

クリープ損傷により劣化した大径管溶接部を現場で 延命化させるための再生熱処理技術

Regenerative Heat Treatment Technology for On-site Life Extension of
High Energy Pipe Welds Degraded by Creep Damage



坂田 文稔
Fumitoshi Sakata

尾崎 政司
Masashi Ozaki

西村 宣彦
Nobuhiko Nishimura

椎橋 啓
Akira Shiibashi

小林 雅浩
Masahiro Kobayashi

近年の火力発電プラントの維持・管理においては、稼働率向上とメンテナンスコストの低減という相反する要求を両立できるメンテナンスが求められている。その1つのメニューとして当社は、クリープ損傷により劣化した低合金鋼の大径管溶接部を現地での誘導加熱により取り替えることなく延命化させる応急対策技術を、東京電力(株)と共同で開発した。本報では、実機ボイラから撤去した主蒸気管エルボのき裂発生寿命を13万時間延命できることを検証した例などについて紹介する。

1. はじめに

近年の発電プラントの維持・管理においては、稼働率の向上とメンテナンスコストの低減という相反する要求を両立できる、バランスのとれたメンテナンスが求められている。その一つとして、定期検査やトラブルによるユニット停止中の類似部位の検査により、停止期間中に延命措置が必要と判断された場合に、取り替えることなく補修して延命化する応急対策技術が求められている。

特に近年、材料の調達に時間がかかる大径管においては、その要望が強い。そこで本報では、クリープ損傷により劣化した低合金鋼の大径管の溶接部を現地での誘導加熱の施工により延命化させる応急対策技術を、東京電力(株)と共同で開発したので、以下に報告する。

2. 大径管溶接部のクリープ損傷事例

2005年3月末現在の75MW以上の国内事業用火力発電プラントの運用年数の構成⁽¹⁾を図1に示すが、運転開始から35～40年経過したユニットが最も多く、30年以上経過したユニットは全体の60%を占めている。火力発電プラントにおいては、運用年数の増加とともに時間依存型の損傷、すなわちクリープ損傷が顕著となり、その対処が必要となる。このクリープ損傷のうち、取替えのための材料調達に時間がかかり、漏洩した場合の被害が大きいものが、大径管溶接部のクリープ損傷である。

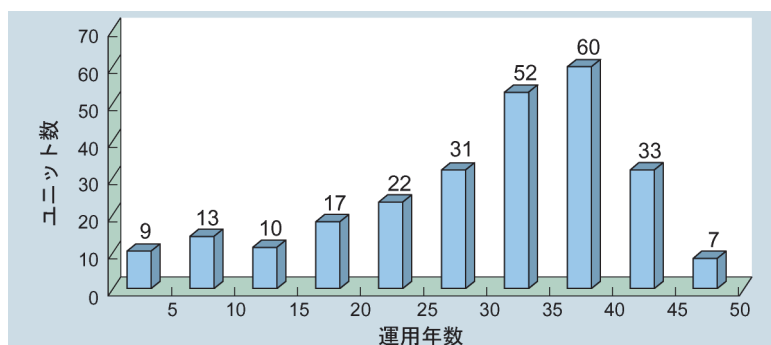


図1 国内事業用火力発電プラントの運用年数
(2005年3月末現在、出力75MW以上)

米国の火力発電プラントにおいては、1985 年以降図2に示すようなクリープ損傷による大径管の漏洩事故が複数発生している。これらの事故は、長手溶接HAZ部で発生したき裂が、伝播貫通して漏洩に至ったものである。

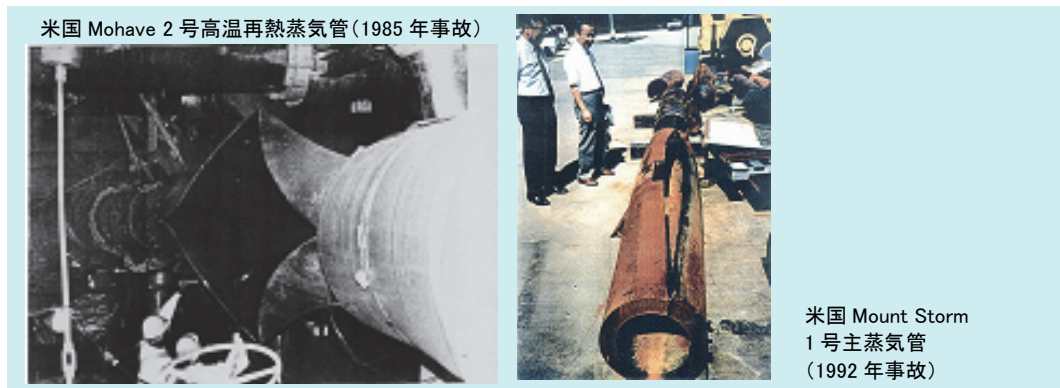


図2 米国における大径管溶接部の事故事例

3. 大径管溶接部のクリープ損傷形態

溶接部のクリープ損傷の進行形態を図3に示す。経年使用に伴い、まず溶接 HAZ 部の粒界にボイドが発生する。次に、そのボイドの数が増加するとボイドが合体して長さが1つの粒界程度の微視き裂となる。さらに微視き裂が増加すると、それら微視き裂が合体連結してき裂となり、そのき裂が伝播して最終的に貫通に至る。

ここで、主蒸気管のような厚肉管の場合、多軸拘束の影響により配管の外表面よりも肉厚方向の内部の寿命が短く、その結果外表面よりも先に肉厚内部でき裂が発生する傾向にある事が実験的に検証されている^{(2), (3)}。

このような挙動を踏まえ、当該部位の保守においては配管外表面の寿命消費率を算出するための非破壊評価法(ボイドの数や組織の変化に着目した評価法)と、肉厚方向の内部で発生するき裂を検出するための高精度 UT(TOFD やフェーズドアレイ)を併用している⁽⁴⁾。

しかし、き裂発生以前の寿命予測により予防保全を実施するという意味では、配管外表面の非破壊評価法が唯一の手段となる。この配管外表面の非破壊評価法の1つとしてボイド個数密度法があるが、この方法ではボイドの数を捉えることが重要となる。ここで、ボイド個数密度とは、単位面積中に存在するボイドの個数である。

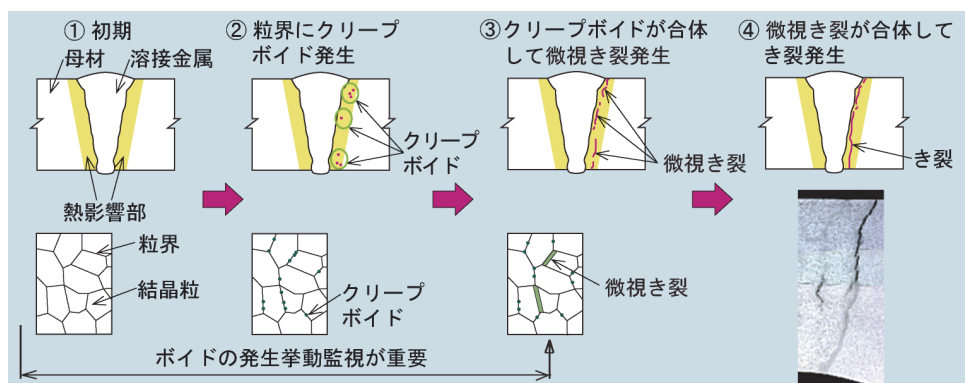


図3 溶接部のクリープ損傷の進行形態

クリープ損傷による寿命消費率とボイド個数密度の関係を図4に示す。この図から分かるように、クリープ損傷の進行により寿命消費率が高くなるに従い、ボイド個数密度は高くなる事が分かる。ここで、“クリープ損傷による劣化が進行するとボイド個数密度が高くなる事”から発想を転換すると、“ボイド個数密度を低くすることにより劣化していた材料が再生し、その寿命を延命化できるのではないか？”との発想が浮かぶ。これが、再生熱処理の発想の原点である。

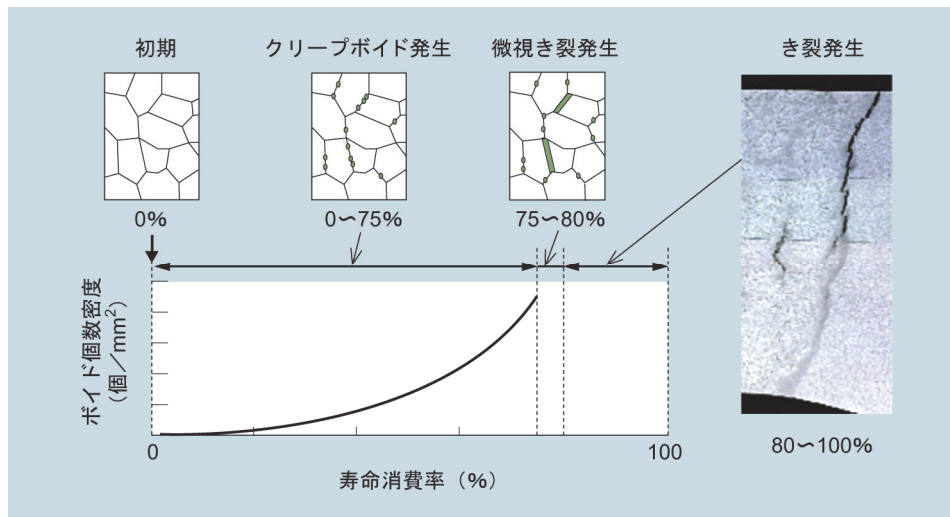


図4 クリープ損傷による寿命消費率とボイド個数密度の関係

4. 原理と施工方法

再生熱処理の原理を図5に示す。再生熱処理は大きく分けて、2つのステップからなる。まず、最初のステップは、 A_3 変態点以上の温度まで加熱した状態で圧縮力を加えることによりボイドの数を減少させるボイド圧接処理である。次のステップは、 A_3 変態点前後での熱処理により組織を母材組織に整え、さらに粒界にあるボイドを粒内に閉じ込める再結晶熱処理である。

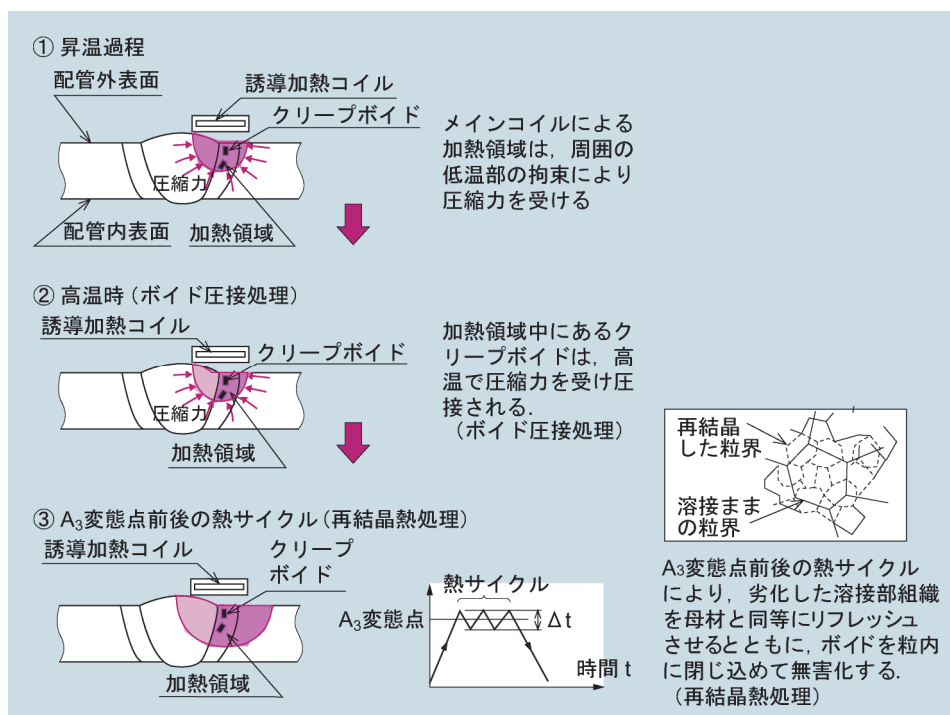


図5 再生熱処理の原理

ここで、ボイド圧接処理において圧縮力を加える方法として機械的な方法が考えられるが、主蒸気管や高温再熱蒸気管のような大径管の場合、そのための装置や治具が大掛かりになり、コストや施工する場所のスペースを考えると現実的ではない。そこで我々は、ボイドに圧縮力を負荷する方法として誘導加熱により生じる熱応力を用いた。誘導加熱は、加熱コイルに電流を流して発生させた磁場により部材内に誘導電流を発生させて、ジュール熱により加熱させるものである。

なお、ボイド圧接処理と再結晶熱処理の施工条件は、実機ボイラから撤去したエルボを用いた各種試験の結果、並びに非定常 FEM 温度応力解析の結果を基に選定した。

5. 施工性確認試験

実機ボイラの天井ハウジング内の主蒸気管エルボに再生熱処理を施工した時の状況を図6に示す。再生熱処理を施工するための機材(加熱コイルとトランス)の搬入搬出、及び再生熱処理の施工は問題なく可能であり、施工性に問題がないことを確認した。



図6 再生熱処理の現場での施工性確認状況

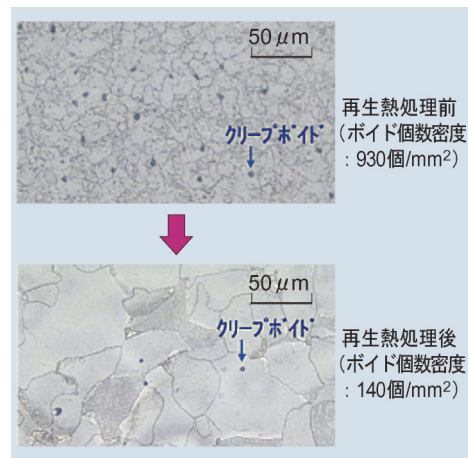


図7 再生熱処理施工前後の断面組織

6. 再生熱処理部の組織調査結果

再生熱処理を施工する前後の断面組織の一例を図7示す。この図から分かるように、ボイド圧接処理の効果によりボイド個数密度は85%減少している。また、再結晶熱処理の効果により、粒界に発生していたボイドの一部は粒内に閉じ込められており、かつその組織は母材と同等のフェライト・パーライト組織になっている。

以上の断面組織の調査結果より、再生熱処理の施工により寿命を延命化できる可能性が示唆されたので、次に破壊試験による延命効果の確認を実施した。

7. 延命効果の確認

再生熱処理による延命効果は、小型単軸クリープ破断試験と実体内圧バースト試験により確認した。小型単軸クリープ破断試験は、延命効果の肉厚方向の分布を確認するために実施した。また、実体内圧バースト試験はエルボの実体の延命効果を確認するために実施した。試験には、実機ボイラから撤去した主蒸気管エルボを供試した。供試したエルボの腹側長手溶接HAZ部の外表面の寿命消費率は75%であった。なお、エルボの仕様は以下のとおりである。

- 外径:355.9mm
- 肉厚:77mm
- 材質:ASTM A387GrD-NT(2.25Cr-1Mo 鋼)
- 使用時間:191 340 時間

7.1 破壊試験結果の整理方法

破壊試験の結果は、アイソストレス法により実機温度での余寿命に換算した。なお、アイソストレス法による実機温度での余寿命への換算には、後述の7.2 節に記載した試験と別に実施した小型単軸クリープ破断試験の結果を用いた。その試験体は実機ボイラから撤去後に再生熱処理を施工した主蒸気管エルボから採取したものであり、異なる3つの温度条件で試験を実施した。

7.2 小型単軸クリープ破断試験

試験体は、天井ハウジング内で腹側長手溶接部に再生熱処理を施工した後に撤去したエルボから採取した。

試験温度は650℃である。また試験応力は、実機定格運転圧力24.5MPaを負荷した場合のクリープ解析により求めた、エルボ腹側外表面の緩和後の応力46.2MPaとした。

小型単軸クリープ破断試験の結果を図8に示す。ここで、未施工部の結果は誘導加熱コイルから離れた断面から採取した試験体の結果を、また施工部の結果は誘導加熱コイル中央直下の断面から採取した試験体の結果を示している。それぞれの断面からは、深さ方向の4つの位置から試験体を採取した。

この結果から分かるように、未施工部の余寿命は、配管外表面に近いほど短くなる傾向にあり、配管外表面から10mmの位置の余寿命が9.3万時間と最も短い。これに対して、再生熱処理施工部の余寿命は、配管外表面に近いほど長くなる傾向にあり、配管外表面から10mmの位置の余寿命が34万時間と最も長くなっており、最短寿命は外表面から40mmの位置で20万時間であった。

以上の結果から、寿命が短い配管外表面近傍ほど再生熱処理による延命効果が高く、効果的な延命化がなされていることが分かる。

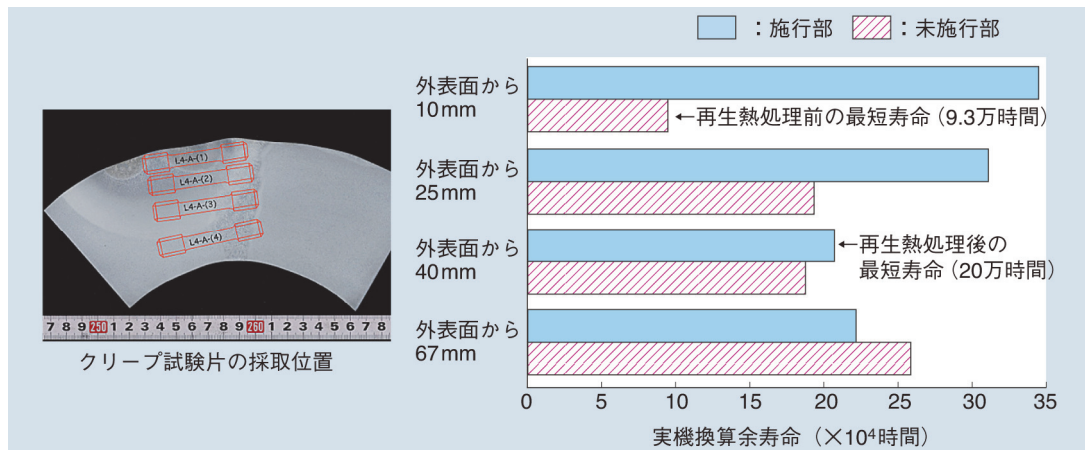


図8 小型単軸クリープ破断試験による肉厚方向の延命効果分布の確認結果

7.3 実体内圧バースト試験

実体内圧バースト試験の試験体の外観を図9に示す。試験体は、実機から撤去したエルボに蓋板などを施工した後、腹側長手溶接部に再生熱処理を施工したものである。試験温度は630℃、また試験時の内圧は実機定格運転圧力 24.5MPa とした。

実体内圧バースト試験を開始してから 1 874 時間後に、エルボの腹側長手溶接部の表面の旧 HAZ 部に深さ 4.5mm のき裂が確認された。

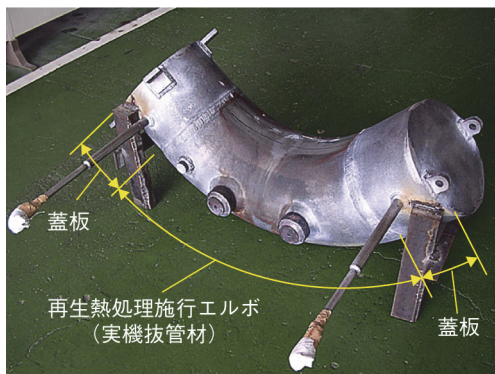


図9 実体内圧バースト試験体の外観

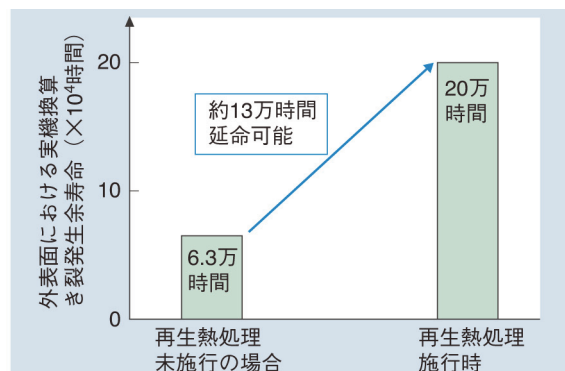


図10 実体内圧バースト試験による延命効果の確認結果

再生熱処理の施工による延命効果の確認結果を図10に示す。ここで再生熱処理未施工の場合の実機換算き裂発生余寿命は、ボイド個数密度法により求めた再生熱処理施工前の試験体の腹側長手溶接HAZ部の寿命消費率を基に、き裂が発生するまでの時間を求めたものである。

また、再生熱処理施工後の実機換算き裂発生余寿命は、実体内圧バースト試験において外表

面にき裂が発生するまでの時間を、アイソストレス法により実機換算して求めた。

この結果から分かるように、実機換算き裂発生余寿命は、再生熱処理未施工の場合 6.3 万時間、そして再生熱処理を施工した場合 20 万時間であり、約 13 万時間の延命化が可能であることを確認した。

8. まとめ

今後、実機などの配管での施工実績を積み、延命効果のデータを蓄積してその信頼性を検証していく予定である。

参考文献

- (1) (社)火力原子力発電技術協会, 火力・原子力発電所設備要覧(平成17年度改訂版), 2006
- (2) 西田, 由上ら, 溶接製高温再熱蒸気管の高温クリープバースト試験(第2報:非破壊余寿命評価法の検討), 第36回高温強度シンポジウム前刷集, 1998, P.30-34
- (3) 西田ほか, ボイラ高温再熱蒸気管長手溶接部のクリープ破断メカニズムの実験的検討, 日本機学会論文集A編66巻645号, 2000, P.86-93
- (4) 時吉, 山内, 西村ほか, ボイラ高温配管溶接部の寿命診断システム, 三菱重工技報 Vol.38 No. 2 (2001), P.84-86

執筆者紹介



坂田文稔
原動機事業本部
サービス統括部
技術サービスグループ



尾崎政司
技術本部
長崎研究所
サービス技術課



西村宣彦
技術本部
長崎研究所
サービス技術課
主席



椎橋啓
原動機事業本部
原動機品質マネジメント統括室
主席



小林雅浩
原動機事業本部
ボイラ統括技術部
次長