

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	ZHANG ZHEXIAN
論文題目	Ion-irradiation Hardening and Microstructure Evolution in Tungsten (タングステンのイオン照射硬化および微細組織変化)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、イオン加速器を用いて、純タングステン(W)における照射硬化および損傷組織の発達に及ぼす照射環境の影響を調べた結果をまとめたものであり、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、核融合炉の開発においてはダイバータのプラズマ対向材料第一候補材とされている W の過酷環境下における特性の解明が重要な課題の一つであり、W の照射下挙動の基礎的理解が遅れていることを指摘している。特に、高熱負荷を受けた際の W の再結晶化やヘリウム(He)による粒界脆化の促進が懸念されていることから、イオン加速器を用いた He 注入の影響や再結晶化処理後のイオン照射の影響を調べる必要があると述べている。</p> <p>第2章では、試料作製法などの実験方法が示されている。受け入れ W 材が微細粒 (平均粒径 $2\mu\text{m}$) の加工集合組織を持つのに対し、1400°C、1時間の熱処理を施した再結晶処理 W 材は、等方的な形状の粗大粒 (平均粒径 $30\mu\text{m}$) をもつことが確認されている。照射影響は、受け入れ W 材および再結晶処理 W 材の双方に対し、イオン加速器を用いて、鉄イオンだけの single 照射と鉄イオンと He イオンの dual 照射により、300°C、500°C、700°C および 1000°C にて、2 dpa までの照射を行い、照射硬化量の測定および照射後組織観察により評価されている。</p> <p>第3章では、ナノインデンテーション法を用いた照射硬化量の測定結果がまとめられている。イオン照射においては、損傷領域が照射表面近傍に限られることから、ナノインデンテーション硬さの評価法における課題を提示し、その課題に対処する新たな評価方法が提案されている。その評価法に基づき、照射硬化量を求めた結果、W の照射硬化量は照射温度の上昇と共に増大する傾向にあるが、受け入れ材に比べ、再結晶処理材では照射硬化量が増大すること、さらにこの傾向は He の同時照射により軽減されることが明らかにされている。</p> <p>第4章では、single 照射の場合の挙動がまとめられており、格子間型転位ループ (I-loop) が集合して形成される raft の形態が照射温度に依存し、300°C では raft の形状が一次的に伸びる傾向にあるが、500°C ではやや二次元に広がり、1000°C では成長して粗大化した I-loop が孤立して存在するようになることが示されている。一方、空孔クラスターであるポイドは、500°C 以下では観察されず、700°C 以上で観察されることが明らかにされている。</p> <p>第5章では、dual 照射の場合の挙動がまとめられており、He の同時照射がポイドの形成を促進することが明らかにされている。また、粗大粒を持つ再結晶処理材においては、損傷組織が表面近傍、中間深さ領域およびイオンの飛程を超えた拡散</p>			

領域の 3 つの領域に分布することが初めて示されている。特に、1000°C においては、表面近傍に個々の I-loop が格子状に整列する、いわゆる「ループ格子 (Loop Lattice)」が形成されることが初めて見出されている。また、中間深さ領域では I-loop 形成が顕著に抑制されており、この領域では空孔濃度が高いため、格子間原子は空孔との対消滅により、数密度が低減されるためであるとされている。さらに、イオンの飛程を超える領域において I-loop が存在する理由としては、1000°C では I-loop の一次元運動が活発になり、飛程内で生成された I-loop が一次元運動により、試料内部に拡散するためであると説明されている。

第 6 章では、前章で発見された Loop Lattice について詳細な微細組織観察と構造解析が行われている。Loop Lattice は格子定数が約 45nm の BCC 構造を組んでおり、W の格子との方位関係は同じであることが明らかになり、loop の性格 (I-loop か V-loop (空孔型転位ループ)) について詳細な検討が行われ、Loop Lattice を形成している loop は I-loop であることが明らかにされている。

第 7 章では、第 3 章から第 6 章の結果に基づき、照射損傷組織に及ぼす結晶粒界と He の影響や照射硬化量と組織変化の相関について検討されている。結晶粒界の影響については、空孔と格子間原子の易動度の相違に着目し、結晶粒界は I-loop を吸収することでその近傍に I-loop の欠乏領域を形成すること、結晶粒界内では空孔の再配列、すなわち移動が容易になり、ボイドの成長が促進されることが明らかにされている。He の影響については、He はボイドの核生成および成長を促進し、より低温域での形成を可能にすることが述べられている。また、W の照射硬化の主要な因子は、空孔型欠陥のボイドではなく、I-loop の形成によるもので、I-loop の持つひずみ場が転位の運動に対する障害になると結論されている。

第 8 章は結論である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、イオン加速器を用いて純タングステン(W)における照射硬化および損傷組織の発達に及ぼす照射環境の影響を調べた結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

まず、純 W のイオン照射による照射硬化および損傷組織の照射温度依存性を調べ、300°C から 700°C までは照射温度の上昇に伴い照射硬化が増大するが、1000°C では硬化量が減少することを明らかにした。照射硬化は格子間原子型転位ループ (I-loop) に起因し、300°C から 700°C までは I-loop が集合して<110>方向に伸びた raft が形成されるが、1000°C では個々のループが BCC 格子を形成するように分布する、いわゆる“Loop Lattice”が形成されることを初めて見出している。さらに、損傷組織の深さ方向の分布を調べた結果、高温になる程分布領域が深くなり、温度依存性を示さない計算結果とは挙動が大きく異なることを見出した。また、この挙動の異なる原因として、I-loop の一次元運動に着目し、TEM 観察と速度論的解析結果に基づき、高温域においては I-loop の一次元運動が生じやすいためであると説明している。

次に、二重イオンビームを用いてヘリウム (He) 同時照射の影響を調べ、He 同時照射は細粒からなる圧延加工後の W の照射硬化量を増大させるが、粗大粒からなる再結晶処理後の W に対してはほとんど影響を与えないことを示した。また、その発現機構に関しては、詳細な微細組織観察を行い、その観察結果に基づいて結晶粒界による選択的な He および I-loop の吸収捕獲機構を提案した。さらに、He 同時照射は He バブルの形成を促進し、より低温域で He バブルが形成されることを明らかにした。一方、高温域で形成される He バブルは照射硬化に寄与しないと結論している。

以上、本論文は、核融合炉プラズマ対向材料として研究開発が進められている W の微細組織及び硬さに及ぼす照射影響に関する重要な基礎的知見を与えており、それらは核融合炉 W ダイバータの設計や補修技術開発において寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 2 月 19 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：平成 29 年 3 月 20 日以降