課題番号 <u>2021A-C14</u> 利用区分 成果公開(学術)

電子顕微鏡その場観察によるイオン照射下での格子間原子集合体の一次元運動

One-dimensional migration of self-interstitial atom clusters under ion irradiation by

in situ observation using transmission electron microscopy

阿部 陽 $\hat{\boldsymbol{\Gamma}}^{1}$ 大久保 成彰¹⁾

Yosuke ABE Nariaki OKUBO

¹⁾原子力機構 原子力基礎工学研究センター

(概要)

中性子照射下で生じる連鎖的な弾き出し(カスケード損傷)が、α鉄中の格子間原子集合体の一次元(1D) 運動挙動に与える影響を明らかにする目的で、TIARA 照射施設における 400kV イオン注入装置を結合した電 子顕微鏡を用いた自己イオン照射下その場観察実験を実施してきた。昨年度までは、室温条件において、カ スケード損傷下での高純度鉄における格子間原子集合体の 1D 運動の距離が、カスケード損傷を生じない電 子照射下と比べて著しく短いことを明らかにした。また、溶質原子を多く含む実用鋼では、1D 運動の距離 が減少することが分かった。さらに、1D 運動の引き金が、入射イオンビームによる原子の弾き出しに起因 することを明らかにした。今年度は、侵入型不純物(炭素や窒素)の拡散による偏析が起こり得る 360 K における 1D 運動挙動を調査した。その結果、室温の場合と比べて、1D 運動の距離や頻度に顕著な差が見ら れないことが示唆された。

キーワード:電子顕微鏡その場観察、格子間原子集合体、カスケード損傷

1. 目的

原子炉構造材料では、中性子照射下でのカスケード損傷によって直接形成される格子間原子集合体が高速な 1D 運動を行うことで、照射脆化の要因となるミクロ組織の発達過程に影響を与えることが知られている。 しかしながら、中性子照射下での格子間原子集合体の 1D 運動挙動を調べることは困難なため、カスケード 損傷下での 1D 運動機構は未解明である。我々はこれまでに、超高圧電子顕微鏡を用いたその場観察実験に より、カスケード損傷を生じない電子照射下では、試料内の残留不純物や溶質原子が 1D 運動を阻害するこ とを明らかにしてきた[1-3]。

本研究では、イオン照射下での電子顕微鏡その場観察実験により、カスケード損傷下での格子間原子集合体の1D運動機構の解明を目的とし、昨年度までは、室温における1D運動挙動を調査してきた。今年度は、 侵入型不純物(炭素や窒素)が拡散することにより、格子間原子集合体に偏析することが予想される高温域 として、360 Kにおける1D運動挙動を調査し、室温での結果と比較することを目的とした。

2. 実施方法

TIARA 照射施設における 400kV イオン注入装置を備えた電子顕微鏡を用いて、原子炉圧力容器鋼のベース金属である純鉄に対する 250kV 自己イオン照射下でのその場観察実験を行い、形成される格子間原子集合体の 1D 運動挙動を外部カメラにより 30 fps (fps: 1 秒当たりのフレーム数)で動画撮影した。照射温度は 360 K とし、格子間原子集合体の 1D 運動の距離分布および生起頻度を解析した。

昨年度までのデータ解析方法は、撮影動画を1コマずつ進めたり戻したりを繰り返しながら、どの格子間 原子集合体がいつ 1D 運動を行うかを PC モニター上で目視によりモニタリングし、1D 運動が生じたことを 認識した場合に、その格子間原子集合体のサイズや移動距離を照射時間の関数として記録する方法を用いて きた。今年度は、この解析を半自動的に行うため、数値解析ソフトウェア MATLAB を用いた画像解析技術を 構築し、データ解析の高速化と高精度化を図った[4]。

3. 結果及び考察、今後の展開等

両温度において、間欠的な1D運動が観察された。その1D運動の距離分布のヒストグラムを図1aに示 す。両者の分布形状は似ていて、1D運動の距離は同程度であった。電子照射下での実験で得られた1D運 動の距離分布は、1D運動が生じる確率が距離の増加に対して指数関数的に低下する幾何分布に従うこ とが示されている[1]。このとき、1D運動の距離分布を片対数プロットした際のフィッティング直線

課題番号 <u>2021A-C14</u> 利用区分<u>成果公開(学術)</u>

の傾きから、格子間原子集合体の 1D 運動を阻止するトラップ濃度の情報が得られる。本研究でも、図 1aのヒストグラムを図 1b に示す片対数プロットに変換した結果、幾何分布によるフィッティングが可 能であるとともに、温度の違いによるフィッティング直線の傾きへの影響は小さいことが分かった。ま た、1D 運動を行った格子間原子集合体のサイズ分布(図 1c)と、1D 運動の生起頻度(図 1d)を両温度で比 較した結果、顕著な差は認められなかった。

これらの結果から、1) カスケード損傷を生じない電子照射実験で明らかにされた、不純物や溶質原子な どにより格子間原子集合体がトラップされ自由な1D運動が阻害されているとするモデルは、カスケード損 傷を生じるイオン照射下でも適用できること、2) 侵入型不純物(炭素や窒素)が格子間原子集合体に偏 析し得る360Kにおいても、格子間原子集合体の1D運動の機構は、室温の場合と概ね変わらないこと、が 示唆された。次年度は、高温域での1D運動挙動の理解を深めるため、照射強度依存性を調査する。



図 1 300 K と 360 K における格子間原子集合体の 1D 運動挙動の比較: a) 1D 運動の距離分布のヒストグラム、b) 1D 運動の距離分布の方対数プロット、c) 1D 運動を行った格子間原子集合体のサイズ分布、d) 1D 運動の生起頻度分 布。いずれの場合も両温度において顕著な差は見られない。

4. 引用(参照)文献等

- [1] Y. Satoh, et al., Phys. Rev. B 77 (2008) 1-10.
- [2] Y. Satoh, Y. Abe et al., Philos. Mag. 96 (2016) 2219-2242.
- [3] Y. Abe, Y. Satoh, N. Hashimoto, Philos. Mag. 101 (2021) 1619-1631.
- [4] Y. Abe, Y. Satoh, N. Hashimoto, Philos. Mag. 102 (2022) 1173-1193.