

# 低放射化フェライト鋼 F82H に対するレーザー溶接の適用性に関する研究

## Study on Applicability of Laser Beam Welding for Reduced Activation Ferritic Steel F82H

|                 |       |                   |        |
|-----------------|-------|-------------------|--------|
| 大阪大学            | 小森 駿介 | Shunsuke KOMORI   |        |
| 大阪大学            | 荻原 寛之 | Hiroyuki OGIWARA  | Member |
| 大阪大学            | 才田 一幸 | Kazuyuki SAIDA    | Member |
| 大阪大学            | 芹澤 久  | Hisashi SERIZAWA  |        |
| 日本原子力研究<br>開発機構 | 谷川 博康 | Hiroyasu TANIGAWA |        |
| 日本原子力研究<br>開発機構 | 廣瀬 貴規 | Takanori HIROSE   |        |
| 大阪大学            | 森 裕章  | Hiroaki MORI      | Member |

### Abstract

The fusion reactor is expected as a next-generation electric source to resolve electricity shortage. The reduced activation steel F82H has been considering as the structural material for blanket modules set in fusion reactors. In the case of welding for the steel, it's demanded to minimize the heat affected zone (HAZ). Therefore, laser beam welding (LBW) has been considering as one of welding methods to construct the modules.

The objectives of this investigation are to clarify the critical condition on laser beam welding (LBW) method without defects and the conditions of post weld heat treatment (PWHT) for welded joints of reduced activation ferritic steels F82H.

The effect of LBW conditions on weld penetration behavior were ascertained by observation of cross sectional view in welds. The applicable PWHT condition is confirmed by value of fracture toughness and ductile-brittle transition temperature (DBTT) measured by Charpy impact test.

**Keywords:** Fusion reactor , Reduced activation steel F82H, Charpy impact test, Post weld heat treatment (PWHT), Ductile-brittle transition temperature (DBTT)

## 1. 緒言

近年、エネルギー需要の増加や、原発事故などの問題から、新たなエネルギー源の確保が求められている。

そこで、次世代のエネルギー源として期待されているのが、核融合炉である。核融合炉は燃料である、重水素、トリチウムが比較的容易に確保できる、高レベル放射性廃棄物を排出しない、万が一のトラブル時にも従来の原子力発電のような連鎖反応が生じない、といった利点を持っている。

核融合炉において、核融合によって発生する中性子照射を熱・電気エネルギーに変換する役割を担っているのが、ブランケットモジュールである。

ブランケットモジュールの構造材料に求められる特徴を以下に示す<sup>[1]</sup>。

1. 高エネルギー中性子照射環境において耐照射性を有する
2. 使用温度で十分な強度を有する
3. 高い熱流束に耐える
4. 低誘導放射化特性を有する

このような要求に対して、現在、実証段階にあり、最も有力視されているのが、低放射化フェライト鋼 F82H である<sup>[2]</sup>。

しかし、核融合炉の製造において、F82H 鋼は従来の耐熱鋼とは異なる複雑な構造用材料として利用されるため、従来の接合技術の高度化が必要となる<sup>[3]</sup>。

F82H 鋼を構造材料として用いる際の主な問題点として、溶接部の熱影響部の軟化が挙げられる。溶

接部の強度不均一は、中性子照射下によって、強調されたため、解決策として、HAZ部の狭小化が求められる<sup>[4]</sup>。

以上の観点から、高品質・高出力な熱源として、ファイバーレーザを用いた溶接が検討されている。

ファイバーレーザを用いることで、高密度エネルギーによる溶接が実現し、TIG溶接と比較して、溶接部の狭小化が可能となる。加えて、より深い溶け込みが実現し、板厚の大きな部材に対して、従来は複数パスで溶接していたが、1パスで貫通ビードを得ることに成功している<sup>[3]</sup>。

しかし、同鋼の溶接条件については、未だ明確になつたとは言い難く、特に実施工で高密度熱源を用いた溶接については、十分な検討がなされていない。そこで、本研究では、ブランケットモジュール材料の候補材料に挙げられている低放射化フェライト鋼F82Hのファイバーレーザ溶接部の健全性を担保すべく、複数の条件で溶接した貫通ビードの観察により、健全な溶接部を実現するための溶接条件を明らかにする。さらに、シャルピー衝撃試験によって、溶接部が十分なじん性を確保するための、適切な溶接後熱処理(PWHT)の条件を解明することを試みた。

## 2. 供試材料および実験方法

本研究では、供試材料として、低放射化フェライト鋼F82H(Fe-8Cr-2W-0.2V-0.04Ta-0.1C)を用いた。

溶接には、定格出力4kW、ビーム径0.2mmのファイバーレーザを用いた。板厚が3,4,5mmの各試験片に対し、溶接速度を2,3,4,5,6,7 m/minと変化させて溶接を行った。なお、レーザの焦点位置は試験片表面で固定した。溶接後の継手に対し、720℃×1h, 680℃×1hのPWHTを施した。それらに、As welded

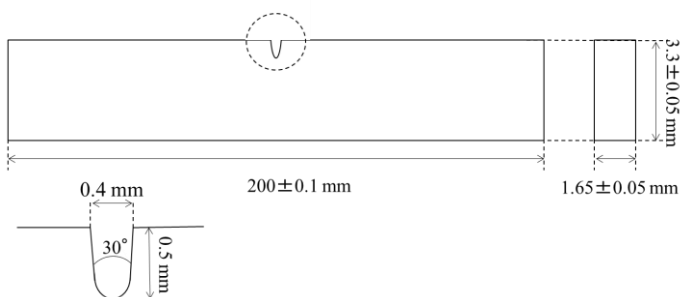


Fig.1 Schematic illustration of t/2-1/3CVN specimen

材を加えた3種類の溶接継手からt/2-1/3CVN(Charpy-V-notch)試験片を作製し、軽装化シャルピー衝撃試験により、溶接部のじん性評価を行った。試験片の形状をFig.1に示す。試験後、試験片の断面を観察し、割れの伝播経路を確認した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 溶接条件の最適化溶接欠陥の発生挙動におよぼすレーザ照射条件の影響

各条件での溶接部の欠陥の有無をTable.1に示す。

板厚3mmの場合、各溶接速度で貫通ビードを得ることができた。溶接速度3.4 m/min以外の条件では、ポロシティの発生が見られ、溶接速度を3.4 m/minとし、溶接を行うことが適正だといえる。板厚4mmの場合、溶接速度が6 m/minでは、貫通ビードを得ることはできなかった。さらに溶接速度3.4 m/min以外の条件ではポロシティの発生を確認したため、溶接速度を3.4 m/minとすることが、適正な溶接条件であるといえる。板厚5mmの場合、溶接速度4 m/min以上の速度では、貫通ビードを得ることはできなかった。さらに、今回試みた溶接条件では、各溶接速度でポロシティが発生した。そこで本実験においては、板厚を3.4 mm、溶接速度を3.4 m/minとすることで、健全な溶接部を実現できるといえる。

板厚4mmの場合の溶接部の断面を、Fig.2に示す。溶接速度が上昇することによって、単位長さあたりの入熱量が減少し、溶け込み長さやビード幅が減少していることがわかる。

Table.1 Summary of microstructure in cross section of laser beam welds

|                |   | Welding Speed (m/min) |   |   |   |   |   |
|----------------|---|-----------------------|---|---|---|---|---|
|                |   | 2                     | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Thickness (mm) | 3 | ×                     | ○ | ○ | × | × | × |
|                | 4 | ×                     | ○ | ○ | × | × | × |
|                | 5 | ×                     | × | × | × | × | × |

○ porosity free

× porosity

not full penetration

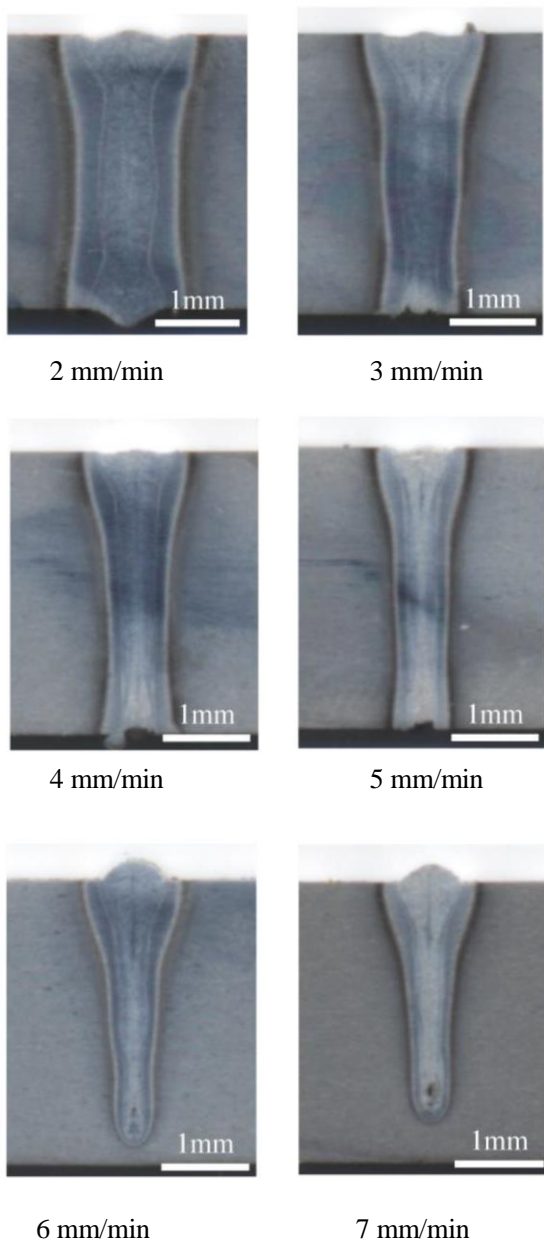


Fig.2 Cross sectional microstructure in the weld of F82H after laser beam welding

### 3.2 溶接継手の靱性におよぼす溶接後熱処理の影響

2条件の溶接後熱処理 720 °C×1h ,680 °C×1h を行った試験片と As welded 材を用いたシャルピー衝撃試験を行った。試験片の断面を Fig.3 に示す。割れが、溶接金属中を通っていることがわかる。これにより、本試験によって、溶接金属のじん性が適正に評価されているものと考えられる。

次に、シャルピー衝撃試験片の破面を Fig. 4 に示す。吸収エネルギーの大きい（上部棚）の試験片破面からは、延性破壊特有の破面が見られる。一方、吸収エネルギーの小さい（下部棚）試験片破面からは脆性破壊が発生したことがわかる。

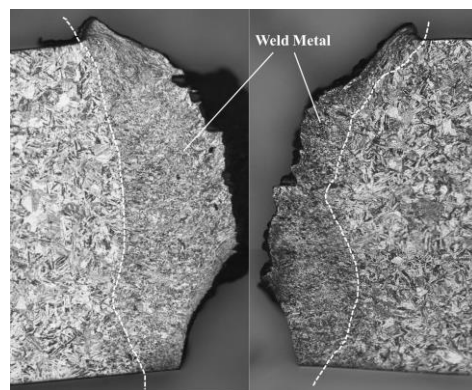


Fig.3 Cross sectional view of fracture specimen after Charpy impact test

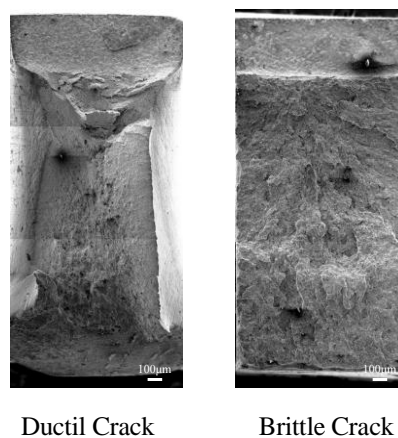


Fig.4 Fracture surface of the specimen after Charpy impact test

試験結果を Fig.5 に示す。この図より、As welded 材に比べて、PWHT 材はいずれも上部棚エネルギーが大幅に増大していることがわかる。さらに、上部棚および下部棚エネルギーの測定結果を基に、式(1)を用いて DBTT の算出を試みた<sup>[5]</sup>。

$$E(T) = \frac{USE + LSE}{2} + \left( \frac{USE + LSE}{2} \right) \tanh \left( \frac{T - DBTT}{r} \right) \dots \dots (1)$$

ここで、E は試験片の吸収エネルギー、LSE は下部棚エネルギー、USE は上部棚エネルギー、 $r$  はフィッティングパラメータである。

計算結果より As welded 材、 $680^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$ 、 $720^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$  熱処理材の DBTT はそれぞれ、 $-28.2^{\circ}\text{C}$ 、 $-52.4^{\circ}\text{C}$ 、 $-85.4^{\circ}\text{C}$  と算出された。

以上のことから、PWHT を施すことによって、As welded 材と比較すると、大きく靱性を回復することが可能となったといえるとともに、加熱温度が  $680^{\circ}\text{C}$  よりも  $720^{\circ}\text{C}$  においてその傾向がより顕著に認められることが明らかとなった。

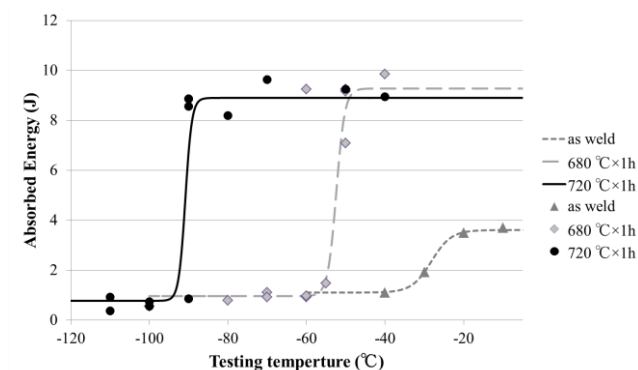


Fig.5 Relationship between testing temperature and absorbed energy (Result of Charpy impact test)

#### 4. 結言

本研究において、低放射化フェライト鋼 F82H に対するレーザ溶接の適用性について検討した結果、定格出力が 4 kw のファイバーレーザを用いた場合という限定的な条件範囲内ではあるものの適切なレーザ溶接条件（板厚 3,4 mm、出力 4 kw、ビーム径 0.2 mm、焦点距離 0 mm、溶接速度 3,4 m/min）を設定することにより、溶接欠陥の無い良好な継手が得られることがわかった。

加えて、As welded 材と  $720^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$ 、 $680^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$  の溶接後熱処理（PWHT）材に対するシャルピー衝撃試験の結果から、As welded 材に比べて PWHT 材では上部棚エネルギーが大幅に増大することが明らかとなった。さらに、延性脆性遷移温度（DBTT）を比較した結果、As welded 材と比較して PWHT 材は、いずれも DBTT が低温側にシフトすることがわかったとともに、その傾向は  $720^{\circ}\text{C}$  で熱処理した場合において、より顕著に認められることが明らかとなった。

#### 5. 参考文献

- [1] 井上多加志、栗原研一、“核融合炉の概要 そのも核融合炉とは”、日本原子力学会誌、Vol.46、No.12、(2004)、pp27-34
- [2] 長谷川晃、土屋邦彦、石塚悦男、“核融合炉を成立させる最適な材料”、日本原子力学会誌、Vol.47、No.8、(2005)、pp20-28
- [3] 谷川博康、酒瀬川英雄、芝清之、廣瀬貴規、“低放射化フェライト鋼製造技術の現状と課題”、プラズマ・核融合学会誌、(4)(2011)、pp172-179
- [4] E.Wakai , M.Ando , S.Matsukawa , T.Taguchi , T.Yamamoto , H.Tomita and F.Takada, “EFFECT OF INITIAL HEAT TREATMENT ON DBTT OF F82H STEEL IRRADIATED BY NEUTRONS”、Fusion Sci.Technol、Vol47、No4、pp856-860、(2005)
- [5] 土肥謙次、曾根田直樹、恩地健雄、鳴井實、松井秀樹、“軽水炉圧力容器のサブサイズシャルピー衝撃試験（その1）”、電力中央研究所報告書、(1999)