

JAERI - M

89-010

船用原子炉の遮蔽方式の最適化に関する調査

1989年2月

竹内 清*・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）で複写による実費頒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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

船用原子炉の遮蔽方式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^{*}・伊藤 泰義・横村 武宣

(1989年1月17日受理)

通常運転時およ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。

船用炉の場合、一次遮蔽の最適化は従業員の被曝低減化と原子炉の設置スペースを最小にするように行う。

一方、二次遮蔽は遮蔽の全重量の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。これら一次、二次遮蔽の目的を念頭におき両方の遮蔽の最適化を図る方法として、炉運転時の遮蔽設計において、従来の遮蔽設計で線量に関する設計目標値をおよそ一桁下げて、一次遮蔽、機器遮蔽がこの設計目標値を満足するように設けることにより、二次遮蔽の役割を仮想事故時にのみ限定させる。

事故時に、格納容器内に水を漲水することで、二次遮蔽重量を軽量化する検討を行った。その結果、漲水方法、漲水時間等、課題はあるものの十分に可能性のあることが明らかになった。

本研究は運輸省船舶技術研究所への委託調査「船用原子炉の遮蔽方式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1丁目15-16

* 船舶技術研究所

A Study on the Optimization with Shielding
Design of Marine Reactor

Kiyoshi TAKEUCHI*, Yasuyoshi ITOH
and Takeyoshi YOKOMURA

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

(Received January 17, 1989)

The primary shield should be optimized for the purpose of decreasing the radiation dose to personnel during reactor operation and also shut down. In general, the marine reactor should be designed as small as possible, which requires the minimization of the total space including the reactor and its primary shield. While for the secondary shield, its weight is overwhelmingly heavy and reaches a large percent of the total shield weight, which inevitably forces to minimize its weight.

Thus, a proposal is presented for the shielding optimization with taking the respective aim described above for the primary and secondary shield into account. This proposal requires that the target dose-rate level should be set as 1/10 of the usual one behind the primary shield during reactor operation, and that the primary shield and also the shield for equipments should be designed to satisfy this new target level, resulting in that the aim of the secondary shield can be restricted to only the hypothetical accident. Consequently this proposal enables us to consider the shielding design separately for the primary and the secondary shields. On the basis of this idea, a consideration is made for decreasing the secondary shield weight by means of filling water

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."

* Ship Research Institute

within the container at the time of accidents, which suggests a reasonable means of decreasing the weight, although there remain still several considerations on how to filling water and the time for filling.

Keywords: Marine Reactor, Shielding, Optimization

目 次

1. はじめに	1
2. 事故時のガンマ線源評価	1
3. 二次遮蔽透過計算	2
4. 事故時の被曝線量評価	4
5. 事故時のための二次遮蔽	5
6. 最大許容破損率での線源条件の場合	6
7. 結 論	7
7.1 遮蔽重量軽減	7
7.2 事故時のガンマ線源評価	8
7.3 二次遮蔽	8
7.4 時間経過に対する積分被曝線量	8
7.5 船舶構造を考慮に入れた二次遮蔽体	9
7.6 最大許容破損率下での被曝線量評価	9
参 考 文 献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Evaluation of Gamma-Ray Source at Accident	1
3. Transport Calculation through Secondary Shield	2
4. Evaluation of Dose Rate at Accident	4
5. Secondary Shield for Accident	5
6. For Source Condition at the Maximum Permissible Burst-Slug Rate	6
7. Conclusion	7
7.1 Decreasing Shield Weight	7
7.2 Evaluation of Gamma-Ray Source at Accident	8
7.3 Secondary Shield	8
7.4 Integrated Dose with the Lapse of Time	8
7.5 Secondary Shield with Taking Account of Marine Structure ..	9
7.6 Evaluation of Dose under the Maximum Permissible Burst-Slug Rate	9
References	9

1. はじめに

遮蔽重量軽減に関して最も効果的なことは二次遮蔽の重量を軽減することであることが前年度^{1),2)}の調査で明確になった。前年度の調査では仮想事故時における二次遮蔽について検討を加えたが、その際に仮想事故時の線源として原子力船「むつ」の遮蔽改修のための詳細遮蔽解析の結果を参考にした。³⁾これは事故時のガンマ線源をORIGENコードを使用して、事故直後、事故1日後及び事故7日後の3ケースについて算出したものである。この事故時のデータを検討した結果、事故直後と事故1日後とではガンマ線源の値に1桁以上の差があり、特に遮蔽体を透過しやすい高いガンマ線の線源の値が事故1日後では零になるエネルギー領域が存在するので、遮蔽体透過後の線量率で比較するとおよそ50倍もの差が出て来ることがわかった。したがって、事故直後と事故1日後の二次遮蔽透過線量率から事故時の全被曝線量を推定すると極めて過大評価となる。二次遮蔽重量軽減に関して、より詳細な議論を行うにはもっと詳細な事故時のガンマ線源データが必要であることが結論となった。

そこで今回の調査においてはまず事故時の時間経過に関して詳細なガンマ線源を最新のORIGENコードであるORIGEN-2コードにより算出し、このデータにもとづいて二次遮蔽透過後の線量率を評価して事故時の被曝線量を求めた。また、二次遮蔽体として船体の構造も考慮に入れて二次遮蔽重量の軽減について検討を行った。

2. 事故時のガンマ線源評価

使用した計算コードはORIGEN-2コードである。⁴⁾本コードはORIGENコードで炉心の燃焼時のエネルギースペクトルを推定するのに必要となるfast, epithermal, thermalの3つのインデックスが内蔵されている。今回の計算目的に最も似ているケースとしてPWR炉の30,000 MWD/Tの場合のインデックスを選んだ。原子炉が特定していなかったため炉心の条件を「むつ」の炉心を仮定し、燃焼度も「むつ」の最大値である13,500 MWD/Tとして事故時のガンマ線源を算出した。一般には各種のケースが考えられるが燃焼度と炉心のウランの重量がわかれば「むつ」の場合の比を掛けてやればよい。なお、「むつ」炉心のウラン重量については表1に示す。

上記の条件で計算した放射能のうち、現行の基準である「事故時に瞬時にして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」として放射線源をガンマ線エネルギー群別に求めたものを表2に示す。放射性核種のうち極めて短い半減期のものは事故直後からまもなく減衰してしまうので、今回は事故直後から1時間経過、2時間経過、4時間経過、12時間経過及び24時間経過のように事故直後から1日までを細かな時間に分割した。事故直後から1日以上経過するとかなり被曝線量率は小さくなってしまいうので全体の積分被曝線量には影響を及ぼさない。したがって1日経過以降は無視することにした。この表の値を図

1. はじめに

遮蔽重量軽減に関して最も効果的なことは二次遮蔽の重量を軽減することであることが前年度の調査^{1),2)}で明確になった。前年度の調査では仮想事故時における二次遮蔽について検討を加えたが、その際に仮想事故時の線源として原子力船「むつ」の遮蔽改修のための詳細遮蔽解析の結果を参考にした。³⁾これは事故時のガンマ線源をORIGENコードを使用して、事故直後、事故1日後及び事故7日後の3ケースについて算出したものである。この事故時のデータを検討した結果、事故直後と事故1日後とではガンマ線源の値に1桁以上の差があり、特に遮蔽体を透過しやすい高いガンマ線の線源の値が事故1日後では零になるエネルギー領域が存在するので、遮蔽体透過後の線量率で比較するとおおよそ50倍もの差が出て来ることがわかった。したがって、事故直後と事故1日後の二次遮蔽透過線量率から事故時の全被曝線量を推定すると極めて過大評価となる。二次遮蔽重量軽減に関して、より詳細な議論を行うにはもっと詳細な事故時のガンマ線源データが必要であることが結論となった。

そこで今回の調査においてはまず事故時の時間経過に関して詳細なガンマ線源を最新のORIGENコードであるORIGEN-2コードにより算出し、このデータにもとづいて二次遮蔽透過後の線量率を評価して事故時の被曝線量を求めた。また、二次遮蔽体として船体の構造も考慮に入れて二次遮蔽重量の軽減について検討を行った。

2. 事故時のガンマ線源評価

使用した計算コードはORIGEN-2コードである。⁴⁾本コードはORIGENコードで炉心の燃焼時のエネルギースペクトルを推定するのに必要となるfast, epithermal, thermalの3つのインデックスが内蔵されている。今回の計算目的に最も似ているケースとしてPWR炉の30,000 MWD/Tの場合のインデックスを選んだ。原子炉が特定していなかったため炉心の条件を「むつ」の炉心を仮定し、燃焼度も「むつ」の最大値である13,500 MWD/Tとして事故時のガンマ線源を算出した。一般には各種のケースが考えられるが燃焼度と炉心のウランの重量がわかれば「むつ」の場合の比を掛けてやればよい。なお、「むつ」炉心のウラン重量については表1に示す。

上記の条件で計算した放射能のうち、現行の基準である「事故時に瞬時にして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」として放射線源をガンマ線エネルギー群別に求めたものを表2に示す。放射性核種のうち極めて短い半減期のものは事故直後からまもなく減衰してしまうので、今回は事故直後から1時間経過、2時間経過、4時間経過、12時間経過及び24時間経過のように事故直後から1日までを細かな時間に分割した。事故直後から1日以上経過するとかかなり被曝線量率は小さくなってしまいうので全体の積分被曝線量には影響を及ぼさない。したがって1日経過以降は無視することにした。この表の値を図

示したのが図1であり、横軸は対数目盛でとったガンマ線のエネルギー (MeV) である。また、図中の丸の中の数字は事故直後からの経過時間とともに増加する。

図1から直ちにわかることは3 MeV以上の高いエネルギーのガンマ線源は事故1時間後には極めて小さく減衰してしまうことである。3 MeV以上の高いエネルギーのガンマ線は遮蔽体を透過しやすいので、この分の透過線量が無視できる程小さくなることは被曝線量の急激な減少を意味する。後述するようにこの予想は実証される。対照的に0.45 MeV～1.0 MeVのエネルギー領域では事故直後から24時間にわたってガンマ線源の減少率がわずかである。

PALLASコードでガンマ線遮蔽計算を行うには上述のORIGENコードの線源のままでは不適当であり、単位MeV、単位線源体積あたりに変換する必要がある。⁵⁾表3はPALLAS計算用に変換したガンマ線源であり、エネルギー点はPALLAS計算に適するように多少の変更を行っている。同表における全線源体積は仮定した格納容器の体積である。これを図2に示す。仮定した格納容器の大きさは半径が550 cmで高さが990 cmの円柱形状のモデルである。なお、表2を直観的に判断しやすいように図示したのが図3である。図3からわかるのは1 MeV以上のガンマ線源がエネルギーの増加とともに急激に減少することである。しかし、厚い二次遮蔽体を透過するのはむしろこの比較的小さな値の1 MeV以上のガンマ線である点に注意を要する。

3. 二次遮蔽透過計算

表3に示すPALLASコード用のガンマ線源を使って、まず二次遮蔽についての第1のモデルである図2に示すモデルに対してガンマ線遮蔽計算を実施した。その結果を図4に示す。これは550 cm半径の格納容器(構造材として3.2 cm厚の鉄を有する)の外側に76 cm厚の重コンクリート(密度が3.5とした)の二次遮蔽があるケースの半径方向に対するガンマ線の線量率の減衰を示している。横軸は半径(cm)であり、縦軸は線量率(mR/h)であり、図中の丸内の番号は事故直後からの経過時間に対応している。この図の減衰カーブは事故直後に対し経過時間とともに減衰が少しずつ急になっているが、これは経過時間とともに高いエネルギーのガンマ線源が弱くなってしまふからである。

図5には重コンクリート二次遮蔽透過後のガンマ線のエネルギースペクトルを示す。横軸はエネルギー(MeV)であり、縦軸はガンマ線のエネルギーE(MeV)をスカラー束に掛けたエネルギー束である。図中の丸内の番号は図4と同様に事故直後からの経過時間に対応している。事故直後に二次遮蔽を透過して出て来るエネルギー束は5.5 MeV近傍から0.2 MeVまでほぼ一定であることがわかる。一方、ガンマ線源のエネルギースペクトルは図3からわかるように1 MeV以上が透過線量率に大きく寄与することが理解できる。さらに詳細に検討すると、5.5 MeVの線源はおおよそ1.2 MeVの線源に較べておおよそ1/233と極めて小さいが、76 cm厚の重コンクリート透過後のエネルギー束はあまり差がなくなることがわかる。このことは1 MeV近傍のガンマ線源に対して4～6 MeV近くのエネルギーをもつガンマ線源は非常に重要であることを意味する。また、事故後1時間経過の時のエネルギースペクトルを見ると、3 MeV以上で急激な減

示したのが図1であり、横軸は対数目盛でとったガンマ線のエネルギー (MeV) である。また、図中の丸の中の数字は事故直後からの経過時間とともに増加する。

図1から直ちにわかることは3 MeV以上の高いエネルギーのガンマ線源は事故1時間後には極めて小さく減衰してしまうことである。3 MeV以上の高いエネルギーのガンマ線は遮蔽体を透過しやすいので、この分の透過線量が無視できる程小さくなることは被曝線量の急激な減少を意味する。後述するようにこの予想は実証される。対照的に0.45 MeV～1.0 MeVのエネルギー領域では事故直後から24時間にわたってガンマ線源の減少率がわずかである。

PALLASコードでガンマ線遮蔽計算を行うには上述のORIGENコードの線源のままでは不適当であり、単位MeV、単位線源体積あたりに変換する必要がある。⁵⁾表3はPALLAS計算用に変換したガンマ線源であり、エネルギー点はPALLAS計算に適するように多少の変更を行っている。同表における全線源体積は仮定した格納容器の体積である。これを図2に示す。仮定した格納容器の大きさは半径が550 cmで高さが990 cmの円柱形状のモデルである。なお、表2を直観的に判断しやすいように図示したのが図3である。図3からわかるのは1 MeV以上のガンマ線源がエネルギーの増加とともに急激に減少することである。しかし、厚い二次遮蔽体を透過するのはむしろこの比較的小さな値の1 MeV以上のガンマ線である点に注意を要する。

3. 二次遮蔽透過計算

表3に示すPALLASコード用のガンマ線源を使って、まず二次遮蔽についての第1のモデルである図2に示すモデルに対してガンマ線遮蔽計算を実施した。その結果を図4に示す。これは550 cm半径の格納容器(構造材として3.2 cm厚の鉄を有する)の外側に76 cm厚の重コンクリート(密度が3.5とした)の二次遮蔽があるケースの半径方向に対するガンマ線の線量率の減衰を示している。横軸は半径(cm)であり、縦軸は線量率(mR/h)であり、図中の丸内の番号は事故直後からの経過時間に対応している。この図の減衰カーブは事故直後に対し経過時間とともに減衰が少しずつ急になっているが、これは経過時間とともに高いエネルギーのガンマ線源が弱くなってしまうからである。

図5には重コンクリート二次遮蔽透過後のガンマ線のエネルギースペクトルを示す。横軸はエネルギー(MeV)であり、縦軸はガンマ線のエネルギーE(MeV)をスカラー束に掛けたエネルギー束である。図中の丸内の番号は図4と同様に事故直後からの経過時間に対応している。事故直後に二次遮蔽を透過して出て来るエネルギー束は5.5 MeV近傍から0.2 MeVまでほぼ一定であることがわかる。一方、ガンマ線源のエネルギースペクトルは図3からわかるように1 MeV以上が透過線量率に大きく寄与することが理解できる。さらに詳細に検討すると、5.5 MeVの線源はおよそ1.2 MeVの線源に較べておよそ1/233と極めて小さいが、76 cm厚の重コンクリート透過後のエネルギー束はあまり差がなくなることがわかる。このことは1 MeV近傍のガンマ線源に対して4～6 MeV近くのエネルギーをもつガンマ線源は非常に重要であることを意味する。また、事故後1時間経過の時のエネルギースペクトルを見ると、3 MeV以上で急激な減

少を示していることがわかる。これによって事故後1時間経過の透過線量率は事故直後に較べて急に減少することになるのである。事故後1時間経過、4時間経過及び12時間経過の透過エネルギースペクトルはいずれもおよそ2 MeV以上の高いガンマ線の成分の減少が大きいことを示している。対照的におよそ2 MeV以下の比較的低いエネルギー成分は事故後の時間経過とともにある一定の割合で減少していく様子が示されている。特に1 MeV以下の透過エネルギースペクトルは1 MeV以下のガンマ線源のスペクトルの形や絶対値に依存しないで、むしろ1 MeV以上のガンマ線の散乱減速によって決まると考えてよい。以上のことから、二次遮蔽透過後の線量に寄与するガンマ線源は1 MeV以上のものであり、1 MeV以下のガンマ線源は無視してもよい程であると言ってもよい。しかも、特に4 MeV以上のガンマ線源は精度よく評価する必要があると考えられる。

次に、二次遮蔽のモデルとして重コンクリート層の代わりに鉄-鉛層を配した例を示した。これを図6として図示する。図6でVOIDあるいはWATERとあるのは通常運転及び停止時には空間のままの層であるが、事故時には水が注入されて水遮蔽体になることを意味する。図7にこのモデルに対する二次遮蔽計算結果を示す。横軸は円柱格納容器の半径であり、縦軸は線量率 (mR/h) である。本モデルでは550 cm半径の格納容器の3.2 cm厚の鉄の外側に15 cm厚の鉛を挿入するための2 cm厚の鉄層が設けられている。そして50 cm厚の空間の外側に2 cm厚の鉄層があるモデルである。まず、丸の中の1及び2の番号により50 cm厚の空間がそのままの状態における事故直後及び2時間経過後のガンマ線の線量率減衰曲線を示す。期待通り15 cm厚の鉛により線量率はおよそ4桁近く減衰するが空間の中では減衰は無視できる程で最外層の2 cm厚の鉄により再び減衰する。

事故2時間経過するうちに水が50 cm厚の空間を満たすと仮定すると、図中丸の中の2の番号にダッシュがついた減衰曲線に移ることになる。以降の経過時間は全て50 cm厚の水遮蔽体がある場合の減衰曲線となる。この図から50 cmの水遮蔽体の存在により二次遮蔽透過後の線量率はおよそ1桁減少することがわかった。

図8は本モデルにおける二次遮蔽透過後のガンマ線エネルギー束単位でのエネルギースペクトルである。横軸はエネルギー (MeV) で、縦軸はエネルギー束である。図中の丸中の番号は事故直後、1時間経過、2時間経過及び4時間経過のエネルギースペクトルであり、いずれも空間のままの状態の時のものである。また、ダッシュのついた番号は水が注入されて水遮蔽体になった際のエネルギースペクトルである。同図で事故直後のエネルギースペクトルを見ると、3.5 MeV以上の高いガンマ線の成分は図5の重コンクリート遮蔽の場合と較べて減少しているが、対照的に3.5 MeV以下の低いガンマ線の成分は重コンクリートの場合よりも大きいことが示されている。特に2.5 MeVから0.4 MeVまでのエネルギー範囲で大きく盛り上がっている。この理由は鉛の断面積が2~3 MeV領域で最小になることに関係しており、このために2 MeV近傍のガンマ線が遮蔽体を透過しやすくなる。さらに、この透過した2 MeV近傍のガンマ線が散乱して2 MeV以下のエネルギー領域のガンマ線を増加させることになる。もちろん、鉛が重コンクリートに較べて遮蔽性能が劣っているわけではない。15 cm厚の鉛と76 cm厚の重コンクリートを較べているわけで、厚さで約5.1倍の差があり、比重の比の3.24を考慮に入れてもやはり鉛の使用の方が効果的な遮蔽になる。事故後1時間から4時間経過に対するエネルギースペクトルは高いエネルギーのガン

マ線源が減衰してしまうので重コンクリート使用の際の同じ経過時間に対するスペクトルと似た様なものになって来る。この図では4時間経過後に水が空間を満たしたと仮定した場合のエネルギースペクトルの変化を丸中の4にダッシュをつけて図示してある。エネルギースペクトルの形はあまり変わらないけれども絶対値では1桁の減少となる。

図9では事故後2時間経過した時には水が空間を満たしたと仮定し、2時間以降の二次遮蔽透過エネルギースペクトルを示している。議論は図8における4時間経過後の変化と同様になる。

4. 事故時の被曝線量評価

仮想事故の条件、すなわち550 cm半径の格納容器内に核分裂生成物のうち、希ガス100%、ハロゲン50%、その他1%が放出されて一様なガンマ線源が形成された時、二次遮蔽のモデル1について二次遮蔽体背後における線量の計算結果を図10に示す。横軸は事故直後からの経過時間であり、縦軸は照射線量率(mR/h)である。事故直後にはおよそ1.2 R/hとかなり大きな値であるが、1時間の経過時間後にはおよそ200 mR/hと1/6に減少していることが図示されている。同様に2時間後には110 mR/hになり、3時間後にはおよそ80 mR/h、4時間後には62 mR/hに減少する。全被曝線量を推定するために同図の横軸の時間により積分する。そのためにステップ状の線量率変化を仮定した。

経過時間に対する積分線量の和、すなわち累積積分線量の時間増加を図11に示す。同図の縦軸は線量(Rem)であるが、ここでは近似的に $Rem = R$ と仮定した。モデル1のケースはコンクリート遮蔽であるから同図で丸の1の番号のケースである。事故直後から1/5時間(12分間)で0.24 Remからプロットが始まり、1時間ではおよそ0.5 Rem、2時間ではおよそ0.63 Rem、3時間では0.74 Rem、4時間では0.8 Rem、6時間で0.89 Rem、10時間で1 Rem、16時間で1.1 Rem、これ以降の時間では1.1 Remからほとんど増加しないことがわかる。そこで全累積積分線量を1.13 Remと推定し、事故直後からの増加の割合をみると最初の12分間で全被曝線量の21.2%、1時間では44.2%、2時間では55.8%、3時間では65.5%、4時間では70.8%、6時間では78.8%、10時間では88.5%となる。

次にモデル2について二次遮蔽体背面の照射線量率を計算し、横軸を事故直後からの経過時間にとってプロットした図を図12に示す。同図で点線のプロットは鉄-鉛-ボイド-鉄遮蔽体のケースであり、実線のプロットはボイドが水で満たされたケースである。事故発生時にはモデル2の二次遮蔽は水がなくボイドのままであるから点線でプロットした線量率が被曝線量になってくる。このケースでは事故直後は2.6 R/hとかなり大きな線量率である。したがって、モデル1におけるのと同様に被曝線量を推定すれば、事故直後から12分間で0.52 Remの被曝線量となる。1時間ではおよそ1.5 Remとなり、2時間ではおよそ2.2 Remとなる。もし、2時間後にボイドの二次遮蔽に水が満たされると仮定すれば、図12で2時間の時点で点線でプロットした線量率から実線でプロットした線量率に減少することになる。したがって図11の累積積分線量の時間に対する増加は2時間経過後は丸内に2の番号で示される点線の方へ移行することになり積分線量のはほ

マ線源が減衰してしまうので重コンクリート使用の際の同じ経過時間に対するスペクトルと似た様なものになって来る。この図では4時間経過後に水が空間を満たしたと仮定した場合のエネルギースペクトルの変化を丸中の4にダッシュをつけて図示してある。エネルギースペクトルの形はあまり変わらないけれども絶対値では1桁の減少となる。

図9では事故後2時間経過した時には水が空間を満たしたと仮定し、2時間以降の二次遮蔽透過エネルギースペクトルを示している。議論は図8における4時間経過後の変化と同様になる。

4. 事故時の被曝線量評価

仮想事故の条件、すなわち550 cm半径の格納容器内に核分裂生成物のうち、希ガス100%、ハロゲン50%、その他1%が放出されて一様なガンマ線源が形成された時、二次遮蔽のモデル1について二次遮蔽体背後における線量の計算結果を図10に示す。横軸は事故直後からの経過時間であり、縦軸は照射線量率(mR/h)である。事故直後にはおよそ1.2 R/hとかなり大きな値であるが、1時間の経過時間後にはおよそ200 mR/hと1/6に減少していることが図示されている。同様に2時間後には110 mR/hになり、3時間後にはおよそ80 mR/h、4時間後には62 mR/hに減少する。全被曝線量を推定するために同図の横軸の時間により積分する。そのためにステップ状の線量率変化を仮定した。

経過時間に対する積分線量の和、すなわち累積積分線量の時間増加を図11に示す。同図の縦軸は線量(Rem)であるが、ここでは近似的に $Rem = R$ と仮定した。モデル1のケースはコンクリート遮蔽であるから同図で丸の1の番号のケースである。事故直後から1/5時間(12分間)で0.24 Remからプロットが始まり、1時間ではおよそ0.5 Rem、2時間ではおよそ0.63 Rem、3時間では0.74 Rem、4時間では0.8 Rem、6時間で0.89 Rem、10時間で1 Rem、16時間で1.1 Rem、これ以降の時間では1.1 Remからほとんど増加しないことがわかる。そこで全累積積分線量を1.13 Remと推定し、事故直後からの増加の割合をみると最初の12分間で全被曝線量の21.2%、1時間では44.2%、2時間では55.8%、3時間では65.5%、4時間では70.8%、6時間では78.8%、10時間では88.5%となる。

次にモデル2について二次遮蔽体背面の照射線量率を計算し、横軸を事故直後からの経過時間にとってプロットした図を図12に示す。同図で点線のプロットは鉄-鉛-ボイド-鉄遮蔽体のケースであり、実線のプロットはボイドが水で満たされたケースである。事故発生時にはモデル2の二次遮蔽は水がなくボイドのままであるから点線でプロットした線量率が被曝線量になってくる。このケースでは事故直後は2.6 R/hとかなり大きな線量率である。したがって、モデル1におけるのと同様に被曝線量を推定すれば、事故直後から12分間で0.52 Remの被曝線量となる。1時間ではおよそ1.5 Remとなり、2時間ではおよそ2.2 Remとなる。もし、2時間後にボイドの二次遮蔽に水が満たされると仮定すれば、図12で2時間の時点で点線でプロットした線量率から実線でプロットした線量率に減少することになる。したがって図11の累積積分線量の時間に対する増加は2時間経過後は丸内に2の番号で示される点線の方へ移行することになり積分線量のはは

とんど増加していないことがわかる。このケースでは4時間経過時の積分線量はおよそ2.27 Remであり、12時間では2.4 Remとなり、これ以降の増加は無視できる。このケースにおける被曝線量の時間に対する変化は全被曝線量を2.4 Remと推定すれば、事故直後から12分間で21.7%、1時間で62.5%、2時間で91.7%である。

水が満たされる時間を3時間後あるいは4時間後と仮定したケースも図11に一点鎖線及び二点鎖線で示してある。3時間後にボイドが水で満たされるケースでは3時間内の被曝線量はおよそ2.65 Remであり、12時間では2.9 Remとなり増加はほとんどしていないことがわかる。このケースにおける全被曝線量に対する割合は事故直後から12分間で17.9%、1時間で51.7%、2時間で75.9%、3時間で91.4%となる。もし4時間後にボイドが水で満たされると仮定すると、4時間後の被曝線量はおよそ3 Remであり、12時間後でも3.1 Remとほとんど増加しないので、全被曝線量に対する割合も3時間でボイドが水で満たされるケースとあまり変化はない。すなわち、事故直後から12分間で約16.8%、1時間で48.4%、2時間で約71%、3時間で85.5%、4時間で96.8%となる。

以上のことから、二次遮蔽のボイド領域に早い時間で水を注入すれば被曝線量が減少することがわかる。念のために事故後1時間でボイドが水で満たされると仮定すると、2時間における被曝線量は約1.57 Remとなり、4時間では約1.66 Rem、8時間では1.75 Rem、12時間では約1.79 Remとなり全被曝線量ではおよそ1.84 Remと推定される。このケースの全被曝線量に対する時間経過の割合は、事故後12分間で28.3%、1時間で81.5%、2時間で85.3%、4時間で90.2%となる。以上の時間経過に対する被曝線量をまとめたのが表4である。

なお、モデル2のボイドを有する遮蔽の方が積分被曝線量はモデル1の重コンクリート遮蔽のケースよりも大きくなることが図11からわかるが、この理由は前章で説明したように鉛遮蔽体の断面積が2~3 MeVのエネルギー領域で最小をもつために比較的高いエネルギーのガンマ線が透過しやすくなることによる。しかし、いずれのケースも全被曝線量は規制値の12 Remよりもかなり下まわっており、ここで検討した最悪のケースの二次遮蔽体のボイドが4時間後に水で満たされる場合でもおよそ3.1 Remである。前回の検討例^{1),2)}では12 Remを少し上まわる値が推定されたが、今回は事故時及びその経過時間に対するガンマ線源をより正確に評価し、しかも経過時間を事故直後はかなり細かく選んだので前年度の評価計算例に較べて格段の精度向上がみられ、その結果被曝線量がかなり小さくなったわけである。

5. 事故時のための二次遮蔽

前章では具体的な船用炉として「むつ」の炉心を対象にして事故時における二次遮蔽について、二次遮蔽背面の線量の評価を行い、事故時の被曝線量の検討を行った。今後開発されると予想される船用炉の炉心出力は「むつ」の場合より大きい上に燃焼度も「むつ」の場合よりも大きいであろう、遮蔽の最適化を遮蔽重量軽減化の上から検討を行った際に、具体的にとりあげた3つの船用炉⁶⁾の炉心と「むつ」の炉心のウラン重量と燃焼度について表5にまとめた。新たに提案され

とんど増加していないことがわかる。このケースでは4時間経過時の積分線量はおよそ2.27 Remであり、12時間では2.4 Remとなり、これ以降の増加は無視できる。このケースにおける被曝線量の時間に対する変化は全被曝線量を2.4 Remと推定すれば、事故直後から12分間で21.7%、1時間で62.5%、2時間で91.7%である。

水が満たされる時間を3時間後あるいは4時間後と仮定したケースも図11に一点鎖線及び二点鎖線で示してある。3時間後にボイドが水で満たされるケースでは3時間内の被曝線量はおよそ2.65 Remであり、12時間では2.9 Remとなり増加はほとんどしていないことがわかる。このケースにおける全被曝線量に対する割合は事故直後から12分間で17.9%、1時間で51.7%、2時間で75.9%、3時間で91.4%となる。もし4時間後にボイドが水で満たされると仮定すると、4時間後の被曝線量はおよそ3 Remであり、12時間後でも3.1 Remとほとんど増加しないので、全被曝線量に対する割合も3時間でボイドが水で満たされるケースとあまり変化はない。すなわち、事故直後から12分間で約16.8%、1時間で48.4%、2時間で約71%、3時間で85.5%、4時間で96.8%となる。

以上のことから、二次遮蔽のボイド領域に早い時間で水を注入すれば被曝線量が減少することがわかる。念のために事故後1時間でボイドが水で満たされると仮定すると、2時間における被曝線量は約1.57 Remとなり、4時間では約1.66 Rem、8時間では1.75 Rem、12時間では約1.79 Remとなり全被曝線量ではおよそ1.84 Remと推定される。このケースの全被曝線量に対する時間経過の割合は、事故後12分間で28.3%、1時間で81.5%、2時間で85.3%、4時間で90.2%となる。以上の時間経過に対する被曝線量をまとめたのが表4である。

なお、モデル2のボイドを有する遮蔽の方が積分被曝線量はモデル1の重コンクリート遮蔽のケースよりも大きくなることが図11からわかるが、この理由は前章で説明したように鉛遮蔽体の断面積が2~3 MeVのエネルギー領域で最小をもつために比較的高いエネルギーのガンマ線が透過しやすくなることによる。しかし、いずれのケースも全被曝線量は規制値の12 Remよりもかなり下まわっており、ここで検討した最悪のケースの二次遮蔽体のボイドが4時間後に水で満たされる場合でもおよそ3.1 Remである。前回の検討例^{1),2)}では12 Remを少し上まわる値が推定されたが、今回は事故時及びその経過時間に対するガンマ線源をより正確に評価し、しかも経過時間を事故直後はかなり細かく選んだので前年度の評価計算例に較べて格段の精度向上がみられ、その結果被曝線量がかなり小さくなったわけである。

5. 事故時のための二次遮蔽

前章では具体的な船用炉として「むつ」の炉心を対象にして事故時における二次遮蔽について、二次遮蔽背面の線量の評価を行い、事故時の被曝線量の検討を行った。今後開発されると予想される船用炉の炉心出力は「むつ」の場合より大きい上に燃焼度も「むつ」の場合よりも大きいであろう、遮蔽の最適化を遮蔽重量軽減化の上から検討を行った際に、具体的にとりあげた3つの船用炉⁶⁾の炉心と「むつ」の炉心のウラン重量と燃焼度について表5にまとめた。新たに提案され

た3つの炉型における全燃焼度はいずれも「むつ」のものを上まわっており、その程度はおよそ2.34～3.37倍である。そこで燃焼度とガンマ線源の強度とが比例すると仮定すれば同表から最大で「むつ」の場合の3.4倍になり得る。前章で二次遮蔽について検討した際の最大被曝線量を与えるケースはモデル2の遮蔽体における4時間後にボイド領域に水が充満する場合であった。その時の推定被曝線量はおよそ3.1 Remであったので、この値を3.4倍すると10.54 Remとなる。これは事故時の規制値である12 Remを下まわっている。

モデル2の二次遮蔽体のボイド領域に4時間で水が注入できるかどうかの検討が必要であるが、この場合はむしろ安全性確保の立場から2時間以内でボイド領域に水を注入する方法を考えた方がよい。その1つの案は二次遮蔽体のボイド全域に2時間以内で水を注入するのではなく、船の機関室のある方面のみをプライオリティ1として最優先にボイド部分に水を注入した方が合理的である。そのためには二次遮蔽体を大きく4つに分割して鉄板で区切りを入れる。すなわち、船の船首方向、船尾方向及び両舷の4つ分割するように区切るのである。船の両舷の二次遮蔽体背面には乗組員は通常では居ないのであるから事故直後の被曝線量はない筈である。さらに、船の両舷の二次遮蔽の外側には耐衝突構造のための空間領域が設けられており、その外側が船の外側構造になっている。この空間領域の幅は「むつ」の例ではおよそ280 cmあり、ガンマ線の線量はこの距離によりおよそ70%に減衰することが期待できる。さらに船の舷の鉄板構造により、この鉄板を10 mm～20 mmとすれば図7の外側の鉄板2 cmによる減衰率からガンマ線の線量は0.73～0.52に減衰することが期待できる。以上の減衰から船の両舷の外側では事故時の被曝線量はすでに推定した最大値である10.54 Remに0.5～0.35を掛けて5.27～3.69 Remとなる。したがって、この値から考えられることは事故時に船の両舷の二次遮蔽のボイド領域には水の注入がかなり遅れてもよいということである。

仮りに船の機関室側の二次遮蔽体のボイド領域に1時間で水を注入できるとすれば、安全率を見積っても2時間で水が確実に入ることとなり、先に行った推定被曝線量が図11の丸内の4のケースから丸内の2のケースに減少(0.774の比)するので二次遮蔽体の鉛をもっと薄くすることが可能になる。あるいは鉛遮蔽厚をかなり薄くしてその分を鉄板で置き換えてもよいのかも知れない。このように水の注入能力を考慮に入れて二次遮蔽の構造をさらに最適化することが可能であり、これによって二次遮蔽の重量軽減化は一層合理的に行えるものと考えられる。

6. 最大許容破損率での線源条件の場合

西ドイツでは原子力船に対する安全基準として、一般の原子力発電炉に対する安全基準とは別のものを設定している。その理由は一体型炉における仮想事故時の格納容器内放射能を評価する際に、冷却材喪失事故時の解析の結果、新たに燃料破損を生じないことから、設計燃料破損率である1%破損を適用する。そして破損燃料からの放射能の放出割合は、希ガス10%、ハロゲン3%、揮発性固体2%、その他0.1%としている。この条件は一体型炉では冷却材喪失事故時にも炉心は常に冠水状態に保たれることから合理的安全基準であると思われる。

た3つの炉型における全燃焼度はいずれも「むつ」のものを上まわっており、その程度はおよそ2.34～3.37倍である。そこで燃焼度とガンマ線源の強度とが比例すると仮定すれば同表から最大で「むつ」の場合の3.4倍になり得る。前章で二次遮蔽について検討した際の最大被曝線量を与えるケースはモデル2の遮蔽体における4時間後にボイド領域に水が充満する場合であった。その時の推定被曝線量はおよそ3.1 Remであったので、この値を3.4倍すると10.54 Remとなる。これは事故時の規制値である12 Remを下まわっている。

モデル2の二次遮蔽体のボイド領域に4時間で水が注入できるかどうかの検討が必要であるが、この場合はむしろ安全性確保の立場から2時間以内でボイド領域に水を注入する方法を考えた方がよい。その1つの案は二次遮蔽体のボイド全域に2時間以内で水を注入するのではなく、船の機関室のある方面のみをプライオリティ1として最優先にボイド部分に水を注入した方が合理的である。そのためには二次遮蔽体を大きく4つに分割して鉄板で区切りを入れる。すなわち、船の船首方向、船尾方向及び両舷の4つ分割するように区切るのである。船の両舷の二次遮蔽体背面には乗組員は通常では居ないのであるから事故直後の被曝線量はない筈である。さらに、船の両舷の二次遮蔽の外側には耐衝突構造のための空間領域が設けられており、その外側が船の外側構造になっている。この空間領域の幅は「むつ」の例ではおよそ280 cmあり、ガンマ線の線量はこの距離によりおよそ70%に減衰することが期待できる。さらに船の舷の鉄板構造により、この鉄板を10 mm～20 mmとすれば図7の外側の鉄板2 cmによる減衰率からガンマ線の線量は0.73～0.52に減衰することが期待できる。以上の減衰から船の両舷の外側では事故時の被曝線量はすでに推定した最大値である10.54 Remに0.5～0.35を掛けて5.27～3.69 Remとなる。したがって、この値から考えられることは事故時に船の両舷の二次遮蔽のボイド領域には水の注入がかなり遅れてもよいということである。

仮りに船の機関室側の二次遮蔽体のボイド領域に1時間で水を注入できるとすれば、安全率を見積っても2時間で水が確実に入ることとなり、先に行った推定被曝線量が図11の丸内の4のケースから丸内の2のケースに減少(0.774の比)するので二次遮蔽体の鉛をもっと薄くすることが可能になる。あるいは鉛遮蔽厚をかなり薄くしてその分を鉄板で置き換えてもよいのかも知れない。このように水の注入能力を考慮に入れて二次遮蔽の構造をさらに最適化することが可能であり、これによって二次遮蔽の重量軽減化は一層合理的に行えるものと考えられる。

6. 最大許容破損率での線源条件の場合

西ドイツでは原子力船に対する安全基準として、一般の原子力発電炉に対する安全基準とは別のものを設定している。その理由は一体型炉における仮想事故時の格納容器内放射能を評価する際に、冷却材喪失事故時の解析の結果、新たに燃料破損を生じないことから、設計燃料破損率である1%破損を適用する。そして破損燃料からの放射能の放出割合は、希ガス10%、ハロゲン3%、揮発性固体2%、その他0.1%としている。この条件は一体型炉では冷却材喪失事故時にも炉心は常に冠水状態に保たれることから合理的安全基準であると思われる。

報告書(6)の仮定を参考にして、ここでも多少安全側に上記の仮想事故時の放射能の放出条件を設定する。すなわち、これまで用いた発電炉の仮想事故時の値に比較して、希ガス、ハロゲン、及びその他についていずれの場合も1/1000の値に条件を設定する。この理由は設計燃料破損率が1%であるから1/100になり、希ガスはその10%であるから1/1000になり、ハロゲンやその他もおおよそ1/1000になるからである。したがって、新ためて遮蔽計算を行う必要はなく、仮想事故時の被曝線量が推定できることになる。すなわち、図1、図3の線源の値は単純に1/1000になり、図4及び図6の線量率減衰曲線の絶対値も単純に1/1000になり、したがって図10及び図12の事故直後からの時間経過に対する被曝線量も単純に1/1000になる。以上のことから最終的な図11に示される積分被曝線量も1/1000になり、重コンクリートのモデル1のケースでは1.13 mRemとなり、鉄-鉛-ボイド-鉄のモデル2のケースの4時間後にボイドが水で充満するケースでもわずか3.1 mRemとなる。

この値ではあまりにも非合理的な遮蔽になっているのでモデル2のケースについて、少し議論を行う必要がある。再び図7を参照してもらおう。当然のことであるが、鉛15 cm厚は厚過ぎるので5 cm厚に仮定してみる。図7で鉛5 cm厚の時の値は事故直後の場合、550+5(鉄)+5(鉛)=560 cmの時の 2.2×10^6 mR/hと読める。鉛背後の鉄2 cm及びボイド背後の鉄2 cmでの減衰は $5/8.5 \times 2.5/4.8 = 0.3$ となるので、 $2.2 \times 10^6 \times 0.3 = 6.6 \times 10^5$ mR/hとなる。ガンマ線源は1/1000になるのであるから、 6.6×10^2 mR/hになる筈である。この値と図12に示されている事故直後のボイドの状態での被曝線量の値である 2.6×10^3 mRemを較べるとおおよそ1/4に減少している。したがって、もっと鉛の厚さを減じてよいことがわかる。そこで鉛厚を2.5 cm厚に仮定してみる。おおよそ 9×10^6 mR/hと図7から読めるのでこの値に0.3を掛け1/1000にすると 2.7×10^3 mR/hとなり、これは 2.6×10^3 mRemの被曝線量にはほぼ等しくなる。

二次遮蔽の重量は前回の報告書^{1),2)}の場合、重コンクリート76 cmに対して計算されているのでこれに対する比率でみると、0.357の比になる。報告書(5)に求められている半一体型炉の二次遮蔽(これが重コンクリート76 cmのケースである)は重量が1650 tであったから、この0.357倍で589 tとなる。

7. 結 論

7.1 遮蔽重量軽減

船用原子炉の遮蔽の最適化の主な目的は遮蔽重量軽減化にある。すでに提案されている三炉型についてこの目的を達成するために、原子炉運転時の遮蔽設計、炉停止時の遮蔽設計、さらに事故時の遮蔽設計に対して検討を加えた。その結果、遮蔽重量軽減は二次遮蔽に対して行うのが最も効果的であることが明らかにされた。二次遮蔽の重量軽減のためには、二次遮蔽の役割を事故時の遮蔽に限定する必要のあることも明らかにされた。そのためには原子炉運転時や炉停止時の遮蔽は一次遮蔽及び補償遮蔽で十分に役割を果すことができるように遮蔽設計することが肝要で

報告書(6)の仮定を参考にして、ここでも多少安全側に上記の仮想事故時の放射能の放出条件を設定する。すなわち、これまで用いた発電炉の仮想事故時の値に比較して、希ガス、ハロゲン、及びその他についていずれの場合も1/1000の値に条件を設定する。この理由は設計燃料破損率が1%であるから1/100になり、希ガスはその10%であるから1/1000になり、ハロゲンやその他もおおよそ1/1000になるからである。したがって、新ためて遮蔽計算を行う必要はなく、仮想事故時の被曝線量が推定できることになる。すなわち、図1、図3の線源の値は単純に1/1000になり、図4及び図6の線量率減衰曲線の絶対値も単純に1/1000になり、したがって図10及び図12の事故直後からの時間経過に対する被曝線量も単純に1/1000になる。以上のことから最終的な図11に示される積分被曝線量も1/1000になり、重コンクリートのモデル1のケースでは1.13 mRemとなり、鉄-鉛-ボイド-鉄のモデル2のケースの4時間後にボイドが水で充満するケースでもわずか3.1 mRemとなる。

この値ではあまりにも非合理的な遮蔽になっているのでモデル2のケースについて、少し議論を行う必要がある。再び図7を参照してもらおう。当然のことであるが、鉛15 cm厚は厚過ぎるので5 cm厚に仮定してみる。図7で鉛5 cm厚の時の値は事故直後の場合、 $550 + 5$ (鉄) + 5 (鉛) = 560 cmの時の 2.2×10^6 mR/hと読める。鉛背後の鉄2 cm及びボイド背後の鉄2 cmでの減衰は $5 / 8.5 \times 2.5 / 4.8 = 0.3$ となるので、 $2.2 \times 10^6 \times 0.3 = 6.6 \times 10^5$ mR/hとなる。ガンマ線源は1/1000になるのであるから、 6.6×10^2 mR/hになる筈である。この値と図12に示されている事故直後のボイドの状態での被曝線量の値である 2.6×10^3 mRemを較べるとおおよそ1/4に減少している。したがって、もっと鉛の厚さを減じてよいことがわかる。そこで鉛厚を2.5 cm厚に仮定してみる。おおよそ 9×10^6 mR/hと図7から読めるのでこの値に0.3を掛け1/1000にすると 2.7×10^3 mR/hとなり、これは 2.6×10^3 mRemの被曝線量にはほぼ等しくなる。

二次遮蔽の重量は前回の報告書^{1),2)}の場合、重コンクリート76 cmに対して計算されているのでこれに対する比率でみると、0.357の比になる。報告書(5)に求められている半一体型炉の二次遮蔽(これが重コンクリート76 cmのケースである)は重量が1650 tであったから、この0.357倍で589 tとなる。

7. 結 論

7.1 遮蔽重量軽減

船用原子炉の遮蔽の最適化の主な目的は遮蔽重量軽減化にある。すでに提案されている三炉型についてこの目的を達成するために、原子炉運転時の遮蔽設計、炉停止時の遮蔽設計、さらに事故時の遮蔽設計に対して検討を加えた。その結果、遮蔽重量軽減は二次遮蔽に対して行うのが最も効果的であることが明らかにされた。二次遮蔽の重量軽減のためには、二次遮蔽の役割を事故時の遮蔽に限定する必要のあることも明らかにされた。そのためには原子炉運転時や炉停止時の遮蔽は一次遮蔽及び補償遮蔽で十分に役割を果すことができるように遮蔽設計することが肝要で

ある。

事故時の遮蔽を確実に、合理的に実施するには、まず事故時の線源の評価をできるだけ正確に詳細に行う必要がある。さらに、船舶の構造も遮蔽の観点から考慮に入れる方が無駄な遮蔽を施して重量を増大させないためにもよい。

7.2 事故時のガンマ線源評価

これまで放射線源評価のためによく使用されていたORIGEN コードの代りに、より新しいORIGEN-2 コードの使用が推奨できる。今回の線源評価計算もORIGEN-2 コードを使用した。次に、事故直後からの時間経過に対してガンマ線源は急激に変化することを考慮に入れて、少くとも事故直後、1時間、2時間、4時間、12時間、24時間程度の細かい時間役割での線源評価が必要である。在来の線源評価は5日間の積分被曝線量の事項にとらわれて、事故直後、1日、2日、5日のような時間間隔で線源評価が行われていたが、積分被曝線量の90%以上は1日までに決められてしまうので、2日や5日の時間経過での線源評価は無意味である。その上に、事故直後と1日とにおける線源評価にもとづいてガンマ線の線量を推定すると、かなり過大評価になってしまい、これは二次遮蔽の重量をかなり過大に見積ることになる。

事故直後に重要なガンマ線源は比較的エネルギーの高いガンマ線源である。具体的には3 MeV以上のものであり、3 MeV以上のガンマ線の線源の精度は被曝線量評価に極めて大きな影響を及ぼすので重要視する必要がある。

7.3 二次遮蔽

二次遮蔽のモデルとして2つ考えた。その1は提案された半一体型炉の二次遮蔽である重コンクリート76 cmであり、モデル2はボイド領域を設けた鉄-鉛遮蔽体である。モデル1の重コンクリート遮蔽の場合、ガンマ線の線量の減衰は厚さとともに一様に減衰して行く様子が図4に示されているが、モデル2の鉄-鉛-ボイド遮蔽の場合は図7に示されるように15 cm厚の鉛で急激な減衰があるがボイド領域での減衰がほとんどないために二次遮蔽透過後では重コンクリートのケースより大きな線量になる。図8に示されるように鉛の2 MeV近傍の山のスペクトルのために鉛をあまり厚くしても線量の減衰に大きな効果をもたらされない。この原因は鉛の断面積が2~3 MeV領域で最小になることに関係している。

7.4 時間経過に対する積分被曝線量

図11に示すように事故直後から2時間くらいまでに被曝線量は急上昇し、2時間経過以降4時間ないし6時間までは少しづつ上昇し、6時間以降に加えられる被曝線量はわずかである。したがって、被曝線量を低減するためには事故直後から2時間までの線量を抑えることが肝要である。このことは図10及び図12からも容易にわかることであり、特に図12からはボイド領域に水をいかに早急に注入するかが被曝線量低減化の鍵を握るといってもよい。

7.5 船舶構造を考慮に入れた二次遮蔽体

7.4で記述したようにモデル2のケースではボイド領域にいかにか早急に水を注入するかが重要な課題であるので、船舶の構造を考慮に入れて二次遮蔽体を船首方向、船尾方向及び両舷方向の4つに区分し、乗組員の居るエンジン室側の二次遮蔽体のボイドに最優先で水を注入することにすれば従業員の被曝線量は低減される。一方、船の両舷方向は二次遮蔽体と船の外側との間に耐衝突構造のためにかかなり大きなスペースがあり、その上に船の鉄板構造でもガンマ線の減衰効果は期待できるので、ボイド領域に水を注入しなくてもよいと考えられる。

7.6 最大許容破損率下での被曝線量評価

上記7.3～7.5は事故時の安全基準として発電炉のケースをそのままにあてはめた場合であるが、念のために西ドイツにおける原子力船に対する安全基準を採用した場合の検討も行った。その結果は期待されるように二次遮蔽は大幅に薄くなり、したがって遮蔽重量軽減化は極めて大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 昭和62年度調査報告書、船用原子炉の遮蔽の最適化に関する調査（昭和62年2月）
- 2) 竹内清等、改良船用炉の試設計の評価(7) 一遮蔽性能(Ⅱ)；遮蔽の最適化に関する調査一 JAERI-M 88-056（1988）
- 3) 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）
- 4) A. G. Croff：ORNL/TM-7175（1980）
- 5) K. Takeuchi and N. Sasamoto：JAERI-M 84-244（1988）
- 6) 改良船用炉試設計報告書、昭和58年度及び59年度

7.5 船舶構造を考慮に入れた二次遮蔽体

7.4で記述したようにモデル2のケースではボイド領域にいかにか早急に水を注入するかが重要な課題であるので、船舶の構造を考慮に入れて二次遮蔽体を船首方向、船尾方向及び両舷方向の4つに区分し、乗組員の居るエンジン室側の二次遮蔽体のボイドに最優先で水を注入することにすれば従業員の被曝線量は低減される。一方、船の両舷方向は二次遮蔽体と船の外側との間に耐衝突構造のためにかかなり大きなスペースがあり、その上に船の鉄板構造でもガンマ線の減衰効果は期待できるので、ボイド領域に水を注入しなくてもよいと考えられる。

7.6 最大許容破損率下での被曝線量評価

上記7.3～7.5は事故時の安全基準として発電炉のケースをそのままにあてはめた場合であるが、念のために西ドイツにおける原子力船に対する安全基準を採用した場合の検討も行った。その結果は期待されるように二次遮蔽は大幅に薄くなり、したがって遮蔽重量軽減化は極めて大きくなる。

参 考 文 献

- 1) 昭和62年度調査報告書、船用原子炉の遮蔽の最適化に関する調査（昭和62年2月）
- 2) 竹内清等、改良船用炉の試設計の評価(7) 一遮蔽性能(II)；遮蔽の最適化に関する調査一 JAERI-M 88-056（1988）
- 3) 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）
- 4) A. G. Croff：ORNL/TM-7175（1980）
- 5) K. Takeuchi and N. Sasamoto：JAERI-M 84-244（1988）
- 6) 改良船用炉試設計報告書、昭和58年度及び59年度

表1 「むつ」原子炉炉心のウラン重量

	3.24%領域	4.44%領域
燃料棒1本当りのウラン重量 (g)	681.177	680.436
集合体1体当りの燃料棒数	112	112
集合体数 (体)	12	20
領域別ウラン重量 (kg)	915.5	1524.2
存在比 (%)		
ウラン-234	0.0259	0.035
ウラン-235	3.24	4.44
ウラン-238	96.7343	95.525
核種別重量 (kg)		
ウラン-234	0.235	0.533
ウラン-235	29.662	67.673
ウラン-238	885.60	1455.97
炉心当りの核種別重量 (kg)		
ウラン-234		0.769
ウラン-235		97.336
ウラン-238		2341.574
炉心当りのウラン重量 (トン)		2.44

注) 「むつ」炉心核設計再解析報告書, 添付資料No.1

表2 「むつ」 仮想事故時のガンマ線源

群	エネルギー幅 (MeV)	代表エネルギー	事故直後	事故1時間後	事故2時間後	事故4時間後	事故12時間後	事故24時間後
6	0.10 - 0.15	0.125	6.32+16	1.01+16	8.13+15	6.09+15	4.70+15	2.77+15
7	0.15 - 0.30	0.225	2.33+17	6.64+16	6.15+16	5.69+16	4.39+16	2.51+16
8	0.30 - 0.45	0.375	1.16+17	3.52+16	2.74+16	2.06+16	1.57+16	1.34+16
9	0.45 - 0.70	0.575	2.01+17	1.03+17	9.34+16	8.22+16	6.58+16	5.10+16
10	0.70 - 1.00	0.850	1.71+17	9.93+16	7.33+16	4.55+16	3.01+16	2.53+16
11	1.00 - 1.50	1.250	1.29+17	4.38+16	3.63+16	2.69+16	1.39+16	7.59+15
12	1.50 - 2.00	1.750	5.87+16	2.41+16	1.37+16	9.14+15	3.67+15	1.67+15
13	2.00 - 2.50	2.250	4.62+16	2.05+16	1.54+16	9.52+15	1.82+15	4.29+14
14	2.50 - 3.00	2.750	1.05+16	2.37+15	1.41+15	5.38+14	4.61+13	2.19+13
15	3.00 - 4.00	3.500	6.00+15	3.39+14	1.27+14	2.35+13	1.81+11	1.80+11
16	4.00 - 6.00	5.000	2.25+15	4.11+12	3.83+11	2.36+11	0.0	0.0
17	6.00 - 8.00	7.000	1.22+12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表3 PALLAS 用ガンマ線源 (ガンマ線 / $\text{cm}^3 \cdot \text{sec} \cdot \text{MeV}$)

エネルギー (MeV)	事故直後	1時間後	2時間後	4時間後	12時間後	24時間後
6.00 - 8.00	6.49 + 2	0	0	0	0	0
4.00 - 6.00	1.20 + 6	2.19 + 3	2.04 + 3	1.26 + 3	0	0
3.00 - 4.00	6.38 + 6	3.61 + 5	1.35 + 5	2.50 + 4	1.93 + 2	1.92 + 2
2.50 - 3.00	2.23 + 7	5.04 + 6	3.00 + 6	1.15 + 6	9.81 + 4	4.66 + 4
2.00 - 2.50	9.83 + 7	4.36 + 7	3.28 + 7	2.03 + 7	3.87 + 6	9.13 + 5
1.50 - 2.00	1.25 + 8	5.13 + 7	2.92 + 7	1.95 + 7	7.81 + 6	3.55 + 6
1.00 - 1.50	2.75 + 8	9.32 + 7	7.72 + 7	5.72 + 7	2.96 + 7	1.62 + 7
0.70 - 1.00	6.06 + 8	3.52 + 8	2.60 + 8	1.61 + 8	1.07 + 8	8.97 + 7
0.45 - 0.70	8.55 + 8	4.38 + 8	3.97 + 8	3.50 + 8	2.80 + 8	2.17 + 8
0.30 - 0.45	8.23 + 8	2.50 + 8	1.94 + 8	1.46 + 8	1.11 + 8	9.51 + 7
0.15 - 0.30	1.65 + 9	4.71 + 8	4.36 + 8	4.04 + 8	3.11 + 8	1.78 + 8
0.10 - 0.15	1.35 + 9	2.15 + 8	1.73 + 8	1.30 + 8	1.00 + 8	5.89 + 7

PALLAS線源 = ORIGEN線源 / (V X ΔE)

V = $9.40 \times 10^8 \text{ cm}^3$

表4 各モデルについて時間経過に対する被曝線量の推移とその比率

経過時間	12分	1時間	2時間	3時間	4時間	10～12時間	全線量
モデル1 重コンクリート	0.24	0.50	0.63	0.74	0.80	1.0	1.13
	21.2%	44.2	55.8	65.5	70.8	88.5	100%
モデル2 2時間で水 遮蔽体	0.52	1.5	2.2		2.27	2.4	2.4
	21.7	62.5	91.7				100
3時間で水 遮蔽体	0.52	1.5	2.2	2.65		2.9	2.9
	17.9	51.7	75.9	91.4			100
4時間で水 遮蔽体	0.52	1.5	2.2	2.65	3.0	3.1	3.1
	16.8	48.4	71.0	85.5	96.8		100
1時間で水 遮蔽体	0.52	1.5	1.57		1.66	1.79	1.84
	28.3	81.5	85.3		90.2		100

表5 提案されている3つの炉型と「むつ」の炉心のウラン重量と燃料度の比較

炉型	ウラン重量 トン	燃焼度 MWD/t	全燃焼度 MWD
むつ炉	2.44	13,500	32,940
半一体型炉	6.1	18,000	109,800
一体型炉	3.65	30,400	110,960
自己加圧 一体型炉	4.06	19,000	77,140

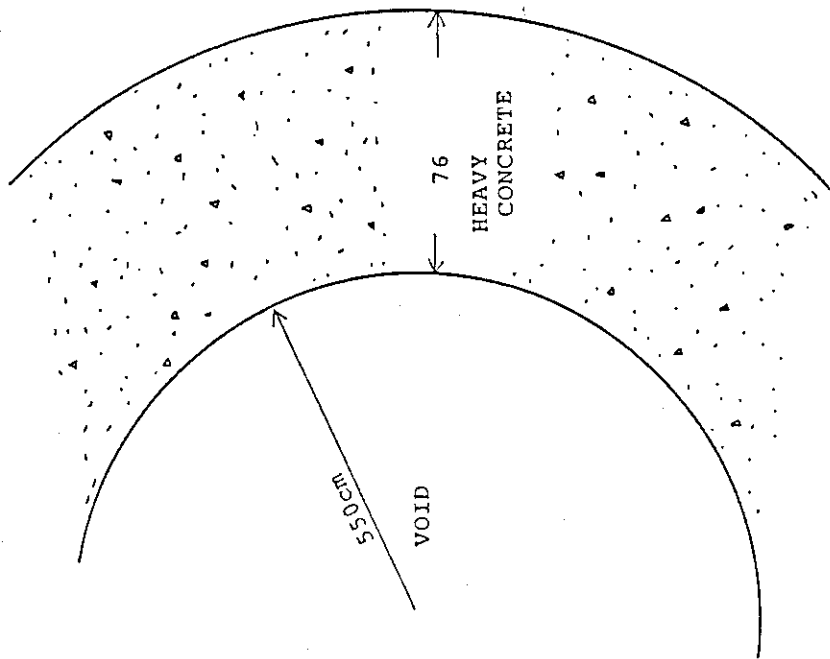


図2 半一体型炉格納容器及び二次遮蔽を円柱モデルで近似した場合の半径及び重コンクリートの厚さ(断面図)

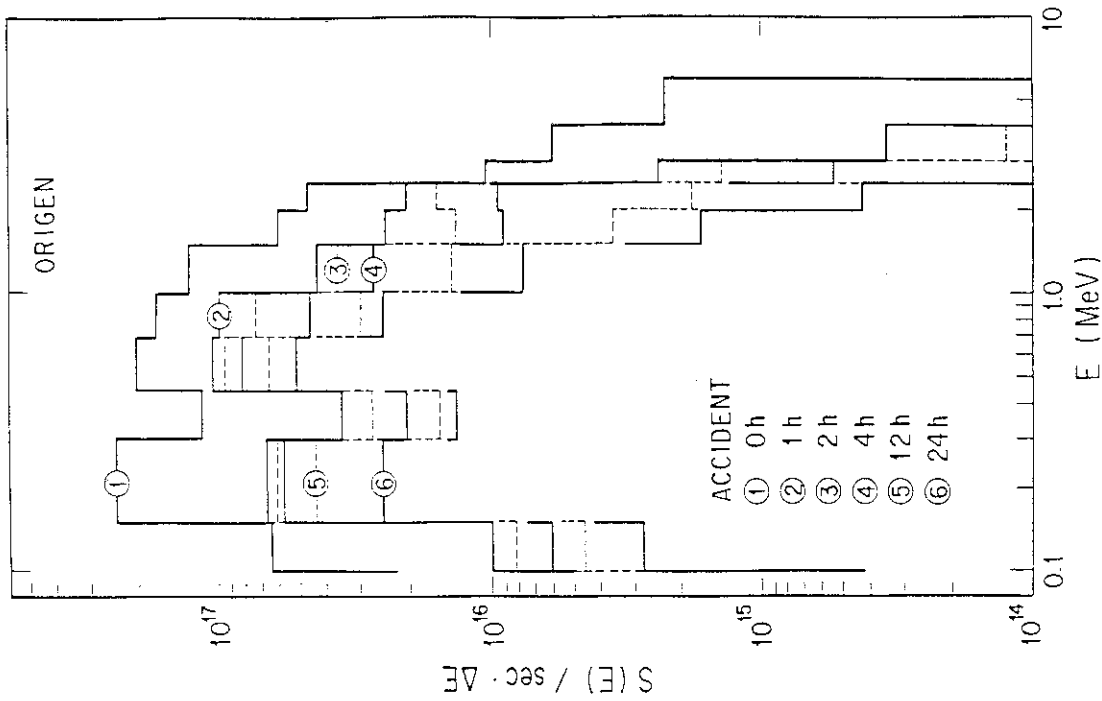


図1 ORIGEN-2コードによる「むつ」仮想事故時のガンマ線源強度、丸中の番号は仮想事故直後からの経過時間に対応する

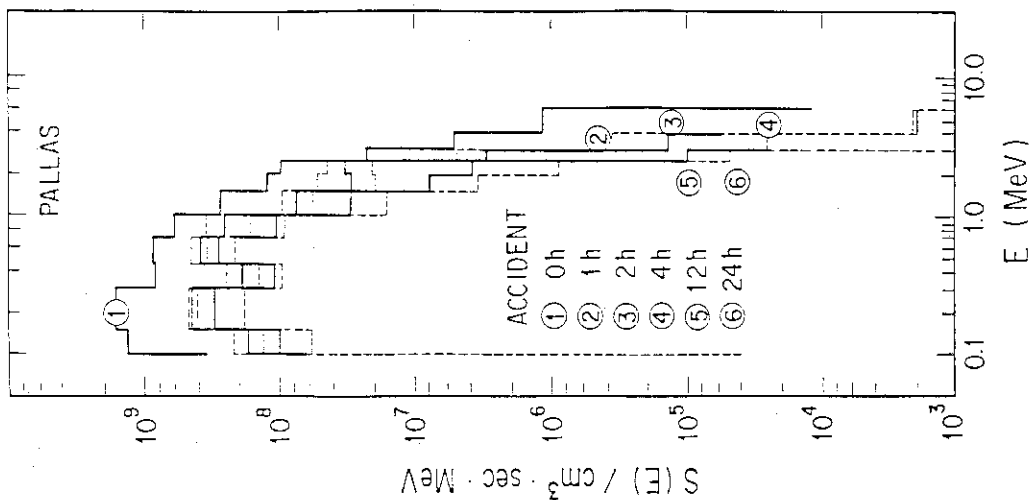


図3 PALLASコード用のガンマ線源強度 (単位体積あたり単位エネルギーあたりの値)

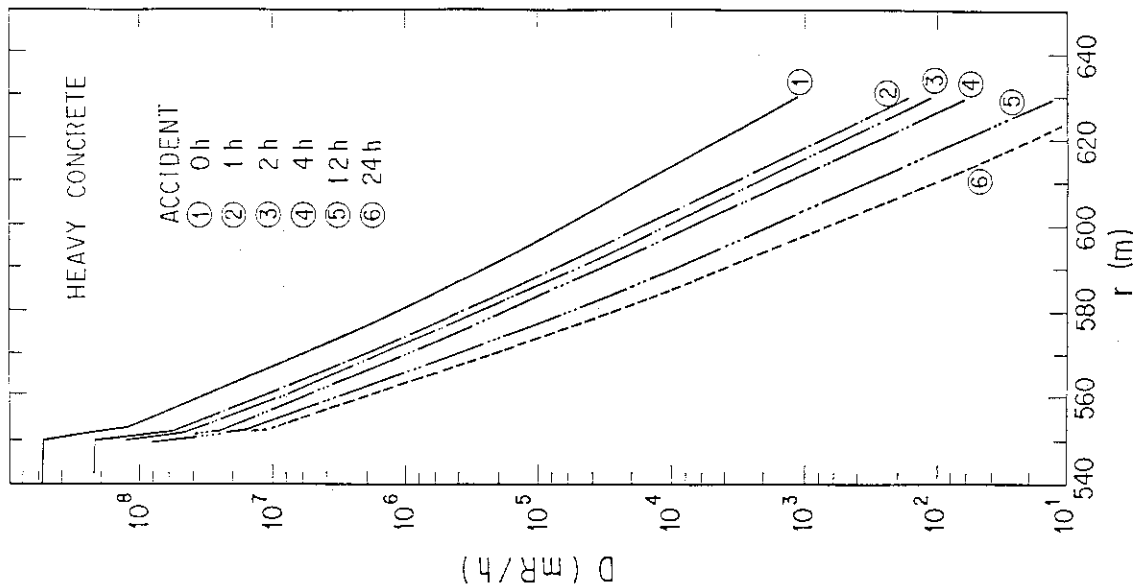


図4 二次遮蔽モデル-1 (重コンクリート76 cm厚) における PALLAS計算の線量率減衰, 丸中の番号は事故直後からの経過時間に対応する

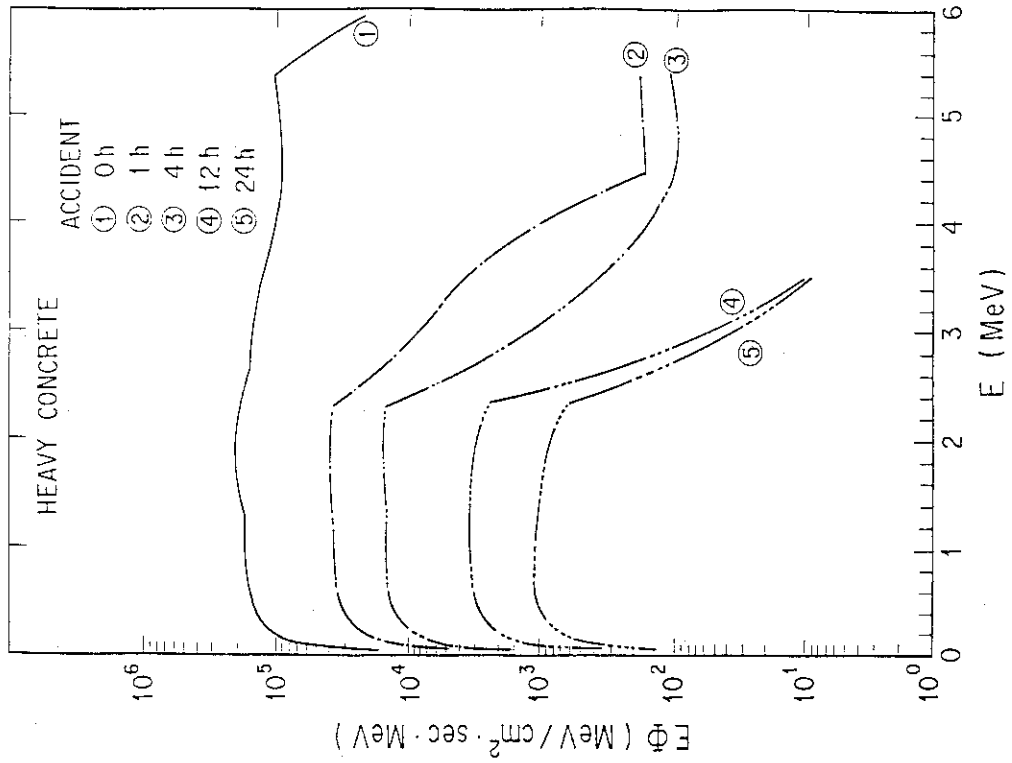


図5 重コンクリート二次遮蔽透過後のガンマ線エネルギースペクトル、事故直後からの24時間まで

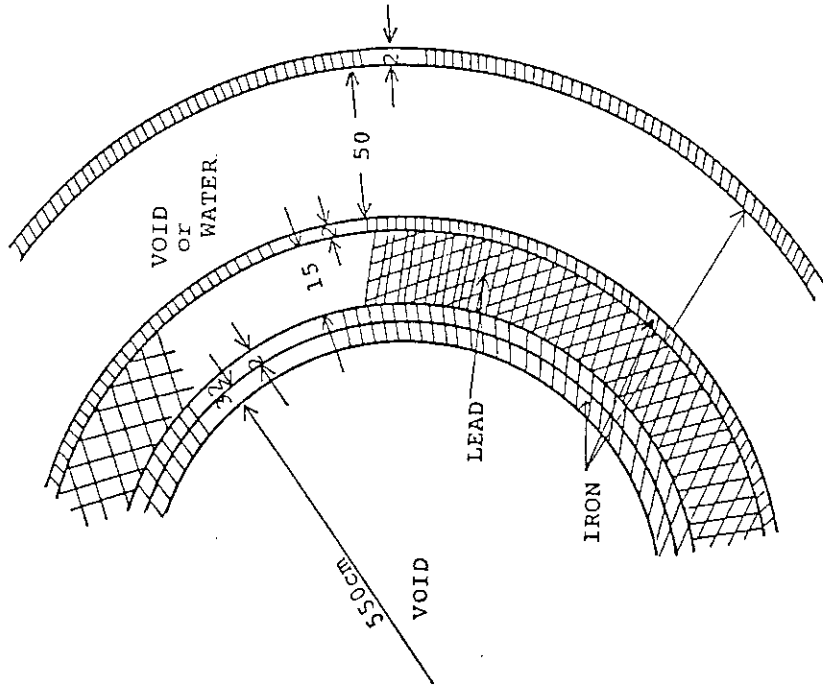


図6 格納容器及び鉄-鉛-空間(水)多重層二次遮蔽の円柱モデル(断面図)

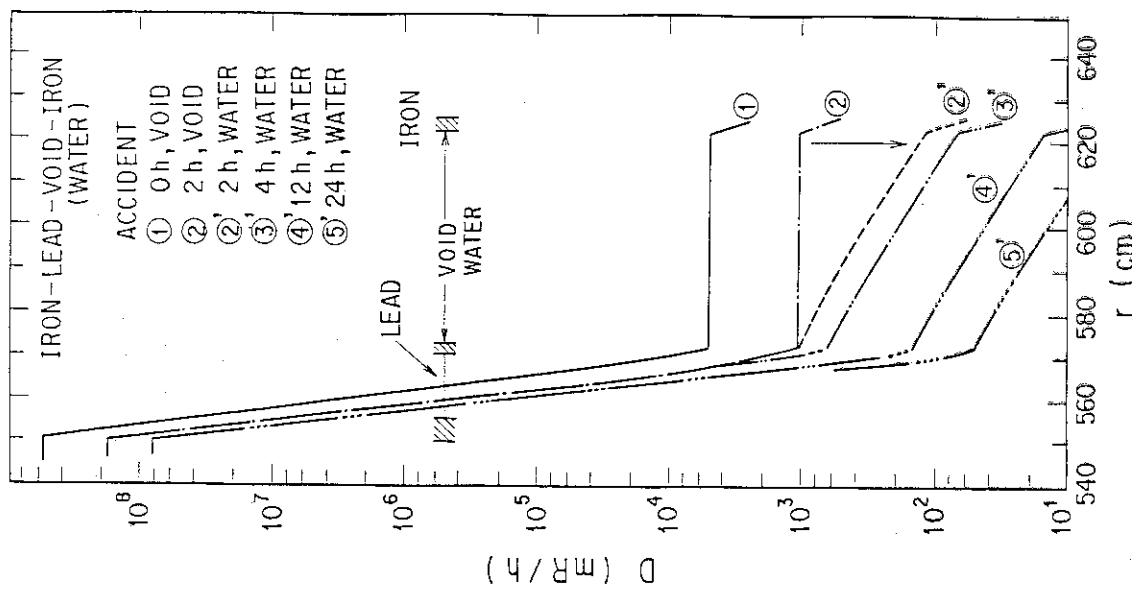


図7 二次遮蔽モデル-2 (鉄-鉛-ボイド-鉄) におけるPALLAS 計算の線量率減衰, 丸中の番号にダッシュがついたものはボイドに水が充満した時

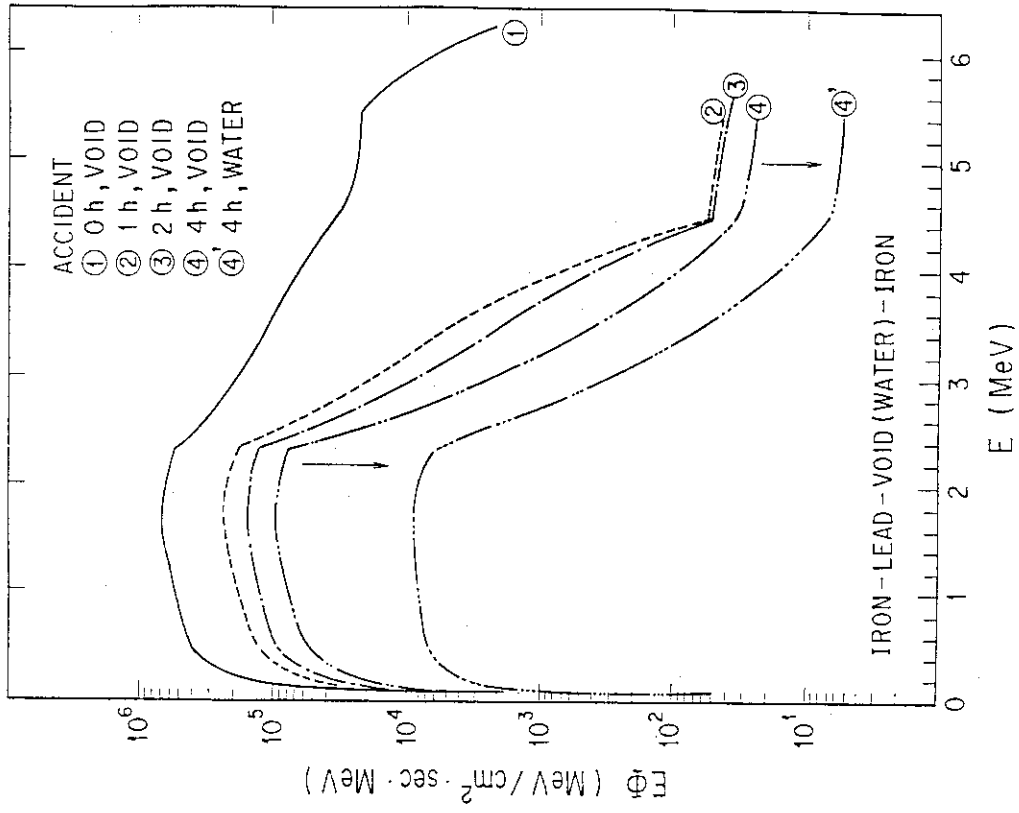


図8 モデル-2 遮蔽体透過後のガンマ線エネルギースペクトル

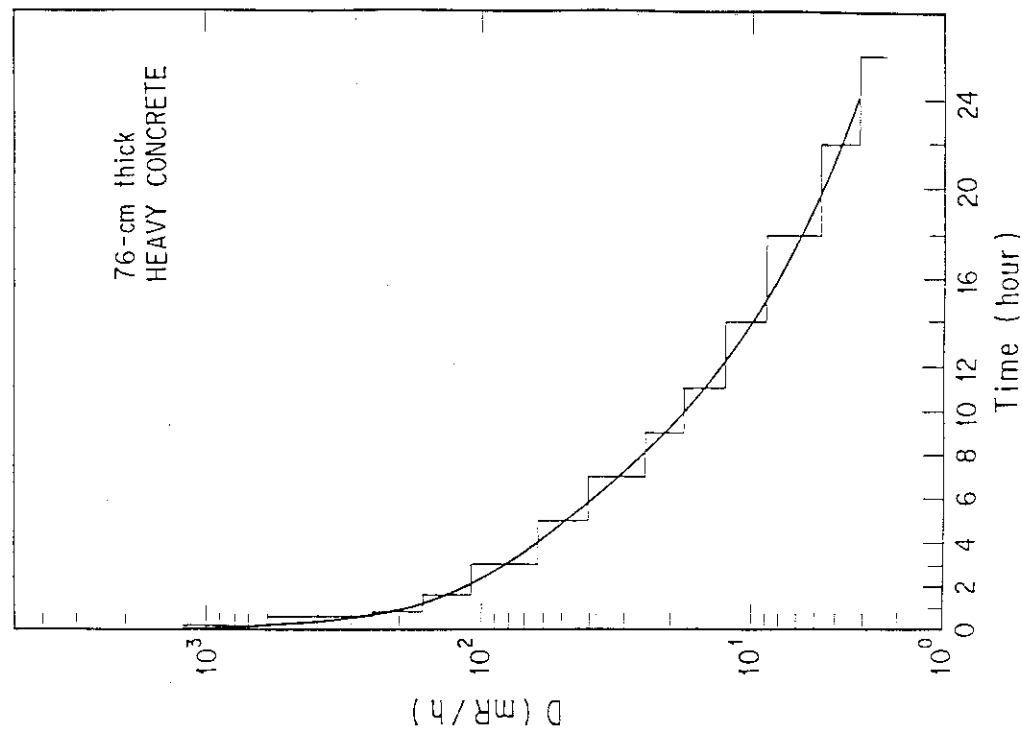


図 10 モデル-1 遮蔽体透過後の線量率の事故直後からの経過時間に対する減衰

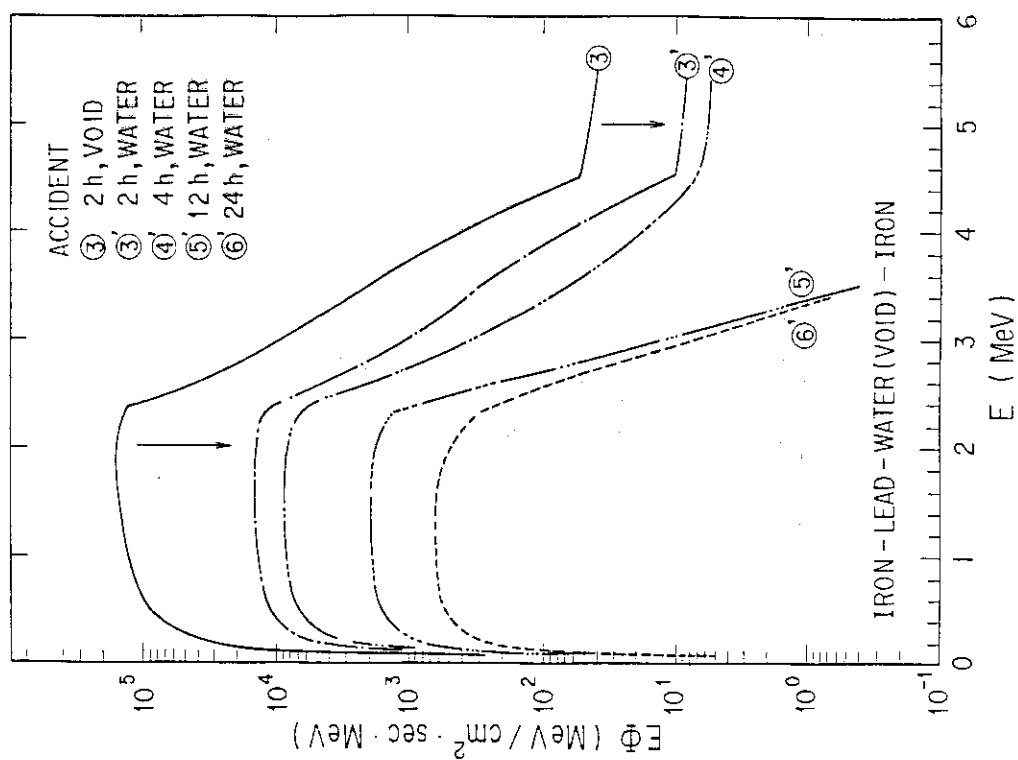


図 9 モデル-2 遮蔽体透過後のガンマ線エネルギースペクトル、丸中の番号にダッシュがついたのは2時間後にポイドに水が充填した後の経過時間を示す

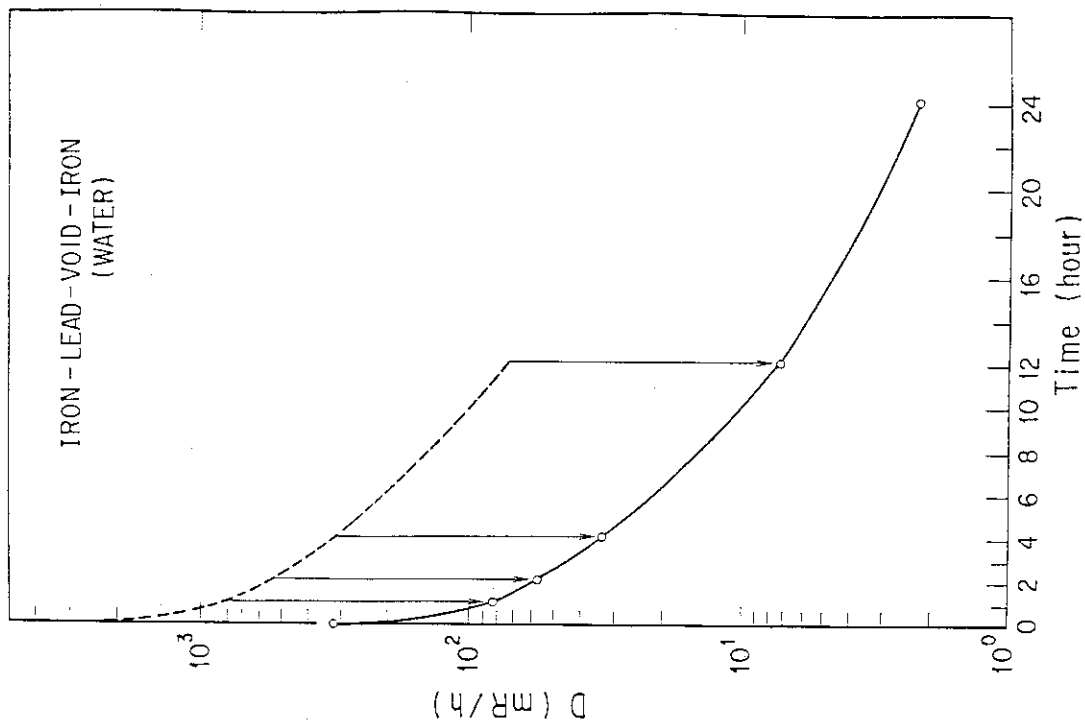


図12 モデル-2 遮蔽体透過後の線量率の経過時間に対する減衰，点線はボイドの時で実線は水で充満した場合を示す

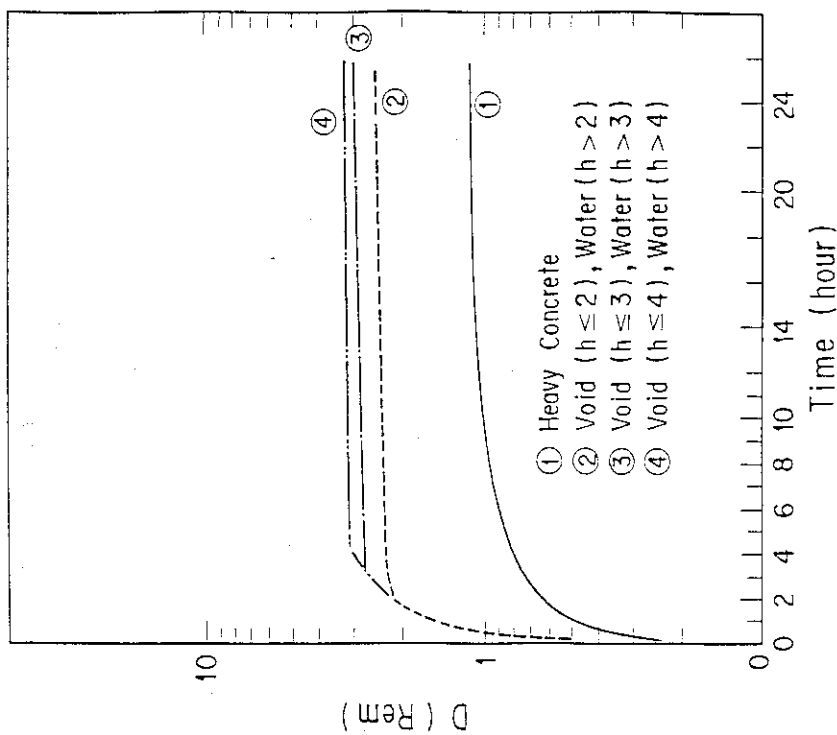


図11 事故直後からの経過時間までの積分被曝線量，丸中の1の番号はモデル-1のケース，丸中の2～4の番号はモデル-2のケースで2時間，3時間，4時間後にボイドが水で充満した場合を示す