

フュージョンエネルギー・ナノプラットフォームによる PWIおよび炉工学研究の進展

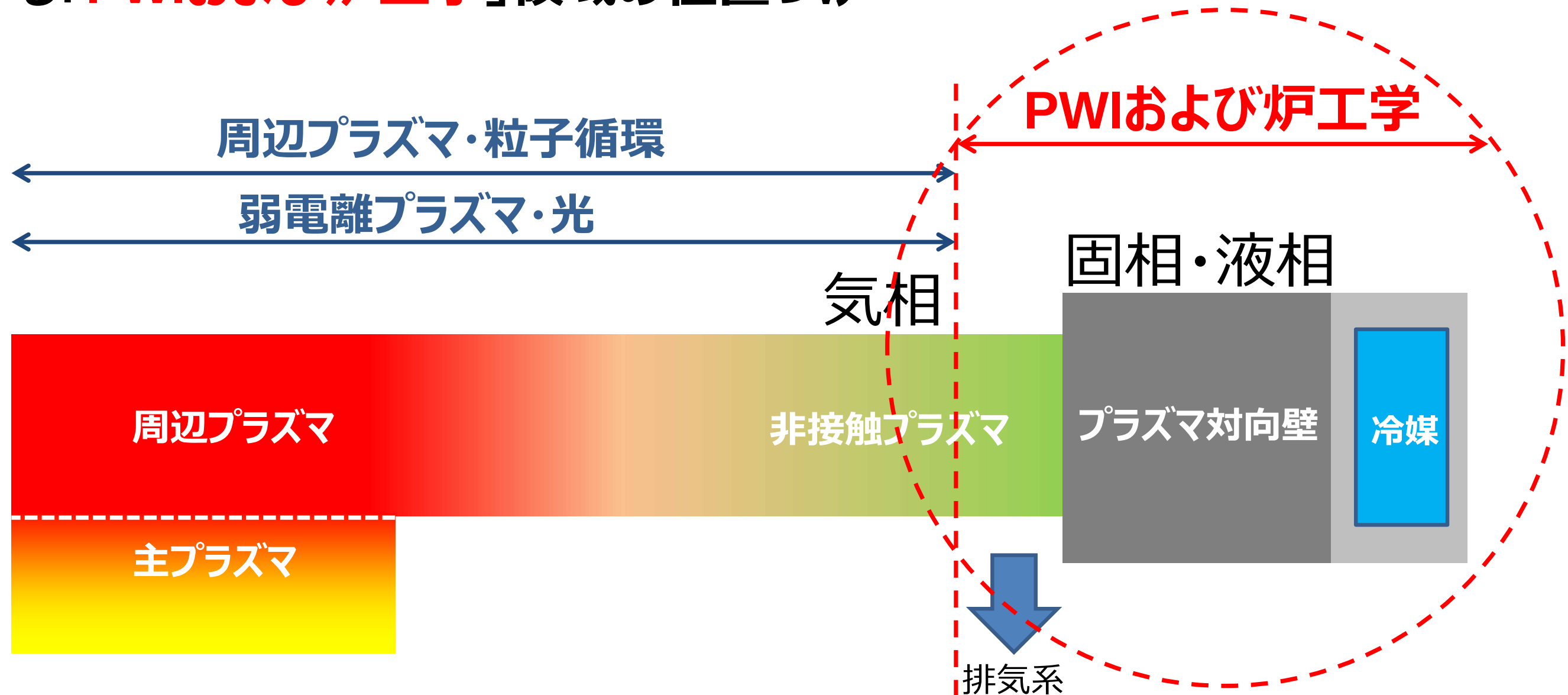


時谷 政行

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
核融合科学研究所
研究部 プラズマ・複相間輸送ユニット

プラズマ・複相間輸送ユニットでの「PWIおよび炉工学」領域

- 磁場閉じ込め核融合炉の周辺プラズマから対向壁⇒冷媒／排気系における粒子・エネルギー・運動量の輸送現象の理解と予測，制御における「PWIおよび炉工学」領域の位置づけ



「プラズマ壁相互作用(PWI)および炉工学」研究内容と役割分担

所内メンバーの役割分担：

1. プラズマ・壁相互作用(PWI)：中性子照射損傷を含む
時谷，増崎，庄司，矢嶋
2. 微細組織制御による材料接合継手部の高度化
時谷，森崎
3. 液体金属プラズマ対向壁研究
浜地，増崎

内容

1. 研究成果

- ナノスケールのプロファイリング技術
- 2025年度 各課題の研究成果

2. フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム

- 核融合科学の新しい学際的展開



アカデミックプラン

1. 研究成果

- ナノスケールのプロファイリング技術
- 2025年度 各課題の研究成果

2. フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム

- 核融合科学の新しい学際的展開

「PWIおよび炉工学」領域 目的～課題～メソッドの全体像

目的

核融合炉
高性能定常プラズマ

課題

1. 燃料粒子
バランス

2. 不純物(ダスト)
発生

3. 材料損耗

4. 熱除去

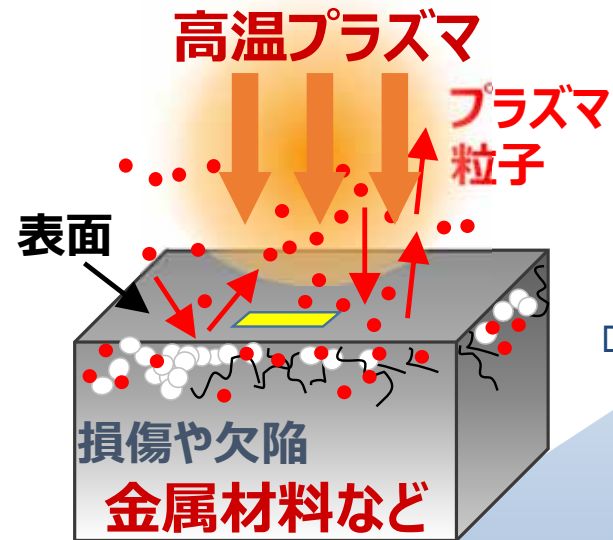
メソッド

ナノスケールのプロファイリング技術

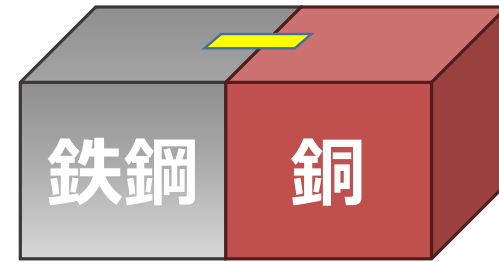
オリジナルのメソドロジー(methodology)

電子顕微鏡によるナノスケールのプロファイリング技術

プラズマ照射表面



異材接合部



集束イオンビーム/電子ビーム加工観察装置(FIB-SEM)



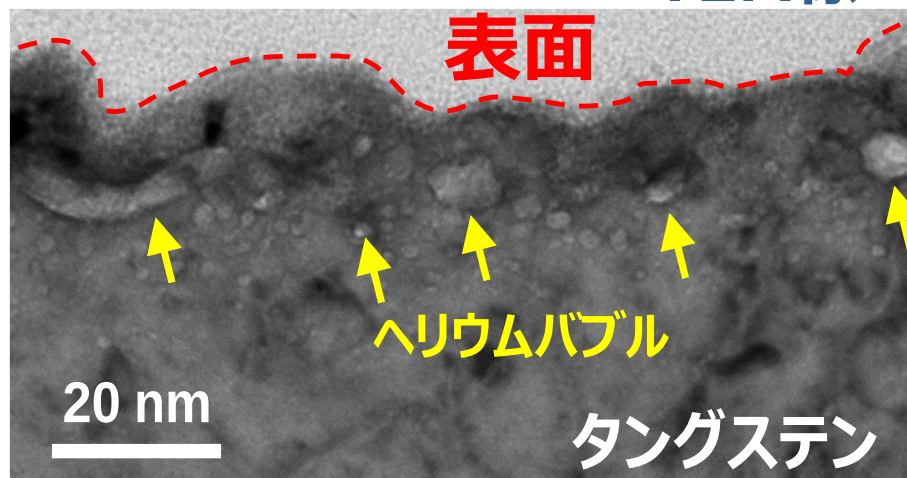
共同研究プラットフォーム

透過型電子顕微鏡(TEM)

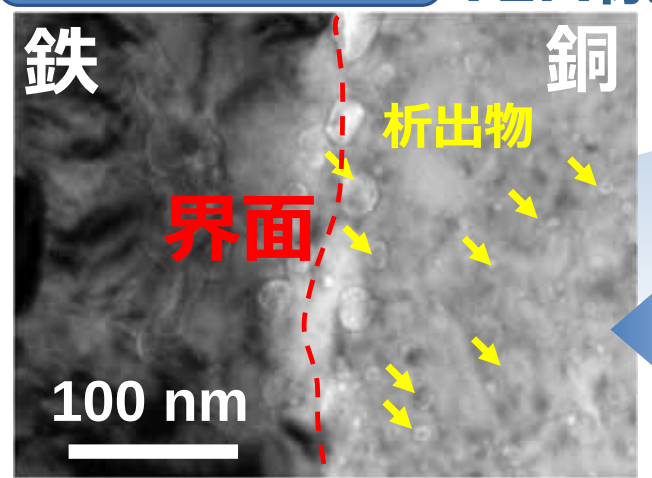


「ナノスケール加工技術」を使う

プラズマ照射表面



異材接合部



薄い

TEM電子ビーム

薄く仕上げて電子を透過させる

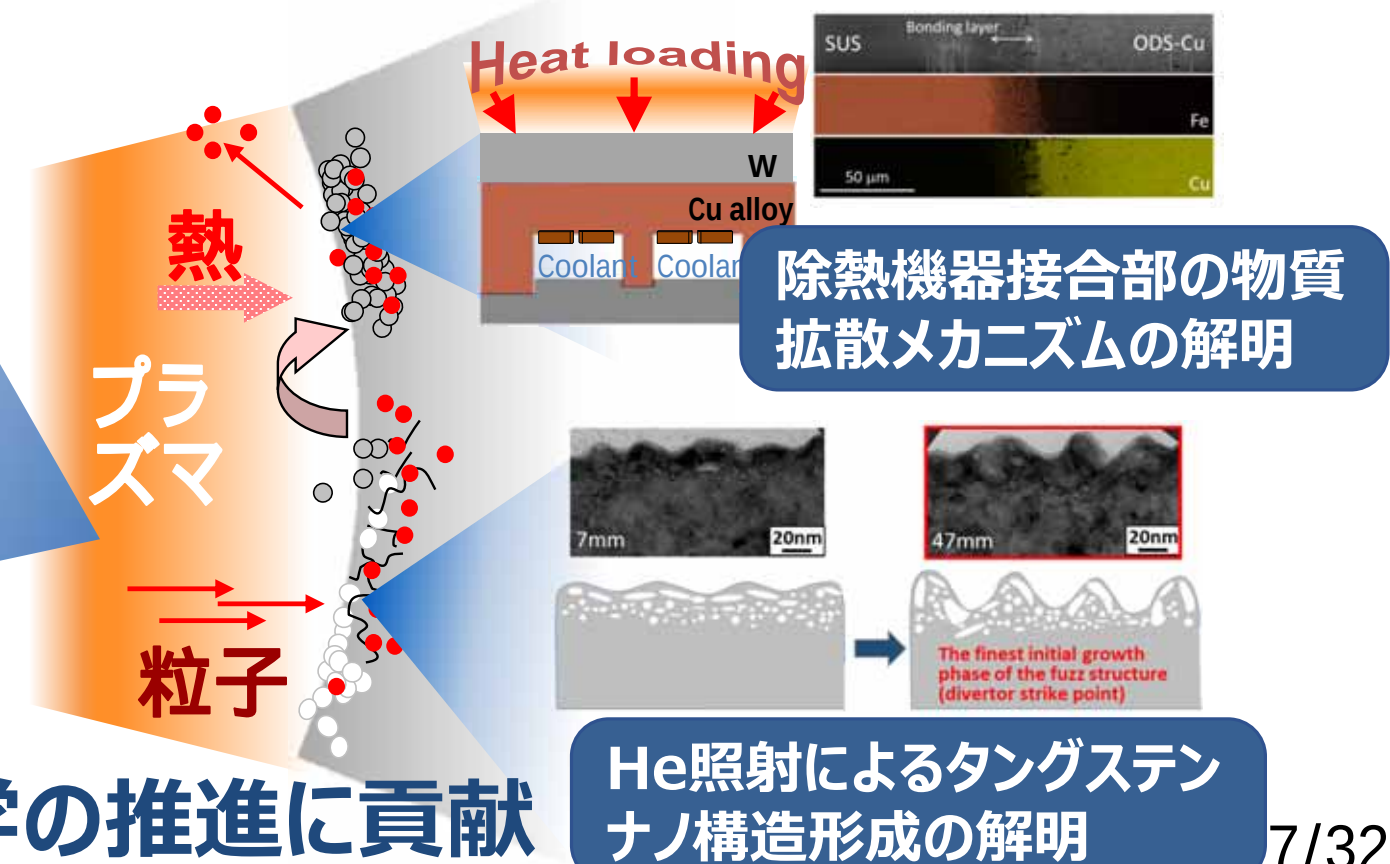
TEM観察へ

「ナノスケールのプロファイリング技術」の独創性

核融合微細構造解析 データの蓄積と分類



ナノ・プロファイリング



核融合科学の推進に貢献

電子顕微鏡装置群「フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム」による共同研究の学際的展開

核融合科学の推進

フュージョンエネルギー・ ナノプラットフォーム

想定される異分野共同研究



各課題に対応する 2025年度の研究成果

メソッド：

ナノ・プロファイリング

1.燃料粒子バランス

QUEST第一壁開発（時谷）

2.不純物(ダスト)発生

IPD壁分析（増崎），IPD輸送解析（庄司），LHDダスト分析（増崎）

3.材料損耗

LHD第一壁分析（矢嶋），W中性子照射（矢嶋）

4.熱除去

液体金属プラズマ対向壁（浜地），SPS受熱機器開発（森崎），AMSB受熱機器開発（時谷）

各課題に対応する 2025年度の研究成果

1.燃料粒子バランス

QUEST第一壁開発（時谷）

2.不純物(ダスト)発生

IPD壁分析（増崎）, IPD輸送解析（庄司）, LHDダスト分析（増崎）

3.材料損耗

LHD第一壁分析（矢嶋）, W中性子照射（矢嶋）

4.熱除去

液体金属プラズマ対向壁（浜地）, SPS受熱機器開発（森崎）, AMSB受熱機器開発（時谷）

定常プラズマ実現の壁「密度制御の不安定化」抑制手段

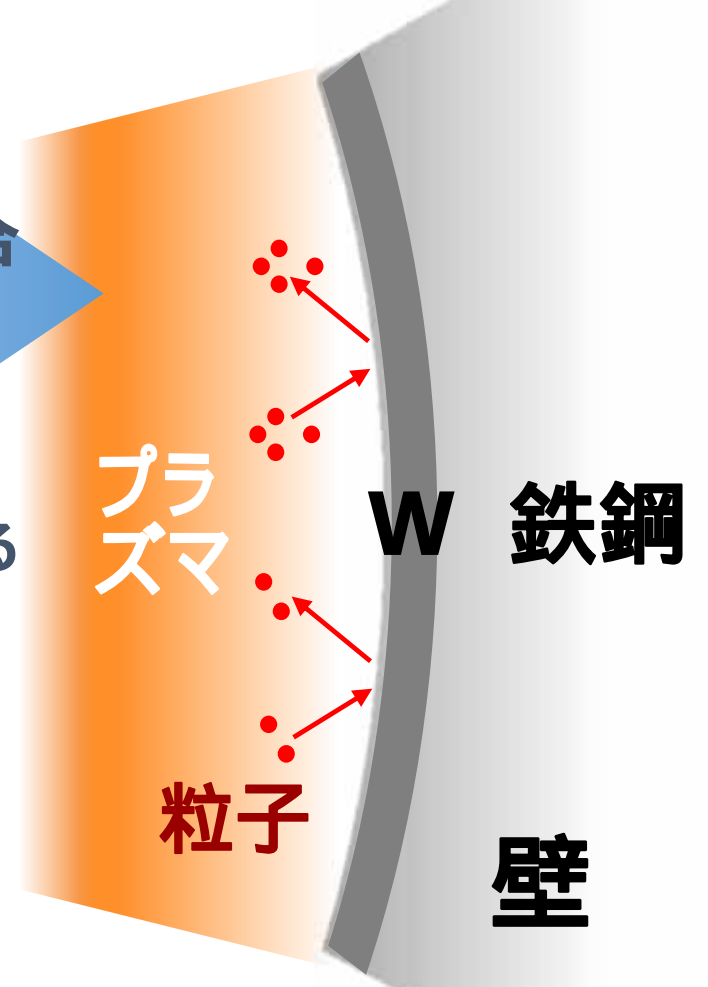
- 対向壁全面を単一の材料で構成する.
- 高温壁で運転する(表面はWが候補).

理想的な壁

水素の捕捉/脱離の割合
(リサイクル率: R)

$$R \approx 1$$

netでバランスする

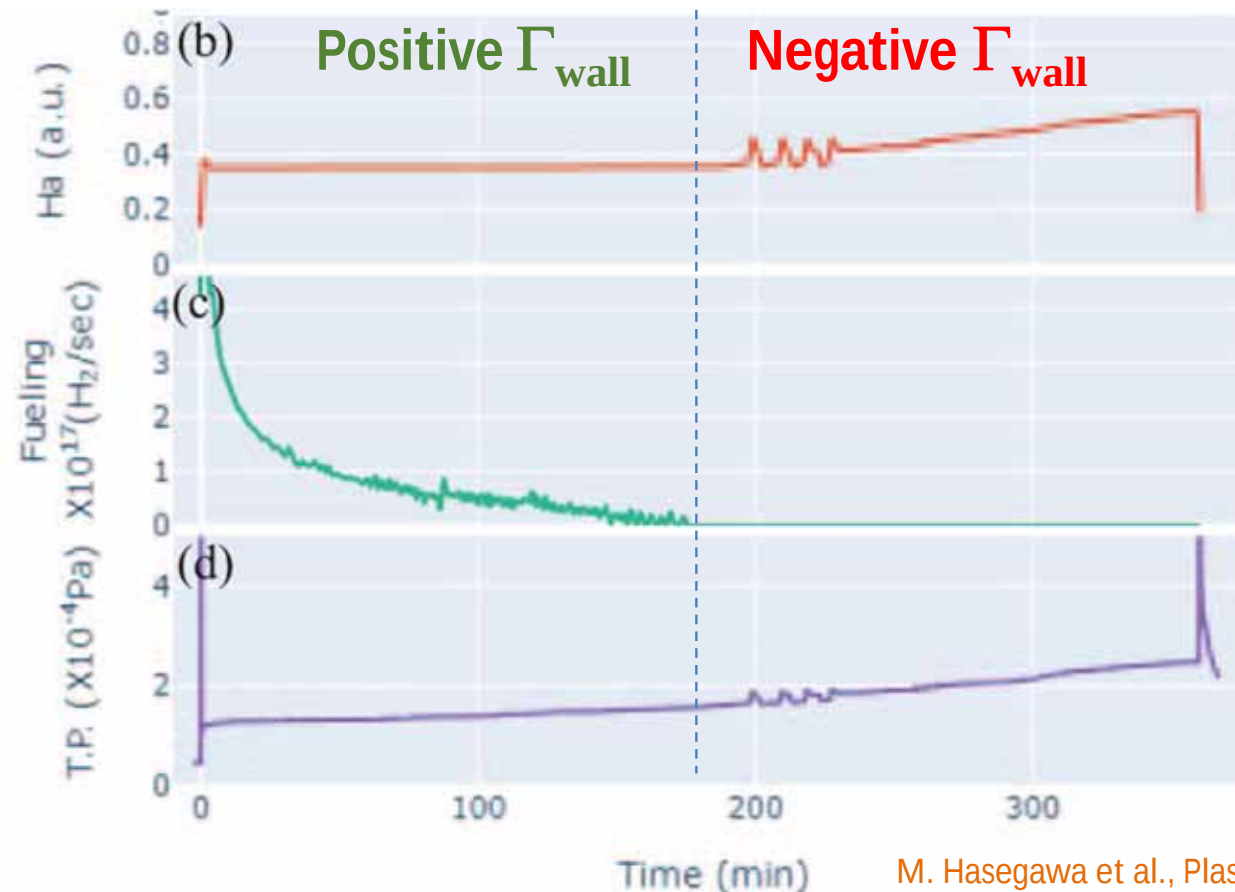


タングステン(W)で覆われた鉄鋼など

□ 九大QUESTの例



□ QUEST 6h放電での水素放出 (200°C)



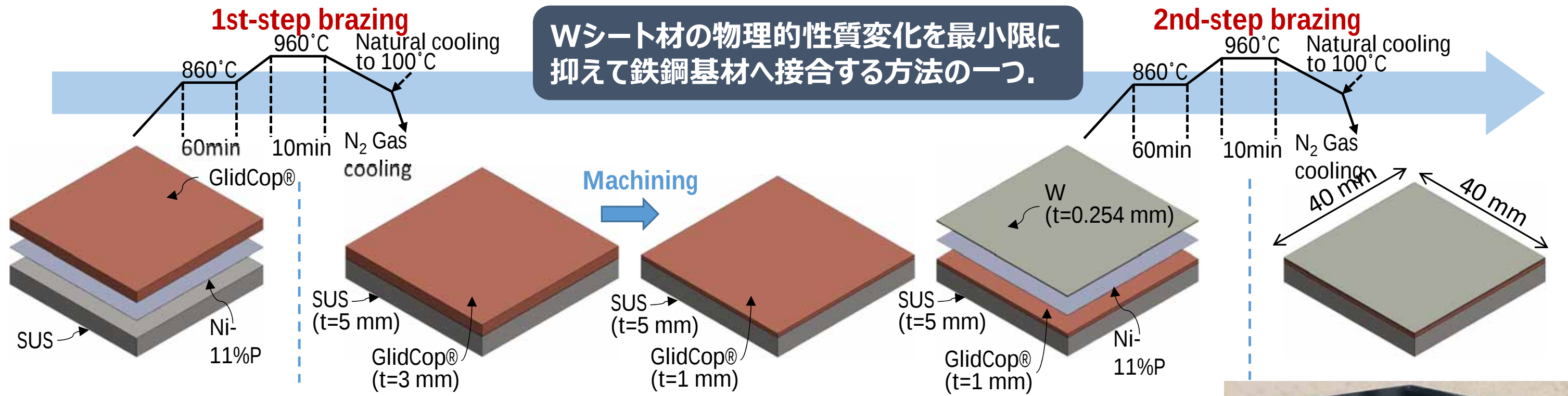
$R \approx 1$ を実現するプラズマ対向機器(第一壁)が必要

K. Hanada et al., Nucl. Fusion 57 (2017) 126061

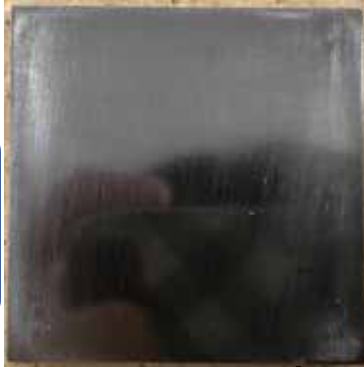
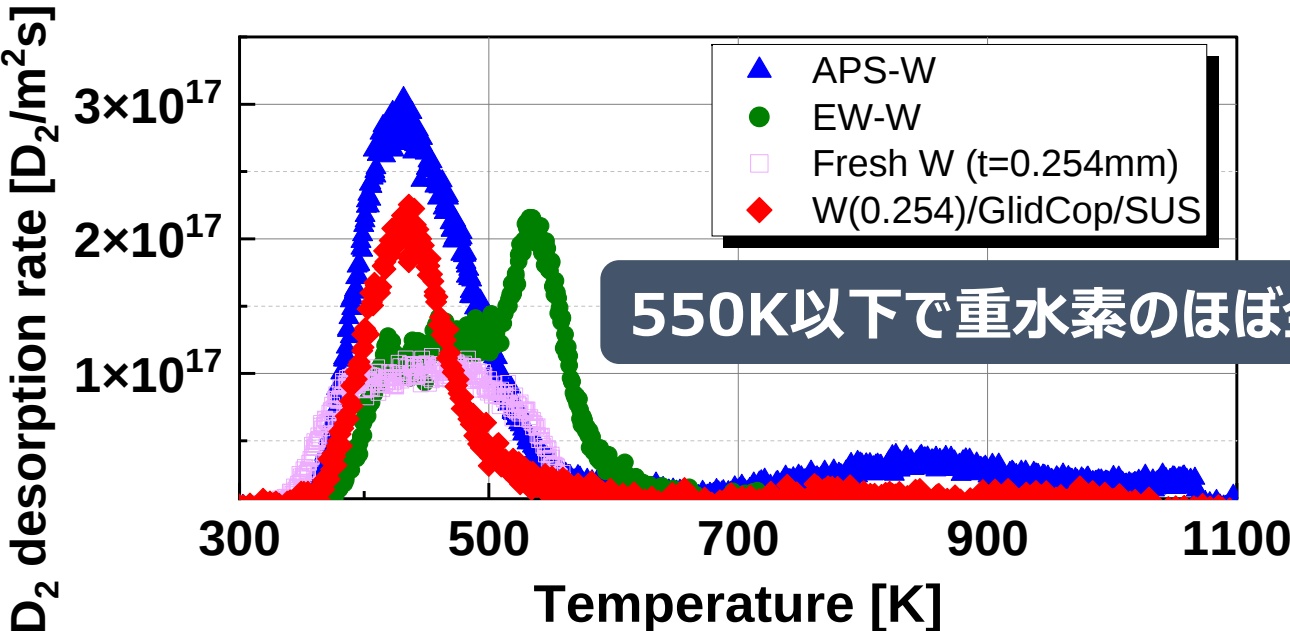
M. Hasegawa et al., Plasma Fusion Res. 16 (2021) 2402034.

新構造「Wシート材/GlidCop®/SUS第一壁」の製造（時谷）

先進多段階ろう付接合法: Advanced Multi-Step Brazing (AMSB)



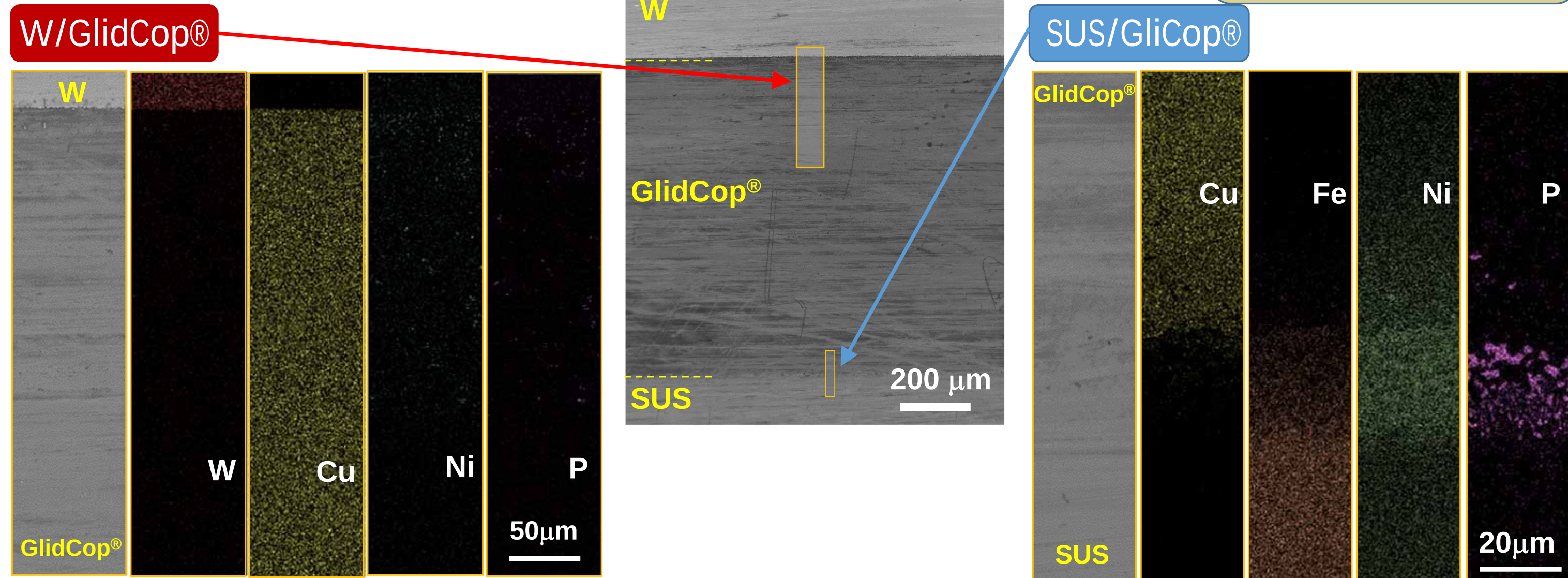
Wシート材の物理的性質変化を最小限に抑えて鉄鋼基材へ接合する方法の一つ。



特許取得済
No. 6528257
No. 6606661

W/GlidCop®/SUS接合界面近傍の元素分布（時谷）

ナノ・プロファイリング



- マイクロレベルで欠陥の無い接合部
- Ni, Pの分布状態は, 被接合金属がWとSUSの場合で異なる.

各課題に対応する 2025年度の研究成果

1.燃料粒子バランス

QUEST第一壁開発（時谷）

2.不純物(ダスト)発生

IPD壁分析（増崎）, IPD輸送解析（庄司）, LHDダスト分析（増崎）

3.材料損耗

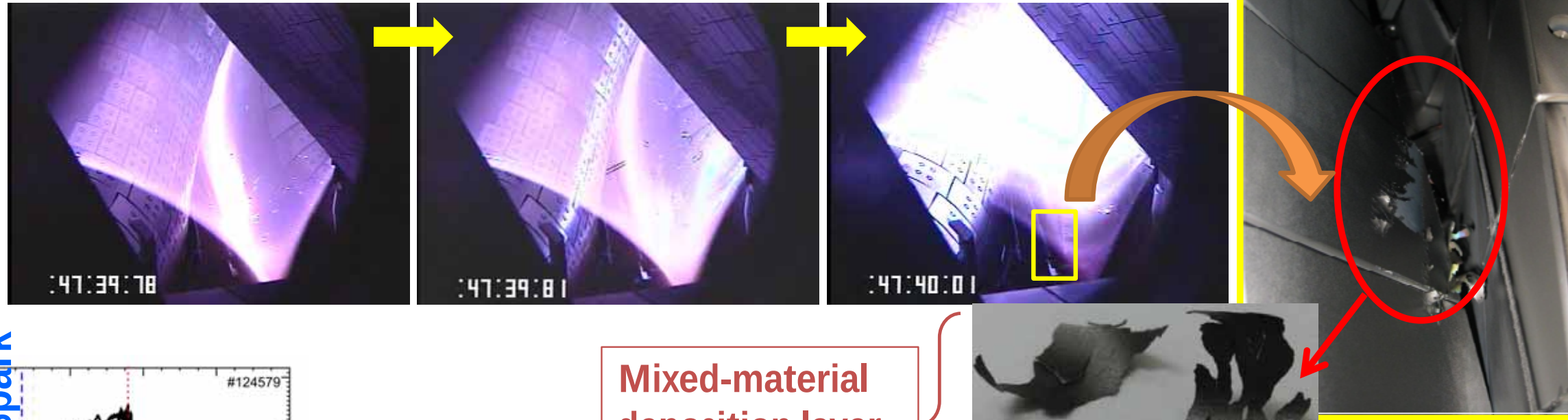
LHD第一壁分析（矢嶋）, W中性子照射（矢嶋）

4.熱除去

液体金属プラズマ対向壁（浜地）, SPS受熱機器開発（森崎）, AMSB受熱機器開発（時谷）

LHDでの不純物(ダスト)放出・混入によるプラズマ放電の停止 (例)

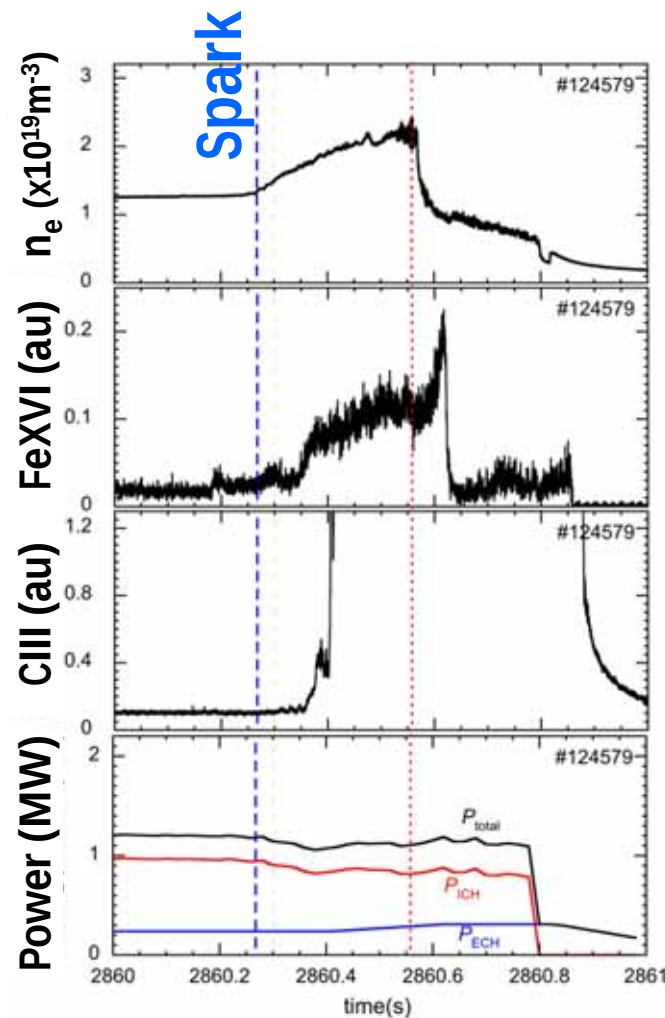
Continuous visible camera images at the end term of the long pulse helium discharge



M. Shoji et al., Nucl. Fusion 55 (2015) 053014

Mixed-material
deposition layer
with C and Fe

5mm



◆ プラズマ放電停止に至るシナリオ

1. ダイバータ領域で突然の発光.
2. プラズマ中のC, Fe不純物の急激な増加.
3. プラズマの放射崩壊

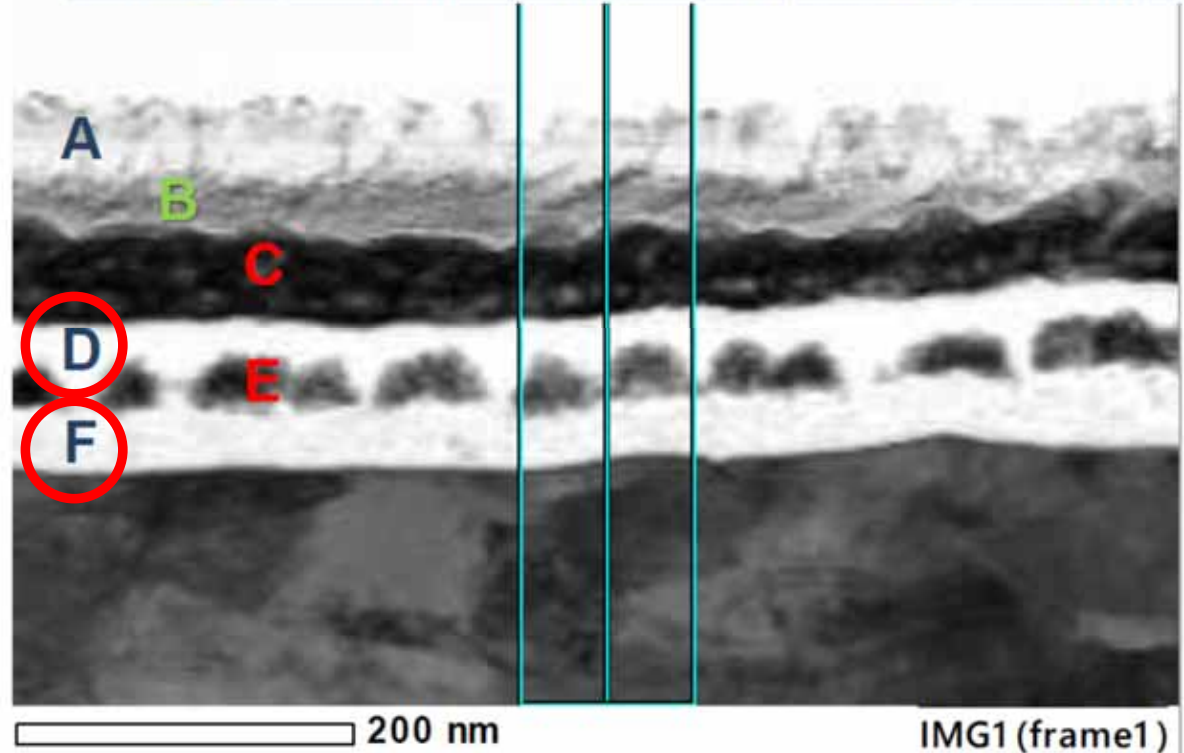
➤ 炭素を主とし, 鉄を僅かに含むMixed-material
堆積層の剥離が要因

ダスト生成メカニズムの考察（増崎，矢嶋，吉田）

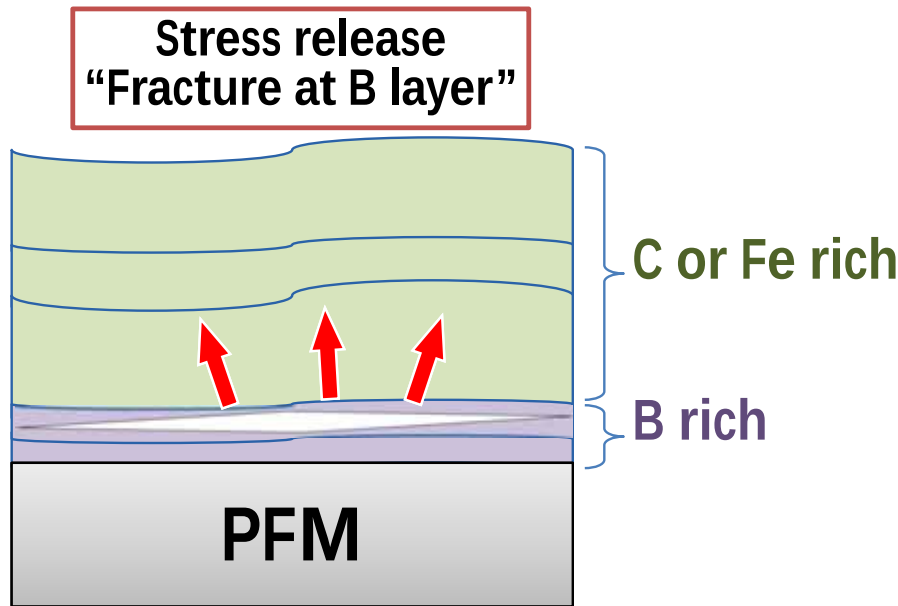
LHD第一壁：堆積層の断面構造解析

ナノ・プロファイリング

Position	A	B	C	D	E	F
Element	at%	at%	at%	at%	at%	at%
B K	6.62	2.39		37.3		24.82
C K	84.32	87.56	56.66	40.83	38.02	23.98
O K	6.6	3.62	5.58	17.97	23.71	43.63
Cr K	0.34	0.31	1.13	0.27	3.07	0.75
Fe K	1.27	1.21	5.91	1.88	13.26	4.44
Ni K	0.08	0.18	0.83	0.16	1.63	0.69
W M	0.77	4.73	29.89	1.59	20.32	1.68
total	100	100	100	100	100	100

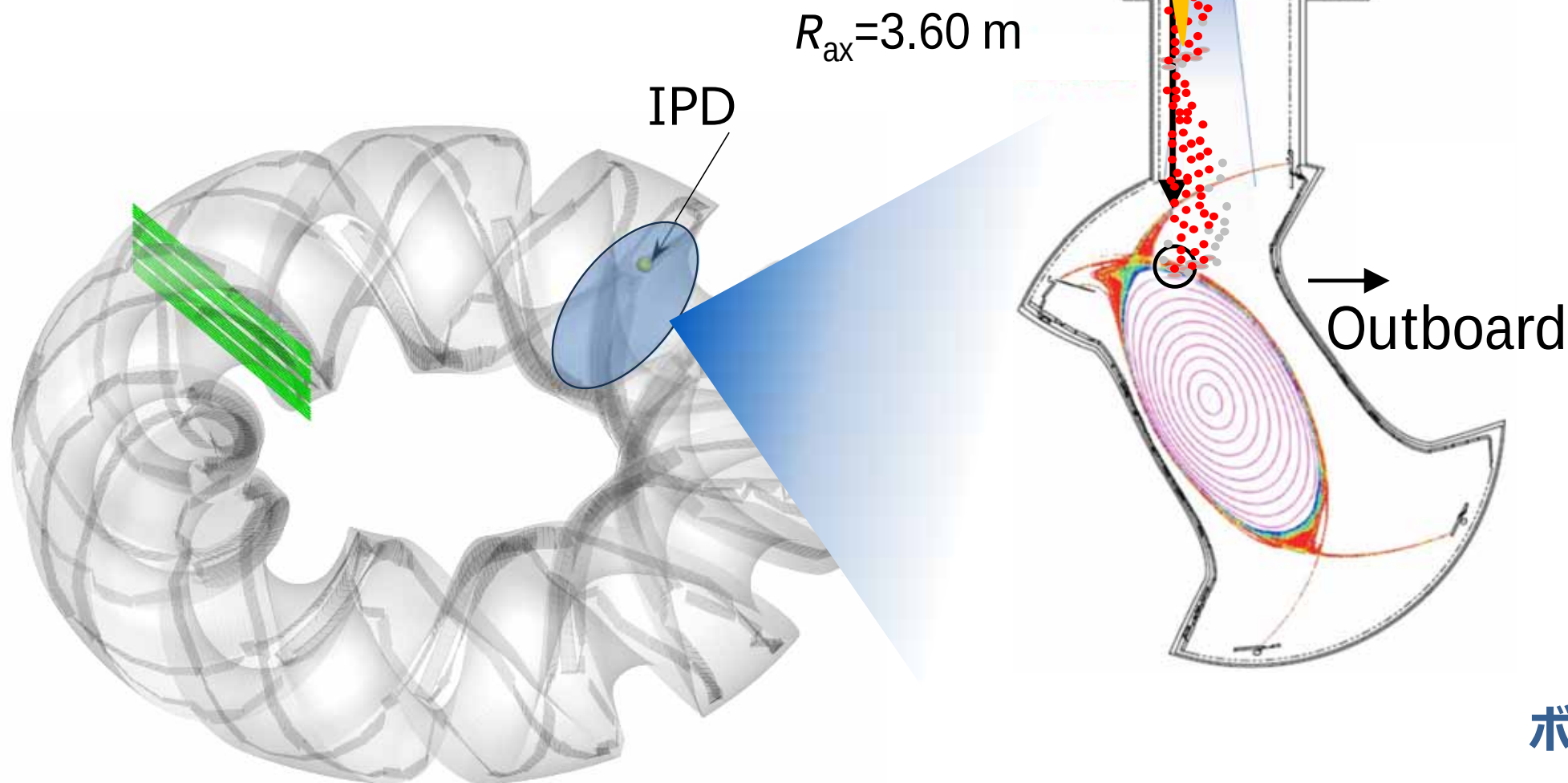


- グロー放電、プラズマ実験などで，第一壁には Mixed-material 堆積層が形成.
- ボロンが多い層で剥離が見られる.
 - ⇒ ボロニゼーションが要因の可能性
 - ⇒ 適量かつ効果的なボロニゼーションが必要



LHDパウダードロッパー(IPD)による実時間ボロニゼーション

- 放電中に実時間で壁コンディショニングが可能
- ITERでも、タングステン不純物抑制を目的として実施を検討中



CCD and fast-framing cameras

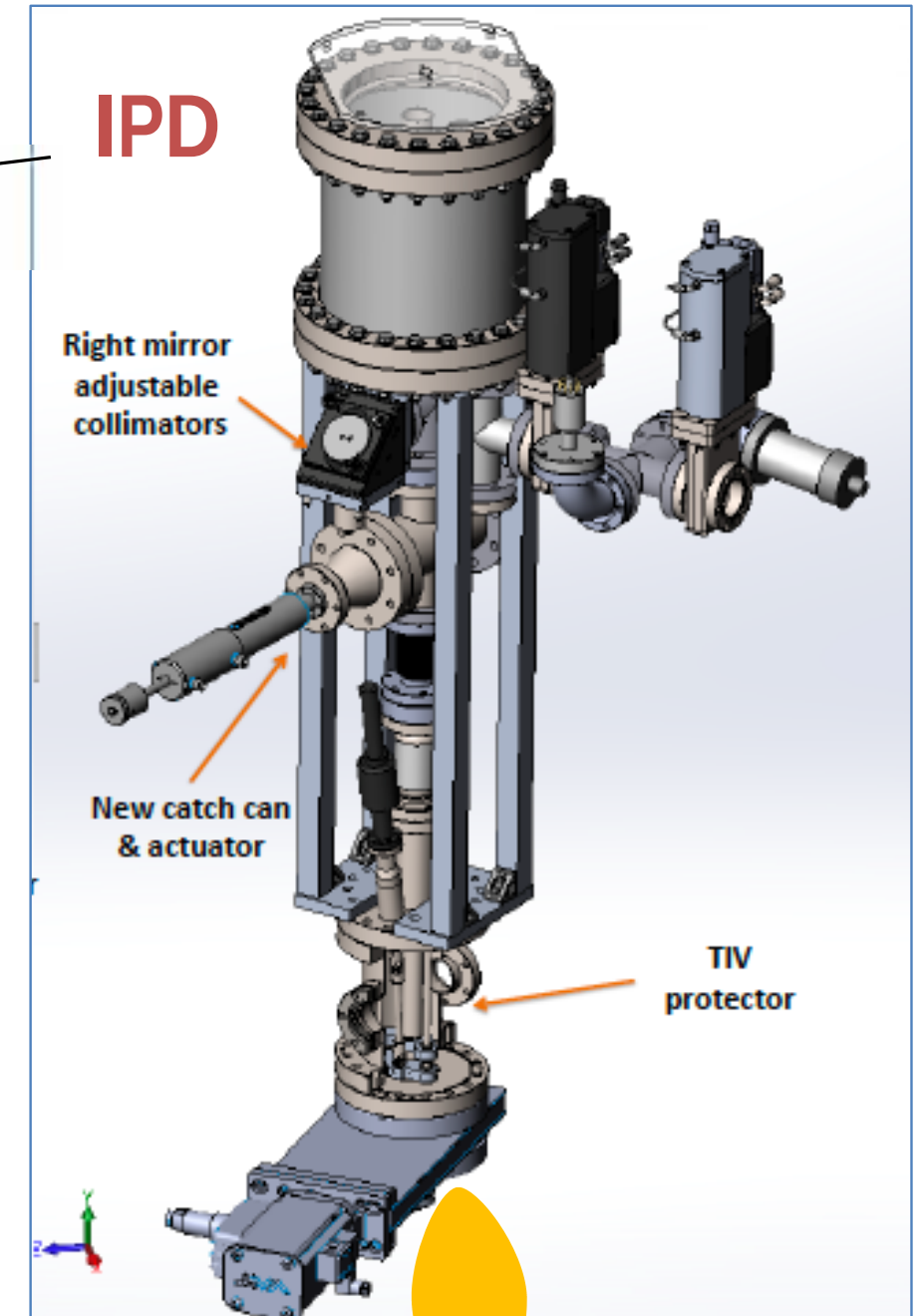
IPD

2.5-U port

FOV of the camera

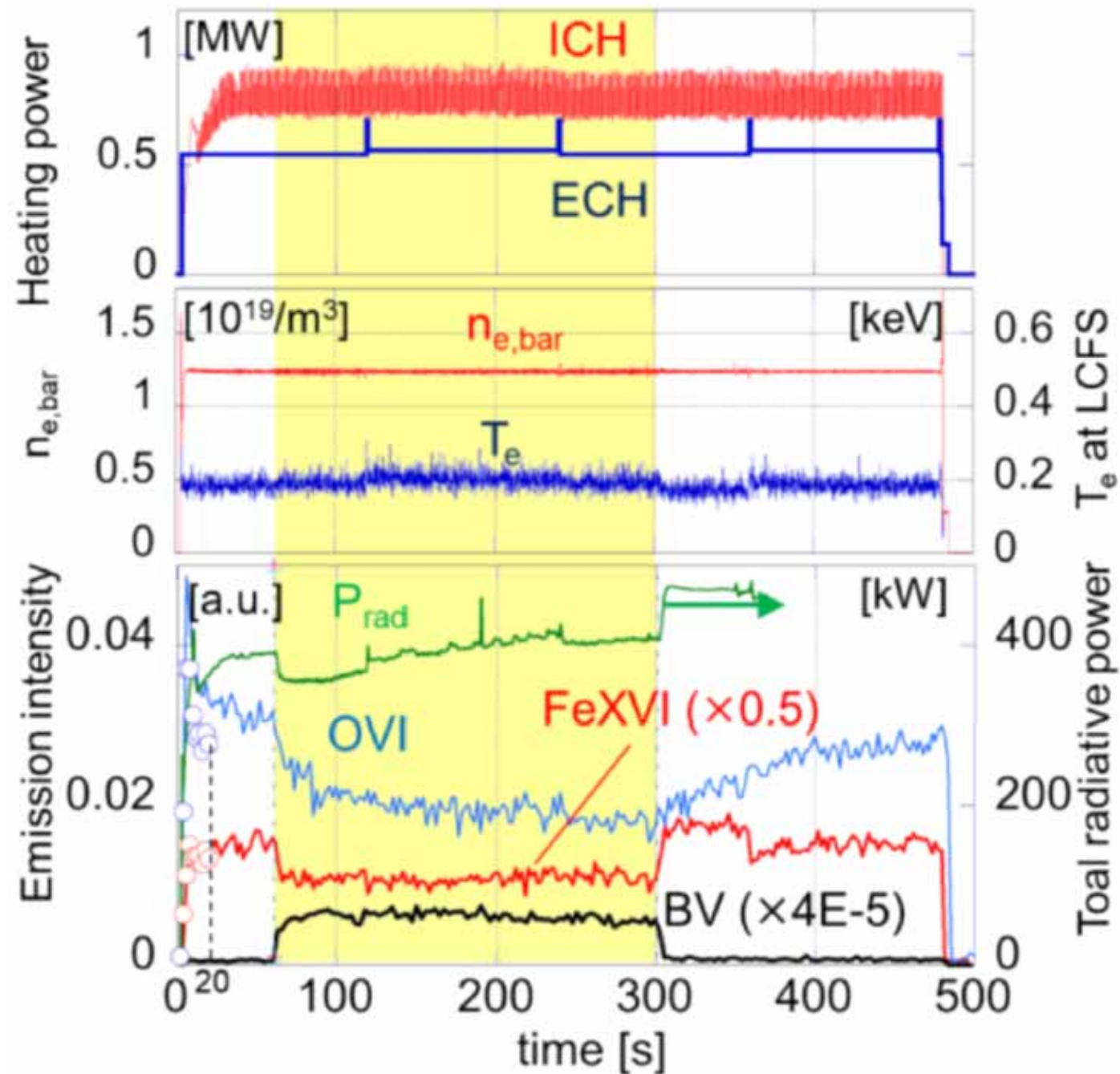
$R_{ax} = 3.60 \text{ m}$

Outboard



ボロン粉末を投下

LHDにおける実時間ボロニゼーションの効果（増崎）

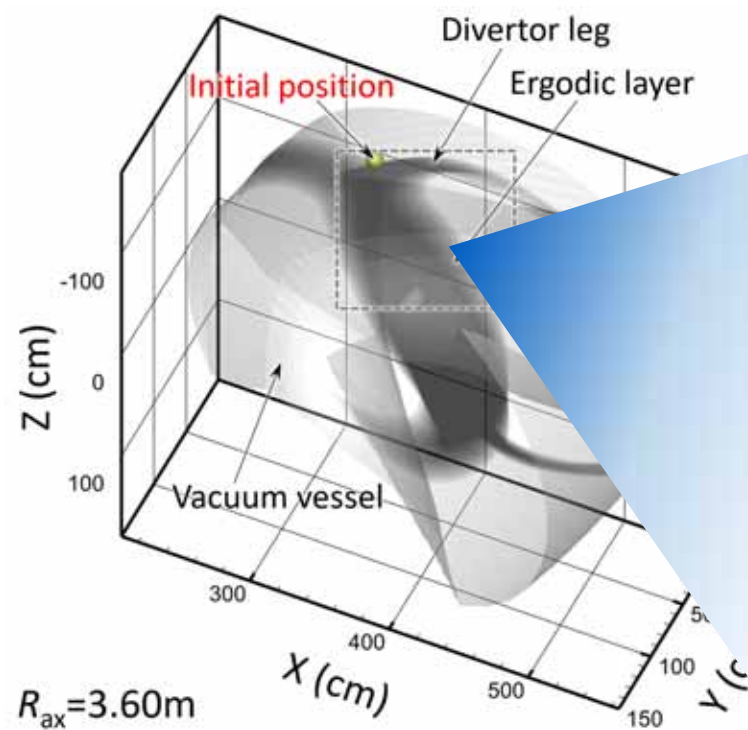


- 長時間放電中に、ボロン粉末を投下（黄色ハッチ）
- 粉末投下により、第一壁材料である鉄と、酸素が低減
- 粉末投下停止後に、酸素の発光強度が100秒以上かけて回復するのに対して、鉄の発光強度は速やかに元のレベルに戻ることを観測
- 鉄と酸素の時間変化の違いの理由を検討中

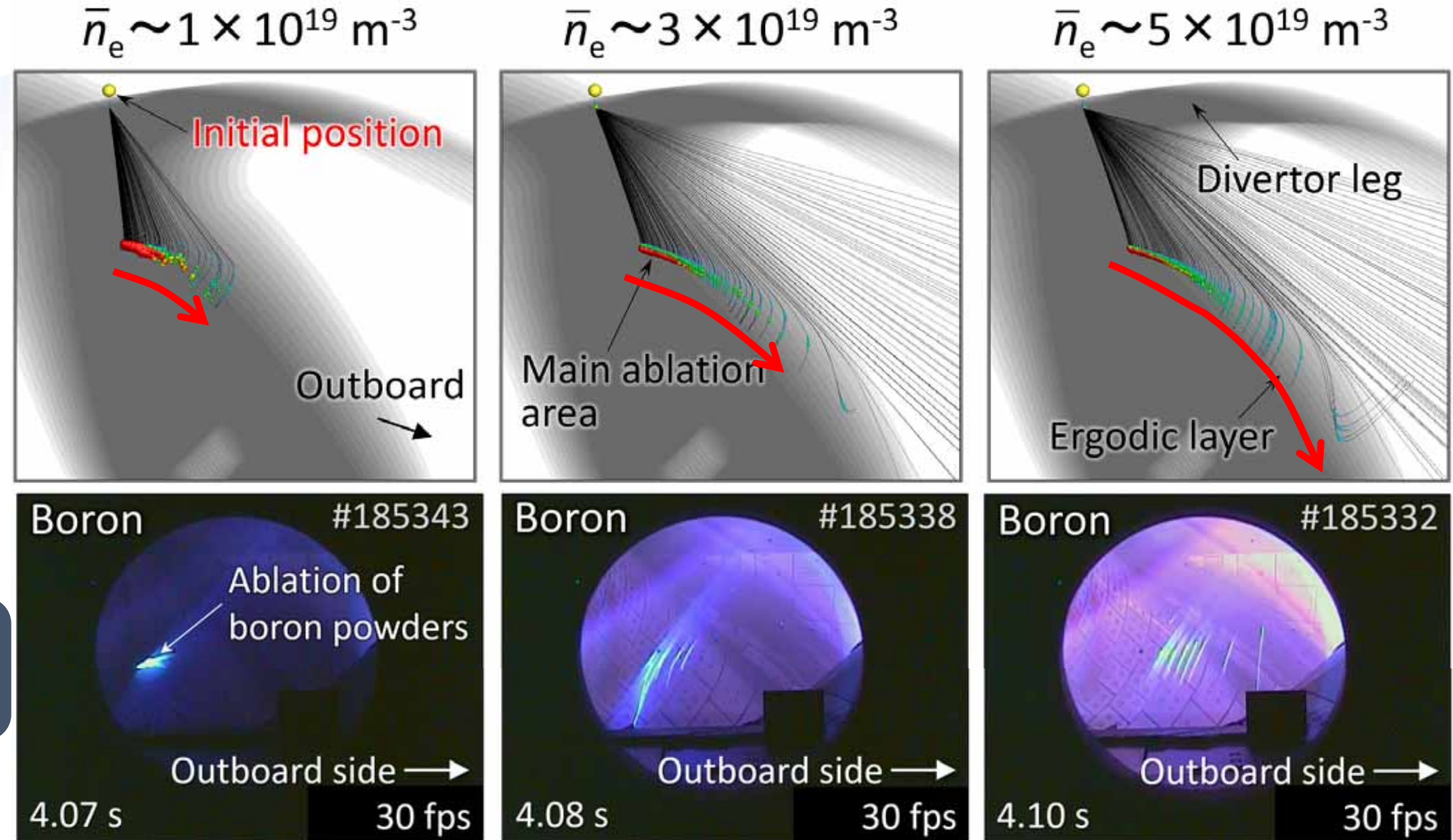
能動的な不純物量制御が可能となる

パウダードロッパー(IPD)ボロン輸送解析 (庄司)

ダスト輸送シミュレーションコード(DUSTT)を用いて, LHDの各プラズマ密度において IPDから投下したボロン(B)粒子の軌道を計算.



高密度放電では, プラズマ中心部までボロン(B)が届かない.



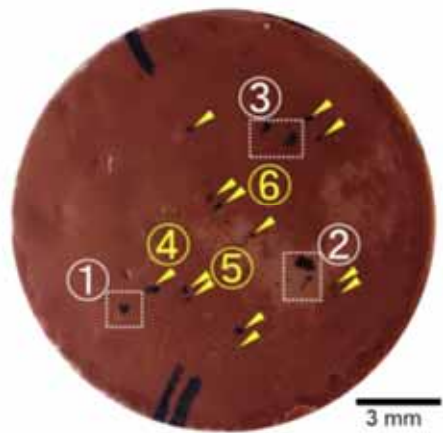
適量かつ効果的なボロニゼーション: **低密度放電でIPDボロニゼーション $\Rightarrow$ 高密度定常プラズマ放電**

核融合装置真空容器内ダストへのトリチウム蓄積の分析（大塚、増崎、矢嶋）

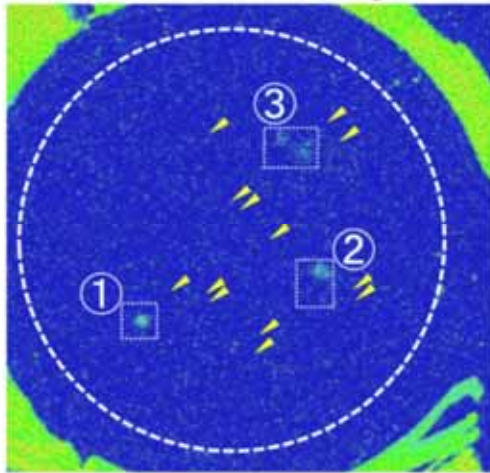
発生したダストの組成やトリチウム蓄積量の解析も進めている

2I – 30

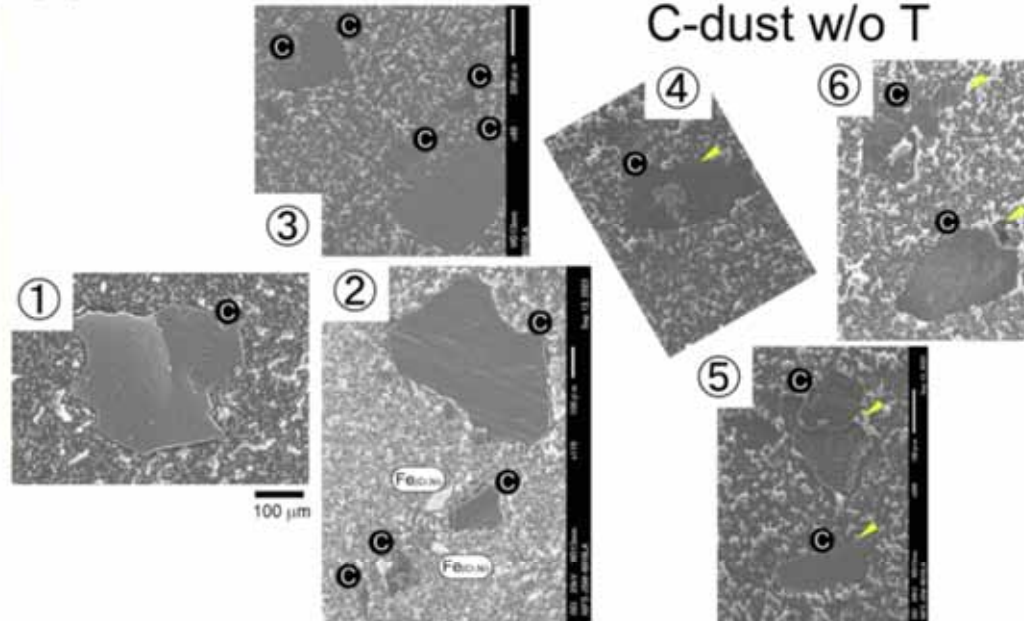
(a) Optical image



(b) Tritium image



(c) SEM image of C-dust with T



➤ 21サイクル実験後、LHD真空容器内のダストを各トロイダルセクション毎に採取。

➤ 微細構造分析、組成分析とイメージングプレート法を組み合わせることにより、個々のダストの特性とトリチウム蓄積を調べた。

➤ フレーク状のダストが多数。堆積層の剥離が成因。

➤ 炭素を主成分とするダストが大多数

➤ タングステン被覆炭素ダイバータ板とゲッターポンプが設置された9I-100セクションでは、タングステンやZr、Tiを含むダストが見られた。

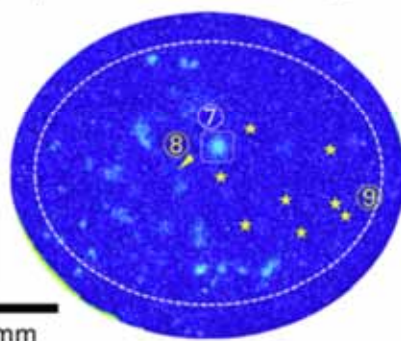
➤ タングステンドアストは炭素ダストに比べてトリチウム蓄積が小さいことが観測された。

9I – 100

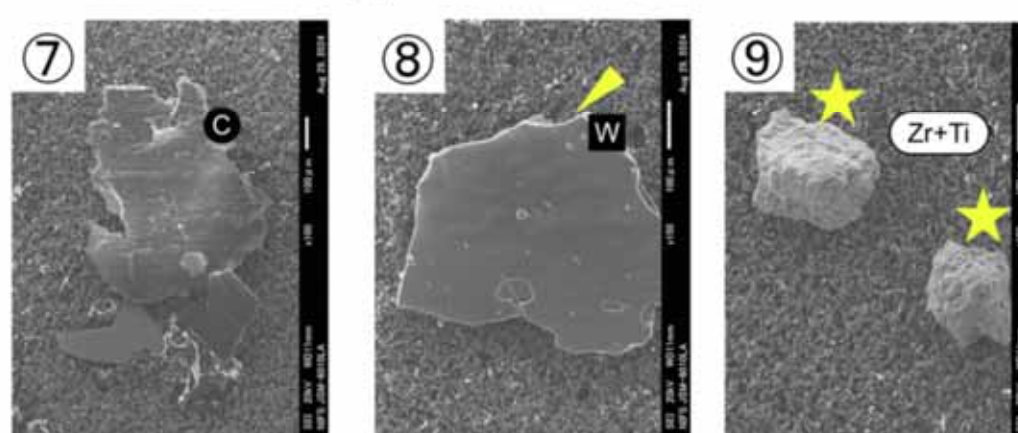
(d) Optical image



(e) Tritium image



(f) SEM images



各課題に対応する 2025年度の研究成果

1.燃料粒子バランス

QUEST第一壁開発（時谷）

2.不純物(ダスト)発生

IPD壁分析（増崎）, IPD輸送解析（庄司）, LHDダスト分析（増崎）

3.材料損耗

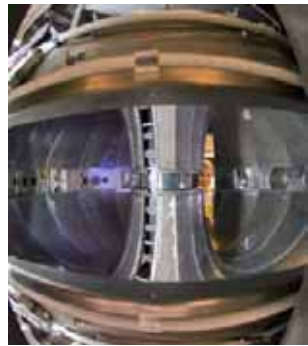
LHD第一壁分析（矢嶋）, W中性子照射（矢嶋）

4.熱除去

液体金属プラズマ対向壁（浜地）, SPS受熱機器開発（森崎）, AMSB受熱機器開発（時谷）

液体金属-プラズマ相互作用研究 (浜地)

多くの磁場閉じ込め装置での実績
と複数の先進的提案

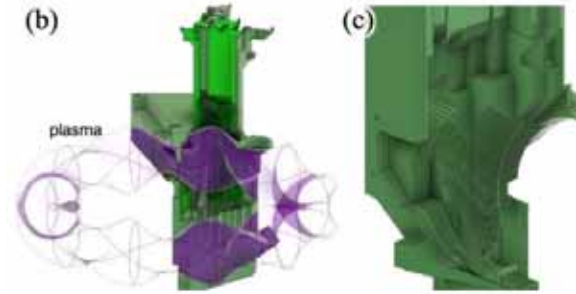


LTX (Lithium Tokamak eXperiment)



CLiFF in ARIES-RS

M.A. Abdou, FED 54 (2001) 181

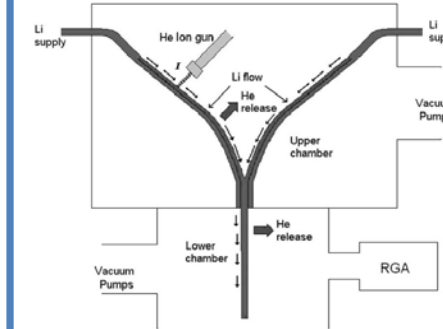


FFHR-b3

J. Miyazawa et al, (2021) nucl.

Fusion

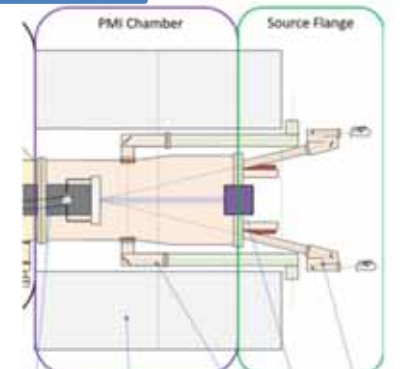
加速しつつある実験室規模研究



FLIRE(米) Li流へのHeイオンビーム実験(2001)



OLMAT (西, 2021) でNBIパルス照射後のCPS Sn



蘭で計画(2025-)される超伝導コイルを備えた対LM直線型装置LiMes-PSI

液体金属-プラズマ間相互作用の
知見は十分ではない



直線型プラズマ装置
での実験研究



PFC設計

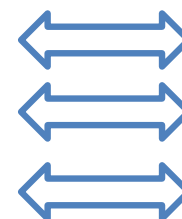


シミュレーション
への統合

長期目標

先行研究

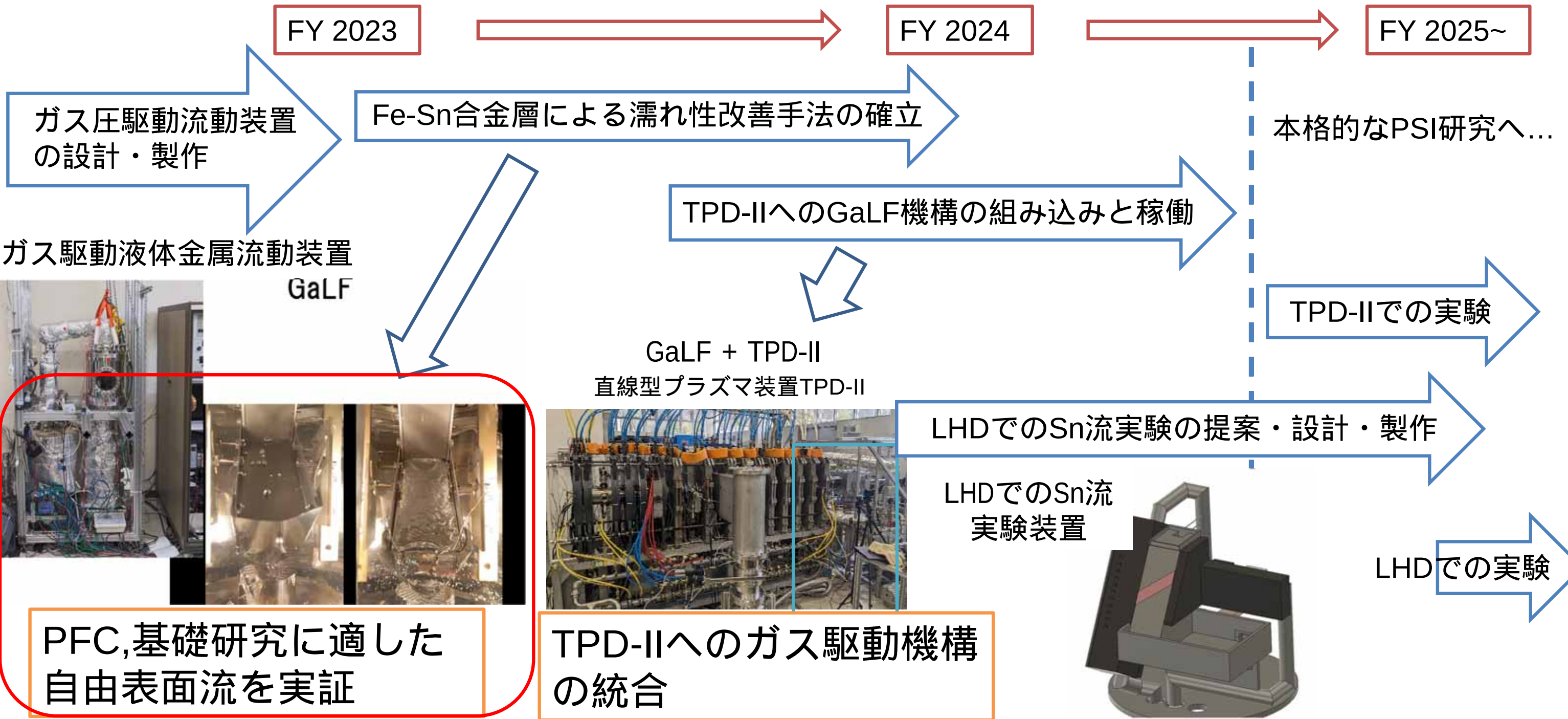
- トーラス装置実験
- CPS、プールのプラズマ曝露
- 粒子吸蔵、透過



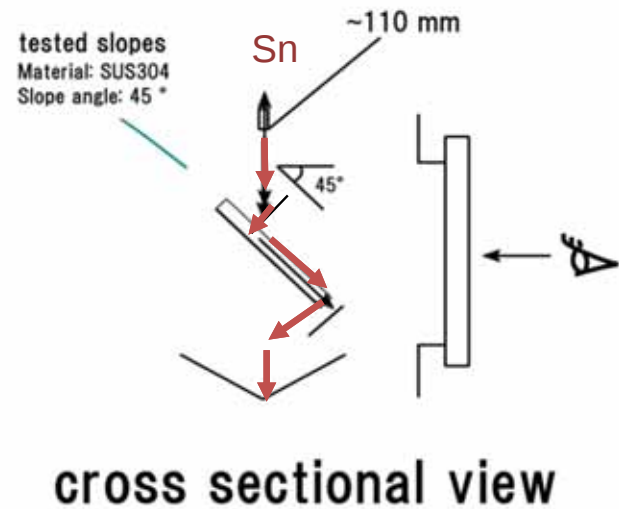
直線型プラズマ装置TPD-IIでの計画

- 制御された実験室実験
- 自由表面流のプラズマ曝露
- 流動する液体金属での粒子輸送

実験プラットフォームの整備状況（浜地）

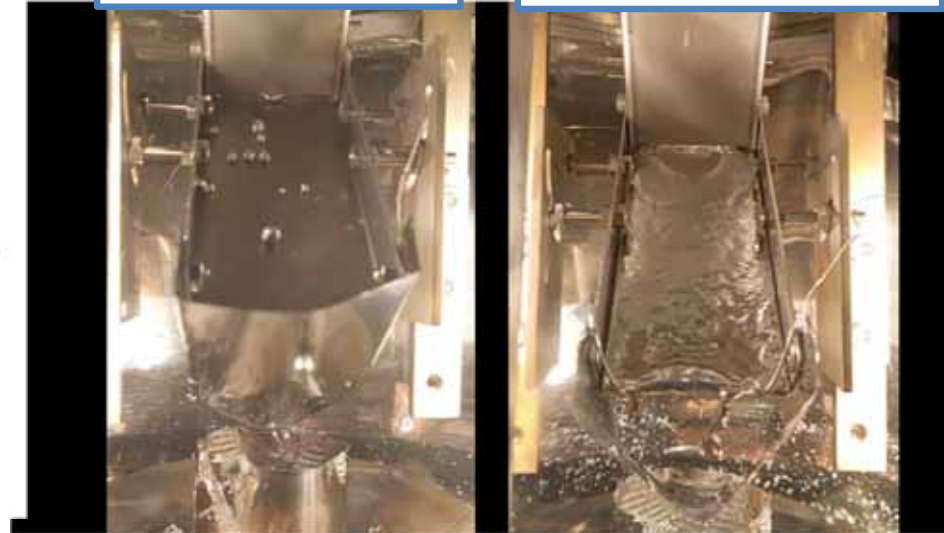


Sn自由表面流形成手法の提案と実証（浜地）

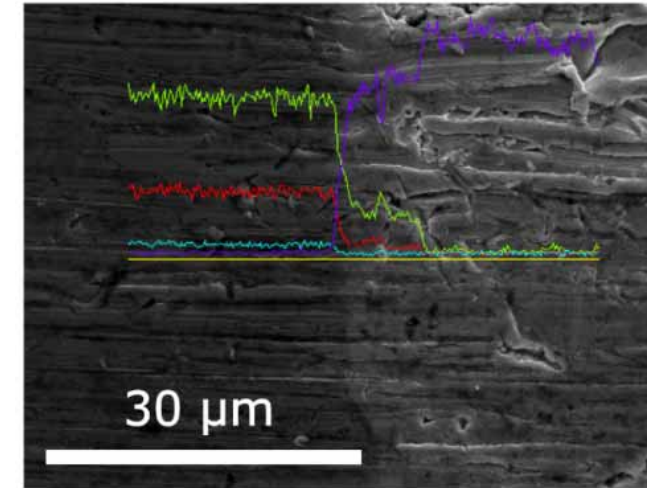


前処理なし
(SPCC)

Sn 550 °C 5 h.
(SPCC)

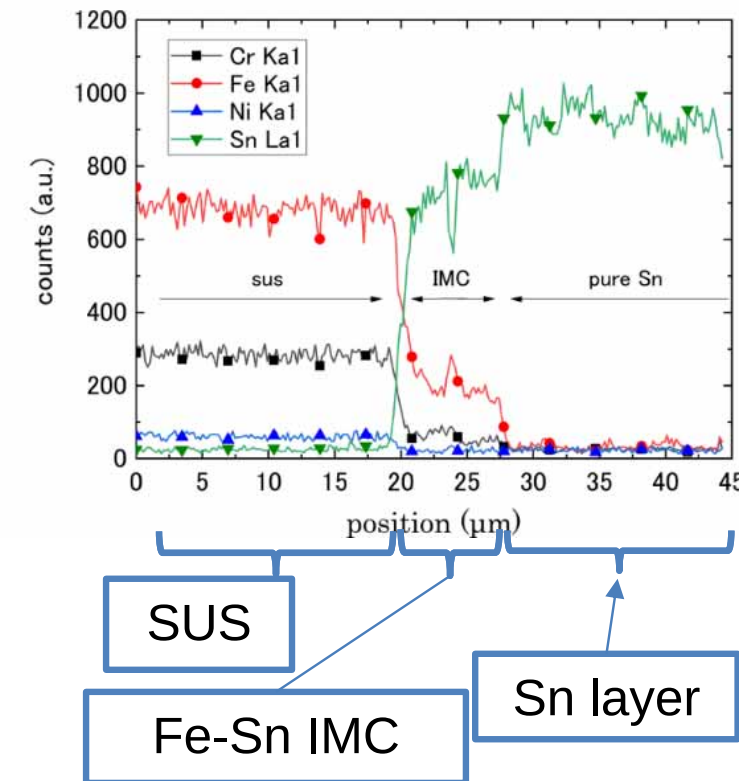


未処理のSPCC鋼と、事前浸漬処理（550°Cの純Snへの浸漬5時間）SPCC鋼での濡れ性の比較



試料断面の電子顕微鏡像とEDX分析経路

ナノ・プロファイリング



- 熔融Snに試験材を浸漬(550 °C 5 h)させ、SPCC鋼表面にSnとFeの金属間化合物層（Inter Metallic Compound 層:IMC）を形成させた。

PFC設計、基礎研究に適した自由表面流の形成手法を確立

放電プラズマ焼結（SPS）による異材接合（森崎）

背景

- LHDのクライオ吸着ポンプに用いる活性炭の開発過程で用いたSPS法を、異種金属接合に応用
- ダイバータタイルのアーマー材(タングステン)とヒートシンク(銅合金)の接合に適用

原理と手法



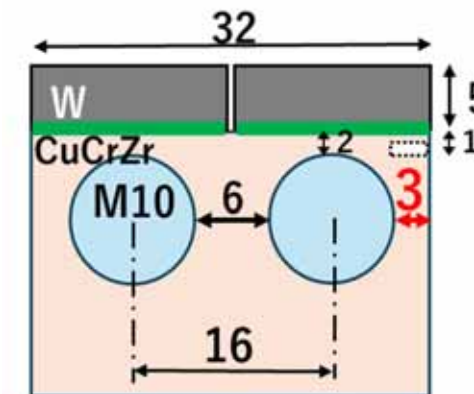
- 被接合材の界面にW,Cu粉末を中間層として充填し加圧
- 繰り返しパルス電流を印加し加熱（H雰囲気）
- 放電による洗浄効果、電場による拡散効果
- 繰り返し放電による塑性化

令和6年度の成果

JT-60SAへの適用を目指した
W-CuCrZrダイバータ試験体の開発

- これまでテストピース、小型モデルによる接合を試みてきたが、R6年度はJT-60SA実機と同じ断面積を持つ試験体を製作
- ACT2による熱負荷試験を実施
- JT-60SAに要求される最も厳しい条件
「 $15\text{MW/m}^2 \times 5\text{秒} \times 100\text{回繰り返し}$ 」を達成
⇒ R7年度、CEAのHADES装置を用いた熱負荷試験を実施予定

断面模式図



2025年度の各課題について まとめ

定常高性能プラズマ実現へのPWIおよび炉工学に関する4つの課題に関して、
「**ナノスケールのプロファイリング技術**」を用いて現象理解・解決への研究を継続中。

1. 燃料粒子バランス

- AMSBによるW/GlidCop[®]/SUS中規模第一壁試験体を開発し、QUEST第一壁での初期照射実験を行った。

2. 不純物(ダスト)発生

- IPDによる実時間ボロニゼーションでは、パウダー落下中にプラズマ中のFe, O不純物量が減少することを確認した。
- ダスト輸送シミュレーションコード(DUSTT)との比較により、IPDを用いた適量かつ効率的なボロニゼーション手法を提示した。(ボロン量の最適化)

3. 材料損耗

- W中の空孔集合体の成長に水素同位体濃度が関わっていることを実験と分子動力学法(MD)により明らかにした。

4. 熱除去

- 鉄鋼表面の微細組織制御により、鋼材表面に液体Snを均一に流せる技術を開発した。
- JT-60SAへの適用を目指したW/CuCrZrダイバータ試験体の開発が進展した。

内容

1. 研究成果

- ナノスケールのプロファイリング技術
- 2025年度 各課題の研究成果

2. フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム

- 核融合科学の新しい学際的展開

フュージョンエネルギーの早期実現に向けた核融合科学研究所の取り組み

フュージョンサイエンスヒルズ構想

核融合科学研究所 土岐キャンパスの将来計画

研究基盤と環境の整備計画

ナノ・プロファイリングの
基盤となるプラットフォーム

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を実現するためには、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『ミクロ集団現象』のメカニズムを解明することが必要
- 『ミクロ集団現象』の理解のために、高温プラズマのミ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、多様な実験を展開できる強磁場低温設備の更新整備
- ヘリウム資源の制約を受けない核融合炉実現に必要な液体水素実験環境の新規整備

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

ベンチャーラボ

- 産業界との連携研究のための専有ラボ群を整備し、スタートアップ等を支援
- フュージョンエネルギー産学連携研究室を設置し、産業界を受け入れる体制を整備済

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や国際会議等、国際交流、学際交流の拠点となる場を新規整備。地域共創の拠点としても活用

シミュレーション科学棟

●フュージョン・インフォマティクス

●核融合・プラズマデータベース

- 核融合・プラズマ実験で得られたビッグデータの共有と公開



「フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム」予算が採択

背景と目的（要約）

- 電子顕微鏡解析装置群を用いた「**ナノ・プロファイリング**」をさらに発展させるため、電子顕微鏡装置群の高分解能化、加工・観察の高速化が必須となる。本計画では、以下に示す顕微鏡装置群を導入・強化することで「**フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム**」を立ち上げる。

フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム新規導入装置構成：**2024-2025年度 採択（補正予算）**

- **先進ナノ加工**：革新的マルチイオン(Xe, Ar, O, N)プラズマFIBカラムと高分解能FE-SEMカラムを組み合わせたFIB-SEM装置に、**日本初導入**  **レーザー加工機能が付属され、トリプルビームによる桁違いの高速加工／観察が可能（Laser PFIB）**
- **ナノ構造解析**：高分解能透過型電子顕微鏡(**S/TEM**)機能とマルチシリコンドリフト元素分析装置による原子レベルの高速TEMイメージングが可能
- **原子レベル表面観察**：広範囲の試料上を原子レベルで3次元多点計測可能な原子間力顕微鏡(**AFM**)
- **光物性測定**：反射率・透過率・散乱・非線形吸収率などの測定によって物質の電子状態を推定（**TiSappレーザー**）

期待される成果・効果

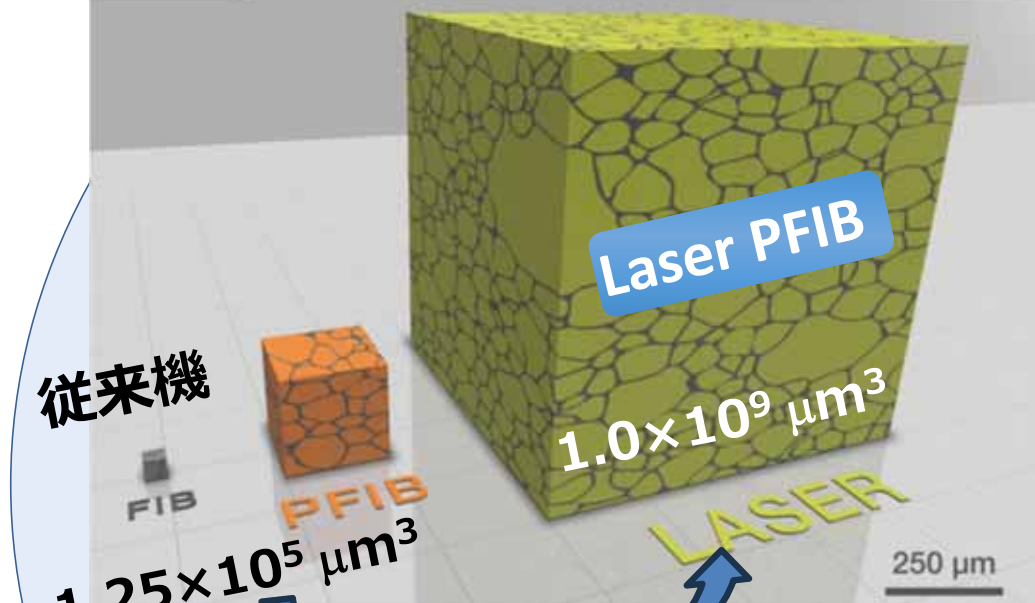
- 「**フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム**」を立ち上げることによって、世界で類を見ない**核融合材料科学・先端技術の発展**が可能となり、NIFSと外部研究者を含めた**核融合研究の中核拠点が形成**される。
- 同プラットフォームは核融合科学の先端技術である「**ナノ・ファイリング**」の基盤となるものであり、同技術で得られた学術的知見は核融合科学の発展だけでなく取り扱う物理を軸として産業界を含めた異分野へもイノベーションを引き起こすポテンシャルを持っている。

他機関では実施できない「ナノ・プロファイリング」が可能に

ハブとなる装置は**日本初導入**

nm ~ mm レベルで**桁違いの高速加工が可能**

同じ加工時間での従来機との加工体積の違い



Datasheetより
www.thermofisher.com

体積換算で約10,000倍の高速加工

先進ナノ加工

Laser PFIB

Talos F200X G2
(S)TEM

www.thermofisher.com

加工後の試料を新規ナノ・プラットフォーム
装置群で観察・分析

ナノ構造解析

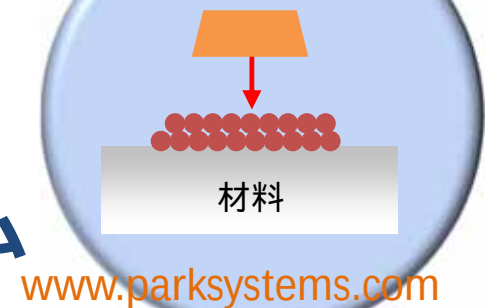
S/TEM

Helios 5
Laser Hydra

www.thermofisher.com

原子レベル
表面観察

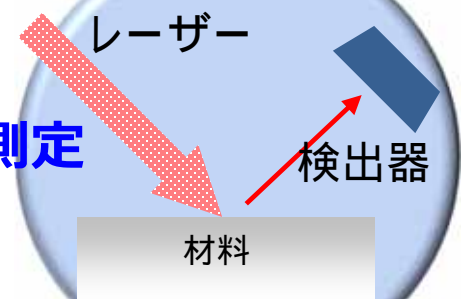
AFM



TiSappレーザー

レーザー

光物性測定



– 日本導入実績

• 実績なし → **今回が日本初導入**

– 世界導入実績 (2024年時点)

• 6台のみ

⇒ スイス連邦工科大学チューリッヒ校, バーミンガム大学, マックスプランク研究所・ハンブルク など

「ナノ・プロファイリング」による核融合科学の学際化を推進

フュージョンエネルギー・ナノプラットフォーム

2025年度新規導入主要構成装置群：

Laser PFI



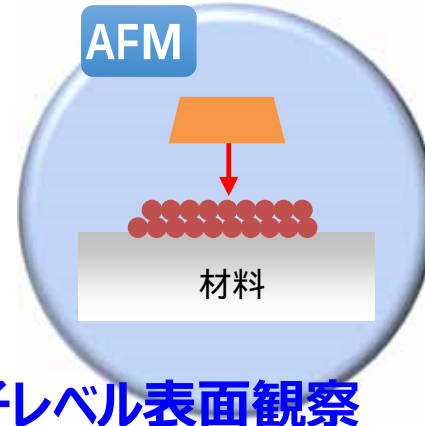
先進ナノ加工

S/TEM



ナノ構造解析

AFM



原子レベル表面観察



既存の装置群

- 核融合研究の中核拠点を形成
- 数多くの核融合研究者と関連する異分野研究者に利用していただく環境・仕組みを整備
- 大学・研究機関・産業界を巻き込んだ運用を加速させる

- － 既存装置群での顕微鏡関係の利用実績
 - ・ 共同研究者：約30人
 - ・ 所内利用者：約30人
- － 新規導入顕微鏡群により今後共同研究に発展するかもしれない研究者数：約200人
- － 研究力
 - ・ 民間との共同研究件数(2020～2024)：6件
 - ・ 本件整備計画の代表研究者(1名)の関連論文数：約10件／年
 - ・ 関連特許取得件数(2019～2024)：5件（うち、権利化済特許5件）
- － 海外機関との関係(今後の共同研究可能性を含む)
カリフォルニア大学サンディエゴ校(UCSD), カリフォルニア大学サンタバーバラ校(UCSB), オークリッジ国立研究所(ORNL), マンチェスター大学, フランス原子力・代替エネルギー庁(CEA), マックス・プランク・プラズマ物理学研究所(IPP), カラム核融合エネルギーセンター(CCFE), フィンランドVTT技術研究センター, スウェーデン王立工科大学(KTH), オランダ基礎エネルギー研究所(DIFFER)

「ナノスケールのプロファイリング技術」学際的展開：研究年次計画

