

2023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
小林 真

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

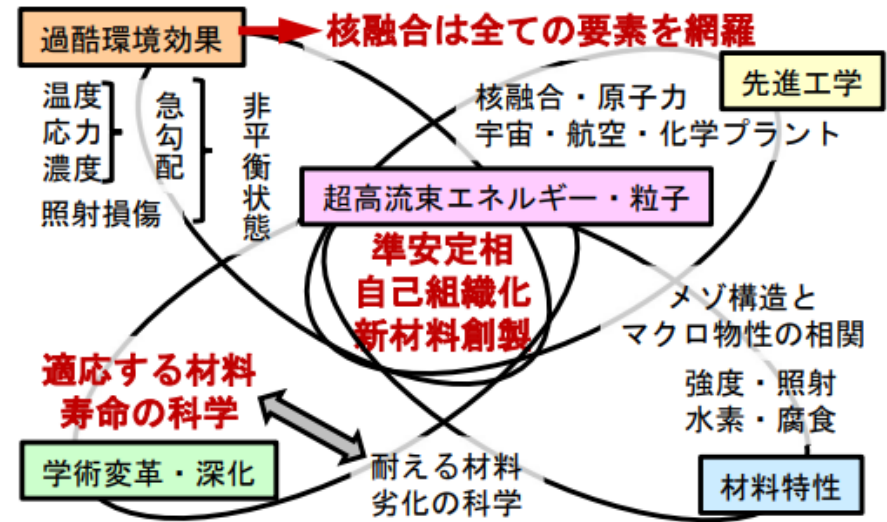
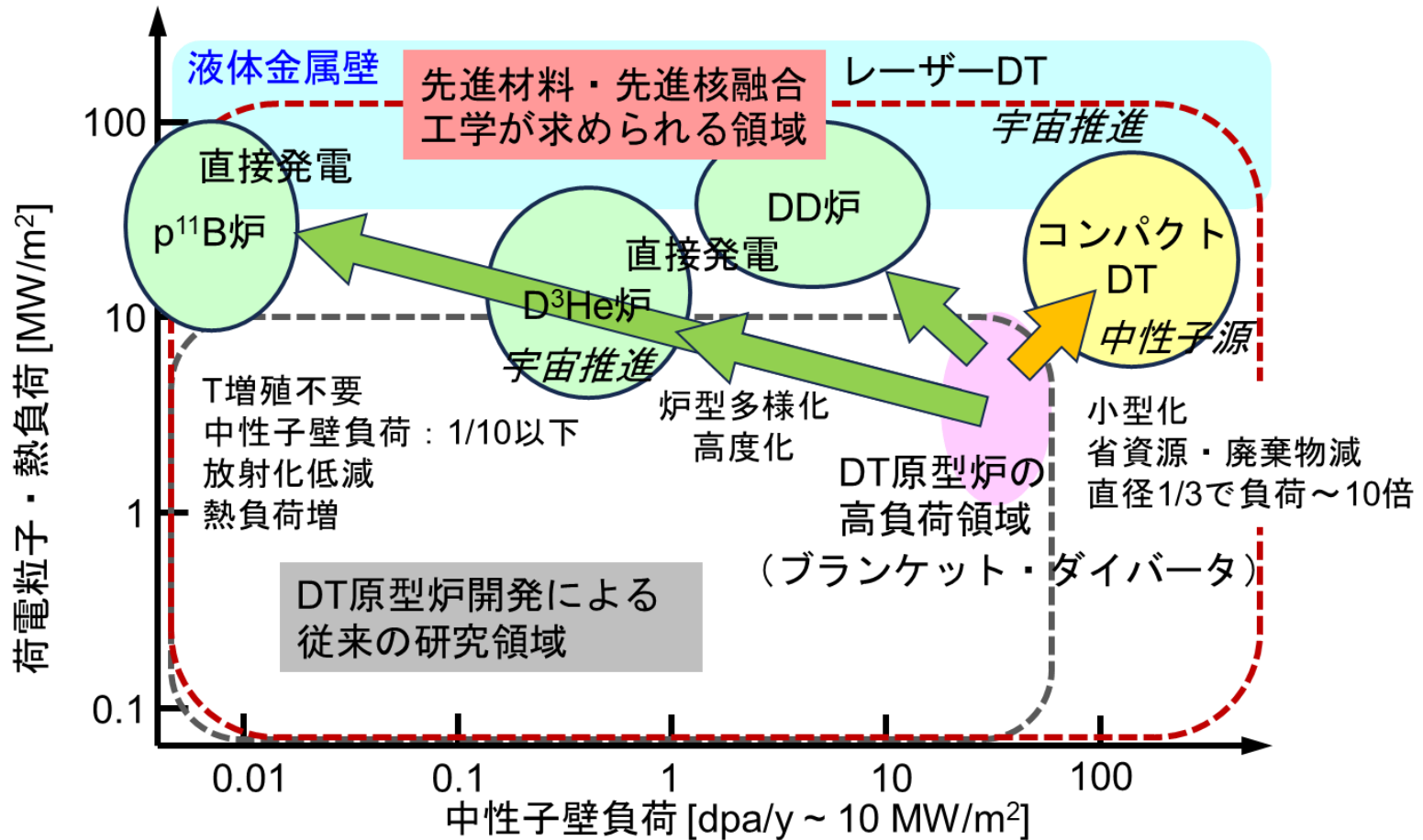


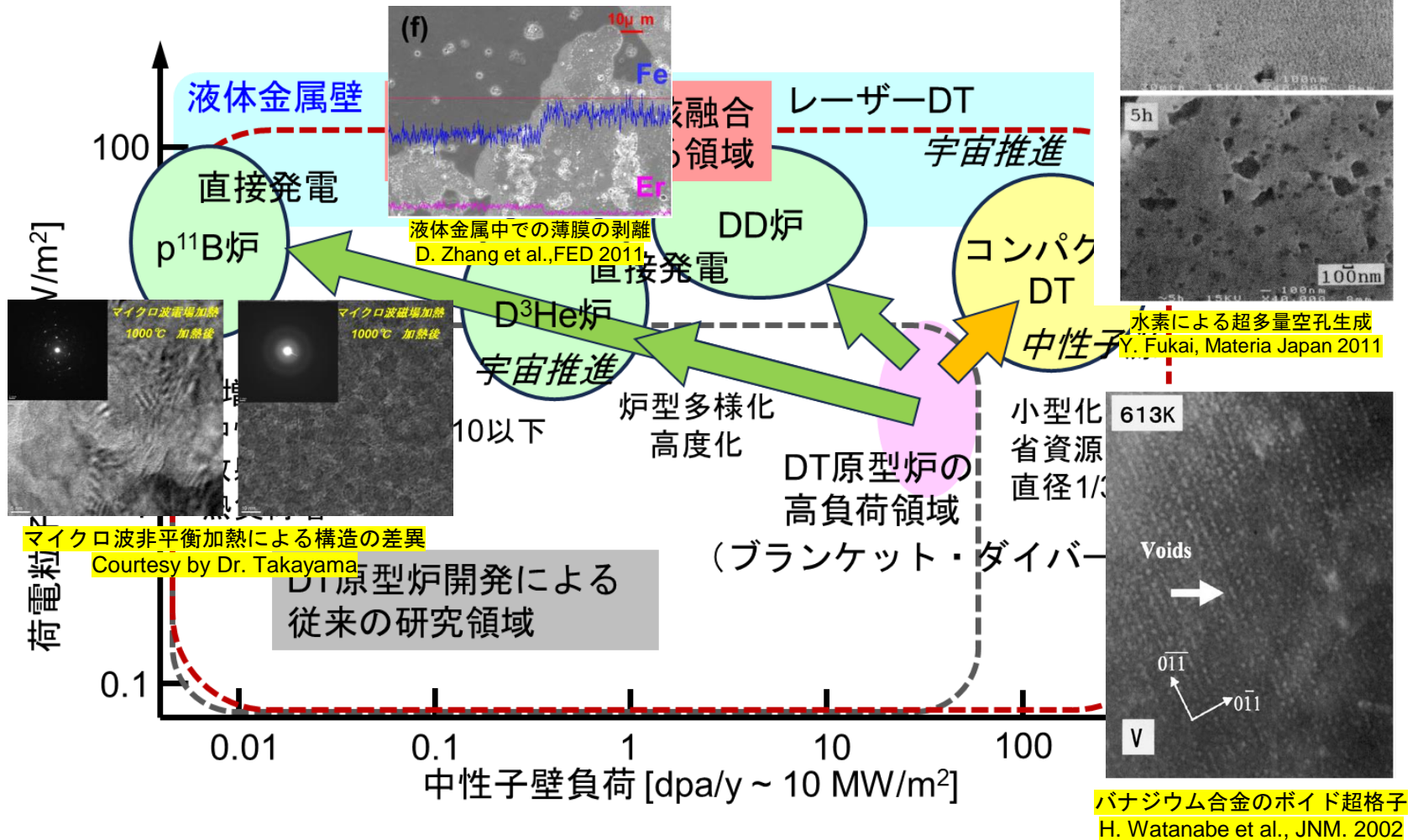
図 ユニットテーマの焦点

アカデミックプラン（研究領域）



- ◆ 超高流束領域に拡大した物理環境下での材料科学により、広い時空間スケラビリティを有した包括的材料モデルを構築し、先進核融合炉への適用を可能とする。

アカデミックプラン（研究領域）

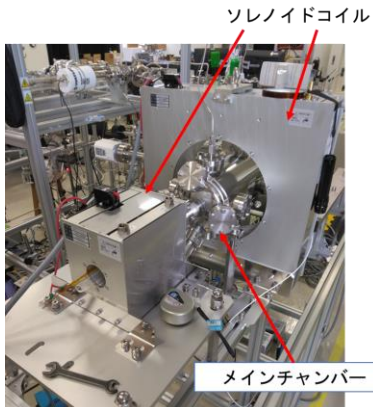


- ◆ 高い中性子壁負荷環境における格子欠陥の高密度導入→材料寿命
- ◆ 高密度水素・格子欠陥の相互作用→トリチウムインベントリ
- ◆ 急峻な温度勾配による物質移動→特性・機能の変化と破壊
- ◆ 液体金属壁の共存性→腐食・事故リスク

アカデミックプラン（研究領域）

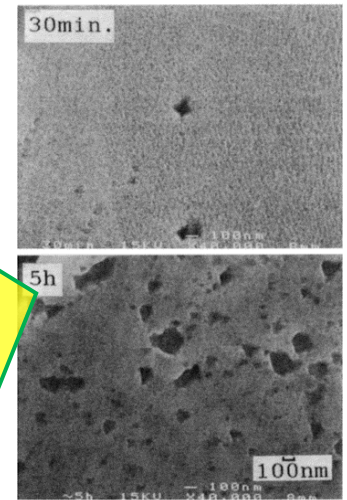
高密度水素駆動相転移

- 水素超透過応用



水素超透過試験装置

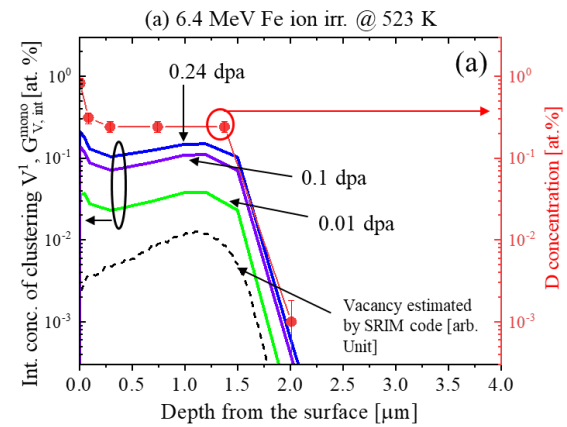
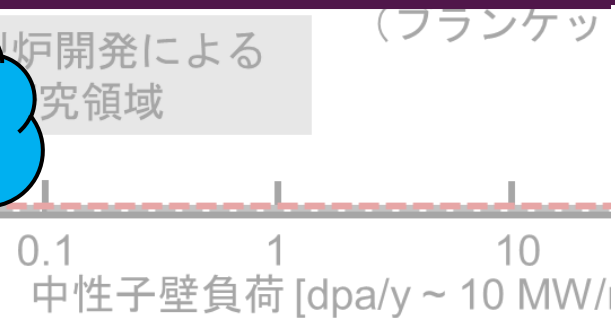
水素流・中性子照射環境下での材料構造変化の系統的理解と制御



水素による超多量空孔生成
Y. Fukai, Materia Japan 2011

照射欠陥移行現象の体系化

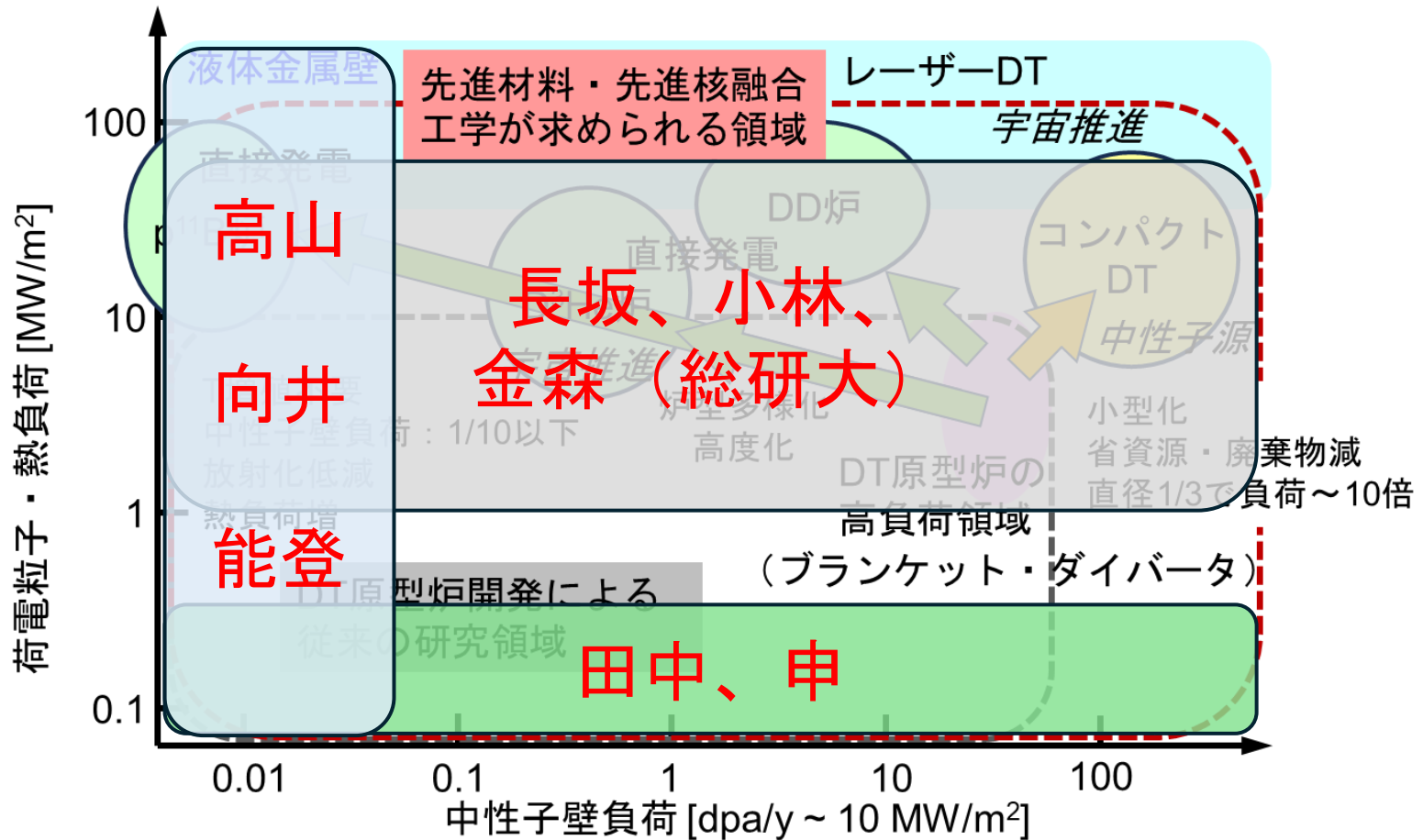
- 欠陥ダイナミクスシミュレーション



タングステン中照射欠陥ダイナミクスシミュレーション

高密度水素挙動までカバーする水素輸送理論と照射欠陥ダイナミクスの体系化により、超高流束下での材料構造変化を予測可能とする。

アカデミックプラン（個別の研究領域）



各領域におけるキーワード

高粒子・熱負荷：高温科学、耐熱材料、非平衡化学反応

高損傷率：機能材料、耐照射材料

重畳領域：自己組織化と物性の相関、非平衡相転移、非平衡化合物

➤ 各研究内容の詳細は次の発表で紹介します。

アカデミックプラン（プラットフォーム）

Fusion2030研究会炉工ワーキング最終報告書より、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・プラズマ照射装置が挙げられた。

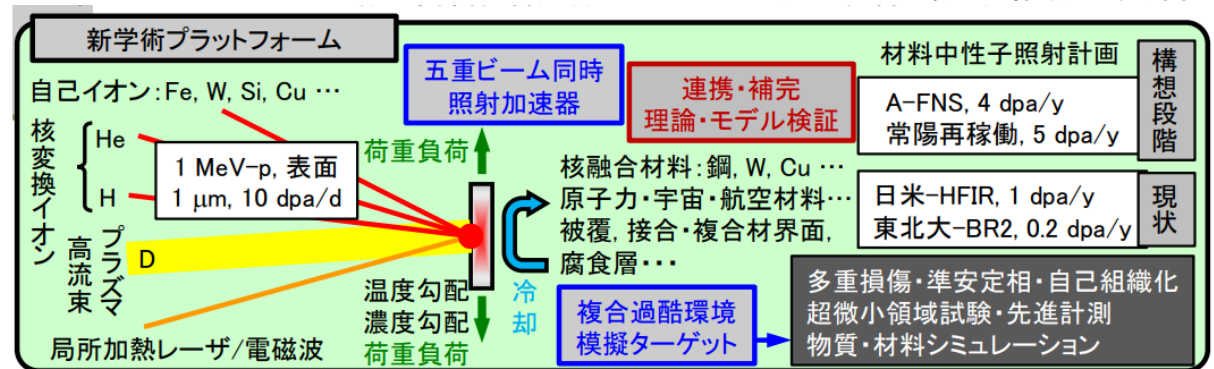
- この提言をベースに、多重ビーム・プラズマ同時照射照射・その場高精度分析可能な新学術プラットフォームを検討。
- 本件を**プラズマ・複相間輸送ユニット**とユニット間連携プロジェクトとして推進することとした。
- 核融合研究だけでなく、より**広い学際研究に展開可能なプロジェクトへの拡張**を検討。

核融合炉工W：今後必要な共通研究リソースを集約

メンバー 江原真司(東北大)、伊藤悟(東北大)、近藤創介(東北大)、片山一成(九大)、石山新太郎(弘前大)、八木重郎(京大)、森芳孝(光産業創成大)、菊地崇志(長岡技科大)

<ul style="list-style-type: none"> ・ サイエンスチャート集計結果より、中間報告「これまでの成果」、「今後の課題」、今後必要な研究リソース/共同利用設備を纏めた ・ 炉工学研究者へフィードバックし、意見を集約する。 <p>今後必要な研究リソース/共同利用設備</p>	<p>構造材料：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 核融合炉に特有な環境と照射が重畳する「場」
<p>超電導コイル分野：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 原型炉以降の核融合炉環境を模擬した大型導体通電・機械試験装置 ・ 絶縁耐圧試験装置や液体水素製造装置 ・ 照射場の導入 	<p>ブランケット：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 複合環境の実験プラットフォーム（磁場・流動・腐食etc） ・ Be取り扱い・同位体測定などのできる共同利用実験室 ・ 関連他分野の取り込み（機械系研究者、産業界）に資する交流の場
<p>トリチウム：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 中性子照射トリチウム製造施設 ・ 大量トリチウム取扱施設 ・ トリチウム循環システム 	<p>慣性炉工：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 慣性炉システムを束ねる中核研究者 ・ 慣性核融合へ展開可能な液体ブランケット装置 ・ 液体金属ループを活用した中性子エネルギー回収/トリチウムプリーディング等のニュートロニクス ・ 炉壁材料研究のための各種負荷試験・各種分析装置
<p>ダイバータ：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高温・高磁場環境 ・ 短パルス熱負荷照射 ・ 中性子照射場 	

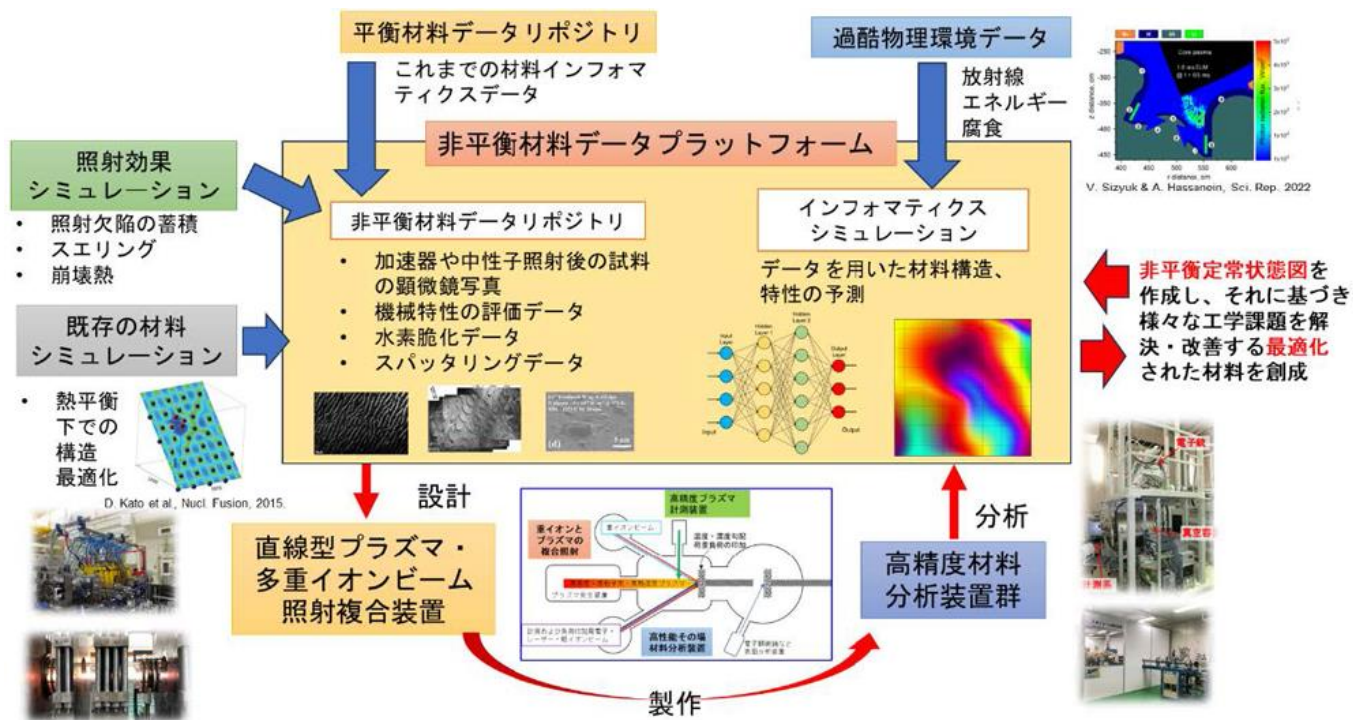
ユニット設立報告会資料



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

直線型プラズマ・多重イオンビーム複合照射装置による材料組成・構造・元素分布・密度制御、多角的・高精度な材料分析装置群による材料の三次元微細構造・物性のその場計測と、材料インフォマティクス研究との相乗により、時間変化や温度変化など、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」を予測可能とし、多様な社会実装可能な様々なアウトカムを目指す。



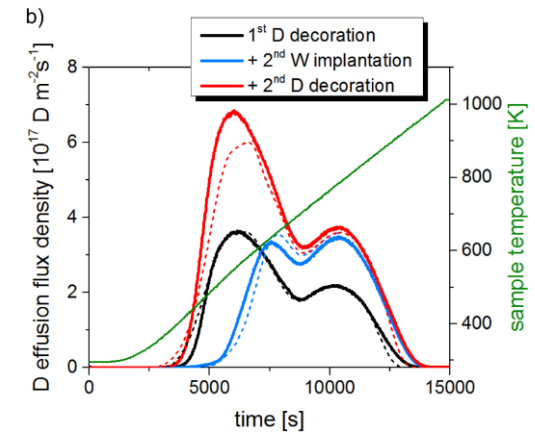
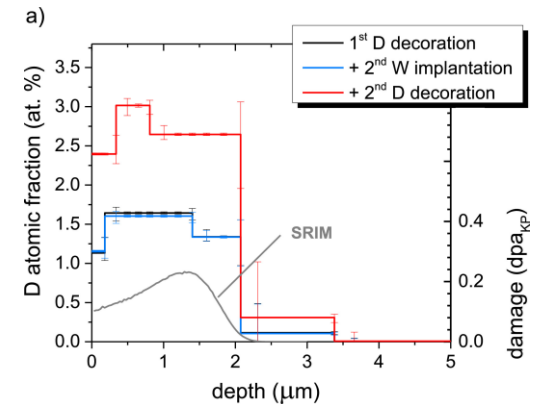
NIFSホームページにて掲載: <https://projects.nifs.ac.jp/spices/>

SPICES計画の学術課題

SPICES計画では、以下のような学術課題を明らかにし、最終的に非平衡定常状態図の予測を可能とする。

- ◆ 超高流束定常流下で自発出現する結晶構造の物理
- ◆ 自己組織化構造と材料物性の相関
- ◆ 急峻な温度・濃度勾配下での非平衡輸送現象
- ◆ 水素共存下における欠陥構造の安定化
- ◆ エネルギー付与環境下での加速的電気化学反応
- ◆ 炉システムにおける水素同位体輸送統合コード開発
- ◆ 水素同位体効果
- ◆ 高密度水素含有化合物の形成

- ✓ 凝縮系における集団現象
- ✓ 過酷環境と協奏し適応する材料の開発
- ✓ 核融合炉内の物質循環を理解・制御
- ✓ 高密度水素制御工学

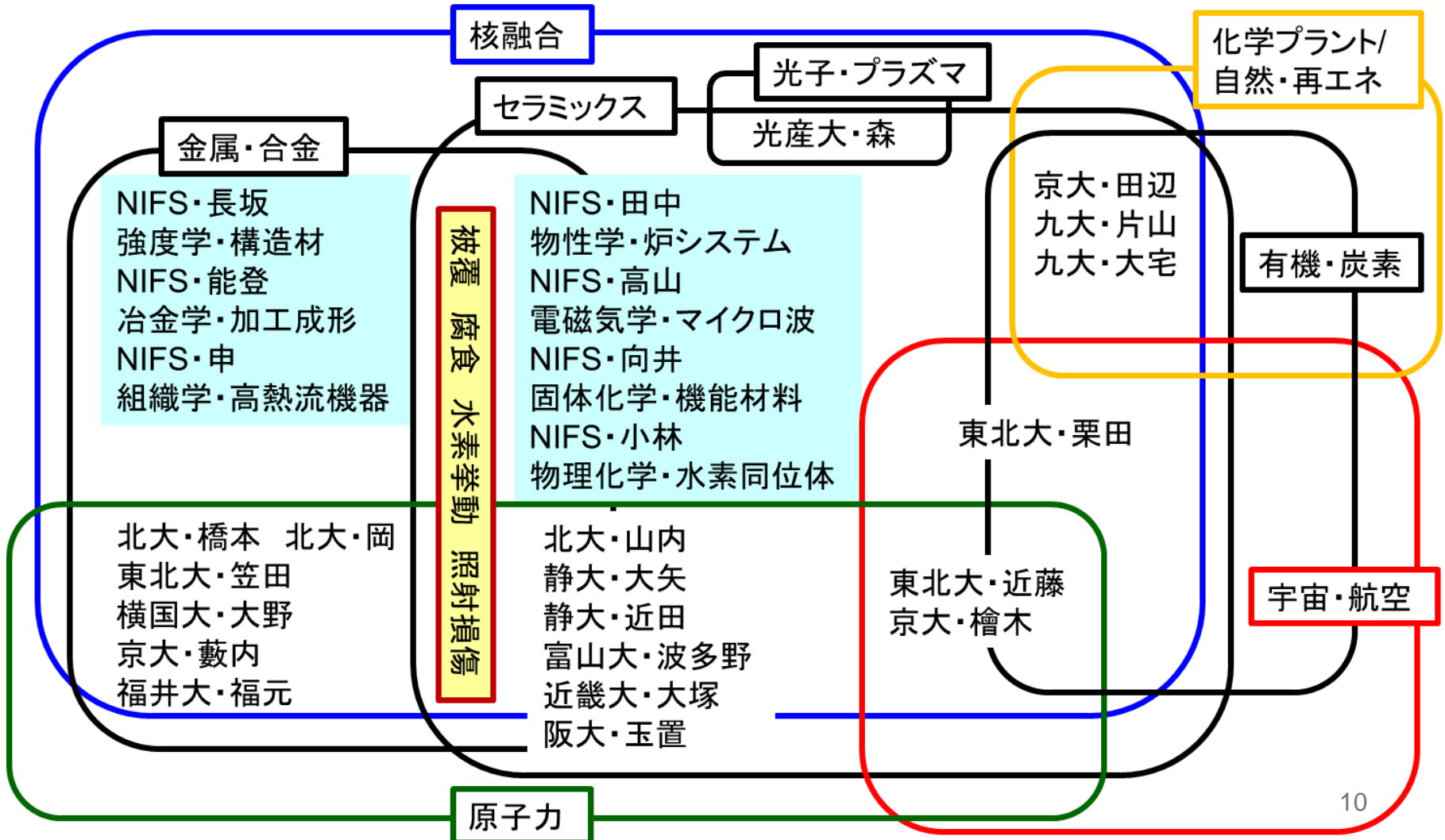


水素共存下の空孔密度は、非共存下での飽和密度を上回る。
T. Schwarz-Selinger, et al., Nucl. Mater. Energy, 17 (2018) 228-234.

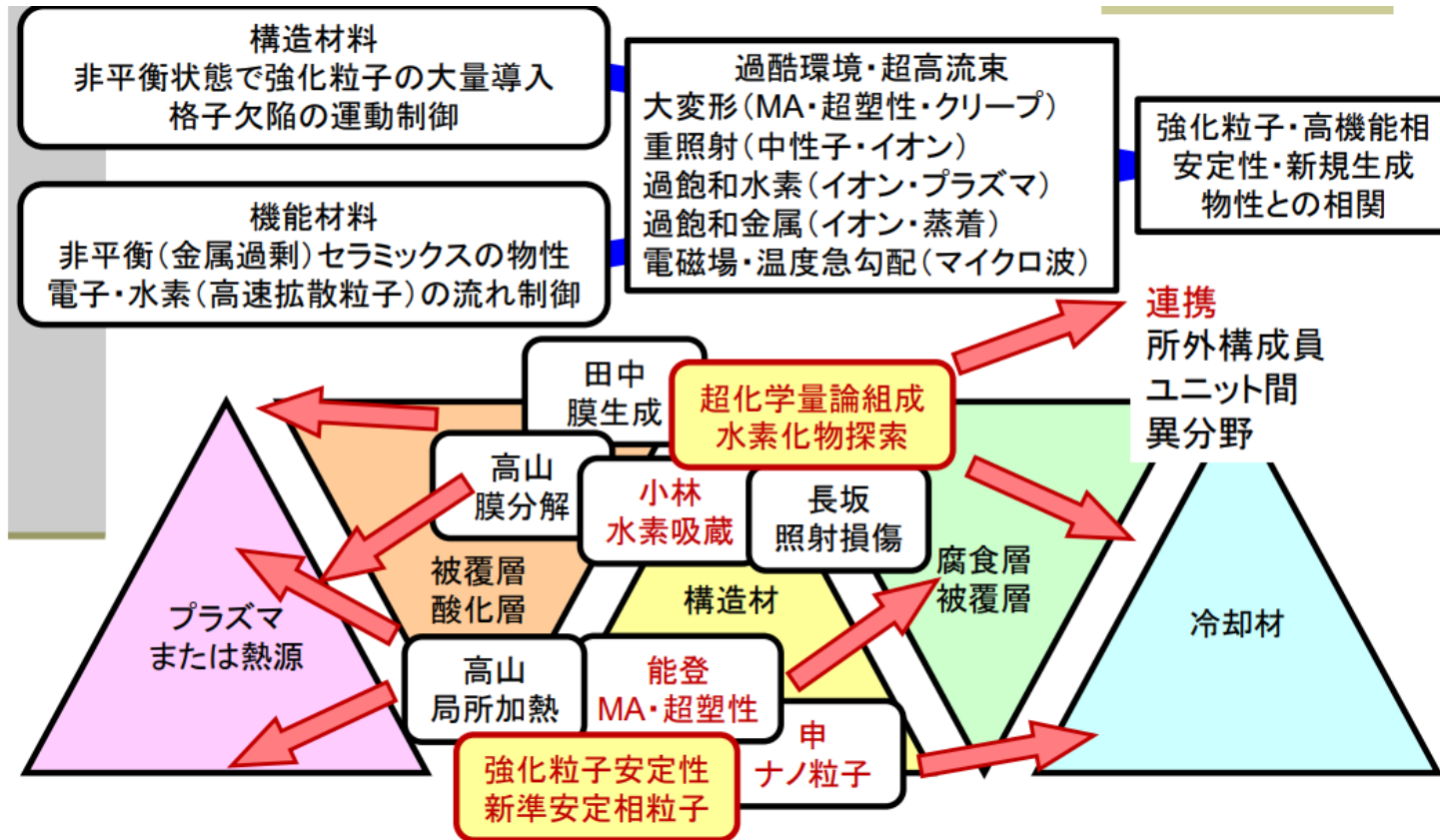
今後の加速器研究、直線型プラズマとの連携による物理研究、データサイエンスとの連携など、個別の議論を進めている。

協力組織体制（役割分担）

核融合だけでなく、様々な工学における過酷環境領域で使用する材料研究をカバーする研究者集団



協力組織体制（役割分担）



- ✓ 金属中格子欠陥（長坂）、セラミックス中金属元素（田中）、セラミックス中酸素欠損（高山）、金属中高密度水素（小林）により材料中に非平衡状態を形成
- ✓ 材料物性分析（申）、試験体製作（能登）、物性シミュレーション（向井）による包括的研究グループを構築。

協力組織体制（コミュニティとの意見交換）

- ◆ ユニット研究戦略会議：毎月、2時間程度、平均的な参加人数：15名
- ◆ 照射研究の今後とイオン加速器利用に関する検討会
- ◆ 研究部セミナー：材料の欠陥生成を予測する電子的記述子の探索（向井 啓祐）
- ◆ 2023年度プラ核学会 炉工シンポジウム
 - S2-1 趣旨説明、小林 真
先進炉研究を学術・開発研究の協働で進めるために課題を整理したい
 - S2-2 先進核融合炉開発の現状と炉壁における物理環境、小西哲之
民間と知識の共有（人の交流も含めて）、先進材料の照射施設が必要
 - S2-3 高損傷率領域における材料研究、長谷川晃
材料の選定幅は広くない。ライセンスには照射データが不十分
 - S2-4 材料中の損傷と燃料粒子の相互作用とダイナミクス、波多野雄治
高濃度水素・空孔の形成・安定化・物質移動の相関性を理解・制御
 - S2-5 マイクロ波加熱による非平衡場での結晶構造挙動と物性物理、高山定次
温度勾配により生成する化合物の物性は異なる可能性がある
 - S2-6 液体金属の適用と技術課題、片山一成
流動系におけるトリチウム挙動の予測精度の向上が必要

ユニット化に伴う共同研究の広がり（国内）

以下の課題について、超高流束協奏材料ユニットのアカデミックプランに位置付け、2024年度核融合科学研究所一般共同研究として推進する。

研究課題名	研究代表者	世話人
FeCrAl合金のクラッド技術開発	大野直子 (横浜国立大学)	長坂琢也
液体リチウム中のバナジウム合金の腐食とトリチウム挙動の影響	片山一成 (九州大学)	長坂琢也
低温照射した低放射化低濃度チタン濃度含有V-Cr-Ti合金の照射挙動	福元謙一 (福井大学)	長坂琢也
応力が存在する材料中の燃料粒子挙動	山内有二 (北海道大学)	長坂琢也
金属薄膜への水素吸蔵特性に及ぼす表面効果に関する研究	玉置真悟 (大阪大学)	小林 真
中性子増倍材を添加した先進固体ブランケット材料におけるトリチウム回収挙動	大矢恭久 (静岡大学)	小林 真

ユニット化に伴う共同研究の広がり（国外）

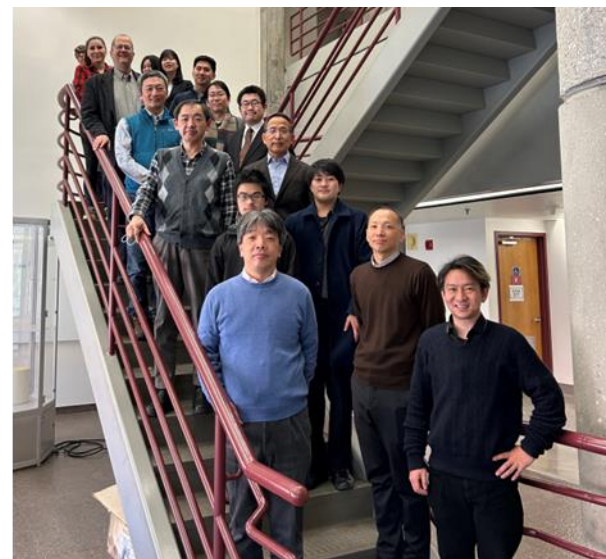
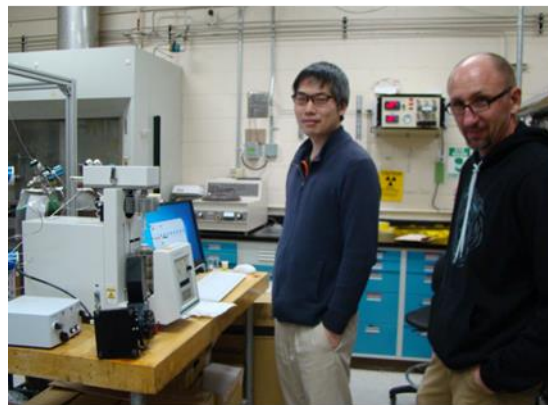
◆ 所内・所外メンバーの多くが日米科学技術協力事業 FRONTIER 計画に参加。オークリッジ国立研究所やアイダホ国立研究所にて、**中性子照射により損傷を与えた第一壁材料の力学特性変化や水素同位体輸送現象**との相関性などに関する研究だけでなく、計画の運営や管理を行った。

◆ **若手研究者を派遣**し、研究を実施するだけでなく、海外の研究者とのネットワーク構築を進めた。

◆ **特に若手研究者の育成や研究ネットワークの拡大を目標**に、ASPIRE等大型国際共同研究に係る外部資金獲得に挑戦する。

2023年度の若手研究者(39歳以下)・大学院生派遣実績

課題実施者	所属	課題	派遣先
北村嘉規	東京工業大学	液体金属錫中に浸漬したODS FeCrAl alloyの腐食組織分析	オークリッジ国立研究所
岡 弘	北海道大学	Fe-W-Cu複合材料界面近傍における照射損傷組織	オークリッジ国立研究所
関 航太郎	東北大学	爆発接合タングステン被覆F82H界面強度特性に及ぼす中性子照射影響	オークリッジ国立研究所
小林 真	核融合科学研究所	熱中性子シールドした中性子照射タングステン中の高温下での重水素滞留挙動に及ぼす結晶構造添加元素の影響評価	アイダホ国立研究所



大型研究予算申請

○JST 先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)

FRONTIER計画に係る研究者を中心に、超高流束協奏材料、プラズマ・複相間輸送ユニット、プラズマ量子プロセスユニット、メタ階層ダイナミクスユニットメンバーと連携し、原子炉等での材料照射に関する国際ネットワークの拡大、若手研究者の育成について検討し、ユニット研究戦略会議等での審議を経て申請した。

● エネルギー、マテリアル領域

➤ 不採択

➤ 外部資金の獲得に向けて引き続き活動を行う。

○ムーンショット型研究開発制度

早い段階から本事業の検討を開始。

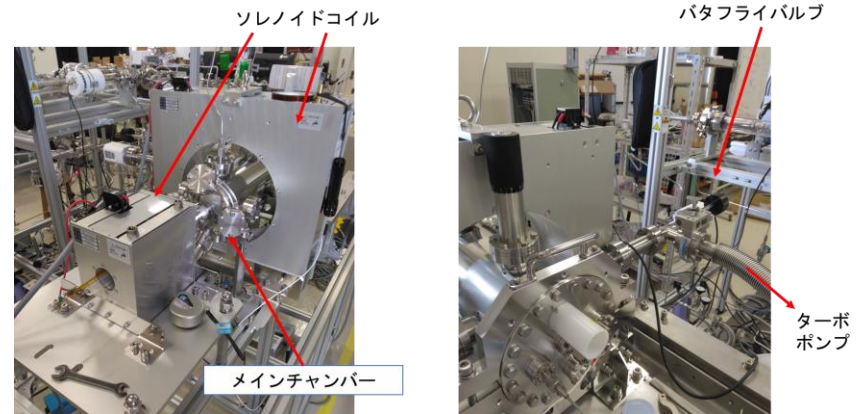
数グループで材料工学関連研究の提案を検討している。

特筆される成果（プラットフォームの整備）

ユニット主要テーマを推進するためのプラットフォーム整備

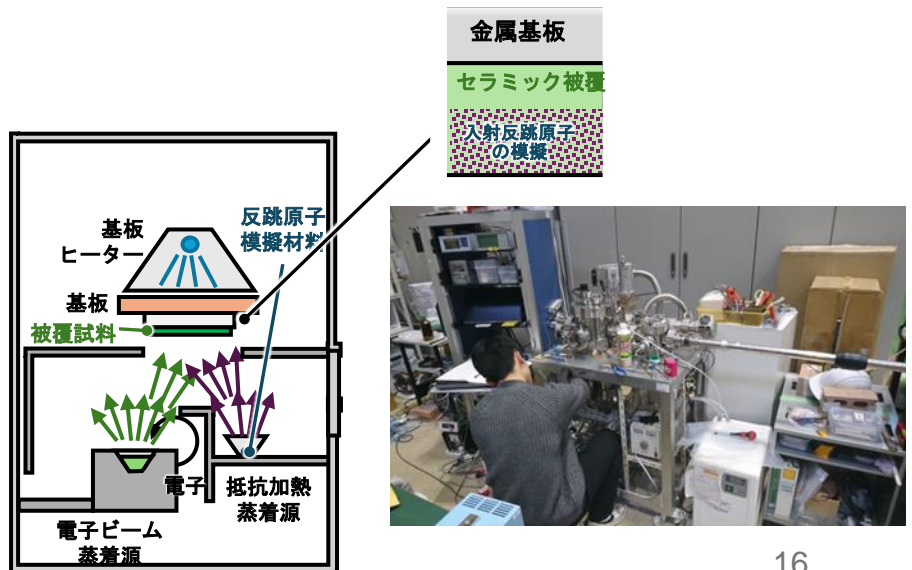
◆ 水素超透過試験装置

エヴァポレータにより表面を制御した金属材料に水素プラズマを曝露することで、金属表面領域に高密度水素濃度を実現し、様々な応用を実証する装置。



◆ セラミック薄膜蒸着装置

“セラミック材料の電子ビーム蒸着”と“金属の抵抗加熱蒸着”を組み合わせることで、金属原子が混入したセラミック薄膜試料を製作し、電気・光学特性の変化を調べる。



特筆される成果（研究業績と今後の展開）

ユニット化による研究の進展

2021・2022年度合計論文数
7報



2023年度論文数
10報(査読中含まず)

- 所内メンバーの増加（6名→7名）
- ITCオーガナイズドセッション開催→2件の論文
- 半分程度はこれまでの研究結果をまとめたものを出版。
- ユニット構築に係るエフォートが研究に配分された。
- 今後はユニットテーマに沿った研究発表が中心となることを期待。

主な研究の展開

- ◆ 加速器を用いたイオン照射により、材料中に形成する自己組織化構造を発現させ、力学特性等との対応を明らかにする。
- ◆ 薄膜層への粒子注入、欠陥導入に伴う材料化学状態変化と電氣的・光学特性等の挙動の相関性を調べる。
- ◆ 過飽和に注入した水素の動的挙動を明らかにし、高密度水素貯蔵状態を実証する。
- ◆ 多元系機能性材料のシミュレーションによる探索と特性評価

思うようにいかない点。原因分析と解決試案

- アカデミックプランの検討などに時間がかかり、研究遂行や研究者間の議論に充てる時間を十分確保できていない。
 - 2023年度までにアカデミックプランや様々なルール等の大きな方向性を決めることはできたので、研究に充てる時間を増加させていく。
- 実績不足により外部資金獲得の成績が良くない。
 - 科研費だけでなく民間助成に更に目を向け、小さな実績を積み上げていくことが必要。（一方、予算規模の小さな共同研究を多く引き受け、規模の大きな予算申請に割く時間を確保できないという課題もある。）
- これまでの継続課題やユニットテーマとやや方向の異なる共同研究の整理が難しい。
 - 共同研究者とユニットテーマとの関連を継続議論する。

ユニット等評価委員会への要望

- 現時点では特段ありませんが、必要に応じて相談させていただきます。

まとめ

- ✓ 超高流束がもたらす材料中非平衡状態を深く理解し制御することで、**過酷環境に適応する材料を創生**。
- ✓ 高流束（高熱負荷・粒子負荷・中性子損傷速度）環境へ拡大した物理領域における材料科学。
 - **広い時空間スケラビリティを有した材料モデル**
- ✓ **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
 - 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**」予測
- ✓ 新規プラットフォーム整備（水素超透過試験装置、セラミック薄膜蒸着装置）
- ✓ 各メンバーが行う研究の詳細は次の発表で紹介。