

超高流束協奏材料ユニット研究成果報告

- ① 照射効果のモデリングによるタングステン材料内トリチウム蓄積挙動予測
- ② 先進シンチレーションファイバーを利用したトリチウム水計測技術開発

核融合科学研究所
発表者：小林 真

発表者紹介

小林 真（こばやし まこと）

- ◆ 中性子により損傷を受けた核融合炉材料におけるトリチウム蓄積挙動
- ◆ 炉内トリチウム移行現象のモデリング
- ◆ 放射線検出器開発
- ◆ 環境放射線分析



照射効果のモデリングによる炉材料内トリチウム蓄積挙動予測

- ◆ International Workshop on Models and Data for Plasma-Material Interactions in Fusion Devices (MoD-PMI2025)にて招待講演

先進材料×放射線：放射線計測技術開発

- ◆ 単結晶ダイヤモンドを利用した中性子検出器開発に関する研究
 - Plasma and Fusion Research誌にてOverview論文(2026.5に発行済)
- ◆ 先進シンチレーションファイバーを利用したトリチウム水計測に関する研究
 - Radiation measurement誌へ論文投稿

発表者紹介

小林 真（こばやし まこと）

- ◆ 中性子により損傷を受けた核融合炉材料におけるトリチウム蓄積挙動
- ◆ 炉内トリチウム移行現象のモデリング
- ◆ 放射線検出器開発
- ◆ 環境放射線分析



照射効果のモデリングによる炉材料内トリチウム蓄積挙動予測

- ◆ International Workshop on Models and Data for Plasma-Material Interactions in Fusion Devices (MoD-PMI2025)にて招待講演

先進材料×放射線：放射線計測技術開発

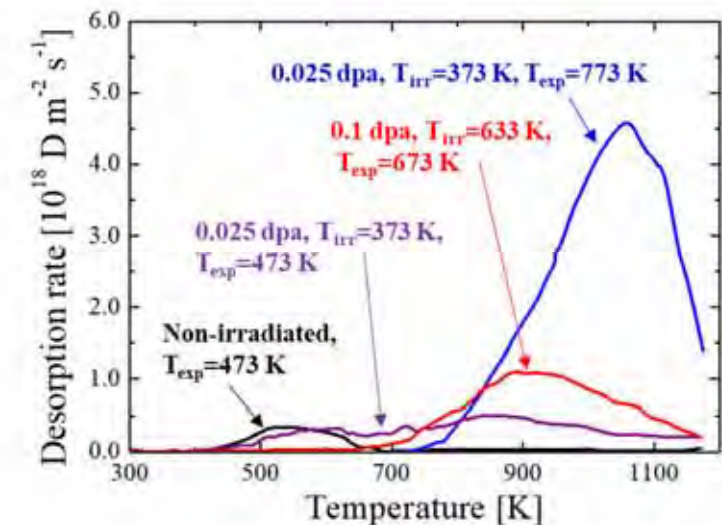
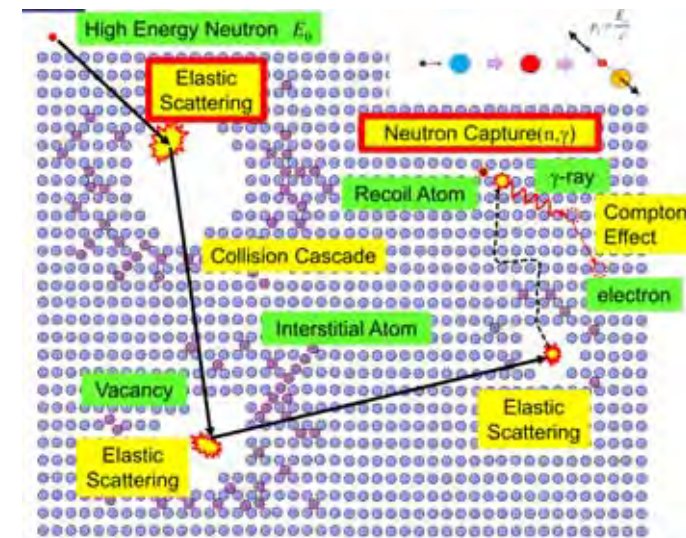
- ◆ 単結晶ダイヤモンドを利用した中性子検出器開発に関する研究
 - Plasma and Fusion Research誌にてOverview論文(2026.5に発行済)
- ◆ 先進シンチレーションファイバーを利用したトリチウム水計測に関する研究
 - Radiation measurement誌へ論文投稿

照射効果のモデリングによる 炉材料内トリチウム蓄積挙動予測

- QST原型炉共研
- MS10星プロジェクト

提供：長谷川先生(東北大)

- ◆ 核融合炉のプラズマ対向材であるタングステンは、高い融点、熱伝導性、低スパッタリング率、低トリチウム保持量などの特長
- 中性子の衝突により生成する照射欠陥は、更なる中性子照射、環境温度、時間経過により材料内部を移動・蓄積し、材料のミクロ構造が変化していく。
- 照射欠陥に燃料トリチウムが捕獲される。
- 放射線ハザードポテンシャル増大、燃料損失
- 種類・サイズにより欠陥の動的挙動、及びトリチウム捕獲特性が異なる。長時間運転により、材料ミクロ構造とそれに伴う炉内トリチウムインベントリはどのように変化するか？
- 照射欠陥の生成・蓄積挙動と、材料中に蓄積した様々なサイズの欠陥集合体による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。



中性子照射によりW中の水素同位体滞留量は大幅に増加

欠陥密度評価モジュール

- **RIDIER**(Radiation Induced Defects Interaction Evaluation Resolver)は、速度論方程式により、照射欠陥密度の時間変化を評価する。
- 照射欠陥(種類, サイズ)密度の時間変化を、拡散項、相互作用項（再結合、集合、熱分解）、ソース項の**線形結合**としてモデル化する。

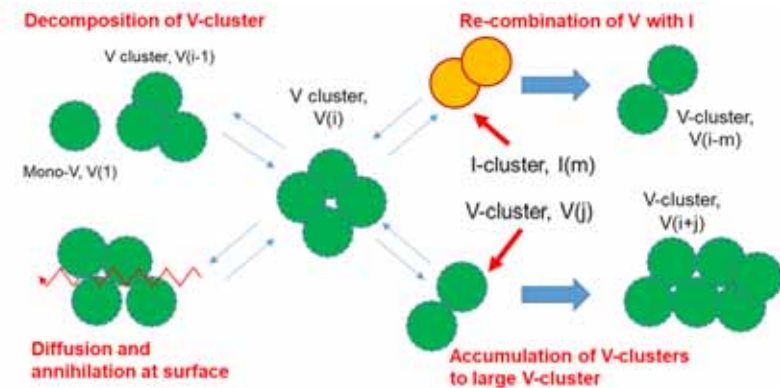
入力：

- 欠陥生成速度（MDで計算→今回はPHITS）
- 結晶粒径
- 中性子フラックス
- 照射温度→反応速度に影響（右図）

出力：

- 原子空孔クラスター濃度
- 転位ループ濃度

- ✓ モデル内の多数のパラメータは理論値・予測値などを使用（※フリーパラメータ有り）
- ✓ 欠陥クラスターサイズの不均一グループ化することで欠陥同士の組み合わせ爆発に対応
- 巨大欠陥も扱うことが可能



欠陥相互作用の反応速度係数

Reaction types	Reaction rate [s ⁻¹]
Clustering reactions	
$V_n + V_m \rightarrow V_{n+m}$	$\omega (n^{\frac{1}{2}} + m^{\frac{1}{2}}) (D_{Vn} + D_{Vm}) C_{Vn}(t) C_{Vm}(t)$
$V_n + I_m (3D \text{ SIA}) \rightarrow V_{n-m} \text{ or } I_{m-n}$	$\omega (n^{\frac{1}{2}} + m^{\frac{1}{2}}) (D_{Vn} + D_{Im}) C_{Vn}(t) C_{Im}(t)$
$V_n + I_m (1D \text{ SIA}) \rightarrow V_{n-m} \text{ or } I_{m-n}$	$\left[\left(\frac{m}{n} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{nmn^2}{16D} \right)^{\frac{1}{2}} \right] D_{Im} C_{Im}(t) C_{Vn}(t) + \left(n_{2D} m^{\frac{1}{2}} + \omega n^{\frac{1}{2}} \right) D_{Vn} C_{Vn}(t) C_{Im}(t)$
$I_n + I_m \rightarrow I_{n+m} (3D + 3D \text{ SIA})$	$\omega_{2D} \omega (n^{\frac{1}{2}} + m^{\frac{1}{2}}) (D_{In} + D_{Im}) C_{In}(t) C_{Im}(t)$
$I_n + I_m \rightarrow I_{n+m} (3D + 1D \text{ SIA})$	$\omega_{2D} \left[\left(\frac{m}{n} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{nmn^2}{16D} \right)^{\frac{1}{2}} \right] D_{Im} C_{Im}(t) C_{In}(t) + \left(n_{2D} m^{\frac{1}{2}} + \omega n^{\frac{1}{2}} \right) D_{In} C_{In}(t) C_{Im}(t)$
$I_n + I_m \rightarrow I_{n+m} (1D + 1D \text{ SIA})$	$\omega_{2D} \left(\frac{n^{\frac{1}{2}} + m^{\frac{1}{2}}}{2} \right)^2 (D_{In} C_{In}(t) + D_{Im} C_{Im}(t)) C_{In}(t) C_{Im}(t)$
Decomposition reactions	
$V_n \rightarrow V + V_{n-1}$	$\omega n^{\frac{1}{2}} D_V \exp \left(- \frac{E_d(n)}{k_B T} \right) C_{Vn}(t)$
$I_n \rightarrow I + I_{n-1} (3D \text{ SIA})$	$\omega n^{\frac{1}{2}} D_I \exp \left(- \frac{E_d(n)}{k_B T} \right) C_{In}(t)$
$I_n \rightarrow I + I_{n-1} (1D \text{ SIA})$	$\omega_{2D} n^{\frac{1}{2}} D_I \exp \left(- \frac{E_d(n)}{k_B T} \right) C_{In}(t)$

水素移動評価モジュール

HYPER(Hydrogen Penetration Evaluation Resolver)は、速度論方程式により、拡散、照射欠陥による捕獲過程、照射欠陥からの脱捕獲過程や、様々な化学反応等の、材料中での水素同位体の移動現象の時間発展を評価。

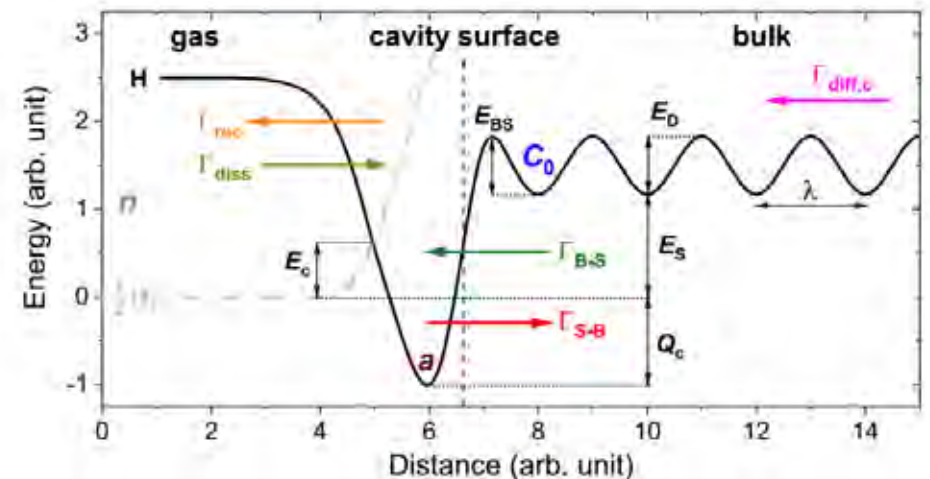
入力：

- 試料サイズ
- 水素入射フラックス
- TDS測定における昇温速度
- 照射温度→反応速度に影響

出力：

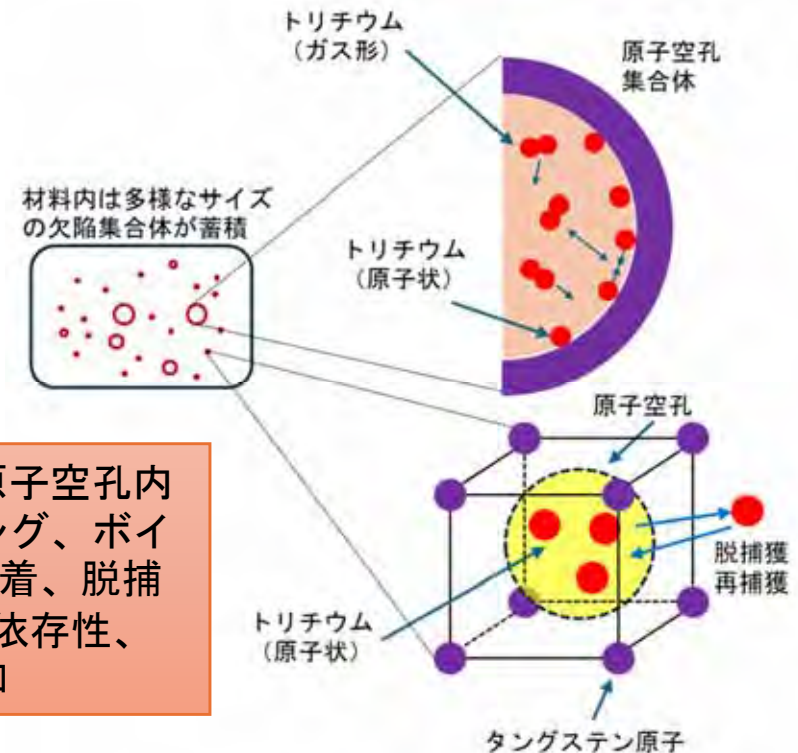
- 水素濃度分布
- 水素脱離スペクトル
- 透過、再放出速度

従来モデルと比較し、原子空孔内の水素マルチトラッピング、ボイド内壁におけるH化学吸着、脱捕獲⇄再捕獲の欠陥サイズ依存性、など様々なモデルを追加

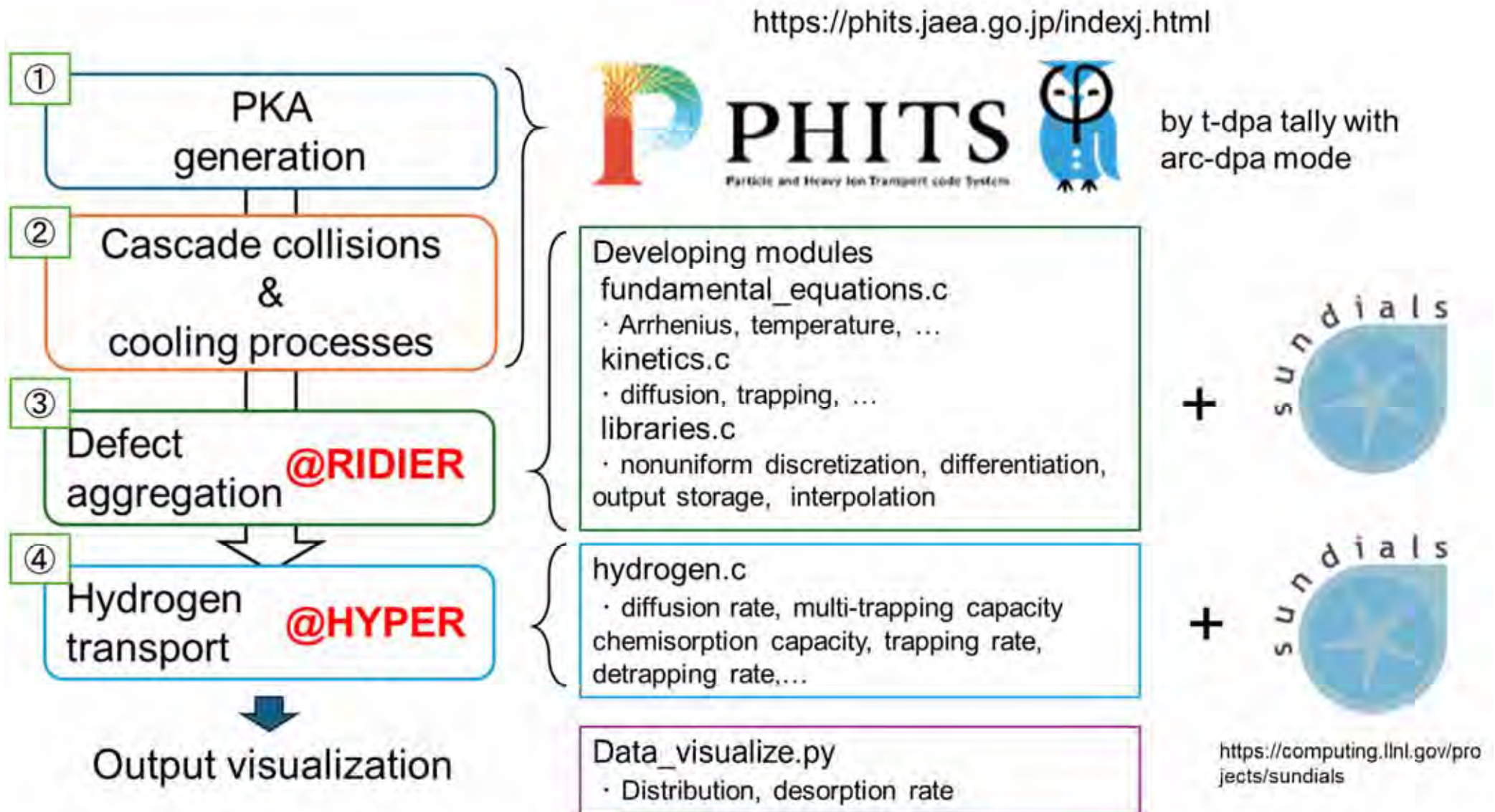


金属材料内の水素のポテンシャル

M.Zibrov and K. Schmid, Nucl. Mater. Energy, 32 (2022) 101219.



統合コードの構造（開発モジュール、ソルバー、等）

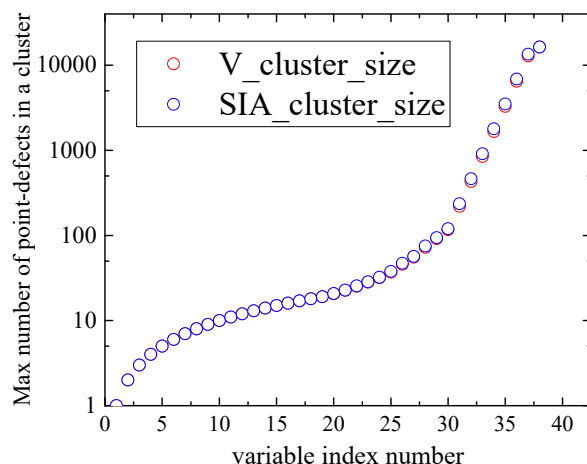


イオン照射実験データによるベンチマーク試験

イオン照射実験文献データ：

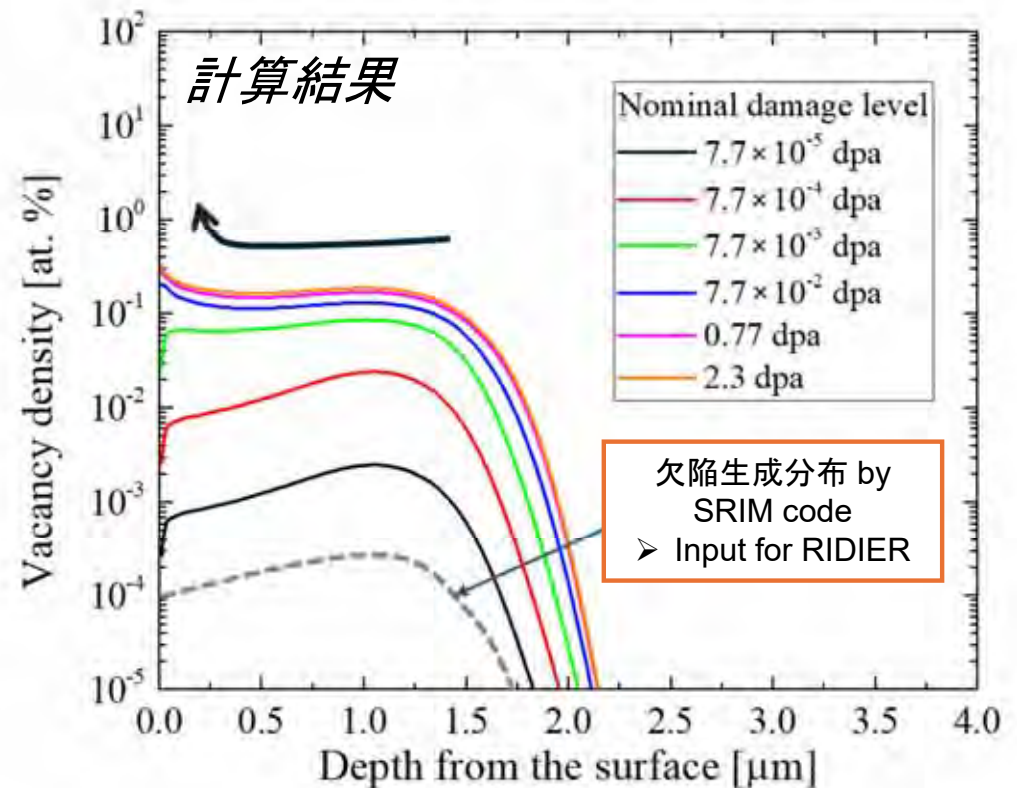
- 6.4 MeV鉄イオン照射により欠陥を導入したタングステン材料へ重水素ガス曝露することで欠陥内部に重水素を蓄積させ、核反応法により濃度計測を実施。
- この文献データをコードにより再現できるか試験した。

欠陥グループ化による組合わせ爆発の低減



- 結晶粒体積不均一メッシング
- 欠陥クラスターサイズの不均一グループ化 (n:30000→40)

各グループ内の最大欠陥サイズ
(サイズ小領域は細かく、大領域は粗く)



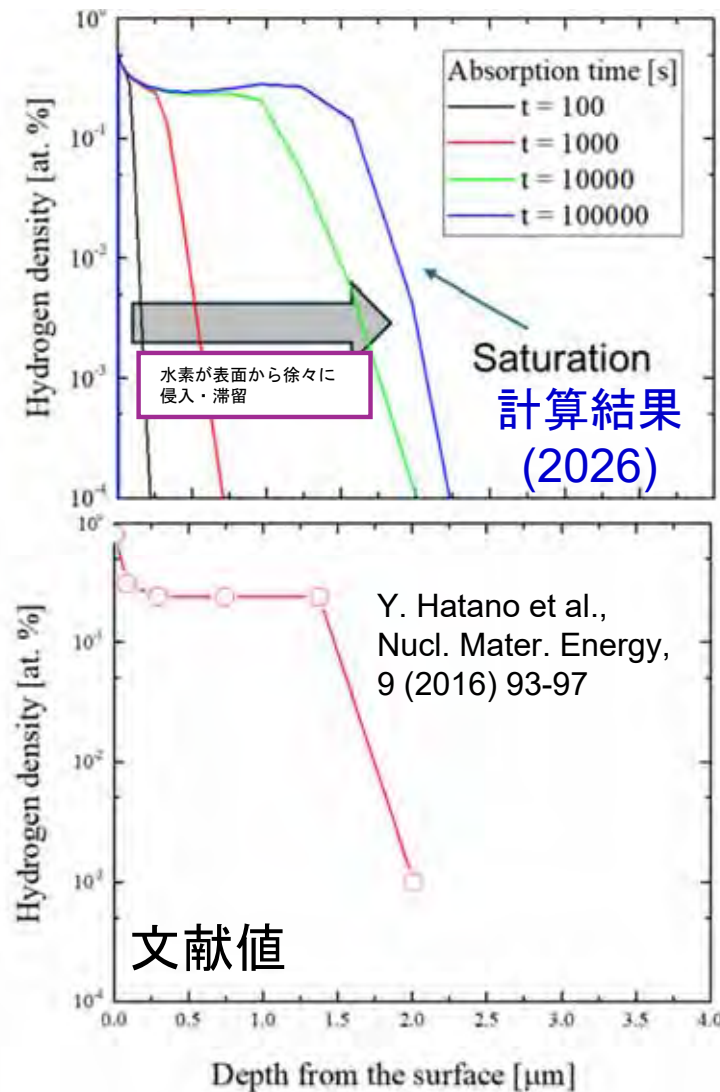
室温での6.4 MeV Fe 照射により発生する
原子空孔クラスターの蓄積挙動の予測結果

空孔クラスター密度を後段のトリチウム移動挙動予測コードのインプットデータとする。

イオン照射実験データによるベンチマーク試験

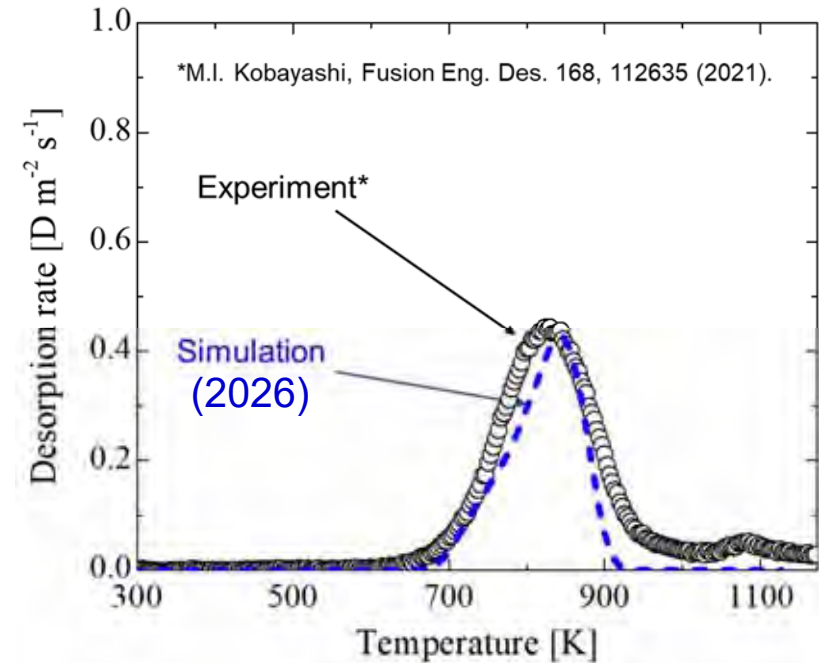
ベンチマーク①：

重水素ガス曝露→重水素密度深さ分析



ベンチマーク②：

重水素ガス曝露→重水素脱離挙動評価



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、同様の条件下でのシミュレーションによる予測値

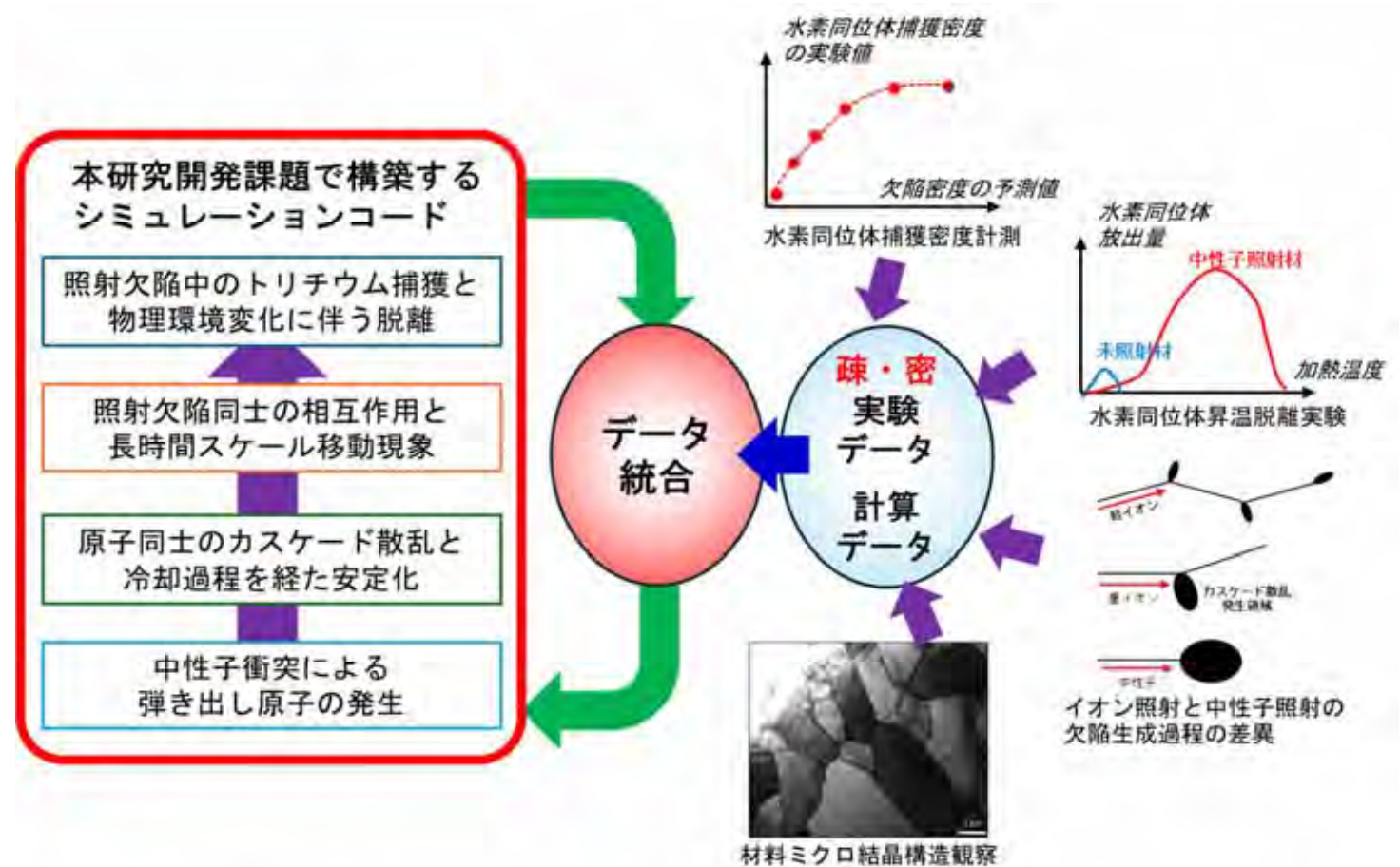
- ◆ 限られた条件範囲ではあるが、実験結果の再現に成功した。
 - ✓ モデルの更なる改良
 - 高温照射実験
 - 中性子照射実験
- の予測に挑戦

6.4 MeV Fe照射したタングステン(0.23dpa)へ重水素ガス曝露(673 K, 100 kPa)した際の重水素深さ分布

照射効果のインフォマティクスにより、 材料内のトリチウム移動現象の未来予測に挑戦

密データであるイオン照射実験データ（水素同位体捕獲密度、脱離挙動、材料ミクロ構造観察結果、など）を、シミュレーションコードへデータ統合し、コードの予測精度の向上を図る。

イオン照射と中性子照射間での欠陥生成過程の差異による補正項をコードに組み込み、疎データである中性子照射実験データの予測に挑戦する。



開発するシミュレーションコードの階層構造とデータ統合による高度化

先進フュージョンエネルギーシステムにおける
トリチウムハザードポテンシャルの未来予測

発表者紹介

小林 真（こばやし まこと）

- ◆ 中性子により損傷を受けた核融合炉材料におけるトリチウム蓄積挙動
- ◆ 炉内トリチウム移行現象のモデリング
- ◆ 放射線検出器開発
- ◆ 環境放射線分析



照射効果のモデリングによる炉材料内トリチウム蓄積挙動予測

- ◆ International Workshop on Models and Data for Plasma-Material Interactions in Fusion Devices (MoD-PMI2025)にて招待講演

先進材料×放射線：放射線計測技術開発

- ◆ 単結晶ダイヤモンドを利用した中性子検出器開発に関する研究
 - Plasma and Fusion Research誌にてOverview論文(2026.5に発行済)
 - ◆ 先進シンチレーションファイバーを利用したトリチウム水計測に関する研究
 - Radiation measurement誌へ論文投稿

先進シンチレーションファイバーを利用したトリチウム水モニタの開発計測

● NIFS課題提案型共研

- トリチウムの利用および安全性に関する技術開発は、核融合発電の社会実装において欠かせない要素であり、核融合炉の成功を左右する重要な課題である。
- ベータ線のエネルギーが小さいため、トリチウム水の近くに放射線検出器を置いても検出できない（届かない）。
- ◆ 高感度な液体シンチレーションカウンタは、バッチ式で廃棄物が発生してしまう。

シンチレーションファイバー

- ファイバー状のシンチレータ
- 発生光子を全反射で長距離輸送
- 大面積化が可能
- 水に直接浸漬可能



<https://www.kuraray-trading.co.jp/products/acryl/product4.html>

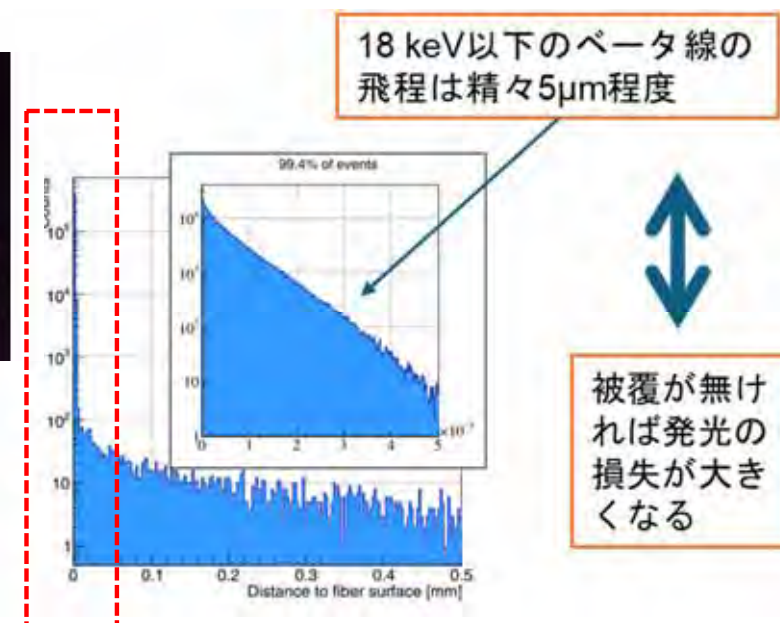
効率的な光子輸送に必要な被覆層が厚く、トリチウム起因のベータ線がファイバー内部に侵入できない。

➤ 従来構造は検出できない。

放射性同位体としてのトリチウムの特徴

β 線の最大エネルギー	18.6 keV
β 線の平均エネルギー	5.7 keV
空気中の飛程	約 6 mm
水中での飛程	約 6 μ m
水中での平均到達距離	約 500 nm
物理学的半減期	12.3 年
生物学的半減期	トリチウム水 HTO：約10日 有機物に結合した T：約40日

https://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/9606-10koza.pdf



クラッド層内部における
ベータ線のエネルギー減衰

C.D.R. Azevedo, et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., A 982 (2020) 164555

OLSファイバー

● (株)クラレレーディングより提供

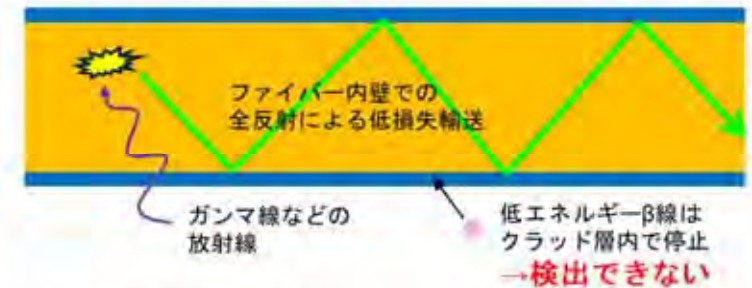
- **Outer Layer Scintillation (OLS)**
ファイバー構造は、ファイバー表面のシンチレータ層と内部の波長変換ファイバー(WLSF)層がクラッドで隔てられた構造。
- 表面シンチレータ層にベータ線が入射することで光子が発生。**光子はクラッド層を透過できる。**その光子がWLSFに再吸収され、長波長変換された光子がファイバー内部に発生し、全反射により長距離輸送される。
- ファイバー端部に設置した検出器で光子を捕集し、放射線を検出。

(a)従来構造のシンチレーションファイバー

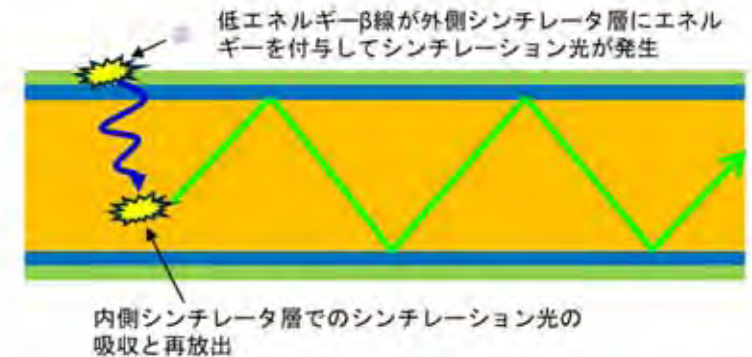
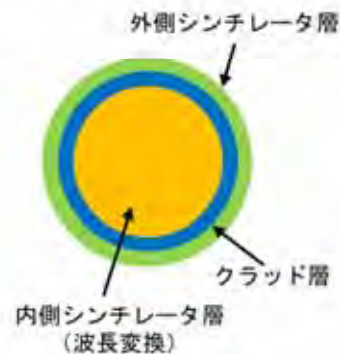
ファイバー断面構造



ファイバー内でのシンチレーション光の発生と輸送



(b)先進構造のシンチレーションファイバー

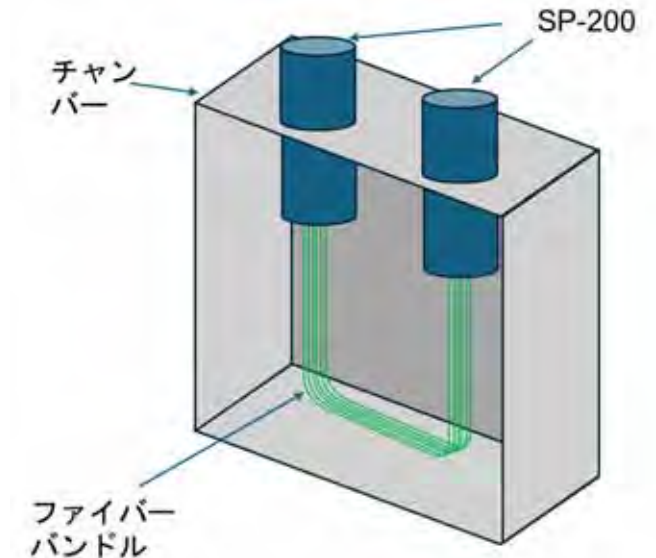


低エネルギーベータ線に対しても感度を有すると期待。しかし、放射線検出は、①放射線吸収→②発光(OLS)→③再吸収→④発光(WLSF)→⑤検出という2段階過程であり、②→③の過程で多くの光子が逃走してしまう。**感度向上方法の開発が必要。**

- ◆ トリチウムの壊変由来の低エネルギーベータ線検出の実証
- ◆ バンドル構造による光子回収効率向上の実証

計測システムの整備

- 富山大学水素同位体科学研究センター管理区域内に装置をセッティング
- 2本のシンチレーションプローブ(応用光研SP-200)による同時計数回路を構築
- 光が入射しないようにチャンバー内にファイバーを設置
- チャンバーを暗室テント内に設置し光の入射を抑制
- プローブからの信号を増幅し、マルチチャンネルアナライザにて集計



実験装置
(実験中は蓋を閉じて暗室とする)



装置の外観

30cmOLS x 30本のバンドル



データ収集系

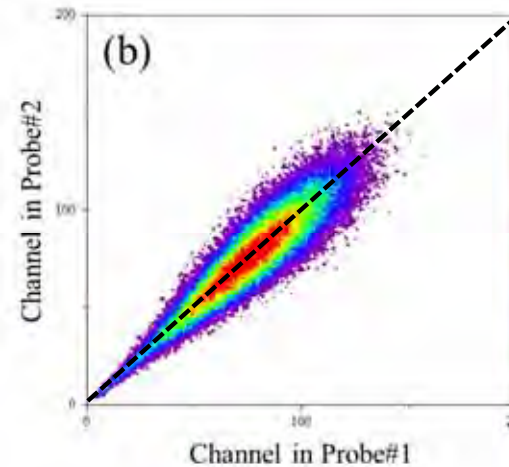


外側暗室

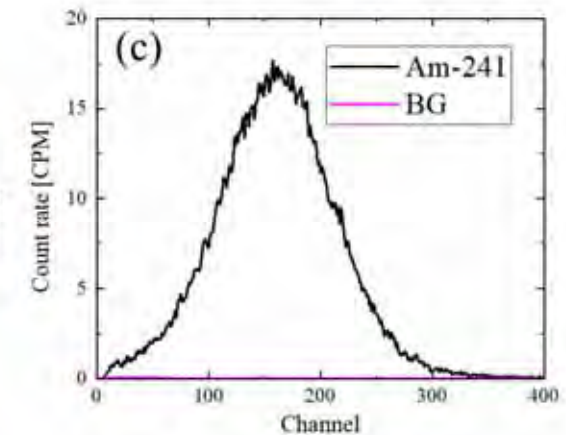
トリチウム崩壊由来の低エネルギーベータ線検出の実証

Am-241アルファ線源を利用したベータマーク試験

- 各プローブのゲイン調整
- 同時計数回路によるノイズ除去
- 波高スペクトル取得



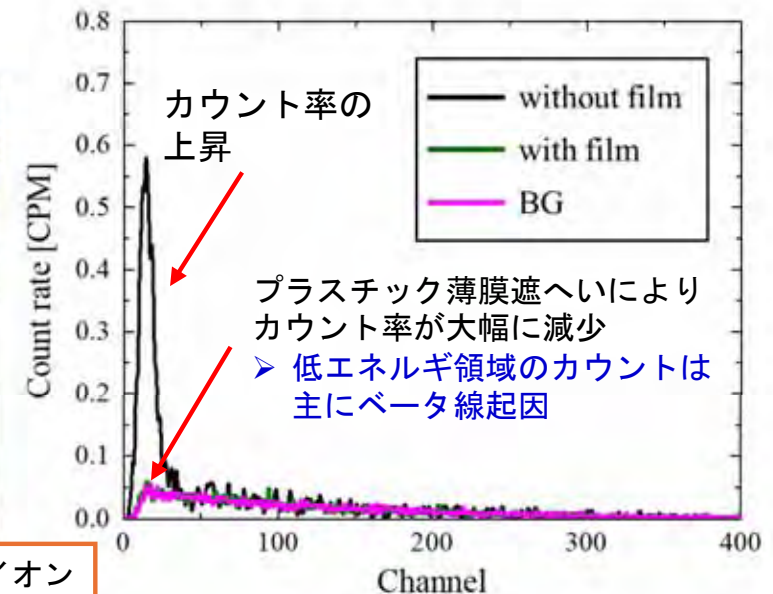
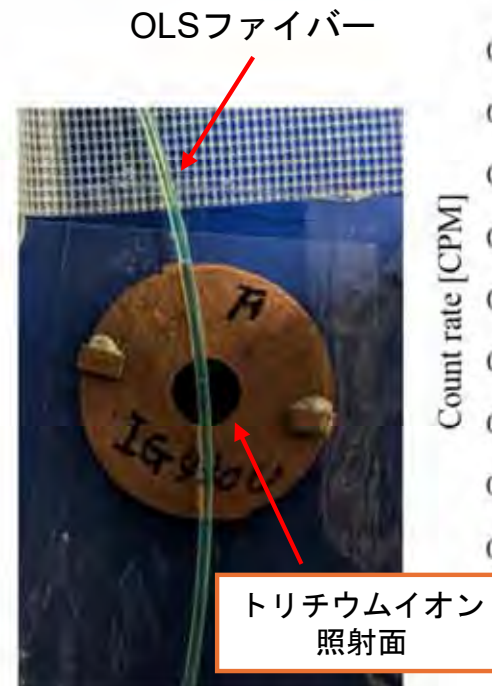
各プローブにおける波高分布
→ゲイン調整良好・低ノイズ



波高スペクトル
→BGと比較し有意な計数率増加

トリチウム注入した炭素材を利用したベータ線計測試験

- 照射面直上にOLSファイバを設置
 - ~3 μm 厚プラスチック薄膜によりベータ線が遮蔽され、計数率が極度に減少。
- トリチウムの壊変起因のベータ線検出が可能であることが実証された。



波高スペクトル

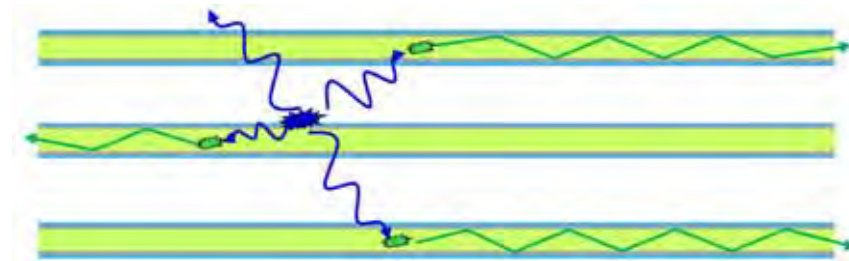
バンドル構造による 光子回収効率向上の実証

- OLSファイバーでは表面シンチレーション層で発生した光子の大部分が逃走してしまい検出効率が低くなってしまふ。
- **ファイバーを束ねたバンドルを構築し、逃走光子が周囲のファイバー中の波長変換ファイバーに吸収され、検出効率が向上する。**
- ◆ OLSファイバー切片へアルファ線照射した際に発生する光子を波長変換ファイバーで回収可能か実験。
計数率増加を確認。

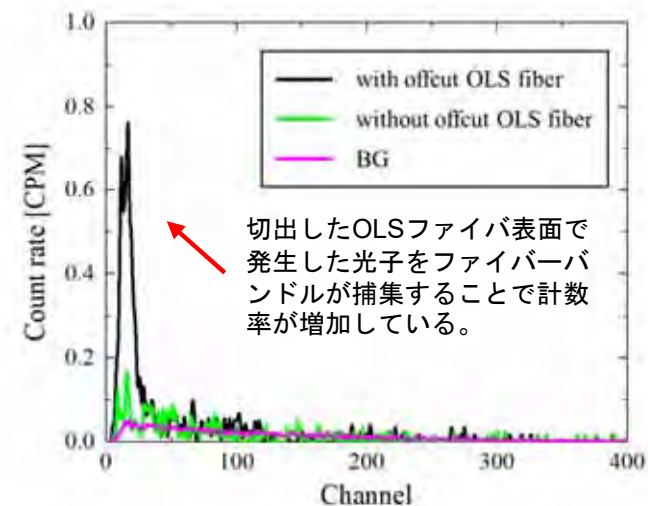
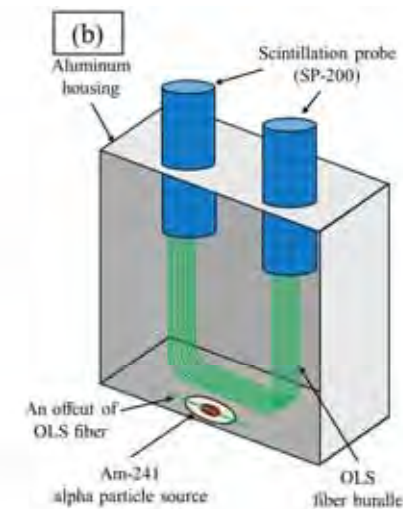
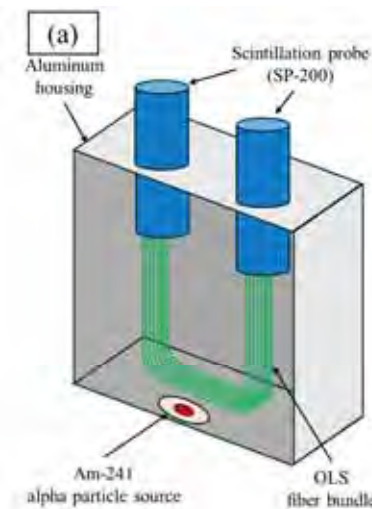
➤ **バンドル効果の実証。**

ファイバーを密集させたバンドル構造は、有効体積を増加させるだけでなく**光子回収効率を上昇させる相乗効果がある**ことを実証した。

➤ **トリチウム水モニタ設計に必要データ収集**



バンドル効果の概要：ファイバの表面で発生し逃走した光子を周囲のファイバが捕集することで検出効率が向上する。



切出したOLSファイバ表面で発生した光子をファイバーバンドルが捕集することで計数率が増加している。

まとめ

照射効果のモデリングによるタングステン材料内トリチウム蓄積挙動予測

- 照射欠陥の生成・蓄積挙動予測モジュール（RIDIER）と、材料中に蓄積した様々なサイズの欠陥集合体によるトリチウム捕獲現象予測モジュール（HYPER）を整備し、両者を統合することでイオン照射したタングステン材料中の水素同位体移動現象の解析を実施。

データ同化を適用し予測確度の高いモデルに改良し、中性子照射実験の再現に挑戦。

MoD-PMI2025にて招待講演
➤ 論文投稿予定

先進シンチレーションファイバーを利用したトリチウム水計測技術開発

- ファイバー表面にシンチレータ層を備えたOLSファイバーを用いたトリチウム水モニタの実現のため、トリチウムの壊変由来の低エネルギーベータ線検出の実証試験を実施した。
- 表面シンチレータ層で発生し逃走した光子を周囲の別のファイバーにより捕獲し検出するという、バンドル効果によって光子回収効率が向上することを実証した。

Radiation measurement誌へ論文投稿済