

2023.3.16 10:15-10:45

Webex

令和2~3年度 原子力システム研究開発事業 成果報告会

# スピン熱電発電素子による同位体発電システム 開発に向けた基盤構築

家田淳一

日本原子力研究開発機構



共同研究者 岡安悟<sup>1</sup>, 佐藤奈々<sup>1</sup>, 埋田真樹<sup>1</sup>

1. 原子力機構

謝辞 原子力システム研究開発事業





1. 研究目的
2. 技術背景
3. 実施内容
4. 研究成果
5. まとめと展望

# 1. 研究目的



# 原子力電池

## POWERING THE MARS 2020 MISSION

MARS PERSEVERANCE ROVER | STEM ACTIVITY BOOK



**RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator)**

放射性同位体熱電轉換器（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  $^{238}\text{Pu}$  ( $\text{PuO}_2$ ) 4.8 kg]

[https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope\\_thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator)

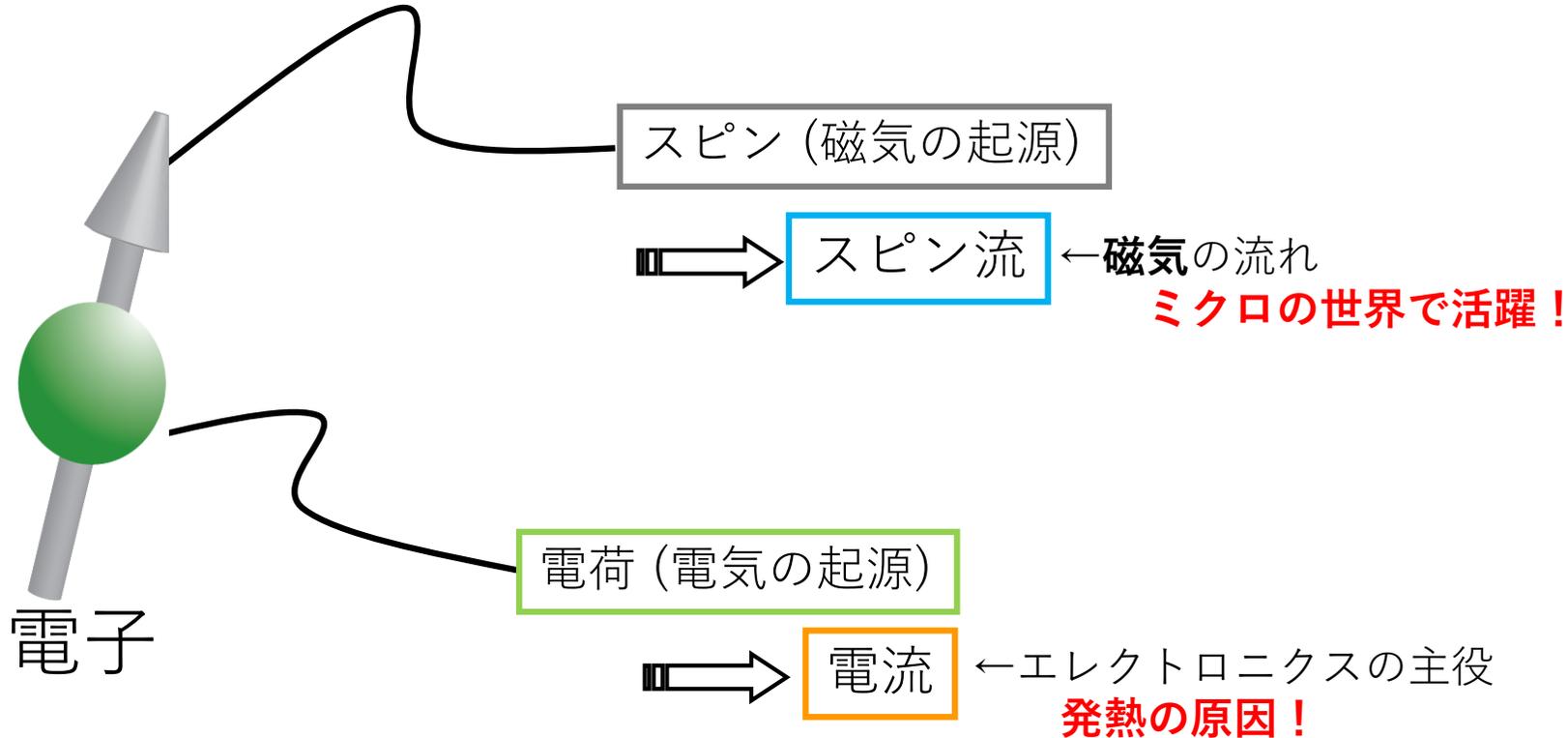
Name and model	Used on (# of RTGs per user)	Maximum output		Radio-isotope	Max fuel used (kg)	Mass (kg)	Power/mass (Electrical W/kg)
		Electrical (W)	Heat (W)				
MMRTG	MSL/ <i>Curiosity</i> rover and <i>Perseverance</i> /Mars 2020 rover	c. 110	c. 2000	$^{238}\text{Pu}$	c. 4	<45	2.4
GPHS-RTG	<i>Cassini</i> (3), <i>New Horizons</i> (1), <i>Galileo</i> (2), <i>Ulysses</i> (1)	300	4400	$^{238}\text{Pu}$	7.8	55.9–57.8 <sup>[52]</sup>	5.2–5.4
MHW-RTG	LES-8/9, <i>Voyager 1</i> (3), <i>Voyager 2</i> (3)	160 <sup>[52]</sup>	2400 <sup>[53]</sup>	$^{238}\text{Pu}$	c. 4.5	37.7 <sup>[52]</sup>	4.2
SNAP-3B	Transit-4A (1)	2.7 <sup>[52]</sup>	52.5	$^{238}\text{Pu}$	?	2.1 <sup>[52]</sup>	1.3
SNAP-9A	Transit 5BN1/2 (1)	25 <sup>[52]</sup>	525 <sup>[53]</sup>	$^{238}\text{Pu}$	c. 1	12.3 <sup>[52]</sup>	2.0
SNAP-19	<i>Nimbus-3</i> (2), <i>Pioneer 10</i> (4), <i>Pioneer 11</i> (4)	40.3 <sup>[52]</sup>	525	$^{238}\text{Pu}$	c. 1	13.6 <sup>[52]</sup>	2.9
modified SNAP-19	<i>Viking 1</i> (2), <i>Viking 2</i> (2)	42.7 <sup>[52]</sup>	525	$^{238}\text{Pu}$	c. 1	15.2 <sup>[52]</sup>	2.8
SNAP-27	Apollo 12–17 ALSEP (1)	73	1,480	$^{238}\text{Pu}$ <sup>[54]</sup>	3.8	20	3.65
(fission reactor) <i>Buk</i> (BES-5)**	US-As (1)	3000	100,000	highly enriched $^{235}\text{U}$	30	1000	3.0
(fission reactor) SNAP-10A***	SNAP-10A (1)	600 <sup>[55]</sup>	30,000	highly enriched $^{235}\text{U}$		431	1.4
ASRG****	prototype design (not launched), <i>Discovery</i> Program	c. 140 (2x70)	c. 500	$^{238}\text{Pu}$	1	34	4.1

## 熱源となる放射性元素

ほぼ  $^{238}\text{Pu}$   利点：遮蔽が容易 ( $\alpha$ 線のみ放出)  
 欠点：燃料確保や取扱に障壁

## 2. 技術背景

## スピントロニクス



## 電気と磁気のハイブリッド素子

# 薄膜加工技術で利用可能になった!

## スピントロニクスは耐放射線性能が高い!



The Nobel Prize in Physics 2007



## HDD読み取りヘッド

⇒磁気センサーの技術革新  
省エネ + 小型化



米：Everspin社、2019年下期より  
28nm世代STT-MRAMの量産開始  
日：東京エレクトロン株式会社、  
Power Spin株式会社, etc

## 磁気ランダムアクセスメモリ

⇒メモリ素子の技術革新  
省エネ + 耐放射線

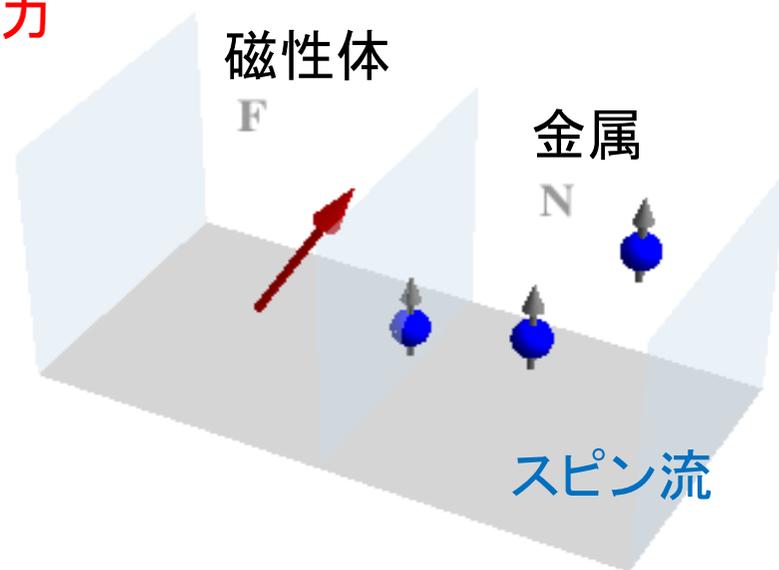
**微細加工でスピンは室温動作する！**

## 新しいスピン物性現象

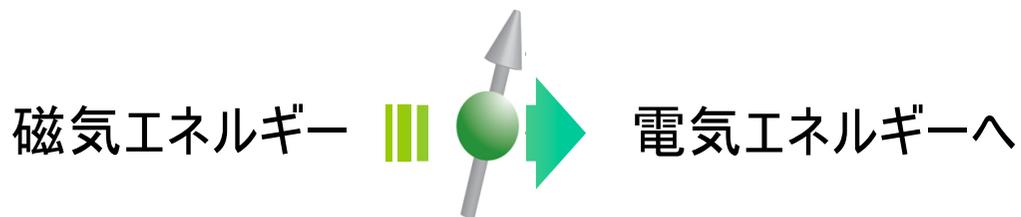


未使用エネルギーの有効利用へ

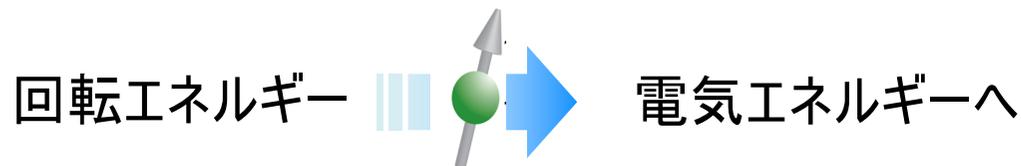
外力



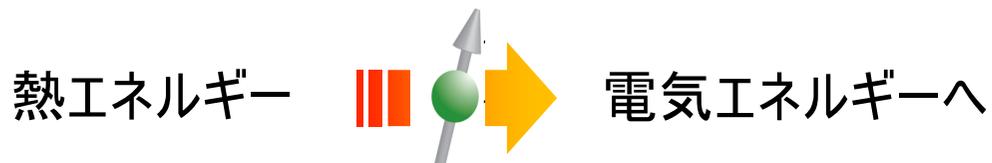
## 量子効果によるエネルギー変換



スピン起電力

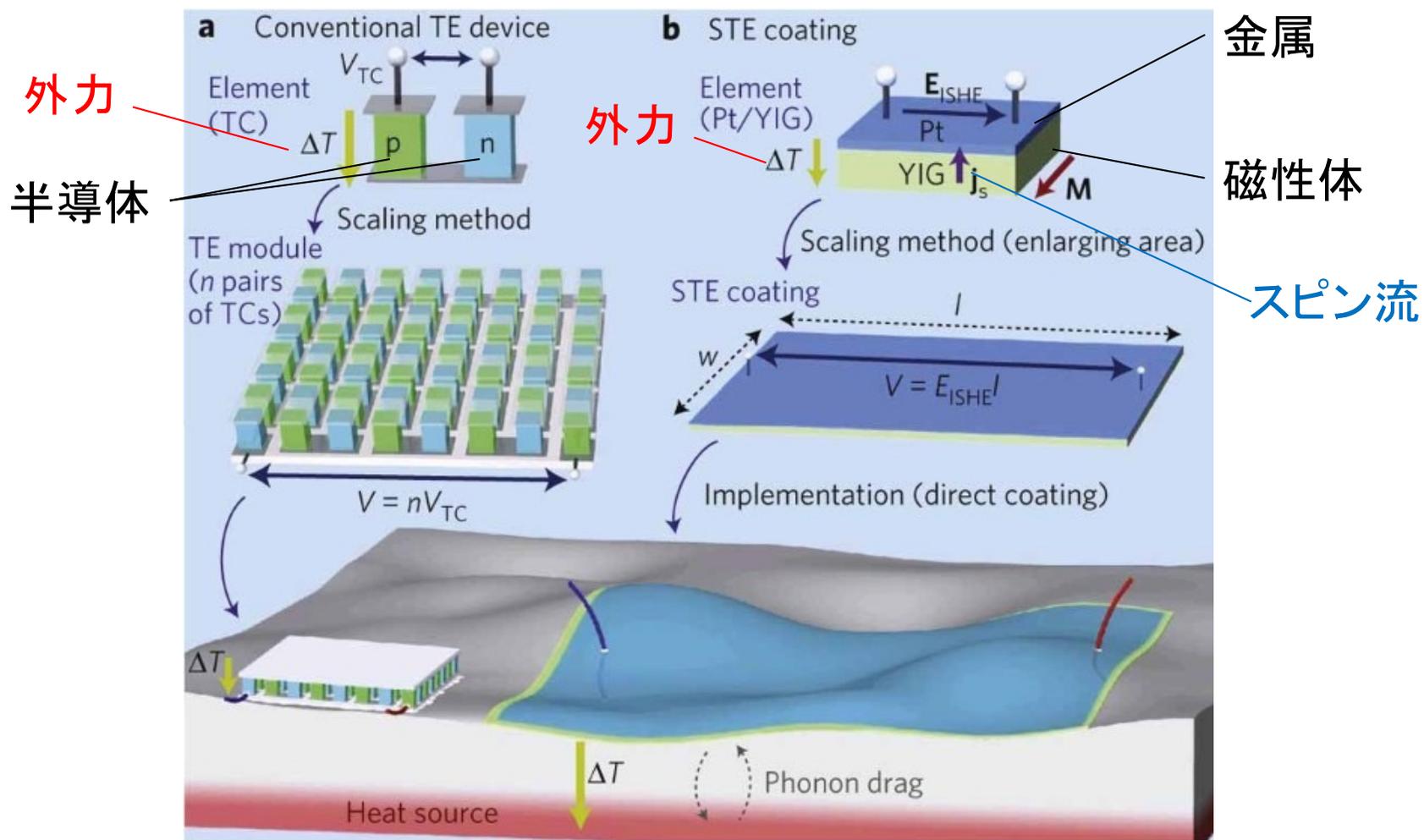


スピン流体発電



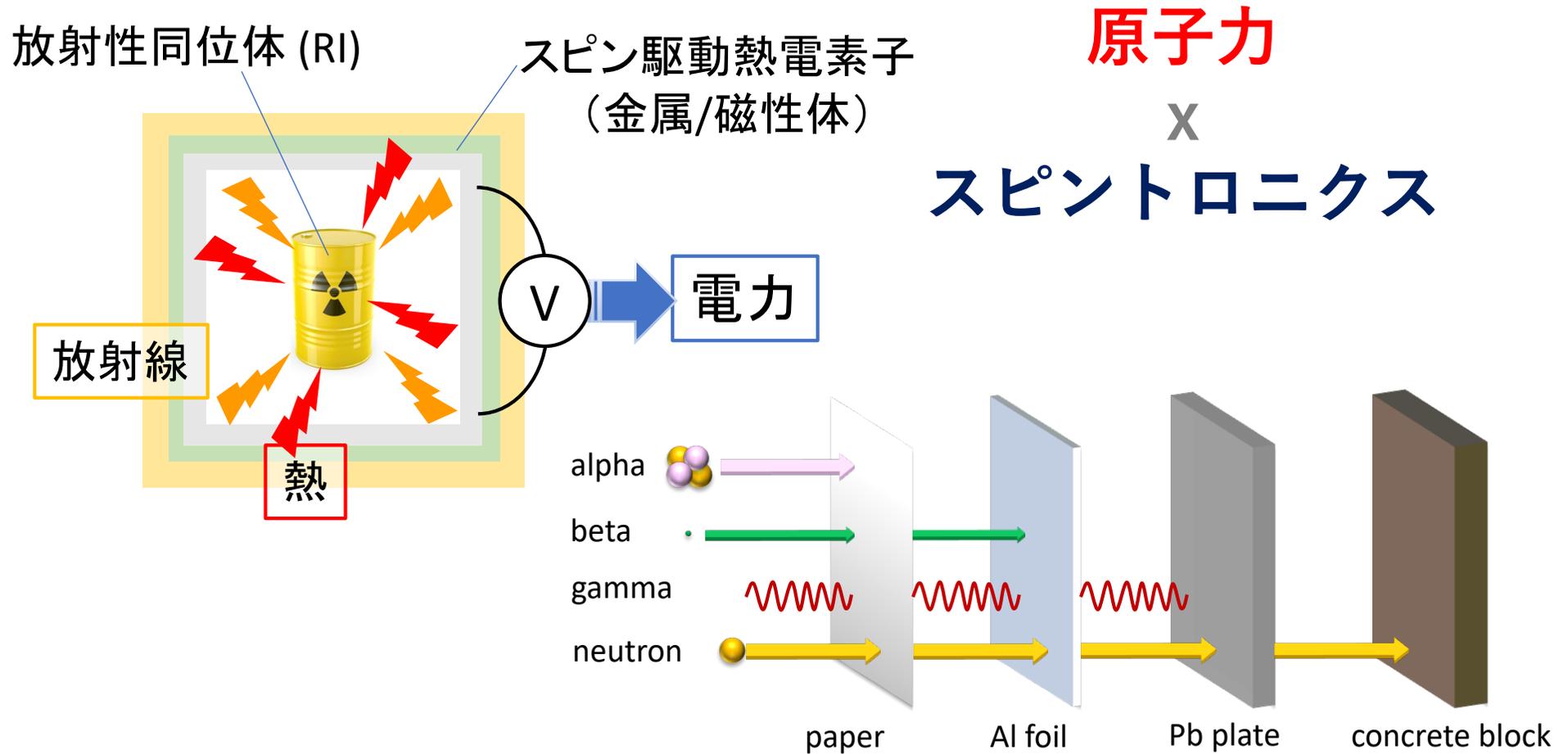
スピン熱電発電

[Kiriwara et al., Nature Mater. **11**, 686 (2012)]



**半導体照射損傷を原理的に回避する手段!**

## 耐放射性の熱電転換器をめざして



各種放射線に対する耐性テストが必要

## ■ 重イオン照射耐性の検証

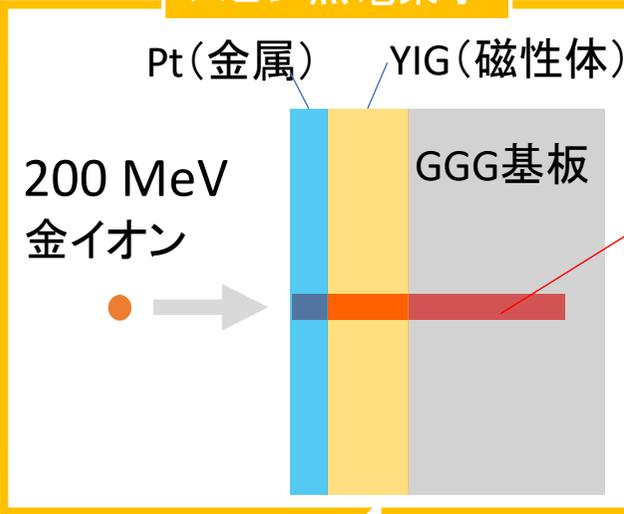
[Okayasu et al., J. Appl. Phys. **128**, 083902 (2020)]

日本物理学会2021年秋季大会22pC2-3

JAEA タンデム型重イオン加速器



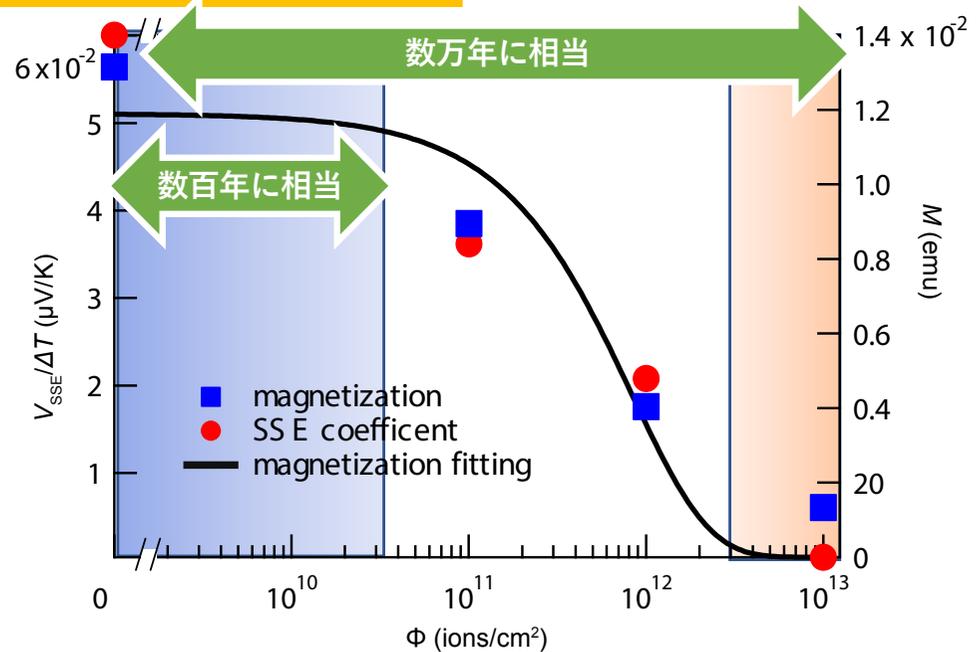
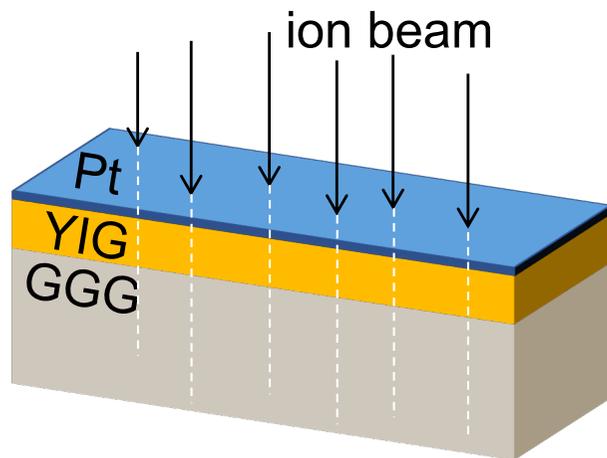
スピン熱電素子



ナノスケールの柱状欠陥



アモルファス化で  
磁性を消失



## 3. 実施内容

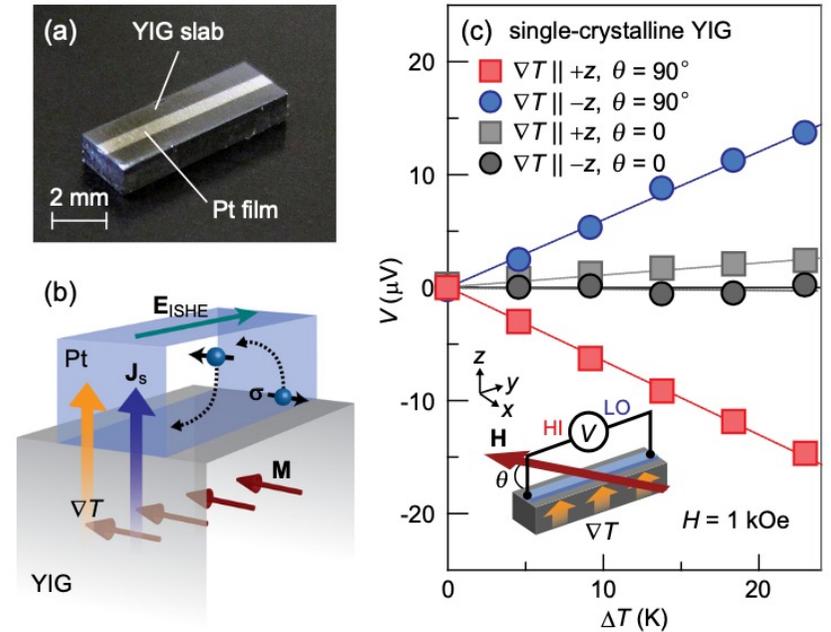
区 分	R2	R3
(1) スピン熱電素子の耐放射線特性の研究		
①スピン熱電素子作製システムの整備	計画 ← 実際の進捗 ←	← → ← →
②スピン熱電発電に対するガンマ線照射効果の実験	計画 ← 実際の進捗 ←	← → ← →
③スピン熱電発電に対する中性子線照射効果の実験	計画 ← 実際の進捗 ←	← → ← →
④スピン熱電発電に対するベータ線照射効果の実験	計画 ← 実際の進捗 ←	← → ← →
(2) 研究推進	計画 ← 実際の進捗 ←	← → ← →

- スピン熱電素子作製  
YIG磁性絶縁体に  
白金(Pt)薄膜(5 nm)を成膜

これまで:

東北大学で試料作製しJAEAで実験

⇒ **オンサイトで試料作製が可能に**



[Journal of Applied Physics **111**, 103903 (2012)]



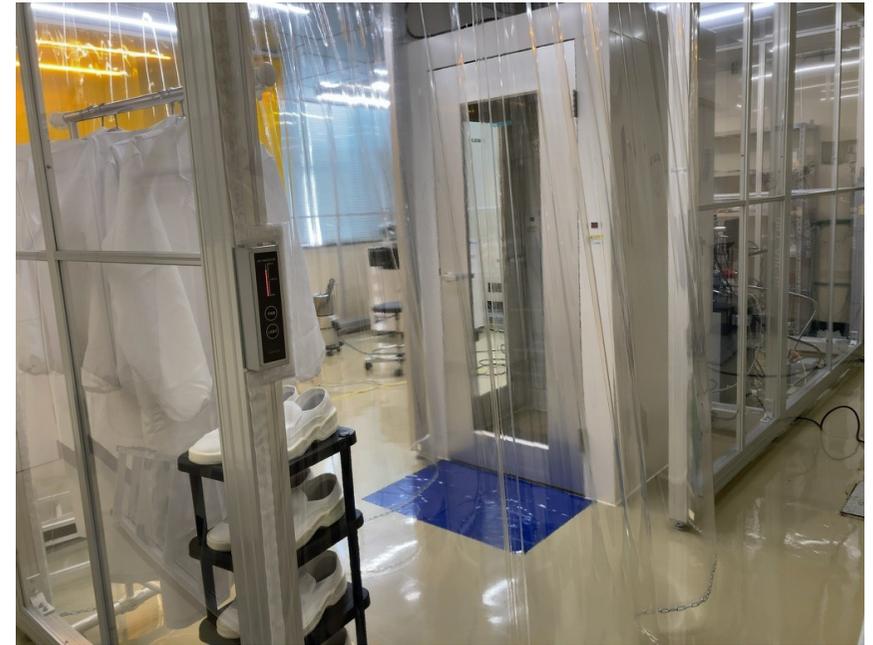
ECRイオンビームによる超微細加工

1月28日契約完了  
3月納品・設定



- スピン熱電素子作製  
微細加工用機器の設置

⇒ 微細加工により熱電効率を  
今後大幅に向上させる可能性



建屋は、放射線防護の目的で重量コンクリートが使用されており、耐放射線に優れ、電磁・振動ノイズに強い。このため、クリーンブースを整備し、スピン熱電発電研究の拠点として発展的に利用。



実験室建家  
外観

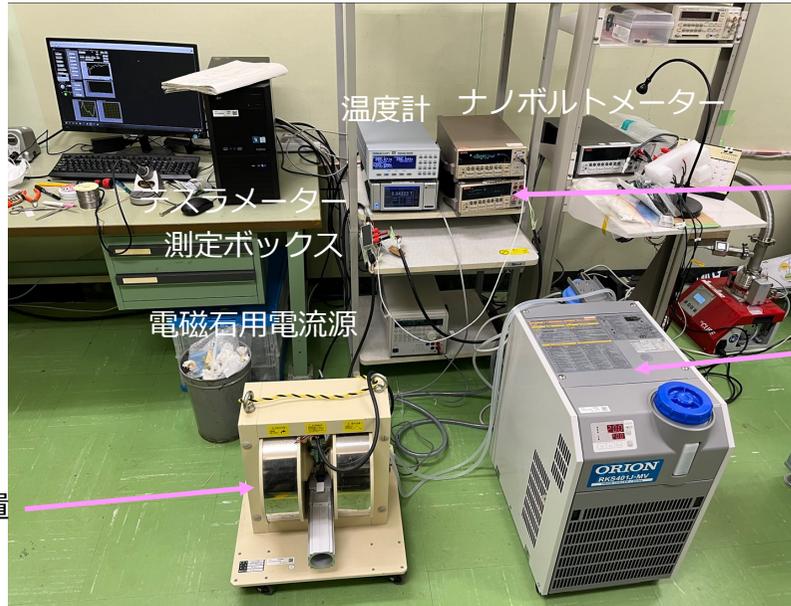


玄関天井  
漏水痕



実験室の清浄化

制御用PC



温度計 ナノボルトメーター

ペルチェ素子用電流源

測定ボックス

電磁石用電流源

ペルチェ素子用電流源

水冷用チラー

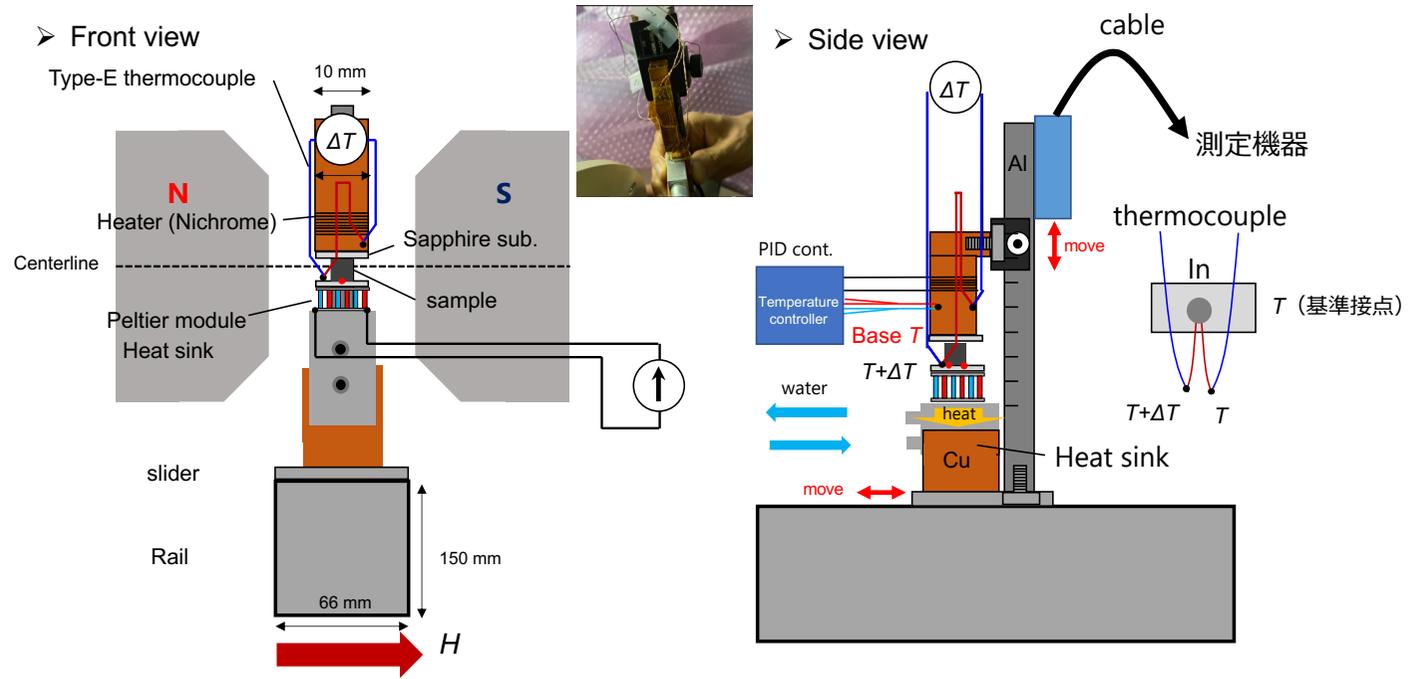
電磁石+SSE測定装置



佐藤研究員



埋田博士研

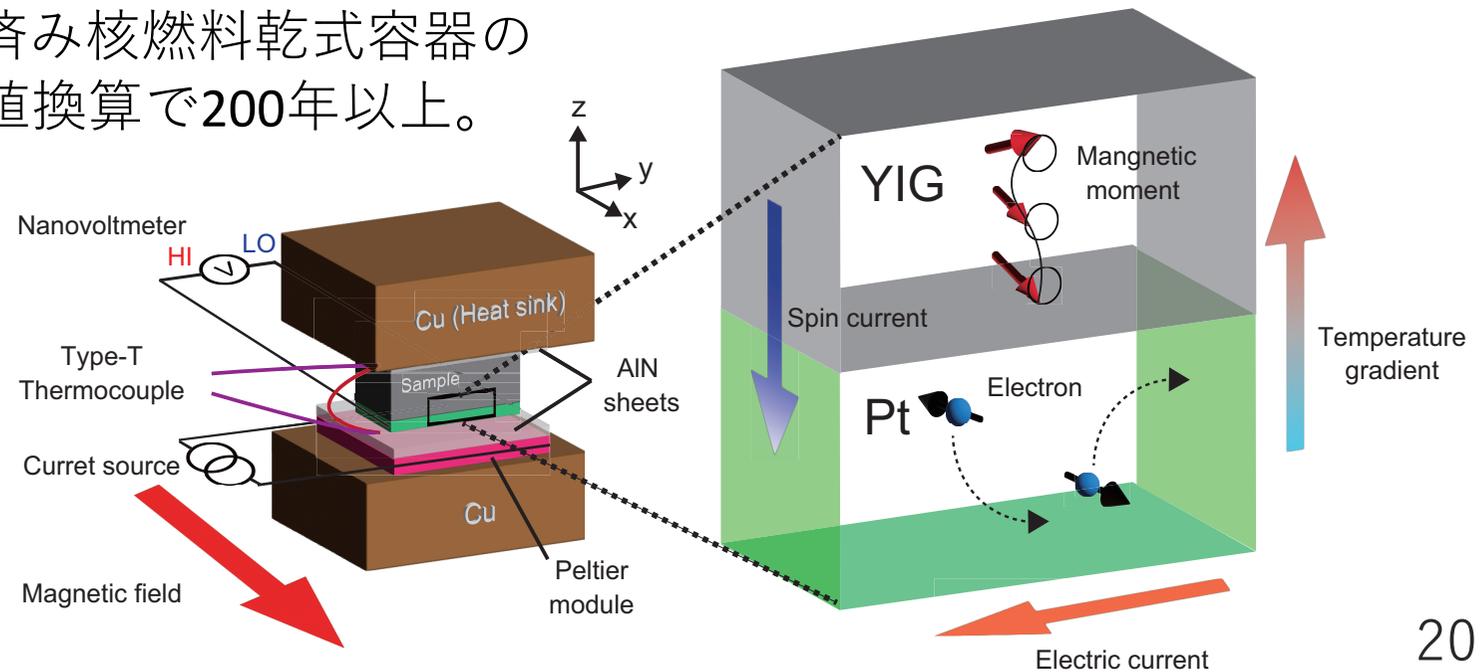


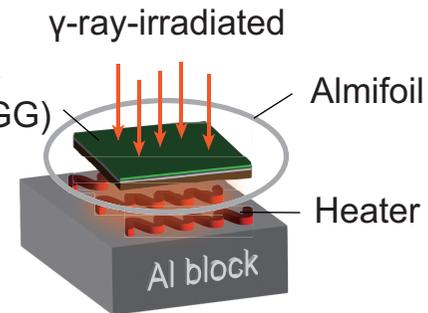
## 4. 研究成果

- **ガンマ線照射** Co60照射施設 @QST高崎
  - スピン熱電素子のガンマ線耐性を確認
- **中性子線照射** 研究用実験炉JRR-3 @JAEA東海
  - スピン熱電素子の中性子線耐性を一部確認
- **ベータ線照射** ベータ線照射施設 @QST高崎  
及び (株) NHVコーポレーション
  - スピン熱電素子のベータ線耐性を確認
- **得られた新知見**
  - スピン熱電素子の複合的な放射線耐性
  - スピン熱電素子に対する多湿環境の悪影響

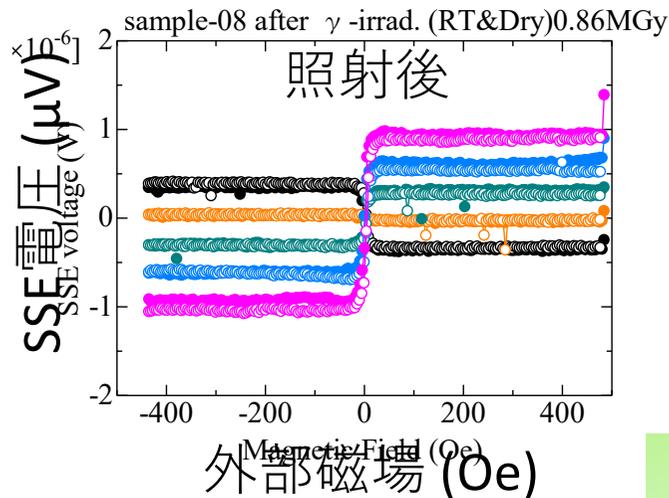
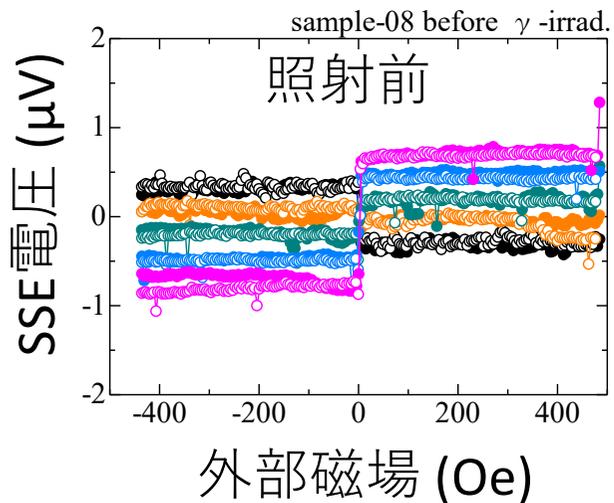
- ガンマ線照射 Co60照射施設 @QST高崎
  - 照射条件
    - A. 室温 照射量0.9 MGy
    - B. 150 °C 照射量0.9 MGy
    - C. 150 °C + スチーム 照射量0.8 MGy\*
- 試料：Pt (5 or 10 nm)/YIG (200 nm)

\*0.8 MGy: 使用済み核燃料乾式容器の規制値換算で200年以上。





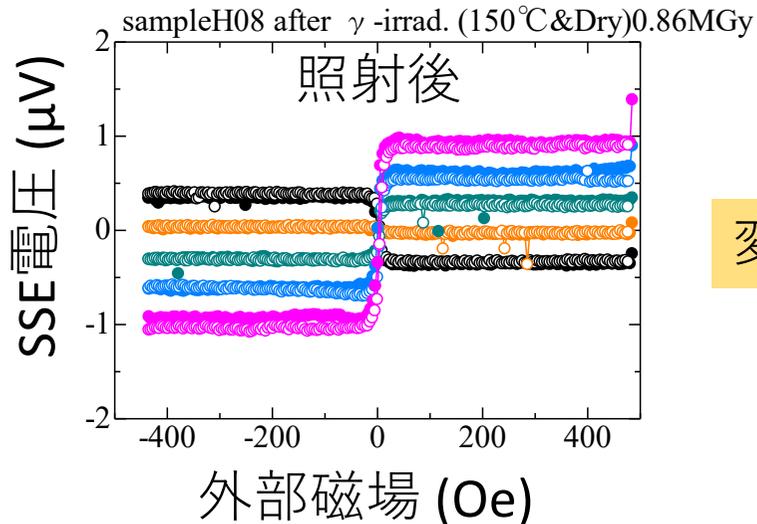
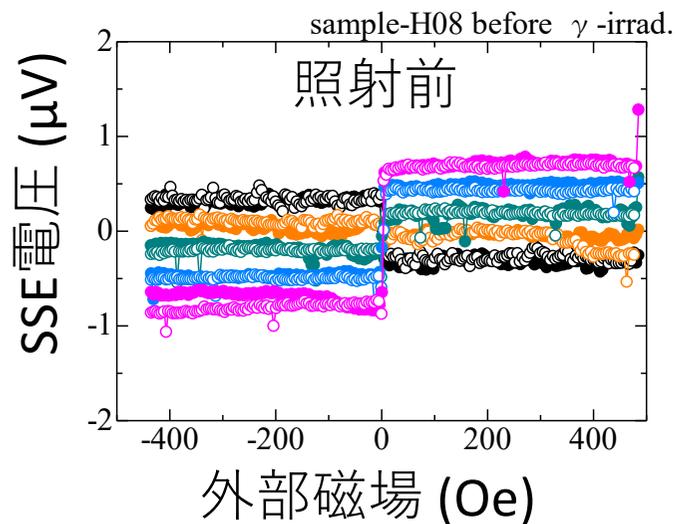
## A. 室温 照射量~0.9MGy Pt(5nm)



変化無し

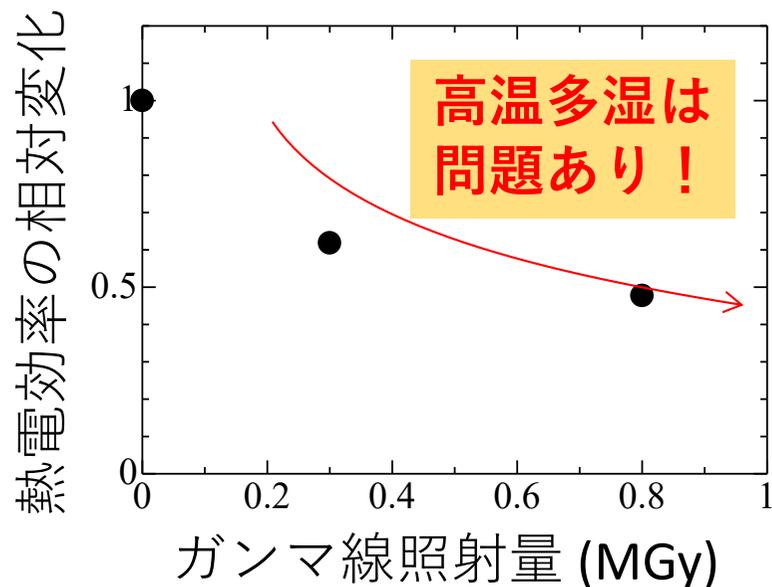
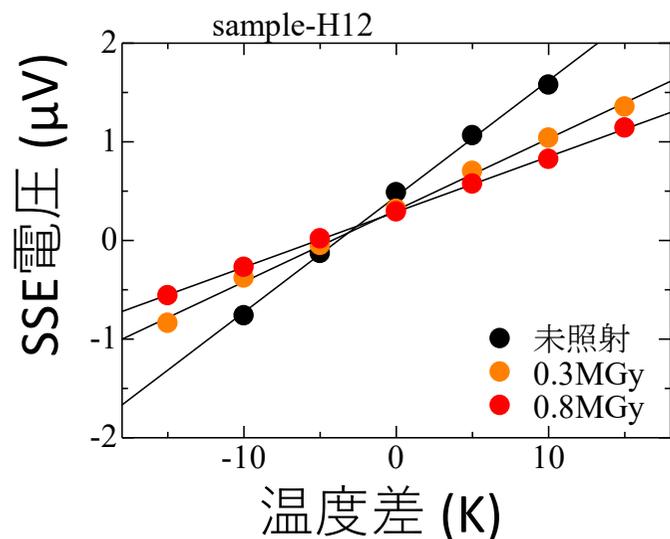
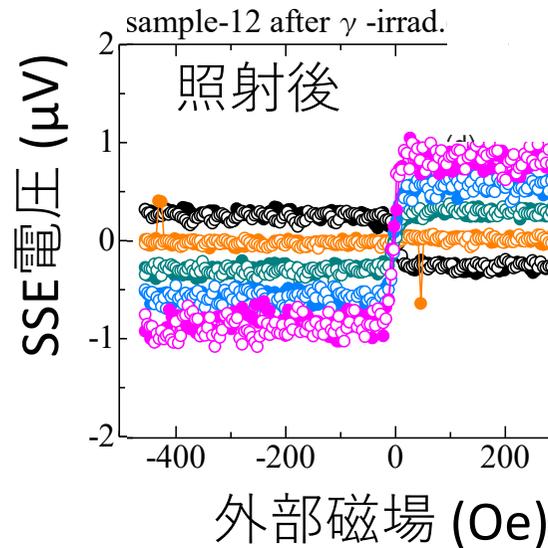
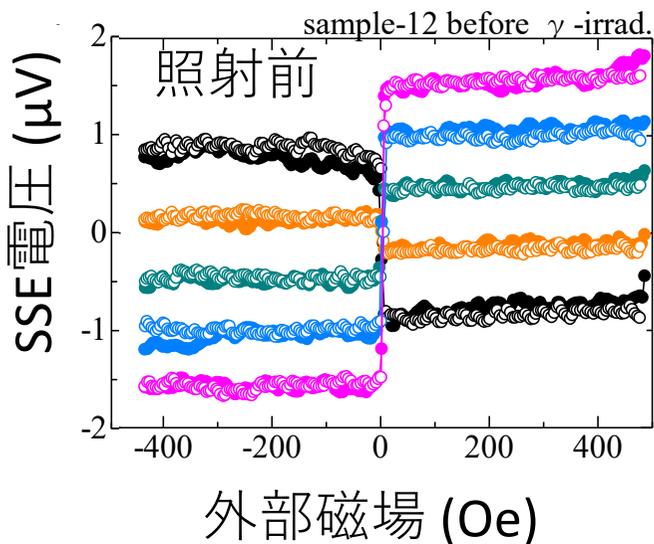
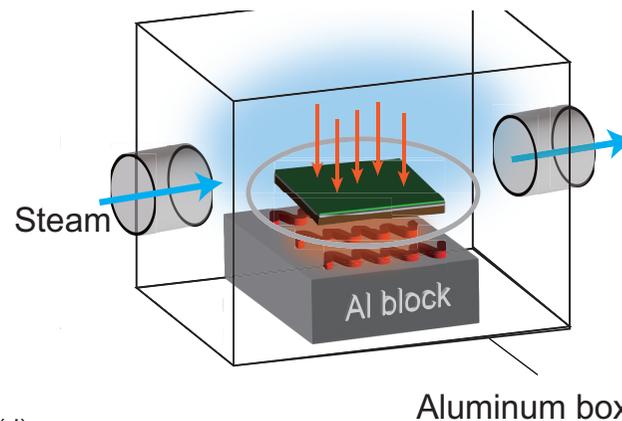
ガンマ線照射  
耐性を有する

## B. 150°C 照射量~0.9MGy Pt(5nm)



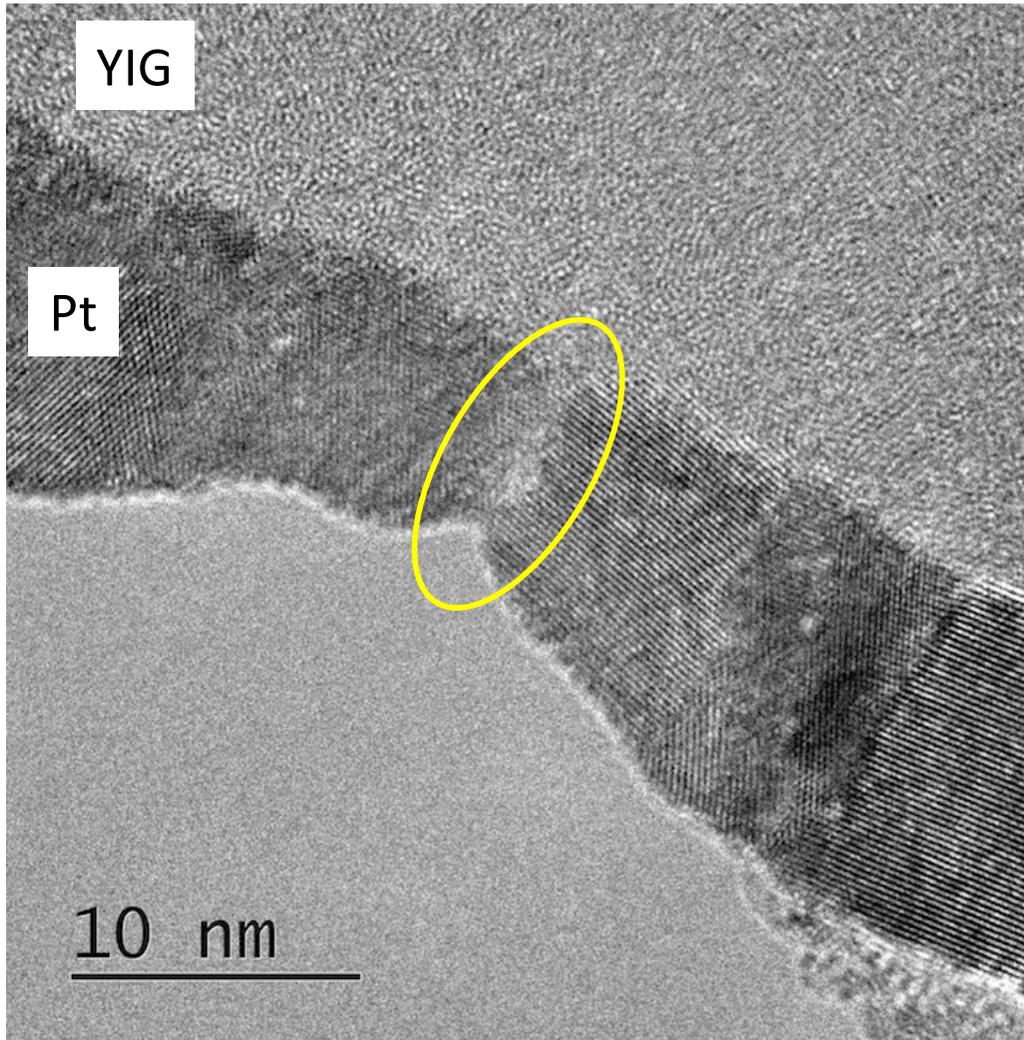
変化無し

C. 150°C + スチーム 照射量 $\sim$ 0.8MGy Pt(5nm)

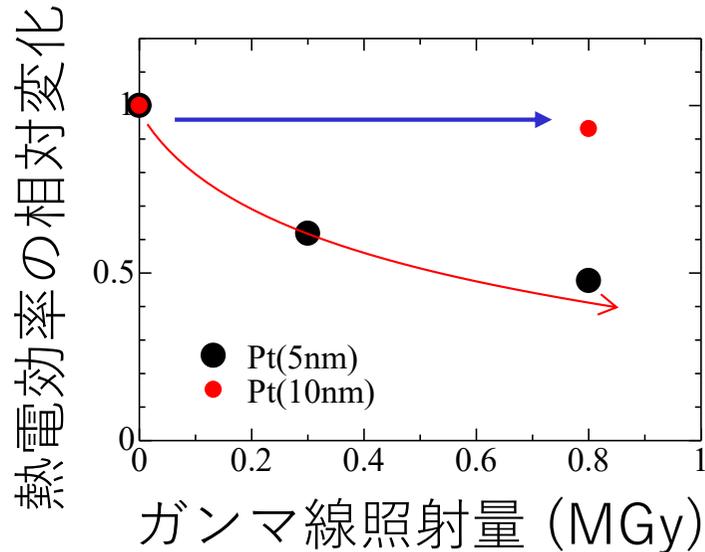
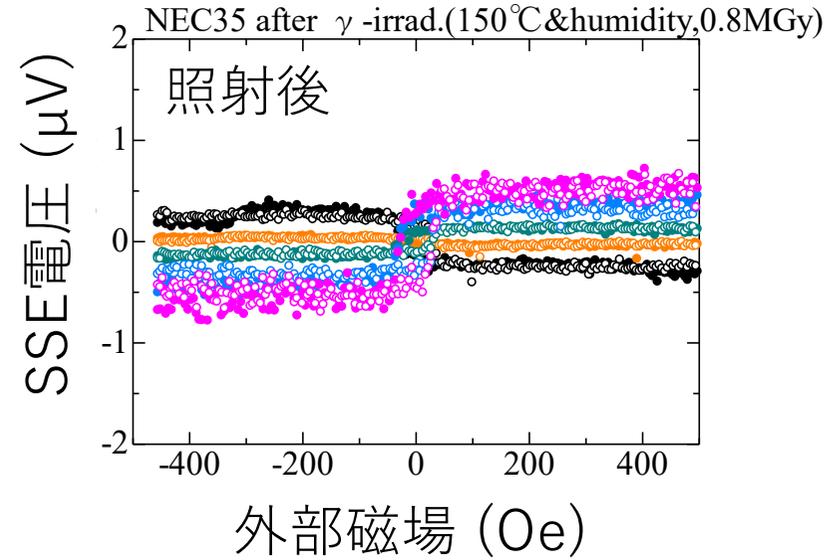
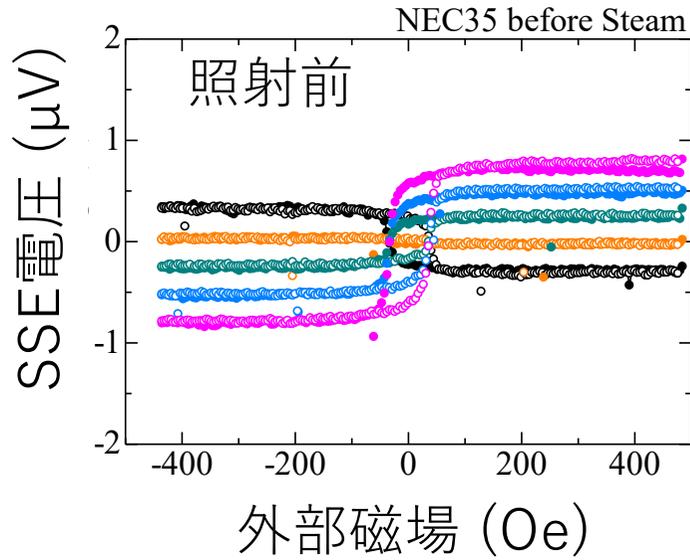


- YIG(200 nm)/Pt(5 nm)界面

謝辞：QST田口氏による撮像



## C. 150 °C + スチーム 照射量 ~ 0.8 MGy Pt(10 nm)



**白金を厚膜化で  
素子劣化が抑制**

- < 論文発表 > 1件
- < 口頭発表 > 3件
- < 特許出願 > 0件
- < 受賞 > 0件



The 15th Joint MMM-INTERMAG, January 2022, Hybrid Conference  
 GOI-12  
**The damage analysis for irradiation tolerant spin-driven thermoelectric device based on  $Y_3Fe_5O_{12}/Pt$  heterostructures**  
 Jun'ichi Ieda   
 Japan Atomic Energy Agency (JAEA)  
 In collaboration with S. Okayasu<sup>1</sup>, K. Hari<sup>1,2</sup>, M. Kobata<sup>1</sup>, K. Yoshii<sup>1</sup>, T. Fukuda<sup>1</sup>, M. Ishida<sup>3</sup>, and E. Saitoh<sup>1,4,5</sup>  
 1. JAEA; 2. QST; 3. NEC; 4. Tohoku U; 5. U Tokyo  
 Supported by Innovative Nuclear Research and Development Program.

ICMFS  
2022 (OIST)

MMM-Intermag  
2022 (online)

## 5. まとめと展望

- スピン熱電素子の耐放射線特性の研究を推進するための基盤整備を行った。
- 各種放射線を照射して熱電性能の劣化度合いを調べた。
  - Pt/YIG系が強いガンマ線耐性を持つ
  - ガンマ線放出を伴うRIを熱源として利用可能
  - 多湿環境では水蒸気に対する対処が必要
- 今後の展望：
  - MAとして核廃処理される $^{241}\text{Am}$ の活用を検討
  - JAEAにおける原子力電池Pjに参加・協力