

JAERI-M  
86-055

モンテカルロコードMCNPによる  
黒鉛体系中での中性子透過計算

1986年3月

小手川 洋・笹本 宣雄・田中 俊一

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日青工業株式会社

Calculations of Neutron Penetration through Graphite  
Medium with Monte Carlo Code MCNP

Hiroshi KOTEGAWA, Nobuo SASAMOTO  
and Shun-ichi TANAKA

Department of Reactor Engineering,  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai -mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

( Received February 20, 1986 )

Experiments for fast neutron penetration through graphite are analysed with the continuous energy Monte Carlo code MCNP. Reaction rates and energy spectra obtained with the MCNP are compared with measured values and calculated ones with McBEND code. And validity of penetration calculation with the MCNP is confirmed. In addition, it is revealed that the MCNP code using Weight-Window method is well applicable to calculations of neutron penetration through graphite up to 70 cm in depth.

Keywords: MCNP, Monte Carlo Code, Continuous Energy Model, McBEND, Graphite, Neutron Penetration, Reaction Rate, Energy Spectrum

モンテカルロコードMCNPによる  
黒鉛体系中での中性子透過計算

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部  
小手川 洋・笹本 宣雄・田中 俊一

( 1986 年 2 月 20 日 受理 )

連続エネルギーモデル・モンテカルロコードMCNPの適用性評価のため速中性子の黒鉛透過実験の解析を行った。反応率及びスペクトルについて実験値及びMcBENDコードの計算値と比較することにより、MCNPコードの透過計算の妥当性を確認した。その結果、MCNPコードはWeight-Window法の適用により、70 cmまでの深層透過計算に十分適用可能であることを明らかにした。

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. NEA黒鉛ベンチマーク実験の解析 .....	3
2.1 計算条件 .....	3
2.2 計算手法 .....	3
2.3 計算結果と検討 .....	5
3. 黒鉛球体系中性子透過実験の解析 .....	17
3.1 計算条件 .....	17
3.2 計算手法 .....	17
3.3 計算結果と検討 .....	18
4. ま と め .....	32
謝 辞 .....	32
参考文献 .....	33
付録A Weight-Window法を用いたMCNPによる中性子黒鉛透過計算入力 データリスト .....	34
付録B MCNPコードによる中性子透過計算で要したCPU時間 .....	37

Contents

1. Introduction .....	1
2. Analysis of NEA graphite benchmark experiment .....	3
2.1 Computational conditions .....	3
2.2 Computational method .....	3
2.3 Results and discussion .....	5
3. Analysis of neutron penetration experiment through spherical graphite .....	17
3.1 Computational conditions .....	17
3.2 Computational method .....	17
3.3 Results and discussion .....	18
4. Summary .....	32

Acknowledgements

References

Appendix A Input Data List for MCNP Calculation of Neutron  
Penetration through Graphite

Appendix B CPU Times for Neutron Penetration Calculations with  
MCNP Code

## 1. はじめに

遮蔽ベンチマークに関する1984年9月のNEA (Nuclear Energy Agency) 専門家会議で、各種遮蔽材料を用いた中性子透過ベンチマーク実験の解析を、参加各国による国際協力の形で実施することが決められた。そこで我国は、炉物理研究委員会・遮蔽専門部会において、核分裂中性子の黒鉛透過ベンチマーク問題<sup>1)</sup>を、各種の放射線輸送計算コード(輸送コード)と核データライブラリの組合せを用いて解析することにした。

本ベンチマーク問題は、ウランコンバータで得られた核分裂中性子を奥行約1 mの黒鉛パイルに導き、速中性子しきい反応の反応率分布をパイル表面から70 cmの深さまで測定した実験に基づくものである。本実験では、反応率分布だけが測定され、スペクトルは得られていないが、文献1)には反応率分布測定値の他に、連続エネルギーモデル・モンテカルロコードMcBENDを用いて計算した0.1 MeV以上の透過中性子スペクトルが与えられている。このMcBEND計算では、随伴拡散計算の結果から導びかれるインポータンスを用いて計算の加速を図り、深い透過位置においても分散の十分に小さいスペクトルが得られているため、参考スペクトルとして利用可能なものである。

本報告書では、炉物理研究委員会の解析作業の一環として、本ベンチマーク問題を、McBENDと同様の連続エネルギーモデル・モンテカルロコードのMCNP<sup>2)</sup>を用いて計算した結果を示す。本コードは、Discrete Ordinates 輸送コードや群モデル・モンテカルロコードが群定数を使用し、散乱断面積の非等方性を少数項ルジャンドル展開近似するのとは対照的に、ほぼ連続的と見なせる程度に詳細なエネルギー点毎に作成された断面積を使用するものである。したがって、MCNP計算では、自己遮蔽因子、負線束の算出、少数項のルジャンドル展開近似等に起因する計算誤差等の問題から解放されるため、今後本コードは我国において実験解析、遮蔽設計計算などの面でますます利用の機会がふえるものと考えられる。

今回の一連の計算では、透過距離が浅い場合、加速計算法を一切使用しない直接的なモンテカルロ計算を行い、透過距離が深くなり、直接的な計算だけでは分散が大きくなりすぎる場合、W-W法(Weight-Window法)や指数関数変換法(Exponential Transform Method)を併用し分散の低減化を試みた。

MCNPコードの現実の遮蔽設計への適用を考える上で、計算効率をいかに向上させるかは重要なポイントとなる。そこで、モンテカルロ計算で用いるエスティメータ(Estimator)、W-W法や指数関数変換法の分散低減化手法を組み合わせることで計算した時の、分散値、McBENDスペクトルとの一致度、必要とする計算時間等の関係を系統的に調べ、中性子の深層透過計算にMCNPを適用する際の問題点の把握、コード使用上の実際的な知見の習得につとめた。

本ベンチマーク問題の一連の解析を通じて、黒鉛透過中性子スペクトルに特徴的な、3.5 MeV近傍の共鳴吸収の谷間が、計算の条件により、McBENDスペクトルと比較して深くえぐれすぎたり、あるいは谷が無視されたり、さらには谷の位置が隣りのエネルギーメッシュにずれるなど、必ずしも安定した解が得られないことが分った。そこでNEAベンチマーク問題に加え、Profio

等による黒鉛球中性子透過実験<sup>3)</sup>の解析を行い、角度スペクトルの実験値と計算値の比較から MCNP の計算精度の検証を行った。



## 2. NEA黒鉛ベンチマーク実験の解析

### 2.1 計算条件

実験体系は大別して、原子炉からウランコンバータへ熱中性子ビームを導くサーマルコラム、線源領域となるウランコンバータ及びそれに接続する黒鉛供試体領域から構成される。計算のためモデル化した体系図をFig. 2.1に示す。同図に示した①～⑭の領域番号に対応する領域の物質名とその物質組成をTable 2.1に与える。ウランコンバータ(⑩)とそれを囲むアルミ製容器(⑨)のみが直方体であり、それ以外の領域はコンバータ面に垂直な回転軸を有する円柱形状をなし、その軸は原子炉側から見てコンバータ面の重心から上方2.5cm、右方2.5cm離れた位置でコンバータを貫く。コンバータは40.2cm×63.5cmの長方形の面を有し、厚さが0.6cmの直方体であり、同領域内の出力分布はTable 2.2に5×11に分割した領域毎にそれぞれの平均値として与えられる。この時、軸方向の0.6cm中での出力分布は平坦であると仮定した。核分裂スペクトルはWattの式を用いて次式で表わされる。

$$\chi(E) \propto e^{-1.0123E} \sinh\sqrt{2.1893E}$$

(E ; MeV)

MCNPのスペクトル編集用のエネルギービン(群)構造は、スペクトル間の比較の便宜を考慮してTable 2.3に示したMcBENDの構造と共通のものを採用した。

スペクトルから反応率を計算するための、 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ ,  $^{32}\text{S}(n, p)$ ,  $^{115}\text{In}(n, n')$ ,  $^{103}\text{Rh}(n, n')$ の各反応の応答関数をTable 2.4に示す。この応答関数は、Cullen等による620群ドジメトリファイル<sup>4)</sup>を今回の計算に合わせて縮約したものである。

### 2.2 計算手法

今回の計算で使用したエスティメータは、半径10cm、高さ1.24cm(供試体表面の場合のみ半径5cm、高さ0.2cm)の円筒形状のPath Length Estimator(PLE)、その円筒の前後の円板上に定義したSurface Crossing Estimator(SCE)及び円筒の中心位置に定義したPoint Detector Estimator(PDE)の3種類である。

SCEは、着目する面の表面積をSとして、この面を通過するフルーエンス $\Phi$ を、

$$\Phi_{sc} = \sum_i W_i / (|\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega}_i| \cdot S)$$

$\mathbf{n}$  : 表面の法線方向単位ベクトル

$\boldsymbol{\Omega}_i$  : 粒子の飛行方向ベクトル

$W_i$  : 粒子の重み

から評価し、得られた $\Phi_{sc}$ をエネルギービン幅、単位時間、立体角、表面積全体に亘って積分

することにより、着目する面上での平均スカラー束  $\phi$  が次式より求まる。

$$\phi(\mathbf{r}, \bar{t}, \bar{E}) = \int_S d\mathbf{r} \int_{4\pi} d\Omega \int_{\Delta t} dt \int_{\Delta E} dE \Phi_{sc}(\mathbf{r}, \Omega, t, E) / \Delta t / \Delta E$$

SCEは、 $\Phi_{sc}$ の評価式から明らかなように、検出面にほぼ平行に入射する ( $|\mathbf{n} \cdot \Omega_i| \ll 1.0$ ) 粒子の寄与が無視できない場合、スカラー束が発散するという原理的な問題がある。

PLEは、エスティメータ領域内のフルーエンス  $\Phi$  をその領域内の粒子の飛程  $L_i$  から評価する方法であり、次式のように表現できる。

$$\Phi_{PL} = \sum_i W_i \cdot L_i / V,$$

$W_i$ : 粒子の重み,

$V$ : PLEの体積,

スカラー束  $\phi$  は、 $\Phi_{PL}$  を PLE の体積、エネルギービン幅、単位時間、立体角について積分することにより、エスティメータ領域の平均値として次式により計算することができる。

$$\phi(\mathbf{r}, \bar{t}, \bar{E}) = \int_V d\mathbf{r} \int_{4\pi} d\Omega \int_{\Delta t} dt \int_{\Delta E} dE \cdot \Phi_{PL}(\mathbf{r}, \Omega, t, E) / \Delta t / \Delta E$$

上式において体積  $V$  は有限の大きさにとるので PLE には解の発散の心配はない。しかし、SCE、PLE は共に粒子が直接エスティメータを横切る場合のみフルーエンスを評価する方法であるため、深層透過の計算においては計算効率が悪く、ヒストリーを大巾にふやすか、もしくは後述のバイアス法等の分散低減化手法を併用する必要がある。

PDE は、点検出器位置におけるフルーエンス  $\Phi$  を、粒子の衝突毎に衝突点から仮想的な粒子を検出器方向に飛ばして評価する方法であり、次式により計算することができる。

$$\Phi_{PD} = \sum_i W_i e^{-\Sigma_t R_i} \cdot P_i / R_i^2$$

$P_i$ : 衝突点から検出器へ粒子が飛ぶ確率,

$R_i$ : 衝突点と検出器間の距離,

$\Sigma_t$ : 全断面積。

スカラー束  $\phi$  は、 $\Phi_{PD}$  をエネルギービン幅、単位時間、立体角について積分することにより次式を用いて計算することができる。

$$\phi(\mathbf{r}, \bar{t}, \bar{E}) = \int_{4\pi} d\Omega \int_{\Delta t} dt \int_{\Delta E} dE \cdot \Phi_{PD}(\mathbf{r}, \Omega, t, E) / \Delta t / \Delta E$$

本手法によれば、少ないヒストリーでも数多くの仮想的な粒子をエスティメータに到達させることができ、FSD (Fractional Standard Deviation) は必ずしも小さくはないが、比較的精度の良い解を得ることができる。しかし、 $\Phi_{PD}$  の評価式からも明らかなように、衝突点が検出点に非常に近い場合 ( $R_i \ll 1.0$ )、解が発散するという原理的な問題がある。したがって、PDE を物質中で定義するのは不適當である。また、本手法は衝突毎に仮想粒子の PDE への寄与を計算するので、SCE や PLE にくらべて、ヒストリー数の割に計算時間がかかるという欠点をあわせもつものである。

一方、分散低減のための手法の一つとして、20cm 以上の透過計算に対して W-W 法を適用した。

本手法は、粒子のウェイトの上限、下限値をエネルギー及び領域の関数として与え、粒子のウェイトが指定された上限値より大きければスプリッティング（粒子の分割）を施し、逆に下限値以下の場合にはロシアンルーレットを施すことにより分散を低減化する方法である。本方法によれば、少ないヒストリーでも数多くの粒子をエスティメータへ到達させることが可能である。しかし、MCNPコードでは、各領域におけるエネルギービン毎の粒子の平均ウェイトが出力されないため、現状では上限、下限値の設定は試行錯誤による経験に頼らざるを得ない。

30 cm以上の透過計算に対しては、体系の中心軸に平行に、線源からエスティメータに向けてバイアスをかける指数関数変換法をW-W法と合わせて適用した。本手法は、バイアス方向に対する粒子の飛行方向の方向余弦を $\mu$ とし、パラメータ $p$  ( $|p| \leq 1.0$ )を与えて、全断面積 $\Sigma_t$ を見かけ上 $\Sigma_t(1-p)$ とすることで、エスティメータ方向へむかう粒子数を増加させ分散を低減するものである。

参考のためAppendix AにW-W法のみを適用した20 cm透過計算に対するMCNPの入力データリストを示す。

### 2.3 計算結果

今回の計算では、まず第一にエスティメータの違いによるスペクトルの計算値への影響を調べるため、SCE, PLE, PDEの3種類のエスティメータを用いて、黒鉛透過距離0, 20, 30, 70 cm位置におけるスペクトルを計算し、McBENDによるスペクトルとの比較検討を行った。

Fig. 2.2はMCNPとMcBENDによる黒鉛供試体表面におけるスペクトル計算値の比較である。SCEとPLEによる計算は30万ヒストリーで18分、PDEの計算では10万ヒストリーで15分の計算時間を要し、ヒストリー当りの時間はPDEがSCE, PLEにくらべて3倍弱かかっている。ただし、ここで言う計算時間は、FACOM M-380による14 MeVから0.1 MeVまでのスペクトル計算のためのcpu時間であり、本文中の計算時間はすべて同様である。図中PLEとPDEのスペクトルに対して示した誤差は1FSDをあらわす。McBENDによる0.9 MeV近傍のスペクトルピークは、いずれのエスティメータによるMCNPスペクトルにおいても再現されなかったが、それ以外の領域におけるMCNPとMcBENDスペクトルの一致は良好である。Fig. 2.3は透過距離20 cmの位置でのスペクトルの比較である。SCE, PLEは30万ヒストリーの計算で12分、PDEは10万ヒストリーで18分かかっている。同図から明らかなように、5 MeV以下の領域ではSCE, PLEの分散がPDEよりも小さく、McBENDスペクトルとの一致も良好である。一方、5 MeV以上の領域においては、3つのエスティメータの結果ともMcBENDを大巾に過少評価している。また、McBENDスペクトルに現われている3.5 MeVの共鳴の谷が、SCE, PLEでは浅く広がっており、PDEでは谷の位置が3.5 MeVから3.0 MeVへ移動している。これはMCNPスペクトルの分散が大ききことに起因している。Fig. 2.4は30 cm位置におけるMcBENDスペクトルとSCE, PLE, PDEスペクトルの比較である。SCE, PLEは30万ヒストリーで17分、PDEでは10万ヒストリーで19分の計算時間を要したが、いずれも分散が大きくMcBENDを全エネルギー領域で大巾に過少評価している。Fig. 2.5は同じく70 cmの透過距離における結果である。SCE, PLEの計算では40万ヒストリーで22.5分、PDEでは10万ヒストリーで22分

かかっており、PDEはSCE、PLEよりもヒストリー当たり約4倍の計算時間を要したことになる。SCE、PLEの結果は40万ヒストリーの計算でも所々に零スペクトルを算出するのに対し、PDEの結果は10万ヒストリーの計算でも零スペクトルの算出は無い。いずれのケースも分散は大きい、SCE、PLEは2 MeV以下でMcBENDスペクトルとの一致が良く、逆にPDEは4 MeV以上で良く一致するという、各エスティメータのアリゴリズム上の特徴が現われている。

以上は分散低減化手法を使用せずに得られたMCNPの結果である。0 cm (供試体表面) の場合を除けば、いずれの場合も分散は大きく、ヒストリー数を数倍程度ふやしても大した分散の改善にはむすびつかないことが分った。そこで、20 cm以上の深い透過計算に対してMCNPコードに内蔵されている分散低減化手法の一つであるW-W法の適用を試みた。ウェイトウィンドーの下限値は黒鉛供試体の表面から5 cm間隔で設定し、上限値はコード内で自動的に下限値の2倍の値がとられる。Table 2.4に0 cmと70 cmの透過位置での下限値を示す。0～70 cmの間の中間の位置での下限値は0 cmと70 cmでの値を用いた対数補間により決定した。Fig. 2.6はW-W法を用いてSCE、PLE、PDEにより求めた20 cm透過位置でのスペクトルとMcBENDスペクトルとの比較である。SCE、PLEの計算は20万ヒストリーで15分、PDEは10万ヒストリーで19分かかっている。全エスティメータ共0.7 MeV以下でMcBENDを約20%過少評価しており、3.5 MeVの共鳴吸収の谷については、SECとPLEはMcBENDスペクトルを良く再現しているが、PDEは分散が大きく、谷は浅く再現性は良くない。また4 MeV近傍のピークは、SCE、PLEの結果は分散が小さいにもかかわらずMcBENDを大中に過少評価する結果が得られた。Fig. 2.7はW-W法を用いて求めた30 cmの透過位置でのスペクトルのMcBENDとの比較である。全エスティメータ共1.5 MeV以下でMcBENDを15%程度過少評価しているが、1.5 MeV以上では、SCE、PLE共わずかに過少評価の傾向を示すもののMcBENDとの一致は良好である。Fig. 2.8は70 cm位置でのW-W法を適用して計算したスペクトルの比較である。SCE、PLEは15万ヒストリーの計算で23分かかり、ほぼ満足できる分散値が得られた。一方、PDEの計算では5万ヒストリーで23分かかり、なお分散値は大きかった。SCE、PLEの結果は1.3 MeV以下でMcBENDを20%程度過少評価するものの1.3 MeV以上の領域ではMcBENDとの一致は良好である。以上見てきたようにW-W法を適用すると、直接的な計算に比較して分散は飛躍的に改善され、McBENDスペクトルとの一致が良くなることが明確に示された。

次に、30、70 cmの透過計算に対し、W-W法に加えて指数関数変換法を併用し、分散低減の効果の検討を行った。この時、指数関数変換法のパラメータ $k$ は0.5を使用した。Fig. 2.9は、W-W法と指数関数変換法を併用した場合の30 cm位置でのスペクトルである。SCE、PLEは20万ヒストリーで18分、PDEは10万ヒストリーで23分の計算である。SCE、PLEの場合、指数関数変換法の適用により7 MeV以下でわずかにMcBENDとの一致が改善されたが、分散は3.5 MeVの谷や7 MeV近傍においてわずかながら悪化している。一方、PDEの場合は、全エネルギー領域で分散に多少の改善が見られ、また、SCE、PLEスペクトルとの一致が良くなった。特に、4 MeV近傍のスペクトルのピークが改善された点が注目される。Fig. 2.10は、同じくW-W法と指数関数変換法を併用して得た70 cm透過位置でのスペクトルである。SCE、PLEは15万ヒストリーで23分、PDEは5万ヒストリーで22分の計算であり、ヒストリー当たりPDEはSCE、PLEにくらべ約3倍の計算時間がかかっている。SCE、PLEの結果は、指数関数変換法を併用

しない場合と比較して、部分的にわずかな改良はみられるものの、全体として特に目立った変化は得られなかった。また、FSDの改善もごくわずかであった。一方PDEの場合3.5 MeVの谷が相対的に浅くなるなど、指数関数変換法を併用したことによる改善は得られなかった。以上、指数関数変換法をW-W法と併用したことによる解への影響を検討したが、70 cm深さまでの透過計算ではエスティメータの種類によらず解の顕著な改善は得られなかった。0 cm~70 cmまでの透過計算に対してFig. 2.1~2.9に示したスペクトルのエスティメータによる差異を調べてみると、エスティメータに入射する粒子の寄与からスペクトルを評価する方式のSCEとPLEによるスペクトル間に本質的な差はなく、粒子の衝突毎に衝突点から検出器への寄与を考慮してスペクトルを評価するPDEとSCE、PLEとの差は顕著である。特に、今回取り上げたベンチマーク問題では評価点が体系内であるため、部分的に突出した異常スペクトルが算出されたこと等が原因でその差を大きくしたものであると思われる。今後のMCNP計算の参考のため、Appendix Bに、今回とりあげた計算の全ケースについて単位ヒストリー当りの計算時間の一覧表を与える。

本実験で得られた測定値は、速中性子領域にのみ感度を有するしきい反応の反応率の空間分布だけであるため、MCNP計算結果を実験値と直接比較するために、上で得られたスペクトルの中から、解の発散の心配のないPLEによるスペクトルを用いて反応率分布の計算を行った。その結果は、実験値及びMcBENDによる計算値と比較した。反応率計算に使用したMCNPスペクトルは直接的な計算で得た0 cmでのスペクトル、W-W法のみを用いて得た20 cmでのスペクトル、W-W法と指数関数変換法を併用して得た30、70 cmでのスペクトルでありこれらにTable 2.4で与えた応答関数をかけて、 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ 、 $^{24}\text{Na}$ 、 $^{32}\text{S}(n, p)$ 、 $^{32}\text{P}$ 、 $^{115}\text{In}(n, n')$ 、 $^{115m}\text{In}$ 、 $^{103}\text{Rh}(n, n')$ 、 $^{103m}\text{Rh}$ の4種類の反応について反応率を計算した。Fig. 2.11は反応率分布の実験値、MCNP、McBENDによる計算値を比較したものである。また、これらの結果をC/EでまとめたものをTable 2.6に示す。0 cmでのMCNPの結果は、すべての反応に対して実験値と良い一致を示し、20 cm以上の計算では、 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ 、 $^{32}\text{S}(n, p)$ に対しては良好な一致が得られたものの、 $^{103}\text{Rh}(n, n')$ 、 $^{115}\text{In}(n, n')$ については透過距離の増加と共に、実験値との差異は過少評価の方向に拡大する傾向をもつ。このことは、MCNPのスペクトルが散乱成分の多い低エネルギー領域で過少評価していることを示すものである。一方、MCNPとMcBENDのスペクトルを比較すると、0~70 cmまでの着目している領域全体において、MCNPはMcBENDをほぼ一様に10%程度過少評価していることがわかる。また、供試体表面(0 cm)ではMCNPの方が実験値との一致は良く、20 cm以上の透過スペクトルでは $^{103}\text{Rh}$ 、 $^{115}\text{In}$ の両反応率についてMcBENDの方が良好な一致が得られた。

W-W法の基本パラメータであるウェイトウィンドーの下限値は、今回の一連の計算では試行錯誤をくり返して経験的に決定したものであり、その値が最適値であるという保証はない。したがって、本パラメータの計算結果に対する感度が大きいことを考えると、その最適値をいかにして決定するかがMCNPコードによる輸送計算の当面の課題となるであろう。

Table 2.1  
Materials in the NEA Graphite Benchmark

Zone	Material	Element	Atomic Density ( $10^{24}/\text{cm}^3$ )
1	Carbon	C	8.276-2
2	Concrete	Si	1.662-2
		Fe	3.473-4
		H	1.374-2
		O	4.580-2
		Al	1.745-3
		Ca	1.521-3
		Na	9.639-4
		K	5.668-4
3	Aluminium	Al	6.029-2
4	Void		0.0
5	Aluminium	Al	6.029-2
6	Mild Steel	C	8.646-4
		Mn	9.366-4
		P	1.524-5
		S	4.711-5
		Fe	8.338-2
7	Carbon	C	8.276-2
8	Void		0.0
9	Aluminium	Al	6.029-2
10	U/Al Fuel	Al	3.941-2
		U235	1.051-3
		U238	7.816-5
11	Aluminium	Al	6.029-2
12	Carbon	C	8.326-2
13	Carbon	C	8.326-2
14	Carbon	C	8.276-2

Table 2.2  
Source Distribution to 1 Watt Across the  
0.6 cm Thick Uranium Converter

		X - AXIS (cm)					
		-20.10	-12.10	-4.10	4.10	12.10	20.10
Y - AXIS (cm)	-31.75	4.884+7 <sup>*)</sup>	4.734+7	4.705+7	4.695+7	5.055+7	
	-26.32	4.849+7	4.533+7	4.505+7	4.534+7	5.031+7	
	-20.58	4.987+7	4.573+7	4.554+7	4.606+7	5.166+7	
	-15.44	5.178+7	4.713+7	4.698+7	4.763+7	5.351+7	
	-10.00	5.363+7	4.871+7	4.853+7	4.930+7	5.533+7	
	- 3.33	5.459+7	4.957+7	4.931+7	5.015+7	5.629+7	
	3.33	5.418+7	4.914+7	4.883+7	4.973+7	5.589+7	
	10.00	5.288+7	4.794+7	4.769+7	4.860+7	5.457+7	
	15.44	5.157+7	4.689+7	4.678+7	4.765+7	5.324+7	
	20.58	5.058+7	4.666+7	4.671+7	4.744+7	5.227+7	
	26.32	5.092+7	4.870+7	4.873+7	4.920+7	5.280+7	
	31.75						

\*) read as  $4.884 \times 10^7$

Table 2.3  
Energy Scoring Bins of MCNP Calculations

Group	Lower Energy Boundary (MeV)	Lethargy Width
1	12.214	0.20
2	10.000	0.20
3	8.187	0.20
4	7.047	0.15
5	6.376	0.10
6	5.488	0.15
7	4.966	0.10
8	4.493	0.10
9	4.066	0.10
10	3.679	0.10
11	3.329	0.10
12	3.012	0.10
13	2.725	0.10
14	2.466	0.10
15	2.346	0.05
16	2.019	0.15
17	1.827	0.10
18	1.653	0.10
19	1.496	0.10
20	1.353	0.10
21	1.003	0.30
22	0.7427	0.30
23	0.5502	0.20
24	0.2472	0.80
25	0.1111	0.80

Table 2.4  
Response Functions of Threshold Reactions

Group	Response Functions			
	AL27 (N,A)	S32 (N,P)	RH103 (N,N')	IN115 (N,N')
1	1.258-1	3.047-1	3.941-1	9.312-2
2	1.040-1	4.225-1	7.919-1	2.058-1
3	6.620-2	3.711-1	1.083+0	2.797-1
4	2.886-2	3.452-1	1.131+0	2.973-1
5	9.881-3	3.403-1	1.149+0	3.232-1
6	1.402-3	3.283-1	1.160+0	3.373-1
7	4.178-5	2.674-1	1.105+0	3.259-1
8	9.415-7	2.736-1	1.143+0	3.145-1
9	3.489-9	3.427-1	1.077+0	3.112-1
10	8.013-13	2.211-1	1.063+0	3.218-1
11	1.003-20	2.236-1	1.045+0	3.305-1
12	1.104-23	1.623-1	1.031+0	3.319-1
13	0.0	1.128-1	1.013+0	3.355-1
14	0.0	7.712-2	9.983-1	3.326-1
15	0.0	8.433-2	9.154-1	3.224-1
16	0.0	5.015-2	8.858-1	2.933-1
17	0.0	1.010-2	8.127-1	2.377-1
18	0.0	2.915-3	8.038-1	2.033-1
19	0.0	9.186-4	7.437-1	1.839-1
20	0.0	2.897-4	6.785-1	1.496-1
21	0.0	6.355-5	6.382-1	9.407-2
22	0.0	1.253-6	5.601-1	4.174-2
23	0.0	0.0	2.951-1	1.111-2
24	0.0	0.0	1.302-1	1.304-3
25	0.0	0.0	4.406-2	0.0

Table 2.5  
Lower Limit Value of Weight Window  
at 0 cm and 70 cm Penetration  
through Graphite

Penetration (cm)	Neutron Energy Range (MeV)		
	0.1 ~ 4.0	4.0 ~ 7.0	7.0 ~ 15.0
0	9.0-1 <sup>*)</sup>	4.5-1	2.4-1
70	9.0-3	1.2-4	6.0-5

\*) read as  $9.0 \times 10^{-1}$

Table 2.6  
Comparison of MCNP and McBEND Calculated  
Reaction Rates with Measurements in C/E

Penetration (cm)	Reaction			
	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	$^{32}\text{S}(n,p)$	$^{103}\text{Rh}(n,n')$	$^{115}\text{In}(n,n')$
0	1.01 <sup>*)</sup>	0.95	1.00	0.95
	1.19	1.10	1.07	1.01
20	0.93	0.90	0.86	0.84
	1.10	1.13	0.99	0.97
30	0.94	0.96	0.85	0.86
	1.15	1.13	0.98	1.02
70		1.06	0.63	0.75
		1.01	0.69	0.80

\*) The upper figures are C/E for MCNP calculation, and the lower ones are C/E for McBEND calculation.



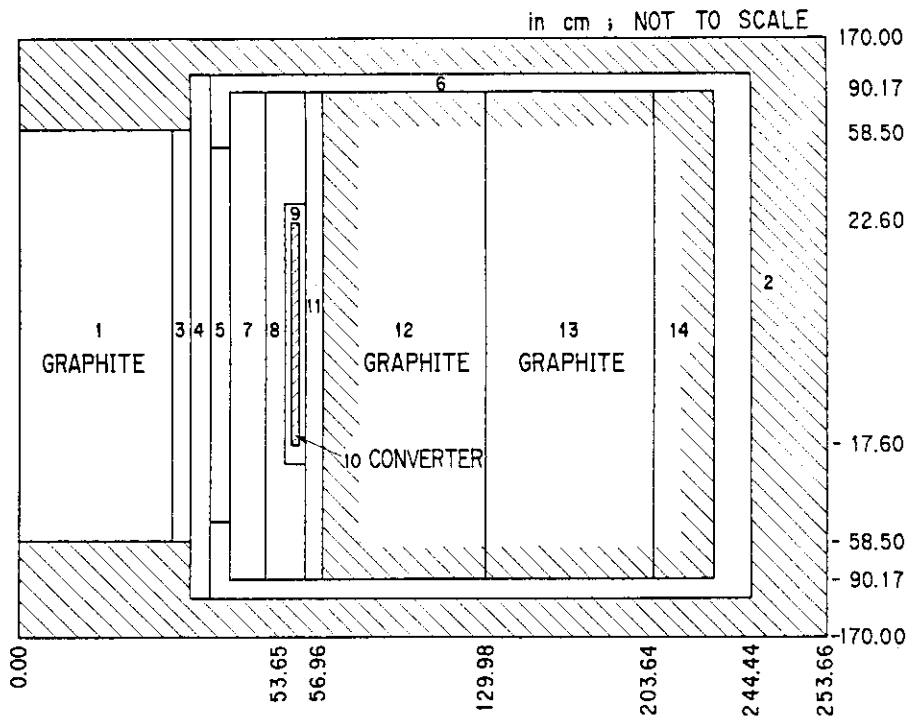


Fig. 2.1 Simplified model of experimental setup for the NEA graphite benchmark.

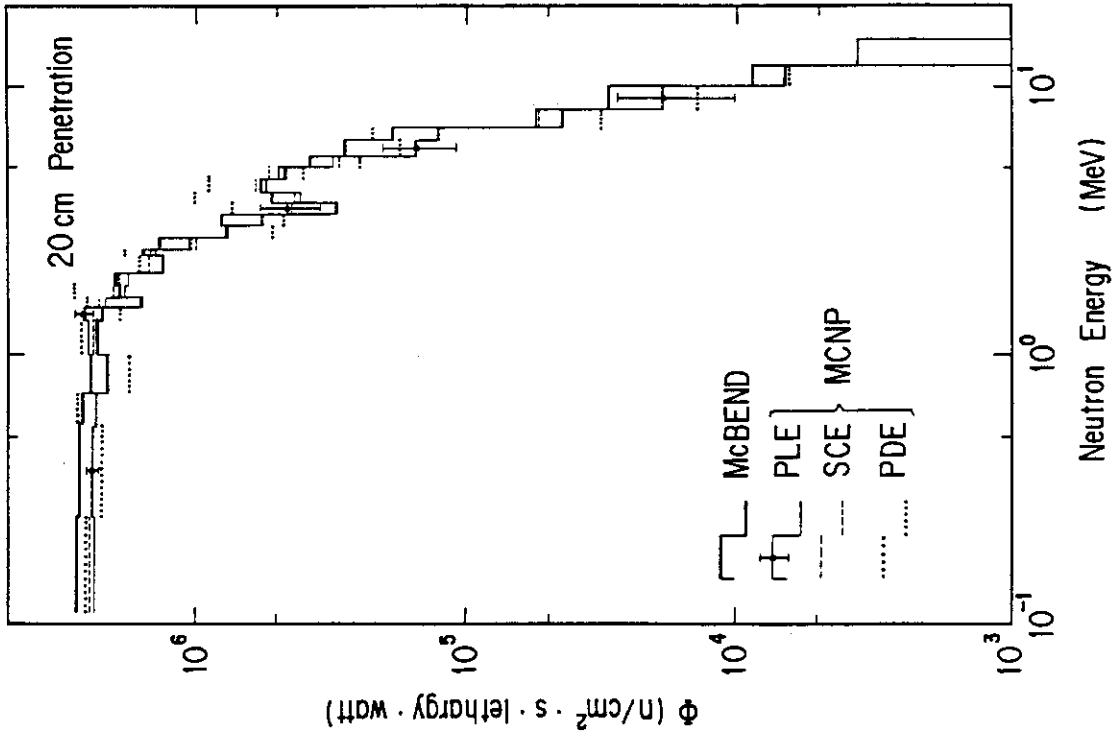


Fig.2.3 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 20 cm penetration through graphite.

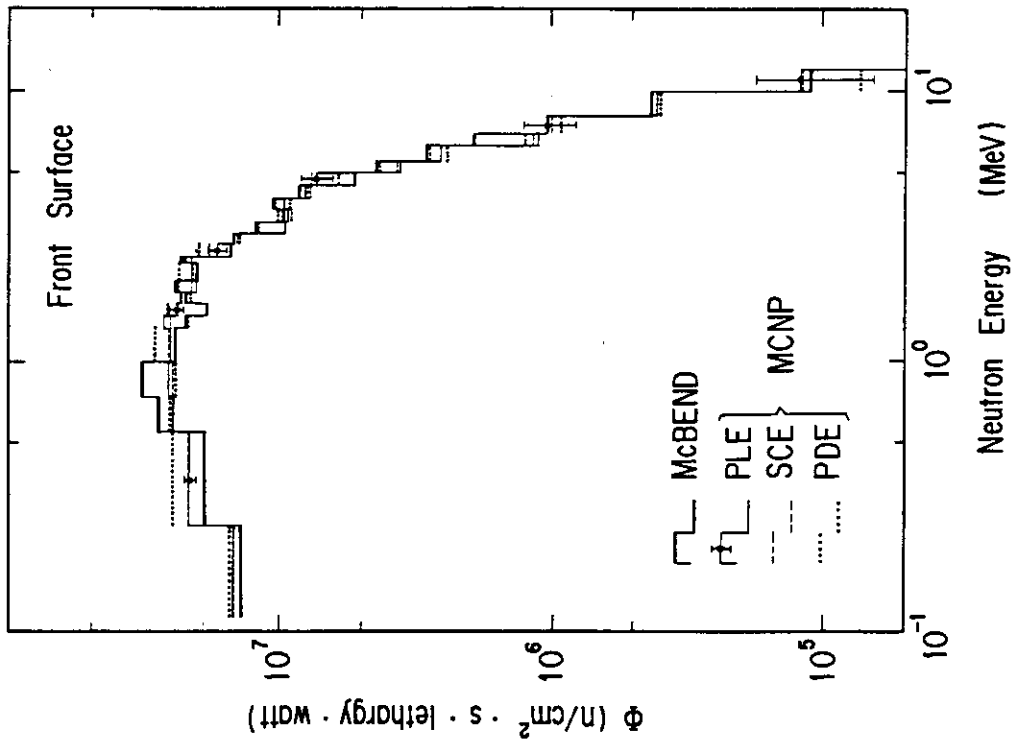


Fig.2.2 Comparison of MCNP and McBEND spectra at the front of the graphite.

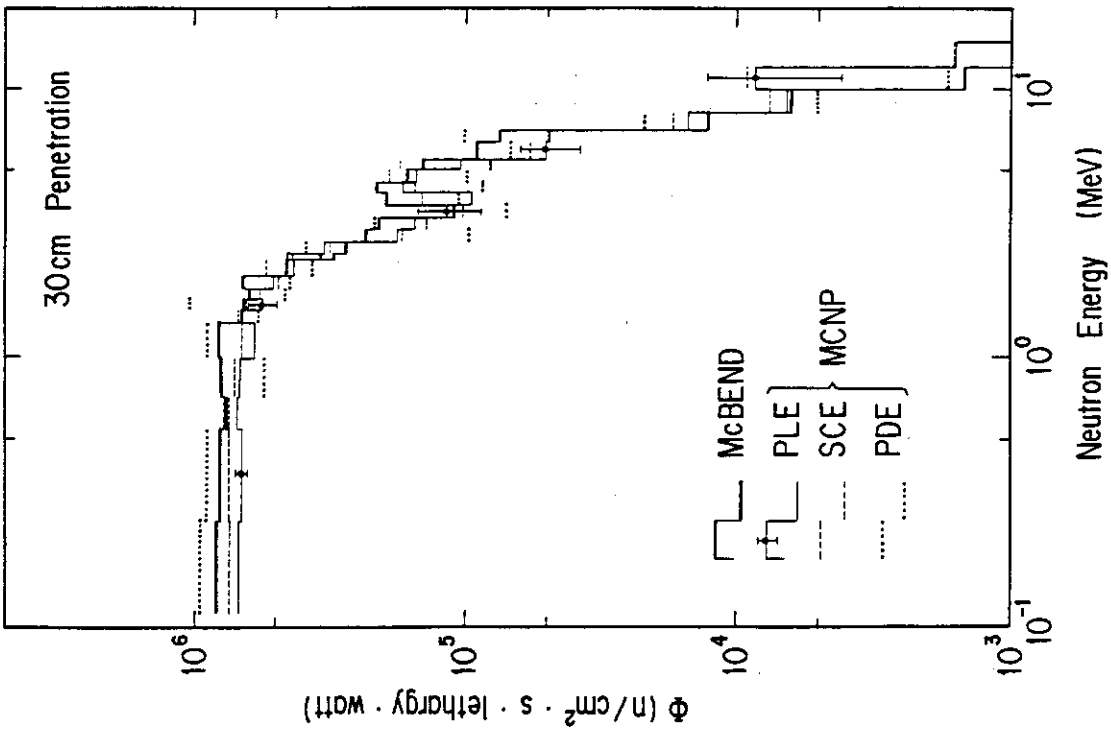


Fig. 2.4 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 30 cm penetration through graphite.

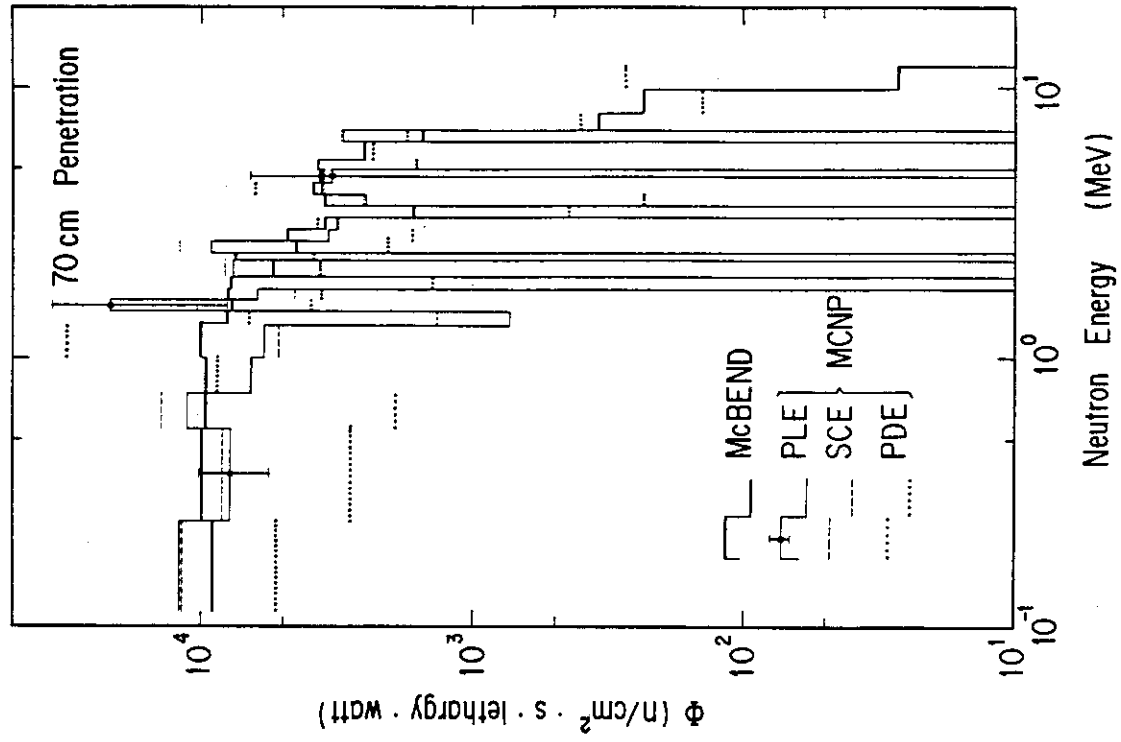


Fig. 2.5 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 70 cm penetration through graphite.

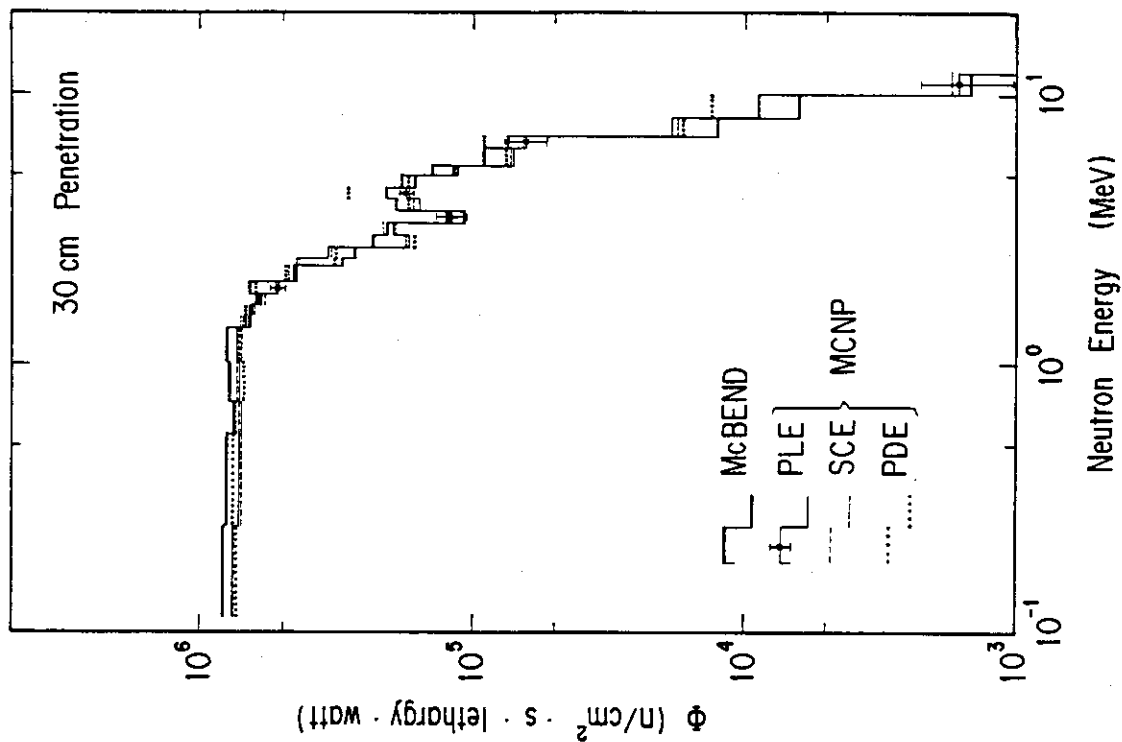


Fig.2.7 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 30 cm penetration through graphite. W-W method is applied to MCNP calculation.

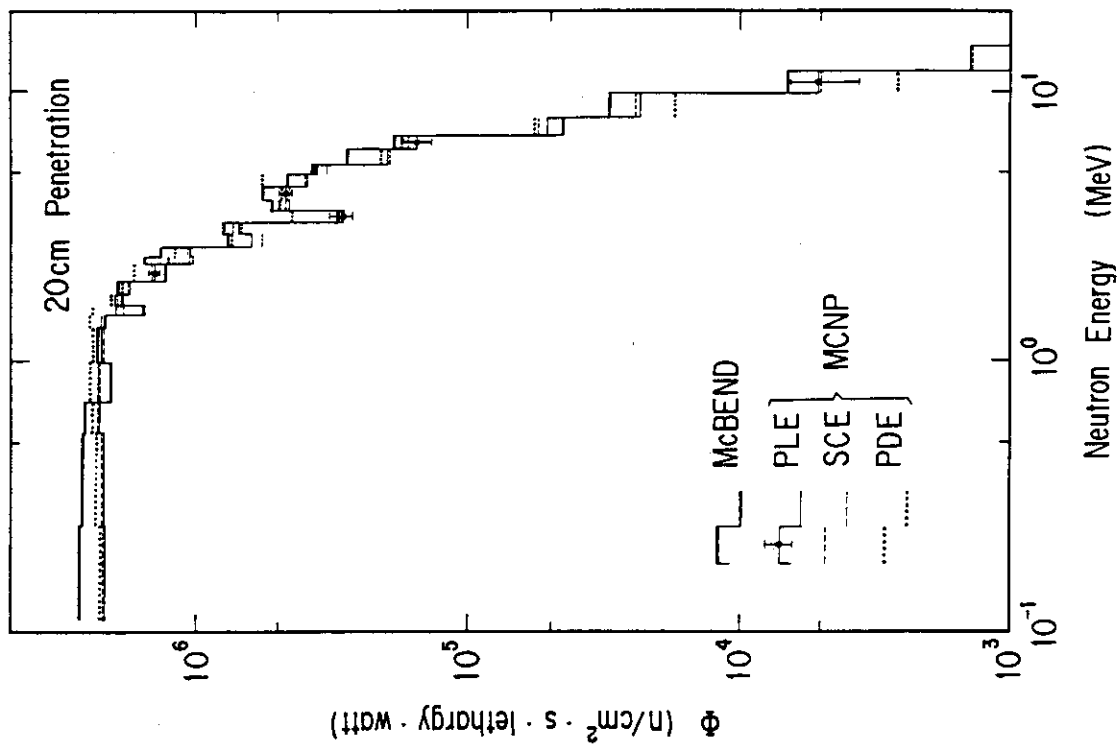


Fig.2.6 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 20 cm penetration through graphite. W-W method is applied to MCNP calculation.

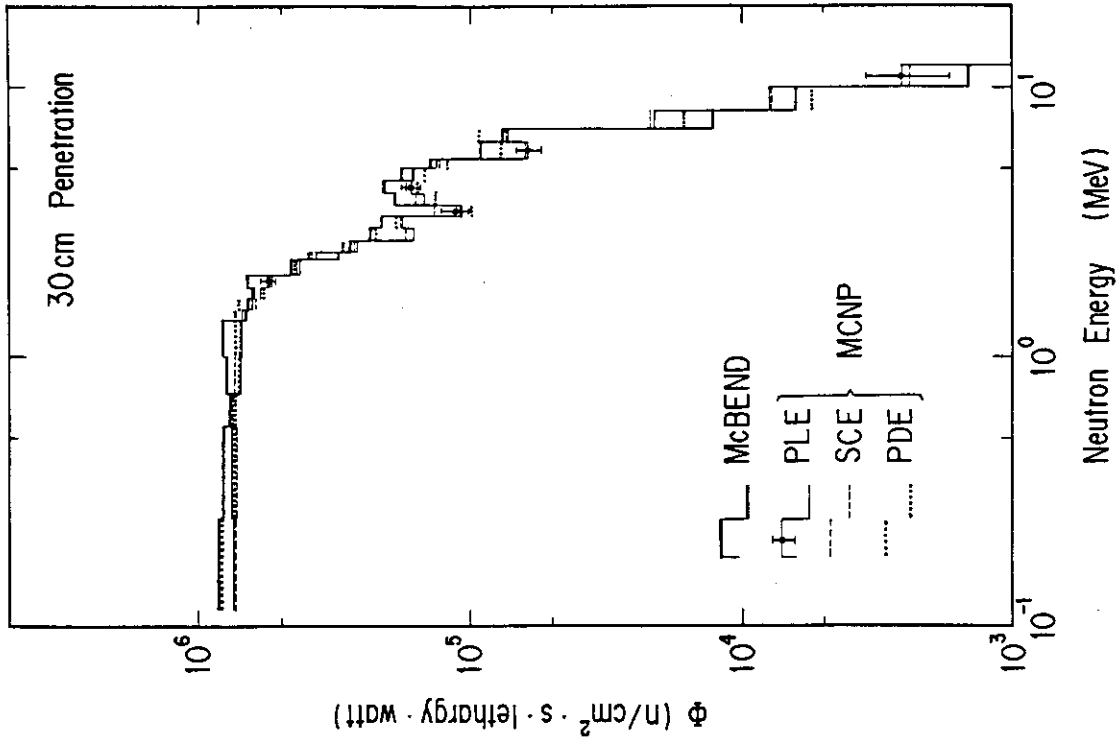


Fig.2.9 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 30 cm penetration through graphite. A combination of W-W and exponential transform methods is applied to MCNP calculation.

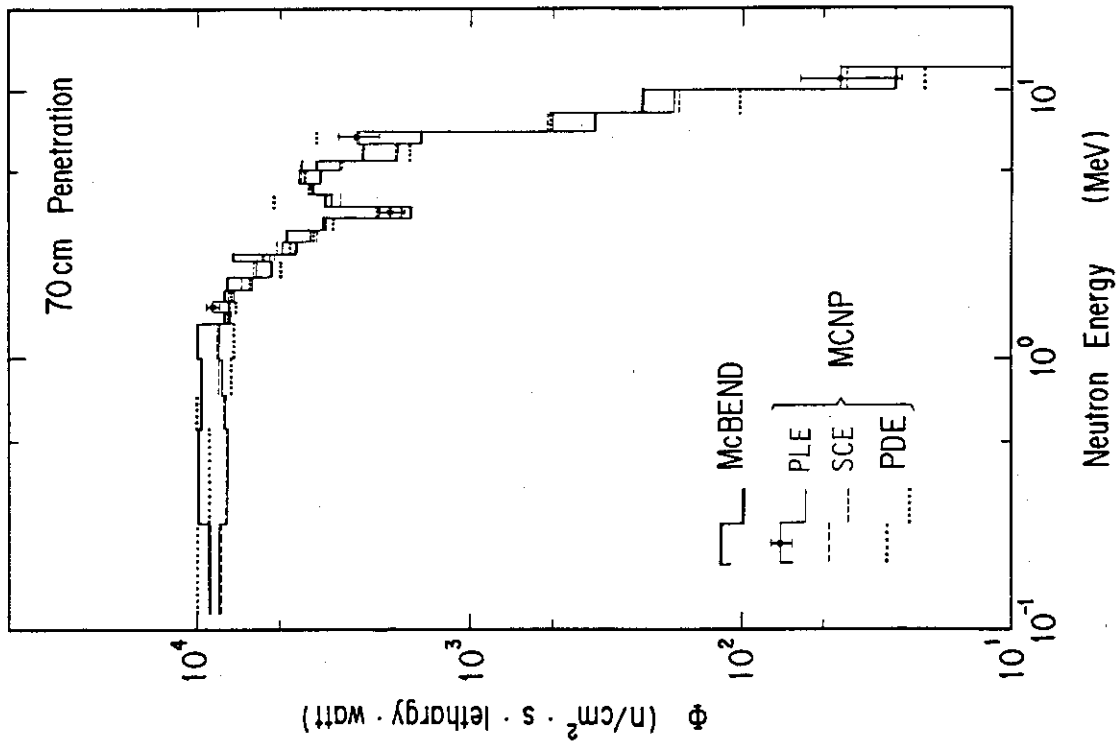


Fig.2.8 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 70 cm penetration through graphite. W-W method is applied to MCNP calculation.

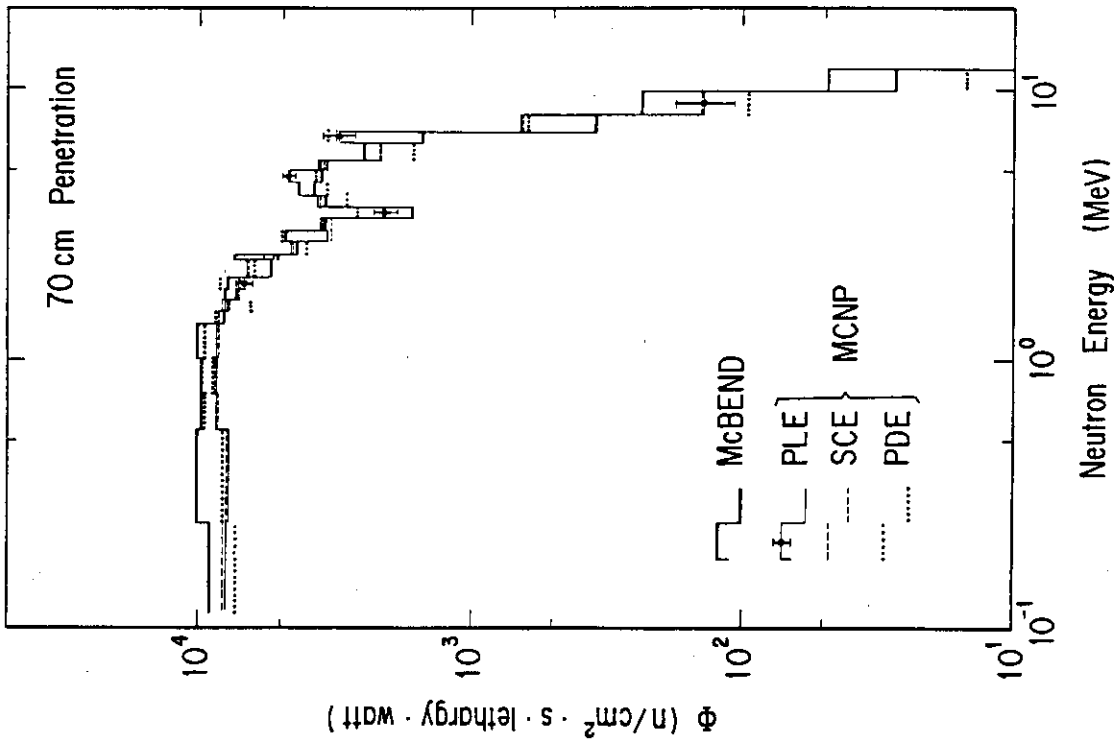


Fig. 2.10 Comparison of MCNP and McBEND spectra after 70 cm penetration through graphite. A combination of W-W and exponential transform methods is applied to MCNP calculations.

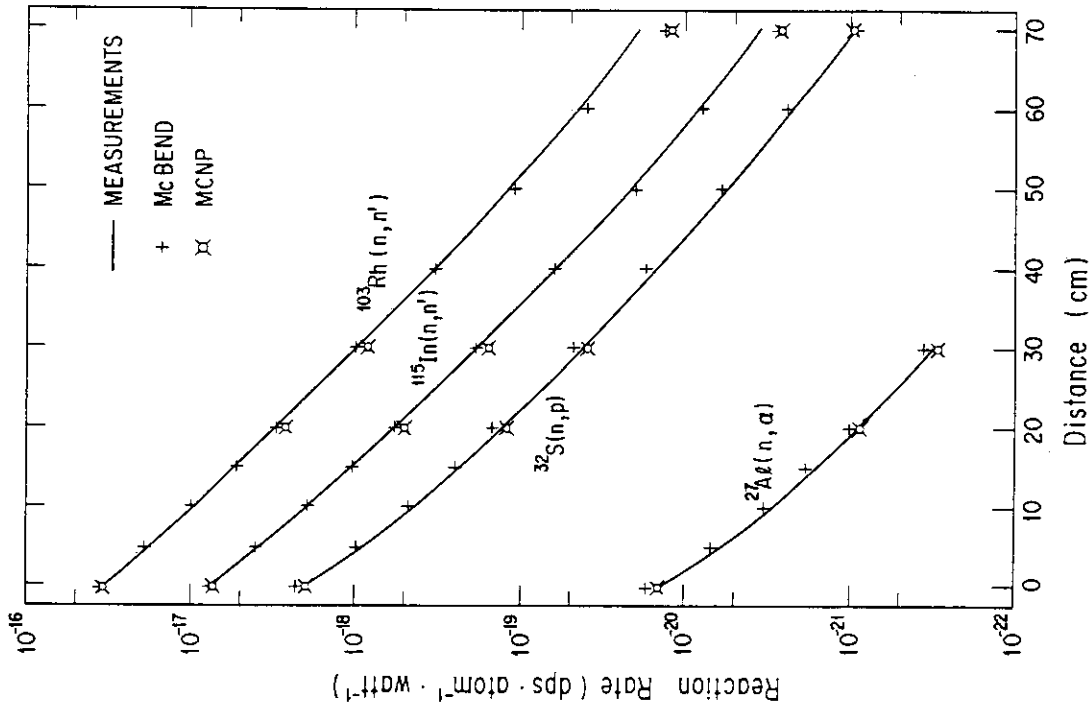


Fig. 2.11 Comparison of MCNP, McBEND and measured reaction rate distributions.

### 3. 黒鉛球体系中中性子透過実験の解析

本実験の体系は一次元球形状で精度良く近似できるため、形状のモデル化による誤差は無視することができる。また、本実験で得られた角度スペクトルは、輸送計算で得られる角度スペクトルとの直接比較が可能であるため、角度スペクトルの積分量であるスカラー束や反応率による比較よりも厳密な計算精度の評価が可能である。そこで、NEA黒鉛ベンチマーク問題のMCNPによるスペクトル計算の妥当性を裏付けるために本実験の解析を行った。

#### 3.1 計算体系

本実験は、直径2.54 cmのビーム孔を通して黒鉛集合体に入射した28 MeV電子からの制動輻射線が標的核と $(r, n)$ 、 $(r, f)$ 反応によって発生する光中性子を中性子源として、黒鉛集合体を透過した中性子角度スペクトルをTOF法を用いて測定したものである。

Fig. 3.1は球殻形状によりモデル化した実験体系である。本体系は、内側2領域が光中性子の線源領域であり、外側2領域が実験供試体の黒鉛領域である。Table 3.1に領域毎の組成核種とその原子数密度を与える。線源スペクトルは、外側線源領域表面からの漏洩中性子スペクトルとしてTable 3.2に示す。このスペクトルは0.22 MeVから15.0 MeVのエネルギー領域で毎秒1個の中性子に規格化したものである。Table 3.3には、線源領域表面からの漏洩中性子の角度分布が、球表面法線方向に対する中性子の飛行方向の方向余弦 $\mu$ の関数として与えられる。Table 3.4は角度スペクトル測定用のリエントランスホール(reentrance hole)入口の位置を、その中心を見込む角度 $\theta$ と、下端、上端部それぞれを見込む角度を $\theta$ からの偏位量として示したものである。本実験で対象とした $\theta$ は $0^\circ$ から $60^\circ$ までの範囲である。

#### 3.2 計算手法

本計算体系では、角度束 $\psi$ の計算に最適のエスティメータはFlux Current Estimator (FCE)である。この手法は、着目する検出面を横切る粒子線束からフルーエンス $\Phi_{FC}$ を次式により評価する。

$$\Phi_{FC} = \sum_i W_i / (|\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega}_i| \cdot S)$$

得られた $\Phi_{FC}$ の、検出面の法線方向に対する余弦方向成分を、エネルギービン、時間、角度、球表面全体に亘って積分することにより、次式により半径 $R$ の球の表面での角度束 $\psi$ を計算するものである。

$$\psi(R, \boldsymbol{\Omega}, \bar{E}, \bar{t}) = \int_S d\mathbf{r} \int_{\Delta\boldsymbol{\Omega}} d\boldsymbol{\Omega} \int_{\Delta E} dE \int_{\Delta t} dt \cdot |\cos \theta| \Phi_{FC}(r, \boldsymbol{\Omega}, E, t) / \Delta\boldsymbol{\Omega} / \Delta E / \Delta t / S$$

本式から明らかなように、面の法線方向に対して $90^\circ$ 近い角度で面を通過する粒子に対して、

FCEの計算では  $|\cos \theta|$  が重みとして考慮されるので、SCEのような解の発散の問題は回避される。

FCEのみを用いた計算では、透過距離が50 cmをこえると粒子はほとんどエスティメータに到達せず、ヒストリー数を数倍ふやした程度では分散を改善することにはならないため、次の2通りの分散低減化手法を試みた。一つは、リエントランスホールを通して体系外に出てくる粒子を、体系表面から4 m離れた位置に設置したPDEで計数してフルーエンス  $\Phi_{PD}$  を計算する。これを、エネルギービン、単位時間について積分した後、PDE位置からリエントランスホールを見込む立体角で割って次式により角度束  $\psi$  を求める。

$$\psi(r, \Omega, \bar{E}, \bar{t}) = \int_{\Delta E} dE \int_{\Delta t} dt \cdot \Phi_{PD}(r, \Omega, E, t) / \Delta \Omega / \Delta E / \Delta t$$

もう一つの計算手法は、W-W法とFCEの組み合わせで評価する方法である。

一方、スカラー束  $\phi$  は、SCEを使って得られたフルーエンス  $\Phi_{sc}$  を球表面全体及び全角度について積分することにより次式を用いて計算することができる。

$$\phi(R, \bar{E}, \bar{t}) = \int_S dr \int_{4\pi} d\Omega \int_{\Delta E} dE \int_{\Delta t} dt \Phi_{sc}(r, \Omega, E, t) / \Delta E / \Delta t$$

ただし、本手法においては、粒子がエスティメータ表面をその法線方向に対して  $90^\circ$  に近い角度で通過する時、解が発散するという原理的な問題が残る。

### 3.3 計算結果と検討

Fig. 3.2, 3.3に、半径20.3 cm体系での各々  $\theta = 0^\circ, 30^\circ$  の角度束の実験値と、FCEを用いたMCNP及び文献3)から引用した連続エネルギーモデル・モンテカルロコードO5Rの各計算値の比較を示す。MCNPのスペクトルは20万ヒストリーで、約25分の計算時間をかけて得られたものであり、1回の計算で  $0^\circ$  と  $30^\circ$  の両角度束を同時に求めることができる。

$0^\circ$  方向の角度スペクトルについては、MCNPは実験値に対して1.5 MeV以下で過大評価、5 MeV以上で過少評価の傾向をもつが、3~3.5 MeV近傍のスペクトルの山、谷の再現性は良好である。図中のMCNPスペクトルに付した誤差は1 FSDを示す。一方、O5Rの結果は、エネルギー積分値として見ると実験値との一致は良好であるが、エネルギーメッシュが粗いため、黒鉛透過中性子スペクトルに特徴的な3.5 MeV近傍のスペクトルの山と谷はほとんど無視されている。

$30^\circ$  の角度スペクトルについては、MCNPのスペクトルは6 MeV以下の領域で実験値と非常に良い一致を示しており、一方、O5Rのスペクトルは、全エネルギー領域に亘って実験値を過少評価する傾向にある。

Fig. 3.4~3.7は、それぞれ半径35.6 cm体系における  $0^\circ, 16.6^\circ, 34.8^\circ, 58.9^\circ$  に対する角度スペクトルの計算値と実験値の比較である。計算値は半径20.3 cm体系の場合と同様、MCNPとO5Rによるものである。MCNP計算では、FCEを用いて20万ヒストリーで約25分の計算時間を要した。

$0^\circ$  の角度スペクトルについては、MCNPと実験値との一致は2.5 MeV以下の領域を除くと非常に良い。特に、スペクトル上の細部構造にいたるまでMCNP計算は実験値を良く再現してい



る。さらに、角度が $16.6^\circ$ 、 $34.8^\circ$ 、 $58.9^\circ$ と大きくなってもMCNPと実験値の一致は相変わらず良好である。一方、O5Rのスペクトルは、 $0^\circ$ スペクトルに対しては積分量では実験値との一致は良好であるが、3.5 MeV近傍の山と谷は無視されている。角度が大きくなると、さらに、過少評価の傾向が加わり、一致の度合は一層悪化する。

Fig. 3.8～3.11は、それぞれ半径50.8cm体系における $0^\circ$ 、 $11.5^\circ$ 、 $23.6^\circ$ 、 $36.9^\circ$ 方向の角度スペクトルのMCNP計算値と実験値の比較である。MCNP計算は、FCEを用いて40万ヒストリーで約1時間の計算時間を要した。すべての角度方向のスペクトルに対して、MCNP計算値は分散は大きいものの実験値との一致は良好である。

以上見てきた半径20.3cmから50.8cmまでの体系の計算では、エスティメータとしてFCEを用い、分散を低減化する手法は一切使わなかった。これらの計算は、計算時間がかかりすぎる欠点があるものの、実験値との一致は非常に良いことが分った。しかし、この直接的な評価法だけに頼るかぎり、その適用は50.8cm体系が限度である。半径66.0cm体系へ適用する場合、50.8cmのケースのヒストリーを数倍程度ふやしても、エスティメータまで到達する粒子はごくわずかであり、連続スペクトルを形成するまでにはいたらない。そのため、66.0cm体系についてのみ次に述べるPDE評価法とW-W法を用いる方法を試みた。Fig. 3.12は、PDEによる半径66.0cm体系のMCNP計算の $0^\circ$ スペクトルの実験値との比較である。計算は24万ヒストリーで約30分かかった。しかし、ヒストリー数不足のため全体的にFSDは悪く、また、実験値を過少評価する傾向があるが、スペクトルの山と谷の再現性は良好である。Fig. 3.13は、前ケースと同じ半径66.0cm体系についてW-W法を適用してFCEにより評価したMCNP計算値と実験値の比較である。この計算は50万ヒストリーで約25分かかっている。得られたスペクトルはFSDも小さく実験値との一致も良好である。W-W法においては、パラメータを変化させるとスペクトルの谷や山が変動するため、パラメータの設定には相当の注意が必要であるが、Fig. 3.13から明らかのように、最適なパラメータが設定できれば、少いヒストリー、少い計算時間で高精度の計算結果を得ることができ、特に、深層透過を含む遮蔽計算では非常に有効な手段であると考えられる。

Fig. 3.14は、半径20.3cmと35.6cmの体系の外表面におけるスカラー束について、MCNPとO5Rによる計算値同志の比較を示したものである。MCNPの計算は、O5Rと同じエネルギーメッシュによるものと、それよりも細かいエネルギーメッシュによるものの2種類の計算を行った。実験値がないので詳細な評価はできないが、O5RのスペクトルはMCNPのスペクトルを多少過少評価するものの、計算値間の一致は良好である。詳細なメッシュによるMCNP計算では、3.5 MeV近傍に小さな山と谷があらわれるが、この山と谷の部分は、O5Rの1つのエネルギービンの中に含まれるため相殺され、スペクトルとしてあらわれてこないことが分る。このことは、O5Rと同じメッシュで計算したMCNP計算のスペクトルにおいても山と谷が消滅していることから裏付けられる。

以上の黒鉛透過スペクトルの解析を通して以下のことが明らかになった。MCNPの直接的な評価法であるFCEによる計算は、計算時間がかかりすぎる欠点はあるものの、50cmまでの透過計算においては角度スペクトル実験値をスペクトルの細部構造にいたるまで精度良く再現できることが分った。また、66cm体系のように深い透過計算においては、FCEとW-W法を併用した

り、PDEを用いることにより精度良いスペクトル計算が可能であることが分った。また、MCNPの結果を、同コードと同じ連続エネルギー・モンテカルロコードO5Rの計算値と、角度スペクトル及びスカラ束について比較し、両者は概ね良好な一致を示したが、透過距離が深くなるにつれ、MCNPの方が実験値との一致が良い結果を与えることが分った。

Table 3.1  
 Materials in the Experimental Configuration  
 by Profio et al.

Material Region		Nuclide	Atomic Density ( $10^{24}/\text{cm}^3$ )
Target	1 *)	U-235	4.796-2 **)
		U-238	1.071-4
Water + Iron	2	H	4.965-2
		O	2.482-2
		Fe	2.187-2
Air	3	N	4.25 -5
		O	1.13 -5
Graphite	4	C	8.33 -2
	5		

\*) Region ID Number in Fig. 3.1

\*\*) read as  $4.796 \times 10^{-2}$

Table 3.2

## Normalized Target Leakage Spectrum

Energy (eV)	$N(E)$	Energy (eV)	$N(E)$
2.2800 + 05	9.3922 - 07	1.4300 + 06	2.2159 - 07
2.3900 + 05	8.8415 - 07	1.4800 + 06	2.0672 - 07
2.5100 + 05	9.2784 - 07	1.5500 + 06	1.9265 - 07
2.6400 + 05	8.8965 - 07	1.6100 + 06	1.8116 - 07
2.7800 + 05	9.0287 - 07	1.6800 + 06	1.6438 - 07
2.9400 + 05	8.4926 - 07	1.7600 + 06	1.5583 - 07
3.1000 + 05	8.6542 - 07	1.8400 + 06	1.4496 - 07
3.2800 + 05	8.9883 - 07	1.9200 + 06	1.3060 - 07
3.4800 + 05	9.3518 - 07	2.0100 + 06	1.2216 - 07
3.6900 + 05	9.6676 - 07	2.1100 + 06	1.1287 - 07
3.9200 + 05	8.7166 - 07	2.2200 + 06	1.0589 - 07
4.1800 + 05	9.1609 - 07	2.3300 + 06	9.7190 - 08
4.4700 + 05	9.1462 - 07	2.4500 + 06	8.8121 - 08
5.1300 + 05	8.4449 - 07	2.5800 + 06	7.9492 - 08
5.5200 + 05	8.4412 - 07	2.7300 + 06	7.4866 - 08
5.9500 + 05	7.8868 - 07	2.8800 + 06	6.4034 - 08
6.4300 + 05	7.4499 - 07	3.0500 + 06	5.9922 - 08
6.9800 + 05	6.7266 - 07	3.2300 + 06	5.2762 - 08
7.6000 + 05	6.0840 - 07	3.4400 + 06	4.7438 - 08
7.7600 + 05	6.9065 - 07	3.6600 + 06	4.1711 - 08
7.9900 + 05	6.2970 - 07	3.9000 + 06	3.7708 - 08
8.2300 + 05	6.0179 - 07	4.1700 + 06	3.2373 - 08
8.7500 + 05	5.3166 - 07	4.4600 + 06	2.7960 - 08
9.0300 + 05	5.0926 - 07	4.7900 + 06	2.4145 - 08
9.3200 + 05	4.6667 - 07	5.1600 + 06	2.0418 - 08
9.6200 + 05	4.3767 - 07	5.5700 + 06	1.7128 - 08
9.9400 + 05	4.0022 - 07	6.0300 + 06	1.4151 - 08
1.0300 + 06	3.8773 - 07	6.5600 + 06	1.0589 - 08
1.0600 + 06	3.6298 - 07	7.1500 + 06	7.7620 - 09
1.1000 + 06	3.4389 - 07	7.8300 + 06	5.5002 - 09
1.1400 + 06	3.2553 - 07	8.6000 + 06	3.4433 - 09
1.1800 + 06	3.0435 - 07	9.5000 + 06	2.1226 - 09
1.2200 + 06	2.8540 - 07	1.0550 + 07	1.1408 - 09
1.2700 + 06	2.6264 - 07	1.1790 + 07	5.7095 - 10
1.3200 + 06	2.4446 - 07	1.3250 + 07	2.7828 - 10
1.3700 + 06	2.3201 - 07	1.5520 + 07	1.0453 - 10

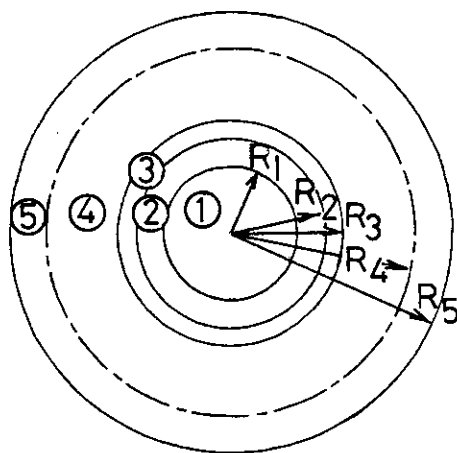
Table 3.3

Cumulative Probability for Source Angular Distribution

$E(\text{MeV})$	1.00-0.99	0.99-0.875	0.875-0.750	0.750-0.625	0.625-0.500	0.500-0.375	0.375-0.250	0.250-0.125	0.125-0.0
15.00 - 10.00	0.37515	0.94507	0.98778	0.99932	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
10.00 - 6.70	0.33407	0.86961	0.92311	0.94178	0.99883	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
6.70 - 4.49	0.31717	0.87134	0.94723	0.97849	0.99208	0.99749	0.99952	1.00000	1.00000
4.49 - 3.01	0.29114	0.82415	0.91232	0.95396	0.97613	0.98740	0.99332	0.99762	1.00000
3.01 - 2.02	0.28429	0.80479	0.89597	0.94233	0.96924	0.98280	0.98957	0.99694	1.00000
2.02 - 1.35	0.26970	0.77257	0.87008	0.92375	0.95728	0.97561	0.98558	0.99449	1.00000
1.35 - 0.821	0.22590	0.69746	0.81994	0.89410	0.94317	0.97010	0.98376	0.99410	1.00000
0.821 - 0.498	0.16473	0.58862	0.74387	0.84549	0.91607	0.95609	0.97677	0.99171	1.00000
0.498 - 0.302	0.12122	0.49596	0.66771	0.78725	0.87424	0.93058	0.96545	0.98850	1.00000
0.302 - 0.200	0.09054	0.42435	0.60527	0.75822	0.83941	0.91234	0.96142	0.98887	1.00000

Table 3.4  
Radius-Angle Adopted in TOF Measurement

Radius (cm)	Angle (degrees)
20.3	0.0 ± 10.4
	30.0 ± 10.0
35.6	0.0 ± 5.9
	16.6 ± 6.0
	34.8 ± 6.0
	58.9 + 12.0 (-9.0)
50.8	0.0 ± 3.6
	11.5 ± 4.0
	23.6 ± 4.5
	36.9 ± 5.0
66.0	0.0 ± 3.2



$R_1 = 3.81$	
$R_2 = 4.12$	
$R_3 = 4.45$	
$R_4 =$	$\theta$
$\left\{ \begin{array}{l} 20.3 : 0^\circ \quad 30.0^\circ \\ 35.6 : 0^\circ \quad 16.6^\circ \quad 34.8^\circ \quad 58.9^\circ \\ 50.8 : 0^\circ \quad 11.5^\circ \quad 23.6^\circ \quad 36.9^\circ \\ 66.0 : 0^\circ \end{array} \right.$	
$R_5 = 80.0$	
(cm)	

① Depleted U Target ② Water+Iron  
③ Air ④, ⑤ Graphite

### Calculational Model

Fig. 3.1 Geometrical model for the experimental setup.

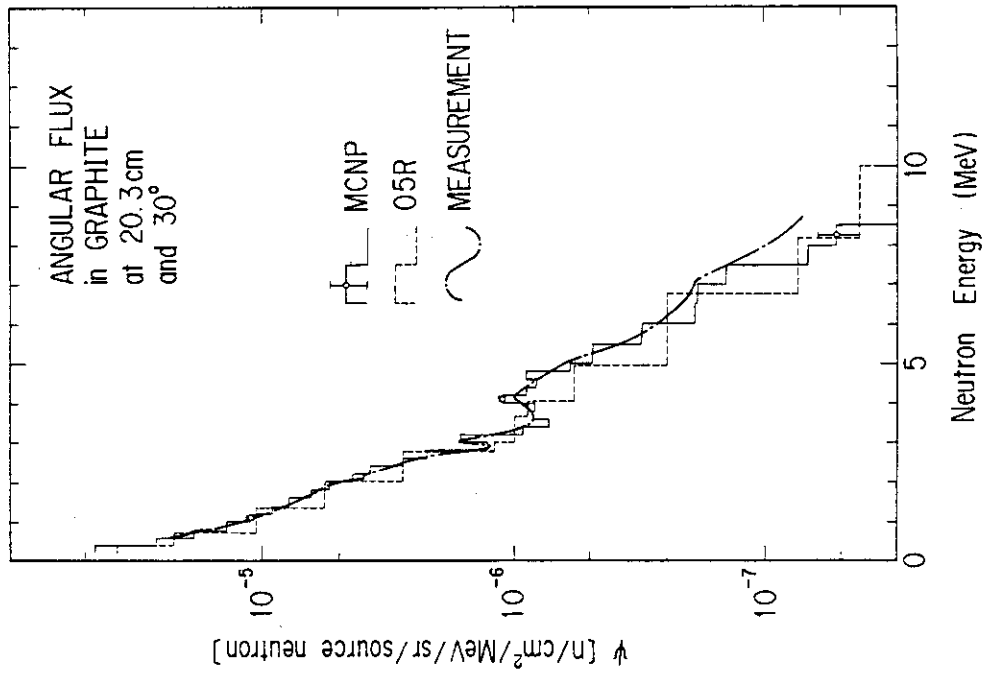


Fig.3.3 Comparison of MCNP, O5R and measured 30 deg. angular spectra at 20.3 cm.

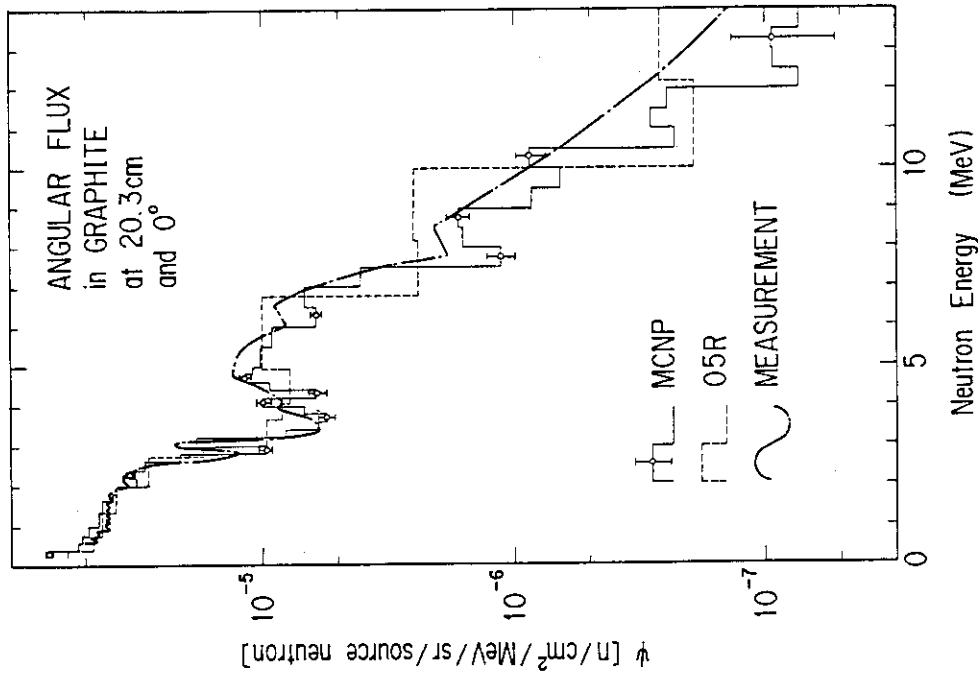


Fig.3.2 Comparison of MCNP, O5R and measured 0 deg. angular spectra at 20.3 cm.

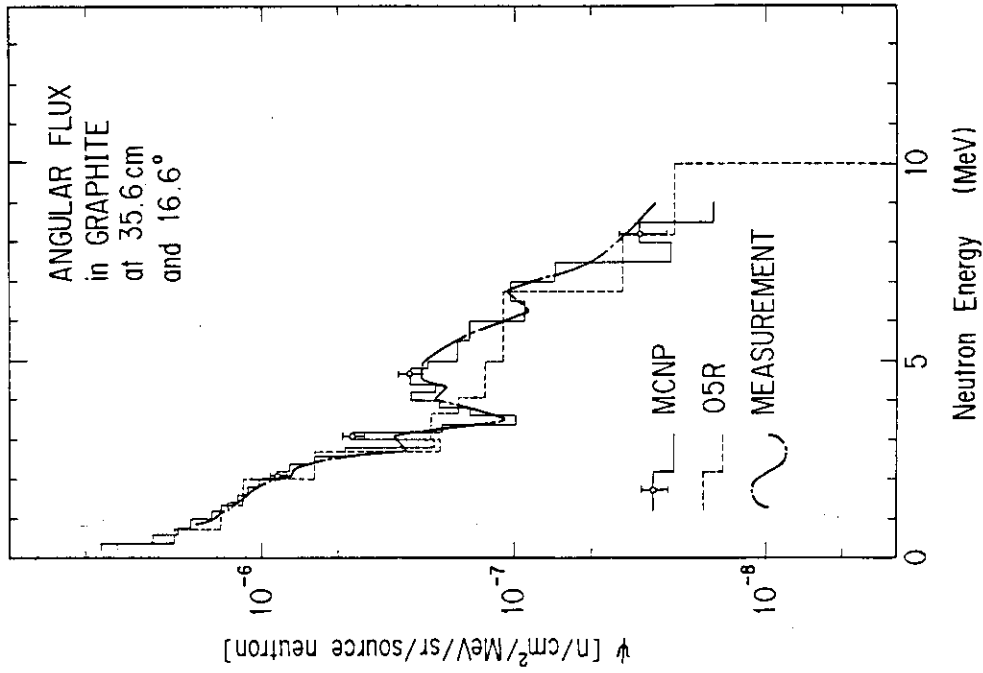


Fig 3.5 Comparison of MCNP, O5R and measured 16.6 deg. angular spectra at 35.6 cm.

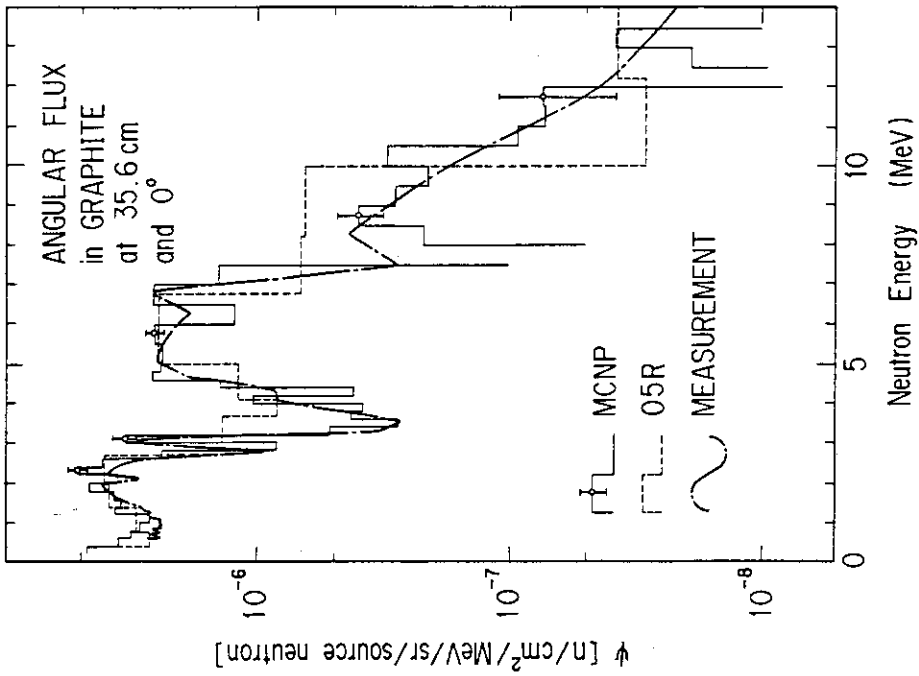


Fig.3.4 Comparison of MCNP, O5R and measured 0 deg. angular spectra at 35.6 cm.



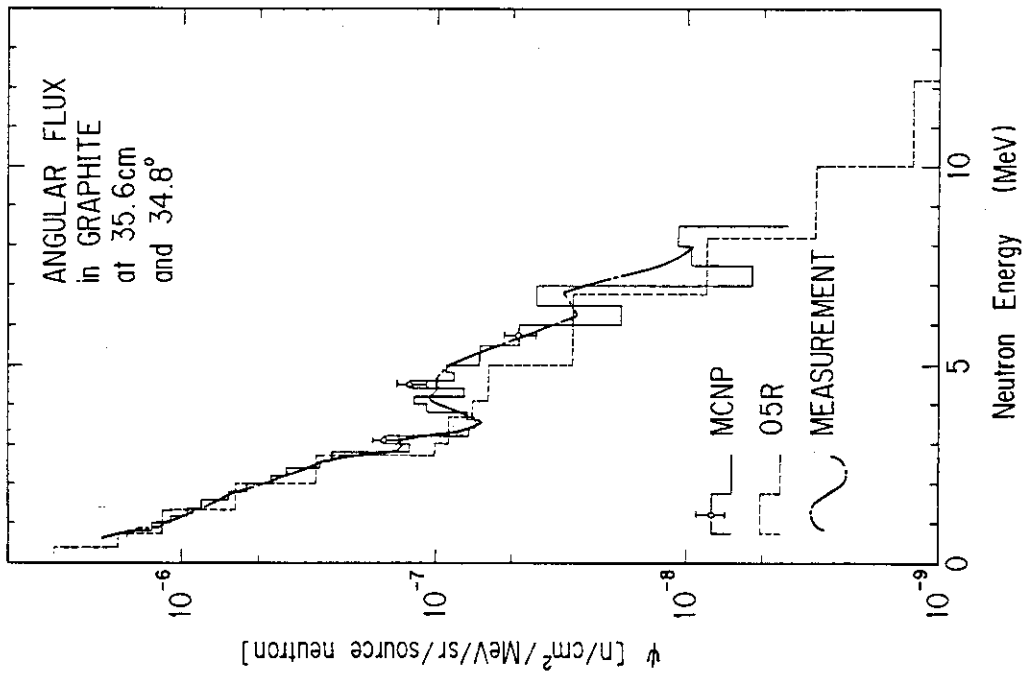


Fig.3.6 Comparison of MCNP, O5R and measured 34.8 deg. angular spectra at 35.6 cm.

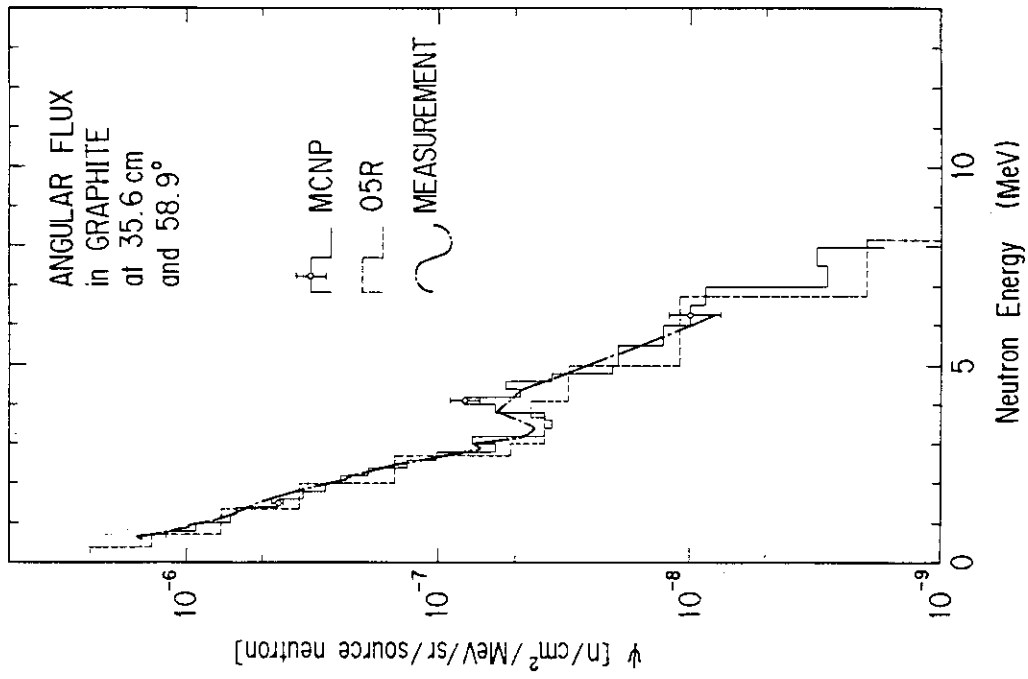


Fig.3.7 Comparison of MCNP, O5R and measured 58.9 deg. angular spectra at 35.6 cm.

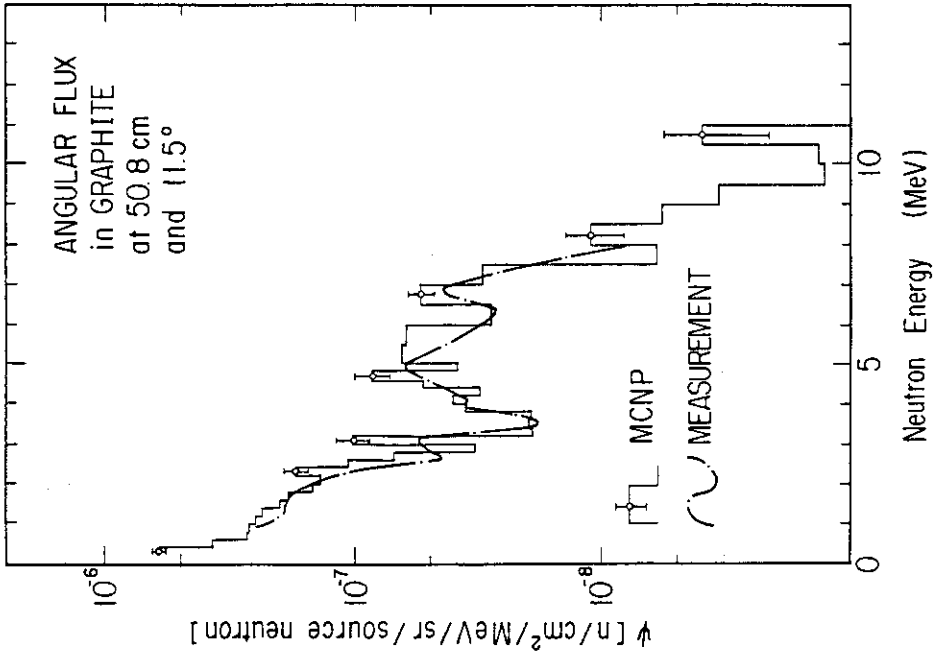


Fig. 3.9 Comparison of MCNP and measured 11.5 deg. angular spectra at 50.8 cm.

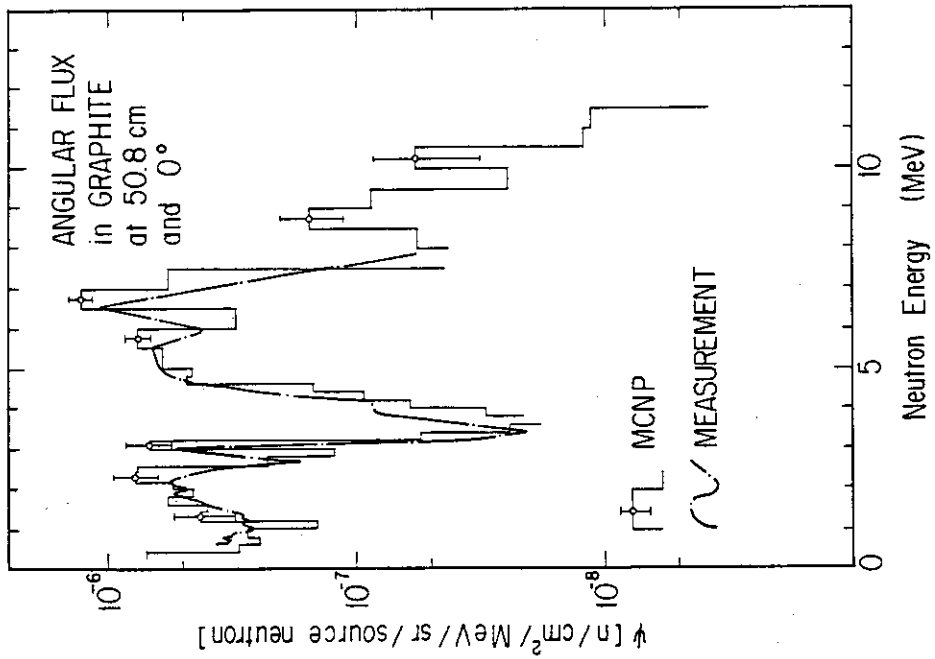


Fig. 3.8 Comparison of MCNP and measured 0 deg. angular spectra at 50.8 cm.

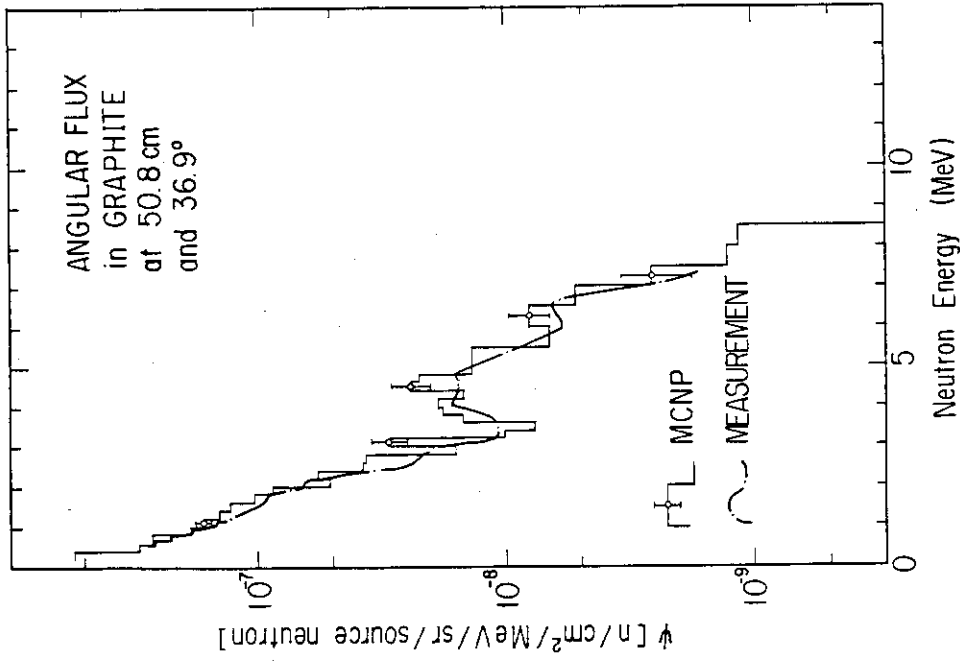


Fig.3.11 Comparison of MCNP and measured 36.9 deg. angular spectra at 50.8 cm.

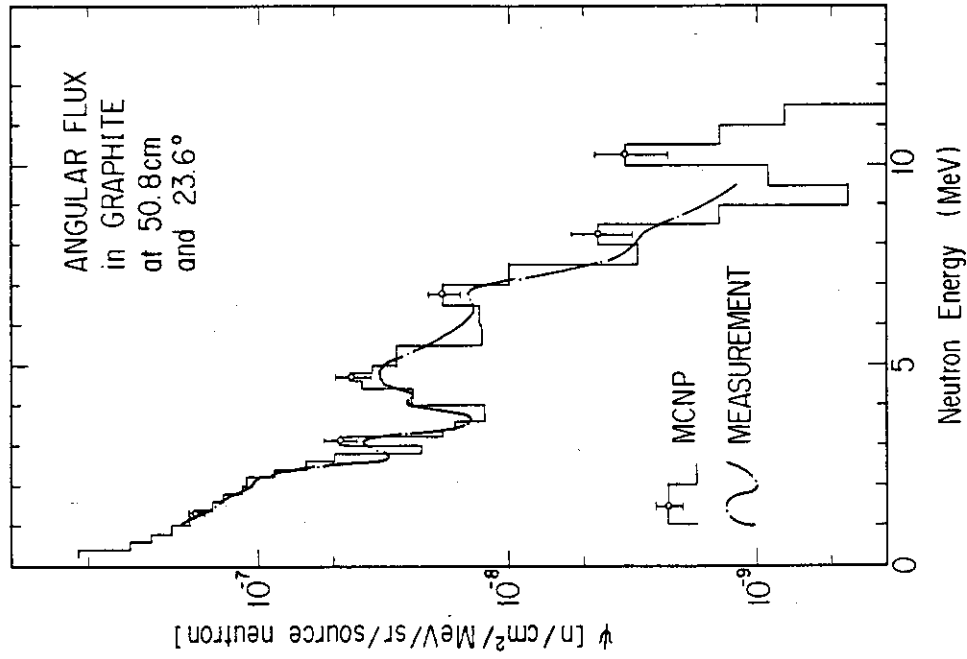


Fig.3.10 Comparison of MCNP and measured 23.6 deg. angular spectra at 50.8 cm.

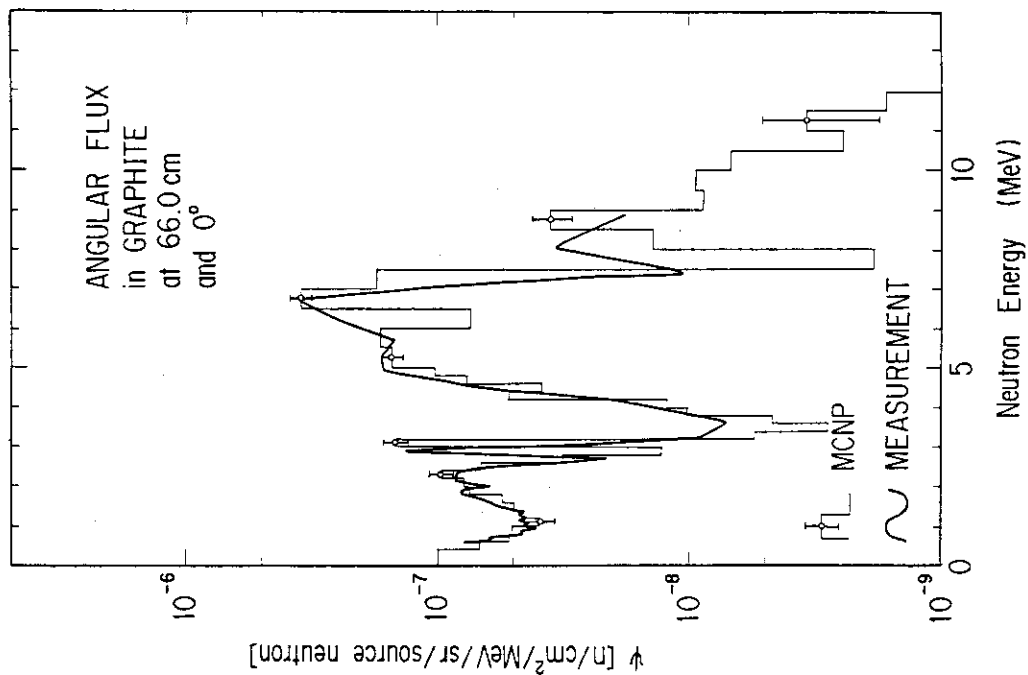


Fig. 3.12 Comparison of MCNP and measured 0 deg. angular spectra at 66.0 cm.

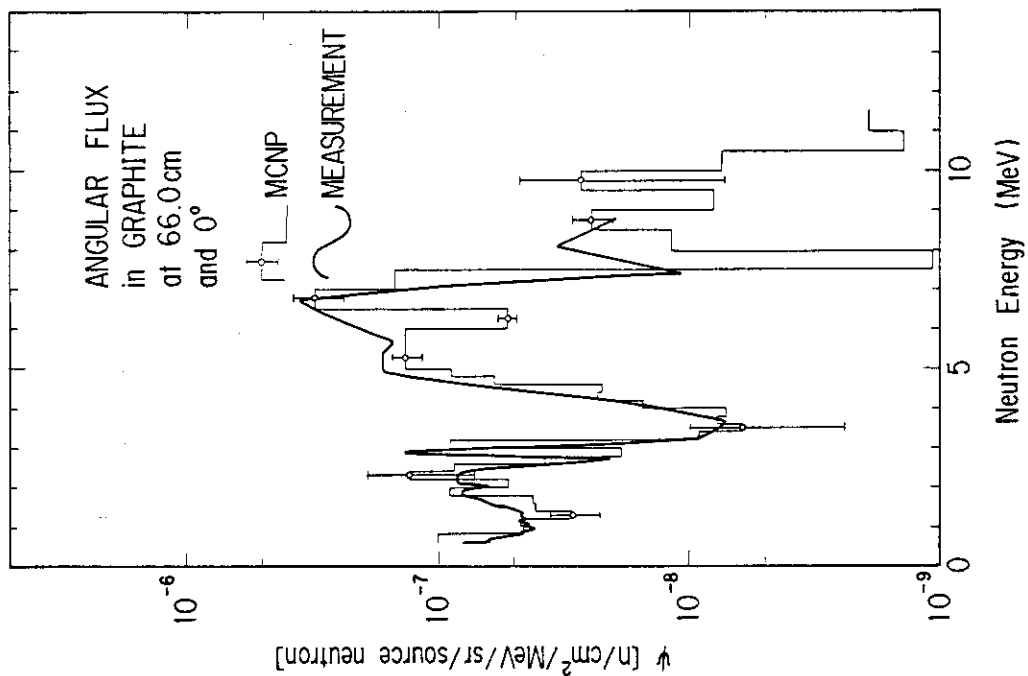


Fig. 3.13 Comparison of MCNP and measured 0 deg. angular spectra at 66.0 cm. W-W method is applied to MCNP calculation.

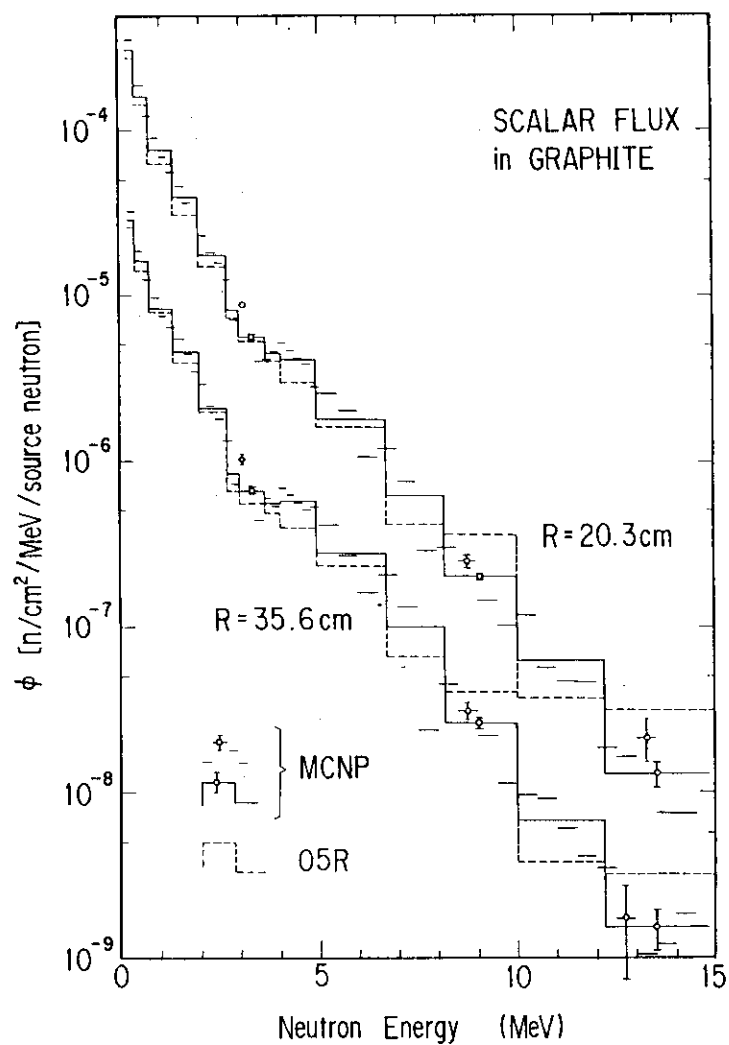


Fig. 3.14 Comparison of MCNP and O5R scalar fluxes at 20.3 cm and 35.6 cm.

## 4. ま と め

NEAベンチマーク計算における国際協力の一環として、黒鉛体系中の核分裂中性子の透過計算を、MCNPコード及びその内蔵核データライブラリを用いて行った。計算結果は、4種類のしきい反応の反応率について実験値との比較を行い、20 cm以上深い透過距離での $^{103}\text{Rh}(n, n')$ 、 $^{115}\text{In}(n, n')$ の反応率に対し実験値を最大で20%以上過少評価する箇所があるものの、全体的には、実験値との一致は概ね満足のものであった。さらに、MCNPと同様の連続エネルギーモデル・モンテカルロコードであるMcBENDにより求めた透過スペクトルと比較し、MCNPの方が全般にFSDが大きいものの、スペクトル自体はMcBENDの結果に対して非常に良く一致することが分った。

さらに、NEA黒鉛ベンチマーク実験のMCNPによるスペクトル計算の妥当性を実験値の解析により検証するため、MCNPを用いて黒鉛球中性子透過実験の解析を行い、角度スペクトルについて実験値との比較を行った。その結果、66 cmまでの透過距離における $0^\circ$ から $60^\circ$ までの角度スペクトルに対して、MCNP計算値と実験値との一致は非常に良好であり、黒鉛透過スペクトルに特徴的な3.5 MeV近傍の山と谷の構造を正確に再現できることが分った。以上のことから、MCNPコードにより黒鉛体系中の速中性子透過計算を精度良く行えることが確められた。

MCNPコードにより深い透過計算を行う上で、現実的な計算時間内で分散の小さい信頼できる解を得るためには、種々の分散低減化手法を適切なエスティメータと組合せて用いることが不可欠であることが分った。今回の計算では、分散低減化の手法としてW-W法(Weight-Window法)、指数関数変換法を適用しその有効性を系統的に調べたが、指数関数変換法については今回の計算に関する限りメリットはなかった。W-W法については、領域及びエネルギーの関数としての最適パラメータが設定できれば透過問題に対する分散低減に有効な手法であることが実証された。W-W法における最適パラメータの決定の方法は今後の課題であろう。

MCNPコードの最大の欠点は、他のモンテカルロコードとも共通であるが、計算時間がかかりすぎることであり、一方、利点は核データに付随する近似誤差から解放され、比較的容易に3次元体系の輸送計算を行えることである。計算時間の短縮の問題は、大型コンピュータの進歩や種々の計算加速法の開発により徐々に実現していくものと思われるので、本コードは今後ますます複雑形状を扱う放射線遮蔽計算の分野で重要な位置をしめるであろうと期待される。

## 謝 辞

我々がMCNPコードを使えるようになったのは、東大工学部 橋倉宏行氏の指導と助言に負うところが大きい。また、モンテカルロコード使用上のテクニックについては、船舶技研植木紘太郎氏の貴重な助言によっている。ここに記して感謝の意を顕します。さらに、炉物理研究委員会・遮蔽専門部会のモンテカルロ計算WGの方々の励ましに感謝します。

## 4. ま と め

NEAベンチマーク計算における国際協力の一環として、黒鉛体系中の核分裂中性子の透過計算を、MCNPコード及びその内蔵核データライブラリを用いて行った。計算結果は、4種類のしきい反応の反応率について実験値との比較を行い、20 cm以上深い透過距離での $^{103}\text{Rh}(n, n')$ 、 $^{115}\text{In}(n, n')$ の反応率に対し実験値を最大で20%以上過少評価する箇所があるものの、全体的には、実験値との一致は概ね満足のものであった。さらに、MCNPと同様の連続エネルギーモデル・モンテカルロコードであるMcBENDにより求めた透過スペクトルと比較し、MCNPの方が全般にFSDが大きいものの、スペクトル自体はMcBENDの結果に対して非常に良く一致することが分った。

さらに、NEA黒鉛ベンチマーク実験のMCNPによるスペクトル計算の妥当性を実験値の解析により検証するため、MCNPを用いて黒鉛球中性子透過実験の解析を行い、角度スペクトルについて実験値との比較を行った。その結果、66 cmまでの透過距離における $0^\circ$ から $60^\circ$ までの角度スペクトルに対して、MCNP計算値と実験値との一致は非常に良好であり、黒鉛透過スペクトルに特徴的な3.5 MeV近傍の山と谷の構造を正確に再現できることが分った。以上のことから、MCNPコードにより黒鉛体系中の速中性子透過計算を精度良く行えることが確められた。

MCNPコードにより深い透過計算を行う上で、現実的な計算時間内で分散の小さい信頼できる解を得るためには、種々の分散低減化手法を適切なエスティメータと組合せて用いることが不可欠であることが分った。今回の計算では、分散低減化の手法としてW-W法(Weight-Window法)、指数関数変換法を適用しその有効性を系統的に調べたが、指数関数変換法については今回の計算に関する限りメリットはなかった。W-W法については、領域及びエネルギーの関数としての最適パラメータが設定できれば透過問題に対する分散低減に有効な手法であることが実証された。W-W法における最適パラメータの決定の方法は今後の課題であろう。

MCNPコードの最大の欠点は、他のモンテカルロコードとも共通であるが、計算時間がかかりすぎることであり、一方、利点は核データに付随する近似誤差から解放され、比較的容易に3次元体系の輸送計算を行えることである。計算時間の短縮の問題は、大型コンピュータの進歩や種々の計算加速法の開発により徐々に実現していくものと思われるので、本コードは今後ますます複雑形状を扱う放射線遮蔽計算の分野で重要な位置をしめるであろうと期待される。

## 謝 辞

我々がMCNPコードを使えるようになったのは、東大工学部橋倉宏行氏の指導と助言に負うところが大きい。また、モンテカルロコード使用上のテクニックについては、船舶技研植木紘太郎氏の貴重な助言によっている。ここに記して感謝の意を顕します。さらに、炉物理研究委員会・遮蔽専門部会のモンテカルロ計算WGの方々の励ましに感謝します。

参 考 文 献

- 1) Carter M. D., 他:私信
- 2) LASL Group TD-6 : "MCNP - A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport", LA-7396-M, Los Alamos Scientific Laboratory (1978)
- 3) Profio A. E., Antunez H. M. and Huffman D. L. : Nucl. Sci. Eng., 35, 91 (1969)
- 4) Cullen D. E., Kocherov N. and Mclaughlin P. M. : "The International Reactor Dosimetry File (IRDF-82)", IAEA-NDS-41/R (1982)



## Appendix A Input Data List for MCNP Calculation of Neutron Penetration through Graphite

```

WINFRITH ; THE ASPIS GRAPHITE BENCHMARK EXPERIMENT **NEACRP-A-630**
C   MCNP 3V ; SHIELDING BENCHMARK PROBLEMS(1-6)<<WINF20WH>>'85/10/31
1   0           1,27 -2,2 -39,27
C   VOID
2   1   8.326-2  2,1 -3,3 -39,27
C   CARBON*REFLECTOR
3   0           3,2 -7,6 -39,27 (-4,4:-31,4:34,4:-35,4:38,4)
C   VOID
4   2   6.029-2  4,3 -7,6 31,3 -34,3 35,3 -38,3
      (-5,5:6,5:-32,5:33,5:-36,5:37,5)
C   ALUMINIUM
5   3   4.054-2  5,4 -6,4 32,4 -33,4 36,4 -37,4
C   U/AL FUEL
6   2   6.029-2  7,3,4 -8,7 -39,27
C   ALUMINIUM
7   1   8.326-2  8,6 -9,8 -39,27
C   CARBON
8   1   8.326-2  9,7 -10,9 -39,27
C   CARBON
9   1   8.326-2  10,8 -11,10 -39,27
C   CARBON
10  1   8.326-2  11,9 -12,11 -39,27
C   CARBON
11  1   8.326-2  12,10 -13,12 -39,27
      (-28,26:29,26:30,26)
C   CARBON
12  1   8.326-2  13,11 -14,13 -39,27
C   CARBON
13  1   8.326-2  14,12 -15,14 -39,27
C   CARBON
14  1   8.326-2  15,13 -16,15 -39,27
C   CARBON
15  1   8.326-2  16,14 -17,16 -39,27
C   CARBON
16  1   8.326-2  17,15 -18,17 -39,27
C   CARBON
17  1   8.326-2  18,16 -19,18 -39,27
C   CARBON
18  1   8.326-2  19,17 -20,19 -39,27
C   CARBON
19  1   8.326-2  20,18 -21,20 -39,27
C   CARBON
20  1   8.326-2  21,19 -22,21 -39,27
C   CARBON
21  1   8.326-2  22,20 -23,22 -39,27
C   CARBON
22  1   8.326-2  23,21 -24,23 -39,27
C   CARBON
23  1   8.326-2  24,22 -25,24 -39,27
C   CARBON
24  1   8.326-2  25,23 -26,25 -39,27
C   CARBON
25  1   8.326-2  26,24 -27,27 -39,27
C   CARBON
26  1   8.326-2  28,11 -29,11 -30,11
C   CARBON*DETECTOR
27  4   8.524-2  (-1,1:27,25:39,1,2,3,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,
      17,18,19,20,21,22,23,24,25)
      40,28 -41,28 -42,28
C   MILD*STEEL
28  0           (-40,27:41,27:42,27)
C   OUT WORLD
1   PY  0.0
2   PY  38.15
3   PY  53.15
4   PY  53.65
5   PY  54.05
6   PY  54.65
7   PY  55.05
8   PY  56.96

```

```

9      PY  59.46
10     PY  64.46
11     PY  69.46
12     PY  74.46
28     PY  76.34
29     PY  77.58
13     PY  79.46
14     PY  84.46
15     PY  89.46
16     PY  94.46
17     PY  99.46
18     PY 104.46
19     PY 109.46
20     PY 114.46
21     PY 119.46
22     PY 124.46
23     PY 129.46
24     PY 134.46
25     PY 139.46
26     PY 144.46
27     PY 149.46
30     CY  10.0
31     PZ -20.0
32     PZ -17.6
33     PZ  22.6
34     PZ  25.0
35     PX -34.15
36     PX -31.75
37     PX  31.75
38     PX  34.15
39     CY  90.17
40     PY  -0.5
41     PY  150.
42     CY  115.

MODE  0
ERGN  0  15.5
WFN1  4.0 -1. 5. 0. 2R 0.9 1R 0.54 0.33 0.2 0.12
      4R -1. 9R 0.12 0. -1.
WFN2  7.0 -1. 2. 0. 2R 0.45 1R 0.25 0.16 0.075 0.042
      4R -1. 9R 0.042 0. -1.
WFN3  15.5 -1. 1. 0. 2R 0.24 1R 0.13 0.072 0.039 0.022
      4R -1. 9R 0.022 0. -1.
C      SRC(1)=R1,R2,ICL,SDIS,ABIS,PSC,EBIS
SRC    54.05 54.65 5 0. 0. 0.5 0.
F2     28 29 (28 29)
F4     26
FSW    0. 76.96 0. 1.
EO     0.11109 0.24724 0.55023 0.74274 1.0026 1.3534 1.4957 1.6530
      1.8268 2.0190 2.3460 2.4660 2.7253 3.0112 3.3287 3.6788
      4.0657 4.4933 4.9659 5.4881 6.3763 7.0469 8.1873 10.000
      12.214 14.918
EMO    7.233E+11 9.508E+10 1R 2.536E+11 2R 7.607E+11 3R 5.071E+11
      1.521E+12 7.607E+11 7R 5.071E+11 7.607E+11 5.071E+11
      3.803E+11 2R
C      WINFRITH MATERIAL(1/2/3/4)=(C/AL/FUEL/STEEL)
M1     6012 1.
M2     13027 1.
M3     13027 .97214
      92235 .02593
      92238 .00193
M4     6012 .01014
      15031 .00018
      16032 .00055
      25055 .01099
      26000 .97814
CUTN   1.E16 1.E-1 0.01
NPS    200000
PRDMP  200000
PRINT

```

```

GULF RADIATION TECHNOLOGY LINAC,PHOTO-N-SOURCE)) ((20.3))
C MCNP 3V CODE < JAERI-M-7843, SHIELDING BENCHMARK PROBLEMS(I-7)>
1 1 4.807E-2 -1,2
C DEPLETED U TARGET (PHOTONEUTRON SOURCE)
2 1 4.807E-2 1,1 -2,3
C DEPLETED U TARGET
3 2 9.634E-2 2,2 -3,4
C WATER+FE
4 3 5.38E-5 3,3 -4,5
C AIR
5 4 8.33E-2 4,4 -5,6
C GRAPHITE
6 4 8.33E-2 5,5 -6,7
C GRAPHITE
7 0 6,6
C OUT*WORLD

1 S 0. 0. 0. 0.85
2 S 0. 0. 0. 3.81
3 S 0. 0. 0. 4.12
4 S 0. 0. 0. 4.45
5 S 0. 0. 0. 20.3
6 S 0. 0. 0. 80.0

MODE 0
ERGN 0 15.0
IN 1 4R 1 0
SRC 4.11 3
F1 S
F21 5
F2 5
F22 5
FQ1 E C
FQ21 E C
C1 0. 0.9836 1. T
C21 0. 0.7660 0.9397 1.
EO 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0
2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 3.2 3.4 3.6 3.8 4.0
4.2 4.4 4.6 4.8 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5
8.0 8.5 9.0 9.5 10.0 10.5 11.0 11.5 12.0 12.5
13.0 13.5 14.0 14.5 15.0
EMO 2.0 5.0 23R 2.0 19R
EM1 3.742E-1 9.355E-3 23R 3.742E-3 19R
EM21 4.086E-2 1.022E-3 23R 4.086E-4 19R
E22 2.4724E-1 4.0762E-1 7.4274E-1 1.3534E+0 2.0190E+0
2.7253E+0 3.0112E+0 3.6788E+0 4.0657E+0 4.9659E+0
6.7032E+0 8.1873E+0 1.0000E+1 1.2214E+1 1.4918E+1
EM22 7.3459193 6.2351914 2.9840057 1.6375724 1.5024038
1.4158288 3.4977264 1.4979029 2.5846471 1.1108642
0.5756058 0.6738090 0.5516632 0.4516711 0.3698224
C GULF RAD. TECH. MATERIAL (1/2/3/4)=(U-TARGET/WATER+FE/AIR/GRAPHITE)
M1 92235 .99777
92238 .00223
M2 1001 .51536
8016 .25763
26000 .22701
M3 7014 .78996
8016 .21004
M4 6012 1.
CUTN 1.E16 2.0E-1 0.01
NPS 100000
PRDMP 100000
PRINT

```

Appendix B CPU Times for Neutron Penetration  
Calculations with MCNP Code

Penetration (cm)	Method	CPU Time (min/10 <sup>4</sup> hstr.)	
		SCE, PLE	PDE
0	non <sup>1)</sup>	0.6	1.5
20	non	0.6	1.8
20	W-W <sup>2)</sup>	0.7	1.9
30	non	0.6	1.9
30	W-W	0.9	2.4
30	combined <sup>3)</sup>	0.9	2.4
70	non	0.6	2.2
70	W-W	1.5	4.5
70	combined	1.5	4.5

- 1) no variance reduction technique
- 2) with Weight-Window method
- 3) with a combination of Weight-Window and exponential transform methods