研究論文

911. MANYCASKコードを用いた使用済核燃料運搬船内の γ 線線量率分布計算における容器表面線量率の役割

山 越 寿 夫*

(1988年 11月 8日 受理)

*Role of Gamma-Ray Dose Rate at the Surface of Spent Fuel Shipping Cask
in Calculation of Dose Rate Distribution throughout Ship
by Using MANYCASK Code*

By Hisao YAMAKOSHI

A new method is contrived to economize the CPU time in the calculation of spatial distributions of γ -ray dose rates in ships loaded with spent fuel shipping casks. One of main features of this method is that the method requires radiation dose rates on each cask surface as the input data instead of volume source data of radiations, and another is that the method succeeds in economizing the calculation time remarkably in comparison with that of QAD. In this method, the decrease of dose rates behind shieldings due to shielding effect is calculated by the approximation that the way of decreasing is equal to that of γ -rays with energy of 2.18 MeV. It is deduced from a theoretical study that this approximation yields an overestimation of at most 20% to the calculated dose rates behind shieldings in ships. The energy of 2.18 MeV corresponds to that of γ -rays from ^{144}Pr ; a fission product isotope. Consequently, the above mentioned approximation is applicable as far as one deals with spent fuel shipping casks.

The new calculation method is coded as MANYCASK code. As an example for the demonstration of applicability of this code, this code is applied to one of the most popular personal computers in Japan; PC-9801(VX 21), to the calculation of γ -ray dose rate distributions above a ship loaded with 12 casks. Spatial mesh points of 1,500 are chosen with spatial interval of 50 cm. The CPU time required is about 5 min, i.e. very tolerable calculation time for a practical usage of a personal computer. As an output of this calculation, one can obtain a very fine contour map for the spatial distribution of γ -ray dose rates in the ship. From a comparison of dose rate distributions between measurements and calculations, it is clarified that one can calculate reliable dose rate distributions very close to actual ones, if one feeds measured dose rates on the surface of each cask as input data to this code.

KEYWORDS: spent fuel shipping casks, ships, gamma radiation, dose rates, radiation doses, cask surface, computer calculations, MANYCASK code, calculation time, praseodymium 144, spatial distribution, contour map

I. 緒 言

使用済核燃料を輸送容器に収納し、船舶輸送する際の船内 γ 線線量率空間分布を計算から予測する場合は、点減衰核法に基づく簡易計算コードQAD⁽¹⁾あるいはこれと同様の計算手法に基づく簡易計算コードが用

いられている。

それらの計算コードは線源として体積線源を対象としているが、線量率計算において体積線源に関する数値積分を行うため、積載容器数が多い場合や線量率空間分布を船全体にわたって詳しく求める場合は、線源

* 船舶技術研究所 (Ship Res. Inst.)

の体積素片数や空間における線量率算出点数が膨大になり、多大な計算時間が費やされることになる。

このような課題の背景のもとで、計算効率改善のための計算手法開発の一環として、容器周辺の線量率空間分布を容器表面上の γ 線線量率と容器の幾何形状パラメータおよび線量率計算点の容器に対する位置座標を用いて簡単な解析関数として表わした式が導かれた⁽²⁾。また多数の容器が船に積載された場合についても、容器相互の影が船内線量率空間分布に及ぼす効果を採り入れる簡単な手法が開発され⁽³⁾、さらにこれらの成果を採り入れた簡易計算コードMANYCASKがつけられた⁽⁴⁾。

ところで、このMANYCASKコードによる計算で必要となる容器表面線量率についてであるが、使用済核燃料を収納した輸送容器を船舶輸送する場合には、法令によって義務づけられた発送前検査の一環として、各容器の表面において中性子・ γ 線の線量率測定が行われている。そこで得られる測定データには、各容器に収納された体積線源の線源条件の相違が、容器型式の相違と共に、いわば容器の個性として反映している。これを入力データとして利用しようとするのが本報の目的である。

従来から行われている体積線源を対象とした線量率分布計算では、同一型式の容器に対しては共通の平均的線源条件が適用され、しかも船内の目ぼしい点を少数点選んで計算が行われている。このため、計算で得られる分布は概略的にならざるを得ない。

これに対して本報の立場は、船内線量率分布計算に各容器の個性を反映させ、さらにただ一度の計算で船全体にわたる線量率分布を従来よりも飛躍的に詳細に算出する方法を得ることにある。そのためにはMANYCASKコードの適用を念頭に置いているが、課題は、いわば積分量としての容器表面線量率を用いて如何に効率よく船内線量率を求めるか、その手法にある。

本報では、そのような手法として、容器表面上の γ 線エネルギー分布と船内線量率との対応関係の理論的検討から、容器表面の γ 線線量率があたかも核分裂生成物(FP)中の¹⁴⁴Prから生ずる2.18 MeVの単色 γ 線によるものと仮定する近似的手法が有効なことを示し、あわせてこの仮定の実用性も示すこととする。

第Ⅱ章では、容器表面上の γ 線線量率と船内の γ 線線量率との対応関係や上記仮定の物理的意味、および仮定に起因する計算誤差について述べる。第Ⅲ章では、容器12体を積載した運搬船の上甲板上空における

γ 線線量率空間分布の計算例を示し、第Ⅳ章では、本報で示した手法の実用性につき考察する。第Ⅴ章では結論を示す。

Ⅱ. 計算手法の原理

1. 線量率の対応関係

容器表面上の γ 線線量率と容器周辺のそれとは、以下に示すように、 γ 線線束を仲介として相互に結び付いている。

いま全部で n 個の容器が積載されているものとする。半径 $r_s^{(k)}$ 、長軸方向長さ $2H^{(k)}$ の幾何形状をもつ容器(第 k 容器)に着目し、容器中心軸からの径方向距離が $d^{(k)}$ の位置において、エネルギーが $E \sim E + dE$ の範囲にある γ 線の線束を $\phi^{(k)}(r_s^{(k)}, d^{(k)}, E)$ とし、また容器表面中央高さにおける線束を $\phi_0^{(k)}(r_s^{(k)}, 0, E)$ と表わすことにする。

線束計算点と着目容器との間に遮蔽板が存在する場合、両線束 $\phi^{(k)}$ と $\phi_0^{(k)}$ は容器配列や容器形状や線束計算点の座標のような幾何学的条件のみで決まる因子 $Q^{(k)}$ を用いて、以下のように表わせる。

$$\begin{aligned}\phi^{(k)}(r_s^{(k)}, d^{(k)}, E) \\ &= \prod_{j=1}^N B(E, \mu_j, l_j) e^{-\sum_{j=1}^N \mu_j l_j} Q^{(k)} \phi_0^{(k)}(r_s^{(k)}, 0, E) \\ &\equiv A_E Q^{(k)} \phi_0^{(k)}(r_s^{(k)}, 0, E) \quad (1)\end{aligned}$$

ただし、 A_E は N 枚の遮蔽板に対する γ 線ビルドアップ係数 B と線束減衰因子 $e^{-\mu l}$ との積を簡便のために一括して表現したものであり、また幾何学的因子 $Q^{(k)}$ は影分布関数⁽³⁾と呼ばれる因子 f と単体容器の周辺の線束空間分布を記述する関数 $\theta^{(k)}(r_s^{(k)}, d^{(k)})$ との積で与えられる⁽³⁾。

ここで、 f の役割は着目容器からの γ 線を他の容器が遮って空間に織りなす、いわば光と影の斑模様を、他容器が存在しない場合の線束空間分布に対する補正として詳細に記述することにある。例えばFig. 1では、容器1, 2, 3のそれぞれから生ずる γ 線が容器A, B, Cによって遮られる場合につき、容器1, 2, 3のそれぞれに対する f を、 x 軸から10m離れた平行線の上で%表示してある。図示したように、遮りのない場合の値(100%)から完全に遮られた場合の値(0%)まで急激かつ微妙な値の変化として、影の効果を f を用いて記述することができる。

単体容器周辺の線束分布関数 $\theta^{(k)}(r_s^{(k)}, d^{(k)})$ は、容器の幾何形状と容器からみた計算点の位置で決まり、容器が円柱形であれば第2種の楕円積分を用いて解析的に表わすことができる⁽³⁾。

Gamma-rays from Cask Nos. 1~3 are shadowed by casks marked A, B and C. Shadow distribution functions for Cask Nos. 1~3 are calculated on the line that is parallel to and 10m apart from the x-axis.

Fig. 1 Schematic illustration of shadow distribution function⁽³⁾

ところで、 γ 線の線束から線量率を求める変換係数を $C(E)$ と表わし、線束計算点の座標 $(r_d^{(k)}, d^{(k)})$ における γ 線線量率を $D^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)})$ と表わせば、 $D^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)})$ と $\phi_0^{(k)}(r_s^{(k)}, 0, E)$ とは以下の関数で結ばれる。

$$\begin{aligned} D^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)}) &= \int C(E) \phi^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)}, E) dE \\ &= Q^{(k)} \int C(E) A_E \phi_0^{(k)}(r_s^{(k)}, 0, E) dE \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式右辺のうちに最後に示す式の被積分関数が $\phi_0^{(k)}$ と $C(E)$ との積で表わされているが、便宜上、この積を $W^{(k)}(E)$ と表わすことにする。

$$D^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)}) = Q^{(k)} \int A_E W^{(k)}(E) dE \quad (2')$$

2. A_E に対する仮定

容器積載船内の遮蔽体の厚さとしてはかなりその上限に近い例として、厚さ2cmの鉄板の場合と厚さ10cmのコンクリート板の場合につき、 $A_E = B e^{-\mu l}$ の関係におけるビルドアップ係数 B ならびに減衰因子 $e^{-\mu l}$ の γ 線エネルギー依存性をFig. 2に示す。さらに同図中では、実用容器の典型的な型の1例に対して $W(E)$ のエネルギー依存性も示してある。

同図中で E^* として示してあるエネルギーは、使用済核燃料中に含まれる核分裂生成物 ^{146}Pr から生ずる γ 線のエネルギー2.18 MeVに対応している。

Fig. 2の例からも推察できるように、 A_E の構成要素である因子 B と $e^{-\mu l}$ とが相反するエネルギー依存性

The weight function $W(E)$ is calculated by using ANISN code for the case of TN-12B type cask. Factors B and $\exp(-\mu l)$ are illustrated for steel slab shield of 2 cm thick and for concrete slab shield of 10 cm thick. In the higher energy part of γ -rays, the value of the function $A_E (= B \exp(-\mu l))$ is nearly equal to that at the energy $E = E^*$.

Fig. 2 Illustration on energy dependence of weight function $W(E)$, and factor B and $\exp(-\mu l)$ in expression of function A_E

をもち、 E^* を中心とするかなり広いエネルギー領域で両者のエネルギー依存性が互いに打ち消し合う傾向がある。この結果として、そのような領域では、 A_E の値がエネルギー E^* における A_E の値、すなわち A_{E^*} にほぼ等しくなっている。

より低エネルギー側では、因子 B の値の増加に比較して因子 $e^{-\mu l}$ の値の減少の方が激しく、 A_E の値は A_{E^*} の値よりも遙かに小さくなっている。他方、このような領域では $W(E)$ の値は非常に小さいので、 A_E を A_{E^*} で近似しても(2')式の積分値への影響は小さくかつ誤差は安全側であると考えられる。

以上の考察から、(2')式中の A_E を A_{E^*} で近似する。

$$D^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)}) = Q^{(k)} A_{E^*} \int W^{(k)}(E) dE \quad (3)$$

ここで、(3)式の右辺をあらためて $D^{*(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)})$ と書き表わすことにする。ところで $W(E)$ は以下のよう定義されている。

$$W^{(k)}(E) \equiv C(E) \phi_0^{(k)}(r_s^{(k)}, 0, E) \quad (4)$$

したがって、(3)式右辺の積分はちょうど第 k 容器の表面における線量率を与えることになる。この表面線量率を $D_0^{(k)}$ と書くことにすれば、

$$D_0^{(k)} \equiv \int C(E) \phi_0^{(k)}(r_s^{(k)}, 0, E) dE \quad (5)$$

で定義される。

以上を総合すれば、以下の関係が成立する。

$$D^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)}) \approx Q^{(k)} A_E^* D_0^{(k)} \quad (6)$$

$$\equiv D^{*(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)}) \quad (6')$$

この(6)式は容器表面上の γ 線線量率と任意の位置における γ 線線量率との対応関係を示したものとなっ

ており、 $Q^{(k)}$ と A_E^* が与えられていれば、 $D_0^{(k)}$ から第 k 容器による γ 線の船内線量率空間分布が直ちに算出できることになる。

3. 仮定に起因する計算誤差の検討

A_E を A_E^* で近似する物理的意味合いについては、前節で述べた通りであるが、この近似の結果、(2')式の右辺の被積分関数が低エネルギー側で過大に見積られることになる。Fig. 3(a)では遮蔽材の厚さが2cmの鉄板の場合を例として、Fig. 3(b)では厚さが10cmのコンクリート板の場合を例として、 $A_E W(E)$ と $A_E^* W(E)$ との相違を示してある。

$W(E)$ is calculated for TN-12 B cask.

(a) Steel shield

(b) Concrete shield

Fig. 3 (a), (b) Influence of assumption: $A_E \approx A_E^*$ on value of function $W(E)A_E$ for cases of steel shield (2 cm thick) and of concrete shield (10 cm thick)

このような被積分関数の相違が線量率の計算値にどれほどの影響をもたらすか、その目安を与える量として、(2')式で定義した $D^{(k)}$ と(6')式で定義した $D^{*(k)}$ とを用いて、以下のように定義した比 R を導入する。

$$R \equiv \frac{D^{*(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)})}{D^{(k)}(r_d^{(k)}, d^{(k)})} \quad (7)$$

$$= \frac{A_E^* \int W^{(k)}(E) dE}{\int A_E W^{(k)}(E) dE} \quad (7')$$

(7')式は見方を変えれば、 $W^{(k)}(E)$ を重み関数とした因子 A_E のエネルギー平均値で特定値 A_E^* を除した値を与えるものと考えられる。すなわち、

$$R = \frac{A_E^*}{\langle A_E \rangle} \quad (8)$$

である。

現用の輸送容器の典型的な例として、EXELLOX-4型湿式容器とTN-12B型乾式容器の場合につき、遮蔽体としての鉄板の厚さが1cmと2cmの場合に対して、またコンクリート板の厚さが1cmと10cmの場合に対

しても、 R の値を求めてTable 1に示してある。

Table 1 Example for values of ratio R

	Iron		Concrete	
Thickness	1 cm	2 cm	1 cm	10 cm
TN-12 B	1.025	1.115	1.002	1.126
EXELLOX-4	1.014	1.088	1.001	1.058

The ratio R is a measure of deviation in the calculated dose rate caused by the approximation of Eq. (3) in the text.

使用済核燃料運搬船の鉄板の厚さはせいぜい2 cm程度であり、コンクリート遮蔽体の厚さは大略10cm前後である。したがって、Table 1から判断して、2.18 MeVの γ 線エネルギーに対応した A_E の値を用いる(6)式を採用して船内の γ 線線量率空間分布を計算しても、実用上は差し支えないものと考えられる。

III. MANYCASKコードによる解析例

MANYCASKコードの実用性を確かめるために、現

在わが国で最も広く普及している小型電算機 PC-9801 VX 21*でこの計算コードをはしらせて、Fig. 4 に概略的に示すように、2 種類の使用済核燃料輸送容器を総数12体積載した容器運搬船を例として、上甲板付近とその上空の γ 線の線量率分布を計算した。

上甲板付近を計算対象とした理由は、計算結果の妥

当性を検証するための線量率の測定が、Fig. 4 中で黒い小丸として示されているように、上甲板付近に存在する⁽⁶⁾からである。またさらに、上甲板上空を計算対象とした理由は、船の遮蔽構造が上甲板上空の線量率空間分布に微妙に反映することと、船橋中にいる人の対放射線安全性を確かめるためである。

Concrete shield shown as a thick solid line varies its thickness from part to part up to 14 cm.
Positions of dose measurements are located by small black circles.

Fig. 4 Schematic illustration of cask configuration, steel walls, concrete shield and positions of dose measurements in dose calculation system taken up in present study

1. 船内体系の概略

Fig. 4 に示す体系では、第2、第3船倉に乾式容器 (TN-12B型) が上・下段に合計5体積載され、また第4、第5船倉には湿式容器 (EXELLOX-4型) が上・下段に合計7体積載されている。

第4、第5船倉のハッチカバー上と上甲板には、最大厚さ14cmまでの種々の厚さでコンクリート遮蔽が施してある。Fig. 4では、コンクリートの部分は太線で示してある。

船倉を形作る鉄板は1cmと仮定し、また各船倉を上・下2段に分けた鉄板は、床と天井を合わせた厚さとして2cmと仮定した。

この体系では折悪しく、容器表面上の線量率の測定データが入手不可能であったが、乾式・湿式の各型ごとに、収納燃料の平均的線源条件が入手できたため⁽⁶⁾、容器表面上の γ 線エネルギースペクトルをANISNコードを用いて算出し、得られたスペクトルから表面線量率を出し、それをMANYCASKコードに入力して、線量率分布を算出するといった手順をとった。

2. 上甲板付近の線量率分布

実験値と計算結果とを比較するために、ハッチカバー上および上甲板上で船の前後方向に、船の中心線上および中心線から、それぞれ1.75, 3.5m ずつ片舷に離れた平行線に沿って線量率分布を計算した。計算結果はFig. 5 に示すが、これらの分布を得るために、計算点は幅50cmの間隔で選ばれている。Fig. 5に示す分布

を得るために約250点の計算格子点が選ばれており、PC-9801機で約50sで計算が終了する。

Fig. 5の横軸に示した距離の目盛は、Fig. 4中の下方で示した x 軸の目盛と一致させており、計算値と実測値との比較が体系中のどこで行われているのかが明確となるように配慮してある。

Fig. 5中で、距離が約26~35mの範囲と約36~46mの範囲の測定位置はハッチカバー上に対応し、約34~36mの範囲と約46~50mの範囲の測定位置は上甲板に対応する。船の舷方向に関する測定位置は、船の中心線も含めて左右両舷に対称に1.75, 3.5mの平行線上に選ばれている。したがって、同一水平面内では合計5本の線上に測定点が並んでいる。

約26~34mの範囲では、5本の線上の測定値は相互に極めて近い値である。このことは計算結果においても認められる。また、この範囲では、計算結果と測定結果とは良く一致しているといえる。

他方、約36~46mの範囲では、計算値が船の中心線から両舷に1.75mずつ離れた平行線上の値と船の中心線上の値とかなり近い値であるものの、3.5mずつ離れた線上の値は中心線上の値からやや外れた小さな値となっている。この傾向は測定値においても認められ

* 40MBのハードディスクを外付けしたものを用いた。計算コード中でラベル付きコモンが大きいいため、約3MB程度のコアメモリーが実用計算では必要である。

Fig. 5 Comparison of dose rate distribution between calculation and measurement

るところであるが、3.5 m離れた場合の測定値は計算値よりも大分小さくなっている。一方、船の中心線上と1.75 mずつ離れた線上については、計算値と測定値は大略良い一致を示している。

上記3.5 mの線上における計算値と実測値との相違については、その原因として、現実の船の構造が、施工上の事柄として、部分的に船体構造設計図とは異なる場合があり、この相違の効果が計算では取り入れられていなかったためと考えられる。

46~50 mの範囲では計算値と測定値とは概略良く一致しているが、34~36 mの範囲では測定値の方が計算値よりも大きな値となっている。後者の場合にはのちほどFig. 6の甲板上空線量率等高線図にも示されるように、測定位置付近では線量率等高線が局所的に複雑な分布を持っており、測定位置の誤差が測定線量率に大きな相違をもたらす可能性の強い、いわば微妙な位置となっていたものと考えられる。

3. 上甲板上空の線量率分布

船の中心線を含む垂直面内で上甲板上空間における線量率分布を計算した。船の前後方向に関しては、距離5 mから54.5 mまでを幅50 cmの格子点で100点に切り、また上甲板から垂直上方向に9.8 mまでの高さを15個の均等格子に切り、総計1,500点の網の目で対象

とする平面を覆った。この場合のPC-9801機による計算時間は約5 sであった。

Fig. 6では、Fig. 4の体系図との対応を明確にするため、各船倉名および船倉中の容器中心軸位置が示してある。特に容器中心軸位置は、船の側面から見た容器軸の位置をそのまま上甲板に鉛直投影させた位置としてX印で示してある。またハッチカバーにおいてコンクリートが存在する部分は太い灰白線で、また鉄板のみの部分は太い白黒の斑線として示してある。

4. 各容器からの線量率分布への寄与

MANYCASKコードの特徴の一つは、計算実行上の手順として、各容器が各計算格子点の線量率にどれほどの寄与をもたらすか、その内訳をまず一旦計算して記憶していることである。したがって、今回の計算で関心のある船橋部について、例えばFig. 4で線分A-A'として示す線分上における線量率への各容器からの寄与についても、記憶内容を取り出すことによってその詳細な様子を知ることができる。

Fig. 7に、上記線分A-A'上の線量率分布と各容器からの寄与の内訳を、代表的な例について示す。図中の記号D₁, D₂, D₃は、Fig. 4に示した船橋中の各床の位置に対応している。また、Fig. 4で示した容器番号と寄与との対応は線種別となっており、Fig. 7のキャ

Steel plates are denoted by the mark , while steel plates with concrete shields are denoted by the mark . Each type of lines corresponds to each range of dose rate values as shown in the following table:

Type of Lines	Factors	Units
1.0, 1.2, 1.4,	mrem/h
1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0	10^{-1} mrem/h
1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0	10^{-2} mrem/h
1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0	10^{-3} mrem/h
1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0	10^{-4} mrem/h

Fig. 6 Contour map of calculated γ -ray dose rate distribution above center line of ship

ブションにその対応一覧表が示してある。

この図から船橋の線分A—A'に沿った線量率分布に各容器がもたらす寄与は、容器ごとに複雑・微妙に異なることや容器ごとの寄与の様子が一目瞭然とわかるであろう。

Fig. 7はFig. 6と共に船の構造や容器積載位置と線量率空間分布との関係を知る上で甚だ興味ある結果を与えているが、船橋の中に選んだ線分A—A'に沿った高さ方向における γ 線線量率は極めて小さいであろうということがFig. 7から伺える。

IV. 考 察

今回示した近似法は、使用済核燃料輸送容器を対象とする限り、容器型式の相違にかかわらず、 γ 線の容器周辺線量率分布や船内線量率分布を計算する場合に有効であると考えられる。その理由は、核分裂生成物中の ^{144}Pr から2.18 MeVの γ 線が多量に発生し、容器表面上の重み関数 $W(E)$ の値の主要部分である高エネルギー成分を支配するからである。

今回の計算では、測定による容器表面線量率を直接入力することができず、体積線源の線源条件に基づく容器表面線束のエネルギー分布をANISNコードを用いて一旦算出し、次いで容器表面線量率を求め、最後

にこの容器表面線量率の計算値をMANYCASKコードに入力して容器積載船の線量率空間を求めている。この計算結果はおおむね測定値と良い一致をみたが、MANYCASKコードへの入力データが各型の容器についての平均的線源条件に基づく計算値であったため、実際に各容器ごとに異なるはずの線源条件の相違、いわゆる容器の個性が線量率分布の計算値に反映しているわけではない。このことが、Fig. 5中の36~40 mと40~46 mの範囲で、船の中心線付近の線量率分布に計算値と測定値との間でやや相違が認められる原因となっていると思われる。

Table 1でも示した通り、遮蔽体の厚さが小さければ、今回示した近似法による誤差は小さい。したがって、船倉内部の線量率空間分布の計算におけるように、計算点と容器とが同一船倉内にあって鉄の区画壁を間に全く挟まないか、あるいは1枚か2枚程度を挟んでいるような状態においては、計算点に近接した容器からの寄与が主要成分を占める。そのような主要成分の計算値に対する上記近似誤差は、全くゼロかまたはかなり小さいものと思われる。したがって、容器が存在する船倉内やその付近の計算線量率が比較的高い領域では、充分良い近似で線量率が予測されよう。

今回計算した上甲板上空の線量率分布では、遮蔽体

Positions located by marks D_1 , D_2 and D_3 in this figure correspond to the deck positions indicated by the same marks in Fig. 4. The MANYCASK code calculates the partial contributions in detail before the calculation of the total dose rate distribution shown by the line ———— at the top of the curves. Partial contributions are shown by the following lines:

----- : from No.1 cask,	----- : from No.8 cask
××× : from No.4 cask,	----- : from No.9 cask
-○-○-○-○- : from No.5 cask,	----- : from No.10 cask
●●●●● : from No.7 cask,	----- : from No.11 cask
	----- : from No.12 cask

Fig. 7 Calculated γ -ray dose rate distribution along line A-A' in Fig. 4 and typical partial contribution from casks

の厚さが船倉内部の線量率分布を計算する場合に比較してやや大きい。このため、船倉内の計算に比較して、上記近似に起因する計算誤差は大きいと考え得るが、その大きさの程度は Table 1 に示した通りである。

MANYCASK コードは計算ステップ数が少なく、かつ影分布関数の導入や本報で示した近似法の採用により計算時間の一層の短縮化が図られており、パソコン向きである。簡易計算法の実用性の実証は最もポピュラーなパソコンで行われるべきであるとの考えから、PC-9801機を対象として機種 VX-21 につき MANYCASK コードを整備した。Fig. 4 に示す 12 体の容器積載状態で 1,500 点の計算格子点に対して約 5 min という計算

時間は、パソコンによる MANYCASK コードの現場的使用法としては、入力データとしての実測値をとり終って、一息ついたところで計算が終了するといった意味で、我慢できる長さといえよう。

もちろん QAD の手法では、線源部分を体積素片に分割する際の分割数の倍率で計算時間が長くなる。例えば、100 分割の場合は、大型計算機とパソコンとでは加減乗除算のそれぞれにかかる計算時間に相違があるものと思われるが、FACOM-M 180 の場合の計算時間比率をそのまま適用すれば、大略 10,000 min、すなわち約 1 週間、パソコンの連続運転を要するものと考えられる。

Fig. 6 の等高線図では、0.06 mrem/h の線の様子が 0.08 や 0.04 mrem/h の線の様子とやや異なっているが、これは、この空間領域では空間格子点間隔が未だ粗いこと、したがって x 軸、 y 軸の各方向についてこの付近ではもっと細かに、例えば x 軸方向については 50 cm から 25 cm 程度へと、また y 軸方向についても 75 cm から 25 cm 程度へと、現在の場合よりも格子間隔を詰めて選ぶ必要のあることを示唆している。

このように、線量率空間分布計算の格子間隔を選ぶ際の目安が極めて容易に得られることも、比較的短時間の計算で線量率等高線分布が得られる MANYCASK コードを用いる利点の一つといえよう。

容器発送前検査の現場で得られる容器ごとの表面線量率実測値を入力すれば、容器積載船内の線量率分布の計算値は実際に近いものと考えられる。したがって、容器の表面線量率実測データに基づき、各容器の船内最適配置の検討も容易に行うことが可能となる。

V. 結 論

MANYCASK コードを用いて使用済核燃料運搬船を対象とした γ 線線量率空間分布を計算する際の本簡易手法を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) γ 線遮蔽効果により遮蔽体前後で生ずる線量率変化は、核分裂生成物中の ^{144}Pr から生ずる 2.18 MeV の γ 線に対して求めた遮蔽効果による線量率変化で近似できるものと仮定して、容器表面上の γ 線線量率から近似的に線量率分布を計算することができる。
- (2) 上記仮定は、實際上、たかだか 20% の線量率

過大評価をもたらすに過ぎず、実用上有効である。

- (3) 容器表面上の γ 線線量率として実測値を入力すれば、表面線量率が容器ごとに異なる効果が線量率分布の計算値に反映され、その結果として実際に近い線量率分布が推算できると期待される。
- (4) パソコンを用いた MANYCASK コードの実用性は現在、広くゆきわたっている機種の場合については、すでに充分に高いものと思われる。発送前検査を行なっている現場において測定データを用い、そのような機種のパソコンにより、容器積載後の船内・外における γ 線線量率分布を容易に予測することが可能である。計算において空間格子点の間隔、計算でカバーする空間の広さ等の妥当性を検討する際は、算出値の等高線分布を参考に加えた繰返し計算が短時間で行え、有力な手段となる。

— 参考文献 —

- (1) MALENFANT, R.E.: QAD: A series of point kernel general-purpose shielding programs, LA-3537, (1967).
- (2) YAMAKOSHI, H.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 22[9], 697 (1985).
- (3) *idem: ibid.*, 25[7], 563 (1988).
- (4) 山越寿夫: 複数のキャスクを含む空間体系の線量率空間分布を計算する MANYCASK コードのユーザーズマニュアル, 船研報告, 23[3] 資料, (1986).
- (5) 植木紘太郎: 私 信, (1986).
- (6) 松本誠弘: 私 信, (1986).
- (7) YAMAKOSHI, H., et al.: Measurement and analysis of gamma-ray dose distribution in actual ship, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 20[2], 127 (1983).

◇原子力構造機器の材料、設計、施工、検査講習会

主 催 日本溶接協会、後 援 本会ほか17学協会

日 時 1990年3月5日(月)、6日(火) 9:30~16:40

場 所 グランドヒル市ヶ谷(東京都新宿区市ヶ谷木村町4-1)

○プログラム○

基礎コース(3月5日) 9:30~16:40

原子力構造設計の基礎

強度の基礎

材料の耐食性

非破壊検査

溶接の基礎

原子力構造物の技術基準

(東大)矢川元基

(東大生研)結城良治

(東大)辻川茂男

(原研)大岡紀一

(神戸製鋼)上田敏三

(東芝)前川 治

応用コース(3月6日) 9:30~16:40

事故のプロセス

新素材の開発と原子力への応用

高速炉における革新技術

核融合材料

品質保証と経営

軽水炉の寿命延伸

放射線への応用

原子燃料の再処理と溶接

(東工大)小林英男

(次世代機器開発研)徳田育三

(電中研)服部禎男

(東大)石野 稔

(IHI)天野牧男

(東電)猪股俊雄

(原研)町 末男

(原燃サ)坂井元彦

○申込要領 所定申込書により下記宛へ。(定員 100名)

○参加費 (テキスト代、昼食代、消費税を含む)

1日コース…25,750円(協賛学会員)、30,900円(非会員)

2日コース…41,200円("), 51,500円(")

申込・問合せ先 (〒101)東京都神田佐久間町1-11

日本溶接協会 原子力研究委員会(03-257-1521)