

日本原子力発電株式会社東海第二発電所納め

1,100MWe原子炉格納容器の建設

Design and Fabrication of MARK-II Type Reactor Primary Containment Vessel for the Japan Atomic Power Company, Tokai No.2 Power Station

日本原子力発電株式会社東海第二発電所納め1,100MWe原子炉格納容器は、MARK-II型の鋼製自立型格納容器としては世界で初めての型式であるが、従来のMARK-I型の経験を生かし関連部門との密接な協力と実験を含めた十分な事前検討により、7箇月という短期間で据付けを完了し、官庁立会試験に合格した。

本格納容器は構造的に新しい部分が多かったため、多くの試作実験を行なって設計の裏付けを行なうとともに、製作面に関しても、実験によって確認した新しい技術を積極的に採用し、品質の向上を図った。更に現地据付においても安全・品質を第一としながらも、土建作業との並行作業を積極的に取り入れ、据付工程の短縮を図った。本稿はこれらの設計・製作・据付について説明したものである。

和田孝直* Wada Takanao

好永俊昭* Yoshinaga Toshiaki

根本洋一* Nemoto Yôichi

1 緒 言

日立製作所は昭和49年11月、日本原子力発電株式会社東海第二発電所納め原子炉格納容器を7箇月という短期間で据付けを完了し、官庁立会の耐圧・漏洩試験に合格した。図1にこの完成外観を示す。本格納容器は、従来のMARK-I型と呼

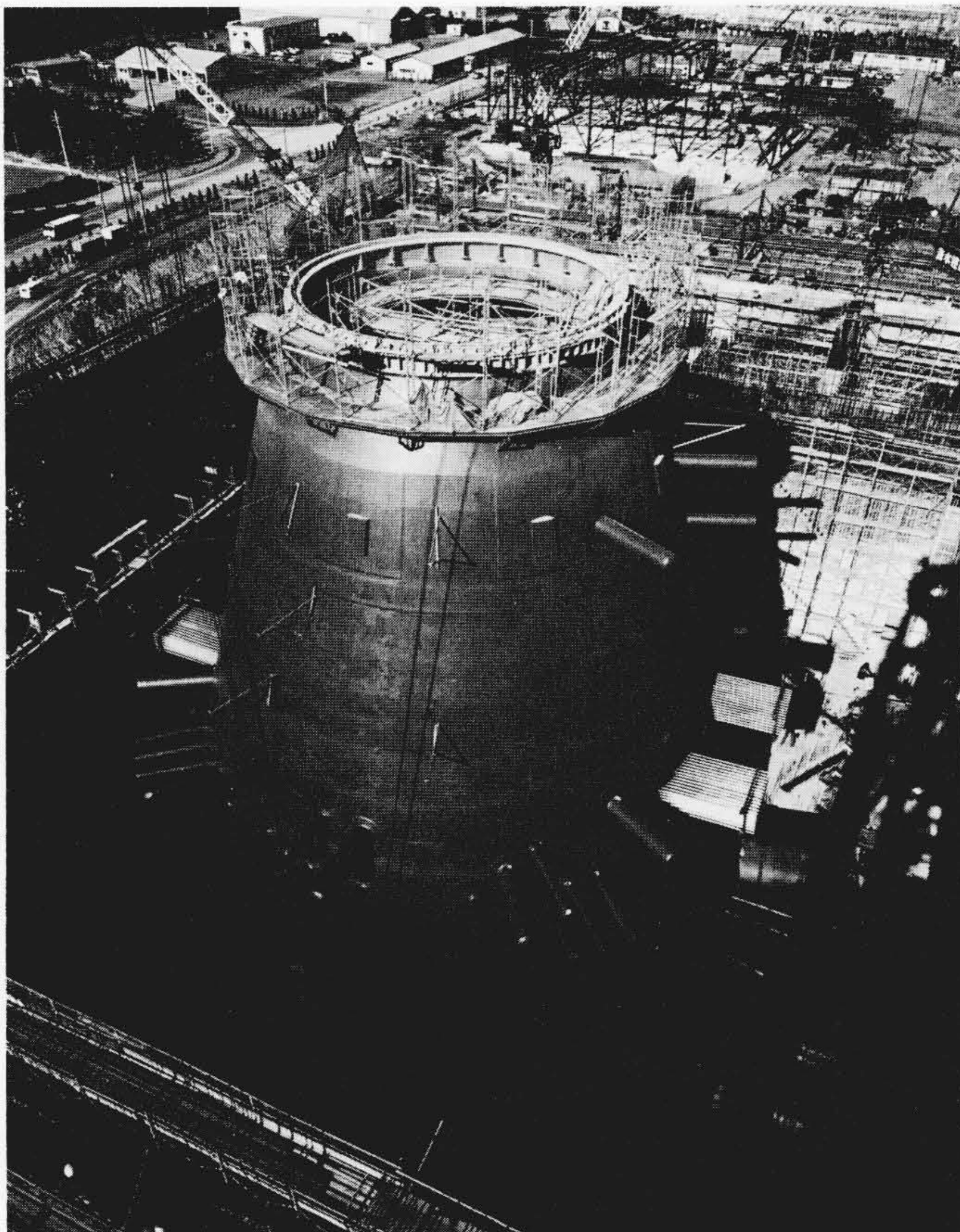


図1 MARK-II型原子炉格納容器 写真は漏洩率試験後の状態を示す。

ばれる電球形ドライウエルの周囲に円環状の圧力抑制室を配置した構造のものと異なり、円錐台形ドライウエルと円筒形圧力抑制室を上下に組み合わせたMARK-II型と呼ばれるもので、原子炉圧力容器や格納容器内部の重要機器類の点検及び配管の仮想破断によって格納容器の健全性が損なわれないようにするための保護対策を、より実施しやすくするため近年開発されたものである。今回完成したMARK-II型格納容器は、鋼製自立型として、日立製作所としては無論のこと、世界でも初めてのものであるが、この格納容器は日本法人GETSCO社から受注し、アメリカ、EBASCO社より与えられた基本設計条件(基本寸法、荷重など)に基づいて日立製作所が詳細な設計を行ない、また永年にわたるMARK-I型の東京電力株式会社福島第一原子力発電所1号機、同3号機及び同4号機、並びに中国電力株式会社島根原子力発電所及び、台湾電力公司金山原子力発電所1号機及び同2号機の設計製作の経験を生かし、かつ諸々に新機軸を採用し好評裏に建設を終了することができた。

以下にその設計、工場製作、現地据付、試験検査などの概要について報告する。

2 設 計

2.1 設計基本仕様

2.1.1 構 造

MARK-II型格納容器は、図2に示すようにドライウエルと圧力抑制室の間を断熱コンクリートと鉄筋コンクリート層を組み合わせたダイアフラムフロアによって仕切り、これに108本の直線状ダウンカマ管を貫通させて連絡したものである。圧力抑制室の円筒胴は、底部マットコンクリートに544本のアンカボルトによって固定されている。このために円筒胴下端に大きな拘束応力が発生するので、固定部外周にサンドピットを設け、砂の反力によって応力を緩和させる構造となっている。更に、圧力抑制室の底部は鉄筋マットコンクリートの上面に薄肉の鋼板をはり、これをアンカボルトで固

* 日立製作所日立工場

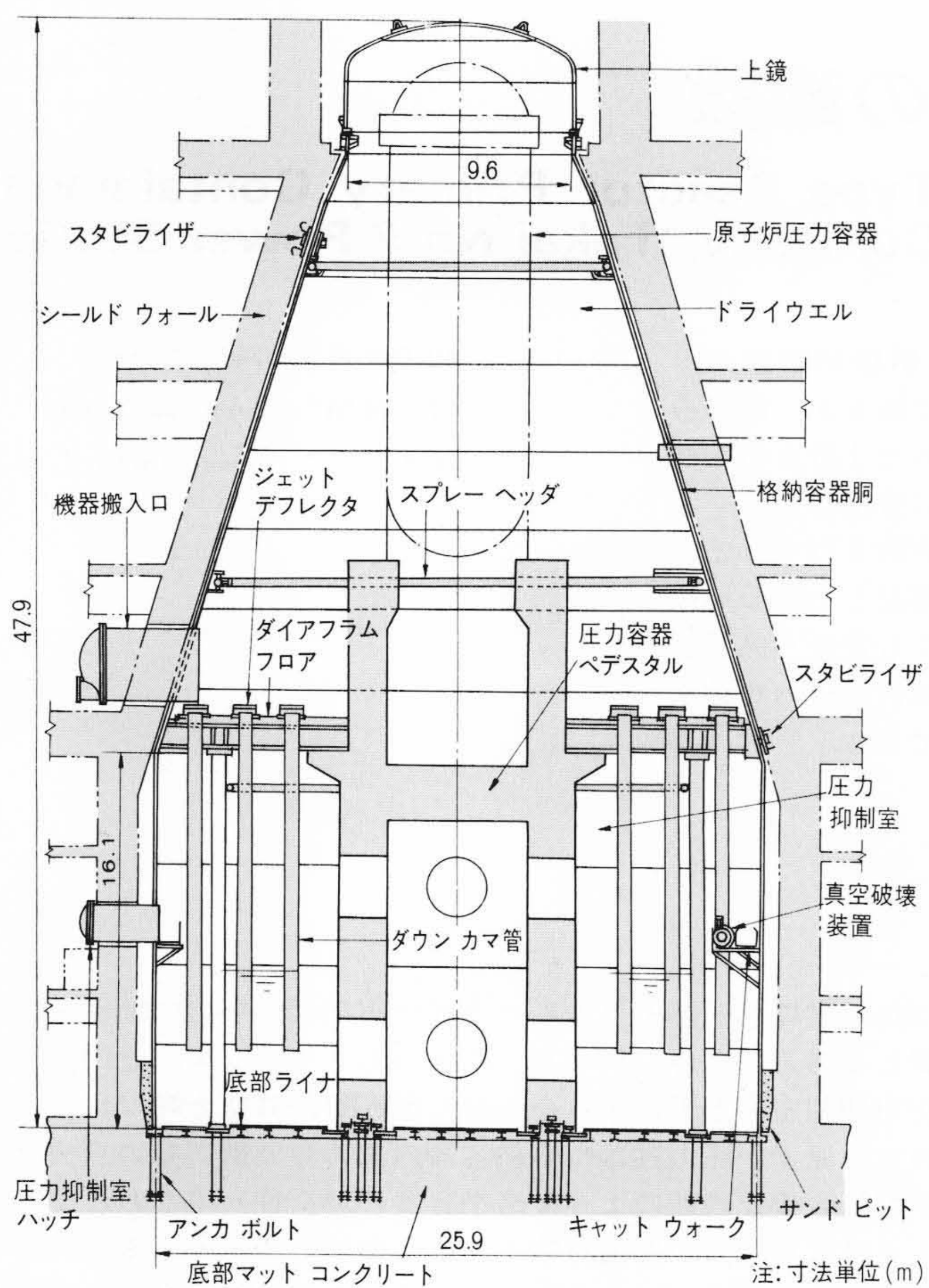


図2 MARK-II型原子炉格納容器の構造 図は鋼製自立型格納容器の断面を示している。

定されたH形鋼に溶接する構造となっている。ライナ プレートは格納容器の気密を保つバリアで、荷重はマット コンクリートで受けることになっている。ドライウエルの円錐部上方には8個、下方には18個の耐震用スタビライザが取り付けられ、原子炉運転中の横方向の地震荷重を拘束支持する。また、ドライウエル円錐部には内部機器を支持するための床用ビームの支持座が、2段に計15個配置されている。ドライウエル円錐部には機器搬入、搬出用のハッチ(1個)、所員用エアロック(1個)、及び圧力抑制室内円筒部にはアクセスハッチ(1個)などが設けられている。

2.1.2 適用規格

MARK-II型格納容器に適用した規格、基準は次に示すとおりである。

- (1) 通商産業省令第81号「電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令」
- (2) 通商産業省告示第501号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」
- (3) 鋼構造計算規準 (AIJ: Architectural Institute of Japan)
- (4) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III "Nuclear Power Plant Components" Devision-1

上記のほか、MARK-II型格納容器の新しい構造部分である底部(ライナ プレート、アンカ ボルト、基礎鉄筋コンクリート)及びダイアフラム フロアに対しては次の規定が適用される。

- (1) 新型格納容器底部に関する仕様
- (2) 新型格納容器ダイアフラム フロア (BWR: Boiling Water Reactor) 及び内部コンクリート構造 (PWR: Pressurized Water Reactor) に関する仕様

表1 荷重の組合せと許容応力強さ 種々の荷重の組合せに対する格納容器各部の許容応力・ひずみの値を示す。

荷 重 の 組 合 せ			許 容 応 力 強 さ		一 次 応 力 強 さ		一次+二次 応 力 強 さ	条 件	内 圧	外 圧	死荷重	活荷重	水重量	空 気 重 量	ジェット力 及び ジェット反力	熱変形 荷 重	地 震 荷 重
			Pm	PL+Pb	PL+Pb+Q												
格 納 容 器 耐 圧 部 分	初 期 試 験 時	D+O+L*	S	1.5 S	3 S	フェライト系鋼材で 製造された格納容器 が考えられるいづれ かの荷重状態で相当 の塑性変形が考えら れる場合は、その領 域を含む鋼材の使用 温度はNDT+67°C 以上とする。	○	—	○	○	○	○	—	—	○		
	最 終 試 験 時	D+O+L*					○	—	○	○	○	○	—	—	○		
	定 常 運 転 時	D+O+S ₁	S	1.5 S	3 S		—	○	○	○	○	○	—	—	○	○	
	燃 料 交 換 時	D+O+S ₁					—	○	○	○	○	○	—	—	○	○	
	安全検討地震時	D+O+S ₂	1.2 S	1.8 S	3 S		—	○	○	○	○	○	—	○	○		
	事故時(ジェット力)	D+O+J	0.9 Sy		3 S		—	○	○	—	○	○	○	○	○		
	事 故 時	D+O+L+S ₁	1.2 S	1.8 S	3 S		○	—	○	—	○	○	○	○	○		
	事故後満水時	—	0.9 Su		—		—	—	○	—	○	—	○	—	—	○	

鉄 筋 コ ン ク リ ー ト 格 納 容 器 胴 ア ン カ ボ ル ト ラ イ ナ プ レ ー ト	許容応力	ライナー プレート		格納容器胴アンカ ボルト		鉄 筋 コ ン ク リ ー ト			
		許 容 膜 ひ ず み		引 張 り	条 件	圧 縮 f _{cc}	せ ん 断 f _{cs}	付 着 (異形鉄筋)	
	荷重の 組 合 せ	圧縮ひずみ ε _{sc}	引張ひずみ ε _{st}					上 端 筋 f _{csf}	
	D+O+L*	—	—	0.5βF	1. F=0.75Su又は Syのいずれか小さい ほうの値 2. β=(Dn/Do) ² Dn=ボルトの呼び径 Do=ボルトの谷径 3. ボルトの設計は谷径 で行なうものとする。	⅓ F _c	⅓ ₀ F _c かつ (5+⅓ ₀₀ F _c)以下	⅓ ₅ F _c かつ (9+⅓ ₅ F _c)以下	⅓ ₀ F _c かつ (13.5+⅓ ₅ F _c)以下
	D+O+L	0.002	0.001	0.75βF		⅔ F _c	⅓ ₀ F _c かつ 1.5(S+⅓ ₀ F _c)以下	⅓ ₀ F _c かつ 1.5(9+⅓ ₅ F _c)以下	⅓ ₀ F _c かつ 1.5(13.5+⅓ ₅ F _c)以下
	D+O+S ₁	0.004	0.002						
	D+O+S ₂	0.005	0.003	F _y		外力と内力を合計したものがつり合いの法則を満たし、どの断面においても降伏状態にならないこと。			
	D+O+L+S ₁								

注: D = 死荷重
O = 通常運転時荷重
L* = 事故時内圧荷重
L = 事故時の荷重
S₁ = 設計地震荷重
S₂ = 安全余裕検討用地震荷重 (1.5 × S₁)
J = ジェット力
S = 規格に定められる許容応力
Sy = 降伏応力
Su = 最大引張応力
F = コンクリート設計基準応力
NDT = Nil-Ductility Temperature 脆性遷移温度

2.1.3 設計仕様

(1) 荷重の組合せと許容応力

格納容器の設計は表1に示すように、五つの荷重条件に対して、それぞれに加わる荷重の組合せを考慮して応力評価を行ない、どのような条件でも格納容器の機能が果たせるような十分な強度をもっていることを確認することが要求される。各条件に対する格納容器本体などの耐圧部及びライナ プレート・格納容器胴アンカ ボルト、鉄筋コンクリートなどの新しい構造部分の応力評価は、表1に示す許容応力で行なわれた。非耐圧部の応力評価はAIJに従って行なわれた。

設計荷重のうち、格納容器胴の設計内圧は $2.85\text{kg/cm}^2\text{g}$ 、設計外圧は $0.14\text{kg/cm}^2\text{g}$ であり、設計温度はドライウエル 171°C 、圧力抑制室 104°C である。またジェット力は、ドライウエル内の一次系配管が仮想破断事故を起こしたとき、配管内の高圧流体が破断部から放出されることにより生ずるものであるが、流体が配管から吹き出した後のジェット流の広がり、は、「Moody の理論」により算出した。

2.2 構造の特徴

2.2.1 応力解析

格納容器の各部応力解析は、表1に示す荷重条件に従って、表2に示す電子計算機計算プログラムを用いて基本板厚計算及び詳細解析を行なった。これらの解析は各計算プログラムを組み合わせ、電子計算機を有効に利用して解析から評価までシステマティックに行ない、計算の精度を上げた。図2に示す形状で応力の大きな点は、仮想事故時の内圧(設計内圧)によるドライウエル胴と圧力抑制室胴の接合部及び仮想事故時の温度分布によるサンド ピット部である。ドライウエル及び圧力抑制室胴の内圧による応力は、表2の計算プログラム“PCVOMP”を使用して求めた。またサンド ピット部については、安全側の計算としてライナ プレート以下の部分は仮想事故前の温度 32°C に保たれ、プール水と接触している部分は事故後の最高温度 104°C に保たれていると仮定し、計

表2 主な計算プログラム 日立製作所内で開発した格納容器用解析プログラムを示す。

プログラム名	計 算 内 容
PCVOMP	回転対称シェルの対称、非対称荷重による応力解析
PCVSAND	サンドクッション部対称、非対称荷重による応力解析
DISHEAD	鏡板の対称荷重による応力解析
FEMR	有限要素法による回転対称体の対称荷重による応力解析
FUYO	Bijilaard法による応力解析
FLPCV	主フランジの対称荷重による応力解析
FLASME	各種フランジの応力解析
ROARK	材料強度公式計算
RINGMY	各種リングの応力解析
ANBOLT	アンカーボルトの応力解析
WINDY	風荷重による反力計算
TEDSI	二次元回転対称体温度分布計算
HEATRAN	各種伝熱形態に対する伝熱係数計算
EVAST	応力評価と疲れ解析計算

算プログラム“PCVSAND”を使用して図3に示すように求めた。これらは十分規定許容値にあり、構造強度上問題がないことを示している。

2.2.2 モデル実験による確認

MARK-II型格納容器は新しい構造であるため、縮小モデル及び実物大により実験による実証確認を積極的に採り入れた。実験を行なったものとしては、図4に示す鋼製モデルによる応力測定実験(円錐胴の斜角ノズルに外力が加わった場合の簡便応力解析法の妥当性確認)、ジェット力分布実験(蒸気・水二相流破断に対するジェット圧力分布、温度分布の確認)、サンド ピット部分実物大試験、(サンド ピット部形状の妥当性確認)サンド平面ひずみ実験(砂の特性確認)及びダイアフラム フロア ベローズ部分実物大実験がある。結果はいずれも所期の目的を達成できるものであった。

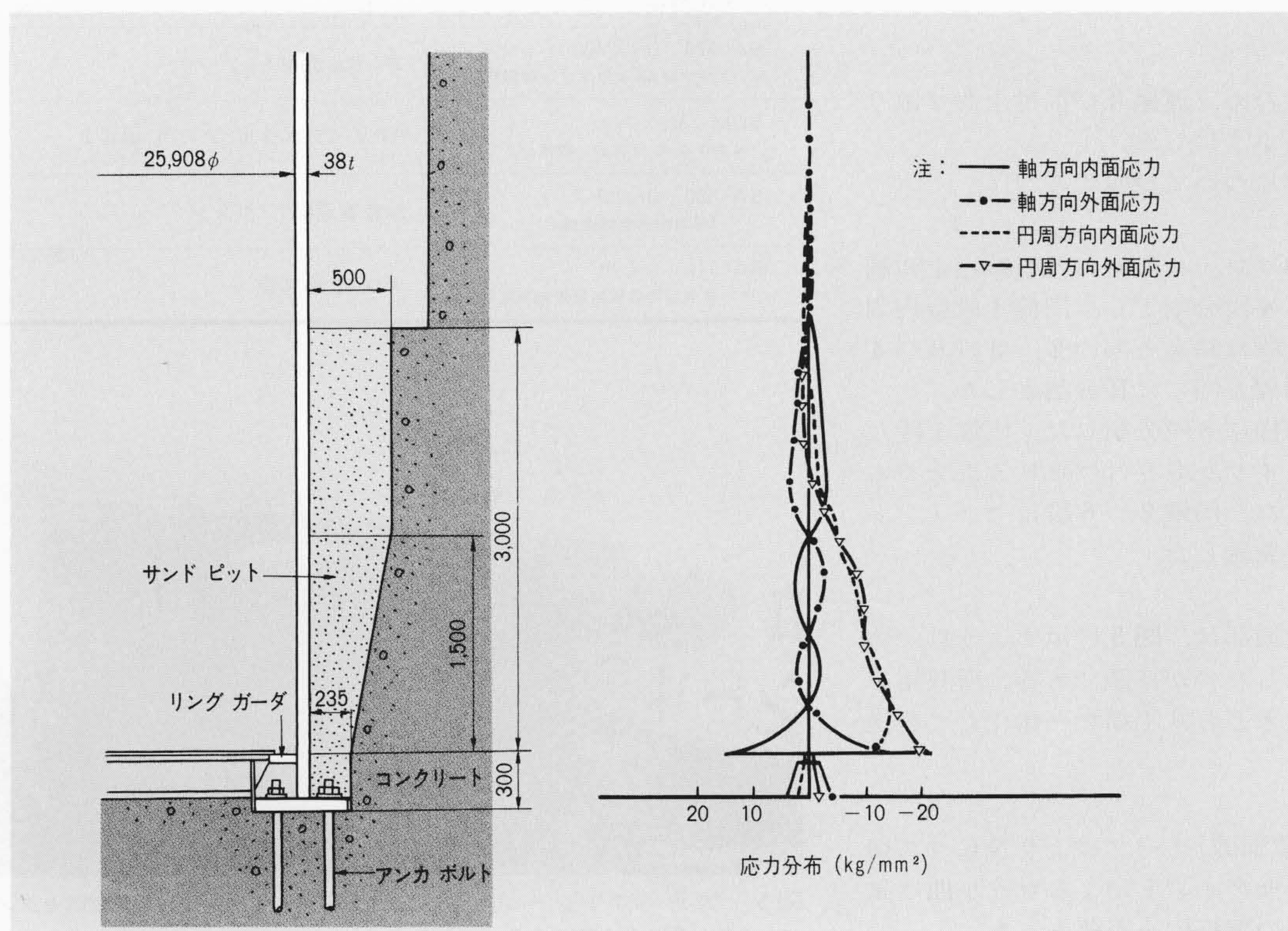


図3 サンド クッション部の温度こう配による応力分布 温度こう配 $32\sim 104^\circ\text{C}$ による熱応力分布を示す。

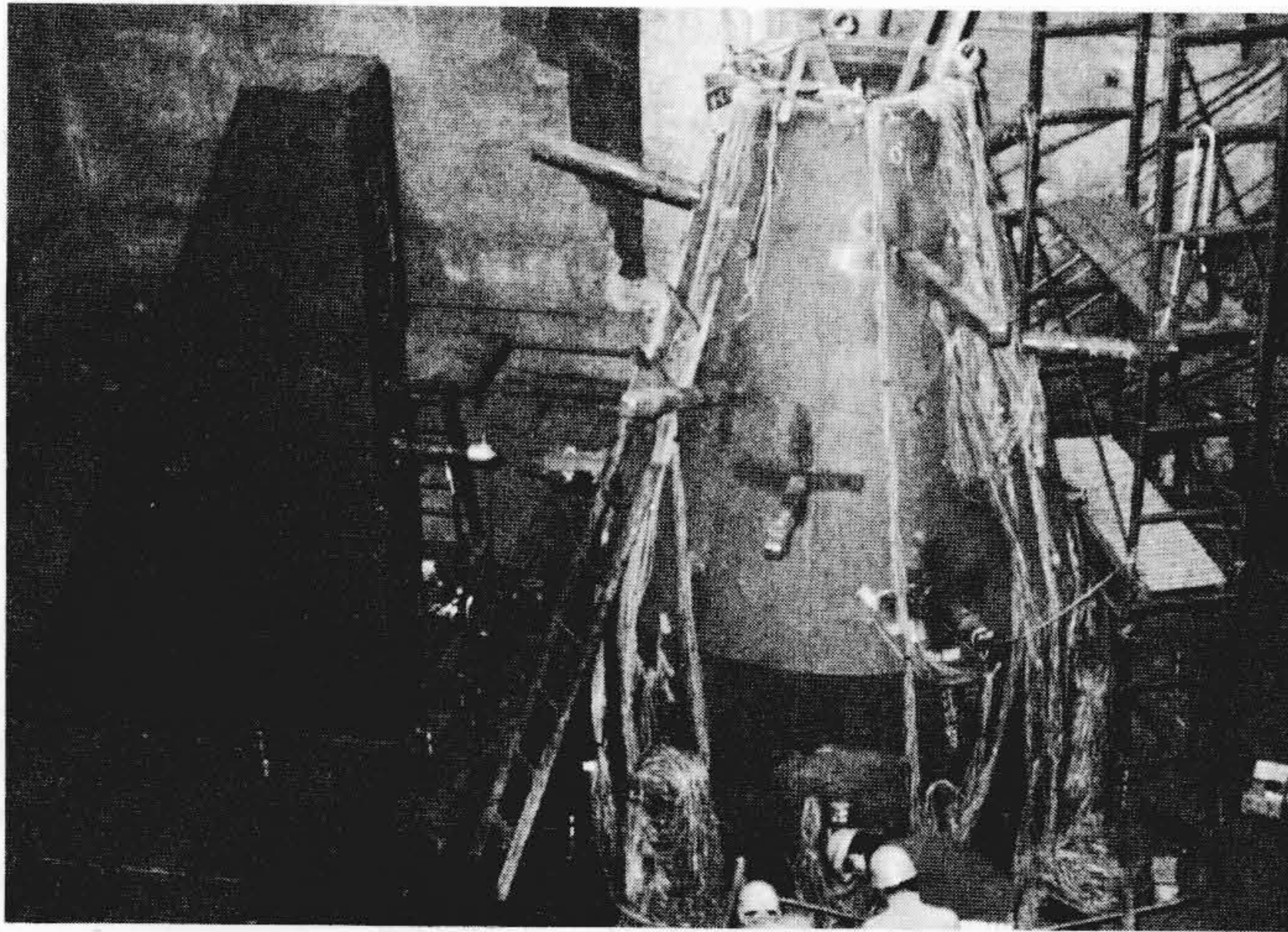


図4 鋼製モデルによる応力測定実験 図は鋼製モデルにひずみゲージを取り付けている状態を示す。また左側に見えるのは荷重装置である。

2.2.3 実機による応力測定

MARK-II 型格納容器の新しいコンクリート構造である底部(ライナ プレート、アンカ ボルト、鉄筋マット コンクリート)の設計方法の妥当性を確認するため、格納容器の耐圧、漏洩率試験時実機のライナ プレート、コンクリート埋設部のアンカ ボルト及び鉄筋にひずみゲージをはり応力測定を行なった。更に、リング ガード周辺及びアンカ ボルト上端の変形測定を行なった。結果はいずれも底部構造の設計が妥当であることを裏付けるものであった。

3 材 料

格納容器は、高い安全性の要求から脆性破壊は絶対に避けなければならないため靱性の優れた材料を選定し、十分な品質管理の下で製作することが必要条件である。このために主要材料として表3に示すものを使用した。

4 工場製作

4.1 工場製作範囲の概要

現地据付工程の短縮を図るため、運搬及び据付上許す限り工場で大きな部品にまとめるようにした。

以下に主な部分の工場製作について説明する。

4.1.1 格納容器胴部

円筒部は、鋼板の定尺、曲げロールの能力及び輸送上の制限などを考慮して鉛直方向に4段分割とし、円筒1段は円周方向8分割とし、円筒2～4段は鉛直方向の2、3段及び4段を工場溶接で一体とし、円周方向には10分割とした。

円錐部も円筒部の考え方同様に8段分割した。円錐1段及び7段は、耐震用のスタビライザが取り付けられる部分であり、円周方向2枚つなぎとした。円錐2～6段はセグメント同士の溶接は行なわず単体で発送した。

4.1.2 配管貫通部

主蒸気配管、給水配管の貫通部は、図5に示すように一体の超大形ブロックとして発送したのが特徴である。所員用エアロック、機器搬入口は、従来どおり工場で一体化して発送した。

4.2 製作上の特徴

胴体セグメントはNC(数値制御)テープによりNCガス切断を行なった。また実物大のセグメントによるロール曲げ試作を行ない、セグメント上端の調整代を不要とした。

4.2.1 溶接の特徴

円筒2～4段においてNCガス切断、ロール曲げ加工後、各段のセグメントごとに溶接し、合計10枚の超大形セグメントとし、各セグメント間の溶接は、自動サブマージド アーク溶接により日立製作所が確立したグラスウール棒を使用する裏はつり不要の技術を駆使して行なった。

4 現地据付

5.1 据付の特徴

5.1.1 建築工事との並行作業

従来型格納容器の据付は建築工事と分離されていたが、今回の格納容器では、底部マット コンクリート、シールドウォール、圧力容器ペデスタル及びダイアフラム フロアの建築工事並びにアンカ ボルト、底部ライナ及び格納容器胴の機械工事が並行作業となった。この様子を図6に示す。

5.1.2 円錐部の地上組立

地上組立定盤としては2面用いたが、この2面の定盤で円錐2、4、6段、円錐3、4、7段及び6リングを同時組立とし、工程の短縮を図った。

表3 格納容器使用材料一覧表 格納容器各部分に用いられた主な材料を示す。

材 質	使 用 部 分
SA-516 GR. 70 (中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板)	ドライウエル胴 圧力抑制室胴 配管貫通部 底部ライニング
SA-333 GR. 6 (低温配管用鋼管)	配管貫通部 スプレー ヘッダ
SUS 304 TP (配管用ステンレス鋼鋼管)	配管貫通部
SA-320 GR. L43 (ニッケルクロム モリブデン鋼鋼材)	主フランジ ボルト
SA-320 GR. L43 (ニッケルクロム モリブデン鋼鋼材)	アンカ ボルト
SCM 3 (クロム モリブデン鋼鋼材)	RPVペデスタル アンカ ボルト
SA-350 GR. LF I (低温用炭素鋼鍛鋼品)	配管貫通部 フランジ
SA-516 GR. 70 (中・常温圧力容器用炭素鋼鋼板)	ダウン カマ管

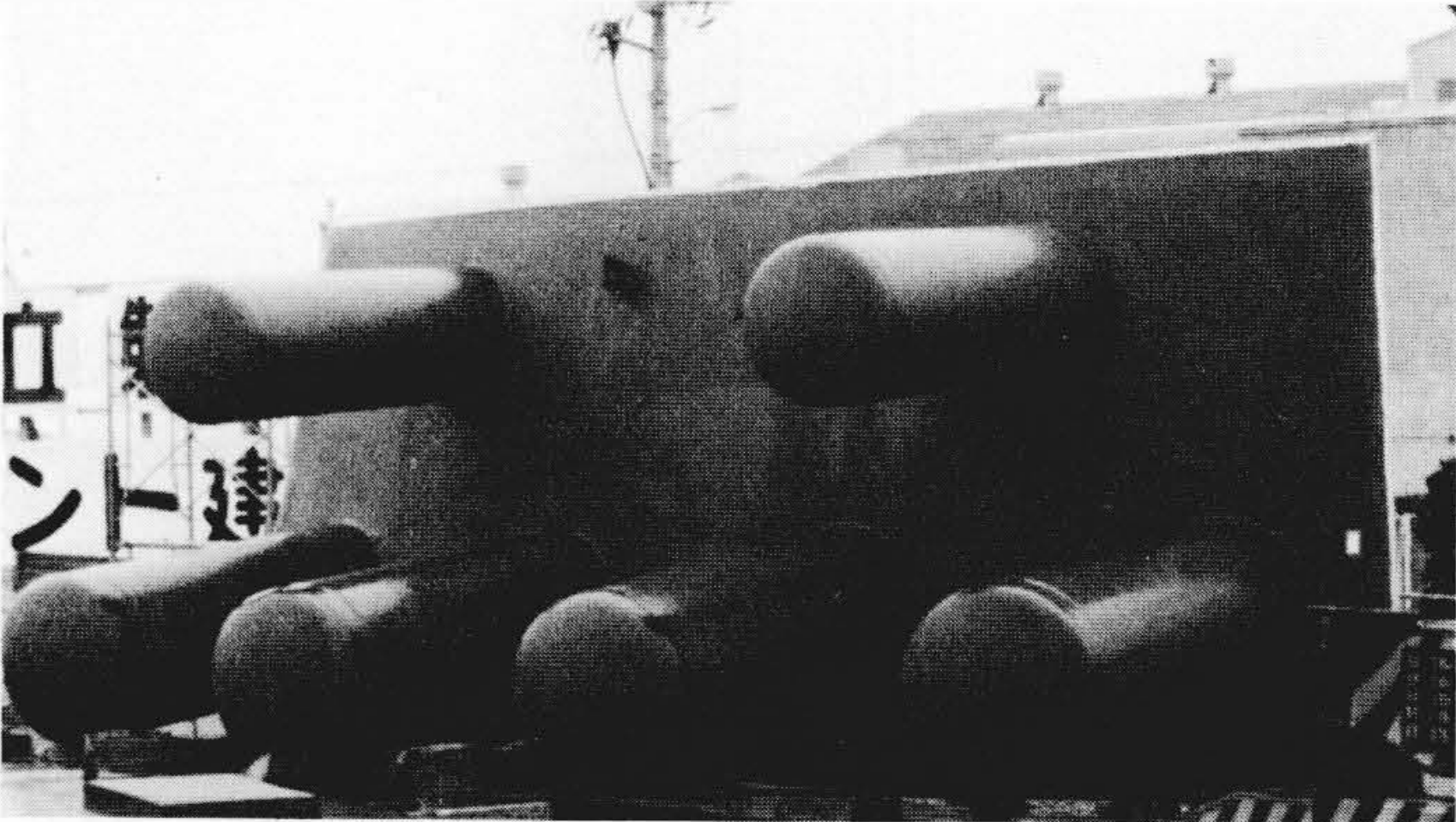


図5 大形ペネトレーション 大形ペネトレーションを円錐胴セグメント1枚に集めたものである。

5.1.3 現地溶接

パルス アーク溶接、サブマージ アーク溶接及びミグ溶接の自動、又は半自動溶接を大幅に採り入れた。特に横向きサブマージ アーク溶接を我が国で初めて格納容器胴に採用し、品質の向上と工期の短縮を図った。その模様を図7に示す。

5.2 格納容器の据付作業の詳細

5.2.1 基礎ボルト及びリング ガーダの設定

基礎ボルトの据付は、格納容器本体の据付に先行し、建屋作業のベース マットの配筋作業と同時期に行ない、テンプレート及びアンカ フレームを用いて設定した。

5.2.2 円筒部の据付

円筒1段は地上でリング状組立後つり込みを行ない、円筒2～4段は円周方向10セグメントでつり込んだ。つり込み後の各セグメントの転倒防止及び真円度調整は、側壁シールドウォールに埋め込まれている埋込金物を利用し、ターンバックルを用いて行なった。これら超大形パネルの据付は、従来に例はないが開先合せ及び心出しなど比較的容易に行なうことができた。

5.2.3 ダイアフラム フロアの据付

ダイアフラム フロアの据付は、格納容器の円筒部据付後に行なったため、短期間にダイアフラム フロアのつり込み設定を完成させる必要があった。このため、地上組立を大幅に行ない平面18分割のうち、1スパン飛びの9スパンを地上組立で完成させ、つり込み設定をした。

5.2.4 ダウン カマ管の据付

ダウン カマ管は、直径610φ長さ14mの管にジェットデフレクタをもち、直管状が97本、途中にバキュームブレーカ弁を取り付ける構造のものが11本、合計108本をダイアフラムフロアへつり込み設定したものである。このつり込み時期は、下記項目との多重複作業となり、工程上、安全上最も注意を払った点である。

- (1) ダイアフラムフロアの据付
- (2) ダウンカマ管のつり込み
- (3) 格納容器中央部の圧力容器ペデスタル建築工事
- (4) 格納容器円錐1段のつり込み設定
- (5) 格納容器外周シールドウォール建築工事
- (6) 格納容器円錐部へ取り付ける配管貫通部の基準墨出し
- (7) 格納容器内の円錐部据付足場用架台の設定

5.2.5 円錐部の地上組立及びつり込み据付

円錐1段はダイアフラムフロア支持ビームの関係上、地上組立リング状でのつり込みが不可能のため、単セグメントのつり込みとし、2～7段は地上でリング状に組み立て、つり

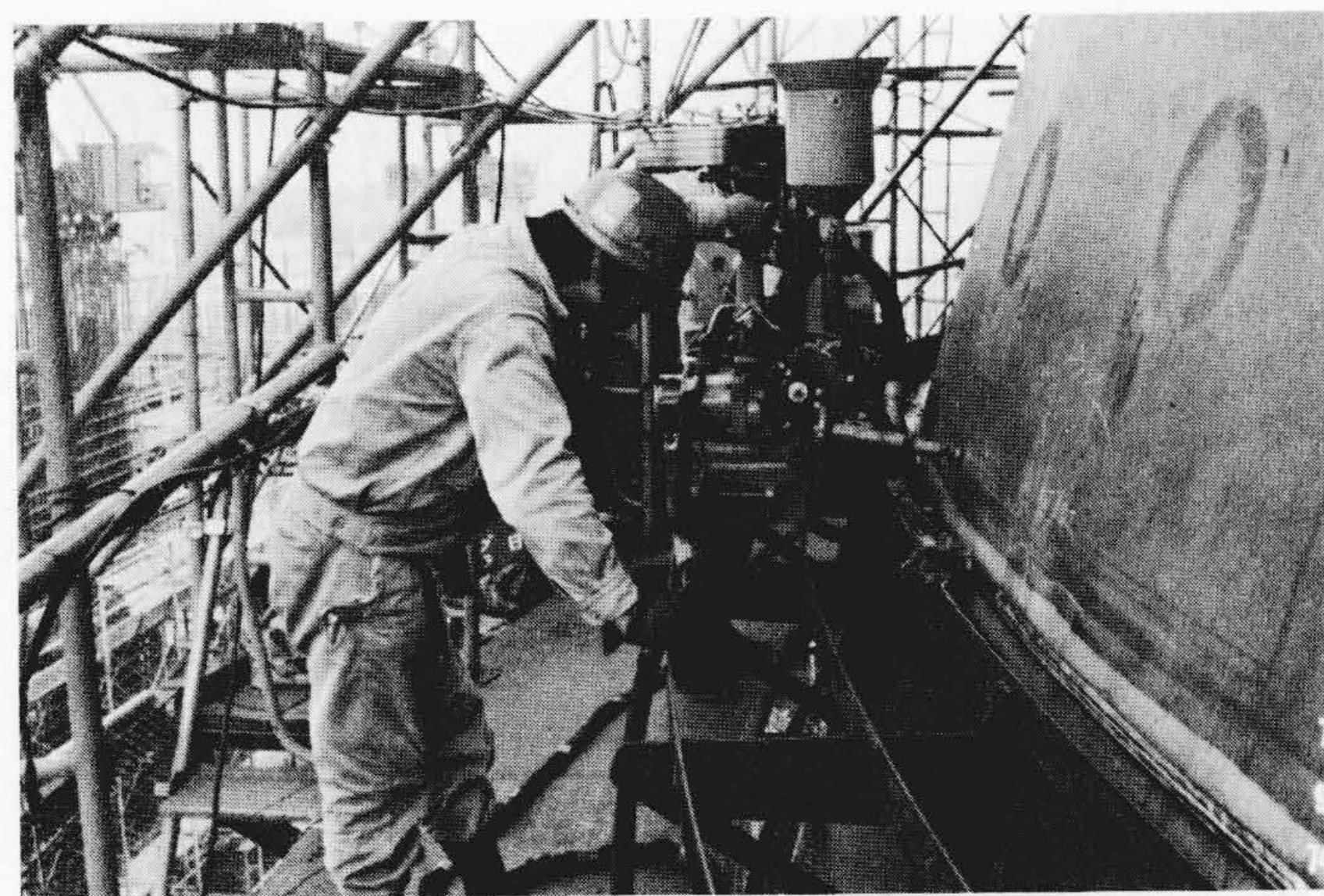


図7 横向き自動サブマージアーク溶接 円錐胴円周継手部の横向き自動サブマージアーク溶接を行なっている様子を示す。

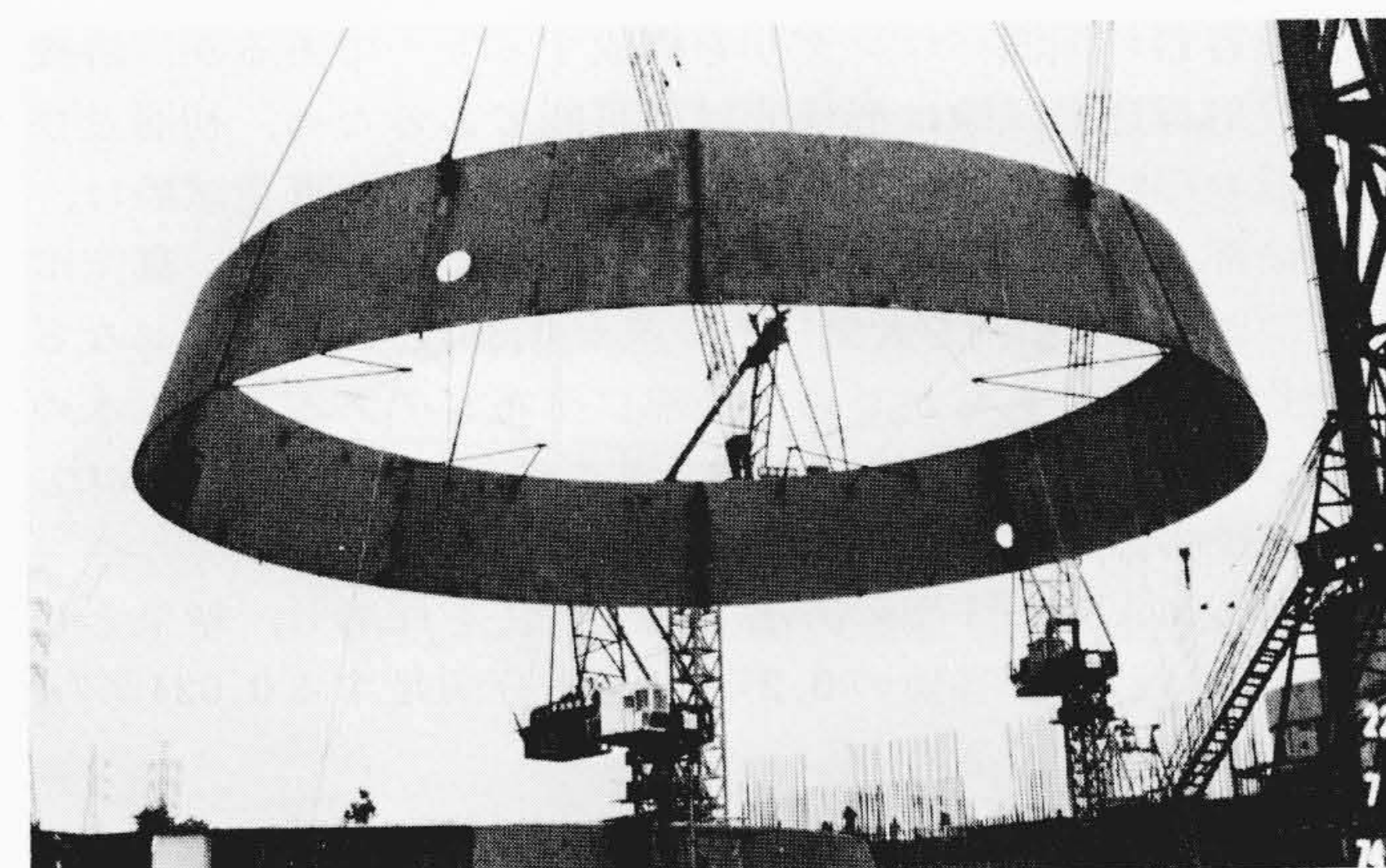


図8 円錐胴のつり込み状況 円錐胴を地上でリング状にした後、つり上げている状態を示す。

込みを行なった。つり込みの様子を図8に示す。

5.2.6 ダイアフラムフロア シールベローズの据付

ダイアフラムフロアシールベローズは、ドライウエルと圧力抑制室を仕切るエキスパンション式シールであり、ダイアフラムフロア部に取り付けられる。このベローズは、事前に実物大の部分モデル試験を行ない、締付力、気密性などを検討した。

5.2.7 底部ライナの据付

底部ライナは、ライナサポートビーム、ライナプレート

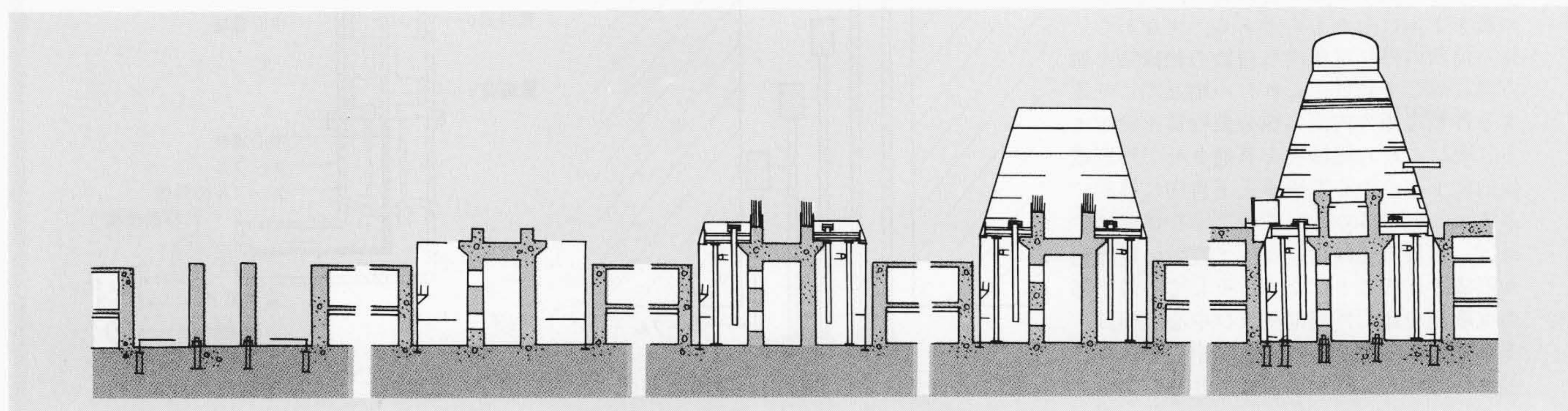


図6 格納容器据付順序 格納容器胴、内部鋼構造物及びコンクリート構造物の据付手順を示す。

及びライナ プレート溶接線の漏洩テスト用テスト チャンネルで構成されている。このうち、ライナ サポート ビームは、格納容器リング ガーダ据付と同時期に施工され、その後グラウトを行ない、ライナ プレートの据付テスト チャンネルの取付という順序で施工された。特徴としてライナ プレート及びテスト チャンネルの溶接の大半に、サブマージ アーク溶接を採用したことであるが、野天作業のための雨の影響とグラウトを先に施工した上に、ライナ プレートを載せ溶接するという施工方法のため、その品質管理には細心の注意が払われた。

6 試験及び検査

6.1 現地品質管理体制

格納容器据付品質管理に対する現地組織を確立し、格納容器品質保証計画書に基づき、品質管理活動を行なった。

6.2 試験の特徴

(1) 底部ライナ プレート

2種容器の漏洩バウンダリを構成するものであるが、溶接部の放射線透過試験は形状的に不可能であるため、初層及び最終層の磁粉探傷試験と真空試験を実施した。真空試験は、各溶接部の形状に応じた真空箱を溶接部に押し当て、真空ポンプにより真空箱内を大気圧との差が $0.35\text{kg/cm}^2\text{g}$ 以下になるまで負圧にし、あらかじめ溶接部に塗布してある石けん水の発泡の有無により、溶接部の健全性を確認する方法によった。

(2) 格納容器全体耐圧漏洩試験

従来型 MARK-I 型の方法と同じ方法を採用し、結果として漏洩率は設計許容値の $0.2\%/d$ を十分満足する $0.024\%/d$ に収めることができた。

(3) ダイアフラム フロア耐圧、漏洩試験

初めての試験経験であるため、実施に当たり特に次の点を主眼とした。

- (a) 社内予備試験を十分行ない、昇圧途中でダイアフラムフロアの漏洩箇所確認のため点検を行なうこととした。
- (b) 耐圧圧力 $1.94^{+0.04}_{-0.04}\text{kg/cm}^2\text{g}$ の計測のため、高精度ブルドン管圧力計を取り付けた。
- (c) 漏洩率測定方法は絶対圧力法を用い、併用してダイアフラムフロアからの漏洩率を算出する漏洩量計量法を計画実施した。

試験結果として漏洩率は設計許容値 $10\%/d$ を十分満足できる $1.32\%/d$ に収めることができた。

7 結 言

原子炉格納容器は、その機能から原子力発電所における安全上最も重量な機器の一つであると同時に、その建設は発電所建設工程上クリティカル パス上にあるため、高度の品質管理を念頭においた設計、製造、据付、検査及び短期間での現地据付が要求される。幸い日立製作所は世界初の MARK-II 型鋼製自立型原子炉格納容器を厳密な品質管理の下で短期間に据付けることができた。

今後、更に新技術の採用などにより品質の向上、据付期間の短縮について努力する考えである。

最後に本格納容器の建設に当たり、御指導と御協力をいただいた日本原子力発電株式会社、General Electric Technical Services Co., Inc. (Japan) 及び EBASCO Services Inc., (USA)、清水建設株式会社及び日立製作所関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。



放射能検出器

岸 勝一

特許 第790379号 (特公昭50—2833号)

本発明は、複数の電離箱を用いて原子炉炉心内の放射能の分布を測定する装置に関するものである。

従来は図1に示すように、炉内の空間に複数の検出器を配置して、放射能の分布を測定していたが、この構成ではケーブルの数が多く、それだけ中性子がケーブルに吸収されて、有効に利用されていなかった。

そこで、本発明は、図2に示すように1個の検出器の中に複数の電離箱（同図では4個）を形成させることにより、ケーブルの数を1本にしたものである。すなわち、長い筒状の外側電極内に複数の絶縁物を軸方向に離して設け、これらの相互間に位置する外側電極の内面に核分裂物質を塗布する。更にこれら絶縁物を貫通させて外側電極内に1本の中心電極を上下自由に移動できるようにしている。このような構成にすれば、複数の絶縁物によって複数の電離箱が形成されることになる。そして、最下部の電離箱では、外側電極及び中心電極は、それぞれケーブルの外側及び中心導体に接続されていて、移動機構によりケーブルの

中心導体を移動させると、中心電極が上下に移動するようになっている。

このような構成の検出器で、まず中心電極を最先端の電離箱 a の上端まで押し上げたときの電流計の読みを I_1 とし、次いで中

心電極を電離箱 a の下端まで下げたときの電流計の読み I_2 とすると、両電流値 I_1, I_2 の差から電離箱 a での放射能が検出されることになる。同様の操作により各部の電離箱 b, c, d での放射能の検出も可能である。

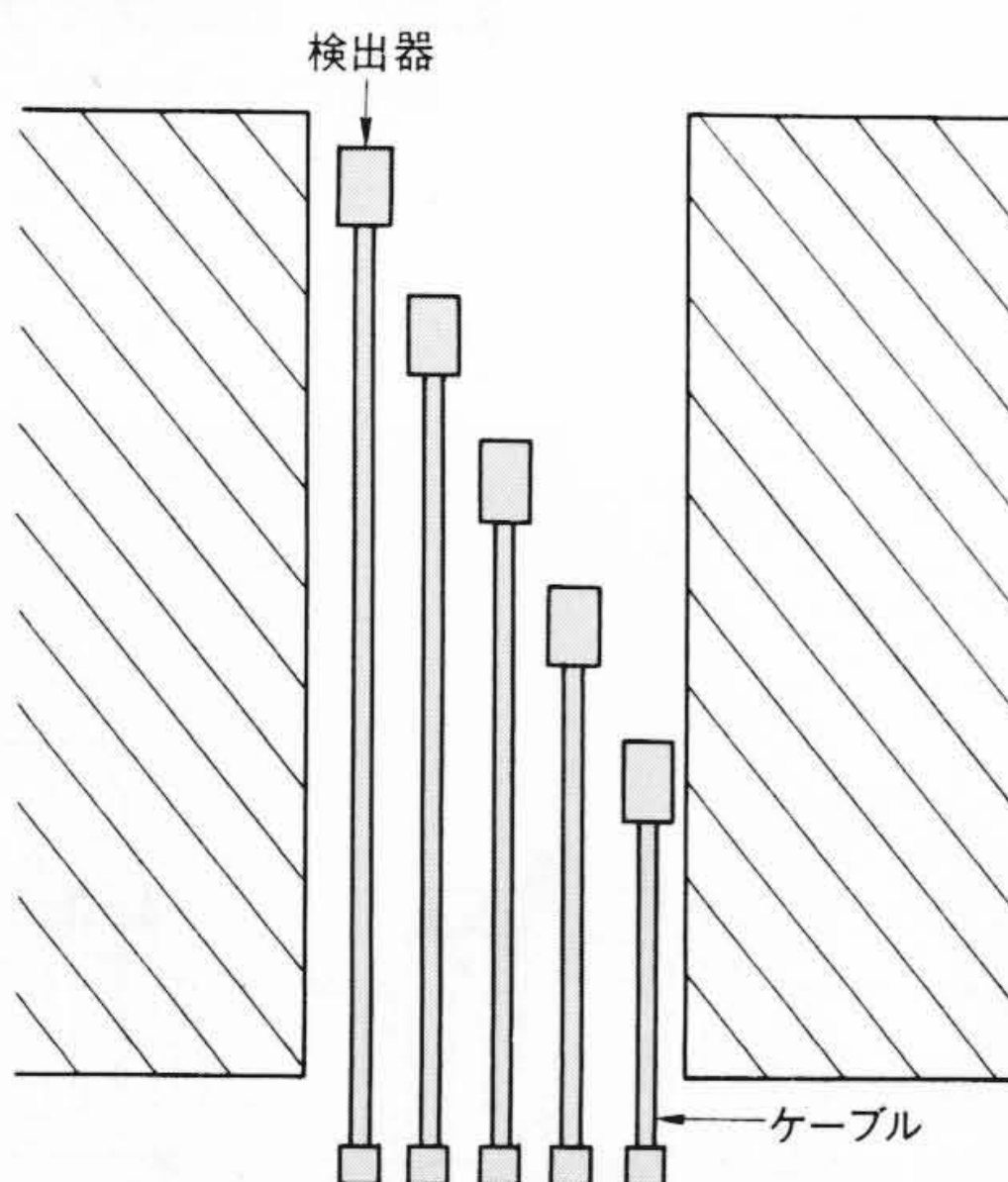


図1 従来の放射能検出装置の説明図

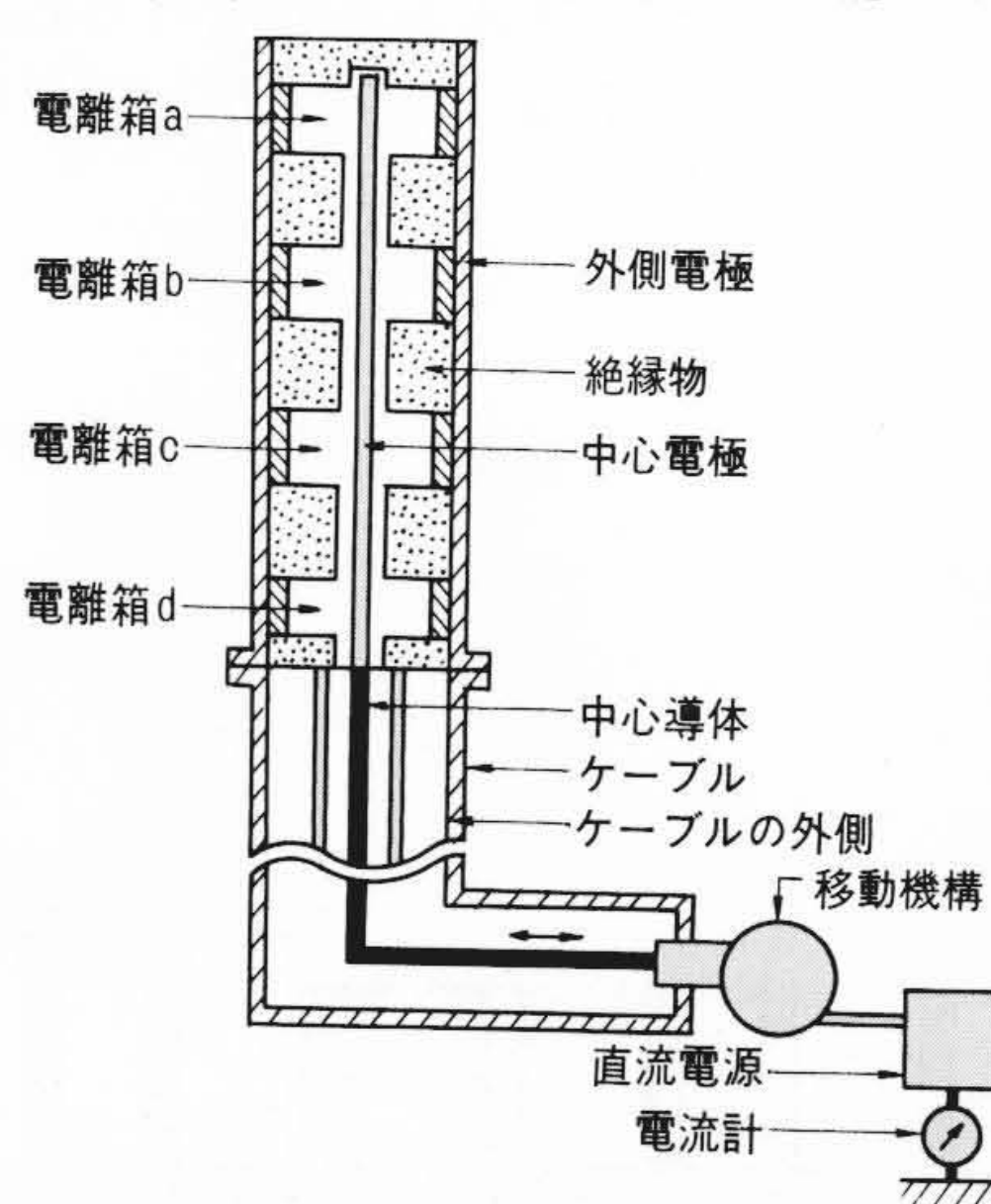


図2 本発明による検出装置の説明図