

新型転換炉原型炉「ふげん」原子炉本体の製作及び据付

Manufacture and Installation Experience of Pressure Vessels for the Prototype Heavy Water Moderated Boiling Light Water Cooled Reactor "FUGEN"

新型転換炉原型炉「ふげん」は、昭和52年半ばに機器の据付けを完了し、各種の機能試験を経た後、昭和53年3月臨界に達する予定である。

「ふげん」原子炉本体は、軽水炉のそれと構造、材料などが全く異なるため、実機の建設に先立って多くの研究開発が実施され、これらの成果に基づき実機の製作を完了し、現在据付作業が順調に進められている。

本稿は、原子炉本体の製作及び据付けに研究開発の成果が直接反映された例、並びに製作、据付けにおける生産技術面での特記すべき事項について、幾つかを紹介する。

柴 藤 英 造* Shibatô Eizô
小口伊佐男* Oguchi Isao
岸 俊 一* Kishi Toshikazu
小 山 高 一* Koyama Takaichi
北 川 祐 司* Kitagawa Yûji
横 田 拓** Yokota Hiroshi

1 緒 言

新型転換炉原型炉「ふげん」(以下、「ふげん」と略す)は、我が国で初めての重水減速、沸騰軽水冷却、圧力管型原子炉であり、国家プロジェクトとして動力炉・核燃料開発事業団の手により昭和53年3月臨界達成を目指して目下福井県敦賀市に建設が進められている。「ふげん」プロジェクトの中で日立製作所は、主務会社として全体計画を取りまとめるとともに主要部の一つである原子炉本体などの設計、製作及び据付けを担当している。

「ふげん」の原子炉本体は、減速材である重水を収納するカランドリア・タンク、熱(放射線)遮蔽のために層状に鉄と水とを収納する鉄水遮蔽体並びに内部に燃料集合体及び一次冷却水を収納し、それらを垂直に貫通する224本の圧力管集合体により構成されており、軽水炉のそれとは全く異なる構造を呈している。したがって、あらかじめ多くの製作などに関する技術開発を図り^{1), 2)}、その成果をベースとして実機製作に着手した。本稿では、原子炉本体の製作、試験・検査及び据付けについてその内容を概説する。

2 原子炉本体構造及び主要仕様

原子炉本体は、図1に示すように圧力管集合体、カランドリア及び鉄水遮蔽体から構成されている。圧力管集合体は、図2に示すようにジルコニウム・ニオブ合金製の圧力管とその上下端にロールド・ジョイントにより結合されるステンレス鋼製の延長管から構成されている。各圧力管集合体には、一次冷却水の入口及び出口ノズルが接続されており、また下端部にはシールプラグが取り付けられている。カランドリアは、ステンレス鋼製のカランドリア・タンクとジルカロイ-2製のカランドリア管から構成されており、カランドリア管はカランドリア・タンク上下管板にロールド・ジョイントにより結合されている。鉄水遮蔽体は、カランドリアの周囲を取り巻いて一つの容器を構成している。

表1に原子炉本体の主要仕様を示す。これらは、原則として軽水炉を主対象として定められている現行法規に従ったものであるが、一部材料(圧力管、カランドリア管材料)、構造

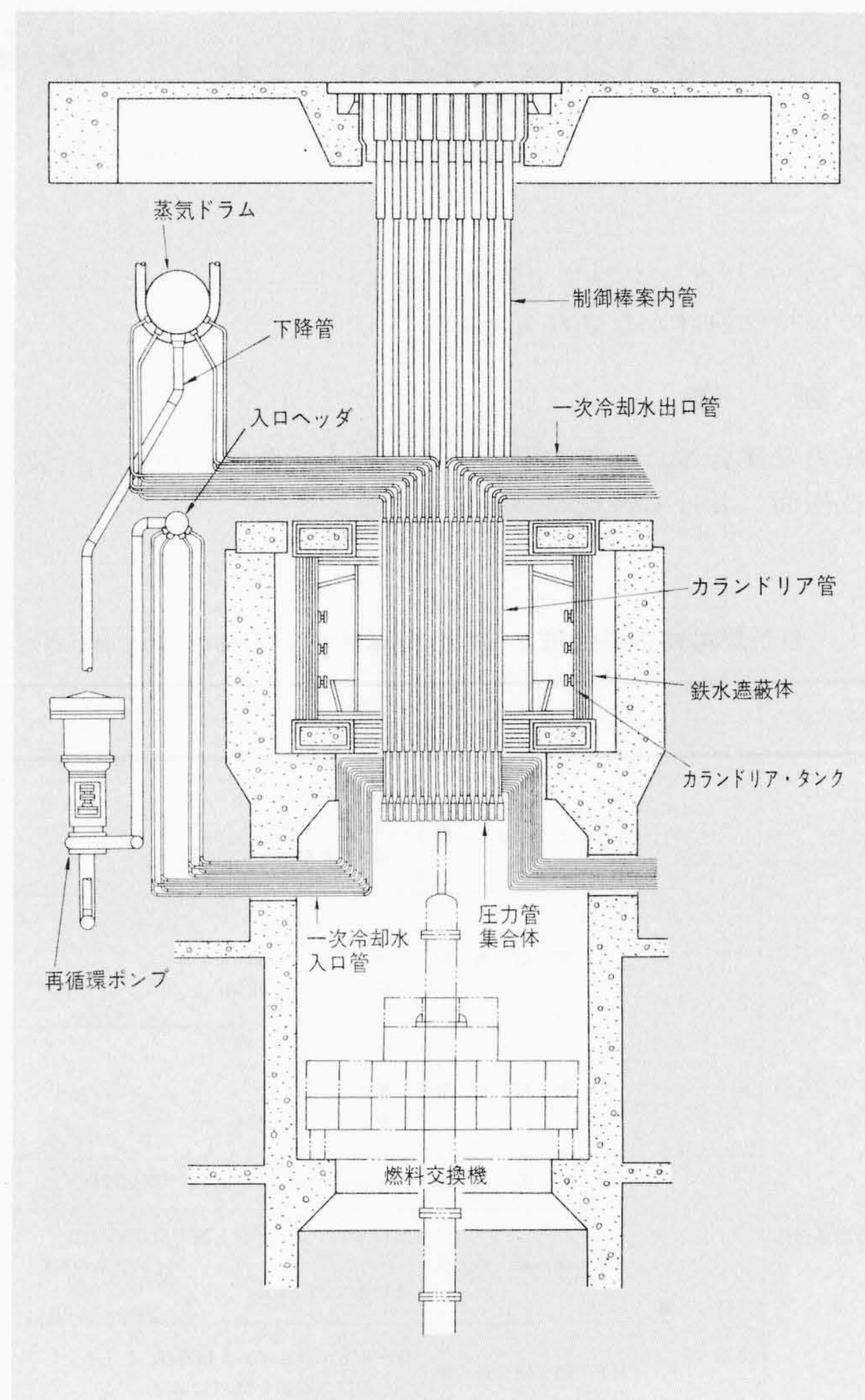


図1 原子炉一次冷却系縦断面図 カランドリア・タンク及び鉄水遮蔽体に、224本正方配列の圧力管集合体が垂直に貫通している。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所電力事業本部

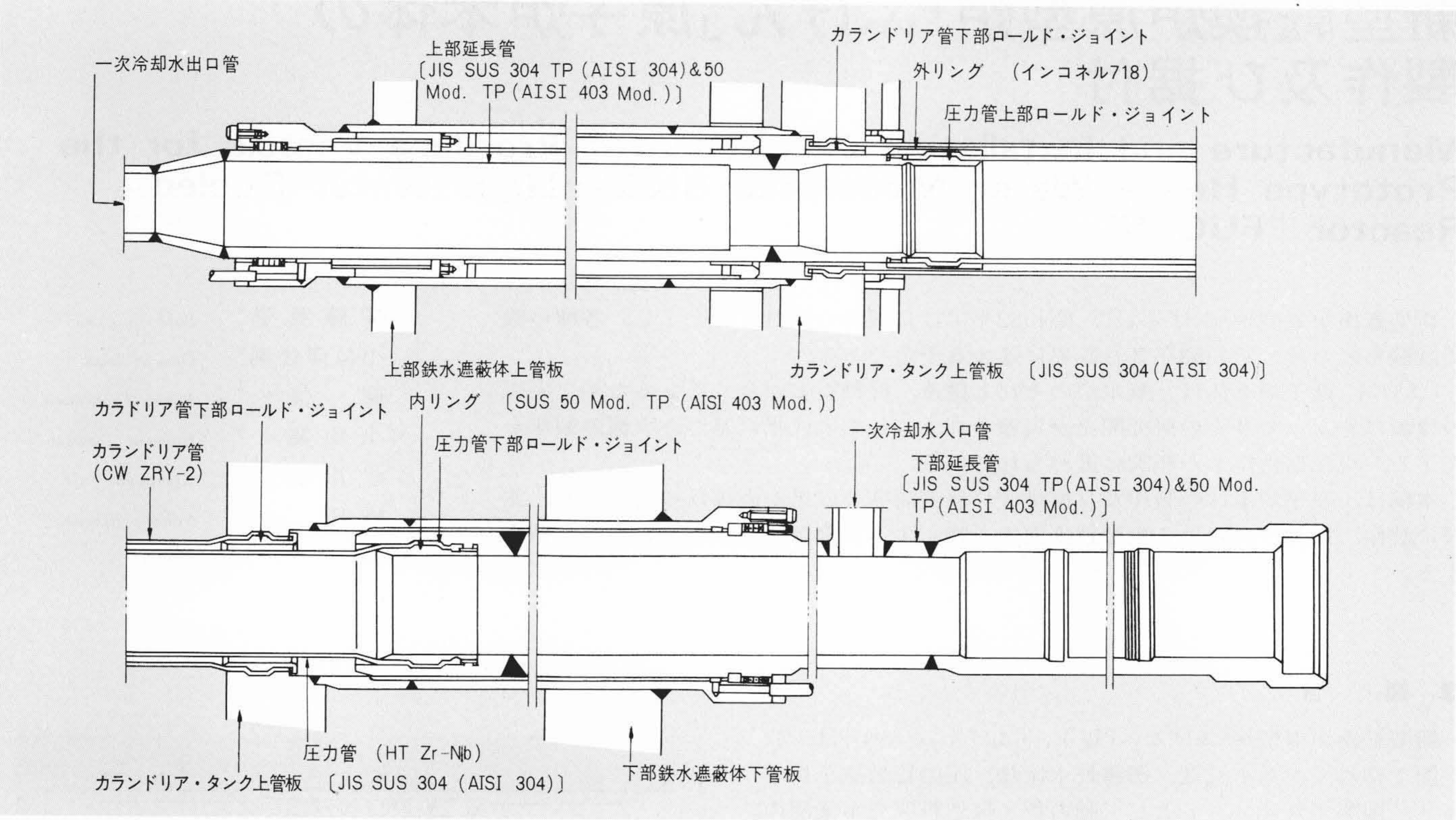


図2 圧力管集合体 圧力管集合体の断面図で、据付時の状態を示す。

(圧力管及びカランドリア管ロール・ジョイント)などにおいては特殊設計がなされている。

3 製作

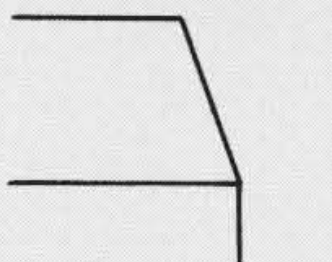
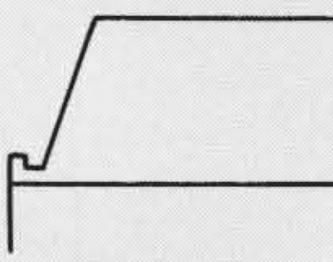
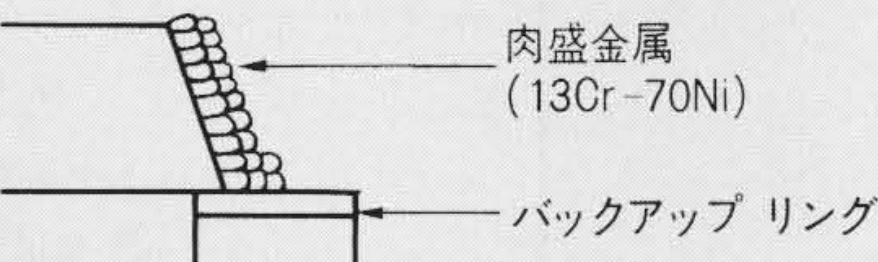
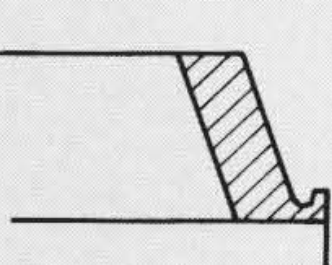
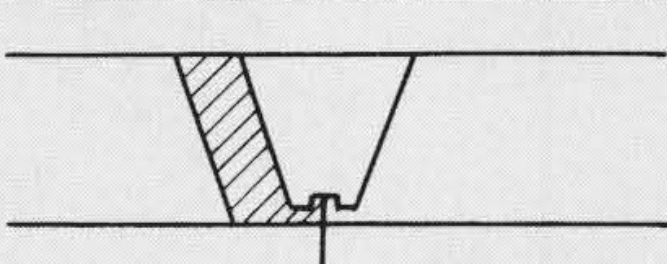
圧力管集合体、カランドリア及び鉄水遮蔽体についての製作技術面における特長について次に述べる。

3.1 圧力管集合体

圧力管集合体は、この機器のもつ重要性及び現地据付けの容易さを考慮して工場内ですべて組み立てられた。上部及び下部延長管には、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)とマルテンサイト系ステンレス鋼(SUS50Mod.)との異種金属溶接部がある。また、圧力管と上部及び下部延長管とはロー

表1 原子炉本体主要仕様 原子炉本体の寸法、材質などの主要仕様を示す。

機 器	仕 様			機 器	仕 様		
圧力管集合体	寸 法	圧 力 管	内径：117.8mm 厚さ： 4.3mm 長さ：4,800mm	カランドリア	寸 法	カランドリア・タンク	外径：7,950mm 高さ：5,040mm
		上 部 延 長 管	外径： 127mm 厚さ： ～13.5mm 長さ： ～1,900mm			カランドリア管	内径：156.4mm 厚さ： 1.9mm
		下 部 延 長 管	内径：118mm 厚さ：～15mm 長さ：～3,000mm		材 質	カランドリア・タンク	SUS304
	材 質	圧 力 管	ジルコニウム-2.5%ニオブ熱処理材			カランドリア管	ジルカロイ-2
		上 部 延 長 管	ロール・ジョイント部：SUS50Mod. インコネル718 その他：SUS304	鉄水遮蔽体	容器種別及び設計条件	—	通産省技術基準第3種容器 内圧：0.8kg/cm ² g 外圧：1.0kg/cm ² g 温度：150℃
		下 部 延 長 管	ロール・ジョイント部及び シールプラグ部：SUS50Mod. その他：SUS304		寸 法	—	外径：9,050mm 高さ：6,980mm
		容器種別及び設計条件	通産省技術基準第1種容器 圧力：82kg/cm ² g 温度：296℃ 高速中性子照射量：3×10 ²² nvt(炉心) 3×10 ¹⁹ nvt(延長管)		材 質	耐圧強度部材	ASTM A516 Gr.60
						遮 蔽 体	炭素鋼スラブ
					容器種別及び設計条件	—	通産省技術基準第4種容器 内圧：水頭9m 温度：105℃

順序	内 容	SUS50Mod.	SUS304
1	開先加工		
2	肉盛溶接 (手動被覆アーク) 及び後熱処理		
3	開先加工		
4	突合せ溶接 (自動TIG)		

(a) 溶接方法

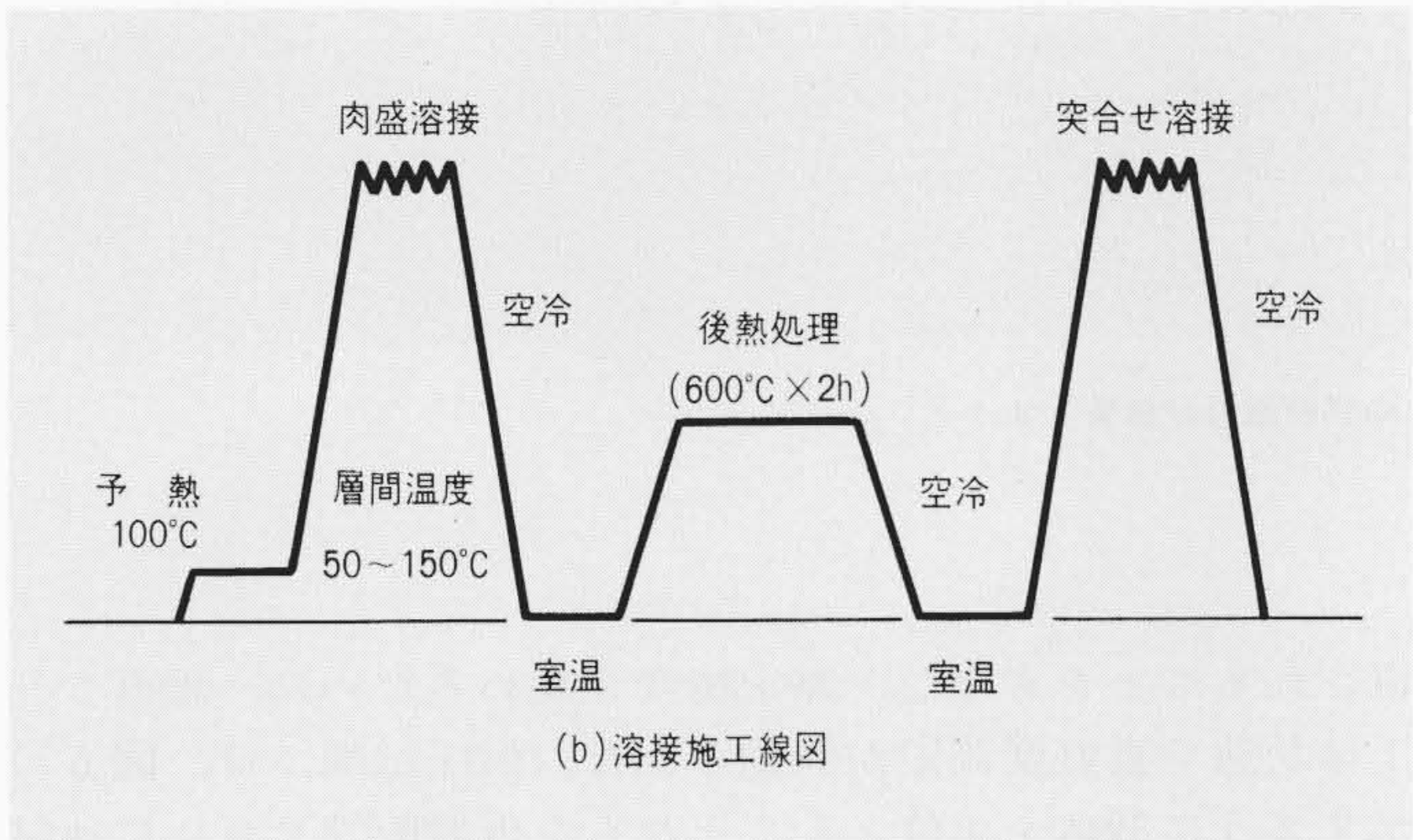


図 3 異種金属溶接手順 (a) は本溶接の作業順序及び内容を示し、(b) は溶接施工要領を示す。

表 2 母材及び溶接部に対する試験結果 母材及び溶接部は、照射下でも要求仕様を満足している。

項 目	要 求 仕 様	母 材		溶 接 部	
		非 照 射	照 射*	非 照 射	照 射*
引 張 試 験	UTS	735.5MPa**	853.2MPa	1,029.7MPa	596.3～618.8MPa
		510.0MPa***	559.0MPa	—	691.4～715.9MPa
	0.2YS	539.4MPa**	640.4MPa	892MPa	340.3～387.4MPa
		205.9MPa***	245.2MPa	—	549.2～588.4MPa
	伸び	18%**	22%	15%	19.1～38.8%
		30%***	68%	—	19.0～24.5%
曲 げ 試 験 (裏曲げ, 側曲げ)	合 格	—	—	合 格	合 格
硬 さ** (Hv)	242～306** (母 材)	285	310～345	260～315	280～465

注：*は $\sim 3 \times 10^{19}$ nvt, $E \geq 1$ MeV
 **はSUS50Mod.
 ***はSUS304

ルド・ジョイントという機械的接合方法で接合されている。

(1) 異種金属溶接

SUS304(18Cr-8Ni)とSUS50Mod.(13Cr-3.5Ni)との溶接については、試作によって溶接施工法を確立し、溶接部の特性を確認するための各種試験を行なった³⁾。

溶接は、図3に示すように、SUS50Mod.に13Cr-70Ni合金を肉盛溶接、後熱処理した後SUS304と突合せ溶接するという手順で実施されたが、これは次に述べる事項を考慮して決められている。

- (a) SUS50Mod.材の溶接部に対して、特に熱影響部に対して靱性及び硬さの回復を図るため、後熱処理を実施する。
- (b) 突合せ溶接後には、熱処理による延長管の変形を避けるため、後熱処理を実施しない。
- (c) 突合せ溶接部の特性は共材溶接と同等とする。

母材及び溶接部に対して行なった非照射及び照射下での各種試験結果を表2に示す。結果はすべて要求仕様を満足しており、また溶接部の組織にも異常は認められなかった。溶接部を含めた材料の靱性を確認するために実施された衝撃試験の結果、脆性遷移(NDT)温度(衝撃試験での吸収エネルギーが4.8kg-mに相当)が、SUS50Mod.母材で -110°C 、SUS50Mod.と肉盛金属とのボンド部(本溶接部の中で最も吸収エネルギーが小さい)で -188°C となり、高速中性子の設計照射量を受けた場合でも前者が約 100°C 、後者が約 70°C 高温側に移行して -10°C 、 -118°C となるが、これらはいずれも、一次冷却系機器及び配管の最低使用温度 38°C 及び法規上から「使用材料は最低使用温度より 33°C 低い温度で所定の靱性をもっていなければならない」ということから定められた、設計仕様値 5°C 以下を満足していることが分かっている。

(2) ロールド・ジョイント

ジョイント部の各部材の寸法及び拡張率は、ジョイント部の機械的強度、耐久性に大きな影響を与える因子である。これらの最適値は、多くの試作開発の結果から決められた。

図1に示すジョイント部の延長管及び内、外リングは、NC(数値制御)旋盤によって精密に仕上げられ、圧力管は下端部をパンチによりフレアし、オートクレイブ処理後、これら各部材を所定の位置にセットし、図4に示すように、ジョイント装置により上記最適拡張率までエキスパンドした。拡張率とエキスパンダ・マンドレルの軸方向移動量及び所要トルクとの関係は、作業管理上必要となることから、あらかじめ試作開発の段階で図5に示すとおり求めた。これに基づき、実際

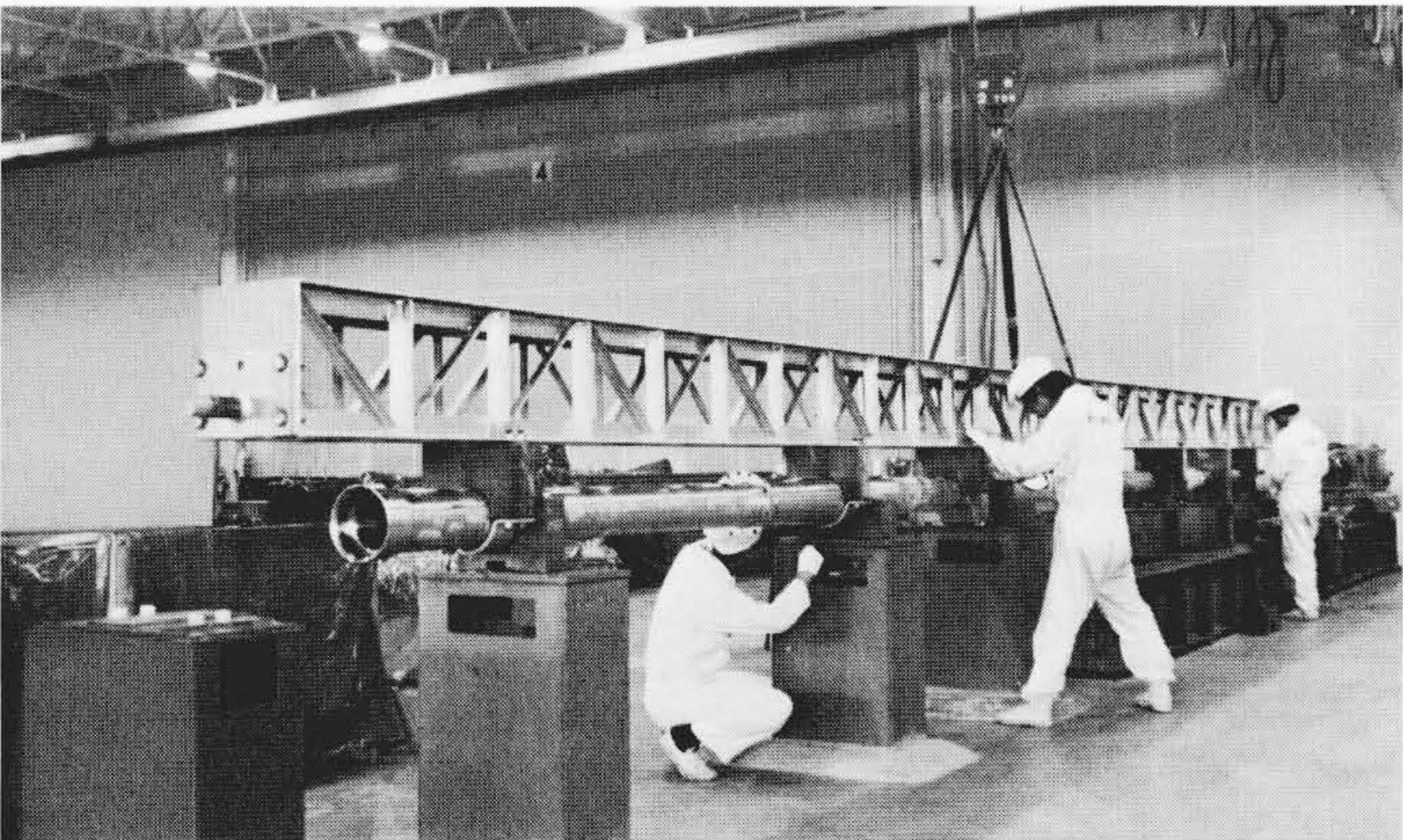


図 4 圧力管ロールド・ジョイント作業 圧力管集合体がロールド・ジョイント装置用架台にセットされているところを示すもので、手前側が下部延長管である。

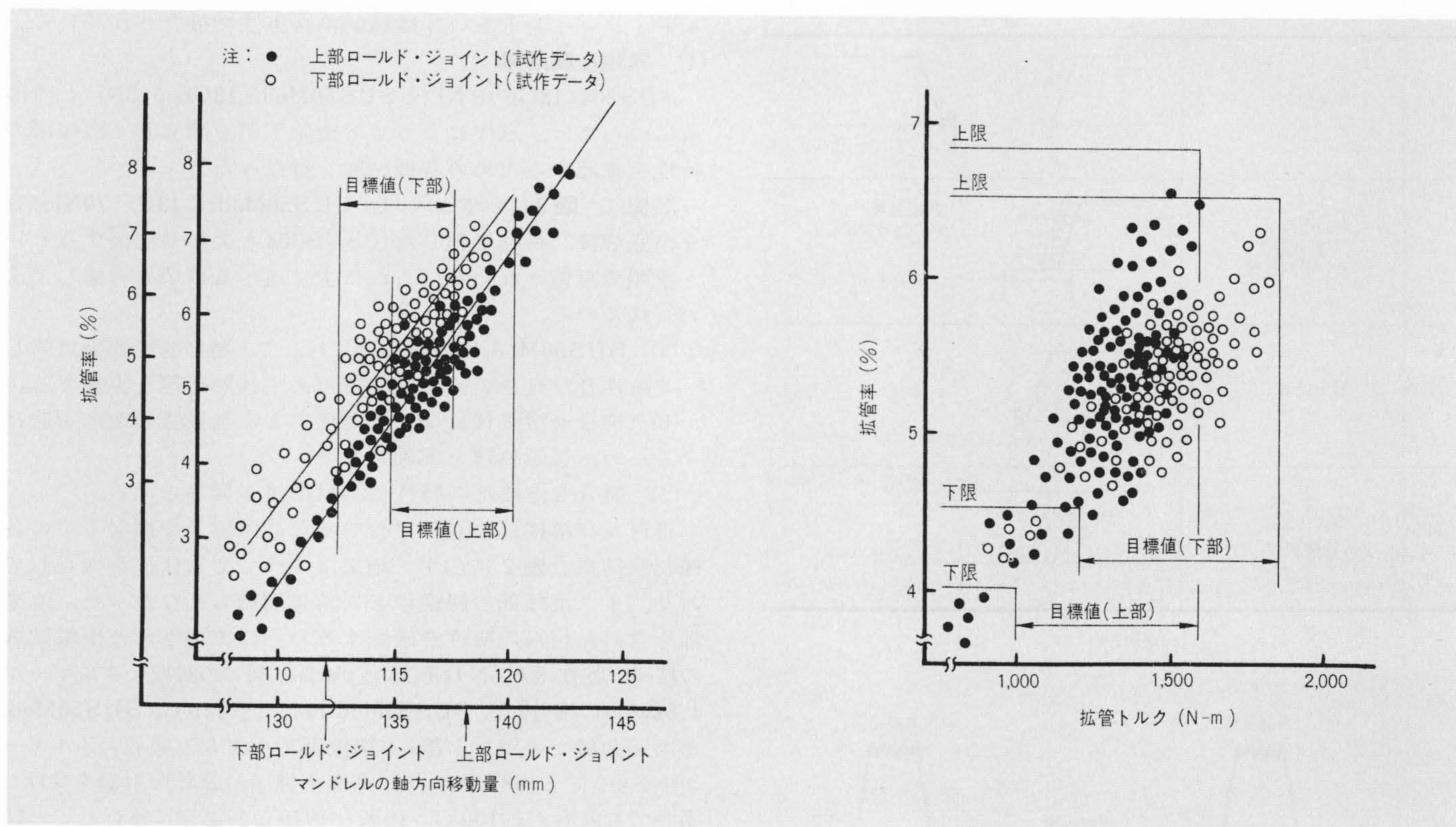


図5 圧力管ロール・ジョイントの作業管理 拡張率とマンドレル軸方向移動量及び拡張トルクとの関係を試作により求め、これから実機製作での目標値を定めた。

の作業は主にマンドレルの軸方向移動量を管理することによって行ない、その結果、拡張率は上、下部について各々4.1～6.1%、4.8～6.5%となり、いずれも最適拡張率の範囲内に収めることができた。

ジョイント後の耐漏洩性を確認するためのヘリウム漏洩試験結果では、上下両ジョイントとも目標値(1.0×10^{-4} Acc/s 以下)を十分下回る結果となっている。

なお、本作業は特殊作業であること及び塵埃などの混入が製品の品質を左右する一因となることを考慮し、試作開発の段階から一貫した熟練者が、管理された部屋で実施するなど特別の配慮が払われた。

(3) 試験検査

組立完了後の各種寸法検査のうち真直度測定は、約4mの燃料集合体が圧力管集合体内部に挿入されるという点から大切な検査である。据付完了状態では圧力管集合体が垂直に設

置されることを考慮し、測定精度を高めるために、垂直つり下げ状態で真直度測定が実施された。耐圧試験では、図6に示すように32体を単位としてそれらを仮設配管で互いに連結した状態で同時に加圧した。試験温度は、法規上から38℃以上にする必要があったため、専用温水供給装置を仮設配管に設置し、循環ポンプで加圧水を循環させることによって規定温度以上に保持させた。

以上、組立後の試験検査だけについて述べたが、各部品の製作段階でも十分な品質管理を行ない、これらを含めすべての試験検査に合格することができた。

3.2 カランドリア及び鉄水遮蔽体

カランドリア及び鉄水遮蔽体は、大形溶接構造物であると同時に、管板の面及び穴加工に精密さが要求される機械加工品でもある。特に、カランドリア・タンク管板に使用されたステンレス鋼板は、その大きさ及び厚さの点から国内での記録品である。

(1) 管板の溶接

カランドリア・タンク上下管板は、直径が約8mもあること及び炉心部分と外周部の厚さが各々150mm、100mmと異なることから、各々5枚のステンレス鋼板(SUS304)が使用された。これらのうち炉心部分に相当するものは、4.8m×4.8m×180mm(材料段階)と大形厚肉品である。これらの溶接は、試作により溶接条件を確立し、サブマージアーク法により極力変形を抑えるべく両側から交互に行なうという方法がとられた。

鉄水遮蔽体管板は、4枚の炭素鋼[ASTM(American Society for Testing and Materials A516Gr.60)]から成り、炉心部分に相当する板の寸法は、4.05m×7.5m×165mm(材料段階)であり、これらの溶接は、サブマージアーク法により予熱及び後熱処理が施されるとともに、カランドリア・タンク管板と同

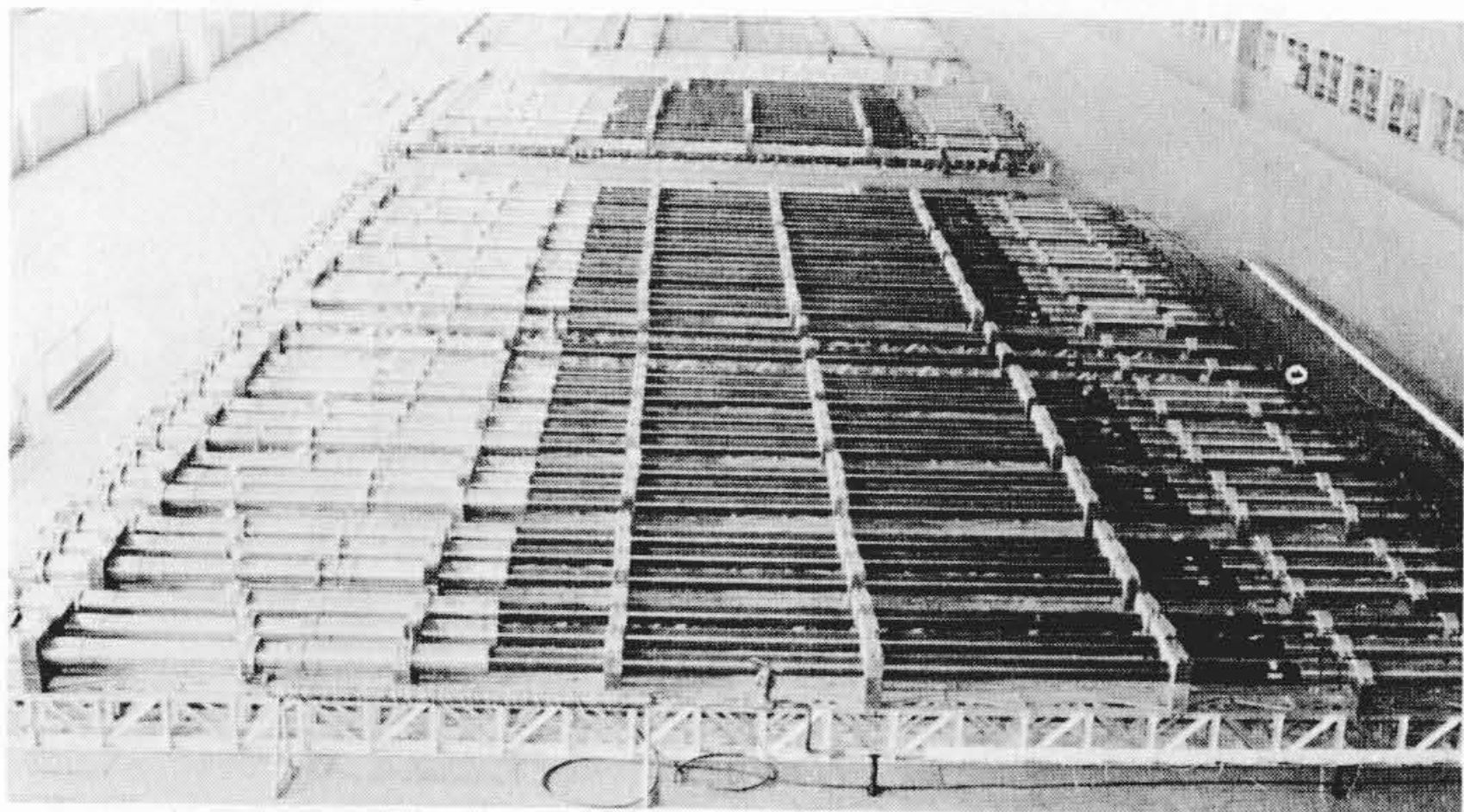


図6 圧力管集合体の耐圧試験 32体の圧力管集合体を一群として仮配管で連結し、能率的な耐圧試験を行なった。

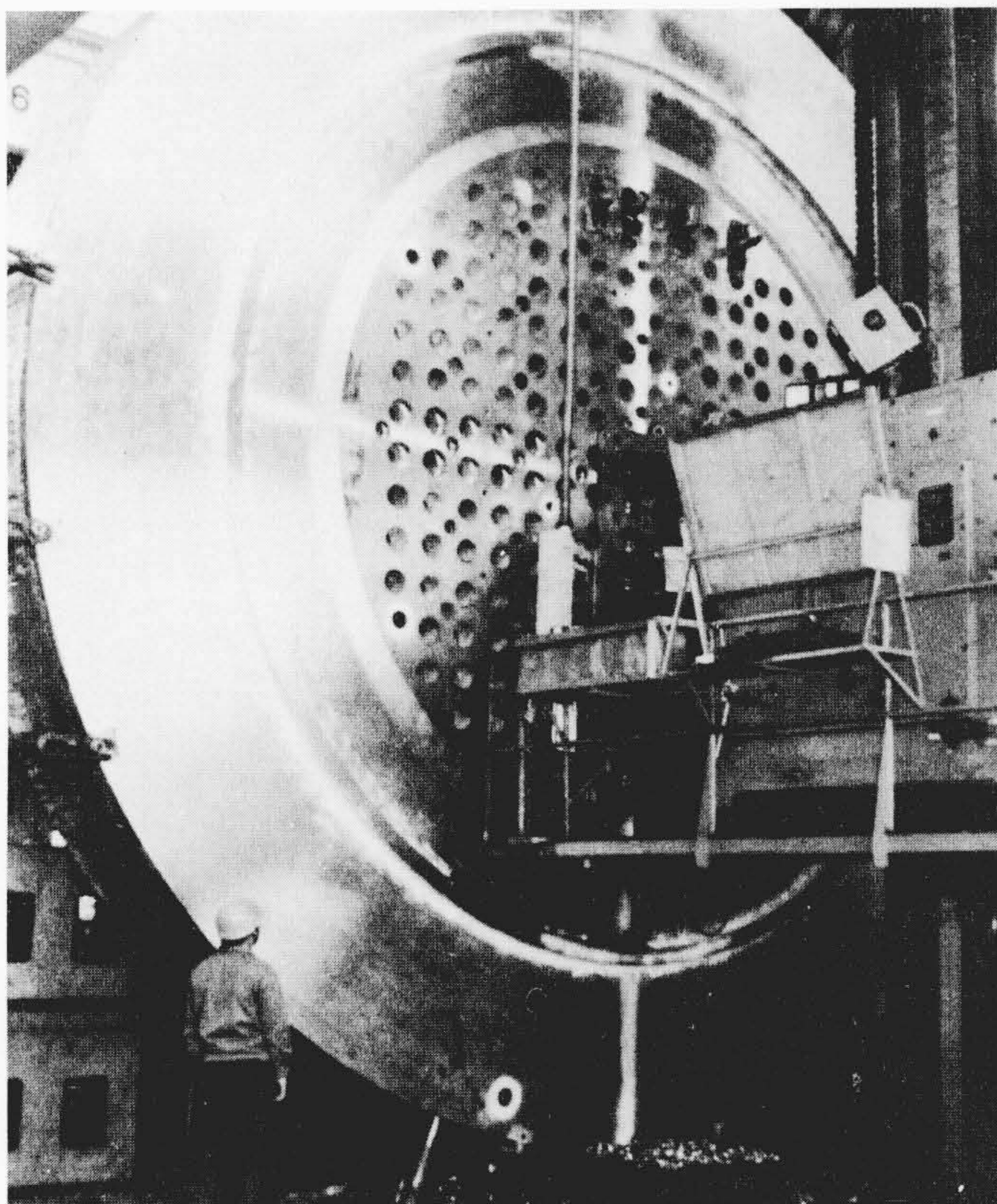


図7 カランドリア・タンク管板の穴加工 カランドリア・タンク上管板を加工しているところを示す。

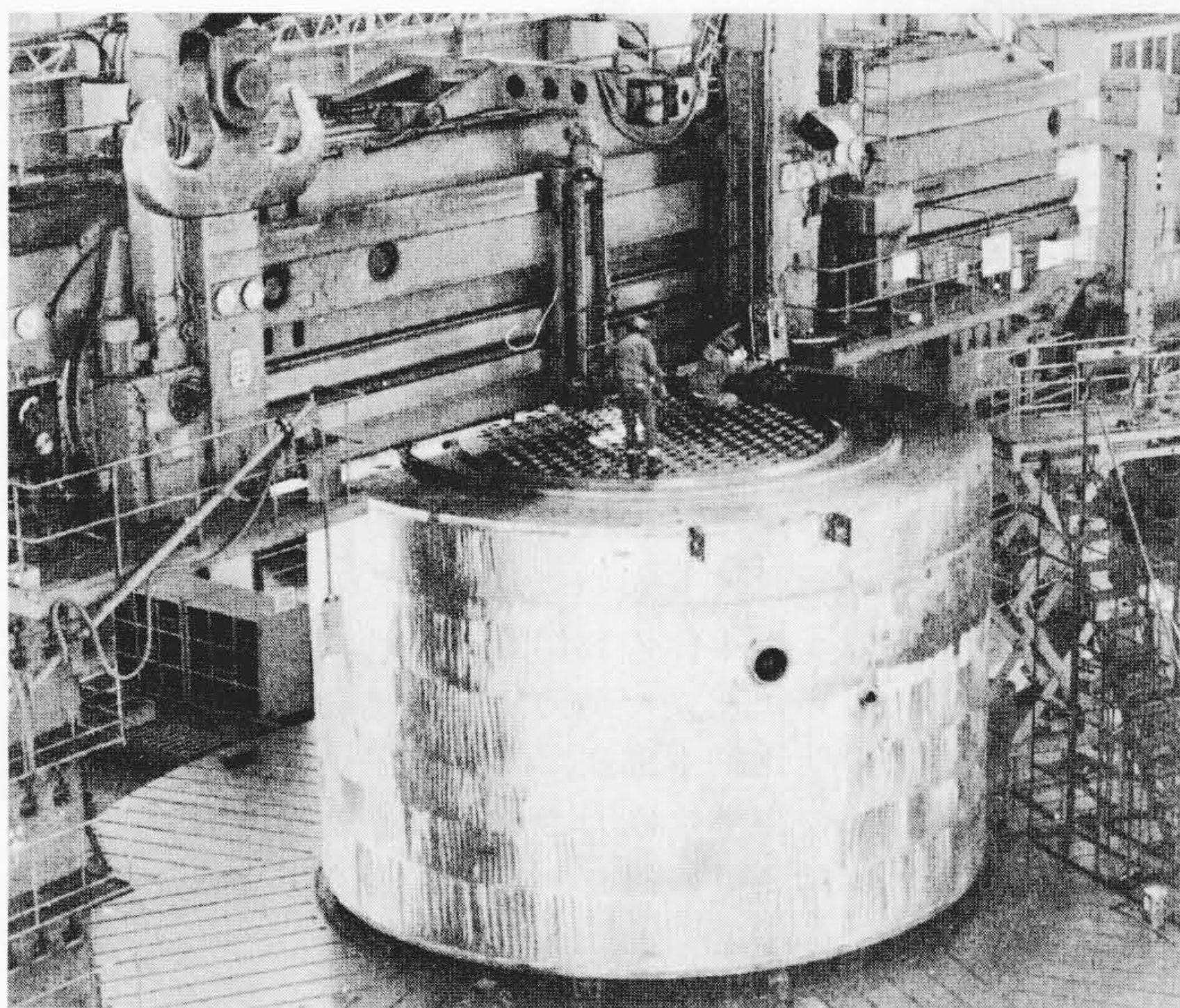


図8 カランドリア・タンク管板面加工 カランドリア・タンク上管板の面加工を行なっているところを示す。

様に変形を抑える配慮がなされた。

これら管板の素材厚さは、仕上寸法150mmに対して管板の溶接、管板と胴体の溶接などによる溶接変形、機械加工仕上代を考慮して定められた。

(2) 機械加工

カランドリア・タンク及び鉄水遮蔽体の管板には、カランドリア管、鉄水スリーブなどを取り付けるために多くの穴が空けられた。これら穴径及びピッチは、圧力管集合体が精度

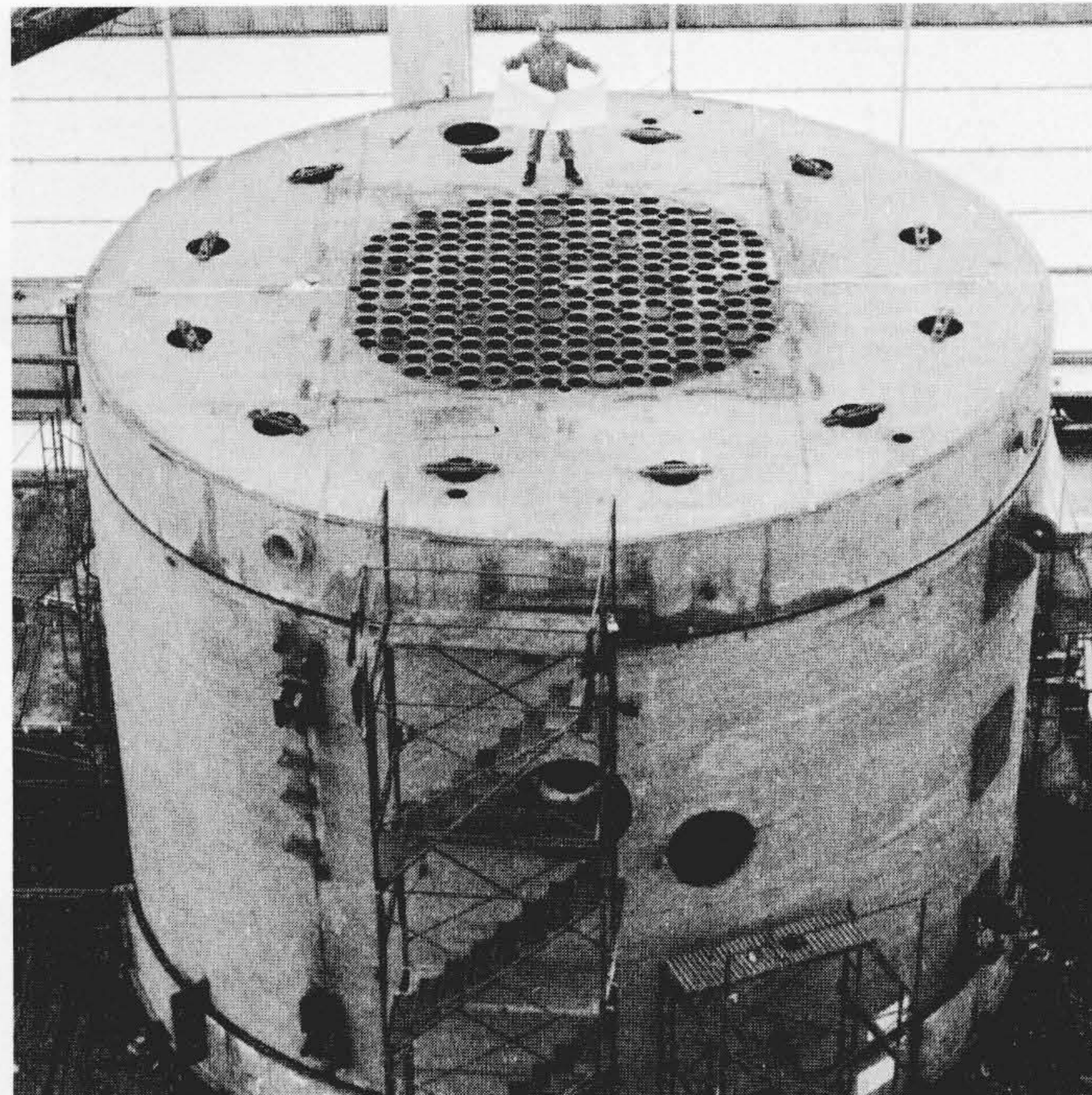


図9 カランドリア・タンク及び鉄水遮蔽体の工場仮組立て 工場仮組立てが完了したところを示す。

良く据え付けられるかどうかの基本となるため、厳しい寸法公差が要求された。更に、カランドリア・タンク上下管板には、後述するカランドリア管ロール・ジョイントのために高精度の溝加工が必要とされた。これらは、図7に示すように大形横中ぐり盤で加工されたが、特に上記溝加工には、このために開発された特殊な倣い装置が使用された。カランドリア・タンク及び鉄水遮蔽体の高さも前記と同様の理由から厳しい寸法公差が要求され、管板の面加工には大形立て旋盤が用いられた。加工による変形を抑えることには細心の注意が払われたが、特に、カランドリア・タンク管板面加工では、この時点ではまだカランドリア管が連結されていないために管板の曲げ剛性が小さいこと、及び切削時の昇温による熱変形を抑えるため、特殊治具が用いられた。図8に、カランドリア・タンクの管板面加工の様態を示す。

(3) 工場仮組立て

カランドリア・タンクと鉄水遮蔽体は、現地で一体に組み立てられることから、その据付方法の確認、及び現地据付工程の短縮を図るために、図9に示すように工場内で仮組立てを行ない、各種取合寸法などの確認が行なわれた。

4 現地据付

4.1 管と管板の溶接

カランドリア・タンク管板と鉄水スリーブとの溶接は、専用に開発された管内面自動溶接機を用い自動TIG法により行なわれた。鉄水スリーブは上部、下部で合計448本あり、しかもこれらの間隔が非常に接近しているため、溶接による溶着金属と母材との比が大きくなることを考慮し、過度の溶接変形を防ぐために、カランドリア・タンク上、下管板間に変形防止用治具を設けるとともに、溶接順序を考慮して溶接変形を極力抑える配慮がなされた。また、鉄水スリーブとカランドリア・タンク管板との溶接部に対する非破壊検査は、構造上放射線透過試験が不可能であるため、溶接深さの $\frac{1}{3}$ ごとの液体浸透探傷試験及び溶接後の耐圧試験並びにヘリウム漏洩

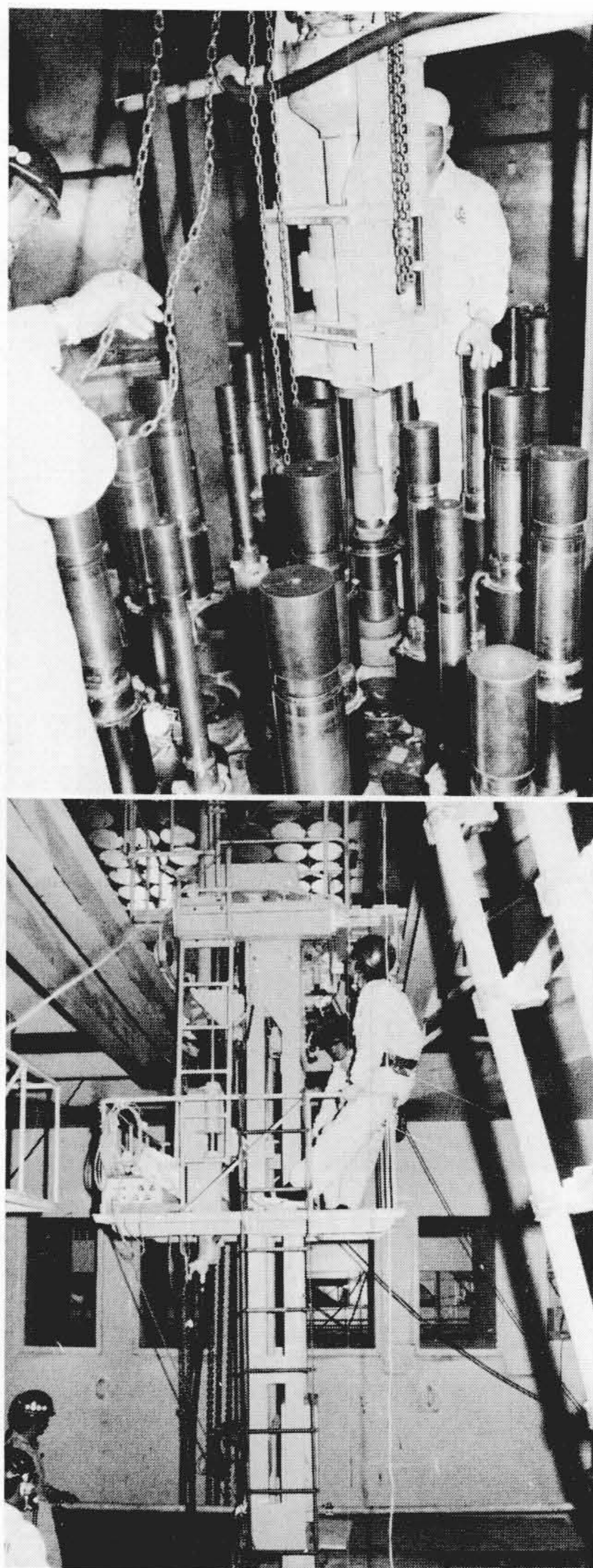
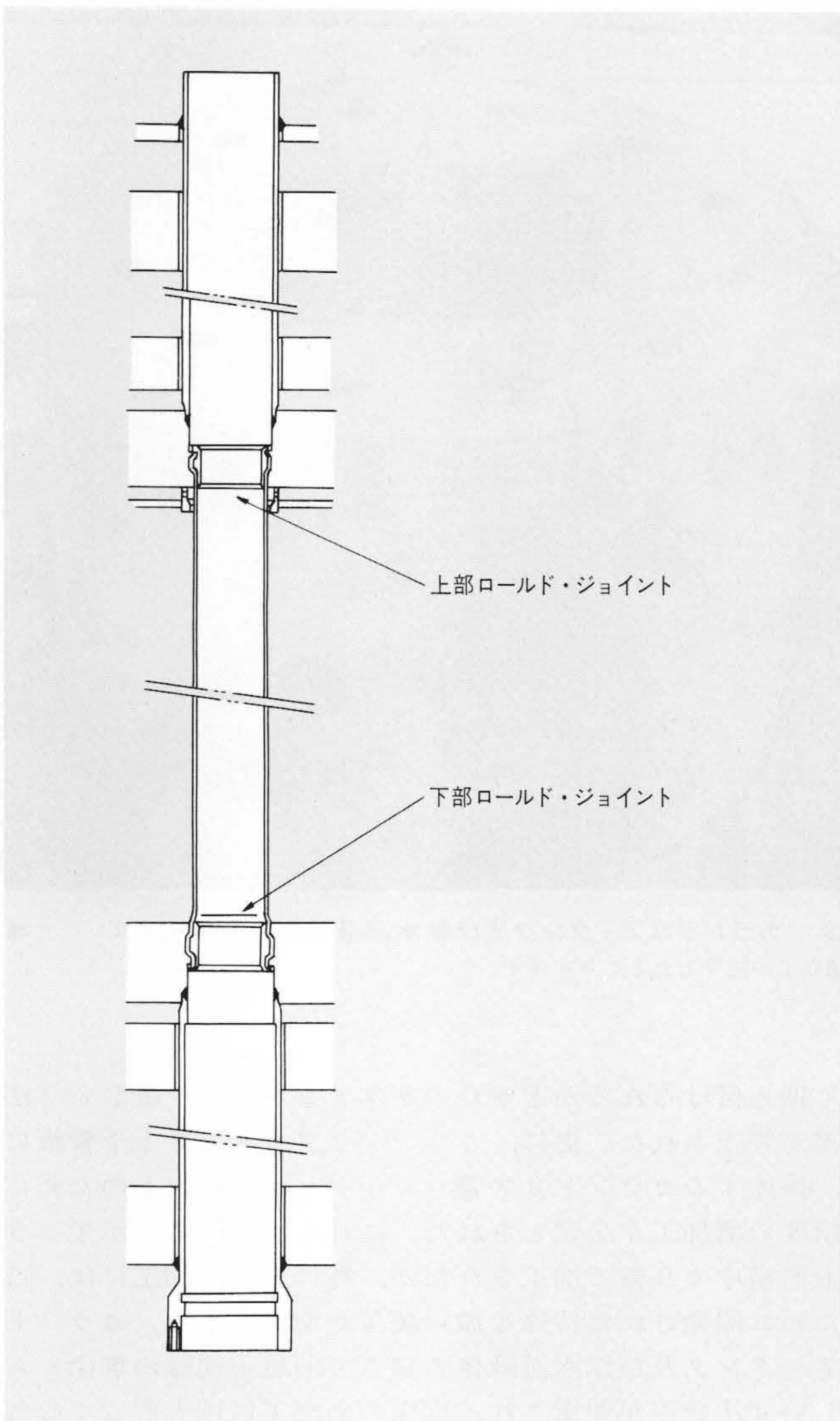


図10 カランドリア管ロール・ジョイント 上図は上部、下図は下部のジョイント作業を行っているところを示す。

試験により同部の健全性を確認した。

4.2 カランドリア管ロール・ジョイント

鉄水スリーブの溶接完了後、カランドリア管のロール・ジョイント作業が行なわれた。本作業は、試作開発により確立した要領、手順に基づき、カランドリア・タンク管板の変形を最小限に抑えるように、定められた順序により行なわれた。図10にジョイント作業状況を示す。

ジョイント部に対する2種類のヘリウム漏洩試験、すなわち各管のジョイントが完了するごとの加圧積分法と、すべてのジョイントが完了した後の真空法による耐漏洩性の確認が行なわれた。結果は、両者とも全ジョイント部に対して目標値(1.0×10^{-4} Acc/s以下)を十分下回って合格となった。

4.3 圧力管集合体の据付

カランドリア管のロール・ジョイントが完了した後、圧力管集合体の据付けが行なわれた。圧力管集合体は、取扱い中に変形が生ずることを防ぐため、工場の製作段階で取り付けられた変形防止用補強雇と一体の状態で、原子炉本体下部に搬入され、垂直状態に仮置された。この時点で雇が取り外された後、原子炉本体内につり上げられ、パッキン装着の後支持フランジにより設置、固定された。

5 結 言

以上、「ふげん」の原子炉本体について製作から据付けまでの製作技術面に関する主な事柄を紹介したが、今後引き続き

一次冷却系配管などの据付け、機能試験を行ない、昭和53年3月臨界に達する予定である。製作着手以来今日に至るまで約4年、試作開発まで含めると約7年を要したが、この間得られた数々の経験は、今後の技術向上の上で重水炉分野はもとより他の分野に対しても大いに貢献するものと考えている。

終わりに、本原子炉本体の製作、据付けに当たって、終始御指導、御協力をいただいた動力炉・核燃料開発事業団新型転換炉開発本部の明比副本部長、本多原子炉課長はじめ関係各位、並びにこれの実施に協力された日立製作所日立工場及び日立研究所の関係各位に対し、心から謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 柴藤ほか：新型転換炉原型炉「ふげん」炉本体研究開発の概要，日立評論，56，901(昭49-9)
- 2) E. Shibato et al : Outline of Development on Pressure Vessel Structure for the Prototype Advanced Thermal Reactor FUGEN, Proceeding of the 2nd International Conference on Pressure Vessel Technology, Part I, 1973
- 3) J. Morisawa et al : Development of Dissimilar Material Welding Method of the Pressure Tube-Extension Tubes for the Prototype Advanced Thermal Reactor "FUGEN", Proceeding of the 2nd International Colloquy Welding in Nuclear Engineering in Düsseldorf, Oct. (1974)