831. 使用済核燃料輸送容器内の線量率感度の概念

概念の定義; 燃焼度が異なる燃料の配置効果評価への応用

山 越 寿 夫*

(1985年 4月23日 受理)

(1985年 9月12日 再受理)

Concept of Radiation Dose Rate Sensitivity Applicable to Spent Fuel Shipping Casks

Definition of Concept and Application to Evaluation of Array Effect Obtained upon Arranging Spent Fuels in Different Burnup States within Same Shipping Cask

By Hisao YAMAKOSHI

For shipping spent fuels of very high burnup, the normal procedure is to place the fuels of highest burnup in the center of cask, and to surround them with those of lower burnup. The actual arrangement of these fuels within the cask is currently determined individually at the time of loading, based on experience.

The present paper proposes a simple method for quantitatively evaluating the effect brought on the radiation dose rate at cask surface by differences in the arrangement of spent fuel inside the cask. The proposed method is based on a concept embodying "sensitivity to change in radiation source strength shown by the radiation dose at cask surface". This concept permits quick and reliable evaluation of an arrangement of spent fuels in a cask. The concept is formulated by means of a quantity termed "sensitivity coefficient of radiation dose rate", which coefficient can be easily calculated.

The present method provides a means of finding an ideal array for loading spent fuels in several—including high—burnup states, once the upper limits of fuel burnup and radiation dose rate at cask surface are given.

The validity of the present method is verified by a trial application to analysis of the measured radiation dose rate distributions around an actual shipping cask.

KEYWORDS: *burnup, casks, characteristic functions, dose rates, heterogeneous array, maritime transport, radiation doses, sensitivity, spent fuel casks, spent fuels*

I. 緒 言

使用済核燃料の輸送が始まってから久しいが、最近燃焼度がより高く、燃料冷却時間のより短い燃料が輸送される傾向にある。(原子力発電所の稼働率がやや低かったことと、燃料交換サイクルの若い時期であったため、昔は燃焼度が低く、使用済核燃料再処理工場の再処理能力と発電所の使用済燃料冷却池の燃料収納容量ならびに収納燃料の混み具合などの兼ね合いが

ら、昔は冷却時間が長かったと考えられる。炉の稼働率の向上、再処理能力の向上とともに燃焼度が高く、冷却時間の短い燃料が輸送されてきている。)

燃焼度の高まりとともに燃料中の中性子源強度が、線源強度に比較して相対的により大きな値を持つようになる。この結果として、高燃焼度燃料を多量に収納した輸送容器では、容器外部の放射線線量率のうちで

* 船舶技術研究所 (Ship Res. Inst.)

中性子線量率が占める割合が低燃焼度燃料を収納した場合よりも大きくなる。

使用済核燃料を収納している容器の輸送指数(容器表面から1 m離れた位置の放射線線量率を mrem/h 単位で表わした値)が10以下になるように規制されている。したがって、線源強度の大きい使用済燃料を容器に収納する場合は、この規制を満たすように燃料配置に工夫が施される。線源強度の大きい高燃焼度燃料は容器内筒部中央付近に集中させ、それを取り巻くように低燃焼度燃料を配置することは普通行われていることであるが、その具体的全体配列は燃料輸送のつど経験的に決められている。

このような燃料配置は放射線源強度の空間分布に関して非均質性の強い状態となっているはずであるが、従来の容器遮蔽計算では、計算モデルとして均質線源分布の近似が用いられてきた。線源強度の空間分布に関する均質モデルを用いた計算から予測される容器外部線量率は安全側の値を与えることは確かであるが、現実の非均質配置がその安全側の値に対しどの程度のゆとりを持たせているかという点は、いまだかつて検討されたことがなかった。

高燃焼度燃料を多量に輸送する場合、このゆとりを定量的に評価することができれば、燃料配置の工夫が合理的となり輸送効率の改善にもつながる。従来の容器遮蔽計算法で線源強度の非均質性を考慮することは原理的には可能であるが、膨大な計算時間がかかるので経済性の面で好ましくない。このことが、従来均質線源モデルによる安全側計算のみが行われてきた大きな理由と考えられる。

本報では、すでに発表した線量率簡易計算法⁽¹⁾の応用の一環として、線源強度の空間分布が容器表面線量率に及ぼす影響を簡便に評価する方法を示す。この方法においては、線源の置かれた位置と容器表面線量率の値との対応関係が線量率感度関数(以下、感度関数)という概念を導入することにより容易に把握できることを示すとともに、この概念は上記の影響評価を簡易化する有効な手段であることを示す。

この感度関数を用いる計算法の妥当性を検証するため、容器周辺線量率の測定がすでに行われており⁽²⁾、さらに内筒部に収納した燃料の燃焼度、配置、物質の原子数密度、中性子増倍率など、基本的なデータが揃った形で入手可能な体系⁽³⁾を対象として採り上げ、計算結果と測定結果との比較検討も行う。

測定値と比較する計算値は、容器表面線量率のほか容器表面中央部から径方向に沿って空間分布する中

性子線量率と γ 線線量率である。この空間分布の解析には、容器に相対的な検出体位置座標、容器形状パラメータ、容器表面線量率に関する解析関数として容器周辺線量率分布を表わす式⁽⁴⁾を用いた。

以下、第Ⅱ章では感度関数の概念を導入・定義し、第Ⅲ章では実例につき非均質燃料配置効果の評価方法を示して計算値と測定値との比較検討を行う。第Ⅳ章では第Ⅱ、Ⅲ章で示した計算法に関する考察を、第Ⅴ章では本研究の結論を述べる。

Ⅱ. 感度関数の概念と定義

1. 仮定およびモデル化

輸送容器に32,000 MWd/t 程度の燃焼度の、いわゆる高燃焼度燃料を収納する場合、すでに述べたように、高燃焼度燃料の燃料集合体を幾つか内筒部中央付近に集中させ、28,000 MWd/t 程度の比較的低燃焼度の燃料集合体をそれらのまわりに配列するといった配置がとられている。したがって、このような内筒部の内部体系をモデル化するために、内筒部は燃焼度に関して2領域、すなわち内部線源領域と外部線源領域とから成り立つものと仮定する。

内部線源領域の線源強度を $s(\text{inner})$ (particles/s/cm³) とし、外部線源領域の線源強度を $s(\text{outer})$ (particles/s/cm³) と表わすこととする。

燃焼度が異なる場合、その影響が線源エネルギースペクトルに現れ易いのは中性子の場合である。例えば、 (α, n) 反応による中性子の生成は燃焼度に依存する。しかしながら、種々の線源からの中性子を総合した場合、中性子エネルギースペクトルを構成する主要成分は、第Ⅳ章でも述べるように、核分裂生成物からのものである。線源中性子数を1に規格化した場合の線源中性子エネルギースペクトルの燃焼度依存性は、線源中性子エネルギースペクトルの形に現れるが、この依存性は燃焼度にはほとんど依存しない(これについては第Ⅳ章で詳細を示す)。したがって、第1エネルギー群に対する内・外部線源領域の線源エネルギー分布を $s_i(\text{inner})$, $s_i(\text{outer})$ とし、スペクトルの形のみを表わす関数を ρ_i とすれば、 $s_i(\text{inner}) = s(\text{inner}) \rho_i$, $s_i(\text{outer}) = s(\text{outer}) \rho_i$ で表わせる。(1 = $\sum \rho_i$)

燃焼度の相違は燃焼中の核種別濃度に関連をもたすが、内筒部には燃料以外の物質が多量に存在しており、容器遮蔽計算上、中性子吸収・散乱断面積への燃焼度の相違の影響は無視できるものと考えられる。したがって、内筒部の2つの線源領域に対する遮蔽計算上の群定数は同一であると近似する。

2. 容器表面線量率の表現

容器表面の中央部(容器表面上の中央部からはずれた位置, 例えば両端部付近における線量率分布は, すべて容器周辺線量率分布を解析的に記述する別の表示式で扱えるので, ここでは中央部の線量率のみを対象とすればよい)における線量率を D_0 で表わすと, 以下に示すように, D_0 は容器の遮蔽性能特性関数 B (中性子, 2次 γ 線に対する成分と内筒部 γ 線源に由来する1次 γ 線に対する成分とから成る。すなわち,

$$B = \begin{pmatrix} T_n C_n + T_{n,\gamma} C_{\gamma} \\ T_{\gamma} C_{\gamma} \end{pmatrix}$$

ただし, T : 入射線流と表面線束とを結び付ける透過行列, C : 線束から線量率への変換係数のベクトル)

と, 内筒部から容器壁部への実効入射線流 J^+ とに

依存する。

$$D_0 = (J^+) * B \quad (1)$$

ただし, $*$ は転置を意味する。 J^+ と B はともに入射線のエネルギー群に関する列ベクトルである。第1図(a)~(c)に示すように, 中性子, 1次 γ 線, 2次 γ 線(使用済核燃料から生ずる γ 線を1次 γ 線, 容器壁に入射した中性子と容器壁との相互作用により容器壁中で生ずる γ 線を2次 γ 線として区別した)に対する容器遮蔽性能の特性は, 容器の型ごとに異なっている。

ベクトル量 J^+ の第 m エネルギー群成分を J_m^+ と表わすことにする($+$ は内筒部表面上外向き方向の意味)。容器壁へ入射する放射線流の内訳を, 内部線源領域にある線源と外部線源領域にある線源とに由来する成分に分けることにする。

(a) 中性子

(c) 2次 γ 線

ヒストグラムの記号の意味は(a)図と同一である。

(b) 1次 γ 線

記号の相違は容器の型の相違を意味する。

第1図(a)~(c) 線源別の遮蔽性能の特性関数

内部線源領域を例にとると、位置ベクトル $\mathbf{r}_i$ に等方線源があり、エネルギー群 l に対して単位強度の放射線を放射しているものとする。内筒部と容器壁部との境界面上に仮に位置ベクトル $\mathbf{r}$ で指定される 1 点を考えることとする。いま上記等方線源からの放射線が位置ベクトル $\mathbf{r}$ における第 m エネルギー群の放射線に対し、値 Ψ の外向き線流を与えるとす。 Ψ はエネルギー群 l, m および位置ベクトル $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}$ に依存する。内部線源領域全体に上記の等方線源が一様に分布している場合について考え、位置ベクトル $\mathbf{r}$ において第 m エネルギー群の外向き線流を $j_{l,m}^+(\text{inner})$ と表わすと、 $j_{l,m}^+$ は次のような体積分で与えられる。

$$j_{l,m}^+(\text{inner}) = \int_{V_{\text{inner}}} \Psi_{l,m}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}) d\mathbf{r}_i \quad (2)$$

ただし、 V_{inner} : 内部線源領域

同様の考え方が外部線源領域にも当てはまる。外部線源領域にわたって第 l エネルギー群に単位強度を持つ等方線源が一様に分布している場合の、第 m エネルギー群の外向き線流 $j_{l,m}^+(\text{outer})$ を位置ベクトル $\mathbf{r}$ に考えると、次式が成立する。

$$j_{l,m}^+(\text{outer}) = \int_{V_{\text{outer}}} \Psi_{l,m}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}) d\mathbf{r}_i \quad (2')$$

内部線源領域、外部線源領域のそれぞれにおいて、第 l エネルギー群の線源強度が $s_l(\text{inner})$ と $s_l(\text{outer})$ で与えられており、その場合の位置ベクトル $\mathbf{r}$ における外向き線流が第 m エネルギー成分に対して J_m^+ である場合は、次式が成立する。

$$J_m^+ = \sum_l s_l(\text{inner}) j_{l,m}^+(\text{inner}) + \sum_l s_l(\text{outer}) j_{l,m}^+(\text{outer}) \quad (3)$$

(2), (2')式における $\Psi_{l,m}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r})$ には、容器壁部と内筒部との間の反射線カップリング(coupling)効果⁽¹⁾を含んでいる。したがって、(2)式の $j_{l,m}^+(\text{inner})$ および $j_{l,m}^+(\text{outer})$ にも、この反射線カップリング効果が含まれている。

以上を総合すると、容器表面線量率 D_0 は次のように表わされる。

$$D_0 = s(\text{inner}) \sum_{l,m} \rho_{lm} j_{l,m}^+(\text{inner}) B_m + s(\text{outer}) \sum_{l,m} \rho_{lm} j_{l,m}^+(\text{outer}) B_m \quad (4)$$

3. 表面線量率の感度関数

簡単のため、内部線源領域のみにおいて線源強度に変化があったものとする。これに対応した D_0 の相対変化率は、次式で与えられる。

$$\frac{dD_0}{D_0} = \frac{ds(\text{inner})}{s(\text{inner})} - \frac{1}{D_0} \sum_{l,m} s_l(\text{inner}) j_{l,m}^+(\text{inner}) B_m \quad (5)$$

ただし、 $d\rho_{lm}/ds(\text{inner})=0$

上式右辺の二重和を $D_0(\text{inner})$ と定義することにし、さらに内部線源領域に関する線量率感度関数 $S_c(\text{inner})$ を次式のように定義する。

$$S_c(\text{inner}) \equiv \left(\frac{dD_0}{D_0} \right) / \left(\frac{ds(\text{inner})}{s(\text{inner})} \right) \quad (6)$$

以上の結果として、 $S_c(\text{inner})$ は次式のように表わされる。

$$S_c(\text{inner}) = \frac{D_0(\text{inner})}{D_0} \quad (7)$$

$D_0(\text{inner})$ の定義と(4)式とを考え合わせると、 D_0 のみならず $D_0(\text{inner})$ もまた容器遮蔽性能特性関数を用いた簡易計算法が適用できることがわかる。このようにして内部線源領域に関する $S_c(\text{inner})$ は、(7)式から量 $D_0(\text{inner})$ と D_0 とを知ることにより決定することができる。

外部線源領域に関する線量率感度関数 $S_c(\text{outer})$ の表現も、上記手続きと同様にして求めることができる。

内筒部は線源に関して 2 領域からなると考えたモデルを用いているが、この場合は、

$$S_c(\text{inner}) + S_c(\text{outer}) = 1 \quad (8)$$

の関係が成立するので、どちらかの感度関数を求めれば、他の感度関数は補数として決定される。

Ⅲ. 非均質効果の評価法

1. 対象とする内筒部体系の概略

TN-12A型の乾式輸送容器にPWRからの使用済核燃料(冷却日数546日)を12体、第2図に示す配置で収納した体系⁽²⁾を取り上げる。

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

数値は燃焼度 MWd/t

第2図 燃料集合体の配置図

第2表 遮蔽計算に用いた中性子,
 γ 線のエネルギー群構造

(a) Neutrons			(b) γ -ray		
Energy group N	Upper limit of energy group $E_N(\text{eV})$	Energy group N	Upper limit of energy group $E_N(\text{eV})$	Energy group N	Upper limit of energy group $E_N(\text{eV})$
1	1.4918+7†	21	1.2277+5	33	1.0000+7
2	1.2214+7	22	8.6517+4	34	8.0000+6
3	1.0000+7	23	5.2475+4	35	6.5000+6
4	8.1273+6	24	3.1828+4	36	5.0000+6
5	6.7032+6	25	1.5034+4	37	4.0000+6
6	4.4933+6	26	7.1017+3	38	3.0000+6
7	3.6788+6	27	2.6126+3	39	2.5000+6
8	3.0199+6	28	9.6112+2	40	2.0000+6
9	2.4660+6	29	2.1445+2	41	1.6600+6
10	2.0190+6	30	4.7851+1	42	1.3300+6
11	1.6530+6	31	5.0436+0	43	1.0000+6
12	1.3534+6	32	4.1400-1	44	8.0000+5
13	1.1080+6			45	6.0000+5
14	9.0718+5			46	4.0000+5
15	7.4274+5			47	3.0000+5
16	6.0810+5			48	2.0000+5
17	4.9787+5			49	1.0000+5
18	4.0762+5			50	5.0000+4
19	2.7324+5				
20	1.8316+5				

† Read as 1.4918×10^7

(9), (10)式および(1)式は通常の行列演算法を用いて計算を実行できる。これらの式による D_0 および $D_0(\text{inner})$ の計算のために、計算コード SMART を作成した。SMART コードによる D_0 , $D_0(\text{inner})$ の計算は、FACOM-M-180 では1s以内のCPUタイムで行うことができる。

使用済核燃料からの中性子および γ 線に対するエネルギースペクトルは線源計算コード⁽⁶⁾ ORIGIN-2182を用い、炉型、燃料濃縮度、燃焼度、冷却時間等を考慮しつつ決定した。その際、与えられた燃料冷却時間および燃焼度に対する線源強度を内挿する必要があるが、第4図(a), (b)に例示するように、線源強度の対数と冷却時間の対数、あるいは線源強度の対数と燃焼度の対数との関係は、冷却時間、燃焼度の狭い範囲内では直線的であるとして直線内挿する。

第3表には、対象とする体系の燃料中のU1t当りの線源強度と燃焼度との関係を示す。第5図には、感度関数 $S_0(\text{inner})$ と内部領域が燃料域に占める体積の割合との関係を、中性子、2次 γ 線、1次 γ 線に対して示す。

(a) 冷却時間

(b) 燃焼度

第4図(a), (b) 冷却時間および燃焼度に関する線源強度の内挿法(中性子の場合)

4. 非均質効果の補正量計算法と計算結果

内筒部に収納した燃料集合体がすべて平均燃焼度 29,871 MWd/t を持つものと仮定した場合は、体系に

第3表 各平均燃焼度の線源強度

Burnup (MWd/t)	28,206	29,871	33,206
Neutrons	1.1370+8†	1.4702+8	2.3597+8
γ -rays	4.5126+16	4.7389+16	5.2197+16
Radiation sources (particles/s/U t) for cooling time of 546 d			
† Read as 1.1370×10^8			

における中性子増倍率として0.3を仮定すると*, 中性子, 2次 γ 線, 1次 γ 線に対する D_0 (mrem/h) として, それぞれ3.34, 6.01, 8.05の値を得る。第4表では, これらの値は D_{av} (0 cm) として与えられている。ただし (0 cm) は容器表面上を意味するものとする。第4表中

第4表 簡易計算法による線量率計算結果の測定値と他の解析値との比較

	Present calculation				Measurement		Other calculation		
	Cask surface		6 cm apart from cask surface		1 m apart from cask surface	Cask surface†	1 m apart from cask surface	Cask surface	1 m apart from cask surface
	D_{av} (0 cm)	D_{hetero} (0 cm)	D_{av} (6 cm)	D_{hetero} (6 cm)	D_{hetero} (1 m)	$D_{measurement}$ (6 cm)	$D_{measurement}$ (1 m)	$D_{other cal}$ (0 cm)	$D_{other cal}$ (1 m)
Neutrons	3.34(1.81)	2.93	2.91(1.58)	2.55	1.11	2.2	1.1	2.79	1.20
Secondary γ -rays	6.01(2.17)	5.27	5.23(1.88)	4.59	1.90	—	—	—	—
Primary γ -rays	8.05(8.05)	7.73	7.00(7.00)	6.73	2.94	6.7	3.3	6.96	3.72

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

第4表では, 燃焼度に関する非均質配置効果を補正した結果が D_{hetero} (0 cm) として与えられているが, 以下ではその値の求め方を述べる。

燃料集合体収納孔は1辺が22.6 cmの正方形の断面をしている。内部線源領域を形成する集合体は4体であるので, 燃料域におけるこの4体の占める体積は13.8%である。

第5表には, この体積比の場合をCase 1とし, これに対する中性子, 2次 γ 線, 1次 γ 線の S_c (inner) の値および第3表に示した燃焼度に依存する線源強度を用いて, 非均質配置効果の補正值を求めるアルゴリズムをまとめて示す。中性子を例として以下に述べるものとする。

対象とする体系の内部線源領域は, 全収納燃料に対する平均燃焼度に比較して1.605倍の高い線源強度を持ち, 他方, 外部線源領域は0.773倍の低い線源強度を持っている。したがって, 全体を平均燃焼度の近似で扱った場合よりも, 内・外部線源領域はそれぞれ60.5%の線源強度増加および22.7%の線源強度低下となっている。

第5図 中性子, 1次・2次 γ 線の感度関数

で()中に示した1.81, 2.17, 8.05の値は, 内筒部と容器壁との間における反射線のカップリング効果を無視した場合の線量率である。

内部線源領域の体積が全線源領域の13.8%を占めるCase 1に対しては, S_c (inner) は0.073であり, S_c (outer) は0.927である。

従来の平均燃焼度近似を用いた場合の線源強度に相対的な線源強度のズレを内・外部線源領域について求め, その結果に各線源領域の感度係数を乗じたものは, 各線源領域からの容器表面線量率への寄与を考慮した相対的線量率補正量となる。

第5表では, 内部線源領域で生じた中性子は外部線源領域により遮蔽される効果があるが, それにもかかわらず4.4%程度の表面線量率の値の増加をもたらすこと, 外部線源領域における線源強度低下の効果がこの内部線源領域からの寄与の増加を打ち消してなお余りあり, 総合的な補正量としては表面線量率を17%程度低下させることが示してある。

1次 γ 線の場合は, 内部線源領域の線源強度増加の効果は外部線源領域によりほとんど完全に遮蔽される。したがって, もっぱら外部線源領域における線源

* 体系の臨界安全性解析の結果から推定した値である。

第5表 感度関数を用いた非均質燃料配置効果の評価表

Region	s	Source ratio s/s_{av}	Deviation $1-s/s_{av}$	$S_c^\dagger$		$S_c(1-s/S_{av})$	
				Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
Neutrons							
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
Secondary γ -rays							
Outer	$s=s_{lower}$	0.773	-0.227	0.897	0.788	-0.204	-0.179
Inner	$s=s_{higher}$	1.605	+0.605	0.103	0.212	+0.062	+0.128
Summation						-0.142	-0.358
Primary γ -rays							
Outer	$s=s_{lower}$	0.952	-0.048	0.996	0.979	-0.0478	-0.047
Inner	$s=s_{higher}$	1.171	+0.171	0.004	0.021	$+6.84 \times 10^{-4}$	$+3.59 \times 10^{-3}$
Summation						-0.0471	-0.0434

$^\dagger S_c$ stands for $S_c(\text{inner})$,

Case 1 corresponds to 13.8% of volume ratio; $V_{inner}/(V_{inner}+V_{outer})$

Case 2 corresponds to 30.0% of volume ratio.

強度低下の効果のみにより非均質効果の補正量が決定されてしまう。この様子が第5表に示してある。

数値例を示すため、内部線源領域が全燃料域の30%を占める場合をCase 2として第5表に示してある。この場合は、中性子に対する総合的な補正量は7.4%の線量率低下をもたらし、1次 γ 線に対する総合的な補正量は4.3%の線量率低下をもたらしている。

1次 γ 線の場合は、内部線源領域の体積変化に対する非均質効果補正量の変化が、中性子、2次 γ 線の場合に比較して小さいことが第5図からうかがえる。このことと上記の内部線源領域からの1次 γ 線の外部線源領域による遮蔽効果とは同一の根源に根ざしているものと解釈される。すなわち、容器壁部と内筒部との境界の付近に存在する1次 γ 線線源のみが容器外側表面の γ 線線量率に支配的寄与をするのである。第4表の $D_{av}(0\text{ cm})$ で、1次 γ 線の場合の()内の値が()外の値と変わらないのも同一の理由によると考えられる。

5. 補正結果と測定値との比較

非均質配置をした場合について、線量率補正を行なって求めた容器表面線量率の値が第4表では $D_{hetero}(0\text{ cm})$ として与えてある。またこの表では、平均燃焼度近似の取扱いと非均質効果を考慮した取扱いのそれぞれについて、特に容器表面から6 cm 容器の径方向に離れた位置の場合に対しても、 $D_{av}(6\text{ cm})$ および

$D_{hetero}(6\text{ cm})$ として値を示してある。

6 cm 表面から離れた位置における線量率は下記の式⁽⁴⁾により算出されているが、このような計算値が必要な理由は、測定値⁽²⁾ $D_{measurement}$ は検出器の実効モニタ中心が容器表面から6 cm*径方向に離れた状態で測定されたと考えるからである。

$$D_{hetero}(r_d) = \frac{2D_{av}(0\text{ cm})}{\pi} HJ \sin^{-1}\left(\frac{r_d}{r_s}\right) \quad (11a)$$

$$D_{av}(r_d) = \frac{2\pi D_{av}(0\text{ cm})}{\pi} HJ \sin^{-1}\left(\frac{r_d}{r_s}\right) \quad (11b)$$

ただし、 r_d : 容器長軸中央から径方向に測った検出体位置

H : 容器長軸方向における全有効長の半分の値

r_s : 容器表面の半径

J : 楕円積分を用いて表わされる関数

第4表には、他の著者による測定値⁽³⁾の解析結果が $D_{other cal}(0\text{ cm})$ として示してある。

第4表には、容器表面から1 m離れた位置における線量率も、 $D_{hetero}(1\text{ m})$ 、 $D_{measurement}(1\text{ m})$ 、 $D_{other cal}(1\text{ m})$ として示してある。 $D_{hetero}(1\text{ m})$ の値の計算には(11a)式を用いている。

* 電離箱サーベイメータの実効中心はサーベイメータの前面から6 cm $\pm$ 1.5 cm奥にあり、NP-2レムカウンタでは7.5 cm $\pm$ 1.5 cm奥にある⁽⁶⁾。便宜上、本研究では、実効中心は中性子、 γ 線ともに6 cm奥とした。

第6図には、中性子、1次 γ 線に対する $*D(r_d)$ をそれぞれ実線および点線により、測定値ならびに他の著者の解析値と比較して示す。

中性子の計算線量率の径方向分布は、 γ 線の場合と比較して距離変化に対してなだらかであり、容器表面から1 m離れた位置では測定値および他の著者の解析値ともよく一致している点が特徴的である。

γ 線に関しても、計算線量率の径方向分布は容器表面から1 m離れた位置において、測定値および他の著者の解析値にかなり近い値となっている。

第6図 線量率分布解析値と測定値との比較

容器表面上の測定値は本研究の解析値よりもやや小さな値となっているが、測定器の寸法・形状の都合で、容器表面からやや離れた位置で測定されており、その測定値が寸法・形状効果に対する補正を施されずに「表面線量率」ということで報告されている可能性がある。この補正を施せば、測定値と本研究の解析値の表面における値の一致は改善されるものと思われる。

一般的に、本報に示した手法による中性子線量率と γ 線線量率の径方向分布は実測値とかなり良く一致していると考えられる。すでに(11)式の妥当性は明らかにされているので⁽⁴⁾、上に述べた線量率分布についての一致の良さは、燃焼度が異なる燃料を2領域的に配置した効果を評価する方法として、本報で示した手法が妥当なものであったことを示している。

IV. 考 察

1. 線源放射線のエネルギー分布 ρ_i

(4)式における ρ_i は (α, n) 反応に起因する成分 $\rho_{\alpha, n}$,

核分裂生成物に起因する成分 $\rho_{fission\ products}$, アクチノイドに起因する成分等をエネルギー群について加算して1に規格化した量(中性子と γ 線とは別々に規格化している)である。第7図においては、 ρ_i のことを上記の意味で ρ_{tot} とも書いてある。

中性子に対する $\rho_{\alpha, n}$ は燃焼度とともに変化するものであるが、その値の変化は小さいことから、 $\rho_{\alpha, n}$ 自身も ρ_i 中に占める割合が小さいことから、 ρ_i はほとんど対象とする燃焼度範囲では燃焼度に依存しないといえる。1次 γ 線の場合も ρ_i の燃焼度依存性は無視できることが第7図からうなずけよう。

以上の理由から、(4)式から(5)式を導く際に $dp_i/ds(\text{inner})=0$ と置いた。

2. 表面線量率の測定値

中性子線量率測定にはレムカウンタ(NP-2)が使われ、 γ 線線量率測定には電離箱型サーベイメータが使われている。

電離箱型サーベイメータを輸送容器表面に接触させた状態では、電離箱中心部は輸送容器表面から6 cmほど離れた位置にある。この場合に測定される線量率は輸送容器表面の値よりも15%程度低い値となるはずであることが(11)式を用いて確かめられる。

容器表面中央部の中性子線量率測定の際にレムカウンタがいかなる位置にあったかは文献からは不明である。例えば、6 cm 離れていれば15%程度、15 cm 離れていれば27%程度、容器表面上の値より低下することが、やはり(11)式を用いて確かめられる。

いずれにせよ、中性子の場合に容器表面から1 m離れた位置における測定値が本報の計算法による計算結果と良く一致すること、理論値から中性子線量率の径方向分布は距離変化に対して割合になだらかであることが予測され、この1 m付近では測定位置の誤差の影響は小さいと考えられること等を考え合わせると、輸送容器表面から1 m離れた位置における測定値は本報の解析手法の妥当性を示していると思われる。それだけに一層、輸送容器表面上の中性子線量率の測定値には、まだカウンタ位置に対する補正が施される余地が残されていると考えられる。

3. R_{couple} の収束性

乾式のTN-12A型容器の内筒部には多量のAlが存

* TN-12A型容器の表面に存在するレジン層にはボロンが含まれており、レジン層からの2次 γ 線生成は無視できるといわれているので、 γ 線線量率の測定値は主として、1次 γ 線によるものとして扱った。

ρ_{tot} はすべての種類の線源につきエネルギー・スペクトルを加算して線源強度全体を1に規格化したものであり、これをエネルギー群別に表示したものが ρ_i である。

第7図 中性子、 γ 線に対するエネルギー分布の形を表わす関数 ρ_i の値

在する。AIは湿式容器の内筒部に多量に存在する水と比較して中性子減速効果があまり期待できない。したがって、(9)式における右辺の和の収束性も水の場合よりは悪いことが予想される。

(9)式右辺に示すように、 n の値を6までで打ち切った近似の妥当性を検討するため、以下、各項の大きさとそれが和全体の値に与える寄与について述べる。

TN-12A型容器の場合、(9)式の右辺の和を $n=10$ までとって求めた R_{couple} の値に対する各項からの寄与を、中性子、1次 γ 線のそれぞれについて%表示した結果が第8図(a),(b)である。第8図(c)には電力中央研究所の50 t容器(湿式)を対象とした遮蔽実験体系^{UX}における中性子につき、同様な表示をした結果を示してある。

図中の縦軸では(10)式の右辺第2項に対する別の表現 J^+ を用いているが、その意味するところは R_{couple} に起因する寄与を与える点で同じである。また横軸には、第2表に示した中性子、 γ 線のそれぞれについてエネルギー群が目盛っている。

第8図には、第1図(a),(c)に示したTN-12A型容器の中性子、 γ 線の遮蔽性能特性関数および50 t容器の中性子遮蔽性能特性関数が、以下の議論を理解し易くするために示してある。

TN-12A型容器における中性子の場合、第7項以上の項についての和が ≥ 7 の印を付けて示してある。この和の値は低エネルギー領域においては無視できない状態となっており、 R_{couple} の値としては第7項以上の項からの寄与が無視できないことを意味している。

しかしながら、TN-12A型容器の遮蔽性能特性関数の中性子エネルギー依存性を考慮に入れば、この低エネルギー中性子に対する R_{couple} の収束性の悪さは容器表面線量率に対してほとんど影響を及ぼさないことが第8図(a)からわかる。すなわち、TN-12A型容器の表面線量率を計算することが目的である限りは、(10)式の右辺で示したような第6項までの打ち切りを行っても、計算結果への影響は無視できるほど小さいと考えられる。

第8図(b)からは、 γ 線の場合には(10)式の右辺の和

ただし、 $J_n^{+1} \equiv \sum_{n=1}^{10} J_n^{+1}$ とし、また Charact. Funct. は「遮蔽性能特性関数」を意味する。

(a) 散乱中性子
(乾式容器TN-12Aの場合)

(b) 散乱γ線
(TN-12Aの場合)

(c) 散乱中性子(湿式容器である
電中研50 t 容器を対象とした
測定体系の場合)

第8図(a)~(c) カップリング効果の寄与

を第2項までで打ち切っても、TN-12A型容器の表面線量率の計算値への影響は無視できるほどに小さいことがわかる。

第8図(c)からは、50 t 容器の場合、中性子に対して第3項までとれば充分であることがうかがえるが、このことは、すでに本節の初めで述べた湿式容器における水の中性子効果に果す役割の大きいことを裏付けている。

TN-12A 型容器の表面線量率を計算する際に、(10)式の右辺で和の項数を増加させていった場合の線量率計算値が、和の項数を10項とした場合の線量率計算値に比較して相対的にどれほどの近似となっているか、その関係を第9図に示す。

第9図 表面線量率への相対的累積寄与率

点線はγ線の場合であるが、第1項のみでも99%程度の近似精度となっていること、中性子の方はやはり最初の6項を考慮すれば十分に良い近似精度であることを示している。

4. 低燃焼度燃料

第4表に示してある1次γ線の線量率 D_{00} および D_{hetero} の計算においては、容器壁と内筒部との間の反射線の交換効果の影響は無視できた。この理由を説明するために、第10図(a),(b)を用意した。これらの図では(10)式の右辺第1項を J_0^{+} として表わし、第2項を J^{+1} として表わした場合の相対的大きさが示してある。

中性子の場合、第10図(b)に示されているように、中性子エネルギーが低下するとTN-12A型容器の内側壁に入射する J^{+1} の成分は J_0^{+} の成分よりもはるかに大きな寄与を J^{+} の値にもたらしている。これに対して、1次γ線の場合は、第10図(a)に示されているように、低エネルギー領域において J^{+1} の成分が、中性子の場合に見られたように大幅に J_0^{+} 成分を上回る値を示すことはなく、せいぜい J_0^{+} と同程度かそれ以下である。

中性子の遮蔽性能特性関数の値は、TN-12A 型容器の場合、 5×10^4 eV 程度以上では中性子エネルギーが大きくなるにつれて増大する。第10図(b)で、 $10^5 \sim 10^6$ eV 程度の範囲において J^{+1} の値が J_0^{+} の値を上回っている効果が、容器表面線量率への反射線カップリング効果からの寄与として現れる。

1次γ線の遮蔽性能特性関数の値は、TN-12A 型容器の場合、 10^6 eV 以下では急激に小さくなっていく。したがって、第10図(a)で見た J^{+1} の値の J_0^{+} の値に相

第10図(a), (b) γ 線, 中性子のカップリング効果の強さ (TN-12A の場合)

対的な値の詳細は、容器表面線量率にはあまり効かないことになる。すなわち、第10図(b)においての $10^4 \sim 5 \times 10^4$ eV 程度の範囲で J_0^+ が J^{+1} よりもはるかに大きな値となっている効果の方が表面線量率には効くのである。このようにして、TN-12A 型容器の容器壁と内筒部との間の反射線カップリング効果の影響は無視することができたのである。

以上の事情から、容器表面線上の1次 γ 線線量率は反射線交換効果を考慮しなくとも、直接的に遮蔽性能特性関数と J_0^+ とから算出することができることになる。したがって、中性子成分が線源として無視できるような低燃焼度燃料をTN-12A 型容器に収納する場合は、上記手続きによる線量率評価を行なっても、充分に良い近似値が得られているものと考えられる。

5. 燃料配置の定量的評価

第2図で示した燃料配置では、第5表からもわかるように、高燃焼度燃料から生じた中性子は低燃焼度燃料により遮蔽され、平均燃焼度近似による容器表面線量率の評価値に比較して非均質配置効果を考慮した評価値には16%程度の中性子線量率のゆとりがある。

γ 線の場合は、第2図で示した燃料配置に対する非均質効果の補正值に約5%であり大きくない。すなわち、1次 γ 線に対しては燃料配置効果のことは考える必要はなさそうである。

中性子に関しての上記の16%のゆとりは、中央4個の燃料の燃焼度がその分だけ高くともよかったことを示唆している。

このように、なるべく多くの高燃焼度燃料を輸送すべく燃料配置を工夫する際は、感度関数を用いること

により配置効果を定量的に評価することができる。

第Ⅲ章ではTN-12A 型容器に対する感度関数を例示したが、その値は現実にPWRから取り出される使用済核燃料の物質組成が多少変化しても、燃料集合体が12体収納される限りほとんど変化しないと思われる。その理由は、内筒部では多量のAl基材が収納燃料を取り巻いており、燃料中の物質組成の変化が多少変化したことによる燃料棒の中性子吸収・散乱の核特性の変化があっても、内筒部全体としての遮蔽性能上の核特性にはその影響はほとんど及ばないと考えられるからである。

輸送容器の今後の型や燃料収納法に関する考え方によっては、より多数の燃料集合体を収納する場合も生じてくることもあるかも知れないが、そのような場合は、燃料配置が燃焼度に関して3領域以上の多領域的配置の近似が必要となることもあり得る。

このような場合でも、第5図に示したような感度関数曲線に対応する数表データを一度求めておけば、容易に第5表で示したアルゴリズムを拡張したもの、その数表データを適用することができる。

内筒部燃料域の半径を R とし、 N 個のサブ線源領域に分割した場合を例にとれば、第1燃料領域の感度関数 S_0^1 は、第5図の横軸の値を $(r_1/R)^2$ とした場合と $(r_{1-1}/R)^2$ とした場合に対する S_0 (inner) の値の差として求められる。ただし、 $(r_0/R)^2$ に対する S_0 (inner) の値はゼロとする。したがって、第1線源領域の線源強度と内筒部平均線源強度とのズレの相対値を ΔS^1 とすれば、容器表面線量率に対する燃料非均質配置効果の相対的補正值 $\Delta D_0/D_0$ は次式で与えられる。

$$\frac{DD_0}{D_0} = \sum_{i=1}^N \Delta S^i S_i^t$$

$$S_i^t \equiv [S_c(V_i) - S(V_{i-1})]_{\text{inner}}$$

$$V_i \equiv \left(\frac{r_i}{R}\right)^2, \quad r_N = R$$

$$[S_c(V_0)]_{\text{inner}} = 0$$

ただし、 $[\]_{\text{inner}}$: $S_c(\text{inner})$ の値に基づくことを意味する。

6. 非均質配置効果評価法の特徴

本報で述べた感度関数を用いる方法の代りに、非均質燃料配置効果を直接的に Forward 計算することも、逆に Adjoint 法*で計算することも可能である。

直接的に Forward 計算する場合、内筒部から容器表面に至るまでの一貫した遮蔽計算を内筒部燃料配置を変えるごとに繰り返すことになる。

本報に示した感度関数の計算においても、燃料配置ごとに $D_0(\text{inner})$ の計算を行う必要があるが、その計算の際には、 D_0 の計算と同様に、容器壁の遮蔽効果の計算を極めて短時間に、少ない計算手順で済ませてしまう。ただ(10)式中の J_0^+ のみの計算を繰り返し求めることが、計算時間の観点からは主な手続きである。内筒部のみを対象とする J_0^+ の計算は、ANISN コードを用いた1次元計算で短時間に求めることができる。

以上に述べたように、本報に示した感度関数の計算は遮蔽性能特性関数を用いた容器表面線量率計算の簡易的手法^①をそのまま応用し、SMART コードにより短時間に行うことができる特徴がある。

さらには、いったん求めた感度関数は、新たな燃焼度非均質配置に対してもそのまま適用することができるので、この感度関数を用いて燃料配置に応じた単純な計算から非均質配置効果の定量的評価が容易に行える点に、本報の手法の特徴がある。

* 本報で示した手法は $S_c(\text{inner})$ が線源位置に対する一種の importance function となっている点で、Adjoint 法とも等価であると考えられる。ただ、本報は遮蔽性能特性関数を用いる容器表面線量率簡易計算法^①の応用の一環として開発した手法を示すという立場をとっている。

V. 結 論

燃焼度が異なる使用済核燃料を輸送容器中に非均質配置した効果を、従来の均質モデルによる容器表面線量率計算値に対して補正する方法として、感度関数なる概念を用いる方法を述べてきた。以下に結論を述べる。

- (1) 感度関数の計算は、容器壁のもつ遮蔽性能特性関数を用いる遮蔽計算法を応用することにより、比較的簡便に求めることができる。
- (2) 感度関数を用いることにより、燃料非均質配置が容器表面線量率に及ぼす影響を定量的に評価することができる。
- (3) 今後、高燃焼度燃料を輸送する機会が多くなる傾向があるが、高燃焼度燃料を効率よく輸送するための燃料配置法の検討に本研究で示した非均質燃料配置効果評価法が応用できる。

なお、今後の課題として、各種現用の輸送容器に対して中性子、1次γ線の感度関数を算出することが残されている。

感度関数を用いた燃料配置効果評価法の妥当性を確かめるため、乾式容器 TN-12A を対象とする収納実例につき計算を行い、また解析結果と実測結果とを比較検討した。

筆者がこのような実例に対する比較検討を行うに際し、計算に必要な諸データの提供ばかりではなく、実測値までも提供頂けたことは、関西電力㈱のご厚意によるものであり、ここに深く感謝する。

さらに、データを入手するに際して小鍛治市造氏にひとかたならずご尽力を頂き、心から感謝のことは述べたい。

— 参 考 文 献 —

- (1) YAMAKOSHI, H.: *Nucl. Sci. Eng.*, 87, 152 (1984).
- (2) 関口 晃, 他: 原子力学会「昭56分科会」予稿集, C17, (1981).
- (3) 小鍛治市造: 私 信, (1984).
- (4) YAMAKOSHI, H.: *Nucl. Sci. Eng.*, 88, 110 (1984).
- (5) CROFF, A.G.: A user's manual for the ORIGEN-2 computer code, ORNL-TM-7175, (1980).
- (6) 中沢正治: 私 信, (1984).
- (7) UEKI, K., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 84, 271 (1983).