

沸騰水型原子炉新形格納容器の構造

Structure of New Type Reactor Primary Containment Vessel

和田孝直* Takanao Wada

A reactor primary containment vessel in a boiling water reactor nuclear power plant constitutes a barrier in preventing the radioactive substance from scattering to the outside of the plant in a loss of coolant accident. Hence, a severe quality assurance system on design, fabrication and inspection has been required of the containment vessel.

As for the type of the containment vessel, a light bulb-torus type (MARK-I type) containment vessel, in which a torus-shaped suppression chamber is provided around the light bulb-shaped drywell, has been used mainly, but recently, an over-under type (MARK-II type) containment vessel which has a frustum drywell over a cylindrical suppression chamber has come to be used increasingly because of its advantages in respect of safety, maintenance and the control of the reactor.

The article compares the MARK-II with the MARK-I in such points as applicable codes, structure, materials, fabrication and inspection, also giving a description of the characteristics of the MARK-II.

1 緒 言

沸騰水型原子炉格納容器は、現在の原子力発電所において通常発生するとは考えられないような大事故をあらかじめ想定し、その場合においても核燃料から放散された核分裂生成物をその内部に封じ込め、発電所従業員を含め一般公衆に放射線障害を与えない役めをするもので、安全確保上非常に重要な機器である。そのため、その設計、製作、検査は通商産業省技術基準やASME (American Society of Mechanical Engineers) 規格などの厳しい規定に従って行なわれ、そのうえ更に、製品品質の完全性を保証するため、それぞれの組織について品質保証体制を確立することが要求される。このように原子炉格納容器は厳しい品質の完全性が要求され

るが、その現地据付工程は、原子力プラント建設上のクリティカルパスにもなり、経済性の面と合わせて総合技術の結集が必要となってくる。

沸騰水型原子炉には圧力抑制式格納容器が用いられており、図1に示すようにその構造は大別して、原子炉圧力容器及び再循環系などを収納するドライウェル及び事故時に蒸気を凝縮し圧力上昇を抑制するための水を蓄えた圧力抑制室より構成されている。現在、建設中あるいは建設済みの格納容器の形式は、このドライウェルと圧力抑制室の形状により二つに大別される。その一つは図1(a)に示すように、電球形ドライウェルの周囲に円環状の圧力抑制室を配置したもので、MA

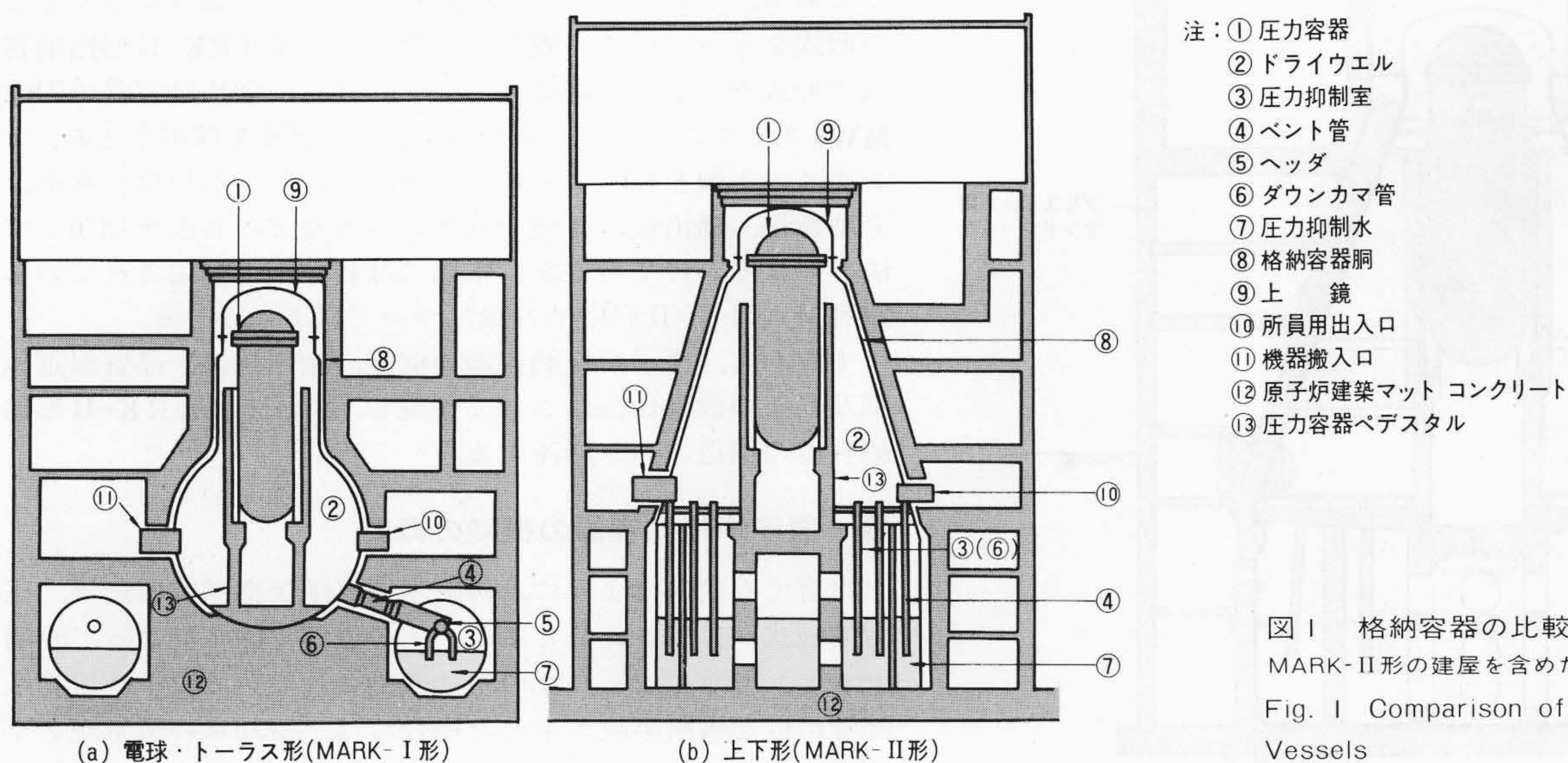


図1 格納容器の比較 MARK-I形及びMARK-II形の建屋を含めた構造の比較を示す。

Fig. 1 Comparison of Containment Vessels

* 日立製作所日立工場

表 I MARK-II 形格納容器の形式 世界における主なMARK-II 形格納容器の形式を示す。

Table I MARK-II Type Containment Vessel

プラント名	プラント 所在国	電気出力 (MWe)	着工年	営業運転 開始予定	格納容器 の形式
CAORSO	イタリア	800	1970	1976	コンクリート容器
BAILLY	アメリカ	660	—	1978	—
SHOREHAM	—	819	1973	1977	—
W. H. ZIMMER-1	—	810	1972	—	—
日本原子力発電株式会社東海第二発電所	日本	1,100	1973	—	鋼製容器
東京電力株式会社福島原子力発電所 6 号機	—	—	—	—	—
LA SALLE-1	アメリカ	1,078	1971	1978	コンクリート容器
LA SALLE-2	—	—	—	1979	—
HANFORD-2	—	1,100	1973	1977	鋼製容器
LIMERICK-1	—	1,053	—	1978	コンクリート容器
LIMERICK-2	—	—	1972	1980	—
SUSQUEHANNA-1	—	1,040	1973	1979	—
SUSQUEHANNA-2	—	—	—	1981	—

MARK-I 形（電球・トラス形）格納容器と呼ばれ、日立製作所では東京電力株式会社福島原子力発電所 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 1 号機、台湾電力公司金山原子力発電所 1 号機、同 2 号機用として納入あるいは製作・据付中である。他の一つは図 1(b)に示すように、円すい台形ドライウェルと円筒形圧力抑制室を上下に組み合わせた MARK-II 形（上下形）格納容器といわ

れるもので、現在日本原子力発電株式会社東海第二発電所用として製作中である。この MARK-II 形格納容器は、原子炉圧力容器や格納容器内部の重要配管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に近年開発されたものである。

次に格納容器を構成材料の面からみると、鋼製自立形格納容器と鋼板ライナを内張りした鉄筋コンクリート（又はプリストレス コンクリート）製格納容器に大別される。鋼製自立形格納容器は、格納容器胴が鋼板のみでできているものであり、我が国で用いられているものはこの形式である。鉄筋コンクリート（又はプリストレス コンクリート）製格納容器は、鉄筋コンクリート（又はプリストレス コンクリート）製容器の内面に薄い鋼板製ライナを張り、圧力、地震荷重などをコンクリートで受け、鋼板ライナで気密性を保持するものであり、アメリカでは MARK-II 形格納容器はほとんどこの形式をとっている。表 1 は世界の主な MARK-II 形格納容器の形式を、また、図 2 は、コンクリート製格納容器の 780 MWe クラスの一例を示すものである。鋼製を採用するか、コンクリート製を採用するかは、その国における規格や基準、立地条件、経済性、各種の技術レベルなどの要因を加味して決められるわけであるが、本稿では我が国で採用されている鋼製 MARK-II 形格納容器について以下に述べる。

すなわち、原子炉格納容器の機能、適用規格、品質保証体制及びその設計仕様について概説し、次いで MARK-II 形格納容器の構造につき詳述する。

2 原子炉格納容器の機能の概要

緒言でも述べたように、沸騰水型原子炉格納容器には、圧力抑制式が採用されているが、その原理を図 1 によって説明すると、ドライウェル②の中に収納されている原子炉冷却系配管に仮想破断事故が生じた場合には、冷却水の蒸気がドライウェル内に放出され、ドライウェル内に充満すると蒸気は MARK-I 形の場合にはベント管④、ヘッダ⑤及びダウンカマ管⑥を通して、また MARK-II 形の場合にはベントダウンカマ管④、⑥を通して圧力抑制室③内に蓄えられた冷却水⑦中に導かれて凝縮され、ドライウェル内の圧力上昇が抑えら

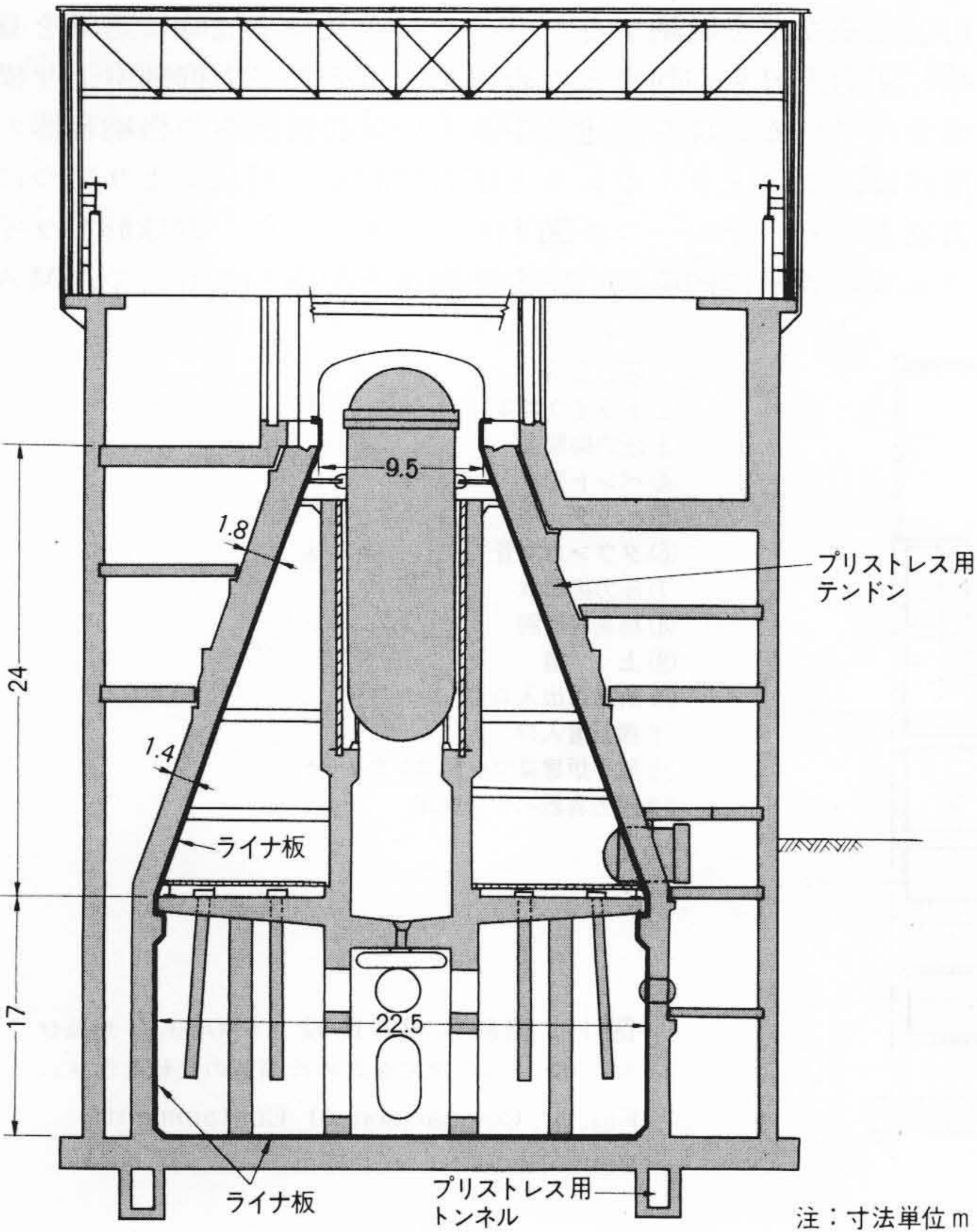


図 2 コンクリート製格納容器の一例(780MWe クラスの例)
図はプリストレス コンクリート容器の例について示している。
Fig. 2 Concrete Containment Vessel

表2 各設計条件に対する荷重の組合せ 本表のそれぞれの荷重の組合せに対して応力を評価し、許容値以下に収める。

Table 2 Loading Combinations for Design Conditions

設計荷重	内 圧	外 圧	自 重	機器支 持荷重	溶接座 の荷重	機器搬 入の荷 重	エアロ ックの 床荷重	キャッ トウォ ータの 荷 重	圧力抑 制室内 水重量	燃 料 交換時 水重量	事故後 水重量	風荷重	空 気 重 量	ジェット 力及び ジェット 反力	ベント スラス ト荷重	ペロー 反 力	熱変形 荷 重	地 震 荷 重
設計条件																		
初期試験時	○		○					○	○			○	○		○			○
最終試験時	○		○	○	○			○	○				○		○			○
定常運転時		○	○	○	○		○		○									○
燃料交換時		○	○	○	○	○	○		○	○								○
事故時	○	○	○	○	○				○				○	○	○	○	○	○
事故後満水時			○	○	○				○		○							○

れる。格納容器胴⑧は、このときの蒸気の最大圧力に耐え、かつその圧力での漏洩率が24時間当たり 0.5%以下になるような気密構造となっている。格納容器内外への機器の搬入、搬出は上鏡⑨を取り外すか、又は機器搬入口⑪の扉を開けて行なわれる。また、格納容器内外への所員の出入りは所員用出入口⑩を通して行なわれる。原子炉運転時には、これらの開口部は気密性のガスケットによってシールして漏洩のないようにし、格納容器内部には窒素ガスを充満しておく。

3 原子炉格納容器への適用規格と品質保証体制

3.1 適用規格

格納容器は主として以下の規格、基準に基づいて製造されるが、これらの規格、基準には使用材料、許容応力、荷重の組合せ、製作方法、検査・試験方法などが詳細に規定されている。

- (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」

表3 荷重の組合せと許容応力強さ 許容応力強さを示す。

Table 3 Loading Combination and Allowable Stress

番号	荷重の組合せ	許容応力強さ		一次+二次 応力強さ	条 件
		P_m	$P_t + P_b$		
1	$D + O + L$	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。いずれかの荷重状態において、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。
2	$D + O + J$	$0.9 S_y$		"	
3	$D + O + S_1$	S	$1.5 S$	"	
4	$D + O + S_2$	$1.2 S$	$1.8 S$	"	
5	$D + O + L + S_1$	"	"	"	

注：D＝死荷重
O＝通常運転時荷重（設計外圧、機器に加わる活荷重など）
L＝事故時の荷重（設計内圧、熱荷重、ジェット反力など）
J＝ジェット力
S₁＝設計地震荷重
S₂＝ $\alpha \times S_1$ （ α は、通常1.5）
S＝規格に定められる許容応力（告示別表4）
S_y＝降伏応力

- (3) 鋼構造設計規準（AIJ）
- (4) A S M E : Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1
その他、MARK-II形格納容器で新しく採用されたコンクリート構造部分に対しては、次の規定が適用される。
- (5) 新型格納容器底部に関する仕様
- (6) 新型格納容器ダイアフラム フロア（BWR）及び内部コンクリート構造（PWR）に関する仕様
- (7) A S M E : Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 2

3.2 品質保証体制

格納容器が、厳密に上記の規格、基準に従って設計、製作、検査されることを保証するため、通商産業省や顧客による計算書、図面の審査、更に各製造工程における立会検査が行なわれる。そのうえ更に完成した製品の品質が完全であることを保証するため、以下の各項目について詳細な品質保証要領書を作成し、この要領書に従って各作業が行なわれる。

- (1) 設計、製作、検査の各組織の役割と責任
- (2) 購入、設計、製造、検査、輸送、据付及び保管の管理方法
- (3) 修正措置の方法

4 設計仕様

4.1 荷重の組合せと許容応力

表2は各設計条件に対する荷重の組合せを、表3は許容応力を示すものである。

4.2 格納容器の寸法

図3は各出力に対するMARK-I形及びMARK-II形格納容器の寸法を示すものである。

5 MARK-I形格納容器の構造の概要

MARK-I形格納容器は、図1に示すように原子炉建屋のマット コンクリートで支持された電球形ドライウェルとその回りを取り囲んだ円環状の圧力抑制室及び両者を結合した8本のベント管より構成されている。これらの主要材料はA S M E S A 516 G r 70鋼板（通商産業省告示第 501号第 3 条原子力発電用炭素鋼圧延鋼板第 4 種）である。このベント管にはドライウェルと圧力抑制室の熱膨張差を吸収するため、ステンレス鋼製のペローズが設けられている。ベント管の先端はヘッダに連結されており、ヘッダから多数のダウンカマ管が水中に没している。ドライウェルには二重ドアを備えた所員用出入口が設けられており、その構造は図4に示すとおりである。上鏡フランジ部は二重ガスケットによってシールさ

れており、このフランジ部は単独で漏洩試験ができる構造となっている。また、耐震上の理由から格納容器しゃへい壁、格納容器胴、原子炉しゃへい壁及び原子炉圧力容器の間は耐震連絡金具により連結されている。ドライウエルのベント管入口には配管仮想破断によって管内より噴出する流体ジェットがベント管内に直接入るのを防ぐために、ジェットディフレッタが設けられている。

6 MARK-II形格納容器の構造と特徴

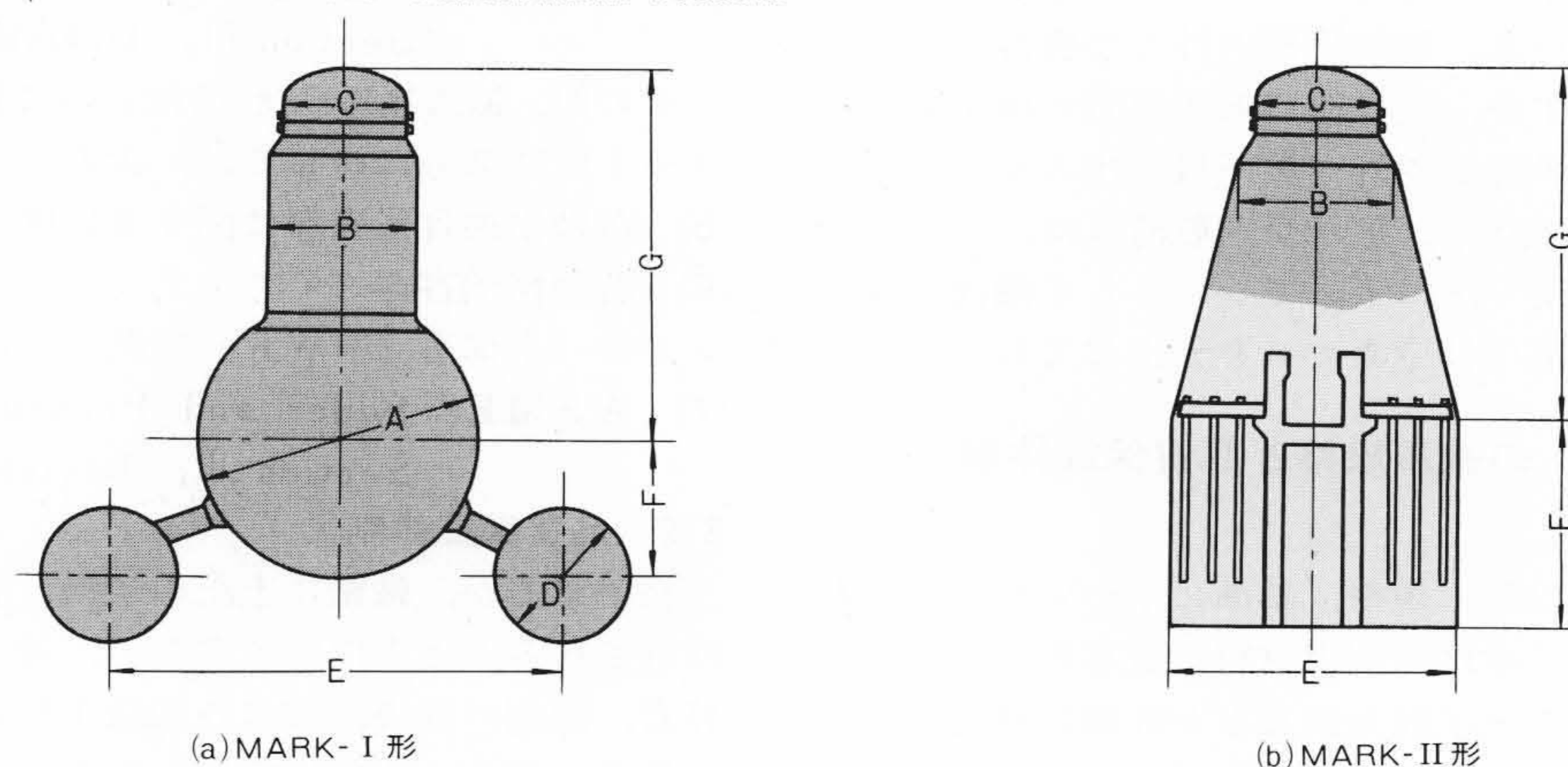
MARK-II形鋼製格納容器は図5に示すように円錐台状のドライウエルと円筒状圧力抑制室を上下に組み合わせ、両者を鉄筋コンクリート製のダイヤフラムフロアで仕切り、これに多数のベントダウンカマ管を貫通させて連絡したもので

ある。ドライウエル、圧力抑制室の胴は鋼板製で底部マットコンクリートに多数のアンカボルトで固定されているが、圧力抑制室底部はマットコンクリート上に鋼製ライナを張った構造となっている。以下、各部の詳細構造について、電気出力1,100MWeの場合を例にとり説明する。

6.1 ドライウエル

ドライウエルの円すい状胴は、低温衝撃値の高いASME SA516Gr70鋼板をロールで曲げたものを溶接で組み合わせて構成したもので、内圧、地震荷重、熱荷重はもとより、配管破断事故による流体ジェットに対しても耐え得るよう設計されている。鋼板同士の溶接は完全溶け込み溶接であり、開先面には液体探傷試験、又は磁粉探傷試験を、溶接ビードに対してはX線透過試験を適用し、欠陥のないことを確認する。

図3 格納容器の寸法比較 MARK-I形、MARK-II形格納容器の各出力に対する寸法を示す。
Fig. 3 Dimensions Comparison of Various Containment Vessels



形 式	出 力 (MWe)	A	B	C	D	E	F	G	重 量 (t)	設計圧力 (kg/cm ²)
MARK-I	460	17.7	9.6	9.6	8.1	29.6	9.4	23.1	1,200	3.92
	780	20.0	10.9	9.2	8.9	33.5	10.8	24.1	1,700	
	1,100	20.7	11.8	10.0	9.4	33.8	11.3	24.6	2,000	
MARK-II	780	—	10.9	9.2	—	24.4	14.3	29.6	1,300	2.85
	1,100	—	12.1	9.7	—	25.9	16.1	31.8	1,500	

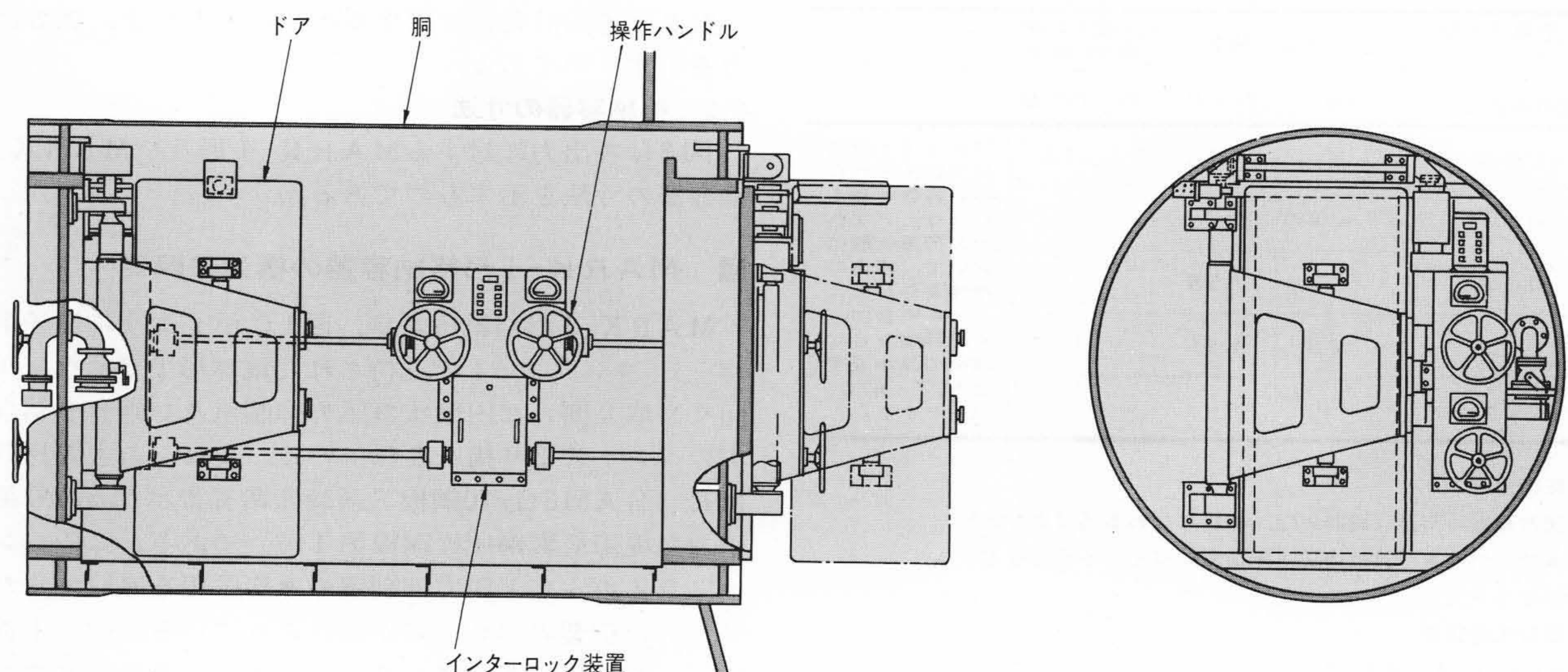


図4 発電所所員用出入口 二重ドアとなっており、両ドアが同時に開かないようインターロックされている。

Fig. 4 Personnel Air Lock

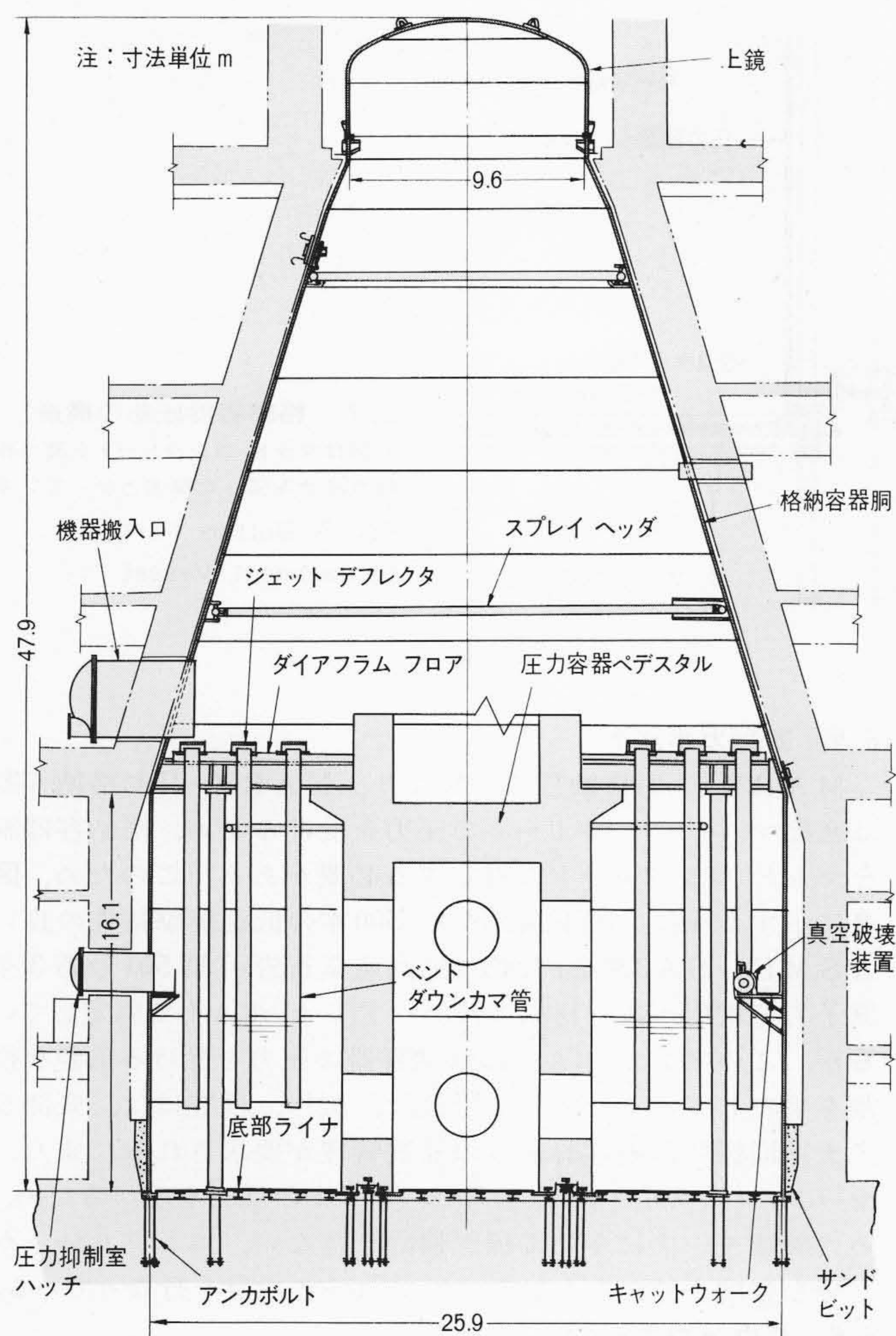


図 5 MARK-II 形原子炉格納容器 (出力 1,100MWe)

図は鋼製自立形格納容器を示している。

Fig. 5 Mark-II Type Primary Containment Vessel (Output 1,100MWe)

更に格納容器完成後には容器全体の耐圧・漏洩試験を行なうことによって、溶接部の完全性と、溶接部から漏洩のないことを確認する。

MARK-II 形は MARK-I 形と異なり、ドライウェルが円すい形になっているため、原子炉圧力容器まわりの空間が広く、

(1) 圧力容器ノズルや配管類の点検

(2) 配管破断による配管むち打ち現象からその他の重要配管及び格納容器を保護する防護対策、すなわちパイプ ウィップ レスト レントの取付け

が容易になっている。

6.2 圧力抑制室

ドライウェルの直下には、円筒形をした圧力抑制室が配置されているが、その円筒胴はドライウェル胴と同じ材料で構成されており、また同様な非破壊検査が適用される。円筒胴下部はマット コンクリートに固定されているため、固定部胴板に大きな熱応力を発生するので、固定部外周にサンド ピットを設け、砂の反力を利用して応力を緩和している。また、この圧力抑制室にはハッチ、キャット ウォークを設けてあり、内部に入ることができるようになっている。

6.3 ダイアフラム フロア

ドライウェルと圧力抑制室は鋼板ライナで裏打ちし、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られている。図 6 はその構造を示すものである。このダイアフラム フロアは、JIS SM41B の H 形鋼を高張力ボルトで組み合わせ、内径側を圧力容器ペダスタルで、また外径側を圧力抑制室底部から立てた支持柱で支えた支持構造物で受けられている。このダイアフラム フロアは、ドライウェルの圧力や流体ジェットを受けることからその製作、据付には格納容器並みの厳しい品質管理が要求される。ダイアフラム フロアの外周部にはシール ベローズを設け、格納容器との間をシールするとともに、熱膨張を吸収している。

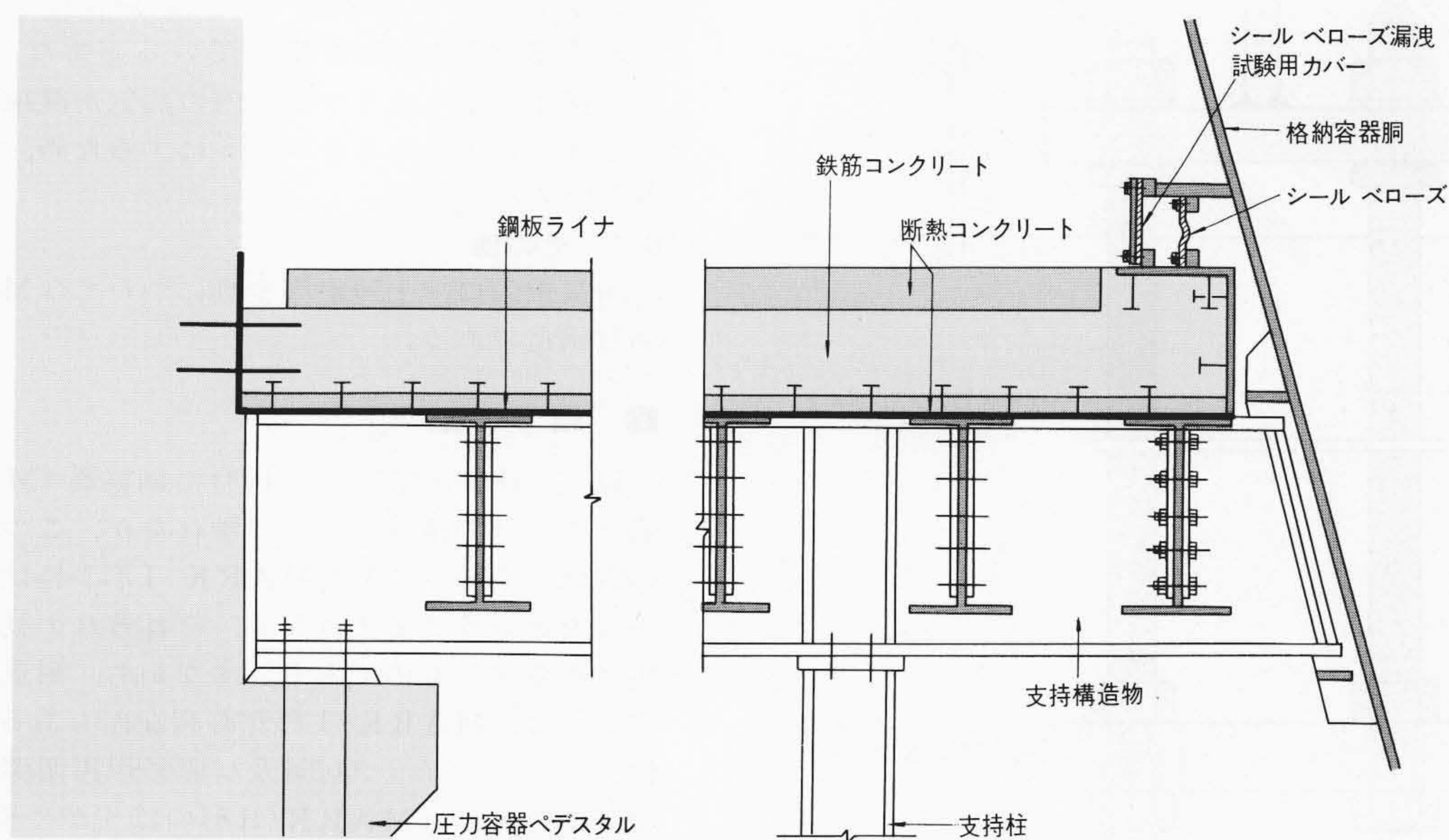


図 6 ダイアフラム フロアの構造

図はコンクリート製のダイアフラム フロアと鋼製支持構造物を示している。

Fig. 6 Structure of Diaphragm Floor

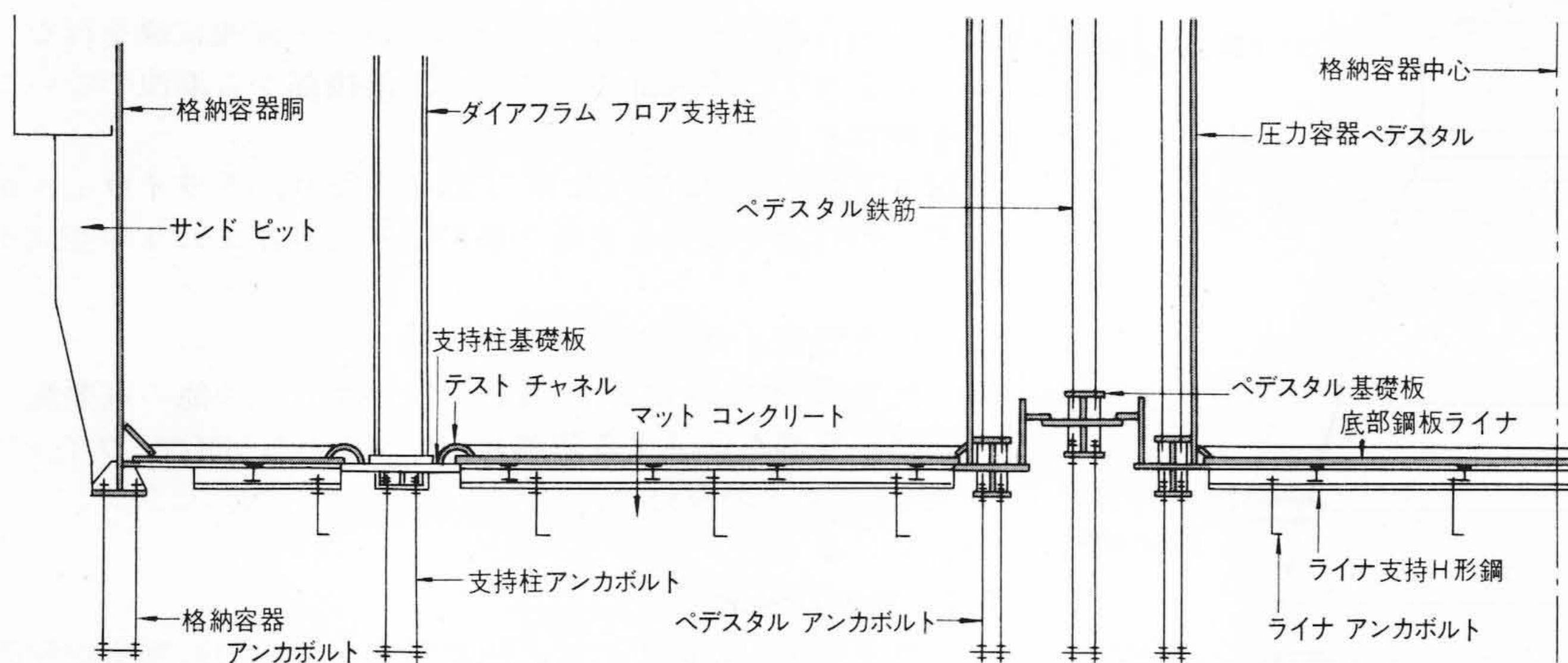


図7 格納容器底部の構造
底部はマットコンクリート上面に鋼板ライナを張った構造となっている。
Fig. 7 Bottom Part of Containment Vessel

6.4 格納容器底部

圧力抑制室の底部は鉄筋マットコンクリートの上面に厚さ10mm程度のSA516Gr70鋼板を張った構造になっている。この鋼板ライナは図7に示すように、短いピッチでコンクリート中に埋め込まれ、かつアンカボルトで固定されたH形鋼に溶接され、マットコンクリートとライナ板が同一挙動をするようにしている。格納容器内圧力は、マットコンクリートで受けるが、鋼板ライナが格納容器の気密を保つバリアとなっているため、設計、製作、検査を含めて格納容器並みの品質管理が要求され、溶接部には磁粉探傷試験、液体探傷試験、真空箱による洩れ試験及び耐圧漏洩試験が適用される。

6.5 アンカボルト

MARK-I形格納容器と異なり、MARK-II形格納容器は底部マットコンクリートで圧力を受けるため、格納容器胴をマットコンクリートに固定する必要がある。このため、図8に示すように、胴下端部を約500本の低温衝撃特性の良いASME SA320GrL43（通商産業省告示第501号第3条原子力発電用ボルト材第4種）のアンカボルトで固定しているが、このアンカボルトは格納容器の圧力を受ける重要な役割を果たしているため、その設計、製作、検査には、底部ライナと同様に格納容器並みの品質管理が要求される。また、マットコンクリートは、アンカボルトの反力を受けるため、その破壊モードについて種々検討を行ない、コンクリートが十分な強度を持つようなアンカボルトの設計を行なっている。

6.6 ダウンカマー管

MARK-II形格納容器はドライウェルと圧力抑制室が上下に組み合わされているため、百数十本の直線状ダウンカマー管がダイアフラムフロアを貫通して取り付けられている。このダウンカマー管の上端には、ジェットデフレクタが設けられている。これらは、いずれも格納容器の機能上重要な役割を果たしているため、格納容器並みの品質が要求され、特にダウンカマーパイプは単体で水圧試験が行なわれる。材料はいずれもSA516Gr70を用いている。また、このダウンカマー管の途中にはドライウェル内の蒸気が凝縮したとき、ドライウェルが負圧にならないようにするため、真空破壊装置が取り付けられている。

6.7 その他

所員出入口、上鏡耐震金具についてはMARK-I形とはほぼ同じ構造である。

7 結 言

以上、沸騰水型原子炉新形格納容器（MARK-II形格納容器）の各部の構造について触れたが、この出現によって従来の電球・トラス形（MARK-I形）格納容器が存在価値を失ったということではなく、それぞれの長所に応じて今後採用されるべきものである。すなわち、耐震上及び工程上の観点からは、MARK-I形が有利な面もあるが、配管などの点検、パイプウィップ対策及び原子炉再循環系統流量のバルブ制御のためにはMARK-II形のほうがやや優れている。

また、格納容器の形も両者の中間的なものや、一部形状を変更したものも種々検討され、実際のプラントに採用されているものもある。

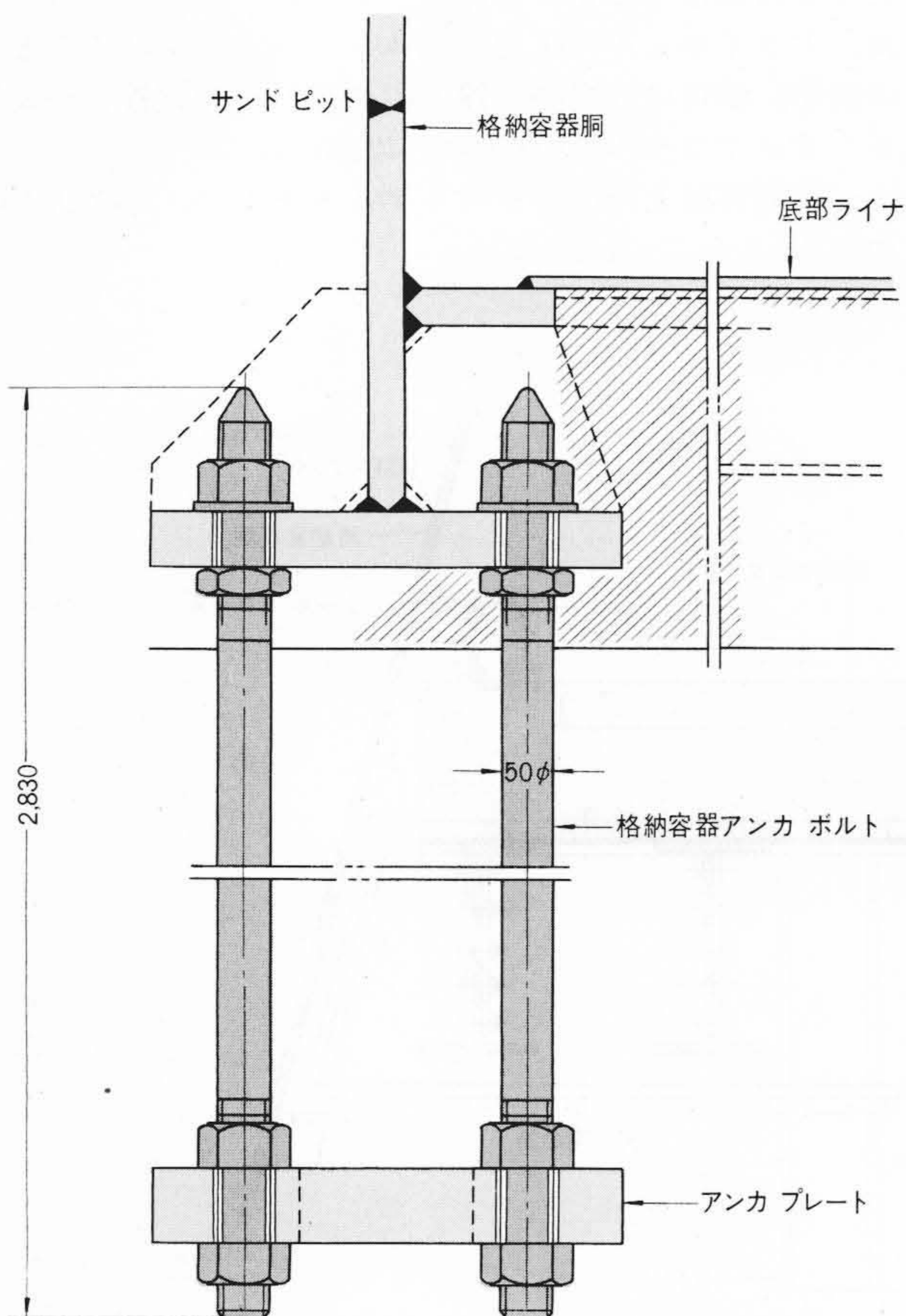


図8 格納容器アンカボルトの構造 格納容器胴は図のようなアンカボルトでマットコンクリートに固定されている。

Fig. 8 Structure of Containment Vessel Anchor Bolt