

( 続紙 1 )

京都大学	博士(エネルギー科学)	氏名	藪内 聖皓
論文題目	Mn effect on irradiation hardening behavior and microstructural evolution in BCC Fe (BCC鉄中の照射硬化挙動及び微細組織発達に及ぼすMnの影響)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、合金元素としてMnを最も多量に含んでいる原子炉圧力容器鋼のモデル合金(Fe-Mn二元系合金)において見出されている高照射量領域における顕著な照射硬化、すなわち「Mn影響」の発現機構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章では、本研究の背景と目的について述べている。BCC構造からなる原子炉圧力容器鋼やフェライト鋼中で引き起こされる照射硬化についての現在までの研究状況及び学術的知見をまとめ、近年着目されている転位ループの一次元運動に関する報告を整理し、マトリックス損傷の形成の素過程に関する研究課題を抽出した。</p> <p>第2章では、実験方法について述べている。材料試験炉を使用した中性子照射法やイオン加速器を用いたイオン照射法、およびナノインデントによる硬度変化測定法の照射硬化評価における妥当性を説いている。また、透過型電子顕微鏡(TEM)内焼鈍その場観察手法の詳細について述べている。</p> <p>第3章では、中性子照射実験の結果をまとめている。各種の合金元素からなるFe二元系合金を用いた中性子照射実験の結果、Fe-Mn二元系合金においてのみ、中性子照射量が <math>4 \times 10^{19}</math> n/cm<sup>2</sup> (商用炉運転開始後30年相当)以上の高照射量領域において急激な照射硬化を示すという特異な照射量依存性、すなわち「Mn影響」を見出した。また、微細組織観察の結果、以下のことを明らかにした。まず、顕著な照射硬化を示したFe-Mn合金中では、格子間原子型転位ループが高密度かつ均一に分散されていることを示した。一方、硬化量の小さな純鉄中では、転位ループは転位線の周辺に形成されたり、転位ループ同士でラフト状の集合体を形成したりして、材料中に不均一に分散されていることを示した。以上のことから、Mn影響は照射によって形成された高密度の格子間原子型転位ループの形成により発現すると結論した。また、照射硬化を分散強化モデルで表し、運動転位と転位ループ間の相互作用の強さを表す強度因子を用いて、強度と組織の相関を合理的に説明した。</p> <p>第4章では、中性子照射実験で得られなかった系統的な照射条件でのイオン照射実験の結果をまとめている。先ず、各種のFe二元系合金に対し、照射硬化および損傷組織に及ぼす照射温度および照射量の影響を詳細に調べた結果、Fe-Mn二元系合金では、中性子照射の場合と同様に高照射量領域において顕著な照射硬化挙</p>			

動が観察され、Mn影響がイオン照射材においても発現することを確認した。次に、Mn影響に及ぼすMn量および照射温度の影響について調べた結果、照射温度が低い程、少ないMn量でMn影響が発現することを明らかにした。さらに、低温での焼鈍実験により、不安定マトリックス損傷の挙動を調べ、Mnはカスケードで形成されるような微細な照射欠陥の運動を抑制し、マトリックス損傷を安定化させていることを示した。

第5章では、TEM内焼鈍その場観察による照射損傷組織の回復過程を調べた。これにより、純鉄中では従来報告されているように転位ループの一次元運動による照射欠陥の回復現象が確認されたが、Fe-Mn合金中では転位ループの一次元運動が抑制されていることを直接観察により初めて明らかにした。

第6章では、上記の実験で得られた知見を確認するため、反応速度論を用いた模擬実験結果について述べている。格子間原子の移動の活性化エネルギーの増大に伴い、格子間原子10個以上からなる転位ループの密度が上昇することおよび低温程硬化量が増大することを確認した。格子間原子の移動の活性化エネルギーの増大は、Mnによる格子間原子の捕獲およびFe-Mn格子摩擦による格子間原子の易動度の減少によると結論した。

第7章では、各章の結果を総合的に評価し、Fe-Mn二元系合金の照射硬化挙動と照射損傷メカニズムについてまとめている。Mn影響は、定常的な損傷組織発達の素過程の不均衡やカスケードの重なりが生じ始める高照射量領域において、転位ループの運動がMnに抑制され、高密度の転位ループが残存すること、およびMnによる転位ループの捕獲に伴い、転位ループと運動転位との相互作用が増大することにより、発現すると結論した。最後に、これらの結論に基づき、高経年原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測における留意点を指摘した。

以上、本論文は、原子炉圧力容器鋼の照射脆化機構を科学的根拠に基づいて予測するために不可欠な、照射硬化に及ぼすMn添加元素の影響に関する重要な基礎的知見を与えており、学術上および実際上の貢献が期待される。

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23年8月24日に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。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、合金元素としてMnを最も多量に含んでいる原子炉圧力容器鋼のモデル合金(Fe-Mn二元系合金)において見出されている高照射量領域における顕著な照射硬化、すなわち「Mn影響」の発現機構を論じ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、中性子照射およびイオン照射の影響を調べるため、各種の合金元素からなる鉄二元系合金を用いた照射実験を行った。その結果、Fe-Mn二元系合金においてのみ、中性子照射量が  $4 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> (商用炉運転開始後30年相当)以上の高照射量領域において、急激な照射硬化を示すという特異な照射量依存性、すなわち「Mn影響」を見出した。また、詳細な組織観察結果に基づき、Mn影響は照射によって形成された高密度の格子間原子型転位ループの形成によるものであり、照射温度が低い程、少ないMn量で発現することを示した。併せて、照射硬化を分散強化モデルで近似的に表すことにより、強度と組織の相関を合理的に説明した。

さらに、TEM内焼鈍その場観察法により、照射損傷組織の回復過程を詳細に調べた。これにより、純鉄中では従来報告されているように、転位ループの一次元運動による照射欠陥の回復現象が確認されたが、Fe-Mn合金中では転位ループの一次元運動が顕著に抑制されていることをはじめて明らかにした。

以上の実験結果から、Mn影響は、定常的な損傷組織発達の素過程の不均衡やカスケードの重なりが生じ始める高照射量領域において、転位ループの運動がMnに抑制され、高密度の転位ループが残存すること、およびMnによる転位ループの捕獲に伴い、転位ループと運動転位との相互作用が増大することにより、発現すると結論した。最後に、これらの結論に基づき、高経年原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測における留意点を指摘した。

以上、本論文は、原子炉圧力容器鋼の照射脆化機構を科学的根拠に基づいて予測するために不可欠な、照射硬化に及ぼすMn添加元素の影響に関する重要な基礎的知見を与えており、学術上および実際上の貢献が期待される。

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23年8月24日に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。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、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： 年 月 日以降