

氏名	こしいし まさと 越石 正人
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成29年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)量子エネルギー工学専攻
学位論文題目	沸騰水型原子炉炉内構造物への応力腐食割れ評価手法と 補修溶接技術の適用性に関する研究
指導教員	東北大学教授 渡邊 豊
論文審査委員	主査 東北大学教授 渡邊 豊 東北大学教授 長谷川 晃 東北大学教授 秋山 英二 東北大学准教授 竹田 陽一

## 論文内容要旨

沸騰水型原子炉(BWR)の原子炉炉内構造物においては、主にステンレス鋼が使用されている。ステンレス鋼は腐食生成物の発生が少なく強度特性に優れた特性を持つ材料であるが、高い引張応力が作用する部位では BWR 炉水環境条件において応力腐食割れ (SCC) が生じる可能性がある。ステンレス鋼は炉心シュラウド等の主要構造物に用いられるため、SCC 対策はプラント経年化対応における重要な課題の一つとなっており、SCC 発生を抑制することを目的に、材料、環境、および応力面から、各種対策技術の開発を進めてプラントに適用してきている。1970年代には、溶接熱影響によるクロム炭化物析出に伴う鋭敏化が原因となる SCC を経験し、その対策として炭素量を低減した原子力用低炭素ステンレス鋼が開発された。しかし、2001年以降、炉心シュラウド等で再び SCC を経験し、調査の結果、グラインダ加工等による強加工層の付与が原因であることが明らかとなった。その対策として、磨きによる強加工層の除去等が実施されている。

このように BWR における SCC は古くから経験してきているが、その経緯を踏まえると、SCC を確率論的発生事象と捉えて常にその発生ポテンシャルに留意し、SCC に対する評価を確実に行っていくことが必要である。また、炉内構造物においては、供用中の中性子照射による材料特性変化が SCC の発生・進展挙動に影響を及ぼすとともに、SCC が生じた後の補修対策においても照射による材料特性の変化を考慮する必要があるため、多くの検討すべき課題がある。

このような背景の下、本研究では、沸騰水型原子炉炉内構造物に使用されているステンレス鋼の SCC 管理の高度化を目指し、SCC の評価に必要な知見と評価手法を提供することを目的に、SCC 発生試験と SCC 進展モデルの開発を行った。また、SCC 発生後の補修溶接の適用可否判断に必要な知見を提供することを目的に、中性子照射を受けたステンレス鋼を用いて、溶接試験を行った。さらに、これらの結果から得られた知見を基に、SCC 発生、SCC 進展、SCC 発生後の溶接補修に関し、実機における評価手順を整理した。以下、本研究で得られた成果の概要を述べる。

第1章では、BWR実機におけるSCC管理フローを整理するとともに課題を抽出し、本研究における検討対象として、加工層に起因するSCC発生における加工層管理指標の策定、中性子照射による材料特性の変化を考慮したSCC進展モデルの開発、及びSCC発生後の補修溶接の適用可否判断に必要となる知見の提供の3項目を課題として設定した。また、BWR環境下でのステンレス鋼のSCC発生・進展機構について調査・検討し、すべり酸化機構と捉えることが適切と判断した。

第2章では、SCC発生に対する加工層管理指針について検討した。実機における表面加工を模擬した試験片によりSCC試験を行い、SCC発生に対する加工層の管理指針を検討した。

この結果、機械加工により導入された加工層において、実機において確認されたのと同じ粒内型SCCが観察された。また、SCCき裂深さと加工による表面硬さの間には相関があり、300HV以上で急激に割れ深さが大きくなった。表面加工層の硬さは加工方法によって異なり、加工によるナノ結晶粒層や、変形双晶やすべり変形帯から構成される加工硬化層の形成が、表面近傍における組織変化に対応しているものと考えられた。

さらに、試験片表面の酸化皮膜厚さは、加工による表面硬さが高いほど厚い傾向があった。この結果から、加工層を有するステンレス鋼のSCC発生過程は、表面機械加工により形成されるナノ結晶粒における酸化の加速が影響した変色皮膜破壊機構である可能性を指摘した。

以上より、実機において300HV以上となりうる表面加工が施されている部位ではSCCに対して注意が必要であり、実験結果に基づく工学的判断として表面硬さ300HVをしきい値として設定し、SCC発生における加工層管理を行うことを提案した。

第3章では、SCCき裂の進展挙動を予測する評価手法として、Shojiらから提唱されたSCC進展モデルであるFRIモデルに対し、照射による機械的特性と腐食特性の変化を反映する方法を検討し、計算により実験データを再現することができた。照射による材料特性変化のモデル入力パラメータへの反映に際しては、転位チャネリングを伴う照射材特有の変形挙動に着目し、結晶粒界におけるひずみの局在化を皮膜の破壊ひずみの低下としてモデルに反映することを、従来にない新たな手法として提案した。

具体的には、3dpa未満の照射量では、この照射量領域での照射誘起偏析による粒界Cr濃度の低下は耐食性に影響しないと判断し、降伏応力とひずみ硬化指数の実験値を入力パラメータとし、照射硬化に伴う結晶粒界におけるひずみの局在化を皮膜の破壊ひずみを低下させることで反映し、照射量増加に伴うき裂進展速度の増加を計算により再現した。

3dpa以上領域においては、転位チャネリングを伴う変形挙動が支配的となり、結晶粒界におけるひずみの局在化の程度が照射量によらず一定になると考えて機械的特性にかかわる入力パラメータの設定方法を検討すると

ともに、照射誘起偏析による粒界 Cr 濃度の低下が耐食性に及ぼす影響を考慮した計算を行い、計算により実験データを再現することができた。

以上により検討した入力パラメータの設定方法により、モデル入力パラメータの設定検討の対象としなかった照射下試験データの条件に対応したモデル計算結果を比較し、モデル計算結果が照射下試験データとよく一致することを確認した。

さらに、冷間加工材の材料特性を入力パラメータに反映し、き裂進展速度を計算する方法についても検討した。この結果を基に、き裂進展速度の応力拡大係数(K)依存性について冷間加工材と照射材との比較を行い、降伏応力が同等の場合、冷間加工材に比べて照射材のき裂進展速度の K 依存性が急峻となることを示した。

第 4 章では、中性子照射をうけたステンレス鋼の補修溶接性とその影響因子を評価し、補修溶接の適用可否の判断材料を提供することを目的に、中性子照射された SUS304 及び 316L を用いて、それらの溶接性を、多パス TIG 溶接及び YAG レーザ溶接により調べた。また、SCC の発生部位に対して補修溶接を行う場合、加工層除去が必要か否かを明らかにすべく、加工層の照射材溶接性に対する影響の有無を評価した。

具体的には、照射された SUS304 に対し、多パス TIG 溶接により、最大 He 量 3.4appm まで、割れや粒界劣化がない溶接が可能であることを示すとともに、母材 He 量 0.56 appm の SUS304 溶接継手を対象に室温大気中で機械試験を実施し、継手の健全性を確認した。また、多パス YAG レーザ溶接により、最大 He 量 18appm まで、割れや粒界劣化がない溶接が可能であることを示すとともに、母材 He 量 0.91 appm の SUS304 溶接継手を対象に室温大気中で機械試験を実施し、継手の健全性を確認した。

一方、SUS304 と SUS316L の間には、He に起因する溶接割れ感受性に違いが認められ、SUS316L の方が割れ感受性が高いことを明らかにした。健全な溶接が可能な限界入熱条件と He 量の関係は必ずしも明確にはできなかったが、1 appm He の SUS316L に対し、0.2MJ/m のレーザによるビードオンプレート溶接 (4 層 22 パス) では、割れが生じないことを示した。さらに、溶接時の割れを抑制するための因子について考察した結果、溶接入熱の低減、溶接中の引張応力の低減、溶接熱サイクルの低減が、割れの抑制に有効であることを示した。

次に、表面加工層の照射材溶接性への影響を評価するために、ワイヤーピーニングにより表面に加工層を付与した後に溶接試験を実施した。この結果、加工層導入部分では、溶接により再結晶によるものと考えられる結晶粒の微細化が生じるとともに、He に起因する割れは抑制されることが、世界で初めて明らかとなった。このことから、補修溶接施工前に、表面加工層を除去する必要がないことが分かった。表面加工層導入部で He に起因する割れが抑制される理由として、再結晶により He バブルの数密度は変化しないものの、He バブル径が抑制されることによることが明らかとなった。これは、凝固収縮時の再結晶後の粒成長と He バブル成長の間の相互作用によるものと考えられる。

第5章では、これらの結果得られた知見を、実機 BWR における SCC 管理フローに反映すべく、SCC 発生、SCC 進展、SCC 発生後の溶接補修に関し、評価手順を整理した。

SCC 発生における加工層管理においては、ナノ結晶粒層形成の程度と相関があると考えられる表面硬さを管理指標とし、加工層管理フローを作成した。実験結果に基づく工学的判断として、表面硬さ 300HV をしきい値として設定し、それ以上となるうる部位を選定して、SCC 管理・評価を優先的にを行うことを提案した。また、SCC 発生に対する予防保全として、フラップホール研磨や CNS 研磨を想定し、これらの方法による加工層除去のあと表面硬さが 300HV 未満になることを確認して、SCC 発生ポテンシャルを小として扱うことをオプションとした。

SCC 進展評価においては、開発したモデルを活用して実機構造物における SCC 進展評価を行う場合の手順を整理した。評価対象部の照射量を評価し、それに応じて評価を必要とする材料特性とモデル入力パラメータへの反映手順を整理した。また、SCC 進展に対する予防保全として、水素注入水質環境(HWC)や貴金属注入水質環境(NMCA)を採用する場合に対し、本研究で開発したモデルが適用可能であることを示した。

SCC 発生部位に対する補修溶接については、補修溶接の適用性を検討する場合の検討フローを作成した。補修溶接により健全な溶接の可能性があるかないかの一次スクリーニング判断を、本研究成果を基に、SUS304 の場合は  $He \leq 18$  appm、SUS316L の場合は  $He \leq 1$  appm を目安とすることを提案した。また、補修溶接方法として封止溶接か開先溶接を選定するか、補修前に表面加工層を除去する必要があるか等の判断に、本研究で得られた知見を活用することを提案した。

以上の研究成果により、SCC の発生・進展が炉内構造物の健全性に及ぼす影響を正確に把握し、運転中の炉内構造物の健全性を確保するための管理フローの高度化を図るとともに、SCC 発生後の溶接補修の適用可否を合理的に判断するための指針を提案した。本提案手法により、沸騰水型原子炉における炉内構造物のより一層の健全性確保が可能となるとともに、SCC 発生後の溶接補修の適用可否が判断可能となり、シュラウド取替に代替する補修の適用性が合理的に判断可能となれば、放射性廃棄物発生量の低減に貢献することができる。

# 論文審査結果の要旨

沸騰水型原子炉(BWR)の原子炉炉内構造物においては、主にステンレス鋼が使用されているが、炉水環境条件において応力腐食割れ(SCC)が生じる可能性があり、プラント高経年化技術評価等で、SCC に対する評価が求められている。このような背景の下、本研究では、沸騰水型原子炉炉内構造物に使用されているステンレス鋼の SCC 管理の高度化を目指し、SCC の評価に必要な知見と評価手法を提供することを目的として SCC 発生試験と SCC 進展モデルの開発を行った。また、SCC 発生後の補修溶接の適用可否判断に必要な知見を提供するため、中性子照射を受けたステンレス鋼を用いて、溶接試験を行った。これらの結果から得られた知見を基に、SCC 発生、SCC 進展、SCC 発生後の溶接補修に関し、実機における評価手順を提案したものであり、全 6 章から成る。

第 1 章では、BWR 炉内構造物の健全性管理の現状と課題ならびに SCC の機構論的理解の現状について論じ、研究の動機を明確にしている。

第 2 章では、実機における表面加工を模擬した試験片により SCC 試験を行い、SCC 発生に対する加工層の管理指針を検討した。この結果、表面機械加工を施した試験片の表面硬さと SCC 割れ深さには相関があり、300HV 以上で SCC 割れ深さが急激に増大することを明らかにした。また、表面硬さが硬いほど表面酸化皮膜の厚さが厚くなり、表面皮膜厚さが厚いほど SCC 割れ深さが深い傾向が認められた。これらの結果から、加工層を有するステンレス鋼の SCC 発生機構が、機械加工により形成されるナノ結晶粒における酸化の加速が影響した変色皮膜破壊機構である可能性を指摘した。

第 3 章では、中性子照射を受けた材料の SCC 進展評価モデルの開発を行っている。SCC 進展モデルである FRI モデルに対し、照射による機械的特性と腐食特性の変化を反映する方法を検討し、計算により実験データを再現した。照射による材料特性変化のモデル入力パラメータへの反映に際しては、転位チャネリングを伴う照射材特有の変形挙動に着目し、結晶粒界におけるひずみの局在化を皮膜の破壊歪みの低下としてモデルに反映することを、従来にない新たな手法として提案した。

第 4 章では、中性子照射を受けたステンレス鋼の補修溶接性とその影響因子を評価し、補修溶接の適用可否の判断材料を提供することを目的に、補修溶接試験を行った。この結果、照射済み SUS304 に対する多パス TIG 溶接において、入熱低減により最大 He 量 3.4appm まで割れがない溶接が可能であることを示した。また、レーザ溶接によりさらなる溶接可能範囲の拡大が可能で、最大 18appm He まで割れがない溶接が可能であることを示した。一方、SUS316L は、SUS304 に比べて照射後の溶接性が低下し、He 割れを生じやすいことが明らかとなった。レーザ溶接による溶接入熱低減や施工要領を工夫することで、健全な溶接が行える可能性があることを示した。また、表面加工層がステンレス鋼の溶接性に及ぼす影響を確認し、加工層を有する部位では溶接熱影響により再結晶化が生じるとともに He バブルの成長が抑制され、He 割れが生じにくくなることを世界で初めて明らかにした。

第 5 章では、本研究の成果に基づいて SCC 管理フローを提案している。SCC の発生に関しては、主要因である表面加工層の管理指標として表面硬さを選定し、実験結果に基づき 300HV をしきい値として SCC 発生ポテンシャルを判定する考え方を示した。SCC の進展評価に関しては、本研究で開発したモデルによる SCC 進展評価の手順を提案した。まず、評価対象部の中性子照射量を評価し、それに応じて評価を必要とする材料特性とモデル入力パラメータへの反映手順を整理した。また、SCC 進展に対する予防保全として、水素注入水質環境(HWC)や、貴金属注入水質環境(NMCA)を採用することを想定し、開発したモデルによる評価の適用可能性を明らかにした。さらに、SCC 発生部位に対し補修溶接の適用性を検討する場合の検討フローを作成し、補修溶接による健全な溶接の可能性有無の一次スクリーニング、き裂封止溶接と開先溶接のいずれかの選定、TIG 溶接とレーザ溶接のどちらかの選択などに、本研究で得られた知見を活用することを提案した。

以上本論文は、BWR 炉内構造物を対象として、SCC の発生感受性と進展速度を的確に予測することを可能とし、運転中の構造物健全性を確保するための管理フローの高度化を図るとともに SCC 発生後の溶接補修の適用可否を合理的

に判断するための指針を提案したものであり、量子エネルギー工学の発展に寄与するところが少なくない。  
よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。