

X線吸収を用いた原子炉压力容器鋼溶接熱影響部の微細構造分析 Microstructure analysis using X-ray absorption on heat-affected zone of reactor pressure vessel steel

岩田景子*, 高見澤悠, 河侑成, 岡本芳浩, 下山巖, 本田充紀, 埜悟史, 西山裕孝

日本原子力研究開発機構,

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

Keiko IWATA*, Hisashi TAKAMIZAWA, Yoosung HA, Yoshihiro OKAMOTO, Iwao SHIMOYAMA, Mitsunori HONDA, Satoshi HANAWA and Yutaka NISHIYAMA

Japan Atomic Energy Agency,

2-4 Shirakata, Tokai, 319-1195, Japan

1 はじめに

原子炉压力容器内表面には腐食を抑制するためステンレスオーバーレイクラッド(以下、クラッド)が肉盛溶接され、クラッド直下には入熱により熱影響部(以下、Heat Affected Zone: HAZ)が形成される。HAZは最高到達温度の違いにより、結晶粒径や組織分布が異なり、最高到達温度が1000°C程度で粗粒HAZ(Corse Grain HAZ: CGHAZ), 825°C程度で細粒HAZ(Fine Grain HAZ: FGHAZ)が形成される。さらに、複数回の熱影響が加わった領域では、二次組織の相分布、結晶粒の大きさ、析出物の分布などが異なり、機械的特性にも影響する。組織や機械的特性の違いは照射による材料劣化(照射脆化)にも影響することから、組織毎に微細構造を把握することが重要である。

本研究では、原子炉压力容器鋼のクラッド直下の熱履歴によるHAZ組織の違いについて、炭化物分布に着目し、形成元素のひとつであるMoの周辺微細構造を分析した。測定では、微小領域測定が可能なキャピラリレンズを装着することで μm オーダーの領域を分析した。

2 試料

試料は肉盛溶接された低合金鋼のクラッド下約10mmの範囲に形成される溶接熱影響部から試験片(7mm×5mm×1mm)を採取した(図1(a))。低合金鋼の組成を表1に示す。有限要素法解析により推測されるHAZ内の組織分布を図1(b)に色分けして示す。解析結果から複数回の入熱により形成される二次組織(Inter Critically CGHAZ: ICCGHAZ, Sub Critically CGHAZ: SCCGHAZ, Sub Critically FGHAZ: SCFGHAZ)とFGHAZが複雑に分布しており、粒径の小さい領域が母材側に位置することが示されている。

3 実験

放射光XAFS測定はKEK-PFのBL-27Bにて実施した。X線の入射角が45度となるように試料を設

置し、蛍光X線を7素子ゲルマニウム検出器で測定した。HAZ組織毎の狭い範囲におけるデータを取得するため、キャピラリレンズを使用し、入射X線の強度をほとんど落とすことなく200 μm 程度まで集光した。有限要素解析により推測したHAZ内の組織分布から領域毎の測定箇所を5点選択し、Mo K吸収端(20003 eV)について測定した。取得したEXAFSスペクトルの解析にはWinXAS 3.2を使用した。

表1 低合金鋼の化学組成(wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.18	0.29	1.31	0.015	0.009
Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
0.16	0.67	0.17	0.52	Bal.

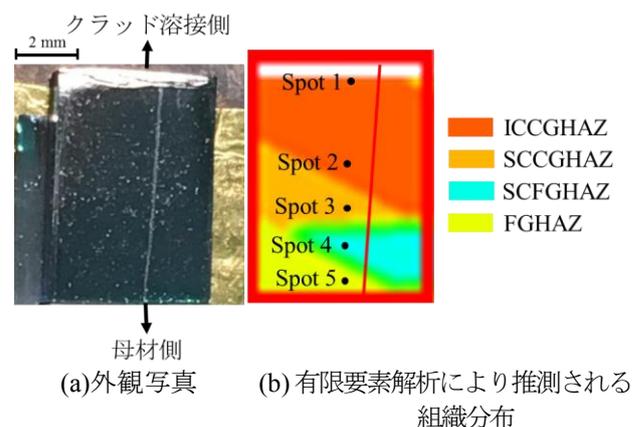


図1 クラッド下HAZ領域から採取した試験片

4 結果および考察

HAZ全体にX線を照射して測定した結果及びキャピラリレンズで図1(b)中のSpot 1~5を測定した結果を図2に示す。比較のためにXAFS理論計算ソフトであるFEFFを用い、Mo原子がFe中に固溶した状態を再現するbcc型Feの中心原子をMoに置換したモデル(以下、bcc Fe-Mo)とHAZ内で生成が

確認されている炭化物種^[1]の一つである Mo₂C モデルの理論フーリエ変換スペクトルを併記した。

HAZ 全体を測定したスペクトルは bcc Fe-Mo の理論フーリエスペクトルと比較すると、Mo-Fe 結合に対応する第一ピーク位置の変化は見られないが 2.8 Å 付近に新たなピークが出現し、同様のピークが Spot 3~5 でも確認される。さらに Spot 1~5 では CG 領域から FG 領域に移行するにつれ第一ピークの高さの減少が認められ、配位数減少や結晶構造の乱れが生じていることが示唆される。また Spot 4 の 1.2 Å 付近におけるなだらかな肩は Mo₂C の理論フーリエ変換スペクトルの Mo-C 結合と bcc 構造の Fe-Mo 結合の足し合わせであると考えられ、Spot 5 でも同位置にピークが確認できることから、Mo₂C の生成が示唆され、溶接熱により生成した Mo₂C は FG 領域に比較的多く分布することが考えられる。一方で Spot 4 及び Spot 5 の 2.8 Å 付近で確認できる新たなピークは Mo₂C 理論フーリエ変換スペクトルの第二ピークと比較するとピーク位置は右側に位置するものの、Mo₂C の Mo-Mo 結合であると推測される。また、本研究で実施したキャピラリレンズを用いた微小領域測定では HAZ 全体を測定したスペクトルでは得られなかった Mo₂C の Mo-C 結合に対応するピークが確認できたことから、微小領域測定の有用性を示すことができた。

4 まとめ

原子炉圧力容器鋼 HAZ の複雑に分布する組織について、領域毎の微細構造を調査するため、微小領域測定が可能なキャピラリレンズを用いた EXAFS 測定を実施した。HAZ 内に析出する炭化物の構成元素の一つである Mo について HAZ 全体で取得したスペクトル及び領域毎に取得したスペクトルと FEFF で得られた理論フーリエ変換スペクトルを比較した結果、Mo₂C が FG 領域に比較的多く存在することが示唆された。

謝辞

本研究は、高エネルギー加速器研究機構放射光共同利用実験課題 2016G118 のもとに行われました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

[1] 日本原子力研究開発機構, 平成 21 年度高経年化対策強化基盤整備事業 成果報告書 (2010)

* iwata.keiko@jaea.go.jp

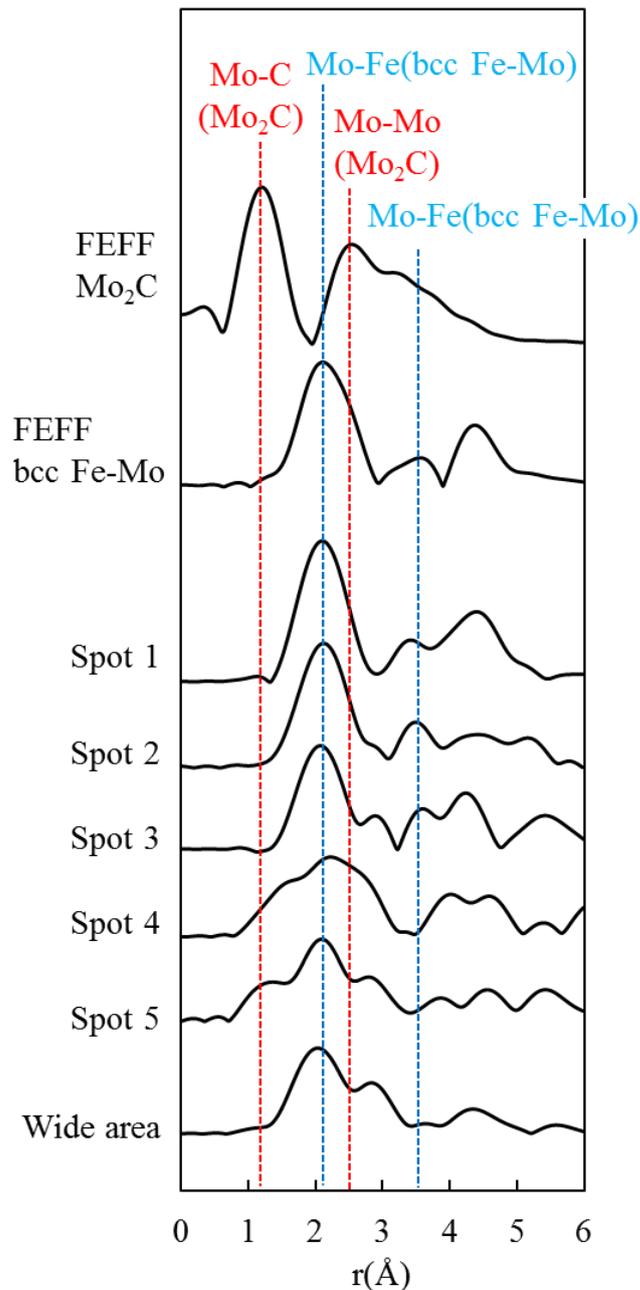


図2 広範囲での測定結果 (wide area), 微小領域での測定結果 (Spot 1-5)及び FEFF による理論フーリエ変換スペクトル