

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)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	広田 憲亮		
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	小林 能直	教授	審査員	春本 高志	准教授
	審査員	多田 英司	教授			
		村石 信二	教授			
		小林 覚	准教授			

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「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」と題し、8章から構成されている。

第1章「緒論」では、原子力発電は、CO₂削減や安定的な電力供給に寄与し、世界各国で運転期間の延長や新設が検討されている一方で、原子力構造部材であるシュラウド等において、応力腐食割れ(SCC)が発生しており、このクラック抑制対策は十分に講じられていないことを述べた上で、結晶粒超微細化技術を適用することの可能性、重要性を指摘し、本論文の目的と意義を述べている。

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)濃度の変化が SCC に与える影響について、低ひずみ速度引張試験(SSRT)を行った結果を示している。DO濃度が非常に低い場合および中程度の場合で、破断ひずみが減少する傾向を示し、低DO濃度下(DO<1ppb)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 が生じることを見出している。一方、高DO濃度(20000ppb)では、FeやCrの酸化皮膜が試験片に形成され、これが剥離することで、粒界 SCC 発生に繋がり得ることを推測している。

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ている。その結果、表層角部において、結晶粒超微細化が確認され、材料内部においては結晶粒超微細化は確認されないことを示している。この原因としては、部位によるひずみ速度のばらつきがあること、圧延ロールへの抜熱等による再結晶が起らないことによるものと推察している。

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を検討している。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を示し、再結晶完了温度は昇温速度に依存することを示している。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1μmの超微細粒ステンレス鋼を創製できることを明らかにしている。

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るため、DO10ppb環境でのSSRTを実施している。その結果、結晶粒径28.4mm以下の微細粒材では、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す一方で、結晶粒径が39.5mm以上の粗大粒材では、脆性破面や側面クラックが増加することを示している。また、微細粒材では延性破面率も高く、{111}/Σ3対応粒界の割合が多いのに対して、結晶粒が粗大化した方が、これらの割合は減少することも明らかにしている。この結果により、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ること、また転位が結晶粒界へ移動しやすくなる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ることを示唆している。

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、DO20000ppb環境でのSSRTを実施している。その結果、粗大粒材では、延性が低下するとともに、クラックが増加することが示されている。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ることも見出している。一方で、微細粒材では、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できなかったとしている。これらの

結果から、結晶粒微細化が緻密な酸化皮膜を形成し、表面からの粒界 SCC 発生を抑制する効果を持つものと考えられている。

第7章「実用的な表層部クラック抑制手法の提案及び評価」では、数値解析を用いて、相当塑性ひずみが3以上となる、ショットピーニングによる加工条件を検討し、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を見出している。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ている。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、粒内 SCC が抑制されること、健全な延性破壊であることを確認している。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することを観察している。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は、クラック発生が抑えられることを確認している。

第8章「結論」では、本論文で得られた結果を総括している。

以上を要するに、本論文は、粒内 SCC 抑制のためには、材料の結晶粒微細化により、 $\{111\}/\Sigma 3$ 対応粒界の割合を増加させることが有効であること、また粒界 SCC 抑制のためには、材料の結晶粒微細化により、緻密な Cr_2O_3 酸化皮膜形成がクラック進展を抑制できることを示し、今後の原子力発電所の長期運転時のシュラウド構造部材の SCC 抑制に重要な役割を果たす技術を提案しており、この成果は工学上および工業上貢献するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として、十分な価値があるものと認められる。