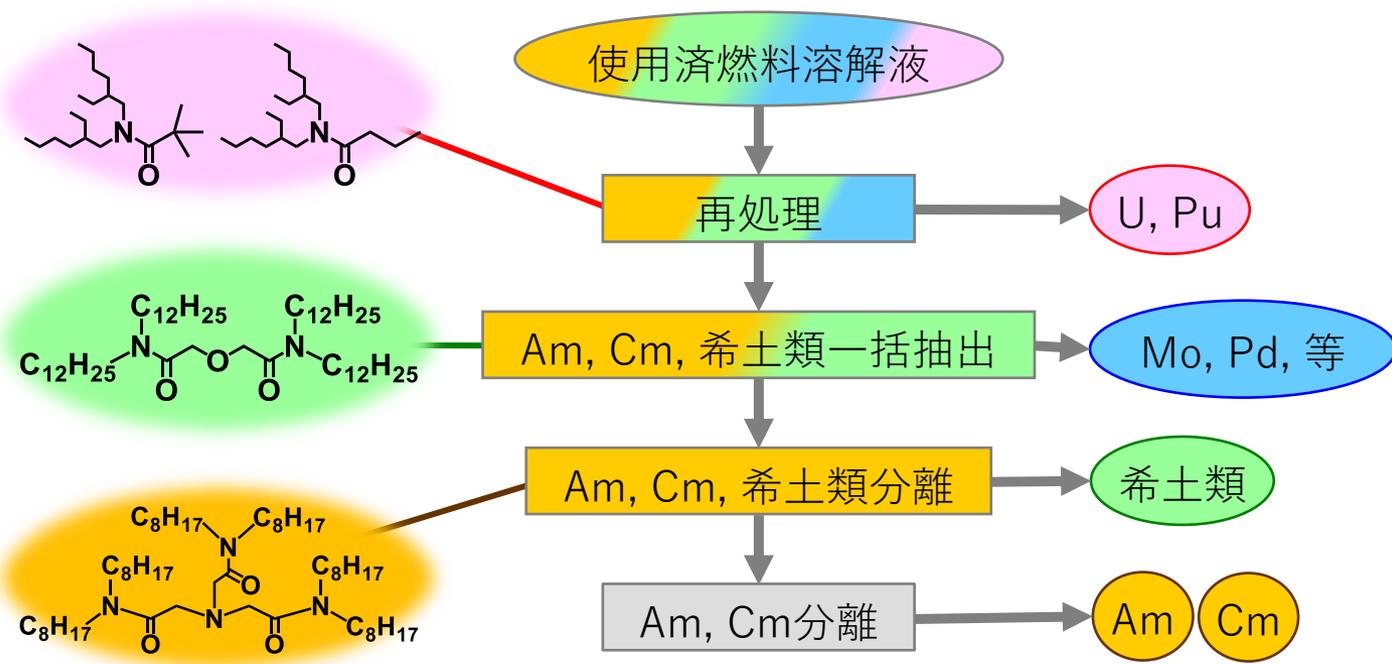
- 使用済燃料には白金族、希土類などが含まれており、**貴重な資源**とみなせる
- 供給源の開拓は**資源セキュリティの確保**につながる

\*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



- 有用元素の実用的な分離・利用技術の開発

# 溶媒抽出法による分離

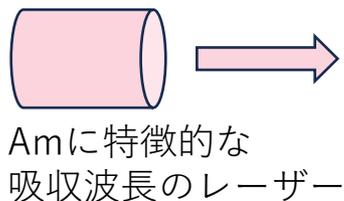


現在JAEAで開発中のSELECTプロセスの抽出剤候補と概略フロー

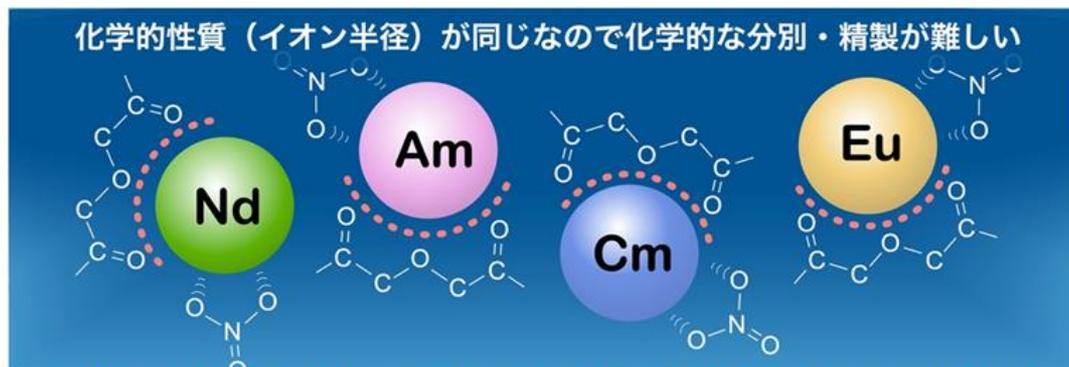
原科研NUCEFでの試験の様子

- JAEAが開発中の溶媒抽出法による分離技術 (SELECTプロセス) の**高度化**
- 核変換を組み合わせた**放射性廃棄物の減容・有害度低減**にも有効

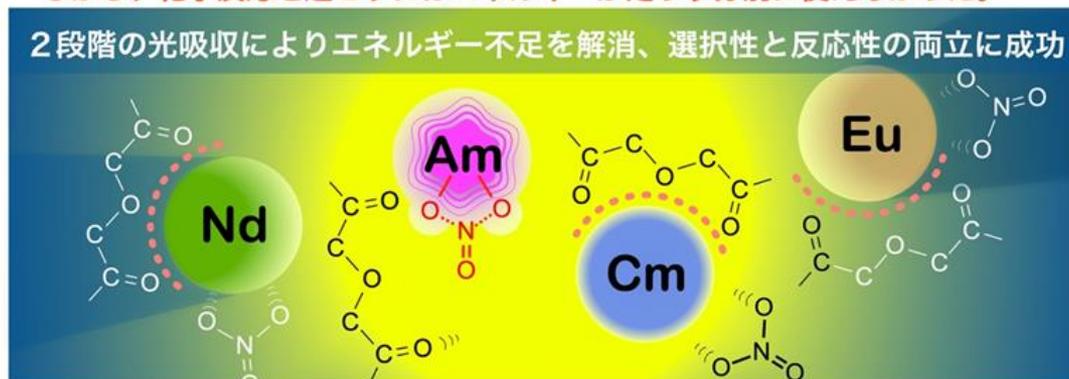
# レーザーアシスト分離



Amに特徴的な  
吸収波長のレーザー



可視光の吸収波長の違いを利用すれば元素を選んでエネルギーを付与できる。  
しかし、化学反応を起こすにはエネルギーが足りず分別に使えなかった。



- レーザー光による光誘起反応を利用した新しい分離技術
- 元素選択性が高いため、**処理工程の簡素化、2次廃棄物の抑制が期待**される

• S. Matsuda, et al., Science Advances, 8, 20 (2022).

• 原子力機構プレスリリース 2022/5/20, <https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22052003/>



- 使用済燃料からの有用元素分離の研究は、基礎の段階で実用化に至っていない
  - ImPACTプログラム※では、模擬HLLWを用いた試験で、湿式電解でPd 95%の回収を確認。
- 分離手法の**開発・高度化**
  - SELECTプロセスの高度化
  - レーザーアシスト分離法の開発
- **都市鉱山への技術応用**

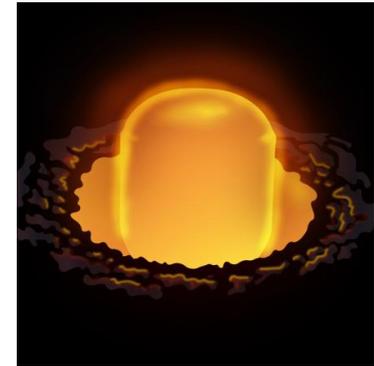
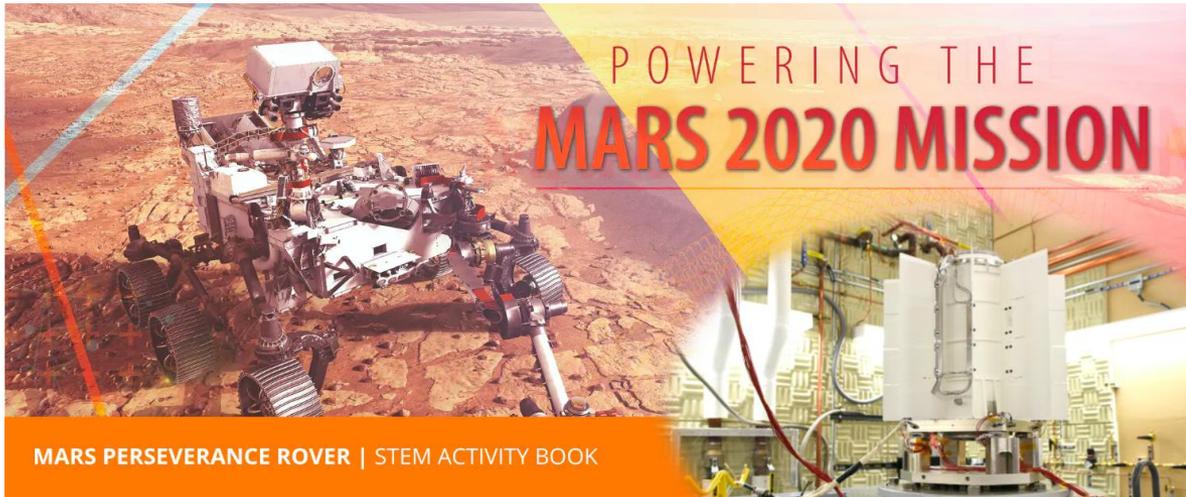
達成目標	2023/R5	2024/R6	2025/R7	2026/R8	2027/R9	2028/R10	～2035
高レベル廃液から様々な有用元素の分離を可能にする		少量のAmを分離（RI電池実証用）		<u>数十gの燃料溶解液で達成</u>		<u>数百gの実廃液で達成</u>	<u>数kgの実廃液で達成</u>

**ゴールド下線：世界初**

※ImPACT藤田プログラム、2014-2018

**4.8 kg**

# 背景：熱・放射線による発電

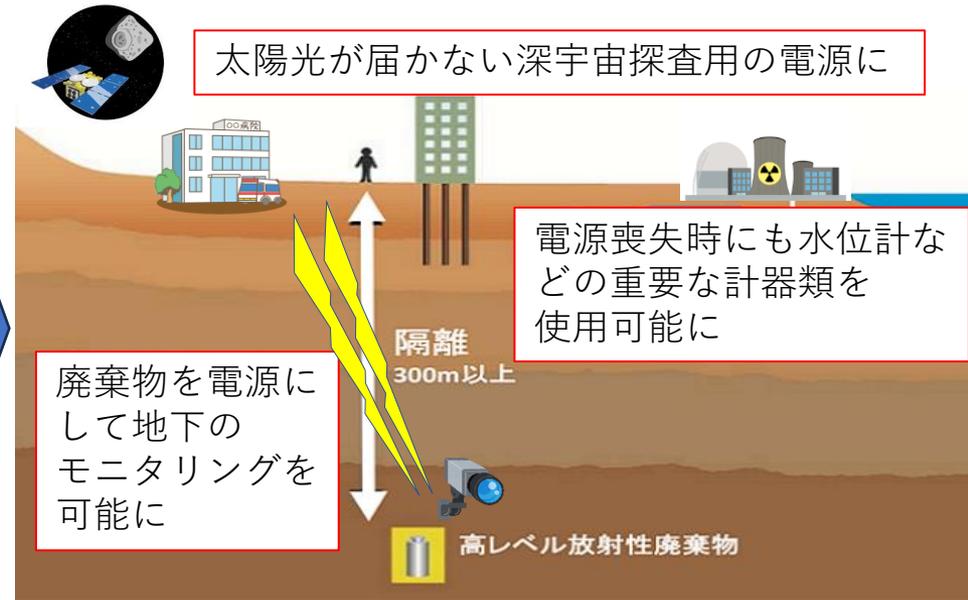
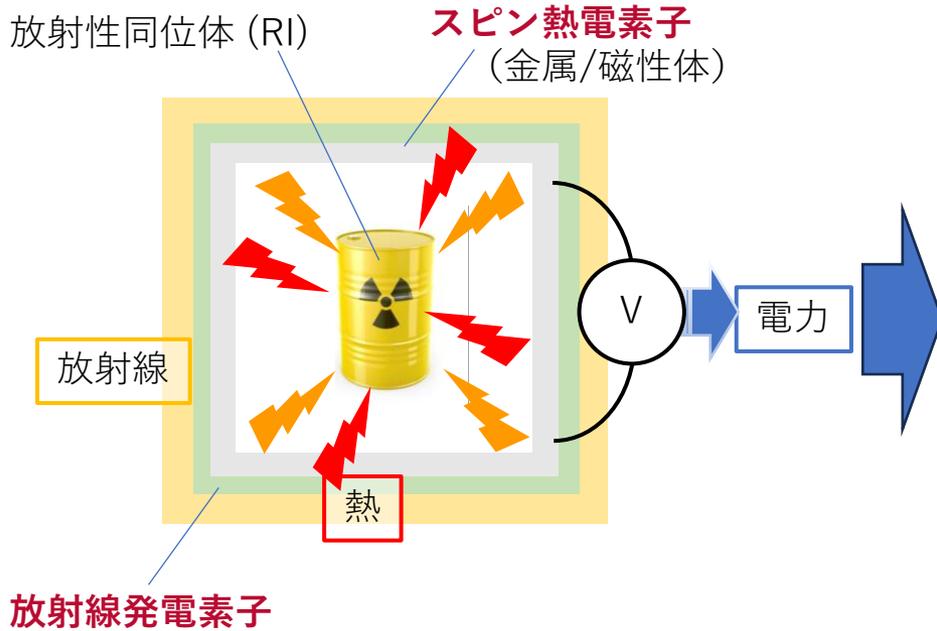


- NASA火星探査ローバー用熱源： **$^{238}\text{PuO}_2$  4.8kg** (110We)
  - 熱電変換素子は放射線に弱い
  - $^{238}\text{Pu}$ は高発熱の一方、放射線量が少ない
- 放射線耐性の高い熱電素子を用いることで、熱源としての同位体の選択肢が広がる可能性

<https://inl.gov/mars-2020/>

<https://www.ornl.gov/news/ornl-produced-plutonium-238-help-power-perseverance-mars>

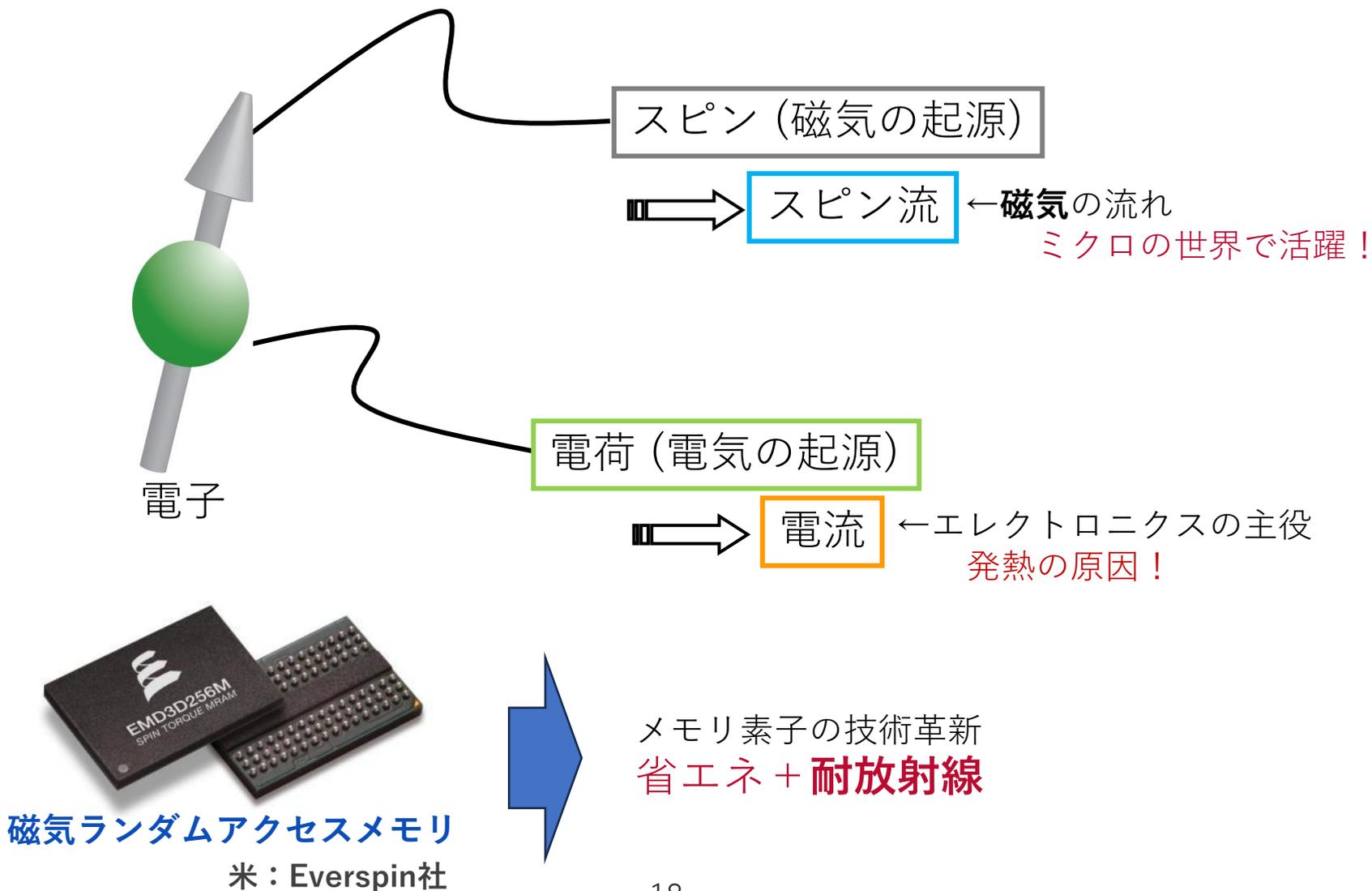
# 目的



- 放射性同位体等の熱、放射線を電気に変換し、人間が容易に近づけない過酷な環境における**半永久・メンテナンスフリー電源の実現**

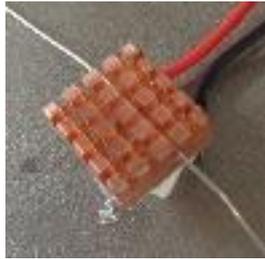
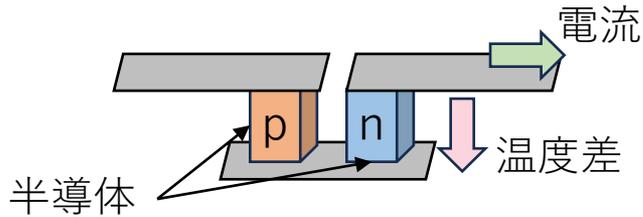


## 電気と磁気のハイブリッド技術



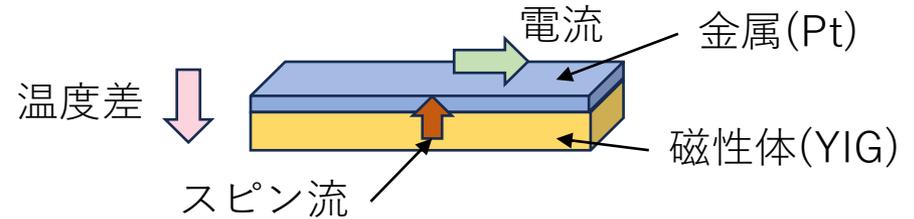


## 既存の熱電素子



- 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**

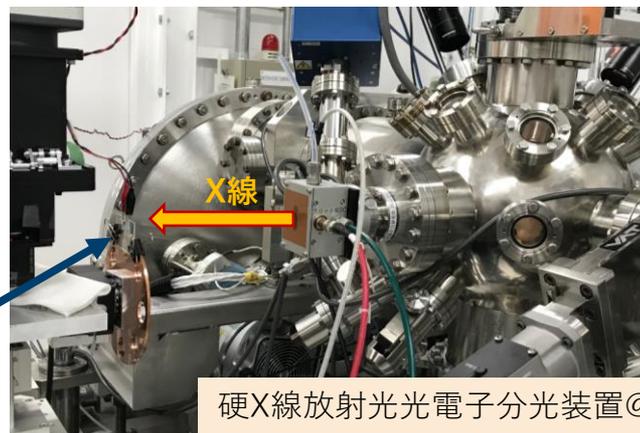
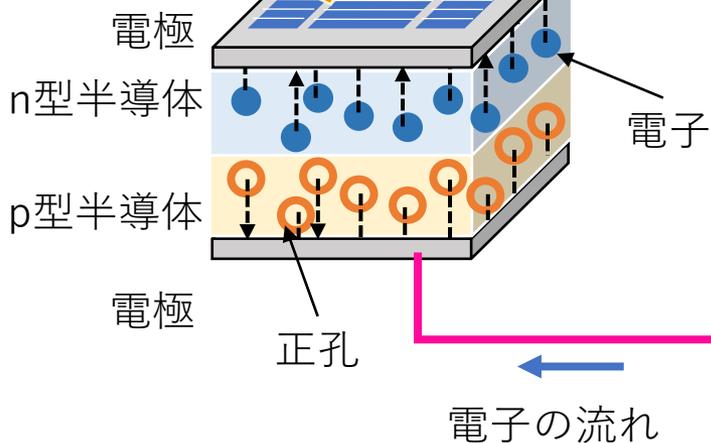
- 実際に1 MGyのガンマ線を照射し、素子の健全性を確認

# 放射線による発電



太陽光

電気の流れ  
(電流)



- 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

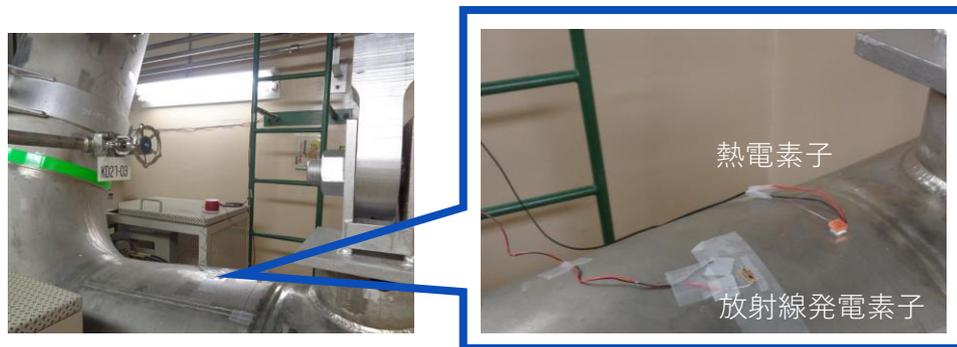
# 現状と今後の見通し



- スピン熱発電、放射線発電ともに**原理実証は確認済み**
  - 参考：スピン熱発電（10°C差で4 W/m<sup>2</sup>）、放射線発電（30 keV-6.6x10<sup>13</sup> [photon/cm<sup>2</sup>/s]で1 W/m<sup>2</sup>）
- 発電効率の向上と放射性廃棄物等を用いた実証試験

達成目標	2023/R5	2024/R6	2025/R7	2026/R8	2027/R9	2028/R10	~2035
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>

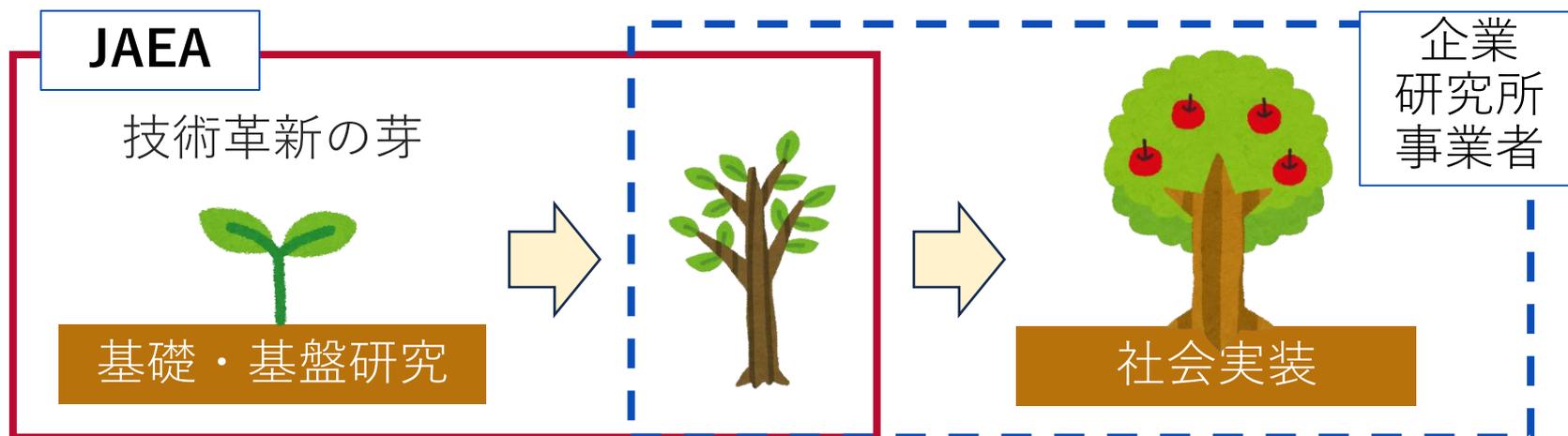
**ボード下線：世界初**



JRR-3一次冷却系配管における熱・放射線発電試験の様子



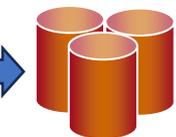
- 放射性廃棄物等を資源に変える技術として、以下の研究を推進
  - 燃えないウランを蓄電池化し、再エネとの**Synergy**
  - 使用済燃料の元素利用により、資源セキュリティ確保および原子力を**Sustainable**にする
  - 熱・放射線による発電を進め、IoTでの利用、過酷環境での利用など**Ubiquitous**化を進める



**自前主義からの脱却**

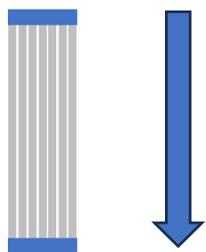
## 現状

ウラン加工  
(濃縮)

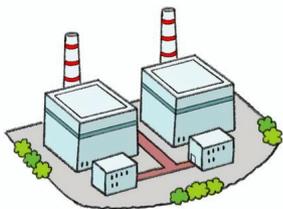


劣化ウラン

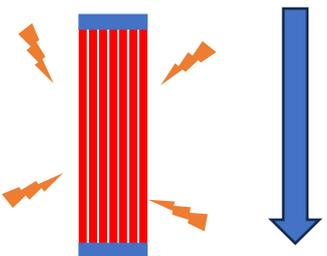
新燃料



原子力発電



使用済燃料



再処理工場



## 技術革新

## 新しい価値

URF電池

再エネの有効利用

ウランの新しい利用方法

熱・放射線発電

極地利用

IoT利用

非常用微弱電源

元素利用

医療・産業利用

資源セキュリティ確保

核燃料サイクルの合理化

都市鉱山利用