MCNP(X)メッシュタリーを用いた中間貯蔵庫ストリーミンク 経路解析

海上安全研究領域 原子力安全技術研究グループ 株式会社 オー・シー・エル

# 1.はじめに

中間貯蔵施設の必要性が高まり、我が国において も原子炉等規正法の改正にあたり使用済み燃料の 貯蔵の事項が追加され、法令及び指針の整備が行 われている。中間貯蔵施設の放射線安全評価とし て、施設境界における線量の評価は施設の貯蔵能 力とも関係するため重要な課題である。我が国の 中間貯蔵施設境界における被曝線量の基準値はア メリカ(年間 250 µ Sv)等に比べ厳しく、年間 50 µ Sv となっており<sup>[1]</sup>より効率的な遮蔽設計と合 理的な遮蔽評価、被曝線量評価が求められる。

通常、使用済燃料貯蔵庫ではキャスク冷却に受 動的空冷システムが用いられ、貯蔵庫には外気を 吸気・排気するための空気孔が備えられている。 このためこれら空気孔から放出される放射線に起 因するスカイシャインが発生し遮蔽庫周囲におけ る被ばく線量に大きく寄与する。したがって中間 貯蔵システムの貯蔵能力向上のためには使用済核 燃料貯蔵容器及びその貯蔵庫における放射線スト リーミングの経路推定及び低減技術を確立する必 要がある。本発表では MCNPX コードを用いて、建 屋外へ放出される放射線の建屋内ストリーミング 経路の把握を行い、これに対する効果的な対策を 検討する。

### 2. 中間貯蔵庫概要

本研究では中間貯蔵システムとして原燃輸送株 式会社と株式会社オー・シー・エルが共同開発を 進めている輸送可能型乾式キャスクによる屋外貯 蔵システムを想定した。当システムはモジュラー 型の貯蔵庫を多数並列する方式で、貯蔵庫1ユニ ットには2基のキャスクが格納される。この貯蔵 庫の概要を図1に示す。貯蔵庫外壁は鉄-水-鉄多 重層になっており、中性子及び1次・2次ガンマ 線を効果的に遮蔽できる構造になっている。しか

大西世紀	小田野直光	澤田健一	近内亜紀子
川上数雄	松本務	岩崎昭	清水大輔

しながら遮蔽庫には中間貯蔵キャスクを自然冷却 するための吸気孔が下部に、排気孔が上部にそれ ぞれ設置されておりこの空気孔から漏れた放射線 によりスカイシャインが発生する。



## 3.計算コード

放射線輸送計算コードには点減衰核積分法のよ うな簡易計算から空間分割法、モンテカルロ法の ような詳細計算まで様々なものが存在する。しか しながら簡易計算では基本的に散乱線の効果を限 定的にしか考慮できない。詳細計算でも、空間分 割法で複雑形状を含む体系で計算する場合には空 間を複雑形状のスケール程度で分割する必要があ り、膨大なメッシュが必要になる。また空間を有 限に分割するため角度分点が存在する方向に輸送 されやすく、フラックスの分布が波状になるレイ エフェクトなどが起こりやすい。このため複雑形 状ストリーミングの計算にはあまり適さない。以 上を考慮し本研究ではモンテカルロ法に基づいた 詳細計算コードである MCNPX<sup>[2]</sup>を採用した。 MCNPX は MCNP4C3<sup>[3]</sup>を元に高エネルギー領域 へ拡張し、バリオン・レプトン・メゾンの素粒子 一般や水素やヘリウムのような軽核イオンに対応 したコードである。また、エネルギー領域と対応 粒子だけではなくタリー(Tally:物理量の測定機能)の拡張も行われている。特に新規に、空間を任意の間隔で3次元的に分割し、その小空間ごとの物理量を計量するメッシュタリーが採用されており、この機能を用いて線量やフラックスの空間分布を計算することができる。

## 4.計算条件

このようにある程度の厚みを持つ鉄 水多重層 遮蔽を有する体系内にキャスクを設置し使用済み 燃料を貯蔵する場合には核分裂生成物からのガン マ線の寄与は小さい<sup>[4]</sup>ため、本研究ではキャスク 内部の1次線源としては核分裂中性子のみを考慮 した。貯蔵庫外壁の構造は建屋内側から鉄 6cm、 プロピレングリコール水(以後 PG 水と略) 20cm、 鉄 6cm であり、PG 水層中には二次ガンマ線低減 のためにホウ素が 3000ppm 添加されている。想定 する貯蔵庫はモジュラー型貯蔵庫であり敷地境界 線量限度まで建屋を増設することができるが、今 回は簡単のため2ユニット構成で合計4基のキャ スクが収納されている場合を仮定し計算を行っ た。まず、リングディテクター(ring detector: 任意の点から一定の半径上での平均的物理量を計 算するタリー)で貯蔵庫外の線量減衰を計算した。 次にメッシュタリーを用いて貯蔵庫内部・外部の フラックス分布を計算し、ストリーミング経路の 推定を行った。貯蔵庫内部の計算では給排気ダク トの径を考慮して、貯蔵庫外の計算では貯蔵庫全 体の大きさを考慮して、メッシュタリーの解像度 はそれぞれ 5cm、50cm 程度に設定した。

## 5.計算結果

MCNPX2.5E 及び ENDF/B-VI<sup>[5]</sup>に基づく連続エ ネルギーライブラリを用いて中間貯蔵庫敷地 内の中性子線量及び貯蔵庫内の中性子フラッ クス分布を計算した。貯蔵庫外での距離による 線量の減衰の結果を示したものが図2である。 このグラフを見るとガンマ線は貯蔵庫外では 距離の二乗に反比例して減衰していることが わかる。一方、中性子線量はガンマ線量に比べ 減衰が穏やかであり比較的遠距離にならなけ れば距離の二乗に反比例して減衰しない。これ は中性子の場合、フラックス分布が比較的非等 方的であり、貯蔵庫からの直接線のみではなく 貯蔵庫外からの散乱線が大きく寄与している 可能性を示唆している。

メッシュタリーにより貯蔵庫内のフラック ス分布を計算した結果が図 3(中性子)図 4(ガ ンマ線)である。ここで「×断面」は貯蔵庫中 心で図1と平行に切断した断面を、「 v 断面」 は貯蔵庫中心でx断面に対し垂直に切断した断 面を指している。貯蔵庫はどちらの方向に対し ても対称であるため断面の半分のみをプロッ トしている。図3左では下部に吸気ダクトがあ り散乱された中性子がダクト内を輸送されて いるが、ダクトが3回屈曲する間に十分減衰し ていることがわかる。これは図4のガンマ線の 場合でも同様である。しかしながら図3右の上 部排気ダクト付近に注目すると貯蔵庫斜め上 方に中性子が漏れていることが確認できる。上 部ダクト近傍を拡大した図5を見ると、この中 性子漏れはダクト付け根接合部(ダクト壁内水 タンクの底部)の鉄部分を透過していることが わかる。貯蔵庫中心~50mまでの敷地内フラッ クス分布を示したのが図 6(中性子)、図 7(ガ ンマ線)であるが、これを見ても貯蔵庫斜め上 方へ中性子が放出されている様子が見られる。 この貯蔵庫外へ放出された中性子が大気中で 散乱され(スカイシャイン現象)敷地境界線量 が増大していることがわかる。





図 3.中性子フラックス分布の常用対数プロット図 (単位:cm<sup>-2</sup>/source neutron):断面、右:y断面



図5.図2右、上部排気ダクト近傍拡大図(図中 黒線枠内は中性子遮蔽用水タンク)



図6.敷地内中性子フラックス分布常用対数 プロット図(単位:cm<sup>-2</sup>/source neutron)y 断面



図 7 . 敷地内ガンマ線フラックス分布常用対数 プロット図(単位:cm<sup>-2</sup>/source neutron)y 断面

## 6.補償遮蔽の設置

前章での結果により貯蔵庫上部排気ダクト の水タンク底部から中性子が漏れていること を確認した。次にこの漏れに対し遮蔽を追加し その効果を計算した。除熱のための空気の流れ



図 4 . ガンマ線フラックス分布の常用対数プロット図 (単位:cm<sup>-2</sup>/source neutron):x断面、右:y断面

を阻害しないような補償遮蔽としてダクト付け根を取り囲むように三角柱状のポリエチレンブロックを配置し、その外側に鉄板を重ねた。この補償遮蔽追加の様子を表したのが図8であり、同様の計算を行った結果が図9、図10である。それぞれ図3、図6と比較すると貯蔵庫外への漏れが効果的に軽減されている様子



図8.補償遮蔽設置図(濃灰色:ポリエチレンブロッ クによる補償遮蔽、黒色:鉄、薄灰色:水)



図9.補償遮蔽設置後の貯蔵庫内フラックス分布 常用対数プロット(単位:cm<sup>-2</sup>/souce neutron)

## 6.まとめ

原子力関連施設の敷地境界線量では非常に 小さな線量のみが許容され、使用済燃料貯蔵庫 の様に遮蔽壁にダクト設けられている体系で はストリーミング・スカイシャイン対策が重要 となる。本研究では MCNPX のメッシュタリー機 能により中性子漏洩箇所を推定し、わずかな補 償遮蔽の設置により 40%程度の敷地境界線量削 減を達成した。本研究で用いたような補償遮蔽 では根本的な施設設計の変更無しに線量を低 減できるため非常に有効な手段といえる。

以上のようにメッシュタリーによる空間フ ラックス分布計算の有用性と、中間貯蔵施設に おける敷地境界線量低減対策のための補償遮 がわかる。補償遮蔽設置前と設置後の貯蔵庫外 での線量をまとめたものが表1である。補償遮 蔽の設置により貯蔵庫外での線量が低減され ており、特に距離が離れるほど低減率は大き く、中性子線量の減衰傾向が距離の逆自乗に近 づいていることがわかる。

### 表1.補償遮蔽追加前/後の中性子線量

(単位:pSv/source neutron)

距離(m)	追加前	追加後	比(後/前)
10	2.26E-11	1.89E-11	0.84
15	1.36E-11	1.05E-11	0.77
20	9.49E-12	6.65E-12	0.70
25	6.92E-12	5.05E-12	0.73
30	5.38E-12	3.82E-12	0.71
50	2.39E-12	1.46E-12	0.61
70	1.27E-12	8.08E-13	0.64
100	8.15E-13	3.73E-13	0.46



図10.補償遮蔽設置後の貯蔵庫外フラックス分布 常用対数プロット(単位:cm<sup>-2</sup>/source neutron)

蔽の一例を示すことができた。

#### 7.謝辞

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学 省原子力試験研究費によって、また株式会社オー・ シー・エルとの共同研究として実施された。

#### 参考文献

- [1]原子力委員会「発電用軽水型原子炉施設周辺の 線量目標値に関する指針」(昭和58年原子力 委員会決定、平成元年一部改訂)
- [2]Laurie S. Waters, Editor, "MCNPX<sup>™</sup> USER'S MANUAL Version 2.4.0", Los Alamos National Laboratory, LA-CP-02-408, (2002)

- [3]J. F. Briesmeister, Editor, "MCNP<sup>TM</sup>-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C", Los Alamos National Laboratory, LA-13709-M (2000).
- [4]K. Ueki, et al., "Using the Monte Carlo Coupling Technique to Evaluate the Shielding Ability of a Modular Shielding House to Accommodate Spent-Fuel Transportable Storage Casks", Nucl. Technol., 141, 177 (2003).
- [5]Dermott E. Cullen, "POINT 2004 A Temperature Dependent ENDF/B-VI, Release 8 Cross Section Library" University of California, Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-TR-202284(2004).