

氏 名	キム 金	サ 思	ウシ 雄
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)		
学 位 記 番 号	エ ネ 博 第 159 号		
学位授与の日付	平 成 19 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 応 用 科 学 専 攻		
学位論文題目	低放射化鉄鋼材料の低サイクル疲労と組織相関に関する研究		

論文調査委員 (主 査) 教 授 香 山 晃 教 授 小 西 哲 之 助教授 檜 木 達 也

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、発電を目指す核融合炉ブランケット・システム開発における最大の課題である構造用低放射化鉄鋼材料の研究に関するものであり、低サイクル疲労特性を系統的に検討し、低サイクル疲労と組織相関に関する理解の体系化を目指としたものであり、全8章から構成されている。

第1章は序論で、研究の背景及び目的について述べている。化石エネルギー源に変わる次世代のエネルギーとしての核融合エネルギーの特長と、核融合発電の要ともいえる構造物であるブランケットについて述べている。また、ブランケット構造材料の要件と課題について述べ、核融合炉ブランケットの設計や総合特性評価において不可欠である低サイクル疲労特性を詳細に検討し、低サイクル疲労と組織相関に関する理解の体系化を目指とした本研究の位置づけを示している。

第2章では、低放射化鉄鋼材料に関する基礎として、火力発電プラント等の耐熱材料として開発されたフェライト/マルテンサイト鋼について述べ、この材料をベースとして、高エネルギー中性子との核反応による誘導放射化特性ならびに照射環境下における高温強度と破壊靱性の確保の観点から開発されつつある低放射化鉄鋼材料の研究経緯について概説している。更に核融合炉用低放射化鉄鋼材料の開発現状および問題点を述べ、実用化に向けた材料研究・開発の方針を示している。

第3章では、学問的背景として、金属材料における一般的な疲労破壊に関する現象論および機構論の現状について述べている。次いで、核融合材料においては基本となる照射損傷について概説し、核融合中性子による照射損傷過程で生じる微細組織変化と疲労現象との関連に関する基礎を重点的に記している。

第4章では、微小試験片による低サイクル疲労特性評価について述べ、微小試験法の妥当性を実証している。また、F82H IEA heat 鋼の疲労特性について、断片的な寿命評価だけではなく、繰返し負荷による材料の挙動を応力振幅の段階的な解析と微細組織の変化に注目し、現象論的/機構論的な解析を行っている。その解析によって、F82H IEA heat 鋼の疲労破壊機構は、全ひずみ振幅の増加に伴い繰返し軟化挙動は変化することを見出した。また、疲労の蓄積より形成された突き出し(Extrusion)と入り込み(Intrusion)損傷が、応力集中の原因となり、亀裂の発生起点となることを実験的に明示した。

第5章では、試験片の微小化に伴う材料因子の影響について、試験片の表面粗さと介在物の影響を明らかにしている。試験片の表面粗さは試験片の微小化に伴いデータ自体への影響が大きくなることを示し、高い信頼性を持つ評価を行うためには統一化された適切な試験片の仕様設定が必要であると提案している。この成果に基づき、ITER-TBM用冷却管の寿命を表面粗さの観点から予測した結果、試験片から得られた低サイクル疲労寿命の約70%まで低下することが判り、要素部材の設計/製作において十分な考慮が必要であることを指摘している。また、砂時計型微小試験片の採用に伴い、介在物の有効試験断面積に対する影響が支配的になる事を示し、介在物が疲労亀裂の発生・進展及び停止に関する重要な因子として作用することを実証している。

第6章では、微小試験片による低サイクル疲労特性評価手法を活かし、F82H IEA heat鋼の低サイクル疲労特性に及ぼす中性子照射の影響を明らかにしている。中性子照射により導入される照射欠陥および欠陥集合体が照射硬化を引き起し、

顕著な初期応力振幅の低下をもたらし、著しい繰返し軟化挙動を引き起こすため、数 DPA のはじき出し損傷によって非照射材と比べ約30%以上の疲労寿命が低下されることを明らかにしている。疲労亀裂は、試験片表面からのみ発生し、応力負荷方向と垂直に伸びる旧オーステナイト粒界近傍に発生している事を見出した。また、繰返し変形による重要な組織変化として、ラス構造中に高密度に存在する転位が再配列の過程で集積し、亜粒界を形成することを示し、亀裂生成の要因となることも実験的に示した。

第7章では、flow stress 解析と呼ぶ新しい解析法を用い、これまで困難であった低い照射量による低サイクル疲労特性の変化を解析することを可能にした。中性子照射により導入された照射欠陥及び欠陥集合体が照射硬化を引き起こし、低サイクル疲労蓄積下での転位の再配列を促進させることで顕著な繰返し軟化挙動をもたらし、疲労寿命を著しく低下させることを応力解析により実証している。照射による疲労挙動の機構的な変化は無いが、中性子照射による影響が flow stress 解析によって表現されることを示している。この成果は、核融合炉等の設計概念の構築へ大きく寄与するものと期待される。

第8章では、本研究の成果を総括し、核融合発電の早期実現化に向けた低放射化鉄鋼材料の開発における照射効果の機構論的な理解に基づく検討の重要性を述べ、今後の核融合炉構造材料の研究開発における先導的な研究としての意義についても述べている。本研究で得られた成果は核融合動力炉の性能向上に貢献する重要な材料設計指針を与えるものである。

論文審査の結果の要旨

本論文は、発電を目指して開発が進んでいる核融合炉の核心技術となる第一壁・ブランケット構造用低放射化鉄鋼材料の研究に関するものであり、疲労特性と組織相関を検討し、最大の課題である核融合中性子による照射効果についても新たな分野を開拓している。本研究は核融合炉ブランケットの設計や総合特性評価において不可欠である低サイクル疲労特性を系統的に検討し、これまでの知識の整理と新たな情報の追加を通して低サイクル疲労と組織相関に関する理解の体系化を目指すものである。本研究は、(1)微小試験片による低サイクル疲労挙動特性評価手法の確立、(2)低サイクル疲労挙動特性と微細組織の相関の解明(3)中性子照射による低サイクル疲労挙動特性と微細組織変化の解明、に大別される。まず、低サイクル疲労特性に及ぼす試験片の表面状態の影響に着目し、表面粗さを制御した微小試験片を用いてその効果の解明を行っている。また、この成果に基づき、10年後の実現を目指して開発されている国際核融合実験装置（ITER）のテストブランケットモジュール（TBM）用冷却管の寿命を表面粗さの観点から予測し、要素部材の設計/製作に対する方針を提案している。次に、低サイクル疲労特性に及ぼす試験片表面介在物の影響を解明し、鉄鋼材料中の介在物の制御における表面介在物の量及び形状の管理の重要性を述べ、高纯净度鉄鋼材料のあり方を提案している。これらを通じて、低放射化鉄鋼材料における低サイクル疲労挙動特性評価法を提案し、その技術基盤から低サイクル疲労挙動特性と微細組織の相関を系統的に整理している。中でも繰返し荷重の負荷による転位の再配列より、転位セル構造の形成過程を解析し、亀裂形成及び進展に及ぼす微細組織影響についての走査型電子顕微鏡や透過電子顕微鏡観察を用いるマルチスケール研究の有効性を示している事は新たな学問領域の開拓といえる。これまでは誘導放射化や複雑な照射損傷組織の形成により解析がほとんどなされていなかった低サイクル疲労挙動に及ぼす中性子照射の影響についてもはじめて体系的に述べており、中性子照射による著しい低サイクル疲労寿命の低下を照射損傷組織形成と疲労による微細組織発展との面より現象論的/機構論的に解明している。最も重要な中性子照射材における疲労メカニズムとして、試験片表面からの亀裂発生に注目し、応力負荷方向と垂直に伸びる旧オーステナイト粒界近傍が主要な発生サイトであることを明らかにしている。また、疲労の蓄積による組織発展においては、マルテンサイト・ラス構造中に高密度に存在する転位が再配列の過程で集積し、亜粒界が形成される事実を明瞭に示している。また、低サイクル疲労試験の要素データである負荷応力変動（ヒステリシスループ）の flow stress 解析法を用い、低サイクル疲労の進展に伴う変形応力変化を解析し、疲労進展挙動と微細組織の相関について究明している。中性子照射により導入された照射欠陥及び欠陥集合体が照射硬化をもたらす、疲労進展下での転位の再配列を促進させることで顕著な疲労軟化をもたらす、疲労寿命を低下させることが示唆された。本研究の範囲では照射による疲労挙動の機構的な変化は無いが、疲労特性への影響は顕在化することを初めて示し、設計概念の構築への貢献も認められる。

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19年1月18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。