

使用済核燃料輸送容器の周辺線量率評価法の研究

山越寿夫

Study on the Evaluation Method of Radiation Dose Rate
Around Spent Fuel Shipping Casks

by

Hisao Yamakoshi

Abstract

Present study aims at deriving a simple calculation method by which one can evaluate radiation dose rate around casks in high accuracy with very short calculation time. The method is based on a concept named Radiation Shielding Characteristics of cask wall. Here, the concept is introduced to replace ordinary radiation shielding calculations, which requires a large calculation time and a large core memory of large computers, by a matrix calculation. For the purpose of verifying the accuracy and reliability of the new method, the method is applied to analysis of measured dose rate distributions around actual casks. Results of analysis revealed that the newly proposed method is excellent in predicting radiation dose rate distributions around casks in high accuracy with short calculation time.

The proposed method takes the place of both extreme evaluation methods ordinarily adopted; one is very simple but rough method based on experiences: the other is very fine method based on lengthy radiation shielding calculation codes. The achievement of short calculation time and high accuracy in the proposed method is attained by deviding the whole procedure of ordinary fine radiation shielding calculation into two steps; one is calculation of radiation dose rate on the cask surface by using matrix expression of the characteristic functions: the other is calculation of dose rate distributions by using simple analytical expression of dose rate distributions around casks. Owing to simpleness in calculation procedure of each step, one can easily

evaluate dose rate distribution around casks, once source conditions for spent fuels are given. Result of the evaluation is expected to be highly reliable.

As an application of the proposed method, a new method is derived for evaluating influence of heterogeneous array effect of spent fuels in different burnup states upon dose rate distribution around casks. This method is shown to be effective for determination of fuel positions as a function of fuel burnup state, if one plans shipping of spent fuels in different burnup states at one time by a cask.

目次

第一章 序論	6
1.1 本研究の意義と目的	6
1.2 本研究の概要	7
文 献	14
第二章 遮蔽物質の核定数	16
2.1 はしがき	16
2.2 24 keV 付近の鉄の全反応断面積	22
2.3 鉄の弾性散乱の角度分布	25
2.4 光学模型ポテンシャルの妥当性の証拠	25
2.4.1 高エネルギー 中性子の全反応断面積	25
2.4.2 散乱半径、中性子強度関数	28
2.4.3 (n, p), (n, 2n) 反応の断面積	29
2.4.4 中性子放出反応の二重微分断面積	29
2.5 二次ガンマ線生成断面積の解析	33
2.6 結 論	33
文 献	35
第三章 輸送容器表面線量率の計算法	35
3.1 はしがき	38

3.2	多重層遮蔽体応答関数と遮蔽計算法	40
3.3	遮蔽性能特性、反射線流特性の概念と表現法	43
3.3.1	概 念	43
3.3.2	数学的表現法	44
3.3.2.1	容器壁遮蔽性能特性関数	44
3.3.2.2	容器壁反射線流特性関数	47
3.3.2.3	内筒部反射線流特性関数	48
3.4	容器表面線量率の計算式	49
3.5	容器壁部に関する特性関数の値の決定法	49
3.5.1	決定法の基本方針	49
3.5.2	体系のモデル化と仮定	50
3.5.3	計算コードと計算手順	53
3.5.4	結果の整合性	53
3.6	内筒部に関する特性関数の値の決定法	54
3.6.1	決定法の基本方針	54
3.6.2	体系のモデル化と仮定	55
3.6.2.1	湿式容器の場合	55
3.6.2.2	乾式容器の場合	55
3.7	実効入射線流 \vec{J}^+ の値の決定法	55
3.7.1	\vec{J}_0^+ の計算手順	56
3.7.2	R COUPLE の計算手順	56
3.8	結 論	56
	文 献	57
第四章	表面線量率実測に基づく計算法妥当性の評価	59
4.1	はしがき	59
4.2	特性関数の性質	59
4.2.1	特性関数の表	59
4.2.2	容器壁遮蔽性能特性関数	89
4.2.3	容器壁反射線流特性関数	89
4.2.4	内筒部反射線流特性関数	92
4.3	計算値と実測値との比較	95

4.3.1	実測体系と測定法	95
4.3.1.1	電力中研50トン容器による中性子測定	96
4.3.1.2	TN-12A型容器による中性子、ガンマ線測定	96
4.3.2	測定体系のモデル化	100
4.3.2.1	50トン容器の体系	100
4.3.2.2	TN-12型容器の体系	100
4.3.3	計算結果および測定値との比較	103
4.3.3.1	50トン容器の場合	103
4.3.3.2	TN-12型容器の場合	106
4.4	考 察	112
4.5	結 論	119
	文 献	121
第五章 容器外部線量率の解析関数による表現		123
5.1	はしがき	123
5.2	線量率分布の解析的表現	123
5.2.1	基準平面上の解析的表現	124
5.2.1.1	解析的表現の導出	124
5.2.1.2	解析的表現の漸近的性質	128
5.2.2	解析的表現の一般化	134
5.2.2.1	$d < H$ の場合	135
5.2.2.2	$d > H$ の場合	136
5.2.2.3	$d = H$ の場合	138
5.3	理論値と測定値との比較	138
5.3.1	基準平面上の式の場合	138
5.3.1.1	線量率測定法	141
5.3.1.2	Monte Carlo 計算法と解析的手法との比較	141
5.3.1.3	相互比較	143
5.3.2	一般位置に対する式の場合	146
5.3.2.1	線量率分布計算法	148
5.3.2.2	相互比較	148
5.4	考 察	148

5.5	結 論	150
	文 献	152
第六章	燃料配置法への応用	154
6.1	はしがき	154
6.2	線量率の感度係数	154
6.3	計算値と実測値との比較	158
6.3.1	対象とする体系の概略	158
6.3.2	感度係数と感度解析	159
6.3.3	線量率分布の計算値と測定値との比較	162
6.4	考 察	162
6.5	結 論	164
	文 献	164
第七章	結 論	165
	謝 辞	169

的処理がおこなわれている。

これらの経験的方法に頼る根本的原因は、定量的方法としての従来の精密な遮蔽計算コードの適用はあまりにも多大な計算時間がかかりすぎることにある。

以上の背景のもとに本研究では、従来の精密な遮蔽計算コードによる計算結果と精度の点で遜色がなく、かつ、計算時間を大幅に短縮した、容器周辺線量率評価計算法を開発することを第一の目的とし、さらに、従来の遮蔽計算コードを用いては多大な計算時間が避けがたいため重要な事柄ではありながら開発が阻まれ未着手のままとされてきた、燃料配置が容器周辺線量率へ及ぼす効果を定量的、かつ、見通しよく簡便に評価する方法を開発することを第二の目的としている。

1.2. 本研究の概要

第一の研究目的の立場から精密遮蔽計算コードによる容器周辺線量率の計算法を検討すると、内筒部から始まって容器外部の指定位置に至るまでの一貫した放射線透過計算が行なわれることに由来する問題点を抽出することができる。

問題点は要約すると以下の三点に絞られる。

- (1) 収納燃料が決まらなると全体の遮蔽計算が始められない。
- (2) 同一容器にたいしても、収納燃料が与えられるたびごとに、放射線の容器壁透過計算が繰り返される。
- (3) 容器外部の線量率計算は放射線の容器壁透過計算とは独立ではない。

上記の問題点(2)における容器壁透過計算は全体の遮蔽計算のうちで最も多くの計算時間のかかる部分である。その主な理由は、この計算では多重層遮蔽体構造をした壁部を透過する中

注) 中性子とガンマ線が共存する状態の容器壁多重層遮蔽体構造に対し、中性子、ガンマ線の透過計算を Discrete Ordinates Sn法で行なうと、中性子のみあるいはガンマ線のみが存在するばあいよりも多くの空間メッシュ数が必要となる。多重層中の重い物質層ではガンマ線の平均自由行程が中性子のものよりも小さく、したがってガンマ線に対するメッシュ幅が中性子透過計算に用いられる。軽い物質層では逆に、中性子の平均自由行程の方がガンマ線のものよりも小さく、したがって中性子に対するメッシュ幅がガンマ線透過計算に適用される。

計算結果に含まれる誤差のうちで空間メッシュの選び方に起因する誤差をできるだけ小さくするために、物質層の境界付近ではメッシュ幅を特に小さくすることも、多重層構造をもつ壁部の空間メッシュ数を大きくする一因である。

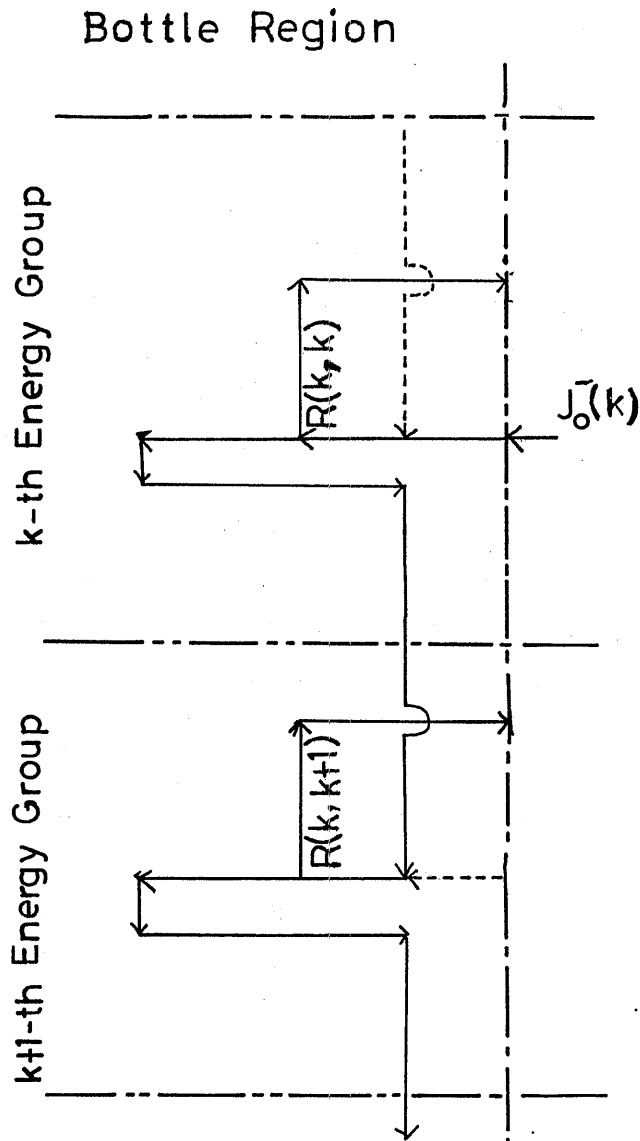


Fig.1-2 Schematic Illustration of Matrix Elements of Characteristic Function for the Bottle Region.

応答関数から合成する方法を研究したものと(11) ARONSON⁽¹¹⁾の研究⁽¹²⁾と片岡の研究⁽¹³⁾が挙げられる。

ARONSON の場合は、各層の H 行列とよばれる、一種の透過行列を物質の核特性のみに依存する、より基本的な量を用いて、厚さに関する微分方程式の解として決定する方法を研究したものである。

片岡の場合は H 行列を構成する透過行列 T と反射行列 R を Monte Carlo 法で幾つかの層構成要素に対して求めておき、層全体としての H 行列を合成する方法を研究したものである。

片岡の⁽¹³⁾T 行列は入射角、透過線の放射角、入射線エネルギー、透過線エネルギーの4個のパラメタに関する4階の行列であり、R 行列は入射角、反射角、入射線エネルギー、反射線エネルギーに関する4階の行列である。したがって合成計算に多くの計算機記憶容量と計算時間がかかることと、層間の反射および透過の取り扱いが複雑となる難点がある。これらの難点为了避免するために、ガンマ線の3回以上の層間反射を無視する近似が採られている。

本研究では応答行列法を円柱体系に拡張し、かつ、中性子とガンマ線とを、二次ガンマ線も含めて、同時に扱う方法を示している。したがって、層間の反射線相互作用は3回にとどまらず、無限回反射に対する表示式をえている。

ただ本研究では、容器壁に対する透過行列 T および反射行列 R は、その容器の壁部に対する放射線遮蔽性能特性と反射線流特性をそれぞれ意味しているとの立場から全体系は容器壁部と内筒部の二重層体系としており、さらに容器表面のスカラー量である線量率を求めることに主眼があるので、行列 T と R の階数を片岡の場合よりも下げて、行列 T については入射線エネルギー群に関する1階のベクトル量とし、行列 R については入射線エネルギーと反射線エネルギーとに関する2階の行列量としている。この結果として、対象とする体系全体に対する合成計算法自身が簡潔となっている点と計算時間が短い点とで実用性が高くなっている。

本研究で導いた容器周辺線量率評価計算法は大型電子計算機によらずミニチュアコンピュータを用いて計算できることと計算時間が極めて短く短縮されていること、および計算結果の精度も従来の精密遮蔽計算コードを用いた結果と遜色がないことから、従来の経験的な容器周辺線量率評価計算法の代わりに用いられるほか、容器壁の最適遮蔽構造設計に対する定量的評価法への応用や、複数個の輸送容器を積載した船内および容器間の線量率空間分布への応用において、手法の特徴が十分に発揮されると期待される。

第2目的の研究の方針として、燃料配置が容器表面線量率に及ぼす効果を感度係数の概念⁽¹⁰⁾を用いて数学的に表現することとし、感度係数の算出法として第1目的の研究から得た容器表面線量率の計算手法を応用することとした。

平均燃焼度の仮定に基づく容器周辺線量率と感度係数を用い燃料配置効果を考慮した容器周辺

線量率とをそれぞれ、乾式容器の場合につき計算し実験値と比較した。その結果、燃料配置効果を考慮した計算は、平均燃焼度の仮定に基づく計算よりも、より一層良く実験値を説明できる結果を与えることが明らかとなった。第1目的、第2目的の研究成果はそれぞれがあいまって、燃料最適配置法の定量的評価が期待される。

以下、各章の構成と概要につき説明しておく。

第二章では容器遮蔽計算に用いられる中性子、ガンマ線の核データにつき、精度の現状と注意すべき事項を述べる。特に容器壁中での二次ガンマ線の生成は、使用済核燃料の燃焼が増すと中性子線源強度も増大することにより、盛んとなり、中性子と同程度の寄与を容器周辺線量率にもたらすこととなる。この理由から、二次ガンマ線生成データについても述べることとする。

第三章では容器表面線量率の計算法の理論的な面を詳述しまた、容器壁遮蔽性能特性関数、容器壁反射線流特性関数、内筒部反射線流特性関数の求め方についても詳細な注意を述べることとする。

第四章では応用上の狙いもこめて、種々の主要な輸送容器に対して特性関数の具体的な値を示すとともに、湿式容器、乾式容器の代表例につき、容器表面線量率の理論値と実験値との比較検討を行なう。この検討結果を踏まえて、本研究で得た輸送容器表面線量率の計算法の信頼性の高いことと実用性の高いことを明らかにする。

第五章では容器外部の放射線線量率に対する解析関数を用いた表現を導き、この表現の妥当性を理論的に示すとともに、実験値と理論値との比較検討から、この解析関数を用いた表現が信頼性の高い計算結果を与えることを明らかにする。

第六章では燃料配置が容器周辺線量率へ及ぼす効果の評価法を感度係数の概念を導入して詳述するが、この評価法を用いた応用例として乾式容器周辺線量率の理論値と実験値との比較検討を行ない、この評価法が燃料最適配置の定量的検討を行なう際において有効な手段となることを示す。

文 献

- (1) D. K. Trubey and B. F. Maskewitz, "A Review of the Discrete Ordinates Sn Method for Radiation Transport Calculations" ORNL/RSIC/19 (1968)
- (2) W. W. Engle, Jr., "A User's Manual for ANISN, A One Dimensional Discret

Ordinates Transport Code”, K-1693, Union Carbide Corporation, Nuclear Division (1967)

- (3) F. R. Mynatt, "A User's Manual for DOT- A Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", K-1694 (1968)
- (4) J. M. Hammersley and D. C. Handscomb, Monte Carlo Methods, Wiley, New York (1964)
- (5) G. G. Biro, "Application of the Monte Carlo Method to Shielding", Engineering Compendium of Radiation Shielding, Engineering Compendium of Radiation Shielding, Vol.-1, P. 101, Springer-Verlag, New York (1968)
- (6) M. B. Emmett, ORNL-4972 (1975)
- (7) H. Yamakoshi, Nucl. Sci. Eng., 87, 152 (1984)
- (8) H. Yamakoshi, Nucl. Sci. Eng., 88, 110 (1984)
- (9) H. Yamakoshi, J. Nucl. Sci. Tech., 22, 697 (1985)
- (10) 山越寿夫、日本造船研究協会 RR-28 基準部会 研究資料 No.148R、192 頁 (1985)
- (11) R. Aronson and D. L. Yarmush, J. Math. Phys., 7, 221 (1966)
- (12) R. Aronson and D. L. Yarmush, "Matrix Method", Engineering Compendium of Radiation Shielding, Vol-1, P. 152, Springer-Verlag, New York、(1968)
- (13) 片岡巖、船舶技術研究所報告 第3巻第4号 161 頁 (1966)

おうむね固まってきている。他方、中性子の核反応断面積等、群定数作成に必要な核データの評価精度が改善されてきたのは 1970 年代以降であり、測定値の精度改善のほかに、評価法そのものも発展途上にある面がある。

中性子の場合、遮蔽計算において重要な量は、全反応断面積、吸収断面積、弾性散乱および非弾性散乱の断面積、散乱後の中性子のエネルギー分布と角度分布である。

本章では筆者の行った鉄の断面積、二次中性子エネルギー分布、弾性散乱中性子角度分布、二次ガンマ線エネルギー分布等の解析ならびに評価の結果を示すが、その動機、背景を以下に粗く述べる。

我が国においてこんにち遮蔽計算に使用されている評価核データは米国で作成されたデータファイル ENDF/B⁽⁴⁾ に収録されたものが主流を占めている。ENDF/B-IV 中の全反応断面積は評価精度の良いものの代表的な量であり、TABLE 2-1 に示すように、鉄の場合の誤差は、共鳴領域では 5 ないし 10%、14MeV 以上では 1 ないし 5% といわれている。

しかしながら、以上のように比較的評価精度の良い鉄の全反応断面積においても局所エネルギー的に評価精度の思わしくない箇所があり、しかも遮蔽計算上、その箇所が重大な意味をもっている。

Fig.2-1 に ENDF/B-IV に基づく水、鉄、鉛の全反応断面積を巨視断面積のかたちで示したが、鉄の 24keV 付近に認められる断面積の谷が上記の箇所である。この谷の中心および低エネルギー側に於けるその付近の断面積の測定が多くの著者により発表されてきたが、従来から測定値が大きくばらついており、評価のむつかしいエネルギー領域であった。

断面積の谷の部分は中性子透過を扱う遮蔽計算では特に重要である。すなわち、遮蔽体中で減速中の中性子がこの断面積の谷を通して遮蔽体出口に近い法へ一種のストリーミングを起こして到達し、そこで新たな減速中性子源となるため透過線のエネルギースペクトルに多大な影響を及ぼすことになる。⁽⁵⁾

したがって、谷の付近の断面積の評価誤差を明らかにすることは、その評価値の改善に必要なばかりではなく、ENDF/B-IV に基づく遮蔽計算の結果に含まれる計算誤差の見積りにも必要なことである。

山越等は鉄断面積の再評価の一環としてこの谷の付近の断面積の値を計算から求めたが、⁽⁶⁾ 後日、米国及び我が国で行なわれた純度の高い試料による詳細な測定値^{(7),(8)} との良好な一致が確認され、ENDF/B-IV 中のこの断面積に対する評価誤差が決定できた。

中性子遮蔽計算においては断面積のみならず散乱中性子の角度分布およびエネルギー分布も核データとして重要である。

弾性散乱の角度分布は中性子エネルギーにより大きく変化する。この角度分布は普通、散乱

	Cr	Fe	Ni	Cu
σ_{tot}	20% at 0.65 MeV	3% above 400 keV 5~10% in reso. region 1~5% up to 14 MeV	5% at thermal 5~10% to in reso. region 1~5% up to 14 MeV	15% at thermal 5~10% to 3 MeV 3~4% at higher energies
σ_{el}	5~15% below 0.65 MeV	Derived	3% at thermal 16~27% in reso. region, 13~20% from 0.7 to 4 MeV, 8% above 4 MeV	15% at thermal 5~10% to 1 MeV 5~9% at higher energies
σ_{inel}	Discrete levels: 10~20% for better known levels, Higher for others	^{54}Fe , ^{57}Fe , ^{58}Fe : 10% for individual levels	30% for all levels and continuum	total 15~20% Discrete levels: 15~20% Continuum: 20~30%
σ_{capt}	—	10~20% above keV region, 2~5% in resonance region back ground	4% at thermal 20% elsewhere	3% at thermal 10~15% to 3 MeV 20~25% at higher energies
$\sigma_{n,\gamma}$	—	—	15~20% below 1 MeV 10~25% above 1 MeV	10% at thermal 20~40% elsewhere
$\sigma_{n,part}$	(n,2n): 2~5% near threshold (n,3n), (n,n' α), (n,d): 20% (n,n'p): 10~20% (n,p), (n, α): 7~20% (n,d), (n, ^3He): 40%	(n,2n): 10% (n,np), (n,n α), (n,p): 20% (n,d), (n,t), (n, ^3He), (n, α): 40%	(n,2n): 10~20% (n,n'p), (n,n' α): 15% (n,d), (n,2p): 30~35%	(n,2n): 5~10% (n,n' α): 30~40% (n,3n): 25% (n,n'p): 50~200% (n,d): 400% (n, α): 25~40%

	^{209}Bi	Pb	W
σ_{tot}	10~20% below 2.5 keV 5~10% to 0.05 MeV 2~5% to 1.5 MeV 1~2% to 5 MeV 2~5% to 20 MeV	3~5% above 1 keV	5~15%
σ_{el}	5%	3% below 1 keV	10%
σ_{inel}	4 discrete levels up to 5 MeV: 10% Other discrete levels and continuum levels: 10~15%	5~7% below 9 MeV 20~40% above 14 MeV	10%
σ_{capt}	—	—	5%
$\sigma_{n,\gamma}$	—	—	30~50%
$\sigma_{n,part}$	(n,p): 50% (n, α): 50% (n,2n): 15% to 9.5 MeV 8% to 17.5 MeV (n,3n): 30% to 17 MeV 20% to 18.5 MeV	(n,2n): highly uncertain near threshold 10~30% elsewhere	30~50%

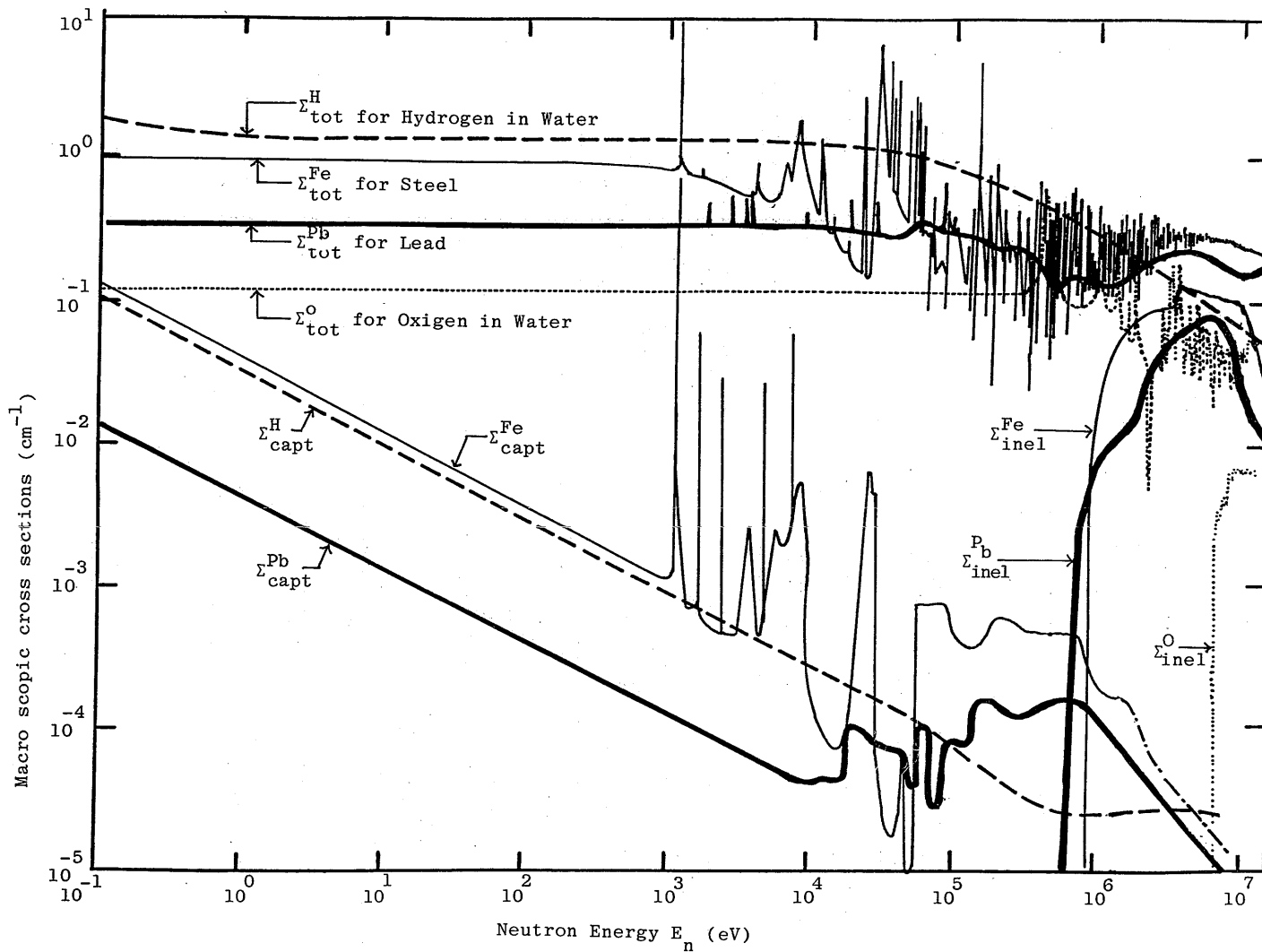


Fig.2-1 Neutron Energy Dependence of Macroscopic Neutron Cross Sections.
(Cross section curves are based on the data in the data library ENDF/B-IV)

角に関する Legendre関数の多項式により近似されるが高エネルギー中性子の場合には角度分布が複雑になり P14近似程度の高次の多項式となる。

ここに、1985年現在において、我が国の遮蔽計算で用いられる角度分布、エネルギー分布に関する群定数は ENDF/B-IV の評価核データに基づいている。

注意すべきことは、実際の遮蔽計算では計算機記憶容量の制約から P5 近似までの比較的低次多項式による角度分布の記述しか行ない得ないことである。したがって与えられた高次多項式近似による角度分布の記述を低次項の展開係数のみを用いて記述する場合は、角度分布が負の値として記述されることもあるのである。

この事態を避けるために角度分布の記述を Legendre関数で近似せず、直接、入射エネルギーと散乱角度との二次元空間内のメッシュ点上に数値として与え、任意の入射エネルギーと散乱角との組に対する記述の値を内挿することが提案されている。⁽⁹⁾

この場合、メッシュ間隔は一定の規則に従った幅となることが望ましく、指定されたメッシュ点上の記述の値を高い信頼性のある計算から与えることが望まれている。

上記の必要性から山越は重要な遮蔽物質である鉄を対象に、光学模型ポテンシャルを決定し、⁽¹⁰⁾

そのポテンシャルが鉄の全反応断面積、中性子の S 波、P 波に対する強度関数、鉄付近の質量の核の散乱半径の実験値を矛盾なく説明できることを確かめ、弾性散乱の角度分布も実験値と計算値とが互いに良く一致することを示した。^{(10), (11)} 本章では、このポテンシャルを用いた弾性散乱角度分布および全反応断面積の計算結果を示し、輸送容器の場合のように 2MeV 程度以下の中性子を対象とする弾性散乱角度分布につき、角度依存性を検討する。

散乱中性子のエネルギー分布については、数 MeV 以上の入射エネルギーに対し確信のもてるデータはあまり発表されてはいなかった。最近に至り我が国の加速器 OKTAVIAN による中性子放出反応の二重微分断面積が測定されるに至り、⁽¹²⁾ ようやく実用的な意味での、放出二次中性子に対するエネルギー分布の測定値が得られるようになった。

上記の鉄に対する光学ポテンシャルを用い、⁽¹³⁾ 多重複合核模型に基づく中性子エネルギー分布を計算すると OKTAVIAN による鉄の実験値が良く説明できる。^{(14), (29)}

本章では、すでに述べた鉄の弾性散乱角度分布の計算のために決定した、光学ポテンシャルの妥当性の証拠として、多種類の核データに対する実験値も矛盾なく計算できることを示すととも⁽¹³⁾に、OKTAVIAN による測定値と計算値との比較も合わせて示すこととする。

輸送容器壁で発生する二次ガンマ線の生成断面積も容器の遮蔽計算群定数として重要なデータである。この群定数として従来は、熱中性子吸収に伴う二次ガンマ線の生成データが用いられてきたが、エネルギー保存則を満たさぬデータが殆どであった。

近年、1970年代後半になってから、非弾性散乱過程に伴う、いわゆる (N, X γ) 反応ガンマ線

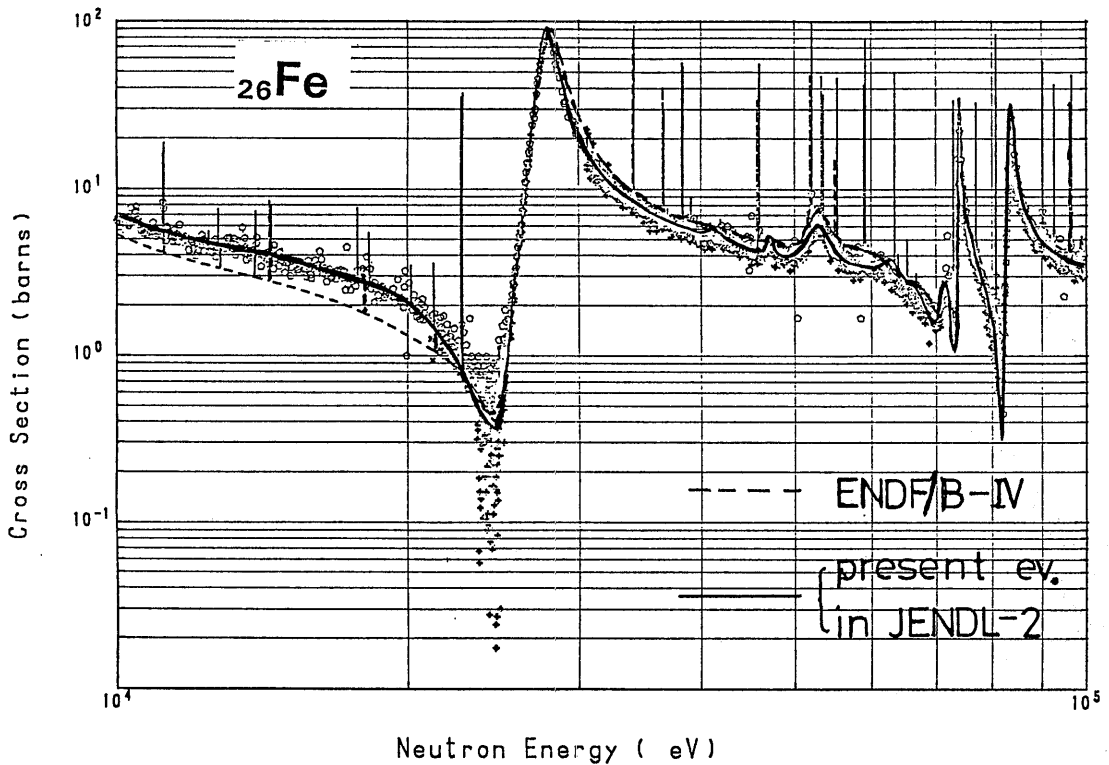


Fig.2-2 Experimental Data, ENDF/B-IV Data and Evaluated Data in the Present Data Evaluation for Iron in the Vicinity of the 24 keV Valley in Total Cross Section. (H. Yamakoshi⁽⁶⁾)

Table 2 - 2 Adopted Resonance Parameter Sets

Isotopes	R' (fm)	Adopted resonance parameter set	Energy range (keV)	Data modification
⁵⁴ Fe	5.6	Pandey <i>et al.</i>	Up to 510.1	None
⁵⁶ Fe	5.4†	Perey <i>et al.</i>	Up to 400	Yes
⁵⁷ Fe	6.5	Allen <i>et al.</i> for <i>s</i> -wave resonances Beer <i>et al.</i> for <i>p</i> -wave and <i>d</i> -wave resonances	Up to 189.5	None

† This value corresponds to allowable lower limit of (6.1±0.7) fm given in *BNL-325*, 3rd edition, Vol. 1, (1973).
(H. Yamakoshi⁽⁶⁾)

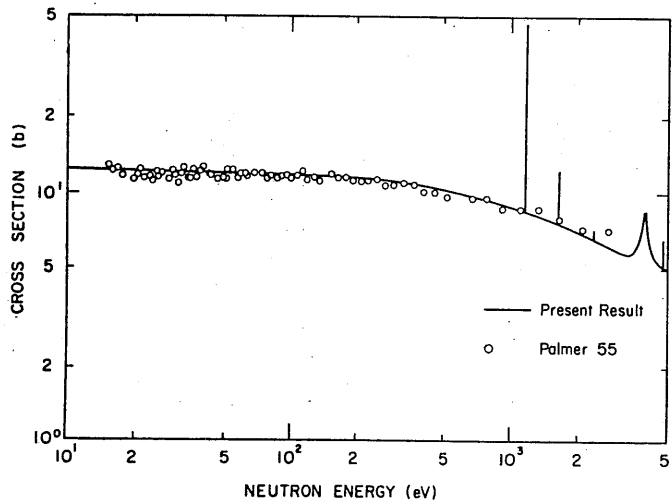
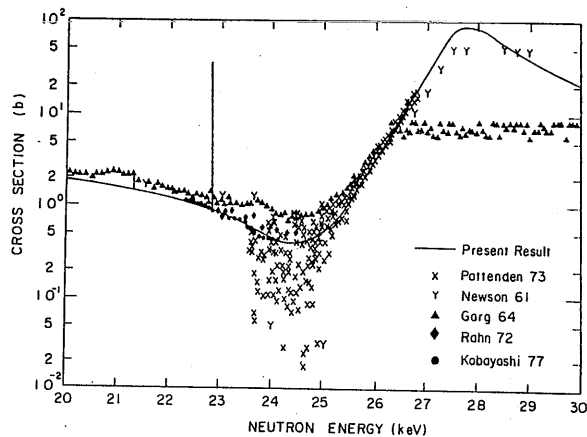


Fig. 2-3a Total Cross Section of Natural Iron in Lower Energy Region. (H. Yamakoshi⁽⁶⁾)



Total cross section for natural iron around resonance valley near 24 keV

(H. Yamakoshi and S. Iijima)¹²

Fig. 2-3b Total Cross Section of Natural Iron around the Resonance Valley near 24 keV. (H. Yamakoshi⁽⁶⁾)

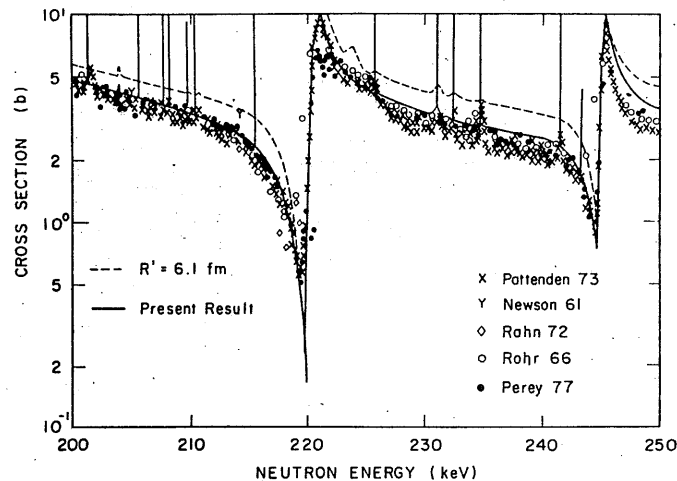
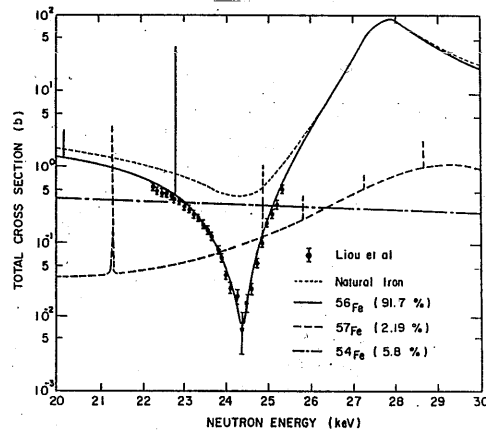


Fig. 2-3c Total Cross Section of Natural Iron in Higher Energy Region. (H. Yamakoshi⁽⁶⁾)



Ingredients of total cross section for natural iron around resonance valley near 24 keV

(H. Yamakoshi and S. Iijima)¹²

Fig. 2-3d Ingredients of Total Cross Section of Natural Iron around the Resonance Valley near 24 keV. (H. Yamakoshi⁽⁶⁾)

実験値と解析値とは良く一致していることから判断して、ENDF/B-IV の鉄にたいする全反応断面積は、24keV 付近の断面積の谷の中心において 15%程度の過大評価となっており、反面、10keV 付近の谷の斜面の値を30%ないし40%も過小評価しているものと結論できよう。

2.3 鉄の弾性散乱の角度分布

光学模型に基づく全反応断面積、弾性散乱角度分布を計算するコード ELIRSE-3 ならびに筆者が決定した光学模型ポテンシャルとを用いて計算した、 ^{56}Fe に対する弾性散乱中性子の角度分布を実験値とともに Fig.2-4 に示した。

光学模型ポテンシャルのパラメタを決定する際は、高エネルギーの入射中性子に対する弾性散乱中性子角度分布の測定値を選び、パラメタの値は χ^2 -fitting 法⁽¹⁸⁾ により測定値に対する再現性を高めるよう、繰り返し計算が行なわれている。

^{56}Fe の場合、 $E_n = 14.5$ MeV の測定値に対する fitting からポテンシャルパラメタの値が求められているが、Fig.2-4 に示すように、計算結果は他のエネルギーに対しても実験値の角度依存性を比較的良好に再現しているものと思われる。

各中性子のエネルギースペクトルは 1 MeV 付近に極大値があるが、Fig.2-4 の 1 MeV の中性子に対する散乱線角度分布はかなり単純な形をしている。この形は Legendre 関数による角度分布の近似において P_5 近似でも十分良好な近似が可能であることを意味している。

したがって、輸送容器の中性子遮蔽計算では、中性子の弾性散乱角度分布を P_5 近似で計算しても差し支えないものと判断する。

2.4 光学模型ポテンシャルの妥当性の証拠⁽¹³⁾

筆者が求めた光学模型ポテンシャルを用いて弾性散乱中性子の角度分布を計算し、その結果から P_5 近似に対する妥当性を前節で考察したが、このポテンシャルの妥当性の証拠の幾つかを以下に例示する。

2.4.1 高エネルギー中性子の全反応断面積

光学模型ポテンシャルのパラメタを決定する際は、14.5 MeV の弾性散乱中性子角度分布の測定値とともに、14.5 MeV, 7.55 MeV, 1.5 MeV と、広いエネルギー範囲における全反応断面積の測定値のエネルギー平均値を採り上げ、パラメタの値を決定した。この結果、Fig.2-5a、2-5b に示すように、広いエネルギー範囲にわたって、鉄の全反応断面積の測定値のエネルギー依存性が良好に再現されている。

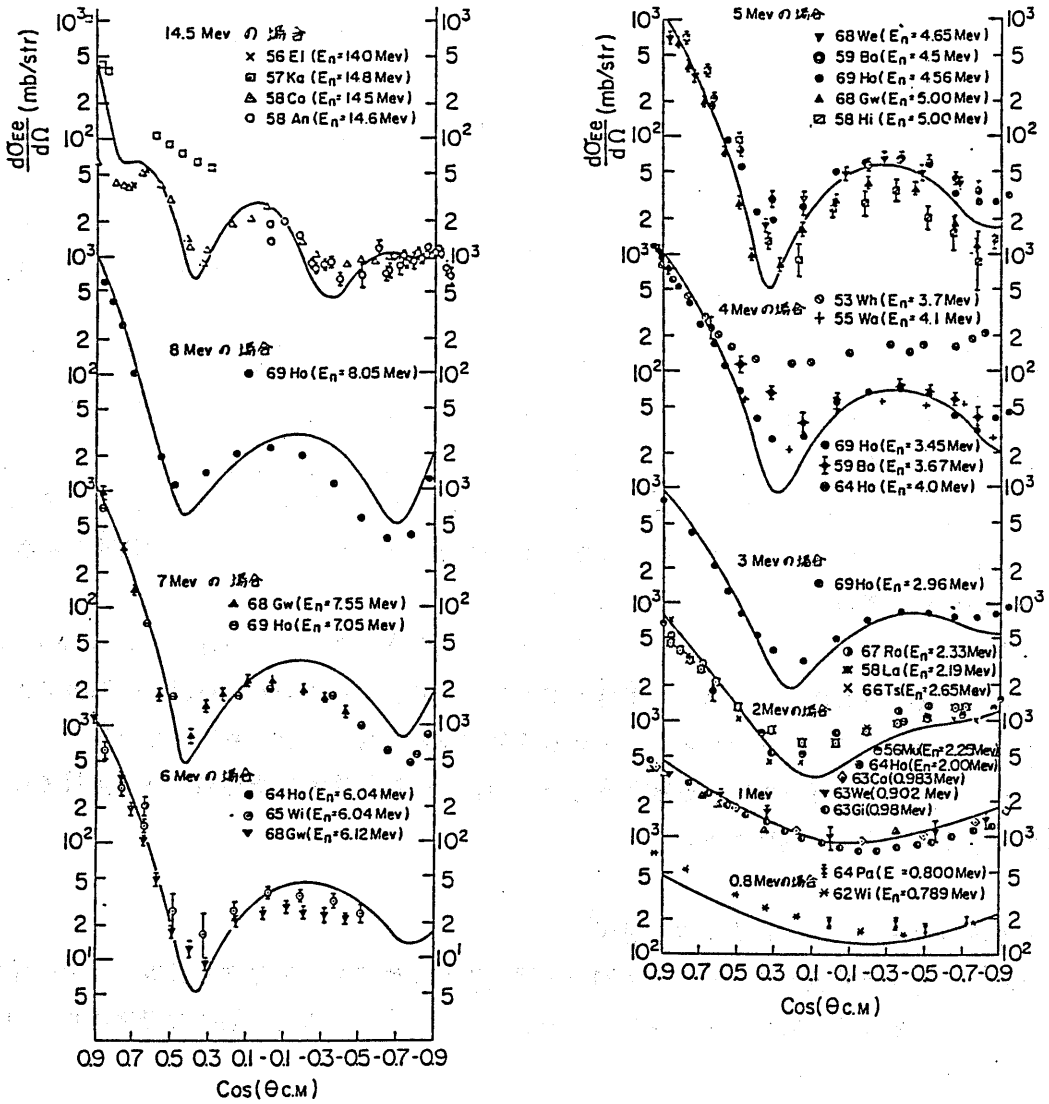


Fig.2-4 Comparison of Angular Distribution of Elastically Scattered Neutrons between Experiment and Calculation. (H. Yamakoshi (10), (11), (13))

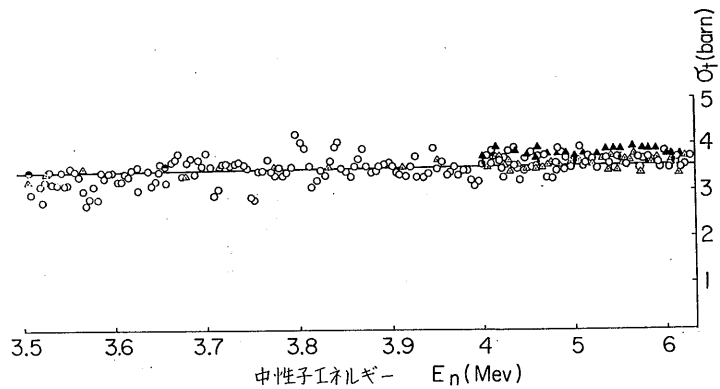


Fig. 2-5a Comparison of Total Cross Section of Iron between Experiment and Calculation above 6 MeV. (H. Yamakoshi (10), (11), (13))

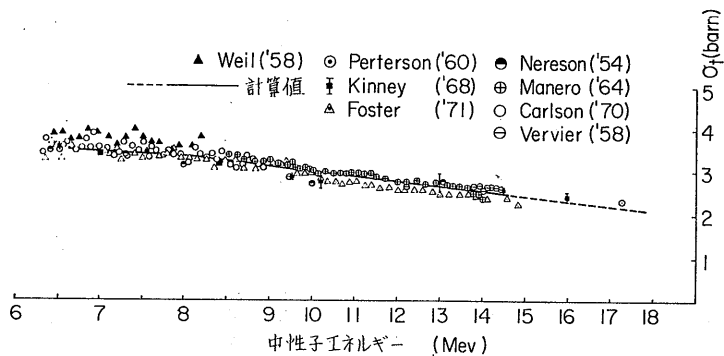


Fig. 2-5b Comparison of Total Cross Section of Iron between Experiment and Calculation in the Energy Range from 3.5 MeV to 6 MeV. (H. Yamakoshi (10), (11), (13))

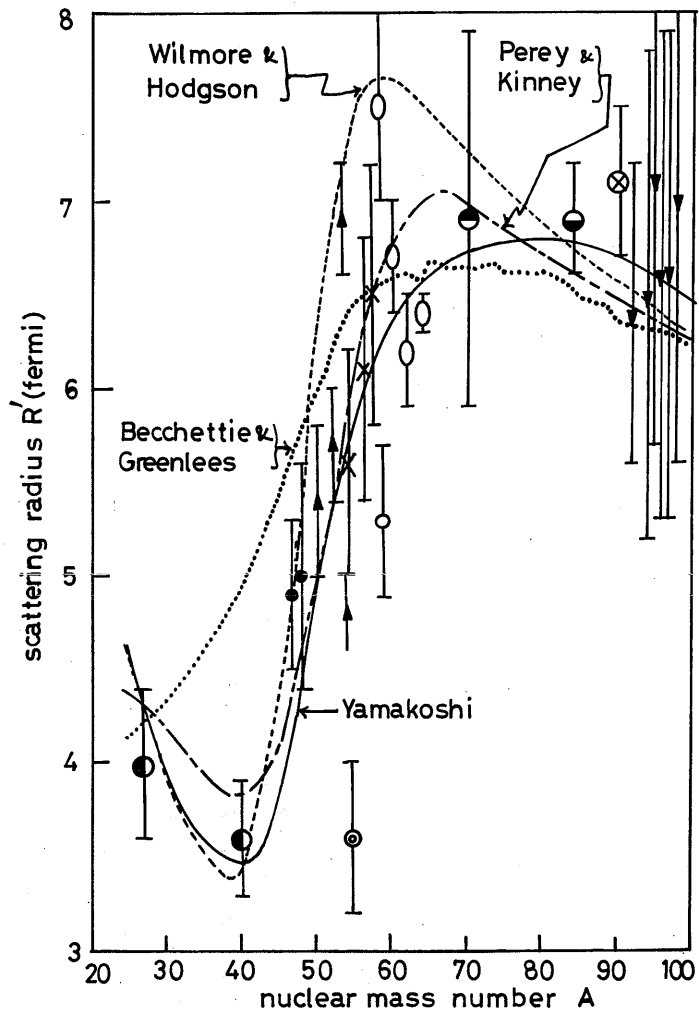


Fig. 2-6a Comparison of Mass Number Dependence of Scattering Radius Predicted from Various Optical Model Potentials with Experimental Results. (H. Yamakoshi (10), (11), (13))

2.4.2 散乱半径、中性子強度関数

10 eV 程度の低エネルギー中性子に対する Shape Elastic Scattering Cross Section σ_{she} を光学模型計算コード ELIESE-3 で計算し、⁽¹⁹⁾ $\sqrt{\sigma_{she}/2\pi} \equiv R'$ の関係から散乱半径 R' を求めた結果が Fig.2-6a に示してある。この図ではほかに、広範囲の核種に対して適用性があるものとして提案されたり、実際にもよく使用されている光学模型ポテンシャルについても R' を求め、測定値とともに示してある。

筆者の求めた光学模型ポテンシャルは全体としては Penny-Kinney の場合 ⁽²⁰⁾ ^(注) に近く、対象とする核種の範囲では実験値とかなり良く一致している。

光学模型ポテンシャルのパラメタの値を決定する際は 10 eV 程度の低エネルギー中性子に対する S 波、P 波の中性子強度関数の計算値を測定値と一致させるように配慮した。

S 波と P 波の中性子強度関数をそれぞれ、 S_0 、 S_1 と表わすことにすれば、これらは以下の手順で求められる。

$$S_n = (n S_{n, n-\frac{1}{2}} + (n+1) S_{n, n+\frac{1}{2}}) / (2n + 1), \quad n = 1, 2$$

$$S_{n,j} \equiv (1 - (1 - T_{n,j}^{1/2})^{1/2}) / (\pi V_n E^{1/2})$$

$$V_n \equiv P_n(kR) / kR$$

$$P_1(kR) = (kR)^2 / (1 + (kR)^2)$$

$$P_2(kR) = (kR)^4 / (9 + 3(kR)^2 + (kR)^4)$$

ただし k は中性子の物質波としての波数を表わし、 R は井戸型ポテンシャルの半径である。

また $T_{l,j}$ は軌道角運動量 l と全角運動量 j を持つ中性子の原子核透過係数である。中性子エネルギー E を eV 単位で表わすことにすれば、 K は $k = 2.19685 \times 10^{-3} \frac{A}{A+1} E^{1/2}$ の

注) ENDF/B-IV の鉄の断面積の評価に用いられた光学模型ポテンシャルである。

関係から、 R は $R_{(f,m)} = 1.23A^{1/3} \mp 0.8$ の関係からそれぞれ求めることができる。 Tl, j は ELIESE-3 コードを用いて求められる。 Fig.2-6b, 2-6c にはそれぞれ、 $S0$ 、 $S1$ の測定値と計算値との比較を、種々の光学模型ポテンシャルに対して示してある。

軽核に対する $S0$ の値は、 R' の場合もそうであったように、Becchetti と Greenlees の光学模型ポテンシャル⁽²¹⁾ の場合は、測定値からやや大きくはずれている。また Wilmore と Hodgson の光学模型ポテンシャル⁽²²⁾ の場合は、鉄の付近の中重核に対する他のポテンシャルの場合よりもやや大きな値となっているが、測定値のちらばり具合から判断して、このポテンシャルによる R' 、 $S0$ の値が特に異常であるとも思われない。

筆者の求めた光学模型ポテンシャルは R' 、 $S0$ 、 $S1$ に対する測定値と比較すると、広い範囲の核種に対して、測定値との良い一致を与えていると思われる。

2.4.3 (n,p)、(n,2n)反応の断面積

多段階複合核過程の模型に前平衡過程の模型を結合させた計算コード GNASH⁽²³⁾ に筆者の光学模型ポテンシャルを適用し、複合核および残留核から発生する (n,2n) 反応の中性子、(n,p) 反応の陽子、(n, α) 反応の alpha 粒子のエネルギースペクトルおよび反応断面積を計算した。 Fig.2-7a および Fig.2-7b に (n,2n) 反応と (n,p) 反応の断面積に対する実験値と計算値とを比較して示す。⁽²⁹⁾

残留核のレベル密度パラメタには Gilbert と Cameron が与えた値を用い、陽子の光学模型ポテンシャルとして Becchetti と Greenlees が陽子に対して与えたポテンシャルを、⁽²¹⁾ また Alpha 粒子に対しては Huizenga と Igo のポテンシャル⁽²⁵⁾ を用いている。複合核過程に対する前平衡過程の相対的大きさを表わすパラメタ⁽²³⁾ としては、Fig.2-7b に示した値 $\alpha_n = \alpha_p = 5 \times 10^{-4}$ 、 $\alpha_\alpha = 3 \times 10^{-3}$ を採用している。(n, α) 反応の断面積の実験値は未だあまり多く得られていないので、計算値と実験値との比較は割愛した。

(n,2n) 反応および (n,p) 反応の断面積の測定値と計算値とは良く一致している。これらの計算結果には多種類のパラメタが関与し、それらの値の選択の自由度が非常に多いので、これらの結果だけから一概に筆者の光学模型ポテンシャルの妥当性を論ずることは困難であるが、逆にまた、光学模型ポテンシャルが全反応断面積を高エネルギー部分で良く実験値を再現できることを考慮すれば、これらの Fig.2-7a, 2-7b に示した計算値と測定値との良い一致は、間接的ではあるが筆者の得た光学模型ポテンシャルの妥当性の傍証となる。

2.4.4 中性子放出反応の二重微分断面積

大阪大学の加速器 OKTAVIAN により⁵⁶Fe の中性子放出反応の二重微分断面積が測定された⁽¹²⁾

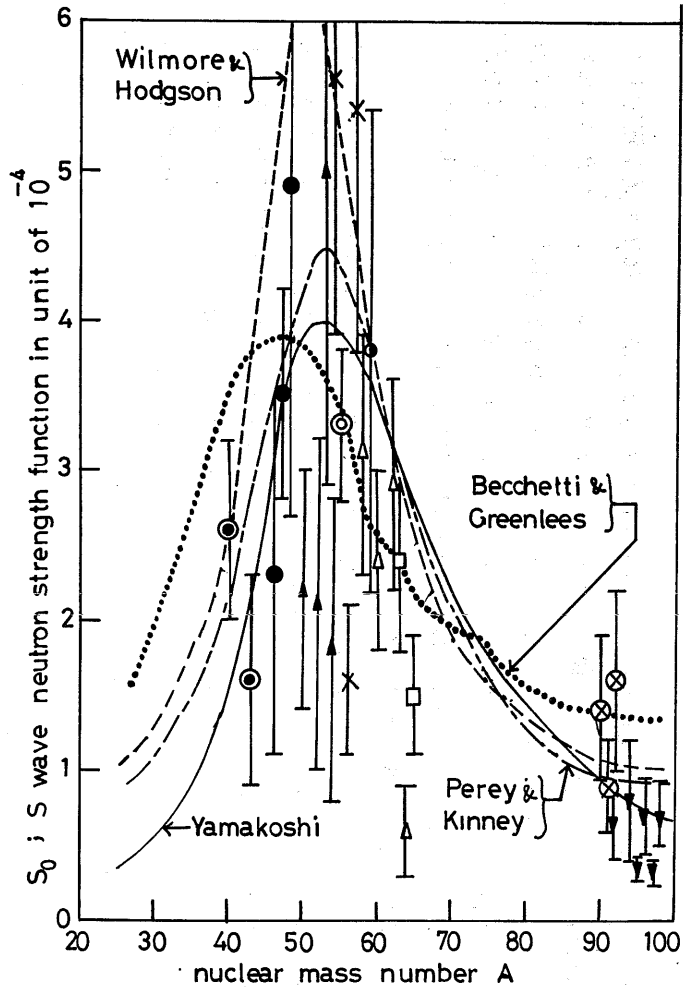


Fig.2-6b Comparison of Mass Number Dependence of s-Wave Neutron Strength Function Predicted from Various Optical Model Potentials with Experimental Results. (H. Yamakoshi (10), (11), (13))

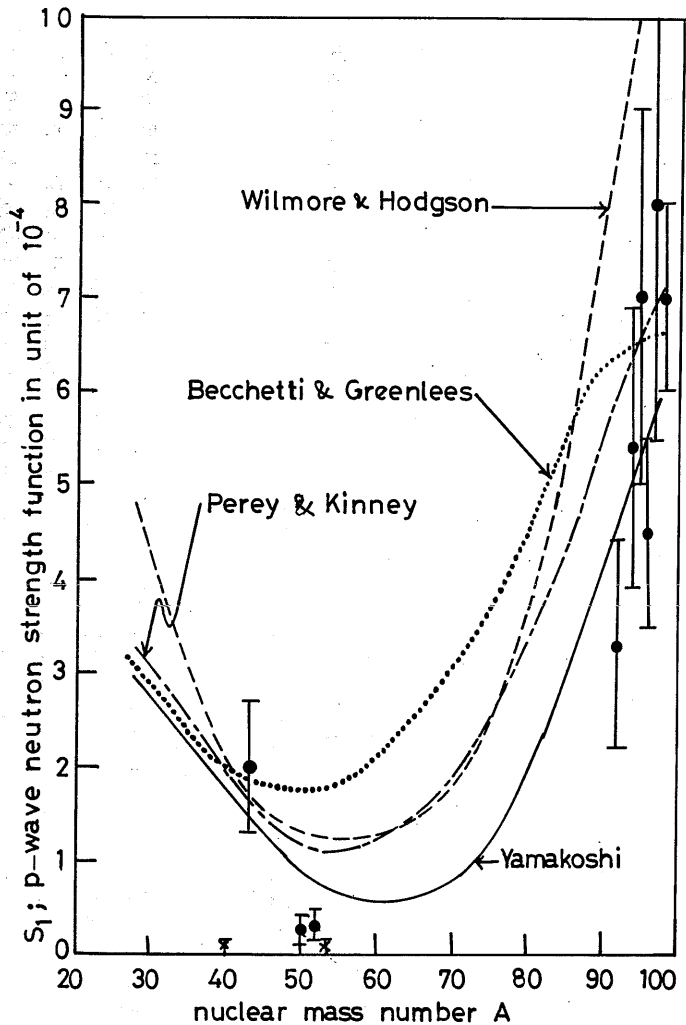


Fig.2-6c Comparison of Mass Number Dependence of p-Wave Neutron Strength Function Predicted from Various Optical Model Potentials with Experimental Results. (H. Yamakoshi (10), (11), (13))

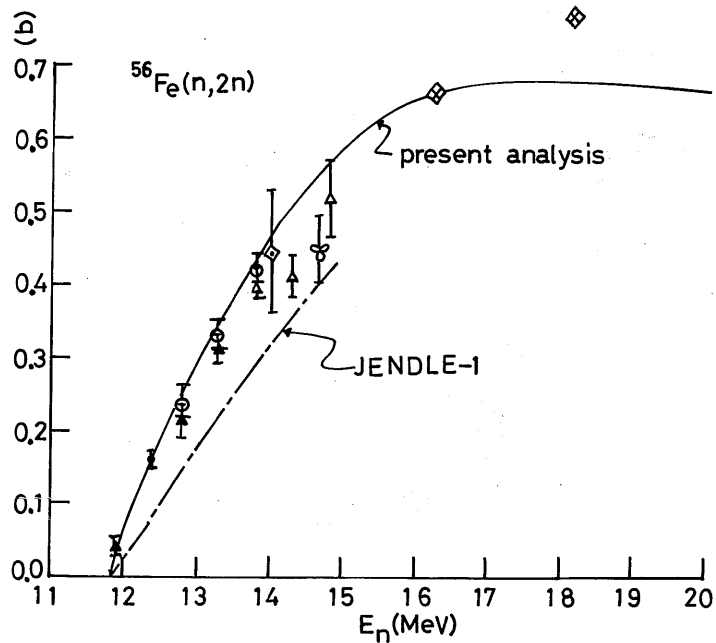


Fig.2-7a The $^{56}\text{Fe}(n,2n)$ Reaction Cross Section Predicted by Using Yamakoshi's Optical Model Potential. (H. Yamakoshi (29))

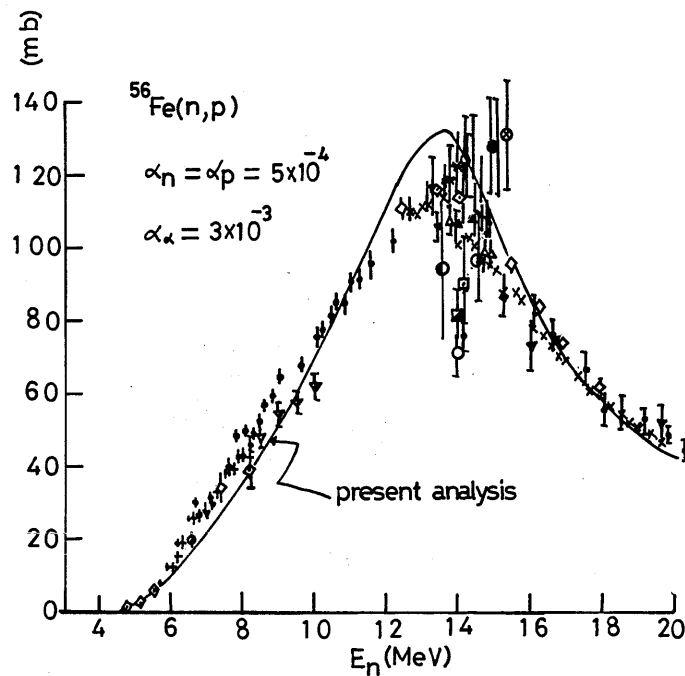


Fig.2-7b The $^{56}\text{Fe}(n,p)$ Reaction Cross Section Predicted by Using Yamakoshi's Optical Model Potential. (H. Yamakoshi (29))

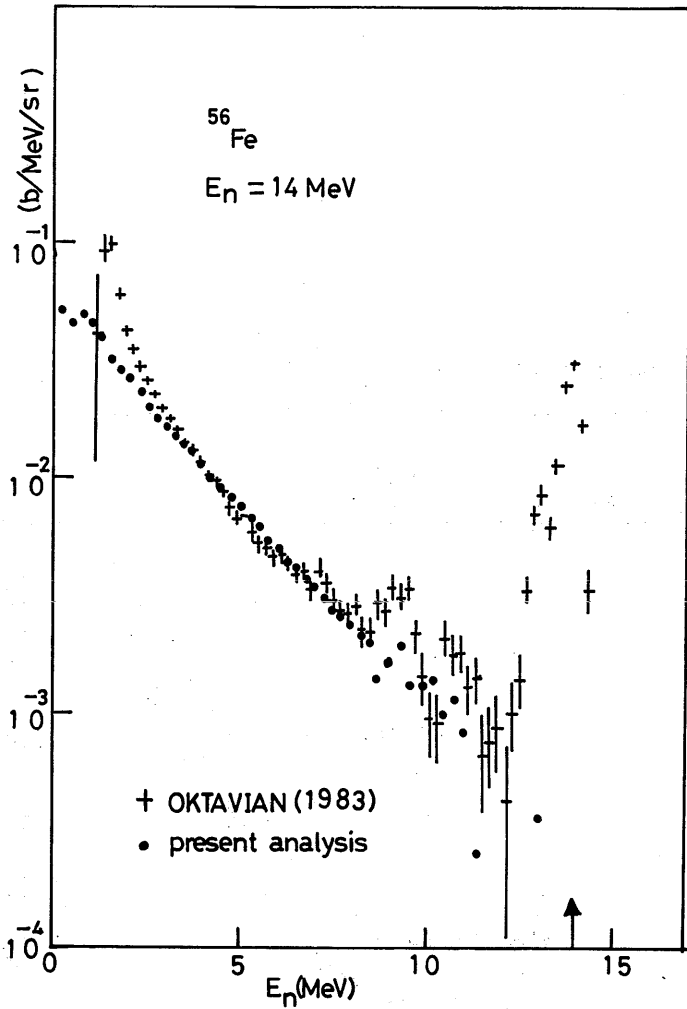


Fig.2-8 Comparison of Double Differential Cross Section of Neutron Emission Reaction Cross Section between Calculation and Experiment with OKTAVIAN. (H. Yamakoshi⁽²⁹⁾)

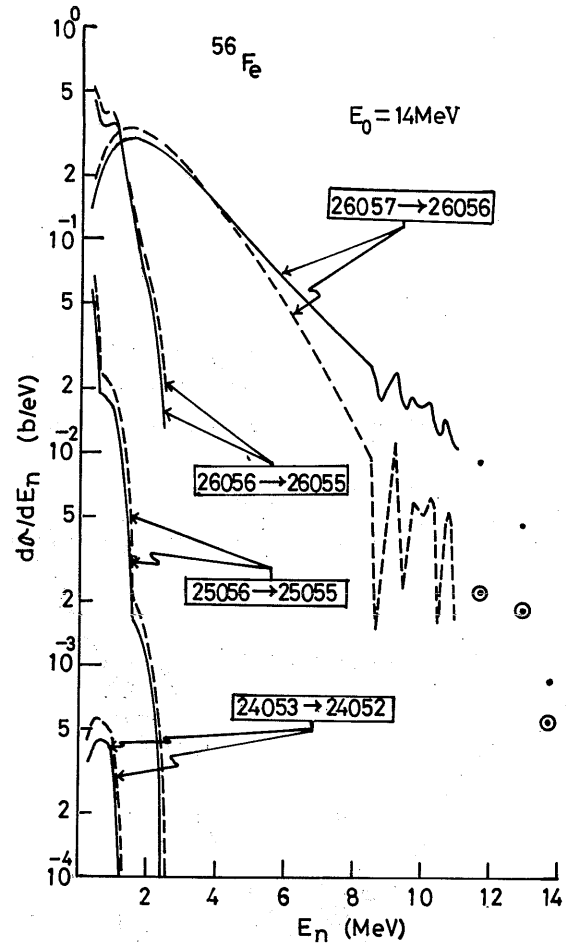


Fig.2-9 Influences of Pre-Equilibrium Process and Partial Reactions. (H. Yamakoshi⁽²⁹⁾) The mark ——— stands for the case that the pre-equilibrium process is taken into account. On the other hand, the mark - - - - stands for the case that no pre-equilibrium process is considered.

で、GANASH コードを用いて解析した。一切の手続きと計算のパラメタに関しては、前記 2.4.3項で述べた通りである。

Fig.2-8 には、Fe に 14 MeV の中性子が入射した場合につき、OKTAVIAN による測定値と計算値とが比較してある。3 MeV 程度から 8 MeV 程度の範囲において両者の一致は良好である。

Fig.2-9 には、Fig.2-8 の計算値の反応別内訳を、中性子エネルギー・スペクトルのかたち、すなわち計算による二重微分断面積に 4π を掛けたかたちで示した。破線は前平衡過程を考慮しない場合のスペクトルである。複合核 ^{57}Fe が ^{56}Fe へと崩壊する際に放出される中性子のエネルギー・スペクトルが前平衡過程を考慮しないと柔らかくなっており、この中性子スペクトルの形が全体としての中性子の大局的なスペクトルの形をきめている。

前平衡過程を考慮することが OKTAVIAN による測定値と計算値との良好な一致の不可欠な条件であるが、計算値と測定値との良好な一致は、間接的ではあるがやはり、筆者の得た光学模型ポテンシャルの妥当性に対するひとつの傍証となっている。

2.5 二次ガンマ線生成断面積の解析

1975年頃から $(n, x\gamma)$ 反応によるガンマ線生成断面積の測定値ならびに二次ガンマ線エネルギー・スペクトルの詳細な測定値が発表されるに至り、遮蔽計算に不可欠な二次ガンマ線に対する信頼性の高い核データ評価が可能となりつつある。

筆者等は、Grober と Gillat が開発した二次ガンマ線生成量の計算コード GROGI-2^{(26), (27)} に計算モデル上の改良を加え、二次ガンマ線エネルギー・スペクトルの計算を行なった。結果を Fig.2-10 に示す。

GROGI コードは原理上 GNASH コードと同様に多段階複合核模型に基づいているが、残留核の励起エネルギーが低い場合に対する不連続レベルの代わりにイラストレベル⁽¹⁵⁾ が用いられている点が GANASH コードとの主な相違である。

Fig.2-10 に示した計算値は、前平衡過程の効果を補正する余地が残されているが、実験的に得られた二次ガンマ線のエネルギー・スペクトルの形を大まかにではあるが良く説明している。

軽い核の場合は残留核の不連続レベルの影響が 1 MeV から 3 MeV のガンマ線エネルギー領域で無視できないので、今後は GNASH コードによるより精密な計算が必要であるが、測定値の存在しない核種に対する二次ガンマ線生成データを計算から求める為の知見が得られている。

2.6 結論

以上に述べた事柄をまとめると以下の結論が導かれる。

(1) ENDF/B-IV における鉄の全反応断面積は、24 keV 付近の、共鳴に由来する断面積の谷の、低

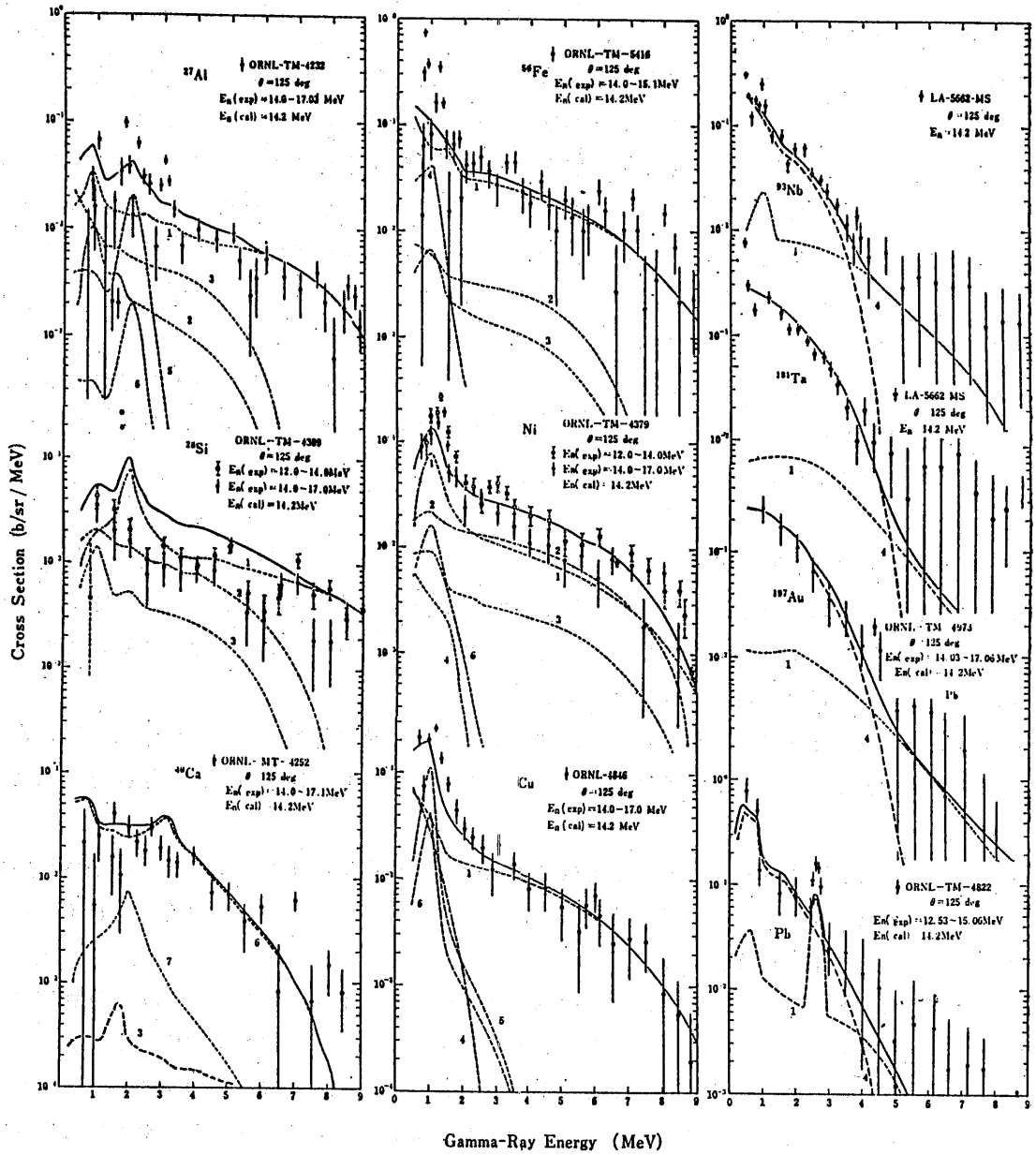


Fig.2-10 Examples of Calculated Energy Spectra of Secondary Gamma Rays.
 (H. Kitazawa et. al. (15))

エネルギー側の斜面の値を、30%ないし40%も過小評価し、谷の中心部の深さを15%程度過小評価している。

(2) 核分裂中性子のエネルギースペクトルを持つ中性子源を対象とする限り、弾性散乱中性子の角度分布はLegendre関数による展開の、 P_5 近似で十分である。

(3) 弾性散乱角度分布についての上記の結論は弾性散乱角度分布に対する計算値の散乱角依存性から導かれたが、この計算の基礎となる光学模型ポテンシャルは鉄に対する各種反応の測定データをかなり良好に再現することができる。このことから判断して、弾性散乱角度分布の計算結果は高い信頼性を持っていると思われる。

(4) 鉄に近い質量を持つ核種に対しては、筆者の得た光学模型ポテンシャルを適用して、測定値の得られていない二次ガンマ線生成量のデータを計算から補うことができると考えられる。

文 献

- (1) E. Storm and H. I. Israel, Nuclear Data Tables, A7, 565 (1970)
- (2) J. H. Hubbell, Int. Jour. Appl. Radiat. Isot., 33, 1269 (1982)
- (3) H. Brisk and C. D. Zerby, Phys. Rev., 171, 292 (1968)
- (4) M. K. Darke, "Data Formats and Procedures for the ENDF Neutron Cross Section Library", BNL-50274 (1974)
- (5) H. Goldstein et. al., "The Role of Cross Section Minima in the Deep Penetration of Fast Neutrons", Proc. Knoxville Conf., P 106 (1971)
- (6) H. Yamakoshi and S. Iijima, J Nucl. Sci. Tech., 17, 477 (1980)
- (7) K. Kobayashi et. al., Ann. Nucl. Energy, 4, 449 (1977)
- (8) H. L. Liou et. al., Nucl. Sci. Eng., 70, 150 (1979)

- (9) N. Yamano et. al., Proc. 6th Int. Conf. on Radiation Shielding, P 331 (1983)
- (10) H. Yamakoshi, JAERI-M-5984 (1975)
- (11) 山越寿夫、他 船舶技術研究所報告 第12巻 第5号 247頁 (1980)
- (12) A. Takahashi et. al., Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology, Knoxville, P 360 (1983)
- (13) H. Yamakoshi, "Role of the Level Density Parameter 'a' in Calculation of Energy Distribution Matrices for Secondary Neutrons and Gamma Rays in Shielding Materials", Int. Conf. on Neutron Phys. and Nuclear Data for Reactor and Other Applied Purposes, Harwell, P (1978)
- (14) Y. Kikuchi et. al., "Tentative Evaluation of Nuclear Data of Structural Materials for Fusion Neutronics Application", to be Published in J. Nucl. Sci. Tech., (1985)
- (15) H. Kitazawa et al., J. Nucl. Sci. Tech., 20, 273 (1983)
- (16) F. G. Perey et. al., "Neutron Data of Structural Materials for Fast Reactors", Geel Conf., P 530 (1977)
- (17) D. I. Garber and R. R. Kinsey, BNL-325 3rd Ed., (1976)
- (18) P. E. Hodgson, "The Optical Model of Elastic Scattering", Oxford, Clarendon Press, (1963)
- (19) S. Igarasi, JAERI-1224 (1972)
- (20) K. Penny and E. Kinney, ORNL-4617 (1971)

- (21) F. D. Becchetti Jr. and G. W. Greenlees, Phys. Rev., 182, 1190 (1964)
- (22) D. Wilmore and P. E. Hodgson, Nucl. Phys., 55, 637 (1964)
- (23) P. G. Young and E. D. Arther, LA-6947 (1977)
- (24) A. Gilbert and A. G. W. Cameron, Can. J. Phys., 43, 1446 (1965)
- (25) J. R. Huizenga and G. Igo, Nucl. Phys., 29, 462 (1962)
- (26) J. R. Grover and J. Gilat, Phys. Rev., 157, 814 (1967)
- (27) J. R. Grover and J. Gilat, Phys. Rev., 157, 832 (1967)
- (28) R. W. Roussin, Progress in Nucl. Energy, 13, No.2/3 (1984)
- (29) 山越寿夫、 原子力学会核データ評価ワーキンググループ (1983)

第三章 輸送容器表面線量率の計算法

3.1 はしがき

放射性物質を運搬するための容器はその壁部自身が放射線の遮蔽体となっている。計算から容器周辺の放射線線量率空間分布を評価する際は、放射性物質を収納した内筒部から始まって、容器壁部を経て、容器周辺の空間に至るまで、一貫した放射線遮蔽計算が行なわれてきた。

容器は有限の大きさを持つので、容器の形状は容器周辺線量率の空間分布に影響する。この形状効果は容器周辺線量率分布の計算では考慮されることは当然のことである。もしも容器が球形であれば容器周辺線量率の空間分布は容器の中心から計った半径方向距離のみに依存する。すなわち、球対称の一次元座標系で空間分布は記述される。

しかしながら実際には、多くの容器は有限な高さの円柱形、すなわち茶筒のような形をしており、容器周辺線量率の空間分布は容器の長軸に平行な座標軸およびそれに垂直な径方向の座標軸を用いて記述される。すなわち、円柱対称の二次元座標系で記述される。

円柱対称の二次元座標系で記述される容器周辺線量率分布を計算する場合は Monte Carlo⁽¹⁾ 法⁽²⁾ に基づく計算コード MORSE⁽³⁾ や二次元の Discrete Ordinates Sn 法⁽⁴⁾ に基づく計算コード DOT⁽⁵⁾ が用いられるが、いずれの計算コードを用いても高速かつ、第記憶容量の大型電子計算機を要し、しかも長時間の計算は避け難い。

このような従来の二次元体系に対する一貫した遮蔽計算を行なう代わりに、(a) 容器表面の中央部^{注)}における線量率の計算と、(b) 容器形状を記述するパラメタ、線量率を求めるべき位置の座標、および容器表面中央部の線量率を用い、容器外部線量率分布を比較的簡単な解析関数として表現する計算式を用いた計算で置き換えることができる。特に容器表面中央部の線量率の計算は、中性子ならびにガンマ線に対して容器壁が持つ放射線遮蔽性能特性と反射線流特性の概念ならびに内筒部が持つ反射線流特性の概念を用いることにより、新たな線源条件が内筒部に与えられた場合はいつでも、短時間に精度良く行なえる。

注) 容器表面上では燃料有効長にわたって放射線線量率は一定値である。したがって、その線量率計算には一次元計算コード ANISN が適用できる。容器表面から離れるにしたがい、線量率空間分布は容器形状の影響を受ける。この影響は第五章に於いて示すような別の方法で求められる。その場合、容器形状と検出体の空間座標のほかには、ただ容器表面中央部の線量率のみが必要である。したがって、この意味で、容器表面中央部の線量率のみを対象とした計算を行なえば十分である。

容器壁遮蔽性能特性は容器表面上の線量率に対して考えられた概念であり、その数学的表現は入射エネルギー群に関するベクトル量として与えられる。このベクトル量は一種の応答関数行列としてのほたらきをする。

反射線流特性は容器内側壁および内筒部から反射する放射線流に対して考えられた概念であり、容器壁と内筒部との間の反射線流相互作用を考慮した実効入射線流を求めるために不可欠な概念である。

反射線流特性の数学的表現は入射エネルギーと反射後のエネルギーとに関する行列として与えられる。この行列もまた一種の応答関数行列としてのほたらきをする。

容器壁に対する遮蔽性能特性を数学的に表現したこのベクトル量を容器壁遮蔽性能特性関数と呼ぶことにする。また、容器壁および内筒部に対する反射線流特性を数学的に表現した行列量をそれぞれ、容器壁反射線流特性関数および内筒部反射線流特性関数と呼ぶことにする。ベクトル要素および行列要素はそれぞれ対象とする容器壁や内筒部の構造を反映し、容器壁や内筒部の個性を表わしている。

容器壁遮蔽性能特性は容器の表面上で考えられた概念であるため、容器壁遮蔽性能特性関数のベクトル要素は円柱体系の径方向に関する一次元遮蔽計算から求めることができる。したがって、一次元の Discrete Ordinates Sn 法に基づく計算コード ANISN⁽⁶⁾を用いることができ、二次元コード DOT による計算と比較して短時間でベクトル要素の計算ができる。容器壁反射線流特性関数の行列要素は、ANISNコードを用いた容器壁遮蔽性能特性関数のベクトル要素を計算する際に、同時に求められる。内筒部反射線流特性関数の行列要素の計算は、これとは独立に行なわれる。

容器表面中央部の放射線線量率の計算は、内筒部および容器壁部の反射線流特性関数を用いた、容器壁への実効入射線流の計算と、容器壁遮蔽性能特性関数を用いた、容器表面中央部の線量率計算とから成るが、いずれも簡単な行列演算から計算値が得られる。

この計算の際の、容器壁に関する特性関数の値は収納燃料の変化にはほとんど依らないが、さらには、内筒部反射線流特性関数もその値は収納燃料の変化に対して鈍感であるという利点がある。

以下ではまず、応答関数を用いた多重層遮蔽体の遮蔽計算法の研究の流れを、手法の特徴と問題点を中心として述べ、本研究で用いる応答関数の手法が占る位置、意味合いを述べる。

次いで、遮蔽性能特性および反射線流特性の概念の由来とこれら概念の数学的表現法を述べる。

この結果を用いて、容器壁ならびに内筒部を対象とする反射線流特性関数や容器壁を対象とする遮蔽性能特性関数を定義し、これらの特性関数を用いた容器表面中央部線量率の計算法を示す。最後に、これら特性関数の値の決定法を示す。この内容としては、対象とする輸送容器体系

のモデル化のほか、Monte Carlo法、Discrete Ordinates Sn法のそれぞれを用いた場合につき特性関数算出法を述べ、両算出法による計算結果の比較も合わせて示す。

3.2 多重層遮蔽体応答関数と遮蔽計算法

平板状遮蔽体の層から成る体系に入射する放射線が透過あるいは反射する量を、各層が持つ透過、反射の性質から合成しようとする研究は従来からあった。

Fig.3-1 に示すように、左から入射する放射線の線流あるいは線束 $\vec{\Psi}_1$ と右から入射する放射線の同様な物理量 $\vec{\Psi}_2^{(1)}$ とを考える。この物質層が左から入射する放射線に対して持つ透過、反射の性質をそれぞれ透過演算子 \tilde{T} 、反射演算子 \tilde{R} で表わし、この物質が右から入射する放射線に対して持つ透過、反射の性質をそれぞれ透過演算子 \tilde{T}' 、反射演算子 \tilde{R}' で表わせば、遮蔽体から左側に出て行く放射線の線流あるいは線束 $\vec{\Psi}_2$ と遮蔽体から右側に出て行く同様な物理量 $\vec{\Psi}_1^{(1)}$ は、重ね合わせの原理が適用できるものとして、以下のように与えられる。

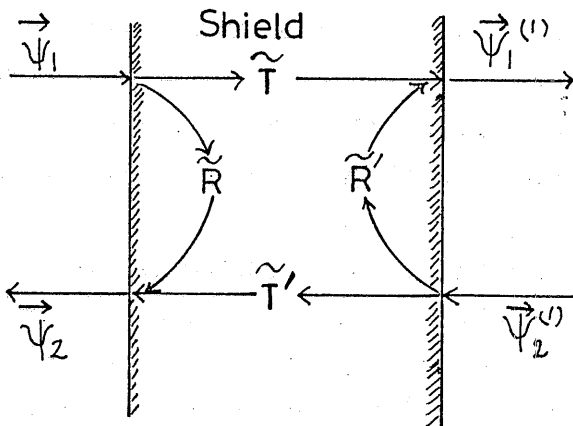


Fig.3-1 Schematic Drawing of Transmission and Reflection Matrices in Eq.(3-1).

The transmission matrix \tilde{T} and the reflection matrix \tilde{R} for the radiations incident from the left side of the shield are written differently from those for radiations incident from the right side of the shield in order to give an general formulation in Eq.(3-1), although \tilde{T} and \tilde{R} are considered to be same as \tilde{T}' and \tilde{R}' , respectively. Quantities $\vec{\Psi}_1^{(1)}$ and $\vec{\Psi}_2^{(1)}$ will play the roles of $\vec{\Psi}_1$ and $\vec{\Psi}_2$, respectively, if there is another shield layer at the right side of the present shield shown in this figure.

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_1 &= \tilde{T} \vec{\Psi}_1 + \tilde{R}' \vec{\Psi}_2^{(1)} \\ \vec{\Psi}_2 &= \tilde{R} \vec{\Psi}_1 + \tilde{T}' \vec{\Psi}_2^{(1)} \end{aligned} \quad (3-1)$$

特に遮蔽体の左側における量 $\vec{\Psi}_1$ と $\vec{\Psi}_2$ が遮蔽体の反射、透過の性質とともに予め分かっている場合は、遮蔽体の右側の量 $\vec{\Psi}_1^{(1)}$ と $\vec{\Psi}_2^{(1)}$ を求めるように上記の式を变形することにより、H行列と呼ばれる演算子が定義される。

$$\begin{pmatrix} \vec{\Psi}_1(1) \\ \vec{\Psi}_2(1) \end{pmatrix} = \tilde{H} \begin{pmatrix} \vec{\Psi}_1 \\ \vec{\Psi}_2 \end{pmatrix} \quad (3-2)$$

$$\tilde{H} \equiv \begin{pmatrix} \tilde{T} - \tilde{R}'(\tilde{T}')^{-1}\tilde{R} & \tilde{R}'(\tilde{T}')^{-1} \\ -(\tilde{T}')^{-1}\tilde{R} & (\tilde{T}')^{-1} \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

平板遮蔽体が n 個の物質層から成り立つ場合は、最も右側の層の右側表面における物理量 $\vec{\Psi}_1^{(n)}$ および $\vec{\Psi}_2^{(n)}$ は、各物質層の H 行列を用いて、

$$\begin{pmatrix} \vec{\Psi}_1^{(n)} \\ \vec{\Psi}_2^{(n)} \end{pmatrix} = \tilde{H}_n \cdot \tilde{H}_{n-1} \cdot \dots \cdot \tilde{H}_2 \cdot \tilde{H}_1 \begin{pmatrix} \vec{\Psi}_1 \\ \vec{\Psi}_2 \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

と与えられる。

以上は遮蔽層の応答関数を用いて多重層遮蔽体の応答関数 $\tilde{H}_n \tilde{H}_{n-1} \dots \tilde{H}_2 \tilde{H}_1$ を合成する方法の原理を示したものであるが、反射演算子 \tilde{R} や透過演算子 \tilde{T} は、入射線および反射線のエネルギー分布、放射線の飛行方向に対する分布を記述する、高階の行列であり、行列要素の量は膨大なものとなる。

(3-4) 式の演算子操作には隣接する層の間で生じる反射線流相互作用の効果が含まれており、体系全体に対する放射線の透過量あるいは反射量は本来、この演算子操作を直接用いることで求められる筈であるが、実際には、体系全体に対するそのような量の計算は、以下の例で示すような別の物理的解釈に基づく計算から求め直した透過演算子 \tilde{T} や反射線演算子 \tilde{R} を用いて算出されている。二重層から成る遮蔽体体系の透過演算子 \tilde{T} と反射演算子 \tilde{R} の例を以下に示す。

$$\tilde{T} = \tilde{T}_2 (\tilde{I} - \tilde{R}'_1 \tilde{R}_2)^{-1} \tilde{T}_1 = \tilde{T}_2 \sum_{n=0}^{\infty} (\tilde{R}'_1 \tilde{R}_2)^n \tilde{T}_1$$

$$\tilde{R} = \tilde{R}_1 + \tilde{T}'_1 (\tilde{I} - \tilde{R}_2 \tilde{R}'_1)^{-1} \tilde{R}_2 \tilde{T}_1$$

本研究の場合は容器外側表面で求める量、すなわち線量率がスカラー量であるため、後述の(3-11)式に示すように、各演算子に於いて入射角、反射角、透過線放射角に関する行列要素の記述をする必要がない。この結果として、透過線に対する演算子は入射線エネルギー群に関する1階の行列、すなわちベクトル量となっており、反射線に対する演算子は入射線エネルギー群と反射線エネルギー群とに関する2階の行列となっている。

このように本研究に於ける演算子の階数が片岡の場合よりも低下した効果として、大幅な計算機記憶容量の低減と計算時間の短縮が達せられた。この結果として、3回以上、10回迄の散乱線相互作用を異なる物質層間で考慮した計算を行なうことが可能となった。

本研究に於いて用いられる行列の他の特徴として、ガンマ線と中性子とを同時に扱っていることと、対象とする遮蔽体体系が円柱体系であることが挙げられる。特に部分行列として、内筒部から入射する中性子と一次ガンマ線のほかに、容器壁中で生ずる二次ガンマ線も含めた表現となっている。したがって、本研究の行列を用いることにより、同一の計算から同時に、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線に対する線量率の計算結果が得られる。

本研究で用いられる応答関数は平板体系からより複雑な円柱体系へと対象を移しておくこと、また多重散乱効果の扱いでは反射線流相互作用を高次項まで考慮していること、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線を同時、且つ、対等に扱う行列表現としていること、以上の点に於いて、本研究に於ける応答関数の取り扱いが片岡の研究の拡張となっている。

3.3 遮蔽性能特性、反射線流特性の概念と表現法

3.3.1 概念

輸送容器内筒部に収納する使用済核燃料の線源状態は燃料輸送のたびごとに異なり、容器表面上の放射線線量率も燃料輸送のたびごとに異なった値となる。

しかしながら、容器壁内側面へ入射する中性子、ガンマ線のうちで、ある狭いエネルギー範囲内のみ限ったスペクトル成分に着目した場合は、単位入射線流当たりの透過線量率および内筒部への反射線流エネルギースペクトルは、線源状態のいかに拘らず、一定であると考えられる。

ここで着目している狭い入射エネルギー区間を順次移動させた場合に得られる上記の透過線量率および反射線流エネルギースペクトルはそれぞれ、多群エネルギー表示におけるベクトルおよび2階の行列となる。このベクトルと行列は入射線流に対する容器表面線量率および、容器壁から内筒部への反射線流に対するエネルギー分布の応答関数関数であり、各ベクトル要素および各行列要素は容器壁構造を反映し、その容器固有の放射線に対する性質を表わしていると考えられる。

すなわち、これらベクトルと行列はそれぞれ、容器壁の放射線遮蔽性能特性と反射線流特性を表わしていると考えられる。Peebles等や片岡は、応答関数に対して上に述べたような特別な意味は与えなかった。それは、彼等の場合、対象とする遮蔽体の構造が特に定まったものではないことと、応答関数は任意の多重層遮蔽体に対する総合的な透過演算子および反射演算子を合成するための基礎的な演算子に過ぎなかったことに起因している。

輸送容器内筒部に対しても、容器壁部と同様に、反射線流のエネルギー分布に関する応答関数が考えられる。この場合、内筒部には燃料輸送のたびごとに異なった燃料が収納されるのであるが、内筒部からの反射線流応答関数なるべく収納燃料の変化に依存しないほうが応用上望ましい。

後にも述べるが、内筒部からの反射線流応答関数の行列要素の値を燃料の変化にあまり依存しないように工夫することができる。このようにして求められた反射線流応答関数はやはり、それぞれの型の輸送容器に応じた内筒部についての、反射線流に対する内筒部固有の性質を表わしていると考えられる。

輸送容器壁に対する応答関数に容器壁遮蔽性能特性および容器壁反射線流特性の概念を与え、内筒部に対する上記の応答関数に内筒部反射線流特性の概念を与えることは、複雑な壁構造を持つ容器壁部をひとつの基本的遮蔽層と考え、内筒部を他の基本的遮蔽層とみなすことに相当し、燃料を収納した輸送容器がこのふたつの基本的遮蔽層から成る2領域遮蔽体体系を形成していると考えられることになる。

この2領域間では反射線流の交換過程、即ちいわゆる反射線流のカップリングがあるが、このカップリング効果の記述に容器壁反射線流特性と内筒部反射線流特性の概念が使われることが後ほど示される。

3.3.2 数学的表現法

3.3.2.1 容器壁遮蔽性能特性関数

多群エネルギーの取り扱いで、容器の内筒部から壁部へ入射する中性子流を \vec{j}_n^+ と表わし、容器壁の外側から放射する中性子の線束を $\vec{\Phi}_n$ で表わすことにする。ここで \vec{j}_n^+ の+符号は外向き径方向を意味している。

容器壁の中性子応答関数 \tilde{T}_n を仲介として $\vec{\Phi}_n$ と \vec{j}_n^+ とは以下のように結ばれている。

$$\vec{\Phi}_n = \tilde{T}_n^* \vec{j}_n^+ \quad , \quad (3-6)$$

ここで、*印は行列の転置を意味している。

(3-6) 式と同様な関係が内筒部から容器壁に入射する一次ガンマ線についても成立する。しかしながら、中性子が容器壁中に存在すると二次ガンマ線が生ずるため、容器の外側表面から放射するガンマ線の線束 $\vec{\Phi}_\gamma$ には、二次ガンマ線からの寄与が付加項として加わることになる。

$$\vec{\Phi}_\gamma = \tilde{T}_\gamma^* \vec{J}_\gamma^+ + \tilde{T}_{n,\gamma}^* \vec{J}_n^+ \quad (3-7)$$

(3-6) 式と (3-7) 式とを結合することにより、下記のように、中性子とガンマ線とを同時に取り扱う行列表示が得られる。

$$\begin{pmatrix} \vec{\Phi}_n \\ \vec{\Phi}_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{T}_n & \tilde{T}_{n,\gamma} \\ \tilde{O} & \tilde{T}_\gamma \end{pmatrix}^* \begin{pmatrix} \vec{J}_n^+ \\ \vec{J}_\gamma^+ \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

(3-8) 式では、中性子とガンマ線とが恰もある仮想粒子のそれぞれの成分であるかのごとく、統一的に表現されている。そこで (3-8) 式を以下のように簡潔に表示することにする。

$$\vec{\Phi} = \tilde{T}^* \vec{J}^+ \quad (3-9)$$

(3-9) 式中の行列 \tilde{T} は、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線に対する容器壁の応答関数を総合的に統一して表わしたものである。その部分行列である、(3-8) 式の中の行列 \tilde{O} は、すべての行列要素の値が零である。また、部分行列 \tilde{T}_n と \tilde{T}_γ では、中性子やガンマ線のエネルギーは散乱に伴って不変に保たれるかあるいは減少するため、 i 行 j 列めの行列要素は $i > j$ に対して値が零である。これに対して、部分行列 $\tilde{T}_{n,\gamma}$ では、いかなるエネルギーの中性子に於いても二次ガンマ線のエネルギーはすべてのエネルギー範囲にわたって分布しているので、原則的にすべての行列要素の値は零以外の値を持つものと考えられる。

(3-8) 式の表示法を用いれば、容器壁外側表面上の放射線線量率 D_{out} は、中性子およびガンマ線の線束からそれぞれの線量率への変換係数のエネルギー群に関するベクトル \vec{C}_n および \vec{C}_γ を用い、以下に示す行列演算で与えられる。

$$D_{\text{out}} = (C_n^*, C_\gamma^*) \begin{pmatrix} \vec{\phi}_n \\ \vec{\phi}_\gamma \end{pmatrix}, \quad (3-10)$$

(3-10)式は(3-9)式のような簡潔な表現を用いれば、(3-11)式のように表わせる。

$$D_{\text{out}} = C \vec{\phi}, \quad (3-11)$$

ベクトル \vec{J}^+ が与えられた場合に D_{out} を求めるためには、(3-9)式に示すように応答行列 T を用いた演算が必要である。この応答行列は2階の行列であるので、二次元的な配列の行列要素が必要であり、データ量としては大量の行列要素データを必要とする。また、(3-11)式は、いわば、線量率の線束表現とも言える表現であり、物理的に理解し易い表現であるが、しかし線源条件の変化が D_{out} に及ぼす影響はベクトル C を作用させてから始めてわかる表現である。この意味で、この表現は間接的表現であると言える。

これに対し、以下に導くような、いわば線量率表現とも言える、より簡潔な表現が可能である。この表現の利点は、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線に対する各エネルギー成分が D_{out} にもたらず寄与を直接的に表現しているがために、線源条件の変化が D_{out} に及ぼす影響を直接的に把握することが容易なことと、行列の代わりにベクトルを用いた表示が採られているため、より少量の要素データで計算が実施できるという応用上の便利さが挙げられる。

先ず(3-9)式と(3-11)式とから次の関係式、

$$D_{\text{out}} = C^* \tilde{T}^* \vec{J}^+, \quad (3-12)$$

が得られるが、 D_{out} はスカラー量であるから (3-12)式の右辺を転置しても結果は変わらない。

$$D_{\text{out}} = (\vec{J}^+)^* \tilde{T} C, \quad (3-13)$$

ここで右辺を書き直すと以下のようになる。

$$D_{\text{out}} = (\vec{J}^+)^* \vec{B}, \quad (3-14)$$

ただし量 \vec{B} は下記のような列ベクトルである。

$$\vec{B} \equiv \begin{pmatrix} \vec{T}_n \vec{C}_n + \vec{T}_{n,\gamma} \vec{C}_\gamma \\ \vec{T}_\gamma \vec{C}_\gamma \end{pmatrix} \quad (3-14)$$

(3-13')式と(3-14)式とに依れば、容器表面上の線量率 D_{out} は部分ベクトル $\vec{T}_n \vec{C}_n$ 、 $\vec{T}_\gamma \vec{C}_\gamma$ 、 $\vec{T}_{n,\gamma} \vec{C}_\gamma$ 、を用いて求められ、したがってこれらの部分ベクトルは容器壁に入射する放射線流と容器表面線量率との関係を直接的に記述する量となっている。これに対して(3-9)式と(3-1)式とによる線束表現では、 \vec{C} のエネルギー依存性が与えられない限り、直接 \vec{T}_n 、 $\vec{T}_{n,\gamma}$ 、 \vec{T}_γ 、のエネルギー依存性のみから D_{out} への入射放射線流の寄与を判断することは困難である。

(3-14)式の部分ベクトル $\vec{T}_n \vec{C}_n$ 、 $\vec{T}_\gamma \vec{C}_\gamma$ 、 $\vec{T}_{n,\gamma} \vec{C}_\gamma$ を以下ではそれぞれ、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線に対する容器壁遮蔽性能特性関数と呼ぶことにする。^{注)}

注意すべきことは、(3-12)式ではベクトル \vec{J}^+ は右側から作用させてあるのに対し、(3-13')式では転置ベクトル $(\vec{J}^+)^*$ としてベクトル \vec{B} の左側から作用させてあることである。

3.3.2.2 容器壁反射線流特性関数

容器壁に内筒部から入射した放射線流に対する反射線流の応答関数の行列を \vec{R}_c と表わすことにする。行列 \vec{R}_c に対しては、(3-9)式の行列 \vec{T} に対する(3-8)式の部分行列表現と同様な部分行列表現が考えられる。

中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線の容器壁部からの反射線流応答行列をそれぞれ、 $(R_n)_c$ 、 $(R_\gamma)_c$ 、 $(R_{n,\gamma})_c$ で表わせば、容器壁に内筒部から入射する中性子流 \vec{J}_n^+ および一次ガンマ線流 \vec{J}_γ^+ と、容器壁部からの反射中性子流 \vec{J}_n^- および反射ガンマ線流 \vec{J}_γ^- との間には以下の関係がある。

注) Characteristic Function for Shielding Ability of Neutrons (CFSN)

Characteristic Function for Shielding Ability of Primary Gamma Rays (CFSPG)

Characteristic Function for Shielding Ability of Secondary Gamma Rays (CFSSG)

$$\begin{pmatrix} \vec{J}_n^- \\ \vec{J}_\gamma^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{R}_n & \tilde{R}_{n,\gamma} \\ 0 & \tilde{R}_\gamma \end{pmatrix}_c \begin{pmatrix} \vec{J}_n^+ \\ \vec{J}_\gamma^+ \end{pmatrix}, \quad (3-15)$$

ただし、添字 c は輸送容器壁に関する量であることを意味している。以下では部分行列 $(\tilde{R}_n)_c$ 、 $(\tilde{R}_\gamma)_c$ 、 $(\tilde{R}_{n,\gamma})_c$ はそれぞれ、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線の容器反射線流特性関数と呼ぶことにする。^{注)}

(3-15)式は以下のように簡潔に表わすことができる。

$$\vec{J}^- = \tilde{R}_c \vec{J}^+ \quad (3-16)$$

ここで容器壁反射線流特性関数 \tilde{R}_c は入射線エネルギー群と反射線エネルギー群とに関する 2 階の行列である。

3.3.2.3 内筒部反射線流特性関数

容器壁から内筒部に入射した放射線流が内筒部から反射する場合に対しては、入射放射線流を \vec{J}^- 、反射線流を \vec{J}^+ として、(3-16)式に対応して、

$$\vec{J}^+ = \tilde{R}_b \vec{J}^- \quad (3-16')$$

が成立する。ただし、添字 b は内筒部の関する量であることを意味する。

(3-16') 式に於ける 2 階の行列 \tilde{R}_b を内筒部反射線流特性関数とよぶことにする。 \tilde{R}_b も \tilde{R}_c と同様に中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線に関する部分行列から成立している。

注) Characteristic Function for Reflected Current of Neutrons (CFRN)

Characteristic Function for Reflected Current of Primary Gamma Rays (CFRPY)

Characteristic Function for Reflected Current of Secondary Gamma Rays (CFRSG)

3.4 輸送容器表面線量率の計算式

内筒部に使用済核燃料が収納されると内筒部から容器壁へ放射線が入射する。その場合、壁部から内筒部へと反射した放射線が幾度も壁部と内筒部との間で反射を繰り返す、すなわち Fig.1-1に示したように、反射線流によるひとつの閉ループを形成する。閉ループをまわる放射線の一部分は各空間領域で減速する。

壁部へ入射する放射線の実効入射線流 $\vec{J}^+(k)$ に於けるエネルギー群 k への依存性は内筒部の線源に直接的に由来する最初の壁部入射線流 $\vec{J}_0^+(k)$ のエネルギー群 k への依存性とは、このような閉ループ効果が反映する結果として異なっているはずである。

ベクトル量 \vec{J}^+ とベクトル量 \vec{J}_0^+ との差を \vec{J}'^+ と表わすことにすれば、 \vec{J}'^+ は \vec{J}_0^+ に対する補正項を意味しており、上記の閉ループ効果を含んでいる。この閉ループ効果を以下のように取り扱うことにする。

$$\vec{J}^+ = \vec{J}_0^+ + \vec{J}'^+ \quad , \quad (3-17)$$

$$= \vec{J}_0^+ + (\tilde{R}_{\text{couple}})^* \vec{J}_0^+ \quad , \quad (3-18)$$

ここで行列 $\tilde{R}_{\text{couple}}$ は上記反射線流の閉ループ効果を表わす量であり、下記の (3-19) 式で与えられる。

$$\tilde{R}_{\text{couple}} = \sum_{n=1}^{\infty} (\tilde{R}_c \tilde{R}_b)^n \quad (3-19)$$

ただし、(3-19)式の右辺の n に関する無限和は実用上、以下に示す理由から、 $n=6$ までの和で近似する。

内筒部に水を含まぬ型式の容器では、低エネルギー中性子に対する \vec{J}'^+ への、 $n > 7$ の項からの寄与は全体として30%程度であるが、容器表面線量率へのその影響は非常に小さいため、容器表面線量率を計算する限りに於いては、実質的には和を $n=6$ まで打ち切った近似で十分である。この近似の妥当性についての詳細は第四章で述べることにする。

3.5 容器壁部に関する特性関数の値の決定法

3.5.1 決定法の基本方針

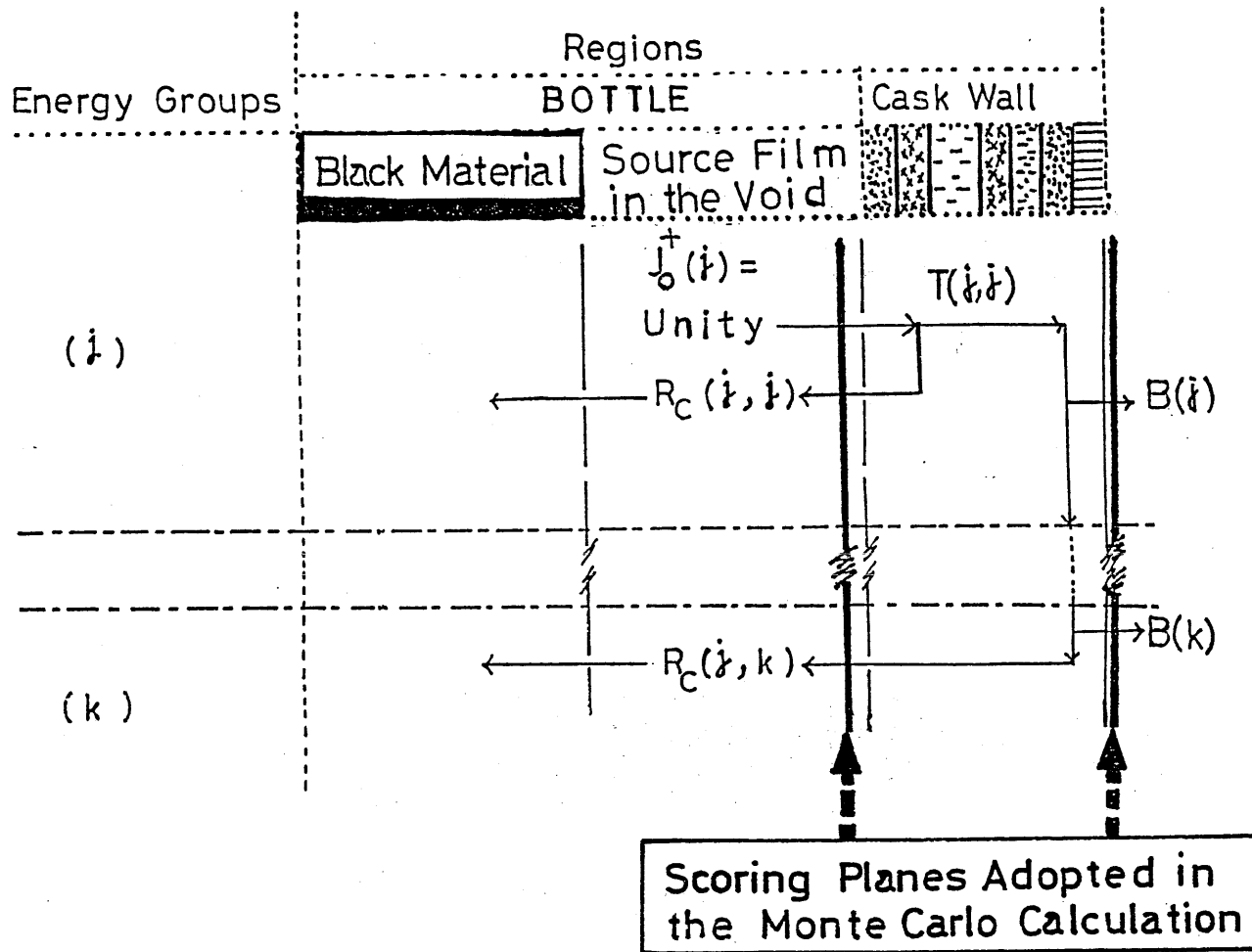


Fig.3-2 Schematic Illustration of the Model Adopted in the Calculation of Characteristic Functions of Shielding Ability B and of Reflected Current R_C .

Table 3 - 1 Energy Group Structures for Neutrons and Gamma Rays
Adopted in the Calculation Model

For Neutrons		For Gamma Rays	
Energy Group N	Upper Limit of Energy Group (eV)	Energy Group N	Upper Limit of Energy Group (eV)
1	1.4918+7	(33) 1	1.00+7 ^{a)}
2	1.2214+7	(34) 2	8.00+6
3	1.0000+7	(35) 3	6.50+6
4	8.1273+6	(36) 4	5.00+6
5	6.7032+6	(37) 5	4.00+6
6	4.4933+6	(38) 6	3.00+6
7	3.6788+6	(39) 7	2.50+6
8	3.0199+6	(40) 8	2.00+6
9	2.4660+6	(41) 9	1.66+6
10	2.0190+6	(42) 10	1.33+6
11	1.6530+6	(43) 11	1.00+6
12	1.3534+6	(44) 12	8.00+5
13	1.1080+6	(45) 13	6.00+5
14	9.0718+5	(46) 14	4.00+5
15	7.4274+5	(47) 15	3.00+5
16	6.0810+5	(48) 16	2.00+5
17	4.9787+5	(49) 17	1.00+5
18	4.0762+5	(50) 18	5.00+4
19	2.7324+5		
20	1.8316+5		
21	1.2277+5		
22	8.6517+4		
23	5.2475+4		
24	3.1828+4		
25	1.5034+4		
26	7.1017+3		
27	2.6126+3		
28	9.6112+2		
29	2.1445+2		
30	4.7851+1		
32	5.0436+0		
32	4.1400-1		

a) Read as 1.00×10^7

(H. Yamakoshi⁽¹²⁾)

のとする。

内筒部のボイド領域にある薄膜状線源からは、Table 3-1に示すエネルギー群構造に対する単色な中性子あるいはガンマ線が壁部に入射するものとする。その際、中性子とガンマ線は同時に入射することではなく、かつまた、中性子、ガンマ線のそれぞれの入射流は1個/sec/cm³に規格化されているものと仮定する。

3.5.3 計算コードと計算手順

ANISN コードならびに MORSE-CG コードによる計算では、共に共通した群定数ライブラリーのデータを用いる。このライブラリーでは評価核データファイル ENDF/B-IV の断面積データに基づいて群定数が作られており、散乱線の角度分布を記述する際の Legendre 多項式近似の精度を従来の遮蔽計算に用いられて来た P3 近似から P5 近似へと高めてある。

ANISN コードによる計算では、S16P5 近似が採られている。中性子とガンマ線とに対しては共通した空間メッシュを用いている。すなわち、空間メッシュ幅は中性子とガンマ線のそれぞれに対し、エネルギーに依存する平均自由行程のうちで最小のものを選び、その1/3の値を着目物質中の中性子、ガンマ線に共通した、原則的空間メッシュ幅とするが、物質境界付近では原則的空間メッシュ幅の更に数分の1程度にその幅を細かくする技巧を施して、空間メッシュ幅の選び方に起因する計算誤差を小さくする方法を採用している。MORSE-CGコードを用いた計算では、線源中性子あるいは線源ガンマ線がなるべく多く容器壁部へ入射するように粒子発生方向に重みを付ける、いわゆる、Direction Biasing⁽³⁾の技巧を採用し、限られた計算時間内の計算値に対する統計性を改善し計算精度を高めるようにはかった。さらに、計算効率向上と計算精度向上のため、線量率と反射線流の計算をする際は、容器長軸中央を通り長軸に垂直な平面を考え、この面を対象の中心とする幅の広い帯状検出体でスコアリングさせることとし、Next Surface Crossing⁽³⁾の技巧を採用した。また熱中性子の場合は、多数回散乱を繰り返しても散乱中性子が計算体系内に生き残る機会が大きく、多数回散乱が計算時間を長引かせる原因となるので、Russian Roulette⁽³⁾の技巧を作動させる敷居(Threshold) 確率を調整することで計算時間の短縮をはかった。

MORSE-CGコードを用いた計算では、計算結果の精度の目安である標準偏差の値によって、各エネルギー群あたりに発生させる粒子数を10,000個から40,000個まで変えて、粒子の飛跡を追跡した。

3.5.4 結果の整合性

ANISN コードと MORSE-CG コードとでは計算原理も計算手法もまったく異なるが、代表的容器

したがって、内筒部反射線流特性関数の値を決定する際には、内筒部に多量に存在するこれらの物質による収納燃料依存性への、いわば緩衝効果を上手に取り入れた内筒部体系のモデル化が大切である。

3.6.2 体系のモデル化と仮定

3.6.2.1 湿式容器の場合

内筒部に燃料が収納された状態を考え、内筒部構造は燃料、水の均質混合物から成る混合領域とそれを取り巻く厚さ 10 cm の水領域とから成る、2 領域の構造であると仮定する。

水層の厚さは中性子全反応断面積 (Fig.2-1 参照) の大きさから判断して十分厚い値である。

また、この水層の 10 cm と云う値は、多くの湿式容器について燃料の最大収納状態に於ける燃料部分の等価面積を求めた結果から経験的に決めたものである。上記の 2 領域から成る内筒部自身は真空中に、いわば、裸の状態で孤立しているものと仮定する。この内筒部の表面から 0.01 mm 外側に、内筒部表面を同軸円筒状に取り巻いた仮想的線源薄膜が存在し単色な中性子あるいはガンマ線を等方的に内筒部に入射させているものと仮定する。

これら内筒部と仮想線源薄膜は無限に長いものと仮定する。仮想線源薄膜の外側には 0.01 mm 離れて中性子あるいはガンマ線の帯状検出体があり、内筒部からの反射線流を測定しているものと仮定する。

反射線流の計算は一次元遮蔽計算コード ANISN を用いて行なう。計算上の手続きは、3.5.3項で述べたように行なう。第一章でも述べたように、Fig.1-2 で $J_0^-(k) = 1$ とした場合が上記の計算体系に相当し、 $\tilde{R}_b(k, k)$, $\tilde{R}_b(k, k+1)$ 等が行列 \tilde{R}_b の行列要素に対応する。

3.6.2.2 乾式容器の場合

内筒部の構造上の相違以外の点ではモデル化に関する考え方はすべて上記湿式容器の場合と同一のものとする。

内筒部は、燃料、構造材、アルミ等の混合した、いわゆる混合領域と、それを取り巻く、厚さ 1.4 cm のアルミを主体とする、バスケット領域とから成る、2 領域構造をしているものと仮定する。バスケット領域の厚さは、第四章でも述べるように、経験的に決められた値である。この背景には、水ほどにはアルミの中性子平均自由行程が小さくないので、アルミと燃料との均質混合領域が内筒部に占める割合を大きめに選んであるという配慮がある。

3.7 実効入射線流 J^+ の値の決定法

容器壁に内筒部から入射する放射線の実効入射線流 J^+ は (3-17) 式中の第 1 項 J_0^+ と 第

部反射線流特性は2階の行列 \tilde{R}_c および \tilde{R}_b で表現される。

量 B 、 \tilde{R}_c はそれぞれ容器壁遮蔽性能特性関数、容器壁反射線流特性関数と名付けられ、その行列要素は収納燃料の変化には依らぬ一定の値をもつ。他方、 \tilde{R}_b は内筒部反射線流特性関数と名付けられ、その行列要素は燃料変化に鈍感であり、近似的には収納燃料の変化には依らぬ一定の値を持つものと考えられる。

これらの特性関数の行列要素の値は ANISNコードを用いて計算できる。ANISNコードによる特性関数の計算結果と MORSE-CG コードによる特性関数の計算結果との間の整合性は良好である。

使用済核燃料を収納した輸送容器の内筒部と容器壁部との間には反射線流の多数回にわたる交換過程、いわゆるカップリングがあり、内筒部から容器壁へ入射する放射線流の実効値には、この反射線流のカップリング効果の寄与が重なっている。

容器壁内側面に於ける実効入射線流と容器壁遮蔽性能特性関数との間の通常のベクトル内積を用いて容器表面中央部の放射線線量率 D_{out} が求められる。したがって、反射線流カップリング効果の寄与の評価が必要であるが、これは行列 \tilde{R}_c と \tilde{R}_b との内積に関する巾剰の和で表わせる。この和は、放射線の往復を6回まで考慮したことに対応する6剰までの和として近似されている。

このようにして、特性関数の値を各容器に対して一度求めておけば、容器遮蔽計算はこれらの特性関数を用いた比較的単純な行列演算に置き換えられる。

これらの特性関数を用いた行列演算式の体系は、中性子とガンマ線とを同時に包括的に扱える点、容器壁と内筒部と云うふたつの異なる領域の間の反射線流交換過程を高次まで考慮した扱いを行なっている点、行列演算子の階数を低下させて計算方法の単純化と計算に必要な基本データの量の省略、削減化を達成している点で、従来の応答行列による遮蔽計算法を発展させ、実用性を高めたものとなっている。

文 献

- (1) J. M. Hammersley and D. C. Handscomb, "Monte Carlo Methods", Wiley, New York, (1964)
- (2) G. G. Biro, "Application of the Monte Carlo Method to Shielding", Engineering Compendium of Radiation Shielding, Vol-1, P 101,

Springer-Verlag, New York (1968)

- (3) M. B. Emmett, ORNL-4972 (1975)
- (4) D. K. Trubey and B. F. Maskewitz, "A Review of the Discrete Ordinates Sn Method for Radiation Transport Calculations", ORNL/RSIC/19 (1968)
- (5) F. R. Mynett, "A User's Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", K-1694, Union Carbide Corporation, Nuclear Division (1968)
- (6) W. W. Engle, Jr., "A User's Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code", K-1693, Union Carbide Corporation, Nuclear Division (1967)
- (7) R. Aronson and D. L. Yarmush, J. Math. Phys., 7, 221 (1966)
- (8) R. Aronson and D. L. Yarmush, Engineering Compendium of Radiation Shielding, Vol-1, P 152, Springer-Verlag, New York (1968)
- (9) G. H. Peebles and M. S. Plesset, Phys. Rev., 81, 430 (1951)
- (10) 片岡巖、船舶技術研究所報告 第3巻 第4号 161頁 (1966)
- (11) H. Yamakoshi et al., "Handy Calculation Method of Transport Index and Radiation Spectrum Outside of Cask", Proc. 6th Int. Symp. Packaging and Transportation of Radioactive Material (PATRAM), Berlin, Nov., 1980, Vol.1 P 501, K. O. Storch and Co., Verlag and Druckerei GmbH (1980)
- (12) H. Yamahoshi, Nucl. Sci. Eng., 87, 152 (1984)
- (13) A. G. Croff, "A User's Manual for ORIGEN2 Computer Code", ORNL-TM-7175 (1980)

Table 4 - 2 Calculated Values of Characteristic Functions CFSN, CFSSG and CFSPG for Typical Actual Casks
 Characteristic Function for Secondary Gamma-Ray Shielding (CFSSG)

Energy Group, N	Upper Limit of Energy Group, E _N (eV)	TN-12A (mrem/h)	EXCEL-LOX-3 (mrem/h)	HZ-75T (mrem/h)
1	1.4918+7 ^a	1.397-4	8.855-5	1.195-4
2	1.2214+7	1.116-4	7.690-5	1.049-4
3	1.0000+7	1.058-4	6.367-5	8.469-5
4	8.1273+6	1.030-4	5.191-5	6.805-5
5	6.7032+6	9.652-5	4.241-5	5.940-5
6	4.4933+6	9.376-5	3.778-5	5.489-5
7	3.6788+6	9.360-5	3.614-5	5.317-5
8	3.0199+6	9.246-5	3.549-5	5.308-5
9	2.4660+6	9.752-5	3.469-5	5.371-5
10	2.0190+6	9.130-5	3.255-5	5.355-5
11	1.6530+6	8.548-5	3.261-5	5.422-5
12	1.3534+6	8.118-5	2.975-5	5.173-5
13	1.1080+6	8.326-5	2.762-5	5.151-5
14	9.0718+5	8.294-5	2.664-5	4.786-5
15	7.4274+5	7.926-5	2.554-5	4.678-5
16	6.0810+5	6.804-5	2.399-5	4.680-5
17	4.9787+5	5.746-5	2.109-5	4.652-5
18	4.0762+5	4.402-5	1.978-5	3.668-5
19	2.7324+5	2.527-5	1.689-5	3.228-5
20	1.8316+5	1.361-5	1.479-5	2.895-5
21	1.2277+5	6.295-6	1.321-5	2.689-5
22	8.6517+4	2.206-6	1.094-5	2.288-5
23	5.2475+4	1.007-6	1.022-5	2.314-5
24	3.1828+4	1.536-7	7.151-6	1.696-5
25	1.5034+4	1.128-7	5.971-6	1.290-5
26	7.1017+3	4.642-7	6.780-6	1.726-5
27	2.6126+3	4.966-7	5.813-6	1.683-5
28	9.6112+2	9.382-7	5.910-6	1.300-5
29	2.1445+2	1.154-5	7.691-6	2.509-5
30	4.7851+1	4.070-6	5.798-5	2.332-5
31	5.0436+0	4.364-7	3.569-6	1.831-5
32	4.1400-1	1.774-7	1.379-6	5.860-6

^aRead as 1.4918 × 10⁷.

(H. Yamakoshi (1))

Table 4 - 2 Calculated Values of Characteristic Functions CFSN, CFSSG and CFSPG for Typical Actual Casks
 Characteristic Function for Primary Gamma-Ray Shielding (CFSPG)

Energy Group, N	Upper Limit of Energy Group, E _N (eV)	TN-12A (mrem/h)	EXCEL-LOX-3 (mrem/h)	HZ-75T (mrem/h)
33	1.0000+7 ^a	6.460-7	1.916-8	3.956-8
34	8.0000+6	6.322-7	2.581-8	4.540-8
35	6.5000+6	5.704-7	3.011-8	1.700-8
36	5.0000+6	2.848-7	2.842-8	3.230-8
37	4.0000+6	1.576-7	2.249-8	1.913-8
38	3.0000+6	6.618-8	1.339-8	1.616-8
39	2.5000+6	2.702-8	6.393-9	8.397-9
40	2.0000+6	8.394-9	1.963-9	4.846-9
41	1.6600+6	2.334-9	4.169-10	1.642-9
42	1.3300+6	4.046-10	3.059-11	9.869-10
43	1.0000+6	3.880-11	3.771-13	2.407-10
44	8.0000+5	4.394-12	4.220-14	2.119-11
45	6.0000+5	2.200-13	2.886-15	1.892-13
46	4.0000+5	4.282-16	1.705-19	3.388-17
47	3.0000+5	1.012-18	1.820-25	3.835-20
48	2.0000+5	1.284-19	3.219-34	6.069-27
49	1.0000+5	6.000-35	3.037-50	6.769-37
50	5.0000+4	<1.0-50	<1.0-50	<1.0-50

^aRead as 1.0000 × 10⁷.

(H. Yamakoshi (1))

Table 4 - 3a Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for TN-12A Cask

N ^a	N ^a														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.984-2 ^b	1.085-2	3.367-3	4.038-3	1.598-2	1.585-2	1.911-2	2.306-2	2.511-2	2.707-2	3.044-2	3.642-2	4.137-2	4.857-2	5.161-2
2		2.097-2	1.041-2	4.141-3	1.382-2	1.387-2	1.789-2	2.313-2	2.741-2	3.015-2	3.136-2	3.486-2	3.801-2	4.205-2	4.235-2
3			2.451-2	1.160-2	1.161-2	1.210-2	1.649-2	2.227-2	2.720-2	3.072-2	3.278-2	3.740-2	4.023-2	4.397-2	4.347-2
4				2.919-2	2.122-2	1.040-2	1.470-2	2.092-2	2.640-2	3.056-2	3.349-2	3.916-2	4.208-2	4.634-2	4.593-2
5					4.906-2	1.721-2	1.350-2	1.712-2	2.401-2	3.000-2	3.375-2	4.030-2	4.382-2	4.907-2	4.913-2
6						5.700-2	2.366-2	1.930-2	2.140-2	2.760-2	3.106-2	3.968-2	4.400-2	5.059-2	5.125-2
7							6.696-2	3.142-2	2.220-2	2.846-2	3.421-2	3.469-2	3.860-2	4.979-2	5.183-2
8								8.571-2	3.537-2	2.362-2	3.455-2	4.551-2	5.022-2	4.671-2	4.119-2
9									1.141-1	3.843-2	2.485-2	4.018-2	4.933-2	6.027-2	6.224-2
10										1.282-1	5.182-2	2.143-2	4.131-2	5.141-2	5.359-2
11											1.655-1	8.154-2	2.012-2	3.337-2	4.401-2
12												2.426-1	1.178-1	3.441-2	2.211-2
13													2.789-1	1.617-1	5.408-2
14														3.294-1	1.813-1
15															3.526-1
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	5.271-2	5.833-2	9.381-2	6.857-2	4.852-2	2.905-2	2.015-2	1.584-2	7.881-3	3.439-3	4.251-4	6.552-4	9.535-5	7.092-5	7.415-5
2	4.042-2	4.368-2	6.516-2	4.559-2	3.149-2	1.912-2	1.388-2	1.114-2	5.496-3	2.379-3	2.692-4	4.282-4	5.965-5	4.759-5	5.170-5
3	4.023-2	4.330-2	6.441-2	4.460-2	3.032-2	1.817-2	1.283-2	1.024-2	4.930-3	2.101-3	2.056-4	3.459-4	4.487-5	3.922-5	4.672-5
4	4.258-2	4.541-2	6.700-2	4.593-2	3.086-2	1.832-2	1.268-2	1.007-2	4.783-3	2.020-3	1.813-4	3.161-4	3.914-5	3.613-5	4.502-5
5	4.587-2	4.857-2	7.132-2	4.861-2	3.247-2	1.912-2	1.305-2	1.027-2	4.886-3	2.063-3	1.908-4	3.267-4	4.108-5	3.644-5	4.396-5
6	4.823-2	5.082-2	7.473-2	5.082-2	3.384-2	1.983-2	1.343-2	1.051-2	5.022-3	3.127-3	2.061-4	3.451-4	4.448-5	3.793-5	4.415-5
7	4.927-2	5.275-2	7.817-2	5.316-2	3.531-2	2.057-2	1.371-2	1.067-2	5.075-3	2.146-3	2.057-4	3.459-4	4.441-5	3.799-5	4.427-5
8	3.584-2	4.955-2	8.182-2	5.748-2	3.860-2	2.240-2	1.478-2	1.397-2	5.430-3	2.298-3	2.271-4	3.760-4	4.905-5	4.035-5	4.522-5
9	5.061-2	5.356-2	7.164-2	4.686-2	3.138-2	1.816-2	1.267-2	1.006-2	4.801-3	2.028-3	1.864-4	3.193-4	3.989-5	3.588-5	4.408-5
10	5.074-2	5.410-2	9.126-2	5.813-2	3.584-2	2.149-2	1.570-2	1.200-2	5.664-3	2.331-3	2.072-4	3.436-4	4.122-5	3.582-5	4.299-5
11	4.782-2	5.898-2	7.832-2	5.546-2	3.938-2	2.462-2	2.005-2	1.556-2	7.599-3	3.060-3	2.877-4	4.329-4	5.164-5	3.960-5	4.351-5
12	3.326-2	4.199-2	6.904-2	5.876-2	4.202-2	2.154-2	1.531-2	1.175-2	5.563-3	2.300-3	2.132-4	3.503-4	4.233-5	3.481-5	3.987-5
13	2.746-2	2.170-2	5.499-2	4.314-2	2.658-2	1.952-2	1.668-2	1.306-2	6.584-3	2.705-3	2.730-4	4.007-4	4.753-5	3.582-5	4.013-5
14	6.590-2	4.159-2	3.555-2	2.524-2	2.467-2	1.747-2	1.360-2	9.475-3	4.399-3	1.798-3	1.601-4	2.650-4	3.173-5	2.856-5	3.635-5
15	1.940-1	8.503-2	6.059-2	2.813-2	1.571-2	8.735-3	6.788-3	7.385-3	3.911-3	1.623-3	1.644-4	2.441-4	2.889-5	2.600-5	3.435-5

Table 4 - 3a Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for TN-12A Cask

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
1	1.341-5	2.556-7	2.222-3	1.297-2	2.258-2	2.466-2	3.939-2	2.612-2	3.476-2	3.513-2	4.707-2	1.003-1	6.093-2	6.894-2	1.196-1
2	1.007-5	1.901-7	1.604-3	1.056-2	2.234-2	2.657-2	4.544-2	2.995-2	3.756-2	3.864-2	4.923-2	1.040-1	6.540-2	6.850-2	1.141-1
3	9.281-6	1.733-7	4.746-4	6.523-3	1.628-2	2.269-2	4.108-2	2.847-2	3.622-2	3.748-2	4.593-2	9.910-2	6.427-2	6.729-2	1.056-1
4	9.022-6	1.676-7	1.328-4	3.203-3	8.691-3	1.648-2	3.355-2	2.622-2	3.277-2	3.482-2	4.351-2	9.303-2	6.404-2	6.589-2	9.688-2
5	8.749-6	1.628-7	1.074-4	2.543-3	1.681-3	6.334-3	1.882-2	1.821-2	2.467-2	2.825-2	3.717-2	8.243-2	5.866-2	6.124-2	8.193-2
6	8.724-6	1.628-7	1.107-4	2.627-3	8.704-4	1.026-3	7.017-3	1.030-2	1.687-2	2.085-2	2.885-2	6.872-2	5.031-2	5.494-2	6.911-2
7	8.747-6	1.632-7	1.154-4	2.695-3	9.181-4	7.386-4	1.503-3	5.278-3	1.054-2	1.444-2	2.403-2	5.761-2	4.233-2	4.978-2	6.070-2
8	8.857-6	1.656-7	1.284-4	2.752-3	1.008-3	7.536-4	9.210-4	1.309-3	4.981-3	9.968-3	1.923-2	4.321-2	3.257-2	4.498-2	5.383-2
9	8.811-6	1.639-7	1.584-4	2.624-3	1.004-3	7.372-4	8.674-4	5.369-4	1.559-3	5.037-3	1.175-2	3.024-2	2.688-2	3.943-2	4.541-2
10	8.542-6	1.581-7	1.869-4	2.932-3	1.119-3	8.867-4	1.025-3	5.516-4	7.362-4	1.794-3	5.476-3	2.337-2	2.534-2	3.320-2	3.633-2
11	8.491-6	1.567-7	2.007-4	3.245-3	1.242-3	1.061-3	1.184-3	6.671-4	7.347-4	6.811-4	2.024-3	1.892-2	2.305-2	2.659-2	2.728-2
12	7.845-6	1.451-7	5.349-5	3.234-3	9.559-4	7.312-4	6.795-4	3.911-4	4.210-4	3.824-4	7.499-4	4.485-3	1.516-2	2.176-2	1.531-2
13	7.878-6	1.469-7	5.54-11	3.475-3	9.089-4	6.509-4	5.230-4	3.061-4	3.218-4	2.882-4	3.026-4	3.918-4	4.418-3	1.562-2	8.370-3
14	7.328-6	1.361-7	5.54-11	3.208-3	8.356-4	5.979-4	4.782-4	2.797-4	2.934-4	2.632-4	2.759-4	3.575-4	2.927-4	7.973-3	4.906-3
15	6.984-6	1.297-7	5.28-11	3.092-3	8.029-4	5.741-4	4.575-4	2.675-4	2.802-4	2.517-4	2.634-4	3.415-4	2.800-4	1.679-3	2.822-3
	N^a							N^a							
	46	47	48	49	50		N^a	46	47	48	49	50			
1	7.386-2	9.514-2	6.206-2	2.545-3	8.698-5	16	1.248-3	1.369-3	8.078-4	1.852-5	1.772-7				
2	6.983-2	8.629-2	4.971-2	1.218-3	1.732-5	17	1.350-3	1.481-3	8.735-4	2.000-5	1.928-7				
3	6.541-2	8.009-2	4.449-2	8.632-4	9.902-7	18	1.499-3	1.645-3	9.706-4	2.222-5	2.186-7				
4	6.158-2	7.562-2	4.189-2	8.143-4	1.024-6	19	1.774-3	1.948-3	1.150-3	2.640-5	2.689-7				
5	5.350-2	6.610-2	3.659-2	7.259-4	1.809-6	20	2.145-3	2.357-3	1.392-3	3.202-5	3.331-7				
6	4.573-2	5.634-2	3.112-2	6.108-4	1.070-6	21	2.629-3	2.891-3	1.708-3	3.933-5	4.115-7				
7	4.008-2	4.914-2	2.721-2	5.368-4	1.087-6	22	3.004-3	3.306-3	1.963-3	4.570-5	5.058-7				
8	3.513-2	4.249-2	2.366-2	4.693-4	1.054-6	23	4.045-3	4.460-3	2.654-3	6.174-5	6.678-7				
9	2.974-2	3.555-2	1.985-2	3.942-4	8.783-7	24	4.847-3	5.340-3	3.240-3	7.994-5	1.110-6				
10	2.481-2	2.973-2	1.679-2	3.701-4	3.088-6	25	6.953-3	7.634-3	4.700-3	1.233-4	2.116-6				
11	1.998-2	2.416-2	1.395-2	3.656-4	6.267-6	26	1.268-2	1.393-2	8.501-3	2.171-4	3.447-6				
12	1.012-2	1.293-2	7.298-3	1.679-4	1.746-6	27	1.218-2	1.340-2	8.150-3	2.047-4	3.072-6				
13	4.847-3	6.403-3	3.585-3	7.233-5	1.798-7	28	3.714-2	4.056-2	2.527-2	7.048-4	1.436-5				
14	2.701-3	3.409-3	1.949-3	4.064-5	1.706-7	29	5.458-3	6.002-3	3.556-3	8.237-5	8.917-7				
15	1.440-3	1.649-3	9.621-4	2.141-5	1.671-7	30	1.015-2	1.117-2	6.708-3	1.613-4	2.055-6				

(Continued)

Table 4 - 3a Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for TN-12A Cask

N ^a	N ^a														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	3.568-1	2.190-1	1.043-1	4.146-2	2.137-2	1.140-2	7.571-3	6.030-3	2.771-3	1.176-3	9.602-5	1.804-4	2.205-5	2.315-5	3.102-5
17		4.049-1	2.324-1	6.650-2	3.005-2	1.504-2	9.649-3	7.470-3	3.393-3	1.428-3	1.160-4	2.155-4	2.624-5	2.469-5	2.974-5
18			5.204-1	1.523-1	4.971-2	2.192-2	1.317-2	9.706-3	4.321-3	1.792-3	1.443-4	2.636-4	3.189-5	2.649-5	2.768-5
19				5.237-1	1.543-1	4.666-2	2.384-2	1.569-2	6.678-3	2.683-3	2.122-4	3.738-4	4.464-5	3.121-5	2.569-5
20					5.177-1	1.493-1	5.242-2	2.825-2	1.115-2	4.258-3	3.277-4	5.492-4	6.439-5	3.932-5	2.678-5
21						4.835-1	1.727-1	6.049-2	2.074-2	7.270-3	5.355-4	8.365-4	9.588-5	5.167-5	3.056-5
22							5.459-1	1.616-1	3.879-2	1.151-2	7.850-4	1.106-3	1.223-4	5.806-5	3.101-5
23								5.515-1	1.316-1	2.699-2	1.608-3	1.958-3	2.053-4	8.497-5	4.168-5
24									6.302-1	8.513-2	3.323-3	2.944-3	2.734-4	9.041-5	3.898-5
25										6.207-1	1.804-2	9.066-3	7.073-4	1.814-4	6.937-5
26											4.230-1	1.913-1	1.046-2	1.966-3	6.565-4
27												7.084-1	3.158-2	3.564-3	1.003-3
28													3.541-1	3.292-2	5.337-3
29														6.882-1	1.122-1
30															6.994-1
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
16	6.293-6	1.167-7	4.50-11	3.169-3	8.224-4	5.880-4	4.684-4	2.738-4	2.867-4	2.577-4	2.696-4	3.495-4	2.867-4	5.384-4	2.520-3
17	5.886-6	1.089-7	3.77-11	3.427-3	8.889-4	6.355-4	5.059-4	2.957-4	3.096-4	2.783-4	2.912-4	3.775-4	3.097-4	5.818-4	2.725-3
18	5.278-6	9.731-8	2.86-11	3.802-3	9.828-4	7.021-4	5.566-4	3.251-4	3.398-4	3.059-4	3.196-4	4.147-4	3.408-4	6.436-4	3.024-3
19	4.531-6	8.294-8	1.60-11	4.495-3	1.156-3	8.247-4	6.494-4	3.790-4	3.950-4	3.565-4	3.715-4	4.829-4	3.979-4	7.577-4	3.576-3
20	4.370-6	7.937-8	8.61-12	5.429-3	1.388-3	9.891-4	7.732-4	4.508-4	4.683-4	4.239-4	4.407-4	5.736-4	4.740-4	9.108-4	4.319-3
21	4.679-6	8.438-8	4.19-12	6.644-3	1.687-3	1.201-3	9.313-4	5.423-4	5.615-4	5.098-4	5.285-4	6.891-4	5.713-4	1.109-3	5.288-3
22	4.543-6	8.150-8	1.98-12	7.568-3	1.891-3	1.341-3	1.018-3	5.913-4	6.066-4	5.555-4	5.709-4	7.475-4	6.253-4	1.249-3	6.018-3
23	5.904-6	1.055-7	1.49-12	1.016-2	2.511-3	1.776-3	1.329-3	7.696-4	7.840-4	7.225-4	7.380-4	9.695-4	8.163-4	1.663-3	8.091-3
24	5.260-6	9.346-8	1.39-12	1.214-2	2.877-3	2.017-3	1.424-3	8.184-4	8.099-4	7.669-4	7.609-4	1.012-3	8.745-4	1.944-3	9.576-3
25	8.992-6	1.590-7	1.74-12	1.741-2	4.014-3	2.796-3	1.892-3	1.081-3	1.045-3	1.012-3	9.801-4	1.316-3	1.161-3	2.758-3	1.360-2
26	8.147-5	1.433-6	2.83-12	3.176-2	7.439-3	5.201-3	3.608-3	2.069-3	2.028-3	1.938-3	1.904-3	2.541-3	2.215-3	5.065-3	2.493-2
27	1.187-4	2.076-6	4.61-12	3.049-2	7.170-3	5.017-3	3.501-3	2.009-3	1.976-3	1.882-3	1.855-3	2.473-3	2.150-3	4.866-3	2.399-2
28	5.427-4	9.298-6	7.11-12	9.306-2	2.095-2	1.452-2	9.455-3	5.374-3	5.080-3	5.029-3	4.751-3	6.440-3	5.798-3	1.464-2	7.201-2
29	9.812-3	1.653-4	2.50-11	1.378-2	3.478-3	2.472-3	1.903-3	1.107-3	1.142-3	1.040-3	1.075-3	1.403-3	1.167-3	2.291-3	1.096-2
30	4.171-2	5.921-4	4.82-11	2.551-2	6.211-3	4.380-3	3.215-3	1.858-3	1.875-3	1.743-3	1.763-3	2.325-3	1.974-3	4.148-3	2.019-2

Table 4 - 3a Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for TN-12A Cask

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
31	5.541-1	9.469-3	1.35-10	5.523-2	1.290-2	9.015-3	6.231-3	3.571-3	3.493-3	3.345-3	3.279-3	4.380-3	3.825-3	8.793-3	4.333-2
32		2.769-1	6.87-10	1.542-1	3.360-2	2.317-2	1.456-2	8.236-3	7.610-3	7.705-3	7.099-3	9.714-3	8.923-3	2.386-2	1.166-1
33			1.020-4	2.631-4	4.710-4	5.371-4	9.574-4	7.861-4	1.199-3	1.238-3	1.821-3	3.078-3	3.144-3	5.487-3	1.656-1
34				1.701-4	4.801-4	5.841-4	1.072-4	8.911-4	1.373-3	1.422-3	2.098-3	3.558-3	3.650-3	6.394-3	1.451-1
35					2.159-4	5.701-4	1.164-3	1.026-3	1.608-3	1.687-3	2.510-3	4.280-3	4.426-3	7.807-3	1.192-1
36						1.940-3	1.075-3	1.218-3	1.780-3	1.921-3	2.899-3	4.973-3	5.179-3	9.207-3	9.589-2
37							4.661-4	9.391-4	1.785-3	2.049-3	3.168-3	5.532-3	5.801-3	1.039-2	7.627-2
38								3.320-4	1.474-3	2.010-3	3.329-3	5.982-3	6.344-3	1.145-2	5.863-2
39									5.562-4	1.609-3	3.200-3	6.176-3	6.665-3	1.213-2	4.737-2
40										5.364-4	2.512-3	6.022-3	6.822-3	1.257-2	3.895-2
41											8.678-4	4.992-3	6.684-3	1.270-2	3.325-2
42												1.758-3	5.424-3	1.220-2	3.059-2
43													1.581-3	9.953-3	2.918-2
44														3.378-3	2.530-2
45															1.030-2
	N^a						N^a								
	46	47	48	49	50	N^a	46	47	48	49	50				
31	2.205-2	2.425-2	1.481-2	3.775-4	5.903-6	41	3.630-2	7.461-2	2.923-2	5.572-4	2.088-7				
32	6.072-2	6.589-2	4.167-2	1.242-3	2.971-5	42	3.641-2	8.718-2	3.390-2	6.320-4	2.353-7				
33	4.284-2	5.469-2	3.164-2	6.267-4	2.483-7	43	3.556-2	9.883-2	4.096-2	7.448-4	2.761-7				
34	4.067-2	5.231-2	2.931-2	5.797-4	2.289-7	44	3.320-2	9.599-2	5.782-2	9.683-4	3.503-7				
35	3.844-2	5.055-2	2.677-2	5.283-4	2.105-7	45	2.787-2	8.313-2	8.873-2	1.399-3	3.365-7				
36	3.691-2	5.038-2	2.494-2	4.909-4	1.946-7	46	8.684-3	6.042-2	1.268-1	1.945-3	4.777-7				
37	3.592-2	5.168-2	2.384-2	4.679-4	1.850-7	47		2.212-2	1.635-1	2.835-3	7.151-7				
38	3.547-2	5.482-2	2.357-2	4.600-4	1.799-7	48			1.052-1	2.235-2	3.688-6				
39	3.559-2	5.952-2	2.427-2	4.792-4	1.845-7	49				2.930-2	2.732-4				
40	3.597-2	6.619-2	2.583-2	5.106-4	1.938-7	50					3.308-3				

(H. Yamakoshi (1))

^aThe terms N and N' are, respectively, the energy group for the incident radiation and the transmitted or reflected radiation.

^bRead as 1.984×10^{-2} .

Table 4 - 3b Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for EXCELLOX-3 Cask.

N ^a	N ^a														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.070-2 ^b	1.209-2	4.774-3	4.894-3	1.611-2	1.451-2	1.777-2	2.467-2	2.776-2	2.952-2	3.326-2	3.461-2	3.365-2	3.945-2	3.712-2
2		1.303-2	1.478-2	5.471-3	1.342-2	1.223-2	1.709-2	2.261-2	2.877-2	3.036-2	3.254-2	3.340-2	3.119-2	3.481-2	3.266-2
3			1.631-2	1.549-2	1.318-2	1.087-2	1.426-2	2.105-2	2.461-2	2.834-2	2.917-2	2.983-2	2.837-2	3.100-2	2.835-2
4				1.978-2	2.619-2	1.066-2	1.485-2	2.123-2	2.500-2	2.566-2	2.890-2	2.913-2	2.754-2	3.061-2	2.703-2
5					3.968-2	1.982-2	1.424-2	1.817-2	2.431-2	2.772-2	3.009-2	3.164-2	3.005-2	3.246-2	2.933-2
6						4.579-2	3.403-2	2.251-2	2.193-2	2.500-2	2.753-2	3.253-2	2.911-2	3.383-2	3.001-2
7							5.819-2	4.834-2	2.597-2	2.696-2	2.922-2	2.663-2	2.781-2	3.287-2	3.185-2
8								7.654-2	4.276-2	2.672-2	3.089-2	3.409-2	3.119-2	3.237-2	2.478-2
9									9.383-2	4.256-2	2.858-2	3.281-2	3.183-2	3.601-2	3.562-2
10										9.538-2	5.461-2	2.559-2	3.069-2	3.528-2	3.006-2
11											1.111-1	6.673-2	2.103-2	2.966-2	3.050-2
12												1.417-1	7.808-2	3.043-2	2.207-2
13													1.447-1	1.144-1	3.098-2
14														1.760-1	9.295-2
15															1.841-1
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	3.575-2	2.852-2	5.021-2	3.754-2	2.750-2	1.844-2	1.815-2	1.540-2	1.439-2	1.144-2	1.284-2	1.313-2	1.585-2	1.758-2	2.457-2
2	3.015-2	2.342-2	4.014-2	2.966-2	2.169-2	1.507-2	1.536-2	1.308-2	1.226-2	9.772-3	1.099-2	1.123-2	1.393-2	1.564-2	1.848-2
3	2.689-2	2.083-2	3.605-2	2.695-2	1.946-2	1.357-2	1.374-2	1.174-2	1.103-2	8.825-3	9.956-3	1.049-2	1.231-2	1.393-2	1.909-2
4	2.424-2	1.949-2	3.213-2	2.377-2	1.716-2	1.173-2	1.195-2	1.018-2	9.593-3	7.689-3	8.686-3	9.130-3	1.079-2	1.217-2	1.457-2
5	2.614-2	2.026-2	3.421-2	2.425-2	1.776-2	1.189-2	1.189-2	1.021-2	9.565-3	7.046-3	8.687-3	8.921-3	1.103-2	1.220-2	1.740-2
6	2.734-2	2.218-2	3.627-2	2.649-2	1.892-2	1.293-2	1.255-2	1.097-2	1.019-2	8.220-3	9.255-3	9.556-3	1.162-2	1.435-2	1.577-2
7	2.785-2	2.278-2	3.785-2	2.746-2	1.917-2	1.334-2	1.283-2	1.120-2	1.046-2	8.434-3	9.516-3	1.002-2	1.183-2	1.310-2	1.530-2
8	2.322-2	2.190-2	3.952-2	2.805-2	2.067-2	1.363-2	1.357-2	1.144-2	1.097-2	8.756-3	9.942-3	1.037-2	1.284-2	1.568-2	1.732-2
9	2.646-2	2.368-2	3.565-2	2.561-2	1.966-2	1.280-2	1.368-2	1.155-2	1.115-2	8.892-3	1.015-2	1.050-2	1.265-2	1.543-2	1.981-2
10	2.939-2	2.235-2	4.320-2	3.030-2	2.054-2	1.502-2	1.522-2	1.295-2	1.223-2	9.724-3	1.110-2	1.134-2	1.385-2	1.642-2	1.939-2
11	2.786-2	2.649-2	3.989-2	2.918-2	2.249-2	1.649-2	1.653-2	1.452-2	1.318-2	1.041-2	1.177-2	1.228-2	1.471-2	1.671-2	1.960-2
12	2.516-2	2.102-2	3.837-2	3.244-2	2.472-2	1.483-2	1.645-2	1.428-2	1.321-2	1.093-2	1.234-2	1.278-2	1.567-2	1.927-2	2.435-2
13	2.023-2	1.582-2	3.759-2	3.036-2	2.122-2	1.672-2	1.801-2	1.485-2	1.437-2	1.157-2	1.290-2	1.343-2	1.630-2	1.919-2	2.431-2
14	2.850-2	1.739-2	2.931-2	2.624-2	2.385-2	1.801-2	1.827-2	1.543-2	1.514-2	1.236-2	1.396-2	1.466-2	1.773-2	2.055-2	2.396-2
15	9.269-2	2.452-2	3.419-2	2.682-2	2.198-2	1.540-2	1.786-2	1.614-2	1.628-2	1.304-2	1.499-2	1.565-2	1.895-2	2.228-2	2.837-2

Table 4 - 3b Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for EXCELLOX-3 Cask

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
1	1.876-2	2.396-2	1.704-3	2.901-2	2.277-2	2.226-2	3.420-2	2.315-2	2.997-2	3.015-2	3.865-2	8.212-2	5.038-2	5.613-2	1.078-1
2	1.795-2	2.168-2	1.227-3	2.487-2	2.196-2	2.275-2	3.808-2	2.510-2	3.106-2	3.193-2	3.931-2	8.410-2	5.315-2	5.435-2	9.978-2
3	1.457-2	2.056-2	3.519-4	1.989-2	1.763-2	1.998-2	3.419-2	2.478-2	3.050-2	3.073-2	3.687-2	7.957-2	5.189-2	5.276-2	9.175-2
4	1.402-2	1.889-2	9.393-5	1.520-2	1.077-2	1.528-2	2.779-2	2.473-2	2.847-2	2.945-2	3.590-2	7.568-2	5.219-2	5.224-2	8.493-2
5	1.272-2	1.744-2	7.708-5	1.388-2	4.100-3	7.225-3	1.586-2	1.822-2	2.146-2	2.392-2	3.068-2	6.701-2	4.799-2	4.891-2	7.199-2
6	1.495-2	1.915-2	8.034-5	1.466-2	3.485-3	2.751-3	6.590-3	1.092-2	1.517-2	1.785-2	2.380-2	5.593-2	4.131-2	4.429-2	6.252-2
7	1.479-2	1.944-2	8.426-5	1.518-2	3.634-3	2.583-3	2.451-3	5.887-3	1.013-2	1.264-2	1.992-2	4.692-2	3.479-2	4.057-2	5.639-2
8	1.604-2	2.052-2	9.372-5	1.573-2	3.806-3	2.667-3	2.040-3	2.074-3	5.732-3	8.823-3	1.585-2	3.494-2	2.675-2	3.677-2	5.131-2
9	1.493-2	2.005-2	1.132-4	1.602-2	3.899-3	2.726-3	2.055-3	1.196-3	3.061-3	4.764-3	9.739-3	2.426-2	2.207-2	2.207-2	4.452-2
10	1.557-2	2.117-2	1.278-4	1.723-2	4.196-3	2.978-3	2.253-3	1.255-3	2.569-3	2.242-3	4.912-3	1.862-2	2.054-2	2.698-2	3.766-2
11	1.847-2	2.353-2	1.278-4	1.855-2	4.504-3	3.243-3	2.432-3	1.375-3	2.722-3	1.436-3	2.342-3	1.466-2	1.780-2	2.111-2	3.075-2
12	2.004-2	2.495-2	3.153-5	1.981-2	4.617-3	3.237-3	2.257-3	2.283-3	2.695-3	1.329-3	1.531-3	4.352-3	1.167-2	1.710-2	2.299-2
13	1.871-2	2.433-2	7.04-11	2.037-2	4.690-3	3.262-3	2.219-3	1.269-3	2.650-3	1.305-3	1.280-3	1.694-3	4.247-3	1.292-2	1.904-2
14	2.251-2	2.747-2	7.80-11	2.177-2	5.005-3	3.479-3	2.356-3	1.346-3	2.884-3	1.391-3	1.361-3	1.801-3	1.584-3	8.338-3	1.861-2
15	2.302-2	2.867-2	8.12-11	2.353-2	5.417-2	3.768-3	2.561-3	1.464-3	3.089-3	1.509-3	1.479-3	1.958-3	1.701-3	4.554-3	1.905-3
	N^a							N^a							
	46	47	48	49	50	N^a	46	47	48	49	50				
1	6.478-2	8.402-2	7.758-2	2.404-3	8.519-5	16	1.022-2	1.144-2	7.212-3	1.597-4	1.568-6				
2	5.966-2	7.440-2	4.473-2	1.171-3	1.562-5	17	1.049-2	1.174-2	7.420-3	1.653-4	1.399-6				
3	5.537-2	6.835-2	3.950-2	7.860-3	1.907-6	18	1.166-2	1.305-2	8.316-3	1.816-4	1.765-6				
4	5.242-2	6.483-2	3.737-2	7.445-4	1.846-6	19	1.269-2	1.420-2	8.950-3	1.982-4	1.679-6				
5	4.579-2	5.693-2	3.287-2	6.701-4	2.563-6	20	1.382-2	1.547-2	9.751-3	2.163-4	1.847-6				
6	4.006-2	4.960-2	2.864-2	5.823-4	1.892-6	21	1.468-2	1.642-2	1.036-2	2.301-4	1.985-6				
7	3.587-2	4.415-2	2.561-2	5.245-4	1.910-6	22	1.425-2	1.594-2	1.006-2	2.258-4	1.664-6				
8	3.208-2	3.885-2	2.279-4	4.706-4	1.915-6	23	1.540-2	1.721-2	1.087-2	2.453-4	1.420-6				
9	2.766-2	3.304-2	1.951-2	4.088-4	1.754-6	24	1.323-2	1.474-2	9.335-3	2.185-4	1.351-6				
10	2.391-2	2.851-2	1.708-2	4.021-4	2.717-6	25	1.391-2	1.540-2	9.771-3	2.424-4	2.289-6				
11	2.011-2	2.407-2	1.476-2	3.927-4	5.930-6	26	1.842-2	2.035-2	1.295-2	3.321-4	3.444-6				
12	1.325-2	1.616-2	9.901-3	2.356-4	1.729-6	27	1.679-2	1.857-2	1.180-2	2.995-4	2.879-6				
13	1.002-2	1.199-2	7.402-3	1.608-4	1.387-6	28	3.598-2	3.899-2	2.519-2	6.947-4	1.408-5				
14	9.585-3	1.106-2	6.927-3	1.529-4	1.378-6	29	2.063-2	2.309-2	1.459-2	3.299-4	2.411-6				
15	9.674-3	1.087-2	6.839-3	1.508-4	1.441-6	30	2.388-2	2.666-2	1.689-2	3.926-4	2.197-6				

(Continued)

Table 4 - 3b Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for EXCELLOX-3 Cask

N ^a	N ^a														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	1.886-1	8.621-2	4.228-2	2.666-2	2.182-2	1.757-2	1.919-2	1.743-2	1.702-2	1.384-2	1.630-2	1.694-2	2.055-2	2.423-2	3.005-2
17		1.955-1	1.138-1	3.364-2	2.459-2	1.830-2	2.034-2	1.793-2	1.792-2	1.519-2	1.746-2	1.814-2	2.207-2	2.504-2	3.269-2
18			2.532-1	6.615-2	2.483-2	1.834-2	2.065-2	1.940-2	1.930-2	1.639-2	1.903-2	1.979-2	2.432-2	2.827-2	3.286-2
19				2.615-1	5.969-2	1.870-2	2.015-2	1.916-2	2.019-2	1.731-2	2.053-2	2.181-2	2.684-2	3.120-2	3.794-2
20					2.652-1	5.609-2	2.072-2	1.863-2	2.026-2	1.793-2	2.171-2	2.335-2	2.886-2	3.361-2	4.101-2
21						2.605-1	6.616-2	1.946-2	1.877-2	1.785-2	2.252-2	2.437-2	3.047-2	3.569-2	4.357-2
22							3.253-1	5.989-2	1.782-2	1.574-2	2.015-2	2.282-2	2.911-2	4.451-2	4.215-2
23								3.221-1	5.461-2	1.566-2	2.000-2	2.367-2	3.064-2	3.673-2	4.508-2
24									4.543-1	4.037-2	1.384-2	1.742-2	2.409-2	2.929-2	3.648-2
25										4.733-1	1.783-2	1.491-2	2.140-2	2.709-2	3.441-2
26											3.343-1	9.269-2	2.426-2	3.300-2	4.361-2
27												5.094-1	3.033-2	2.955-2	4.143-2
28													2.791-1	3.830-2	4.572-2
29														3.686-1	7.747-2
30															4.034-1
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
16	2.515-2	3.169-2	8.85-11	2.512-2	5.778-3	4.017-3	2.723-3	1.555-3	3.347-3	1.608-3	1.574-3	2.083-3	1.813-3	4.081-3	2.015-2
17	2.595-2	3.186-2	8.95-11	2.581-2	5.930-3	4.123-3	2.795-3	1.596-3	3.400-3	1.648-3	1.613-3	2.135-3	1.858-3	4.185-3	2.068-2
18	2.796-2	3.482-2	9.57-11	2.871-2	6.606-3	4.594-3	3.122-3	1.784-3	3.763-3	1.839-3	1.802-3	2.385-3	2.073-3	4.653-3	2.301-2
19	3.033-2	3.836-2	1.04-10	3.122-2	7.178-3	4.990-3	3.384-3	1.932-3	4.116-3	1.996-3	1.954-3	2.587-3	2.251-3	5.064-3	2.503-2
20	3.364-2	4.205-2	1.13-10	3.400-2	7.816-3	5.433-3	3.681-3	2.102-3	4.494-3	2.173-3	2.127-3	2.816-3	2.450-3	5.517-3	2.726-2
21	3.581-2	4.469-2	1.20-10	3.611-2	8.295-3	5.765-3	3.903-3	2.228-3	4.771-3	2.305-3	2.255-3	2.985-3	2.598-3	5.858-3	2.894-2
22	3.466-2	4.325-2	1.16-10	3.507-2	8.050-3	5.594-3	3.782-3	2.158-3	4.617-3	2.233-3	2.183-3	2.891-3	2.517-3	5.689-3	2.809-2
23	3.712-2	4.633-2	1.24-10	3.789-2	8.689-3	6.037-3	4.075-3	2.324-3	4.957-3	2.404-3	2.378-3	3.111-3	2.711-3	6.145-3	3.033-2
24	3.014-2	3.764-2	1.03-10	3.259-2	7.436-3	5.161-3	3.455-3	1.969-3	4.097-3	2.029-3	1.972-3	2.619-3	2.292-3	5.276-3	2.597-2
25	2.858-2	3.574-2	9.96-11	3.443-2	7.790-3	5.398-3	3.564-3	2.028-3	4.027-3	2.075-3	2.000-3	2.666-3	2.351-3	5.555-3	2.723-2
26	3.663-2	4.601-2	1.29-10	4.561-2	1.028-2	7.120-3	4.672-3	2.656-3	5.219-3	2.715-3	2.605-3	3.479-3	3.078-3	7.353-3	3.597-2
27	3.562-2	4.505-2	1.34-10	4.152-2	9.377-3	6.495-3	4.275-3	2.431-3	4.955-3	2.500-3	2.405-3	3.206-3	2.830-3	6.709-3	3.282-2
28	4.168-2	4.364-2	1.66-10	9.010-2	1.975-2	1.359-2	8.487-3	4.797-3	7.564-3	4.761-3	4.406-3	5.986-3	5.464-3	1.435-2	6.935-2
29	6.379-2	8.596-2	2.83-10	5.039-2	1.153-2	8.008-3	5.397-3	3.077-3	8.034-3	3.310-3	3.236-3	4.265-3	3.698-3	8.296-3	4.057-2
30	6.889-2	9.332-2	4.08-10	5.841-2	1.331-2	9.234-3	6.176-3	3.517-3	8.958-3	3.766-3	3.664-3	4.840-3	4.215-3	9.595-3	4.684-2

Table 4 - 3b Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for EXCELLOX-3 Cask

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
31	3.764-1	1.050-1	8.12-10	7.772-2	1.749-2	1.211-2	7.933-3	4.508-3	1.067-2	4.764-3	4.574-3	6.080-3	5.357-3	1.268-2	6.160-2
32		2,983-1	3.459-9	1.456-1	3.158-2	2.169-2	1.327-2	7.482-3	1.208-2	7.458-3	6.803-3	9.283-3	8.561-3	2.322-2	1.106-1
33			8.801-5	2.442-4	4.614-4	5.370-4	9.567-4	7.860-4	1.199-3	1.237-3	1.821-3	3.075-3	3.140-3	5.442-3	1.612-1
34				1.484-4	4.600-4	5.820-4	1.067-4	8.900-4	1.368-3	1.418-3	2.096-3	3.554-3	3.642-3	6.336-3	1.412-1
35					1.980-4	5.493-4	1.158-4	1.020-3	1.603-3	1.681-3	2.504-3	4.277-3	4.413-3	7.735-3	1.162-1
36						1.720-4	1.047-3	1.069-3	1.775-3	1.911-3	2.883-3	4.969-3	5.166-3	9.131-3	9.370-2
37							4.320-4	9.221-4	1.780-3	2.041-3	3.162-3	5.525-3	5.790-3	1.032-2	7.467-2
38								3.019-4	1.451-3	2.004-3	3.324-3	5.980-3	6.336-3	1.139-2	5.758-2
39									5.183-4	1.594-3	3.193-3	6.166-3	6.659-3	1.207-2	4.665-2
40										4.986-4	2.502-3	6.006-3	6.819-3	1.253-2	3.848-2
41											8.244-4	4.984-3	6.672-3	1.268-2	3.294-2
42												1.718-3	5.408-3	1.219-2	3.041-2
43													1.554-3	9.904-3	2.907-2
44														3.362-3	2.524-2
45															1.029-2
	N'^a							N'^a							
	46	47	48	49	50	N^a	46	47	48	49	50				
31	3.158-2	3.493-2	2.224-2	5.578-4	5.587-6	41	3.578-2	7.341-2	2.822-2	5.435-4	1.674-7				
32	5.805-2	6.233-2	4.041-2	1.189-3	2.775-5	42	3.607-2	8.628-2	3.252-2	6.215-4	1.884-7				
33	4.081-2	5.178-2	3.132-2	6.184-4	1.915-7	43	3.530-2	9.834-2	3.975-2	7.353-4	2.188-7				
34	3.881-2	4.958-2	2.902-2	5.722-4	1.075-7	44	3.304-2	9.576-2	5.691-2	9.453-4	2.411-7				
35	3.685-2	4.811-2	2.656-2	5.228-4	1.623-7	45	2.709-2	8.252-2	8.765-2	1.342-3	3.321-7				
36	3.557-2	4.822-2	2.483-2	4.875-4	1.511-7	46	8.220-3	5.942-2	1.255-1	1.942-3	4.216-7				
37	3.481-2	4.974-2	2.382-2	4.662-4	1.443-7	47		2.212-2	1.531-1	2.830-3	5.151-7				
38	3.453-2	5.309-2	2.355-2	4.592-4	1.415-7	48			1.007-1	1.810-2	2.310-6				
39	3.480-2	5.796-2	2.425-2	4.712-4	1.445-7	49				2.724-2	9.444-6				
40	3.532-2	6.481-2	2.582-2	4.997-4	1.522-7	50					7.780-4				

(H. Yamakoshi (1))

^aThe terms N and N' are, respectively, the energy group for the incident radiation and the transmitted or reflected radiation.

^bRead as 1.070×10^{-2} .

Table 4 - 3c Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for HZ-75T Cask

N ^a	N ^a														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.352-2 ^b	9.641-3	4.211-3	5.061-3	1.579-2	1.610-2	2.308-2	3.289-2	4.114-2	4.721-2	5.609-2	6.200-2	6.789-2	7.361-2	7.112-2
2		2.732-2	9.433-3	4.466-3	1.383-2	1.319-2	1.921-2	2.962-2	4.115-2	4.869-2	5.617-2	5.930-2	6.291-2	6.602-2	6.230-2
3			3.208-2	1.028-2	1.188-2	1.234-2	1.692-2	2.508-2	3.283-2	3.840-2	4.387-2	4.779-2	5.082-2	5.416-2	5.193-2
4				3.644-2	1.915-2	1.143-2	1.894-2	2.908-2	3.201-2	3.647-2	4.103-2	4.474-2	4.639-2	4.800-2	4.409-2
5					5.932-2	1.715-2	1.467-2	2.176-2	3.435-2	4.065-2	4.522-2	5.008-2	5.144-2	5.233-2	4.734-2
6						8.317-2	3.017-2	2.315-2	2.576-2	3.288-2	4.217-2	5.051-2	5.015-2	5.105-2	4.864-2
7							1.135-1	4.770-2	3.240-2	3.491-2	3.917-2	3.614-2	4.245-2	5.315-2	5.087-2
8								1.540-1	5.517-2	3.921-2	4.225-2	4.942-2	4.932-2	4.379-2	3.463-2
9									1.945-1	5.450-2	4.349-2	4.788-2	4.801-2	5.456-2	5.262-2
10										2.066-1	6.760-2	3.361-2	5.103-2	5.309-2	4.377-2
11												2.458-1	8.349-2	2.522-2	4.045-2
12													3.063-1	1.122-1	2.502-2
13														3.417-1	1.437-1
14															4.043-1
15															4.210-1
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	7.233-2	6.242-2	9.094-2	6.211-2	3.618-2	2.084-2	1.495-2	1.014-2	6.369-3	3.311-3	1.358-3	2.207-3	1.185-3	2.197-3	3.116-3
2	6.233-2	5.306-2	7.373-2	4.911-2	2.760-2	1.622-2	1.241-2	8.590-3	5.405-3	2.828-3	1.166-3	1.940-3	1.054-3	1.971-3	2.800-3
3	5.338-2	4.622-2	6.826-2	4.612-2	2.615-2	1.551-2	1.189-2	8.356-3	5.270-3	2.757-3	1.110-3	1.772-3	9.155-4	1.646-3	2.315-3
4	4.217-2	3.574-2	5.115-2	3.397-2	2.038-2	1.209-2	8.958-3	6.192-3	3.848-3	1.999-3	8.646-4	1.321-3	7.000-3	1.286-3	1.818-3
5	4.370-2	3.547-2	4.936-2	3.096-2	1.736-2	9.567-3	6.322-3	4.083-3	2.437-3	1.251-3	5.289-4	9.771-4	5.783-4	1.147-3	1.653-3
6	4.706-2	4.030-2	5.595-2	3.551-2	1.961-2	1.052-2	6.515-3	3.941-3	2.194-3	1.074-3	4.511-4	8.829-4	5.504-4	1.128-3	1.638-3
7	4.912-2	4.335-2	5.496-2	3.264-2	1.836-2	9.904-3	6.028-3	3.692-3	2.086-3	1.027-3	4.326-4	8.461-4	5.272-4	1.080-3	1.570-3
8	3.078-2	3.434-2	5.759-2	3.760-2	2.177-2	1.164-2	6.866-3	4.057-3	2.225-3	1.071-3	4.397-4	8.386-4	5.169-4	1.054-3	1.531-3
9	4.257-2	3.545-2	4.323-2	2.537-2	1.416-2	7.321-3	4.727-3	2.952-3	1.715-3	8.733-4	3.876-4	7.927-4	5.059-4	1.050-3	1.530-3
10	4.188-2	3.655-2	6.001-2	3.481-2	1.748-2	9.816-3	6.882-3	4.063-3	2.211-3	1.034-3	4.219-4	8.422-4	5.346-4	1.108-3	1.614-3
11	4.914-2	4.195-2	4.622-2	3.134-2	1.975-2	1.193-2	9.985-3	6.286-3	3.435-3	1.448-3	5.022-4	9.135-4	5.589-4	1.148-3	1.672-3
12	3.433-2	3.611-2	5.859-2	3.921-2	2.228-2	9.146-3	5.953-3	3.582-3	2.019-3	9.888-4	4.319-4	8.745-4	5.569-4	1.153-3	1.679-3
13	1.399-2	1.402-2	4.082-2	3.468-2	1.971-2	1.360-2	1.038-2	6.296-3	3.477-3	1.512-3	5.342-4	9.570-4	5.787-4	1.179-3	1.713-3
14	4.446-2	1.386-2	1.161-2	1.834-2	1.558-2	1.053-2	8.480-3	4.513-3	2.315-3	1.064-3	4.213-4	8.266-4	5.162-4	1.063-3	1.549-3
15	1.897-1	4.916-2	1.736-2	4.485-3	5.084-3	4.265-3	4.298-3	4.258-3	2.470-3	1.116-3	4.316-4	8.245-4	5.129-4	1.055-3	1.535-3

Table 4 - 3c Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for HZ-75T Cask

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45		
1	2.467-3	2.564-3	1.713-3	1.072-2	1.752-2	2.014-2	3.235-2	2.303-2	2.888-2	3.127-2	3.973-2	8.523-2	5.370-2	5.745-2	9.682-2		
2	2.219-3	2.310-3	1.261-3	9.282-3	1.766-2	2.112-2	3.594-2	2.503-2	2.993-2	3.297-2	4.016-2	8.742-2	5.663-2	5.569-2	9.018-2		
3	1.828-3	1.886-3	3.749-4	5.914-3	1.342-2	1.896-2	3.372-2	2.635-2	3.035-2	3.187-2	3.813-2	8.259-2	5.521-2	5.381-2	8.338-2		
4	1.441-3	1.503-3	1.006-4	2.806-3	7.952-3	1.484-2	2.880-2	2.863-2	2.957-2	3.180-2	3.849-2	8.014-2	5.630-2	5.448-2	7.968-2		
5	1.317-3	1.392-3	8.398-5	1.904-3	1.561-3	6.299-3	1.615-2	2.224-2	2.197-2	2.606-2	3.320-2	7.174-2	5.263-2	5.182-2	6.847-2		
6	1.303-3	1.363-3	8.751-5	1.926-3	5.596-4	7.953-4	5.965-3	1.400-2	1.528-2	1.986-2	2.598-2	6.108-2	4.632-2	4.748-2	5.846-2		
7	1.251-3	1.319-3	9.319-5	1.896-3	5.803-4	4.687-4	1.139-3	7.268-3	9.699-3	1.421-2	2.209-2	5.246-2	3.978-2	4.413-2	5.202-2		
8	1.221-3	1.297-3	1.083-4	1.860-3	6.419-4	4.715-4	5.899-4	1.825-3	4.459-3	9.785-3	1.789-2	3.994-2	3.146-2	4.107-2	4.711-2		
9	1.226-3	1.320-3	1.356-4	1.801-3	6.563-4	4.730-4	5.601-4	3.471-4	1.230-3	4.887-3	1.087-2	2.804-2	2.646-2	3.643-2	3.993-2		
10	1.289-3	1.369-3	1.572-4	2.023-3	7.338-4	5.839-4	6.720-4	3.446-4	4.789-4	1.608-3	4.965-3	2.145-2	2.476-2	3.057-2	3.135-2		
11	1.334-3	1.411-3	1.654-4	2.235-4	8.128-4	7.105-4	7.799-4	4.269-4	4.541-4	4.476-4	1.664-3	1.705-2	2.185-2	2.363-2	2.239-2		
12	1.336-3	1.391-3	4.277-5	2.352-3	6.111-4	4.629-4	3.876-4	2.171-4	2.174-4	2.121-4	5.146-4	3.800-3	1.436-2	1.905-2	1.178-2		
13	1.358-3	1.401-3	7.66-13	2.640-3	5.958-4	4.144-4	2.749-4	1.574-4	1.478-4	1.447-4	1.378-4	1.848-4	4.381-3	1.392-2	6.332-3		
14	1.234-3	1.292-3	7.37-13	2.482-3	5.593-4	3.888-4	2.571-4	1.470-4	1.382-4	1.355-4	1.288-4	1.729-4	2.273-4	7.275-3	3.833-3		
15	1.221-3	1.275-3	7.25-13	2.449-4	5.526-4	3.846-4	2.552-4	1.464-4	1.369-4	1.341-4	1.276-4	1.711-4	1.530-4	1.443-3	2.264-3		
	N^a						N^a						N^a				
	46	47	48	49	50	N^a	46	47	48	49	50						
1	5.840-2	7.466-2	5.042-3	2.401-3	7.755-5	16	9.594-4	1.023-3	6.207-4	1.612-5	2.100-7						
2	5.397-2	6.574-2	3.803-2	1.055-3	1.536-5	17	1.014-3	1.082-3	6.565-4	1.708-5	2.236-7						
3	5.015-2	6.010-2	3.324-4	6.982-4	9.389-7	18	1.045-3	1.114-3	6.771-4	1.783-5	2.436-7						
4	4.876-2	5.833-2	3.226-2	6.777-4	8.144-7	19	1.187-3	1.264-3	7.693-4	2.045-5	2.852-7						
5	4.317-2	5.197-2	2.873-2	6.182-4	1.458-6	20	1.414-3	1.505-3	9.167-4	2.449-5	3.468-7						
6	3.763-2	4.522-2	2.492-2	5.289-4	1.009-6	21	1.728-3	1.841-3	1.122-3	2.993-5	4.306-7						
7	3.368-2	4.039-2	2.231-2	4.754-4	1.001-6	22	2.069-3	2.203-3	1.344-3	3.611-5	5.311-7						
8	3.031-2	3.592-2	1.993-2	4.274-4	1.041-6	23	2.948-3	3.142-3	1.916-3	5.127-5	7.411-7						
9	2.587-2	3.028-2	1.687-2	3.630-4	9.600-7	24	4.006-3	4.251-3	2.605-3	7.250-5	1.162-7						
10	2.140-2	2.512-2	1.420-2	3.443-4	3.191-6	25	6.249-3	6.596-3	4.058-3	1.181-4	2.057-6						
11	1.675-2	1.982-2	1.160-2	3.426-4	6.349-6	26	1.070-2	1.132-2	5.960-3	1.996-4	3.535-6						
12	7.877-3	1.005-2	5.750-3	1.477-4	1.817-6	27	1.023-2	1.085-2	6.653-3	1.864-4	3.042-6						
13	3.610-3	4.829-3	2.755-3	6.069-5	2.230-7	28	3.532-2	3.708-2	2.293-2	7.000-4	1.411-5						
14	2.065-3	2.609-3	1.517-3	3.490-5	2.106-7	29	3.268-3	3.477-3	2.123-3	5.753-5	8.633-7						
15	1.134-3	1.269-3	7.575-4	1.894-5	2.067-7	30	7.332-3	7.788-3	4.768-3	1.319-4	2.099-6						

(Continued)

Table 4 - 3c Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for HZ-75T Cask

N ^a	N ^a														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	4.406-1	1.880-1	5.313-2	1.186-2	3.403-3	1.437-3	9.751-4	8.839-4	9.970-4	6.831-4	3.683-4	8.123-4	5.286-4	1.094-3	1.589-3
17		4.506-1	1.980-1	3.624-2	9.121-3	3.242-3	1.746-3	1.155-3	8.630-4	6.157-4	3.696-4	8.602-4	5.703-4	1.175-3	1.695-3
18			5.842-1	1.335-1	2.679-2	8.063-3	3.498-3	1.753-3	9.600-4	5.735-4	3.133-4	7.162-4	4.711-4	9.636-4	1.384-3
19				5.902-1	1.393-1	3.249-2	1.204-2	4.961-3	1.950-3	8.378-4	3.449-4	7.304-4	4.634-4	9.290-4	1.319-3
20					5.763-1	1.530-1	4.402-2	1.580-2	5.209-3	1.733-3	4.736-4	8.230-4	4.728-4	9.151-4	1.281-3
21						5.535-1	1.801-1	4.930-2	1.418-2	4.091-3	8.124-4	1.080-3	5.128-4	9.275-4	1.278-3
22							6.040-1	1.644-1	3.581-2	9.051-3	1.449-3	1.508-3	5.404-4	8.513-4	1.444-3
23								6.125-1	1.411-1	2.705-2	3.560-3	3.081-3	7.924-4	9.517-4	1.215-3
24									6.554-1	9.285-2	7.721-3	5.714-3	1.082-3	8.319-4	9.351-4
25										6.429-1	2.930-2	1.575-2	2.260-3	9.796-4	7.877-4
26											4.577-1	1.982-1	1.612-2	3.853-3	1.589-3
27												7.218-1	4.334-2	7.148-3	2.221-3
28													4.024-1	4.305-2	6.514-3
29														7.310-1	9.337-2
30															7.449-1
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
16	1.258-3	1.296-3	7.16-13	2.485-3	5.649-4	3.953-4	2.662-4	1.548-4	1.417-4	1.384-4	1.324-4	1.767-4	1.584-4	3.812-4	1.958-3
17	1.326-3	1.319-3	7.03-13	2.633-3	5.994-4	4.199-4	2.834-4	1.653-4	1.506-4	1.470-4	1.407-4	1.877-4	1.684-4	4.042-4	2.067-3
18	1.075-3	1.535-3	6.04-13	2.713-3	6.168-4	4.317-4	2.899-4	1.689-4	1.534-4	1.503-4	1.433-4	1.914-4	1.723-4	4.171-3	2.126-3
19	1.008-3	9.451-4	5.01-13	3.078-3	6.991-4	4.890-4	3.272-4	1.906-4	1.727-4	1.695-4	1.613-4	2.157-4	1.945-4	4.736-4	2.409-3
20	9.573-4	8.554-4	4.69-13	3.669-3	8.341-4	5.839-4	3.908-4	2.281-4	2.055-4	2.019-4	1.920-4	2.567-4	2.320-4	5.651-4	2.871-3
21	9.392-4	8.056-4	4.56-13	4.470-3	1.011-3	7.049-4	4.662-4	2.693-4	2.463-4	2.427-4	2.298-4	3.084-4	2.783-4	6.875-4	3.498-3
22	8.277-4	6.879-4	4.36-13	5.356-3	1.209-3	8.416-4	5.535-4	3.188-4	2.921-4	2.885-4	2.723-4	3.662-4	3.308-4	8.235-4	4.181-3
23	8.628-4	6.916-4	4.74-13	7.622-3	1.722-3	1.198-3	7.877-4	4.534-4	4.157-4	4.106-4	3.876-4	5.213-4	4.709-4	1.172-3	5.957-3
24	6.449-4	4.968-4	5.04-13	1.036-2	2.319-3	1.608-3	1.038-3	5.932-4	5.449-4	5.430-4	5.073-4	6.859-4	6.229-4	1.593-3	8.039-3
25	5.042-4	3.686-4	5.93-13	1.620-2	3.589-3	2.479-3	1.571-3	8.906-4	8.198-4	8.247-4	7.620-4	1.036-3	9.459-4	2.488-3	1.246-2
26	7.421-4	4.812-4	9.10-13	2.768-2	6.145-3	4.245-3	2.698-3	1.529-3	1.413-3	1.418-3	1.314-3	1.785-3	1.626-3	4.251-3	2.135-2
27	7.960-4	4.610-4	1.45-12	2.642-2	5.880-3	4.062-3	2.590-3	1.466-3	1.363-3	1.364-3	1.267-3	1.720-3	1.562-3	4.055-3	2.046-2
28	1.019-3	3.411-4	2.16-12	9.159-2	2.012-2	1.386-2	8.646-3	4.879-3	4.478-3	4.546-3	4.156-3	5.678-3	5.218-3	1.407-2	6.989-2
29	8.019-3	1.079-3	5.92-12	8.494-3	1.888-3	1.306-3	8.441-4	4.785-4	4.490-4	4.454-4	4.177-4	5.649-4	5.086-4	1.294-3	6.585-3
30	4.515-2	1.735-3	1.50-11	1.905-2	4.222-3	2.918-3	1.873-3	1.061-3	9.916-4	9.880-4	9.223-4	1.250-3	1.130-3	2.905-3	1.473-2

Table 4 - 3c Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for HZ-75T Cask

	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
31	6.301-1	1.292-2	4.24-11	5.000-2	1.105-2	7.623-3	4.852-3	2.744-3	2.551-3	2.556-3	2.372-3	2.221-3	2.926-3	7.635-3	3.847-2
32		2.966-1	2.08-10	1.523-1	3.309-2	2.275-2	1.398-2	7.871-3	7.152-3	7.336-3	6.624-3	9.082-3	8.414-3	2.332-2	1.135-1
33			8.800-5	2.443-4	4.602-4	5.342-4	9.494-4	7.786-4	1.186-3	1.220-3	1.790-3	3.009-3	3.055-3	5.249-3	1.655-1
34				1.484-4	4.595-4	5.797-4	1.060-3	8.832-4	1.355-3	1.402-3	2.065-3	3.486-3	3.553-3	6.128-3	1.451-1
35					1.980-4	5.485-4	1.154-3	1.015-3	1.593-3	1.668-3	2.477-3	4.213-3	4.324-3	7.513-3	1.194-1
36						1.720-4	1.046-3	1.067-3	1.769-3	1.902-3	2.863-3	4.914-3	5.084-3	8.911-3	9.620-2
37							4.298-4	9.222-4	1.778-3	2.036-3	3.150-3	5.484-3	5.720-3	1.011-2	7.638-2
38								3.000-4	1.451-3	2.002-3	3.318-3	5.955-3	6.285-3	1.122-2	5.851-2
39									5.156-4	1.595-3	3.191-3	6.153-3	6.624-3	1.194-2	4.701-2
40										4.979-4	2.502-3	6.001-3	6.799-3	1.243-2	3.840-2
41											8.144-4	4.982-3	6.665-3	1.261-2	3.257-2
42												1.718-3	5.407-3	1.216-2	3.004-2
43													1.552-3	9.897-3	2.888-2
44														3.362-3	2.516-2
45															1.028-2
	N'^a						N'^a								
	46	47	48	49	50	N'^a	46	47	48	49	50				
31	1.924-2	2.037-2	1.252-2	3.566-4	6.116-6	41	3.471-2	6.976-2	2.564-2	5.033-4	6.765-8				
32	5.828-2	6.062-2	3.772-2	1.226-3	2.812-5	42	3.517-2	8.268-2	2.983-2	5.802-4	7.856-8				
33	4.043-2	4.960-2	2.912-2	5.880-4	1.031-7	43	3.468-2	9.511-2	3.699-2	6.940-4	9.553-8				
34	3.835-2	4.735-2	2.689-2	5.424-4	9.507-8	44	3.267-2	9.331-2	5.412-2	9.053-4	1.303-7				
35	3.629-2	4.574-2	2.449-2	4.931-4	8.646-8	45	2.698-2	8.115-2	8.493-2	1.305-3	1.661-7				
36	3.487-2	4.563-2	2.274-2	4.569-4	8.018-8	46	8.224-3	5.896-2	1.232-1	1.910-3	2.498-7				
37	3.396-2	4.690-2	2.168-2	4.341-4	7.629-8	47		2.204-2	1.514-1	2.808-3	3.593-7				
38	3.354-2	4.998-2	2.132-2	4.250-4	7.483-8	48			1.003-1	1.811-2	2.223-6				
39	3.372-2	5.462-2	2.192-2	4.350-4	7.673-8	49				2.724-2	9.461-5				
40	3.422-2	6.127-2	2.336-2	4.613-4	6.164-8	50					7.780-4				

(H. Yamakoshi⁽¹⁾)

^aThe terms N and N' are, respectively, the energy group for the incident radiation and the transmitted or reflected radiation.

^bRead as 2.352×10^{-2} .

Table 4 - 3d Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from
the Fuel- Basket Region in the TN-12A Cask

N	N'														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	4.489-2	2.804-2	1.258-2	1.067-2	2.901-2	1.648-2	1.813-2	2.184-2	2.606-2	2.811-2	3.008-2	3.133-2	3.173-2	3.506-2	4.103-2
2		4.459-2	3.612-2	1.580-2	2.540-2	1.646-2	1.888-2	2.200-2	2.549-2	2.755-2	2.972-2	3.100-2	3.113-2	3.450-2	3.980-2
3			4.978-2	4.355-2	3.510-2	1.531-2	1.843-2	2.036-2	2.492-2	2.812-2	3.089-2	3.157-2	3.151-2	3.444-2	4.033-2
4				5.710-2	8.158-2	2.591-2	2.122-2	2.122-2	2.547-2	2.672-2	2.783-2	2.905-2	2.935-2	3.282-2	3.806-2
5					1.013-1	5.801-2	3.481-2	3.010-2	3.307-2	3.215-2	3.354-2	3.186-2	3.032-2	3.318-2	3.401-2
6						8.870-2	8.351-2	4.968-2	3.113-2	3.132-2	3.445-2	3.673-2	3.777-2	4.051-2	4.384-2
7							1.055-1	1.061-1	5.866-2	4.142-2	3.276-2	3.495-2	3.610-2	3.832-2	4.231-2
8								1.323-1	1.181-1	5.522-2	4.759-2	3.772-2	3.309-2	3.330-2	3.936-2
9									1.497-1	1.341-1	5.122-2	4.541-2	4.439-2	4.108-2	4.233-2
10										1.703-1	1.512-1	5.240-2	3.456-2	4.436-2	5.100-2
11											1.856-1	1.652-1	6.242-2	3.760-2	3.946-2
12												1.933-1	1.900-1	8.697-2	5.708-2
13													2.004-1	2.215-1	1.159-1
14														2.310-1	2.452-1
15															2.323-1

Table 4 - 3d Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from
the Fuel- Basket Region in the TN-12A Cask

N	N'														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	3.753-2	2.542-2	6.060-2	5.146-2	4.679-2	1.164-2	4.282-2	7.889-3	3.119-2	1.607-2	6.579-3	1.978-3	3.383-4	1.323-5	3.024-7
2	3.597-2	2.416-2	5.664-2	4.699-2	4.223-2	1.035-2	3.844-2	7.053-3	2.820-2	1.457-2	5.978-3	1.799-3	3.086-4	1.228-5	3.593-7
3	3.620-2	2.392-2	5.616-2	4.691-2	4.210-2	1.026-2	3.815-2	6.971-3	2.801-2	1.449-2	5.946-3	1.790-3	3.067-4	1.216-5	3.448-7
4	3.410-2	2.294-2	5.419-2	4.519-2	4.047-2	9.839-3	3.679-2	6.727-3	2.699-2	1.394-2	5.712-3	1.718-3	2.938-4	1.146-5	2.675-7
5	3.415-2	2.262-2	5.204-2	4.247-2	3.770-2	9.103-3	3.401-2	6.197-3	2.508-2	1.300-2	5.347-3	1.611-3	2.755-4	1.065-5	2.194-7
6	3.748-2	3.385-2	5.292-2	4.310-2	3.801-2	9.138-3	3.387-2	6.149-3	2.478-2	1.282-2	5.259-3	1.582-3	2.693-4	1.016-5	1.538-7
7	3.541-2	2.392-2	5.443-2	4.390-2	3.802-2	9.084-3	3.312-2	6.023-3	2.403-2	1.241-2	5.084-3	1.528-3	2.603-4	9.880-6	1.675-7
8	3.641-2	2.427-2	5.402-2	4.294-2	3.744-2	8.929-3	3.280-2	5.990-3	2.400-2	1.242-2	5.098-3	1.534-3	2.615-4	9.937-6	1.722-7
9	3.581-2	2.233-2	5.005-2	4.165-2	3.730-2	9.203-3	3.358-2	6.164-3	2.442-2	1.261-2	5.168-3	1.554-3	2.648-4	1.008-5	1.798-7
10	4.273-2	2.636-2	5.689-2	4.378-2	3.742-2	8.914-3	3.296-2	5.994-3	2.410-2	1.246-2	5.105-3	1.534-3	2.610-4	9.797-6	1.389-7
11	3.986-2	3.085-2	6.546-2	4.947-2	4.239-2	1.015-2	3.655-2	6.611-3	2.596-2	1.332-2	5.429-3	1.626-3	2.761-4	1.035-5	1.403-7
12	3.716-2	2.137-2	5.424-2	5.040-2	4.391-2	1.081-2	3.764-2	6.746-3	2.586-2	1.319-2	5.344-3	1.596-3	2.705-4	1.013-5	1.357-7
13	6.206-2	2.930-2	5.175-2	3.949-2	3.541-2	8.562-3	3.196-2	6.046-3	2.369-2	1.216-2	4.942-3	1.475-3	2.506-4	9.519-6	1.610-7
14	1.045-1	4.466-2	6.412-2	4.179-2	3.475-2	8.011-3	3.002-2	5.384-3	2.193-2	1.145-2	4.692-3	1.407-3	2.390-4	8.973-6	1.258-7
15	2.259-1	8.379-2	9.922-2	5.787-2	4.281-2	9.196-3	3.335-2	5.935-3	2.423-2	1.253-2	5.142-3	1.546-3	2.628-4	9.803-6	1.245-7

Table 4 - 3d Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from
the Fuel- Basket Region in the TN-12A Cask

N'															
N	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	2.372-1	1.995-1	1.630-1	8.017-2	5.391-2	1.117-2	3.794-2	6.544-3	2.570-2	1.311-2	5.323-3	1.593-3	2.701-4	1.007-5	1.278-7
17		2.085-1	3.405-1	1.193-1	6.864-2	1.342-2	4.163-2	7.046-3	2.611-2	1.303-2	5.202-3	1.542-3	2.602-4	9.698-6	1.231-7
18			3.808-1	2.216-1	9.697-2	1.780-2	5.151-2	8.595-3	3.072-2	1.513-2	5.984-3	1.764-3	2.969-4	1.106-5	1.404-7
19				3.908-1	2.371-1	3.288-2	7.767-2	1.238-2	3.972-2	1.879-2	7.199-3	2.084-3	3.476-4	1.295-5	1.644-7
20					5.110-1	8.950-2	1.264-1	1.828-2	4.918-2	2.183-2	7.960-3	2.239-3	3.604-4	1.372-5	1.742-7
21						2.118-1	4.372-1	4.460-2	8.386-2	3.299-2	1.096-2	2.928-3	3.702-4	1.748-5	2.221-7
22							5.146-1	8.797-2	1.243-1	4.622-2	1.475-2	3.863-3	6.146-4	2.283-5	2.902-7
23								3.057-1	3.705-1	7.967-2	1.909-2	4.314-3	6.425-4	2.375-5	3.026-7
24									4.692-1	7.765-1	3.456-2	7.439-3	1.087-3	4.006-5	5.097-7
25										4.831-1	1.180-1	1.879-2	2.463-3	8.982-5	1.145-6
26											4.866-1	7.951-2	7.420-3	2.604-4	3.333-6
27												4.162-1	5.342-2	1.538-3	1.977-5
28													3.180-1	1.888-2	2.055-4
29														2.052-1	8.336-3
30															9.568-2

N	N'		N	N'		N	N'	
	31	32		31	32		31	32
1	1.245-8	5.14-11	16	4.04-10	3.05-13	31	3.109-2	5.319-4
2	2.036-8	3.92-11	17	3.89-10	2.94-13	32		7.207-3
3	2.801-8	3.50-11	18	4.44-10	3.35-13			
4	1.366-8	3.50-11	19	5.20-10	3.93-13			
5	9.678-9	3.24-11	20	5.50-10	3.15-13			
6	3.482-9	8.67-12	21	7.02-10	5.30-13			
7	5.429-9	8.83-12	22	9.17-10	6.93-13			
8	5.386-9	8.86-12	23	9.56-10	7.22-13			
9	8.136-9	9.80-12	24	1.600-9	1.22-12			
10	2.406-9	5.11-12	25	3.582-9	2.73-12			
11	1.349-9	6.18-12	26	1.034-8	7.91-12			
12	9.81-10	1.92-11	27	6.034-8	4.68-11			
13	4.724-9	2.76-10	28	6.227-7	4.90-10			
14	1.598-9	9.08-11	29	1.989-5	1.671-8			
15	4.00-10	5.90-13	30	1.959-3	1.259-6			

Matrix M_b for the Current of Gamma Rays Reflected from the Fuel-Basket Region of TN-12A Cask

N (Ng)	N' (N'g)														
	33(1)	34(2)	35(3)	36(4)	37(5)	38(6)	39(7)	40(8)	41(9)	42(10)	43(11)	44(12)	45(13)	46(14)	47(15)
33(1)	2.323-1	2.259-1	8.379-2	9.922-2	5.787-2	4.281-2	9.196-3	3.335-2	5.935-3	2.423-2	1.253-2	5.142-3	1.546-3	2.628-4	9.803-6
34(2)		2.372-1	1.995-1	1.630-1	8.017-2	5.391-2	1.117-2	3.794-2	6.544-3	2.569-2	1.311-2	5.322-3	1.593-3	2.701-4	1.007-5
35(3)			2.085-1	3.405-1	1.193-1	6.864-2	1.342-2	4.163-2	7.046-3	2.611-2	1.303-2	5.202-3	1.542-3	2.602-4	9.698-6
36(4)				3.808-1	2.216-1	9.697-2	1.780-2	5.151-2	8.595-3	3.072-2	1.513-2	5.984-3	1.764-3	2.969-4	1.106-5
37(5)					3.908-1	2.371-1	3.288-2	7.767-2	1.238-2	3.972-2	1.879-2	7.200-3	2.084-3	3.476-4	1.295-5
38(6)						5.110-1	8.950-2	1.264-1	1.828-2	4.918-2	2.183-2	7.960-3	2.239-3	3.685-4	1.372-5
39(7)							2.118-1	4.372-1	4.460-2	8.386-2	3.299-2	1.096-2	2.928-3	4.702-4	1.748-5
40(8)								5.146-1	8.797-2	1.243-1	4.622-2	1.475-2	3.862-3	6.146-4	2.283-5
41(9)									3.057-1	3.705-1	7.967-2	1.909-2	4.314-3	6.425-4	2.375-5
42(10)										4.692-1	1.765-1	3.456-2	7.439-3	1.087-3	4.006-5
43(11)											4.831-1	1.180-1	1.879-2	2.463-3	8.982-5
44(12)												4.866-1	7.951-2	7.420-3	2.604-4
45(13)													4.162-1	5.342-2	1.538-3
46(14)														3.180-1	1.888-2
47(15)															2.052-1

- 77 -

N (Ng)	N' (N'g)			N (Ng)	N' (N'g)		
	48(16)	49(17)	50(18)		48(16)	49(17)	50(18)
33(1)	1.245-7	4.00-10	5.90-13	48(16)	9.568-2	1.950-3	1.259-6
34(2)	1.278-7	4.04-10	3.05-13	49(17)		3.109-2	5.319-4
35(3)	1.231-7	3.89-10	2.94-13	50(18)			7.207-3
36(4)	1.404-7	4.44-10	3.35-13				
37(5)	1.644-7	5.19-10	3.93-13				
38(6)	1.742-7	5.50-10	3.15-13				
39(7)	2.221-7	7.02-10	5.30-13				
40(8)	2.902-7	9.17-10	6.93-13				
41(9)	3.026-7	9.56-10	7.22-13				
42(10)	5.097-7	1.600-9	1.22-15				
43(11)	1.145-6	3.582-9	2.73-12				
44(12)	3.333-6	1.034-8	7.91-12				
45(13)	1.977-5	6.035-8	4.68-11				
46(14)	2.055-4	6.227-7	4.90-10				
47(15)	8.336-3	1.981-5	1.671-4				

Table 4 - 3e Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from the
Bottle Region of the EXCELLOX-3 Cask

N	N'															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	1.782-2	1.684-2	8.735-3	7.327-3	1.581-2	8.345-3	5.602-3	7.976-3	5.630-3	4.584-3	4.932-3	3.384-3	2.585-3	3.544-3	2.474-3	
2		1.644-2	2.358-2	9.517-3	1.358-2	7.093-3	8.918-3	6.965-3	7.338-3	4.438-3	4.111-3	4.328-3	2.861-3	3.086-3	3.434-3	
3			1.489-2	2.228-2	1.697-2	6.356-3	5.542-3	8.266-3	5.804-3	7.441-3	5.581-3	4.538-3	4.044-3	3.737-3	3.181-3	
4				1.400-2	3.194-2	8.362-3	7.027-3	6.598-3	7.477-3	3.933-3	6.297-3	3.987-3	3.928-3	4.965-3	3.602-3	
5					2.264-2	1.651-2	9.207-3	8.603-3	6.618-3	5.981-3	5.981-3	5.088-3	4.701-3	4.604-3	4.342-3	
6						1.271-2	2.697-2	1.279-2	8.176-3	6.957-3	5.609-3	7.209-3	4.169-3	6.789-3	4.456-3	
7							1.388-2	3.363-2	9.661-3	7.615-3	7.141-3	5.886-3	6.556-3	5.863-3	6.733-3	
8								9.828-3	1.615-2	6.639-3	6.925-3	6.622-3	4.700-3	7.800-3	4.580-3	
9									7.352-3	1.570-2	7.759-3	7.070-3	6.146-3	6.379-3	7.393-3	
10										9.307-3	2.284-2	9.396-3	6.899-3	8.704-3	6.040-3	
11												8.667-3	2.445-2	8.278-3	9.486-3	7.615-3
12													9.936-3	2.618-2	1.444-2	8.535-3
13														7.028-3	4.997-2	1.214-2
14															7.936-3	2.244-2
15																7.546-3

Table 4 - 3e Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from the
Bottle Region of the EXCELLOX-3 Cask

N	N'														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	2.149-3	1.635-3	3.395-3	2.461-3	2.190-3	1.522-3	1.784-3	1.559-3	1.982-3	1.748-3	2.109-3	1.959-3	2.764-3	2.600-3	3.695-3
2	2.392-3	1.691-3	3.814-3	2.788-3	2.249-3	1.789-3	1.996-3	1.699-3	2.233-3	1.951-3	2.344-3	2.186-3	3.074-3	2.887-3	4.091-3
3	3.538-3	2.009-3	4.108-3	3.524-3	2.608-3	2.148-3	2.386-3	2.009-3	2.650-3	2.308-3	2.773-3	2.585-3	3.626-3	3.397-3	4.799-3
4	3.272-3	3.018-3	4.690-3	4.227-3	3.114-3	2.248-3	2.896-3	2.329-3	3.062-3	2.676-3	3.197-3	2.978-3	4.164-3	3.889-3	5.471-3
5	3.877-3	2.532-3	5.926-3	4.206-3	3.898-3	2.602-3	3.290-3	2.792-3	3.503-3	3.177-3	3.750-3	3.486-3	4.870-3	4.537-3	6.360-3
6	4.399-3	3.708-3	6.329-3	5.644-3	4.382-3	3.465-3	3.758-3	3.536-3	4.238-3	3.869-3	4.542-3	4.186-3	5.836-3	5.397-3	7.501-3
7	4.477-3	3.671-3	7.679-3	6.782-3	4.655-3	4.115-3	4.365-3	4.013-3	4.877-3	4.406-3	5.175-3	4.739-3	6.589-3	6.058-3	8.362-3
8	6.453-3	3.418-3	8.571-3	6.190-3	5.708-3	3.936-3	5.204-3	4.094-3	5.614-3	4.801-3	5.812-3	5.292-3	7.358-3	6.764-3	9.328-3
9	4.365-3	5.710-3	8.890-3	7.324-3	6.805-3	4.206-3	5.955-3	4.586-3	6.338-3	5.375-3	6.551-3	5.932-3	8.204-3	7.506-3	1.028-2
10	7.422-3	3.967-3	1.043-2	9.101-3	6.577-3	5.643-3	6.449-3	5.469-3	7.181-3	6.094-3	7.398-3	6.659-3	9.143-3	8.300-3	1.126-2
11	5.725-3	6.582-3	1.213-2	8.891-3	7.712-3	6.543-3	6.541-3	6.534-3	7.892-3	6.884-3	8.228-3	7.381-3	1.007-2	9.084-3	1.224-2
12	7.461-3	5.130-3	1.200-3	1.091-2	9.343-3	5.876-3	8.355-3	7.225-3	8.453-3	7.930-3	9.120-3	8.181-3	1.106-2	9.903-3	1.321-2
13	8.477-3	7.046-3	1.446-2	1.218-2	9.263-3	7.492-3	9.299-3	7.163-3	9.808-3	8.651-3	9.737-3	8.854-3	1.175-2	1.041-2	1.371-2
14	7.990-3	6.386-3	1.281-2	1.142-2	1.051-2	8.501-3	9.310-3	8.013-3	1.088-2	9.528-3	1.081-2	9.945-3	1.315-2	1.173-2	1.544-2
15	1.858-2	6.597-3	1.448-2	1.288-2	1.111-2	7.256-3	1.017-2	9.557-3	1.185-2	1.009-2	1.191-2	1.081-2	1.424-2	1.264-2	1.652-2

Table 4 - 3e Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from the Bottle Region of the EXCELLOX-3 Cask

N	N'														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	7.966-3	1.477-2	1.560-2	1.184-2	1.094-2	9.703-3	1.166-2	1.037-2	1.298-2	1.080-2	1.339-2	1.188-2	1.558-2	1.372-2	1.779-2
17		1.205-2	4.564-2	1.626-2	1.380-2	1.044-2	1.313-2	1.055-2	1.425-2	1.288-2	1.465-2	1.277-2	1.652-2	1.425-2	1.811-2
18			2.223-2	2.192-2	1.213-2	1.034-2	1.331-2	1.229-2	1.571-2	1.411-2	1.621-2	1.400-2	1.851-2	1.586-2	2.007-2
19				1.526-2	1.715-2	9.559-3	1.382-2	1.283-2	1.798-2	1.585-2	1.860-2	1.650-2	2.133-2	1.807-2	2.260-2
20					1.229-2	1.406-2	1.325-2	1.367-2	2.011-2	1.794-2	2.118-2	1.883-2	2.397-2	2.003-2	2.478-2
21						9.296-3	1.651-2	1.393-2	1.983-2	2.000-2	2.447-2	2.090-2	2.664-2	2.204-2	2.686-2
22							1.149-2	1.484-2	2.069-2	2.109-2	2.559-2	2.320-2	2.953-2	2.443-2	2.909-2
23								1.024-2	2.055-2	2.156-2	2.833-2	2.636-2	3.273-2	2.687-2	3.157-2
24									1.314-2	2.079-2	2.930-2	2.823-2	3.715-2	3.006-2	3.485-2
25										1.242-2	2.803-2	2.968-2	4.190-2	3.386-2	3.913-2
26											1.546-2	2.866-2	4.455-2	3.901-2	4.471-2
27												1.531-2	4.417-2	4.354-2	5.153-2
28													2.426-2	4.524-2	6.033-2
29														2.433-2	6.708-2
30															4.121-2

N	N'				N	N'		
	31	32	31	32		31	32	
1	3.860-3	4.781-2	16	1.683-2	1.207-1	31	4.760-2	2.989-1
2	4.260-3	5.142-2	17	1.679-2	1.117-1	32		3.412-1
3	4.978-3	5.846-2	18	1.851-2	1.207-1			
4	5.648-3	6.439-2	19	2.054-2	1.266-1			
5	6.537-3	7.209-2	20	2.218-2	1.297-1			
6	7.638-3	7.956-2	21	2.370-2	1.322-1			
7	8.452-3	8.443-2	22	2.523-2	1.345-1			
8	9.415-3	9.305-2	23	2.698-2	1.373-1			
9	1.031-2	9.794-2	24	2.928-2	1.416-1			
10	1.117-2	1.005-1	25	3.227-2	1.476-1			
11	1.204-2	1.038-1	26	3.609-2	1.559-1			
12	1.286-2	1.054-1	27	4.129-1	1.672-1			
13	1.318-2	1.022-1	28	4.860-2	1.824-1			
14	1.483-2	1.143-1	29	5.962-2	2.064-1			
15	1.577-2	1.178-1	30	7.152-2	2.407-1			

Table 4 - 3e Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from the Bottle Region of the EXCELLOX-3 Cask

N (N _g)	N' (N' _g)														
	33(1)	34(2)	35(3)	36(4)	37(5)	38(6)	39(7)	40(8)	41(9)	42(10)	43(11)	44(12)	45(13)	46(14)	47(15)
33(1)	5.621-2	3.520-3	3.761-3	2.831-3	3.493-3	2.169-3	2.684-3	2.300-3	2.868-3	4.058-3	3.542-3	5.273-3	4.397-2	1.729-2	2.196-2
34(2)		5.393-2	4.600-3	3.359-3	4.052-3	2.483-3	3.046-3	2.602-3	3.236-3	4.575-3	4.001-3	5.973-3	3.957-2	1.718-2	2.214-2
35(3)			4.834-2	4.401-3	5.077-3	3.024-3	3.646-3	3.082-3	3.809-3	5.368-3	4.708-3	7.062-3	3.458-2	1.753-2	2.334-2
36(4)				4.137-2	6.392-3	3.667-3	4.323-3	3.595-3	4.410-3	6.168-3	5.415-3	8.160-3	3.046-2	1.826-2	2.544-2
37(5)					3.759-2	4.341-3	4.992-3	4.080-3	4.944-3	6.856-3	6.012-3	9.091-3	2.737-2	1.913-2	2.814-2
38(6)						3.169-2	5.706-3	4.585-3	5.485-3	7.537-3	6.558-3	9.938-3	2.494-2	2.017-2	3.171-2
39(7)							2.856-2	4.950-3	5.882-3	8.040-3	6.960-3	1.055-2	2.366-2	2.117-2	3.568-2
40(8)								2.503-2	6.119-3	8.428-3	7.307-3	1.104-2	2.286-2	2.216-2	4.056-2
41(9)									2.248-2	8.533-3	7.549-3	1.143-2	2.246-2	2.303-2	4.639-2
42(10)										2.074-2	7.369-3	1.163-2	2.253-2	2.376-2	5.461-2
43(11)											1.767-2	1.093-2	2.248-2	2.388-2	6.256-2
44(12)												1.706-2	2.106-2	2.330-2	6.248-2
45(13)													1.967-2	2.065-2	5.666-2
46(14)														1.635-2	4.565-2
47(15)															2.685-2

N (N _g)	N' (N' _g)			N(N _g)	N' (N' _g)		
	48(16)	49(17)	50(18)				
33(1)	2.781-2	1.764-2	4.242-4	48(16)	1.364-1	1.488-1	2.882-3
34(2)	2.718-2	1.717-2	4.127-4	49(17)		2.744-1	9.316-3
35(3)	2.725-2	1.706-2	4.099-4	50(18)			1.393-1
36(4)	2.813-2	1.743-2	4.183-4				
37(5)	2.957-2	1.814-2	4.348-4				
38(6)	3.169-2	1.923-2	4.605-4				
39(7)	3.425-2	2.059-2	4.925-4				
40(8)	3.748-2	2.230-2	5.330-4				
41(9)	4.148-2	2.441-2	5.829-4				
42(10)	4.747-2	2.749-2	6.559-4				
43(11)	5.624-2	3.144-2	7.497-4				
44(12)	7.356-2	3.700-2	8.814-4				
45(13)	1.041-1	4.642-2	1.102-3				
46(14)	1.404-1	5.887-2	1.387-3				
47(15)	1.717-1	7.538-2	1.740-3				

Table 4 - 4 Wall Structure of 50-Ton Cask at CRIEPI

		50ton Cask	
Cavity		-	34.3
Region Number in the Cask Wall	1	Steel	3.7
	2	Lead	14.6
	3	Steel	8.0
	4	Resin	10.0
	5	Copper	0.8
	6	Copper (Fin)	22.0
	7		
	8		
	9		

(H. Yamakoshi (1))

Table 4 - 5 Calculated Values of Characteristic Functions CFSN, CFSSG and CFSPG for 50-Ton Cask at CRIEPI

Energy Group, N	Upper Limit of Energy Group, E_N (eV)	CFSN (mrem/h)	CFSSG (mrem/h)
1	1.4918+7*	1.554-3	3.242-4
2	1.2214+7	1.236-3	2.802-4
3	1.0000+7	9.413-4	2.324-4
4	8.1273+6	8.294-4	1.974-4
5	6.7032+6	6.327-4	1.829-4
6	4.4933+6	4.870-4	1.759-4
7	3.6788+6	4.651-4	1.730-4
8	3.0199+6	4.888-4	1.762-4
9	2.4660+6	4.840-4	1.762-4
10	2.0190+6	4.035-4	1.752-4
11	1.6530+6	3.560-4	1.750-4
12	1.3534+6	2.873-4	1.679-4
13	1.1080+6	2.465-4	1.649-4
14	9.0818+5	1.945-4	1.570-4
15	7.4274+5	1.400-4	1.560-4
16	6.0810+5	1.048-4	1.538-4
17	4.9787+5	8.340-5	1.466-4
18	4.0762+5	5.633-5	1.167-4
19	2.7324+5	3.842-5	9.159-5
20	1.8316+5	2.640-5	6.974-5
21	1.2277+5	1.663-5	5.172-5
22	8.6517+4	9.258-6	3.220-5
23	5.2475+4	5.612-6	2.289-5
24	3.1828+4	1.506-6	8.568-6
25	1.5034+4	7.012-7	5.314-6
26	7.1017+3	1.500-6	1.219-5
27	2.6126+3	1.565-6	1.193-5
28	9.6112+2	1.509-6	8.667-6
29	2.1445+2	1.343-5	6.190-5
30	4.7851+1	6.637-6	3.975-5
31	5.0435+0	1.130-6	1.314-5
32	4.1400-1	1.242-9	7.517-7

Energy Group, N	Upper Limit of Energy Group, E_N (eV)	CFSPG (mrem/h)
33	1.0000+7	2.899-8
34	8.0000+6	3.767-8
35	6.5000+6	4.189-8
36	5.0000+6	3.788-8
37	4.0000+6	2.905-8
38	3.0000+6	1.698-8
39	2.5000+6	8.150-9
40	2.0000+6	2.591-9
41	1.6600+6	5.900-10
42	1.3300+6	5.090-11
43	1.0000+6	8.896-13
44	8.0000+5	9.978-14
45	6.0000+5	8.155-15
46	4.0000+5	9.314-19
47	3.0000+5	3.600-23
48	2.0000+5	4.379-34
49	1.0000+5	4.879-48
50	5.0000+4	<1.0-50

*Read as 1.4918×10^7

(H. Yamakoshi (1))

Table 4 - 6a Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for 50-Ton Cask at CRIEPI

N ^a	N ^a														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.410-2 ^b	9.919-3	3.559-3	4.314-3	1.542-2	1.555-2	2.040-2	2.702-2	3.210-2	3.603-2	4.243-2	4.934-2	5.602-2	6.431-2	6.598-2
2		1.611-2	9.636-3	4.102-3	1.341-2	1.327-2	1.815-2	2.566-2	3.327-2	3.819-2	4.266-2	4.688-2	5.142-2	5.659-2	5.612-2
3			1.991-2	1.069-2	1.133-2	1.192-2	1.646-2	2.338-2	2.971-2	3.420-2	3.807-2	4.275-2	4.629-2	5.068-2	4.990-2
4				2.435-2	1.981-2	1.054-2	1.613-2	2.410-2	2.897-2	3.340-2	3.740-2	4.249-2	4.530-2	4.895-2	4.709-2
5					4.490-2	1.687-2	1.381-2	1.892-2	2.832-2	3.463-2	3.919-2	4.541-2	4.862-2	5.271-2	5.070-2
6						5.878-2	2.601-2	2.101-2	2.353-2	3.022-2	3.637-2	4.526-2	4.824-2	5.303-2	5.231-2
7							7.661-2	3.795-2	2.696-2	3.191-2	3.745-2	3.671-2	4.193-2	5.367-2	5.408-2
8								1.040-1	4.386-2	3.080-2	3.925-2	4.904-2	5.220-2	4.809-2	4.083-2
9									1.380-1	4.568-2	3.381-2	4.532-2	5.126-2	6.086-2	6.102-2
10										1.510-1	5.928-2	2.780-2	4.757-2	5.526-2	5.243-2
11											1.899-1	8.401-2	2.352-2	3.834-2	4.872-2
12												2.596-1	1.180-1	3.165-2	2.189-2
13													2.961-1	1.587-1	4.638-2
14														3.529-1	1.810-1
15															3.729-1
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	6.911-2	6.851-2	1.032-1	7.300-2	4.672-2	2.775-2	1.986-2	1.480-2	8.184-3	3.845-3	7.082-4	1.204-3	2.231-4	4.905-4	8.882-4
2	5.683-2	5.553-2	7.922-2	5.435-2	3.386-2	2.048-2	1.545-2	1.178-2	6.495-3	3.054-3	5.397-4	9.588-4	1.768-4	4.153-4	7.622-4
3	5.010-2	4.913-2	7.201-2	4.959-2	3.076-2	1.852-2	1.377-2	1.054-2	5.778-3	2.729-3	4.721-4	8.776-4	1.614-4	3.636-4	6.436-4
4	4.544-2	4.365-2	6.238-2	4.210-2	2.631-2	1.568-2	1.129-2	8.495-3	4.580-3	2.131-3	3.534-4	6.634-4	1.211-4	2.950-4	5.422-4
5	4.832-2	4.549-2	6.388-2	4.205-2	2.556-2	1.471-2	1.004-2	7.261-3	3.817-3	1.721-3	2.716-4	4.903-4	8.820-5	2.622-4	5.061-4
6	5.096-2	4.884-2	6.908-2	4.564-2	2.759-2	1.571-2	1.047-2	7.408-3	3.834-3	1.699-3	2.642-4	4.571-4	8.127-5	2.539-4	4.944-4
7	5.285-2	5.165-2	7.102-2	4.564-2	2.756-2	1.559-2	1.017-2	7.162-3	3.703-3	1.641-3	2.549-4	4.421-4	7.873-5	2.494-4	4.865-4
8	3.672-2	4.552-2	7.399-2	5.043-2	3.114-2	1.756-2	1.127-2	7.828-3	4.028-3	1.782-3	2.811-4	4.782-4	8.498-5	2.502-4	4.836-4
9	5.083-2	4.828-2	6.112-2	3.830-2	2.325-2	1.293-2	8.906-3	6.390-3	3.326-3	1.472-3	2.230-4	3.962-4	7.065-5	2.474-4	4.889-4
10	5.055-2	4.892-2	8.013-2	4.923-2	2.739-2	1.608-2	1.177-2	8.112-3	4.114-3	1.751-3	2.528-4	4.357-4	7.549-5	2.515-4	4.943-4
11	5.278-2	5.562-2	6.720-2	4.601-2	3.032-2	1.877-2	1.567-2	1.119-2	5.835-3	2.385-3	3.403-4	5.324-4	8.926-5	2.569-4	4.974-4
12	3.570-2	4.191-2	6.828-2	5.324-2	3.409-2	1.620-2	1.124-2	7.785-3	3.969-3	1.705-3	2.554-4	4.372-4	7.562-5	2.451-4	4.802-4
13	2.244-2	1.777-2	4.937-2	4.088-2	2.407-2	1.759-2	1.479-2	1.057-2	5.648-3	2.377-3	3.546-4	5.492-4	9.105-5	2.449-4	4.704-4
14	6.236-2	3.054-2	2.252-2	2.084-2	2.028-2	1.453-2	1.164-2	7.329-3	3.608-3	1.526-3	2.196-4	3.829-4	6.637-5	2.225-4	4.386-4
15	2.026-1	7.574-2	4.165-2	1.564-2	8.588-3	5.380-3	4.906-3	5.516-3	3.183-3	1.351-3	2.045-4	3.270-4	5.633-5	2.190-4	4.394-4

(Continued)

Table 4 - 6a Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for 50-Ton Cask at CRIEPI

N ^a	N ^a														
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
1	3.140-4	8.921-6	1.992-2	1.118-2	1.998-2	2.221-2	3.557-2	2.413-2	3.161-2	3.267-2	4.343-2	9.373-2	5.747-2	6.457-2	1.097-1
2	2.699-4	7.680-6	1.452-3	9.404-3	2.001-2	2.391-2	4.085-2	2.736-2	3.385-2	3.558-2	4.502-2	9.685-2	6.130-2	6.356-2	1.039-1
3	2.271-4	6.450-6	4.313-4	5.699-3	1.476-2	2.075-2	3.744-2	2.686-2	3.326-2	3.466-2	4.228-2	9.214-2	6.000-2	6.190-2	9.598-2
4	1.921-4	5.465-6	1.202-4	2.420-3	8.044-3	1.539-2	3.101-2	2.606-2	3.087-2	3.300-2	4.096-2	8.761-2	6.050-2	6.141-2	8.936-2
5	1.806-4	5.141-6	9.921-5	1.633-3	1.403-3	6.017-3	1.742-2	1.879-2	2.330-2	2.696-2	3.526-2	7.822-2	5.603-2	5.782-2	7.626-2
6	1.766-4	5.027-6	1.027-4	1.698-4	5.543-4	7.852-4	6.428-3	1.106-2	1.613-2	2.022-2	2.766-2	6.604-2	4.873-2	5.258-2	6.507-2
7	1.739-4	4.953-6	1.086-4	1.715-3	5.884-4	4.884-4	1.225-3	5.694-3	1.017-2	1.424-2	2.341-2	5.623-2	4.160-2	4.845-2	5.799-2
8	1.726-4	4.915-6	1.235-4	1.735-3	6.680-4	4.989-4	6.609-4	1.356-3	4.736-3	9.854-3	1.888-2	4.268-2	3.255-2	4.450-2	5.212-2
9	1.752-4	4.992-6	1.529-4	1.614-3	6.684-4	4.884-4	6.172-4	3.854-4	1.369-3	4.925-3	1.151-2	2.998-2	1.711-2	3.925-2	4.408-2
10	1.769-4	5.040-6	1.781-4	1.869-3	7.610-4	6.172-4	7.498-4	3.884-4	5.453-4	1.646-3	5.261-3	2.301-2	2.541-2	3.293-2	3.484-2
11	1.776-4	5.053-6	1.890-4	2.125-3	8.593-4	7.678-4	8.827-4	4.874-4	5.286-4	5.083-4	1.815-3	1.844-2	2.282-2	2.598-2	2.551-2
12	1.717-4	4.884-6	4.970-5	2.202-3	6.162-4	4.761-4	4.266-4	2.408-4	2.493-4	2.376-4	5.786-4	4.189-3	1.495-2	2.108-2	1.375-2
13	1.678-4	4.779-6	1.01-11	2.530-3	5.992-4	4.207-4	2.972-4	1.717-4	1.683-4	1.596-4	1.588-4	2.112-4	4.340-3	1.521-2	7.274-3
14	1.573-4	4.482-6	2.339-3	5.525-4	3.877-4	2.727-4	1.575-4	1.541-4	1.464-4	1.453-4	1.935-4	1.844-4	7.804-3	4.127-3	3.484-2
15	1.580-4	4.507-6	9.74-12	2.243-4	5.293-4	3.715-4	2.612-4	1.510-4	1.472-4	1.400-4	1.387-4	1.848-4	1.607-4	1.509-3	2.154-3
	N ^a					N ^a	N ^a								
	46	47	48	49	50		46	47	48	49	50				
1	6.806-2	8.773-2	5.850-2	2.566-3	7.552-5	16	9.039-4	9.915-4	5.966-4	1.531-5	1.795-7				
2	6.390-2	7.881-2	4.610-2	1.229-3	1.539-5	17	9.899-4	1.086-3	6.532-4	1.672-5	1.941-7				
3	5.962-2	7.275-2	4.095-2	8.680-4	8.290-7	18	1.148-3	1.261-3	7.576-4	1.935-4	2.234-7				
4	5.682-2	6.943-2	3.901-2	8.278-4	6.730-7	19	1.423-3	1.562-3	9.381-4	2.389-5	2.741-7				
5	4.984-2	6.126-2	3.439-2	7.446-4	1.309-6	20	1.810-3	1.988-3	1.192-3	3.025-5	3.429-7				
6	4.313-2	5.289-2	2.960-2	6.341-4	7.063-7	21	2.315-3	2.544-3	1.524-3	3.847-5	4.287-7				
7	3.840-2	4.685-2	2.627-2	5.654-4	7.265-7	22	2.770-3	3.043-3	1.826-3	4.642-5	5.312-7				
8	3.415-2	4.112-2	2.316-2	5.011-4	8.085-7	23	3.852-3	4.233-3	2.541-3	6.456-5	7.322-7				
9	2.901-2	3.456-2	1.950-2	4.228-4	8.002-7	24	4.748-3	5.200-3	3.163-3	8.470-5	1.141-6				
10	2.400-2	2.867-2	1.638-2	3.923-4	3.046-6	25	6.897-3	7.507-3	4.631-3	1.310-4	1.993-6				
11	1.902-2	2.296-2	1.345-2	3.813-4	6.237-6	26	1.232-2	1.344-2	8.235-3	2.279-4	3.496-6				
12	9.266-3	1.192-2	6.822-3	1.712-4	1.734-6	27	1.187-2	1.298-2	7.926-3	2.144-4	2.978-6				
13	4.271-3	5.738-3	3.254-3	7.174-5	1.903-7	28	3.665-2	3.964-2	2.478-2	7.438-4	1.362-5				
14	2.312-3	2.974-3	1.718-3	3.919-5	1.796-7	29	4.660-3	5.121-3	3.075-3	7.829-5	8.919-7				
15	1.118-3	1.294-3	7.667-4	1.886-5	1.747-7	30	9.522-3	1.044-2	6.317-3	1.654-4	2.090-6				

Table 4 - 6a Elements of Matrices CFRN, CFRSG and CFRPG for 50-Ton Cask at CRIEPI

		N ^a														
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	3.829-1	2.167-1	8.821-2	2.891-2	1.174-2	5.714-3	3.667-3	2.690-3	1.473-3	7.042-4	1.071-4	2.227-4	4.246-5	2.170-4	4.440-4	
17		4.153-1	2.297-1	5.780-2	2.090-2	9.416-3	5.739-3	3.985-3	1.994-3	9.075-4	1.322-4	2.648-4	4.920-5	2.177-4	4.382-4	
18			5.444-1	1.539-1	4.271-2	1.680-2	9.341-3	6.036-3	2.883-3	1.270-3	1.800-4	3.385-4	5.977-5	1.890-4	3.660-4	
19				5.462-1	1.567-1	4.537-2	2.166-2	1.246-2	5.509-3	2.302-3	3.124-4	5.509-4	9.217-5	1.764-4	3.019-4	
20					5.339-1	1.591-1	5.593-2	2.734-2	1.093-2	4.253-3	5.443-4	9.105-4	1.464-4	1.701-4	2.420-4	
21						5.013-1	1.854-1	6.461-2	2.247-2	7.938-3	9.372-4	1.487-3	2.311-4	1.950-4	2.078-4	
22							5.573-1	1.720-1	4.370-2	1.333-2	1.408-3	2.095-3	3.143-4	2.025-4	1.616-4	
23								5.647-1	1.421-1	3.092-2	2.741-3	3.742-3	5.358-3	2.919-3	1.729-3	
24									6.291-1	9.007-2	4.683-3	5.088-3	6.654-4	3.131-4	1.452-4	
25										6.180-1	1.994-2	1.211-2	1.278-3	5.025-4	2.069-4	
26											4.191-1	1.985-1	1.247-2	3.361-3	1.198-3	
27												7.062-1	3.400-2	5.538-3	1.747-3	
28													3.518-1	3.668-2	6.541-3	
29														7.038-1	1.142-1	
30															7.167-1	
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
16	1.599-4	4.554-6	9.54-12	2.247-3	5.311-4	3.735-4	2.636-4	1.531-4	1.481-4	1.408-4	1.396-4	1.857-4	1.617-4	3.587-4	1.800-3	
17	1.570-4	4.457-6	9.11-12	2.462-3	5.826-4	4.098-4	2.897-4	1.684-4	1.629-4	1.547-4	1.536-4	2.043-4	1.777-4	3.932-4	1.972-3	
18	1.299-4	3.675-6	7.60-12	2.855-3	6.755-4	4.749-4	3.354-4	1.947-4	1.889-4	1.793-4	1.780-4	2.368-4	2.059-4	4.558-4	2.289-3	
19	1.052-4	2.957-6	5.95-12	3.536-3	8.369-4	5.882-4	4.154-4	2.408-4	2.340-4	2.222-4	2.207-4	2.937-4	2.552-4	5.643-4	2.838-3	
20	8.161-5	2.275-6	5.10-12	4.496-3	1.065-3	7.484-4	5.289-4	3.064-4	2.984-4	2.831-4	2.814-4	3.744-4	3.252-4	7.175-4	3.611-3	
21	6.414-5	1.759-6	4.50-12	5.749-3	1.361-3	9.553-4	6.739-4	3.893-4	3.810-4	3.615-4	3.594-4	4.786-4	4.153-4	9.161-4	4.620-3	
22	4.473-5	1.192-6	3.95-12	6.881-3	6.162-3	1.138-3	7.986-4	4.605-4	4.505-4	4.285-4	4.248-4	5.664-4	4.924-4	1.095-3	5.521-3	
23	3.934-4	9.974-7	4.01-12	9.568-3	2.255-3	1.580-3	1.107-3	6.376-4	6.239-3	5.939-3	5.884-3	7.848-3	6.827-3	1.522-3	7.677-3	
24	2.626-5	6.143-7	4.28-12	1.182-2	2.732-3	1.906-3	1.296-3	7.423-4	7.176-4	6.935-4	6.753-4	9.069-4	7.994-4	1.869-3	9.366-3	
25	3.345-5	7.488-7	5.26-12	1.722-2	3.912-3	2.717-3	1.796-3	1.024-3	9.764-4	9.584-4	9.168-4	1.239-3	1.107-3	2.711-3	1.346-2	
26	1.779-4	3.863-6	8.42-12	3.073-2	7.037-3	4.896-3	3.279-3	1.872-3	1.800-3	1.753-3	1.692-3	2.280-3	2.023-3	4.846-3	2.415-2	
27	2.469-4	5.299-6	1.37-11	2.957-2	6.801-3	4.735-3	3.193-3	1.824-3	1.761-3	1.709-3	1.657-3	2.230-3	1.971-3	4.667-3	2.336-2	
28	7.596-4	1.554-5	2.05-11	9.175-2	2.049-2	1.417-2	9.106-3	5.169-3	4.849-3	4.840-3	4.541-3	6.183-3	5.608-3	1.440-2	7.081-2	
29	1.079-2	2.125-4	6.09-11	1.160-2	2.719-3	1.902-3	1.327-3	7.612-4	7.492-4	7.139-4	7.063-4	9.433-4	8.205-4	1.837-3	9.284-3	
30	4.702-2	7.619-4	1.43-10	2.373-2	5.512-3	3.847-3	2.644-3	1.514-3	1.478-3	1.420-3	1.392-3	1.865-3	1.634-3	3.749-3	1.886-2	

(Continued)

Table 4 - 6b Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from the Water Region in the Cavity of 50-Ton Cask at CRIEPI

N ^a	N ^a														
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
31	5.689-1	1.013-2	4.08-10	5.462-2	1.249-2	8.689-3	5.824-3	3.324-3	3.199-3	3.115-3	3.007-3	4.052-3	3.594-3	8.599-3	4.291-2
32		2.705-1	2.049-9	1.493-1	3.275-2	2.257-2	1.406-2	7.949-3	7.311-3	7.443-3	6.828-3	9.374-3	8.651-3	2.336-2	1.137-1
33			9.790-5	2.575-4	4.678-4	5.338-4	9.570-4	7.861-4	1.199-3	1.238-3	1.821-3	3.077-3	3.144-3	5.477-3	1.656-1
34				1.642-4	4.749-4	5.827-4	1.070-3	8.905-4	1.370-3	1.420-3	2.097-3	3.557-3	3.647-3	6.361-3	1.451-1
35					2.160-4	5.657-4	1.160-3	1.024-3	1.605-3	1.684-3	2.508-3	4.279-3	4.416-3	7.772-3	1.192-1
36						1.880-4	1.068-3	1.073-3	1.779-3	1.911-3	2.887-3	4.970-3	5.171-3	9.175-3	9.594-2
37							4.560-4	9.344-4	1.783-3	2.044-3	3.166-3	5.530-3	5.795-3	1.036-2	7.629-2
38								3.221-4	1.467-3	2.008-3	3.328-3	5.981-3	6.341-3	1.143-2	5.862-2
39									5.440-4	1.602-3	3.195-3	6.172-3	6.663-3	1.212-2	4.734-2
40										5.626-4	2.509-3	6.018-3	6.822-3	1.256-2	3.890-2
41											8.560-4	4.991-3	6.680-3	1.270-2	3.320-2
42												1.746-3	5.419-3	1.220-2	3.055-2
43													1.578-3	9.921-3	2.914-2
44														3.371-3	2.528-2
45															1.029-2
	N ^a						N ^a								
	46	47	48	49	50	N ^a	46	47	48	49	50				
31	2.187-2	2.387-2	1.463-2	4.023-4	5.919-6	41	3.616-2	7.418-2	2.865-2	5.489-4	2.059-7				
32	5.945-2	6.382-2	4.047-2	1.299-3	2.902-5	42	3.632-2	8.684-2	3.278-2	6.231-4	2.336-7				
33	4.276-2	5.412-2	3.144-2	6.224-4	2.453-7	43	3.545-2	9.868-2	3.999-2	7.401-4	2.745-7				
34	4.041-2	5.175-2	2.911-2	5.754-4	2.269-7	44	3.311-2	9.589-2	5.707-2	9.567-4	3.091-7				
35	3.820-2	5.000-2	2.657-2	5.243-4	2.065-7	45	2.761-2	8.300-2	8.824-2	1.387-3	3.333-7				
36	3.668-2	4.984-2	2.485-2	4.882-4	1.915-7	46	8.542-3	5.988-2	1.258-1	1.948-3	5.628-7				
37	3.573-2	5.115-2	2.383-2	4.670-4	1.820-7	47		2.212-2	1.561-1	2.835-3	9.212-7				
38	3.527-2	5.429-2	2.356-2	4.598-4	1.778-7	48			1.033-2	2.200-2	3.000-6				
39	3.540-2	5.902-2	2.426-2	4.787-4	1.812-7	49				2.854-2	6.015-5				
40	3.580-2	6.572-2	2.582-2	5.100-4	1.906-7	50					1.500-3				

^aThe terms N and N' are, respectively, the energy group for the incident radiation and the transmitted or reflected radiation. (H. Yamakoshi⁽¹⁾)

^bRead as 1.410×10^{-2} .

Table 4 - 6b Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from the Water Region in the Cavity of 50-Ton Cask at CRIEPI

N ^a	N ^a														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.375-3 ^b	1.899-2	1.011-2	8.606-3	1.773-2	9.205-3	6.166-3	8.705-3	6.124-3	4.948-3	5.295-3	3.633-3	2.774-3	3.772-3	2.642-3
2		2.140-2	2.537-2	1.066-2	1.531-2	7.766-3	9.624-3	7.468-3	7.901-3	4.758-3	4.398-3	4.593-3	3.038-3	3.263-3	3.617-3
3			1.895-2	2.377-2	1.872-2	6.997-3	6.034-3	8.923-3	6.216-3	7.889-3	5.872-3	4.774-3	4.250-3	3.919-3	3.337-3
4				1.750-2	3.386-2	9.043-3	7.532-3	7.063-3	8.001-3	4.185-3	6.651-3	4.195-3	4.108-3	5.170-3	3.772-3
5					2.574-2	1.723-2	9.759-3	9.145-3	7.029-3	6.316-3	6.283-3	5.313-3	4.895-3	4.776-3	4.507-3
6						1.465-2	2.770-2	1.327-2	8.615-3	7.273-3	5.837-3	7.485-3	4.300-3	7.007-3	4.591-3
7							1.532-2	3.429-2	1.002-2	7.940-3	7.397-3	6.082-3	6.763-3	6.004-3	6.930-3
8								1.127-2	1.661-2	6.955-3	7.236-3	6.867-3	4.857-3	8.049-3	4.716-3
9									8.671-3	1.605-2	8.010-3	7.335-3	6.331-3	6.537-3	7.612-3
10										1.042-2	2.323-2	9.622-3	7.103-3	8.906-3	6.192-3
11											9.531-3	2.477-2	8.457-3	9.713-3	7.800-3
12												1.081-2	2.616-2	1.468-2	8.723-3
13													7.802-3	5.003-2	1.230-2
14														8.699-3	2.248-2
15															8.290-3
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	2.293-3	1.739-3	3.601-3	2.641-3	2.316-3	1.612-3	1.882-3	1.648-3	2.094-3	1.846-3	2.225-3	2.065-3	2.911-3	2.736-3	3.880-3
2	2.525-3	1.784-3	4.006-3	2.931-3	2.362-3	1.873-3	2.092-3	1.780-3	2.335-3	2.041-3	2.450-3	2.283-3	3.209-3	3.010-3	4.260-3
3	3.699-3	2.103-3	4.294-3	3.674-3	2.721-3	2.234-3	2.484-3	2.091-3	2.754-3	2.399-3	2.880-3	2.684-3	3.762-3	3.522-3	4.969-3
4	3.405-3	3.127-3	4.867-3	4.375-3	3.226-3	2.327-3	2.993-3	2.408-3	3.163-3	2.764-3	3.301-3	3.073-3	4.296-3	4.010-3	5.636-3
5	4.020-3	2.622-3	6.119-3	4.345-3	4.015-3	2.682-3	3.387-3	2.872-3	3.602-3	3.266-3	3.853-3	3.581-3	4.999-3	4.655-3	6.520-3
6	4.527-3	3.804-3	6.493-3	5.783-3	4.487-3	3.543-3	3.846-3	3.612-3	4.331-3	3.951-3	4.639-3	4.274-3	5.957-3	5.507-3	7.651-3
7	4.592-3	3.758-3	7.851-3	6.926-3	4.759-3	4.197-3	4.455-3	4.091-3	4.723-3	4.491-3	5.276-3	4.831-3	6.717-3	6.175-3	8.522-3
8	6.636-3	3.510-3	8.778-3	6.341-3	5.836-3	4.025-3	5.313-3	4.181-3	5.728-3	4.898-3	5.929-3	5.398-3	7.505-3	6.900-3	9.514-3
9	4.479-3	5.821-3	9.078-3	7.478-3	6.934-3	4.292-3	6.062-3	4.672-3	6.450-3	5.472-3	6.667-3	6.039-3	8.354-3	7.644-3	1.045-2
10	7.618-3	4.042-3	1.062-2	9.258-3	6.692-3	5.732-3	6.550-3	5.554-3	7.289-3	6.187-3	7.508-3	6.759-3	9.282-3	8.428-3	1.144-2
11	5.859-3	6.690-3	1.232-2	9.038-3	7.833-3	6.637-3	6.641-3	6.623-3	8.001-3	6.979-3	8.340-3	7.483-3	1.021-2	9.213-3	1.241-2
12	7.626-3	5.206-3	1.218-2	1.105-2	9.454-3	5.958-3	8.457-3	7.309-3	8.559-3	8.023-3	9.229-3	8.281-3	1.120-2	1.009-2	1.338-2
13	8.627-3	7.113-3	1.465-2	1.228-2	9.327-3	7.541-3	9.356-3	7.212-3	9.871-3	8.708-3	9.807-3	8.919-3	1.184-2	1.050-2	1.383-2
14	8.104-3	6.536-3	1.299-2	1.151-2	1.058-2	8.570-3	9.382-3	8.074-3	1.096-2	9.597-3	1.089-2	1.002-2	1.327-2	1.183-2	1.558-2
15	1.856-2	6.683-3	1.474-2	1.307-2	1.120-2	7.305-3	1.024-2	9.613-3	1.192-2	1.017-2	1.200-2	1.089-2	1.436-2	1.274-2	1.667-2

(Continued)

Table 4 - 6b Matrix Elements for the Current of Neutrons Reflected from the Water Region in the Cavity of 50-Ton Cask at CRIEPI

N ^a	N ^a														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16	8.705-3	1.459-3	1.580-3	1.205-2	1.100-2	9.778-3	1.170-2	1.042-2	1.304-2	1.086-2	1.345-2	1.193-2	1.566-2	1.380-2	1.790-2
17		1.344-2	4.628-2	1.678-2	1.413-2	1.057-2	1.322-2	1.050-2	1.419-2	1.279-2	1.448-2	1.259-2	1.624-2	1.400-2	1.777-2
18			2.350-2	2.247-2	1.266-2	1.069-2	1.359-2	1.243-2	1.573-2	1.407-2	1.611-2	1.387-2	1.833-2	1.569-2	1.985-2
19				1.639-2	1.773-2	1.013-2	1.433-2	1.315-2	1.822-2	1.592-2	1.855-2	1.638-2	2.110-2	1.782-2	2.226-2
20					1.335-2	1.465-2	1.414-2	1.419-2	2.067-2	1.810-2	2.113-2	1.865-2	2.357-2	1.959-2	2.415-2
21						1.002-2	1.649-2	1.396-2	2.028-2	2.026-2	2.446-2	2.071-2	2.620-2	2.154-2	2.613-2
22							1.233-2	1.468-2	2.084-2	2.145-2	2.548-2	2.299-2	2.902-2	2.386-2	2.826-2
23								1.107-2	2.038-2	2.179-2	2.871-2	2.629-2	2.227-2	2.629-2	3.067-2
24									1.421-2	2.039-2	2.993-2	2.855-2	3.686-2	2.954-2	3.397-2
25										1.349-2	2.760-2	3.032-2	4.185-2	3.344-2	3.824-2
26											1.689-2	2.816-2	4.520-2	3.884-2	4.396-2
27												1.671-2	4.422-2	4.394-2	5.090-2
28													2.603-2	4.547-2	5.998-2
29														2.611-2	6.740-2
30															4.442-2
	N ^a			N ^a			N ^a			N ^a			N ^a		
	31	32	N ^a	31	32	N ^a	31	32	N ^a	31	32	N ^a	31	32	
1	4.042-3	5.823-2	11	1.221-2	1.121-1	21	2.298-2	1.346-1	31	5.123-2	3.000-1				
2	4.425-3	6.194-2	12	1.303-2	1.129-1	22	2.446-2	1.368-1	32		3.454-1				
3	5.145-3	6.968-2	13	1.331-2	1.085-1	23	2.610-2	1.392-1							
4	5.811-3	7.586-2	14	1.499-2	1.212-1	24	2.837-2	1.430-1							
5	6.694-3	8.347-2	15	1.592-2	1.244-1	25	3.129-2	1.488-1							
6	7.785-3	9.008-2	16	1.694-2	1.267-1	26	3.516-2	1.566-1							
7	8.609-3	9.452-2	17	1.647-2	1.148-1	27	4.035-2	1.673-1							
8	9.599-3	1.039-1	18	1.833-2	1.244-1	28	4.762-2	1.821-1							
9	1.050-2	1.083-1	19	1.023-2	1.301-1	29	5.889-2	2.053-1							
10	1.135-2	1.094-1	20	2.158-2	1.320-1	30	7.293-2	2.383-1							

^aThe terms N and N' are, respectively, the energy group for the incident radiation and the transmitted or reflected radiation. (H. Yamakoshi⁽¹⁾)

^bRead as 2.375 × 10⁻³

容器壁および内筒部に対する反射線流特性関数の表、Table 4-3a 4-3e ならびに Table 4-6a、4-6b では、入射線のエネルギー群は縦に上から下へ、反射線のエネルギー群は左から右へ並べて配列してある。i 行 j 列目の行列要素 $m_{i,j}$ は、もし $i > j$ であれば、値は零であるが簡潔のため、0 の文字は省略してある。

$1 \leq i \leq 32$ であり、かつ、 $1 \leq j \leq 32$ の範囲にある反射線流特性関数の部分行列は中性子に対する成分を与え、 $33 \leq i \leq 50$ かつ $33 \leq j \leq 50$ の範囲の部分行列は一次ガンマ線に対する成分を与え、 $1 \leq i \leq 32$ かつ $33 \leq j \leq 50$ の範囲にある部分行列は二次ガンマ線の成分を与える。

4.2.2 容器壁遮蔽性能特性関数

輸送容器の壁部に対する遮蔽性能特性関数は壁構造に依存する。したがって、容器の型に依存するわけであるが、その依存性を分かり易くするために、Fig. 4-1 ~ 4-3 に於いて、中性子、二次ガンマ線、一次ガンマ線に対する容器相互間の比較結果を示した。^(注)

HZ-75T型容器は壁中央部に厚さ 20 cm の水層があり、有効な中性子遮蔽性能を持つ要因となっている。また、この水層を挟んで厚い鉛層が存在しておりガンマ線に対する良好な遮蔽性能をもたらしている。

以上に示した容器壁遮蔽性能特性関数の容器間相互比較から、対象とした容器のうちで HZ-75T 型容器が総合的に最も好ましい壁構造を持つことが結論付けられる。また、TN-12A型容器は、中性子に対して良好な遮蔽性能をもたらす壁構造をしているが、一次ガンマ線に対しては相対的にやや遮蔽性能の悪い構造をしていることも分かる。

入射中性子エネルギーが低くなるにつれて、中性子が輸送容器表面線量率へ及ぼす影響は二次ガンマ線が輸送容器表面線量率へ及ぼす影響に比較して小さくなる、いわゆる逆転の存在することが Fig. 4-1 と Fig. 4-2 との比較からわかる。そして、この比較からどの種類の容器に於いても、中性子エネルギーが数百 keV 程度に低くなると、二次ガンマ線の寄与のほうが確実に中性子の寄与よりも大きいことがわかる。

4.2.3 容器壁反射線流特性関数

容器壁遮蔽性能特性関数と同様に容器壁反射線流特性関数も容器壁構造に依存するが、その依

注) 実際の容器の表面にあるレジン層にはボロンが混ざっている場合があるが、その混合比率は容器の種類ごとに異なっている。本研究ではレジン層中にボロンは存在しないと仮定した。

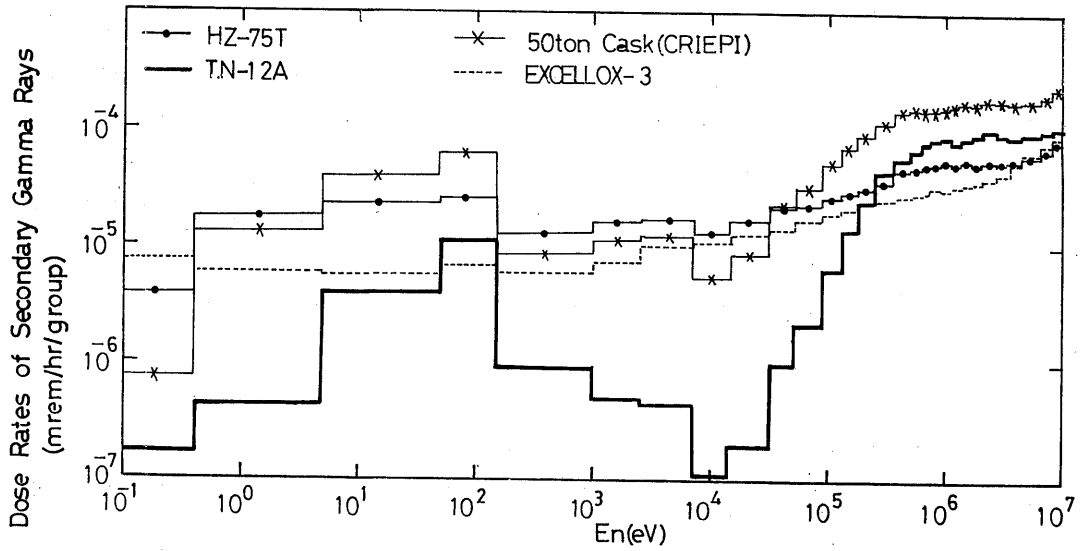


Fig.4-1 Profile of the Characteristic Function CFSSG of Typical Four Casks in Incident Neutron Energy Dependence. (H. Yamakoshi⁽¹⁾)

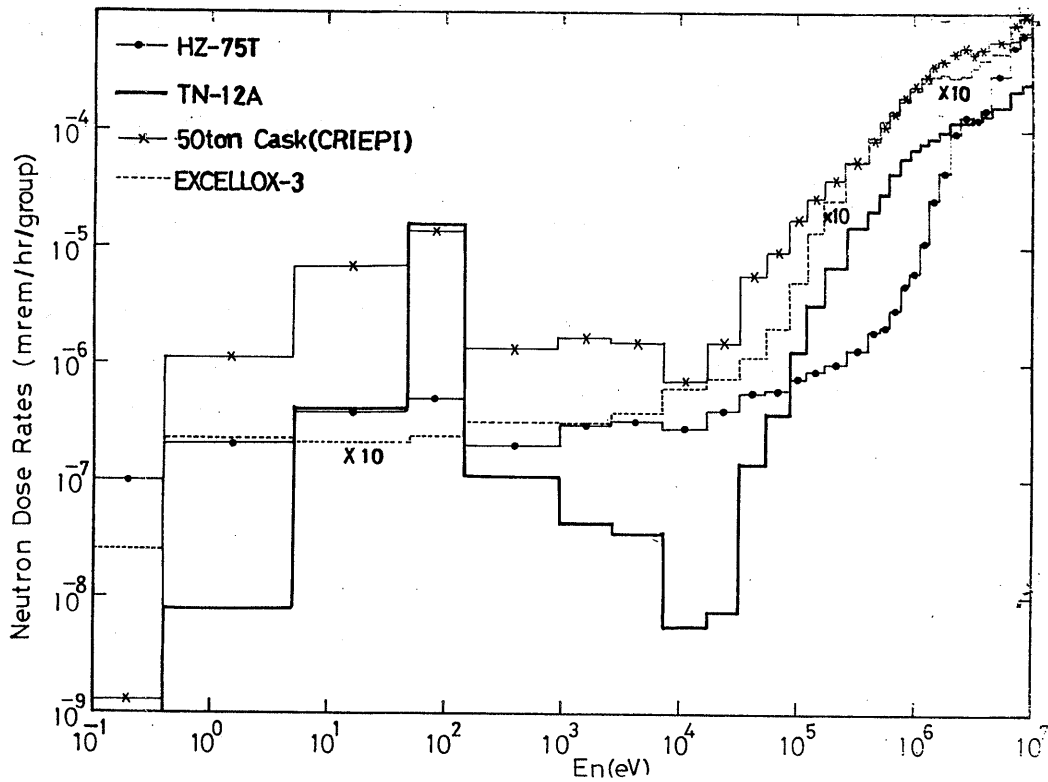


Fig.4-2 Profile of the Characteristic Function CFSN of Typical Four Casks in Incident Neutron Energy Dependence. (H. Yamakoshi⁽¹⁾)

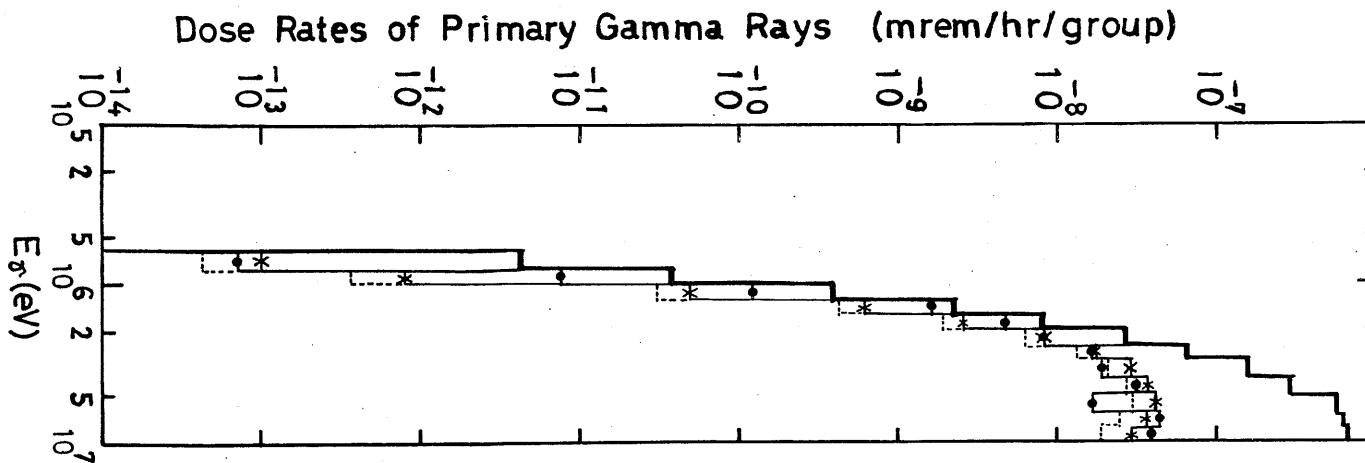


Fig.4-3 Profile of the Characteristic Function CFSPG of Typical Four Casks in Incident Gamma-Ray Energy Dependence. (H. Yamakoshi⁽¹⁾)

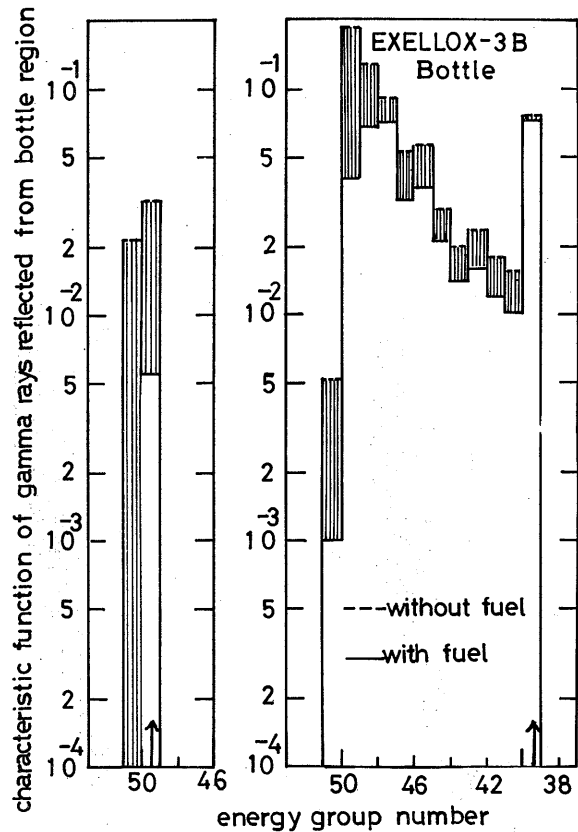


Fig.4-4a Relative Comparison in Energy Distributions of Gamma-Ray Currents Reflected from the Cask Bottle between With-Fuel State and Without-Fuel State in EXELLOX-3 Cask. Incident energy group in the left figure is the 49th group and incident energy group in the right figure is the 39th group as indicated by the mark in respective figures.

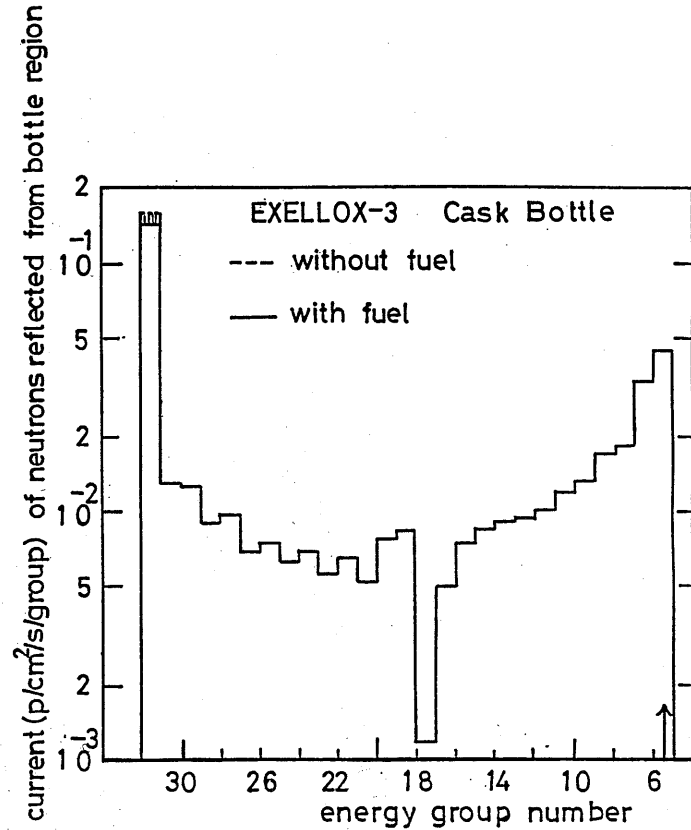


Fig.4-4b Relative Comparison in Energy Distributions of Neutron Currents Reflected from the Cask Bottle Between With-Fuel State and Without-Fuel State in EXELLOX-3 Cask. Incident energy group is the 5th group as indicated by the mark ↑.

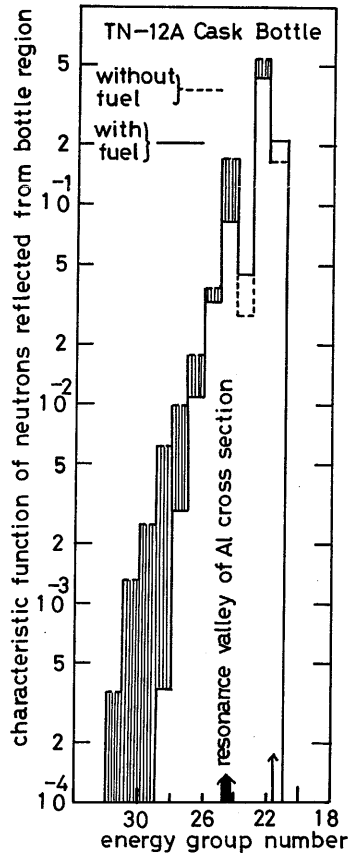


Fig. 4-4c Relative Comparison in Energy Distributions of Neutron Currents Reflected from the Cask Bottle between With-Fuel State and Without-Fuel State in TN-12A Cask. Incident energy group is the 5th group as indicated by the mark ↑.

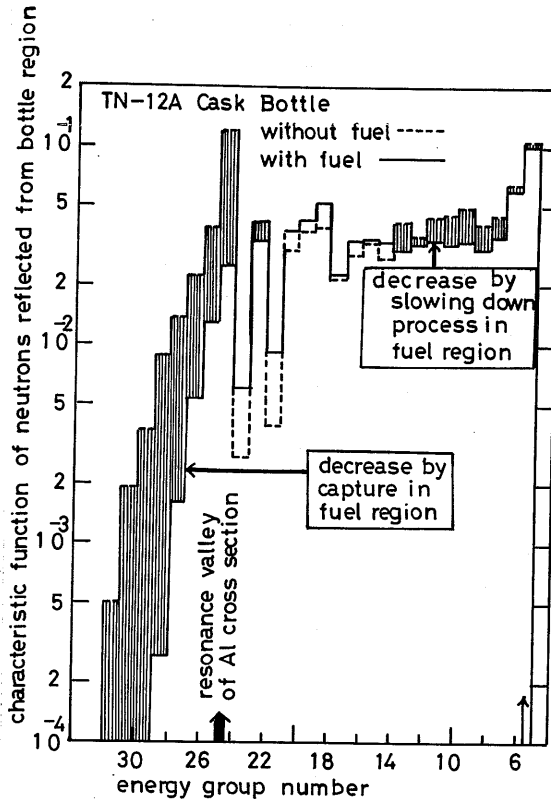


Fig. 4-4d Relative Comparison in Energy Distributions of Neutron Currents Reflected from the Cask Bottle between With-Fuel State and Without-Fuel State in TN-12A Cask. Incident energy group is the 13th group as indicated by the mark ↑.

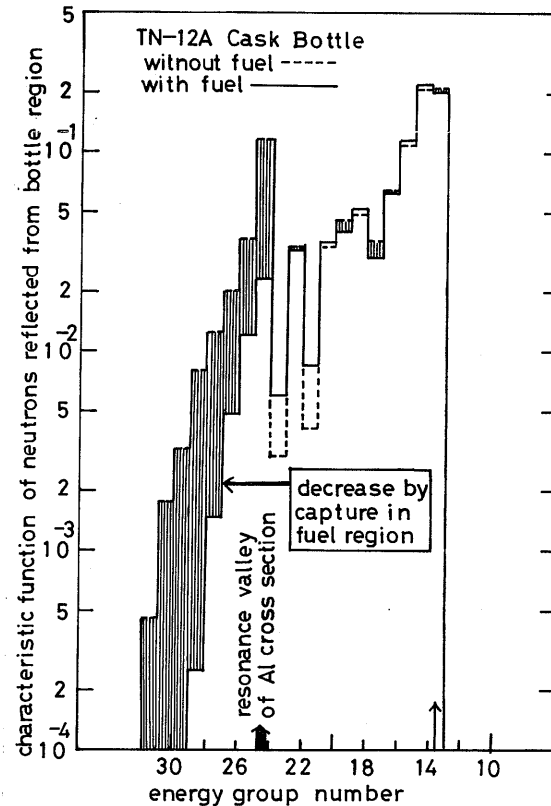


Fig. 4-4e Relative Comparison in Energy Distributions of Neutron Currents Reflected from the Cask Bottle between With-Fuel State and Without-Fuel State in TN-12A Cask. Incident energy group is the 21st group as indicated by the mark ↑.

4.3.1.1 電力中央研究所の 50 トン容器を対象とした中性子線量率測定

電力中研でいわゆる 50 トン容器を対象とした中性子線量率測定が行なわれ、その測定値が発表されている。⁽⁶⁾ そこで得られた測定結果を湿式容器に対する実測例として採り上げ、第三章で示した計算手法で解析⁽¹⁾することとする。

50 トン容器の構造は Fig. 4-5a に示したとおりである。実験の際は Fig. 4-4b に示すように 50 トン容器は直立の姿勢となり内筒部に水が入れられる。

内筒部はさらに、Fig. 4-5b にも示すように、直径 1 m、高さ 50 cm の中空な線源籠が吊り下げられる。線源籠の位置は鉛直の上下方向に可動であり、任意の位置に固定できる。

線源籠の表面には一様に、²⁵²Cf を封入したプラスチック小球が 80 個固着しており、一様な表面線源を模擬している。籠に固着する線源としては、総量で 2.4×10^9 n/sec の中性子源強度を持つ ²⁵²Cf が用いられていた。

測定では線源籠の種々の位置に対する中性子線量率が、容器表面中央から外径方向に 15 cm 離れて固定してあるスタズウィック社製レムカウンターで、Count/sec の単位で記録された。

mrem/hr 単位の線量率への換算には、同レムカウンターの計数値に対する線量率への換算率を用いた。⁽⁴⁾ その場合、以下の関係がある。

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

測定線量率は線源籠の位置が変わると Fig. 4-6 に示すように分布する。図中、線源籠の位置とその範囲は \leftrightarrow 印で、また測定線量率は X 印で示してある。

4.3.1.2 TN-12A型容器による中性子、ガンマ線測定

実際の使用済核燃料を収納した TN-12A 型容器を対象に、その周りの中性子、ガンマ線の線量率測定が行なわれている。⁽⁷⁾ そこで得られた実測値を乾式容器に対する実測値として採りあげ、第三章で示した計算手法で解析する⁽³⁾こととする。

使用済核燃料は濃縮度 3.3 % の酸化ウラン燃料を PWR から採り出して 546 日間冷却したものであり、Fig. 4-7 に示した燃焼度配置の燃料集合体 12 体が輸送容器に収納されていた。⁽⁸⁾ 集合体には 0.548 トン/体のウランが含まれていたと考えられる。⁽⁸⁾

ガンマ線線量率の測定は電離箱サーベイメータで、中性子線量率の測定はレムカウンター (NP-2) で行なわれており、⁽⁷⁾ Fig. 4-8 に示す壁構造の容器の表面上 および表面から 1 m 離れた位置の数箇所づつに対し測定値が得られている。⁽⁷⁾ ⁽⁸⁾ 得られた測定値の一部分を Table 4-7 に示す。

なお、輸送容器表面上の線量率測定の際は、次頁注から判断して、モニタ中心は表面から 6 cm

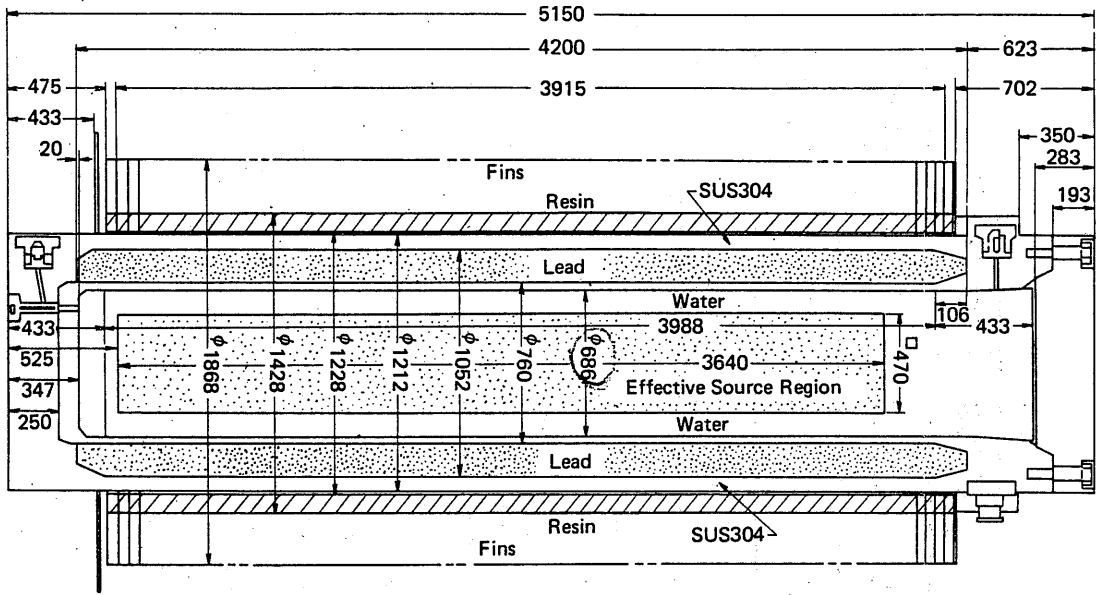


Fig.4-5a Geometry of the 50-Ton Cask at CRIEPI. Dimensions are in millimeters. (K. Ueki et. al. (6))

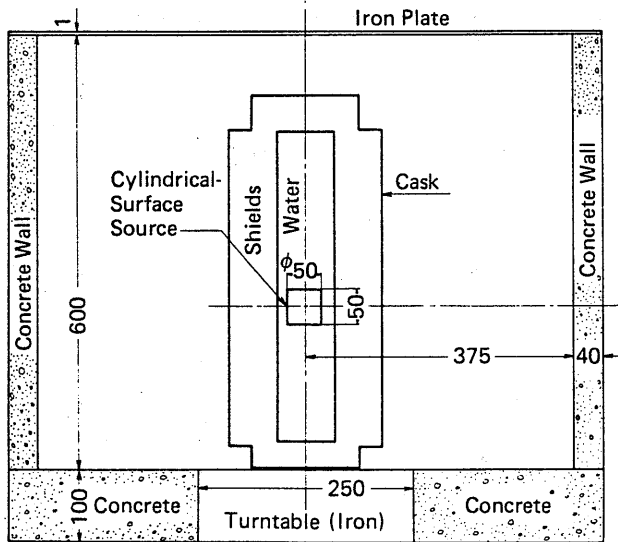


Fig.4-5b Illustration for Configuration of Neutron Source, Cask Position and Other Materials in the Experimental Circumference. (K. Uekiet. al. (6))

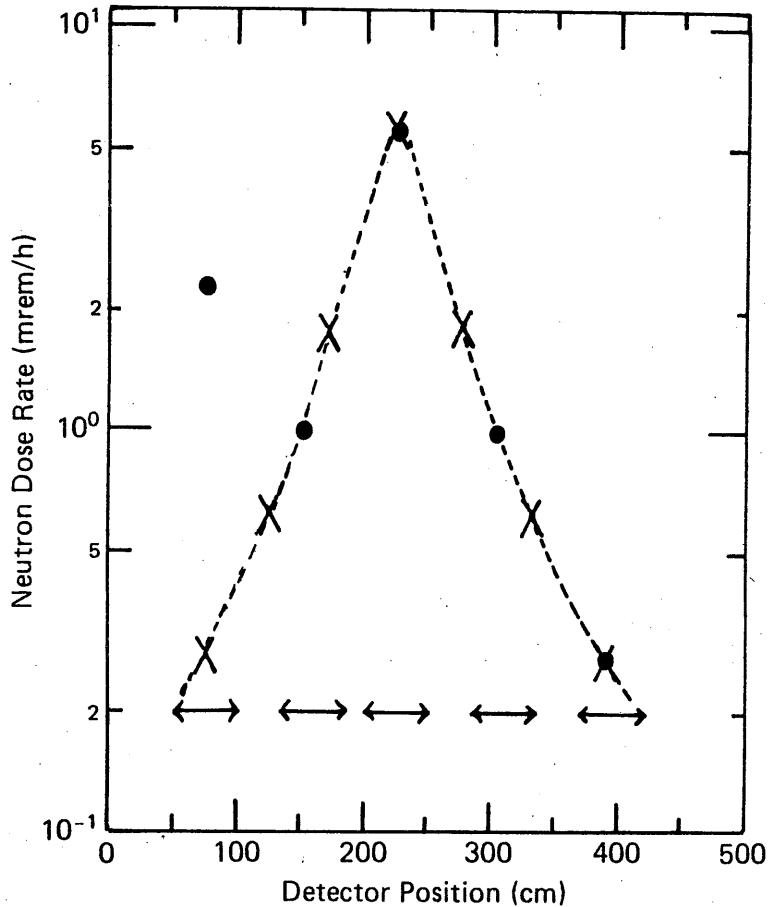


Fig.4-6 Contribution to the Neutron Dose Rate from Various Cylindrical Source Positions. Source positions are measured from the bottom of the 50-Ton cask. Measured dose rates are shown by black dots in the figure. The values shown by the mark x are those adopted in the present study. (H. Yamakoshi⁽¹⁾)

	29,169	28,981	
27,999	32,889	33,088	27,970
27,182	33,474	33,373	27,363
	28,447	28,512	

Fig.4-7 Heterogeneous Distribution of Fuel Burnup in the Bottle Region of TN-12A Cask. Fuel data are as follows; (1) UO₂-fuel with 3.3 % enrichment for PWR, (2) weight of uranium = 0.548 ton/feul assembly, (3) cooling time = 546 days. Averaged fuel burnup over all installed fuels is 29,781 MWd/ton. Fuel burnup averaged over the central four assemblies is 33,206 MWd/ton. Fuel burnup averaged over the peripheral eight assemblies is 28,206 MWd/ton. (H. Yamakoshi⁽³⁾)

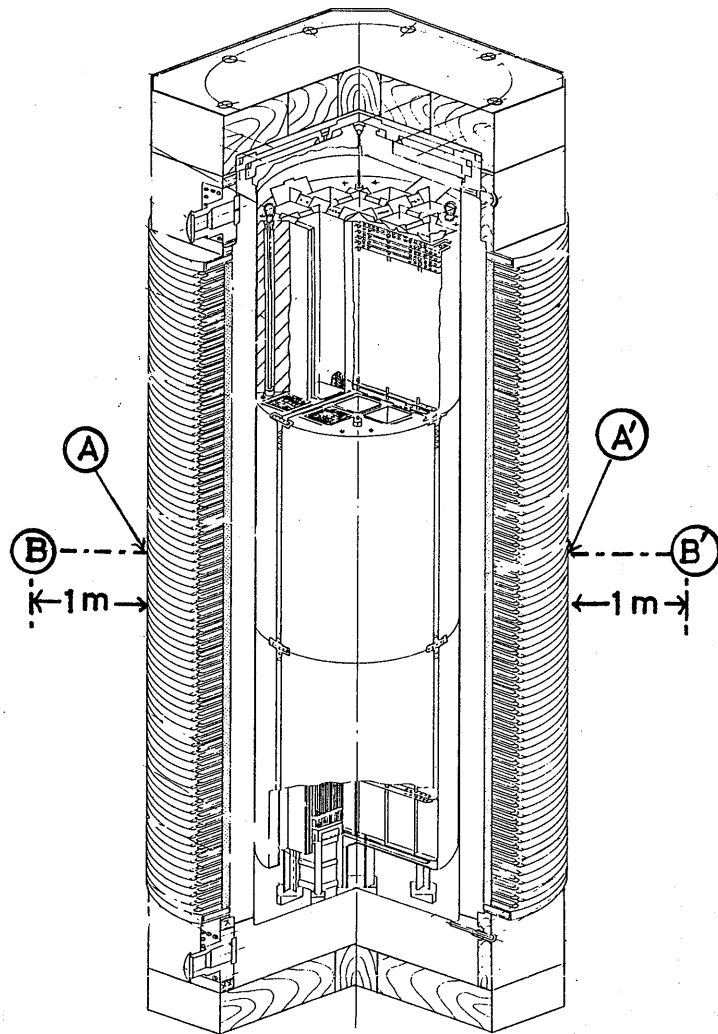


Table 4 - 7 Measured Dose Rates at Positions A and A' at Mid-Points of the Cask Surface, and at Positions B and B' 1 m Apart from the Surface of the Cask Shown in Fig.4 - 8

Measuring Point	Neutron Dose Rates (mrem/hr)	Gamma-Ray Dose Rates (mrem/hr)
A	2.2	6.7
B	1.1	3.3
A'	2.0	6.9
B'	1.0	3.4

(A. Sekiguchi et. al. (7))

Fig.4-8 Schematic Illustration of Cask Structure and Detector Positions for the Case of TN-12A Cask. (Base on Private Communication⁽⁸⁾ for Mr. Kokaji)

Actual Structure Calculation Model

● : Detector Position

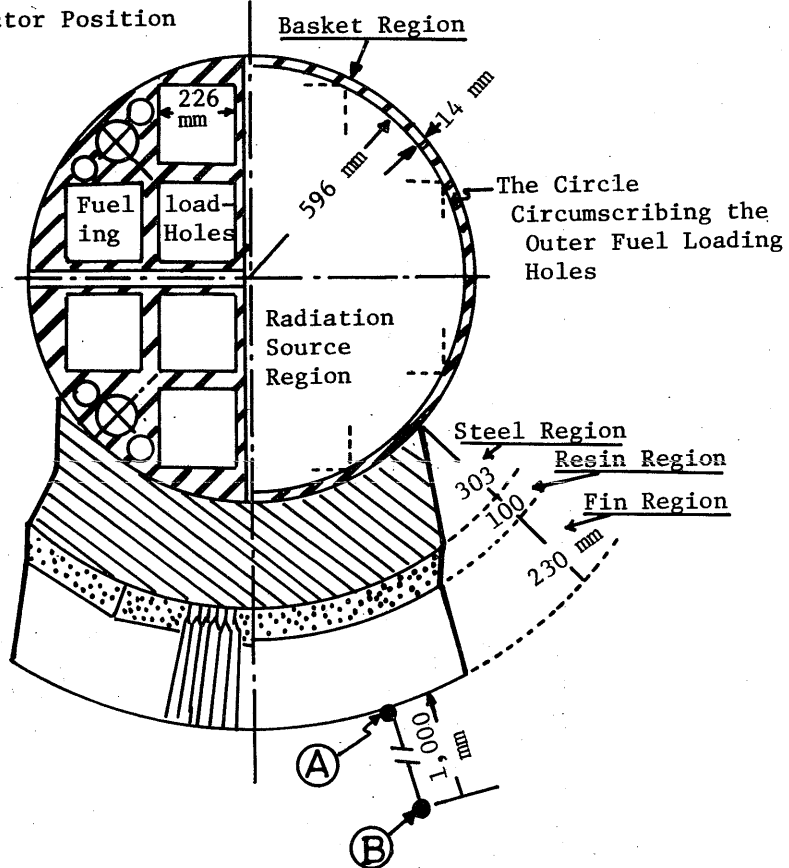


Table 4 - 8 Atomic Densities of Materials in the Radiation Source Region and the Basket Region Adopted in the Calculation Model

(atoms/barn·cm)

	Radiation Source Region	Basket Region
B(10)	2.72 -4	3.70 -3
C	3.43 -4	4.67 -3
O	6.81 -3	
Al	1.09 -2	7.02 -2
Si	1.42 -3	9.19 -3
Cr	1.96 -4	2.09 -3
Fe	7.29 -4	7.78 -3
Ni	9.63 -5	1.03 -3
Cu	5.47 -3	7.44 -3
Zr	2.02 -3	
U(235)	1.21 -4	
U(238)	2.38 -3	

(H. Yamakoshi (3), (10)).

Fig.4-9 Modelling of Actual System of TN-12A Cask for the Calculation of Radiation Dose Rate at the Point A on the Cask Surface. (H. Yamakoshi (3))

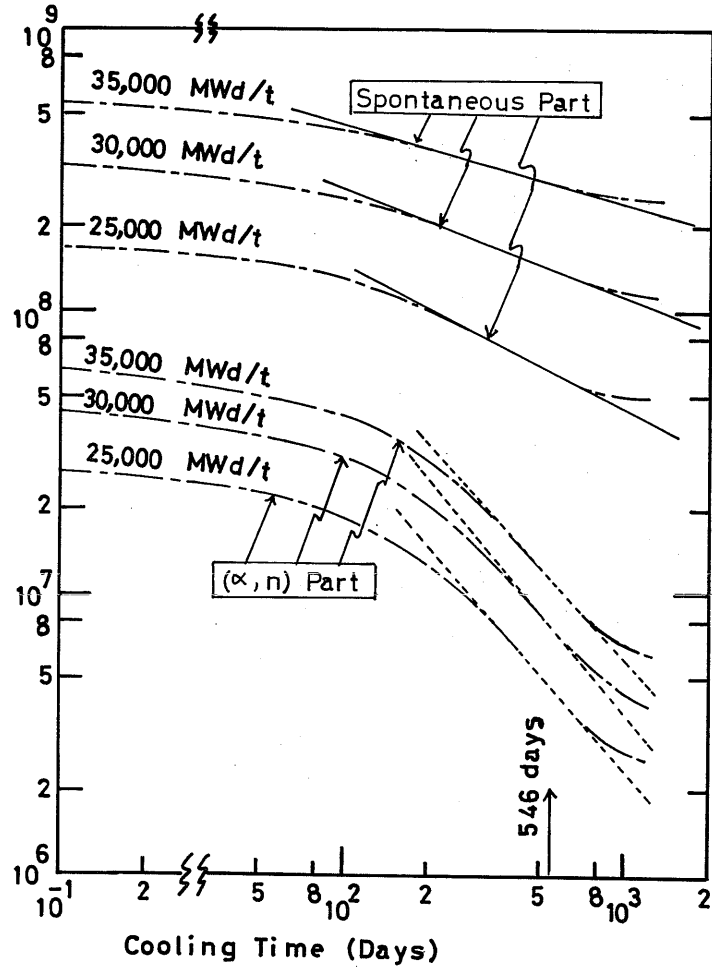


Fig.4-10 Schematic Illustration for Validity of Linear Interpolation of Source Strength Concerning the Cooling Time on the Log-Log Plane.
 (H. Yamakoshi⁽³⁾) (Data are based on the data library ORIGEN/2/82)

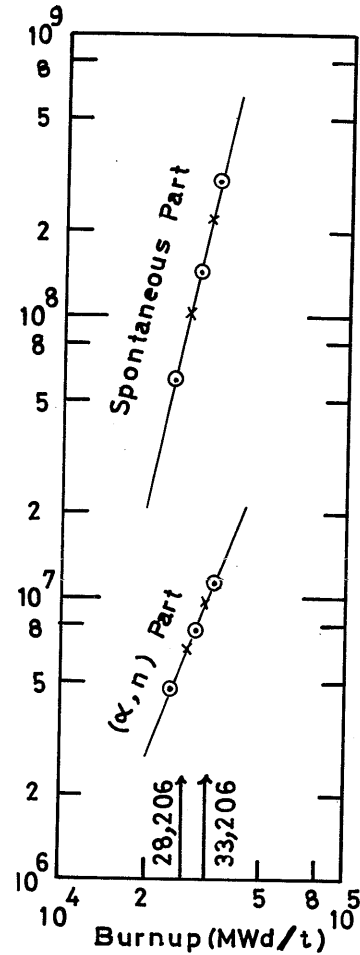


Fig.4-11 Schematic Illustration for Validity of Linear Interpolation of Source Strength Concerning the Fuel Burnup on the Log-Log Plane.
 (H. Yamakoshi⁽³⁾) (Data are based on the data library ORIGEN/2/82)

Table 4 - 9 Coupling Effect on Neutron Currents and Doses in the Case of 50-Ton Cask

Coupling Effect on Currents and Doses								
Energy Group, N	Upper Limit of Energy Group, E _N (eV)	J _{0N} ⁺ * (n/S · CG)	J ₁ ⁺ (n/S · CG)	J ⁺ (n/S · CG)	D _N ⁿ ** (mrem/h · G)	D _C ⁿ (mrem/h · G)	D _N ^{sg} (mrem/h · G)	D _C ^{sg} (mrem/h · G)
Energy Distributions								
1	1.4918+7 ^A	2.822+1	3.810-2	2.828+1	4.386-2	4.392-2	9.151-3	9.164-3
2	1.2214+7	1.098+2	2.062-1	1.100+2	1.358-1	1.360-1	3.078-2	3.083-2
3	1.0000+7	3.064+2	7.762-1	3.072+2	2.885-1	2.892-1	7.122-2	7.140-2
4	8.1273+6	6.581+2	2.189+0	6.603+2	5.459-1	5.477-1	1.299-1	1.304-1
5	6.7032+6	2.691+3	1.782+1	2.709+3	1.703+0	1.714+0	4.922-1	4.955-1
6	4.4933+6	1.683+3	1.994+1	1.704+3	8.200-1	8.297-1	2.962-1	2.997-1
7	3.6788+6	1.858+3	3.891+1	1.897+3	8.642-1	8.823-1	3.215-1	3.282-1
8	3.0199+6	2.334+3	6.771+1	2.402+3	1.141+0	1.174+0	3.996-1	4.112-1
9	2.4660+6	2.289+3	7.097+1	2.360+3	1.108+0	1.142+0	4.034-1	4.159-1
10	2.0190+6	1.801+3	9.891+1	1.901+3	7.269-1	7.669-1	3.156-1	3.330-1
11	1.6530+6	1.591+3	1.485+2	1.740+3	5.666-1	6.194-1	2.875-1	3.045-1
12	1.3534+6	1.345+3	2.107+2	1.557+3	3.867-1	4.472-1	2.260-1	2.613-1
13	1.1080+6	9.533+2	2.469+2	1.200+3	2.350-1	2.959-1	1.572-1	1.979-1
14	9.0718+5	1.084+3	4.803+2	1.564+3	2.108-1	3.042-1	1.701-1	2.455-1
15	7.4274+5	9.758+2	3.890+2	1.365+3	1.366-1	1.911-1	1.522-1	2.129-1
16	6.0810+5	8.419+2	3.911+2	1.233+3	8.823-2	1.292-1	1.295-1	1.896-1
17	4.9787+5	5.573+2	4.003+2	9.577+2	4.649-2	7.987-2	8.171-2	1.404-1
18	4.0762+5	1.097+3	1.130+3	2.227+3	6.179-2	1.255-1	1.280-1	2.599-1
19	2.7324+5	8.803+2	9.855+2	1.866+3	3.382-2	7.168-2	8.063-2	1.709-1
20	1.8316+5	7.085+2	9.002+2	1.609+3	1.871-2	4.247-2	4.941-2	1.122-1
21	1.2277+5	5.199+2	7.547+2	1.275+3	8.647-3	2.120-2	2.689-2	6.592-2
22	8.6517+4	6.240+2	1.022+3	1.646+3	5.777-3	1.524-2	2.009-2	5.301-2
23	5.2475+4	5.362+2	1.005+3	1.541+3	3.010-3	8.648-3	1.228-2	3.527-2
24	3.1828+4	6.979+2	1.489+3	2.187+3	1.051-3	3.293-3	5.980-3	1.874-2
25	1.5034+4	6.341+2	1.512+3	2.146+3	4.447-4	1.505-3	3.370-3	1.140-2
26	7.1017+3	7.877+2	1.997+3	2.785+3	1.182-3	4.177-3	9.602-3	3.349-2
27	2.6126+3	7.594+2	2.065+3	2.825+3	1.188-3	4.421-3	9.060-3	3.370-2
28	9.6112+2	1.126+3	3.035+3	4.161+3	1.700-3	6.279-3	9.764-3	3.606-2
29	2.1445+2	1.117+3	3.194+3	4.311+3	1.500-2	5.789-2	6.915-2	2.668-1
30	4.7851+1	1.704+3	5.349+3	7.053+3	1.131-2	4.681-2	6.775-2	2.804-1
31	5.0435+0	1.920+3	6.344+3	8.264+3	2.170-3	9.338-3	2.523-2	1.086-1
32	4.1400-1	4.045+4	7.381+4	1.143+5	5.025-5	1.419-4	3.041-2	8.590-2
Summation					9.213+0	10.01+0	4.212+0	5.650+0

^ARead as 1.4918 × 10⁷.

(H. Yamakoshi (1))

* GC stands for abbreviation of cm²/energy group

* hG stands for hr/energy group

Table 4 - 10 Interpolated Neutron Dose Rates

Source Position	Center of Source ^a (cm)	Dose Rate (mrem/h)
1	75	0.3
2	125	0.65
3	175	1.5
4	225	.5
5	275	1.5
6	325	0.65
7	375	0.3
Summation		10.4

^aMeasured from the bottom of the cask.

(H. Yamakoshi (1))

理由 (c) に於ける補正には、植木等が Monte Carlo 計算法を用いて得た 50 トン容器測定値の解析結果 ⁽⁶⁾ を利用する。

Table 4-10 に示すように、線源籠が第 4 番目の位置、すなわち、理想線源柱の中央部に対応した位置では測定線量率は 5.5 mrem/hr である。この同一状態に対して Monte Carlo 法から求めた線量率はやはり 5.5 mrem/hr を中心とし 5.0 mrem/hr から 6.0 mrem/hr の範囲にある。一方、Monte Carlo 法で求めた容器表面上の値は 7 mrem/hr である。

Monte Carlo 法による線量率の計算値では、容器表面上の値は容器表面から 15 cm 離れた位置の値の 27 % 増しとなっている。この対応関係を実測値に適用することとし、線源籠が他の位置にある場合も容器表面上の線量率は 27 % 増大するものと仮定する。したがって、この仮定を用い、Table 4-10 で示した加算値 10.4 mrem/hr から推定する容器表面上の線量率は 13.2 mrem/hr となる。

Table 4-9 に於ける中性子線量率 D_c^n の計算値 10.01 mrem/hr と比較すべき実験値は、以上の結果から、13.2 mrem/hr である。

使用したレムカウンターの換算率には約 10 % の誤差が含まれており、⁽⁴⁾ 補正理由 (b) に対する補正には、内挿近似方式の相違により 15 % 程度の誤差が含まれる。また補正理由 (c) に対する補正として利用した Monte Carlo 計算の結果には約 10 % 程度の誤差が含まれている。したがって推定値 13.2 mrem/hr には総合的に 35 % 程度の誤差が見込まれる。

他方、Table 4-9 に於ける中性子線量率 D_c^n の計算値 10.01 mrem/hr にも、空間メッシュの採り方に伴う誤差の他に、計算に用いた断面積の誤差に基づく誤差が含まれる。このうちで空間メッシュの採り方に起因する計算誤差は 1 % 以下に抑えてあるが、断面積誤差に基づく計算誤差は下記のごとき見積りからおおよそ 90 % 程度が見込まれる。

50 トン容器の壁部のうちで主要物質層は鉄層、鉛層、レジン層である。これらの層による中性子束の減衰を粗く以下のかたちで近似することとする。

$$\Phi \approx \Phi_0 e^{-(\Sigma_{Fe} X_{Fe} + \Sigma_{Pb} X_{Pb} + \Sigma_{Re} X_{Re})}$$

断面積誤差に起因する中性子束の相対誤差は

$$\left| \frac{d\Phi}{\Phi} \right| = X_{Fe} d\Sigma_{Fe} + X_{Pb} d\Sigma_{Pb} + X_{Re} d\Sigma_{Re}$$

である。

いま、中性子エネルギースペクトルが容器表面線量率に及ぼす影響を考慮して、 Σ_{Fe} 、 Σ_{Pb} 、 Σ_{Re} の値を決めるべき中性子エネルギー領域を選ぶことにする。Fig. 4-12b に示すように 50 トン容器の壁部に入射する中性子の実効入射中性子流(= $\vec{j}_{on} + \vec{j}'_n$) は第 5 群(7 MeV 付近)と第 8 群(3 MeV 付近)にスペクトルの山があるものの、1 MeV 付近で一度、谷を形成し、エネルギーが低下するにつれてふたたび大きな値となる。一方、Fig. 4-2 に示す 50 トン容器の中性子に対する容器壁遮蔽性能特性関数は約 10^4 eV 付近から 10^7 eV にかけて中性子エネルギーの増加とともに 3 桁も値が増加する。以上の理由から 7 MeV 付近の中性子が容器表面線量率に大きく寄与するものと考え、 Σ_{Fe} 、 Σ_{Pb} 、 Σ_{Re} の値を第 5 群に適用する。

第二章でも示したごとく、このエネルギー領域の全反応断面積に対する評価誤差は最大で 5 % である。しかし、Fig. 2-1 で示すように、鉄、水素の断面積がエネルギーに関して強い依存性を持つ領域でもあるから、群定数化の手続きで 10 % 程度の、やや大きな群定数誤差が入る可能性がある。

第 5 群の中性子に対しては、 $\Sigma_{Fe} \approx 0.322$ cm、 $\Sigma_{Pb} \approx 0.232$ cm、 $\Sigma_{Re} \approx 0.149$ cm であるので、 $\delta\Sigma_{Fe} = 0.0322$ cm、 $\delta\Sigma_{Pb} = 0.0232$ cm、 $\delta\Sigma_{Re} = 0.0149$ cm とし Table 4-4 で示すとうりに $X_{Fe} = 11.7$ cm、 $X_{Pb} = 14.6$ cm、 $X_{Re} = 10$ cm と置けば、 $|d\Phi/\Phi| \approx 0.865$ となる。

第 5 群から第 8 群にかけての $|d\Phi/\Phi|$ の値は、例えば第 8 群において 0.886 という値であり、大略、第 5 群の場合の値と同程度である。したがって、線量率の計算値 10.01 mrem/hr にはおよそ 90 % 弱の計算誤差が含まれ得る。

以上のごとく計算値 10.01 mrem/hr には大きな計算誤差が含まれ得るが、測定値から得た推定値に含まれる誤差を考慮すれば推定値 13.2 mrem/hr と良く一致している。このことから、群定数も含めて計算法の妥当性が証明されたとと言える。

4.3.3.2 TN-12A 型容器の場合

Table 4-3d の内筒部反射線流特性関数および Table 4-3a の容器壁反射線流特性関数から実効入射線流 \vec{j}^+ を計算し、Table 4-2 中の TN-12A 型容器に対する容器壁遮蔽性能特性関数を用いて容器表面上の中性子と二次ガンマ線に対する線量率 D_c^n 、 D_c^{sg} および一次ガンマ線の線量率 D_c^g を算出した。結果を Table 4-11 に示す。

Table 4-11 の値の算出に於いては、Table 4-12 中の燃焼度 29,871 MWD/T の値に対する中性子、ガンマ線の線源強度を用い、また後にも述べるように、中性子の内筒部に於ける増倍効果の補正も考慮してある。

Table 4-11 には、(3-17)式の第 1 項に対応する中性子、一次ガンマ線の線流 \vec{j}_{on}^+ 、 \vec{j}_{og}^+ とともに、第 2 項に対応した中性子、一次ガンマ線の線流に対する補正量 \vec{j}'_n 、 \vec{j}'_g が示してある。

Table 4 - 11 Coupling Effect on Neutron and Gamma-Ray Currents, and on Dose Rates in the Case of TN-12A Cask

Coupling Effect on Currents and Doses								
Energy Group, N	Upper Limit of Energy Group, E_N (eV)	J_{On}^+ (n/s·GC)	J_n^+ (n/s·GC)	J_n^+ (n/s·GC)	D_c^n (mrem/hG)	D_N^n (mrem/hG)	D_c^{sg} (mrem/hG)	D_N^{sg} (mrem/hG)
Energy Distributions								
1	1.4918+7	1.436+0	2.561-3	1.438+0	6.563-4	6.551-4	2.010-4	2.006-4
2	1.2214+7	8.365+0	1.863-2	8.383+0	2.753-3	2.744-3	9.347-4	9.334-4
3	1.0000+7	3.374+1	1.063-1	3.384+1	8.637-3	8.610-3	3.582-3	3.570-3
4	8.1273+6	9.693+1	4.610-1	9.739+1	2.119-2	2.109-2	1.003-1	9.984-3
5	6.7032+6	6.405+2	7.577+0	6.479+2	1.049-1	1.037-1	6.254-2	6.180-2
6	4.4933+6	6.197+2	1.285+1	6.326+2	8.494-2	8.321-2	5.906-2	5.809-2
7	3.6788+6	8.944+2	2.922+1	9.235+2	1.170-1	1.133-1	8.642-2	8.370-2
8	3.0199+6	1.257+3	7.045+1	1.328+3	1.647-1	1.559-1	1.228-1	1.163-1
9	2.4660+6	1.648+3	1.472+2	1.795+3	2.287-1	2.099-1	1.751-1	1.607-1
10	2.0190+6	1.804+3	2.605+2	2.064+3	2.040-1	1.782-1	1.885-1	1.647-1
11	1.6530+6	2.010+3	4.425+2	2.453+3	2.149-1	1.761-1	2.097-1	1.718-1
12	1.3534+6	2.033+3	7.656+2	2.798+3	2.251-1	1.635-1	2.273-1	1.651-1
13	1.1080+6	1.925+3	1.242+3	3.167+3	2.395-1	1.456-1	2.638-1	1.603-1
14	9.0718+5	2.238+3	2.227+3	4.464+3	2.677-1	1.342-1	3.703-1	1.856-1
15	7.4274+5	2.801+3	3.683+3	6.484+3	2.798-1	1.208-1	5.139-1	2.219-1
16	6.0810+5	2.563+3	5.008+3	7.571+3	2.235-1	7.567-2	5.152-1	1.744-1
17	4.9787+5	1.608+3	5.564+3	7.171+3	1.569-1	3.518-2	4.121-1	9.238-2
18	4.0762+5	4.131+3	1.962+4	2.375+4	3.572-1	6.212-2	1.045+0	1.818-1
19	2.7324+5	2.681+3	2.643+4	3.011+4	2.160-1	2.642-2	7.606-1	9.305-2
20	1.8316+5	3.560+3	4.499+4	5.855+4	1.642-1	1.204-2	6.608-1	4.845-2
21	1.2277+5	8.494+2	1.416+4	1.501+4	2.015-2	1.140-3	9.450-2	5.347-3
22	8.6518+4	3.614+3	6.662+4	7.025+4	2.717-2	1.398-3	1.550-1	7.972-3
23	5.2475+4	6.477+2	2.482+4	2.546+4	3.500-3	8.899-5	2.566-2	6.524-4
24	3.1828+4	2.887+3	8.017+4	8.306+4	6.482-4	2.253-5	1.276-2	4.435-4
25	1.5034+4	1.563+3	6.328+4	6.484+4	3.740-4	9.015-6	7.315-3	1.763-4
26	7.1017+3	6.511+2	2.383+4	2.447+4	9.020-4	2.400-5	1.136-2	3.023-4
27	2.6126+3	1.989+2	1.319+4	1.339+4	5.856-4	8.701-6	6.650-3	9.881-5
28	9.6112+2	3.382+1	2.403+3	2.437+4	2.643-4	3.666-6	2.286-3	3.172-5
29	2.1445+2	1.280+0	1.902+2	1.915+2	3.053-3	2.040-5	2.210-3	1.477-5
30	4.7851+1	1.693-2	1.730+1	1.732+1	7.505-6	7.334-9	7.048-5	6.889-11
31	5.0436+0	6.452-5	7.919-1	7.191-1	5.574-9	5.000-13	3.139-7	2.813-11
32	4.1400-1	3.065-7	8.816-3	9.814-3	1.369-17	4.267-22	1.742-9	5.429-14
Summation					3.339	1.832	6.007	2.170

* GC stands for abbreviation of cm^2 /energy group (H. Yamakoshi⁽¹⁰⁾)

** hG stands for hr/energy group

Table 4 - 11 Coupling Effect on Neutron and Gamma-Ray Currents, and on Dose Rates in the Case of TN-12A Cask

Coupling Effect on Currents and Doses

Energy Group, N	Upper Limit of Energy Group (eV)	J_{Og}^+ * (p/s·GC)	J_g^{+1} (p/s·GC)	J_g^+ (p/s·GC)	D_c^g ** (mrem/hG)	D_N^g (mrem/hG)
Energy Distributions						
1	1.0 +7					
2	8.0 +6					
3	6.5 +6					
4	5.0 +6					
5	4.0 +6	4.293+5	1.565+2	4.295+5	6.769-2	6.769-2
6	3.0 +6	3.154+6	1.577+3	3.156+6	2.088-1	2.088-1
7	2.5 +6	1.925+8	4.793+4	1.926+8	5.204+0	5.204+0
8	2.0 +6	8.863+7	4.743+5	8.914+7	7.484-1	7.484-1
9	1.66 +6	5.569+8	8.914+5	5.579+8	1.304+0	1.304+0
10	1.33 +6	9.779+8	6.977+6	9.846+8	3.984-1	3.984-1
11	1.0 +6	2.471+9	1.688+7	2.488+9	9.634-2	9.634-2
12	8.0 +5	4.853+9	6.628+7	4.919+9	2.162-2	2.162-2
13	6.0 +5	5.677+9	2.771+8	5.955+9	1.310-3	1.310-3
14	4.0 +5	2.271+9	3.576+8	2.629+9	1.126-6	1.126-6
15	3.0 +5	1.946+9	6.663+8	2.612+9	2.644-9	2.644-9
16	2.0 +5	1.128+9	3.334+8	1.516+9	1.947-10	1.947-10
17	1.0 +5	2.566+7	1.139+7	3.705+7	2.223-27	2.223-27
18	5.0 +4	3.184+4	7.273+4	1.046+5	1.046-30	1.046-30
Summation					8.05	8.05

* GC stands for abbreviation of cm^2 /energy group (H. Yamakoshi (10))

** hG stands for he/energy group

Table 4 - 12 Burnup Dependence of Neutron and Gamma-Ray Source Strength
in the Case of Cooling time of 546 Days.

(Data are based on the data library ORIGEN/2/82)

Fuel Burnup	28,206 Mwd/t	29,871 Mwd/t	33,206 Mwd/t
Neutrons	1.1370 +8	1.4702 +8	2.3597 +8
Gamma Rays	4.5126 +16	4.7389 +16	5.2197 +16

(H. Yamakoshi (3), (10))

Table 4 - 13 Comparison of Calculated Dose Rates with Measured Values
and with Other Results of Calculation at Points A and A'
on the Cask Surface Shown in Fig.4-9

	Present Calculation				
	on the Cask Surface		6 cm Apart from the Cask Surface		1 m Apart from the Cask Surface
	D(0 cm) av.	D(0 cm) hetero	D(6 cm) av.	D(6 cm) hetero	D(1 m) hetero
Neutrons	3.34 (1.81)	2.93	2.91 (1.58)	2.55	1.11
Secondary Gamma Rays	6.01 (2.17)	5.27	5.23 (1.88)	4.59	1.90
Primary Gamma Rays	8.05 (8.05)	7.73	7.00 (7.00)	6.73	2.94

	Measurement		Other Calculation	
	on the Cask Surface*	1 m Apart from the Cask Surface	on the Cask Surface	1 m Apart from the Cask Surface
	D(6 cm) *	D(1 m)	D(0 cm)	D(1 m)
Neutrons	2.2	1.1	2.79	1.20
Secondary Gamma Rays	-	-	-	-
Primary Gamma Rays	6.7	3.3	6.96	3.72

* Effective monitoring center is 6 cm apart from the cask surface. (H. Yamakoshi (3), (10))
The bracket () stands for dose rate without taking account of radiation coupling effect between the cask wall and the bottle region.

Table 4-13には、従来の平均燃焼度近似に基づく輸送容器表面線量率の計算値を^{注)} $D_{av}(0\text{cm})$ として表わし、実測体系のモニタ中心位置(表面から6 cm離れた位置)に対応した位置の計算値を $D_{av}(6\text{cm})$ としてあらわし、測定値⁽³⁾ $D_{measured}$ ⁽⁸⁾ および他の著者の計算値⁽³⁾ $D_{other cal}$ ⁽⁸⁾とともに示してある。表中には容器壁と内筒部との間の反射線流カップリング効果を無視した場合、すなわち、容器壁遮蔽性能特性関数のみを考えた場合の計算値を()内に示した。

燃焼度が低く、ガンマ線の場合、容器表面線量率はガンマ線の容器壁遮蔽性能特性関数のみで評価することができることをTable 4-13は示唆している。

$D_{av}(6\text{cm})$ の計算値に含まれる誤差の要因として、中性子に関するものは、群定数誤差に基づくもの、実効増倍率の評価誤差に基づくもの、中性子線源密度評価誤差に基づくものが挙げられる。

群定数に基づく誤差は約100%が見込まれる。この誤差の見積り法は既に述べた通りであるが、 Σ_{Fe} 、 Σ_{Re} の値の見積りをする際の中性子エネルギー領域が、Fig.4-12aから判断される実効入射線流の中性子エネルギー依存性とFig.4-2中のTN-12A型容器に対する中性子の容器壁遮蔽性能特性関数のエネルギー依存性とに基づき、およそ2 MeVと、やや50トン容器の場合よりも低くなっている。したがって、Fig.2-1から明らかのように、鉄の断面積の値がやや小さくまたレジン中の水素の断面積は値がやや大きくなる。

$\Sigma_{Fe} = 0.257 \text{ cm}$ 、 $\Sigma_{Re} = 0.262 \text{ cm}$ であるので、群定数誤差として10%を見込めば、Table 4-1中のTN-12A型容器の鉄層、レジン層の厚さを考慮して、 $|d\phi/\phi| = 1.02$ すなわち、Table 4-13中の値2.91 mrem/hrには群定数誤差に基づく誤差が約100%有り得るのである。

線源密度を求める際は燃料部有効長が用いられるが、有効長の定義とその値に於いて誤差の余地がある。しかしこの定義誤差は現在は未知であるので不問にする。

内筒部に於ける中性子実効増倍率としては本来、収納した使用済燃料の体系に対する値を用いるべきであるが、本研究ではそのような値は使用済核燃料データ供給側からは与えられてはおらず、使用済核燃料の代わりに新燃料の体系に対する値 $K_{eff} = 0.33$ が提供されている⁽⁸⁾のみである。乾式容器に於いては経験上、新燃料体系に対する値から10%を差し引いた値を使用済核燃料体系の値としているので、この近似を用いて K_{eff} の値とした。

中性子の容器上面線量率を求める場合、計算に用いる群定数の誤差に起因する線量率計算誤差のほかに、上記のごとく、内筒部中の中性子実効増倍率の値の不確かさに起因する計算誤差が無視し得ない。この後者の誤差がガンマ線線量率計算の場合と異なる点である。

注) 第五章で述べる解析的表現による容器周辺線量率の空間依存性の効果をここでは考慮し、 $D_{av}(6 \text{ cm}) = D_{av}(0 \text{ cm})/1.15$ の関係を適用した。

今回の TN-12A 型容器の周りを対象とした計算値と測定値との一致の様子から逆に、乾式容器に対する K_{eff} の経験値、 $K_{eff} = 0.3$ がほぼ妥当であったと言える。

一次ガンマ線の計算では増倍効果の影響が無いことと、第二章で述べたごとくガンマ線に対する断面積が 2% 程度の誤差しか含まぬことから、線量率に含まれる計算誤差は 25% 程度と見積られる。

TN-12A 型容器では、ガンマ線減衰の主役は厚さ 30.3 cm の鉄層である。鉄は約 2 MeV で吸収係数の谷がある。このエネルギーに於いて $\Sigma_{Fe} = 0.39$ cm、 $\Sigma_{Re} = 0.063$ cm である。群定数誤差として 2% を見込み、中性子と同様な議論から $\left| \frac{d\phi}{\phi} \right| = 0.237$ となる。

以上の誤差の考察から、Table 4-13 に示すガンマ線の $D_{av}(6\text{cm})$ の値 7.00 mrem/hr は、計算誤差の範囲内で測定値 6.7 mrem/hr および他の著者の計算値 6.96 mrem/hr とかなり良く一致していると言える。

いっぽう、実測体系と今回の平均燃焼度を仮定した体系とでは直接の比較が無理であり、後に第六章で扱う燃焼度不均質配列効果の補正をしてから比較をすべきであると思われる。

すなわち、燃焼度の違う燃料を Fig. 4-7 のように不均質に配置した場合は、内筒部中央付近にある高燃焼度燃料からの放射線は周囲を取り巻く低燃焼度燃料によりある程度遮蔽される。

ガンマ線の場合は中性子の場合に比較してこの遮蔽効果は大きいので、主として低燃焼度燃料からのガンマ線が大きく容器表面線量率に寄与することになる。実測では、このような体系に対する表面線量率が測定されているのである。

Table 4-13には参考までに燃焼度不均質配置の効果を第六章で述べる方法で補正した結果を $D_{hetero}(0\text{ cm})$ と $D_{hetero}(6\text{ cm})$ として示してある。(注)

$D_{other\ cal}$ の値は、同一体系に対して他の著者が ANISNコードを用いて、内筒部から始まって容器表面から 1 m の位置に至るまでの一貫した遮蔽計算を行なって得た結果である。計算に用いた仮定、体系のモデル化の詳細は不明であるが、線源データは ORIGIN コードを用いて求めており、 $D_{av}(0\text{ cm})$ の計算に於ける線源データが ORIGIN-2/82 を用いて求められた点とは異なっている。

一次ガンマ線の線量率の場合、燃焼度不均質配置効果を考慮した補正は Table 6-1に示すように 5% 程度と小さく、また $D_{av}(0\text{ cm})$ に含まれる計算誤差も中性子の場合に比較して小さな値である。

注) Table 4-13 中の、容器表面から 1 m 離れた位置に於ける線量率計算値 $D_{hetero}(1\text{ m})$ は、 $D_{hetero}(0\text{ cm})$ を用い、第五章で述べる線量率空間分布計算式を適用して求めたものである。

測定値と比較する計算値として Dhetero(6 cm) を採り上げた場合、中性子線量率に対する値 2.55 mrem/hr は測定値 $D_0 = 2.55$ mrem/hr にかかなり近い値であり、またガンマ線線量率に対する値 6.73 mrem/hr は測定値 $D_0 = 6.7$ mrem/hr に近い値である。以上のように、一次ガンマ線、中性子ともに、計算値 Dhetero(6 cm) が測定値に非常に近い値を与えることが明らかとなった。このことは、間接的に計算群定数の妥当性をも証明していることになるが、既に 50 トン容器の場合に中性子群定数の妥当性が証明されているので、中性子に対する第三章の計算法の妥当性がここに於いて確認できたと言える。

さらにガンマ線の場合には群定数の妥当性と第三章の計算法の妥当性が合わせて証明できたことを意味する。

4.4 考察

(3-17)式に於ける第2項 \vec{j}'^+ が第1項 \vec{j}_0^+ に対してどの程度の大きさとなるか、すなわち内筒部、容器壁間に於ける反射線流のカップリング効果の寄与がどの程度となるかと言う点については、中性子とガンマ線とではエネルギーによって異なるが、中性子の場合であっても容器が乾式容器であるか湿式容器であるかに従って、やや異なる面がある。

Fig.4-12a と Fig.4-12b に乾式容器である TN-12A 型容器と湿式容器である電力中央研修書の 50 トン容器とに対する \vec{j}_0^n と \vec{j}'^n との間の大小関係のエネルギー依存性が示してあるが、ともに数百 keV を境として大小関係に逆転が生じている。いっぽう、TN-12A型容器に対するガンマ線の \vec{j}'^g と \vec{j}_0^g との間の大小関係について、そのエネルギー依存性が Fig.4-13 に示してあるが、TN-12A 型容器はどのエネルギー領域でも \vec{j}'^g は \vec{j}_0^g よりも小さな値となっている。

ガンマ線の場合は中性子に比較して、TN-12A 型容器の壁部、内筒部を構成する物質に対する平均自由行程が小さく、かつ、Fig.2-9 に示すように低エネルギーでも前方散乱が強いことから常に \vec{j}'^g は \vec{j}_0^g よりも小さい。

Fig.4-12a と Fig.4-12b とを比較した場合、Fig.4-12a の低エネルギー領域に於ける \vec{j}_0^n と \vec{j}'^n との間のひらき具合は Fig.4-12b に於いて認められる、同様なひらき具合よりも大きくなっている。

さらに Fig.4-12b では、中性子エネルギーの減少とともに \vec{j}_0^n は増加しているのに対し、Fig.4-12a では逆に低下する傾向が認められる。

Fig.4-12a と Fig.4-12b との間のこれらの相違は内筒部の物質の相違に基づくものである。湿式容器の場合、内筒部に存在する水の分子中の水素が大幅な中性子減速を惹き起こすので幅広い範囲の高エネルギー中性子が小数回の散乱で大量に低エネルギー領域に減速し、その効果が重

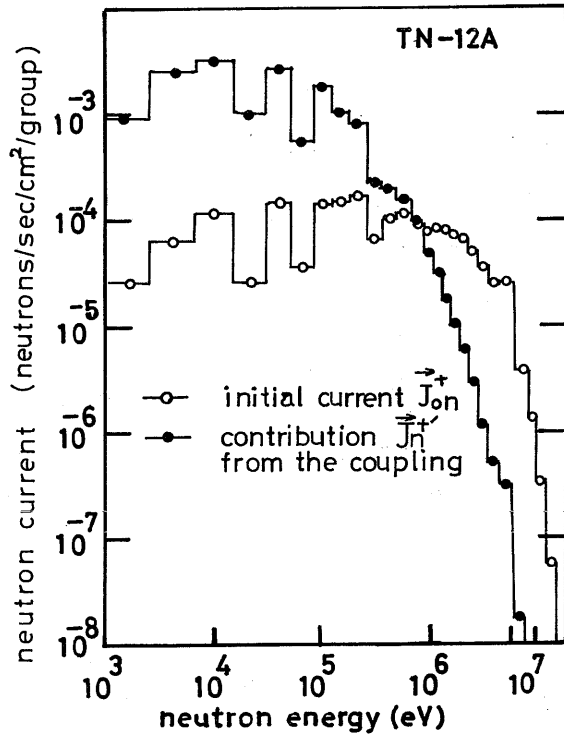


Fig. 4-12a Relative Comparison of the Initial Incident Current J_{0n}^+ and the Contribution J_n^+ from the Coupling of Neutrons between Cask Wall of TN-12A Cask and Its Bottle Region. (H. Yamakoshi⁽³⁾)

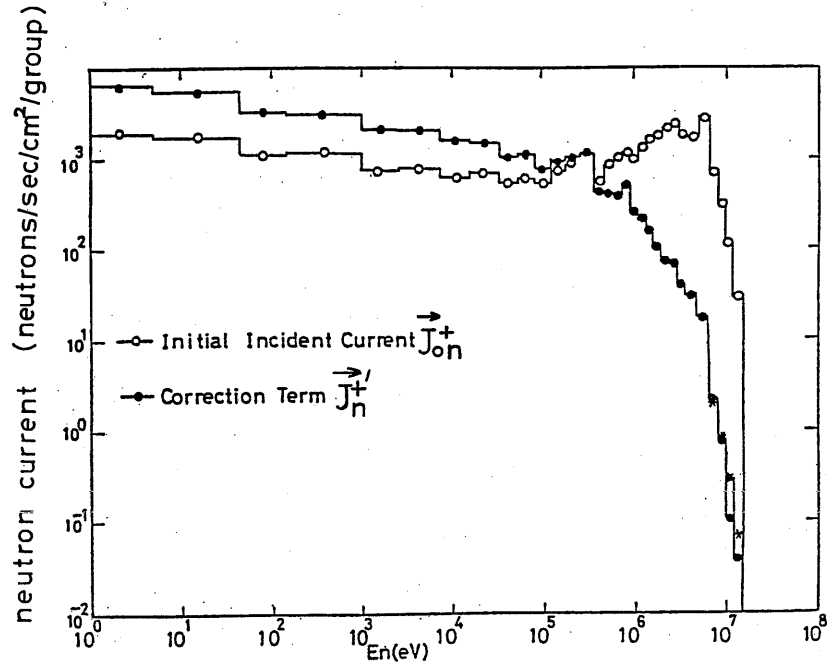


Fig. 4-12b Relative Comparison of the Initial Incident Current J_{0n}^+ and the Contribution J_n^+ from the Coupling of Neutrons between Cask Wall of 50-Ton Cask and Its Bottle Region. (H. Yamakoshi⁽³⁾)

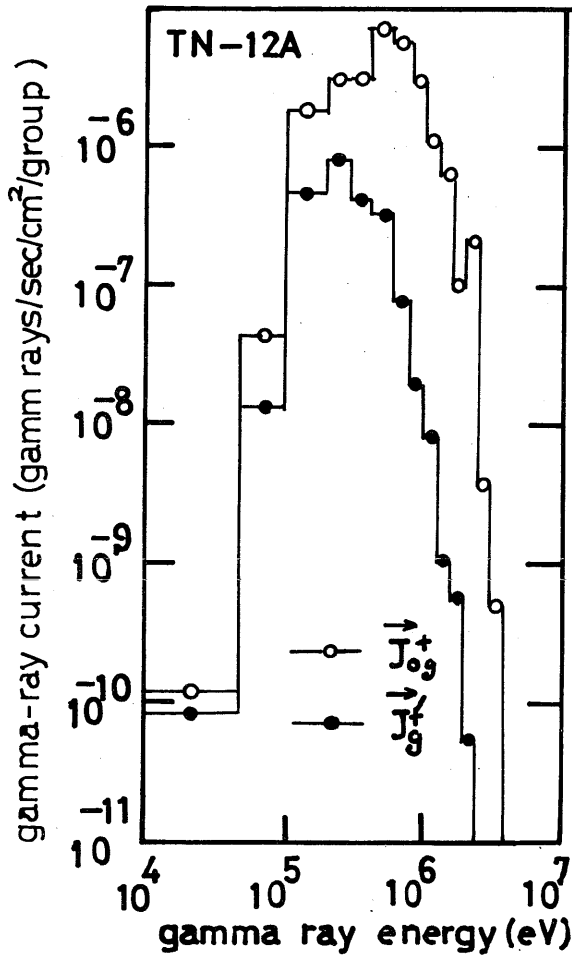


Fig. 4-13 Relative Comparison of the Initial Incident Current J_{0g}^+ and the Contribution $J_{g'}^+$. (H. Yamakoshi (3))

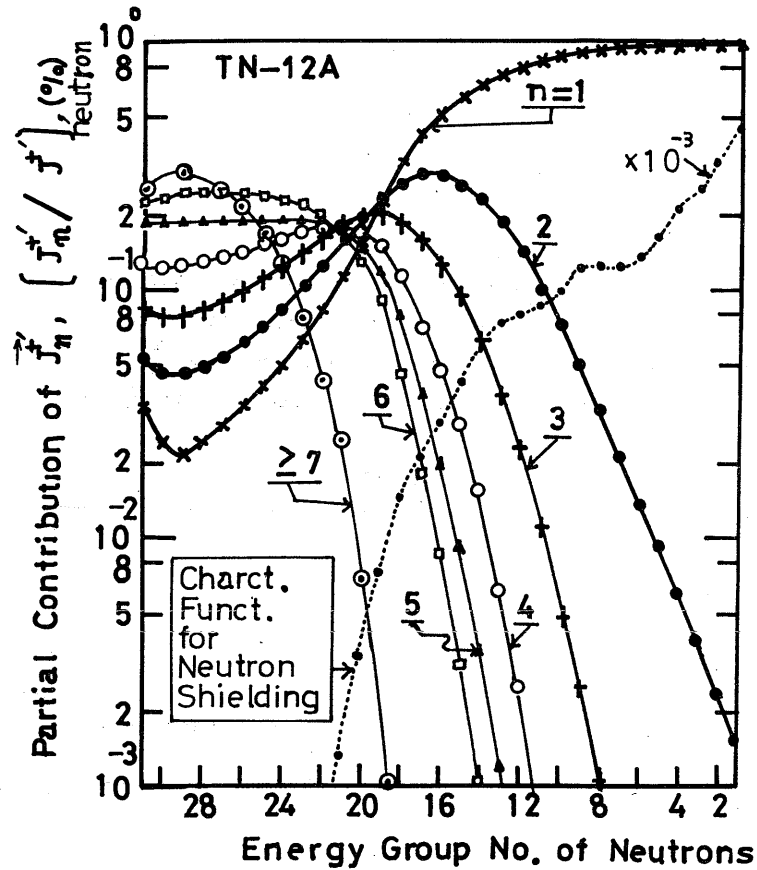


Fig. 4-14a Percentage Representation of Contribution from Each Step of Neutron Coupling to the Quantity J_n^{+1} for the Case of TN-12A Cask.

Characteristic Function for Neutron Shielding (CFSN) for the TN-12A Cask is also shown to explain importance of each contribution to the dose rate on the cask surface. The quantity n in the expression " $n=1$ " corresponds to the power n in the expression " $(R_b R_c)^n$ " in Eq. (3-19). (H. Yamakoshi (3), (10))

ね合わされている。乾式容器の場合は内筒部に水素は存在せず、小幅な中性子エネルギー減速による多数回散乱が中性子の減速機構となっている。以上に述べた湿式容器、乾式容器間の中性子減速幅の大きさの相違の効果は、(3-19)式中の無限和に対する打ちきり項数にも反映する。

同様にガンマ線に対する打ち切り項数には、ガンマ線平均自由行程の小さいことと前方散乱性の強いことが反映している。

ここで(3-19)式の無限和に対する打ち切りを第何項までで行なえば良いか、以下に考察する。

まず、(3-19)式の右辺に於ける第 n 番目の項 $(\tilde{R}c \tilde{R}c)^n$ を用いて計算した(3-17)式右辺の第2項を \vec{J}'_n と表わし、(3-19)式の右辺の和で第10項目まで採って求めた $\tilde{R}couple$ を用いた場合の(3-17)式右辺第2項を \vec{J}'^+ で表わすこととする。

両者の比 \vec{J}'_n / \vec{J}'^+ は、(3-19)式に於ける展開の第 n 項が(3-19)式で第10項までを採った場合の総和値にもたらす寄与の大きさを与え、 n の値を変えた場合は展開の収れん性の情報を与えるが、この比の値の n 依存性は容器の型、入射する放射線の種類に依存している。

Fig.4-14a と Fig.4-14b には、それぞれ TN-12A 型容器と 50 トン容器に対する中性子入射の場合の \vec{J}'_n / \vec{J}'^+ の値が示してある。また Fig.4-15 には TN-12A 型容器にガンマ線が入射した場合の \vec{J}'_n / \vec{J}'^+ の値が示してある。これらの図では、横軸にエネルギー群構造に於ける群番号が目盛ってある。さらに、参考のため、中性子あるいはガンマ線に対する各容器の容器壁遮蔽性能特性関数の値も同時に示してある。

Fig.4-14a と Fig.4-14b との比較から分かるように、湿式容器では反射中性子流のカップリングの効果は、 $n = 5$ の項に於いても十分に小さくなっており、第5項までの和で打ち切っても(3-17)式の右辺第2項 \vec{J}'^+ はかなり良い近似で求められる。

これに対し、乾式容器では中性子エネルギー群の24群から第29群にかけての様子で示してあるように $n > 7$ の項からの総和がまだ低エネルギー領域に於いても 30% 以上もの寄与を \vec{J}'^+ にもたらしている。

いっぽう、Fig.4-15 で示すように、ガンマ線の場合は $N = 3$ までで(3-19)式の右辺に対する和を打ち切っても、(3-17)式の右辺第2項 \vec{J}'^+ は十分に良い近似で求めることができる。

このことは、片岡の主張⁽⁹⁾と一致している。

乾式容器の場合、(3-17)式の右辺第2項 \vec{J}'^+ の計算では、Fig.4-14a でも示したとうり低エネルギー中性子に対して収れんが悪いので、(3-19)式の右辺の和を第6項までで打ち切った場合の低エネルギー領域に於ける近似はあまり良好ではない。しかしながら、Fig.4-14a の中に示してある TN-12A 型容器の中性子に対する容器壁遮蔽性能特性関数が第20群よりも低エネルギー側にある中性子に対して極めて小さな値であることから、第7項以上の高次項からの容器表面中性子線量率への寄与は無視できる。したがって、線量率計算のためには、(3-19)式の和

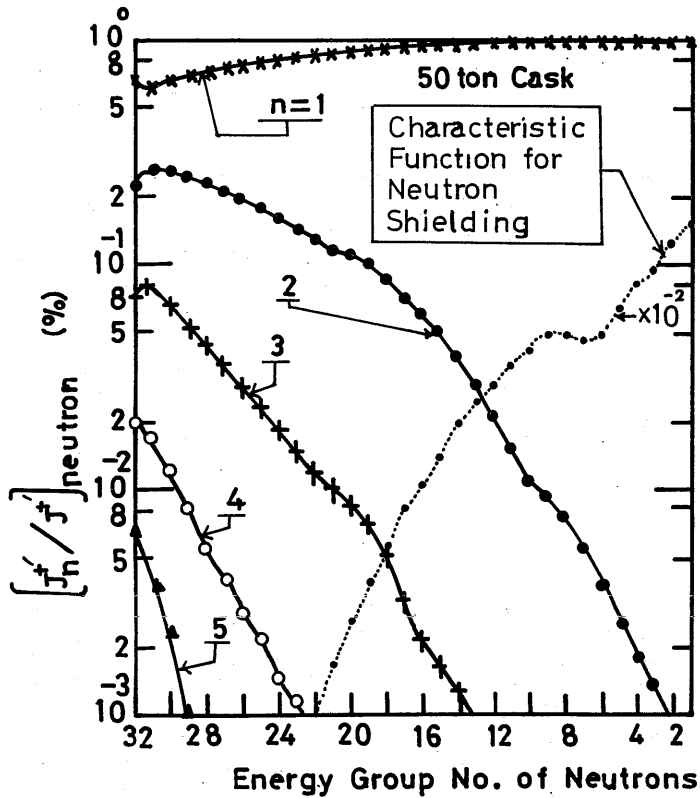


Fig. 4-14b Percentage Representation of Contribution from Each Step of Neutron Coupling to the Quantity J_n^+ for the Case of 50-Ton Cask at CRIEPI. Characteristic Function for Neutron Shielding (CFSN) for the 50-ton cask is also shown to explain importance of each contribution to the dose rate on the cask surface. The quantity n in the expression " $n=1$ " corresponds to the power n in the expression " $(R_b R_c)^n$ " in Eq. (3-19). (H. Yamakoshi (3), (10))

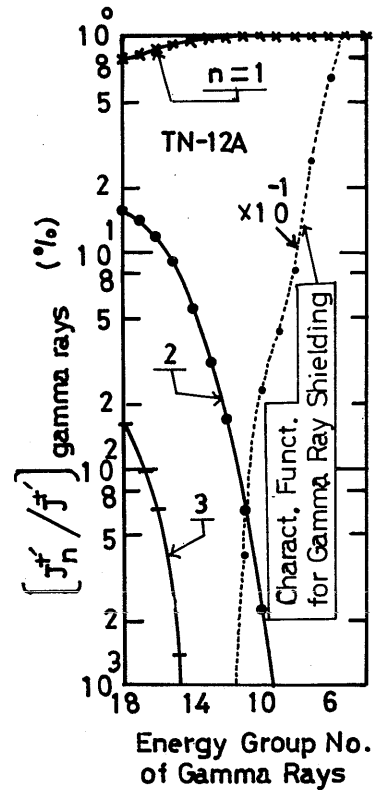


Fig. 4-15 Percentage Representation of Contribution from Each Step of Gamma-Ray Coupling to the Quantity J_g^+ for the Case of TN-12A. Characteristic Function for Primary Gamma-Ray Shielding (CFSPG) for the TN-12A cask is also shown to explain importance of each contribution to the dose rate on the cask surface. The quantity n in the expression " $n=1$ " corresponds to the power n in the expression " $(R_b R_c)^n$ " in Eq. (3-19). (H. Yamakoshi (3), (10))

cumulative contribution to the dose rates
on the surface of TN-12A cask

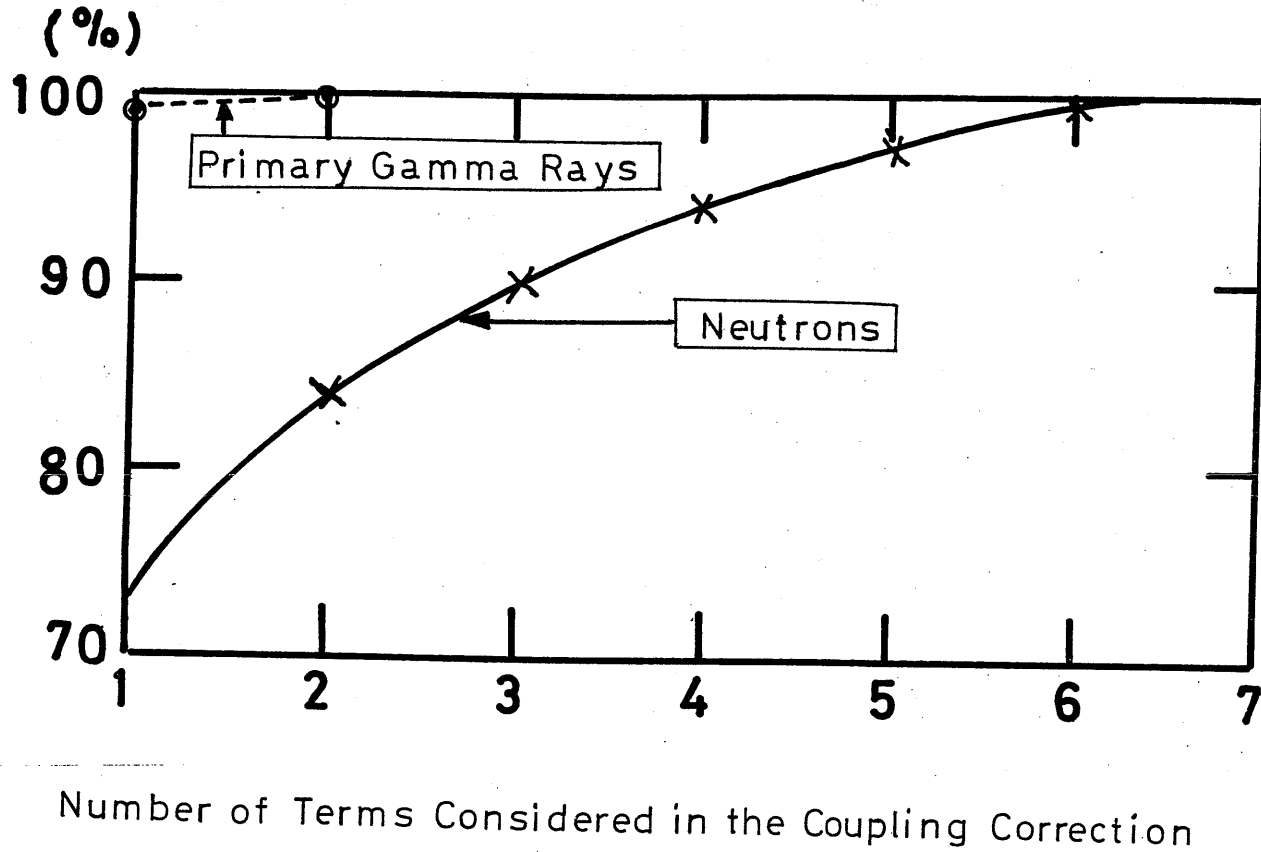


Fig.4-16 Percentage Representation of Cumulative Contribution from
Each Summation of the Power Series Expansion in Eq.(3-19)
to the Neutron Dose Rate on the Surface of the TN-12A Cask .
(H. Yamakoshi (3),(10))

リング効果が容器表面線量率に及ぼす影響を検討した結果、どの型式の容器でも、(3-19)式の右辺の和を第6項まで採れば十分に良好な近似で容器表面線量率が計算できることが明らかとなった。

いっぽう、乾式容器のガンマ線に対する同様な検討から(3-19)式の右辺の和は第3項まで採れば十分に良い近似で容器表面線量率が計算できることが明らかとなった。この点に関しては、片岡がガンマ線の計算で用いた仮定を支持している。

以上の事柄から、第三章で示した計算法に於ける反射線流のカップリングの役割は、ガンマ線よりは中性子に於いて重要であるが、乾式容器の場合のその役割は特に重要であると言える。

第三章で示した計算法をコード化し、計算プログラム SMART を作成した。このプログラムはステップ数が少なく、かつ、このプログラムを用いた場合の計算時間も極めて短い点に特徴がある。

したがって、内筒部線源条件が変わるたびごとに容器遮蔽計算を繰り返さなければならない事態に対しては、このプログラムを活用することにより精度良く手軽に計算を済ますことができ、実用性の高い計算プログラムであると言える。

実用と応用の便宜のために、主要な型の現用輸送容器に対し容器壁遮蔽性能特性関数および容器壁反射線流特性関数を決定し表として掲げた。さらに、乾式容器として TN-12A 型容器を、湿式容器として EXCELLOX-3 型容器を採り上げ、収納能力いっぱいの使用済核燃料を収納した状態に於いて内筒部反射線流特性関数を決定し、表として示した。

湿式容器の場合、内筒部表面を厚さ 10 cm の水層が覆っていると近似したモデルを採用して内筒部反射線流特性関数を決定したが、この近似を用いて求めた内筒部からの中性子反射線流の値は収納燃料の存否には鈍感であること、したがって、一度、中性子に対する内筒部反射線流特性関数を求めておけば、以後新たに使用済核燃料を収納する際に、改めて内筒部反射線流特性関数を計算する必要はないことが明らかとなった。

湿式容器の場合のガンマ線についても、内筒部反射線流特性関数が大きな値をとる成分については使用済核燃料の存否の影響が最大で 5% であることから判断して、中性子の場合と同様に、一度求めた内筒部反射線流特性関数の値は新たな燃料装荷に対しても適用可能と考えられる。

乾式容器の場合、内筒部に入射した中性子はあまり減速されずに容器壁部へ反射され、もっぱら容器壁部に於いて大幅な減速をうける。この内筒部から反射される中性子線流に収納燃料が及ぼす影響は最大で 5% である。このことから判断して、中性子に対する内筒部反射線流特性関数の値もまた、一度求めれば以後の新たな燃料装荷の際にその値を適用することができると考えられる。

乾式容器の場合、内筒部に入射したガンマ線は内筒部の主要構成材料であるアルミによって強

く反射される。 収納燃料の存在が内筒部からの反射ガンマ線線流に及ぼす影響は殆ど完全にこの強いアルミによる反射で覆い隠されてしまうので、ガンマ線に対する内筒部反射線流特性関数も、一度その値を求めれば以後の新たな燃料装荷の際にその値を適用することができる。

なお、容器壁遮蔽性能特性関数の値は予想どおりに、容器壁構造の相異を反映して、容器の各型に応じた個性を表現しておることが確認された。

容器壁遮蔽性能特性関数は容器表面線量率の計算、すなわち、いわゆる容器遮蔽計算を短時間に済ませるために有効であるばかりではなく、その関数値の放射線エネルギー依存性が容器壁構造を反映しているのも、特に遮蔽性能上の観点から有利な壁構造とはいかなるものであるか究明したり、またどの容器がより有利な遮蔽性能を有するか判断をする際に、明確な判断基準を与える点に於いて、容器壁遮蔽性能特性関数の応用上の効用がある。

容器の運搬および取り扱いの容易さであるとか、使用済核燃料輸送に於ける輸送政策、輸送方式とそれに伴う経済性等、それぞれの容器には、遮蔽性能のみからその容器の優劣を判断することのできぬ要素が多くあるので、上記遮蔽性能上の有利さは、あくまでもひとつの目安に過ぎないことは言うまでもないことである。

文 献

- (1) H. Yamakoshi, Nucl. Sci. Eng., 87, 152 (1984)
- (2) 山越寿夫 他、船舶技術研究所報告 第20巻 第6号 431頁 (1983)
- (3) 山越寿夫、日本造船研究協会 RR-28 基準部会 研究資料 No.148R、192頁 (1985)
- (4) 中沢正治、私信
- (5) A. G. Croff, "A User's Manual for ORIGEN-2 Computer Code", ORNL-TM-7175 (1980)
- (6) K. Ueki et al., Nucl. Sci. Eng., 84, 271 (1983)

5.2.1 基準平面上の解析的表現

5.2.1.1 解析的表現の導出⁽¹⁾

輸送容器は外側表面に対する半径が r_s 、高さが $2H$ の茶筒形をしており、容器は Fig.5-1

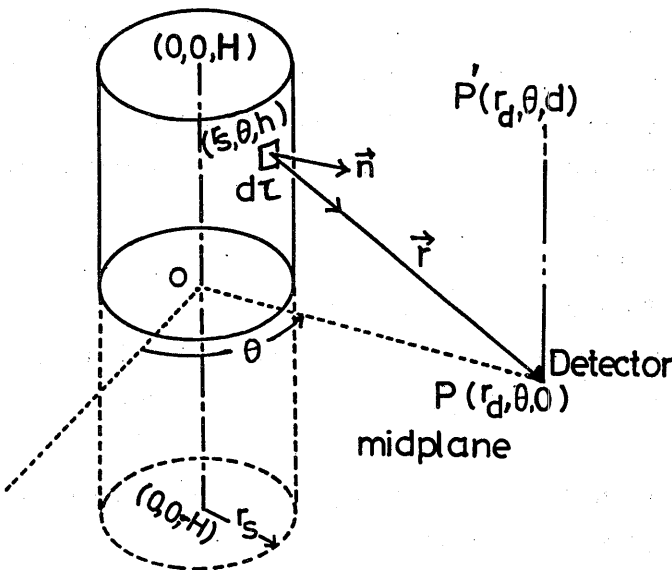


Fig.5-1 Schematic Illustration of Coordinate System Adopted, Cask Midplane and Detector Positions P and P' (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

に示すように、長軸に垂直な基準平面と呼ばれる平面により、高さ H ずつの部分に2分されるものとする。

基準平面上の線量率分布 D は長軸からの距離 r_d に依存するので、以下では $D(r_d)$ と記すこととする。 $D(r_d)$ の解析的表現を導く際に以下の仮定を設ける。

(1) 容器表面からの放射線放射角度分布は、容器表面の外向き法線と放射方向との間の角度をとすれば、 $\cos\theta$ に比例するものとする。

(2) 容器表面上の単位表面積から放射される放射線の線束は、容器長軸方向については一定とする。

(3) 容器表面から放射した放射線が空气中で散乱しても、

観測点の放射線エネルギー分布に及ぼす散乱の影響は無視することができるものと仮定する。

容器表面の線源強度を放射線エネルギー E に依存するものとして $s(E)$ と表わすことにすれば、観測点 P に於ける線量率 $D(r_d)$ は、上記仮定のもとでは以下のように与えられる。

$$D(r_d) = \int_R s(E') C(E'') \left[\frac{(\vec{k} \cdot \vec{n})}{4\pi s^2} d\tau \right] dE' \quad , \quad (5-1)$$

ここで $C(E)$ は線束から線量率への変換係数であり、 \vec{k} は線源位置から観測点Pへ向かう単位方向ベクトルであり、 \vec{n} は線源位置に於ける面積素片 $d\tau$ に対する外向き法線ベクトルである。また r は線源位置と観測点Pとの間の三次元的距離である。表面積分の積分領域Rは、点Pから直接見える容器表面上の領域に限定されている。

(5-1) 式のエネルギーの関する積分は表面積分から分離できるので、線量率 $D(r_d)$ の距離 r_d に対する依存性は次のように線束 $\Phi(r_d)$ の距離 r_d に対する依存性で置き換えることができる。

$$D(r_d) = \int s(E') C(E') dE' \Phi(r_d), \quad (5-2)$$

$$\Phi(r_d) \equiv \int_R \frac{(\vec{k} \cdot \vec{n})}{4\pi \xi^2} d\tau, \quad (5-3)$$

(5-3) 式に於ける右辺の具体的表現は表面線源の長軸に関する座標 h と角度 θ に関する二重積分で表わされる。

$$\Phi(r_d) = \frac{r_s}{\pi} \int_0^H \int_0^{\theta_c} \frac{(r_d \cos\theta - r_s) d\theta dh}{(r_d^2 + r_s^2 - 2r_d r_s \cos\theta + h^2)^{2/3}}, \quad (5-4)$$

$$\theta_c \equiv \cos^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right), \quad (5-5)$$

(5-4) 式の積分のうちで h に関する積分は容易に実行できるので、 $\Phi(r_d)$ は角度 θ に関する積分表示で与えられる。

$$\Phi(r_d) = \frac{H r_s}{\pi} \int_0^{\theta_c} \frac{r_d \cos\theta - r_s}{(r_d^2 + r_s^2 - 2r_d r_s \cos\theta)^{1/2}} d\theta \quad (5-6)$$

(5-6) 式の積分は解析的に実行することは不可能であり、通常は、これから先の積分は数值的に実行される。しかしながら、本研究では、物理的考察から、(5-6) 式の被積分関数のうちで第2因子として与えられる (...) の部分は、その依存性が、 $0 \leq \theta \leq \theta_c$ の範囲では、極めて鈍感であると考え、この部分を以下で定義する平均値 J で置換することが可能であると仮定する。

$$J \equiv \int_0^{\theta_c} (r_s^2 + r_d^2 - 2r_s r_d \cos\theta + H^2)^{-1/2} d\theta \quad (5-7)$$

(5-6) 式の被積分関数のうちで第1因子で与えられる (...) の部分の積分は解析的に容易に実行することができる。この積分の結果を K として表わすこととする。

$$K \equiv \int_0^{\theta_c} \frac{r_d \cos\theta - r_s}{r_d^2 + r_s^2 - 2r_d r_s \cos\theta} d\theta \quad (5-8)$$

上記の (5-8) 式ならびに (5-7) 式を考慮すれば、(5-6) 式は近似的に、以下のように表わせる。

$$\Phi(r_d) \approx \frac{H r_s}{\pi} J \cdot K \quad (5-9)$$

積 H J は 2 個の第 1 種楕円積分 $F(\frac{\pi}{2}, \lambda)$ ならびに $F(\psi_c, \lambda)$ を用いて以下のように表わせる。

$$HJ = \frac{2}{\cos^{-1}(X/Y)} \frac{F(\frac{\pi}{2}, \lambda) - F(\psi_c, \lambda)}{\sqrt{1 + (X + Y)^2}}, \quad (5-10)$$

ただし、

$$X \equiv \frac{r_s}{H}, \quad Y \equiv \frac{r_d}{H}, \quad (5-11)$$

である。

さらに、 λ 、 ψ_c 、 θ_c は、 X 、 Y を用いて以下のように表わされる。

$$\lambda \equiv \sqrt{\frac{4XY}{1 + (X + Y)^2}}, \quad (5-12)$$

$$\psi_c \equiv \sin^{-1}\left(\sqrt{\frac{1 + (X/Y)}{2}}\right), \quad (5-13)$$

$$\theta_c \equiv \cos^{-1}\left(\frac{X}{Y}\right), \quad (5-14)$$

他方、量 K は以下に示すように単純な関数で表わせる。

$$K = \frac{1}{r_s} \sin^{-1}\left(\frac{X}{Y}\right), \quad (5-15)$$

以上の結果を総合すれば、線束 $\phi(r_d)$ の式は

$$\Phi(r_d) \approx \frac{H J}{\pi} \sin^{-1}\left(\frac{X}{Y}\right), \quad (5-16)$$

で与えられる。

観測点Pが容器表面に接近して行くと、YはXに接近して行くので、(5-16)式中の関数 $\sin^{-1}(X/Y)$ は $\frac{\pi}{2}$ に、また積HJは1に接近して行く。したがって、(5-17)式のように因子2を掛けた場合の線束の式は容器表面で値を1に規格化した場合の線量率分布であると言える。

$$\Phi(r_d) \approx \frac{2 H}{\pi} J K \sin^{-1}\left(\frac{X}{Y}\right), \quad (5-17)$$

Table 5-1 には、(5-17)式と、容器表面上で上記規格化を行なった場合の(5-4)式との比較を示す。半径 r_s が現用容器の場合のように1 m 程度の場合は、Hの値が0.5 m 程度に小さいと(5-17)式は近似がやや悪い。しかしながら、Hの値が大きくなるにつれて急速に近似精度が改善され、現用容器の場合のように、 $H \approx 2$ m 程度では良好な結果を与えることが分かる。

(5-2) 式の積分で $\int_S (E') C(E') dE'$ は容器表面中央部に於ける線量率 D_0 を与える。したがって、(5-17)式を考慮すれば、基準平面上の線量率分布 $D(r_d)$ は

$$D(r_d) \approx \frac{2 D_0}{\pi} H J \sin^{-1}\left(\frac{X}{Y}\right), \quad (5-18)$$

として表現される。⁽¹⁾

5.2.1.2 解析表示の漸近的性質⁽¹⁾

(a) 容器から遠方に離れた場合

Jの定義式である(5-7)式からも伺えるように、距離 r_d が半径 r_s 、高さHに比較して十分に大きくなるにしたがい、Jは漸的に

$$J = \frac{1}{r_d}, \quad (5-19)$$

Table 5 - 1 Comparison of Exact Flux ϕ in Eq.(5-4) with Approximated Flux ϕ in Eq.(5-9).
(Both expressions in Eqs.(5-4) and (5-9) are normalized to the unity on the cask surface)

$r_s = 1.0$ m		$H = 0.25$ m		$H = 0.5$ m		$H = 1.0$ m	
r_d (m)	$r_d - r_s$ (m)	ϕ (n/cm ² ·s ⁻¹)		ϕ (n/cm ² ·s ⁻¹)		ϕ (n/cm ² ·s ⁻¹)	
		Exact	Approximate	Exact	Approximate	Exact	Approximate
1.01	1.0E-2 ^a	9.045E-1	8.658E-1	9.075E-1	8.972E-1	9.089E-1	9.060E-1
1.05	5.0E-2	7.600E-1	6.596E-1	7.905E-1	7.524E-1	8.004E-1	7.878E-1
1.1	1.0E-1	6.265E-1	5.184E-1	6.945E-1	6.416E-1	7.180E-1	6.996E-1
1.2	2.0E-1	4.342E-1	3.534E-1	5.520E-1	4.938E-1	6.045E-1	5.798E-1
1.4	4.0E-1	2.337E-1	1.962E-1	3.623E-1	3.198E-1	4.534E-1	4.268E-1
1.6	6.0E-1	1.453E-1	1.258E-1	2.495E-1	2.220E-1	3.503E-1	3.272E-1
1.8	8.0E-1	9.950E-2	8.814E-2	1.803E-1	1.622E-1	2.759E-1	2.572E-1
2.0	1.0E-0	7.271E-2	6.550E-2	1.358E-1	1.235E-1	2.212E-1	2.064E-1
3.0	2.0E-0	2.499E-2	2.348E-2	4.901E-2	4.612E-2	9.115E-2	8.636E-2
5.0	4.0E-0	7.663E-3	7.388E-3	1.524E-2	1.470E-2	2.985E-2	2.882E-2
7.0	6.0E-0	3.685E-3	3.586E-3	7.350E-3	7.154E-3	1.456E-2	1.418E-2
9.0	8.0E-0	2.162E-3	2.134E-3	4.317E-3	4.220E-3	8.585E-3	8.396E-3
11.0	1.0E+1	1.420E-3	1.392E-3	2.838E-3	2.780E-3	5.655E-3	5.542E-3

$r_s = 1.0$ m		$H = 2.0$ m		$H = 4.0$ m	
r_d (m)	$r_d - r_s$ (m)	ϕ (n/cm ² ·s ⁻¹)		ϕ (n/cm ² ·s ⁻¹)	
		Exact	Approximate	Exact	Approximate
1.01	1.0E-2	9.100E-1	9.082E-1	9.101E-1	9.088E-1
1.05	5.0E-2	8.020E-1	7.980E-1	8.030E-1	8.006E-1
1.1	1.0E-1	7.245E-1	7.186E-1	7.261E-1	7.236E-1
1.2	2.0E-1	6.215E-1	6.130E-1	6.260E-1	6.228E-1
1.4	4.0E-1	4.913E-1	4.800E-1	5.025E-1	4.990E-1
1.6	6.0E-1	4.405E-1	3.936E-1	4.431E-1	4.392E-1
1.8	8.0E-1	3.402E-1	3.296E-1	3.653E-1	3.612E-1
2.0	1.0E-0	2.898E-1	2.800E-1	3.206E-1	3.164E-1
3.0	2.0E-0	1.471E-1	1.416E-1	1.903E-1	1.868E-1
5.0	4.0E-0	5.535E-2	5.366E-2	8.860E-2	8.672E-2
7.0	6.0E-0	2.865E-2	2.736E-2	4.954E-2	4.850E-2
9.0	8.0E-0	1.681E-2	1.644E-2	3.109E-2	3.048E-2
11.0	1.0E+1	1.115E-2	1.093E-2	2.116E-2	2.076E-2

$r_s = 0.25$ m		$H = 0.25$ m		$r_s = 0.5$ m		$H = 0.5$ m	
r_d (m)	$r_d - r_s$ (m)	ϕ (n/cm ² ·s ⁻¹)		r_d (m)	$r_d - r_s$ (m)	ϕ (n/cm ² ·s ⁻¹)	
		Exact	Approximate			Exact	Approximate
0.26	1.0E-2	8.205E-1	8.104E-1	0.51	1.0E-2	8.720E-1	8.666E-1
0.30	5.0E-2	6.045E-1	5.798E-1	0.55	5.0E-2	7.175E-1	6.996E-1
0.35	1.0E-1	4.533E-1	4.268E-1	0.60	1.0E-1	6.045E-1	5.798E-1
0.45	2.0E-1	2.760E-1	2.572E-1	0.70	2.0E-1	4.534E-1	4.268E-1
0.65	4.0E-1	1.250E-1	1.177E-1	0.90	4.0E-1	2.759E-1	2.572E-1
0.85	6.0E-1	6.915E-2	6.588E-2	1.10	6.0E-1	1.802E-1	1.686E-1
1.05	8.0E-1	4.355E-2	4.182E-2	1.30	8.0E-1	1.250E-1	1.177E-1
1.25	1.0E-0	2.985E-2	2.882E-2	1.50	1.0E-0	9.115E-2	8.636E-2
2.25	2.0E-0	8.585E-3	8.394E-3	2.50	2.0E-0	2.986E-2	2.882E-2
4.25	4.0E-0	2.307E-3	2.266E-3	4.50	4.0E-0	8.585E-3	8.396E-3
6.25	6.0E-0	1.051E-3	1.031E-3	6.50	6.0E-0	4.003E-3	3.928E-3
8.25	8.0E-0	5.985E-4	5.856E-4	8.50	8.0E-0	2.307E-3	2.266E-3
10.25	1.0E+1	3.859E-4	3.764E-4	10.50	1.0E+1	1.499E-3	1.471E-3

^aRead as 1.0×10^{-2} .

に近づいて行く。

また、その場合の $\sin^{-1}(r_s/r_d)$ は、以下の多項式に展開されるので、

$$\sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right) \approx \left(\frac{r_s}{r_d}\right) + \frac{1}{6} \left(\frac{r_s}{r_d}\right)^3 + \dots, \quad (5-20)$$

距離 r_d が容器半径 r_s よりも十分に大きくなるにつれて漸近的に

$$\sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right) = \frac{r_s}{r_d}, \quad (5-21)$$

に近づいて行く。

以上の結果を総合すれば、観測点Pが容器から十分に離れた位置で線量率 $D(r_d)$ は、 r_d^{-2} に比例するものと考えられる。

$$D(r_d) \propto \frac{1}{r_d^2}, \quad (5-22)$$

(b) 容器近傍の場合

Hの値が現用容器のように2 m程度ある場合には、値として $r_s/10 \sim r_s$ 程度の範囲に収まる r_d に対して関数Jの値は以下のように r_d の一次式として近似できる。

$$J \approx a \cdot r_d + b, \quad (5-23)$$

ここで a と b は、位置

$$\left. \begin{aligned} r_{d_1} - r_s &= 0.1 \text{ m} \\ r_{d_2} - r_s &= 1.0 \text{ m} \end{aligned} \right\}, \quad (5-24)$$

に於いて(5-23)式が正確に、Jの定義式(5-7)の値を再現するように決定されるものとする。

Table 5 - 2 r_s and H Dependence of the Coefficient a and the Constant b in the Approximation $J = ar_d + b$

r_s (m)	H = 0.5 m		H = 1.0 m		H = 1.5 m	
	-a	b	-a	b	-a	b
0.01	1.184E-4*	2.087E-2	3.206E-5	1.029E-2	1.232E-5	6.779E-3
0.5	1.167E-4	2.550E-2	3.586E-5	1.193E-2	1.466E-5	7.476E-3
1.0	1.139E-4	3.020E-2	3.821E-5	1.384E-2	1.641E-5	8.355E-3
1.5	1.111E-4	3.478E-2	3.978E-5	1.587E-2	1.778E-5	9.351E-3
2.0	1.085E-4	3.922E-2	4.088E-5	1.796E-2	1.889E-5	1.043E-2
2.5	1.060E-4	4.353E-2	4.167E-5	2.009E-2	1.981E-5	1.157E-2
3.0	1.038E-4	4.773E-2	4.225E-5	2.225E-2	2.059E-5	1.276E-2

r_s (m)	H = 2.0 m		H = 2.5 m		H = 3.0 m	
	-a	b	-a	b	-a	b
0.01	5.822E-6	5.052E-3	3.158E-6	4.027E-3	1.892E-6	3.349E-3
0.5	7.164E-6	5.398E-3	3.963E-6	4.220E-3	2.398E-6	3.466E-3
1.0	8.265E-6	5.857E-3	4.660E-6	4.484E-3	2.857E-6	3.630E-3
1.5	9.192E-6	6.399E-3	5.274E-6	4.805E-3	3.272E-6	3.833E-3
2.0	9.992E-6	7.007E-3	5.823E-6	5.174E-3	3.652E-6	4.071E-3
2.5	1.069E-5	7.669E-3	6.319E-6	5.584E-3	4.003E-6	4.338E-3
3.0	1.131E-5	8.377E-3	6.770E-6	6.030E-3	4.329E-6	4.634E-3

*Read as 1.184×10^{-4} .

(H. Yamakoshi⁽¹⁾)

Table 5 - 3 Comparison of Exact J-Value in Eq.(5-7) with the Approximated J-Value Given by Eq.(5-23).
(In the case of $r_s = 1$ m)

r_d (m)	$r_d - r_s$ (m)	H = 0.5 m			H = 1.0 m			H = 2.0 m		
		Exact J	Approximate J	Error (%)	Exact J	Approximate J	Error (%)	Exact J	Approximate J	Error (%)
1.01	1.01: -2*	1.972E-2	1.870E-2	(-5)	9.956E-3	9.980E-3	(+1)	4.990E-3	5.022E-3	(+1)
1.05	5.01: -2	1.875E-2	1.824E-2	(-3)	9.818E-3	9.827E-3	(+1)	4.972E-3	4.989E-3	(+1)
1.1	1.01: -1	1.767E-2	1.767E-2	(-0)	9.636E-3	9.636E-3	(+0)	4.948E-3	4.948E-3	(+0)
1.2	2.01: -1	1.576E-2	1.653E-2	(+5)	9.249E-3	9.254E-3	(+1)	4.890E-3	4.865E-3	(-1)
1.4	4.01: -1	1.264E-2	1.425E-2	(+12)	8.430E-3	8.490E-3	(+1)	4.750E-3	4.700E-3	(-1)
1.6	6.01: -1	1.034E-2	1.197E-2	(+16)	7.616E-3	7.725E-3	(+2)	4.583E-3	4.534E-3	(-1)
1.8	8.01: -1	8.659E-3	9.696E-3	(+12)	6.864E-3	6.961E-3	(+2)	4.398E-3	4.369E-3	(-1)
2.0	1.01: -0	7.418E-3	7.418E-3	(+0)	6.197E-3	6.197E-3	(+0)	4.204E-3	4.204E-3	(-0)
2.2	1.21: -0	6.475E-3	5.140E-3	(-20)	5.617E-3	5.433E-3	(-3)	4.007E-3	4.038E-3	(+1)
2.4	1.41: -0	5.738E-3	2.861E-3	(-50)	5.118E-3	4.668E-3	(-9)	3.813E-3	3.873E-3	(+2)
2.6	1.61: -0	5.150E-3	5.830E-4	(-88)	4.689E-3	3.904E-3	(-17)	3.625E-3	3.708E-3	(+3)
2.8	1.81: -0	4.669E-3	-1.695E-3	(-136)	4.319E-3	3.140E-3	(-28)	3.446E-3	3.543E-3	(+3)
3.0	2.01: -0	4.270E-3	-3.974E-3	(-193)	3.998E-3	2.376E-3	(-41)	3.277E-3	3.377E-3	(+3)
3.2	2.21: -0	3.933E-3	-6.252E-3	(-259)	3.718E-3	1.612E-3	(-57)	3.118E-3	3.212E-3	(+3)
3.4	2.41: -0	3.646E-3	-8.531E-3	(-334)	3.473E-3	8.473E-4	(-76)	2.969E-3	3.047E-3	(+3)
3.6	2.61: -0	3.397E-3	-1.081E-2	(-418)	3.256E-3	8.310E-4	(-98)	2.831E-3	2.881E-3	(+2)

*Read as 1.0×10^{-2} .

(H. Yamakoshi⁽¹⁾)

α の値を順次動かして行き r_d の値の最も広い範囲で良い近似が得られるのは、Table 5-3 に示すように、 $\alpha = 1.303061$ とした場合である。この α の値に於ける B の値は、丁度

$$B = 0 \quad (5-26)$$

となり、(5-25)式の間数形がより単純な単一項のみから成る表現になることは注目に値する。

条件式 (5-25) を課して得られる A および α を以下では改めて A, α_q で表わすことにする。

$$\left. \begin{aligned} \ln\left[\sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right)\right] &= \ln A - \alpha_q \ln r_{d_1} \\ \ln\left[\sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right)\right] &= \ln A - \alpha_q \ln r_{d_2} \end{aligned} \right\} \quad (5-27)$$

(5-27)式で求められる α_q は A と同様に、容器表面の半径 r_s に依存する。Table 5-5 に示したように、 r_s の値が小さくなるにつれて α_q, A はともに値が減少し、 r_s が 1 に近づく一方で A は r_s に近づく。

Table 5 - 5 r_s Dependence of α_q and A in Eq.(5-25)

r_s (m)	α_q	A
1.0E-3 ^a	1.000000	1.000E-3
5.0E-1	1.161520	5.444E-1
1.0E-0	1.303061	1.292E-0
1.5E-0	1.424830	2.374E-0
2.0E-0	1.533469	3.934E-0
2.5E-0	1.632530	6.150E-0
3.0E-0	1.724180	9.257E-0

^aRead as 1.0×10^{-3} . (H. Yamakoshi⁽¹⁾)

α_q の r_s 依存性のうちで特に注目に値することは、 $r_s = 1$ m の場合に於いて $\alpha_q = 1.303061$

が成立することである。この値は、次項で述べるように、 $D(r_d)$ に対する経験則との対応で重要な意味を持っている。

5.2.1.3 理論式と経験式との対応

$r_s = 1 \text{ m}$ 、 $H = 1 \text{ m}$ の場合の容器を例に採れば、Table 5-2 の a、b の値および Table 5-5 の α_q A の値から線量率 $D(r_d)$ の r_d 依存性として以下の関係が得られる。

$$D(r_d) \propto \frac{1.788}{r_d^{1.303061}} - \frac{4.937 \times 10^{-3}}{r_d}, \quad (5-28)$$

(5-28)式は観測点Pが容器表面から数 cm ないし 2 m 程度の範囲内にある場合は良い近似値を与える。しかもその範囲に於いては、第2項は第1項に比較して無視できるほどに小さな値である。したがって、(5-28)式はさらに

$$D(r_d) \propto r_d^{-1.303061}, \quad (5-29)$$

で近似することができる。

実際の容器の表面半径はそのほとんどが 1 m 程度である。このような容器に対する周辺線量率分布の測定値から得られる線量率分布の r_d 依存性は、容器から十分にはなれた位置では r_d^{-2} に比例し、容器近傍では $r_d^{-1.2}$ に比例している。この距離依存性は経験則として得られているものである。

容器近傍の線量率分布をひとつのパラメタ α で表わした場合のこの理論値 $\alpha_q = 1.303061$ は、観測結果から α に対応する値を求めた場合に於けるその値の変動範囲内に収まっている。

以上のことから、実際の容器に対して得られている経験則を理論的に十分良く説明できたと考えることができる。

Table 5-5 から予測されることであるが、容器半径が 1 m からかなり懸け離れている容器では、経験則に於ける容器近傍線量率分布の距離 r_d に対する指数は 1.2 とはかなり違った値をとるはずである。

5.2.2 解析的表現の一般化⁽⁵⁾

観測点が基準平面上に存在しない場合は、線量率分布を記述するために r_d 、 θ のほかに、もう 1 個の独立変数が必要となる。Fig. 5-1 に例示するように、観測点P'の位置座標は $(r_d$

, θ, d)で記述されるので、この追加された独立変数として d を用いることとする。

観測点が一般的な位置 P' に存在する場合の線量率を記述するべく、基準平面上の線量率分布の式 (5-18) を拡張する必要がある。そのために、加法則 (Additivity Rule)⁽⁴⁾ と呼ばれる手法の考え方をを用いることとする。

この手法の原理は、例えば Fig. 5-1 で点 P' の位置を容器長軸に沿って上方へ移動させ、 $d = H$ の状態にした場合を想定すれば、 P' の位置が高さ $4H$ の仮想的容器に対する基準平面上に存在することになるので、点 P' に於ける線量率はこの仮想容器による線量率の丁度半分の値となると考え得ることにある。

加法則を適用する場合、 P' の位置が $H > d$ を満たすか、あるいは $H < d$ を満たすかに依って取り扱いが異なることに注意する必要がある。

この加法則を適用するのに先立ち、(5-10)式で表わされる積、 HJ を改めて $G(x, y)$ と表わすことにする。

5.2.2.1 $d < H$ の場合

Fig. 5-2 中の観測点 P' に於ける線量率は、容器が仮想的な表面線源 \overline{AD} を持つ場合の線量率から \overline{BD} の部分による線量率への寄与を差し引いたものとして与えられる。ただし \overline{AD} は P' 点とその基準平面上に来るように配慮はれた長さとなっている。

他方、仮想線源 \overline{BD} から点 P' への線量率の寄与は、仮想的な表面線源 \overline{AD} を持つ容器からの寄与と表面線源 \overline{BC} を持つ容器からの寄与との差の、丁度半分の値として与えられる。

以上を総合して、実際の線源 \overline{AB} による、点 P' の位置に於ける線量率 $D(r_d, d)$ は

$$\begin{aligned}
 D(r_d, d) &= \frac{2D_0}{\pi} G\left(\frac{r_s}{H+d}, \frac{r_d}{H+d}\right) \sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right) \\
 &- \frac{1}{2} \left[\frac{2D_0}{\pi} \left\{ G\left(\frac{r_s}{H+d}, \frac{r_d}{H+d}\right) - G\left(\frac{r_s}{H-d}, \frac{r_d}{H-d}\right) \right\} \right] \sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right) \\
 &= \frac{D_0}{\pi} \left[G\left(\frac{r_s}{H+d}, \frac{r_d}{H+d}\right) + G\left(\frac{r_s}{H-d}, \frac{r_d}{H-d}\right) \right] \sin^{-1}\left(\frac{r_s}{r_d}\right), \quad (5-30)
 \end{aligned}$$

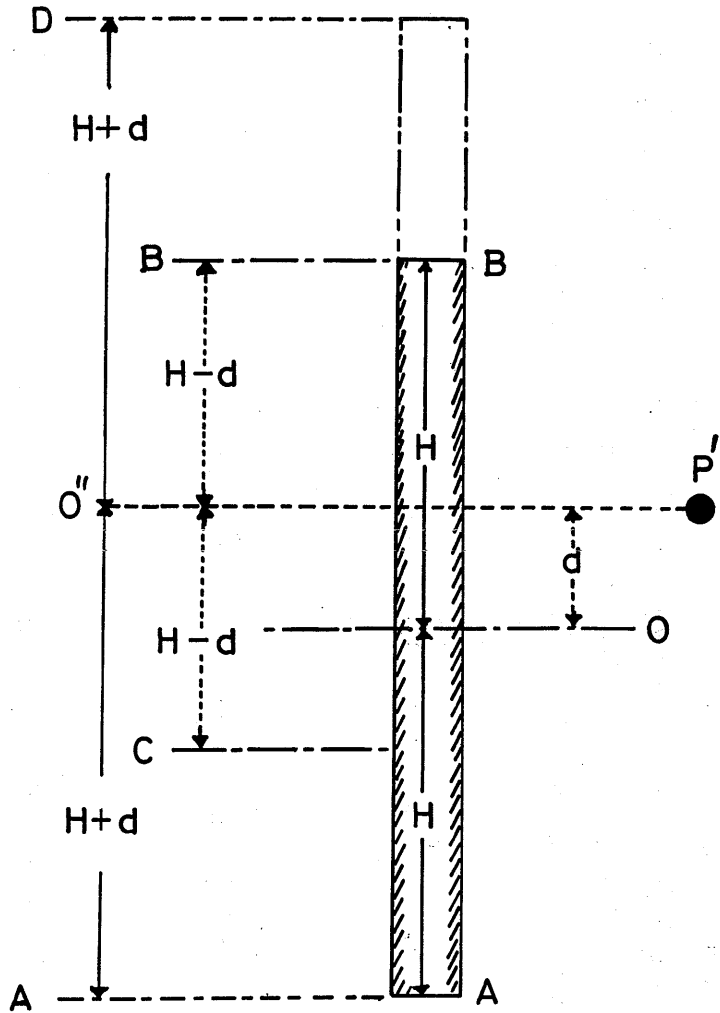


Fig.5-2 Configuration of Imaginary Sources and Detector P' for the Case $d < H$. (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

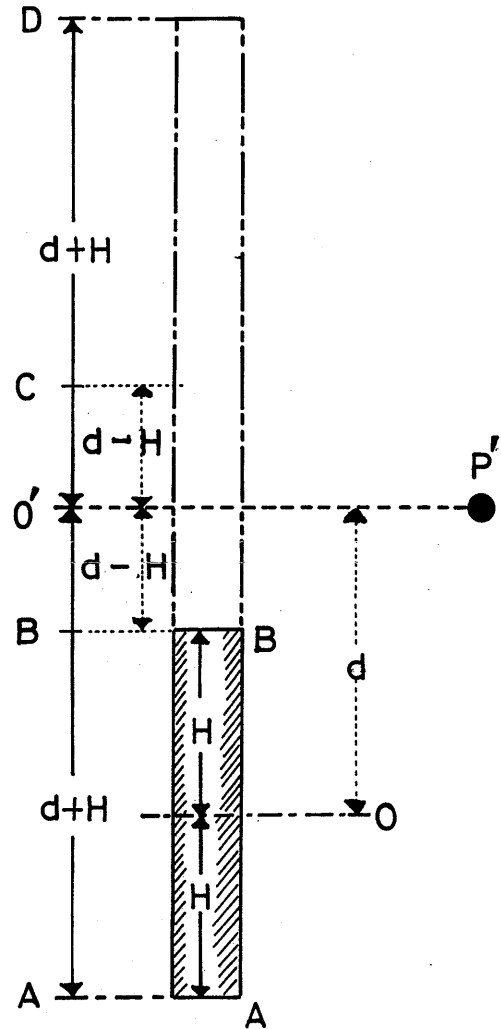


Fig.5-3 Configuration of Imaginary Sources and Detector P' for the Case $d > H$. (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

で与えられる。

ここで新しい変数として、以下に定義する4変数 ξ 、 η 、 ξ' 、 η' を導入し、(5-30)式を書き直すことにする。

$$\left. \begin{aligned} \xi &\equiv \frac{r_s}{H+d}, & \eta &\equiv \frac{r_d}{H+d} \\ \xi' &\equiv \frac{r_s}{|H-d|}, & \eta' &\equiv \frac{r_d}{|H-d|} \end{aligned} \right\}, \quad (5-31)$$

$$D(r_d, d) = \frac{D_0}{\pi} [G(\xi, \eta) + G(\xi', \eta')] \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right), \quad (5-32)$$

5.2.2.2 $d > H$ の場合

Fig.5-3 中の観測点 P' に於ける線量率は、容器が仮想的な表面線源 \overline{AD} を持つ場合の線量率から \overline{BD} の部分による寄与を差し引いたものとして与えられる。ただし、ここでも、 \overline{AD} の長さは、点 P' がその基準平面上に来るように配慮して、選んである。

仮想線源 \overline{BD} から点 P' に於ける線量率への寄与は仮想的表面線源 \overline{AD} を持つ容器からの寄与から、 \overline{AD} からの寄与の半分に相当する $\overline{O'D}$ からの寄与と仮想線源 \overline{BC} からの寄与の半分とを差し引いたものとして与えられる。ところで、 \overline{BC} の長さの半分は $d - H$ である。

以上を総合すると、実際の表面線源 \overline{AB} による点 P' の位置の線量率 $D(r_d, d)$ は

$$\begin{aligned} D(r_d, d) &= \frac{2D_0}{\pi} G\left(\frac{r_s}{H+d}, \frac{r_d}{H+d}\right) \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right) \\ &- \frac{1}{2} \left[\frac{2D_0}{\pi} \left\{ G\left(\frac{r_s}{H+d}, \frac{r_d}{H+d}\right) + G\left(\frac{r_s}{H-d}, \frac{r_d}{H-d}\right) \right\} \right] \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right) \\ &= \frac{D_0}{\pi} \left[G\left(\frac{r_s}{H+d}, \frac{r_d}{H+d}\right) - G\left(\frac{r_s}{H-d}, \frac{r_d}{H-d}\right) \right] \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right), \quad (5-33) \end{aligned}$$

で与えられる。

(5-31)式で定義した変数を用いれば、(5-33)式は

$$D(r_d, d) = \frac{D_0}{\pi} [G(\xi, \eta) - G(\xi', \eta')] \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right), \quad (5-34)$$

で与えられる。

5.2.2.3 d = H の場合

d = H の場合は、 ξ' および η' は無窮大となる。この場合のH Jの値は零となるので、 $G(\xi', \eta')$ は零となり、(5-32)式あるいは(5-34)式の()の中は第1項のみで与えられる。

$$D(r_d, d=H) = \frac{D_0}{\pi} G \left(\frac{r_s}{2H}, \frac{r_d}{2H} \right) \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right), \quad (5-35)$$

5.2.3 関数 $G(\xi, \eta)$ の性質

式(5-32)および(5-34)に現われる関数 $G(\xi, \eta)$ は、Fig.5-4に見られるように、 ξ および η の値の変化に対して単調にゆっくりと変化する。

この結果として、変数 ξ と η の値が任意に ξ_0, η_0 と与えられた場合、Table 5-6で与えられる関数 $G(\xi, \eta)$ の値の表から直線内挿により良い近似で、対応する $G(\xi_0, \eta_0)$ の値を容易に決定することができる。

5-3 理論値と測定値との比較

5.3.1 基準平面上の式の場合

前記 5.2.1.3 節で(5-18)式の右辺の関数形が物理的に矛盾のないことを、関数の漸近的性質の検討から示した。本節では、実測結果から(5-18)式の妥当性を示すこととする。なお、測定は実際の使用済核燃料を積載した船内で行なわれているため、測定空間の制約から測定が船内空間の一部でしか行なわれていない場合もある。そのような場合の測定値の不足は Monte Carlo 計算によって補って、(5-18)式が予測する線量率の空間分布と比較することとした。

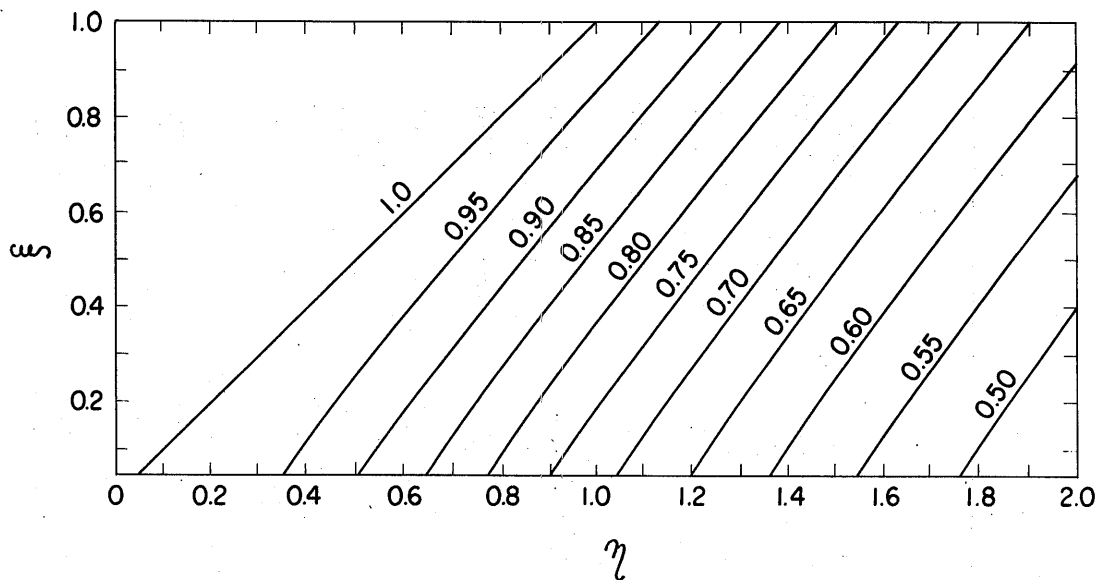


Fig.5-4 Contour Map of the Function $G(\xi, \eta)$ (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

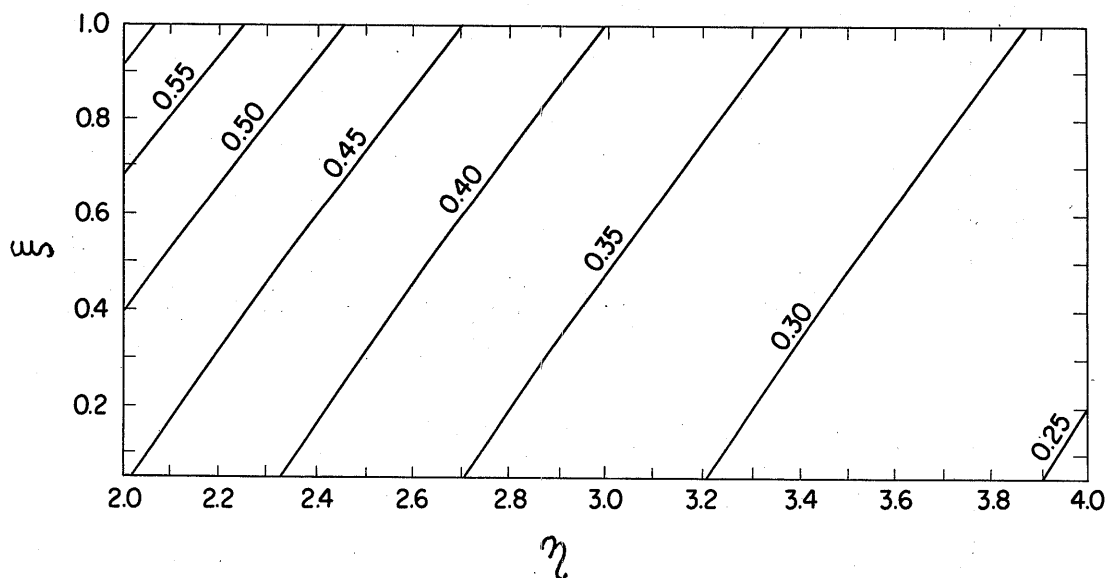


Fig.5-4 Contour Map of the Function $G(\xi, \eta)$ (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

Table 5 - 6 Function $G(\xi, \eta)$

$\eta - \xi$	ξ							
	0.0001	0.2	0.6	1.0	1.6	2.4	3.2	4.0
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.2	0.9795	0.9669	0.9447	0.9250	0.8990	0.8694	0.8441	0.8219
0.4	0.9275	0.9063	0.8716	0.8430	0.8078	0.7701	0.7396	0.7140
0.6	0.8566	0.8318	0.7926	0.7617	0.7247	0.6865	0.6562	0.6312
0.8	0.7800	0.7551	0.7164	0.6865	0.6512	0.6152	0.5869	0.5637
1.0	0.7063	0.6832	0.6474	0.6197	0.5874	0.5545	0.5288	0.5078
1.4	0.5806	0.5625	0.5340	0.5119	0.4858	0.4593	0.4384	0.4213
1.8	0.4851	0.4714	0.4493	0.4319	0.4111	0.3897	0.3728	0.3588
2.2	0.4134	0.4029	0.3856	0.3718	0.3551	0.3376	0.3237	0.3121
2.6	0.3586	0.3504	0.3368	0.3256	0.3119	0.2975	0.2858	0.2760
3.0	0.3159	0.3094	0.2984	0.2892	0.2779	0.2657	0.2558	0.2474
3.6	0.2674	0.2626	0.2543	0.2473	0.2385	0.2289	0.2210	0.2142
4.2	0.2314	0.2277	0.2214	0.2159	0.2088	0.2010	0.1945	0.1890
4.8	0.2037	0.2009	0.1958	0.1914	0.1856	0.1792	0.1738	0.1691
5.4	0.1819	0.1796	0.1755	0.1718	0.1671	0.1617	0.1571	0.1530
6.2	0.1591	0.1573	0.1541	0.1512	0.1474	0.1430	0.1392	0.1359
7.0	0.1413	0.1399	0.1373	0.1350	0.1318	0.1282	0.1251	0.1223
7.8	0.1270	0.1259	0.1238	0.1219	0.1193	0.1162	0.1135	0.1112
8.6	0.1154	0.1144	0.1127	0.1111	0.1098	0.1063	0.1040	0.1019
9.8	0.1014	0.1007	0.0993	0.0980	0.0963	0.0942	0.0923	0.0906

(H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

5.3.1.1 線量率測定法

輸送容器の専用運搬船、日の浦丸に積載した HZ-75T 型容器 2 体と NH-25 型容器 1 体の周りのガンマ線線量率の空間分布が、主として電離箱型サーベイメータを用いて、また一部分は熱蛍光線量計を用いて測定されている。

先ず Fig.5-5 に示すように、③印で示す NH-25 型容器 1 体が船倉に積載された状態に於いて — 印で示す領域と容器表面で線量率が測定された。

次いで Fig.5-6 に示すように、①および ②印で示す HZ-75T 型容器が隣接する船倉に積載された状態で、— 印で示す領域および、容器①と②との間の領域、容器表面上に対して線量率が測定された。

5.3.1.2 Monte Carlo 計算法と解析的手法との比較

Fig.5-6 で — として示す領域は他の容器からの影響が①印で示す容器により遮蔽されていて単一輸送容器に対する線量率分布の判定と言う意味では理想的である。ただ、この領域は狭く、すぐに船尾側にある遮蔽壁につかえてしまう欠点がある。そこで、この領域に於いて(5-18)式が与える線量率分布を測定結果と比較するためには、この遮蔽壁が仮に存在しないと考へ、遮蔽壁以遠の線量率分布は Monte Carlo 法により推定し、測定値に於ける欠落部分を補うこととした。

Monte Carlo 法による計算では MORSE-CG コード を使用した。計算は以下の計算モデルに基づいている。

(1)内筒部は、容器壁部に接する幅 0.01 mm の空隙部と、ほとんど無限に近い強さで放射線を吸収する仮想物質で満たされた部分との、2 領域に分けられるものとする。

(2)空隙部は、HZ-75T の内筒部幾何形状を反映し、高さ 3.8 m 、内径、外径がそれぞれ 47.63 cm および 47.64 cm の円柱殻状の等方線源膜を含んでいるものとする。

(3)容器は Table 4-1 中の HZ-75T 型容器に対する壁構造を持ち、壁の全体の高さは 4.4 m であるものとする。

(4)線源強度は全体で 1 の値に規格化し、容器長軸方向に関する線源分布は一様であるものとする。

(5)容器の外部には、容器表面から 2 m ないし 6 m の範囲にわたって数箇所、基準平面を挟んで対称的な帯状検出体を同軸円筒状に配列した。その帯状検出体の幅には $0.25 r_d$ (m) のかたちの r_d 依存性を持たせた。

計算効率を向上させるために、通常の Source Biasing Technique の技法⁽⁷⁾と Next Event Surface Crossing の技巧⁽⁷⁾とを採用した。

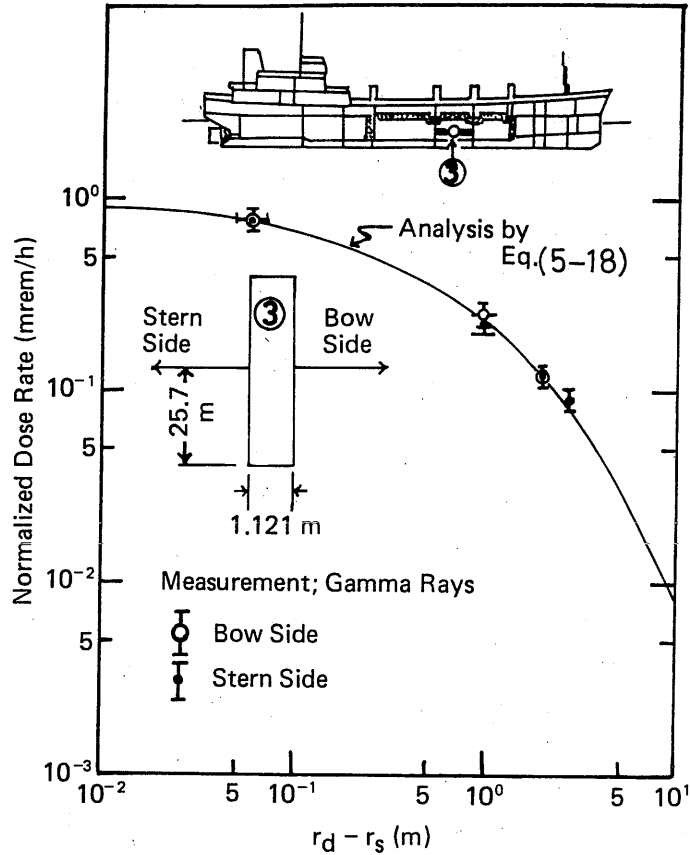


Fig.5-5 Relative Comparison of Radial Dose Rate Distributions between Measurement and Analysis with Eq. (5-18). The radius r_d is 0.5605 m. The measured distribution is normalized to the analytical distribution at 6 cm from the cask surface.

(H. Yamakoshi⁽¹⁾)

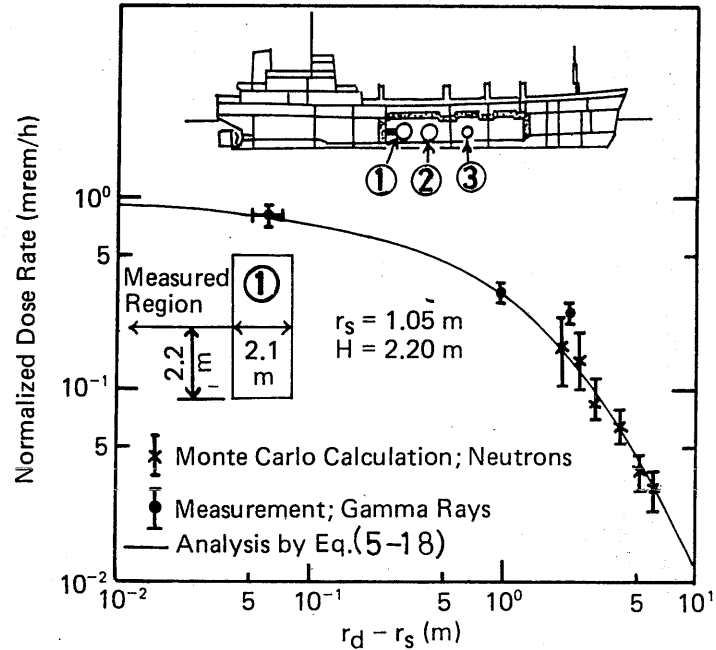


Fig.5-6 Relative Comparison of Radial Dose Rate Distributions among Measurement, Monte Carlo Calculation and Analysis with Eq. (5-18). The radius is 1.05 m. The measured distribution is normalized to the analytical distribution at 6 cm from the cask surface. The distribution by the Monte Carlo method is normalized to the analytical distribution at 6 m from the cask surface.

(H. Yamakoshi⁽¹⁾)

Monte Carlo 計算を行なう際の線源放射線の粒子数は、中性子に対しては 40,000 個とした。

ただし、ガンマ線の場合は、容器壁中で吸収され易く検出体に至る確率が比較的に低いので、計算精度を高めるためには線源粒子数を大幅に増加させなければならないが、計算時間の制約から 90,000 個とした。

中性子の計算では熱中性子に体する Sussian Roulette の引き金を支配するパラメタの値を調整し、計算時間の短縮化をはかった。

5.3.1.3 相互比較

(5-18)式に於いて $D_0 = 1$ と置いた場合に対する線量率分布の r_d 依存性を、測定および Monte Carlo 法で求めた線量率の r_d 依存性と比較した。結果を Fig.5-5 と5-6 に示す。

測定ガンマ線線量率分布は容器表面から 6 cm 離れた位置で (5-18) 式の理論値に規格化した。

この 6 cm という位置は輸送容器表面に接触させた NaIシンチレーションサーベイメータの実効体積中心の、輸送容器表面からの距離に相当する。

興味の内容は理論値の r_d 依存性が妥当なものであるか否かを実測結果から確かめることにあり、絶対値の異なる測定線量率分布が示す r_d 依存性を同一図面上で理論値の r_d 依存性と比較検討することを容易ならしめるために実測値の方を理論値に規格化する方針としたのであるが、その際、散乱ガンマ線の寄与が最も少ない状態、すなわちサーベイメータを容器表面に接触させた状態の測定値を理論値に規格化した。

船内で測定されるガンマ線線量率には成分として一般に、ガンマ線散乱体である天井、床、部屋や廊下の壁からの散乱ガンマ線の寄与が含まれる。ただしその値を線源からの直接線の寄与と比較して見た場合、その相対的な大きさは、測定器と線源との間の距離のほか、測定器をとりまくガンマ線散乱体の位置、大きさにも依存する。

Fig.5-7a から 5-7c に於いて、点状ガンマ線線源による船内線量率分布を測定した結果⁽⁸⁾とその Monte Carlo 法による解析の結果の一例⁽⁸⁾を示したが、line Segment A に沿った測定では Fig.5-7b に示すように測定器は狭い廊下の中にあるため壁からの反射線の寄与が大きく、この結果として Fig.5-7c に示すように線源から 3 m 程度離れた位置から早くも、測定値は直接線に対する空間依存性から目立ったずれをしめしている。いっぽう、Line Segment B は船の甲板に垂直な方向に採られており、測定値に寄与する散乱ガンマ線のうちで壁からの反射線は、測定器が広い部屋の中ほどにあったため、極めて少なくなき、測定値は直接線に対する空間依存性に極めて近い分布となっている。

ひるがえって日の浦丸の場合をみると⁽⁶⁾、船内に積載された使用済核燃料輸送容器は、Fig.5-8a に示すように船倉内でかなり大きく広がった表面線源を形成しており、線源と船倉壁とが近い場

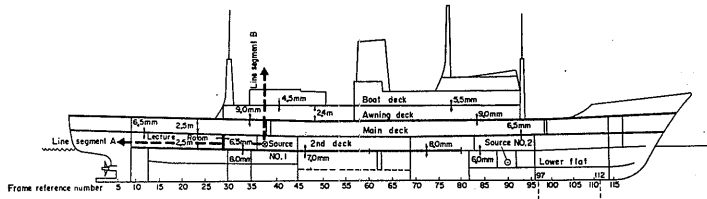


Fig.5-7a Two Line Segments A and B Chosen in Shintokumaru for the Purpose of Measuring Gamma-Ray Dose Rate Distributions in the Ship. (H. Yamakoshi (8))

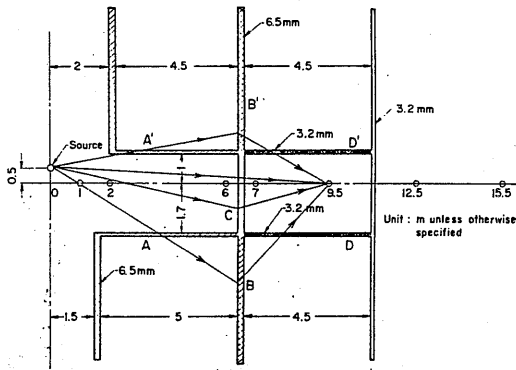
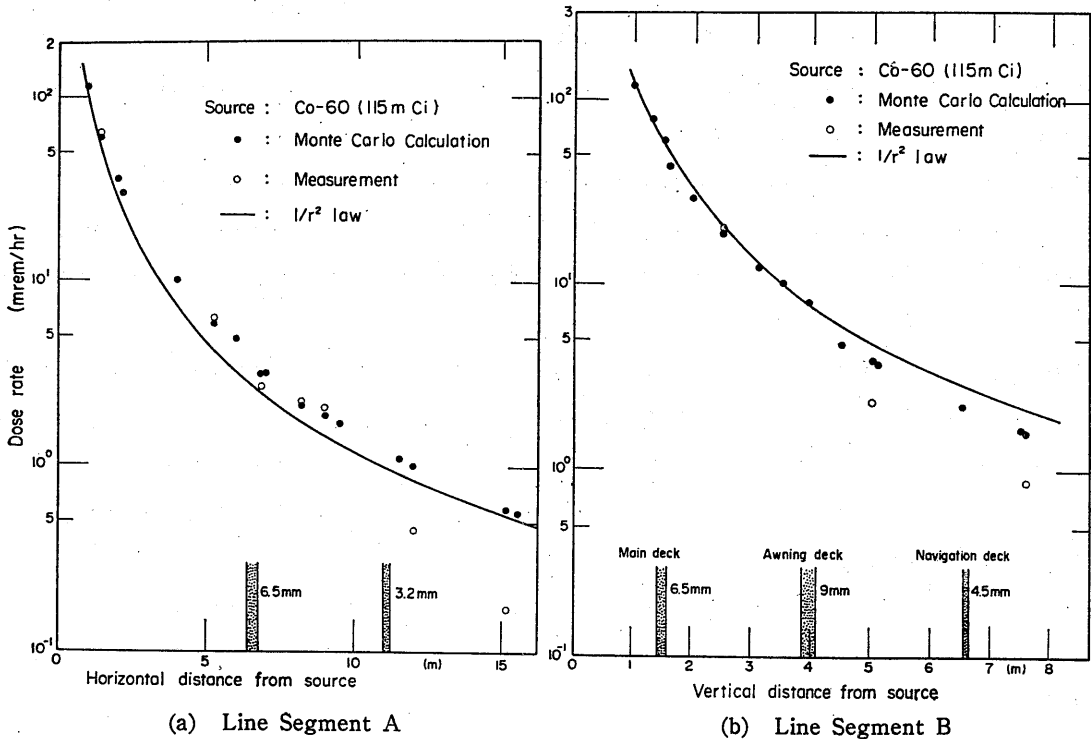


Fig.5-7b Schematic Illustration of Source and Detector Positions along the Line Segment A. Dose rate distribution is measured in a fairly narrow collimator. Consequently, gamma rays scattered from walls, ceiling and floor contribute to the measured dose rate distribution. (H. Yamakoshi (8))



(a) Line Segment A

(b) Line Segment B

Fig.5-7c Detailed Comparison of Dose Rates between Calculations along Line Segments A and B. (H. Yamakoshi (8))

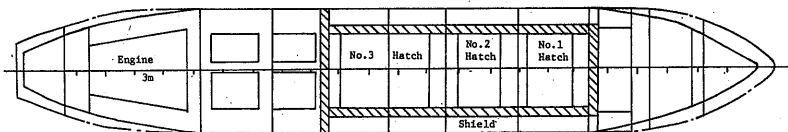


Fig. 5-8a Configuration of Casks and Shieldings in Hinouramaru. (A. Yamaji (6))

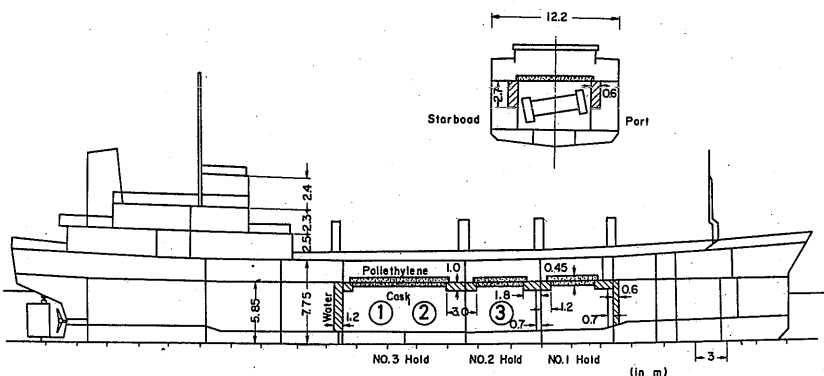


Fig. 5-8b Size of Holds in Horizontal Section of Hinouramaru. (A. Yamaji (6))

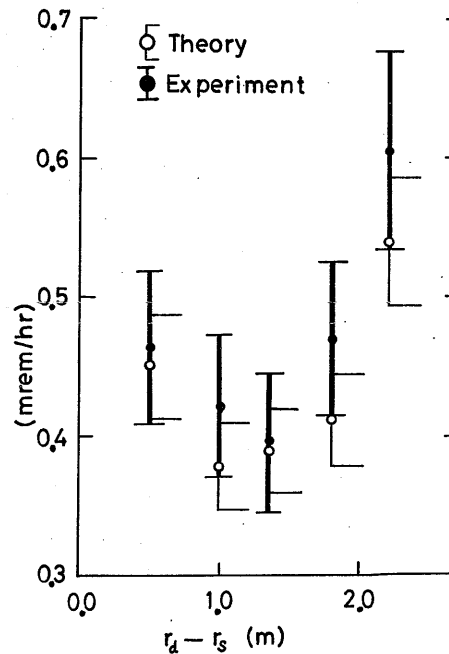
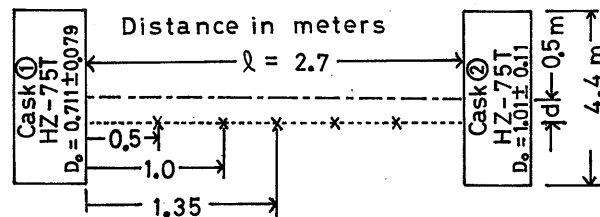


Fig. 5-9a Comparison of Dose Rate Distributions between Analysis and Measurement for the Case of $d = 0.5$ m. Configuration of the measurement system is also illustrated. (H. Yamakoshi (5))

合がある。特に Fig.5-6 の容器 ①とそれに対立する船尾側の壁 (Fig.5-8a では 1.2 m の厚さの遮蔽壁としてしめしてある) との間は 2.7 m 程度と比較的短い。

容器 ①とこの船尾側船倉壁との間の空間は、既に述べたように他の空間部分よりも素性の良い線量率分布の測定が期待されているわけであるが、Fig.5-6 で認められるように、船尾側壁部の位置の近傍に相当する箇所で測定線量率が理論値よりもかなり高い値となっている。これは上記の壁部からの散乱線の影響であると思われる。

以上のことから輸送容器表面にサーベイメータを接触させた状態は散乱線の寄与に相対的な直接線の寄与をできるだけ大きくする目的に適った状態であると言える。

上記の船倉壁から遠方に於ける理論値の r_d 依存性の妥当性を確かめるために、Fig.5-6 では Monte Carlo 法で求めた線量率分布の r_d 依存性と理論値の r_d 依存性とを比較して示した。

容器表面から 6 m 離れた位置に於ける Monte Carlo 計算結果が他の位置に於ける計算結果よりも計算誤差がより小さい値であったので、Monte Carlo 計算による線量率分布は容器表面から 6 m 離れた位置で理論値に規格化した。

Fig.5-6 では理論値の r_d 依存性は測定値および Monte Carlo 計算値の r_d 依存性を良く説明している。

Fig.5-5 では、Fig.5-6 の場合の輸送容器よりもより細長い形状をした NH-25型容器を対象として、その船首側および船尾側の測定線量率分布の r_d 依存性を同時に一枚の図の中で理論値の r_d 依存性と比較したものである。

この図から、理論値は異なる形状をした輸送容器に対しても測定線量率分布の r_d 依存性をやはり良く説明していることが分かる。

すでに述べたように、NH-25 型容器は他の容器が積載される前に積載され、その積載直後に線量率分布測定が行なわれているので、Fig.5-5 に示す測定値の r_d 依存性には他の容器からの放射線の寄与は全く含まれてはいない。

Fig.5-8a および Fig.5-8b から判断して、NH-25 型容器の周りの線量率測定は容器の大きさに対して相対的にかなり広い部屋の中で行なわれたと考えられる。したがって、Fig.5-5 に示した測定線量率には、船倉壁からの反射線の寄与は僅かしか含まれてはいないと思われる。

Fig.5-5 から、理論式はより細長い容器に対しても良好な r_d 依存性を与えていることが結論できよう。

以上、幾何形状の異なる二種類の輸送容器に対して理論値の r_d 依存性が妥当なものであることを示すことができた。

5.3.2 一般位置に対する式の場合

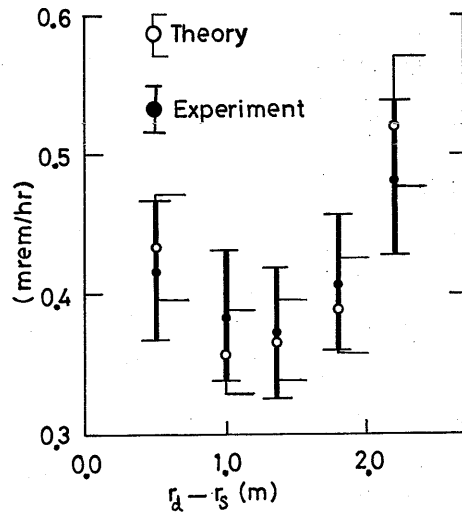
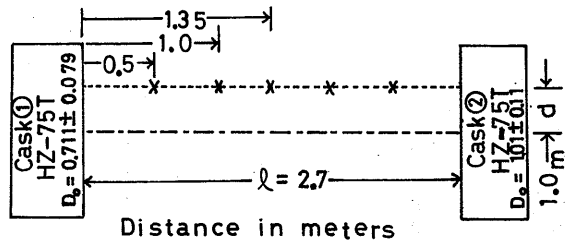


Fig.5-9b Comparison of Dose Rate Distributions between Analysis and Measurement for the Case of $d = 1.0$ m. Configuration of the measurement system is also illustrated. (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

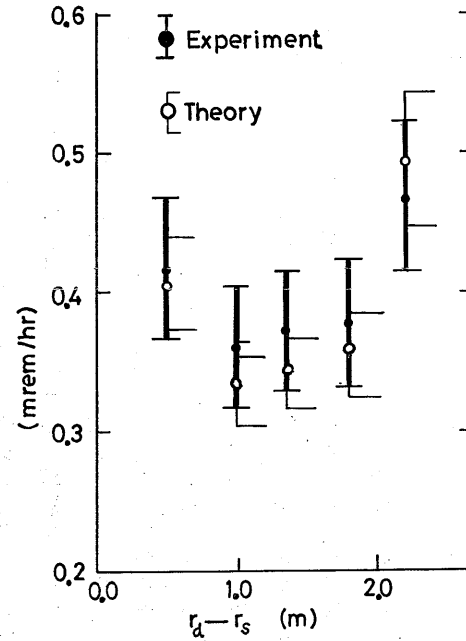
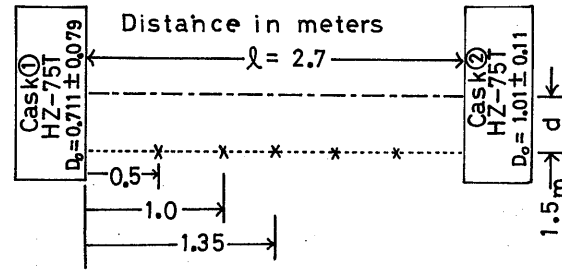


Fig.5-9c Comparison of Dose Rate Distributions between Analysis and Measurement for the Case of $d = 1.5$ m. Configuration of the measurement system is also illustrated. (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

2個の HZ-75T 型容器に挟まれた領域に於けるガンマ線線量率の測定では、Fig.5-9a から Fig.5-9c までの図に示すように、容器長軸中心からそれぞれ、0.5 m、1.0 m、1.5 m づつ水平にずれた線分上で線量率分布の測定が行なわれた。

この測定結果と計算結果との比較に於いては、(5-32)式を用いた理論値と測定値とを絶対値で比較した。

5.3.2.1 線量率分布計算法⁽⁵⁾

たがいの容器の裏側に於ける表面線量率の測定値の分布から (5-32) 式の D_0 値を決定し、各容器の周りの線量率空間分布を計算し、重ね合わせの原理から 2 個の HZ-75 型容器の間の空間の線量率分布を合成する方法を採った。

容器 ①と ②の D_0 の値はそれぞれ、 $0.711 + 0.079$ mrem/hr と $1.01 + 0.11$ mrem/hr としたがこれらの値を決定する際は、隣接する船倉に存在する NH-25型容器の影響は途中の隔壁の遮蔽効果ならびに距離による減衰効果により無視できる程に小さくなっていると仮定した。

Table 5-7 に、この 2 容器間の線量率合成計算法に於ける手順の概略をまとめて表とした。この表には、計算との比較のため測定結果もあわせて示した。

5.3.2.2 相互比較

Fig.5-9a から Fig.5-9c に於いて、Table 5-7 に示した計算結果と測定結果の r_d 依存性を、絶対値で比較して示した。

測定値、計算値は相互に、誤差の範囲内で一致している。このことは、(5-32)式が多数の容器に囲まれた領域の線量率空間分布の計算に有効に適用できることを意味するとともに、基礎となった (5-18) 式の妥当性をも裏付けていると思われる。

以上の事柄から、(5-34)式も輸送容器の周囲の線量率空間分布を記述する式として妥当なものであると考えられる。

5.4 考 察

(5-18)式および (5-32) 式が測定線量率分布の r_d 依存性を良く説明できることや、(5-18)式の間数形は物理的な意味合いに於いて妥当と考えられることが明らかとなったが、このことは以下の仮定がほぼ満足されていることを意味している。

(1) 容器表面上の面積素片から放射される放射線の線源強度は容器表面上ではどこでも一定である。

(2) 容器表面上の面積素片に対する外向き法線ベクトルと面積素片から放射される放射線との間

Table 5 - 7 Illustration of the Procedure for Synthesizing Dose Rate Distributions.
(Final dose rates D by calculation are compared with measured results)

$d=0.5$ (m) $r_s=1.05$ (m), $H=2.2$ (m), $H+d=2.7$ (m), $H-d=1.7$ (m), $\xi=0.398$, $\xi'=0.618$, $l=2.7$ (m)										
r_a-r_s	η	$G(\xi, \eta)$	η'	$G(\xi', \eta')$	D_*		D_1	D_2	D	Exp.
0.5	0.5741	0.9582	0.9118	0.9101	0.443	D (Lower)	(0.280)	(0.122)	(0.413)	(0.409)
						(Middle)	0.315	0.136	0.451	0.463
						(Upper)	(0.350)	(0.149)	(0.489)	(0.517)
1.0	0.7593	0.9080	1.206	0.8013	0.291	D (Lower)	(0.184)	(0.153)	(0.348)	(0.371)
						(Middle)	0.207	0.170	0.377	0.421
						(Upper)	(0.230)	(0.187)	(0.406)	(0.471)
1.35	0.8889	0.8522	1.412	0.7189	0.226	D (Lower)	(0.143)	(0.204)	(0.359)	(0.350)
						(Middle)	0.161	0.227	0.388	0.397
						(Upper)	(0.179)	(0.249)	(0.417)	(0.444)
1.7	1.055	0.7885	1.676	0.6285	0.172	D (Lower)	(0.108)	(0.262)	(0.380)	(0.415)
						(Middle)	0.121	0.291	0.412	0.469
						(Upper)	(0.134)	(0.320)	(0.443)	(0.523)
2.2	1.204	0.7269	1.912	0.5626	0.135	D (Lower)	(0.085)	(0.398)	(0.494)	(0.536)
						(Middle)	0.096	0.442	0.539	0.604
						(Upper)	(0.107)	(0.487)	(0.584)	(0.672)

$d=1.0$ (m) $r_s=1.05$ (m), $H=2.2$ (m), $H+d=3.2$ (m), $H-d=1.2$ (m), $\xi=0.328$, $\xi'=0.875$, $l=2.7$ (m)										
r_a-r_s	η	$G(\xi, \eta)$	η'	$G(\xi', \eta')$	D_*		D_1	D_2	D	Exp.
0.5	0.4844	0.9664	1.292	0.8451	0.429	D (Lower)	(0.272)	(0.115)	(0.398)	(0.367)
						(Middle)	0.306	0.129	0.435	0.417
						(Upper)	(0.339)	(0.140)	(0.471)	(0.467)
1.0	0.6406	0.9250	1.708	0.6846	0.276	D (Lower)	(0.174)	(0.144)	(0.330)	(0.338)
						(Middle)	0.197	0.162	0.359	0.384
						(Upper)	(0.218)	(0.176)	(0.388)	(0.430)
1.35	0.7500	0.8885	2.003	0.5190	0.213	D (Lower)	(0.135)	(0.192)	(0.339)	(0.329)
						(Middle)	0.152	0.216	0.368	0.374
						(Upper)	(0.169)	(0.235)	(0.397)	(0.419)
1.7	0.8906	0.8343	2.375	0.4970	0.160	D (Lower)	(0.101)	(0.248)	(0.359)	(0.360)
						(Middle)	0.114	0.278	0.392	0.408
						(Upper)	(0.126)	(0.303)	(0.425)	(0.456)
2.2	1.016	0.7848	2.708	0.4333	0.128	D (Lower)	(0.081)	(0.386)	(0.476)	(0.427)
						(Middle)	0.091	0.433	0.524	0.483
						(Upper)	(0.101)	(0.472)	(0.572)	(0.539)

$d=1.5$ (m) $r_s=1.05$ (m), $H=2.2$ (m), $H+d=3.7$ (m), $H-d=0.7$ (m), $\xi=0.284$, $\xi'=1.50$, $l=2.7$ (m)										
r_a-r_s	η	$G(\xi, \eta)$	η'	$G(\xi', \eta')$	D_*		D_1	D_2	D	Exp.
0.5	0.4111	0.9737	2.214	0.7699	0.413	D (Lower)	(0.262)	(0.099)	(0.371)	(0.367)
						(Middle)	0.295	0.111	0.406	0.417
						(Upper)	(0.326)	(0.121)	(0.441)	(0.467)
1.0	0.5438	0.9439	2.929	0.5711	0.259	D (Lower)	(0.164)	(0.129)	(0.304)	(0.317)
						(Middle)	0.185	0.145	0.330	0.361
						(Upper)	(0.205)	(0.158)	(0.356)	(0.405)
1.35	0.6366	0.9140	3.429	0.4621	0.198	D (Lower)	(0.126)	(0.179)	(0.315)	(0.329)
						(Middle)	0.141	0.200	0.341	0.375
						(Upper)	(0.157)	(0.218)	(0.367)	(0.421)
1.7	0.7560	0.8731	4.071	0.3199	0.143	D (Lower)	(0.091)	(0.233)	(0.323)	(0.332)
						(Middle)	0.102	0.262	0.354	0.378
						(Upper)	(0.113)	(0.285)	(0.385)	(0.424)
2.2	0.8621	0.8318	4.643	0.2202	0.110	D (Lower)	(0.070)	(0.372)	(0.449)	(0.414)
						(Middle)	0.078	0.417	0.495	0.468
						(Upper)	(0.087)	(0.454)	(0.541)	(0.522)

$D_* = [G(\xi, \eta) + G(\xi', \eta')] (1/\pi) \sin^{-1}(r_s/r_a)$: Dose rate distribution around the cask HZ-75T

for a fictitious case where the dose rate on the cask is unity.

D_1 represents the dose rate distribution around the cask ①, for which $D(r_a-r_s, d) = (0.711 \pm 0.079) D_*$

D_2 represents the dose rate distribution around the cask ②, for which $D(r_a-r_s, d) = (1.01 \pm 0.11) D_*$.

(H. Yamakoshi (5))

の角度を θ と表わした場合、放射線の方向分布は $\cos \theta$ 則により近似できる。上記仮定の (1) が成り立つことは、内筒部の水中に於けるガンマ線が、壁部からの反射や内筒部内部での散乱で乱反射を受けることと、水中でのガンマ線の平均自由行程が長いことから、容器長軸方向に一様な空間分布状態が成立しているものと解釈される。上に述べた仮定 (1) が満足されている場合は加法則⁽⁴⁾が成立する。

上記仮定 (2) が成り立つことは、放射線が遮蔽体表面付近の比較的薄い層状部分から放射され、観測点から見た立体角素片に一定量の放射線が送り出されていることを意味する。⁽⁹⁾ HZ-75T 型容器を例に ANISNコード⁽¹⁰⁾を用いて容器表面から放射するガンマ線束方向分布を計算すると、Fig.5-10 に示すように X 印で示した計算値はほぼ \cos 分布となっており、上記 (2) の仮定が良い近似であることが伺える。

放射方向分布が等方的であると仮定した式が既に発表されているが、⁽³⁾その場合は Fig.5-1 に於ける基準平面上の点 P で放射線束 $\Phi_*(r_d)$ は

$$\Phi_*(r_d) = \frac{S_A}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{d\tau}{r_s^2 + r_d^2 - 2r_s r_d \cos \theta}, \quad (5-36)$$

で与えられる。⁽³⁾

容器表面上で Φ_* の値が 1 となるように規格化し、その放射線束を Φ_*^{norm} と表わすことにする。さらに (5-18) 式で与えられる線量率を \dot{D}^{norm} と表わすことにする。

両者の r_d 依存性は Fig.5-11 に示すように容器表面から観測点までの距離が増加するとともに、相違が大きくなって行く。比 $\Phi_*^{\text{norm}} / \dot{D}^{\text{norm}}$ の値も ----- 印で示すように、なだらかではあるが、距離 $r_d - r_s$ の増加とともに単調に減少して行く。

以上のことから、放射角度に無関係な放射方向分布は輸送容器の場合、成立していないと判断される。⁽⁵⁾

5.5 結 論

被積分関数の一部分を他の関数で置き換えることは一般的には積分結果に誤りを導くこととなり、はなはだ危険なことである。しかしながら、今回、基準平面上の線量率に対する積分表示に於いて採られた置き換えは、幸いにも対象とする積分区間に於いて被積分関数の一因子がおとなしかったため、積分結果にめだつた誤差を導くことには至らなかった。

このことは、この置き換えの根拠となった物理的背景、すなわち (5-6) 式の被積分関数中の第 2 因子が変数 の積分領域内に於ける値の変化には鈍感であるとする近似が、妥当なものであ

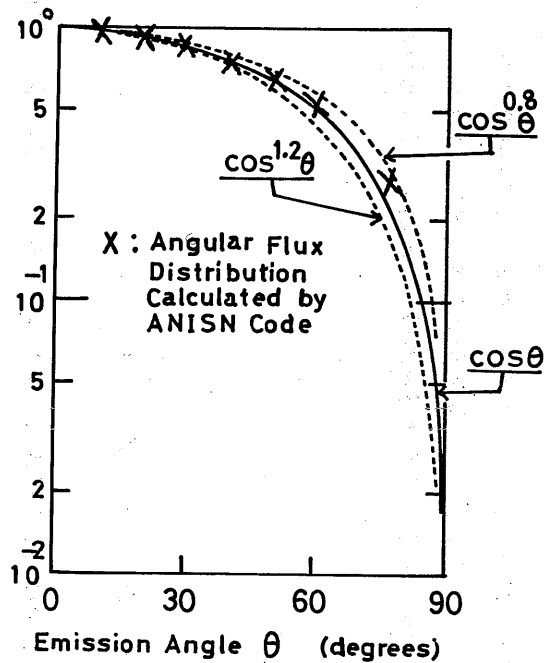


Fig.5-10 Angular Distribution of Angular Flux Calculated by ANISN Code. Calculated angular distribution denoted by the mark x can be approximated by the function: $\cos\theta$. (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

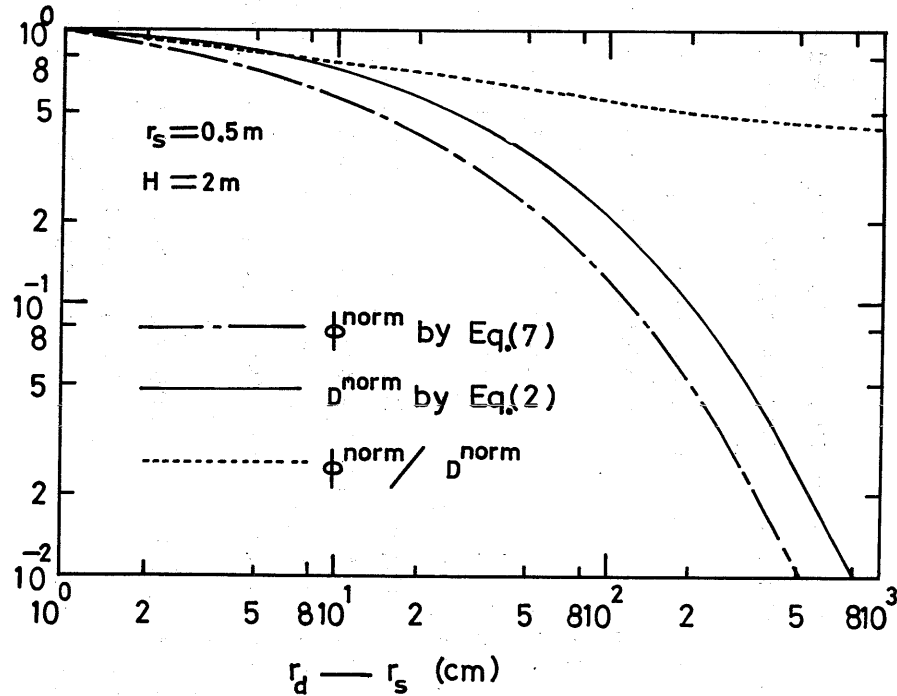


Fig.5-11 Comparison of Radial Dose Rate Distributions between D^{norm} Given by Eq.(5-18) and ϕ^{norm} Given by Eq.(5-36) with Normalization of the Value at the Cask Surface to be Unity. (H. Yamakoshi⁽⁵⁾)

た証拠である。

この近似を用いることにより、従来、数値積分でしか実行できなかった線量率分布の積分表現に対する計算が解析的に実行可能となり、容器外部の線量率空間分布を比較的簡単な解析関数で表現する式を導いた。

解析的表示式では容器表面中央部の線量率が関数全体に掛かる係数となっているので、容器周辺線量率分布のうちで、容器の幾何形状に依存する部分は、容器に収納する核燃料の線源状態とは係わりなく常に一定である。

容器表面から放射される放射線の角度分布は、面積素片の外向き法線方向と放射線の放射方向との間の角度を θ で表わした場合は、 $\cos\theta$ 則に従うことが ANISNコードを用いた容器表面上の線束角度分布の計算から明らかとなった。

上記分布則を仮定し、かつ、容器表面上の面積素片を通して放射される放射線束は容器長軸方向に関して一定であると仮定して得た今回の線量率分布の解析的表示式は、容器表面から放射された放射線線量率の空間分布を良く説明することができる。なおかつ、この解析的表示式も単に近似式であるということだけではなく、十分に物理的内容を内包しており、線量率分布の経験則に対し理論的根拠を与えている。

放射線の放射角度分布が角度 θ に依存せず一定値であるとする仮定に基づいた線束分布の式が既に他の著者により発表されているが、この仮定に基づく線量率分布の r_d 依存性は実際の線量率分布の r_d 依存性をあまり良く説明できない。特に容器から遠ざかるにつれて、実際の分布との相違が増大する。

今回得られた容器周辺線量率分布の解析的表示式は式も比較的簡単であり、簡易計算に適している。表示式中の楕円積分に関しては、独立変数と関数値との関係を数表で与えてマイクロコンピュータに組み込ませたり、あるいは、この関数関係を等高線として表わすことで電卓により、任意に与えられた独立変数の値に対応する関数値を内挿から算出することも可能である。

文 献

(1) H. Yamakoshi, Nucl. Sci. Eng., 88, 110 (1984)

(2) 山越寿夫、他、船舶技術研究所報告 第20巻 第6号 431 頁 (1983)

- (3) E. E. Kovalev and A. Foderaro, Engineering Compendium of Radiation Shielding, Vol-1, P 396, Springer-Verlag, New York (1968)
- (4) E. E. Kovalev and A. Foderaro, Engineering Compendium of Radiation Shielding, Vol-1, P 369, Springer-Verlag, New York (1968)
- (5) H. Yamakoshi, J. Nucl. Sci. Tech., 22, 697 (1985)
- (6) 山路昭雄、植木紘太郎、船舶技術研究所報告 第19巻 第5号 309 頁 (1982)
- (7) M. B. Emmett, ORNL-4972 (1975)
- (8) H. Yamakoshi, J. Nucl. Sci. Tech., 20, 2 (1983)
- (9) N. M. Schaeffer, Reactor Shielding for Nuclear Engineers, TID-25951 (1973)
- (10) W. W. Engle, Jr., K-1693 (1967)

第六章 燃料配置法への応用

6.1 はしがき

容器表面線量率の計算法のひとつの応用例として、従来未着手のままとされてきた、燃焼度が相違する使用済核燃料を内筒部に配列、収納する場合の配置法を定量的かつ、容易に評価する⁽¹⁾方法を⁽²⁾以下に示すこととする。

この定量的評価法では摂動計算法的一种である感度解析法を用いた、燃料配置と容器表面中央部の線量率との関係の解析^(註)が行なわれるが、そのために感度係数と呼ばれる概念を導入する⁽¹⁾、⁽²⁾。

燃料配置と容器表面線量率との対応関係がこの感度係数を用いて単純、明白に把握できるが、この感度係数自身の数学的表現も極めて単純である。

感度係数の値の算出に於いては、多種の燃料配置に対する容器表面線量率の計算が必要であるが、この計算は既に第三章、第四章で述べた方法を用いて極めて短時間に行なえると言う利点が遺憾なく発揮される。

具体的応用例として、第四章で示した乾式容器 TN-12A の体系を対象とする、燃料配置効果を考慮した場合の容器表面ならびに容器周辺の線量率を計算から求め、実測値と計算値との比較を行なうこととする。

比較の結果から、燃焼度の違う核燃料を内筒部に収納する際に燃焼度に関して不均質、多領域的に配置した場合は、その効果を考慮することにより、第三章、第五章の方法に基づく計算値からより一層、実測値に近い値が得られることをしめすこととする。

この具体例から、燃焼度の違う核燃料の配置法の定量的評価にも、第三章から第五章までに示した方法が有効に応用できることが明らかとなろう。

6.2 線量率の感度係数⁽¹⁾、⁽²⁾、⁽³⁾

線源強度が相違する使用済核燃料を内筒部に収納する場合、燃焼度が高く線源強度の大きい燃料を内筒部中央部へ、比較的低い燃焼度の燃料をその周りに配置することが普通行なわれている。

このような、いわば線源強度に関する不均質、多領域的配置が容器表面線量率にどのような効果をもたらすか、その様子は、各領域の線源強度の値、領域の位置と大きさに依存する。

この燃焼度に関する多領域配置が容器表面線量率に及ぼす影響を定量的かつ簡便に評価する方

注) この方法と等価な方法として Ajoint 法があるが、第三章および第四章の手法の応用としての観点から本章では感度係数法を選んだ。

法として、線量率感度解析法を提案する。

便宜上、第三章、第四章で述べた容器内筒部の混合領域は線源強度に関して、内部線源領域と外部線源領域との2領域に分けられるものとする。前者は中央部を占める領域であり、同程度に高い線源強度を持つ幾体かの燃料集合体から成るものと考え、その平均線源強度は $s(\text{inner})$ (Particles/sec/cm³) で表わされるものとする。後者は周辺のより低い線源強度を持つ燃料集合体から成り、その平均線源強度は $s(\text{outer})$ (Particles/sec/cm³) で表わされるものとする。

(3-13') 式に示すように、容器表面中央部に於ける線量率 D_0 は \vec{J}^+ に依存する。ただし、 \vec{J}^+ と D_0 とを結び付ける容器壁遮蔽性能特性関数の線源状態依存性は無視できると考える。

\vec{J}^+ は $s(\text{inner})$ と $s(\text{outer})$ とに依存するので、 \vec{J}^+ を仲介として D_0 は $s(\text{inner})$ と $s(\text{outer})$ ならびにそれぞれの線源領域の大きさに依存する。

ここでさらに便宜上、各線源領域に於ける線源強度 $s(\text{inner})$ 、 $s(\text{outer})$ の放射線を第 l エネルギー群に配分する関数として (inner) および (outer) を導入する。ただしこれらの関数は以下の規格化条件を満たすものとする。

$$\left. \begin{aligned} \sum_l \rho_l (\text{inner}) &= 1 \\ \sum_l \rho_l (\text{outer}) &= 1 \end{aligned} \right\} , \quad (6-1)$$

内部線源領域および外部線源領域に於ける第 l エネルギー群の放射線線源強度をそれぞれ $s(\text{inner})$ 、 $s(\text{outer})$ と表わすことにすれば、これらは $s(\text{inner})$ 、 $s(\text{outer})$ とは以下の関係で結ばれる。

$$s_l(\text{inner}) = \rho_l(\text{inner}) s(\text{inner}) , \quad (6-2a)$$

$$s_l(\text{outer}) = \rho_l(\text{outer}) s(\text{outer}) , \quad (6-2b)$$

いま、 \vec{J}^+ の第 m エネルギー群の成分を J_m と表わし、さらに第 l エネルギー群に属す inner 領域からの線源放射線が第 m エネルギー群の容器壁実効入射線流 \vec{J}_m^+ にきよする成分を $\vec{J}_{l,m}^+$ (inner) と表わすことにする。同様にして、 $\vec{J}_{l,m}^+$ (outer) も定義することができる。

この結果として、 \vec{J}_m^+ は $\vec{J}_{\ell,m}^+$ (inner) と $\vec{J}_{\ell,m}^+$ (outer) とを用いて以下のように記述することができる。

$$\begin{aligned} \vec{J}_m^+ &= \sum_{\ell} s_{\ell}(\text{inner}) \vec{J}_{\ell,m}^+(\text{inner}) \\ &+ \sum_{\ell} s_{\ell}(\text{outer}) \vec{J}_{\ell,m}^+(\text{outer}) \quad , \quad (6-3) \end{aligned}$$

したがって、(3-13') 式と(6-3) 式とを用いて線量率 D_0 の相対変化率が以下のように導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{dD_0}{D_0} &= \frac{1}{D_0} \left[ds(\text{inner}) \left(\sum_{\ell} \rho_{\ell}(\text{inner}) \vec{J}_{\ell,m}^+(\text{inner}) B_m \right. \right. \\ &+ s(\text{inner}) \sum_{\ell,m} \frac{d\rho_{\ell}(\text{inner})}{ds(\text{inner})} \frac{d\vec{J}_{\ell,m}^+(\text{inner})}{d\rho_{\ell}(\text{inner})} B_m \left. \right. \\ &+ ds(\text{outer}) \left(\sum_{\ell} \rho_{\ell}(\text{outer}) \vec{J}_{\ell,m}^+(\text{outer}) B_m \right. \\ &+ s(\text{outer}) \sum_{\ell,m} \frac{d\rho_{\ell}(\text{outer})}{ds(\text{outer})} \frac{d\vec{J}_{\ell,m}^+(\text{outer})}{d\rho_{\ell}(\text{outer})} B_m \left. \right) \left. \right] \quad , \quad (6-4) \end{aligned}$$

いま特に、使用済核燃料の線源強度に相違があっても $\rho_{\ell}(\text{inner})$ と $\rho_{\ell}(\text{outer})$ との間には

何らエネルギースペクトルの形の上では相違はないものと仮定する。この仮定は実際の使用済核燃料に対してはよい近似で成り立っている。このような仮定のもとでは、(6-4)式の中の第2項および第4項は消滅する。

さらに仮に、内部線源領域の線源強度の値はそのまま固定しており、外部線源領域の線源強度の値のみが変化したと考えれば、容器表面線量率 D_0 の相対変化率は以下のように表わせる。

$$\begin{aligned} \frac{dD_0}{D_0} &= \frac{ds(\text{outer})}{D_0} \sum_{\ell, m} \rho_{\ell}(\text{outer}) J_{\ell, m}^+(\text{outer}) B_m \\ &= \frac{ds(\text{outer})}{D_0 \cdot s(\text{outer})} \sum_{\ell, m} s_{\ell}(\text{outer}) J_{\ell, m}^+(\text{outer}) B_m, \quad (6-5) \end{aligned}$$

(6-5) 式の右辺の和は (6-1) 式からも明らかのように、内部線源領域に於ける線源強度の値を零と置いた場合の容器表面線量率に相当する量となる。そこでこの量を $D_0(\text{outer})$ と書き表すことにすれば、(6-5) 式はさらに、

$$\frac{dD_0}{D_0} = \frac{ds(\text{outer})}{D_0(\text{outer})} D_0(\text{outer}), \quad (6-6)$$

と表わせる。

(1), (2), (3)

ここで、外部線源領域に対する線量率感度係数 $s_c(\text{outer})$ を以下のように定義する。

$$s_c(\text{outer}) \equiv \left(\frac{dD_0}{D_0} \right) / \left(\frac{ds(\text{outer})}{s(\text{outer})} \right), \quad (6-7)$$

$s_c(\text{outer})$ は (6-6) 式を考慮すれば、

$$s_c(\text{outer}) = \frac{D_0(\text{outer})}{D_0}, \quad (6-8)$$

で与えられる。

式(6-7)を導いたのと同様な論法で、内部線源領域に対する線量率感度係数 $S_c(\text{inner})$ を定義することもでき、(6-8)式に対応した式も導くことができる。

$$s_c(\text{inner}) \equiv \left(\frac{dD_0}{D_0}\right) / \left(\frac{ds(\text{inner})}{s(\text{inner})}\right) \quad , \quad (6-9)$$

$$s_c(\text{inner}) = \frac{D_0(\text{inner})}{D_0} \quad , \quad (6-10)$$

(6-8)式と(6-19)式とから以下の関係が存在することがわかる。

$$S_c(\text{inner}) + s_c(\text{outer}) = 1 \quad , \quad (6-11)$$

上記の(6-11)式の関係が存在するので、内部線源領域か外部線源領域かのどちらかの感度係数を算出すれば、残りの感度係数は補数として決定される。

感度係数の計算に於ける $D_0(\text{inner})$ あるいは $D_0(\text{outer})$ の計算には、第三章、第四章で示した容器表面中央部の線量率計算法がそのまま適用できる。

6.3 計算値と実測値との比較⁽⁴⁾

第四章で取り扱った乾式容器 TN-12A の体系をふたたびここで採り上げることにする。

6.3.1 対象とする体系の概略

Fig.4-6でも示したように、この体系では12体の収納燃料のうちで中央の4体が比較的に高い燃焼度の状態にあり、その平均燃焼度は約 33,200 MWd/t である。他方、周りの8体は比較的に燃焼度が低く、平均燃焼度は約 28,200 MWd/t である。

中央部4体の燃料集合体についての燃料収納孔の総面積は、 $(22.6) \times 4 \text{ (cm}^2\text{)} = 2043 \text{ (cm}^2\text{)}$ であり、燃料領域の面積に対して約 18.3% を占めている。

線量率の測定は、第四章に於いて採り上げた容器表面線量率のみではなく、容器表面から 1 m 離れた位置に於いても行なわれている。本節では、そのうちで特に、Fig.4-7 に示す測定位置、すなわち容器表面中央部および容器表面から 1 m 離れた位置を対象として採り上げることにする。対象とする測定位置に対する測定結果は Table 4-7 に示したとうりである。

6.3.2 感度係数と感度解析

(6-10)式を用い、高燃焼度燃料から成る内部線源領域が燃料領域全体に占める割合を変数として、上記体系に対する感度係数 $Sc(\text{inner})$ を中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線のそれぞれにつき計算すると Fig.6-1 に示すような結果がえられる。数値の詳細は Table 6-1 に示した。

中性子は、乾式容器の内筒部ならびに壁部を構成する物質中を、一次ガンマ線よりもよく透過するので、Fig. 6-1 に於いて中性子に対する $Sc(\text{inner})$ の値がガンマ線に対する $Sc(\text{inner})$ よりも大きくなっている。また二次ガンマ線はその発生が容器壁を透過中の中性子に由来するので、感度係数 $Sc(\text{inner})$ の値が中性子の値に近くなっている。

一次ガンマ線は内筒部の物質に対しても平均自由行程が短く、したがってその線源領域が容器壁に接近するにつれて急速に感度が高まることとなる。

4体の高燃焼度燃料から成る内部線源領域が全線源領域、すなわち混合領域に占める割合は 18.3% であったが、この場合を case 1 と呼ぶことにする。燃料配置の変化による容器表面線量率への影響を数値的に検討するため、内部線源領域が仮にやや大きな体積を占め混合領域に占める体積率が 30% である場合を case 2 と呼ぶことにする。

Fig.6-1 に示したような感度係数を用いることにより、収納燃料全体についての平均燃焼度を用いて計算した容器表面線量率に対して燃料配置効果の補正を施すことができる。補正されるべき計算値は既に Table 4-13 に於いて $Dav(0\text{ cm})$ として掲げてある。

Table 6-2 では上記の case 1、case 2 につき、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線に対する補正量の計算法のアルゴリズムを示した。この表からも明らかのように、補正量の計算手続きは極めて簡単である。

表中の $S = S_{\text{lower}}$ は低燃焼度燃料の線源強度を対象とした場合を意味し、今回の例では外部線源領域の線源強度を対象としたことに対応する。また、 S/S_{av} の値の算出の際は、Table 4-12 に示した燃焼度に依存する線源強度を用いる。

Table 6-2 に示すように、高燃焼度燃料を中央部に集中させた場合の容器表面線量率の計算値は全収納燃料についての平均燃焼度に基づいて算出した値よりも小さいが、その小さくなり方の程度は各線源領域中の線源強度の大きさに依存するが同様に、各線源領域の位置、大きさに依存する。

中性子の場合、燃焼度に関する不均質配置の効果として容器表面線量率の値は、case 1 では 16.6% 低下し、case 2 では 7.4% 低下する。

他方、一次ガンマ線の場合は、case 1 と case 2 とではそれぞれ、4.7% と 4.3% 程度の低下となり、補正量としての値は両者とも大差がない。

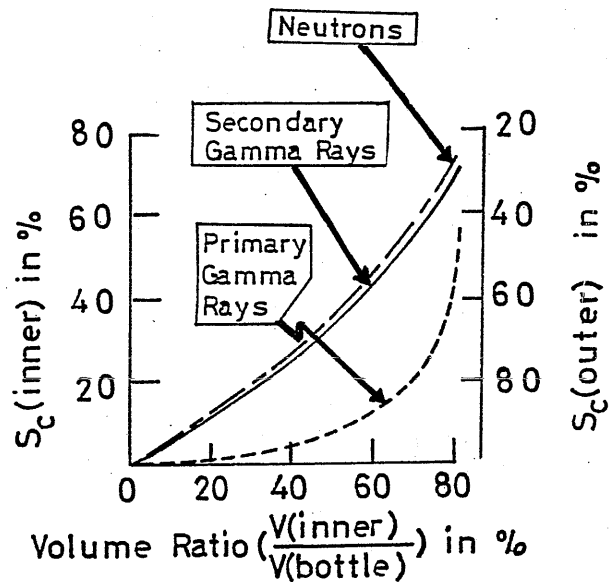


Fig.6-1 Sensitivity Coefficients S_c (inner) and S_c (outer) for Neutrons, Primary Gamma Rays and Secondary Gamma Rays.
(H. Yamakoshi⁽¹⁾, (2), (3))

Table 6 - 1 Sensitivity Coefficient S_c (inner) in % Representation
(In the case of full loading of PWR fuels to the TN-12A cask)

$V(\text{inner})/V^*$ (%)	Neutrons	Secondary Gamma Rays	Primary Gamma Rays
5	2.51	2.45	0.01
10	5.48	4.89	0.25
15	8.50	7.52	0.50
20	12.3	10.6	0.75
25	14.9	13.5	1.01
30	18.4	16.8	1.98
35	22.3	20.0	2.53
40	26.7	24.3	3.81
45	31.4	28.2	5.32
50	36.1	33.6	6.98
55	41.3	38.8	9.55
60	46.7	43.7	13.0
65	52.3	50.2	16.8
70	59.0	56.3	22.7
75	66.8	64.4	35.2
80	74.5	72.5	58.1

* V stands for volume of the source region, i.e., $V = V(\text{inner}) + V(\text{outer})$.

(H. Yamakoshi⁽³⁾)

Table 6 - 2 Algorithm for Determination of Correction Factors to the Dose Rates on the Surface of TN-12A Cask by Using the Proposed Sensitivity Analysis Method

For Neutrons

Region	s	Source Ratio $s/s_{av.}$	Deviation $1 - s/s_{av.}$	Sensi. Coef.: s_c		$s_c(1 - s/s_{av.})$	
				Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
Outer	$s=s_{lower}$	0.773	-0.227	0.927	0.817	-0.210	-0.185
Inner	$s=s_{higher}$	1.605	+0.605	0.073	0.183	+0.044	+0.111
Summation						-0.166	-0.074

For Secondary Gamma Rays

Region	s	$s/s_{av.}$	$1 - s/s_{av.}$	s_c		$s_c(1 - s/s_{av.})$	
				Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
Outer	s_{lower}	0.773	-0.227	0.897	0.788	-0.204	-0.179
Inner	s_{higher}	1.605	+0.605	0.103	0.212	+0.062	+0.128
Summation						-0.142	-0.358

For Primary Gamma Rays

Region	s	$s/s_{av.}$	$1 - s/s_{av.}$	s_c		$s_c(1 - s/s_{av.})$	
				Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
Outer	s_{lower}	0.952	-0.048	0.996	0.979	-0.0478	-0.047
Inner	s_{higher}	1.171	+0.171	0.004	0.021	$+6.84 \times 10^{-4}$	$+3.59 \times 10^{-4}$
Summation						-0.0471	-0.0434

(H. Yamakoshi (1), (2), (3))

以上に示した中性子と一次ガンマ線に対する補正量の値に見られる相違は、感度係数のところで既に述べたとうり、内筒部物質に対する透過性が中性子と一次ガンマ線とで大きく相違することに基づいている。

6.3.3 線量率分布の計算値と測定値との比較

Table 4-13の $D_{av}(0cm)$ に Table 6-2 で示した補正を施し、第五章の (5-18) 式に於ける係数 D_0 に代入すれば、Table 4-7 と比較すべき容器外部線量率分布を計算することができる。

Fig. 6-2 に、中性子、一次ガンマ線に対する線量率分布の計算値を測定値と比較して示した。中性子に対する計算値は実線で、一次ガンマ線に対する計算値は点線で示してある。X印は他の著者が ANISNコードを用いて内筒部から始まる一貫計算を行なった結果である。⁽³⁾

今回の解析で得た線量率分布 D_{hetero} のうちで中性子に対する分布は、平均燃焼度の仮定のもとに求めた線量率分布 D_{av} に比較して、より一層、実測値に近づいている。特に容器表面から 1 m 離れた位置に於ける計算値はゆるやかな距離依存性を持ちながら測定値とは良い一致を示しており、計算値の妥当性を検討するうえで注目に値する結果を示している。

6.4 考察

第四章でも述べたとうり、測定体系は燃焼度の違う燃料を多領域的配列により不均質に配置した体系であるが、本章で示したようにこの不均質配置の効果は中性子に対して顕著に現われる。

したがって、収納燃料に対し平均燃焼度の仮定を適用して求めた中性子の容器周辺線量率分布を測定値と比較する場合は、不均質効果の分だけ過大評価となることに注意する必要がある。

Fig.6-1 および Table 6-1 に示した感度係数の利用法として、燃料域が2領域よりも多くの領域数から成る場合にも Table 6-2 に示す手法がそのまま拡張できるので、与えられた燃焼度の上、下限の範囲内に於ける最適燃料配置法が検討可能である。

本章で示した燃料不均質配置効果の計算法に於いては、燃焼度の相違は燃料中の線源強度の相違を意味し、燃料中の物質組成が燃焼度に依存して異なる効果は無視できるものと暗黙に仮定していた。

Fig.6-2 で示すとうり、本章で導いた方法による中性子の容器周辺線量率分布の計算結果は測定値を良く説明でき、少なくとも上記の仮定の破棄を迫るような矛盾は計算値と測定値との間には認められない。このことは、上記の仮定が良い近似であることを物語っており、感度係数に対する以下の解釈を導くことになる。

Fig.6-1 と Table 6-1 で示した感度係数は、各種の放射線源が内筒部の各位置に置かれた場合の容器表面線量率に対する importance function であると解釈できる。したがって、この

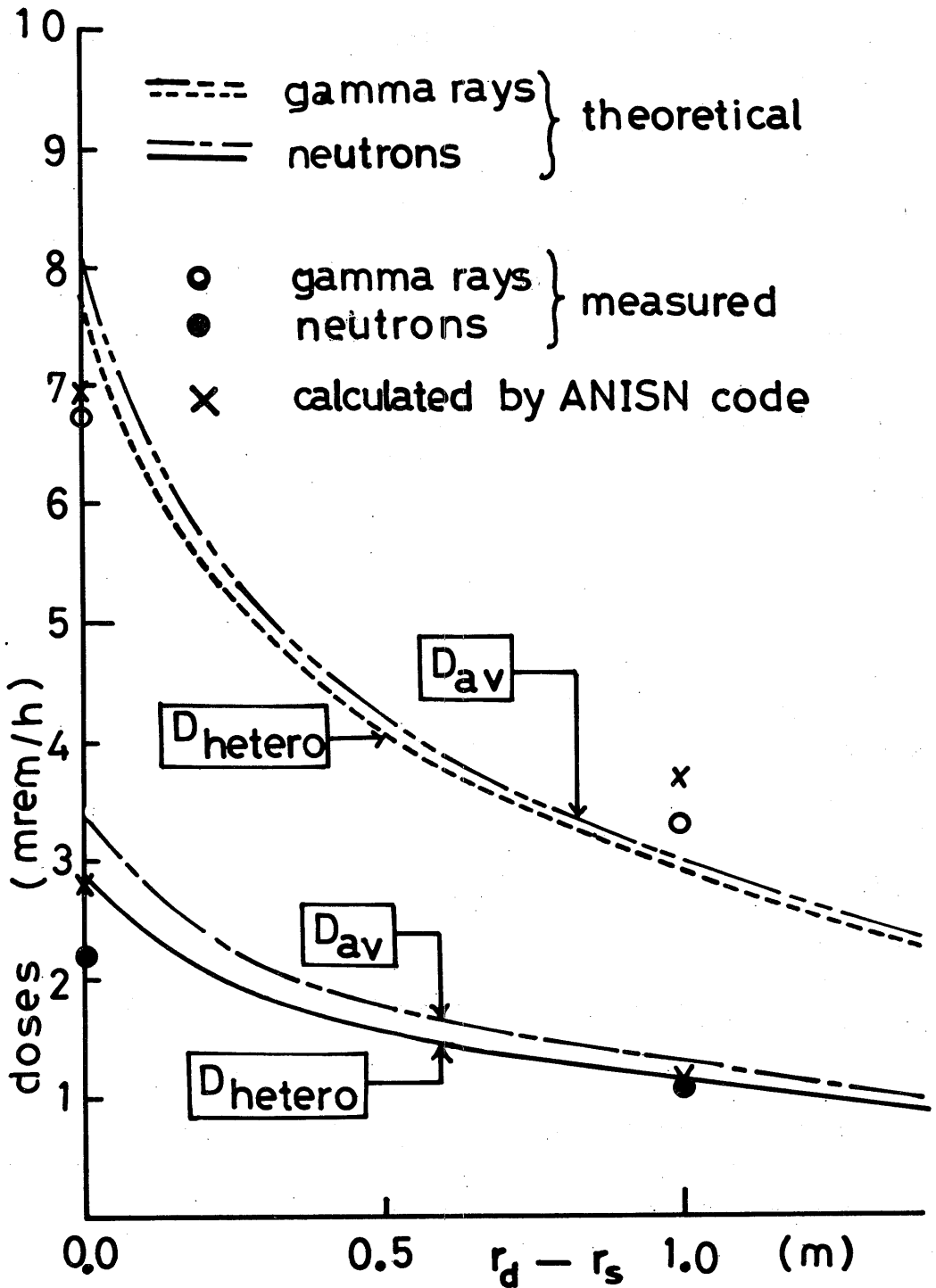


Fig.6-2 Comparison of Radiation Dose Rates between Present Analysis and Measurement around TN-12A Cask. (H. Yamakoshi^{(1),(2),(3)})

例で求めた $Sc(\text{inner})$ の値は、燃料要素が12体収納される限りに於いては、燃料燃焼度には依存しない不変な値であるとみなすことができる。

6.5 結 論

使用済核燃料を燃焼度の相違に応じ多領域的に不均質配置した場合、その不均質効果が容器外部線量率分布へ与える影響は中性子の場合に顕著である。

その効果を定量的に計算するために容器表面線量率に対する感度係数の概念を導入した。実測体系にこの概念に基づく計算法を適用し、計算値と実測値とを比較することにより、この概念を用いた計算法が不均質配置効果を定量的に評価するのに有効であることを示した。特に、第三章で示した計算手法に基づく第四章の計算例は、不均質配置効果を考慮した補正を施すことにより計算値と測定値との一致が一層改善されることが明らかとなった。この結果として、従来経験的に処理されてきた燃料配置法に対し、定量的燃料配置評価が可能となった。

それぞれの型の輸送容器に於いては設計限度いっぱいの収納本数のPWR燃料あるいはBWR燃料で満たした内筒部を対象とする限り、一度求めた感度係数の値は、収納燃料の本数が設計限度いっぱいである限り、燃料燃焼度に係わりなく一定値であると近似できる。

上に述べた近似が成り立つことと、感度係数を計算する際は第三章で示した容器表面線量率計算法がそのまま応用できること等の理由から、燃料不均質配置効果の計算は信頼性の高い結果が短時間で得られることとなり、計算手法の特徴が遺憾なく発揮される。

文 献

- (1) 山越寿夫、日本造船研究協会 RR-28 基準部会 研究資料 No.148R、192 頁 (1985)
- (2) 山越寿夫、日本原子力学会 昭和 60 年年会 C20 (1985)
- (3) 山越寿夫、日本原子力学会会誌 28 巻 9 号 (1986) 掲載予定
- (4) 小鍛治市造、私信

第七章 結 論

本研究は使用済核燃料輸送容器周辺線量率評価法の簡易化を目的としたものであり、従来の経験的評価法が適用できなくなる、線源条件の厳しい状況に於いても比較的簡単な数学的操作により、汎用精密遮蔽計算コードを用いて得られる結果と精度、信頼性の点で遜色のない線量率評価が行なえることを示した。

本研究は理論的内容として下記の3研究から成る。

- (1) 容器表面中央部の線量率評価法の研究
- (2) 容器周辺線量率分布評価法の研究
- (3) 高、低燃焼度燃料不均質配置効果評価法の研究

上記研究(1)ならびに(2)を総合することにより、以下の結論が得られる。

二次元、三次元の遮蔽体系を扱う汎用精密遮蔽計算コード DOT、MORSE を輸送容器周辺線量率評価に適用した場合は、容器内筒部の線源領域から出発し、容器壁部を経て、容器外部の線量率計算点に至るまでを一貫して遮蔽計算する方法が採られており、膨大な計算時間が費やされるが、この一貫した計算を行なう代わりに容器表面中央部の線量率計算と容器外部の線量率分布計算とに全体の計算手順を分割すれば、それぞれの部分計算は簡易化することができ、計算精度を損なわずに全体の計算時間が大幅に短縮できる。すなわちこの計算時間の短縮の程度として、DOTコードを用いた容器周辺線量率分布計算の場合と比較すると、その約千分の一である。

ORIGENコードによる線源計算、二次元拡散コード CITATION による K_{eff} の計算と比較して、DOT による容器周辺の二次元的線量率分布計算は、普通、約百倍程度も計算時間がかかる。したがって、上記の計算時間の短縮は、本研究で得た手法を用いれば容器周辺の二次元的線量率分布計算が線源計算や K_{eff} の計算よりも更に十分の一程度に短い計算時間で行なえることを意味し、計算時間に於ける経済性の利得は非常に大きいと言える。

以下に於いて、それぞれの研究の成果を述べる。

<A> 研究(1)の成果として以下の点が明らかとなった。

- i) 輸送容器の遮蔽体系は容器壁部と内筒部の2領域から成るものとみなせば、容器壁部に対しては容器壁遮蔽性能特性関数と容器壁反射線流特性関数を定義することができ、内筒部に対しては内筒部反射線流特性関数を定義することができる。

容器壁遮蔽性能特性関数は容器内側壁に入射する中性子流、ガンマ線流に対する容器外側表面中央部の中性子線量率およびガンマ線線量率の応答関数であり、入射線のエネルギー群に関する列ベクトルで表わせる。この列ベクトルは中性子の列ベクトルとガンマ線の列ベクトルを部分要素としている。

容器壁反射線流特性関数は内筒部から入射する中性子および一次ガンマ線の線流に対する容器壁からの反射線流の応答関数であり、入射線エネルギー群と反射線エネルギー群に関する2階の行列で表わせる。中性子に対する容器壁反射線流特性関数および一次ガンマ線に対する容器壁反射線流特性関数はそれぞれ容器壁反射線流特性関数全体の部分行列となっているが、容器壁中の中性子吸収に起因する二次ガンマ線に対する部分行列もまた容器壁反射線流特性関数には含まれている。

容器壁部から内筒部に入射する中性子流、ガンマ線流 に対しても上記の容器壁反射線流特性関数と同一の型式の行列表現で内筒部反射線流特性関数が記述できる。

ii) 容器壁遮蔽性能特性関数は容器外側表面上の線量率に対して定義されているため、そのベクトル要素の値の計算は一次元の遮蔽計算体系で扱うことができる。

容器壁反射線流特性関数と容器壁遮蔽性能特性関数の値は、容器壁部の構造を詳細に考慮した一次元遮蔽計算から互いに同時に算出される。この計算には一次元遮蔽計算コード ANISN を適用し比較的短時間で結果を得ることができる。

他方、内筒部反射線流特性関数は、内筒部を2領域体系すなわち、湿式容器の場合は燃料と水との混合領域およびそれを取り巻く水領域、乾式容器の場合はバスケットの主要構成材であるアルミと燃料との混合領域およびそれを取り巻くアルミ領域から成る体系とみなし、ANISNコードを用いてその値が算出される。

iii) 内筒部から容器壁へ入射する中性子流ならびにガンマ線流の実効エネルギースペクトルを計算する場合は、内筒部と容器壁との間に生ずる反射中性子流や反射ガンマ線流の交換過程の効果を考慮することが不可欠である。このいわゆる反射線流カップリング効果の記述には容器壁反射線流特性関数と内筒部反射線流特性関数が不可欠な量である。

iv) 容器表面線量率の計算は、容器壁遮蔽性能特性関数、容器壁反射線流特性関数、内筒部反射線流特性関数を用いた、通常の簡単な行列演算に帰着する。

v) 本研究で導入、定義された諸特性関数の値は、輸送容器に収納された燃料の変化に対して殆ど依存しないと近似できる。したがって、上記の簡単な行列演算による容器表面線量率の計算法は収納燃料の燃焼度が変わっても常に適用可能であり、この計算法を用いることにより、容器表面線量率の定量的評価法を大幅に簡略化することができる。

vi) 本研究の容器表面線量率の計算手法は遮蔽計算に於ける応答関数法に属すが、(a) 体系の

そのままこの感度係数の値が使用できる。

iv) 燃焼度が互いに相違する燃料を輸送容器内筒部に多領域的に不均質配置した場合は、研究(1)、(2)で示した手法から先ず容器周辺線量率分布を算出し、その後本研究で示した不均質配置効果補正計算法を用いることにより、不均質配置効果の補正の入った容器周辺線量率空間分布を求めることができる。この補正の求め方は極めて簡単である。また補正結果は測定値に十分に近い計算値をもたらす。

以上に述べたごとく、研究(1)、研究(2)、研究(3)で得た計算手法は、従来の汎用精密遮蔽計算コードを用いた容器周辺線量率分布評価法に比較して、極めて簡単な計算手続きと少ない計算時間とで同程度の信頼性のある値を与える特徴を持ち、容器周辺線量率分布の簡易計算法として十分に有効な手法である。

上記3種の内容の研究から導かれた計算手法は次のような問題に応用することができる。

- (a) 輸送容器を複数個積載した船内および容器相互のあいだの空間に於ける線量率空間分布の評価に研究(2)の成果が適用できる。
- (b) 従来経験したことのない高燃焼度を達成した使用済核燃料を輸送する場合、研究(1)、(2)、(3)の成果を総合的に適用することにより、輸送容器周辺線量率分布を定量的かつ、容易に評価することができる。
- (c) 新しく設計する輸送容器の壁構造の当否を遮蔽性能の観点から判定する場合、研究(1)で示した手法に基づき求めた容器壁遮蔽性能特性関数はその判定基準として用いることができる。すなわち、設計容器の容器壁遮蔽性能特性関数を従来の容器に対する容器壁遮蔽性能特性関数と比較することにより、容易に設計壁の遮蔽性能の特徴が把握できる。

以上のように、本研究で開発した計算手法ならびにデータはさまざまな形態で輸送容器放射線安全性評価の各方面で応用することができるので、積極的な活用を期待できる。なお、活用を容易にするため、研究(1)で示した行列演算による容器表面線量率計算法はコード化して SMART コードとし、研究(2)で示した任意の位置に対する線量率分布計算式は多数の容器から成る体系に対してコード化して MANYCASK コードとした。

謝 辞

本研究の実施にあたっては船舶技術研究所原子力船部前部長中田正也博士に有益な御指導と励ましをいただいた。また、Monte Carloコード MORSE-CG の使用法と入力データについては同部の植木紘太郎氏に負うところが大きい。さらに、一次元遮蔽計算コード ANISN の使用法については同部の金井康二氏に負うところが多い。本論文をマイクロコンピュータを用いて編修する際に同部の稲坂富士夫氏から編修操作法上の助言を種々いただいた。現原子力船部部長布施卓嘉氏には種々、御厄介いただいた。

TN-12A型容器に対して得られた容器周辺線量率の測定値ならびに測定に先立ち行なわれた解析値は関西電力の小鍛治市造氏の御厚意により入手することができた。

本論文をまとめるにあたり、東京大学関口晃教授の終始懇切な御指導、御鞭達を賜わった。東京大学長谷川賢一助教授および中沢正治助教授には懇切な御助言をいただいた。

これらの諸氏の御厚意に対し慎んで感謝の意を表わします。