

# 火力発電所ボイラ用改良9Cr-1Mo鋼溶接部のクリープ強度低下要因の解明 補修溶接部の保守管理手法の検討

## Elucidation of Creep Strength Degradation Mechanism on Welded Joint of Mod.9Cr-1Mo Steel for Boiler of Thermal Power Station

### Examination of Maintenance Management Technique on Repair Welded Joint

(電力技術研究所 材料技術G 材料T)

(Materials Technology Team, Materials Engineering Group, Electric Power Research and Development Center)

改良9Cr-1Mo鋼溶接部は母材より高温(クリープ)強度が低く、その溶接部に補修のため溶接修理を施すと、さらに強度が低下することが判明していた。今回、実機配管を模擬したクリープ破断試験、破断材料の詳細調査および有限要素法による応力解析を併用して、補修溶接材のクリープ強度低下要因を明らかにした。これを踏まえて、適切な保守管理手法の検討も行った。

The welded joint of Mod.9Cr-1Mo steel has a lower high-temperature (creep) strength than the base material, and it has been confirmed that the strength further degrades when repair welding is applied to the welded joint. In combination with a creep rupture test using a mock-up of real piping, detailed investigation of the ruptured material, and stress analysis employing the finite element method, we have clarified the mechanism of creep strength degradation of repair welding material. Based on these findings, we have also examined appropriate maintenance management techniques.

## 1 背景と目的

当社では、火力発電所の高効率化を目指した蒸気条件の高温高圧化に対応して、高温強度が大きいと謳われていた改良9Cr-1Mo(9Cr1MoNbV)鋼をわが国で初めて超々臨界圧ボイラ(蒸気温度566℃)である川越火力発電所1号機の主蒸気管、つり下げ二次過熱器出口管寄せ等に1989年に採用し、さらに、わが国で初めて593℃の高温再熱蒸気温度を適用した碧南火力発電所3号機の高温再熱蒸気管に、1993年に採用した<sup>\*1</sup>。その後、同材料の劣化状況を調査するため、2003年に継続使用している高温再熱蒸気管エルボ管代表部位をサンプリングし、破壊試験により寿命評価を行ったところ、製作時に補修溶接を施した溶接部位の寿命がそれ以外の溶接部位の寿命を下回っていることが判明した。そこで、補修溶接部のクリープ強度低下メカニズムの解明および適切な保守管理手法について検討を行った。

## 2 研究の概要

### (1) 補修溶接材の材料試験の概要

改良9Cr-1Mo鋼溶接部の補修溶接有無による差異を調査するため、火力発電所の高温再熱蒸気管エルボ管を模擬した長手方向のサブマージーク溶接および溶接後熱処理(溶接による残留応力を除去する熱処理)を行った無補修溶接材と無補修溶接材に被覆アーク溶接で補修溶接および溶接後熱処理を施した補修溶接材を作製した。本材料のように高温高圧の条件で使用される金属は、一般的に材料の組織が劣化し、損傷・破断するクリープ劣化が進行することから、この劣化に対する強度を評価するため、無補修溶接材および補修溶接材から単軸クリープ破断試験片を採取し、温度923K、

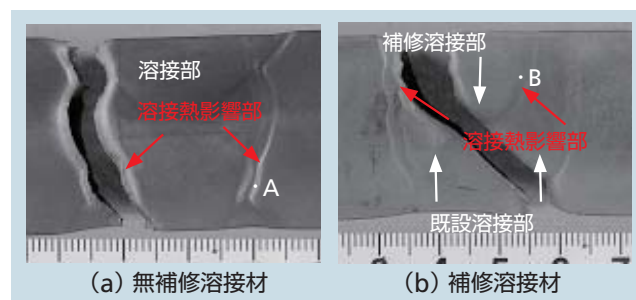
応力80MPaの条件で破断させた。そして、クリープ破断させた無補修溶接材および補修溶接材の試験片について、外観観察、断面ミクロ組織観察を含む詳細な調査および有限要素法による応力解析を併用して、補修溶接部のクリープ強度低下メカニズムを検討した。

### (2) 単軸クリープ破断試験結果

無補修溶接材は平均768時間で破断したのに対し、補修溶接材は平均279時間で破断したことから、補修溶接材のクリープ強度は無補修溶接材のその約40%と、極端に短くなることがわかった<sup>\*2</sup>。

### (3) 外観観察結果

(2)項で破断させた試験片を外観観察した結果、無補修溶接材は溶接熱影響部(溶接時に熱を受けた部分)(第1図(a))で、補修溶接材は溶接端部の既設溶接と補修溶接の共通した溶接熱影響部で破断していた(第1図(b))。この結果から、改良9Cr-1Mo鋼溶接継手の弱点部位は溶接熱影響部であることがわかった。

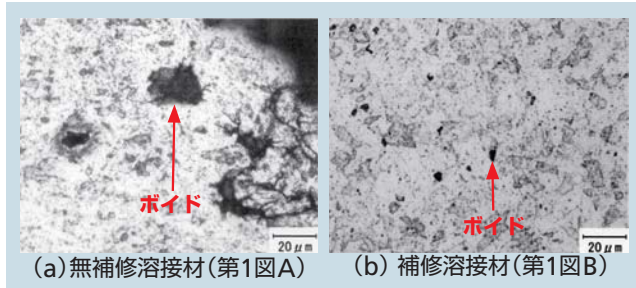


第1図 破断したクリープ破断試験片の外観観察結果<sup>\*2</sup>

### (4) 断面ミクロ組織観察結果

前述のとおり、無補修溶接材および補修溶接材はいずれも溶接熱影響部で破断していたことから、溶接熱影響

部にはクリープ損傷の証拠が残っていると考えた。そこで、溶接熱影響部の断面ミクロ組織観察を行ったところ、無補修溶接材および補修溶接材の溶接熱影響部にはクリープ損傷を示すポイド(孔)が多数発生しており、クリープ劣化により破断したことを確認した(第2図)。

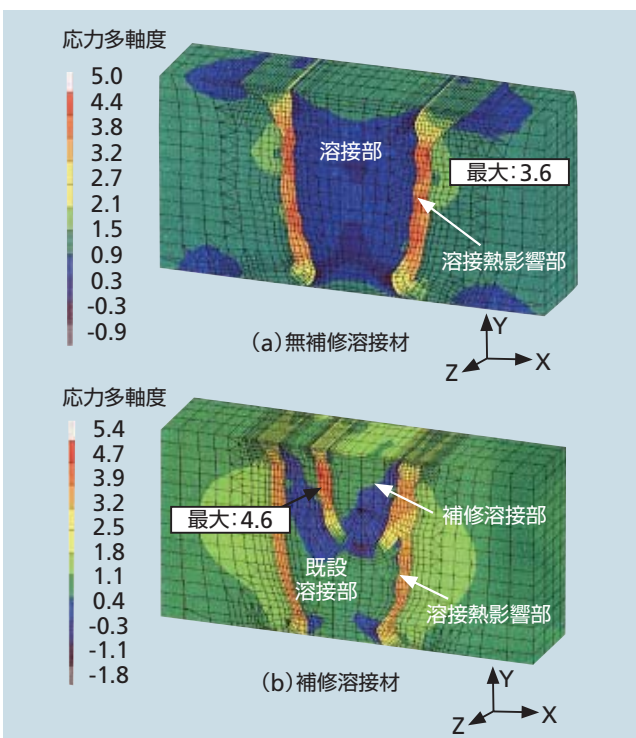


第2図 断面ミクロ組織観察結果<sup>\*2</sup>

### 3 補修溶接部のクリープ強度低下メカニズムの検討

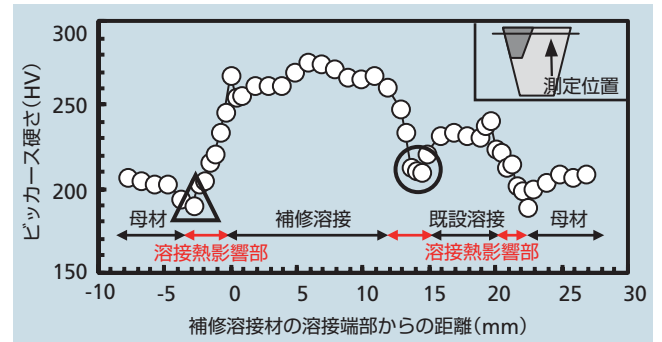
前述2より、溶接部は溶接熱影響部のクリープ劣化により破断することがわかった。これを踏まえ、補修溶接材のクリープ強度が無補修溶接材のそれよりも低下するメカニズムを解明するために、有限要素法による応力解析を実施した(第3図)。クリープ劣化は、応力が様々な方向に同時に作用する状態即ち応力多軸度が大きい方がより進行することから、この多軸度を解析により求めた結果、無補修溶接材および補修溶接材ともに弱点部位である溶接熱影響部で応力多軸度が大きく、短時間で破断した補修溶接材の応力多軸度が無補修溶接材のそれよりも大きいことが確認できた。

この結果より、補修溶接材のクリープ強度低下の原因



第3図 応力解析結果(寿命消費80%)<sup>\*2</sup>

としては、既設溶接と補修溶接に共通した溶接熱影響部での応力多軸度が通常溶接部における溶接熱影響部の応力多軸度よりも大きいことが疑われた。しかしながら、補修溶接材は応力多軸度が最も大きい部位では破断していないことから、補修溶接材のクリープ強度低下原因は応力多軸度の他にもあると考えた。そこで、改良9Cr-1Mo鋼を含む高クロム鋼の溶接継手材は応力多軸度が大きく、かつ硬さが小さい溶接熱影響部で破断する<sup>\*3</sup>と報告されていることに着目し、補修溶接材の表面近傍の硬さ試験を行うことにした(第4図)。



第4図 補修溶接材の硬さ試験結果<sup>\*2</sup>

その結果、実際に破断した位置である補修溶接金属と母材間の溶接熱影響部(第4図△印)の硬さは応力多軸度が最も大きい補修溶接金属と既設溶接金属の熱影響部(第4図○印)の硬さに比べて小さいことがわかった。この理由は、前者は補修溶接材の材料試験の概要に示したように2回の溶接後熱処理で硬さが大きく低下した既設溶接金属の溶接熱影響部を含んでいるのに対し、後者は1回目の溶接後熱処理後も高い硬さを示す既設溶接金属部を含んでいるためと考えられる。

以上の結果、補修溶接部のクリープ強度は、応力多軸度が大きくなること、加えて、2回の溶接後熱処理の影響で硬さが小さくなるのが重なって低下することが明らかになった。

### 4 補修溶接部の保守管理手法の検討

補修溶接部のクリープ強度は大きく低下することから、まず、補修溶接の有無を修理記録、外表面組織(転写レプリカ)観察または超音波探傷法による非破壊検査(フェーズドアレイ法等)で把握する必要がある。その結果、補修溶接が施されている場合、補修溶接部の表面硬さ測定および応力多軸度の解析を併用したクリープ寿命評価を行い、適切な配管取替時期を検討する必要がある。

#### 参考文献

- ※1:電気評論 2013年1月号p80より転載
- ※2:熱処理 第51巻第1号(2011)より転載
- ※3:緒方ら 材料第58巻第2号(2009)p90



執筆者/藤田明吾