

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15310

研究課題名（和文）格子欠陥の熱拡散に及ぼす磁壁の影響

研究課題名（英文）Effects of domain wall on diffusion of defects

研究代表者

藪内 聖皓（Yabuuchi, Kiyohiro）

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：70633460

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：核融合炉に使用される材料特有の劣化事象として、炉心プラズマから発生する高エネルギー中性子に曝されることによって材料特性が劣化する、いわゆる照射脆化が極めて重要である。本研究の目的は、核融合炉構造材料である鉄系合金をターゲットに、照射損傷組織発達に及ぼす外部磁場の影響について明らかにすることである。純Feを供試材として用い、京都大学エネルギー理工学研究所のイオン加速器DuETを用いてイオン照射実験を行った。実験及び数値計算の結果、照射時の磁場の有無と照射硬化および組織発達の関係が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合炉に使用される材料特有の劣化事象として、炉心プラズマから発生する高エネルギー中性子に曝されることによって材料特性が劣化する、いわゆる照射脆化が極めて重要である。照射脆化は、ミクロには金属結晶中の原子がピリヤードのようにはじき出されることにより形成した格子欠陥（またはその集合体）が熱拡散過程を経て最終的に粗大な欠陥を形成することにより材料が劣化する事象である。格子欠陥は拡散中に磁壁によってトラップされると考えられるが、その詳細については明らかになっていない。本研究結果は、磁場閉じ込め核融合炉の構造材料の照射脆化予測を行う上で重要である。

研究成果の概要（英文）：Irradiation embrittlement, the phenomenon which the property of components of fusion reactors was degraded by neutrons generated in the fusion plasma, is one of the most important issue of safety of fusion reactor. In this study, we focused on the effect of magnetic domain on the irradiation effect. Pure Fe was used for the materials and the ion irradiation experiments was performed using the ion accelerator DuET in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. Experimental and computational study revealed the relationship between magnetic effect and microstructure evolution.

研究分野：構造材料

キーワード：核融合 構造材料 格子欠陥 拡散 イオン照射 磁性

1. 研究開始当初の背景

核融合炉は水素原子を融合させることで莫大なエネルギーを得ることを目的とした次世代エネルギー炉である。核融合反応を継続して起こす方法としては磁場閉じ込め方式が現在最有力であり、同方式を利用した ITER (国際熱核融合実験炉) の建設も国際協力のもと進められている。磁場閉じ込め方式では、超電導マグネットを用いて 10~20 テスラという強磁場を発生することで水素プラズマを閉じ込めることになる (図 1) が、当然核融合炉を構成する構造材料もその強磁場にさらされることになる。構造材料の大部分は磁性体である鉄鋼材料でできているため、強磁場による影響も十分に検討されなければならない。

また、核融合炉に使用される材料特有の劣化事象として、照射脆化が挙げられる。照射脆化は、核融合反応によって生じる高エネルギー中性子が、結晶中の原子をビリヤードのようにはじき出すことにより引き起こされる劣化事象である。はじき出しによって形成した格子間原子や空孔またはそれらの集合体は、熱拡散過程を経て材料中に様々な欠陥を形成し、材料特性の劣化を引き起こすことになる。このような事象は原子炉でも同様に引き起こされ過去に多くの研究がなされてきた。しかしながら、原子炉と核融合炉で大きく異なるのは、前章で述べたように強磁場による影響であり、この点を新たに含めた検討が必要である。磁気特性と材料中の欠陥について、非破壊検査の分野においていくつか報告があり、磁壁の移動が種々の欠陥によってピンングされることが明らかにされている (図 2)。これは逆に言えば、欠陥の拡散が磁壁によってピンングされることを意味している。つまり、磁壁の有無や磁区のサイズが照射欠陥の発達挙動に大きな影響を及ぼすことになるが、その影響についてはこれまで全く議論されていない。そこで、本研究では材料中に形成する各種欠陥の拡散運動が如何に磁壁によって阻害されるかを明らかにすることを目的としており、まさにこれが本研究課題の確信をなす学術的な「問い」である。

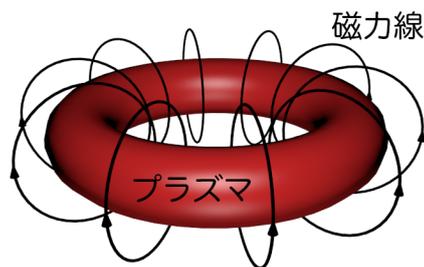


図 1 磁場閉じ込めプラズマ

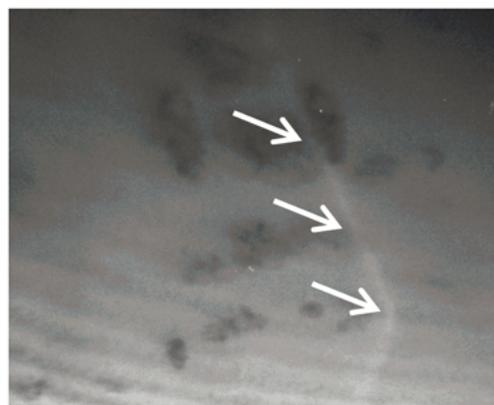


図 2 磁壁の欠陥によるピンングの様子
[Y. Kamada, J. Magn. Soc. Jpn., 37, 147-150(2013)]

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁性材料である鉄鋼材料をターゲットに、照射欠陥の発達挙動に及ぼす磁壁の影響を明らかにすることである。照射欠陥の発達挙動は、格子間原子や空孔などの点欠陥およびその集合体である点欠陥クラスターの熱的拡散によって引き起こされる。これら欠陥の発達過程 (拡散過程) では、欠陥同士の対消滅や、固溶原子や侵入型原子によるトラッピング、転位や粒界などによる吸収・消滅など、様々な過程を経て照射量や時間に依存した微細組織を形成する。格子欠陥は、研究背景で述べたように磁壁によってもトラップされると考えられるが、格子欠陥の拡散に対する磁壁の影響についてはこれまでの研究では議論されていない。格子欠陥と磁壁の相互作用は学術的な側面から重要かつ興味深いだけでなく、核融合炉の健全性の担保や磁性材料の偏極に関する技術開発などエンジニアリングの側面からも重要な事象である。従来の研究では既に材料中に存在する欠陥に対して、磁壁を動かしそのトラッピングについて検討していたが、本研究では全く逆の発想をし、動かない磁壁に対して拡散運動をする欠陥がどの程度トラップされるかという視点で検討する。この逆転の発想により、欠陥サイズや温度等をパラメータにデータを整理することが可能となり、これまでの研究では明らかにすることができなかった格子欠陥挙動についての新たな知見・法則が明らかになることが期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、照射欠陥の拡散挙動に及ぼす磁壁の影響について、イオン加速器と電子顕微鏡を用いて明らかにすることを目的としている。供試材としては、純鉄を用いる。本研究期間中に対象とする照射欠陥は転位ループである。純鉄の低温での照射欠陥は主に転位ループであること

がこれまでの研究によって明らかになっている。材料中への照射欠陥の導入には、京都大学エネルギー理工学研究所が有するイオン加速器 DuET を用いてイオン照射実験によって行う。6.4MeV の Fe³⁺イオンを用いて、照射速度 1 × 10⁻⁴dpa/s で、1dpa まで照射を行う。照射温度は 200℃ とし磁場条件を変えて照射実験を行う。イオン照射による損傷量と深さの関係を SRIM コードを用いて計算した結果を図 3 に示す。照射後の試験片はナノインデントによる硬さ試験および透過型電子顕微鏡を用いた微細組織観察を行い、欠陥のタイプ、サイズ、数密度などをまとめる。得られた結果から、磁壁によってトラップされる照射欠陥のサイズ依存性や障壁エネルギーについて検討を行う。

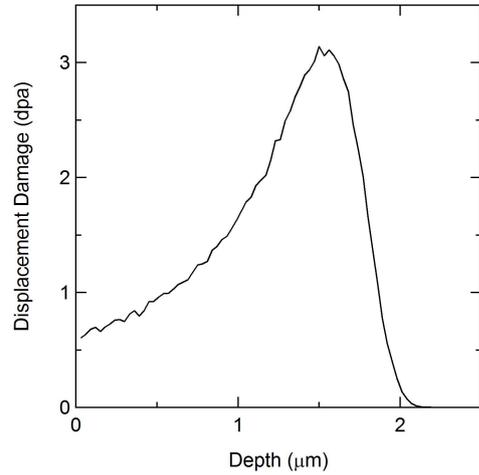


図 3 損傷量の深さ依存性

4. 研究成果

図 4 に照射後のナノインデント硬さの深さ依存性を示す。深さが深くなるにつれて硬さが低下するインデントサイズエフェクトが観察された。Nix と Gao によって、インデントサイズエフェクトは幾何学的に必要な転位モデルとして次の関係が見いだされている。

$$H^2 = H_0^2 + \frac{h^{**}}{h}$$

$$h^{**} = \frac{81}{2} b \alpha^2 \mu^2 \tan^2 \theta$$

ここで、H₀ は無限遠での硬さを表しておりバルク相当硬さと呼ぶ。照射領域の硬さを本式に当てはめてバルク相当硬さを求めると、磁場なしと磁場ありの場合のバルク相当硬さは、それぞれ、2.7GPa、2.9GPa となり、有意な差は観察されなかった。図 5 に透過型電子顕微鏡観察の結果を示す。いずれにもブラックドットと呼ばれる照射欠陥が観察された。これらのブラックドットは微細な転位ループと考えられ、他に照射欠陥が観察されなかったことから、照射硬化を引き起こす主な因子であると考えられる。観察されたブラックドットはどちらも数 nm であり、サイズ、数密度共に磁場の有無によらず大きな差が観察されなかった。磁壁のサイズを仮定して反応速度論によるブラックドットの組織発達を計算したところ、本照射条件では有意な差は認められなかった。以上のことから、本照射条件における磁場の有無は組織発達および照射硬化に大きな影響を及ぼさないことが明らかとなった。今後より幅広い照射条件による実験を通して、より詳細に磁壁と照射欠陥の相互作用について明らかになることが期待される。

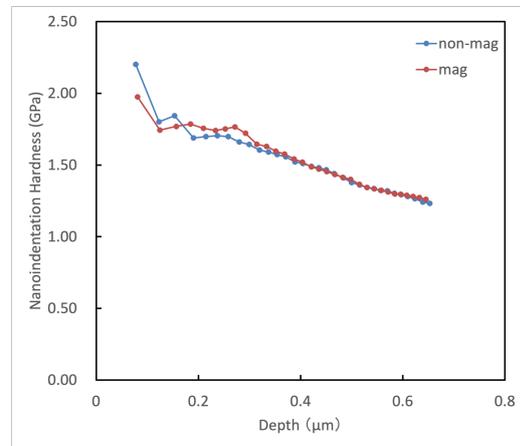


図 4 ナノインデント硬さの深さ依存性

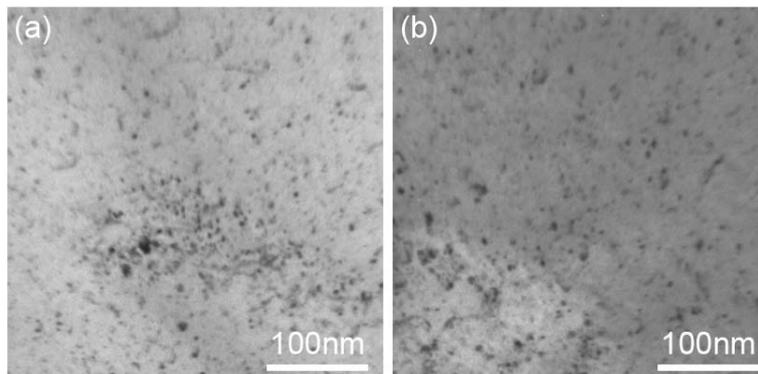


図 5 照射欠陥の透過型電子顕微鏡観察結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------