

クリープ強度強化フェライト鋼溶接熱影響部における 炭化物固溶挙動のその場観察

In-situ Observation of Carbide Dissolution Behavior in Heat Affected Zone of Weld in Creep Strength-enhanced Ferritic Steel

Yu Xinghua^a, 寺崎 秀紀^b, Babu Sudarsanam^a, 小溝 裕一^b,
Yu Xinghua^a, Hidenori Terasaki^b, Babu Sudarsanam^a, Yu-ichi Komizo^b,

^aオハイオ州立大学, ^b大阪大学接合科学研究所,
^aOhio State University, ^bJWRI, Osaka University,

火力発電用フェライト鋼の溶接熱影響部における炭化物固溶挙動を直接追跡する目的で、加熱炉により溶接熱影響部の熱サイクルを再現し、放射光 X 線回折法によるその場観察を行った。微量炭化物の時分割 X 線回折測定に成功し、最高温度 1000°C となる熱サイクル下で、 $M_{23}C_6$ が加熱中に固溶する挙動を時系列に捉えた。さらに一部の炭化物はその相量を全く変化させないことも直接観察に基づき示した。

キーワード： フェライト鋼、X 線回折、炭化物固溶、溶接熱影響部、その場観察

背景と研究目的：

世界的なエネルギー問題を背景に、火力発電のニーズが高まっている。さらに火力発電運転中のエネルギー効率を向上させる取り組みが行われており、その基本原理は高温での運転となる。高温での運転には、それを支える鉄鋼材料が必要であり、クリープ強度を微細炭化物の分散により強化させたフェライト鋼(CSEF 鋼: creep strength-enhanced ferritic steel)の活用[1]が始まっている。例えばその成分はクロム元素の含有量を高めたものである。しかしながら、このような CSEF 鋼を用いたプラントの運転が始まってから数年で、特に“溶接熱影響部”で割れ等の欠陥が報告されている。溶接熱影響部は溶接中に熱の影響を受けたため、当初の鉄鋼材料デザインとは異なった組織が形成される可能性がある場所であり、想定外の欠陥が発現することがある。しかしながら、溶接構造物を製作する上で、熱影響部の存在は不可避である。そのため溶接熱サイクル下の組織変化を知ることは、溶接構造物の安全を確保するために大変重要な共通課題となる。本研究では、火力発電用フェライト鋼を溶接したときの、炭化物の析出・固溶挙動を動的に把握し、炭化物形成シミュレーションモデルのキャリブレーションデータとして活用し、開発中の予測モデルを完成させることを目標とする。

具体的にはハイブリッドその場観察システム[2,3] (赤外線集光型の加熱炉により溶接部の熱サイクルを再現し、時分割 X 線回折測定と組織形態の変化のレーザ顕微鏡観察を可能とする：図 1) を用いて、溶接熱影響部の熱サイクルをフェライト鋼に付与し、熱サイクル下の炭化物の析出・固溶挙動を時分割 X 線回折測定することで、実験室の X 線では取得困難な析出・固溶挙動の速度論的情報を取得する。付与する熱サイクルは、フェライト鋼溶接継手のクリープテストにおいて、破壊の生じた細粒域(ine-grained heat affected zone: FGHAZ)を模擬したものとした。取得データは、予測モデルの界面エネルギーおよび界面易動度の固定に利用し、開発中の炭化物形成シミュレーションモデルを検証・完成させる。

実験：

フェライト鋼 (ASTM A387 Grade 91: 0.006C-0.25Mn-0.18Cr-1Mo((mass%)) を準備し、ボタン状(5 mm 径、2 mm 厚さ)に加工し供

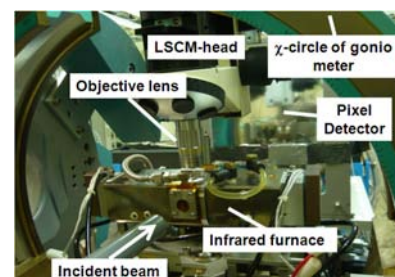


図 1. ハイブリッドその場観察システム

試材とした。2種類の熱処理を施した試料を準備し、溶接熱源からの距離に応じた溶接熱影響部を模擬した熱サイクルの5種を付与した。それぞれの熱サイクルの最高到達温度は1050°C、1000°C、950°C、900°C、875°Cであり、FGHAZの熱サイクルを模擬している。実施ビームラインはアンジュレータビームライン(BL46XU)であり、X線エネルギーは30 keVとした。入射X線形状は0.1×0.5 mmであった。多軸回折装置のθ軸上に赤外線集光型の加熱炉を搭載し、カプトン窓を通して、加熱炉内の試料にX線を照射した[2-3]。微量相からの回折パターンを記録するために検出器Pilatus2Mを使用した。Pilatus2Mは暗電流が無く、また20 bitという高いダイナミックレンジ有しているため、微量相からの弱い強度の回折パターンを時間分解能0.5 sで高いS/N比をもって明瞭に記録することが可能となった。カメラ長は、標準試料(LaB6)の回折パターンより校正し524.959 mmとなった。

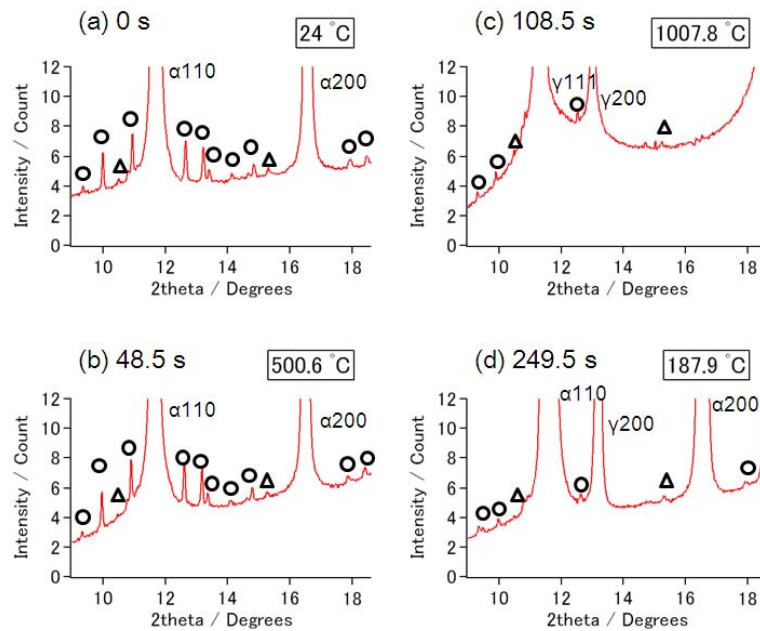


図2. 溶接熱影響部再現熱サイクル中の回折パターンの時系列変化(○ $M_{23}C_6$, ΔMX)

結果および考察：

フェライト鋼に1000°Cまで10°C/sで加熱後、10 s保持し、その後10°C/sで室温まで冷却する溶接熱影響部の熱サイクルを付与した場合の回折パターンの変化を図2示す。放射光の高い輝度とPilatus検出器の高いS/N比により、少量の炭化物相($M_{23}C_6$: M=Cr, Fe, Mo)の回折線を明瞭に捉えられていることがわかる。図2(a)-(c)が加熱サイクルに対応する回折パターンであり、溶接熱影響部細粒域の熱サイクル中、ピーク温度に到達する直前において、これら $M_{23}C_6$ の回折線はその強度を減少させることがその場測定によりわかった。図2(c)に示すようにピーク温度では母相はオーステナイト相に変化している。図2(d)が冷却後の回折パターンであり、炭化物相の回折強度はピーク温度後はほとんど変化していない。また、本研究結果において、MX(M=V, Nb および X=C,N)炭化物は溶接熱影響部に相当する加熱・冷却サイクル下でほぼ強度を一定に保っていることも見いだしている。

検出器像でデバイリングを観察するとほぼ均質な強度分布をもつリング状になっているため、これら炭化物の相量を定量化し、計算モデルの参照データとすることで、計算モデル中において任意に設定している界面易動度パラメータのキャリブレーションを行いモデルを完成させる。今回の実験では同様のデータを2種の熱処理材に対して、前述の5種のピーク温度をもつ溶接熱影響部の熱サイクルを付与した場合に対して取得することに成功した。これら溶接熱影響部の熱サイクルがフェライト鋼の炭化物量に与える影響を計算モデルとともに系統的に整理し、クリープ試験結果との対応を検討する。

参考文献：

- [1] M. Taneike, F. Abe, K. Sawada, *Nature*. **424**, 294(2003).
- [2] H. Terasaki, Y. Komizo, *Scripta Mater.* **64**, 29(2011).
- [3] 成果公開優先利用課題 Proposal No. 2010B1886