技術報告

429. MCNP—ラインビームレスポンス接続による
BWR タービンスカイシャイン線量評価手法の適用平沼 巨樹^{1,*}, 松岡 圭吾², 河野 直文², 石川 智之³, 滝吉 幸嗣³*Evaluation Technique on the BWR Turbine Skyshine Analysis Based on the
MCNP-Line Beam Response Coupled Method*Naoki HIRANUMA, Keigo MATSUOKA, Naofumi KAWANO,
Satoshi ISHIKAWA and Kouji TAKIYOSHI

A refinement of a simplified QAD-SKYSHINE calculation for gamma-rays skyshine emitted from a turbine building of nuclear power plant is performed by the hybrid method using the MCNP Monte Carlo code. In this method, a detailed Monte Carlo transport calculation is firstly used to determine the energy and emission angle of an crossing point of the gamma-rays through the turbine building wall into atmosphere. Then, the computationally efficient integral Line-Beam method is used to transport gamma-ray from this pseudosource to the distant location at which the skyshine dose is to be calculated. Where, the Line-Beam response functions are generated by the MCNP and fitted to the four-parameter formula.

The present developed method is able to estimate precisely skyshine dose within short time.

KEYWORDS: BWR type reactors, turbine skyshine, SKYSHINE, MCNP, and line beam response function

I. 緒 言

原子力発電プラント等の原子力関連施設周辺では、施設から放出される放射線による公衆への影響を考慮する必要があり、事業者は原子力関連施設に対する許認可の際に施設敷地境界での線量(敷地境界線量)が年間 $50 \mu\text{Gy}$ ($\approx 0.05 \text{ mSv}$) 以下になるように遮へい設計を行っている。沸騰水型軽水炉プラント(BWR)における敷地境界線量は、主蒸気中に含まれる ^{16}N から放出される 6.2 MeV の γ 線を起源としたタービン建屋からのスカイシャイン線(タービンスカイシャイン線)が支配的であり、計算機コードによる解析によって線量評価を実施している。

タービンスカイシャイン線を専用に解析する計算機コードとして、1972年に米国 RRA 社によって SKYSHINE¹⁾ コードが開発された。SKYSHINE は、建屋内にある 6.2 MeV の等方点線源からの γ 線によるスカイシャイン線を解析する計算機コードで、その後、1979年に中性子やスペクトル線源を扱うことができる SKYSHINE-II²⁾、1988年に SKYSHINE-III³⁾が開発されたが、タービンスカイシャイン線解析では主に初期の SKYSHINE の改良版が使用されている。

SKYSHINE は、線源として 6.2 MeV の単色等方点線源しか扱えないことから、タービン建屋内に存在する、主蒸気を内包したタービンや配管などの機器を点減衰核コード QAD⁴⁾を用いて3次元で体積線源にモデル化し、その機器ごとに鉛直方向遠方における線量評価値から機器中心位置での等価な点線源を作成している。この接続計算手法は QAD-SKYSHINE 手法と呼ばれている。一方、SKYSHINE での建屋遮へい体のモデル化は、直方体の建屋を1つの面あたり9分割(3×3)の領域に区切り、建屋内の遮へい構造物も含めた等価遮へい厚さと、3種類の組成(コンクリート、鉄、空気)を設定して建屋壁面および屋根を記述している。これら計算体系において、 ^{16}N の γ 線を近似した等方点線源から建屋内部の散乱、反射、透過効果をモンテカルロ法によって計算し、あらかじめ評価された壁面反射・減衰データから外壁表面で9分割に入る γ 線を各エネルギーおよび角度で積分し線束分布を求め、 γ 線のラインビーム法⁵⁾に接続して空気中におけるスカイシャイン線の解析を行っている。ラインビーム法は、空気中の散乱線による線量率を全散乱空間で積分した関数(Line Beam Response Function: LBRF)として評価する手法で、SKYSHINE はモンテカルロコード COHORT⁶⁾によって計算された LBRF を内蔵している。

この QAD-SKYSHINE 手法は、非常に短い計算時間で線量値の評価が可能である反面、実際は非等方体積線源であるタービンなどの機器を等方点線源として取り扱う点や、建屋内部の遮へい構造物のモデル化は壁面に投影することでは取り扱うことができない点、さらに建屋壁面の

¹ 東京電力㈱(Tokyo Electr. Power Co. Inc.)

² 東電設計㈱(Tokyo Electr. Power Service Co., Ltd.)

³ ㈱CRC ソリューションズ(CRC Solutions Corp.)

(2004年5月31日受理; 2005年2月16日査読通過)

* 著者連絡先: Tel. 03-4216-4947, Fax. 03-4216-4919,
E-mail: hiranuma.naoki@tepcoco.jp

組成や厚さに制限があるといった要因から、タービン建屋のモデル化による保守性が過度に大きくなる課題があった。また、施設内のプラント増設に伴う周辺の方角別の合算値を評価する必要性が生じてきている。これを改善するため、SKYSHINEに内蔵されている壁面の反射・減衰データに対して改良が検討されているが⁷⁾、過度の保守性や方向性を改善するものではなかった。このQAD-SKYSHINE手法の保守性によって評価結果が実測値に対して過度に安全側になっていると、過剰な遮へい設備を設置する必要が生じるため、近年では設備合理化ならびに設備運用上の余裕を持たせるために精度の高い評価手法の確立が課題となっている。

一方、詳細な非等方体積線源の取り扱いや、より現実に即した建屋構造モデルでタービンスカイシャイン線量評価が可能となる計算コードとして、3次元モンテカルロ計算コードMCNP⁸⁾があるが、タービンスカイシャイン線量評価のような評価点までの距離が大きい体系においてはモンテカルロ手法に特有の分散誤差の低減が困難となることや、広範囲の空気中におけるランダムウォークシミュレーションに多大な計算時間を要すること等が課題となっていた。

以上の課題を解決するために、非等方体積線源の取扱いを含めた建屋内部の詳細な解析を3次元モンテカルロコードMCNPによって行い、建屋外壁におけるすべての γ 線の通過位置でのエネルギーおよび角度等の各物理量をラインビーム法に接続することによって建屋外部の空気中におけるスカイシャイン解析を行う手法を考案した。また、 γ 線のLBRFはこれまでCOHORTをはじめ様々な計算機コードで作成されているが⁹⁻¹¹⁾、それらの評価距離の制限や接続するMCNPとの整合性を考慮して、新たに評価点距離3,000 mまで対応したMCNPによるLBRFを整備し、本解析手法による計算コード「MCNPカップリングコード」の開発を行った。

II. 評価手法

1. スカイシャイン線量評価に対するMCNPの適用

タービンスカイシャイン線量評価に対するMCNPの適用性を検討するために、実際の110万kW級BWRプラントのタービン建屋をモデル化し、タービン建屋周囲で測定した実測値、およびQAD-SKYSHINE手法評価値との比較を行った。測定はNaIシンチレータを用いて行い、その測定誤差は平均20%であった。タービン建屋内の線源となる機器は、内部に主蒸気を内包している高圧タービン、低圧タービン、各タービン配管、湿分分離器(オペレーションフロア上にある建屋の場合)とした。タービンなどの機器が設置されているオペレーションフロア床面は十分に厚く、 γ 線を遮へいすることができるため、オペレーションフロアより下層に存在する線源機器はモデル化

の対象外とした。モデルの概要を第1図に示す。

ここで、線源の形状、強度、組成等は、SKYSHINEで等方点線源を作成する際に使用した保守性のある3次元モデルの値とし、線源条件を同等とした。これにより、従来の非等方体積線源を等方点線源と仮定する手法および建屋壁面等の遮へい体の簡略的なモデル化による保守性は除外しつつ、実測値に対する適切な保守性を持つことが可能と考えた。計算結果を第2図に示す。

第2図より、実測値と比較して、QAD-SKYSHINE手法による評価値は約6.0~8.0倍、MCNPによる評価値は約1.2~3.0倍の値となる保守性を持っている。建屋近傍では実測値とMCNP評価値の減衰傾向に差異が見られるが、これは、MCNP評価モデルの検討において、遮へい構造物以外の詳細な壁や建屋内の設備機器、実測時の地形効果等を除外したためと考える。

この結果から、MCNPによるタービンスカイシャイン線量評価は、従来のQAD-SKYSHINE手法よりもより実測値に近い現実的な評価が可能であり、かつ、適切な線源モデル化により距離ごとに十分な保守性を有しながら評価が可能であることがわかった。ただし、評価距離が500 m以遠では膨大な計算時間と分散誤差の低減が困難となっている。

2. ラインビーム法

ラインビームレスポンス関数積分法(ラインビーム法)は、無限均一空気媒質内の点線源からエネルギー E_0 MeVの光子が、点線源—評価点軸とのなす角 ϕ 度方向に放出して、点線源から距離 x m離れた評価点に到達した光子による線量率寄与 $R_n(x, E_0, \phi)$ を基に、コリメートした線源の許容されたエネルギー、放出方向にわたって積分する手法である。概念図を第3図に示す。

この線量率寄与 R_n の積分平均値はラインビームレスポンス関数(LBRF)と呼ばれ、放出角度 ϕ 、エネルギー E_0 MeVの光子による距離 x mでの評価点における1光子当たりの線量率寄与を表しており、放出線上の散乱点から評価点までの飛程のBuildup Factorを考慮した減衰で表示する1回散乱法とは異なる¹²⁾。

空気中の点線源における光子エネルギー E と全方位にわたる放出角度 Ω による光子放出分布 $A(E, \Omega)$ が得られているとき、規格化されたこの分布に対してLBRFを乗算積分し線源強度 S を乗じることで、評価点に対する空気中の散乱によるスカイシャイン線量率 D_s を求めることができる。スカイシャイン線量率 D_s はLBRF(x, E, ϕ)から下式のように表される。

$$D_s = S \int_0^\infty dE \int_{\Omega_s} d\Omega A(E, \Omega) \text{LBRF}(x, E, \phi)$$

ここで、 Ω_s は全方位の立体角積分を表している。

第1図 BWR タービン建屋 MCNP モデル図

第2図 タービン建屋周辺実測値と MCNP, SKYSHINE 計算値の比較

第3図 ラインビームレスポンス関数(LBRF)概念図

3. MCNP 接続計算手法

緒言にて述べたように、評価点までの距離が長い体系において MCNP を用いた解析を行う場合、空気中のランダムウォークにより多大な計算時間が必要となり、分散誤差

を低減しにくいという問題がある。タービンスカイシャイン線量評価では、評価点となる施設敷地周辺までの距離は数百から千数百 m と非常に長く、MCNP を用いたスカイシャイン解析を行うには非常に難しい体系であるといえ

る。そこで、タービン建屋内部から外壁表面までを MCNP を用いて詳細な解析を行い、建屋外壁表面から空気中における散乱は、MCNP で事前に解析した評価済の LBRF を用いて解析する MCNP 接続計算手法を考案し、それに基づく MCNP カップリングコードを開発した。

MCNP の Point Detector (F5 Tally) は、 γ 線の発生点および各散乱点 (イベント点) からの評価点に対する点減衰寄与を積算するタリーであり、モンテカルロ法の 1 回のヒストリーで得られる評価点への寄与 R は、

$$R = wt \cdot C(E) \sum_n p_n(\mu) \exp(-\lambda_n) / 2\pi r_n^2$$

となる⁸⁾。ここで、 wt は光子の統計的重み、 $C(E)$ は光子エネルギー E の線量率換算係数、 n はイベント回数、 $p_n(\mu)$ は n 番目のイベント点から評価点に向かって光子が散乱する確率、 $\exp(-\lambda_n)$ は n 番目のイベント点から評価点までの距離減衰割合、 r_n はその距離である。モンテカルロ手法における 1 光子あたりの寄与は、ヒストリー回数による積分平均値で与えられるため、タービン建屋内に存在する線源の全線源強度を S 、全ヒストリー数を N とすると、計算結果の線量率 D は、

$$D = S \frac{\sum_N R}{N}$$

として得られる。1 回のヒストリーによる γ 線の寄与はイベント点からの寄与の積算値であるため、タービン建屋の内部で起きたイベントによる寄与を R_d 、タービン建屋の外部で起きたイベントによる寄与を R_s とするならば、

$$D = S \frac{\sum_N R_d}{N} + S \frac{\sum_N R_s}{N} = D_d + D_s$$

第4図 MCNP と LBRF の接続による線量評価手法

となり、建屋内部からの線量率寄与と外部からの線量率寄与に分けることができる。この第2項の D_s は建屋外部空気中における散乱点からの平均的な線量率寄与であり、LBRF の積分平均によって簡易的に求めることができる。

タービンスカイシャイン解析を MCNP のみで計算を行った場合と同様に、遮へい構造物および線源となる主蒸気を内包した機器を3次元モデル化し、タービン建屋外壁表面を通過した1ヒストリーごとの光子放出方向および放出光子エネルギーを記録する。この記録した1光子ごとの放出角度、エネルギーについて LBRF を求め、全発生光子について積分平均することで建屋外部空気中の散乱線からの寄与 D_s が得られる。また、同じタービン建屋モデルについて、建屋外部でのランダムウォークを禁止し、建屋内部のイベント点からの寄与のみを MCNP の F5 Tally を用いて解析することで建屋内部からの線量率寄与 D_d を得ることができ、 D_d と D_s の和は通常の MCNP による計算結果と一致する。概念図を第4図に示す。

III. LBRF の作成

1. ラインビームレスポンス計算

ラインビームレスポンスは、すべての空間が空気であるような体系において線源点から決まった1方向に放出する光子を発生させ、線源から線源—評価点の軸上の任意の距離にある評価点の線量率寄与を計算することで得られる。放出方向と評価点方向のなす角度 ϕ 、放出される光子エネルギー E_0 、線源と評価点間の距離 x に対して離散的な各条件におけるラインビームレスポンス計算を行った。タービンスカイシャイン解析において線源から発生する光子のエネルギーは 6.2 MeV であるが、ラインビーム法に接続する建屋外壁表面でのスペクトルによって適切なエネルギー範囲の LBRF を用意する必要がある。しかし、およそ 0.5 MeV 以下のエネルギーの γ 線は空気中の減衰が大きく、遠距離までのラインビームレスポンスを計算することは非常に困難である。ここで、MCNP による実機タービン建屋モデル外壁表面のスペクトルを第5図に示す。この結果、0.5 MeV 以下の光子が放出される割

第5図 タービン建屋外壁光子エネルギー分布図

合は約6%程度であり、評価点に対するラインビームレスポンス自体も主要なエネルギーのラインビームレスポンスと比較して大変小さいことから、作成するLBRFの下限エネルギーは0.5 MeVとした。計算を行った各条件を第1表に示す。

ラインビームレスポンス計算を行う計算機コードは、作成したLBRFとMCNPの接続計算を行うことを考慮して、同じくMCNPバージョン4Cを採用した。散乱空間を満たす空気は密度0.0012 g/cm³とし、物質組成はJAERI-M6928「遮へい定数の群定数」¹³⁾記載の値を使用した。断面積ライブラリはMCNP4C標準の光子ライブラリMCPLIB02を使用した。また、検出器は、線源から見たときの半径が放出角に対して十分小さい角度となるような円形のSurface Detector (F2 Tally)を使用し、 γ 線

束からの線量率換算係数は国際放射線防護委員会が1987年に発表した勧告(ICRP Pub. 51)¹⁴⁾に示された空気吸収線量率換算係数[(Gy/hr)/(photons/cm²/s)]を用いた。

2. LBRF フィットTING

LBRFは線源—評価点間の距離 x に対して大きく変動し、離散的な各計算条件間の値を得るための内挿補間が難しいため、ラインビーム法ではスカイシャイン線の減衰傾向を表した距離 x の関数式にフィッティングを行う手法が用いられている。ここではフィッティングを行う関数として、SKYSHINE-IIに内蔵された関数式を改良して考案された播磨らの式⁹⁾を採用し、以下の式に対して最小二乗近似法によるフィッティングパラメーター a, b, c, d を得た。

$$\text{LBRF}(E_0, \phi, x) = \exp(-a - cx)x^{(-b-dx)}$$

フィッティングパラメーター a, b, c, d は、それぞれが放出角 ϕ と光子エネルギー E_0 の関数であり、2つの変数が決定することで距離 x の関数であるLBRFが得られる。このLBRFはMCNPによるラインビームレスポンスの計算結果を約10%以内の誤差で再現することができた。

光子エネルギー6.2, 3.0, 0.5 MeVのラインビームレスポンスの計算結果およびこの結果に対しフィッティングを行ったLBRFをそれぞれ、第6図(a)~(c)に示す。放出角度 ϕ の増加に伴いLBRF値は小さくなり、光子エネルギーが小さくなるに従ってLBRFの距離による減衰が早くなる。

第1表 ラインビームレスポンス関数計算条件	
作成コード	MCNP
単位	Gy/hr
エネルギー	8点(0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 6.2, 7.0, 10.0 MeV)
角度	22点(0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 70.0, 80.0, 90.0, 100.0, 120.0, 140.0, 160.0, 170.0 deg)
距離 (フィッティング用)	86点(10 mから200 mまで10 m刻み, 200 mから300 mまで20 m刻み, 300 mから1,000 mまで50 m刻み, 以降3,000 mまで100 m刻み)

(a) 光子エネルギー 6.2 MeV

第6図 LBRF 計算およびフィッティング結果

第6図 LBRF 計算およびフィッティング結果

第6図 LBRF 計算およびフィッティング結果

IV. MCNP カップリングコードの作成

1. SSW 記録ファイルの生成

MCNP と LBRF の接続は、MCNP の Surface Source Write(SSW)機能を用いて行った。SSW 機能は、MCNP のランダムウォークシミュレーション計算中に、ユーザーが設定した 3 次元モデル中の任意の面に対して粒子が通過した際、通過した粒子の種類(中性子・光子・電子)、粒子のエネルギー、交点座標、方向ベクトル、およびモンテカルロ法における粒子重みのそれぞれを外部記録装置のファイルに記録する機能である⁸⁾。

この機能を利用して 3 次元モデル化したタービン建屋の建屋外壁面を外向きに通過した光子の放出方向および放出エネルギーを得ることができ、十分な通過光子記録数であればそれぞれの分布を再現することができる。

2. 接続コードの作成

MCNP の SSW 機能による光子情報ごとに、作成した LBRF からその光子の評価点に対するラインビームレスポンスを求め、光子記録数分の積算を行い、平均値(スカイシャイン線量率)を計算するプログラムを作成した。

SSW 機能で生成した光子記録ファイルを読み出し、記録されたすべての光子についてラインビームレスポンスを算出するが、この時、ラインビームレスポンスを計算した時の空気密度と、対象とする計算体系の空気密度が異なる場合は、以下の Zerby らの密度補正式¹⁵⁾で補正を行う。

$$\text{LBRF}(\rho_2, r) = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^2 \text{LBRF}\left(\rho_1, \frac{\rho_2}{\rho_1} r\right)$$

ここで、 ρ_1 は LBRF を作成した体系の空気密度、 ρ_2 は解析対象体系の空気密度、 r は解析対象の評価点距離である。

また、ラインビームレスポンスは放出角が 0° に近づくに従って非常に大きい値になるが、建屋外壁上の光子放出角分布は 0° に近づくに従って極小となり、その積である解析値が不安定になる。本コードではこれを避けるため放出角 ϕ が 0.01° 以下となった場合は、その光子に対して 0.01° の LBRF を適用した。

すべての光子について得たラインビームレスポンスから、以下の式によって評価点におけるスカイシャイン線量 D_s を得る。

$$D_s = S \frac{\sum N_{rec} \text{LBR}_N w_{tN}}{N_{src}}$$

ここで、 S はタービン建屋内に存在する線源の全線源強度、 N_{rec} は建屋外壁面における記録光子数、 N_{src} は MCNP が線源から発生させた光子数(計算ヒストリー数)、 LBR_N は N 番目の光子によるラインビームレスポンス、 w_{tN} は N 番目の光子の重みである。

3. 光子分布の妥当性

MCNP の SSW 機能によって記録した個々の光子情報は、モンテカルロ法のランダムウォークシミュレーションの結果であり、その平均値としての壁面の光子分布を再現するためには十分な通過光子記録数を得る必要がある。しかし、十分な線源発生光子数や記録面通過光子数はタービン建屋モデルごとに異なった値となるため、モデルに依存しない本評価手法共通の指標として、記録面に対して Surface Detector(F2 Tally)を設定し、これを通過した試行粒子の統計的確からしさ(分散誤差)を光子分布の再現性の指標とすることを考案した。

110万 kW 級 BWR プラントタービン建屋を 3 次元形状にモデル化し、Surface Detector の分散誤差による MCNP カップリングコード評価値の変化を計算した。第 7 図に示すように、評価点はタービン建屋北側のタービン軸方向に外壁からの距離 100 m から 1,000 m までの点に配置した。MCNP カップリングコードによる線量率評価値の MCNP 光子発生数による変動を第 8 図に、光子発生数と記録面 Surface Detector の分散誤差の変動を第 9 図に示す。

第 8 図から、光子発生数が約 1.0×10^8 以上で MCNP カップリングコードの評価値は 1% 以内で収束しているといえる。この時、第 9 図から、同じ光子発生数で Surface Detector の分散誤差は最も大きいものでも約 1% 以内になっていることから、記録面に設定した Surface Detector の分散誤差が 1% 以下となるような光子記録ファイルであることを、MCNP カップリングコード評価値の妥当性の

第 7 図 評価点位置概略図

第 8 図 MCNP ヒストリー数による MCNP カップリング評価値の変動

第9図 MCNP ヒストリー数による MCNP Surface Detector 分散誤差の変動

指標とした。

V. MCNP カップリングコード計算結果の比較検討

1. スカイシャインベンチマーク実験との比較

作成した MCNP カップリングコードの精度評価として、1977年に米国カンザス州立大学において行われた、 γ 線スカイシャインベンチマーク実験結果¹⁶⁾と MCNP カップリングコードの比較を行った。このベンチマーク実験は、横方向に十分な厚さを持つ円柱形のコンクリートサイロに囲まれた ^{60}Co 線源(光子エネルギー 1.17, 1.33 MeV)から上方約150°の角度で光子を放出し、サイロの屋根部分を上方に向けて開放した場合と、厚さ 21 cm のコンクリート遮へい体を設置した場合の2つの実験条件において、距離 50~700 m までの地点でのスカイシャイン線量を測定したものである。

コンクリートサイロと線源を3次元モデル化し、実測値、MCNP 評価値、MCNP カップリングコード評価値の比較を行った。このとき、ラインビーム法に接続する MCNP カップリングコードでは外部散乱空間はすべて空気として扱うため、手法上、光子放出後の記録面内部構造物による遮へい効果や、地表面による吸収および散乱効果を考慮することができない。これらの寄与を検討するため、MCNP 解析モデルはサイロ外の散乱空間をすべて空気としたものと、地表面をモデル化したものの2つについて解析を行い、比較を行った。体系モデル図を第10図に、結果を第11, 12図に示す。

屋根部分が開放されている条件では、地表面をモデル化した MCNP の比較値(計算値/実測値: C/E)は平均1.05となった。また、全空間を空気とした MCNP の C/E は平均1.34, MCNP カップリングコードの C/E は全空間を空気とした MCNP とほぼ同じ、平均1.34となった。地表面をモデル化した MCNP の C/E から実験結果がよく再現されていることがわかり、また、MCNP カップリングコードは全空間を空気とした MCNP の結果を非常によく

第10図 米国カンザス州立大学スカイシャインベンチマーク実験解析モデル図¹⁷⁾

第11図 米国カンザス州立大学スカイシャインベンチマーク実験屋根部開放条件モデル解析結果

再現できた。この時、地表面による吸収効果が約30%程度であるといえる。

屋根部分に 21 cm のコンクリート遮へい体を設置した条件では、地表面をモデル化した MCNP の C/E は平均1.08となった。また、全空間を空気とした MCNP の C/E は平均1.65, MCNP カップリングコードの C/E は平均2.07となった。屋根が開放されている条件と同様に、地表面をモデル化した MCNP の結果は実測値を大変よく再現しているが、全空間を空気とした場合の MCNP と MCNP

第12図 米国カンザス州立大学スカイシャインベンチマーク実験 21 cm 遮へい体設置モデル解析結果

カップリングコードの C/E は大きくなっている。これは、屋根部分に遮へい体を設置したことによりサイロ上方に放出される光子が低減され、評価点における線量率に対する地表面の効果が相対的に大きくなったことによる。

また、MCNP カップリングコードは、全空間を空気とした MCNP よりも C/E が大きくなっているが、これは、サイロ屋根部分に遮へい体を設置することによって放出される光子エネルギーが、タービンスカイシャイン評価を対象とした本 LBRF ライブラリーの下限エネルギー (0.5 MeV) 以下となる割合が大きくなることが原因であると考えられる。LBRF ライブラリーの下限エネルギー以下の光子は保守性を考慮してすべて下限エネルギー値として取り扱うため、全空間を空気とした MCNP 評価と比較

第13図 タービン建屋モデル周辺16方位(100 m 地点)解析結果比較図

第14図 タービン建屋モデル周辺16方位(500 m 地点)解析結果比較図

しても値が大きくなっている。

これらの結果から MCNP カップリングコードは、記録された光子のエネルギーが作成した LBRF ライブラリーのエネルギー範囲である場合、全空間を空気とした MCNP 評価値に対してよい再現性を示すことがわかった。また、地表面をモデル化した MCNP 評価値は実測値とよく一致し、全空間を空気とした MCNP 評価値および MCNP カップリングコード評価値は約30%の保守性をもっていることが確認できた。

2. タービン建屋モデル

次に、3次元モデル化した110万kW級BWRプラントのタービン建屋において、MCNPによる解析結果と

MCNP カップリングコードによる解析結果を比較した。

ベンチマーク実験の場合と同様に、MCNP 解析モデルは建屋外の散乱空間をすべて空気としたものと地表面をモデル化したものの2つについて解析を行い、比較を行った。

タービン建屋から放出される γ 線は非等方であることから、全方位にわたって比較を行うために、評価点はタービン建屋を中心とした16方位方向に対して建屋外壁からの距離100m, 500mの2点を設定した。また、16方位中、東西南北の4方位については建屋外壁からの距離100mごとに1,000mまで評価点を10点設定し、距離減衰分布を計算した。評価点高さはタービン軸高さと同位置にした。100m, 500m点における16方位の線量率分布図とMCNPとMCNPカップリングコードの比を第13, 14図に、東西

第15図 タービン建屋モデル周辺線量率分布(東方向)

第16図 タービン建屋モデル周辺線量率分布(西方向)

第17図 タービン建屋モデル周辺線量率分布(南方向)

第18図 タービン建屋モデル周辺線量率分布(北方向)

第2表 MCNP と MCNP カップリングコードの比較

	MCNP カップリング コード/MCNP (全空間空気モデル)	MCNP カップリング コード/MCNP (地表面モデル)
建屋16方位 100 m 地点平均	1.18	1.23
建屋16方位 500 m 地点平均	1.10	1.40
建屋東方向平均	1.09	1.30
建屋西方向平均	1.09	1.34
建屋南方向平均	1.03	1.21
建屋北方向平均	1.15	1.63

南北方向の線量率分布を第15～18図に示す。

MCNP の結果に対する MCNP カップリングコードによる結果を第2表に示す。この結果から、MCNP カップリングコードは、全空間を空気とした MCNP 評価値と比較すると平均1.2倍以内、地表面をモデル化した MCNP 評価値と比較すると平均1.6倍以内で保守側に評価した。スカイシャインベンチマーク実験と同様に、全空間を空気とした場合の MCNP 評価値を全方位にわたって精度よく再現でき、また、地表面の効果によって建屋全方位に対して保守性を持った評価を行うことができた。また、線量率の距離減衰分布から、地表面による光子の吸収効果は遠方に行くほど大きくなり、建屋が点線源とみなせる距離では散乱面空間が地表面で二分されることから、その効果は2.0倍に収束するものと考えられる。

VI. 結 言

BWR プラントのタービンスカイシャイン線に対する設備の合理化、設備運用上の余裕を持たせるために、3次元モンテカルロコード MCNP とラインビーム法を接続する解析手法を考案し、MCNP カップリングコードを開発した。

本コードによるカンザス州立大学でのスカイシャインベンチマーク実験解析を行った結果、実験実測値を再現し、実機タービンスカイシャイン線量評価においては、全散乱空間を空気とした場合の MCNP 評価値に対して平均1.03～1.18倍、地表面をモデル化した場合の MCNP 評価値と比較すると平均1.21～1.63倍と、建屋遠方においても保守性を持ちつつ精度よく MCNP 評価値を再現し、MCNP 単独で計算した場合に対し、数百分の一の時間で計算を行うことが可能になった。

これらにより、MCNP カップリングコードはタービンスカイシャイン線量評価コードとして有効に活用可能であることが確認できた。

本研究の評価手法の検討に当たり、技術検討会に参加していただき、多くのご助言をいただきました元海上技術安全研究所の植木紘太郎氏および日本原子力研究所の坂本幸夫氏に感謝いたします。また、LBRF の評価に関し、

CRC ソリューションズの播磨良子氏にも多くの助言をいただいたことを感謝いたします。

— 参考文献 —

- 1) J. H. Price, D. G. Collins, M. B. Wells, *Utilization Instructions for SKYSHINE*, RRA-N7608, (1976).
- 2) C. M. Lampley, M. C. Andrews, M. B. Wells, *The SKYSHINE-II Procedure: Calculation of the effects of structure design on neutron, primary gamma-ray and secondary gamma-ray dose rates in air*, RRA-T8209, (1982).
- 3) C. M. Lampley, M. C. Andrews, M. B. Wells, *The SKYSHINE-III Procedure: Calculation of the effects of structure design on neutron, primary gamma-ray and secondary gamma-ray dose rates in air*, RRA-T8209A, (1988).
- 4) R. E. Malenfant, *QAD: A Series of Point Kernel General-Purpose Shielding Programs*, LA-3573, (1967).
- 5) R. E. Lynch, J. W. Benoit, W. P. Johnson, C. D. Zerby, *A Monte Carlo Calculation of Air-Scattered Gamma Rays*, ORNL-2292, (1958).
- 6) J. H. Price, M. B. Wells, *Utilization Instructions for COHORT*, RRA-N7504, (1975).
- 7) T. Hayashida, S. Ishikawa, K. Hayashi, H. Hirayama, Y. Sakamoto, Y. Harima, M. Nemoto, O. Sato, R. Tayama, "Improvement of air transport data and wall transmission/reflection data in the SKYSHINE code (2); Calculation of gamma-ray wall transmission and reflection data," *Proc. 9th Int. Conf. on Radiation Shielding*, Tsukuba Ibaraki, March 2000, p. 621 (2000).
- 8) J. F. Briesmeister, *MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*, LA-13709-M, (2000).
- 9) Y. Harima, H. Hirayama, Y. Sakamoto, A. Shimizu, "A simplified method of gamma-ray skyshine calculations," *Proc. 8th Int. Conf. on Radiation Shielding*, Alington Texas, April 1994, p. 939 (1994).
- 10) T. Hayashida, S. Ishikawa, K. Hayashi, H. Hirayama, Y. Sakamoto, Y. Harima, M. Nemoto, O. Sato, R. Tayama, "Improvement of air transport data and wall transmission/reflection data in the SKYSHINE code (1); Calculation of line beam response function for gamma-ray skyshine analysis," *Proc. 9th Int. Conf. on Radiation Shielding*, Tsukuba Ibaraki, March 2000, p. 616 (2000).
- 11) J. K. Shultis, R. E. Faw, M. H. Stedry, *McSKY: A Hybrid Monte-Carlo Line-Beam Code for Shielded Gamma Skyshine Calculations*, KSU 9501, (1997).
- 12) Y. Harima, H. Hirayama, Y. Sakamoto, N. Kurosawa, M. Nemoto, "Comparison of linebeam response function for gamma-ray skyshine analysis based on single scattering method with the Monte Carlo calculations," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **34**, 856 (1997).
- 13) 小山謹二, 奥村芳弘, 古田公人, 宮坂駿一, 遮へい定数の群定数, JAERI-M6928, 日本原子力研究所, (1977).
- 14) 日本アイソトープ協会, ICRP Publication 51 体外放射線に対する防護のためのデータ, (1988).
- 15) C. D. Zerby, *Radiation Flux Transformation as a Function of Density of an Infinite Medium with Anisotropic Point Sources*, ORNL-2100, Oak Ridge National Laboratory, (1956).
- 16) 原子力安全研究協会, 原子炉施設からのスカイシャイン線量評価手引, (1979).
- 17) M. L. Roseberry, J. K. Shultis, *Nucl. Sci. Eng.*, **80**, 334 (1982).