

JAERI - M  
87-010

モンテカルロコードMCNPによる中・低エネルギー  
中性子輸送計算の精度評価

1987年2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）で複写による実費頒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, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 いばらき印刷(株)

モンテカルロコード MCNPによる中・低エネルギー  
中性子輸送計算の精度評価

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

(1987年1月23日受理)

連続エネルギーモデル・モンテカルロコード MCNPを用いて、JPDR遮蔽コンクリートにおける放射化放射能の実測値の解析、黒鉛球体系中・低エネルギー中性子透過実験の解析を行ない、本コードの熱中性子および熱外中性子輸送計算の精度を評価した。その結果、熱中性子スペクトルは精度良く計算できるものの、ほぼ  $1/E$  スペクトルに近い熱外中性子スペクトルに対して実測値よりも過大評価することが明らかになった。

Accuracy Estimation for Intermediate and Low Energy Neutron  
Transport Calculation 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 January 23, 1987)

Both "measured radioactive inventory due to neutron activation in the shield concrete of JPDR" and "measured intermediate and low energy neutron spectra penetrating through a graphite sphere" are analyzed using a continuous energy model Monte Carlo code MCNP so as to estimate calculational accuracy of the code for neutron transport in thermal and epithermal energy regions. Analyses reveal that MCNP calculates thermal neutron spectra fairly accurately, while it apparently over-estimates epithermal neutron spectra (of approximate  $1/E$  distribution) as compared with the measurements

Keywords : MCNP, Monte Carlo Code, Transport Calculation,  
Thermal Neutron, Epithermal Neutron, JPDR, Concrete,  
Graphite, Activity, Angular Spectrum

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. JPDRにおける放射能計算 .....	2
2.1 計算条件 .....	2
2.2 計算手法 .....	2
2.3 計算結果と検討 .....	3
3. 黒鉛球体系中中性子透過実験解析 .....	11
3.1 計算体系 .....	11
3.2 計算手法 .....	11
3.3 計算結果と検討 .....	12
4. まとめ .....	20
謝 辞 .....	20
参考文献 .....	20
付 録	
A. JPDRのMCNPによる中性子透過計算入力データリスト .....	21
B. Profio等による黒鉛球体系中中性子透過ベンチマーク実験の MCNP計算入力データリスト .....	24
C. 規格化された標的漏洩中性子スペクトル .....	27
D. MCNP計算に用いた線源角度分布の積算確率 .....	28

Contents

1. Introduction .....	1
2. Calculation of activity in JPDR configuration .....	2
2.1 Computational conditions .....	2
2.2 Computational method .....	2
2.3 Results and discussions .....	3
3. Analysis of neutron penetration experiment through a spherical graphite .....	11
3.1 Computational conditions .....	11
3.2 Computational method .....	11
3.3 Results and discussions .....	12
4. Summary .....	20
Acknowledgments .....	20
References .....	20
Appendices	
A. Input data list for MCNP calculation of neutron penetration through JPDR configuration .....	21
B. Input data list for MCNP calculation of graphite benchmark experiment by Profio et al. ....	24
C. Normalized target leakage spectrum .....	27
D. Cumulative probability for source angular distribution for MCNP calculation .....	28

## 1. はじめに

近年、遮蔽計算コードとして、連続エネルギーモデル・モンテカルロコードMCNP<sup>1)</sup>が注目を集めている。それは、群モデルによる輸送計算の場合のように核データの群定数化に伴う誤差の心配がなく、しかも離散角度分点 (discrete ordinates) 輸送コードに較べ、より複雑な3次元形状の計算に適用可能である事など、従来の輸送コードに較べてすぐれた利点を持っているためである。本コードの最大の欠点は、これはモンテカルロコード共通の問題であるが、計算時間がかかりすぎるという事である。しかし、そのすぐれた特徴のゆえに、我国においても核データで核定数の評価、遮蔽実験解析などの分野でますます利用の機会が増大していくものと考えられる。

筆者らは JAERI-M 86-055 (文献2)において、MCNPコードを使った、黒鉛透過ベンチマーク実験の解析により、MCNPコードが精度良く速中性子透過計算を行うことができることを検証した。そこで本報告書では、中低エネルギー領域におけるMCNPによる輸送計算の適用性と有効性の検証を行い、あわせて本コード使用上の実際的な知見の習得につとめた。計算対象としたのは小型BWRであるJPDR内の中性子放射化反応による<sup>60</sup>Co, <sup>134</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu核種からの残留放射能<sup>3)</sup>であり、熱中性子の割合が主となる遮蔽コンクリート領域について、計算値と実測値の比較を行った。これらの放射能への寄与は、100 eV以下の低エネルギー中性子が支配的であるため、中・低エネルギー中性子の輸送計算精度の評価の目的に沿うものである。JPDR計算における形状モデル化、物質の均質化、コンクリート内含水量などのデータは、既に評価済みの妥当と考えられるデータを使用した<sup>3)</sup>。

JPDRにおける放射能実測値の解析を通して、遮蔽コンクリート内において、MCNPによる計算値は実測値を良く再現しているが、遮蔽コンクリート表面で<sup>134</sup>Cs, <sup>154</sup>Euの実測値に対して計算値が明らかに過大評価することが明らかになった。

そこでこの過大評価の原因を検討するため、Profio等による黒鉛球体系中性子透過実験<sup>4)</sup>の解析をMCNPを用いて行ない、特に中・低エネルギー中性子に着目した輸送計算の精度評価を行なった。

## 2. JPDRにおける放射能計算

本章では、助川ら<sup>3)</sup>の測定による、日本原子力研究所の動力試験炉(JPDR)の解体のため、実測された炉内放射化放射能の空間分布に対するMCNPによる解析について述べる。

### 2.1 計算条件

Fig. 2.1は、炉中央高さの遮蔽コンクリート内放射能のMCNP計算用に2次元円筒形状にもとづいてモデル化したJPDRの計算体系図であり、炉中央高さから上下方向に各々約1 m、炉心中心軸から半径約2.5 mの領域を考慮した。炉心領域は均質化し、さらに沸騰水のボイド率の軸方向分布を考慮するため垂直方向に3分割し、下からそれぞれCore 1, Core 2, Core 3とした。水領域のWater 1, Water 2はそれだけボイド率が0%, 41.2%である277°Cの沸騰水が含まれる領域である。

Fig. 2.2は、JPDR炉心内のR方向およびZ方向の燃焼度依存出力分布を時間平均化したものであり、MCNP計算ではこの図を積算確率分布に変換して使用した。線源スペクトルは、Wattの公式<sup>5)</sup>で表現される<sup>235</sup>U熱中性子核分裂スペクトルS(E)

$$S(E) \propto e^{-E} \cdot \sinh \sqrt{2E} \quad [1 / (\text{MeV} \cdot \text{fiss})] \quad (2.1)$$

を用い、これを0.1 MeVから15.0 MeVの範囲で、炉心全体で定格出力の45 MWになるように規格化した。炉心および炉内構造物での温度は277°C、空隙領域、ライナー、及び遮蔽コンクリート表面10 cmまでは60°C、遮蔽コンクリート表面10 cmより深い領域は30°Cとした。計算の対象となるエネルギー領域は、上限を15 MeV、下限を $1.0 \times 10^{-8}$  MeVとし、Table 2.1に示した計算結果出力用のエネルギービンの境界エネルギー値を使用した。

### 2.2 計算手法

計算に用いたエスティメータはTrack Length Estimator (TLE)であり、炉中央高さ(Z = 0.0 cm)を中心に、シュラウド内では軸方向に30 cm、半径方向に1.3 cmの、炉心を取り囲む円筒状のエスティメータ、圧力容器(PV)領域では、半径方向の7.34 cm幅を3等分した軸方向に30 cmの幅を有する3層(IN, MID, OUT)の円筒形状エスティメータ、ライナー領域では、軸方向30 cm、半径方向1.3 cmのエスティメータ、また遮蔽コンクリート領域では、軸方向50 cm、半径方向2 cmのエスティメータをそれぞれ設定した。

TLEは、エスティメータ領域を通過する粒子の飛程長さ $L_i$ にもとづいてフルーエンス $\phi$ を評価する方法であり、次式で計算される。

$$\phi = \sum_i W_i L_i / V \quad (2.2)$$



$W_i$  : 入射粒子のウェイト

$V$  : エスティメータの体積

スカラー束  $\phi$  は, (2.2) 式を積分して次式により求められる。

$$\phi(\bar{r}, \bar{t}, \bar{E}) = \int_V d\mathbf{r} \int_{4\pi} d\Omega \int_{\Delta t} dt \int_{\Delta E} dE \phi(\mathbf{r}, \Omega, t, E) / \Delta t / \Delta E / V \quad (2.3)$$

なお 10 eV 以下で効いてくる熱中性子衝突の取り扱いでは, 酸素原子までの軽粒子に対して, 自由ガスモデルが使われ, 散乱断面積にドップラー効果が考慮されている。2 eV 以下での水素原子による散乱に関しては, ENDF/B-IV から参照したエネルギー・散乱角結合表現である  $S(\alpha, \beta)$  散乱核に従って非弾性散乱が起こるようにプログラムされている。

エスティメータに入射する粒子の統計精度を良くするために, Weight-Window法(W-W法: 位相空間上でのスプリットティングとルシアンルーレット法の組合せ)を使用した。W-W法のパラメータは, 炉心の外側の領域において厚さ約 5 cm に分割した各円筒殻状のセル毎に下限パラメータを設定し, 上限は下限の値の 2 倍に設定した。またエネルギー依存性を考慮するため, 全エネルギー領域を 5 群に分けてそれぞれパラメータを設定した。半径 145.0 cm 位置での計算の入力データを参考のため Appendix A に与える。

得られたスカラー束  $\phi$ , 12 の時間ステップにまとめた JPDR の運転履歴<sup>3)</sup>, 実測による放射性微量元素  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}$  の存在量  $N_i$ <sup>3)</sup> および Table 2.2 に与えた放射化断面積  $\sigma_i$  を使って, 放射能  $A_i$  は次式により求められる。

$$A_i(\bar{r}) = N_i \cdot \sum_k (1 - e^{-\lambda_i t_k'}) \cdot e^{-\lambda_i t_k} \int \sigma_i(E) \phi(E, \bar{r}) dE \quad (2.3)$$

$t_k$  : 冷却時間

$t_k'$  : 運転時間

$\lambda_i$  : 崩壊定数

なお, 放射能は JPDR の最終運転停止から約 8 年間の冷却期間を経過した 1984 年 3 月 31 日現在の値を求めた。

### 2.3 計算結果と検討

Fig. 2.3 に, シュラウド, PV の内 (IN), 中 (MID), 外 (OUT) の 3 層, ライナー, 遮蔽コンクリート表面における, MCNP により求めたエネルギースペクトルを示す。0.1 MeV 以上の領域で形成されるスペクトルのピークは, シュラウドから遮蔽コンクリート表面へ移るに従って低エネルギー側へ推移する。0.1 MeV から熱中性子エネルギーの上限値である  $4 \times 10^{-7}$  MeV までの領域では, シュラウドではほぼ平坦な  $1/E$  スペクトルを形成し, PV から遮蔽コンクリート表面にかけては, 鉄による吸収のため多少左下りのスペクトルを形成する。  $4 \times 10^{-7}$  MeV 以下では, シュラウドにおいて  $6 \times 10^{-8}$  MeV 近傍にマクスウェル分布のピークを持つ熱中性子スペクトルを示している。PV の 3 層では, その間隔が数 cm にもかかわらず, 鉄による強い吸収のため熱中性子は急激な激衰を受けていることがわかる。しかし, いったんライナーに入ると, 背後にある

遮蔽コンクリートからの反射の影響で、熱中性子スペクトルのピークのもり返しが見られる。遮蔽コンクリート表面およびライナーにおけるスペクトルを比較すると、 $10^{-5}$  MeV 以上では両者の差はほとんど無視できる程度であるが、それ以下の領域では、相対的にコンクリート表面での熱中性子のウェイトが大きくなるのがわかる。

Fig. 2.4 は、遮蔽コンクリート表面から 9 cm ( $R=145.0$  cm), 34 cm ( $R=170.0$  cm), 59 cm ( $R=195.0$  cm) でのエネルギースペクトルであり、 $R=145.0$  cm は遮蔽コンクリート内の放射能分布が最大となる位置に対応する。そこで中・低エネルギー領域のスペクトルはやや左下りの  $1/E$  スペクトルとなり、170 cm 位置では逆に多少右下りとなる。 $1/E$  スペクトルからの熱中性子スペクトルのもりあがりには 170 cm でのスペクトルが 145 cm のデータに較べて倍近く大きい。しかし 3ヶ所のスペクトルとも熱中性子スペクトルピークの位置は変わらず  $6 \times 10^{-8}$  MeV 近傍である。また 170 cm より深い位置では、スペクトルがほぼ平衡状態に達していることがわかる。

以上のスペクトル計算値を使って放射能を計算した結果を Fig. 2.5 に示す。シュラウド、PV、ライナー位置では、 $^{60}\text{Co}$  放射能について計算値と実測値を比較した。一方、遮蔽コンクリート内では  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  による放射能について計算値と実測値の比較を行なった。 $^{60}\text{Co}$  の放射能に対して、シュラウドと PV 内で計算値は実測値を過少評価している。遮蔽コンクリート表面付近では、 $^{152}\text{Eu}$  に対しては、計算値と実測値とはほぼ良い一致を示しているが、 $^{60}\text{Co}$  に対しては 5 割程度、 $^{134}\text{Cs}$  と  $^{154}\text{Eu}$  に対しては 2 倍ほど過大評価している。

シュラウドは等価円筒でモデル化した炉心最外周からわずか 15 cm しかはなれておらず、燃焼に伴って変化する炉心内出力分布の影響を強く受ける領域であること、また炉心の水平断面は矩形であるのに対してシュラウドが円形のため炉心とシュラウドの間隔は一定でないことなどの理由により、2次元円筒モデルによる計算の、この位置での詳細な精度の評価は難しい。

PV における実測値と計算値の差異に関しては、実測値が PV 表面でのデータであるのに対して、計算値は、エスティメータの厚さが有限であることから、表面から数 cm 透過した位置での値である。この位置の違いによる減衰を考慮して計算値を PV 表面に近似的に外挿するとほぼ 2 倍以内の過少評価におさえることができる。

一方、遮蔽コンクリート内においては、表面付近を除くと計算値と実測値の一致が良好であるにもかかわらず、表面近傍のみ過大評価の結果が得られた。

遮蔽コンクリート内では、シュラウドや PV 表面と異なり、4 種類の核種の放射能が半径方向にはほぼ連続的に実測されていることから、表面も含めた遮蔽コンクリート内の放射能に着目し、MCNP による中・低速エネルギー中性子輸送計算の精度の検討を行なった。

Table 2.3 は、コンクリート表面から 0.7 cm 深さの 137.5 cm の位置、および 145 cm, 170 cm, 195 cm の遮蔽コンクリート内各位置における放射能の計算値と、その計算誤差を、Table 2.4 は、放射能の 0.3 eV 以下の熱中性子による寄与の割合 (%) をそれぞれ示している。

$^{151}\text{Eu}$  ( $n, \gamma$ )  $^{152}\text{Eu}$  の反応断面積は 0.5 eV 近傍に巨大共鳴ピークがあり、 $^{59}\text{Co}$  ( $n, \gamma$ )  $^{60}\text{Co}$  反応では 120 eV 近傍、 $^{133}\text{Cs}$  ( $n, \gamma$ )  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{153}\text{Eu}$  ( $n, \gamma$ )  $^{154}\text{Eu}$  の各反応では共に 1 eV から 10 eV の間に巨大共鳴のピークを持つという共通の特徴があり、これらの核種の放射能への寄与が必ずしも熱中性子だけによるものではないことがわかる。Table 2.4 から  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{154}\text{Eu}$  の場合、

表面近傍の 137.5 cm 位置では熱外中性子の寄与が 70% 以上に達し、195 cm 位置においても、なお寄与が 50% 近いことがわかり、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{152}\text{Eu}$  と対照をみせている。これらのことから、熱外中性子による寄与が大きい程、遮蔽コンクリート表面における過大評価の程度が大きくなることがわかった。

熱外中性子からの寄与が過大評価する要因として、巨大共鳴ピークを含む熱外エネルギー領域の放射化断面積の誤差と、計算によって得られたスペクトルの誤差が考えられる。しかし共鳴ピーク近傍の断面積が放射能計算値の過大評価を解消する程の誤差を含むことは一般的には考えにくいことである。したがって過大評価の原因は、MCNP による熱外中性子スペクトルの過大評価にあることが考えられる。

Table 2.1 Energy score bins for MCNP calculations

BIN <sup>+</sup> NO.	UPPER ENERGY BOUNDARY (MEV)	LETHARGY WIDTH	BIN NO.	UPPER ENERGY BOUNDARY (MEV)	LETHARGY WIDTH
1	1.569E+1 <sup>*)</sup>	0.2	34	3.900E-3	0.4
2	1.285E+1	0.2	35	2.614E-3	0.4
3	1.052E+1	0.2	36	1.752E-3	0.4
4	8.613E+0	0.2	37	1.175E-3	0.4
5	7.052E+0	0.2	38	7.874E-4	0.4
6	5.773E+0	0.2	39	5.278E-4	0.4
7	4.727E+0	0.2	40	3.538E-4	0.4
8	3.870E+0	0.2	41	2.372E-4	0.4
9	3.169E+0	0.2	42	1.590E-4	0.4
10	2.594E+0	0.2	43	1.066E-4	0.4
11	2.124E+0	0.2	44	7.143E-5	0.4
12	1.739E+0	0.2	45	4.788E-5	0.4
13	1.424E+0	0.2	46	3.210E-5	0.4
14	1.166E+0	0.2	47	2.152E-5	0.4
15	9.543E-1	0.2	48	1.442E-5	0.4
16	7.813E-1	0.2	49	9.667E-6	0.4
17	6.397E-1	0.2	50	6.480E-6	0.4
18	5.237E-1	0.2	51	4.344E-6	0.4
19	4.288E-1	0.2	52	2.912E-6	0.4
20	3.511E-1	0.2	53	1.952E-6	0.4
21	2.874E-1	0.2	54	1.308E-6	0.4
22	2.353E-1	0.2	55	8.770E-7	0.4
23	1.927E-1	0.2	56	5.879E-7	0.4
24	1.578E-1	0.2	57	3.941E-7	0.4
25	1.292E-1	0.3	68	2.642E-7	0.4
26	9.568E-2	0.4	69	1.771E-7	0.4
27	6.414E-2	0.4	60	1.187E-8	0.4
28	4.299E-2	0.4	61	7.956E-7	0.4
29	2.882E-2	0.4	62	5.333E-8	0.4
30	1.932E-2	0.4	63	3.575E-8	0.4
31	1.295E-2	0.4	64	2.396E-8	0.4
32	8.680E-3	0.4	65	1.606E-8	0.4
33	5.818E-3	0.4	66	1.077E-8	0.4

\*) read as 1.569×10

+) bin has the same meaning as 'group'

Table 2.2 Atomic number densities of  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ , and  $^{153}\text{Eu}$  in the JPDR concrete, shroud, PV and liner regions (atoms/cm<sup>3</sup>)

	CONCRETE	SHROUD and PV(INNER 0.34 cm)	PV(OUTER 7.0 cm) and LINER	HALF LIFE (YEAR)
$^{60}\text{Co}$	1.340E+17	8.083E+19	1.443E+19	5.275E+0
$^{134}\text{Cs}$	2.084E+16	0.0	3.555E+18	2.062E+0
$^{152}\text{Eu}$	2.660E+15	1.502E+16	0.0	1.330E+1
$^{154}\text{Eu}$	2.900E+15	1.633E+16	0.0	8.600E+0

Table 2.3 Calculated activities in the shield concrete ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ) and its error

	137.5 cm		145.0 cm		170.0 cm		195.0 cm	
	A	Err.(%)	A	Err.(%)	A	Err.(%)	A	Err.(%)
$^{60}\text{Co}$	3.64-2*)	± 11.2	3.67-2	± 13.2	5.47-3	± 14.9	3.85-4	± 17.6
$^{134}\text{Cs}$	3.27-3	± 10.9	2.55-3	± 13.2	2.97-4	± 14.7	2.13-5	± 17.3
$^{152}\text{Eu}$	1.19-1	± 11.6	1.34-1	± 13.2	2.18-2	± 14.9	1.53-3	± 17.6
$^{154}\text{Eu}$	1.17-2	± 11.0	9.85-3	± 13.0	1.22-3	± 14.9	3.68-5	± 17.3

\*) read as  $3.64 \times 10^{-2}$

Table 2.4 Contribution of thermal neutron below 0.3 eV to activities in the shield concrete (%)

	137.5 cm	145.0 cm	170.0 cm	195.0 cm
$^{60}\text{Co}$	57.6	72.7	85.0	83.9
$^{134}\text{Cs}$	21.8	32.4	46.4	45.4
$^{152}\text{Eu}$	93.3	95.9	97.7	97.6
$^{154}\text{Eu}$	28.5	40.1	54.4	53.2

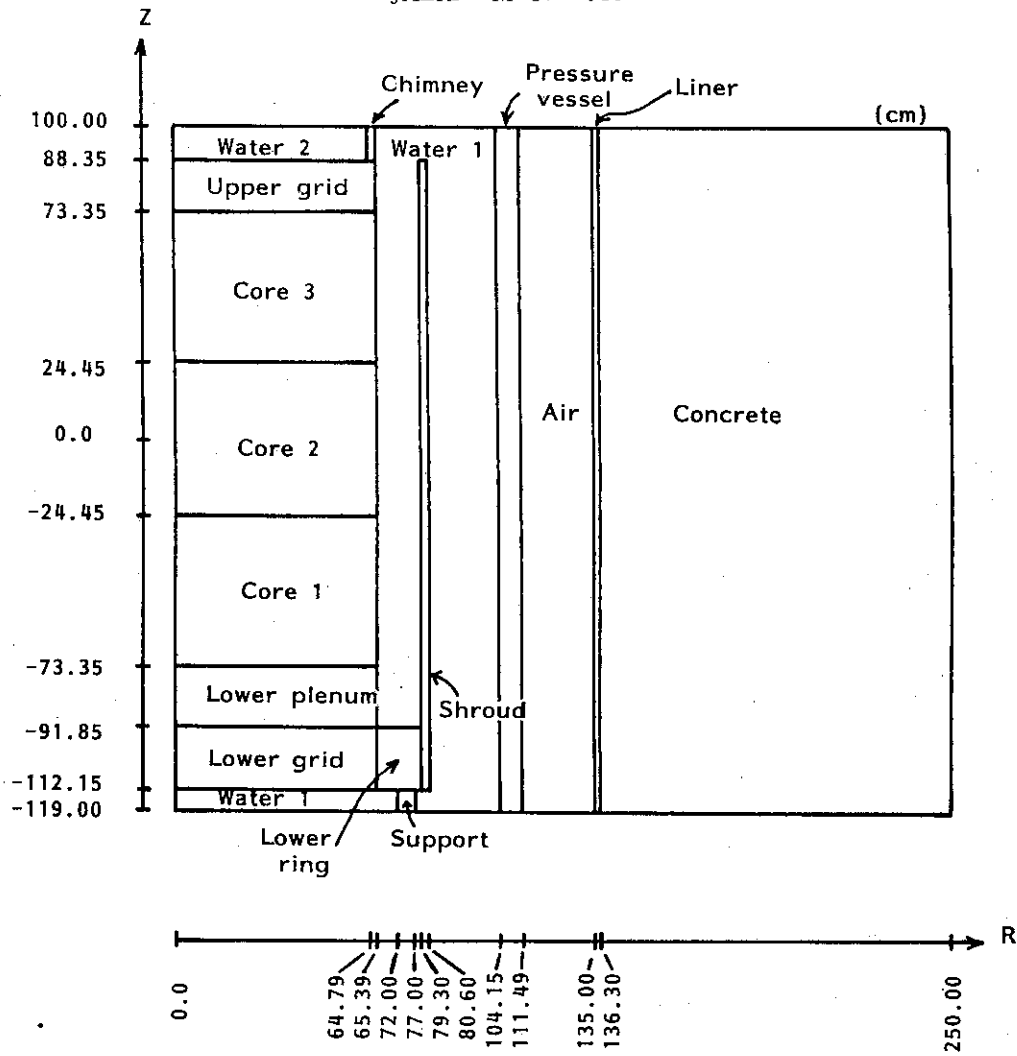


Fig. 2.1 Simplified model of JPDR configuration for MCNP calculation.

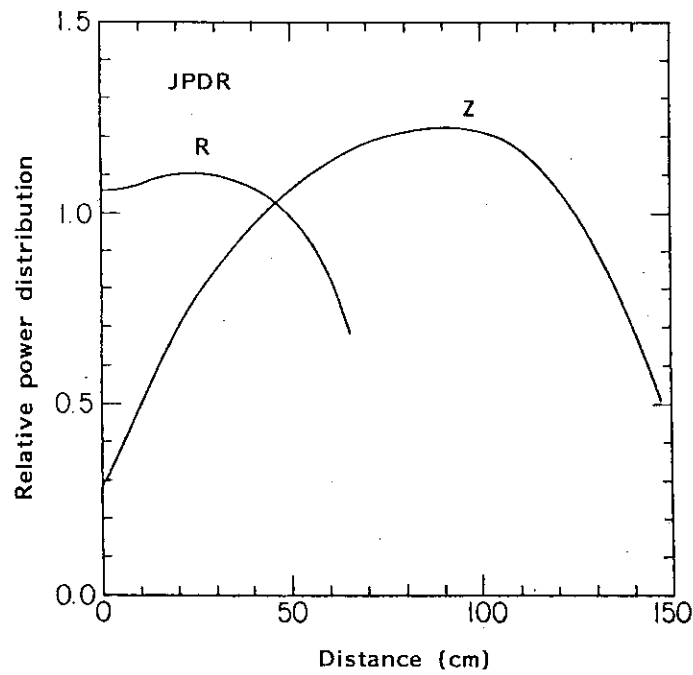


Fig. 2.2 Relative power distributions in the JPDR core.

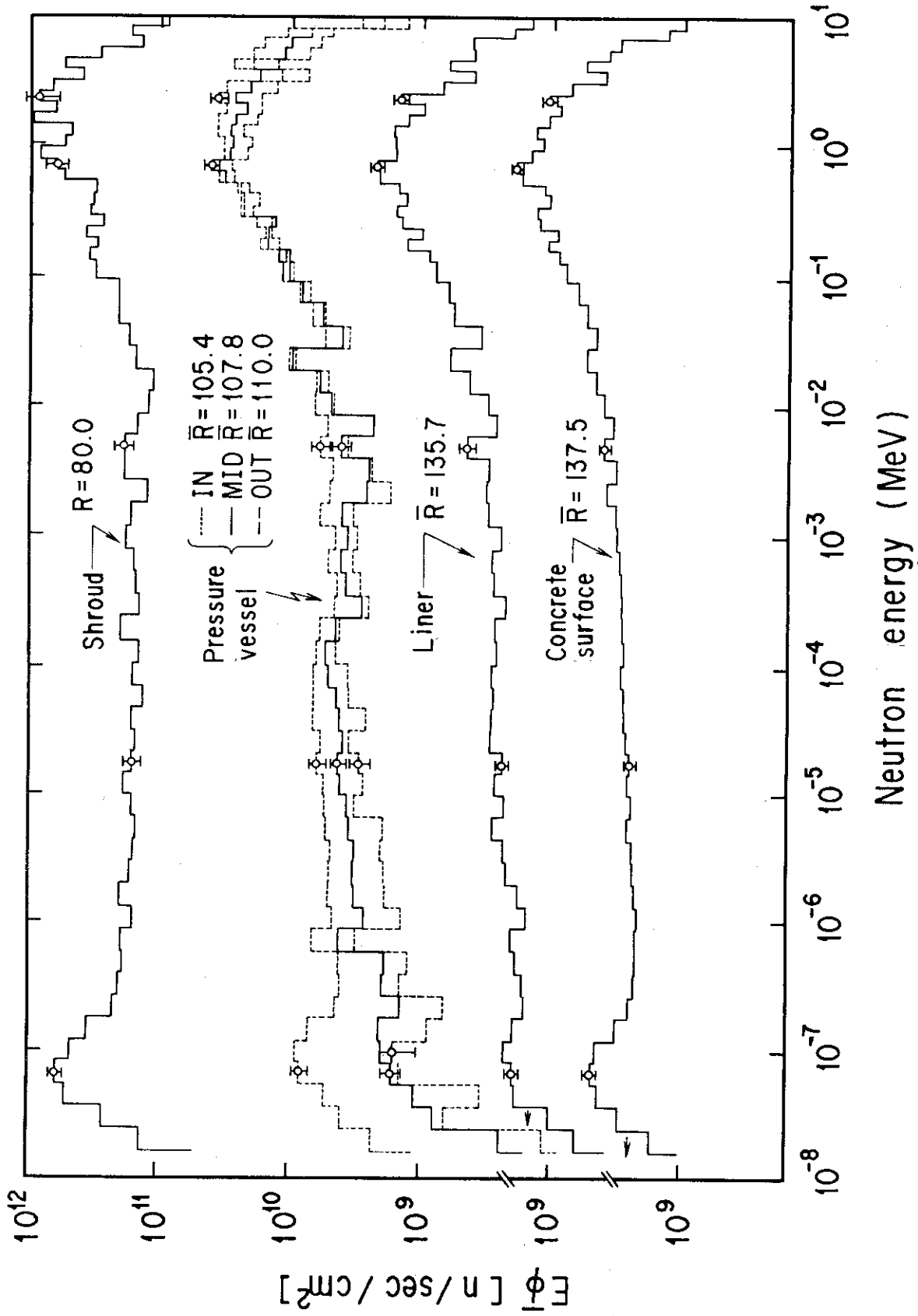


Fig. 2.3 Energy spectra at the shroud, reactor pressure vessel, liner and shield concrete with MCNP (A weight window method is applied to MCNP calculations).

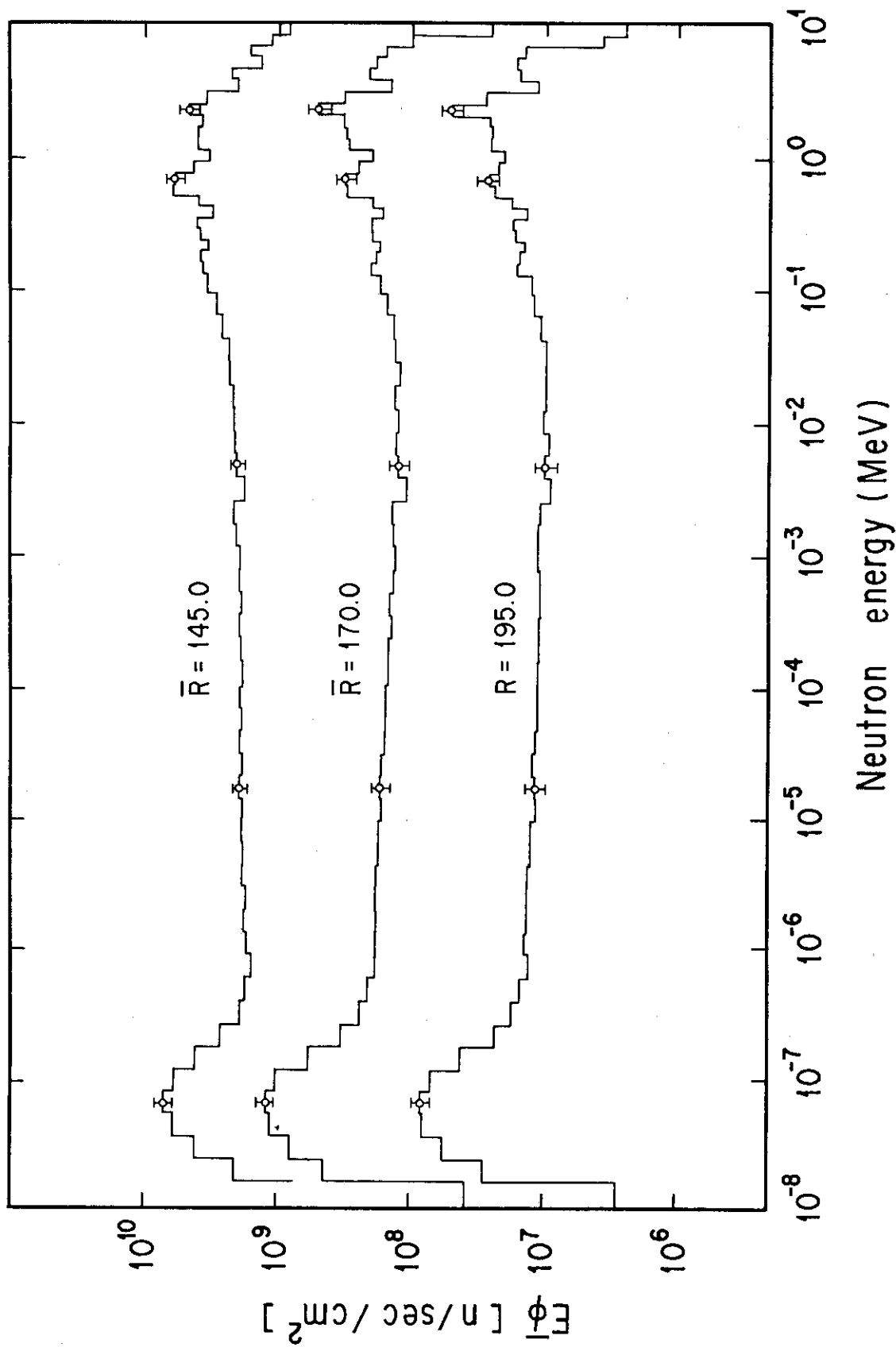


Fig. 2.4 Energy spectra in the shield concrete with MCNP  
(A weight window method is applied to MCNP calculations).

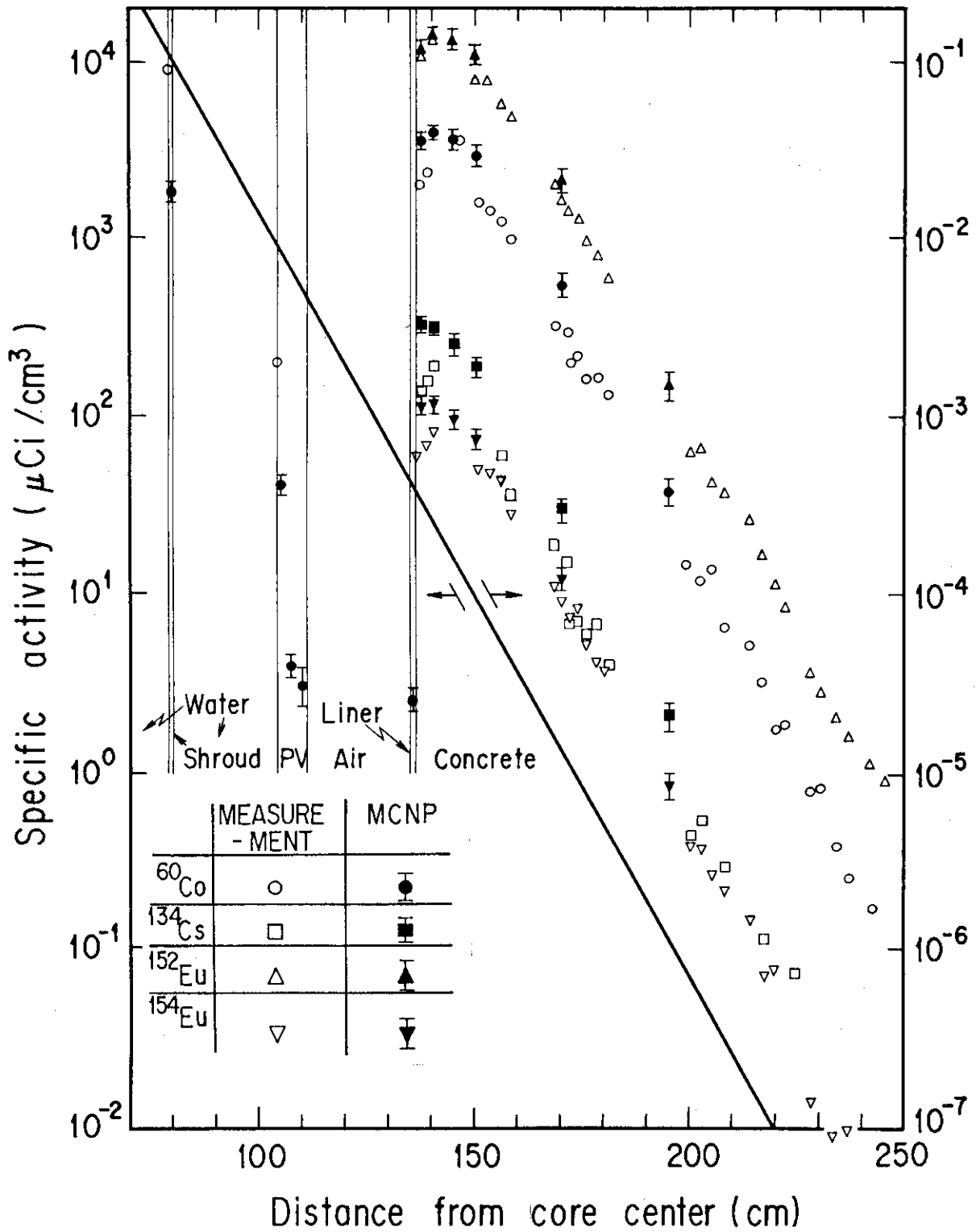


Fig. 2.5 Comparison of calculated and measured radio-activity distribution of  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  and  $^{154}\text{Eu}$  at the mid-plane of JPDR.



### 3. 黒鉛球体系中中性子透過実験解析

本実験体系<sup>4)</sup>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できる。また、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、中間エネルギーから熱エネルギー領域にわたる中性子束による寄与が重要である前章のMCNPによる放射能の詳細な検討を行うために、本実験の解析をMCNPを用いて実施した。

#### 3.1 計算体系

本実験は劣化ウランターゲットで発生する核分裂中性子及び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法により、1 MeV以下200 eV以上の中間エネルギー領域をboron capture 検出器で、100 eV以下の低エネルギー領域をBF<sub>3</sub> 計数管を使って測定したものである。

Fig. 3.1は、球殻形状でモデル化した実験体系である。Table 3.1に領域毎の組成核種とその原子数密度を与える。Table 3.2は角度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、その下端部、上端部それぞれを見込む角度を $\theta$ からの偏位量を用いて表わしたものである。線源スペクトルは、劣化ウランターゲット表面からの漏洩・中性子スペクトルで与えAppendix Bに示す。本スペクトルは0.22 MeVから15 MeVのエネルギー領域で毎秒1個発生する中性子に規格化したものである。

Appendix C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。体系の温度は、室温(25 °C)を仮定した。

#### 3.2 計算手法

使用したエスティメータはFlux Current Estimator (FCE)であり、Fig. 3.1に示した体系の半径 $R_1$ の球体系表面全体を取り囲むように設定される。この時フルーエンス $\phi$ と角度スペクトル $\psi$ は次式で与えられる。

$$\phi = \sum_i W_i / ( |\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega}| \cdot S ) \quad (3.1)$$

$\mathbf{n}$  : 球表面の法線方向単位ベクトル

$\boldsymbol{\Omega}$  : 粒子の飛行方向ベクトル

$W_i$  : 粒子のウェイト

$S$  : 表面積

$$\psi(R, \bar{\Omega}, \bar{E}, \bar{t}) = \int_S d\mathbf{r} \int_{4\Omega} d\Omega \int_{4E} dE \int_{4t} dt \cdot |\cos \theta| \cdot \phi(\mathbf{r}, \Omega, E, t) / 4\Omega / 4E / 4t / S \quad (3.2)$$

$\cos \theta$  : 表面の法線方向に対する飛行方向の方向余弦

また、スカラー束  $\phi$  は、上記フル-エンス  $\Phi$  を、球表面全体および全角度について積分することにより求められる。

$$\phi(R, \bar{E}, \bar{t}) = \int_S d\mathbf{r} \int_{4\pi} d\Omega \int_{4E} dE \int_{4t} dt \phi(\mathbf{r}, \Omega, E, t) / 4\pi / 4E / 4t / S \quad (3.3)$$

計算の対象となるエネルギー範囲は、15.0 MeV から  $2.0 \times 10^{-9}$  MeV までである。また計算効率向上のために、W-W法を用いて計算を行なった。

### 3.3 計算結果と検討

本ベンチマーク実験に対する 0.2 MeV 以上のスペクトルの計算値と実験値の比較はすでに文献 2) に与えられているが、スペクトルの全体像の理解を容易にするため、以下に示す今回の中・低速エネルギースペクトルの計算値と実験値の比較の図に、文献 2) から引用した 0.2 MeV 以上のデータも併記した。

Fig. 3.2 は、半径 20.3 cm 位置での  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  方向の角度スペクトルの計算値と実験値の比較である。計算誤差は  $0^\circ$  の角度スペクトルの場合  $1.4 \times 10^{-8}$  MeV 以下と 7.5 MeV 以上の領域で 10% を越えているが、その中間の領域では 10% 以下である。 $30^\circ$ ,  $90^\circ$  の角度スペクトルの計算誤差は  $0^\circ$  の場合に比べて小さく、グラフ上にはその大きさの指示はしていない。 $0^\circ$ ,  $90^\circ$  方向の熱中性子角度スペクトルについては、計算値と実験値とはほぼ良い一致を示しているが、0.2 eV 以上 100 eV 以下の領域では、 $0^\circ$ ,  $90^\circ$  の角度スペクトルとも計算値が 5 割程度過大評価していることがわかる。なお、この過大評価の W-W法のパラメータによる依存性が無視できる程度であることは確認した。 $30^\circ$  方向に関しては、200 eV 以上の領域で実験値との比較ができ、 $5 \times 10^{-3}$  MeV 以上で計算値と測定値との一致は良いが、 $5 \times 10^{-3}$  MeV 以下では両者の差はエネルギーが低くなるにつれて拡大する傾向にある。

Fig. 3.3 は半径 35.6 cm 位置での、 $0^\circ$ ,  $16.6^\circ$ ,  $34.8^\circ$ ,  $58.9^\circ$ ,  $90^\circ$  方向の角度スペクトルの計算値と実験値を比較したものである。 $0^\circ$ ,  $90^\circ$  以外は 100 eV 以下の実験値は存在しない。また  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  の角度スペクトルでは 200 eV から 1.5 MeV までの領域の実験値が存在しない。計算誤差は、 $0^\circ$  方向の角度スペクトルの場合が最も悪く、 $1.0 \times 10^{-8}$  MeV 以下と 8.0 MeV 以上の領域で 20% 以上、その中間の領域では約 10% でほぼ一定している。 $0^\circ$  以外では、 $1.0 \times 10^{-8}$  MeV 以下と 8.0 MeV 以上の領域で 10% 程度、その中間領域で 5% 以下の計算誤差である。この 35.6 cm の場合も 20.3 cm の場合と同様、 $0^\circ$ ,  $90^\circ$  の角度スペクトルは 0.2 eV 以下の領域で計算値と実験値との一致は良好であるが、0.2 eV 以上 100 eV 以下の区間に関しては計算が 5 割程度過大評価している。 $16.6^\circ$ ,  $34.8^\circ$ ,  $58.9^\circ$  の角度スペクトルの 200 eV から 1.5 MeV の領域での計算値と実験値との不一致は、1 MeV 近傍において、検出器の違いによる実験値の不連続が存在することから、実験値

の絶対値に主たる原因があると考えられる。

Fig. 3.4 は、半径 50.8 cm 位置での  $0^\circ$ ,  $11.5^\circ$ ,  $23.6^\circ$ ,  $36.9^\circ$ ,  $90^\circ$  方向の角度束に対する計算値と実験値の比較である。35.6 cm 位置での実験値と同様、 $0^\circ$ ,  $90^\circ$  のスペクトルでは 100 eV から 1.0 MeV の領域に、それ以外のスペクトルでは 200 eV 以下の領域に実験値がない。 $0^\circ$  方向スペクトルが最も計算誤差が大きく、 $1.0 \times 10^{-8}$  MeV 以下と 7.0 MeV 以上の領域で 10% 以上、それ以外の領域では 5% 程度である。 $0^\circ$  以外のスペクトルの計算誤差は  $0^\circ$  スペクトルの半分かそれ以下である。 $0^\circ$ ,  $90^\circ$  方向のスペクトルの  $2 \times 10^{-6}$  MeV 以下での計算値と実験値との一致は満足できる程度に良好である。一方、0.2 eV 以上 100 eV 以下の領域では  $0^\circ$  スペクトルに対して約 2 倍、 $90^\circ$  スペクトルに対して 5 割程度実験値を過大評価している。 $11.5^\circ$ ,  $23.6^\circ$ ,  $36.9^\circ$  の各スペクトルを 200 eV から 1.5 MeV の領域で実験値と比較すると、相対分布の一致はほぼ良好であるが、絶対値において大きな差異が存在する。これは 35.6 cm 位置でのスペクトルと同様、実験値の絶対値に問題があると考えられる。

Fig. 3.2 ~ 3.4 に示した  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  方向の低エネルギー領域スペクトルの実験値から明らかなように、この領域のスペクトルの角度依存性は無視できる程度である。これら低エネルギースペクトルを  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  以外の角度スペクトルに適用すると、200 eV ~ 1 MeV の中間エネルギースペクトルと外挿によりなめらかに接続することは明らかに不可能である。さらにこの中間エネルギースペクトルは 1 MeV 近傍において速中性子スペクトルに対して高めにずれていることから、中間エネルギースペクトルの絶対値に問題のある可能性がある。そのため、この領域の実験値にもとづく MCNP 計算の精度評価は割愛せざるを得ない。この中間領域における大巾な過少評価を除けば、20.3 cm, 35.6 cm, 50.8 cm の各位置において 0.2 eV 以下の  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  方向角度スペクトルは、計算値と実験値の一致は良く、0.2 eV ~ 100 eV のいわゆる熱外中性子エネルギー領域では、計算値が実験値を 5 割からそれ以上過大評価することがわかった。またこの領域ではスペクトルの角度依存性がほとんど無視できる程度であることから、以上の傾向は  $11.5^\circ$ ,  $23.6^\circ$ ,  $36.9^\circ$  方向の角度スペクトルについてもあてはまると考えることができる。

なお、20.3 cm 位置での計算で、FACOM-M 380 を用いて 40,000 ヒストリーに対して 26 分、35.6 cm 位置では 40,000 ヒストリーに対して 55 分、50.8 cm 位置では 20,000 ヒストリーで 1 時間 15 分の計算時間をそれぞれ要した。

Profio らの実験では、角度スペクトルしか測定されておらず、スカラー束の測定は行なわれていない。ところが実験値と比較する上で、計算コードによっては角度スペクトルよりもスカラー束の方が好都合な場合がある。そこで MCNP 計算による角度束を積分して得られる、20.3 cm, 35.6 cm, 50.8 cm 位置におけるスカラー束を Fig. 3.5 に示す。ただし、これらのスカラー束は、角度スペクトルに対する検討結果から明らかなように、0.2 eV 以下の熱中性子エネルギー領域及び 1 MeV 以上の高速中性子エネルギー領域における誤差は小さく、0.2 eV から 100 eV の低エネルギー領域で 5 割以上の過大評価誤差が含まれると考えられる。

Table 3.1 Composition of each mixture in the regions of experimental configuration by Profio et al.

Material region		Nuclide	Atomic density ( $10^{24}/\text{cm}^3$ )
Target	1*)	U-235	1.071 - 4 **)
		U-238	4.796 - 2
Water +	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		

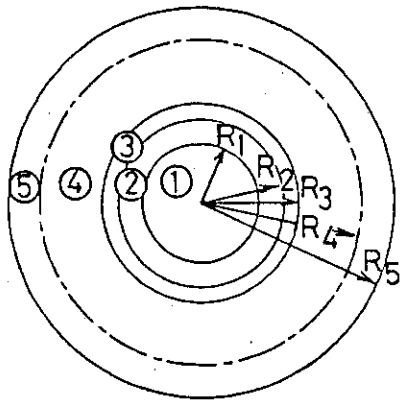
\*) region ID number in Fig. 3.1

\*\*\*) read as  $1.071 \times 10^{-4}$

Table 3.2 Radii and angles adopted in the TOF measurement

Radius (cm)	Angle (degree)
20.3	0.0 ± 10.4
	30.0 ± 10.0
	90.0 ± 35.0
35.6	0.0 ± 5.9
	16.6 ± 6.0
	34.8 ± 6.0
	58.9 ± 12.0 (-9.0)*)
	90.0 ± 26.0
50.8	0.0 ± 3.6
	11.5 ± 4.0
	23.6 ± 4.0
	36.9 ± 5.0
	90.0 ± 22.0

\*) range between 58.9 - 9.0 and 58.9 + 12.0



$R_1 = 3.81$	
$R_2 = 4.12$	
$R_3 = 4.45$	
$R_4 =$	$\theta$
20.3	0° 30.0° 90.0°
35.6	0° 16.6° 34.8° 58.9° 90.0°
50.8	0° 11.5° 23.6° 36.9° 90.0°
$R_5 = 80.0$	
	(cm)

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

Fig. 3.1 Geometrical model for the experimental setup.

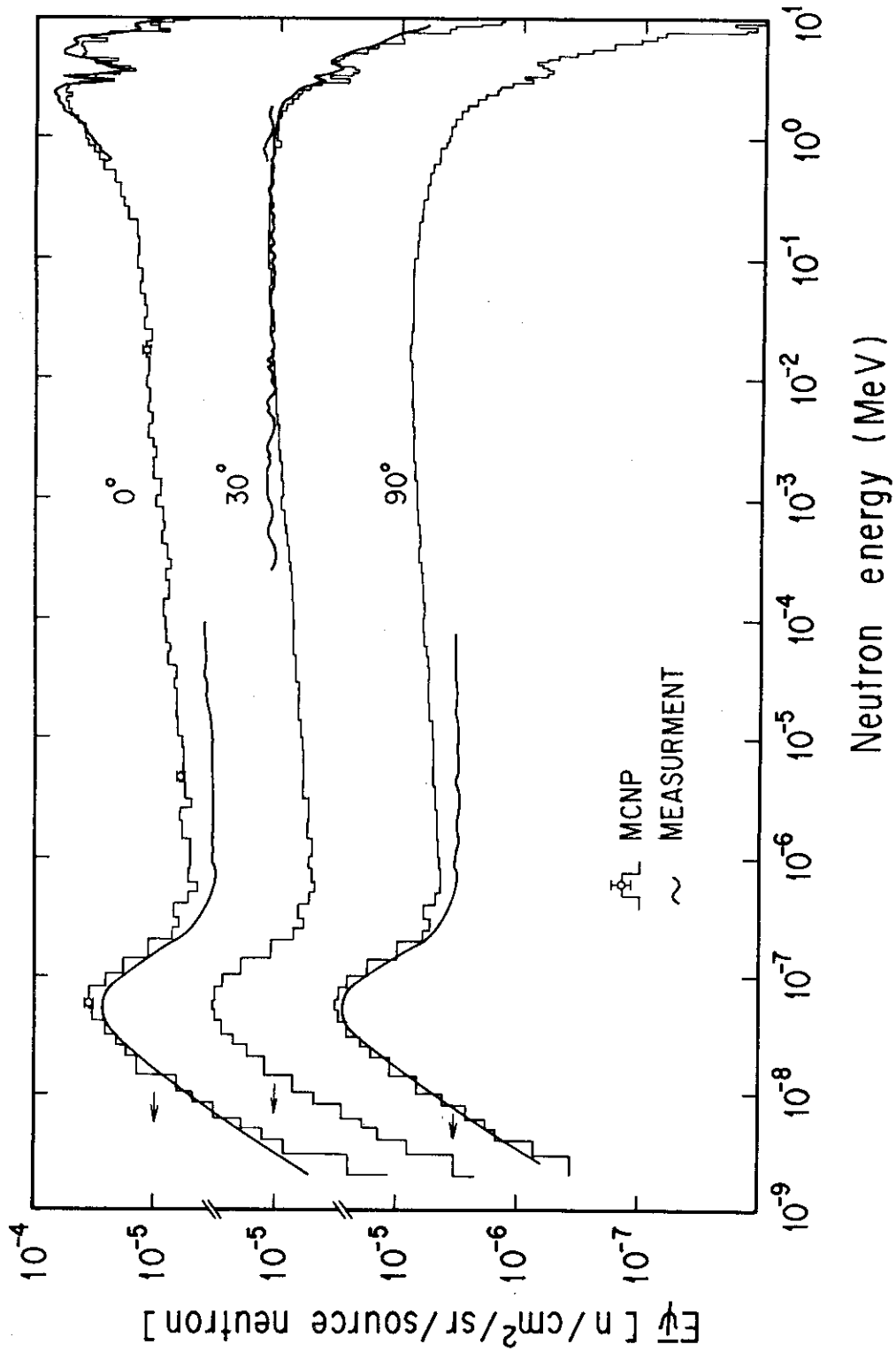


Fig. 3.2 Comparison of calculated and measured spectra to the directions 0, 30 and 90 degree at the point 20.3 cm from the target.

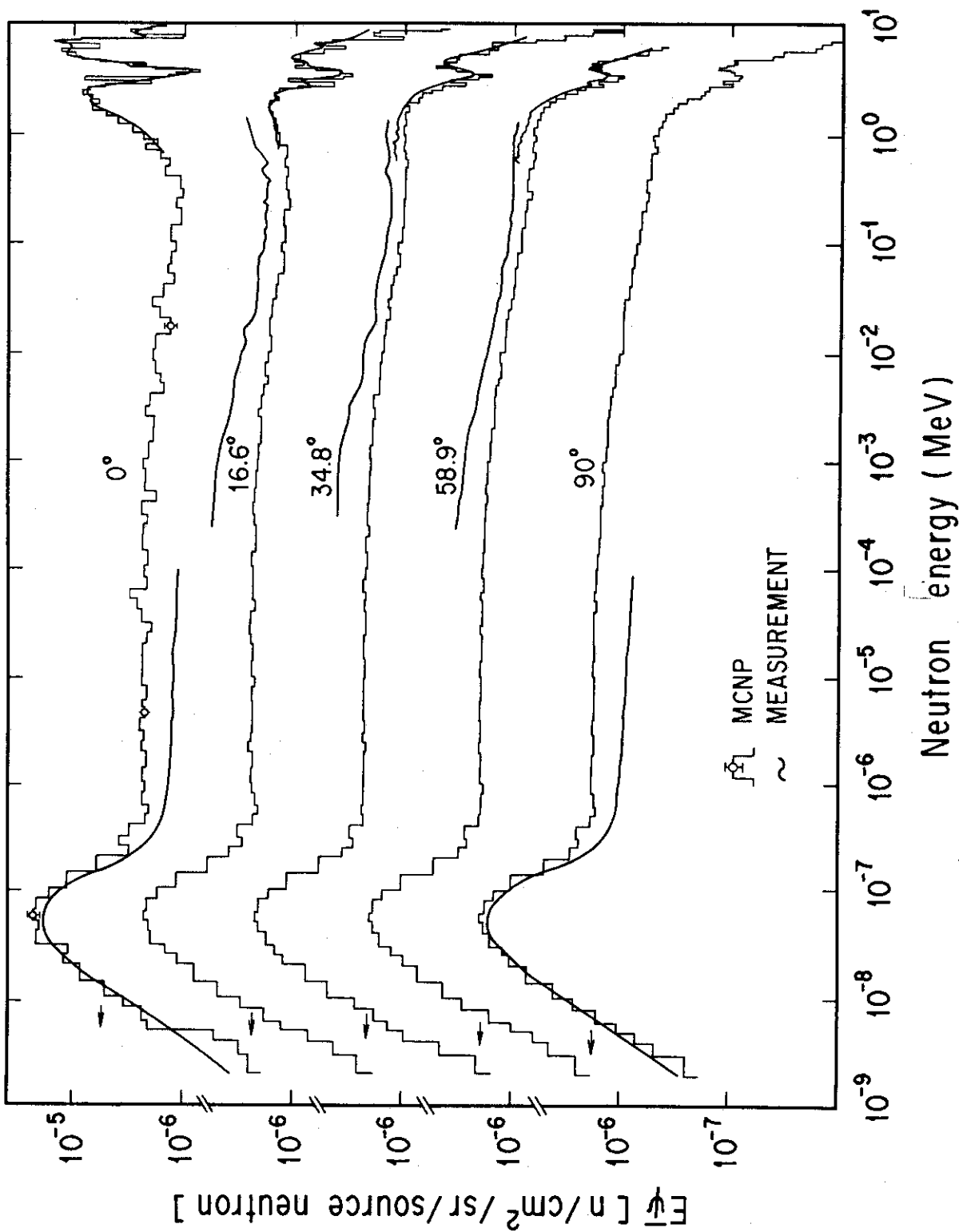


Fig. 3.3 Comparison of calculated and measured spectra to directions 0, 16.6, 34.8, 58.9 and 90 degree at the point 35.6 cm from the target.

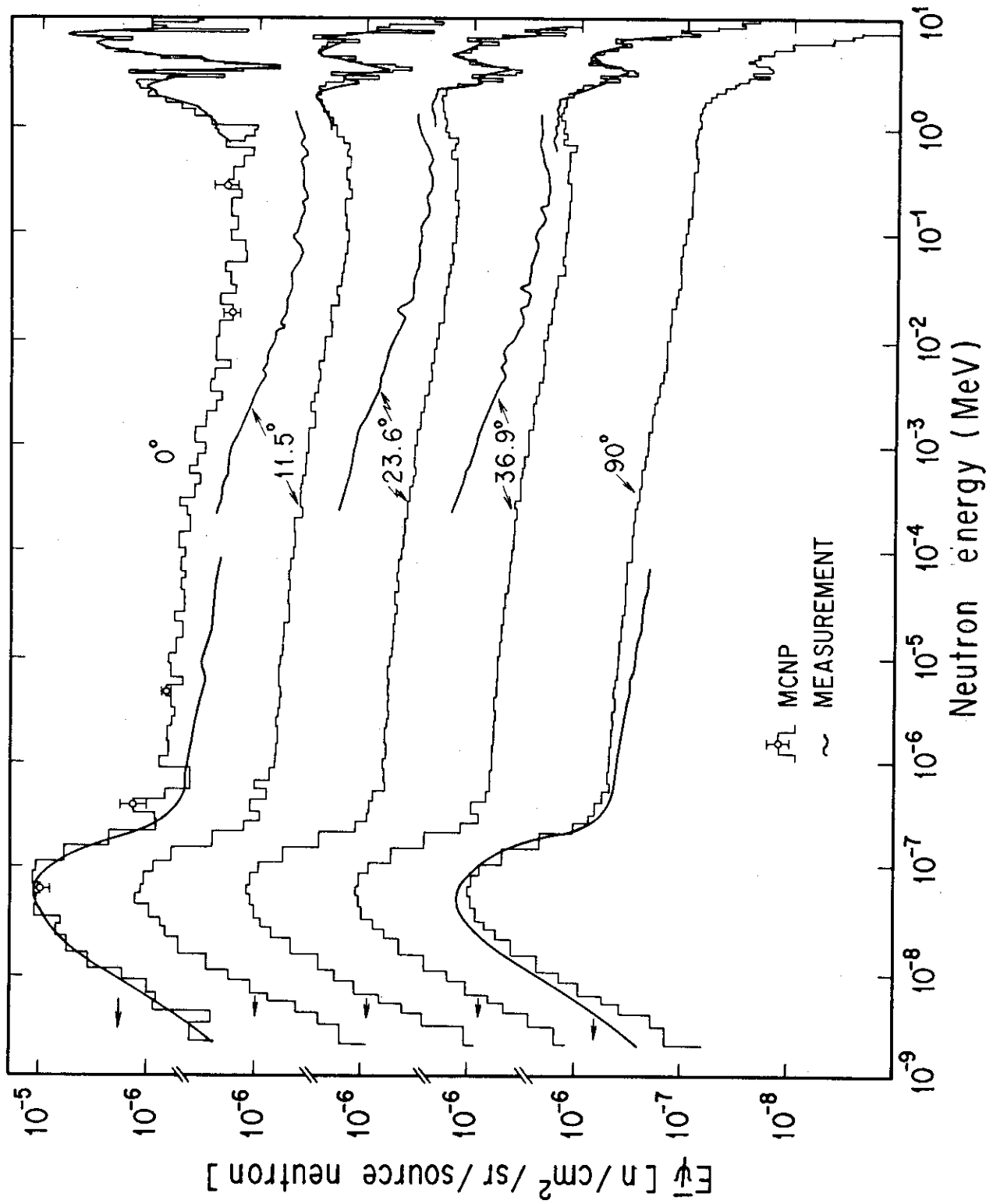


Fig. 3.4 Comparison of calculated and measured spectra to directions 0, 11.5, 23.6, 36.9 and 90 degree at the point 50.8 cm from the target.



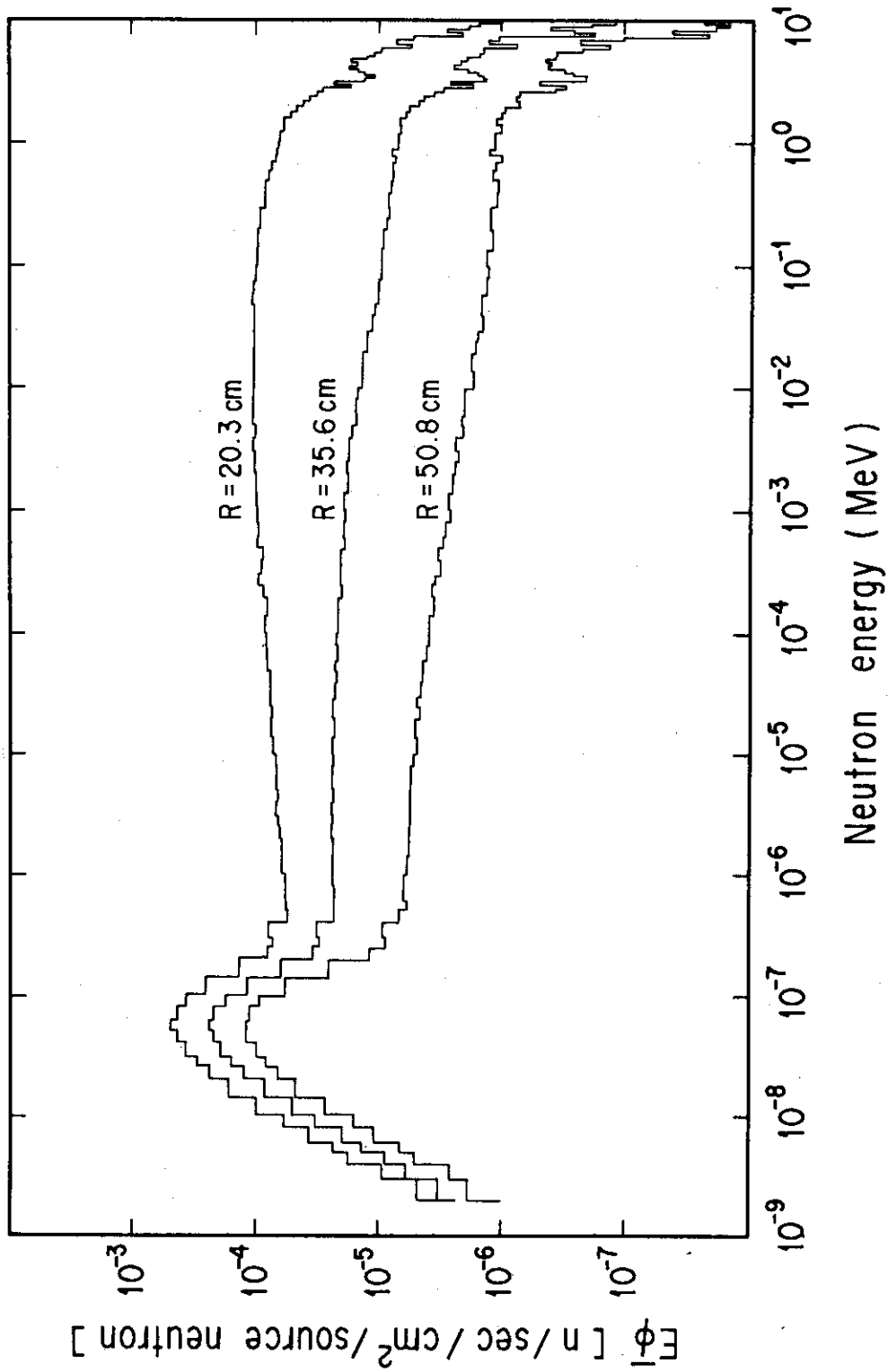


Fig. 3.5 Scalar fluxes calculated with MCNP at the radii of 20.3, 35.6 and 50.8 cm.

## 4. ま と め

MCNPコードを用いて、熱および熱外中性子エネルギー領域での中性子吸収反応による生成核種である $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ からのJPDRにおける放射能計算を行ない、主として系統的な測定値が利用できる遮蔽コンクリート領域において計算値と実測値の比較を行なった。

遮蔽コンクリート内においては、表面近傍を除いて、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ のいずれの実測値とも非常に良い一致を示した。一方、遮蔽コンクリート表面においては、MCNPの結果は1 eV から 10 eV の間に反応断面積の巨大共鳴ピークを持つ反応生成核種である $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ の実測値を2倍程度過大評価しており、このエネルギー区間に巨大共鳴ピークを持たない $^{60}\text{Co}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ は実測値と比較的良く一致する。

この不一致の原因を検討する目的で、Profio等による中・低エネルギー領域の角度スペクトルの黒鉛ベンチマーク実験の解析を行なった。その結果、MCNPによる角度スペクトルは、0.2 eV以下の熱中性子エネルギー領域の実験値と良く一致したが、0.2 eV～100 eVのエネルギー領域で、実験値を5割から最大2倍程度過大評価することがわかった。このことから、黒鉛体系と同様な $1/E$ に近いスペクトルを形成する遮蔽コンクリート表面における放射能計算の過大評価の原因の一つが、0.2 eV～100 eV領域のスペクトルの過大評価にあることがわかった。

以上の結果と、速中性子計算の精度評価を取り扱った文献2)の結果から、MCNPコードは、0.2 eV以下の熱中性子束や、1 MeV以上の速中性子の輸送計算に対して満足できる精度を得られることがわかった。一方、0.2 eV～100 eVの熱外中性子エネルギー領域の計算に対して、過大評価の傾向が明らかになった。

## 謝 辞

動力試験炉部技術開発室の助川武則、柴本真尚の両氏には、JPDRにおける放射能測定基礎データの提供を受けました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) LASL Group TD-6 : "MCNP-A General Monte Carlo for Neutron and Photon Transport", LA-7396-M, Los Alamos Scientific Laboratory (1978)
- 2) 小手川洋, 笹本宣雄, 田中俊一 : 「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」, JAERI - M 86-055
- 3) 助川武則 : 私信
- 4) Profio A.E., Antunez H.M. and Huffman D.L. : Nucl. Sci. Eng., 35, 91 (1969)
- 5) Watt B.E., : Phys. Rev., 87, 1037 (1952)

## 4. ま と め

MCNPコードを用いて、熱および熱外中性子エネルギー領域での中性子吸収反応による生成核種である $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ からのJPDRにおける放射能計算を行ない、主として系統的な測定値が利用できる遮蔽コンクリート領域において計算値と実測値の比較を行なった。

遮蔽コンクリート内においては、表面近傍を除いて、 $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ のいずれの実測値とも非常に良い一致を示した。一方、遮蔽コンクリート表面においては、MCNPの結果は1 eV から 10 eV の間に反応断面積の巨大共鳴ピークを持つ反応生成核種である $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ の実測値を2倍程度過大評価しており、このエネルギー区間に巨大共鳴ピークを持たない $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ は実測値と比較的良く一致する。

この不一致の原因を検討する目的で、Profio等による中・低エネルギー領域の角度スペクトルの黒鉛ベンチマーク実験の解析を行なった。その結果、MCNPによる角度スペクトルは、0.2 eV以下の熱中性子エネルギー領域の実験値と良く一致したが、0.2 eV ~ 100 eVのエネルギー領域で、実験値を5割から最大2倍程度過大評価することがわかった。このことから、黒鉛体系と同様な $1/E$ に近いスペクトルを形成する遮蔽コンクリート表面における放射能計算の過大評価の原因の一つが、0.2 eV ~ 100 eV領域のスペクトルの過大評価にあることがわかった。

以上の結果と、速中性子計算の精度評価を取り扱った文献2)の結果から、MCNPコードは、0.2 eV以下の熱中性子束や、1 MeV以上の速中性子の輸送計算に対して満足できる精度を得られることがわかった。一方、0.2 eV ~ 100 eVの熱外中性子エネルギー領域の計算に対して、過大評価の傾向が明らかになった。

## 謝 辞

動力試験炉部技術開発室の助川武則、柴本真尚の両氏には、JPDRにおける放射能測定基礎データの提供を受けました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) LASL Group TD-6 : "MCNP-A General Monte Carlo for Neutron and Photon Transport", LA-7396-M, Los Alamos Scientific Laboratory (1978)
- 2) 小手川洋, 笹本宣雄, 田中俊一 : 「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」, JAERI - M 86 - 055
- 3) 助川武則 : 私信
- 4) Profio A.E., Antunez H.M. and Huffman D.L. : Nucl. Sci. Eng., 35, 91 (1969)
- 5) Watt B.E., : Phys. Rev., 87, 1037 (1952)

## 4. ま と め

MCNPコードを用いて、熱および熱外中性子エネルギー領域での中性子吸収反応による生成核種である $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ からのJPDRにおける放射能計算を行ない、主として系統的な測定値が利用できる遮蔽コンクリート領域において計算値と実測値の比較を行なった。

遮蔽コンクリート内においては、表面近傍を除いて、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ のいずれの実測値とも非常に良い一致を示した。一方、遮蔽コンクリート表面においては、MCNPの結果は1 eVから10 eVの間に反応断面積の巨大共鳴ピークを持つ反応生成核種である $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{154}\text{Eu}$ の実測値を2倍程度過大評価しており、このエネルギー区間に巨大共鳴ピークを持たない $^{60}\text{Co}$ 、 $^{152}\text{Eu}$ は実測値と比較的良く一致する。

この不一致の原因を検討する目的で、Profio等による中・低エネルギー領域の角度スペクトルの黒鉛ベンチマーク実験の解析を行なった。その結果、MCNPによる角度スペクトルは、0.2 eV以下の熱中性子エネルギー領域の実験値と良く一致したが、0.2 eV～100 eVのエネルギー領域で、実験値を5割から最大2倍程度過大評価することがわかった。このことから、黒鉛体系と同様な $1/E$ に近いスペクトルを形成する遮蔽コンクリート表面における放射能計算の過大評価の原因の一つが、0.2 eV～100 eV領域のスペクトルの過大評価にあることがわかった。

以上の結果と、速中性子計算の精度評価を取り扱った文献2)の結果から、MCNPコードは、0.2 eV以下の熱中性子束や、1 MeV以上の速中性子の輸送計算に対して満足できる精度を得られることがわかった。一方、0.2 eV～100 eVの熱外中性子エネルギー領域の計算に対して、過大評価の傾向が明らかになった。

## 謝 辞

動力試験炉部技術開発室の助川武則、柴本真尚の両氏には、JPDRにおける放射能測定基礎データの提供を受けました。ここに謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) LASL Group TD-6 : "MCNP-A General Monte Carlo for Neutron and Photon Transport", LA-7396-M, Los Alamos Scientific Laboratory (1978)
- 2) 小手川洋, 笹本宣雄, 田中俊一 : 「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」, JAERI - M 86 - 055
- 3) 助川武則 : 私信
- 4) Profio A.E., Antunez H.M. and Huffman D.L. : Nucl. Sci. Eng., 35, 91 (1969)
- 5) Watt B.E., : Phys. Rev., 87, 1037 (1952)

Appendix A : Input data list for MCNP calculation of neutron penetration through JPDR configuration

```

JPDR CORE HIGHT REGION SPECTRUM DISTRIBUTION TEST MODEL =CONCRETE=
C      MCNP SV CODE
1      1  6.425E-2  -9,2 10,36 -17,4
2      2  5.917E-2  -5,3 9,1 -17,4 (6,47,48:-8,47,48:15,48)
3      3  5.467E-2  -3,37 5,2 -17,4
4      4  7.582E-2  -1,49 11,39 17,1,2,3,36,37,44 -18,5
5      4  7.582E-2  -1,49 11,39 18,4 -19,6
6      4  7.582E-2  -1,49 11,39 19,5 -20,7,8,9
7      5  8.725E-2  -6,8 8,8 20,6 -21,10
8      5  8.725E-2  -2,9 12,42 20,6,39 -21,10 (6,7:-8,7)
9      4  7.582E-2  -1,49 2,8 20,6 -21,10
10     4  7.582E-2  -1,49 13,49 21,7,8,9,42 -22,11
11     4  7.582E-2  -1,49 13,49 22,10 -23,12
12     4  7.582E-2  -1,49 13,49 23,11 -24,13
13     4  7.582E-2  -1,49 13,49 24,12 -25,14
14     4  7.582E-2  -1,49 13,49 25,13 -26,15,18
15     6  8.515E-2  -6,18 8,18 26,14 -27,16
16     6  8.515E-2  -6,18 8,18 27,15 -28,17
17     6  8.515E-2  -6,18 8,18 28,16 -29,19
18     6  8.515E-2  -1,49 13,49 26,14 -29,19 (6,15,16,17:-8,15,16,17)
19     7  4.964E-5  -1,49 13,49 29,17,18 -30,20,21
20     8  8.622E-2  -6,21 8,21 30,19 -31,22
21     8  8.622E-2  -1,49 13,49 30,19 -31,22 (6,20:-8,20)
22     9  7.835E-2  -1,49 13,49 31,20,21 -32,23
23     9  7.835E-2  -1,49 13,49 32,22 -33,24
      (4,46:-8,45:-46,45,46:47,45,46)
24     9  7.835E-2  -1,49 13,49 33,23 -34,25
25     9  7.835E-2  -1,49 13,49 34,24 -35,26
26     9  7.835E-2  -1,49 13,49 35,25 -36,27
27     9  7.835E-2  -1,49 13,49 36,26 -37,28
28     9  7.835E-2  -1,49 13,49 37,27 -38,29
29     9  7.835E-2  -1,49 13,49 38,28 -39,30
30     9  7.835E-2  -1,49 13,49 39,29 -40,31
31     9  7.835E-2  -1,49 13,49 40,30 -41,32
32     9  7.835E-2  -1,49 13,49 41,31 -42,33
33     9  7.835E-2  -1,49 13,49 42,32 -43,34
34     9  7.835E-2  -1,49 13,49 43,33 -44,35
35     9  7.835E-2  -1,49 13,49 44,34 -45,49
36     10 6.692E-2  -10,1 11,38 -17,4
37     11 4.652E-2  -2,43,44 3,3 -17,4
38     12 7.832E-2  -11,36 12,40 -17,39
39     13 8.316E-2  -11,4,5,6 12,40,41,42 17,38 -20,8
40     4  7.582E-2  -12,38,39 13,49 -18,41
41     5  8.725E-2  -12,39 13,49 18,40 -19,42
42     4  7.582E-2  -12,8,39 13,49 19,41 -21,10
43     14 4.449E-2  -1,49 2,37 -16,44
44     5  8.725E-2  -1,49 2,37 16,43 -17,4
45     9  7.835E-2  -5,46 8,23 46,23 -47,23
46     9  7.835E-2  -4,23 5,45 46,23 -47,23
47     2  5.917E-2  -6,2 8,2 -14,48
48     2  5.917E-2  -6,2 8,2 14,47 -15,2
49     0      (1,4,5,6,9,10,11,12,13,14,18,19,21,22,23,24,25,26,27,
      28,29,30,31,32,33,34,35,43,44
      :-13,10,11,12,13,14,18,19,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,
      33,34,35,40,41,42
      :45,35)

1      PZ      110.00
2      PZ      98.35
3      PZ      73.35
4      PZ      35.00
5      PZ      24.45

6      PZ      15.00
C      7      PZ      0.00
8      PZ     -15.00
9      PZ     -24.45
10     PZ     -73.35
11     PZ     -92.85
12     PZ    -113.15
13     PZ    -120.00
    
```

14 CZ 5.  
 15 CZ 10.  
 16 CZ 64.79  
 17 CZ 65.39  
 18 CZ 72.00  
 19 CZ 77.00  
 20 CZ 79.30  
 21 CZ 80.60  
 22 CZ 85.20  
 23 CZ 89.80  
 24 CZ 94.90  
 25 CZ 100.00  
 26 CZ 104.15  
 27 CZ 106.60  
 28 CZ 109.04  
 29 CZ 111.49  
 30 CZ 135.00  
 31 CZ 136.30  
 32 CZ 141.30  
 33 CZ 146.30  
 34 CZ 151.30  
 35 CZ 156.30  
 36 CZ 161.30  
 37 CZ 166.30  
 38 CZ 171.30  
 39 CZ 176.30  
 40 CZ 181.30  
 41 CZ 186.30  
 42 CZ 191.30  
 43 CZ 196.30  
 44 CZ 206.30  
 45 CZ 226.30  
 46 CZ 144.00  
 47 CZ 146.00

MODE 0  
 ERGN -15 17.4 1.0E-7  
 C SRC(I)=(ZZZO/ABIAS/EBIAS/PSC)  
 SRC 73.35 1. 1. 0.5  
 WFN1 1.0E-6 0.7 0.5 0.7 0.3 0.1 0.05 0.02 0.03 0.04 0.02 0.01 0.006  
           0.004 0.002 0.001 4R 0.001 1R 0.0006 0.0004 4R -1 7R  
           0 8R 0.0002 1R 0.5 1R -1  
 WFN2 1.0E-3 0.7 0.5 0.7 0.3 0.1 0.05 0.02 0.03 0.04 0.01 0.005 0.002  
           0.001 0.0005 0.0002 4R 0.0001 1R 0.00005 0.00002 4R -1 7R  
           0 8R 0.00001 1R 0.5 1R -1  
 WFN3 1.0 1.2 1.0 1.2 0.5 0.2 0.1 0.05 0.07 0.08 0.02 0.01 0.005  
           0.002 0.001 0.0005 4R 0.0002 1R 0.0001 0.00005 4R -1 7R  
           0 8R 0.00002 1R 1.0 1R -1  
 WFN4 5.0 2.4 2.0 2.4 1.0 0.5 0.2 0.08 0.1 0.1 0.04 0.02 0.01  
           0.005 0.002 0.001 4R 0.0005 1R 0.0002 0.0001 4R -1 7R  
           0 8R 0.00005 1R 2.0 1R -1  
 WFN5 17.4 1.9 1.8 1.9 0.5 0.15 0.04 0.014 0.014 0.03 0.008 0.003  
           0.001 0.0003 0.0001 0.00003 4R 0.00001 1R 0.000003 0.000001  
           4R -1 7R 0 8R 3.E-7 1R 2.0 1R -1  
 F4 7 15 16 17 20 (45 46) (47 48)  
 THTME 1.E+6  
 TMP1 4.74E-8 17R 2.87E-8 4R 2.61E-8 11R 4.74E-8 8R 2.61E-8 1R  
       4.74E-8 1R 0  
 MT1 LWTR.07  
 MT2 LWTR.07  
 MT3 LWTR.07  
 MT4 LWTR.07  
 MT9 LWTR.07  
 MT10 LWTR.07  
 MT11 LWTR.07  
 MT12 LWTR.07  
 MT13 LWTR.07  
 MT14 LWTR.07  
 TOTNU  
 EO 1.61D-08 2.40D-08 3.57D-08 5.33D-08 7.96D-08 1.19D-07 1.77D-07  
       2.64D-07 3.94D-07 5.88D-07 8.77D-07 1.31D-06 1.95D-06 2.91D-06  
       4.34D-06 6.48D-06 9.67D-06 1.44D-05 2.15D-05 3.21D-05 4.79D-05  
       7.14D-05 1.07D-04 1.59D-04 2.37D-04 3.54D-04 5.28D-04 7.87D-04  
       1.17D-03 1.75D-03 2.61D-03 3.90D-03 5.82D-03 8.68D-03 1.29D-02  
       1.93D-02 2.88D-02 4.30D-02 6.41D-02 1.06D-01 1.29D-01 1.58D-01  
       1.93D-01 2.35D-01 2.87D-01 3.51D-01 4.29D-01 5.24D-01 6.40D-01  
       7.81D-01 9.54D-01 1.17D+00 1.42D+00 1.74D+00 2.12D+00 2.59D+00  
       3.17D+00 3.87D+00 4.73D+00 5.77D+00 7.05D+00 8.61D+00 1.05D+01  
       1.28D+01 1.57D+01  
 EM4 5.000D-1 2.533D+0 37R 2.042D+0 5.017D+0 24R  
 C JPDR\*C1\*MATERIAL\*  
 C (1C1/2C2/3C3/4W1/5SH/6PV/7AR/8LN/9CN/10LP/11UG/12LG/13LR/14W2)  
 M1 1001 .43263  
       8016 .38735  
       24000 .00296

	26000	.01140
	28000	.00129
	40000	.07886
	92235	.00225
	92238	.08326
M2	1001	.40749
	8016	.39706
	24000	.00321
	26000	.01237
	28000	.00140
	40000	.08562
	92235	.00244
	92238	.09041
M3	1001	.39166
	8016	.39680
	24000	.00348
	26000	.01340
	28000	.00152
	40000	.09267
	92235	.00264
	92238	.09783
M4	1001	.66666
	8016	.33334
M5	6012	.003636
	14000	.020744
	24000	.199512
	25055	.019877
	26000	.663265
	28000	.092966
M6	6012	.011544
	14000	.004545
	25055	.013388
	26000	.965324
	28000	.005202
M7	7014	.787699
	8016	.212301
M8	6012	.009587
	14000	.001330
	25055	.011378
	26000	.977705
M9	1001	.135184
	8016	.576039
	11023	.010724
	13027	.033912
	14000	.205125
	20000	.032688
	25055	.000125
	26000	.006199
	28000	.000004
M10	1001	.508151
	6012	.009387
	8016	.254068
	25055	.003425
	26000	.190876
	40000	.034093
M11	1001	.511447
	8016	.255724
	14000	.003003
	25055	.002501
	26000	.120297
	28000	.032213
	40000	.074815
M12	1001	.435407
	6012	.005607
	8016	.221324
	14000	.003395
	24000	.032648
	25055	.006810
	26000	.294809
M13	1001	.217603
	6012	.002449
	8016	.108802
	14000	.013973
	24000	.134390
	25055	.013389
	26000	.446773
	28000	.062621
M14	1001	.666666
	8016	.333334
CUTN	1.E9 1.E-8	0.01
NPS	5000	
PRDMP	5000	
PRINT		

Appendix B : Input data list for MCP calculation of graphite benchmark  
experiment by Profio et al.

```

GULF RADIATION TECHNOLOGY LINAC(PHOTO-N-SOURCE)) ((20.3CM))
C MCNP 3V CODE < JAERI-M-7843, SHIELDING BENCHMARK PROBLEMS(1-7)>
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 4 8.33E-2 6,6 -7,8
C GRAPHITE
8 4 8.33E-2 7,7 -8,9
C GRAPHITE
9 4 8.33E-2 8,8 -9,10
C GRAPHITE
10 4 8.33E-2 9,9 -10,11
C GRAPHITE
11 4 8.33E-2 10,10 -11,12
C GRAPHITE
12 4 8.33E-2 11,11 -12,13
C GRAPHITE
13 4 8.33E-2 12,12 -13,14
C GRAPHITE
14 0 13,13
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. 10.0
6 S 0. 0. 0. 15.0
7 S 0. 0. 0. 20.3
8 S 0. 0. 0. 25.0
9 S 0. 0. 0. 30.0
10 S 0. 0. 0. 35.0
11 S 0. 0. 0. 40.0
12 S 0. 0. 0. 45.0
13 S 0. 0. 0. 80.0

MODE 0
ERGN -15 17.0 1.0E-7
SRC 4.11 3
WFN1 1.E-8 0 3R 0.6 0.30 0.15 1R 0.30 0.8 2.0 5.0 10. -1
WFN2 1.E-7 0 3R 1.0 0.80 0.60 1R 2.00 6.0 20. 60. 99. -1
WFN3 1.E-6 0 3R 0.9 0.60 0.30 1R 0.90 3.0 10. 35. 80. -1
WFN4 1.0 0 3R 0.6 0.30 0.15 1R 0.25 0.8 2.5 8.0 25. -1
WFN5 17.0 0 3R 0.3 0.10 0.03 1R 0.06 0.2 0.6 2.0 6.0 -1
THTME 1.E+6
TMP1 2.568E-8 12R 0
MT2 LWTR.07
TOTNU
F1 7
F21 7
F41 7
FQ1 E C
FQ21 E C
FQ41 E C
C1 0. 0.9836 1. T
C21 0. 0.7660 0.9397 1.
C41 -0.5825 0.5825 1.
F2 7
EO 2.00D-09 3.00D-09 4.00D-09 5.00D-09 6.00D-09 8.00D-09 1.00D-08
1.40D-08 2.00D-08 2.50D-08 3.00D-08 4.00D-08 5.00D-08 6.00D-08
8.00D-08 1.00D-07 1.40D-07 2.00D-07 2.50D-07 3.00D-07 4.00D-07

```



JAERI - M 87 - 010

	5.00D-07	6.00D-07	8.00D-07	1.00D-06	1.40D-06	2.00D-06	2.50D-06
	3.00D-06	4.00D-06	5.00D-06	6.00D-06	8.00D-06	1.00D-05	1.40D-05
	2.00D-05	2.50D-05	3.00D-05	4.00D-05	5.00D-05	6.00D-05	8.00D-05
	1.00D-04	1.40D-04	2.00D-04	2.50D-04	3.00D-04	4.00D-04	5.00D-04
	6.00D-04	8.00D-04	1.00D-03	1.40D-03	2.00D-03	2.50D-03	3.00D-03
	4.00D-03	5.00D-03	6.00D-03	8.00D-03	1.00D-02	1.40D-02	2.00D-02
	2.50D-02	3.00D-02	4.00D-02	5.00D-02	6.00D-02	8.00D-02	1.00D-01
	1.40D-01	2.00D-01	2.50D-01	3.00D-01	4.00D-01	5.00D-01	6.00D-01
	7.00D-01	8.00D-01	9.00D-01	1.00D+00	1.20D+00	1.40D+00	1.60D+00
	1.80D+00	2.00D+00	2.20D+00	2.40D+00	2.60D+00	2.80D+00	3.00D+00
	3.20D+00	3.40D+00	3.60D+00	3.80D+00	4.00D+00	4.20D+00	4.40D+00
	4.60D+00	4.80D+00	5.00D+00	5.50D+00	6.00D+00	6.50D+00	7.00D+00
	7.50D+00	8.00D+00	8.50D+00	9.00D+00	9.50D+00	1.00D+01	1.20D+01
	1.40D+01	1.70D+01					
EM1	9.355D-4	4.678D-3	6.549D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3
	5.613D-3	5.301D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	1.029D-2
	6.549D-3	8.420D-3	5.613D-3	5.301D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3
	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	5.613D-3	5.301D-3	8.420D-3
	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	5.613D-3
	5.301D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3
	8.420D-3	5.613D-3	5.301D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3
	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	5.613D-3	5.301D-3	8.420D-3	1.029D-2
	6.549D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	5.613D-3	5.301D-3
	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3
	5.613D-3	5.301D-3	8.420D-3	1.029D-2	6.549D-3	8.420D-3	1.029D-2
	1.216D-2	1.403D-2	1.590D-2	1.777D-2	1.029D-2	1.216D-2	1.403D-2
	1.590D-2	1.777D-2	1.965D-2	2.152D-2	2.339D-2	2.526D-2	2.713D-2
	2.900D-2	3.087D-2	3.274D-2	3.461D-2	3.648D-2	3.836D-2	4.023D-2
	4.210D-2	4.397D-2	4.584D-2	1.965D-2	2.152D-2	2.339D-2	2.526D-2
	2.713D-2	2.900D-2	3.087D-2	3.274D-2	3.461D-2	3.648D-2	1.029D-2
	1.216D-2	9.667D-3					
EM21	1.021D-4	5.107D-4	7.150D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4
	6.129D-4	5.788D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	1.124D-3
	7.150D-4	9.193D-4	6.129D-4	5.788D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4
	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	6.129D-4	5.788D-4	9.193D-4
	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	6.129D-4
	5.788D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4
	9.193D-4	6.129D-4	5.788D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4
	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	6.129D-4	5.788D-4	9.193D-4	1.124D-3
	7.150D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	6.129D-4	5.788D-4
	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4
	6.129D-4	5.788D-4	9.193D-4	1.124D-3	7.150D-4	9.193D-4	1.124D-3
	1.328D-3	1.532D-3	1.737D-3	1.941D-3	1.124D-3	1.328D-3	1.532D-3
	1.737D-3	1.941D-3	2.145D-3	2.349D-3	2.554D-3	2.758D-3	2.962D-3
	3.167D-3	3.371D-3	3.575D-3	3.780D-3	3.984D-3	4.188D-3	4.392D-3
	4.597D-3	4.801D-3	5.005D-3	2.145D-3	2.349D-3	2.554D-3	2.758D-3
	2.962D-3	3.167D-3	3.371D-3	3.575D-3	3.780D-3	3.984D-3	1.124D-3
	1.328D-3	1.056D-3					
EM41	4.311D-5	2.155D-4	3.018D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4
	2.587D-4	2.443D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	4.742D-4
	3.018D-4	3.880D-4	2.587D-4	2.443D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4
	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	2.587D-4	2.443D-4	3.880D-4
	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	2.587D-4
	2.443D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4
	3.880D-4	2.587D-4	2.443D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4
	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	2.587D-4	2.443D-4	3.880D-4	4.742D-4
	3.018D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	2.587D-4	2.443D-4
	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4
	2.587D-4	2.443D-4	3.880D-4	4.742D-4	3.018D-4	3.880D-4	4.742D-4
	5.604D-4	6.466D-4	7.329D-4	8.191D-4	4.742D-4	5.604D-4	6.466D-4
	7.329D-4	8.191D-4	9.053D-4	9.915D-4	1.078D-3	1.164D-3	1.250D-3
	1.336D-3	1.423D-3	1.509D-3	1.595D-3	1.681D-3	1.768D-3	1.854D-3
	1.940D-3	2.026D-3	2.112D-3	9.053D-4	9.915D-4	1.078D-3	1.164D-3
	1.250D-3	1.336D-3	1.423D-3	1.509D-3	1.595D-3	1.681D-3	4.742D-4
	5.604D-4	4.455D-4					
E2	2.000D-09	3.000D-09	4.000D-09	5.000D-09	6.000D-09	8.000D-09	
	1.000D-08	1.400D-08	2.000D-08	2.500D-08	3.000D-08	4.000D-08	
	5.000D-08	6.000D-08	8.000D-08	1.000D-07	1.400D-07	2.000D-07	
	2.500D-07	3.000D-07	4.000D-07	5.000D-07	6.000D-07	8.000D-07	
	1.000D-06	1.400D-06	2.000D-06	2.500D-06	3.000D-06	4.000D-06	
	5.000D-06	6.000D-06	8.000D-06	1.000D-05	1.400D-05	2.000D-05	
	2.500D-05	3.000D-05	4.000D-05	5.000D-05	6.000D-05	8.000D-05	
	1.000D-04	1.400D-04	2.000D-04	2.500D-04	3.000D-04	4.000D-04	
	5.000D-04	6.000D-04	8.000D-04	1.000D-03	1.400D-03	2.000D-03	
	2.500D-03	3.000D-03	4.000D-03	5.000D-03	6.000D-03	8.000D-03	
	1.000D-02	1.400D-02	2.000D-02	2.500D-02	3.000D-02	4.000D-02	
	5.000D-02	6.000D-02	8.000D-02	1.000D-01	1.400D-01	2.000D-01	
	2.500D-01	3.000D-01	4.000D-01	5.000D-01	6.000D-01	7.000D-01	
	8.000D-01	9.000D-01	1.000D+00	1.200D+00	1.400D+00	1.600D+00	
	1.800D+00	2.000D+00	2.200D+00	2.400D+00	2.600D+00	2.800D+00	
	3.000D+00	3.200D+00	3.400D+00	3.600D+00	3.800D+00	4.000D+00	
	4.200D+00	4.400D+00	4.600D+00	4.800D+00	5.000D+00	5.500D+00	
	6.000D+00	6.500D+00	7.000D+00	7.500D+00	8.000D+00	8.500D+00	
	9.000D+00	9.500D+00	1.000D+01	1.200D+01	1.400D+01	1.700D+01	

```

EM2  5.000D-01 2.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00 4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 3.000D+00 2.833D+00
      4.500D+00 5.500D+00 3.500D+00 4.500D+00 5.500D+00 6.500D+00
      7.500D+00 8.500D+00 9.500D+00 5.500D+00 6.500D+00 7.500D+00
      8.500D+00 9.500D+00 1.050D+01 1.150D+01 1.250D+01 1.350D+01
      1.450D+01 1.550D+01 1.650D+01 1.750D+01 1.850D+01 1.950D+01
      2.050D+01 2.150D+01 2.250D+01 2.350D+01 2.450D+01 1.050D+01
      1.150D+01 1.250D+01 1.350D+01 1.450D+01 1.550D+01 1.650D+01
      1.750D+01 1.850D+01 1.950D+01 5.500D+00 6.500D+00 5.167D+00
C     GULF RAD. TECH. MATERIAL (1/2/3/4) = (U-TARGET/WATER+FE/AIR/GRAPHITE)
M1    92235      .00223
      92238      .99777
M2    1001      .51536
      8016      .25763
      26000     .22701
M3    7014      .78996
      8016      .21004
M4    6012      1.
CUTN  1.E9 2.0E-9 0.01
NPS   20000
PRDMP 10000
PRINT

```

## Appendix C : 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

Appendix D : Cumulative probability for source angular distribution for  
MCNP calculation

E(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	0.73822	0.83941	0.91234	0.96142	0.98887	1.00000