

2025年度成果報告会

超高流束協奏材料ユニット 取り組み・成果概要

2025年度 ユニット長
田中 照也

◆ 取り組み・成果概要	田中照也（ユニット長）	15分
◆ 研究成果トピックス	小林真	20分
◆ 研究基盤、体制の整備	田中照也（戦略会議議長）	10分
◆ 総合討論		15分

ユニット研究テーマの焦点

ユニット設立報告会資料

- 核融合を含む過酷環境の特徴
 - 温度・応力・濃度場急勾配と照射重畳
 - エネルギーと物質粒子の超高流束
- 材料には非平衡状態がもたらされる
 - 準安定相
 - 自己組織化構造
- 研究の対象と戦略
 - 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
 - 「安定で」「耐える」材料から、「準安定をとらえ」「適応する」材料へのパラダイムシフト
 - 工学システムを最小限の材料で構成し、経済性と安全性を両立させる寿命の科学

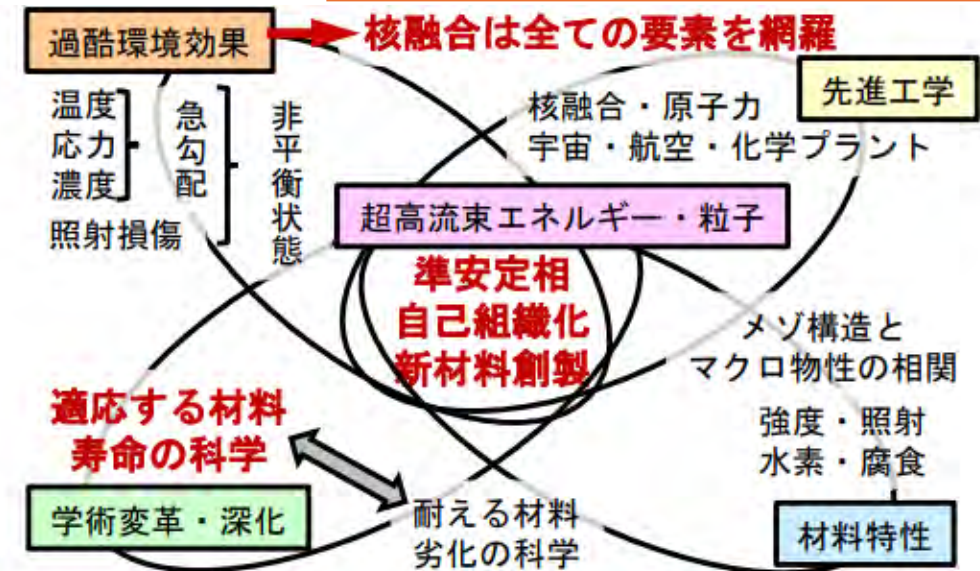


図 ユニットテーマの焦点



バナジウム合金のボイド超格子
H. Watanabe et al., JNM, 2002

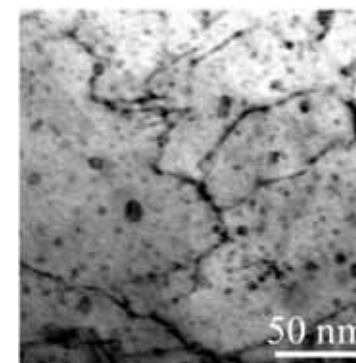
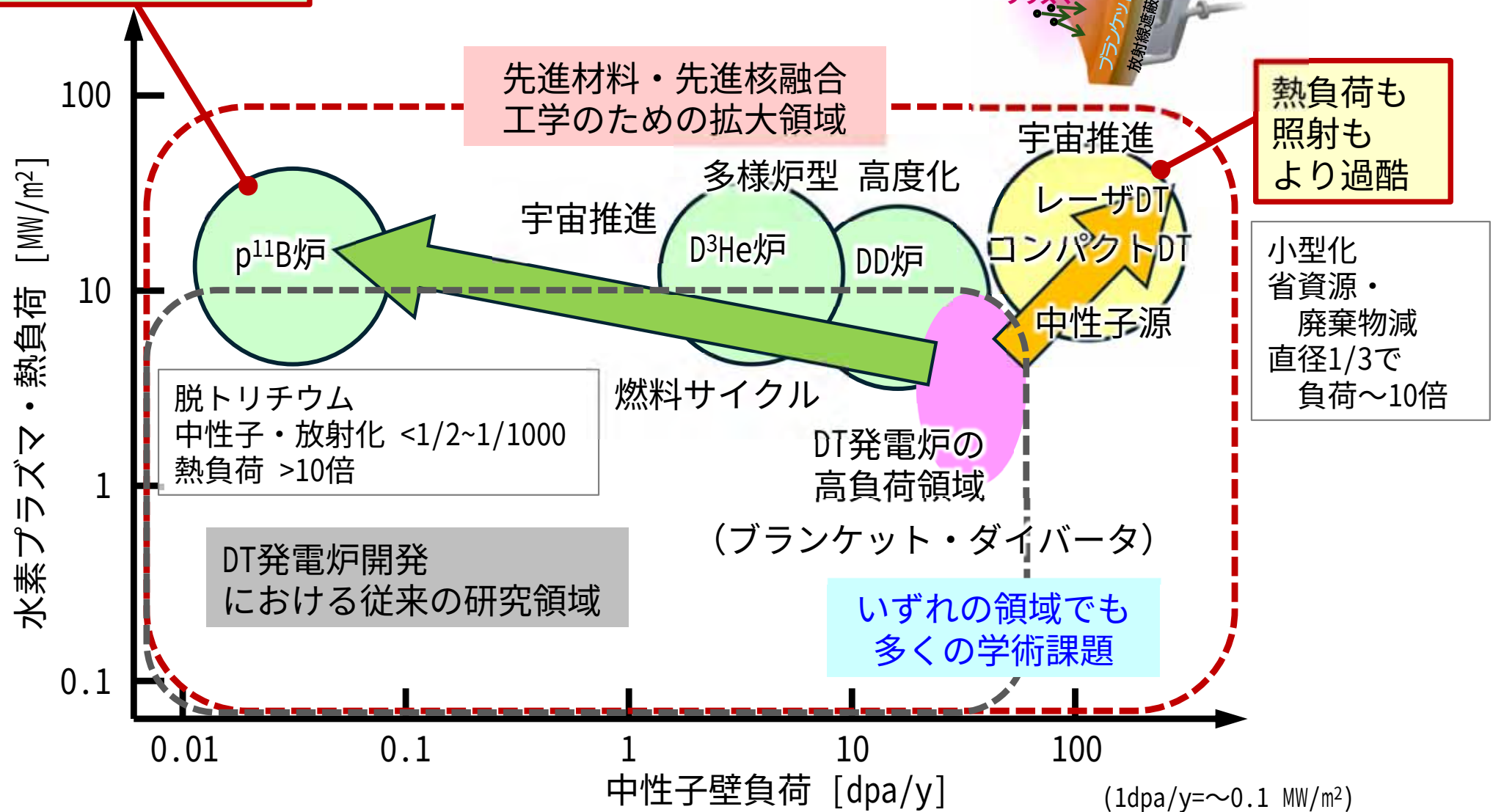


図 12CrODS鋼の微細組織(酸化物ナノ粒子と転位)
J. Shen et al. Mat. Sci. Eng. A 673 (2016) 624-632.

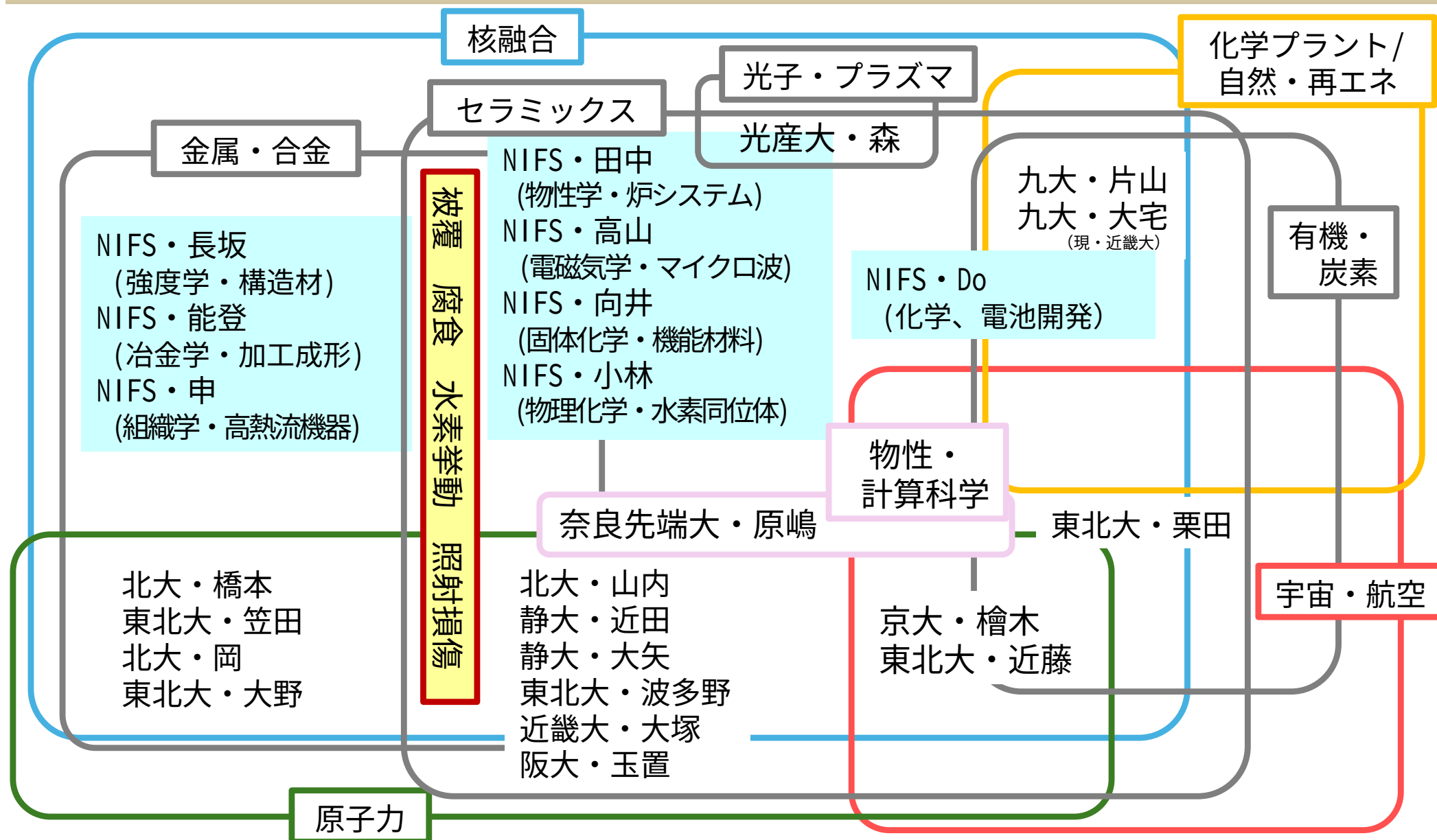
アカデミックプラン（研究領域）

中性子少だが表面
プラズマ照射負荷大



- ・ 超高流束に拡大した物理環境下
 - ・ 広い時間・空間を扱う包括的材料モデル
- 先進核融合炉への適用を可能に

ユニット構成員の研究領域 (2025年度)

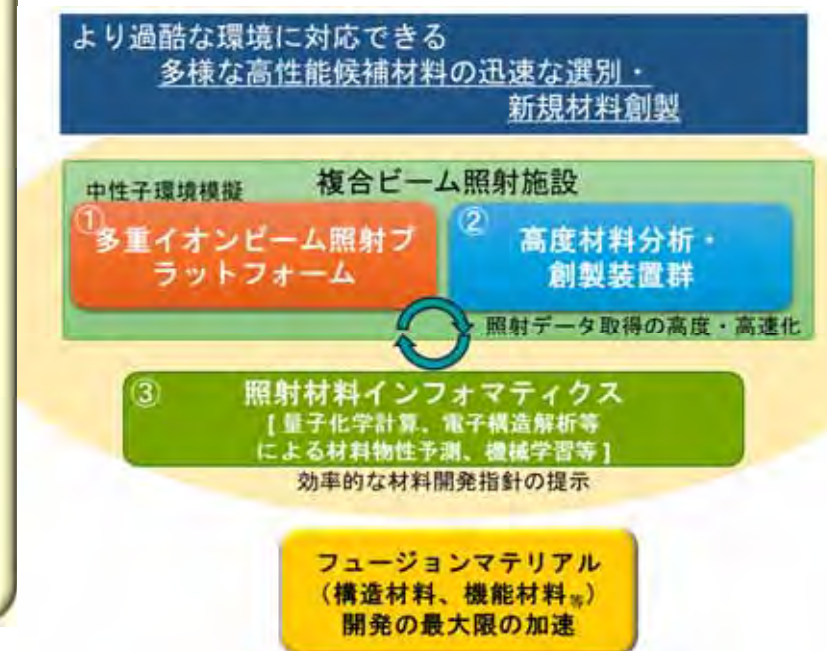


◆ ユニット研究戦略会議：2025年度、6回開催、2時間程度、平均参加人数：～15名

- 研究基盤構築や材料開発研究の加速に関する議論
- 日米科学技術協力事業等に関する情報交換

[ユニット全体としての活動]

- 2024年度に
 - 『①多重イオンビーム照射プラットフォーム』
 - 『②高度材料分析・創製装置群』
 - 『③照射材料インフォマティクス』の導入』を柱としたアカデミックプラン推進の方針提示。
- ➔ 2025年度、研究計画の策定、予算申請、体制作りを継続。
(研究基盤、体制の整備において進展報告)



[所内ユニット構成員の研究活動]

- ユニット化以前より推進する材料開発研究
- アカデミックプランに沿った研究の推進
 - ✓ イオンビーム照射装置を用いた非平衡状態での材料挙動解明、材料探索に関する研究の推進。
 - ✓ 理論計算・機械学習と実験が連携した研究活動の拡充。

次のスライドから、ユニット構成研究者の成果

- 純Vの段階で核融合炉で使用後10年以内に材料の再生作業が可能 (<10 mSv/h) な純度レベルを達成
- 従来のV-4Cr-4Tiに加え、より低放射化なV-10Cr-1Ti等の組成の合金を試作中

表 放射化で長半減期の核種を生じる不純物の濃度 (mass ppm)

	Co	Cu	Fe	Nb	Ni	Mo
10年以内再利用	≤ 0.1	≤ 0.3	≤ 3	≤ 1	≤ 0.1	≤ 10
NIFS-HEAT-2	0.7	2	49	0.8	7	24
本研究V-Z5	0.01	< 0.05	0.12	0.86	0.03	10

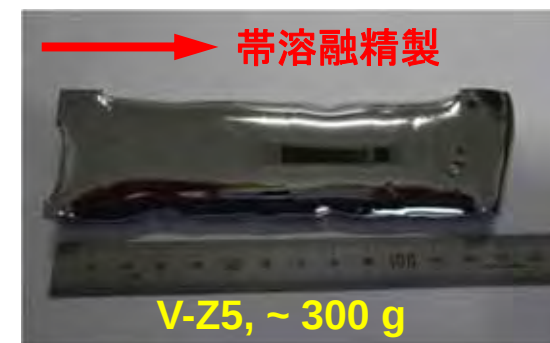


図 高精製金属バナジウム

- V固相-液相，液相-気相間での不純物輸送を解析

固-液の例

→ 溶融部 (液相) を移動

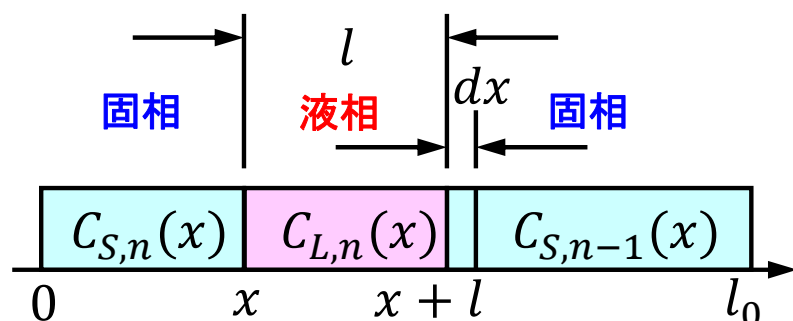


図 帯溶融精製モデル

液相に不純物を濃縮して除去

$$dC_{L,n}(x) = \frac{C_{S,n-1}(x+l)dx - C_{S,n}(x)dx}{l} \quad (1)$$

$$C_{S,n}(x) = kC_{L,n}(x) \quad (2)$$

$C_{S,n}$: 固相中不純物濃度, $C_{L,n}$: 液相中不純物濃度,
 k : 偏析係数 (固液分配係数) → 1未満で小さいほど除去に有利

- V中のCo, Niの k : 0.4~0.6 < Fe中: 0.7~0.9
- V合金からのCo, Ni除去は鉄鋼より容易

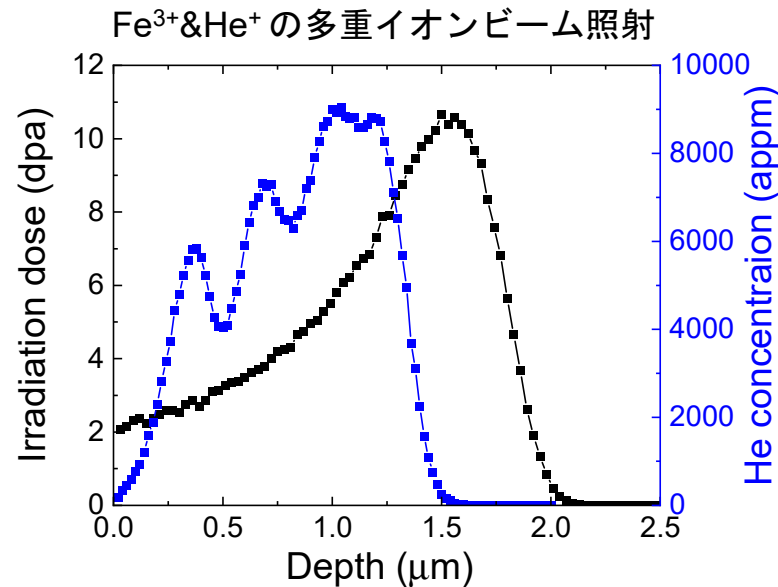


Fig. SRIM results show irradiation damage dose and helium concentration as a function of depth.

- 加工まま材と再結晶試料で、結晶粒の内部に同程度の大きさのヘリウム気泡が確認された。
- 結晶粒界に大きなヘリウム気泡が見られ、結晶粒界が優先核生成サイトを示している。
- 再結晶した試料は硬度がわずかに上昇している。

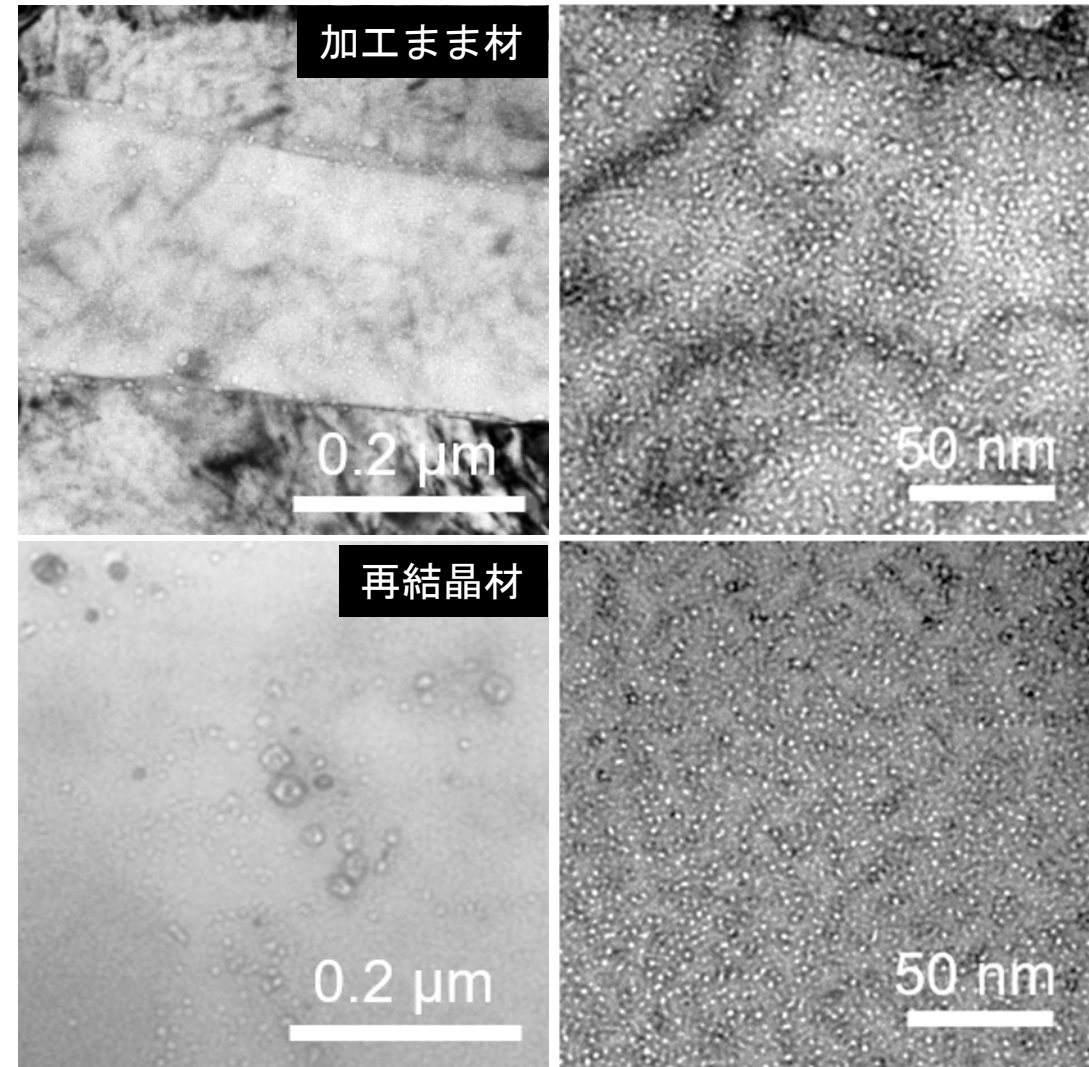
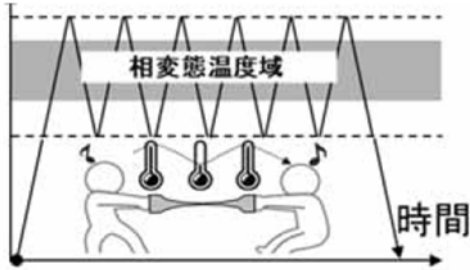


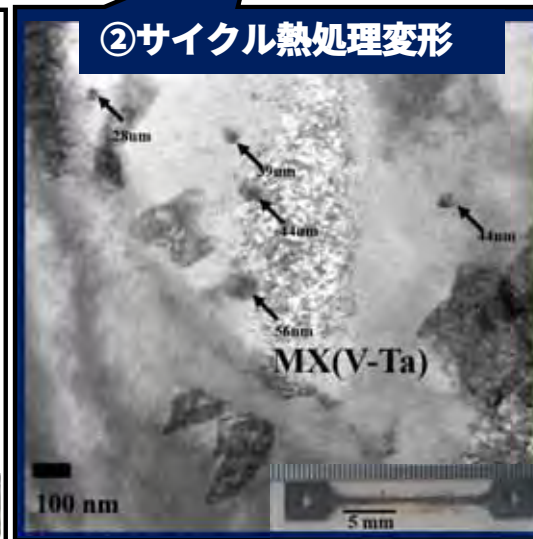
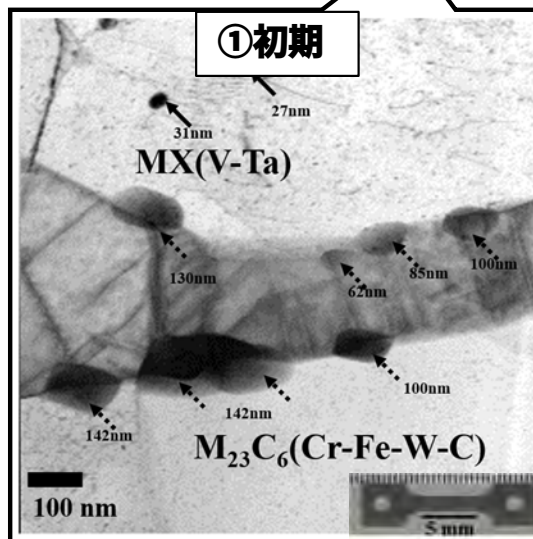
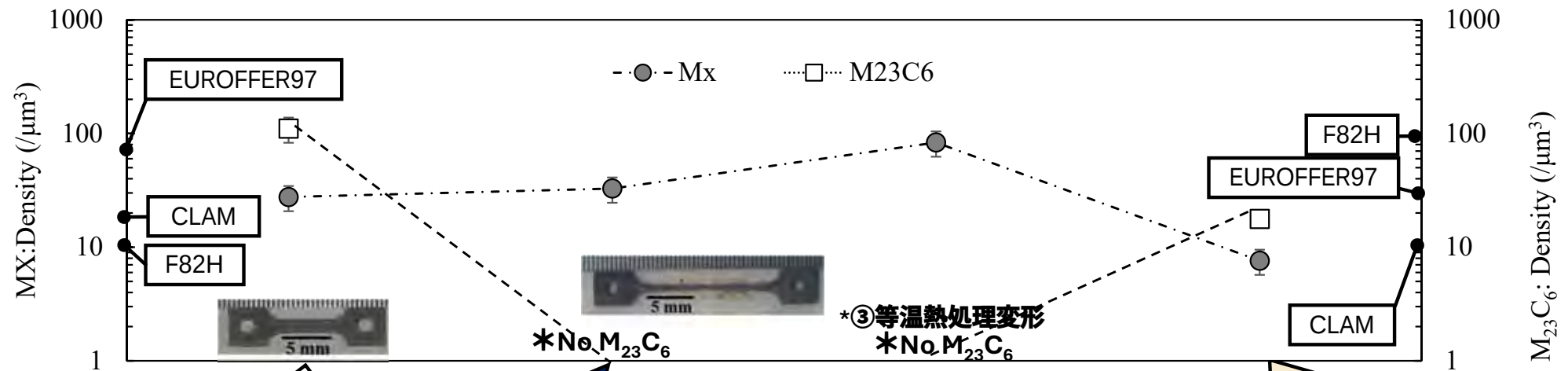
Fig. TEM images of as-fabricated and recrystallized 12Cr ODS steel after Fe^{3+} & He^+ irradiation at 973 K. (10.6 dpa)

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

能登 裕之



応用課題：相変態誘起巨視的変形を成形に応用しようとした場合、強化粒子($M_{23}C_6$, MX)のうち $M_{23}C_6$ が消失してしまう。



②→焼き戻し熱処理

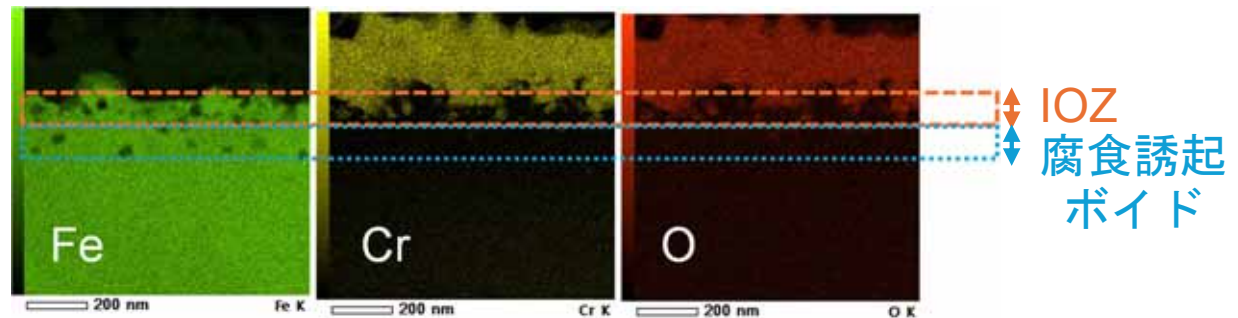
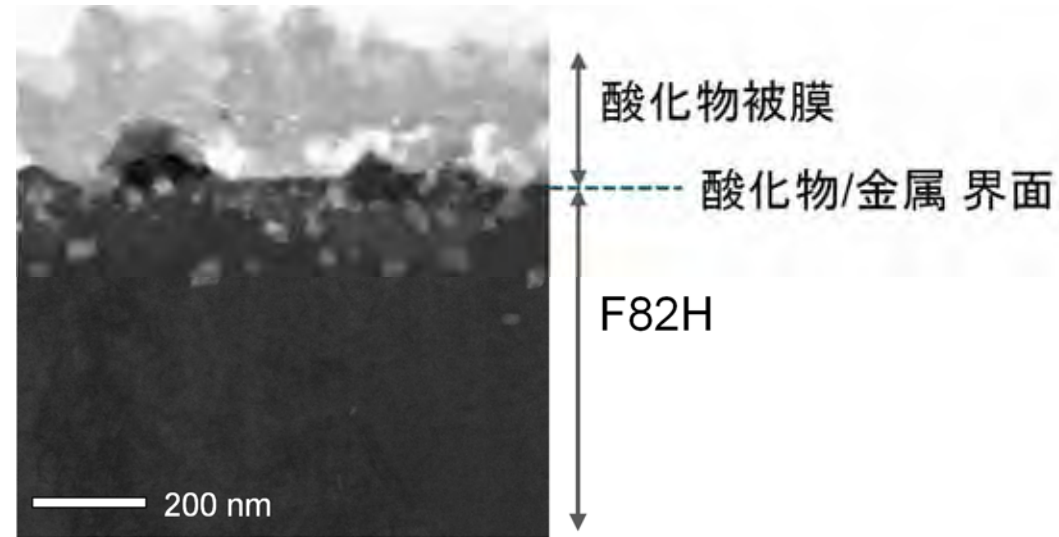
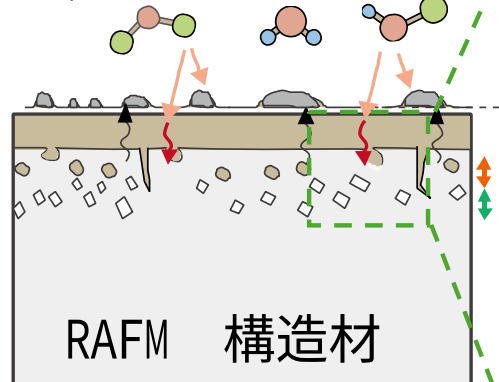
克服成果：低放射化フェライト鋼の“焼き戻し熱処理”のみを行うことにより再析出可能であることが明らかになった！！

(QST・原型炉共同研究)

向井 啓祐

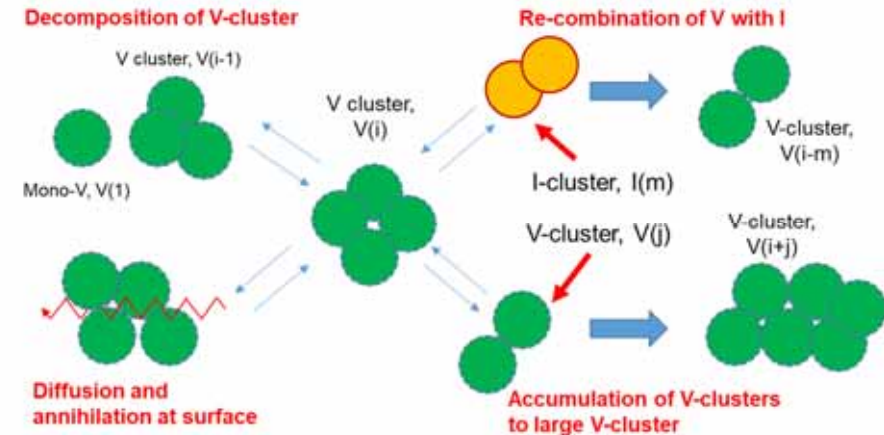
ブランケット材の共存性を調べるため、低放射化フェライトマルテンサイト (RAFM) 鋼の腐食試験とナノ分析を実施

増殖材から発生
する腐食性ガス
(LiOH等)



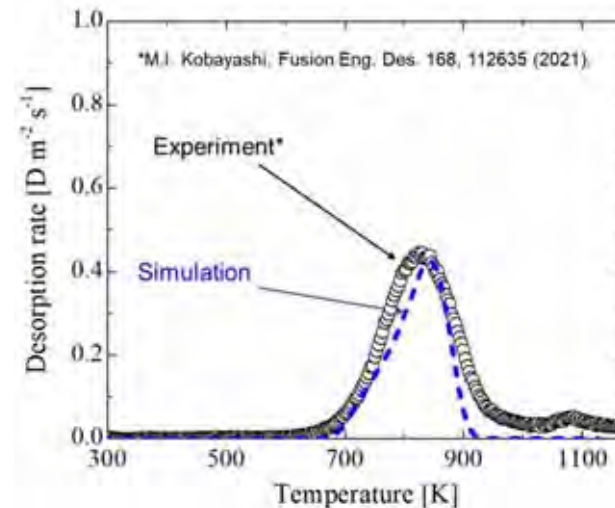
- 界面付近での腐食誘起ボイドと内部酸化層 (IOZ) の形成
 - 腐食のモデル化へ

タングステンをモデル材料とし、照射欠陥の生成・蓄積挙動とトリチウム捕獲現象のモデルを開発し、両者の統合を行う。

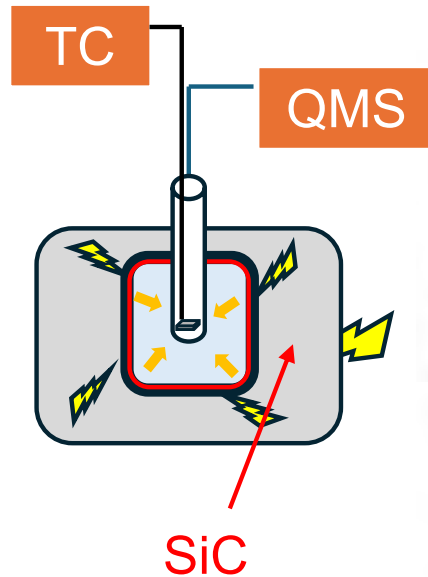


照射欠陥の相互作用モデル

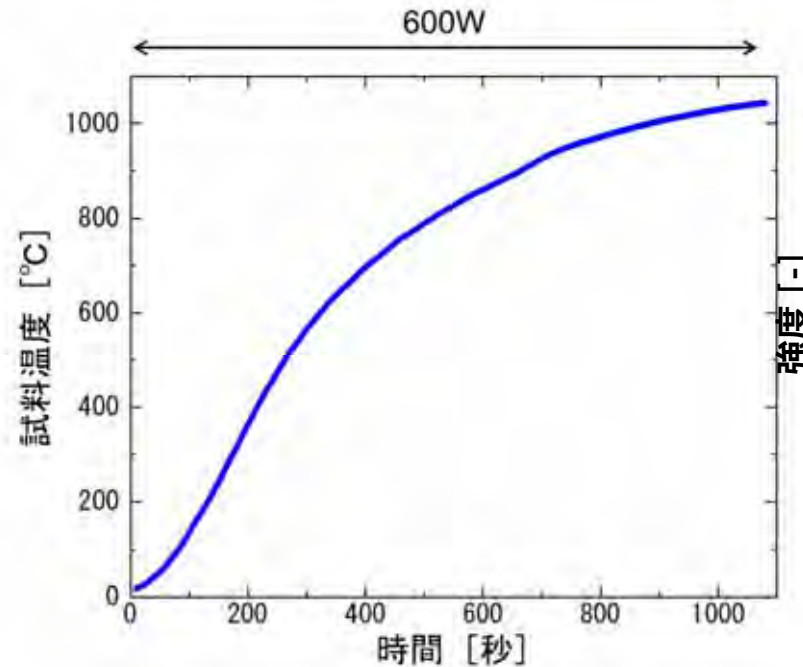
- イオン照射実験データを用いたベンチマーキングを実施。
- データ同化を適用しモデルの予測精度を向上させる。
- 中性子照射実験データの解析に挑戦。



6.4 MeV Fe照射
(3 dpa)し重水素
ガス曝露(873 K)
したタングステ
ンに対する昇温
脱離実験の結果
と予測

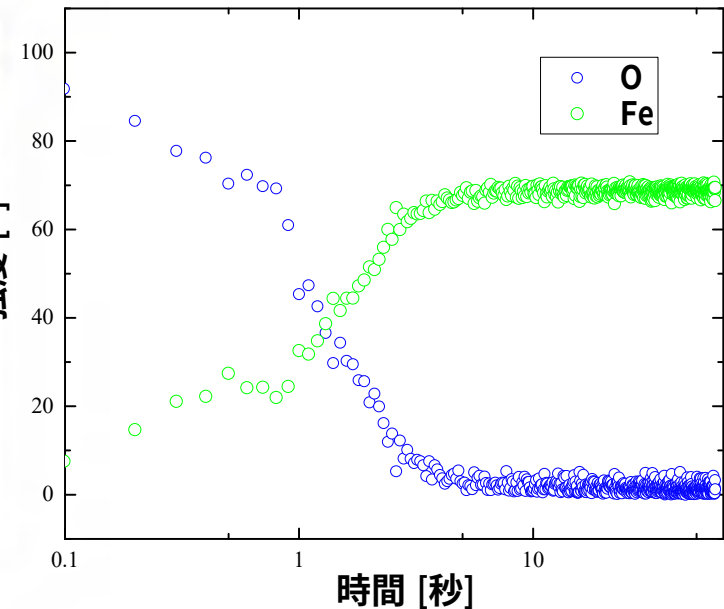


真空下での急速加熱実験



急速加熱した際の試料温度の変化

大気下での加熱実験後の試料



マイクロ波加熱試料の元素深さ分布
(横軸の時間は表面からの深さに対応)

急速加熱実験：10分程度のマイクロ波照射で800°Cに到達

➤ 簡易的なトリチウム除染

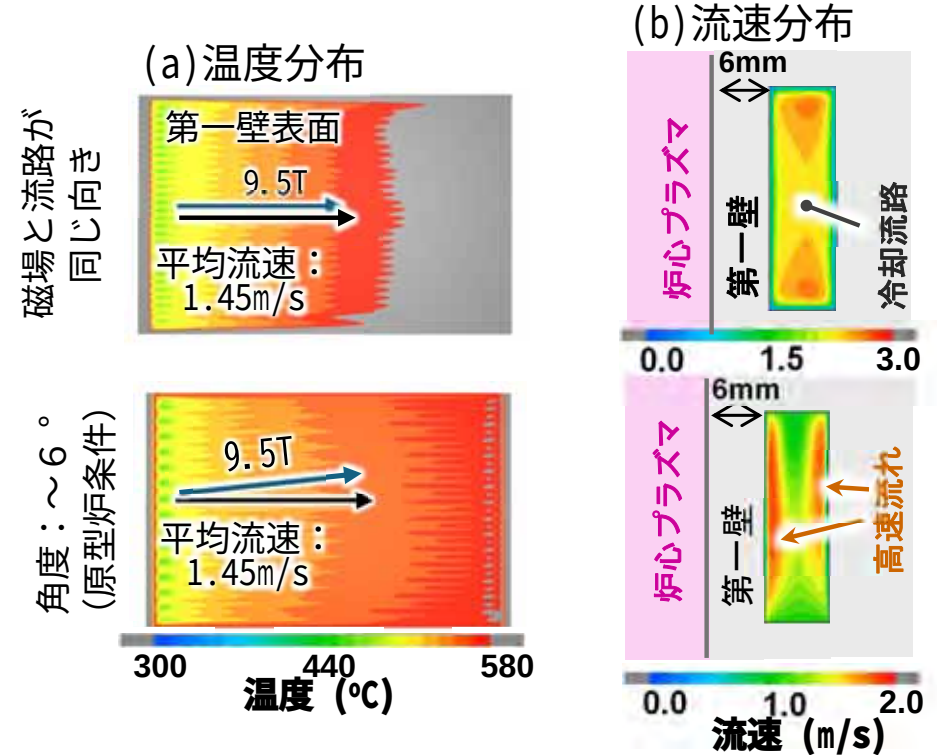
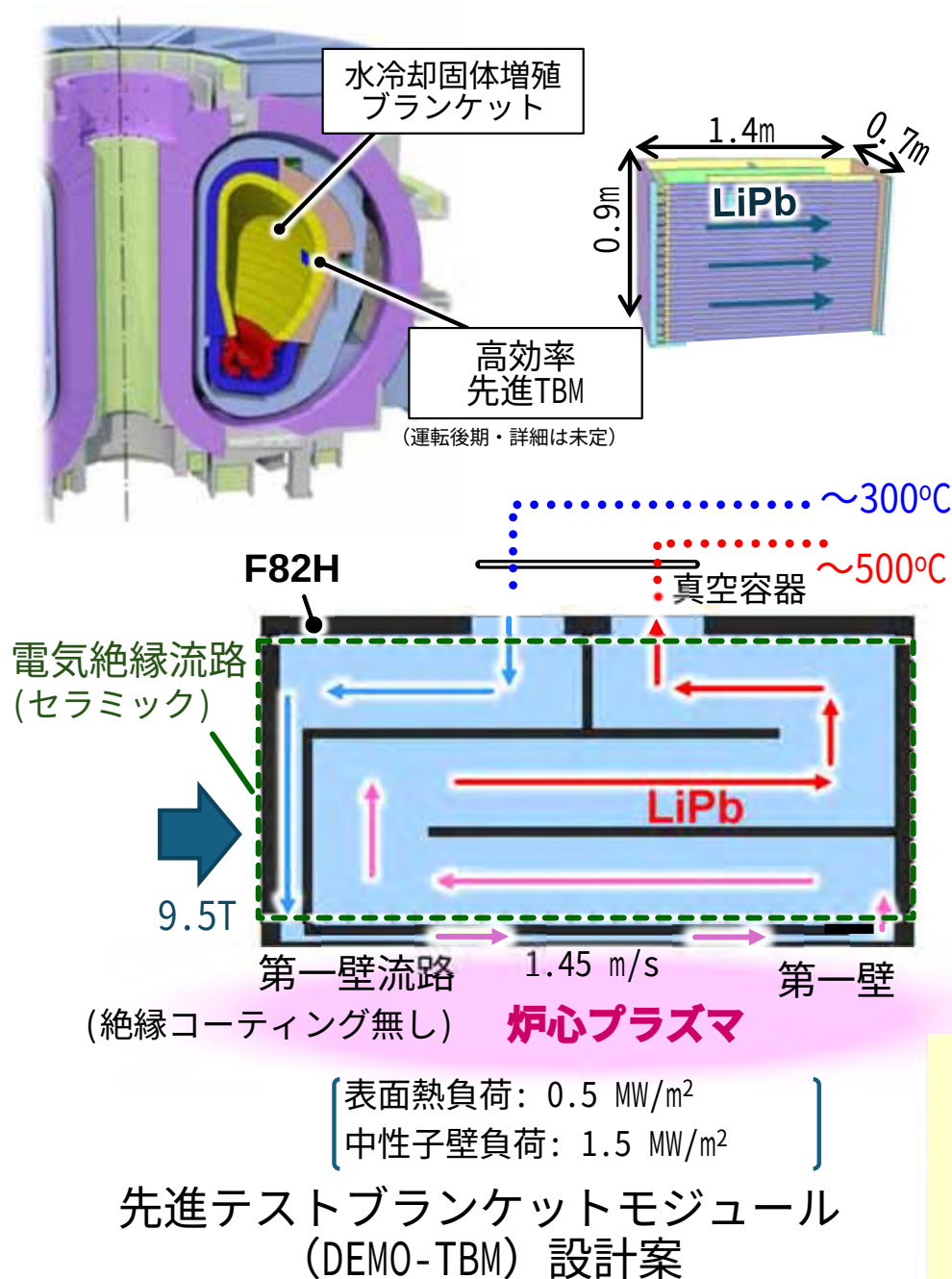
大気での輻射加熱実験：系を変えずに雰囲気ガスを変え、酸化膜生成。

➤ 除染後の機器表面を酸化膜で覆い、長期間保管中に僅かに放出する可能性があるトリチウムを閉じ込める。

JA-DEMO用 先進テストブランケットモジュールの設計研究

(QST・原型炉共同研究)

田中 照也



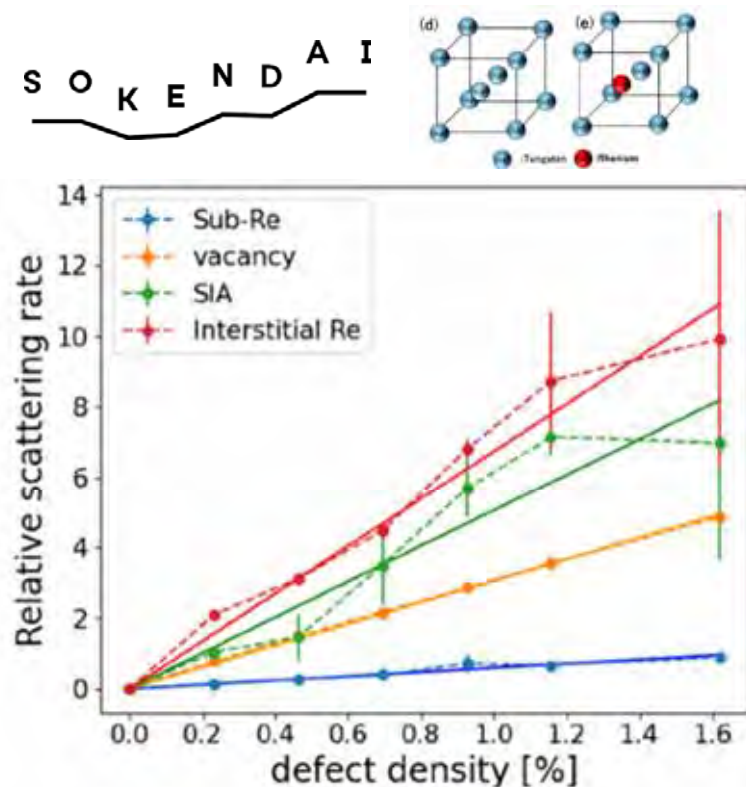
- 10T、角度 6 ° :
電磁ブレーキ効果 (MHD圧力損失) の低減と冷却能力の向上、を両立
- 最も単純なモジュール構造の成立性を提示

- 開発新材料・技術の適用先 (表面酸化FeCrAl合金等)
- 材料照射・腐食実験等で模擬すべき環境条件提供
(モジュール内の中性子照射量、温度、流速、電位、電流等の分布)

「タングステン中の点欠陥及び Re添加が熱伝導率に与える影響」

総研大3年生 金森大悟

(指導教員：向井啓祐)



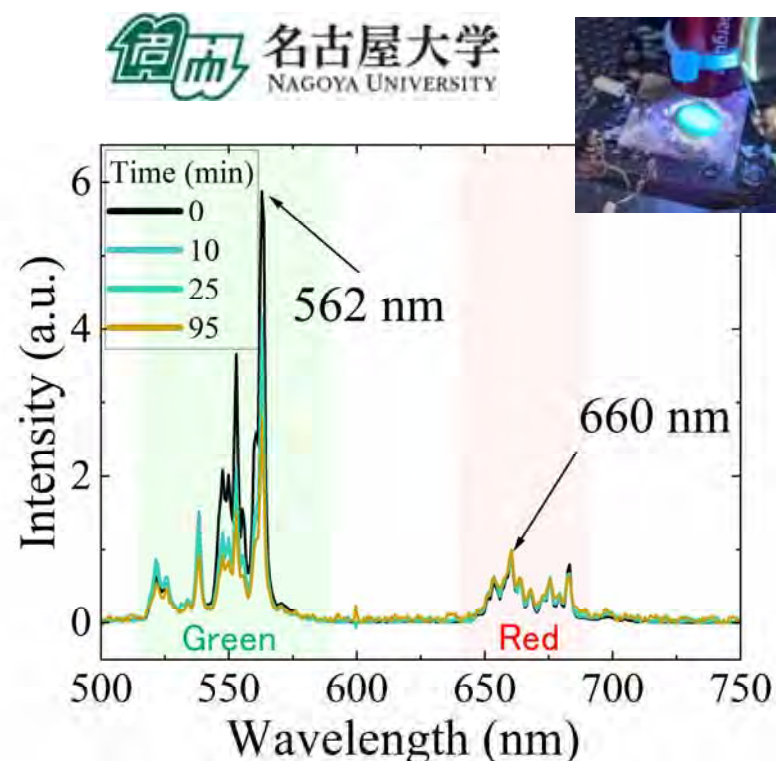
分子動力学法(LAMMPS)により熱伝導率低下を評価し、欠陥の寄与を明らかにした。

論文：D. Kanamori et al., *Fusion Eng. Des.* 2025.

「Er₂O₃の発光特性を利用した 核融合炉内環境モニタリング システムの研究」

名大院修士2年 小倉結季

(指導教員：田中照也)



イオンビーム照射損傷に伴う発光スペクトル変化

ErドーパY₂O₃発光スペクトルの温度、照射損傷量、磁場強度による変化を観測。

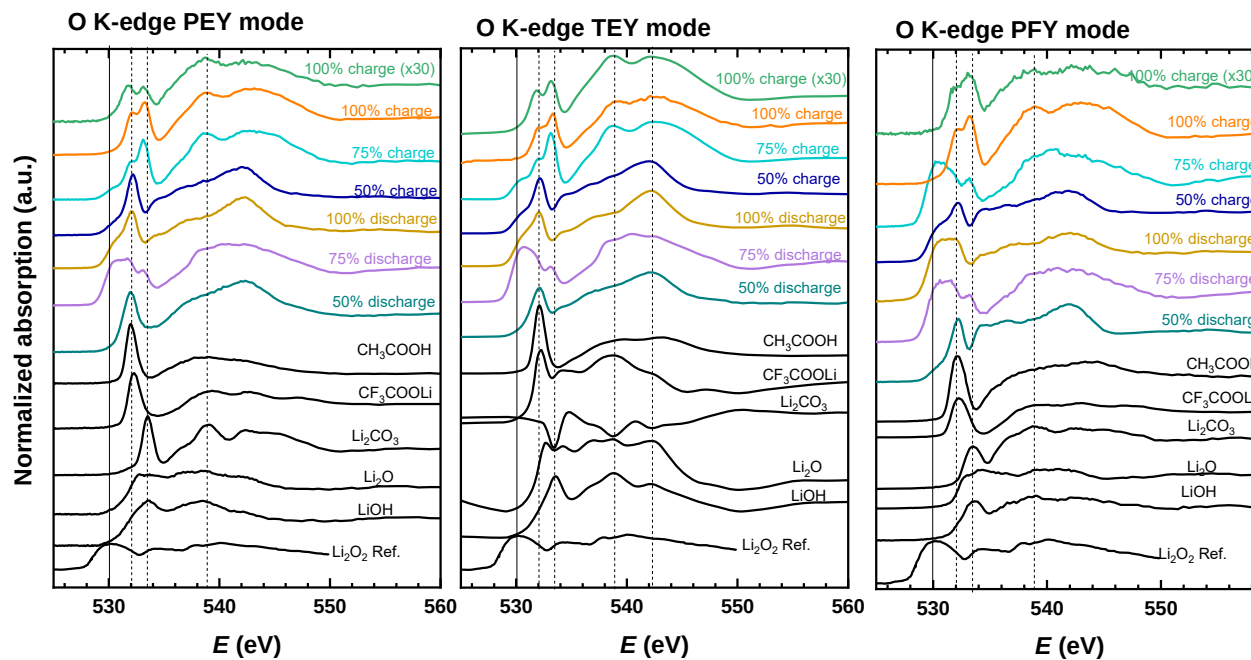
名大、総合エネルギー工学専攻、修士論文、2025年3月

リチウム空気電池の放電生成物および副生成物の構造解析

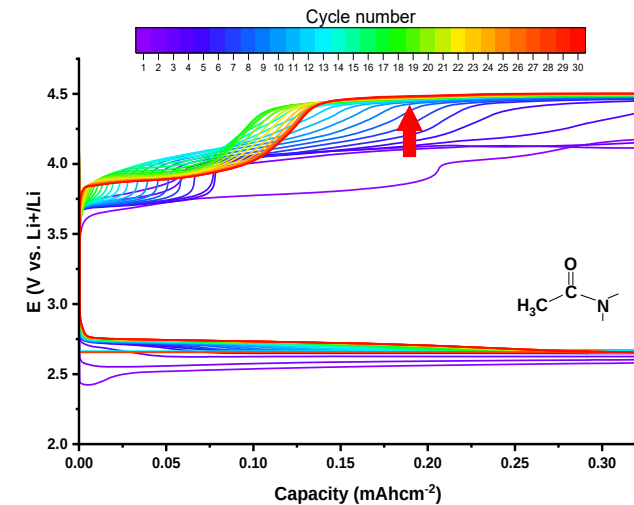
(分野外連携、革新的GX技術創出事業 (GteX))

Do Duy Khien

- Li_2O_2 が放電時に生成、充電時に分解。
- 正極上に絶縁性の副生成物が形成されると充電電圧が上昇し、サイクル特性が劣化することを明らかにした。

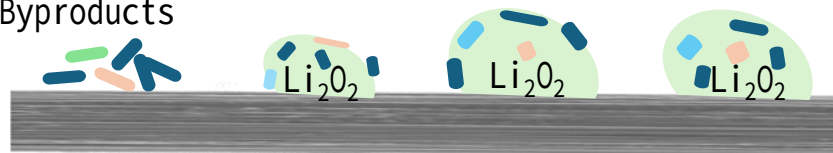


DMA電解液および参照試料のO K吸収端XANESスペクトル



30サイクル後の副生成物生成による充電電圧の上昇

Byproducts



絶縁性副生成物が Li_2O_2 粒子および正極表面を覆う様子

2025年度の研究成果

- ◆ ブランケット・ダイバータ用の多彩な構造材、機能材を対象に、各研究者の専門分野の開発研究を推進。



2025年度論文数
主著論文：6報、共著論文：12報

2025年度特許数：6

アカデミックプランに沿った研究

- ◆ 多重イオンビーム照射による際立った非平衡状態での材料挙動解明、材料探索へ発展させる研究推進
 - [1] 酸化物分散強化(ODS)鋼：**ヘリウムバブルの照射下挙動、材料強度特性との相関**を評価。
 - [2] V合金：中性子照射で確認されている**照射劣化（スエリング、照射硬化）の自己回復を再現するための照射実験**を継続。
 - [3] Y₂O₃セラミック被覆：**照射＋高温＋電界印加条件で生じる電気絶縁特性劣化**の実験データ蓄積。
- ◆ 材料インフォマティクスの立ち上げ、発展のための理論計算－実験連携研究
 - [1] タングステン材料：**材料科学計算(分子動力学法)**による欠陥の熱伝導率低下への寄与評価。
 - [2] タングステン材料：**照射欠陥**の生成・蓄積挙動及び**トリチウム捕獲現象モデルの統合と実験データとのデータ同化**による高精度トリチウム蓄積予測

民間企業との共同研究

核融合スタートアップ企業との共同研究を1件、民間企業との共同研究を1件実施。