

原子炉用プレストレスト コンクリート 圧力容器の現況と将来

文献調査委員会

1. ま え が き

電力需要の急激な増加に対処するため、重油燃料の供給ならびに公害問題とも関連して、最近の技術革新とともに、原子力発電の経済性ならびに安全性が認識されるようになり、各国とも原子力発電の開発を積極的に推進している。

1965年現在、世界で建設中の主要な原子力発電所は全部で33カ所を数え、各国ともそれぞれ独自の方式をもって開発を進めている。とくに、英、仏においては、天然ウラン黒鉛減速炭酸ガス冷却炉が主流をなしており、イギリスのOldbury, Wylfa, フランスのEDF-3, EDF-4において圧力容器としてプレストレスト コンクリート圧力容器（以下PCPVと略記する）を採用している。

従来、プレストレスト コンクリート(PC)は、タンク、ダム、橋梁、圧力管路などの主要な土木構造物に応用され、その信頼性が確かめられてきたのであるが、さらに厳しい設計条件と安全性が要求される原子炉の圧力容器にPCを採用することについては多くの問題があった。しかし、1958年、フランスにおいてパイロットプラント的意義をもったG-2, G-3にPCPVが採用されて以来、一時、EDF-1, EDF-2では鋼製圧力容器が用いられたことはあったが、多くの比較研究が行なわれた結果、ガス内圧とユニット容量の増大にともなって、以後のガス冷却炉の圧力容器にはPCPVが断然有利であることが明らかになったのである。

発電用ガス冷却炉の原理は図-1に示すように、炉心で核反応を起させ、ここで発生した多量の熱を高圧のCO₂ガスなどの媒介によって、蒸気発生装置（熱交換機）に集め、この蒸気を発電に用いるものである。PCPVはこの高圧高温のガスを封入するための耐

圧容器であって、気密性を得るため、容器内面には鋼ライナーが張りつけられている。容器壁には燃料送風機などのために多数のダクトが貫通している。

鋼製圧力容器と比較してPCPVの利点を列挙すれば

つぎのようである。

1) PCPVは引張りに弱いコンクリートに高張力鋼材によってプレストレスを与え、内圧と温度応力に抵抗させ、同時に放射線の生体しゃへいをも兼ねるものである。したがって、鋼製圧力容器の場合のように別にコンクリートのしゃへい体を設ける必要がない。

2) コンクリートを現場打ちすることにより、容器の形状および内空間の選定を比較的自由に行なえ、大きさおよび壁厚にほとんど制約されることがない。このことがPCPVの根本的に有利な点であって、例えば、Wylfaの圧力容器を鋼製容器で設計すると厚さ25cm程度の鋼板を必要とするといわれている。

3) 安全性の観点から、1カ所の欠陥がただちに全体の破壊を誘起することもなく、破壊は漸進的であって、破壊を起すまでのひびわれ、変形などにより十分に破壊を予知し、必要な対策をとることができる。さらに、マシブな構造であるため、地震力などの外力に対する抵抗性が大きい。

4) 炉心、熱交換機、圧力パイプ等の主系統機器をすべて容器内に一体に組み込むことにより、事故時の安全性を増し、コンパクトな構造とし、ユニット出力の増大にともなって単位出力当りの建設費を相当に減少させることができる（図

図-2 PCPVと鋼製容器の経済比較 (600MWのPCPVを基準)

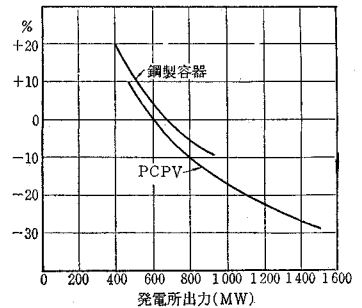


図-2) 5) 内圧および温度変化による容器の変形が比較的小さく、器機の配置および運転上有利である。

現在、英、仏の5発電所において、8基のPCPV

が運転中あるいは本年中に完成するが、合理的な形状、レイアウト等が確立されているわけではなく、各個に別個の方式が採用されている状態であって、設計施工の指針となるべき一般的な規準も存在しない。したがって、安全率なども各個ごとに異なっているが、経験と実績の積み重ねによって設計施工が改善され、安全率も次第に小さくなる傾向が認められる。

わが国においても、高温下におけるコンクリートおよ

表-1 既往の PCPV (Dungeness B, Bugey-I をのぞく) の設計条件と諸元 (PCPV 1 基について)

原子炉名	G 2 G 3	EDF-3	EDF-4	Oldbury (2基)	Wylfa (2基)	Dungeness B (2基)	Bugey I
所在国	フランス	フランス	フランス	イギリス	イギリス	イギリス	フランス
炉の熱出力 (MW)	250	1560	1560	834	1875		
炉の電気出力 (MW)	32	480	480	300	590	600	500
容器に收容される部分	炉心	炉心	炉心と主系統	炉心と主系統	炉心と主系統	炉心と主系統	炉心と主系統
完成年度	1960	1965	1966	1965	1967	1970	
CO ₂ ガス圧力 (気圧)	15	30	30	27	28.5	33	94
CO ₂ ガス温度 (°C)	140~350	240~410	225~400	245~410	247~414	292~675	225~?
ボイラー位置	容器外	容器外	炉心の下	炉心の周囲	炉心の周囲	炉心の周囲	
容器の外形状	円柱型	曲線平行柱	正六角形断面角柱	円柱形	5つの同心円柱筒に16の垂直リブ	円柱形	円柱形
外寸法 (m)	φ20×33.7 (長さ)	27.5×27.5×32 (高さ)	28.5 (上面)×31 (下面)×49.1 (高さ)	φ27.5×31.7 (高さ)	35.9 (最小)	φ27.6×32.2 (高さ)	φ28.1×53.25 (高さ)
容器の内面形状	円柱形, 両端内凸ドーム	円柱形, 上下端内凸ドーム	円柱形, 上端外凸ドーム	円柱形, 上下端平板	球形	円柱形	円柱形
内寸法 (m)	φ14×15.7 (長さ)	φ19×21 (高さ)	φ19×36.3 (高さ)	φ23.5×18.3 (高さ)	φ29.2	φ20×17.7 (高さ)	φ17.1×38.25 (高さ)
貫入孔の数×寸法 (m)	1200×0.107 (燃料セウ入面) 14×1.2 (反対面)	16×2.2, 5×1.0 211×0.47	211×0.4 (上面), 2×0.5 211×0.4 (下面)	4×2.6, 4×(?)	4×3.12, 397×0.49 69×0.48	上面 465×0.24 その他不明	
PC鋼材の本数	フープ 57 軸方向 46 クロス 58	垂直 2360 水平 2360 円周 4000	垂直 1080 水平 1566 円周 2500	らせんケーブル 3520	二系統垂直ケーブル・外側フープ 合計 1338		垂直 1300 水平 180 円周 2750
PC鋼材の種別	φ5 mm 790 ワイヤー	61 ワイヤーストラ ンド	7 ワイヤーストラ ンド 19 本まとめ	7 ワイヤーストラ ンド 12 本まとめ	12 ストラ ンドの 3 グループ緊張	φ7 mm ワイヤ ー 163 本ストラ ンド	φ7 mm ワイヤ ー 54 本ストラ ンド
定着方法		SEEE	SEEE	フレジネ	フレジネ	BBRV	Boussiron
有効緊張力 (t)	1200	115~95	225~185	210~191	600	700	200~220
最小破断荷重 (t)	2200	130	270	273	820		
鋼材の配置	フープ外部 その他コンクリ ート中のシース	コンクリート中のシ ース (外側の円周鋼 材を除く)	同左	同左	同左		
鋼材の保護	グラウトなし, 乾燥 空気循環	セメントグラウト	セメントグラウト	グラウトなし	グラウトなし		
ライナーの厚さ (cm)	3.0	2.5	2.5 と 3.5	1.27 と 1.11	1.9	1.27	2.54
最大コンクリート 温度 (°C)	50	75	平均 70, 最大 80	55~60	平均 35, 最大 45	55	70, 局部的に 80
コンクリートの 冷却方法	CO ₂ ガス循環	ライナーに半わりパ イプを溶接し, これ ら有機液体を循環	ライナーに溶接した パイプに水を循環	鉱物成分を除去し, 脱気した水を循環	鉱物成分を除去 し, 酸素を分離し た水を循環		ライナーに溶接し たパイプに処理し た水を循環
断熱方法	アルミニウムフォ イル	軽石コンクリート (厚さ 50 cm) 型鋼 ケーシング	軽石コンクリート (厚さ 20 cm) 型鋼 ケーシング	波形鋼板を 30 層	波形鋼板層		軽石コンクリート あるいはステンレ ス鋼フェイル
断熱層の高温側 温度 (°C)	350	410	225	245	247		225
コンクリート量 (m ³)	6660	18500	25000		21200		
PC鋼材の量 (m or t)	6500 m 1250 t	250000 m	190000 m	190000	2256 t		
鉄筋 (t)	766 t	1000	800		2400		

びPC鋼材の諸性質, PCPV へのプレストレスの導入方法, 応力解析などについて若干の研究が行なわれてきたが, 将来 PCPV が実用化されるすう勢を見越して, 本格的な研究に着手する必要があるものと考えられる。

2. 実用化された PCPV の概要

現在, フランスの Marcoule における G2, G3, Chinon の EDF-3 と Saint-Laurent-des-Eau の EDF-4 およびイギリスの Oldbury 発電所において PCPV が完成し, 運転を行なっている。また, イギリスの Wylfa 発電所において近く PCPV が完成する予定であり, 同じく Dungeness B 発電所でも基礎工事を終り, 近く PCPV

に着工する予定である。

これらの実用化された PCPV の設計条件と諸元は表-1 に示すようである。以下にこれらの概要を述べる。

(1) G 2, G 3 (フランス)

フランスでは, 1955 年の後半から PCPV の研究を開始し, 3年後の 1958 年に G2 の建設を開始している。準備期間が非常に短かったため, 多くの問題点が完全に解決されないまま建設に着手したのであった。それゆえ, G2, G3 の压力容器は試験的な意味を多分に持つものであって, 電気出力も各 32 MW と小さく, PCPV の設計施工に関する知識と経験を得ることを主な目的としていた。しかし, これらの PCPV によって, それまで

使用されていた鋼製圧力容器の設計内圧の2倍以上の15気圧まで内圧を高めることができた功績は高く評価されなければならない。

容器の形状は図-3に示すように水平円筒形であって、端部に内側に凸のドームがとりつけられている。容器には3グループのケーブルによってプレストレス

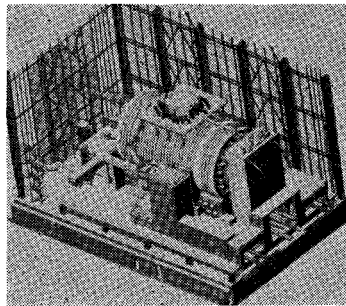
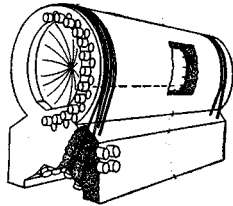
が与えられている。すなわち、1) 軸方向にプレストレスを与えるため、両端で定着された軸方向ケーブル、2) 円筒にフーププレストレスを与える270°の角度の弧をもった円周ケーブルで、両端はコンクリートの基礎底版に定着されている。3) 基礎底版にプレストレスを与えるための短い直線ケーブルである。ケーブルには有効緊張力1200tという大きなものを使用し、全プレストレス力は150000tであって、重量約750tのPC鋼材を使用した。緊張力の大きいケーブルを使用したのは、コンクリートのクリープと収縮、PC鋼材のリラクセーションによるプレストレスの損失を補償するため、再緊張を行ないやすくし、必要に応じてケーブルの交換ができるようにしたためである。ケーブルにはグラウトを行わず、乾燥空気を循環させて鋼材の腐食を防止している。

円周ケーブルの摩擦損失を減少させることについては特別に考慮され、コンクリートとケーブルの間に滑動板と固定具(球状黒鉛鑄鉄)をそう入し、二硫化モリブテングリスを塗付した。その結果、摩擦係数を非常に小さく0.02(設計上は0.05)とし、プレストレスの摩擦損失量を1%以下にすることができた。しかし、このようなケーブルのすべり支承は非常に高価なものであったという。

端部のドームにはプレストレスを与えておらず、内圧によって圧縮応力が作用するように設計されている。ドームは力学的にみれば有利であるが、燃料の取り扱い操作上からは相当に不利である。

気密性を保つため、鋼ライナーが内壁面に強固に定着されている。ライナーはコンクリートの打設に際し、内側の型わくの役割も果たした。コンクリートの冷却は埋め込みパイプにCO₂ガスを循環させて行なっている。

図-3 G2, G3の圧力容器



(2) EDF-3 (フランス)

EDF-3は、電気出力480MWをもった天然ウラン黒鉛減速CO₂ガス冷却炉(マグノックス炉)であって、CO₂ガス圧力は27気圧である。炉心だけがPCPV中に收容され、熱交換機、送風機は容器の外部に置かれている(図-4)。

容器内部は、直径19m、最大高さ21.19mの円筒状である。蓋版は平板であるが、底版は直径約1mの平面円板部とこれに接続する勾配17%の母線で作られる截頭円錐体で形成されている。底版に勾配を設けたのは、ライナーとコンクリートが密着するようにコンクリートを打設

できるようにしたためである。円筒部と底版の最小厚さは5m、蓋版の最小厚さは5.9mである。

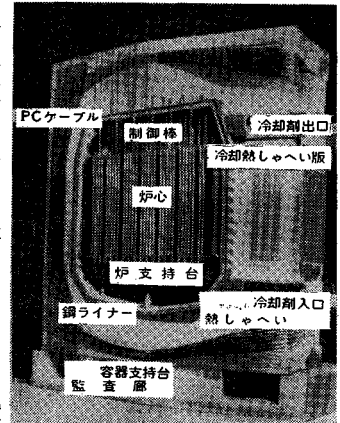
容器は鉄筋コンクリートフーチングを介して岩盤にすえられている。フーチングと容器の間には、周辺部では厚さ2cmのネオプレーンを、中央部では厚さ1cmのネオプレーンをそう入し、プレストレス導入時および内圧作用時に容器が拘束を受けないようにされている。

CO₂ガス循環用として直径2.25mのパイプ16本、電気回路用として直径1.02mのパイプ5本、燃料そう入および制御棒用として直径0.47mのパイプ204本がこの容器を貫通している。CO₂ガス用パイプは水平に貫通していて、うち8本は円筒壁の上部に、他の8本は下部に配置されている。電気回路用パイプは上部のCO₂ガス用パイプと同じ高さに配置されている。燃料用と制御用パイプは正六角形網目状に蓋版を垂直に貫通している。

容器壁には高張力PCケーブルによってプレストレスが与えられている。このケーブルの初緊張力は115tであるが、摩擦損失、コンクリートのクリープと収縮、鋼材のリラクセーションなどにより設計上95tの有効緊張力が残留するようになっている。ケーブルはコンクリートの内部に配置された鋼製シース中をとおされており、ボルト・ナット方式の定着具(SEE方式)で定着されている。シースにはセメントグラウトを注入し、腐食を防止している。

蓋版および底版にはパイプが正六角形状配置で貫通していることから、平面でたがいに120°の角度をなす正

図-4 EDF-3の圧力容器



三角形のケーブルネットワークが採用されている。

コンクリートの温度を 75°C 以下に抑制するため、ライナーに溶接したパイプに水を循環させて、冷却を行っている。

(3) EDF-4 (フランス)

EDF-4 は電気出力 480 MW であって、EDF-3 と出力の全く同じマグノックス炉である。PCPV 中の熱交換機の配置上のレイアウトについてはつぎの3つの案が考慮された。すなわち、

- 1) 炉心と熱交換機を別個の容器に收容する案
- 2) 熱交換機を炉心の周囲に配置して一つの容器に收容する案
- 3) 熱交換機を炉心の下に配置し、一つの容器に收容する案

である。

第1の案によるといくつかの压力容器を相ならんで設置する必要があり、CO₂ガスの循環系統が複雑になるために廃棄された。結局、一体組み込み方式が有利であることが判明したが、そのうちでも第3案が最適であるとされ、採用された。その理由は、第2案よりも压力容器の工費が10~15%少なくなること、底版と蓋版のプレストレス導入が行ないやすいこと、また EDF-4 は EDF-3 と発電所の諸元がほとんど同じであるので、かなりの基本的な技術の反復が可能であったからである。

容器の外側形状は正六角柱であって、平面直径 28.5~31 m、高さは 49.15 m である。内空間は直径 19 m、高さ 36.275 m の円筒形である(図-5)。

容器の円筒壁には耐熱材および炉心材の搬入のための直径約 2.5 m の貫入孔および送風機用、炉停止時の接近検査用ならびに空調用に直径 2.7~3.2 m の6本の貫入孔が設けられている。

蓋版には、EDF-3 と同様、燃料そう入と制御用に 211 本のパイプ、炉出力検出用に 3 本のパイプ、および 2 つのマンホールが貫通している。

底版には、水の取り入れ、熱交換機からの蒸気の出口、燃焼済み燃料の検知装置および炉心の熱電対用電線のために 211 本のパイプが貫通している。

PCケーブルは EDF-3 の場合よりも緊張力の大きい

ものが使用され、初期緊張力を 225 t、残留有効緊張力を 185 t 以上とした。ケーブルは全部で 5200 本使用されている。

容器の円筒壁は 6 グループのケーブルでプレストレスが与えられ、各グループのケーブルは正六角形の2辺にプレストレスを与えるようにされている。垂直ケーブルは 1100 本であって、同心円状に7層に配置されている。上下の版には互いに 120° の角度をなすケーブル網でプレストレスが与えられている。

工事の状況は写真-1 に示すようである。

(4) Oldbury (イギリス)

現在、イギリスでは、マグノックス炉によって 10 ヶ所の原子力発電所が運転中あるいは建設中である。最初の7発電所では炉心を鋼製压力容器に收容したのであるが、ユニット出力と CO₂ ガス圧力の増加によって容器の寸法が大きくなり、鋼製容器は製作と運搬上限界に達し、PCPV が考慮されるようになった。その結果、Oldbury では、工費、レイアウト、安全性等の面で優れている一体組み込み方式が採用され、熱交換機を炉心の周囲に配置することになった。炉心を2基並列させ、おのおのについて压力容器を設けた。電気出力は各 300 MW である。

Oldbury の压力容器は、G2(G-3) と EDF-3 を折衷させたものと考えられる。すなわち、図-6 に示すように、バスケットの網目状に配置された 130° の角度で交差するケーブルによって円筒壁に2軸のプレストレスが与えられ、上下の版には EDF-3 と同様に水平方向のプレストレスが与えられている。この方式の利点は、ケーブルの摩擦損失が少なく、壁内にプレストレスを均等に導入できる点にある。7本よりワイヤーストランドを 12 本まとめたケーブルを使用し、シース中にグラウトを行わず配置し、後に再緊張できるようにされている。

容器への貫入孔は2グループからなり、第1のグループは熱交換機への接近検査用および送風機用の大きな径をもった8本のダクトであって、内側のライナーのところで開閉されるようになっている。第2のグループは比

写真-1 EDF-4 压力容器の
コンクリート打設

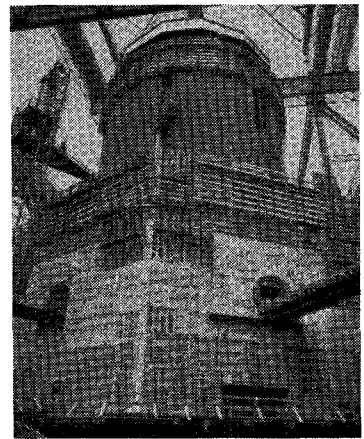


図-5 EDF-4 の压力容器

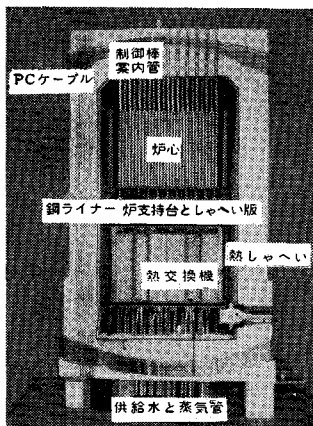
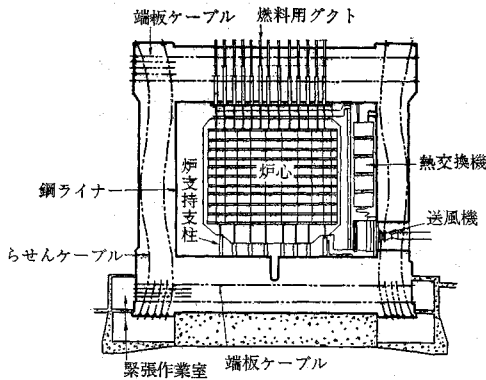
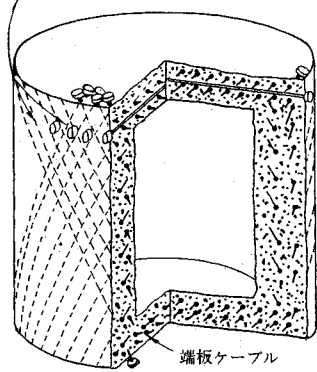


図-6 EDF-6 の圧力容器

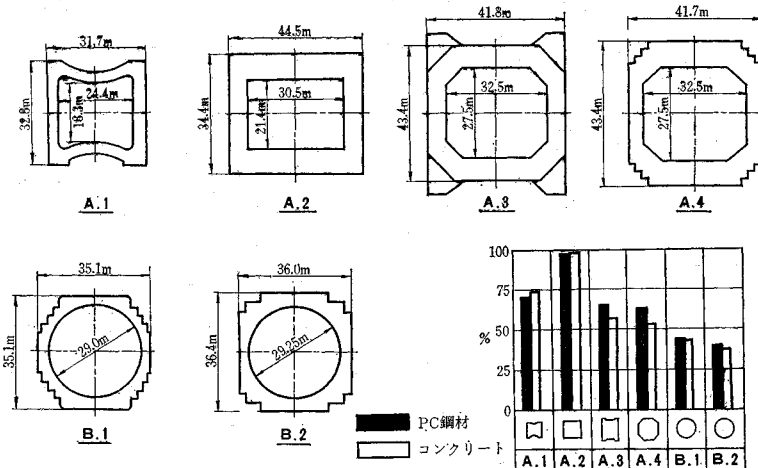
二軸プレストレスを与えるらせんケーブル



較的径の小さい多数のダクトであって、水の供給と蒸気の取り出し用、燃料そ入および制御棒用、諸装置の計測用等のためのものであり、外表面付近で開閉されるようになってい

コンクリートのクリープによってライナーの大部分は圧縮降伏点を越えることになるので、ライナーをフラットフィンおよびフック鉄筋によってコンクリートに定着

図-7 Wylfa において検討された各種形状の容器と材料の使用比



し、座屈を防止している。

コンクリートを冷却するためライナーの内側に鋼管を溶接し、銻物成分をのぞき、脱気した pH 値の大きいボイラー用水を循環させ、鋼管の腐食を防止している。これによって、ライナーの平均温度を 65°C 以下に、コンクリートの最大温度を円筒壁および蓋版で 55°C、底版で 60°C 以下にし、コンクリート壁に生ずる温度勾配を 30°C 以下にすることができた。

圧力容器は、地耐力 13 kg/cm² の砂岩上に造られたマス コンクリートのフーチング上に置かれ、容器底面とフーチング上面の間に厚さ 12.7 mm のネオプレーンパットをそ入し、プレストレスと内圧による容器の変形を拘束しないようにされている。

(5) Wylfa (イギリス)

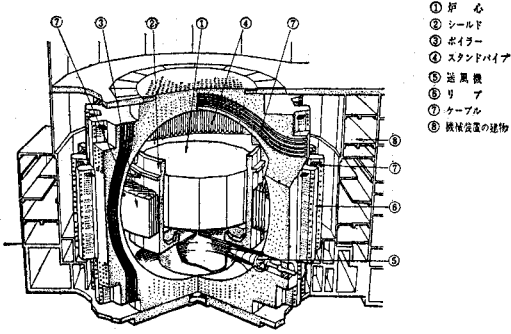
Wylfa 発電所は、イギリスにおいて PCPV を採用した第 2 番目の原子力発電所であって、2 基の PCPV からなり、おのおの電気出力は 590 MW であって、完成時 (1967 年) には、総出力 (1 180 MW) において世界最大の原子力発電所になる予定である。Oldbury と同様、熱交換機を炉心の周囲に配置する一体組み込み方式であるが、内空間が球形であることが特異な点である。

Wylfa の圧力容器は、内圧 28.3 気圧、CO₂ ガス温度 400°C の設計条件で種々の形状について比較設計が行なわれた(図-7)。まず最初に円筒形容器 (A.1~A.4) が検討されたが、使用材料が多くなり、壁厚がいちじるしく増大し、プレストレスの効率が悪くなり、曲げモーメントとせん断力の影響が大きくなるため、これらの案は廃棄された。その結果、B.1, B.2 のような使用材料が少なく、壁厚が小さくなる内空間が球形の容器が採用された。

容器は内径 29.2 m であって、最小壁厚は 3.35 m である。容器の外壁面は、施工の容易さ、器機類、貫通孔および緊張装置と定着具の収容を考慮して、16 のリブをもった同心円筒から形成されている(図-8)。内壁面には厚さ 19 mm の鋼板ライナーをとりつけ気密性を保つとともにコンクリートを打ち込む際の型わくとして使用した。ライナーは最大間隔 61 cm でアングルバーによりコンクリートに固定されている。

容器は 3 つのグループの PC 鋼材によってプレストレスが与えられている。第一のグループは、垂直のリブにおいて定着されるフープケーブルであり、第

図-8



二のグループは中央部で球の大圏をとる垂直ケーブルであり、第三のグループは上部と下部に配置される直角網目状のケーブルである。PC鋼材には15.3mmのフレシネストランドを3本まとめて1ケーブルとしたものを3ケーブル1単位(初期緊張力630t)として用い、直径14cmのシース中をとおし、グラウトを行なっていない。このような大きなケーブルを使用することによりケーブルとケーブル定着部の混雑を避けることができた。

コンクリートの冷却は、最大ピッチ30.5cmでライナー溶接した正方形断面のパイプ(断面積11cm²)に鉱物成分を除去し、脱気したpH値約10.5の水を循環させて行ない、コンクリートの平均温度を35°C以下にすることができた。スタンドパイプの部分には環状の水ジャケットを取りつけ冷却を行なっている。

容器はネオプレーンパット上に置かれ、容器の重量は内蔵機器類もふくめて約80000tである。

3. PCPVの将来におけるすう勢

ヨーロッパで実用化されたPCPVは、すべて出力密度の低い天然ウラン黒鉛減速CO₂ガス冷却炉(マグノックス炉)に対してであって、その設計内圧は30気圧以下、ガス温度は400°C以下であった。しかしながら、内圧あるいは温度の条件においてPCPVの応用に限界があるかどうか明らかでない。

まず第一に従来の実績に基づいて応用が可能であると考えられるものは、改良ガス冷却炉(AGR)および高温ガス冷却炉(HTGR)である。これらの原子炉の圧力容器の設計条件となる内圧は30~50気圧、ガス温度は600~800°Cであって、設計条件はマグノックス炉に対するよりもややきびしい。A.G.R.については、イギリスのDungeness B発電所において1971年の運転開始を目標にPCPVを採用することを決定し、すでに着工している。一方、HTGRについては、アメリカにおいて電気出力330MWのものが1971年の完成を目標に着工

することが決まっている。これらはいずれも垂直円筒の一体組み込み方式を用いたもので、従来のものと比べて画期的な改善がなされたものとはいえない。

つぎに興味ある問題は、PCPVの水型炉への応用である。一般に水型炉の圧力容器の内容積はガス型炉に比べて相当に小さくなり、内径も4~10m程度であるが、内圧がいちじるしく大きく、沸とう水型で80~100気圧、加圧水型では約150気圧にもなる。さらに熱容量の大きい液体を用いているので、コンクリートの冷却および断熱をいかにするかということが大きな問題である。スウェーデンにおいては沸とう水型重水炉(BWHR)に対するPCPVの適用に関する研究が行なわれており、アメリカにおいてもG.E.社がフランスと共同して軽水炉へのPCPVの適用を検討中であるという。その他、ソ連、チェコ等の共産圏諸国、西ドイツ、フランスなどでも水型炉へのPCPVの適用を考慮しているという。

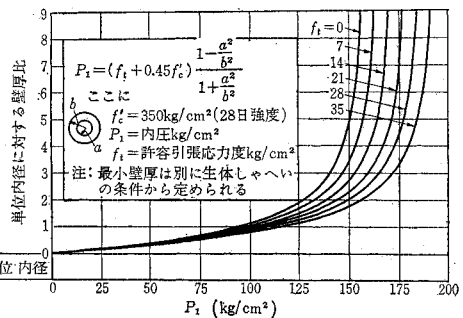
わが国においても、今後しばらくは、各電力会社においてアメリカの軽水炉を購入する計画であり、原子力委員会は改良転換炉(重水減速沸とう水冷却型または重水減速ガス冷却型)および高速増殖炉の開発を行なう方針を定めている。したがって、わが国においても、将来、水型炉あるいはガス型炉へのPCPVの利用を検討すべき時点が到来することが予想される。

つぎに既往の文献からみたPCPVの将来の可能性について概略を述べることにする。

(1) 円筒形容器の限界内圧

従来のPCPVは主として円筒形であって、設計内圧は30気圧以下であっても、ガス炉の場合、鋼製容器の数倍の内圧を許容できたのであるが、今後の設計内圧の増大に対する円筒形容器の可能性についてZudanおよびTan氏は、円筒形容器の単位内径に対する壁厚比を、コンクリートの許容圧縮応力度をACI規準にしたがい、無限長の肉厚円筒と仮定し、Laméの方法により計算した結果を示している(図-9)。この図に示されるよう

図-9 円筒形容器の内圧と単位内径に対する壁厚比の関係



に、コンクリートの材令 28 日における圧縮強度を 350 kg/cm^2 とする場合、引張応力を許容しなければ、内圧が 150 気圧付近で壁厚が急激に増大し、構造上の限界に達するものと考えられる。しかし、実際には、端版隅角部におけるモーメントおよびせん断力の影響、また PC 鋼材およびその定着具の配置の可能性をも考慮すれば、この限界内圧はさらに小さくなり、100 気圧以下になるものと思われる。

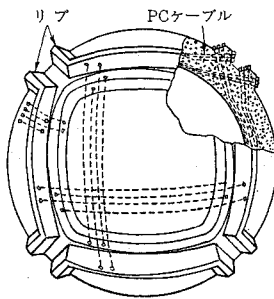
したがって、円筒形容器の限界内圧を増大させるためには、さらに高強度のコンクリートを使用し、設計内圧で引張応力を許容し、コンパクトで能力の大きい PC 鋼材および定着具を用いなければならない。既往の PCPV には $400 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートが使用されているのであるが、内圧が 80 気圧にもなると 700 kg/cm^2 程度の圧縮強度のコンクリートを用いるのが最も経済的になるという。

円筒形容器の限界を克服するためには、構造的に新しい形式、すなわち、球形容器を用いなければならない。すでにイギリスの Wylfa 発電所において内空間が球形の PCPV を採用し、経済的に優れていることが実証されたのであるが、これは周囲を同心円筒でかこみ、リブをもったものであって、構造的にみてまだ理想的なものとは考えられない。

(2) 容器形状とレイアウト (球殻容器の開発)

イギリスの T.C. Waters および N.T. Barrett 氏は、設計内圧を 30 気圧として、図-10 に示すような球殻容器を提案している。球殻は大圏をとるリブによって 6 つの等しいパネルに分割されている。各パネルは大圏をとる二方向のケーブルによってプレストレスが与えられ、ケーブルはリブで定着されている。両氏はこの球殻容器の利点として以下の点をあげている。

図-10 リブ付球殻容器のスケッチ



1) ケーブルを大圏をとるように配置すれば、2次応力の値を円筒形に比べかなり小さくすることができる。

2) 円筒形容器とは異なって構造上の不連続点がないので2次応力によるひびわれが発生する危険が少ない。また、ひびわれが発生してもひびわれ断面に主せん断力が作用しないので、ひびわれによって直接破壊耐力が影響されることがない。

3) 容器の耐力は、ケーブル、定着具およびコンクリ

ートの強度に関係し、容器のどの部分をも漸進的な破壊形態をとるように設計することができる。

理想的な球殻容器は力学的には非常に魅力のあるものであるが、実際には、ケーブルの定着のために剛度の大きいリブが取り付けられるので、リブで補強されたシェル構造となり、リブの拘束によって殻には膜応力だけが作用するのではなく、当然、曲げとせん断力も作用するものと考えなければならない。赤道上に送風機用の大きな開口を設けなければならないことも力学的にみて不利である。

施工面からは、円筒形容器に比べ球殻容器では、型わくと支保工がいちじるしく複雑になり、ケーブルの配置と定着に相当の困難をとまう。コンクリートの打設前にシースを定位置に保持しておかなければならないこともコンクリートの打設に際し大きな防げとなる。さらに施工中の用心鉄筋量がいちじるしく多くなり、仮支保工を多量に用いなければならない。これらはいずれも Wylfa の PCPV の施工においても経験されたことである。

容器内部の機器の配置に対する有効空間は円筒形の方が大きい。また、発電所全体としてのレイアウトを考える場合、周辺の機器ならびに付属建築物との調和の面から円筒形容器の方が有利である。

図-11 ガス型炉のレイアウト方式

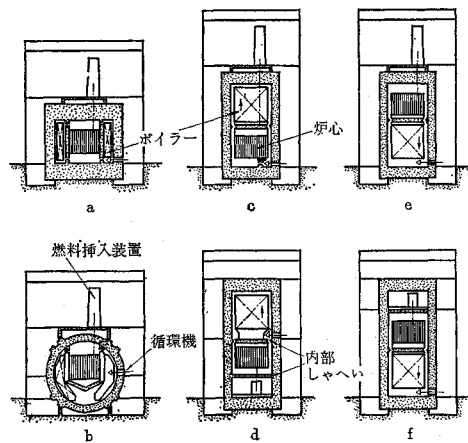


図-11 は、ガス炉に応用される一体組み込み方式の円筒形あるいは球形の PCPV の種々のレイアウト形式を示したものである。これらの容器の得失として一般的につぎのことがいえよう。

1) 内圧が 30 気圧を越える場合は、球殻容器 (b) の方が熱交換機を炉心の周囲に配置する形式の高さの低い円筒形容器 (a. 例えば Oldbury) に比べ経済的である。

2) 内圧が $35 \sim 45$ 気圧の範囲では、中程度の出力のマグノックス炉およびほとんどすべての実用規模の AGR と HTGR に対し、熱交換機を炉心の上あるいは下に配

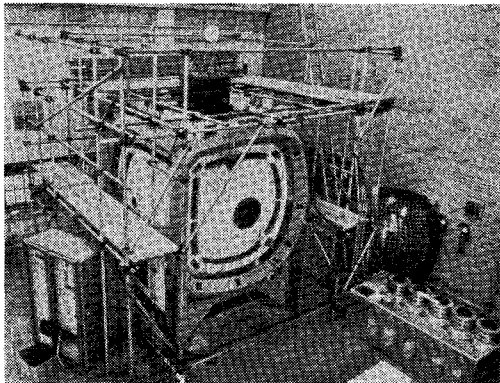
置するいわゆる“タワー形式”の円筒形容器 (c, d, e, f 例えば EDF-4) が球殻容器と十分に競合できるものと考えられる。内圧がこれ以上になると球殻容器が有利になる。

3) 一般につきのような条件にあるとき円筒形容器が有利である。すなわち、設計内圧が小さい場合、高さと同直径の比が大きい場合、容器内部に燃料そう入装置をも組み込む場合 (f)、端版を内に凸あるいは外に凸のドーム形式にする場合、規制されたひびわれをコンクリートに許容する設計方法を採用する場合などである。一方、球殻容器が有利になるのは設計内圧がいちじるしく大きい場合、基礎地盤の地耐力が小さい場合、容器のいかなる部分で破壊を生じても漸進的な破壊形態をとるように設計を行なう場合などである。

球殻容器を用いて、燃料そう入装置を容器の外部に配置する形式をとる場合、電気出力 1000 MW のガス炉に対し、球の内径はマグノックス型の場合、37 m 程度、AGR の場合、27~30 m、HTGR の場合、18~21 m になるといわれている。現在、HTGR については設計内圧として 70 気圧までのものが考慮されている。

いずれにしても設計内圧が高くなるにしたがって球殻容器の有利性が増大することは明らかであって、今後の設計内圧の上昇に対処するため、球殻容器が注目を集めることになる。写真-2 はこのような球殻容器の模型試験の一例を示すものである。

写真-2 球殻容器の模型試験の一例 (イギリス)



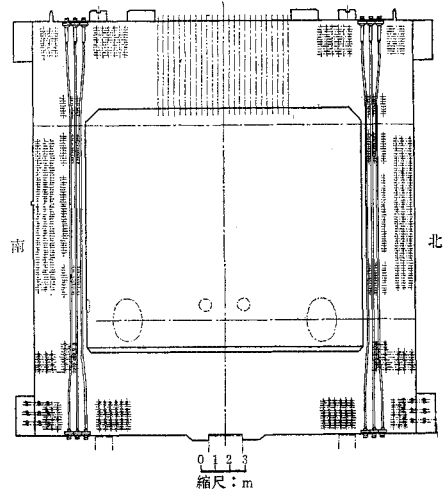
(3) 改良ガス冷却炉 (AGR) および高温ガス冷却炉 (HTGR) への PCPV の応用

AGR は燃料に酸化ウランを、被覆材にステンレス鋼を使用する炉形式であって、冷却材の CO_2 ガス温度を従来のマグノックス炉よりも相当に高くし、熱効率を高めることができる。1965 年イギリスの Dungeness B 発電所 (電気出力各 500 MW の炉 2 基よりなる) の入札において、AGR がアメリカの沸とう水型炉を押えて入札に成功し、AGR の経済性が優れていることが示され

た。

Dungeness B 発電所において使用が予定されている PCPV の断面ならびにその諸元は 図-12 および 表-1 に示すようである。この PCPV は垂直円筒形であって、既往のものと本質的に異なるところはないが、蓋版に燃料そう入および制御用のスタンドパイプが相当に密に貫通することになるので、P C 鋼材の配置ならびにコンクリートの打設に相当の困難をとまうことが予想される。

図-12 Dungeness 発電所 PCPV の断面



一方、イギリスの原子力委員会では、各電気出力 500 MW の二基並列の AGR による発電所の計画が提案されている。

最初の計画案では、炉の圧力容器を鋼製にし、熱交換機、燃料そう入ならびに制御装置等をすべて直径 57 m の鋼製の球殻コンテナメントに收容する方法が考えられた (図-13)。

その後、改良案として一体組み込み方式による球殻の PCPV による案が提案されている (図-14)。この 2 つの図を比較することにより、PCPV を用いることにより、発電所のレイアウトをかなりコンパクトにすることが可能であることがわかる。

高温ガス冷却炉 (HTGR) は AGR よりさらにガス温度と内圧を高め、熱効率を増大させることが可能なガス炉であって、冷却材としてヘリウムを使用する形式のものである。PCPV の HTGR への応用については主としてアメリカにおいて検討が行なわれており、TARGET 計画において電気出力 1000 MW の炉に PCPV を応用するための計画案があり、すでに模型試験を行ない、図-15 のような概念設計案が提示されている。実際には、電気出力 330 MW のものが 1971 年の完成を目標に着工することが決定している。

図-13 AGR 発電所の設計案 (鋼製压力容器による)

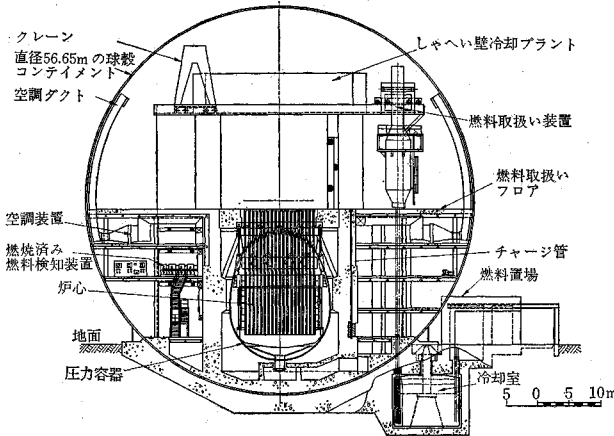
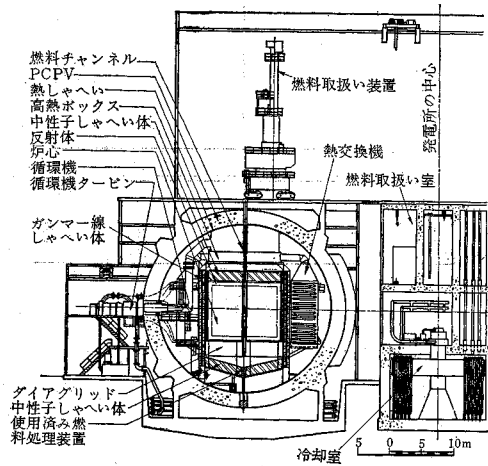


図-14 ACR 発電所の設計案 (PCPV による)



フランスでは環状燃料を用いた改良マグノックス炉により、今後5年間に PCPV を用いて 500 MW 級の炉を5基建設することを発表している。その一例として、Bugey-I 発電所に採用される予定の PCPV を 図-16 に示す。

さらに、将来の問題として 140 気圧の CO₂ ガスによる高速炉に PCPV を応用することも考えられており、ガス冷却炉については PCPV の将来性は非常に明るく、PCPV なくしてガス冷却炉の発展は考えられない段階にきているといえる。

(4) 水型炉への PCPV の応用

PCPV がガス型炉に成功りに応用されたことは、水型炉への応用を非常に興味あるものにしてている。水型炉の中でも PCPV の応用の可能性が高いのは沸とう水型炉であって、設計内圧も 80 気圧程度で、燃料そう入のために上部の蓋を移動させる必要がなく、在来の技術によって設計施工が可能であると考えられている。水型

図-15 HTGR に応用するための PCPV の設計案

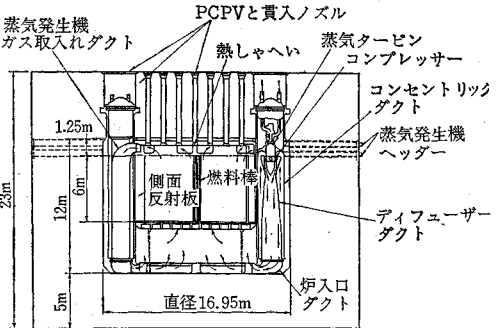
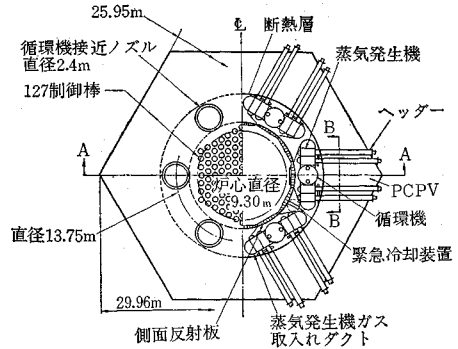
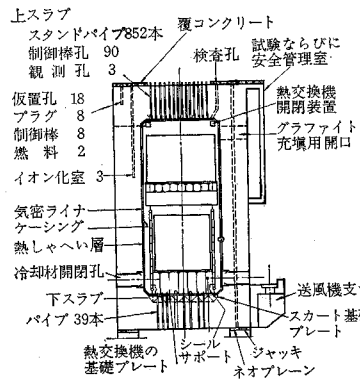


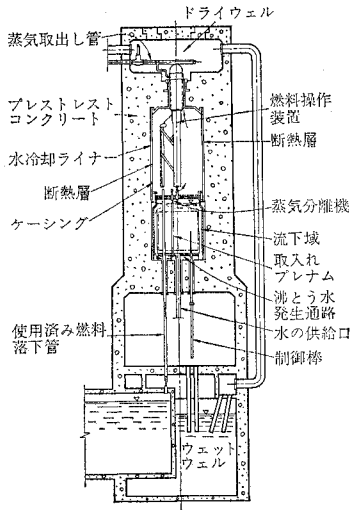
図-16 Bugey-I 発電所の PCPV の設計案



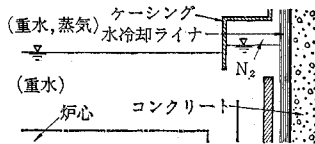
炉の容器の内径はガス型炉に比べかなり小さく、大きさについては問題はないが、コンクリートに作用する水と蒸気の熱をしゃへいする方法とコンクリートの冷却方法が PCPV を応用する場合の最大の難関になるものと考えられる。

スウェーデンのMarviken 発電所(電気出力 200 MW)の沸とう水型重水炉には鋼製压力容器が使用されたが、サブプレッショチェーンバーには PC 構造が採用されている。この経験に基づいてスウェーデンでは BHWR への PCPV の適用を検討している。BHWR は循環ループがないため貫入孔の数が少なく、さらに压力容器とコンテナメントを兼ねることができるので、PCPV が非常に適したものである。図-17 は電気出力 400 MW の

図-17 BWHR への PCPV の適用
(概念設計・スウェーデン)



てんおよび取り出しは落下管中で行なわれる。水圧で操作される制御棒は下側から容器にそう入される。コンクリート容器では平板の底板を利用でき、凹型底面を用いた場合の余剰重水および充てん材を使わないですますことが可能である。排圧用のドライウェルはパイプでウェットウェルと連結されている。



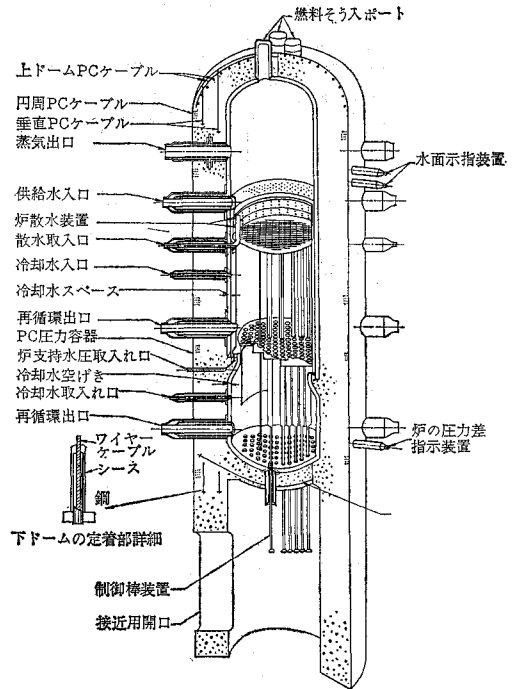
水面下では停滞する冷却材が用いられ、水面上では停滞するガスが用いられる。重水と蒸気の境界面より上では、薄い鋼板ケーシングを配置し、温度の低い外側の鋼ライナーの間に空間をつくり、これを窒素ガスで満たす。ライナーは冷却され厚さ 3cm の波形ケーシングおよびワイヤメッシュで被覆され、ガスの停滞条件をつくる。水面近くでケーシングは内側に広げられ、冷却されるライナーとケーシングの間に半径方向の反射板を収容するだけの空間をつくる。この方法により N_2 と D_2O -蒸気境界で水のしゃへいをつくる。水面は圧力変動によりわずかに変化するだけであって、ケーシングの内部と外部では大きな圧力差はない。 N_2 ガスが減速材に拡散しないよう、また、 N_2 が変成しないような措置がとられる。

BHWR に PCPV を応用するための概念設計案を示すものであって、設計内圧は 77 気圧である。

アメリカでは沸とう水型軽水炉 (内圧 85 気圧) に PCPV を応用するための研究が行なわれており、図-18 に示すような概念設計案が提案されている。容器の内空間は内径約 5.5 m、長さ約 18 m である。この PCPV の工費は、工場製作鋼製容器の約 75%、現場溶接鋼製容器の約 55% であって、経済性も大きいという。

沸とう水あるいは加圧水型炉に使用される直径の小さい PCPV について、チェコでは層状容器を考えている。これは、内側の層に水分を保持させた重コンクリートブロックを置き、中性子線とガンマー線をしゃへいし、つぎに断熱層を配置し、外側に機械的強度をもたせた PC 構造を配置するものである。水型炉への PCPV の応用については現在のところ概念設計の域を出ないが、炉のユニット当りの出力の増大にともない、大鋼型

図-18 PCPV の沸とう水型軽水炉への適用
(概念設計)



製容器の輸送ならびに溶接上の制約から、将来、PCPV が本格的に検討されるようになる。

(5) 地下炉への PCPV の応用

地下炉が考慮される主な理由はつぎの三つである。すなわち、1) コンテイメントの問題が有利に解決できること、2) 軍事上安全であること、3) 周辺の景観を害さないこと、である。

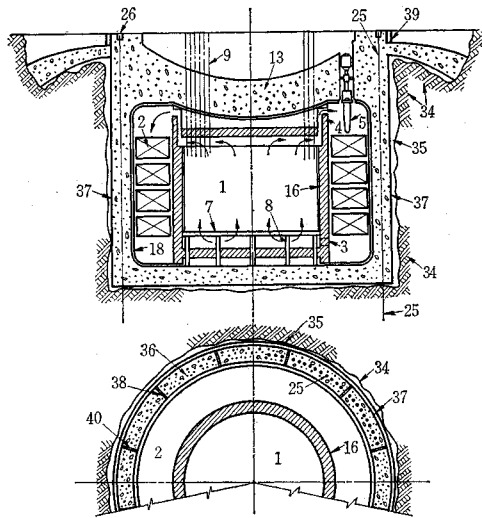
原子力発電所の心臓部である炉-熱交換機を一体にして PCPV に収容し、これを地下に設置すれば、周辺の付属構造物をかなり簡易化することができる。図-19 はこのような一体組み込み式による PCPV の地下配置の一案である。ただし、容器の上面は地表面近くになっている。わが国のように原子力発電所の用地の確保が困難で、安全性を厳しく要求される場所では、原子炉の地下配置の問題は検討に値する課題であると思われる。例えば、原子炉を既設のダム付込の岩盤中に設置し、ダム工事用道路を資材の運搬に活用し、冷却水には貯水池の水を利用し、既設の水力発電所と組み合わせて運転を行なうのも一案であろう。

(6) 施工法の可能性

施工法については在来の現場打ち工法の他につぎのような工法が考えられる。

1) プレキャストブロックによる PCPV の施工

図-19 PCPV を応用した地下炉の一案



	炉と諸器機	16	1次しゃへい
1	原子炉	18	鋼ライナー
2	蒸気発生装置	25	基礎へのアンカーケーブル
3~4	主ダクト	26	端部定着ブロック装置
3	取り入れダクト		地下構造
4	排出ダクト		
5	送風装置	34	岩盤
7	炉を支持する格子ばり	35	掘さく岩面のコンクリートライニング
8	格子ばりを支持する短い柱	36	ブロックに分割した容器壁体
9	スタンドパイプ	37	滑動ジョイント
	プレストレストコンクリート構造	38	垂直目地
13	上側端板	39と40	水圧フラットジャッキ

各プレキャストブロックの重量を運搬と架設が容易にできるようにする。この施工法によれば、コンクリートの収縮を少なくし、施工管理を良好にし、基礎工事とともにブロックの製作を開始し、施工を急速化することができる。ブロックには溝を設け、ジョイントには低収縮あるいは膨張性のセメントグラウトを行なう。さらに、構造上の不連続部に回転可能な継手を設け、2次の応力を減少させることができる。円筒形容器で炉と熱交換機を上下に配置する形式では、プレキャストの円環体で容器を形成することも可能であろう。

2) 吹きつけモルタル工法 吹きつけモルタルは、PCタンクにおいてPC鋼材の保護層として広く用いられている。PCPVにこの工法を応用することも考えられるが、この場合、コンクリートの核をあらかじめつくりなければならない。吹きつけモルタルの収縮がかなり大きいので、プレストレスの損失が相当に大きくなることを考慮しなければならない。

3) プレパックドコンクリート工法 この工法によればコンクリートの収縮をかなり小さくし、ひびわれ抵抗を増すことができるが、モルタルタイトな型わくに

かなりの工費を必要とし、PC鋼材のシースをモルタルが浸入しないように強固なものとしなければならない。空洞が残らないようにするために施工管理を厳重にする必要があり、PC鋼材と鉄筋が錯綜したところに粗骨材をてん充することも非常に困難な問題であろう。

4. あとがき

以上に発電用原子炉のPCPVの現況と将来について概略を述べたが、PCPVには、特殊条件下におけるコンクリートおよび鋼材の諸性質、安全性と管理、設計計算と解析方法、施工法などについて多くの問題点が残されている。本年、3月、ロンドンにおいてPCPVに関する国際会議が開催され、ここにおいて多数の論文が発表されているので、PCPVの現況ならびに問題点がかなり明確になることが期待される。紙面の都合で多くの点に触れることができなかったため、以下に文献を示し、参考に供したい。

参考文献

- 1) Caine, Y.: "Reflexion sur la conception des caisson en béton précontraint pour réacteurs nucléaires", TRAVAUX. Juillet-Août (1965), pp. 453~467
- 2) Merot, J.P.: "A propos de la conception des caisson en béton précontraint pour réacteurs nucléaires", TRAVAUX. Novembre (1965), pp. 621~629,
- 3) T.C. Waters, N.T. Barrett: "Prestressed Concrete Pressure Vessels for Nuclear Reactors", J. Brit Nucl. Energy. Soc. July (1963), pp. 315~325
- 4) 上記に対する Discussion, April (1964), pp. 119~146
- 5) K. Billig: "Prestressed Concrete Pressure Vessels" J. of A.C.I. November (1962), pp. 1601~1634
- 6) 上記に対する Discussion, June. (1963), Part-II pp. 2055~2064
- 7) M. Bender: "A status Report on Prestressed Concrete Pressure Vessel Technology-Part. I" Nucl. Struc. Engr. No. 1, (1965), pp. 83~90
- 8) M. Bender: "A status Report on Prestressed Concrete Pressure Vessel Technology-Part. II", Nucl. Struc. Engr. No. 1, (1965), pp. 206~223
- 9) R.O. Marsh, G.B. Melese: "Prestressed Concrete Vessels I-Review of Experience to date" Nucleonics, September (1965), pp. 63~67
- 10) P. Margen, G. Beliaev: "Prestressed Concrete Vessels 11-An Application to Boiling D₂O Reactors", Nucleonics September (1965), pp. 68~69, 78
- 11) J. Bellier, M. Tourasse: "Concrete Pressure Vessels Part-I", The Civil Engineer Feb.(1959), pp. 71~75
- 12) J. Bellier, M. Tourasse: "Concrete Pressure Vessels Part-II", The Civil Engineer., March (1959), pp. 142~143
- 13) К.В. Михайлов, В.В. Жуков: "Предварительно напряженный железобетон в строительстве атомных электростанций во Франции", Бетон и Железобетон (1967-1), pp. 30~34
- 14) R.O. Marsh, W. Rockenhauser: "Prestressed Concrete Structures for Large Power Reactors", ASME Publication, WA/NE-9, (1965), pp. 1~13
- 15) 猪股俊司: "原子力発電におけるPCの応用", 第7回電

- 力中央研究所, 土木講演と懇談の会資料(1965, 10), pp. 1~39
- 16) 黒田 孝: “プレストレスト コンクリート原子炉圧力容器の開発” 日本原子力学会誌 No. 12,(1965), pp. 38~41
 - 17) 角田良吉: “P.C.V. 設計の問題点と開発計画”, 富士電機, pp. 1~6
 - 18) “P S コンクリート調査団報告書-欧米の原子力施設における P S コンクリートの利用状況”, 日本原子力会議, (1966, 12), pp. 1~80
 - 19) 竹村立史: “原子力発電について” セメント工業 (1966. 5), pp. 4~6
 - 20) 関 慎吾: “原子力発電用プレストレスト コンクリート容器について”, 土木技術 21 巻 10 号, pp. 35~41, 11 号 pp. 41~47
 - 21) Camperon Erand 社: “プレストレスト コンクリート圧力容器”, 日仏原子力会議(東京),(1962), LE 12~14 pp. 1~15
 - 22) A.J. Harris, 外 4 名: “Prestressed Concrete Pressure Vessels for Nuclear Power Stations”, J. Prest. Conc. Inst. May (1965), pp. 17~27
 - 23) J. Bellier: “Les caissons en béton précontraint de G 2 et G 3 I. Réflexions sur le projet”, Bull. Inform. A.T.E.N. No. 47, (1964), pp. 31~33
 - 24) J. Bellier, M. Tourasse: “Les caissons en béton précontraint de G 2 et G 3 II. Description des caissons”, Bull. Inform. A.T.E.N., No. 47, (1964), pp. 34~37
 - 25) M. Tourasse: “Les caissons en béton précontraint de G 2 et G 3 III. Construction des caissons”, Bull. Inform. A.T.E.N., No. 47, (1964), pp. 38~44
 - 26) J. Bellier, M. Tourasse: “Les caissons des réacteurs nucléaires G 2 et G 3 de Marcoule”, TRAVAUX Mai, (1966), pp. 749~759
 - 27) エヌ・エ・ベルナル社: “G-2, G-3 のコンクリート製圧力容器”, 日仏原子力会議(東京)(1962), EL 12-14, pp. 1~8
 - 28) G. Ramiral, 外 4 名: “The Prestressed Concrete Pressure Vessels For French Graphite CO₂ Gas Type Reactors”, Third United Nations Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy (Paris) (1964 年 5 月) P. No. 28/p/52, pp. 1~16
 - 29) G. Ramiral, J. Courbon: “Les Caissons en Béton Précontraint dan les Centraire Nucléaires d'EDF 3 et d'EDF 4”, Annales de L'institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Février (1965), pp. 208~231
 - 30) M. Lamiral, M. Menestrier: “Les Caissons en béton précontraint des centrales nucléaires d'Electricité de France”, TRAVAUX, Mai. (1966), pp. 769~782
 - 31) “Prestressed Concrete Pressure Vessels for Electricité de France”, Nuclear Engineering, Oct. (1966), pp. 790~794
 - 32) P. Jensen: “Les caissons pour réacteurs et les centrales atomiques construits à l'étranger à l'aide de procédés français de précontrainte”, TRAVAUX Mai. (1966), pp. 783~788
 - 33) G. Lamiral, J. Courbon: “Electricité de France : Les Centrales Nucléaires. Les caissons en béton précontraint des réacteurs”, Energie Nucléaire JuilletAoût, (1964), pp. 285~292
 - 34) A.H. Brown, 外 3 名: “The Design and Construction of Prestressed Concrete Pressure Vessels with Particular Reference to OLDBURY Nuclear Power Station”, Third United Nations Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy (Paris) (1964, 5), p. No. 28/p/140, pp. 1~16
 - 35) “Prestressed Concrete Pressure Vessels” Concrete & Constructional Engineering, Nov. (1965), pp. 189~194
 - 36) R.S. Taylor, A.J. Williams: “The Design of Prestressed Concrete Pressure Vessels with Particular Reference to Wylfa”, Third United Nations Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy (Paris) (1964, 5), p. No. 28/p/141, pp. 1~15
 - 37) “Progress at world's largest Nuclear Power Station” The Steam and Heating Engineering, August, (1965), pp. 6~9
 - 38) “Kernkraftwerk Dungeness B”, Brennstoff Wärmekraft (1965), No. 12, pp. 596
 - 39) “Das Kernkraftwerk Dungeness B”, Elektrizitätsverwertung, (1965. 10), pp. 283~287
 - 40) R.V. Moore, J.D. Thorn, J. Brit: “Advanced Gas cooled Reactors-an Assessment” Nucl. Energy Soc. April (1963), pp. 97~110
 - 41) W. Koenne: “Einige Gedanken zur Errichtung von Beton-Contaiment” Nucl. Struc. Engr. (1965), No. 2, pp. 389~418
 - 42) L.L. Baker, M.L. Anderson, S. Gill: “The Design Construction and Testing of a Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessel Model”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers December (1961), pp. 555~586
 - 43) F. de Hoffman: “High-Temperature Gas-Cooled Reactors” Third United Nations Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy (Paris) (1964, 5), P. No. 28/p/810, pp. 1~15
 - 44) C.T. Chave, R.A. Deluca: Memorandum “Reinforced concrete Boiling Water Reactor Vessel”, p. 9
 - 45) C.P. Tan: “Conceptual Design of a Prestressed Concrete Pressure Vessel” Nucl. Struc. Engr. (1965), No. 1, pp. 224~231
 - 46) R.L. Taylor: “Methods for Thermoviscoelastic Stress Analysis in Concrete Reactor Vessels”, Nucl. Struc. Egr. No. 1, (1965)
 - 47) J.R.H. Otter: “Computations for Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessels Using Dynamic Relaxation”, Nucl. Struc. Engr. No. 1,(1965), pp. 61~75
 - 48) A.N. Kinkead: “A Problem of Prestressed Concrete Pressure Vessels ; Stress Concentration Adjacent to Reinforced Penetration Under Unidirectional Stress”, Nucl. Struc. Engr. (1965), No. 1, pp. 359~402
 - 49) H.C. Chan, S.J. Mcminm: “The stabilisation of the steel liner of a Prestressed Concrete Pressure Vessel”, Nucl. Struc. Engr., No. 1, (1966), pp. 66~73
 - 50) Y.R. Rashid: “Analysis of Axisymmetric Composite Structures by finite Element Method” Nucl. Struc. Engr. No. 1, (1966), pp. 168~182
 - 51) 太田 達 磯畑 脩: “プレストレストコンクリート圧力容器の緊張実験とその力学的考察”, 清水建設研究所報, 第 5 号 (昭和 40 年 4 月) pp. 23~31
 - 52) 藤田亀太郎: “フラットジャッキによるプレストレスト導入法の研究”, 土木学会論文集, 第 128 号(昭和 41 年 4 月) pp. 29~43

【担当委員 青柳 征夫 電力中央研究所 技術研究所】