

## 「コンクリート圧力容器および貯蔵容器」に関するセミナー

岡 村 甫\*

表記のセミナーが、1978年5月に開催された第8回 FIP 大会の期間中に、FIP 委員会の主催で行われた。講演は次の順に行われた。

1. 委員長報告：J.J. Closner
2. プレストレストコンクリート圧力容器：R.E.D. Burrow
3. プレストレストコンクリート石油貯蔵タンク：F. Kulka & P.Y. Chow
4. プレストレストコンクリート格納容器：K. Eriksson
5. 低温におけるプレストレストコンクリート：J.J. Closner & N.A. Legatos

これらの報告は、現時点におけるコンクリート容器に関する知識を集約したものであって、この問題の全体像を把握するのに格好の資料である。以下は、これらの報告の主要部分の要約である<sup>1)</sup>。なお、5. はページ数の関係で省略した。

## 1. 委員長報告

(J.J. Closner, 米国)

1974年5月の第7回 FIP 大会において、“石油貯蔵用プレストレストコンクリートタンク”および“プレストレストコンクリート原子力容器 (PCRVR)”に関する指針および報告書を作成するため、“コンクリート圧力容器および貯蔵容器”に関する委員会が設けられた。

Felix Kulka 氏が石油貯蔵グループの主査となり、報告書<sup>2)</sup>を作成した。この指針には、タンクの種類、設計、構造部材と構造詳細、ライナー、安全基準および特殊設備に関する章が含まれている。また、付録には、地震、火災、衝撃荷重および不同沈下に対する設計について考慮すべき事項が述べられている。この報告書は、石油業界、政府機関および設計ならびに建設に従事するエンジニアに対して、製品貯蔵用の PC 構造物の設計施工のガイドラインを提供するものである。石油貯蔵に関して、業界と公共機関の双方が今日直面している環境および安全の問題の観点から、多くの場合に、PC は鋼よりも良い回答をもたらすであろう。

R.E.D. Burrow 氏が PCRVR グループの主査となっ

て報告書<sup>3)</sup>がまとめられた。この報告書は、基礎理念、荷重作用、設計解析、受認評価、ライナー・配管および温度防護システム、材料施工、品質保証および品質管理、容器用機器および容器の確証実験、運転等に関する事項をカバーしている。

Kurt Eriksson 氏が格納容器グループの主査となり、Burrows 氏のグループと緊密なる連絡をとりつつ作業が進められた。その報告は、各種原子炉システムに対する各国の PC および鉄筋コンクリート格納容器の設計に関する概観を提供しており、現存の基準類と提案の基準類との比較、基準およびプラクティスにおける各国間の相違が論じられている。

James Irving 氏は、“コンクリートおよびコンクリート構造物における高温の影響”と題するレポート<sup>4)</sup>によって、すばらしい文献調査結果を提供した。

J.L. Zielinski 教授は、S. Kajifasez 教授の助力を得て、質問表による原子力発電所における緊張材の防護に関する経験についての調査を行った。その調査結果は、まもなく FIP Notes に発表される。

低温時のコンクリート使用に対する関心の高まりによって、John J. Closner と Nicholas A. Legatos の報告“低温におけるプレストレストコンクリート”が急いで行われた。PC は、一般に、通常的环境下で用いられる材料ではあるが、低温下で構造用に用いることも可能である。低温环境下での PC の良好なパフォーマンスの結果、この材料は、低温液体の貯蔵、および危険物貯蔵用の金属製タンクのまわりの防護壁または防護堤システム分野での各種応用に適する理想的な材料である。

本委員会は次回の FIP 大会まで存続することとなったが、従来の目的のほかに、“防護壁または防護堤などの安全防護システム”および“水槽”を含むこととなった。アンモニア、ブタン、プロパン、エチレンは、液化天然ガスと同様、大量に用いられる監督機関にマークされている商品である。これら危険物の貯蔵施設は、今までよりも、相当強力かつ精巧な防護システムを必要とするようになってきている。

水槽は、PC タンクの主要な使用例の一つである。発展途上国での需要が増加してきているが、それらの国が従来から関係の深い国の規準およびガイドラインに基づ

\* 東京大学、工博

いて、大部分が造られている。したがって、PCの水槽、上水および下水施設用タンクに関して、FIPがドキュメントを作成する必要があると思われる。

参 考 文 献

- 1) Proceedings of 8th Congress: FIP, Part 3, pp. 60~103
- 2) FIP/3/2: Recommendations for the design of prestressed concrete oil storage tanks, January 1978
- 3) FIP/3/3: The design and construction of prestressed concrete reactor vessels, March 1978
- 4) FIP/3/1: The Effect of Elevated Temperatures on Concrete and Concrete Structures, A review of literature prepared by J. Irving, September 1975

2. プレストレストコンクリート圧力容器

(R.E.D. Burrow, 英国)

2.1 序

コンクリート製圧力容器および貯蔵容器に関するFIP委員会は、多くの報告書を作成した。その一つは“プレストレストコンクリート原子力用容器の設計施工”<sup>1)</sup>と題するもので、本文の背景をなすものである。原子力産業の将来の方向が論争中であり、鋼製圧力容器の使用がすっかり定着した原子炉の形式に、市場の好みが決定的に動いている時期に、この報告の出版が行われたのは不運である。このような環境下で、本文は、PC容器の発端に興味をもち、他分野への応用の可能性を探っている幅広い読者を対象としたものである。原子力産業は、本来、容器の形式の主な革新者でありつづけるであろうし、本文では、将来の原子炉システムに対する計画に具体化されているいくつかを説明している。しかし、この分野以外にも、PCとプレストレスト鉄に関して、注目すべき開発が進行中である。将来最も有望なこれらについても述べている。

2.2 原子炉一般

コンクリート容器の将来を考えるうえで、主な競争相手の現状と将来性について、簡単に考察するのは有益であろう。

原子炉は、三つの主なタイプ、熱炉 Thermal Reactors、増殖炉 Breeder Reactors、および核融合炉 Fusion Reactors に分けられる。

熱炉では、燃料中の核分裂物質から放出された中性子は、周囲にある多量のグラファイトあるいは水のような減速剤によって減速され、中性子の一部は、周囲の燃料内で、次の核分裂反応をおこす。各々の核分裂によってエネルギーは解放され、熱の形になる。熱は、熱交換流体によって、炉心からとりだされる。Magnox, AGR, PWR および BWR はこのタイプの原子炉である。

高速炉は、核分裂によって放出された中性子が減速剤

によって減速されないで、このように呼ばれる。燃料アセンブリーはコンパクトとなり、連鎖反応を持続するため、高い割合の核分裂物質が用いられる。連鎖反応に必要なもの以上の放出中性子は、周囲一面の核分裂物質に変換できる材料中に捕えられる。そこで、中性子は新しく核分裂物質をつくりだす。LMFBR および GCFR はこのタイプである。

熱炉および高速炉の反応速度は、炉心におろされる制御棒で調整される。

核融合炉では、水素の同位元素、重水素と三重水素とを含むガスが、磁氣的に、温度数千万度のプラズマになるまで圧縮される。このエネルギーレベルで、水素同位元素は融合して、ヘリウムのようなより重い元素を形成すると同時に、大きなエネルギーを放出する。太陽はこのタイプの原子炉である。

これらすべてのタイプの原子炉の理論的な可能性は、長い間、原子物理学者達によって認められている。

現時点では、世界の商業炉はすべて熱炉である。商業用のデモンストレーションプラントが、高速増殖炉の技術を確立するためにつくられている。核融合炉は、商業用プロトタイプとして、21世紀になるまで現れないと、一般に認められている。これらすべてのタイプの原子炉は、プレストレストコンクリート原子力容器を含む可能性をもっているのである。

2.3 熱炉 Thermal Reactors

1950年代の初頭に、ヨーロッパ諸国は、ガス冷却炉 Gas Cooled Reactor を主とした入念な長期開発プログラムに着手した。このプログラムは、高温ガス炉 Gas Cooled High Temperature Reactor (HTR) に到達する一連の原子炉を念頭においたものであった。

米国は、異なった途を採り、戦時開発事業に基づいて、二つの水炉 Water Reactors すなわち沸騰水型炉 Boiling Water Reactor (BWR) および圧力水型炉 Pressurized Water Reactor (PWR) に焦点を合わせて、これらの建造を行った。これらは、物理学あるいは熱力学の観点からは、決して最も効率の良いものではないが、概念が単純であって、船の推進用および商業発電用のいずれにも応用できたのである。

以上の二つの流れのほかに、カナダのエンジニアは、燃料をひとまとめにして一つの容器内に収容するかわりに、別々の圧力管内に収容した燃料エレメントを用いる水炉 (CANDU) を開発する途を採った。この炉は、現在カナダの発電計画の主流となっている。この種の炉の変形 (SGHWR) が、英国の発電計画で考慮されているが、未だに実行に移されていない。これらのタイプは、いずれも圧力容器を必要としないので、本文ではこれ以

上議論しないことにする。

### 2.4 ガス冷却熱炉 Gas Cooled Thermal Reactors

初期の原子力発電所では、コンクリートは単に、運転スタッフを放射線から保護するためのものとして用いらただけである。炉心を収容している鋼製容器は、約2m厚のコンクリートの生体遮蔽に包まれ、燃料ルートや燃料貯蔵施設のようなシステムの他の部分も同様の方法で保護されたのである。

英国の原子力計画の初期に造られた Magnox 炉は、マグネシウム金属で蔽われた天然ウラン燃料、冷却用炭酸ガスを用いた。初期の発電所では、規模と運転圧力とは穏当なもので、鋼製の圧力容器が用いられた。後に、そのシリーズの炉は、鋼では造りえないような大きな容器を必要とするようになり、コンクリートエンジニアは、生体遮蔽用コンクリートをプレストレスし、それを鋼膜でライニングすることによって、安全かつ大きな容器を造りうることを直ちに認識した。プレストレストコンクリート容器を用いることによって、炉のまわりにボイラーを配置し、完全なサーキットを一つの容器内に収容することが可能となったのである<sup>2),3)</sup>。この形式の容器がもつ安全上好ましい特性は、いまやすっかり定着し、容認されている。最近の Magnox 炉は、炉心出口温度約400°C、回路の作用圧力約2.62 N/mm<sup>2</sup>で運転されている。英国では、Magnox 炉の発電所からの出力は現在ほとんどが5000 MWであって、これらの発電所の最上のものは、世界中で最も安価な電力を供給しているのである。

フランスでは、一連のガス冷却炉の発電所<sup>4)</sup>を完成した後、EDFは重大な変更を決定し、現在、軽水炉の大計画を作成することを検討している。代替エネルギー源の払底によって、フランスはその未来を原子力開発の成功に大きく負っている。このことが、ガス冷却炉の第2世代の開発における経費と見込まれる遅れの問題から、アメリカ型の水炉の明らかに単純な面に惹かれて、進路を変更させた理由であったのかもしれない。いかに十分な理由があろうとも、この決定は、ガス冷却炉の主唱者達に深刻な打撃を与え、将来の購買者達に疑いを投げかけたのである。

英国はガス炉を継続しており、Advanced Gas Cooled Reactor (AGR)の次の世代は、ステンレス鋼に蔽われた酸化ウラン燃料を使用するものである。炉心の出口温度約650°C、サーキットの運転圧力4.00 N/mm<sup>2</sup>で、炭酸ガス冷却剤が用いられる。二つのタイプの圧力容器がこれらの設計に用いられた<sup>5),6)</sup>。最初のもは、炉心とボイラーとを1個のキャビティの容器中にもつものであり、2番目のものは、容器の壁の全高を通して鉛

直に通っている貫通孔の中にボイラーを収納している多孔の容器をもつものである<sup>7)</sup>。最初の二つの発電所は順調に運転中であり三つは建設の終りの段階である。あと二つが1980年代の初期に建造される命令が出される可能性がある。

グラファイトで蔽われた濃縮酸化ウラン燃料を使用し、冷却剤としてヘリウムを用いる第3世代の高温ガス炉 High Temperature Reactor (HTR)をAGRが予期していることは、一般に認められていた。これらは炉心出口温度約750°C、冷却剤圧力4.41 N/mm<sup>2</sup>で運転される。この炉は多くの魅力をもっており、一つの例がFigure 1に示されている<sup>8)</sup>。三つの異なった形式が開発され、試験に成功している。開発の現段階において、すでに、製鋼および石炭気化のような直接熱を応用するものにとって適当な温度と圧力で運転できる。蒸気用に用いられると、効率の良い最新のタービン発電所の要求する高い圧力と温度とを供給できる。この炉の最大の魅力は、クーリングシステムの熱損失が水炉に比して約20%少ないことで、長期的には、HTRの高い熱効率(約40%)が立証されよう。

痛ましいことに、この炉の未来は今や非常に不確実に

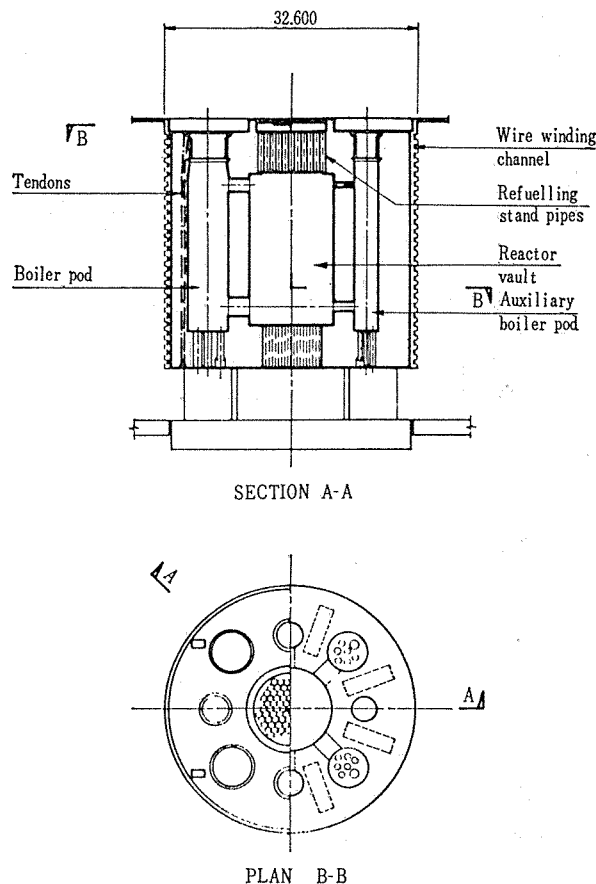


Figure 1 Outline of vessel for high temperature reactor<sup>8)</sup>.

見える。英国では、AGR 炉に伴う遅延とフラストレーションとが、ガス炉システムに反対する意見を強めており、この炉の将来は、現在主として米国と西独の手にゆだねられている。米国上院に対する ERDA レポートは、HTR の利点を再述しており、商業用デモンストレーション発電所を造るため、政府、産業界および公益事業者の連合体を提案している。西独では、政府権威筋が、プロセスヒート原子炉およびヘリウムタービンシステムの設計開発の提案を検討中である。これらの提案が実行されると、少なくとも HTR の開発ポテンシャルは十分に調査され、将来の世界の発展がこれを望ましいとしたとき、これを選択する可能性が残されるのである。

ドイツのヘリウム高温炉 Helium High Temperature Reactor (HHT) のプロジェクトの一部は、ヘリウムタービンに直接連結される高温炉 (HTGR)<sup>9)</sup> をもつ大きな原子力ガスタービン発電所の開発を目的としている。このプロジェクトにおいて、多くの可能性が検討されたがすべてに共通なのは、発電サーキットの一部あるいはすべてを収容している Wire-wound PCRV の使用である。Figure 2 に図解された例には、主キャビティのまわりに六つの鉛直ポッドが配置され、その中に三つの熱

回収装置と三つのプレクーラーが入っている。水平なキャビティには、三つの水平軸ガスタービンが放射状に配置されている。三つのガスタービンループと三つの予備クーリングシステムとを結んでいるガスダクトは、ポッドとキャビティとの間に、対称に配置されている。周波数制御のための三つの貯蔵ポッドが、外側の円筒部分に配置されている。図の計画は、3000 MW の熱出力と 850°C のタービン入口温度および 6 N/mm<sup>2</sup> の圧力とをもっている。同様の研究が米国でも進行中である。Gulf General Atomic が、発電およびプロセスヒートの応用のための一連の HTR の設計開発を行っているのである。

### 2.5 水炉 Water Reactors

ガス炉システムの変化に富む歴史とは対照的に、水炉の発展は、外面的には、穏やかに見える。原子炉の二つの基本的なタイプが、浮揚性のあるアメリカの国内市場で発展し、輸出資金調達に対する政府の強力な援助を得、世界市場へ次第に浸透していくことがわかる。しかし、この楽観的な面は、影の面をもっており、これらの原子炉システムが生き残るとは限らないのである。

沸騰水型炉 Boiling Water Reactor (BWR) は、熱湯に浸された炉を用い、直接タービンに、約 6.90 N/mm<sup>2</sup>、280°C の蒸気を供給する。このタイプの原子炉は、伝統的に、円筒形の鋼製圧力容器を用いている。1200 MW の原子炉に対して、圧力容器の壁の厚さ 150 mm、約 22 m に 6 m (直径) である。蒸気は放射能を帯びているので、供給ラインとタービンとは厳重にシールされなければならない。また、メンテナンス作業中、人員を保護するために、特別の手段と予防措置とが講じられなければならない。このシステムの主要な長所は、概念の基本的な単純さと適当な運転温度と圧力とである。

水炉の第 2 のタイプすなわち圧力水型炉 Pressurized Water Reactor (PWR) においては、炉心が、沸騰を防ぐために、約 12.24 N/mm<sup>2</sup> の圧力に保たれた水に浸されている。熱交換器を通じて、熱は 2 次サーキットに伝達されるので、蒸気は放射能を帯びておらず、サーキットクリーナーの必要がない。したがって、BWR よりも小さな鋼製圧力容器をもつ、コンパクトな一次サーキットとなる。

これら二つの水炉システムは、世界市場における主要な競争者である。現在、世界中で建設あるいは計画されている原子炉は 500 以上である。そのうち約 200 が BWR であり、残りが PWR であって、後者への傾斜の傾向が顕著である<sup>10)</sup>。最近、ヨーロッパ諸国が PWR に基づく原子力計画を採用しており、英国も同様のコースに従う決定をする可能性があるように思われる。

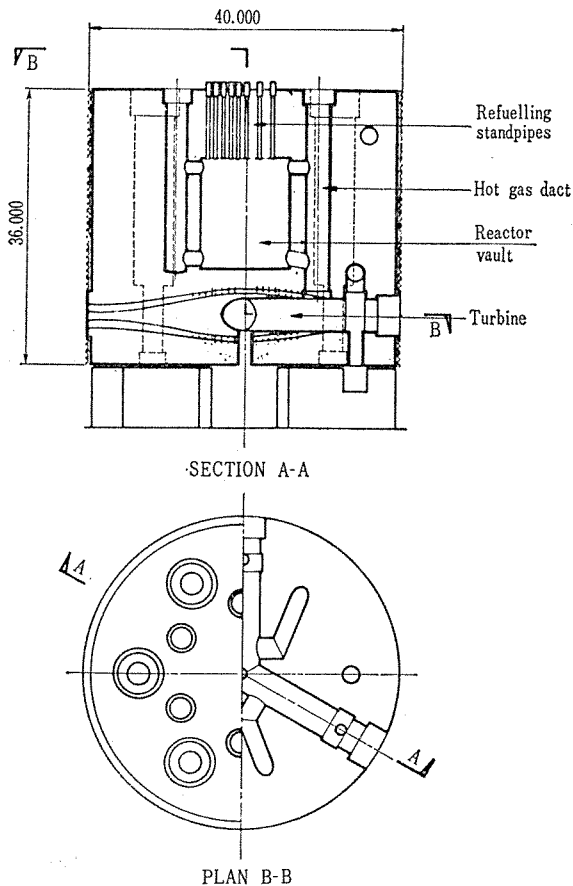


Figure 2 Outline of vessel for helium high temperature reactor and gas turbine system<sup>9)</sup>.

すべの原子炉システムと同様、これらのタイプも、米国および採用しようとする諸国において、安全問題の検討が強められ変化が現われた。

これらの影響によって、水炉に対して二つの関心が浮び上った。一つは、冷却剤の損失を含む重大事故の際の性状に関するものであり、もう一つは、鋼製压力容器の完全性に関するものである。各国のこれらの問題に対する受取り方は、水炉の拒否から比較的軽微な設計変更に至るまで、幅の広いものである。鋼製容器の安全性は、製造および使用中に生ずる重大な欠陥を発見するための規則正しい検査に大きく影響されることが指摘される。安全性の鎖の中で、人間は最も信頼できない結び目であり、検査という手段は、必然的に、検査官の用心さと勤勉さとに負っているのである。そこで、ある権威筋は、压力容器をとりかこむ爆発保護用ジャケットの形の余分の防護を要求するようになった。

PCPV に関する主流はガス冷却炉であったが、BWR (少なくともコンクリート容器に収容されるもの) に対しても適したものであって、それに関する多くの価値ある検討が、スカンジナビアで行われた<sup>11)</sup>。Figure 3 に示されている PCRV の設計は、その開発における最新

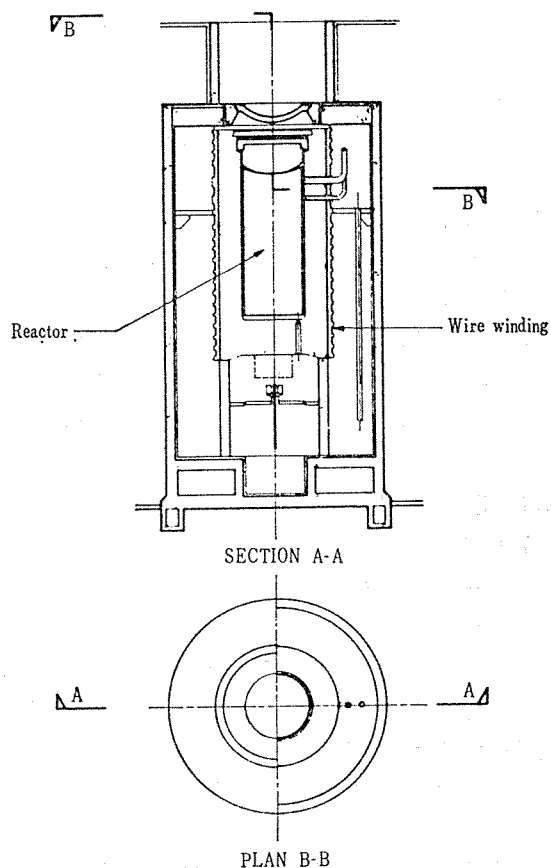


Figure 3 Layout of prestressed vessel and containment for boiling water reactor<sup>11)</sup>.

のものである。厳重な安全規則のもとでは、PCRV の使用によって、BWR 発電所の全経費の節減が大幅に行えると、スカンジナビアのチームは確信している。第 4 回 SMiRT 会議での論文<sup>12)</sup>で Hannah は、“水炉システムに対して、スカンジナビアによって開発された PCRV は、疑いもなく、その実行可能なことを示した”と述べている。

プレストレストセグメンタル鑄鉄も、BWR の建造に対して提案されている<sup>13)</sup>。一つの方法は、通常の鋼製容器を鉄セグメントのジャケットでとりかこみ、プレストレストされたジャケットは主容器の破壊を防ぐ、爆発防護用ジャケットとなるものである。スカンジナビアの PC 技術のレイアウトに基づき、もっと革新的な提案では、原子炉容器が完全にプレストレストセグメンタル鑄鉄に置きかえられている (Figure 4)。

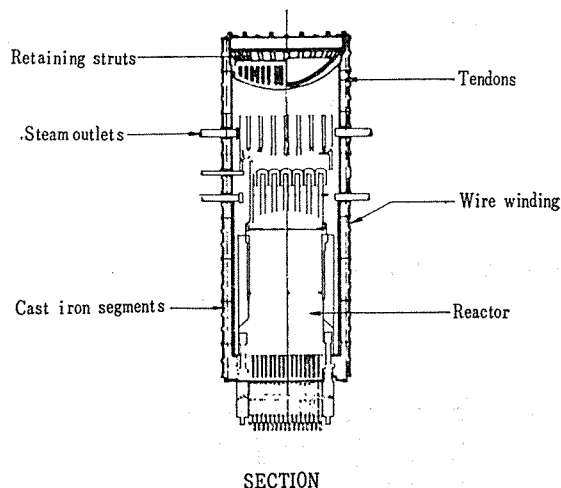


Figure 4 Outline section of prestressed cast iron vessel for boiling water reactor<sup>13)</sup>.

PC 容器は、PWR に対しても提案されている。しかし、多分、その高圧力と高温および複雑なサーキットのゆえに、この提案は、未だ、顕著な開発努力を生みだすに至っていない。

## 2.6 高速増殖炉 Fast Breeder Reactors

高速増殖炉は、1990年頃から次の世紀に入る頃までにおける、先進諸国の主要な電力源と期待されている。このタイプの原子炉は、新しい燃料を造り出す能力をもっているため、ごく少量のウランを必要とするだけである。したがって、天然資源の需要に関して、極めて経済的である。2種類の高速度増殖炉が開発中である。一つは、圧力約 10.34 N/mm<sup>2</sup> のヘリウム冷却剤を用い、もう一つは、常圧で液化ナトリウムを用いるものである。

公表された LMFBR 炉のレイアウトが Figure 5 に示されている<sup>14)</sup>。この設計では、ステンレススチールタンク内にたくわえられたナトリウムに、中間熱交換器とポンプとが浸されている。そのタンクは、PC 格納容器

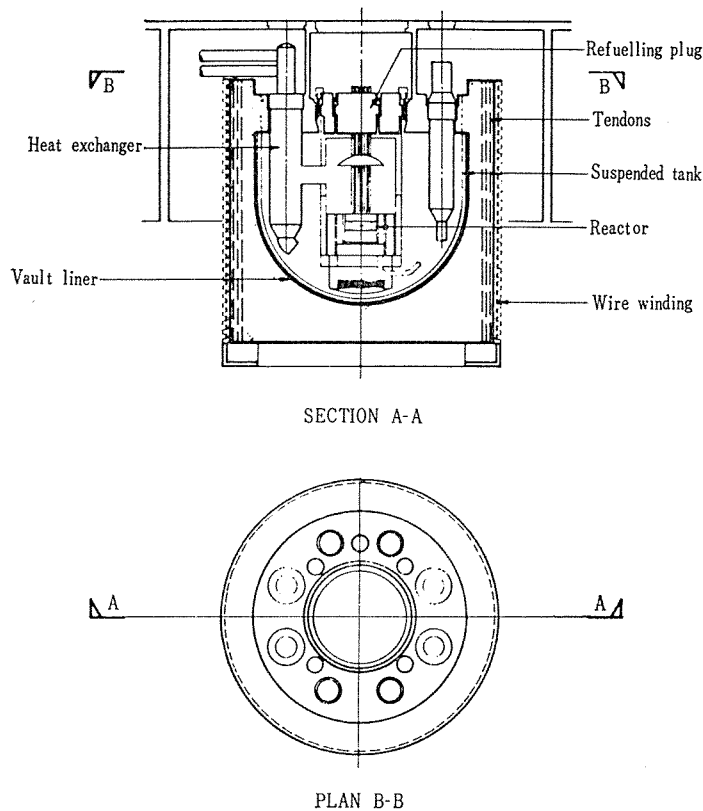


Figure 5 Outline of vessel for liquid metal fast breeder reactor<sup>14)</sup>.

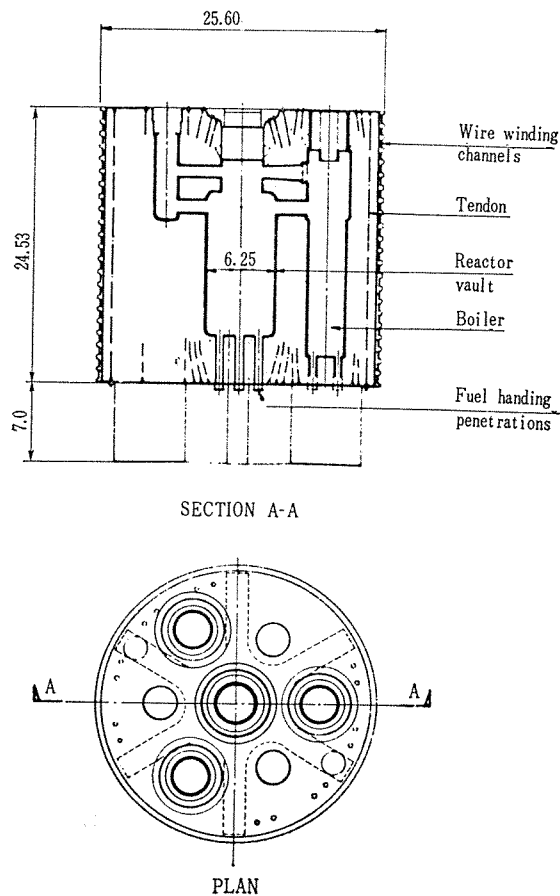


Figure 6 Outline of vessel for gas cooled fast reactor<sup>15)</sup>.

の屋根から吊るされている。

原子炉全体の崩壊の想定事故時には、圧力衝撃が主タンクを破壊する。そこで、コンクリート格納容器中の全キャビティ内は、減圧荷重が適用され、同時に、その内表面が約400°Cの液体ナトリウムで充填するであろう。炉の熱拒否システムが損なわれていなければ、この温度は急激に低下するが、事故によって損なわれていると、格納容器のライナーに隣接するクーリングシステムによって制御されなければ、ナトリウムの温度はさらに上るのである。

この LMFBR の設計において、まずありそうもない重大事故時には、PCRVR だけがそれに対処するものであって、圧力容器としてよりも多分格納容器として考えられるであろう。FBR の開発を継続すると、ナトリウムタンクと格納容器とを、一つの構造体内にもつ、もっと簡単な形に、早晩到達することができる。

ナトリウム冷却剤を用いる高速増殖炉は、

現在、好ましい炉と思えるが、そのために必要なマルチ・キャビティ容器の研究を含め、ガス冷却高速増殖に関する研究が続けられている。このスタイルの炉は、ヘリウム冷却剤を、約 9.21 N/mm<sup>2</sup> の圧力で用いる HTR 技術の延長にある。Figure 6 は、一つのレイアウトを示している。それは、容器の壁と底に造られた別々の空隙内に收容されているボイラーと補助設備とをもつ、マルチ・キャビティ設計である<sup>15)</sup>。

FBR に対して、どのルートの設計をとろうとも、高応力、移動圧力、および高温下における PCRVR の性状を明らかにするため、一層の開発研究が必要である。最近の研究から、これらの問題は解決でき、PC が FBR 計画のなかで、カギとなることは明らかである。

## 2.7 その他

### 2.7.1 地域暖房

スウェーデンとフィンランドの4会社が、小さな PC 容器を、低温の地域暖房用の炉に対して用いることを提案している<sup>16)</sup>。その計画 (Figure 7) は、5万~7万の住民をもつ地方都市の地域暖房システムに、95°C の水を分配するための小さな 200 MW の原子炉を組入れている。炉は、PC 容器内を 0.7 N/mm<sup>2</sup> の圧力としたものである。炉は住宅区域に位置しなければならないので、安全性を極端に重視し、容器は地下の空洞に建造されなければならない。そこで、容器のプレストレッシングのすべてを上面から実行するための新しい設計法が導

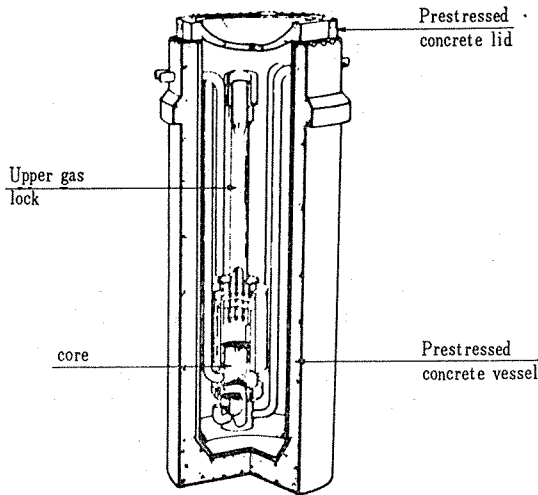


Figure 7 Arrangement of reactor vessel for district heating<sup>16)</sup>.

入された。それは、ヘリカルテンドンが容器の床スラブの下におりていき、再び上面に戻る方法で解決された。緊張材の両端は、容器上面の近づけるところにあり、運転中は炉のふたによってカバーされるのである。

### 2.7.2 エネルギー貯蔵

EC および米国を含む多くの国が、世界のエネルギー資源の経済的な使用に関心をもつようになってきている。太陽、風、波、潮および海洋の熱エネルギーのような天然資源の利用への関心が高まっている。しかし、これらの資源は、需要サイクルに応じては供給できないという欠点をもっている。このようなシステムを実行可能ならしめるためには、高需要時に使用するために、低需要の期間の余剰エネルギーを貯蔵する必要がある。揚水による貯蔵が、通常の電力システムにおいて、伝統的にこの目的に用いられており、適当な環境下では経済的であることが立証されている。圧縮されたガス、蒸気あるいは温水の貯蔵による方法を見出すことが可能であって、ある状況のもとではより適当であるかもしれない。

PC および最近ではプレストレスト鉄の容器がこの目的に提案されており、プレストレスト容器によって今や可能となった大容量高圧力を用いる実行可能な全エネルギー貯蔵システムを確立するための研究が現在盛んに行われている。

### 2.7.3 ガス貯蔵の応用

最初のプレストレスト鉄容器が、ドイツの THTR プロトタイプ原子炉の急速シャットダウンシステムに用いるヘリウムガスを貯蔵するために、現在、Schmehausen で製造中である。これは、17.5 m<sup>3</sup> の容量と 23 N/mm<sup>2</sup> の圧力とをもつものである。Bühler と Schilling<sup>13)</sup> は、100 MW のセットに対して、16.5 N/mm<sup>2</sup> で約 120 m<sup>3</sup> の貯蔵容器が必要と述べている。

### 2.7.4 高圧力疲労チャンバー

プレストレストコンクリートと鋼とを同時に用いる可能性を示す最後のものは、海洋構造部材の疲労試験用の大チャンバーの設計である (Figure 8)。この施設は、現在、完成に近づいている。圧力容器<sup>17)</sup> は、作用圧力が 69 N/mm<sup>2</sup> に達するまでの海洋構造部材の水圧試験のための、高さ 9.15 m、直径 3.05 m のチャンバーであ

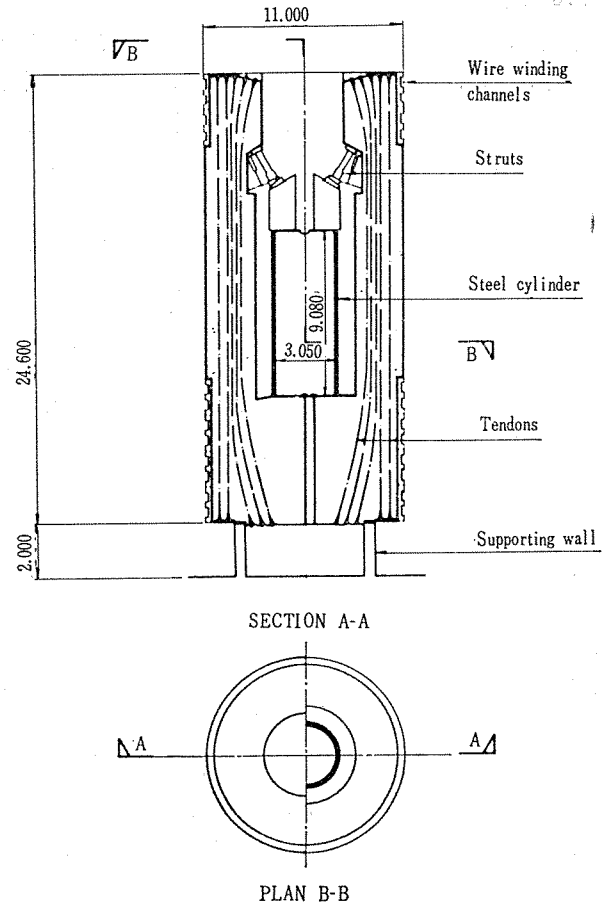


Figure 8 Outline of large fatigue chamber of prestressed concrete and steel<sup>17)</sup>.

る。このチャンバーは、プレストレストコンクリート構造体の中に収容されている独立な端板をもつ円筒でできている。その円筒は半分に造られ、それぞれが、90 mm 厚のライナーに締めつけられた 170 mm 厚の 3 個の鍛造リングから成り立っている。それは 100 mm 厚の底板上に置かれており、円筒は、試験圧力の変化に応じて滑動できる。チャンバーで試験されるモデルは、150 mm の可動頂板から吊られている。中央の楕円形のハッチは、チャンバーへのアクセスとなる。

頂板は、wire-wound PC 閉鎖プラグを通して、12 個の傾斜鋼ストラットによって拘束される。傾斜ストラットは、頂板上の荷重をコンクリート構造体に伝える。また、ストラットは、閉鎖プラグと頂板の移動を許すために、引込められる。

コンクリート構造体は、高さ 25 m、直径 11 m で、閉鎖板から試験室へ軸方向荷重を支えるために、鉛直方向にプレストレストされている。高容量の wire-wound 緊張材が、適切な 3 軸状態の応力をもたらすように、構造体の上下部に応用されている。この寸法の容器で今まで耐えられた最高圧力であり、実質上 PC 構造体にとっての最高圧力と信じられている。

## 2.8 結 論

本文は、広範囲な分野にわたる将来についての概観を行ったもので、ある部分は失望的、ある部分は不分明と思われるけれども、PC 容器が将来有望な多くの道をもっていることは明らかである。Hannah が“プレストレストコンクリート容器は、我々が現在考えている以上に、産業への応用のポテンシャルを持っている”と信じていることに、私は全く同感である。そして、彼の引用を続ける以上に良い方法で、本文を結論づけることはできない。“異なった学問分野間のエンジニアにおけるコミュニケーションギャップが、しばしば、論理的進歩を迷わせるものとなる。我々自身とプレストレスト容器のポテンシャルユーザー、特に、ケミカルプラントエンジニアとの間に存在するそのようなギャップの橋渡しに、本気にとりかかる必要がある”。他産業においては、経済性と安全性とのバランスが、原子力発電所の場合といく分異なっているであろう。他機関からの要求をすばやく認識することが、他の工学分野において PC 容器が受入れられるカギとなるであろう。鑄鉄プレストレスト圧力容器の創造的な開発は、容器の開発に関する独創的な考え方の魅力的な例を我々に提示したのである。PCPV の最初の 25 年間に象徴されるようなすばらしい刺激の維持を助けるために、他の類似の創造的な開発に努力する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) FIP COMMISSION : Report on Design and Construction of Prestressed Concrete Reactor Vessels. FIP 8th Congress, London, May 1978.
- 2) HOUGHTON BROWN, A. and DARTON, A.J. : The Oldbury Vessels. Proceedings of Conference on PCPV, I. Civ. E., London 1968.
- 3) TAYLOR, R.S. : The Wylfa Vessels. Proceedings of Conference on PCPV, I. Civ. E., London 1968.
- 4) LAMIRAL, G., BONELLE, R., VAUJOUR, J.A. and ROUGIER, A. : Pressure Vessels for EDF Nuclear Power Stations. Proceedings of Conference on PCPV, I. Civ. E., London 1968.
- 5) BURROW, R.E.D. and WILLIAMS, A.J. : Hartlepool AGR Reactor Pressure Vessel. Nuclear Engineering International, November 1969.
- 6) HAY, J.D. and EADIE, D. McD. : The PCPVs for Hinkley Point 'B' and Hunterston 'B'. IAEA Symposium on Advanced and HTGRs. Julich,

October 1968, pp. 501~516.

- 7) Seminar on Design and Construction of Nuclear Power Plants : Papers presented to FIP 7th Congress, New York, May/June 1974.
- 8) MORGAN, P.L.T. and BRADBURY, J.N. : Multicavity PCPVs for HTR and GCFR Systems. International Conference on Design, Construction and Operation of PCPV and Containments for Nuclear Reactors, York, September 1975. I. Mech. E.
- 9) HORNER, R.M.W. and HODZIC, A. : A Prestressed Concrete Pressure Vessel for Helium High Temperature Reactor System. International Conference on Design, Construction and Operation of PCPV and Containments for Nuclear Reactors, York, September 1975. I. Mech. E.
- 10) Nuclear Engineering International, Power Reactors 1977, April 1977 Supplement, Vol. 22, No. 258.
- 11) MARGEN, P.H. and MENON, S. : PCRVs for BWRs-A New Dimension in LWR Exploitation. Aktiebolaget Atomenergi, BT-3-S-132, 1974-03-25.
- 12) HANNAH, I.W. : Structural Engineering of Prestressed Reactor Pressure Vessels. Proceedings 4th International Conference on SMiRT, San Francisco, August 1977
- 13) BEINE, B., GROSS, H. and SCHILLING, F.E. : The Prestressed Cast Iron Pressure Vessel (PCIV); Its Applicability for Gas and Water Cooled Nuclear Power Reactors and for Burst Protection. Proceedings 2nd International Conference on SMiRT, Berlin, September 1973.
- 14) HUBEL, H., KOHLER, M., LANGE, L., COBB, E.C. and LEIGH, K.M. : Design of the Primary Containment for Pool and Loop Arrangements of LMFBRs. Proceedings 2nd International Conference on SMiRT, Berlin, September 1973.
- 15) MACKEN, T., DEE, J.B. and DAVIDSON, I. : PCRV Design and Development for the GCFR. International Conference on Design, Construction and Operation of PCPV and Containments for Nuclear Reactors, York, September 1975. I. Mech. E.
- 16) HANNUS, M. : Thin Walled PCRV for Urban District Heating Reactors. Proceedings 4th International Conference on SMiRT, San Francisco, August 1977
- 17) DAWSON, P. : Design and Construction of a PCPV for a Working Pressure of 69 N/mm<sup>2</sup> (10,000 psi). Proceedings 4th International Conference on SMiRT, San Francisco, August 1977.

## 3. プレストレストコンクリート石油貯蔵タンク (F. Kulka & P.Y. Chow, 米国)

### 3.1 序

コンクリートは、石油および他の炭化水素生成物の貯蔵のために、広く用いられている材料の一つである。コンクリート、特に PC は、世界中で、そのような貯蔵に関して優れた成果を挙げてきた。

1966年に、“プレストレストコンクリート製燃料用油



および石油タンク”と題する FIP レポートによれば、1939 年からその時点までに、213 の PC タンクが建造されている。それは、建設と使用の概略を述べており、タンクの平均寸法は、約 5 000 m<sup>3</sup>、最大容量は 17 500 m<sup>3</sup> である。また、タンクの容量は、年と共に増大する傾向を指摘している。

PC タンクの人気は貯水タンクについては定着しているのに対して、貯油タンクの場合は、PC は未だ鋼に及ばず、鋼は現在まで貯油タンクの大部分を占めてきている。使用実績から集められた経験によって、コンクリート容器の経済性、多方面における優秀さおよびタンクのオーナーとユーザーにとって非常に魅力的な資質が論証されている。

コンクリートは、ほとんど世界の全地域に存在する材料である。その製造および使用が、経済的に未発達な国においてさえ確立されている。タンクの建設は、特にむずかしいプロセスではなく、通常の鉄筋コンクリートおよび PC に用いられるごくありふれた方法と材料とが必要だけである。

コンクリートが容易に手に入ること、コンクリート構造物が簡単に造れることが、建設材料としてコンクリートを、その製造が少数の国に限られている鋼よりも、好ましいものとしている。また、建設および製作における鋼の使用は、熟練者を必要とする。このように、PC タンクの鋼製タンクに対する経済性は、鋼の製造されていない地域では、すでに明らかである。しかし、PC は、鋼の生産国においても競争力をもっている。PC タンクによって、鋼材使用量が減少するからである。

PC タンクに要する土地の面積は、鋼製タンクの場合よりも小さい。コンクリート本来の強度は、タンクの直径を減じて高さを高くすることによって容量を増すことを許す。また、耐火性の良好なことによって、タンクを相互に近接できる。コンクリートの耐火性は、確かに、主要な利点ではあるが、同様に重要なことは、世界の多くの地域で主要な考慮を必要とする耐震性である。

PC 貯油タンクのその他の利点は、メンテナンスの必要が減少すること、爆風、破壊行為などのような異常事態に対するその抵抗力である。PC は直接土に接しても腐食のおそれがないように、地下に建造できる。これは、安全性と環境保護との点から重要な利点である。

PC 貯油タンクよりも鋼製タンクが継続して好まれている理由は、主観的なものである。鋼の使用は、石油産業が非常に鋼にむいている事実によって誇張されている。その産業の設計者とユーザーとが、その産業における他の建造物の多くをそうしたように、鋼製タンクに向うのは自然であった。鋼製タンク使用の理由はほかにも

あったが、主な要因は、石油産業およびその周辺産業の専門家が、PC に十分には親しんでいないという事実である。

1974年、FIP は、“コンクリート 圧力容器および貯油容器”に関する委員会を設け、この委員会は直ちに、貯油容器に関する作業グループを指名した。このグループの作業は、PC 貯油タンクの設計施工指針を準備することであった。この指針は完成し、現在印刷中である。

### 3.2 指針の目的

この指針の目的は、設計者、オーナーおよび政府当局に、石油製品の貯蔵に関する PC 構造物の設計施工のガイドラインを提供することである。

この指針は、構造設計のテキストブックまたは現場施工のマニュアルを意図したものではなく、PC 石油タンクの特徴を示したものであり、この種タンクの設計と使用の基本となるものである。これらの容器の設計は、建設が資格のある請負人によって行われなければならないと同様に、資格ある構造設計エンジニアによってなされなければならない。しかし、PC 貯油タンクの設計および施工のどちらについても、特に新しいことあるいは特別なことは何もない。

タンクの間隔は広大で、タンクは、地下に埋設される場合、浮上の場合あるいは地上に設置される場合がある。また、形においても、正方形、長方形、円形あるいはその他に変わりうる。指針は、原則として、地上の円形タンクに限られているが、大部分は他のタイプにも適用可能である。

地上の円形タンクでは、プレストレッシングは wire-wound または埋設テンドン方式で与えられる。両方法ともに広く用いられ、設計家および建設業にとって熟知されているものである。

### 3.3 タンクの種類

石油製品の貯蔵タンクの最も一般的な分類は、貯蔵される製品のタイプ、タンクの形状寸法および屋根のタイプによる方法である。

貯蔵される製品は、その可燃性、発火点および沸点に応じて、クラス 1, 2 および 3 に分類される。これらはすべて指針に規定されている。屋根のタイプは、タンクの設計と運転の両方に影響するので重要である。屋根のタイプは 3 種に分類される。タイプ 1 は、固定屋根であって、球状、ドーム状、板状または円錐状の形をとることができる。これは、液体との間に空間をもっている。タイプ 2 も固定式ではあるが、タンク内の液体表面に浮んでいるメンブレインあるいは床版と一体となっている。タイプ 3 は浮き屋根である。ときには、もう一つのタイプ、吊屋根が用いられる。これは、通常、柱とタンクの

周辺とで支えられたシェルタイプのエレメントからなっている。

屋根のタイプは、タンクの運転上の必要性、特に蒸発損失を考慮して選ばれる。タンク設計上、経済性のみならず、ほとんどの国で問題となっている環境問題の点からも、この面は極めて重要である。一構造要素として、屋根は、タンクの設計で重要視しなければならないのである。指針は、蒸発の制御と屋根タイプの使用区分とを、タンクの液体容積に関連して論じている。

### 3.4 設 計

PC 石油タンクの構造設計は、通常の PC の設計と同様であるが、ローカルコード、特定の産業規則または特定の装置に関する特殊な条件から起る要求に従う必要がある。一般に、タンクに作用する荷重は、施工時荷重、プレストレス力、貯蔵液体の重量による載荷荷重、後詰荷重、気象荷重、地震荷重、温度荷重、内圧、クランプ乾燥収縮、不同沈下およびミサイルの衝突、隣接タンクの火災による圧力等のような異常荷重である。

タンク壁のたわみは検討されなければならない。コンクリートタンク本来の剛性によって、水平荷重によるたわみは、通常重大なものとはならない。しかしながら、設計者は、その大きさを知り、必要ならば適切な処置を講じなければならない。

ひびわれは、水平および鉛直とも、タンクの用途ならびに有効性に応じたある制限値以下に保たなければならない。許容ひびわれ幅は、ライナーあるいはコーチングによって著しく異なる。タンクの条件を支配するひびわれ制御は、許容引張応力度の大きさによって分類される。指針では、これらの分類を、タンクのタイプに関連させて、一般的に記述している。

透水性も特にライナーをもたないタンクでは、一つの重要な基準として記述されている。

### 3.5 構造部材の詳細

タンク構造の主要部分、基礎および基礎盤、タンク床、タンク壁および屋根である。これらの各部材は、建造物の一部として、またそれ自体を別個の部材として取り扱われる。各部材をつなぐジョイントは部材と同様に重要である。

タンクを支持する土を意味する基礎盤は、タンクおよび設計荷重を過度の沈下その他の不都合なしに、支持できるものでなければならない。長期間の沈下は、タンクの場合、低く見積もられうる。その場合には、ジャッキングを行ってタンクを元の位置に戻す必要が生ずる。

貯蔵タンクにおいては、いわゆる活荷重が長期間作用する実荷重であって、建物や橋梁で通常考えられている活荷重とは全く異なることを念頭において、地盤がすべ

ての死荷重を、許容沈下量を超えることなしに、支持できることを確かめなければならない。沈下量の設定を行う際には、しばしば土の上に直接置かれているタンク床は、ごく限られた皿形不同沈下にしか適応できないことに注意する必要がある。地震による液状化が設計上考慮されなければならない。沈下については、指針の付録に詳細に記載されている。

タンク床は、通常 12 cm~20 cm 厚の鉄筋コンクリートスラブであって、死活荷重を基礎盤および基礎へ伝え、タンク底面から液体がもれないものでなければならない。スラブは、壁に対するフーチングを形成するように、通常タンクの端部で厚くなっている。なお、内部柱が用いられる場合は、スラブは、柱の基礎の部分で柱を支持するために厚くなっている。鋼製ライナーをもつ床の場合には、コンクリートスラブを省略し、その代わりに、良く固められたアスファルト層を用いることもある。スラブはまた、安定性あるいは不透性を損なわずに、ある量の不同沈下に対応するように、設計されなければならない。

タンク壁は、スリップフォーム方式によって、現場施工されるか、プレキャスト施工される。鉛直プレストレスはポストテンションまたは、プレキャストの場合のプレテンションである。円周方向のプレストレスはポストテンション方式である。荷重のすべての組合せに対して設計されなければならないが、すべての荷重を受けてなお圧縮を残すように、円周方向のプレストレスを与えるよう設計される。

壁は、構造的に健全であるほかに、漏洩を起さないものでなければならない。壁の不透液性は、基本的には、良質のコンクリートおよびひびわれを制限するための鉛直ならびに水平のプレストレスによってなしとげられる。必要な場合、例えば、揮発性の高い製品の貯蔵の場合、液体あるいは蒸気のコンクリートへの浸透を防ぐために、内部バリアーが加えられる。

構造設計に関しては、屋根は、固定型か浮上型かである。固定屋根は、プレキャストも用いられるが、一般に現場打ちコンクリートであって、ドームまたは円錐形である。なお、内部柱が経済的レイアウトを許す場合には、平板状の屋根が用いられる。コンクリートタンクに対して固定の鋼製屋根を用いることもできる。屋根の内面のライニングまたはコーチングは、揮発性の高い液体の貯蔵の場合に望ましい方法である。

浮屋根は、コンクリート、鋼、アルミニウムまたはファイバーグラスで造られる。製品が日光で熱せられたときに、沸点に達するのを防ぐために気密にしなければならない。蒸気の放散を防ぐために、屋根端部は壁に対し

てシールされなければならない。信頼できるシールを設計することは大事なことであって、指針ではいくつかの可能性が論じられている。

蒸気損失を減じ、大気中への蒸気の放出を減ずるために、固定屋根の下に浮屋根を設けることがある。これは、通常、アルミニウム、鋼またはファイバーグラスでできている。これらも壁に対してシールされなければならない。壁の頂部および底部における連結は、非常に重要である。それらは液体が漏洩しないように設計されなければならない。スライディング壁の場合には、プレストレッシングその他による半径方向への壁の移動を許すよう設計しなければならない。これらのジョイントの設計は、ヒンジ、固定のいずれにしても、実際の荷重条件のもとでのその性状と与えると同様に、タンクの構造設計に大きな影響を及ぼす。

### 3.6 Insulation およびライナー

コンクリートタンクのための Insulation は、指針がカバーしている製品の範囲では、めったに用いられない。必要な場合には、スプレー方式または foam blocks を壁外面に適用することによって行われる。

炭化水素生成物との長期間の接触によって、コンクリートの性質は何ら重大な影響を受けないにもかかわらず、コンクリートタンクには、通常、保護バリアーが用いられる。保護バリアーは液体もしくは液状の形で用いられる。鋼、合成または天然ゴムあるいは合成樹脂のライナーの場合もある。バリアーは、以下のうちのいくつかを目的としている。

- (1) コンクリート中への製品の浸透の防止
- (2) 浸食性の製品に対するコンクリートの保護
- (3) コンクリートとの化学反応による汚染からの製品の保護

ライナーとその詳細は指針に論じられている。

## 3.7 安全規定および特別規定

### 3.7.1 環境への配慮

環境保護規定についての普遍的なルールを作ることはむずかしいが、英国の IP コード、米国の EPA 規則などは、かなり良いガイドとなる。

石油タンクに関しては、液体の漏洩と蒸発物の放出とがその対象となる。一部の石油業者は、液体の漏洩防止に加えて、漏洩、特にタンク底面からの漏洩の発見システムを今やもつようになってきた。

### 3.7.2 タンクの間隔とレイアウト

鋼製タンク間の最小間隔、石油の最大容積および1堤防内のタンクの寸法と数は、米国の NFPA 30 および英国の IP コードのような各国のコードでカバーされる。PC タンクは、その本来もっている耐火性のために、こ

れらの規定をゆるめることができると思われる。それは地形、アクセス、メンテナンス規定等のような状況によっても異なる。

### 3.7.3 火災防止

石油タンク設備の火災防止とその関連事項は、通常、ローカルコードおよび産業規則によってカバーされている。耐火性は、主として、骨材の選択、鉄筋および PC 緊張材のかぶりおよび構造物の間隔で決まる。しかしながら、耐火性は、石油貯蔵の分野では非常に重要であるので、その問題に関連する種々の事項が指針に相当詳しく述べられている。論じられている事項は、タンク内外の火災、構成材料の性質と性状とを含む火災にさらされた PC 石油タンクの性状、ライナー材料の性状、終局破壊荷重等である。

### 3.7.4 衝撃荷重

危険な液体を扱うどの産業プラントにおいても、爆発の可能性を完全に除去することはできない。与えられた衝撃条件に対して、鋼よりも抵抗力が相当に大きいので、鉄筋コンクリートは、通常、この危険に対する防護用に用いられる材料である。指針の付録には、爆風圧とミサイル衝撃に対する静的ならびに動的応答を含めて、衝撃荷重の詳細を論じている。

### 3.7.5 耐震設計

この項は、指針の範囲に含まれていないが、それにもかかわらずタンクの設計にとっては重要な事項である。世界の各地で最近地震が発生していることから、今まで地震の被害を知らない地域においても、構造物、特にその破壊が周囲に危険をもたらすおそれのある場合に対しては、耐震設計が要求されはじめたのである。

耐震設計は、より信頼できる動的解析を必要とし、複雑なものである。動的解析は、一般に、普及しているが、熟練したコンピューターアナリシスを必要とする。耐震設計の条件は、ローカルコードによってカバーされることもあるが、そのままタンクに適用できないことが多い。タンクは、建築物や橋梁と同じようには扱えないからである。

指針の付録は、プレストレストコンクリート石油タンクに対する耐震設計の基本的な事項を含んでいる。

## 3.8 結 論

PC は、各種液体の貯蔵用容器として用いられる場合、非常に良い機能を発揮してきた。また、多くの異なった環境、条件および規則の要求に答えてきた。PC タンクの性状は、石油タンク用の適切な建設材料と考えられることを保証している。また、コンクリートが一般的な建設材料である世界の多くの地域において、経済的でもある。

タンクの設計建設の分野では、鋼が圧倒的に優位であるので、PC 石油タンクの設計施工の周辺技術は、未だ十分に発達していない。PC を用いようとする設計者は、自身で、異なった広範囲のソースから情報を集めることを強制されてきた。本指針は、設計者が組織的な方法でその仕事を遂行できるように、PC 石油タンクのための基礎とガイドラインとを提供しようとしたものである。

PC タンクの建造を推進することを、常に一産業を奨励する努力と見なしてはならない。石油貯蔵は、主要な国際的問題であって、コンクリートの鋼に対する有力な競争者としてのポテンシャルを明示することは極めて大切なことである。鋼が十分に供給されている地域では、コンクリートは、イニシャルコストおよびタンクの耐用期間中のコストに基づいて、通常のエコノミーベースで競争することになる。鋼の普及していない地域では、国産材料の使用の可能性は、石油貯蔵に対して、相当なコスト減となるであろう。

#### 4. プレストレストコンクリート格納容器

(K. Eriksson, スウェーデン)

##### 4.1 序

原子力格納容器の主要目的は、主システムにおける想定冷却剤損失事故 (LOCA) の場合に、核分裂生成物の環境への放散を防ぎ、通常運転時における放射能に対する遮蔽物となることである。ある場合には、格納容器は、飛行機事故、化学爆発、竜巻、ミサイルなどのような異常荷重に対する防護の働きもする。

すべての熱炉は、今日、格納容器をもっている。Magnox タイプのガス冷却炉、AGR、HTR は、格納容器をもたないで造られてきたが、ガス冷却炉の最近の設計は格納容器をもつものである。主システムが原理的に圧力をもたないにもかかわらず、高速増殖炉でさえ、通常格納容器をもっている。

格納容器の設計が対象としている設計事故 (DBA) は、主システム中の蒸気または水の主パイプの突如の破損である。緊急炉心冷却システム (ECCS) が働き、電力源が確保されることが要求されている。これらのシステムはすべて相当程度の余裕をもって設計され

ている。もしこのシステムが作動しないと、炉心が溶融する結果(米国の NRC の記号によればクラス 9 の事故)となるおそれがある。この場合は、格納容器の対象としているよりも高い圧力と温度とになりうるが、その確率は極端に小さいので、設計では考慮されていない。

初期の格納容器は鋼製のシェルでできていた。ある場合には、岩洞窟が格納容器として利用された。鉄筋コンクリートおよび PC は今日、格納容器の最も一般的な構造材料である。なお、ハイブリッドシステムも存在する。

ベースマットは常に鉄筋コンクリートまたはパーシャルプレストレスである。壁が少なくとも設計圧力に対応するレベルまでプレストレスされていれば、格納容器は PC 製と今日まで呼ばれている。なお、ガス気密のため、鋼製ライナーが通常用いられている。

#### 4.2 格納容器の分類

##### 4.2.1 単独あるいは複数バリアー

格納容器は、原子力システムを囲むバリアーの数によって分類できる (Fig. 1)。単独バリアーは、圧力を保持する構造物が原子力建屋としても機能するものであって、PWR にとって最も一般的なタイプである。複数バリアーでは、圧力を保持する容器は建屋に囲まれており、内側のバリアーを通しての漏洩は、はけ口から出されるかポンプによって 1 次格納容器に戻される。PWR では、2 次格納容器は、一般に、同心円の二つの主要構造物間

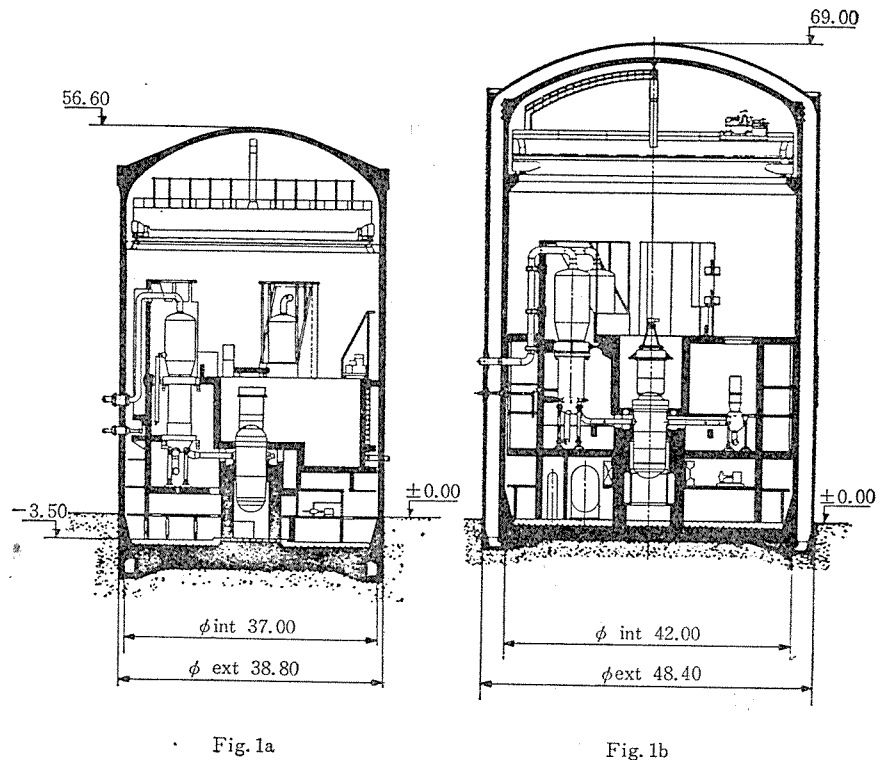


Fig. 1 PWR Containments of French Standard Design

- a) 900 MW<sub>t</sub>, Single Barrier
- b) 1350 MW<sub>t</sub>, Double Barrier

の環 (annulus) からできている。BWR では、同様の場合と、1次格納容器の外にある原子力建屋自身が2次格納容器として機能する場合とがある。

原子力建屋は大気圧よりもわずかに低い圧力に保たれている。漏洩はフィルターを通して煙突へ出される。原子力建屋の気密性は、当然、格納容器の気密性に比べると非常に限られたものである。

外側の建物 (Fig. 1 b) は二つの点での改善を意味している。

(1) 圧力を保持している内側の壁を通しての過度のガスの漏洩に対する2次バリアーとして役立つ。外側の円筒がプレストレスされていなくともまたライナーをもっていない場合でも annulus によって気密をつくることのできる。

(2) 飛行機、ミサイル、爆発等の外側からの衝撃に対する防護として役立つ。

2次バリアーは、1次バリアーの破壊時に生ずる圧力

に対して設計されていない。この点では余分に安全ではない。

2次格納容器は、ライナーを通してのリークレートに対する厳重な要求を軽減することによって得られる以上に、余分のコストを要する。

#### 4.2.2 圧力水型炉 (PWR)

PWRについては、3種類の分類がある。Normal dry, Ice condenser および Sub-atmospheric concepts である。格納容器は、原子力压力容器, Steam generator, 循環ポンプ, Reactor hall, 燃料プール, いくつかの補助システム等を含む主サーキットのすべてを収納する。

Dry containment は、LOCA の場合、主冷却流体全量のエネルギーを収納する容量として設計される。したがって、寸法が非常に大きくなる。代表的な容積および設計圧力は、1 000 MW。ユニットに対して、それぞれ 80 000 m<sup>3</sup> および 0.33 MPa である。

鉄筋コンクリートおよび PC 格納容器は米国で発達し

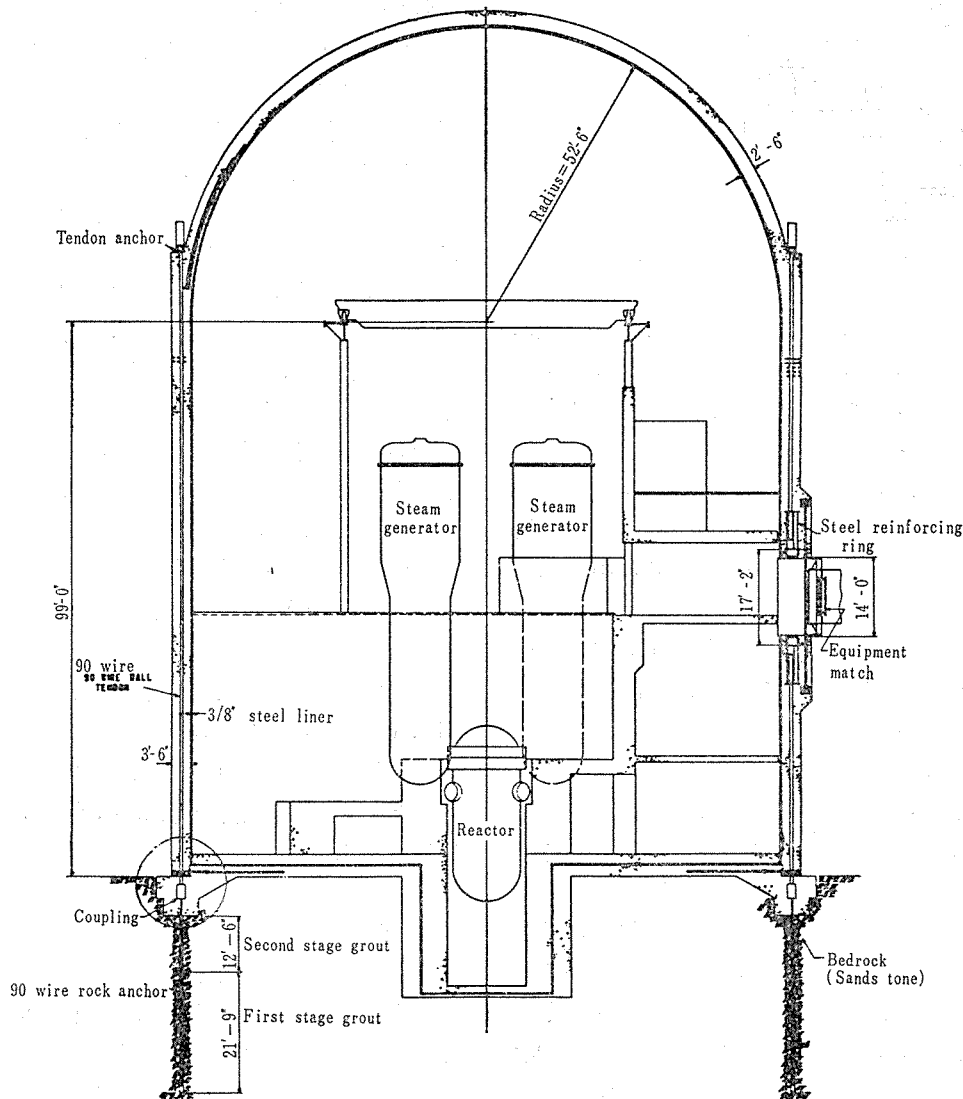


Fig. 2 R.E. GINNA Power Plant, PWR, 490 MW., Containment

た。最初のプラントは、プレストレッシングが用いられたもので、Robert E. Ginna (ニューヨーク 490 MW。(Fig. 2) であり、1970年にスタートした。

Ice condenser 付格納容器は Fig. 3 (Donald C. Cook プラント, ミシガン州, 1060 MW<sub>e</sub>) に示されている。LOCA 発生後、蒸気は、ホウ酸塩入りの氷のベッドの

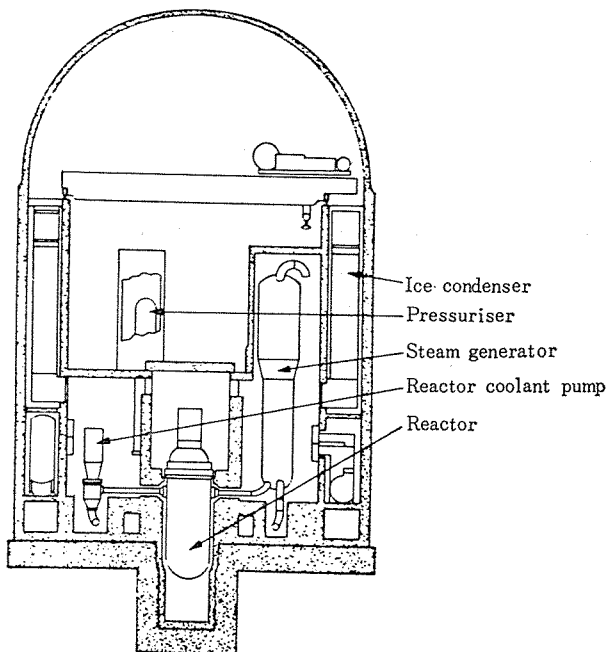


Fig. 3 Ice Condenser Containment PWR

中を通され、完全に凝縮する。炉心崩壊熱からの解放エネルギーは、残っている氷と散水システムとによって吸収される。Ice condenser は格納容器の容積を 40% 減少させる手段である。

格納容器の寸法を減じるもう一つの方法は、Ice condenser のように効果的ではないが、Sub-atmosphere 格納容器である。そこでは、絶対圧力は約 0.07 MPa に保持される。

PC PWR 格納容器は、フランス (Fig. 1), スウェーデン, ベルギーおよびスペインにおいても用いられた。

#### 4.2.3 沸騰水型炉 (BWR)

BWR はすべて、圧力抑制システム (PS) 付で設計される。その格納容器は、二つの主要コンパートメントに分かれている。Dry-well と Wet-well とである。LOCA の後、Dry-well 中の空気および蒸気は、多数の降下管を通して Wet-well 中のプールに強制的に送られ、そこで凝縮する。散水システムも用意されている。これらによって、一般に緊急システムとともに原子力建屋内にある格納容器は、非常に小さく、同じような Dry containment の約 1/6 とすることが可能となる。

Mark II デザインの General Electric の格納容器の

いくつかは、PC で造られた (Fig. 4)。スカンジナビアにおいては、ASEA-ATOM デザイン (Fig. 5) のプラント 11 が建設中、もしくはすでに建設されている。ドイツでは、双子の 1244 MW<sub>e</sub> の KWV プラントが現在 Gundremmingen で建設中である。そのレイアウトは ASEM-ATOM のものと同様である。

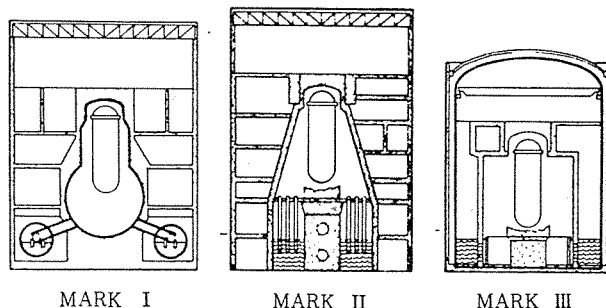


Fig. 4 General Electric BWR P.S. Containment Concepts

#### 4.2.4 その他の原子炉システム

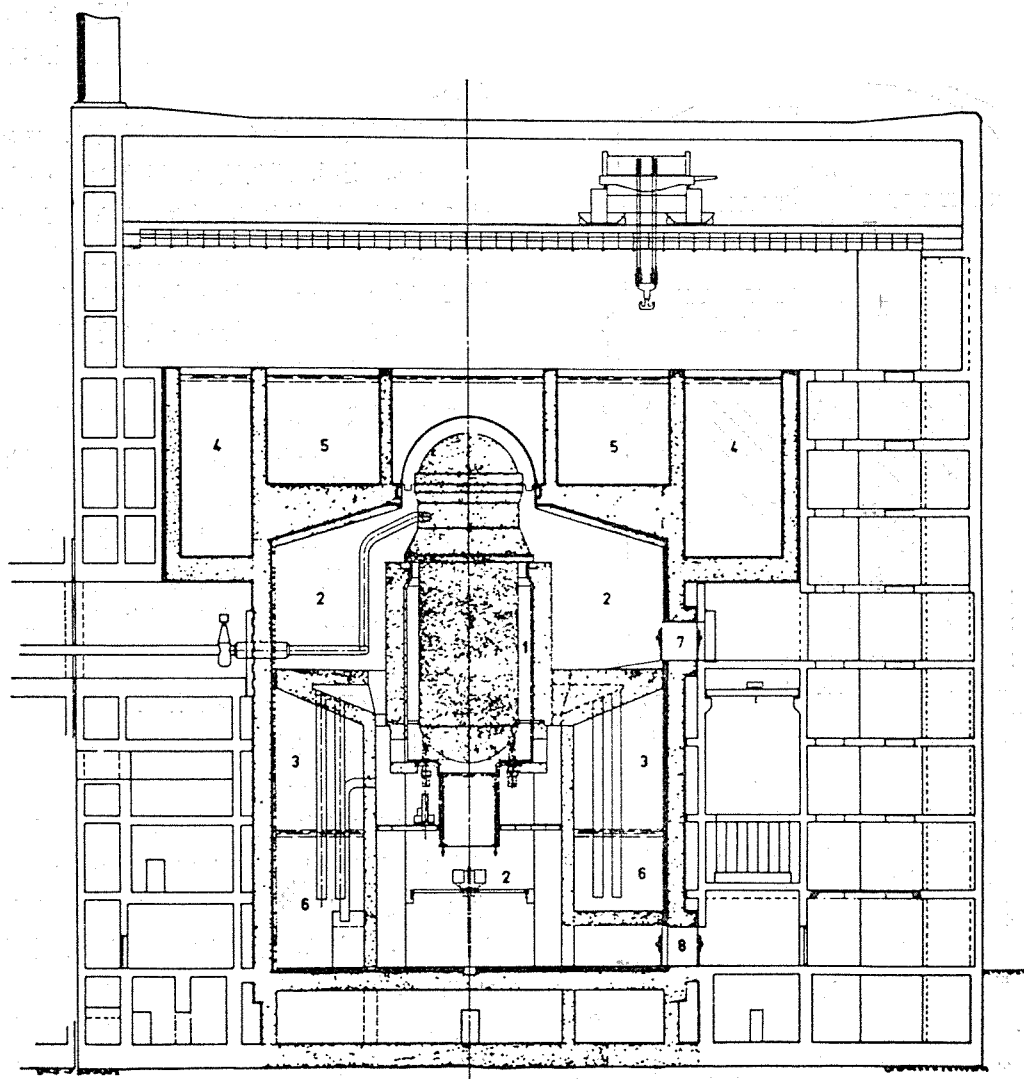
CANDU (カナダ) の重水炉が、現在、カナダ、インド、パキスタンおよび韓国に建設中である。それらは、圧力容器の代わりに、圧力管を用い、減速剤と冷却剤との両方に重水を用いている。発電所のレイアウトの特徴は通常四つのコンクリート製原子力建屋が一つの真空建屋に連結されていることである。真空建屋はコンクリート製で、0.007 MPa の絶対圧力に保たれている。原子力建屋の一つに重大事故が起ると、真空建屋へのダクトのバルブが開き、原子力建屋の圧力の一部が解放される。計画中の英国の蒸気発電用重水炉 (SGHWR) は、CANDU と類似のものであるが、ダイレクトサイクル中の冷却剤に軽沸騰水を用いている。その原子炉は格納容器をもっている。

一つの高圧炉が Schmehausen (ドイツ) に建設中である。1160 MW<sub>e</sub> のユニットが米国で設計されている。これらはすべて、PC 圧力容器および円筒壁とドーム屋根のコンクリート格納容器をもっている。その原理は Fig. 6 に示されている。

液体金属高速増殖炉は、コンクリートまたは鋼の格納容器をもつ。その設計圧力は、0.05~0.15 MPa と低く、したがって、コンクリートはプレストレスされていない。

#### 4.2.5 クラス 9 事故に対する格納容器の設計

前述のように、格納容器は、炉心の溶融に至る事故 (クラス 9 の事故) に対しては設計されていない。そのような事故を軽減するため、例えば、プラントを地下に設置するなど、各種の考え方が議論されてきた。炉心溶融状態を対象として設計され、コアキャッチャーをもつ



- |                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| 1. Reactor              | 5. Reactor internals pool |
| 2. Containment dry well | 6. Condensing pool        |
| 3. Containment wet well | 7. Upper lock             |
| 4. Fuel storage pool    | 8. Lower lock             |

Fig. 5 BWR Reactor Building ASE-ATOM 1060 MW.

Passive containment (Fig. 7) が提案されている。この構造物は、事故に伴う非常に高い圧力（設計圧力 1.3 MPa）と温度とに耐えるものである。このシステムによる安全性の増加に加えて、このシステムに要する余分のコストと、緊急炉心冷却システムおよびその補助システムのコスト軽減とをバランスするという考え方をとっている。しかし、この考え方には、解決すべき多くの問題が残されている。

#### 4.3 コンクリート格納容器のコードおよびデザインプラクティス

##### 4.3.1 現存のコード

コンクリート格納容器に関する完全なコードとしては、現在、コンクリート原子力容器および格納容器に関する 1975 年の ASME-ACI コードが唯一のものである。

る。

西独では、Gundremmingen II および HTR Schmehausen において、PC 格納容器に関する設計示方書が定められた。

フランスでは、PWR 格納容器の二つの特別の設計に対して、示方書が用意された。

日本では、1975年8月以来、コンクリート格納容器に関する技術規準の委員会が活動しており、その一部が最近公表された。

ISO では、原子力エネルギーに関する技術委員会 ISO/TC 85 に作業グループ WG 3 があり、原子炉用格納容器に関する国際標準を目指している。コンクリート格納容器に関しては、設計についてのドラフトが公表されている。

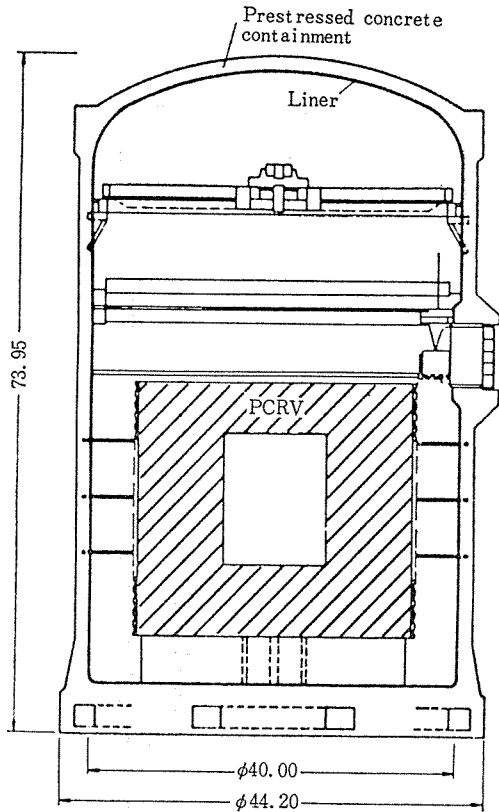


Fig. 6 HTR Schmehausen 300 MW. Prestressed Concrete Containment and PCRV

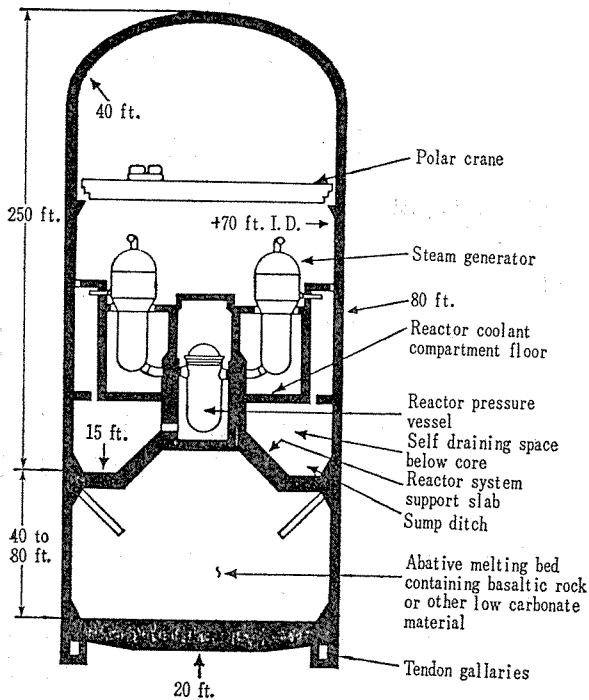


Fig. 7 Concept of Passive Concrete Containment to Withstand Core Melt for a 1100 MW. LWR System

4.3.2 デザインプラクティス

格納容器の各種の設計コードは、本質的には、各種の荷重の組合せに対する許容応力度に基づいている。した

がって、荷重に対する係数は、最近のモデルコードにおける限界状態設計法の部分安全係数と比べることはできない。

使用限界状態、ライナーの不透過性、コンクリートのひびわれ、変形、耐久性は、係数のかかった荷重の組合せに対する許容応力度に置きかえられている。PC 構造物では、メンブレインの引張応力を生じさせないことを規定しているコードが見うけられる。しかし、プレストレスされていない構造物が一般に受け入れられるとすれば、この条件を規定するのは論理的でない。

終局限界状態は使用限界状態ほど興味を惹かない。しかし、コンクリート格納容器がぜい性破壊とならないことを論証するのは必要である。

確率論的な解析方法を用いる設計原理が導入されると、原子炉格納容器の安全性を原子力プラントの他の安全システムと同様の用語で表現する可能性が開かれるであろう。

4.4 プレストレッシング作業

4.4.1 プレストレストコンクリートあるいは鉄筋コンクリート

格納容器の基本要件は、ガスの漏洩防止である。ガス漏洩に対するバリアーとしてライナーをもてば、その要件は PC および鉄筋コンクリートの両方ともによって果たされる。PC は、通常メンブレインに引張応力を発生せず、設計圧力でひびわれが生じないので、DBA 状態における漏洩に対する安全性が大きいのは自然である。プレストレッシングは、地震時におけるせん断力に対する抵抗力を改善し、斜め引張鉄筋を不要にできる。

プレストレスト構造物は、高い設計圧力の場合、機能的に優れているほかに、通常経済的である。したがって、高い設計圧力に対して、多くのノンプレストレストコンクリート構造が米国で見受けられるのは驚くべきことである。その一つの説明は、米国がプレストレッシングシステムを複雑とし、高価とするアンボンドの緊張材を好むことであろう。

カナダの格納容器のように、設計圧力が非常に低い場合、飛行機の衝突の可能性から、余分のコンクリート断面と鉄筋とが必要な場合などには、鉄筋コンクリート構造が PC よりも好まれるであろう。

4.4.2 プレストレッシングの配置

円周方向の緊張材は、2個またはそれ以上のバットレスに定着できる (Fig. 8 a)。バットレスの数は少なくなる傾向がある<sup>5)</sup>。ASEA-ATOM プラントの初期の設計では、4個のバットレスが用いられた。後の大規模のプラント用格納容器では、わずか2個のバットレスが定着用として用いられた。緊張材はほとんど 400° を囲ん



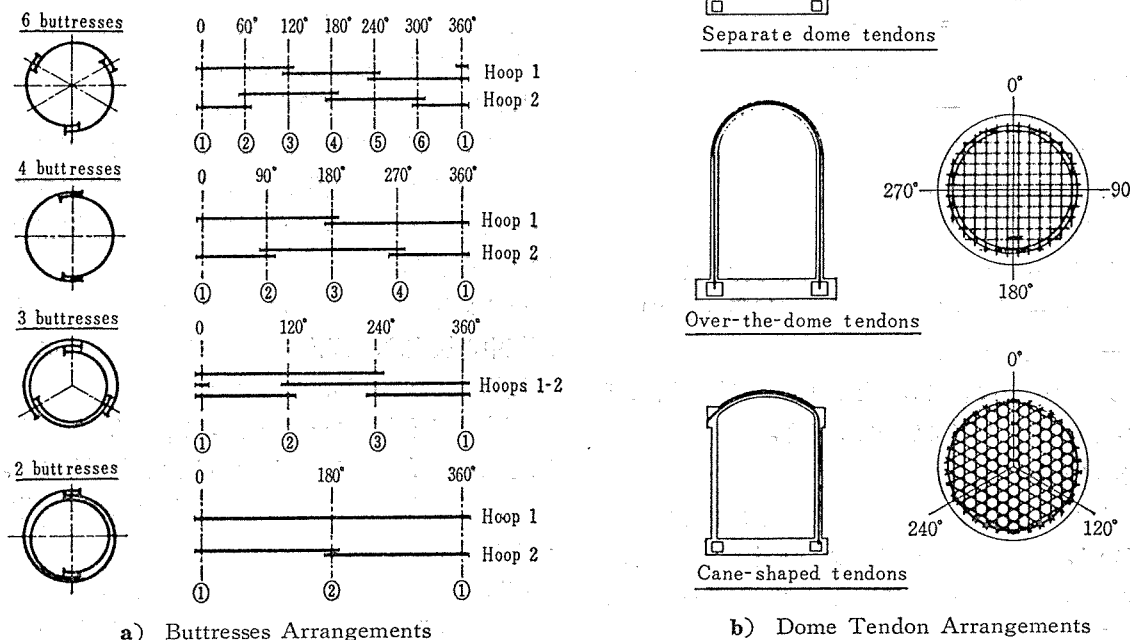


Fig. 8 Arrangement of Prestressing Tendons

でいる。

PWR 格納容器では、鉛直方向とドームのプレストレッシングについて3種類の方法が用いられてきた<sup>6)</sup>(Fig. 8 b)。最初のは、120°に分けられたドーム用緊張材をもつもので、最も一般的であり、かつ多分最もプラクティカルなものであろう。

コンクリート格納容器のプレストレッシングには、すべて、ポストテンション方式が採用され、鋼線または鋼より線の緊張材が主として金属製シースに入れられて用いられてきた。緊張材の引張力は、2000 kN と 10000 kN との間であった。経済性と工期の理由から、大寸法の緊張材が用いられる傾向にある。

Wire-winding によるプレストレッシングは、原理的には可能であるが、実際には用いられなかった。市場に普及していた器械装置は、格納容器用としては大きすぎるか小さすぎるものであった。さらに、防錆の問題とともに、大きな開口部のまわりの配置の問題がある。

4.4.3 ボンドまたはアンボンド

緊張材の防錆は以下の3システムによって行われてきた。

(1) Bonded tendon: ダクトはセメントグラウトを注入される。

(2) Unbonded tendon: ダクトはグリースで満たされる。

(3) Unbonded tendon: ダクトは乾燥空気を送られる。

米国ではシステム(1)および(2)が用いられてきた。ただし、Unbonded tendon の方が多い。ヨーロッパでは、Bonded tendon が多く用いられてきた。スウェーデンでは、システム(2)と(3)の Unbonded tendon がいくつかのケースで用いられた。

Bonded tendon と Unbonded tendon の構造物の性状における相違は、参考文献 2) に述べられている。要約すると、Bonded tendon は、ひびわれが生ずると多くの小さなひびわれに分散する能力があることが優れており、第2に、荷重による応力は、端部定着に全く無関係であることである。

グリースの不便さは、空気通風のシステム(3)では除かれている。しかし、このシステムは複雑であり、運転中永久に通風しなければならない。

原子力以外の分野では、PC 緊張材の防錆方法としては、セメントグラウト注入がほとんど唯一の実際的方法である。適切に行われたグラウトは、錆に対して信頼できる保護となることが従来の一般的な経験である。

4.4.4 許容プレストレス

プレストレッシング作業終了時の許容プレストレスは、国によって相当に異なっている。

許容応力の定義と値についての国際的な統一が望まれ

る。多くの国において、原子力圧力容器に対する許容プレストレスとして、 $0.70 f_{pu}$  の値が用いられており、プレストレスコンクリート格納容器に対して、国際的に用いられる値として推奨できるように思われる。

#### 4.4.5 注入作業

長い鉛直緊張材へのグウト注入は特別の問題がある。特に、鋼より線が用いられたところでは、ブリージングが著しいことが観察されている。これは、より線の線の間のフィルター効果によるものと信じられている。これに対して、以下の対策が講じられた。

- (1) 特殊混和剤の使用
- (2) 上部 2~3m の注入を第 2 段階で行うこと
- (3) アンカープレートの孔に結んだ延長パイプとジョーゴを設けること

スカンジナビアでは方法(2)と(3)とが格納容器に適用された。方法(3)が望ましいであろう。

#### 4.5 ライナー

鋼製ライナーが、通常、内部クラディングとして用いられている。スカンジナビアでは、鋼製ライナーを、約 250mm のコンクリートかぶり、コンクリート中に埋め込んでいる。これは、ミサイル衝撃の保護として役立つ。

フランスの提案 (Fig. 1 b) では、プレストレスされた内側のシェルにはライナーがない。密実なコンクリートは十分な気密性をもっている。しかし、プレストレスコンクリート構造物でも、乾燥収縮その他によるひびわれが生じやすく、それを通しての漏洩が著しくなるおそれがある。その場合、漏洩は数倍のオーダーとなるかもしれない。

プラスチックライナーが CANDU 原子炉で用いられた。新しいプラスチック材料が鋼製ライナーの替りに受け入れられれば、非常な節約となる。

#### 4.6 PC 緊張材の運転中における監視

##### 4.6.1 グラウトされていない緊張材

グラウトされていない緊張材を用いることの正当性は主として、緊張材を運転中に直接検査できることであった。さらに、もし検査で欠陥が見つかり、緊張材を交換できるのである。グラウトされていない緊張材を PC 格納容器に対してもっぱら用いてきた米国では、グラウトされていない緊張材の運転中の検査が、NRC 規則ガイド 1.35 “プレストレスコンクリート格納容器構造物における緊張材の運転中の検査” に従って行われている。それには下記が含まれている。

(1) プレストレスの損失をモニターするために、特定の緊張材を定期的にとりだすかまたは同等の試験を行わなければならない。

(2) 試験のためにとりだされた緊張材の材料の物理的性質を検査しなければならない。

(3) (1) および (2) に従って検査されたすべての緊張材の端部定着装置を、目視によって検査しなければならない。

このガイドには、検査されるべき緊張材の数および試験方法が詳細に規定されている。

##### 4.6.2 セメントグラウトされた緊張材

セメントグラウトされた緊張材の最大の利点は、緊張材の防錆にとって最善であり、格納容器の構造性状が良好となることである。一方、緊張材を直接検査する可能性はなくなる。

セメントグラウトされた緊張材をもつ PC 格納容器の運転中の検査は、以下のような測定と観察とによって、間接的に行わなければならない。

- (1) 貫通孔、コーナー等に注意を払って、定期的な圧力試験を行う際に、ひびわれの観察を行うこと。
- (2) 格納容器の建設時に造られたはり供試体中のケーブルの検査。
- (3) 定期的な圧力試験時の変形測定。
- (4) Glöztz タイプまたはそれに類似の圧力計による応力の直接測定。

ひずみの測定は、長期間の観測には不相当と思われる。圧力計は満足に機能することが経験されている。

NRC 規則ガイド 1.90 “グラウトされた緊張材をもつプレストレスコンクリート格納容器構造物の運転中の検査” は、1977年 8 月に改訂された。新しい版では、次の事項が運転中の検査プログラムとして推奨されている。

- (1) グラウトされていない試験用緊張材の力のモニタリング
- (2) グラウトされた緊張材のパフォーマンスの以下によるモニタリング
  - a. プレストレスレベルのモニタリングまたは
  - b. 圧力下の変形のモニタリング
- (3) 目視検査

このように、プレストレスのレベルをモニタリングする方法として、二つの方法が与えられているのである。前回の非常に保守的な条項を削除するとともに、新版はプレストレスコンクリート技術に対する態度が改善されているのである。

#### 参 考 文 献

- 1) International Conference on Experience in the Design Construction and Operation of Prestressed Concrete Pressure Vessels, and Containments for Nuclear Reactors. University of York, England 8-12 Sept. 1975. The Institution of Mechanical Engi-

- neers. 64 papers.
- 2) ERIKSSON, K: "The Use of Prestressed Concrete in Nuclear Plant Construction in Scandinavia", Seminar on Design and Construction of Nuclear Power Plants. FIP VII Congress, New York, 1974.
  - 3) WEEMS, S.J., LYMAN, W.G., HAGA, P.B.: "Ice Condenser Reactor Containment System". Nuclear Engineering International, Jan. 1970.
  - 4) STEVENSON, J.D.: "Preliminary Design of a Containment to Withstand Core Melt for a 1100 MW. LWR System". 4th SMiRT Conference, San Francisco. 1977, Paper J 1/1.
  - 5) Prestressing in Nuclear Reactor Construction. VSL, Losinger, Oct. 1975.
  - 6) HALLINGAN, D.W.: "Prestressed Concrete Nuclear Plant Containment Structures". PCI Journal. Sept.-Oct. 1976.
  - 7) DUMAS, F.: "Enquête internationale sur la durabilité des ouvrages pré ou post-contraints et sur les incidents ou accidents qui auraient pu survenir en service à certains d'entre eux". FIP Special Report No. 8.

## ◀刊行物案内▶

## P C く い 基 礎 の 最 近 の 進 歩

—P C く い の 正 し い 使 い 方—

体 裁: A 4 判 246 ページ  
 定 価: 2 000 円 (会員特価 1 800 円) 送料 600 円  
 内 容: 1) P C く い, 2) P C く い 基 礎 の 設 計, 3) P C く い の 施 工, 4) 超 高 強 度 コ ン ク リ  
 ー ト く い, 超 大 径 く い  
 お申込みは代金を添え, (社)プレストレストコンクリート技術協会へ

## ◀刊行物案内▶

## P C 定 着 工 法 (16 工 法)

会誌 Vol. 19-No. 3 が品切れとなり, これに代わるべく, 内容も一部改訂し, 本書が発刊となりました。

現在, わが国で使用されている P C 定着工法 (16 工法) について, その概要, 定着具, 緊張方法, その他使用すべき鋼材およびシース, ジャッキ, 工法の特長や注意事項等について, わかり易く説明してあります。

本書は学校・官庁始めコンサルタント, 施工会社等の新入社員教材用としてご利用頂けるものと確信いたしております。

ご希望の方は代金を添えて, ハガキ (なるべく) または 電話で (社)プレストレストコンクリート技術協会へお申し込み下さい。

体 裁: B 5 判 71 頁  
 定 価: 1 800 円 (会員特価 1 500 円)  
 送 料: 200 円  
 送 金: 振替口座番号 東京 7-62774 または 三井銀行銀座支店 (普通預金) 920-790