

|          |                             |
|----------|-----------------------------|
| 氏 名      | ひろ せ たか のり<br>廣 瀬 貴 規       |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (エネルギー科学)               |
| 学位記番号    | エネ博第46号                     |
| 学位授与の日付  | 平成14年3月25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応用科学専攻       |
| 学位論文題目   | 低放射化鉄鋼材料の破壊機構に及ぼす照射効果に関する研究 |

論文調査委員 (主 査)  
教授 香山 晃 教授 塩津 正博 教授 井上 達雄

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、核融合炉や原子炉に利用される低放射化鉄鋼材料の研究に関するものであり、低サイクル疲労破壊特性および破壊特性に及ぼす中性子ならびにヘリウムイオンの照射効果を論じている。

第1章の序論では、研究の背景及び目的について述べており、理想的なエネルギー源として核融合の必要性を述べ、核融合炉構造材料が具備すべき特性と研究開発の現状について概説し、本論文全体の構成及び各章の位置づけについて述べている。

第2章では、核融合炉構造材料としての低放射化鉄鋼材料の開発の現状、核融合炉環境における材料の特性劣化を評価する手法など研究の背景について述べている。これまで、照射材を対象とした疲労特性評価は、試験技術の困難さから、特異な評価法による極端な試験条件を対象とした汎用性に欠ける評価が主であり、材料の性能実証データを取得した例はなかった。これを受けて、解決すべき技術課題を明らかにし、それを踏まえた評価技術開発の方針を示した。

第3章では、核融合炉における材料の疲労特性評価手法の開発について述べている。放射化した微小試験片の疲労特性評価を遠隔操作により行うために必要な要素技術について検討し、それらを組み合わせた新しい照射後疲労試験装置を開発した。特に、試験片固定治具ならびにレーザー変位計を利用したひずみ計測システムを導入したことにより、単純な作業による高精度の特性評価を実現した。併せて、破壊機構の詳細な解析を可能とする微細組織観察手法を確立した。この方法では、優れた位置精度で観察位置を制御することが可能であることから、疲労亀裂先端部分のような破壊特性に大きな影響を及ぼす微細な領域から観察用試験片を作製すること、すなわち、破壊機構の詳細な解析を可能にした。

第4章では、新たに開発した試験装置により、低放射化鉄鋼材料の疲労特性評価を実施し、微小試験片を用いた強度特性評価の際に問題となる試験片寸法効果の検討を行った結果について述べている。疲労寿命特性に及ぼす試験片寸法効果は、体積の効果が顕著であり、破壊の起点が最小直径部分に限定される砂時計型試験片では、表面積の減少による寿命特性の変化はほとんど無いことを明らかにした。このことにより、本研究で用いた微小砂時計型試験片は、一般的に用いられている大型強度試験片と同等の評価を与えることを示した。

第5章では、低放射化鉄鋼材料の低サイクル疲労破壊と微細組織の発達に着目し、疲労破壊特性を支配する組織因子について述べている。低放射化鉄鋼材料の繰返し軟化挙動は、鋼の転位構造が変化することに起因することを明らかにした。鋼の転位構造は、繰返し変形に伴いマルテンサイトラス構造が消失し、代わって転位セル構造が形成されることを明らかにした。転位セル構造は、局所的に転位の粗密が明確に分かれた組織であり、全体としては転位密度が減少する。この変形抵抗の減少が繰返し軟化の原因であることを実験的に示した。

第6章では、前章までに構築した評価方法ならびに基礎特性を元に、中性子照射材を対象とした疲労特性評価を行った結果について述べている。照射欠陥が疲労破壊特性に及ぼす影響について述べている。中性子照射により著しく硬化した鋼の疲労寿命は、最大で非照射材の1/10程度まで低下することを示した。破壊様式及び破壊の起点における微細組織解析から、

このような寿命の低下は、中性子照射により導入された照射欠陥が鋼の変形を著しく妨げたため、変形に耐え切れなくなった旧オーステナイト粒界において割れを生じさせたことが原因であると結論している。

第7章では、核変換ヘリウムが疲労破壊特性に及ぼす影響を評価した結果について述べている。加速器において100ppmまでのヘリウムを注入した鋼は、繰返し軟化挙動の発現に遅れが生じることを明らかにした。このような挙動は、鋼に導入されたヘリウム及び照射欠陥が転位の再配列を妨げる抵抗となることを微細組織の評価より明らかにした。

第8章は、本研究の総括を述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、核融合炉や原子炉に利用される低放射化鉄鋼材料の研究に関するものであり、低サイクル疲労破壊特性および破壊特性に及ぼす中性子ならびにヘリウムイオンの照射効果を論じている。

本論文の目的は、これまでに技術的な困難さから評価が行われていなかった照射材を対象とした疲労特性評価技術を確認し、それを用いて低放射化鉄鋼材料の照射後疲労強度を評価し、微細組織の観点から、照射損傷が材料の疲労特性に及ぼす影響を明らかにすることである。

誘導放射能を有する照射後試験片の取り扱いには、微小試験片による評価技術が必須であるが、これまでに様々な技術的困難から評価技術の開発が遅れていた。この点に着目し、新たに小型の照射後疲労試験装置を開発し、一般的に用いられている試験片の1/50以下の体積を持つ微小試験片により、従来の大型の試験片と同等の疲労特性評価を実現した。

核融合炉材料の強度特性に及ぼす照射効果の研究は、核分裂炉を利用した照射材の微細組織発達評価や照射後強度特性評価などを単独に評価することが主流であった。

本研究では、疲労特性などの経年劣化挙動に対する照射効果については、照射欠陥と変形組織の相互作用の解明が有効な評価手法になり得ることに着目し、これまで観察手法の困難さから不可能であった破壊起点部の微細組織評価手法を確立した。この方法により、低放射化鉄鋼材料における疲労亀裂発生及び伝播挙動について体系的に示すとともに、強度特性変化と微細組織発達の相関についても明らかにした。

更に、この手法を中性子照射後疲労試験した試験片に適用し、照射により導入された格子欠陥が低サイクル疲労破壊機構に及ぼす影響を評価した。その結果、中性子照射により導入された格子欠陥は、繰返し変形の抵抗としてはたらく、局所的な粒界破壊を生じさせることを明らかにした。併せて、核融合反応より発生する中性子が、構造材料中に導入する核変換ヘリウムが疲労破壊に及ぼす影響について評価した結果、最大200appmまでのヘリウム含有量では、低放射化鉄鋼材料は脆化を示さないことを明らかにした。このことは、現在建設の準備が進められている国際熱核融合実験炉（ITER）において想定されるヘリウム導入量では、核変換ヘリウムによる脆化は起こり難いことを示したものである。

本研究により開発された評価技術は、放射線環境で使用される材料の強度・寿命特性を評価する上で極めて重要であり、得られた知見は、核融合炉における低放射化鉄鋼材料の使用条件ならびに使用限界を策定する際の重要な基礎を成すものである。また、この成果は原子炉環境やエネルギー粒子照射環境における材料挙動理解・評価にとって重要な知識を体系的に示している。

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14年2月6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。