



研究ノート

放射線スカイシャイン効果

村田 勲*

Skyshine effect of radiation

Key Words : skyshine, fusion reactor, secondary gamma-ray, Ge detector

1. はじめに

原子力発電所や粒子線加速器等の放射線発生施設では、十分に厚い壁を設けることで放射線の外部への漏洩を防いでいる。しかし、普通上部方向にはそれほど厚い遮蔽を設けない。構造的な問題もあるが上部方向には敷地境界がないためである。上部に漏れ出た放射線は、空气中を輸送し、ある程度離れた場所に降り注ぐ。この現象を放射線スカイシャイン効果と呼ぶ。

我々の研究グループでは、大阪大学にある重水素(D)と三重水素(T)の核融合反応($D+T \rightarrow {}^4\text{He}+n+17.6\text{MeV}$)を利用した14MeV中性子発生装置オクタビアン周辺における放射線(中性子及びガンマ線)のエネルギースペクトルや空間線量を測定し、スカイシャイン効果のメカニズムを解明するための研究を続けている^{1,2)}。中性子発生施設におけるスカイシャイン効果の一般的な認識としては、中性子の降り注ぎによる効果(中性子スカイシャイン)が大きく、中性子と物質(主に空気)との相互作用の結果発生するガンマ線(2次ガンマ線という)の寄与(2次ガンマ線スカイシャイン)はそれに比べて小さいというものである³⁾。しかし、最近までの実験例を見ると中性子の測定が大半であり、2次ガンマ線に対する上記の結論は、建家を考慮しない粒子輸送計算に基づ

く考察から導き出されており、実験的に確認されているわけではない。

我々は、建家の遮蔽壁を考慮することによって、従来はその寄与が小さいと考えられてきた2次ガンマ線が、中性子発生施設におけるスカイシャイン効果として重要になってくるのではないかと考え、外部に漏れ出る2次ガンマ線の詳細な測定をオクタビアン周辺において実施してきた。その結果、2次ガンマ線スカイシャイン効果には、空から降り注ぐいわゆるスカイシャイン成分の他、建物からの直接線や地面からの反射成分をかなり含んでいることを明らかにした^{*1)}。さらに、ガンマ線エネルギースペクトルの詳細な解析により、2次ガンマ線スカイシャイン効果の発生メカニズムの解明を進めることができた。これらの結果は、将来の核融合炉開発における放射線遮蔽設計研究に役立てられるものと注目している。

本稿では、これらの結論を導く背景となった実験結果を交え、2次ガンマ線スカイシャイン効果について分かりやすく解説したい。

2. スカイシャインガンマ線測定実験

図1に2次ガンマ線スカイシャイン測定システム

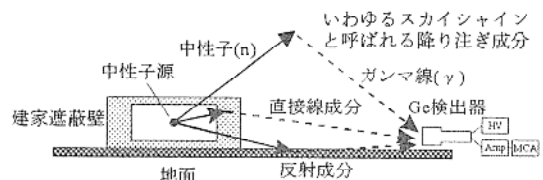


図1 2次ガンマ線スカイシャインとその測定システム

* Isao MURATA
1962年7月26日生
昭和63年大阪大学大学院工学研究科
原子力工学専攻博士前期課程修了
現在、大阪大学大学院工学研究科原
子力工学専攻、助手、工学博士、
核融合中性子工学
TEL 06-6879-7892
FAX 06-6879-7899
E-Mail murata@uncl.eng.osaka-
u.ac.jp



*1 : 通常は降り注ぎ成分のみをスカイシャイン効果ということが多いが、ここでは、図1に示すような効果全てを含むものとして2次ガンマ線スカイシャインを定義している。被曝線量を議論する場合にもこの方が便利である。

の概略図を示す。オクタピアンを運転中に建家の外で放射線検出器によりガンマ線のスペクトルを測定するという、極めて単純な方法で実験は実施できる。検出器としては、大型(約180cc)の高純度Ge半導体検出器を用いた。この検出器は、優れたエネルギー分解能を持っており、核反応により発生する単色エネルギーのガンマ線を識別することが可能である。

3. 2次ガンマ線スカイシャインのメカニズム

図2にオクタピアン建家の外に放射線モニターとして設置されているNaIシンチレーション検出器により測定されたガンマ線エネルギー Spektrum を示す。NaIは検出効率が高いことから古くからガンマ線検出器として幅広く使用されてきた。しかし、エネルギー分解能がGe半導体検出器に比べ桁違いに悪く、スペクトル全体がならされたような構造になることから、スペクトル構造についての詳細な考察

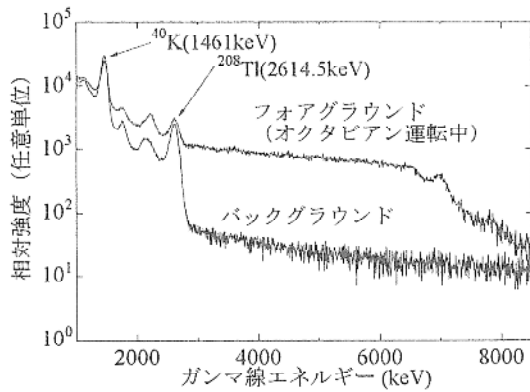


図2 NaI検出器により測定されたオクタピアン建家外におけるガンマ線エネルギー Spektrum

を得ることは一般的に困難である。

図の3MeV以下に見られるスペクトルの構造は主に自然放射線によるものである。バックグラウンド Spektrum に見られる3MeV以上の平らな構造は検出器の電気的なノイズと宇宙線によるものである。一方、オクタピアン運転中の Spektrum には約8 MeVまで顕著な構造が見られる。この構造は、中性子の酸素原子核との非弾性散乱($^{16}\text{O}(n, n'\gamma)$ と書き表し、中性子(n)が ^{16}O に入射し、入射中性子とエネルギーが異なる中性子(n')とガンマ線(γ)が放出される核反応を意味する)により発生したガンマ線が支配的ではないかと考えられていた。つまり、中性子スカイシャインと同様、中性子が建家上部から漏洩し、大気中の酸素と核反応するというメカニズムである。もちろんこの仮説は現在まで実験的に確認されていない。

図3にGe半導体検出器を用いて測定した、オクタピアンから50m離れた建家が見える地点での、2次ガンマ線スカイシャイン Spektrum を示す。図2ではなめらかに見えた連続 Spektrum が実は数多くの離散ガンマ線を含んでいることが確認できる。それぞれの単色ガンマ線は、原子核の励起状態間の遷移に対応するものであり、そのエネルギーからガンマ線が放出された核種と起こった核反応を知ることができる。図3の結果から、図2で酸素が原因と考えられていた構造は、実は鉄の捕獲ガンマ線(エネルギーが低い中性子で起こりやすい中性子捕獲((n, γ) 反応)により発生したガンマ線)が主要な成分であることが分かった他、シリコンや水素等の構造物材

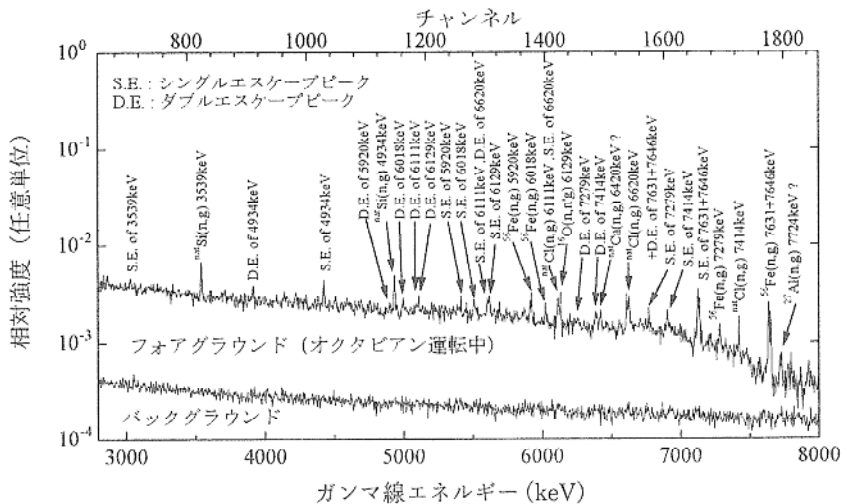


図3 Ge検出器により測定されたオクタピアン建家外におけるガンマ線エネルギー Spektrum (3MeV以下はバックグラウンドが支配的なので削除してある)

に含まれる核種の捕獲ガンマ線が主要な部分を占めることが分かった。つまり、核融合反応で発生する中性子のエネルギーは高いので、通常は非弾性散乱に代表される高エネルギーでのみ起こるしきい核反応からのガンマ線が主であると予想されていたものが、図3の結果により、覆されたわけである。

以上の結果から、次のような2次ガンマ線スカイシャイン効果のメカニズムを考えることができる。建家内で発生した高エネルギー中性子は、建家の遮蔽壁に入射し、内側表面付近で散乱によりエネルギーを失っていく。この散乱反応としては弾性散乱((n, n) ; 玉突き衝突に相当)と不弾性散乱(非弾性散乱($(n, n'\gamma)$ 反応) + $(n, p\gamma)$, $(n, 2n\gamma)$, $(n, \alpha\gamma)$, $(n, n'p\gamma)$ 反応等))が考えられ、不弾性散乱は通常2次的にガンマ線を放出する反応であることが知られている。しかし、これらの2次ガンマ線はいずれもエネルギーが低く(概ね $E_\gamma < 2\text{MeV}$)、壁の透過能は比較的低い。加えて発生場所が主として遮蔽壁内側なので外部に漏洩することは希である。一方、散乱中性子は減速しながら壁を透過していき、外側付近に輸送するまでに14MeVから9桁程度エネルギーが減少し、いわゆる熱中性子($\sim 0.025\text{eV}$)になる。このエネルギーの中性子は、既に述べたとおり中性子捕獲反応を起こしやすく、しかも発生する2次ガンマ線のエネルギーは核子の結合エネルギーに近い8MeV程度と高いことから、壁を透過しやすい。更に、これらの反応は比較的壁の外側で起こっていると予想できるので外表面までの壁厚は薄い。以上のような理由により、捕獲ガンマ線のみが主として検出されていると考えられる。次に、それぞれの反応核種の存在場所を考えてみる。図3に見られる鉄は、明らかに建家の鉄骨等であると思われる。シリコン及び水素については、建家及び土壌に SiO_2 及び H_2O のかたちで豊富に含まれているものであると考えられる。酸素の非弾性散乱によるガンマ線も見られるが、これも構造物中元素と考えられる。もし空気中の酸素であるとする、窒素の非弾性散乱反応によるガンマ線が測定されない事実を説明できないからである。また、塩素の捕獲ガンマ線も測定されているが、塩素が多量に含まれている物質が見当たらないことから、現在までのところ植物中に存在している微量元素としての塩素ではないかと推定している。

4. 伝播経路によるスペクトルの違い

前節の結果は、予想外に建家からの直接寄与分が大きいことを示している。とすれば、従来いわゆる2次ガンマ線スカイシャインといわれていた降り注ぎ分がどの程度の割合を占めているのかを調べることは興味深い。実験は、2節で述べた手法と全く同じであり、検出器のまわりを適当な大きさの鉛遮蔽体で覆うことで、降り注ぎ分と地面からの反射成分をそれぞれ選択的に測定した。50m地点における結果を図4に示す。図から、降り注ぎ分には全く離散成分がないことが分かる。また、地面からの反射成分にはシリコンのピークのみが見られることがわかる(図にはないが水素のピークも確認されている)。

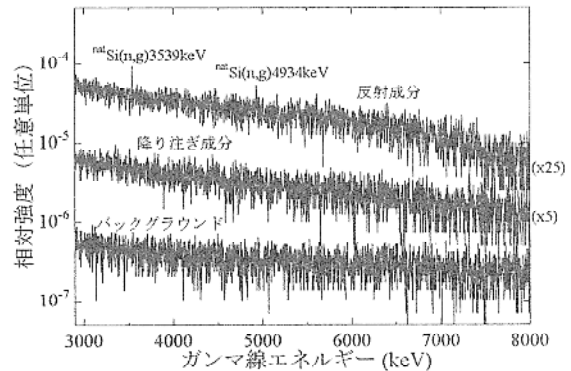


図4 Ge検出器により測定された降り注ぎ成分と地面からの反射成分

これらの結果はどのように理解すればよいだろうか。降り注ぎ分については、熱中性子の空気(酸素及び窒素)による捕獲反応の確率(断面積という)が極端に小さい(非弾性散乱断面積に比べても数桁以上小さい)ことから、漏洩した熱中性子による捕獲ガンマ線は見られないと予想できる。建家から漏洩した高エネルギー中性子の空気による非弾性散乱が少ないことは前節のメカニズムにより分かっている。従って、このスペクトルは、建家から漏洩した捕獲反応によるガンマ線が空気中で1回以上コンプトン散乱した結果発生した散乱ガンマ線スペクトルであると考えるを得ない。スペクトルが8MeV程度まで見られることがそのことを裏付けているといえる(コンプトン効果による散乱ガンマ線は、散乱前のエネルギーの90%前後を最大エネルギーとするならかな連続スペクトルを持つため)。また、地面からの反射成分については次のように説明できる。特定さ

れたシリコン及び水素のピークについては、建家から漏洩した熱中性子が土壤に含まれるシリコン及び水素と捕獲反応を起こした結果である。また、8 MeV程度までの連続スペクトルは、降り注ぎ分と同様建家から漏洩した捕獲ガンマ線の地面によるコンプトン散乱成分である。

さて、肝心のそれぞれの寄与の強度はどうだろうか。ここでは、多少正確さを欠くが相対強度をみるために、簡単に3MeV以上のスペクトルの積分値の比を求めた。建家から100m以内においては、建家からの直接寄与分が約50%、降り注ぎ分と地面からの反射成分がそれぞれ25%程度ずつとなった。従来の評価手法では、建家からの寄与成分が計算に入っていないことから過小評価になっていた可能性が高いことを示す重要な結果である。

5. 結 論

前節までの結果はもちろんオクタピアン施設固有のものであるため、今後設計が進められるであろう核融合炉にそのまま当てはめることは若干乱暴かもしれない。しかし、世界的に知られた核融合実験装置(TFTR)でも、建家外で鉄の捕獲ガンマ線が測定されたということが報じられており⁴⁾、問題の本質は徐々に明らかになりつつある。

今回行ってきた一連の実験から、ガンマ線スカイシャインの評価のためには、中性子輸送計算を建家まで含めたモデルを用いて低エネルギーまで正確に実施することが重要であること、更に、熱中性子に対する捕獲反応断面積は一般に大変大きいことから、たとえ存在量が小さい不純物元素でも十分に注意する必要があることが示唆された。このことは更に以下の提言を導く。現状のスカイシャイン評価では、

いわゆるair-over-groundモデルという建家を考慮しないモデルを用いた計算が実施されており、いわゆる建家遮蔽評価とは一線を画している。今後はスカイシャインの観点からではなく、むしろ遮蔽の観点から、建家を考慮した詳細な計算を中性子とガンマ線について実施し、スカイシャイン効果を含めた形で遮蔽評価することが合理的な設計のために重要になってくると考えられる。

スカイシャイン問題は、放射線発生施設の敷地境界外に居住している一般市民の被曝量を確実に抑えるために解かなければならない重要な問題である。核融合炉実現に向けて更に研究を続けていく必要があるとの認識を新たにしつつ筆をおきたい。

最後に以下のことを誤解の無いように付け加えておく。現存する原子炉等の全ての放射線発生施設は、ここで述べてきたスカイシャイン効果を十分保守的に考慮して設計されており、敷地境界で人の被曝量が法律で定められた許容値以下になるように、建設場所や遮蔽方法等が厳しく規制されている。

参 考 文 献

- 1) S. Yoshida et al., Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol., Trieste, 1392 (1997).
- 2) I. Murata et al., Fusion Technol., 34, 997 (1998).
- 3) K. Hayashi and T. Nakamura, Nucl. Sci. Eng., 91, 332 (1985).
- 4) H. W. Kugel et al., Fusion Eng. Des., 28, 534 (1995).

