

## 論文の内容の要旨

論文題目 スカイシャイン線量評価手法の高度化に関する研究

氏 名 鈴木 ちひろ

### 1. 背景と目的

現行のスカイシャイン線量評価手法には、精度検証のためのベンチマーク問題が限られている、施設周辺の環境要因の影響に関する考察が少ない、線源が限定的等の課題が存在する。本研究は、これらの課題を踏まえ、以下の4点を研究目的とする。

(1) 高エネルギー中性子・高エネルギーガンマ線スカイシャインの効率的評価および線源孔の二次元的強度分布評価を目的として測定器を選定し、その特性を評価することで、従前の測定評価手法に新たな検討を加える。

(2) 高速中性子源を線源とした中性子スカイシャインの実測と解析を実施し、中性子スカイシャインのベンチマークデータを提供する。

(3) スカイシャイン線量の擾乱要因として、大気と地表面の状況が与える影響について考察する。

(4) 原子力発電所シビアアクシデント時のスカイシャイン挙動について考察する。

### 2. スカイシャイン測定を目的とした検出器の特性評価

#### 2.1. 中性子検出器とその特性評価

中性子スペクトルを効率よく測定する測定器として、液体有機シンチレータに着目した。液体有機シンチレータは中性子とガンマ線の弁別能力や検出効率に優れている。一般的に用いられる液体有機シンチレータは直径3インチ、厚さ3インチ以内であるが、本研究では、高エネルギー放射線場への適用と高効率化をめざし、直径8インチ、厚さ4インチの検出器を用意し、その応答特性を評価した。応答関数の評価は、まずSCINFUL-QMDによるモンテカルロ計算によって行った。その後、計算結果にRIガンマ線の実測によって求められた分解能関数[1]を適用し、検出器の応答関数とした。次に、日本原子力研究開発機構の中性子標準施設を用いて、5 MeV及び14.8 MeV単色中性子を検出器に照射した。計算の結果、計算値が、最大10%の精度で実測を良く模擬していることを示しており、整備された応答関数が妥当であることが示された。

#### 2.2. 二次元型検出器とその特性評価

スカイシャイン放出源の放射線強度分布の二次元的情報を精細に得るための検出器として、イメージングプレート（以下IP）に着目した。IPは輝尽性蛍光を利用した二次元積分型の放射線検出器であり、放射線の二次元的な分布の様子を精細に描くことができる。本研究では、従来評価の乏しいIP応答のエネルギー依存性及び入射角度依存性を、実験及び計算により正確に評価した。

応答関数の計算には、モンテカルロ粒子輸送計算コードEGS5を用いた。5 keVから100 keVまでの光子ビームをIPに垂直に入射させ、有感領域である蛍光体層内における放射線の沈着エネルギーを算出した。実験値は、高エネルギー加速器研究機構放射光科学施設にて生成された単色光子を、IPに直接照射することで得た。

計算値と実験値の比較の結果、計算値と実験値の比が、エネルギーとともに大き

くなる様子が確認された。そこで、計算値と実験値の不一致の改善のため、計算手法の再検討を行った。IP読取時のレーザーと発光が、蛍光体層内で散乱され、蛍光体層内のより深い位置に放射線のエネルギーが沈着した場合に、応答が小さくなる考えた。そこで、計算時に蛍光体層を複数層に分割してそれぞれの層における応答を算出し、応答が深度方向に指数関数的に減少すると考えて、以下の式により応答を再評価した。

$$R_c(E)_{rev} = k \sum_{i=1}^{i_{max}} \varepsilon(i, E) e^{-\alpha x(i)} \quad (1)$$

ここで、 $R_c(E)_{rev}$ は新しく評価されたIP応答の計算値、 $k$ は実験条件によって決まる定数、 $\alpha$ は読取に関連した光の減衰係数、 $\varepsilon(i, E)$ は第*i*層におけるエネルギー沈着、 $x(i)$ は蛍光体層表面からの距離を表す。

再評価されたIP応答の計算値と実験値とを比較したところ(図1)、 $\alpha$ を $0.013 \mu\text{m}^{-1}$ 、 $i_{max}$ を23としたときに計算値と実測値が約3%の誤差でよく一致しており、応答特性の妥当性を検証できた。

### 2.3. ガンマ線検出器とその特性評価

高エネルギーガンマ線を効率よく測定する測定器として、BGOシンチレーション検出器に着目した。原子力施設のスペクトルモニタリングにはNaI(Tl)シンチレーション検出器が通常用いられるが、BGO検出器はNaI(Tl)検出器と比較して、高い効率と高い放射線エネルギー吸収能力を有している。本研究では、このシンチレータについて、その応答関数と入射角度依存性を評価した。

まず、モンテカルロ粒子輸送計算コードEGS5を用いて応答関数を計算し、計算値にRIガンマ線の実測によって求められた分解能関数を適用した。求めた応答関数の検証のため、日本原子力研究開発機構のガンマ線標準施設を用いて、 $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) 及び $^{60}\text{Co}$  (1173 keV、1333 keV)のガンマ線を照射し、応答の実測値を得た。計算の結果、計算値は実測を良く模擬しており、整備された応答関数が妥当であることが示された。

入射角度依存性の評価は、EGS5を用いて入射角度を $10^\circ$  ずつ変化させて光子を照射することで行った。計算の結果(図2)、入射角度によって、応答が数十%異なる様子が確認された。また、照射光子のエネルギーが小さいほど、入射角度依存性が大きくなる様子が確認された。スカイシャイン線測定の際には、直接線やバックグラウンド放射線の影響を避けるため、検出器の下方及び横方向に鉛等の遮へい材を設置し、放射線の入射方向を制限する場合が多い。こうした場合には、入射角度別の応答を入射立体角に応じて組み合わせることで、精度良い評価が期待できる。

### 3. 中性子スカイシャインの実測と解析

東京大学研究炉「弥生」を線源として用いた。測定は、炉心部から上方に貫通した直径10 cmのグローリー孔及び建屋屋上の直径60 cm天井プラグを開孔して行った。中性子線量の測定には中性子レムカウンタを使用し、中性子スペクトルの測定には寸法の異なる4個のポリエチレン減速球(直径8.1~23.1cm)と $^3\text{He}$ 比例計数管からなるボナー球スペクトロメータを使用した。ガンマ線スペクトルの測定には、先に校正したBGO検出器を使用した。

計算には、モンテカルロ粒子輸送計算コードMCNPXを用いた。放射線源には、実験で測定された線源放出孔で測定された中性子スペクトルを用い、線源中心から上空に放出角 $2.7^\circ$ で放出させた。水平距離0~850 mまでの中性子及びスカイシャイン線線量の水平分布を得た。

実験と計算による中性子線量分布（図3）より、評価点20～25 m地点における評価値の不連続は、半径22 mに及ぶ原子炉建屋の影響と考えられる。また、320 mより後方におけるスカイシャイン線量の誤差は、競合する環境放射線（約5 nSv/h）の影響と考えられる。実験の結果から、25 mより遠方に置いては、実測値とMCNPXによる計算値の減衰傾向がよく一致していることがわかる。このことから、スカイシャイン線量の減衰傾向を表すために、MCNPXを用いることが妥当であることが示唆される。また、20 mより近傍では、計算値が実測値を下回っているが、これは計算時に建屋を直接透過する放射線を模擬しなかったためと考えられる。

#### 4. スカイシャイン線量評価における擾乱要因

本研究では、スカイシャイン線量を変化させるパラメータのうち、地表面と大気条件の影響に着目した。

異なる大気条件がスカイシャイン線量に与える影響の違いを検証するために、大気密度、大気中水分量の異なる9つの大気条件下における、1 MeVの中性子及び662 keVのガンマ線を線源とするスカイシャイン線量分布を、MCNPXを用いて計算した。

計算の結果、中性子スカイシャイン線量は近傍では大気密度に、遠方では大気中の水分密度により大きく依存することが確認された。また、ガンマ線スカイシャイン線量は、大気中の水分密度の影響はほとんど見られず、単純に大気密度に依存することが確認された。そしてこれらの影響により、大気を標準大気で模擬した場合、施設境界（300mと仮定）付近で評価値に約20～50%の誤差が生じる可能性があることが分かった。

#### 5. 原子力シビアアクシデント時スカイシャインに関する考察

原子力シビアアクシデント発生時のスカイシャイン挙動について、そのフェーズごとに簡易モデルを用いてMCNPXによる計算を行った。その結果、線源中心の移動とともに、スカイシャイン線量が減少する様子を確認した。

#### 6. まとめ

本研究における成果を以下にまとめる。

（1）高エネルギー中性子、高エネルギーガンマ線スカイシャイン並びにスカイシャイン放出孔における放射線強度分布の測定を目的として、大容量液体有機シンチレータ、BGO シンチレーション検出器、イメージングプレートに着目し、スカイシャインへの適用に向け応答特性を評価した。

（2）研究用原子炉「弥生」を用いて中性子線スカイシャインの測定と解析を行った。

（3）スカイシャイン線量の擾乱要因として地表面及び大気の影響に着目し、これらの影響についてモンテカルロ計算によって考察した。

（4）原子力発電所シビアアクシデント発生時のスカイシャイン挙動について、モンテカルロコードを用いた計算により考察した。

#### 参考文献

[1]Scholermann, H. and Klein, H. Nucl.Inst.Meth. 169, 25-31, (1980).

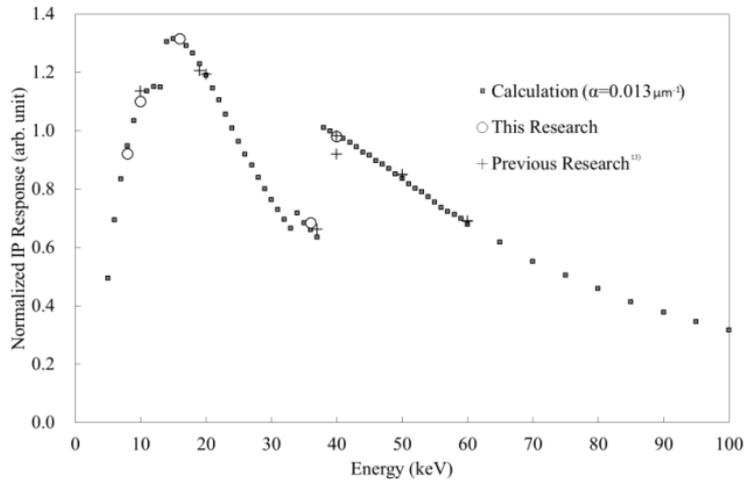


図 1 IP応答の計算値と実測値との比較

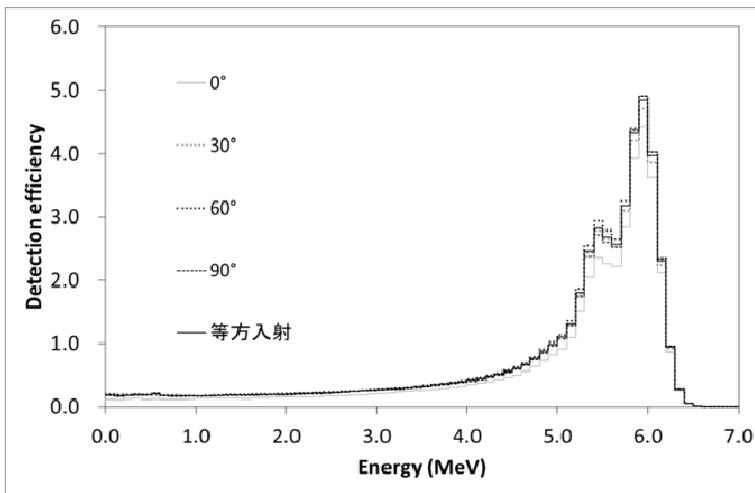


図 2 6MeVガンマ線に対するBG0検出器応答関数の入射角度依存性

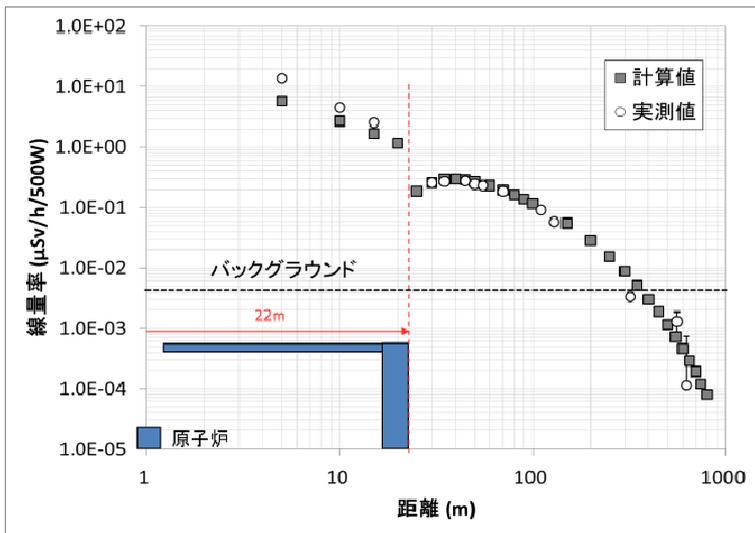


図 3 スカイシャイン中性子線量の水平分布