

令和元年6月25日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26289358

研究課題名(和文) 低放射化フェライト鋼-ステンレス鋼異材溶接継手の中性子照射特性と不均質変形の解明

研究課題名(英文) Investigation on the neutron irradiation properties and inhomogeneous deformation of dissimilar-metals weld joints between low-activation ferritic steel and stainless steel

研究代表者

長坂 琢也 (NAGASAKA, Takuya)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：40311203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：低放射化フェライト鋼F82Hと316Lステンレス鋼の異材溶接継手を作製し、295℃、0.1 dpaの中性子照射を行った。照射後の異材溶接継手は衝撃試験で十分な延性を示し、実験炉や原型炉の条件で使用可能であることが示された。試験では、316L鋼母材が大きく変形し、溶接部とF82Hの変形は抑制された。この不均一変形を有限要素法で解析し、接合強度は1540 MPa以上であると推定できた。計算ではSS316Lの変形は比較的よく再現できたが、F82Hの変形の誤差は大きかった。今後の課題としては、計算精度向上のため試験片のすべりを計算に取り入れることがあげられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低放射化フェライト鋼とステンレス鋼の異材接合は核融合炉を製作するうえで必須の技術であり、本研究では初めて異材溶接継手の中性子照射後機械特性を明らかにし、実験炉及び原型炉条件で継手が使用可能であることを示した。さらに、不均質な変形をする異材溶接材において、実際の照射データに基づいた精度の高い変形シミュレーションを行い、それを実験と比較して検証した。これにより、実験では求められない試験片内部の応力分布が明らかとなり、溶接金属が試験中に経験した最大応力から中性子照射後の接合強度を推定できた。

研究成果の概要(英文)：Dissimilar-metals joints between F82H reduced-activation ferritic steel and 316L stainless steel were fabricated and neutron-irradiated up to 0.1 dpa at 295°C. The irradiated joint exhibited good ductility in the post-irradiation impact tests, and proved that they can work under experimental reactor and demonstration reactor conditions. In the impact tests, the base metal of 316L steel was deformed more, and thus the deformation of the weld metal and F82H was suppressed. Finite element method simulations analyzed this inhomogeneous deformation behavior and estimate the bonding strength as 1540 MPa or more. The calculation simulated well the deformation of 316L, however the error for F82H was relatively considerable. Based on these results, the future investigations are recognized as improvement of the calculations with input of the sliding process of the specimens.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：低放射化材料 機械特性 異材接合 衝撃試験 中性子照射脆化 核融合炉ブランケット 有限要素法
解析 電子ビーム溶接

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

低放射化フェライト鋼の開発は ITER 計画におけるブランケットモジュール (ITER-TBM) 試験及び、幅広いアプローチ (BA) 活動の原型炉 R&D において進展しており、母材単体としての完成度が高まりつつある。しかし、そのフェライト鋼製ブランケットをステンレス鋼製の炉外機器に接続するための異材溶接の研究は遅れており、特に中性子照射データが無い。異材溶接継手の接合部は、二つの母材の混合物、すなわち新しい合金であり、母材とは異なる全く新しい材料となっている。例えば、金属間化合物の生成によって照射前後の機械特性が格段に悪くなる場合がある。そこで中性子照射材の機械特性評価が急務である。

申請者は、平成 22~24 年度の科研費基盤研究(C)「核融合炉低放射化材料異種溶接継手の腐食と耐照射性」において核融合炉用フェライト鋼 F82H と原子炉材料である 316L ステンレス鋼 (SS316L) の異材溶接継手を試作した。その結果、溶接金属及び熱影響部とも、母材よりも大きな照射硬化は起こらなかった。これは、溶接部の照射脆化が問題とならないことを示唆するが、中性子照射試験によって確かめる必要がある。本研究は先の基盤研究を発展させるものである。

本研究に先立ち、非照射の F82H 母材同士の溶接継手及び、F82H と SS316L の異材溶接継手に対しシャルピー衝撃試験を行った。衝撃試験とは、V 型ノッチの反対側中央にハンマーで衝撃荷重 (ハンマー速度 5 m/s) を与え、ノッチ先端に亀裂を発生・伸展させて、破壊するのに要するエネルギーを求めるものである。F82H 母材試験片ではノッチのある中央部以外の変形が小さく、応力集中によって亀裂が発生するのに対し、異材溶接材では SS316L の部分の変形が大きいために応力集中が緩和されて結果的に亀裂が発生しなかった。このときの吸収エネルギーを求めたところ、F82H 母材 (56 J/cm^2) よりも異材溶接材 (72 J/cm^2) のほうが大きかった。F82H 母材では亀裂が発生しているので、求めた吸収エネルギーは破壊に要するエネルギーを反映しているが、異材溶接材では破壊ではなく、単に SS316L の部分に変形するのに要したエネルギーを示している。つまり、破壊に要するエネルギー (破壊への耐性) を評価しているわけではないということになる。異材溶接材では、より軟らかい部分が優先的に変形して破壊を抑制することになる。このこと自体は構造部材として好ましいことであるが、これはこの試験片の拘束条件・応力集中条件でのみ成り立ち、実際の継手が同じように変形するとは限らない。そこで、実際の異材溶接継手の破壊挙動を予測するには、従来のように衝撃エネルギーを求めるだけでは不十分で、別の評価が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下のとおりである。

- (1) 低放射化フェライト鋼 F82H と 316L ステンレス鋼の異材溶接材について、ITER-TBM と同様条件の中性子照射後中性子照射後機械特性を初めて明らかにし、異材溶接材が ITER で使用可能であることを示す。
- (2) 不均質な変形をする異材溶接材において、実際の照射後機械特性データに基づいた精度の高い変形シミュレーションを行い、それを実験で検証する。
- (3) これにより、実験だけでは求められない試験片内部の応力分布、さらに溶接金属が耐えた最大応力を評価する。

3. 研究の方法

上記の(1)~(3)の目的に対応させて、以下に研究方法を述べる。

- (1) 低放射化フェライト鋼 F82H と 316L ステンレス鋼の異材接合材について、引張試験、曲げ試験、衝撃試験を中性子照射後に行う。これにより、構造材料に必要なとされる照射データを取得する。中性子照射条件は ITER-TBM 条件に匹敵する 300°C 、 0.1 dpa 程度とする。
- (2) 衝撃試験については、上記に示した異材溶接材特有の問題で亀裂が発生せず破壊の評価ができない場合がある。そこで、引張試験で得られた照射データから有限要素法計算で衝撃試験片の変形を再現し、応力分布を求める。荷重変位曲線と変形後試験片形状について、計算が実験と一致することを検証する。
- (3) 計算で得られた応力分布から、各部が破壊せずに耐えた応力がわかる。ノッチ先端近傍で応力が最大となり、これが溶接金属が耐えた最大応力となる。

4. 研究成果

電子ビーム溶接で核融合炉用フェライト鋼 F82H と 316L ステンレス鋼 (SS316L) の異材溶接継手を作製した。母材の厚さは 7 mm である。溶接条件は先の科研費研究で採用されたものとした。すなわち、突合せ位置に電子ビームを照射すると高 Cr マルテンサイト相の生成によって溶接金属が硬化し、接合部が脆化するので、これを避けるために、ビーム照射位置を SS316L 側に 0.2 mm シフトさせた。ただし、ビーム照射位置をシフトさせても F82H 側の熱影響部に硬化相が現れる。これも先の研究で、 $680^\circ\text{C} \times 1 \text{ h}$ の溶接後熱処理で母材と同程度まで軟化させられることが分かっており、本研究ではこれを標準的な溶接後熱処理条件として採用した。

東北大学金属材料研究所量子エネルギー材料科学国際研究センターの国際共同利用を利用し、ベルギーの BR-II にて 295°C 、 $5.5 \sim 5.7 \times 10^{23} \text{ n m}^{-2}$ (0.1 dpa 相当) の中性子照射を行った。

図 1 に中性子照射後の異材溶接材の断面硬さ分布を示す。CJ01, CJ02, CH01 とともに同じ異材

接合材から切り出し同じ PWHT をした試験片である。F82H 側の HAZ の領域で著しく硬化している領域が観察された。硬化領域は 50 μm 程度の大きさで島状であった。室温で引張試験を行ったところ、破断位置は SS316L 母材であり継手として十分な接合強度を有することを確認した。図 2 に中性子照射後の衝撃吸収エネルギーを示す。316L 母材 (SS316L-BM) 及び異材溶接材の溶接金属 (WM) の衝撃吸収エネルギーは全ての試験温度で大きく優れた低温延性を示した。硬化領域が観察された F82H 側の熱影響部 (F82H-HAZ) では、試験温度の低下とともに比較的急激に吸収エネルギーが低下した。これは延性-脆性遷移と呼ばれるものであるが、それが起こる延性-脆性遷移温度 (DBTT) は -100°C 以下で室温より十分低く、さらに F82H 母材のそれ (0°C 付近) よりも低いので、継手として十分な延性を持つことが示された。上記の著しい硬化は、その体積が極めて小さいために衝撃試験における破壊の促進は起こらなかったと考えられる。

核融合炉でこの異材接合材が使用されるのはブランケットの背面であり、照射量は真空容器及び超電導コイルのそれと同様である。実験炉 ITER では 0.027 dpa [1]、原型炉 DEMO では $1 \times 10^{23} \text{ n m}^{-2}$ [2] と見込まれている。今回の照射量 0.1 dp 及び $5.6 \times 10^{23} \text{ n m}^{-2}$ はこれらよりも大きく、ITER 及び DEMO の条件で異材接合継手が使用可能であることが示された。

上記の著しい硬化の原因のひとつとして考えられるのは、溶接の加熱で分解、固溶した炭化物が照射誘起で微細高密度に再析出することである。PWHT の温度は F82H 母材の過時効による軟化、すなわち強度低下を防ぐために低く設定したが、これにより焼き戻し中の炭化物の再析出が不十分で、母相に残る固溶炭素量が多くなり照射誘起析出を促進したと考えられる。PWHT 温度を系統的に変化させた実験により、F82H 母材の標準的な焼き戻し条件である $750^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ h}$ であれば溶接による HAZ の硬化を完全に回復させられるが、一方で母材は軟化することが明らかになった。より高温あるいは高照射量で異材接合継手を使用する場合には、上記の著しい照射硬化領域が拡大し問題となる可能性がある。その場合には母材の強度と照射後の HAZ の延性はトレードオフの関係となり、その最適化が必要となる。今後は硬化領域の微細組織観察をして硬化の原因を特定することと、高温での PWHT が照射硬化の軽減に有効であることを実際の中性子照射で実証することが課題である。

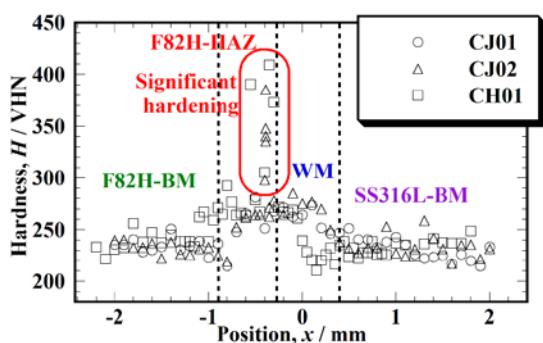


図 1 中性子照射後の溶接部の硬さ

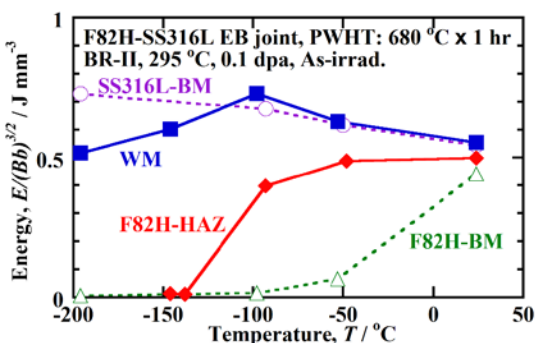


図 2 中性子照射後の衝撃吸収エネルギー

次に、衝撃後の試験片形状を走査型電子顕微鏡にて測定した。SS316L 母材部分が F82H よりも大きく変形していることが分かった。一方、ANSYS を用いて衝撃試験における異材接合材の変形シミュレーションを行った。このとき、F82H 及び SS316L 母材の真応力-真歪曲線については、中性子照射後の室温引張試験より降伏応力と加工硬化指数を直接求め、HAZ 及び溶接金属では硬さより降伏応力を推定し、加工硬化指数は HAZ ではそれぞれの母材と同じ、さらに溶接金属は SS316L と同じオーステナイト相であることから、SS316L と同じと仮定し、計算への入力データとした。

計算の結果、最大引張応力は溶接金属内で発生し、その大きさは 1540 MPa であった。これは衝撃試験で溶接金属が経験した最大の引張応力であり、このことから異材接合材の接合強度は 1540 MPa 以上と推定できる。計算で求められた試験片形状と、走査型電子顕微鏡観察で求めた試験片形状を比較した。衝撃試験における支点の位置と、衝撃試験片のノッチの肩の位置の距離の変化から、SS316L と F82H における平均歪を求めた。平均の歪はそれぞれ 6.8% 、 0.88% であった。一方、走査型電子顕微鏡観察ではそれぞれ 6.4% 、 2.0% であった。SS316L では計算で実験をよく再現できたが、F82H では誤差が大きくなった。これは、計算の収束のために F82H 側の支点を固定したことによるものと考えられる。すなわち、ここでは F82H と治具の間のすべりが無いことを仮定しており、試験片がその支点を中心に回転するので SS316L の変形を計算上大きく、F82H の変形を小さく評価した可能性がある。より正確なシミュレーションには、支点におけるすべりと試験片の回転を取り入れる必要がある。

<引用文献>

- [1] G. Kalinin et al., J. Nucl. Mater. 233-237 (1996) 9-16.
- [2] L.A. El-Guebaly, Fusion Eng. Des. 80 (2006) 99-110.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

① Takuya Nagasaka, Masami Ando, Hiroyasu Tanigawa, Teruya Tanaka, Takeo Muroga, Akio Sagara, Tensile properties of F82H steel after aging at 400 to 650°C for 1,000 to 30,000 h, Fusion Engineering and Design, 査読あり, Vol. 124, 2017, pp. 1011-1014.

② Haiying Fu, Takuya Nagasaka, Masanori Yamazaki, Takeshi Toyama, Wenhai Guan, Shuhe
Nogami, Hisashi Serizawa, Hiroyasu Tanigawa, Deformation of dissimilar-metals joint between F82H and 316L in impact tests after neutron irradiation, Fusion Engineering and Design, 査読あり, Vol. 124, 2017, pp. 1063-1067.

③ Haiying Fu, Takuya Nagasaka, Nobuyuki Kometani, Takeo Muroga, Wenhai Guan, Shuhe
Nogami, Kiyohiro Yabuuchi, Takuya Iwata, Akira Hasegawa, Masanori Yamazaki, Sho Kano, Yuhki Satoh, Hiroaki Abe, Hiroyasu Tanigawa, Effect of post-weld heat treatment and neutron irradiation on a dissimilar-joint between F82H steel and 316L stainless, Fusion Engineering and Design, 査読あり, Vols. 98-99, 2015, pp. 1968-1972.

④ Takuya Nagasaka, Hideo Sakasegawa, Hiroyasu Tanigawa, Masami Ando, Teruya Tanaka, Takeo Muroga, Akio Sagara, Tensile properties of F82H steel after aging at 400-650°C for 100,000 h, Fusion Engineering and Design, 査読あり, Vols. 98-99, 2015, pp. 2046-2049.

〔学会発表〕(計 11 件)

① Takuya Nagasaka, Masami Ando, Hiroyasu Tanigawa, Hideo Sakasegawa, Takeo Muroga, Effects of specimen thickness on high-temperature tensile and creep properties of F82H reduced-activation ferritic/martensitic steel, 30th Symposium on Fusion Technology, 2018 年.

② Takuya Nagasaka, Masami Ando, Hiroyasu Tanigawa, Hideo Sakasegawa, Teruya Tanaka, Takeo Muroga, Akio Sagara, Specimen size effect on the tensile and creep properties of F82H reduced-activation ferritic steel at elevated temperature, 18th International Conference on Fusion Reactor Materials, 2017 年.

③ 長坂琢也、付海英、山崎正徳、外山健、管文海、野上修平、芹澤久、谷川博康、中性子照射した核融合炉用異材溶接継手における不均一変形の解析、日本原子力学会 2017 年秋の年会、2017 年.

④ 長坂琢也、付海英、山崎正徳、外山健、管文海、野上修平、芹澤久、谷川博康、核融合炉用低放射化フェライト鋼 F82H と 316L ステンレス鋼の異材接合材の試作と中性子照射後の機械特性評価、金属学会 2017 年春期講演大会、2017 年.

⑤ Haiying Fu, Takuya Nagasaka, Masanori Yamazaki, Takeshi Toyama, Wenhai Guan, Shuhe
Nogami, Hisashi Serizawa, Hiroyasu Tanigawa, Deformation of dissimilar-metals joint between F82H and 316L in impact tests after neutron irradiation, 29th Symposium on Fusion Technology, 2016 年.

⑥ Takuya Nagasaka, Masami Ando, Hiroyasu Tanigawa, Hideo Sakasegawa, Teruya Tanaka, Akio Sagara, Tensile properties of F82H steel after aging at 400 to 650°C for 30,000 h, 29th Symposium on Fusion Technology, 2016 年.

⑦ 付海英、長坂琢也、山崎正徳、外山健、管文海、野上修平、芹澤久、谷川博康、Bonding properties of the joint between F82H and 316L estimated by Charpy impact tests and finite element method simulation、第 11 回核融合エネルギー連合講演会、2016 年.

⑧ 長坂琢也、付海英、山崎正徳、外山健、管文海、野上修平、芹澤久、谷川博康、中性子照射した低放射化フェライト鋼-ステンレス鋼異材接合材の衝撃特性と変形挙動、プラズマ・核融合学会第 33 回年会、2016 年.

⑨ Haiying Fu, Takuya Nagasaka, Nobuyuki Kometani, Takeo Muroga, Wenhai Guan, Shuhe
Nogami, Masahiko Hatakeyama, Masanori Yamazaki, Impact properties of dissimilar joint between F82H low-activation ferritic steel and type 316L stainless, steel after neutron irradiation, 28th Symposium on Fusion Technology, 2014 年.

⑩ Takuya Nagasaka, Hideo Sakasegawa, Hiroyasu Tanigawa, Masami Ando, Teruya Tanaka, Takeo Muroga, Akio Sagara, Tensile properties of F82H steel after aging at 673 to 923 K for 100 kh, 28th Symposium on Fusion Technology, 2014 年.

⑪ Shuhe
Nogami, Hisashi Serizawa, Akira Hasegawa, Takuya Nagasaka, Makoto Fukuda, Kiyohiro Yabuuchi, Mechanical properties of dissimilar metal weld joint of F82H and SUS316L steels, 21th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy, 2014 年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

無し。

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：野上 修平

ローマ字氏名：NOGAMI, Shuhei

所属研究機関名：東北大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00431528

研究分担者氏名：四竈 樹男

ローマ字氏名：SHIKAMA, Tatsuo

所属研究機関名：八戸工業大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：30196365

研究分担者氏名：申 晶潔

ローマ字氏名：SHEN, Jingjie

所属研究機関名：核融合科学研究所

部局名：ヘリカル研究部

職名：特任研究員

研究者番号（8桁）：80824747

(2) 研究協力者

無し。

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。