



Title	高速増殖炉用316FRステンレス鋼の補修溶接性に関する研究
Author(s)	Chun, Eunjoon
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/52170">https://doi.org/10.18910/52170</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( CHUN Eun-Joon / 千 璽 暎 )

論文題名 高速増殖炉用316FRステンレス鋼の補修溶接性に関する研究

## 論文内容の要旨

本論文は、高経年高速増殖炉（FBR）に対する補修溶接技術の確立を目的として研究開発を実施した結果をまとめたものである。各章の主な内容は次の通りである。

第1章は、緒論であり、研究の背景ならびに問題点を指摘し、本研究の必要性ならびに目的について述べた。第2章では、FBRの実用化および補修・保全技術の現状と課題に対して述べた。特に、FBR運転の際に生じる損傷や補修・保全技術に対する技術的課題を抽出した。第3章では、凝固モードの異なる二種類の316FRステンレス鋼用溶加材を用いた溶接部を対象に、ナトリウム浸漬試験によりナトリウム残存状況を再現して、アーク溶接のトランス・バレストレイン試験を実施した。補修溶加材の凝固割れ感受性を評価するとともに、凝固割れ感受性に及ぼすナトリウムの影響を明らかにした。第4章では、補修溶加材の溶接金属に対して、FBRの運転温度より高い温度で加速時効試験を行い、脆性相の析出挙動について定量評価を行った。また、析出挙動の速度論的検討と析出に伴う機械的性質の評価結果を組み合わせ、長時間実機供用における脆性相析出と $\sigma$ 相脆化挙動の予測を行った。5章では、得られた $\sigma$ 相脆化予測結果に基づき、脆性相の析出が液化および延性低下割れ感受性に及ぼす影響について調査し、長時間運転後の $\sigma$ 相脆化が補修溶接性に与える影響について検討した。第6章では、レーザー溶接における凝固割れ感受性の評価を行うために、レーザー溶接を用いたトランス・バレストレイン試験方法およびその評価技術を新たに開発・確立した。さらに、市販ステンレス鋼に対して溶接速度による凝固割れ感受性の変化挙動について検討を行うとともに、割れ感受性の変化要因を急冷凝固過程の凝固解析手法を用いて理論的に考察した。第7章では、構築したレーザー溶接のトランス・バレストレイン試験により、316FRステンレス鋼の補修溶加材レーザー溶接部の凝固割れ感受性と溶接速度による割れ感受性の変化挙動について検討を行った。また、凝固モードによる凝固割れ感受性の差異を非平衡凝固過程の固液共存温度範囲の理論的解析を用いて考察した。第8章では、得られた補修溶接性の評価結果に基づき、レーザー肉盛溶接試験を実施し、施工健全性を調査した。第9章は、結論であり、本研究で得られた結果を総括した。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( CHUN Eun-Joon / 千 聰峻 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	才田 一幸
	副 査	教授	廣瀬 明夫
	副 査	教授	小溝 裕一
<b>論文審査の結果の要旨</b>			
<p>本論文は、高経年化高速増殖炉 (FBR) に対する補修溶接技術の確立を目的として研究開発を実施した結果をまとめたものである。各章の主な内容は次の通りである。</p> <p>第 1 章は、緒論であり、研究の背景ならびに問題点を指摘し、本研究の必要性ならびに目的について述べている。</p> <p>第 2 章では、FBR の実用化および補修・保全技術に関する現状を述べている。また、次世代 FBR プラント用の構造材である 316FR ステンレス鋼の特徴について述べるとともに、長期間運転の際に生じる損傷および補修・保全技術に対する技術的課題として、①補修溶接性 (凝固割れ感受性) に及ぼすナトリウムの影響、②長期間供用における溶接部の <math>\sigma</math> 相脆化予測および補修溶接性 (液化割れおよび延性低下割れ感受性) に及ぼすその影響、③レーザ溶接部の凝固割れ感受性評価技術の開発および定量評価、の 3 点を抽出している。</p> <p>第 3 章では、凝固モードの異なる二種類の 316FR ステンレス鋼用溶加材 (316FR-A および 316FR-B) を用いた溶接金属の組織解析や凝固モード推定を行うとともに、ティグアーク溶接によるトランス・バレストレイン試験を用い、凝固割れ感受性の定量評価を実施している。AF モード凝固の 316FR-A の凝固脆性温度範囲 (BTR) は 37K、FA モード凝固の 316FR-B の BTR は 14K であり、316FR ステンレス鋼の凝固割れ感受性は一般に高くないことを示している。さらに、残存ナトリウムが凝固割れ感受性に及ぼす影響をトランス・バレストレイン試験により定量評価するとともに、溶接金属中へのナトリウム混入に対する組織学的検討を行い、補修溶接性に及ぼす残存ナトリウムの影響を明らかにしている。ナトリウム付着量の増加に伴い、BTR は約 30K 拡大する傾向が確認され、溶接凝固過程中にナトリウムが凝固偏析し、固液共存温度範囲を拡大させるためであると推察している。</p> <p>第 4 章では、FBR の実機供用における 316FR ステンレス鋼溶接金属の脆性相析出および脆化挙動の定量評価を目的として、溶接金属の加速時効試験を行いマイクロ組織解析により析出現象を検討している。また、析出挙動の速度論的検討を行い、実機供用条件 (773K および 823K) での脆性相析出挙動を予測している。析出初期段階に <math>\chi</math> 相が優先して析出するが、時効温度および時間の増加に伴い、<math>\chi</math> 相の量は徐々に減少するとともに、<math>\sigma</math> 相の析出量が急激に増加し、最終的に <math>\sigma</math> 相のみとなることを示している。また、<math>\sigma</math> 相 + <math>\chi</math> 相の析出は近似的に Johnson-Mehl 型速度式に従い、FBR 実機供用のごく初期段階においては、316FR-A の脆性相析出量が 316FR-B をわずかに上回るが、運転の進行に伴い、316FR-B の脆性相析出量が急激に増加することを予測している。さらに、脆性相の析出に伴う機械的性質の変化を調査し、その結果と析出予測結果を組み合わせることにより、実機供用温度における溶接部脆化挙動も予測している。<math>\sigma</math> 相脆化は 316FR-A より 316FR-B の方が速く進行し、40 年間の供用において、316FR-B ではいずれの供用温度でも靱性値がほぼ最低値まで低下し、316FR-A よりも著しい脆化が起こることを示している。特に、316FR-B では 1 年間のごく短時間の供用によっても、靱性値が初期値の 1/3 以下にまで低下する可能性を予測し、FBR 実機供用に際し、溶接部の <math>\sigma</math> 相脆化は無視できないことを示唆している。</p> <p>第 5 章では、脆性相の析出が液化および延性低下割れ感受性に及ぼす影響について調査し、長時間運転後の <math>\sigma</math> 相脆化が補修溶接性に与える影響について検討している。823K での 40 年以上の実機供用に相当する条件を再現した <math>\sigma</math> 相</p>			

脆化材に対してナトリウムを付着させてスポット・バレストレイン試験を実施した結果、脆性相析出に起因する液化割れおよび延性低下割れの発生は確認されず、補修溶接性に及ぼすこれらの影響は、極めて軽微であると判断している。

第6章では、レーザ溶接部における凝固割れ感受性の評価を行うために、レーザ溶接を用いたトランス・バレストレイン試験方法およびその評価技術を新たに開発・確立している。すなわち、レーザの照射停止とひずみの付与開始を同時に行うことを基本コンセプトとして、溶接ロボット、レーザ発振器、バレストレイン試験の油圧付与機間のタイミング同期制御プログラムを構築するとともに、高速度カメラによる試験シーケンスの観測手法の導入によって、完全なるタイミング同期を実現している。また、ヨーク落下時間を高速度カメラにより実測し、凝固割れ発生の温度範囲に対して後方補正を行い、BTRの評価精度を高めている。市販のSUS310SおよびSUS316L鋼を用いて溶接速度による凝固割れ感受性の変化挙動について検討した結果、レーザ溶接トランス・バレストレイン試験後の溶融池後端部には凝固割れの発生が認められ、溶接速度の増加に伴い、SUS310S鋼のBTRは縮小し、SUS316L鋼のBTRは逆に拡大する結果を示している。さらに、割れ感受性の変化要因を急冷凝固過程の凝固解析手法を用いて理論的に考察している。デンドライト過冷および凝固偏析の解析を用いた非平衡凝固過程における固液共存温度範囲の計算により、溶接速度の増加に伴うSUS310S鋼のBTRの縮小挙動は、分配係数の増加により凝固偏析が軽減し、凝固終了温度が上昇するとともに、デンドライト過冷による凝固開始温度が低下するためであると推察している。また、SUS316L鋼のBTR拡大挙動は、デンドライト過冷による凝固開始温度の降下および分配係数増加による凝固偏析の軽減より、 $\delta$ フェライト晶出量の減少に起因する不純物元素の凝固偏析上昇（SおよびP）効果が支配的になることによると推察している。

第7章では、構築したレーザ溶接トランス・バレストレイン試験により、316FRステンレス鋼補修溶接材によるレーザ溶接部の凝固割れ感受性と溶接速度による割れ感受性の変化挙動について検討を行っている。また、凝固モードによる凝固割れ感受性の差異を非平衡凝固過程の固液共存温度範囲の理論的解析を用いて考察している。すなわち、溶接速度の増加に伴い、316FR-Aおよび316FR-BともにBTRは拡大するが、BTRの拡大幅は、316FR-Bの方が316FR-Aに比べてやや大きく、凝固割れ感受性の変動幅は凝固モードによって異なることを示している。また、316FR-BのBTRが316FR-Aより溶接速度の増加に伴う上昇幅が大きい原因としては、 $\delta$ フェライト晶出量の減少幅が316FR-Bの方が大きく、不純物元素の凝固偏析上昇がより顕著となるためであると推察している。

第8章では、得られた補修溶接性の評価結果に基づき、レーザ肉盛溶接試験を実施し、施工健全性を検証している。溶接速度30mm/sおよびレーザ出力3kWのレーザ多層盛溶接条件では、良好なビード外観が得られるとともに、凝固割れのない健全な肉盛溶接部が得られることを示している。また、残存ナトリウム環境下でレーザ多層盛溶接を行った結果、ビード形状がやや不安定で少量のスラグ形成が見られるものの、ビード表面は良好な様相を呈しており、凝固割れのない健全な肉盛溶接部が得られ、少量のナトリウムが残存しても施工健全性および成立性はおおむね良好であると判断している。

第9章は、結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

以上のように、本論文では、高経年化FBRに対する補修溶接技術の確立を目的とし、FBR用オーステナイト系ステンレス鋼の補修溶接性に及ぼす経年劣化現象の影響を検討している。補修環境となるナトリウムおよび溶接部の $\sigma$ 相脆化が補修溶接性（高温割れ感受性）に及ぼす影響について定量評価するとともに、有力な補修プロセスのひとつとされるレーザ溶接における凝固割れ感受性の評価手法を新たに構築し、レーザ溶接部における凝固割れ感受性の定量評価ならびにその変化原因について理論的考察を行っている。また、レーザ多層肉盛溶接試験を行い、レーザによる補修溶接施工の成立性および健全性について検証している。これらの知見は、高経年化FBRに対する補修溶接プロセスの開発・確立に対して、重要な示唆を与えることが展望され、その成果は、生産科学の発展に寄与するところが大である。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。

## 最終試験の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( CHUN Eun-Joon / 千 璵暎 )	
最終試験担当者	職 名 氏 名
	主 査 教授 才田 一幸
	副 査 教授 廣瀬 明夫
	副 査 教授 小溝 裕一
<b>最終試験の結果の要旨</b>	
<p>本学学位規程第10条の規定により、学位申請者に対して学位論文を中心とし、論文内容及びこれに関連のある科目について試問を行い、審査委員全員の協議の結果、平成27年2月5日合格と判定した。</p>	