

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Effect of oxide former elements on ion-irradiation response of oxide dispersion strengthened ferritic steels

(酸化物分散強化鋼のイオン照射下挙動に及ぼす酸化物形成元素の影響)

申請者 Peng Song

最終学歴 平成 30年 11月
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻博士後期課程
(卒業、修了、研究指導認定見込、研究指導認定退学等)

学識確認 平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
(主査) 教授 木村晃彦

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 星出敏彦

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 今谷勝次

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	Peng Song
論文題目	Effect of oxide former elements on ion-irradiation response of oxide dispersion strengthened ferritic steels (酸化物分散強化鋼のイオン照射下挙動に及ぼす酸化物形成元素の影響)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、酸化物分散強化 (ODS) 鋼のイオン照射下挙動に及ぼす酸化物形成元素の影響を論じた結果をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、次世代原子炉や核融合システム用の各種の候補構造材料の特徴と運転中に構造材料が被ると考えられる照射損傷についてまとめられている。これらの候補材料のうち ODS 鋼は、従来の鉄鋼材料に比べ、優れた耐照射性を有することから、原子炉被覆管や核融合炉のブランケット構造材料としての利用が期待できるとされている。しかし、ODS 鋼の照射下での高性能発現における酸化物粒子の役割については不明な点が残されており、ODS 鋼の照射下挙動に及ぼす酸化物形成元素の影響を調べる必要があると述べている。</p> <p>第2章は実験方法である。3種類の ODS 鋼 (Y-Ti-ODS、Y-Al-ODS、Y-Al-Zr-ODS) の成分及び製造方法について示し、酸化物形成元素の種類が異なると ODS 鋼中に形成される酸化物粒子の組成および構造が異なり、それに伴い、粒子の数密度およびサイズなどの分散形態が変化することを示している。また、酸化物の照射下相安定性評価には、イオン加速器を用いることが効率的であり、照射温度は 300°C 以下である必要があると述べている。</p> <p>第3章では、Al 添加の有無によって ODS 鋼中に存在する酸化物粒子の成分や構造の異なる 2種類の ODS 鋼に対し、1 MeV He イオンを高濃度 (3500 appm) まで照射した後、透過型電子顕微鏡を用いた微細組織観察により損傷組織発達挙動を調べた結果、いずれの ODS 鋼においても He イオン照射により高密度の微細な He バブルが形成されるが、Al 無添加の ODS 鋼ではボイドスウェリングがより顕著に抑制されることが明らかにされている。その原因として Al 無添加鋼では、Al 添加鋼に比べ、より高い数密度でサイズの小さな酸化物粒子 (yttrium-titania) が存在するため、点欠陥や He 原子のシンク強度が大きくなるためと結論している。</p> <p>第4章では、Al 添加型 ODS 鋼の He イオン照射後 (3500 appm He、0.2 dpa) の硬度変化を異なる照射温度 (300、550、700 °C) で調べている。その結果、硬化量が照射温度の上昇とともに減少すること、照射後焼鈍 (800°C) は He バブルの分散形態を変化させるが、照射硬化量はほとんど変化しないことを見出した。また、He バブルでは、Orowan 型の転位運動障壁モデルにおける強度因子 (α) は 0.1 と小さく、He バブルの照射硬化への寄与が転位ループなどの他の照射欠陥に比べ、顕著に小さいことを明らかにした。</p> <p>第5章では、酸化物形成添加元素の種類異なる 3種類の ODS 鋼 (Y-Ti-ODS、</p>			

Y-Al-ODS、Y-Al-Zr-ODS) に対し、二重イオンビーム照射装置を用いて、550°Cで 6.4 MeV Fe³⁺を高照射量 (30 dpa) まで、ならびに 1 MeV He⁺を高 He 量 (3500 appm) まで同時に照射した場合の硬度変化及び組織変化の相関が調べられている。その結果、ボイドスウェリング量は鋼種により異なり、0.13% (Y-Ti-ODS)、0.53% (Y-Al-ODS)、0.20% (Y-Al-Zr-ODS) の値を示すこと、さらにその相違の理由として、空孔型欠陥に対するシンク強度が酸化物粒子の種類により異なることを提案している。また、詳細な組織観察により、照射後の ODS 鋼中に存在する He バブル ~~数~~の約 80%は酸化物粒子に接しており、酸化物粒子は He 原子の強力な捕獲サイトとなり、He バブルの成長を抑制するため、ODS 鋼ではボイドスウェリングが抑制されると結論した。さらにナノインデント (NI) 法を用いてイオン照射後の硬度変化を評価した結果、すべての ODS 鋼において高い数密度の He バブルの存在が認められたものの、照射は軟化現象を引き起こすことが明らかにされている。NI 法によるイオン照射材の硬度評価法として、従来の Nix-Gao のモデルの適用の妥当性を検討するとともに、照射硬化量が最大となる押し込み深さにおける硬度の評価法について検討している。これらの検討により、照射による軟化現象の発現機構として、照射による転位密度の減少を提案するとともに、He バブルの照射硬化への寄与が小さいことを確認している。これらの結果に基づき、酸化物粒子の高いシンク強度は、ODS 鋼のヘリウム脆化割れ感受性を顕著に低下させると結論している。

第 6 章は、酸化物粒子の照射下相安定性の評価のため、室温で 2 dpa から 50 dpa までの範囲でイオン照射を実施し、酸化物粒子の分散形態変化および硬度変化を調べている。その結果、酸化物粒子は照射量の増大に伴い、次第に数密度が減少し、約 20 dpa のイオン照射により、ほとんど消滅するが、照射硬化を伴うことを初めて明らかにした。上述の酸化物粒子の消滅は、高エネルギーイオンの ballistic recoil によるミキシング現象によるもので、照射硬化は酸化物形成原子の溶出による固溶強化及び弾き出し損傷による照射欠陥 (転位ループ) の形成によると結論している。また、酸化物形成元素が異なると酸化物粒子の種類が異なり、その照射下相安定性も異なる傾向にあることを示した。

第 7 章は、本論文のまとめと結論である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、酸化物分散強化 (ODS) 鋼のイオン照射下挙動に及ぼす酸化物形成元素の影響に関する研究の成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、Al 添加および無添加の 2 種類の ODS 鋼を用いて、700℃で He イオンを 3500 appm まで照射し、その損傷組織を詳細に観察した。その結果、いずれの ODS 鋼においても従来鋼に比べてボイドスウェリング量が非常に小さくなり、数密度の高い酸化物粒子を含んだ Al 無添加材では、ボイドスウェリング量が Al 添加材の約 1/4 に抑えられることを明らかにした。また、ODS 鋼の He 脆化割れ感受性を評価するため、種々の条件で He イオンを照射した場合の硬度変化および損傷発達の相関を調べた結果、Ti 添加 ODS 鋼においては He による硬化が著しく小さく、ODS 鋼における He 脆化は硬化型脆化ではないことを示した。

次に、照射硬化の評価にあたっては、Orowan 型の転位障壁モデルに従って定量化し、照射硬化における空孔型照射損傷組織 (空孔集合体) の役割に着目して検討した結果、He バブルなどの空孔集合体は転位運動の大きな障壁にはならないと結論している。

さらに、添加されている酸化物形成元素の種類が異なる 3 種類の ODS 鋼に対し、種々の条件でイオン照射を行い、酸化物粒子の分散形態に及ぼす照射影響を調べた。その結果、いずれの ODS 鋼においても照射量の増大に伴って酸化物粒子のサイズおよび数密度が減少し、その変化の度合いは ODS 鋼中に添加されている酸化物形成元素の種類に依存することが明らかにされている。

以上、本論文は、酸化物形成元素の異なる ODS 鋼のイオン照射下挙動を明らかにし、照射効果における酸化物形成元素の役割について重要な知見を与えていることから、次世代原子炉や核融合システムにおいて重要課題となっている構造材料の耐照射性の向上に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 30 年 8 月 23 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 31 年 10 月 31 日以降