

原子力（プロセス・施工編）*

鴨 和彦**



Nuclear Power (Process & Construction)*

by KAMO Kazuhiko**

キーワード 原子力発電所, 溶接, 品質, クラッド, 補修, 中性子照射

1. まえがき

資源の大部分を輸入に依存する我が国では、発電用エネルギー源の多様化を図るため1970年代から原子力発電が推進されてきた。原子力発電プラントは、核分裂の制御と冷却に加えて発電までを含むため、部品点数は1000万点にも上る巨大システムであり、万が一損傷が発生した場合、福島第一発電所で発生した事故のように周辺の放射能汚染等の社会への影響が大きい。また、運転開始後の主要機器は、人のアクセスが制限される放射線環境状態にあるという特殊性を有している。そのため、設計・材料・工法とも高い品質が求められる。

原子力発電所の製作では、溶接工数が半分弱を占めること、および材質変化と残留応力を伴う溶接部では、母材と比較して損傷が発生しやすいことから、原子力発電所の信頼性は溶接部の品質に依存するところが大きい。

そこで、原子力発電における溶接施工技術と品質管理と技術に関して紹介する。

2. 製品と工作法

図1にPWR（Pressurized Water Reactor：加圧水型原子炉）の最重要機器である原子炉容器の鳥瞰図を示す。外径約4.5m×高さ約13m×厚さ220mmの極厚圧力容器であり、材質は延性破壊と脆性破壊に対して信頼性の高いMn-Mo-Ni系の調質型低合金鋼が採用されている。

図2には、PWR型原子力発電所の蒸気発生器を示す。外径約4.5m×高さ約20m×厚さ100mmの大型熱交換器であり、材質は原子炉容器と同じ調質型低合金鋼が採用

されている。熱交換を担う伝熱管は外径約22mmの690系Ni基合金であり、U字型に曲げられて約3400本が配置

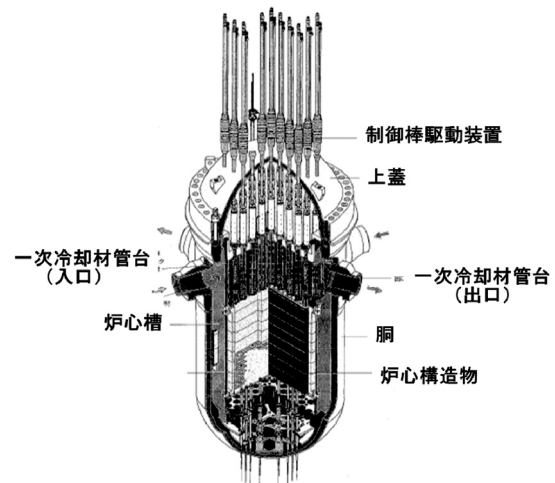


図1 PWR型原子炉容器鳥瞰図

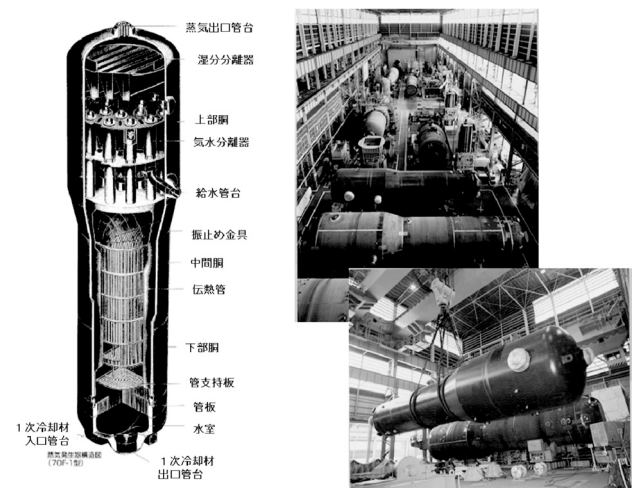


図2 PWR型蒸気発生器製作状況

*原稿受付 平成26年7月28日

**正員 三菱重工業株 Member, Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

されている。

これらの重要機器に用いられる溶接工法は、溶接規格を順守し、性能と信頼性が実証された技術が適用されている。

3. 溶接・接合プロセスおよび施工

腐食による水質劣化を防止するために、一次系機器の接液面は低合金鋼の上にステンレス鋼がクラッド溶接されている。溶接割れを防止しつつ良好な耐食性を有するクラッド溶接金属を得るには、母材の希釈を可能な限り低減し、かつ安定させることが重要であり、以下のクラッド溶接工法が採用されている。胴や球形鏡板のような大きな曲率を有する面には、図3に示す高能率かつ低希釈な幅広のエレクトロスラグによるクラッド溶接が採用されている。溶接能率を向上させるには幅広電極を用いることが有効ではあるが、溶接入熱過多の場合、溶接熱影響部でアンダービードクラッキングが発生する可能性があるため、電極の幅に制限を設けている。曲率が小さい管台廻りの内面には図4に示すように、管台形状のCADデータを元にポジショナーとマニピュレータを同期

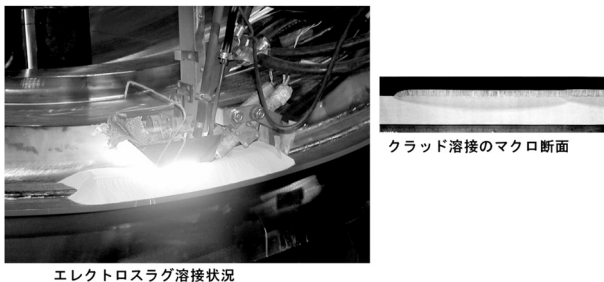


図3 エレクトロスラグクラッド溶接工法

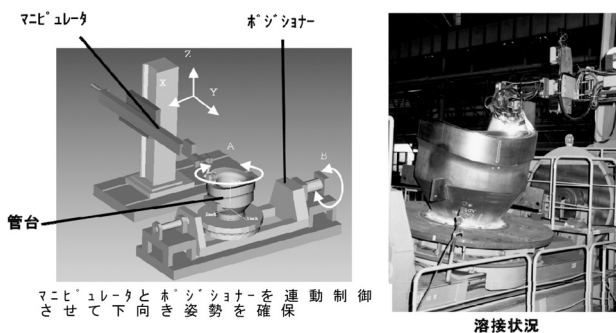


図4 管台内面 TIG クラッド溶接工法

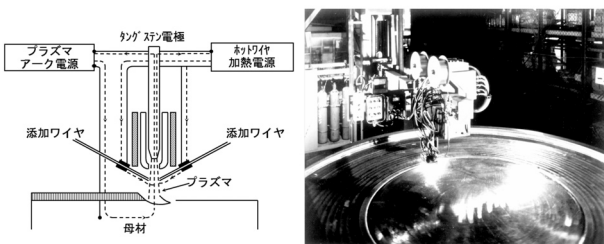


図5 管板プラズマアーククラッド溶接工法

制御させ、常に低希釈が得やすい下向き姿勢を保ちながらの自動TIGクラッド溶接が適用されている。また、690系Ni基合金製伝熱管との溶接が必要な蒸気発生器管板には、同材となる690系Ni基合金のクラッド溶接が施工されており、図5に示すように2つの加熱ホットワイヤを用いたプラズマアーク・クラッド溶接法が用いられ、低希釈なクラッド溶接を実現している。

低合金鋼製原子炉容器や蒸気発生器の管台とステンレス鋼製一次冷却材管を接合するには異材溶接となる。そこで、線膨張係数が両材料の中間値となり熱応力の緩和が可能な690系Ni基合金を溶接材料とし、低合金鋼側に低希釈なプラズマアーク溶接で肉盛溶接した後、ステンレス鋼製セーフエンド部と690系Ni基合金溶接金属を用いて溶接する。この溶接は、図6に示すようにアークモニタを搭載した自動TIG溶接装置2台を用いて遠隔操作により施工している。

原子炉容器の上蓋には制御棒を挿入する690系Ni基合金製の貫通管台が取り付けられる。この溶接では、低合金鋼に設けた座ぐり部に690系Ni基合金を肉盛溶接した後、図7に示すように3次元状の貫通管台とのJ溶接部を円筒座標系の駆動軸を有する自動TIG溶接装置で施工している。

蒸気発生器の胴部は伝熱管等の内装品が挿入されるため高い真円度が要求される。胴の長手溶接に従来は狭開先マグ溶接が適用されてきたが、積層パス数が多いため溶接変形のコントロールが難しく、かつスラグ除去作業が必須のため完全な自動溶接化の妨げになっていた。そこで、パス数削減による低入熱化と施工因子の自動制御化を目的として、図8に示す大型真空チャンバーを用いた電子ビーム溶接が蒸気発生器の長手溶接に適用され、精度と品質の向上に貢献している。

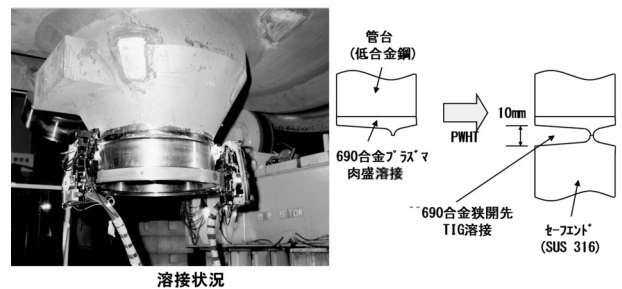


図6 管台セーフエンド異材溶接工法

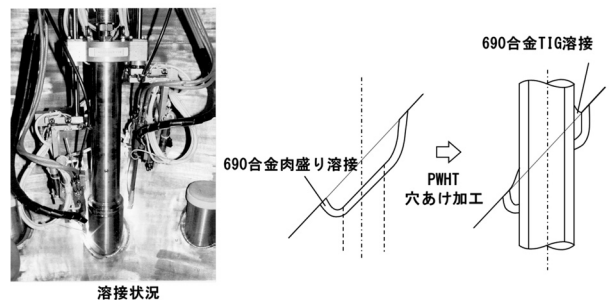


図7 上蓋管台溶接工法

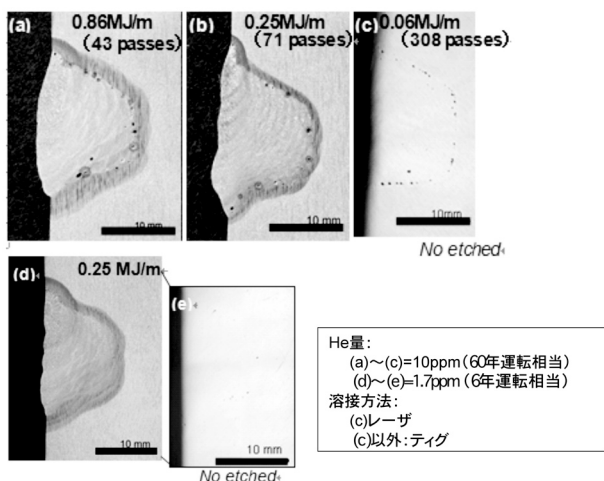


図13 中性子照射低合金鋼の溶接結果⁵⁾

らず、更なるポロシティ抑制が可能な溶接方法の検討が必要である⁵⁾。

4. 検査・品質管理

原子力発電所の溶接品質体系図を図14に示す。ISO9001では“製造及びサービス提供の過程で結果として生じるアウトプットが、それ以降の監視又は測定で検証することが不可能で、その結果、製品が使用され、又はサービスが提供された後でしか不具合が顕在化しない場合には、組織は、その製造及びサービス提供の該当するプロセスの妥当性確認を行わなければならない”と規定されており、溶接工程はまさにこの規定に該当する。このため、各工程で品質を作り込むプロセス管理が重要であるとともに、継続的な品質改善を続けること、すなわち、PDCAを上手く回していくことも重要である。原子力発電所溶接部の品質保証では、ISO9001が制定される前からこの考え方を採用し、品質確保に努めてきた。新設計・新工法のレビュー、図面のレビュー、重要機器は全工程の実績管理（トラベラ管理）、溶接方法・溶接士毎の溶接不良率の集約・評価、溶接記録を含む品質記録の永久管理もその活動の一環である。

また、溶接規格にない溶接工法を採用する際には、第三者機関経由で学識経験者を交えた確性試験を実施し、常に安全側となる工法であることを実証した上で実機に適用している。

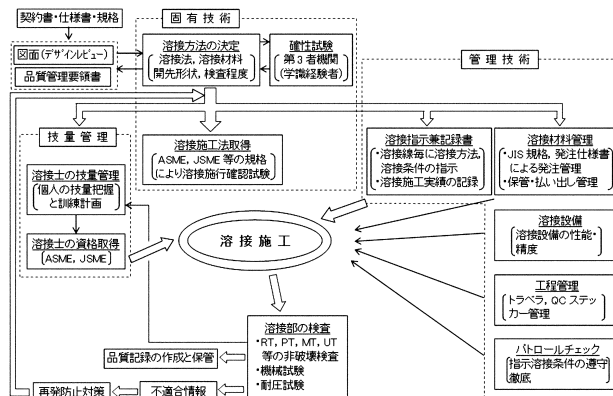


図14 原子力発電所溶接部の品質保証体系

5. おわりに

福島第一発電所の事故は、原子力発電所の安全性の直結する溶接部の品質確保が重要であることを再認識させるものであった。この結果を受け、原子力エネルギーの利用に関して逆風が吹いている。既設原子力発電所の再稼働には様々な審議の承認や自治体との合意に長い時間が必要であり、かつ新規建設が凍結されている。このような逆行の中、溶接技術者と溶接士の技術および技能伝承をしっかりと実施し、長期的に原子力発電所を安全に稼働させることができる体制を維持し続けることが重要であると思われる。

参考文献

- 1) 小山：次世代エネルギー産業の動向とそれに関わる溶接技術へのニーズと課題・原子力発電，溶接学会誌第83巻第1号（2014），23。
- 2) 正野：電子ビーム溶接の大型構造物への展開，溶接学会誌第60巻第1号（1991），30。
- 3) 鴨，成田，西村，中村，平野，長谷川：PWR型原子炉容器管台内面に対する INLAY 工法の開発と実機適用，第253回化学機械溶接研究会資料，CP-09-31（2010）。
- 4) 小藪，浅野，高橋，坂本，川野，中村，橋本，越石，加藤，桂，西村：中性子照射を受けたステンレス鋼およびニッケル合金の溶接性について，溶接学会論文集，第18巻第4号，（2000），606。
- 5) 仲田，小沢，鴨：中性子照射された原子炉（圧力）容器の補修溶接，溶接学会論文集，第24巻，第3号，（2006），205。