

酸化物分散強化型フェライト鋼の 高エネルギー粒子線照射による微細構造変化

学位論文内容の要旨

最近急速な研究開発が行われている酸化物分散強化型（ODS）フェライト鋼は、卓越した高温強度特性のほかに、優れた耐照射性が期待されるために、核融合炉などの先進エネルギーシステムの候補材料となっている。しかしながら、中性子照射による耐照射性の検討は十分ではなく、また照射挙動の基本的な知見も得られていないのが現状である。本論文では ODS フェライト鋼と Fe-Cr 二元系モデル合金の両者に中性子照射のほかにイオンと電子線によるシミュレーション照射を実施し、その複雑な微細構造と照射効果をフェライト母相と酸化物分散粒子の効果に分割して比較検討したものである。この結果から ODS フェライト鋼の耐照射性は、微粒子の分布状態と高転位密度に依存することを明らかにした。また、Fe-Cr モデル合金においてはじめて発見された照射促進による変調構造や σ 相領域の拡大現象は、ODS フェライト鋼を含めたフェライト鋼全般の耐照射性にかかわり、重要であることを指摘した。

第1章では、核融合炉や原子炉などの構成材料に関する研究の背景とその材料開発の課題などをまとめ、フェライト鋼と酸化物分散強化型フェライト鋼の重要性を述べた。

第2章では、現在までの材料照射研究で得られている照射効果の知見を概説した。

第3章では、新たに実施した ODS フェライト鋼の中性子照射実験の結果を示した。これから、ODS フェライト鋼は微細な圧延集合組織からなること、耐スエリング性に優れていること、酸化物粒子の反跳溶解が生じること、Laves 相が粒界に析出する場合があることなどを明らかにした。

第4章では、ODS フェライト鋼のスエリング特性を検討するために、電子照射によるその場観察や、核変換ガス（水素、ヘリウム）の効果を明らかにするためのイオン照射実験を行った。ODS フェライト鋼の電子照射では、ボイド形成はわずかであり、また同時イオン照射では 50dpa の重照射でもスエリングは認められなかった。これらの結果は、電子照射とイ

オン照射の損傷効率を考慮すると、ODS フェライト鋼が優れた耐スエリング性を有していることを示している。高分解能電顕観察によると、酸化物の微細粒子とフェライト母相の界面は非整合で、ミスフィット転位が存在することが明らかとなった。これらのことから、分散粒子表面は照射点欠陥の有効な再結合サイトとして働き、照射下における有効点欠陥濃度を減少させると推定した。また、微細かつ高密度の分散粒子は転位の上昇運動に対する抵抗が大きく、転位構造を安定化することも示された。

第5章では、二次欠陥の発達過程を検討するために、Fe-Cr モデル合金と ODS フェライト鋼の電子照射によるその場観察の結果を述べた。モデル合金の場合、格子間型転位ループの形成挙動は Cr 濃度に依存し、特に固溶限やスピノーダルラインの近傍では点欠陥クラスターの形成過程が複雑である。すなわち、固溶限以上で核形成が促進され、またスピノーダルラインの内側では核形成と成長はいずれも抑制されることが明らかとなった。一方、ODS フェライト鋼の場合、酸化物粒子が微細で高密度なほど転位ループの形成が抑制されることから、フェライト鋼の ODS 化による耐照射性の向上は、酸化物粒子界面のシンク効果と安定な転位組織によるものと推定した。

第6章では、母相の照射に伴う相変化を詳細に検討した。モデル合金のイオン照射実験から、高 Cr 合金では金属間化合物 σ 相の形成が促進されること、低 Cr 合金ではスピノーダル分解によるナノオーダーの変調構造が出現し、この構造には多数の逆位相界面が含まれていること、変調構造は σ 相に類似した構造（擬 σ 相）をとるが、Cr 濃度は母相と同程度であることを明らかとし、擬 σ 相には多数の構造空孔が含まれていると推定した。また、電子照射した ODS フェライト鋼においても同様の変調構造が確認された。これより、照射促進による変調構造はフェライト鋼全般に生じ、フェライト鋼の耐照射性に寄与していると推定した。

第7章は総括であり、ODS フェライト鋼の耐照射特性の主要因子は酸化物粒子の分散状態と粒子により安定化される高密度転位構造であると結論付けた。

(以上 1729 文字)

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 貫 惣 明
副 査 教 授 高 橋 平七郎
副 査 教 授 毛 利 哲 夫
副 査 助教授 渡 辺 精 一

学 位 論 文 題 名

酸化物分散強化型フェライト鋼の 高エネルギー粒子線照射による微細構造変化

酸化物分散強化型（ODS）フェライト鋼は、高温強度のほかに、優れた耐照射性が期待されるため、核融合炉などの先進エネルギーシステムの候補材料となっている。しかしながら、中性子照射による耐照射性の検証は十分ではなく、また照射挙動の基本的な知見も得られていないのが現状である。本研究は ODS フェライト鋼と Fe-Cr 二元系モデル合金の両者に対して種々の照射実験を行い、その複雑な微細構造と照射効果をフェライト母相と酸化物分散粒子の効果の観点から比較検討し、耐照射性の原因を究明したもので有る。その主要な成果は次の点に纏められる。

①ODS フェライト鋼の中性子照射実験を実施した。これから、ODS フェライト鋼は微細な圧延集合組織からなること、耐スエリング性に優れていること、酸化物粒子の反跳溶解が生じること、Laves 相が粒界に析出する場合があることなどを明らかにした。

②ODS フェライト鋼のスエリング特性を検討するために、電子照射によるその場観察や、核変換ガス（水素、ヘリウム）を含んだ多重イオン照射実験を行った。ODS フェライト鋼の電子照射とイオン照射の両者ともボイド形成はほとんど無く、優れた耐スエリング性を有していることを示した。さらに、高分解能電子顕微鏡観察から、酸化物微粒子とフェライト母相の界面は非整合で、ミスフィット転位が存在することを明らかにした。この事実は、分散粒子表面は照射点欠陥の有効な消滅サイトであり、有効点欠陥濃度を減少させると推定した。加えて、微細、高密度の分散粒子は転位の上昇運動に対する抵抗から転位構造を安定化することも示した。

③Fe-Cr モデル合金と ODS フェライト鋼の電子照射その場観察から二次欠陥の発

達過程を検討した。その結果、モデル合金の場合は、固溶限以上でループの核形成が促進され、またスピノーダルラインの内側では核形成と成長はいずれも抑制されることを示した。いっぽう、ODS フェライト鋼の場合は、酸化物粒子が微細高密度なほど転位ループの形成が抑制されることから、ODS 化による耐照射性の向上は、酸化物粒子界面のシンク効果と安定な転位組織によるものと結論した。

④モデル合金のイオン照射実験から、母相の照射に伴う相変化を詳細に検討した。この結果、高 Cr 合金では金属間化合物 σ 相の形成が促進されること、低 Cr 合金ではスピノーダル分解によるナノオーダーの変調構造が出現し、この構造には多数の逆位相界面が含まれていること、変調構造は σ 相に類似した構造（擬 σ 相）であることを明らかとし、擬 σ 相には多数の構造空孔が含まれると推定した。また、ODS フェライト鋼においても同様の変調構造を確認し、照射促進による変調構造はフェライト鋼全般に共通した現象で有り、フェライト鋼の耐照射性の重要な因子であることを明らかにした。

これを要するに、著者は、酸化物分散強化型フェライト鋼について種々の照射実験と検討を行い、この材料が優れた耐照射性を示す理由を主として微細構造の観点から明確としたもので有り、材料工学およびエネルギー工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。