原子力施設からの γ 線スカイシャイン 線量の評価

(日本原子力研究所) 宮坂 駿一, 龍福 廣, 森内 茂,
(中部電力) 志村 重孝, (東京電力) 寺田 賢二, (東芝) 矢島 明,
(東洋エンジニアリング) 木郎 祐二, (センチュリ・リサーチ・センタ) 角谷 浩享

原子力発電施設の周辺線量について、設計目標値をきわめて低く設定しようという最近の動きの中で、大気中に放出された γ 線が電子との衝突により、再び地上へ散乱されて来る現象、いわゆる“スカイシャイン”に帰因する線量も注目されるようになった。本稿は、原研と原安協において現在進められているスカイシャイン線量評価法の理論的および実験的研究の内容を簡単に紹介し、この種の問題の現状をさぐるとともに、原子力発電施設におけるスカイシャイン線量の低減化のために、実用的な遮蔽設計法を確立する上での今後の方向を述べたものである。

I. ま え が き

原子力施設従事者および一般公衆に対する放射線被曝を“合理的に達成できるかぎり低く抑える”というALARA (as low as reasonably achievable)の考えに基づき、米国は10 CFR 50, App. Iにおいて「軽水発電炉からの放射性放出物についての目標設計線量」を規定した。わが国も原子力委員会においてこの点が検討され、1975年5月に軽水発電炉施設周辺の線量目標値に関する指針が出された。これによると、放射性希ガスと液体廃棄物などに起因する全身および甲状腺に対する被曝の目標設計線量をそれぞれ年間5および15 mremとし、施設の設計および運転に当ってこれらの線量を超えないように努めることとしている。

原子炉施設からの公衆被曝の要因としては、上記放射線のはかに、施設から直接大気中に放出される放射線(この場合主として γ 線)、すなわち直接放射線およびその直接線が大気中の酸素、チ素原子の軌道電子と衝突して散乱された放射線(散乱線、特に散乱媒質が空気の場合これをスカイシャイン放射線という)の寄与を考える必要がある。

このスカイシャイン放射線に対しては、当時まだ充分な情報がなかったことから、指針決定に際しては考慮されなかった。その後、これに対しても充分小さい寄与(目安として5 mR/yr)が要請されることになり、合理的にスカイシャイン放射線(以下スカイシャイン)による線量を評価し、現実的な遮蔽設計法を確立することが必要となった。

原子炉施設では、①原子炉冷却材中の放射性物質、特に ^{19}N 、②放射性廃棄物貯蔵施設に格納される放射性物質、③原子炉事故時に格納容器内に充満する放射

性物質などがスカイシャインに寄与する放射線源と考えられる。

γ 線スカイシャインに関しては、1950年代から1960年代にかけて、米国において積極的な研究が行われている。しかし、これらの研究の多くは、核爆発とその降下物による地表面汚染源からの被曝線量の評価を対象とし、実験は線源を空中あるいは地表に置き、検出器は地面に掘られた穴の中に設置するという条件のもとに行われている⁽¹⁾。

先にも述べたように、原子炉施設のスカイシャインに寄与する放射線源は、一般にかなりの拡がりをもつ自己遮蔽効果を有する線源であり、また線源の周囲にはなんらかの遮蔽効果をもつ壁や天井が付属している。したがって、すでに行われている多くの実験は、現在われわれが直面している問題に直接結びつくものはきわめて少ないのが現状である。

スカイシャイン計算法についても、多くの方法が発表されているが⁽²⁻⁴⁾、それらのほとんどが空気中の最初の散乱をクライン・仁科の微分散断面積を用いて求め、2回目以後の多重散乱については、無限媒質(空気または水)のビルドアップ係数を利用するという、いわゆる一回散乱法を用いている。複雑な幾何形状をもつ遮蔽体系に有力なモンテカルロ法も、電子計算機の容量と計算時間との関係から、これまでは主としてスカイシャイン実験結果の解析にのみ用いられ、実用

Evaluations of Skyshine Dose Due to Gamma Rays from Nuclear Power Plant, Shun-ichi MIYASAKA, Hiroshi RYUFUKU, Shigeru MORIUCHI, Shigetaka SHIMURA, Kenji TERADA, Akira YAJIMA, Yuji KIMURA, Hiroyuki KADOTANI.

(1978年 6月6日 受理)

的な計算はほとんど行われていない。

このような背景のもとに現在、われわれが対象としている原子力施設からの γ 線スカイシャイン線量の評価を、遮蔽設計上あるいは安全性評価上、線量目標値に対するものと同程度の現実的な線量評価を行うことを目的に、1976年春頃から日本原子力研究所および原子力安全研究協会において調査、研究活動が開始された。原研においては、1次元、2次元輸送計算コードを軸として計算法の開発が行われ、原安協においては、電気事業連合会(1976年度)および電力会社(中部電、東電、中国電、原電(1977, '78年度))からの調査業務委託のもとに「原子力施設散乱放射線挙動専門委員会」(委員長 宮坂駿一(原研))が設置され、調査、研究、特に米国における野外ベンチマーク実験の実施とその解析、米国におけるスカイシャイン問題に対する考え方等の調査が行われた。

本稿は、スカイシャイン線量評価法の現状と、これらの研究活動の概要をまとめたもので、今後の研究開発の指針になれば幸いである。

II. スカイシャイン問題に対する 米国の考え方

米国のスカイシャインに関する研究は、先にも述べたように、核爆発、フォールアウトなどを対象に7～8年前まではかなり積極的に行われていたが、現在はほとんど行われていない。現在稼働中の原子力発電所においては、過去に敷地周辺の小学校や公道上で ^{131}I γ 線によるスカイシャインの影響が心配されたため⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、現在はスカイシャイン線源となると考えられる機器に対して十分な厚さの遮蔽が施されており、周辺公衆に対してはまったく問題がないと考えている。むしろ発電所では、従事者被曝の観点から ^{131}I γ 線のスカイシャインを考えており、これに対して勧告案の検討が規制側で進められている。

1. 規制側の考え方

NRC(Nuclear Regulatory Commission)は10 CFR 20においてすべての線源からの寄与を対象に、敷地境界で全身に対して年間500 mrem 以下になるよう規制しており、その評価には直接線・散乱線を含めて評価することになっている。しかし、10 CFR 50では effluent のみを対象とし、その線量目標値5 mrem/yrにはスカイシャインを含めていない。現状では従事者被曝の観点から、BWRのタービン中の ^{131}I からの寄与を含めて評価することを審査の対象としている。JMI⁽¹¹⁾遮蔽に関する各種の基準を検討しているANS-6委

員会のサブグループANS-6.6が、主としてBWRタービンを対象にスカイシャイン問題を検討しており、1977年8月に「原子力施設からの直接ガンマ線および散乱ガンマ線の計算と測定に対する基準」(案)⁽¹²⁾が出された。今後これが米国における散乱放射線の評価のための標準となるであろうとNRCは述べている。

なお、NRCは現在の軽水炉の遮蔽設計は一般にオーバーデザインであることを認めているが、その最適化は当面考えていない。現在NRCの最大の関心は、従事者被曝の面から中性子ストリーミングと冷却材中の腐食生成物による被曝低減化対策である。

EPA(Environmental Protection Agency)はNRCと違い規制の権限はないが、環境保全の立場から目標の実現に努めており、放射線防護に関しては、40 CFR 190の公布等もあり、関係する諸基準の整備が当面の課題であるとしている。この40 CFR 190の目標は、単にNRCの規制対象となる原子炉施設だけに着目するのではなく、U燃料サイクル施設全体を通して考える必要があるという考えに立っている。

2. 原子力発電所

米国では原子力発電所の敷地周辺に対するスカイシャイン線量に関する評価・対策は現在ほとんど行われていない。というのは、BWRではタービンなどスカイシャインの原因となると考えられるすべての線源は、厚いコンクリート遮蔽を置くか建屋の中に格納しており、PWRでは格納容器のドーム部を3 ftから3.5 ftのコンクリートで覆っているためである。スカイシャイン γ 線の評価は、主として一回散乱法が用いられているが、計算精度を上げる必要がある場合にはモンテカルロ法(COHORT⁽¹³⁾, SKYSHINE⁽¹⁴⁾)などが用いられている。

3. 研究機関

NBS(National Bureau of Standards)では7～8年前までは、フォールアウトからのスカイシャイン線量評価のための研究が行われていたが、現在はまったく行われていない。

ORNL(Oak Ridge National Laboratory)では1962年に、Ichibanと称するプロジェクト⁽¹⁵⁾が発足し、広島、長崎に投下された原爆による被曝線量評価に関する研究が行われた。これはBRENとHENREと呼ばれる2つの実験からなり、その結果はわれわれの使用するスカイシャイン計算コードの評価のためのベンチマーク問題として利用できるであろう。前者はネバダ実験場に500 mの塔を建て、これにHPRR(Health Physics Research Reactor)あるいは ^{60}Co 線源を取り

付けて中性子、γ線のエネルギー・スペクトル、角度分布、線量率分布を測定したものである。後者は上記の塔にデュートロン加速器を取り付けて、14 MeV 中性子について角度エネルギー分布の測定を行なったものである。なお HP RR は現在 ORNL で生物照射、検出器開発、中性子検出器の国際比較などに用いられている。

ORNL-RSIC (Radiation Shielding Information Center) では、散乱γ線の計算についてはモンテカルロ法を別にすれば、2次元 S_N 輸送計算法が最も適していると考えている。しかし、この方法では ray-effect の問題と散乱の異方性をルジャンドル多項式で近似しているため、展開次数が低いときわめて異方性の強い体系では負の角度線束が現れるという問題がある。モンテカルロ法については多群定数を用いた MORSE⁽¹²⁾ が広く利用されているが、このコードはコンプトン散乱を正しく取り扱うことが困難であることがわかっている。ORNL では point-wise energy cross section を用いる OGRE⁽¹³⁾ を現在利用している。

Ⅲ. スカイシャイン線量評価法

1. 一回散乱近似法

γ線のスカイシャインによる線量の評価法で、最も簡単な方法は一回散乱近似法である。この方法は、線源から放出されたγ線が大気中のチッ素や酸素原子の軌道電子とのコンプトン散乱の結果、線量評価点方向へ散乱する強度をクライン・仁科の微分散乱断面積を用いて取り扱う方法である⁽¹⁴⁾。評価点が線源に近い場合はこの方法は十分な精度をもっているが、評価点が遠くなると多重散乱線の影響が出て来るのでその影響を考慮する必要がある。そこで、線源から散乱点に到達するまでの減衰と、散乱点から評価点に到達するまでの減衰、および多重散乱効果をビルドアップ係数の形で取り入れる方法が考えられた。代表的な計算方法としては、Geller-Epstein の方法⁽¹⁵⁾、SS-2 計算コード⁽¹⁶⁾および G-33 計算コード⁽¹⁷⁾ などがある。ここでは、G-33 の計算法を例に一回散乱法について簡単に説明する。このコードでは散乱γ線の光子束密度を次式により計算する。

$$d\phi_s(E') = \frac{S(E)}{4\pi r^2} \exp\left[-\sum_j \mu_j x_j\right] N(\rho) \frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{1}{\eta^2} \cdot B(E', \sum_k \mu_k' x_k') \exp\left[-\sum_k \mu_k' x_k'\right] dV. \quad (1)$$

ここで、

$d\phi_s(E')$: 線量評価点におけるエネルギー E' の光子束密度 (photons/cm²·sec)

$S(E)$: 光子エネルギー E の点線源の強さ

(photons/sec)

ρ : 線源に対する体積要素 dV の位置ベクトル (cm)

ρ : ρ の大きさ (cm)

x_j : ρ が横切る j 番目の物質の厚さ (cm)

μ_j : 光子エネルギー E に対する j 番目の物質の全吸収係数 (cm⁻¹)

$N(\rho)$: dV における電子密度 (electrons/cm³)

$d\sigma/d\Omega$: 微分散乱断面積 (cm²/sr·electron)

η : dV から線源評価点までの距離 (cm)

x_k' : dV から線量評価点に至る直線が横切る k 番目の物質の厚さ (cm)

μ_k' : 散乱光子エネルギー E' に対する k 番目の物質の吸収係数 (cm⁻¹)

$B(E', \sum_k \mu_k' x_k')$: 散乱後の光子に対するビルドアップ係数。

散乱線による線量率は、(1)式に線量変換係数を乗じて全散乱領域について積分して得られる。

第1図(a), (b)に、第Ⅳ章に述べるベンチマーク実験体系と同じ条件で計算した G-33 の結果、およびⅢ-2 節で述べる輸送計算コード DOT の結果を、高压電離箱による測定結果とともに示す。線源として上方向に開き角 150° にコリメートした ⁶⁰Co γ線源 5,000 Ci を用い、天井遮蔽がない場合(第1図(a))と、厚さ 43 cm の普通コンクリート(密度: 2.2 g/cm³)の天井遮蔽がある場合(第1図(b))について、線源から 700 m の点までの地上 1 m におけるスカイシャイン線量を求めている。上部遮蔽がない場合は、G-33 の結果は実測結果および輸送計算結果と大体一致しているが、上部遮蔽がある場合は、G-33 の結果はきわめて過小評価になっている。この過小評価の原因は、G-33 の方法では上部遮蔽体を透過するγ線の遮蔽体によるビルドアップ効果が正しく評価されないことによるものであると考えられる。この効果を補正する簡便な方法として、γ線の天井遮蔽体に対する線量ビルドアップ係数を G-33 の結果に乗ずる方法、または点減衰核法(例えば計算コード SPAN)⁽¹⁸⁾を用いて遮蔽体上方向の線量分布を計算し、その結果から裸の線源と等価な最大等価点線源を推定し、この線源からのスカイシャイン線量を G-33 で計算する方法などがある。最近では、次節で述べる輸送計算コード ANISN⁽¹⁹⁾ および DOT⁽²⁰⁾⁽²¹⁾ を用いる方法が開発され、第Ⅳ章で述べるようにベンチマーク実験によりその有用性が裏付けられた。

2. 輸送計算法

廃棄物保管庫または発電プラント機器からのスカイシャインを取り扱う場合には、線源周辺の遮蔽および

第 1 図 上方にコリメートした ^{60}Co (5,000 Ci)線源からのスカイシャイン線量の比較

建屋の天井遮蔽などを考慮する必要がある。前節で示したように、一回散乱法はこのような条件の場合計算精度が悪くなる。そこで、最近では輸送計算コードを利用する方法が開発されてきた。この方法では計算技術上、次の2段階に分けて計算する方法が有効である。

(1) 遮蔽体透過後の γ 線エネルギー分布

および角度線束分布の計算

第1段階として、線源から放出された γ 線が周辺遮蔽(自己遮蔽を含む)および建屋遮蔽(天井、側壁等)透過後の漏洩 γ 線エネルギー分布および角度線束分布の計算を行う。この場合、輸送計算法またはモンテカルロ法による計算が考えられるが、後者は現在のところ所要計算時間の観点からあまり実用的であるとはいえない。輸送計算コードとしては、遮蔽計算の分野で現在広く利用されている S_N コード ANISN(1次元)⁽¹⁹⁾およびDOT(2次元)⁽²⁰⁾⁽²¹⁾が利用される。廃棄物保管庫における漏洩 γ 線の計算にはANISNではほぼ満足できる結果が得られるが⁽²²⁾、複雑な形状をしているプラント機器やタービン建屋にはDOTを用いる必要があるであろう。2次元 S_N コードを用いる場合、ray-effectの問題があり、この効果を消すために γ 線の第1回目の衝突は解析的に解き、この衝突 γ 線の空間分布をあらためて線源分布として解く方法がある。これを

初期衝突線源法(first collision source method)という。

(2) スカイシャイン線量の計算

第2段階では、第1段階で求めた結果を新たに線源として、大気および地面を含む媒質中における γ 線輸送計算を行い、スカイシャイン線量を求める。この計算にはDOTまたはモンテカルロ・コードMORSE⁽²³⁾などが用いられるが、また簡易計算法として、例えばG-33などを利用することもできる。MORSEを使用する場合には統計誤差に注意する必要がある。

第1段階から第2段階へ移行する場合、第1段階で求めた漏洩 γ 線のエネルギー分布および角度線束分布を点線源または面線源に置き換えて第2段階に接続しなければならない。このとき線束密度の保存に留意する必要がある。G-33は点線源近似が適用可能であり、MORSEは点線源および面線源のいずれの近似も可能である。DOTも点線源および面線源の接続が可能であるが、ray-effectを除くためには、現在のところ点線源近似で初期衝突線源法を適用する必要がある。

第2図に、廃棄物保管庫からのスカイシャイン線量計算結果の1例を示す。保管庫は内径50m、高さ5mの円筒形状とし、天井遮蔽は厚さ30cmの普通コンクリート($\rho=2.2\text{ g/cm}^3$)で、側壁は充分厚いとしている。天井遮蔽を透過した γ 線による地上1mにおける

スカイシャイン線量を DOT $\rightarrow$ DOT および ANISN $\rightarrow$ MORSE 結合方式で求めている。第1段階の計算で、天井遮蔽からの漏洩 γ 線量は ANISN を用いても DOT を用いてもほとんど変わらないので、図に表われているスカイシャイン線量の違いは、第2段階の計算方法の違いによるものと考えられる。図から、地面を真空とした DOT の結果と地面を土とした MORSE の結果は良い一致を示した。また、DOT の計算はスカイシャイン野外実験の結果から、地面を真空とすると実験値と良い一致を示すが、地面を土とすると実験値より高い値を示すことがわかっている。

第2図 モデル化した廃棄物保管庫からのスカイシャイン線量の計算結果の比較

IV. ベンチマーク実験と計算

原安協の専門委員会は、1976年度の調査研究の結果、体積線源あるいは天井遮蔽のある場合の γ 線スカイシャイン線量を正しく評価するためには、野外実験を実施する必要があるという結論に達した。この結論を受けて中部電力、東京電力、中国電力および原電の4社は、1977年度に共同でセンチュリー・リサーチ・センタ(株)を通じて米国 Radiation Research Associates, Inc. (RRA)に野外実験を委託した。原安協の専門委員会は、この実験計画の詳細をRRAと協議するとともに、実験の立会い、実験結果の解析などを行なった⁽²³⁾。

1. 実験

スカイシャイン野外実験では、 ^{60}Co 点状線源を用いて線源から700mの地点までのスカイシャイン γ 線のエネルギー・スペクトルと線量率分布が、裸の線源と天井遮蔽をもつ線源との場合について測定された。

スカイシャイン実験には、かなり強い線源を裸で使用する、また実施に役に立つ実験ということを考えると、線源から敷地境界までの距離に相当する程度の広い実験場が必要であり、周辺に民家がないことが要求される。また、実験場は解析が容易に行える程度に可能な限り平坦であることが望ましい。このような観点から適地の選択が行われ、米国のカンサス州立大学の野外遮蔽実験場が選ばれた。この実験場は、第3図に示すように、多少の起伏はあるが約0.71 km^2 の広さをもつ高台にある。線源から測定点までの距離は最大700mまで取ることが可能で、線源と測定点(100m間隔で700mまで)の高度差は+1.3 $\sim$ +3.5mの範囲で、その影響を無視できると考えられる。

X(1 $\sim$ 7)は測定点を示し、線源サイロの位置が線源である。(等高線中の数字の単位はftである)

第3図 カンサス州立大学所有の遮蔽実験場の平面図

線源は公称4,000, 230および10Ciの3種の強度のものを用いた。線源形状は円柱状で、最大の線源で直径1.4 $\times$ 2.9cm(ϕ)で、解析上は点線源とみなすことができる。これらの線源は、別途実験場において3通りの方法で較正され、その結果を用いてスカイシャイン測定結果の規格化が行われた。

線源は、第4図に示すように、線源キャスク内に収容され、キャスクは高さ227cm、厚さ90cmの普通コンクリート製のサイロ状の遮蔽体内に納められている。コンクリート遮蔽上面には、 γ 線を150°の方向に放出するように楔状のコンクリートが置かれている。こ

のコンクリートは、天井遮蔽(厚さ21と43 cm)を置く場合には取り除かれた。

大型の線源キャスクには4,000 Ci の ^{60}Co 、小型の線源キャスクには230 Ci と10 Ci の ^{60}Co が収納してある。レールに乗った台車を移動することにより、任意の線源を線源サイロの中心に露出できる。模型のコンクリートにより天井遮蔽のない場合、 γ 線は150°に絞られた。天井遮蔽は、図の点線で示した場所にコンクリート板を置くことにより模擬された。(天井遮蔽厚: $H=21$ cm, 43 cm の場合につき実験)

第4図 線源(^{60}Co)と線源の遮蔽(線源サイロ)

γ 線エネルギー・スペクトルは、4 in $\times$ 5 in (ϕ) の NaI(Tl) シンチレータを用いて行われた。シンチレータには、水平方向に対して開き角約70°のコリメータ(コンクリートの内側に鉛を置いたもの)が取り付けられた。波高分布のアンホールディングは ORNL で開発された SEGOコード⁽²⁴⁾を用いて行われた。

スカイシャイン線量率率は、ロイターストックス社製の高圧電離箱を用いて行われた。電離箱は直径25.4 cm のステンレス鋼製の球殻内に25 atm の Ar ガスを充填したもので、1~1,000 $\mu\text{R/hr}$ の範囲で使用可能である。スカイシャイン測定中は、各測定日の気温、気圧等の気象条件の記録がとられ、測定結果に補正が加えられた。

2. 計算

計算は原研および RRA においてそれぞれ独立に行われた。両者とも第Ⅲ-2節で述べた2次元 S_N 輸送コードを利用する方法が採用された*。

この実験解析では、①線源の取扱い、②天井遮蔽のある場合の計算において天井遮蔽外表面までの輸送計算と、そこから空気中での輸送計算との整合性の問題および③スカイシャイン計算における地面の効果の問題などが検討された。

①については、解析すべき体系の大きさに比して線源領域が小さく、かつ局在しているために生じる問題で、これが2次元 S_N 計算における ray-effect の原因と

なる⁽²⁵⁾。この効果を消すために第Ⅲ-2節でもふれた初期衝突線源法が採用された。

②の問題は、第1段階で求められたコンクリート天井遮蔽外表面の角度依存線束密度を、第2段階のスカイシャイン計算に接続する場合の線源強度の規格化の問題と線源領域のとり方にある。特に後者は、天井半径(約2.1 m)に比べてスカイシャイン空間が半径700 m ときわめて大きいことで、ここでも ray-effect の問題が生じるからである。さらにこの体系の計算で考えねばならない問題は、コンクリートと空気の密度が、2,000 倍近くも異なるため、それぞれの領域でとらねばならない最適空間メッシュ幅が極端に違うことである。

③の問題は、前述の問題と同様、空気と地面との密度の違いによる計算上の困難である。通常は地面の効果は無視されるが、土を含めた計算も可能ではある。現在のところその結果に対する信頼性は低いようである。

3. 実験結果と計算結果との比較

(1) 線量率分布

第5図に、700 m までのスカイシャイン線量率分布の測定結果と解析計算結果とを示す。

天井遮蔽のない場合は、RRAの計算結果(39群, P_8 , S_{10})を示した⁽²⁶⁾。この場合は、地面として厚さ20 cm の土層が考慮され、地面による散乱分として10%程度線量が高くなっているが、メッシュ分けが粗いために正しく評価されているかどうかかわからない。地面による散乱分を差し引くと、遠方における計算と実験との結果はよく一致する。ただし、この場合線源コンテナ上部の鉄板およびサイロ内壁での散乱は、もともと考慮されていない。

天井遮蔽がある場合の計算結果は、すべての距離で実験結果を20%程度上回っている。第1図(b)に示した DOT による計算結果が、第5図に示す43 cm 天井遮蔽の場合の計算結果に比べて実験との一致がよくなっているが、これは第1図(b)では線源を上方向150°にコリメートしているのに対し、第5図では線源を4 π 放出とし、線源コンテナ上部の鉄板による散乱を考慮しているため、線量がそれだけ高くなっていることによるものである。この場合、地面による散乱はもともと考慮されていない。

以上のように、線源コンテナおよび地面による散乱を無視すると、天井遮蔽がない場合は200 m 以上の遠方で、天井遮蔽がある場合はすべての距離で、実験と

* RRA の計算は2次元39群 P_8 , S_{10} および10群 P_8 , S_{12} 、原研の計算は2次元11群 P_8 , $S_6 \sim S_{12}$ で行われた。

第5図 スカイシャイン線量率の計算と実験との比較

(a) 21 cm 厚のコンクリート遮蔽の場合

計算値は39群DOT計算(RRA)による。
 第6図 天井遮蔽のない場合の700 m 地点での γ 線スペクトルの計算と実験との比較

(b) 43 cm 厚のコンクリート遮蔽の場合

第7図 天井遮蔽のある場合の500 m地点での γ 線スペクトルの計算と実験との比較

計算の一致はきわめてよい。したがって、計算値は実験値に比べて上記の散乱分だけ高く出ていることになる。これらの散乱分の全線量への寄与は高々30%と考えられるが、現在のところ2次元コードDOTの計算でこれを正確に把握できていない。

(2) エネルギー・スペクトル

第6図に天井遮蔽のない場合、第7図(a), (b)に天井遮蔽のある場合(21 cmと43 cm厚のコンクリート遮蔽)の、エネルギー・スペクトルの測定値と計算値との比較を示す。第6図は計算値を測定系の分解能で平坦化し、第7図は測定値を10群に縮約して示してある。いずれの場合も計算値と測定値とはよく一致している。

以上から、第Ⅲ-2節で述べた計算手法は充分注意深

く使用すれば、遮蔽体を持つ点線源に対しては、実際上問題のない精度で γ 線スカイシャイン線量の評価ができることがわかった。しかしこの場合でも、スカイシャイン線量に与える地面の効果については充分解明されてはおらず、今後に残された問題である。

V. まとめと今後の課題

以上のように、裸の点状等方線源からのスカイシャイン γ 線量については、一回散乱法に基づく評価法はかなり良い精度で実測値と一致することがわかった。しかし実施施設の場合、スカイシャインの原因となる線源は一般にある大きさを持っており、線源内での自己遮蔽効果を考える必要がある。さらに線源の周囲には遮蔽体があり、そこでの散乱効果を考えねばならない。このような場合、在来の計算手法では十分な精度でスカイシャイン線量を評価できないことがわかった。これは、体積線源の表面あるいは遮蔽体外表面から放出される γ 線エネルギー・スペクトルと角度線束分布が、裸の線源の場合とは異なりきわめて複雑になるからである。

このような線源、遮蔽体条件に適用可能な計算手法を開発し、その計算精度を確認するための研究が、原研および原安協(原子力施設散乱放射線挙動専門委員会)において実施され、それに基づく計算結果は、米国において実施された野外ベンチマーク実験と全般的におおむね10~20%の誤差で一致した。

しかし、ここで実施された野外実験も種々の制約から実施施設とはかなり条件が異なっており、原子炉施設における γ 線スカイシャイン線量を評価し、それを低減させるための実用的な遮蔽設計法を確立するためには、この基礎データをもとに、より実施施設に近い線源・遮蔽形状に対して適用可能な計算手法を確立する必要がある。さらに、計算精度に直接的な影響をもつ線源条件(線源強度、エネルギー分布、幾何形状と線源分布、線源物質組成等)の決定方法に関する標準化を行う必要がある。線源条件は施設依存度が強く、場合によっては実施施設における運転経験に基づくデータの蓄積と実測が要求されることになる。

米国のスカイシャイン問題に対する考え方は、例えば作業従事者の放射線被曝の低減化対策の一環として、ANSにおいてBWRタービン建屋からの ^{16}N γ 線のスカイシャイン線量評価のための基準案が検討さ

れているが、一般的に問題意識は低いといえる。原子力発電所では、スカイシャインが心配になる施設は、厚いコンクリート遮蔽体の中に格納するというやり方が一般に行われている。日本のように地震の多い国で、米国流の考え方がどこまで適用できるかは疑問であり、わが国はわが国なりの考え方と方法でこの問題に対処して行く必要があると考える。また、ANSがBWRタービンの ^{16}N を対象としてスカイシャイン計算法と測定法の技術的基準の作成に努力しているが、わが国も安全審査の技術的根拠としてこの種の基準を独自に作成していく必要があると考える。

最後に、本稿を作成するに当たって、原安協「原子力施設散乱放射線挙動専門委員会」の研究成果を引用させて頂いたことに対し委員各位に深く感謝する。

—参考文献—

- (1) JAEGER, R.G. (Ed.): "Engineering Compendium on Radiation Shielding, Vol. I", Shielding Fundamentals and Methods, Chap. 4.5, (1968), Springer-Verlag.
- (2) STEPHENSON, R.: "Introduction to Nuclear Engineering", p.198 (1954), McGraw-Hill Book.
- (3) NAKADA, M., et al.: 船研技報, 11, 561 (1959).
- (4) KITAZUME, M.: J. Nucl. Sci. Technol., 5(3), 98 (1968).
- (5) LOWDER, W.M., et al.: HASL-271, (1973).
- (6) LOWDER, W.M., et al.: HASL-305, (1976).
- (7) WELLS, M.B., et al.: EPRI NP-243, (1977).
- (8) ANS-6.6: ANSI N346, (1977).
- (9) SOFFER, L., CLEMONS, L. Jr.: NASA TN D-6170, (1971).
- (10) PRICE, J.H., et al.: CCC-289 (ORNL-RSIC Computer Code Collection).
- (11) AUXIER, J.A.: TID-27080, (Unclassified), (1977).
- (12) STRAKER, E.A.: ORNL-4585, (1970).
- (13) PENNY, S.K., et al.: ORNL-3805, (1966).
- (14) TRUBEY, D.K.: Nucl. Sci. Eng., 10, 102 (1961).
- (15) GELLER, L., EPSTEIN, R.: A/Conf., 15, P/435, (1958).
- (16) SS-2コード: 原船協-33「原子力施設の遮蔽計算(コード化)に関する試験研究」, p. 68 (1962).
- (17) COUCHMAN, M.L., ANNO, G.H.: NUS-TM-NA-42.
- (18) 宮坂駿一, 他: JAERI-memo 2472, (公開).
- (19) ENGLE, W.W., Jr.: ORNL-TM 4015, (1972).
- (20) MYNATT, F.R.: ORNL-TM-4280, (1973).
- (21) RSIC: CCC-276.
- (22) 龍福 廣, 他: 本会昭52年会要旨集(II), J61, (1977).
- (23) 原安協: スカイシャイン線量評価法確立のための調査研究報告書, (1978).
- (24) YOUNG, M.H., BURRUS, W.R.: Nucl. Instrum. Methods, 62, 82 (1968).
- (25) LATHROP, K.D., et al.: LA-4600, (1972).
- (26) CLIFFORD, C.E., et al.: RRA-T7802-1, (1978).