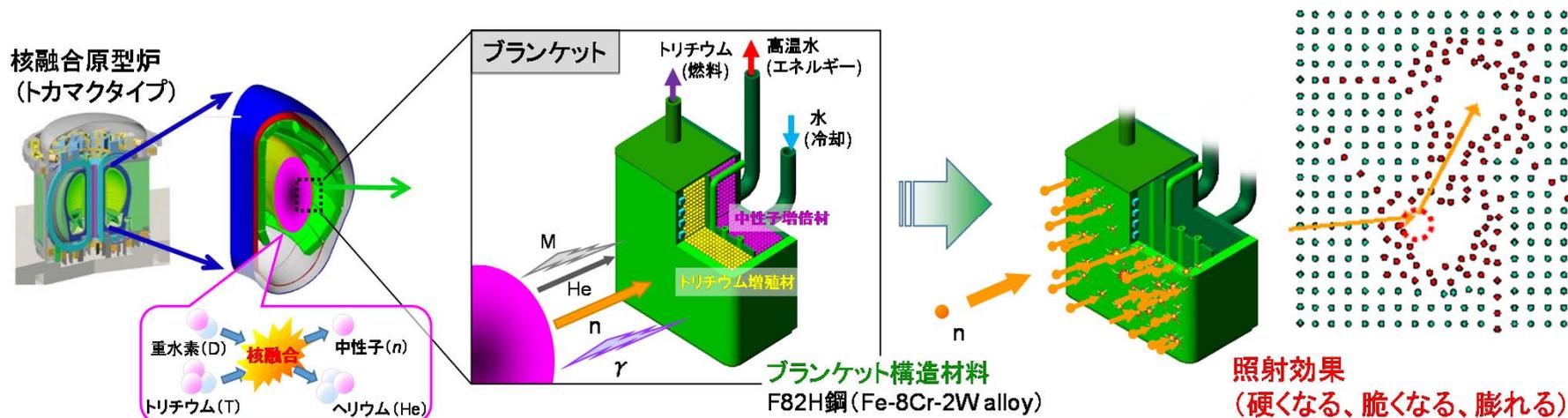


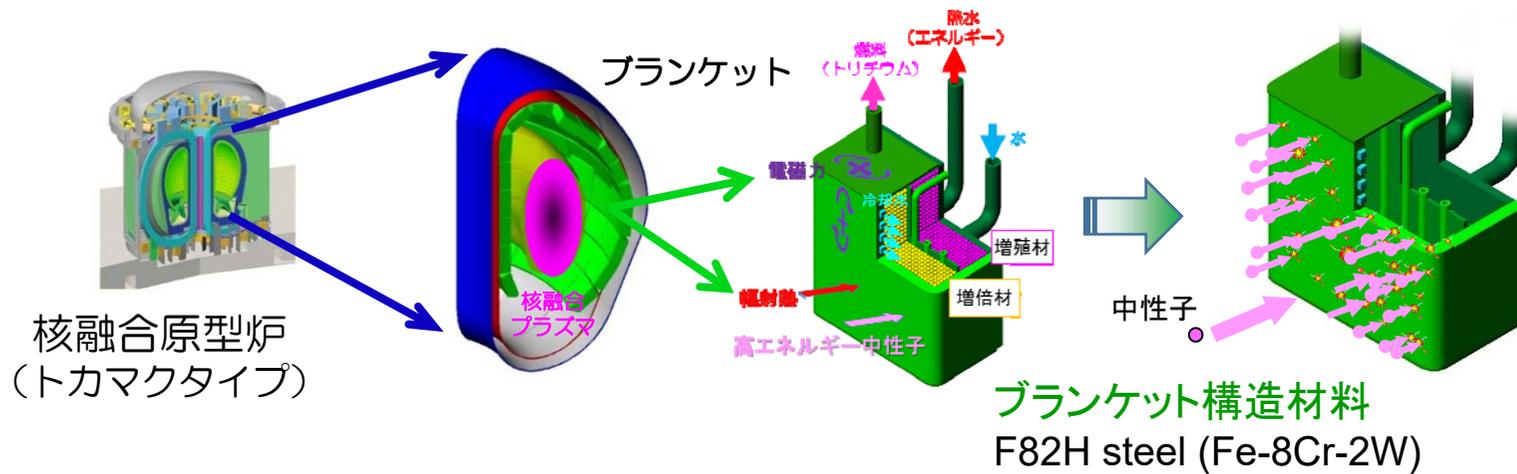
核融合炉ブランケット構造材料における照射劣化 (照射効果)の予測技術の開発

渡辺淑之

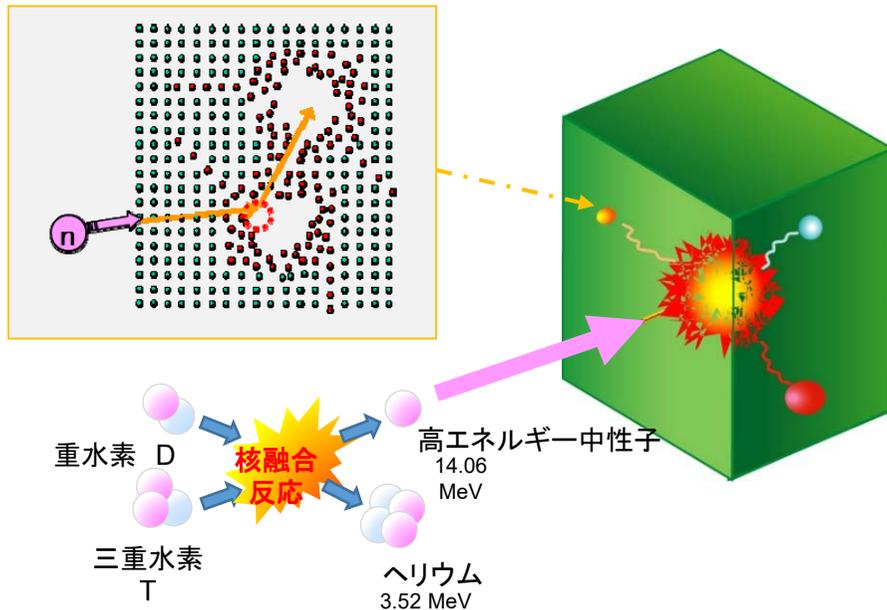
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門 核融合炉構造材料開発グループ



中性子照射によってブランケット構造材料で起きる現象



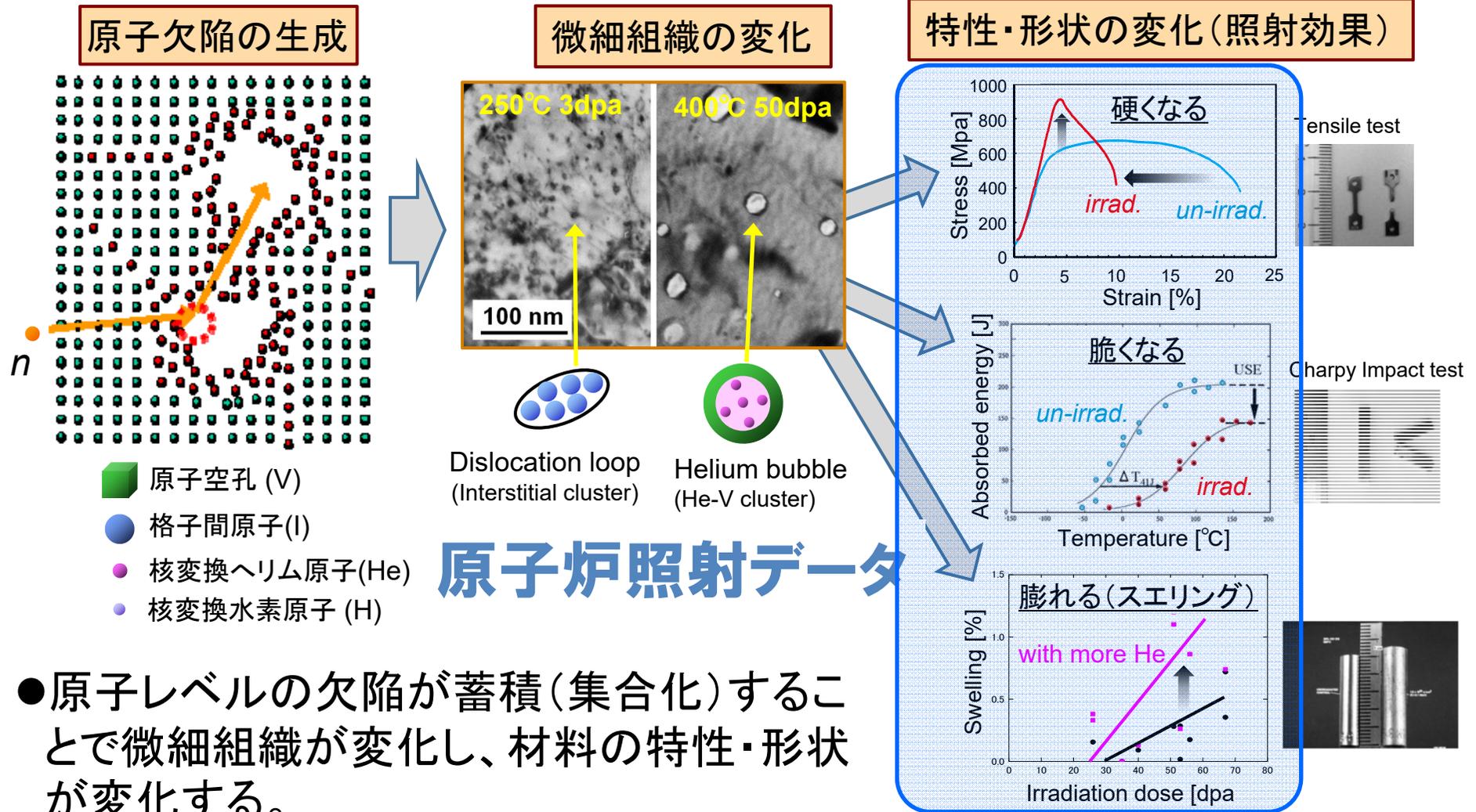
高エネルギーの中性子が衝突すると材料中には原子レベルの欠陥(結晶構造の乱れ)ができる。



放射化
硬くなる
脆くなる
膨れる

照射効果

照射効果(照射による材料の特性・形状変化)



- 原子レベルの欠陥が蓄積(集合化)することで微細組織が変化し、材料の特性・形状が変化する。
- **ヘリウム原子**は材料の**照射効果を促進**させる。
- **核融合炉**では原子炉よりも**約50倍のヘリウムが生成**するため、照射効果が大きくなると予想される。

原型炉ブランケット設計における材料照射効果予測技術開発 (モデリング・シミュレーション研究)の位置付け

ブランケット構造材料に求められる工学的重要課題

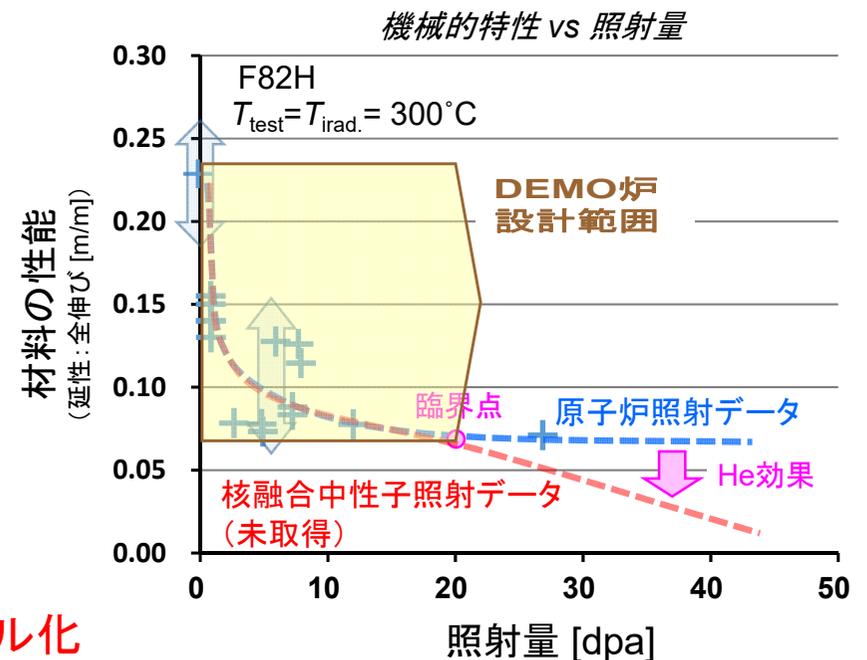
核融合中性子(14 MeV)照射環境下における機械的特性・形状(健全性)の維持
※核分裂炉(原子炉)よりも大量(10倍以上)のヘリウム(He)や水素が材料内で生成
→ 材料劣化の促進効果(ヘリウム効果・水素効果)が懸念

初期のブランケット設計における留意点

有効な核融合中性子照射施設が存在しない。
→ 原子炉照射データの範囲内で原型炉を設計
※原子炉と核融合炉の照射データの傾向が
有意な乖離を示す臨界点の見極めが重要

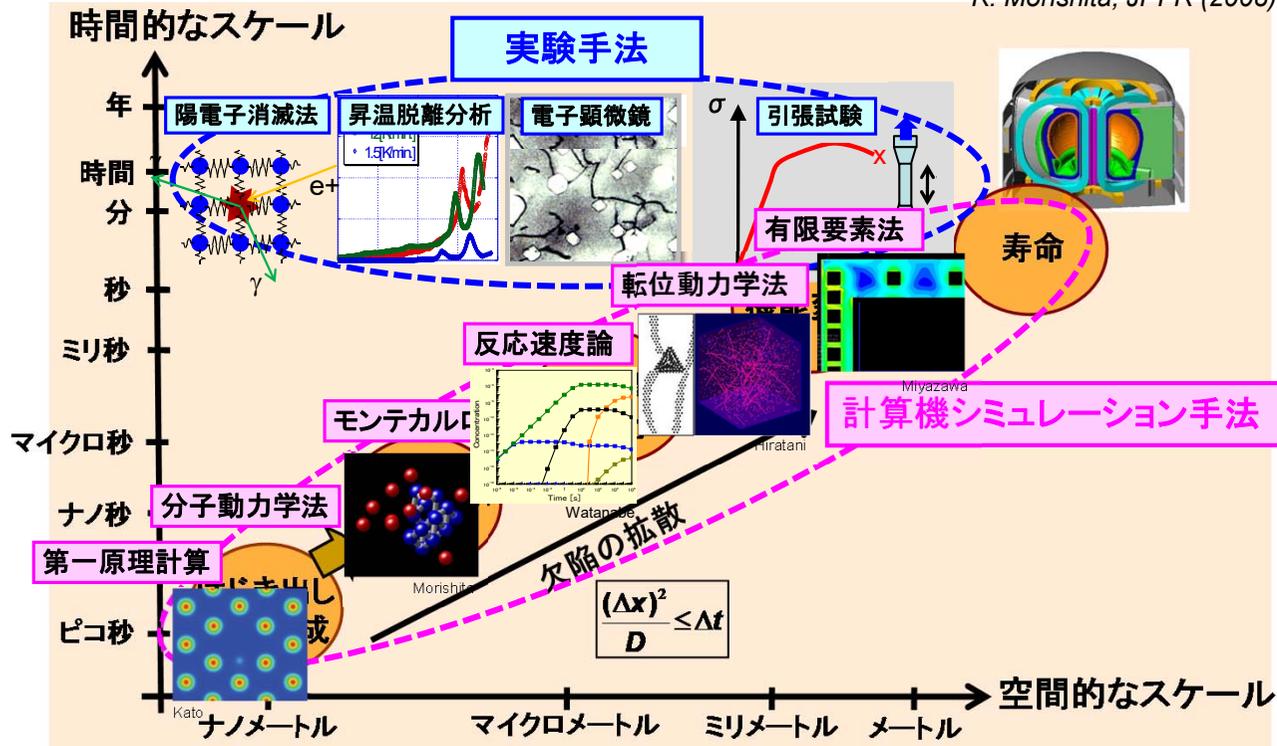
モデリング・シミュレーション研究の位置付け

- 照射挙動のメカニズムの理解、機構論的モデル化
→ 核融合中性子による材料劣化(照射効果)の予測
→ 材料使用条件の提示、核融合中性子源(IFMIF)による実験条件の提示

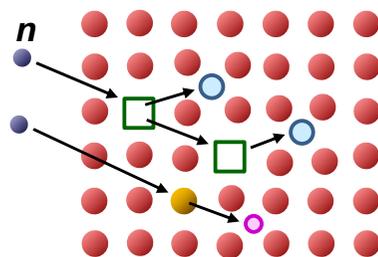


材料の照射プロセスとモデリング手法

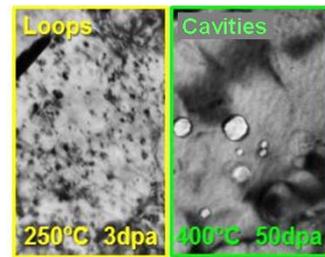
K. Morishita, JPFR (2008)



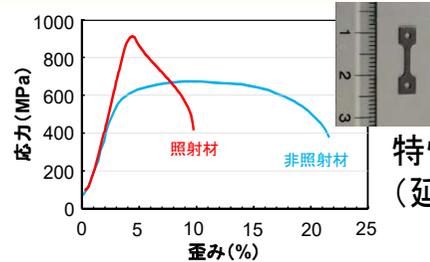
- 材料の照射プロセスは時間的・空間的にマルチスケールな現象
- 現象の解明には実験手法と計算機シミュレーションの相補的な活用が肝要



- 空孔
- 格子間原子
- ヘリウム



- 転位ループ
- ヘリウムバブル



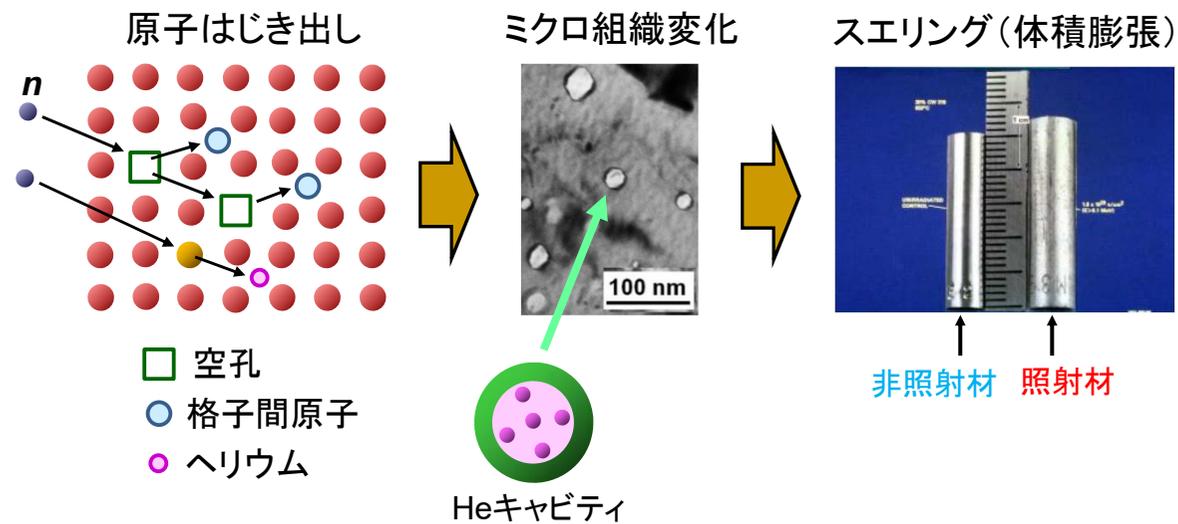
特性変化
(延性低下)



寸法変化
(スエリング)

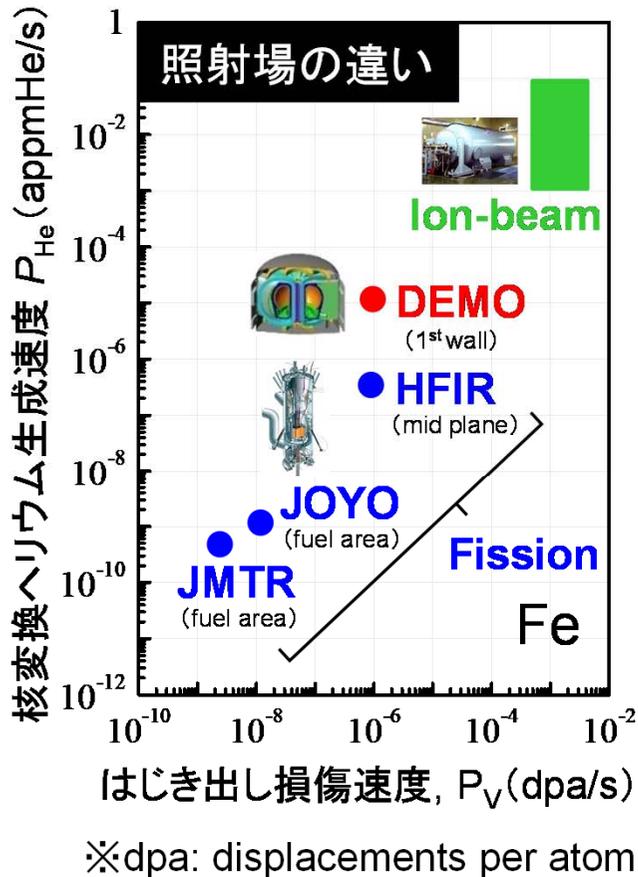
非照射材 照射材

ボイドスエリング(照射欠陥による体積膨張)の 予測モデルの高度化



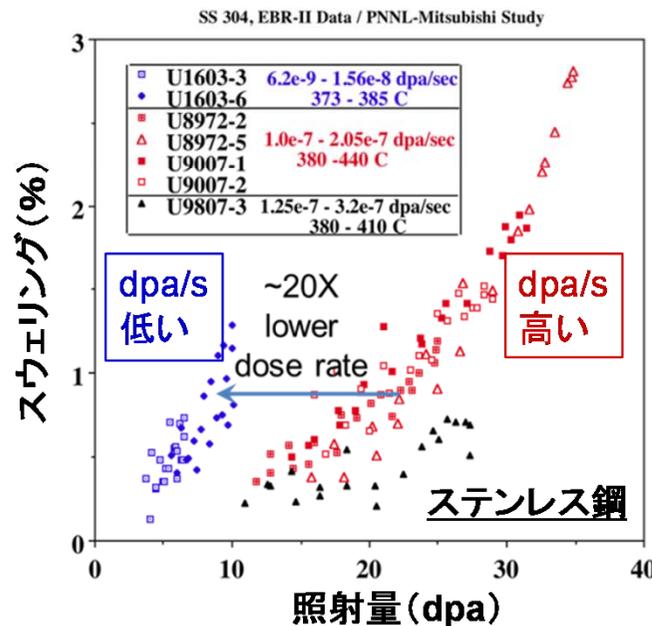
背景

有効な核融合中性子照射施設が存在しない現時点では、材料の照射データは代替照射施設(原子炉、イオン加速器)で取得されている。



各種の照射施設(照射場)は、照射能力が大きく異なっている。

- 原子はじき出し損傷速度 (dpa/s)
- ヘリウム生成速度 (appmHe/s)

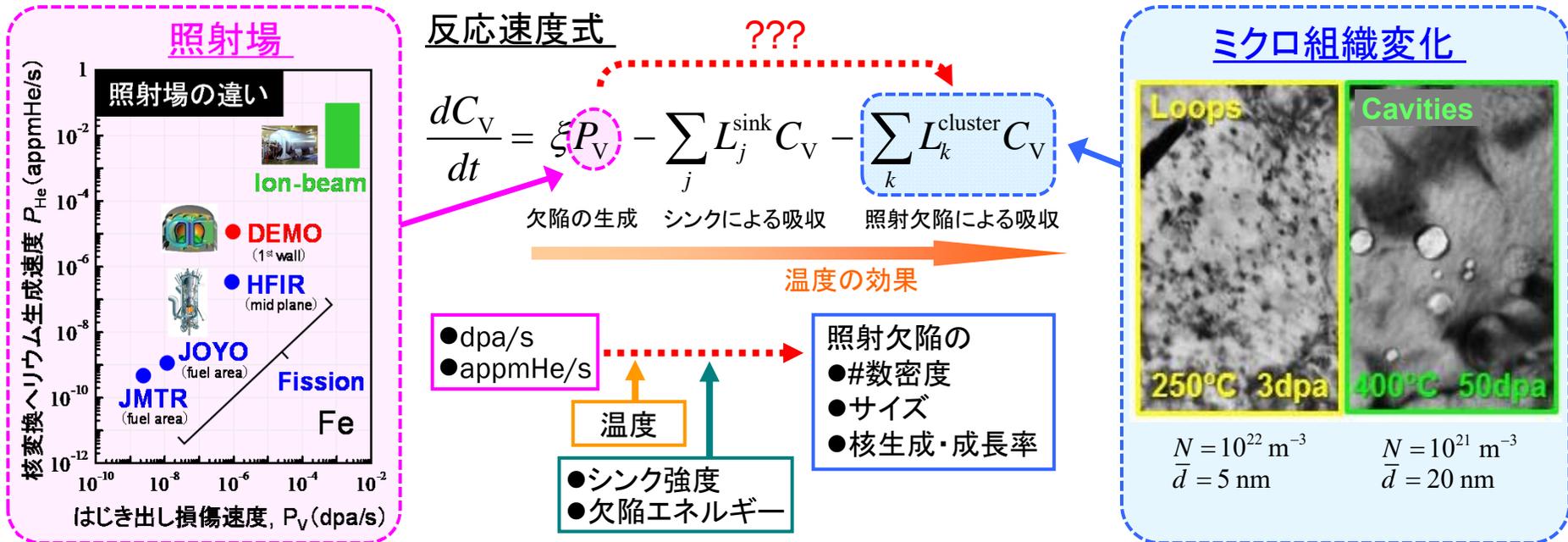


照射量 (dpa) をそろえても両者の照射データが同じになる保証はない。

互いに異なる照射場での材料照射データを物理的に正しく整理するためには、照射場の違いによる影響を十分に踏まえて材料挙動を理解しておく必要がある。

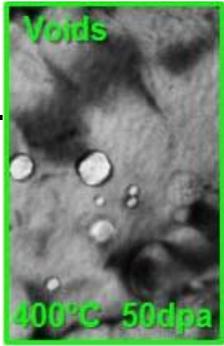
目的・手法

照射場とマイクロ組織変化の因果関係を理論的に明らかにし、照射パラメータ及び材料パラメータの関数として整理する。

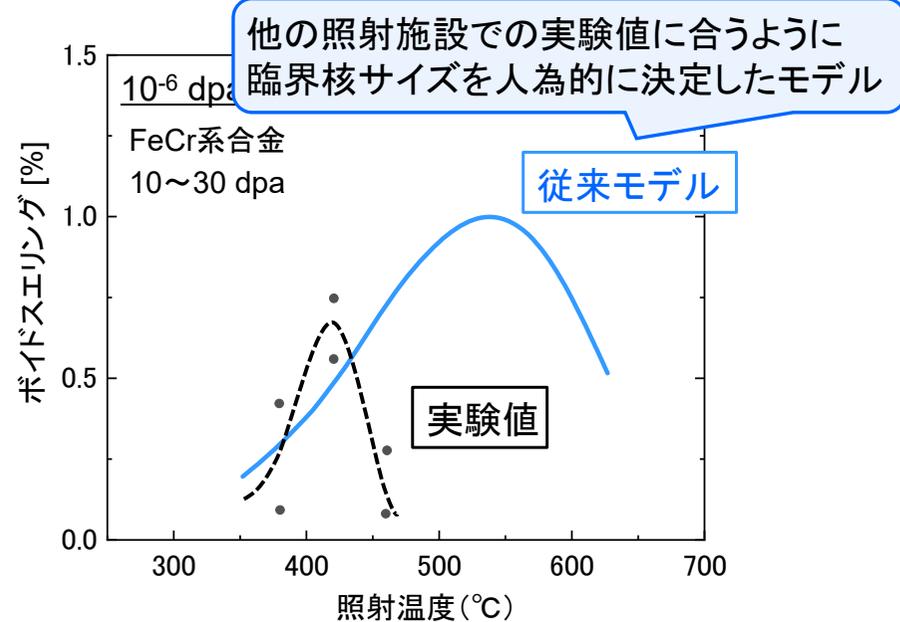
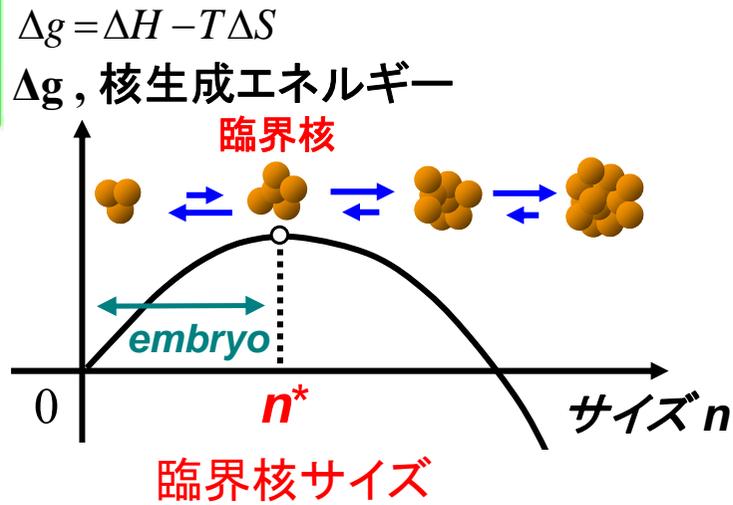


反応速度論解析(平均場動的挙動シミュレーション)

(照射欠陥の濃度の経時変化を数値的に積分して追跡する手法)



従来のボイドスエリングモデルの問題点

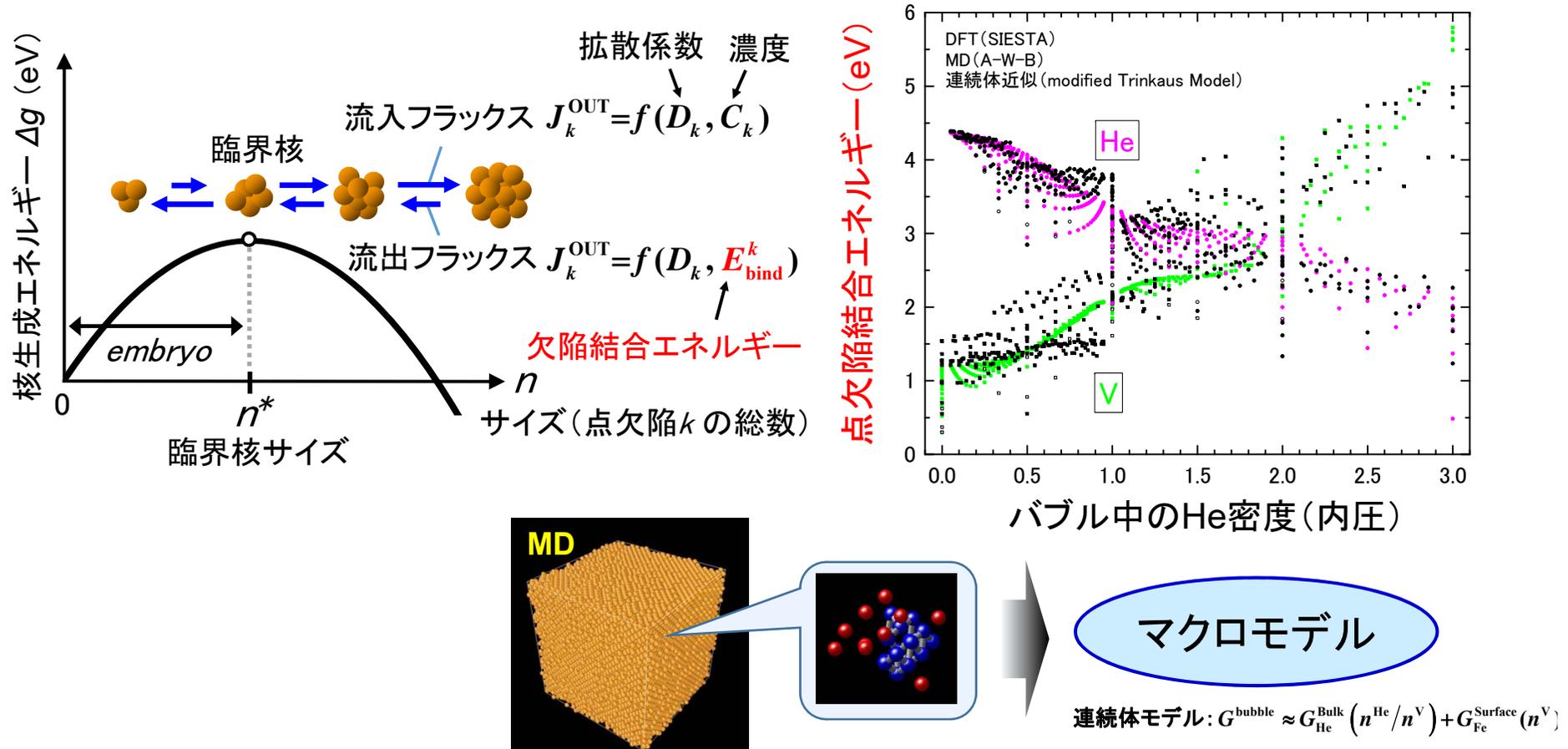


- 欠陥集合体形成のモデル化には、**核生成挙動**の正確な記述が不可欠
- 従来モデルでは、核生成挙動の記述が不十分
臨界核サイズ (n^*) や結合エネルギーを**人為的(経験的)に定義**
 ※特定の**実験値**と合うように人為的に決定(例 $n^*=2\sim 3$ に固定)
- 温度, dpa/s, appmHe/sなどの**照射条件を変えると破綻**



互いに異なる照射場で取得された実験値(材料照射データ)を系統的に説明するためには、メカニズムの理解に基づいた機構論モデルの構築が必要

本研究でのアプローチ(機構論モデルの構築)

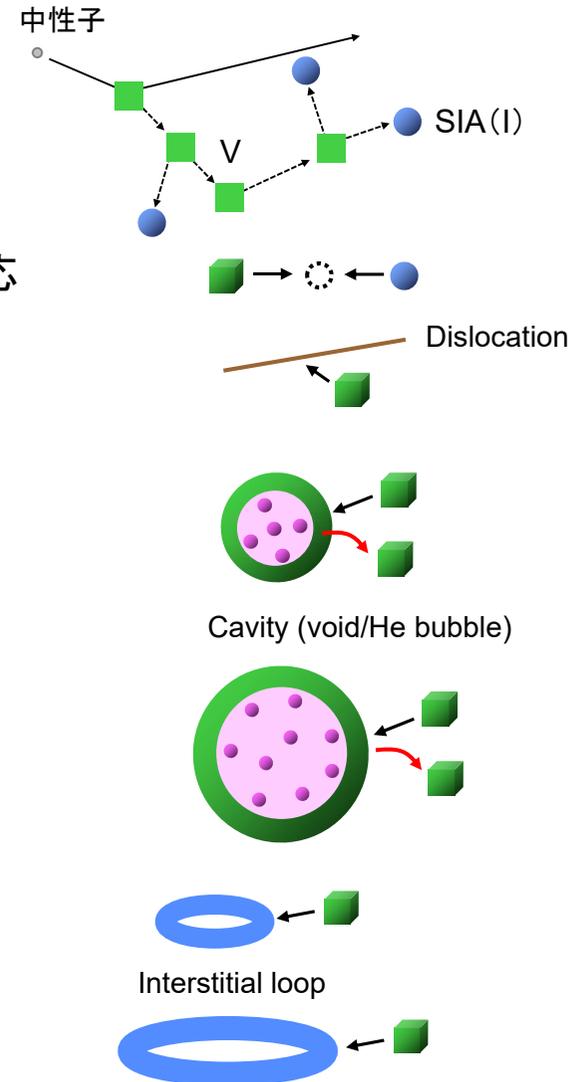


- **分子動力学シミュレーション**により、欠陥集合体(ヘリウムバブル)に対する**点欠陥結合エネルギー(熱的安定度の指標)**のサイズ・内圧依存性を評価
- 取得した**原子レベル(ミクロ)の情報**をマクロな物理モデルに反映させ、さまざまなサイズ・内圧のヘリウムバブルの熱的安定度を定量的に算出できる**機構論モデル**を構築

反応速度式(欠陥濃度の時間変化式)

原子空孔濃度の時間変化 [s⁻¹]

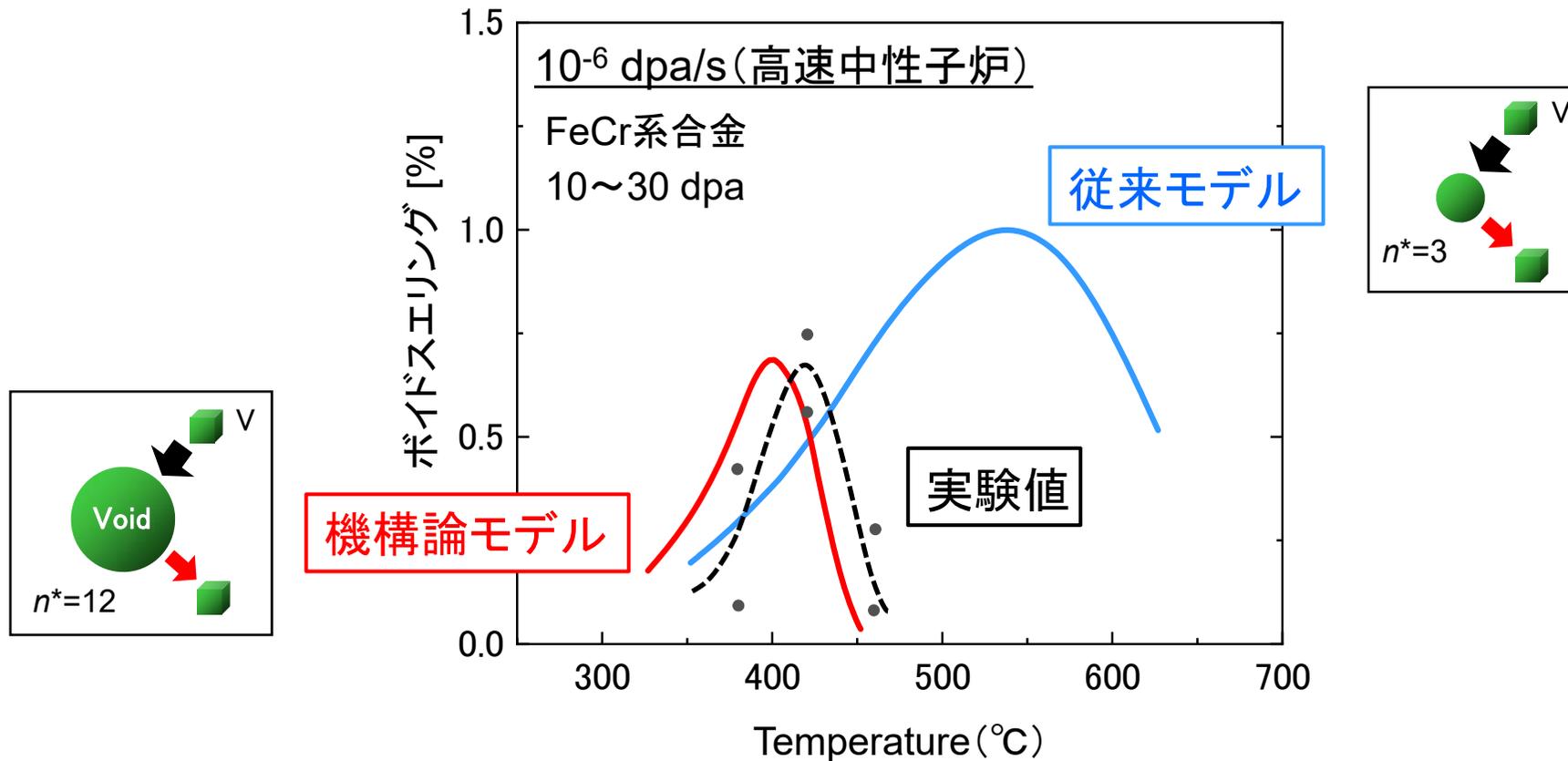
$\frac{dC_V}{dt} = \eta P_V$	空孔の生成
$- K_{V-I}^{annih.}$	空孔と格子間原子の再結合反応
$- K_{V, sink}^{IN}$	転位線への空孔流入
$- K_{V, small cav.}^{IN}$	Smallバブルへの空孔流入
$+ K_{V, small cav.}^{OUT}$	Smallバブルからの空孔放出
$- K_{V, large cav.}^{IN}$	Largeバブルへの空孔流入
$+ K_{V, large cav.}^{OUT}$	Largeバブルからの空孔放出
$- K_{V, small loop}^{IN}$	Smallループへの空孔流入
$- K_{V, large loop}^{IN}$	Largeループへの空孔流入



各種の欠陥濃度の時間変化を反応速度式で記述し、計2,700個の連立微分方程式を数値的に積分した。

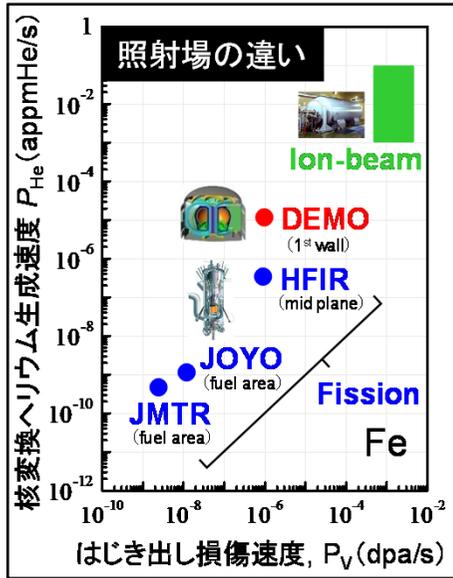
計算結果:ボイドスエリングの温度依存性(従来モデルとの比較)

[実験値の出展] E.A. Litte, JNM 87 (1979) 25.

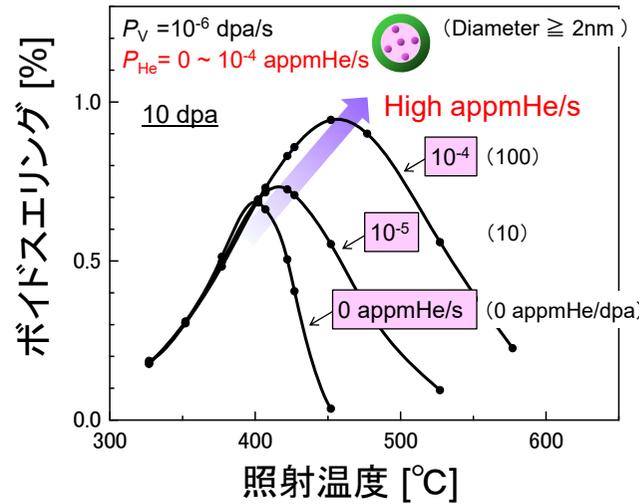


- 従来モデルでは、実験値とのズレが非常に大きい。(スエリングのピーク温度や最大値を過大評価している。)
- 機構論モデルでは、スエリングの予測精度が向上。(ピーク温度や最大値の定量的予測について一定の見通しを得た。)

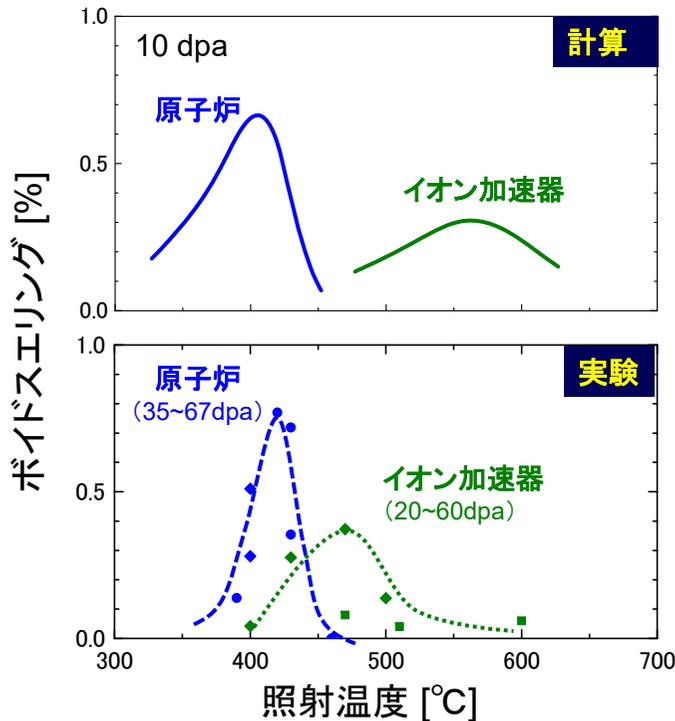
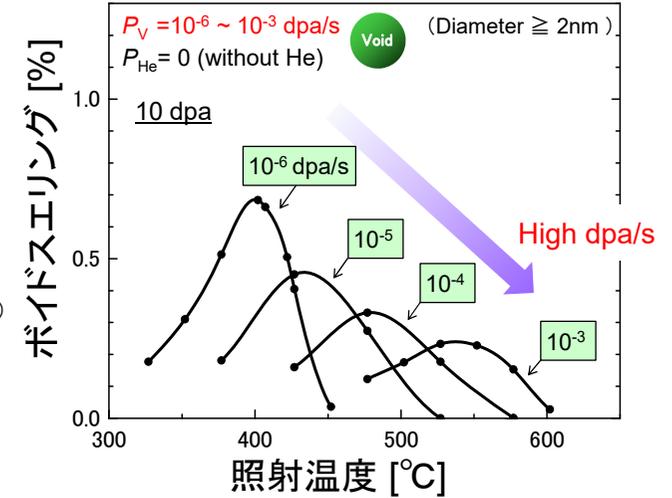
計算結果:ボイドスエリングの照射場依存性



はじき出し損傷速度依存性



ヘリウム生成速度依存性



機構論モデルは、

- ピーク温度シフトの照射場依存性のメカニズムを明らかにした。
- 異なる照射場(原子炉、イオン加速器)での実験データと類似の傾向を示した。

まとめ

- 核融合炉材料の研究開発においては、原子炉やイオン加速器などの代替照射施設で取得した材料照射データから核融合中性子照射による影響(照射効果)を予測する必要があり、照射材料挙動をメカニズムの理解に基づいてモデル化する技術の開発が重要である。
- 材料の照射プロセスは、時間的かつ空間的にマルチスケールな現象であるため、さまざまな実験的アプローチや計算的アプローチを相補的に活用し、解明することが肝要である。
- 照射による材料微細組織変化のモデル化では、欠陥集合体の核生成現象の正確な記述が不可欠であるため、分子動力学シミュレーションで取得したミクロな情報をマクロモデルに反映させることで、ボイドスエリング挙動の照射場依存性を理論的に表現できる機構論モデルを構築した。
- 今後は、他の重要な物理素過程を取り込んでモデルの精度を向上させるとともに、上層スケールの解析手法への繰り込みを行うことで、核融合中性子照射効果の影響を踏まえた材料構造健全性・寿命評価の技術開発への貢献を目指す。