

氏名	酒瀬川 英 雄
学位の種類	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 96 号
学位授与の日付	平成 16 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強度特性と組織の相関における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 木村 晃彦 教授 山 寄 鉄 夫

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、強度特性とマイクロ組織の相関における照射効果の論じた結果をまとめたもので、全 8 章からなっている。

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。地球環境保全とエネルギー枯渇問題を考慮した次世代基幹エネルギー源の実現には、高効率、廉価、信頼性・社会的受容性が望まれている。核融合エネルギーは、それらの要求を満足させるものであり、その早期実現には、魅力的な経済性、円熟した工学基板等を有し、優れた耐照射特性を具備する低放射化鉄鋼材料の研究・開発活動のみが貢献可能な炉工学研究分野の現状を記している。そして、現在の低放射化鉄鋼材料の研究・開発の進展状況に言及して、核融合発電の早期実現計画における本研究・論文の意義について述べている。

第 2 章では、低放射化フェライト鋼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。特に、実証された良好な耐照射特性について言及し、今後の材料工学研究・開発活動の展開における課題提示をしている。また、本論文で主要となるクリープ強度特性の評価方法において採用している指数則の原理の有用性について議論を展開している。これによって、クリープ強度特性結果を直線近似可能なデータとして、その評価・予測に関して、それを簡便かつ正確なものとする。

第 3 章では、低放射化フェライト鋼 JLF-1(9Cr-2W-V, Ta) 鋼、及び高温強度重視型鋼 JLS-2(9Cr-3W-V, Ta) 鋼の高温環境下における強度特性変化とマイクロ組織変化の相関について述べている。ここで、炉設計において必須であるデータベースの提供を行うとともに、高温強度特性の重視化に伴う低温強度特性の変化について言及し、 $M_{23}C_6$ 炭化物、及び Fe_2W 型 Laves 析出相が韌性低下に与える影響を機構論的に明らかとしており、今後の材料設計において不可欠となる基礎知識基盤を提供している。

第 4 章では、炉の上限側運転温度の決定因子となり、エネルギー変換効率の決定因子となるクリープ強度特性に注目している。そのクリープ強度強化機構の経時変化を第 2 相の析出・分散強化情報の正確な把握を可能とする電解抽出残渣法を利用したマイクロ組織観察によって明らかとしている。タングステン添加量を増加させる事によるマルテンサイト・ラス構造の安定化によって、JLF-1 鋼のクリープ強度特性の向上を達成しその重要性を明らかとするとともに、第 3 章で得られた韌性に及ぼすタングステン量増加効果を加味して今後の高温強度重視型鋼の開発における材料設計指針の提案をしている。

第 5 章では、従来フェライト系耐熱鋼分野でも研究例が寡少であり、未だ統一の見解を得ていない微細析出物によるクリープ強度特性の析出効果について、モデル検討を行っている。フェライト相マトリクス中に、 TaX ($X=C$ or N) 系粒子を微細・析出分散させることによる微細サブグレイン構造安定化を原因とする顕著なクリープ強度特性の向上を達成している。また、この強化方法を実用低放射化フェライト鋼において応用する場合その TaX 系粒子の高温環境下における相安定性の検討結果から、炭化物系の TaC 粒子を利用すべき材料設計を行っており、具体的な最適化学組成、及び熱処理条件を提

案している。

第6章では、低放射化フェライト鋼のクリープ強度特性に対する微細析出による強化効果を明らかとしている。マイクロ組織観察において、タンタル添加量増加に伴うTaX系粒子の析出・分散状況の変化に注目し、そのクリープ変形機構、及びクリープ破壊機構に対する影響を解明している。これにより、今後の高温強度特性を重視する低放射化フェライト鋼の材料設計に対して、Normalizing温度を100℃上げるべき熱処理最適化の必要性を具体的に提示している。

第7章では、中性子照射環境下での低放射化フェライト鋼の照射硬化現象を機械的に明らかにしている。照射硬化は、炉の低温側使用限界温度に多大な影響を及ぼす照射脆化と密接な関連を持つために重要視されている。この機構は、従来研究ではマトリクス内の照射導入欠陥の視覚情報のみにより説明がなされてきた。これに対して、照射下析出相安定性の重要性を指摘し、初めてその旧オーステナイト粒界、及びマルテンサイト・ラス境界上の $M_{23}C_6$ 炭化挙動を明らかとしており、照射後組成変化メカニズムにおいて特徴的な転位チャネリング現象を加味した新たな照射硬化メカニズムの提案をしている。

第8章では、以上の研究結果から得られた総括を述べ、核融合発電の早期実現化に向けた低放射化フェライト鋼のデータベースの拡充、及び本研究で得られた炉の総合パフォーマンスの向上に貢献可能な高性能化の材料設計指針について整理・言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、次世代基幹エネルギー源として期待される核融合エネルギー発電プラントの構造用材料である低放射化フェライト鋼の高温・応力負荷・中性子照射下におけるマクロ材料挙動・強度特性変化を、マイクロ組織観察によって機構論的に明らかとしたものであり、材料プロセス活動の向上・材料の高性能化、及び発電ブランケットの最適化を達成するために研究した成果をまとめたものである。

そして、得られた主な成果は次のとおりである。

低放射化フェライト鋼を利用したブランケット・システムの最適化においては、核融合炉環境下における材料挙動の正確な理解が必須である。本論文では、その環境を温度、応力負荷、及び照射の要素に分解し、各々の要素環境について研究を遂行している。

炉システム設計活動において必要な高温環境下における強度特性変化を系統的に整理し、データベースの整備を行い、この強度特性変化を組織変化観察から説明し、最も問題とされる材料の靱性低下に対する $M_{23}C_6$ 炭化物及び Fe_2W 型Laves析出相の影響を明らかにした。

次に、応力負荷が加わるクリープ変形挙動に注目し、その強度特性強化機構の変遷における微細析出物によるマルテンサイト・ラス構造の安定化の重要性を示した。

さらに、これらの成果に基づいて新たに提案したクリープ強度特性強化機構における微細析出物の機能を系統的に検討し、クリープ強度特性に対する顕著な強化効果を実証し、タンタル系炭化物の析出・分散強化機能の効果的な発現を可能とする材料設計の提示に到った。

これらの非照射下における材料挙動の系統的、且つ正確な把握に基づいて、照射環境下での検討の重要性が認識されながらも、技術的な困難さもあり研究例の寡少であった照射下析出相安定性の定量的な評価を初めて行っている。これにより、旧オーステナイト粒界、及びマルテンサイト・ラス境界上に析出した $M_{23}C_6$ 炭化物の照射効果への多大な影響を明らかにし、新たな照射後塑性変形メカニズムの提案に到った。

以上、要するに本論文は、低環境負荷型の次世代基幹エネルギー源として有望視される核融合エネルギー発電の早期実現に向けて、この成果の還元による先進ブランケット・システム最適化活動において、充分貢献するものであり、エネルギー材料の開発、並びにエネルギー化学に大きく寄与するものである。

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16年2月13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。