

原子炉構造の改良とISI装置の開発

Improved Nuclear Reactor Structure and Development of In-Service Inspection Equipment for Boiling Water Reactor

原子炉圧力容器を中心とする原子炉機器は、原子力発電設備の心臓部であり、高度の信頼性が要求されている。更に、最近では、建設・定期検査工程の短縮、作業性及び保守性の向上、それらを含む経済性の向上などの諸要求が厳しくなっている。

このため、日立製作所及びパプコック日立株式会社では、各種の研究開発とそれらに基づく各種成果の実機適用を推進してきた。

本論文では、電気出力1,100MW改良標準化国産1号機である東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機原子炉機器の材料及び構造の改良、ISI装置の開発などの具体例について報告する。

柴藤英造* Eizô Shibatô
岡崎朝彰** Tomoaki Okazaki
佐川 渉*** Wataru Sagawa
成瀬明輔*** Akisuke Naruse

1 緒 言

RPV(Reactor Pressure Vessel: 原子炉圧力容器)を中心とする原子炉機器に要求される高度の機能と信頼性に加えて、最近の建設及び定期検査時の工程短縮、作業性及び保守性の向上、それらを含む経済性の向上などの諸要求を考慮して、これまでに各種の研究開発とそれらに基づく各種成果の実機適用を推進してきた^{1),2)}。

ここでは、国産の電気出力1,100MW改良標準化1号機である東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機(以下、福島第二・2号機と略す。)RPV、炉内構造物、原子炉冷却材再循環配管、制御棒駆動機構ハウジングなどの原子炉周り主要機器の構造(図1参照)に関する最近の成果について述べるとともに、ISI(In Service Inspection: 供用期間中検査)装置³⁾に代表される保守性の向上についても言及する。

2 RPV(原子炉圧力容器)及び炉内構造物

2.1 RPV

RPVは原子炉炉心を収納し、高温高压の原子炉一次冷却材を内包する重要機器であり、特に高い信頼性が要求される。

RPVの製造に当たっては、従来から設計、製作、検査のあらゆる過程で厳しい品質管理を行なっているが、更に信頼性を高め、プラントの稼働率向上を図るため、以下に示す新技術を取り入れた電気出力1,100MW級RPVを完成し、福島第二・2号機へ納入した。

図2にRPVの全体図を示す。

(1) RPVの溶接線の低減

従来、RPVを構成する部材は、主に成形鋼板を溶接組立することにより製造されてきたが、容器の信頼性をいっそう向上するとともに、ISI検査員の被ばく低減などの観点から、検査対象となる溶接線長さを減少させることが望まれている。RPVを上鏡、胴体及び下鏡に区分し、それぞれ従来の素材分割、及び改善後構造の概念を図3に、具体的な溶接線長さの低減効果を図4に示す。なかでも下鏡部分については、従来3ないし4分割であったが、材料メーカーと共同で大型一体鍛造ドームの製造技術を開発し、世界で初めて実機に適用した。これにより、下鏡部分のISI対象溶接線長さは従来の約

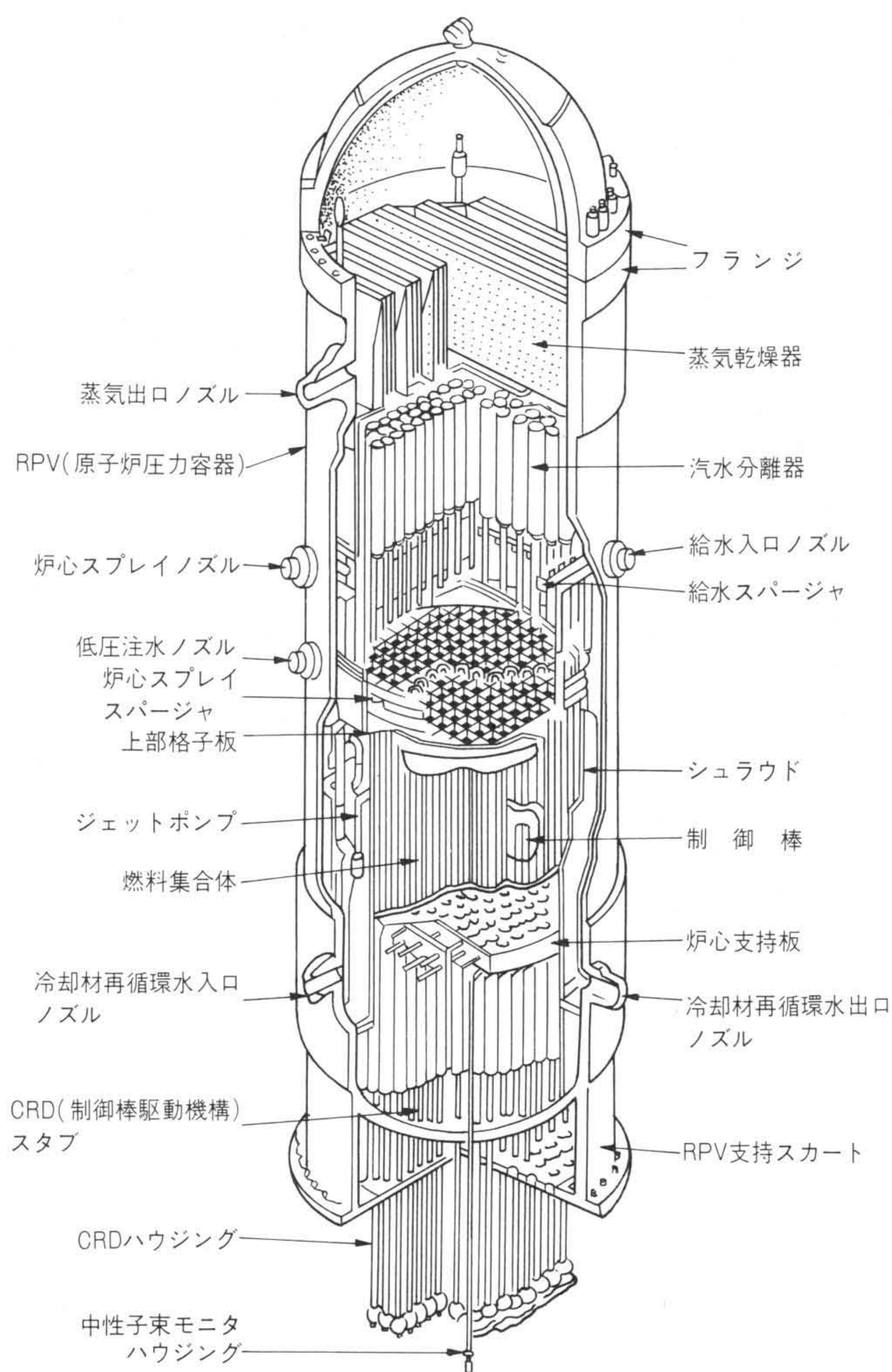


図1 RPV(原子炉圧力容器)内構造図 RPV下鏡に大型一体鍛造ドーム、胴体リングに大型鋼板を採用し、RPV全体で溶接線を従来の約70%に低減した。また、耐SCC(応力腐食割れ)性を考慮してSUS316Lを全面的に採用した世界で最初の炉内構造物である。

* 日立製作所日立工場 工学博士

** パプコック日立株式会社呉工場

*** 日立製作所日立工場

35%に減少できた。

また、従来、胴体リングは3分割の鋼板から製造されていたが、大型鋼板の採用により、これを2分割で製造するなど、大幅な溶接線長さの低減を図った。これらの効果により、RPV全体では従来の約70%とすることができた。

(2) 狭開先ミグ溶接⁴⁾

RPVの溶接部の信頼性向上を図るため、日立製作所独自の狭開先ミグ溶接法を開発し、主要溶接部に適用した。狭開先ミグ溶接の採用により、溶着金属を従来の約 $\frac{1}{4}$ とすることができ、ISI範囲を減少させるとともに、従来に比べ溶接入熱を低くすることができるため、溶接熱影響部の破壊じん性向上



図2 電気出力1,100MW級RPV 世界初の遠隔自動超音波探傷装置用一体型構造軌道を仮設した、搬入前の原子炉圧力容器を示す。

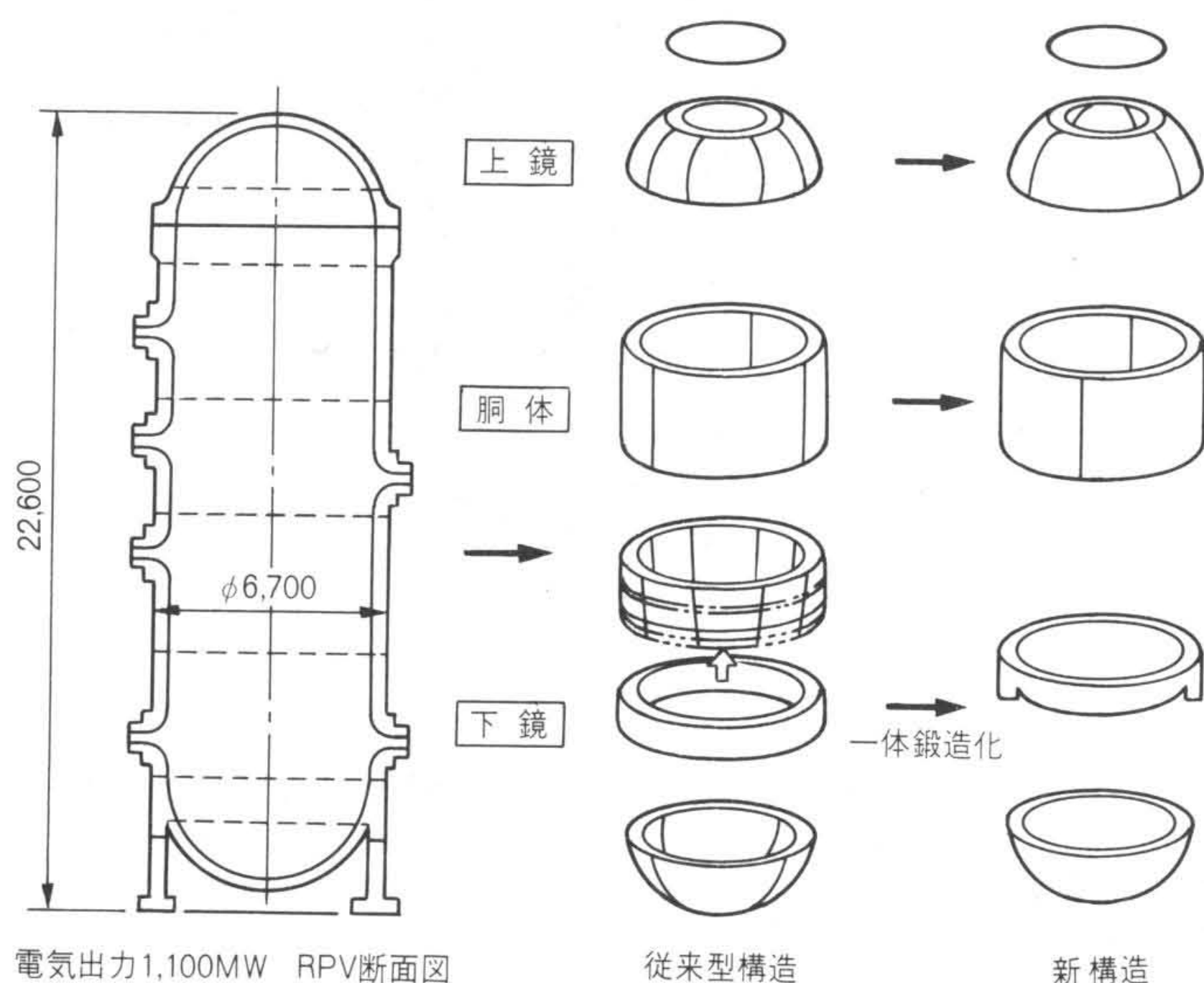


図3 RPV構成素材の大型化 ISI対象溶接線低減のため、RPV構成材の分割数を上鏡は8から6に、胴体は3から2に、下鏡では3から1(一体鍛造)に減らし、RPV全体で溶接線を従来の約70%に低減した。

を図ることができた。狭開先ミグ溶接の開先と溶着金属低減効果を図5に示す。なお、この新溶接技術は海外にも技術供与されている。

2.2 炉内構造物

原子炉炉内構造物は、RPV内で燃料を支持固定し、原子炉一次冷却材の流路を形成するとともに、炉心で発生した熱を高温高压の乾燥蒸気としてタービンへ送り出す役目を果たす重要な機器である。従来この炉内構造物は、SUS304系ステンレス鋼が主に使用されていたが、福島第二・2号機は、世界で初めてより耐食性の優れた、モリブデン入り低炭素ステンレス鋼SUS316Lを全面的に採用した。また、溶接設計につい

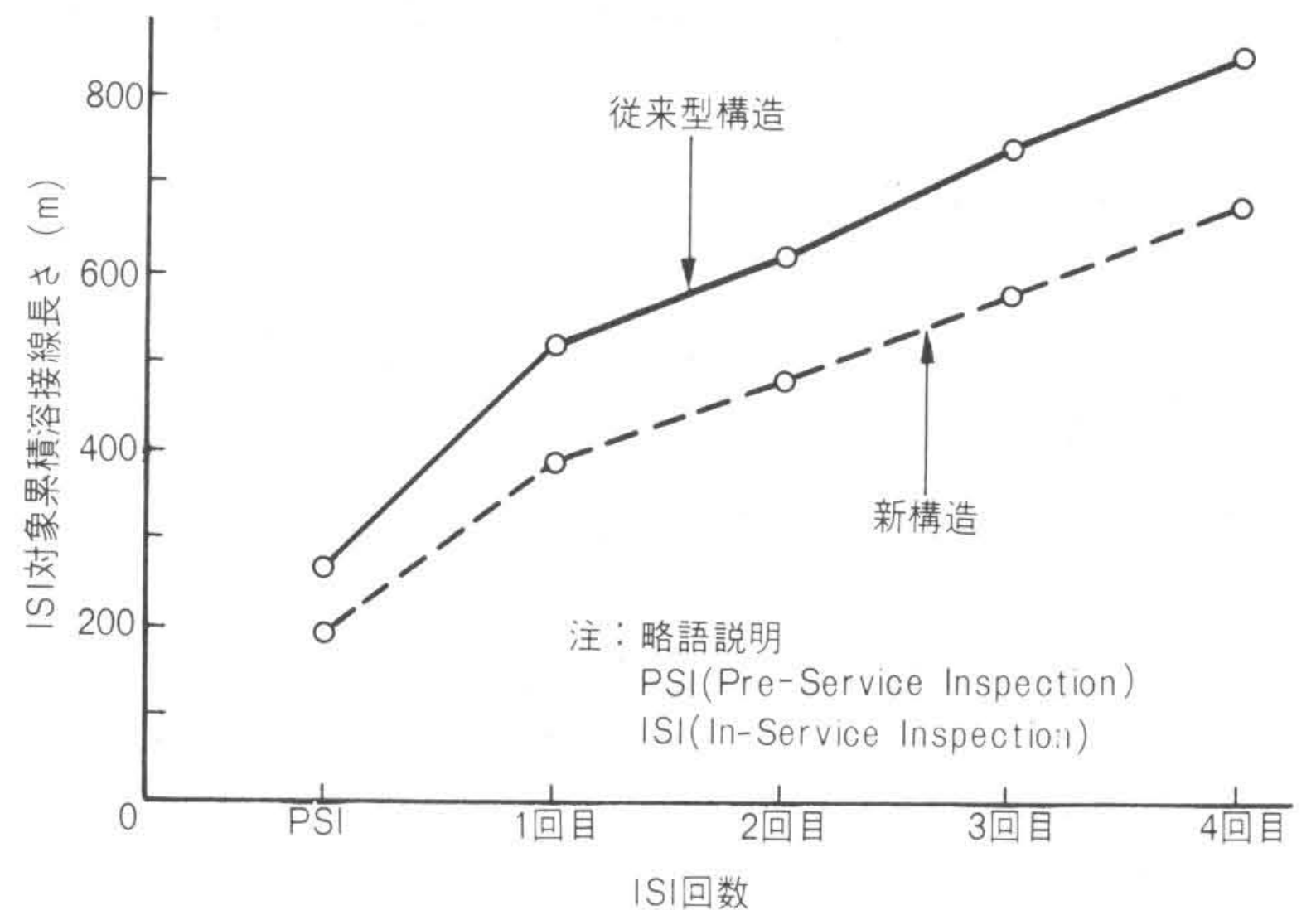


図4 RPVの溶接線長さ低減効果 溶接線長さ低減効果を定期検査に行なわれるISI対象溶接線の累積線長さで示す。ISIの実施対象溶接線は従来に比較して約70%低減されている。

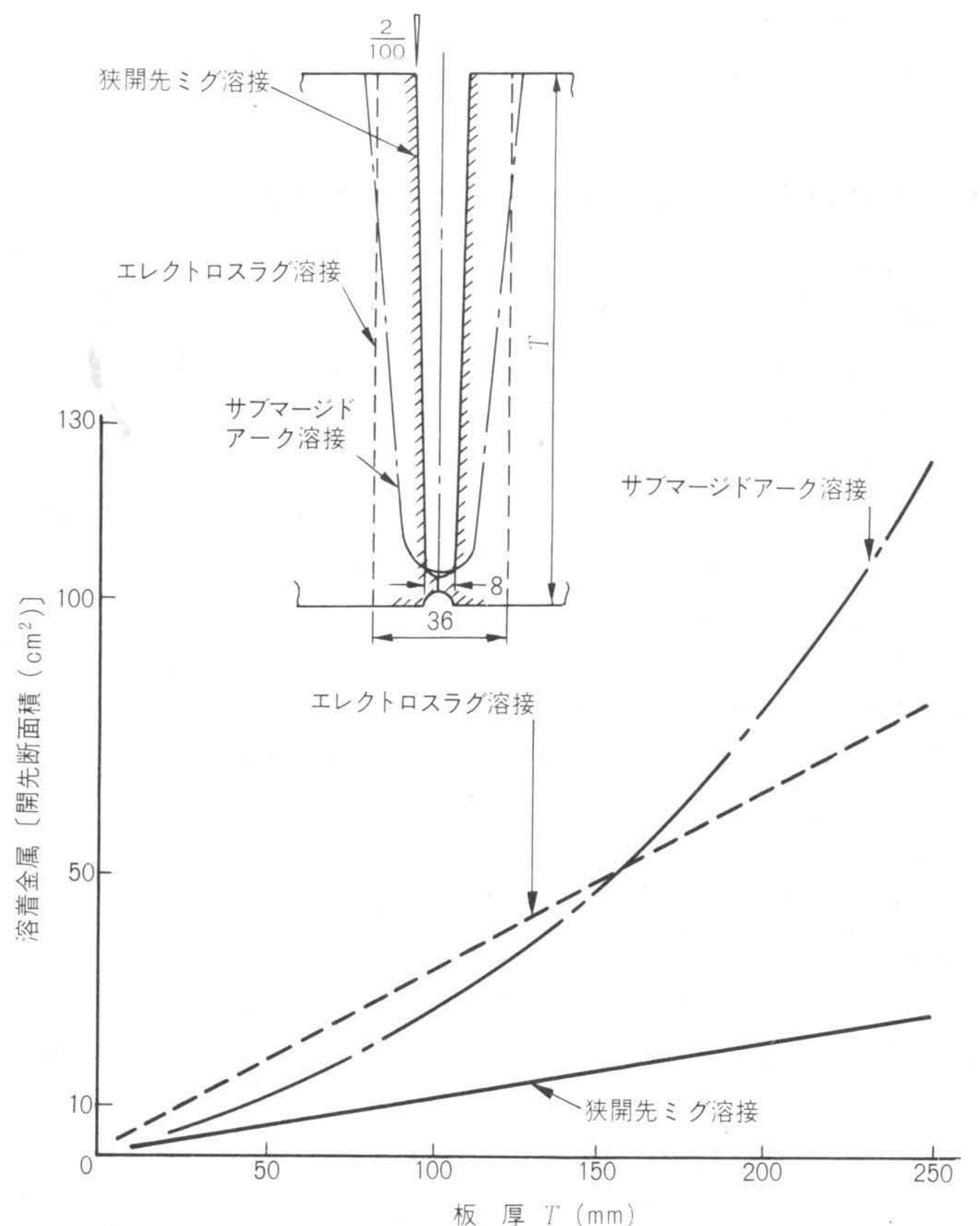


図5 狭開先ミグ溶接法採用効果 狭開先ミグ溶接を採用することにより、溶着金属を従来の約 $\frac{1}{4}$ とすることができ、ISI範囲の減少、溶接熱影響部の破壊じん性の向上を図ることができた。

でも大型鋼板や一体化構造の採用により、溶接継手数低減、部品数低減を図った。

図6に、RPV内につり込み中の炉内構造物を示す。

3 原子炉冷却材再循環配管

原子炉冷却材再循環配管は、原子炉一次冷却材を循環し、プラント出力を制御するための最重要配管であり、高温高压炉水を内包することから、特に耐圧部としての健全性と高い信頼性が要求される。福島第二・2号機は、我が国の鉄鋼メー

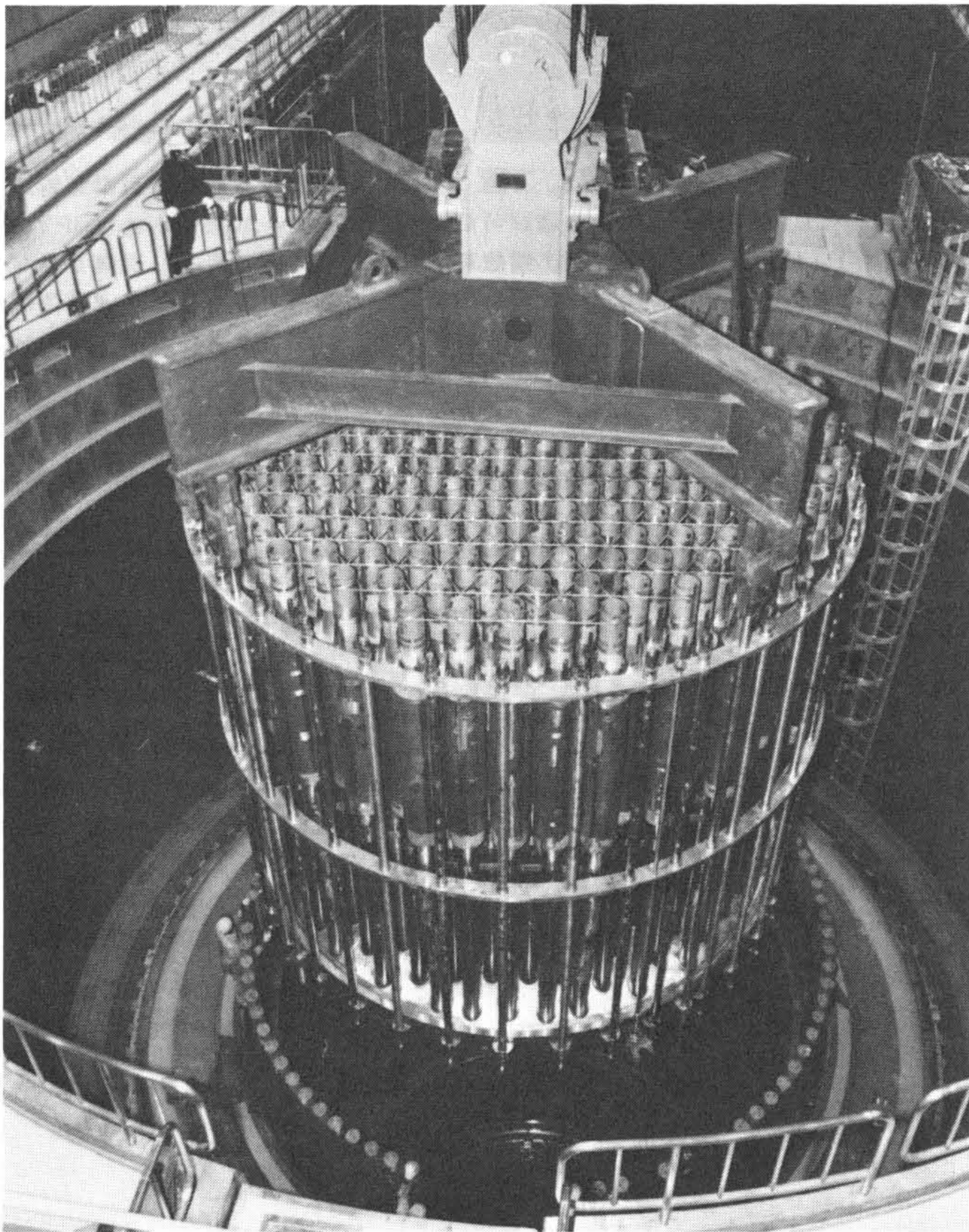


図6 RPV内に据付中のシュラウドヘッド SUS316Lを全面的に採用し、溶接設計についても汽水分離器とスタンドパイプ一体化による溶接継手数及び部品数の低減を図った。

カー、炉メーカー、電力会社で開発した高耐食材料・原子力用SUS316材を初めて完全に適用したプラントである。本配管の構成を図7に示すが、従来、エルボなどの管継手が多数溶接により接続された配管が、原子炉格納容器内の限られたスペースにループ状に設置されていた。このため、福島第二・2号機では、被ばく低減対策・プラントの信頼性の向上を目的とし、ISI性改善・ISIの自動化率向上を考慮した溶接線の削減及び構造改善を行ない、世界で初めて実機に適用した。

構造改善の具体例は図8に示すように、600A配管のシームレス管・シームレスエルボの採用、300Aライザ管の高周波曲げ管の採用及びティ、クロスレジャー、管台などの一体化である。

以上の改善により、従来プラントに対し溶接線長さは約70%、溶接線数は約60%に低減され、ISIの自動化率は約50%となり、被ばく低減及びプラントの信頼性を大幅に向上することができた。なお、現在建設を進めている福島第二・4号機では、600Aエルボと直管、600Aティと直管、管台とヘッダ管の一体化などにより、更に溶接線長さ、数の低減を図っている。

4 CRD(制御棒駆動機構)ハウジング

CRDハウジングは原子炉底部に185本林立して取り付けられ、CRDを収納する重要部材である。従来、CRDハウジングはステンレス製の鍛造フランジとパイプによる溶接構造としていたが、福島第二・2号機ではこれを遠心鋳造法により一体製造し、更に鋳造素材の超音波探傷性及び金属組織改善のため、再結晶化熱処理を施したものを採用した(図9参照)。これにより、フランジ部のISIは不要となり、大幅な被ばく低減が可能となった。

5 国産1号自動・半自動ISI装置

以上述べてきたように、原子炉機器の信頼性向上を図るため各種設計改善を行なってきたが、更に福島第二・2号機では、従来の輸入品に替わり、日立製作所独自の技術により開発された自動・半自動ISI装置が全面的に採用してもらうことができた。本装置は走行制御装置に制御された各種駆動装置が、超音波探触子を搭載して被検体上を探傷するもので、得られた信号は、コンピュータで処理された上、図表として出力する。駆動装置は、RPV胴体用、下鏡用、ノズル用、配管用と、各被検体ごとに準備してあり、これらのほか、放射線下

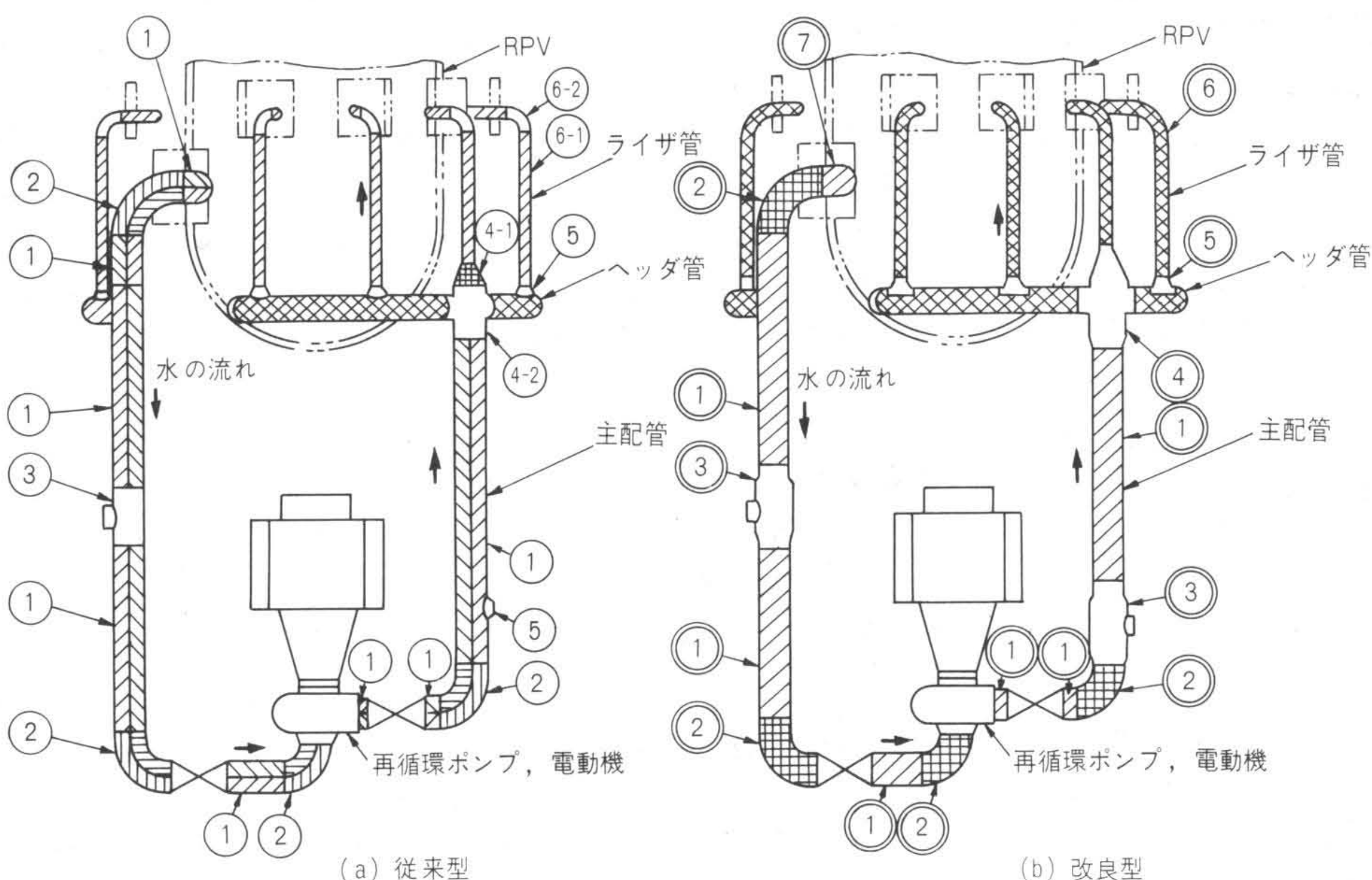


図7 原子炉冷却材再循環配管での従来型と改良型の比較 大口径長手継手あり配管、エルボをシームレス化するとともに、曲げ管を採用して継手の減少を図った。これにより、従来型と改良型を比較して溶接線長が約70%、溶接線数が約60%に低減された。

品 名	従 来 型	改 良 型
大口径シームレス直管, エルボ		
直管付ハイネックティ		
クロスレジャーサ		
くろ形管台		
高周波曲げ管		

図 8 原子炉冷却材再循環配管での部品一体化 鉄鋼メーカーと共同開発を行ない、大口径長手継手あり管、エルボのシームレス化、管継手の一体化、高周波曲げの採用により溶接線の低減を図った。

	従 来 型	改 良 後
構造		
	● SUS304フランジ, パイプ溶接	● 遠心鑄造による一体製作 ● 冷間塑性加工, 再結晶処理材料の超音波特性改善
特徴		

注：略語説明
SCC(応力腐食割れ) UT(超音波探傷検査)

図 9 CRDハウジング一体化の特徴 一体化CRDハウジングを採用することにより、フランジ部のISIは不要となり、大幅な被ばく低減が可能となった。

の探傷現場へ搬入して使用するものは、小型・軽量化を図るとともに、着脱も容易なように設計・製作した。また、自動駆動装置は、制御装置のコンピュータにより遠隔操作されるため、探傷現場で検査員が監視する必要はなく、大幅な被ばく低減が可能となる。このように、従来にない数々の特長を挙げているが、それらを表1にまとめて示す。また、図10にPSI(供用前検査)時の写真を示す。このPSIで、本装置の採用による効果が同表に示すように確認された。今後定期検査時のISIにより、大幅な被ばく低減効果が確認できるものとなる。

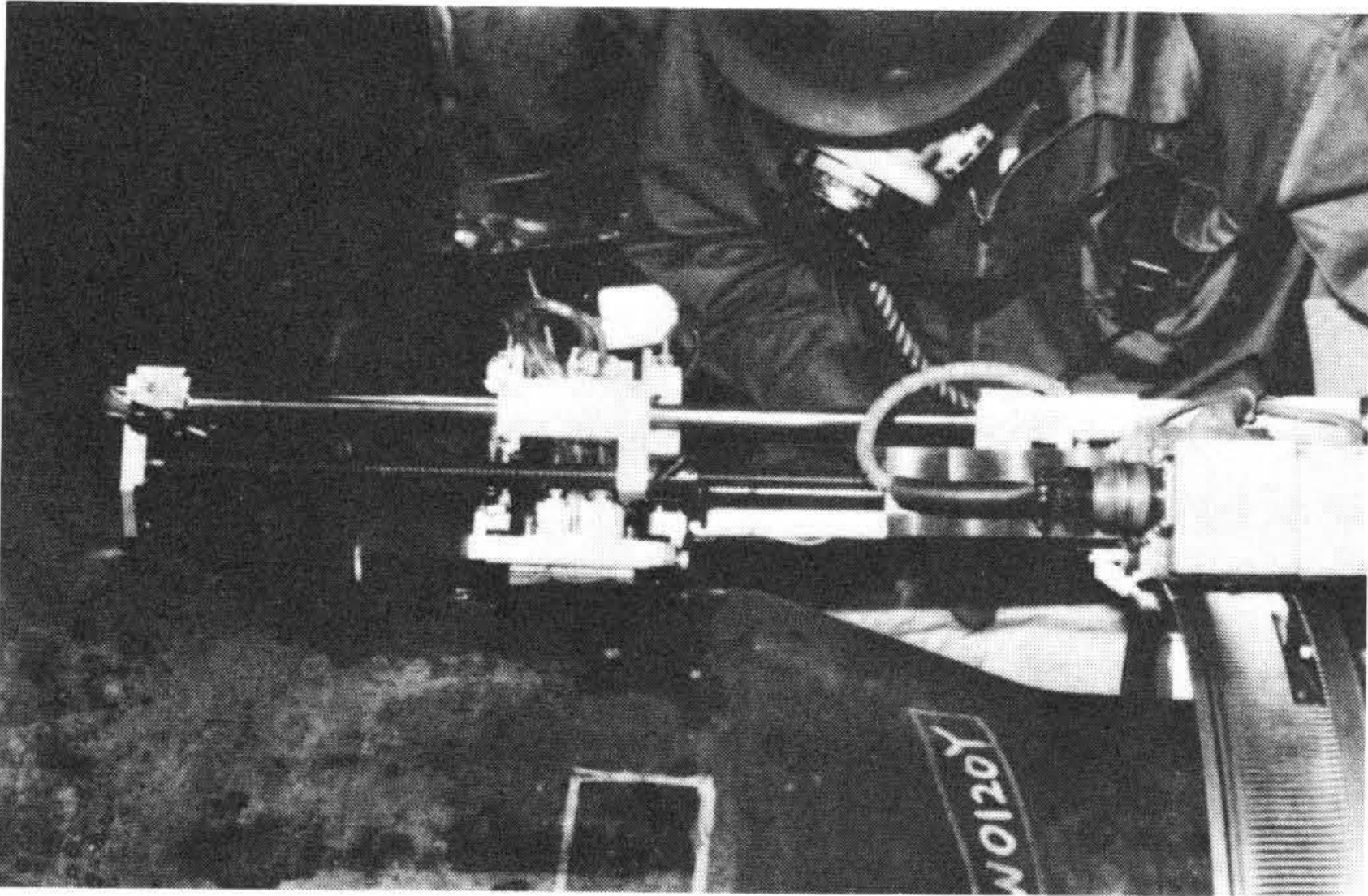


図10 RPVノズル探傷用駆動装置 本駆動装置は自動・半自動超音波探傷装置のうち、検査員一人で持ち運び可能な程度に小型・軽量化されたRPVノズル探傷用駆動装置で、ワンタッチ着脱可能な仮設軌道上を走行し探傷を行なう。得られた位置信号及びエコー信号は、それぞれ制御装置及び超音波探傷装置を経てデータ収録装置に収録される。収録された探傷データは、オフラインでデータ処理装置により図表として出力される。

表1 自動ISI装置の特長及び効果 自動ISI装置の適用箇所ごとの特長及び従来との対比による効果を示す。

No.	自動ISI装置適用箇所	特 長	従来との対比による効果
1	RPV	(1)胴 体	● 世界初の一体型軌道の採用 ● 自動UT可能範囲拡大 ● 約1.6倍の効率向上
		(2)ノズル	● マルチ探触子(0°, 45°, 60°の3角度の振動子を一体化)などの採用 ● 駆動装置の着脱回数低減 ● 約2倍の効率向上
		(3)下 鏡	● マルチ探触子(0°, 45°, 60°の3角度の振動子を一体化)などの採用 ● 駆動装置の着脱回数低減 ● 約2倍の効率向上
2	配 管 (自動・半自動)	(a)マルチ探触子(0°, 45°, 60°の3角度の振動子を一体化)などの採用	● 駆動装置の着脱回数低減 ● 約2倍の効率向上
		(b)配管の自動・半自動UT可能	● 探傷の再現性, 位置決め精度向上
3	シ ス テ ム	(a)制御・データ収録・処理装置のコンピュータ採用	● 操作性向上 ● 約5倍の効率向上
		(b)制御装置1台で多機種の制御・データ収録可能	
		(c)装置 国産化による保守・メンテナンス容易	

注：略語説明 UT(超音波探傷検査)

5 結 言

原子炉構造に関する信頼性及び保守性の向上を重点に述べてきたが、今後は、それらのなおいっそうの推進とともに経済性の追求が急務となっており、先行炉経験などに基づく設計の標準・機械化、材料の評価、構造の単純化、溶接の自動・工場作業化、試験・検査の標準・機械化及びISIなど検査装置の簡易・共用化を推進していく考えである。

最後に、熱心な御指導と御援助をいただいた東京電力株式会社をはじめとする関連電力会社の関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 三木, 外：沸騰水型原子力発電所の信頼性向上の最近の動向, 日立評論, 60, 2, 85~86 (昭53-2)
- 2) 藤本, 外：原子炉压力容器及び炉内構造物の改良, 日立評論, 62, 9, 691~696 (昭55-2)
- 3) 成瀬, 外：原子力発電所供用期間中検査用遠隔自動・半自動超音波探傷装置, 日立評論, 65, 9, 633~638 (昭58-9)
- 4) S. Sawada, et al.: Application of Narrow-Gap GMA Welding Process to Nuclear Reactor Pressure Vessel, IIW Doc. XII-B-283-80