



スカイシャイン線量率評価 コードシステムの開発

山本 偉政 三島 毅 中江 延男*

東海事業所核燃料技術開発部

*同技術開発推進部

資料番号：71-1

Development of Code System for Analysis of Skyshine
Dose Rate

Hidemasa Yamamoto Tsuyoshi Mishima

Nobuo Nakae*

(Nuclear Fuel Technology Development Division,
Tokai Works.

*Technology Development Coordination Division,
ditto.)

中性子線およびガンマ線のスカイシャイン線量率を容易にかつ精度良く評価するために、複数の解析コード、ライブラリを組み合わせたコードシステム (SKYLARK システム) を開発した。このシステムは、問題領域 (評価対象) ごとに分割された4種類のモジュールとドライバルーチンによって構成されており、入力データ簡略化のために代表的物質の原子数密度を内蔵し、自動メッシュ分割機能等も組み込まれている。さらに、本システムの精度を確認するために、国内外で報告されているスカイシャインベンチマーク問題 (3題) に基づく検証も実施した。

本稿では、今回開発したシステムの紹介および報告値に基づく検証の結果について報告する。

1. まえがき

既存のスカイシャイン線量率を評価するコードとしては、QAD、G-33、BCG、SKYSHINE等のコードがある。しかし、これらのコードは主としてガンマ線の評価を対象に開発された計算コードであるため、原子力発電所等とは異なり、プルトニウム燃料施設のように中性子線についても評価が必要である場合には、適用することができなかった。そのため、これまでは中性子線およびガンマ線のスカイシャイン線量率を評価するためには、複数の計算コード (ANISN、DOT3.5等) を組み合わせて、体系のモデル化、線源の評価、断面積の作成、エネルギー群の縮約、天井外壁面から漏洩するFlux (線束) の計算、そしてスカイシャイン線量率評価を行っていた (図1参照)。この解析を行うためには、複数の計算コードに関する知識はもちろん、それらの接続に関する知識、さらには計算機の取扱いまで含めた非常

に広範囲でかつ専門的な知識が必要であるため、スカイシャイン線量率評価に精通した専門家しか解析を行うことができなかった。

以上のようなことから、中性子線・ガンマ線のスカイシャイン線量率評価を特に専門家でなくても、容易にかつ精度良く行うことのできるコードシステム (SKYLARK) を図1の評価フローに基づき開発した。なお、SKYLARKシステムはスカイシャイン線量率評価計算のみでなく、その前処理であるエネルギー群縮約のための断面積の感度解析および通常の一次元、二次元の遮蔽計算も行うことができる機能を有している。

SKYLARKシステムは、1979年より専門家が行っていた評価手順、入力データ作成方法、各計算コード間の連続方法等の調査を開始し、それに基づいたコードの体系化・連換化を行い、その後実験データ等に基づく精度評価および改良を行った。

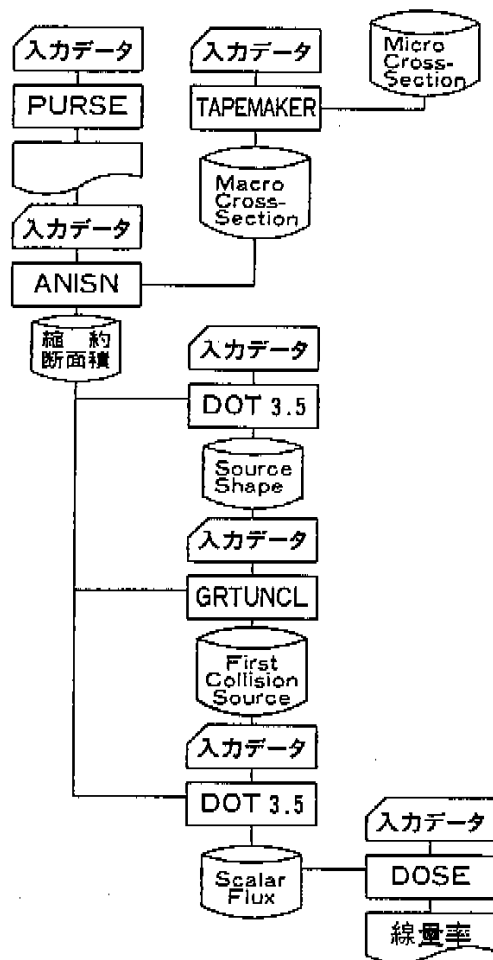


図1 これまでの解析フロー

2. コードシステムの概要

SKYLARK システムは、図2に示すようにスカイシャイン線量率評価手順調査に基づき、問題領域(評価対象)ごとに独立した4つの処理コントロールモジュール、一連の処理を人が介することなく制御するドライバルーチン、3種類の断面積ライブラリおよび複数の計算コード群から構成されている。4つのコントロールモジュールの評価対象は、以下のとおりである。

- (1) SKY 1 モジュール：エネルギー群縮約のための断面積の Flux に対する感度解析
 - (2) SKY 2 モジュール：一連のスカイシャイン線量率の計算
 - (3) SKY 3 モジュール：一次元の遮蔽解析
 - (4) SKY 4 モジュール：二次元の遮蔽解析
- 各コントロールモジュールの詳細については、後述

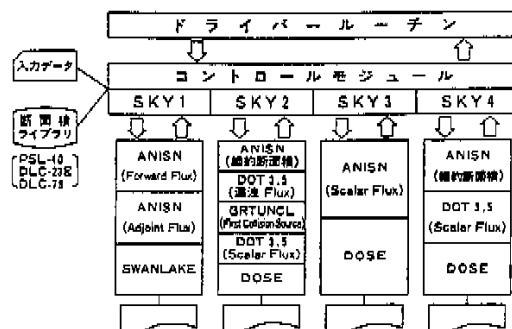


図2 SKYLARKシステム構成図

する。

SKYLARK システムは入力データ作成を容易にするために、個々の計算コードの入力データを別々に作成するのではなく、全体で1つの入力データにまとめた。さらに、下記のような機能をシステム内に組み込むことによって、入力データの簡略化も図った。

(1) 代表的物質の物性データの組み込み

解析にたびたび使用される物質(空気、ステンレス、コンクリート等)の原子個数密度を組み込んでおり、「AIR」、「SUS 304」の形式で入力することができる。

(2) 任意の S_n 角度分点定数の作成 (二次元のみ)

利用者の S_n 角度分点次数を入力することによって、内蔵されている DOQ-DP コードにより、 S_n 角度分点次数(方向余弦、重み)を算出し、DOT 3.5 コードに利用することができる。なお、ANISN コードについては $S_2, S_4, S_6, S_8, S_{12}, S_{16}$ の S_n 角度分点定数をシステム内部に組み込んでいる。

(3) 自動メッシュ分割機能

計算モデルの物質(領域)の厚さを入力することによって、メッシュ分割を対数でシステムが行う機能を有している。しかし、現状では単純に領域の厚さを対数で分割するだけで、物質の密度を考慮したメッシュ分割を行うことはできない。

(4) 任意の断面積ライブラリの選択

本システムには、PSL-40、DLC-23E、DLC-75の3種類の断面積ライブラリが組み込まれており、解析対象(新燃料、使用済燃料等)に応じて使い分けをすることができる。また、各ライブラリに格納されている核種のID番号も統一されている。このため、どのライブラリを利用する場合も核種のID番号を変更する必要はない。

(5) 任意の線量率変換係数の選択

PSL-40、DLC-23E ライブラリを使用する場合

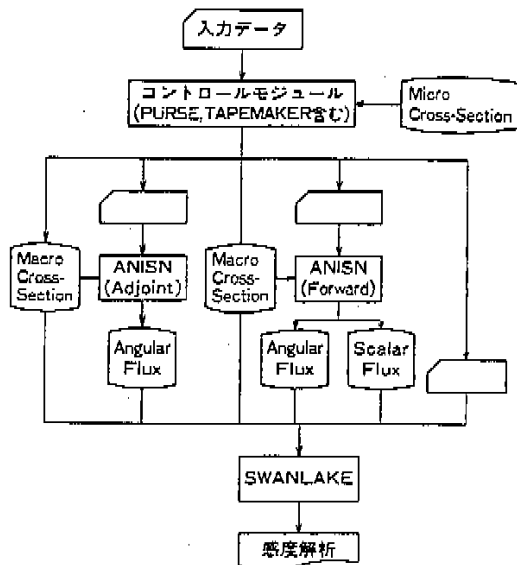


図3 SKY1モジュールのシステムフロー

は、通常の変換係数と科学技術庁の告示にある変換係数のどちらかを選択することができる。DLC-75ライブラリの場合は、通常の変換係数のみである。また、エネルギー群を縮約する場合の変換係数は、内部で算出する。

2.1 SKY1モジュール

このモジュールは、解析条件（体系、物質等）を考慮し、使用する断面積ライブラリの適切な縮約エネルギーレンジを決定するために断面積の感度解析を行うモジュールであり、PURSE, TAPEMAKER, ANISN, SWANLAKE コードから構成される。処理手順としては、図3にシステムフローを示すように、まず ANISN コードを用い、随伴角度束 (Adjoint Angular Flux) および順方向角度束 (Forward Angular Flux)、順方向スカラー束 (Forward Scalar Flux) を算出する。次に、SWANLAKE コードにそれらを入力として与えて感度解析を実施し、その結果を出力する。

2.2 SKY2モジュール

このモジュールは、SKY1モジュールの結果（断面積の感度解析）を基に、スカイシャイン線量率の計算を行うモジュールであり、PURSE, TAPEMAKER, ANISN, DOT 3.5, GRTUNCL, DOSE コードから構成される。計算手法としては、二次元 Sn 輸送計算コードで発生する「Ray-Effect (射線効

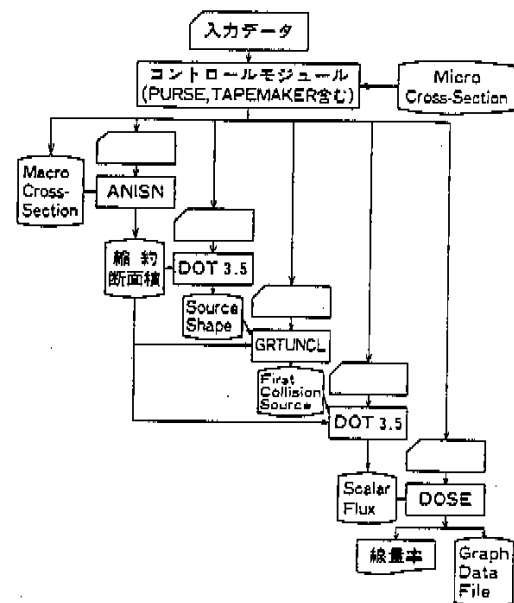


図4 SKY2モジュールのシステムフロー

果)」現象を解消するために、「First Collision Source (初期衝突線源) 法」を用いる。

処理手順としては、図4にシステムフローを示すように、まず ANISN コードを用いて縮約断面積を作成し、この縮約断面積を用いて DOT3.5コードで天井壁面での Angular Flux を算出する。次に、この Angular Flux を用いて、GRTUNCL コードで First Collision Source を計算し、これを線源として、DOT3.5コードで周辺監視区域での Scalar

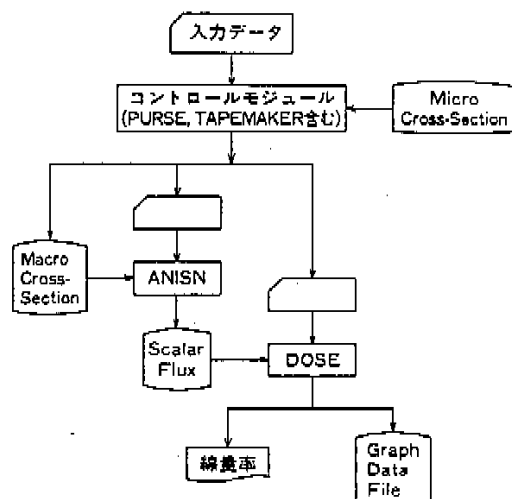


図5 SKY3モジュールのシステムフロー

Flux を計算する。その後、DOSE コードで Scalar Flux を線量率に変換する。

2.3 SKY 3 モジュール

このモジュールは、ANISN コードによる通常の一次元遮蔽計算を行うモジュールであり、PURSE、TAPEMAKER、ANISN、DOSE コードより構成される。処理手順は、図 5 にシステムフローを示すように ANISN コードにより Scalar Flux を計算し、DOSE コードによりそれを線量率に変換する。

2.4 SKY 4 モジュール

このモジュールは、DOT3.5 コードによる通常の二次元遮蔽計算を行うモジュールであり、PURSE、TAPEMAKER、ANISN、DOT3.5、DOSE コードより構成される。処理手順は、図 6 にシステムフローを示すように、まず ANISN コードを用いて縮約断面積を作成し、この縮約断面積を用いて、DOT 3.5 コードにより Scalar Flux を計算し、それを DOSE コードにより、線量率に変換する。

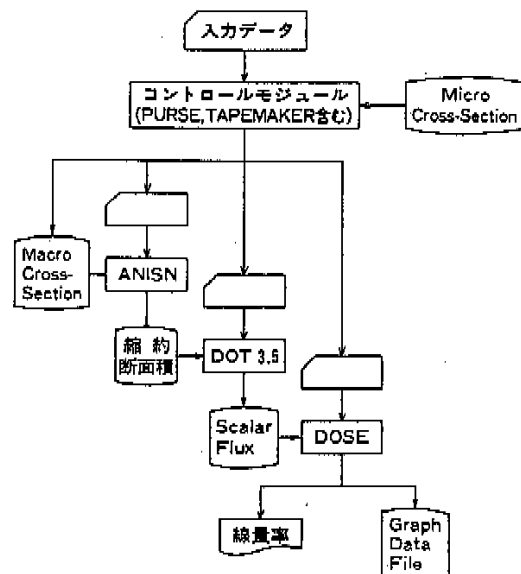


図 6 SKY4 モジュールのシステムフロー

3. 精度評価

SKYLARK システムを用いて、実際の施設を評価するためには、その精度を評価しておく必要がある。個々の計算コード、ライブラリおよび計算手法は従来から使用されてきており、信頼性の面から特に問題はない。そこで、コードシステム全体として見た場合どうなるかということについて精度を評価

することにした。本システムの精度を確認するために、国内外において既に報告されているスカイシェインベンチマーク問題（中性子線問題：1題、ガンマ線問題：2題）に基づく評価を行った。以下に3題のベンチマーク問題とその評価方法・結果について述べる。

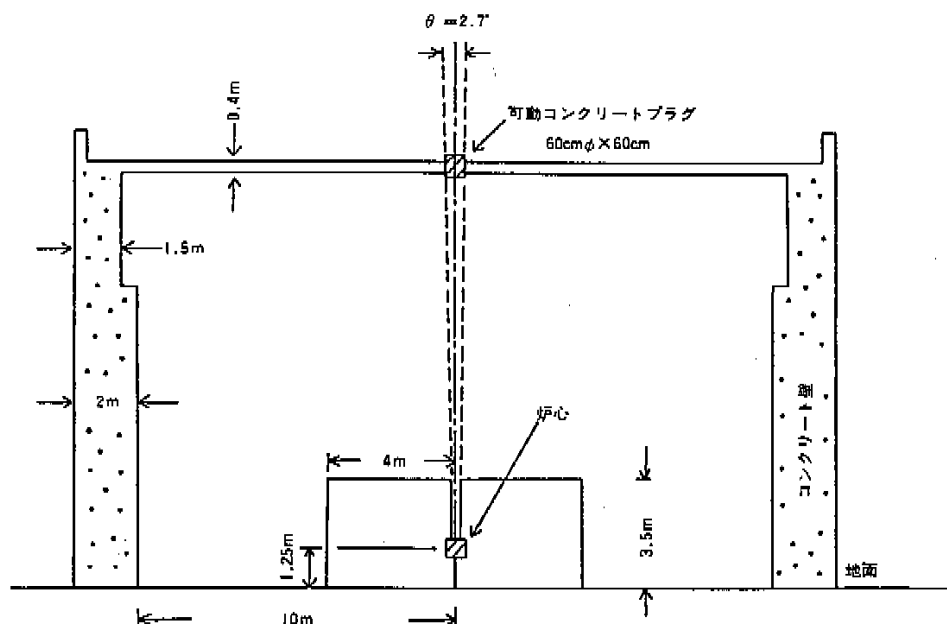


図 7 高速中性子源炉「弥生」の実験体系

3.1 高速中性子源炉「弥生」からのスカイシャイン線量率評価

3.1.1 実験の概要

スカイシャインの実験は、東京大学原子力工学研究施設高速中性子源炉「弥生」(93%金属燃料約28 kg: 炉出力2 kW 空冷)において実施された。実験は建屋の炉室天井(高さ12.5m)の実験孔(直径60 cm)より、垂直方向に漏洩した高速中性子が大気中で散乱され、この中性子スカイシャイン線量率を地上1.5mで測定したものである。

ここでの線源は、実験孔φ60cmあたり、中性子源が 1.07×10^8 Neutron/sec (10KeV 以上) の中性子ビームであり、実験の概略を図7に示す。

3.1.2 評価の概要

本評価では、3.1.1で述べた実験のデータを基に線源を天井の実験孔の上部に置き、その強度を単位体積あたりの強度(1.07×10^8 Neutron/sec $\cdot$ cm 3)とし、PSL-40ライブラリの群構造に沿って、10keV 以上の中性子群の1群~14群に均等に振り分けることとした。

まず、PSL-40ライブラリは中性子22群、ガンマ線18群の合計40群の多数群であり、エネルギー群数の縮約を行うため、感度解析をSKY 1 モジュールを用いて行った。その結果は、図8に示すように、中性子の4群目にピークが見られ、他はそれに比べて小さい。したがって、縮約群数を中性子6群、ガンマ線1群(中性子の問題であるため)とした。また、エネルギー群縮約の影響をみるため、オリジナルの中性子22群も用いた。なお、計算条件として、Plルジャンドル展開次数およびSn 角度分点次数は、それぞれ P_3 、 P_{12} を用いた。

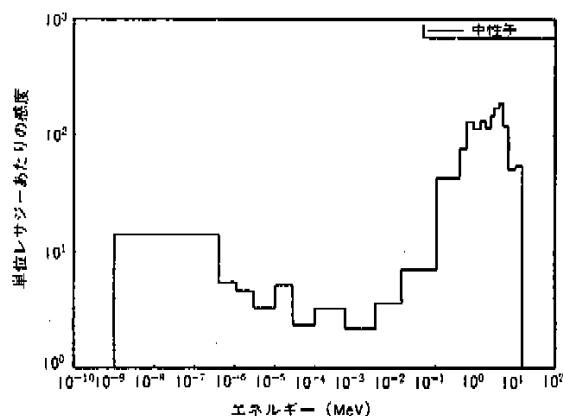


図8 感度解析結果(弥生)

次に、縮約の妥当性を確認するために、22群の断面積と6群の縮約断面積を用いて、天井コンクリート外表面における中性子線量率をANISNコードにより算出した。その結果、22群は427.17rem/hr、6群は、425.01rem/hrとなり、縮約群の方が多少低めの評価となった。

続いて、SKY 2 モジュールを用いたスカイシャイン線量率の計算を行った。その時の計算条件は、以下のとおりである。

計算体系 : 1/2R-Z
Plルジャンドル展開次数: P_3
Sn 角度分点数 : 166
計算モデル図 (DOT3.5(1)): 図9
計算モデル図 (DOT3.5(2)): 図10

3.1.3 評価結果および考察

実験値および本評価の多数群(22群)、縮約群(6群)の計算結果を表1、図11に示す。

両者を比較すると、多数群、縮約群ともに線源に近い位置では、実験値と良い一致がみられる。しかし、線源からの距離が遠くなるにしたがい、過大評価の傾向にある。これは、線源である中性子ビームの放出角度を、実験では天井の引出し孔より垂直方向に $\theta=2.7^\circ$ で大気中に放出しているが、評価では天井の引出し孔上部に線源領域(空気1 cm 3)を設け、引出し孔表面より180°上方に放出していると仮

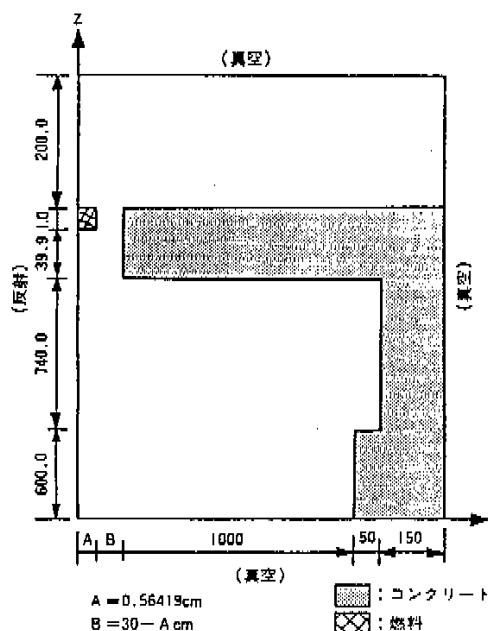


図9 二次元計算体系(1) [単位: cm]

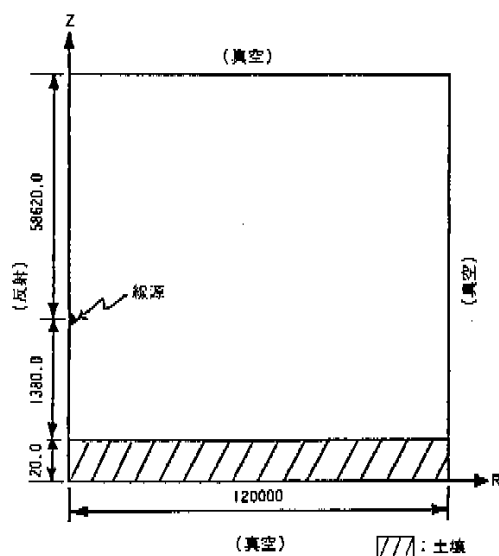


図10 二次元計算体系(2) [単位: cm]

定したため、地面との散乱を過大評価していると考えられる。

多数群と縮約群の計算結果の比較では、縮約後の検証結果と同様に縮約群の結果の方が多少低めの評価である。しかし、全体的にその差は数パーセント

表1 高速中性子源炉「弥生」からの中性子スカイシャイン線量率

(評価位置: 地上約1.5m)

距離 (m) ()内は実験値	SKYLARK(6群) (mrem/hr)	SKYLARK(22群) (mrem/hr)	実験値* (mrem/hr)
31.9(31.2)	1.47616 E-2	1.54845 E-2	1.574 E-2
104.1(107.9)	3.40767 E-3	3.64103 E-3	3.245 E-3
198.5(195.9)	9.48879 E-4	1.02165 E-3	7.887 E-4
327.9(292.5)	2.55885 E-4	2.77448 E-4	2.029 E-4
401.5(443.0)	1.38625 E-4	1.50426 E-4	5.227 E-5
507.2	5.83772 E-5	6.36107 E-5	
604.5(644.6)	2.36769 E-5	2.58478 E-5	9.674 E-6
723.0	9.41639 E-6	1.02972 E-5	
801.2	5.36222 E-6	5.87685 E-6	
898.8	2.93946 E-6	3.21906 E-6	
1027.7(999.6)	1.31838 E-6	1.43247 E-6	6.454 E-7

*グラフからの読取値

であり、かつ実験値と比較しても十分安全側の評価である。

3.2 Radiation Research Associates(RRA)野外実験におけるスカイシャイン線量率評価

3.2.1 実験の概要

この実験は、米国のRadiation Research Associates(RRA)が米国カンザス州立大学の野外遮蔽実験場にて実施した。線源は、 ^{60}Co 点状線源で、強度は公称4,000Ci、230Ciおよび10Ciの3種類であり、

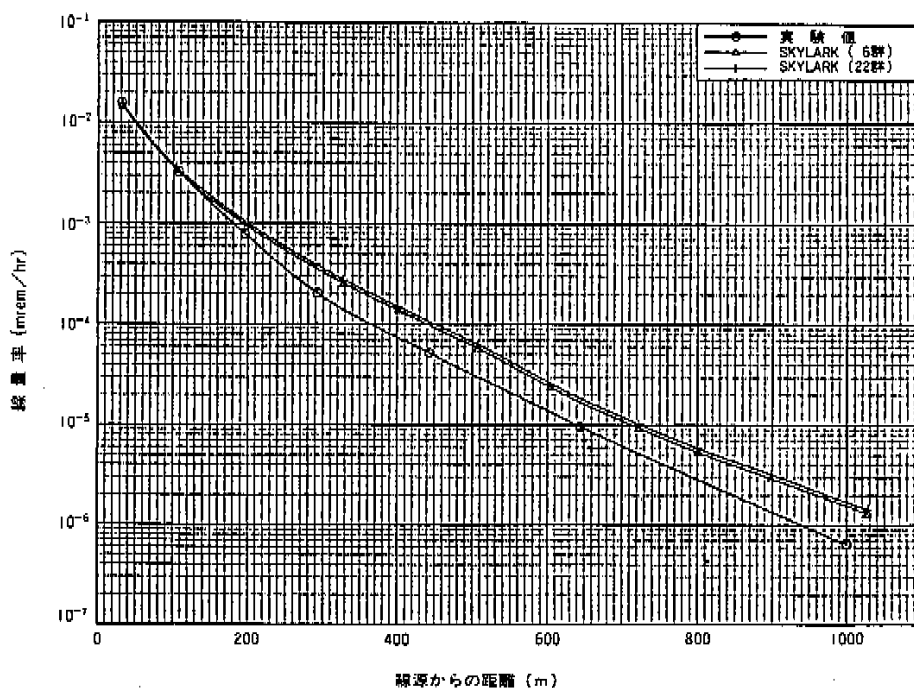
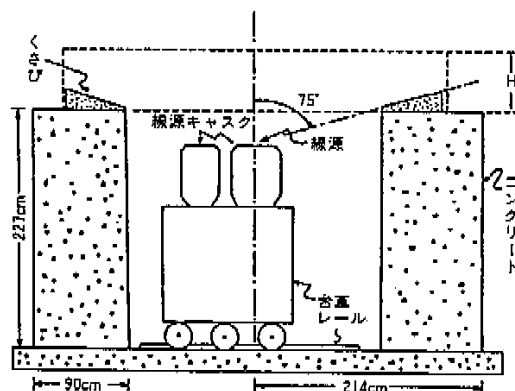


図11 高速中性子源炉「弥生」からの中性子スカイシャイン線量率



大型の線源カスクには4,000Ciの ^{60}Co 、小型の線源カスクには230Ciと10Ciの ^{60}Co が収納されている。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。模様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=21cm、43cmの場合につき変換）

図12 RRA 野外スカイシャイン実験体系

それぞれの線源を用いて実験が行われた。また、線源は、図12に示すように専用カスク上部に置かれ、カスクは高さ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格納されている。

コンクリート上面には、ガンマ線を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。しかし、このコンクリートは天井遮蔽（厚さ21cm、43cm）を置く場合には取り除く。

3.2.2 評価の概要

3.2.1で述べた実験の、 ^{60}Co の4,000Ciを用いた実験データを基に評価を行った。 ^{60}Co 4,000Ciのガンマ線強度は、 ^{60}Co 1Ciが β -崩壊により2つのエネルギー領域（1.1728 MeV、1.3325 MeV）でそれぞれ 3.7×10^{10} 個の粒子を放出することから、 2.96×10^{14} photons/cm $\cdot$ secとした。また、この強度はPSL-40ライブラリのガンマ線18群中の6群目（1.0～1.468 MeV）とした。

まず、PSL-40ライブラリは、ガンマ線が合計で18群あり、エネルギー群数の縮約を行うため、感度解析をSKY 1モジュールを用いて行った。その結果は、図13に示すようにガンマ線の6群目にピークが見られ、他はそれに比べて小さい。したがって、縮約群数ガンマ線6群、中性子1群（ガンマ線の問題であるため）とした。またエネルギー群縮約の影響をみるため、オリジナルのガンマ線18群も用いた。なお計算条件として、Plルジャンドル展開次数およびSn角度分点数はそれぞれ、 P_3 、 S_{12} を用いた。

次に、縮約の妥当性を確認するために、18群の断

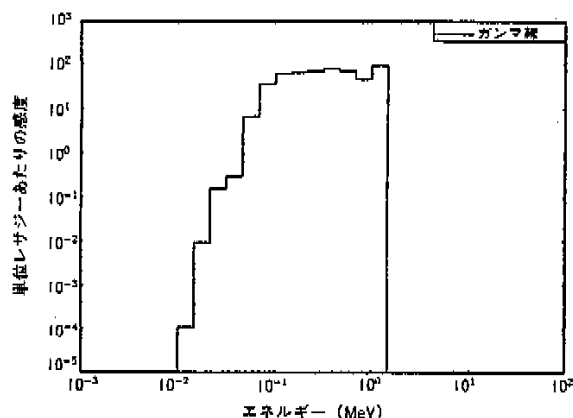


図13 感度解析結果 (Co-60)

面積と6群の縮約断面積を用いて、天井コンクリート外表面におけるガンマ線線量率をANISNコードにより算出した。その結果、18群は 1.32613×10^6 R/hr、6群は 1.29266×10^4 R/hrとなり、縮約群の方が多少低めの評価となった。

続いて、SKY 2モジュールを用いたスカイシャイン線量率の計算を行った。その時の計算条件は以下のとおりである。

計算体系	1/2R-Z
Plルジャンドル展開次数	P_3
Sn角度分点数	166
計算モデル図 (DOT3.5(1))	図14
計算モデル図 (DOT3.5(2))	図15

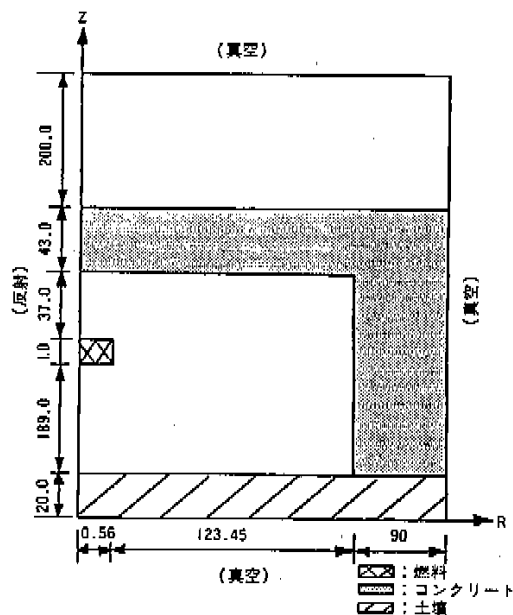


図14 二次元計算体系-1 (単位: cm)

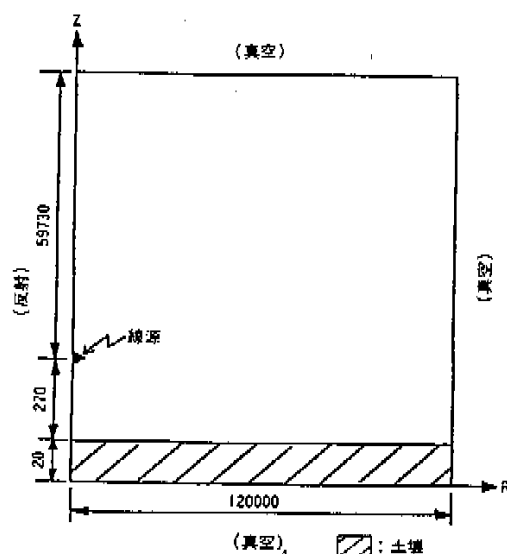


図15 二次元計算体系-(2) (単位: cm)

3.2.3 評価結果および考察

実験値および本評価の多数群 (18群)、縮約群 (6群) の計算結果を表2、図16に示す。

計算結果より、多数群と縮約群では、多数群の結果の方が実験値と良い一致がみられる。多数群と縮

表2 ^{60}Co (4,000Ci) 線源からのガンマ線スカイシャイン線量率

(評価位置: 地上約1m)

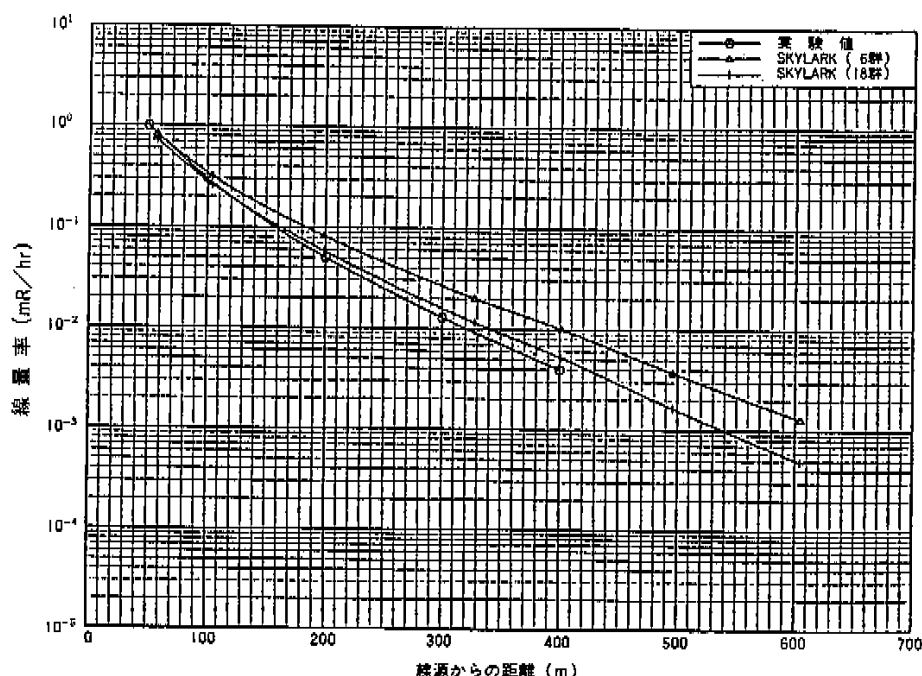
距離(m) ()内は実験値	SKYLARK(6群) (mR/hr)	SKYLARK(18群) (mR/hr)	実験値* (mR/hr)
57.0(50.0)	8.29304 E-1	7.34209 E-1	1.0 E+0
104.1(100.0)	3.18741 E-1	2.81977 E-1	3.0 E-1
198.5(200.0)	8.27333 E-2	5.86504 E-2	5.0 E-2
327.9(300.0)	2.00747 E-2	1.15735 E-2	1.3 E-2
401.5(400.0)	1.00985 E-2	5.25780 E-3	4.0 E-3
495.9	3.73768 E-3	1.64965 E-3	
604.5	1.29357 E-3	4.84942 E-4	

*文献からの読み取り値

約群の減衰傾向を見ると、エネルギー群構造の細かい多数群の方が実験値に近い減衰傾向を示し、縮約群の方は、線源からの距離が遠くなるにしたがい、過大評価の傾向にある。

このように、多数群と縮約群の線量率の減衰傾向が異なるのは、エネルギー群構造の違いそのものであり、当然のことながら、エネルギーレンジを大きく、平均した縮約群の方が減衰傾向が保守側に評価されている。

なお、実験値は文献からの読み取り値であり、実験に使用された ^{60}Co のCi数および遮蔽材の仕様等の不明点を考慮すれば、妥当な結果であると考えられる。

図16 ^{60}Co (4,000Ci) 線源からのガンマ線スカイシャイン線量率

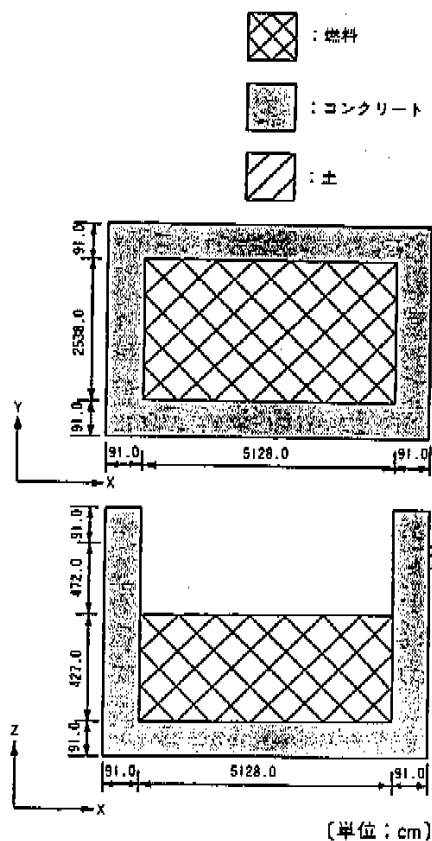


図17 炉外使用済燃料貯蔵施設の実体系

3.3 炉外使用済燃料貯蔵施設からのスカイシャイン線量率評価

3.3.1 計算の概要

この計算は、米国のORNL (Oak Ridge National Laboratory) が、行った炉外使用済燃料貯蔵施設を対象としたスカイシャイン線量率評価である。

計算条件のうち、線源条件としては、使用済燃料貯蔵プール(長さ=51.28m、幅=25.38m、高さ=4.27m)中の冷却水がないものとし、燃焼度40,000 MWd/MT、冷却期間1年の使用済燃料からのガンマ線である。

なお、ORNL で用いた計算コードは、DOT 4 コード、断面積ライブラリは、DNA37N-21G ライブラリで、PI ルジャンドル展開次数は P_3 、Sn 角度分点定数は S_8 である。使用済燃料貯蔵プールの実体系および計算モデルを図17および図18に示す。

3.3.2 評価の概要

本評価で使用する線源強度は、ORNL の計算に使用された線源強度を PSL-40ライブラリのエネルギー

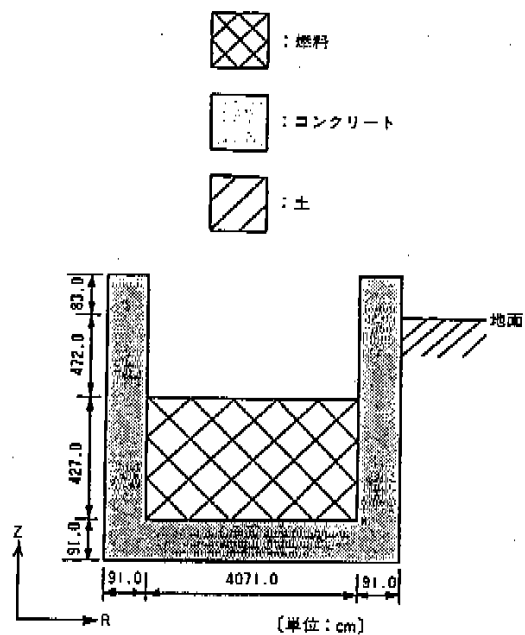


図18 ORNL での解析モデル

ーレンジに合わせて換算したものを使用する。

まず、PSL-40ライブラリは、ガンマ線が合計で18群あり、エネルギー群数の縮約を行うため、感度解析を SKY 1 モジュールを用いて行った。その結果は、図19に示すようにガンマ線の9群目にピークが見られ、他はそれに比べて小さい。したがって、縮約群数をガンマ線6群とした。なお、中性子については、線源が使用済燃料であり、ガンマ線がそのほとんどを占めるため、1群のエネルギー群構造とした。またエネルギー群縮約をみるため、オリジナルのガンマ線18群も用いた。なお計算条件として、PI

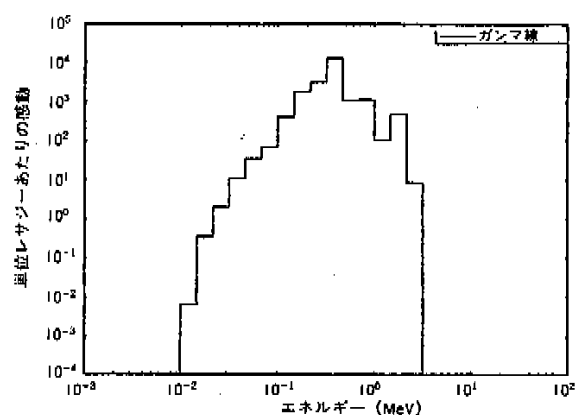


図19 感度解析結果(炉外使用済燃料施設)

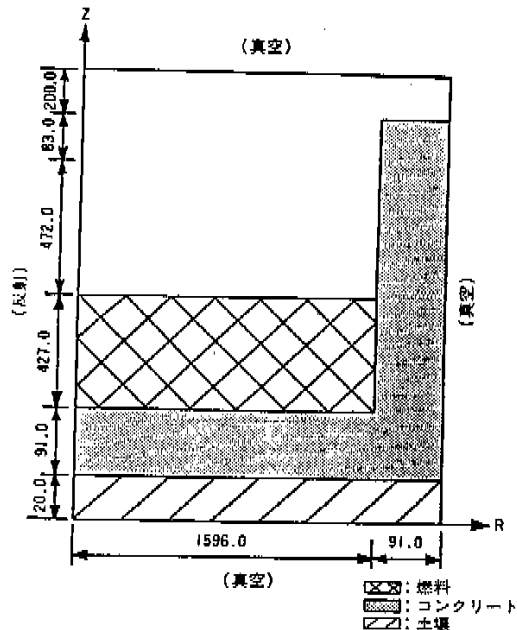


図20 二次元計算体系-1) [単位: cm]

ルジャンドル展開次数および S_n 角度分点次数は、それぞれ P_3 、 S_{12} を用いた。

次に、縮約の妥当性を確認するために、18群の断面積と6群の縮約面積を用いて、地上83m地点でのガンマ線線量率をANISNコードにより算出した。その結果、18群は39.222R/hr、6群は38.377R/hrとなり、縮約群の方が多少低めの評価となった。

続いて、SKY 2 モジュールを用いたスカイシャイン線量率の計算を行った。その時の計算条件は、以下のとおりである。

計算体系 : 1/2R-Z
 Plルジャンドル展開次数 : P_3
 S_n 角度分点数 : 166
 計算モデル図 (DOT3.5(1)) : 図20
 計算モデル図 (DOT3.5(2)) : 図21

3.3.3 評価結果および考察

実験値および本評価の多数群(18群)、縮約群(6群)の計算結果を表3、図22に示す。

計算結果より、多数群と縮約群では、多数群を用いた方がORNLの計算値と良い一致がみられる。

多数群の評価結果とORNLで行われた計算値を比較すると、線源からの距離が300m付近までは本評価の方が多少低く評価されているが、300m以上離れると逆の傾向が見られる。これらの差としては、First Collision Sourceの位置、使用ライブラリのエネルギー群構造およびメッシュの影響が考えら

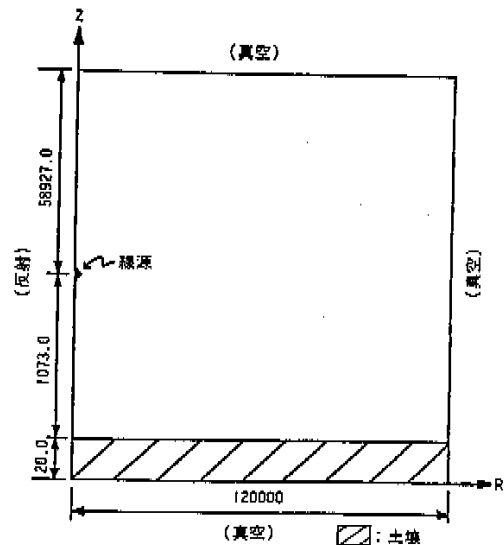


図21 二次元計算体系-2) [単位: cm]

れる。

次に、多数群と縮約群の比較を行うと、エネルギー群構造の粗い縮約群の減衰傾向は、線源から遠くなるにしたがい過大評価となる。

このように、多数群と縮約群の線量率の減衰傾向が異なるのは、エネルギー群構造の違いそのものであり、この傾向からみれば、前節3.2と同様に縮約の検証において多少低めの評価であっても、スカイシャイン線量率評価を行う上では、その差は無視できる。

4. 検討

4.1 S_n 角度分点数の違いによる影響

これまでのスカイシャイン線量率評価の第一段階(DOT3.5(1))では、上方向(Z方向)にバイアスをかけた166非等方角度分点を用いて評価を行った。

表3 使用済燃料貯蔵施設からのガンマ線スカイシャイン線量率
 (評価位置: 地上約1.5m)

距離(m) ()内はORNL	SKYLARK(6群) (mR/hr)	SKYLARK(18群) (mR/hr)	ORNL (mR/hr)
57.0(53.5)	1.12235 E +2	9.10074 E +1	9.08 E +1
104.1(121.5)	5.45053 E +1	4.07558 E +1	3.37 E +1
198.5(200.0)	1.87490 E +1	1.17566 E +1	1.32 E +1
327.9(316.5)	6.71129 E +0	3.30402 E +0	3.55 E +0
401.5(400.0)	4.19143 E +0	1.81839 E +0	1.74 E +0
495.9(505.7)	2.05612 E +0	7.12922 E -1	6.07 E -1
604.5(625.3)	9.62110 E -1	2.61482 E -1	2.02 E -1

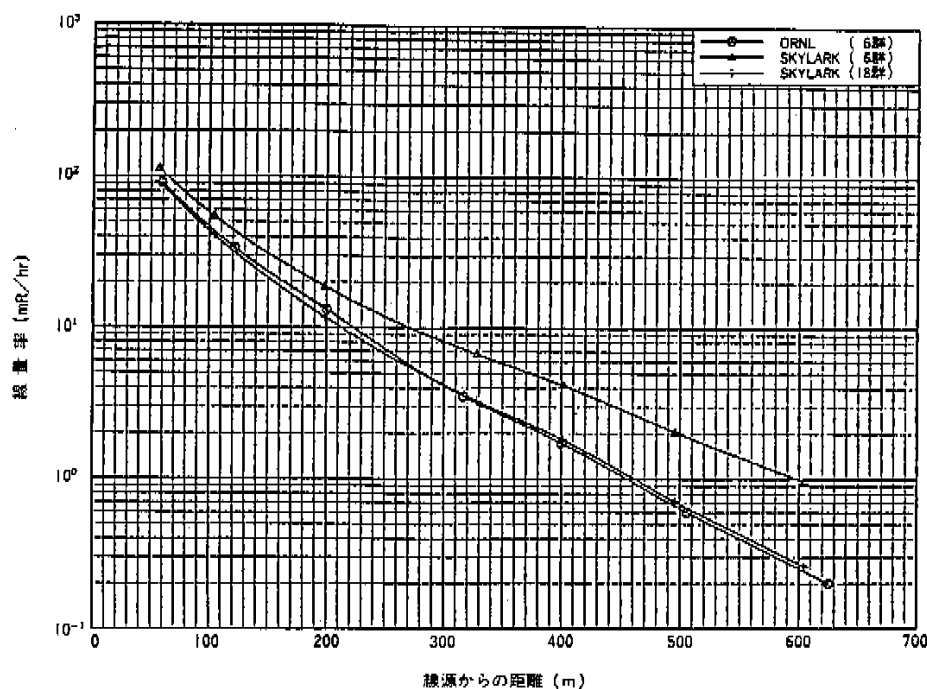


図22 炉外使用消費燃料貯蔵施設からのガンマ線スカイシャイン線量率

表4 Sn 角度分点数の違いによる影響*(高速中性子源炉発生)

(評価位置: 地上約1.5m)

距離 (m) () 内は実験値	SKYLARK (6群) mrem/hr		SKYLARK (22群) mrem/hr		実験値 (mrem/hr)
	S_{16}^{*2}	166^{*3}	S_{16}^{*2}	166^{*3}	
31.9 (31.2)	1.50168 E-2	1.47616 E-2	1.57537 E-2	1.54845 E-2	1.574 E-2
104.1 (107.9)	3.46086 E-3	3.40767 E-3	3.69757 E-3	3.64103 E-3	3.245 E-3
198.5 (195.5)	1.027.7 (999.6)	9.48879 E-4	1.03770 E-3	1.02165 E-3	7.887 E-4
327.9 (292.5)	2.60002 E-4	2.55885 E-4	2.81889 E-4	2.77448 E-4	2.029 E-4
401.5 (443.0)	1.40868 E-4	1.38625 E-4	1.53853 E-4	1.50426 E-4	5.227 E-5
507.2	5.93288 E-5	5.83772 E-5	6.46461 E-5	6.36107 E-5	
604.5 (644.6)	2.40673 E-5	2.26789 E-5	2.62754 E-5	2.58478 E-5	9.674 E-6
723.0	9.57295 E-6	9.41639 E-6	1.04697 E-5	1.02972 E-5	
801.2	5.45178 E-6	5.36222 E-6	5.97602 E-6	5.87685 E-6	
898.8	2.98886 E-6	2.93946 E-6	3.27386 E-6	3.21906 E-6	
1,027.7(999.6)	1.34077 E-6	1.31838 E-6	1.45725 E-6	1.43247 E-6	6.454 E-7
計算時間(分)*1	90	95	203	234	—

* 計算条件のメッシュ分割は、すべて同じである。

*1 FACOM M-380R 使用

*2 等方角度分点 ($S_{16}=160$)

*3 非等方角度分点

しかし、前節3.1または3.2のように線源からの放出角度が明らかにされている場合も同一角度分点を用いて評価することには疑問がある。

そこで、角度分点の違いによる評価結果を検討するために、160等方向角度分点を用いて比較を行った。

計算ケースとしては、ガンマ線および中性子線それぞれについての影響を見るため、前節3.1および3.2の条件(Sn 角度分点を除く条件は同一とした)を用いて評価を行った。

その結果を、それぞれ表4、表5に示す。この結果より、非等方角度分点と等方角度分点を比較する

表5 Sn 角度分点数の違いによる影響*(⁶⁰Co (4,000Ci) 線源)

(評価位置: 地上約1m)

距離(m) ()内は実験値	SKYLARK (6群) mR/hr		SKYLARK (18群) mR/hr		実験値 (mR/hr)
	S16*2	166*2	S16*2	166*2	
57.0 (50.0)	8.31811E-1	8.29304E-1	7.34954E-1	7.34209E-1	1.0E+0
104.1 (100.0)	3.19045E-1	3.18751E-1	2.61587E-1	2.61977E-1	3.0E-1
198.5 (200.0)	8.25810E-2	8.27333E-2	5.28973E-2	5.86504E-2	5.0E-2
327.9 (300.0)	1.99747E-2	2.00747E-2	1.14342E-2	1.15735E-2	1.3E-2
401.5 (400.0)	1.00327E-2	1.00985E-2	5.17681E-3	5.25780E-3	4.0E-3
495.9	3.70519E-3	3.73768E-3	1.61608E-3	1.84964E-3	
604.5	1.27905E-3	1.29357E-3	4.72183E-4	4.84942E-4	
計算時間(分)*1	27	38	50	59	—

* 計算条件のメッシュ分割は、すべて同じである。

*1 FACOM M-380R 使用

*2 等角度分点 (S16=160)

*3 非等角度分点

と、中性子については、全体的に等角度分点を用いた方が約2%高めの評価である。一方、ガンマ線については、最大約3%の差がみられるものの等角度分点を用いた方が実験値との一致は良い。さらに、計算時間を短縮する面からも等角度分点の方が望ましい。

以上の結果より、角度分点数による影響は2~3パーセント程度であり、等角度分点を用いても妥当な結果が得られると考えられる。

4.2 モデル近似の違いによる影響

前節4.1と同様に、3.精度評価のDOT3.5コードにおいては、すべての体系をR-Z近似を用いて評価した。しかし、前節3.3のような体系は一般にX-Y近似で評価することも考えられる。

そこで、評価モデルの近似による影響を見るため前節3.3の体系をX-Y近似で評価し、先の結果(R-Z近似)と比較、検討を行った。

評価条件としては、X方向を貯蔵プールの幅(25.38m)およびY方向を高さ(4.27m)とした。なお、Z方向(長さ方向)は、単位長さで評価するため、実際の貯蔵プールの長さ(51.28m)を乗じて補正することとした。

評価結果を表6および図23に示す。ここで、R-Z近似とX-Yによる結果を比較すると、減衰傾向は同様であるが、全体的にX-Y近似による結果の方が約2.5倍高めの評価である。この原因としては、使用した補正係数(乗じた貯蔵プールの長さ)では、自己遮蔽が考慮できないためであると思われる。

以上のように、X-Y近似を用いて評価を行うと十分安全側の評価となるが、安全裕度は、通常モデル近似以外のところで考慮するため、過剰な安全裕度となると考えられる。さらに、詳細計算および計算

時間等を考慮すると、R-Z近似で評価を行うのが妥当と思われる。

5. まとめ

以上、作成したスカイシャイン線量率評価コードシステム(SKYLARKシステム)の紹介とその精度確認のための検証計算等について述べた。

今回のSKYLARKシステムを開発した結果、以下のような効果が得られた。

(1) 従来は、1つの処理が終了するたびに次の処理のための入力データを作成していたが、入力データを1つにまとめ簡略化したことと、ドライバルーチンが一連の処理の制御を行うことにより大幅な省略化が図れた。

(2) SKYLARKシステムにより、スカイシャイン線量率評価に精通している専門家以外の人でも容易に評価を行うことが可能となり、評価の大衆化が図れた。

表6 計算体系の違いによる影響*(炉外使用済燃料貯蔵施設)

(評価位置: 地上約1.5m)

距離(m) ()内はORNL	SKYLARK (18群)*1 R/hr		ORNL (R/hr)
	R-Z	X-Y*2	
57.0 (59.5)	9.10074E+1	2.10930E+2	9.08E+1
104.1 (121.5)	4.07558E+1	9.58403E+1	3.37E+1
198.5 (200.0)	1.17566E+1	2.77286E+1	1.32E+1
327.9 (316.5)	3.30402E+0	7.83917E+0	3.55E+0
401.5 (400.0)	1.81839E+0	4.32966E+0	1.74E+0
495.9 (505.7)	7.12922E-1	1.70728E+0	6.07E-1
604.5 (625.3)	2.61482E-1	6.32575E-1	2.02E-1
計算時間(分)*3	52	130	

* 同一メッシュ分割

*1 非等角度分点166使用

*2 補正係数として51.28mを考慮

*3 FACOM M-380R 使用

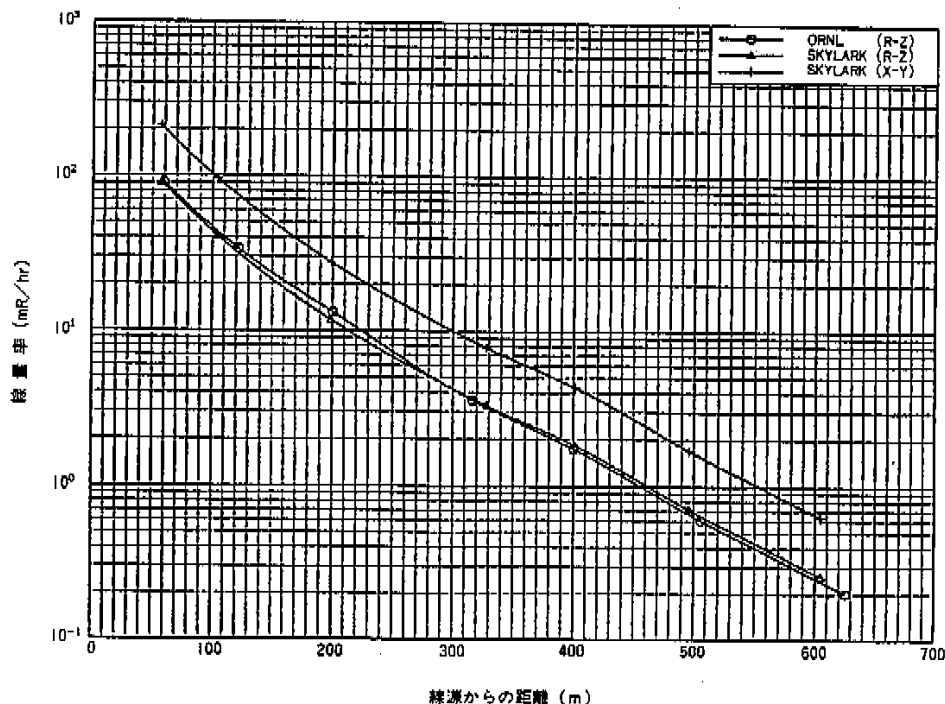


図23 計算体系の違いによる影響 (炉外使用済燃料貯蔵施設)

(3) ベンチマーク問題に基づく精度評価の結果、ガンマ線、中性子線ともに報知値と良い一致を示しており、本システムの妥当性が確認できた。

今後は、実際の核燃料施設のスカイシャイン線量率評価に本システムを適用していく予定である。

なお、今後の課題としては、①断面積ライブラリのより一層の充実、② PURSE コード以外の線源強度評価コードの組み込み (ORIGEN コード等)、③計算結果の図化 (SWANLAKE コードの出力) 等が考えられる。さらに、SKY 3 および SKY 4 モジュールについては、まだ精度評価を行っていないため、今後遮蔽実験データ等に基づき、検証を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 出口、平林、山本他：スカイシャイン線量率評価コードシステム「SKYLARK」、PNC N8410 86-48、1986。
- 2) 出口、平林、山本他：スカイシャイン線量率評価コードシステム「SKYLARK」の検証、PNC SN8410 87-70、1987。
- 3) 三島、中江、山本他：スカイシャイン線量率評価コードシステムの開発、A-17 1989年原子力学会年会。
- 4) 中村他：東大「弥生」におけるスカイシャイン実験、(原子力学会誌 Vol.126, No.11, 1984,) (Nuclear Science and Engineering 77, 168-181, 1981.)
- 5) R.R. Nasso et al: A Benchmark Gamma-Ray Skyshine Exp., (Nuclear Science and Engineering 79, 404-416, 1981.)
- 6) J.W. Puse III et al: Calculation of the Skyshine Gamma-Ray Dose Rates From Independent Spent Fuel Storage Installations (ISFSI) Under Worst Case Accident Conditions, (ORNL/NUREG/TM-315, 1986.)