研究論文

MCNP コードの金属キャスク貯蔵方式中間貯蔵施設線量評価への適用

小佐古 敏荘¹, 飯本 武志¹, 石川 智之^{2,*}, 坪井 孝文²,
寺村 政浩³, 岡村 知巳⁴, 成宮 祥介⁵

Application of Dose Evaluation of the MCNP Code for Interim Spent Fuel Cask Storage Facility

Toshiso KOSAKO¹, Takeshi IIMOTO¹, Satoshi ISHIKAWA^{2,*}, Takafumi TSUBOI²,
Masahiro TERAMURA³, Tomomi OKAMURA⁴ and Yoshiyuki NARUMIYA⁵

¹Tokyo University, 2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

²ITOCHU Techno-Solutions Corp., 3-2-5 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-6080, Japan

³Toyo Engineering Corp., 2-8-1 Akanehama, Narashino-shi, Chiba 275-0024, Japan

⁴The Tokyo Electric Power Co., Inc., 1-1-3 Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8560, Japan

⁵The Kansai Electric Power Co., Inc., 3-6-16 Nakanoshima, Kita-ku, Osaka 530-8270, Japan

(Received August 30, 2006 and accepted in revised form January 22, 2007)

The interim storage facility for spent fuel metallic cask is designed as a concrete building structure with air inlet and outlet for circulating the natural cooling. The feature of the interim storage facility is big capacity of spent fuel at several thousands MTU and restricted site usage. It is important to evaluate realistic dose rate in shielding design of the interim storage facility, therefore the three-dimensional continuous-energy Monte Carlo radiation transport code MCNP that exactly treating the complicated geometry was applied. The validation of dose evaluation for interim storage facility by MCNP code were performed by three kinds of neutron shielding benchmark experiments; cask shadow shielding experiment, duct streaming experiment and concrete deep penetration experiment. Dose rate distributions at each benchmark were measured and compared with the calculated results. The comparison showed a good consistency between calculation and experiment results.

KEYWORDS: *spent fuel cask storage, shielding benchmark experiment, duct streaming, cask shadow shielding, concrete deep penetration, Monte-Carlo, MCNP, neutron*

I. 緒 言

国内で計画されている使用済燃料中間貯蔵施設(以下、「中間貯蔵施設」という。)は、使用済燃料を輸送・貯蔵兼用の金属キャスクに封入し、コンクリートを躯体とした建屋の中で貯蔵する施設である。この金属キャスク貯蔵方式を採用する中間貯蔵施設は、基本的に金属キャスクにより安全性が担保されているが、貯蔵容量が数千tと大規模な施設となること、現行の原子力施設(原子力発電所、再処理施設等)に比べ敷地境界が近いことから、金属キャスクからの放射線による一般公衆の線量評価では、建屋による

補助的な遮へいを考慮する必要がある、適切かつ合理的な評価手法が求められる。

中間貯蔵施設の線量評価においては、金属キャスクが多数離散的に配置されている問題や、近い敷地境界のために非常に厚くなる建屋の壁、天井部のコンクリート遮へい、金属キャスクの除熱のために建屋に開けられた大きな給排口部からのストリーミングの問題を適切に評価しなければならない。これらの評価に、現行の許認可申請等の遮へい解析で使用されている1次元輸送計算コードANISN¹⁾や2次元輸送計算コードDOT²⁾による1次元や2次元での近似では適切なモデル化が難しいため、計算結果が過大となり、必要以上に建屋の壁や天井を厚くしたり、敷地境界への距離を確保しなければならない可能性がある³⁾。この問題を解決するため、中間貯蔵施設の遮へい解析に3次元形状の正確な取り扱いが可能な3次元モンテカルロ評価手法を導入することを検討した。その結果、3次元モンテカルロ評価手法は、現行の1次元や2次元計算コード

¹ 東京大学

² 伊藤忠テクノソリューションズ株

³ 東洋エンジニアリング株

⁴ 東京電力株

⁵ 関西電力株

* Corresponding author, E-mail: satoshi.ishikawa@ctc-g.co.jp

に比べ、より現実的な評価が可能であり、精度検証等のいくつかの検討課題はあるものの、敷地境界の線量に対して寄与が大きい給排気口部ダクトストリーミングにおける中性子の低減効果が顕著である等、中間貯蔵施設における遮へい設計の合理化に対して有効であるとの見通しが得られた。

本研究では、特に施設の遮へい構造の合理化に有効な中性子に着目し、3次元モンテカルロ評価手法を中間貯蔵施設の遮へい解析に適用することの妥当性を確認するため、新たに中性子ベンチマーク実験の策定、実験および実証解析を実施した。使用した計算コードは、米国 Los Alamos 国立研究所 (LANL) において開発された中性子、ガンマ線および2次ガンマ線を対象とする汎用の3次元連続エネルギーモンテカルロ計算コード MCNP^{4,5)}である。MCNPコードは、米国の使用済燃料貯蔵施設の審査指針である NUREG-1567⁶⁾に遮へい解析ツールとして記載されており遮へい設計、線量評価等で広く使用されている^{7~12)}。

II. MCNP コードによる線量評価の検討課題

MCNP コードは、形状を忠実に模擬できるため、中間貯蔵施設の線量評価においては、建屋内に配列される金属キャスクを、線源であると同時に他のキャスクに対する遮へい体(相互遮へい)として取り扱うことが可能となるとともに、建屋の給排気口部からのダクトストリーミング解析においては、ストリーミング線量の低減のために設置する迷路構造などをモデル化することが可能となり、合理的な遮へい設計を実現することができる。ただし、MCNPコードは、国内における許認可申請での使用実績が少ないこと、相互遮へい効果や大口径のダクトストリーミングに関する実験例が少ないことから、解析の妥当性を検証する必要がある。また、建屋の壁・天井部のコンクリートは、敷地境界における線量の低減の観点から、相当の厚さとなる可能性があり、コンクリートの深層透過に関する計算精度の検証も必要である(第1図)。

1. 相互遮へい効果

中間貯蔵施設の線量評価では、金属キャスクの配列によ

る相互遮へい効果を考慮することが遮へい設計の合理化の観点で有意と考えられる。ただし、相互遮へい効果を考慮した適切なベンチマーク実験が存在しないことから、金属キャスクの相互遮へいによる線量低減効果および解析の妥当性について検証が必要である。また、基本設計段階で行う線量評価では、使用する金属キャスクが決まっていない可能性があることや、複数のキャスクを使用する場合にはすべての金属キャスクの構造を忠実にモデル化することは合理的ではないため、安全裕度を考慮した適切な金属キャスクのモデル化の検討が必要である。

2. ダクトストリーミング

中間貯蔵施設の場合、敷地境界までの距離が短いことから、建屋の壁、天井部のコンクリートが相当の厚さになるため、バルク透過成分に比べて、建屋の給排気口部(開口部)からのストリーミング成分の寄与が大きくなると予想される。現在計画中の中間貯蔵施設では、開口部からのストリーミング線量を低減するため、建屋の給排気口部を迷路構造や、コンクリート製のスリット板を設置するルーバー構造とすることが検討されている。しかしながら、中間貯蔵施設のように大口径のダクトストリーミングを対象とした実験^{13,14)}は少なく、かつ線量を低減するためのコンクリート製ルーバーによる遮へい実験は報告されていないため、解析の妥当性について検証が必要である。

3. コンクリート深層透過

コンクリートの深層透過については、厚さ 60 cm までのベンチマーク実験がこれまでに報告されている¹⁵⁾。しかしながら、現在計画中の中間貯蔵施設では、建屋の壁、天井部のコンクリート厚は、100 cm 程度となる可能性があり、これらに対応する計算精度の検証が必要である。また、コンクリートは、その製造方法によって密度や元素組成にばらつきがあり、特に水素原子(水分)の含有量の差は中性子の遮へい性能に大きく影響することから、計算精度検証に当たっては、含有量の違いについても考慮する必要がある。

第1図 中間貯蔵施設における放射線経路

III. 実験の概要

MCNP コードによる線量評価の検討課題を解決するために、新たに相互遮へい効果、ダクトストリーミングおよびコンクリート深層透過の3つのベンチマーク実験について実験計画を策定した。施設選定および予備解析を行った後、実験を実施した。

1. 実験施設

中間貯蔵施設のキャスク配列や給排気口部を模擬するための十分な空間と中性子源を確保できる点からモスクワ物理工科大学の研究用原子炉 IRT 炉で実験を実施した。IRT 炉は、出力 2.5 MW の水プール型炉であり、本実験で使用した水平実験孔の出口直径は 15 cm、中心軸の高さは床上 87.5 cm である(第 2 図)。

2. ビーム散乱体の設置

相互遮へい効果実験およびダクトストリーミング実験の線源は、中性子空間線量分布を確認する観点から、対象とする断面に対して線量率分布が平坦化していること、金属キャスク表面のエネルギースペクトルに近似していることが望ましい。しかしながら、水平実験孔の線源は、ビーム状でかつ炉心のエネルギースペクトルであるため、ビーム散乱体をビーム孔出口に設置し、線量率分布の平坦化およびキャスク表面のエネルギースペクトルを模擬した。ビーム散乱体は、高速中性子と熱中性子の遮へいに対応した鉄とポリエチレンを組合せた対角面幅 30 cm、厚さ 35 cm

の八角柱である(第 3 図(a))。

3. 相互遮へい効果実験

実際の金属キャスクを1/3スケールで模擬したキャスク(以下、「模擬キャスク」という。)を線源の周囲に格子状に配列して、中性子線量などの低減効果を確認するための実験を実施した。模擬キャスクを配列した外側周辺(以下、「外縁部」という。)の測定位置等における中性子束や中性子線量当量率を測定した。また、特定位置での中性子エネルギースペクトルを測定した(第 3 図(b))。

4. ダクトストリーミング実験

中間貯蔵施設の給排気口部のダクトおよびその内部に設置するコンクリート製ルーバーを模擬したモデルを製作

第 2 図 実験炉の概観および配置

(a) ビーム散乱体

(b) キャスク相互遮へい

(c) ダクトストリーミング

(d) コンクリート深層透過

第 3 図 各ベンチマーク実験風景

し、迷路構造およびルーバーによるストリーミング線量の低減効果を確認するための実験を実施した。ダクト内を中心軸上および断面内に測定位置を設定し、中性子束と線量の分布を測定した。また、ルーバーによるストリーミング線量の低減効果を確認するために、ルーバー前後の中性子束と線量も測定した。あわせてダクト内主要点の中性子エネルギースペクトルを測定した(第3図(c))。

5. コンクリート深層透過実験

建屋の壁、天井部を模擬したコンクリート平板(以下、「平板供試体」という。)を実験孔出口に最大 120 cm まで積層して、中性子線量の減衰効果を確認するための実験を実施した。積層するコンクリートの枚数を変化させ、コンクリート表面および表面から 1 m(以下、「at 1 m」という。)位置での中性子線量当量率の測定を行った。コンクリート表面では、中性子線量当量率分布を確認するため、ビーム中心軸位置、そこから 25 cm 離れた位置にある上、下、左および右の 5 ヶ所に測定点を設定した(第3図(d))。

IV. 実験解析

1. 解析手法

IRT 炉水平実験孔出口における中性子エネルギースペクトルは、核分裂飛跡検出器により測定したデータをアンフォールディングすることにより求めた。計算に使用した線源の中性子エネルギースペクトルを第4図に示す。また、ビーム孔から約 4.2 m 離れた炉心に相当する位置に点線源を設定し、ビームの拡がり模擬した。MCNP コードのバージョンは、MCNP 4 を採用した。断面積ライブラリーは、ENDF/B-VI をベースとして MCNP コード用に作られた内蔵ライブラリーを用いた。エスティメータは、レムカウンタと同じ大きさ(直径 25.4 cm の球)の飛程検出器評価法(cell)および面検出器評価法(surface)を使用した。エスティメータの相対誤差(FSD)は、0.1未満を基準とした^{4,5)}。分散低減法は、モデル上の各領域のエネルギー幅に対して設定を行う Weight Window 法を採用した^{4,5)}。レムカウンタの中性子線量率変換係数には、ICRP.

第4図 中性子エネルギースペクトル

Pub 51 対応の 1 cm 線量当量の値を採用した。

2. 相互遮へい効果実験解析

(1) 解析条件

模擬キャスクの配列数、外筒厚さおよび配列間隔を変化させた場合の各測定点でのレムカウンタによる中性子の 1 cm 線量当量率(以下、「中性子線量率」という。)を評価した。

線源部は、実験施設内でのガンマ線量率を低減するためにビーム散乱体全体を鉛で遮へいし、さらに鉄製半円筒のカバー(以下、「鉄製カバー」という。)で覆うことによって実験孔からのビーム状の中性子を散乱させて、強度分布がほぼ均一となる円柱線源とした。ビーム散乱体モデルを第5図、鉛遮へい体付きビーム散乱体および鉄製カバーモデルを第6図に示す。

模擬キャスクは、直径 90 cm および高さ 180 cm の円環タンク形状とし、外筒を鉄で、その内部に中性子遮へい材

第5図 ビーム散乱体計算モデル

第6図 鉛遮へい体付きビーム散乱体および鉄製カバー計算モデル

として水を充填した。水の充填層厚さは、予備解析の結果により模擬キャスク表面の中性子の散乱や吸収に影響を与えない厚さの10 cmとした。模擬キャスクの外筒厚さは、金属キャスクの外筒厚さを考慮して2 cmとし、内側に厚さ2 cmの円柱殻状の板を追加できる構造とすることで、合計4 cm厚の外筒を模擬できる。模擬キャスクの計算モデルを第7図、模擬キャスクを2層配置した場合の計算モデルを第8図に示す。鉄製カバーおよび模擬キャスク(材質:炭素鋼)、並びにビーム散乱体(材質:鉄とポリエチレン)の組成は化学分析値を用いた。計算に使用した原子個数密度を第1表に示す。

計算ケースは、模擬キャスクの配列を「なし/1層/2層」とした3ケースである。外筒厚さは2 cm(基本ケース)と

第7図 模擬キャスク計算モデル

4 cm, 配列間隔は140 cm(基本ケース)と110 cmである。

(2) 解析結果

(a) 模擬キャスクなしの場合の中性子線量率分布

相互遮へい効果実験計算ケースを第2表に示す。模擬キャスクを配置しないケースでは、線源部近傍と模擬キャスク配列時の外縁部における中性子線量率を測定した。線源部近傍の測定方向は、A-ライン(実験孔出口から前方方向)、B-ライン(実験孔出口から90°方向)およびC-ライン

第8図 相互遮へい効果計算モデル(平面図)

第2表 相互遮へい効果実験計算ケース

計算ケースID	キャスク配列	鉄の厚さ(cm)	キャスク中心間距離(cm)
000	キャスクなし	—	—
120	1層	2	140
220	2層	2	140
240	2層	4	140
221	2層	2	110

第1表 計算に使用した原子個数密度

単位: 個/cm³

元素	空気	鉄 (ビーム散乱体)	鉄 (キャスク内筒・外筒)	ポリエチレン	水	鉛
H	7.20E+15 ^{a)}	—	—	7.88E+22	6.61E+22	—
C	7.58E+15	—	—	3.95E+22	—	—
N	3.91E+19	—	—	—	—	—
O	1.05E+19	—	—	—	3.30E+22	—
Fe	—	8.38E+22	8.49E+22	—	—	—
Pb	—	—	—	—	—	3.30E+22
密度(g/cm ³)	1.19E-03	7.774	7.87	0.918	0.988	11.35

a) 7.20E+15 = 7.20 × 10¹⁵

(実験孔出口から45°方向)の3方向である(第9図)。外縁部の測定位置は、第8図のf-ラインとt-ラインである。線源部近傍の3方向の中性子線量率を第10図に示す。外縁部における中性子線量率を第11図に、計算値(C)と測定値(E)の比率(以下、「C/E」という。)を第3表に示す。計算値は20%以内で測定値と一致しており、中性子線量率分布をよく再現している。

(b) 模擬キャスクを配列した場合の中性子線量率分布
模擬キャスクを配列した場合の外縁部(f-ラインとt-ラ

第9図 3方向計算モデル(平面図)(模擬キャスクがない場合)

第10図 3方向の中性子線量率分布(模擬キャスクがない場合の線源部近傍)

第11図 中性子線量率分布(模擬キャスクがない場合の外縁部)

第3表 模擬キャスク配列の違いによる中性子線量率

キャスク 配列	測定値 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)			測定値 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)		
		測定値 (E)	計算値 (C)	(C/E)		測定値 (E)	計算値 (C)	(C/E)
なし (000)	f01	2.2E+01	2.1E+01	0.96	l01	2.4E+01	2.2E+01	0.94
	f03	1.8E+01	1.7E+01	0.96	l03	2.6E+01	2.6E+01	1.01
	f05	1.7E+01	1.8E+01	1.04	l05	2.3E+01	2.4E+01	1.04
	f07	1.6E+01	1.6E+01	1.02	l07	1.9E+01	2.2E+01	1.16
	f09	1.5E+01	1.5E+01	1.01	l09	1.7E+01	1.8E+01	1.08
	f11	1.4E+01	1.3E+01	0.96	l11	1.5E+01	1.6E+01	1.04
	f13	1.3E+01	1.3E+01	1.00				
1層 (120)	f01	7.8E+00	7.3E+00	0.94	l01	4.1E+00	4.1E+00	1.00
	f03	8.3E+00	7.7E+00	0.93	l03	3.7E+00	4.0E+00	1.09
	f05	9.9E+00	1.0E+01	1.06	l05	4.8E+00	4.7E+00	0.97
	f07	7.3E+00	7.5E+00	1.02	l07	4.8E+00	5.5E+00	1.14
	f09	5.2E+00	4.4E+00	0.84	l09	4.8E+00	5.4E+00	1.12
	f11	3.5E+00	2.8E+00	0.81	l11	4.6E+00	5.7E+00	1.25
	f13	3.1E+00	2.4E+00	0.76				
2層 (220)	f01	5.7E+00	4.8E+00	0.84	l01	1.5E+00	1.4E+00	0.93
	f03	5.5E+00	5.5E+00	1.00	l03	2.8E+00	2.9E+00	1.04
	f05	2.8E+00	2.4E+00	0.86	l05	1.5E+00	1.3E+00	0.85
	f07	2.7E+00	2.1E+00	0.79	l07	1.6E+00	1.5E+00	0.94
	f09	2.2E+00	1.7E+00	0.75	l09	1.4E+00	1.2E+00	0.85
	f11	2.0E+00	1.5E+00	0.77	l11	3.4E+00	3.7E+00	1.09
	f13	1.5E+00	1.3E+00	0.86				

イン)における中性子線量率とそのC/Eを、配列のパラメータごとに示す。模擬キャスク配列数を変化させた場合の中性子線量率とC/Eを第12図および第3表に、模擬キャスク外筒厚さが4 cmのときの結果を第13図および第4表に、模擬キャスクの配列間隔が110 cmのときの結果を第14図および第5表に示す。外縁部の計算値は、キャスク中心間距離110 cmのf13, i11以外の測定値と、約30%以内で一致した。模擬キャスク2層目配列計算時におい

て、2層目のキャスク遮へい効果が他の測定点と比較しても特に小さい測定点f01, f03, i03, i11は、今後の検討では評価対象から除外(以下、「除外点」という。)する。

(c) 相互遮へい効果による中性子線量減衰率

外縁部(f-ラインとt-ライン)における相互遮へい効果による減衰率を、「キャスク1層/なし」については第15図(a)に、「キャスク2層/1層」については第15図(b)に示す。除外点を除いた評価位置における中性子線量平均減衰率を第6表に示す。計算値と測定値は10%以内で一致した。

(d) 模擬キャスク外筒厚さの効果

外縁部(f-ラインとt-ライン)における、模擬キャスク外筒厚さの効果(厚さ4 cm/2 cm)を第16図に、線量率の比を第7表に示す。レムカウンタによる中性子線量率の測定結果は、外筒鉄の厚さを2 cmから4 cmに増加したことにより、平均して10%程度増加する傾向がみられる。計算結果は、平均して5%程度の増加で、測定結果に比べて厚さの効果の表れはわずかに小さい。計算誤差が約10%、測定誤差が約5~15%であるため、厚さの効果の再現性について結論を出すことは難しいと考える。ただし、厚さの違いによる測定値の比(A)と計算値の比(B)の比率(B/A)が約15%以内であることから、計算結果は妥当で

第12図 模擬キャスク配列の違いによる中性子線量率分布(外縁部)

第13図 模擬キャスク外筒厚さの違いによる中性子線量率分布(外縁部)

第14図 模擬キャスク配列間隔の違いによる中性子線量率分布(外縁部)

第4表 模擬キャスク外筒厚さが4 cmのときの中性子線量率

キャスク配列	測定値ID	中性子線量率(mSv/h/MW)			測定値ID	中性子線量率(mSv/h/MW)		
		測定値(E)	計算値(C)	(C/E)		測定値(E)	計算値(C)	(C/E)
2層 (240)	f01	5.9E+00	5.3E+00	(0.90)	i01	1.8E+00	1.6E+00	0.91
	f03	6.2E+00	5.7E+00	(0.92)	i03	3.0E+00	3.0E+00	(1.00)
	f05	3.2E+00	2.6E+00	0.82	i05	1.6E+00	1.4E+00	0.87
	f07	3.0E+00	2.0E+00	0.68	i07	1.6E+00	1.4E+00	0.86
	f09	2.3E+00	1.7E+00	0.73	i09	1.4E+00	1.4E+00	0.98
	f11	2.1E+00	1.5E+00	0.72	i11	3.0E+00	3.8E+00	(1.28)
	f13	1.9E+00	1.3E+00	0.68				

除外するデータのC/Eは()で示す。

(a) 「キャスク 1 層/なし」

(b) 「キャスク 2 層/1 層」

第15図 相互遮へい効果による中性子線量減衰率

第16図 模擬キャスク外筒厚さの効果(厚さ 4 cm/2 cm)

第17図 模擬キャスク配列間隔の効果(キャスク中心間距離 110 cm/140 cm)

第 5 表 模擬キャスク配列間隔が 110 cm のときの中性子線量率

キャスク 配列	測定値 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)			測定値 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)		
		測定値	計算値	C/E		測定値	計算値	C/E
2 層 (221)	f01	5.7E+00	4.5E+00	(0.79)	i01	1.5E+00	1.3E+00	0.88
	f03	5.5E+00	4.0E+00	(0.73)	i03	1.9E+00	1.8E+00	(0.93)
	f05	2.8E+00	2.1E+00	0.74	i05	1.2E+00	1.0E+00	0.85
	f07	2.4E+00	1.7E+00	0.70	i07	1.2E+00	1.0E+00	0.83
	f09	2.2E+00	1.6E+00	0.72	i09	1.3E+00	1.1E+00	0.81
	f11	1.8E+00	1.3E+00	0.71	i11	1.5E+00	9.8E-01	(0.65)
	f13	1.7E+00	1.1E+00	0.65				

除外するデータの C/E は()で示す。

第 6 表 相互遮へい効果による中性子線量の平均減衰率

	測定値 (E)	計算値 (C)	(C/E)
1 層/なし	0.31	0.29	0.95
2 層/1 層	0.38	0.34	0.90

ある。

(e) 模擬キャスク配列間隔の効果

外縁部(f-ラインとt-ライン)における, 模擬キャスク配列間隔の効果(キャスク間隔 110 cm/140 cm)を第17図

に, 線量率の比を第 8 表に示す。キャスク配列間隔の 140 cm から 110 cm への変化に対して, 中性子線量率が20%以上減少している1ラインの測定点は i03, i05, i07, i11 である。i11 を除いて, 計算結果は, この配列間隔の効果を約10%以内の精度で再現した。

3. ダクトストリーミング実験

(1) 解析条件

ダクト内やコンクリート製ルーバーの枚数を変化させ, ルーバー前後における各測定点でのレムカウンタによる中性子線量率の測定値と計算値を比較した。

第7表 模擬キャスク外筒厚さに対する線量率の比(厚さ 4 cm/2 cm)

測定点 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)			測定点 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)		
	測定値の比 (A)	計算値の比 (B)	(B)/(A)		測定値の比 (A)	計算値の比 (B)	(B)/(A)
f01	1.04	1.11	(1.07)	101	1.20	1.17	0.98
f03	1.13	1.03	(0.92)	103	1.07	1.03	(0.96)
f05	1.14	1.09	0.95	105	1.07	1.09	1.02
f07	1.11	0.96	0.86	107	1.00	0.91	0.91
f09	1.05	1.01	0.96	109	1.00	1.15	1.15
f11	1.05	0.99	0.94	111	0.88	1.03	(1.17)
f13	1.27	1.00	0.79				

除外するデータの(B)/(A)は()で示す。

第8表 模擬キャスク中心間距離に対する線量率の比(110 cm/140 cm)

測定点 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)			測定点 ID	中性子線量率(mSv/h/MW)		
	測定値の比 (A)	計算値の比 (B)	(B)/(A)		測定値の比 (A)	計算値の比 (B)	(B)/(A)
f01	1.00	0.94	(0.94)	101	1.00	0.94	0.94
f03	1.00	0.72	(0.72)	103	0.68	0.61	(0.90)
f05	1.00	0.86	0.86	105	0.80	0.80	1.00
f07	0.89	0.79	0.89	107	0.75	0.66	0.88
f09	1.00	0.95	0.95	109	0.93	0.89	0.96
f11	0.90	0.84	0.93	111	0.44	0.26	(0.60)
f13	1.13	0.85	0.75				

除外するデータの(B)/(A)は()で示す。

中間貯蔵施設の給排気口部のダクト形状を模擬するものとして、1回90°屈曲矩形コンクリートダクトを実験孔の前に設置した。ダクトの内法寸法は、実験孔の中心軸高さ87.5 cmを考慮して高さ180 cm、約6 m四方以上の実験施設の広さから幅は160 cmとした。ダクト中心軸長さについても実験施設の広さを考慮して、第1脚が470 cm、第2脚が550 cmとした。ダクト側壁および天井の厚さは、予備解析の結果から、ダクト周端部から放出された中性子が第2脚内のルーバー付近の測定値に対して影響しないことを考慮し50 cmとした。コンクリート製ルーバーは、1回屈曲ダクトの2脚目位置に設置した。ルーバー板の厚さは施工性と中性子線量低減効果から10~15 cmが必要となるが、ダクトの断面寸法を考慮して12.5 cmとした。ルーバー板を設置する第2脚の長さでルーバー後方の測定点におけるダクト開口部等からの散乱放射線の影響低減を考慮して長さは195 cmとした。高さは、ルーバー板をダクトの床から天井に渡って鉛直方向に設置するために172 cmとした。ダクトストリーミング計算モデルを第18図に示す。ダクト内第2脚におけるレムカウンタ測定点を第19図に示す。ダクト壁とルーバーのコンクリート組成は化学分析値を用いた。計算に使用した原子個数密度を第9表に示す。

計算ケースは、ルーバーの設置枚数を「なし/3枚/4枚」とした3ケースである。

第18図 ダクトストリーミング計算モデル

第19図 ダクト内のレムカウンタ測定点

第20図 ダクト軸上の中性子線量率分布

第9表 ダクトストリーミング計算に使用したコンクリートの原子個数密度

単位: 個/cm³

元 素	第1脚の ダクト側壁	第2脚の ダクト側壁	天井 ルーバー	床
H	1.04E+22	1.06E+22	9.71E+21	9.22E+21
C	2.18E+21	2.04E+21	3.23E+21	5.42E+20
O	4.44E+22	4.60E+22	4.27E+22	3.90E+22
Na	1.19E+20	1.69E+20	9.33E+19	5.05E+19
Mg	6.90E+20	4.92E+20	9.65E+20	3.20E+20
Al	1.05E+21	1.22E+21	7.85E+20	8.18E+20
Si	1.33E+22	1.45E+22	1.12E+22	1.42E+22
S	1.32E+20	6.53E+19	1.43E+20	1.34E+20
Cl	7.70E+17	7.85E+17	7.56E+17	6.56E+17
K	2.72E+20	3.17E+20	2.33E+20	1.60E+20
Ca	4.91E+21	4.21E+21	5.69E+21	2.46E+21
Mn	9.93E+18	7.60E+18	1.22E+19	1.06E+19
Fe	3.10E+20	2.99E+20	3.36E+20	2.62E+20
密度 (g/cm ³)	2.32	2.37	2.25	1.98

(2) 解析結果

(a) ダクト軸上の中性子線量率分布

ダクト軸上の中性子線量率を第20図に, そのC/Eを第10表に示す。第1脚のC/Eは0.95~1.1, 第2脚のC/Eは0.70~1.0となり, 計算値と測定値は約30%以内で一致し, 減衰傾向の再現性も良好である。

第21図 第2脚ダクト断面における中性子線量率分布

(b) ダクト断面の中性子線量率分布

第2脚のダクト断面における中性子線量率を第21図に示す。ルーバーなし, 3枚ルーバーの断面分布がよく再現

第10表 ダクト内(中心軸)の中性子線量率

測定位置	測定点ID	実験孔からの距離(m)	中性子線量率(mSv/h/MW)								
			測定値(E)	計算値(C)	(C/E)	測定値(E)	計算値(C)	(C/E)	測定値(E)	計算値(C)	(C/E)
ルーバー枚数			なし			4 枚			3 枚		
第1脚	a	0.7	8.4E+02	8.0E+02	0.95	—			—		
	b	1.5	4.7E+02	5.1E+02	1.08	—			—		
	c	2.3	2.8E+02	2.9E+02	1.03	—			—		
	d	3.1	1.6E+02	1.8E+02	1.12	—			—		
	e	3.9	1.1E+02	1.3E+02	1.11	—			—		
第2脚	i	4.7	8.0E+01	8.2E+01	1.02	—			—		
	j	5.2	3.8E+01	3.4E+01	0.90	4.0E+01	3.5E+01	0.87	4.1E+01	3.5E+01	0.85
	k	6.3	1.3E+01	9.5E+00	0.74	—			—		
	l	7.4	5.8E+00	4.1E+00	0.70	—			—		
	m	7.9	4.1E+00	3.1E+00	0.77	4.6E-01	4.0E-01	0.87	7.6E-01	5.1E-01	0.67

第11表 ルーバー前後位置での中性子線量率

測定位置	測定点jのC/E	測定点mのC/E
第2脚ルーバーなし	0.90	0.77
第2脚4枚ルーバー	0.87	0.79 ^{a)}
第2脚3枚ルーバー	0.85	0.72 ^{a)}

a) m ライン上にある測定点での平均値

第12表 コンクリート供試体の原子個数密度

単位: 個/cm³

養生処理	乾燥養生コンクリート		通常養生コンクリート	
密度(g/cm ³)	2.13	2.12	2.20	2.18
自由水(%)	0.52	0.40	3.10	2.72
総水分量(%)	5.68	6.72	9.01	9.11
H	7.99E+21	9.40E+21	1.27E+22	1.28E+22
C	2.51E+21	2.37E+21	2.60E+21	2.31E+21
O	3.71E+22	3.72E+22	3.94E+22	3.89E+22
Si	1.26E+22	1.24E+22	1.22E+22	1.21E+22
Al	9.88E+20	1.02E+21	1.03E+21	1.03E+21
Fe	2.88E+20	2.61E+20	2.92E+20	3.04E+20
Ca	5.39E+21	5.39E+21	5.59E+21	5.61E+21
Mg	7.00E+20	7.28E+20	7.66E+20	8.29E+20
K	2.74E+20	2.29E+20	2.59E+20	2.44E+20
Na	1.81E+20	1.56E+20	2.07E+20	1.57E+20
Mn	1.07E+19	9.02E+18	7.24E+18	7.20E+18
S	1.61E+20	1.44E+20	1.41E+20	1.50E+20
Cl	9.00E+18	7.17E+18	2.53E+18	5.04E+18
枚数	3	3	3	3

されている。ルーバー前後位置での中性子線量率の計算値と測定値の比率を第11表に示す。ルーバー後方部(測定点m)では、4枚ルーバーのC/Eの平均が0.79、3枚ルーバーのC/Eの平均が0.72となり、計算値と測定値は約30

%以内で一致した。

4. コンクリート深層透過実験

(1) 解析条件

平板供試体を複数枚積層し、コンクリート厚さを変化させた場合の各測定点でのレムカウンタによる中性子線量率の測定値と計算値を比較した。

平板供試体は、高さ120 cm×幅100 cm×厚さ20 cmの通常養生コンクリートおよび加熱炉内で100℃の状態での10日間加熱した乾燥養生コンクリートをそれぞれ6枚、合計12枚を製作した。平板供試体厚さは、実験場での取り扱い等で破損しないような厚さ、かつ中性子の遮へい性能への影響が大きい水素含有量(水分含有量)を一定に管理することが可能な厚さとして決定した。コンクリート深層透過実験の中性子減衰特性において、計算結果に大きく影響するコンクリートの組成については化学分析を行い、その結果を計算条件に反映した。計算に使用した平板供試体の原子個数密度を第12表に示す。乾燥養生コンクリートは、通常養生コンクリートに比べて自由水が約1/6に減少している。なお、コンクリート自身の中性子線量減衰特性を評価するため、平板供試体中央部の中性子照射範囲には鉄筋等は使用していない。

計算モデルでは、実験時の平板供試体の配列および実験現場での線量率を低減させるために周囲に組上げた遮へい用コンクリートブロックを忠実に再現した。コンクリート深層透過計算モデルを第22図、第23図に示す。平板供試体(#3)の横にある側部遮へいブロック(#4)のコンクリート厚さは100 cm、天井部遮へいブロック(#2)の厚さは80 cmである。ただし、炉壁側の側部遮へいブロック(#4)は設置が困難なため50 cmの遮へいブロックの1ブロックのみとなっている。この側部からの放射線の影響を小さくするために前方に遮へいブロック(#7)を配置した。

計算ケースは、通常養生および乾燥養生コンクリートの

第14表に示す。中心位置(C)では、計算値と測定値は約20%以内で一致した。

V. 結 語

1. 相互遮へい効果実験

相互遮へい効果実験では、測定誤差は中性子線量率で約5～15%である。計算値は約20%以内で測定値と一致しており、MCNP コードにより精度よく評価できることを確認した。また、キャスク配列による相互遮へい効果は有意であり、遮へい設計の合理化の面でも有効であること、および MCNP コードによる安全裕度を考慮した適切な金属キャスクのモデル化の検討が可能であることを確認した。

第25図 乾燥養生コンクリート透過後の中性子線量率 [測定方向：中心(C)]

2. ダクトストリーミング実験

ダクトストリーミング実験では、測定誤差は中性子線量率で約5～15%である。計算値は約30%以内で測定値と一致しており、MCNP コードにより精度よく評価できることを確認した。また、コンクリート製ルーバーの減衰効果は有意であり、遮へい設計の合理化の面でも有効であることを確認した。

3. コンクリート深層透過実験

コンクリート深層透過実験では、平板中央での測定誤差は約10%以内である。計算値は、厚さが40 cm から120 cm までの水分含有量の異なるコンクリートにおいて、約20%以内で測定値と一致しており、MCNP コードにより精度よく評価できることを確認した。

4. まとめ

MCNP コードによる線量評価の検討課題に対して、本研究において適切なベンチマーク実験と3次元モンテカルロ評価手法・MCNP コードによる計算結果との比較を行い、上記3つの課題に対して30%以内の計算精度であることが確認された。これは現行の許認可申請等で使用されている輸送計算コードのベンチマーク実験解析¹⁶⁾と比較しても、同等またはそれ以上の計算精度を有していることから、十分な計算精度を得られることが検証できた。

以上のことから、3次元モンテカルロ評価手法・MCNP コードは、中間貯蔵施設の遮へい設計および線量評価へ適用する評価手法および解析コードとして十分な妥当性を有していることがわかった。

本研究は、東京電力㈱、関西電力㈱を幹事とする北海道電力㈱、東北電力㈱、中部電力㈱、北陸電力㈱、中国電力㈱、四国電力㈱、九州電力㈱、日本原子力発電㈱、電源開発㈱との共同研究で実施した。

— 参考文献 —

- 1) W. W. Engle Jr., *ANISN, A, One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering*, K-1693 (1967).
- 2) RSIC Computer Code Collection, *DOT-3.5 Two-Dimensional*

第14表 乾燥養生コンクリート透過後の中性子線量率

供試体厚さ (cm)	中性子線量率 (mSv/h/MW)					
	測定位置：表面			測定位置：at 1 m		
	測定値 (E)	計算値 (C)	(C/E)	測定値 (E)	計算値 (C)	(C/E)
40	2.9E+03	3.5E+03	1.20	9.0E+02	9.0E+02	1.00
60	5.2E+02	5.0E+02	0.97	—	—	—
80	8.7E+01	7.5E+01	0.86	2.2E+01	1.8E+01	0.82
100	1.4E+01	1.2E+01	0.83	—	—	—
120	2.5E+00	2.1E+00	0.86	6.2E-01	4.8E-01	0.77

- Discrete Ordinates Radiation Transport Code*, CCC-276 (1975).
- 3) 財原子力安全研究協会, 使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法(金属キャスク方式), リサイクル燃料資源貯蔵施設安全設計・評価検討専門委員会 スカイシャイン線量評価検討ワーキンググループ(1999).
 - 4) J. F. Briesmeister, ed., *MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-12625-M (1997).
 - 5) J. F. Briesmeister, ed., *MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13709-M (2000).
 - 6) U. S. Nuclear Regulatory Commission, *Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities*, NUREG-1567 (2000).
 - 7) W. M. Boehnke, *Safety Analysis Report for Packaging (Onsite) Steel Waste Package*, HNF-4763, Rev. 0 (2000).
 - 8) D. A. Brownson, *Waste Package Design Methodology Report*, TDR-MGR-MD-000006, Rev. 01 (2001).
 - 9) K. T. Tsang, P. Pattantyus, "Direct and scatter radiation from a CANSTOR module," *Proc. 1998 ANS Radiat. Prot. Shield. Div. Top. Conf. Technol. New Century Vol. 1*, ANS Radiation Protection and Shielding Division Topical Conference (5th) Nashville, Tenn. (1998).
 - 10) E. L. Redmond II, "Methodology for calculating dose rates from storage cask arrays using MCNP," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **77**, 332-333 (1997).
 - 11) W. T. Urban, R. R. Roberts, G. P. Estes *et al.* "Application of MCNP to storage facility dose rate assessment," *Radiat. Prot. Shield. Vol. 1, Topical Meeting on Radiation Protection and Shielding*, No. Falmouth, Mass., 440-450 (1996).
 - 12) F. Lemay, "MCNP calculations for the licensing of a spent fuel dry storage facility," *Proc. 8th Int. Conf. Radiat. Shield. 1994 Vol. 2*, International Conference on Radiation Shielding (8th) Arlington, Tex., 765-771 (1994).
 - 13) K. Mio, T. Kurashige, T. Kosako, "The shielding effect of iron louvers for neutrons and gamma rays," *Nucl. Technol.*, **136**, 63-75 (2001).
 - 14) K. Mio, T. Kurashige, T. Kosako, "Experimental and calculational estimation of radiation streaming through a single bent duct with and without a louver type iron shield," *Proc. 8th Int. Con. Radiat. Shield.*, **2** (1994).
 - 15) K. Oishi, Y. Ikeda, H. Maekawa *et al.* "Experiment and analysis of neutron spectra in a concrete assembly bombarded by 14-MeV neutrons," *Nucl. Sci. Eng.*, **103**, 46-58 (1989).
 - 16) 財日本原子力学会, 中性子遮蔽ハンドブック, 放射線挙動工学研究専門委員会, 中性子遮蔽設計法ワーキング・グループ.
-