

原子力材料の照射劣化予測

Prediction of radiation-induced damage in nuclear materials

京大エネ理工研	森下 和功	Kazunori Morishita	Member
京大エネ科	吉松 潤一	Junichi Yoshimatsu	Non-Member
京大エネ科	山本 泰功	Yasunori Yamamoto	Non-Member
京大エネ科	泉 裕太	Yuta Izumi	Non-Member
京大エネ科	渡辺 淑之	Yoshiyuki Watanabe	Non-Member

A multiscale viewpoint is introduced into the modeling of radiation damage processes in nuclear fission and fusion materials, where the processes occur at a wide variety of time and length scales. This viewpoint enables us to understand the dose-rate dependence of microstructural changes in materials, which is important for establishment of irradiation correlation rules.

Keywords: radiation damage process, fission and fusion materials, multiscale modeling, irradiation correlation

1. はじめに

現存しない核融合炉の材料劣化や超長時間照射による原子炉材料の劣化を評価するには、既存の核分裂炉やイオン加速器などの照射場を用いつつ、加速照射によって得られる材料照射データをもとに、物理的に根拠のある方法で材料挙動を予測することになる。しかし、それらの照射場は、入射粒子フラックス・入射エネルギー・入射粒子数・照射時間などが実際の照射条件とは異なるため、材料劣化を予測するには材料劣化の損傷速度依存性を明らかにする必要がある。また材料劣化は、照射による材料のミクロ構造組織変化に起因することが知られており、欠陥の生成、拡散過程のような極めて短い時間、微小な空間スケールの領域も含めた現象の理解が必要である。

本研究では、原子炉や核融合炉で使われる材料の照射による体積膨張（スエリング）の要因であるボイド（空孔集合体）形成を対象に、その核生成の損傷速度依存性評価を行った。臨界サイズに満たないボイド（エンブリオ）は、ボイドサイズが大きくなるほど核生成エネルギーが増大する状態であるため、ボイドは平均的に収縮に向かう。そのため、従来の反応速度論によって核生成過程を解析することは不可能である。本研究では、モンテカルロ法を用いて空孔・格子間原子の

フラックスを確率論的に扱うことで、従来考慮されていなかったボイド核生成の解析を行うことを可能にした。なお、対象材料はタングステンとした。

2. 方法

サイズが R のボイドに点欠陥 i (i は格子間原子および空孔) が流入する確率、およびボイドから点欠陥 i が放出される確率をそれぞれ $J_i^{\text{IN}}=4\pi RD_i C_i/\Omega$, $J_i^{\text{OUT}}=4\pi RD_i C_i^{\text{eq}}/\Omega$ に比例すると考え、乱数を使って実際に起こる事象を決定した (R : ボイド半径、 C_i : マトリクス中の点欠陥濃度、 C_i^{eq} : 欠陥集合体周辺の点欠陥濃度、 D_i : 点欠陥の拡散係数、 Ω : 原子体積)。ボイドへの正味の欠陥流入量は $J=J_i^{\text{IN}}-J_i^{\text{OUT}}$ で決まる。この解析の特徴は、欠陥フラックスの統計的ゆらぎも考慮している点である。Fig.1 はボイドサイズの時間変化を表しており、欠陥が過飽和に達してからボイドの臨界核が生成するまでの時間を潜伏期間と定義している。また、ボイドサイズ 1 のときに格子間原子が流入する事象も考慮しているため、エンブリオが消滅する場合も有り得る。各照射条件での潜伏期間を求める際、どの条件においても 100 回核生成するまで試行を行い、最後に試行回数分の潜伏期間、核生成率の平均をとって評価を行った。

3. 結果と考察

まず、モンテカルロ法を用いて損傷速度、温度ごとの核生成潜伏期間を算出した。Fig. 2 は潜伏期間における損傷速度依存性と温度依存性を表している。同一温

連絡先: 森下和功, 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄, 京都大学エネルギー理工学研究所, 電話: 0774-38-3477, E-mail: morishita@iae.kyoto-u.ac.jp

度では、損傷速度が速くなるほど潜伏期間は短くなっている。これは、損傷速度が速いほど空孔過飽和度が上昇するためである。また、同一の損傷速度では、温度が高いほど潜伏期間が短くなっている。これは温度が高いほど空孔拡散が活発になるためである。さらに、潜伏期間における損傷速度依存性と温度依存性は非線形の関係にあることが明らかになった。

次に、求めた潜伏期間からボイド核生成の温度領域を算出した。損傷速度 10^{-3} dpa/s におけるタングステン核生成温度領域は 600K から 1200K だった。照射プロセスにおけるボイド核生成温度領域は、Fig. 3 のように上限と下限がありピーク温度をもつ。このような特徴を示すのは、下限は温度が低いことで空孔が拡散しにくい状態であり、上限は温度が高いことでボイドが熱的に不安定になるためである。

Fig. 4 は核生成率におけるピーク温度の損傷速度依

存性を示す。縦軸は規格化するために核生成率を損傷速度で割った指標である。ボイド核生成においても、損傷速度が遅くなると、核生成のピーク温度が低温側にシフトしていることがわかる。温度が上昇すると、空孔過飽和度は低下し、損傷速度が速くなると、空孔過飽和度が上昇する。そのため、損傷速度が速いほど、より高温側でもボイドが核生成できると考えられる。

参考文献

- [1] 森下和功, Shahram Sharafat, “今、核融合炉の壁が熱い！—数値モデリングでチャレンジ 第7回 VI-2. 壁の中は傷まないか”, 日本原子力学会誌 Vol. 50, No. 12 (2008) pp. 803-808.
- [2] 森下和功, “マルチスケールでのプラズマ・壁相互作用の理解の現状 5-2 核融合材料のマルチスケールモデリング”, プラズマ・核融合学会誌 Vol. 84, No. 12 (2008) pp. 941-945

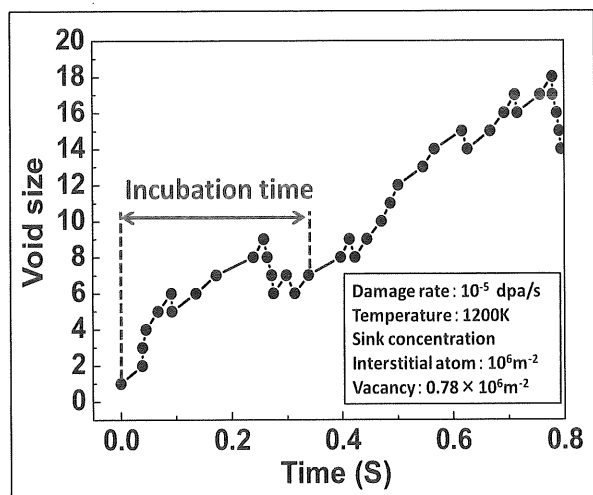


Fig. 1 Incubation time for void nucleation

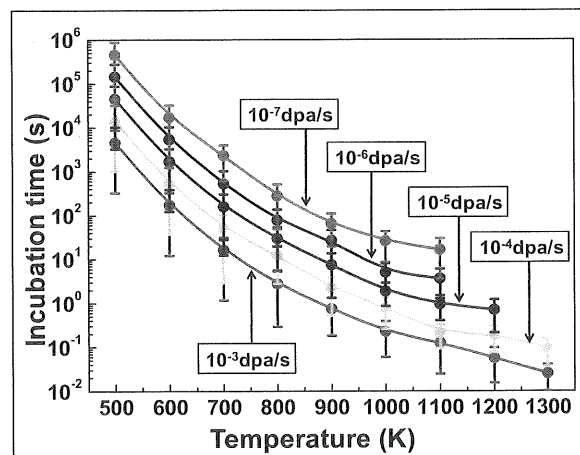


Fig. 2 Dose-rate dependence of incubation time for void nucleation

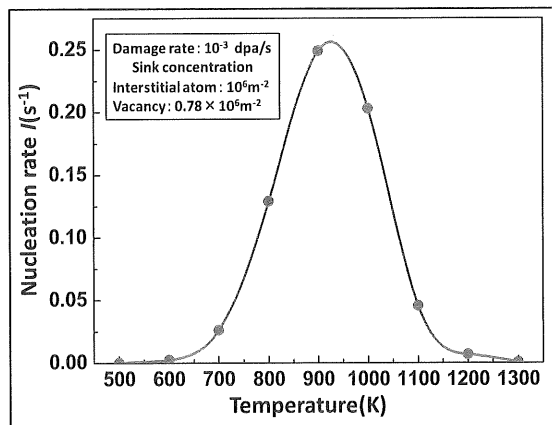


Fig. 3 Temperature range for void nucleation

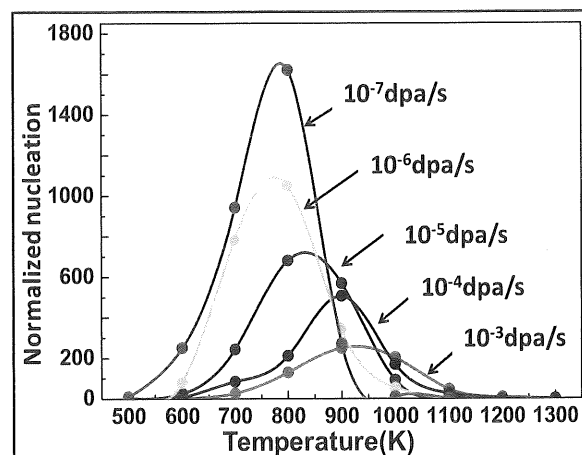


Fig. 4 Dose-rate dependence of peak temperature for void nucleation