

氏名	おぎわらひろゆき 荻原寛之
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 133 号
学位授与の日付	平成 18 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	環境調和型鉄鋼材料の複合苛酷環境挙動に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 香山 晃 教授 宮崎 健創 教授 水内 亨

### 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、14 MeV 核融合中性子による損傷組織形成・発展過程の機構論的な解明を通して、スウェリングや強度変化の定量的な予測精度の向上を目指している。本論文は全7章で構成されており、加速粒子により弾き出し損傷と核変換損傷を模擬するいわゆる同時照射効果研究を実施した結果についてまとめている。

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。将来の基幹エネルギーには、将来の社会生活の基盤を支える大量のエネルギーを合理的な価格で、安定して、地域に依存せず、安全かつ安心できるシステムで供給できることが求められる。核融合エネルギーが有力な候補であることを述べ、その早期実現に向けて、魅力的な経済性、円熟した工学基盤等を有し、優れた耐照射特性を具備する低放射化鉄鋼材料の研究・開発が中心となっている現状を記している。中でも最大の重要課題である核融合中性子による照射効果の研究の現状と課題を述べ、照射損傷の基礎・要素課程の理解に基づく材料特性変化の機構論解明のための加速器を用いる研究の意義と新しい展開について強調している。

第2章では、低放射化鉄鋼材料に関する基礎として、材料工学研究・開発活動の経緯をまとめている。照射効果の基礎的知見を述べるとともに、合金設計及びプロセス設計、過去の核分裂中性子や加速粒子による重照射データを中心に、損傷組織形成・微細組織発達と強度特性変化に対する弾き出し損傷とヘリウム効果について整理し、本研究の方針について言及している。

第3章では、加速粒子を用いる材料照射研究法について述べており、高度に制御された照射環境と2種類の加速粒子の利用により、14 MeV 高速中性子照射により導入される弾き出し損傷と核変換損傷のうちヘリウム生成を同時に模擬する研究法開発の成果を述べている。さらに、損傷組織形成・発展過程の機構論的な解明の基礎となる高精度な微細組織観察のための電子顕微鏡観察用の試料作製技術の開発、組織変化の定量的解析手法の確立に関する成果をまとめている。広範な領域での欠落の無い、均質な薄膜での組織観察の実現により始めて十分な統計精度を有する損傷量や損傷速度の依存性に関する定量的なデータの取得が可能になったことを述べ、超微小押し込み硬さ試験による、イオン照射材の強度特性・微細領域評価技術の確立についても成果として述べている。

第4章は、核融合炉の代表的な材料利用環境における損傷組織形成・発展過程の機構論的な解明を計ることを目的とし、弾き出し損傷のみの照射条件とヘリウムの同時照射効果が付加された条件下での実験を行い詳細な組織観察・解析をおこなっている。重照射下での微細組織変化をキャビティ組織、転位組織および析出組織に分類し系統的に整理しており、中でもキャビティ組織形成が、マルテンサイトラス組織および照射前熱処理によって複雑に変化することを明確に示している。低放射化鉄鋼材料における組織変化過程の研究においては照射誘起偏析・析出・相変化等が特に重要な因子であるが、これらを系統的に解明した研究は極めて限られていた。本研究では照射誘起偏析・析出・相変化挙動に注目し、重照射下における炭化物 (MC 系) および金属間化合物 (MX 系) の析出物形成について新しい知見を系統的に獲得しており、特にヘリウム

重畳効果について低温側（本条件では 420°C）では複合欠陥の微細分散化に始まる組織発達が微細な MC 系や MX 系の析出を通してスウェリング抑制効果となること、高温側では（本条件では 470°C）MC 系や MX 系の析出抑制を通してキャビティ形成を促し、スウェリング促進効果をもたらすことをはじめ明確に示している。

第 5 章では、表面近傍に損傷形成領域が限定されるイオン照射での特徴を活かし、損傷組織形成・発展に起因する強度特性変化の指標として超微小押し込み試験法による硬度評価をおこない、重照射後の強度特性変化について述べている。特にヘリウム重畳効果について低温側（本条件では 420°C）では、微細な MC 系や MX 系の析出を通して複雑な転位組織形成をもたらすこと、硬化促進効果が認められること、高温側では（本条件では 470°C）キャビティ形成を促し、照射軟化すらもたらすことをはじめ明確に示している。このことは 500°C 以上での利用において大きな制約のあることを明確に示しており、設計への反映が求められる重要な知見である。

第 6 章では、重照射後の微細組織発達と強度特性の相関について明らかにすることを目的とし、モデル検討により損傷組織形成による照射硬化メカニズムについて言及している。一般的に用いられている Orowan 型の硬化機構評価においても、転位組織、析出相組織、キャビティ組織について精度の高い定量的なデータを基本として解析することにより、損傷組織因子と強度変化との関係を高精度で予測出来ることを実証しており、これまでの析出組織に関する情報の欠落の下での解析に見られるキャビティ組織が硬化に寄与するとの評価の間違いを正している。更に、マルテンサイトラス内に存在する微細な照射欠陥の影響を超微小硬度測定により測定し、硬化への寄与（障壁因子）の評価が正しいことを示している。

第 7 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 IFMIF（国際核融合材料照射研究施設）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ている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、発電を目指す核融合炉ブランケット・システムの最適化を目的とした第一壁・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、イオン照射法による微細組織発達と強度特性の相関における照射効果に関する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。

本研究は、(1)複合イオン照射実験による照射下材料組織変化の詳細解明、(2)超微小押し込み試験法によるイオン照射材の硬度変化の解明(3)微細組織変化—強度特性変化の相関の解明、に大別される。これらの結果の総合により、低放射化鉄鋼材料の複合苛酷環境における弾き出し損傷と核変換ヘリウム生成の同時照射効果の概要を明らかにすることを目的としている。まず、超微小押し込み硬さ試験による、イオン照射材における表面近傍に限定される損傷領域の強度特性の局所評価技術を確立し、これらを通じて、低放射化鉄鋼材料における弾き出し損傷と核変換ヘリウム生成の同時効果の照射誘起による微細組織と強度特性の相関の解明を試みるための手法を確立している。これら技術基盤のもと、重照射下での微細組織変化をキャビティ組織、転位組織および析出組織に分類し系統的に整理しており、中でもキャビティ組織形成が、マルテンサイトラス組織および照射前熱処理によって複雑に変化することを明確に示している。さらに、実験の困難さより研究例のきわめて少ない照射誘起析出相挙動に注目し、重照射下における  $M_{23}C_6$  および MX 系の析出物形成に対するヘリウム効果についての新しい知見を系統的に獲得し示している。微細組織—強度の相関においては、キャビティ組織、転位組織および析出組織の照射硬化因子を系統的に検討し、マルテンサイトラス内に存在する微細な照射欠陥の影響を明らかにしている。本研究で得られたイオン照射による体系的な重照射データは、過去の核分裂炉中性子を用いた照射研究では明確に示すことの出来なかったものであり、高精度での照射条件の制御性と幅広い条件範囲を有することかがもたらす複合イオン照射法の核融合中性子照射模擬手法としての有効性をフェライトマルテンサイト系鉄鋼材料において示した画期的なものである。

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18年2月17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。