

2024年度成果報告会

超高流束協奏材料ユニット 研究戦略

研究戦略会議議長
田中 照也

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

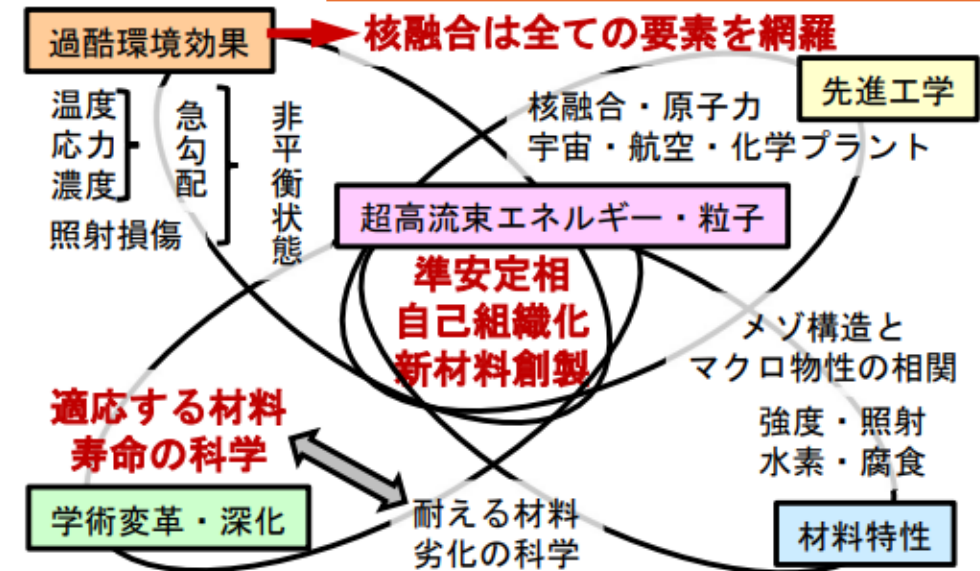
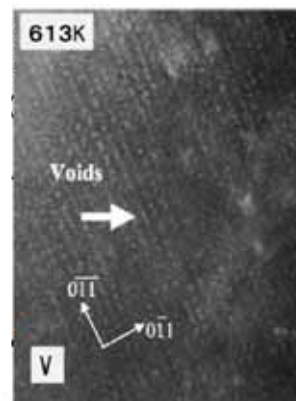


図 ユニットテーマの焦点



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

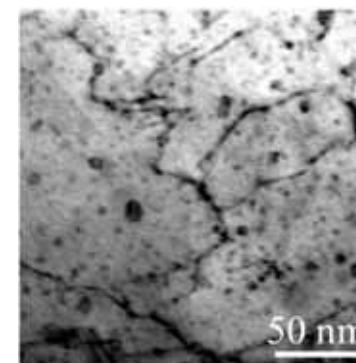
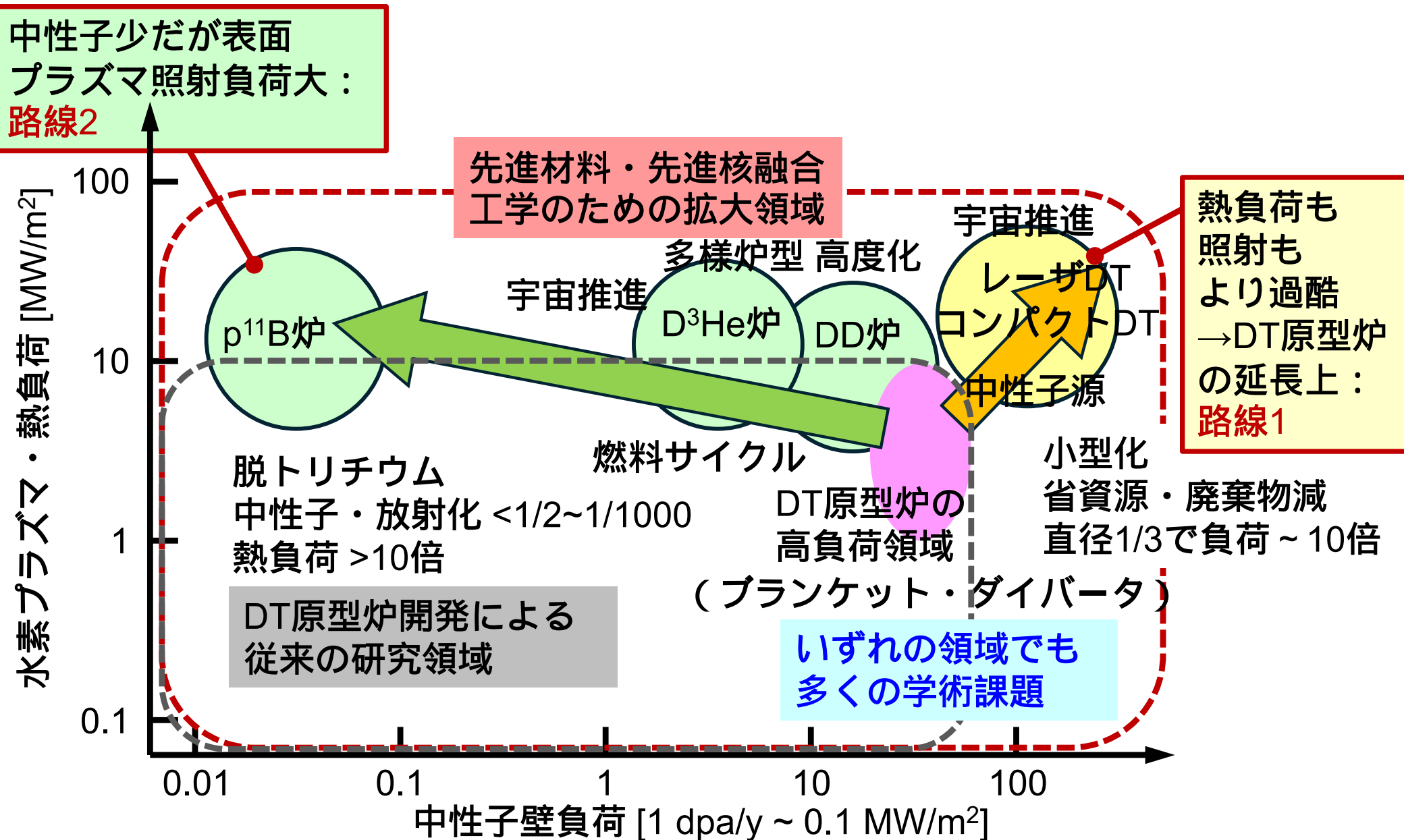


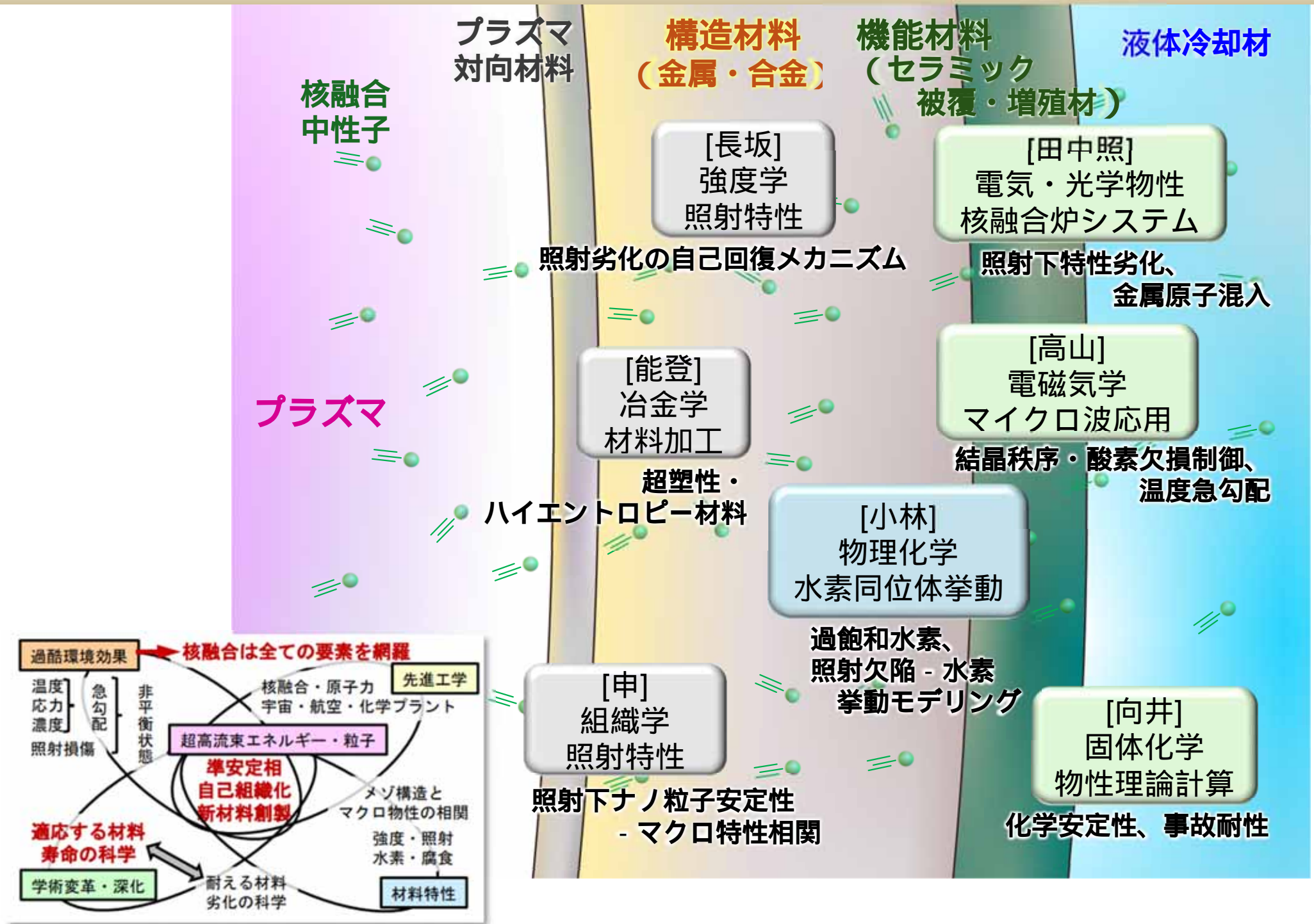
図 12CrODS鋼の微細組織(酸化ナノ粒子と転位)
J. Shen et al. Mat. Sci. Eng. A 673 (2016) 624-632.

アカデミックプラン（研究領域）

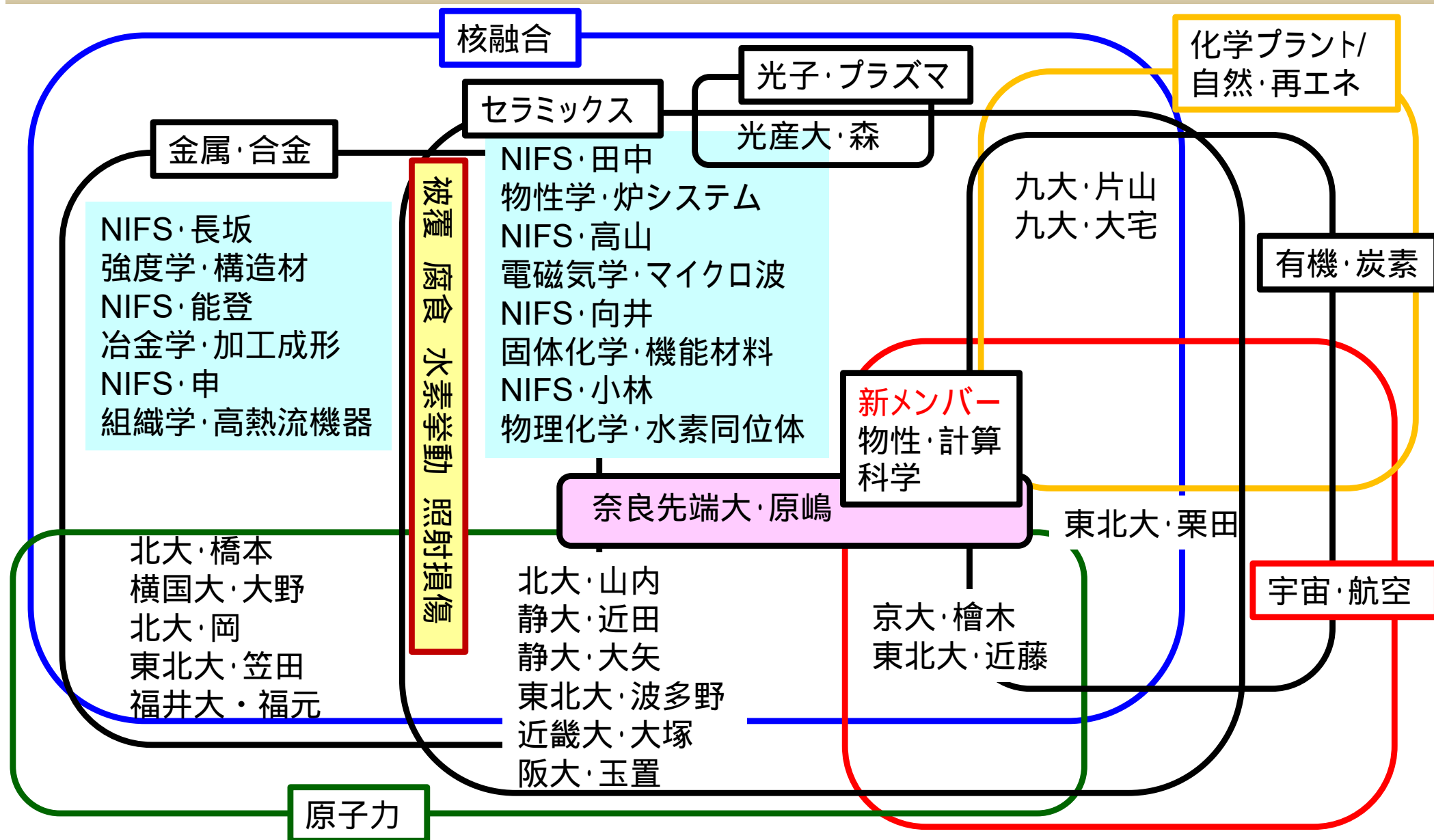


- ・ 超高流束に拡大した物理環境下
 - ・ 広い時間・空間を扱う包括的材料モデル
- 先進核融合炉への適用を可能に

所内メンバーがカバーする領域



ユニット構成員の研究領域 (2024-2025年度)



◆ **ユニット研究戦略会議**：2024年度、9回開催、2時間程度、平均参加人数：~15名

- ユニットの研究基盤構築や材料開発研究の加速に関する議論
- MS10への応募、日米科学技術協力事業等に関する情報交換

成果のBody

[ユニット全体としての活動]

- 研究基盤 『 **多重イオンビーム照射プラットフォーム** 』、 『 **高度材料分析・創製装置群** 』の導入及び 『 **照射材料インフォマティクスの導入** 』 の3つを柱としたアカデミックプラン推進の方針を提示。
 - ✓ 具体的な研究計画の策定、予算申請、体制作り。

[所内ユニット構成員の研究活動]

- アカデミックプランに沿った研究の立ち上げ
 - ✓ 主に所外の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。
 - ✓ 理論計算・機械学習と実験が連携した研究。

研究基盤と環境の整備計画



基盤技術開発実験棟

●先進炉材料研究開発

- 中性子照射試験を補完し、核融合炉材料開発を加速するために必要となる、複数の加速器を用いて核融合炉の中性子照射環境を模擬する装置を新規整備

●周辺プラズマ・PWI研究

- 核融合炉周辺プラズマ・ダイバータにおける複雑な実機環境の要素を大型の直線プラズマ装置を用いて模擬する装置の整備

●中性粒子ビーム研究開発

- NBIテストスタンドを整備し、ITER-NB、原型炉用NBの開発の礎となる要素研究を実施

高温プラズマ実験棟

●磁場閉じ込め高温プラズマ実験

- コンパクトな核融合炉の実現するためには、プラズマの閉じ込め特性や突発的な不安定性を支配する『マイクロ集団現象』のメカニズムを解明することが必要
- 『マイクロ集団現象』の理解のために、高温プラズマのマイクロな状態を高精度で制御・操作し、世界最高の分解能で計測する実験システムを新規整備

材料研究・分析センター

●フュージョン・ナノ・プラットフォーム

- プラズマ対向材料の使用環境を支配するPWIを素過程から理解するために必要となる、ナノ構造解析を高分解能かつ高速で実施できるプラットフォームを新規整備

超伝導・低温実験棟

●超伝導・低温技術研究開発

- 原型炉に向けた超伝導コイル開発に必要な

計測技術開発実験棟

●先進計測技術研究開発

- 先端レーザー光源と高度な計測器群及び高速大容量のデータ収集装置で構成されるプラズマ・同位体・計測システムの整備

国際フュージョンエネルギー連携センター

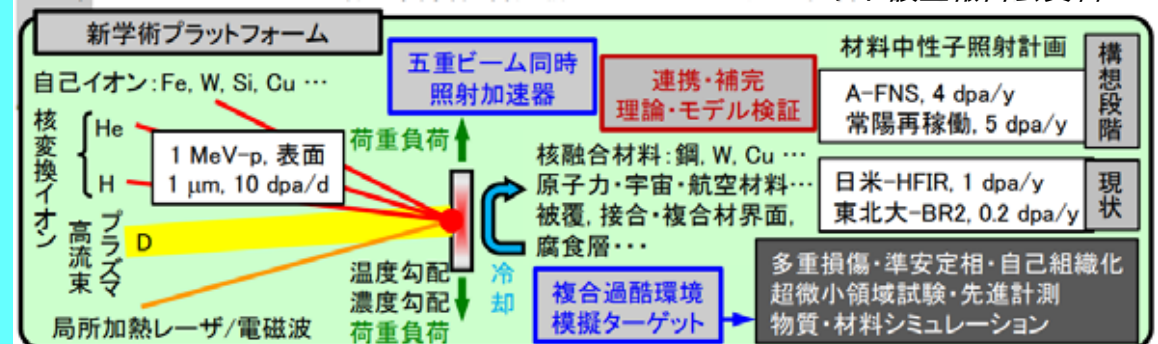
- 海外研究機関連携オフィス、スタートアップ連携オフィス、人材育成センター、学際連携センター等、人と知識が集まり新たな研究展開を創出するための場を新規整備

コンベンションセンター
- Fusion Science School
規整備、地域共創の拠点

Fusion2030研究会・炉工ワーキング最終報告書：
材料研究について核融合研が整備すべきプラットフォームとして、

- ✓ 核融合炉に特有な環境と照射が重畳する「場」
- ✓ イオン・プラズマ照射装置

ユニット設立報告会資料



2024年6月

より過酷な環境に対応できる
多様な高性能候補材料の迅速な選別・
新規材料創製

中性子環境模擬

複合ビーム照射施設

多重イオンビーム照射プ
ラットフォーム

高度材料分析・
創製装置群



照射データ取得の高度・高速化

照射材料インフォマティクス

[量子化学計算、電子構造解析等
による材料物性予測、機械学習等]

効率的な材料開発指針の提示

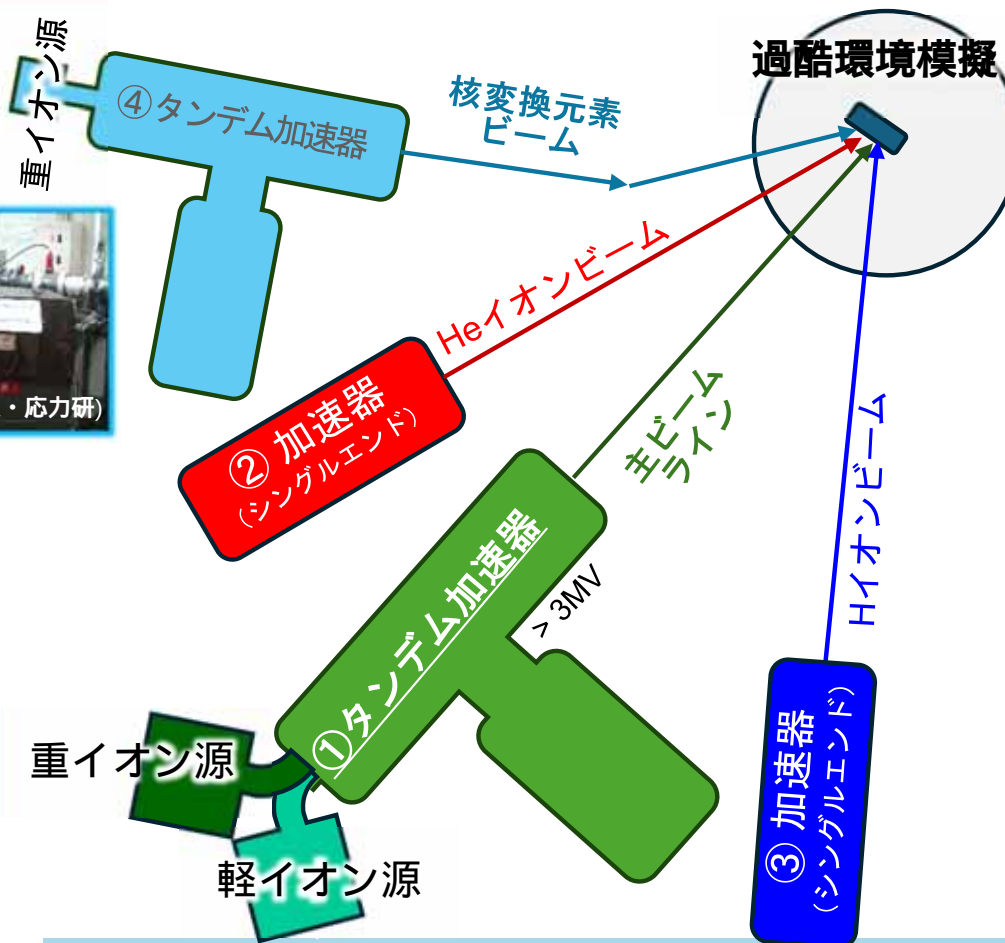
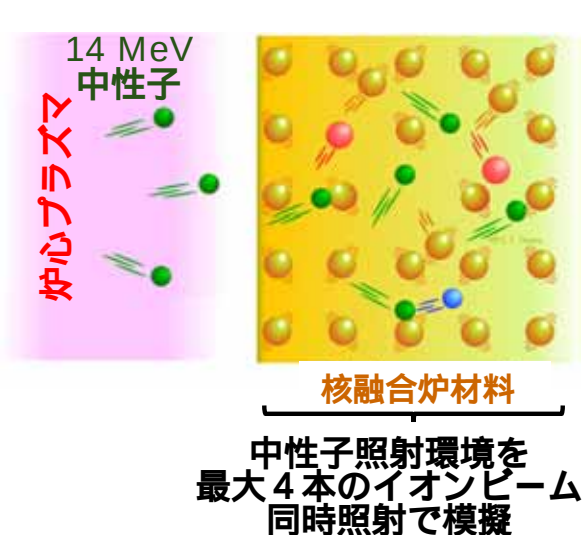
アカデミックプラン

- 超高流束のエネルギー・粒子がもたらす非平衡下。
- 材料のミクロ・メゾスケール構造と、それによって発現するマクロ物性の動態（ダイナミクス）を、原子の集団現象から理解し制御。
- 準安定相、自己組織化構造。

フュージョンマテリアル
(構造材料、機能材料等)
開発の最大限の加速

多様なフュージョン
エネルギーシステムの
早期実現

多重イオンビーム照射プラットフォーム



重イオン照射

入射深さ(損傷領域):
1 ~ 数 μm

数MeV

Fe^{2+} , Si^{2+} 等

構造材料

構造材料

セラミック
被覆層:
~ 1 μm 厚

J.Gao et al., Journal of Nuclear
Materials 511 (2018) 304-311

照射後の材料断面例

中性子照射
模擬領域

約 2 μm

原子炉照射:
1 ~ 数 dpa/年

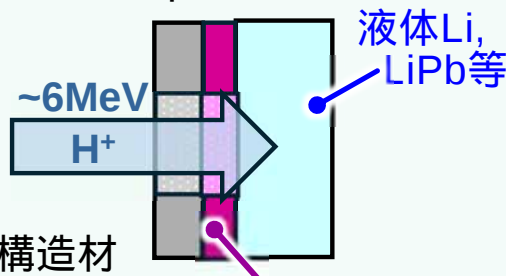
重イオン照射:
~ 1 dpa/時間

超高温(>1500 $^{\circ}\text{C}$),
応力下等の
過酷環境模擬

dpa: displacement per atom

水素イオン照射

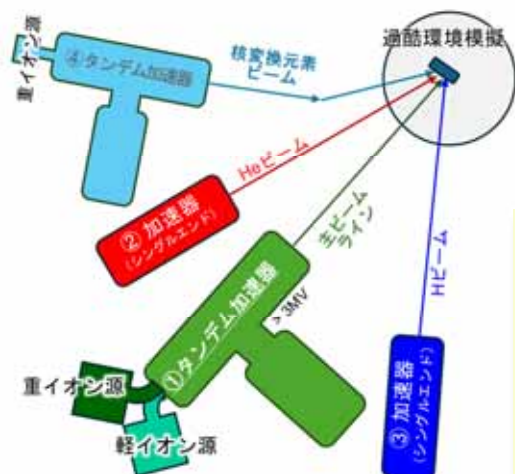
入射深さ:
~ 100 μm



水素イオン照射:
~ 0.03 dpa/時間

材料システム
への照射、
固液界面

多重イオンビーム照射プラットフォーム



■ [戦略会議]

本プラットフォームが有すべき特徴

[環境模擬(照射チェンバー)の多様性・高精度制御、高い稼働率]、
分野外ユーザー拡大の方策等について議論。

■ [シンポジウム開催]

『2025年以降の材料照射場シンポジウム』

(NIFS・QST合同企画、世話人・長坂)

(2024/9/9-9/10、NIFS開催。講演14件、本ユニットメンバー2件、
プラズマ・複相間輸送ユニットから1件)

・ 関連分野の研究者からの支持、中性子照射との連携、ユーザーの獲得。

■ 材料開発の加速、材料規格・基準策定におけるイオンビーム照射が果たす役割の重要性・喫緊性、照射装置の目指すべき方向性等の議論を、客員・笠田教授(東北大)、大野准教授(横浜国大)にリードいただいた。

➔ 予算申請を実施

➤ 2025年度：NIFS共同研究(研究会)『核融合炉照射研究会』(代表：横浜国大・大野先生)

・ 上記課題の他、マテリアルズインフォマティクスの適用・

照射ナレッジプラットフォームの整備に関する議論。

➔ 本プラットフォームで取り組むべき新課題や模擬環境の提言については、
大型予算申請、将来の施設ユーザー獲得につなげていく。

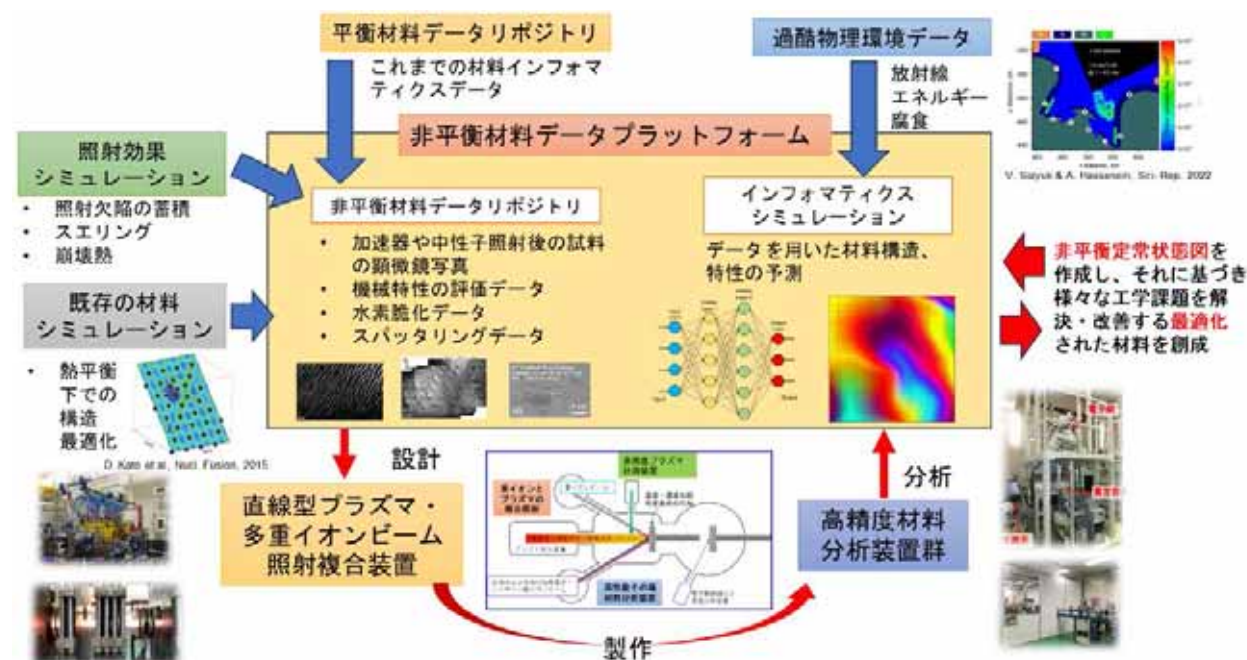
多重イオンビーム照射プラットフォーム

多様な超高流束場を造る新学術プラットフォーム 多重ビームイオン加速器複合施設(SPICES)

SPICES: Synergistic Plasma and Ion Irradiation experiment Combined
with an integrated in-situ Evaluation System
(プラズマ・イオンビーム複合照射・その場分析統合システム) プロジェクト

- ◆ 熱・粒子の流出入、高速中性子の衝突、材料界面の化学反応などエネルギーと物質粒子の輸送。
- ◆ 物質構造の変化機構と、それに伴うエネルギー・粒子輸送挙動の予測性能
(メゾスケール構造とマクロ材料特性の相関)

物理環境の遷移に伴う材料の状態変化「**非平衡定常状態図**」を予測可能とする。
→ 炉壁の材料健全性維持と粒子バランス制御



NIFSホームページ: <https://projects.nifs.ac.jp/spices/>

- 装置構成に関してプラズマ・複相間輸送ユニットと議論を継続。
- 照射チェンバーやビームライン配置検討の段階ではプラズマ照射装置と整合性の取れた複合照射システム構成にまとめ上げる。

高度材料分析装置群

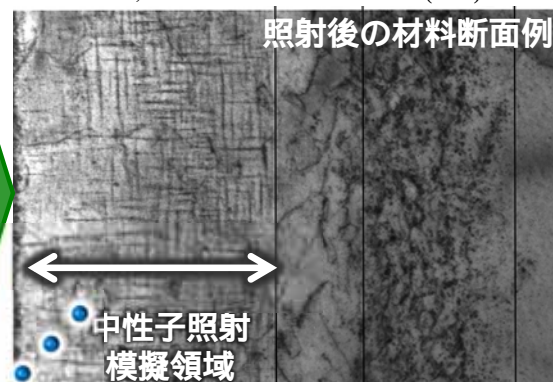
- 整備優先度の高い機器を選定。研究戦略会議等での仕様の議論。
- 多重イオンビーム照射プラットフォーム等とともに価値の高いデータ取得を行う研究環境構築。



イオンビーム照射システム
(九大・応力研)

イオン
ビーム

J.Gao et al., Journal of Nuclear Materials 511 (2018) 304-311



照射後の材料断面例

中性子照射
模擬領域

約 2 μm

ミクロな照射領域の特性変化を
最新鋭 分析装置群
で複合的に評価することが必須



既設及びフュージョン・ナノ・プラットフォームで整備予定の透過型電子顕微鏡 (TEM) も組み合わせた複合的な評価

表面から1 μm 以内の化学状態、高温強度、熱伝導を迅速な連成評価。



(1) 多機能走査型
X線光電子
分光分析装置
(XPS)

(元素・組成分布、
化学結合・電子状態)



(2) 高温高真空
ナノインデント
(3) スモールパンチ
試験システム

(変形・破壊応力、
硬さ、弾性率)

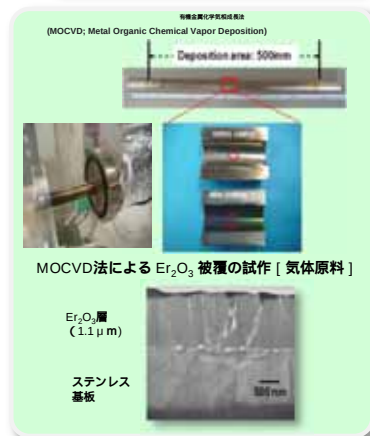
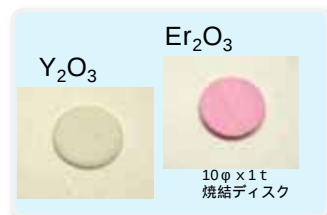
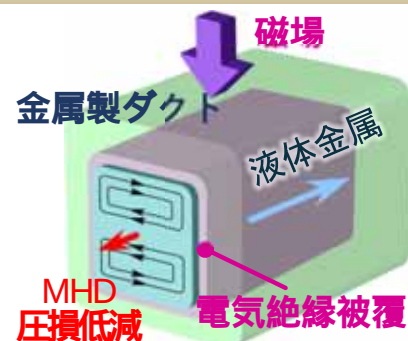


(4) サーモリフレクタンス顕微鏡

(薄膜・微小粒子・
微小構造の熱伝導)

➔ 予算申請を実施

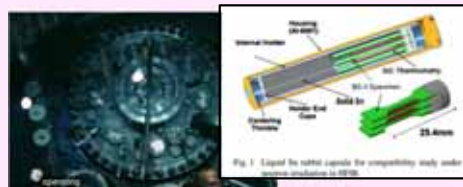
インフォマティクスによる研究開発加速



中性子照射

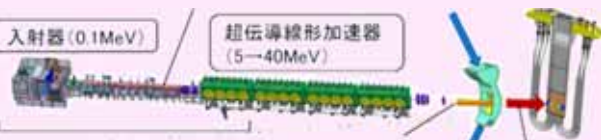
材料試験炉照射

From HFIR Overview,
<https://neutrons.ornl.gov/hfir>



M. Kondo et al., Plasma and Fusion Research
16 (2021) 2405040.

加速器駆動
中性子源



春日井敦他、第15回日本加速器学会

~ 500 のシステム

初期材料特性

材料共存性 (腐食)

高温電気伝導

放射線誘起伝導

成膜技術

照射損傷

組成変化 (核変換等)

照射下共存性 (腐食)

要求性能 $< 10^{-2}$ S/m

中性子環境での
特性変化

核融合発電炉

多様な
先進核融合
システム

高性能機能材料探索に対する適用

より高温 (> 1000),
高出力密度 (高中性子負荷) のシステム
に対応できる材料探索

多彩な
候補材料

(酸化物、窒化物等、
複合化合物)

加速

候補材料
選択

材料科学計算 +
インフォマティクス

加速

多重イオンビームによる
照射効果の検証

材料科学計算 +
放射線物理計算 +
照射インフォマティクス

新規材料創出

インフォマティクスによる研究開発加速

■ [シンポジウム開催]

『多重ビーム照射施設とマテリアルインフォマティクスの連携による核融合炉材料開発研究の加速』

(第41回プラズマ・核融合学会年会、2024/11/19、東京、世話人・田中照。)

所内・所外ユニットメンバー(機能材料)2件、材料科学研究者2件の講演・討論。

- ・新たにインフォマティクス技術を導入するための材料科学研究者との対話の開始。

■ 構造材料への適用について研究戦略会議で議論。

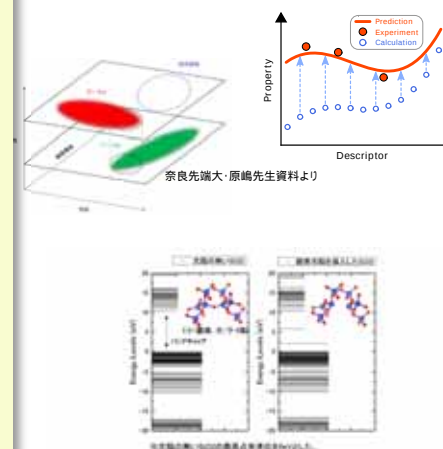
限られた中性子・イオンビーム照射データからの材料寿命予測。

ハイエントロピー材料開発への適用。過去の電子顕微鏡イメージ活用等。

核融合材料データ統合基盤開発。

→ NIFS研究コア提案型共同研究『核融合炉材料のマテリアルズインフォマティクスに基づくデータ統合基盤開発』の申請。

(代表：奈良先端大・原嶋先生)



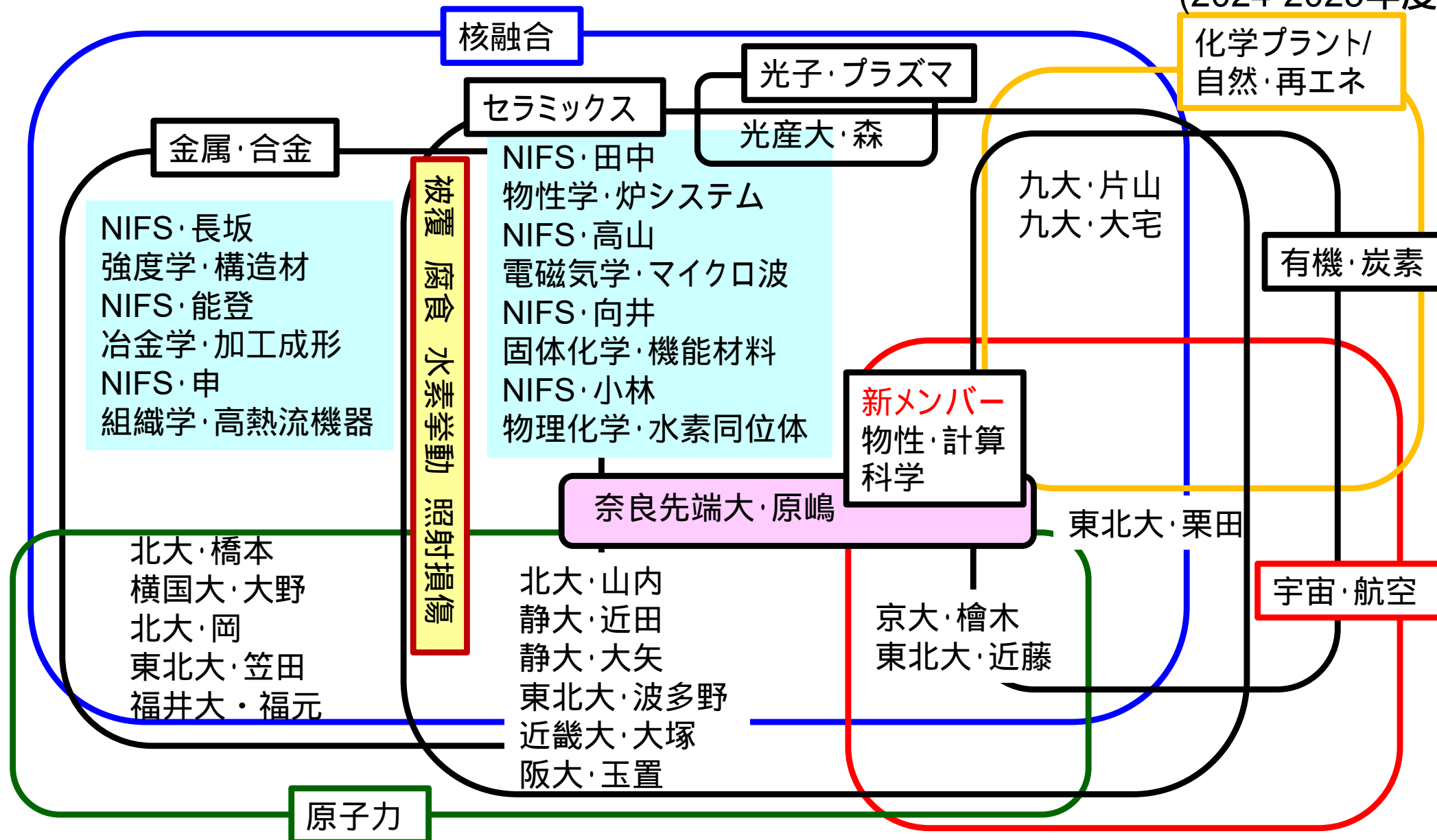
- 客員教授・橋本先生(北大)、ユニットとして初めてとなる材料科学分野から客員准教授・原嶋先生(奈良先端大)が2025年4月就任。2025年度、具体的な取り組みに着手。

- 2025年度NIFS共同研究(研究会)『核融合炉マテリアルズインフォマティクス基盤の構築に関する研究会』(代表：NIFS田中照)

- ・核融合炉材料—材料科学分野。核融合炉材料への適用方法、具体的な取り組みの状況を議論。

インフォマティクスによる研究開発加速

(2024-2025年度)



- **インフォマティクス適用**：全ての材料研究に共通の課題。方法論の議論やデータ基盤構築はユニット活動としてのまとめ、方向性を示す柱の一つに。
- **材料科学研究者の参画、理論計算やインフォマティクスに対応できる人材育成。**

- ✓ 当面取り組むべき、具体的な研究活動計画を議論・策定した。
- 研究基盤『 **多重イオンビーム照射プラットフォーム**』、『 **高度材料分析・創製装置群**』及び『 **照射材料インフォマティクスの導入**』の3つを柱として推進。
- 核融合分野外から研究者に参画いただき、新しい展開を図る体制づくりを進めた。

◆ 本ユニット活動の中核プラットフォームは未導入

「多重イオンビーム照射プラットフォーム」、「高度材料分析装置群」について予算申請は行っているものの、採択には至っていない。

➔ 核融合分野からの必要性に加え、機構内の他の研究所や核融合分野以外の研究者との意見交換を進め、共同利用の計画等も申請書に盛り込めるように検討・準備を進める。

所内ユニット構成員の研究活動

アカデミックプランに沿った研究の立ち上げ

◆ 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、材料探索に発展が見込まれる研究（主に所外のイオンビーム照射装置を利用）

- [1] 酸化物分散強化鋼：**ナノ酸化物粒子の照射下安定性、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**を開始。
- [3] Y₂O₃被覆：セラミックス電気絶縁特性の**照射 + 高温 + 電界印加条件でのみ観測される照射下劣化**に関する実験立ち上げ（NIFSタンデム加速器）とデータ蓄積。

◆ 材料インフォマティクスへの発展が期待できる理論計算 - 実験連携研究

- [1] Li-Beハイブリッドセラミックス：**機械学習モデルによる結晶構造予測と第一原理計算**に基づき、化学安定性に優れる組成を探索。**実験による検証**。

所内メンバー個別の研究報告は次の発表

2023年度論文数
主著論文: 8報



2024年度論文数
主著論文: 5報、共著論文: 33報

2025年度、核融合炉材料の国際会議ICFRM(静岡)等で学生を含め精力的に発表、論文出版予定。

資金獲得に向けた活動

科研費・継続課題4件、新たに核融合スタートアップとの共同研究を1件、民間との共同研究を1件開始。

✓ アカデミックプランに沿った研究の立ち上げを行っている。

- 非平衡状態での材料挙動解明、材料探索に関するイオンビーム照射研究。
- 理論計算・機械学習と実験が連携した研究（インフォマティクスへの発展）。

■ アカデミックプランに沿った顕著な結果創出は未だ

- ✓ ユニット設立前からの取り組みを発展させる研究も継続。
- いずれの所内構成員も、超高流束・過酷環境における材料研究や理論計算を駆使した材料研究を、すでに推進している、もしくは、立ち上げの議論中。
- ユニットのプランに沿う成果は増えると思込まれる。

■ 所内構成員主導の外部資金の獲得

- 科研費のみでなく民間助成への応募の強化。
得意分野を組み合わせた応募検討・新たな連携先開拓を高い頻度で行い、大型予算提案の下地。
- インフォマティクスにより新たに予測される新規高性能・長寿命材料の創製とその特性の検証も大型外部資金獲得につなげていく。

2025年度：2024年度に提示した3つの推進の軸で発展させるべく、精力的に進める。

多重イオンビーム照射プラットフォーム、 高度材料分析・創製装置群、 照射材料インフォマティクス

照射

分析

MI

➤ 次の発表で、個別研究活動状況を報告