

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	原子炉炉内構造部材ステンレス鋼で生じる表層部クラック抑制のための結晶粒微細化に関する研究
Title(English)	Study on grain refinement for suppression of surface cracks in stainless steel used for nuclear reactor core
著者(和文)	広田憲亮
Author(English)	Noriaki Hirota
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第291号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小林 能直,小林 覚,多田 英司,村石 信二,春本 高志
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第291号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)

Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 (工学) Academic Degree Requested Doctor of
学生氏名： Student's Name	広田 憲亮		審査員主査： Chief Examiner 小林 能直

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、原子力発電所におけるシュラウドでの応力腐食割れ (SCC) 発生の問題を解決するための対策について、検討した結果である。第 1 章 緒論では、原子力発電の長期運転により、CO₂排出量削減と安定的な電力供給が期待されている一方で、発電所内で使用されるシュラウドでは、SCC が未だ発生しており、これが原子力発電所の安全性と耐久性に対して、今後課題となることを述べた。そこで、本研究では、シュラウド材として主に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304L) に対して、結晶粒微細化技術の適用を検討し、この技術適用による SCC 抑制に及ぼす影響について検討することが、本論文の目的であることを示した。第 2 章 原子炉運転環境下での粒内 SCC と粒界 SCC の明確化では、原子炉運転環境を模擬した条件下で水中の溶存酸素 (DO) 濃度変化が SCC に与える影響について、低ひずみ速度引張試験 (SSRT) での実験結果が示された。その結果、DO 濃度が極端に低い場合及び高い場合で、破断ひずみが減少する傾向が示された。特に、低 DO 濃度下 (DO < 1 ppb) では動的ひずみ時効に起因したセレーションが確認され、粒内 SCC が生じていることが示された。一方、DO が 20000ppb と極端に高い場合には、Fe や Cr の酸化皮膜が形成され、これが剥離することで粒界 SCC 発生の要因となりえることが示された。第 3 章 動的再結晶を用いた超微細粒ステンレス鋼創製では、温間溝ロール圧延機と数値解析を用いて、ステンレス鋼の動的再結晶による結晶粒超微細化を検討した。結果として、表層部で結晶粒超微細化は確認できたが、材料内部での結晶粒超微細化は困難であった。原因としては、部位によるひずみ速度のばらつき、圧延ロールへの抜熱等による再結晶未達によるものと推察される。第 4 章 静的再結晶を用いた超微細粒ステンレス鋼創製では、強冷間圧延後に非等温焼きなまし処理を行うことで、静的再結晶による結晶粒微細化が検討された。結果として、再結晶温度と昇温速度が結晶粒微細化に重要な役割を果たすことが示され、再結晶完了温度は昇温速度に依存することが確認された。具体的には、昇温速度を 0.093 °C/s 以上とすることで、材料全域に渡って、結晶粒径 1 μm の超微細粒ステンレス鋼を創製できることが示された。第 5 章 粒内 SCC に及ぼす結晶粒微細化の影響では、SUS304L を用いて、原子炉運転環境下での粒内 SCC 発生に及ぼす結晶粒微細化の影響を調査すべく、SSRT による検討が実施された。結果として、結晶粒径 28.4 μm 以下の微細粒 SUS304L では、粒内 SCC が抑制され、破断ひずみが大気中での破断ひずみと同等の値を示した。これは、結晶粒微細化により動的ひずみ時効に起因するセレーションが抑制されたこと、また転位が結晶粒界へ移動しやすくなったことで転位の均一化が促進され、粒内 SCC による延性低下が抑制されたものと推察される。第 6 章 粒界 SCC に及ぼす結晶粒微細化の影響では、SUS304L を用いて、原子炉運転環境下での粒界 SCC 発生に及ぼす結晶粒微細化の影響を調査すべく、SSRT による検討が示された。その結果、粗大な結晶粒を有する SUS304L では、延性が低下するとともに、クラックが増加していた。またこの材料の表面酸化皮膜は厚くなっており、皮膜の剥離が粒界 SCC を引き起こす要因となっていることが示された。一方で、結晶粒微細化した SUS304L では、Cr₂O₃ の薄い酸化皮膜のみが形成され、ほとんどクラックの発生は確認されなかった。これらにより、結晶粒微細化が粒界 SCC を抑制する効果を有することが示された。第 7 章 実用的な表層部クラック抑制手法の提案では、数値解析を用いて、ショットピーニングにより相当塑性ひずみが 3 以上となる加工条件を見出し、より微細なショット粒子を用いることが表層部の相当塑性ひずみ向上に効果的であることが示された。これを踏まえて、ショットピーニングと再結晶熱処理により、SUS304L の表層部に微細粒組織を形成できるプロセスを構築した。実際に、このプロセスを用いて、試験片全域にショットピーニング処理と再結晶処理を施した材料を作製し、原子炉運転環境下で粒内 SCC を発生する条件下での SSRT を実施した結果、粒内 SCC は抑制され、健全な延性破壊が観察された。一方で、粗大なショット粒子を用いた試験片では、クラックが数多く存在していた。また粒界 SCC に対しても、表層に微細粒組織を形成したサンプルにおいて、クラック発生が抑えられていた。第 8 章 結論では、各章で得られた知見が総括され、SCC 抑制のためには、材料の結晶粒微細化が有望であることが述べられた。以上の結果から、結晶粒微細化技術は、原子力発電所の長期運転時の SCC 抑制に大きく貢献するとともに、シュラウド構造部材の長寿命化に重要な役割を果たす技術であると期待される。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	材料 材料	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	広田 憲亮		審査員主査： Chief Examiner	小林 能直

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This study investigates measures to mitigate stress corrosion cracking (SCC) in shrouds used in nuclear power plants. Chapter 1 discusses how extended operation of these plants contributes to CO₂ emissions reduction and stable power supply; however, SCC poses a significant challenge to their safety and durability. In this context, the study focuses on applying grain refinement techniques to austenitic stainless steel (SUS304L) to inhibit SCC. Chapter 2 examines SCC behavior under nuclear reactor operating conditions, specifically the effects of dissolved oxygen (DO) concentration. Results indicate that low DO concentrations (< 1 ppb) lead to intragranular SCC, while high DO levels (20000 ppb) cause intergranular SCC due to the detachment of iron and chromium oxide films. Chapter 3 explores a technique for achieving an ultra-fine grained stainless steel through dynamic recrystallization using numerical analysis. Although surface grain refinement was observed, it was difficult to achieve grain refinement in the matrix due to grain growth during rolling and heat dissipation from the rolls. Chapter 4 investigates an ultra-fine grained stainless steel through static recrystallization via non-isothermal annealing after severe cold rolling. It shows that a high heating rate (> 0.093 ° C/s) can consistently produce a 1 μm ultra-fine grain microstructure. Chapter 5 reveals that fine-grained SUS304L with a grain size of 28.4 μm or smaller enhances resistance to intragranular SCC by suppressing serrations. Chapter 6 confirms that fine-grained SUS304L can suppress intergranular SCC by forming a thin Cr₂O₃ oxide film, preventing thicker oxide films and reducing crack formation. Chapter 7 confirms that combining shot peening with finer particles and recrystallization processing increases equivalent plastic strain and creates a fine grain microstructure, enhancing SCC resistance. Finally, Chapter 8 concludes that grain refinement is a promising technology for improving shroud durability, supporting the safe operation of nuclear power plants.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).