

JAERI-M
88-056

改良船用炉の試設計の評価(7)
—遮蔽性能(II);遮蔽の最適化に関する調査—

1988年3月

竹内 清*・田中 俊一・伊藤 泰義・横村 武宣

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日青工業株式会社

改良船用炉の試設計の評価(7)

—遮蔽性能(Ⅱ)；遮蔽の最適化に関する調査—

日本原子力研究所原子力船研究開発室

竹内 清*・田中 俊一⁺・伊藤 泰義・横村 武宣

(1988年2月3日受理)

原子炉の遮蔽の最適化を行うためには、最適化の対象を明確にすることが大切である。船用炉は重量やスペースの制限、居住空間が原子炉と隣接しているという特殊事情から、遮蔽重量の軽減化と従事者(乗組員)の放射線被曝の低減化を目的とした遮蔽の最適化が原子炉プラント設計上極めて重要な課題となる。

本研究ではまず、試設計の3炉型について遮蔽重量の軽量化と従事者の被曝線量の低減化の観点からそれぞれの遮蔽設計を含む原子炉プラント全体についての評価検討を行った。また、全体のプラント重量に大きな影響を及ぼす2次遮蔽の重量の軽減化を図る方策を探るため、想定事故時の線源条件と事故時のみ遮蔽を強化することの出来る2次遮蔽設計の可能性の検討を行った。

本研究は「運輸省船舶技術研究所への委託調査」「船用原子炉の遮蔽の最適化に関する調査」を基にまとめたものである。

日本原子力研究所：〒105 東京都港区虎ノ門一丁目15-16

+ 東海研究所原子炉工学部

* 運輸省船舶技術研究所

Assessment of Preliminary Design of Advanced Marine Reactor (7)

- Shielding (II); A study on the Optimum Shielding Design -

Kiyoshi TAKEUCHI^{*}, Shunichi TANAKA⁺, Yasuyoshi ITOH
and Takeyoshi YOKOMURA

Office of Nuclear Ship Research and Development
Japan Atomic Energy Research Institute
Tranomom, Minato-ku, Tokyo

(Received February 3, 1988)

It is essential to define what should be optimized for the purpose of shielding optimization of a reactor.

In general, a marine reactor should demand the limitation of its weight and space as well as setting up adjacent room for crews to itself. As a result, it is indispensable for the design of the marine reactor to optimize its shield so as to reduce its shield weight and also the radiation dose to crews.

The present study aims at evaluation on the reduction of both the shield weight and the radiation dose to crews in each shielding design for each marine reactor three proposed reactors.

A further study is made to find a means to reduction of the weight of a secondary shield occupying large percent of the total weight of the marine reactor. In particular, the discussion is focused on the possibility of new design of so effective secondary shielding as to protect radiations in case of a reactor accident.

Keywords: Marine Reactor, Shielding, Optimization

This study was arranged based on the consignment research to the Ship Research Institute, Ministry of Transport, titled "Research as for a optimization for shielding of marine reactor."

+ Department Reactor Engineering, Tokai Research Establishment

* Ship Research Institute Tokai Branch

目 次

1. はじめに	1
2. 船用原子炉の遮蔽の最適化の考え方	2
3. 各炉型に対する最適遮蔽の検討	3
3.1 通常運転時	3
3.1.1 半一体型炉	3
3.1.2 一体型炉	4
3.1.3 自己加圧一体型炉	5
3.2 炉停止時	6
3.2.1 半一体型炉	7
3.2.2 一体型炉	8
3.2.3 自己加圧一体型炉	8
3.3 事故時	8
4. 結論及び今後の課題	11
4.1 通常運転時	11
4.2 炉停止時	12
4.3 事故時	13
参考文献	14

Contents

1. Introduction	1
2. Consideration as for Optimization of Shielding for the Advanced Marine Reactor	2
3. Study for Optimized Shielding for each type Reactor	3
3.1 at Normal Operation	3
3.1.1 Semi-Integrated type Reactor	3
3.1.2 Integrated type Reactor	4
3.1.3 Self-pressurized Integrated type Reactor	5
3.2 at Reactor Shut-down	6
3.2.1 Semi-Integrated type Reactor	7
3.2.2 Integrated type Reactor	8
3.2.3 Self-pressurized Integrated type Reactor	8
3.3 at Accident	8
4. Conclusion and Subject to be solved	11
4.1 at Normal Operation	11
4.2 at Reactor Shut-down	12
4.3 at Accident	13
References	14

1. はじめに

原子力船研究開発室は、昭和58年度から昭和60年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。

これは小型・軽量で安全性、信頼性、経済性に優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることをねらいとし、現状技術に基づく複数の船用炉型式について、同一仕様にもとづき設計研究を行い、それらの特徴、性能を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉、および自己加圧一体型（加圧水）炉の3炉型で、それぞれわが国固有の技術およびフランス、西ドイツの提携技術を基盤としている。

昭和61年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるに当たり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し、合わせて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行った。

- (1) 試設計炉
- (2) 燃料特性 (I) 丸棒燃料
 (II) キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能 (I) 遮蔽設計の妥当性
 (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

さらに、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏えた試設計の総合評価を行ない、用途に適合する炉型を明らかにするとともに、次のステップで実施する設計研究等の目標性能、研究開発の進め方等を明らかにする。

本報告書は、これら一連の設計評価研究(7)の遮蔽性能のうち(II)の遮蔽の最適化についての評価結果である。

本研究の結果、従事者の放射線被曝量低減化と遮蔽重量の軽減化を図る上で最も適した炉は一体型炉であることが明らかになった。また、最適遮蔽に関する今後の研究課題の1つとして、2次遮蔽の大巾な軽量化を図る方策が提案された。

2. 船用原子炉の遮蔽の最適化の考え方

通常運転時及び炉停止時における従業員の放射線被曝低減を目的として遮蔽の最適化を図る対象は一次遮蔽に対してである。さらに船用炉の場合原子炉の設置されるスペースをできる限り小さくすることが肝要であるので、原子炉を含めた一次遮蔽全体のスペースを最適化することも重要である。したがって、一次遮蔽の最適化は従業員の被曝低減化とスペースの最小化を目的として行われる。

一方、二次遮蔽は遮蔽の全重量のかかなりの割合を占めるので、その最適化は重量を最小にすることを目的として行われることになる。

今回の調査の対象となった半一体型炉、一体型炉及び自己加圧一体型炉の三炉型の遮蔽設計は炉運転時と仮想事故時に対して行われており、炉停止時についての線量評価はされてないので、「むつ」遮蔽設計の例を参考にして炉停止時の被曝線量について推定を行った。なお、炉運転中及び炉停止時における作業員の格納容器内立入りの際の被曝低減化のためには格納容器内の線量率をこれまでの遮蔽設計で目的とした設計目標値よりもおよそ一桁程度下げる必要がある。このために一次遮蔽や機器遮蔽及び小口径貫通孔補償遮蔽などに対して大雑把でなく、ていねいに設計計算を行う必要が出てくる。また、このような低い値の設計目標値を設定すれば二次遮蔽の設計は単に仮想事故時に対してのみ行えばよい。このことは遮蔽の最適化を実施する上で一次及び二次遮蔽についてお互いに独立に行える利点が生ずるので好都合である。

遮蔽の最適化は遮蔽体に対してのみ考えればよいわけではなく、むしろ船用炉の炉型に大幅に依存していることに注目すべきである。したがって、遮蔽の最適化に適した炉型というのが逆に選び出されることにもなる。

3. 各炉型に対する最適遮蔽の検討

3.1 通常運転時

炉運転中における点検・修理のため格納容器内に立入る作業員の被曝低減化を図るために、一次遮蔽周辺の線量率に対する設計目標値を

中性子 20 mrem/h 以下

ガンマ線 100 mrem/h 以下

としたい。現在採用されている設計目標値はおよそ中性子が 40 mrem/h 以下でガンマ線が 1 rem/h 以下程度となっている。この線量率では従業員の被曝低減化は困難である。中性子の線量率の方が厳しくなっているのは、一次遮蔽体外側でのガンマ線の線量がほとんど中性子に起因して構造材や一次遮蔽体内で発生する二次ガンマ線の線量であるからである。

特に注意を要するのは蒸気発生器への作業員の接近で、 ^{16}N からのガンマ線による被曝が問題となり、被曝低減のための機器遮蔽を積極的に実施することが肝要である。

なお、局所的なピーク線量率が上記の目標値を多少超えても許容されるであろう。例えば、緊急用注水管貫通孔や核計装用中性子検出器案内管などの小径の貫通孔のある個所では局所的なストリーミングのピーク線量率が発生しやすい。この場合、補償遮蔽によりある程度線量を減衰させ得るが、それでも上記線量率を超える恐れが出る場合が考えられる。この局所的なピーク線量発生周辺での作業は特に注意して行えば被曝低減上大きな問題にはならないであろう。

上記の線量率の設計目標値が満足されるように一次遮蔽が設計できれば、二次遮蔽は仮想事故時の遮蔽を目的に設計を行えばよいので全体の遮蔽設計の考え方が簡単になる。

3.1.1 半一体型炉 (図-1 及び 2 参照)

一次遮蔽は上部、中間及び下部の 3 分割構造になっており、燃料交換や ISI 時には上部及び中間遮蔽体を分割移動させることになっている。そのために上部及び中間遮蔽体は分割移動が容易に行えるような構成にならざるを得ない。しかし、下部遮蔽体は分割移動が容易でなくてもよいのでコンクリート製である必要はない。中性子及び二次ガンマ線を効果的に減衰させるにはコンクリートよりも鉄-水多重層遮蔽体の方がよい。このことは 59 年度報告書 (文献 1) における半一体型炉一次遮蔽内線量率分布 (図 1.2-7, 文献 1) と「むつ」詳細遮蔽解析 (文献 2) における炉心中心高さでの半径方向一次遮蔽内線量率分布とを比較すれば明らかである。

両者の比較を図-3 に示す。同図の上端に半一体型炉の下部一次遮蔽の構成寸法を、下端に「むつ」下部一次遮蔽の構成寸法を示す。半一体型炉の場合の中性子線量率を実線で、ガンマ線の線量率を三点鎖線で示し、一方「むつ」の場合の中性子及びガンマ線の線量率をそれぞれ一点鎖線及び点線で示してある。数値は絶対値であるので「むつ」の出力の 36 MW と今回の 100 MW での差が一次遮蔽体入射線量率の差となって示されている。そこで「むつ」の場合の値を 3 倍して両者を較べてみると、中性子の線量率は「むつ」遮蔽の最外層である半径 113 cm の位置で

1000 / 120 = 8.3 と半一体型炉の遮蔽の方が 8 倍も大きくなる。一方、ガンマ線の線量率は同じ位置で 6500 / 150 = 43.3 と半一体型炉の遮蔽の方が 43 倍も大きな値になっている。「むつ」遮蔽の構成で特に良いのは最外遮蔽層に鉛を使用している点で、このためにガンマ線の線量を急激に減衰させている。図-3 からわかるように半一体型炉の遮蔽厚は 144 cm であるのに「むつ」遮蔽は 113 cm とかなり薄い。

以上の議論から、一次遮蔽のうちで炉心周囲を担当する下部遮蔽は鉄-水多重層構成で外側遮蔽に鉛を使用するのが最適遮蔽である。また、中間及び上部遮蔽についても外側遮蔽に鉛を使用することが設計目標値を満足する最適遮蔽といえよう。

下部遮蔽と中間遮蔽との間には蒸気発生器があるので（図-4 参照）、この部分の遮蔽性能が落ちる可能性が大である。下部及び中間遮蔽の両方に密着させて蒸気発生器の機器遮蔽が設けられるが、炉心側からは中性子がストリーミングしてくる上に、蒸気発生器からは ^{16}N からのガンマ線が強力な線源となるので、鉛遮蔽層で機器遮蔽を構成するのでは不十分であり、中性子とガンマ線の効果的な遮蔽を考える必要がある。しかも、これらの放射線を設計目標値以下に抑えるにはかなり複雑な最適遮蔽となることが予想される。さらに蒸気発生器の上部には気水分離器や冷却水ポンプが接続されているので（図-1 参照）、これらの機器で発生する ^{16}N ガンマ線に対する遮蔽を設ける必要があり、これは鉛遮蔽でよいと思われる。

圧力容器上部の遮蔽の問題は「むつ」の場合と同様に圧力容器と一次遮蔽体との間の円環状間隙部（図-4 参照）中性子ストリーミングであろう。これを効果的に減衰させるかどうかは上部遮蔽の厚さの決定に大きな影響を及ぼす。しかも、中性子ストリーミングは必ず二次ガンマ線の線源発生の原因でもあるから、上部遮蔽は中性子と二次ガンマ線の効果的減衰をもたらす最適遮蔽を考える必要がある。また、中性子検出器案内管（図-5 参照）が垂直に上部遮蔽体から下部遮蔽体まで貫通しているので、ここからの中性子ストリーミング及び二次ガンマ線のストリーミングが問題となり、補償遮蔽の最適化が必要になる。

圧力容器の下方向の遮蔽については、下部遮蔽がそのまま船底まで設けられる設計であれば特に問題はないと考えられる（図-4 の○印の遮蔽体の有用性）。

実際の設計には高レベルガンマ線源となる各種の機器が、二次遮蔽体の内部か、格納容器内に配置されるが、これらの線源となる機器の配置とその機器遮蔽が最適遮蔽となるべく考慮されねばならない。炉運転中及び停止時の保守点検や修理のために作業員が格納容器内に立入ることを考えると、現設計における格納容器の半径はかなり大きくとらなくてはならないことが予想される。半一体型炉の遮蔽は「むつ」の分離型炉の遮蔽（図-6 参照）と基本的には同じであり、遮蔽構成及び構造は複雑であり最適遮蔽により効果的な遮蔽にもって行きにくい炉型であるといえる。

初めに示した新たな設計目標線量値を満足する一次遮蔽の重量は本設計による重量よりも増加する見込みである。しかし、本設計による重量の 360 t（表-1 参照）が仮りに 2 割増加しても 432 t であり 72 t の増加である。これは二次遮蔽の最適化で十分に取り戻せる重量増加である。

3.1.2 一体型炉（図-7 及び 8 参照）

一次遮蔽は炉心の側部の遮蔽体及びその上部の上部遮蔽体から成る。側部遮蔽体は鉄-水多重

層で構成され図-9に示すように中性子及びガンマ線は減衰する。この計算値を正とすれば最外層の鉄遮蔽体をもう5 cm程度厚くすれば初めに設定した設計目標値を十分に満足するので最適遮蔽に近いのかも知れない。今後試みるとすれば鉄層の代わりに鉛層にしたらどのくらい重量が軽減できるかどうかである。

上部遮蔽体は ^{16}N ガンマ線を減衰させるためであるから鉛層も鉄層の中に入れた方がよいかも知れない。また、圧力容器と一次遮蔽体との間の円環状間隙をストリーミングして上昇する中性子の遮蔽も考慮に入れなければならない。そうすると現設計のように10 cm~15 cm厚の鉄板遮蔽で十分かどうか検討する必要がある。蒸気発生器の上部の蓋遮蔽は62.5 cm厚と厚い鉄板なので貫通孔のない状態であれば十分ガンマ線の遮蔽に効果的である。現設計計算の炉心上方向へのガンマ線減衰はこの鉄蓋部下のライザー部でおよそ 10^4 mrem/hとなっているが、図-9からわかるように鉄層20 cmでおよそ2桁減衰している。このガンマ線に圧力容器内の水中で発生する ^{16}N ガンマ線が加わるが、 ^{16}N ガンマ線の減衰も線量単位でみると図-10にPALLAS計算値が示されているように鉄板厚さ9 cmあたりでおよそ1桁減衰している。この計算は ^{16}N の平面等方分布放射のガンマ線源を仮定し平板遮蔽体15 cm中の減衰率である。鉛の方がかなり急激な減衰を示すのでより効果的な遮蔽ができる。この減衰率は遮蔽中で発生する制動X線の線量も考慮に入れてある。鉄製蓋部での問題は二次系配管貫通孔が2個設けられており、特に遮蔽が施されていない点にある。かなりのガンマ線ストリーミングが発生し容器上方周辺の線量率を高めるのではないかとと思われる。

現設計による一次遮蔽の重量は約430 tであるが(表-1参照)、多少の増加により初めに設定した設計目標値を満足できるものと思われる。一体型炉は遮蔽の点からは極めて理想的な体型であり、遮蔽の最適化が最も行いやすい炉型である。

3.1.3 自己加圧一体型炉(図-11及び12参照)

この原子炉の一次遮蔽の特徴はウェットウェル水の活用である。したがって、このウェットウェル水を通常時の一次遮蔽の一部として活用しながら一次遮蔽全体を考えることになる。報告書には西ドイツの安全基準を前提としたA設計方式(図-13参照)とわが国の発電炉用安全基準を適用したC設計方式が提案されている。そして結論として設計方式C(図-12参照)を採用せざるを得ないとしているが、C方式の遮蔽重量は表-1からわかるように他の二炉型に比べて大き過ぎる。したがって、遮蔽の最適化が最も効果的に行える型炉なのかも知れない。わが国の安全基準を適用するとしてもA設計方式を全て捨て去る必要はない。A方式の良い点を取り入れてC方式で遮蔽重量が増加した欠点を補うように設計を行うべきである。

i) ウェットウェル部

A方式が鉄板50 cm厚でC方式が15 cm厚になっているが、両方式の炉心横方向の減衰曲線を59年度報告書から取り図-14及び15、及び図-16と17に示すが、ウェットウェル水背後の中性子については 10^{-8} mrem/h程度以下と極めて小さい。またガンマ線についてはC方式の40 mrem/hが最大となっている。したがって、鉄板は20 cm厚程度でよいのではないかと。次にウェットウェル水の厚さがA方式では337 cmか377 cmの部分もあり大変厚いのと比べ、C方式では周囲全体が272 cmと少し軽量化されている。これはC方式の272 cmあるいはそれ以下で十分であろう。

このように鉄—水多重層を決定すれば一次遮蔽体透過後の線量はガンマ線のおよそ 10mrem/h程度が最大となり十分に設計目標値を満足する。また、下部遮蔽については、鉄板 30 cmか 50 cmの提案であるが(図—12 及び 13 参照)、中性子の効果的な減衰を期待するにはポリエチレンの使用が考えられるし、さらにガンマ線の効果的減衰のためには鉛の使用も考えてよい。したがって、この部分は最適遮蔽設計を行う必要がある。

ii) ドライウェル部

58年度報告書³⁾の図 3.1—1 (165頁)の図面(図—18として示す)ではドライウェル部の圧力容器周辺には密着した形で保温材が施されているが、この周りに上部遮蔽を薄くてもよいから施すのがよいと考えられる。しかし、本報告はこの遮蔽体については触れていない。この遮蔽は遮蔽重量軽減の上から必要不可欠のものであり、是非取り入れるべきである。この部分の遮蔽は運転中の¹⁶Nガンマ線の遮蔽のためであり、また炉停止時には放射性腐食生成物からのガンマ線の遮蔽が主であるから鉄板か鉛板をサンドウィッチした鉄遮蔽体となろう。¹⁶Nガンマ線の鉄あるいは鉛中の減衰の割合は図—10を参考にして最適遮蔽を行うとよい。この圧力容器遮蔽を施すことにより制御棒駆動機構も含めた周辺の遮蔽は大幅に薄くすることができ遮蔽重量が軽減できるものと期待される。因みにドライウェル部鉄遮蔽はA方式では722 tにも達し、一方C方式では101 tである。これは明らかにC方式がよく、ドライウェル床遮蔽体を考慮に入れても全体で204 t(表—1参照)となっている。したがって、圧力容器に密着させて鉄及び鉛遮蔽体を設けて、その上に上述の遮蔽を追加するとして最適遮蔽を行えば設計目標値を満足しながら重量を軽減できると思われる。

例えば、以下に記するのは遮蔽計算を行なわないで概算で遮蔽重量を当ててみたのであるが、i)ウェットウェル部遮蔽は鉄板 20 cmでおよそ 170 t程度、ウェットウェル水 272 cmで 326 t、下部遮蔽体が鉄、ポリエチレン、鉛等の多重層により 100 t程度の合計約 600 t程度となり、A方式の 1,372 t及びC方式の 633 tと比較してみるとよい。次いで、ii)ドライウェル部遮蔽については圧力容器に密着して鉄板 15 cm、床遮蔽として蛇紋コンクリート 60 cmに制御棒周りの遮蔽 5 cm厚程度とすればおそらく 300 t程度となろう。もしこの概算が正しければ一次遮蔽の合計は 900 t程度となりC方式に近い。あとは二次遮蔽を大幅に軽量化すればよい。

3.2 炉停止時

原子炉停止時の主な放射線源は一次冷却水中の核分裂生成物と放射性腐食生成物であり、また一次冷却系機器に蓄積する放射性物質である。さらに、圧力容器やその周辺の構造材や機器の放射化である。表—2に「むつ」の場合の炉停止時1日後におけるこれらの線源からの線量評価値を示しておく²⁾。この例からわかるように炉停止後は一次冷却系機器に蓄積する放射性腐食生成物がいっしょの個所で線量に寄与しており、他の二つの線源はある限られた位置で大きな寄与を示している。この「むつ」の例では合計線量率が炉停止1日後くらいではかなり大きな値を示すので立入り作業には厳しい規制が必要となる。「むつ」の場合、蒸気発生器や一次系ポンプなどの放射線源となる機器に特別な機器遮蔽を設けてないことが大きな線量を生み出す原因である。したがって、これらの放射線源となり得る機器や装置の機器遮蔽は作業員の被曝低減上重要である。

しかし、供用期間中調査（ISI）の際にはこれらの機器遮蔽を取外して行うので、その機器からの放射線による被曝はさげられない。主な調査対象機器には、原子炉容器、蒸気発生器、一次冷却水ポンプがあり、また自己加圧型炉以外の二炉型には加圧器があり、さらに半一体型炉の場合には炉容器と蒸気発生器との連続部が加わる。ISI時には格納容器内が狭いので発電炉のISI時のようにロボット化による被曝低減化がむずかしい。したがって、作業員がかなり放射性機器に接近せざるを得なくなり作業員の被曝量は相当な量になることが予想される。それ故に、ISI時の作業員被曝低減のための最適遮蔽は重要な研究課題となろう。

燃料交換時の作業員の被曝はISI時の被曝よりも対策が立てやすいと思われる。それは作業が原子炉の上部で行われるので燃料交換時の特別な装置（放射線遮蔽も十分考慮されて製作されねばならない）により被曝低減化が可能となるからである。しかし、燃料交換に先立って圧力容器上部の複雑な装置の取外し作業が必要である。

3.2.1 半一体型炉

蒸気発生器への接近及び作業は機器遮蔽を十分に設けておけばあまり作業員被曝は問題ないと思われるが、ISI時には機器遮蔽を取り除いて作業するので被曝線量は大きくなる。

燃料交換時には圧力容器上部遮蔽を取り除き、また同時に圧力容器のISIも行われるので、上部及び中間遮蔽体も取り除かれる。その場合、一次冷却系機器は強力な放射線源となり、また圧力容器自身も強く放射化されている。特に半一体型炉では圧力容器の高さ方向の寸法が他の炉型に較べて短いので、圧力容器と一次遮蔽体間の間隙が上方まで中性子がストリーミングしやすいように構成されるので、上方へストリーミングした中性子による圧力容器上部の放射化がISI時に被曝上問題となる。さらに、燃料交換時やISI時に制御棒駆動機構を固く固定してあるボルトなどを外す作業が必要であるが、制御棒駆動装置が21台と多いとそれだけ作業員の被曝線量が多くなる恐れがある。この点からの圧力容器上部の放射化は大きな問題として認識する必要がある。

蒸気発生器とともに気水分離器や一次冷却水ポンプの表面なども機器に蓄積する放射性物質のためにより大きな線量率になることが予想される。例えば「むつ」の主冷却水ポンプ表面では炉停止後1日経た時の表面線量率が表-2からわかるように約430 mrem/hと評価されている。

原子炉室の下の船底内の線量は圧力容器下の下部遮蔽体により炉心に原因する放射線の線量は小さく抑えることができるが、問題は今後の課題として報告書の中では省略されている各種の放射能を含む機器や装置（高レベルや中レベルのもの）の遮蔽を特別に考慮しないとかなり大きな線量になることが予想される。この点でこれらの高・中レベル機器・装置の格納容器内配置は重要視されなければならない。例えば「むつ」の例では格納容器内に設けられている中レベルタンクにより二重底内の線量率は約210 mrem/hと大きな値に評価されている。（表-2の15の位置）。

「むつ」の評価例では一次遮蔽体の側面でやはり330 mrem/hと高い値になっている点も炉停止後の気になる線量である。主な成分は一次冷却系機器に蓄積する放射性物質が原因である。作業員の被曝低減の観点から何らかの対策を講ずる必要があるのではないと思われる。

半一体型炉が他の二つの炉型と較べて従業員被曝低減化がむずかしいのは、(i)蒸気発生器が圧力容器の外に設けられていることによる、蒸気発生器の保守点検、修理及びISI時の被曝が大

きいこと、(ii) 遮蔽体を压力容器の蓋部、上部遮蔽、中間遮蔽と分けていて、燃料交換時及び I S I 時にはこれらの遮蔽を分離して取り除かねばならないので、この作業時に被曝する点、(iii) 压力容器の高さが短い上に中性子ストリーミングが他の炉型より顕著に起り、このために容器の上部の放射化が問題となる点である。

3.2.2 一体型炉

蒸気発生器が压力容器内にしかも上部に設置されているために炉運転時の放射化が小さい利点がある上に、保守点検時の作業の際の被曝線量が小さいことが期待される。その大きな理由の1つは压力容器の高さが高いので炉心から上部压力容器が離れており、したがって压力容器上部の放射化が小さいからである。また、蒸気発生器の I S I は压力容器内から原子炉室の外へ取り出して行う方式なので、I S I 時の作業員の被曝も小さく抑えることができると思われる。

下部一次遮蔽体が炉心よりかなり上部まで設けられているので、炉停止時の被曝線量は小さく抑えられる。原子炉運転中の中性子の上方へのストリーミングを効果的に軽減できるように上部一次遮蔽を施せば压力容器上部の放射化は問題でなくなる。さらに一次冷却系が压力容器の外へ出ていないので、これに原因する被曝線量が問題でなくなるのは大きな利点である。

燃料交換時に制御棒駆動装置を取外すが制御棒2本を1台で駆動する方式で12基と他の炉型のものより少ないのはこの駆動装置をボルトなどの取り外しによる撤去作業での作業員の被曝低減に有利であると思われる。しかし、上部遮蔽体を除去しての接近であるから被曝は避けられない。同様に一次冷却系ポンプへの接近も被曝は避けられない。

浄化系イオン交換塔は炉停止時の強力なガンマ線源となるが、その他の高・中レベル装置についても作業員の被曝低減上の遮蔽が考えられなければならない。

3.2.3 自己加圧一体型炉

この炉型も蒸気発生器が压力容器内に設けられているのと、下部一次遮蔽体が炉心よりかなり上部にまで達しているのが、作業員被曝低減上有利である。しかし、一体型炉と較べて蒸気発生器が炉心にかかり接近して設置されているので、その分だけ放射化が問題になる。また、蒸気発生器の保守点検も一体型炉より容易ではないのではないかと、すなわち、作業員の被曝がより大きいのではないかと不安である。しかし、蒸気発生器の I S I 時は一体型炉と同様に外へ取り出して行えば I S I 時の作業員被曝は小さく抑えることが可能である。压力容器の I S I は一体型炉の場合と同様に作業員の被曝を小さく抑えられると思われる。

制御棒駆動装置は16台と三炉型中の真中に位置するので、この装置の取外し作業も三炉型中の中間の被曝線量となろう。

他の放射能を含む機器からの作業員の被曝は他の炉型と同じであり被曝低減化は同じ課題を解決すればよいであろう。

3.3 事故時

わが国の発電炉における仮想事故時の条件を船用炉にも適用するとすれば、事故の際に瞬時に

核分裂生成物のうち、希ガス 100%、ハロゲン 50%、その他 1%が格納容器内に放出されることになる。その際に二次遮蔽により積分被曝線量を 12rem 以下に抑えることが条件となっている。提案された三種の炉型ともに二次遮蔽の主体は重コンクリートを考えている。その厚さは 70cm～100 cm 程度である。したがってこの二次遮蔽の重量が、それぞれ 1,650 t、1,900 t 及び 2,222 t とかなり重くなっている（表-1 参照）。そこで、この重量をかなり軽減できれば遮蔽全体の重量軽減となる。以下に 1 つの試みとして遮蔽の最適化の例を記述するが、その前提条件は次の二項目である。

i) 仮想事故時のガンマ線源を 5 日間の積分値としない。その代りに幾つかの時間区分を設けて、その時間に対するガンマ線源を基にして遮蔽計算を行う。いまその例として「むつ」の仮想事故時の線源強度を表-3 のように参考にする。しかし、「むつ」の場合、時間区分が事故直後の次が事故 1 日後になっている。実際は事故直後から数時間以内で線源強度は大幅に減衰するので、「むつ」の例では時間間隔が粗過ぎてかなり過大評価になってしまう。この点、是非事故直後の次ぎは 1 時間後か 2 時間後あるいは数時間後のデータが欲しい。

ii) 二次遮蔽体はガンマ線の遮蔽を目的とするから重コンクリートよりも鉄や鉛の方が効果的ではないかと思われる。そこで二次遮蔽を鉄-鉛多重層にして、水の入るべき空間を二次遮蔽体内に設けた。この空間は事故時に専用ポンプを使って水が注入され二次遮蔽の役割を果たす。注入量は単位時間当たり大量の方が望ましいのはいうまでもないことである。二次遮蔽計算を PALLAS コードで実施するために PALLAS 用ガンマ線源を表-3 から求め表-4 とした。二次遮蔽体のモデルは半一体型炉のケースを適用し、格納容器の体型及び線源の空間分布も半一体型炉のモデルを用いた。すなわち、格納容器を半径 550 cm で高さ 990 cm の円柱形状でモデル化し、線源はこの円柱内に一様に分布すると仮定した。

二次遮蔽のモデルをまず半一体型炉の場合について図-19 に示し、これについても比較の基にする目的で PALLAS で遮蔽計算を行った。次いで鉄-鉛空間多重層から成る二次遮蔽の 1 例を図-20 のようにモデル化した。このモデルが最適遮蔽かどうかはわからない。今後の研究課題である。このモデルに対して PALLAS 計算を行い、最後にこの空間に水が満たされたケースについても PALLAS 計算を試みた。これらの PALLAS 計算結果は事故直後、1 日後及び 7 日後の時間経過のうちの 3 点について求められ、その間については対数目盛上で線型近似した。この近似は「むつ」の場合を倣ったものであり（図-21 参照）、実際の現象は線型近似よりも下側にへこむので、この近似はかなりの過大評価になる近似で好ましいものではない。

最初に半一体型炉の重コンクリート 76 cm のケースを図-22 に示す積分線量の求め方も「むつ」の場合を参考にして階段状に線量を仮定し加算する。事故直後から 1 日後までの積分線量は 11.09 rem となり、1 日後から 5 日後までの積分線量は 1.94 rem になるので合計 13.03 rem となった。半一体型炉については報告書では 12rem 以下となっているが、これは上記の近似がかなり過大になる近似だからであり、12rem 以下の方が正しいと思われる。ここでは単に比較のために上記の数値を用いる。次いで鉄-鉛-空間多重層に対する線量の時間減衰を図-23 に示す。ここで、もし 2 時間後に空間が水で満たされると仮定すれば点線で示すように水遮蔽有のケースの減衰曲線に移る。このケースの積分線量は最初の 2 時間の 4.2 rem に 2 時間後から 24 時間までの 2.9 rem を加えて 7.1 rem となり、1 日後から 5 日までの積分線量は 1.0 rem であり合計 8.1 rem と

なる。次の仮定は、4時間後に空間が水で満たされるとした場合は2番目の点線で下へ移るので最初の4時間の積分線量は7.3 rem となり、以後の5日までの積分線量の3.14 rem を加えると合計10.44 rem となる。参考のために、図-19のモデルと図-20のモデルで水がない場合とある場合の二次遮蔽体内のガンマ線線量率減衰曲線を図-24と図-25に示しておく。図-24のケースは事故直後の線源強度に対するものであり、図-25のケースは事故後1日経過した時の線源強度に対するものである。これら両図から鉛の遮蔽性能の優秀さがわかる。

なお、以上の計算から二次遮蔽の大雑把な重量軽減は重コンクリート76 cmに対し鉄-鉛多重層の今回の遮蔽はおおよそ0.783となり、半一体型炉のケース1650 tに対しては1292 tとなり約380 tの重量軽減になる。これではあまり重量軽減にならない。もっと遮蔽重量軽減を図るためにはこの二次遮蔽の最適化を行う必要がある。さらに詳細な最適化は、船の耐衝突構造を利用してこれを二次遮蔽の一部として取り入れて遮蔽重量を軽減する遮蔽最適化を行うことである。さらに事故時には機関室側とその反対側の線量を早急に減衰させることが必要であるが、船の耐衝突構造の側は時間的に余裕があると思われるので、ポンプにより二次遮蔽空間内に水を注入する場合も注入する順位を考えれば、さらに二次遮蔽重量の軽減が図れるものと思われる。したがって、二次遮蔽の重量の軽減を大幅に行う可能性が船の耐衝突構造や水の注入方式を考慮に入れた遮蔽の最適化により達成できるものと期待される。

念のために今回行った大雑把な重量軽減を他の炉型にもそのまま適用できると仮定して算出した二次遮蔽の重量を、一次遮蔽の改良後の推定の重量増加とともに表-5に示す。一次遮蔽の重量増加は一次遮蔽背後の格納容器内における設計目標線量率を本報告で提案したように従業員被曝低減化のために厳しくするとした場合の大雑把な推定により算出したものである。

自己加圧一体型炉の二次遮蔽については現計画では断面が正方形の二次遮蔽体の内側にも断面が円形のドライウェルまで普通コンクリートが詰め込まれているが(図-12の上の図参照)、改良した二次遮蔽ではこの部分のコンクリートの詰め込みはなく空間のままよいとした。さらに、炉容器下部の遮蔽は現計画では水タンクが82 tあるが、これも一次遮蔽の下部遮蔽を高性能にする改良により不必要になると予想し省略してある。

4. 結論及び今後の課題

4.1 通常運転時

作業員の被曝低減化のために設計目標値を一次遮蔽周辺で中性子に対し 20mrem/h以下、ガンマ線に対し 100 mrem/h 以下とする。この設計目標値を達成するためには中性子に起因して発生する二次ガンマ線の線量を小さくするために鉛を一次遮蔽の外側の遮蔽層として積極的に用いるとよい。半一体型炉の場合、一次冷却系配管からの中性子ストリーミング及び圧力容器と一次遮蔽体との間に構成される円環状間隙からの上下方向への中性子ストリーミングが問題であり、保温材を使用してもストリーミングを抑え切れないので、中性子及び二次ガンマ線の効果的な遮蔽設計、すなわち最適遮蔽設計が必要となる。また、蒸気発生器や一次系ポンプ周辺は¹⁶Nからのガンマ線のため線量が極めて大きくなるので適切な機器遮蔽が必要である。遮蔽全体の重量を軽減するためには一次遮蔽体や機器遮蔽体の重量が多少増加するのはやむを得ない。その代わりに二次遮蔽の重量を大幅に減少させる最適遮蔽を考えればよい。一次遮蔽体の物質は重コンクリートや普通コンクリートよりも鉄-水多重層の外側に鉛層を設けた方が効果的であり、この組合せで最適遮蔽を考えた方がよい。半一体型炉は蒸気発生器が圧力容器の外へ設置されるので原子炉全体が複雑になり「むつ」原子炉と基本的には変らない遮蔽構成になる。これは遮蔽設計の最適化の利点があり生じない炉型である。その上に格納容器をコンパクトにするために球型を選んでいるが、複雑な原子炉の周辺に作業員のスペースが極度に制限されることになるので、作業員の被曝低減化上逆に不利になると思われる。

一体型炉は半一体型炉と対照的に半一体型炉の不利な点を有しない炉型である。圧力容器内にしかも炉心から離れた上部の圧力容器の蓋と一体化して蒸気発生器を設置する案は実によりよいアイデアである。すなわち、炉心から離れているので蒸気発生器の放射化が少ないこと、及び圧力容器が炉心よりかなり上方へ高くとれるので圧力容器上部の放射化が著しくないこと、圧力容器周辺が単純構造になる結果中性子ストリーミングが起りにくいこと、したがって一次遮蔽は簡単な構造になること等数多くの利点を生み出している。一次遮蔽の最適化の結果選ばれた船用炉はこの炉型であるといっても過言ではない。なお、上記の設計目標値を達成するには圧力容器周りの上部遮蔽は単に鉄層のみでなく鉛層も考慮に入れて最適化を図るとよいと思われる。

自己加圧一体型炉はウェットウェル水を活用することが条件となって一次遮蔽が構成されるので、最も最適化の必要な炉型である。半一体型炉で指摘したように、一次遮蔽は鉄-水多重層がよいがウェットウェル水の水量が多いので中性子に極めて効果的な一次遮蔽ができ上る。二次ガンマ線の減衰も考えるとウェットウェル水をできるだけ減少させられるとよい。圧力容器の上部遮蔽は圧力容器周りの保温材にできる限り密接させて鉄あるいは鉄-鉛多重層遮蔽層を設けた方が重量軽減及びスペース軽減上利点大きい。蒸気発生器が容器内に設置されるのは最適遮蔽の大きな利点であるが、一体型炉と較べて炉心にかなり接近して設けられるので放射化が心配になる。

いずれの炉型も新しく設けた設計目標値を達成することを条件として最適遮蔽をていねいに各遮蔽毎に行う必要がある。特に小口径配管中性子ストリーミングに対する補償遮蔽は共通の課題であり効果的な補償遮蔽を考えることが望まれる。

4.2 炉停止時

これまでの遮蔽設計は通常運転時及び仮想事故時のみに限って実施されているので、最も作業員が被曝する炉停止時における燃料交換、機器の点検、I S I、修理時の線量評価がなされていない。従業員の被曝低減化のためには、炉停止時の線量評価が最も重要になる。しかも、炉停止時の被曝線量は炉型によって大きく左右されることに注目すべきである。

半一体型炉の場合、燃料交換時には制御棒駆動装置や圧力容器上部の蓋遮蔽を取外すが、制御棒駆動装置の数が他の炉型よりも多いのでそれだけ作業員の被曝線量も多くなる。圧力容器上部でのガンマ線線量へ大きく寄与するガンマ線源は一次冷却水中の放射性腐食生成物や圧力容器に付着している放射性物質、あるいは圧力容器自身の放射化である。半一体型炉では炉心から圧力容器上部があまり離れていないこと、中性子ストリーミングが大きいことなどから圧力容器上部の放射化が大きい、したがって、他の炉型に較べそれだけ作業員の被曝線量は増加する可能性がある。蒸気発生器の保守・点検・I S I時にも蒸気発生器内の一次冷却水の放射性腐食生成物や蒸気発生器へのこれらの放射性物質の付着のため、その周辺の線量は極めて大きくなる。機器遮蔽を外さない作業の時はよいが、この遮蔽を外した場合の被曝線量は問題となろう。一次冷却水ポンプや気水分離器などへの接近作業でも被曝線量は大きいと思われる。圧力容器のI S I時には一次遮蔽のうち上部及び中間遮蔽を取外すが、この作業の際にもかなりの線量の被曝が予想される。I S I時には圧力容器自身の放射化が被曝線量の原因となる。実際の設計の際には格納容器内か二次遮蔽体内へイオン交換塔や各種の放射能含有機器や装置が設けられる。これらの機器や装置に特別遮蔽を施さないと炉停止時の作業員の被曝の原因となるので注意を要する。これらの機器や装置の配置も最適遮蔽の対象となろう。

一体型炉の場合、燃料交換時には圧力容器上蓋を取外し、蒸気発生器を外へ取り出して他の場所で蒸気発生器の点検やI S Iを実行する予定なので、作業員の被曝は注意すれば避けられ得る利点を有する。さらに、圧力容器の高さが高く、炉心から離れているので上方への中性子ストリーミングを首尾良く抑えるように一次遮蔽を施せば圧力容器上部の放射化を大幅に軽減することが可能であり、したがって作業員の被曝低減化が可能な炉型である。また、制御棒駆動装置台数の少ないのも、これを取外す作業での被曝線量低減化に貢献するものと思われる。

自己加圧一体型炉は炉停止時には一体型炉と同様に考えればよい。やはり圧力容器の下部と上部とでは放射化の程度に大きな差があると思われるので圧力容器上部への接近は半一体型炉よりも容易であろう。蒸気発生器の点検・I S I時にはこれを外へ取り出して行うので、この作業での被曝線量は低減され得る。しかし、圧力容器内に設置された状態での修理の際には一体型炉の場合よりも作業が困難であるので被曝は避けられないと思われる。

全ての炉型に共通した問題であるが、「むつ」の設計計算の際に使用した炉運転条件に較べ今回の炉運転条件の方が、炉停止時の放射線源強度が大きくなる点に注意を要する。すなわち、「む

つ」の場合の炉停止時までの炉運転条件は100%出力の9,000時間であり、この条件で機器の放射化を計算している。また、放射性腐食生成物の濃度を評価するための炉運転履歴は出力上昇試験とそれに続く実験航海で、これは100%出力で267日に相当するものである。これに対し今回の炉運転条件は4年間×0.8(自己加圧一体型炉のみ3年間で稼働日数965日としている)であるので、機器の放射化、一次冷却水中の放射能及び一次冷却系機器付着放射性腐食生成物はいずれも大幅に増大するものと考えられる。したがって、炉停止時の作業員の被曝低減を目的とした炉型及び遮蔽配置、格納容器の型や大きさ及び各種の放射能含有機器・装置の配置を決める最適遮蔽設計を行うことが必要である。

4.3 事故時

二次遮蔽の目的を事故時の従業員被曝防護に限ることができれば、二次遮蔽の最適化は遮蔽重量軽減化を目的とすればよい。現在の発電炉の事故時の線源条件を適用することになれば、事故時に瞬時に線源が格納容器内に充満するわけであるから、その後の精度のよい線源の評価は事故時の時間に対する線源の減衰の仕方のみである。事故時の数時間以内で線源の強度は急激に減衰するので、事故直後、1時間後、2時間後、4時間後、8時間後程度に詳細に線源の強度を評価する必要がある。このように評価された線源強度に対して二次遮蔽透過放射線減衰計算を行えばよい。その際に二次遮蔽体はこれまで提案されているような重コンクリートのみの遮蔽ではなく、重量軽減のために最も効果的な多重層遮蔽を見つけ出す必要がある。しかも、二次遮蔽は事故時に対してのみ考えればよいので、二次遮蔽体内の空間に事故時に水を専用ポンプで注入して遮蔽性能を強化する方法を採用するとよい。その例として鉄—鉛—空間—鉄層から成る二次遮蔽体に対して、事故後2時間あるいは4時間でこの空間が水で充満されると仮定して遮蔽計算を行った。その結果は期待されるように二次遮蔽体の重量が軽減できることが示された。しかし、この例が最適二次遮蔽の例というわけではなく、今後この案に基づく二次遮蔽の最適化の研究が必要であろう。

最後に最適遮蔽設計に関する今後の研究課題を以下のように抽出してみた。

- i) 一次遮蔽を通常運転時及び炉停止時における従業員被曝低減化の目的により遮蔽の最適化を図る。
- ii) 上記の項目を達成するためには、特に中性子ストリーミングに対する最適補償遮蔽を考える。これは単に中性子遮蔽のみではなく、中性子及び二次ガンマ線の効果的減衰を図らねばならない。
- iii) 炉停止時の線源強度は「むつ」の設計計算による評価値に比べ、運転条件の違いから格段に大きくなることが予想されるので、線源強度の評価及び格納容器内の各作業位置における線量評価を詳しく行う。
- iv) 炉停止時の被曝低減化を目的とした格納容器の型や大きさ、さらに各種の放射能含有機器・装置の配置とその機器遮蔽の設計を検討する。
- v) 二次遮蔽の遮蔽重量軽減化を目的として遮蔽最適化を行う。その際に、事故後の線源強度を事故後の時間について詳しく評価し、二次遮蔽体は水の注入による遮蔽性能向上を基本として多重層化を検討する。

参 考 文 献

- 1) 昭和 59 年度, 改良船用炉試設計報告書 日本原子力研究所 原子力船研究開発室
- 2) 原子力船「むつ」遮蔽改修のための詳細遮蔽解析, JNS-T-report 1034 (1981)
- 3) 昭和 58 年度, 改良船用炉試設計報告書, JNS-R-report 0003

表-1 各炉型の遮蔽重量¹⁾

炉型	三 菱 重 工		石 川 島 播 磨 重 工		日 立 造 船		
	半 一 体 型 炉		一 体 型 炉		自 己 加 圧 一 体 型 炉		
構 成	上 部, 中 間, 下 部	原 子 炉 容 器 上 部	機 器 遮 蔽	側 部, 下 部	上 部	ウ ェ ッ ト ウ ェ ル 部	
材 料	蛇 紋 岩 コ ン ク リ ー ト	同 左	鉛	鋼	鋼	蛇 紋 岩 コ ン ク リ ー ト	
厚 寸	144cm		50cm	約 6cm	10, 15, 20cm	337cm	65cm
重 量	約 300 ton	約 60 ton		約 330 ton	約 633 ton	約 204 ton	
全 重 量	約 360 ton						約 837 ton
構 成	本 体 部	本 体 部	本 体 部	側 部	上 部	側 部	
材 料	重 コ ン ク リ ー ト	重 コ ン ク リ ー ト	重 コ ン ク リ ー ト	重 コ ン ク リ ー ト	重 コ ン ク リ ー ト	普 通 コ ン ク リ ー ト	
厚 寸	76cm	76cm	76cm	80cm	83cm	100cm	
重 量	約 1.650 ton			約 1.900 ton		2,222 ton	
構 成	原 子 炉 容 器 下 部	船 底 部	運 転 水 タ ン ク	原 子 炉 容 器 下 部			
材 料	ポ リ エ チ レ ン 鉄 鉛	ポ リ エ チ レ ン	水	水 鉛			
厚 寸	120cm	10cm	76cm	100cm			
重 量	約 40 ton	約 70 ton		51 ton			
合 計 重 量	約 110 ton			133 ton			
総 電 磁 域	約 2120 ton			約 2330 ton		約 3190 ton	
(国 内 基 準 へ の 適 合 と い う 観 点 か ら) 設計方式Cの重量を示す。							

遮蔽計画
(1/1)

表-2 「むつ」の原子炉停止1日後における格納容器内及びその周辺の線量率評価値²⁾

点	計 算 箇 所	炉心内核分裂生成物	機器、配管の放射生成物	一次冷却水中の核分裂生成物及び腐食生成物	一次冷却系機器に蓄積する放射性物質	合計線量率 (mrem/hr)
1	ミサイアルプロテクション上部	$< 4 \times 10^{-2}$	-	-	約 2	約 2
2	制御棒駆動装置周辺	約 4×10^{-2}	-	-	約 2.0	約 2.0
3	原子炉容器下部絶縁体下空間	約 6.0	約 4.4	-	約 0.2	約 5.0
4	主冷却水ポンプ表面	< 1	< 0.2	約 4.0	約 3.9	約 4.3
5	上部一次絶縁体側面	< 1	< 0.2	約 1.0	約 4.0	約 5.0
6	中間一次絶縁体側面	< 1	約 0.2	約 4.0	約 1.6	約 2.0
7	下部一次絶縁タンク側面	約 1	< 0.2	約 4.0	約 2.9	約 3.3
8	蒸気発生器頂部表面	< 1	-	-	約 2	約 2
9	蒸気発生器側部表面	< 1	< 0.2	約 4.0	約 2.4	約 2.8
10	蒸気発生器底部表面	< 1	-	約 4.0	約 1.4	約 1.8
11	下部原子炉室 (船首尾部船体中央、二重底内底版より1.5m上の点)	< 1	-	約 1	約 2.0	約 2.0
12	下部原子炉室 (中レベルトンク表面より横1mの点)	< 1	-	約 4.0	約 2.0	約 4.2
13	下部原子炉室 (体積制御タンク表面より横1mの点)	< 1	-	約 1.0	約 2.0	約 1.2
14	二重底内 (船首尾部船体中央)	< 1	-	< 1	約 1.0	約 1.0
15	二重底内 (中レベルトンク真下)	< 1	-	約 2.0	約 1.0	約 2.1
16	二重底内 (体積制御タンク真下)	< 1	-	約 2.0	約 1.0	約 3.0

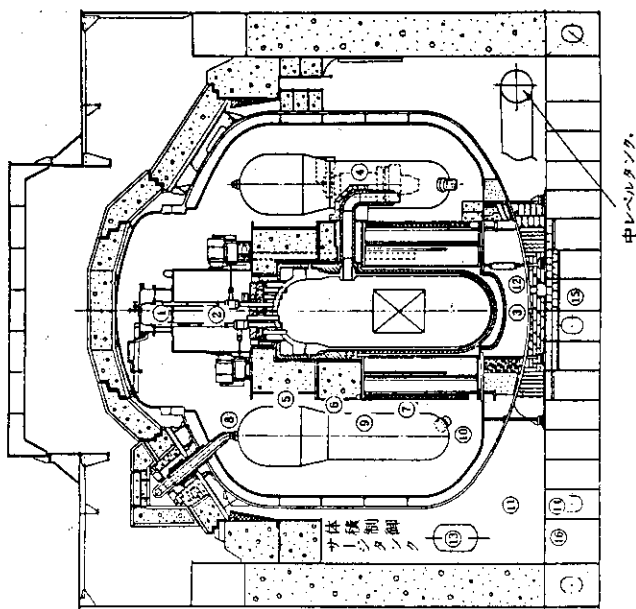


表-3 「むつ」の場合の仮想事故時のガンマ線源²

群	エネルギー幅	代表エネルギー	事故直後	事故1日後	事故7日後
1	>5.0 MeV	5.25	1.92×10^{13}	0.0	0.0
2	4.5 ~ 5.0	4.70	2.70×10^{15}	0.0	0.0
3	4.0 ~ 4.5	4.22	1.66×10^{15}	0.0	0.0
4	3.5 ~ 4.0	3.7	1.07×10^{15}	0.0	0.0
5	3.0 ~ 3.5	3.2	1.02×10^{15}	1.06×10^{14}	1.80×10^{13}
6	2.6 ~ 3.0	2.75	2.42×10^{16}	8.11×10^{14}	1.39×10^{14}
7	2.2 ~ 2.6	2.38	2.59×10^{16}	1.23×10^{15}	2.32×10^{14}
8	1.8 ~ 2.2	1.99	7.26×10^{16}	2.35×10^{15}	4.10×10^{14}
9	1.35 ~ 1.8	1.55	1.06×10^{17}	3.93×10^{15}	1.27×10^{15}
10	0.9 ~ 1.35	1.10	1.35×10^{17}	1.37×10^{16}	2.37×10^{15}
11	0.4 ~ 0.9	0.63	3.91×10^{17}	8.25×10^{16}	2.01×10^{16}
12	0.2 ~ 0.4	0.3	2.34×10^{17}	5.64×10^{16}	2.13×10^{16}

表-4 PALLAS計算に使用した仮想事故時のガンマ線源

E(MeV)	事故直後	事故1日後	事故7日後
	$\gamma/\text{cm}^3 \cdot \text{sec} \cdot \text{MeV}$	$\gamma/\text{cm}^3 \cdot \text{sec} \cdot \text{MeV}$	$\gamma/\text{cm}^3 \cdot \text{sec} \cdot \text{MeV}$
5.25	4.09×10^4	0	0
4.75	5.75×10^6	0	0
4.25	3.53×10^6	0	0
3.75	2.27×10^6	0	0
3.25	2.29×10^6	2.37×10^5	4.04×10^4
2.80	6.05×10^7	2.03×10^6	3.48×10^5
2.40	6.89×10^7	3.28×10^6	6.17×10^5
2.00	1.93×10^8	6.25×10^6	1.09×10^6
1.60	2.51×10^8	9.26×10^6	3.00×10^6
1.10	3.19×10^8	3.24×10^7	5.60×10^6
0.70	8.76×10^8	1.85×10^8	4.51×10^7
0.50	8.76×10^8	1.85×10^8	4.51×10^7
0.35	1.24×10^9	3.00×10^8	1.13×10^8
0.25	1.24×10^9	3.00×10^8	1.13×10^8

注)格納容器は半一体型炉における事故時の線量率計算と同様に550cm半径で990cm高さの円柱形状を仮定し、この体積である $9.4 \times 10^9 \text{ cm}^3$ により事故時のガンマ線放出量を割って単位体積あたりの線源を出した。

表-5 現計画と改良案(概算)における遮蔽重量の比較

	遮 蔽	半一体型炉	一体型炉	自己加圧一体型炉
現 計 画	一次遮蔽重量	約 360 t	約 430 t	約 837 t
	二次遮蔽重量	約 1,650 t	約 1,900 t	約 2,222 t
	炉容器下部 遮蔽重量	約 110 t	—	約 133 t
	合 計	約 2,120 t	約 2,330 t	約 3,190 t
改 良 案	遮 蔽	半一体型炉	一体型炉	自己加圧一体型炉
	一次遮蔽重量*	約 430 t	約 480 t	約 900 t
	二次遮蔽重量	約 1,290 t	約 1,500 t	約 1,480 t
	炉容器下部 遮蔽重量	約 110 t	—	約 50 t
	合 計	約 1,830 t	約 1,980 t	約 2,430 t

* 一次遮蔽背後で厳しい設計目標線量率を適用するとした場合

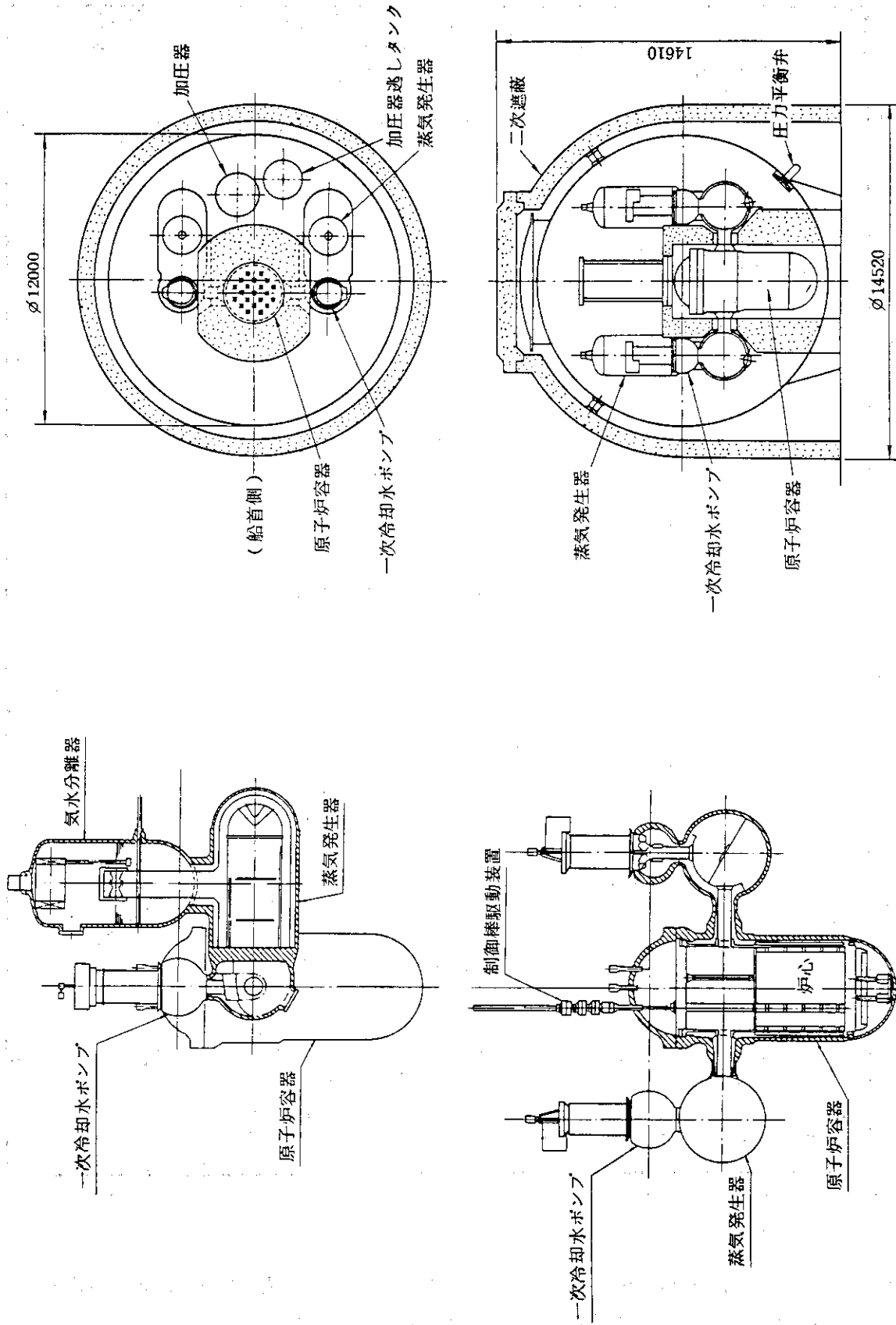


図 一 1 半一体型炉原子炉本体組立図

図 一 2 半一体型炉プラント全体配置図

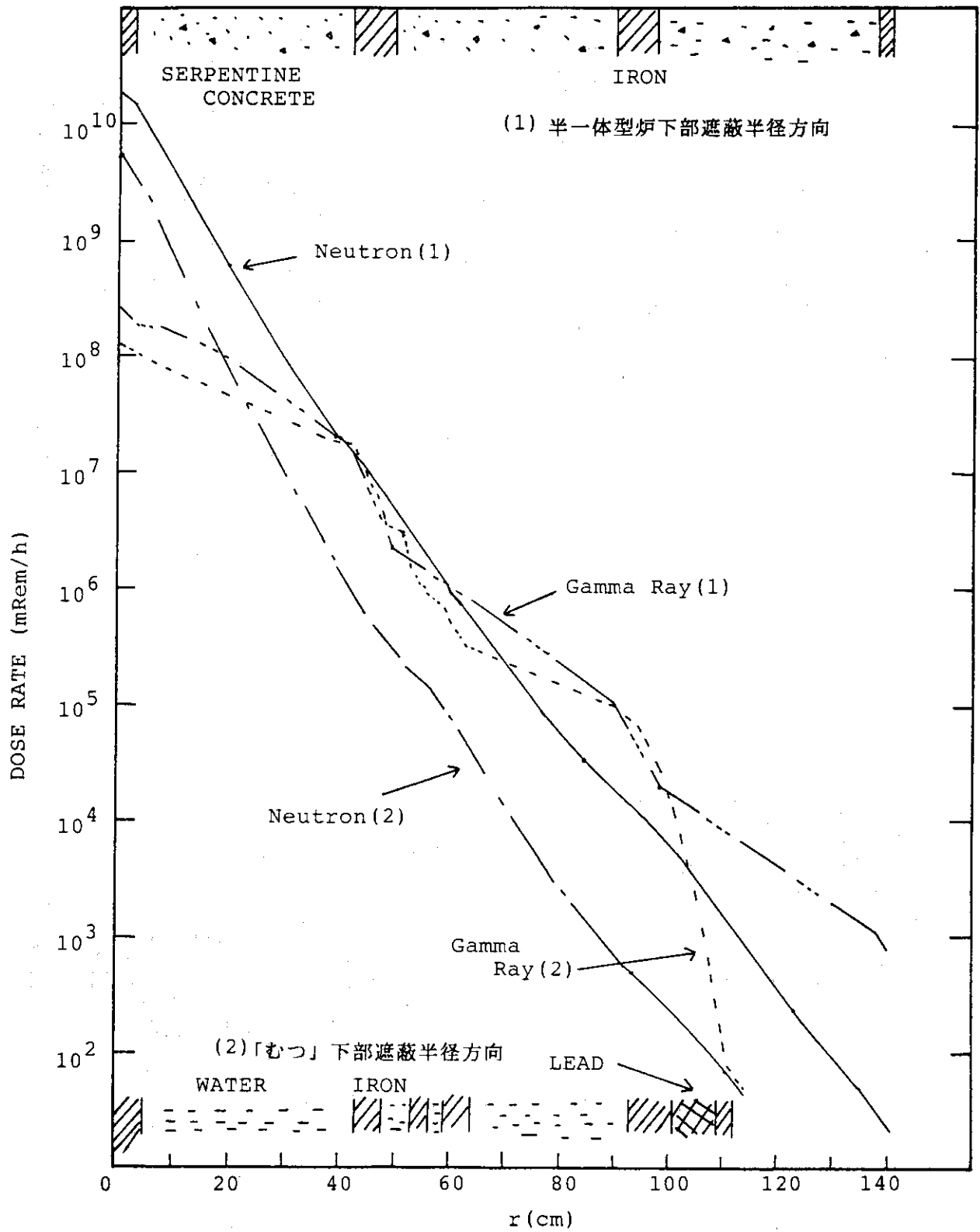


図-3 半一体型炉下部遮蔽半径方向(1)と「むつ」下部遮蔽半径方向(2)における中性子及びガンマ線線量率減衰の比較

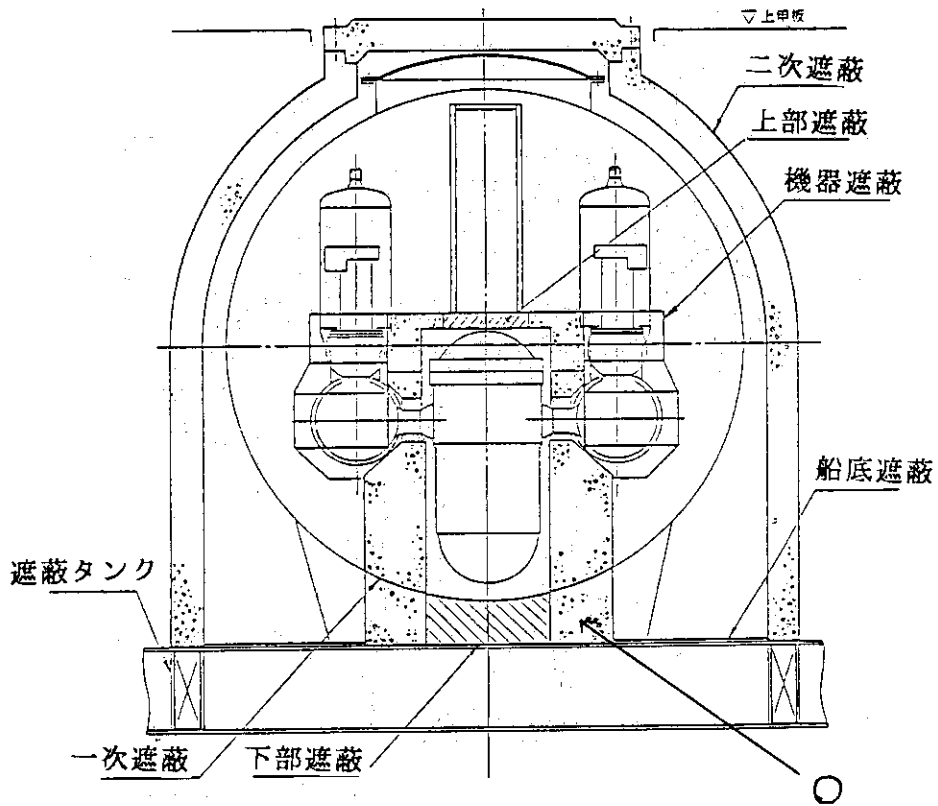


図-4 半一体型炉遮蔽¹⁾における○印遮蔽体の重要性

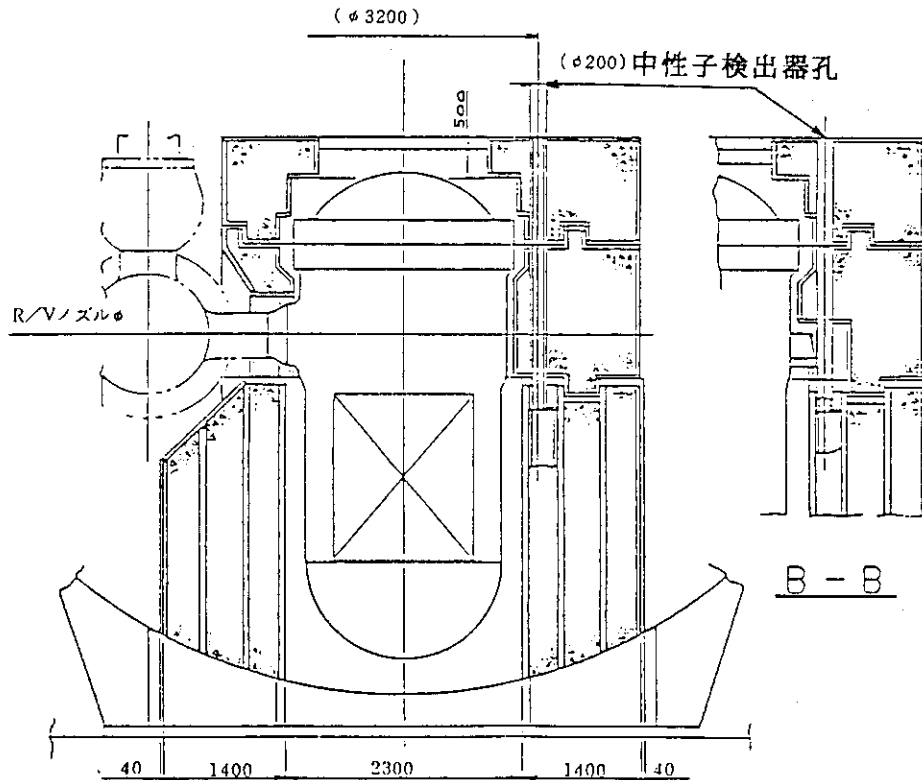


図-5 中性子検出器案内管貫通孔¹⁾

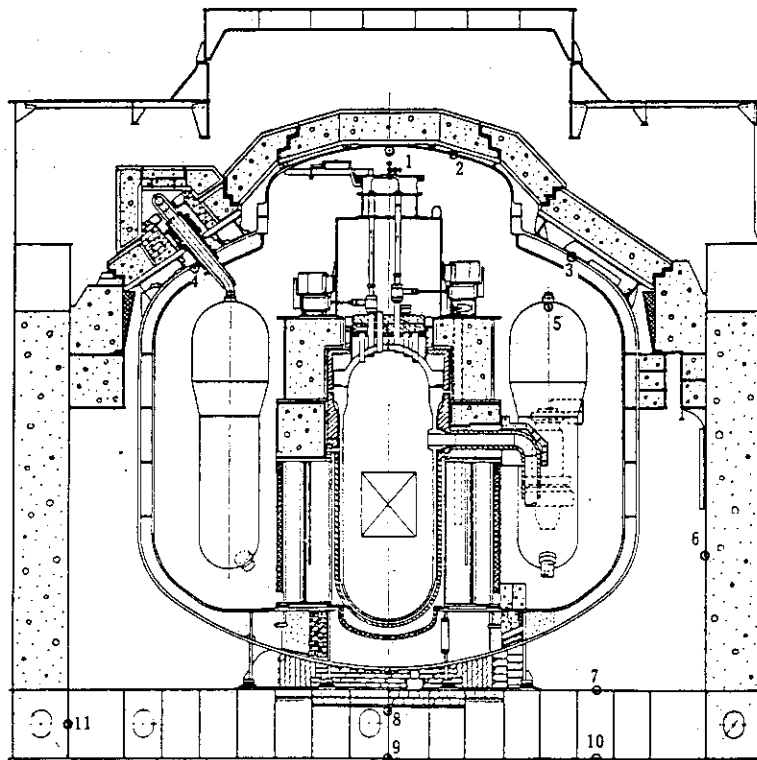
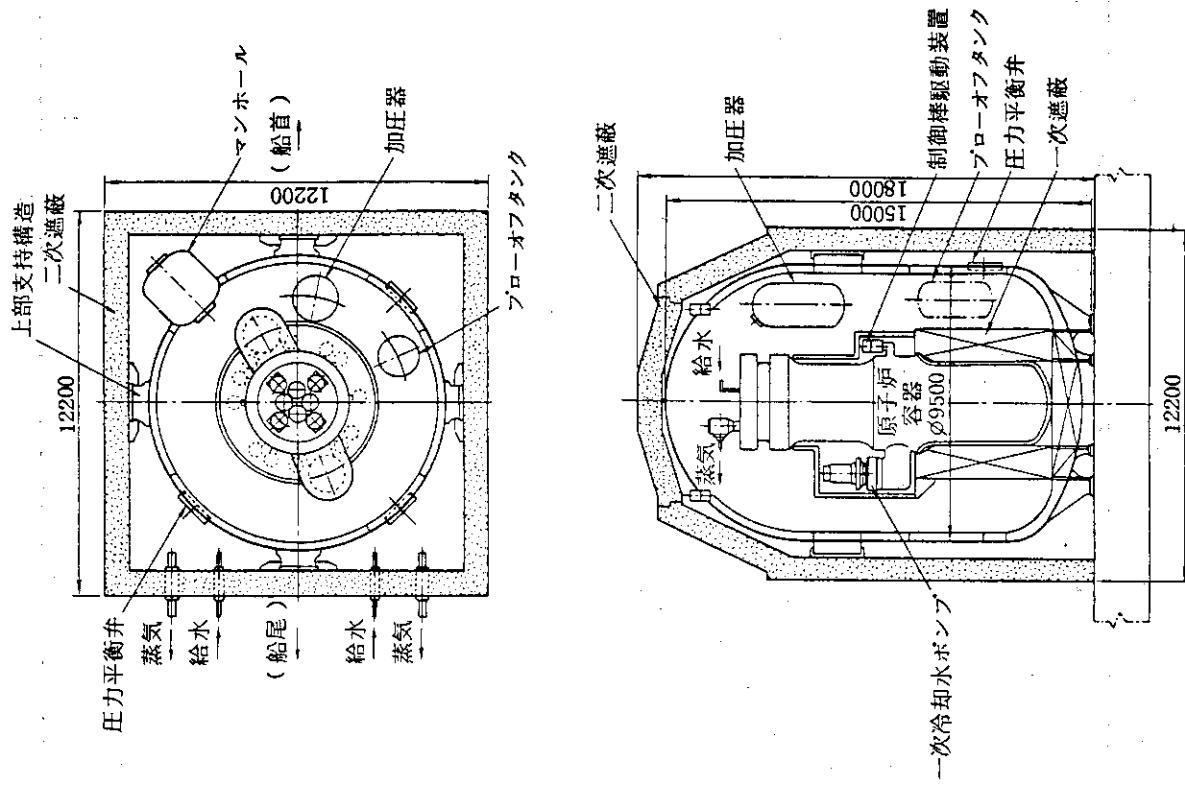
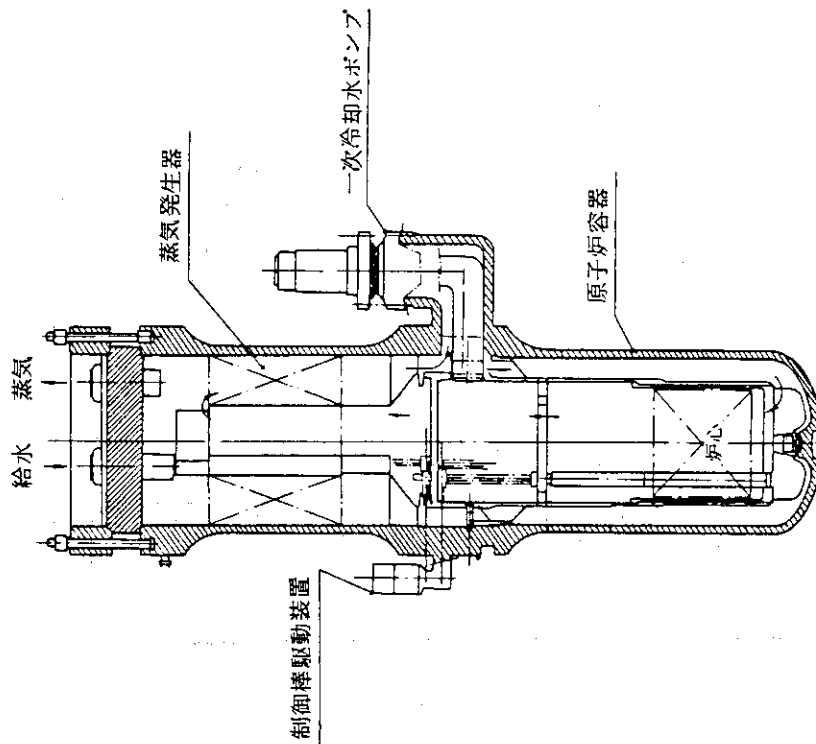


図-6 「むつ」遮蔽配置²⁾



図一 8 一体型炉プラント全体配置図



図一 7 一体型炉原子炉本体組立図

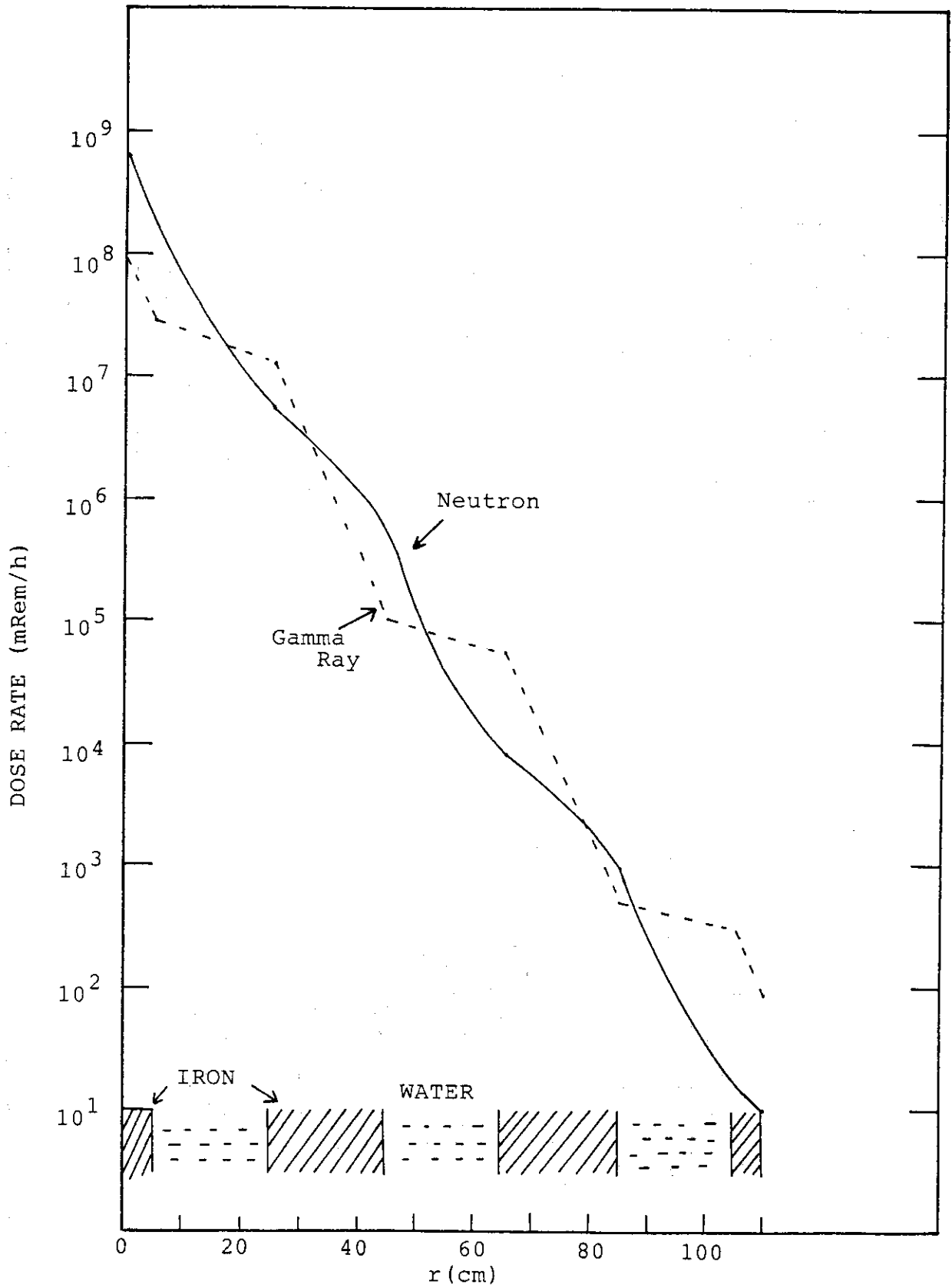


図-9 一体型炉炉心側部一次遮蔽配置と中性子及びガンマ線の線量率減衰¹⁾

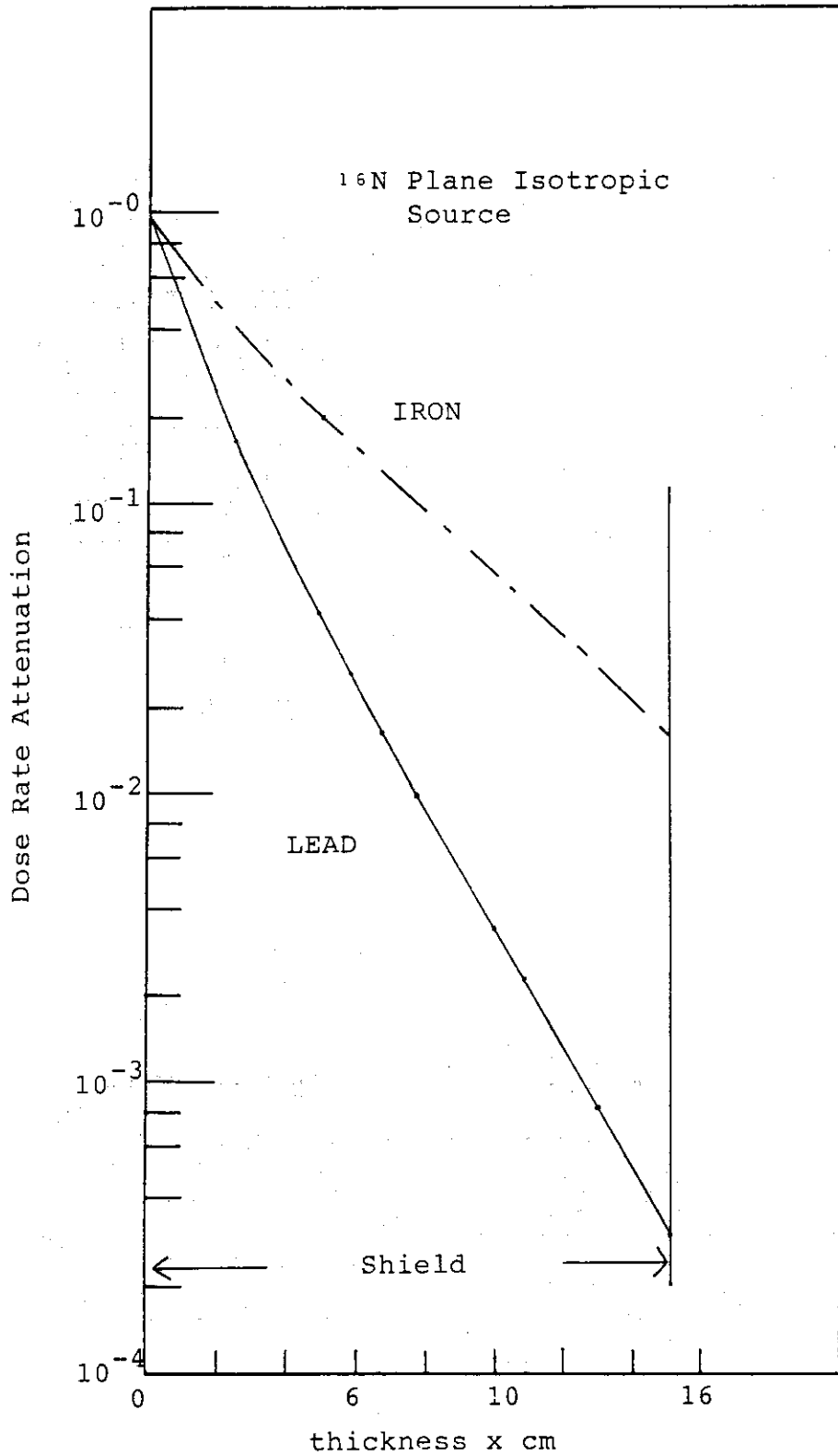
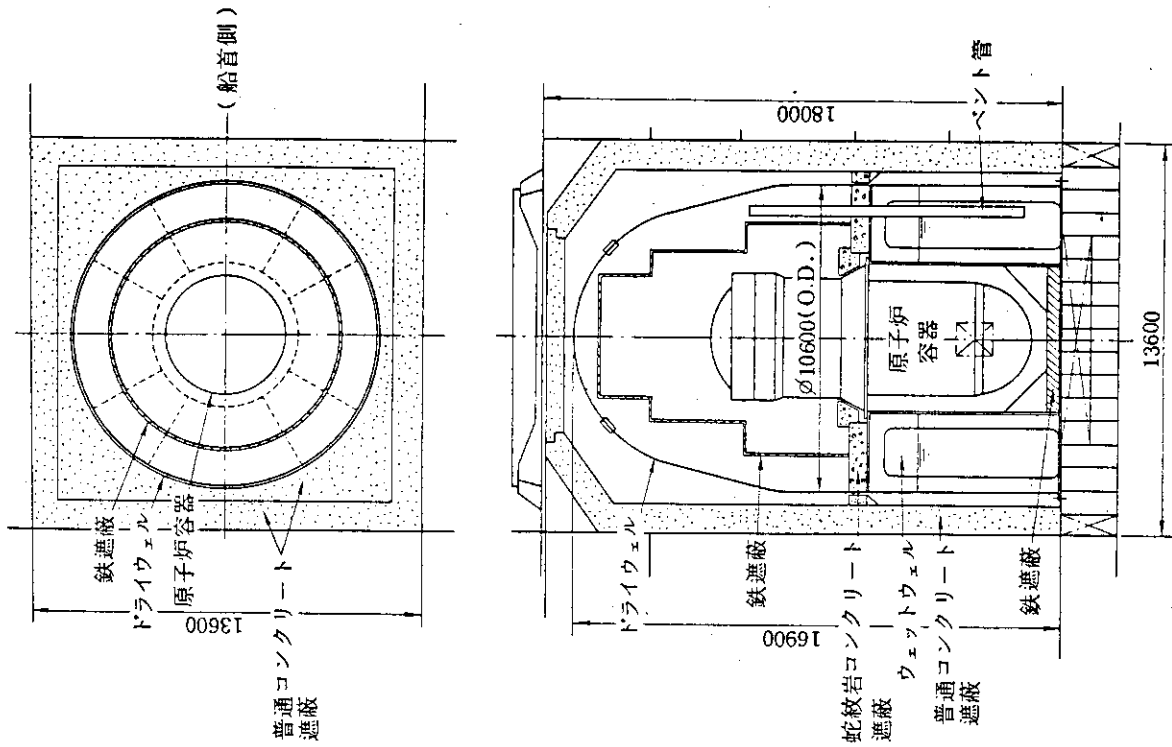
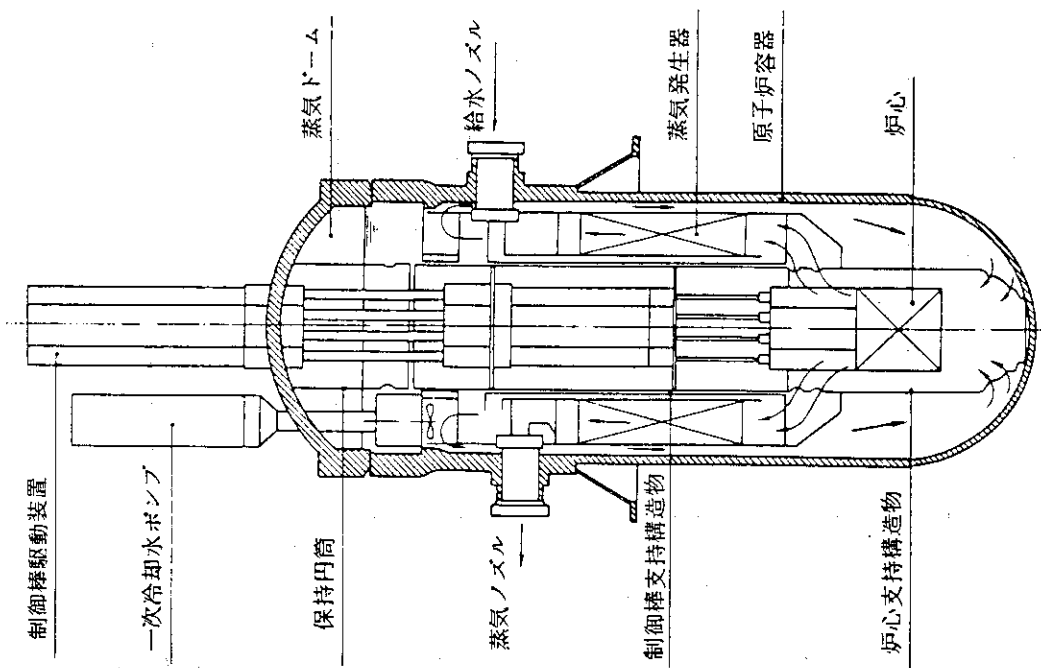


図-10 ¹⁶Nガンマ線源が平面上に等方分布線源としてあった場合、鉄板あるいは鉛板15cm厚が遮蔽として設けられた時のガンマ線線量率の減衰比



図一12 自己加圧一体型炉プラント全体配置図



図一11 自己加圧一体型炉原子炉本体組立図

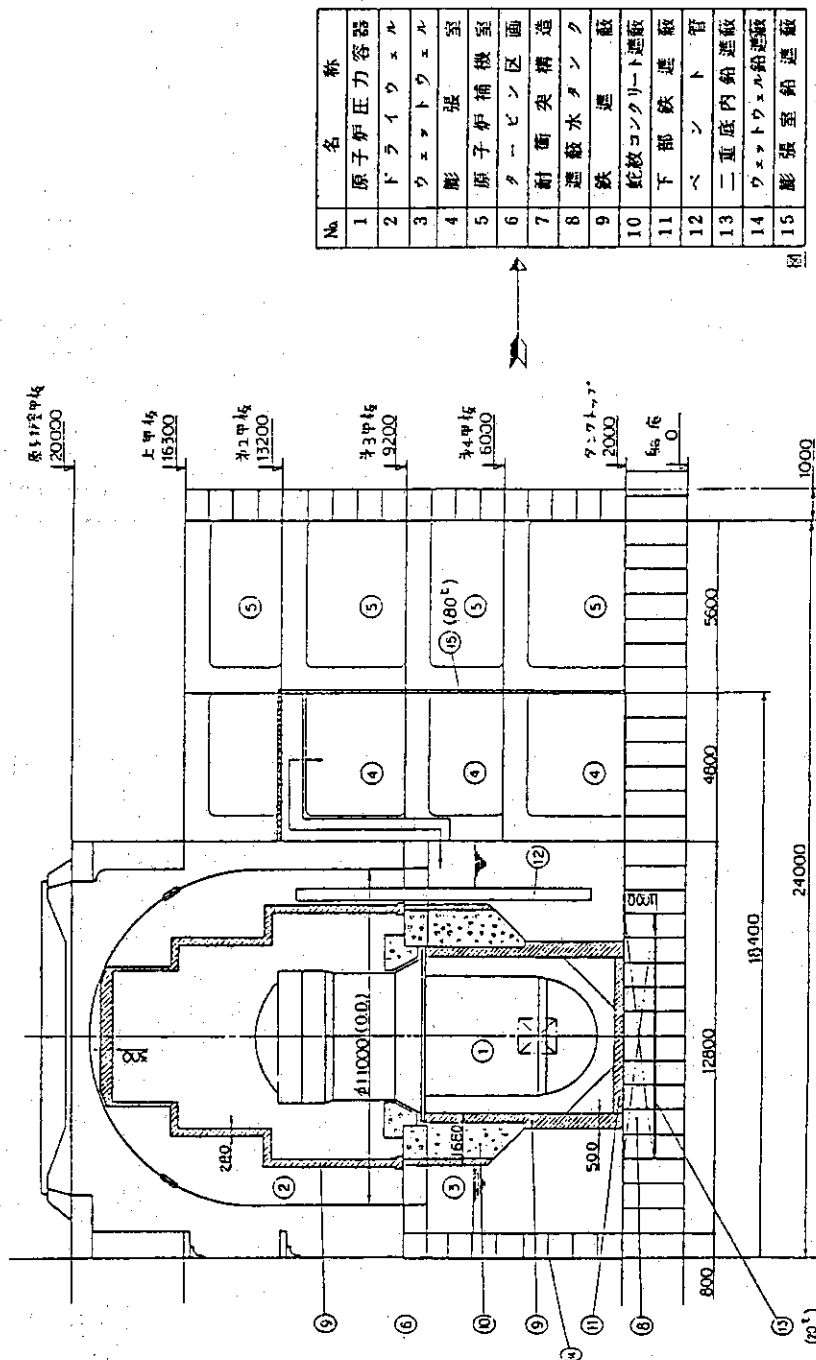


図-13 設計方式A 遮蔽配置¹⁾

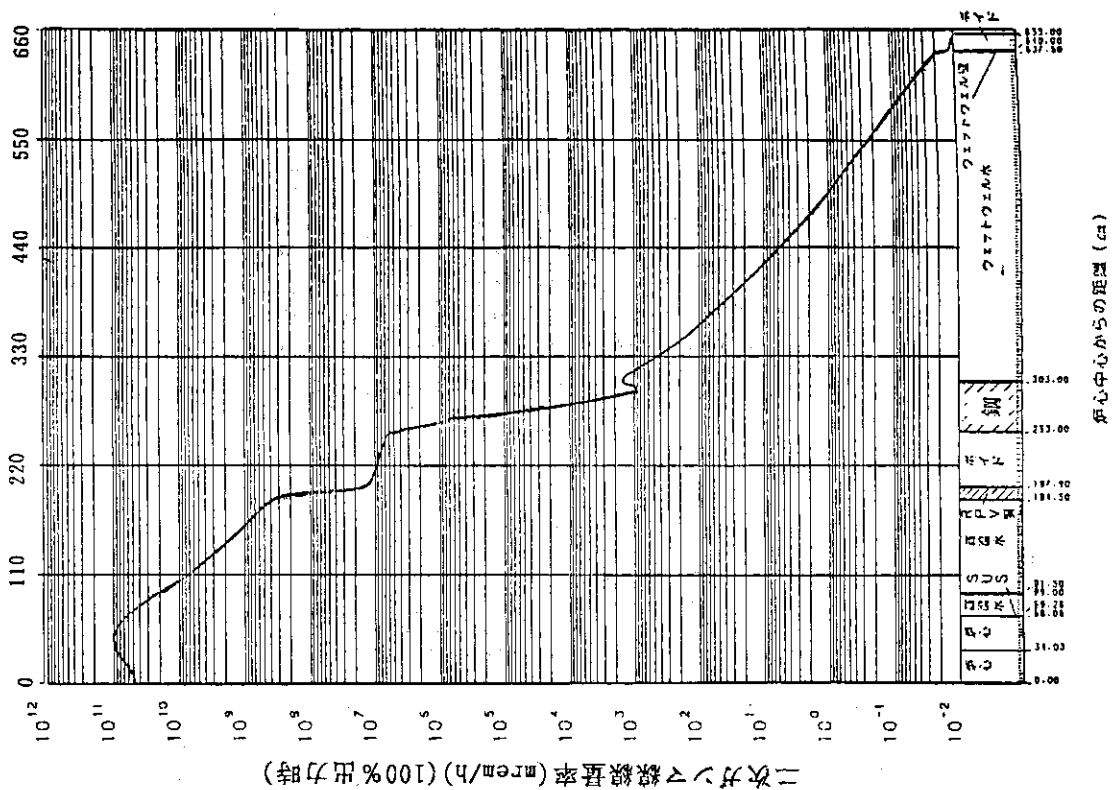


図-14 設計方式 A 炉心真横方向中性子線量率減衰¹⁾

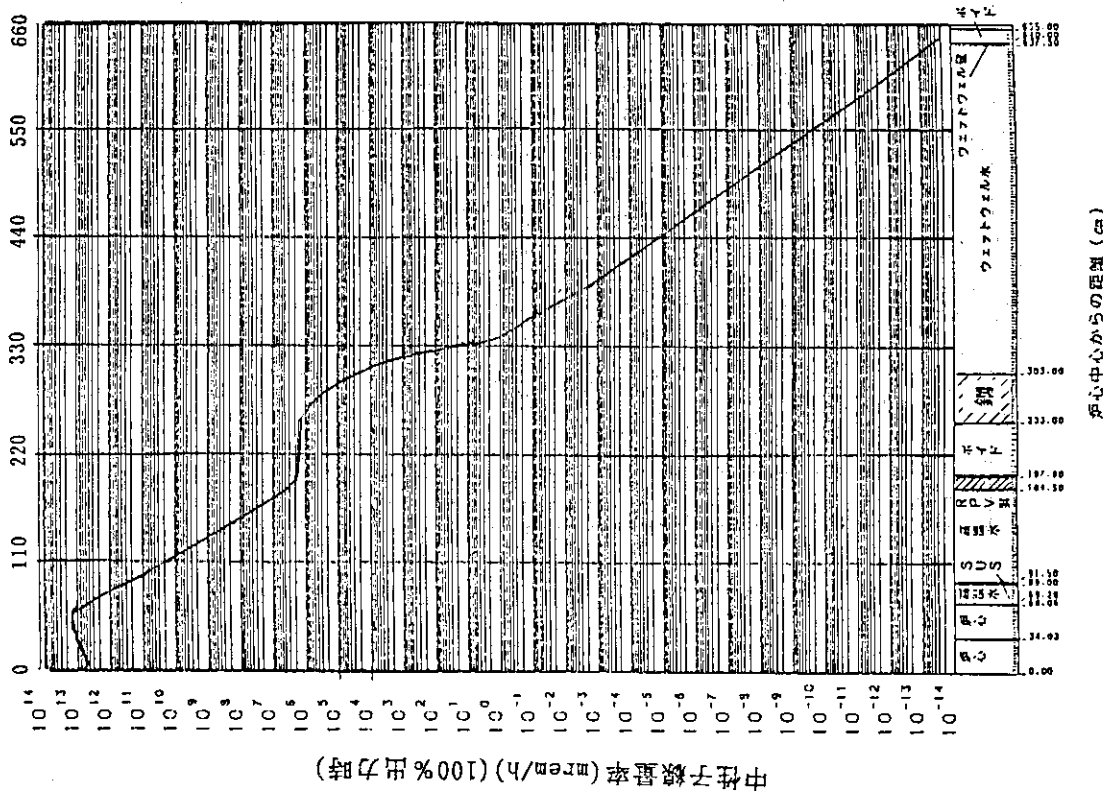


図-15 設計方式 A 炉心真横二次ガンマ線量率減衰¹⁾

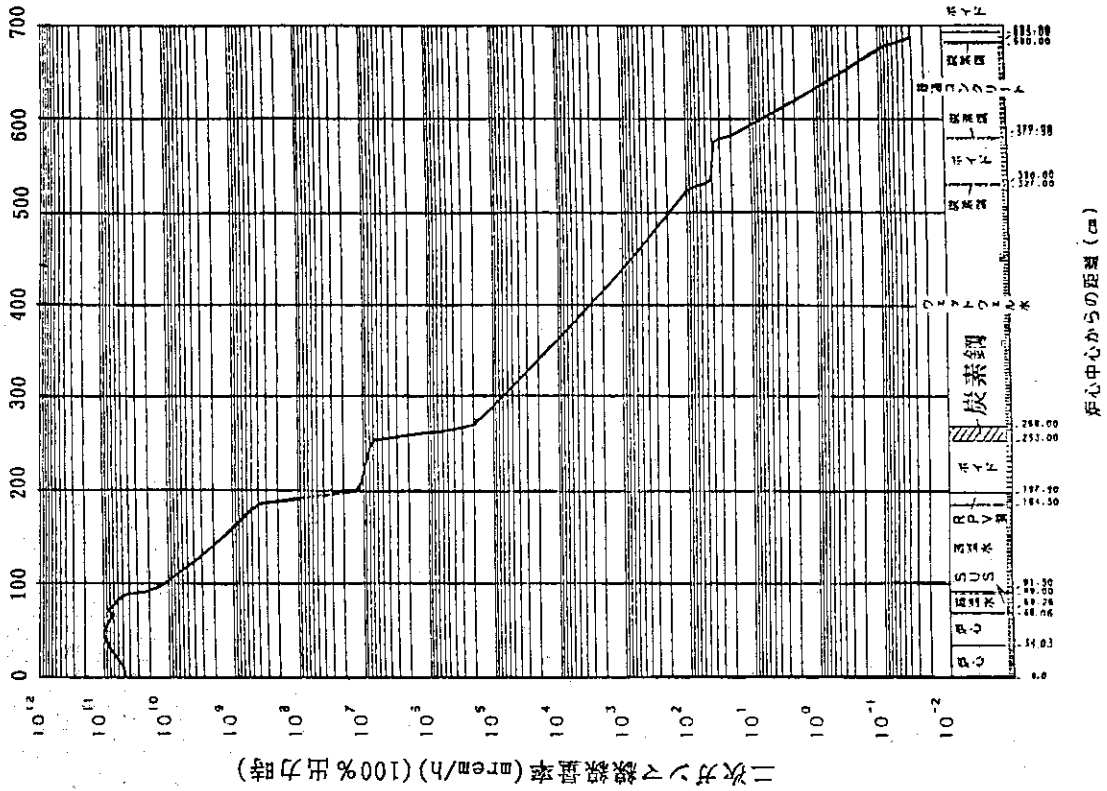


図-17 設計方式 C 炉心真横方向二次ガンマ線量率減衰¹⁾

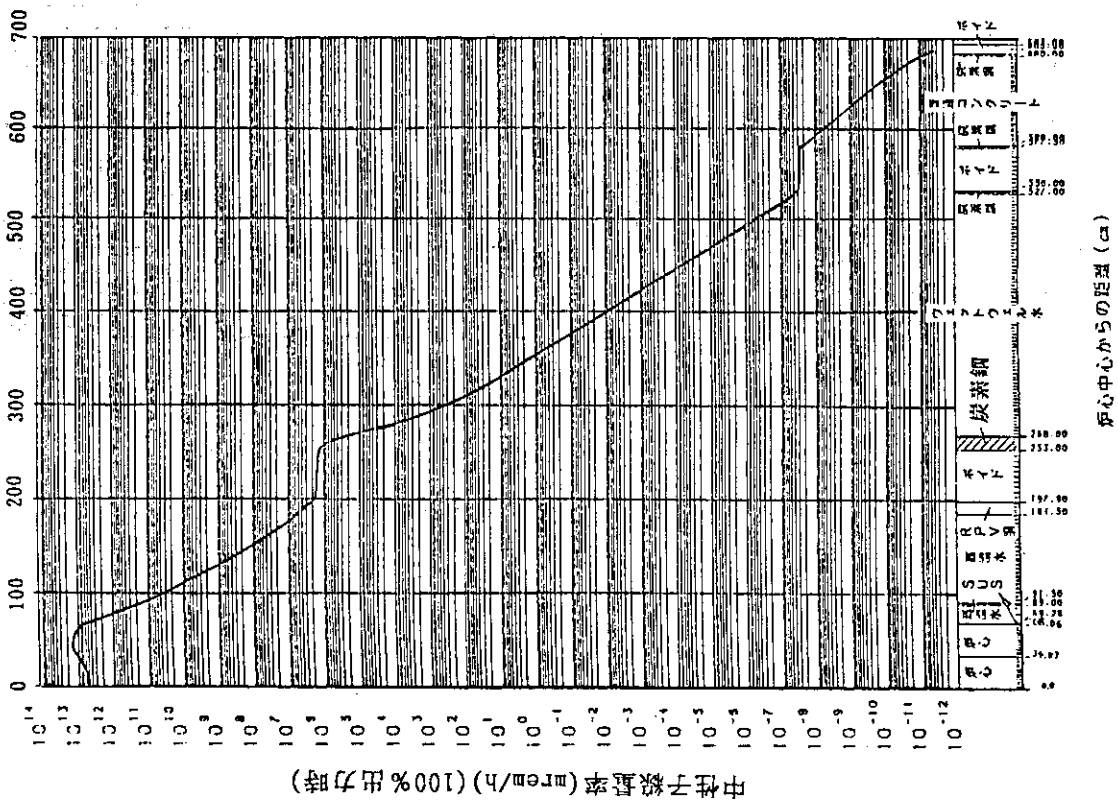


図-16 設計方式 C 炉心真横方向中性子線量率減衰¹⁾

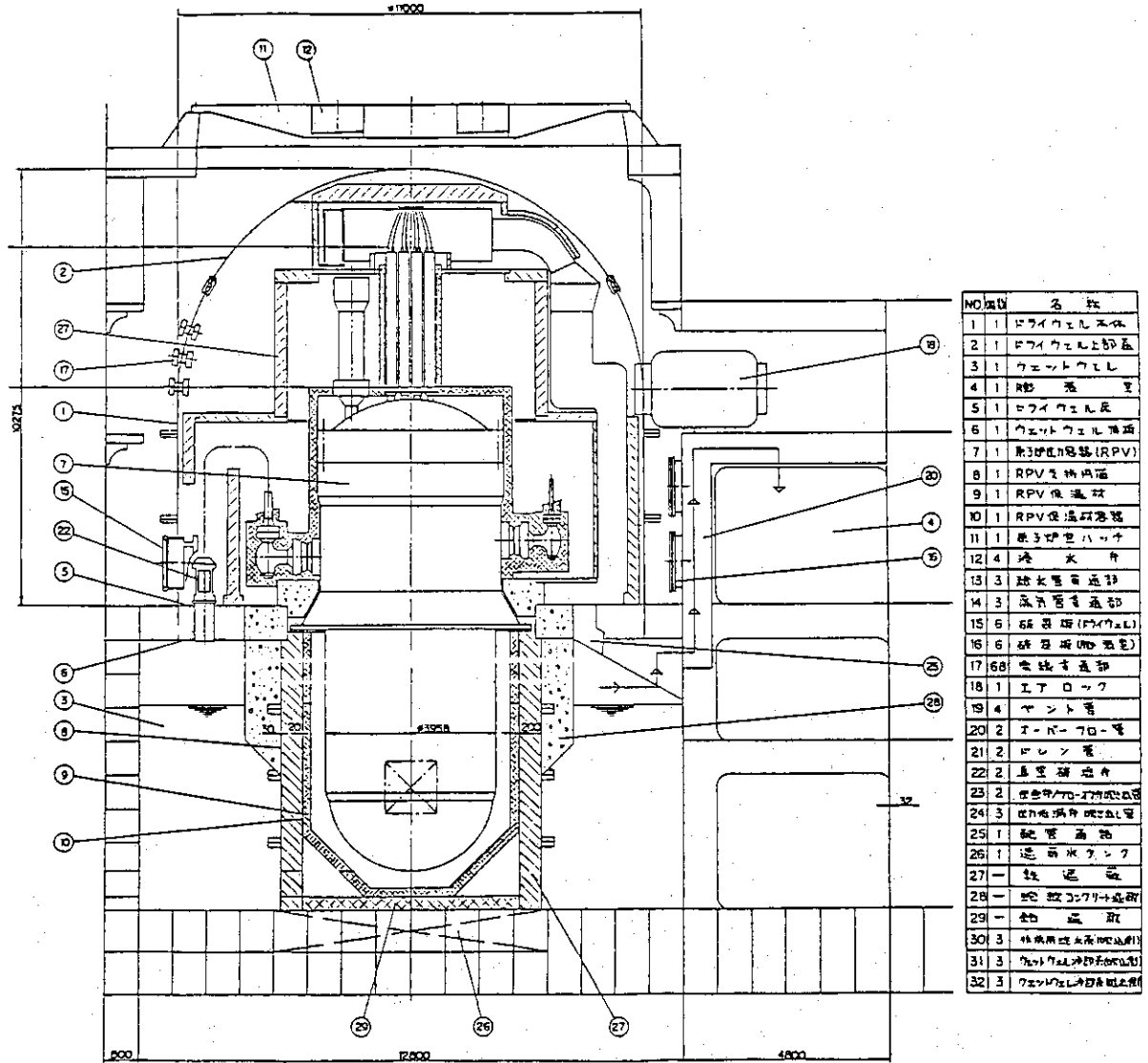


図-18 自己加圧一体型炉の原子炉³⁾

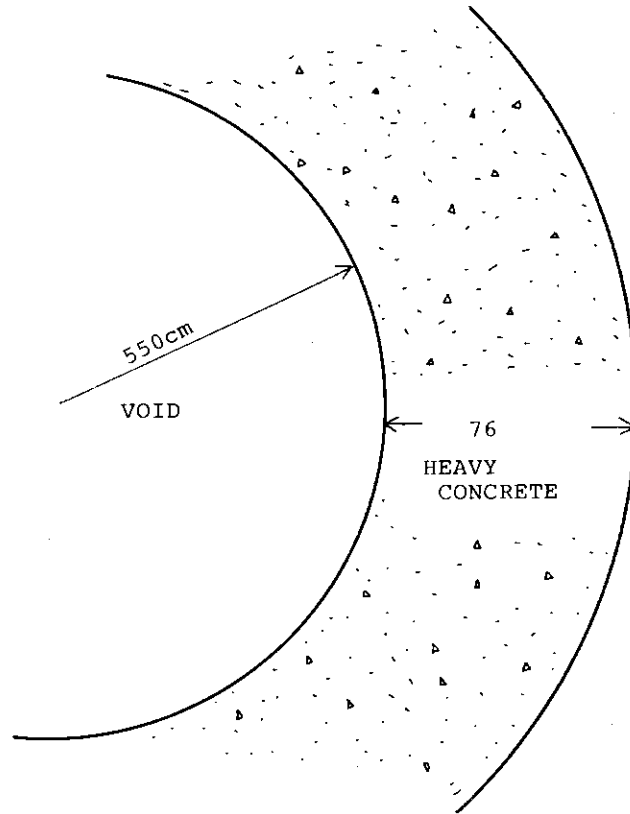


図-19 半一体型炉格納容器及び二次遮蔽を円柱モデルで近似した場合の半径及び重コンクリートの厚さ(断面図)

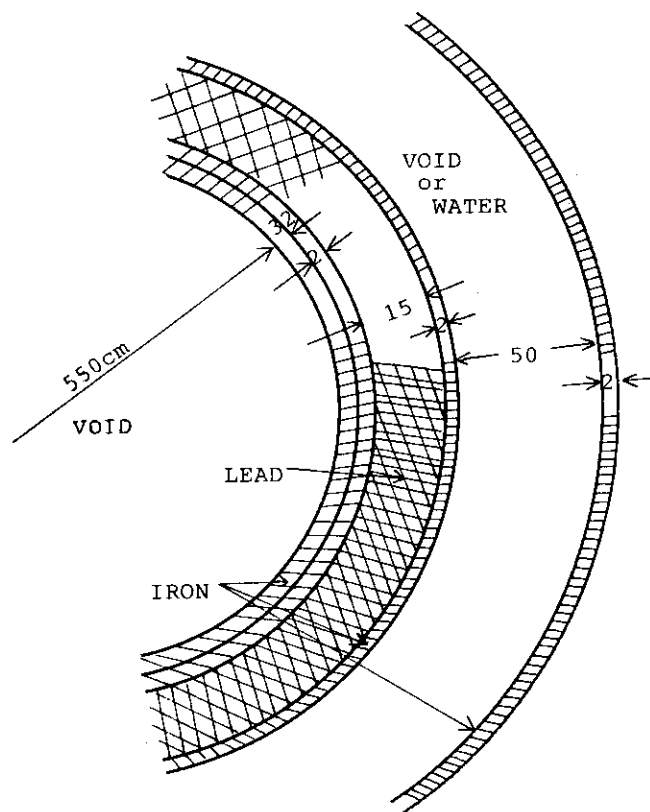


図-20 格納容器及び鉄-鉛-空間(水)多重層二次遮蔽の円柱モデル(断面図)

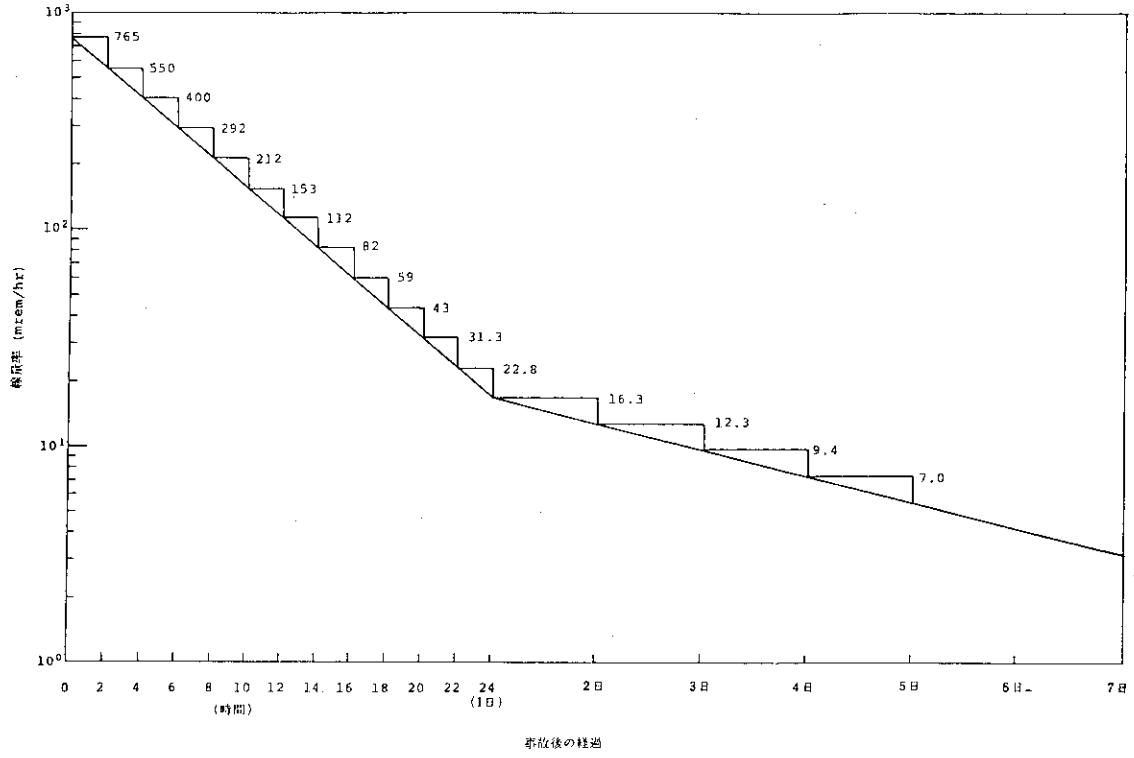


図-21 「むつ」設計における仮想事故時におけるエンジンルーム中の線量率²⁾

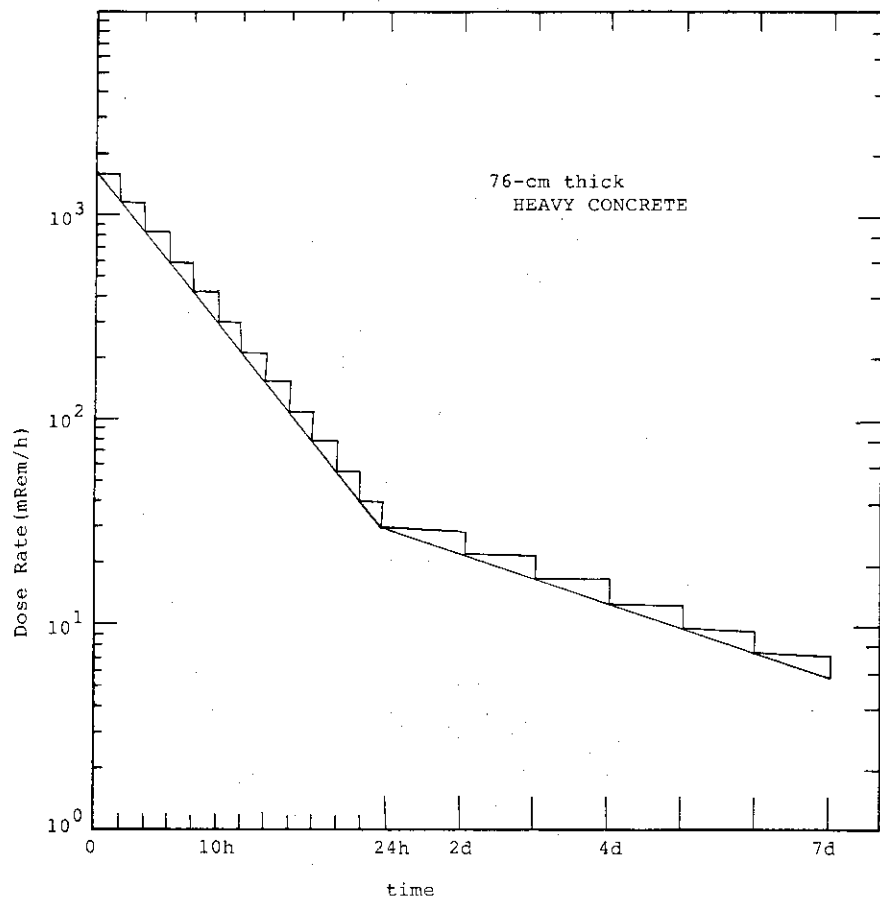


図-22 図-19に示したモデルにおける仮想事故時の二次遮蔽背面における線量率

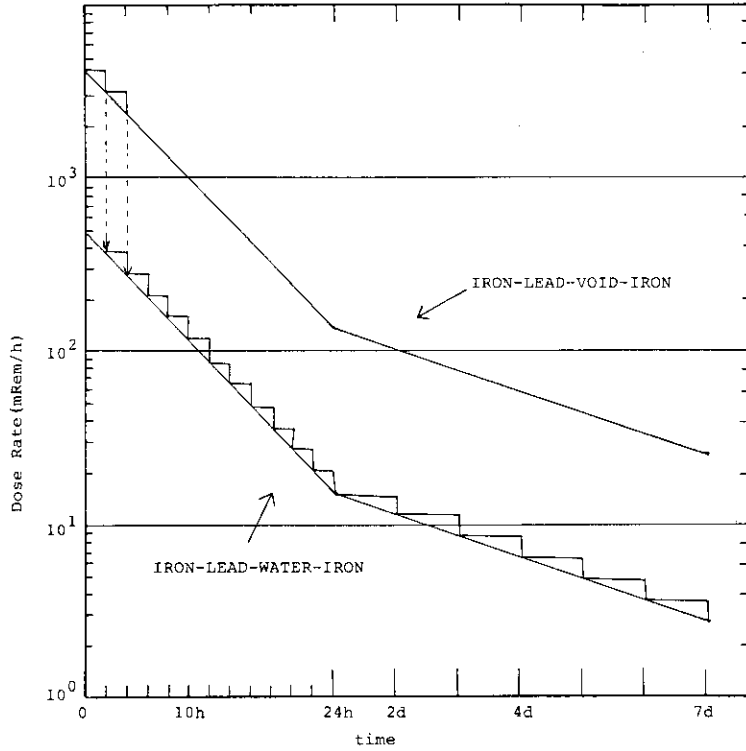


図-23 図-20に示したモデルにおける仮想事故時の二次遮蔽背面における線量率

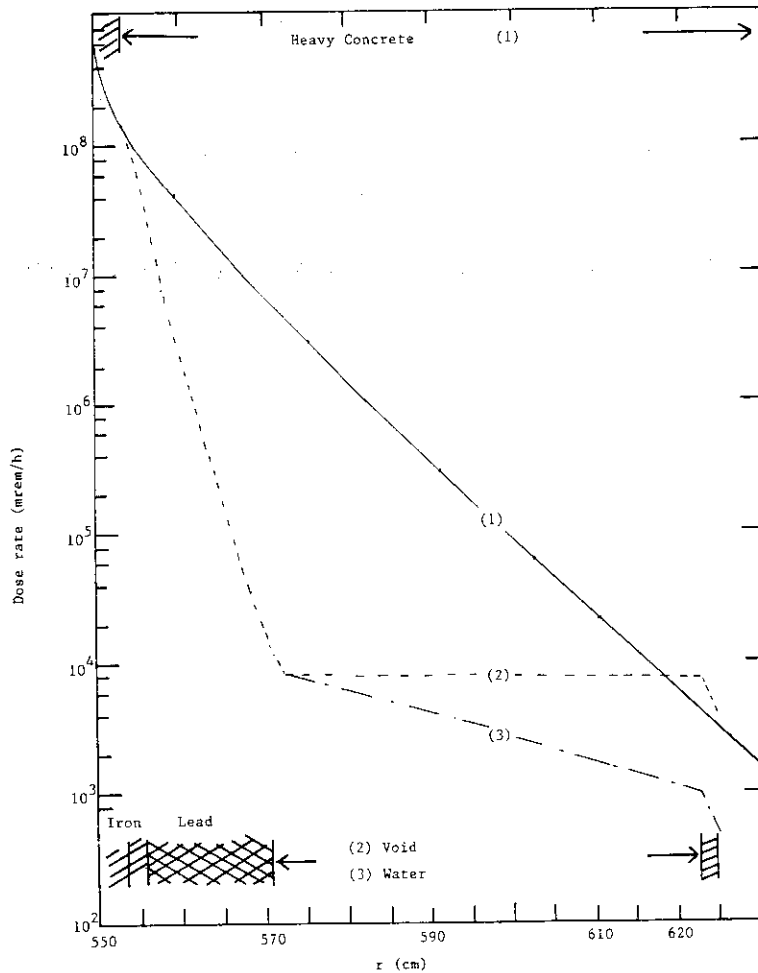


図-24 仮想事故直後の二次遮蔽体内線量率減衰の比較

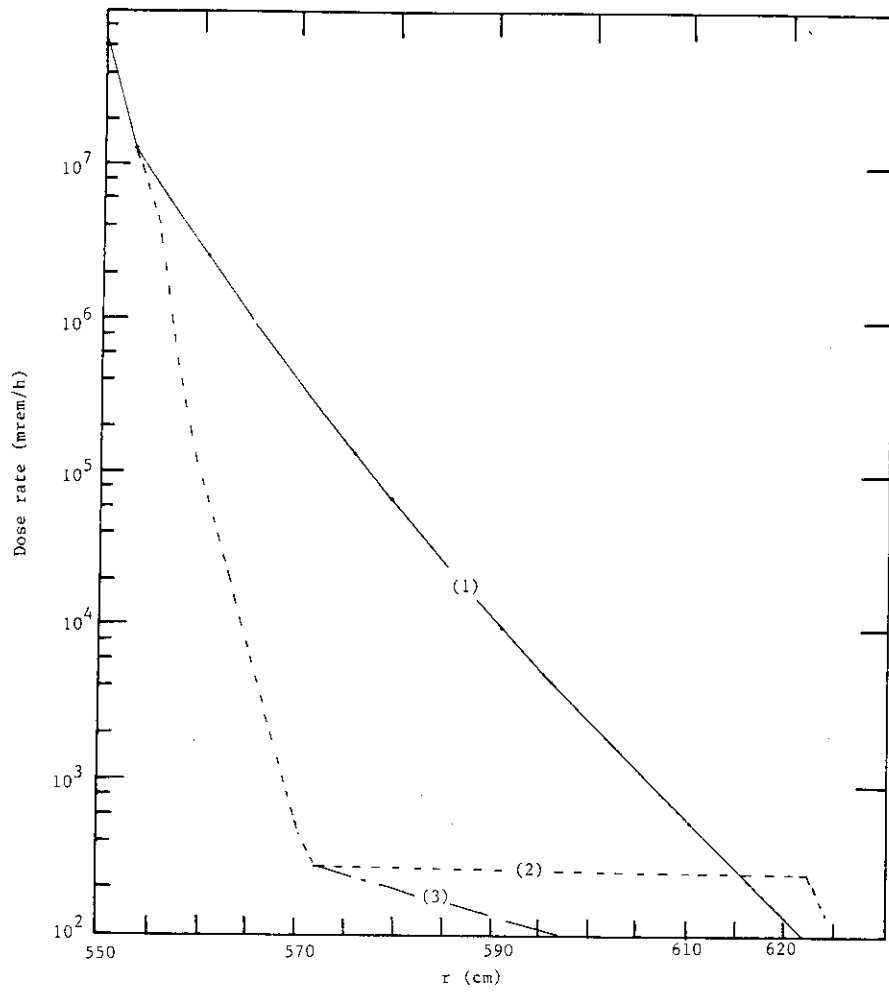


図-25 仮想事故一日後の二次遮蔽体内線量率減衰の比較