

氏名	チョ 曹	ハン 恒	シク 植
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)		
学位記番号	エネ博第 143 号		
学位授与の日付	平成 18 年 9 月 25 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変換科学専攻		
学位論文題目	Effects of Cr and Al on Corrosion Behavior and Mechanical Properties of Oxide Dispersion Strengthened Steels (酸化物分散強化鋼の腐食挙動および機械的性質に及ぼす Cr および Al の影響)		
論文調査委員	(主査) 教授 木村 晃彦	教授 松本 英治	教授 星出 敏彦

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、核融合炉ブランケットや次世代原子力システムの構造材料として利用が期待されている高 Cr 酸化物分散強化鋼 (ODS 鋼) の開発に関わる研究の一環として、高強度化および構造材料の寿命を決定すると考えられている耐食性と耐熱時効脆化特性の向上を目指して実施した研究の成果をまとめたものであり、6 章からなっている。

第 1 章は、序論であり、高い熱効率を持つ先進プラント用構造材料に対する主な材料要件と課題をまとめ、課題解決の方策として材料の高強度化や耐食性の向上のための高 Cr 化を検討し、実現のためには熱時効脆化を抑制した高 Cr-ODS 鋼の開発が重要であることを述べている。

第 2 章は、ODS 鋼の諸特性に関する従来の研究結果の調査と開発のための抽出課題をまとめたものであり、本研究の目的を述べている。

第 3 章では、超臨界圧水 (SCPW: 510°C, 25MPa) 中での耐食性に及ぼす Cr 濃度の影響 (14 から 22wt%) および一定歪速度試験による応力腐食割れ (SCC) 感受性を評価し、以下の結果が得られている。

- 1) SCPW における腐食速度は Cr 量の増大と共に減少する。
- 2) 14wt%Cr-ODS 鋼の耐食性は 18Cr-8Ni ステンレス鋼 (SUS316L) を凌駕する。
- 3) ODS 鋼の酸化皮膜はステンレス鋼に比べても薄く、Cr を含んだスピネル構造である。
- 4) Cr 濃度の増大は安定した Cr 保護皮膜の形成を促進させ、さらに Al 添加は Cr 保護皮膜と母材との間に Al を含んだ保護皮膜を形成させる。
- 5) 保護皮膜形成の速度論的考察を行い、Cr および Al 原子の移動がそれぞれ粒界拡散および体拡散によると提案された。
- 6) 19Cr-ODS 鋼の変形・破壊挙動の歪速度依存性を調べた結果、歪速度が  $10^{-4}$  から  $10^{-7}$ /sec の範囲において依存性を示さないため、当該鋼の SCC 感受性は極めて低い。

第 4 章では、Cr 濃度が 14 から 22wt% の ODS 鋼の基本的な強度特性評価と微細組織観察ならびにそれらに及ぼす熱時効の影響を明らかにするため、時効熱処理前後において室温での硬さ測定、引張試験および各温度における衝撃試験ならびに高分解能透過電子顕微鏡観察を行い、以下の結果が得られている。

1) Al 無添加の 19Cr-ODS 鋼の室温における引張応力は約 1300MPa であり、通常のフェライト鋼の約 2 倍の値を示した。一方、高 Cr-ODS 鋼への 4.5wt% Al 添加は、酸化物粒子の粗大化と数密度の減少を引き起こし、引張応力が約 300MPa 低下したが、引張伸びは逆に増加した。

2) ODS 鋼の引張伸びが試料の採取方向に依存し、その異方性が当該鋼の製造プロセスに不可欠な熱間押し出しが原因となっていることを確認した。

3) Al の添加効果として上記の異方性が抑制されることを見出した。

4) ODS 鋼の Cr 濃度が 19% を超えると、500°C、1 万時間の熱時効によって延性脆性遷移温度 (DBTT) が上昇し、熱

時効脆化が生じるが、16%以下の場合には発現しない。

5) DBTTの上昇はCr濃度の増大につれてFe/Crの二相分離が顕著になり、Cr-rich相の形成による硬さの上昇に起因する。

6) 同一時効条件で比較した結果、ODS鋼の熱時効脆化は通常のフェライト鋼に比べ抑制され、酸化物粒子による空孔の捕獲作用に基づく反応モデルにより説明される。

第5章では、高Cr-ODS鋼の強度特性や微細組織に及ぼす中性子照射の影響を調べ、以下の結果が得られている。

1) 290°Cでの照射により、照射硬化が認められ、硬化量はCr量に依存しない。硬化は照射による格子間型転位ループの形成による。

2) 400°Cでも照射硬化するが、硬化量は高Cr濃度側で顕著になる。硬化は照射によるFe/Crの二相分離による。

3) 600°Cにおいては照射の影響はほとんど見られない。

4) ODS鋼では、照射温度やCr濃度およびAl添加の有無にかかわらず、全ての場合において、中性子照射による引張伸びの低下が観察されなかった。

5) Cr量が16wt%を超えると、400°Cでの照射は二相分離を伴うDBTTの上昇を引き起こすが、14wt%Cr-ODS鋼ではDBTTの上昇は認められず、優れた耐照射性能を示した。

第6章は、総括であり、上記の研究結果に基づきODS鋼の最適Cr量の検討を行うと共に、当該鋼の適用が期待される各先進原子力プラントにおける材料開発の進捗状況について述べ、高Cr-ODS鋼の優れた性質はそれらのプラントの高効率化に寄与すると結論している。

以上の様に、本論文では、SCPW中での腐食挙動および熱時効脆化ならびに照射脆化に及ぼすCr量およびAl添加の影響が明らかにされ、その得られた実験結果に基づき、高Cr-ODS鋼の最適Cr濃度を検討し、最適量が15wt%付近にあることを提示している。本研究の成果は核融合システムなどの次世代原子力システムに不可欠な核エネルギーの高効率安全利用にエネルギー材料工学の観点から貢献すると期待される。

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18年8月22日に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。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、核融合炉ブランケットや次世代原子力システムの構造材料として利用が期待されている高Cr酸化物分散強化鋼(ODS鋼)の開発に関わる研究の一環として、当該構造材料の寿命を決定すると考えられている耐食性と耐熱時効脆化特性の向上を目指して実施した研究の成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- 19wt%CrODS鋼の室温における引張応力は約1300MPaであり、通常のフェライト鋼の2倍の値を示した。高Cr-ODS鋼への4.5wt%Al添加は、酸化物粒子の粗大化と数密度の減少を引き起こし、降伏応力は約300MPa低下したが、引張伸びは逆に増加することを示した。また、Al添加の効果として、ODS鋼の製造プロセスに不可欠な熱間押し出しが原因となっている強度特性における異方性発現の抑制を見出した。
- 超臨界圧水(510°C, 25MPa)中における耐食性を評価した結果、14wt%Cr-ODS鋼の耐食性は18Cr-8Niステンレス鋼(SUS316L)を凌駕することを示した。ODS鋼の酸化皮膜はステンレス鋼に比べても薄く、Crを含んだスピネル構造であることが判明した。Cr濃度の増大は安定したCr保護皮膜の形成を促進させ、さらにAl添加はCr保護皮膜と母材との間にAlを含んだ保護皮膜を形成させることを明らかにした。
- ODS鋼のCr濃度が19%を超えると、500°C、1万時間の熱時効によって延性脆性遷移温度(DBTT)が上昇し、熱時効脆化が生じるが、16%以下の場合には発現しないことが判明した。DBTTの上昇はCr濃度の増大につれてFe/Crの二相分離が顕著になり、Cr-rich相の形成による硬さの上昇に起因することを明らかにした。同一時効条件で比較した結果、ODS鋼の熱時効脆化は通常のフェライト鋼に比べ抑制されることを見出した。
- 高Cr-ODS鋼は、400°C以下での中性子照射により伸びの減少を伴わない照射硬化を示し、硬化量は照射温度が低い場合や高Cr濃度側で顕著になることを明らかにした。また、600°Cにおいては照射の影響はほとんど見られず、

ODS 鋼の優れた耐照射性が発現されることを見出した。Cr 濃度が 16wt% を超えると、400°C での照射は二相分離を引き起こし、DBTT の上昇を引き起こすが、14wt%Cr-ODS 鋼では DBTT の上昇は認められず、優れた耐照射性能を示した。

本論文では、SCPW 中での腐食挙動および熱時効脆化ならびに照射脆化に及ぼす Cr および Al の影響が明らかとなった。また、本実験結果を基に、高 Cr-ODS 鋼の最適 Cr 濃度を検討した結果、最適量が 15wt% 付近にあることを提示した。本研究の成果は核融合システムなどの次世代原子力システムに不可欠な核エネルギーの高効率安全利用に材料工学の観点から貢献すると期待される。

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18年8月22日に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。