

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19760600

研究課題名（和文） 核融合炉用液体増殖材と低放射化材料溶接材の共存性

研究課題名（英文） Compatibility between liquid breeder blanket for fusion reactors and weld joint of low activation materials

研究代表者

長坂 琢也 (NAGASAKA TAKUYA)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・准教授

研究者番号：40311203

研究成果の概要（和文）：核融合炉液体増殖材と低放射化材料溶接材との共存性を明らかにするために、溶接素材における基本的な腐食試験を行うとともに、低放射化材料と 316L 鋼との異材溶接材の試作と機械特性、照射特性の評価を行った。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify the compatibility between liquid breeder for fusion reactors and weld joint of low activation materials, fundamental corrosion tests were conducted on their base metal. Dissimilar weld joints between the low activation materials and 316L steel were fabricated, and their mechanical properties and irradiation properties were examined.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,400,000	0	1,400,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	570,000	3,870,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：低放射化フェライト鋼，低放射化バナジウム合金，核融合炉液体ブランケット，異材接合，腐食，液体金属，溶融塩，照射硬化

## 1. 研究開始当初の背景

核融合炉ブランケットのような大型構造物の製作には溶接が不可欠である。構造材料母材がいかに中性子照射脆化や腐食に耐えても、溶接部の劣化が母材に比較して大きければ、システム全体の寿命は溶接部の劣化によって定まることになる。実際に低放射化材料の溶接部では照射脆化促進、腐食促進が起こり、その解決が問題の焦点として世界的に

認識されている。

低放射化フェライト鋼では日本と欧州連合が、そして低放射化バナジウム合金では日本、米国、ロシアが大量溶解を実施し、実用規模の板材を用いて溶接研究を開始している。申請者は日本の大量溶解バナジウム合金開発に携わってきた。従来のバナジウム合金溶接材は脆く、室温においても脆性破壊をしていたことが問題であったが、高純度化によ

りこれを解決した。そして、0.1 dpa (照射量の単位、核融合炉での要求は 100 dpa) の中性子照射実験ではあるが、バナジウム合金の溶接金属では、母材に比較して照射硬化・照射脆化が大きく、それが溶接によって強制固溶された酸素等の不純物と照射欠陥の相互作用によるものであること、さらにこの不純物を適切な溶接後熱処理によって Ti 析出物として固定すれば溶接金属の照射硬化が抑えられることを世界で初めて明らかにした。現在日本の常陽炉や米国 HFIR 炉で数 dpa の重照射試験が溶接まま材、溶接後熱処理材について進められている。一方、低放射化フェライト鋼では既に 10 dpa を超える照射データが溶接材についても報告されている。ここでも溶接後熱処理により溶接部の照射脆化促進を回避しようという試みがなされているところである。

本研究で取り上げるブランケット形式は液体増殖ブランケットである。これは燃料トリチウムの増殖材に液体金属 Li、液体金属 Li-Pb、溶融塩 Flibe (LiF+BeF<sub>2</sub>)を用いる。液体増殖ブランケットは高温動作させることで高効率となり、これらの液体に冷却材と増殖材の二役を兼ねさせれば単純構造、コンパクト、低廃棄物量のブランケットが可能となる。国際熱核融合実験炉(ITER)においては、欧州連合と米国が液体 Li-Pb 増殖を、ロシアが液体 Li 増殖のテストブランケットモジュールを提案しており、日本でも大学連合、そして中国、韓国はこれらの提案に協力参加を表明している。溶融塩 Flibe 増殖においては当初米国から提案があると期待されたが、開発要素が多く ITER には間に合わないと判断されて見送られた。しかし、魅力的な概念であることには変わりなく、日米科学技術協力事業や、日本国内では大学において要素技術開発が引き続き行われている。

溶接材のうち、低放射化フェライト鋼同士の共金溶接材については、液体金属 Li-Pb 中の腐食研究の報告がある。溶接部では腐食による脆化が起こるが、溶接後熱処理することでこれを回避できることが示されている。その他 Cr 増量や Al 添加で腐食制御の見通しがあり、最近では ITER の影響で日欧の研究アクティビティが高まりつつある。一方で、低放射化フェライト鋼と、炉外機器の構造材料である 316L 鋼あるいは、低放射化バナジウム合金と 316L 鋼の異材溶接材については、その試作から始める必要がある。まず機械特性、照射特性の観点から、溶接方法や溶接条件を検討し、実際に使用できる溶接材を試作するのが重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、液体増殖材と低放射化フェライト鋼、低放射化バナジウム合金溶接材との

共存性を明らかにするために、溶接素材における基本的な腐食試験を行うとともに、低放射化材料と 316L 鋼との異材溶接材の試作評価を行う。

ブランケット自体は低放射化材料で製作するとしても、炉心外部の機器は中性子照射量が低いので低放射化材である必要は無く、むしろ既存工業材料の 316 ステンレス鋼が使用されるはずである。すると必ず接合部が必要になり、炉心外にあることから照射量は高くない。316L 鋼の使用上限である 1 dpa 程度までの照射脆化を評価すれば十分であり、それは照射硬化を明らかにすることで推定できる。具体的には、異材接合部が、316L 鋼の照射硬化より大きくならないことを目標とする。

## 3. 研究の方法

低放射化材料として、フェライト鋼 JLF-1 JOYO-II heat (Fe-9Cr-2W-0.1C) 及び NIFS-HEAT-2 (V-4Cr-4Ti) と、さらに Ni, Cr, W, V, Fe, Ti の純金属を用い、高純度 Flibe 中 (Fe~5, Cr~10, W<1 wppm)、フッ酸中、純 He 中あるいは He-HF 混合ガス中で腐食試験を行った。試験温度は、フッ酸は室温であり、それ以外はブランケット運転温度の 823 K である。試験後、重量変化の測定と、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察、X 線回折 (XRD)、X 線光電子分光法 (XPS) により腐食生成物の解析を行った。

異材溶接材の試作においては、電子ビーム溶接にて、低放射化フェライト鋼 F82H

(Fe-8Cr-2W-0.1C)、純バナジウム (V)、低放射化 V 合金及び 316L ステンレス鋼

(Fe-18Cr-12Ni-2Mo) の異種溶接材を作製した。F82H-316L 溶接材では、最適な溶接条件を求めるために、電子ビームの照射位置をシフトさせた試料を作成した。溶接後の試料には 750°C×1 hr の溶接後熱処理を施し、機械特性への影響を調べるため、硬さ試験、引張試験、衝撃試験、組織観察を行った。溶接金属、熱影響部 (HAZ)、母材に加速器で 0.1~1.0 dpa までプロトン照射を行った。

## 4. 研究成果

室温のフッ酸中では、低放射化材料の重量減少は、それぞれ主成分の純 Fe、純 V と同程度であった。材料の構成元素の中でも、純 Cr、純 W の重量減少は低放射化材料と比較して 1/30~1/50 と小さかった。He- (0~1%) HF ガス中では、バナジウム合金の重量増加がフェライト鋼に比較して 10~30 倍大きかった。He- 1%HF ガスの成分分析の結果は、He- 0.96%HF- 0.055H<sub>2</sub>O- 0.0016O<sub>2</sub> であり、雰囲気中の F 原子の濃度が O 原子より 16 倍大きい条件である。にもかかわらず、XPS 分析で得られた O の光電子強度は F より 3~4 倍大き

く、Flibe 中、He-HF ガス中いずれにおいても、腐食性生物中では酸化がフッ化より支配的であることが明らかになった。バナジウム合金は酸化により機械的特性、照射特性が著しく劣化することが知られており、Flibe 中で用いるには、より厳しい酸素濃度低減など酸化抑制について対策を講じる必要がある。一方、腐食生成物は  $\text{CrF}_2$  に  $\text{O}$ ,  $\text{W}$  が固溶した化合物、あるいは  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  と推定された。Cr, W はフッ酸腐食における重量減少も少なく、腐食生成物中に濃縮されることから、耐腐食被覆の開発に利用できる可能性がある。

フェライト鋼-316L 鋼の異材溶接材の試作においては、溶接位置が突き合わせ位置の場合には、溶接金属の硬さが 400 Hv あり脆化していることが示唆された。これを溶接後熱処理しても、元の硬さ 200 Hv まで回復させることはできなかった。シェフラーの状態図及び溶接金属の電子顕微鏡を用いた蛍光 X 線分光分析によると、溶接金属ではマルテンサイト相が生成していると考えられる。この相の生成を抑えるために、電子ビーム照射位置のシフトを行った。その結果、照射位置を 316L 側に 0.2 mm シフトし、750°C×1 hr の溶接後熱処理を施すことで、上記の硬化を回避することができ、溶接条件が明らかとなった。溶接試料について、引張試験、曲げ試験、シャルピー試験を行い、母材並みの良好な機械的特性を確認した。

加速器で 0.5 dpa までプロトン照射を行った結果、照射硬化量は 57 Hv であり、これは 316L の過去のデータ 145 Hv より小さく、また照射欠陥も特異なものはできないことから、照射後の機械的特性は母材より悪くなることはないと考えられる。溶接金属の 1 dpa での照射硬化量は 135 Hv で、316L 鋼母材と同程度であり、照射硬化の促進は認められなかった。F82H 母材及び F82H 側 HAZ の照射硬化量は 30 Hv であり、316L 鋼と比較すると小さいが、HAZ の中に 50 Hv 軟化した脱炭層の形成が認められ、これが 1 dpa 照射後も周囲より軟化したままであったため、機械強度への影響がありうるということが明らかとなった。

純バナジウム-316 鋼の溶接材においては、母材が 150-200 Hv であるのに対し、溶接金属は溶接ままで 600 Hv と硬く、さらに 1273 K×1 hr の溶接後熱処理によって 1000 Hv 程度の非常に硬い相ができることが明らかになった。この硬化層は、電子ビームの照射位置を純 V 側に 0.4 mm ずらすことで、その体積を小さくすることができた。硬化相は、Fe-V のシグマ相、あるいは  $\text{V}_3\text{Ni}$  相であると推定された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① T. Nagasaka, M. Kondo, T. Muroga, N. Noda, A. Sagara, O. Motojima, A. Suzuki, T. Terai, “Fluoridation and oxidation characteristics of JLF-1 and NIFS-HEAT-2 low-activation structural materials”, Journal of Nuclear Materials, 査読あり, Vols. 386-388, 2009, pp. 716-719.
- ② N. Hara, S. Nogami, T. Nagasaka, A. Hasegawa, H. Tanigawa, T. Muroga, “Mechanical Property Changes and Irradiation Hardening Due to Dissimilar Metal Welding with Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel and 316L Stainless Steel”, Fusion Science and Technology, 査読あり, Vo. 56, 2009, pp. 318-322.

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 宮崎純平, 野上修平, 長坂琢也, 長谷川晃, 佐藤学, 室賀健夫, “バナジウム合金とオーステナイトステンレス鋼の異材溶接に関する研究”, 日本原子力学会「2010年春の大会」, 2010年3月26-28日, 茨城大学
- ② 原法義, 長谷川晃, 長坂琢也, 室賀健夫, “電子ビーム溶接した F82H 鋼/316L 鋼の異材溶接部の照射挙動”, 日本原子力学会「2010年春の大会」, 2010年3月26-28日, 茨城大学
- ③ 原法義, 野上修平, 宮崎純平, 長谷川晃, 長坂琢也, 室賀健夫, 谷川博康, “F82H-SUS316L 異材接合部の機械特性の溶接後熱処理による変化と照射硬化への影響”, 日本原子力学会「2009年秋の大会」2009年9月16-18日, 東北大学
- ④ N. Hara, S. Nogami, T. Nagasaka, A. Hasegawa, H. Tanigawa, T. Muroga, “MECHANICAL PROPERTY CHANGES AND IRRADIATION HARDENING DUE TO DISSIMILAR METAL WELDING WITH REDUCED ACTIVATION FERRITIC/MARTENSITIC STEEL AND 316L STAINLESS STEEL”, 第 18 回核融合エネルギー工学トピカル会議, 2008年9月27日~10月4日, サンフランシスコ (米国)
- ⑤ 原法義, 野上修平, 長谷川晃, 長坂琢也, 室賀健夫, 谷川博康, “低放射化フェライト鋼とオーステナイトステンレス鋼の電子ビームによる異材溶接部の微細組織発達に及ぼす溶接後熱処理の影響”, 日本原子力学会「2008年秋の大会」, 2008年9月4日~6日, 高知工科大学 (高知県香美市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長坂 琢也 (NAGASAKA TAKUYA)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・

准教授

研究者番号：40311203