

ボイラ「プロセス・施工編」*



松井正数**

Boiler(Process & Construction)*

by MATSUI Masakazu**

キーワード ボイラ, 溶接プロセス, 過熱器, 火炉壁, 管寄せ, 溶接施工要領書, 保守・メンテ技術, 非破壊検査

1. はじめに

日本の電力需要は、1973年のオイルショック以降、経済の大幅な成長に伴い、著しく伸びてきていたが、2008年の世界的金融危機の影響で減少に転じ、その後低迷していたが、東日本大震災以降は電力使用制限令や節電目標の設定などによりわずかに減少の傾向にある。さらに、大震災後は、原子力発電プラントの長期運転停止の影響により、発電電力量の構成が大きく変化しており、石炭、天然ガスおよび石油を燃料とする火力発電プラントは、日本国内における主要な電力の供給源の一つとなっている¹⁾。

火力発電プラントは、その量的な発展のみならず、発電効率の向上、信頼性の向上、燃料の多様化、排煙対策や騒音対策による世界に類を見ない厳しい排出規制をクリアする環境対策など、全技術分野において著しい発展を遂げ、あらゆる点において世界のいずれの国の技術も凌駕するに至っている²⁾。

一方、海外、特に中国やインド、東南アジアなどでは、経済の発展に伴い電力需要が急増し、とりわけ石炭焼き大型火力発電用ボイラの市場規模が大きくなっている。従来、超臨界圧ボイラの製造メカは日本や欧米が中心であったが、最近では、韓国に加えて中国やインドなどの新興国メカが、先進国メカとの協業やライセンスなどにより、設計や製造に関する技術を習得し、ボイラ市場に進出している³⁾。日本のボイラメカは多くの稼動実績・技術力等で顧客の高い評価を得てきたが、現在はグローバル市場で生き残りをかけた熾烈な競争の中にある。この競争を勝ち抜くために、製造技術の中で大きなウェイトを占める

溶接プロセスにおいては、効率化と品質の安定化が重要な要素となる。

本稿では、主要な電力の供給源である石炭焼き大型火力発電用ボイラの製作において、溶接の効率化及び溶接品質の管理方法について述べる。

2. 製品と工作法

大型火力発電で使用されている超々臨界圧ボイラは、最大級のものでは、出力：1,000 MW 程度、連続蒸発量：2900 t/h 程度、最高蒸気温度：600℃ 程度、最大圧力：25 MPa 程度となり、高さ 100 m 程の大型設備となる。耐圧部は直径 30 mm 程度の小径から直径 1000 mm 超の大径配管で構成され、材質は、使用される温度や環境によって、主として炭素鋼、低合金鋼（1～2%Cr 鋼）、高合金鋼（9～12%Cr 鋼）およびオーステナイト系ステンレス鋼に至る多くの種類の材料が用いられている³⁾。これらの材料を組み合わせてボイラの構造設計が行われ、そのほとんどが溶接プロセスにより接合されるため、溶接技術はボイラ製造の基盤技術であると言える。配管類は長尺化のための突合せ溶接継手が多く採用され、また、それらの管類を支持する付着金物等には、すみ肉溶接継手が使われている。

発電プラントとしての運転時間は20年を超えるため、溶接部の信頼性は製造時だけでなく、長時間の運転に耐えられることが求められている。溶接技術はもちろん、材料、構造、工作技術、検査など製作全般を通しての品質保証体制の整備充実が必要である。

図1に代表的な火力発電プラント構成の概要を示し、図2に石炭焼きボイラ構造の一例を示す。一般にボイラ水は、給水加熱器から節炭器、火炉壁管、過熱器によって過熱され、高圧蒸気タービンにてタービンを回転させた後、再度過熱するため再熱器から中圧タービンを経て、低圧タービンへと流れ、発電機を回転させる原動力となる。

*原稿受付 平成25年7月31日

**正員 三菱重工業㈱ 技術統括本部 長崎研究所 材料・製造技術研究室
Member, Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Nagasaki R&D center, Materials & Manufacturing Technology Laboratory

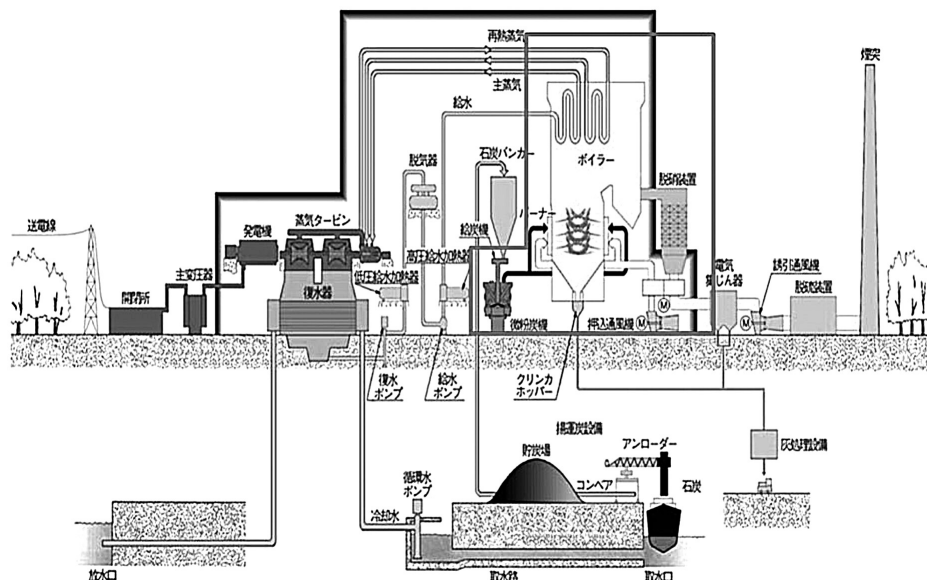


図1 発電プラント構成の概要

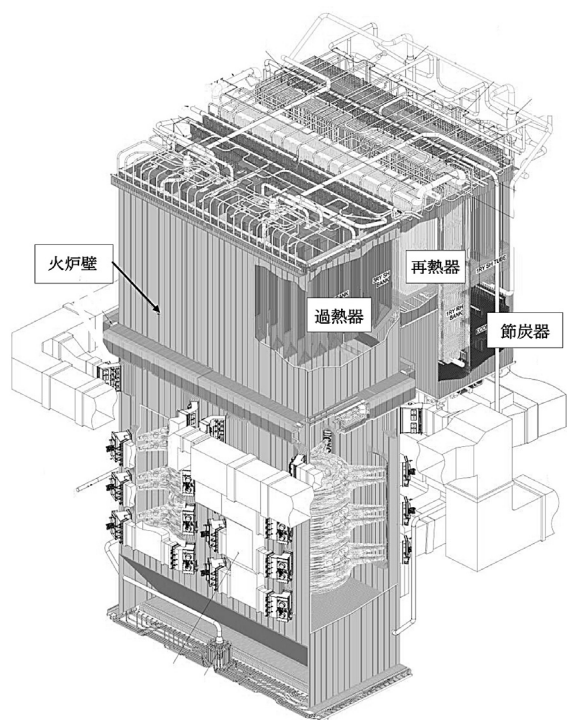


図2 石炭焚きボイラー構造の一例（超臨界圧変圧運転ボイラー）

ボイラー本体は、燃焼によって発生した熱を回収するために小径管群から成る火炉壁や各種熱交換器（節炭器，過熱器，再熱器），その前後にあって水や蒸気を分配・集約するため，中・大径管で構成される管寄せ及びこれらすべてを結び，移送する中・大径の連絡管（パイプ）から構成されている。

ボイラーの工場製作においては，管の突合せ溶接が多く，小径の薄肉管（直径30～60 mm程度，厚さ3～10 mm程度）では主にTIG溶接が適用され，小径管の自動溶接装置としては全周自動TIG溶接装置が使用されている。

大径の厚肉管では，初層をTIG溶接，その後2～3層を被覆アーク溶接で施工し，そして最終層までMAG溶接ま

たはSAW溶接が適用されることが多い。

配管に取り付けられる付着金物のすみ肉溶接においては，取り付け位置や向き，形状が一定でないことから自動化が難しく，また溶接姿勢も一定でないことから，所定の脚長まで半自動MAG溶接または被覆アーク溶接が多く適用されている。

材質としては，炭素鋼および1～2%Cr低合金鋼においては，MAG溶接と被覆アーク溶接が主として適用され，高合金鋼やステンレス鋼においては，TIG溶接が適用されている。このように，管径，材質に合わせて最適でかつ最も効率的な溶接方法が各ボイラーメーカーで適用されている。また，クリープ強度が求められる耐圧部に使用される溶接材料は，クリープ特性の検証がなされた溶接材料が適用され，一般に溶接金属（全溶着金属）のクリープ強度は，母材よりも高いものが適用されている。

ボイラーの製作は，工場の他，現地での組立があり，このうち工場では，過熱器・再熱器の組立，節炭器・火炉壁の組立，管寄せ，パイプ等の厚肉構造物の組立およびそれらを組み合わせたブロック組立が行われ，それら各部品を現地に運び，現地にて最終組立が行われるのが一般的である。

現地組立では溶接工事の比重が高く，管類の突合せ溶接は，通常全継手の20～30%が現地施工となる。現地工事では一般に屋外作業や高所作業が多く，工場溶接に比べ作業環境が悪いため，品質の安定やコスト低減の観点から，工場製作部分のブロック化・大型化が望まれる傾向にある。

3. 溶接・接合プロセス及び施工

3.1 過熱器・再熱器の組立

過熱器は多数の管からなり，外部から燃焼ガスとの接触あるいは輻射による熱を受け，小径曲がり管を平面上に並べたパネル構造となっている。これらの代表的な製作の概要を図3に示す。なお，再熱器も過熱器とほぼ同様の構造および製作手順である。

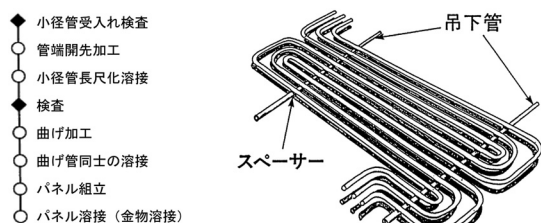


図3 過熱器・再熱器製作の概要⁴⁾

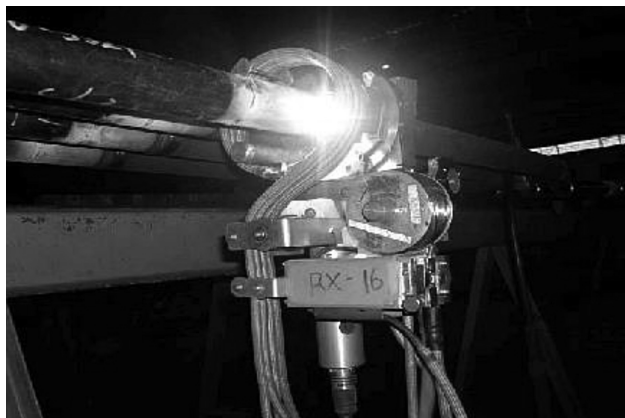


図4 TIG 円周溶接装置

小径管受入れ検査後、順に管端の開先加工、長尺化溶接、曲げ加工、パネル組立、付着金物取り付けとなる。小径管受入れ検査・開先加工、長尺化溶接までは、小径管が直管の状態です突合せ溶接を行うことで自動化が図られている。

溶接後、自動的に検査された長尺の小径管は、曲げ加工ラインに送られ、自動的に曲げ加工機で加工される。曲げ加工された管はリフティング装置を用いて組立ステージに搬送され、付着金物等が取り付けられる。

曲げ管同士の突合せ溶接は、小径管用の自動溶接装置が用いられている。例として、TIG 円周溶接装置による溶接状況を図4に示す。溶接条件（電流、電圧、ワイヤ送給速度）は、溶接ポジション毎にコンピューターで管理され、全姿勢溶接が可能となっている。現在では1人で複数台（3～6台）の溶接装置を用いて多アーク化を図り、溶接効率及び溶接品質の大幅向上が図られている。

さらに、出来上がったパネル構造を固定するため、数種類の付着金物が小径管に溶接される。この内、サドルスペーサの溶接は、ボイラ1缶あたり1～2万箇所もあることから、ロボットによる自動溶接装置が適用されている。例として、サドルスペーサロボット溶接装置を図5に示す。予熱、仮付け溶接、すみ肉溶接および角巻溶接まで、この装置で一環して行われている^{4,5)}。この例のようにロボット化された溶接ラインもあるが、個々の付着金物の形状が大きく異なる場合には、半自動MAG溶接が採用されている。

3.2 火炉壁の組立

火炉壁パネルは、図6(a)に示すように、長尺の小径管とそれをつなぐフィンとから構成され、小径管とフィンのすみ肉溶接によって火炉壁パネルとして一体化される。

ここでも自動化が図られており、その例として、専用の自

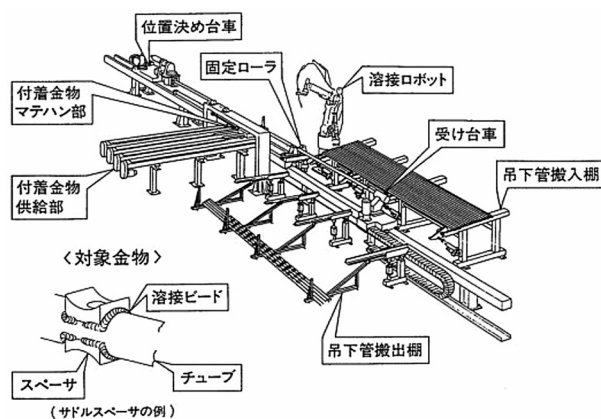
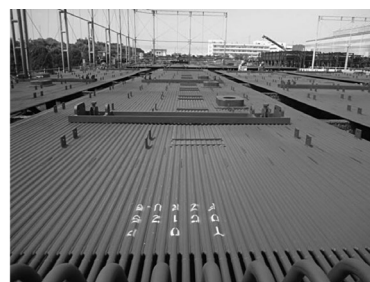
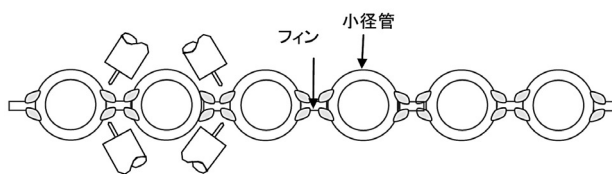


図5 サドルスペーサロボット溶接装置⁴⁾



(a) 火炉壁の断面図



(b) 火炉壁の自動溶接の状況

図6 火炉壁の両面自動溶接装置

動溶接装置を図6(b)に示す。管とフィンは送りローラで上下から押さえられ、上下両面からの多電極MAG溶接装置で溶接される。本装置は既に実用化されてから20数年を要しており、少しずつ改良が進められ、長く培われてきた自動溶接技術といえる。これらの火炉壁パネルを複数組み合わせることで、ボイラの内側と外側を隔てる火炉壁構造となる。

3.3 管寄せの組立

各種熱交換器を構成している数百～数千本の小径管は管寄せに集められる。それら小径管は、座が設けられた管寄せと溶接される。例として、図7にロボットによる自動

溶接装置を示す。図のように、ある間隔で林立した多数の小径短尺管台（スタブ）の溶接において、特殊な曲がり形状のMAG溶接トーチを用いることで、溶接トーチとスタブとの接触を回避し、常に下向き姿勢でのすみ肉溶接を可能としている。さらにロボットによる繰り返しの溶接が可能となり、従来の手溶接に比べ、作業工数の大幅低減が図られている^{4, 5)}。

4. 検査・品質管理

4.1 製造前溶接試験による承認

通常、溶接継手の強度は母材の強度と同等以上であることが求められる。そこで、所定の溶接条件で施工した溶接継手から試験片を切り出して強度および品質をあらかじめ検証しておく。その条件の範囲でのみ溶接施工が許される。このような溶接の再現性を保障するために、溶接施工要領に要求される確認事項を詳細に記したものが施工要領書である。

ボイラの溶接施工にあたっては、ASME (American Society of Mechanical Engineers) などの規格認証機関の規格に従った試験を行い、施工要領書の承認を得ておく必要がある。

4.2 製造中の検査手法

染色探傷試験、磁粉探傷試験、超音波探傷試験、放射線透過試験などの非破壊検査は溶接継手の品質を担保する

ために、法的に実施を求められているものや、メーカーノウハウに基づき自主的に実施しているものがある。後の工程で検査が出来なくなる箇所、例えば溶接した突合せ継手に付着金物を溶接する場合においては、前もって染色探傷試験などの表面検査を実施する必要がある。このように非破壊検査は、製造工程の中で最適なタイミングで行われる必要がある。各ボイラメーカーで効率的に実施されている。

なお、ボイラの場合、最終的に機器全体の信頼性を確認するために、最高使用圧力の1.5倍の水圧で耐圧試験が行われており、この水圧試験に耐え、かつ漏洩がないことを確認しなければならない。

4.3 使用中の検査技術

発電プラントとして溶接部の信頼性は、製造時だけでなく、長時間の運転に耐えられることが求められている。そこで、定期的な保守・メンテナンスを効率的に行うため、検査技術が必要となる。以下に例として、ボイラプラントの検査技術を述べる。

4.3.1 溶接部のクリープ損傷評価法

火力発電プラントの高温耐圧部に使用される溶接部のクリープ損傷を、短時間に評価する余寿命診断技術（組織対比法+ボイド個数密度法）が開発され、この検査結果を踏まえた応急対策が定検期間内で実施されている⁶⁾。

組織対比法とは、CrMo鋼の溶接熱影響部を対象として、レプリカによる組織観察から寿命消費率を評価するものである。機械的損傷、顕微鏡組織および析出物分布を総合的に判断し、余寿命を推定する。既に高温配管、管寄せ

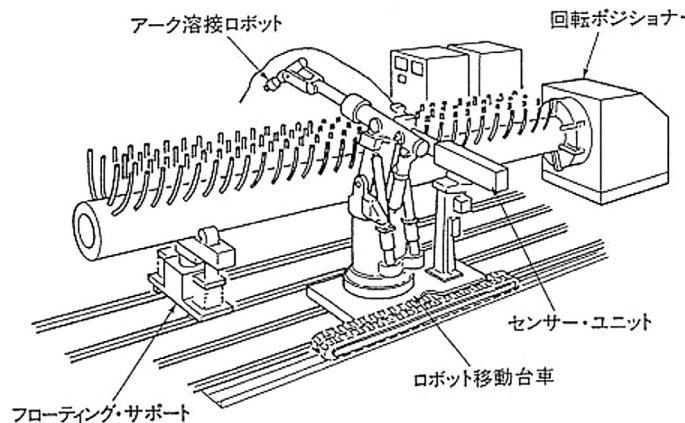


図7 短尺管台ロボット溶接装置⁴⁾

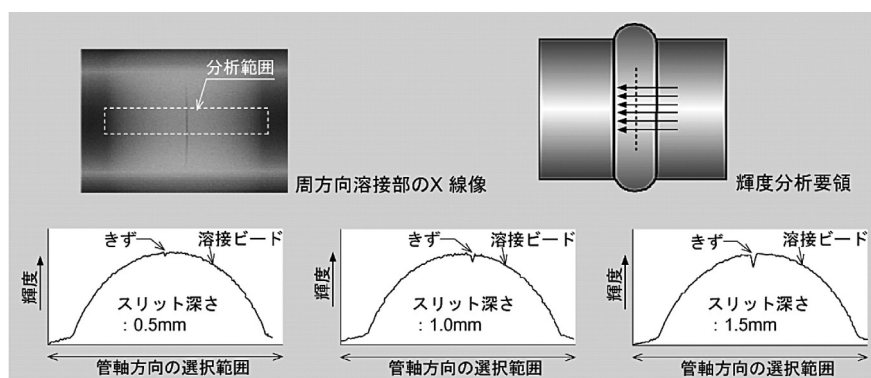


図8 X線画像処理によるき裂評価技術⁷⁾

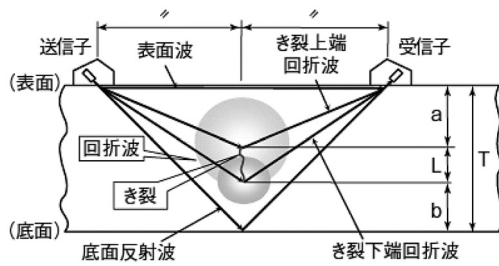


図9 TOFD法の原理⁹⁾

等において多数の実績を有している。

ボイド個数密度法とは、低合金鋼（1～2%Cr鋼）溶接部の脆性クリープ損傷評価法で、クリープ寿命の中盤以降に発生するクリープボイドの生成、進展、成長挙動をレプリカの高分解能デジタル顕微鏡組織を画像処理することにより定量化し、余寿命を評価するもので、単位面積当たりのボイド個数から寿命を精度よく評価できる。組織対比法との併用により、クリープ初期から終盤までの幅広い範囲のクリープ損傷評価をカバーできる。

4.3.2 溶接継手の内面検査技術

1) デジタルX線法

管の突合せ溶接継手の内面に生じたき裂や欠陥は、比較的大きな欠陥で無ければ、放射線透過試験で検出することはできなかった。しかし、デジタル技術の発達に伴い、微小なき裂や欠陥を検出することのできる最新の非破壊検査技術が開発されているので以下に紹介する。

図8は円周溶接部の内面にあらかじめ加工した幅0.1mm、深さ0.5, 1.0, 1.5mmの3種類の円周方向スリット（加工傷）のX線輝度測定結果を示す。管軸方向の輝度分布を取ると、溶接ビードの曲率に沿って輝度変化していることがわかる。また、溶接ビード中央の管内面側（裏側）に円周方向スリットを加工しているの、溶接ビード中央にスリット深さに対応した輝度変化が認められている。このように溶接部内面側に発生した傷についても、その深さを評価することができる。検証試験の結果、溶接部内面のき裂の深さは、その輝度により算出でき、評価誤差 $\pm 0.3\text{mm}$ の精度でき裂深さの計測が可能となったことが示されている⁷⁾。

2) TOFD法（Time of Flight Diffraction）

溶接継手のクリープによるType IV破壊のように、溶接継手の内部に存在するき裂の高さを精度よく、定量的に評価が可能なTOFD法の原理を図9に示す⁹⁾。送信および受信の2つの探触子を使用することが特徴の超音波探傷法

である。TOFD法は、き裂先端からの回折波を検出する方法であるため、欠陥の傾きの影響を受ける反射波を検出する従来法と比較し、欠陥の向きに影響されず、かつ回折波の伝播時間から欠陥の高さを定量的に評価できる。また、検出されたき裂高さをもとに、応力解析法等によりき裂伝播寿命を評価する場合がある。

5. おわりに

火力発電ボイラの高効率化のために、蒸気温度・圧力の上昇が望まれ、それを実現するためのボイラ高温材料が開発されてきた。それに伴い、新しい溶接材料もその特徴を活かすべく開発されている。さらに高温材料、溶接材料の開発とともに、溶接施工法の開発は重要な製造技術となってきた。

一方、ボイラ製作現場の状況を見ると、熟練労働者の不足、作業者の高齢化、若年層の補充不足の中で、品質の維持向上とコスト低減が要求されており、新興国メーカーとの熾烈な競争の中にある。

このような環境の中で、火力発電用ボイラを製作していくためには、人力による溶接作業を自動溶接・ロボット溶接・無監視溶接に替えていく必要があり、その努力が長年にわたって続けられ、モノづくりがなされてきた。新興国メーカーとの差別化を図り、今後も日本が世界をリードしていく上で、溶接技術はその基盤となる要素技術であり、溶接技術が果たすべき役割は大きいと考える。

参考文献

- 1) 鴨：第II部産業界の最近の動向と溶接工学 III 構造製作 6. 压力容器・化学プラント、溶接学会誌、81-5 (2012)、100-102.
- 2) 火力原子力発電技術協会：入門講座 [ボイラ] I. 概説、火力原子力発電、56-4 (2012)、348-363.
- 3) 中田：ボイラ（日本産業機械工業会ボイラ・原動機部会）、溶接学会誌、82-1, (2013)、42-45.
- 4) 河野ら：火力発電用ボイラの組立溶接技術の現状と対応、溶接学会全国大会講演概要集、47 (1990)、21-26.
- 5) T. Kawano: Recent Trends of Automatic Welding for Boilers in Japan, IIW Doc. XII 1389-95, (1995).
- 6) 西村ら：定検時期変更のための三菱火力ボイラ・配管寿命診断システム、三菱重工技報、37-1 (2000)、46-49.
- 7) 取違ら：X線画像処理によるボイラのみき裂評価技術、三菱重工技報、46-2 (2009)、66-70.
- 8) 火力原子力発電技術協会：入門講座「II. ボイラおよび付属装置の保守管理」、火力原子力発電、63-5 (2012)、93-102.