研 究

論 文

671. ガンマ・スキャン法における燃料集合体中の Cs-137 分布のガンマ線強度に対する影響

高 橋 文 信*

(1978年 2月7日 受 理)

(1978年 7月10日 再受理)

Effects of Cesium-137 Distributions in Fuel Bundle on Intensity of Gamma-Ray in Gamma Scan Method

By Fuminobu TAKAHASHI

This paper presents numerical estimation of the relation between measured intensity of 662 keV γ -ray and nonuniform distributions of ^{137}Cs in a γ -scan of a 7×7 fuel bundle without disassembling.

In the present analysis, the intensity of 662 keV γ -ray measured on the bundle is calculated as a function of the γ -ray measurement angle which is defined as an angle between the central axis of a collimator of a γ -ray detector and the line normal to a wall of the channel box.

In the calculation, the local distribution of ^{137}Cs in the bundle is treated as power distributions obtained by calculation at the uncontrolled bundle and at the controlled bundle. The distribution of ^{137}Cs in a fuel rod is assumed to be parabolic in radial directions.

The present numerical analysis shows that the content of ^{137}Cs can be estimated from the intensity of 662 keV γ -ray at a measurement angle of 27° with an error of less than 0.7%, provided that the local distribution of ^{137}Cs is known and the distribution of ^{137}Cs in fuel rods is parabolic.

The analysis also shows that the extent of ^{137}Cs can be estimated from the intensity of 662 keV γ -ray at a measurement angle of 24° with an error of about 3.7% when the local distribution of ^{137}Cs is unknown.

KEYWORDS: gamma fuel scanning, fuel bundles, disassembling, uncontrolled bundle, controlled bundle, local distribution, cesium 137, numerical analysis, errors

I. 緒 言

原子炉燃料の燃焼度を非破壊的に測定するための技術開発は、燃料管理、炉心管理および保障措置などの面で重要である。

現在までに種々の非破壊測定法が試みられているが、原子炉サイトで実施する場合には、 γ スキャン法が最も適しているといわれている。これは、使用済み燃料が核分裂生成物(以下 F.P.)の崩壊によって高い放射能を帯びかつ発熱するので、放射線の遮蔽および燃料体の冷却を兼ねて貯蔵用プール中で測定が可能で

あることによる。

γ スキャン法による個々の燃料ピンの燃焼度測定⁽¹⁾や燃料集合体の燃焼度を測定しようとする試み^{(2)~(5)}がある。特に後者の方法が実用化すれば、燃料集合体の解体作業に伴う放射線被曝、作業時間が大幅に減少し、かつ測定時間が短縮できるなどの効果が大きい。

しかし、燃料集合体の燃焼度測定に γ スキャン法を適用する場合、燃料集合体を構成する燃料ピン相互の遮蔽効果、各燃料ピン中の F.P. 量が異なること、また

* (株)日立製作所エネルギー研究所(Energy Res. Lab., Hitachi Ltd.)

燃料ビン中においても F.P. が燃料ビン径方向に均一には存在していないことなどにより、燃料集合体に存在する F.P. 量に比例した γ 線強度が得られず、燃料ビン 1 本ごとの γ 線強度を測定する方法に比べて燃焼度の測定精度が低下することが問題となる。

そこで本研究では、 7×7 燃料集合体を対象とし測定した γ 線強度から燃料集合体中の F.P. 量を求める場合、燃料集合体中の F.P. 分布の違いによる誤差がどのようになるかを数値計算により検討した。

II. 数値計算の内容

1. γ 線測定系の幾何学的形状

γ 線強度を測定する際の燃料集合体、コリメータ、 γ 線検出器の幾何学的配置を第 1 図に示す。

第 1 図 γ スキャン法における幾何学的配置図

第 1 図に示すように、コリメータ中心線の延長上に燃料集合体の中心軸が位置する。燃料集合体は、中心軸を回転軸として図中に示す方向に回転する。この時の回転角度を α とし、燃料集合体の 1 壁面がコリメータ中心線に対し直角に面する時の回転角 α を 0° とする。

コリメータ・スリットの水平方向幅は、 γ 線検出器から燃料集合体のすべての燃料ビンを見込むことができる大きさとする。コリメータ・スリットの垂直方向幅は、コリメータのスリットから γ 線検出器までの距離に比べて充分小さいものとし、 γ 線検出器からコリメータを通して見込む各燃料ビンの軸方向長さはずべて等しいものとする。コリメータ内部の媒質は空気とし、コリメータ外部の媒質は水とする。

燃料集合体は 7×7 正方格子形燃料集合体とする。燃料集合体、コリメータの寸法等の設定条件は第 1 表に示すとおりとする。

2. γ 線強度の計算式

γ 線検出器としては、Ge(Li) 検出器を用いて ^{137}Cs

第 1 表 設定条件

燃料集合体の構造		
7×7 正方格子形	ビン間隔	18.8 mm
	被覆管外径	14.3 mm ϕ
	被覆管肉厚	0.9 mm
	ペレット直径	12.1 mm ϕ
コリメータ形状		
コリメータ・スリット	水平方向幅	200 mm
	垂直方向幅	1 mm
コリメータ長		2,150 mm
検出器側窓形状		
円形	直径	5 mm
γ 線検出器の検出効率		100%
燃料集合体中心軸と検出器間距離		2,330 mm

から放出される 662 keV の γ 線強度を測定するものとする。この場合、燃料中の ^{137}Cs から水や燃料物質などで散乱されずに直接検出器に入射する γ 線だけが計数の対象となり、 γ 線の減衰については、燃料ビン自身による自己遮蔽、他の燃料ビンによる遮蔽率を計算することにより求められる。

第 1 図で示したように、燃料集合体を角度 α だけ回転させた時、 m 行 n 列目の燃料ビン中に存在する ^{137}Cs から放出される 662 keV の γ 線の計数効率 $G_{m,n}(\alpha)$ は次のように計算できる。

$$G_{m,n}(\alpha) = \varepsilon \int_{r_{m,n}} S(r) \frac{A(\Omega)}{4\pi x^2} \exp\left\{-\int_0^x \mu(x', \Omega) dx'\right\} dV \quad (1)$$

ここで、 ε : 検出器の γ 線検出効率

x : 燃料ビン中の ^{137}Cs から検出器表面までの距離

Ω : ^{137}Cs から検出器表面を見込む立体角

$A(\Omega)$: ^{137}Cs からコリメータを通して見込む検出器表面の実効面積

r : 燃料ビン中心軸から ^{137}Cs までの距離

$S(r)$: 燃料ビン中心軸から距離 r の地点での ^{137}Cs の存在量で、 $\int_{r_{m,n}} S(r) dV = 1$ で規格化する。

$\mu(x', \Omega)$: ^{137}Cs から検出器に至る γ 線の飛行経路における媒質の γ 線吸収係数

$V_{m,n}$: 検出器から見込む燃料ビンの体積

ただし、(1)式により各燃料ビンから放出される γ 線の計数効率を計算するにあたり、コリメータ・スリ

ットの垂直方向幅はコリメータ長さに比べ充分小さいので、検出器から見込む各燃料ピンの有効体積はすべて等しいとした。

次に、 m 行 n 列目の燃料ピンの有効体積 $V_{m,n}$ 中に存在する ^{137}Cs 量を $I_{m,n}$ とすれば、回転角度 α の時の γ 線計数率 $C(\alpha)$ は次式で与えられる。

$$C(\alpha) = \sum_{m=1}^7 \sum_{n=1}^7 (G_{m,n}(\alpha) \times I_{m,n}) \quad (2)$$

$$\text{ただし, } \sum_{m=1}^7 \sum_{n=1}^7 I_{m,n} = 49$$

以上、(1)および(2)式を用いて662 keV の γ 線の計数率を計算した。計算に使用した各媒質の線吸収係数の値は第2表に示すとおりである。なお、短軸形燃料集合体による γ 線強度の測定値と、本計算式による計算値とは5%以内で一致する(4X5)。

第2表 計算に用いた γ 線線吸収係数の値

材 質	γ 線線吸収係数(662 keV)
燃料(UO_2)	1.276 cm^{-1}
被覆管(ジルカロイ-2)	0.468 cm^{-1}
水	0.086 cm^{-1}

第2図 非制御形局所出力分布

い局所分布の3例を想定した。

以上あげた局所分布のほかに、 γ 線強度の計算にあたっては ^{137}Cs の燃料ピン内での径方向分布(以下、局所分布と区別してピン内分布と呼ぶ)を考慮した。

F.P. 特に ^{137}Cs の燃料ピン中の分布についての報告は、Forsyth ら⁽⁶⁾、Bates⁽⁷⁾、Boase ら⁽⁸⁾ によってなされている。これらの報告によれば、 ^{137}Cs の燃料ピン中央部の濃度と表面部の濃度との比(以下、S/C と表現する)が1:1,000 という極端な例も見られるが、一般には ^{137}Cs の燃料ピン中の濃度分布は燃料ピン径方向に関し放物線近似が可能で、S/Cは10程度と考えるこ

3. 燃料集合体中の ^{137}Cs の分布

燃料集合体中での核燃料の燃焼は、燃料集合体軸方向について均一でないのと同様、径方向についても各燃料ピンごとの燃焼度が異なる。したがって、燃料集合体軸方向によって集合体径方向の ^{137}Cs 分布(以下、局所分布)が、下記の3例のパターンのいずれかになるものとした。

第2図および第3図に原子炉装荷時の燃料集合体径方向の典型的な出力分布の計算例を示す。第2図は、制御棒に隣接していない場合の各燃料ピンごとの出力値を示し、第3図は、制御棒に隣接している場合の各燃料ピンごとの出力値を示す。ただし、表示した数値は49本の燃料ピンの平均出力が1になるよう規格化した値である。

現実の燃料集合体径方向の燃焼度の分布は、長期間にわたる燃焼のため第2図、第3図に示す出力分布に比べ、各燃料ピンの燃焼が平均化することが予想されるが、燃料集合体径方向の各燃料ピンの燃焼が第2図、第3図で示すパターンのまま進行したものと仮定する。燃料集合体径方向の ^{137}Cs 分布は燃焼度の分布と同じパターンとし、第2図で示す局所分布(以下、非制御形局所分布)、第3図で示す局所分布(以下、制御形局所分布)および各燃料ピンの ^{137}Cs 量がすべて等し

第3図 制御形局所出力分布

とができる。

そこで、 ^{137}Cs のピン内分布として第4図に示す3種類の分布を想定した。第4図は横軸を燃料ピン中心軸からの距離 r で示し、縦軸を単位体積当りの ^{137}Cs 濃度で示すピン内分布のパターンを表わしたものである。

実線は均一なピン内分布(S/C=1)を示し、点線、1点鎖線は放物線状ピン内分布でそれぞれ S/C の値が5および10である。ただし、第4図に示す3種類のピン内分布では、燃料ピン単位長さ当りの ^{137}Cs 量を1に規格化してある。

第4図 ^{137}Cs 濃度のピン内分布

Ⅲ. 計算結果

1. γ 線強度の燃料集合体回転角度依存性

^{137}Cs のピン内分布が均一($S/C=1$)な場合の γ 線強度における燃料集合体の回転角度依存性を第5図に示す。第5図の縦軸は(1), (2)式を用いて計算した662 keVの γ 線計数率を示し、横軸は燃料集合体の回転角度を示す。図中実線は燃料集合体の各燃料ピン中の ^{137}Cs 量がすべて等しい、すなわち均一な局所分布の場合の γ 線強度を示し、点線および1点鎖線はそれぞれ非制御形および制御形局所分布での γ 線強度を示す。

第5図に示すように、非制御形局所分布での γ 線計数率は均一な局所分布での γ 線計数率より常になくなる。これは、非制御形局所分布が第2図に示したように、燃料集合体中央部の燃料ピンより外側の燃料ピン中の ^{137}Cs 濃度が1より高く、かつ外側の燃料ピンから検出器方向に放出される γ 線は他の燃料ピンに遮蔽されないで、強度が減少しないからである。

制御形局所分布の燃料集合体における γ 線強度の回転角度依存性を第6図に示す。第6図の縦軸、横軸とも第5図の縦軸、横軸と同じである。第6図中の実線および点線はともに局所分布が制御形局所分布で、ピン内分布がそれぞれ均一な分布($S/C=1$)および $S/C=10$ の放物線状分布の場合の γ 線計数率を表す。

第6図に示すように、均一なピン内分布に対して放物線状ピン内分布の場合の γ 線強度が常になくなるのは、燃料ピン表面部に ^{137}Cs がかたよって存在するため燃料ピン自体の自己遮蔽効果が小さくなり、各燃料ピンから放出される γ 線強度が均一なピン内分布時の γ 線強度に比べて高くなるからである。

このように、 ^{137}Cs 量が等しい燃料集合体でも、局所分布、ピン内分布が異なれば γ 線強度が異なる。また、第5図、第6図からわかるように、燃料ピン相互間の遮蔽効果が変化するため燃料集合体の回転角度に

第5図 γ 線強度の角度分布(均一なピン内分布) 第6図 γ 線強度の角度分布(制御形局所分布)

よっても γ 線強度が大きく変化する。例えば、回転角度が $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の時、すなわち燃料集合体の1面が検出器に対して直角に面した時には γ 線強度は極小値を示す。

この原因は、これらの角度では検出器に面した7本の燃料ビン以外の燃料ビンはすべて他の燃料ビンで完全に遮蔽されるため、この時の γ 線の減衰が最も大きくなるからである。

2. γ 線強度に生じる局所分布の影響

第5図、第6図に示したように、 ^{137}Cs の局所分布、ビン内分布および燃料集合体の回転角によって測定される γ 線強度は大きく変化する。特に制御形局所分布では、回転角が $90^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で ^{137}Cs の存在量が多い燃料ビンを検出器が直接見込む場合と、回転角が $270^\circ \sim 360^\circ$ の範囲で ^{137}Cs の存在量が少ない燃料ビンを検出器が直接見込む場合とでは、同じ燃料集合体であっても測定される γ 線強度には大きな差が生じる。

そこで、燃料集合体の回転角を $\alpha, \alpha+90^\circ, \alpha+180^\circ, \alpha+270^\circ$ というようにして 90° ごとに γ 線強度を測定して4方向の γ 線強度の平均値を用いれば、制御形局所分布のように 90° ごとに γ 線強度が大きく異なる場合にも、 γ 線強度から燃料集合体中の ^{137}Cs の存在量を精度よく求めることができる。

第5図で示した γ 線計数率を用いて回転角 $\alpha, \alpha+90^\circ, \alpha+180^\circ, \alpha+270^\circ$ の γ 線計数率の和を縦軸に、横軸を回転角 α とした γ 線強度の角度分布を第7図(a)に示す。ただし、制御形および非制御形局所分布とも燃料集合体の対角線に関して ^{137}Cs の存在量が対称形の分布をしているので、4方向の γ 線強度の和は回転角度 45° を中心に対称形になるため、第7図の横軸は $0^\circ \sim 45^\circ$ の範囲とした。第7図中、実線は均一な局所分布での4方向 γ 線強度の和を示し、点線、1点鎖線はそれぞれ非制御形および制御形局所分布の場合の γ 線強度を示す。

第7図(b)には、(a)で示した非制御形および制御形局所分布の場合の γ 線強度と、均一な局所分布の場合の γ 線強度との差を、それぞれ均一な局所分布での γ 線強度に対する百分率で示す。この図で示すように、回転角度が 0° または 45° において4方向の γ 線強度を測定すれば、非制御形と制御形局所分布とでは γ 線強度で11.5%の差が生じる。回転角度 9° ではその差が6.5%と最小になる。

すなわち、回転角度 $9^\circ, 99^\circ, 189^\circ, 279^\circ$ における γ 線強度の和から、局所分布が均一なものと仮定して燃料集合体中の ^{137}Cs の存在量を求めた場合、実際の局

第7図 γ 線強度における局所分布の影響
(均一なビン内分布の場合)

所分布が非制御形であっても真の存在量に対して4.6%過大評価し、また実際の局所分布が制御形であれば真の存在量に対して2.0%過少評価するにとどまる。

3. γ 線強度に生じるビン内分布の影響

局所分布が均一な場合、燃料ビン中の ^{137}Cs の径方向分布の違いによって4方向の γ 線強度がどのようになるかを第8図に示す。

第8図(a)の縦軸は回転角度 $\alpha, \alpha+90^\circ, \alpha+180^\circ, \alpha+270^\circ$ の各4方向の γ 線強度の和を示し、横軸は回転角度 α を示す。図中、実線は均一なビン内分布($S/C=1$)の場合の γ 線強度を示し、点線および1点鎖線はそれぞれ $S/C=10$ および $=5$ の放物線状ビン内分布の場合の γ 線強度を示す。

第8図(b)には、(a)で示した $S/C=10$ および $=5$ の放物線状ビン内分布の場合の γ 線強度と、均一なビン内分布($S/C=1$)の場合の γ 線強度との差を均一なビン内分布での γ 線強度に対する百分率で示す。この図で明らかなように S/C の値が大きいほど、つまり ^{137}Cs が燃料ビン表面部に偏在するほど燃料集合体全体から

第8図 γ 線強度におけるピン内分布の影響(均一な局所分布の場合)

の γ 線強度は高くなるが、 $S/C=1$ の時 γ と $S/C=5$ の時の γ 線強度との差に比べ、 $S/C=5$ と $S/C=10$ の時の γ 線強度との差は約 $\frac{1}{4}$ になっており、 S/C の値が大きくなるにつれて γ 線強度の増加量は飽和の傾向がみられる。また、異なるピン内分布での γ 線強度の差は、第7図(b)に示した局所分布による γ 線強度の差に比べ角度依存性が強く、均一なピン内分布の場合と $S/C=10$ の放物線状ピン内分布の場合との γ 線強度の差は、回転角度3°で12%と最大になり、回転角度27°で0.7%と最小になる。

IV. 検 討

1. 局所分布の影響が最小となる

γ 線強度の測定条件

回転角度9°, 99°, 189°, 279°での γ 線強度の和は、局所分布が非制御形および制御形の場合でその差が6.5%と最小になった。この回転角度で γ 線強度の差が最小になる理由について述べる。

第9図に、回転角度9°, 99°, 189°, 279°において、他の燃料ピンに遮蔽されずに直接検出器から見込まれる燃料ピンの領域を斜線で表示する。この図からわかるように、燃料集合体の表面部の燃料ピン(最外殻燃料

第9図 検出器から直接見込まれる燃料ピン

ピン)24本と中心部の燃料ピン1本を除く中央部のすべての燃料ピンの一部分は、他の燃料ピンに遮蔽されることなしに検出器から直接見込むことができる。かつその体積は各燃料ピンについてほぼ等しくなる。したがって、最外殻燃料ピンと中心部の燃料ピンを除く中央部の22本燃料ピンからの γ 線強度が高くなり、かつ各燃料ピンごとの γ 線計数効率が均一化される。

第10図に、最外殻燃料ピン、その内側に位置する燃料ピン(第2殻燃料ピン)、さらにその内側に位置する燃料ピン(第3殻燃料ピン)、燃料集合体中心に位置する燃料ピン(最内殻燃料ピン)ごとの γ 線計数効率を示す。第10図に示すように、回転角度0°, 45°の時に比べ、9°の場合の各燃料ピンからの γ 線計数効率がより均一化していることがわかる。

第10図 燃料ピンごとの γ 線計数効率

したがって、各燃料ピン中の ^{137}Cs 量が異なっている、第7図に示したように $\alpha=9^\circ$ の場合は、他の回転角度に比較して集合体全体からの γ 線強度は各燃料ピン中の ^{137}Cs 量がすべて等しい時の γ 線強度により近い値となる。

2. ピン内分布の影響が最小となる

γ 線強度の測定条件

回転角度 $27^\circ, 117^\circ, 207^\circ, 297^\circ$ での γ 線強度の和は、ピン内分布が均一な場合と $S/C=10$ の放物線状ピン内分布の場合とではその差が 0.7% と最小になった。この回転角度での γ 線強度の差が最小になる理由について述べる。

第11図に示すように、燃料ピン中の幅 Δx の斜線で表示した部分に存在する ^{137}Cs より矢印方向に放出される 662 keV の γ 線強度は、燃料ピン中心からの距離 X に対して第12図に示すように変化する。第12図中で実線は燃料ピン中の ^{137}Cs 濃度が均一 ($S/C=1$) である時の γ 線強度を示し、点線は $S/C=10$ の放物線状ピン内分布の時の γ 線強度を示す。 $S/C=10$ の放物線状

第11図 燃料ピンの断面図

第12図 燃料ピン径方向の γ 線強度分布

ピン内分布では ^{137}Cs が燃料ピン表面に偏在し、また表面部では自己遮蔽効果が低いので、燃料ピン中心から離れた部分ほど γ 線強度が高くなる。逆に燃料ピン中心に近い部分では、均一なピン内部分の場合に比べて ^{137}Cs の量が少なくなるため、 γ 線強度は均一なピン内分布での γ 線強度より低くなる。

一方、燃料ピン全体からの γ 線強度と ^{137}Cs の分布との関係を示すと、第13図のようになる。第13図は ^{137}Cs のピン内分布を放物線状分布とし、 S/C の値を横軸に示し、縦軸を均一なピン内分布 ($S/C=1$) での燃料ピン全体の γ 線強度を基準に各ピン内分布での燃料ピン全体の γ 線強度の増加量を百分率で示した図である。第13図からわかるように、 $S/C=10$ のピン内分布では均一なピン内分布の場合に比べ、 γ 線強度は高5%増加するだけである。

第13図 放物線状 ^{137}Cs ピン内分布の燃料ピンからの γ 線強度

したがって、回転角度 27° において ^{137}Cs が $S/C=10$ の放物線状ピン内分布の燃料集合体全体からの γ 線強度を測定する際には、最外殻燃料ピンからの γ 線強度は、均一なピン内分布の場合の γ 線強度に比べて5%高くなる。逆に内部の燃料ピンでは、第12図に示したような均一なピン内分布に対して放物線状ピン内分布の方が、 γ 線強度が高くなる部分が他の燃料ピンで遮蔽されることになり、内部の燃料ピンからの γ 線強度は均一なピン内分布の場合よりも低くなる。この結果、回転角度 27° での燃料集合体全体の γ 線強度は、均一なピン内分布か放物線状ピン内分布かにあまり影響されない値となる。

3. 局所分布およびピン内分布の影響が

最小となる γ 線強度の測定条件

均一なピン内分布の燃料集合体に対しては、回転角

度 9° での γ 線強度を測定すれば、局所分布による影響が最も少ない γ 線強度が得られ、その強度から ^{137}Cs の存在量を求められる。また、ビン内分布が均一分布か放物線状分布であれば、S/C の値にかかわらず燃料集合体中の ^{137}Cs の存在量を最も精度よく求めるには、回転角度 27° で測定して得られる γ 線強度を測定すればよい。

そこで以下、局所分布およびビン内分布による影響が最小となる γ 線強度が測定でき、その強度から ^{137}Cs の存在量を精度よく求めるための回転角度について検討する。

第14図(a)は、 ^{137}Cs のビン内分布が S/C=10 の放物線状分布の時の γ 線強度を示す。第14図(a)の横軸、縦軸とも第7図(a)の横軸、縦軸と同じである。図中実線は均一な局所分布での γ 線強度を示し、点線および1点鎖線はそれぞれ非制御形および制御形局所分布での γ 線強度を示す。第14図(b)は、第7図(b)と同様に、均一な局所分布での γ 線強度と、非制御形および制御形局所分布での γ 線強度との差を、均一な局所分布での γ 線強度に対する百分率で示したものである。

第14図 γ 線強度における局所分布の影響
(放物線状ビン内分布の場合)

第14図(b)では、非制御形局所分布での γ 線強度と、制御形局所分布での γ 線強度との差は回転角 9° で最小となる。均一なビン内分布の場合の例を示す第7図(b)でも回転角 9° でやはり最小となる。

以上のことから、 ^{137}Cs のビン内分布があらかじめわかっているならば、制御形と非制御形局所分布の平均で求まる局所分布とみなすことにより回転角 $9^\circ, 99^\circ, 189^\circ, 279^\circ$ の γ 線強度から求める燃料集合体中の ^{137}Cs 存在量の真の値に対する誤差は3.2%以内になる。

次に、 ^{137}Cs のビン内分布が放物線状分布であり、S/C の値が1～10の範囲にあり、かつ局所分布も非制御形および制御形局所分布より均一な分布に近い種類のパターンをとり得る場合について検討する。

S/C の値が1, 5, 10の3種類のビン内分布と、均一、非制御形、制御形の3種類の局所分布の組合せからなる9通りの γ 線強度を計算し、各回転角度における γ 線強度の下限、上限および平均値を第15図(a)に図示する。図中点線で示す上限値は、S/C=10のビン内分布でかつ非制御形局所分布の場合の γ 線強度である。1点鎖線で示す下限値は、S/C=1のビン内分布でかつ制御形局所分布の場合の γ 線強度である。実線は γ 線強度の平均値を示し、S/C=5のビン内分布でかつ均一な局所分布の場合の γ 線強度に1%以内で一致する。上記9通りの γ 線強度の計算値を用いて、各 γ 線

第15図 γ 線強度の最確値とその標準偏差

強度と第15図(a)で実線で示した γ 線強度との差の二乗平均より γ 線強度の標準偏差を算出した。標準偏差を γ 線強度の平均値に対する百分率で表示した値を第15図(b)に示す。

第15図(b)に示すとおり、 γ 線強度の標準偏差は回転角度 24° で最小となり、その時の値は3.7%である。すなわち、回転角度 24° で測定した γ 線強度から、S/C=5のビン内分布でかつ均一な局所分布とみなして ^{137}Cs の存在量を求めれば、ビン内分布および局所分布による誤差を最小にでき、その時の誤差は3.7%である。

V. 結 論

以上挙げた数値計算の結果より、次のことがいえる。

7×7燃料集合体の径方向について、 90° ごとに異なる4方向の γ 線強度から燃料集合体中の ^{137}Cs の存在量を求める場合、

- (1) ^{137}Cs の局所分布がわかっており、 ^{137}Cs のビン内分布が均一あるいは放物線状であれば、回転角 27° での γ 線強度から ^{137}Cs の存在量を最も精度よく求めることができる。この時の誤差は0.7%以内である。
- (2) ^{137}Cs のビン内分布がわかっており、 ^{137}Cs の局所分布が第2図および第3図に示す分布に比べて均一分布に近ければ、回転角 9° で測定する γ 線強度から ^{137}Cs の存在量を最も精度よく求めることができる。この時の誤差は3.2%以内である。

- (3) ^{137}Cs のビン内分布が放物線状であり、 ^{137}Cs の表面部濃度と中心部濃度との比が1~10の範囲内で、かつ ^{137}Cs の局所分布が第2図および第3図に示す分布に比べて均一な分布に近いパターンであれば、回転角 24° で測定する γ 線強度から ^{137}Cs の存在量を最も精度よく求めることができる。この時の誤差は3.7%である。

本研究にあたり、日立製作所エネルギー研究所菊地宏氏、西政嗣氏よりご助言、ご討論いただいたことを心から感謝いたします。

— 参考文献 —

- (1) 五藤 博, 他: 原子力誌, 15[6], 361~385 (1973).
- (2) GRABER, U.A.: γ -spektrometrische Untersuchungen an abgebrannten Brennstoffkassetten des KKW Rheinsberg, *Kernenergie*, 16, Jahrgang. Heft 1, (1973).
- (3) 牧野格次, 他: BWR 発電所における出力及び燃焼度分布の測定, 東芝レビュー, 30[8], 595~598 (1975).
- (4) 高橋文信, 他: 本会昭50年会要旨集, B44, (1975).
- (5) NISHI, M., et al.: On a simple gamma spectroscopic method for burn-up measurement of a fuel assembly, To be published in *J. Nucl. Sci. Technol.*
- (6) FORSYTH, R.B., et al.: Burn up determination by high resolution gamma spectrometry, *AE-272*, (1967).
- (7) BATES, J.L.: Fission product distribution in irradiated UO_2 , *BNWL-58*, (1965).
- (8) BOASE, D.G., et al.: Gamma spectrometry of irradiated reactor fuels, *AECL-3952*, (1971).

正 誤 表 (Errata)

Vol. 20, No. 8 (1978)

p. 546 写真3のうち、粒度番号11.5~12.0と12.0~12.5の写真を入れ替える。

Vol. 20, No. 9 (1978)

		誤		正
p. 664	(4)式右辺第2項	$\frac{-fhk_x(\cdots)Cdy}{-fhk_y(\cdots)Cdx}$	を	$\frac{-hk_x(\cdots)Cdy}{-hk_y(\cdots)Cdx}$
"	(6)式左辺第3, 4項	$\frac{\partial}{\partial x}(fhC\cdots) + \frac{\partial}{\partial y}(fhC\cdots)$	を	$\frac{\partial}{\partial x}(hC\cdots) + \frac{\partial}{\partial y}(hC\cdots)$
p. 665	右欄19, 20行目	$\frac{-a(fhk\cdots)_{i-1/2, j}}{-a(fhk\cdots)_{i, j-1/2}}$	を	$\frac{-a(hk\cdots)_{i-1/2, j}}{-a(hk\cdots)_{i, j-1/2}}$