

大型輸送物周辺の線量率分布予測計算への立体角法の適用

植木 紘太郎* 山越 寿夫*
金井 康二* 竹内 清**

Application of the Solid Angle Method to the Estimation of Radiation Dose Rate Distributions around Large Packages

By

Kohotaro UEKI, Hisao YAMAKOSHI,
Yasuji KANAI and Kiyoshi TAKEUCHI

Abstract

Gamma-ray dose rate distributions were measured around the spent fuel shipping cask and in the spent fuel shipping boat HINOURA MARU.

Measured dose rate distributions show that the attenuation of the dose rate around the shipping cask is slower than the r^{-2} rule governing the radiation field around a point isotropic source. Thus, the measured distributions suggest that the rule is not suitable for shipping cask cases. A simple empirical formula based on the solid angle method, $D = T_{ID} \cdot \Omega_x / \Omega_1$ (mrem/hr) is introduced, where T_{ID} is the dose rate (mrem/hr) at 1 meter distance from the surface of a package, Ω_1 and Ω_x are solid angles at 1 meter and x meter distance from the surface of the package respectively.

The formula explains the measured values fairly well. The formula is also applicable to the estimation of dose rate distributions around a cask in the spent fuel shipping boat. The calculated dose rates agree well with the measured ones in the hold loaded with the shipping cask.

目次

1. はじめに	1
2. 立体角法の導入とその基礎式	2
3. 立体角法を使用済核燃料輸送容器周辺の線量率分布に適用した場合	5
4. 船内に積載された輸送容器への適用例	10
5. その他大型輸送物への適用について	13
6. 立体角法の適用性について	13
7. 結論	14
謝辞	15

1. はじめに

使用済核燃料, 新燃料, 放射性廃棄物等を船舶で輸送する場合, 輸送物からおよそ100メートルの範囲で荷役作業が行なわれたり船員が居住したりする。輸送に先立って輸送物周辺および船内線量率分布を予測しておく事は放射線管理上重要であるばかりでなく, 輸送中の輸送物の健全性を確認するという観点からも必要となる。専用船のみならず一般船の船内線量率分布を輸送当事者あるいは関係官庁の担当官等が推定できるためには可能な限り手続きが簡単で, 物理的に理解しやすい手法が要求されよう。例えば点等方線源に対する r^{-2} 則程度が望まれる。

* 原子力船部

** 東海支所 原稿受付: 昭和55年3月7日

使用済核燃料輸送容器周辺のガンマ線線量率分の減衰傾向が r^{-2} 則よりも緩いことが分り、一般に使用されている点等方線源に対する r^{-2} 則が大型輸送物周辺の線量率分布を説明できない事が明白になった。そこで、実測した線量率分布の減衰傾向を分析し、“立体角法”と称する経験式を導いた。そして、立体角法による計算値と輸送物周辺の線量率分布の実測値とを比較検討し、立体解法の適用性を調べた。次に、使用済核燃料輸送専用船“日の浦丸”に於ける船内線量率分布測定実験と立体角法による計算値とを比較した結果、測定対象とした輸送容器を積載した船倉内では実測値との一致性がよいが、遮蔽用水タンクや隔壁を何枚も透過するのにつれて計算値が実測値を上回ることが分った。これは立体角法が r^{-2} 則と同様に輸送物周辺にある構造物の遮蔽効果を無視している事によるものと考えられる。

立体角法の使用例として円筒型輸送物の場合、円筒側面の中央部半径方向に対する立体角および底面軸方

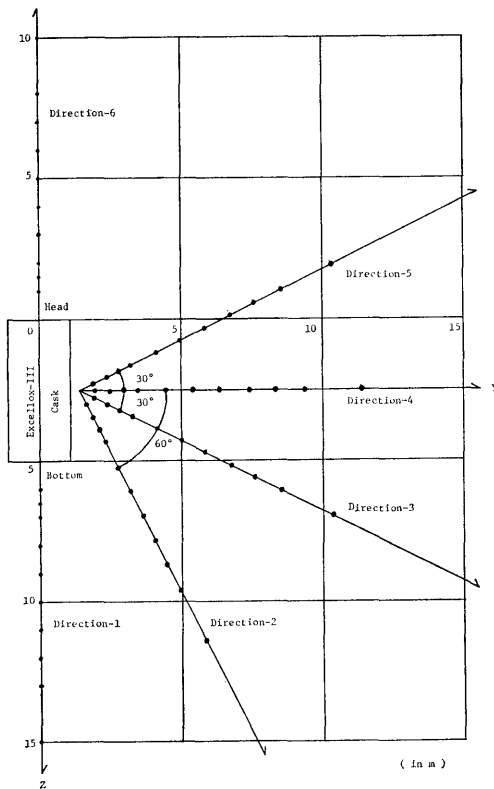


Fig. 1 Experimental configuration for dose rate measurements around the spent fuel shipping cask.

(280)

向に対する立体角を距離 x について必要な位置まで求め、各方向についてそれぞれ Ω_x/Ω_1 を表あるいはグラフにしておき、これから問題とする位置に於ける Ω_x/Ω_1 の値を読み、その値に輸送物表面から1メートルにおける線量率を乗ずるという簡単な手続きで線量率分布が求まる。ここで、 Ω_1 、 Ω_x はそれぞれ輸送物表面から1メートル、 x メートルにおける立体角を表わす。立体角法による線量率は輸送物表面から1メートル以遠で、その表面線量率分布に局所的ピークがなければ実測値に近い値を示すことが分った。

2. 立体角法の導入とその基礎式

使用済核燃料輸送容器 Excelloxx-III 周辺のガンマ線線量率分布の測定を行った。輸送物としての使用済核燃料はPWRで2 ton, そのうち1.2tonが21328MWD/MTU, 冷却日数が1220日, 0.8tonが28644MWD/MTU, 冷却日数が501日である(線源強度, エネルギースペクトル等については文献¹⁾を参照)。図1はExcelloxx-III周辺の測定方向と測定点を示したものである。図2は図1の各測定方向に沿ったガンマ線線量率分布を示したものであり、測定値は自然のバックグラウンドを含んでいる。測定器はシンチレーション型サーベイメータである。

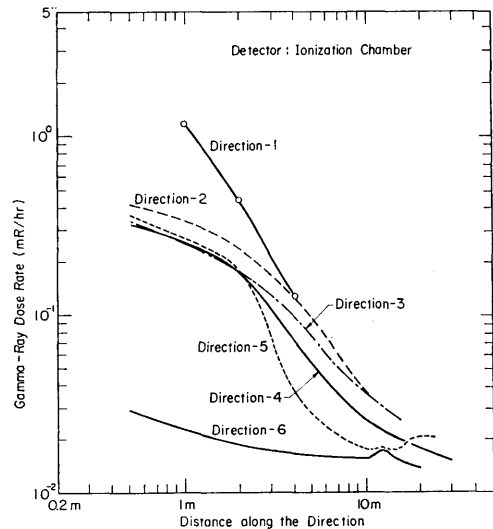


Fig. 2 Gamma-ray dose rate distributions around the shipping cask. Each curve corresponds to the direction shown in Fig. 1. The values include the natural back ground.

図2を見ると容器底面の軸方向の Direction-1 では線量率減衰傾向が両対数のグラフではほぼ-2の勾配であり、 r^{-2} 則に近いが、容器側面の Direction-2 ~5 では線量率減衰傾向が r^{-2} 則よりも緩やかである。容器側面中央から垂直方向の Direction-4 について見ると、表面から数メートルまでは r^{-2} 則よりも遥かに緩やかである。Direction-1 では観測点に対する線源となる面が底面であるのに対し、Direction-2 ~5 では線源となる面は観測点から下した接線で囲まれた側面であり、容器の寸法はフィンを含め半径が1.1メートルに対し高さは5メートルあるので、側面方向に対する線源領域は底面方向よりも大きく、それに伴った線源領域を見込む立体角は Direction-2 ~5 が Direction-1 よりも緩やかな減少傾向にあると考えられる。したがって線量率の減衰傾向と立体角の減少傾向とは何らかの相関関係があるものと推定される。ところで、輸送物の輸送認可申請に当っては輸送物表面から1メートルにおける線量率を $mrem/hr$ で記載することが義務づけられているので、この線量率を輸送容器を見込む立体角とを組合せた“立体角法”は実測値をかなり良く説明できると予想される。

輸送容器から1メートルの位置に於ける立体角を Ω_1 、 x メートルの立体角を Ω_x 、輸送物から1メートルに於ける線量率を $T_{ID}(mrem/hr)$ とすれば、輸送物表面から x メートルの位置に於ける線量率は次式で表わされるものとする。

$$D = T_{ID} \cdot \frac{\Omega_x}{\Omega_1} \quad (\text{mrem/hr}) \quad \dots\dots(1)$$

(1)式が立体角法の基礎式である。図3は円筒側面、図

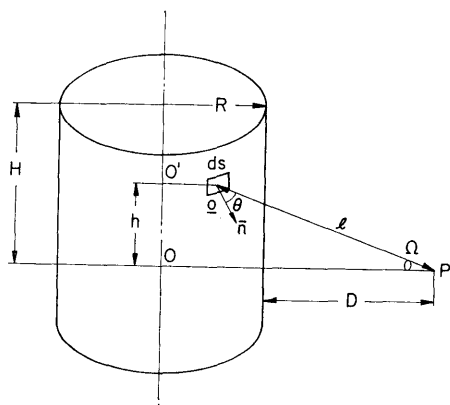


Fig. 3 Geometry for calculation of solid angle of a cylinder side surface.

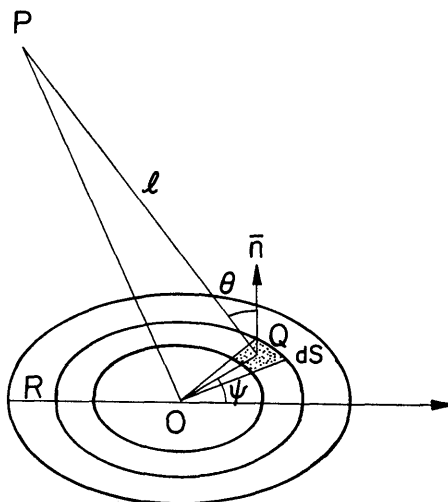


Fig. 4 Geometry for calculation of solid angle of a disk.

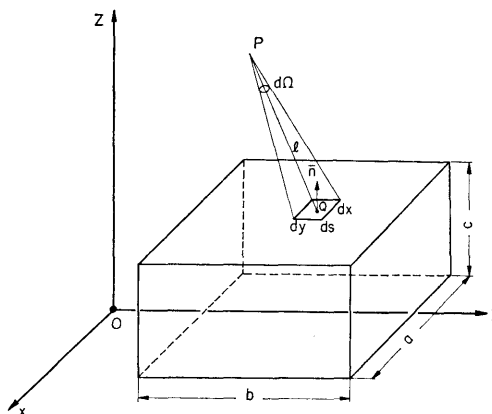


Fig. 5 Geometry for calculation of solid angle of a box.

4は円筒端面円板、図5は直方体に対するそれぞれの立体角を計算するための幾何学的位置関係を示したものである。また図6は円筒について観測位置と立体角との関係を示したものである。

微小立体角 $d\Omega$ は次式のように書かれる。

$$d\Omega = ds \cdot \cos \theta / l^2 \quad \dots\dots(2)$$

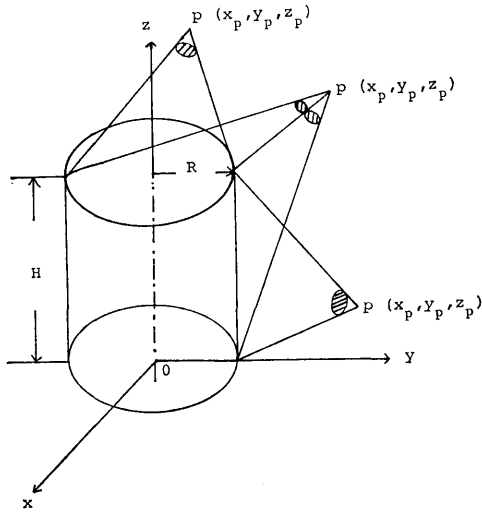
ここで、

ds = 微小面積要素、

l = 観測点 P と ds との距離、

θ = ds に立てた法線と線分 l とのなす角。

次に円筒の側面、端面円板および直方体側面の立体角



Detector location $P(x_p, y_p, z_p)$

- i $0 \leq z_p \leq H$ Cylinder source,
 ii $0 \leq x_p^2 + y_p^2 \leq R$ Disk source,
 iii $\begin{cases} z_p > H \\ x_p^2 + y_p^2 > R \end{cases}$ Cylinder and disk source.

Fig. 6 Solid angle to the detector location.

Ω を求める計算式について述べる。

i) 円筒側面

図3に於いて、点 P, Q の座標を

$$P(0, L, 0), \text{ ここで } L=R+D,$$

$$Q(R \sin \phi, R \cos \phi, h),$$

とする。角 ϕ の最大は点 P から円筒に下した接線と \overline{PO} との交線がつくる角であり、 $0 \leq \phi \leq \cos^{-1}(R/L)$ の範囲にある。点 O' の座標は $O'(0, 0, h)$ である。微小面積 ds は次式で与えられる。

$$ds = R d\phi dh \quad \dots\dots(3)$$

法線とのなす角 $\cos \theta$ は以下のようにして求められる。法線 \overline{n} の方向余弦を $\overline{n}(u', v', w')$ とすれば、 $\overline{n}(u', v', w') = \overline{n}(\sin \phi, \cos \phi, 0)$ 、 \overline{QP} の方向余弦を $\overline{Q}(u'', v'', w'')$ とすれば

$$\overline{Q}(u'', v'', w'') = \overline{Q}\left(\frac{-R \sin \phi}{l}, \frac{L - R \cos \phi}{l}, \frac{-h}{l}\right),$$

となる。ここで、 $l = \sqrt{R^2 \sin^2 \phi + (L - R \cos \phi)^2 + h^2}$
 $\cos \theta$ はベクトル \overline{n} と \overline{Q} の内積であるから、

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \overline{n} \cdot \overline{Q}, \\ &= \frac{-R \sin^2 \phi}{l} + \frac{(L - R \cos \phi) \cos \phi}{l} \dots\dots(4) \end{aligned}$$

(4)式を(2)式に代入すれば、

$$\begin{aligned} d\Omega &= ds \cdot \cos \theta / l^2, \\ &= \frac{1}{l^3} \{-R \sin^2 \phi + (L - R \cos \phi) \cos \phi\} R d\phi dh \end{aligned} \quad \dots\dots(5)$$

よって、

$$\begin{aligned} \Omega &= \int_{-\phi_{max}}^{\phi_{max}} \int_0^H \frac{1}{l^3} \\ &\quad \{-R^2 \sin^2 \phi + (L - R \cos \phi) R \cos \phi\} d\phi dh \end{aligned} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 $\phi_{max} = \cos^{-1}(R/L)$

ii) 円筒底面

図4に於いて点 O, P, Q の座標をそれぞれ

$$O(x_1, y_1, z_1),$$

$$P(x_2, y_2, z_2),$$

$$Q(r \sin \phi, r \cos \phi, z_1),$$

とする。微小面積 ds は次式で与えられる。

$$ds = r d\phi dr \quad \dots\dots(7)$$

\overline{QP} の方向余弦を $\overline{Q}(u', v', w')$ とすれば、

$$\overline{Q}(u', v', w') = \overline{Q}\left(\frac{x_2 - r \sin \phi}{l}, \frac{y_2 - r \cos \phi}{l}, \frac{z_2 - z_1}{l}\right),$$

となる。ここで、

$$l = \sqrt{(x_2 - r \sin \phi)^2 + (y_2 - r \cos \phi)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

法線 \overline{n} の方向余弦 $\overline{n}(u'', v'', w'')$ は、

$$\overline{n}(u'', v'', w'') = \overline{n}(0, 0, 1)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \overline{n} \cdot \overline{Q} \\ &= (z_2 - z_1) / l \end{aligned} \quad \dots\dots(8)$$

(8)式を(2)式に代入すれば、

$$\begin{aligned} d\Omega &= ds \cdot \cos \theta / l^2, \\ &= \frac{r(z_2 - z_1)}{l^3} d\phi dr \end{aligned} \quad \dots\dots(9)$$

$$\Omega = (z_2 - z_1) \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{r}{l^3} d\phi dr \quad \dots\dots(10)$$

図6に示す各観測点に於ける全立体角は(6)式と(10)式を組合せて求めることができる。

iii) 直方体

図5に於いて、点 P, Q の座標をそれぞれ、

$$P(x, y, z),$$

$Q(x_2, y_2, z_2)$,
 とする。微小面積 dS は次式で与えられる。

$$dS = dx \cdot dy \quad \dots\dots(11)$$
 \vec{PQ} の方向余弦を $\vec{Q}(u', v', w')$ とすれば、

$$\vec{Q}(u', v', w') = \vec{Q}\left(\frac{x_1 - x_2}{l}, \frac{y_1 - y_2}{l}, \frac{z_1 - z_2}{l}\right),$$
 となる。ここで、 $l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$
 法線 \vec{n} の方向余弦 $\vec{n}(u'', v'', w'')$ は、

$$\vec{n}(u'', v'', w'') = \vec{n}(0, 0, 1)$$

$$\cos \theta = \vec{n} \cdot \vec{Q},$$

$$= (z_1 - z_2) / l \quad \dots\dots(12)$$
 (12)式を(2)式に代入して、

$$d\Omega = dS \cos \theta / l^2,$$

$$= \frac{(z_1 - z_2)}{l^3} dx dy \quad \dots\dots(13)$$

よって、

$$\Omega = (z_1 - z_2) \int_0^b \int_0^a \frac{1}{l^3} dx dy, \quad \dots\dots(14)$$

ここで、 $a = x$ 軸方向の一辺の長さ、
 $b = y$ 軸方向の一辺の長さ。
 直方体についても円筒の場合と同様に観測点が見込む
 各々の面の立体角の和をとる。

(2)式は本来の立体角を表わしており、今後これを物
 理的立体角と呼び、一方 $\cos \theta$ を $\cos^a \theta$ とすること
 により仮想立体角 $d\Omega^*$ を次のように定義する。

$$d\Omega^* \equiv dS \cdot \cos^a \theta / l^2 \quad \dots\dots(15)$$
 仮想立体角 $d\Omega^*$ を用いた場合の線量率 D は、

$$D = T_{ID} \cdot \frac{d\Omega^*_x}{d\Omega^*_1}, \quad (\text{mrem/hr}) \quad \dots\dots(16)$$

で表わされる。
 物理的立体角を用いた(1)式は輸送物表面で放射線束
 が等分布していることを意味している。仮想的立体
 角を用いた(16)式は放射線束が $\cos^{a-1} \theta$ 分布している
 ことを表わしている。
 輸送容器周辺の線量率の減衰傾向は(16)式のパラメ
 タ a を適当に選ぶことによりかなり良く実測値に一致
 することが予想されるので、(1)式と対比させる意味で
 (16)式を導びいた。

**3. 立体角法を使用済核燃料輸送容器周辺の
 線量率分布に適用した場合**

2章で触れた輸送容器、Excelsior-III周辺のガンマ
 線線量率分布の測定値に対し立体角法を適用、両者の
 比較を行なった。図7-1、7-2、7-3、7-4

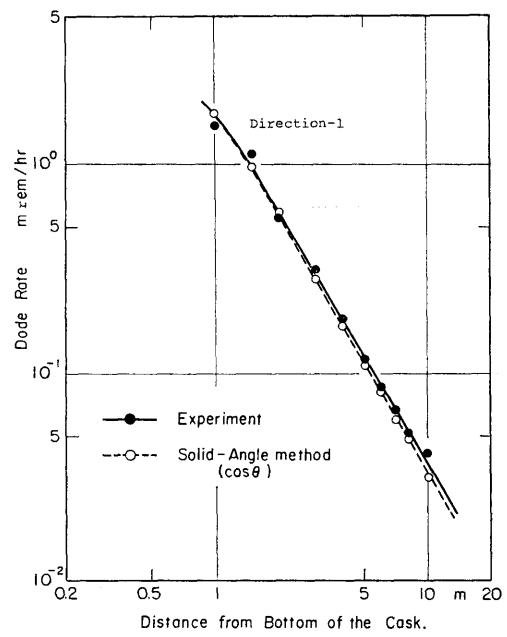


Fig. 7-1 Comparison between experiments and calculations using solid angle method for dose rate distributions along the measured direction, Direction-1.

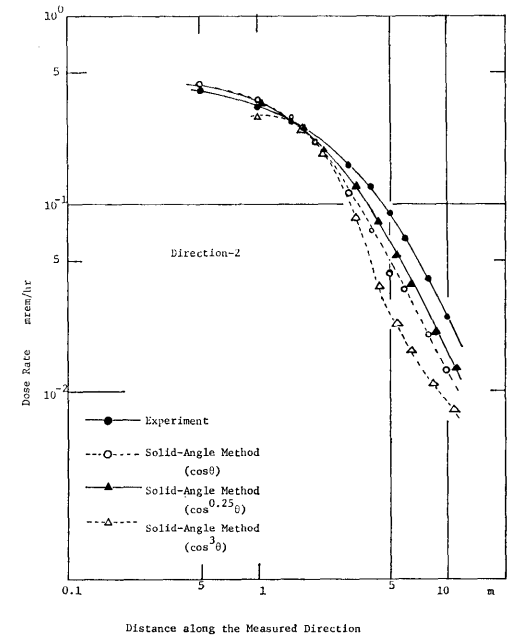


Fig. 7-2 Direction-2.

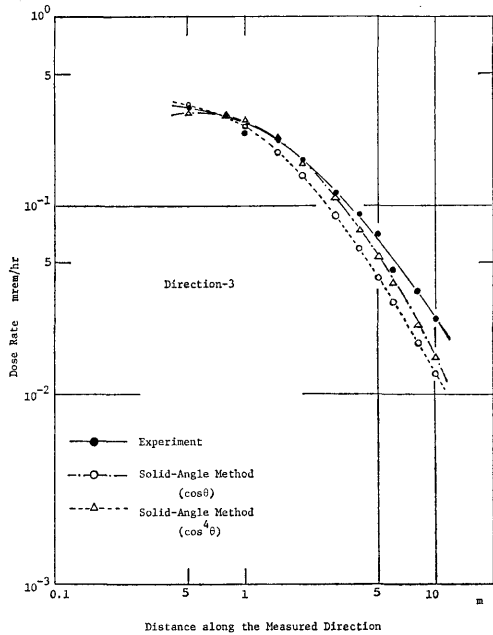


Fig. 7-3 Direction-3

Fig. 7-3 Direction-3.

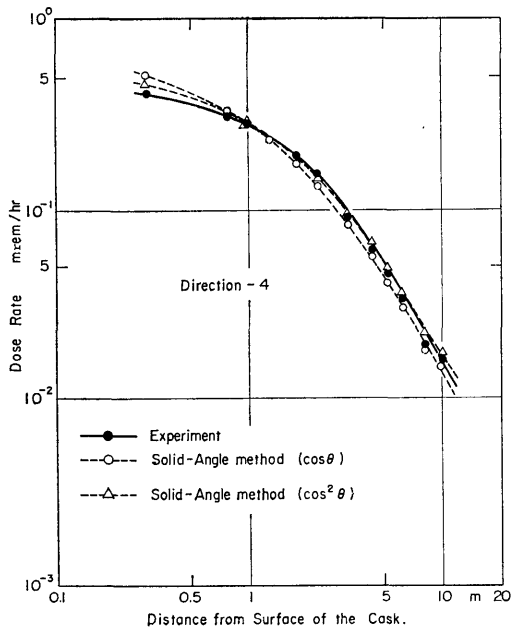


Fig. 7-4 Direction-4.

はそれぞれ図1の Direction-1, 3, 3, 4について測定値と立体角法とを比較したものである。

i) Direction-1について

この方向は測定による線量率分布がほぼ r^{-1} 則に従っているので、物理的立体角を用いた(1)式による計算値と良い一致を示している。これは輸送容器の底面が比較的小さく、点等方線源に近い放射線場がつけられている事によると考えられる。

ii) Direction-2について

この方向は側面を対象としたもので、水平方向から60°傾いている。図7-2は測定値、物理的立体角(等分布)および仮想的立体角($a=3$; $\cos^2\theta$ 分布および $a=0.25$; $\cos^{-0.75}$ 分布)を用いた線量率分布を比較したものである。この方向は明らかに Direction-1よりも減衰傾向が緩やかである。図から、物理的立体角立体角よりも $\cos^{0.25}$ を用いた分布がより測定値に近い傾向を示している。

iii) Direction-3について

この方向は水平方向から30°傾いている。図7-3

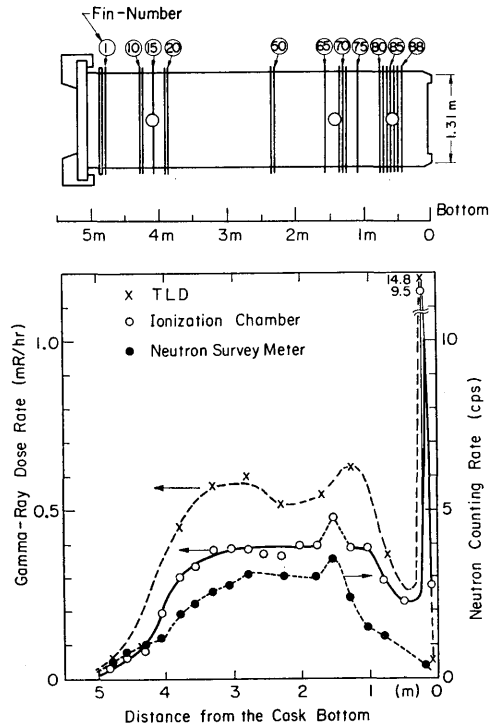


Fig. 8 Radiation dose rate distributions along the transvers direction of the side surface of the shipping cask.

は物理的立体角および仮想的立体角 ($a=4; \cos^3\theta$ 分布) を用いた線量率分布を比較したものである。Direction-3 は Direction-2, 3, 4, 5 の中で最も減衰傾向が緩やかで、特に表面から数メートル以遠でその傾向が強い。図8は容器表面に於けるガンマ線線量率分布を示したものである。図から底部近くで容器の構造によるものと考えられるピークが見られる。このピークの線量率は輸送容器中央部付近よりも30倍程度高いので、ピークを形成している場所の隙間は狭いが、前方にはかなり遠方まで寄与するまでであろう。また Direction-1 の1メートルに於ける線量率が側面中央部から1メートルの位置よりも5倍程度高くなっており、この両者の影響が Direction-2 および3の減衰傾向をより緩やかにしている1つの要因になっていると考えられる。Direction-2 の $\cos^3\theta$ に対し Direction-3 は $\cos^4\theta$ を用いた分布がより測定値に近い傾向を示している。

iv) Direction-4 について

この方向は側面中央部の水平方向になるので底面軸方向および底部付近の局所的線量率ピークの影響をほとんど受けないので、輸送容器周辺の標準的な線量率分布を示すものと考えられる。側面から4メートルまでは $\cos^2\theta$ を用いた計算が物理的立体角よりも測定値に近い傾向にあるが、それ以遠では測定値が両者の間に在る。従って容器中央部の半径方向の表面近くでは線量率分布は $\cos\theta$ 分布をしているものと推定されるが、数メートル以遠までを考慮すると等方分布を仮定した(1)式で十分実測値に近い値が求められる。

v) Direction-5 について

図2からこの方向では表面近くは Direction-3 とほぼ一致するが表面から離れるに従って急激に減衰する傾向を示している。

vi) Direction-6 について

この方向にはショックアブソーバーが付いており、図2から分るように他の方向と比べ著しく線量率が低く、自然のバックグラウンド程度なので、立体角法との比較対象から除外する。

以上、各方向について輸送容器表面から1メートルの位置に於ける線量率を T_{1D} として測定値を採用し、1メートル遠について測定値と計算値とを比較した。測定で得られたガンマ線線量率の単位は mR/hr あるが、ガンマ線に対しては mrem 表示が mR 表示に等しいとすることができる。

輸送物側面半径方向、 Direction-2, 3, 4, 5

に関して線量率分布を物理的立体角で整理するよりも、(1)式のように $\cos^a\theta$ の a を適当に取った仮想立体角を使用した方がより測定値に一致する。しかし、方向によって $a>1$ の場合あるいは $a<1$ の場合が測定値をよりよく説明するといった具合で、 a の値が方向に依存しており一定の値を選定することが本測定実験だけではできない。輸送容器表面の角度線束をディスクリット・オーディネイト法コード、PALLAS で計算した報告¹⁾があるが、角度線束は容器の位置および表面をよぎる放射線のエネルギーの両方に依存した分布を示しており、この複雑な分布を考慮した計算法は簡易計算の範ちゅうを出る。そこで輸送物表面の角度束が等方であると仮定した物理的立体角を用いた(1)式を簡易計算法として採用する事が妥当であろう。

図9は実験値を輸送容器表面からの距離で整理し、(1)式で計算した値と比較したものである。括弧の無い数値が測定値で、括弧内の数値が立体角法で求めた値である。図9から全般に、Direction-1, 4は計算値と測定値との一致が良いが、Direction-2, 3は計算値が測定値を下回っており、逆に Direction-5では計算値が測定値を上回った。Direction-2, 3, 4, 5の線量率分布を比較すると、1メートルの位置では相互間の距離が近いので $295 \pm 15 \mu\text{rem/hr}$ 内で一致するが、表面から2メートル以遠になると同一距離では水平から 30° 底部方向に傾いた Direction-3 が最も線量率の高い分布を示し、 30° 頭部方向が最も低くなっている。この傾向は図8に見られるような底部付近からの局所的なピークおよび一般に燃料棒の縦軸方向燃焼度分布の最大値は中央より下にあるといわれており、容器の中央より下部が上部よりも線源強度が高い事によると考えられる。

立体角法による計算値と実測値とを比較する場合それぞれの方向毎に測定値から1メートルにおける線量率を内挿してきたが、実際問題としては、輸送に先立って輸送物周辺および船内の線量率分布を予測し、推定しておく必要があり、1メートルにおける線量率としては輸送許可申請書に記載された値を使用することになる。現在輸送容器の設計申請の遮蔽に関しては一次元輸送コードを使用し、容器の側面側と底面側とを別々に計算する場合はほとんどであり、放射線の局所的ピークが予測されるような特殊な場合に限り二次元輸送コードが使用されるが、三次元輸送コード(モンテカルロコード)は使用例が我が国ではない。一次元輸送コードを使用して得られる線量率分布は輸送物か

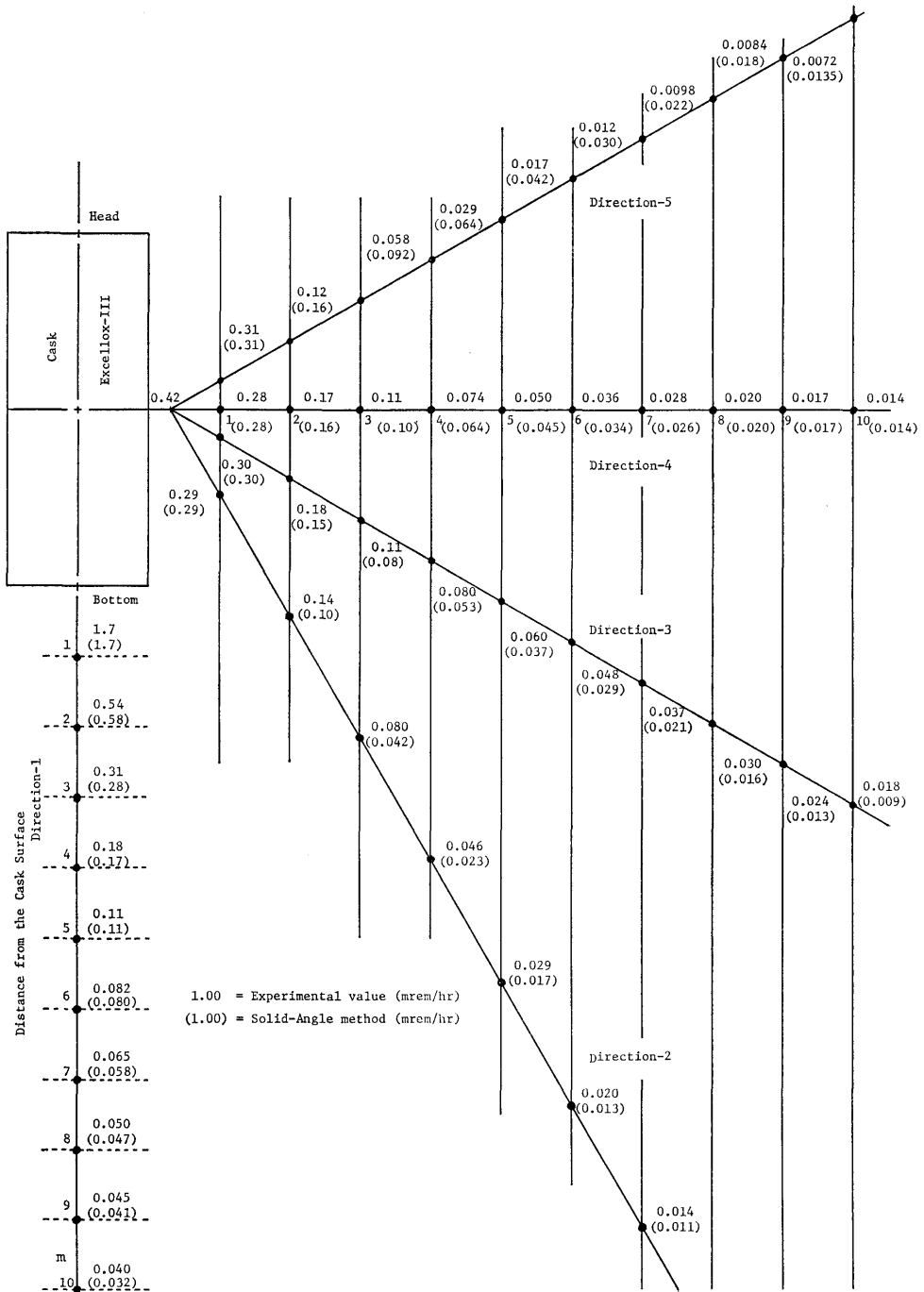


Fig. 9 Comparison of gamma-ray dose rate distributions between experiments and calculations using solid-angle method around the shipping cask.

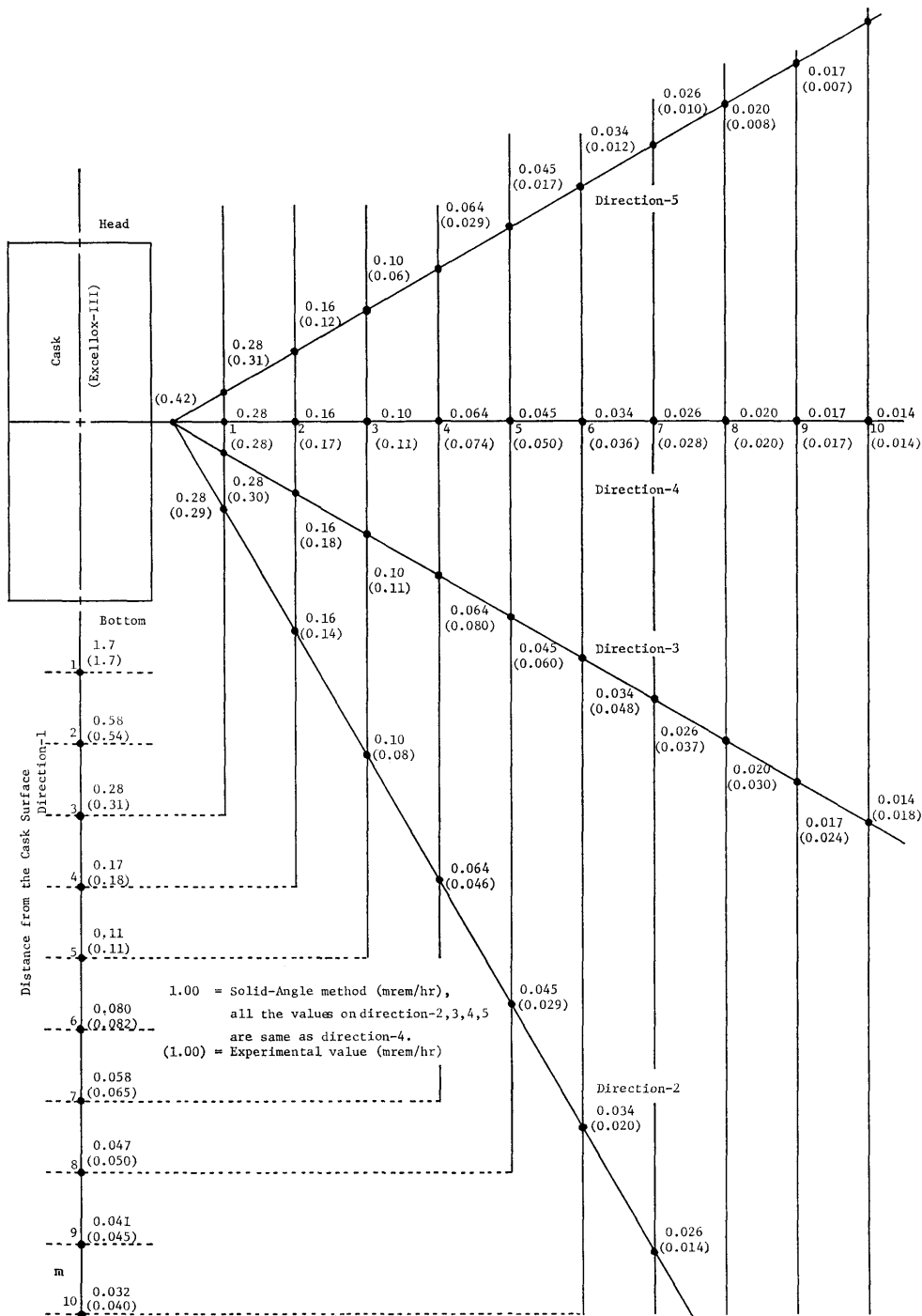


Fig. 10 Comparison of gamma-ray dose rate distributions between experimental and calculations using solid-angle method the shipping cask.

ら等距離では全て同一の値を与えるので、本測定実験の Direction-1 および 4 の方向の線量率が求められることになる。従って申請書に記載される 1メートルにおける線量率に相当する実測値は底面軸方向に対しては Direction-1 の 1.7 mrem/hr であり、側面半径方向では Direction-4 の 0.28 mrem/hr である。図10はこの2つの数値を使って図9を整理したものであり、Direction-2, 3, 4, 5 については1メートルにおける線量率が一次元輸送コードから与えられるものとすれば Direction-4 に対してのみ意味のある分布が得られるので、Direction-4 の値を採用した。図10は図9と逆に括弧の無い値が立体角法による計算値で括弧内が実測値を示している。Direction-1 については両図で括弧無しと括弧内が入れ替っただけである。Direction-4 の値を側面半径方向の分布とした場合、Direction-3 の表面から4メートル～9メートルの領域でおよそ50%実測値が大きい、他の方向では実測値にはほぼ一致するかあるいは実測値を上回る線量率分布が得られた。従って立体角法で求めた線量率に50%の上乗せを考えれば底部半径方向

でも実測を上回る値、規制側から見れば安全側の値が得られるものと考えられる。

4. 船内に積載された輸送容器への適用例

使用済核燃料輸送専用船“日の浦丸”に積載された“NH-25”輸送容器の表面および船内の線量率分布測定実験を行った。図11は“日の浦丸”の側面図を示したものであり、図12は同船の平面図と船倉内の TLD (Thermo-Luminescence-Dosimeter) の設置位置、図13は船体の中央面に設置された TLD の位置を示したものである。“日の浦丸”は放射線遮蔽構造として船倉外周の隔壁の外側に水タンクが設けられ、船倉ハッチは鋼板の間にポリエチレンを詰めた構造になっている。図14は NH-25 容器の寸法および TLD を設置した位置を示したもので、合計29個の TLD を容器の船首側の半円筒面上に設置した表面上のガンマ線線量率分布を詳細に測定した。TLD を容器の船首側に設定した理由は図13から分るように、第3船倉に積載された2基の“Hz-75”容器からの影響をできるだけ小さくするように配慮したからである。船内お

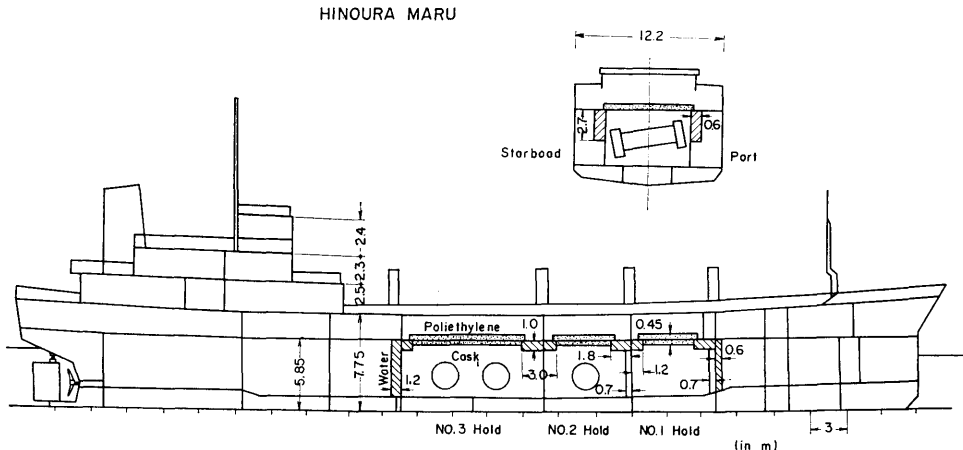


Fig. 11 Side view of the HINOURA MARU.

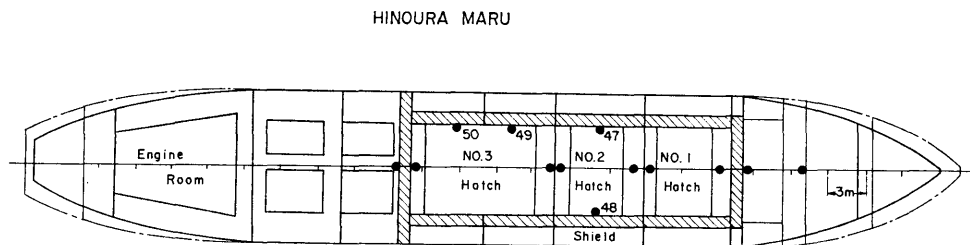


Fig. 12 Plane figure of the HINOURA MARU and measuring points.

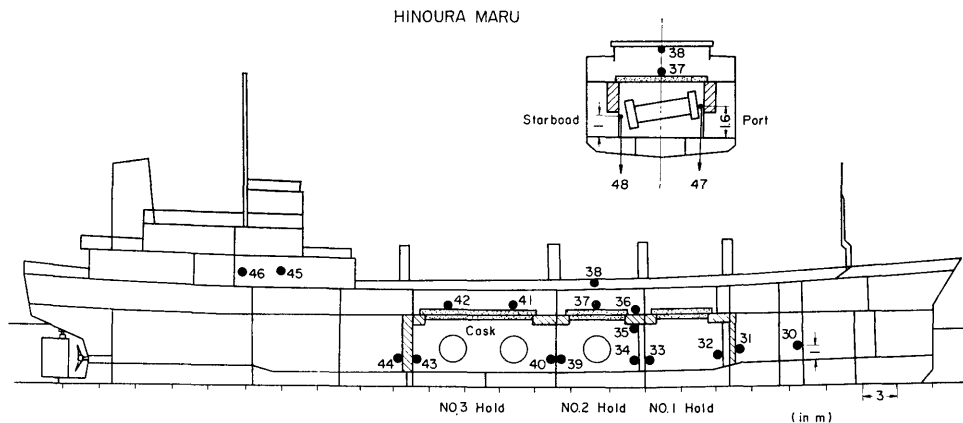


Fig. 13 Measuring points in the HINOURA MARU.

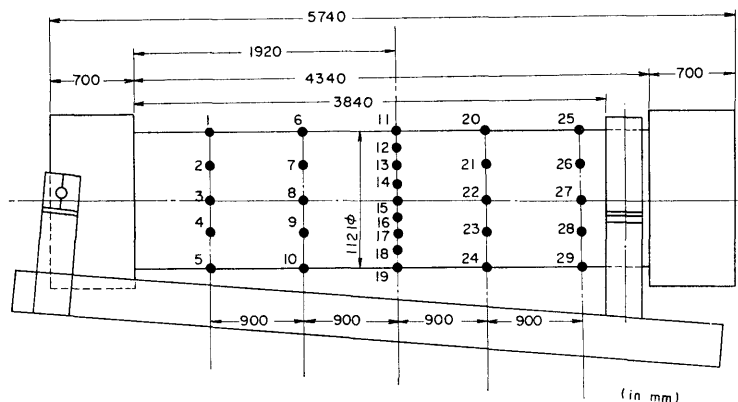


Fig. 14 NH-25 shipping cask measuring points on the shipping Cask.

よびNH-25容器に設置したTLDは約140時間放置されたが、第3船倉のHz-75容器はTLD設置後約24時間後に積載されたもので、両容器の船内滞在時間はNH-25容器がおよそ24時間長い。

測定対象となったNH-25容器には燃焼度が21500 MWD/MTU、冷却時間が550日のBWR型原子炉の使用済燃料2体を収納しており、一方Hz-75容器2基はそれぞれ燃焼度が14300MWD/MTU、冷却日数が2421日のPWRの使用済燃料7体を収納した輸送物であった。NH-25容器の表面線量率分布をTLD設置に先立って電離箱型サーベイメータで測定した結果を表1に示すが、表1から容器の中央部付近が最大でガンマ線線量率が1.7mR/hr程度であろうと推定される。表2はNH-25容器から1メートルの位置におけるガンマ線線量率を示したもので、中央部付近が最大

Table 1 Gamma-ray dose rates on the surface of the shipping case by the ionization type surveymeter, including the natural back ground.

Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr
1	0.5	13	1.6	19	1.2
3	0.5	14	1.65	20	1.7
6	1.2	15	1.7	22	1.7
8	1.6	16	1.6	25	0.7
11	1.4	17	1.4	27	0.9
12	1.5	18	1.2		

で0.6mR/hr程度である。Hz-75容器表面のガンマ線線量率は電離箱型サーベイメータではほとんど感知できず、シンチレーション型サーベイメータで測定し

Table 2 Gamma-ray dose rates at 1 meter from the surface of the shipping case by the ionization type survey-meter, including the natural back ground.

Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr
3	0.3	15	0.6	27	0.5
8	0.5	22	0.6		

Table 3 Neutron dose rates on the surface of the shipping cask by the BF₃ type rem-counter.

Location	Dose rate mrem/hr	Location	Dose rate mrem/hr	Location	Dose rate mrem/hr
1	0.1	11	0.3	25	0.1
3	0.1	15	0.16	27	0.1
6	0.18	20	0.3		
8	0.14	22	0.14		

Table 4 Gamma-ray dose rates on the surface shipping cask by the TLD's, including the natural back ground.

Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr
1	0.88 ± 0.11	11	3.39 ± 0.07	21	4.19 ± 0.09
2	1.20 ± 0.11	12	3.65 ± 0.06	22	4.47 ± 0.02
3	1.39 ± 0.20	13	3.74 ± 0.16	23	3.76 ± 0.10
4	1.41 ± 0.17	14	3.96 ± 0.21	24	3.18 ± 0.09
5	1.08 ± 0.20	15	4.20 ± 0.29	25	1.63 ± 0.02
6	2.73 ± 0.12	16	4.11 ± 0.18	26	1.88 ± 0.10
7	3.02 ± 0.04	17	3.58 ± 0.15	27	2.14 ± 0.07
8	3.96 ± 0.00	18	3.32 ± 0.07	28	1.76 ± 0.03
9	3.40 ± 0.05	19	3.23 ± 0.04	29	1.51 ± 0.05
10	2.99 ± 0.07	20	4.07 ± 0.01		

て容器頭部のトランシオン付近で 0.4mR/hr が観測されたが、側面の値としては 0.015mR/hr 程度であった¹⁾。従ってNH-25 容器を積載した第2 船倉およびそれより船首側の線量率はNH-25容器によるものと考えて差しかえない。表3はNH-25容器表面の中性子線量率をレムカウンターで測定したものである。中性子線量率の最大値は容器側面半径方向の上部で 0.3mrem/hr が観測されている。上部方向が中性子線量率が高い理由としては容器キャビティ内には容積

Table 5 Gamma-ray dose rates by the TLD's in the HINOURA MARU, including the natural back ground.

Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr	Location	Dose rate mR/hr
30	0.011 ± 0.002	37	0.040 ± 0.002	44	0.011 ± 0.002
31	0.014 ± 0.000	38	0.027 ± 0.003	45	0.010 ± 0.001
32	0.056 ± 0.004	39	0.499 ± 0.010	46	0.013 ± 0.003
33	0.198 ± 0.007	40	0.346 ± 0.002	47	0.701 ± 0.019
34	0.594 ± 0.021	41	0.012 ± 0.003	48	0.490 ± 0.012
35	0.544 ± 0.008	42	0.012 ± 0.003	49	0.051 ± 0.002
36	0.016 ± 0.003	43	0.021 ± 0.002	50	0.022 ± 0.002

の10%程度の空気層があるので、横置にした場合キャビティの半径方向上部に空気層ができ、他方向に比べ中性子が透過しやすくなる事が考えられる。表4はNH-25容器表面におけるガンマ線線量率を、表5は船内のガンマ線線量率をそれぞれTLDで測定した値を示したもので、いずれも自然のバックグラウンドを含んでいる。表の測定位置を示す番号と図の黒丸で示した位置に対する番号が対応している。TLDによる測定では容器表面の線量率は中央部付近が最大で 4mR/hr、斜の下方が最小で 1 mR/hr 程度の分布が示されているが、鋭いピークは観測されていない。NH-25 容器の構造上の特徴として冷却フィンが全く付いていない事が掲げられる。従ってTLDは容器本体の表面に直接設置することができた。表5のTLDによる測定は表1の電離箱型サーベイメータと同一の位置で行っている。両者を比較すると全般に亘ってTLDによる値がサーベイメータによる値よりも2.5倍程度大きくなっている。この原因は両者のガンマ線エネルギーに対する応答特性が異なる事、大きさが異なる事、電離箱型サーベイメータの場合数 mR/hr の測定では特定数が長いので指針が十分安定する前に値を読む可能性がある等と考えられるが、ここではどちらが実際の線量率に近いかが判定が困難である。輸送指数を求めるには表面から1メートルに於ける値が必要であるが、TLDではその位置での測定値が無いので、電離箱型サーベイメータによる表面と1メートルに於ける線量率の減衰傾向からTLDの値を推定し、表6のように 1.48 mR/hr とした。船内の自然バックグラウンドを5 μR/hr と推定したが、これは海上に於けるバックグラウンドがシンチレーション型サーベイメータで 2 μR/hr であったので、TLDの値としては電離箱型

Table 6 Estimation of the gamma-ray dose rate for TLD at 1 meter using the values measured by the survey meter.

Average dose rate by ionization chamber (Average of locations 8,15,22) mR/hr	On the surface	1.68	At 1 m	0.60
Average dose rate by TLD's (Average of locations 8,15,22) mR/hr	On the surface	4.12	At 1 m (Estimated value)	1.48

Table 7 Comparison of gamma-ray dose rates between TLD's and solid angle method in the HINOURA MARU.

Locations Distance from the cask surface						
	At 1 m	34	33	32	31	30
TLD's mR/hr	1.48	0.59	0.19	0.051	0.009	0.006
Solid-Angle method mR/hr	1.48	0.51	0.36	0.056	0.044	0.022

サーベイメータに対して2.5倍になっているのでシンチレーション型に対しても2.5倍して5 μ R/hrとしたものである。

“日の浦丸”の同一線上にある測定位置、34→33→32→31→30についてTLDによる測定値と立体角法による値とを比較したものが表7である。立体角法は輸送物からの距離と傾きは考慮しているが周辺の構造による遮蔽効果を見逃しているのが第2船倉内のNH-25容器からほぼ等距離にある位置34, 35, 39に対しては0.51mR/hrを与えるので表5の測定値に良く一致する。しかし遮蔽用水タンクや隔壁を透過した後にある位置33より船首側では立体角法による値が測定値を上回っており、位置31, 30ではそれぞれ4, 5倍高い値になっている。ここでは立体角法で得られた線量率の単位としてmR/hrとしているが、これは実測値への適用を述べているのでmremがmRに等しいとして記述した事によるものである。

立体角法を船内線量率分布の推定に使用する場合は構造物等の遮蔽効果を見逃しているため、輸送物から離れる程実測値を上回る傾向にある事を承知しておく必要がある。実測値との差はガンマ線の場合はエネルギースペクトルが分れば半価層あるいは10分の1価層から^{2),3)}おおよその見当がつく。

5. その他大型輸送物への適用について

使用済核燃料輸送容器よりも大型の輸送物への適用を考える。現在計画中の放射性廃棄物輸送容器を輸送

する専用船の1つの船倉に積載される容器のブロックは10m×5m×3m程度になることが予想される。しかし、このような専用船は現在計画の段階であり、容器ブロックの表面あるいは周辺の線量率分布に文献、調査資料等の公開されたものがないので、図15のように10m×5m×3mの直方体を考えてA面を見込む立体角を示すにとどめる。A面は50平方メートルで立体角は表面から0メートルで2 π 、1メートル離れて表面の2/3、10離れても表面の1/10程度しか小さくならないので使用済燃料輸送容器の場合、表面→1メートルが1/3、1メートル→10メートルが1/25に減少するのに比べさらに減少傾向が緩やかになる。従って廃棄物ブロック周辺の線量率分布は非常に緩やかな減衰曲線を示すことが予想されるので、このブロックを形成する輸送容器に対する線量率規制もその観点に立って検討する必要がある。

6. 立体角法の適用性について

物理的立体角を用いた立体角法の適用性について考察する。

1) 大型輸送物周辺の線量率分布簡易計算法として物理的立体角を用いた立体角法を採用した。この立体角法では容器表面から51メートルにおける線量率さえ与えられれば、点線源に対する r^{-2} 則と同様に距離の関数で線量率が求められる。

2) 輸送容器周辺の線量率分布測定実験との比較では底面軸方向および側面中央部の半径方向では物理的立体角を用いた立体角法による分布が測定値と良い一致を示した。他の側面方向に対しても側面中央部の半径方向の線量率分布を採用すれば計算値は最大でおおよそ50%測定値を下回る程度である。

実験対象の輸送容器には底部付近に局所的に鋭い線量率のピークが見られたが、これはむしろ特殊な場合であり、一般的には局所的なピークの無い構造になるように配慮されているであろう。また輸送容器のキャピティ内の底部方向に燃料集合体の燃焼度の高い部分が収納されることが予め分っていればそれを考慮した遮蔽計算もできるので、底部方向に最大値があるような線量率分布が得られ、それに対応した1メートルにおける線量率が与えられるであろう。以上の事を考慮すれば物理的立体角を用いた立体角法はより妥当性のある結果を与える事が期待できる。

3) 表8-1および8-2は代表的な輸送容器に対する立体角と1メートルにおける線量率を1とした場

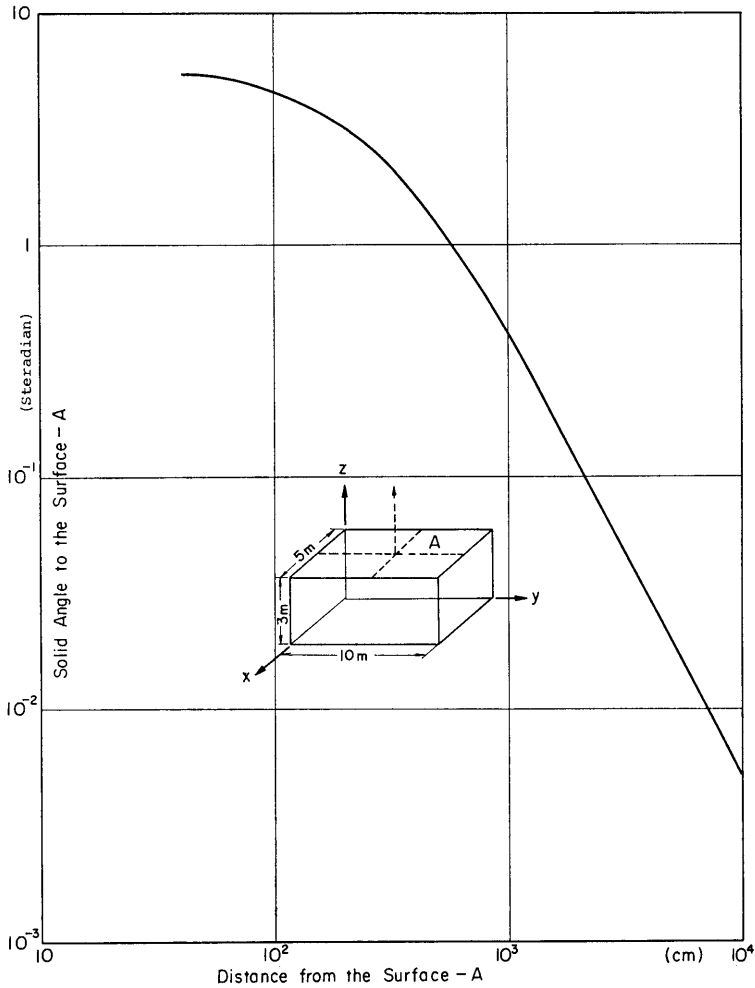


Fig. 15 Solid angle for a box.

合の線量率を示したものである。1メートルにおける線量率が分れば容易に周辺の線量率分布が推定できる。

4) 立体角法を用いて輸送船内の線量率分布を推定する場合、輸送物を収納した船倉内では推定値は十分実測値に近い値であると考えて良いが、遮蔽用水タンクや鋼板の隔壁を数板透過すると実測値を数倍上回る値になることが予想される。

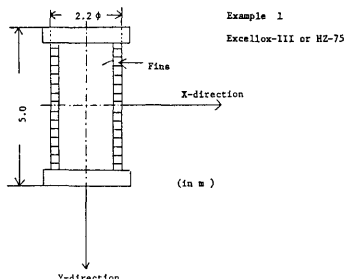
5) 複数個の輸送容器が積載された場合、この立体角法を正確に適用しようとすればどの容器のどの部分からどれだけ寄与するかを求める必要があり非常にやっかいな問題になる。立体角法を複数輸送物がある場合に適用するには現段階ではそれぞれの輸送物が独立に存在しているものと考え、単純に個数分だけ線量率

を加算するという使用方法になると考えられる。しかしこの方法では輸送物が増加するにつれて実測値をより上回る傾向にあるので互の位置関係にある程度加味した計算法に改良することが必要である。

7. 結 論

第2章(1)式で表現するところの物理的立体角を用いた立体角法は、予め輸送容器に対する立体角を計算して Ω_x/Ω_1 の値を表あるいはデブールの形で整理しておけば、その値に輸送表面から1メートルにおける線量率を乗ずるだけで輸送物周辺の線量率分布がほぼ実測値かあるいは実測値を上回る値が得られる。従って立体角法は使用方法が平易であり、物理的な概念も容易に描け、遮蔽の専門家でない人でも十分使用できると

Table 8-1 Dose rate estimation using solid angle method for a shipping cask, Example-1. Dose rate at 1 m distance is presumed as 1 mrem/hr in the direction X.



	Distance from the cask surface X-direction (m)				
	0.5	1	2	3	5
Solid angle	3.00	2.00	1.10	6.60×10^{-1}	3.10×10^{-1}
Dose rate $\mu\text{rem/hr}$ ($TID=1$)	1.50	1.00	5.50×10^{-1}	3.30×10^{-1}	1.55×10^{-1}
	7	10	20	30	50
Solid angle	1.75×10^{-1}	9.40×10^{-2}	2.60×10^{-2}	1.25×10^{-2}	4.90×10^{-3}
Dose rate $\mu\text{rem/hr}$ ($TID=1$)	8.75×10^{-2}	4.70×10^{-2}	1.30×10^{-2}	6.25×10^{-3}	2.45×10^{-3}

いう条件を満足しているため簡易計算法として採用できよう。

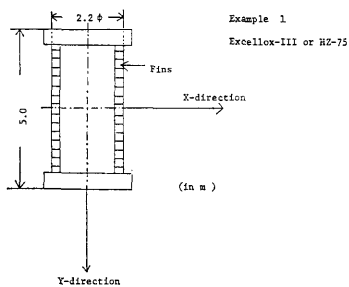
立体角法の適用に際しては次の諸点に留意する必要がある。

1) 立体角法の基本となる輸送物表面から1メートルにおける線量率には高い信頼性が要求されるので、算出に当たっては容器の構造、線源の位置および強度分布をできるだけ忠実にモデル化を行った遮蔽計算を実行すること。一次元計算では不十分で、二次元あるいは三次元計算が望ましい。

2) 精度の良い遮蔽計算を行ない、輸送物表面の線量率分布に鋭いピークがなければ、円筒形輸送物の場合側面では中央部半径方向の、底面では中央部半径方向の、底面では軸方向の1メートルにおける線量率を採用することによってほぼ実測値かあるいは実測値を上回る値が得られる。

3) 船舶に積載された輸送物周辺の線量率分布を求める場合、立体角法は遮蔽構造や船体構造の遮蔽効果を考慮していないので、透過厚が増加すると共に実測値を上回る傾向を持つ。

Table 8-2 Dose rate estimation in the direction Y.



	Distance from the cask surface Y-direction (m)				
	0.5	1	2	3	5
Solid angle	3.20	1.60	5.50×10^{-1}	2.65×10^{-1}	1.00×10^{-1}
Dose rate $\mu\text{rem/hr}$ ($TID=1$)	2.00	1.00	3.44×10^{-1}	1.66×10^{-1}	6.25×10^{-2}
	7	10	20	30	50
Solid angle	5.50×10^{-2}	2.90×10^{-2}	8.20×10^{-3}	3.90×10^{-3}	1.55×10^{-3}
Dose rate $\mu\text{rem/hr}$ ($TID=1$)	3.44×10^{-2}	1.81×10^{-2}	5.13×10^{-3}	2.44×10^{-3}	9.69×10^{-4}

本計算法は1個の輸送物が周辺に構造物が無い空間に置かれた場合に対しては実測値を良く説明する事が分ったので、さらに複数の輸送物への適用、周辺構造物の遮蔽効果の考慮等を図り、より実用的な簡易計算法にして行きたいと考えている。

謝 辞

本研究で引用した実験データは筆者らが参加した日本造船研究協会第13基準部会が昭和51年度から4年間に渡って行なってきた“使用済核燃料の安全輸送に関する調査研究”によるものであり、提供していただいた事について協会関係各位に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 第13基準研究部会 使用済核燃料の安全輸送に関する調査研究報告書、(昭和54年3月, 55年3月発行予定), 日本造船研究協会。
- 2) E. P. Blizard, et al.; Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. II, Shielding Materials, Springer-Verlag, 1975。
- 3) N. M. Schaeffer; Reactor Shielding for Nuclear Engineers, U. S. Atomic Energy Commission, 1973。