

## 学位論文題名

高速増殖炉燃料被覆管用酸化物分散強化型 (ODS)  
フェライト鋼の高温材料特性に関する研究

## 学位論文内容の要旨

高速増殖炉は現在使用されている軽水炉に比べてウラン資源の利用効率を飛躍的に高め、かつ使用済廃棄物の発生量削減も可能な原子力発電システムとして、産官学協力の基にその開発が進められている。これを実現する上での最重要課題の一つは、高温強度、耐照射性、耐食性に優れた燃料被覆管の開発である。本研究は、実用化段階の高速増殖炉燃料被覆管の最有力候補材である酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼を対象として、次の3課題に取り組んだものである。1つはマルテンサイト系 9CrODS 鋼について、固溶強化元素であるタングステンの最適添加量を組織安定性と高温強度の観点から評価した。2つ目はフェライト系 12CrODS 鋼の被覆管製造を行う上で重要な冷間圧延-再結晶特性を評価した。3つ目はこれら 9Cr 及び 12CrODS 鋼の高温酸化挙動を評価した。以下に本論文で得られた知見を要約する。

第1章は緒言であり、本研究の背景と位置付けを示した。

第2章では、マルテンサイト系 9CrODS 鋼を対象とし、固溶強化と残留フェライト相生成、及び脆化を引き起こすラーベス相析出に着目して、タングステンの最適添加量を実験と解析により評価した。タングステン添加量が 0-2.4 重量パーセントの範囲内では、固溶強化量は添加量とともに増加し、固溶強化と残留フェライト相生成の相乗効果により高温強度が大幅に向上するが、2重量パーセントを超えるとラーベス相析出による脆化が発生するため、9CrODS 鋼におけるタングステンの最適添加量は 2 重量パーセントであることを明らかにした。また、タングステン添加による固溶強化とフェライトフォーマーとしての残留フェライト相生成による強化の互いの寄与量を定量的に明らかにした。

第3章では、フェライト系 12CrODS 鋼被覆管製造において重要な冷間圧延-再結晶特性を詳細に検討した。12CrODS 鋼では一旦再結晶組織を経験すると、その後の加工・熱処理で再び再結晶組織が形成されないことを示した。この原因は、再結晶組織をふたたび冷間圧延すると再結晶前の集合組織には戻らず、歪エネルギーの蓄積が低く極めて安定で再結晶しにくい特殊な圧延集合組織が形成されるためであることを明らかにした。実際の被覆管製造工程において、途中で再結晶を起こさずかつ冷間圧延が可能な硬さレベルまで軟化を促進するための独自の方法として、歪の回復によって再結晶温度が上がることを利用した二段軟化熱処理法を考案した。これにより、従来技術

では困難であった安定した再結晶被覆管の製造を可能とした。

第4章では、マルテンサイト系 9CrODS 鋼とフェライト系 12CrODS 鋼の 700 °C での高温酸化挙動を評価した。これら 9Cr 及び 12CrODS 鋼は、Cr 濃度が 11 重量パーセントの PNC-FMS や Cr 濃度が 17 重量パーセントの SUS430 よりも優れた耐高温酸化性を有しており、これは ODS 鋼母材と内層スケールの界面に酸化反応の初期段階で安定なクロミア保護被膜が形成されることに起因することを明らかにした。

第5章ではこれらの成果を総括した。

これを要するに、著者は高速増殖炉燃料被覆管の最有力候補材であるマルテンサイト系 9CrODS 鋼とフェライト系 12CrODS 鋼を実用化する上で重要な新知見を得たものであり、材料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。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鵜 飼 重 治  
副 査 教 授 大 貫 惣 明  
副 査 准教授 林 重 成

学 位 論 文 題 名

## 高速増殖炉燃料被覆管用酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼の高温材料特性に関する研究

高速増殖炉は現在使用されている軽水炉に比べてウラン資源の利用効率を飛躍的に高め、かつ使用済廃棄物の発生量削減も可能な原子力発電システムとして、産官学協力の基にその開発が進められている。これを実現する上での最重要課題の一つは、高温強度、耐照射性、耐食性に優れた燃料被覆管の開発である。本研究は、実用化段階の高速増殖炉燃料被覆管の最有力候補材である酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼を対象として、次の3課題に取り組んだものである。1つはマルテンサイト系 9CrODS 鋼について、固溶強化元素であるタングステンの最適添加量を組織安定性と高温強度の観点から評価した。2つ目はフェライト系 12CrODS 鋼の被覆管製造を行う上で重要な冷間圧延-再結晶特性を評価した。3つ目はこれら 9Cr 及び 12CrODS 鋼の高温酸化挙動を評価した。以下に本論文で得られた知見を要約する。

第1章は緒言であり、本研究の背景と位置付けを示した。

第2章では、マルテンサイト系 9CrODS 鋼を対象とし、固溶強化と残留フェライト相生成、及び脆化を引き起こすラーベス相析出に着目して、タングステンの最適添加量を実験と解析により評価した。タングステン添加量が 0-2.4 重量パーセントの範囲内では、固溶強化量は添加量とともに増加し、固溶強化と残留フェライト相生成の相乗効果により高温強度が大幅に向上するが、2 重量パーセントを超えるとラーベス相析出による脆化が発生するため、9CrODS 鋼におけるタングステンの最適添加量は 2 重量パーセントであることを明らかにした。また、タングステン添加による固溶強化とフェライトフォーマーとしての残留フェライト相生成による強化の互いの寄与量を定量的に明らかにした。

第3章では、フェライト系 12CrODS 鋼被覆管製造において重要な冷間圧延-再結晶特性を詳細に検討した。12CrODS 鋼では一旦再結晶組織を経験すると、その後の加工・熱処理で再び再結晶組織が形成されないことを示した。この原因は、再結晶組織をふたたび冷間圧延すると再結晶前の

集合組織には戻らず、歪エネルギーの蓄積が低く極めて安定で再結晶しにくい特殊な圧延集合組織が形成されるためであることを明らかにした。実際の被覆管製造工程において、途中で再結晶を起こさずかつ冷間圧延が可能な硬さレベルまで軟化を促進するための独自の方法として、歪の回復によって再結晶温度が上がることを利用した二段軟化熱処理法を考案した。これにより、従来技術では困難であった安定した再結晶被覆管の製造を可能とした。

第4章では、マルテンサイト系 9CrODS 鋼とフェライト系 12CrODS 鋼の 700 °C での高温酸化挙動を評価した。これら 9Cr 及び 12CrODS 鋼は、Cr 濃度が 11 重量パーセントの PNC-FMS や Cr 濃度が 17 重量パーセントの SUS430 よりも優れた耐高温酸化性を有しており、これは ODS 鋼母材と内層スケールの界面に酸化反応の初期段階で安定なクロミア保護被膜が形成されることに起因することを明らかにした。

第5章ではこれらの成果を総括した。

これを要するに、著者は高速増殖炉燃料被覆管の最有力候補材であるマルテンサイト系 9CrODS 鋼とフェライト系 12CrODS 鋼を実用化する上で重要な新知見を得たものであり、材料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。