

4-7

溶接・接合技術の適用(压力容器)

—原子炉压力容器について—*

河原 渉**



Welding and Application of Joining Technology (Pressure Vessel) –Nuclear Reactor Pressure Vessel—*

by KAWAHARA Wataru **

キーワード

軽水炉, 改良型沸騰水型炉, 原子炉压力容器, 挟開先マグ溶接, 肉盛溶接, エレクトロスラグ溶接, ホットワイヤティグ溶接, CRD スタブチューブ自動溶接, RIP モータケーシング自動溶接

1. はじめに

現在世界で稼動している商業用原子炉の中では軽水炉 (Light Water Reactor: LWR) が主流を占めている。LWR には沸騰水型炉 (Boiling Water Reactor: BWR) と加圧水型炉 (Pressurized Water Reactor: PWR) があるが、共に原子核反応を行う炉心を内蔵する重要な容器を有し、原子炉压力容器 (Reactor Pressure Vessel: RPV) と呼ばれている。

最近では BWR, PWR 共に構造、運用性を改善した改良型炉が開発されており、その中でも改良型沸騰水型炉 (Advanced Boiling Water Reactor: ABWR) は我国で初めて商用炉として実用化され運転されている。

エネルギーの安定供給、温室効果ガスの排出量削減の観点から、現在米国を含め世界各国で原子力発電所の建設計画が進められている。RPV は原子炉設備の中で最も重要な機器の一つであり、高い構造健全性、品質が要求されている。このような背景から、RPV は細心の注意を払い慎重に設計、製造、検査が行われている。本稿は弊社で製造している ABWR RPV の設計、製造、検査について、溶接・接合技術を中心に紹介する。

2. 軽水炉 (LWR)

LWR は低濃縮二酸化ウランを燃料とし、核分裂反応によって生じる中性子の減速材及び冷却材として軽水を利用する形式の原子炉である。この炉型は現在最も世界的

に広く発電用として利用されており、我国でも多数の商業用原子炉が建設され運転されている。

2.1 沸騰水型炉 (BWR)

BWR は減速材であり且つ冷却材の炉水を沸騰させ発生した飽和蒸気 [運転圧力, 温度 (約 6.9 MPa, 285℃)] を発電用蒸気タービンに供給して発電する。本炉型は系統図 (図1) に示すように直接サイクルであるため構成系統が比較的単純である。

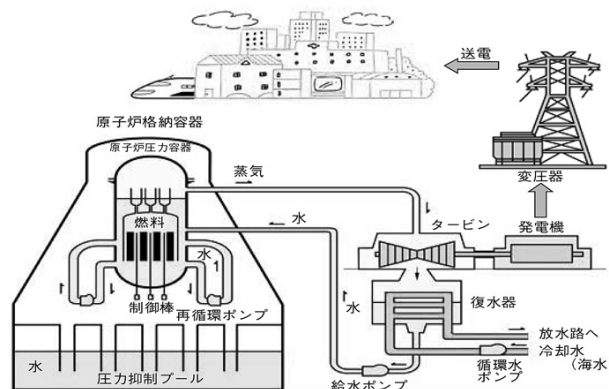
また炉心での蒸気ボイド発生による自己制御性があること等安全面の特徴を有している。

尚、ABWR は日本国内で4基運転中、2基建設工事中の状況である。

海外でも建設中のプラントはあるが未だ運転には至っていない。

2.2 加圧水型炉 (PWR)

PWR は炉心内で炉水の沸騰を生じないように減速材であり且つ冷却材の炉水を加圧して運転する形式の炉型で



出典：資源エネルギー庁「原子力2008」

図1 BWR の系統図

*原稿受付 平成22年1月12日

** パブコック日立(株) 呉事業所 Babcock-Hitachi K.K. Kure Division

ある。本炉型は系統図（図2）に示すように1次系に加圧器を設けて圧力を調整している。炉心で加熱された1次系冷却水〔運転圧力、温度（約15.4MPa、325℃）〕は蒸気発生器で熱交換を行い、2次系（発電用蒸気タービン）に蒸気を供給する。このため、本炉型では原子炉系（1次系）とタービン系（2次系）が分離されており、それぞれ独立した水管理が可能なこと、タービンを含めた発電設備を放射線管理区域外に設置できる等の特徴がある。

尚、改良型加圧水型炉（Advanced Pressurized Water Reactor：APWR）は国内外で建設中のプラントはあるが

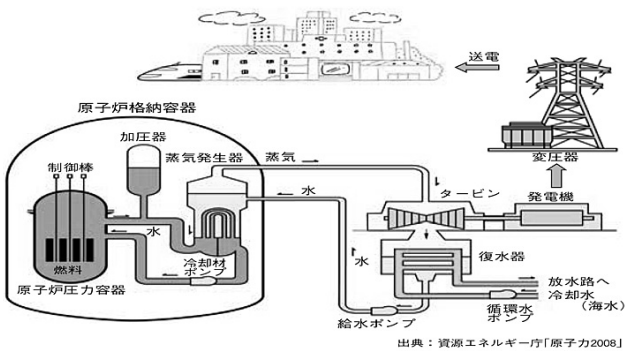


図2 PWRの系統図

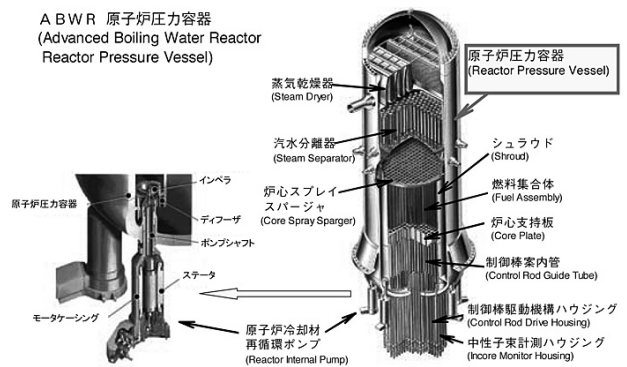


図3 ABWR RPVの鳥瞰図

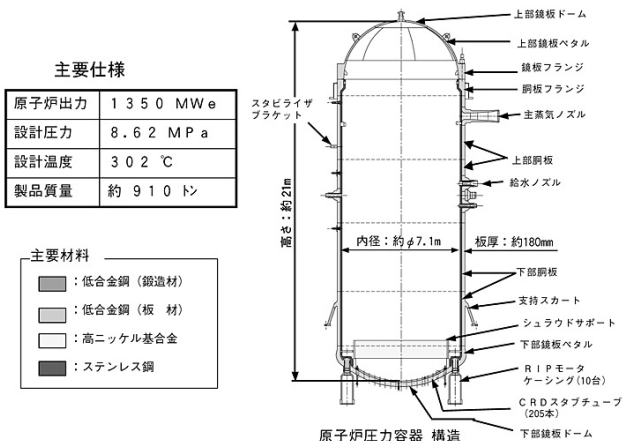


図4 ABWR RPVの主な仕様・構造

未だ運転には至っていない。全世界ではBWR、PWRを含め、運転中の原子力発電設備は約3億8600万kWe（2008年）の設備容量を持っており、このうちBWRが8600万kWe、PWRが2億5200万kWeであり両者で88%を占めている。

我国では1970年3月にBWR初号機である日本原子力発電（株）敦賀発電所1号機が営業運転に入って以来、2009年12月に運転が開始された北海道電力（株）泊発電所3号機まで、合計56基の原子力プラントが試運転中である。我国では両者を合わせて4820万kWeの設備容量を有しており、その内訳はBWRが2880万kWe、PWRが1940万kWeである。

3. ABWR RPVの構造

ABWR RPV（1350MWe級）の鳥瞰図を図3に、主な仕様・構造を図4に示す。上部鏡板及び胴板を含む重量は約910トンにも達する超大型圧力容器である。

ABWRはRPVの冷却材再循環方式としてインターナルポンプを採用している。従来型に比較して再循環配管、再循環ポンプ等の設備の合理化が図られており、定期検査等における線量当量低減に寄与する構造に改善されている。

RPVは上部鏡板、胴板、下部鏡板及びノズルからなる堅型で支持スカートに支えられ自立した構造になっており、上部胴板に取り付けられたスタビライザブラケットに取り付けられているスタビライザとこの支持スカートにより地震荷重に対しても安全に支持される構造となっている。胴板は縦方向4分割であり、弊社では最近4段共に一体鍛造リングを採用しているが、上部2段は周方向2分割の板材が用いられるケースもある。下部鏡板には制御棒や中性子束計測管を挿入するための多数の貫通穴が設けられている。

最外周部には10台の原子炉冷却材再循環ポンプ（Reactor Internal Pump：RIP）を設置するためのRIPノズル（Reactor Internal Pump Nozzle）とRIPモーターケーシング（RIP Motor Casing）が設けられている。ABWR RPVはRIPモーターケーシングが設けられていることが最大の特徴であり、回転体であるモータを内蔵することから、その取り付け溶接、機械加工に対しては非常に厳しい製作公差が規定されており慎重に製作にあっている。RIPノズル配列のために下部鏡板の形状は皿型に設計されている。胴板には主蒸気ノズル、給水ノズル等のノズルが取り付けられている。鏡板フランジと胴板フランジの結合部は多数の大径高張力ボルトで締め付けられており、そのシート面には金属製Oリングが2重に設置され漏洩を完全に防ぐ構造となっている。

容器内面には腐食を防止する目的でステンレス鋼の肉盛溶接が施されている。一方上部鏡板内面は蒸気に接触する部位であり基本的に肉盛溶接は施されていない。下部鏡板内面は、制御棒駆動機構ハウジング（Control Rod Drive Housing：CRDハウジング）を取り付けるためのCRDスタブチューブ及び炉心構造物を取り付けるためのシュラウドサポート（いずれも高ニッケル基合金）が配

列されており、それらの部品を下部鏡板に取り付けるために、その内面には高ニッケル基合金の肉盛溶接が施されている。

4. 適用規格

RPVの構造に関する技術基準体系を図5に示す。技術基準はASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. III (ASME Code)を参考として制定されたものである。本図は基準体系の関連を示している。国内基準は以前、設計、材料、検査の一部については省令第62号及び告示第501号、溶接に関しては省令第123号(旧第81号)に分類規定されていたが、2006年1月に工認の認可基準である新たに性能規定化された省令第62号では旧溶接省令第123号、告示第501号、告示第452号が統合されASME Codeと同様に包括した規定となった。これに伴い技術基準部分については民間基準である日本機械学会規格である設計・建設規格、溶接規格他を活用することとなった。また、供用期間中検査(In-Service Inspection: ISI)については、従来告示第501号には具体的な規定はなく、民間基準である電気協会の電気技術規定JEAC4205において詳細が規定され、この基準に基づき運用していたが、性能規定化された省令第62号では包括規定され、技術基準として日本機械学会規格の維持規格を活用すること

項目	国内基準			米国基準	
	省令	民間規定		ASME Code	
設計	性能規定化 第62号	設計・建設規格 NC1-2001 NC1-2005 NC1-2008	JIS規格	J E A G ^{*)} 4601	SEC. III SEC. II SEC. IX SEC. V
		溶接規格 NB1-2001 NB1-2007	JIS規格	J E A C 4206 J E A C 4201	
材料					
製作					
検査		設計・建設規格 NC1-2001 NC1-2005 NC1-2008	JIS規格	J E A C 4205	
供用期間中検査 (ISI)		維持規格 NA1-2000 NA1-2002 NA1-2004 NA1-2008		J E A C 4205	SEC. XI

*1: 現在 JEAG から JEAC へ改訂中

図5 RPVの構造に関する技術基準体系

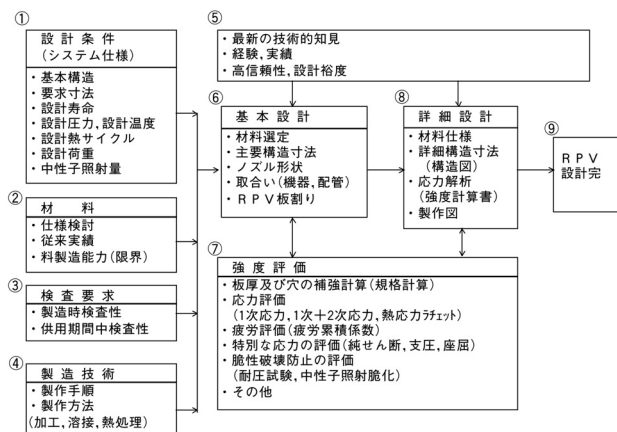


図6 RPVの設計概要・手順例

なった。

5. 設計

コンピュータを用いた有限要素法解析等の詳細解析手法に基づき圧力容器の各部分に対して詳細な応力評価による設計が行われている。設計において考慮すべき荷重として、設計圧力、設計温度、自重、配管反力の他、設計寿命中には発生しないような大規模地震も想定した地震荷重等が含まれている。(敷地周辺の地質・地質構造並びに地震活動性等の地震学及び地震工学的見地から、施設の供用期間中に極めて稀ではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与える恐れがあると想定することが適切な地震)

この他、設計寿命期間中の全ての圧力、温度、流量変化等の過渡的に変化する荷重も考慮されている。これらの荷重を入力して計算した応力は1次応力、2次応力、ピーク応力に分類し、その各々に対応した許容レベルと比較して評価が行われている。更にそのような解析評価結果に基づいて、炉心における照射脆化の影響も考慮し脆性破壊を防止するために必要な材料の靱性値を要求仕様値として定めている。又、設計段階では強度面だけではなくISIに必要な接近性も考慮しながら各部の形状・寸法が決定されている。図6にRPVの設計概要・手順例を示す。

6. 材料

図4に示すように、RPVの主要部には通常の鋼材に比べ靱性や溶接性を高めるために少量の合金成分を加えた低合金鋼(マンガン-モリブデン-ニッケル鋼)が用いられている。以前は上部鏡板、胴板、下部鏡板等に板材を用いたケースもあったが、最近では材料メーカーの技術開発により下部鏡板や胴板にも大型の一体鍛造材が用いられている。

図7に下部鏡板ペタルの外観写真を示す。この部品は約600トンの鋼塊から一体鍛造法で製造され、機械加工による削り出しにより溶接線の無い一体構造になっている。脆性破壊を防止するために設計上材料に要求される

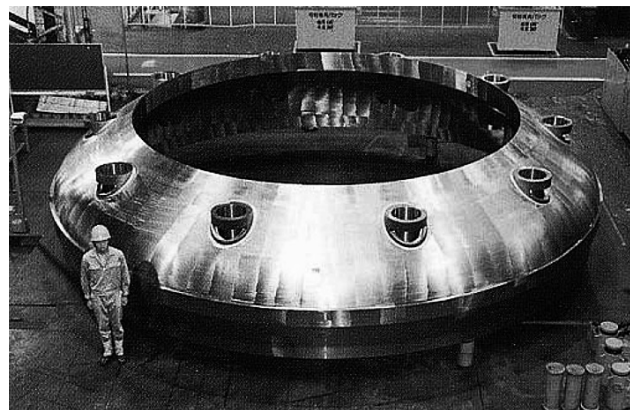


図7 下部鏡板ペタルの外観

関連温度 (RT_{NDT}) は -25°C であるが、不純物の管理、熱処理等の改善により -35°C 程度の高い靱性値を得ることが出来ている。

大型鍛造材を採用することにより溶接線を削減できるために、ISI 期間が短縮でき検査員の線量当量低減が図れる。炉心部に使用される材料については、RPV 特有の問題である中性子照射による脆化についても配慮されている。これらの材料については RPV 製造メーカから材料メーカに対して、製造過程での溶接や熱処理等の材料に及ぼす影響を加味して設計が要求する機械的性質を満たすよう仕様が与えられる。材料は要求仕様を全て満たすことが材料メーカで確認された後発送され、製造メーカに受け入れられる。溶接材料についても母材と同様に熱処理等の製造要領を考慮して仕様を定め、高品質の溶接部が得られるよう配慮されている。ステンレス鋼、高ニッケル基合金の母材、溶接材料については、耐応力腐食割れ性改善の観点から炭素含有量の抑制、不純物の低減等の改善が行われている。

7. 溶接施工

7.1 溶接施工法

RPV の溶接施工法は省令第62号に定められている確認事項に従って溶接施工法試験を実施し、溶接継手部が母材と同等以上の機械的性質を有することを確認しなければならない。従って、未確認の溶接方法による溶接施工は許されず、プラントの計画・設計時点において、新規に確認が必要な溶接施工法取得計画を立案し確認しておく必要がある。新たな溶接施工法を取得する場合、以前は溶接事業者（製造メーカ）が国の指定検査機関（発電設備技術検査協会）に受検申請し、指定検査機関の立会いの下で溶接施工法試験を実施していたが、法令改正により設置者（電力会社）に受検申請し、客観性を有する第三者検査機関の立会いの下で溶接事業者検査として実施するシステムに改定された。従って、以前は RPV に適用する溶接施工法は国の認可を受けていたが、法令改正後は設置者（電力会社）の技術基準に対する適合性の確認を受けるシステムに改定された。溶接施工法試験における主な確認項目は溶接方法、母材、溶接棒、溶接金属、予熱、溶接後熱処理、シールドガス、裏面からのガスの保護、溶加材、ウエルドインサート、電極、フラックス、心線、溶接機、層、母材厚さ等の区分である。

7.2 溶接士

RPV の溶接は技術基準に対する適合性が確認された溶接士のみが作業に従事できる。新たに適合性の確認を受ける溶接士は省令第62号に定められている確認項目に従い技能確認試験を実施し、非破壊検査及び曲げ試験に合格しなければならない。新たな溶接士資格を取得する場合も、7.1 項に記載した溶接施工法と同様の手順で申請手続きを行う必要がある。溶接士の種類は、被覆アーク溶接等の手溶接士と自動ティグ溶接等の自動溶接士に区分されており、資格の有効期限は各々 2 年、10 年である。RPV は製作開始から完成、発送までに約 2～3 年要しており溶接士の資格が失効しないよう適切に管理すること

が重要である。溶接士の資格更新は新たに受検し適合性の確認を受けるケースと、溶接作業実績による資格更新がある。溶接作業実績による資格更新では、溶接士が溶接した製品が耐圧試験に合格することがその条件になっている。技能確認試験における主な確認項目は溶接方法、試験材、溶接姿勢、溶接棒、溶加材、心線、母材の区分である。

7.3 溶接施工管理

RPV の品質は溶接によって左右されると言っても過言ではない。溶接作業をする際には、認可された溶接施工法、溶接士の指定は勿論のこと、溶接作業に関連する注意事項を記載した溶接作業要領書や溶接作業指示書がエンジニアによって準備され、現場で適切に作業が進められるよう配慮されている。また、製造現場では溶接作業、検査等の作業ステップを記載した図書が準備され、決められた手順通り作業が進められている。

7.4 RPV の溶接

7.4.1 主継手の溶接

RPV の胴体の板厚は約 180 mm という極厚である。従って、胴板と胴板の溶接、胴板とノズルの溶接は、この板厚を欠陥なく溶接する必要がある。一般的には比較的能率の良いサブマージアーク溶接法が採用されているが、弊社では狭開先マグ溶接法を開発し、約30年前から RPV の主継手から適用を開始、現在では胴板とノズルの溶接も含め主継手の溶接に全面的に適用している。図 8 に弊社で開発した狭開先マグ溶接法の概要を示す。

本溶接法は開先角度がほぼ垂直であるため壁際に融合不良を起こしやすい。この対策として多くの方法が考えられているが、弊社ではワイヤに予め曲げ癖を付け、開先内に送り込むワイヤバンド方式を採用している。コンタクトチップの先端から開先内に送給されるワイヤは周期的にその向きを変え、十分両開先壁を熔融することが出来る。トーチも小型化しており、板厚に関係なく開先幅は約 10 mm で溶接が可能である。サブマージアーク溶接法と比較すると下記点が優れている。

- (1) 溶接部の幅が約 10 mm と狭く、入熱量が低いため、溶接部の靱性が優れている。
- (2) 1 パス 1 層の溶接法であり、溶接金属量が少なく、溶接変形が小さい。

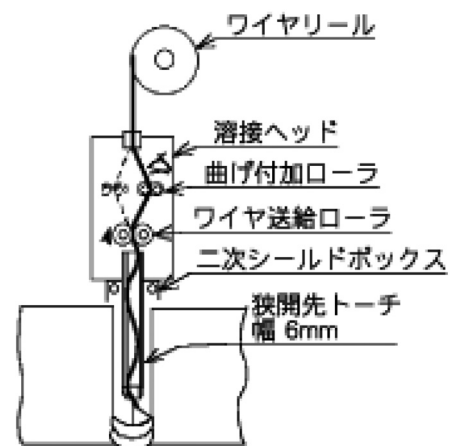


図 8 狭開先マグ溶接法

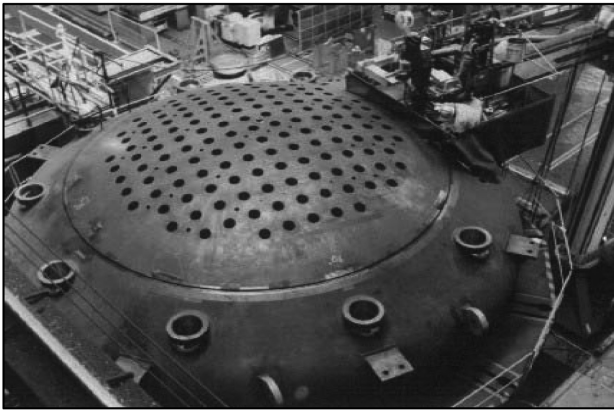


図9 狭開先マグ溶接状況

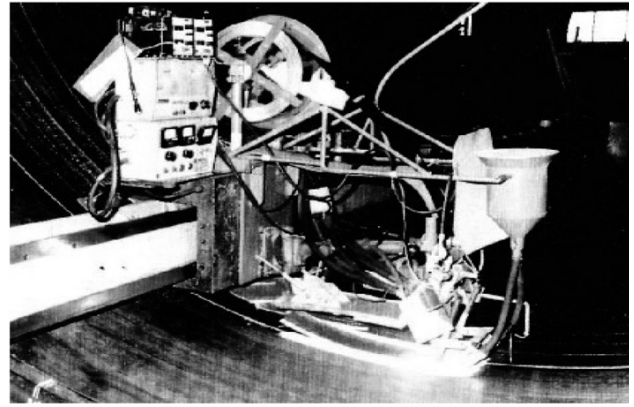
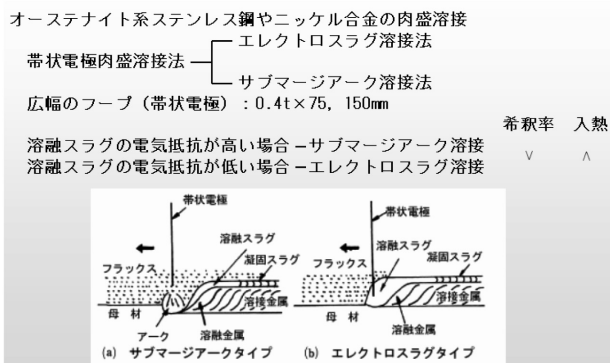


図11 ESW 適用状況



出展：(株)産業技術サービスセンター「接合・溶接技術 Q&A1000」

図10 ESW と SAW の比較

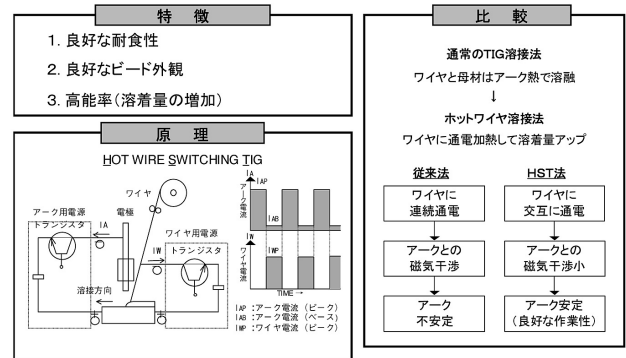


図12 HST 溶接法

(3) 溶接部に残留する水素量が少ないため、溶接部に発生する低温割れ感受性が低い。

図9は下部鏡板ペタルとドームの溶接を大型ポジション上で狭開先マグ溶接している状況を示しているが、この溶接部の板厚は約 300 mm にも達している。

7.4.2 肉盛溶接

RPV 胴板の内面にはステンレス鋼の肉盛溶接が、下部鏡板内面には高ニッケル基合金の肉盛溶接が行われている。肉盛溶接では肉盛部の耐食性の観点から母材の希釈を出来る限り低く抑えることが重要であり、そのためにエレクトロスラグ溶接法 (Electroslag Welding : ESW) やサブマージアーク溶接法 (Submerged Arc Welding : SAW) が適用されている。ESW と SAW の比較を図10に、RPV 胴板内面への ESW 適用状況を図11に示す。溶接材料及び溶接電源を含めた溶接装置の開発により電極の広幅化が図られており150mm 幅まで実用化されている。主蒸気ノズル内面等の狭隘部にもステンレス鋼、高ニッケル基合金の肉盛溶接を施工する。弊社では高品質ではあるが比較的能率が悪いという欠点があるティグ溶接法を能率面で改善したホットワイヤティグ溶接法 (Hot Wire Switching TIG : HST) を開発し実製品に適用している。HST 溶接法の概要、適用状況を図12, 13に示す。弊社の HST 溶接法はワイヤをパルス加熱により瞬時に加熱する方式であるため、磁気干渉が無視できる程



図13 HST 溶接法適用状況

度であり、アークが非常に安定していることが特徴である。また、ワイヤ送給量を調整することにより一般のティグ溶接法よりも希釈率を低くコントロールすることが可能であり、耐食性の観点からも優れている³⁾。

アーク電圧制御装置 (Arc Voltage Control : AVC) との組み合わせにより高品質溶接部を得ることが出来る。

7.4.3 制御棒駆動機構ハウジング取付け用 CRD スタブチューブの溶接

CRD スタブチューブの員数は合計 205 本であり、下部鏡板に溶接で取り付けられている。(材質は高ニッケル基合金) 各々の間隔が狭く、且つ開先形状が 2 次元対称で

はなく、下部鏡板の傾斜面に楕円状に変化する複雑な形状であり自動溶接化が困難であったため、過去においては被覆アーク溶接法で手動溶接していた。このためパス間でのビード形状を修正するためにグラインダによる手入れが必要であり多大な労力を要していた。このような状況下で、この溶接部の自動溶接化を図ることが長年の夢であった。弊社では、高品質溶接法である HST 溶接法と 6 軸を持つ自動溶接装置を組み合わせた溶接技術を開発し、実製品を模擬した試験（モックアップ試験）を行い、その品質を確認後、ABWR 初号機から実製品に適用し現在に至っている。オペレータは下部鏡板の傾斜角度と溶接条件を入力するだけで、マイコンが開先部の楕円軌跡を計算し自動溶接することが出来る。自動溶接装置の概要を図14に示す⁴⁾。

7.4.4 RIP モータケーシングの溶接

下部鏡板の外周部には10台の RIP ノズルが配列されており、RIP ノズルに RIP モータケーシングが溶接により取り付けられている。図15にその溶接構造を示す。当初の設計では RIP ノズルと RIP モータケーシングの隙間は 0.5mm であったが、溶接部の非破壊検査性を改善するために、その隙間が 18mm に拡大された。RIP モータケーシングは RIP モータを内蔵することから、モータとの取り付け部には厳しい寸法公差が要求されている。寸法公差を守るために、この溶接部は RPV の最終焼鈍後、突合せ溶接を実施している。RIP ノズルと RIP モータケーシングの開先部は低合金鋼母材部に高ニッケル基合金が肉盛溶接されており、内径 240mm の内面側から高ニッケル基合金の溶材を使用し、遠隔自動溶接装置を用いて横向き姿勢で突合せ溶接する。この溶接部の非破壊検査を行うために、非破壊検査装置を挿入するための窓が下部鏡板の RIP ノズルスカート部に設けられている。溶接位置が RIP ノズル頂部から約 260mm と深いので、溶接作業中にアークの状況や溶接部の状況を直接監視できないため、遠隔操作可能な自動ティグ溶接装置を開発し、モックアップ試験、溶接士のトレーニングを経て技術確立後、実製品に適用した。図16に溶接装置の構成を示す。本装置は下記特徴を有している^{5,6)}。

- (1) 小型 CCD カメラによるテレビモニタ監視遠隔操作式自動ティグ溶接装置
- (2) ハイパルス電源採用
- (3) AVC 採用
- (4) オペレータの技量に依存しない溶接とするため、初層から最終層までの全溶接条件をプリセット

溶接により裏波が形成されるので溶接部の非破壊検査性を確保するために、溶接後この裏波を除去している。

RIP ノズルスカート部の窓を利用し、約 18mm 隙間内に特殊装置を組み立て、図17に示すように裏波を仕上げている。溶接後、放射線透過試験（RT）、液体浸透探傷試験（PT）及び目視検査（VT）を実施し溶接部の健全性を確認している。各検査を実施する場合もスカート部の窓を利用し、約 18mm の隙間部にテレビカメラ付の特殊検査装置を挿入し検査している。実製品の溶接の経験をベースに、現在では狭開先溶接装置を開発し、実製品に適用し更なる効率化を図っている。図18に RIP モータ



図14 CRD スタブ自動溶接装置

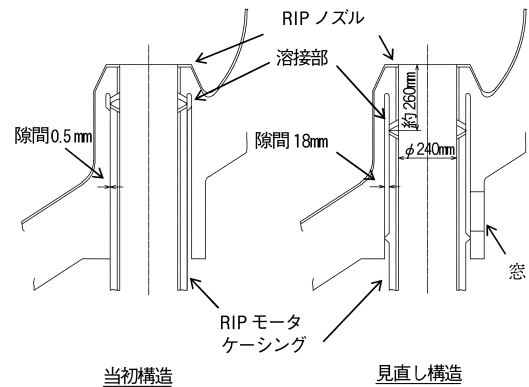


図15 RIP モータケーシング溶接構造

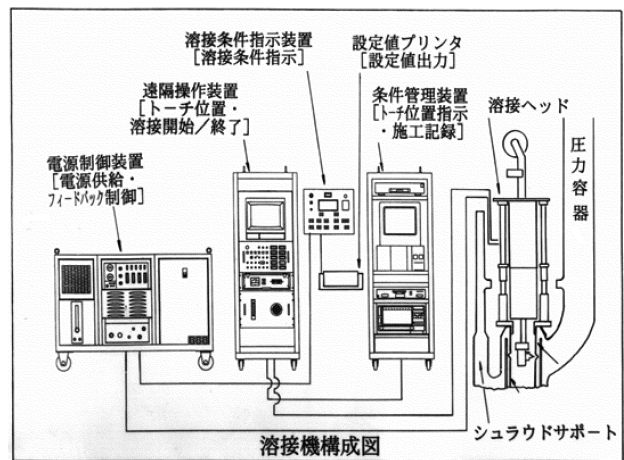


図16 RIP モータケーシング自動溶接装置

手順	ステップ1	ステップ2
仕上げ要領	溶接部 パイト	溶接部 フラップホイール
備考	荒仕上げ	最終仕上げ

図17 裏波仕上げ

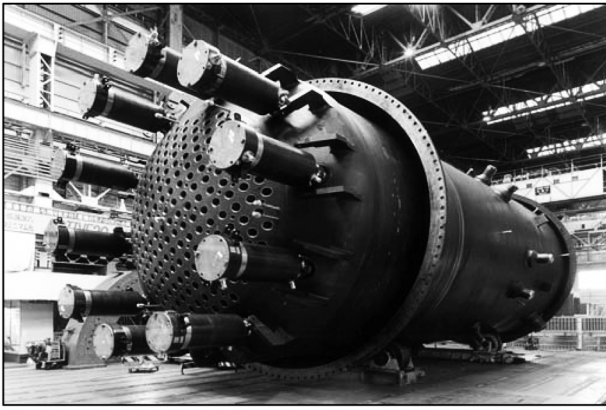


図18 ABWR RPV の外観

表1 RPV の主要検査項目

	部位	検査項目
材料	板材	UT
	鍛造材	UT/MT又はPT
溶接部	長手及び円周突合せ継ぎ手	RT/MT又はPT
	管台溶接部	RT/MT又はPT
	ラグ、ブラケット溶接部	MT又はPT

UT：超音波探傷試験 MT：磁粉探傷試験

PT：液体浸透探傷試験 RT：放射線透過探傷試験

ケーシング溶接後の RPV の外観を示す。長年の経験，技術開発により，現在では RIP モータケーシングの溶接も含め，耐圧部主継手の溶接自動化率はほぼ 100% を達成することが出来ている。

8. 検査

RPV の検査は素材段階及び製作段階に応じて適用規格に基づき実施されている。表 1 に国内向け RPV の主要検査項目を示すが，製作手順に従って材料メーカ又は製造メーカによって実施される。製造メーカの検査は製作ステップを含む管理図書によってホールドポイントとして位置付けが規定され，各々の検査に合格したことを確認した後，次のステップへリリースすることになる。国内向け RPV については，設置者（電力会社）責任で実施される溶接事業者検査の全て，または一部が委託され，製造メーカの検査に加えて，設置者としての検査で溶接の技術基準の適合性が確認されるが，その状況は原子力安全基盤機構（Japan Nuclear Energy Safety

Organization：JNES）によって審査される。製作の最終段階では設置者が JNES による使用前検査の立会いを受検し，最高使用圧力の 1.25 倍の水圧を加えて強度を確認する耐圧・漏洩検査と，認可を受けた工事計画書の通りに仕上がっていることを確認するための構造検査（寸法検査，外観検査）が行われる。

9. おわりに

RPV は原子力プラントの中で最も重要な機器の一つであり，設計，製造，検査の過程で細心の注意を払い製造している。新技術の適用に当たっては，その妥当性を評価するための確認試験は勿論のこと，実製品を模擬した試験（モックアップ試験）を行い，信頼性の高い製品の製造に万全を期している。信頼できる製品を継続して製造するためには技術の伝承が最も重要であり，経験者と若手を旨く組み合わせ作業に従事させる配慮を行っている。技術の伝承においては長い経験の過程で培われたノウハウの伝承が重要である。今まで伝承が困難であった技術や技能を映像や画像で分かりやすい電子データにまとめ，若手の教育に活用している。弊社ではこの活動を「e-Meister 活動」と呼んでいる。

現在米国を含め原子力発電所の建設計画が進んでいるが，本稿に記載した溶接・接合技術を基盤とした「モノづくり」技術が将来に亘り，世界で重要な地位を占めると予想している。これまでと同様，先輩諸氏から受け継いできた技術と精神を忘れることなく，後輩に技術を伝承し，更に信頼できる新技術を開発し，高い信頼性を有し世界に誇ることが出来る RPV を製造することが我々世代の使命であると考えている。

参考文献

- 1) 原子力構造機器の材料，設計，施工，検査，維持に関する講習会テキスト（2007/12）。
- 2) 佐藤他：ABWR 原子炉容器用大型鍛鋼品の製造と諸特性 日本製鋼所技報。
- 3) K. Hori: A Development of the Hot Wire Switching TIG (HST) Welding Process IIW Doc. XII-956-86 July (1986)。
- 4) 明賀他：3次元自動溶接機の開発と原子炉圧力容器への適用 溶接法研究委員会（1995）。
- 5) 小林，河原：原子力プラントの自動溶接技術 原子力工業 Vol. 42 No. 8 (1996)。
- 6) W. Kawahara (Babcock-Hitachi K. K) , A. Endo (Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.) 他: Fabrication of the ABWR RPV (1350MWe) 6th International Conference of Nuclear Engineering May (1998)。