

氏 名	く とう たけし 工 藤 健
学位の種類	博 士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 95 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻
学位論文題目	軽水炉压力容器鋼モデル合金における照射硬化支配因子に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 木村 晃彦 教授 松本 英治 教授 星出 敏彦

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、軽水炉压力容器鋼モデル合金において照射硬化支配因子とされている照射欠陥集合体やナノスケールの銅析出粒子を直接観察法により同定するとともに、その照射硬化への寄与を定量的に評価し、照射脆化機構論に基づいた高精度の照射脆化予測に関して論じた結果をまとめたもので、7章からなっている。

第1章は、序論で、軽水炉压力容器鋼の照射脆化評価は主要な課題の一つであり、その要因は照射誘起格子欠陥の拡散や、それらと溶質原子との相互作用を通じて起こるナノスケールの微細組織変化および組成変化であること、および不純物銅を比較的多く含む鋼材では銅の析出、純鉄やCu濃度の低い鋼材ではMatrix Defectと呼ばれる空孔集合体 (V-cluster) および格子間型転位ループ (I-loop) が硬化型脆化の主要因と考えられているが、現時点ではこれらの照射硬化への寄与の程度が明らかになっていないことを述べている。これを踏まえ、本研究では不純物銅の影響および照射硬化支配因子の同定に着目し、軽水炉压力容器鋼の寿命予測と健全性維持のための基礎的知見を得るため、V-cluster, I-loopおよび銅析出物の挙動をより詳細に理解するために、Fe-Cuモデル合金における電子線照射および中性子照射下での照射硬化支配因子を同定すると共に、それぞれの寄与について定量的に評価する事を目的として研究を行ったと述べている。

第2章では、実験方法を詳細に述べている。

第3章では、Fe-Cu合金における電子線照射下での照射硬化支配因子の同定およびそれらの照射硬化への寄与を定量的に評価した結果が述べられている。陽電子寿命測定法を用いたV-clusterの照射後焼鈍回復挙動の詳細な調査の結果、V-clusterは直接的な照射硬化支配因子ではないと結論した。一方、高分解能透過電子顕微鏡法および3次元アトムプローブFIM分析法を用いてナノスケールの格子間型転位ループ (I-loop) および銅析出物の直接観察を行うとともに、強度特性との相関を調べた結果、I-loopおよび銅析出物は電子線照射したFe-Cuモデル合金における主要な照射硬化支配因子であると結論した。また、OrowanモデルおよびRussel-Brownモデルを用いた微細組織変化による照射硬化の評価では、I-loopと銅析出物の形成による照射硬化量の定量化を実現し、I-loopおよび銅析出物のそれぞれの照射硬化への寄与はほぼ同等であると述べている。

第4章では、実機環境における照射硬化機構を理解するため、Fe-Cu合金の中性子照射環境における照射硬化支配因子の同定を試みた結果を述べている。中性子照射材の照射後焼鈍回復挙動は、照射硬化因子の回復メカニズムが電子線照射材と同じである可能性を強く示唆していることから、Fe-Cuモデル合金の中性子照射下における照射硬化支配因子は、I-loopおよび銅析出物である可能性が高いと述べている。

第5章では、照射環境における微細組織変化を反応速度論に基づいた計算機実験によって模擬し、中性子照射下および電子線照射下における損傷速度依存性ならびにカスケードの影響を評価した結果、シミュレーション実験では大筋で実験結果と一致し、電子線照射下と中性子照射下とは、照射硬化挙動に本質的な相違は見られないこと、および微細組織変化に及ぼす損傷速度の影響は小さいと述べている。

第6章では、本研究成果を元に実機寿命評価への提言を行っている。比較的銅濃度の高い圧力容器鋼では従来照射硬化の大部分は銅析出物によると考えられていたが、本研究成果からその寄与は約50%程度であり、I-loopの寄与と同程度であるため、脆化評価にはI-loopの寄与を考慮する必要があることを指摘している。一方、I-loopの成長挙動に不明な点が多く今後の研究課題であること、並びにPWR環境での損傷速度は本研究結果の適用範囲にあり、照射硬化に及ぼす損傷速度の影響は小さいと述べている。

第7章では本研究を総括し、結論を述べている。

本研究では、pure-FeおよびFe-Cuモデル合金における電子線照射下での照射硬化支配因子は、それぞれ、pure-FeではI-loop、Fe-Cu合金ではI-loopおよび微小銅析出物であり、I-loopおよび微小銅析出物の照射硬化への寄与がほぼ同程度であることを示した。現在の圧力容器鋼の健全性評価に用いられている脆化予測式は合金元素と照射量をパラメータとした経験則から導出されたものであり、I-loopの照射硬化への寄与は陽には考慮されていない。今後の寿命評価の更なる高精度化のためには、機構論的な脆化予測の検討が必要であり、本研究成果はそのための貴重な指針を与えている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、軽水炉圧力容器鋼モデル合金において照射硬化支配因子とされている照射欠陥集合体やナノスケールの銅析出粒子を直接観察法により同定するとともに、その照射硬化への寄与を定量的に評価し、照射脆化機構論に基づいた高精度の照射脆化予測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通りである。

1. Fe-Cu合金における電子線照射下での照射硬化支配因子の同定およびそれらの照射硬化への寄与を定量的に評価した結果、空孔集合体(V-cluster)は直接的な照射硬化支配因子ではないことを示した。
2. 高分解能透過電子顕微鏡法および3次元アトムプローブFIM分析法を用いてナノスケールの格子間型転位ループ(I-loop)および銅析出物の直接観察を行うとともに、強度特性との相関を調べた結果、電子線照射したFe-Cuモデル合金における照射硬化支配因子は、I-loopおよび銅析出物であることを明らかにした。
3. 分散化モデルおよびRussel-Brownモデルを用いた微細組織変化による照射硬化の評価では、I-loopと銅析出物の形成による照射硬化の定量化を実現し、I-loopおよび銅析出物の照射硬化への寄与がほぼ同等であることを明らかにした。
4. Fe-Cu合金の中性子照射下における照射硬化支配因子は、電子線照射下における支配因子とはほぼ等しいことを示した。
5. 照射環境下の微細組織変化を反応速度論に基づいた計算機実験によって模擬し、中性子照射下および電子線照射下における損傷速度依存性ならびにカスケードの影響を評価した結果、シミュレーション実験では大筋で実験結果と一致し、電子線照射下と中性子照射下とでは、照射硬化挙動に本質的な相違は見られないこと、および微細組織変化に及ぼす損傷速度の影響は小さいことを示した。

以上要するに、本論文は、軽水炉圧力容器鋼モデル合金の照射硬化支配因子を同定し、それらの照射硬化への寄与の定量的な評価を行い、硬化型照射脆化評価および予測に関する研究を行ったもので、学術上および實際上、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16年2月20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。