

使用済核燃料輸送容器遮蔽計算の簡易化

—遮蔽性能特性関数の導入とその応用—

山越寿夫*・植木紘太郎*・中田正也**

A Handy Radiation Shielding Calculation Method for Spent Fuel Shipping Casks; Introduction and Application of Radiation Shielding Characteristic Functions

By

Hisao YAMAKOSHI, Kohtarō UEKI and Masaya NAKATA

Abstract

A handy shielding calculation method for spent fuel shipping casks is proposed by introducing a concept of radiation shielding characteristics for casks. Characteristic functions are defined to realize the idea of the shielding characteristics. Numerical examples of these functions are tabulated for several casks belonging to typical cask types.

The handy calculation method is applied to typical casks for the purpose of verifying validity of the method by comparing the calculated results with measured results. The comparison revealed that the handy method is effective in obtaining results in reasonably high accuracy with short calculation time.

目次

1. 緒言	52	4. 各種輸送容器の特性関数	56
2. 容器遮蔽性能の概念	52	4.1 反射流特性関数	57
2.1 遮蔽性能の概念の導入	52	4.1.1 中性子の反射流特性関数	57
2.2 内筒部の仮想物質	53	4.1.2 二次ガンマ線の反射流特性関数	62
2.3 表現の等価性	53	4.1.3 一次ガンマ線の反射流特性関数	63
2.4 反射線流の表現	54	4.2 遮蔽性能特性関数	63
2.5 諸特性関数の定義	54	4.2.1 中性子遮蔽性能特性関数	63
3. 諸特性関数の算出法	54	4.2.2 二次ガンマ線遮蔽性能特性関数	66
3.1 主要計算コードと容器の模型化	54	4.2.3 一次ガンマ線遮蔽性能特性関数	67
3.1.1 ANISN コードと MORSE コード	54	5. 特性関数の応用と応用結果の信頼性	67
3.1.2 容器の模型化	54	5.1 相互作用効果の取扱い	68
3.1.3 その他の近似	55	5.2 容器半径方向線量率分布	68
3.2 両ードによる計算結果の整合性	55	5.3 実験値の解析	69
3.2.1 反射流特性関数	55	5.3.1 中性子の解析	69
3.2.2 遮蔽性能特性関数	56	5.3.2 ガンマ線の解析	72
		6. 考察	72
		6.1 各種容器の遮蔽性能の総合的考察	72
		6.2 線量率の容器外減衰	74
		7. 結論及び結語	74

* 原子力船部

** 埼玉大学

原稿受付: 昭和58年9月2日

1. 緒 言

原子力発電所から出る使用済核燃料は輸送容器に収納され再処理工場へ運ばれる。輸送容器の型式は、水も同時に容器に収納されるか否かにより、湿式と乾式とに大別される。使用済核燃料と共に収納される水は核燃料から生ずる中性子に対し大きな減速作用を持ち、また中性子吸収材でもあるので、湿式と乾式とでは容器壁構成材の種類、壁構造に大きな相異がみられる。

容器のまわりの放射線々量は、容器壁の構造、材質、核燃料収納型式のほか、線源である収納核燃料からの中性子、ガンマ線（以下では一次ガンマ線と呼称する）のエネルギー分布と線源強度等、複雑な因子に微妙に依存している。この容器周辺線量の分布に対する目安を与える量として輸送指数が用いられている。この指数は、容器外側表面の中央部から外向き径方向に1m離れた位置に於ける放射線々量率（mrem/hr単位）の事である。

使用済核燃料の輸送にあたっては、あらかじめ輸送指数を推定し、輸送計画の立案に反映させる必要があるが、この指数の推定値は収納核燃料の線源データ、容器壁の構造と材質に関するデータを考慮に入れ、収納核燃料領域も含む容器全体の詳細な遮蔽計算から得られている。したがって、放射線々源としての収納核燃料が未定の場合は、遮蔽計算に必要な線源データが決まらないため、遮蔽計算の実施も輸送指数の推定も不可能である。言い換えれば、新たな使用済核燃料の収納の度毎に精密な容器全体の遮蔽計算が繰り返されて来ている。

もし、収納核燃料のデータには依存せず、もっぱら容器壁構造と材質のみに依存する、いわば容器遮蔽性能とも呼ばれるべき概念を新しく導入することができるならば輸送指数の、容器壁データへの依存性と収納核燃料データへの依存性とを分離する事が可能となる。その結果、上記の容器全体を対象とする詳細な遮蔽計算は、既知の遮蔽性能データと与えられた線源データとを用いた、簡便な代数計算に帰着させる事が出来、実用上充分高い精度の輸送指数を迅速、かつ見通し良く評価する事が可能となる。

本報告では、この様な遮蔽性能を記述するのに都合の良い量として、容器に対する二種類の放射線応答関数を提案し、その求め方を先ず示す。また、この求め方

に附随して、内筒部*に一度反射した放射線が再び容器壁に入射する影響を応答関数から取り除かなければならないが、その方法も示す。

上記の二種類の応答関数の一方は内筒部から入射した放射線の容器壁からの反射流に対する応答関数であり、他方は容器外側表面の放射線々量に対する応答関数である。両者とも容器毎の壁構造、材質の個性を表していると考えられ、本報ではそれぞれを反射流特性関数、遮蔽性能特性関数と呼ぶことにする。

本報告では、このほか現用輸送容器に対し、これら特性関数の値を示し、特性関数から見た各容器の特徴を述べるとともに、特性関数の輸送指数、線量率空間分布評価への応用方法を示し、応用結果の精度の検討から応用法の妥当性を検証することとする。

2. 容器遮蔽性能の概念

2.1 遮蔽性能の概念の導入

内筒部から容器壁へ入射した中性子、一次ガンマ線は一般的性質として壁を素通りするか又は、壁内で多重散乱を繰り返す、容器外側表面に現われる。容器外側表面には、中性子の非弾性散乱、中性子捕獲反応で生じた二次ガンマ線も現われる。

中性子、ガンマ線のエネルギーは壁内物質との散乱により減少するので、ある狭いエネルギー範囲のみに零ならざる値**を持つパルス状エネルギースペクトルを有する中性子、一次ガンマ線が器壁に内筒部から入射し、透過すると、容器外側表面の中性子束、ガンマ線束にはあるエネルギー分布が観測される。中性子、ガンマ線は壁内散乱で減速する途中で捕獲反応を受け、外側表面に到達出来ない場合もあるので、このエネルギー分布は、入射エネルギー、容器壁を構成する物質層の厚さ、配列順序に依存し、一種の応答関数となっている。

この線束エネルギー分布から求めた線量率もまた、入射エネルギー容器壁構造、材質に依存する応答関数であり、容器の遮蔽性能に対する個性を表わしている。したがって、容器の遮蔽性能はこの線量率に対する応答関数で記述する事も可能である。とくにこの応答関数を遮蔽性能特性関数と呼ぶことにする。

容器壁に内筒部から入射した中性子、一次ガンマ線は多種散乱の結果、容器壁から内筒部へも、容器内側

* 核燃料を収納する領域を以下では内筒部と呼ぶ。

** この値は線源強度に対する値でもあり、2個/cm²/secに規格化されているものと仮定する。

表面を通して、現われる。反射線流のエネルギー分布は、主として容器の内側壁に近い物質層の物質、厚さ、配列と入射エネルギーとに依存し、一種の応答関数である。

内筒部に物質が存在する場合、内筒部と容器壁との間で中性子流、並びにガンマ線流の相互作用があり、入射中性子、一次ガンマ線の見かけ上の線源強度並びにエネルギースペクトルに変化が現われる。そのため、容器外側表面における中性子束、ガンマ線束のエネルギー分布にも相互作用効果の影響が現われる。

このように、反射線流の応答関数は容器の遮蔽性能を記述する際に大きな役割を演ずる重要な量である。この応答関数を以下では、反射流特性関数と呼ぶ。

2.2 内筒部の仮想物質

容器遮蔽性能は、遮蔽性能特性関数と反射流特性関数とを用いて記述されることとなるが、これらの特性関数の値を求める際は、容器形状が平板状ではなくて円筒状である事に起因する好ましくない現象が生ずるので、次に述べるような配慮を払う必要がある。

内筒部を真空として扱った場合、容器内側表面を通過して内筒部に入った放射線は、内筒部を通過して再度、容器壁に入射する。この現象は、板状遮蔽体の場合には存在しないものであり、これを無視すると容器の遮蔽性能を過小評価することとなる。

この現象を防ぐために、両特性関数の算出の際は、内筒部に無限に強い放射線吸収能力を持つ仮想物質を設けることとする。もちろん、中性子吸収に際しては、二次ガンマ線の発生は無いものと仮定する必要がある。

2.3 表現の等価性

遮蔽性能の記述と言う点で、本来、遮蔽性能特性関数は線束に対する応答関数による表現の方が、線量率に対する応答関数による表現よりも、より直接的であり、反射流特性関数との対応の点でも理解し易い。しかしながら、どちらの表現も互いに等価である事が以下の如く示されるので、遮蔽計算に相当する代数計算がより単純、迅速に可能であり、しかも各容器の個性を簡潔に表せる、線量率による表現を本報では遮蔽性能特性関数として採用する。

容器外側表面上の放射線々量率 D は、容器壁外側中央表面上の中性子束のエネルギーベクトル ϕ_n とガンマ線束†のエネルギーベクトル ϕ_r と、次の (1) 式

の関係とで表せる。

$$D = (C_n^*, C_r^*) \begin{pmatrix} \phi_n \\ \phi_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 C_n^* 、 C_r^* は、それぞれ、中性子とガンマ線に対する線束から線量率への変換係数††のエネルギーベクトル C_n 、 C_r を転置した量である。

ところで、 ϕ_n と ϕ_r は、中性子、一次ガンマ線の外側表面への透過率に対する応答行列 T_n 、 T_r 、並びに二次ガンマ線の見かけ上の透過率に対する応答行列 $T_{n,r}$ 、並びに線源中性子と一次ガンマ線に対する入射流エネルギーベクトル J_{+n} 、 J_{+r} を用いて、以下の如く記述される。

$$\begin{pmatrix} \phi_n \\ \phi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_n & T_{n,r} \\ O & T_r \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} J_{+n} \\ J_{+r} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし、 O は行列要素の値がゼロのヌル (Null) 行列であり、*印は転置を意味するものとする。

上記の (1) 式、(2) 式を総合すれば、 D は次の (3) 式のように行列の積の形式で与えられる。

$$D = C^* \cdot T^* \cdot J_+ \quad (3)$$

D はスカラー量であるから、(3) 式の右辺の転置も又 D である。

$$\begin{aligned} D &= [C^* \cdot T^* \cdot J_+]^* \\ &= J_+^* \cdot T \cdot C \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) の右辺を更に (5) 式の如く書き直すこととする。

$$\begin{aligned} D &= J_+^* \cdot T \cdot C \\ &\equiv J_+^* B \end{aligned} \quad (5)$$

ただし B は

$$\begin{aligned} B &\equiv \begin{pmatrix} T_n & T_{n,r} \\ O & T_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_n \\ C_r \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} T_n C_n + T_{n,r} C_r \\ T_r C_r \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

である。

(2) 式と、(5) 式並びに (6) 式との比較から容易に判るとおり、(2) 式に於ける行列 T の部分行列 T_n 、 T_r 、 $T_{n,r}$ の代りに、(5) 式で与えられる行列 B の部分行列に対する要素、 $T_n C_n$ 、 $T_{n,r} C_r$ 、 $T_r C_r$ すなわち透過線々量率に対するエネルギーベクトルの表現を用いても、放射線々量率 D は求められる。ただし、(2) 式では入射線流ベクトル J_+ に行列 T の転置行列 T^* が右側から作用しているが、(5) 式では、転置行列 J_+^* が B の右側から作用している点に J_+ の役割の相異がある。すなわち、応答行列 T_n 、 $T_{n,r}$ 、 T_r は入射エ

† このベクトル表現では、自動的にガンマ線の一次、二次の区別がなされているので、特に両者を区別して述べない。

†† Flux to Dose Conversion Factor と呼ばれている。

ルネギーと出現エネルギーに関する2次元行列であるのに対し、 $T_n C_n$, $T_{n,r} C_r$, $T_r C_r$ は入射エネルギーに関する列ベクトルとなっている。

2.4 反射線流の表現

放射線の内筒部への反射線流に対するエネルギー分布 J_- は、中性子、一次ガンマ線の反射流応答行列 R_n , R_r 並びに見かけ上の二次ガンマ線反射流応答行列 $R_{n,r}$ を用いて、(2) 式に類似した形式で表現さる。

$$J_- = (R)_* J_+ \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} J_{-n} \\ J_{-r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_n & R_{n,r} \\ O & R_r \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} J_{+n} \\ J_{+r} \end{pmatrix} \quad (7')$$

左辺はスカラー量では無いので、(4) 式で示した様な手続きを適用する事は不可能であり、したがって、反射流の応答関数に対する等価な表現は考えられない。

2.5 諸特性関数の定義

(6) 式の部分行列 $T_n C_n$, $T_{n,r} C_r$, $T_r C_r$ のそれぞれを中性子、二次ガンマ線、一次ガンマ線に対する遮蔽性能特性関数と数学的に定義することとする。また(7') 式の部分行列 R_n , $R_{n,r}$, R_r のそれぞれを中性子、二次ガンマ線、一次ガンマ線に対する反射流特性関数と定義する。本報の図中では、 $T C_n$ を CFSN, $T_{n,r} C_r$ を CFSSG, $T_r C_r$ を CFSPG, R_n を CFRN, $R_{n,r}$ を CFRSG, R_r を CFRPG と記入している。(C; Characteristic, F; Function, N; Neutron, S; Shielding, PG; Primary Gamma, SG; Secondary Gamma, R; Reflected).

3. 諸特性関数の算出法

3.1 主要計算コードと容器の模型化

3.1.1 ANISN コードと MORSE コード

遮蔽性能特性関数並びに反射流特定関数の定義に現われる応答行列 T_n , $T_{n,r}$, T_r , R_n , $R_{n,r}$, R_r は遮蔽計算コード ANISN コード²⁾又は MORSE-CG コード³⁾を用いて求められる。その場合、各計算コードには計算時間、計算精度、扱える幾何形状に対する制約に特徴がある。したがって、問題の性質に応じ計算コードを選択する必要があるが、逆に、計算コードの特徴に応じた容器模型を工夫する必要もある。

MORSE-CG コードはモンテカルロ法を用いて放射線輸送方程式を積分する計算コードであるが、特に問題の幾何形状が複雑な三次元形状の場合、その形状に何らの近似を施す事も必要が無い為、計算に非常な威力を発揮する。さらに、計算コード自身の機能とし

て、真空物質を定義することが出来る。また中性子、ガンマ線の物質中での散乱方向、衝突までの飛行距離がすべて連続的に扱える為、現実に存在する現象のままの計算結果が期待出来る。さらに、モンテカルロ法は統計的手法の一種である為、計算誤差の目安として計算結果に対する相対的標準偏差が出力される利点がある。

ANISN コードは、対象とする物質領域の空間を細かな、網の目で覆い、網の目毎の放射線流のバランスを考慮して、放射線輸送方程式を数値積分する方法を採用している。散乱方向に関しては別種の網の目で覆っている。中性子とガンマ線とは物質中での散乱方向分布、衝突までの飛行距離が大いに異なるにもかかわらず、空間、角度に関し共通の網の目を使用する為、網の目を十分に細かに選ぶ必要がある。この点で、中性子と二次ガンマ線を同等に扱う際に注意を要する。ANISN コードの使用上の制約の中で最も特徴的なものは、このコードが扱える幾何形状は一次元に限られると言う事である。また、計算結果の精度を判定するための目安をコード自身が出力する事も無い。しかしながら、このコードの利点は、MORSE-CG コードと比較して計算時間が短い事である。

諸特性関数の計算において、中性子と二次ガンマ線が同等な粒子として対等に扱われる事と、多群計算が行なわれる事は、ANISN コード、MORSE-CG コード共に共通している。

本来、輸送容器の体系は3次元的であり、1次元計算コード ANISN の適用は困難なはずであるが、特に、計算の対象点が容器内外側表面の中央部に存在することと、現用輸送容器の長さ、線源領域の長さが数メートルと、いずれも充分長いことから、充分一次元近似が成立すると考える事ができる。

ANISN コードを使用する場合、真空物質として近似的に密度の低い空気で代用することとする。

3.1.2 容器の模型化

輸送容器を、その半分の高さで、水平に切断した場合を想定すると、切り口の面は中空の内筒部を中心とする同心円的な多重層構造をしている。Table 1 に示すごとく内筒部を形づくる、最も内側の壁層は鉄層である。

容器を模型化する場合、この鉄層に接して厚さ1mmの真空層を内筒部に仮定し、残りの中空部分は無限に強い放射線吸収能力を持つ仮想物質で満たすこととする。

Table 1 Region Thickness for Each Cask in cm

	TN-12A		EXCELLOX-3		HZ-75T		50ton Cask	
Cavity	-	61.00	-	40.50	-	47.63	-	34.3
Region Number in the Cask Wall	1	Steel 30.30	Steel 1.10		Steel 1.91		Steel 3.7	
	2	Resin 10.0	water 1.6		Lead 18.41		Lead 14.6	
	3	Copper 23.0	Steel 1.3		Steel 1.27		Steel 8.0	
	4	(Fin)	Lead 16.4		Water 20.32		Resin 10.0	
	5	—	Steel 1.3		Steel 4.2		Copper 0.8	
	6		water 2.5		Copper 15.24		Copper 22.0	
	7		Steel 8.9		(Fin)		—	
	8		Copper 13.9		—		—	
	9		—					

真空層には2個/cm²/secの線源強度で単色な中性子又はガンマ線を等方放射する線源薄膜を設ける。この線源薄膜と鉄層との間の真空層には、さらに、反射線流を測定するための薄膜状検出器を設ける。

容器外側表面には薄い真空層を設け、その層中に中性子、ガンマ線々量率測定用の薄膜状検出器を設ける。

ANISNコードを用いる際は、真空層に3メッシュ区間を配し、最も内側の第1メッシュ区間に線源薄膜を、第3メッシュ区間に薄膜状検出器を割当てて。また、外側表面に接した外側の薄い真空層には2メッシュ区間を配し、外側メッシュ区間に薄膜状検出器を割当てて。線源薄膜、容器ともに無限の高さを持つと仮定する。各物質層中の空間メッシュ間隔はすべてのエネルギー領域の中性子、ガンマ線に対する平均自由行程のうちで、小さな値のものから決定し、鉄層で5mm間隔、鉛層で3mm間隔、水層とレジン層で1cm間隔、銅フィン層で1cm間隔とした。

MORSE-CGコードを使用する場合、線源薄膜、容器壁の高さ方向の拡がりは、すべて実際の値を用い、仮想物質の高さ方向の拡がりは容器壁のそれと一致させてある。計算効率向上の為、線源から仮想物質中へ向う中性子、ガンマ線は、仮想物質表面で完全反射をして容器壁へ向うようにSOURCEルーチンを作成した。薄膜状検出器の高さ方向の拡がりは、前記切斷平面を挟んで上下に5cmずつとし、帯状に内筒部は容器外側表面を一周しているものとした。検出器に於ける中性子、ガンマ線の反射流又は線量率の計算には、NEXT EVENT SURFACE CROSSING ROUTINEの機能を用いる事とした。なお、MORSE-CGコード

使用の際は、容器周辺の線量率分布も計算するため、容器外側表面以外にも、容器表面から5mまで、0.5m毎に薄膜状検出器の帯を配し、その高さ方向の拡がりを容器中心軸からの距離に比例させる事とした。

冷却フィンを表面に持つ容器に対しては、その領域層の空間体積で平均した密度を持つ冷却フィン物質で置換する近似を採用した。この近似は、ANISNコードの場合も同様に採用している。

3.1.3 その他の近似

ANISNコード、MORSE-CGコードともに、中性子、ガンマ線のエネルギーに関しては、共通のエネルギー群構造を持つ多群の取り扱いを行った。中性子32群、ガンマ線18群、合計50群の群構造である。各群の上限の具体的な値は、表2~5に示す。

真空以外の物質についても、両計算コードを使用する際に共通の値を持つ核データを使用した。散乱の角度分布のルジャンドル展開では、P₅近似を用いる。

ANISN計算は、S₁₆P₅近似で計算を行い、MORSE-CG計算では、1万個ないし4万個の中性子、一次ガンマ線を線源膜から一様発生させ、その飛跡を追跡した。

いずれの計算コードを用いる場合でも、計算は50群中の1群のみを順次、若いエネルギー群数の順に選び、そのエネルギー群のみに集中するパルス状の線源スペクトルに対応した特性関数を求めることとした。

3.2 両コードによる計算結果の整合性

3.2.1 反射流特性関数

乾式容器TN-12Aを例として、中性子に対する反射流特性関数をANISNコード並びにMORSE-CGコードを用いて算出した。Fig. 1に示すように、

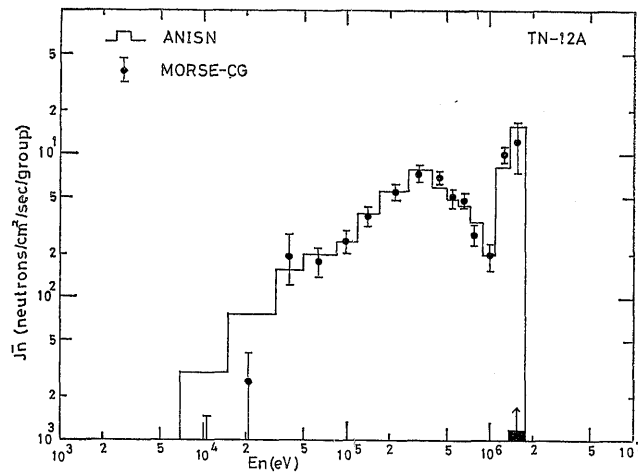


Fig. 1 Consistency in values of the characteristic function CFRN calculated for the cask TN-12A by the ANISN code and the MORSE-CG code.

ANISN コードの結果は、MORSE-CG コードを用いたモンテカルロ計算に計算誤差範囲内でおおむね良く一致している。

TN-12A の内側壁は内径 61 cm, 外径 91.3 cm の円環状鉄層でできている。Fig. 1 には、矢印で示したエネルギー群中の 1 万個の中性子が内側壁へ入射した場合の、反射線流エネルギー分布が示してあるが、 10^6 eV 附近に谷が、 3.5×10^5 eV 附近に山が現われるのは 800 keV 附近にある鉄の非弾性散乱レベルに起因するエネルギー減衰効果によるものであり、この反射線流のエネルギー分布が、ほとんど、円環状鉄層で散乱した反射中性子によるものである事を物語っている。この山と谷附近の分布が、両計算コードによる独立した計算で互いに、モンテカルロ計算誤差の範囲で、良く一致している事は、ANISN コードを用いた計算の妥当性を裏付けるものである。線源からの中中性子数を 1 万個から 4 万個、9 万個へと増加させるにつれて、モンテカルロ計算の計算誤差も 1/2, 1/3 と減少する事が期待できる。

しかしながら、その精度改善に費す、全中性子群にわたった反射流特性の計算時間は膨大なものとなる。したがって、Fig. 1 に示すごとき、1 万個の場合のモンテカルロ計算が ANISN コードを用いた計算と良く一致すると考え、今後、反射流特性関数は、ANISN コードを用いて計算することとする。

一次、二次ガンマ線についても、ANISN コードの

計算結果と MORSE-CG コードのそれとの一致は、おおむね良好である。

3.2.2 遮蔽性能特性関数

乾式輸送容器 TN-12A の中性子遮蔽性能特性関数を、ANISN コード、MORSE-CG コードのそれぞれで計算した。Fig. 2 に結果の比較を示す。モンテカルロ計算では、1 万個の線源中性子に対する履歴を追跡しているが、その結果は、おおむね、ANISN コードで得た結果の傾向を良く表していると言える。数個のエネルギー群で両者の一致にずれがみられるが、このずれは線源中性子の数を、もし膨大な計算をいとわずに、4 万個、9 万個と増大させれば、計算誤差と共に小さくなると考えられる。ANISN コードによる計算では計算結果に対する誤差の目安は与えられない。しかし、空間メッシュに対する幅は最小平均自由行程の 1/2 程度と十分に小さいため、誤差は多くとも 2~3% 程度と考えられる。

モンテカルロ計算が、1 万個の線源中性子数に対し、この程度の計算誤差であれば、ANISN コードによる計算結果のエネルギー依存性を良く表していると考えられる。本報では、以下、ANISN コードによる遮蔽性能特性関数の計算結果をもとにして議論を進める事とする。

4. 各種輸送容器の特性関数

いくつかの種類の実用輸送容器、並びに、実用容器

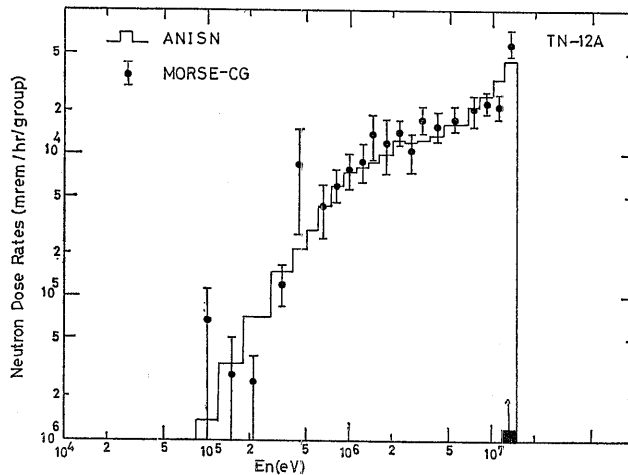


Fig. 2 Consistency in values of the characteristic function CFSN calculated for the cask TN-12A by the code ANISN and MORSE-CG code.

では無いが、良好な実験条件のもとで遮蔽実験が行なわれた電力中央研究所[†]の50トン容器²⁾を対象に、反射流特性関数、遮蔽性能特性関数を算出した。前述のごとく、MORSE-CGコードで算出した結果がANISNコードで算出した結果と良く一致すると考えられるので、ANISNコードで算出した結果を、一部分、Table 2~5に示した。

Table 2では乾式容器TN-12Aの、Table 3では湿式容器HZ-75Tの、Table 4ではEXCELLOX-3の、Table 5では電力中央研究所の50トン容器の結果を示す。どの表も、入射中性子が、第5群、第10群、第16群の各エネルギー群に単色入射した場合の、中性子、二次ガンマ線に対する両特性関数、並びに、一次ガンマ線が第40群に入射した場合の両特性関数の例が示してある。

各表の左側第一列には中性子、ガンマ線のエネルギー群の群番号を、第二列には各エネルギーの定義エネルギーの上限値をMeV単位で示してある。第三列から第五列までの間では、それぞれ第5群、第10群、第16群に中性子が入射した場合の、両特性関数の値が示してある。第六列には、第40群に一次ガンマ線が入射した場合の両特性関数の値が示されている。各列では、第1行目に中性子遮蔽性能特性関数 $T_n C_n$ の

値が D_n として、第2行目に二次ガンマ線遮蔽性能特性関数 $T_{n,\gamma} C_\gamma$ が $D_{n,\gamma}$ として、あるいは一次ガンマ線遮蔽性能特性関数 $T_\gamma C_\gamma$ が D_γ として、mrem/hrを単位として示してある。第3列から第5列まででは、第3行目から第34行目までの間に中性子の、第35行目から第52行目までの間に二次ガンマ線の反射流特性関数を、第6列では、第35行目から第52行目までの間に一次ガンマ線の反射流特性関数を示す。

4.1 反射流特性関数

4.1.1 中性子の反射流特性関数

入射エネルギー群と同一のエネルギー群で反射中性子流として内筒部へ現われる中性子は、散乱に伴うエネルギー減少があるにもかかわらず、同一エネルギー群にとどまった中性子である。このような自分自身のエネルギー群にとどまる散乱を今後、自群散乱と呼称する。

Figs. 3, 4, 5に、それぞれ第5群、第10群、第16群のみに値を持つ、パルス状エネルギー分布の単色中性子が入射した場合につき、反射中性子流のエネルギー分布が示されている。乾式容器、TN-12Aでは、第10群で入射した中性子の自群散乱が他の容器の自群散乱よりも多いのに、他の容器の場合では、自群散乱が相対的に低い事を示している。

特徴的な事として、EXCELLOX-3の行列要素は入射エネルギー群附近では最も低い値であるにもかかわらず、低エネルギー群では逆に、最も高い値となる

[†] 電力中央研究所, Central Research Institute of Electric Power Industry の略称として、図表中ではCRIEPIと呼ぶ。

Table 2 Characteristic Functions for TN-12A

Table 3 Characteristic Functions for HZ-75T

Incident N Upper Energy (MeV) Dn Dn x Df Emission N	Table 2				Table 3			
	N = 5	N = 10	N = 16	N = 40	N = 5	N = 10	N = 16	N = 40
	$1.619 \times 10^{-4} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$9.882 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$2.952 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$		$3.027 \times 10^{-4} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$4.454 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$2.141 \times 10^{-6} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	
	$9.652 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$9.130 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$6.804 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$8.394 \times 10^{-9} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$5.940 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$5.355 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$4.680 \times 10^{-5} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$4.846 \times 10^{-9} \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$
5	6.7032+6	4.906-2			5.932-2			
6	4.4933+6	1.721-2			1.715-2			
7	3.6788+6	1.350-2			1.467-2			
8	3.0199+6	1.712-2			2.176-2			
9	2.4660+6	2.401-2			3.435-2			
10	2.0190+6	3.000-2	1.282-1		4.065-2	2.066-1		
11	1.6530+6	3.375-2	5.182-2		4.522-2	6.760-2		
12	1.3534+6	4.030-2	2.143-2		5.008-2	3.361-2		
13	1.1080+6	4.382-2	4.131-2		5.144-2	5.103-2		
14	9.0718+5	4.907-2	5.141-2		5.233-2	5.309-2		
15	7.4274+5	4.913-2	5.359-2		4.734-2	4.377-2		
16	6.0810+5	4.587-2	5.074-2	3.568-1	4.370-2	4.188-2	4.406-1	
17	4.9787+5	4.857-2	5.410-2	2.190-1	3.547-2	3.655-2	1.880-1	
18	4.0762+5	7.132-2	9.126-2	1.043-1	4.936-2	6.001-2	5.313-2	
19	2.7324+5	4.861-2	5.813-2	4.146-2	3.096-2	3.481-2	1.186-2	
20	1.8316+5	3.247-2	3.584-2	2.137-2	1.736-2	1.748-2	3.403-3	
21	1.2277+5	1.912-2	2.149-2	1.140-2	9.567-3	9.816-3	1.437-3	
22	8.6517+4	1.305-2	1.570-2	7.571-3	6.322-3	6.882-3	9.751-4	
23	5.2475+4	1.027-2	1.200-2	6.030-3	4.083-3	4.063-3	8.839-4	
24	3.1828+4	4.886-3	5.664-3	2.771-3	2.437-3	2.211-3	9.970-4	
25	1.5034+4	2.063-3	2.331-3	1.176-3	1.251-3	1.034-3	6.831-4	
26	7.1017+3	1.908-4	2.072-4	9.602-5	5.289-4	4.219-4	3.683-4	
27	2.6126+3	3.267-4	3.436-4	1.804-4	9.771-4	8.422-4	8.123-4	
28	9.6112+2	4.108-5	4.122-5	2.205-5	5.783-4	5.346-4	5.286-4	
29	2.1445+2	3.644-5	3.582-5	2.315-5	1.147-3	1.108-3	1.094-3	
30	4.7851+1	4.396-5	4.299-5	3.102-5	1.653-3	1.614-3	1.589-3	
31	5.9436+0	8.749-6	8.542-6	6.293-6	1.317-3	1.289-3	1.258-3	
32	4.1400-1	1.628-7	1.581-7	1.167-7	1.392-3	1.369-3	1.296-3	
33	1.0000+7	1.074-4	1.869-4	4.50 -11	8.398-5	1.572-4	7.16 -13	
34	8.0000+6	2.543-3	2.932-3	3.169-3	1.904-3	2.023-3	2.485-3	
35	6.5000+6	1.681-3	1.119-3	8.224-4	1.561-3	7.338-4	5.649-4	
36	5.0000+6	6.334-3	8.867-4	5.880-4	6.299-3	5.839-4	3.953-4	
37	4.0000+6	1.882-2	1.025-3	4.684-4	1.615-2	6.720-4	2.662-4	
38	3.0000+6	1.821-2	5.516-4	2.738-4	2.224-2	3.446-4	1.548-4	
39	2.5000+6	2.467-2	7.362-4	2.867-4	2.197-2	4.789-4	1.417-4	
40	2.0000+6	2.825-2	1.794-3	2.577-4	5.364-4	2.606-2	1.608-3	4.979-4
41	1.6600+6	3.717-2	5.476-3	2.696-4	2.512-3	3.320-2	4.965-3	1.324-4
42	1.3300+6	8.243-2	2.337-2	3.495-4	6.022-3	7.174-2	2.145-2	1.767-4
43	1.0000+6	5.866-2	2.534-2	2.867-4	6.822-3	5.263-2	2.476-2	1.584-4
44	8.0000+5	6.124-2	3.320-2	5.384-4	1.257-2	5.182-2	3.057-2	3.812-4
45	6.0000+5	8.193-3	3.633-2	2.520-3	3.895-2	6.847-2	3.135-2	1.958-3
46	4.0000+5	5.350-2	2.481-2	1.248-3	3.597-2	4.317-2	2.140-2	9.594-4
47	3.0000+5	6.610-2	2.973-2	1.369-3	6.619-2	5.197-2	2.512-2	1.023-3
48	2.0000+5	3.659-2	1.679-2	8.078-4	2.583-2	2.873-2	1.420-2	6.207-4
49	1.0000+5	7.259-4	3.701-4	1.852-5	5.106-4	6.182-4	3.443-4	1.612-5
50	5.0000+4	1.809-6	3.088-6	1.772-7	1.938-7	1.458-6	3.191-6	2.100-7

*1.619-4は 1.619×10^{-4} を意味する。

Table 4 Characteristic Functions for EXCELLOX-3

Table 5 Characteristic Functions for 50 ton Cask (CRIEPI)

Element N	Incident N Upper Energy (MeV) D _x , D _y D _z	N = 5	N = 10	N = 16	N = 40	N = 5	N = 10	N = 16	N = 40
		$3.584-3 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$2.584-3 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$5.487-4 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$		$6.327-4 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$4.035-4 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$1.048-4 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	
		$4.241-5 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$3.255-5 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$2.399-5 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$1.963-9 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$1.829-4 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$1.752-4 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$1.538-4 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$	$2.591-9 \frac{\text{mrem}}{\text{hr}}$
5	6.7032+6	3.968-2				4.490-2			
6	4.4933+6	1.982-2				1.687-2			
7	3.6788+6	1.424-2				1.381-2			
8	3.0199+6	1.817-2				1.892-2			
9	2.4660+6	2.431-2				2.832-2			
10	2.0190+6	2.772-2	9.538-2			3.463-2	1.510-1		
11	1.6530+6	3.009-2	5.461-2			3.919-2	5.928-2		
12	1.3534+6	3.164-2	2.559-2			4.541-2	2.780-2		
13	1.1080+6	3.005-2	3.069-2			4.862-2	4.757-2		
14	9.0718+5	3.246-2	3.528-2			5.271-2	5.526-2		
15	7.4274+5	2.933-2	3.006-2			5.070-2	5.243-2		
16	6.0810+5	2.614-2	2.939-2	1.886-1		4.832-2	5.055-2	3.829-1	
17	4.9787+5	2.026-2	2.235-2	8.621-2		4.549-2	4.892-2	2.167-1	
18	4.0762+5	3.421-2	4.320-2	4.228-2		6.388-2	8.013-2	8.821-2	
19	2.7324+5	2.425-2	3.030-2	2.666-2		4.205-2	4.923-2	4.923-2	
20	1.8316+5	1.776-2	2.054-2	2.182-2		2.556-2	2.739-2	1.174-2	
21	1.2277+5	1.189-2	1.502-2	1.757-2		1.471-2	1.608-2	5.714-3	
22	8.6517+4	1.189-2	1.522-2	1.919-2		1.004-2	1.177-2	3.667-3	
23	5.2475+4	1.021-2	1.295-2	1.743-2		7.261-3	8.112-3	2.690-3	
24	3.1828+4	9.565-3	1.223-2	1.702-2		3.817-3	4.114-3	1.473-3	
25	1.5034+4	7.046-3	9.724-3	1.384-2		1.721-3	1.751-3	7.042-4	
26	7.1017+3	8.687-3	1.110-2	1.630-2		2.716-4	2.528-4	1.071-4	
27	2.6126+3	8.921-3	1.134-2	1.694-2		4.903-4	4.357-4	2.227-4	
28	9.6112+2	1.103-2	1.385-2	2.055-2		8.820-5	7.549-5	4.246-5	
29	2.1445+2	1.220-2	2.423-2	2.423-2		2.622-4	2.515-4	2.170-4	
30	4.7851+1	1.740-2	1.939-2	3.005-2		5.061-4	4.943-4	4.440-4	
31	5.0436+0	1.272-2	1.557-2	2.515-2		1.806-4	1.769-4	1.599-4	
32	4.1400-1	1.744-2	2.117-2	3.169-2		5.141-6	5.040-6	4.554-6	
33	1.0000+7	7.708-5	1.278-4	8.85 -11		9.921-5	1.781-4	9.54 -12	
34	8.0000+6	1.388-2	1.723-2	2.512-2		1.633-3	1.869-3	2.247-3	
35	6.5000+6	4.100-3	4.196-3	5.778-3		1.403-3	7.610-4	5.311-4	
36	5.0000+6	7.225-3	2.978-3	4.017-3		6.017-3	6.172-4	3.735-4	
37	4.0000+6	1.586-2	2.253-3	2.723-3		1.742-2	7.498-4	2.636-4	
38	3.0000+6	1.822-2	1.255-3	1.555-3		1.879-2	3.884-4	1.531-4	
39	2.5000+6	2.146-2	2.569-3	3.347-3		2.330-2	5.453-4	1.481-4	
40	2.0000+6	2.392-2	2.242-3	1.608-3	4.986-4	2.696-2	1.646-3	1.408-4	5.626-4
41	1.6600+6	3.068-2	4.912-3	1.574-3	2.502-3	3.526-2	5.261-3	1.396-4	2.509-3
42	1.3300+6	6.701-2	1.862-2	2.083-3	6.006-3	7.822-2	2.301-2	1.857-4	6.018-3
43	1.0000+6	4.799-2	2.054-2	1.813-3	6.819-3	5.603-2	2.541-2	1.617-4	6.822-3
44	8.0000+5	4.891-2	2.698-2	4.081-3	1.253-2	5.782-2	3.293-2	3.587-4	1.256-2
45	6.0000+5	7.199-2	3.766-2	2.015-2	3.848-2	7.626-2	3.484-2	1.800-3	3.890-2
46	4.0000+5	4.579-2	2.391-2	1.022-2	3.532-2	4.984-2	2.400-2	9.039-4	3.580-2
47	3.0000+5	5.693-2	2.851-2	1.144-2	6.481-2	6.126-2	2.867-2	9.915-4	6.572-2
48	2.0000+5	3.287-2	1.708-2	7.212-3	2.582-2	3.439-2	1.638-2	5.966-4	2.582-2
49	1.0000+5	6.701-4	4.021-4	1.597-4	4.997-4	7.446-4	3.923-4	1.531-5	5.100-4
50	5.0000+4	2.563-6	2.717-6	1.568-6	1.522-7	1.309-6	3.046-6	1.795-7	1.006-7

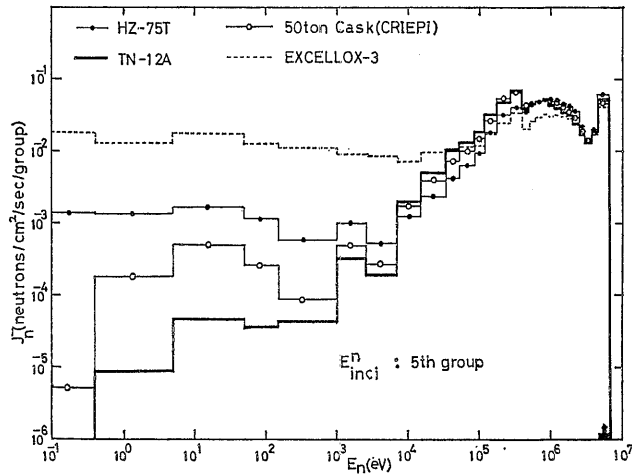


Fig. 3 Incident energy dependence of energy spectra for the characteristic function CFRN calculated for the four casks; TN-12A, HZ-75T, EXCELLOX-3 and the 50 ton cask at CRIEPI. All incident neutron energies are confined in the 5th energy group.

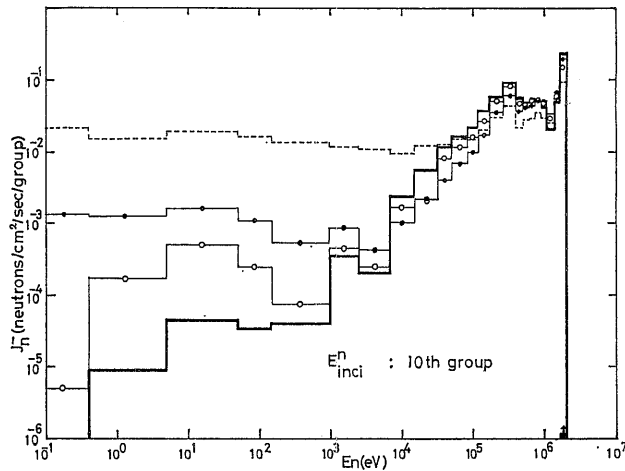


Fig. 4 Incident energy dependence of energy spectra for the characteristic function CFRN calculated for the four casks. All incident neutron energies are confined in the 10th energy group.

ことと、さらに、 3×10^6 eV 付近で見られる反射流の値の大きさの順序が 10^3 eV 付近から小さなエネルギー部分で全く変わることが挙げられる。

これらの結果には容器内側附近の物質層の構造、物質とその配列が微妙に影響を及ぼしており、まさに容器個性が反射流に反映していると言える。Table 1 に

示した各容器壁構造並びに物質配列と厚さを参照すれば、この現象のおおよその機構が、水、鉄、鉛の中性子減速能力に起因している事がわかるであろう。各容器の主な特徴の説明を以下に示す。

EXCELLOX-3 の内側壁第 1 層から第 5 層までの間 21.7 cm の区間は、HZ-75T の内側壁第 1 層から第 3

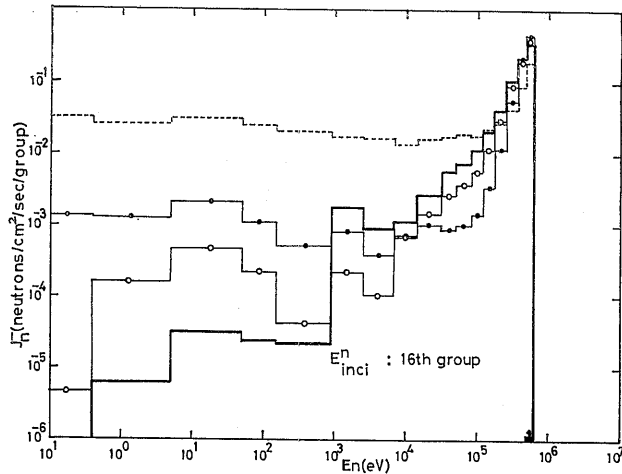


Fig. 5 Incident energy dependence of energy spectra for the characteristic function CFRN calculated for the four casks. All incident neutron energies are confined in the 16th energy group.

層までの 21.09 cm の区間とは、第 2 層の水層、第 3 層の鉄層が存在する事を除けば、よく似た構造をしている。この EXCELLOX-3 の水、鉄層は、それぞれ、あまり厚くは無いが、強力な中性子減速作用を持ち、入射した中性子を 1 回の衝突で 10^5 eV 以下に低下させてしまう。一方、HZ-75T の第 2 層は、鉄ほどでは無いが中性子をよく散乱させ、かつその際に中性子を小さく減速させる、鉛の厚い層である。Figs. 3, 4, 5 で 4×10^5 eV 附近の HZ-75T の反射流が EXCELLOX-3 の値よりも大きい理由は、EXCELLOX-3 の水、鉄層中の散乱中性子は減速の際に、もっと低いエネルギー領域へ減速されてしまい、着目しているエネルギー範囲が、いわば空となっている為と考えられる。

TN-12A の内側壁第 1 層は厚い鉄層であるが、鉄には、 8×10^5 eV 附近、 2×10^6 eV 附近、 4×10^6 eV 附近等に特徴的な非弾性散乱レベルが存在する。また鉄は鉛よりも中性子散乱を生じ易い。この為、Figs. 3, 4, 5 の、 3×10^5 eV 附近で TN-12A の反射流が HZ-75T よりも大きな値となっている。

HZ-75T の鉛層では中性子が鉄よりも透過し易い為、より深部にある水層へ透過して行き、厚い水層中で盛んに低エネルギーへ大幅なエネルギー減衰を受ける。この結果として、 3×10^5 eV 附近では、EXCELLOX-3 ほどでは無いが、TN-12A よりも小さな反射流となっている。

8×10^2 eV 以下の低エネルギーでは、HZ-75T の方が TN-12A よりも大きな反射流となっている。これは、上記機構で減速した中性子が、水層から鉛層を通して内側表面へ来る為である。EXCELLOX-3 の内側壁第 1, 第 2, 第 3 層による減速中性子は、内側表面に最も現われ易い為、 8×10^2 eV 以下のエネルギーでは、EXCELLOX-3 からの反射流が最も大きな値となっている。

電力中央研究所で作られた 50 トン容器の内側表面附近の壁構造は完全な鉄、鉛の互層体系であり、HZ-75T に類似した物質層の配列となっている。ただ、第 2 層 (鉄層) が、50 トン容器では HZ-75T の約 2.5 倍厚く、第 3 層 (鉄層) は 6 倍程度厚い。一方、第 2 層 (鉛層) は約 15 cm であり、HZ-75T よりも 4 cm 程度薄くなっている。

50 トン容器を TN-12A と比較した場合、50 トン容器の第 2 層の厚さの分だけ TN-12A の鉄層が鉛層に置き代わったと考えられる。この事から、50 トン容器の場合の高いエネルギー領域の反射線流にみられる、TN-12A よりはやや小さな値、及び TN-12A に類似したエネルギー依存性の説明がつく。

低エネルギー領域では、50 トン容器と HZ-75T とのエネルギー依存性には類似した傾向がみられるが、これは、鉛層による散乱、減速の効果による。ただ、50 トン容器の第 1 層 (鉄層) が HZ-75T よりも厚い為、値としては HZ-75T よりも小さく、TN-12A と

HZ-75T との中間の値となっている。

EXCELLOX-3 における内側表面第 1, 第 2, 第 3 層の上記役割を証拠立てる結果が, 以下に述べる二次ガンマ線の反射流特性関数において観察される。

4.1.2 二次ガンマ線の反射流特性関数

Figs. 6, 7, 8 には, それぞれ, 入射中性子が第 5 群, 第 10 群, 第 16 群にパルス状エネルギー分布をして入射した場合の, 二次ガンマ線反射特性関数が示してある。

Fig. 6 の場合, 入射エネルギーが高いため, 入射中性子が水, 鉄層で受けるエネルギー減衰は未だそれほど大きくなく, 湿式容器の内側第 1 層, 第 3 層を構成する鉄の中性子捕獲に伴って生ずる二次ガンマ線も, 未だ顕著に現われていない。しかしながら, 5×10^6 eV から 8×10^6 eV にかけて, EXCELLOX-3 と HZ-75T との相異が, わずかに認められる。

TN-12A の二次ガンマ線反射流よりも HZ-75T の二次ガンマ線反射流の方が値が低いのは, HZ-75T の内側第 2 層を構成する厚い鉛が, 第 3 層, 第 4 層で生ずる二次ガンマ線を遮蔽しているからである。

Fig. 7 の場合, 入射エネルギーがやや小さくなり,

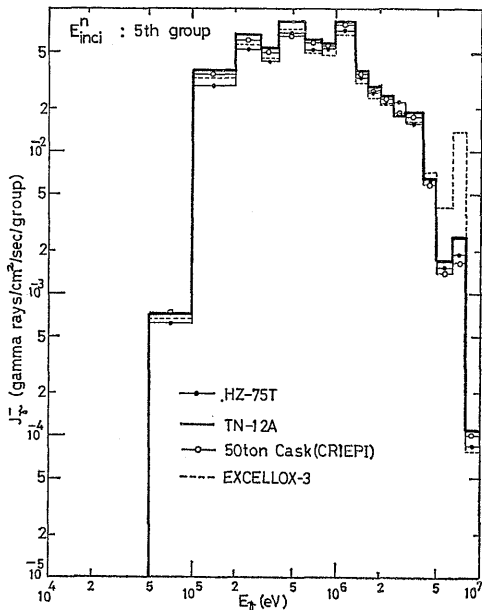


Fig. 6 Incident energy dependence of energy spectra for the characteristic function CFRSG calculated for the four casks. All incident neutron energies are confined in the 5th energy group.

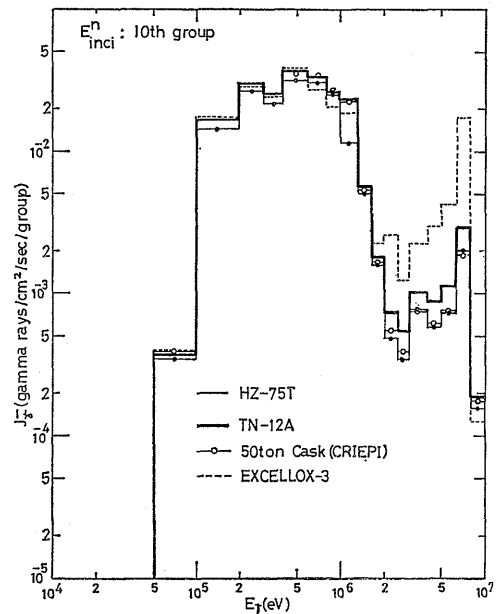


Fig. 7 Incident energy dependence of energy spectra for the characteristic function CFRSG calculated for the four casks. All incident neutron energies are confined in the 10th energy group.

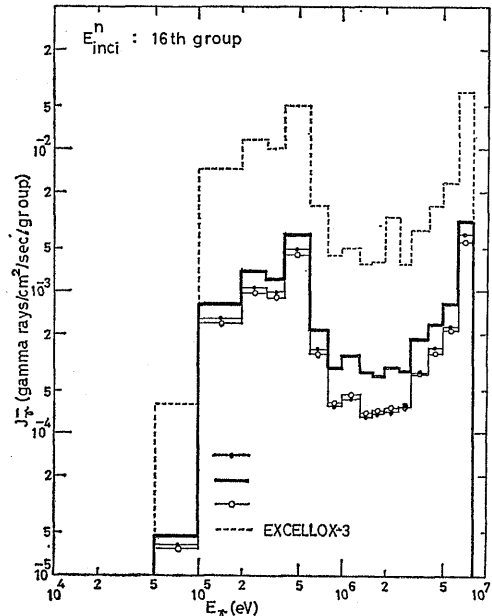


Fig. 8 Incident energy dependence of energy spectra for the characteristic function CFRSG calculated for the four casks. All incident neutron energies are confined in the 16th energy group.

EXCELLOX-3の第2層では入射中性子の減速が増加する。その効果として、第1層、第3層中で二次ガンマ線の生成がきわ立って増加してきている事が現われている。

Fig. 8の場合、入射エネルギーはいっそう低くなっている。このためEXCELLOX-3に於ける、上記第2層の役割、ひいては、第1層、第3層の役割が非常にあらわに認められるようになる。また、Fig. 8では、EXCELLOX-3とHZ-75Tとで、二次ガンマ線の反射流スペクトルのかたちが非常に似ている事も注目される。この事は、鉄層からの二次ガンマ線が反射流の基本部分を構成している事の証しである。尚、EXCELLOX-3の場合のスペクトルで、 2.5×10^8 eV 附近に水中の熱中性子捕獲に伴う二次ガンマ線の寄与が少し現われて来ているのが認められる。

Figs. 3, 4, 5 までの値を見ると、HZ-75Tの場合の反射中性子流は 7×10^2 eV より低いエネルギー領域でEXCELLOX-3の場合に次いで大きな値となっている。特に、 10^1 eV 程度の低エネルギー領域ではTN-12Aよりもはるかに大きな値である。鉄の中性子吸収は低エネルギーで大きな値となる事を考え合せば、Fig. 8でHZ-75Tの場合の二次ガンマ線反射流はTN-12Aの場合のものよりも大きな値となるはずである。この一見矛盾した結果はHZ-75Tの内側壁第二層に存在する鉛が原因となっている。実は、 7×10^8 eV 以下の中性子エネルギー領域で生成される二次ガンマ線が全生成ガンマ線総量に占める割合は、それ以上の中性子エネルギー領域で生成される部分に比較す

ると小さなものである。さらに、鉛層よりも深い位置にある水層で生じた二次ガンマ線は完全に鉛層で遮断され、内側表面には現れない。したがって、Fig. 8の二次ガンマ線の反射流に於て、HZ-75TとTN-12Aとの間の相違は、二次ガンマ線の寄与の原因となる生成領域の相違を反映している。すなわち、HZ-75Tの二次ガンマ線は薄い鉄の第1層並びに第3層と背後の水層とで生成されるのに対し、TN-12Aの二次ガンマ線は、鉄の厚い第1層で生成する。この場合、鉄のガンマ線吸収が鉛よりも小さい事も影響している。

電中研50トン容器の内側壁表面附近の物質配列は、既に述べた如く、鉄の第1層の厚さが大きいだけで、HZ-75Tに類似している。このため、二次ガンマ線の発生、減速、散乱の様子も類似しており、二次ガンマ線反射流のエネルギー依存性も、電中研50トン容器とHZ-75Tとでは類似したものとなっている。

4.1.3 一次ガンマ線の反射流特性関数

Table 2 から Table 5 までで示した様に、一次ガンマ線の反射流特性関数は、容器にあまり依存しない。これは、どの容器についても、内側壁の第1層が薄くとも1cmの厚さの鉄層であることによる。この鉄層の厚さは、一次ガンマ線反射流の大きなエネルギー依存性を決めるのに十分な厚さである。

4.2 遮蔽性能特性関数

4.2.1 中性子遮蔽性能特性関数

中性子は容器壁を透過し易く、したがって、中性子遮蔽性能特性関数には各容器壁の内部構造の、いわば影が反映している。Fig. 9に種々の容器の遮蔽性能特

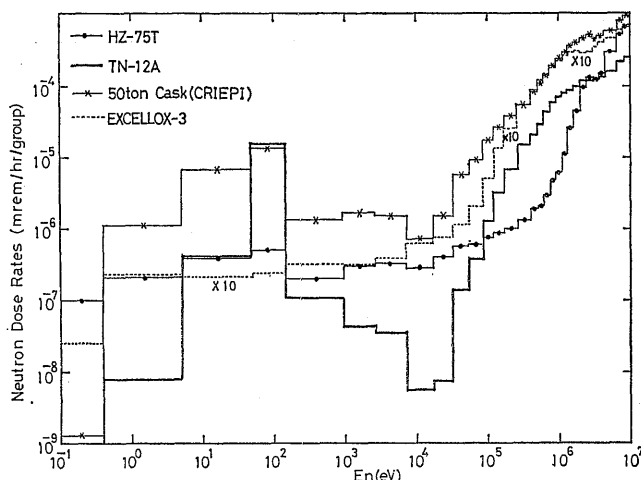


Fig. 9 Profile for incident energy dependence of the characteristic function CFSN calculated for the four casks.

性が示してある。この図は、Table 2~5 に於ける第 1 行の値を第 3 欄から第 34 欄にわたって、入射中性子のエネルギー群の順序に従って作図したものである。

この図で特に注目すべき事は、EXCELLOX-3 の値が、約 1 桁、他の容器よりも高い事と、乾式容器 TN-12A の値が、 $10^5 \text{ eV} \leq E_n \leq 2 \times 10^6 \text{ eV}$ の範囲で、HZ-75T の値よりも大きくなる事である。また、HZ-75T の値の、入射中性子エネルギーに対する全体としての形が $10^5 \text{ eV} \leq E_n \leq 8 \times 10^6 \text{ eV}$ の範囲で凹曲であるのに対し、他の容器では凸曲である事や、TN-12A の値が 10^5 eV 以下のエネルギー領域で他の容器と異な

ったエネルギー依存性を示し、特に 10^4 eV 付近で極小値を持ち、 10^5 eV 付近で極大値を持つ事と電中研 50 トン容器の値が 10^4 eV 以下のエネルギー領域で、他容器の値よりも全体として高い事が特徴的である。

EXCELLOX-3 の値が飛びぬけて高い理由を説明する為に、Figs. 10, 11, 12 に於いて、(2) 式の行列 T_n の行列要素を、3 つの行につき示した。先ず、Fig. 10 ではスペクトルが第 5 群のみに、Fig. 11 では第 10 群のみに、Fig. 12 では第 16 群のみに集中したエネルギー分布をして入射した中性子の、容器外側表面、中央部における線束応答関数を示したものである。

さらに、Figs. 10, 11, 12 で値の大きさが両極端で

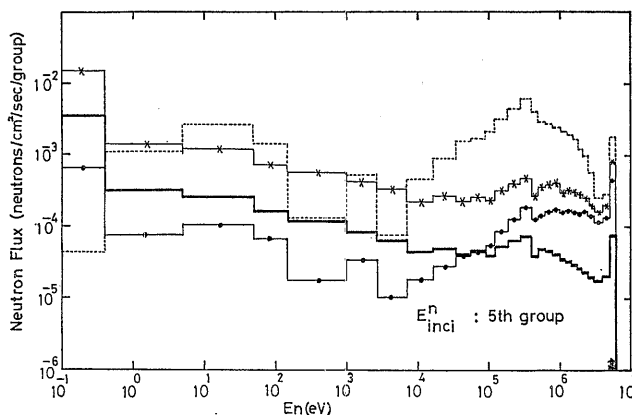


Fig. 10 Incident energy dependence of neutron flux on the outer surfaces of the four casks. Incident neutron energies are confined in the 5th energy group.

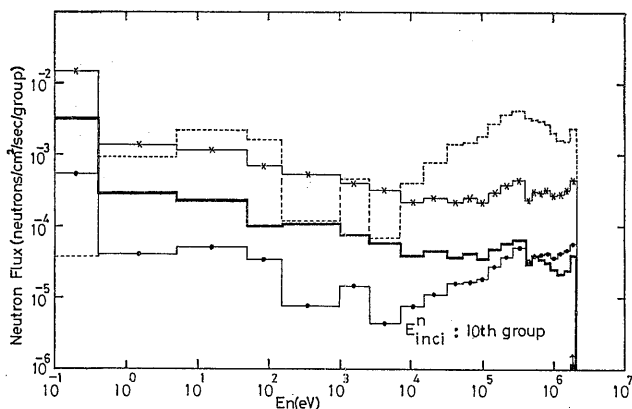


Fig. 11 Incident energy dependence of neutron flux on the outer surfaces of the four casks. Incident neutron energies are confined in the 10th energy group.

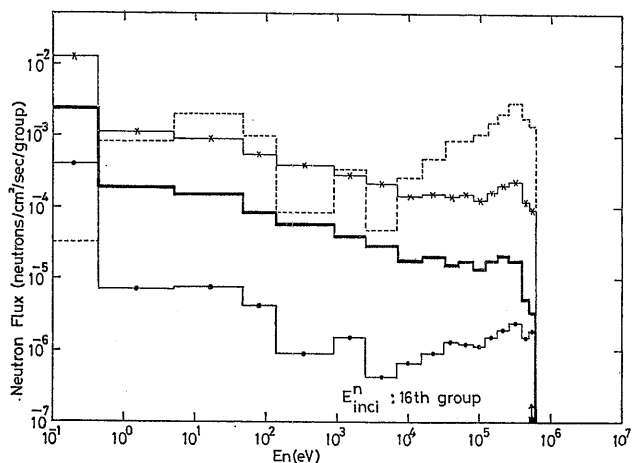


Fig. 12 Incident energy dependence of neutron flux on the outer surfaces of the four casks. Incident neutron energies are confined in the 16th energy group.

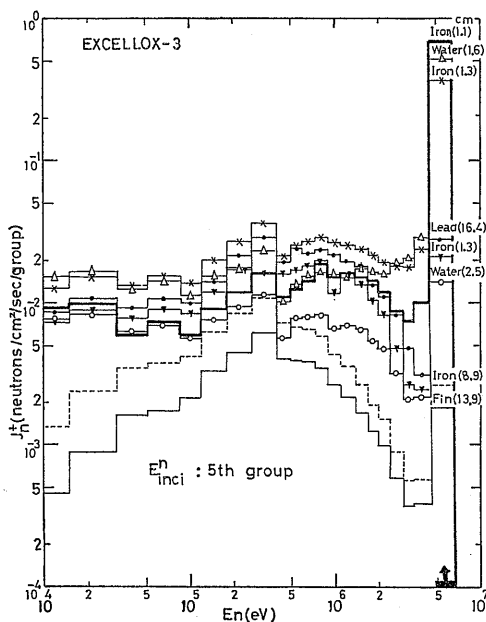


Fig. 13 Energy distribution of neutron current J_n^+ passing through outer boundary of each material region in the direction from inner to outer surface of the cask, EXCELLOX-3, in response to incidence of unit neutron current on the inner wall surface with neutron energies confined in the 5th energy group. Slowing down neutrons are piled up in middle regions.

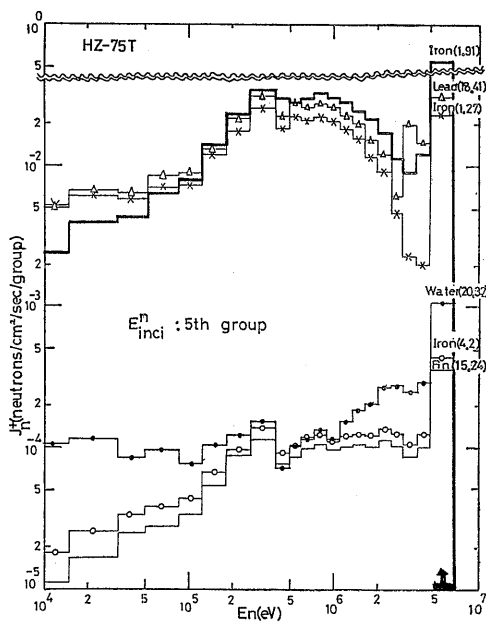


Fig. 14 Energy distribution of neutron current J_n^+ passing through outer boundary of each material region in the direction from inner to outer surface of the cask, HZ-75T, in response to incidence of unit neutron current on the inner wall surface with neutron energies confined in the 5th energy group. The role of the thick water region is very significant.

ある EXCELLOX-3 と HZ-75T に対し、かような結果を導く機構を説明するために、Fig. 13, 14 を示

した。Fig. 13 は EXCELLOX-3 の、Fig. 14 は HZ-75T の、壁内各層の外側境界を容器外側方向へ向けて

通過する中性子流 J^+ を表している。或る物質層の中で、着目したエネルギー群中へ中性子が流入し、流出分との差に余剰が生ずれば、その層の外側境界を外向きに通過する中性子流は、すぐ内側の物質層の外側境界を外向きに通過する中性子流よりも、その値が高くなるはずである。逆に、低下すれば、その物質層では着目エネルギー群で、吸収、減速等により、中性子の流入を上まわる消滅がある事を意味する。

EXCELLOX-3 の遮蔽性能特性関数の値が約 1 桁、他容器よりも高い理由は、EXCELLOX-3 の容器が主として比較的薄い水と鉄の互層から成り、中間に厚さの大きな鉛層が存在する為、中性子の透過し易い体系であると言う事である。特に水層が比較的薄いために、Fig. 13 で示すとおり、水の存在が透過中性子束のエネルギー分布に、他と比較して大きな影響を与えるほどでもない。

一方、Fig. 14 に示すとおり、HZ-75T の容器中の厚さ 20.32 cm の水層は、透過中性子流 J^+ の値を大幅減少させる。この事は、HZ-75T の値が Figs. 10, 11, 12 と入射エネルギーが低下するにつれて急激に減少する理由となっている。

HZ-75T の遮蔽特性関数の値が Fig. 9 の 10^5 eV $\leq E_n \leq 8 \times 10^6$ eV の範囲で凹形となる理由は、Figs. 10~12 の HZ-75T に対する値が入射エネルギーの減少に対して、他容器の場合よりも急激に減少する事に起因している。

TN-12A は厚い鉄層とレジン層が器壁の主体であるが、鉄の中性子断面積の値が 10^4 eV 付近を中心に、小さな極大値を持ち、また、 10^2 eV 付近には小さな極小値を持つ。鉄層が厚いため、この断面積の値のわずかな変動が拡大され、Fig. 9 に現われている。

電中研 50 トン容器は鉄、鉛層体系の外側に厚さ 10 cm の炭水化素（レジン）の層が存在する。一方、EXCELLOX-3 では、鉄、鉛層体系中に、1.6 cm と 2.5 cm の水層がサンドイッチされている。他方、HZ-75T は鉄、鉛層体系の中に厚さ 20 cm の水層が挟まれている。EXCELLOX-3 の体系では水層は合計 4.1 cm の厚さしかなく、中性子が最も多く容器外側表面に到達する。次いで、電中研 50 トン容器の場合に、外側表面へ中性子が到達し易い。この結果、ほとんどの入射エネルギー領域で、EXCELLOX-3 の方が電中研 50 トン容器の値よりも上まわっている。

4.2.2 二次ガンマ線遮蔽性能特性関数

Fig. 15 は Table 2, 3, 4, 5 における第 2 行の値を第 3 欄から第 34 欄にわたって、入射中性子エネルギー群の順序に従って作図したものである。

図の主な特徴として、TN-12A の値が他容器の場合よりもはずれた変動をしている事、電中研 50 トン容器が全般的に、他容器よりも大きな値となっている事が挙げられる。

また特に、Fig. 9 と Fig. 15 との比較の点で目立つ事は、Fig. 9 で飛びぬけて大きな値を示した EXCELLOX-3 が、Fig. 15 では HZ-75T と大差ない値を与えている事と、EXCELLOX-3 以外の容器では、入射エネルギーが 6×10^5 eV 附近よりも低い場合には、中性子よりも二次ガンマ線の方が容器外側表面の線量率に及ぼす影響が大きくなる事である。

電中研 50 トン容器には、容器の外側に厚さ 10 cm のレジン層がある点で、他の湿式容器と比較して、相異がある。レジン層では中性子の熱化が盛んであり、減速した中性子はレジン中の水素より捕獲された二次ガンマ線を発生させる。二次ガンマ線の発生は、この

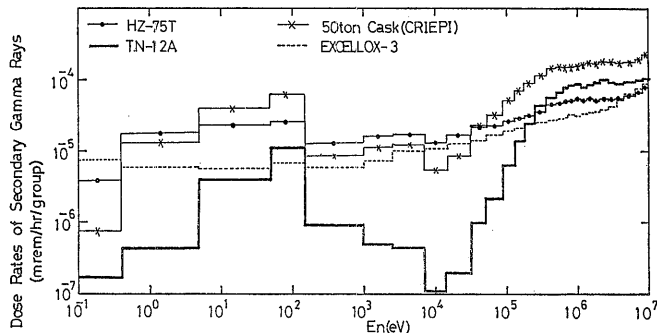


Fig. 15 Profile for incident energy dependence of the characteristic function CFSSG calculated for the four casks.

ほかレジンに接する鉄層に逆流した低エネルギー中性子が鉄層中で獲獲された場合にも可能である。

レジン層は鉄、鉛層よりもガンマ線を透過し易いため、レジン層中並びに上記鉄層で発生した二次ガンマ線は容易に容器外側表面に到達する。この事が、約 10^5 eV 以上の高い入射中性子エネルギー領域で電中研 50 トン容器の二次ガンマ線々量率の値が最も高い理由である。

TN-12A は鉄層の外側にレジン層が付いた簡単な構造であり、大まかに言えば、その物質配列は、電中研 50 トン容器の鉛を鉄に置換したものとなっている。鉄は鉛に比較して中性子を通しにくいので、レジン層に至る中性子束は電中研 50 トン容器よりもやや減少するが、レジン層に入射した中性子からの二次ガンマ線の発生機構は電中研 50 トン容器の場合と同様である。 4×10^5 eV 以上の高い中性子入射エネルギーに対しては、TN-12A の場合のエネルギー依存性が電中研 50 トン容器よりも値がやや小さいものの、よく似ているのは、この二次ガンマ線発生機構が類似しているからである。

TN-12A の値が Fig. 15 の 10^4 eV 附近と 10^5 eV 附近で極値を持つ事は、二次ガンマ線の発生源である中性子が、Fig. 9 に見られる如く、極値を持つためである。

EXCELLOX-3 は、前述のごとく、水を少し含むがほとんど鉛、鉄層の体系であり、中性子は透過し易いが、深部で発生した二次ガンマ線は、外側表面にある 8.9 cm の鉄層で遮蔽される。この為、表面に表れる二次ガンマ線は、主として容器外側表面に近い水層の中で減速した中性子が 8.9 cm の鉄層の、しかも表面附近で発生したものであり、発生領域が極めて限られている。この結果、二次ガンマ線に関しては、特性関数の値が HZ-75T の値と大差なくなっている。

Fig. 10, 11, 12 までに示した容器外側表面の中性子束のエネルギースペクトルに対する入射エネルギー依存性からうなづけるように、入射エネルギーが減少しても、中性子束の応答関数における低エネルギー成分のエネルギースペクトルはあまり変化しない。中性子捕獲に伴う二次ガンマ線のエネルギースペクトルは、中性子エネルギーが低ければ、そのエネルギーにはあまり強く依存せず、従って、入射エネルギーが減少しても二次ガンマ線々量率はあまり変化しない。しかしながら、中性子線量率は、入射中性子エネルギーが減少すれば、しだいにその値が減少する。以上の理

由から、ある入射中性子エネルギー以下では、容器外側表面の中性子線量率よりも、二次ガンマ線の線量率の方が上まわる事が起り得るわけである。

4.2.3 一次ガンマ線遮蔽性能特性関数

Fig. 16 は、Table 2, 3, 4, 5 における第 3 行の値を第 35 欄から第 52 欄にわたって、入射ガンマ線エネルギー群の順序に従って作図したものである。

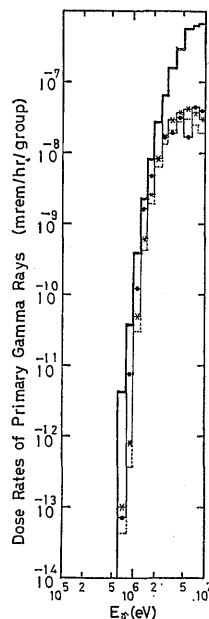


Fig. 16 Profile for incident energy dependence of the characteristic function CFSPG calculated for the four casks.

この図で顕著な点は、TN-12A の値が他の容器の値よりも大きい事である。TN-12A の壁構造材に鉛は使われていない。一方、他の容器は壁構造材に少なくとも 15 cm 程度の厚さに鉛が使われている。鉛はガンマ線に対し、鉄よりも大きな遮蔽能力を持つがその能力の相異はガンマ線エネルギーが約 2 MeV 以上に高くなると増大する。このため、Fig. 16 の E_T の値が 10^7 eV 附近では、TN-12A の方が約 1 桁以上もガンマ線を通し易くなっている。 E_T の値が 2×10^5 eV 程度でも、まだ TN-12A はガンマ線を通し易い事が図からわかる。

5. 特性関数の応用と応用結果の信頼性

Table 2, 3, 4, 5 までの各容器に対する特性関数を基に、内筒部に使用済核燃料を装荷した場合の、輸送

指数並びに容器周辺の線量率分布を計算することが出来る。そのためには先ず、内筒部と壁部との間の中性子、ガンマ線の相互作用効果を(5)式の線量率合成計算にとり入れる必要がある。次いで、線量率が外側表面から外側にどのように分布するか、その法則を知る必要がある。以下では順を追って、これら課題の処理法を示し、特性関数を用いて行なった遮蔽実験の解析結果を示し、特性関数応用法の妥当性を検討する。

5.1 相互作用効果の取扱い

容器壁と内筒部との放射線のやりとりの模型を、Fig. 17 に示した。図では内筒部に殻状の薄い線源と

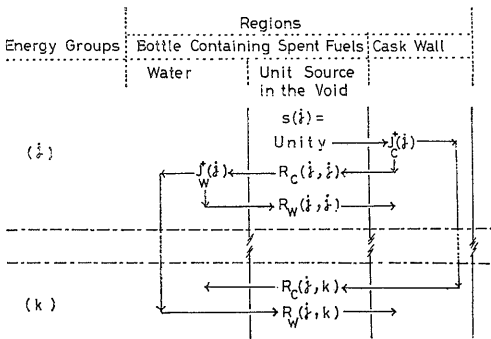


Fig. 17 Model for space-energy coupling of particles reflected between the cask wall and the water region in the bottle of the 50 ton cask.

水領域が存在する場合が示してあり、電中研 50 トン容器の遮蔽実験結果を解析する体系に対応している。線源からは第 j エネルギー群に属す単位の強さの放射線流が容器内側表面に入射しているものとする。

実際の使用済核燃料を装荷した場合は、この内筒部水領域は、湿式容器では、燃料集合体構造材、中性子吸収材、使用済核燃料、水の混合物の領域で、また乾式容器では水以外の混合物領域で置き換えられる。この領域の量を表わすために、便宜上、添字 w を付けることとする。

Fig. 17 では、容器壁へ入射した放射線は、一部分は、自群散乱の結果、 j 群に留まったまま、水領域へ反射するが、他の部分では、第 k 群に減速して、水領域に反射することと、水領域からも同様の反射があることを示す。

$R_c(j, k)$ は、第 (7) 式右辺の部分行列から或る行列の要素であり、 j, k 共に 1 から 50 までの値をとるものとする。行列要素 $R_c(j, k)$ は既に Table 2, 3,

(448)

4, 5 に示したとおり、各種容器に対して求められている。行列要素 $R_w(j, k)$ は使用済核燃料を収納する際に、その燃料集合体の収納状態、使用済核燃料の物質構成状態等に応じて求められるべきものである。

領域 c と w との間に反射流のやりとりがあれば、反射で再入射した反射放射線の減速・吸収が各領域で起り、領域 c に入射する放射線のみかけ上の入射エネルギースペクトルが、反射流のやりとりの無い場合とは異なったものとなると考えられる。この効果を考慮した場合、容器内側表面に入射する放射線の実効値 J_{+c}^{eff} は以下の様に表わせる。

$$J_{+c}^{eff} \equiv J_{+c}^0 + (R_{couple}) * J_{+c}^0 \quad (8)$$

$$\equiv J_{+c}^0 + J_{+c}^+ \quad (8')$$

ただし、 J_{+c}^0 は、裸の内筒部から外部へ流出する中性子、ガンマ線の流れに対する列ベクトル J_{+n}^0 、 J_{+r}^0 を用いて下記のごとく表せる列ベクトルであり、壁と内筒部との間の反射流相互作用が無いと仮定した場合の、容器壁への入射放射線流とも考えられる。

$$J_{+c}^0 = \begin{pmatrix} J_{+n}^0 \\ J_{+r}^0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

R_{couple} は、容器壁と内筒部との反射流相互作用を考慮した場合の、壁部への入射線流に加えるべき補正項を表わす。 R_{couple} は R_c 、 R_w を用いて近似的に以下の如く与えられる。

$$R_{couple} \approx \sum_{n=1}^6 (R_c R_w)^n \quad (10)$$

式 (10) の R_{couple} を式 (8) に代入し、さらに (5) 式の J_{+c} に J_{+c}^{eff} を代入すれば、容器の壁部と内筒部との間に存在する中性子、ガンマ線の反射流における相互作用を考慮した、容器外側表面の放射線々量率 D が求まる。

5.2 容器半径方向線量率分布

無限に長い円柱状遮蔽体の中心軸に等方的な放射線源がある場合、半径方向の放射線々量率分布は中心軸からの距離 r に逆比例する。一方、球状遮蔽体が点状等方放射線源をその中心に含む場合は、球状遮蔽体周辺の線量率分布は中心点からの距離 r の逆自乗に比例する。

実用輸送容器の場合、線源領域、並びに容器自身の長さは 3m~4m であり、容器半径は 1m 程度である。この為、容器外側表面付近では、容器長さ、線源領域長さは共に無限長と近似出来る。一方、容器から充分離れた位置では、容器、線源領域は、共に点に近い状態となる。したがって、容器中心からの線量率分

布は、前の場合では $1/r$ 近く、後の場合では $1/r^2$ に近いものとなるものと考えられる。

実用容器の周辺の線量率分布を、容器、線源の実際の高さをそのまま考慮に入れて、MORSE-CG コードで計算した結果、Fig. 18 から 19 に示すような半径方向の線量率分布が得られる。

Fig. 18 は、HZ-75T からのガンマ線の半径方向線量率分布を、ガンマ線エネルギー別に示したものであ

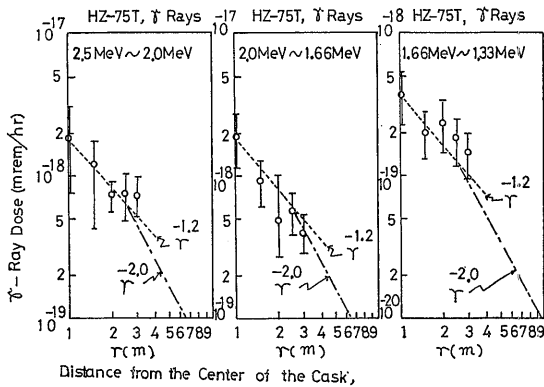


Fig. 18 Attenuation of gamma-ray dose calculated for each energy group around the cask HZ-75T. The dose is in response to the incidence of gamma rays from a large shell source with unit source strength. A simple rule is found to the dose attenuation.

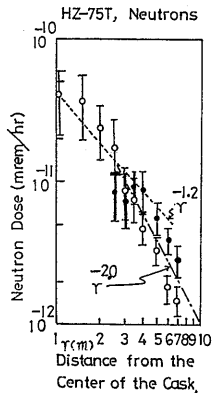


Fig. 19 Attenuation of neutron dose around the cask, HZ-75T, in response to incidence of neutrons from a large shell source with unit source strength. Shape of source spectrum taken into account is that of fission neutrons. A simple rule is found to the dose attenuation.

る。Fig. 19 は、HZ-75T からの中性子の半径方向線量率分布を、核分裂中性子型エネルギースペクトルを考慮した全エネルギーに対して示したものである。この場合、線源は単位強度を持つものとしている。

これらの図では、モンテカルロ計算で得られた線量率分布を中心軸からの距離 r の二つの関数で近似している。

一方の関数は $r^{-1.2}$ であり、他方の関数は $r^{-2.0}$ である。最初の関数形は、容器 HZ-75T の高さ、外側表面に対する直径と同一の高さ、直径をもつ円柱の表面に一樣に単色かつ等方的な表面線源が存在する場合につき、観測点における放射線束を数値積分から求め、径方向分布に関して導かれた。関数形 $r^{-2.0}$ は、容器が点状等方放射線源とみなせる程度の、充分遠方における線量率の径方向分布である。

両関数を近似的に、 $r=2.5\text{ m}$ で接続させて、全体としての径方向分布を近似する事が考えられる。Fig. 19 で示すとおり、この近似的分布はモンテカルロ法による計算結果を可成り良く説明できる。モンテカルロ計算の結果との比較においては、容器の遮蔽性能特性関数を用いて容器表面の線量率を求め、この値を近似関数による分布の容器表面上の値とした。

Fig. 19 の中性子線量率分布は核分裂中性子のエネルギースペクトルをもつ中性子源に対するものであるが、単色な各エネルギー群についての比較をガンマ線について、Fig. 18 に示したある。モンテカルロ計算の値との比較から、容器表面付近で $r^{-1.2}$ の分布は、エネルギーに依存しない事がうかがわれる。

HZ-75T の表面は中心軸から、約 1 m 離れた位置にある。したがってこれらの図から、半径方向放射線量率の減衰率は、中性子、ガンマ線の区別なく、また、線源エネルギーに関係なく、容器表面から 1.5 m の範囲で $r^{-1.2}$ に比例すると考えられ、Fig. 19 からは、1.5 m 以遠で $r^{-2.0}$ に比例すると考えられる。

容器の高さ、線源領域の長さほどの容器でも大差ないので、以後、この近似を各容器にも適用することとする。

5.3 実験値の解析

5.3.1 中性子の解析

輸送容器の構造データは正確に知る事が出来るが使用済核燃料の線源条件は可成り複雑であり、従来、線源データが明確に与えられた状態の遮蔽実験は行なわれていなかった。

最近、電力中央研究所で行なわれた、中性子に関す

る容器周辺線量率分布の測定⁴⁾では、 ^{252}Cf 線源が予定された形状に配列されており、いわば、素性のわかった線源に対して実験が行なわれている。この点で質の良い測定データが得られていると考えられる。

式 (5), (8), (10) 並びに Table 5 を用いて、電中研 50 トン容器外側表面における中性子、二次ガンマ線々量率を計算し、実験値を比較した。この場合、電中研 50 トン容器の内筒部は水が満たされているため、計算では、水円柱からの中性子及びガンマ線の反射流応答関数を求め、式 (10) で用いることとした。

Fig. 20 a に容器内側表面に入射する J_+^0 及び J_+^1 を示してある。 J_+^0 には ^{252}Cf からの自発分裂中性子のエネルギースペクトルが考慮してある。図中には比較のため、 ^{252}Cf からの自発分裂中性子のエネルギー分布も示してあり、水による中性子減速効果が J_+^0 に大きく寄与している事がわかる。更に (8') 式の J_+^1 は反射中性子の相互作用の結果、一層スペクトルの軟化が進む事もわかる。

Fig. 20 b には、反射中性子の相互作用が無い場合と有る場合のそれぞれにつき、容器外側表面の中性子線量率 D_0^0 , D_0^1 並びに二次ガンマ線の線量率 D_0^2 ,

D_0^3 がそのエネルギー分布と共に示してある。 D_0^0 , D_0^1 はそれぞれ 9.213 及び 10.01 (mrem/hr) であり、 D_0^2 , D_0^3 はそれぞれ 4.212 及び 5.650 (mrem/hr) である。反射中性子の相互作用が線量率のエネルギー分布へ及ぼす影響は 2 MeV 以上のエネルギー領域では、ほとんど認められないのに対し、低エネルギー領域では 4 倍程度にも値を大きくする。

線量率のエネルギー依存性は 10 keV 程度に極小値を持ち、それ以下のエネルギーでは減速中性子の蓄積の効果が利き、再び極大値を持つ。前記の如く、反射中性子流の相互作用の効果は、低エネルギー領域で顕著となるが、線量率の値自身は既に小さくなっているため、線量率の絶対値に対する反射中性子流の効果は、100 keV から 2 MeV 程度までの範囲で顕著な寄与を与える事となる。

電中研の 50 トン容器を対象とした実験では、Fig. 21 の矢印で囲まれた線分の範囲内に線源管を移動させて線量率分布を測定している⁴⁾。 $z=225$ cm の位置で容器表面から 15 cm 離れた点に置かれた測定器で、各位置に管が置かれた場合につき測定した中性子カウントレイトを、誤差 10% を含む下記関係

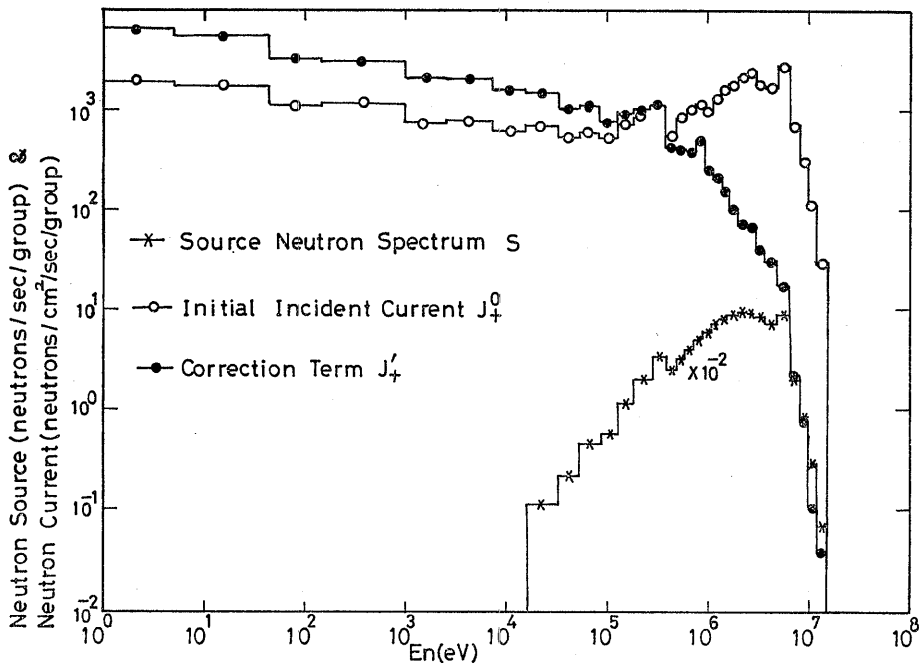


Fig. 20 a Energy dependence of neutron source S and neutron currents J_+^0 and J_+^1 . Summation of source over energy groups is normalized to unity.

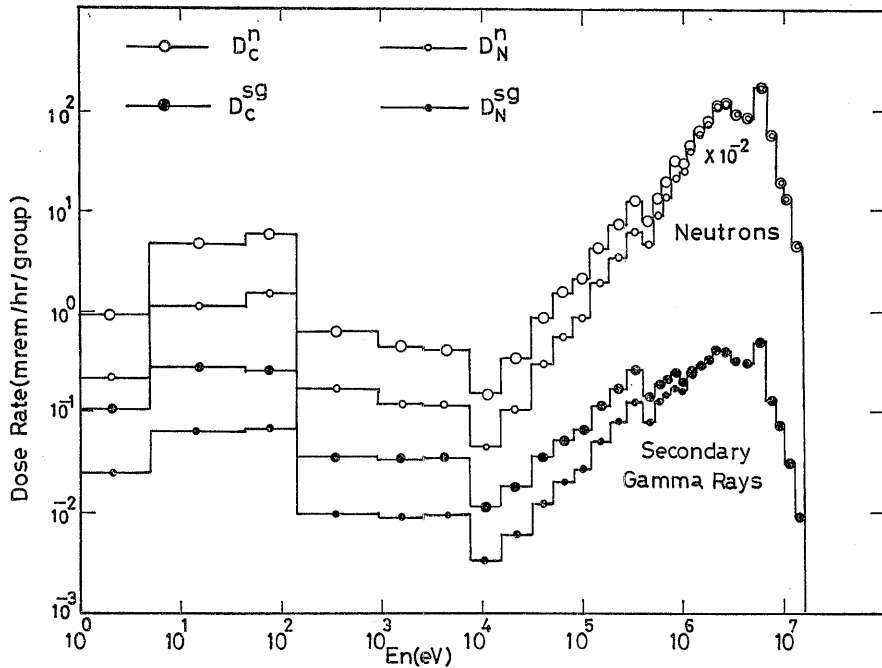


Fig. 20 b Influence of the Coupling effect on energy dependence of neutron and gamma-ray dose rate. Summations of D_C^n , D_N^n , D_C^{sg} and D_N^{sg} over energy groups are 9.213, 10.01, 4.212 and 5.65 in mrem/hr, respectively.

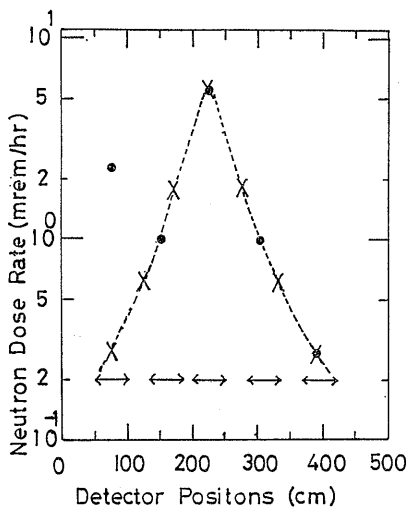


Fig. 21 Procedure in the data processing for the measured dose obtained at CRIEPI.

$$1 \text{ mrem/hr} = 3.3 \text{ counts/sec}$$

で線量率に換算した結果が、Fig. 21 に黒丸として表わしてある。 $z=75 \text{ cm}$ に対応した線量率は、直立さ

せた容器の下に存在するコンクリートから反射した散乱線の寄与が含まれるために、高い値となっていると考えられる。容器、線源管及び測定点を含む測定体系の対称性から、この値は $z=375 \text{ cm}$ の値と同一であると仮定した。

線源管の位置は Fig. 21 に示す如く不規則であるため、管の位置が接する様にして 50 cm から 400 cm までを一様に移動させた場合の線量率を、測定値の内挿から推算した。Fig. 21 に内挿結果を \times 印で示す。推算値の総和として、線源が 50 cm から 400 cm まで一様に分布した場合の総量率を求めた。結果は Table 6 に示す如く、10.4 mrem/hr である。

ところで、この値は容器表面から 15 cm 離れた測定点に於ける値であり、この点が表面に近づけば、更に大きな値となるはずである。

Table 6 中の管の位置が第 4 番目の場合、測定線量率は 5.5 mrem/hr である。管の位置をこの状態に保ったまま測定点を容器表面に垂直に近づけた場合は 7 mrem/hr であると考えられる⁴⁾。この値は、値 5.5 よりも約 27% 大きな値である。

他の管の位置の場合も、表面に近づけた場合の線量

Table 6 Interpolated Neutron Dose Rates

Cage Position	Center of Cage (cm)	Dose Rate (mrem/hr)
1	75	0.3
2	125	0.65
3	175	1.5
4	225	5.5
5	275	1.5
6	325	0.65
7	375	0.3
Summation		10.4

率は、この比の値を保ったまま増大すると仮定すれば、10.4 mrem/hr の値に対応して、13.2 mrem/hr が容器表面上の線量率の推定値となる。

Table 6 の線量率の値に於て、第 4 番目の位置に対する値には 3% 程度の誤差が、第 3 番目と第 5 番目の籠位置に対する値には、内挿線の描き方に伴ない、20% 程度の誤差が見込まれる。

実験的に求めた値 13.2 mrem/hr には、したがって、総合的に約 20% 程度の誤差が見込まれる。一方、 J_p 並びに諸特性関数の値には、空間メッシュ幅の切り方に伴ない、最大 2% 程度の誤差が見込まれる。したがって、容器表面の線量率には、蓄積誤差として、約 10% 程度の誤差が見込まれる。

20% の誤差を持つ実験的中性子線量率 13.2 mrem/hr と 10% の誤差を持つ、計算による中性子線量率 10.0 mrem/hr とは、誤差を考慮しても、両者の一致が可成り良いと結論づけられる。

5.3.2 ガンマ線の解析

使用済核燃料を収納した湿式容器 HZ-75T を 2 個と NH-25 を 1 個積載した専用運搬船日の浦丸内でガンマ線々量率分布の測定が行なわれ、その詳細なデータが得られている⁵⁾。

この測定線量率分布を解析する際 Table 2 を適用した。Table 7 は内筒部に収納した線源データを示す。一次ガンマ線の場合、内筒部に収納された物質が可成り密度が高く、容器壁と内筒部物質との間のガンマ線のやりとりが継続しないものと考え、(8) 式の第二項は無視した。線源強度は ORIGEN コード⁶⁾を用いて算出した[†]。

[†] 全線源強度は 1.5×10^{17} gamma rays/sec とした。

Table 7 Material and Source Conditions of Spent Fuels in the HZ-75T Casks

Reactor Type	BWR
Initial Enrichment	2.5 w/o
Cooling Time	296 Days
Fuel Burn-up	19.700 (in average)
Fuel Assemblies	17

船内ガンマ線々量率分布解析の際は、HZ-75T の長軸の中央点を通る平面内で分布を考える事とし、モンテカルロ法から得られた、線量率の半径方向依存性の知識を用いる事とした。

Fig. 22 に計算で得た船内ガンマ線々量率分布を測定値と比較して示した。両者は船室内の天井における測定値を除けば、良い一致を示している。天井における値は、容器の他の部分からストリーミングしたガンマ線の影響と考えられる。この効果の評価は、本報のらち外であり、別の機会にゆずる。

6. 考 察

6.1 各種容器の遮蔽性能の総合的考察

特性関数のうちで反射流特性関数は容器内側表面附近の物質層の構造、材質に依存するのに対し、遮蔽特性関数には壁全体にわたった物質層の構造、材質の詳細な情報が反映している。以下では、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線の遮蔽性能特性を総合し、各種容器の相互比較をすることとする。

各種容器には、使用済核燃料の装荷量、装荷方式につき自由度がある為、今回の相互比較がそのまま一意的に各種容器の放射線安全性に対する優劣を示すものでは無い事を断わっておく。しかしながら、この比較は、容器内側表面に、或る共通の線源強度をもつ面線源を付着させた場合の外側表面線量率につき比較する事となるため、各容器壁の遮蔽効率に対し相対的な高低を示唆する事となる。したがって、この比較結果が新たな容器設計の際に参考となれば幸いである。

HZ-75T の壁は、一次ガンマ線、中性子に対して、したがって二次ガンマ線に対しても、まんべんなく良い遮蔽設計となっている。これは、壁内に鉛層と共に厚さ 20 cm の水層が存在する事による。

HZ-75T と対称的な壁が EXCELLOX-3 にみられる。水層を薄く幾層も含んでいるが、水層のままとった厚さが小さく、壁としては鉛体系に近い為、中性子

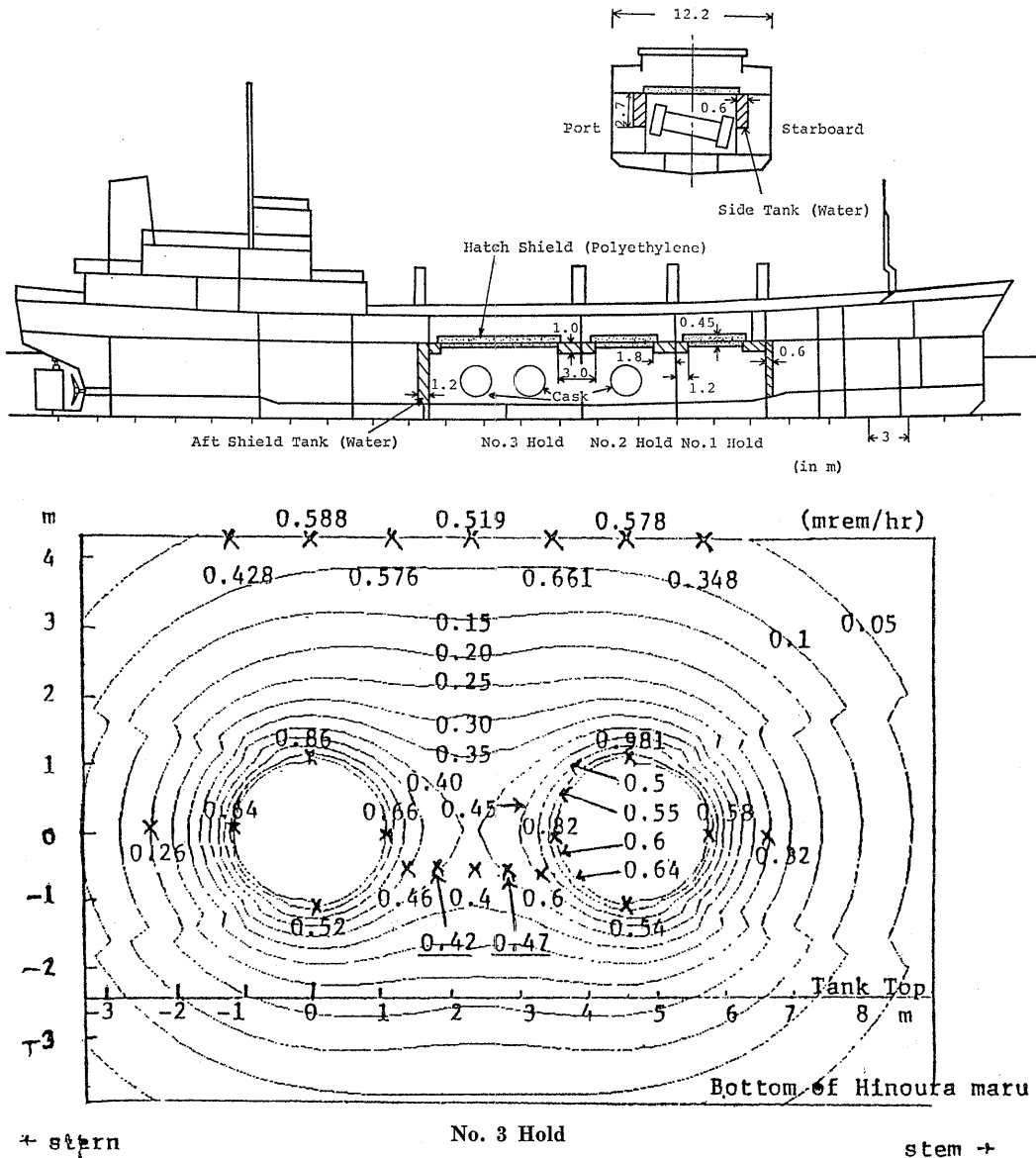


Fig. 22 Comparison between measurement and calculation of gamma-ray dose distribution around HZ-75T casks loaded in the ship HINOGRAMARU. The large dose values detected along the ceiling are caused by gamma-ray streamings occurred at positions not included in the vertical plane on which present dose map is drawn. (The streaming effect is out of the scope of the present study.)

遮蔽が他の容器に比較して弱い一方で、一次ガンマ線は良く遮蔽されている。

TN-12A の壁は厚い鉄層とレジン層から成る単純な構造であるが、中性子は可成り良く遮蔽されている。一方、一次ガンマ線の遮蔽は、高いガンマ線エネルギー

領域でやや甘くなっている。もし、数 cm 程度の鉛層が含まれていれば、一次遮蔽も改善されたであろうと考えられる。

電中研の 50 トン容器の壁は、鉄、鉛層体系の外側にレジン層を付着させた構造となっているが、レジン

層が存在するため、EXCELLOX-3 でみられた、中性子遮蔽の甘さは回避されている。容器外側表面に存在するレジン層が中性子遮蔽の重要な役目を果たしている一方、レジン成分である水素による熱中性子捕獲に伴って生ずる二次ガンマ線を遮蔽する物質層が存在しない為、二次ガンマ線の遮蔽は、やや甘くなっている。

容器表面にレジン層が存在する TN-12A の壁に対しても、二次ガンマ線遮蔽に関しては、電中研 50 トン容器の場合と同様の事が言える。

6.2 線量率の容器外減衰

使用済核燃料輸送容器の高さ、直径は、すべての種類について、大略、同様な値となっている。したがって、どの容器に於ても容器外側表面の中央部では、容器表面から 1.5m 程度までの線量率分布が $r^{-1.2}$ に比例し、それ以遠では $r^{-2.0}$ に比例すると近似しても差しつかえないといえる。

この近似関数による径方向分布の記述は単色放射線の線束の真空中における径方向分布から導かれたものであり、観測点が空気中に存在するため放射線のエネルギー減少が無視出来るが故に、単色放射線から導かれた関数形がそのままのエネルギー群にも適用できたと考えられる。

7. 結論及び結語

本研究の結果として以下の結論を得た。

(1) 中性子、ガンマ線に対する「輸送容器遮蔽性能」の概念を導入すれば、使用済核燃料を新たに装荷する際の容器周辺線量率分布が、精度良く、比較的簡便に予測できる。

(2) 各種容器の遮蔽性能は、容器の透過線々量率、及び反射線流に対する応答関数で表せる。これらの量はそれぞれ、入射エネルギー群に関する列ベクトル、入、反射エネルギー群に関する行列で表現される。この表現では、使用済核燃料からの中性子、一次ガンマ線及び二次ガンマ線は、ある仮想放射線の部分成分となるため、計算上、同時、対等な取扱いができ、便利である。

(3) 新たに装荷する核燃料の線源データ、並びに内筒部の反射線流データが与えられれば、容器外側表面の線量率を求める遮蔽計算は、上記応答関数を用い、簡単な代数計算に置き換えられる。

(4) 中性子では、容器壁と内筒部との間の相互作用

の効果が無視し得ない。ガンマ線では、この効果は無視し得る。

(5) 輸送容器中央部の径方向では線量率の容器外における分布は近似的に、容器表面から 1.5m までの間で、 $r^{-1.2}$ に、また、1.5m 以遠では、 r^{-2} に比例している。

(6) 線量率の容器外減衰に対する上記近似的関数形は、中性子、ガンマ線共に共通である。

(7) 上記 (2) から (6) までの結論から、装荷燃料の線源データ、内筒部材質データをもとに、容器輸送指数の予測及び、容器周辺線量率分布までの一貫した計算が可能となった。

現用の各種容器に対して容器遮蔽性能の数値データが得られ、またその利用法も具体的に示すことが出来た。今後、使用済核燃料の輸送計画立案において、これらのデータ並びに計算法が大いに活用される事が望まれる。また、本報に示したデータ並びに手法が、今後の輸送容器設計において、参考として利用されれば幸いである。

参考文献

- 1) Yamakoshi, H., et al.: "A Handy Calculation Method of Transport Index and Radiation Spectrum Outside of Cask", Proc. 6th Int. Sym. PATRAM '80, 1, 501 (1980)
- 2) Engle, W. W. Jr.: "A Users Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport", K 1693, Union Carbide Corporation, Nuclear Division (1967)
- 3) Bucholz, J. A.: "SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analysis for Licensing Evaluation, SCALE System Criticality Safety Analysis Modules CSAS 1 and CSAS 2", NUREG/CR-0200, ORNL/NUREG/CSD-2, Vol. 1, Oak Ridge National Laboratory (1980)
- 4) Ueki, K., Inoue, M., Maki, Y.: "Validity of the Monte Carlo Method for Shielding Analysis of a Spent-Fuel Shipping Cask: Comparison with Experiment", Nucl. Sci. Eng. 84, 271 (1983)
- 5) 山路昭雄, 植木紘太郎: "複数個の輸送容器を積載した使用済核燃料輸送船内の放射線量率分布測定", 船研報告 19 巻, 第 5 号, 309 頁 (昭和 57 年)
- 6) Bell, M. J.: "ORIGEN—The ORNL Isotope Generation and Depletion Code", ORNL-4628, (1973)