

## 学位論文題名

オーステナイト系ステンレス鋼の  
照射欠陥挙動に及ぼすヘリウムの影響

## 学位論文内容の要旨

現在の化石燃料や核分裂炉に代わる未来のエネルギー源として、核融合炉開発研究が世界規模で進められている。核融合炉の第一壁材料は、高温で高エネルギーの中性子損傷環境に曝されるため、この苛酷な環境に耐え得る材料開発が不可欠である。高温・高エネルギー中性子照射環境下では、照射損傷過程では高濃度の点欠陥とその点欠陥の集合により形成する転位ループやボイド等の照射二次欠陥が導入され、材料の化学的、物理的および機械的性質の劣化をひきおこす。さらに、核融合炉では核反応( $n, \alpha$ )によりヘリウムが同時に生成されるため材料の照射損傷過程の解明には、照射損傷とヘリウムの同時生成効果を考慮した照射挙動の理解が重要な課題となっている。また、照射損傷の研究には現在、既存の核分裂炉、イオン照射および電子線照射法によるシミュレーション照射研究が行われている。なかでも超高压電子顕微鏡とイオン加速器を組み合わせた、電子線・イオン同時照射法は、照射過程の組織変化のその場観察実験が可能であると同時に、核融合炉照射条件で最も重要なヘリウムの同時生成効果を模擬できる有効な手段である。

本研究では、超高压電子顕微鏡を用いた電子線照射による照射損傷過程に関するその場観察、ならびに電子線照射による照射損傷とイオン加速器によるヘリウムイオンの同時注入により、核融合炉照射条件を模擬し、第一壁候補材料として有力なオーステナイト系ステンレス鋼の基本組成からなるFe-Cr-Ni合金鋼を用い、照射下における組織発達に及ぼすヘリウムの影響、ならびに耐照射性向上のために添加される各種の微量添加元素の効果を、照射欠陥とヘリウムとの相互作用に注目し組織学的に解明することを目的にした。

本論文は、8章から構成されている。

第1章では、核融合炉とその構成材料に関する研究背景と従来までの照射損傷に関する研究および本研究の目的について述べている。

第2章では本実験に採用した電子線・ヘリウムイオン同時照射の原理、方法、その特徴と意義および電子線照射による弾き出し損傷素過程について説明している。

第3章では、点欠陥挙動におよぼすヘリウムの影響について検討している。電子線単独照射、および電子線・ヘリウムイオン同時照射による欠陥組織である転位ループ形成挙動を速度論的に解析し、点欠陥移動度、ならびに点欠陥濃度変化におよぼすヘリウム効果を明らかにしている。格子間原

子の移動の活性化エネルギーは電子線照射、同時照射いずれにおいても一定値約0.9eVで、格子間原子とアルムの相互作用が認められなかったのに対し、原子空孔の移動の活性化エネルギーは、アルムの存在しない場合には、約1.04eVであるが、同時照射下でアルムが存在する場合は、その値として1.19-1.53eVと高い値を示すことから、アルムと原子空孔との相互作用により、原子空孔の移動度が低下する事を明らかにした。さらに、照射初期の点欠陥濃度もアルムの存在により大きく影響されることを明らかにしている。

第4章では、ステンレス鋼の基本組成であるFe-16Cr-14Ni鉄合金鋼の二次欠陥形成におよぼすアルムの影響を検討している。同時照射によるアルム注入によりボイドおよび転位ループ核生成と転位成長が促進され、とくにボイド核形成はアルムの同時注入により、転位線上および転位ループ内部で優先的に核形成され、前者は、転位線の引張り応力場に集積したアルムが原子空孔と相互作用することによりボイド核形成し、後者では、格子間型転位ループの圧縮応力場に形成した空孔型クラスターとアルムの相互作用により安定なボイド核が形成されることを見出した。とくに転位ループ内部に高密度に核形成するボイドは比較的低温度での照射で優先的に生成することを明らかにした。さらに、ボイドスリッグの増加割合は核融合炉条件(20appmHe/dpa)で最大となり、その理由として、アルムによるボイド核形成促進にともなってスリッグ速度が最大となる、キャビティと転位の消滅強度比に対応していることを示唆した。

第5章では、微量添加元素とアルムとの相互作用効果を検討した。燐を添加した合金では、電子線照射の場合、照射初期から空孔型の転位ループの形成が顕著である。一方同時照射の場合にはボイド核形成が著しく促進されることを観察し、燐と格子間原子の相互作用ならびに原子空孔と注入アルムの相互作用の両効果によってボイド核形成が促進されると解釈した。さらに、Ti改良型316鋼の電子線単独照射では、ボイドスリッグは顕著に抑制されるが、アルム・電子線同時照射の場合、ボイド形成の他にアルムがスからなるキャビティ形成が顕著となり、さらにアルム注入割合の増大とともにスリッグは減少することを観察し、それは高密度に形成したキャビティ自体が原子空孔と格子間原子の両点欠陥に対する消滅場所となるため、有効点欠陥濃度が減少したことに起因すると結論した。

第6章では、Fe-16Cr-14Ni鉄合金鋼における、照射初期の二次欠陥挙動、特に転位ループ内部におけるボイドおよび積層欠陥形過程ならびにそれらにおよぼすアルムの影響に関する結果を検討した。電子線照射とアルム注入の組み合わせ照射実験から、アルムの同時注入においては、安定な格子間型積層欠陥を転位ループを形成するが、その内部で局部的に空孔型の転位ループを形成し、照射の継続にともなって空孔型転位ループは積層欠陥四面体に変化することを明らかにした。この過程で空孔型転位ループと積層欠陥四面体はアルムと相互作用し、安定なボイド核となることをはじめて見出した。

第7章は、Fe-16Cr-14Ni鉄合金鋼の照射誘起偏析挙動におよぼすアルムの影響について明らかにした。結晶粒界で基地元素より原子径の大きいニッケルは濃縮し、逆に原子径の小さいクロムは枯渇する、いわゆるサイズ効果に依存した照射誘起偏析挙動を示し、同時照射における偏析挙動として、電子線単独照射の場合より偏析量は小さいことを確認した。これはアルムと原子空孔の相互作用に起因する原子空孔の移動度の低下ならびにアルムの転位やボイド核形成促進にともなう結晶内部の点欠陥消滅場所の増大によって、点欠陥の消滅が増大する効果によ

り、偏析の誘因となる有効点欠陥の減少によると結論した。

第8章は、本論文を総括し、核融合炉材料における核変換ヘリウムの影響を考察した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 高 橋 平七郎  
副 査 教 授 山 科 俊 郎  
副 査 教 授 石 井 邦 宜  
副 査 教 授 大 貫 惣 明

学位論文題名

## オーステナイト系ステンレス鋼の 照射欠陥挙動に及ぼすヘリウムの影響

化石燃料や核分裂炉の代替エネルギー源として、核融合炉開発が進められている。核融合炉壁材料は、高温度で高エネルギーの中性子損傷を受けると同時に核反応によりヘリウムが生成されるに伴い、照射点欠陥ならびにその集合により形成する転位ループやボイド等の照射二次欠陥が導入され、材料の化学的、物理的および機械的性質の劣化をひきおこすため、損傷組織におよぼす照射損傷とヘリウムの同時生成効果の解明が重要である。

本論文では、超高压電子顕微鏡を用いた電子線照射による照射損傷過程に関するその場観察、ならびに電子線照射による照射損傷とイオン加速器によるヘリウムイオンの同時注入により、核融合炉照射条件を模擬し、核融合炉第一壁候補材料であるオーステナイト系ステンレス鋼を用い、照射下における組織発達におよぼすヘリウムの影響ならびに耐照射特性向上のため添加した微量の第3元素の効果を照射欠陥とヘリウムとの相互作用に注目し組織学的に解明した。

先ず、点欠陥挙動におよぼすヘリウムの影響を電子線単独照射および電子線・ヘリウムイオン同時照射による転位ループ形成挙動を速度論的に解析し、原子空孔はヘリウムと強く相互作用することによりその移動度の低下と濃度の増加をもたらすことを明らかにした。

次に、二次欠陥形成におよぼすヘリウムの影響を検討し、ヘリウム同時照射によりボイドおよび転位ループ核生成と転位ネットワーク形成が促進され、ボイドは高温度照射では転位線上に、また比較的低温度照射ではフランク型積層欠陥転位ループ内部で優先的に核形成され、ボイド・スリッグの割合は核融合炉照射条件で最大となることを見いだした。

さらに、積層欠陥転位ループ形成ならびにボイド核形成過程におよぼすヘリウムの影響を、電子線照射とヘリウム注入の組み合わせ照射実験から検討し、ヘリウムの同時照射で安定な格子間型積層欠陥転位ループを形成し、その成長過程で転位ループ内部に局部的に空孔型転位ループが形成され、照射とともに空孔型転位ループは積層欠陥四面体に変化し、さらにヘリウムとの相互作用の結果、空孔型転位ループおよび積層欠陥四面体が安定なボイド核となることを見いだした。

また、微量添加元素とヘリウムとの相互作用効果を検討し、燐添加合金では、電子線照射の場合、照射初期から空孔型の転位ループの形成が顕著であるのに対し、同時照射の場合では、ボイド核形成が著しく促進されることを観察し、燐と格子間原子の相互作用ならびに原子空孔と注入ヘリウムの相互作用の両効果によってボイド核形成が促進されること示した。さらに、Ti改良型316ステンレス鋼のボイド・スリッグはヘリウム・電子線同時照射の場合、ボイド形成とともに微細なヘリウムによるハブ形成が顕著となり、ヘリウム注入割合の増大とともにスリッグは減少傾向にあることを観察し、高密度に形成したキャビティ自体が原子空孔と格子間原子の両点欠陥に対する消滅場所となり、有効点欠陥濃度が減少したことに起因すると解釈した。

最後に、照射誘起偏析挙動におよぼすヘリウムの影響を検討し、原子サイズ効果に依存し結晶粒界でのニッケルの濃縮とクロムの枯渇を観測し、偏析量は同時照射において小さいことを確認し、ヘリウム

と原子空孔の相互作用に起因する原子空孔の移動度の低下ならびにヘリウム原子の転位、および空位核形成促進にともなう結晶内部の点欠陥消滅場所の増大による有効点欠陥の減少によると結論した。

これを要するに、著者は核融合炉材料で予想される照射損傷過程における組織変化をヘリウム効果に注目し系統的に研究し、核融合炉材料開発に対し多くの基礎的知見を明らかにし、核融合炉工学ならびに金属材料学工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。