

学位論文題名

低放射化フェライト鋼の耐照射特性と 核融合ブランケット設計指針に関する研究

学位論文内容の要旨

核融合炉は人類究極のエネルギー源として期待され、2030年に発電実証炉の建設が計画されている。しかし、商用発電までには解決すべきいくつかの課題があり、核融合炉用構造材料の開発もその一つである。最有力の方式であるトカマク型核融合炉では、D-T反応の14MeV中性子から熱エネルギーと同時に燃料のトリチウムを得る。この熱エネルギー取り出しとトリチウム増殖を行うのがブランケット部であり、特にこの第一壁構造材料はプラズマ側からの多量の中性子による照射損傷を受けるが、このような過酷な環境で使われる実用材料は現存しない。また、高エネルギー中性子は材料に照射損傷を与えるだけでなく、核反応によりHやHeなどのガス元素を生成したり、材料を放射化させたりする。このような状況から、過酷な環境に耐える低放射化フェライト鋼が開発されてきた。本研究ではこの低放射化フェライト鋼の機械的性質の耐照射性について、照射温度や照射量の挙動から明らかにすることを目的とした。また、研究結果を反映した材料の最適化から、より高靱性の材料を開発し、照射特性を含めたブランケット設計への指針を得る。

第1章では、核融合炉材料、特にブランケット構造材料の研究・開発の背景と課題について概説し、本研究の目的について述べた。

第2章では、低放射化フェライト鋼を、従来の候補材の316系ステンレス鋼と比較しその特徴を述べた。また、研究対象である低放射化フェライト鋼F82H鋼の開発経緯を述べるとともに、照射方法を概説した。

第3章では、F82H鋼の引張特性およびシャルピー衝撃特性などの機械的特性への中性子照射の影響について述べた。核融合炉環境の照射では、核反応生成ガス原子、特に、ヘリウムの影響が大きいと考えられるため、ボロン添加法によるヘリウム効果のシミュレーション照射を実施した。照射硬化はおよそ350℃以下の比較的低温で顕著であり、400℃以上の照射ではほとんど起こらないことを明らかにした。また、照射硬化は照射量の対数に比例して増加することを明らかにすると共に、照射硬化した材料の降伏応力の試験温度依存性が非照射材と同じであることを見出した。これにより、300℃以下の照射での降伏応力が予測可能となった。いっぽう、ヘリウムは照射硬化への寄与は小さいが、伸びや絞りなどの延性を低下させることを突き止めた。また、ヘリウムは材料の靱性に影響を及ぼし、延性脆性遷移温度(DBTT)を上昇させる効果があり、特に照射硬化の顕著な低温で影響が大きいことを明らかにし、さらにDBTTの上昇についてのモデルを提唱した。

第4章では、フェライト鋼の溶接にかかわる諸問題と溶接材の照射効果について述べた。低放射化フェライト鋼により核融合炉ブランケットを製作する場合、溶接による接合が不可欠である。F82H鋼のTIGおよび電子ビーム溶接材を製作し、その機械的特性について調べた結果、TIG溶接材では熱影響部(HAZ)に焼鈍による軟化部分があることがわかつ

た。いっぽう、電子ビーム溶接材でも熱影響部は存在するが、強度特性への影響はほとんどなかった。そのため、特性的に劣る TIG 溶接材を選択し、中性子照射試験を行った。300°C 照射において、TIG 溶接継手のうち溶接金属部（溶融金属部）の照射硬化量は母材部と同等であるが、HAZ 軟化部の照射硬化量は母材または溶接金属部の約 1/2 であることを見出した。その結果、溶接金属部と HAZ 軟化部との強度差は照射により拡大する結果となり、局所的変形が助長されることを指摘した。いっぽうで、HAZ 軟化部での照射硬化が少ないことは材料の耐照射性を高める方策があることを示唆しており、今後の耐照射性の高い材料の開発の糸口となるものである。

第 5 章では、照射結果と使用条件からの靱性の改善、および、ブランケット設計の要求に応じた材料の最適化について述べた。基礎的研究の結果、Ta の増加により結晶粒を微細化して靱性を高めることができるが、粗大な TaC の析出を誘発し材料を脆化させることを突き止めた。また、標準的焼準温度とされてきた 1040°C が、現在の Ta 濃度 (0.04%Ta) では高過ぎることを明らかにした。これらのことから Ti および N を極力除去した高純度材に低温熱処理を施すことにより、F82H 鋼の靱性を高めることができることを示した。さらに、HIP 接合処理での高温加熱や品質安定化のために Ta を 0.1% に増やした材料 (F82H mod3) を開発した。

第 6 章では、設計の高度化と照射材の変形挙動の解明のために、F82H 鋼の真応力-真歪解析について述べた。室温から 600°C までの引張試験による真応力-真歪曲線をモデル化し、各パラメータの温度依存性を求め、真応力-真歪曲線を計算により得ることが可能となった。また、この結果は同様の試験から材料の変形挙動を広範に予測する上で有用である。

第 7 章では、F82H 鋼のブランケット設計に対する指針について述べた。実証炉材料の想定使用温度は 300~500°C であり、400°C 以上では照射の影響は大きくないとされるため、300°C 近辺での照射硬化と照射脆化が最大の材料上の問題となる。検討の結果、75 dpa 程度の照射量までは静的応力で破壊しないと推定されるが、繰返し応力により疲労亀裂が導入された場合や、衝撃的応力が作用した場合に注意が必要である。

以上、本論文は核融合炉ブランケット構造材料として開発された低放射化フェライト鋼 F82H 鋼について、ヘリウム効果を含めた耐照射性を明らかにするとともに、ブランケット設計に寄与するモデル化を行った。また、これらの照射データから F82H 鋼の最適化を行い、実証炉ブランケット材料として適合性を高めた材料の開発に成功した。さらに F82H 鋼を用いてブランケット設計を行う場合の指針を作成した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 貫 惣 明
副 査 教 授 工 藤 昌 行
副 査 教 授 成 田 敏 行
副 査 助 教 授 柴 山 環 樹
副 査 教 授 幸 野 豊

(室蘭工業大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

低放射化フェライト鋼の耐照射特性と 核融合ブランケット設計指針に関する研究

本研究は核融合炉実験炉のブランケット構造材料の候補である新規低放射化フェライト鋼について、特に機械的性質の照射温度依存と照射量の影響を明らかにすること、高靱性の材料への改良、さらに、照射特性を含めたブランケット設計の指針を得ることを目的としている。その主要な成果は次の点に纏められる。

- ① 新規に開発された放射化フェライト鋼 (F82H) を中性子照射し、その機械的特性に及ぼす中性子照射効果を検討した。照射硬化は 350℃以下の比較的低温で顕著であり、照射量の対数に比例して増加すること、降伏応力の試験温度依存性が非照射材と同一であることを見出した。これにより、300℃以下で照射した場合でも降伏応力を予測出来るようになった。
- ② 核融合炉照射環境では核反応生成ヘリウムの影響が大きいと予想されるため、ボロン添加法によるシミュレーション照射を実施した。ヘリウムは照射硬化への寄与は小さいものの、伸びや絞りなど延性を低下させることを明確にした。すなわち、ヘリウムは延性脆性遷移温度 (DBTT) を上昇させ、特に照射硬化の顕著な低温で影響が大きいことを明らかにした。さらに DBTT の上昇についての新しいモデルを提唱した。このような実用鋼を対象としたヘリウム効果の系統的な検討は有用である。
- ③ 低放射化フェライト鋼で核融合炉ブランケットを製作する場合、溶接法が不可欠であるため、F82H 鋼の TIG および電子ビーム溶接材を製作し、その機械的特性を調査した。TIG 溶接では熱影響部 (HAZ) に焼鈍による軟化部分が生じることが判明した。また、電子ビーム溶接の場合は、熱影響部は存在するが強度特性への影響はほとんどないことを示した。
- ④ 溶接材の照射効果を評価するため、溶接特性がより敏感な TIG 溶接材に対して中性子照射試験を行った。溶融金属部の照射硬化は母材部と同等だが、HAZ 軟化部の照射硬化は約 1/2 であり、結果として溶融金属部と HAZ 軟化部との強度差は照射により拡大し、局所的変形が助長されることを見出した。また、HAZ 軟化部の照射硬化が少ないことは材料の耐照射

性を高める方策がありえることを示唆しており、今後の高耐照射性材料の開発に指針を与えるものである。

⑤ F82H 鋼の特性評価の結果を基にその改良試作を行った。Ta の増加は結晶粒を微細化して靱性を高めるが、粗大な TaC の析出を誘発して脆化することを見出した。また、標準的な焼準温度は当該の Ta 濃度では高過ぎるため、Ti と N を極力除去した高純度材に低温熱処理を施すことにより、F82H 鋼の靱性が改良できることを示した。さらに、HIP 接合処理の高温加熱や品質安定化を想定して Ta を増量した材料 (F82H mod3) を開発した。

⑥ 計算から変形挙動を求めることによりブランケット設計を高度化するために、F82H 鋼の真応力-真歪解析を実施した。室温から 600℃までの真応力-真歪曲線をモデル化し、各パラメータの温度依存性を求め、変形挙動を計算により再現することに成功した。この方法は他の材料の変形挙動を広範に予測するためにも適用できる。

⑦ F82H 鋼をブランケット材料として使用する際の設計指針を明らかにした。実証炉材料の想定温度は 300~500℃であり、特に 300℃付近の照射硬化と照射脆化が最大の問題になることを指摘した。照射量が 75 dpa 程度までは静的応力での破壊はないと予測されるが、特に繰返応力による疲労や衝撃的応力負荷は重要な項目である。

以上、本論文は核融合炉ブランケット構造材料として開発された低放射化フェライト鋼について、ヘリウム効果を含めた耐照射性の実証、材料の改良、機械的性質のモデル化、ブランケット設計に当たっての指針の作成など、新知見を得たものであり、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。