

# 超高流束協奏材料ユニット 研究成果

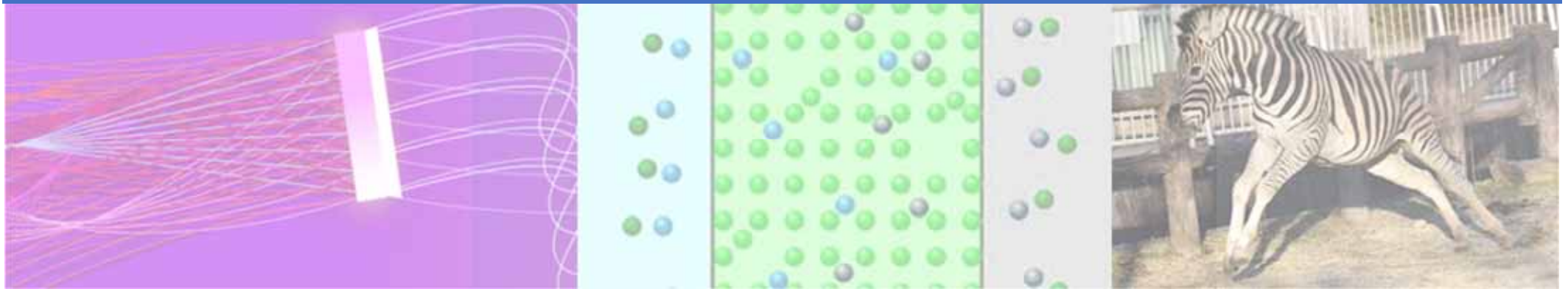
Ver. 1 (2025年5月9日)



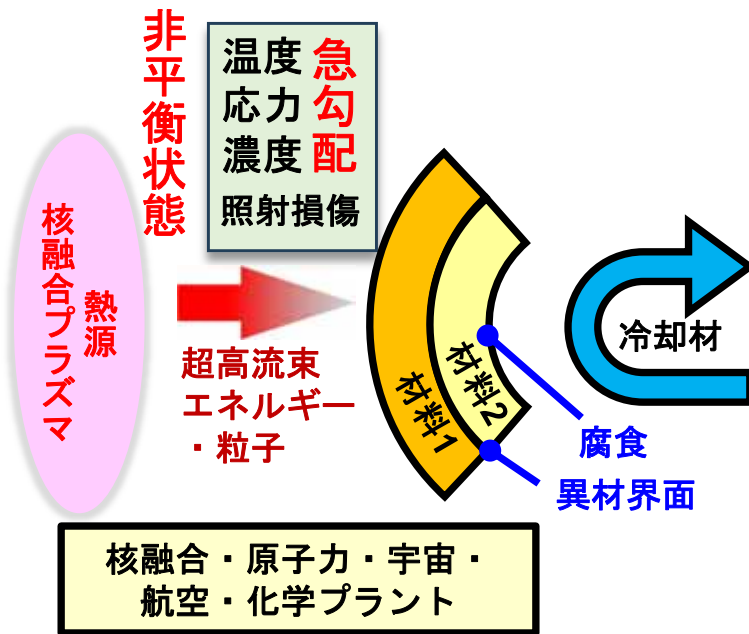
核融合科学研究所

発表：向井 啓祐

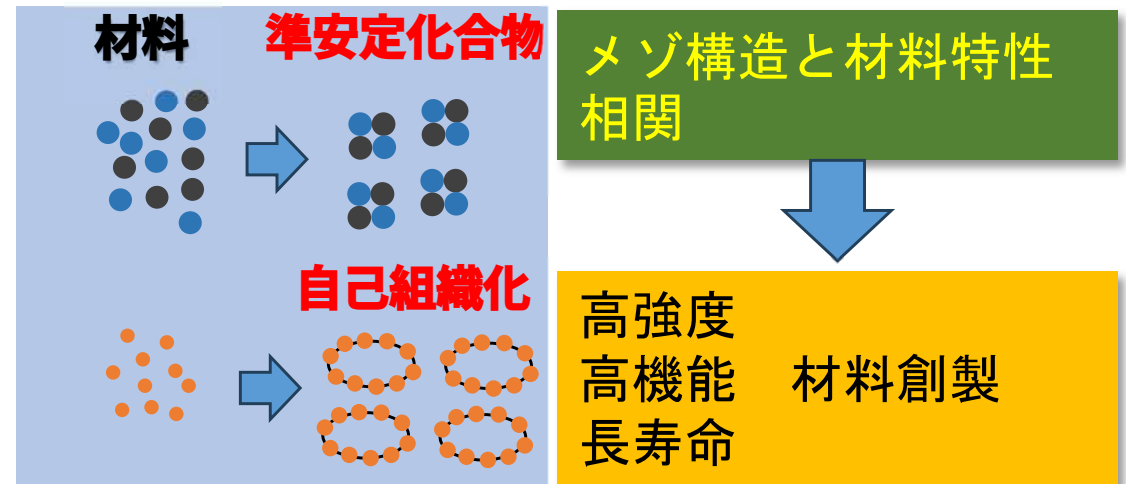
2025年5月29日 ユニット成果報告会



# ユニットの研究対象



## 多様なメゾ構造の生成



- 過酷環境下における非平衡状態で
  - 準安定相・自己組織化構造の材料マクロ物性への寄与を深く理解
  - それらを活用し、超高流束と協奏する適応化構造を増幅する材料設計と新材料創製

## ユニットの重点研究 (Body)

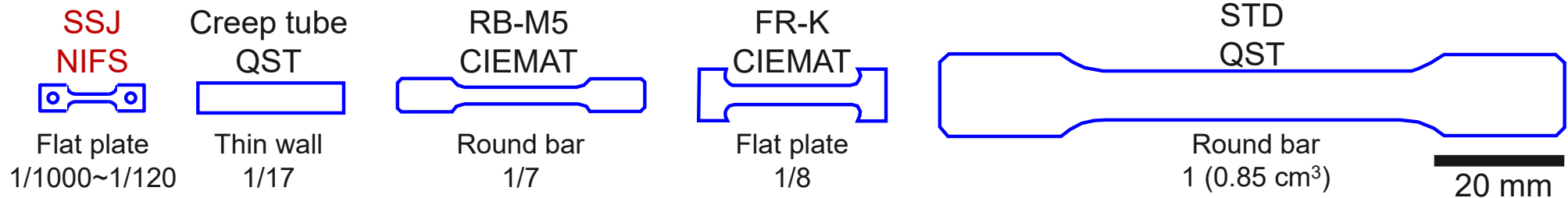
1. 照射効果
2. 高度材料分析
3. マテリアルズインフォマティクス (MI)

# 2024年度所内外メンバー研究成果

| Piece                                    | Body  |       |       |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                          | 1. 照射 | 2. 分析 | 3. MI |
| 長坂琢也: 核融合炉材料の微小試験規格・基準策定に向けた国際協力         |       | ✓     |       |
| 田中照也: エネルギー粒子照射下の非平衡状態で観測されるセラミックス電気絶縁劣化 | ✓     |       |       |
| 小林真: 半導体材料の放射線検出器応用                      | ✓     |       |       |
| 能登裕之: 過酷環境材料のための金属加工学研究                  |       | ✓     |       |
| 高山定次: マイクロ波の非熱的効果の検証                     |       | ✓     |       |
| 申晶潔: 高純度バナジウム合金V-Cr-xTiの照射効果             | ✓     |       |       |
| 向井啓祐: 事故耐性ハイブリッドセラミックス                   |       |       | ✓     |
| 笠田竜太 (客員, 東北大学)                          | ✓     |       |       |
| 大野直子 (客員, 横浜国立大学)                        |       | ✓     |       |

# 核融合炉材料の微小試験規格・基準策定 に向けた国際協力

長坂琢也

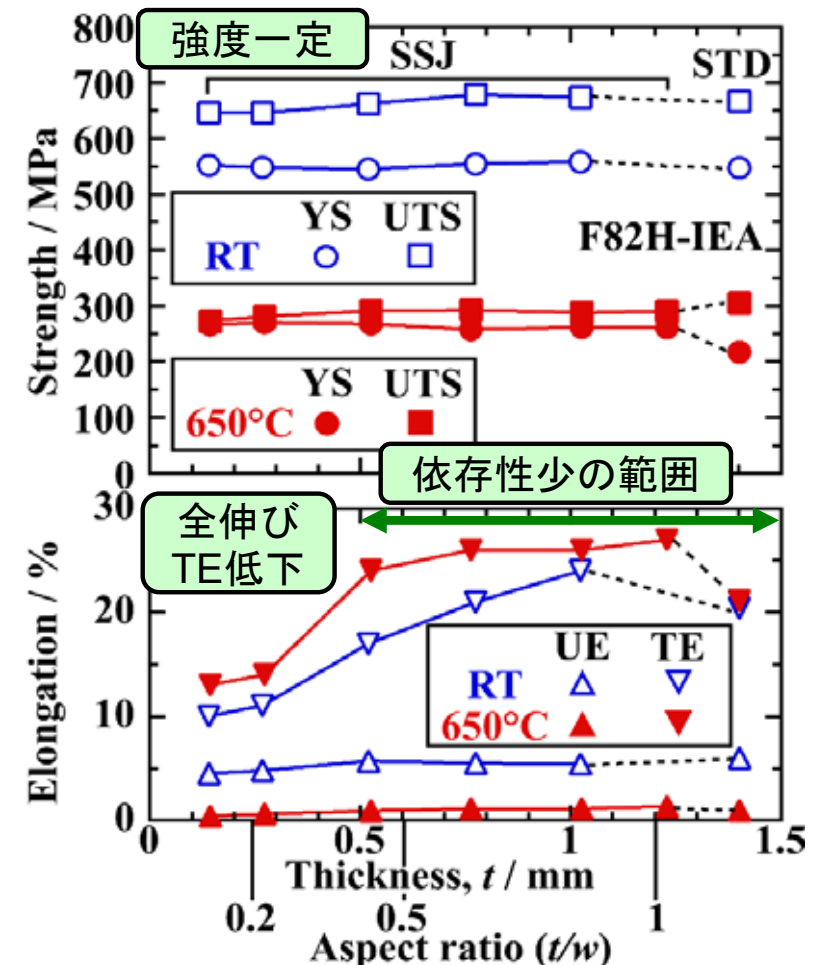


## ■ IAEA Coordinated Research Project

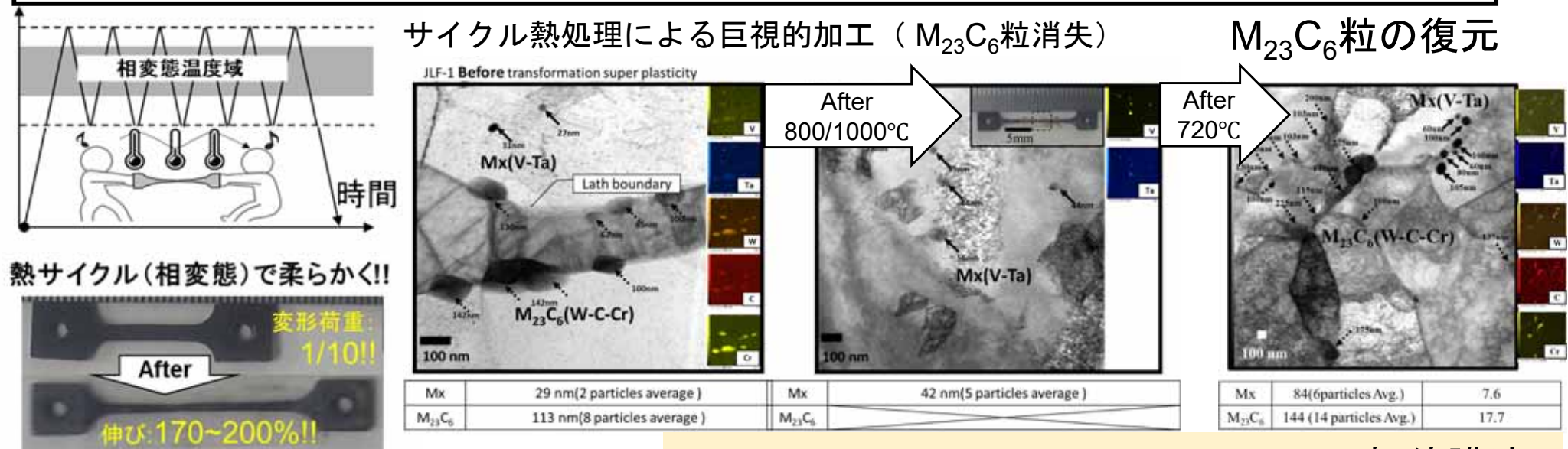
- Phase I (2017~2021): 日、欧、米、中から9機関が参画
- Phase II (2022~2026): 英、亜、民間が加わり14機関に拡大
- 低放射化フェライト鋼の引張\*、クリープ\*、低サイクル疲労、破壊靱性、疲労亀裂伸展\*  
\*NIFSで実施

## ● F82H引張特性値のサイズ依存性

- 強度 (YS, UTS) : 無し→316鋼等では  $t \sim 0.2$  mm以下で低下→微細ラス組織 (幅 $\sim 0.5\mu\text{m}$ ) の特長
- 全伸び (TE) :  $t/w \sim 0.4$ 以下で低下→従来鋼と同様



## ① 低放射化フェライト鋼の相変態誘起巨視的変形を応用した加工技術



H. Noto, J. Shen, T. Muroga, CJS-15 招待講演

## ② B-p核融合のための純Bペレット開発

タンタル箔を用いたホウ素焼結法の開発。LHDにおける”純”ペレット射出実験の成功

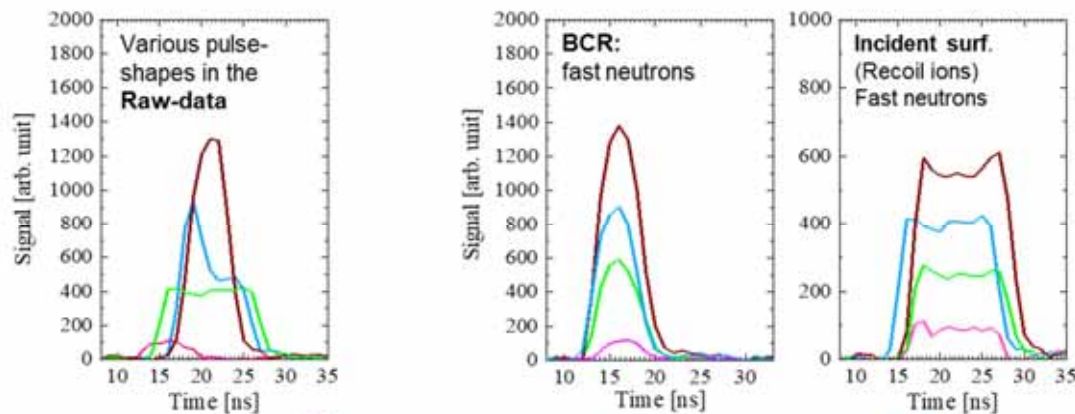


- プラズマ実験への貢献：これまでの小型容器に充填した粉の射出とは異なり、大容量のB元素入射が可能となった。
- 材料学へのアプローチ：Ta箔が焼結性の他、物性に影響を与えている可能性調査中（特許3件出願済）



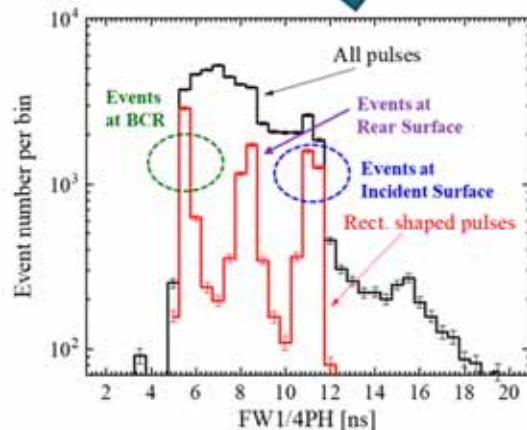
ブランケット内は様々な放射線が混在

- エネルギー付与（電子正孔対生成）過程の差異を利用し放射線を弁別
- 中性子のみに起因したパルスの波高分布と検出器の中性子に対する応答行列（輸送計算）から、中性子エネルギースペクトルを抽出

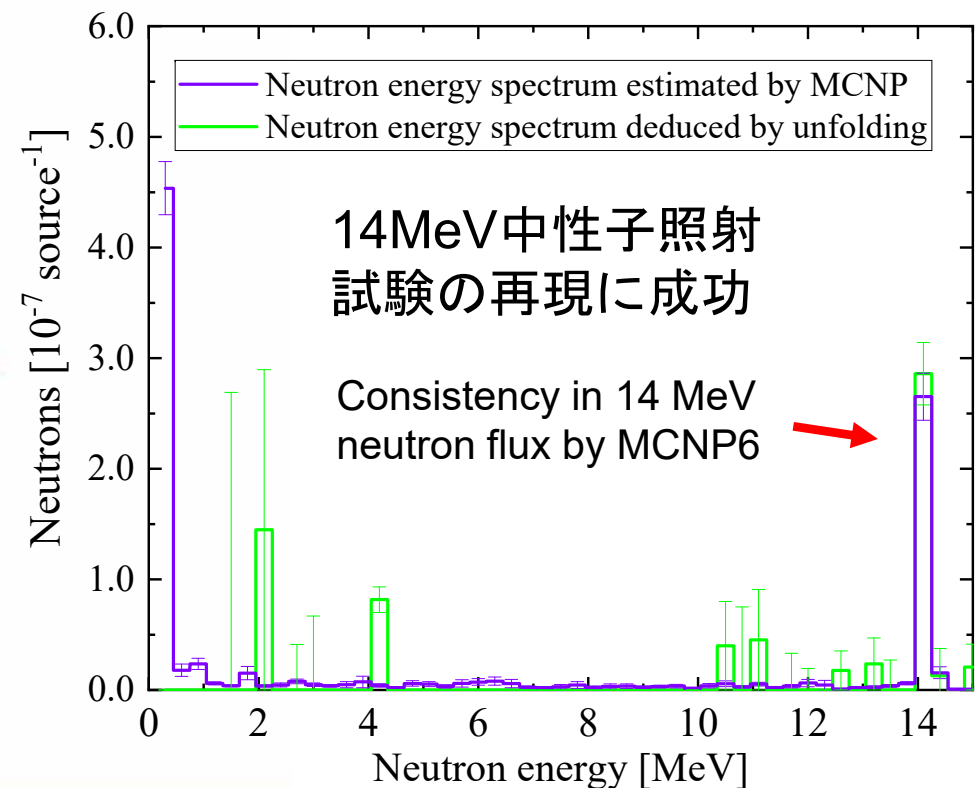


四角形状パルス  
だけ抽出

パルス幅による  
分離



全パルス及び四角形状パルスの1/4値幅の頻度分布



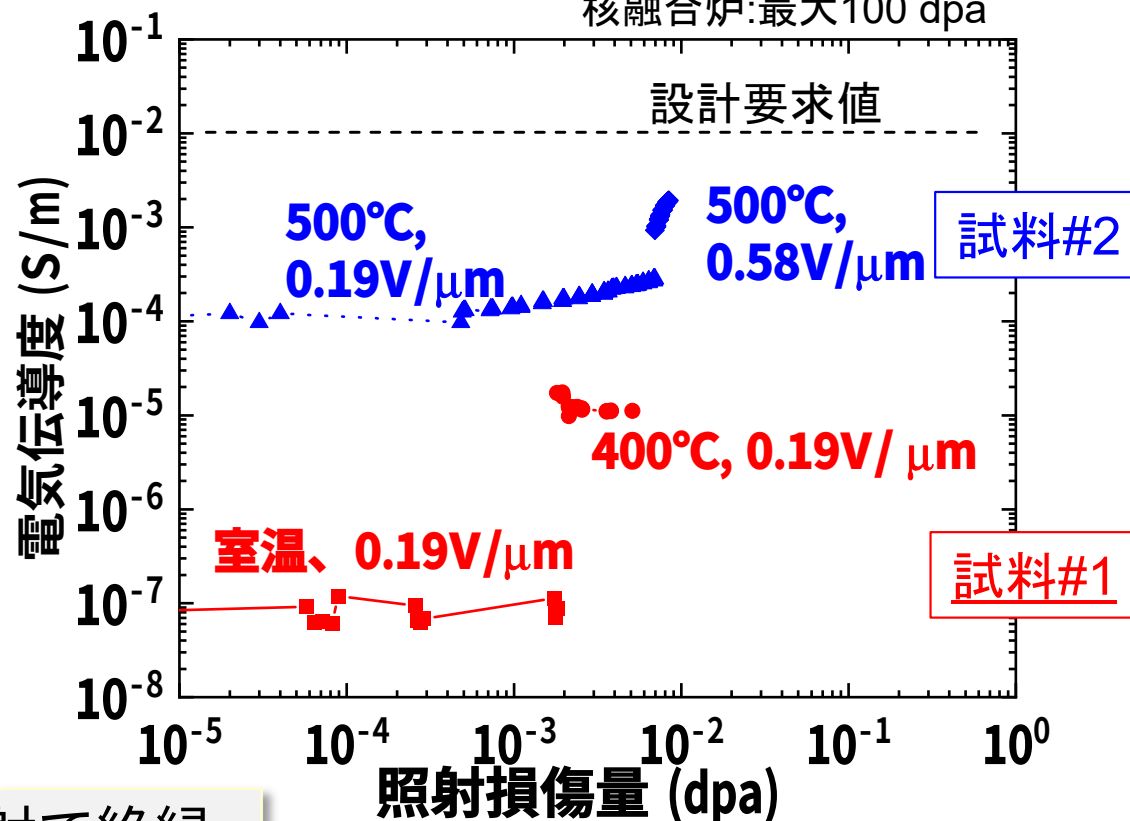
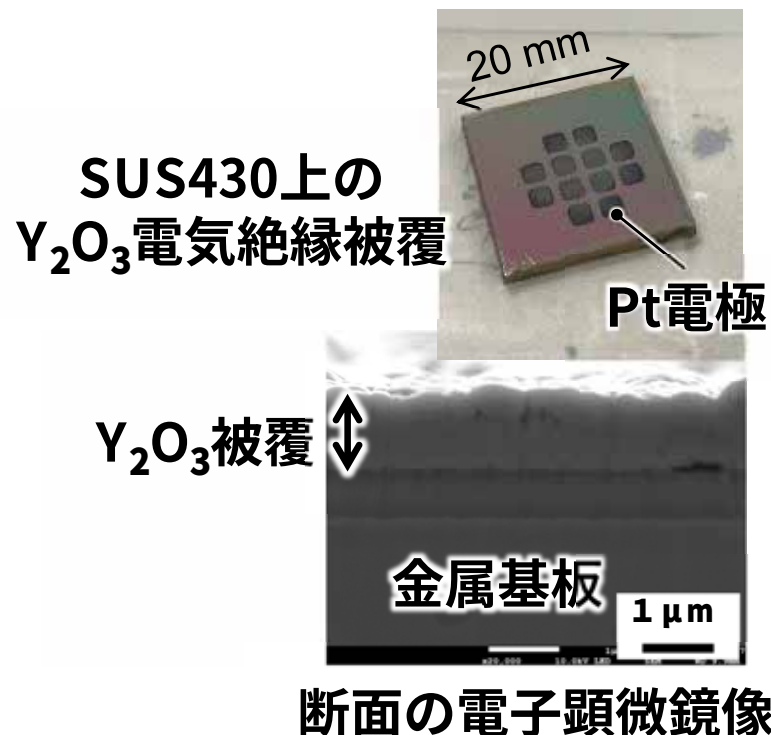
M.I. Kobayashi et al., *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2024  
M.I. Kobayashi et al., *Nucl. Fusion* 2024

# エネルギー粒子照射下の非平衡状態で観測されるセラミックス電気絶縁劣化

田中照也

1.33MeV He<sup>+</sup>照射下における液体金属冷却ブランケット用  
Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>被覆の電気伝導度の変化（NIFSタンデム加速器）

核融合炉:最大100 dpa



- ✓ Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>被覆はイオンビーム照射で絶縁劣化（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>材料でも報告\*）
- ✓ 照射＋高温＋電界が重畳して発現

豊田暁（名大院），田中照也，玉置真悟，佐藤文信，村田勲，”日本原子力学会2024年秋の大会

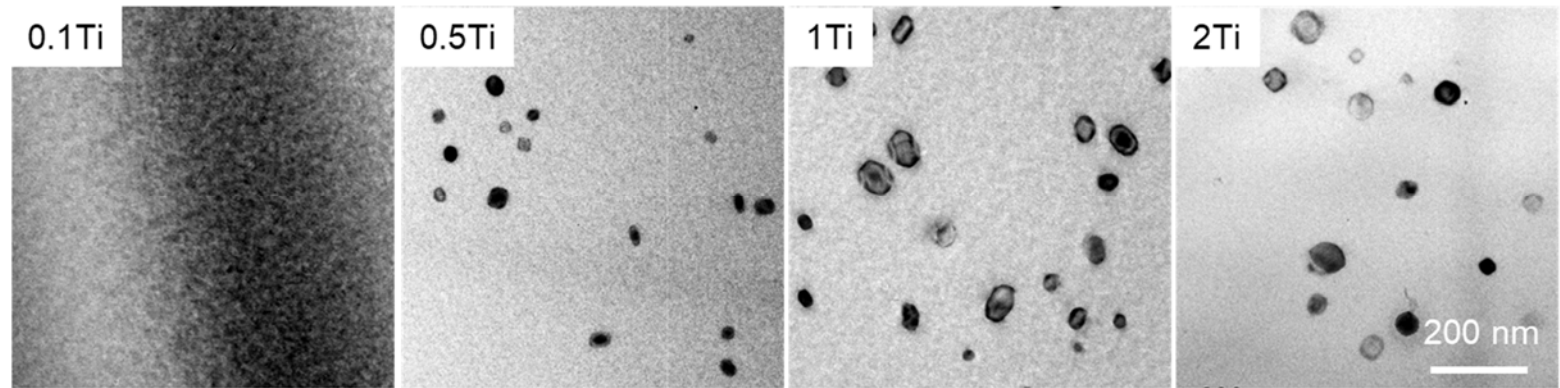
→ 構造変化との関連付け・MIによる材料探索

\*L.L. Snead *et al.*, *J. Nucl. Mater.* 226 (1995) 58-66.

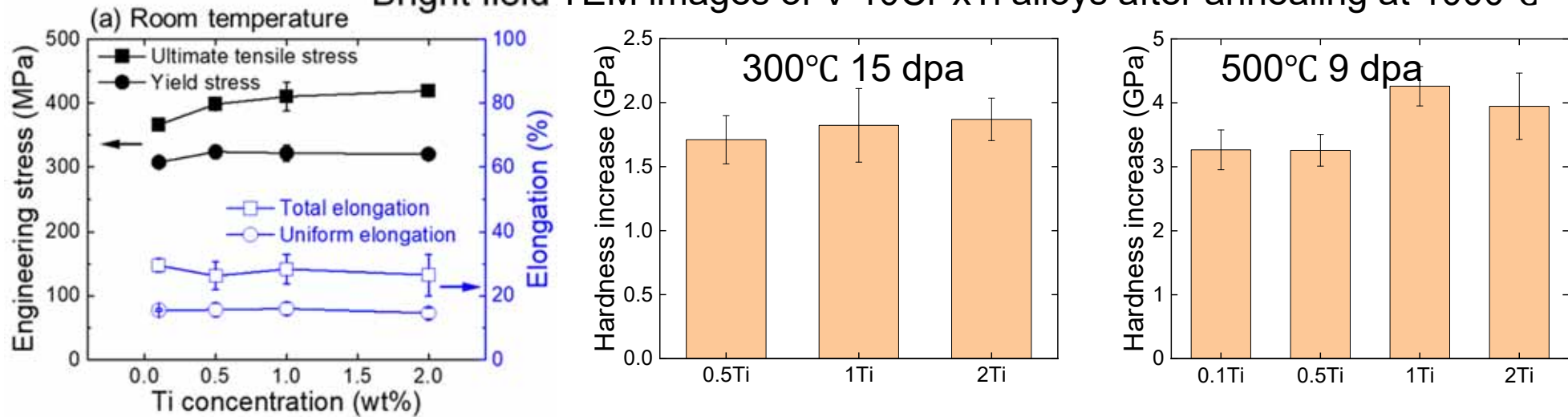
# 高純度バナジウム合金の微細組織と機械特性に及ぼすチタン濃度の影響

申晶潔

従来材  
**V-4Cr-4Ti**  
↓  
本研究  
**V-10Cr-xTi**



Bright field TEM images of V-10Cr-xTi alloys after annealing at 1000°C



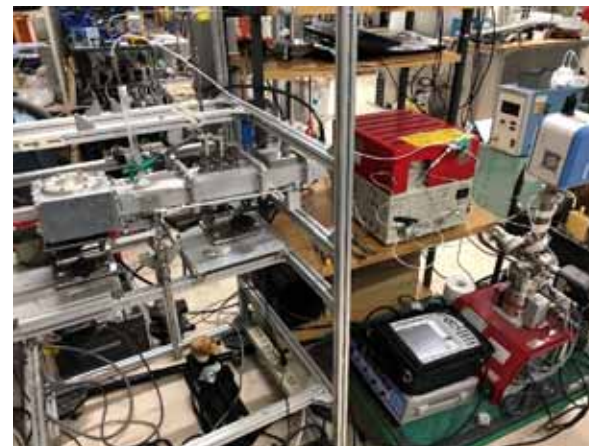
- Ti添加量は0.5wt%以上でTi(CON)析出物が形成、析出強化できる
- 室温及び高温強度はTi添加量とともに増加
- 300°Cと500°Cでのイオン照射で照射硬化



加熱試料：

セルロース、ケイ酸タンゲステン  
水を重量比1:1:1で混合

加熱温度：水の沸点



マイクロ波加熱装置



オイルバスで  
加熱した試料



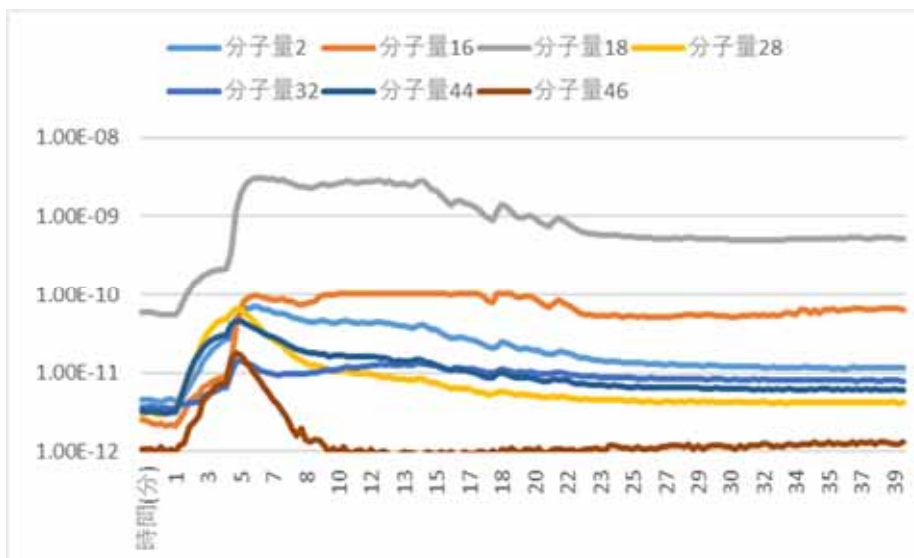
変化なし



マイクロ波で  
加熱した試料



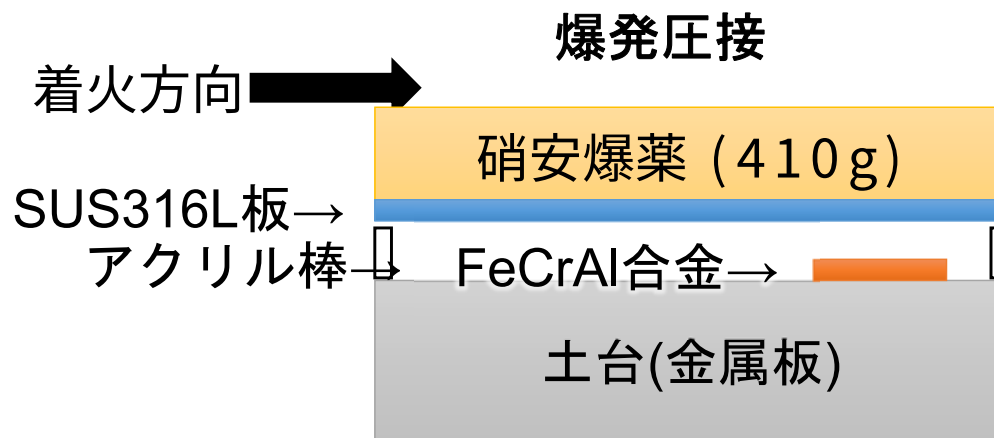
変化あり



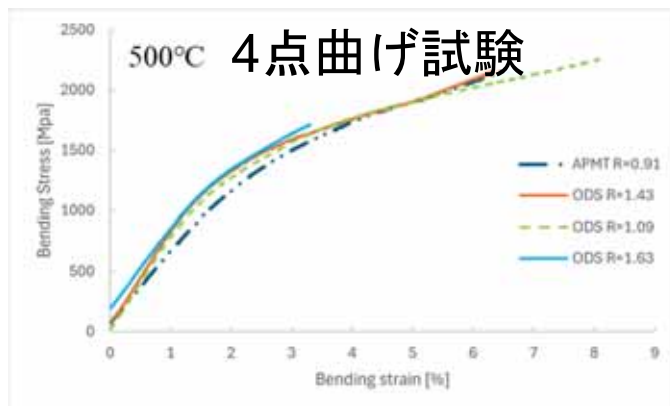
マイクロ波加熱の時の発生ガス

FeCrAl合金は耐食性に優れるが放射化の低減に課題

→ 既存配管材とのクラッド化によるFeCrAl合金の局所化・使用量削減



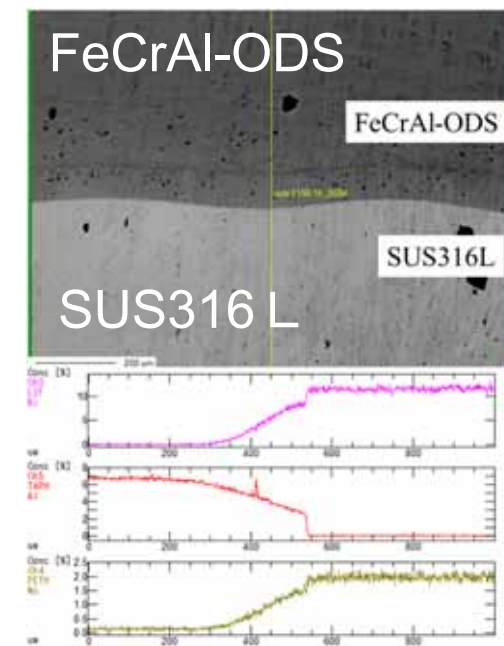
酸化被膜フリーの  
強固な接合界面の形成に成功



試験後に剥離がないことを確認

高温環境を想定した  
相互拡散加速試験

製造・使用温度に  
おけるAl, Niの拡散  
距離の評価

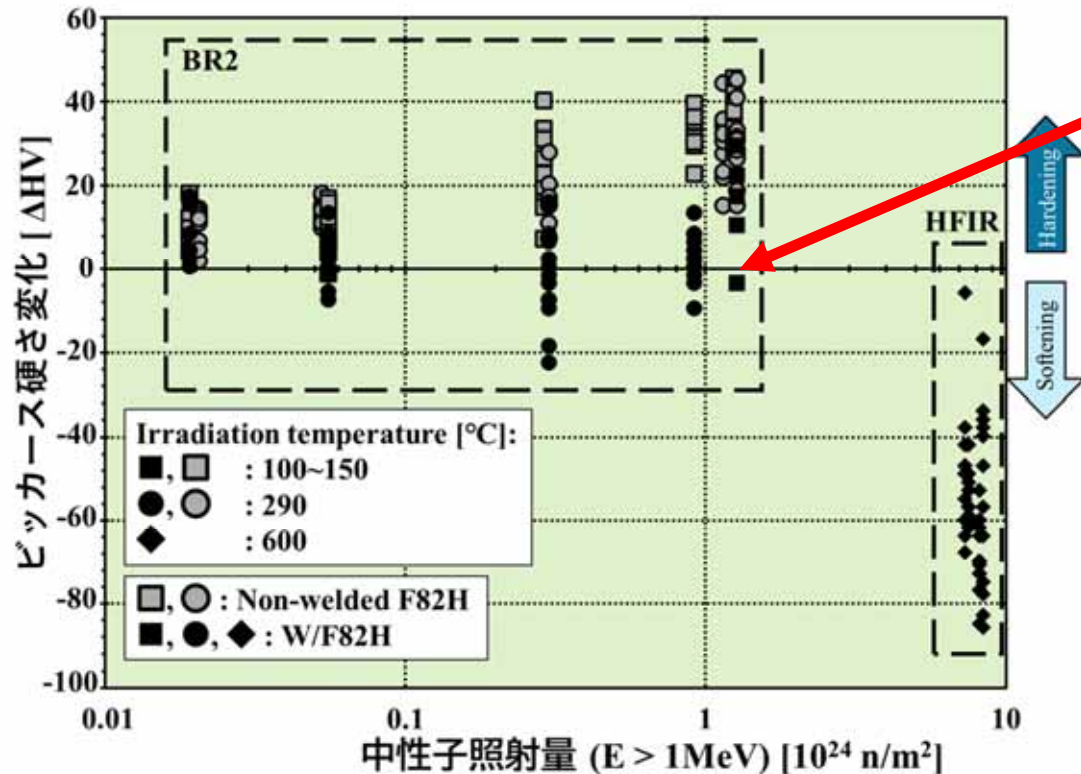


R. Kanai (横国院) N. Oono et al., Mater. Res. Proc. 44 (2024) 691-697

# 核融合炉ブランケット第一壁用W被覆 F82H鋼で見られた照射硬化の抑制

笠田 竜太  
(客員)

W被覆した低放射化フェライト鋼の世界初の中性子照射試験  
ベルギーBR2とORNL HFIR (日米派遣 Frontier計画)



F82H単体で見られる照射硬化が、  
W被覆F82Hでは見られない！

W被覆によってF82H内に生じる  
残留引張応力の影響の可能性

K. Fujii et al. J.  
Nucl. Mater. 2010

比較的低温 (～300°C) において  
も照射欠陥移動・集合に応力が影  
響し、照射欠陥形成を抑制するこ  
とを提唱

構造材料の寿命決定因子である照射硬化・脆化の新たな抑制法の提案と実証へ

材料内の照射欠陥  
シンク密度増加  
(受動的抑制)

+

応力あるいは他の外場によって高流束下照射欠陥  
形成を制御し照射硬化 (照射脆化) を抑制できる  
可能性 (能動的抑制)

K. Seki (東北大院), K. Yoshida, H. Miyata, A. Hasegawa, S. Kondo, H. Yu, Y. Ogino,  
K. Hokamoto, S. Tanaka, T. Koyanagi, R. Kasada, J. Nucl. Mater. 607 (2025) 155657

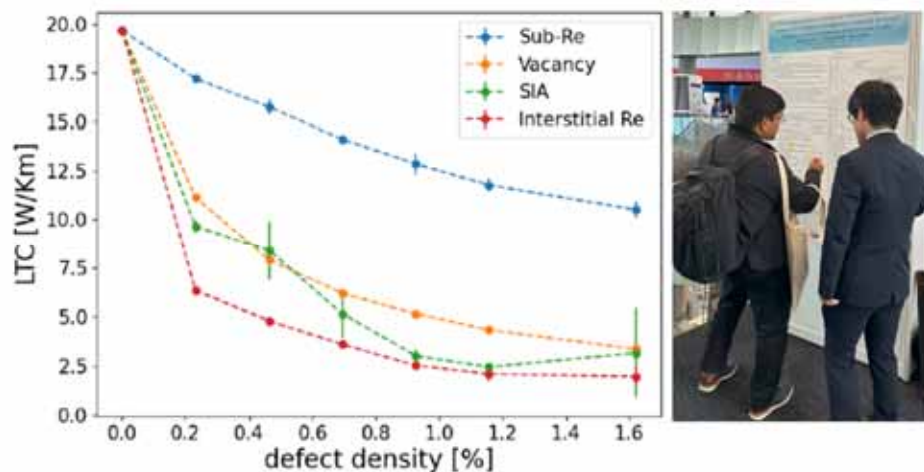
# ユニットにおける大学院生の教育

S O K E N D A I

総研大・博士前期2年 金森大悟

修論「空孔、自己格子間原子、核変換レニウムによるタングステンの格子熱伝導率に対する影響の評価」

(指導教員；向井啓祐)



D. Kanamori (総研大), K. Mukai, T. Hoshi  
33<sup>rd</sup> Symposium on Fusion Technology ポスター発表



名大・修士2年 豊田暁

修論「核融合炉ブランケット用セラミック被覆材料のイオンビーム照射下電気絶縁特性研究」

(指導教員：田中照也)

豊田暁(名大院), 田中照也, 玉置真悟, 佐藤文信, 村田勲「重水素イオンビーム照射下における酸化イットリウム被膜の電気絶縁特性のその場測定による評価」日本原子力学会2024年秋の大会 口頭発表

小倉結季(名大院), 田中照也, 高山定次, “Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>発光特性を利用する核融合炉内環境モニタリングにおける誘導γ線ノイズの影響評価”, 日本原子力学会2025年春の年会 口頭発表





# 超高流速協奏材料ユニット



向井啓祐

2014–2017年  
2017–2023年  
2023年10月–

Karlsruhe Institute Technology  
京都大学エネルギー理工学研究所  
核融合科学研究所

## Contents

### 1. 事故耐性ハイブリッドセラミックスの創成

- ・ 科研費基盤B 代表 2023-2026年

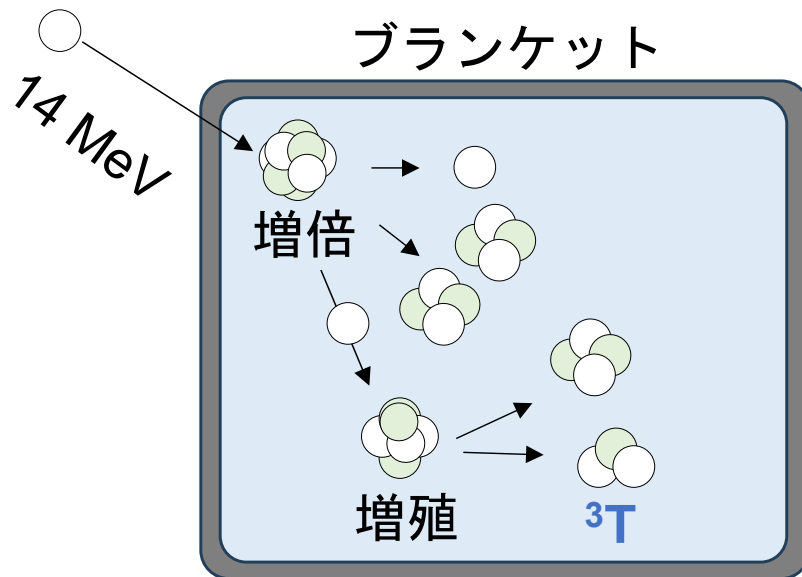


### 2. 軽元素分析技術と化学分野への応用



# ブランケット機能材の探索

1. 事故耐性ハイブリッドセラミックスの創成



|      | 増殖材                            | 増倍材 | 例                  |
|------|--------------------------------|-----|--------------------|
| 固体   | $\text{Li}_2\text{TiO}_3$      | Be  | JA-DEMO<br>EU-DEMO |
| 液体金属 | Li                             | —   | ?                  |
| 液体金属 | $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ |     | EU-DEMO            |
| 溶融塩  | FLiBe                          |     | ARC (CFS)          |

- 固体増殖水冷却ブランケットにおいて冷却水損失事故における水素発生は5大想定事故シナリオの1つ\*



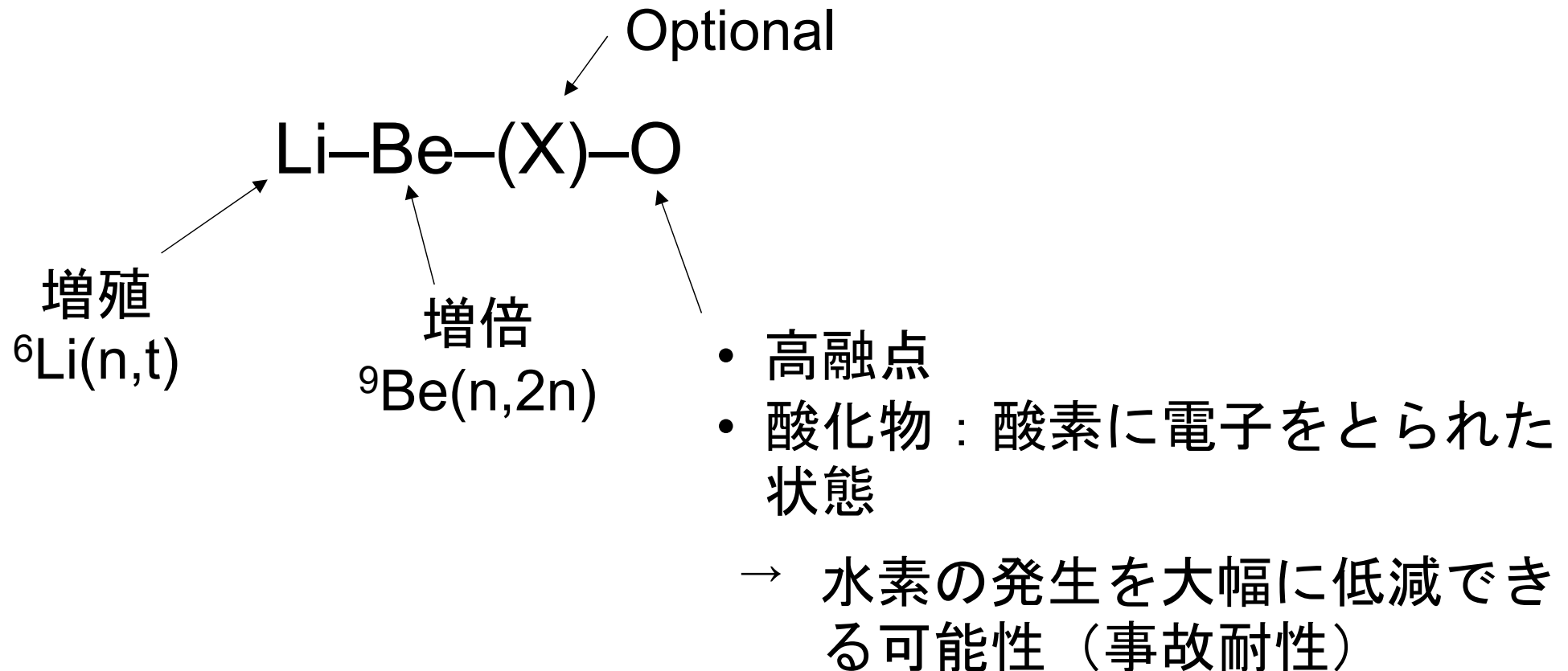
\*Y. Someya et al. *Fusion Energy Technology R&D Priorities* 2025

- 金属間化合物  $\text{Be}_{12}\text{X}$ により反応性は低下する。が・・



M. Nakamichi *Fusion Eng. Des.* 2017

新規材料で固有安全性を持つブランケット  
をつくれなにか・・？



マテリアルインフォマティクス MI  
を活用した材料探索の効率化

# 結晶構造の予測：CSPML

1. 事故耐性ハイブリッドセラミックスの創成

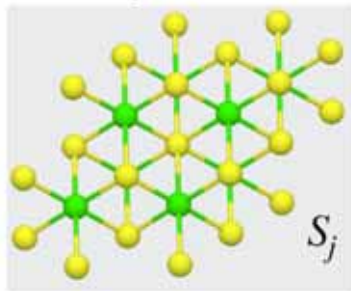
## Crystal Structure Prediction by ML based model (CSPML)

M. Kusaba et al. *Comput. Mater. Sci.* 211, 111496 (2022)

学際連携センター・草場穂さんの資料を使用

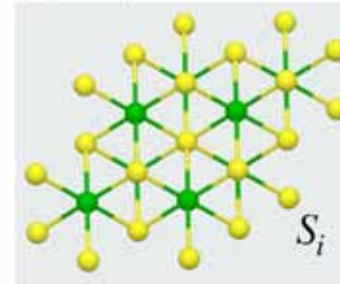


Query  $C_i$   
with **unknown structure**



Element  
substitution  
→

Composition  $C_j$   
with **known structure**



Candidates  
→

Classifier  $\{j | f(C_i, C_j) = \text{almost same}\}$



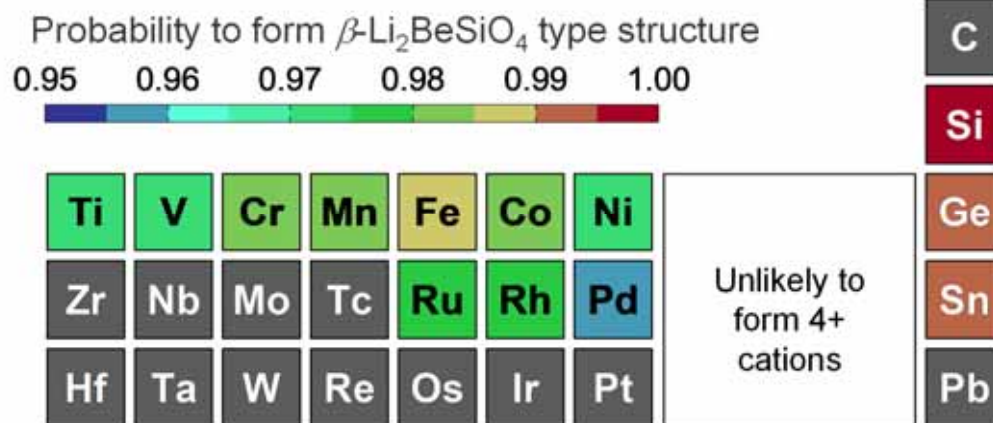
The Materials  
Project Database

第三者ベンチマーク試験においてCSPMLは優れた予測性能を示す\*

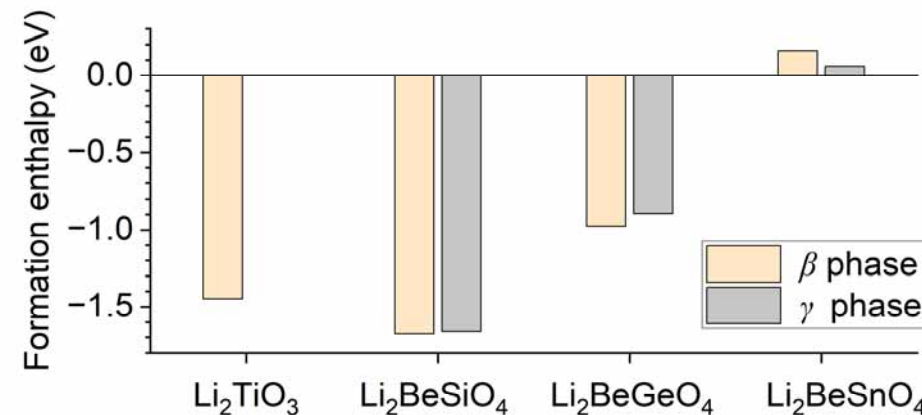
\*Wei, Lai, et al. arXiv preprint arXiv:2407.00733 (2024).



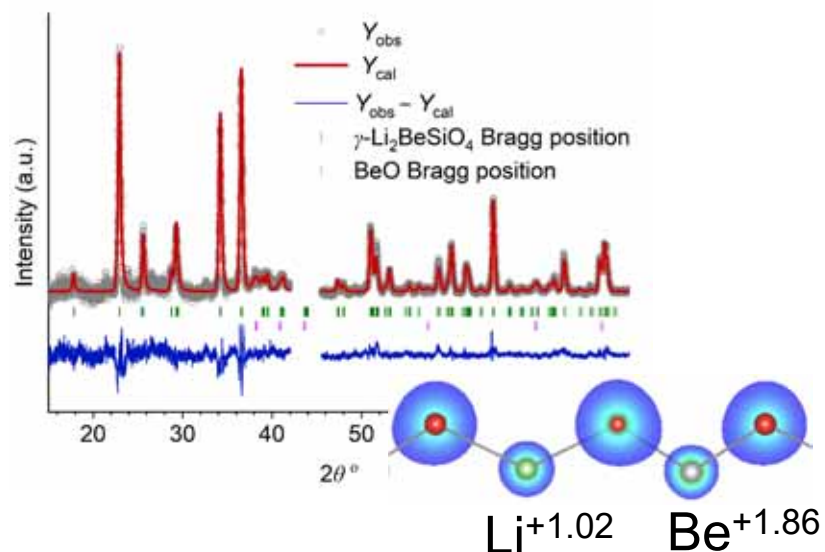
## Prediction by the ML-model



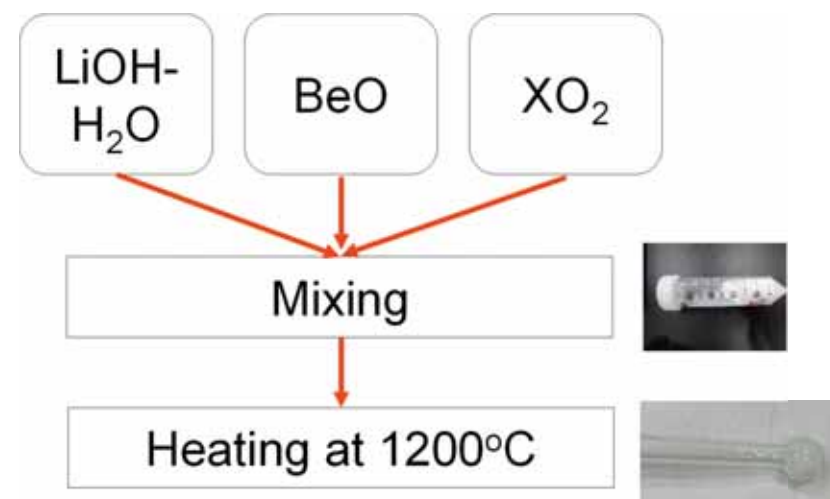
## First principles calculations



## Crystal structure analysis



## Synthesis

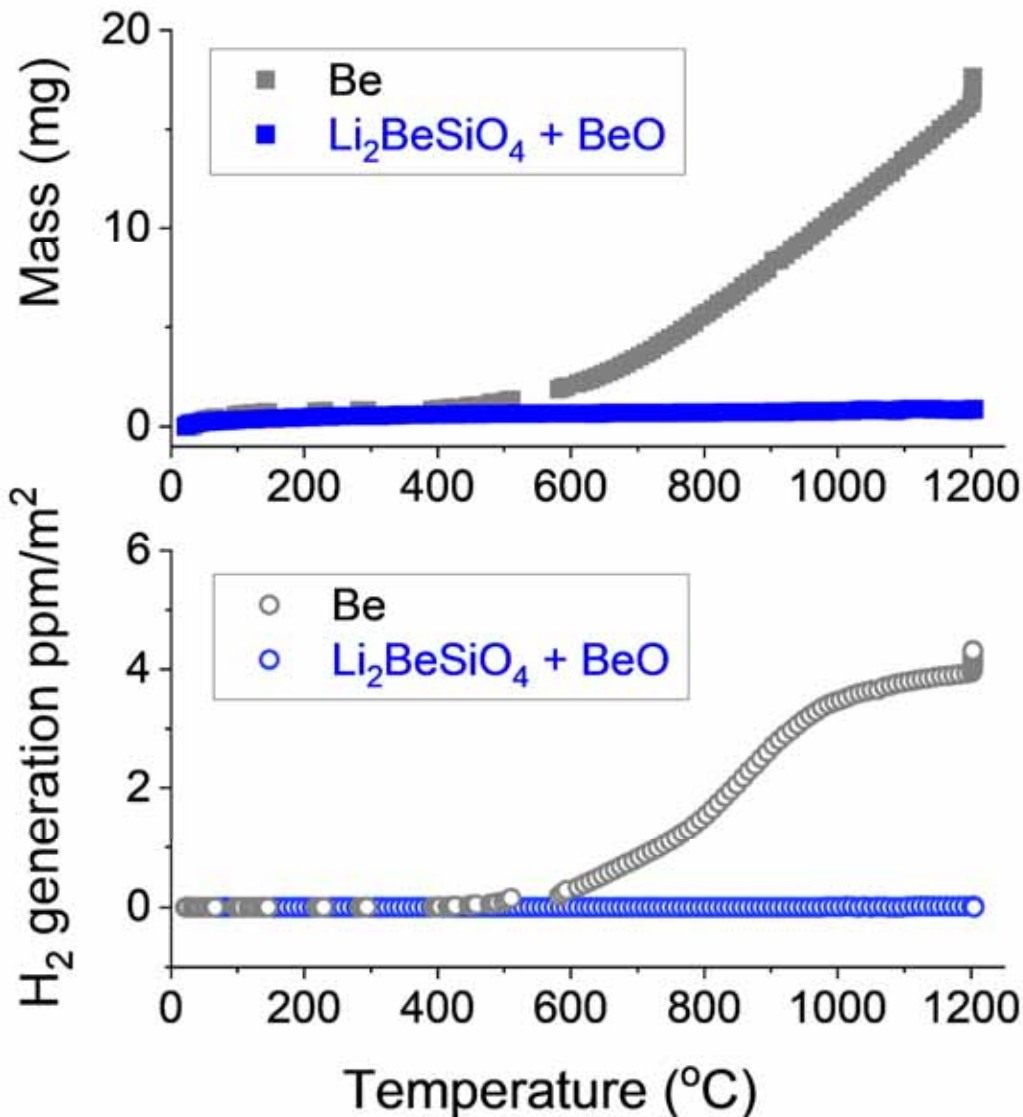


# 高温水蒸気反応性（事故耐性）

1. 事故耐性ハイブリッドセラミックスの創成

- 水蒸気中(Ar+1% H<sub>2</sub>O)で室温 → 1200°Cの加熱試験を実施

質量  
変化



水素  
発生

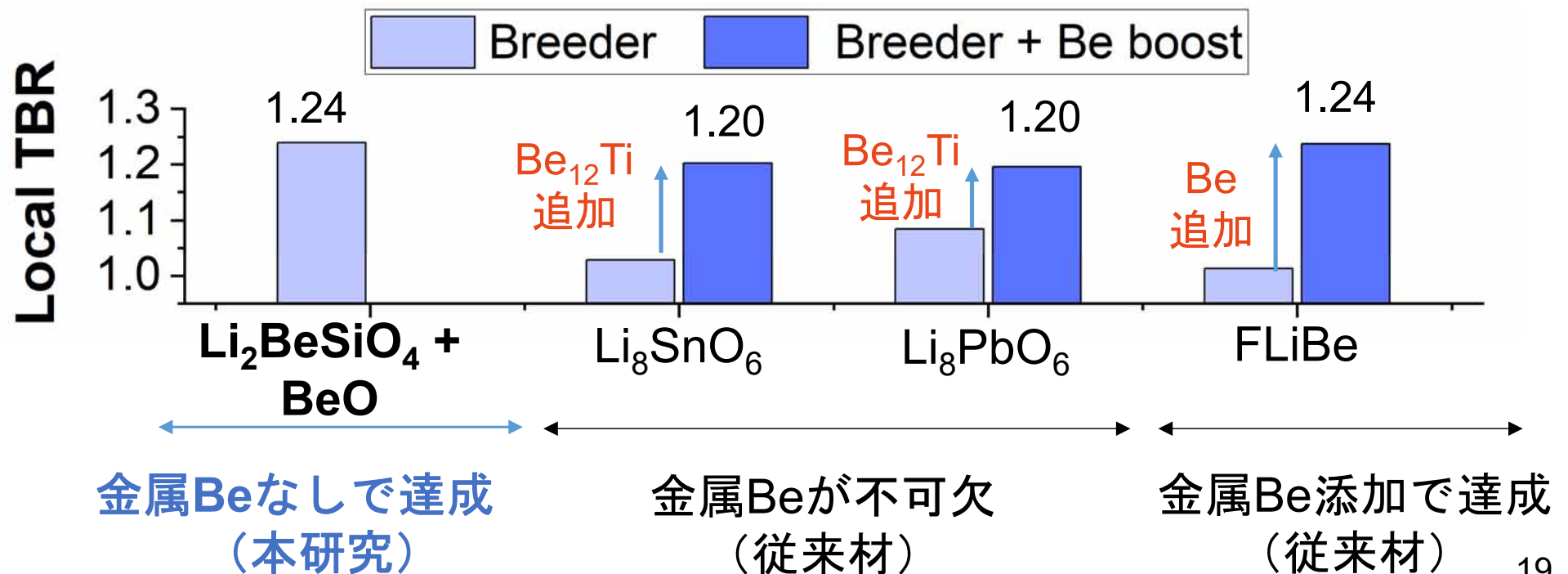
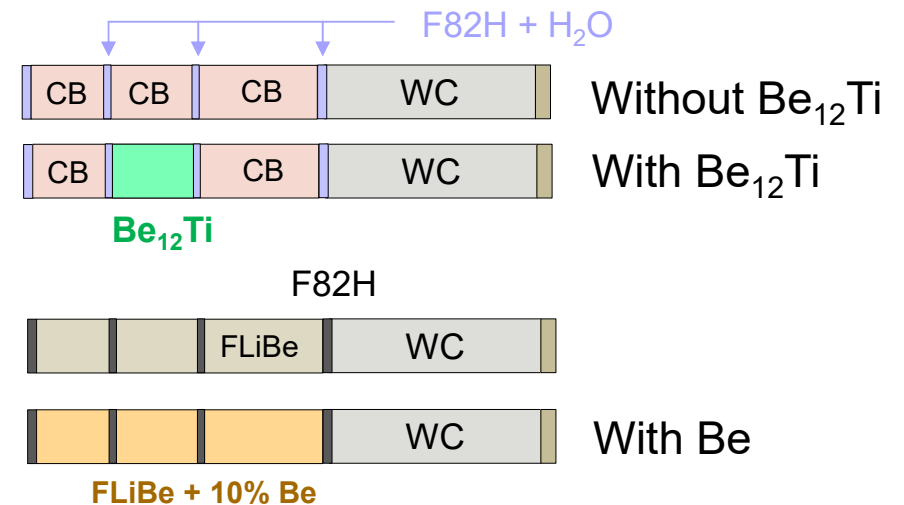
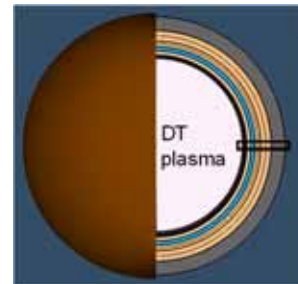
酸化に伴う質量増加  
とH<sub>2</sub>発生 (>400°C)

殆どH<sub>2</sub>が発生しない

# 燃料生産性能の評価

1. 事故耐性ハイブリッドセラミックスの創成

- 1Dモデルによる中性子輸送計算
- ブランケットのカバー率85%では Local TBR = 1.24が必要



### ■ 結果

- MIによる材料探索→合成→特性試験を実施
- 高温水蒸気環境で $H_2$ 発生をほぼゼロに
- 固有の安全性を持つ新しいブランケット設計が可能

### ■ 次年度計画

- アイダホ国立研究所（米国）と共同で中性子照射試験と三重水素放出試験を実施予定（LDRDプログラム）

### ■ アウトプット

- K. Mukai, T. Hwang, J.H. Kim, SOFT 2024 口頭発表
- K. Mukai, M. Kusaba ICACC 2025 招待講演
- 論文受理（2025年4月）

K. Mukai, T. Hwan, M. Kusaba,  
J.H. Kim *Mater. Des.* 2025

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤B  
（23H01156）のもと実施されました





# 超高流速協奏材料ユニット



向井啓祐

2014–2017年  
2017–2023年  
2023年10月–

Karlsruhe Institute Technology  
京都大学エネルギー理工学研究所  
核融合科学研究所

## Contents

### 1. 事故耐性ハイブリッドセラミックスの創成

・ 科研費基盤B 代表 2023-2026年



### 2. 軽元素分析技術と化学分野への応用





# 低Z材料のミクロ分析技術

2. 軽元素分析技術と化学分野への応用

- 軽元素材の電子構造解析

- リチウム金属/酸化物の化学状態分析

- K. Mukai, R. Kasada *et al.* *J. Phys. Chem.* 2020

- ベリリウム金属間化合物の電子構造解析と電子的記述子の探索

- K. Mukai, R. Kasada *et al.* *ACS Appl. Energy Mater.* 2019

- K. Mukai, R. Kasada *et al.* *Acta Mater.* 2022

- Li空気電池研究への展開

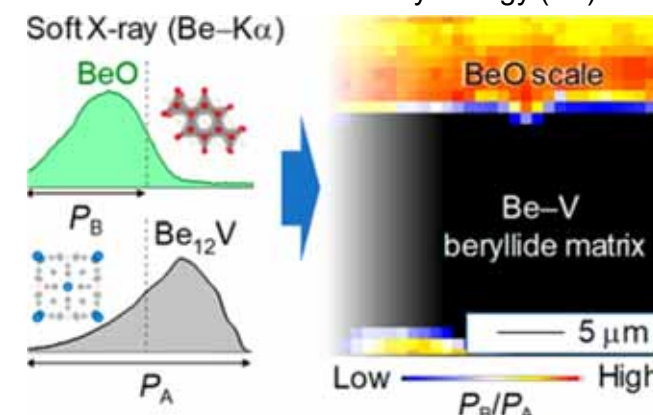
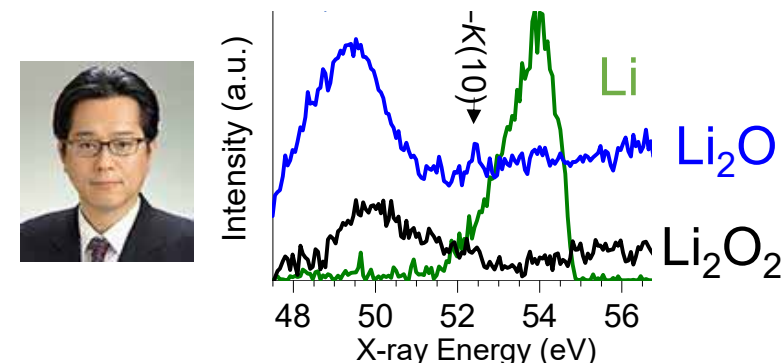
- JST GteX チーム型研究

- 阪大, 東大, 東北大, 北大, 神大, 名大, NIMSほか

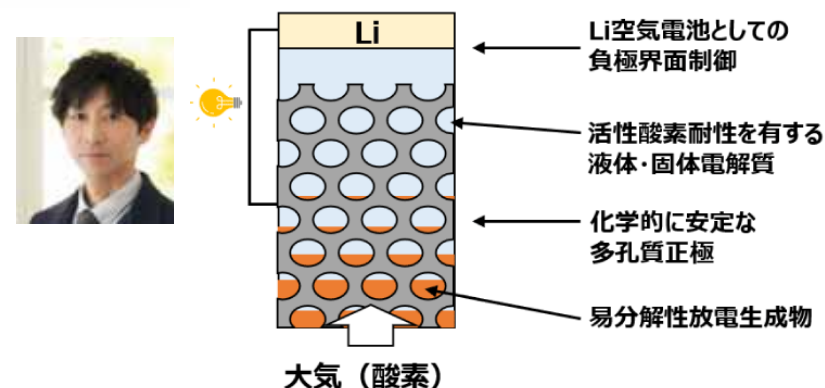
- TL: 中西周次 (阪大)

- 理論分析Gr. PI

- 2024年10月スタート



**GteX** 革新的GX技術創出事業



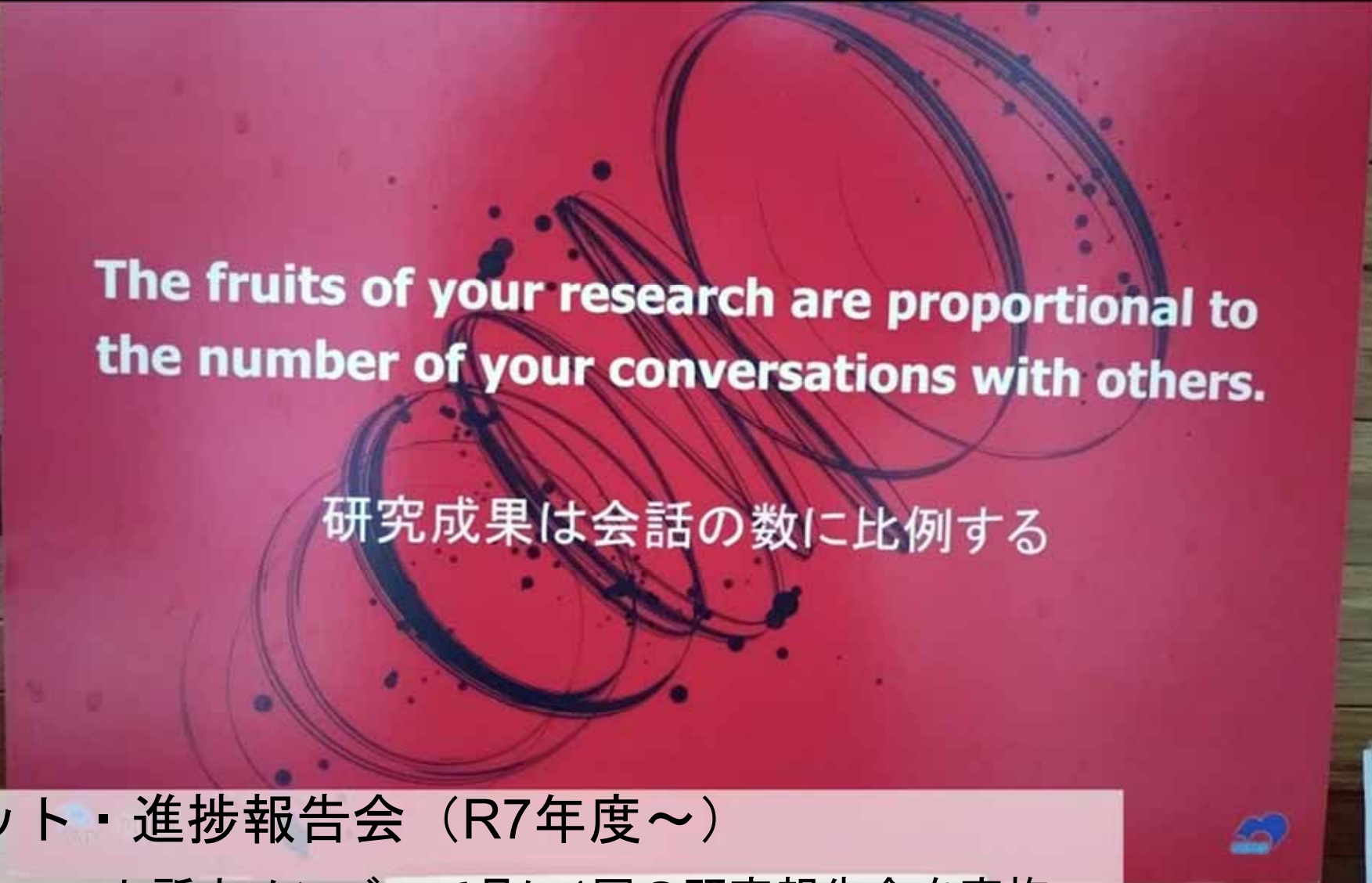
# サマリー & 次年度計画

| Piece                                    | Body  |       |       |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                          | 1. 照射 | 2. 分析 | 3. MI |
| 長坂琢也: 核融合炉材料の微小試験規格・基準策定に向けた国際協力         | ✓     | ✓     |       |
| 田中照也: エネルギー粒子照射下の非平衡状態で観測されるセラミックス電気絶縁劣化 | ✓     |       | ✓     |
| 小林真: 半導体材料の放射線検出器応用                      | ✓     |       |       |
| 能登裕之: 過酷環境材料のための金属加工学研究                  |       | ✓     |       |
| 高山定次: マイクロ波の非熱的効果の検証                     |       | ✓     |       |
| 申晶潔: 高純度バナジウム合金V-Cr-xTiの照射効果             | ✓     |       |       |
| 向井啓祐: 事故耐性ハイブリッドセラミックス                   | ✓     |       | ✓     |
| 橋本直幸 (北大・客員)                             | ✓     |       | ✓     |
| 原嶋庸介 (NAIST・客員)                          |       |       | ✓     |

✓ 2024年度

✓ 2025年度～ 実施予定

# 新しい取り組み



The fruits of your research are proportional to  
the number of your conversations with others.

研究成果は会話の数に比例する

## ユニット・進捗報告会（R7年度～）

- ユニット所内メンバーで月に1回の研究報告会を実施

ありがとうございました