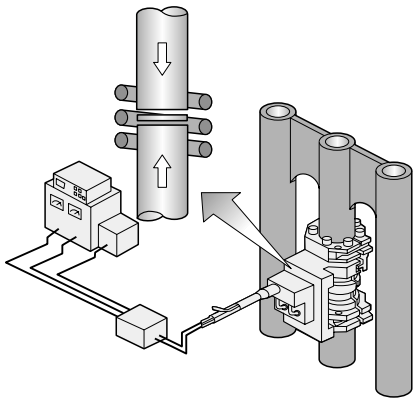
特　集　論　文



迅速な復旧を可能にする“アモルファス接合法を適用したボイラ火炉壁管補修技術”

Repair Technology with Liquid Layer Diffusion Bonding for Pipes Installed in Furnace Walls of Existing Boilers

児玉　克[*1] Masaru Kodama　大塚　孝[*2] Takashi Otsuka　松井正数[*2] Masakazu Matsui
小林雅浩[*3] Masahiro Kobayashi　松本真太郎[*4] Shintaro Matsumoto

発電設備の延命化に強い要求がある中，不適合発生に対して迅速かつ信頼性良く，さらに低コストで復旧できる補修技術が求められている．本論文では，火炉壁管の不適合に対し迅速な復旧を目的に，アモルファス接合法の特長を生かした新しい補修技術を開発した．本技術により，従来，必要とした炉内での足場仮設が不要となり復旧工事の大幅な短縮と，送電の迅速な再開が期待できるようになった．現在，本技術を適用したアモルファス接合継手の信頼性を最終確認するため，実機ボイラでの暴露試験を継続中である．

1. は　じ　め　に

既存の火力発電設備では，既に建設後20年，運転時間15万時間を超えたプラントの割合が半数以上を占めている．さらに，原子力発電がベースロード運用されていく中，火力発電設備は頻繁な発停と負荷調整運用が行われている．その結果，経年劣化と過酷な運転による各部の損傷が顕在化し，発電コストに占める保守コストの割合が高くなる傾向にある．

このような状況の下，新設火力には高効率化が，既設火力には設備信頼性と保守コストの節約が求められている．この要望に応える技術として，損傷事例が最も多いボイラ火炉壁管を対象に，アモルファス接合法の特長を生かした補修技術を開発した[(1)]．

本報告では，この新しい補修技術の特長を示しながら，復旧工期の短縮，迅速な立ち上げへの有効性について言及する．

2. ボイラプラントにおける損傷の要因

図1に当社事業所で納入の事業用火力ボイラにおける過去４年間の不適合の分析結果を示す．図から分かるように，ボイラ・プラント関連機器の損傷のうち，過半数をボイラ本体が占め，損傷要因の約半数は腐食疲労を含む熱疲労損傷である．これらの疲労損傷は，火力発電設備の経年化に加え負荷調整運用されるに従って増加する傾向にある．また，機器別分類では火炉壁管（WW）が全体の半数以上を占め，保守コスト低減のためには，この部位を対象とした疲労損傷の

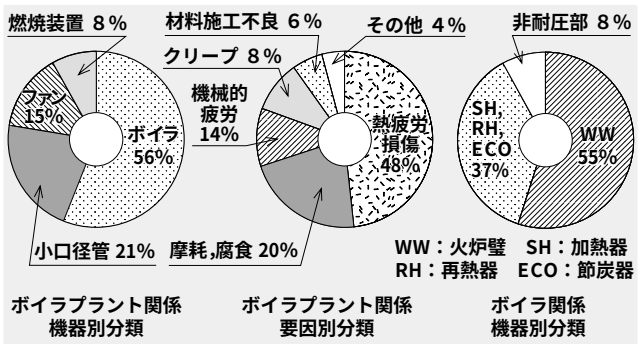


図１　事業用火力ボイラの最近の損傷分析結果
損傷要因の約半分は熱疲労損傷であり，ボイラ本体の機器別では火炉壁（WW）が最も多い．

発生防止と発生した損傷部の迅速な復旧が有効であることが分かる．**図２**にはさらに，火炉壁管の疲労損傷の代表的な発生位置を示す．腐食疲労損傷は主に，タイロッドやテンションプレートといった付着金物と火炉壁の溶接部の管内面側に発生する．この損傷は，管内面を起点として発生することから外観検査や磁粉探傷等の表面欠陥検出技術では漏洩前の損傷を検出できず，損傷の発生位置の予測も容易ではない．さらに，炉壁の付着金物溶接部は数万点に及び，全対象個所の検査には多額の費用を要する．したがって，その寿命評価法および非破壊検査法の開発研究[(2)]が鋭意実施されている．

3. アモルファス接合法による火炉壁管補修技術

3. 1　アモルファス接合法の適用

上述のように，ボイラ全体の不適合割合が半分以

[*1] 技術本部長崎研究所材料・溶接研究室主席 工博
[*2] 技術本部長崎研究所材料・溶接研究室
[*3] 長崎造船所火力プラント設計部陸用ボイラ設計課主席
[*4] 長崎造船所火力プラント設計部陸用ボイラ設計課

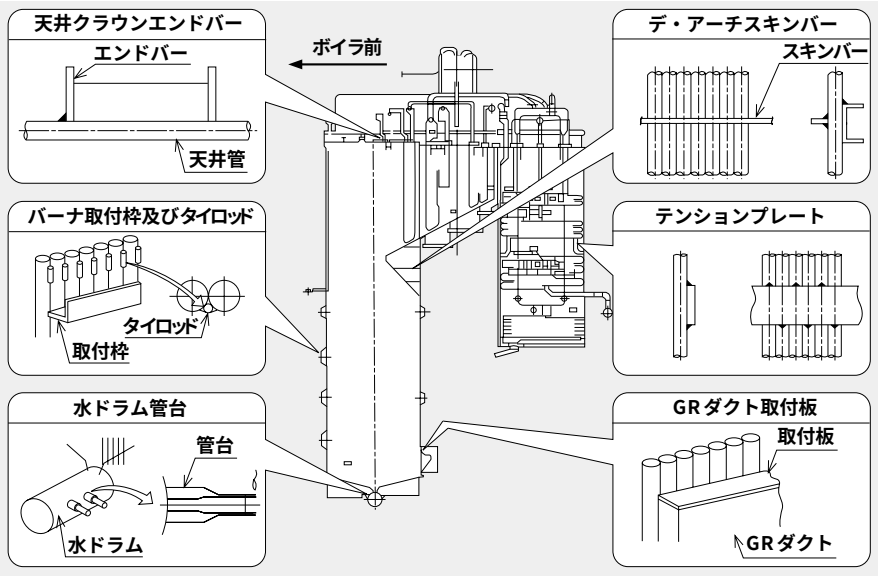


図２　火炉壁管の疲労損傷の代表的な発生位置　損傷部の寿命評価法，非破壊検査法の開発とあわせ，事故後の早急な補修・復旧技術が求められる．

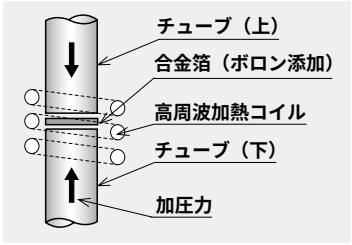


図３　アモルファス接合法の構成
従来溶接法のような熱源の移動はなく，溶接材料となる金属箔シートを挿入し，加熱と加圧で接合できる．

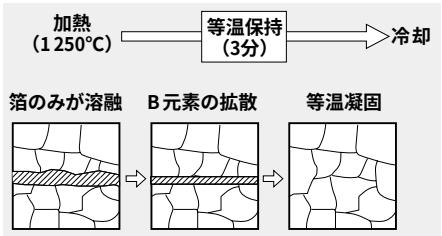


図４　アモルファス接合法の原理
加熱後，等温に保持するだけで，ボロン（B）元素の拡散作用によって接合が形成される．

上を占める火炉壁管の補修では，管と管の間隔が10 mm程度なので，管を炉外側と炉内側から別々に突合せ溶接して復旧している．そのため，炉内側にはどうしても足場の仮設が必要となる．これに対し，開発を進める補修技術ではアモルファス接合法を適用することで，火炉壁管の補修接合を炉外側からのみで施工できることを狙っている．これにより，炉内足場が不要となり火炉壁管取替の大幅な工程短縮が可能となる．**図３**及び**図４**に，本接合法の概念図を示す．まず，接合面に数%（wt）のボロン（B）元素を含んだ母材成分ベースの合金箔を挟み込み加圧する．次に，高周波加熱コイルにより開先部を1 250 ℃まで加熱する．融点低下元素であるボロンを含んだ合金箔（厚さ20 μm程度）の融点は1 200 ℃程度となっており加熱温度1 250 ℃では箔自体は溶融状態となる．その後，等温保持すると次のようなプロセスで接合が完了する．

① 融点を超えた箔が溶融する．
② 箔の中のボロンは溶融部と接している管の端面から管内に拡散浸透する．
③ 箔の溶融部と接している管の端面はボロン濃度が高くなり，融点が下がり一部溶融する．
④ その後，拡散が進みボロン濃度が低下してくると溶融部は融点が上がり，凝固して接合が完了する．

本接合法は液相拡散接合であり，アモルファス化（金属組織が非晶質になった状態）した合金箔を使うことから，これを接合の名称としている．

本接合の特長は，

(1) 従来接合法のように熱源を移動させるようなことがなく，一旦設置が終わると後は加熱するだけなので狭あい空間での接合が可能である．
(2) 母材を大きく溶かすことなく接合ができるため母材への熱影響が少ない．
(3) 溶接金属が非常に少ない，などである．

特に，狭あい空間での接合が可能となることを利用して，火炉壁の外側からの補修接合を実現している．

図５には，実際に600 MWクラスのボイラ設備で生じた炉壁管漏洩時の復旧工事に対し，従来溶接法の実績と開発法で想定した工程を比較して示す．管と管の間隔は10 mm程度なので，従来法では管を炉外側と炉内側から別々に突合せ溶接して復旧している．このため，管の切断・復旧工事は１日で実施できるが，その前後に各々２，３日の足場組立・解体工事が必要になって，ボイラの冷却から点火までにはおよそ８日間を必要とした．これに対して，炉外側からのみの施工が可能となれば，足場組立・解体工事が不要となって復旧工事は３日で完了できると見積られる．

３．２　接合継手性能

図６には本接合法による接合継手断面の光学顕微鏡金属組織を示す[(1)(3)]．供試体は補修接合を想定して，実機で使っていたボイラ用鋼の既設管と新管の組み合わせである．**表１**には代表的な適正接合条件を示す．接合部は母材とほとんど区別がつかないほど均一な金属組織である．この接合法で作成した継手に対して，引張・曲げ・衝撃・硬さ・クリープ破断試験を行い，いずれも問題ないことを確認済みである．**図７**には接合継手の機械的特性を示す．引張試験の破断位置はい

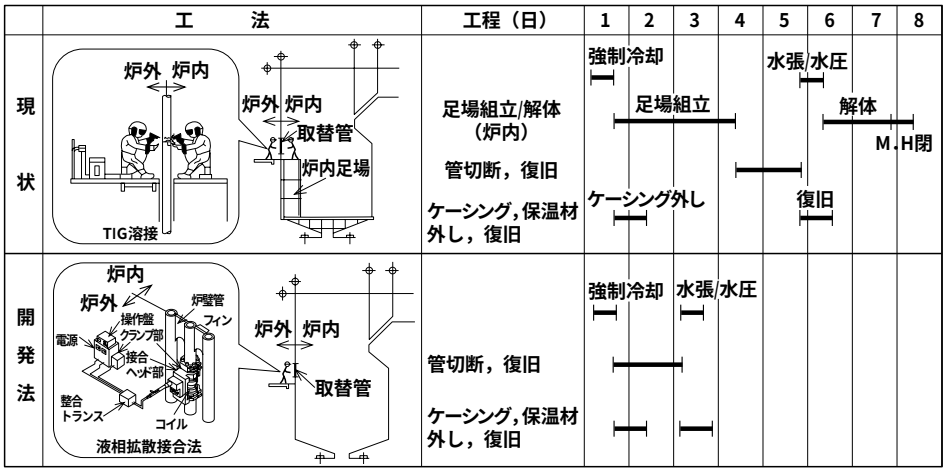


図５　従来法と開発法の火炉壁管復旧工程の比較　開発工法では従来工法で不可欠な炉内足場仮設が不要となり，大幅な工程短縮が期待できる．

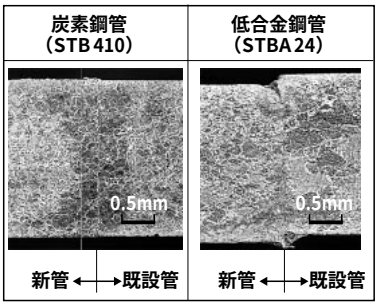


図６　アモルファス接合継手断面の光学顕微鏡金属組織
従来溶接法のような熱影響部はなく，接合部は母材とほとんど区別がつかないほど均一な金属組織となる．

表１　ボイラ用鋼管の接合条件

項　目	条　件
加圧力	5～7 MPa
保持温度	1250～1130 ℃
保持時間	120～180 sec
シールドガス	Ar
供試材	STB 410（炭素鋼管） STBA 24（低合金鋼管）
合金箔シート材	Fe-Si-C-B系（炭素鋼用） Fe-Si-Cr-B系（低合金鋼用）

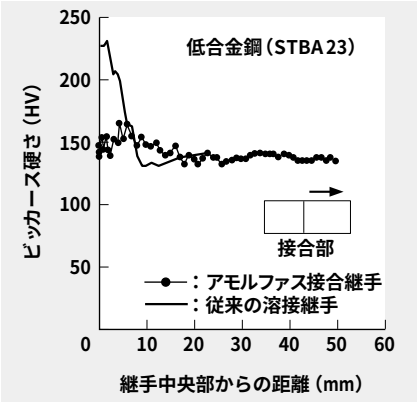


図８　アモルファス接合継手の硬さ分布
従来溶接法のような母材への熱影響がないため，硬さ分布は母材と変わらない滑らかな分布となる．

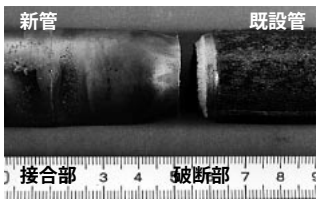
材　質	引張試験			表・裏曲げ試験	
	外　観	破断位置	強　度	外　観	
STB 410（炭素鋼）		母材（既設管）	415 (N/mm^2)		JIS規格適合
STB 24（低合金鋼）		母材（既設管）	482 (N/mm^2)		JIS規格適合

図７　アモルファス接合継手の機械的特性　このほか，高温（MAX 500 ℃）引張特性，衝撃値についても良好な結果を得ている．

ずれも母材であり，曲げ特性は裏曲げ・表曲げいずれもJIS規格適合の性能を有している．**図８**には硬さの計測結果を従来溶接法と比較して示す．アモルファス接合の場合，母材への熱影響が従来法に比べ少なく，硬さ分布は母材と変わらないレベルとなる．また，火炉壁管に適用される低合金鋼はクリープ域で使用されるために，クリープ破断強度が要求される．**図９**には低合金鋼（STBA23）の接合継手のクリープ破断試験結果を示す．低応力長時間側のデータは採取中であるが，現在までに破断した継手のクリープ強度は母材のデータバンド内であり，継手は母材と同等のクリープ破断強度を有している．

4．火炉壁管補修装置の開発

以上の検討結果から，アモルファス接合法によってボイラ用鋼管の接合が良好に得られることを確認したので，実機における施工要領の検討と装置化の開発を行った．

図10にアモルファス接合法による炉壁管補修方法の手順を示す．まず，既設管を抜管した位置に新管を挿入する．この時，既設管の端部にはあらかじめ溶接金属となる合金箔を取り付けておく．次に，片面の接合を行うが，接合ヘッドには高周波加熱コイル，アルゴンシール部に加えて，接合部に適切な圧力を加えるための加圧装置を設けている．片面の接合が終了すると他面の接合を行うが，この時には新管に加熱装置を設けて管の熱伸びによって接合部のギャップをなくした状態で，同じ接合ヘッドで接合温度及び加圧力を調

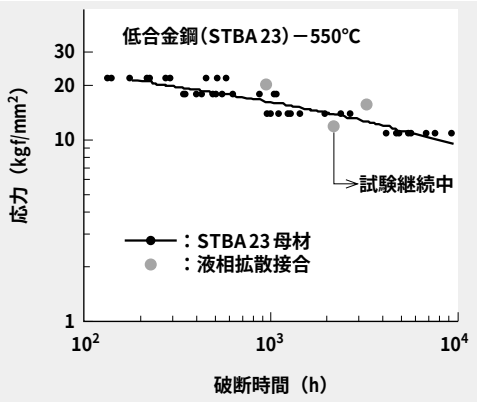


図9　液相拡散接合継手のクリープ破断試験結果　破断した継手のクリープ強度は母材のデータバンド内であり，母材同等のクリープ継手強度を有する．

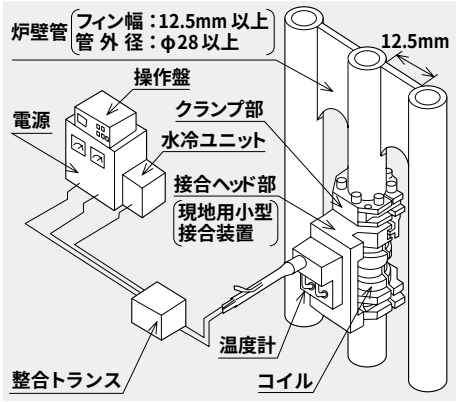


図11　開発した火炉壁管補修接合装置
接合ヘッドは15 Kg／ユニット以下と可搬性をもたせ，組立と接合はすべて火炉壁外側から施工できる．

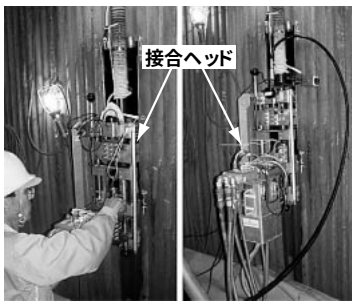


図12　実機ボイラでの施工要領の検証
開発した火炉壁管補修接合装置を適用し，火炉壁外側からの復旧作業が可能であることを検証している．

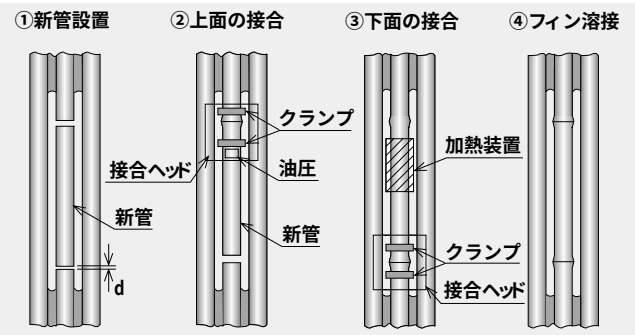


図10　火炉壁管の補修施工要領
不適合部を撤去後に，新管の両端を火炉壁外側から液相拡散接合して復旧する．

整して接合する．その後，フィンを溶接して，復旧を完了する．

このような施工要領に基づき開発した火炉壁管の補修接合装置の構成を**図11**に示す．装置の主な仕様は**表2**のとおりである．電源，操作盤，水冷ユニットは電力が供給できる近傍に設置し，そこから接合ヘッドを工事個所へ搬入する．そのため，接合ヘッドは可搬性を考慮して，数個のユニットに分割でき，重量は15 kg/ユニット以下である．接合ヘッドの組立ては，すべて火炉壁外側から施工できる構造である．また，加圧力，温度，接合時間の調整は自動シーケンス制御で管理している．**図12**には本装置を適用しての実機での施工要領の検証状況を示す．現在，本技術の信頼性を最終確認するため，実機ボイラへ実際にアモルファス接合継手を取り付け，実機での暴露試験を継続中である．

5．ま　と　め

以上のように，アモルファス接合法による火炉壁管補修技術について報告した．本技術により，復旧工事の大幅な短縮と送電の迅速な再開が可能になることを示した．既設の設備に対する保守・保全の取り組みは，今後，環境保全・循環型社会を目指す日本にとって重要な技術分野となることが予想される．将来，本報告が既設ボイラの保守・保全に役立てば幸甚である．

表2　火炉壁管補修接合装置の主仕様

対 象 管	管外径：φ28 mm以上 フィン幅：12.5 mm以上
電源出力	20 kW（10～20 kHz）
加熱温度	MAX 1300 ℃（常用1250 ℃）
加圧力（油圧）	0～10 MPa（加圧力一定制御）
接合ヘッド	加熱コイル幅：20 mm 重　　量：15 kg

参　考　文　献

(1) 児玉，ボイラ保守・保全の補修接合・再生技術，火力原子力発電　VOL.55 NO.7（2004）P.723
(2) 富永ほか，石炭焚ボイラの灰磨耗に対する保全技術，火力原子力発電　VOL.54 NO.561（2003）P.643
(3) 柏木，アモルファス接合による管補修技術の開発，中国電力技研時報　NO.100（2003）P.55

児玉克

大塚孝

松井正数

小林雅浩

松本真太郎