



2.6 MCNPによる遮蔽計算

増川 史洋

(財) 原子力発電技術機構 原子力安全解析所

masukawa@nupec.or.jp

Radiation Shielding Calculation Using MCNP

Fumihito Masukawa

Institute of Nuclear Safety

Nuclear Power Engineering Corporation

masukawa@nupec.or.jp

To verify the Monte Carlo code MCNP4A as a tool to generate the reference data in the shielding designs and the safety evaluations, various shielding benchmark experiments were analyzed using this code. These experiments were categorized in three types of the shielding subjects; bulk shielding, streaming, and skyshine. For the variance reduction technique, which is indispensable to get meaningful results with the Monte Carlo shielding calculation, we mainly used the weight window, the energy dependent Russian roulette and splitting. As a whole, our analyses performed enough small statistical errors and showed good agreements with these experiments.

1. はじめに

従来、核燃料サイクル施設等の放射線遮蔽設計においては、解析コード等の制約による幾何形状等の変更や、近似による物理現象の簡略化（多群近似・経験式等）が行われる。このような解析上のモデル化は安全上、保守的な評価となるように行われるが、その安全余裕は定量的には把握されていない場合がほとんどである。

平成4～7年度にかけて行われた「再処理施設遮蔽安全性実証解析」では、従来の解析手法に含まれる安全余裕を定量的に把握するために、連続エネルギーモンテカルロコードMCNP4A¹⁾が参照解を提供すべく導入され、これに当たり、MCNP4Aの利用法と精度を把握するためにさまざまな遮蔽ベンチマーク実験の解析が行われた。

モンテカルロ法は、幾何形状を正確に取り扱うことができ、エネルギーについても連続的に取り扱えるという利点がある。解析にあたっては、中性子に関してはJENDL-3.1に基づくFSXLIB-J3²⁾が、光子に関しては付属のMCPLIBライブラリが用いられた。

遮蔽形態としては、(1)バルク遮蔽（深層透過）、(2)ストリーミング、(3)スカイシャイン、の3種類を考慮した。

中性子の深層透過については、ウインフリスのASPIS施設を用いて行われた鉄の深層透過実験³⁾、原研のFNS施設において行われた鉄の深層透過実験⁴⁾とコンクリートの透過実験⁵⁾の解析を行った。

ストリーミングに関しては、中性子ストリーミングに関してETNAのリドタンクを用いて行われた実験⁶⁾、光子についてはカンサス州立大において行われたコンクリートダクトストリーミング実験⁷⁾を取り上げた。

中性子スカイシャインについては東大の弥生炉を線源とするスカイシャイン実験⁸⁾、光子についてはカンサス州立大において行われたスカイシャイン実験⁹⁾を解析した。

2. 深層透過実験解析

深層透過実験の解析では、分散低減手法としてウェイトウィンドウ（以下WW）と次期面交差検出器¹⁰⁾（Next Event Surface Crossing Estimator 以下NESXE）を適用した。

WWは従来用いられているロシアンルーレット・スプリッティングの手法をエネルギー依存で設定できるようにしたものであり、NESXEは点検出器と同様に仮想粒子をカウントする検出器であるが、衝突後の粒子の運動方向が、衝突点－検出器面の張る立体角内に収まるときのみに仮想粒子の寄与が計算されるものである。この検出器はFSDを効果的に改善することが示されており、MCNP4AのサブルーティンTALLYDを変更することでMCNP4Aに組み込まれた。

WWパラメータに関しては、植木らの推奨する経験式¹⁰⁾を用いた。

$$W_m = W_0 f^{m-1},$$

ここで、 W_m は線源から数えて粒子の透過方向に m 番目のセルに対する最小のウェイトであり、 f はセルを構成する物質とセルの厚さ、粒子のエネルギーに依存する係数である。ASPIS実験³⁾の解析では、中性子のエネルギーを E_n として、

$$\begin{aligned} E_n \leq 0.007 \text{ MeV} & \text{では } W_0 = 0.64, f = 0.75, \\ 0.007 < E_n \leq 0.72 \text{ MeV} & \text{では } W_0 = 0.25, f = 0.60, \\ 0.72 < E_n \leq 17.5 \text{ MeV} & \text{では } W_0 = 0.10, f = 0.50, \end{aligned}$$

を用い、深い位置での統計を改善させるために、若干の変更を加えた。

FNSの鉄透過実験⁴⁾の解析に関しては、セルインポートランスによる調整から始めて、WWジェネレータによりWWパラメータを決定するという基本的なアプローチを試みた。WWパラメータの調整は、CPU時間を10~30分程度（FACOM M780による）に制限して行った。計算モデルは、室内散乱などを含めない単純な形状であったので、この実験解析のためのパラメータ調整は数回で充分であった。FNSのコンクリート透過実験⁵⁾の解析には、鉄透過実験の解析に用いたものを流用したが、再調整の必要はほとんどなかった。

WWを効果的に用いるためには、形状の適切な分割が必要であるが、解析形状は粒子の透過方向に5~10cm程度厚さのセル分割が行われた。

WWとNESXEの組み合わせにより、これらの実験をよく再現することができた。解析結果の例をFigs. 1~3に示す。反応率で見られた実験との差異は最大20%程度であった。

また計算（CPU）時間については、反応率の計算では30分~2時間程度、スペクトルの計算では2~4時間程度（FACOM M780）であった。

3. ストリーミング実験解析

ETNAにおける中性子ストリーミング実験⁶⁾は、天然ウランコンバータを線源とし、水を満たしたタンク中に置かれた2回屈曲円筒ダクト内の中性子束を放射化箔で測定したものである。この実験はダクト口径・各脚の長さ・屈曲角などが実験パラメータとなっており、ダクト延長が3m以上にも達するものである。MCNP4Aによる解析は、ダクト直径28.7cm、第1脚長/屈曲角/第2脚長/屈曲角/第3脚長が順に、108cm/45°/104cm/45°/111cmの体系について $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$, $^{164}\text{Dy}(n, \gamma)^{165}\text{Dy}$, $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$

(Cd covered) 放射化反応率の解析を行った。

本解析においてもWWを分散低減法として用いたが、ダクト内におけるアルベド散乱と遮蔽体内からダクト内への透過漏洩の両方のランダムウォークを再現するために、計算体系は粒子の透過方向とダクトを軸とする径方向に分割された。エネルギーに関しては、S(n, p)Pの解析では0.1~1.0 MeV, 1.0~20 MeVの2群に分け、Dy(n, γ), Au(n, γ)の場合にはカットオフエネルギーを 10^{-6} MeVとし、 $10^{-6} \sim 10^{-5}$, $10^{-5} \sim 10^{-4}$, $10^{-4} \sim 10^{-3}$, $10^{-3} \sim 10^{-2}$, $10^{-2} \sim 0.1$, 0.1~1.0, 1.0~20 MeVの7群に分けてWWパラメータを設定した。また、線源となるコンバーターがダクト径に比べて大きいため、ダクト入口付近で線源粒子を多く発生させるように線源バイアスを用いた。検出器としては、ダクト軸上10 cm間隔に面検出器を設定した。解析結果の例をFig.4に示す。

計算値は実測値をよく再現し、Sについては概ね15%以内で実験と一致し、他の箱でも概ね50%以内で実測値と一致した。計算時間については、Sの計算で約2日間、Dyで約1週間、Auに関しては反応の大半が4.7eVの巨大共鳴に支配されているので小さな分散の解を得るためには約4週間であった。(Sun SPARC Station 2)

光子のストリーミング実験としては、Kansas State 大学で行われたコンクリートダクトの ^{60}Co γ 線ストリーミング実験⁷⁾を取り上げた。この実験では、厚さ50~150 cmのコンクリート壁に開けられた直円筒、直円環、または直方体のダクトに対して、点状の ^{60}Co 線源をダクト軸よりずらして配置し、ストリーミングしてくる γ 線による遮蔽壁後側の照射線量率の分布を電離箱により測定している。

MCNP4Aによる解析は、ストリーミングによる線量率のピークが顕著に見られた、遮蔽厚101.6cm、ダクト直径21.1 cm、ダクト軸(入口)と線源のなす角度/距離=45°/300 cm、遮蔽壁-検出器間の距離150 cmの場合について解析を行った。

遮蔽壁を透過してくる成分、および遮蔽壁の外側を回り込んで検出器に到達する成分は、実験上、バックグラウンド測定を行って差し引かれているため、モデル化に際してはコンクリート遮蔽壁は十分に大きな(半径4 m)円盤で模擬し、検出器室の壁は無視した。そして、ダクトの有る体系(フォアグラウンド)とダクトの無い体系(バックグラウンド)で、それぞれ計算した線量率の差をストリーミング線量率として求めた。

分散低減法に関しては、解析したケースの場合、線源からダクト開口部を見込む立体角は全立体角の1/1000以下であり、粒子を全方向に均等に発生させるとダクトに入射する粒子を効率的に模擬することができないので、ダクト開口部周辺の領域に入射するコーン状の線源とそれ以外の領域に入射する線源とに分けて、それぞれ独立に計算を行い、照射線量率をその和として求めた。これは線源の放出角にバイアスを与えるのと同等の効果が得られる。また、本解析についてもWWを適用したが、その設定はDORTコード¹¹⁾によりダクト中心軸上の検出器位置で照射線量率変換係数を線源とした随伴線束分布・スペクトルを用いて行った。その際、空気中でのレイエフェクトを減少させるために、GRTUNCL

コードを用いて1回散乱線源を計算し、これをDORTによる2次元Sn計算の線源としている。随伴線束はバックグラウンド（ダクトの無い体系）とフォアグラウンド（ダクトのある体系のそれぞれについて計算した。

Fig. 5には、ダクト中心軸から検出器位置までの半径方向距離とストリーミング線量率の関係を計算値と実測値を比較して示す。C/Eについては、中心軸から-63~19cmの範囲では、距離-32cmおよび39cmの点を除き、5%以内で計算値と実測値が一致している。この不一致は、図から明らかなように、実測値はダクト中心軸に対してほぼ対称な分布を示すのに対し、計算値は線源側（+側）に偏った分布を示すためであるが、原因は分からない。

4. スカイシャイン実験解析

中性子スカイシャイン実験については東大・弥生炉による中性子スカイシャイン線量の測定実験⁸⁾、光子に関してカンサス州立大で行われた⁶⁰Co線源を用いたガンマ線スカイシャイン実験⁹⁾の解析を行った。

中性子スカイシャイン実験の解析には、分散低減法としてセルインポートランスを用い、検出器としてトラス状のセルを用いたトラックレンジスエスティメータとリング検出器を用いた。2つの検出器による計算値の間には有意な差は見られなかった。解析結果をFig. 6に示す。減速材付きの大型BF₃検出器で測定された1000mまでのスカイシャイン線量当量率に関しては、減衰傾向は再現したものの、計算値は測定値を2~3倍過大に評価した。しかし一方で、79m位置でボナーカウンタにより測定された線量当量率（中性子束の絶対値・エネルギースペクトルも）とはよく一致しており、不一致の原因としては計算に用いた検出器レスポンスに問題があるものと思われる。計算時間は20分程度（FACOM M780）であった。

ガンマ線スカイシャイン実験の解析は、線源サイロの天井なし/天井厚21cmの場合の2つのケースについて行った。分散低減法としてはWWとリング検出器を用いた。解析結果の例をFig. 7に示すが、解析結果は天井なし/ありいずれの場合も概ね10%以内で実測値と一致した。計算時間は3~4時間程度（Sun SPARC Station 10）であった。

5. まとめ

各種遮蔽ベンチマーク実験の解析を通じて、深層透過、ストリーミング、スカイシャインそれぞれの放射線遮蔽問題に対して、MCNP4Aによる解析が、分散低減法を適切に用

いることにより十分に小さい分散で、実験を再現できることが確認できた。解析精度を論ずるには解析ケース数が少なすぎるが、解析を行ったベンチマーク実験の範囲では、バルク遮蔽に関しては概ね±20%、ストリーミングに関しては概ね±50%、スカイシャイン（ガンマ線）に関しては概ね±10%程度でMCNP4Aにより実験を再現することができた。中性子のスカイシャインに関しては、新たな精度の良い実験が望まれるが、およその減衰傾向は再現できていて、かつ過小評価にはならなかった。

参考文献

1. Briesmeister, F., Ed.: MCNPTM – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A, LA-12625-M (1993)
2. Kosako, K., *et al.*: FSXLIB-J3: MCNP Continuous Cross Section Library Based on JENDL-3, *Proc. New Horizons in Radiation Protection and Shielding*, Pasco, Washington, April 26 – May 1, 1992, p. 357-363, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois (1992)
3. Carter, M. D., and Packwood, A.: The Winfrith Benchmark Experiments in Iron, NEACRP-U-73 (1976)
4. Konno, C., *et al.*: Measurement and Analysis of Low Energy Neutron Spectrum in a Large Cylindrical Iron Assembly Bombarded by D-T Neutrons, *Fusion Eng. Des.*, **18**, 297 (1991)
5. Oishi, K., *et al.*: Verification of Dose Rate Calculation and Selection Study on Low Activation Concrete in Fusion Facilities, *Fusion Eng. Des.*, **17**, 359 (1991)
6. Chinaglia, B., *et al.*: Study of the Neutron Streaming through Cylindrical Ducts with Two Bends in Water: Experiments, EUR4498e (1970)
7. Clifford, C. E.: Gamma-Ray Streaming in Concrete Ducts, Model Development and Benchmark Experiments, RRA-T8003 (1980)
8. Nakamura, T., *et al.*: Environmental Neutron Measurements around Nuclear Facilities with Moderated-Type Neutron Detector, *Health Phys.*, **47** 729 (1984)
9. Nason, R. R., *et al.*: A Benchmark Gamma-Ray Skyshine Experiment,” *Nucl. Sci. Eng.*, **79**, 404 (1981)
10. Ueki, K., *et al.*: Continuous Energy Monte Carlo Analysis of Neutron Shielding Benchmark Experiments with Cross Sections in JENDL-3,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **30**, 339 (1993)
11. Rhoades, W. A., and Childs, R. L.: The DORT Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code,” *Nucl. Sci. Eng.*, **99**, 88 (1988)

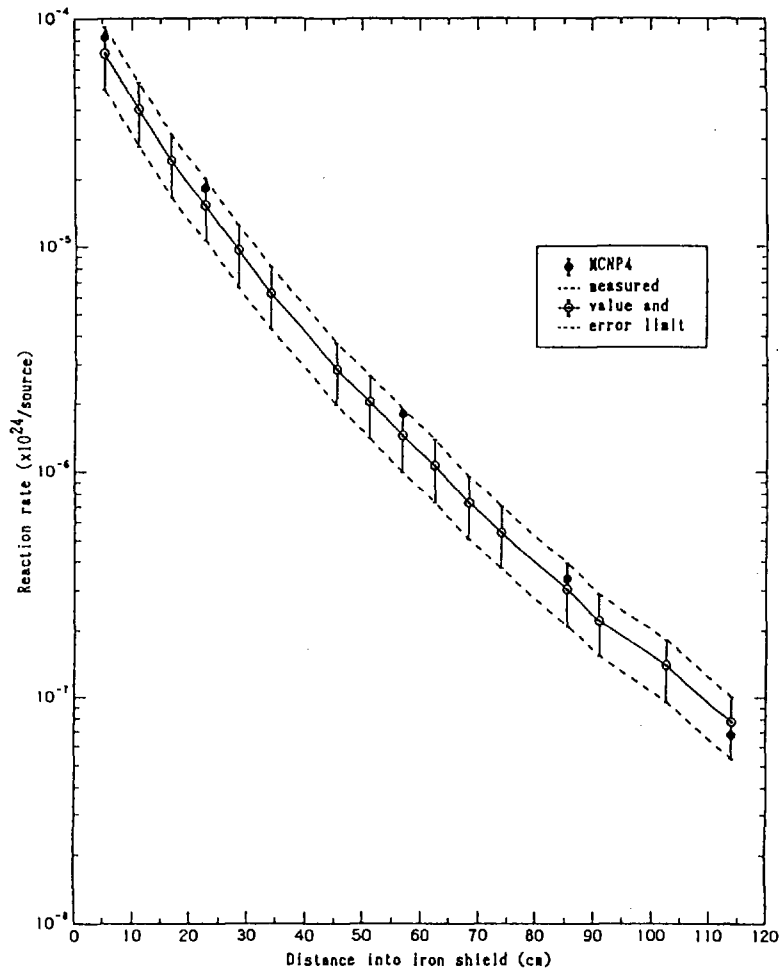


Fig. 1 Comparison between MCNP calculated and measured $^{103}\text{Rh}(n, n')^{103\text{m}}\text{Rh}$ reaction rate in Winfrith experiment on iron

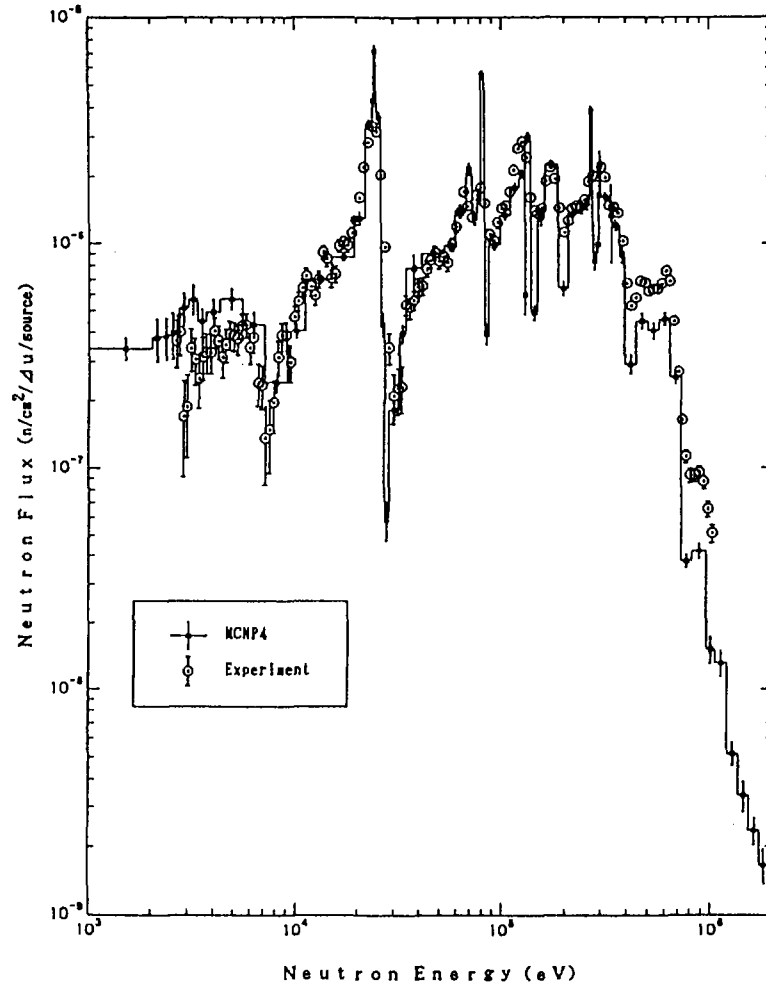


Fig. 2 Comparison between MCNP calculated and measured energy spectrum in FNS experiment on iron (at 81cm)

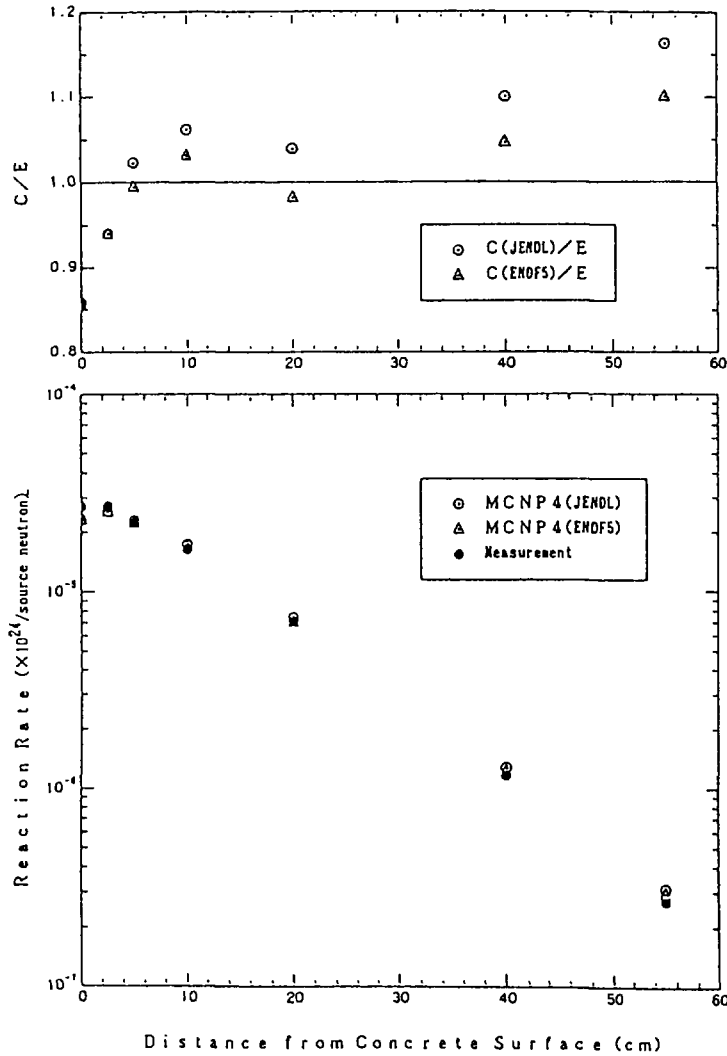


Fig. 3 Comparison between MCNP calculated and measured $^{115}\text{In} (n, n') ^{115m}\text{In}$ reaction rate in FNS experiment on concrete

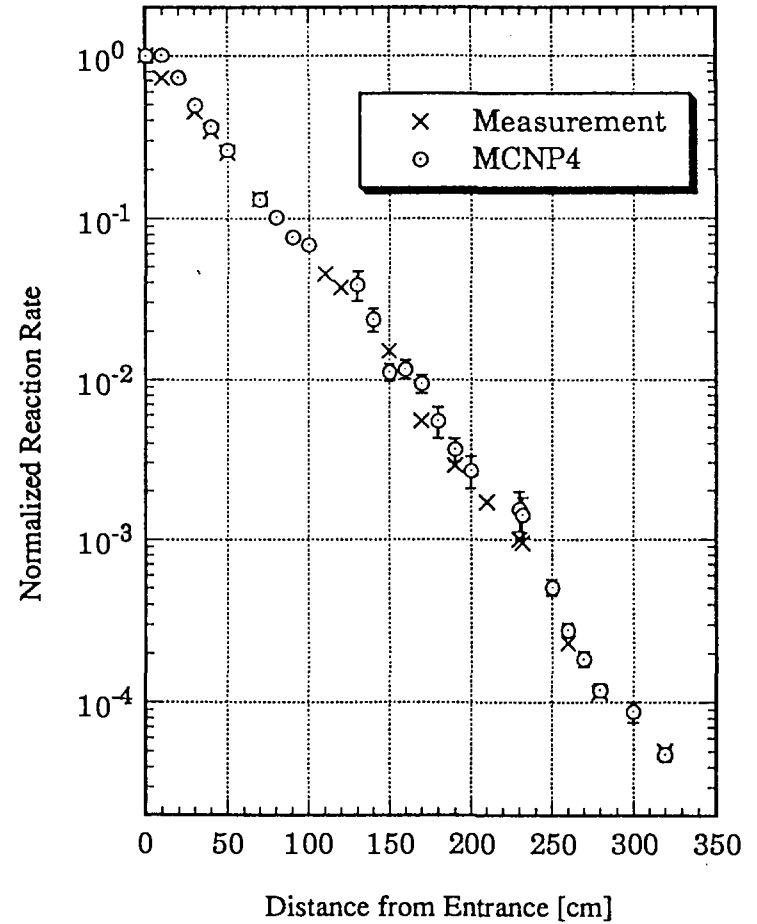


Fig. 4 Comparison between MCNP calculated and measured $\text{Au} (n, \gamma) (\text{Cd covered})$ reaction rate in ETNA experiment

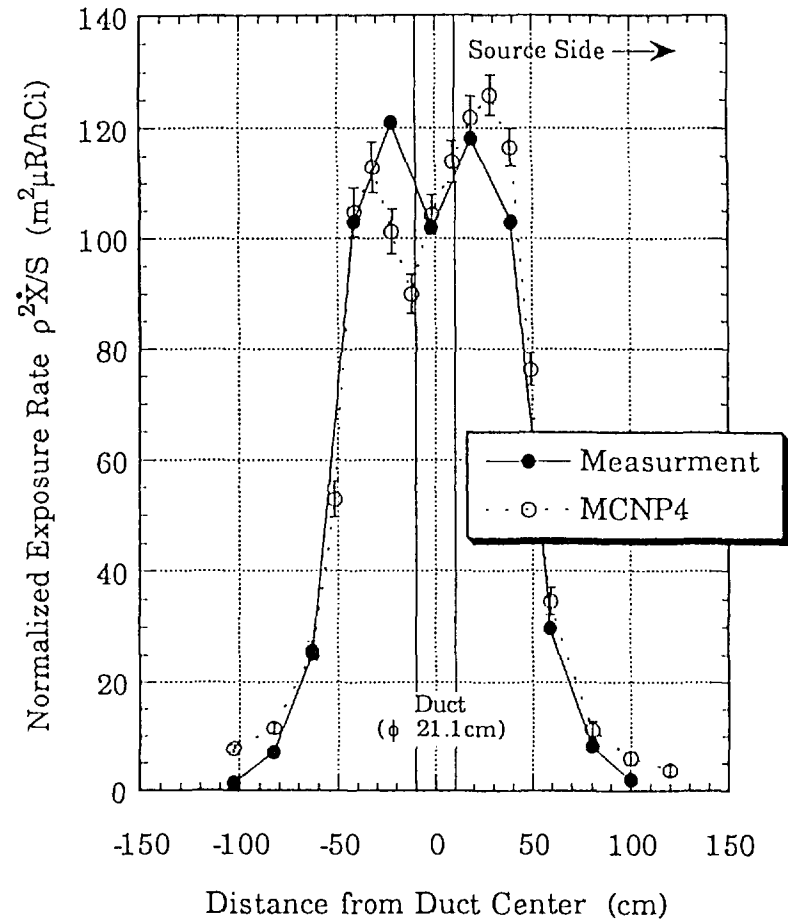


Fig. 5 Comparison between MCNP calculated and measured exposure rate in KSU duct experiment (wall thickness : 40 in, duct diameter : 21.1cm, polar (ρ, θ) from the center of duct mouth : (300cm, 45°), distance between detector and wall : 150cm)

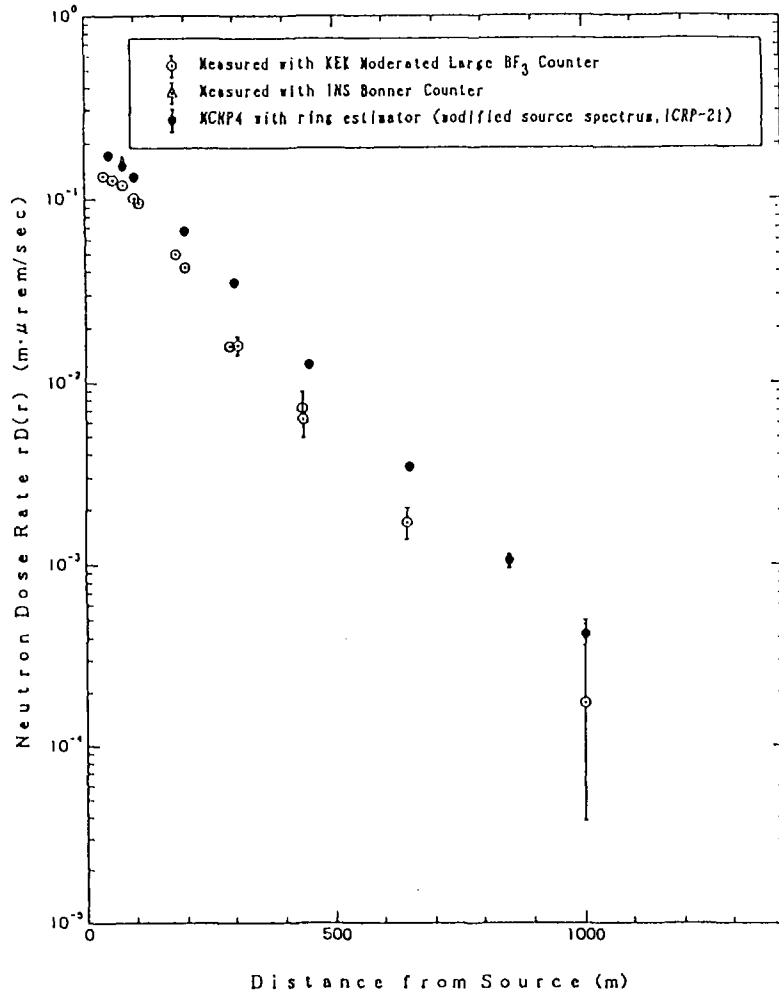


Fig. 6 Comparison between MCNP calculated and measured neutron dose rate in YAYOI skyshine experiment

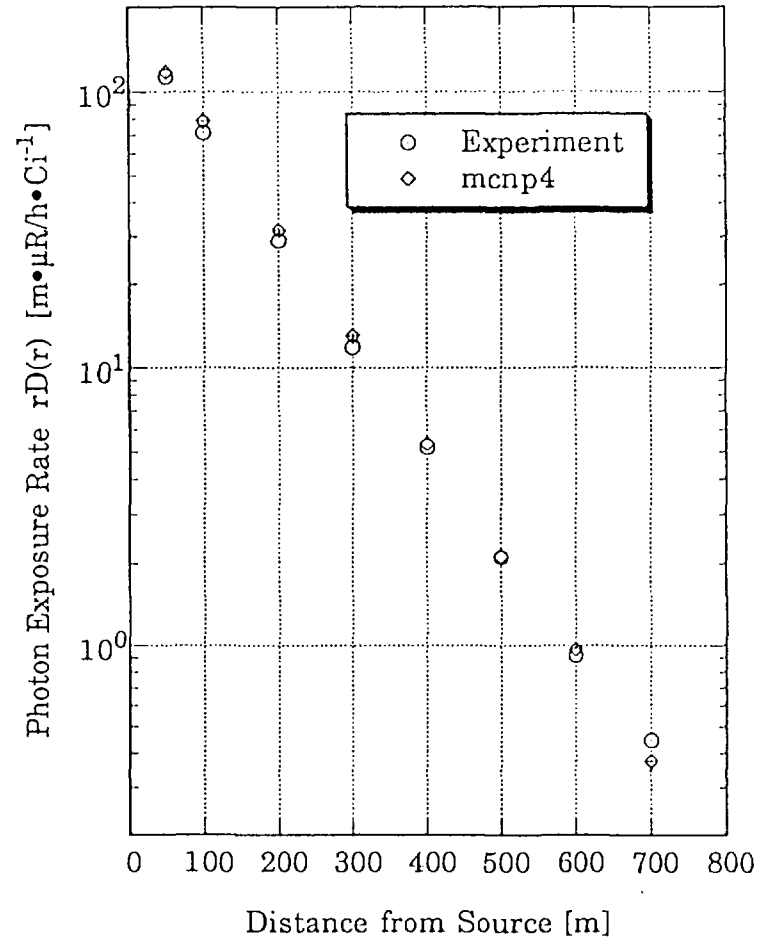


Fig. 7 Comparison between MCNP calculated and measured exposure rate in KSU skyshine experiment (with 21cm concrete ceiling)