

J A E R I - M
90-203

遮蔽ベンチマーク解析によるRADHEAT-V4
コードシステムの評価

1990年11月

(編) 坂本 幸夫・内藤 哲孝

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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。
入手の問合せは、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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 核原子力資料サービス

遮蔽ベンチマーク解析による RADHEAT-V4
コードシステムの評価

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部
(編)坂本 幸夫・内藤 傲孝

(1990年10月23日受理)

核燃料施設の遮蔽安全性評価のために計算コード RADHEAT-V4を開発した。この計算コードの計算精度の確認と使用上の問題点を把握するために、18題のベンチマーク問題を選定して解析計算を行った。放射線は中性子とガンマ線であり、問題の種類は透過、ストリーミング及びスカイシャインの3種類である。解析結果は、在来のSnコードANISN, DOT 3.5及びモンテカルロコードMORSEより、おおむね高い精度をしめた。しかし、大きな記憶容量を要すること、I/O回数が多い等使用上の問題があることも判った。

Evaluation of the Computer Code System RADHEAT-V4 by
Analysing Benchmark Problems on Radiation Shielding

(Eds.) Yukio SAKAMOTO and Yoshitaka NAITO

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

(Received October 23, 1990)

A computer code system RADHEAT-V4 has been developed for safety evaluation on radiation shielding of nuclear fuel facilities. To evaluate the performance of the code system, 18 benchmark problems were selected and analysed. Evaluated radiations are neutron and gamma-ray. Benchmark problems consist of penetration, streaming and skyshine. The computed results show more accurate than those by the Sn codes ANISN and DOT3.5 or the Monte Carlo code MORSE. Big core memory and many times I/O are, however, required for RADHEAT-V4.

Keywords: Computer Code, RADHEAT-V4, Radiation Shielding

目 次

1. はじめに	1
2. 遮蔽ベンチマーク問題の解析	3
3. おわりに	305
謝 辞	305

Contents

1. Preface	1
2. Analysis of benchmark problems on radiation shielding	3
3. Conclusion	305
Acknowledgment	305

1. はじめに

核燃料施設の遮蔽安全性評価においては、種々の放射線源を考慮するとともに複雑な幾何形状を取り扱う必要がある。放射線としては中性子線及びガンマ線が評価の対象となる。これらの放射線に対する遮蔽性能を解析するために多くの計算コードが開発されてきた。代表的な計算コードとして米国の ORNL で開発された 1 次元 Sn コード ANISN, 2 次元 Sn コード DOT 及び 3 次元モンテカルロコード MORSE がある。日本原子力研究所（以下原研という）では、これら計算コードを整備するとともに一部機能を追加して、RADHEAT - V 3 を作成した。ORNL で開発された上記計算コードにおいては散乱断面積は Legendre 関数で近似されている。そのため、強い非等方線源を有する体系においてはしばしば負の角度線束が発生する。この点を改善し計算精度を向上させるため、直接角度表示（DAR）法と呼ばれる散乱断面積表示法をもじいて新たに計算コード体系 RADHEAT - V 4 を開発した。

RADHEAT - V 4 は、中性子及びガンマ線輸送計算用多群定数作成機能、1 次元 Sn コード DIAC, 2 次元 Sn コード ESPRIT, 3 次元モンテカルロコード MCACE 等からなっている。これら計算コードの精度を確認するために多くのベンチマーク計算を実施した。ベンチマーク問題を設定するに当たっては、線源の種類及び体系の特徴（放射線透過、ストリーミング、スカイシャイン）を考慮した。

計算コードの評価作業は、原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会 RADHEAT コード評価ワーキング・グループの活動の一環として進めた。ワーキング・グループ員を表 1.1 に示す。作業は昭和 57, 58, 59 の 3 年間に渡り行った。

表 1.1 RADHEAT コード評価ワーキング・グループ構成員

部会名	氏名	機関名
RADHEAT コード評価ワーキング・グループ	岡 芳明	東京大学
"	植木 紘太郎	船舶技術研究所
"	山内 孝道	動力炉・核燃料開発事業団
"	播磨 良子	東京工業大学
"	加藤 和明	高エネルギー物理学研究所
"	川合 将義	日本原子力事業(株)
"	松延 広幸	住友原子力工業(株)
"	山野 直樹	原子燃料工業(株)
"	西村 達雄	三菱原子力工業(株)
"	松本 誠弘	三井造船(株)
"	南多 善	富士通(株)
"	林克 己	(株)日立エンジニアリング
"	金野 正晴	フジタ工業(株)
"	木邨 祐二	(株)東洋エンジニアリング
"	竹村 守雄	川崎重工業(株)
"	芳賀 暢	(財)原子力工学試験センター 原子力安全解析所
"	中沢 昇	日揮(株)
"	谷本 亮二	三菱金属(株)
"	岩男 義明	日立造船(株)
○	内藤 俊孝	原研 核燃料施設安全解析室
"	片倉 純一	原研 核燃料施設安全解析室
"	坂本 幸夫	原研 核燃料施設安全解析室

○: グループリーダー

2. 遮蔽ベンチマーク問題の解析

昭和 57 年度から 59 年度までの 3 年間に解析した遮蔽ベンチマーク問題の一覧を表 2.1 に示す。これらの問題は線源として中性子 (D - T 反応, 核分裂反応, (α , n) 反応及び (γ , n) 反応) 及びガンマ線 (^{16}N , ^{60}Co , ^{137}Cs 及び熱中性子捕獲反応) を用い, 実験体系として単一層透過, 多重層透過, ストリーミング, アルベド及びスカイシャインを含んでおり, 線源及び実験体系で分類すると図 2.1 に示す通りである。本章では, 解析したベンチマーク問題毎の結果と評価検討について述べる。

表 2.1 遮蔽ベンチマーク問題一覧

No. 問題の標題

1. 14 MeV 中性子の球体系透過問題
2. 屈曲ダクトでの中性子ストリーミング問題
3. 高速炉体系を模擬したナトリウム-SUS 層の中性子透過問題
4. ORNL における中性子のナトリウム透過問題
5. 弥生炉での中性子・ガンマ線の鉄透過問題
6. オットハーン号 1 次遮蔽タンク内の中性子透過問題
7. 平板 ^{235}U 線源からの中性子鉄水層透過問題
8. ウランコンバーターからの中性子の鉄透過問題
9. Am-Be 中性子源を用いた球体系透過問題
10. 光中性子源を用いた中性子の鉄透過問題
11. 光中性子源を用いた中性子の黒鉛透過問題
12. 鉄, 鉛及びコンクリート中でのガンマ線の減衰
13. ^{16}N ガンマ線の透過問題
14. 単一層ガンマ線ビルドアップ係数問題
15. 多重層ガンマ線ビルドアップ係数問題
16. ガンマ線のダクトストリーミング問題
17. 固体廃棄物貯蔵庫からのスカイシャイン問題
18. タービン建家からのスカイシャイン問題

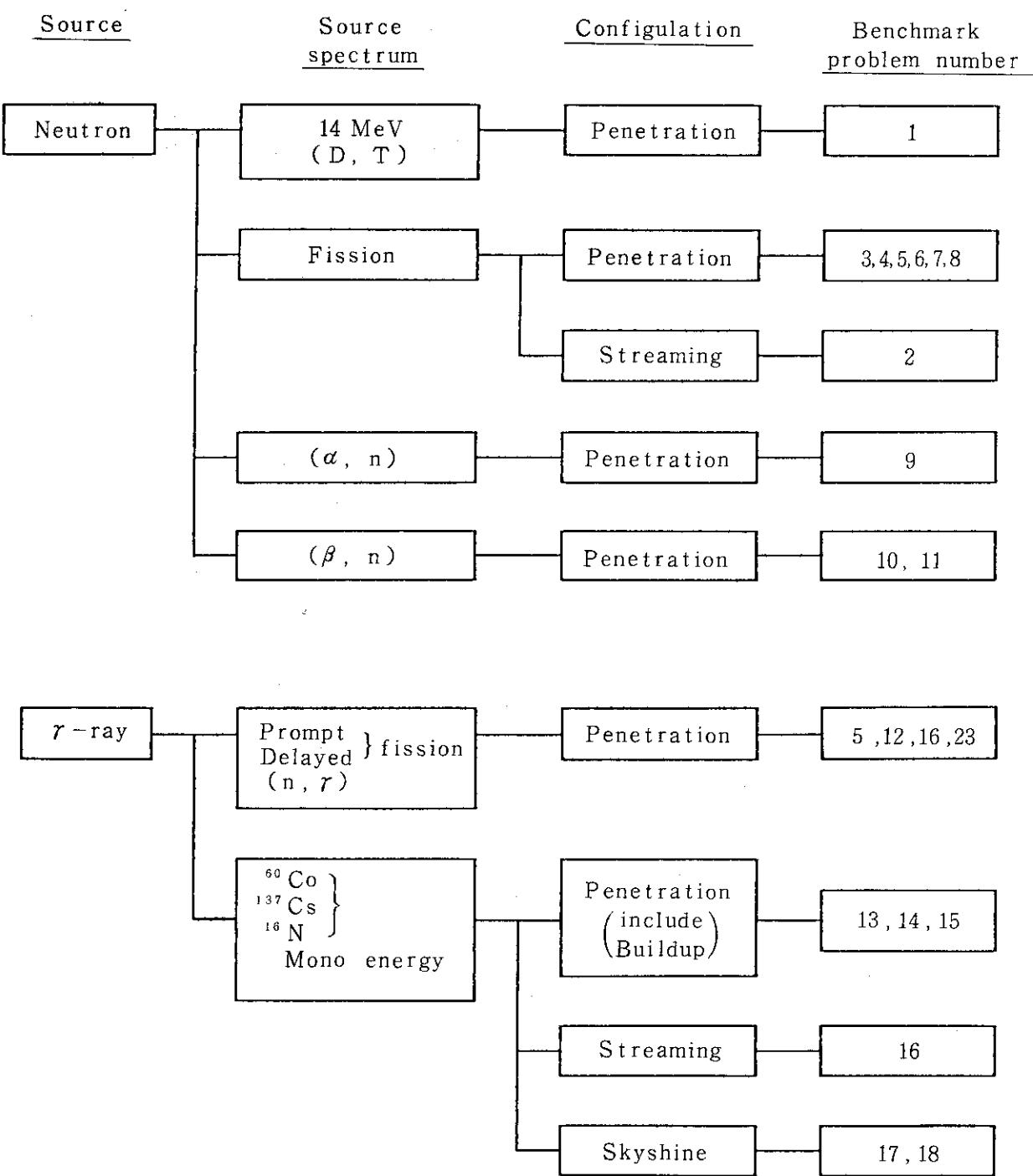


図 2.1 遮蔽ベンチマーク問題の分類

2.1 14 MeV 中性子の球体系透過問題

2.1.1 実験概要

本問題は 400 keV に加速した重陽子ビームをトリチウム・ターゲットに当て、 $T(\alpha, n)^4\text{He}$ 反応で生成される 14 MeV 中性子を、 トリチウム・ターゲットを中心に設置された球状供試体に透過させ、 供試体表面から漏洩する中性子をトリチウム・ターゲットから 801.4 cm 離れ、 且つ重陽子の入射方向に対して 26 度をなす方向に設置された ^6Li グラス検出器で計測した Hansen 達³⁾ の一連の実験に関するものである。この実験体系を図 2.1.1 に示す。

本実験に使用された供試体は下記のとおりである。

供試体	半径 (cm)	m. f. P
i) カーボン	10.16	1.3
ii) 鉄	4.46	0.9
iii) 鉄	13.41	2.9
iv) コンクリート	21.0	2.0
v) コンクリート	35.5	3.8

上記供試体の断面図を図 2.1.2 ~ 図 2.1.6 に示す。次にこの実験は高エネルギー中性子 (2 ~ 15 MeV) と、低エネルギー中性子 (数 keV ~ 1 MeV) とのスペクトル測定に分れており、今回のベンチマーク解析の対象とした低エネルギースペクトルの測定では、入射重陽子ビームのパルス幅として、 5, 10, 100, 250 (n sec) の 4 種類が使用されており、 上記供試体との組合せにより全部で 10 ケースの測定が行われた。

次に、 トリチウム・ターゲットから放出される中性子のエネルギーは、 運動学的には入射重陽子のエネルギーと中性子の放出角とが決まれば決定されるが、 実際の、 特に厚いターゲットでは、 ターゲット中で重陽子のエネルギーが減衰する為、 (α, n) 反応を起す実効的な重陽子のエネルギーは入射エネルギーよりも大幅に低くなる。上記の実験では、 重陽子の入射エネルギー 400 keV に対して、 (α, n) 反応を起した重陽子の most probable energy は 200 keV であったと報告されており、 また、 これに対応した中性子のエネルギーと強度の角度依存性が表で与えられている。これを表 2.1.1 に示す。

測定結果は、 トリチウム・ターゲットから中性子が 1 個放出された時に ^6Li グラス検出器で計測する中性子数 (count rate / source neutron) として、 各エネルギー毎に与えられている。また、 この計数率を中性子の飛行時間で積分した値も併記されている。

2.1.2 計算概要

(1) 計算体系

図 2.1.1 に示した実験体系に基づいて計算体系を決定した。前節で述べたように、 測定では ターゲットで生成された中性子 1 個当り、 ^6Li グラス検出器に入る中性子のスペクトルが求められているので、 この測定値に $\frac{4 \pi R^2}{A}$ ($R = 801\text{ cm}$ …… ターゲットから検出器迄の距離、 $A = 20.3\text{ cm}^2$ …… 検出器の面積) を乗じて検出器を含む球面から漏洩する中性子スペクトルと

し、これを計算値と比較する事にした。

次に球状供試体に関しては、1次元解析では、ターゲット後部の供試体切欠きを無視した球形状にモデル化し、3次元解析では、Combinatorial geometry 入力により、実体系そのままの形状を入力した。

(2) 線源条件

トリチウム・ターゲットから放出される中性子のエネルギーと線源強度に関しては、3次元解析では表 3.1.1 に示した分布をその儘 source routine に入れた。しかし、1次元解析ではこの分布を入力する事ができないので、測定方向 26 度に対応して、エネルギー 15 MeV の等方線源とし、その相対強度は 0.99 とした。

(3) エネルギー群構造

低エネルギー・スペクトル ($1 \text{ keV} \sim 1 \text{ MeV}$) を解析するための群定数を作成するに当って、そのエネルギー群構造は下記のような 110 群とした。即ち、 14.918 MeV から 1 MeV までは GAM-II タイプの 25 群とし、 1 MeV 以下は GAM-III 群構造を更に等レザージで 2 倍に細分割して、 $1 \text{ MeV} \sim 1 \text{ keV}$ の領域を 82 群、 $1 \text{ keV} \sim 660.57 \text{ eV}$ を 3 群に分割した計 110 群の群構造とした。この群構造を表 2.1.2 に示す。

(4) 無限希釈断面積の作成

本解析に使用する Al , C , Ca , H , Fe , K , Mg , O , Na , Si , Mn の 11 元素の無限希釈断面積は FAIR CROSS step 1 を用いて作成した。

(5) 巨視的断面積の作成

カーボン、鉄及びコンクリートの供試体用巨視的群定数は FAIR CROSS step 2 を用いて作成した。この step 2 では、16 角度及び 32 角度の角度依存性を考慮して群定数を作成したが、後述する解析においては 32 角度の群定数を使用した。

(6) ルジャンドル展開断面積の作成

カーボン、鉄及び鉄の供試体用 P_s 展開断面積は、FAIR CROSS step 3 を用いて、ANISN-JR 用及び MORSE-CG 用に夫々の format で作成した。

2.1.3 計算値と測定値の比較

今回のベンチマーク解析において、1次元解析には DIAC コード、3次元解析には MCACE 及び MORSE の 2 コードが使用された。前述した Hansen 達の実験ではカーボン、鉄及びコンクリートの球状供試体を用いて 10 ケースの測定がなされているが、そのすべてについて解析を行ってはいないので、1次元及び 3 次元解析を実施したケースと、測定との対応表を表 2.1.3 に示す。

(1) 1次元解析の結果

1次元解析はカーボン、鉄（2 ケース）、コンクリート（2 ケース）の計 5 ケースについて実施されたが、その結果と測定値との比較について述べる。

(i) カーボン（図 2.1.7）

図 2.1.7 に見られる測定値は、他の供試体と比較すると、データ点数が少なく、且つ、 100 keV 以下の領域で大きくばらついている。この理由は、カーボン供試体の半径が 10.16 cm

(1.3 mfp) と比較的小さいため, keV 領域迄減速される中性子数が他の供試体と比べて少く, 従って, 統計が悪いためと推測される。そのため, 解析結果との厳密な比較は難しいが, 計算値は全領域に亘って幾分低目の値を示している。

(ii) 鉄 (図 2.1.8 及び図 2.1.9)

ここで解析した鉄供試体 2 ケースはいずれも半径 13.41 cm (2.9 mfp) のものであるが, 図 2.1.8 は入射重陽子のパルス幅が 250 n sec, 図 2.1.9 は 5 n sec の測定によるものである。両図共, 計算値は可成り良く測定結果を再現している。特に, 27 keV の共鳴による谷の構造は良い一致を示している。また, 100 keV ~ 1 MeV の領域における計算値の信頼性は図 2.1.9 にプロットされた測定データと比較する事によって極めて良い事が判る。

(iii) コンクリート (図 2.1.10 及び図 2.1.11)

コンクリート供試体 2 ケースに関しても鉄の場合と同様に, 半径はいずれも 21.0 cm (2.0 mfp) であるが, 図 2.1.12 はパルス幅 250 n sec, 図 2.1.10 は 100 n sec による測定値と比較したものである。図 2.1.10において, 100 keV ~ 1 MeV の領域で計算値と測定値とは良い一致を示しているが, 100 keV 以下の領域では計算値は測定値よりも 25 ~ 30 % 程高い値を示している。図 2.1.10においてもこの傾向はほとんど同じであるが, 後者の測定の方がデータ点数が多いため, 100 keV 以下における系統的なずれは平均すると幾分小さくなるように見える。100 keV ~ 1 MeV における計算値と測定値の一致の良さも, 後者の図の方が一層明白である。

(2) 3 次元解析の結果

3 次元解析は MCACE コード及び MORSE コードを用いて鉄供試体について 5 ケース, コンクリート供試体について 2 ケース, 計 7 ケースに対して実施された。

(i) 鉄 (半径 : 4.46 cm) (図 2.1.13 ~ 図 2.1.14)

図 2.1.12 ~ 図 2.1.14 はいずれも半径 4.46 cm (0.9 mfp) の鉄供試体についての計算値と測定値の比較であるが, 図 2.1.12 はパルス幅 250 n sec, 図 2.1.13 及び図 2.1.14 は 10 n sec の測定値をプロットしたものである。図 2.1.13 と図 2.1.14 にプロットされた測定値は同じパルス幅によるものであるが, 中性子スペクトルの下限が異なっており, 図 2.1.13 には 54.359 keV までのスペクトル, 図 2.1.14 には 21.031 keV までのスペクトルがプロットされている。計算値は両コード共, 25 万 history の結果であり, F. S. D. は 100 keV までは 0.1 以下であるが, 1 ~ 100 keV では 0.2 ~ 0.5 程度であり, ばらつきは大きい。測定値の方も 3 図共, 共通して低エネルギー側に大きなばらつきが見られる。計算値は測定値のばらつきの平均値を示しているように見えるが, 必ずしも良い一致とは云えない。特に, 1 MeV 近傍の高エネルギー側では可成りの過大評価になっている。測定値と計算値の山が一致しないのは, タイムキャリブレーションに問題があるためと推測される。

(ii) 鉄 (半径 : 13.41 cm) (図 2.1.15 及び図 2.1.16)

図 2.1.15 及び図 2.1.16 にプロットされている測定値は 1 次元解析の比較図, 図 2.1.8 及び図 2.1.9 に用いた測定値と夫々同データであり, 図 2.1.15 に 250 n sec, 図 2.1.16 に 5 n sec のパルス幅による測定値がプロットされている。計算値は両コード共, 10 万 history の結果が示されている。F. S. D. は数点の中性子束のはね上がりを除けば, 100 keV 以上で

0.1 以下, 1 ~ 100 keV で 0.1 ~ 0.3 程度である。両図共, 計算値と測定値は比較的良い一致を示しており, 特に分解能の良い測定値をプロットした図 3.2.18 で比較すると, 27 keV 近傍の共鳴構造は 40 % 以内の精度で再現されている。100 keV ~ 1 MeV 領域の構造も計算値が 20 ~ 30 % 高目ではあるが, 良く再現されている。

(iii) コンクリート (半径 : 21 cm) (図 2.1.17 及び図 2.1.18)

このコンクリート供試体も亦, 前述した 2.9 mfp 鉄供試体と同様に, 1 次元解析に用いられたものであり, 図 2.1.17 にはパルス幅 250 n sec, 図 2.1.18 には 100 n sec による測定結果がプロットされている。計算値は両コード共, 10 万 history の結果が示されており, F.S.D. は数点を除き, 0.05 ~ 0.1 の範囲にある。また, 数点に亘って中性子束のはね上がりが見られる。両図共, 全領域に亘って計算値の方が測定値よりも 50 ~ 60 % 高く, 顕著な系統的ずれが見られる。このずれの原因として, コンクリートの含水量等の問題が考えられるが, 果たしてそうであるか否かは未だ判っていない。

(3) 1 次元解析と 3 次元解析の比較

前述したように鉄 (2.9 mfp) 供試体及びコンクリート (2.0 mfp) 供試体各 2 ケースについては, 1 次元解析と 3 次元解析とを行ったので, 測定値に対しては両者の比較を直接試みる事ができる。これについて以下に述べる。

(i) 鉄 (半径 : 13.41 cm) (図 2.1.19 及び図 2.1.20)

前と同様に図 2.1.19 がパルス幅 250 n sec, 図 2.1.20 が 5 n sec による測定データをプロットした図である。この両図を一見して判るように, MCACE コードによる 3 次元解析の結果は, DIAC コードによる 1 次元解析の結果よりも 10 ~ 30 % 高く, 全領域に亘って測定データとの一致が悪い。また, MCACE コードによる計算結果には 1 次元解析には現れない中性子束の異常なはね上がりが数ヶ所に亘って現れている。

(ii) コンクリート (半径 : 21.0 cm) (図 2.1.21 及び図 2.1.22)

図 2.1.21 がパルス幅 250 n sec, 図 2.1.22 が 100 n sec による測定値をプロットした図である。コンクリートの場合も鉄の場合と同様に, 両図とも 1 次元解析の結果の方が測定値に近い。図 2.1.22 で比較すると, MCACE コードによる計算値は DIAC コードによる値よりも 30 % 程高い値を示す。また, 鉄の場合と同様に, コンクリートについても数ヶ所に中性子束のはね上がりが見られるが, この場合鉄程顕著ではない。

2.1.4 評価及び考案

全節において, 14 MeV 中性子の球状供試体透過スペクトルの測定データと解析結果との比較及び 1 次元解析と 3 次元解析の結果の比較について述べたが, 此等の比較から判るように, 計算値と測定値との間にはある程度の不一致が見られるケースもあるが, 測定値と著しく異なるケースは一つもなかった。これは RADHEAT - V4 システムが一応実用に耐え得るものである事を実証したと見てよいであろう。しかし問題がない訳ではない。

1 次元解析と 3 次元解析の結果を比較した 4 ケースについて極めて特徴的な事は, 何れのケースにおいても 1 次元解析の方が測定値を良く再現している事である。これは一体どうした訳であろうか? 1 次元解析では中性子のエネルギー及び強度の角度依存性を無視し等方とし, 且つ球

状供試体の切欠き部分も無視しているのに対し、3次元解析では此等の条件を全部考慮した体系になっている。にも拘らず、3次元解析の結果の方が悪いと云うのでは3次元計算をする意味がない。今回の解析ではこの原因を追求する所まで到っていないが、この問題は出来るだけ早い時期に解明しておく必要がある。

この原因を究明するための追試問題として二つの計算を提案したい。その第1は、3次元計算を1次元計算と全く同じ条件で実証し、即ち、中性子スペクトル及び強度は等方とし、且つ供試体は切欠きの無い完全な球として解析し、その結果を比較して見る事である。

第2の提案は、今回の解析のように測定データと計算値とを $4\pi R^2 j$ の形に換算して比較するのではなく、加工されていない測定値と直接比較する事である。即ち、トリチウム・ターゲットから26度方向に 801.4 cm 離れた ^6Li ガラス検出器の位置で、検出器の面積 20.3 cm² に入射する中性子のスペクトル及び強度を1次元及び3次元コードで求め、測定値と比較して見る事である。この2種類の計算だけからでも何らかの手掛かりが得られるかも知れない。

残る問題としては3次元計算に見られる中性子束の異常なはね上がりがある。これを生ずる原因は大体判っているようであるから、あとは技術的な問題として異常な中性子束を消す努力を望みたい。

参考文献

- (1) C. Wong, J.D. Anderson, P. Brown, L.F. Hansen, J.D. Kammerdiener, C. Logan, and B. Pohl: "Livermore Pulsed Sphere Program: Low-Energy Measurements on Carbon, Iron, and Concrete", UCRL-51144, Rev. 1 and Addendum (1973).

表 2.1.1 中性子源の角度分布

Angle (deg)	Energy (MeV)	Intensity	Angle (deg)	Energy (MeV)	Intensity
0	15.11	1.00	95	14.04	0.93
5	15.10	1.00	100	13.95	0.92
10	15.09	1.00	105	13.87	0.92
15	15.07	1.00	110	13.80	0.91
20	15.04	1.00	115	13.72	0.91
25	15.01	0.99	120	13.65	0.90
30	14.97	0.99	125	13.58	0.90
35	14.92	0.99	130	13.52	0.90
40	14.87	0.98	135	13.46	0.89
45	14.81	0.98	140	13.41	0.89
50	14.75	0.98	145	13.36	0.88
55	14.68	0.97	150	13.32	0.88
60	14.60	0.97	155	13.28	0.88
65	14.53	0.96	160	13.25	0.87
70	14.45	0.96	165	13.23	0.88
75	14.37	0.95	170	13.21	0.87
80	14.29	0.95	175	13.20	0.87
85	14.20	0.94	180	13.20	0.87
90	14.12	0.94			

表 2.1.2 エネルギー群構造

--- NEUTRON GROUP ---

GROUP	ENERGY	RANGE	GROUP	ENERGY	RANGE
1	1.4918E+07	1.3494E+07	51	2.8725E+05	2.7324E+05
2	1.3494E+07	1.2214E+07	52	2.7324E+05	2.5991E+05
3	1.2214E+07	1.0000E+07	53	2.5991E+05	2.4724E+05
4	1.0000E+07	9.0484E+06	54	2.4724E+05	2.3518E+05
5	9.0484E+06	8.1873E+06	55	2.3518E+05	2.2371E+05
6	8.1873E+06	7.4082E+06	56	2.2371E+05	2.1280E+05
7	7.4082E+06	6.7032E+06	57	2.1280E+05	2.0242E+05
8	6.7032E+06	6.0653E+06	58	2.0242E+05	1.9255E+05
9	6.0653E+06	5.4881E+06	59	1.9255E+05	1.8316E+05
10	5.4881E+06	4.9659E+06	60	1.8316E+05	1.7422E+05
11	4.9659E+06	4.4933E+06	61	1.7422E+05	1.6573E+05
12	4.4933E+06	4.0657E+06	62	1.6573E+05	1.5764E+05
13	4.0657E+06	3.6788E+06	63	1.5764E+05	1.4996E+05
14	3.6788E+06	3.3287E+06	64	1.4996E+05	1.4264E+05
15	3.3287E+06	3.0119E+06	65	1.4264E+05	1.3569E+05
16	3.0119E+06	2.7253E+06	66	1.3569E+05	1.2907E+05
17	2.7253E+06	2.4660E+06	67	1.2907E+05	1.2277E+05
18	2.4660E+06	2.2313E+06	68	1.2277E+05	1.1679E+05
19	2.2313E+06	2.0190E+06	69	1.1679E+05	1.1109E+05
20	2.0190E+06	1.8268E+06	70	1.1109E+05	1.0567E+05
21	1.8268E+06	1.4957E+06	71	1.0567E+05	8.6517E+04
22	1.4957E+06	1.3534E+06	72	8.6517E+04	7.6351E+04
23	1.3534E+06	1.2246E+06	73	7.6351E+04	6.7379E+04
24	1.2246E+06	1.1080E+06	74	6.7379E+04	5.9462E+04
25	1.1080E+06	1.0026E+06	75	5.9462E+04	5.2475E+04
26	1.0026E+06	9.5369E+05	76	5.2475E+04	4.6309E+04
27	9.5369E+05	9.0718E+05	77	4.6309E+04	4.0868E+04
28	9.0718E+05	8.6294E+05	78	4.0868E+04	3.6066E+04
29	8.6294E+05	8.2085E+05	79	3.6066E+04	3.1828E+04
30	8.2085E+05	7.8082E+05	80	3.1828E+04	2.8088E+04
31	7.8082E+05	7.4274E+05	81	2.8088E+04	2.4788E+04
32	7.4274E+05	7.0651E+05	82	2.4788E+04	2.1875E+04
33	7.0651E+05	6.7206E+05	83	2.1875E+04	1.9305E+04
34	6.7206E+05	6.3928E+05	84	1.9305E+04	1.7036E+04
35	6.3928E+05	6.0810E+05	85	1.7036E+04	1.5034E+04
36	6.0810E+05	5.8744E+05	86	1.5034E+04	1.3268E+04
37	5.8744E+05	5.5023E+05	87	1.3268E+04	1.1709E+04
38	5.5023E+05	5.2340E+05	88	1.1709E+04	1.0333E+04
39	5.2340E+05	4.9787E+05	89	1.0333E+04	9.1188E+03
40	4.9787E+05	4.7359E+05	90	9.1188E+03	8.0473E+03
41	4.7359E+05	4.5049E+05	91	8.0473E+03	7.1017E+03
42	4.5049E+05	4.2852E+05	92	7.1017E+03	6.2673E+03
43	4.2852E+05	4.0762E+05	93	6.2673E+03	5.5308E+03
44	4.0762E+05	3.8774E+05	94	5.5308E+03	4.8810E+03
45	3.8774E+05	3.6883E+05	95	4.8810E+03	4.3074E+03
46	3.6883E+05	3.5084E+05	96	4.3074E+03	3.8013E+03
47	3.5084E+05	3.3373E+05	97	3.8013E+03	3.3546E+03
48	3.3373E+05	3.1746E+05	98	3.3546E+03	2.9604E+03
49	3.1746E+05	3.0197E+05	99	2.9604E+03	2.6126E+03
50	3.0197E+05	2.8725E+05	100	2.6126E+03	2.3056E+03

表 2.1.2 (続き)

--- NEUTRON GROUP ---

GROUP	ENERGY	RANGE
101	2.3056E+03	2.0347E+03
102	2.0347E+03	1.7956E+03
103	1.7956E+03	1.5846E+03
104	1.5846E+03	1.3984E+03
105	1.3984E+03	1.2341E+03
106	1.2341E+03	1.0891E+03
107	1.0891E+03	9.6112E+02
108	9.6112E+02	8.4818E+02
109	8.4818E+02	7.4852E+02
110	7.4852E+02	6.6057E+02

表2.1.3 測定と解析の対応表

No.	供試体	半径(cm)	MFP	Burst (n sec)	E _{max} (MeV)	E _{min} (keV)	D I A C	MCACCE & MORSE	1次元と 3次元の比較
1	Carbon	10.16	1.3	100	15.283	2.5161	○		
2	Iron	4.46	0.9	250	24.214	5.4055		○	
3	"	"	"	10	515.94	54.359		○	
4	"	"	"	10	"	21.031	○		
5	"	13.41	2.9	250	24.214	6.1295	○	○	
6	"	"	"	5	769.60	10.092	○	○	
7	Concrete	21.0	2.0	250	2.396	2.7120	○	○	
8	"	"	"	100	15.283	2.5161	○	○	
9	"	35.5	3.8	"	"	2.3903			
10	"	"	"	"	"	"			

○印は解析を実施したケース

解析は 14.918 MeV ~ 0.66057 keV の領域を 110 群として実施されている。

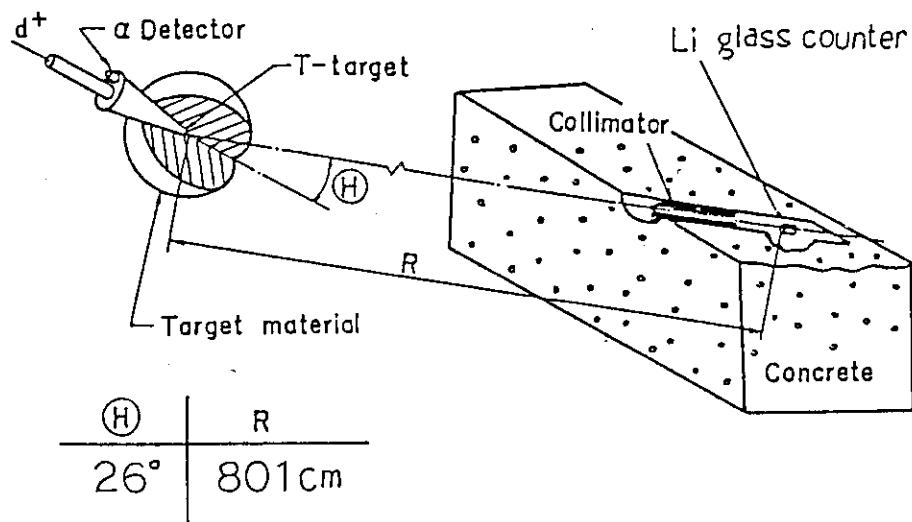


図 2.1.1 測定配置図

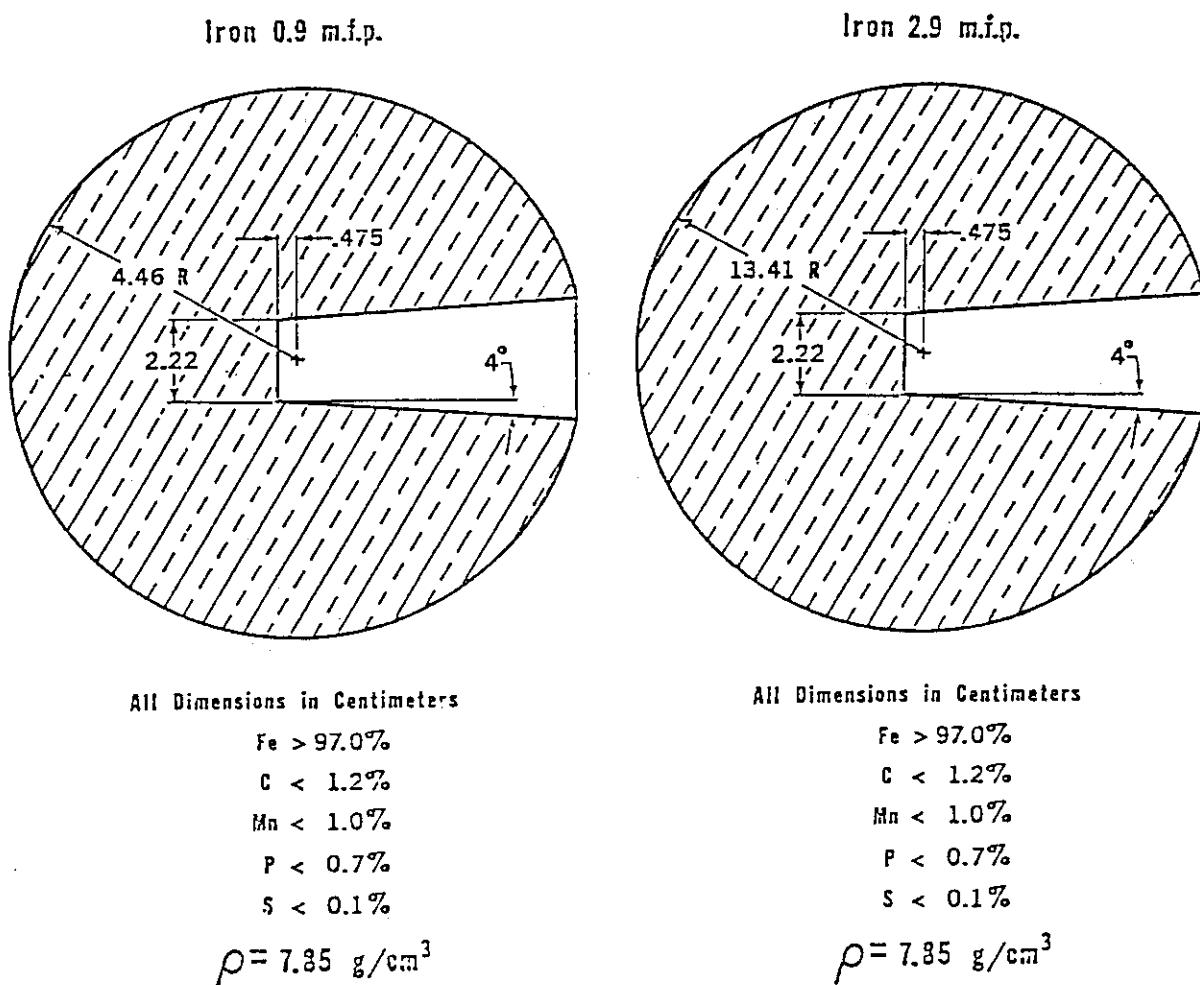


図 2.1.2 鉄 0.9 mfp の供試体

図 2.1.3 鉄 2.9 mfp の供試体

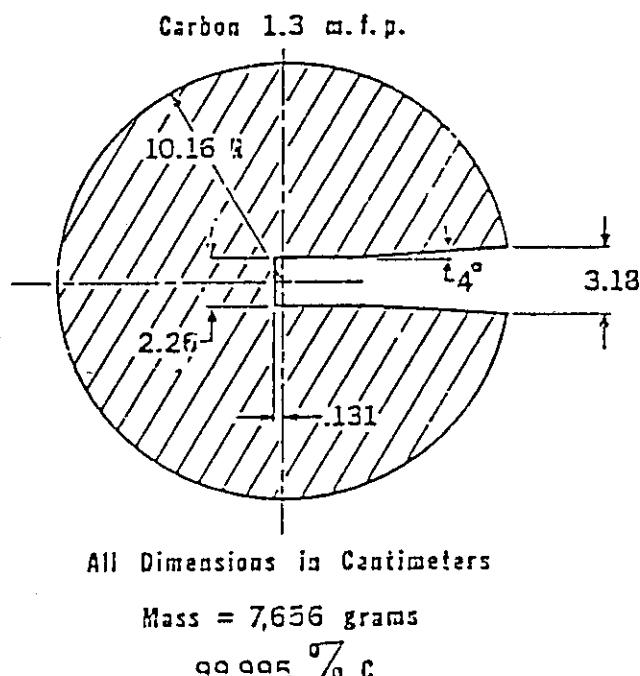


図 2.1.4 炭素 1.3 mfp の供試体

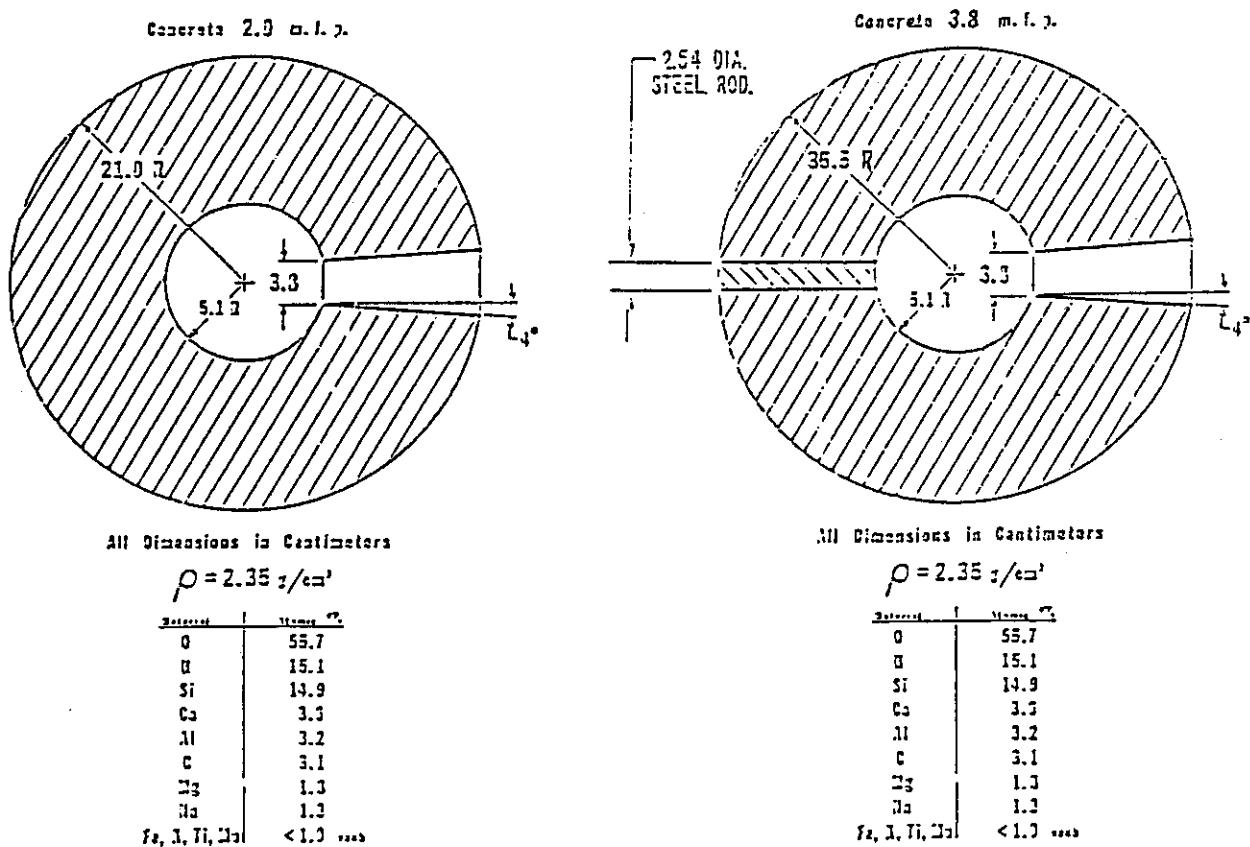


図 2.1.5 コンクリート 2 mfp の供試体

図 2.1.6 コンクリート 3.8 mfp の供試体

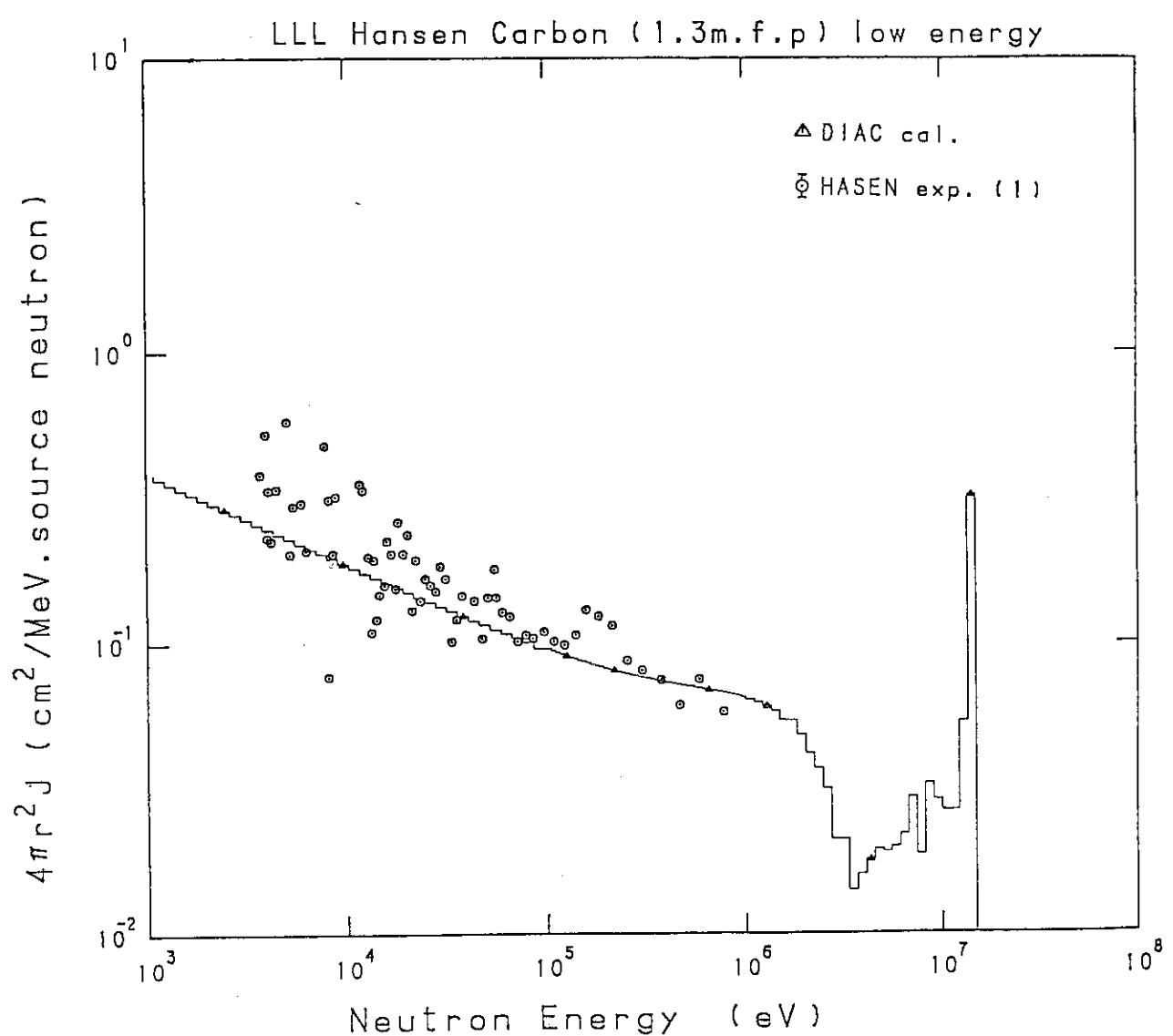


図 2.1.7 1.3 mfp の炭素へ重陽子を入射した実験の測定値と計算値の比較

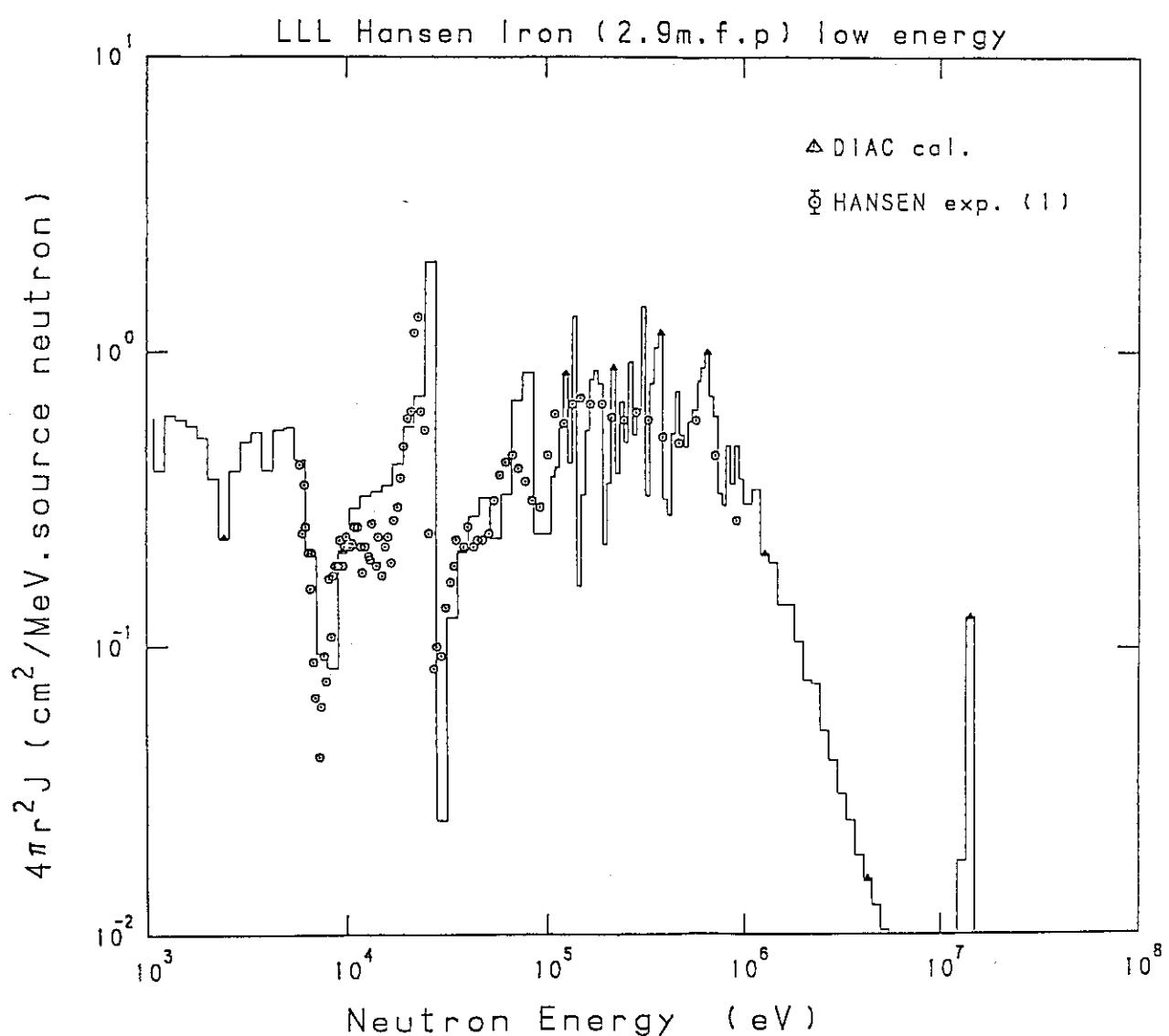


図 2.1.8 2.9 mfp の鉄へパルス巾 250 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と計算値との比較

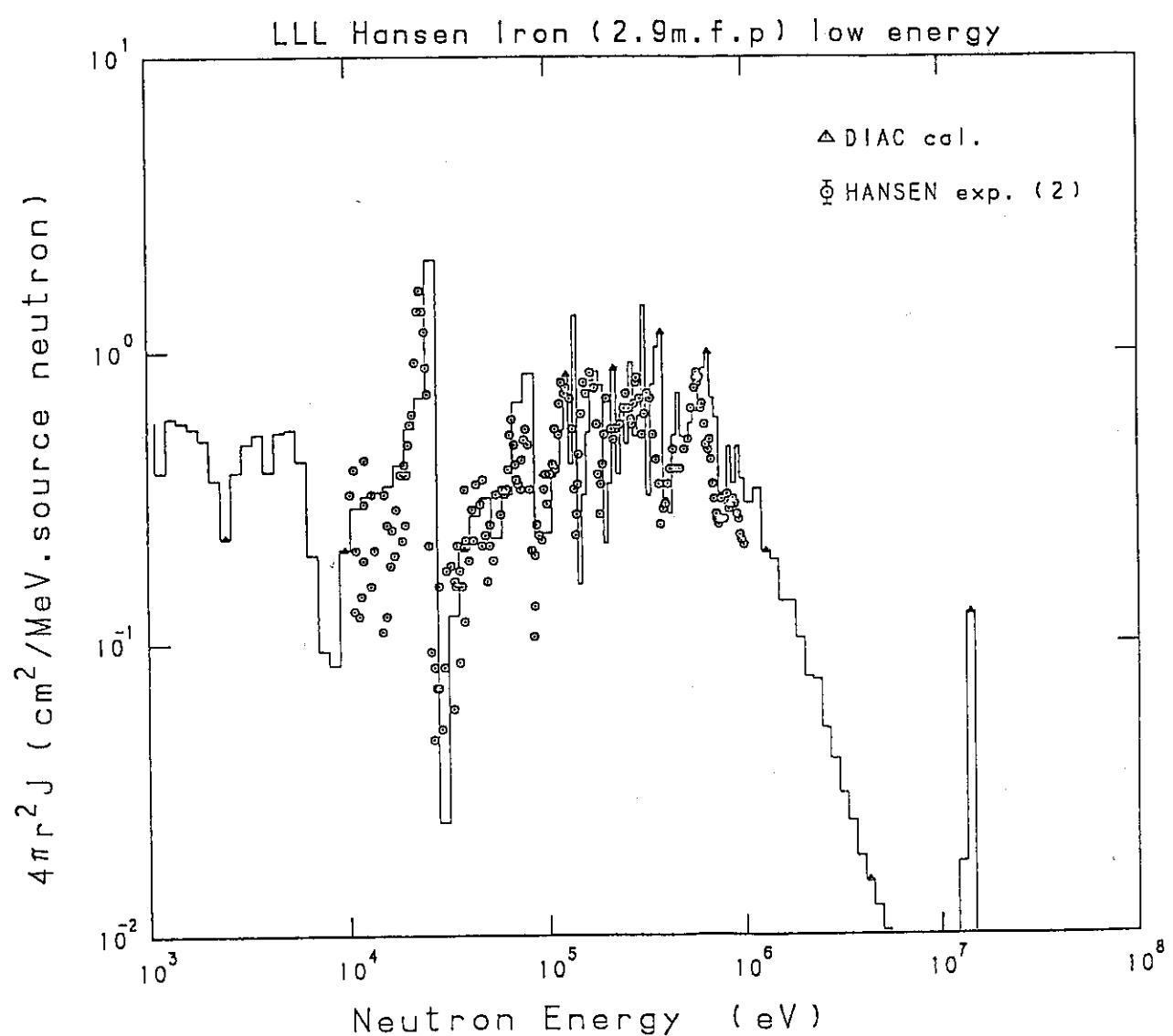


図 2.1.9 2.9 mfp の鉄へパルス巾 5 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と計算値との比較

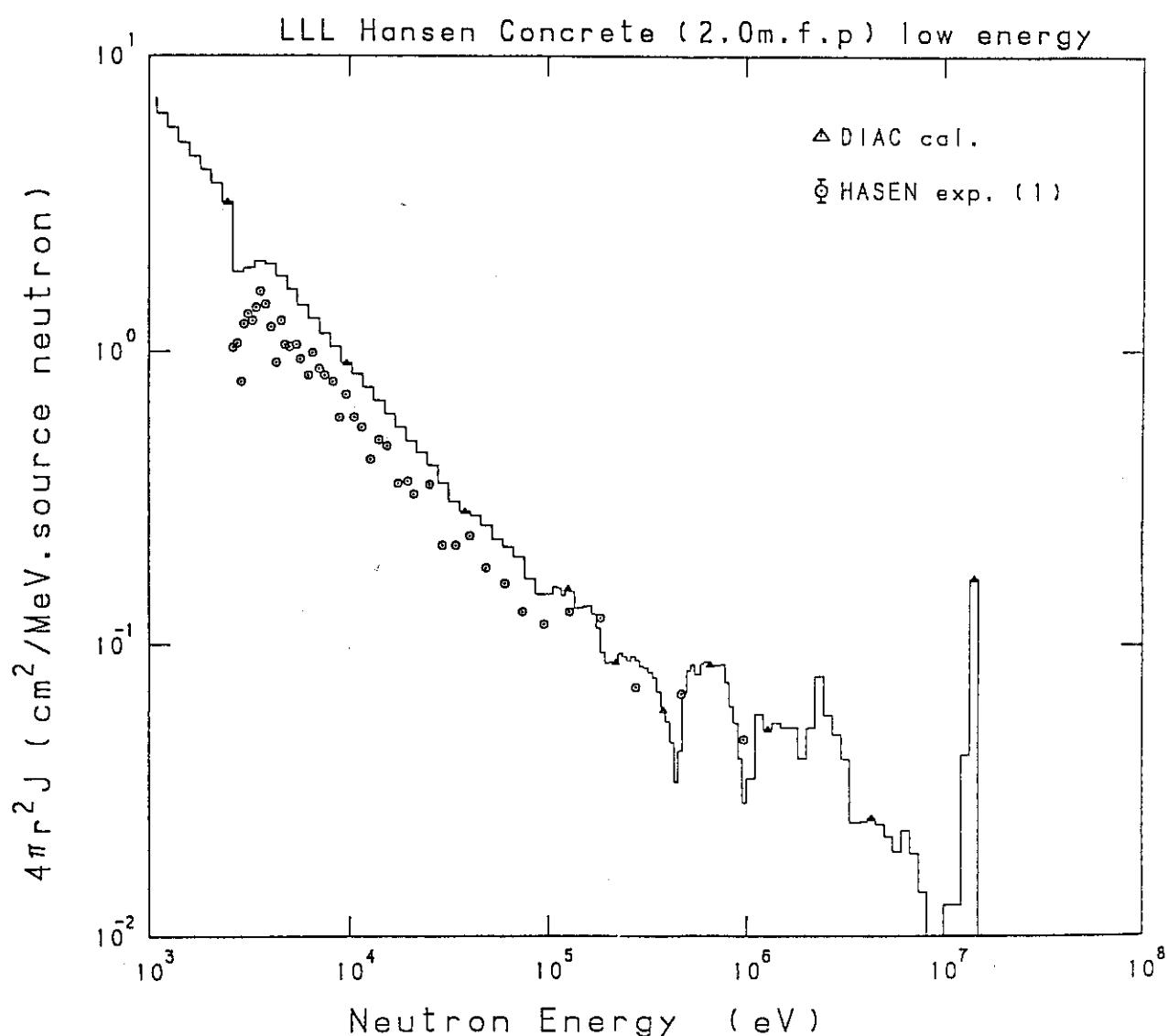


図 2.1.10 2.0 mfp のコンクリートへパルス巾 250 nsec の重陽子を入射した
実験の測定結果と計算値との比較

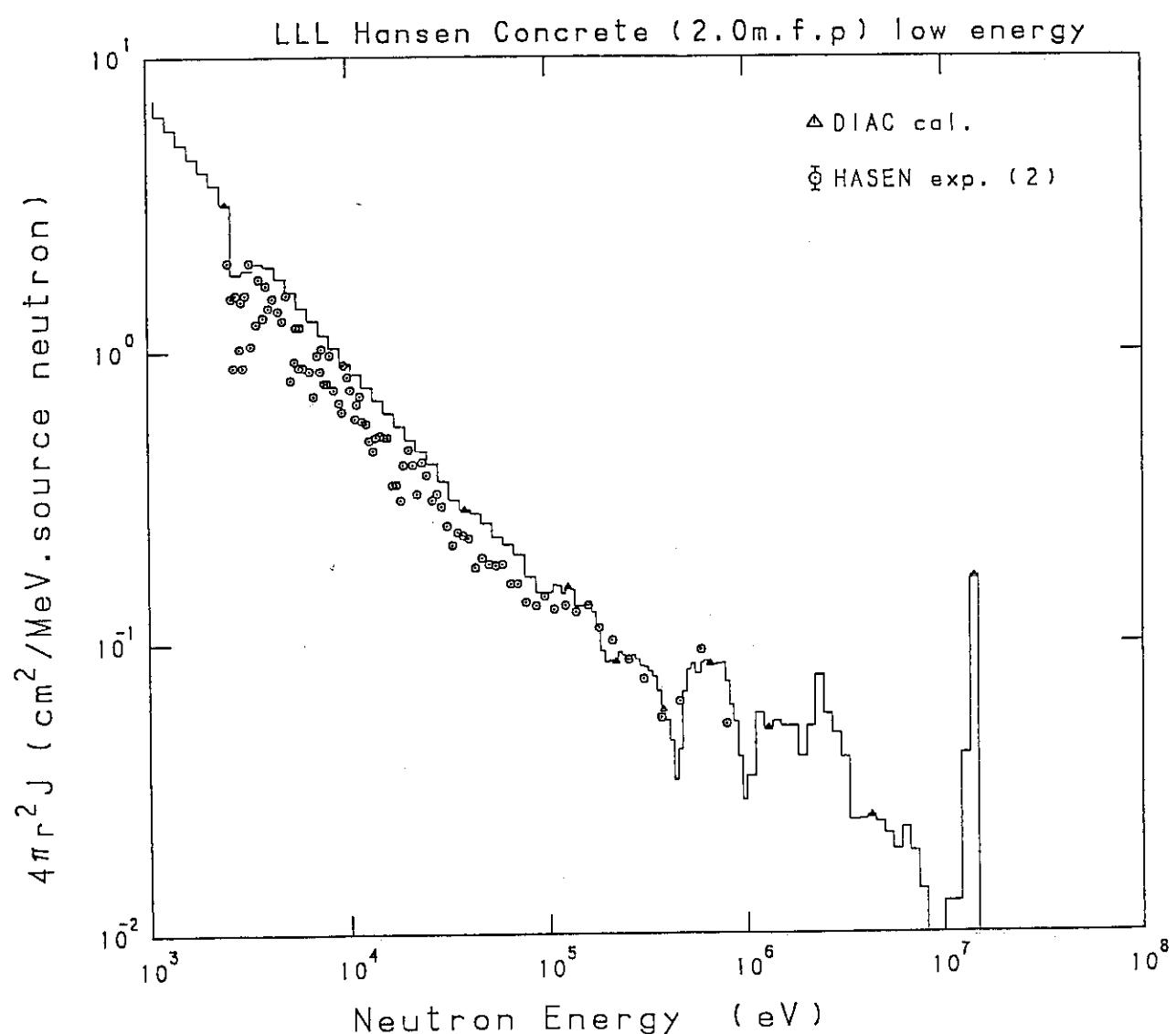


図 2.1.11 2.0 mfp のコンクリートへパルス巾 100 nsec の重陽子を入射した
実験の測定結果と計算値との比較

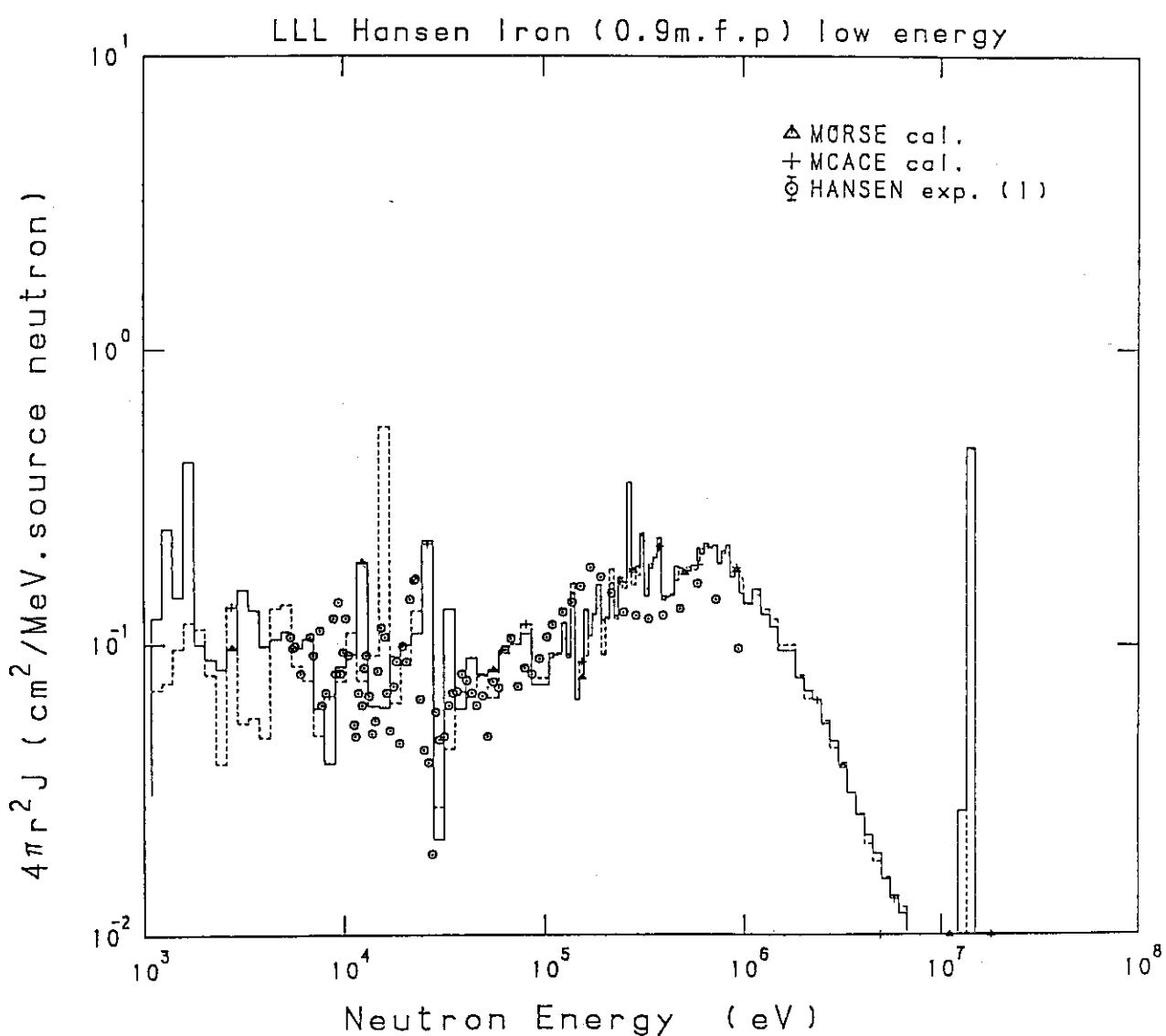


図 2.1.12 0.9 mfp の鉄へパルス巾 250 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と計算値との比較

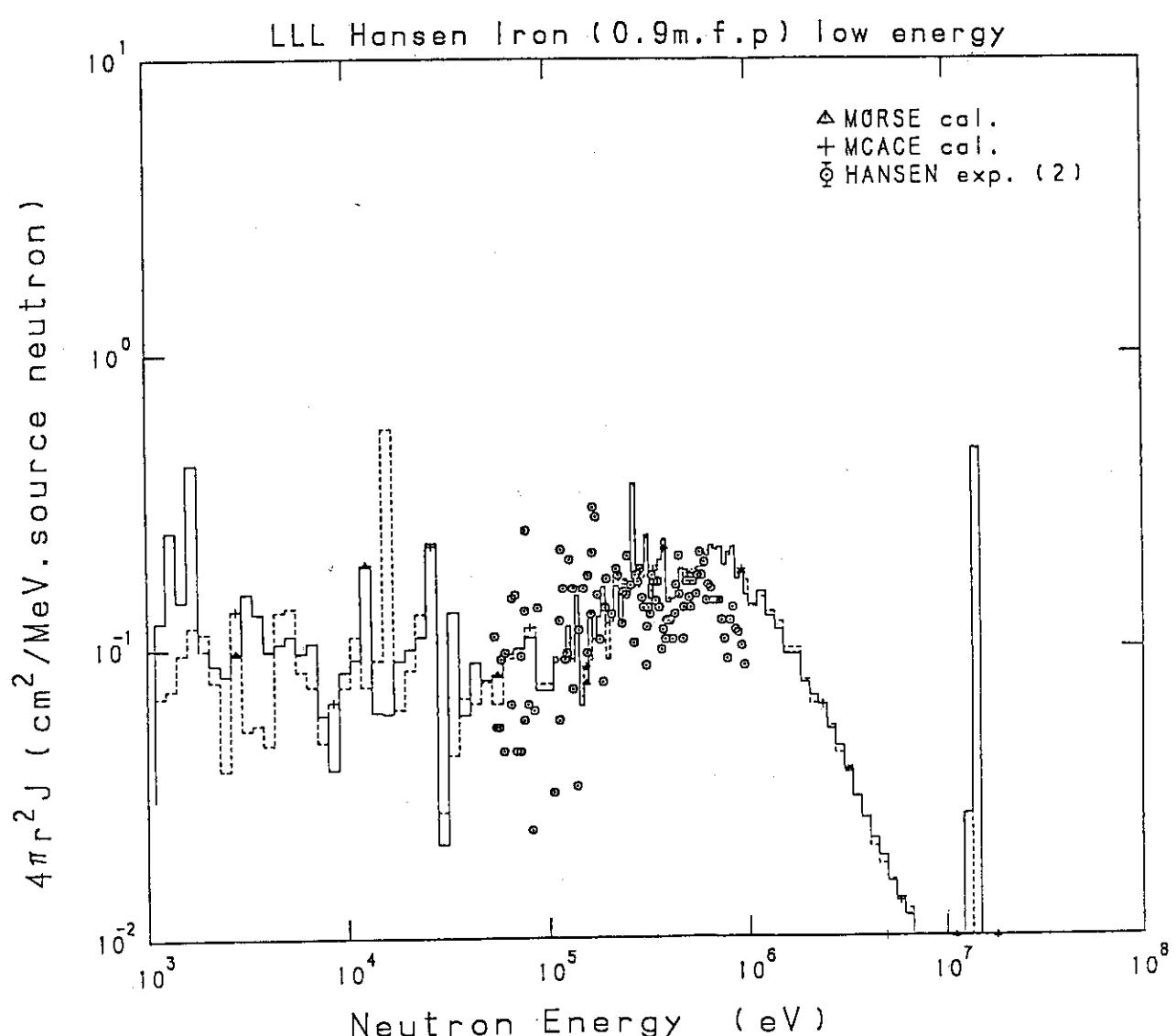


図 2.1.13 0.9 mfp の鉄へパルス巾 10 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と
計算値の比較；54.359 keVまでのスペクトル

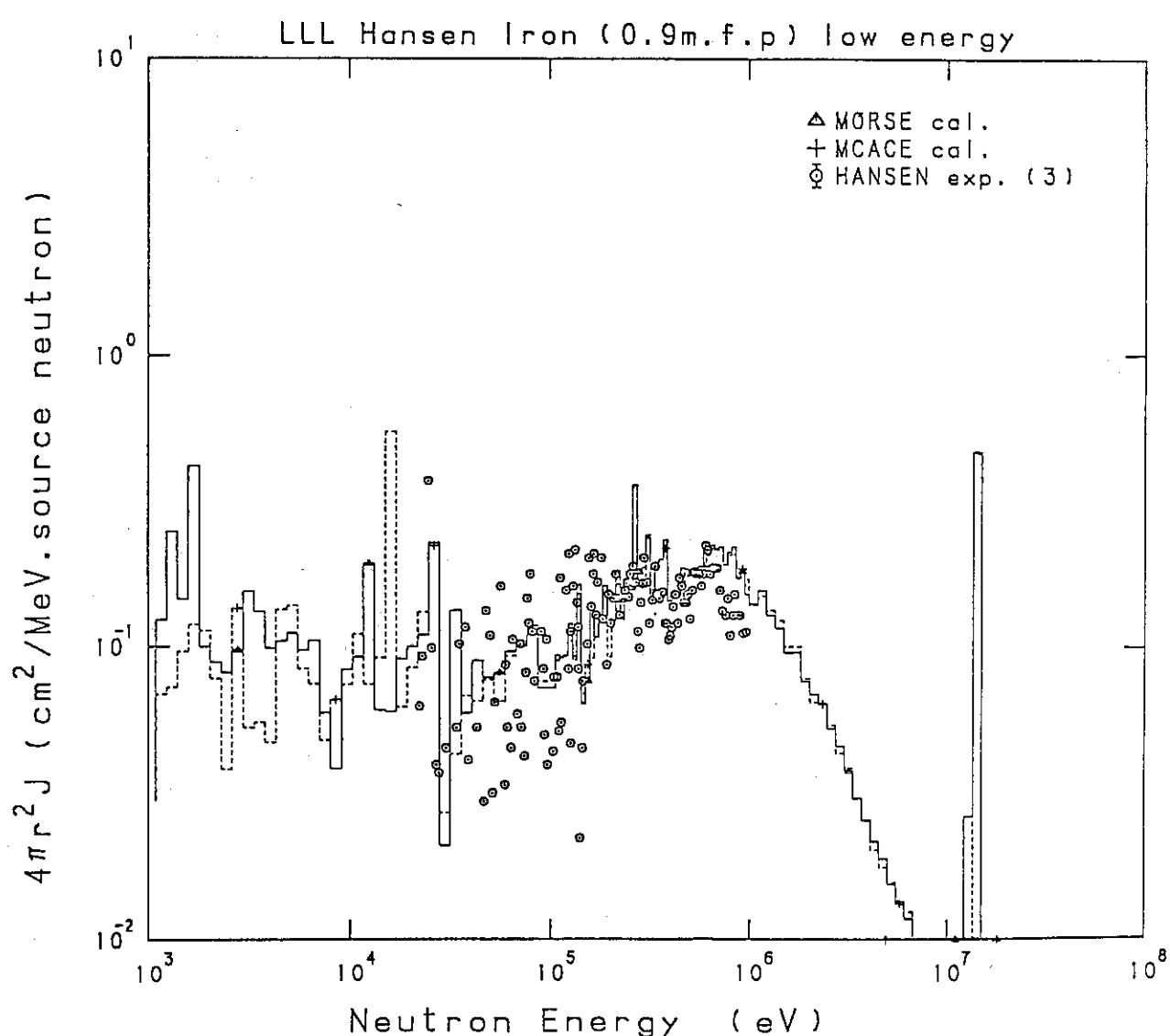


図 2.1.14 0.9 mfp の鉄へパルス巾 10 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と
計算値の比較；21.031 keVまでのスペクトル

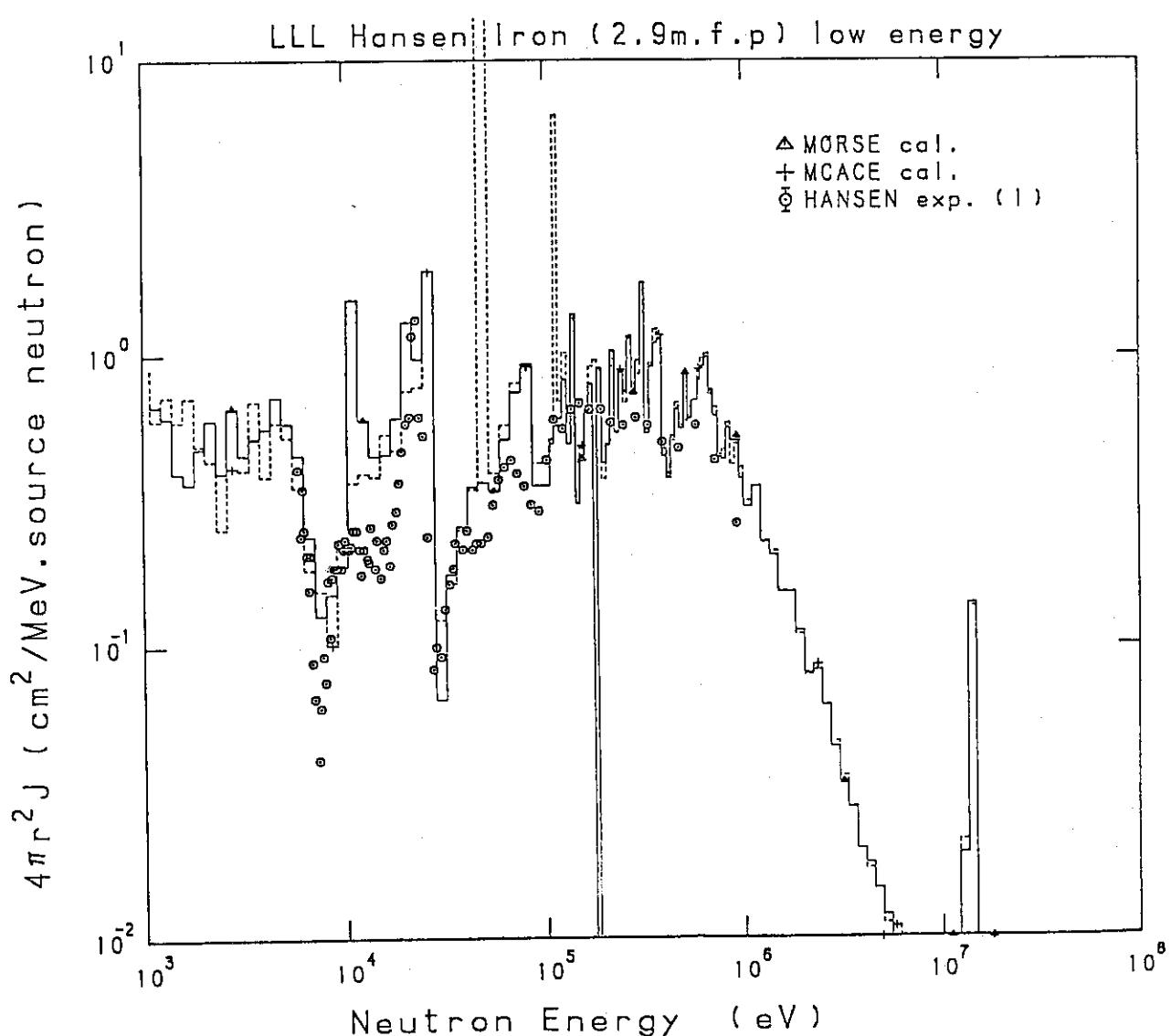


図 2.1.15 2.9 mfp の鉄へパルス巾 250 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と計算値の比較

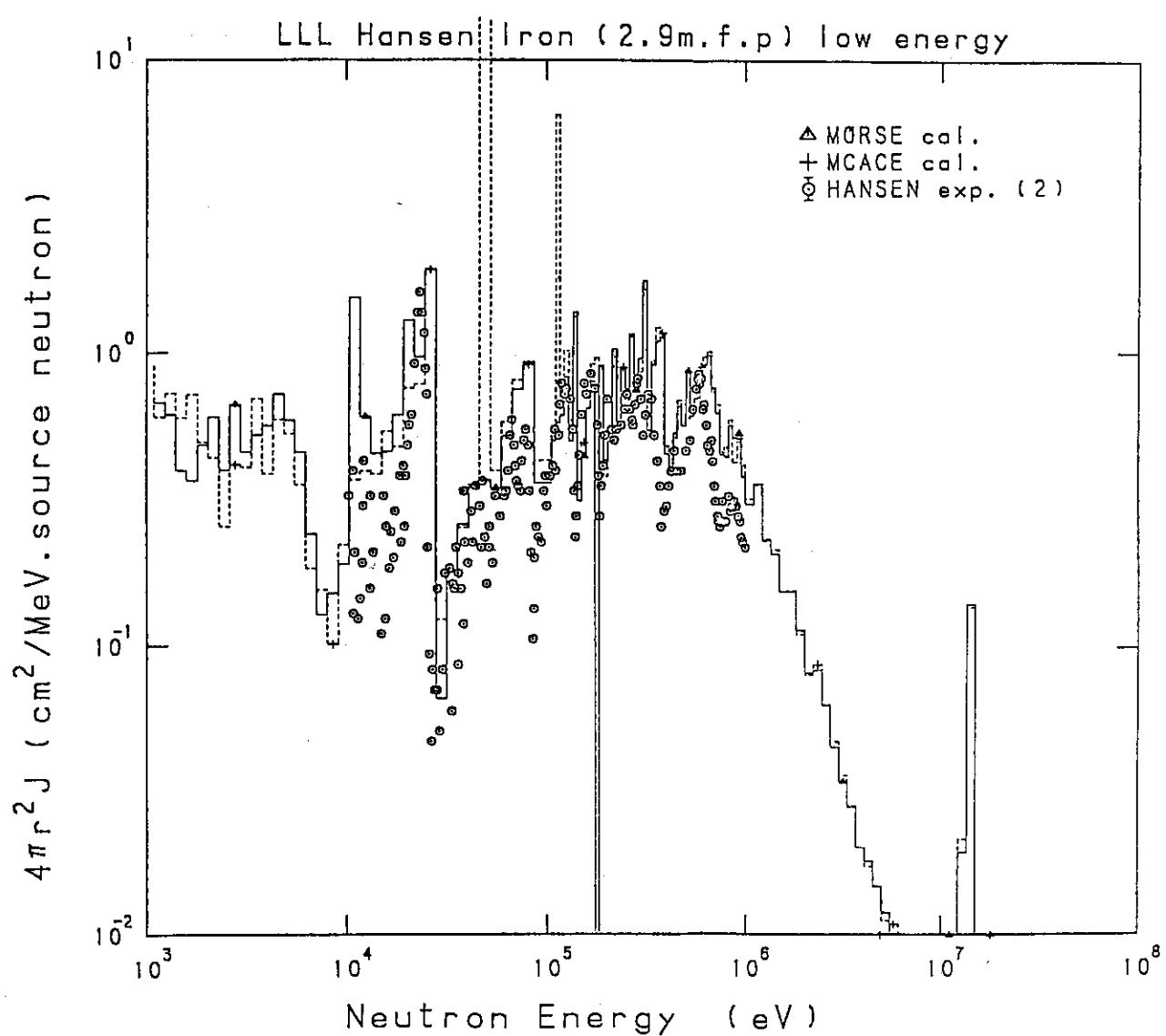


図 2.1.16 2.9 mfp の鉄へパルス巾 5 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と計算値の比較

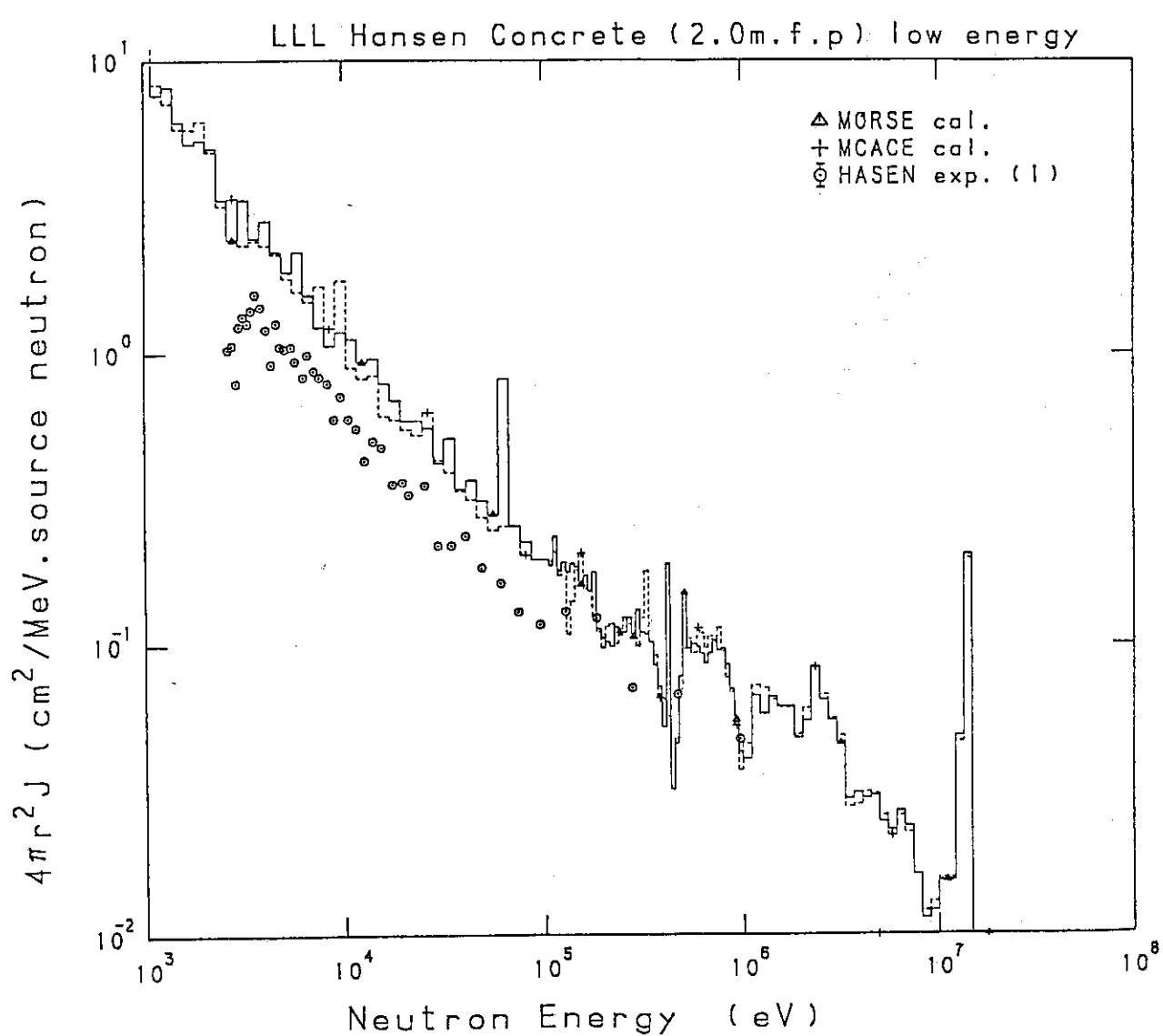


図 2.1.17 2.0 mfp のコンクリートへパルス巾 250 nsec の重陽子を入射した
実験の測定結果と計算値との比較

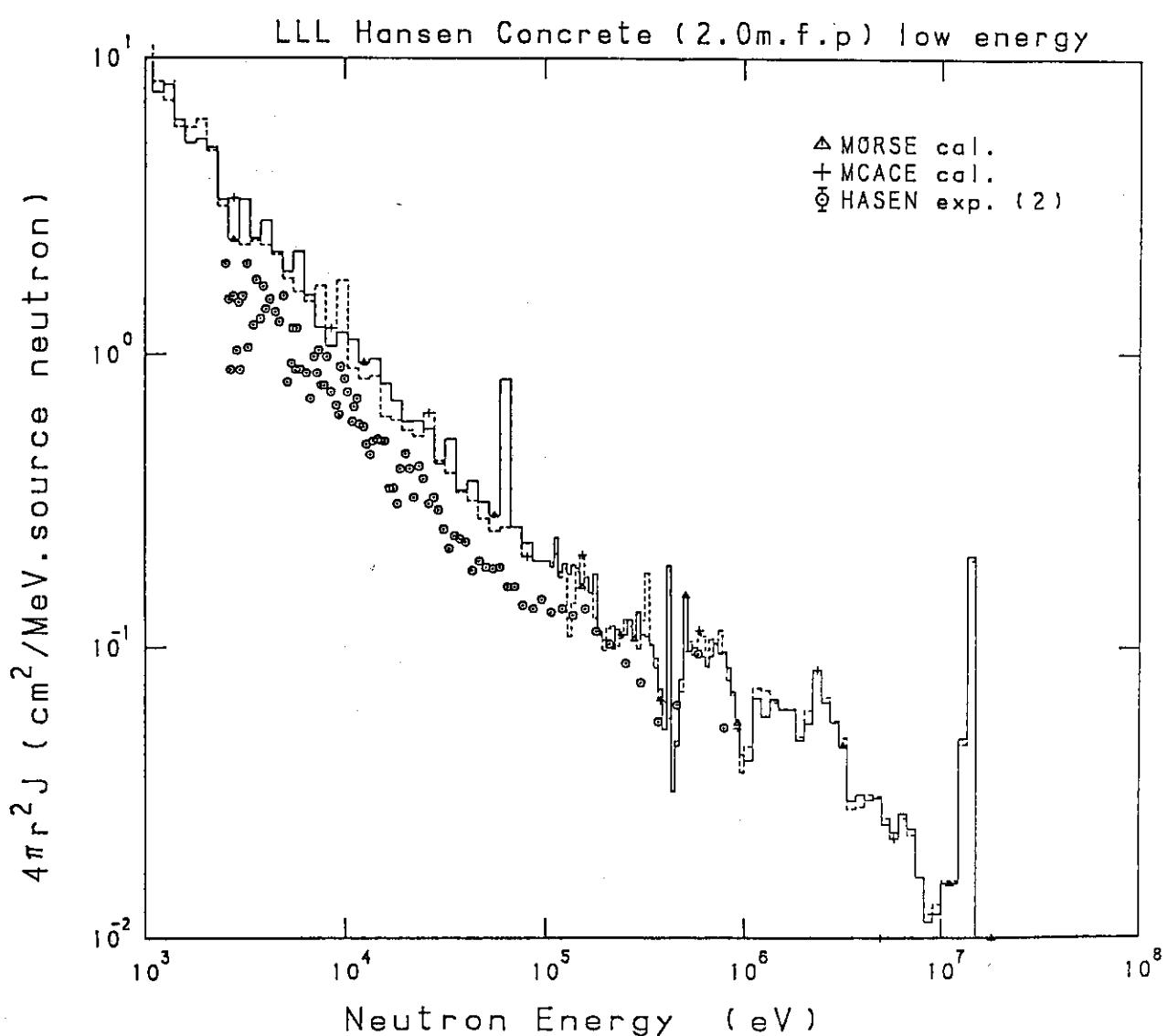


図 2.1.18 2.0 mfp のコンクリートへパルス巾 100 nsec の重陽子を入射した
実験の測定結果と計算値との比較

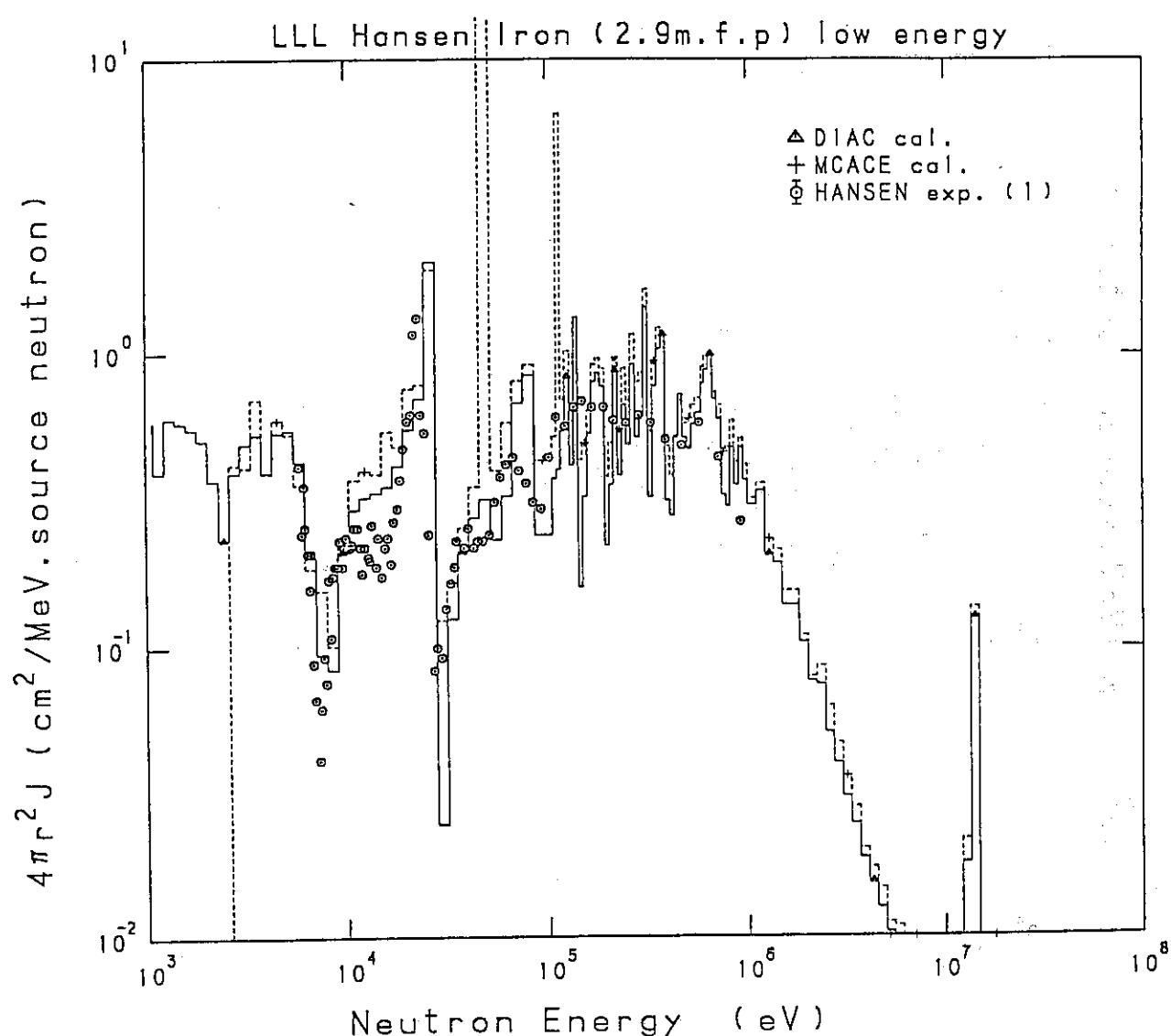


図 2.1.19 2.9 mfp の鉄へパルス巾 250 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と計算値との比較

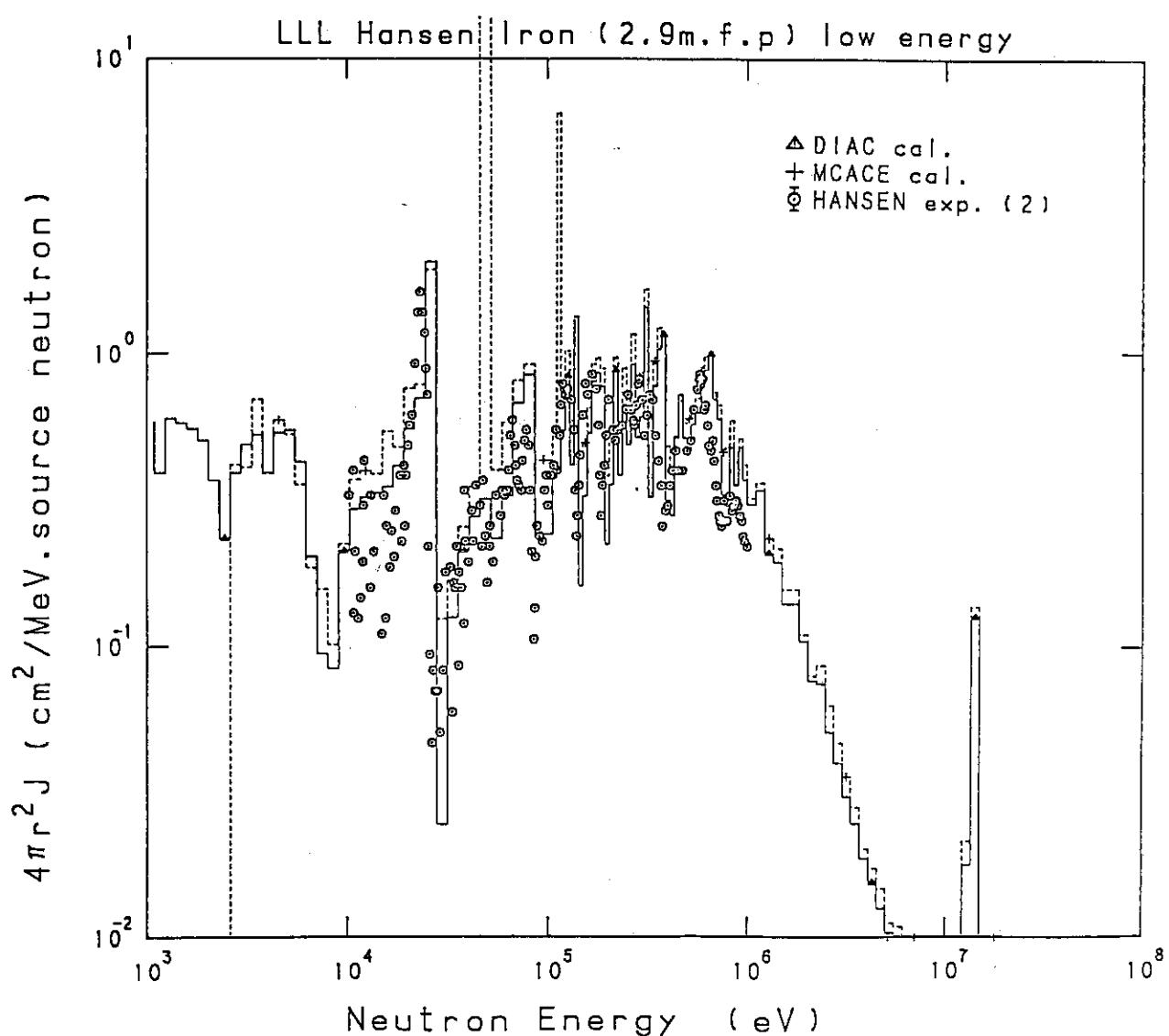


図 2.1.20 2.9 mfp の鉄へパルス巾 5 nsec の重陽子を入射した実験の測定結果と計算値との比較

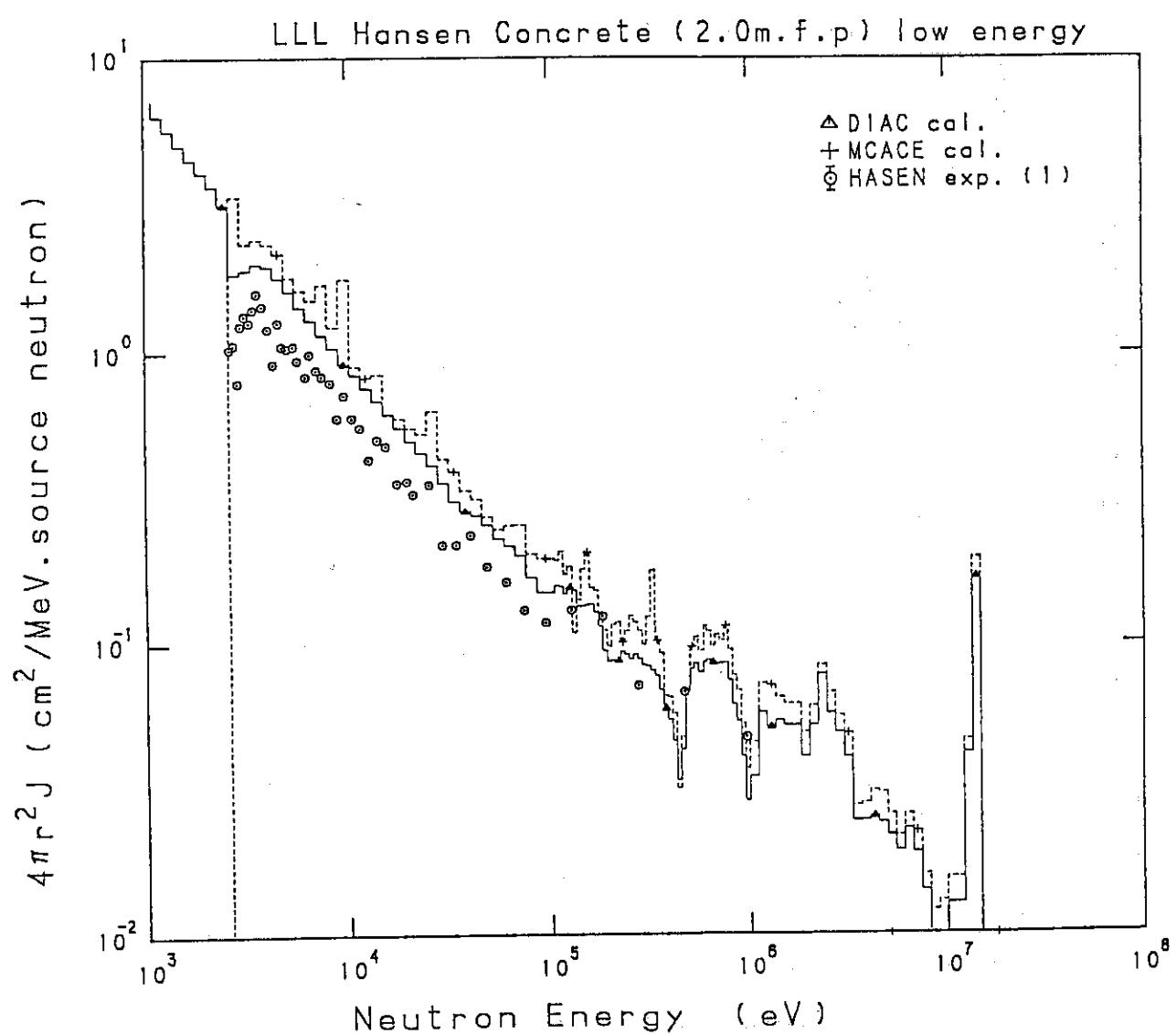


図 2.1.21 2.0 mfp のコンクリートへパルス巾 250 nsec の重陽子を入射した
実験の測定結果と計算値との比較

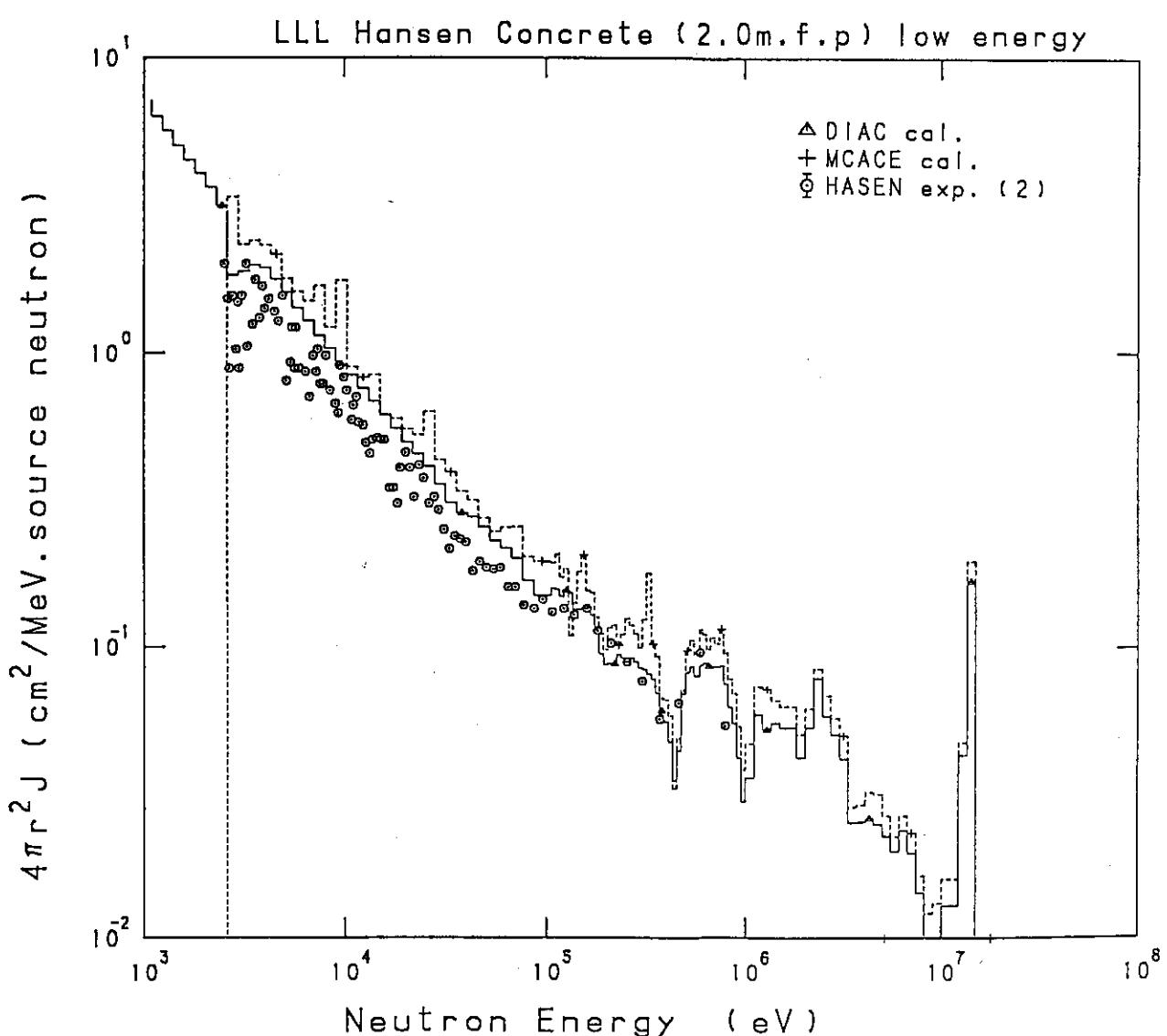


図 2.1.22 2.0 mfp のコンクリートへパルス巾 100 nsec の重陽子を入射した
実験の測定結果と計算値との比較

2.2 屈曲ダクトでの中性子ストリーミング問題

2.2.1 ベンチマーク問題の概要

1回屈曲の短形ダクトの中心に点状の中性子源があり、ダクトの中心軸上で中性子線量が測定されている。

(a) 線源条件

$T(\alpha, n)^4\text{He}$, $D(\alpha, n)^3\text{He}$ 反応による中性子と Pu - Be 中性子源の 3 種類の線源を使用している。前二者による中性子は加速器を用いて発生され、そのエネルギーはそれぞれ 14 MeV と 2.5 MeV であり、単色の点状の等方線源とみなすことができる。Pu - Be 線源の方も点状の等方線源とみなせる。

(b) 供試体と実験体系

図 2.2.1 に供試体を示す。ダクトは第一脚、第二脚とも 15 ft の長さである。Pu - Be を線源とした場合は第一脚は 7 ft と短くなっている。ダクトの壁は 4 インチ又は 8 インチの厚さのコンクリートである。この外側はさらに 3 ft 以上の厚さの川砂でおおわれている。ダクトの断面は短形で $3\text{ ft} \times 3\text{ ft}$, $2\text{ ft} \times 3\text{ ft}$, $2\text{ ft} \times 2\text{ ft}$ について実験がなされている。

(c) 検出器

測定器は Texas Nuclear 社の 9120 型球形中性子線量計（減速材付の計数管で直径は 1 ft.）であり、図 2.2.1 に示したように、ダクトの中心軸上で測定されている。Pu - Be 線源以外の測定値は BF_3 モニタのカウント数で規格化されている。これは、加速器を用いるため、発生中性子数に時間的変動があり、その影響を除くためである。

2.2.2 計算概要

解析にはモンテカルロコード MCACE を用いた。

(1) 群定数作成

JSD 1000 ライブラリーをもとに 50 群に縮約したものを用いた。コンクリート及び砂の組成は、JSD 1000 ライブラリー中の ordinary concrete と soil の値を用いた。断面積は DAR 法に基づく断面積の外に P_1 型の断面積も作成して計算結果を比較した。線量率変換係数は、AMPX-II に内蔵されている線量率変換係数計算コード dose で作成した。それを 50 群構造とともに表 2.2.1 に示す。

(2) 輸送計算

モンテカルロ計算コード MCACE を用いた。計算モデルを図 2.2.2 に示す。ダクトの断面は $2\text{ ft} \times 2\text{ ft}$ とし、ダクトの脚の長さは両脚とも 12 ft である。Pu - Be 線源の場合は第一脚の長さは 7 ft である。第一脚の方向を X 方向、第二脚の方向を Y 方向と呼ぶことにした。線源は点線源とし、エネルギーは $T(\alpha, n)^4\text{He}$ は 14 MeV, $D(\alpha, n)^3\text{He}$ 反応の場合は 2.5 MeV, Pu - Be 線源の場合は表 2.2.2. に示すものを用いた。ダクト中心軸上の線量率は、点検出器計算により求め、この値を線源から 1 cm 離れた点における線量率で規格化して実験値と比較した。計算に用いたバイアスとヒストリー数を本計算に先だって検討した。その結果、第一脚については 3000 ヒストリーでバスストレッ칭を用いないで、第二脚については

3000 ヒストリーでバスストレッチングを用いて計算すればよいことがわかった。

2.2.3 計算と実験との比較

群定数として、DAR 法に基づくものとルジャンドル展開したものを用いて計算を行い比較した。DAR 法の群定数の空間分点は 16 とし、ルジャンドル展開法の次数は 11 とした。

$T(\alpha, n)^4\text{He}$ 線源の場合の計算結果を図 2.2.3 に示す。第一脚の計算結果は 2 つの計算でよく一致しているが、実験値より少し高くなっている。第二脚の計算結果は 3 ft までは実験値と両計算ともよく一致しているが、6 ft 以上になると、ルジャンドル展開群定数を用いたものは FSD が大きくなり、実験値との差が大きくなつた。

$D(\alpha, n)^3\text{He}$ 線源の場合の計算結果を図 2.2.4 に示す。2 つの群定数を用いた計算間に差はないが、実験値と比較すると過大評価になつてゐる。

Pu - Be 線源を用いた場合の計算結果を図 2.2.5 に示す。2 つの計算間の差違はダクト屈曲部を除いてないが実験値と比較すると少し過大評価になつてゐる。

これらの計算に用いた定数は 14 MeV の単色エネルギー線源を用いた 1 次元計算により縮約して作成している。Pu - Be 線源の広がりを持ったスペクトルを線源とした 1 次元計算で、縮約した DAR 法群定数を作成し、計算結果への影響を調べた。その結果を図 2.2.6 に示す。群定数の差による違いは小さいが、Pu - Be 線源のスペクトルで縮約して作った定数を用いた方が実験値に近づいてゐる。

2.2.4 評価及び考察

実験値と計算値の一致は、7 ケタの減衰があることを考えると比較的良好であると考えられ、MCACE コードのストリーミング問題に対する能力を示している。

第一脚でいずれも計算値が実験値を上まわつてゐるのは、次のいずれかの原因によるとと思われる。

① 減衰係数を求める際の規格化が実験と計算とで対応していない。線源から 1 cm の点の線量は計算では求まるが、実験では線量計算の直径が大きいために測定できない。③ に述べるように、線量計のレスポンス関数と線量計算に用いたレスポンス関数は、同一ではないので、実験値を線源から 1 cm の点の線量で規格化して、減衰係数を求める際に誤差が生じた可能性がある。

② 実験で用いた線量計は、図 2.2.1 に示すように直径 1 ft と球形の大きいものであり、線量計を構成する材料とダクト壁との相互作用が、計算には入っていない。第一脚側では、線量計によって影になる部分の影響が大きいが、第二脚では、散乱線が多いので影の影響は小さいと考えられる。

③ 実験に使用した線量計のレスポンス関数と、計算で線量を算出するのに用いた関数とが同一でない。特に高エネルギーでこの差が大きい場合は第一脚での C/E の差を生じる。

DAR 法による群定数を用いた計算と、 P_e 展開法による群定数による計算との差が、 $T(\alpha, n)^4\text{He}$ 線源の場合に第二脚の 9 ft 以降に見られるが、 P_e 展開法の場合の FSD が 9, 10, 11 ft の場合、それぞれ 0.350, 0.647, 0.580 と悪いので、断定的なことは言えない。

その他の誤差要因としては、線源の角度分布とエネルギー分布を、計算では単色、等方と仮定したことによる誤差がある。特に $D(\alpha, n)^3\text{He}$ 反応は、加速される α のエネルギーが、反応の Q 値に比して無視できないので、実験の線源の角度分布は前方に偏っている。

参考文献

- (1) Y.T. Song "Neutron Streaming through ducts-Analysis of experimental results", Nucl. Sci. Eng. 44 252 (1971).

表 2.2.1 50群のエネルギー群構造と線量率変換係数

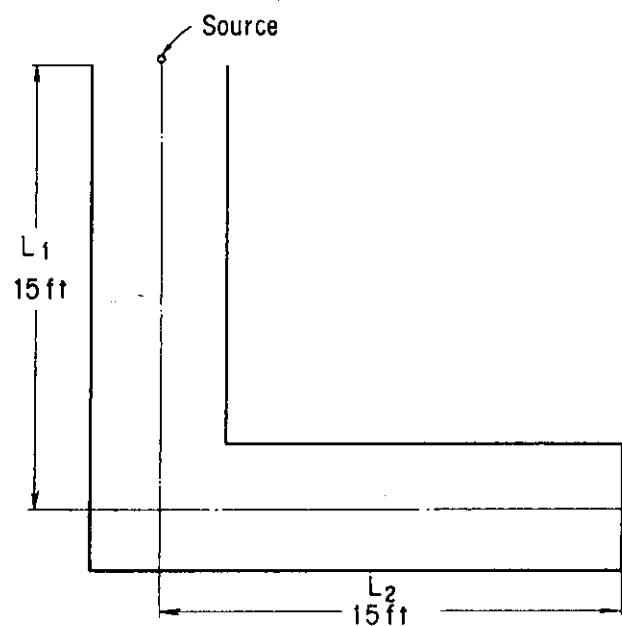
GP	UPPER LIMIT (EV)	DOSE FACT ^{*)}
1	1.6487E+07	1.4980E-04
2	1.2840E+07	1.4771E-04
3	1.0000E+07	1.4701E-04
4	7.7880E+06	1.4716E-04
5	6.0653E+06	1.4707E-04
6	4.7237E+06	1.4533E-04
7	3.6788E+06	1.4340E-04
8	7.8650E+06	1.4318E-04
9	2.2313E+06	1.4224E-04
10	1.7377E+06	1.3638E-04
11	1.3534E+06	1.2662E-04
12	1.0540E+06	1.1351E-04
13	8.2085E+05	9.7540E-05
14	6.3928E+05	8.0295E-05
15	4.9787E+05	6.5162E-05
16	3.8774E+05	5.3792E-05
17	3.0197E+05	4.4272E-05
18	2.3518E+05	3.6402E-05
19	1.8316E+05	2.9982E-05
20	1.4264E+05	2.4810E-05
21	1.1109E+05	2.0573E-05
22	8.6517E+04	1.6672E-05
23	6.7379E+04	1.3360E-05
24	5.2475E+04	1.0807E-05
25	4.0868E+04	8.8063E-06
26	3.1828E+04	7.2608E-06
27	2.4788E+04	6.0699E-06
28	1.9305E+04	5.0313E-06
29	1.5034E+04	3.9200E-06
30	9.1188E+03	3.2802E-06
31	5.5308E+03	3.2400E-06
32	3.3546E+03	3.3008E-06
33	2.0347E+03	3.4794E-06
34	1.2341E+03	3.7016E-06
35	7.4852E+02	3.8332E-06
36	4.5400E+02	3.9425E-06
37	2.7536E+02	4.0404E-06
38	1.6702E+02	4.1261E-06
39	1.0130E+02	4.1928E-06
40	6.1442E+01	4.2407E-06
41	3.7267E+01	4.2793E-06
42	2.2603E+01	4.3132E-06
43	1.3710E+01	4.3461E-06
44	8.3153E+00	4.4016E-06
45	5.0435E+00	4.4591E-06
46	3.0590E+00	4.5060E-06
47	1.8554E+00	4.5362E-06
48	1.1254E+00	4.5330E-06
49	6.8256E-01	4.3971E-06
50	1.5183E-01 3.5238E-04 ^{**)}	3.8717E-06

*) 単位は (rem/hr)/(N/cm²-sec)

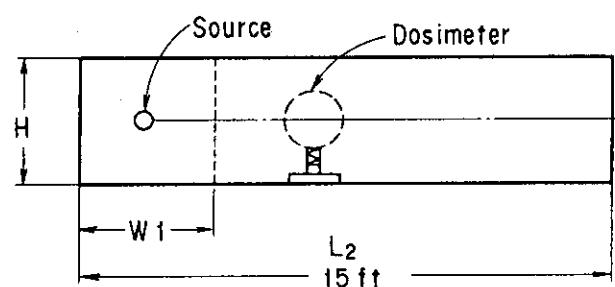
**) エネルギー群の下限値

表 2.2.2 Pu, Beより発生する中性子のスペクトル（相対値）

群	エネルギー(MeV)	スペクトル
1	16.487	0.0
2	12.84	0.128
3	10	3.993
4	7.788	5.645
5	6.065	8.257
6	4.723	8.473
7	3.678	8.886
8	2.865	2.560
9	2.231	2.598
10	1.737	2.112
11	1.135	1.280
12	1.054	1.440
13	0.821	1.664
14	0.639	0.0
		↓ 以下50群まで



(a) Top view of duct geometry



(b) Side view of duct geometry

図 2.2.1 実験体系

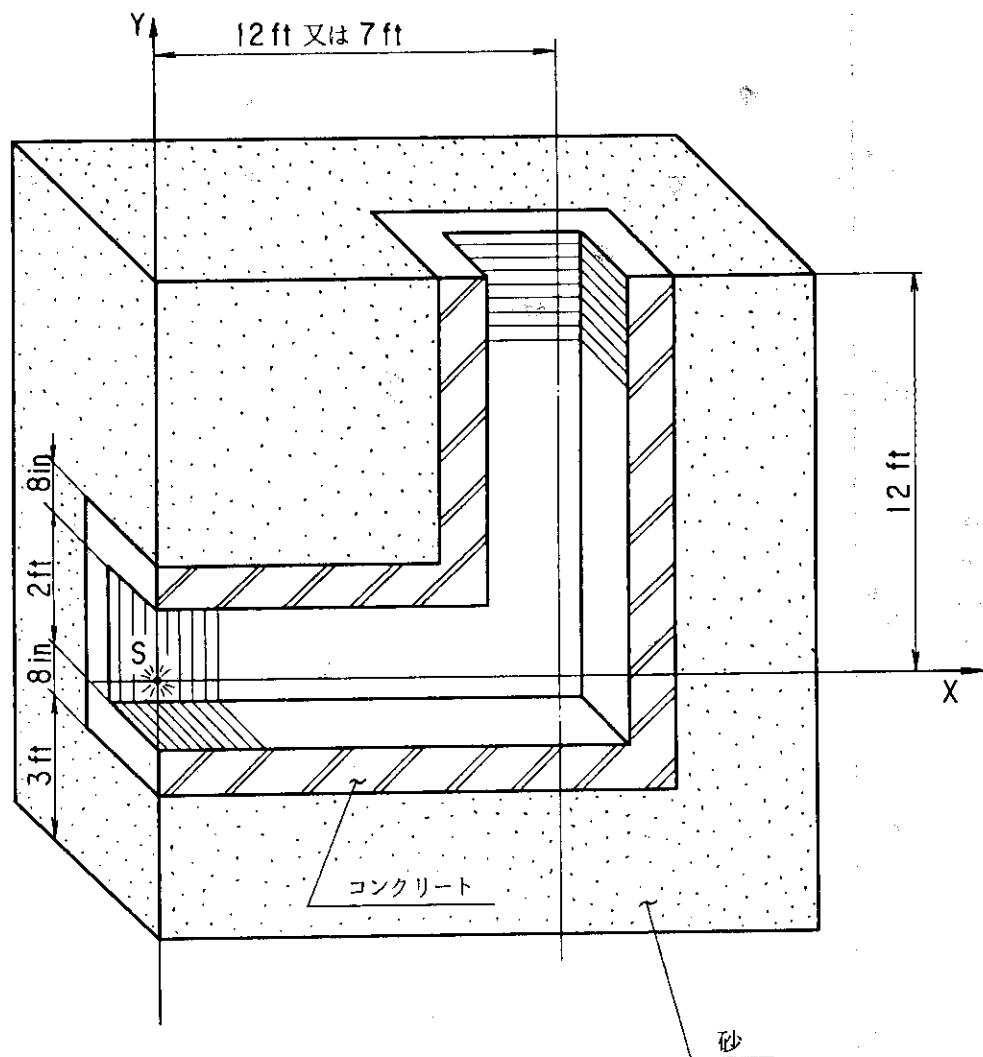
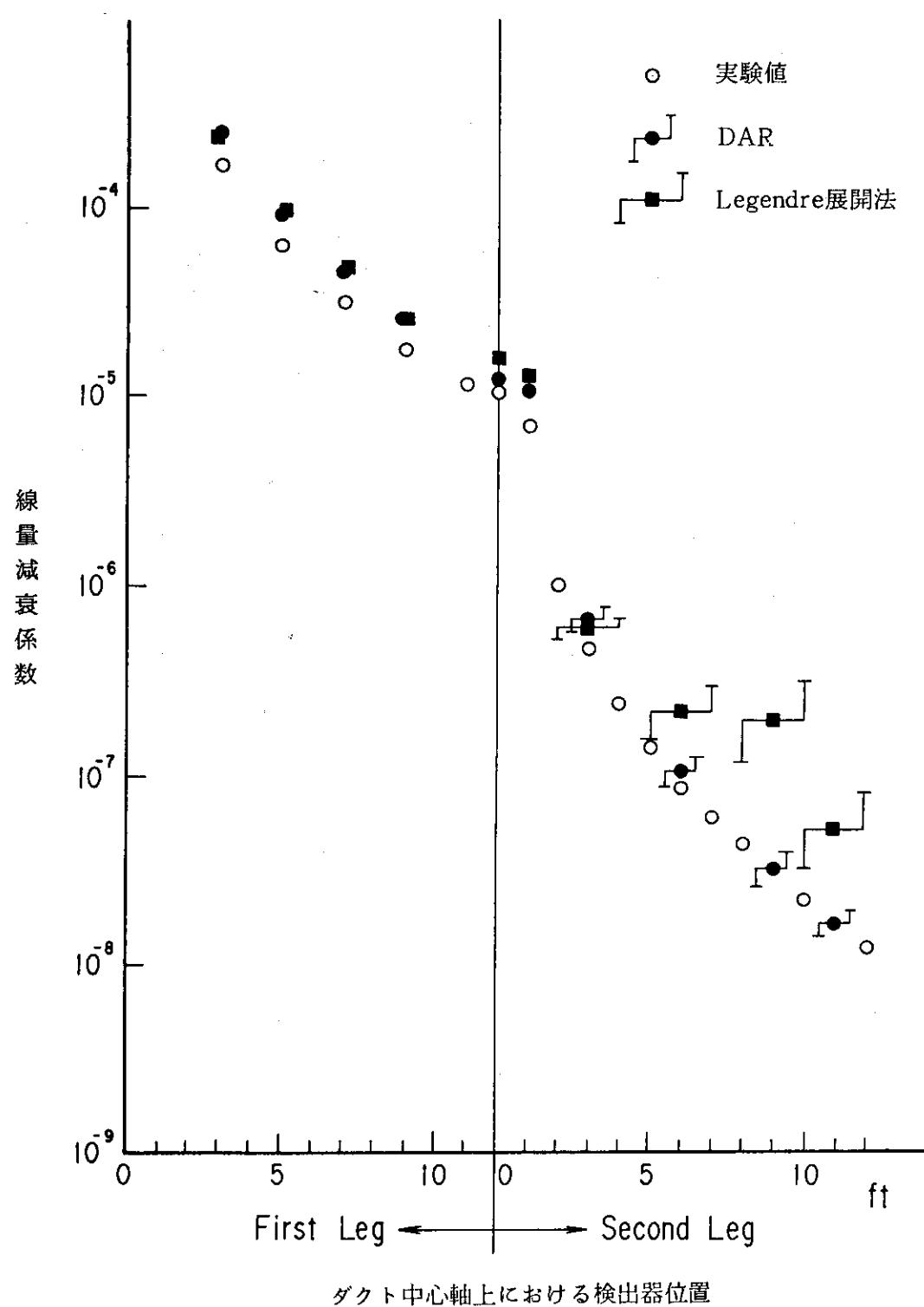
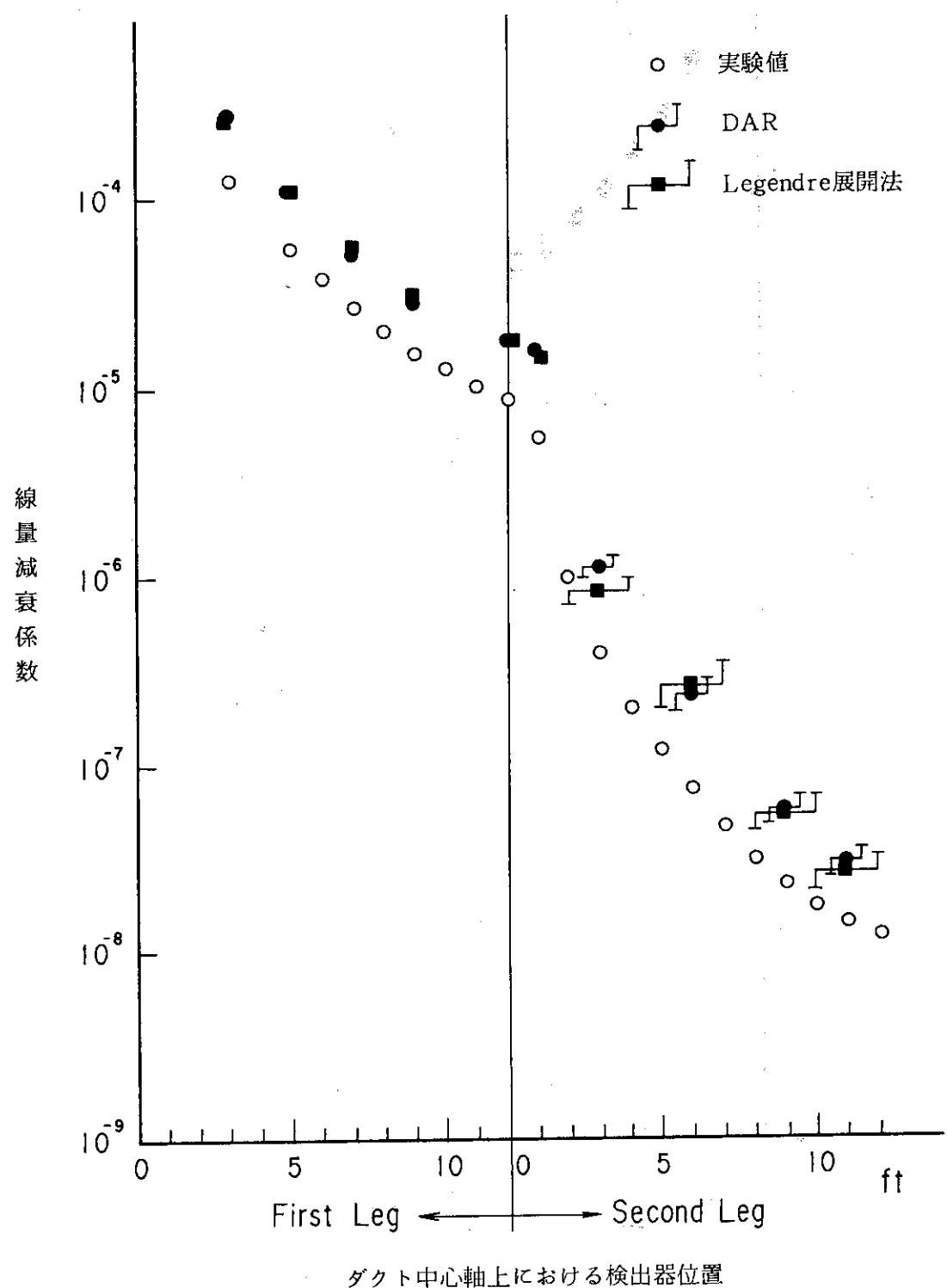


図 2.2.2 計 算 モ デ ル

図 2.2.3 実験値と計算値の比較, $T(d, n)^4\text{He}$ 線源

図 2.2.4 実験値と計算値の比較, D(d, n)³He 線源

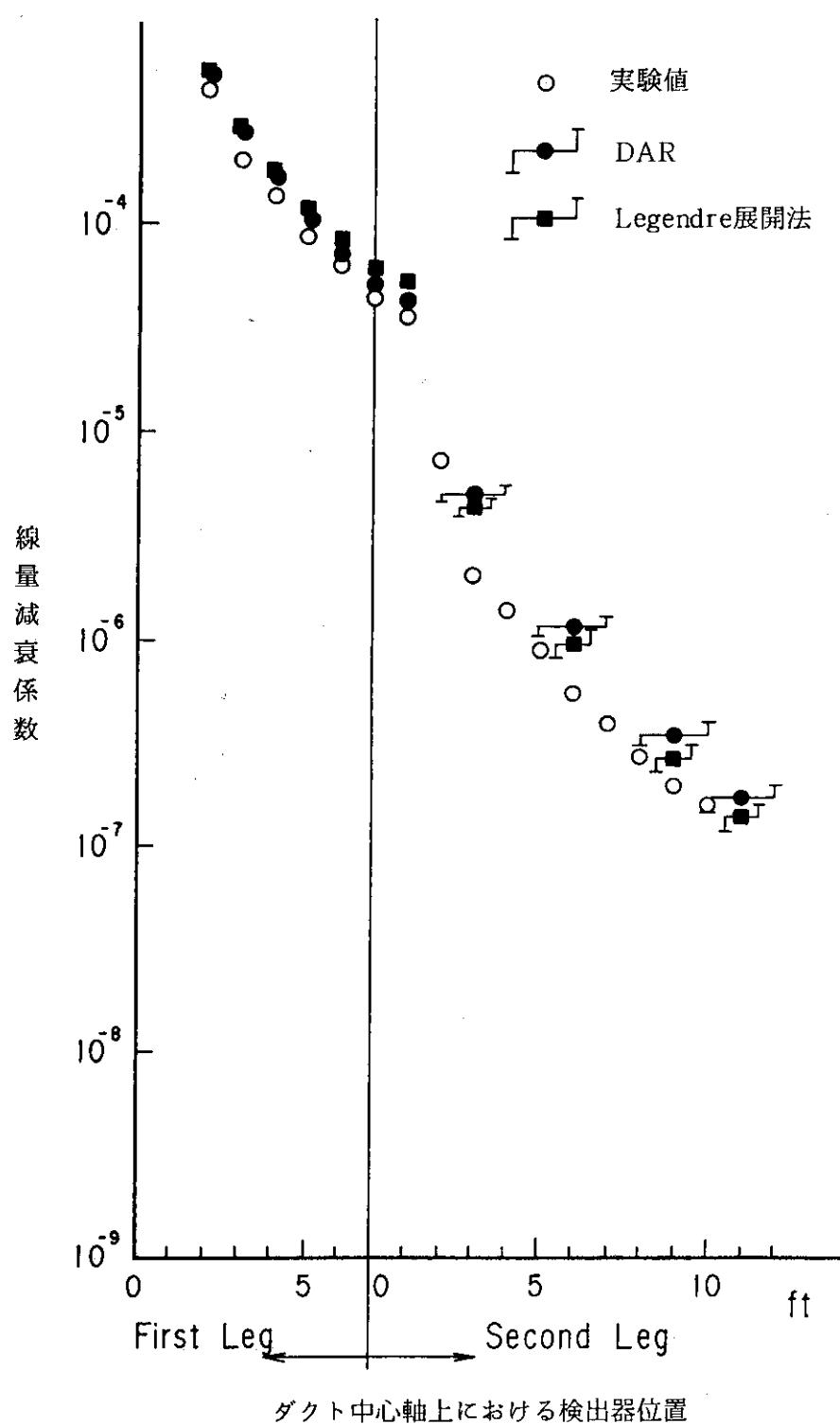


図 2.2.5 実験値と計算値の比較, PuBe 線源

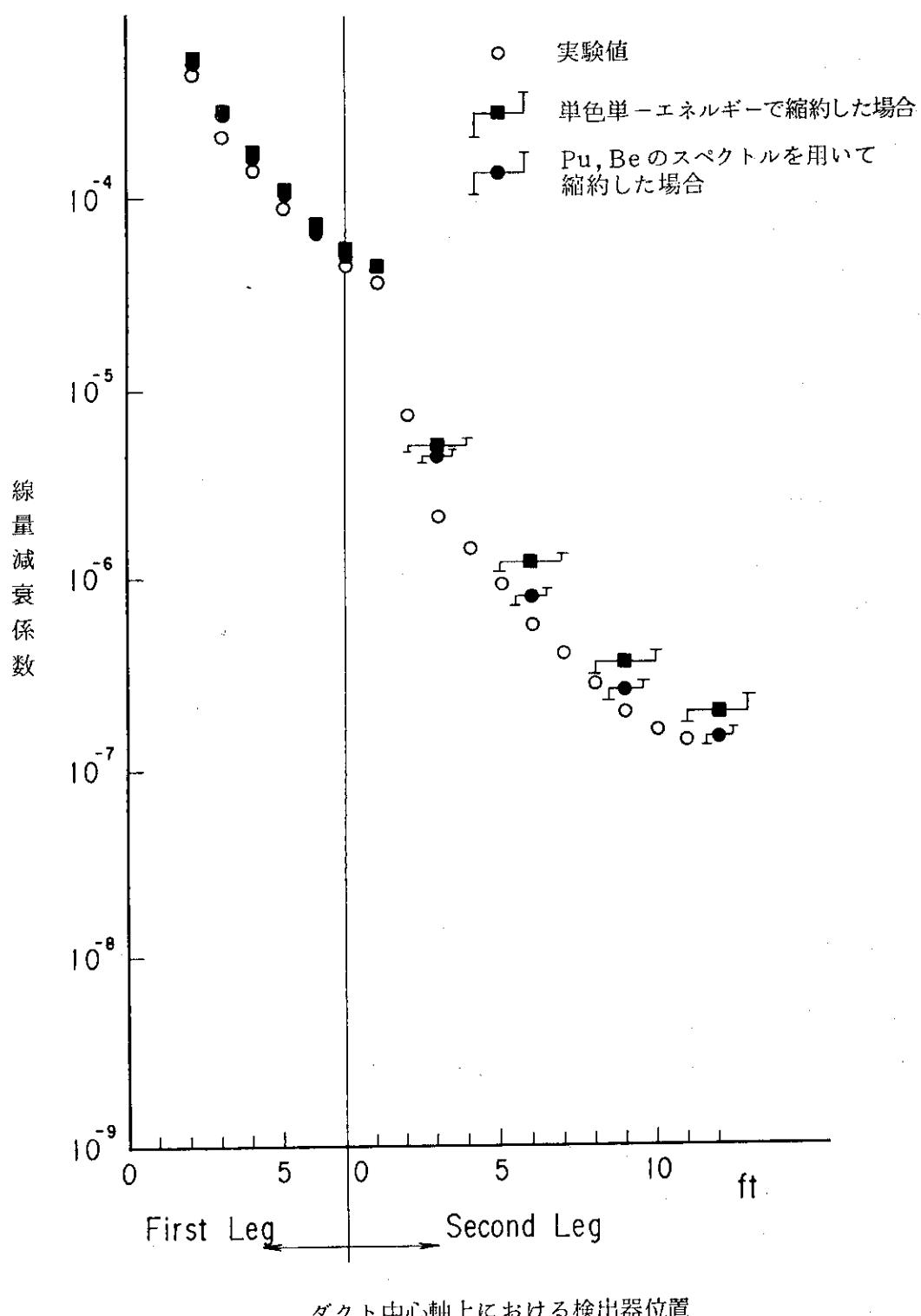


図 2.2.6 群定数縮約法による計算結果の比較

2.3 高速炉体系を模擬したナトリウム – SUS 層の中性子透過問題

2.3.1 実験概要

(1) 実験配置

本問題は FFTF 炉 (Fast Flux Test Facility) の半径方向の遮へい体である Na と SUS の多重層を模擬するベンチマーク実験^①に関するものである。実験は AI (Atomic International) 社の Shield Test and Irradiation Reactor の fission plate を利用して行われており、全体の実験配置は図 2.3.1 に示すとおりである。各試験体の種類と寸法を以下に要約する。

Na 試験体 : $60 \times 60 \times 12$ in. (1/4 in. 厚の Al で被覆)

" " $60 \times 60 \times 6$ in. (" ")

鉄試験体 : 60×66 in. (1020 Steel – 0.2 % C)

SUS 試験体 : 60×60 in. (2 in. or 1 in. 厚 SUS 304)

これらの試験体は、その中心軸上に沿って中性子の測定を行うため、図 2.3.2 に示すような検出器挿入のためのギャップを設けて配置されている。

(2) 測定方法と測定器

共鳴領域の中性子束分布の測定には、1 ~ 300 eV エネルギー範囲を対象として下記の共鳴検出器が使用された。

$$E_n = 1.46 \text{ eV} \quad ^{115}\text{In} (n, \gamma) ^{116}\text{In}$$

$$E_n = 4.91 \text{ eV} \quad ^{197}\text{Au} (n, \gamma) ^{198}\text{Au}$$

$$E_n = 132 \text{ eV} \quad ^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$$

一方、速中性子の測定には ^{32}S (n, p) ^{32}P と ^{27}Al (n, α) ^{24}Na によるしきい検出器が使用された。これらの検出器からの放射能の絶対測定には、 ^{32}P については 2π ガスフロー・カウンタ、その他については $\beta - \gamma$ 同時計数法が使用された。また、5 keV から 2.3 MeV までの領域の中性子エネルギー・スペクトルは反跳陽子比例計数管によって測定された。

(3) 線 源

図 2.3.1 の下部に示すように、1 MW のプール型の原子炉を一次線源とし、これをサーマルコラムを通して減速させた後、24 in. 直径、0.06 in. 厚の ^{235}U 核分裂コンバータ (fission plate) に入射させ二次中性子源を作っている。この fission plate からの中性子は、表 2.3.1 に示すような半径方向の分布を有する等方線源と考えられる。

(4) 測定結果

測定データは、 ^{32}S (n, P) ^{32}P , ^{27}Al (n, α) ^{24}Na によるしきい検出器と ^{115}In (n, γ), ^{197}Au (n, γ), ^{59}Co (n, γ) の共鳴検出器の反応率及び反跳陽子比例計数管による中性子スペクトルとして得られている。これらの結果は fission plate で 1 kW 出力 ($= 7.49 \times 10^{13} \text{ n/sec}$) になるように規格化して与えられている。

なお、測定誤差については下記の数値が示されている。

- (a) 試験体以外からの低速エネルギー中性子の寄与を省くために用いた LiH の効果は、Au 検出器の場合 130 cm で 4 %, 210 cm で 20 % 程度であった。
- (b) 比例計数管による測定には、26 keV で 20 %, 5 keV で 50 % 程度の系統的誤差がある。
- (c) 共鳴検出器の Self-shielding factor は次のとおりである。

	Thermal	Epithermal
In	1.147	5.23
Co	1.089	2.46
Au	1.216	5.46

2.3.2 計算概要

(1) 群定数の作成

ESPRIT 用の群定数は、図 2.3.3 の flow chart に示すように、JSD 1000 ライブラリーの 100 群ミクロ群定数を FAIRCROSS コード step 2 を用いて処理したものを更に、DIAC コードで求めた 100 群中性子スペクトルで 21 群に縮約して作成した。

群定数は、グラファイト、アルミニウム、ボラル、ウラン、ナトリウム、鉄について作成し、エネルギー群構造は、表 2.3.2 に示す 21 群構造である。また、微分断面積の角度分点数は 16 とした。

共鳴検出器及びしきい検出器の断面積については、ENDF/B-IV のデータを FAIR-CROSS コード step 1, step 2 で処理し、更に、DIAC で求めた 100 群の中性子スペクトルで縮約した 21 群のものを用意した。2 次元計算上の有限項ルジャンドル展開による誤差を見るため、ESPRIT 用群定数を FAIRCROSS コード step 3 で処理し、2 次元輸送コード DOT 3.5 用の 21 群 P_3 の群定数を作成した。

(2) 線源条件

線源は、Table 2.3.1 に示す半径方向分布をもつ、平板状線源とした。角度分布は等方であり、スペクトルは Watt の式に基づいて作成した。

即ち、fission スペクトル $\chi(E)$ を

$$\chi(E) dE = \frac{2}{\sqrt{\pi e}} \exp(-E) \cdot \sinh(\sqrt{2E}) dE$$

で与えた。但し、E は MeV 単位で表わした中性子エネルギーである。

(3) 解析条件

2 次元モデルによる解析は、ESPRIT, DOT 3.5 両コードで実施し、その計算条件は表 2.3.3 に示すとおりである。

ESPRIT コードと DOT 3.5 コードの計算は可能な限り同一条件のもとで行うこととした。しかし Sn 分点数に関しては、S 48 とした場合 DOT 3.5 コードでは必要なメモリーサイズが約 110 kB であるのに対し、ESPRIT コードでは 3600 kB 必要であり計算の実施が困難である

ため、ESPRIT コードによる解析のみ、S 30 分点セットを用いることとした。

ESPRIT コード及び DOT 3.5 コードによる両解析の計算条件の相違点は前述の Sn 分点と、階差式の 2 点である。ESPRIT コードの解析についても、最初は、DOT 3.5 の解析と同様、Mixed linear-weighted model (MODE = 4) で計算を開始したが、中性子の誤差が 10 % 程度になった時点で解が振動を始めたため、途中から、weighted difference model に切換えた。この症状は DOT 3.5 コードにもしばしば見られるもので、Mixed linear-weighted model の考え方あるいは coding 上に欠陥があるとされている。

(4) 解析結果

体系の中心軸上、 $Z = 50, 90, 142 \text{ cm}$ の位置における中性子スペクトルの計算結果の代表例を、proton recoil detector による測定データと合わせて図 2.3.4(a)～(c) に示す。ここに、2 つ以上の異なるガス圧の検出器で測定されているエネルギー領域については検出器相互間の平均値をとった。

計算結果相互間の比較では、ESPRIT の計算結果は P_s 近似の DOT 3.5 の計算結果に対して全般に 10 % 程度の高い値を与えていた。

次に、両計算結果と測定値を比較してみると、中性子エネルギー 10 keV ～ 1 MeV の領域では ESPRIT で、C/E 値が 0.85 ～ 1.3、DOT 3.5 で 0.8 ～ 1.2 程度の範囲に収まっており、計算値はいずれも測定値とよく一致した。ただし、第 7 群 (302 ～ 498 keV) の中性子束については、ESPRIT、DOT 3.5 いずれも C/E = 1.2 ～ 1.4 で過大になっている。また、1 MeV 以上の領域（第 4 群）では C/E 値が 0.35 ～ 0.6 で計算値が著しく低くなっている。ESPRIT コードの計算値は S 30 近似であるので計算結果が過小ぎみであるにしても、その Sn 分点数の影響は数 % 程度（1 次元計算で確認済）であり、主因とはなり得ない。第 4 群中性子束計算結果の過小傾向はすでに、fission plate から 25 cm の位置に現われており、線源条件に起因するということも考えられる。各放射化箔の反応率については、図 2.3.5(a)～(e) に ESPRIT コードによる結果と DOT 3.5 コードによる結果、測定データを比較して示した。¹⁷Al (n, α) 反応と ³²S (n, p) 反応の反応率で、ESPRIT コードと DOT 3.5 コードの両計算結果を比較すると、前者による結果の方が線源からの距離とともに速く減衰しているのがわかる。これは、DOT 3.5 コードの計算で S 48 近似としたものに対し、ESPRIT コードの計算では S 30 近似としたためである。

10 MeV 以上の高エネルギー中性子に着目した ²⁷Al (n, α) 反応について実験と計算を比較すると、線源からの距離が、53 cm 以内の領域では、ESPRIT 及び DOT 3.5 双方とも、C/E 値 0.9 ～ 1.3 で良い一致を示している。しかし、線源からの距離が 53 cm 以上の領域では、距離とともに、急速に実験との一致が悪くなっている。図 2.3.5(a) に示すように、線源から 29 cm ～ 46 cm に位置するナトリウム層での反応率分布と、それ以外のナトリウム層での反応率分布が測定データでは傾向が著しく異なっており、実験データの検討も必要であると思われる。

2 MeV 以上の中性子を対象とした ³²S (n, p) 反応については、図 2.3.5 に示すように反応率分布の傾向は一致しているが、ESPRIT コードでは C/E 値が 1.6 ～ 2.4、DOT 3.5 コードでは 1.7 ～ 2.7 であり、計算値が過大である。

その他、⁵⁹Co (n, γ)、¹⁹⁷Au (n, γ)、¹¹⁵In (n, γ) 反応についてはいずれも ESPRIT コード

ドによる計算値は DOT 3.5 の計算値よりも 10 ~ 20 % 高い値を示した。C/E 値は DOT 3.5 コードでは ^{59}Co (n, γ) 反応率に対しては、0.9 ~ 1.2, ^{197}Au (n, γ) 反応率に対して 0.5 ~ 0.7, ^{115}In (n, γ) 反応率では 0.7 ~ 1.0 で、実験との一致は良いが、やや過小の傾向がある。これに対して ESPRIT コードの計算結果を見ると、C/E 値は ^{59}Co (n, γ) 反応率で 1.0 ~ 1.3, ^{197}Au (n, γ) 反応率で 0.65 ~ 0.8, ^{115}In (n, γ) 反応では 0.9 ~ 1.1 となっており、DOT 3.5 の結果のような過小傾向は見られない。

解析結果全てについてのエネルギー帯域別にみた C/E 値はまとめると以下のようにになる。

中性子エネルギー En	ESPRIT	DOT 3.5
^{27}Al (n, α) 反応率	En > 6 MeV	C/E = 0.9 ~ 1.3
^{32}S (n, p) 反応率	En > 2 MeV	C/E = 1.6 ~ 2.4
中性子束	0.8 MeV < En < 2.2 MeV	C/E = 0.7 ~ 0.9
中性子スペクトル	10 keV < En < 0.8 MeV	C/E = 0.85 ~ 1.3
^{59}Co (n, γ) 反応率	\approx En 132 eV	C/E = 1.0 ~ 1.3
^{197}Au (n, γ) 反応率	\approx En 4.9 eV	C/E = 0.65 ~ 0.8
^{115}In (n, γ) 反応率	\approx En 1.46 eV	C/E = 0.9 ~ 1.1

(5) 総合的考察

以上のベンチマーク解析の結果を総合的に評価すると、DOT 3.5 では C/E 値が 0.6 ~ 1.2、即ち 10 % 過小評価でかつ 30 % の不確実さをもつに対し、ESPRIT では C/E 値が 0.7 ~ 1.3 であり、計算の誤差は 30 % の不確実さのみで記述できる。DOT 3.5 コードによる計算結果の過小傾向は距離とともに増大しているが、その一般的傾向は ESPRIT の場合と類似している。

ESPRIT コードによる計算結果は、DOT 3.5 コードの P_3 近似の計算結果よりも精度が良いことが示せた。しかしながら、コードの使い易さという点では、ESPRIT コードにはまだいくつかの問題点がある。即ち、ESPRIT コードの短所はまず、非常に大きな core memory を要するという点である。本解析を例にとれば、DOT 3.5 コードの 3.5 倍の core memory が必要であった。

第 2 に、ESPRIT コードは、DISK との I/O access 回数が異常に多いという問題がある。

従って、このような点を改善する今後のコード整備計画が望まれる。

参考文献

- (1) P.F. Rose et al., "CSEWG Shielding Benchmark Specifications Neutron Attenuation Measurements in a Mockup of the FFTF Radial Shield", AI-AEC-13048 (1973).

表 2.3.1 板状中性子源からの中性子の半径方向分布

Mesh interval	r (cm)	Fission plane source (1 neutron/sec)
1	2.86625	0.010313
2	5.7325	0.010275
3	8.59875	0.0101765
4	11.4650	0.01006496
5	14.33125	0.0097802
6	17.19750	0.0093097
7	20.06375	0.0085052
8	22.93000	0.00742848
9	26.70500	0.00534829
10	30.48	0.0038750
11	36.032	
12	41.584	
13	47.136	
14	52.688	
15	58.240	
16	63.792	
17	69.344	
18	74.896	
19	80.448	
20	86.000	

*For all detector data, 7.49×10^{13} neutrons/sec normalizes the calculation to 1-kw fission plate (F.P.) power, as used in the data reported in the benchmark specification.

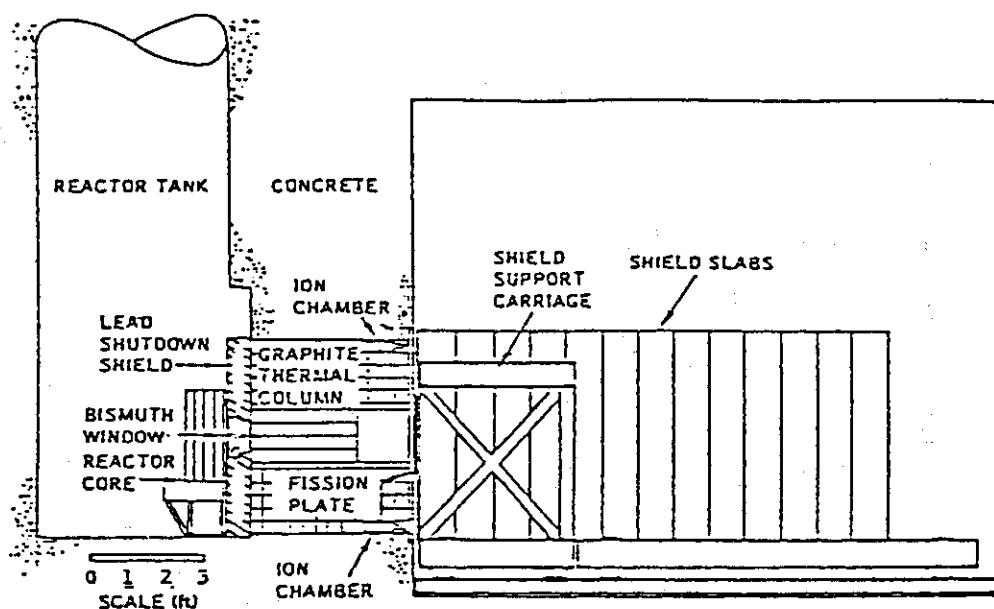
表 2.3.2 中性子エネルギー群構造とソース・スペクトル

Group	Energy Range (eV)	Fine Group	$^{235}_{\text{U}}$ fission spectrum
1	*) 1.6487+07 - 6.0653+06	1 - 8	2.4788-02
2	6.0653+06 - 3.6788+06	9 - 12	1.1037-01
3	3.6788+06 - 2.2313+06	13 - 16	2.1045-01
4	2.2313+06 - 1.3534+06	17 - 20	2.2978-01
5	1.3534+06 - 8.2085+05	21 - 24	1.7902-01
6	8.2085+05 - 4.9787+05	25 - 28	1.1403-01
7	4.9787+05 - 3.0197+05	29 - 32	6.4427-02
8	3.0197+05 - 1.8316+05	33 - 36	3.3893-02
9	1.8316+05 - 6.7379+04	37 - 44	2.5477-02
10	6.7379+04 - 2.4788+04	45 - 52	6.0051-03
11	2.4788+04 - 9.1188+03	53 - 58	1.3672-03
12	9.1188+03 - 3.3546+03	59 - 62	3.0733-04
13	3.3546+03 - 1.2341+03	63 - 66	6.8761-05
14	1.2341+03 - 4.5400+02	67 - 70	1.5358-05
15	4.5400+02 - 1.6702+02	71 - 74	3.4281-06
16	1.6702+02 - 4.7851+01	75 - 79	8.3373-07
17	4.7851+01 - 1.3710+01	80 - 84	1.2786-07
18	1.3710+01 - 3.979+00	85 - 89	1.9609-08
19	3.9279+00 - 1.1254+00	90 - 94	3.0071-09
20	1.1254+00 - 4.1399-01	95 - 98	4.2315-10
21	4.1399-01 - 3.5238-04	99 - 100	1.2152-10

*) Read as 1.6487×10^7

表 2.3.3 多重層透過実験解析用パラメータの説明

計算コード	DOT 3.5	ESPRIT
計算体系	円柱 (Fig. 3.6 参照)	円柱 (Fig. 3.6 参照)
空間メッシュ数	50 × 103	50 × 103
線源	^{235}U fission source (分布線源)	^{235}U fission source (分布線源)
非等方散乱近似	P_3 近似	FX 16 (角度分点数 16)
Sn 分点数	完全対称 S 48	完全対称 S 30
エネルギー群数	中性子 21 群 (Table 3.5 参照)	中性子 21 群 (Table 3.5 参照)
境界条件	上下右, 真空, 左完全反射	上下右, 真空, 左側完全反射
収束判定法	各メッシュの中性子束最大誤差 1 %	同 左
加速法	pointwise rescaling (WWESOL)	} 同 左
	収束判定 0.1 %, 繰返し最大数 = 50 inner iteration 2 回目から毎回加速	
階差式	Mixed linear - weighted scheme (MODE = 4)	weighted difference (MODE = 3)



Shield test arrangement

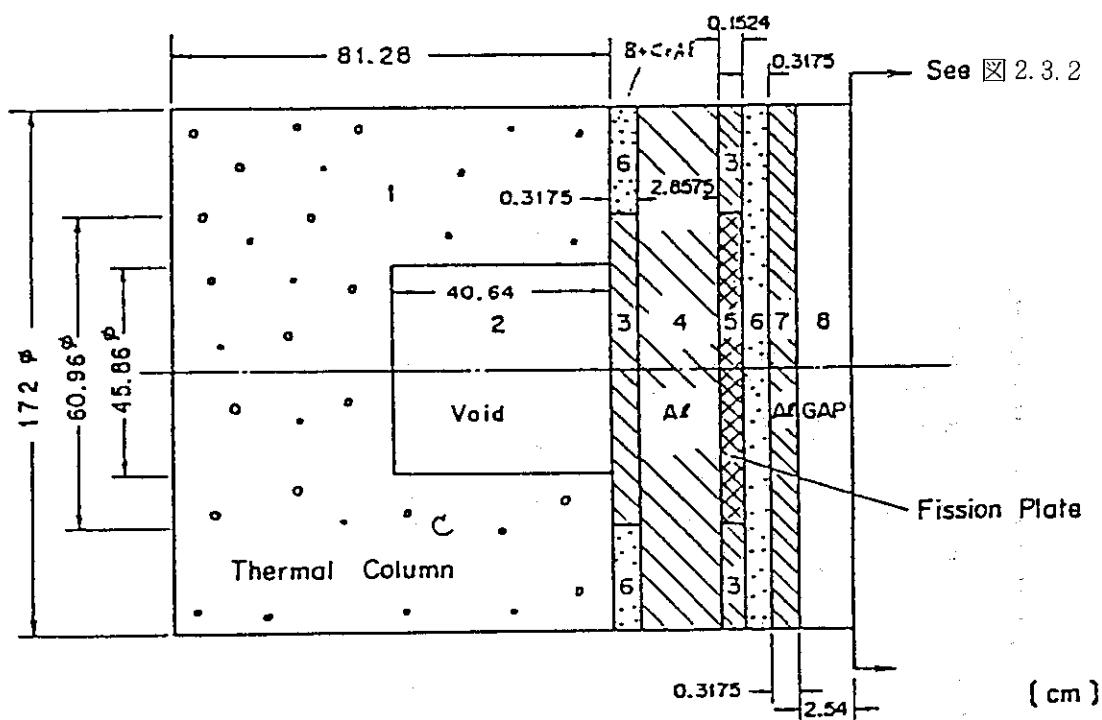


図 2.3.1 遮蔽実験で使用された板状中性子源とその周辺の構成
(図中の番号はゾーン番号を示す。)

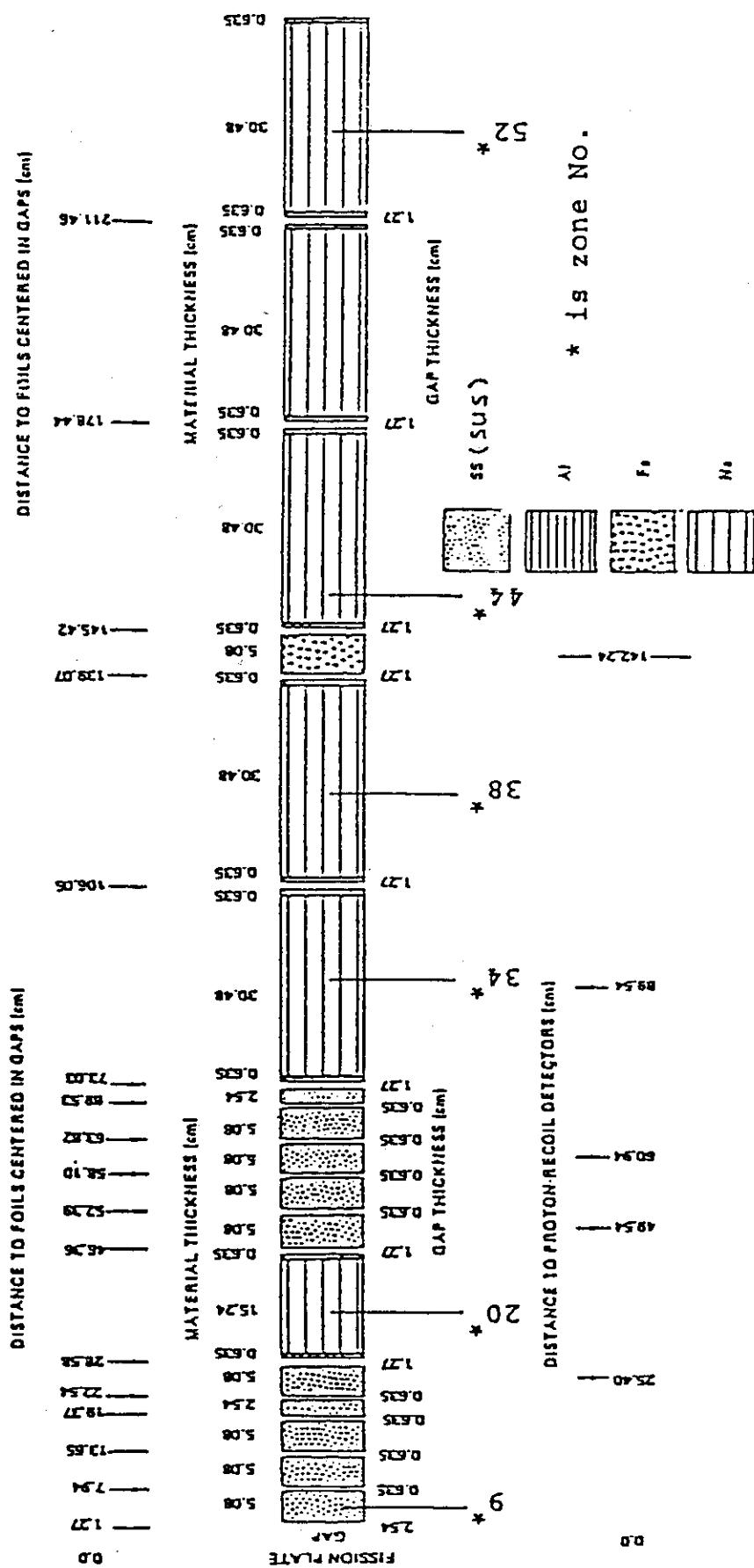


図 2.3.2 FFTF (Fast Flux Test Facility) 半径方向遮蔽モックアップの幾何形状

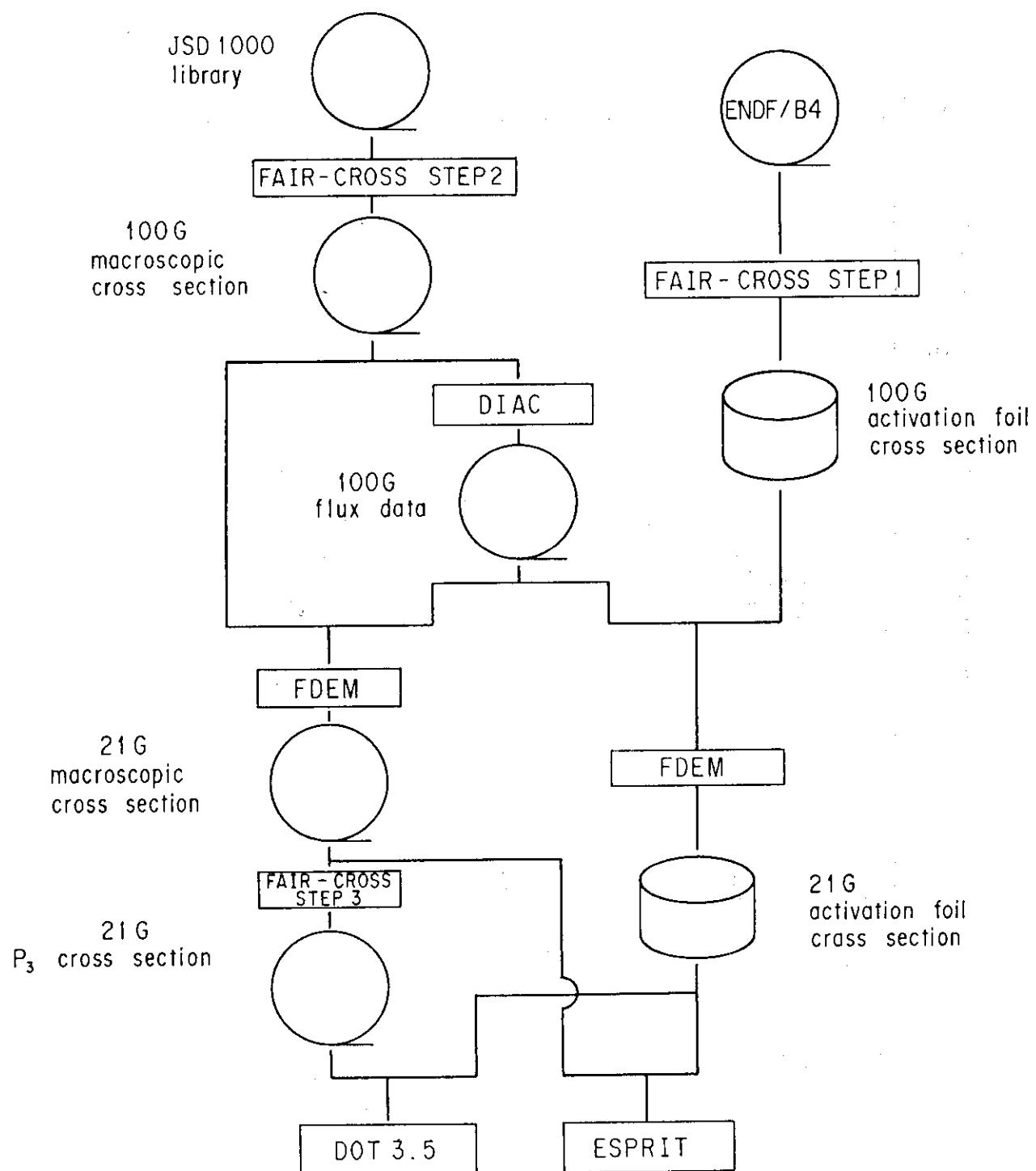
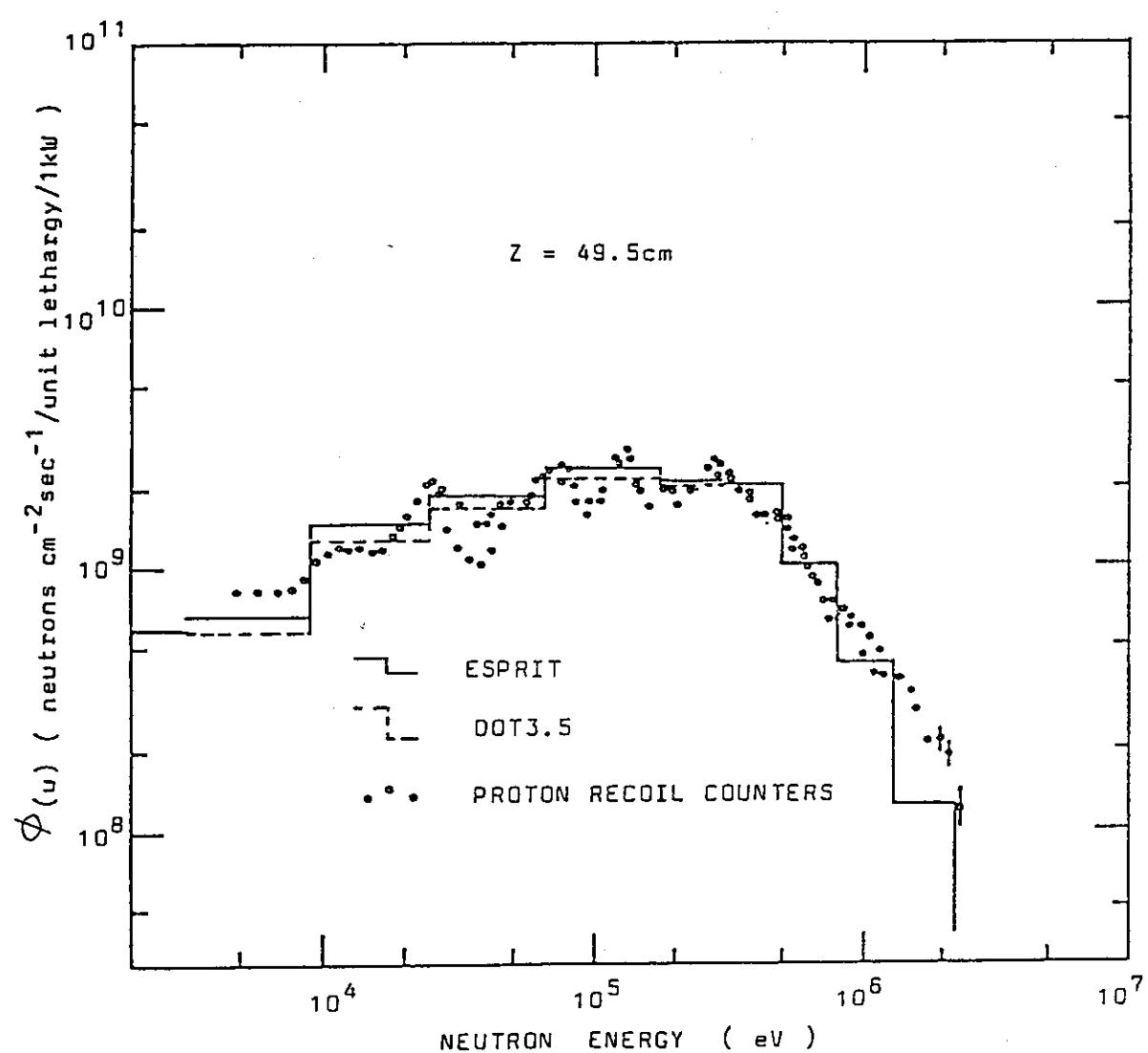
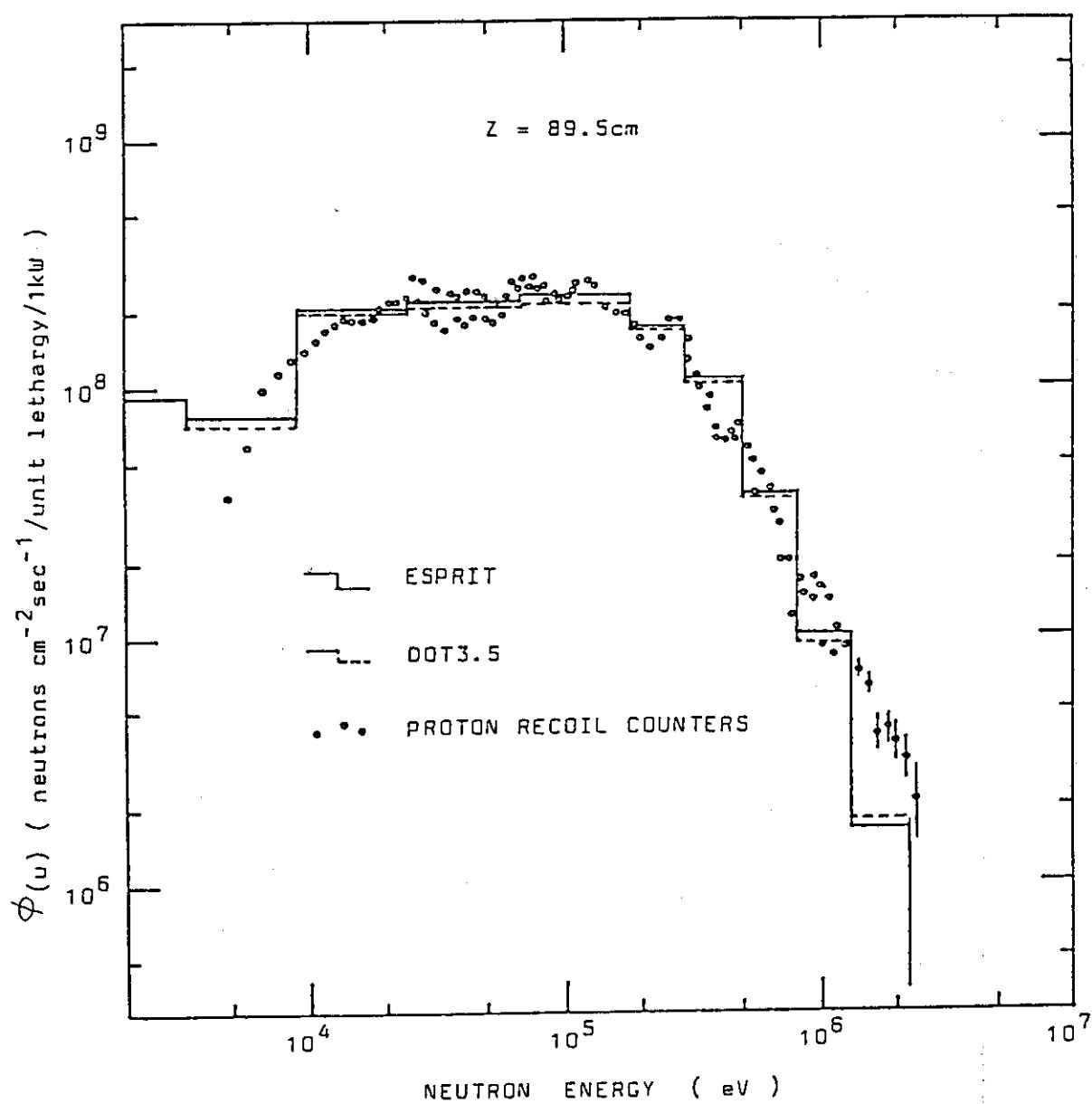
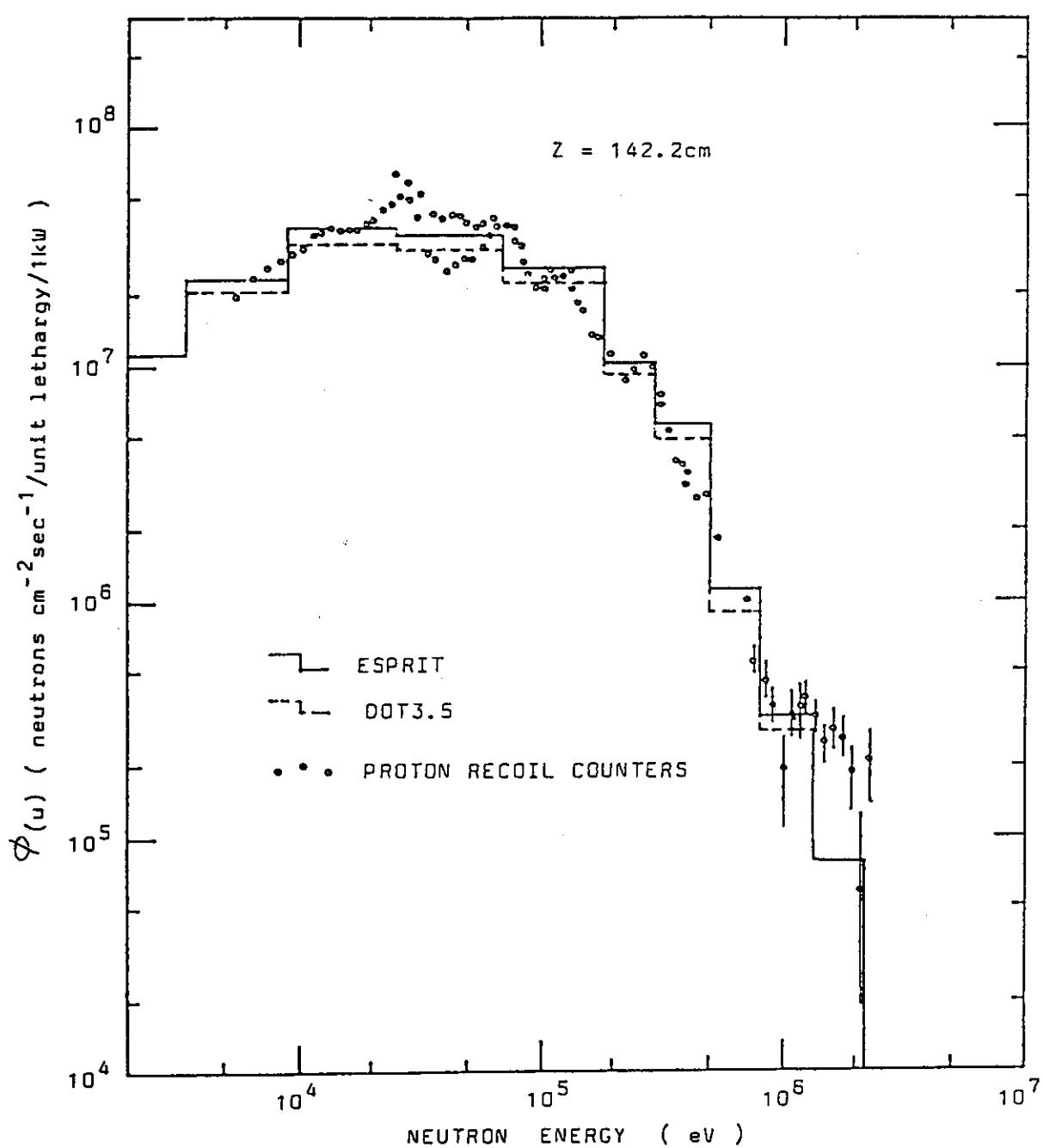
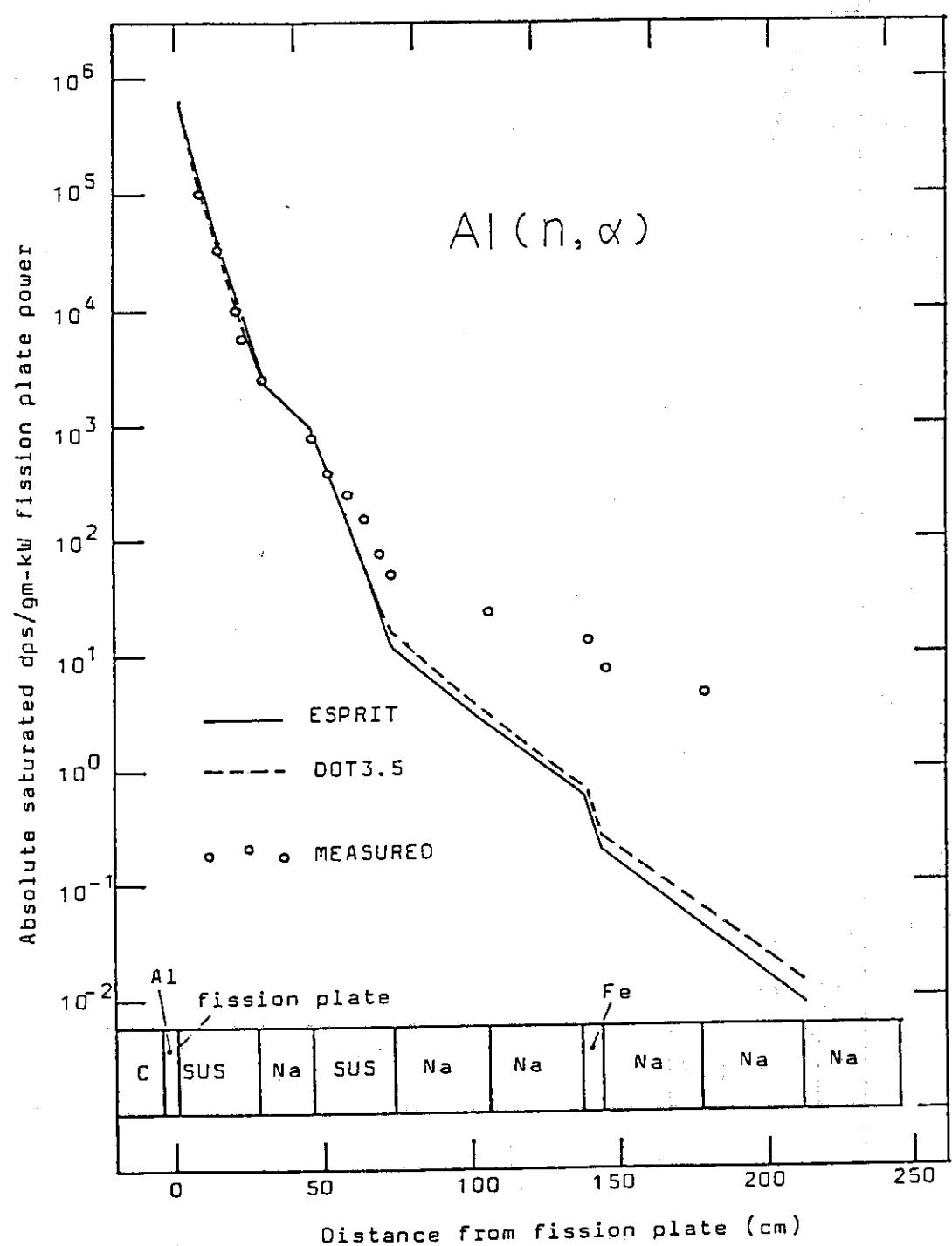


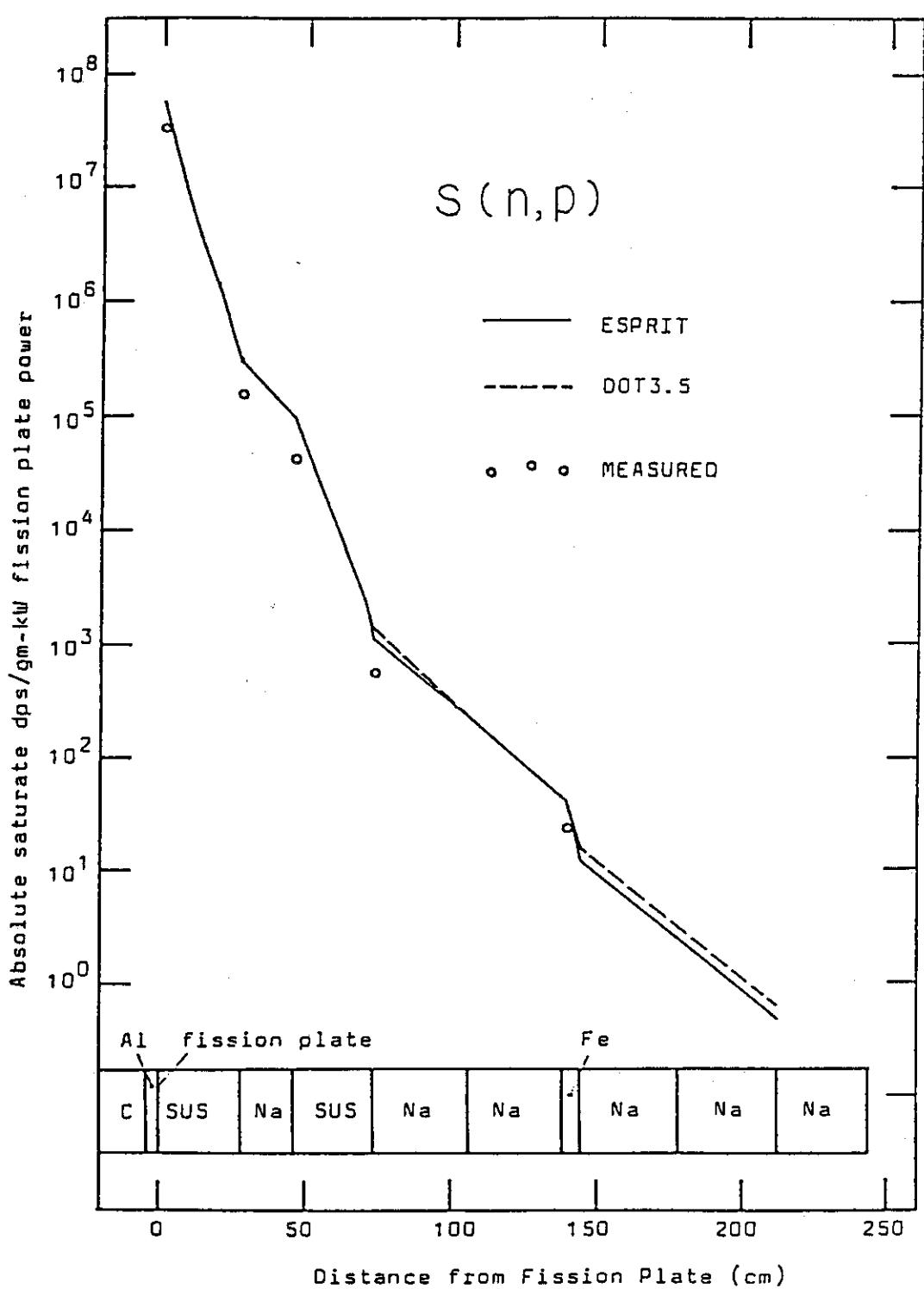
図 2.3.3 多重層 (SUS, Na, 鉄) 透過実験解析のための計算の流れ図

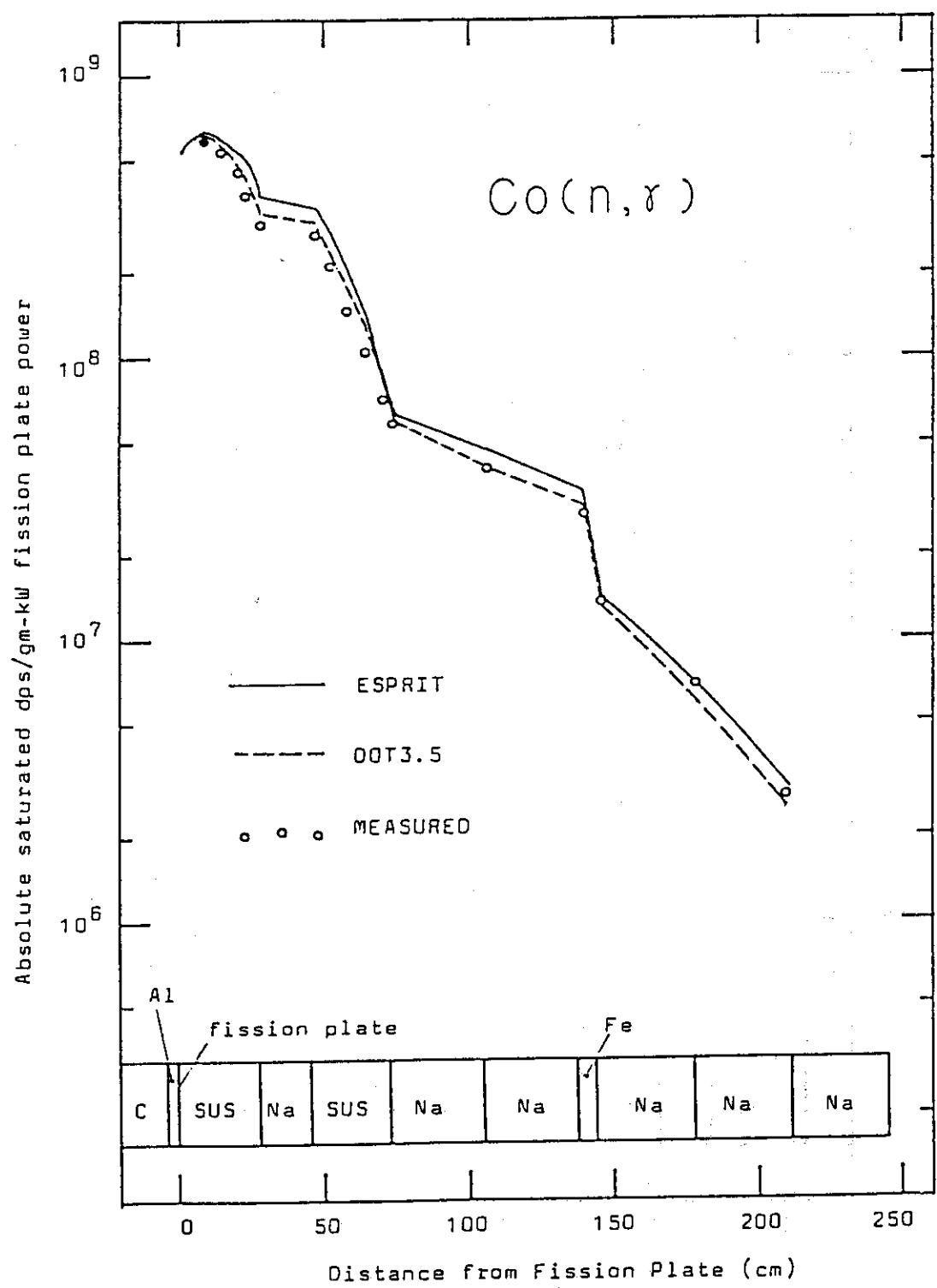
図 2.3.4(a) $Z = 49.5\text{ cm}$ での中性子スペクトルの実験と解析計算の比較

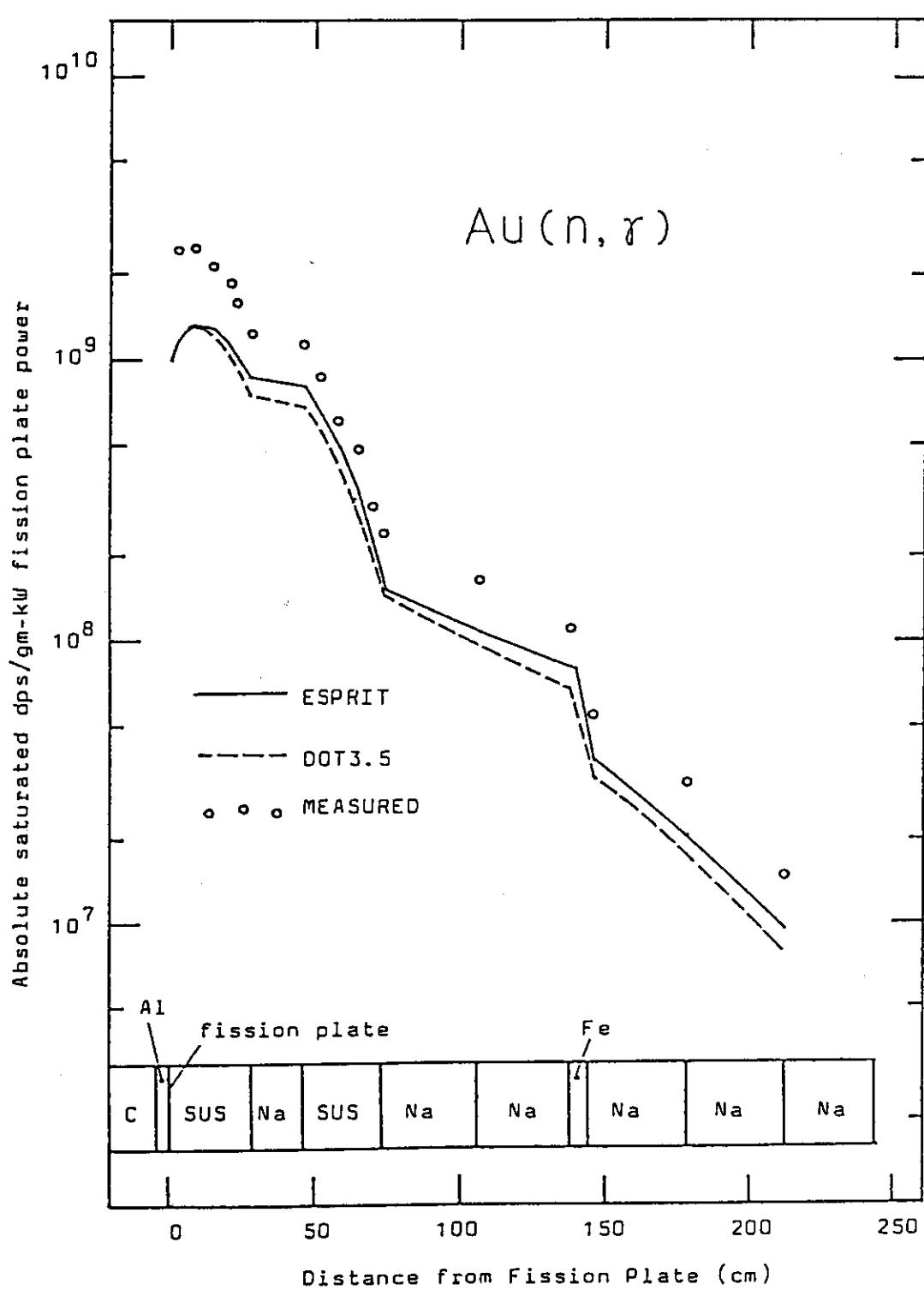
図 2.3.4(b) $Z = 89.5 \text{ cm}$ での中性子スペクトルの実験と解析計算の比較

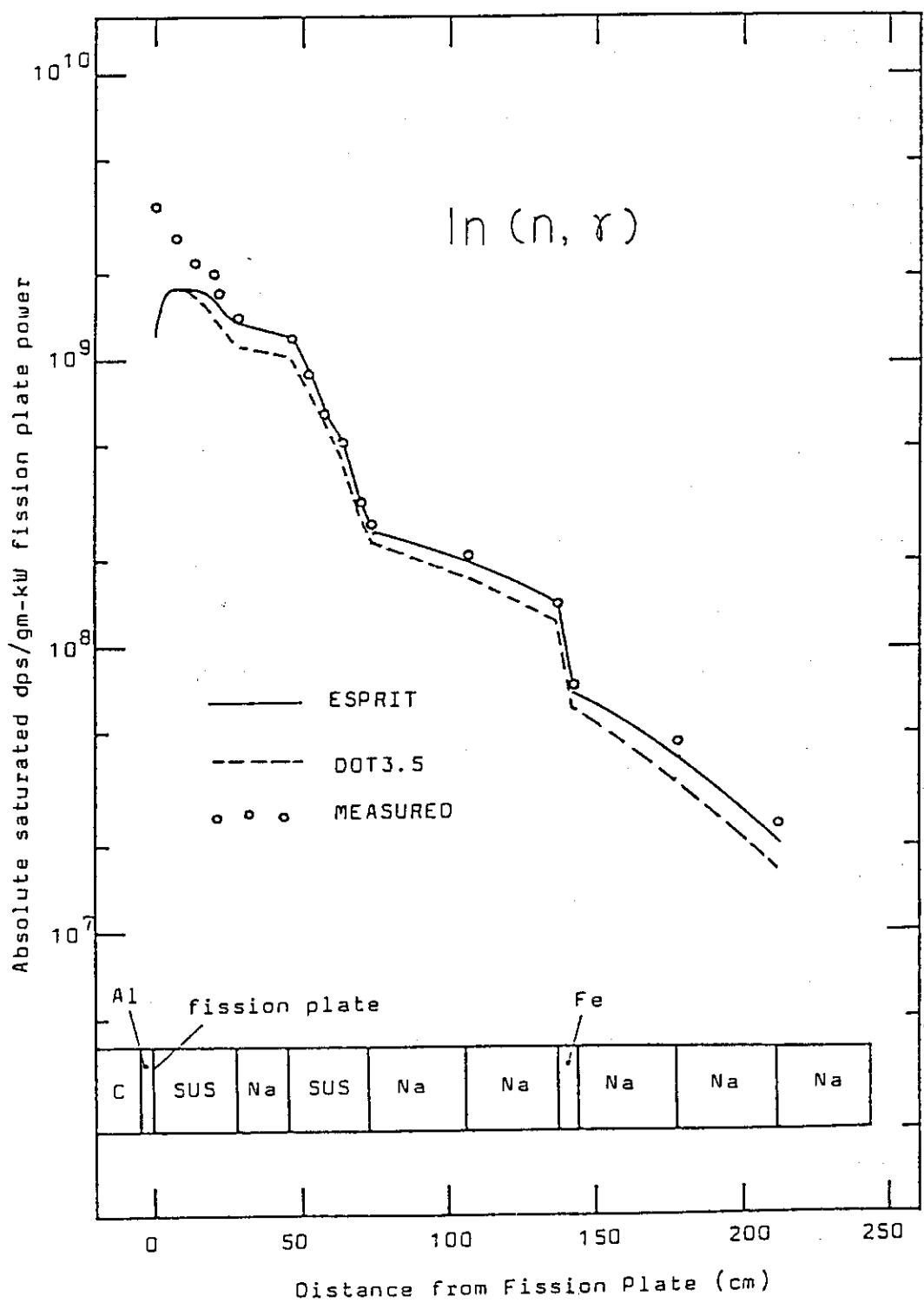
図 2.3.4(c) $Z = 142.2 \text{ cm}$ での中性子スペクトルの実験と解析計算の比較

図 2.3.5(a) $^{27}\text{Al}(\text{n}, \alpha)$ 反応率の空間分布

図 2.3.5(b) $^{32}\text{S}(n, p)$ 反応率の空間分布

図 2.3.5(c) $^{59}\text{Co}(n, \gamma)$ 反応率の空間分布

図 2.3.5(d) $^{197}\text{Au}(n, \gamma)$ 反応率の空間分布

図 2.3.5(e) ^{115}In (n, γ) 反応率の空間分布

2.4 ORNL における中性子のナトリウム透過問題

2.4.1 実験概要

本問題は「コリメートされた核分裂中性子がナトリウム遮へい体に入射した時の遮蔽へい体内外での中性子束分布」のベンチマーク実験解析に関するものである。実験は TSF (Tower Shielding Facility) からのビーム状中性子をナトリウム供試体に入射させ、その透過スペクトル及び反応率を測定したもので、その実験体系を図 2.4.1 に示す。ナトリウム供試体は直径 11 フィートの円筒形アルミタンクに入れられ、タンク外側はバックグラウンドの遮へいと中性子の漏洩を減少させるために 1.5 フィート以上の厚さのコンクリート層で囲まれている。

(1) 検出器と測定法

本実験では下記 3 種類の検出器が使用されている。

- ① N - 213 液体シンチレータ (以後 NE - 213 と呼ぶ)
- ② Benjamin 反跳陽子型スペクトロメータ
- ③ 球型 BF₃ 検出器 (以後 Bonner Ball と呼ぶ)

これらのうち NE - 213 による測定値からは FERDOR コードを用いた unfolding により 1 MeV ~ 10 MeV 領域の中性子スペクトルが得られ、Benjamin スペクトロメータの測定からは SPEC 4 コードを用いた unfolding により 70 keV ~ 1.5 MeV 領域の中性子スペクトルが得られている。一方、Bonner Ball は種々の厚さのポリエチレン、あるいは Cd 被覆を使用して熱中性子スペクトルの積分的評価に用いられている。

これらの検出器はナトリウム供試体後方の中心軸上に及び中心軸から径方向に一定距離だけ離れた場所に置かれ測定が行われている。

(2) 線 源

入射中性子ビームのスペクトル測定は、コリメータ出口で NE - 213, Benjamin スペクトロメータ及び ¹⁰B スペクトロメータを用いて行われ、熱中性子領域から 14 MeV までの範囲についてエネルギースペクトルの絶対値が得られている。中性子ビームの軸方向及び径方向の線源強度分布の測定によって、コリメートされた中性子ビームはコリメータ出口から炉心側に 59.5 in (151 cm) 入った位置で実質的に点等方線源となることが仮定できる。コリメータ出口の入射中性子スペクトルを図 2.4.2 に示す。

2.4.2 計算概要

ベンチマーク解析は、RADHEAT コードシステムの下記のコードを使用し、ナトリウム 10 フィート厚の供試体を対象として実施した。

- ① FAIRCROSS (巨視的 100 群断面積の計算)
- ② DIAC (1 次元計算による 100 群中性子束分布の計算)
- ③ FDEM (100 群中性子束を使い領域依存の縮約断面積の作成)
- ④ SNPL (上記縮約断面積をルジャンドル展開された断面積に変換)
- ⑤ DOT 3.5, 或いは ESPRIT (2 次元 Sn 計算)

なお、供試体から測定点までの線束及び測定点における反応率は SPACETRAN コードを用

いて求めた。

計算はナトリウム 10 フィート厚の供試体を対象として下記 8 ケースについて実施し、測定値と比較した。

- ケース A (23 群, P_s, S 48)
- ケース B (23 群, P_t, S 48)
- ケース C (23 群, P_s, S 96)
- ケース D (23 群, P_t, S 96)
- ケース E (100 群, P_s, S 48)
- ケース F (100 群, P_s, S 96)
- ケース G (100 群, S 48)
- ケース H (23 群, S 48)

(1) 100 群巨視的断面積の作成

DOT 3.5 計算 (ケース A ~ F) 及び ESPRIT 計算 (ケース G ~ H) 用の 100 群巨視的断面積については、FAIRCROSS コードで作成したものを各コード用に変換して使用した。23 群の場合は、100 群巨視的断面積から FDEM コードを使用して 23 群に縮約した。これらの断面積を作成した物質はコンクリート、ナトリウム、空気及びアルミニウムの 4 種類である。

(2) 2 次元計算における線源と計算条件

線源は実質的に等方線源と見做される位置、即ち中心軸に沿ってコリメータ出口から炉心側に 59.5 in (151 cm) 離れた場所に点線源があると仮定した。その点線源は、7.3° の円錐角内に $4\pi (59.5 \times 2.54)^2 \times 2.70 \times 10^5 = 7.76 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2/\text{Watt}$ の強度があるものとし、その他の角度方向の線源強度を 0 とした。この前提に従い、ナトリウム供試体の 1 次元衝突線源を計算する幾何学的体系を図 2.4.3 に示す。また、表 2.4.1(1) ~ (2) には線源強度を $7.76 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2/\text{Watt}$ に規格化した時、点線源位置における 100 群及び 23 群構造と線源スペクトルを示す。

空間線束の計算は、2 次元 R-Z の円柱座標で実施し、その領域モデルは図 2.4.4 に示すとおりである。この場合の主要な計算条件を以下に要約する。

- | | |
|----------|----------------------------|
| ① 計算問題 | 1 次元衝突線源問題 |
| ② 収束判定条件 | 0.01 |
| ③ 計算モード | 混合モード |
| ④ メッシュ数 | 径方向 25 メッシュ
軸方向 38 メッシュ |
| ⑤ 領域数 | 8 領域 |

計算は 8 ケースとも特に問題なく終了し、各々のケースにおける CPU 計算時間 (FACOM M-380 による) は下記のとおりであった。

- ケース A (23 群, P_s, S 48) 143 秒
- ケース B (23 群, P_t, S 48) 107 秒
- ケース C (23 群, P_t, S 96) 253 秒
- ケース D (23 群, P_s, S 48) 208 秒 (SPACETRAN 含)

- ケース E (100 群, P₃, S 48) 546 秒
- ケース F (100 群, P₃, S 96) 945 秒
- ケース G (100 群, S 48) 5.252 秒
- ケース H (23 群, S 48) 453 秒

(3) SPACETRAN の計算

前述のケース A ~ H のスカラー中性子束を入力として、測定点における反応率及び中性子スペクトルを求め、実測値と比較した。その要点は下記のとおりである。

応答関数及び縮約断面積の作成：

3.00 in, 6.00 in, 9.86 in 及び Cd 被覆 Bonner Ball の応答関数は ORNL - TM - 3451⁽¹⁾ から引用した。但し、この文献に与えられた応答関数の 100 群構造は本作業の 100 群構造と異なっているため、これと前述の表 3.4.1 に示す 100 群構造に変換して使用し、更にこの 100 群応答関数を FDEM コードを使用して 23 群に縮約した。これらの縮約断面積作成の流れを図 2.4.5 に示す。

2.4.3 計算と実験との比較

(1) Bonner Ball に対する計算と実験との比較

SPACETRAN コードを用いて求めた Bonner Ball に対する中性子計数率の計算結果（ケース A ~ H）を、実測値と対比して表 2.4.2 ~ 表 2.4.9 に示した。なお、これらの比較において、実測値は ORNL - 4480⁽²⁾ から引用した。

(2) Benjamin スペクトロメータに対する計算と実験の比較

中間エネルギー領域の中性子スペクトル (70 keV ~ 1.5 MeV) については、Benjamin スペクトロメータの中性子計算率の計算結果を実験と対比して、図 2.4.6 (ケース A B C D H) 及び図 2.4.7 (ケース E F G) に示した。これらの比較は、いずれも Na 層 10 ft を通した後、その外表面から中心軸後方 2 ft の位置で与えられたものである。

(3) NE - 213 検出器に対する計算と実験との比較

高エネルギー領域の中性子スペクトル (1 MeV ~ 10 MeV) については、NE - 213 検出器の中性子計数率の計算結果を実験と対比して、図 2.4.8 (ケース A B C D H) 及び図 2.4.9 (ケース E F G) に示した。これらの比較も、Na 層 10 ft を通し後、その外表面軸後方 2 ft の位置で与えられている。

2.4.4 評価及び考察

以上に述べた計算と実験の比較から下記の評価及び考察を行った。

(1) 幾何学的形状が計算結果に与える影響

比較評価した 8 ケースとも軸中心線上で C / E はほぼ満足できるものであるが、中心軸から離れるにしたがってその一致は悪くなっている。この原因は SPACETRAN コードの中性子束評価方法に起因するものと考えられる。即ち、SPACETRAN コードはある特定方向の角度線束を内挿して求めず、もっとも近傍の角度線束で代用して求めるようになっている。体系の形状によらず計算を正確に行うには、特定方向の角度線束を正確に求める解析モデルが必要

になる。

(2) 非等方散乱近似による効果

ケース A, B, C, D の比較から下記の傾向が観察される。

- ① P_n 成分が高いほど Bonner Ball, Benjamin スペクトロメータ, 及び NE - 213 に対する計算結果が測定値より大きくなり, その差は高エネルギー領域側で広がる。
- ② 100 keV ~ 1 MeV のエネルギー領域では P_3 と P_1 の差はほとんど見られない。また, P_1 と P_3 の差もこのエネルギー領域では 1 MeV ~ 10 MeV 領域における差より小さくなる。

(3) Sn 効果

ケース A, C, E, F の比較から次の考察結果を得る。

- ① 0.2 eV 以上のエネルギー領域では S 96 が S 48 よりも計算を低めに評価する傾向がある。しかし, 0.2 eV 以下ではその差は縮小する。

(4) 群数の効果

ケース A, C, E, F の比較から次の考察結果を得る。

- ① 100 群は 23 群に比べて高エネルギー側で大きめな評価を与える。この結果は S 48, S 96 のいずれにについても同じである。
- ② 一般に群数の効果は P_n , Sn の次数を上げる効果より大きい。

(5) Benjamin 及び NE - 213 のスペクトルの考察

図 2.4.6 ~ 図 2.4.9 に示す Benjamin スペクトル図及び NE - 213 スペクトル図から次の考察を得る。

- ① Benjamin 領域（中間エネルギー領域）のスペクトル計算値の形は測定値と類似しているが, 計算値は実測値より過大評価における傾向がある。特に, 0.7 MeV ~ 1.5 MeV の領域においてこの傾向が強い。
- ② NE - 213 領域（高エネルギー領域のスペクトル）計算値の形も測定値と類似しているが, 1.5 MeV 以下のエネルギー領域で, 計算値は測定値に対して過大評価になる傾向を有する。

(6) ESPRIT と DIAC 計算の比較

- ① ケース G (ESPRIT : 100 群, S 48) をケース E (DIAC : 100 群, P_3 , S 48) と比較すると, Benjamin では約 8 %, NE - 213 では約 12 % C / E の改善が見られる。これは P_L 近似に伴う解析誤差を排除したことによると考えられる。同様に, ケース H (ESPRIT : 23 群, S 48) をケース A (DIAC : 23 群, P_3 , S 48) 及びケース B (DIAC : P_1 , S 48) と比較すると, Benjamin では 6 ~ 9 %, NE - 213 では 11 ~ 25 % C / E の改善が見られる。
- ② ケース G, H 間の比較では, エネルギー群を縮約したケース H の方が C / E は小さくなっている。この傾向はケース A, E 間の比較でも同様である。

(7) 総合的考察

以上, (1) ~ (5) に述べた考察を総合すると, ナトリウム透過問題に対する RADHEAT - V 4 コードシステムの適用性は, 若干の問題を残すものの実用的な観点からほぼ満足すべきものと

考えられる。線源の取り扱い方、空間形状と格子点の取り方などにもかなりの任意性があり、これらが実測値との比較にある程度の差異を与えていていることを考慮し、解析モデルの本質的な部分を抽出して解析制度を評価することが今後の課題である。

参考文献

- (1) R.E. Maerker, L.R. Williams, F.R. Mynatt, and N.M. Greene,
"Response Functions for Bonnet Ball Neutron Detectors," ORNL-TM-
3451, Oak Ridge National Laboratory (1971).
- (2) R.E. Maerker, et al, "Final Report on a Benchmark Experiments for
Neutron Transport in Thick Sodium," ORNL-4880, Oak Ridge National
Laboratory (1974).

表 2.4.1 群構造と線源

(1 / 2)

100群	エネルギー範囲 (eV)	100群の線源 (n/cm ² /min/W)	23群	23群の線源 (n/cm ² /min/W)
1	1.64870E 07 ... 1.45500E 07	9.68011E 05		
2	1.45500E 07 ... 1.28400E 07	7.59686E 06		
3	1.28400E 07 ... 1.13310E 07	2.02757E 07	1	2.18951E 08
4	1.13310E 07 ... 1.00000E 07	6.24309E 07		
5	1.00000E 07 ... 8.82500E 06	1.27680E 08		
6	8.82500E 06 ... 7.78800E 06	2.40400E 08		
7	7.78800E 06 ... 6.87290E 06	4.15529E 08		
8	6.87290E 06 ... 6.06530E 06	6.99673E 08	2	3.53090E 09
9	6.06530E 06 ... 5.35260E 06	9.68688E 08		
10	5.35260E 06 ... 4.72370E 06	1.20665E 09		
11	4.72370E 06 ... 4.16860E 06	1.48491E 09		
12	4.16860E 06 ... 3.67880E 06	1.71436E 09		
13	3.67880E 06 ... 3.24650E 06	1.76377E 09	3	9.54730E 09
14	3.24650E 06 ... 2.36500E 06	2.09558E 09		
15	2.86500E 06 ... 2.52840E 06	2.48868E 09		
16	2.52840E 06 ... 2.23130E 06	2.45895E 09		
17	2.23130E 06 ... 1.96910E 06	2.20104E 09		
18	1.96910E 06 ... 1.73770E 06	1.92807E 09	4	9.65708E 09
19	1.73770E 06 ... 1.53350E 06	1.66900E 09		
20	1.53350E 06 ... 1.35340E 06	1.40002E 09		
21	1.35340E 06 ... 1.19430E 06	1.09795E 09		
22	1.19430E 06 ... 1.05400E 06	8.87112E 08		
23	1.05400E 06 ... 9.30140E 05	7.94543E 08	5	4.41462E 09
24	9.30140E 05 ... 8.20850E 05	7.95119E 08		
25	8.20850E 05 ... 7.24400E 05	8.39898E 08		
26	7.24400E 05 ... 6.39280E 05	7.82654E 08		
27	6.39280E 05 ... 5.64160E 05	6.50516E 08	6	1.95883E 09
28	5.64160E 05 ... 4.97870E 05	5.25655E 08		
29	4.97870E 05 ... 4.39370E 05	4.33477E 08	7	8.48908E 08
30	4.39370E 05 ... 3.87740E 05	4.15431E 08		
31	3.87740E 05 ... 3.42180E 05	4.20938E 08	8	8.27445E 08
32	3.42180E 05 ... 3.01970E 05	4.06507E 08		
33	3.01970E 05 ... 2.66490E 05	3.68602E 08	9	3.68602E 08
34	2.66490E 05 ... 2.35180E 05	3.28524E 08	10	6.12877E 08
35	2.35180E 05 ... 2.07540E 05	2.84353E 08		
36	2.07540E 05 ... 1.83160E 05	3.21792E 08	11	6.29149E 08
37	1.83160E 05 ... 1.61630E 05	3.07357E 08		
38	1.61630E 05 ... 1.42640E 05	2.90574E 08	12	5.76468E 08
39	1.42640E 05 ... 1.25880E 05	2.85894E 08		
40	1.25880E 05 ... 1.11090E 05	2.80279E 08	13	5.49357E 08
41	1.11090E 05 ... 9.80370E 04	2.69078E 08		
42	9.80370E 04 ... 8.65170E 04	2.69031E 08		
43	8.65170E 04 ... 7.63510E 04	2.57413E 08		
44	7.63510E 04 ... 6.73790E 04	2.57388E 08	14	1.28066E 09
45	6.73790E 04 ... 5.94620E 04	2.48429E 08		
46	5.94620E 04 ... 5.24750E 04	2.48394E 08		
47	5.24750E 04 ... 4.63090E 04	2.37090E 08		
48	4.63090E 04 ... 4.08680E 04	2.37003E 08		
49	4.08680E 04 ... 3.60660E 04	2.26664E 08	15	1.14827E 09
50	3.60660E 04 ... 3.18280E 04	2.26678E 08		

表 2.4.1 (続 き)

100群	エネルギー範囲 (eV)	100群の線源 (n/cm ² /min/W)	23群	23群の線源 (n/cm ² /min/W)
51	3.18280E 04 ... 2.80880E 04	2.20832E 08	15	
52	2.80880E 04 ... 2.47880E 04	2.20723E 08		
53	2.47880E 04 ... 2.18750E 04	2.13224E 08		
54	2.18750E 04 ... 1.93050E 04	2.13164E 08	16	
55	1.93050E 04 ... 1.70360E 04	2.05041E 08		1.45285E 09
56	1.70360E 04 ... 1.50340E 04	2.04991E 08		
57	1.50340E 04 ... 1.17090E 04	3.95707E 08		
58	1.17090E 04 ... 9.11880E 03	3.86017E 08		
59	9.11880E 03 ... 7.10170E 03	3.75435E 08	17	
60	7.10170E 03 ... 5.53080E 03	3.61792E 08		1.47444E 09
61	5.53080E 03 ... 4.30740E 03	3.51194E 08		
62	4.30740E 03 ... 3.35460E 03	3.41720E 08		
63	3.35460E 03 ... 2.61260E 03	3.39204E 08	18	
64	2.61260E 03 ... 2.03470E 03	3.28382E 08		1.00931E 09
65	2.03470E 03 ... 1.58460E 03	3.20766E 08		
66	1.58460E 03 ... 1.23410E 03	3.15251E 08		
67	1.23410E 03 ... 9.61120E 02	2.99674E 08	19	
68	9.61120E 02 ... 7.48520E 02	2.93647E 08		2.08236E 09
69	7.48520E 02 ... 5.82950E 02	2.89243E 08		
70	5.82950E 02 ... 4.54000E 02	2.84049E 08		
71	4.54000E 02 ... 3.53570E 02	2.79733E 08		
72	3.53570E 02 ... 2.75360E 02	2.72783E 08		
73	2.75360E 02 ... 2.14450E 02	2.68963E 08		
74	2.14450E 02 ... 1.67020E 02	2.66187E 08		
75	1.67020E 02 ... 1.30070E 02	2.57888E 08	20	
76	1.30070E 02 ... 1.01300E 02	2.55835E 08		2.10069E 09
77	1.01300E 02 ... 7.88930E 01	2.61442E 08		
78	7.88930E 01 ... 6.14420E 01	2.57520E 08		
79	6.14420E 01 ... 4.78510E 01	2.60076E 08		
80	4.78510E 01 ... 3.72670E 01	2.58166E 08		
81	3.72670E 01 ... 2.90230E 01	2.56594E 08		
82	2.90230E 01 ... 2.26030E 01	2.58991E 08		
83	2.26030E 01 ... 1.76030E 01	2.58277E 08		
84	1.76030E 01 ... 1.37100E 01	2.57739E 08		
85	1.37100E 01 ... 1.06770E 01	2.70034E 08	21	
86	1.06770E 01 ... 8.31530E 00	2.73821E 08		2.71189E 09
87	8.31530E 00 ... 6.47600E 00	2.84234E 08		
88	6.47600E 00 ... 5.04350E 00	2.95512E 08		
89	5.04350E 00 ... 3.92790E 00	2.98517E 08		
90	3.92790E 00 ... 3.05900E 00	2.96813E 08		
91	3.05900E 00 ... 2.38240E 00	2.95484E 08		
92	2.38240E 00 ... 1.35540E 00	3.08483E 08		
93	1.85540E 00 ... 1.44500E 00	3.08388E 08		
94	1.44500E 00 ... 1.12540E 00	3.45831E 08	22	
95	1.12540E 00 ... 8.76420E 01	3.52348E 08		
96	8.76420E 01 ... 6.32560E 01	3.89305E 08		
97	6.82560E 01 ... 5.31580E 01	4.49739E 08		
98	5.31580E 01 ... 4.13990E 01	5.43693E 08		
99	4.13990E 01 ... 1.51830E 01	3.28400E 09	23	
100	4.51830E 01 ... 1.00000E 04	2.39826E 10		2.72666E 10

表2.4.2 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 23群, P3, S48, DOT3.5)ケースA

検出器種類	検出器の位置(cm)	測定値(E)				計算値(C)				計算値/測定値(C/E)						
		Bonner Ball (counts/nim/W)				Bonner Ball (counts/nim/W)				Bonner Ball						
	供試体後部軸中心から る軸方向距離。	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in			
Bonner Ball	15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.94	32.4	24.8	4.08	0.95	1.18	0.93	0.83		
	30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.27	24.9	18.8	3.08	0.85	1.06	0.82	0.74		
	60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.68	18.3	13.8	2.25	0.86	1.06	0.83	0.75		
	91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	1.23	13.3	9.94	1.62	-	0.82	1.02	0.79	0.72	-
	121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	0.936	10.1	7.56	1.23	-	0.82	1.00	0.79	0.72	
	152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	0.724	7.82	5.81	0.943	-	0.82	1.01	0.78	0.71	
	183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	0.575	6.21	4.61	0.747	-	0.81	1.02	0.80	0.73	
	5.08	0.0	3.55	30.6	-	-	3.82	42.1	-	-	-	1.08	1.38	-	-	
Bonner Ball	5.08	30.48	3.36	28.8	-	-	2.80	30.7	-	-	-	0.83	1.07	-	-	
	5.08	60.96	2.95	25.3	-	-	2.44	26.6	-	-	-	0.83	1.05	-	-	
	5.08	91.44	2.39	20.3	-	-	1.40	15.0	-	-	-	0.59	0.74	-	-	
	5.08	121.92	1.69	14.0	-	-	0.760	8.06	-	-	-	0.45	0.58	-	-	
	5.08	152.40	0.909	7.34	-	-	0.327	3.40	-	-	-	0.36	0.46	-	-	
	5.08	182.88	0.083	0.64	-	-	0.095	0.98	-	-	-	1.14	1.53	-	-	
	Benyamin Spectrometer	60.96	0.0	-	-	-	* ² 0.276	-	-	-	-	0.402	-	-	-	1.46
	NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	-	-	-	* ³ 0.0487 ~0.0633	-	-	-	-	0.0675	-	-	-	1.10 ~1.42

*1 単位 (n/cm²/min/W)

*2 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。

*3 1 MeV ~ 10 MeV の値。

表 2.4.3 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 23群, P1, S48, DOT 3.5)ケースB

検出器の種類	検出器の位置(cm)	測定値(E)			計算値(C)			計算値/測定値(C/E)									
		Bonner Ball(counts/nim/W)			Bonner Ball(counts/nim/W)			Bonner Ball									
Bonner Ball	供試体後部軸から 軸心からの径方向距離。	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	その他の 検出器			
		15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.91	31.9	24.1	3.90	0.94	1.16	0.90	0.80		
		30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.25	24.5	18.3	2.95	0.85	1.04	0.80	0.71		
		60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.66	18.1	13.4	2.16	0.85	1.05	0.80	0.72		
		91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	—	1.21	13.1	9.69	1.55	—	0.81	1.01	0.77	0.69
		121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	—	0.927	10.0	7.37	1.18	—	0.81	0.99	0.77	0.69
		152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	—	0.717	7.71	5.67	0.905	—	0.81	0.99	0.77	0.62
		183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	—	0.570	6.12	4.49	0.717	—	0.81	1.01	0.78	0.70
		5.08	0.0	3.55	30.6	—	—	—	3.77	41.5	—	—	—	1.07	1.36	—	—
		5.08	30.48	3.36	28.8	—	—	—	2.77	30.3	—	—	—	0.82	1.05	—	—
Bonner Ball	供試体後部軸から 軸心からの径方向距離。	5.08	60.96	2.95	25.3	—	—	—	2.41	26.2	—	—	—	0.82	1.04	—	—
		5.08	91.44	2.39	20.3	—	—	—	1.38	14.8	—	—	—	0.58	0.73	—	—
		5.08	121.92	1.69	14.0	—	—	—	0.753	7.96	—	—	—	0.45	0.57	—	—
		5.08	152.40	0.909	7.34	—	—	—	0.324	3.35	—	—	—	0.36	0.46	—	—
		5.08	182.88	0.083	0.64	—	—	—	0.095	0.97	—	—	—	1.14	1.52	—	—
Benyamin Spectrometer	供試体後部軸から 軸心からの径方向距離。	60.96	0.0	—	—	—	—	*2	—	—	—	0.347	—	—	—	—	1.26
		NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	—	*3	—	—	—	0.0510	—	—	—	—

*1 単位 (n/cm²/min/W)

*2 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。

*3 1MeV ~ 10 MeV の値。

表 2.4.4 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 23 群, P3, S96, DOT 3.5) ケース C

検出器種類	供試体後部軸中心からの垂直方向距離。(cm)	測定値 (E)			計算値 (C)			計算値/測定値 (C/E)			Bonner Ball						
		Bonner Ball (counts/nim/W)			Bonner Ball (counts/nim/W)			Bonner Ball			Bonner Ball						
		Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in				
	15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.94	32.4	24.8	4.06	0.95	1.18	0.93	0.83			
	30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.34	25.7	19.5	3.17	0.88	1.09	0.86	0.76			
Bonner Ball	60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.69	18.5	13.9	2.25	0.86	1.07	0.83	0.75			
	91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	—	1.26	13.7	10.2	1.66	—	0.84	1.05	0.81	0.73	—
	121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	0.951	10.3	7.68	1.24	0.83	1.02	0.81	0.73	—		
	152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	0.745	8.06	6.00	0.970	0.84	1.04	0.81	0.73	—		
	183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	0.586	6.33	4.70	0.759	0.83	1.04	0.81	0.74	—		
	5.08	0.0	3.55	30.6	—	—	3.93	43.4	—	—	1.11	1.42	—	—	—		
	5.08	30.48	3.36	28.8	—	—	2.87	31.6	—	—	0.85	1.10	—	—	—		
Bonner Ball	5.08	60.96	2.95	25.3	—	—	2.41	26.3	—	—	0.82	1.04	—	—	—		
	5.08	91.44	2.39	20.3	—	—	1.45	15.6	—	—	0.61	0.77	—	—	—		
	5.08	121.92	1.69	14.0	—	—	0.773	8.20	—	—	0.46	0.59	—	—	—		
	5.08	152.40	0.909	7.34	—	—	0.367	3.81	—	—	0.40	0.52	—	—	—		
	5.08	182.88	0.083	0.64	—	—	0.094	0.97	—	—	1.13	1.52	—	—	—		
Benyamin Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	—	* ² 0.276	—	—	—	0.393	—	—	—	1.42		
NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	—	* ³ 0.0487	—	—	—	0.0632	—	—	—	1.00 ~1.29		

*1 単位 (n/cm²/min/W)

*2 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。

*3 1MeV ~ 10 MeV の値。

表2.4.5 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 23群, P5, S48, DOT3.5)ケースD

検出器の種類	検出器の位置(cm)	測定値(E)			計算値(C)			計算値/測定値(C/E)								
		Bonner Ball(counts/nim/W)			Bonner Ball(counts/nim/W)			Bonner Ball								
供試体後部からの軸方向距離。	軸中心からの軸方向距離。	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	その他の検出器		
Bonner Ball	15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.95	32.5	24.8	4.10	0.96	1.18	0.93	0.84		
	30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.27	24.9	18.9	3.09	0.85	1.06	0.83	0.74		
	60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.68	18.4	13.8	2.26	0.86	1.06	0.83	0.75		
	91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	—	1.23	13.3	9.97	1.62	—	0.82	1.02	0.79	0.72
	121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	0.937	10.2	7.58	1.23	—	0.82	1.01	0.80	0.72	
	152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	0.725	7.83	5.83	0.946	—	0.82	1.01	0.79	0.71	
	183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	0.576	6.22	4.62	0.750	—	0.81	1.02	0.80	0.73	
	5.08	0.0	3.55	30.6	—	—	3.82	42.2	—	—	—	1.08	1.38	—	—	
Bonner Ball	5.08	30.48	3.36	28.8	—	—	2.80	30.8	—	—	—	0.83	1.07	—	—	
	5.08	60.96	2.95	25.3	—	—	2.44	26.6	—	—	—	0.83	1.05	—	—	
	5.08	91.44	2.39	20.3	—	—	1.40	15.1	—	—	—	0.59	0.74	—	—	
	5.08	121.92	1.69	14.0	—	—	0.761	8.08	—	—	—	0.45	0.58	—	—	
	5.08	152.40	0.909	7.34	—	—	0.328	3.40	—	—	—	0.36	0.46	—	—	
	5.08	182.88	0.083	0.64	—	—	0.096	0.98	—	—	—	1.16	1.53	—	—	
	Benyamin Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	*2	—	—	—	0.408	—	—	—	—	1.48
	NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	*3	—	—	—	0.0771	—	—	—	—	1.12

*1 単位 (n/cm²/min/W)

*2 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。

*3 1MeV ~ 10 MeV の値。

表 2.4.6 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 100 群, P3, S48, DOT 3.5) ケース E

検出器の種類	検出器の位置 (cm)	測定値 (E)				計算値 (C)				Bonner Ball				計算値／測定値 (C/E)	
		供試体後部軸中心から軸方向距離。		Bonner Ball (counts/nim/W)		その他検出器		Bonner Ball (counts/nim/W)		その他検出器		Bonner Ball		その他検出器	
		Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in		
Bonner Ball	15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.93	34.4	27.4	4.55	0.95	1.25	1.03	0.93	
	30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.27	26.4	20.8	3.42	0.85	1.12	0.91	0.82	
	60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.68	19.4	15.2	2.49	0.86	1.12	0.91	0.83	
	91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	1.22	14.0	10.9	1.79	—	0.81	1.08	0.87	0.79
	121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	0.932	10.7	8.30	1.35	0.82	1.06	0.87	0.79	
	152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	0.720	8.24	6.38	1.04	0.81	1.06	0.86	0.78	
	183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	0.572	6.53	5.05	0.822	0.81	1.08	0.87	0.80	
	5.08	0.0	3.55	30.6	—	—	3.80	44.8	—	—	1.07	1.46	—	—	
	5.08	30.48	3.36	28.8	—	—	2.79	32.6	—	—	0.83	1.13	—	—	
	5.08	60.96	2.95	25.3	—	—	2.44	28.2	—	—	0.83	1.11	—	—	
Bonner Ball	5.08	91.44	2.39	20.3	—	—	1.40	15.9	—	—	0.59	0.78	—	—	
	5.08	121.92	1.69	14.0	—	—	0.758	8.48	—	—	0.45	0.61	—	—	
	5.08	152.40	0.909	7.34	—	—	0.324	3.53	—	—	0.36	0.48	—	—	
	5.08	182.88	0.083	0.64	—	—	0.093	1.01	—	—	1.12	1.58	—	—	
	Benyamin Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	* ² 0.276	—	—	—	0.445	—	—	—	1.61
NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	—	* ³ 0.0487 ~0.0633	—	—	—	0.0833	—	—	—	1.32 ~1.70

*1 単位 (n/cm²/min/W)

*2 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。

*3 1 MeV ~ 10 MeV の値。

表 2.4.7 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 100 群, P3, S96, DOT 3.5) ケース F

検出器の種類	検出器の位置 (cm)	測定値 (E)			計算値 (C)			計算値/測定値 (C/E)							
		供試体後部軸から の軸方向距離。	軸中心から の径方向距離。	Bonner Ball (counts/nim/W)	その他の 検出器 *1	Bonner Ball (counts/nim/W)	その他の 検出器 *1	Bonner Ball	Cd	3 in	6 in	10 in	10 in		
Bonner Ball	15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.93	34.4	27.4	4.52	0.95	1.25	1.03	0.92	
	30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.34	27.2	21.5	3.52	0.88	1.16	0.94	0.84	
	60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.69	19.5	15.3	2.49	0.86	1.13	0.92	0.83	
	91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	1.25	14.4	11.2	1.83	-	0.83	1.11	0.89	0.81
	121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	0.947	10.9	8.43	1.37	0.83	1.08	0.89	0.80	
	152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	0.741	8.49	6.57	1.07	0.83	1.09	0.89	0.80	
	183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	0.583	6.66	5.15	0.836	0.82	1.10	0.89	0.81	
	5.08	0.0	3.55	30.6	-	-	3.91	46.1	-	-	1.10	1.51	-	-	
	5.08	30.48	3.36	28.8	-	-	2.87	33.5	-	-	0.85	1.16	-	-	
	5.08	60.96	2.95	25.3	-	-	2.41	27.9	-	-	0.82	1.10	-	-	
Bonner Ball	5.08	91.44	2.39	20.3	-	-	1.45	16.5	-	-	0.61	0.81	-	-	
	5.08	121.92	1.69	14.0	-	-	0.770	8.62	-	-	0.46	0.62	-	-	
	5.08	152.40	0.909	7.34	-	-	0.363	3.96	-	-	0.40	0.54	-	-	
	5.08	182.88	0.083	0.64	-	-	0.092	0.99	-	-	1.11	1.55	-	-	
	Benyamin Spectrometer	60.96	0.0	-	-	-	*2	-	-	-	0.432	-	-	1.57	
NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	-	-	-	-	*3	-	-	-	0.0754	-	-	1.19 ~1.54	

*1 単位 (n/cm²/min/W)*2 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。
*3 1MeV ~ 10 MeV の値。

表 2.4.8 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 100群, S 48, ESPRIT) ケース G

検出器の種類	検出器の位置 (cm)	測定値 (E)			計算値 (C)			計算値／測定値 (C/E)						その他検出器		
		Bonner Ball (counts/nim/W)			Bonner Ball (counts/nim/W)			Bonner Ball								
	供試体後部から軸中心からの径方向距離。	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	その他検出器		
Bonner Ball	15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.90	33.9	26.9	4.43	0.94	1.23	1.01	0.90		
	30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.24	26.0	20.5	3.34	0.84	1.11	0.899	0.80		
	60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.66	19.1	14.9	2.43	0.85	1.10	0.89	0.81		
	91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	—	1.21	13.9	10.7	1.74	—	0.81	1.07	0.85	
	121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	0.92	10.5	8.14	1.32	—	0.81	1.04	0.86	0.77	
	152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	0.71	8.13	6.26	1.01	—	0.80	1.04	0.84	0.76	
	183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	0.57	6.44	4.95	0.80	—	0.81	1.06	0.86	0.78	
	5.08	0.0	3.55	30.6	—	—	3.76	44.1	—	—	—	1.06	1.44	—	—	
Bonner Ball	5.08	30.48	3.36	28.8	—	—	2.76	32.2	—	—	—	0.82	1.12	—	—	
	5.08	60.96	2.95	25.3	—	—	2.41	27.8	—	—	—	0.82	1.10	—	—	
	5.08	91.44	2.39	20.3	—	—	—	1.38	15.7	—	—	—	0.58	0.77	—	—
	5.08	121.92	1.69	14.0	—	—	0.75	8.36	—	—	—	0.44	0.60	—	—	
	5.08	152.40	0.909	7.34	—	—	0.32	3.48	—	—	—	0.35	0.47	—	—	
	5.08	182.88	0.083	0.64	—	—	0.092	0.99	—	—	—	1.11	1.55	—	—	
	Benyamin Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	*2	—	—	—	—	—	—	—	—	
	NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	—	—	—	0.276	—	—	—	0.409	—	—	—	1.48	
							*3	—	—	—	0.0487	—	—	—	1.16	
							~0.0633	—	—	—	~0.0736	—	—	—	~1.51	

*1 単位 (n/cm²/min/W)

*2 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。

*3 1 MeV ~ 10 MeV の値。

表2.4.9 Bonner Ball 測定値に対する計算結果 (Na 10 ft 23群, S48, ESPRT)ケース H

検出器の種類	検出器の位置(cm)	測定値(E)			計算値(C)			計算値/測定値(C/E)							
		Bonner Ball(counts/nim/W)			Bonner Ball(counts/nim/W)			Bonner Ball							
供試体後部軸中心から軸方向距離。	軸方向距離。	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	Cd	3 in	6 in	10 in	その他の検出器	
Bonner Ball	15.24	0.0	3.08	27.5	26.7	4.90	2.90	31.84	24.20	3.97	0.94	1.16	0.91	0.81	
	30.48	0.0	2.66	23.5	22.8	4.17	2.24	24.42	18.41	2.99	0.84	1.04	0.81	0.72	
	60.96	0.0	1.96	17.3	16.7	3.01	1.66	17.99	13.47	2.19	0.85	1.04	0.81	0.73	
	91.44	0.0	1.50	13.0	12.6	2.26	-	1.21	13.05	9.71	1.57	-	0.81	1.00	0.77
	121.92	0.0	1.14	10.1	9.52	1.71	0.92	9.95	7.38	1.19	-	0.81	0.99	0.78	0.70
	152.40	0.0	0.888	7.78	7.41	1.33	0.712	7.67	5.68	0.92	0.80	0.99	0.77	0.69	
	183.896	0.0	0.707	6.07	5.78	1.03	0.566	6.09	4.50	0.73	0.80	1.00	0.78	0.71	
	5.08	0.0	3.55	30.6	-	-	3.76	41.42	-	-	1.06	1.35	-	-	
	5.08	30.48	3.36	28.8	-	-	2.76	30.18	-	-	0.82	1.05	-	-	
	5.08	60.96	2.95	25.3	-	-	2.40	26.11	-	-	0.81	1.03	-	-	
Bonner Ball	5.08	91.44	2.39	20.3	-	-	1.37	14.76	-	-	0.57	0.73	-	-	
	5.08	121.92	1.69	14.0	-	-	0.75	7.90	-	-	0.44	0.56	-	-	
	5.08	152.40	0.909	7.34	-	-	0.32	3.32	-	-	0.35	0.45	-	-	
	5.08	182.88	0.083	0.64	-	-	0.093	0.96	-	-	1.12	1.50	-	-	
	Benyamin Spectrometer	60.96	0.0	-	-	-	* ²	0.276	-	-	0.379	-	-	-	
NE-213 Spectrometer	60.96	0.0	-	-	-	-	* ³	0.0487	-	-	0.0636	-	-	1.00	
								~0.0633						~1.30	

*¹ 単位 (n/cm²/min/W)*² 72.9 keV ~ 1.5 MeV の値。*³ 1MeV ~ 10 MeV の値。

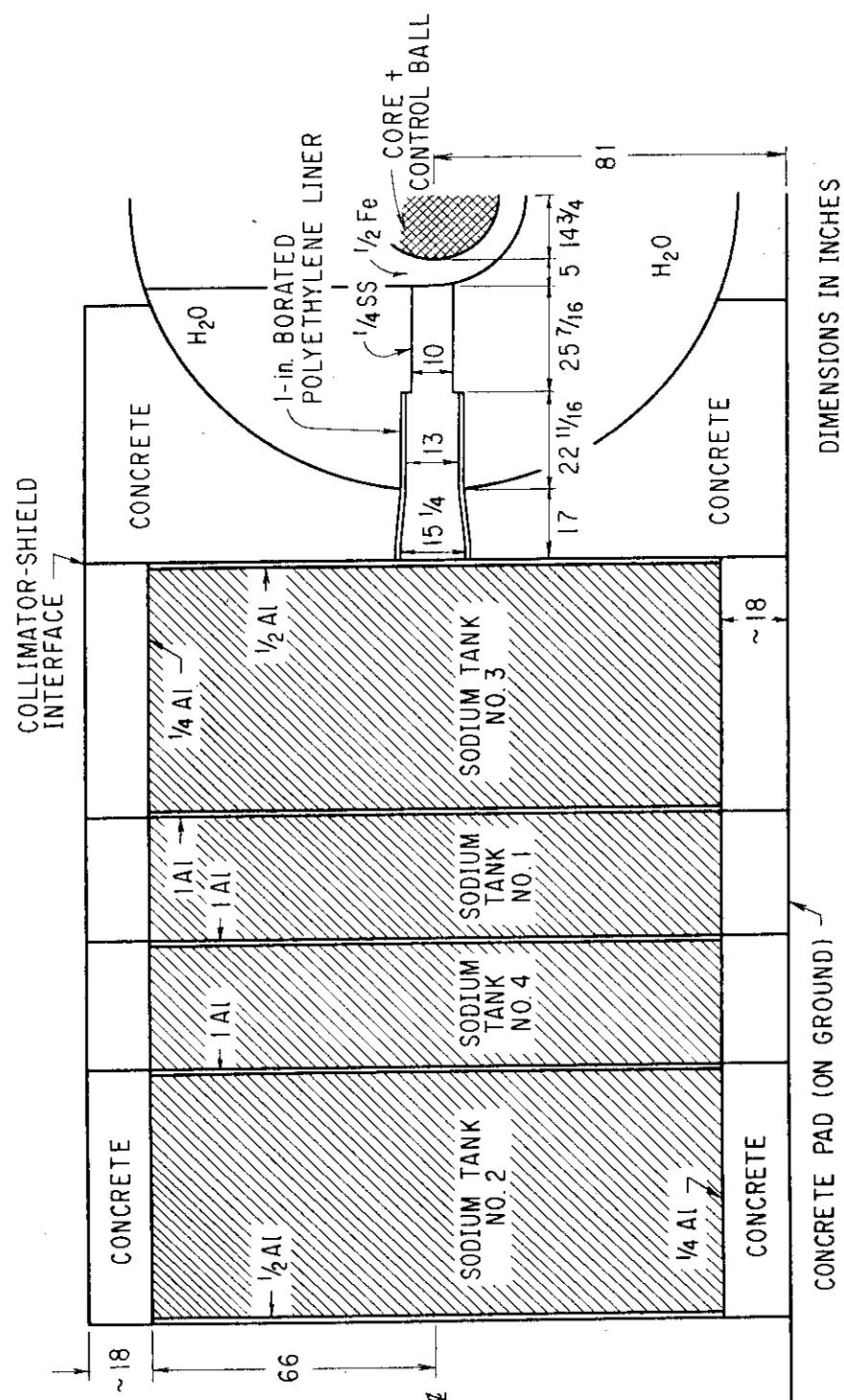


図 2.4.1 原子炉とナトリウム遮蔽の形状

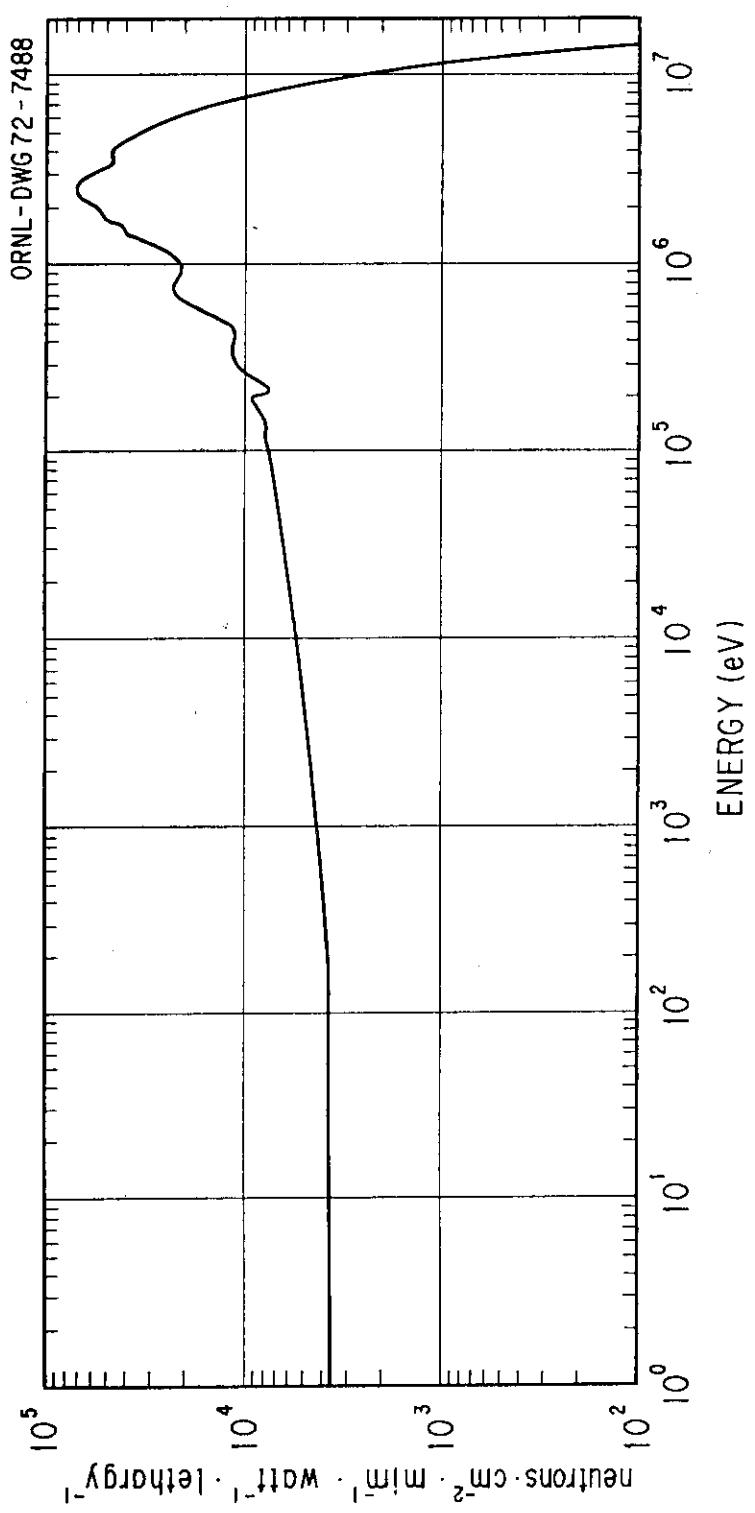


図 2.4.2 コリメータの出口平面中心線JのE $\phi(E)$
(1 eV $\leq E \leq 15$ MeV)

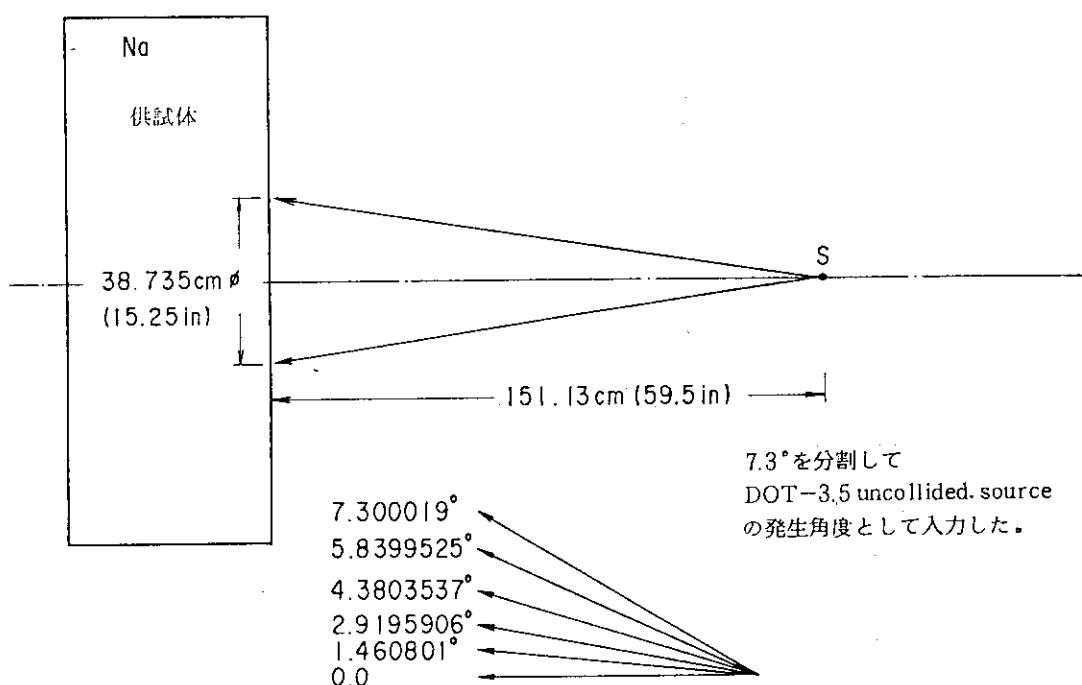


図 2.4.3 ナトリウムでのFirst Collision Source 計算の概略図

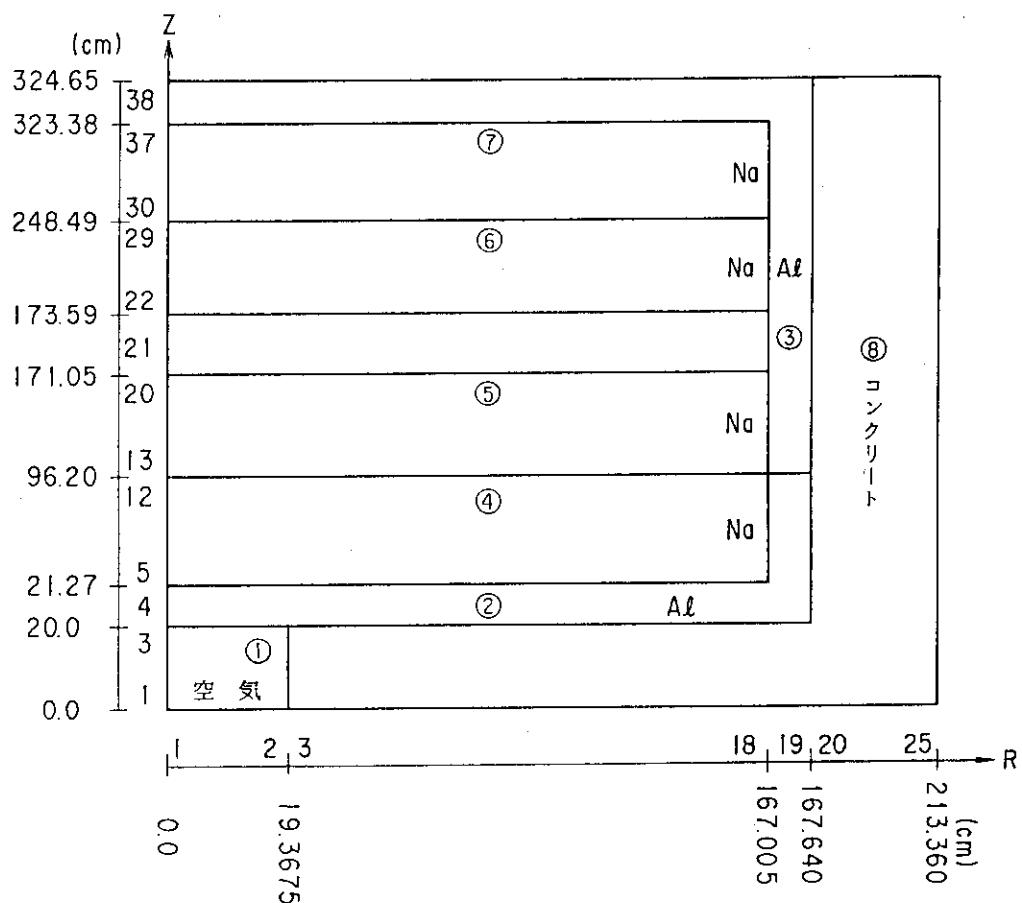


図 2.4.4 Na 10 ft 2次元計算体系

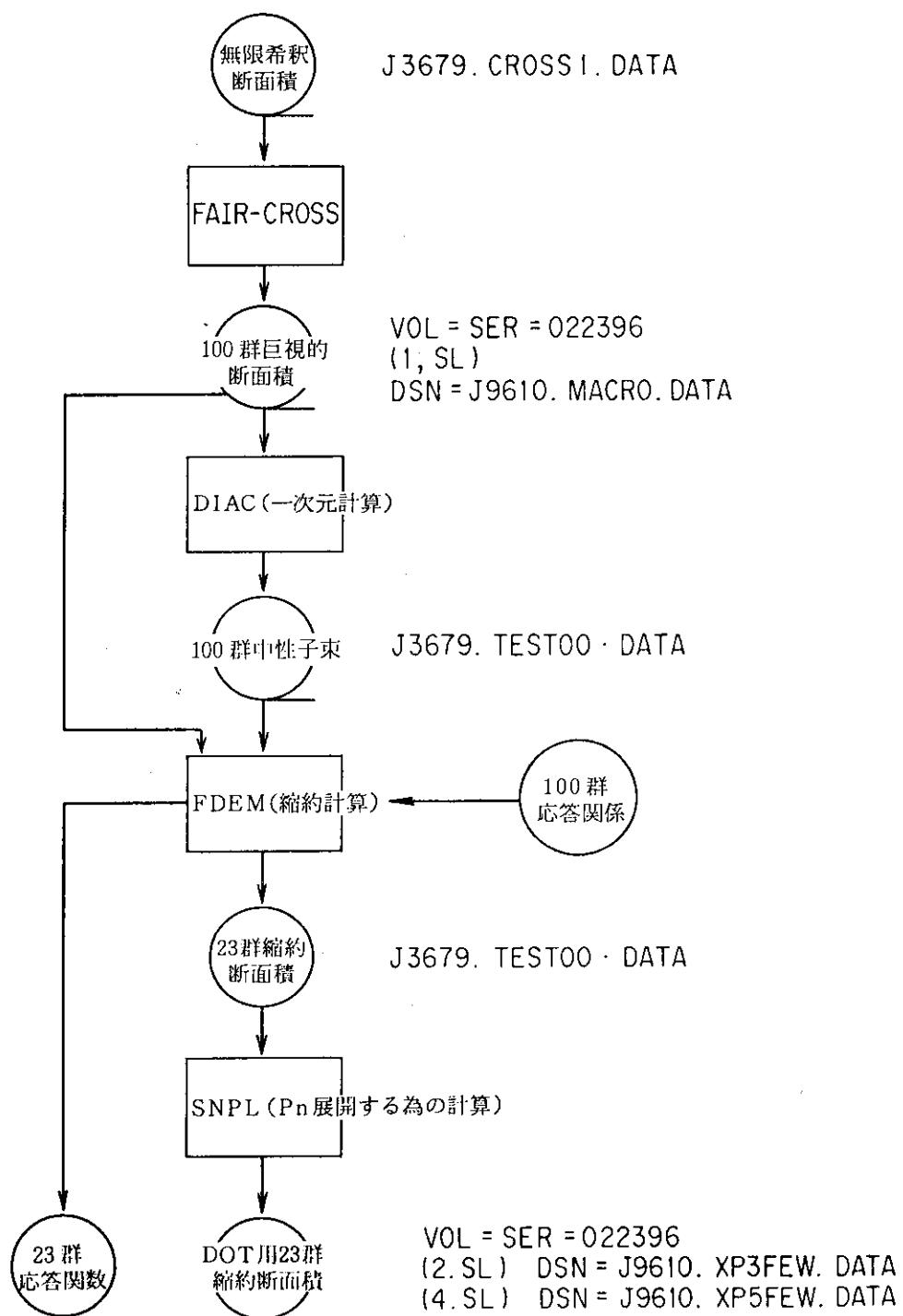


図 2.4.5 縮約断面積作成の流れ

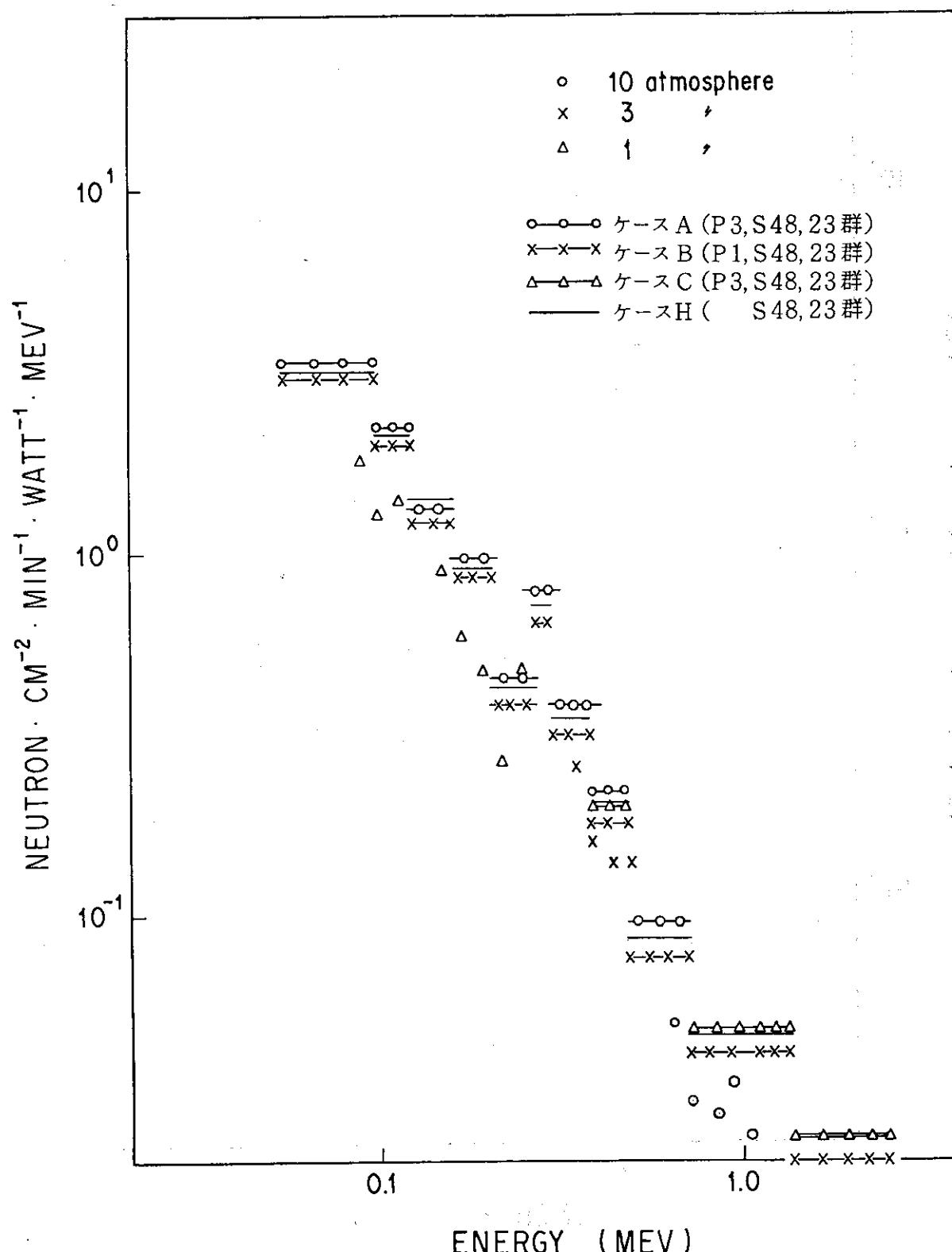


図 2.4.6 Na 10ft 中心軸後方24 in Benjamin の実験値と計算値のスペクトルとの比較

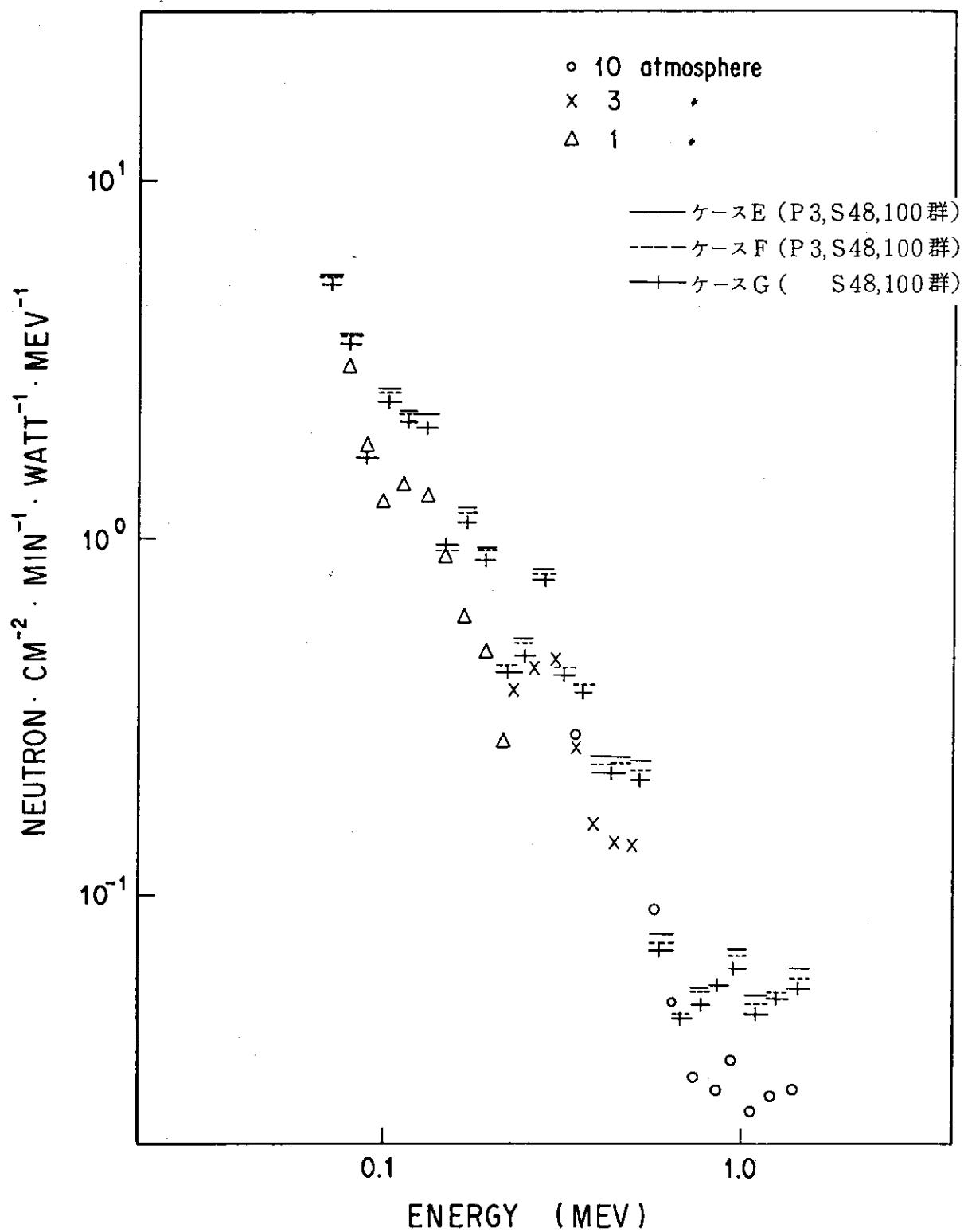


図 2.4.7 Na 10 ft 中心軸後方 24 in Benjamin の実験値と計算値のスペクトルとの比較

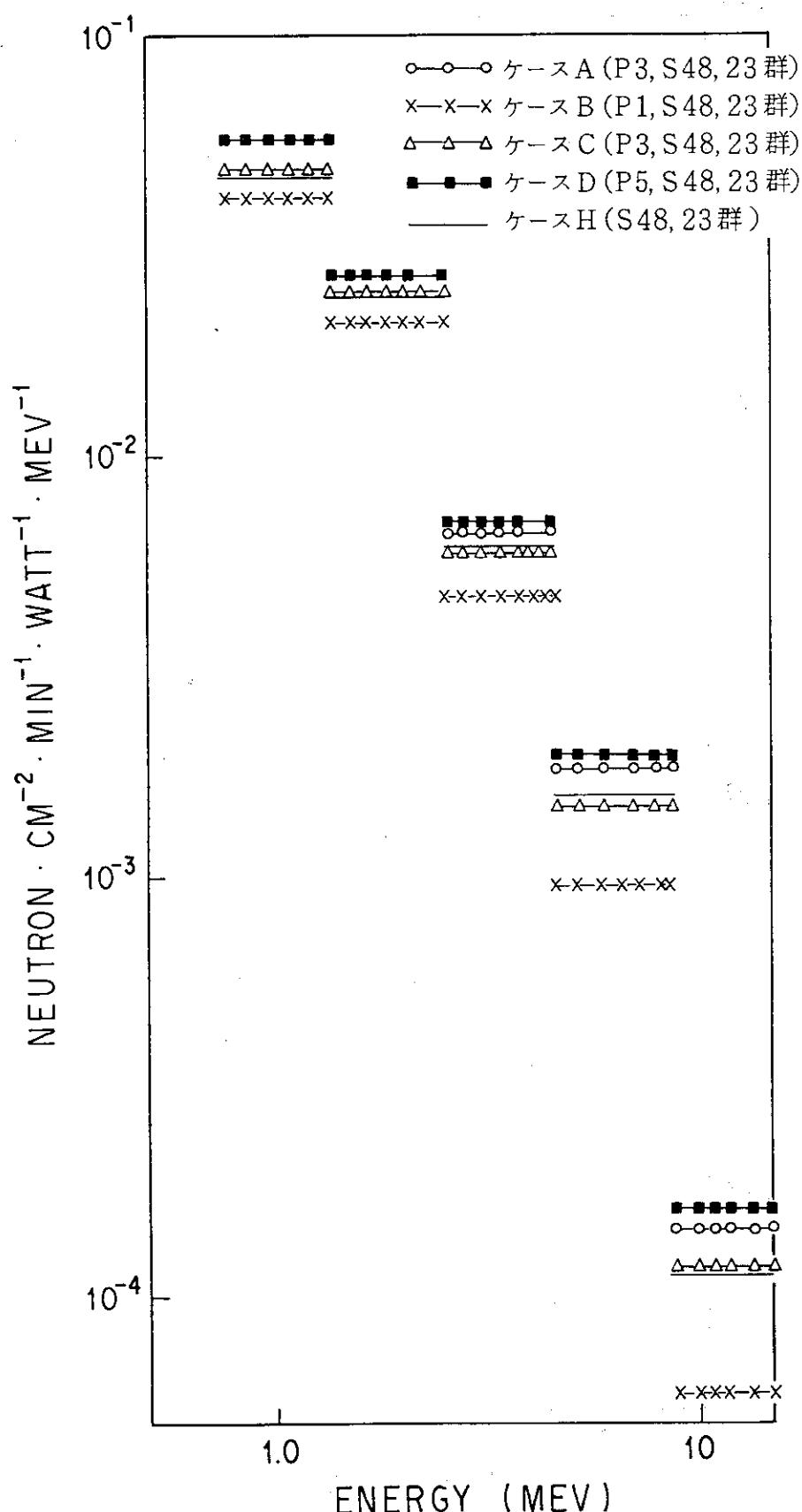


図 2.4.8 Na 10ft 中心軸後方24 in NE-213 実験と計算値のスペクトルとの比較

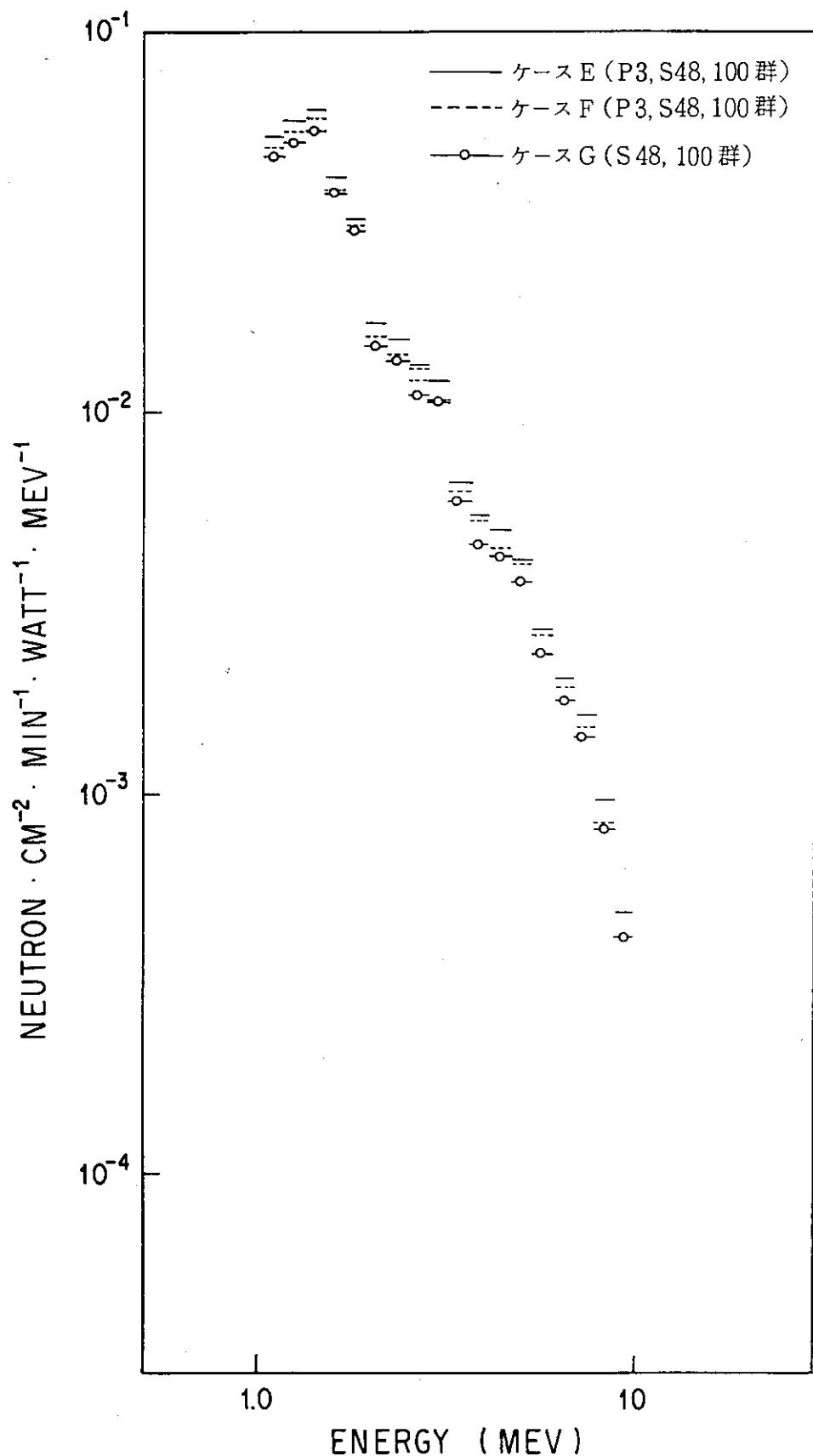


図 2.4.9 Na 10 ft 中心軸後方24 in NE-213 実験と計算値のスペクトルとの比較

2.5 弥生炉での中性子・ガンマ線の鉄透過問題

2.5.1 ベンチマーク問題の概要

高速中性子源炉「弥生」を線源として、鉄平板を透過する高速中性子が放射化箔で、ガンマ線が TLD で測定されている。

(1) 線源条件

「弥生」炉心が線源である。炉心を含めた計算により供試体入射面での線束を求め、それを用いて供試体部の解析を行う。炉心から供試体に至る部分で生じる計算誤差を除くためには、上記で計算された線束を初期推定値とし、供試体底面で詳しく測定されている各種反応率とその空間分布に合格するように供試体入射面での線束を修正する（一種のアンフォールディングを行う）のが望ましい。

(2) 供試体

89.6 cm × 89.6 cm の厚さ 10 cm の鉄板 7 枚を積み重ねて用い、厚さ 60 cm までの反応率が測定されている。放射化箔等は鉄板にあけられた小孔に挿入して照射された。

(3) 実験体系

上記供試体は「弥生」炉心の鉛反射体の上に設置され、重コンクリートのコラム壁によりとり囲まれている。実験体系を図 2.5.1 に示す。

(4) 検出器

^{115}In (n, n') ^{115}In , ^{197}Au (n, γ) ^{198}Au , CaSO_4 TLD と ^6Li TLD については横方向 10 cm 各縦方向 20 cm 各に二次元的な反応率の空間分布が測定されている。供試体中心軸上では、サンドイッチ共鳴放射化箔により反応率が測定され共鳴エネルギーでの中性子スペクトルが求められている。供試体底面ではさらにこの他に ^{58}Ni (n, p) 反応等 6 種のしきい放射化箔の反応率が測定されている。⁽¹⁾

2.5.2 計算概要

解析は二次元計算コード ESPRIT と DOT 3.5 により行った。

(1) 群定数作成

JSD 1000 ライブライバーをもとに FAIRCROSS step 2 で中性子 100 群、ガンマ線 20 群の各領域の群定数を作成した。これを用いて DIAC により一次元計算を行い、中性子 13 群、ガンマ線 3 群の二次元計算用群定数を作成した。自己遮蔽因子も考慮されている。DOT 3.5 用の断面積は、FAIRCROSS step 3 で P_3 断面積ファイルを作成した。

反応率に用いた ^{115}In (n, n') ^{115m}In 反応の断面積は ENDF/B - IV ライブライバーの値をもとに FAIRCROSS step 1 で、JSD 1000 の構造に従って作成した。13 群への縮約は上記と同様である。ガンマ線量率変換係数は、鉄のエネルギー吸収係数をもとに作成し、DIAC で求めたガンマ線束をもとに 3 群に縮約した。

(2) 輸送計算

二次元輸送計算コード ESPRIT と DOT 3.5 を用いた。まず炉心及びプランケットを正しく近似して Z 軸を水平にとった R - Z 体系の固定線源計算を行い、鉄供試体底面での内部境界

線束を求めた。このとき鉄供試体は約 20 cm の厚みで最外層に巻いている。固定線源は炉心に一様に分布されている。核分裂中性子スペクトルは Watt の式を、核分裂ガンマ線スペクトルには Goldstein の式⁽²⁾を用いている。角度分点数は S 48 分点セットを DOQ コードで作成して用いた。

次にこの内部境界線束を用いて鉄供試体の解析を行った。鉄供試体中の空間メッシュ幅は 2.5 cm であるこの継ぎ計算は鉛直方向を軸とする R-Z 体系で行うため、 μ と η についての境界線束の入れかえをプログラムを作成して行った。鉄遮蔽体は断面が 1 辺 96.6 cm の正方形であるが、R-Z 2 次元でモデル化するため、面積等価な半径が 53.94 cm の円におきかえた。鉄遮蔽体の厚さは 70 cm である。

2.5.3 計算と実験との比較

^{115}In (n, n') ^{115m}In の反応率分布について、ESPRIT と DOT 3.5 の計算値と実験値の比較を図 2.5.2 に示す。両計算値間にはほとんど差がない。鉄入射面である $Z = 0$ cm では、実験値と比較して、分布の形、絶対値とも一致がよくない。 $Z = 0$ cm の点で実験値に計算値を規格化すると、 $Z = 16$ cm での値は実験値と一致する。

^{197}Au (n, γ) ^{198}Au の反応率分布の比較を図 2.5.3 に示す。計算値は遮蔽体の中心で約 2 倍大きくなっている。 ^{197}Au の反応率の多くは 4.9 eV の共鳴吸収によるものである。

ガンマ線量率の結果を図 2.5.4 に示す。計算値は鉄遮蔽体入射部で実験値の約 1/2 であり、過小評価である。この差は、鉄遮蔽体を透過するほど小さくなっている。鉄供試体の端の線量率に注目すると、実験値は明らかに増加するが、計算値はわずかに増加するだけである。この差は、鉄供試体を円柱でモデル化したため、遮蔽体中心から 40 cm の計算点は実体系に比べて、コンクリート境界から距離が長くなっている。コンクリートで発生するガンマ線の寄与が過小評価されたためであると思われる。

2.5.4 評価及び考察

ESPRIT と DOT 3.5 の計算結果相互の間には、ほとんど差がなかった。このことは、ESPRIT の計算プログラムとしての妥当性を示すものと考えられる。

実験値との比較では、不一致が残っている。その原因としては、炉心部分の計算によって生じた誤差が、鉄遮蔽体入射部の線源条件に含まれているため、鉄遮蔽体での計算も実験と一致していないことが挙げられる。即ち、

- ① 炉心燃料部に一様な固定線源を与えたため、プランケットを含む実際の炉心の核分裂の空間分布との間に差が生じた。
- ② 炉心部を水平を軸とする二次元の R-Z モデルで計算し、それによって得た線源を鉛直方向を軸とする鉄遮蔽体の解析に用いたことにより、炉心部分の計算においても生じた誤差（モデル化、核定数計算手法によるもの）が残っていること。

実験の発表されている原論文にある DOT 3.5 コードによる解析では、これらの誤差を除くため、炉心部については臨界計算を行い、さらに鉄遮蔽体入射部で得られた計算値を、その点で測定されている実験値にあらかじめ修正して用いている。その結果、今回の計算よりもよい一致が

得られている。参考のためその結果を表 2.5.1 と図 2.5.5 ~ 図 2.5.7 に示す。

参考文献

- (1) Y. Oka et al., "Neutron and Gamma-Ray Penetrations in Thick Iron"
Nucl. Sci. Eng. 73, 259 (1980).
- (2) H. Goldstein "Reactor Handbook" 2nd Ed., vol III part B, New
York, Interscience Publishers (1962).

表 2.5.1 鉄遮蔽体底面でのフラックス変更前後の C/E 値比較

Comparison of Ratios of Calculated-to-Experimental (C/E)
Values Between Before and After Modification of the
Flux at the Bottom Face of the Iron Shield

Type of Reaction	C/E	
	DOT-III <i>k</i> Calculation	Modified Boundary Source
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	0.306	0.782
$^{24}\text{Mg}(n,p)$	0.341	0.922
$^{27}\text{Al}(n,p)$	0.257	0.777
$^{58}\text{Ni}(n,p)$	0.567	1.086
$^{115}\text{In}(n,n')$	0.639	0.988
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)$	0.752	0.98
$\text{CaSO}_4 \cdot \text{Tm}$	0.775	1.027

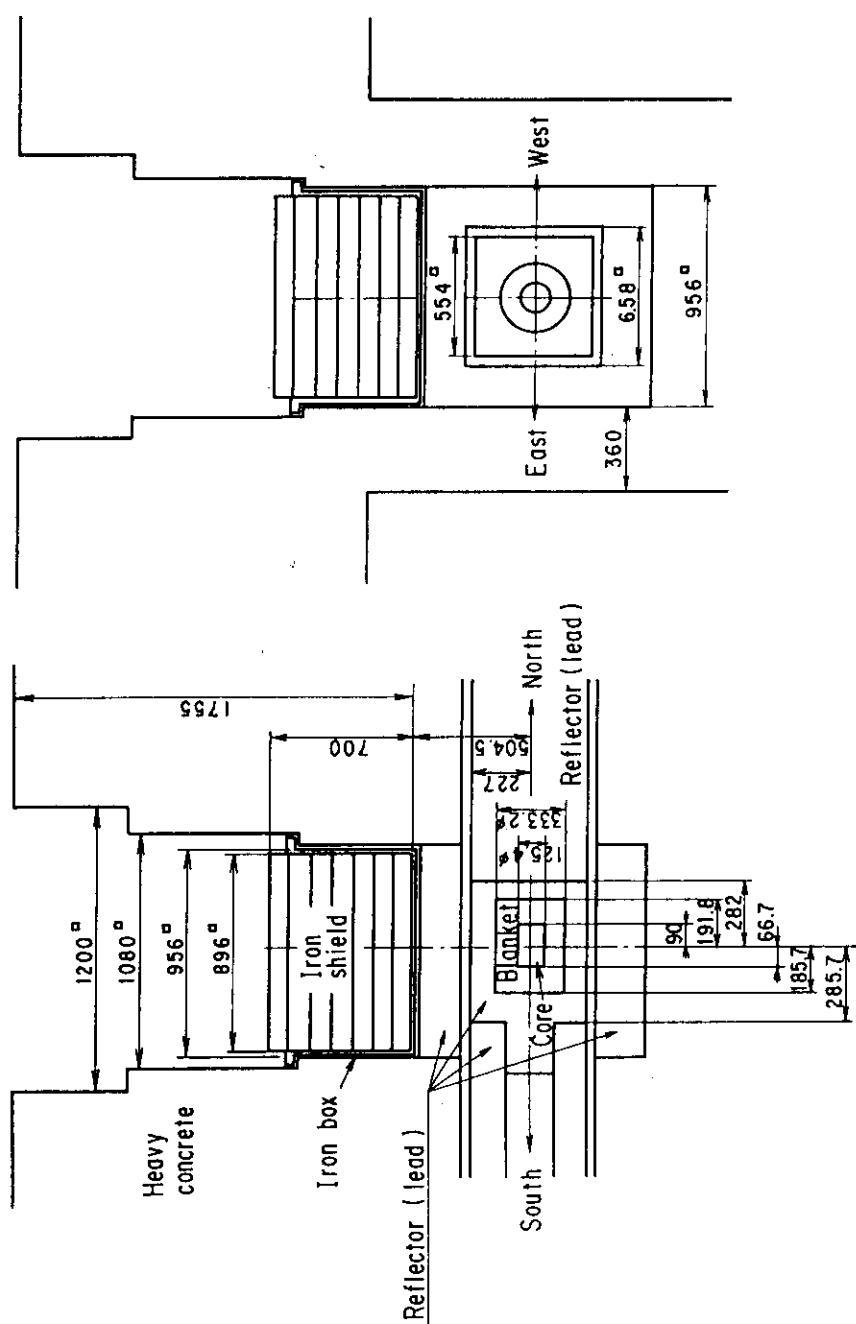


図 2.5.1 実験体系図 (寸法は cm)

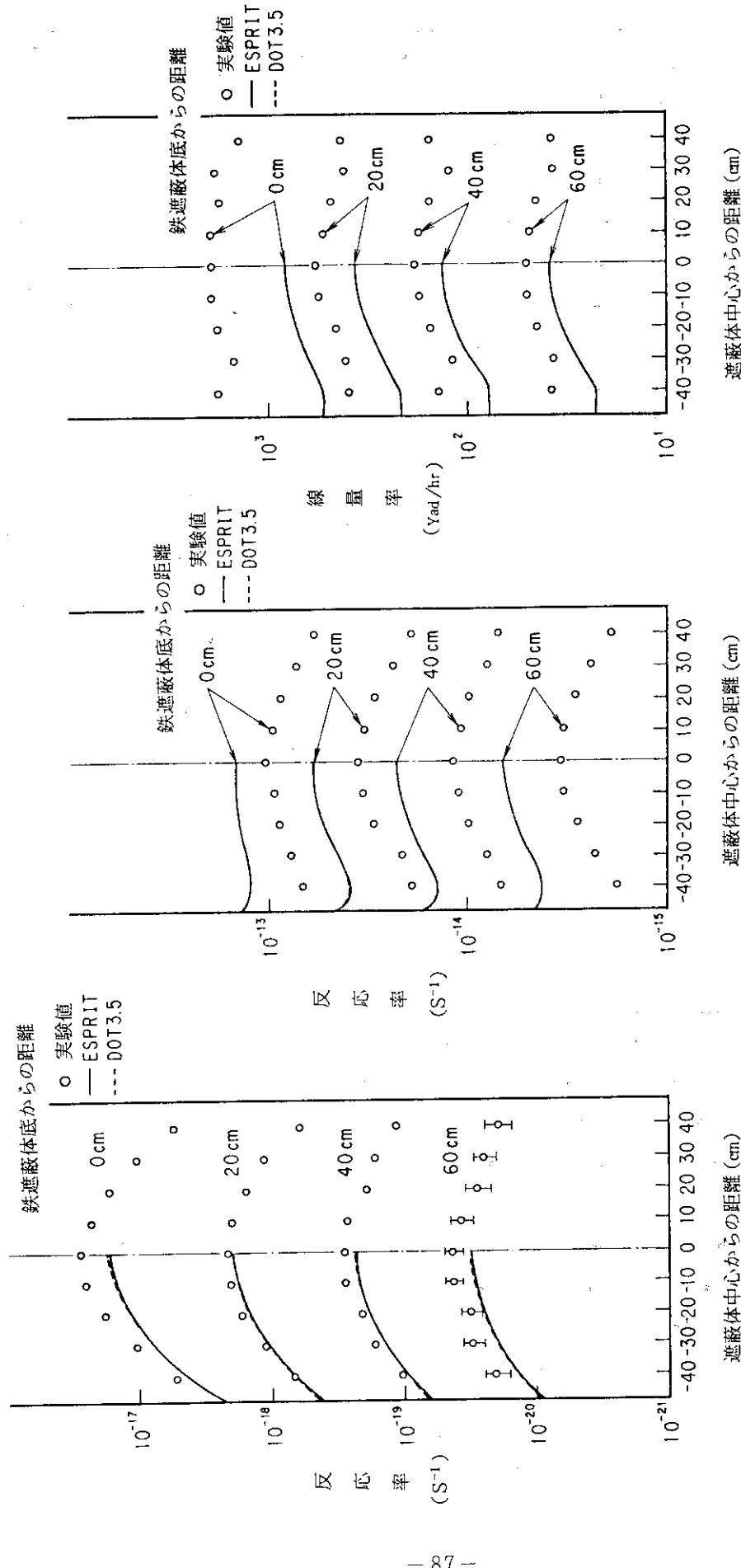


図 2.5.2
鉄供試体中の ^{115}In (n, n') $^{115\text{m}}\text{In}$ 反応率のESPRITとDOT 3.5の計算値と実験値の比較

図 2.5.3
鉄供試体中の ^{197}Au (n, r) ^{198}Au 反応率のESPRITとDOT 3.5の計算値と実験値の比較

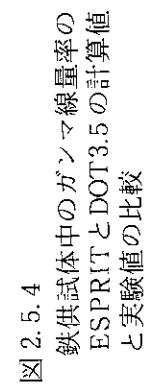


図 2.5.4
鉄供試体中のガンマ線量率の
ESPRITとDOT 3.5の計算値
と実験値の比較

図 2.5.5
鉄供試体中のガンマ線量率の
ESPRITとDOT 3.5の計算値
と実験値の比較

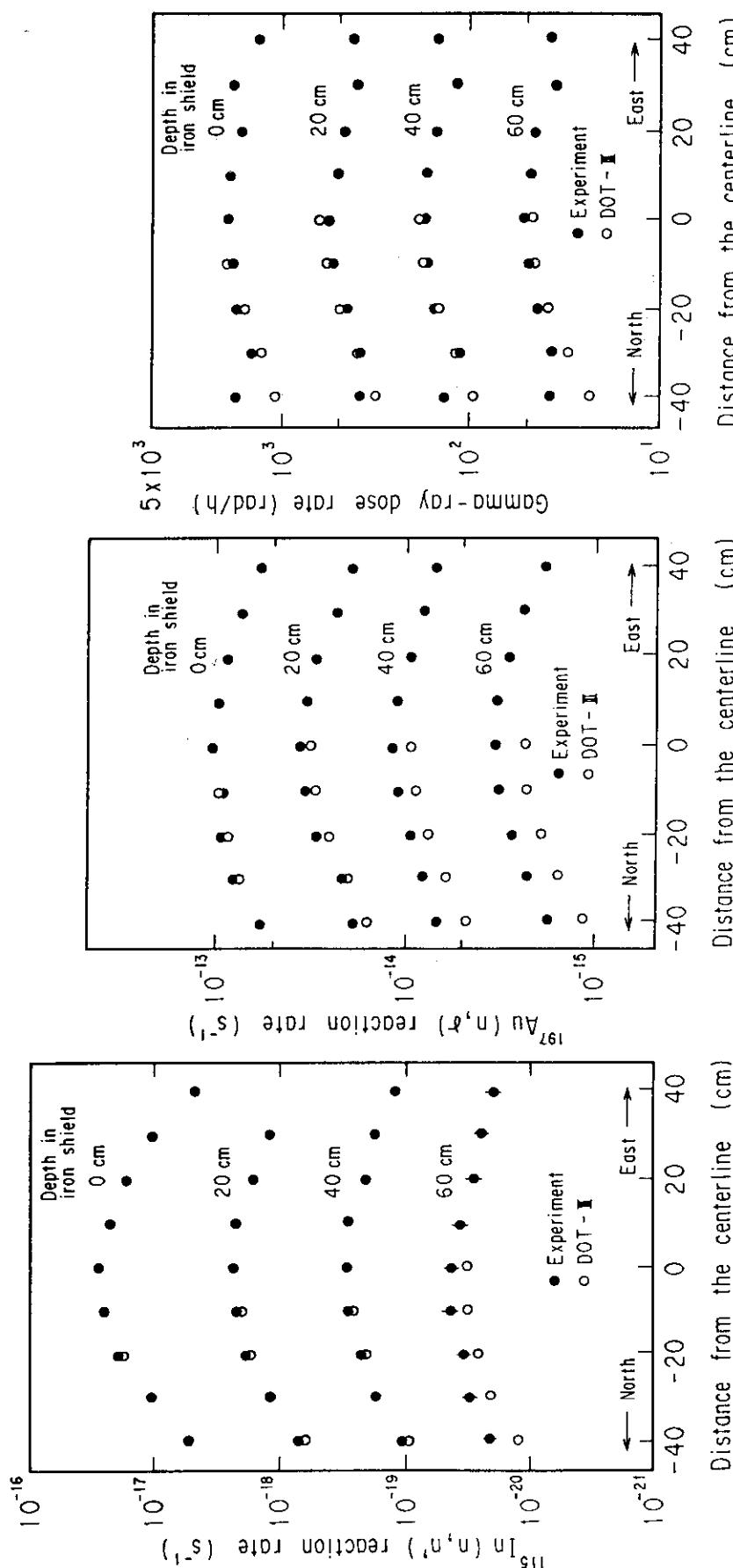


図 2.5.5
鉄供試体中の $^{115}\text{In}(\text{n}, \text{n}')$ $^{115\text{m}}\text{In}$ 反応率の原論文にある解析結果と実験値の比較

図 2.5.6
鉄供試体中の $^{197}\text{Au}(\text{n}, \gamma)^{198}\text{Au}$ 反応率の原論文にある解析結果と実験値の比較

図 2.5.7
鉄供試体中のガソマ線量率の原論文にある解析結果と実験値の比較

図 2.5.7

2.6 オットハーン号 1 次遮蔽タンク内の中性子透過問題⁽¹⁾

2.6.1 実験概要

本実験は、西独の原子力船「オットハーン号」で行われたものである。原子炉、遮蔽タンク、測定機器の配置を図 2.6.1 に示す。測定軸は船首から 17° の方向で、高さは炉心中心から 20 cm 下にある。この位置で、初期制御棒位置に対し放射線強度が最大になる。

(1) 線源条件

熱出力 38 MW の原子力船「オットハーン号」の炉心で発生する中性子

(2) 供試体

本実験は「オットハーン号」の 1 次遮蔽体の鉄水体系について実施された。

(3) 実験体系

図 2.6.2 に実験体系を示す。測定軸は船首から 17° の方向で、高さは炉心中心から 20 cm 下がっている。体系は、水 - 鉄の多重層になっている。

(4) 検出器

各種の放射化箔検出器が用いられた。それらは、In, Ca (PO_3)₂, Zn, Al, Dy, Au である。箔の放射化に伴う放射線の測定は、 β 計数装置、 $4\pi\beta$ 計数装置、 $3''\phi \times 3''$ NaI (Tl) シンチレーション・スペクトロメータを用いてアンチコインシンデンス法およびコインシンデンス法によって行われた。熱中性子の影響をさけるためにはカドミウムカバーが取り付けられた。熱中性子の測定には Dy 箔が、5 eV の熱外中性子は Au 箔が使用された。

2.6.2 計算概要

(1) 群定数作成

DIAC 用には RADHHEAT - V 4 データプールのミクロ断面積より、FAIRCROSS step 2 で作成、中性子 100 群 (JSD 1000 の群構造)、角度分割 32。ANISN 用には DIAC 用の群定数を SNLP で変換して定数を作成した。

(2) 輸送計算

一次元 Sn 輸送計算コード DIAC と ANISN - JR を用いて計算した。

DIAC では、 S_{16} , S_8 , S_4 近似計算、メッシュ分割は、およそ 1 cm, S_{16} についてはおよそ 2 cm のメッシュ分割計算も実施した。

ANISN - JR では、 $P_1 S_{16}$, $P_3 S_{16}$, $P_5 S_{16}$ で計算、メッシュ分割はおよそ 1 cm である。

(3) データ処理

各放射化箔検出器の反応率を求めるために、反応断面積をレスポンスにしてエネルギー・フラックスに乘じた。線源強度は、38 MW 热出力に対して $2.882 \times 10^{18} (\text{n}/\text{s})$ を用いた。

2.6.3 計算と実験との比較

計算結果と実験との比較を図 2.6.3 ~ 図 2.6.8 に示す。

DIAC による計算は高速中性子に対する反応率分布及び熱中性子速分布とも、実験値と既に妥当な一致を示しているが、 ^{31}P (n , p) ^{31}Si の反応率について計算値がかなり実験値を過小評価し

ている。

ANISN による計算も、DIAC の結果とほとんど同じ傾向である。

2.6.4 評価と考察

メッシュ幅を 1 cm にした S_{16} 近似での DIAC の計算では、 $^{27}Al(n, \alpha)^{24}Na$ の反応率に対しでは C/E は 2.2 ~ 1.2 であり、 $^{64}Zn(n, p)^{64}Cu$ の反応率では C/E は 1.6 ~ 0.87, $^{31}P(n, p)^{31}Si$ の反応率に対しては C/E が 0.73 ~ 0.25, $^{115}In(n, n')$ ^{115}In の反応率では C/E は 2.0 ~ 1.2 であった。特に、 $^{31}P(n, p)^{31}Si$ の反応率に対する C/E が 1 より小さくなつた他は、実験値と妥当な一致を示している。また、熱外中性子束 (epithermal flux) では C/E が 0.48 ~ 0.8、熱中性子束に対しては C/E が 0.3 ~ 1.7 である。 S_8 と S_4 の計算結果は S_{16} の結果よりも小さな値になる傾向にあり、また、メッシュの分割を粗くすると計算結果が小さくなる傾向が見られた。

ANISN による計算では、 $P_5 S_{16}$ 及び $P_3 S_{16}$ の計算結果は DIAC の S_{16} の結果とほぼ同じ値を示した。従って、 $^{31}P(n, p)^{31}Si$ の C/E は ANISN による計算結果も 1.0 を大きく下回った。この結果、 $^{31}P(n, p)^{31}Si$ の反応率については、この反応断面積に何らかの誤りがないかどうか検討する必要がある。

もう 1 点は、 $^{164}Dy(n, \gamma)$ 反応を利用して求めた熱中性子束分布において、鉄層のすぐ後の水中における熱中性子束の増加による極大値が、実験値に対し DIAC も ANISN の計算値もかなり過小評価している。この原因は明確ではないが、両計算とも熱中性子を 1 群扱いしていることも、原因の 1 つに考えられる。

以上述べてきたように、 $^{31}P(n, p)^{31}Si$ の反応率に対する C/E 鉄層のすぐ後の水中における熱中性子束の C/E の実験との対応が不十分な点があったが、その他は既に良好な一致を見ているので、DIAC コードのロジック及び本計算に対する適用は妥当であろう。

参考文献

- (1) R. Fiebig, F. Frisia, H. Hackbarth, and G. Richter;
"Untersuchungen über das Strahlungsfeld in der Reaktor abschirmung
Bord der OTTO HAHN", Atomkernenergie, 18, 71 (1971).

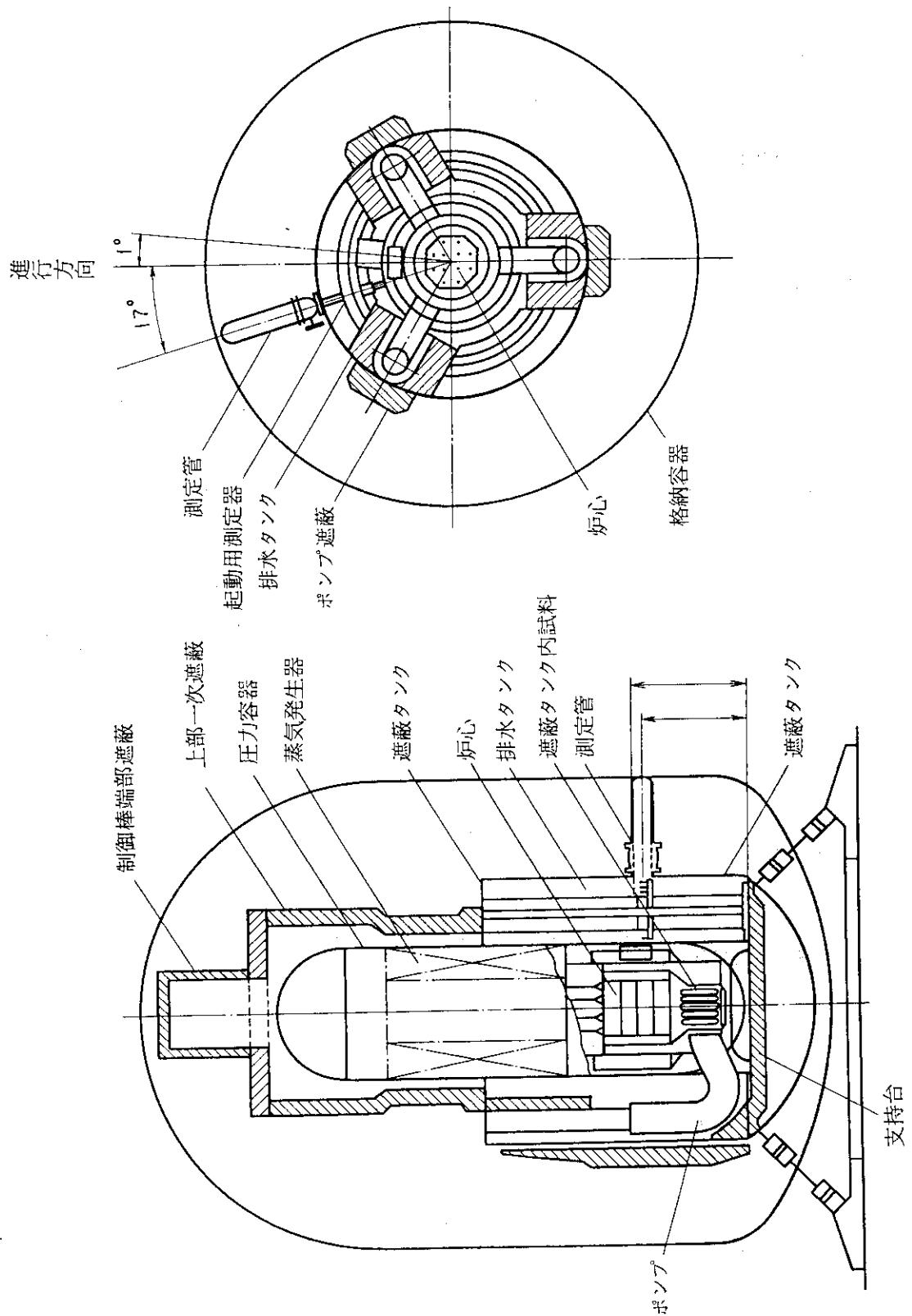


図 2.6.1 オットハーレン炉での測定装置位置

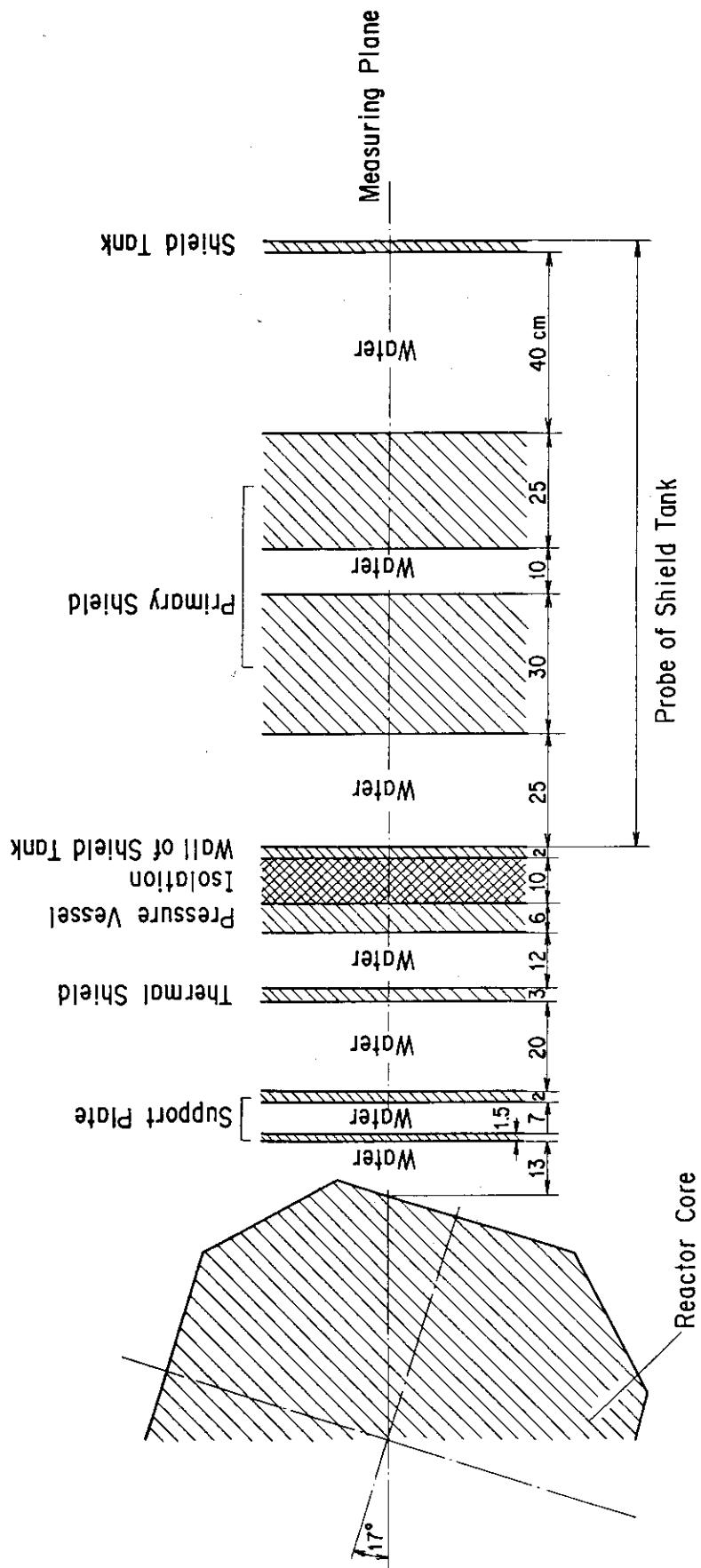
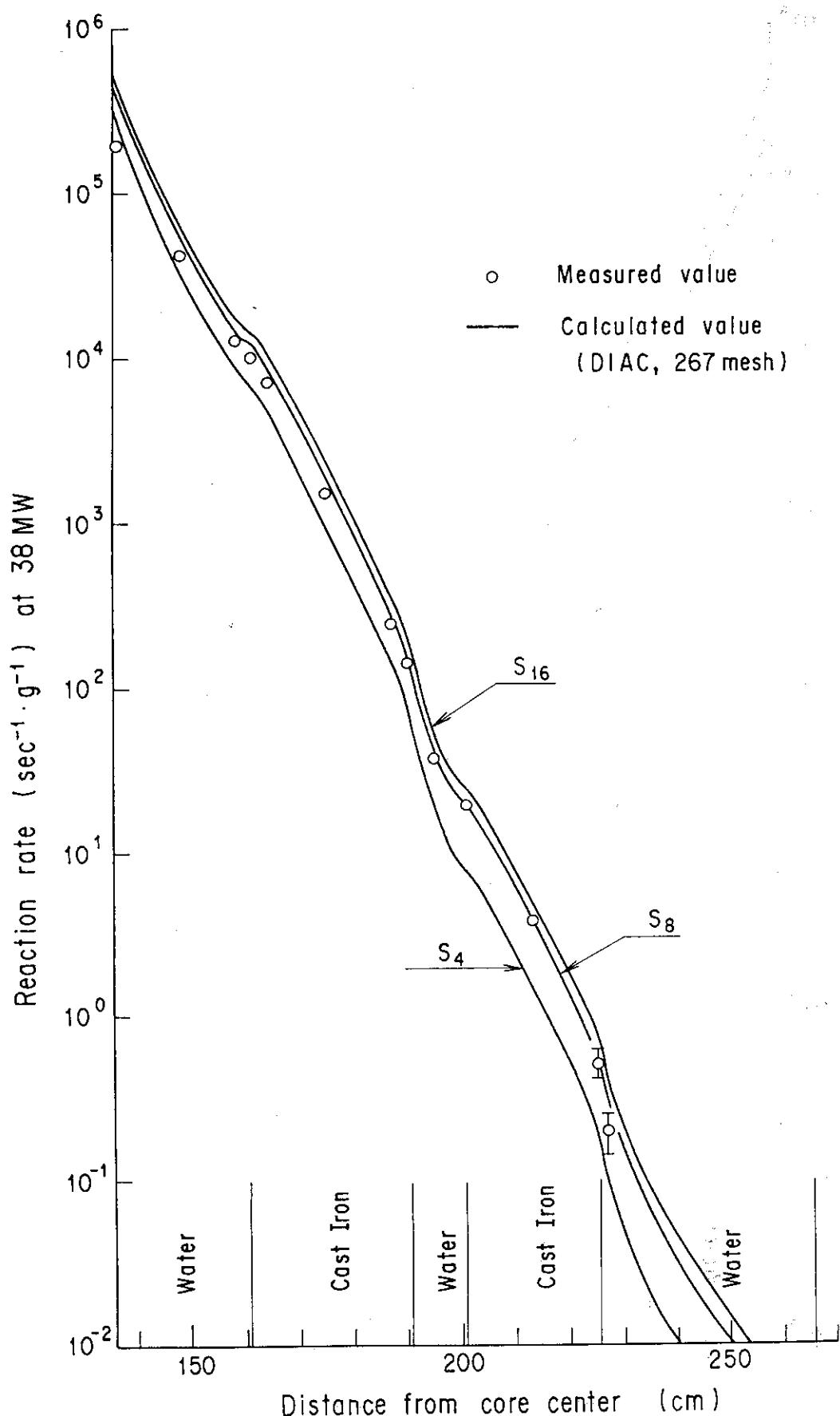
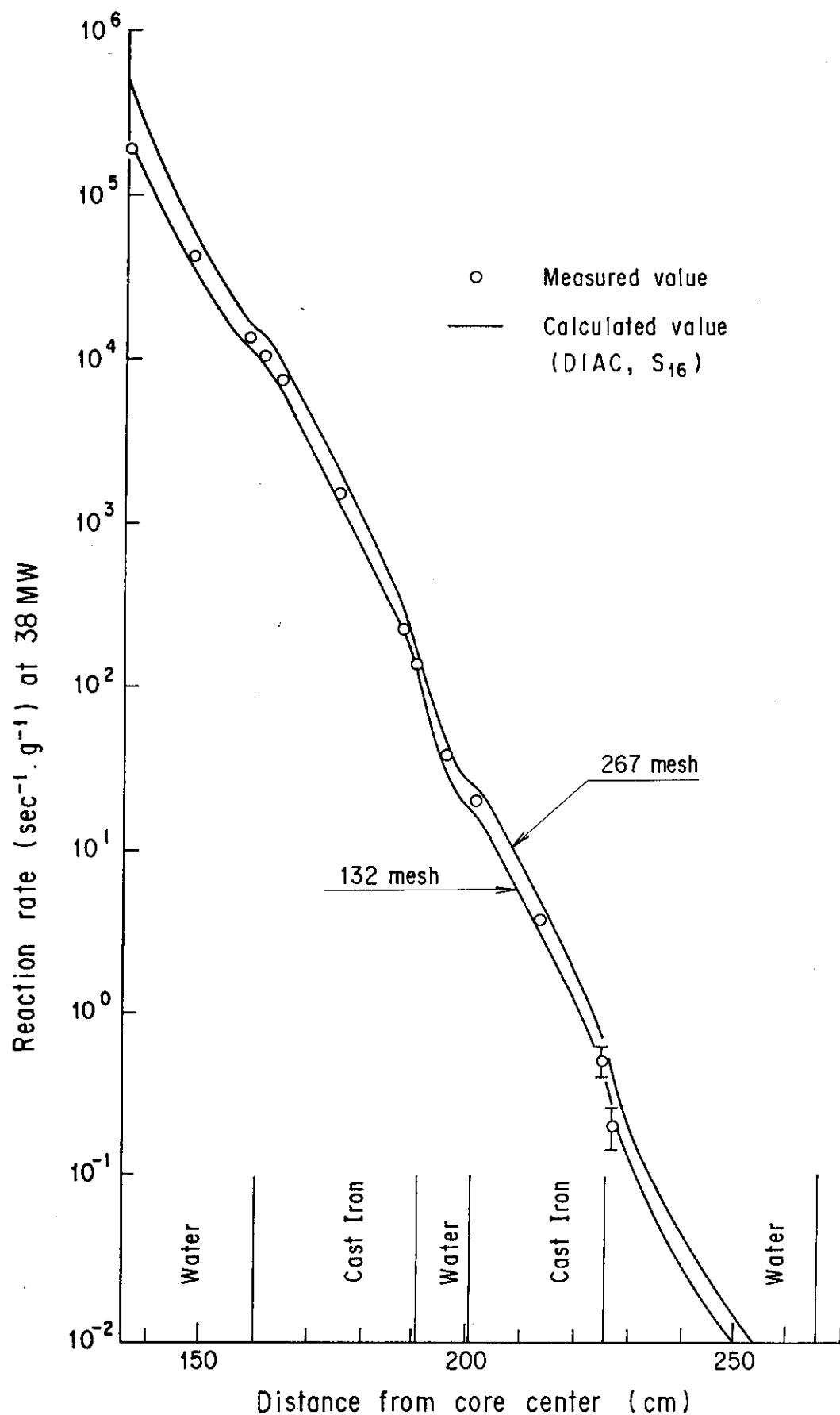
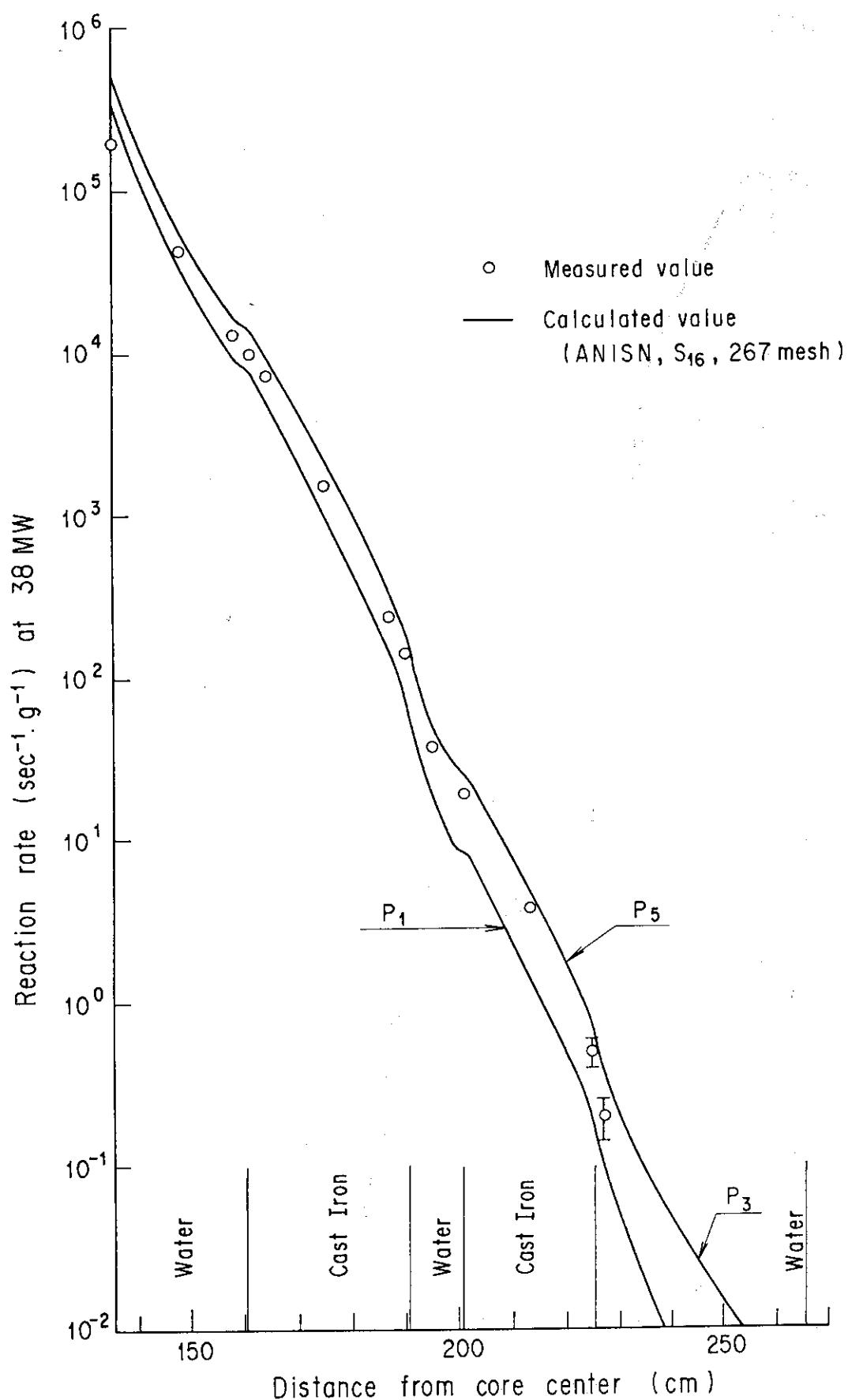


図 2.6.2 測定装置設置面の遮蔽構成

図 2.6.3 $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ の反応率分布の実測値と計算値(DIAC, 267mesh)の比較(1)

図 2.6.4 $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ の反応率分布の実測値と計算値(DIAC, S₁₆)の比較(2)

図 2.6.5 $^{115}\text{In}(n, n')^{115\text{m}}\text{In}$ の反応率分布の実測値と計算値(ANISN, S₁₆, 267 mesh)の比較(3)

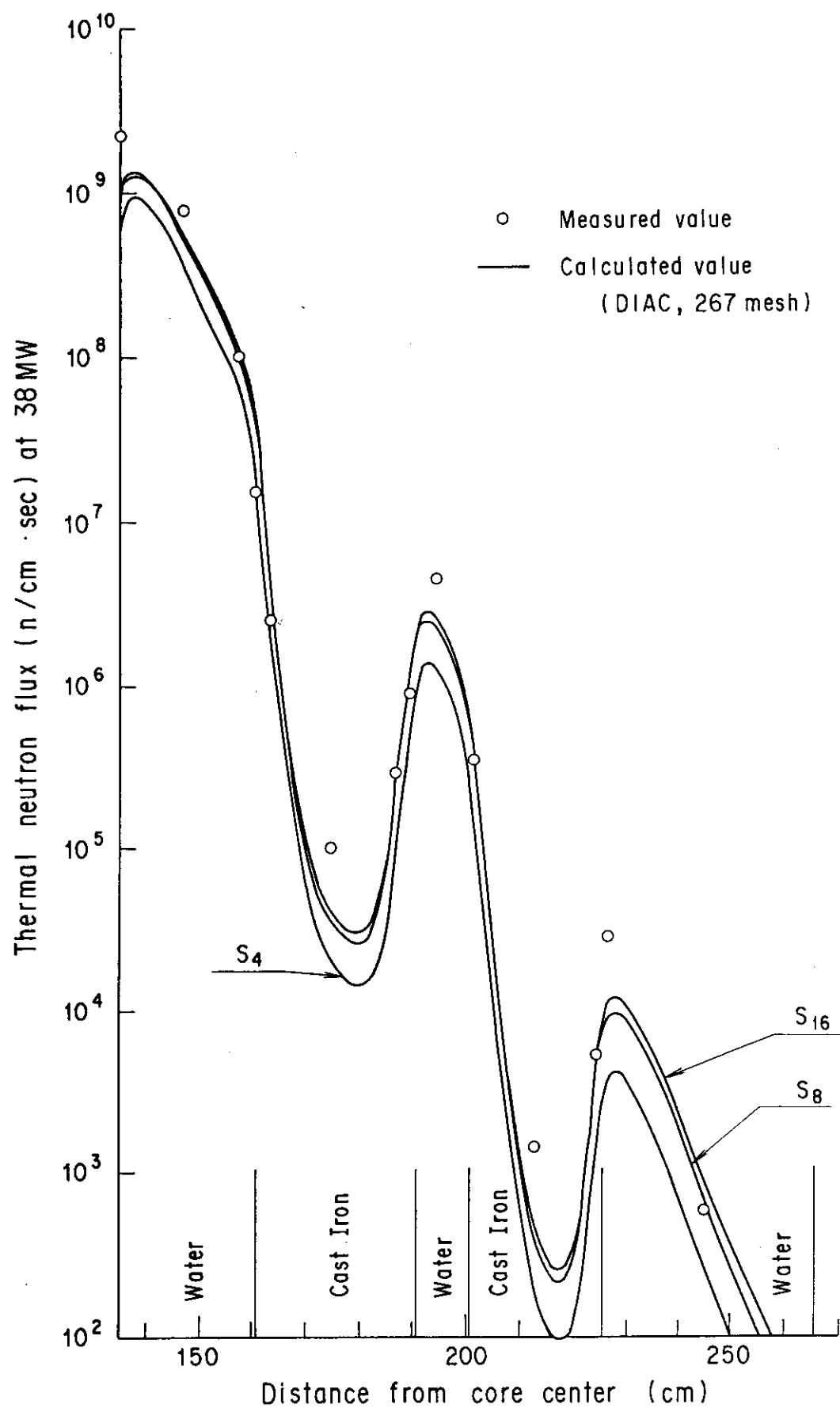
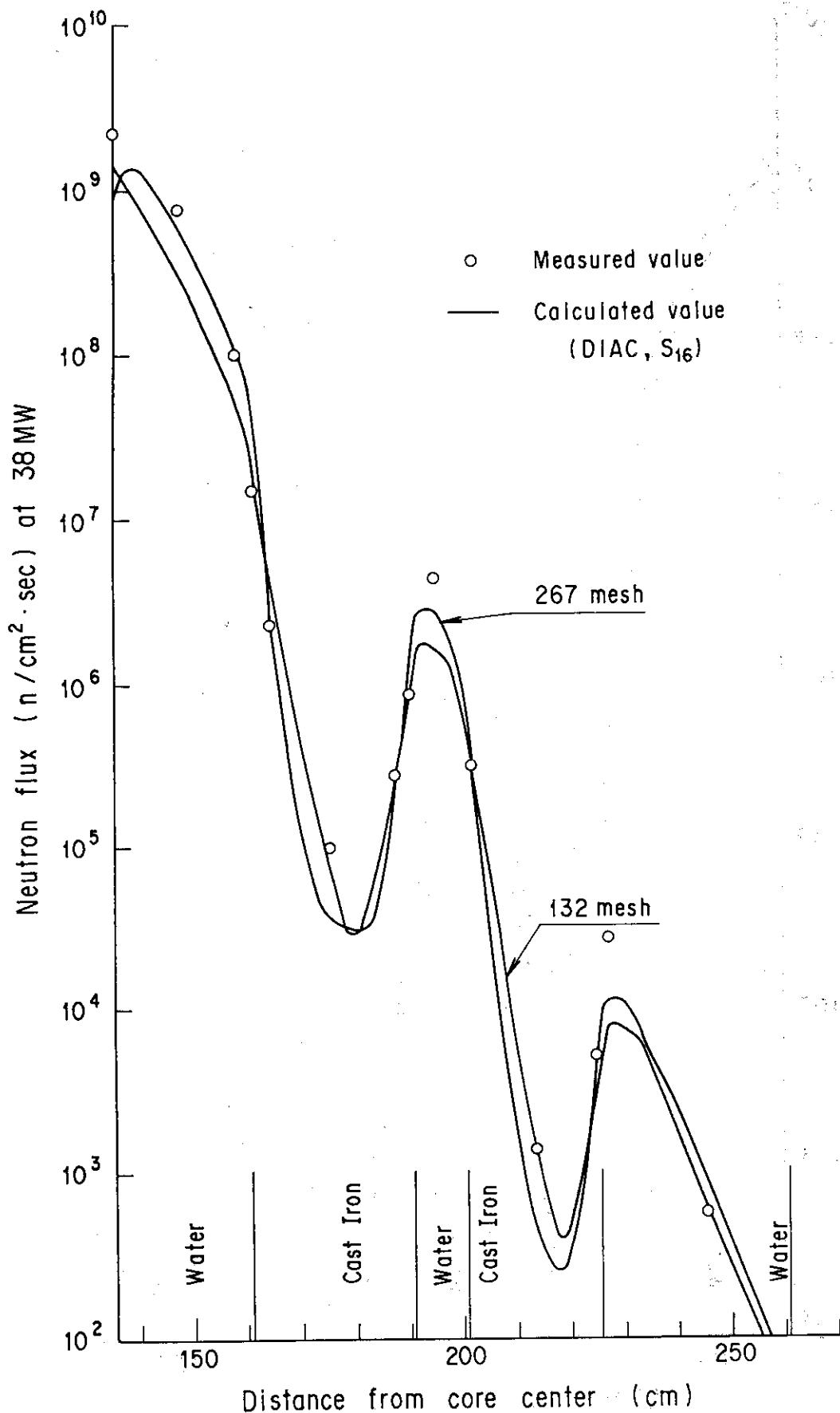
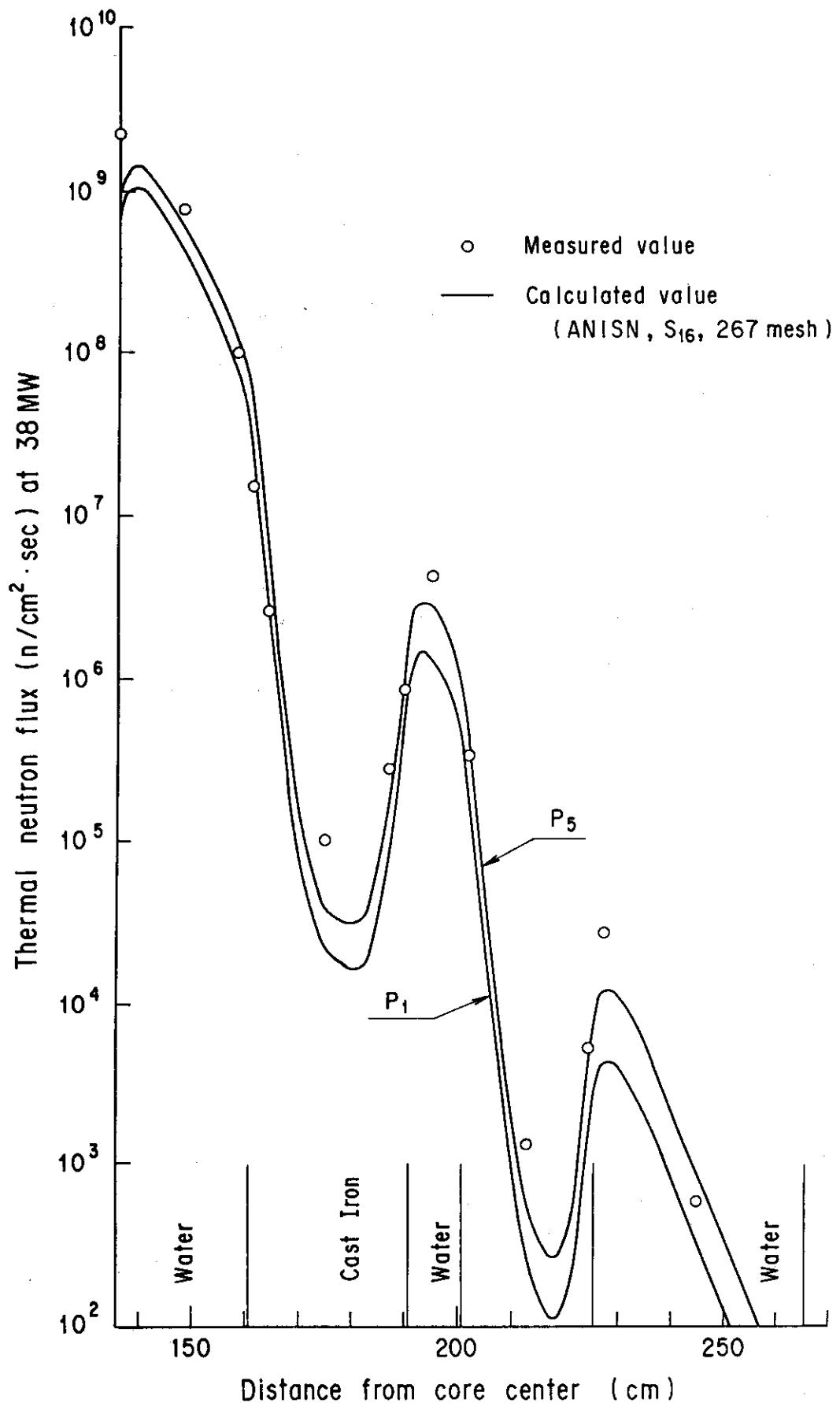


図 2.6.6 热中性子束の実測値と計算値(DIAC, 267 mesh)の比較(1)

図 2.6.7 热中性子束の実測値と計算値(DIAC, S₁₆)の比較(2)

図 2.6.8 热中性子束の実測値と計算値(ANISN, S₁₆, 267mesh)の比較(3)

2.7 平板²³⁵U 線源から中性子鉄水層透過問題⁽¹⁾

2.7.1 実験概要

本実験は、RS1スイミングプール型原子炉の熱中性子コラム(thermal column)から引き出されたビームを直径90cm、厚さ2cmの円板状天然ウランコンバータに入射させ、発生する核分裂中性子を線源にする。図2.7.1に実験体系を示す。

(1) 線源条件

i 線源強度

$$\eta_f = 2.7 \times 10^7 \text{ (fission} / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}))$$

ii 線源スペクトル

$$\eta(E) = 0.453 e^{-E/0.965} \sinh \sqrt{2.29} \text{ (neutrons} \cdot \text{MeV}^{-1} \cdot \text{fission}^{-1})$$

(2) 供試体

水中に厚さ10cmの鋼板が設置された。

(3) 実験体系

図2.7.2に実験体系の計算モデルを示す。モデル1は水層だけ、モデル2は厚さ10cmの鉄層がウランコンバータから5cm後方に設置、モデル3では同じ鉄層がウランコンバータから25cm後方に置かれている。

(4) 検出器

各種の放射化箔検出器が用いられた。それらは以下のようなものである。

¹⁶⁴Dy (n, γ) ¹⁶⁵Dy (A ℓ / Dy 10% alloy)

¹⁹⁷Au (n, γ) ¹⁹⁸Au or ¹¹⁵In (n, γ) ¹¹⁶In (under 0.5-mm-thick cadmium)

¹¹⁵In (n, n') ^{115m}In

⁵⁸Ni (n, p) ⁵⁸Co

2.7.2 計算概要

(1) 群定数作成

DIAC用にはRADHEAT-V4データプールのミクロは断面積より、FAIRCROSS step2で作成。中性子100群(JSD1000の群構造)。ANISN用にはFAIRCROSS step3で作成した。

(2) 輸送計算

一次元Sn輸送計算コードDIACとANISN-JRを用いて計算した。

DIACではS₃₂近似計算、メッシュ分割は水層では0.5~4.0cm、鉄層は0.5~2.0cmである。

ANISN-JRでは、P₁、P₃、P₅、S₁₆近似計算、メッシュ分割は水、鉄層とも1.0cmである。

(3) データ処理

各放射化箔検出器の反応率を求めるために、FAIRCROSS step1で放射化断面積を計算した。

2.7.3 計算と実験との比較

計算結果と実験との比較を図 2.7.3 ~ 図 2.7.6 に示す。

DIAC による計算は高速中性子及び熱外中性子に対する反応率分布に対しては水体系及び鉄 - 水体系ともに実験値と良い一致を示したが、Dy (n, γ) 反応による熱中性子束分布は水体系及び鉄 - 水体系ともに実験との差違が大きくなっている。

2.7.4 評価と考察

(1) 水体系

DIAC で計算した S₁₆, メッシュ幅 1 cm の場合以下のような結果を得た。

高速中性子に対する ⁵⁸Ni (n, p), ¹¹⁵In (n, n') の反応率, 热外中性子に対する ¹⁹⁷Au (n, γ) epi Cd の反応率については, 計算結果は実験値と良い一致を示した。しかし, 热中性子に対する反応率については, 水中約 10 cm (ウランコンバータの背面からの距離) 以上で計算値は実験値を過大評価しており, 30 ~ 80 cm では C / M がおよそ 3 である。

(2) 鉄 - 水の多重層の体系

角度分割 16, メッシュ幅が鉄, 水とも 1.0 cm にとった場合の DIAC の計算結果について述べる。この場合が, メッシュ幅をさらに粗くとった場合よりも実験との一致が良く, 鉄, 水層のメッシュ幅を 0.5 cm に細く分割した場合とほとんど差違はない。

高速中性子及び熱外中性子に対する反応率分布に対しては計算は実験と良い一致を示したが, 热中性子に対する反応率分布は, 鉄層のすぐ後の水中において実験値を大きく過小評価している。この傾向は水層のメッシュ幅を変えても同じようであった。また, Sn についても n を変えて同じような傾向を示した。従って, 热中性子を一群扱いしていることも 1 つの原因になっているものと考えられる。

上記(a) 及び(b) の考察から, DIAC コードの適用の仕方は適当であると考えられる。

参考文献

- (1) B. Chinaglia, et al., "Neutron-Attenuation Experiments in Iron-Water Configurations", Nucl. Sci. Eng., 27, 308 (1967).

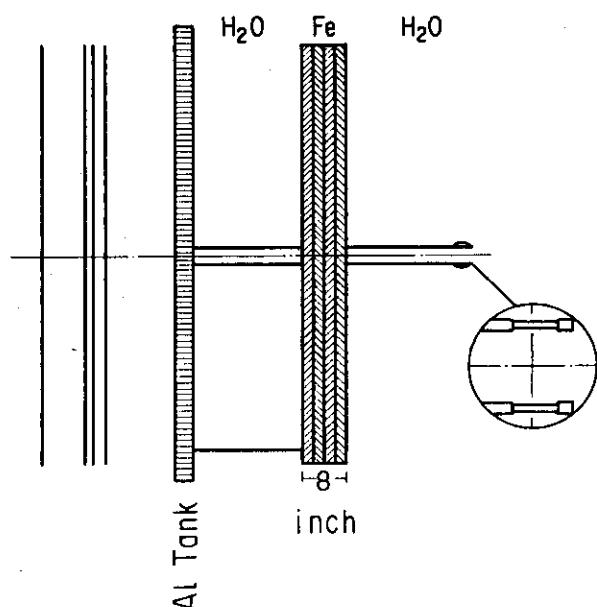


図 2.7.1 中性子多重層透過問題における実験配置図

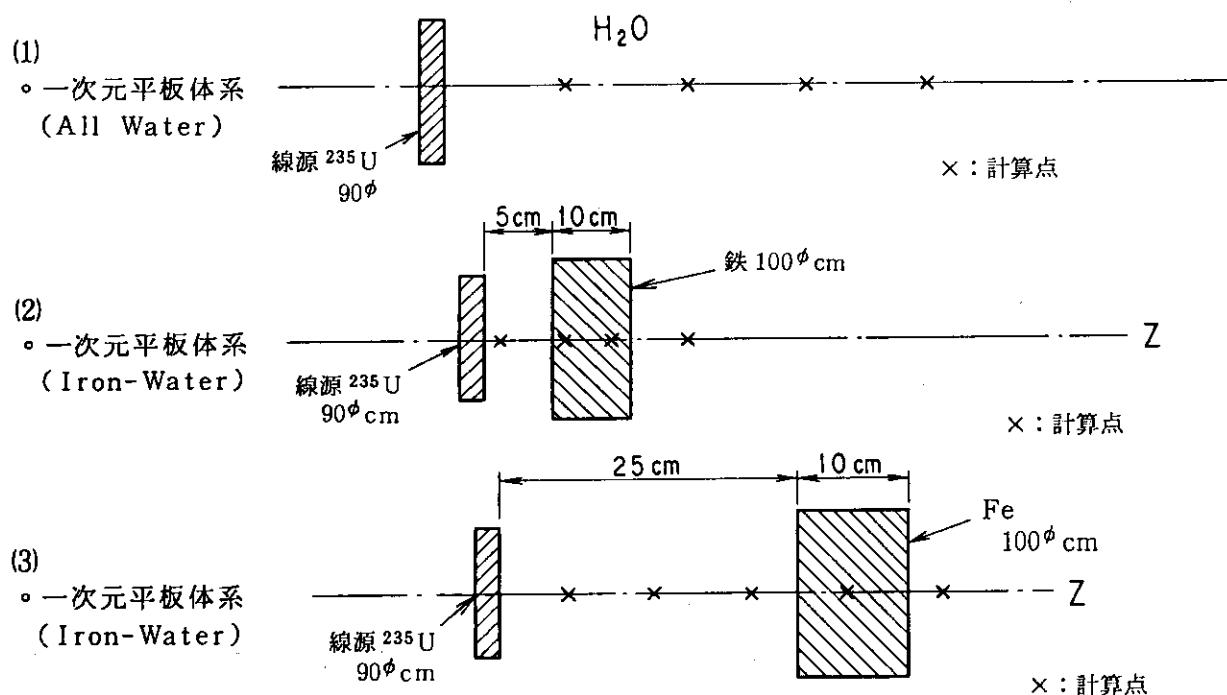


図 2.7.2 実験体系の計算モデル

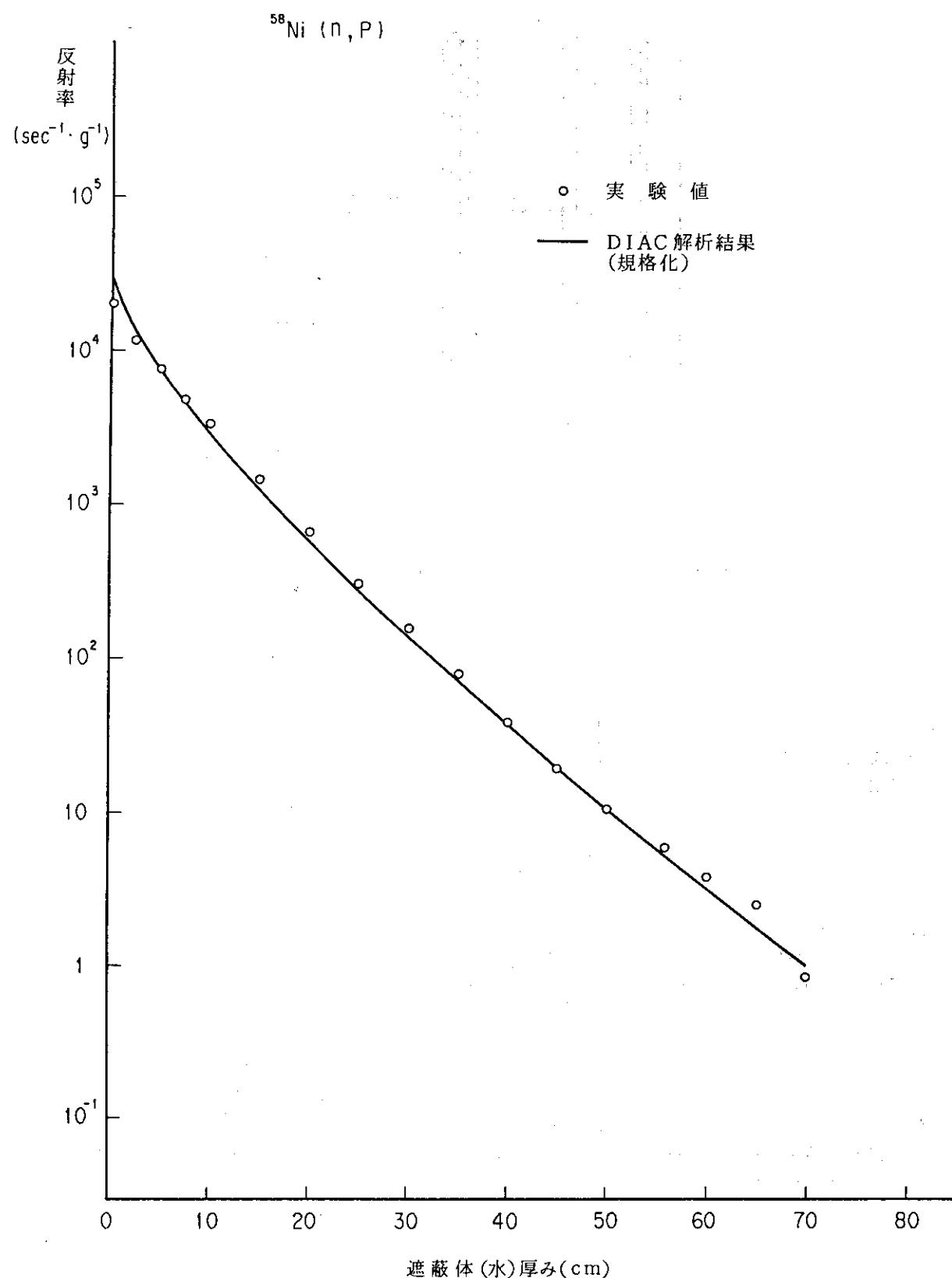


図 2.7.3 $^{58}\text{Ni} (\text{n}, \text{p})$ 反応率分布の実測値と解析結果
(DIAC, S 16, メッシュ幅 1.0 cm) の比較

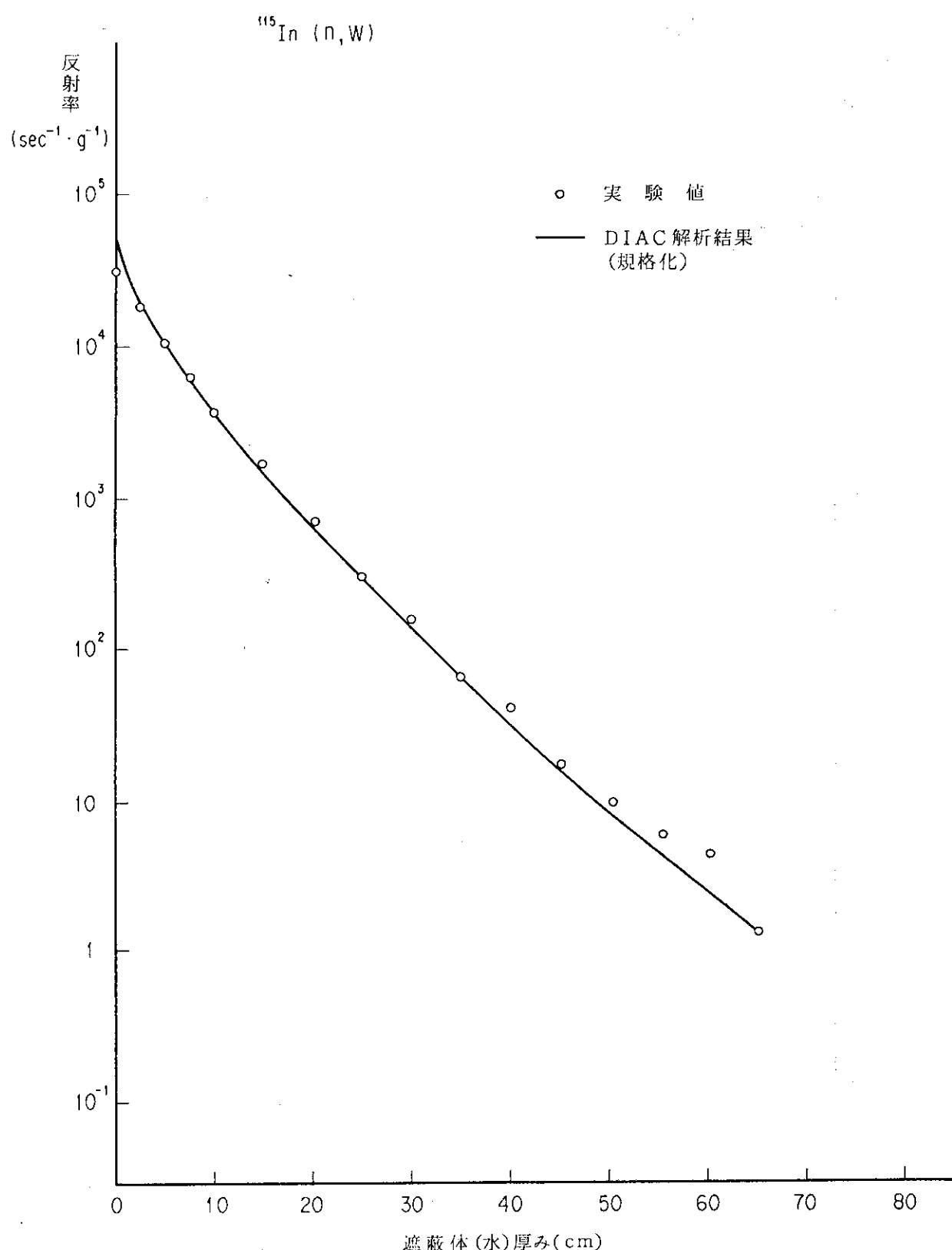


図 2.7.4 ^{115}In (n, n') 反応率分布の実測値と解析結果
(DIAC, S 16, メッシュ幅 1.0 cm) の比較

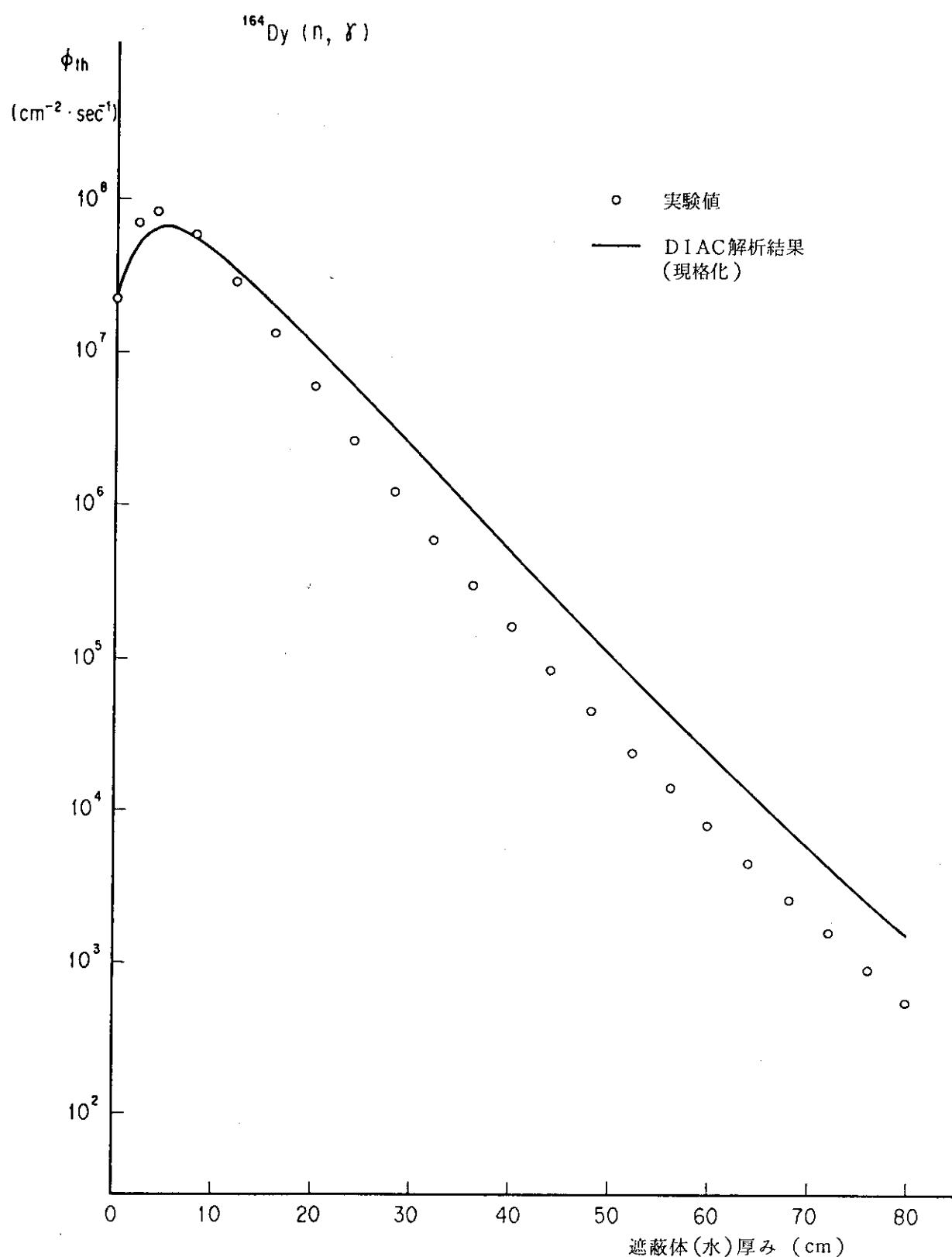


図 2.7.5 热中性子束分布 ($^{164}\text{Dy} (\text{n}, \gamma)$ による) の実測値と
解析結果 (DIAC, S 16, メッシュ幅 1.0 cm) の比較

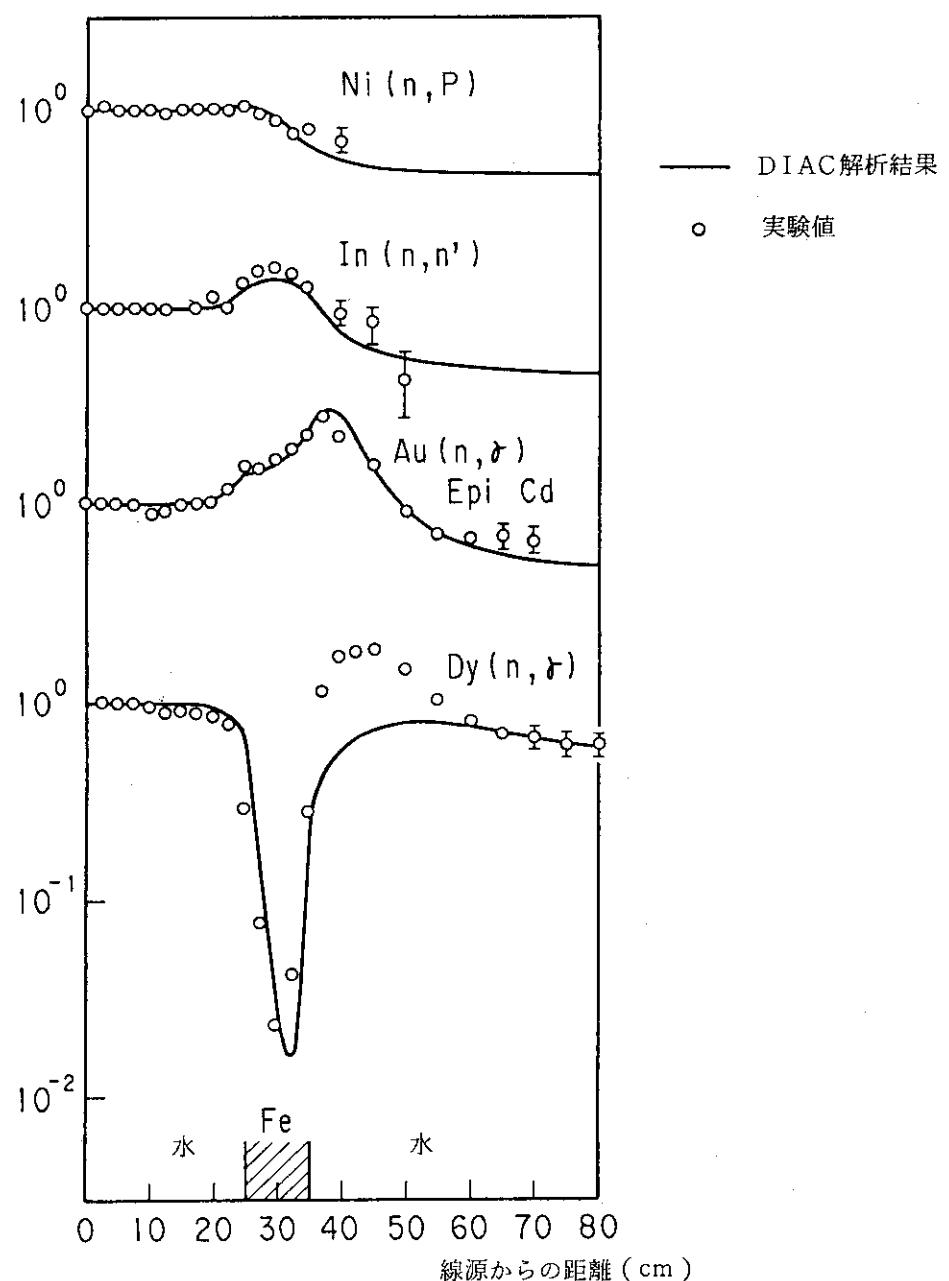


図 2.7.6 Ni (n, p) , In (n, n') , Au (n, γ) , Dy (n, γ) 反応率分布の実測値と解析結果 (DIAC, S 16, メッシュ幅 1.0 cm) の比較

2.8 ウランコンバータからの中性子の鉄透過問題⁽¹⁾

2.8.1 実験概要

(1) 実験配置

NESTOR 原子炉の熱中性子からの中性子を天然ウラン・コンバータ板に入射させ、このコンバータで、発生する核分裂中性子を線源としており、図 2.8.1 に NESTOR 炉の黒鉛反射体からコンバータまでの配置を示す。

鉄供試体は、1830 mm 幅 × 1910 mm 高さ × 50.8 mm 厚の軟鋼板 24 枚で構成されている。この供試体、全体がトロリーに載せられ、供試体の前面がトロリーの前面に接するようにされている。各軟鋼板の間には、検出器を挿入するための 6.35 mm の空隙があり、鉄供試体の後には 101.6 mm 厚の鉄板と重コンクリートが設置されている。スペクトロメータの実験では、鉄供試体の中心に 50.8 mm のスロットを入れ、そこに検出器が挿入された。また、トロリーの床と壁は 25 mm 厚の鉄から成る。その外側は重コンクリートと推定される。

(2) 測 定

鉄板透過厚さ 2 インチから 40 インチまでの ^{103}Rh (n, n') $^{103\text{m}}\text{Rh}$, ^{115}In (n, n') ^{115}In , ^{32}S (n, p) ^{32}P のしきい検出器と Cd カバー付き Au 箔による中性子反応率、更に反跳陽子検出器と NE - 213 シンチレータによる測定と上記しきい検出器の測定データを unfolding した中性子スペクトルが透過厚さ 8 ~ 40 インチについて求められている。

2.8.2 計算概要

解析は、DIAC, ANISN - JR コードを用いた中性子 100 群 1 次元計算及び ESPRIT, DOT 3.5 コードを用いた 28 群 2 次元計算によって行った。実験値との比較は、主として ESPRIT による計算結果を対象にして行った。

(1) 群定数

FAIRCROSS step 1 によって作成された JSD 1000 ライブラリを用いて角度メッシュ数 16, 100 群の巨視的実効断面積を FAIRCROSS step 2 にて作成した。これを DIAC コードに入力し、その計算で得られた領域毎のスペクトルを重みとして用い、FDEM コードにて縮約し 28 群断面積とした。表 2.8.1 及び表 2.8.2 に 100 群及び 28 群のエネルギー群構造を示す。また、FAIRCROSS step 3 により DOT 3.5 および ANISN - JR 計算用の P_s 群定数を作成した。

(2) 検出器反応断面積

検出器反応断面積は、全て ENDF/B - IV から作成したものを用いた。 ^{35}S (n, p) ^{32}P , ^{115}In (n, n') $^{115\text{m}}\text{In}$ 及び ^{197}Au (n, γ) ^{198}Au 反応断面積は、SAND - II タイプ 620 群定数があり、これを JSD 1000 の 100 群構造にまとめた。また、 ^{103}Rh (n, n') $^{103\text{m}}\text{Rh}$ 反応断面積は、FAIRCROSS step 1 で ENDF/B - IV を直接処理して得た。また、28 群への縮約は、輸送計算用の群定数と同様 DIAC 計算で得た領域毎のスペクトルを用いて FDEM コードで行った。

(3) 線 源

線源のウラン・コンバータの特性は次のとおりである。

燃 料	:	天然ウラン 3.18 mm 厚
等価半径	:	593 mm
^{235}U 核分裂率	:	$3.345 \times 10^3 \text{ fission/cm}^2 \cdot \text{sec}$
半径方向分布	:	$3.345 \times 10^3 \times \cos \frac{\pi r}{142.9} \text{ fission/cm}^2 \cdot \text{sec}$
全出力	:	$2.27 \times 10^7 \text{ fission/sec}$

計算では、上記の空間分布と ^{235}U 核分裂中性子スペクトルを有する等方分布をした角度中性子束を算出し、シェル線源（内部境界源）として入力した。

(4) 計算モデル

図 2.8.2 には、DIAC や ANISN - JR 計算に対する 1 次元平板形状のモデルを示す。鉄供試体における 24 枚の軟鋼の間の 6.35 mm の空隙は全て除き、各軟鋼が密着したモデル化を行った。また、スペクトルの空間的な変化をより忠実に追うため、鉄供試体を 14 領域に分けた。メッシュ分割は、鉄供試体部で 1.016 cm 幅、スペクトル変化の大きい線源側では、より細かいメッシュを与えた。

図 2.8.3 に ESPRIT や DOT 3.5 計算に対する 2 次元 RZ モデルを示す。メッシュ幅は、鉄供試体部で 1 次元計算の 2 倍以内（約 2 cm）とした。原子炉側にある黒鉛反射体の影響を調べるために、黒鉛反射体領域（第 II 領域）をボイドで置き換えた計算を行った。

表 2.8.3 には、各媒質の原子数密度組成を示す。鉄供試体については、軟鋼 100 % の組成を与えた。

(5) 計算条件

計算条件を以下に記す。

- DIAC 計算 : 100 群 S_8 近似, ISCT = 16
- ANISN 計算 : 100 群 S_8 近似, P_5
- ESPRIT 計算 : 28 群 S_{48} 近似, ISCT = 16
- DOT 3.5 計算 : 28 群 S_{48} 近似, P_3

2.8.3 計算と実験の比較

実験値には、中性子スペクトルと検出器反応率の空間分布がある。それぞれ、ESPRIT コードによる計算結果と比較・検討する。

(1) 中性子スペクトル

図 2.8.4 ~ 図 2.8.7 に鉄板透過厚さ 8 インチ、20 インチ、30 インチ及び 40 インチにおける中性子スペクトルについて ESPRIT 計算結果と実験値と比較して示す。計算は、総じて MeV 領域の中性子を過小評価し、軟いスペクトルを与えていた。20 ~ 500 keV 域のスペクトルの山の部分の中性子束を比較すると、計算値は 8 インチ透過位置で約 50 % 高いが、減衰が実験より急であり、40 インチ透過位置までは測定値に比べて約 40 % 低くなっている。このことは、計算に使用した JSD 1000 に含まれる鉄の全断面積や減速断面積が過大である可能性の高いことを示している。

(2) 検出器反応率分布

図 2.8.8 ~ 図 2.8.11 に各検出器反応率の空間分布について、計算と実験を比較して示す。計算結果には、ESPRIT 計算の他、DIAC 計算及び DOT - 3.5 計算を含む。

^{32}S (n, p) ^{32}P および ^{115}In (n, n') $^{115\text{m}}\text{In}$ のしきい反応率について、ESPRIT 計算の値は線源近くで実験値とほぼ一致しているが、透過源に対する減衰傾向について実験値より急であり、24 インチの透過位置では、 ^{32}S の場合ファクター 8、しきいエネルギーがやや低い ^{115}In 箔でファクター 3 過小である。

一方、 ^{103}Rh (n, n') $^{103\text{m}}\text{Rh}$ は、図 2.8.11 に示すように、計算値は実験値より高い。しかし、これも相対的な空間分布で見る限り計算値の透過厚に対する減衰割合は実験値より急である。

Cd カバー付 Au の反応率は、図 2.8.12 に示すように全体過大評価であり、透過厚 6 インチ以上では、計算値は実験値のほぼ 1.6 倍である。反応率の鉄板透過厚依存性を眺めると、6 インチ以上では相対的な分布は実験・計算がよく一致している。しかし、6 インチ内では、実験値の減衰がゆるやかで食い違いが認められる。

2.8.4 評価と検討

(1) 計算値間の比較

1 次元での DIAC と ANISN の計算結果を比較すると、図 2.8.12. に例示するように ANISN 計算の方がゆるい減衰を示す。両者の差は、鉄供試体 25 インチ (63.5 cm) 透過位置でも 20 ~ 50 % であり、両コード間の一一致は良いと考えられる。なお、ANISN - JR の計算モデルでは、供試体中のメッシュ幅が DIAC 計算の 2 倍になっているため、上記の差には、メッシュ効果も含まれていると考えられる。

2 次元での ESPRIT と DOT - 3.5 による反応率分布については、図 2.8.9 ~ 図 2.8.12 に示したように、いずれも数 % の差しか生じていない。また、中性子スペクトルについて比較すると、両者の差は鉄透過と共に大きくなる傾向にあるが、図 2.8.13 に示すように 40 インチ透過位置でもたかだか 10 % 程度の差しかない。

従って、DIAC、ESPRIT 両コードとも Sn 輸送方程式を解く上でのアルゴリズムの妥当性は検証できた。

(2) 黒鉛層の有無による比較

ウラン・コンバータをはさんで鉄供試体の反対側に黒鉛反射体がある。計算上、この反射体がどの程度影響を与えるかを DOT - 3.5 コードを用いて計算した。その結果、中高速中性子に対しては殆んど影響はないことがわかった。しかし、低速中性子に対しては、図 2.8.14 の熱中性子束の等高線分布で示すように鉄供試体 20 インチ透過位置に至るまで中性子束レベルを高めている。この影響は、図 2.8.15 の Cd 被覆の ^{197}Au 箔放射化率の空間分布にはっきりと現われている。なお、20 インチ以上では、この影響はない。

2.8.5 総合的検討

実験値と比較した限り ESPRIT 計算の計算精度はあまり良くない。例えば、 ^{32}S (n, P) ^{32}P 反応率は、鉄中 24 インチ透過位置でファクター 8 過小評価となっている。この食い違いは、実

験での出力較正誤差 25 %, In, S の測定誤差（最大）10 % に比べると非常に大きい。しかし、ESPRIT と DOT - 3.5 計算の結果がよく一致していること、垂直方向への洩れを含まない 1 次元計算と 2 次元計算の整合性のとれた結果から判断すると、計算誤差は、使用した群定数の不確かさ、あるいは、線源スペクトルの不確かさにあると考えられる。従って、この誤差要因の解明が今後の課題として残されるが、ESPRIT や DIAC コードの計算のアルゴリズムに関しては、妥当であると判断される。

^{103}Rh (n, n') $^{103\text{m}}\text{Rh}$ および Cd 被覆の ^{197}Au (n, γ) 反応率の過大評価の原因には、計算に使用した検出器反応断面積の誤差が挙げられる。即ち、 ^{103}Rh (n, n') $^{103\text{m}}\text{Rh}$ 反応断面積は、FAIRCROSS step 1 で処理して得たとなっているが、その際、全非弾性散乱断面積を使用してしまったものと考えられる。従って、この計算結果は、割り引いて考える必要がある。また、 ^{197}Au (n, γ) 反応断面積は、4.9 eV に非常に強い共鳴を有する。そのため、実験に使用した箔の厚さに対応した共鳴の自己遮蔽効果が問題になる。もしも、このことを考慮すれば、測定値の再現性は改善されるものと考えられる。また、計算上線源には、核分裂中性子しか考慮していないが、実際は原子炉からの熱外中性子が金箔放射化に多少寄与しているものと思われる。但し、その影響は原著に言及されていないぐらいに小さいと思われる。

参考文献

- (1) Carter, M.D., and Packwood, A.: "The Winfnth Benchmark Experiments in Iron", NEACRP-U-73 (1976).

表2.8.1 100群エネルギーの群構造

NEUTRON ENERGY GROUP (EV) (1 - 100 GROUPS)

NO.	LOWER	UPPER	NO.	LOWER	UPPER
1	1.4550E+07	1.6487E+07	51	2.8088E+04	3.1828E+04
2	1.2840E+07	1.4550E+07	52	2.4788E+04	2.8088E+04
3	1.1331E+07	1.2840E+07	53	2.1875E+04	2.4788E+04
4	1.0000E+07	1.1331E+07	54	1.9305E+04	2.1875E+04
5	8.8250E+06	1.0000E+07	55	1.7036E+04	1.9305E+04
6	7.7880E+06	8.8250E+06	56	1.5034E+04	1.7036E+04
7	6.8729E+06	7.7880E+06	57	1.1709E+04	1.5034E+04
8	6.0653E+06	6.8729E+06	58	9.1188E+03	1.1709E+04
9	5.3526E+06	6.0653E+06	59	7.1017E+03	9.1188E+03
10	4.7237E+06	5.3526E+06	60	5.5308E+03	7.1017E+03
11	4.1686E+06	4.7237E+06	61	4.3074E+03	5.5308E+03
12	3.6788E+06	4.1686E+06	62	3.3546E+03	4.3074E+03
13	3.2465E+06	3.6788E+06	63	2.6126E+03	3.3546E+03
14	2.8650E+06	3.2465E+06	64	2.0347E+03	2.6126E+03
15	2.5284E+06	2.8650E+06	65	1.5846E+03	2.0347E+03
16	2.2313E+06	2.5284E+06	66	1.2341E+03	1.5846E+03
17	1.9691E+06	2.2313E+06	67	9.6112E+02	1.2341E+03
18	1.7377E+06	1.9691E+06	68	7.4852E+02	9.6112E+02
19	1.5335E+06	1.7377E+06	69	5.8295E+02	7.4852E+02
20	1.3534E+06	1.5335E+06	70	4.5400E+02	5.8295E+02
21	1.1943E+06	1.3534E+06	71	3.5357E+02	4.5400E+02
22	1.0540E+06	1.1943E+06	72	2.7536E+02	3.5357E+02
23	9.3014E+05	1.0540E+06	73	2.1445E+02	2.7536E+02
24	8.2085E+05	9.3014E+05	74	1.6702E+02	2.1445E+02
25	7.2440E+05	8.2085E+05	75	1.3007E+02	1.6702E+02
26	6.3928E+05	7.2440E+05	76	1.0130E+02	1.3007E+02
27	5.6416E+05	6.3928E+05	77	7.8893E+01	1.0130E+02
28	4.9787E+05	5.6416E+05	78	6.1442E+01	7.8893E+01
29	4.3937E+05	4.9787E+05	79	4.7851E+01	6.1442E+01
30	3.8774E+05	4.3937E+05	80	3.7267E+01	4.7851E+01
31	3.4218E+05	3.8774E+05	81	2.9023E+01	3.7267E+01
32	3.0197E+05	3.4218E+05	82	2.2603E+01	2.9023E+01
33	2.6649E+05	3.0197E+05	83	1.7603E+01	2.2603E+01
34	2.3518E+05	2.6649E+05	84	1.3710E+01	1.7603E+01
35	2.0754E+05	2.3518E+05	85	1.0677E+01	1.3710E+01
36	1.8316E+05	2.0754E+05	86	8.3153E+00	1.0677E+01
37	1.6163E+05	1.8316E+05	87	6.4760E+00	8.3153E+00
38	1.4264E+05	1.6163E+05	88	5.0435E+00	6.4760E+00
39	1.2588E+05	1.4264E+05	89	3.9279E+00	5.0435E+00
40	1.1109E+05	1.2588E+05	90	3.0590E+00	3.9279E+00
41	9.8037E+04	1.1109E+05	91	2.3824E+00	3.0590E+00
42	8.6517E+04	9.8037E+04	92	1.8554E+00	2.3824E+00
43	7.6351E+04	8.6517E+04	93	1.4450E+00	1.8554E+00
44	6.7379E+04	7.6351E+04	94	1.1254E+00	1.4450E+00
45	5.9462E+04	6.7379E+04	95	8.7642E-01	1.1254E+00
46	5.2475E+04	5.9462E+04	96	6.8256E-01	8.7642E-01
47	4.6309E+04	5.2475E+04	97	5.3158E-01	6.8256E-01
48	4.0868E+04	4.6309E+04	98	4.1399E-01	5.3158E-01
49	3.6066E+04	4.0868E+04	99	1.5183E-01	4.1399E-01
50	3.1828E+04	3.6066E+04	100	3.5238E-04	1.5183E-01

表 2.8.2 2 次元計算用28群エネルギー群構造

GROUP	ENERGY	RANGE
1	1.6487E+C7	7.7880E+05
2	7.7880E+C6	4.7237E+05
3	4.7237E+06	3.2465E+06
4	3.2465E+06	2.2313E+06
5	2.2313E+06	1.7377E+06
6	1.7377E+06	1.1943E+06
7	1.1943E+06	8.2085E+05
8	8.2085E+05	6.3928E+05
9	6.3928E+05	5.2416E+05
10	5.6416E+05	3.8774E+05
11	2.8774E+05	2.6649E+05
12	2.6649E+05	1.8316E+05
13	1.8315E+05	1.2588E+05
14	1.2588E+05	8.8517E+04
15	8.8517E+04	5.9262E+04
16	5.9462E+04	4.0868E+04
17	4.0858E+04	2.8088E+04
18	2.8088E+04	2.1875E+04
19	2.1875E+04	1.5034E+04
20	1.5034E+04	4.3074E+03
21	4.3074E+03	9.6112E+02
22	9.6112E+02	2.1445E+02
23	2.1445E+02	4.7851E+01
24	4.7851E+01	1.3710E+01
25	1.2710E+01	6.4760E+00
26	6.4760E+00	3.9279E+00
27	3.9279E+00	4.1399E-01
28	4.1399E-01	3.5238E-04

表2.8.3 各媒質の原子数密度

	① $A\ell$	② 黒鉛	③ ボイド	④ $Fe + Al$	⑤ U-コソミタード	⑥ 銅	⑦ 重コンクリート
H	1269			7.000 - 7		2.330 - 5	1.128 - 2
C	1274		8.524 - 2	2.700 - 5		8.996 - 4	8.270 - 3
N	1275		5.550 - 5				1.482 - 2
O	1276			4.440 - 2			6.610 - 4
Al	1193	6.027 - 2					4.760 - 3
Si	1194						3.680 - 3
Ca	1195				1.910 - 5	6.370 - 4	2.130 - 4
Mn	1197				2.501 - 3	8.330 - 2	4.990 - 2
Fe	1192						
U-235	1261				3.409 - 4		
U-238	1262				4.698 - 2		
備考							
NODE名	ALUM	CBON	AI RW	ALFE	CNZD	MLDZ	CONC

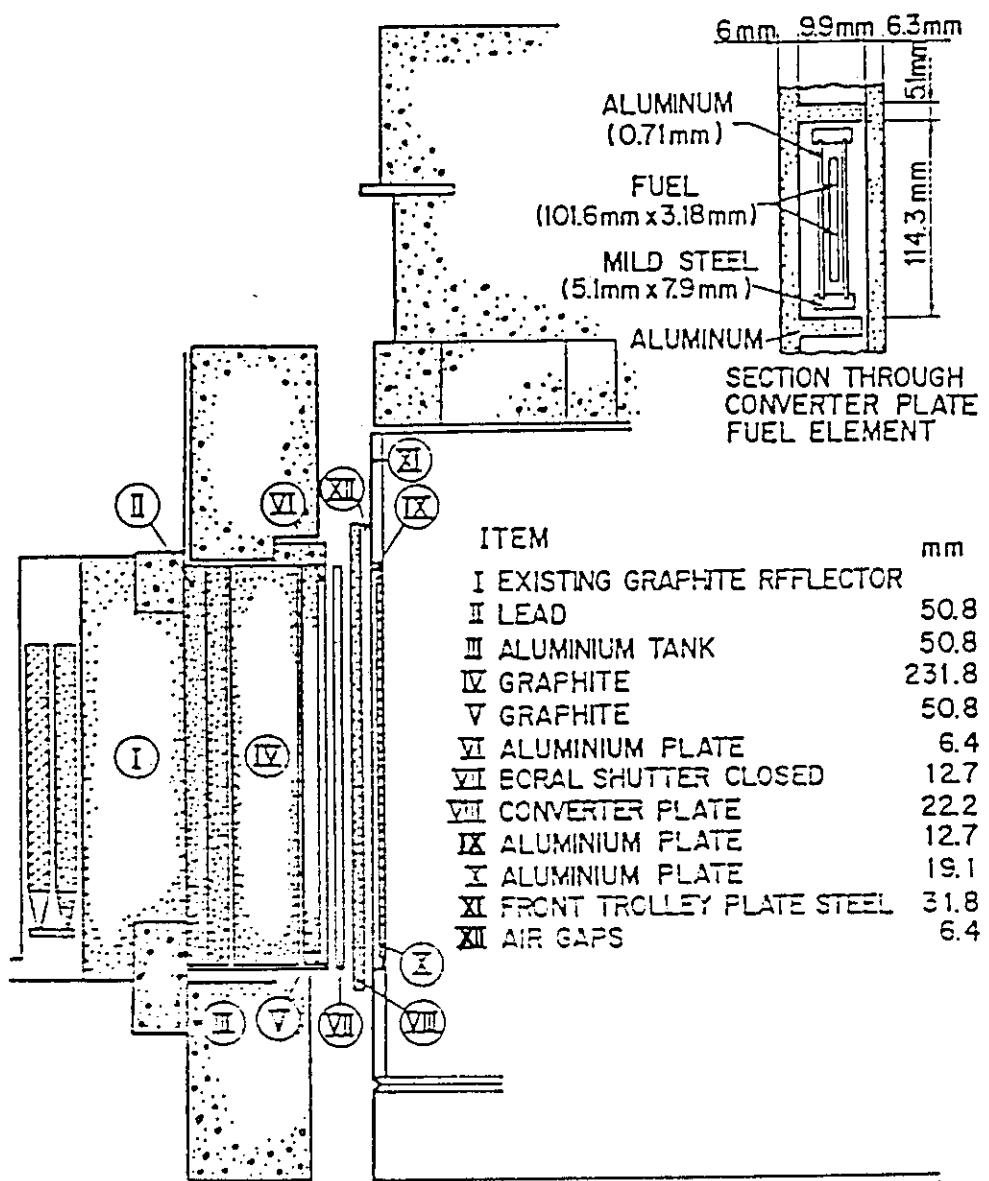


図 2.8.1 線 源 部 配 置 図

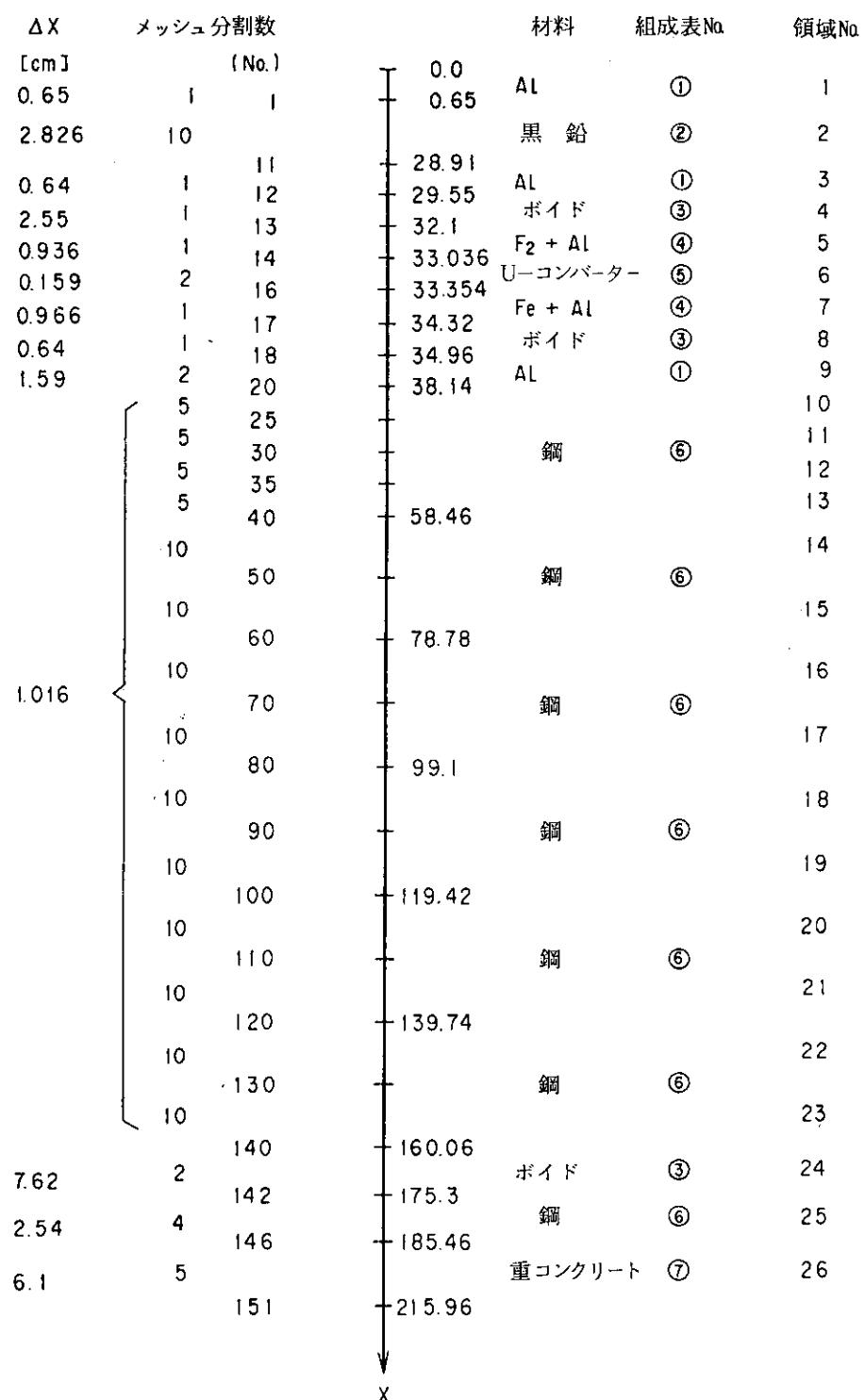


図2.8.2 1次元計算モデル

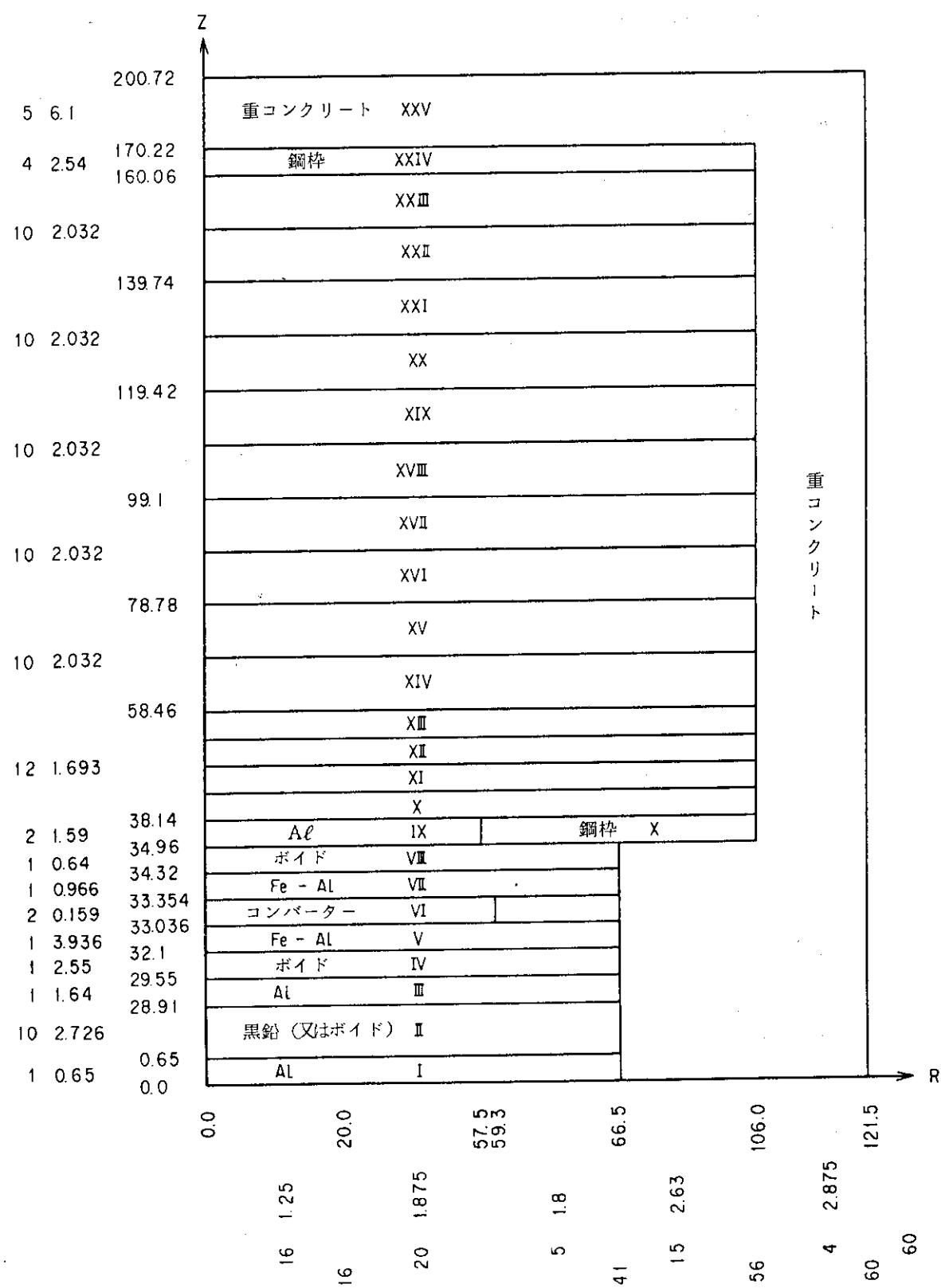


図 2.8.3 2 次元 R -- Z 計算モデル

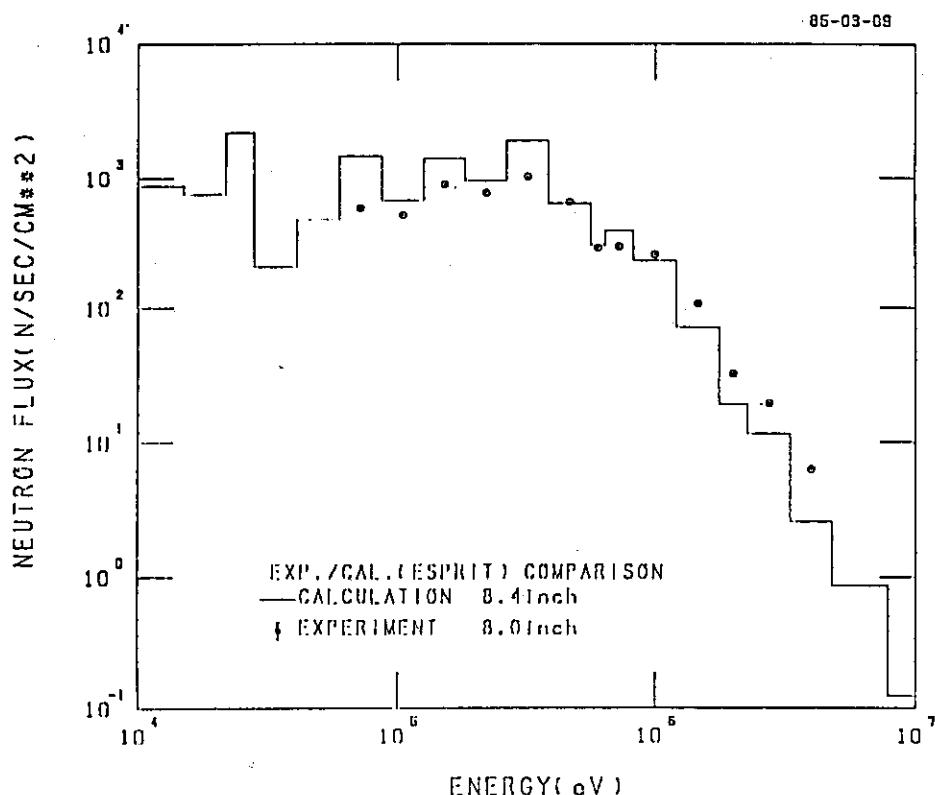


図 2.8.4 鉄中 8 インチ透過位置での中性子スペクトル

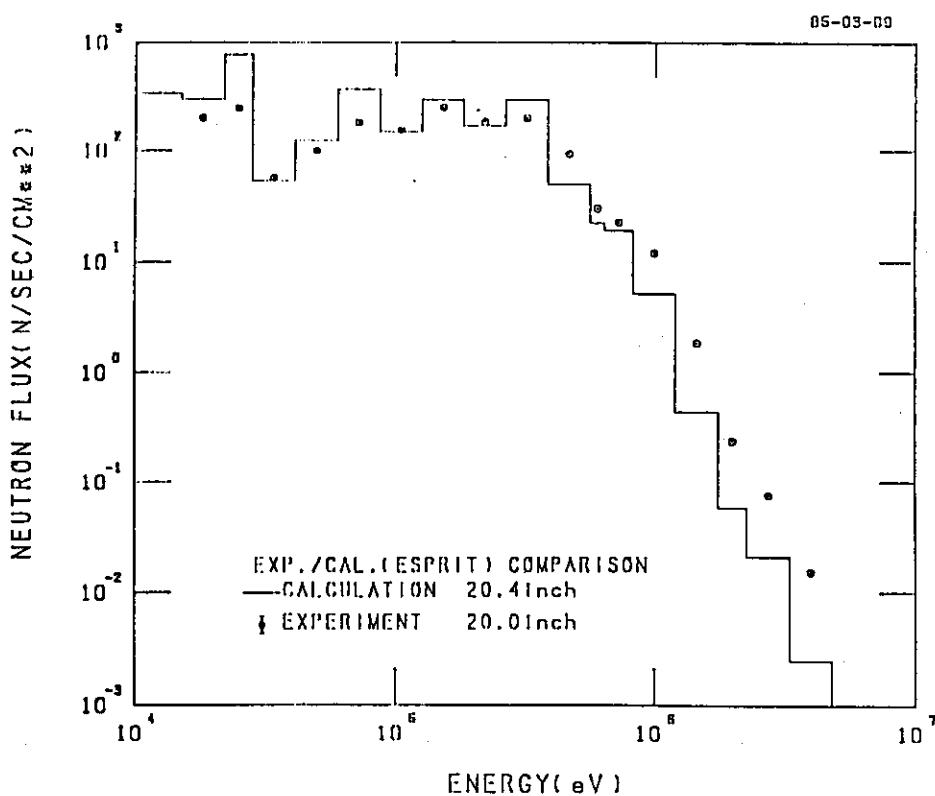


図 2.8.5 鉄中 20 インチ透過位置での中性子スペクトル

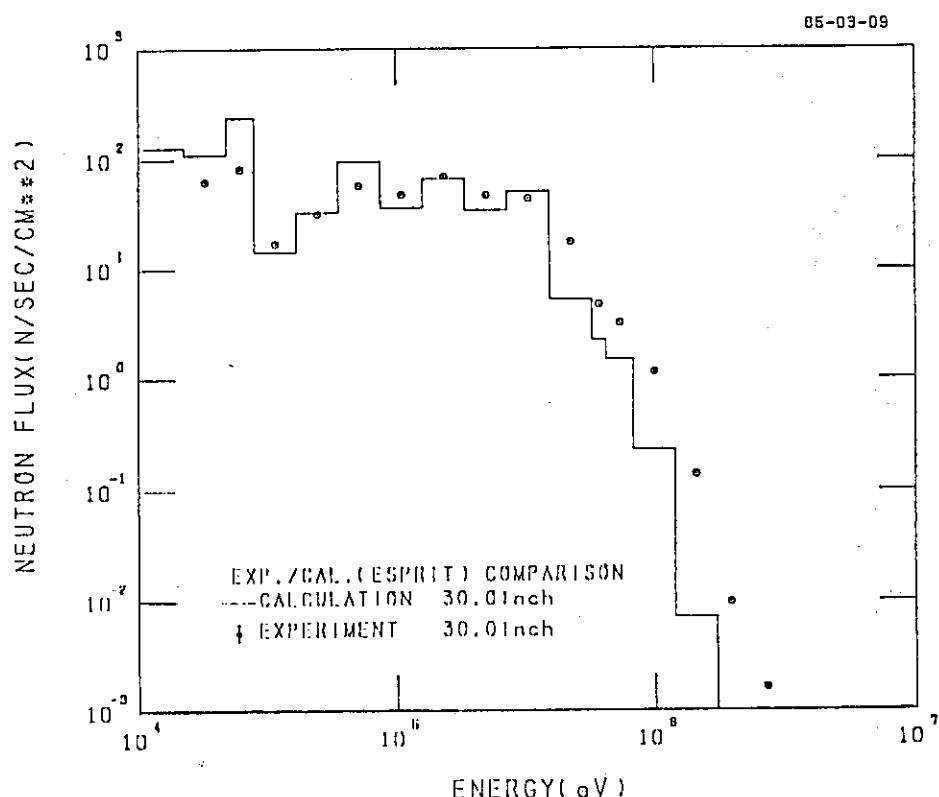


図 2.8.6 鉄中30インチ透過位置での中性子スペクトル

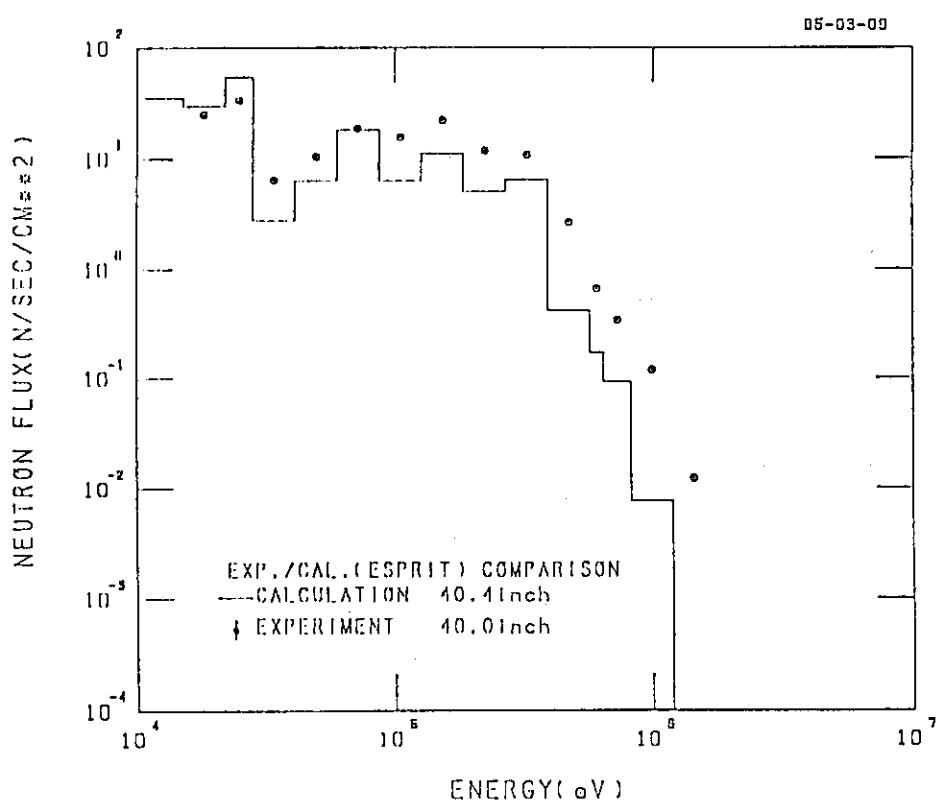
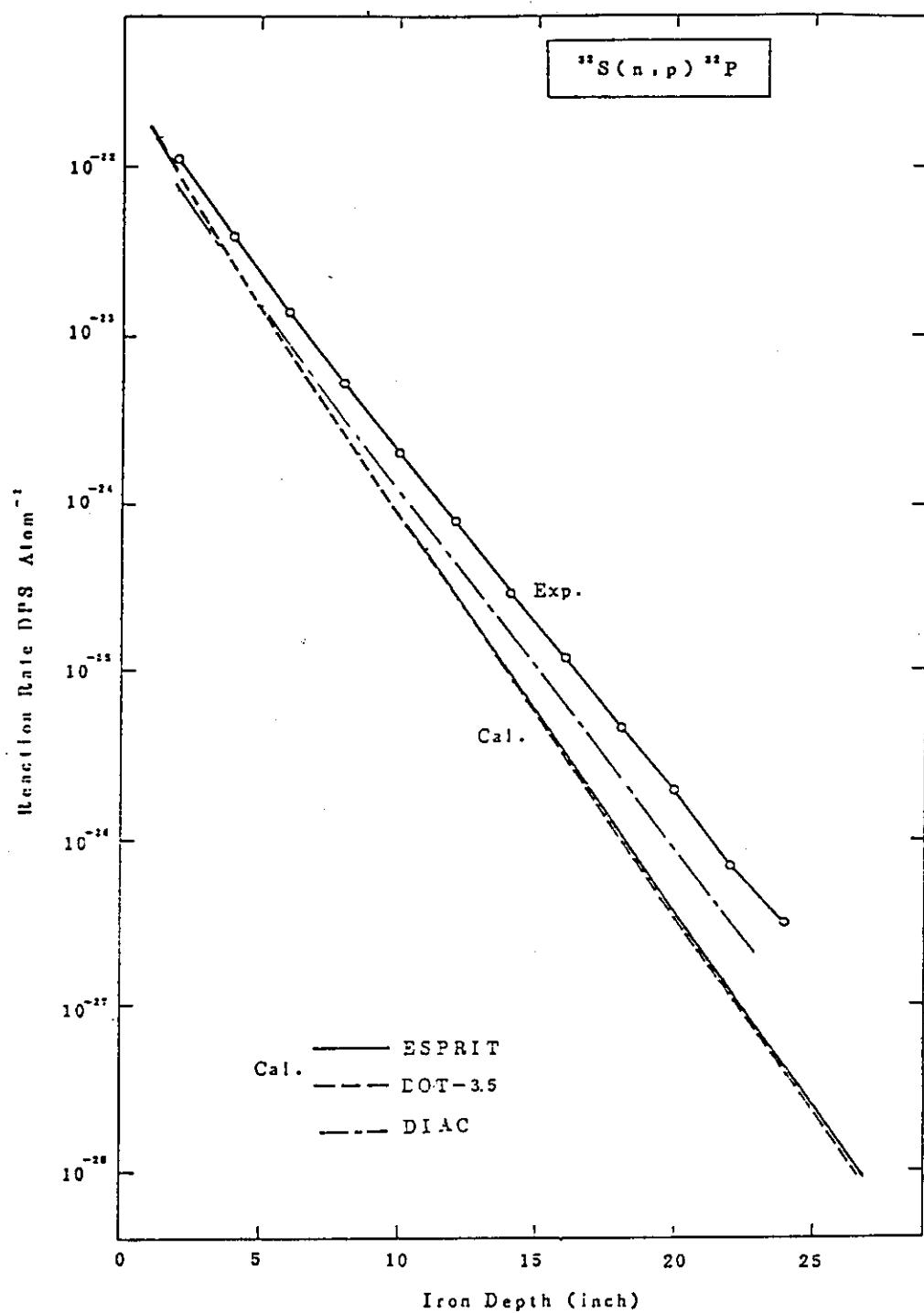


図 2.8.7 鉄中40インチ透過位置での中性子スペクトル

図 2.8.8 $^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})^{32}\text{P}$ 反応率分布の実験値と計算値の比較

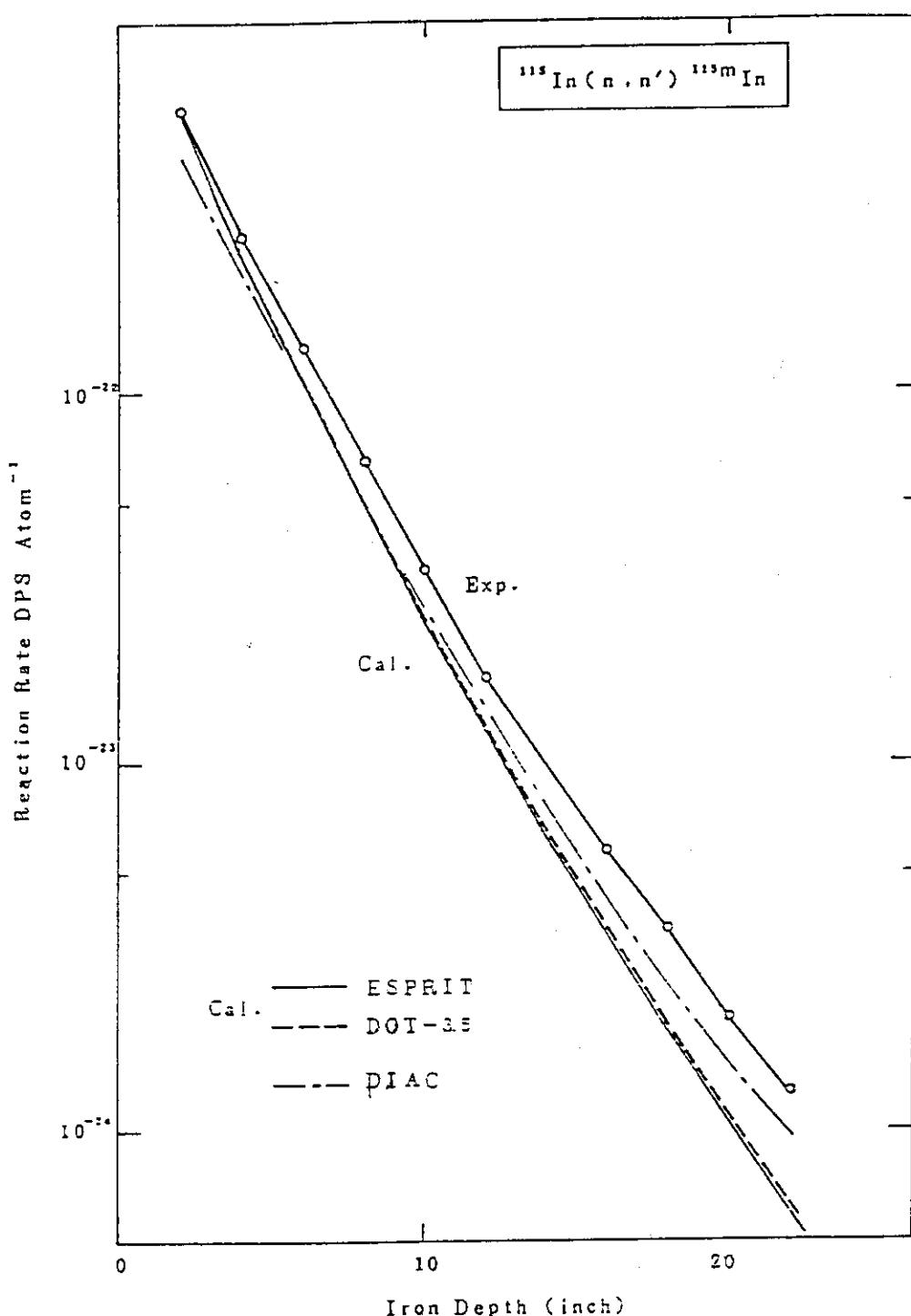


図 2.8.9 $^{115}\text{In}(n, n') ^{115\text{m}}\text{In}$ 反応率分布の実験値と計算値
(ESPRIT, DOT 3.5, DIAC) の比較

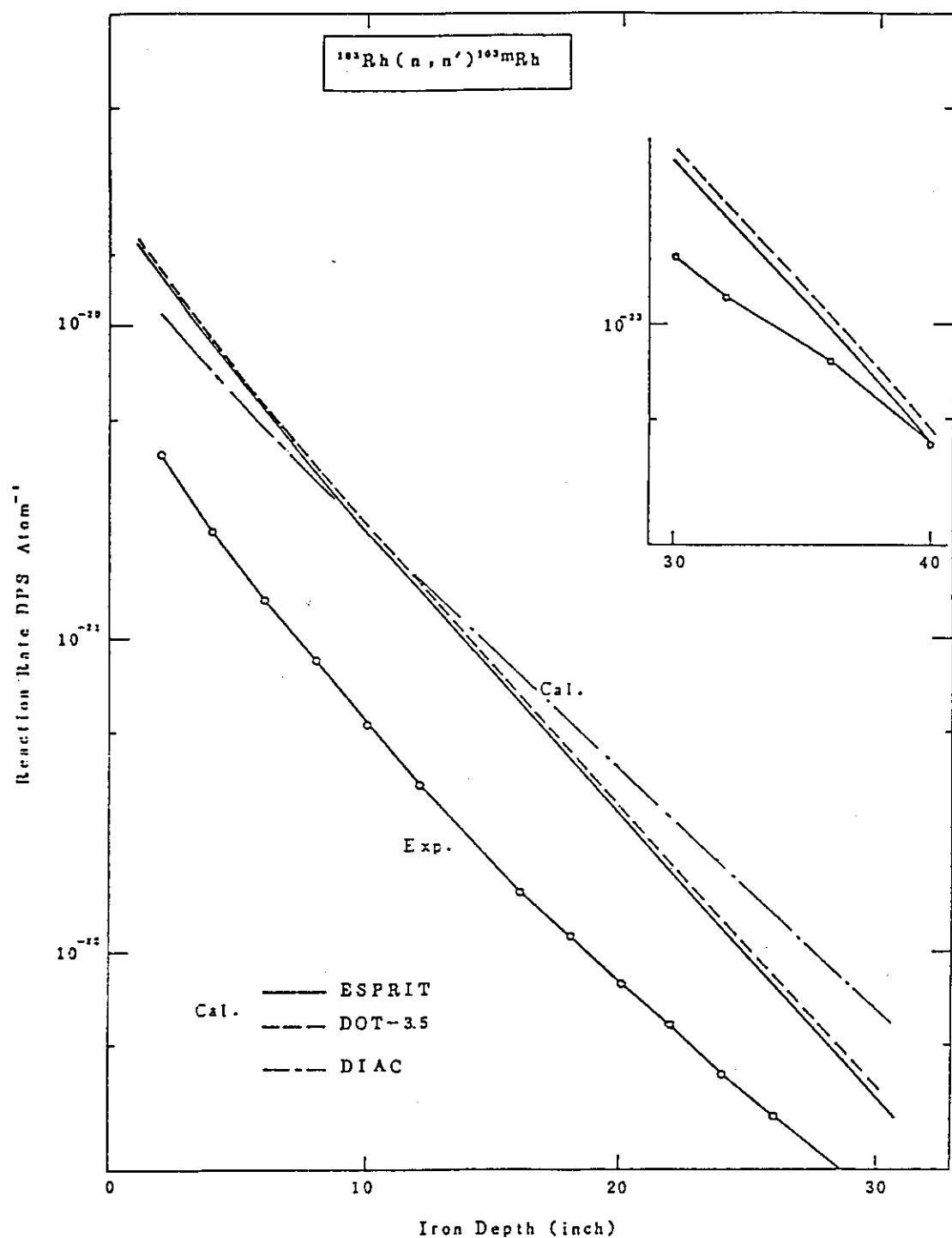


図 2.8.10 $^{103}\text{Rh} (\text{n}, \text{n}') ^{103\text{m}}\text{Rh}$ 反応率分布の実験値と計算値
(ESPRIT, DOT3.5, DIAC) の比較

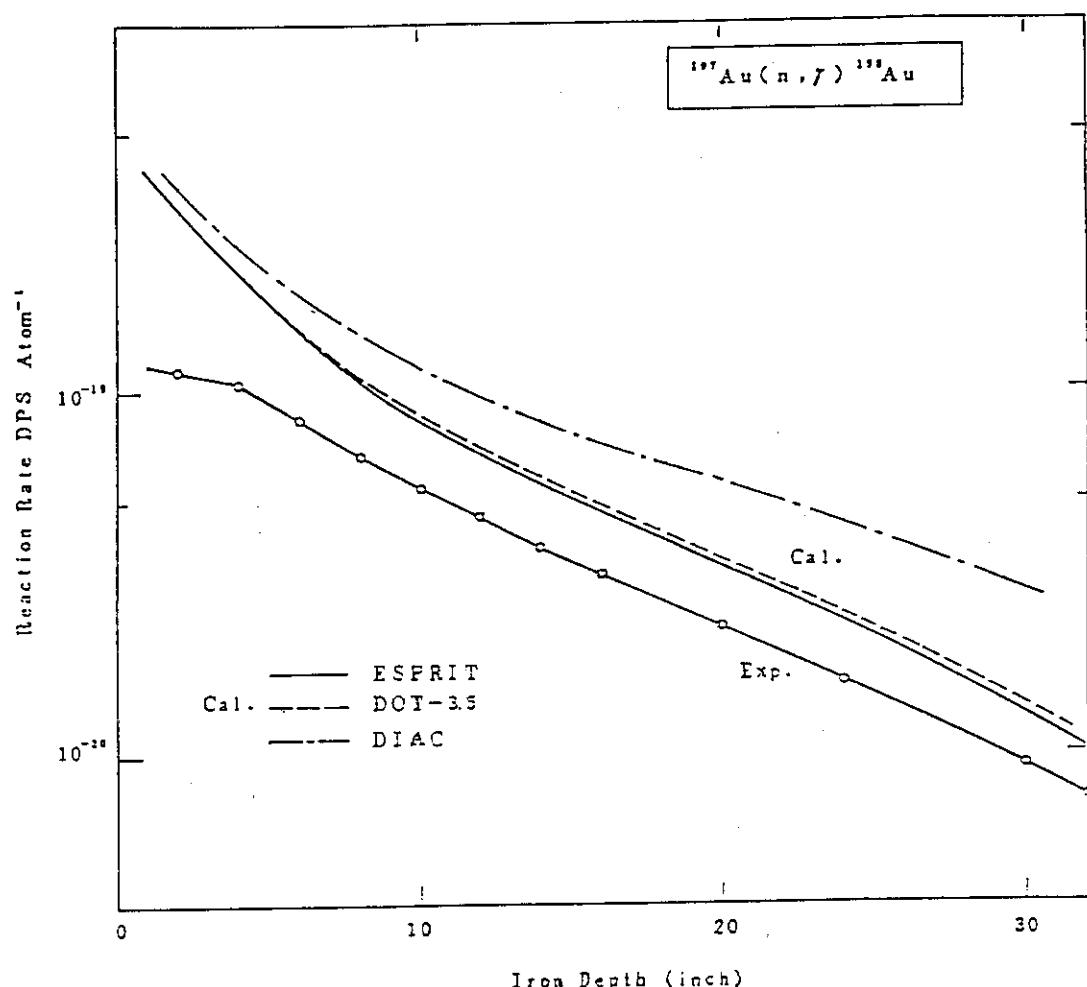


図 2.8.11 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}/\text{Cd}$ 被覆の反応率分布の実験値と計算値
(ESPRIT, DOT 3.5, DIAC) の比較

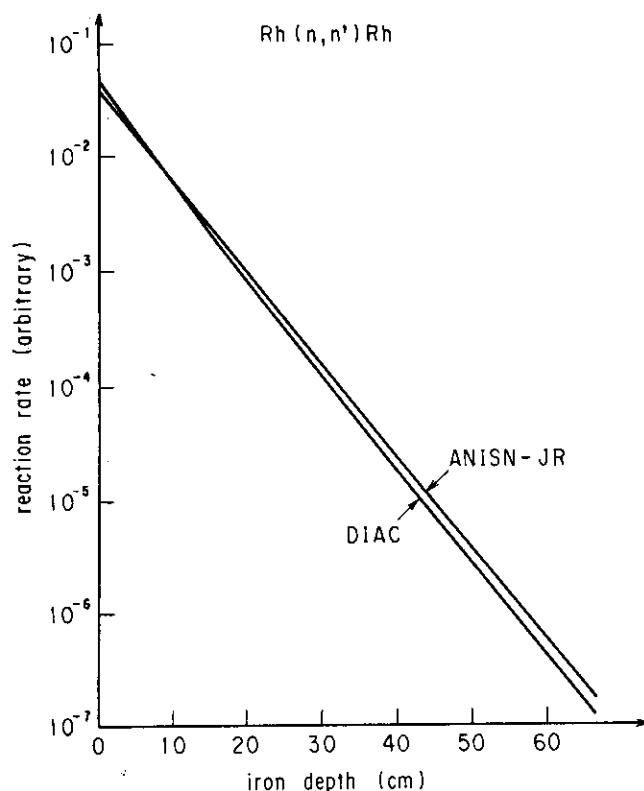


図 2.8.12 Rh (n, n') Rh 反応率分布の ANISN - JR と
DIAC の計算結果の比較

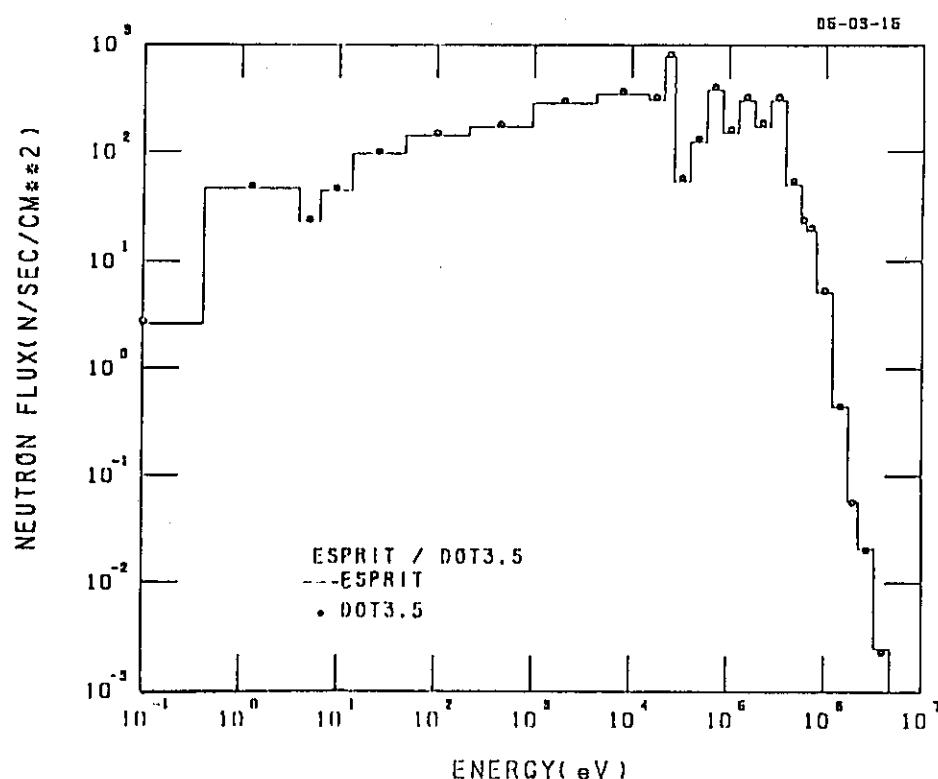


図 2.8.13 鉄中 20.4 インチにおける中性子スペクトルについて
ESPRIT と DOT3.5 の計算結果の比果

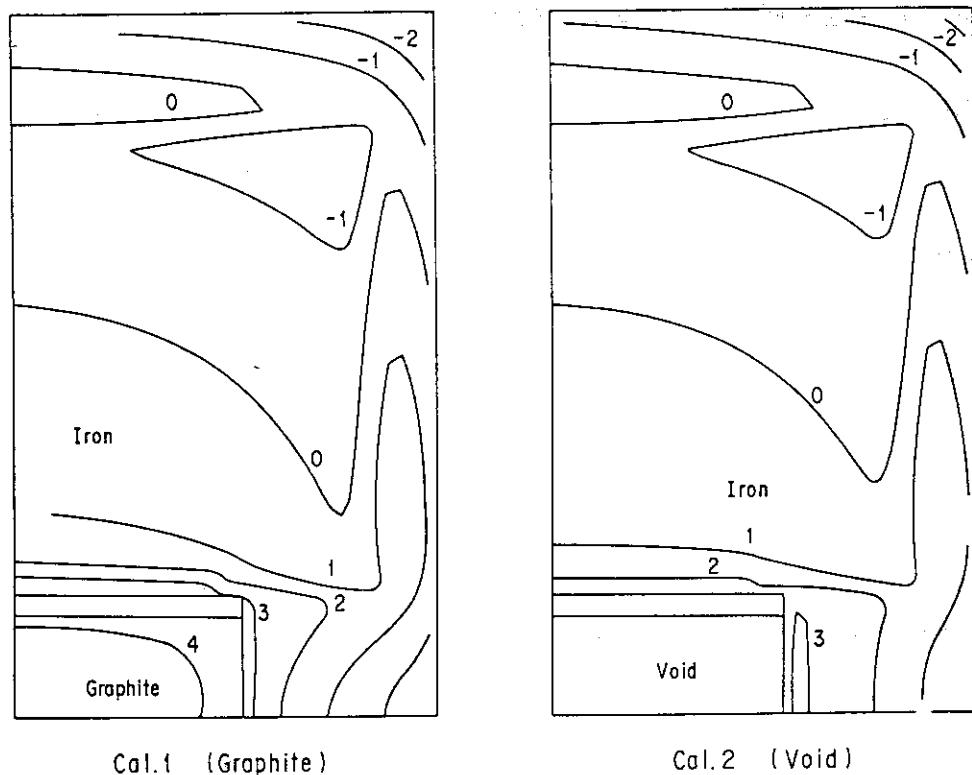
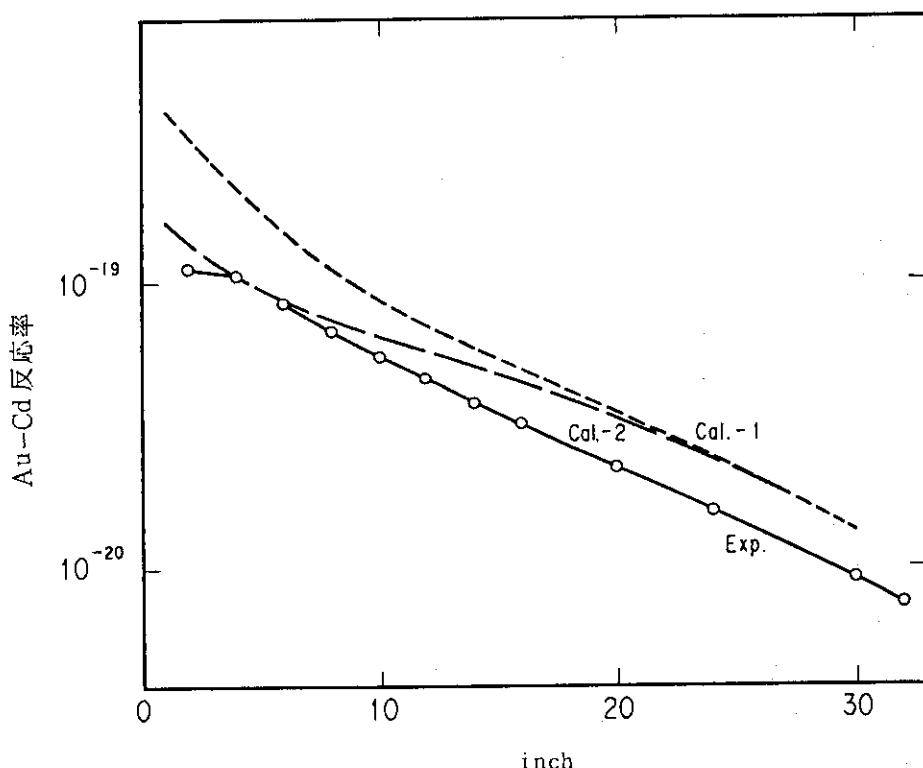


図 2.8.14 中性子束の等高線分布

図 2.8.15 Cd 被覆の Au (n, γ) 反応率に対する
黒鉛反射体の影響評価

2.9 Am - Be 中性子源を用いた球体系透過問題

2.9.1 実験概要

NASA の D. Bogart 達¹⁾によって行われた Am - Be 線源による中性子透過実験の概要について以下に述べる。

(1) 実験体系

図 2.9.1 に示した実験体系から判るように、床から高さ 160 cm の位置に Am - Be 線源が設置され、その周囲を種々の物質で作られた供試体（8 種類）が取巻いている。この線源から 200 cm 離れた位置に NE - 213 中性子スペクトロータが置かれ、このスペクトロメータの窓の高さは略、線源の高さに等しい。線源とスペクトロメータとの間にパラフィンで作られた shadow cone が置かれており、供試体を透過した中性子はこの shadow cone を通ってスペクトロメータに入射する。

(2) Am - Be 線源

この実験に使われた Am - Be 線源は ^{241}Am 16.7 g と Be 66.8 g とでできている。Be は粉末で、これに ^{241}Am を均一に混ぜ合せた上、冷間圧縮して体積 84.3 cm³ の球形に作られた。この線源の α 線強度は 54 Ci、Be との (α, n) 反応で放出される中性子の強度は $(1.30 \pm 0.08) \times 10^8 \text{ n/sec}$ である。次に、この球形線源は、厚さが 0.140 cm 及び 0.152 cm の SUS 製球形二重容器に封入されており、この容器の外径は 6.10 cm、内径は 5.46 cm である。線源及び容器の寸法を図 2.9.2 に示す。

(3) 解析用中性子スペクトル

この実験に使用された Am - Be 線源は体積が大きく、Hf Be の量が多いため、この線源から (α, n) 反応で放出される中性子は、Be によって可成り減速及び吸収される。従って、(α, n) 反応で直接得られる中性子スペクトルに比べて、可成り軟化していると考えられるので、解析用の中性子スペクトルとしては、Po - Be の標準小型線源（直徑 1.3 cm、長さ 1.2 cm）を用いて測定された中性子スペクトルが与えられている。これが virgin source spectrum と呼ばれるものであり、原著者達はこれを用いてスペクトル解析を行っている。

Po - Be、Am - Be 及び Pu - Be の各線源から放出される α 粒子のエネルギーはほとんど等しいので、此等 3 種類の線源から得られる virgin source spectrum の形は本質的に同じであると考えられる。これが解析用中性子スペクトルとして Po - Be 小型線源が採用された理由である。この小型線源を用いて測定された中性子スペクトルと、群定数化された virgin source spectrum との比較を図 2.3.9 に、また、この virgin source spectrum とその群構造との数値を表 2.9.1 に示す。

(4) 供試体

この実験に使用された供試体は、ポリエチレン (CH₂)、Be、Nb、Mo、Ta、W（密度の異なるもの 2 種類）及び P_b の 8 種類である。なお、測定としてはこの他に、供試体を用いない裸の体系における中性子スペクトルも測定されている。上記供試体の形態及び寸法を表 2.9.2 に示す。なお、この表に記載してある供試体の内半径は筆者が原論文に記載されている外径と厚みから算出したものであるが、どの値も原論文に記述されている供試体の内半径

(3.075 cm, 図 2.9.1 参照) と一致しない。ポリエチレンの場合は、線源と供試体との間に空隙なし, Ta の場合は線源の外半径 3.05 cm よりも僅か 0.05 mm ながら小さく、線源の収納が厳密には不可能、また、大型の W 供試体の場合には、線源と供試体との間に 7.8 mm もの空隙が生ずる。

(5) 中性子スペクトロメータ

供試体からの透過中性子の測定に使用された中性子スペクトロメータの正式名は 5 cm × 5 cm cylindrical NE - 213 liquid scintillator proton - recoil spectrometer である。また、Po - Be 線源による virgin source spectrum の測定には、これよりも小型のシンチレータが使われた。

大型シンチレータの利点は感度が良い事及び中性子の良い応答関数が得られる事であり、一方、小型シンチレータの利点はエネルギー分解能が良い事である。上記大型シンチレータのエネルギー分解能は、中性子エネルギー 11 MeV 10 %, 3 MeV で 20 %, 1 MeV で 35 % と、エネルギーが低くなるにつれて悪くなる。この分解能のエネルギー依存性を図 2.9.4 に示す。

(6) 測定データ

裸の体系及び前記 8 種類の供試体を使用した体系で測定された漏洩中性子スペクトルの数値データを表 2.9.3 に示す。

2.9.2 計算概要

前節で述べた D. Bogart 達の中性子透過実験に対して実施したベンチマーク解析の計算概要について以下に記述する。

(1) 計算体系

昭和 57 年度から昭和 59 年度にかけて実施されたベンチマーク解析において、昭和 57 年度及び昭和 58 年度に採用している計算体系と、昭和 59 年度の計算体系との間には或程度の差異がある。昭和 57, 58 年度の基本形状として採用している JAERI - M 7843^② に記載されている幾何形状と共に、此等を図 2.9.5 及び表 2.9.4 に示す。

図 2.9.5^③ は JAERI - M 7843 に記載されている線源及び SUS 容器の幾何形状である。この図では Am Be 線源の半径を 2.70 cm, SUS 線源容器の内側及び外側部分と一緒に厚みを 0.29 cm としているが、実際の寸法は図 2.9.2 に示したように、夫々 2.72 cm 及び 0.292 cm である。

図 2.9.5 は昭和 57, 58 年度に採用した計算体系（球模型）を示す。線源半径及び SUS の厚みは図 2.9.5^④ と同じであるが、三層からなる空隙の厚みを図 2.9.5^④ の 0.085 cm から約 2 倍の 0.16 cm としているが、何故このような値を採ったのか、理由は不明である。

図 2.9.5^⑤ は昭和 59 年度に採用した計算体系を示すが、この体系では SUS 容器と空気層の位置が前年度とは逆になっており、且つ SUS 容器と供試体との間には空気層を設けていない。前述したように、これはポリエチレン供試体の場合には正しいが、その他の供試体では Ta を除いて多少の空気層が生ずる。線源半径と SUS の厚みに関しては正しい値を採用している。

最後に、表 2.9.4 の前回モデルと JAERI - M 7843 との欄に記載されている空気層の厚み及び外半径の数値は図 2.9.5^④ 及び図 2.9.5^⑤ に記載されている数値と全く逆になっており、また、逆だとすると、この表の脚注 C) の記述と矛盾する。

(2) ベンチマーク解析に使用した実験体系（供試体）及び計算ケース

今回のベンチマーク解析に使用した実験体系（供試体）は裸の体系も含めて9種類の内、裸の体系と、ポリエチレン、Be、Mo、Ta及びP_bの供試体を用いた体系の計6種類である。此等の体系についての計算ケースを表2.9.5に示す。この表に示されるように、昭和57、58年の解析においては、Am-Be線源を体積8.43 cm³内に一様に分布した線源として取扱ったが、昭和59年度には裸の体系及びBe供試体を用いた体系に対して、線源は球状線源表面に垂直なshell sourceとし、且つ線源内部はボイドとして取扱った。また、裸の体系については、線源内部をボイドとしない計算も併せて行い、両者の比較をした。次に、Be供試体の場合にはSnの次数を8、16、32と3種類変えて計算し、Sn次数の効果も検討した。この計算において、前方方向(n=9、17及び33)に対する重み係数としては、この表の脚注3)に記載されている値が使われた。

次に、Am-Be線源、5種類の供試体、SUS容器及び空気の組成と原子個数密度とを表2.9.6に記載する。この表の中で、Amの原子個数密度 4.909×10^{20} atoms/cm³は²⁴¹Amを誤って²⁴³Amとして算出した値であり、正しくは 4.949×10^{20} atoms/cm³である。

(3) 使用した計算コード

今回の解析に使用した計算コードと、各コードの計算内容とを表2.9.7に記載する。

(4) 入力用中性子スペクトルとその作成法

実験概要の3)において、D. Bogart達は実験解析用の中性子スペクトルとして、Po-Be小型標準線源によるvirgin source spectrumを使用していると述べたが、昭和57、58年度の本解析においても上記スペクトルが使用された。しかし、表2.9.1に示した67群virgin source fractionの群構造と、RADHEATシステムの75群群構造とは群数は似ているものの、エネルギー meshes の切り方が異なっているため、RADHEATシステムでこれを使用するには75群用に作成し直さなければならない。元のスペクトルを異なった群構造に変換するのは、厳密に実施しようとすると可成り手間のかかる作業であるが、昭和57、58年度の解析においては、表2.9.8のSource Fraction(B)の欄に示すような方法でRADHEAT用中性子スペクトルを作成した。即ち、元のvirgin source fractionの群数(67群)とRADHEATシステムの群数(75群)とは群数に大きな差が無いため、上表の図に見られるように、RADHEATシステムのある群の中に元のスペクトルのエネルギー meshes 点が含まれる場合には元のfractionと同じ値をとり^{*)}、エネルギー meshes 点が含まれない場合(図のn₃に対応する)にはfractionを0とした。

しかし、上記の方法で作成した中性子スペクトルを用いて実験解析を行った結果は、後述するように、決して満足できるものではなかったので、昭和59年度の解析では別の方法が採られた。この方法は表2.9.8のSource Fraction(A)の欄に記載されているように、Po-Be線源によるvirgin source spectrumを採らずに、表2.9.3に示したAm-Be線源のみの裸の体系で測定された中性子スペクトルを採用すると云う事である。表2.9.3に示されているエネルギー点はRADHEATシステムのエネルギー meshes と完全に同じなので、面倒な変換をす

^{*)} 表2.9.9に記載されている数値を見ると、近い値ではあるが、決してこうはなっていない。

る必要がなく、唯、測定値を全エネルギー領域で積分した値が 1 になるように規格化すれば source fraction が得られる。昭和 59 年度の解析では、こうして作成した中性子スペクトルが使用された。

上述した此等の source fraction のテーブルを表 2.9.9 に示す。尚、表 2.9.8 及び表 2.9.9 の Source Fraction (C) の欄に示されている作成方法及び数値は、Source Fraction (B) を修正するために、筆者が当 SWG に提示した通常行われている方法とその結果である。

しかし、この方法はスペクトルの勾配（エネルギー依存性）平坦、又はゆるやかな領域では良い近似値が得られるが、勾配が急な領域では精度は悪い。この場合には矢張り多項式を用いて元のスペクトルを fitting し、これで得られた fitting function を求める群のエネルギー領域で積分して求める必要がある。なお、この場合には元のスペクトルが fractum の形になっていても、全領域に亘って再規格化する必要があろう。

表 2.9.9 の Source Fraction (A) 及び (C) 裸の体系の測定データ（1 に規格化された値）との比較を図 2.9.6 にまた、Source Fraction (A) と (B) の比較を図 2.9.7 に示す。

(5) 計算結果

上述した計算概要に基づいて実施した昭和 57, 58 年度の解析の結果を測定データと共に図 2.9.8～図 2.9.13 に、次に昭和 59 年度に実施した解析の結果を測定データ及び昭和 57, 58 年度の解析結果と共に図 2.9.14 及び図 2.9.15 に示す。また、昭和 59 年度に裸の体系について線源領域のボイド効果を検討した結果を図 2.9.16 に、Be 供試体を用いた体系について Sn 次数の効果を図 2.9.17 に示す。

2.9.3 計算値と測定値の比較

ここでは図 2.9.8～図 2.9.15 に基づいて、ベンチマーク解析の結果と測定データとの比較を行うが、昭和 57, 58 年度の解析と昭和 59 年度の解析とでは、前述したように、計算体系及び線源の中性子スペクトルが異なっているので二つに分けて検討する。

(1) 昭和 57, 58 年度解析結果の検討

昭和 57, 58 年度の解析は図 2.9.5(2) に示した計算体系に基づいて、Po - Be 線源による virgin source spectrum から作成した source fraction (B) を使用して行われた。使用コードは DIAC であり、解析の対象とした実験は裸の体系と、ポリエチレン (CH_2)、Be, Mo, Ta, Pb の供試体を用いた体系の計 6 ケースである。

解析結果と測定データとの比較図（図 2.9.8～図 2.9.13）に現れている共通点は、どの計算結果にも数ヶ所に及ぶ特異なピークと谷が出ている事である。これは明かに使用した source fraction (B) に起因するものである事が判る。この点を別にして各グラフを眺めて見ると、測定データのそれはそれ程悪くはない。

裸の体系（図 2.9.8）については、8 MeV 及び 10 MeV 近傍のピークと 9 MeV 近傍の谷によるずれを別にすると、3～5.5 MeV で測定データよりもやや高く、逆に 1～2.5 MeV でやや低く、1 MeV 以下で再び高くなっている。

ポリエチレン供試体（図 2.9.9）については、測定データには見られないピークが 4 ケ所 (3.2, 7, 8.3, 9.8 MeV)，谷も 4 ケ所 (3, 6.3, 8, 9 MeV) に亘って現れている。この

構造によるずれを別にすると、1～11 MeV の略全域が測定データより高く、1 MeV 以下で低い結果となっている。測定データも 1 MeV 以下では誤差が大きい。

Be 供試体（図 2.9.10）については、特異なピークはポリエチレン程顕著ではないが、1.5, 4.2, 7.5, 9.7 MeV の 4 ケ所に見られ、谷も 0.7, 2.9, 9.0 MeV の 3 ケ所に存在する。全般的傾向としては、3 MeV 以上で計算値が高く、また、0.8～2.2 MeV でも高い。0.6 MeV 以下及び 2.2～2.8 MeV の領域のみは測定データとの一致は極めて良い。なお、測定データとのずれは裸の体系の場合よりも大きい。

Mo 供試体（図 2.9.11）については、測定データとの一致度は裸の体系の場合に似ている。特異なピークは大小合せて 5 ケ所（2.5, 3.5, 6.6, 7.7, 9.8 MeV）に現れており、谷も大小合せて 4 ケ所（2, 4, 7.1, 9.1 MeV）に見られるが、9.1 MeV 以外は鋭い谷ではない。全般的形状としては、2.3～5.5 MeV の領域と 7.7 及び 9.8 MeV のピークの近傍で測定値よりやや高く、1.5 MeV 以下を除くその他の領域ではやや低い。1.5 MeV 以下の領域では測定データに極めて良く一致しており、この点が裸の体系とは異なっている。

Ta 供試体（図 2.9.12）については、特異なピーク 3.5 MeV 及び 7.7 MeV の 2 ケ所、谷は 9.1 MeV に見られる程度で、全般的に測定データとの一致は良いと云える。また、7.7 MeV のピークに対応して、測定データにも 8 MeV に 1 点他よりも高い値が出ている。2 MeV 以下と 6 及び 9 MeV 近傍で測定データより少し低く、2.3～5 MeV, 6.5～8.5 MeV 及び 9.7 MeV 近傍で少し高い結果となっている。

最後に Pb 供試体（図 2.9.13）については、これも Ta の場合と同様に、ピーク及び谷の数は少なく、7.7 及び 9.8 MeV にピーク、7.1 及び 9.1 MeV に鋭い谷が在る程度である。この二つのピークと 9.1 MeV の谷を含む 7.5～10.8 MeV の領域では計算値は測定値から可成りずれるが、7 MeV 以下では 3～5 MeV の領域でやや低い程度で、他は測定値と非常に良い一致を示している。測定データは前記 4 種類の供試体及び裸の体系と異り、起伏がなく、エネルギーの増加と共に単調にスペクトルが減少する形となっている。

(2) 昭和 59 年度解析結果の検討

昭和 59 年度の解析は図 2.9.5(3) に示した計算体系に基づいて Am - Be 線源のみの裸の体系で測定された中性子スペクトルを新たに線源スペクトルとして行われた。当然の事ながら、この場合線源は線源球面上から球面に垂直に放出される shell source として取扱い、線源内部領域はボイドとしている。線源内部をボイドとした場合としない場合との差については別途検討されている。解析した実験体系としては、裸の体系と Be 供試体を使用した体系の 2 ケースのみである。なお、Be 供試体については Sn 次数が 8, 16, 32 の場合について計算し、次数の効果を検討している。

裸の体系の解析結果（図 2.9.14）から判るように、今回の計算結果には前回に見られた特異なピークや谷は現れていない。計算値は測定データの形を良く再現しているが、これは当然の事であろう。それよりもスペクトルの絶対値が 10 MeV 以下の大部分の領域で測定値よりも大きくなっている点が注目される。測定データからのずれはエネルギーが低くなる程大きく、2 MeV で 30 % 程の過大評価となっている。

次に、Be 供試体（図 2.9.15）については、これも上記裸の体系と同様に、前回に見られた

ピークと谷は消えているが、代りに 0.7 MeV に小さなピーク、0.6, 1.1, 2.7 MeV の 3ヶ所に小さな谷が現れている。スペクトルの全般的な形状は裸の体系の場合と同様に、大体測定値を再現しているが、4～10 MeV の領域で 25 % 程度の過大評価になっている。その他の領域では、ピークや谷の近傍を除くと良く一致しており、特に 0.6～2.0 MeV の領域は前回よりも改善されている。

次に、線源領域のボイド効果については、裸の体系の線源領域を Be で満した場合と、ボイドにした場合とで中性子スペクトルにどれ程の差が出るかが調べられた。その結果が図 2.9.16 であるが、この図から判るように、0.4 MeV 以上の領域では殆ど差は無く、僅かに 0.4 MeV 以下の領域でその差が現れている。線源領域に Be が在る場合には、その減速効果によるものと思われるが、0.2 MeV においてボイドの場合よりも約 50 % 高い値となっている。

最後に、Be 供試体を用いた体系について Sn 次数の効果を調べた結果（図 2.9.17）を検討すると、図から判るように、Sn 次数が増すとスペクトルの絶対値も僅かながら増加する結果となっている。このスペクトルの増加率は、11.2 MeV において S_8 から S_{16} の増加に対して 4 %, S_{16} から S_{32} の増加に対して 3 % となっている。

2.9.4 評価及び考察

前節迄に本ベンチマーク解析の対象とした実験の概要、この実験を解析するのに使用した計算体系、計算コード、入力データ（特に線源の中性子スペクトル）、そして計算結果と測定データとの比較について述べてきたが、計算結果のみから評価すると本解析は測定データを可成り良く再現していると云える。特に、Ta や Pb 供試体については、特異なピークや谷によるずれを除くと、D. Bogart 達の解析結果よりも測定データとの一致は良い。従って、RADHEAT システムの信頼性の検証と云う目的は一応達成されたと云えるであろう。

しかし、解析の過程を詳細に検討して見ると、色々と不備な点がある。その中で解析結果に最も大きな影響を及ぼしているのは線源の中性子スペクトルである。昭和 57, 58 年度の解析では前述したように、Po - Be 線源による 67 群の virgin source fraction から、表 2.9.8 に示した方法によって 75 群の source fraction (B) を作成し、これを用いて解析を行っているが、この作成方法は余りにも粗雑である。このため、解析結果に測定データには見られない特異なピークや谷が出現する事になった。

そこで、昭和 59 年度の解析においては、裸の体系で測定された中性子スペクトルを shell source として使用すると云う方法を探ったが、これにも幾つか問題がある。先ず、この shell source は 2 m 弱の距離ではあるが、空気中の散乱の効果が含まれた線源になっている事、次に shell source にする事の妥当性の問題がある。後者の問題は、図 2.9.14 及び図 2.9.15 に見られるように、スペクトルの形は比較的良く再現されるものの、スペクトルの絶対値が、裸の体系の場合に、全域に亘って過大評価となっている事から示唆される。また、shell source については 2 ケースしか解析されていないので、他の供試体について適用した場合、どのような結果が出るかは判らないが、ベンチマーク解析である以上、矢張り Po - Be 線源を使用すると云う条件に基づいて解析を進めるべきであろう。そうでないと、D. Bogart 達の解析結果との比較検討が困難になる。これを遂行するには source fraction の作成方法をもっと精密化する事が肝要

である。

次に、これは解析結果には余り影響していない問題かも知れないが、線源、SUS 容器、空気層等の幾何形状（寸法）や原子個数密度（ ^{241}Am ）等の入力データに僅かながら誤りがある。これについては原論文の中にも矛盾した記述（供試体内径）があり、JAERI - M 7843 も不確かな寸法が記入されているので、解析者のみの責任ではないが、結果に効くか効かないかは別問題として、入力データには出来る限り実態実体系に忠実な値を使用すべきである。

此等の入力データを訂正し、且つもっと精度の良い線源スペクトルを作成した上で、再度、本問題の解析を実施する事が出来れば、RADHEAT システムの信頼性及び解析手法の評価にもっと有用なデータが得られる事と思う。

参考文献

- (1) Bogart, D., Shook, D.F. and Fieno, D.: "Transport Analysis of Measured Neutron Leakage Spectra from Spheres as Tests of Evaluated High-Energy Cross Sections", Nucl. Sci. Eng. 53, 285 (1974).
- (2) 田中俊一他：遮蔽ベンチマーク問題
“中心に AmBe 中性子源を持った種々の物質の球状遮蔽体からの漏洩中性子スペクトル”
JAERI-M 7843 P.86 (1978).

表 2.9.1 67群のエネルギー一群構造と $P_0 - Be$ ソースのエネルギー・スペクトル

Group	High-Energy Boundary of Group (MeV)	Energy Width of Group (MeV)	Virgin Source Fraction	Group	High-Energy Boundary of Group (MeV)	Energy Width of Group (MeV)	Virgin Source Fraction
1	11.331	0.279	0.000330	35	4.274	0.208	0.034159
2	11.052	0.273	0.001699	36	4.066	0.199	0.031177
3	10.779	0.266	0.004010	37	3.867	0.188	0.029836
4	10.513	0.260	0.006221	38	3.679	0.180	0.033700
5	10.253	0.253	0.007526	39	3.499	0.170	0.032400
6	10.000	0.247	0.008642	40	3.329	0.163	0.026700
7	9.753	0.241	0.007721	41	3.166	0.154	0.023188
8	9.512	0.235	0.005624	42	3.012	0.147	0.021269
9	9.277	0.229	0.004591	43	2.865	0.140	0.018104
10	9.048	0.223	0.006584	44	2.725	0.133	0.015515
11	8.825	0.218	0.010140	45	2.592	0.126	0.013445
12	8.607	0.212	0.012271	46	2.466	0.120	0.012154
13	8.395	0.208	0.013867	47	2.346	0.115	0.009900
14	8.187	0.202	0.014402	48	2.231	0.108	0.008040
15	7.985	0.197	0.016120	49	2.123	0.104	0.007020
16	7.788	0.192	0.016170	50	2.019	0.192	0.011401
17	7.596	0.188	0.014484	51	1.827	0.174	0.006968
18	7.408	0.183	0.012698	52	1.653	0.157	0.006287
19	7.225	0.178	0.011839	53	1.496	0.143	0.006321
20	7.047	0.174	0.014082	54	1.353	0.128	0.006091
21	6.873	0.170	0.014806	55	1.225	0.117	0.007730
22	6.703	0.165	0.014282	56	1.108	0.105	0.008440
23	6.538	0.162	0.013805	57	1.003	0.182	0.017775
24	6.376	0.157	0.013378	58	0.821	0.149	0.016573
25	6.219	0.154	0.013948	59	0.672	0.122	0.015032
26	6.065	0.149	0.013832	60	0.550	0.100	0.012457
27	5.916	0.146	0.015370	61	0.450	0.081	0.010163
28	5.770	0.143	0.017200	62	0.369	0.067	0.008391
29	5.627	0.139	0.017426	63	0.302	0.078	0.009769
30	5.488	0.267	0.037562	64	0.224	0.058	0.007264
31	5.221	0.255	0.038803	65	0.166	0.055	0.006889
32	4.966	0.242	0.037056	66	0.111	0.111	0.014036
33	4.724	0.231	0.038848	67 ^a	0.414×10^{-6}	0.414×10^{-6}	0
34	4.493	0.219	0.036369				$\Sigma = 1.000000$

^a Lower energy limit is 0.0001 eV.

表 2.9.2 試験球の材質と大きさ

Material	Form	Density (g/cm ³)	Outer Diameter (cm)	Inner Radius (cm)	Shell Thickness (cm)	Shell Thickness (total mean free paths at 4 MeV)
CH ₂	Polyethylene	0.957	45.72	3.05	19.81	4.5
Be	Solid metal	1.84	20.32	3.16	7.00	1.7
Nb	Solid metal	8.4	25.4	3.09	9.61	2.0
Mo ^a	Powder	3.73	22.96	3.10	8.38	0.8
Ta	Solid metal	16.60	24.13	3.045	9.02	3.4
W ^a	Fine balls	11.87	22.96	3.10	8.38	2.0
W ^b	Fine balls	12.26	44.24	3.83	18.29	4.5
Pb	Solid metal	11.35	38.0	3.10	15.9	4.0

*All materials are chemically pure with impurities in the ppm range except niobium which contained 0.95 wt% Zr.

^aThe materials were contained in 0.05-cm-thick stainless steel spheres.

^bThe stainless steel container for this tungsten sphere was 0.04 cm thick.

表 2.9.3 アメリシウム-ベリリウム中性子源の入った球から 2 m 位置での
もれ中性子スペクトルの絶対測定値

Energy (MeV)	Bare Source	Beryllium	Polyethylene (CH ₂)	Lead	Niobium	Molyb- denum	Tantalum	Tungsten	
								small	large
Absolute Neutron Leakage Spectra, neutrons/(cm ² sec MeV)									
0.4	---	---	14.5 ± 5.5	---	---	---	---	280 ± 40	
0.5	44 ± 4	71 ± 6	10.0 ± 4.0	160 ± 10	190 ± 20	93 ± 8	---	165 ± 30	
0.6	40 ± 3	65 ± 6	9.5 ± 2.5	150 ± 10	165 ± 20	84 ± 6	---	140 ± 20	
0.7	39 ± 3	54 ± 5	7.5 ± 2.7	135 ± 7	147 ± 15	75 ± 6	---	105 ± 15	
0.8	36 ± 3	48 ± 4	5.5 ± 0.7	120 ± 7	110 ± 10	65 ± 5	86 ± 9	92 ± 8	74 ± 11
0.9	35 ± 3	48 ± 4	3.9 ± 0.7	115 ± 7	91 ± 9	61 ± 5	70 ± 8	85 ± 8	70 ± 8
1.0	33 ± 3	48 ± 4	3.9 ± 0.7	100 ± 6	72 ± 8	56 ± 5	60 ± 7	75 ± 7	57 ± 8
1.1	28 ± 2	47 ± 4	4.2 ± 0.7	95 ± 5	56 ± 5	52 ± 5	52 ± 6	66 ± 7	46 ± 8
1.2	24 ± 2	49 ± 4	4.0 ± 0.6	85 ± 5	48 ± 5	50 ± 4	43 ± 3	58 ± 6	34 ± 7
1.3	24.5 ± 2.0	51 ± 3	3.9 ± 0.6	78 ± 5	39 ± 4	47 ± 4	37 ± 3	49 ± 6	29 ± 5
1.4	25 ± 2	52 ± 3	3.85 ± 0.50	73 ± 5	29 ± 3	43 ± 4	31 ± 2.5	41 ± 5	23.5 ± 4.0
1.5	23 ± 2	52 ± 3	3.6 ± 0.5	65 ± 4	24 ± 3	39 ± 4	24.5 ± 2.5	35 ± 4	18.5 ± 4.0
1.6	21.5 ± 2.0	51 ± 3	3.3 ± 0.4	58 ± 3	24.5 ± 3	38.5 ± 3.0	21.5 ± 2.0	29 ± 3	15.5 ± 3.0
1.7	21.5 ± 2.0	48 ± 3	3.25 ± 0.40	55 ± 3	26.5 ± 2	35 ± 3	19 ± 2	26 ± 2	12.5 ± 2.0
1.8	23 ± 2	46 ± 3	3.55 ± 0.40	52 ± 3	26.5 ± 2	34 ± 3	17 ± 2	24.5 ± 2.0	10.0 ± 1.5
1.9	25 ± 2	44 ± 3	3.8 ± 0.4	50 ± 3	24.5 ± 2	33 ± 3	15.5 ± 1.5	24.5 ± 2.0	9.0 ± 0.9
2.0	28 ± 2	42.5 ± 2.5	4.0 ± 0.4	49 ± 3	23 ± 2	32 ± 2.5	14 ± 1.5	23.5 ± 2.0	8.3 ± 0.9
2.1	30.0 ± 2.5	41 ± 2.5	3.8 ± 0.4	46 ± 3	21 ± 2	32 ± 2.5	12.5 ± 1.0	22.0 ± 1.0	7.4 ± 0.8
2.2	32 ± 3	39 ± 2.5	3.5 ± 0.4	42 ± 2	20 ± 1.5	31.5 ± 2.5	12.2 ± 1.0	19.5 ± 1.0	6.1 ± 0.7
2.3	32.5 ± 3.0	37 ± 2.5	3.3 ± 0.4	36.5 ± 2	17.7 ± 1.5	30.5 ± 2.5	11.2 ± 0.8	17.5 ± 1.0	5.5 ± 0.7
2.4	33 ± 3	35 ± 2	3.3 ± 0.4	33.0 ± 1.5	16.5 ± 1.5	29.5 ± 2.5	10.5 ± 0.8	18.0 ± 1.0	5.3 ± 0.7
2.5	34 ± 2.5	31 ± 2	3.5 ± 0.4	28.5 ± 1.5	15.3 ± 1.5	29.0 ± 2.0	9.5 ± 0.6	15.7 ± 0.8	5.4 ± 0.6
2.6	35 ± 2.5	27.5 ± 1.5	3.7 ± 0.4	25.5 ± 1.5	14.0 ± 1.5	29.5 ± 2.0	9.5 ± 0.6	15.2 ± 0.8	5.4 ± 0.6
2.7	35 ± 2.5	23 ± 2	3.8 ± 0.4	24.0 ± 1.5	15.0 ± 1.5	29.0 ± 2.0	9.5 ± 0.6	16.0 ± 0.8	5.1 ± 0.5
2.8	36 ± 2	21.5 ± 1.5	3.8 ± 0.4	22.0 ± 1.5	15.2 ± 1.5	28.0 ± 2.0	9.5 ± 0.6	16.2 ± 0.8	4.9 ± 0.5
2.9	36 ± 2	20 ± 2	3.65 ± 0.4	21.5 ± 1.5	16.5 ± 1.5	28.0 ± 2.0	9.5 ± 0.6	16.4 ± 0.8	4.9 ± 0.5
3.0	36.5 ± 2.0	18.5 ± 1.5	3.45 ± 0.35	20.5 ± 1.5	17.0 ± 1.5	27.5 ± 2.0	9.5 ± 0.6	16.4 ± 0.8	4.8 ± 0.5
3.2	37 ± 2	18.5 ± 1.5	3.3 ± 0.35	18.5 ± 1.5	17.0 ± 1.5	26.5 ± 2.0	9.4 ± 0.5	16.5 ± 0.7	4.5 ± 0.5
3.4	35 ± 2	18.5 ± 1.5	2.9 ± 0.30	16.5 ± 1.5	15.2 ± 1.5	26.5 ± 2.0	9.0 ± 0.5	16.5 ± 0.7	4.3 ± 0.4
3.6	35 ± 2	18.5 ± 1.5	2.45 ± 0.25	14.5 ± 1	13.5 ± 1.0	26.5 ± 2.0	8.9 ± 0.4	16.4 ± 0.7	4.3 ± 0.4
3.8	37 ± 2	19 ± 1	2.65 ± 0.25	13.2 ± 1	12.7 ± 1.0	26.0 ± 2.0	8.9 ± 0.4	16.3 ± 0.7	4.2 ± 0.4
4.0	37 ± 2	19 ± 1	3.0 ± 0.25	11.7 ± 1	12.7 ± 1.0	25.5 ± 2.0	8.8 ± 0.4	15.7 ± 0.7	3.9 ± 0.4
4.2	37 ± 2	18.5 ± 1.0	3.15 ± 0.25	10.2 ± 0.8	13.0 ± 1.0	25.5 ± 2.0	8.5 ± 0.4	15.2 ± 0.7	3.9 ± 0.4
4.4	37 ± 2	18.5 ± 1.0	3.15 ± 0.25	9.8 ± 0.8	13.0 ± 1.0	24.5 ± 1.5	8.4 ± 0.4	15.2 ± 0.7	3.8 ± 0.4
4.6	36.5 ± 2.0	18 ± 1	3.15 ± 0.25	9.3 ± 0.7	12.8 ± 1.0	24.0 ± 1.5	8.4 ± 0.4	15.0 ± 0.7	3.8 ± 0.4
4.8	35 ± 2	17.5 ± 1.0	3.15 ± 0.25	8.6 ± 0.7	12.7 ± 1.0	23.5 ± 1.5	8.4 ± 0.4	15.0 ± 0.7	3.75 ± 0.3
5.0	34.5 ± 2.0	16.5 ± 1.0	3.05 ± 0.2	7.8 ± 0.7	11.5 ± 1.0	22.5 ± 1.5	8.5 ± 0.4	14.5 ± 0.7	3.50 ± 0.3
5.2	33 ± 2	15 ± 1	2.80 ± 0.2	7.2 ± 0.7	11.0 ± 0.8	21.5 ± 1.5	7.7 ± 0.4	13.5 ± 0.6	3.30 ± 0.3
5.4	31.5 ± 2.0	13.7 ± 1.0	2.60 ± 0.20	6.7 ± 0.6	10.0 ± 0.8	21.0 ± 1.5	7.4 ± 0.4	12.5 ± 0.6	3.10 ± 0.3
5.6	29 ± 2	12.6 ± 0.8	2.50 ± 0.20	6.3 ± 0.6	9.5 ± 0.7	19.5 ± 1.5	6.8 ± 0.3	11.6 ± 0.6	2.90 ± 0.3
5.8	27.5 ± 2.0	12.0 ± 0.6	2.40 ± 0.15	6.0 ± 0.5	9.0 ± 0.6	19.0 ± 1.5	6.4 ± 0.3	11.0 ± 0.6	2.90 ± 0.3
6.0	25 ± 2	11.1 ± 0.6	2.35 ± 0.15	5.5 ± 0.5	8.5 ± 0.5	17.0 ± 1.5	5.9 ± 0.3	10.0 ± 0.6	2.65 ± 0.2
6.2	23.5 ± 2.0	10.5 ± 0.5	2.25 ± 0.15	5.0 ± 0.4	7.7 ± 0.5	16.0 ± 1.0	5.5 ± 0.3	9.0 ± 0.5	2.50 ± 0.2
6.4	20.5 ± 2.0	9.5 ± 0.5	2.20 ± 0.15	4.8 ± 0.4	6.8 ± 0.5	14.0 ± 1.0	5.0 ± 0.3	8.0 ± 0.5	2.30 ± 0.2
6.6	19.5 ± 1.5	8.7 ± 0.5	2.15 ± 0.15	4.6 ± 0.4	6.4 ± 0.4	12.5 ± 1.0	4.5 ± 0.3	7.2 ± 0.4	2.15 ± 0.15
6.8	18.0 ± 1.5	8.5 ± 0.5	2.05 ± 0.10	4.2 ± 0.3	6.2 ± 0.4	12.0 ± 1.0	4.1 ± 0.2	6.9 ± 0.4	2.00 ± 0.15
7.0	18.0 ± 1.5	8.0 ± 0.5	1.90 ± 0.10	4.0 ± 0.3	5.8 ± 0.4	11.7 ± 1.0	3.9 ± 0.2	6.9 ± 0.4	1.85 ± 0.15
7.2	17.5 ± 1	7.7 ± 0.5	1.85 ± 0.10	3.9 ± 0.3	5.7 ± 0.4	11.7 ± 1.0	3.9 ± 0.2	6.6 ± 0.3	1.80 ± 0.15
7.4	17.2 ± 1.0	7.4 ± 0.5	1.85 ± 0.10	3.70 ± 0.25	5.5 ± 0.4	11.4 ± 1.0	3.5 ± 0.2	6.5 ± 0.3	1.75 ± 0.15
7.6	16.5 ± 1.0	7.0 ± 0.4	1.52 ± 0.08	3.60 ± 0.25	5.3 ± 0.4	11.1 ± 1.0	3.4 ± 0.2	6.5 ± 0.3	1.75 ± 0.15
7.8	16.0 ± 1.0	6.6 ± 0.4	1.40 ± 0.08	3.40 ± 0.25	5.0 ± 0.3	10.7 ± 0.8	3.4 ± 0.2	6.1 ± 0.3	1.70 ± 0.15
8.0	15.5 ± 1.0	6.6 ± 0.4	1.30 ± 0.08	3.0 ± 0.2	4.8 ± 0.3	10.2 ± 0.8	3.6 ± 0.2	5.8 ± 0.3	1.65 ± 0.15
8.2	14.2 ± 1.0	6.1 ± 0.4	1.20 ± 0.07	2.75 ± 0.20	4.6 ± 0.3	9.4 ± 0.7	3.3 ± 0.2	5.3 ± 0.3	1.60 ± 0.10
8.4	13.7 ± 1.0	5.3 ± 0.3	1.08 ± 0.07	2.35 ± 0.15	4.0 ± 0.3	8.4 ± 0.6	2.9 ± 0.2	4.6 ± 0.3	1.40 ± 0.10
8.6	11.5 ± 0.8	4.8 ± 0.3	0.98 ± 0.07	2.15 ± 0.15	3.5 ± 0.3	7.3 ± 0.6	2.55 ± 0.15	3.9 ± 0.3	1.20 ± 0.10
8.8	9.2 ± 0.8	3.8 ± 0.3	0.90 ± 0.07	1.90 ± 0.15	2.9 ± 0.3	6.5 ± 0.6	2.20 ± 0.15	3.35 ± 0.20	0.97 ± 0.09
9.0	7.7 ± 0.7	3.35 ± 0.3	0.84 ± 0.07	1.75 ± 0.15	2.65 ± 0.20	5.2 ± 0.4	2.00 ± 0.15	3.0 ± 0.2	0.87 ± 0.08
9.2	6.8 ± 0.5	2.90 ± 0.25	0.80 ± 0.07	1.56 ± 0.10	2.40 ± 0.20	4.7 ± 0.4	1.80 ± 0.10	2.7 ± 0.2	0.77 ± 0.08
9.4	6.5 ± 0.4	2.75 ± 0.25	0.78 ± 0.07	1.45 ± 0.10	2.30 ± 0.20	4.6 ± 0.3	1.65 ± 0.10	2.5 ± 0.2	0.73 ± 0.07
9.6	6.4 ± 0.4	2.62 ± 0.24	0.73 ± 0.06	1.35 ± 0.10	2.25 ± 0.20	4.4 ± 0.3	1.65 ± 0.10	2.5 ± 0.2	0.68 ± 0.07
9.8	6.2 ± 0.3	2.35 ± 0.2	0.68 ± 0.06	1.25 ± 0.10	2.05 ± 0.20	4.0 ± 0.3	1.55 ± 0.10	2.4 ± 0.2	0.65 ± 0.06
10.0	5.8 ± 0.3	2.20 ± 0.2	0.60 ± 0.05	1.15 ± 0.10	1.85 ± 0.15	3.6 ± 0.3	1.5 ± 0.1	2.2 ± 0.2	0.63 ± 0.06
10.2	5.2 ± 0.3	2.05 ± 0.15	0.50 ± 0.04	0.92 ± 0.09	1.50 ± 0.10	3.2 ± 0.3	1.4 ± 0.1	2.05 ± 0.15	0.56 ± 0.06
10.4	4.2 ± 0.3	1.85 ± 0.15	0.40 ± 0.04	0.75 ± 0.07	1.27 ± 0.10	2.9 ± 0.3	1.3 ± 0.1	1.65 ± 0.15	0.48 ± 0.05
10.6	3.4 ± 0.3	1.35 ± 0.15	0.31 ± 0.03	0.58 ± 0.07	0.92 ± 0.08	2.2 ± 0.3	1.0 ± 0.1	1.45 ± 0.10	0.39 ± 0.05
10.8	2.5 ± 0.3	1.00 ± 0.25	0.25 ± 0.025	0.42 ± 0.06	0.73 ± 0.07	1.7 ± 0.2	---	1.10 ± 0.08	0.34 ± 0.05
11.0	1.7 ± 0.2	---	0.165 ± 0.02	0.32 ± 0.05	0.55 ± 0.05	1.60 ± 0.25	---	---	0.26 ± 0.05
11.2	1.2 ± 0.2	---	0.125 ± 0.015	0.21 ± 0.04	0.39 ± 0.05	---	---	---	0.18 ± 0.05
11.4	---	---	---	0.10 ± 0.02	0.28 ± 0.05	---	---	---	0.11 ± 0.05
11.6	---	---	---	---	0.21 ± 0.05	---	---	---	---
11.8	---	---	---	---	0.16 ± 0.05	---	---	---	---
12.0	---	---	---	---	0.11 ± 0.05	---	---	---	---

表 2.9.4 実験体系と計算モデルのAm-Be中性子源部分

物質及び領域	実験体系 D.Bogart et al (cm)	計算モデル		
		今回モデル ^{a)} (cm)	前回モデル ^{b)} (cm)	JAERI-M7843 (cm)
Am-Be (半径)	2.72	2.72	2.70	2.70
空 気 (厚み)	0.01			
S U S (厚み)	0.14		0.29	0.29
空 気 (厚み)	0.028	0.038	0.085 ^{c)}	0.16
S U S (厚み)	0.152	0.292		
外 半 径	3.050	3.050	3.075	3.15

a) 今回の計算モデルは実験体系に合せ、空気層及びSUSの厚さ、順序を決定した。

b) 本報告書 昭和57, 58年度版

c) 前回モデルは基本的にJAERI-M7843のモデルに合せたが、空気層は実験で用いられた供試体内径が615cmであることより決定した。

表 2.9.5 今回及び前回の計算ケース¹⁾

計算コード	物 質	Sn 次 数		
		S ₈	S ₁₆	S ₃₂
D I A C	裸 線 源			(S) ³⁾
	Be	(S) ^{2),3)}	(S) ³⁾	(D)
	Polyethylene			(D)
	Pb			(D)
	Mo			(D)
	Ta			(D)

1) 各欄左上に今回計算ケース。

2) (S)はShell Sourceを、(D)は分布線源を示す。

3) Shell Sourceの場合、前方方向に対する重み係数

$$S_8 \text{ の場合, } S_9 \text{ の重み係数} = 6.0494 \times 10^{-2}$$

$$S_{16} \text{ の場合, } S_{17} \text{ の重み係数} = 2.4494 \times 10^{-2}$$

$$S_{32} \text{ の場合, } S_{33} \text{ の重み係数} = 3.5093 \times 10^{-3}$$

表 2.9.6 計算に用いた物質組成

物質及び組成		原子個数密度 (atoms/cm ³)	
物質とその内容		組成	
線 源	Am - Be ^{a)}	Am	4.909×10^{20} *
		Be	5.295×10^{22}
供 試 体	CH ₂	H	8.218×10^{22}
		C	4.109×10^{22}
	Be	Be	1.230×10^{23}
	Mo	Mo	2.341×10^{22}
	Ta	Ta	5.525×10^{22}
	Pb	Pb	3.299×10^{22}
ステンレス	SUS 304 ^{b)}	Cr	1.653×10^{22}
		Fe	6.328×10^{22}
		Ni	6.509×10^{21}
空 気	空 気 ^{c)}	N	4.147×10^{19}
		O	9.071×10^{18}

a) Be 66.8 g, Am 16.7 g, 線源部体積 84.3 cm³b) JISハンドブック鉄鋼を参考とし, $\rho = 7.93 \text{ g/cm}^3$, Cr-18%, Ni-8%としたc) 理科年表より, $\rho = 1.205 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ (20°C, 1気圧), N₂-80%, O₂-20%とした* 4.949×10^{20} の誤り

表 2.9.7 使用計算コード

使 用 コ ー ド	内 容
FAIRCROSS STEP-1	各元素の無限希釈断面積を作成する
FAIRCROSS STEP-2	STEP-1で作成した無限希釈断面積より
FAIRCROSS STEP-2	各物質の巨視断面積を作成する
DIAC	STEP-2で作成した巨視断面積を使用し、 1次元の輸送方程式をSn法により解く
FAIRCROSS STEP-3 (以上RADHEAT-V4システム)	STEP-2で作成した各物質の巨視断面積 をANISN-JRで使用可能な断面積に作 成する
ANISN-JR	STEP-3で作成した巨視断面積を使用し、 1次元の輸送方程式をSn法により解く (DIACと異なる点は、散乱の非等方性) をPe近似により扱う

表 2.9.8 Source Fraction の作成方法

今回計算に用いた線源スペクトル		前回計算に用いた線源スペクトル Source Fraction (A)	実測値 (67群) より、75群に引き直された 線源スペクトル (RADHEAT 解析評価 ループ)
群数	76群 (12MeV ~ 0.001MeV) 高エネルギー側75群まで/(B), (C) と 同じ	75群 (12MeV ~ 0.01MeV)	Source Fraction (B) Source Fraction (C)
作成方法	原論文 (NSE53, 285 (1974) D.Bogart et al.) P295, Table III, Bare Source に示された漏洩中性子スペクトルより, Source Fraction を作成した。 ϕ_1 ————— ϕ_2 ————— 75群 ————— n_1 ————— n_2 ————— 75群 $n_i = \phi_i / \sum_{i=1}^{75} \phi_i$ ϕ_i ; 漏洩中性子束 n_i ; 75群 Source Fraction	同左原論文, P293, Table II の線源スペクトル実測値 (67群) より75群に引き直した。 N_1 ————— N_2 ————— N_3 ————— E_1 ————— E_2 ————— E_3 ————— n_1 ————— n_2 ————— n_3 ————— n_4 $n_i = N_i / N_j$; Virgin Source Fraction $n_1 = 0$ \vdots n_i ; 75群 Source Fraction	同左原論文, 同左 Table II より, 75群に引き直した。 N_1 ————— N_2 ————— N_3 ————— E_1 ————— E_2 ————— E_3 ————— n ————— ϵ_1 ————— ϵ_2 ————— ϵ_3 $n = \epsilon_1 N_1 + \epsilon_2 N_2$ $\epsilon_1 + \epsilon_2 = 0.2 \text{ or } 0.1 \text{ MeV}$
線源スペクトルの使用方法	ANISN-JR, DIAC (RADHEAT-V4) では, 球状線源表面に垂直な Shell-Source として使用する。	ANISN-JR, DIAC (RADHEAT-V4) では, 線源領域において, 分布線源として使用する。	

表 2.9.9 実験及び計算に用いた中性子線源スペクトル

(1)

High Energy Boundary (MeV)	Experimental Source Fraction 67 Grp. ($\times 10^{-6}$)	Group No.	Upper Energy (MeV)	Source Fraction (A) Used in Present Analysis ($\times 10^{-6}$)	Source Fraction (B) Used in Former Analysis ($\times 10^{-6}$)	Source Fraction (C) Converted into 75 Grp. ($\times 10^{-6}$)
1 11.331	330	1	12.0			
		2	11.8			
		3	11.6			
		4	11.4			
		5	11.2	995.5	330.91	154.95
					1691.7	498.67
2 11.052	1699	6	11.0	1415.9		1244.7
		7	10.8	2082.2		2829.2
3 10.779	4010	8	10.6	2831.8		4015.3
4 10.513	6221	9	10.4	3498.1		5093.9
5 10.253	7526	10	10.2	4331.0		5949.4
					4278.2	
6 10.000	8642	11	10.0	4830.7		6997.6
7 9.753	7721	12	9.8	5163.9		6546.1
8 9.512	5624	13	9.6	5330.5		5499.7
9 9.277	4591	14	9.4	5413.7		4487.3
		15	9.2	5663.6		4486.0
					6645.8	
10 9.048	6684	16	9.0	6413.2		6408.1
11 8.825	10140	17	8.8	7662.5		9382.3
12 8.607	12271	18	8.6	9578.2		11576
13 8.395	13867	19	8.4	11410.5		13290
14 8.187	14402	20	8.2	11826.9		14199
				14557		

表2.9.9 (続き)

(2)

High Energy Boundary (MeV)	Experimental Source Fraction 67 Grp. ($\times 10^{-6}$)	Group No.	Upper Energy (MeV)	Source Fraction (A) Used in Present Analysis ($\times 10^{-6}$)	Source Fraction (B) Used in Former Analysis ($\times 10^{-6}$)	Source Fraction (C) Converted into 75 Grp. ($\times 10^{-6}$)
15 7.985	16120	21	8.0	12909.7	16293	16208
16 7.788	16170	22	7.8	13326.1	16355	16815
17 7.596	14484	23	7.6	13742.6	27212	15376
18 7.408	12698	24	7.4	14325.6	11717	13806
19 7.225	11839	25	7.2	14575.4	13977	13980
20 7.047	14082	26	7.0	14991.9	14748	16636
21 6.873	14806	27	6.8	14991.9	14288	17364
22 6.703	14282	28	6.6	16241.2	13886	17126
23 6.538	13805	29	6.4	17074.1	27308	17144
24 6.376	13378	30	6.2	19572.7	13753	18261
25 6.219	13948					
26 6.065	13832	31	6.0	20822.1	15412	20010
27 5.916	15370	32	5.8	22904.3	17411	23743
28 5.770	17200	33	5.6	24153.6	55308	26421
29 5.627	17426	34	5.4	26235.8	38225	28378
30 5.488	37562	35	5.2	27485		30434
31 5.221	38803					
32 4.966	37056	36	5.0	28734.4	37555	30592
33 4.724	38848	37	4.8	29150.9	39046	32491
34 4.493	36369	38	4.6	30400.2	36312	33439
35 4.274	34159	39	4.4	30816.6	33953	33077
36 4.066	31177	40	4.2	30816.6	30919	32346

表2.9.9 (続き)

(3)

High Energy Boundary (MeV)	Experimental Source Fraction 67 Grp. ($\times 10^{-6}$)	Group No.	Upper Energy (MeV)	Source Fraction Used in Present Analysis ($\times 10^{-6}$)	Source Fraction Used in Former Analysis ($\times 10^{-6}$)	(B)	Source Fraction (C) Converted into 75 Grp. ($\times 10^{-6}$)
37	3.867	29836	41	4.0	30816.6	29584	31470
38	3.679	33700	42	3.8	30816.6	33509	33994
39	3.499	32400	43	3.6	29150.9	32391	37778
40	3.329	26700	44	3.4	29150.9	26935	34662
41	3.166	23188	45	3.2	30816.6	44347	30494
42	3.012	21269	46	3.0	15200.1	—	14469
43	2.865	18104	47	2.9	14991.9	18199	13469
44	2.725	15515	48	2.8	14991.9	15374	12615
45	2.592	13445	49	2.7	14575.4	—	11665
			50	2.6	14575.4	13666	10750
46	2.466	12154	51	2.5	14159.0	12233	10313
47	2.346	9900	52	2.4	13742.6	9883.2	9429.3
48	2.231	8040	53	2.3	13534.4	7972.1	88247.8
49	2.123	7020	54	2.2	13326.1	6931.8	7284.7
			55	2.1	12493.2	11229	6595.7
50	2.019	11401	56	2.0	11660.4	—	5938.0
			57	1.9	10411.0	6881.4	5416.0
51	1.827	6968	58	1.8	9578.2	—	4004.6
52	1.653	6287	59	1.7	8953.5	6298.4	4004.5
			60	1.6	8953.5	—	4004.5

表2.9.9 (続き)

(4)

High Energy Boundary (MeV)	Experimental Source Fraction 67 Grp. ($\times 10^{-6}$)	Group No.	Upper Energy (MeV)	Source Fraction (A) Used in Present Analysis ($\times 10^{-6}$)	Source Fraction (B) Used in Former Analysis ($\times 10^{-6}$)	Source Fraction (C) Converted into 75 Grp. ($\times 10^{-6}$)
53	1.496	6321	61	1.5	9578.2	6521.5
54	1.353	6091	62	1.4	10411.0	6104.5
55	1.225	7730	63	1.3	10202.8	7575.4
56	1.108	8440	64	1.2	9994.6	8131.8
			65	1.1	11660.4	16979
57	1.003	17775	66	1.0	13742.6	9766.5
58	0.821	16573	67	0.9	14575.4	10051
			68	0.8	14991.9	11123
59	0.672	15032	69	0.7	16241.2	11986
60	0.550	12457	70	0.6	16657.6	12457
					18323.4	10163
61	0.450	10163	71	0.5		12502
62	0.369	8391	72	0.4		12531
63	0.302	9769	73	0.3		12524
64	0.224	7264	74	0.2		12538
65	0.166	6889	75	0.1		12645
66	0.111	14036	76	0.01		
67	0.414×10^{-6}					
	0.1×10^{-9}	Lower energy limit		0.001	Lower energy limit	

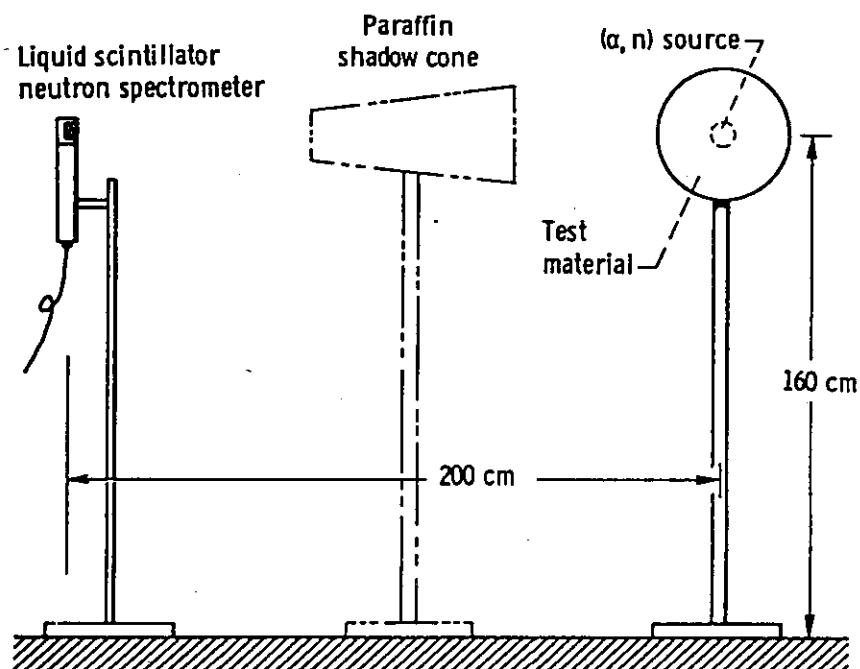


図 2.9.1 Am-Be (α , n) 中性子源の入った球からのもれ中性子スペクトル測定体系

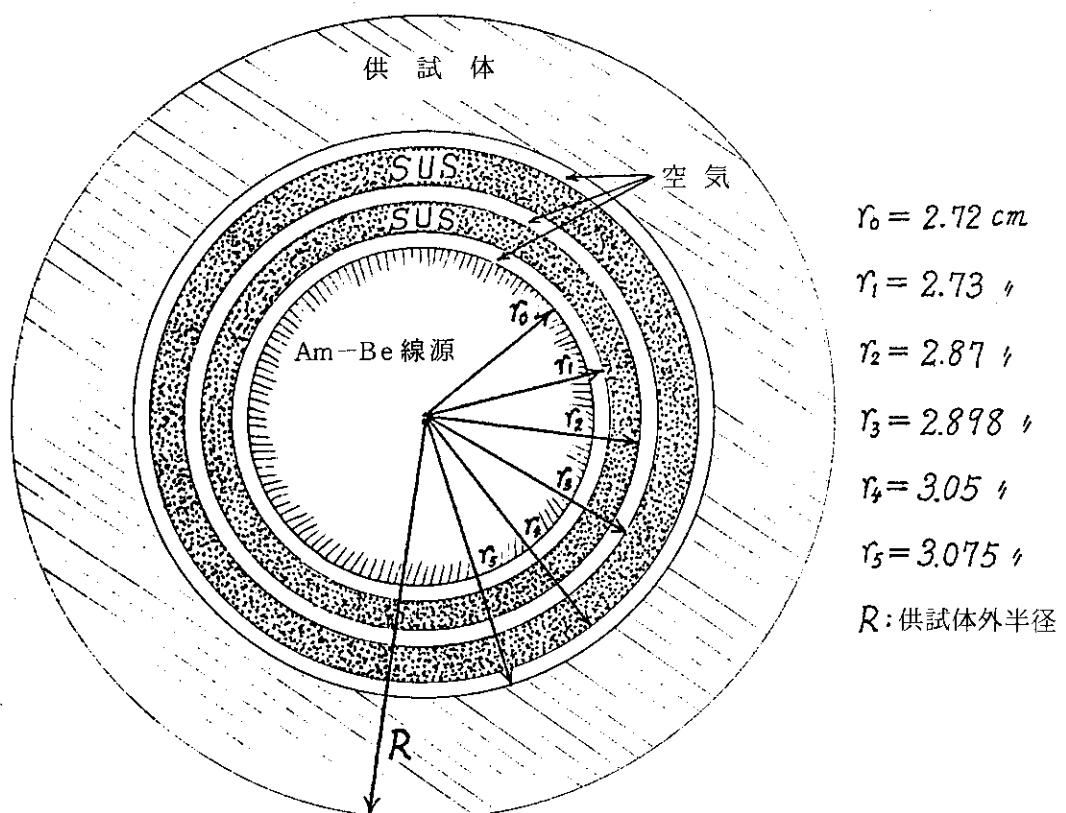


図 2.9.2 Am-Be 線 源 仕 様

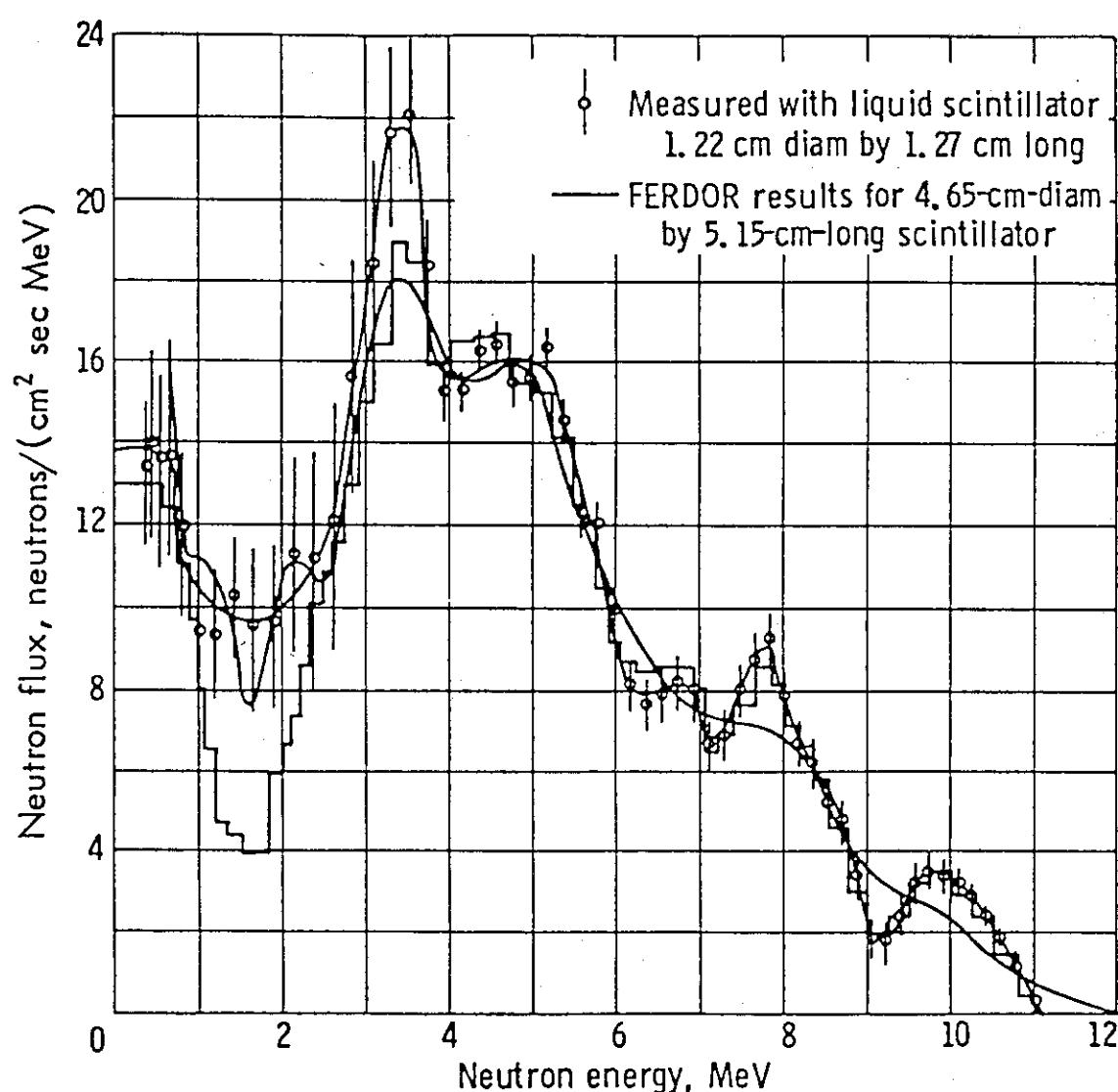


図 2.9.3 小型ポロニウム-ベリリウム中性子源のスペクトル、ヒストグラムによる
バージン (α, n) 中性子源スペクトルの表示

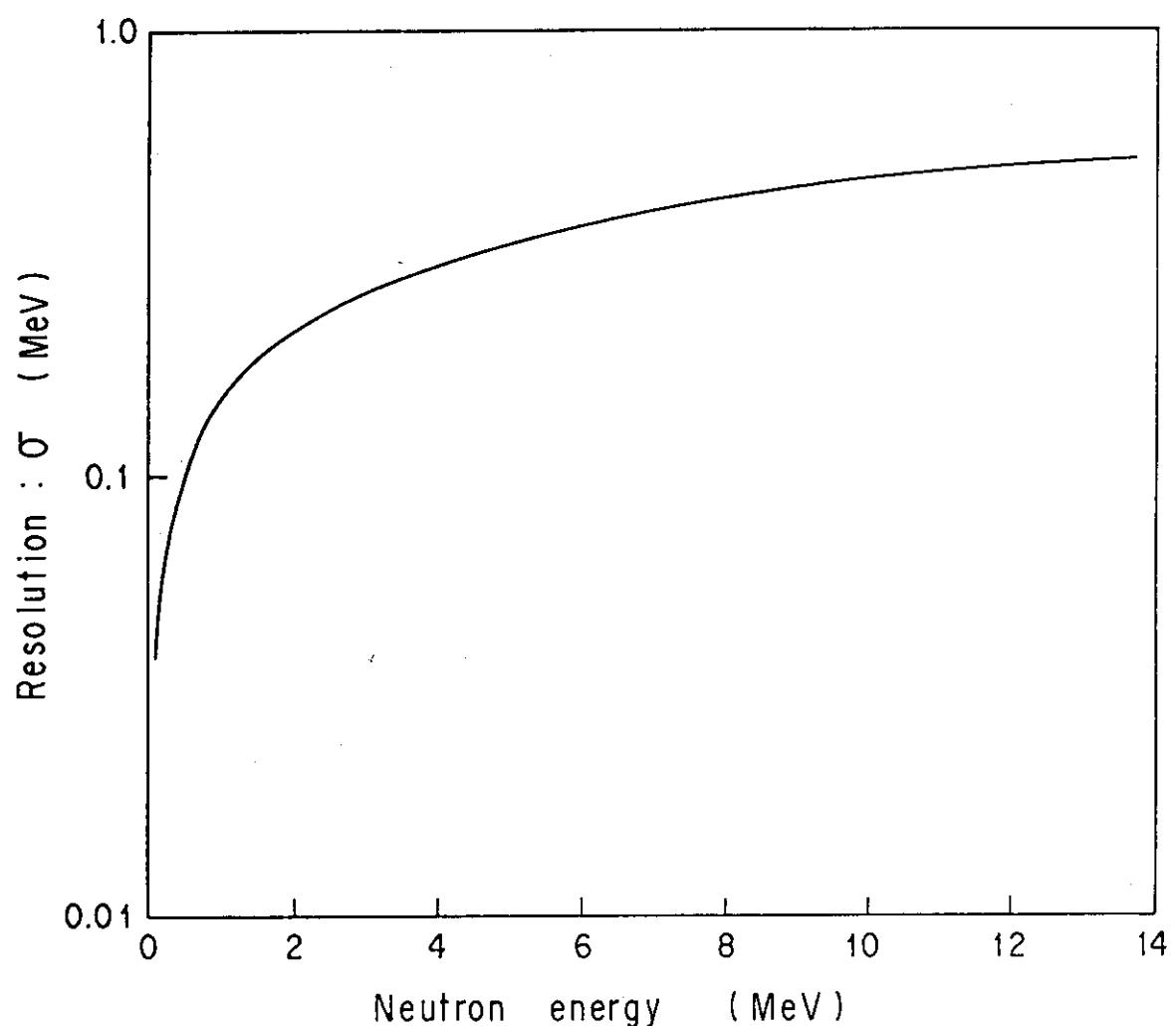
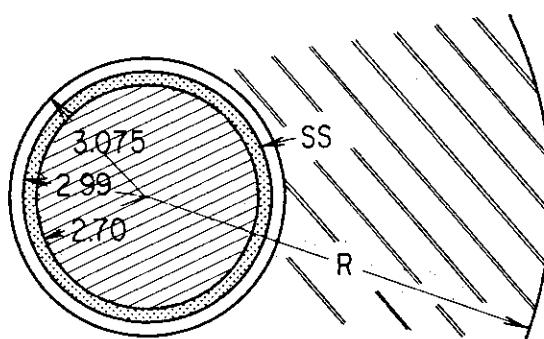
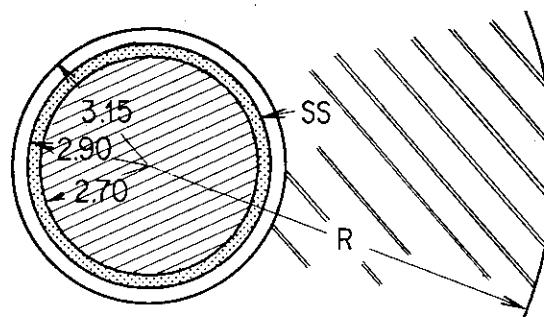


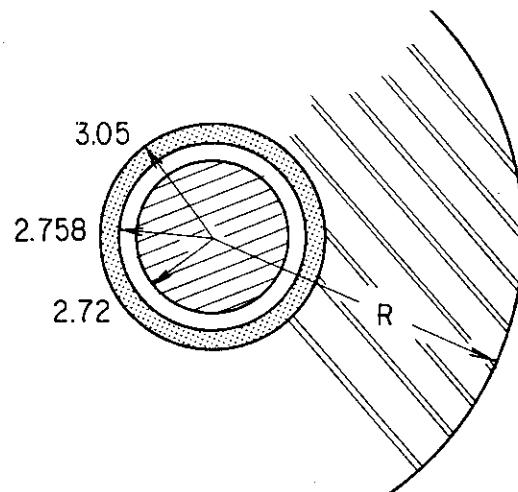
図 2.9.4 5 cm $\phi \times 5$ cm の NE-213 シンチレータの分解能



(1) JAERI M 7843 に記載されている幾何形状



(2) S 57, 58 年度計算体系



(3) S 59 年度計算体系

R : 供試体外径

R : radius of sample sphere

■: Am-Be 線源

Unit : cm

■: SUS 304

□: 空 気

■: 供 試 体

図 2.9.5 計算対象のモデル化の比較図

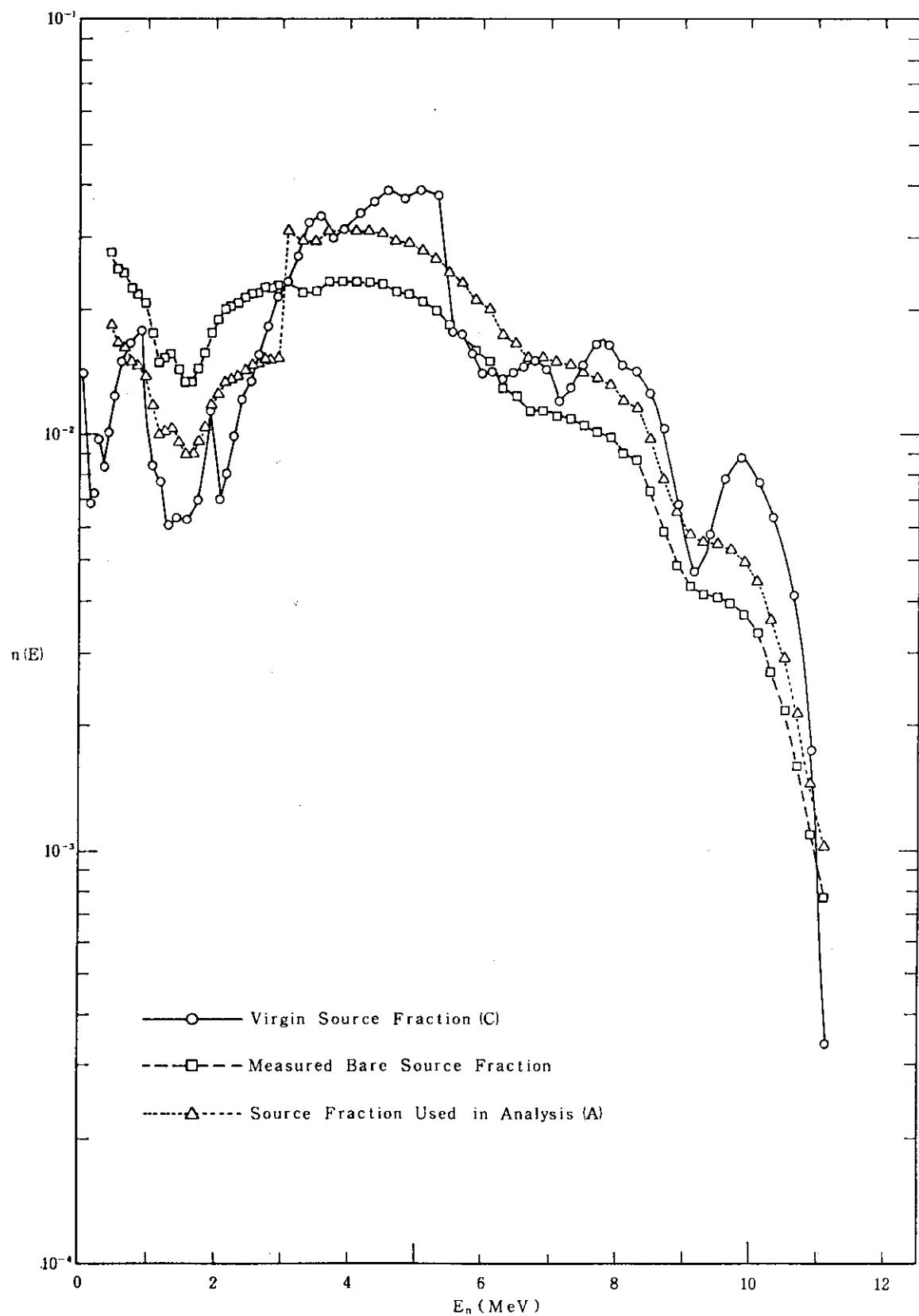


図2.9.6 線源中性子スペクトルの測定値と計算値の比較

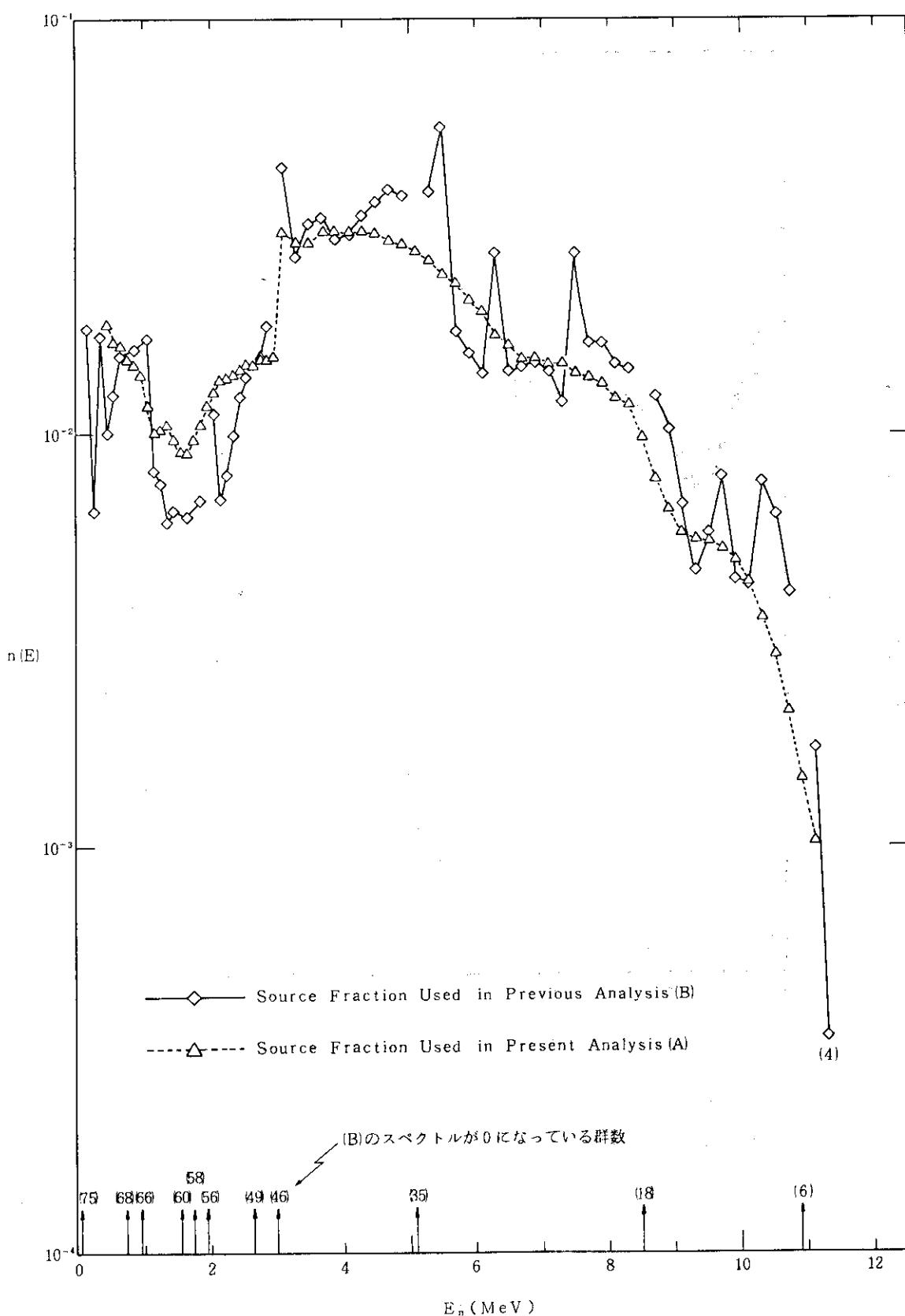


図 2.9.7 解析に使用した線源中性子源スペクトルの比較

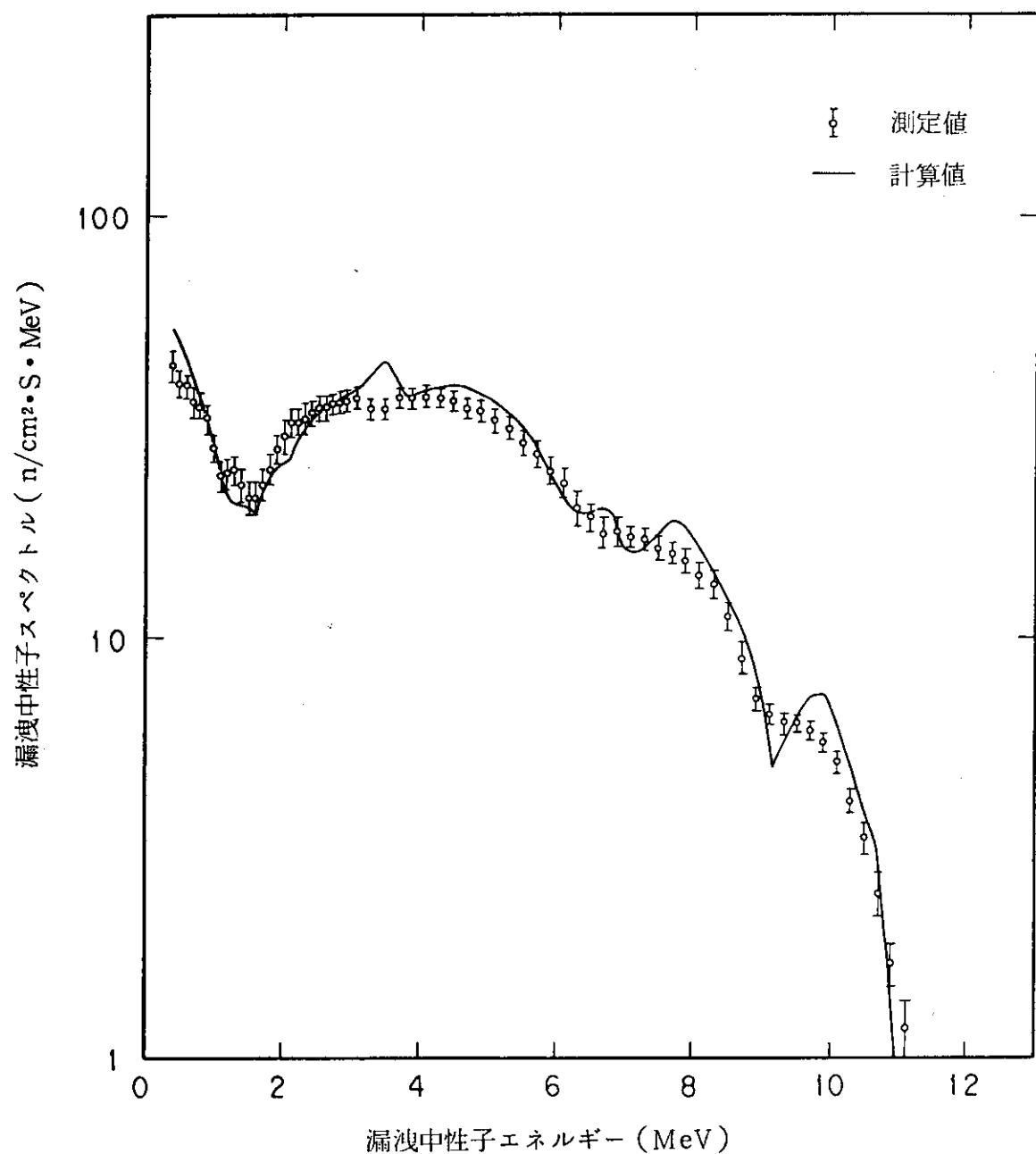


図 2.9.8 漏洩中性子スペクトル (BARE Am-Be Source)
の測定値と計算値の比較

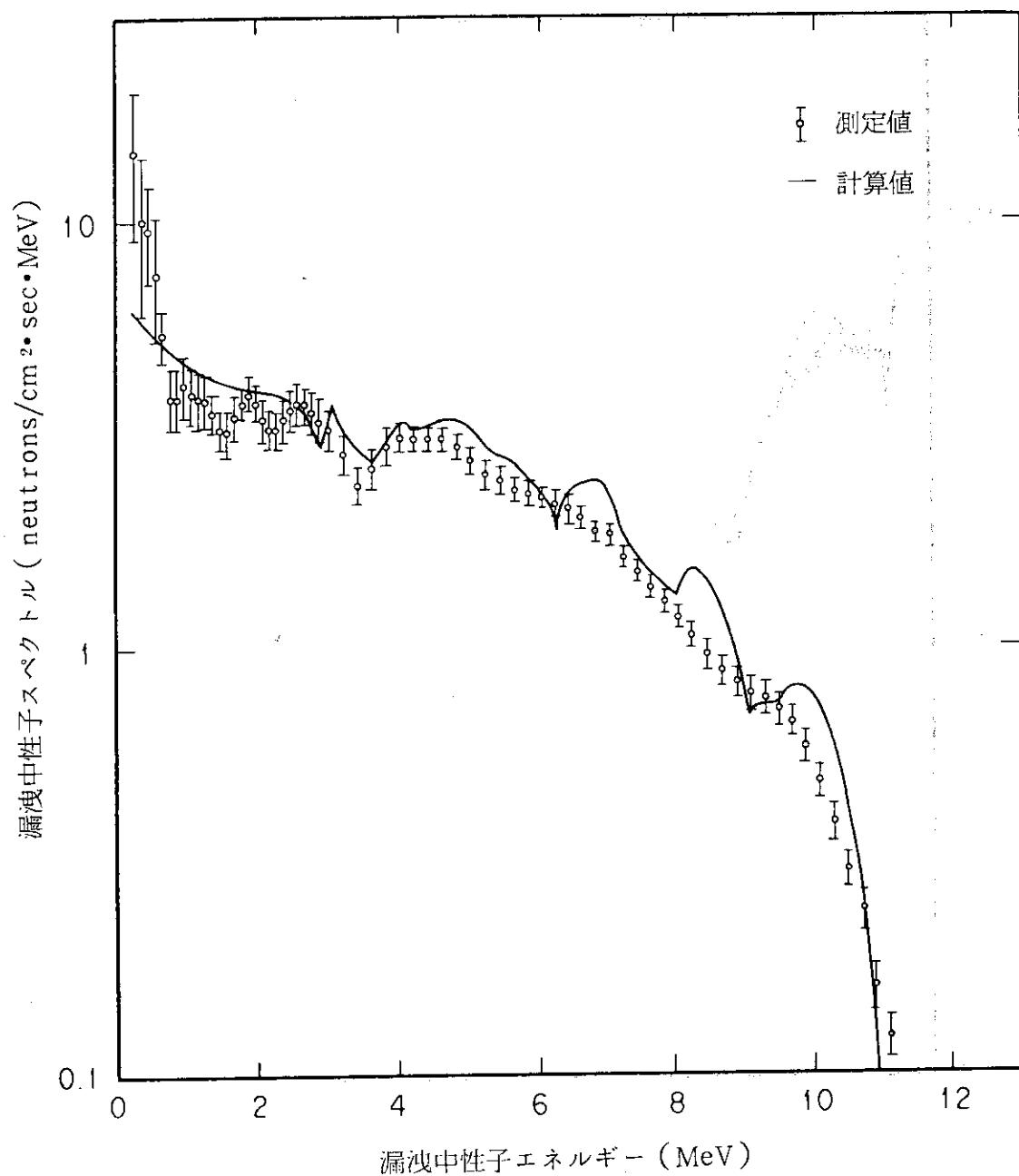


図 2.9.9 漏洩中性子スペクトル (Polyethylene) の測定値と計算値の比較

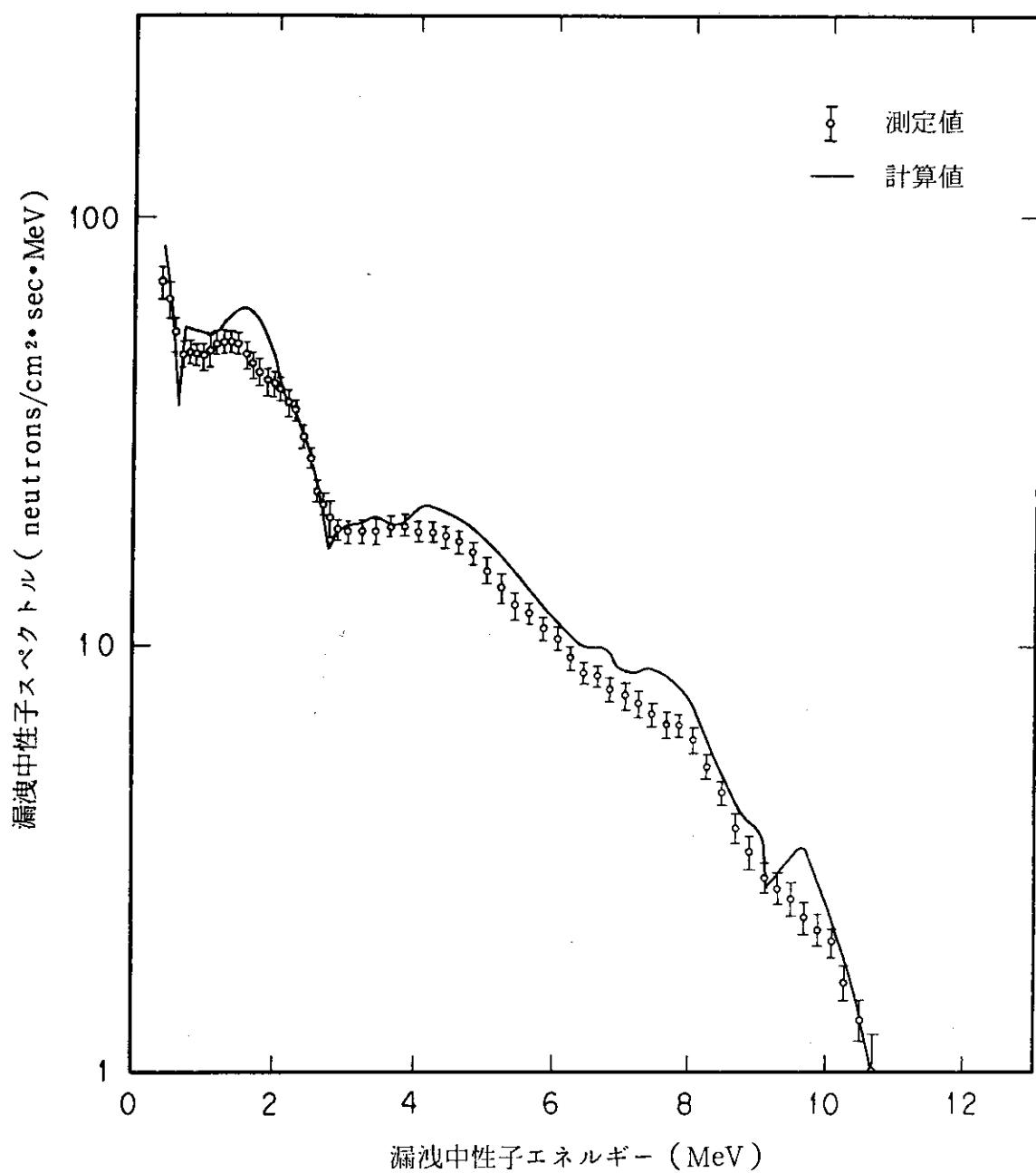


図 2.9.10 漏洩中性子スペクトル (Beryllium) の測定値と計算値の比較

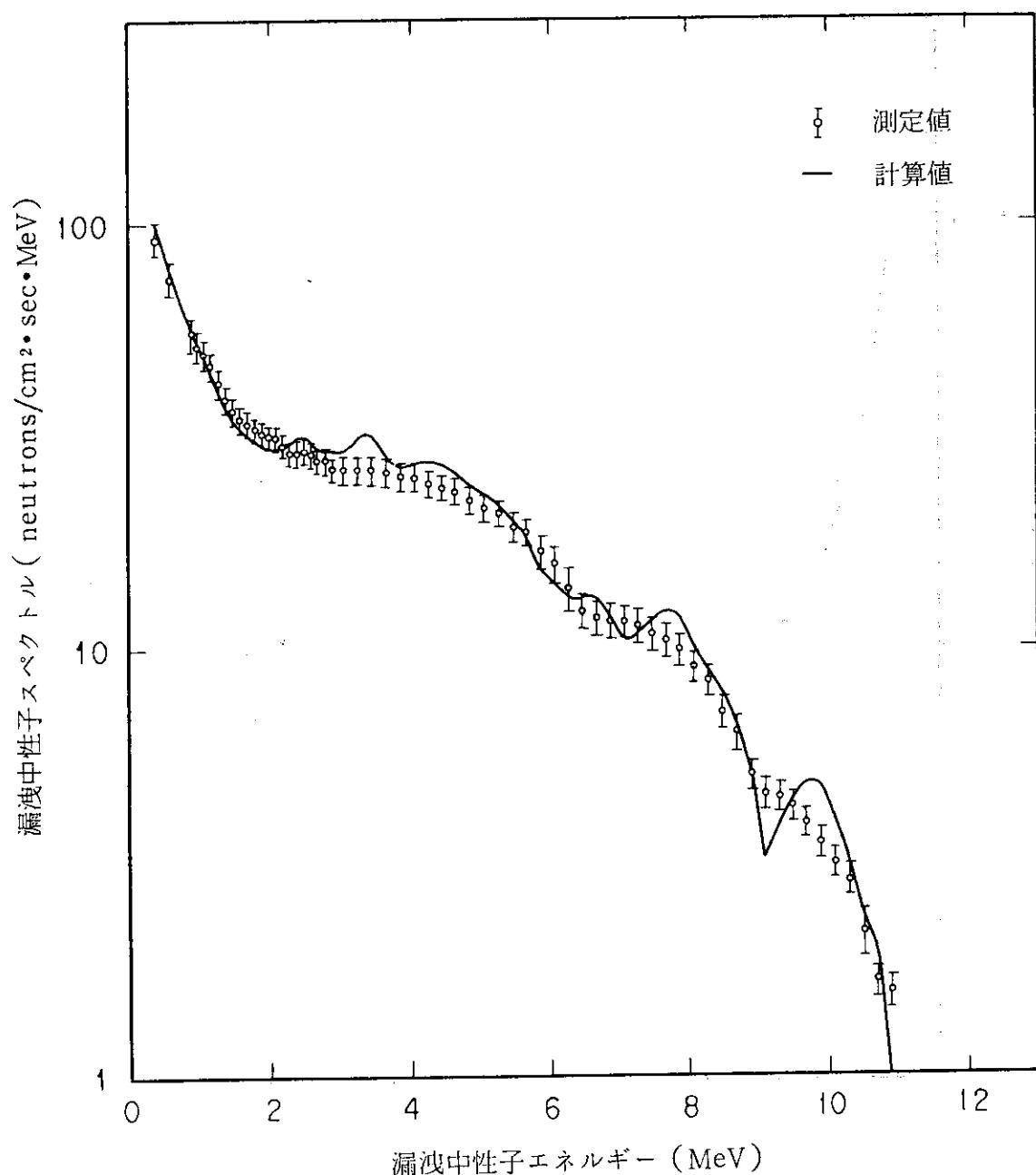


図 2.9.11 漏洩中性子スペクトル (Molybdenum) の測定値と計算値の比較

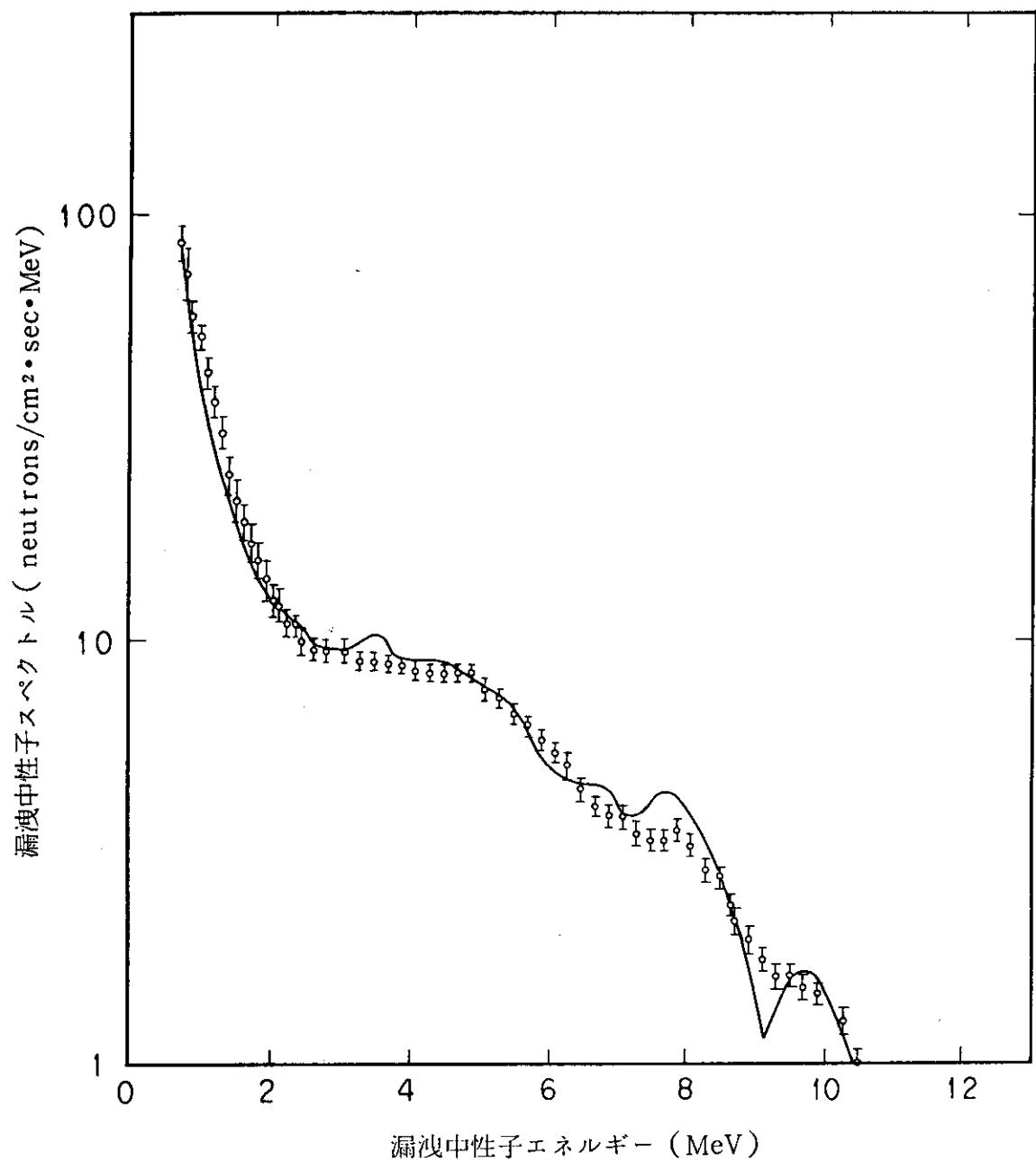


図 2.9.12 漏洩中性子スペクトル (Tantalum) の測定値と計算値の比較

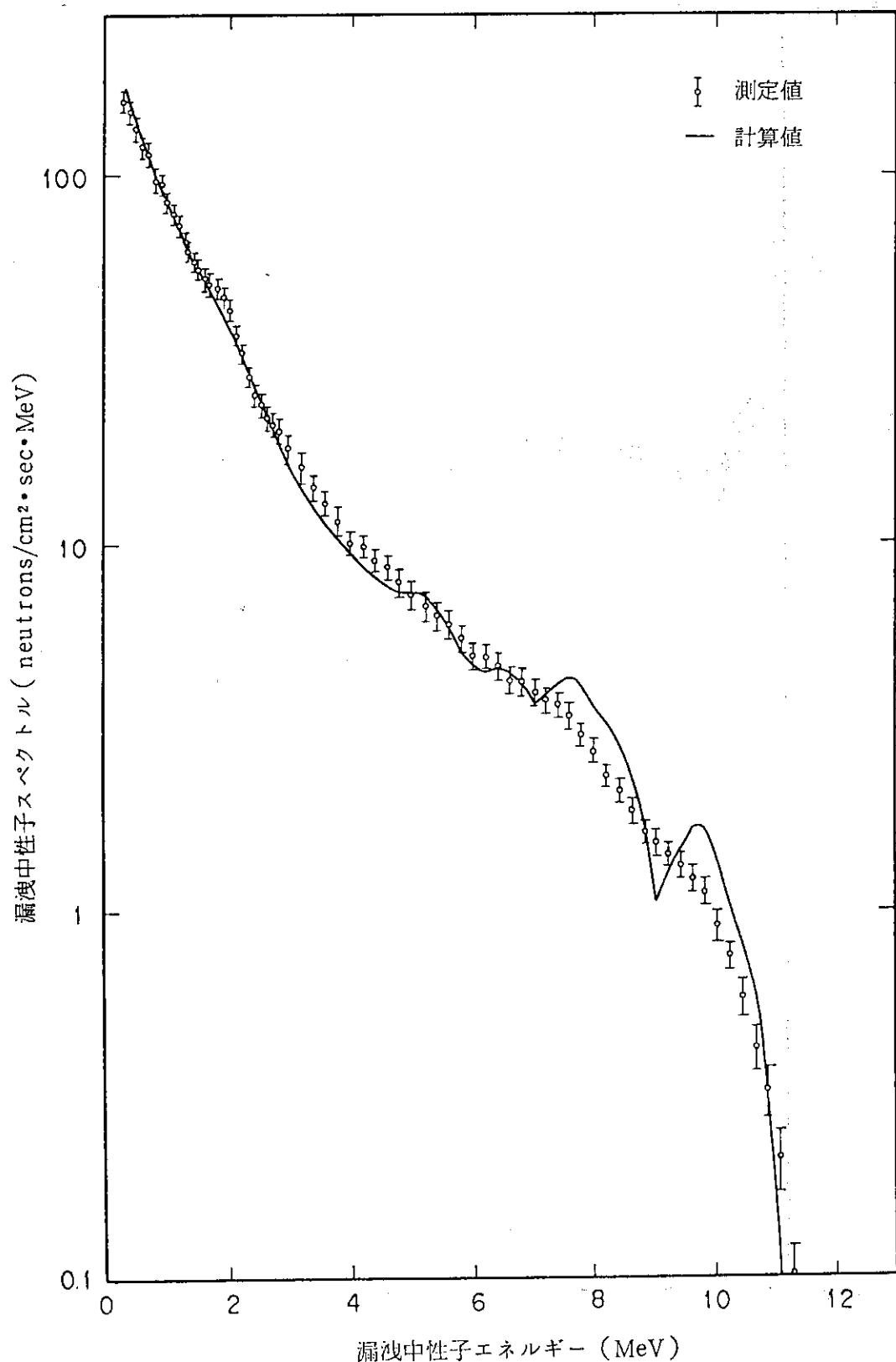


図 2.9.13 漏洩中性子スペクトル (Lead) の測定値と計算値の比較

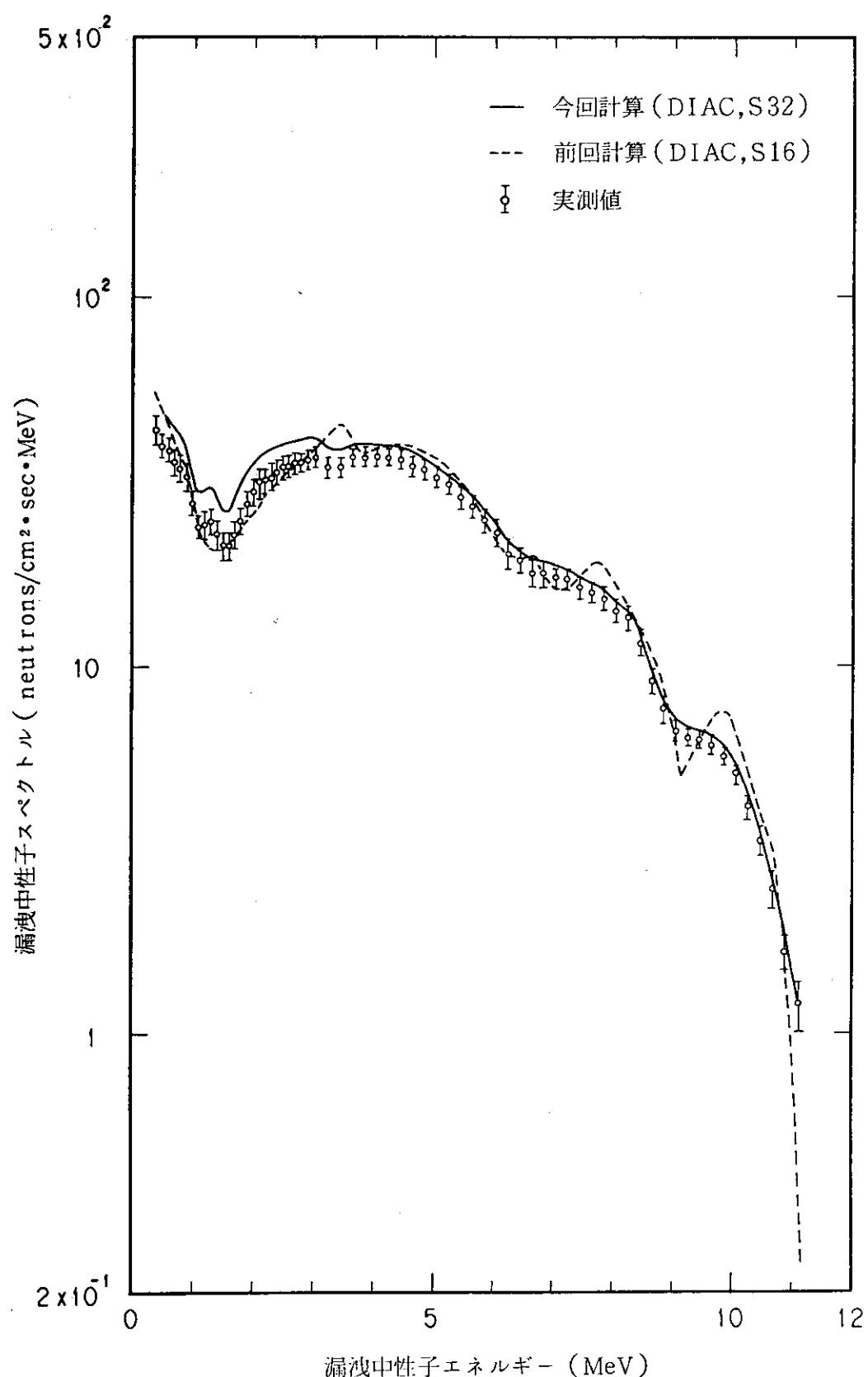


図 2.9.14 Bare Source の漏洩中性子スペクトルの実測値と計算値の比較

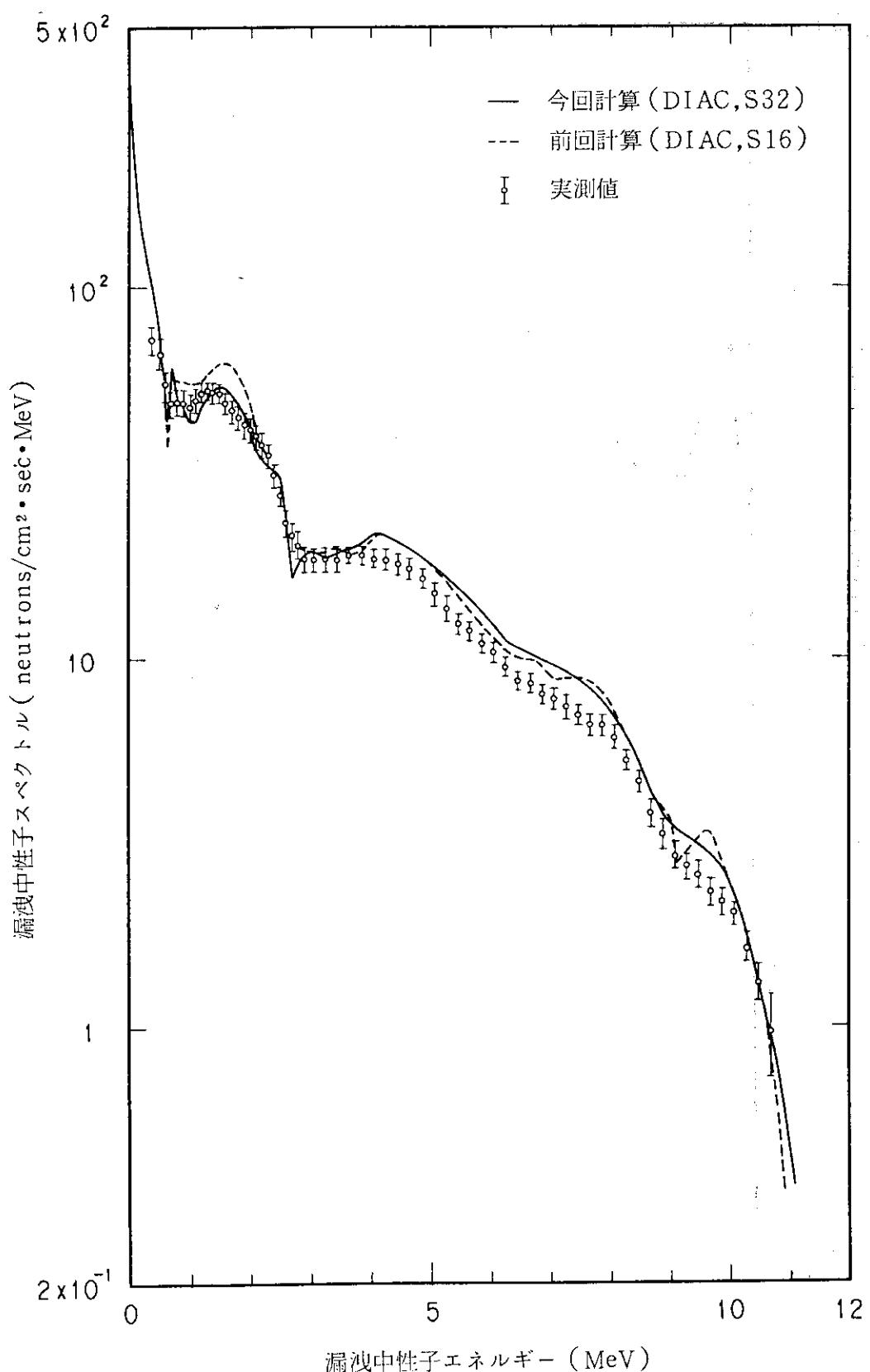


図 2.9.15 漏洩中性子スペクトル (Be) の測定値と計算値の比較

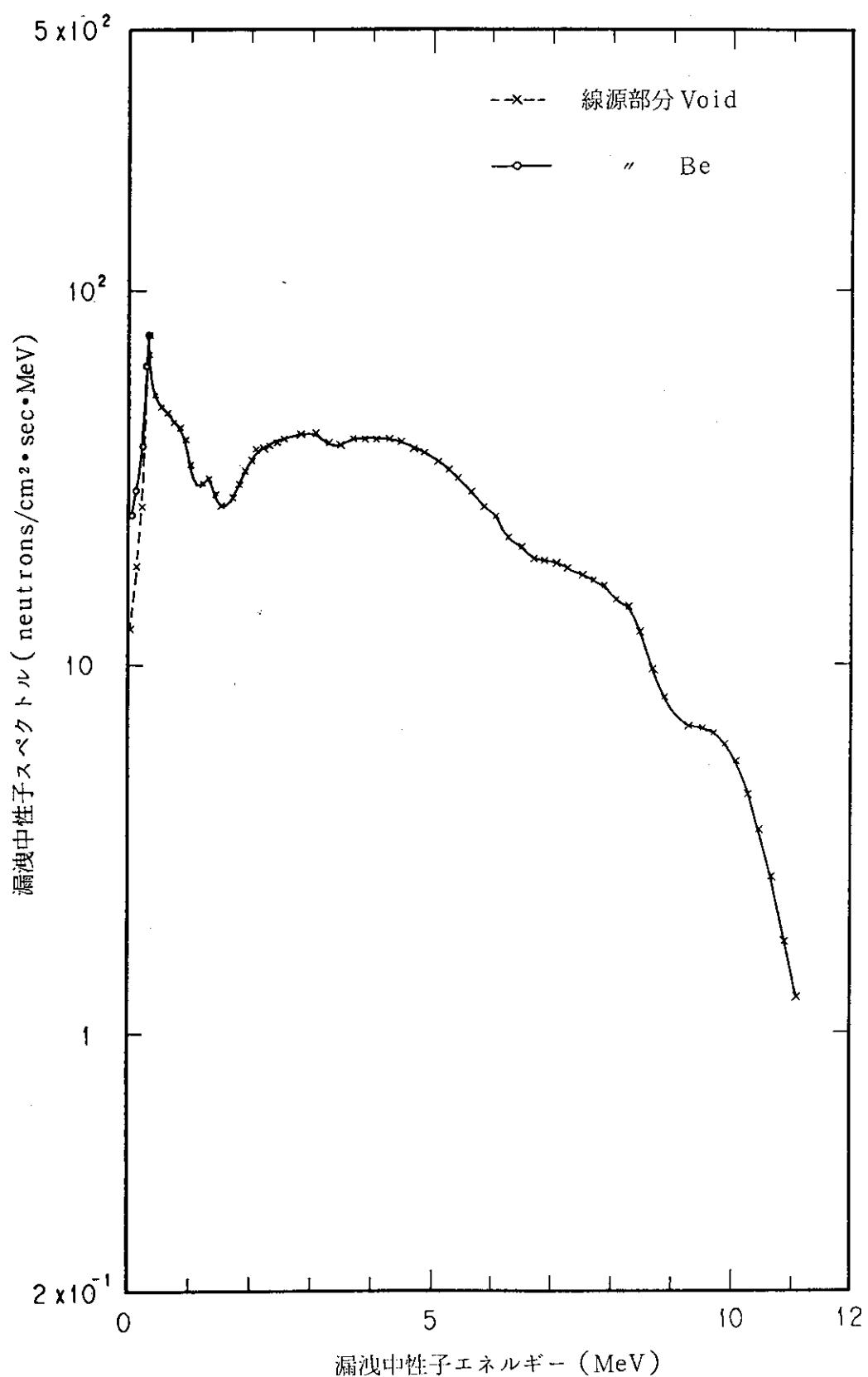


図 2.9.16 漏洩中性子スペクトルに対する線源領域の Void 効果

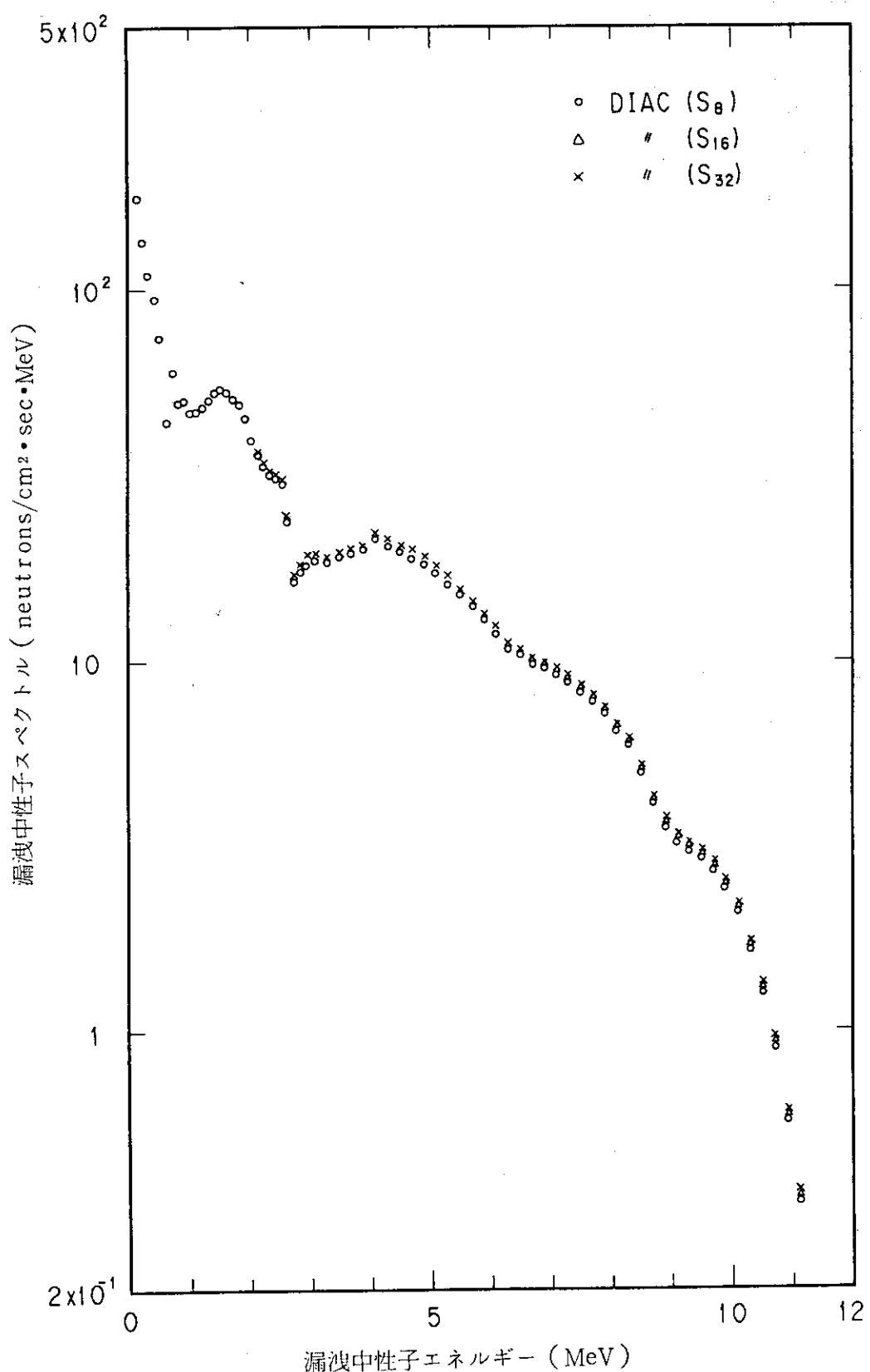


図 2.9.17 漏洩中性子スペクトルの計算結果に対する Sn 次数の影響

2.10 光中性子源を用いた中性子の鉄透過問題⁽¹⁾

2.10.1 実験概要

(1) 実験配置

本問題はエレクトロン・ライナックからのパルス状電子ビームを鉛球ターゲットに入射させ、そこから発生する中性子を線源とする鉄体系内の角度依存スペクトル測定実験のベンチマーク問題である。実験の全体配置は図 2.10.1 及び図 2.10.2 に示す構成となっており、鉄体系は図 2.10.3 に示すように $38'' \times 40'' \times 40''$ のほぼ立方体で中央水平層部に $2'' \times 2''$ の断面を持つ種々の深さの実験孔を有している。⁽¹⁾

(2) 測 定

エレクトロン・ライナックから 60 MeV の電子ビームを $3''$ 直径の鉛球ターゲットに入射させる。この結果、鉄体系内の実験孔から出て来る中性子をコリメータとドリフトチューブを通して 10 m 飛ばした後、長さ 28 m と 100 m の飛行管を用いる TOF 法によって、中性子のエネルギースペクトルが測定された。先行パルスに起因する低速中性子の重複を避けるため、飛行管内に ^{10}B フィルターが挿入されている。0.3 MeV 以上のエネルギーの中性子は $20'' \phi \times 5''$ 有機液体シンチレータで測定され、1 MeV 以下の中性子は $12'' \phi \times 2''$ の円板状アルミ容器中の ^{10}B の (n, α) 反応で発生する 480 keV ガンマ線を NaI シンチレータで検出し測定された。中性子スペクトルの絶対値は、カレント・インテグレータと線源近傍において $T\ell$ 箔との放射化により求められたが、両者は 10 % 以内で一致している。

2.10.2 計算概要

(1) 群定数作成

FAIRCROSS step 1 で作成されている群定数ライブラリー JSD 1000 から、100 群無限希釈群定数 (INFX) 及び自己遮蔽係数 (FTBL) を用いて、FAIRCROSS step 2 により 100 群の巨視的実効群定数ライブラリ (FX 16) を作成した。この時の角度メッシュ数 (IPO) は 16 とした。DAIC による一次元輸送計算にはこの FX 16 ライブラリーを入力した。

(2) 線源条件

中性子発生用ターゲットは $3'' \phi$ 鉛球であり、その鉛球の電子ビームの方向の穴の中に厚いタンタル板が置かれている。このターゲットは、ほぼ核分裂スペクトルに近い球状の中性子源となる。ターゲット表面の線源スペクトルは図 2.10.4 に与えられている。線源入力は、ターゲットを半径 3.97 cm のシェル線源とし、その表面から上記中性子スペクトルが外向きに等方的に放出されると考えた。

(3) 解析条件

ターゲット及び鉄体系を含めて、解析形状を図 2.10.5 に示すように一次元体系で近似した。各領域の物質組成も併せて同図に示している。輸送計算境界条件は、中心で対称、外側で真空とした。

(4) 解析結果

測定結果は図 2.10.4 の線源スペクトルに対して絶対値になっている。計算にはこのスペク

トルをそのまま入力しているため、計算値を実験値と直接比較することができる。図2.10.4にはターゲット表面位置における中性子スペクトルの計算結果を実験値と比較しているが、両者の一致は極めて良く、これによって入力が適切であったことがわかる。

まず最初に、実験と解析との比較を取り上げる。DIACによる角度依存スペクトル計算結果を実験と比較すると図2.10.6～図2.10.9のようになる。

(5) 総合的考察

本ベンチマーク問題の実験は約1m立方の鉄体系で実施されており、ターゲットはこの立方体の軸を表面から約1/5分割する場所に置かれている。一方、解析は線源（ターゲット）を中心として一次元球体系の計算を行っている。従って、線源周辺領域は鉄体系の外側境界に近いために中性子の洩れが大きく、計算値との不一致も大きくなると思われる。

図2.10.6には線源に近い測定点での中性子スペクトル計算値を実測値と対比しているが、本作業の計算結果は原典の計算結果に対して測定値を間に反対側にずれる傾向が見られる。この傾向は、特に高いエネルギー領域の部分で顕著である。一方、線源から離れた位置における中性子スペクトルの比較（図2.10.7～図2.10.9）では、実験値と計算値との一致は改善し、特に原典と本作業との計算値相互間の対比はほぼ同じ傾向を示すようになる。以上の考察から、本作業の一次元球座標の計算結果については、実際の実験体系との幾何学的形状の相違による影響を検討する必要があると考えられる。

また、中性子エネルギーが30keV以下の領域で中性子スペクトルの計算値は、全ケースについて一様に実験値を下回る傾向があり、本作業の計算結果は実験値の1/4程度になっている。この相違はかなり大きいと思われる所以、30keV以下のエネルギー領域について計算に使用した鉄体系の中性子断面積の検討を行う必要があると考えられる。しかし、総合的な考察としては、本作業の計算は実験値に対して妥当な一致を示しているものと判断できる。

参考文献

- (1) Malaviya B.K., Kaushal N.N., Becker M., Burns E.T., Ginsberg A. and Gaerttner E.R.: "Experimental and Analytical Studies of Fast Neutron Transport in Iron," Nucl. Sci. Eng., 47, 329-348 (1972).

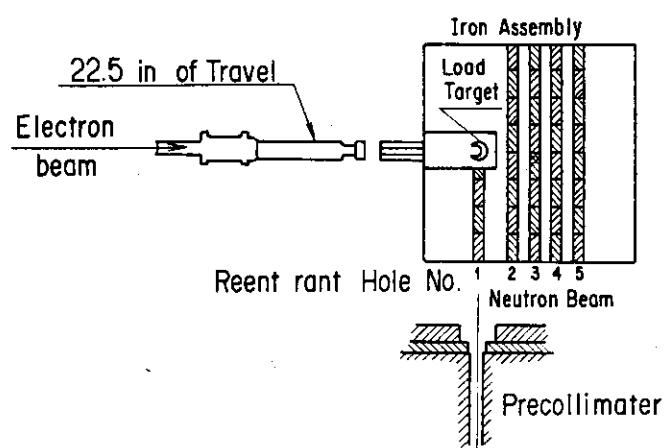


図 2.10.1 実験装置の配置

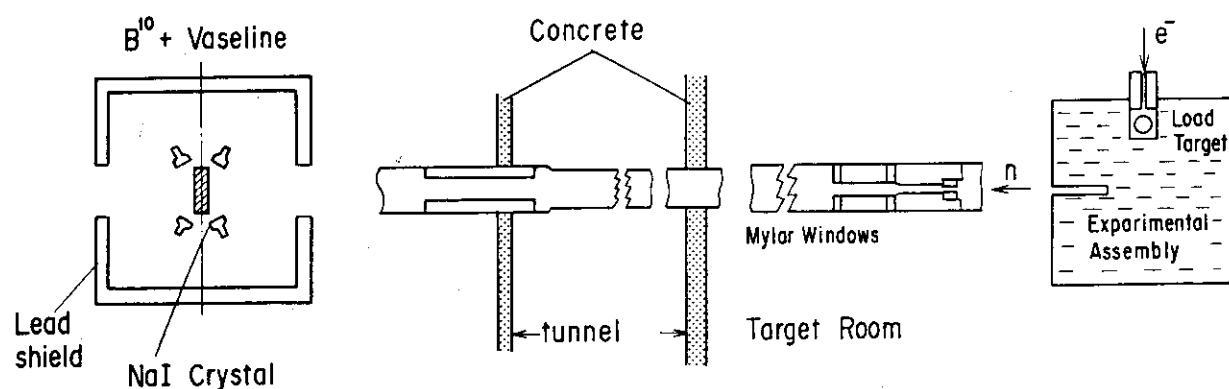


図 2.10.2 TOF スペクトロメータの配置概略図

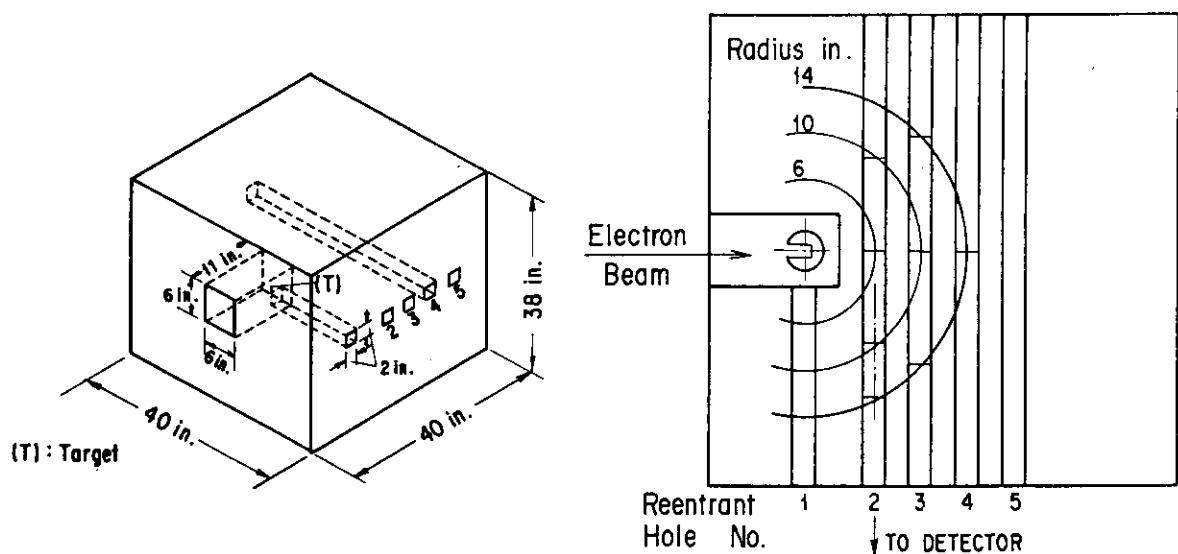


図 2.10.3 鉄体系におけるターゲットとリエントラントホールの位置及び測定点位置

NEUTRON TRANSPORT IN IRON

JAERI-M 90-203

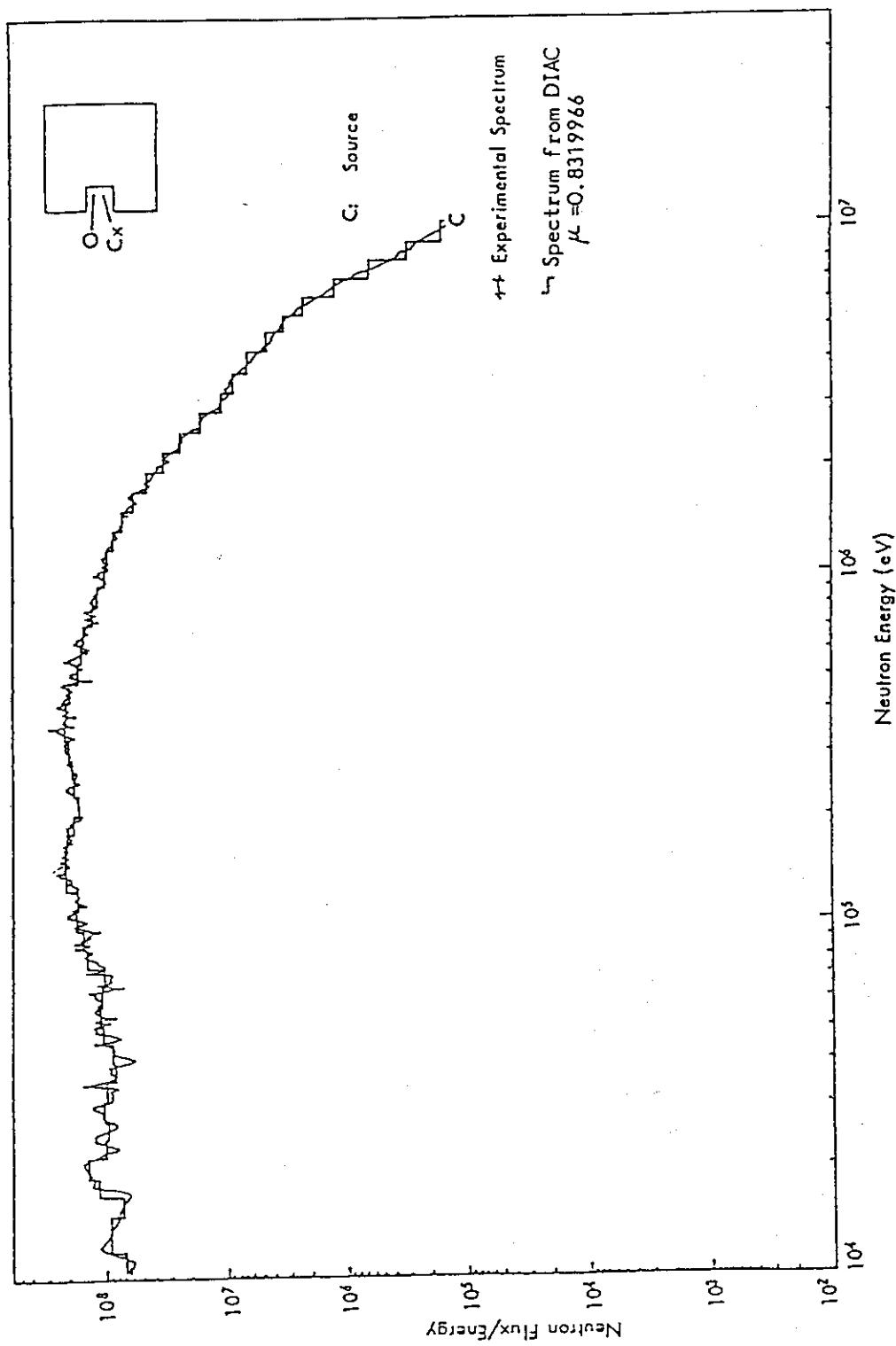


図 2.10.4 鉄体系内でのソースで規格化した測定値と計算値 (DIAC, ENDF/B-4) の比較
 $R = 10 \text{ in}$, $\mu = \pm 0.8$

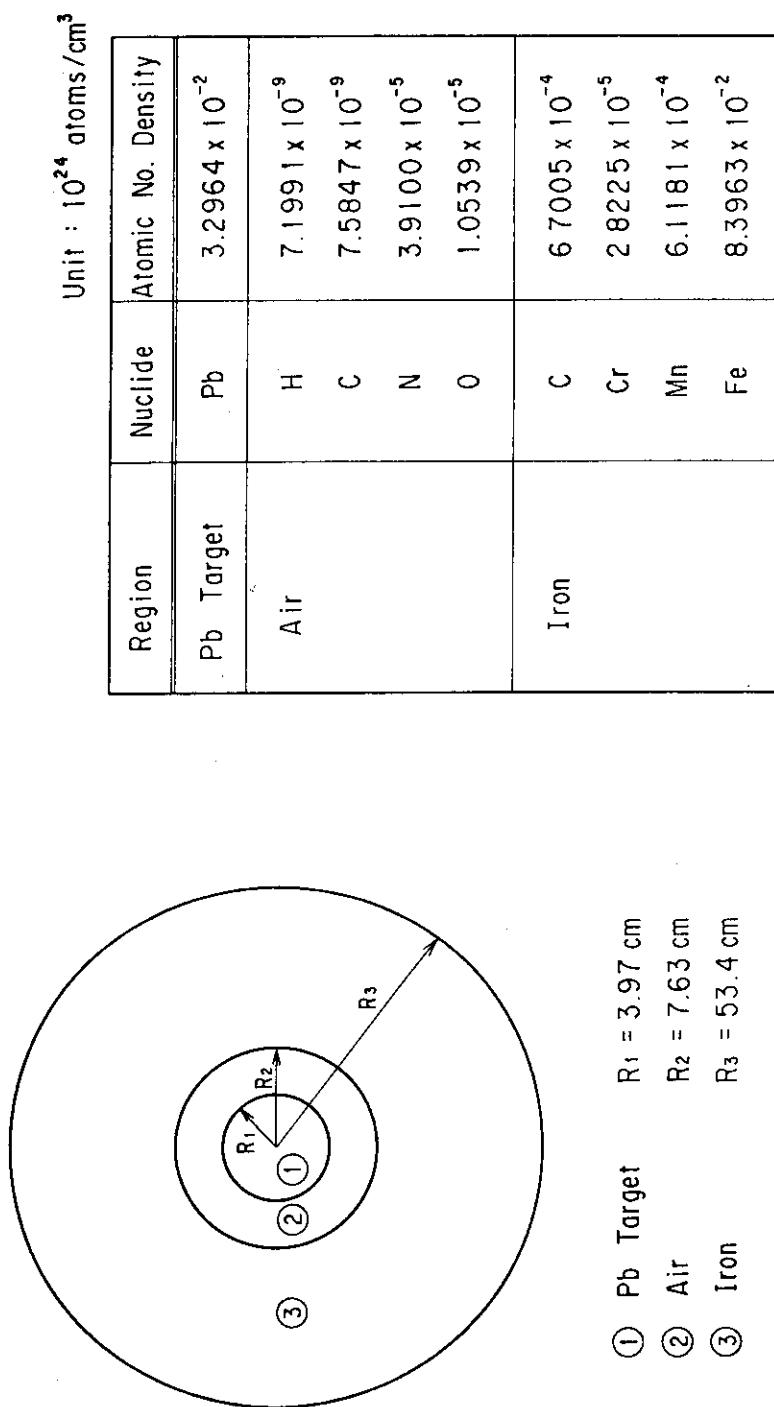


図 2.10.5 一次元球体系の計算用形状モデル

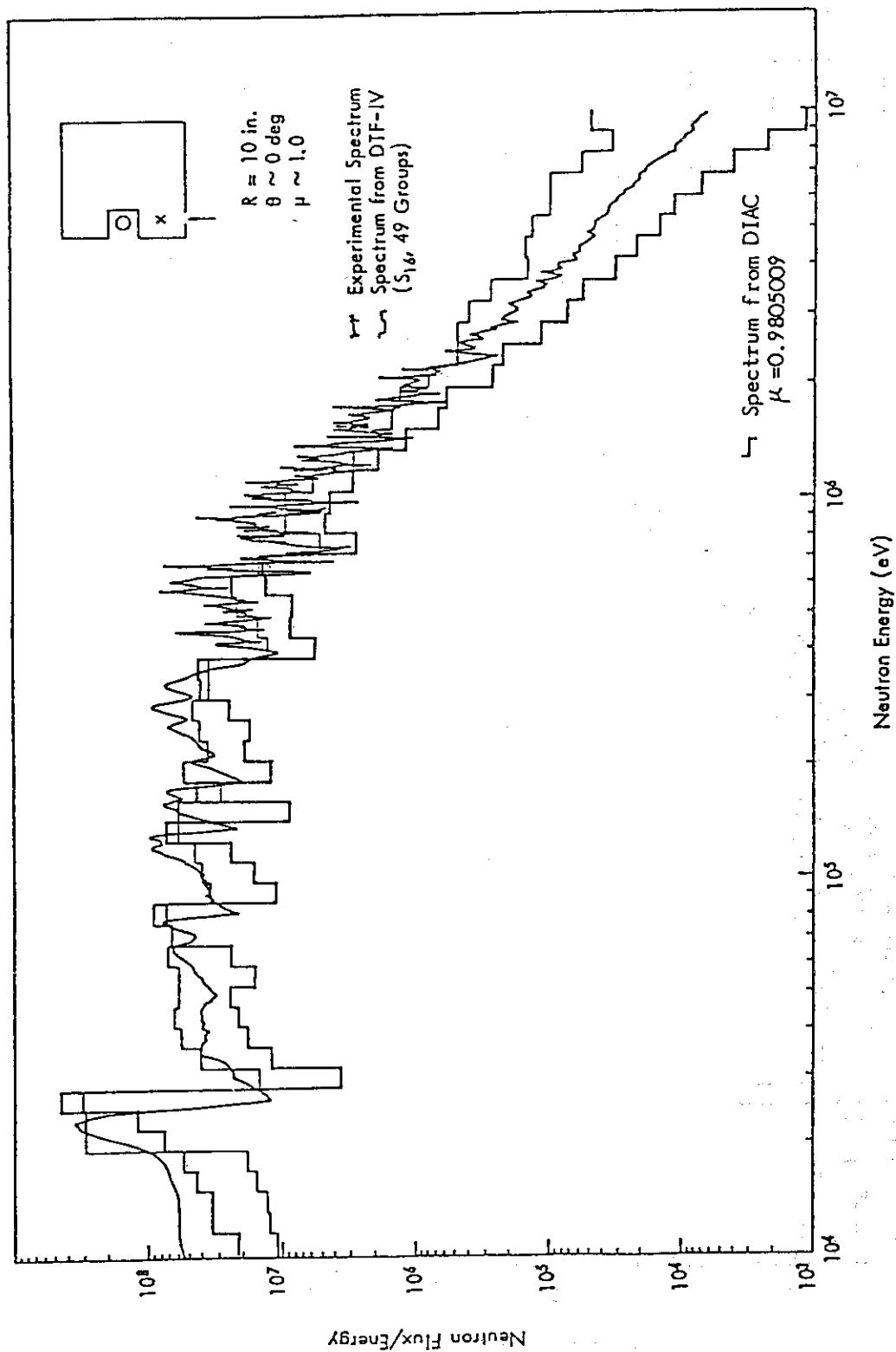


図 2.10.6 鋼体内スペクトルの測定値と計算値 (DIAC, ENDF/B-4) の比較
 $R = 10$ in., $\mu = 1$ —

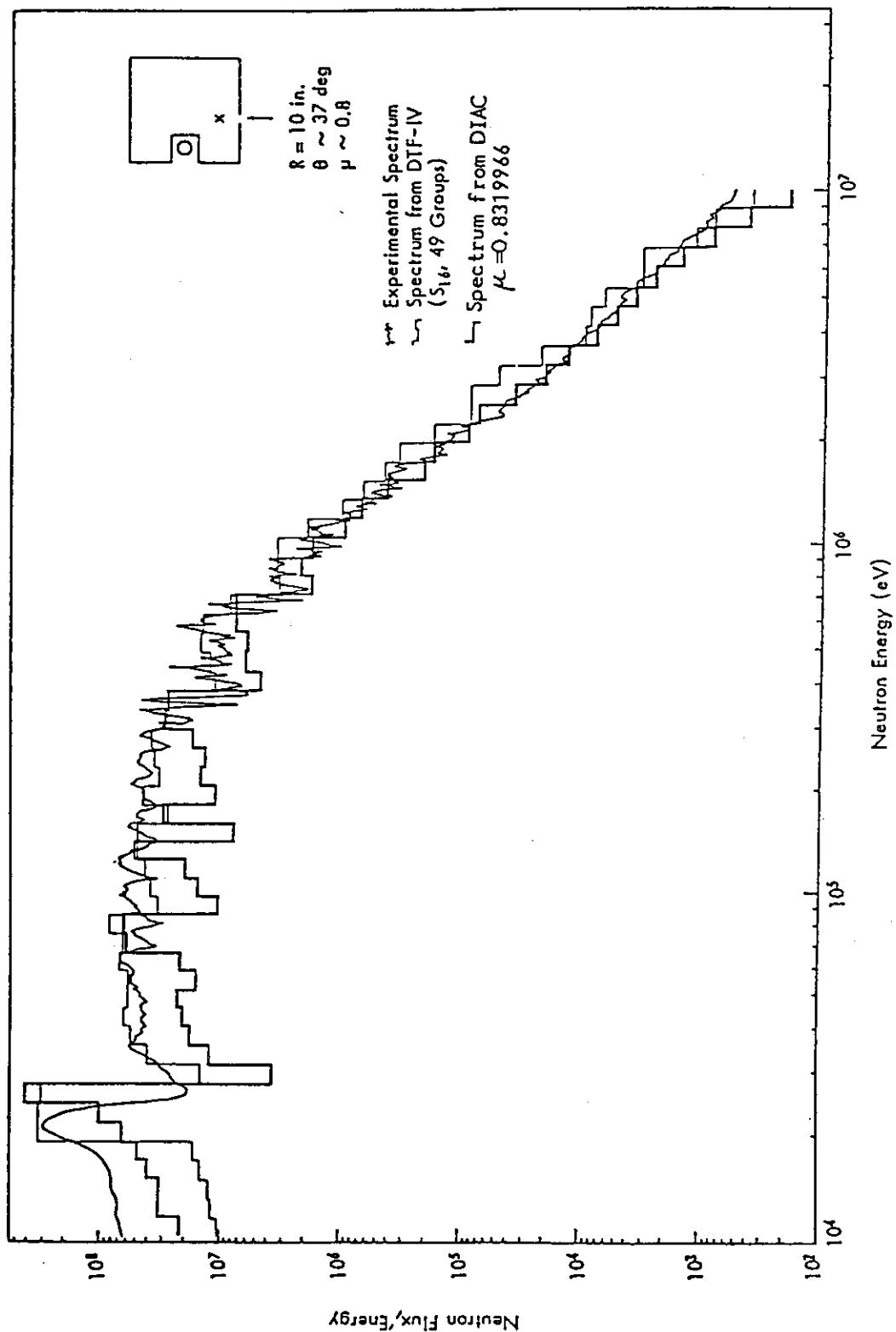


図 2.10.7 鉄体系内スペクトルの測定値と計算値 (DIFC, ENDF/B-4) の比較
— $R = 10 \text{ in.}, \mu = 0.8$ —

NEUTRON TRANSPORT IN IRON

JAERI-M 90-203

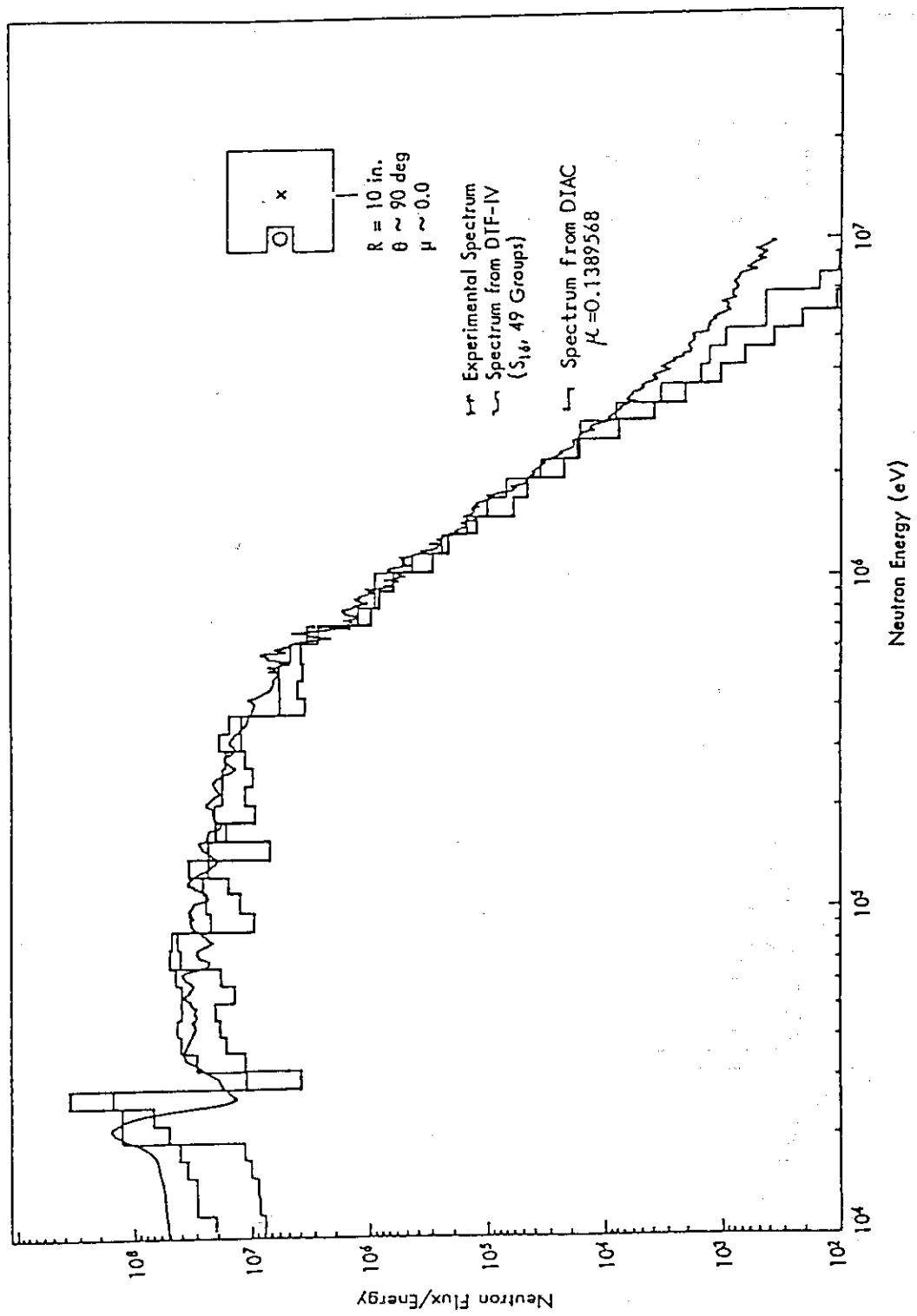


図 2.10.8 鉄体系内スペクトルの測定値と計算値 (DIAC, ENDF/IV) の比較
 $R = 10 \text{ in.}, \mu = 0$

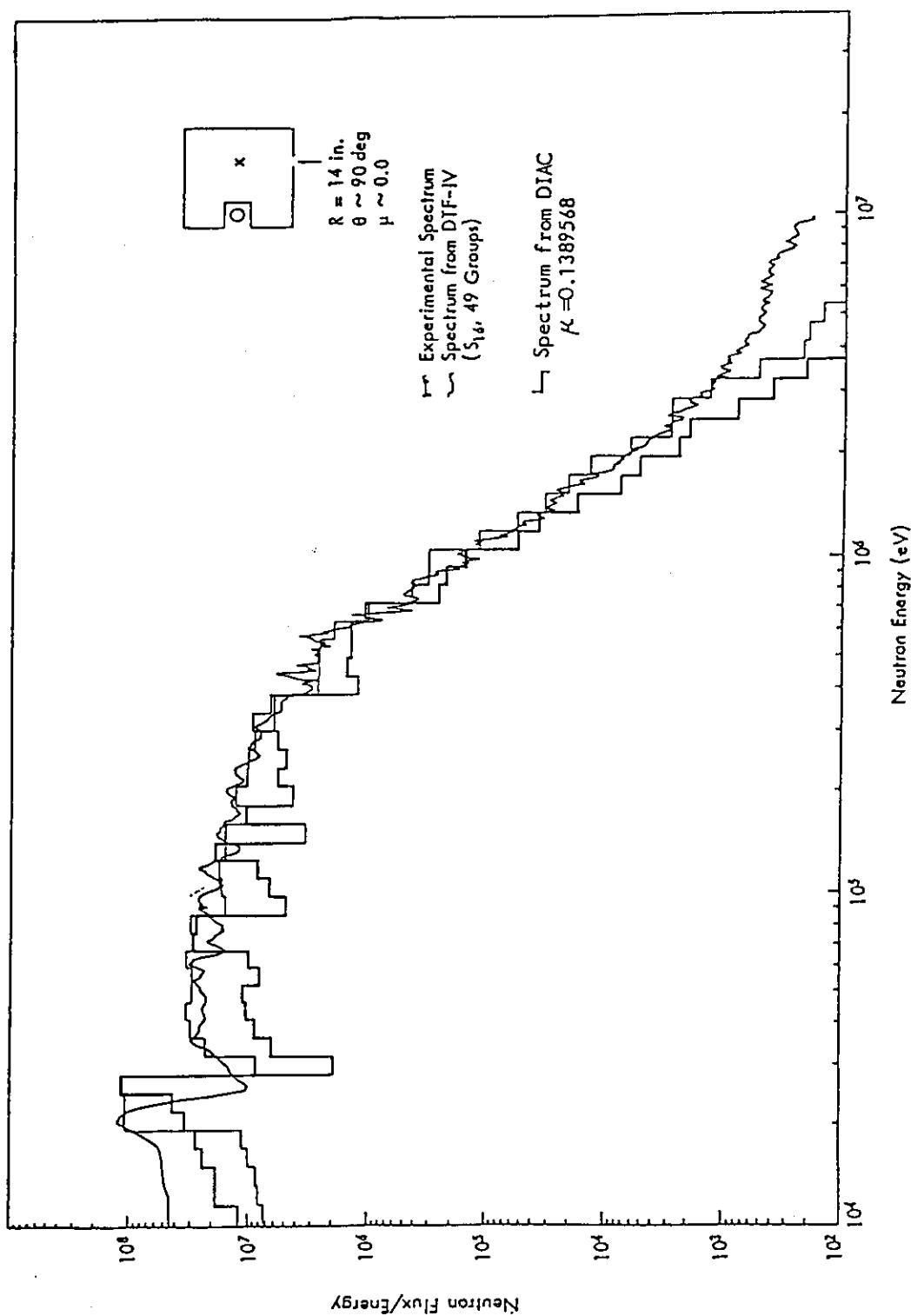


図 2.10.9 鉄体系内スペクトルの測定値と計算値 (DIAC, ENDf/B-4) の比較
— R = 14 in , $\mu = 0$ —

2.11 光中性子源を用いた中性子の黒鉛透過問題

2.11.1 実験概要

(1) 実験配置

本実験は、RPI の 28 MeV 電子線形加速器からのパルス状電子ビームを劣化ウラン・ターゲットに照射して得られるパルス状光中性子源を用い、黒鉛体系中の角度中性子スペクトルを飛行時間法を用いて測定したものである¹⁾。図 2.11.1 に全体の実験配置を、図 2.11.2 に劣化ウラン・ターゲットを示す。黒鉛供試体の大きさは、 $132 \times 152 \times 152 \text{ cm}^3$ と $112 \times 132 \times 112 \text{ cm}^3$ の 2 種類である。前者は、200 eV 以上の高速中性子、後者は、200 eV 以下の中性子スペクトルの測定に使用された。線源からの適当な距離に中性子抽き出し用の実験孔が電子ビーム軸に垂直方向を向けて設けられている。また、熱中性子の影響を減らすため、供試体の周囲は、0.32 cm 厚のボロン入りポリエチレンと 0.05/cm 厚の Cd で被覆された。

(2) 測 定

28 MeV の電子線形加速器でパルス状の電子を加速し、劣化ウラン・ターゲットで (γ, n) , (γ, f) 反応によって中性子を発生させて中性子源とし、体系内に設けられた実験孔から抽き出された中性子を飛行時間法を用いて測定することによって、角度依存中性子スペクトルが得られた。0.8 MeV 以上のエネルギーの中性子は、 $5.05 \text{ cm} \phi \times 5.08 \text{ cm}$ 長の NE-211, 又は、 $12.7 \text{ cm} \phi \times 12.7 \text{ cm}$ 長の NE-213 液体シンチレータで測定された。また、200 eV から 0.8 MeV までの中性子の測定には、boron capture 検出器が、さらに 200 eV 以下の中性子の測定には、BF₃ 検出器が使用された。

中性子源強度は、線源中心から 19 cm 離れた位置での硫黄ペレットでモニターし、³²S (n, p) ³²P 反応率で決められ、測定結果は、S 単位照射量に対してまとめられている。即ち、角度中性子束に関して、単位中性子源当たりの ϕ と S 単位照射量当たりの値 ϕ_0 とは次式で換算できる。

$$\begin{aligned}\phi & (\text{n}/\text{eV} \cdot \text{eV} \cdot \text{Sr} \cdot \text{単位中性子源}) \\ & = 2.65 \times 10^{-19} \phi_0 (\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{eV} \cdot \text{Sr} \cdot \text{S} \cdot \text{単位照射量})\end{aligned}$$

2.11.2 計算概要

計算は、1 次元 Sn 輸送コード DIAC と ANISN-JR を用いて行った。その際、線源やメッシュ幅等の計算条件を変えて全部で 14 ケースの計算を行った。

(1) 群定数の作成

FAIRCROSS step 1 で作成されている群定数ライブラリー JSD1000 に含まれる 100 群無限希釈断面積 (INFX) 及び共鳴自己遮蔽因子 (FTBL) を用いて、FAIRCROSS step 2 により 100 群の巨視的実効断面積 (FX16) を作成した。この時の角度メッシュ数 (IPO) は 16 とした。DIAC による 1 次元輸送計算には、この FX16 データを使用した。

一方、ANISN-JR 計算に対しては、散乱断面積について直接表示した FX16 データを FAIR-CROSS step 3 により P_s ルジャンドル展開表示データ (P_s) に変換して使用した。また、JSD100 セットによる 100 群定数による計算も行った。

(2) 線源条件

中性子発生用劣化ウラン・ターゲットは、半径 3.81 cm の球形状をしており、表面を水冷却されている。文献1には、ターゲット表面での漏洩中性子スペクトルと角度分布がえられており、計算では、これに従ってターゲット表面での角度依存のシェル線源として扱った。但し、その位置として、半径 3.81 cm の丁度劣化ウラン球面上 (S_A) と半径 4.12 の SUS ジャケット表面 (S_B) の 2 種類を保った。

また、ウラン・ターゲット中央の半径 0.85 cm の領域に一様等方源 (S_C) を仮定した解析も行った。この場合、線源スペクトルは ^{235}U の核分裂中性子スペクトルを用いた。

(3) 解析条件

解析には、図 2.11.3 に示すようにターゲット及び黒鉛体系を含めて 1 次元球形状モデルを用いた。各領域の物質組成も併せて同図に示している。輸送計算の境界条件は、中心で対称、外側で真空とした。なお、最外半径 $R_4 = 80$ cm は高速中性子スペクトル測定時の黒鉛供試体の体積を保存する等価球半径である。

計算は、1 次元 S_N 輸送コード DIAC と ANISN-JR を用い、表 2.11.1 に示すように全部で 14 ケース行った。表中、 P_∞ は DIAC 計算を示し、 P_5 又は P_1 は、ANISN-JR による、非等方散乱について P_5 又は P_1 近似の計算を示す。実験解析条件が最も良いのはケース 5905 である。これは、線源をターゲットの SUS ジャケットの表面に置き、メッシュ幅を図 2.11.4 に示すように黒鉛中で約 1.25 cm と比較的細かくとったモデルを用いた S_{32} 近似の DIAC 計算である。中性子束の収束精度は、0.01 % に採った。

計算条件の影響は、下記のものが調べられた。

- ① メッシュ幅効果 (基準、倍メッシュ、4 倍メッシュ)
- ② S_n 効果 (S_{16} , S_{32})
- ③ P_e 効果 (P_1 , P_5 , P_∞)
- ④ モデルの大きさ ($R_4 = 56, 80, 108$ cm)
- ⑤ 線源の違い (3 種類のシェル源、分布源)
- ⑥ ライブラリーの違い (JSD 1000, JSD 100)

2.11.3 計算と実験との比較

(1) MeV 領域の角度中性子スペクトル

NE-211 液体シンチレータを用いて、以下の位置における角度中性子スペクトル (0.8 MeV 以上) が測定されている。即ち、 $\gamma = 20.3$ cm (動径方向に対する角度 $\theta = 0^\circ, 30^\circ$),

$$\gamma = 35.6 \text{ cm } (\theta = 0^\circ, 16.6^\circ, 34.8^\circ, 58.9^\circ),$$

$$\gamma = 50.8 \text{ cm } (\theta = 0^\circ, 11.5^\circ, 23.6^\circ, 36.9^\circ),$$

比較は全ケースについて行ったが、代表的な例を図 2.11.5 ~ 図 2.11.9 に示す。図中計算値は実験値との相対値を一致させるため、便宜的にファクター 1.2だけ乗じられている。

0° 方向について、実験値と計算値との一致は良くない。20.3 cm 位置では 30 % 程度計算値が高い。また、35.6 cm, 50.8 cm 位置では、過小評価しており特に後者において 6 MeV のピークは実験値の約 3 分の 1 と小さい。これは、限られた S_N 近似で 0° 方向の角度束を評

価することの難しさを示している。

しかし、 0° 方向以外の角度中性子スペクトルについては計算値と実験値は極めて良い一致を示している。

2.11.4 評価及び考察

以上に述べた計算と実験の比較並びに各ケースの計算結果の比較から下記の評価及び考察を行った。

(1) メッシュ効果

角度中性子束に対するメッシュ効果は、 S_N 分点と密接な関係がある S_{16} の場合、ケース 5701, 5702, 5812 の結果を比較して調べられる。ケース 5701 (4 倍粗メッシュ) で得られた角度中性子スペクトルには、100 keV 域で不自然な盛り上がりが見出されており、後の 2 ケースと最大 2 倍異なる結果を示す。一方、後の 2 ケースでは、そのような盛り上がりもなく、両者の一致も良好である。従って S_{16} 計算では、倍メッシュの 2.5 cm で十分と云える。しかし、 S_{32} の場合、ケース 5902 (粗メッシュ) で θ の大きい場合の角度中性子スペクトルに揺らぎが現れ、メッシュが十分に細かくないことを暗示している。これも基準のメッシュ幅 (約 1.25 cm) にすると消失している。即ち、 S_N 分点数を大きくすると、それに応じてメッシュ幅も細かくする必要があり、実験との比較に用いたケース 5905 については、十分と考えられる。

(2) S_N 効果

前方方向の角度中性子スペクトルのうち、100 keV 以上で明らかに S_N 効果が認められる。前方方向スペクトルには、2 MeV と 5 ~ 6 MeV にピークがあるが、その高さは、 S_{32} 計算のものが S_{16} 計算より数倍高い。しかし、100 keV 以下では、両者の差は殆んど見出されなくなる。

(3) P_ℓ 効果

P_ℓ 効果は、 S_{16} 計算の場合、ケース 5701, 5703, 5704 の結果を、また、 S_{32} 計算の場合、ケース 5905 と 5911 の結果を比較して調べられる。DIAC (P_ℓ) 計算と ANISN-JR P_ℓ 計算結果等を比較した場合、両者の差は高々 0.4 % であり、非常に一致が良い。このことは、黒鉛に関して P_ℓ 近似ではほぼ十分であること、また、比較の ANISN が正しくプログラムされているという了解のもと DIAC コードでの散乱源の扱い方が妥当であることを示している。なお、 P_ℓ 近似の結果は、 P_ℓ 近似の結果と比べて、中心から 25 ~ 60 cm の黒鉛領域層での 30 eV ~ 500 keV の中性子束について最大 40 % 高い値を示しているが、両者は大概数 % 内で一致している。

(4) 体系の大きさ

直方体形状の実験供試体を実験解析では球形にモデル化して行っている。そこでそのモデル化の問題をつめるため、体系の大きさを変えて外側境界が体系内の中性子束に及ぼす影響を調べた。ケース 5811 では半径 108 cm が揺られ、ケース 5904 では 56 cm が揺られた。体系を大きくしたケース 5811 では、半径 80 cm の対応するケース 5720 に比べて低速中性子束に差が見出され、実供試体の外側境界面となりうる 66 cm 位置で熱中性子束が約 1.6 倍になっている。他方、30 keV 以上 (1 ~ 50 群) では、両者は殆ど差がない。

また、体系を小さくしたケース 5904 では、境界に最も近い位置での測定点のある 50.8 cm では、数 100 keV 以下から差が生じている。即ち、標準 ($R_4 = 80$ cm) のケース 5901 に比べた場合、熱中性子束について 60 % 低い。しかし、内部の 35.6 cm の位置では、境界の影響は熱中性子を除けば認められない。従って、高速中性子スペクトルに関しては、境界の影響は殆んど無視しうる。

一方、3.13.3 項の実験値との比較で明らかとなった 100 eV 以下の低エネルギー領域の中性子束の計算値が実験値に比べて 2 ~ 3 倍高いという傾向は、計算体系の大きさを実験条件に近づけることによっていくぶん改善できるが、その程度は僅かである。しかも、計算と測定のずれは、体系内ではほぼ一定なので、ずれ要因は境界の影響とは別と考えられる。

(5) 热源効果

シェル源の入力位置の効果は、ケース 5903, 5905 と 5907 を比較して調べた。先ず、シェル源の位置の違いによるスペクトルの変化は無視でき、絶対値で全線源強度の 1.2 倍の差が生じたのみである。

(6) 群定数の効果

ケース 5911 (ANISN/JSD 1000) とケース 5912 (ANISN/JSD 100) を比較すると、後者の方がスペクトルが硬い。MeV 領域の角度束のピークでは、ケース 5912 の方が 2 倍程度高い。また、低エネルギー領域での角度はケース 5912 の方が低いが、その違いは、黒鉛内の透過が進むにつれて小さくなっている。例えば、熱中性子束について、20.8 cm 位置で 10 %, 35.6 cm 位置で 3 % の差が見出されている。

(7) 総合的検討

DIAC コードによる計算結果と測定値を比較した場合、高速中性子スペクトルに関しては良好な一致を見た。しかし、1 MeV 以下のスペクトルに関しては、計算の方が硬いスペクトルを与えていた。黒鉛の断面積は、中性子エネルギーに対して比較的滑らかであり、また、精度も良いことから本来、低エネルギー側でも MeV 領域と同程度の測定値の再現性を期待できると考えられる。一方、boron capture 検出器と BF₃ 検出器による測定値を比較すると 200 eV で両者は連続につながらず、測定そのものに何らかの系統的な誤差が混入している可能性を否定できない。また、DIAC と ANISN-JR コードでの計算結果との一致の良いことも考慮して、DIAC コードは妥当な解を提示していると結論づける。

しかし、角度中性子束はメッシュ幅や S_N オーダーに影響され易く、両方がバランスのとれた詳しさにない場合、角度中性子スペクトルに不自然な振動が生じる。この解の不安定さは、DIAC コード使用上の問題ともなる。従って、差分方程式の解法の改良が今後の課題として残る。

参考文献

- (1) Profio, A.E., Antúnez, H.M. and Huffman, D.L.: "The Neutron Spectrum from a Fission Source in Graphite", Nucl. Sci. Eng., 35, 91-103 (1968).

表 2.11.1 計 算 ケ 一 ス

Case I.D.	library	R ₄ (cm)	mesh width ¹⁾	Source ²⁾	S _N -P _ℓ	remark's
5701	JSD1000	80	4Δ	S _A	S ₁₆ -P _∞	mesh size effect (S ₁₆)
5702	"	"	2Δ	"	"	ditt. (S ₁₆)
5703	"	"	4Δ	"	S ₁₆ -P ₅	P _ℓ effect (S ₁₆)
5704	"	"	4Δ	"	S ₁₆ -P ₁	ditt.
5811	JSD1000	<u>108</u>	2Δ	S _A	S ₁₆ -P _∞	outer boundary effect
5812	"	80	Δ	"	"	mesh size effect (S ₁₆)
5813	"	"	2Δ	S _{A'}	"	low energy contribution
5814 (5902)	"	"	2Δ	S _A	S ₃₂ -P _∞	mesh size effect (S ₃₂)
5903	JSD1000	"	Δ	S _A	S ₃₂ -P _∞	ditt.
5904	"	<u>56</u>	Δ	"	"	outer boundary effect
*5905	"	80	Δ	S _B	"	most reliable case
5907	"	"	Δ	S _C	"	distributed source
5911	"	"	Δ	S _B	S ₃₂ -P ₅	P _ℓ effect (S ₃₂)
5912	JSD-100	"	Δ	S _B	S ₃₂ -P ₅	different library

N.B. 1) Mesh widths in the graphite region; Δ~1.25 cm

2) Sources:

S_A : shell source at the depleted U target surfaceS_{A'} : S_A and additive lower energy contributions (assumed)S_B : shell source at the sus jacket surfaceS_C : distributed source

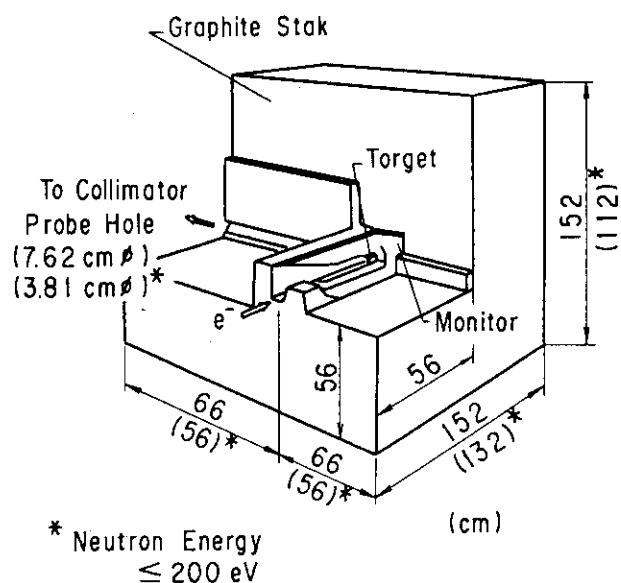


図 2.11.1 実験装置の配置

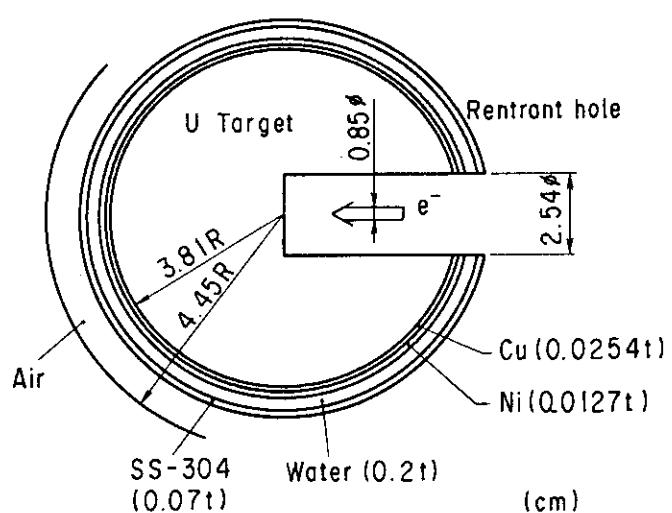
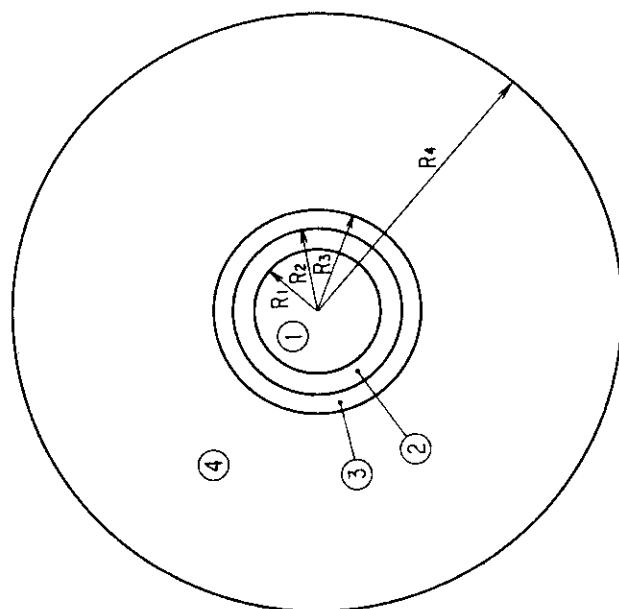


図 2.11.2 劣化ウラン・ターゲットの幾何形状

Unit : 10^{24} atoms/cm³

Region	Nuclide	Atomic No. Density
Depleted U Target	^{235}U	1.0711×10^{-4}
	^{238}U	4.7967×10^{-2}
Water / SUS	H	4.2966×10^{-2}
	C	7.6447×10^{-5}
	O	2.1483×10^{-2}
	Si	4.3610×10^{-4}
	Cr	4.1943×10^{-3}
	Mn	4.1786×10^{-4}
	Fe	1.3943×10^{-2}
	Ni	5.4677×10^{-3}
	Cu	6.4864×10^{-3}
Air	H	7.1991×10^{-9}
	C	7.5847×10^{-9}
	N	3.9100×10^{-5}
	O	1.0539×10^{-5}
Graphite	C	8.3300×10^{-2}



- ① Depleted U Target $R_1 = 3.81 \text{ cm}$
- ② Water / SUS $R_2 = 4.12 \text{ cm}$
- ③ Air $R_3 = 4.45 \text{ cm}$
- ④ Graphite $R_4 = 80.0 \text{ cm}$

図 2.11.3 一次元球形状計算モデルと領域の組成

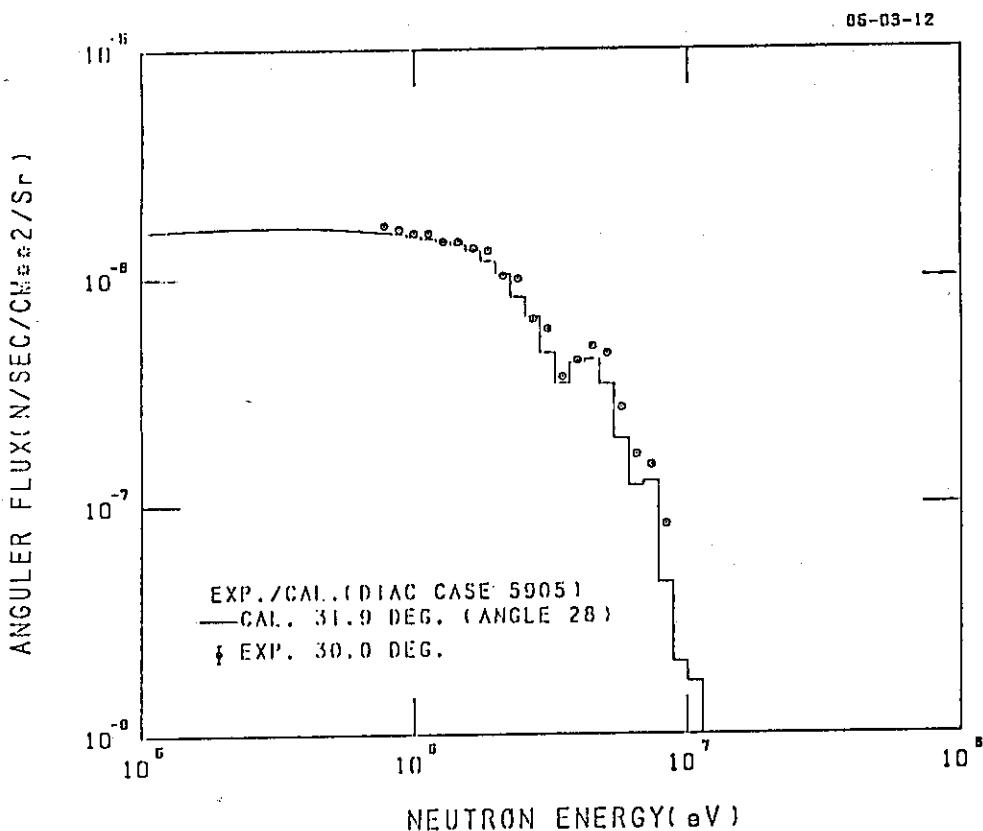
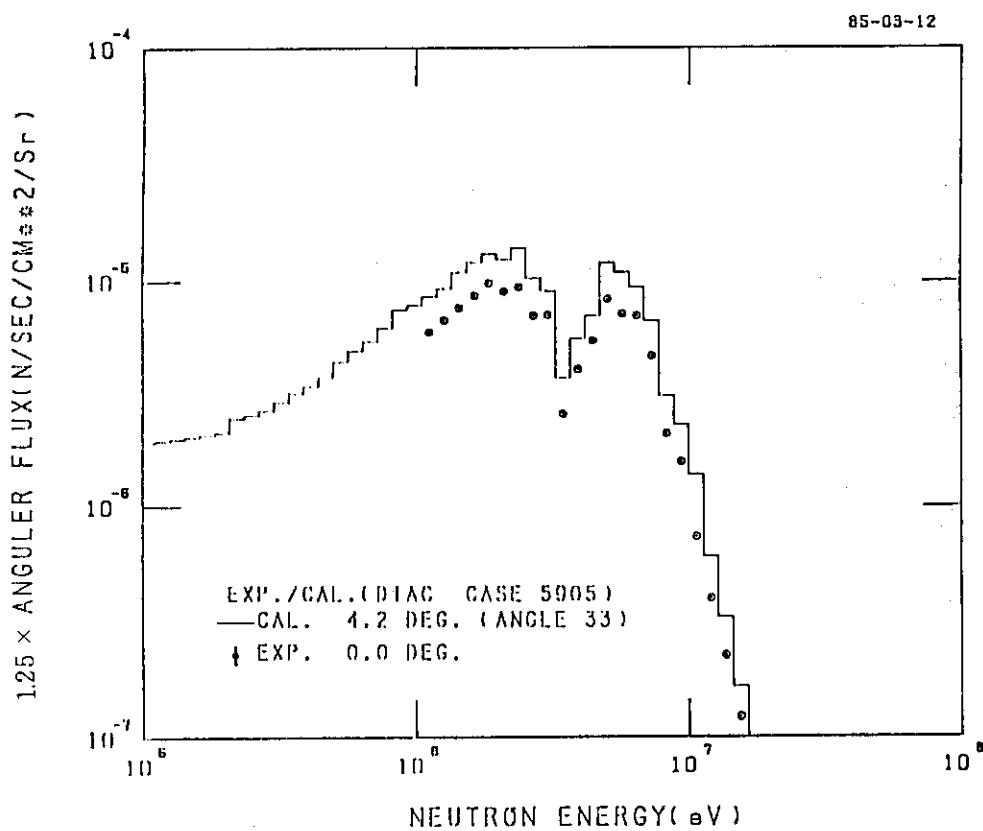
Geometry	Region	Case 5902		Case 5903 5905 5907		Case 5904	
		Distance (cm)	Mesh	Width (cm)	Mesh	Width (cm)	Mesh
		0.0					
Depleted U Target		*	16	0.23813			
Water / SUS		** 3.81	2	0.155			
Air		** 4.12	2	0.165			
		4.45					
		5.3	4	0.2125	8	0.10625	
		6.3	2	0.5	4	0.25	
		10.3	4	1.0	8	0.5	同左
		*** 20.3	4	2.5	8	1.25	
Graphite		*** 35.6	6	2.55	12	1.275	
		*** 50.8	6	2.5333	12	1.2666	
		*** 66.0	6	2.5333	12	1.2666	-50.8 -54.6 -56.0 3 1.2666 2 0.7 77 meshes
		80.0	6	2.3333	12	1.1666	
				total 58 meshes		96 meshes	

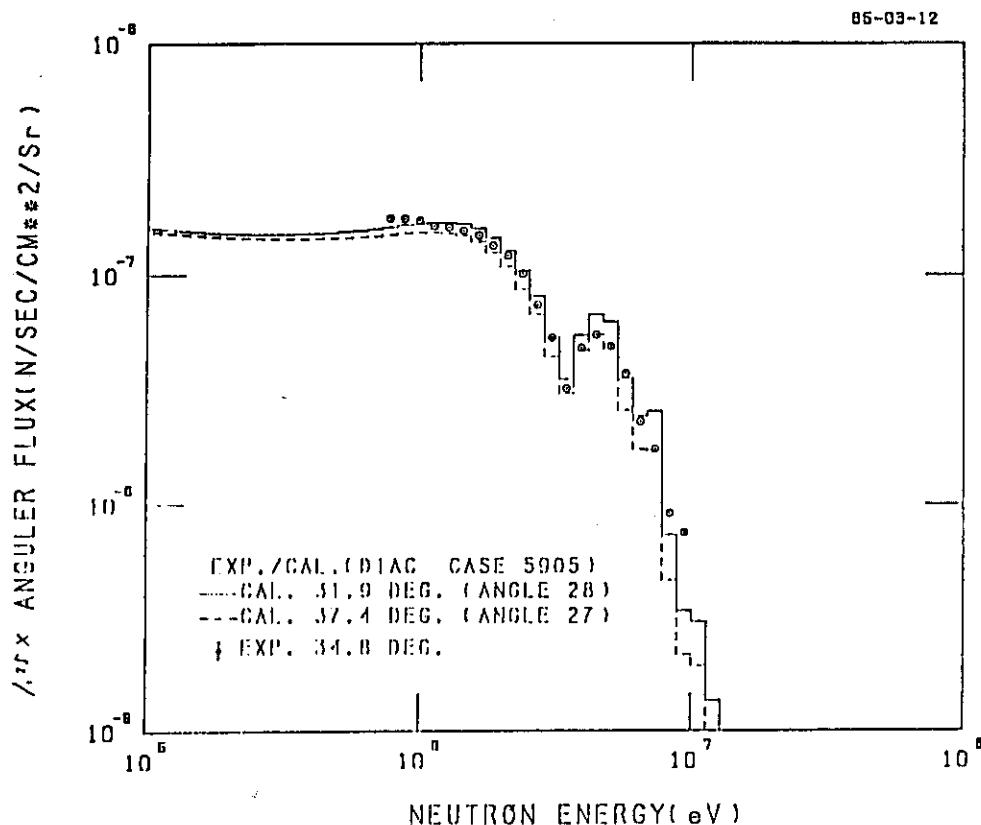
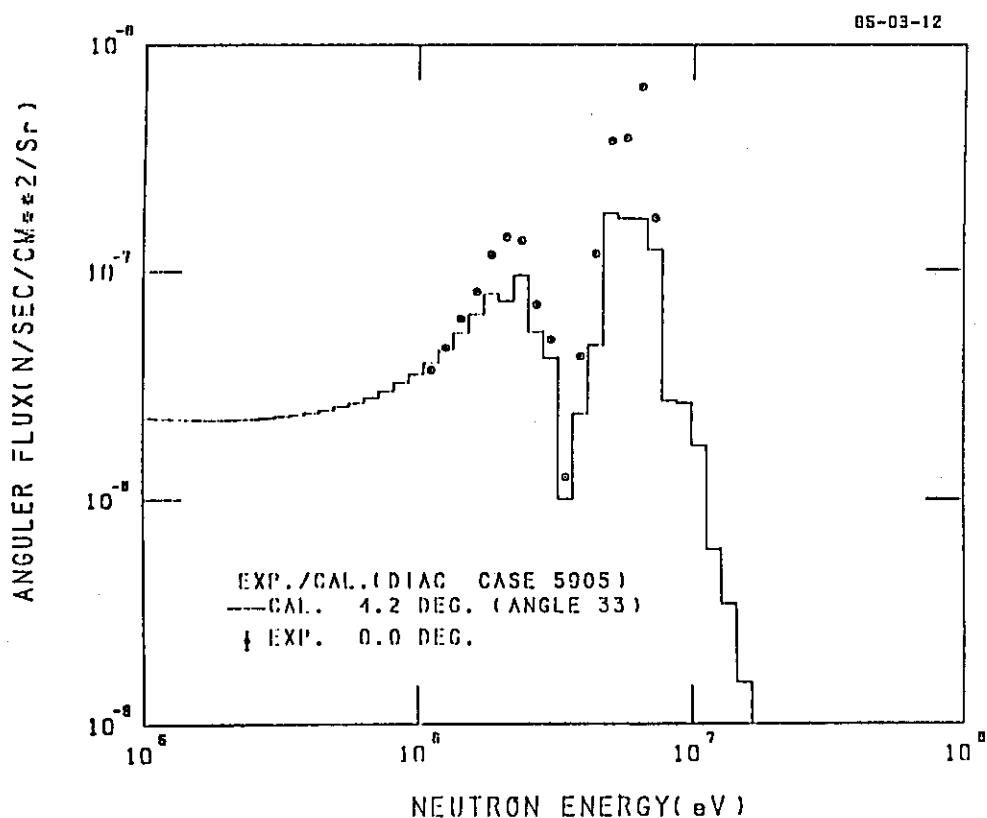
* input point of shell source for Case 5902~5904

** " Case 5905~5912

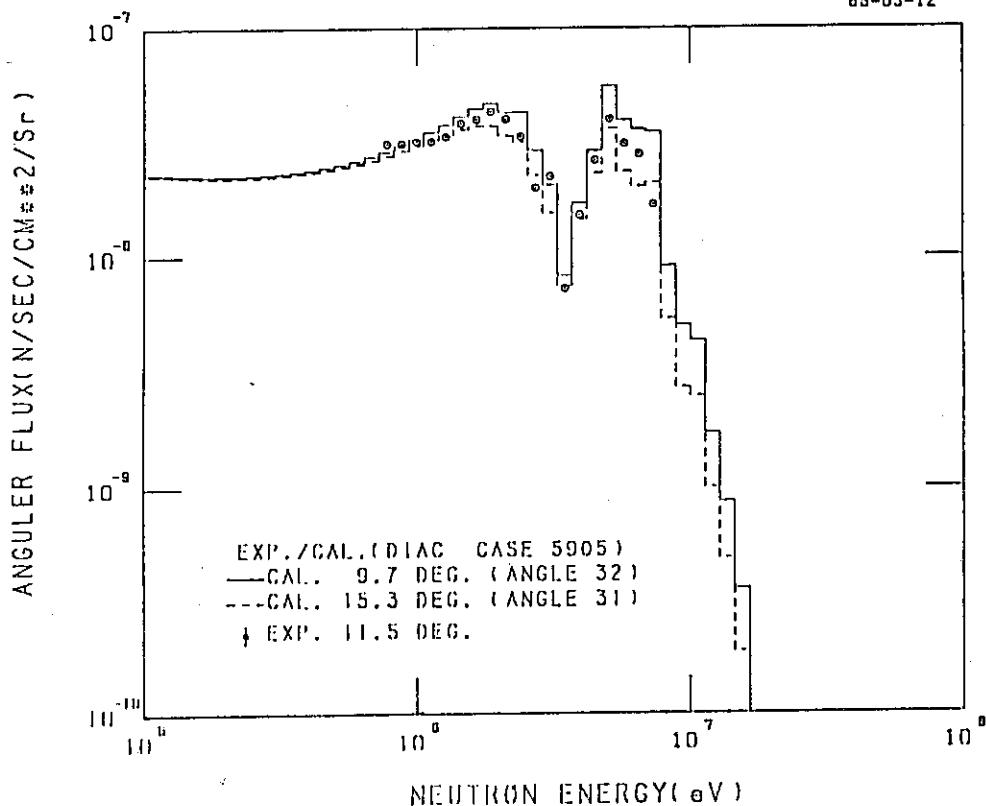
*** measuring point

図 2.11.4 一次元モデルにおけるメッシュ分割

図 2.11.5 $r = 20.3$ cm, $\theta = 0^\circ$ におけるグラファイト中の角度中性子束図 2.11.6 $r = 20.3$ cm, $\theta = 30^\circ$ におけるグラファイト中の角度中性子束

図 2.11.7 $r = 35.6$ cm, $\theta = 34.8^\circ$ におけるグラファイト中の角度中性子束図 2.11.8 $r = 50.8$ cm, $\theta = 0^\circ$ におけるグラファイト中の角度中性子束

85-03-12

図 2.11.9 $r = 50.8 \text{ cm}$, $\theta = 11.5^\circ$ におけるグラファイト中の角度中性子束

2.12 鉄、鉛及びコンクリート中のガンマ線の減衰

2.12.1 実験概要

本ベンチマーク解析の対象としたバージニア大学の W. R. Johnson 達¹⁾によって行われた実験の概要を以下に記述する。⁽²⁾

(1) 実験配置²⁾

全体の実験配置を図 2.12.1 に示す。この図の targt box で発生した熱中性子捕獲ガンマ線はビームフィルタを通り、collimated ビームとして遮蔽体に入射する。遮蔽体は入射角度が変えられるよう回転台上に設置されている。

(2) 線 源

ガンマ線線源として Ni 又は Ti の熱中性子捕獲ガンマ線を用いる。図 2.12.1 のビームフィルタを変えることにより、それぞれのターゲットに対して 2 種類の僅かに異ったスペクトルを持つ線源が作られ、表 2.12.1 に示すように、全部で 4 種類のガンマ線線源スペクトルが用いられた。これらの線源スペクトルはターゲット物質 (Ni 又は Ti) とビームフィルタの違いを意味する。Series A 又は B によって区別される。

(3) 測定方法と測定器

平板透過計算を評価する上で最も都合のよい実験データは図 3.14.2 に示したように平行ビームが無限平板に入射した後平板の後の 1 点で測定されたものである。図 2.12.2 及び図 2.12.3 の体系は同じことが判っているので、本実験では図 2.12.3 の体系で実験が行われた。なお、plane detector の代りに 1 つの測定器で遮蔽体後方のある平面の mapping を行い、その積分量を plane detector の測定量とした。

線源スペクトル測定のための $1'' \phi \times 1/2'' t$ のアントラセン結晶を lucite で覆った測定器が用いられた。線量計のエネルギー依存のレスポンスは 100 keV 以上で、ほぼ air-kerma に比例することから測定量はほぼ照射線量に比例する。

本実験で用いた線量計のレスポンスは 100 keV 以下のエネルギーで急激に下がる。この影響はモンテカルロ計算により調べられたが、低エネルギーのガンマ線の線量の全線量に対する割合が小さいことから、この測定器で得られる照射線量の誤差は 2 % 以下である。

(4) 測定結果

測定値は照射線量であり、遮蔽体がある場合と無い場合の比の形で求められている。測定は入射角度が 0° 、 30° 及び 45° の場合について、遮蔽体の物質及び厚さを変えて行われた。その結果は図 2.12.4 ~ 図 2.12.9 に示す。各測定値は遮蔽体の中で測定されたものでなく、それぞれの厚さの遮蔽体の後方で測定されたものである。なお、それぞれのグラフの測定値に対応する遮蔽体の厚さは、鉄と鉛の最も厚い遮蔽体の場合を除いて表 2.12.2 に示した厚み (shield thickness) に対応している。

(注) W. R. Johnson 達の実験の概要に関する記述には文献 2) に記載されている内容をそのまま引用させて頂いた。

2.12.2 計算概要

上記のガンマ線減衰実験のベンチマーク解析は、RADHEAT システムの DIAC コードを使用して行われ、一部 ANISN コードも併用された。また、簡易計算コードとしては QAD コードが使用され、これによって全測定データの解析が行われた。そこで、これらの計算概要を DIAC に関するものと、QAD に関するものとに分けて以下に記述する。

(1) DIAC コードに関する計算概要

(i) 計算体系

本解析では無限平板に平行ビームが入射する1次元平板モデルが採用された。平行ビームは特定の angular flux を面線源として、境界面に入力する事により模擬された。即ち、 S_n 近似として S_{32} を採用し、 0° , 30° , 45° の入射ビームに対し各々 4.24° , 31.85° , 48.46° に相当する角度分点にのみ線源を入力している。この計算体系を図 2.12.10 に示す。また、遮蔽体厚みを表 2.12.3 に示す。

(ii) エネルギー群構造及び線源条件

本解析に使用されたガンマ線 20 群のエネルギー構造を表 2.12.4 に示す。ガンマ線のスペクトルは表 2.12.1 の値を表 2.12.4 の値に変換して使用された。なお、計算では中性子 100 群も付加して実施された。

(iii) 物質の組成及び断面積

本解析に使用された鉄及び鉛の組成を表 2.12.5 に示す。コンクリートは ANL-5800 に記載されている Type-1 相当のもので、その組成を表 2.12.6 に示す。

これらの組成に対する巨視的断面積は、日本原子力研究所で作成されたデータプール RADHDP02 に含まれている微視的断面積より FAIRCROSS step 2 を用いて作成された。角度分割は 32 としている。

(iv) 線量率変換係数

本解析に使用された線量率変換係数を表 2.12.7 に示す。

(v) 計算ケース

1 次元輸送コード DIAC を用いて S_{32} 近似で実施された計算ケースを表 2.12.8 に示す。Ti シリーズ A ではこの表に示す 3 ケースについて計算が行われた。他の場合は、ケース 1 のメッシュ分割で計算された。また、比較の為に Ti シリーズ A の場合についてのみ ANISN コードで計算がなされた。なお、この場合、メッシュ分割はケース 1 のみとし、 P_5 近似で計算された。

(2) QAD コードに関する計算概要

(i) 計算体系

QAD コードを用いた計算では図 2.12.11 に示す 1 次元体系が採られた。この体系では平行ビームに近づけるため、可能な限り線源と遮蔽体との距離をとる事とし、今回の計算では 100 m に設定された。

(ii) 線源条件

表 2.12.1 に示すエネルギースペクトルを有する点線源が仮定された。

(iii) 線量率変換係数

QAD コードによる簡易計算で使用された線量率変換係数を表 2.12.9 に示す。

(iv) 計算ケース

線源, 遮蔽体, 入射角度の異なる 18 種類の実験に対する 18 ケースの計算がなされた。

2.12.3 計算値と測定値の比較

DIAC, ANISN 及び QAD の 3 コードを用いて行われたガンマ線の減衰に関する解析結果を測定データと共に図 2.12.12 ~ 図 2.12.29 に示す。これら 18 枚の図にプロットされている DIAC コードによる結果及び QAD コードによる結果を測定値と比較し, ガンマ線源の種類, 遮蔽体の種類及びガンマ線の入射角について分類して見ると興味ある結果(系統性)が出てくる。これを解析結果のまとめとして表 2.12.10 に示す。この表に基づいて, 各遮蔽体毎に解析結果の検討をしてみる。

(1) コンクリート遮蔽体

コンクリート遮蔽体の場合は, Ti シリーズ A と Ni シリーズ A の線源に就て, ガンマ線入射角が 0° 度の場合しかデータが無いので総合的な傾向は判らない。唯, この 2 件の結果を比較してみると, DIAC 及び QAD の両コード共 Ni シリーズ A のほうが測定データとの一致が良い。DIAC コードによる結果には余り大きな差は無いが, QAD コードによる結果には明瞭な差が出ている。また, 両図共 DIAC に比べて QAD の結果はどのデータ点に対しても低目の値を出している点が注目される。なお, ANISN コードによる解析結果は Ti シリーズ A (図 2.12.12) のみにプロットされているが, 測定データとの一致は 200 g/cm^2 の点を除くと極めて良い。

(2) 鉄遮蔽体

鉄遮蔽体に関しては, ガンマ線入射角が 0° のデータが 4 種類の線源総べてに対して有り, また, 入射角が 30° 及び 45° のデータが Ti シリーズ B と Ni シリーズ B に対して有り, 計 8 件のデータがある。これらについて DIAC の結果と測定データとを比較して見ると, 入射角 0° の場合にはどの線源にでも良好であり, 特に Ti シリーズ A と Ni シリーズ B に対して優れた一致を見せている。入射角 30° の場合には, Ti シリーズ B については 0° の場合と同程度の一一致であり, Ni シリーズ B については 0° の場合よりは一致が悪くなるが, 前者とは同程度である。しかし, 入射角が 45° になると, 両線源共, 測定データとのずれはやや大きくなる。以上, 鉄遮蔽体について DIAC コードによる解析結果をまとめると, ガンマ線入射角が大きくなるにつれて測定データとの一致は徐々に悪くなって行く。

他方, QAD コードの結果に就いて同様の事を調べてみると, 入射角 0° の場合には, Ti シリーズ A の線源で測定データとの一致は最も良い。この場合, 図 2.12.13 からも判るように DIAC コードの結果とも殆ど一致している。次いで, Ni シリーズ A 及び B に就ても良好な一致を示しているが, Ti シリーズ B に対しては一致がやや悪くなり, 遮蔽体厚みが増加するにつれて測定データとのずれが大きくなる傾向を示す。次に入射角 30° の場合には, Ti シリーズ B 及び Ni シリーズ B の両線源共測定データとの一致は悪くなるが, 特に Ti シリーズ B についてはその差が大きい。ところが入射角が 45° になると, 上記両線源共, 測定データとの一致は最も良くなる。特に Ni シリーズ B に対して優れた一致を見せている。従って, 鉄遮蔽体に

関して QAD コードの結果をまとめると、QAD コードの場合には DIAC コードに見られた入射角依存性は余り無いように見える。即ち、QAD コードが最も悪い結果を示すのは 30° の場合であり、 45° では 0° の場合と同程度の良い結果を示している。加えて 45° の場合には上述したように、Ti シリーズ B 及び Ni シリーズ B の中では測定データと一番良い一致を示し、且つ DIAC コードの結果よりも優れている。

従って、鉄遮蔽体に関して DIAC コードと QAD コードを比較すると、測定データに対してほとんど同等な結果を示しているケースが 2 件、DIAC コードの方が測定データとの一致が良いケースが 4 件、逆に QAD コードの方が測定データと良い一致を示すケースが 2 件で、総合的には DIAC コードの方がやや信頼性が高いと云えるのではなかろうか。

(3) 鉛遮蔽体

鉛遮蔽体に関してもガンマ線入射角が 0° のデータは鉄の場合と同様、4 種類の線源絶べてについて有るが、入射角が 30° のデータは Ti シリーズ A と Ni シリーズ B、入射角が 45° のデータは Ti シリーズ B と Ni シリーズ B となっており、データ総数は 8 件で鉄と同じである。そこで鉛についても鉄と同様に、DIAC、QAD 両コードの結果と測定データとの一致度を調べて見る。

先ず、DIAC コードについて入射角 0° の結果を測定値と比べて見ると、鉄の場合とは対照的に一致が悪い。その中でも比較的一致がよい Ti シリーズ A (図 2.12.14) に就て検討して見ると、図から判るように、遮蔽体厚みが増すにつれて測定データとのずれが大きくなり、且つ測定値よりも低い。なお、このケースでは QAD の結果は非常に良い一致を示している。Ni シリーズ B の場合が測定データとのずれが最も大きく、 150 g/cm^2 近傍で測定値の $\frac{2}{3}$ に減少する。入射角 30° に対しては、Ti シリーズ A の場合は 0° の場合より一致は悪く、Ni シリーズ B の場合は 0° の時と略、同程度に悪い。最後に入射角が 45° になると、測定値とのずれは更に大きくなり、Ti シリーズ B 及び Ni シリーズ B の何れにおいても、此等の線源の他のどの入射角の場合よりも測定値との一致が悪い。特に、Ni シリーズ B の線源では、DIAC 及び QAD コードによる全計算値の中で、測定値からのずれが最大となる。以上をまとめると、鉛遮蔽体の場合には全ケースに亘って測定値との一致が悪く、この場合も鉄と同様にガンマ線の入射角が大きくなると、測定値との一致が悪くなると云う角度依存性が現れている。また、ガンマ線源に対しては、Ti シリーズ A の場合が不一致がそれ程ひどくなく、次に Ti シリーズ B と Ni シリーズ A とが入射角 0° では同程度に悪く、最後に Ni シリーズ B の場合が不一致が最大になる結果となっている。

他方、QAD コードに関しても、鉄の場合と比べると、DIAC コードと同様に、測定値との一致は全般的に悪くなっている。しかし 8 ケースの中で、Ti シリーズ A の入射角 0° の場合には例外的に極めて良い一致を示している。このケース以外は Ti シリーズ A (30°)、Ti シリーズ B 及び Ni シリーズ A (いずれも 0°) が同程度に少し一致が悪くなり、次いで Ti シリーズ B (0° 及び 30°) の 3 ケースが同程度に悪くなり、最後に、Ni シリーズ B の 45° のケースが DIAC と同様に最も測定値からずれる結果となっている。

ここで、鉛遮蔽体の場合に特筆すべき事は、8 ケース全部に対しては QAD の方が測定値に近い値を出している事である。また、鉛遮蔽体に対しては QAD の計算値は鉄の場合と異り、

DIAC の場合に見られる角度依存性を示している点が注目される。

最後に、コンクリート、鉄、鉛の 3 種類の遮蔽体に対して、DIAC 及び QAD の計算結果を比べてみると、コンクリートのデータが少い点が少し心配であるが、遮蔽体を構成している元素の原子量が大きくなる程、測定値と計算値との一致が悪くなるように見えるが、これ丈の少いデータからこれを結論づけるのは早計かも知れない。

2.12.4 評価及び考察

全節の計算値と測定値との比較において、既に考察の一部を述べたが、今回のベンチマーク解析の結果には数多くの興味深い問題が含まれている。一部繰返しになるが注目すべき点を例挙してみる。

- ① DIAC, QAD 両コード共、測定値との一致が一番良いのは入射角 0° の場合である（例外は 1 ケース）。
- ② 測定値との一致度については、少なくとも DIAC コードには角度依存性が有るらしい。
- ③ Ni シリーズ B 線源については、鉄遮蔽体と鉛遮蔽体との間に計算値の信頼性に関して大きな差がある。
- ④ 鉛遮蔽体の場合には全ケースについて DIAC コードよりも簡易コードである QAD の方が測定値を示している。
- ⑤ 3 種類の遮蔽体全体について比較しても、QAD の結果は DIAC の結果と比べてそれ程悪くはない。少くとも入射角 45° では QAD の方がよい。
- ⑥ 鉛遮蔽体の場合、DIAC コードは 8 ケース全部、QAD コードは 8 ケース中の 7 ケースまで、測定値を下廻る値を出している。他の遮蔽体について過小評価になっているケースは、DIAC については鉄で 3 ケース、QAD はコンクリートで 1 ケースである。
- ⑦ 遮蔽体の原子量と測定値に対する一致度の間に何らかの関係は無いだろうか。

これらの問題点或いは疑問を少しづつでも解決する事によって、RADHEAT システムの信頼性は次第に明瞭に検証される事になると思われる。

参考文献

- (1) Johnson, W.R., Risher, D.H., Rogers, J.E., and Thompson, W.L.: "Gamma-Ray Attenuation at Energies of Approximately 6 and 8 MeV", Nucl. Sci. Eng. 43, 32 (1971).
- (2) 田中俊一他：遮蔽ベンチマーク問題
"鉄、鉛およびコンクリート中でのガンマ線の減衰", JAERI-M 7843 p.175 (1978).

表 2.12.1 捕獲ガンマ線を小数群スペクトル表示にした際の
平均エネルギーと平均強度

Source Name	Ni-Series A		Ni-Series B		Ti-Series A		Ti-Series B	
Number of Groups	E _j (MeV)	N _j						
4 or 5	8.8	0.58	8.9	0.59	7.4	0.06	7.7	0.04
	7.9	0.21	7.8	0.17	6.6	0.79	6.8	0.42
	6.9	0.13	6.7	0.16	6.0	0.10	6.4	0.34
	5.9	0.060	4.8	0.08	4.8	0.04	4.8	0.09
	4.3	0.02			3.1	0.01	1.8	0.11
2	8.6	0.8			6.6	0.94		
	6.5	0.2			4.5	0.06		
1	8.2	1.0	8.0	1.0	6.5	1.0	6.0	1.0

表 2.12.2 最適配置におけるナロー・ビーム測定の結果

Shield Thickness (g/cm ²)	Ti - Series A	Ni - Series B
Concrete Shield		
0	1	1
25.5	0.49(2.3)*	0.52(2.3)
50.0	0.27(2.6)	0.29(2.6)
74.4	0.14(2.8)	0.16(2.8)
98.9	0.073(3.3)	0.086(3.3)
147.7	0.020(4.5)	0.027(4.5)
197.0	0.0058(6.1)	0.0078(6.0)
241.1	0.0017(8.4)	0.0029(7.8)
Iron Shield		
0	1	1
19.7	0.55(2.3)	0.56(2.3)
39.5	0.30(2.6)	0.31(2.6)
79.0	0.092(3.6)	0.094(3.5)
118.6	0.027(5.1)	0.028(5.1)
158.1	0.0079(7.3)	0.0086(7.4)
177.9	0.0045(8.6)	0.0048(8.6)
197.6	0.0024(10)	0.0025(10)
Lead Shield		
0	1	1
29.2	0.28(2.5)	0.26(2.5)
58.3	0.075(3.0)	0.066(3.0)
87.5	0.021(4.3)	0.017(4.4)
116.7	0.0055(5.8)	0.0041(5.9)
145.8	0.0016(8.0)	0.0011(8.5)

*Numbers in parentheses are fractional standard deviations in percent.

表 2.12.3 遮蔽厚

(単位 cm)

Shield Material	Concrete	Iron	Lead
T1	10.94	2.51	2.57
T2	21.46	5.03	5.14
T3	31.93	10.05	7.71
T4	42.40	15.09	10.28
T5	63.39	20.12	12.85
T6	84.55	22.63	15.63
T7	103.48	25.14	
T8		30.15	

表 2.12.5 物質の組成

物質	比重 (g/cm ³)	原子密度 (atoms/cm ³)
鉄	7.86	8.48×10^{22}
鉛	11.35	3.30×10^{22}

表 2.12.6 ANL-5800に記されているタイプー1コンクリートの核種組成

Nuclide	Atomic density (atoms/cm ³)	Nuclide	Atomic density (atoms/cm ³)
H	2.892×10^{21}	Al	2.657×10^{20}
O in water	1.446×10^{21}	Si	9.394×10^{21}
O in dry mix	4.182×10^{22}	S	3.607×10^{19}
C	6.521×10^{21}	Ca	8.733×10^{21}
Mg	1.204×10^{20}	Fe	7.831×10^{19}

Density = 2.33 g/cm³

表2.12.4 エネルギー群構造ヒソース・スペクトル

GROUP	ENERGY RANGE (eV)	SPECTRUM			
		Ni-Series A	Ni-Series-B	Ti-Series A	Ti-Series B
1	1.4000E+07	1.2000E+07	0.0	0.0	0.0
2	1.2000E+07	1.0000E+07	0.0	0.0	0.0
3	1.0000E+07	8.0000E+06	0.58	0.59	0.0
4	8.0000E+06	6.5000E+06	0.34	0.39	0.46
5	6.5000E+06	5.0000E+06	0.06	0.0	0.34
6	5.0000E+06	4.0000E+06	0.02	0.08	0.04
7	4.0000E+06	3.0000E+06	0.0	0.0	0.01
8	3.0000E+06	2.5000E+06	0.0	0.0	0.0
9	2.5000E+06	2.0000E+06	0.0	0.0	0.0
10	2.0000E+06	1.6600E+06	0.0	0.0	0.01
11	1.6600E+06	1.3300E+06	0.0	0.0	0.0
12	1.3300E+06	1.0000E+06	0.0	0.0	0.0
13	1.0000E+06	8.0000E+05	0.0	0.0	0.0
14	3.0000E+05	6.0000E+05	0.0	0.0	0.0
15	6.0000E+05	4.0000E+05	0.0	0.0	0.0
16	4.0000E+05	3.0000E+05	0.0	0.0	0.0
17	3.0000E+05	2.0000E+05	0.0	0.0	0.0
18	2.0000E+05	1.0000E+05	0.0	0.0	0.0
19	1.0000E+05	5.0000E+04	0.0	0.0	0.0
20	5.0000E+04	2.0000E+04	0.0	0.0	0.0

表 2.12.7 フラックスの線量変換係数

	Average Energy MeV	K(E) (mrem/hr/photon/cm ² s)
1	13	9.09×10^{-3}
2	11	9.09×10^{-3}
3	9	8.33×10^{-3}
4	7.25	7.08×10^{-3}
5	6.75	6.72×10^{-3}
6	4.5	5.13×10^{-3}
7	3.5	4.35×10^{-3}
8	2.75	3.70×10^{-3}
9	2.25	3.11×10^{-3}
10	1.83	2.80×10^{-3}
11	1.5	2.44×10^{-3}
12	1.17	1.96×10^{-3}
13	0.9	1.61×10^{-3}
14	0.7	1.28×10^{-3}
15	0.5	9.09×10^{-4}
16	0.35	6.45×10^{-4}
17	0.25	4.25×10^{-4}
18	0.15	2.38×10^{-4}
19	0.075	1.17×10^{-4}
20	0.035	1.94×10^{-4}

表 2.12.8 計算ケース (一次元平板モデル)

Material	Boundary (cm)	Thickness (cm)	Number of meshes			
			Case-1	Case-2	Case-3	
Concrete (1)	10.94	10.94	11	20	6	
	" (1)	21.46	10.52	11	20	6
	" (2)	31.93	10.47	11	20	6
	" (2)	42.40	10.47	11	20	6
	" (3)	63.39	20.99	21	40	11
	" (4)	84.55	21.16	21	40	11
	" (5)	103.48	18.93	19	40	10
Iron	2.51	2.51	3	5	2	
	" (1)	5.03	2.52	3	5	3
	" (2)	10.05	5.02	5	10	3
	" (3)	15.09	5.04	5	10	3
	" (4)	20.12	5.03	5	10	3
	" (5)	22.63	2.51	3	5	2
	(5)	25.14	2.51	3	5	2
		30.15	5.01	5	10	3
Lead	2.57	2.57	5	10	3	
	" (2)	5.14	2.57	5	10	3
	" (3)	7.71	2.57	5	10	3
	" (4)	10.28	2.57	5	10	3
	" (5)	12.85	2.57	5	10	3
		15.42	2.57	5	10	3

表 2.12.9 フラックスの線量変換係数

Source Name	Ni-Series A			Ni-Series B			Ti-Series A			Ti-Series B		
	Energy (MeV)	K (E) (mrrem/hr/photon/cm ²)	Energy (MeV)	K (E) (mrrem/hr/photon/cm ²)	Energy (MeV)	K (E) (mrrem/hr/photon/cm ²)	Energy (MeV)	K (E) (mrrem/hr/photon/cm ²)	Energy (MeV)	K (E) (mrrem/hr/photon/cm ²)	Energy (MeV)	K (E) (mrrem/hr/photon/cm ²)
1	8.8	8.197 × 10 ⁻³	8.9	8.264 × 10 ⁻³	7.4	7.194 × 10 ⁻³	7.7	7.435 × 10 ⁻³				
2	7.9	7.605 × 10 ⁻³	7.8	7.519 × 10 ⁻³	6.6	6.623 × 10 ⁻³	6.8	6.757 × 10 ⁻³				
3	6.9	6.826 × 10 ⁻³	6.7	6.689 × 10 ⁻³	6.0	6.25 × 10 ⁻³	6.4	6.494 × 10 ⁻³				
4	5.9	6.173 × 10 ⁻³	4.8	5.376 × 10 ⁻³	4.8	5.376 × 10 ⁻³	4.8	5.376 × 10 ⁻³				
5	4.3	4.975 × 10 ⁻³			3.1	5.714 × 10 ⁻³	1.7	2.645 × 10 ⁻³				

表 2.12.10 解析結果のまとめ

遮蔽体	γ 線の入射角	γ 線源の種類及び解析コード							
		Ti-A		Ti-B		Ni-A		Ni-B	
		D	Q	D	Q	D	Q	D	Q
Concrete	0°	○	×			◎	◎		
Fe	0°	◎	◎	○	△	○	○	◎	○
	30°			○	×			○	○
	45°			△	○			△	◎
Pb	0°	△	◎	×	△	×	△	*	×
	30°	×	△	*	*			*	×
	45°							*	*

注: D DIAC, Q QAD

◎ 測定値との一致が極めて良い。

○ 測定値との一致が良い。

△ 測定値との間に少し差がある。

× 測定値との差が可成りある。

* 測定値との差が極めて大きい。

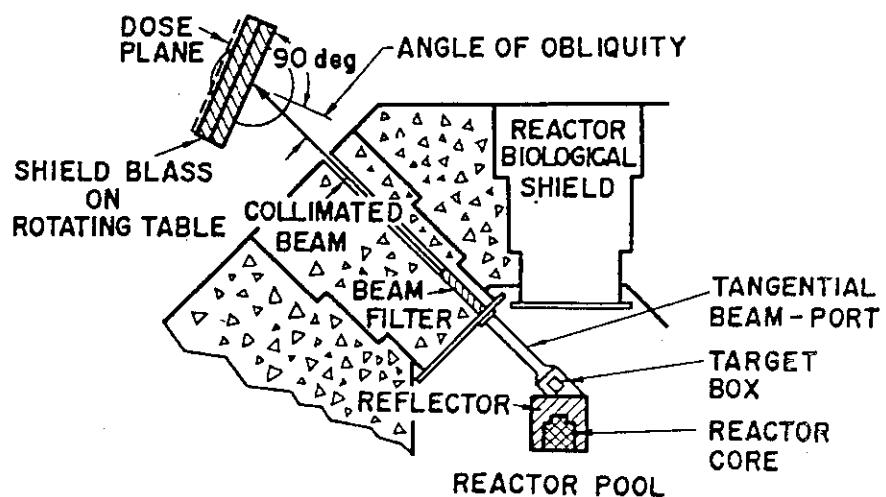


図 2.12.1 バージニア大学原子炉の構造図
—ビームポートと遮蔽実験区域—

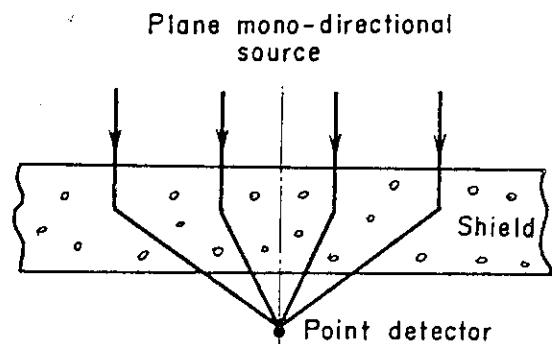


図 2.12.2 単一方向平面状ソースの点状検出器を有する無限平板状遮蔽体の均一入射

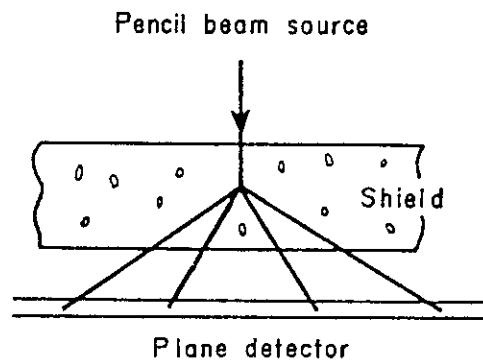


図 2.12.3 単一方向ペンシル状ビームの無限平板検出器を有する平板遮蔽体への入射

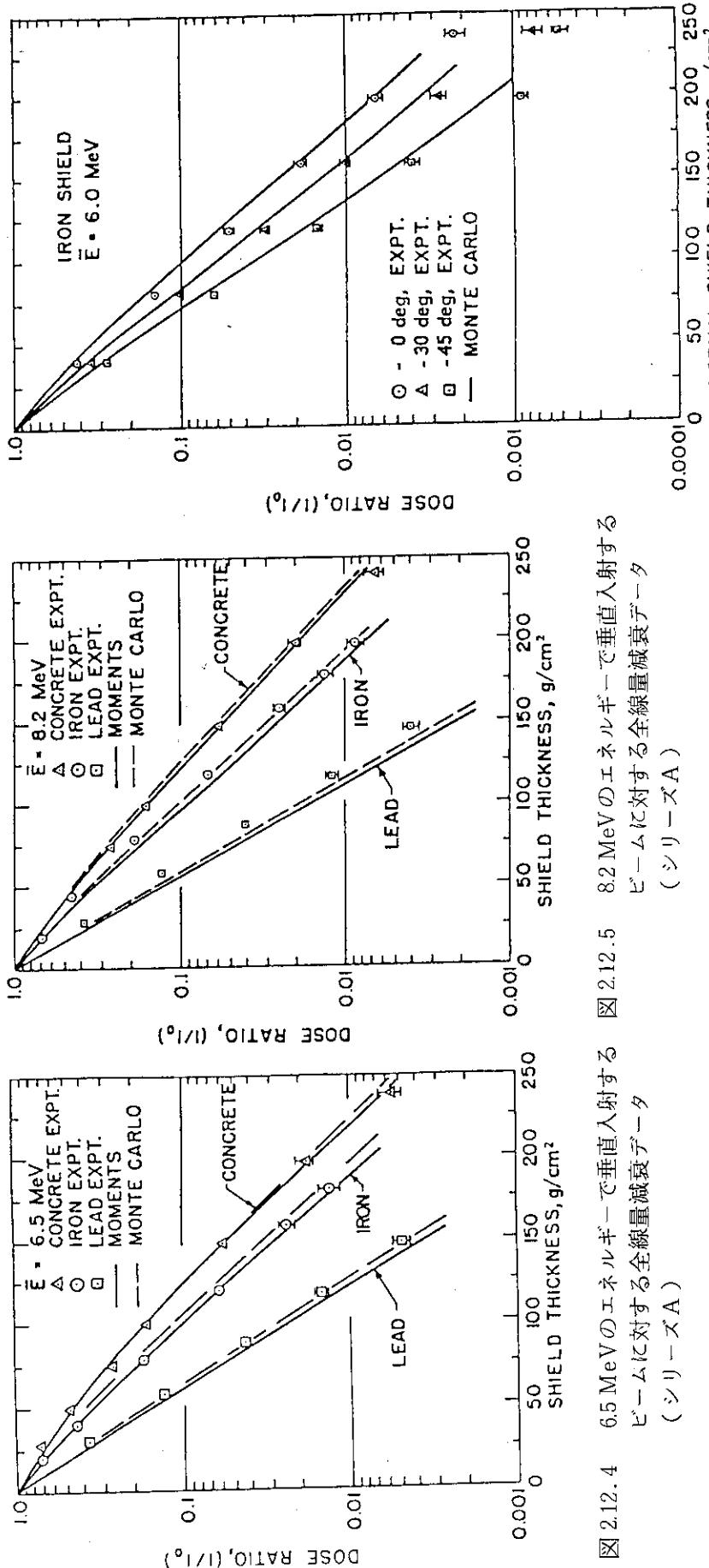


図 2.12. 4 6.5 MeV のエネルギーで垂直入射する
ビームに対する全線量減衰データ
(シリーズ A)

図 2.12. 5 8.2 MeV のエネルギーで垂直入射する
ビームに対する全線量減衰データ
(シリーズ A)

図 2.12. 6 6.0 MeV のエネルギーで垂直入射する
ビームに対する全線量減衰データ
(シリーズ B)

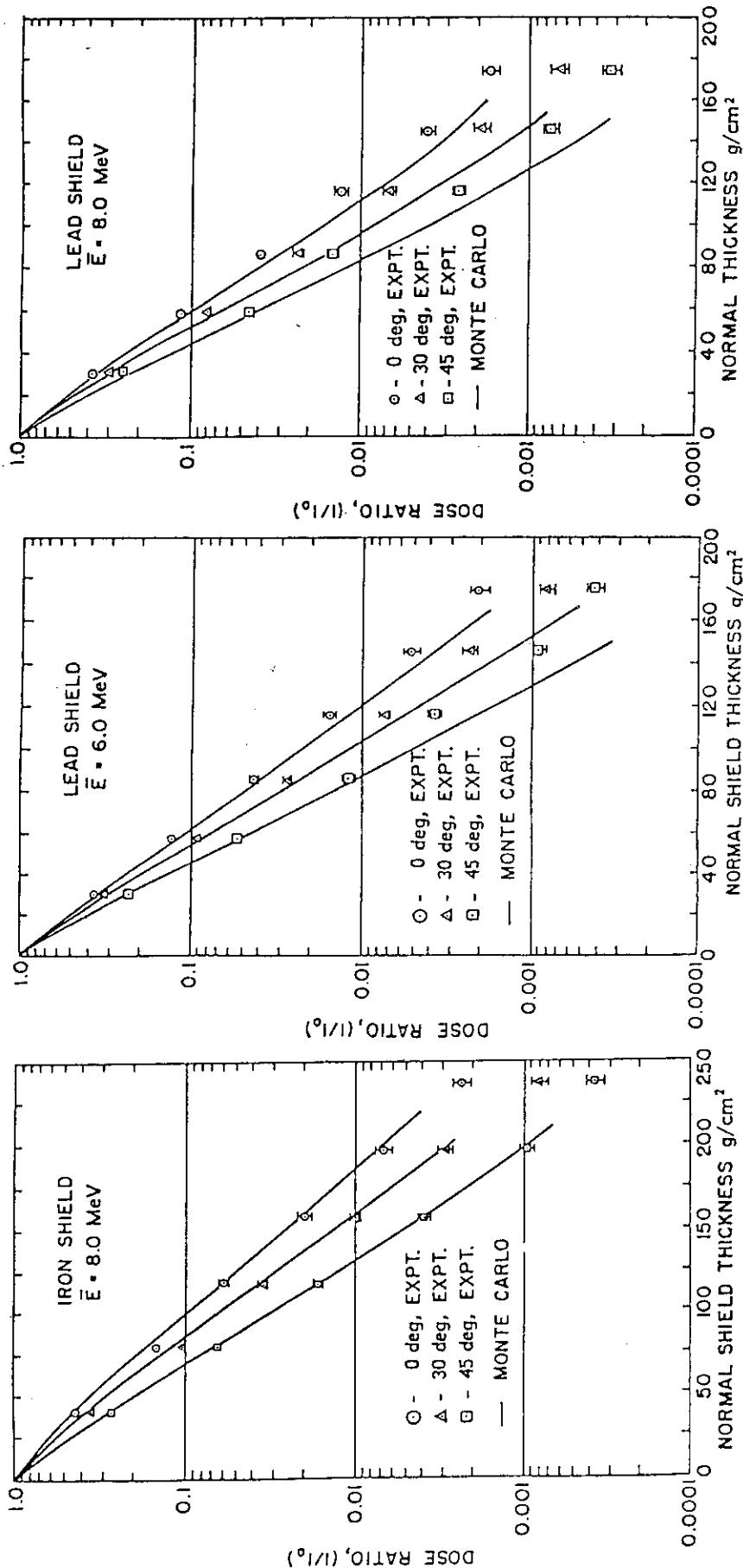


図 2.12.7 8.0 MeV のエネルギーで鉄遮蔽材に傾斜角 0, 30, 45 度で入射するビームに対する全線量減衰データ (シリーズ B)

図 2.12.8 6.0 MeV のエネルギーで鉄遮蔽材に傾斜角 0, 30, 45 度で入射するビームに対する全線量減衰データ (シリーズ B)

図 2.12.9 8.0 MeV のエネルギーで鉛遮蔽材に傾斜角 0, 30, 45 度で入射するビームに対する全線量減衰データ (シリーズ B)

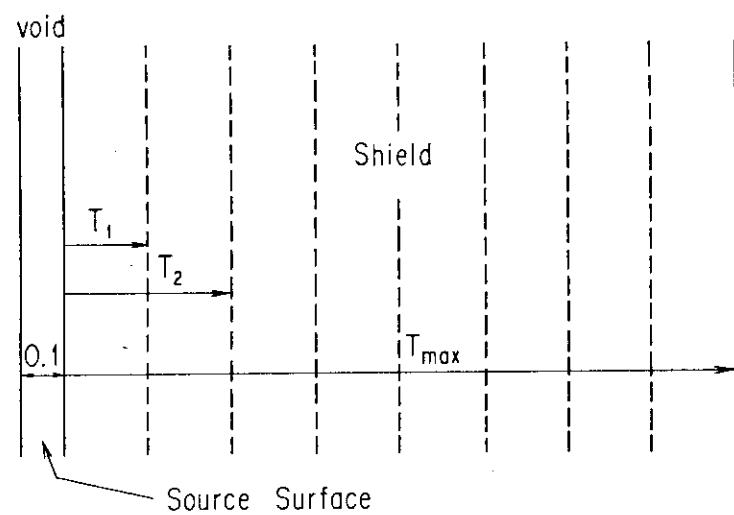


図 2.12.10 D I A C 用計算体系

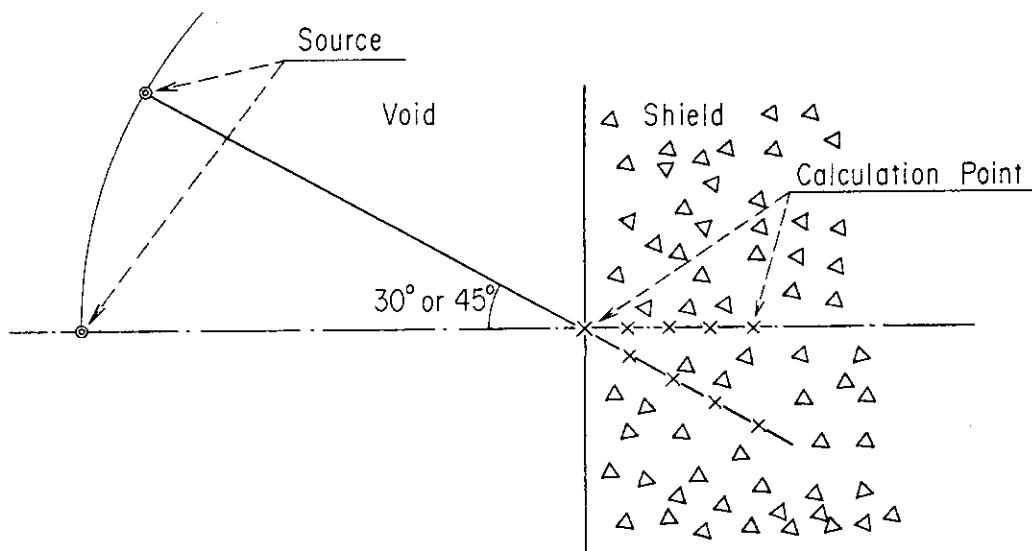


図 2.12.11 Q A D のための計算モデル

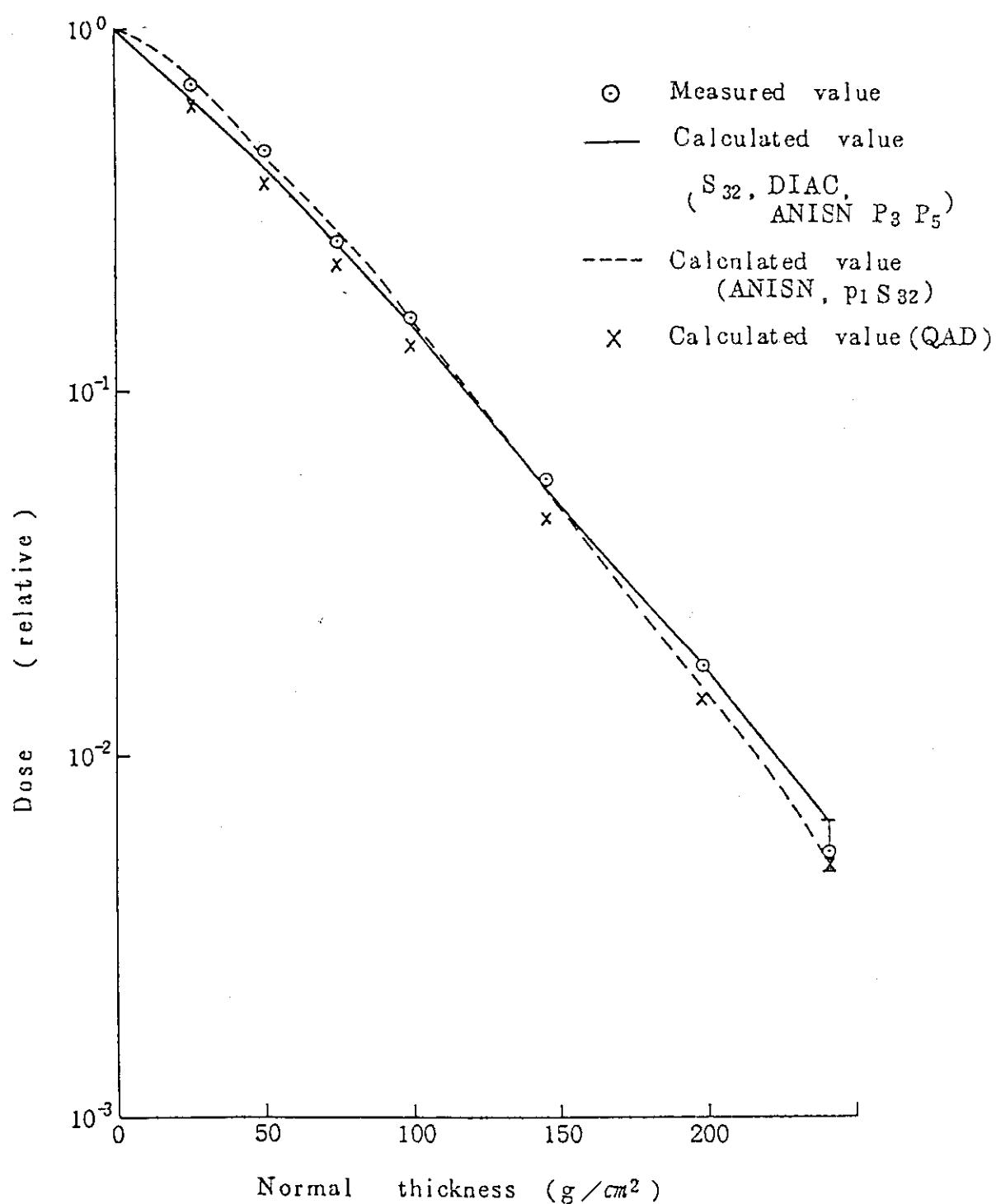


図 2.12.12 Ti シリーズ A ガンマ線ソース (0°) に対するコンクリート遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

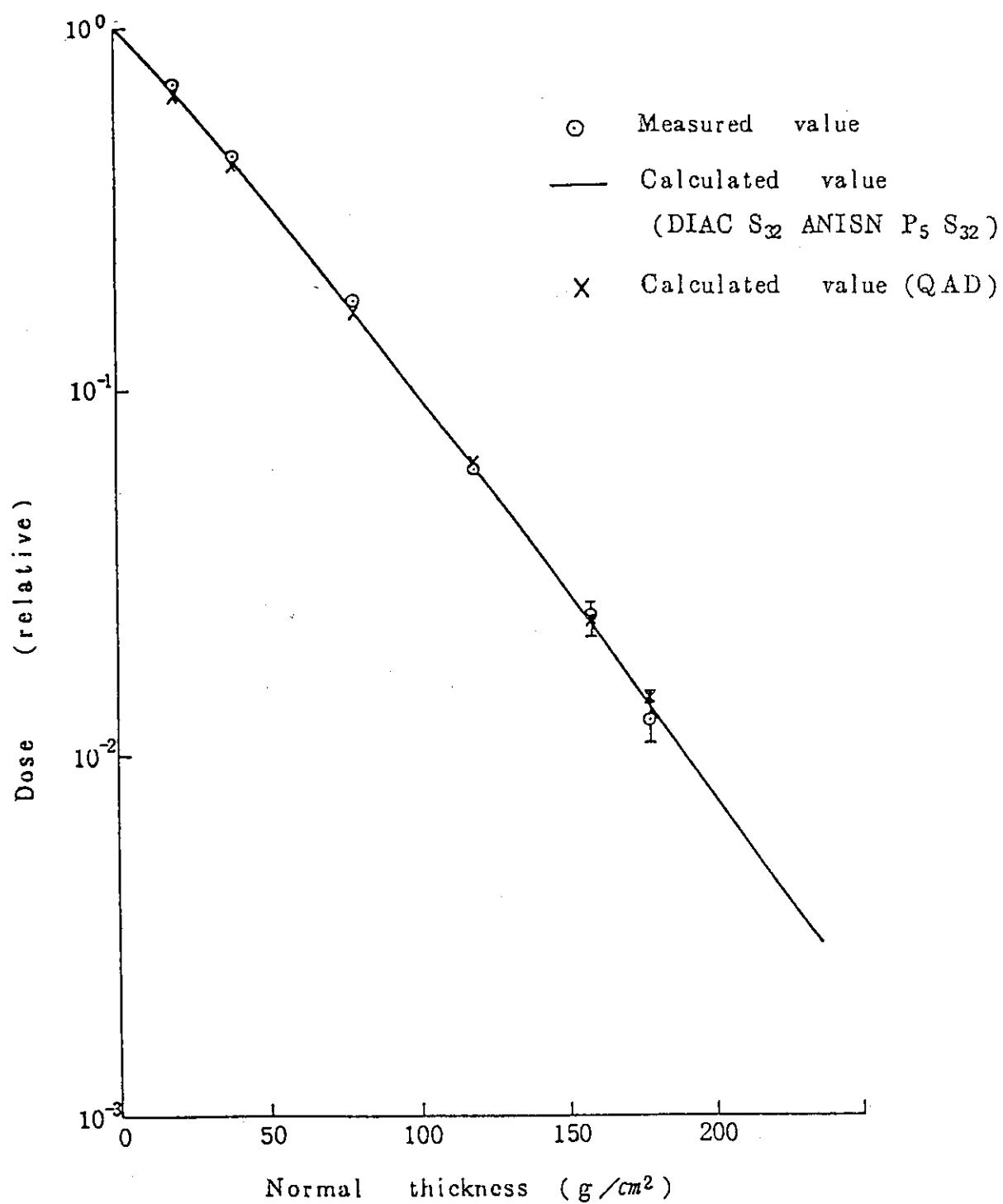


図 2.12.13 Ti シリーズ A ガンマ線ソース (0°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

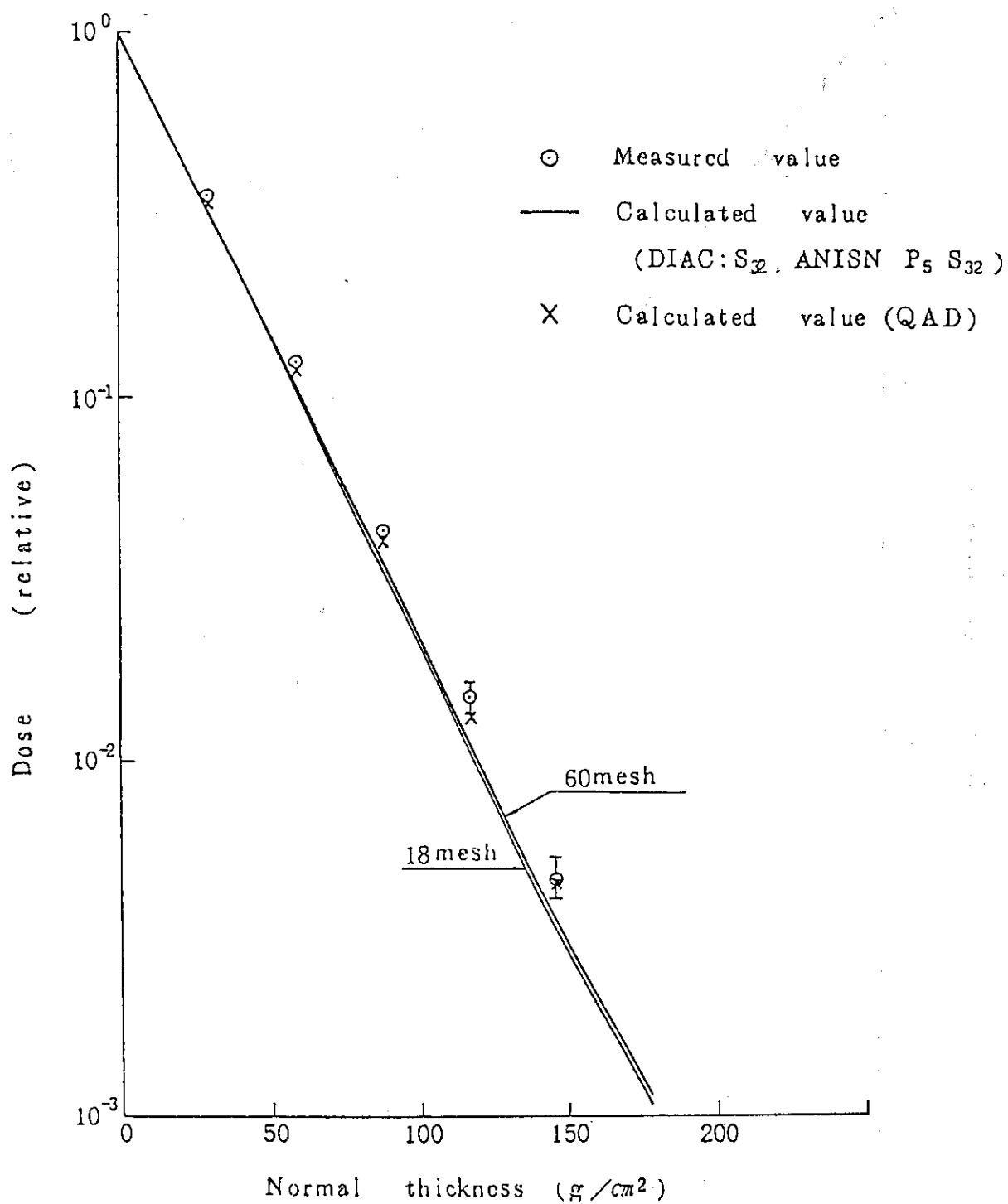


図 2.12.14 Ti シリーズ A ガンマ線ソース (0°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

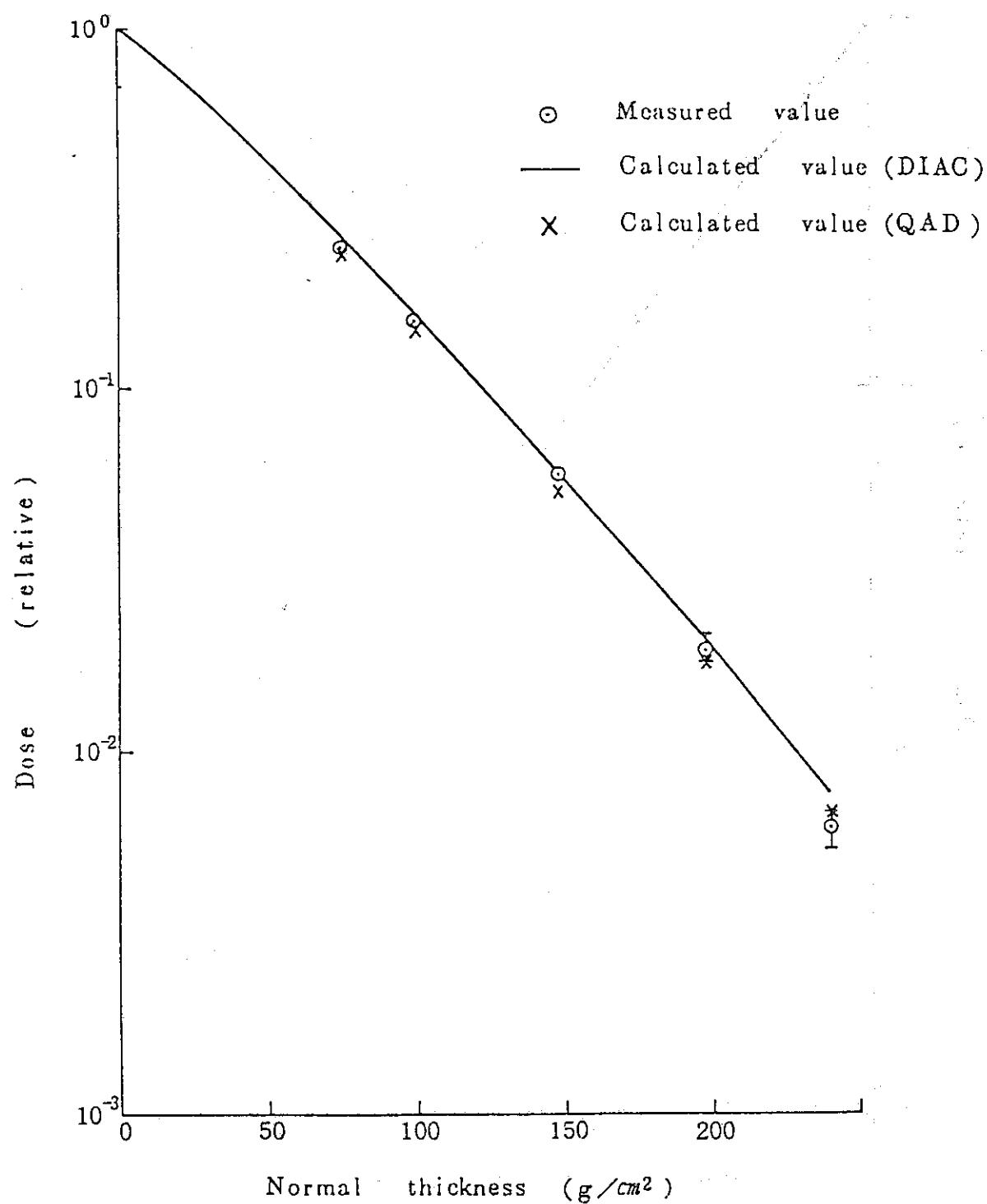


図 2.12.15 Ni シリーズ A ガンマ線ソース (0°) に対するコンクリート遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

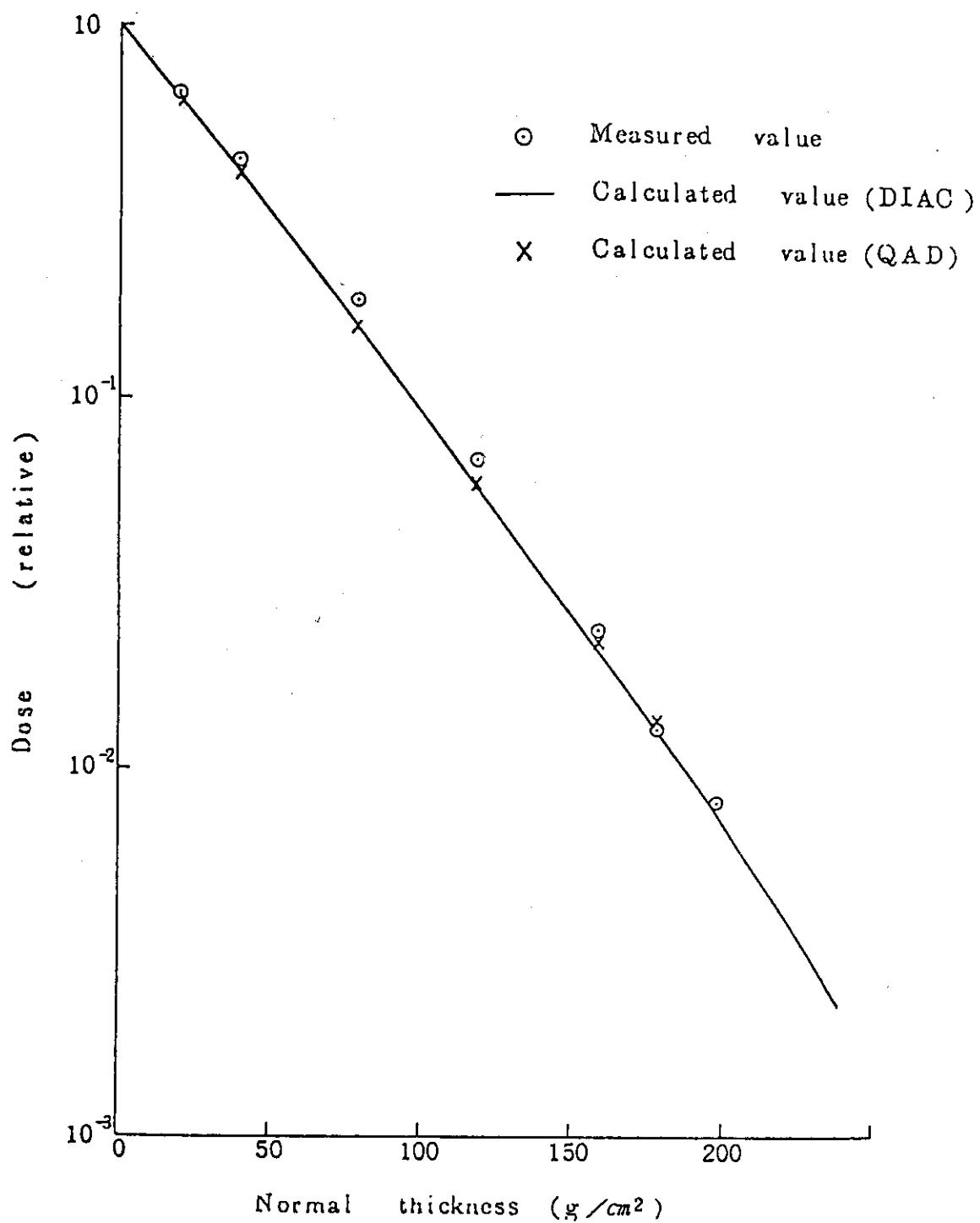


図 2.12.16 Ni シリーズ A ガンマ線ソース (0°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

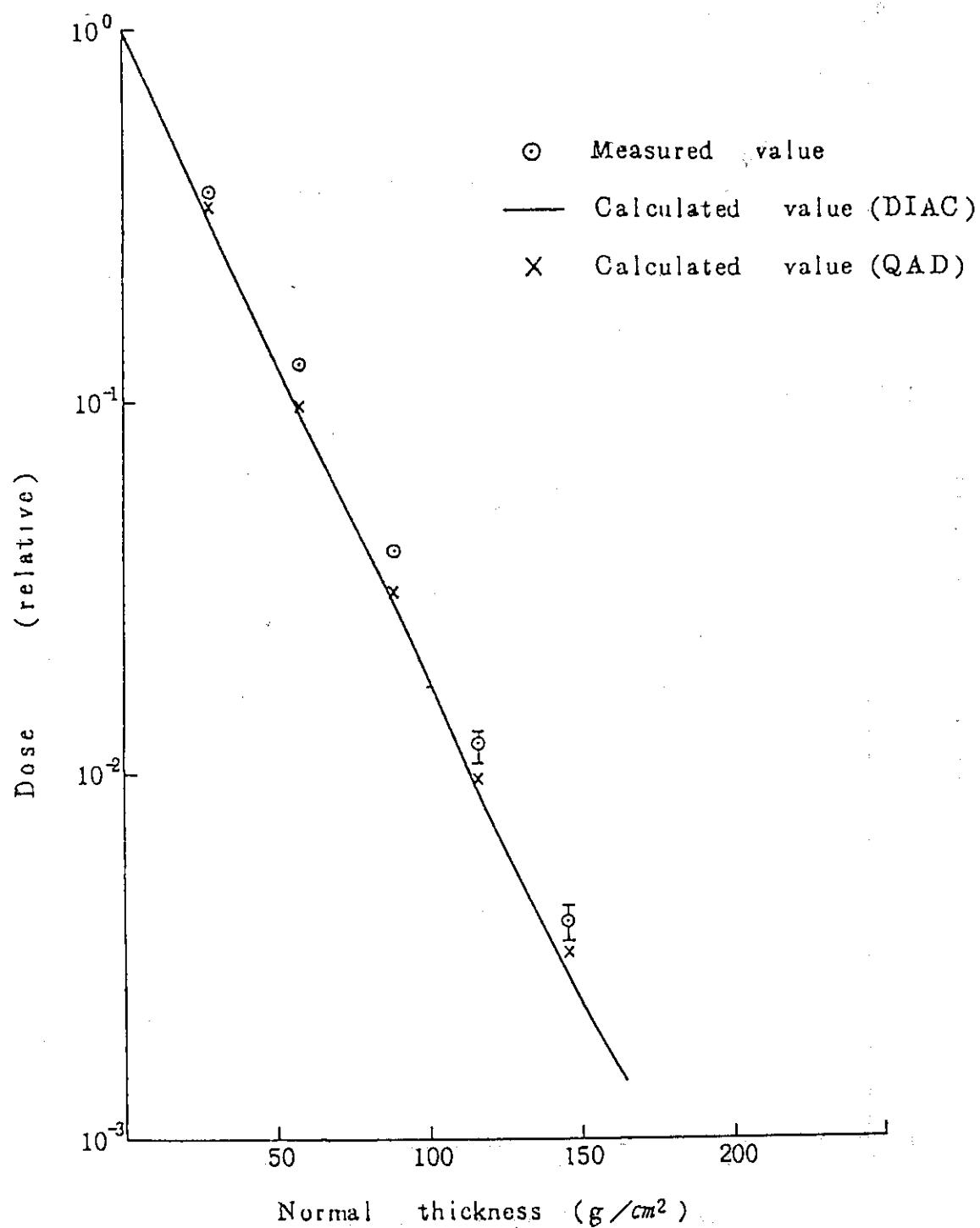


図 2.12.17 Ni シリーズ A ガンマ線ソース (0°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

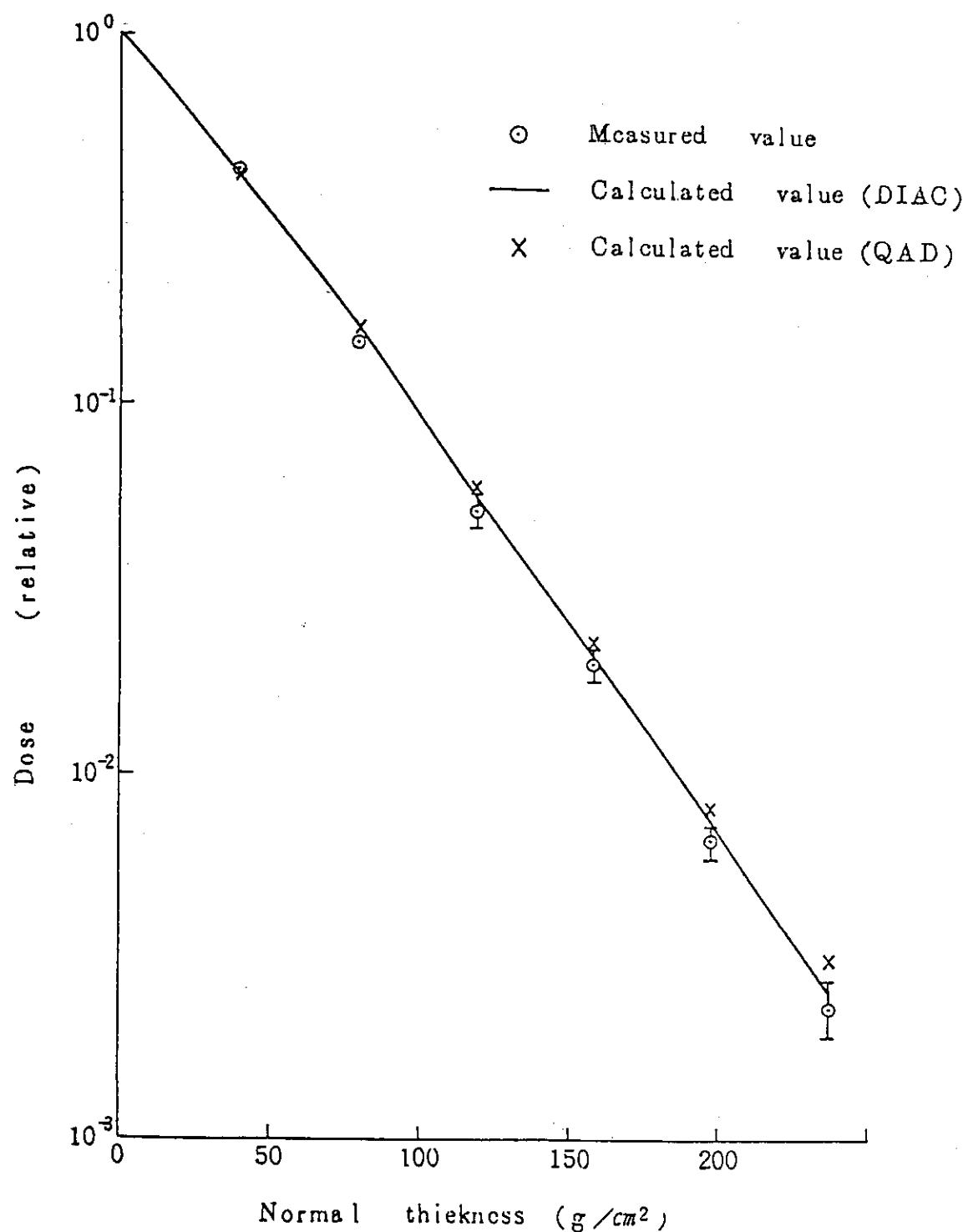


図 2.12.18 Ti シリーズ B ガンマ線ソース (0°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

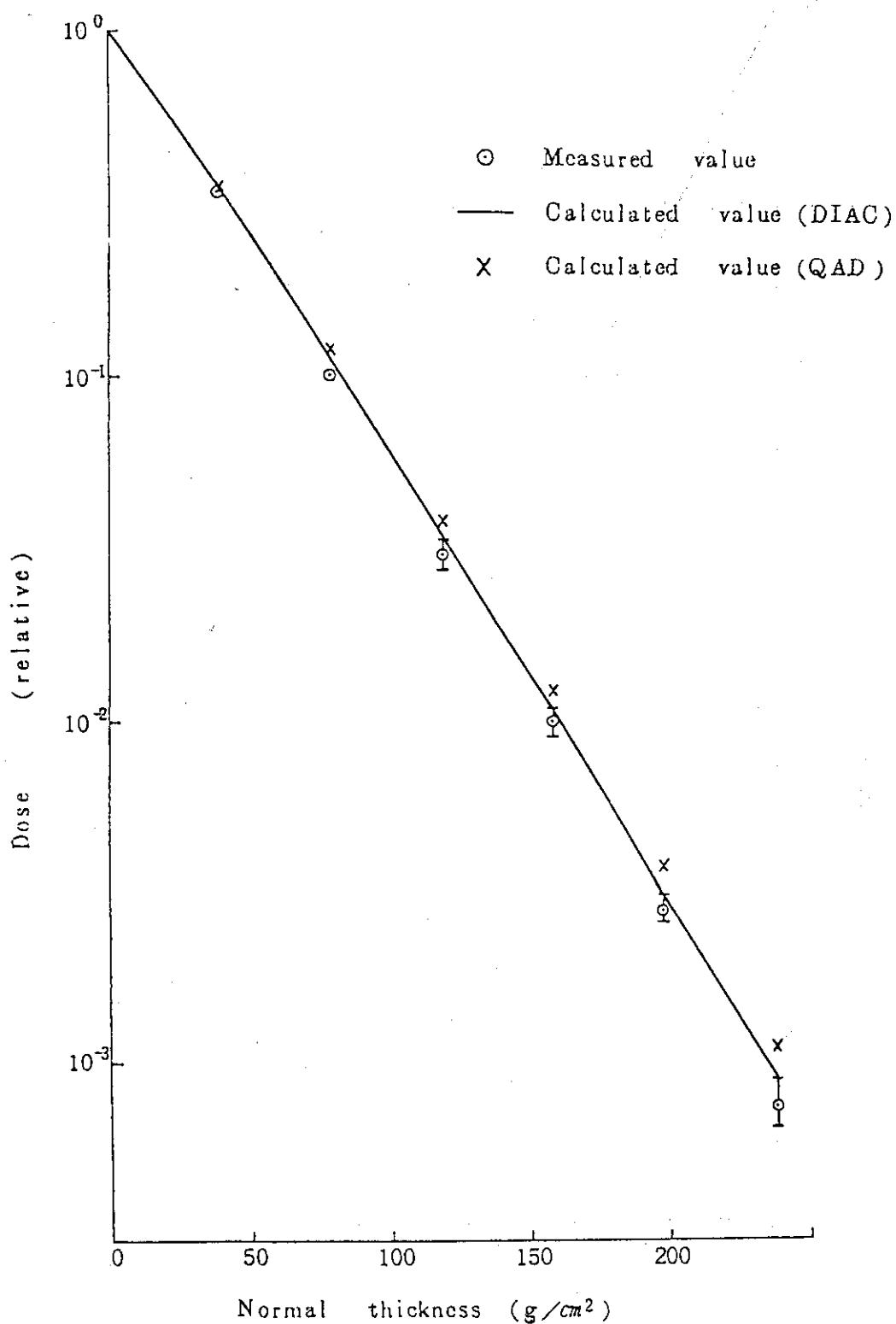


図 2.12.19 Ti シリーズ B ガンマ線ソース (30°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

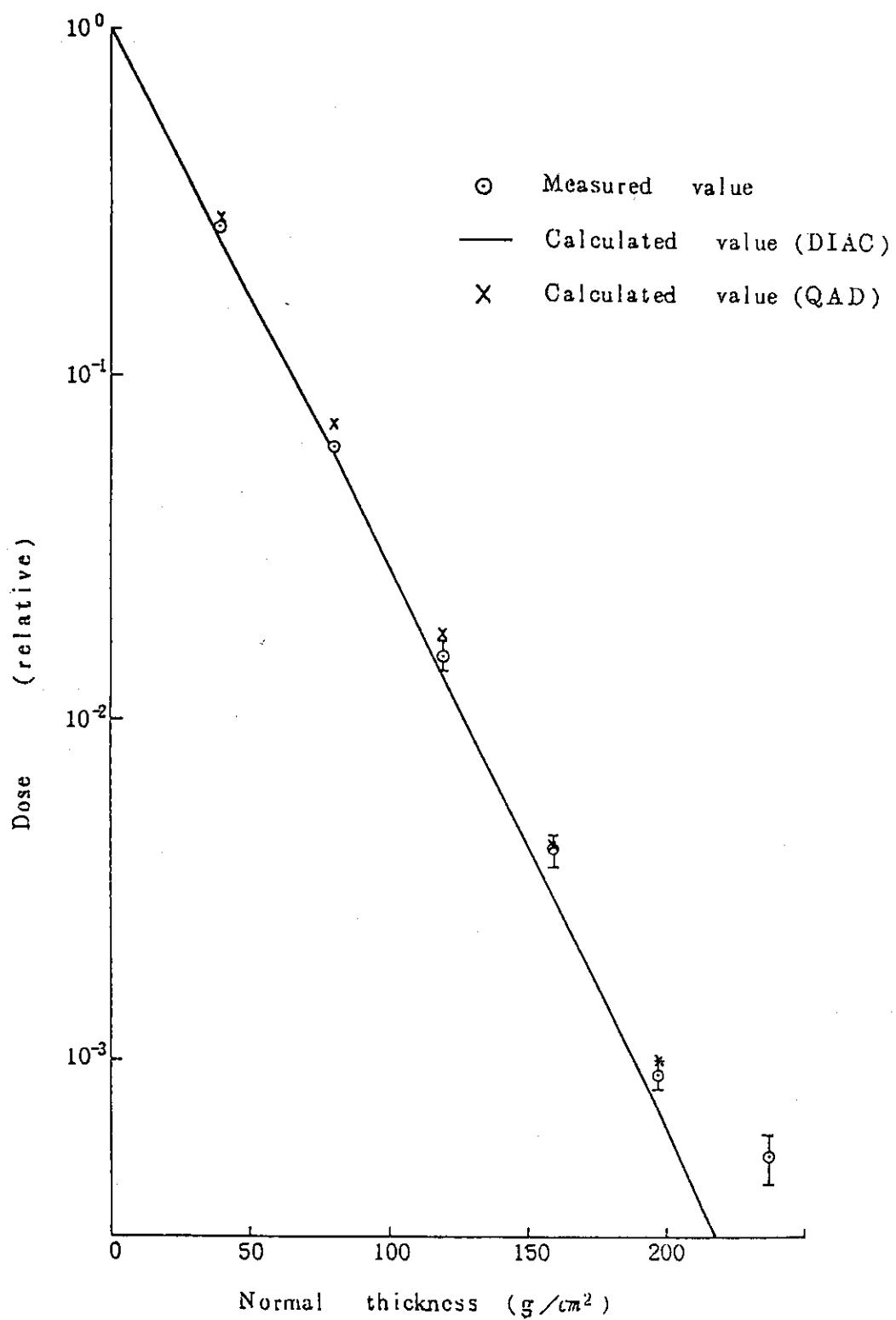


図 2.12.20 Ti シリーズ B ガンマ線ソース (45°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

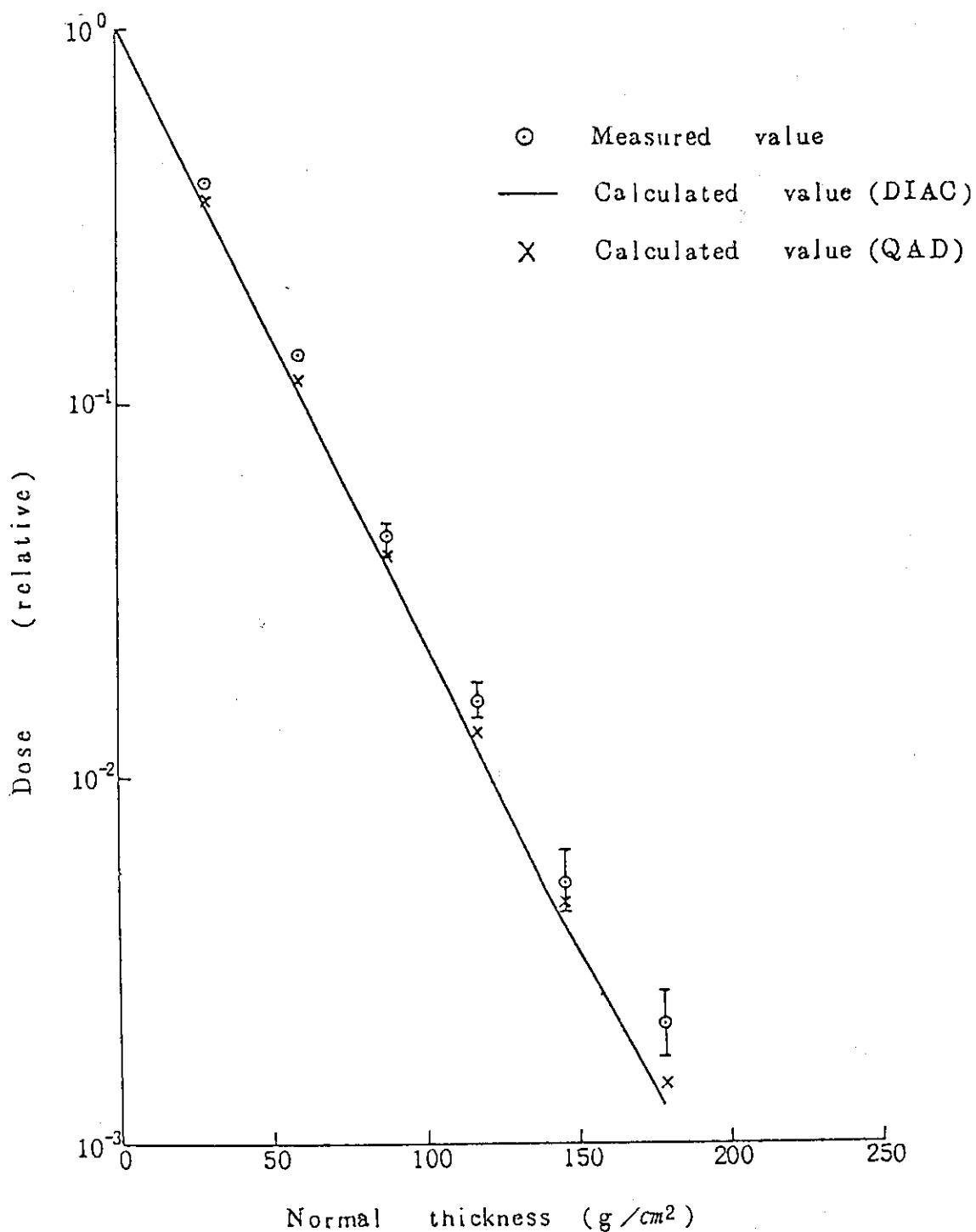


図 2.12.21 Ti シリーズ B ガンマ線ソース (0°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

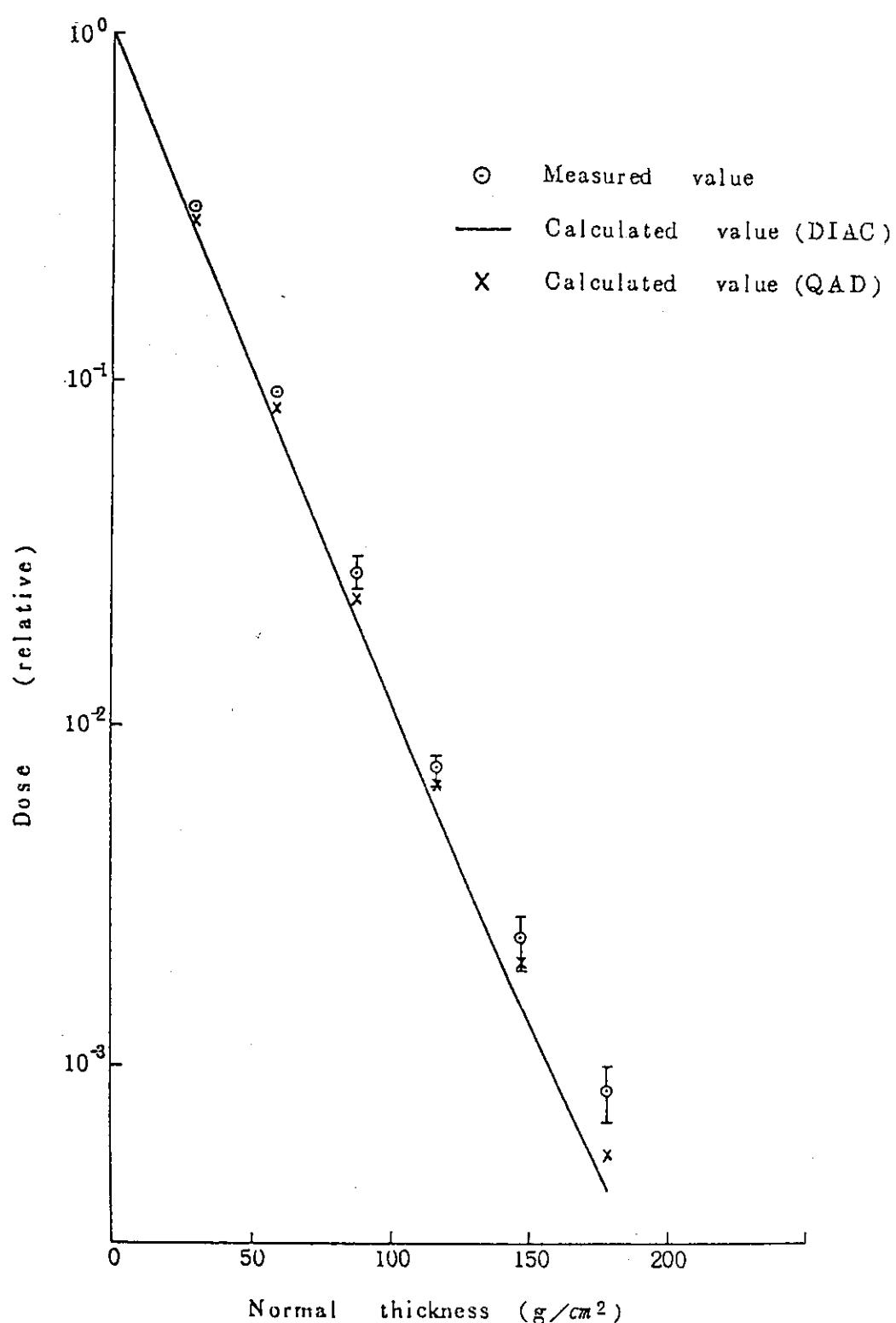


図 2.12.22 Ti シリーズ A ガンマ線ソース (30°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

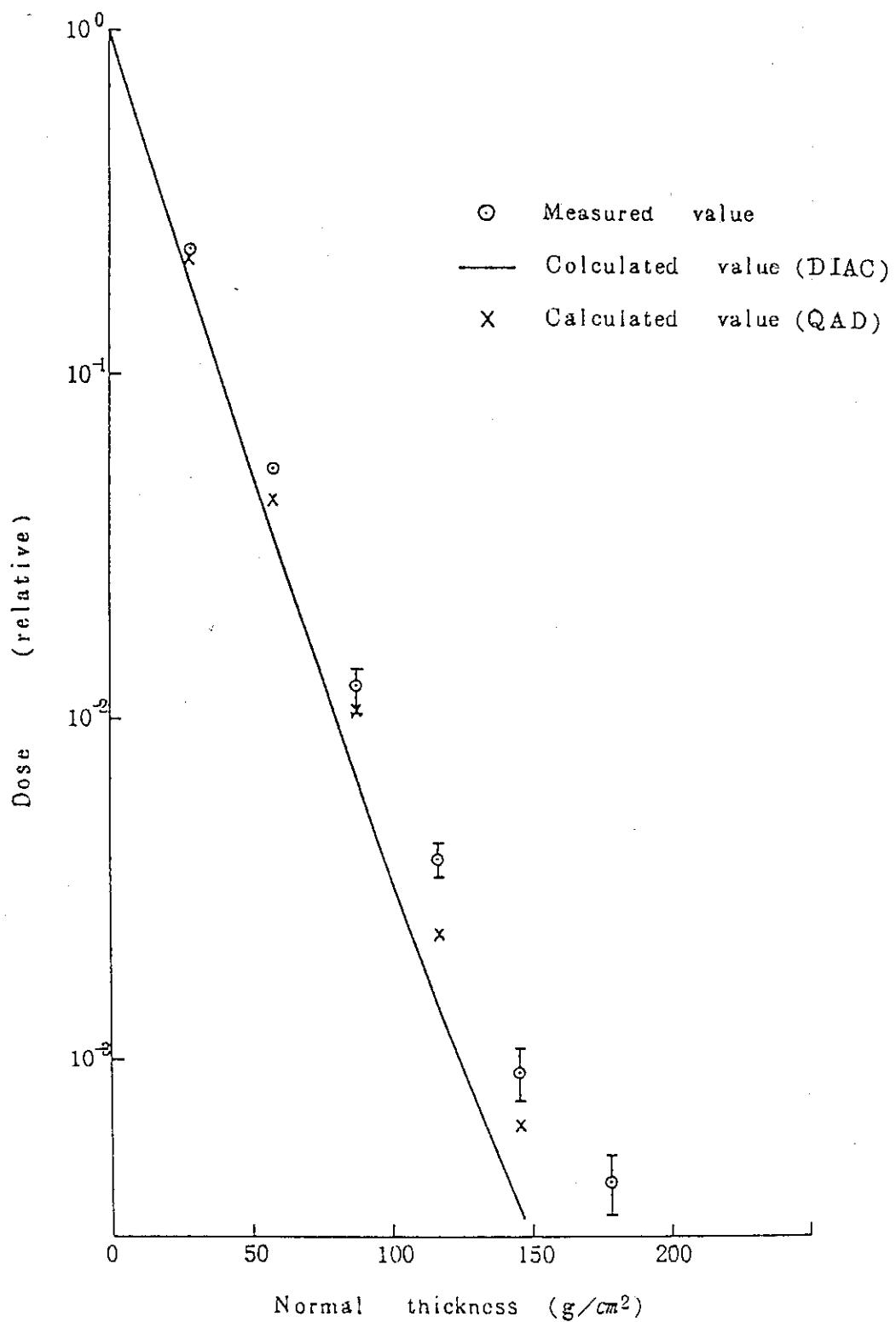


図 2.12.23 Ti シリーズ B ガンマ線ソース (45°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

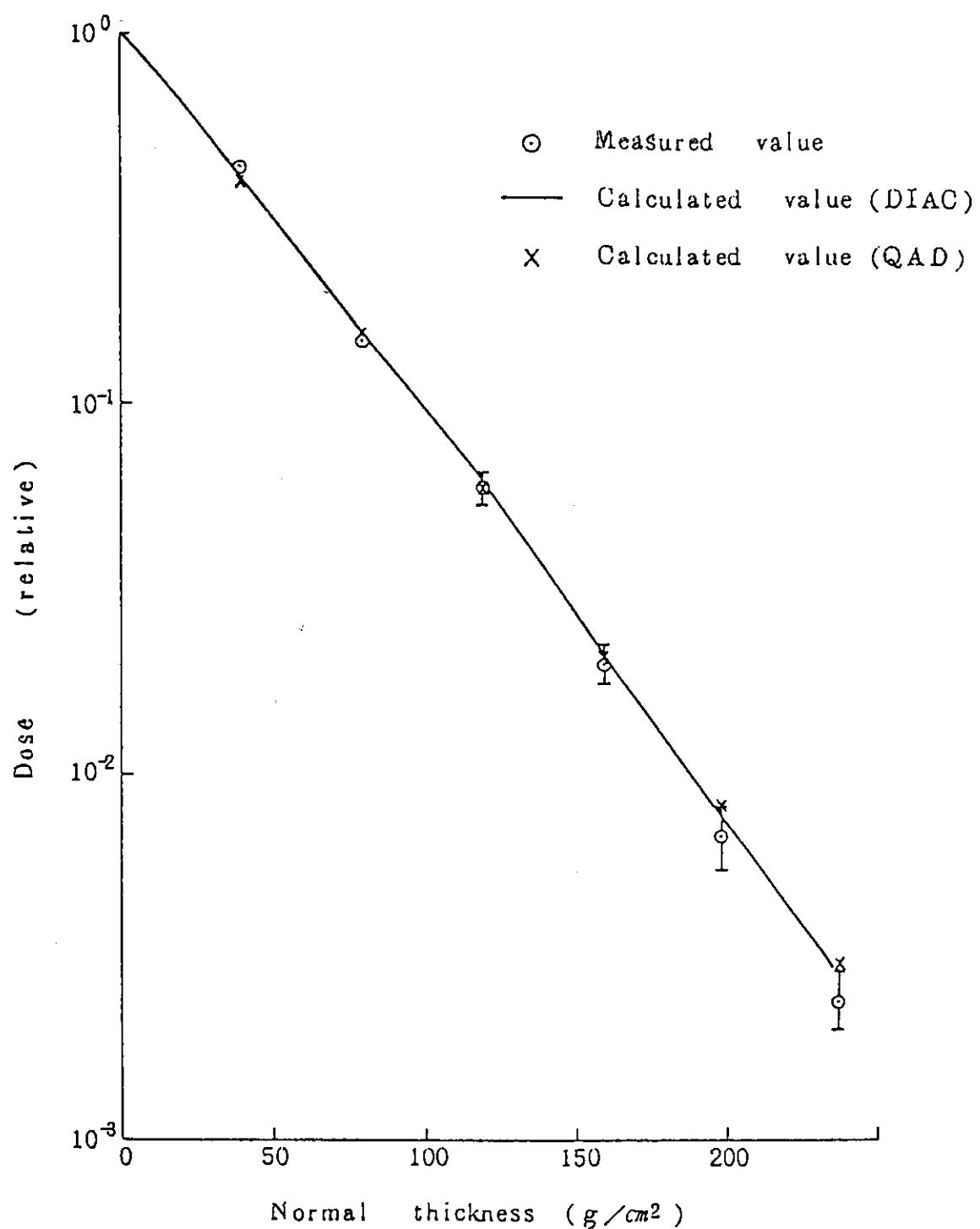


図 2.12.24 Ni シリーズ B ガンマ線ソース (0°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

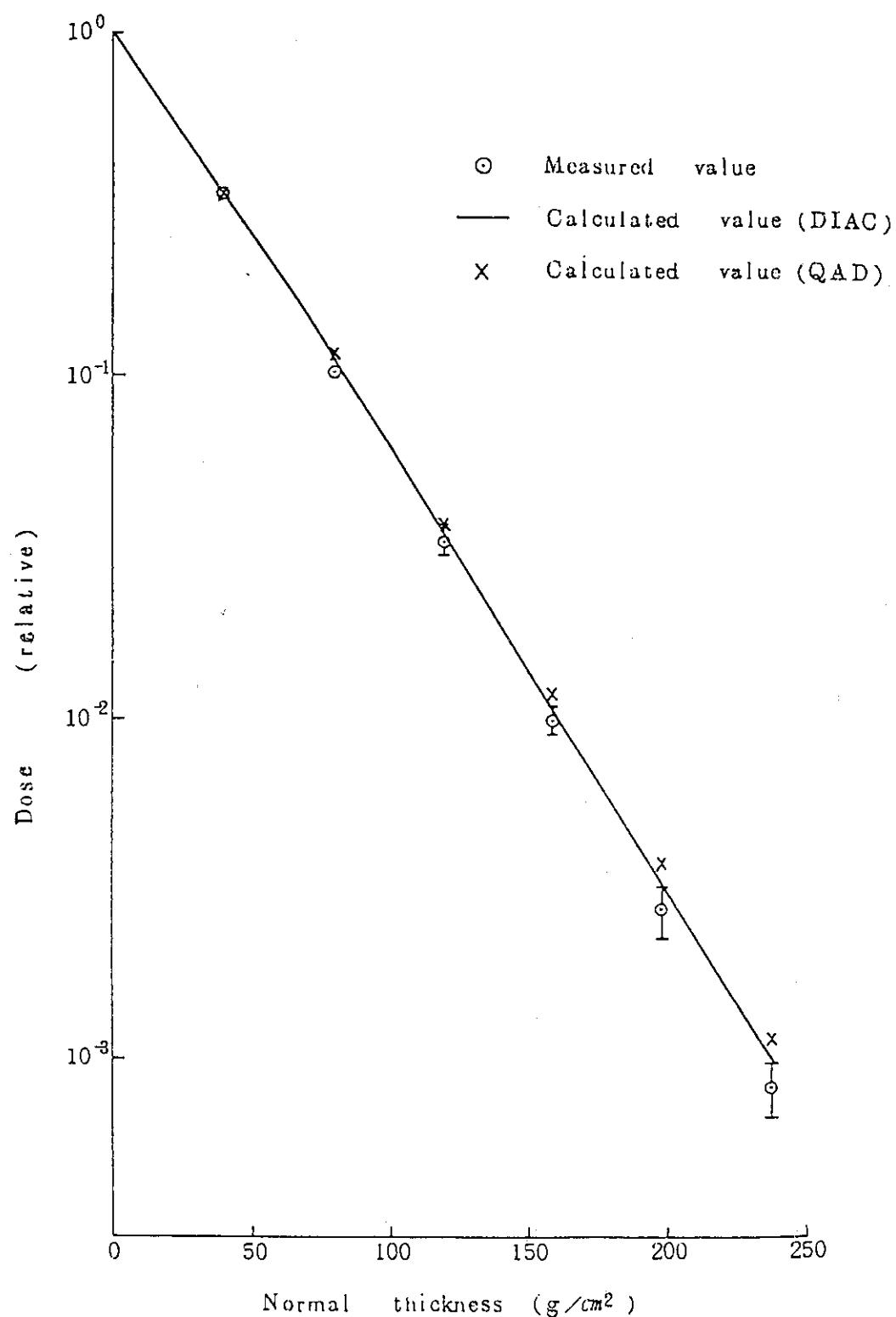


図 2.12.25 Ni シリーズ B ガンマ線ソース (30°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

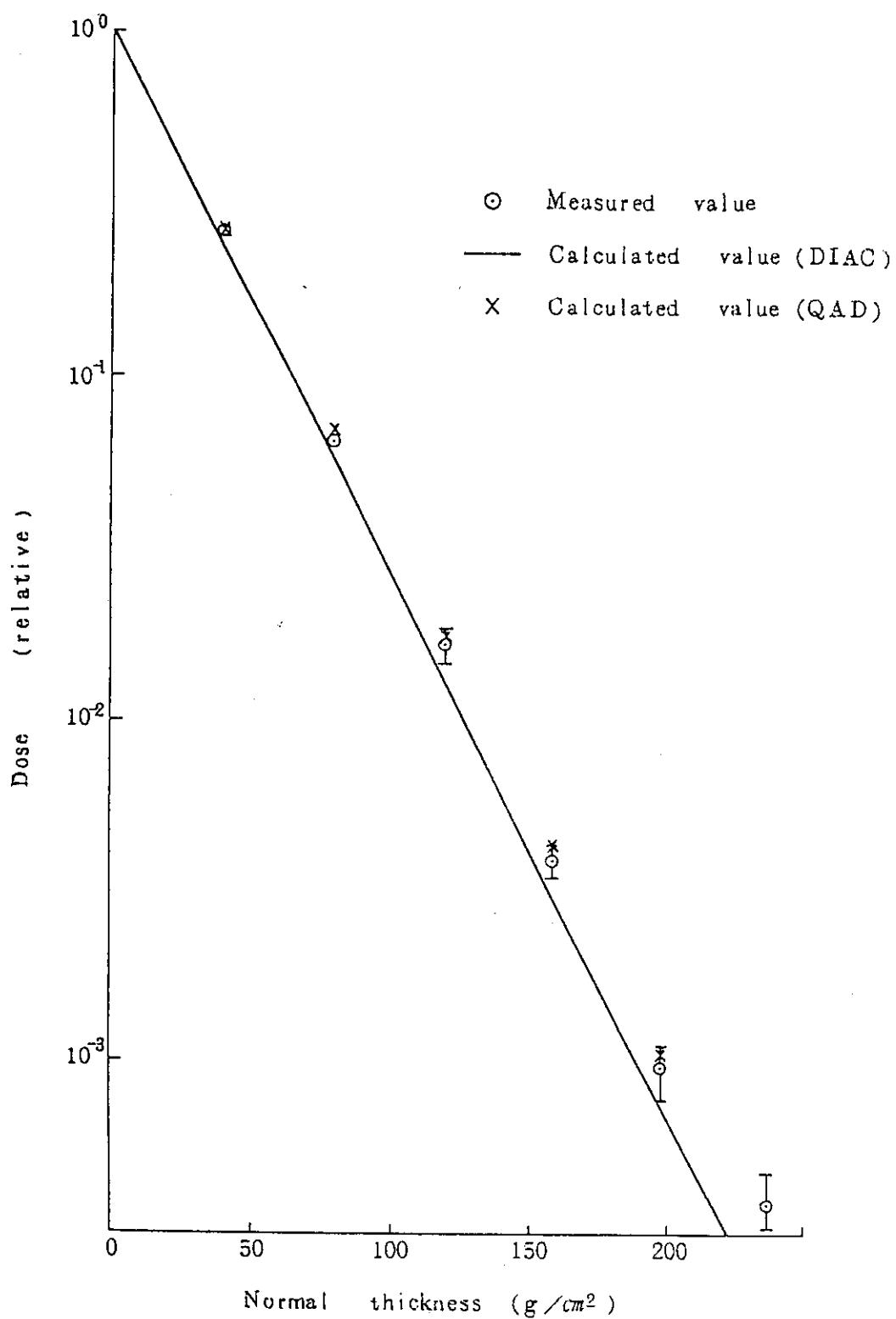


図 2.12.26 Ni シリーズ B ガンマ線ソース (45°) に対する鉄遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

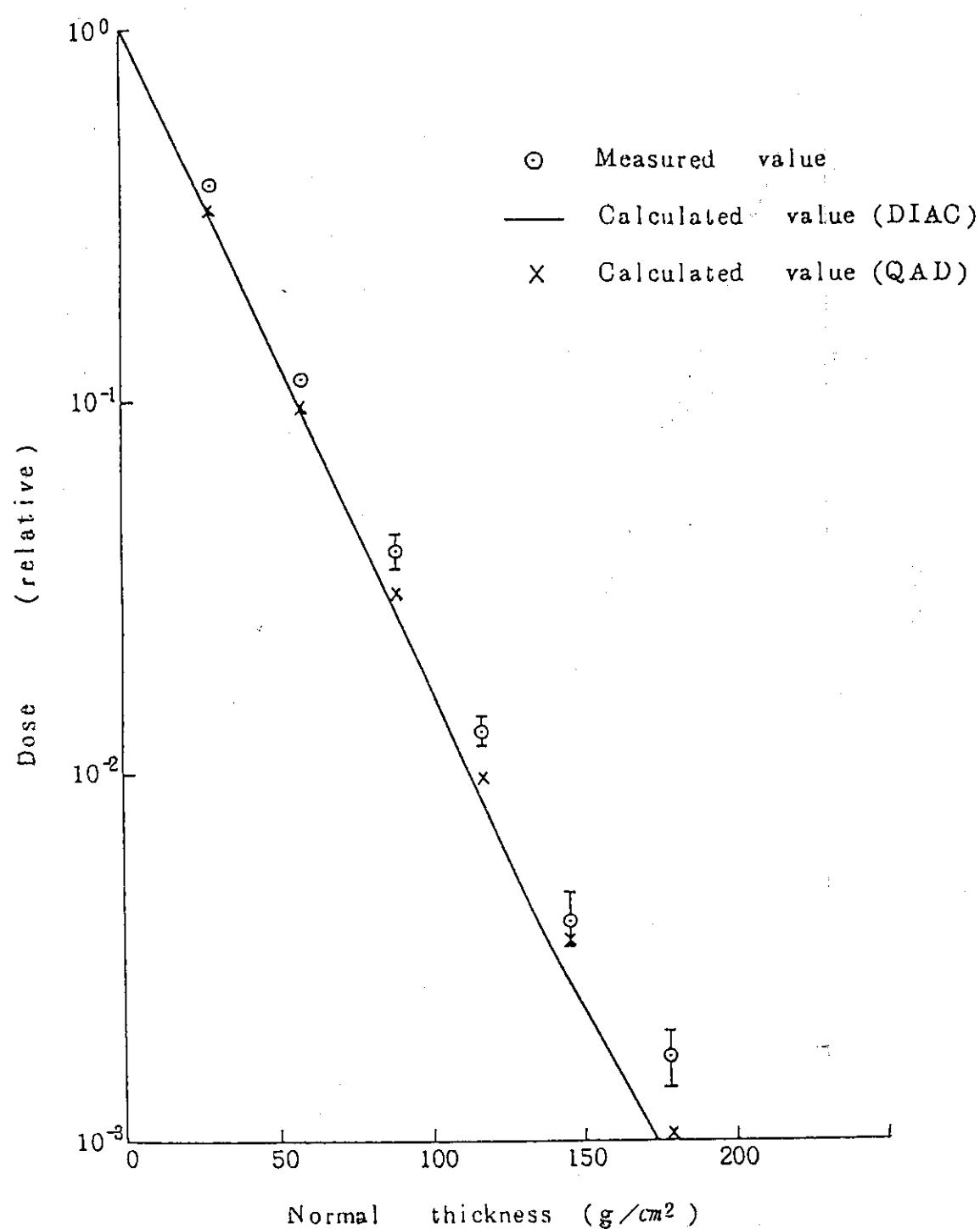


図 2.12.27 Ni シリーズ B ガンマ線ソース (0°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

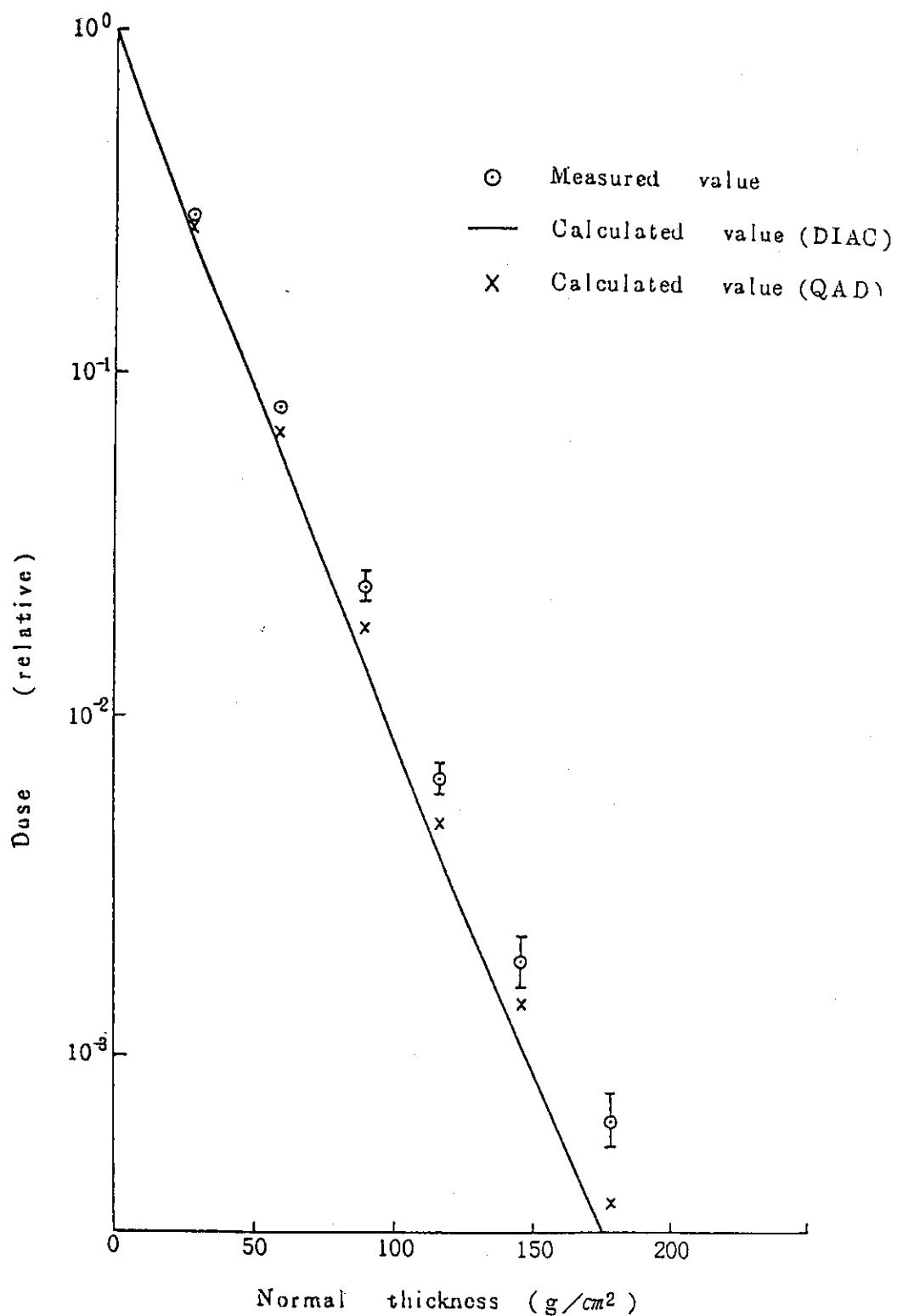


図 2.12.28 Ni シリーズ B ガンマ線ソース (30°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

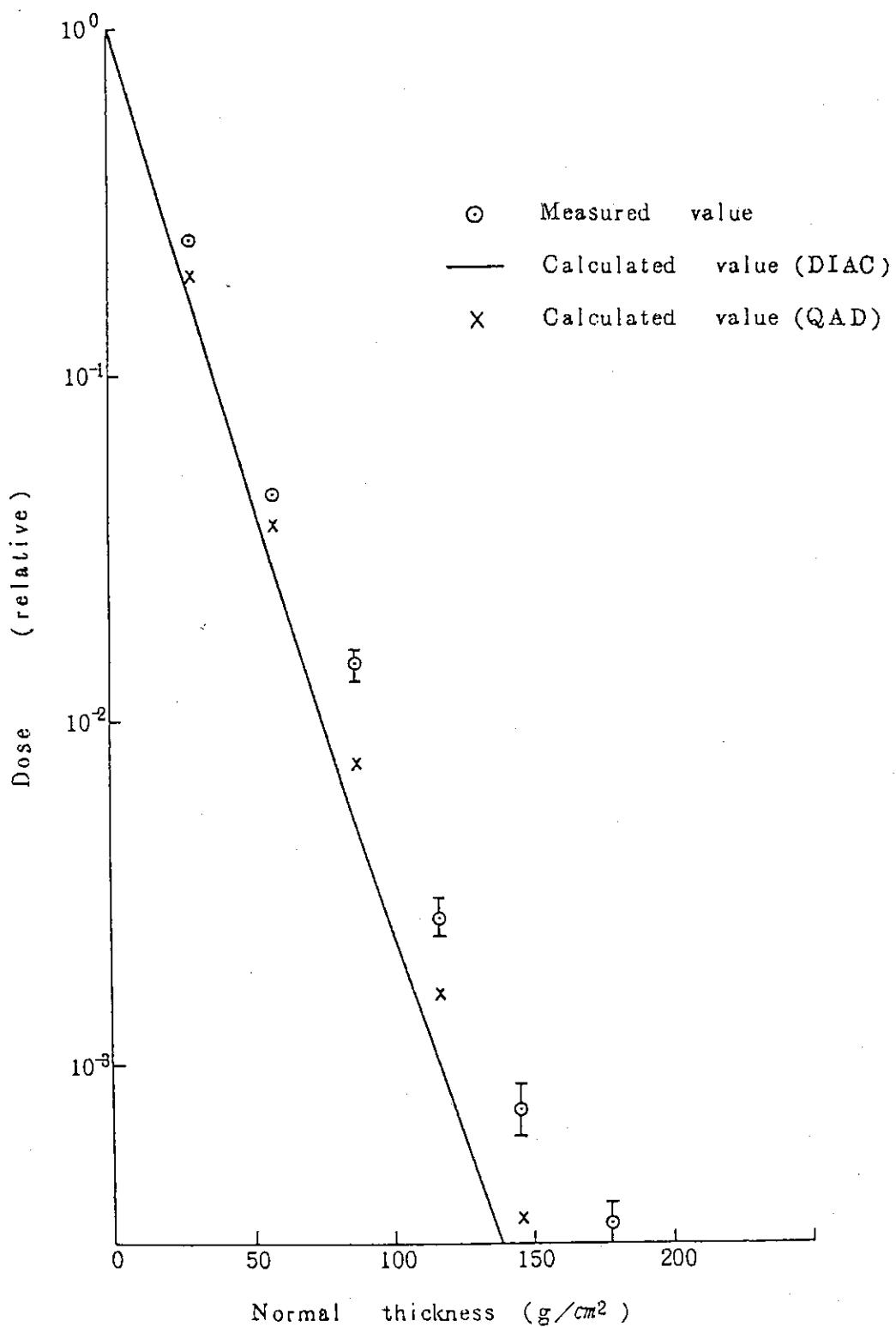


図 2.12.29 Ni シリーズ B ガンマ線ソース (45°) に対する鉛遮蔽材での全線量減衰の実測値と計算値の比較

2.13 ^{16}N ガンマ線の透過問題

2.13.1 実験概要

本問題は原子炉一次冷却水ループからバイパスしたループを使用し、一様な円板線源となるような線源装置により、コンクリート、鉄、鉛の ^{16}N によるガンマ線透過スペクトルを測定したものである。

(1) 線源条件

AERE の LIDO 原子炉の Activation Tank 内で ^{16}O (n, p) ^{16}N 反応により生じる ^{16}N を Disk Radiator に導き、 ^{16}N の β 崩壊によって放出される 6.13 MeV (93 %) と 7.12 MeV (7 %) のガンマ線を線源とする。なお、Disk Radiator の表面におけるガンマ線強度は時間的・空間的にも一定となるよう考慮されている。

(2) 供試体

鉛 (厚さ 5, 10, 15 cm), 鉄 (厚さ 10, 20 cm), コンクリート (厚さ 30, 50 cm) 及び水 (厚さ 40, 80 cm) である。

(3) 実験体系

配置図を図 2.13.1 に示す。この配置は鉛、鉄及びコンクリートの場合であり、水の場合には、水タンクの中に Disk Radiator と検出器を入れて測定している。

(4) 検出器

NaI (Tl) シンチレータによって測定している。波高分子布は GAMAK コードによって 19 群及び 21 群のエネルギースペクトルに変換されている。

2.13.2 計算概要

(1) 群定数作成

測定のエネルギー群構造 (19 群 : 鉛 ; 鉄、水 ; 21 群 : コンクリート) に合わせた群定数を FAIRCROSS step 2 で作成した。エネルギー群構造及び原子数密度を表 2.13.1 ~ 表 2.13.3 に示す。

(2) 輸送計算

一次元 S_N 輸送計算コード DIAC と ANISN-JR を用い計算を行った。空間メッシュ幅は パラメータ サーベイの結果 1 メッシュ 0.5 cm としている。同様に角度メッシュは S_{16} としている。体系は一次元無限平板としており、第 1 メッシュに等方な Shell source を与えている。計算条件の一覧を表 2.13.4 に示した。

(3) データ処理

本問題はガンマ線エネルギースペクトルの測定値が結果として得られているため、計算値のデータ処理は特に行っていない。但し、規格化として第 3 群のガンマ線束が測定値に一致するように考慮されている。

2.13.3 計算値と測定値の比較

測定値と計算値の比較を図 2.13.2 ~ 図 2.13.10 に示す。全体的な傾向として、6 ~ 7 MeV

の計算値が過小評価となっている。また、鉛及び鉄について、2 MeV以下の計算値が過小評価となっている。

2.13.4 評価・考察

定量的な検討を行うため、適当なエネルギー範囲（0～2 MeV, 2～6 MeV, 6～7.25 MeV）でガンマ線束を積分した値の比較を表 2.13.5 に示した。

鉛の場合には 2～6 MeV 間での一致は良好であるが 2 MeV 以下の不一致が大きい。この原因は、ガンマ線群定数に制動輻射の効果が考慮されていない事による。鉄の場合も同様の結果である。水の場合は 2 MeV 以下の計算値が異常に高くなっている。これは 0.265～0.095 MeV 間のガンマ線束の計算値が過大評価となっており、この群における計算が収束していないと思われる。コンクリートの場合は 6 MeV 以上を除いておむね良好な一致となっている。6 MeV 以上については、すべての物質で計算値が測定値より小さくなっている。これは電子対消滅の寄与を計算に考慮していない事と、測定値が絶対値評価ではないため、便宜的にエネルギー 3 群での測定値に計算値を規格化したことによる不確定性が含まれている。測定値は unfolding によってガンマ線スペクトルに変換されているため、計算値にはそのエネルギー分解能を考慮した分布関数を用いて処理する必要がある。しかしながら、今回の解析ではこのような配慮がなされず、単純にエネルギー 3 群での規格化を行っているため、計算値が過小評価している可能性が大きい。従って、今回の解析においてガンマ線束の絶対値の比較の正確な議論は行えないと考えられ、相対的な比較検討にとどめるべきものと考えられる。また、供試体の厚さが増すにつれて測定と計算の不一致が大きくなり、かつ誤差の系統性がエネルギー群によってふらついているが、この原因としては、実験体系が二次元体系であるにもかかわらず、一次元平板体系として近似したモデル化の誤差が考えられる。制動輻射ガンマ線の寄与は重要であるため、RADHEAT-V4 システムにこの寄与を計算する機能を付加する改良に着手しているが、精度の良い制動輻射データの評価が必要と考えられる。

有限項 Legendre 展開近似の計算結果に与える影響を調べるため、同一問題を ANISN-JR で計算した結果の一部を図 2.13.11 に示す。 P_1 近似ではガンマ線スペクトルを過小評価するが、3 次元項以上を考慮する事により、DIAC の結果とほぼ一致することが示された。これより、ガンマ線輸送問題では、 P_1 近似以上で十分な精度が得られる。むしろ低エネルギー領域での空間メッシュ幅を細かくする配慮が精度向上に重要である。

参考文献

- (1) G.B. Bishop and M.E. Abookazemi, "Experimental Calibration of a Collimated NaI Detector using Large Diameter Source", Nucl. Instrum. Methods, 148, (1978), 553.
- (2) G.B. Bishop and A.E. Marafie, "Formation of a response matrix to provide benchmark data for 6 MeV gamma photon penetrations using a NaI spectrometer", Nucl. Instrum. Methods, 150, (1978), 505.

- (3) A.E. Marafie and G.B. Bishop, "Intercomparison of Unfolding Code for Benchmark Gamma Spectrometry", Ann. Nucl. Energy, 5, (1978), 197.
- (4) C. Smitton and G.B. Bishop, "Benchmark data for the penetration of 6 MeV gamma photons through water", J. Br. Nucl. Energy. Soc., 14, (1975), 89.
- (5) C. Smitton and G.B. Bishop, "Benchmark data for high energy gamma photon penetration through low-Z materials", Nucl. Instrum. Methods, 121, (1974), 41.
- (6) G.B. Bishop, "Gamma-Ray Spectral Penetrations: A Review", Progress in Nuclear Energy, 3, (1979), 67.
- (7) G.B. Bishop, C. Smitton and A. Packwood, "Benchmark data for the penetration of 6 MeV gamma photons through steel and lead", Ann. Nucl. Energy, 3, (1976), 65.

表 2.13.1 ガンマ線エネルギー群構造(鉛, 鉄及び水)

GROUP NUMBER	LOWER ENERGY (MEV)	UPPER ENERGY (MEV)	SOURCE SPECTRUM
1	0.095	0.265	0.
2	0.265	0.435	0.
3	0.435	0.605	0.
4	0.605	0.775	0.
5	0.775	1.115	0.
6	1.115	1.445	0.
7	1.445	1.795	0.
8	1.795	2.135	0.
9	2.135	2.475	0.
10	2.475	2.985	0.
11	2.985	3.495	0.
12	3.495	4.005	0.
13	4.005	4.515	0.
14	4.515	5.025	0.
15	5.025	5.535	0.
16	5.535	6.045	0.
17	6.045	6.215	0.93
18	6.215	7.065	0.
19	7.065	7.235	0.07

表 2.13.2 ガンマ線エネルギー群構造（コンクリート）

GROUP NUMBER	LOWER ENERGY (MEV)	UPPER ENERGY (MEV)	SOURCE SPECTRUM
1	0.095	0.237	0.
2	0.237	0.379	0.
3	0.379	0.521	0.
4	0.521	0.663	0.
5	0.663	0.805	0.
6	0.805	0.947	0.
7	0.947	1.089	0.
8	1.089	1.231	0.
9	1.231	1.515	0.
10	1.515	1.799	0.
11	1.799	2.083	0.
12	2.083	2.367	0.
13	2.367	2.651	0.
14	2.651	3.321	0.
15	3.321	3.991	0.
16	3.991	4.66	0.
17	4.66	5.33	0.
18	5.33	6.00	0.
19	6.00	6.26	0.93
20	6.26	7.00	0.
21	7.00	7.26	0.07

表 2.13.3 各物質の原子数密度

MATERIAL NAME	ATOM	DENSITY (BARN·CM) ⁻¹
LEAD	PB	3.295-2
STEEL	FE	8.487-2
CONCRETE	C	6.74-3
	O	4.3231-2
	SI	9.7782-3
	CA	8.8825-3
WATER	H	6.686-2
	O	3.344-2

表 2.13.4 計算条件一覧

	LEAD	IRON	CONCRETE	WATER
NEUTRON GROUP NO.	0	0	0	0
GAMMA-RAY GROUP NO.	19	19	21	19
MESH WIDTH (CM)	0.5	0.5	2.0	4.0
ANGULAR MESH NO.	S16	S16	S16	S16
THICKNESS (CM)	5	10	30	40
	10	20	50	80
	15			

表 2.13.5 測定値と計算値の比較

供試体	厚さ (cm)	ガンマ線束(C-E)/E×100		
		2 MeV以下	2~6 MeV	6~7.25 MeV
鉛	5	-61	-38	-9
	10	-48	+3	-10
	15	-55	-17	-86
鉄	10	-55	-13	-16
	20	-71	-56	-19
水	40	+427	+8	-17
	80	+1005	+24	-13
コンクリート	30	-36	-24	-50
	50	+0.1	-27	-36

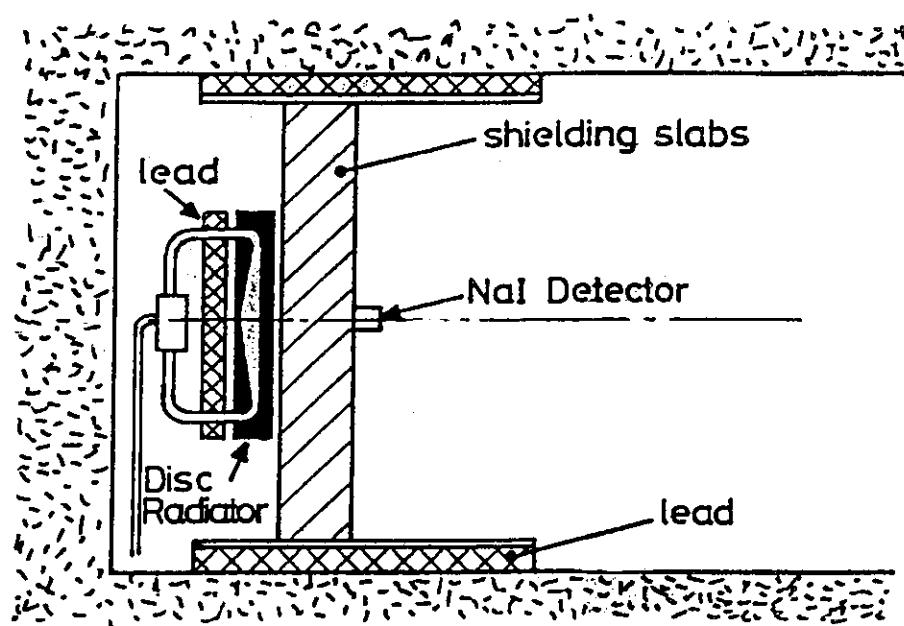


図 2.13.1 ベンチマーク実験体系

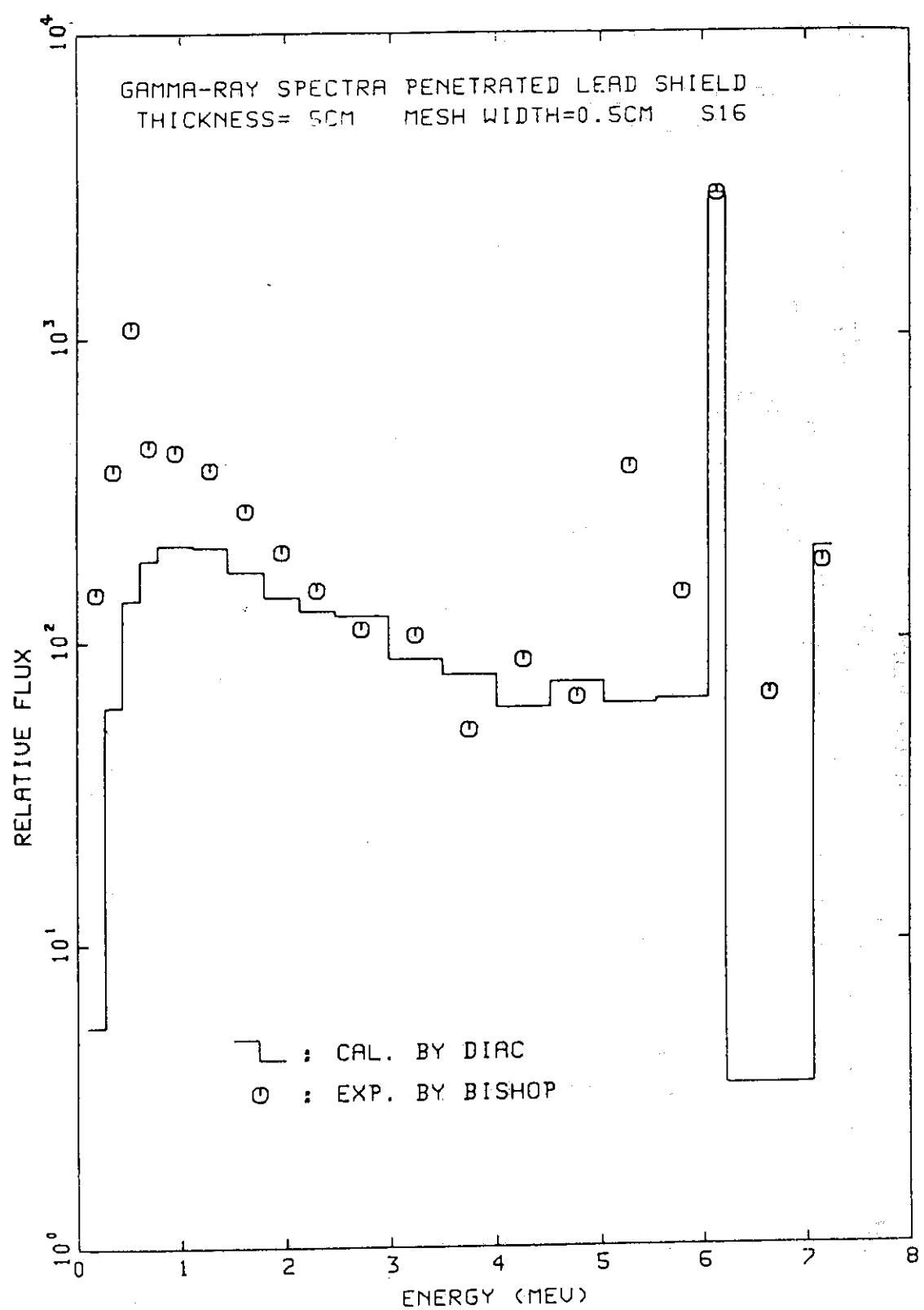


図 2.13.2 ガンマ線透過スペクトル（鉛 5 cm）

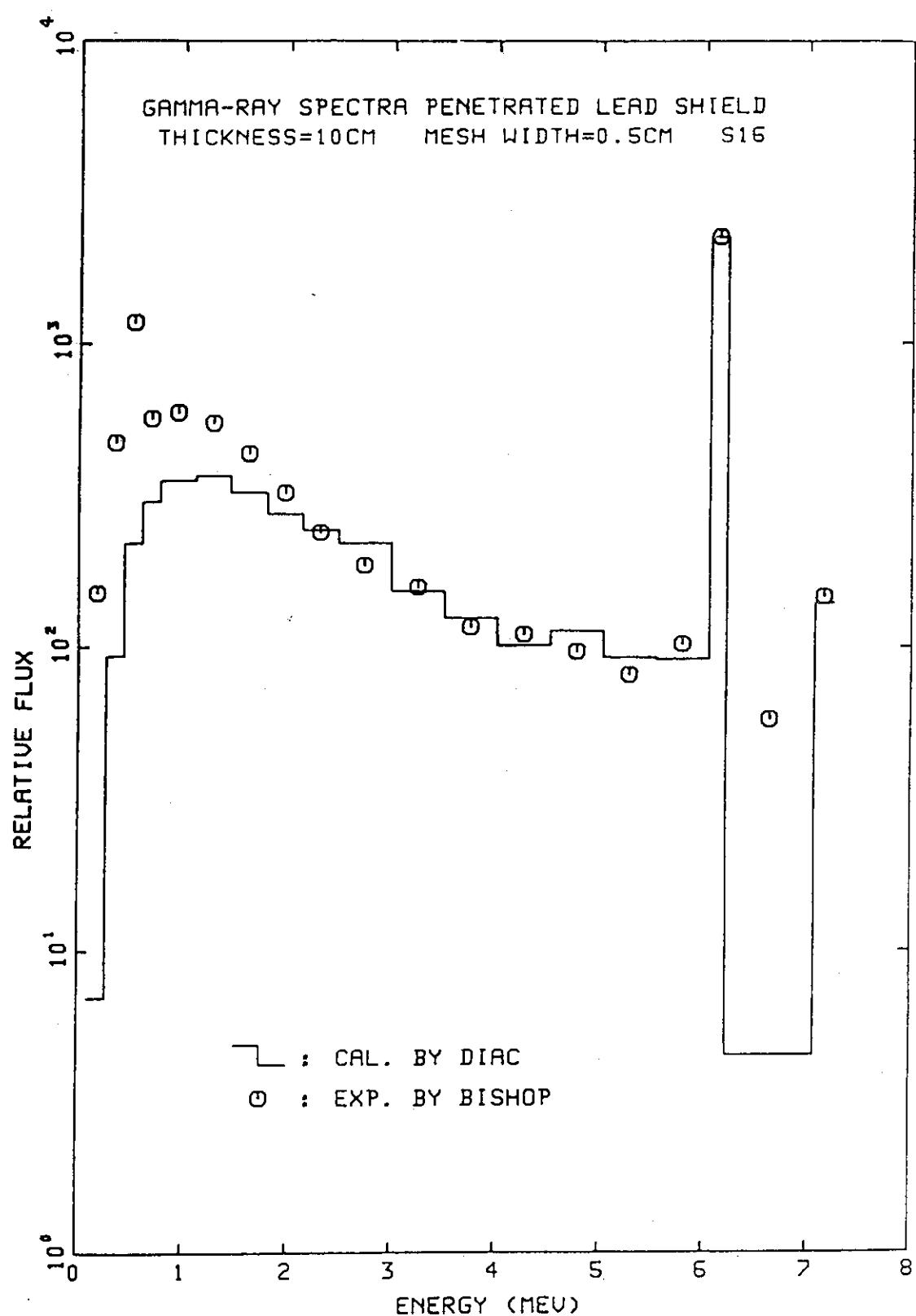


図 2.13.3 ガンマ線透過スペクトル（鉛10 cm）

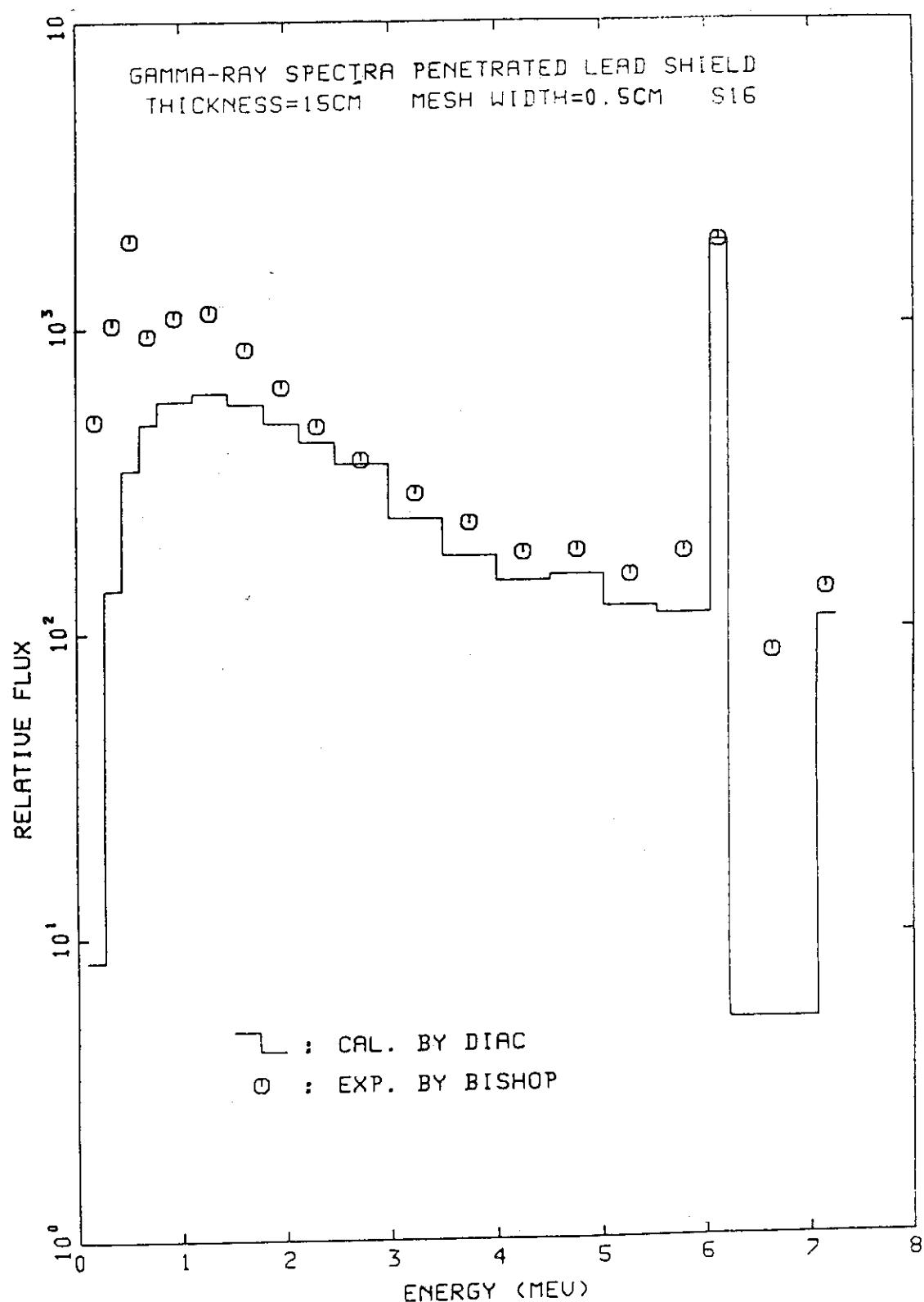


図 2.13.4 ガンマ線透過スペクトル（鉛15cm）

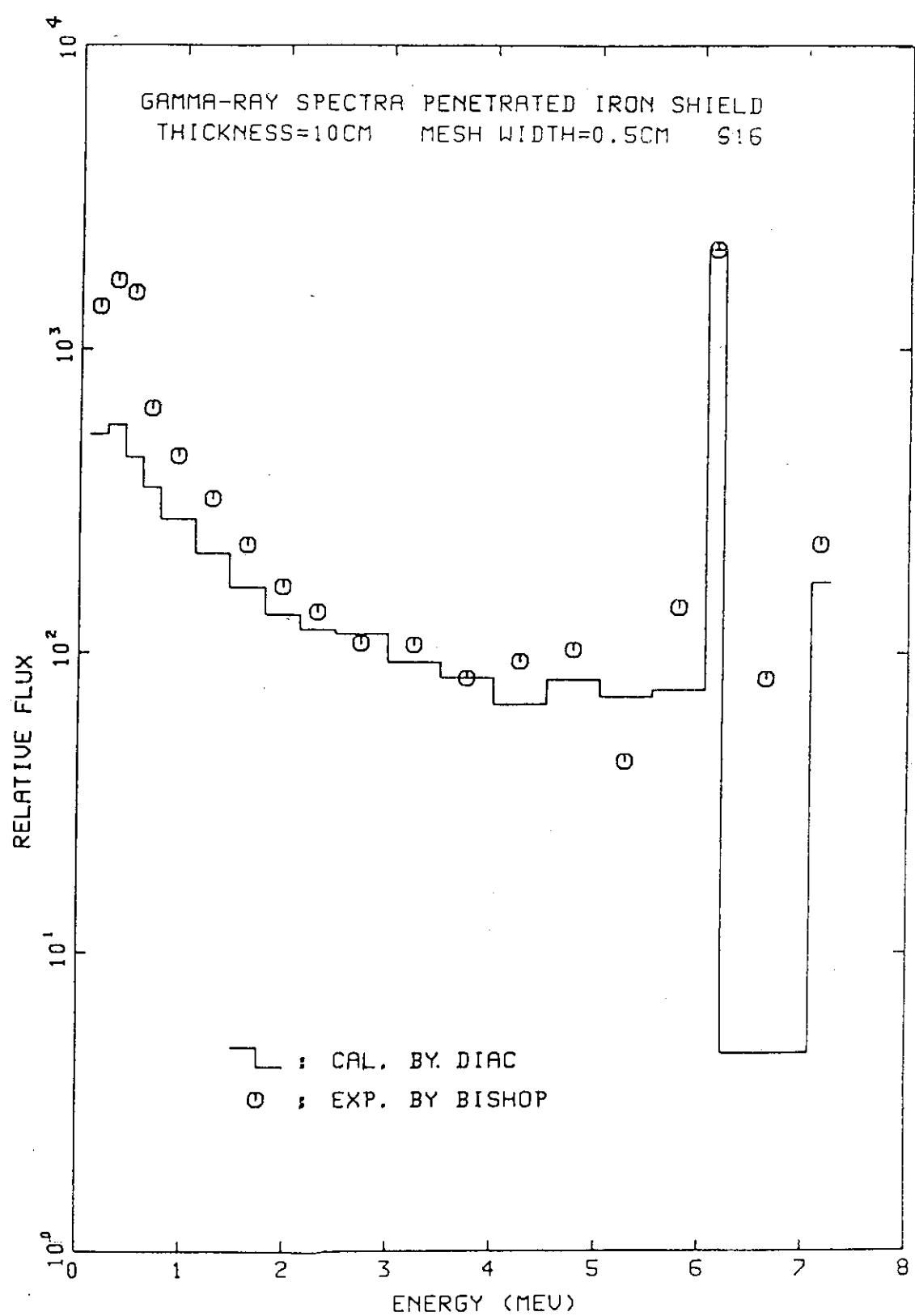


図 2.13.5 ガンマ線透過スペクトル（鉄10cm）

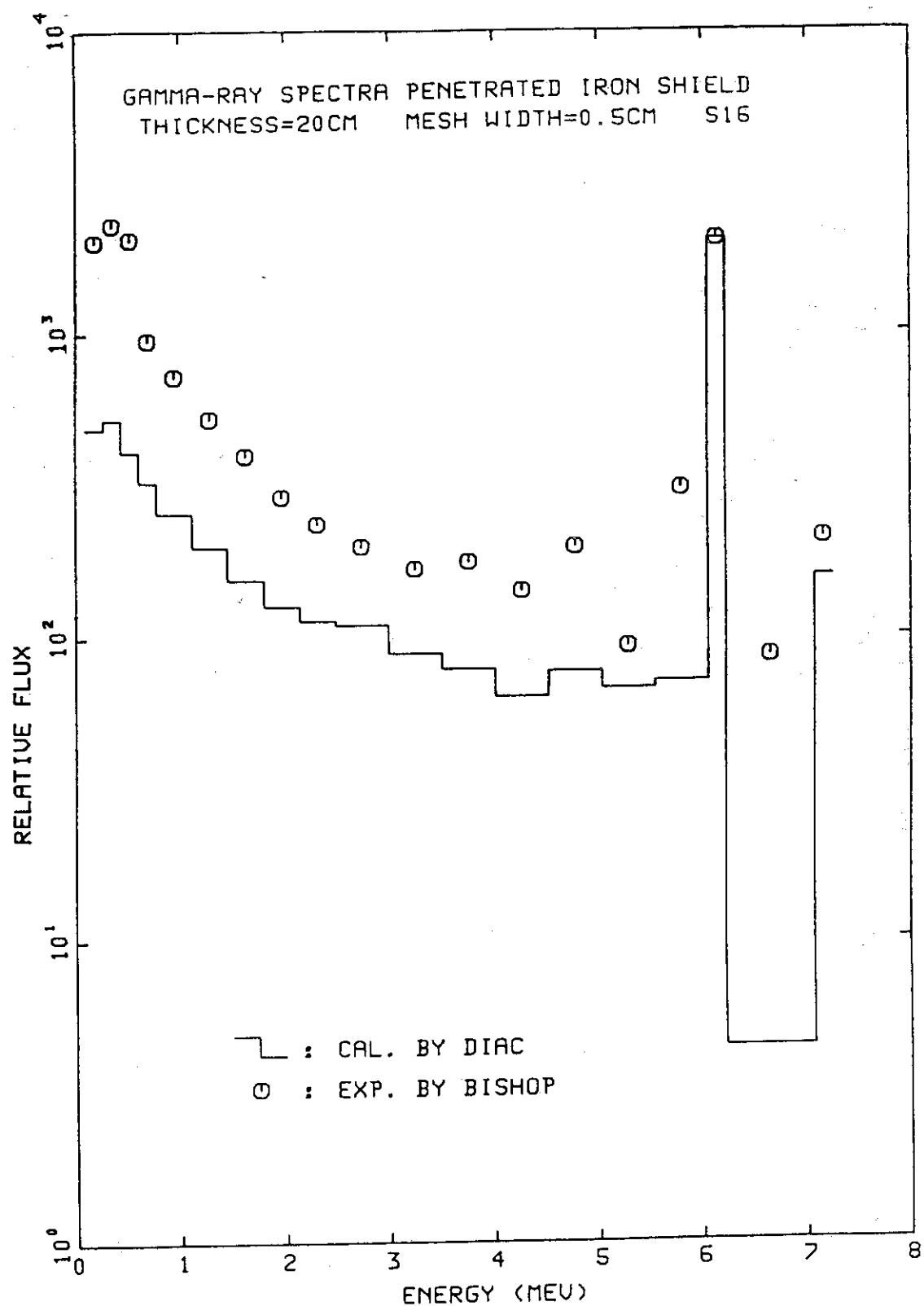


図 2.13.6 ガンマ線透過スペクトル（鉄20cm）

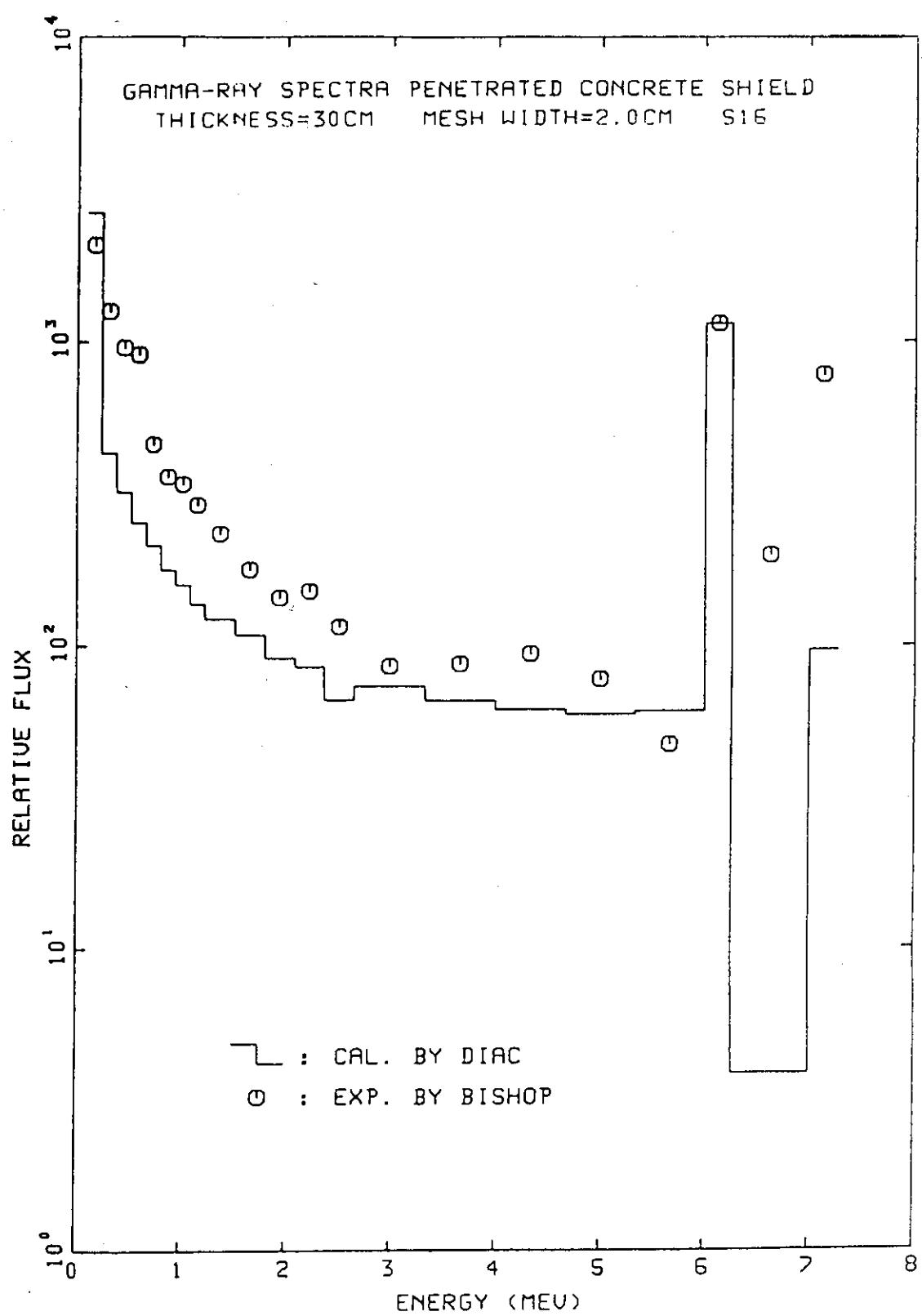


図 2.13.7 ガンマ線透過スペクトル（コンクリート30cm）

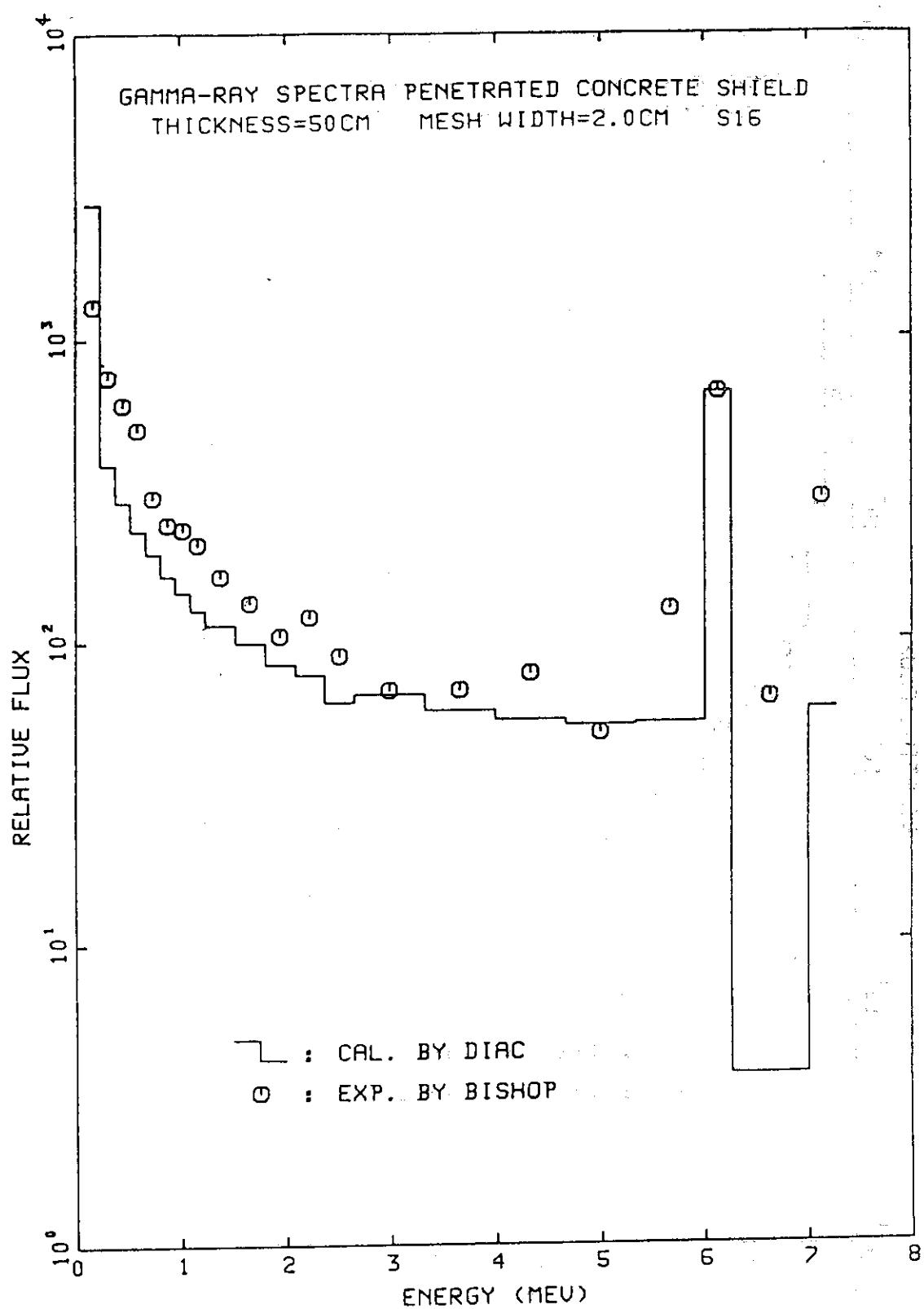


図 2.13.8 ガンマ線透過スペクトル（コンクリート 50 cm）

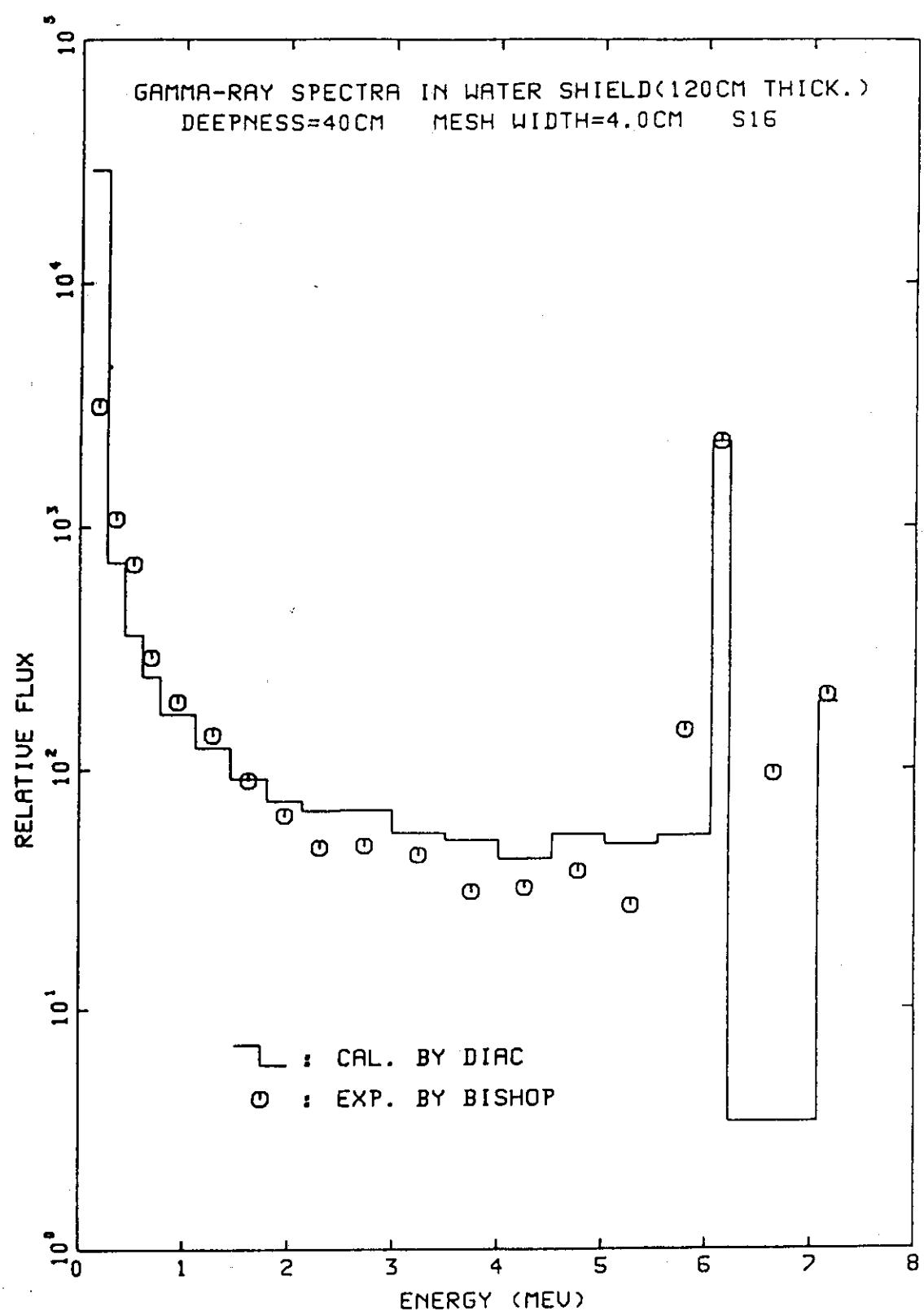


図 2.13.9 ガンマ線透過スペクトル（水40 cm）

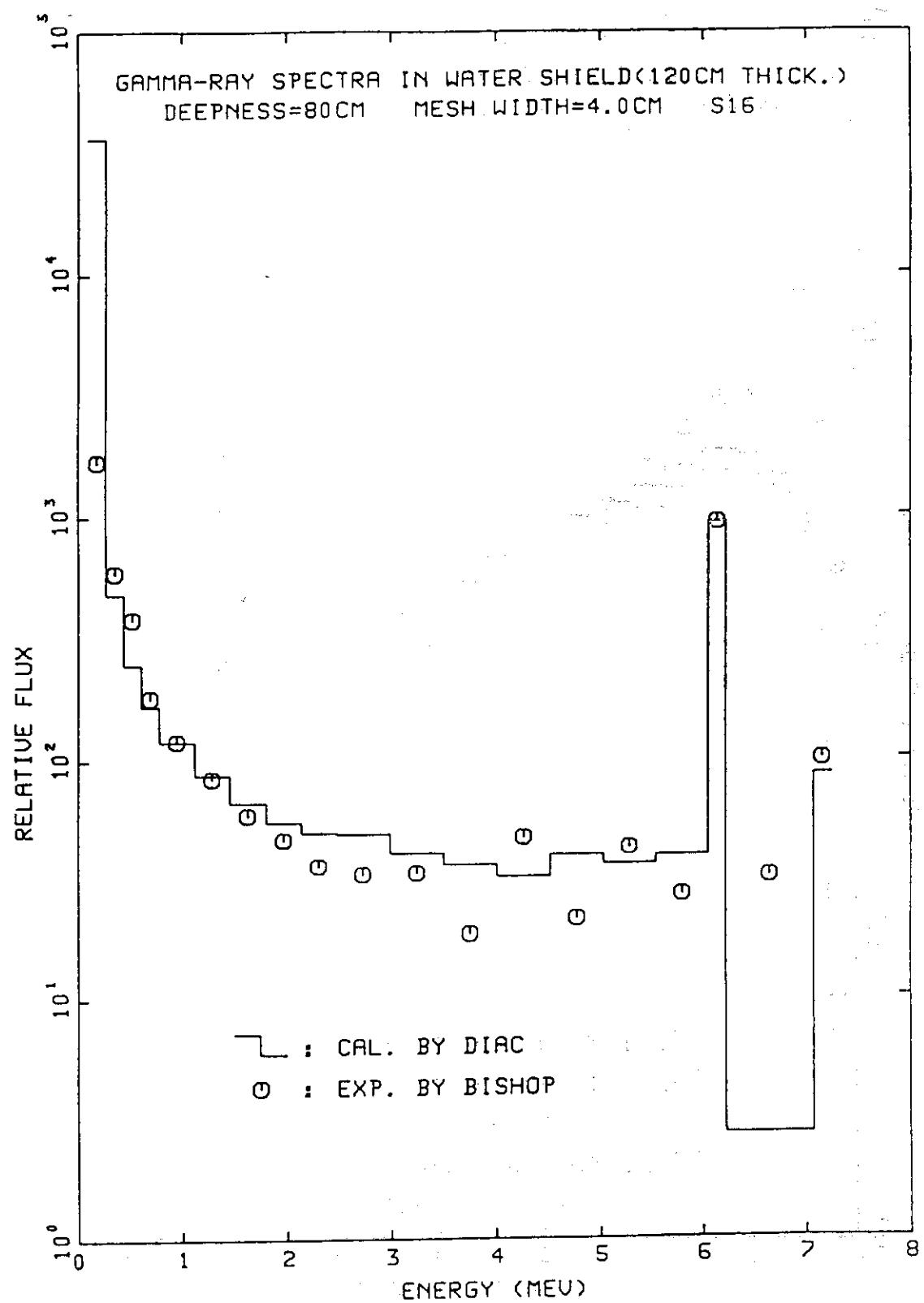


図 2.13.10 ガンマ線透過スペクトル（水80 cm）

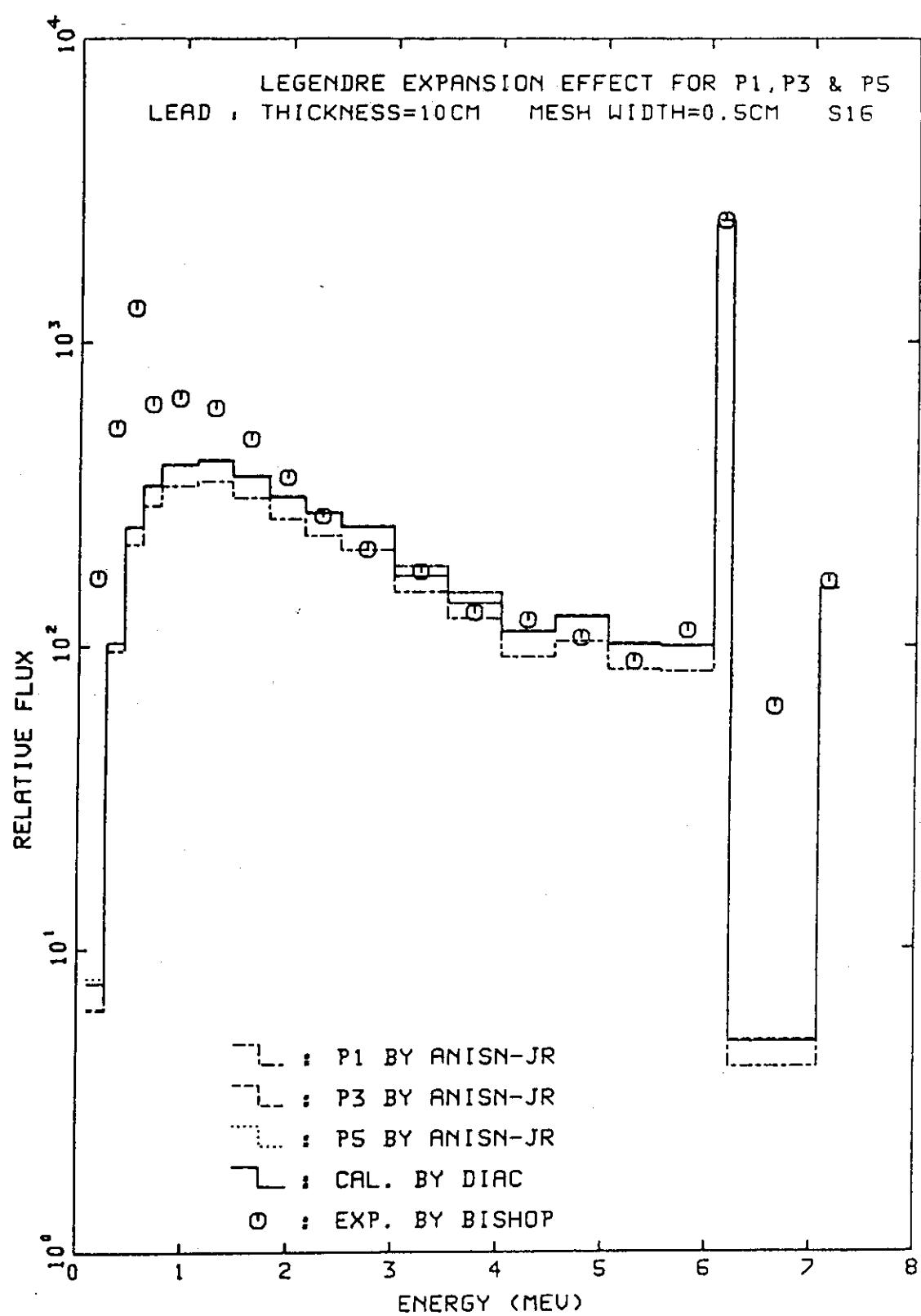


図 2.13.11 有限項Legendre 展開次数の影響

2.14 単一層ガンマ線ビルドアップ係数問題

2.14.1 実験概要

本問題はモーメント法により得られた二種類の物質のビルドアップ係数値が評価の対象である。

(1) 線源条件

線源はガンマ線エネルギー 15 MeV から 15 keV の範囲の 15 点における単色点線源である。

(2) 供試体

物質はアルミニウム (40, 20, 10, 4, 2 及び 1 mfp) と水 (40, 20, 10, 5, 2 及び 1 mfp) とする。なお、各 mfp 値は各々の線源エネルギーに対応した値である。

(3) 実験体系

なし。

(4) 検出器

なし。

2.14.2 計算概要

(1) 群定数作成

群定数は線源エネルギーを考慮して 5 種類の群構造によるものを FAIRROSS step 2 で作成している。エネルギー群構造は線源エネルギーを含む群のエネルギー幅とそのエネルギーに対する比 ($\Delta E/E$) が 5 % 以内となるように配慮したもの (4 種類) とエネルギー群幅の影響を調べるため、前述の ($\Delta E/E$) を 2 % とし、0.1 MeV ~ 0.02 MeV の範囲をより細かくしたもの (1 種類) を採用した。これらの群構造を表 2.14.1 に示す。断面積の作成方法として、FAIRCROSS step 2 には、DLC-15 ライブライ (Storm & Israel 1970 年評価) より断面積を作成する方法と内蔵の半経験式を用いて作成する方法の 2 種類が組込まれている。後者の処理法は RADHEAT - V3 システムの群定数作成モジュール MACS に採用されている GAMLEG - JR と同一であり、低エネルギー領域では計算誤差が大きいと考えられる。前者については、1 keV 以上のデータ処理が可能である。本解析では両者の比較検討も行った。

(2) 輸送計算

一次元 S_N 輸送計算コード DIAC により、球体系の形状で計算を行った。空間メッシュ幅は線源エネルギーに対して 0.2 mfp となるよう考慮した。線源は第 1 メッシュに体積線源として与えた。角度分点数は S_{32} とし、外側境界条件の影響を除くため、球半径は 45 mfp としている。計算条件の一覧を表 2.14.2 に示す。

(3) データ処理

照射ビルドアップ係数を求めるため、非散乱線束は、DIAC 計算に用いた線源エネルギー群での全断面積 Σ_t を用いて次式で計算した。

$$\phi_u = \frac{S}{4 \pi r^2} \exp(-\Sigma_t r). \quad (2.14.1)$$

また、照射線量率変換係数は空気の質量エネルギー吸収係数 μ_{en}/ρ を用いて次式より求

めた。

$$C = \frac{3600 \bar{E}}{5.43 \times 10^7} \cdot \frac{\mu_{en}}{\rho} \cdot \frac{(R/hr)}{(\text{photon}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})} \quad (2.14.2)$$

ここで \bar{E} は各エネルギー群の中心の値を採用した。従って、照射ビルドアップ係数は上記の値と DIAC による結果 ϕ_t を用いて以下の式より算出される。

$$B_i = \sum_1 C_i \phi_i^t / C_i \phi_i^j \quad (2.14.3)$$

2.14.3 計算と実験の比較

DIAC により算出した照射ビルドアップ係数とモーメント法による比較を図 2.14.1 及び 図 2.14.2 に示す。水体系の場合、0.4 MeV 以上のエネルギーでの両者の差異は GAMLEG - JR で作成した群定数を用いた場合 10 % 以下である (1 mfp, 40 mfp, 10 MeV ではそれぞれ 16 % 及び 13 % 以下)。0.2 MeV 以下においては 12 % (0.1 MeV, 1 mfp) ~ 625 % (0.04 MeV, 40 mfp) の範囲にばらついている。一方、DLC-15 ライブラリーを処理した群定数を使用した場合では 0.2 MeV 以上のエネルギーで 10 % 以内で一致する。(但し、20 mfp 以上では 20 % 以内) 0.2 MeV 以下においては 8 % (0.1 MeV, 1 mfp) ~ 168 % (0.04 MeV, 40 mfp) である。断面積の処理方法による差異は 0.2 MeV 以下で大きく、DLC-15 ライブラリーを処理した群定数を使用した場合の方が良好な結果を与える。0.2 MeV 以上では両者の差異はほとんど無い。

アルミニウム体系の場合、GAMLEG - JR で作成した群定数を用いた場合では 20 % 以内で一致しているが 0.6 MeV 以下及び 15 MeV については比較していない。一方、DLC-15 ライブラリーで作成した群定数を用いた場合では 0.2 MeV 以上で約 20 % 以内の誤差である。しかし、低エネルギー及び透過距離が大きな場合に誤差が増大する傾向があり、0.04 ~ 0.06 MeV, 40 mfp で 96 % の過大評価となる。また、1 mfp 透過の場合、ほぼ全エネルギー範囲において約 20 % 程度の誤差が生じる。

2.14.4 評価・考察

本解析ではエネルギー群幅及び空間メッシュ幅の結果に与える影響が大きく 0.2 MeV 以上で前者が 5 %、後者が 15 % 程度であるとの評価が予備検討より得られている。従ってモーメント法の結果との比較で 20 % 以内の一一致が得られている 0.2 MeV 以上では本システムの計算精度は良好であると評価できる。また、群定数作成方法についても、上記のエネルギー領域においては、DLC-15 ライブラリーを使用した場合と GAMLEG - JR を使用した場合の差異はほとんど無い。

しかし、0.2 MeV 以下においては、モーメント法の結果より過大評価する傾向が見られる。これは単に群定数データの誤差とは考えられないため、エネルギー群構造をより細かくした場合の計算を行い結果を表 2.14.3 に示した。エネルギー群構造を詳細にした場合の結果はモーメント法による結果と 10 % 以内で一致している。従って、DLC-15 ライブラリーによる群定数を用いた場合の低エネルギー領域での差異は主としてエネルギー群幅による誤差が大きい。即ち、低エネルギーガンマ線の透過問題では、エネルギー群幅をより細かくする必要がある。また、群

定数作成における重み関数として本解析ではエネルギー依存性を無視したが、単色エネルギーを扱う問題では適切なエネルギースペクトルを考慮する事により精度の改善が行えると思われる。

透過距離の短い場合の差異を検討するため、計算時の空間メッシュ幅を 0.2 mfp から 0.05 mfp に変更した場合の結果を表 2.14.4 に示す。1 mfp で約 18 %, 2 mfp で約 10 % 程度の減少となり、モーメント法の結果により近い値となっている。

以上の結果より、低エネルギー領域におけるビルドアップ係数の定量的評価は行えなかったが、エネルギー群構造及び空間メッシュ幅を細かくすることによって、かなり良い再現性を得る事が可能と考えられる。また、GAMLEG - JR によって処理した群定数は 0.1 MeV 以下で誤差が増加し、より過大評価する事が示された。

参考文献

- (1) J. Goldstein and J.E. Wilkins, JR. "Calculations of the Penetration of Gamma Rays", USAEC Report NYO-3075 (1954).
- (2) W.R. Johnson, D.H. Risher, J.E. Rogger and W.L. Thomson "Gamma-Ray Attenuation at Energies of Approximately 6 and 8 MeV", Nucl. Sci. Eng. 43, (1971), 32.
- (3) Bishop G.B. et al.; Benchmark Data for High Energy Gamma Penetration, 4th Int. Conf. Reactor Shielding, E-8 (1972).
- (4) A.B. Chilton et al.: NSE 73,97 (1980).
- (5) C.M. Eisenhauer and G.L. Simmons: NSE 56, 263, (1975).
- (6) J.H. Hubbell; Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients From 10 KeV to 100 GeV: NSRDS-NBS 29 (1969).
- (7) D. Trubey: private communication (1985).

表 2.14.1(a) エネルギー群構造 (線源エネルギー 15 MeV ~ 2 MeV)

		NODE NAME : EG50	
		NUMBER OF GROUPS : 50	
GROUP ENERGY BOUNDARIES		GROUP ENERGY BOUNDARIES	
(MEV)		(MEV)	
1	15.375	26	2.3417
2	14.625	27	2.05
3	13.167	28	1.95
4	11.708	29	1.5979
5	10.25	30	1.3094
6	9.75	31	1.073
7	9.233	32	0.8793
8	8.717	33	0.7205
9	8.2	34	0.5904
10	7.8	35	0.4838
11	7.25	36	0.3965
12	6.7	37	0.3249
13	6.15	38	0.2662
14	5.85	39	0.2182
15	5.4875	40	0.1788
16	5.125	41	0.1465
17	4.875	42	0.12
18	4.4875	43	0.09837
19	4.1	44	0.08061
20	3.9	45	0.06605
21	3.625	46	0.05413
22	3.35	47	0.04436
23	3.075	48	0.03635
24	2.925	49	0.02978
25	2.633	50	0.02441
		51	0.02

表 2.14.1(b) エネルギー群構造 (線源エネルギー 1 MeV ~ 0.2 MeV)

NODE NAME : EG42
 NUMBER OF GROUPS : 42

GROUP ENERGY BOUNDARIES (MEV)		GROUP ENERGY BOUNDARIES (MEV)	
1	1.5375	26	0.23417
2	1.4625	27	0.205
3	1.3167	28	0.195
4	1.1708	29	0.1675
5	1.025	30	0.1439
6	0.975	31	0.1237
7	0.9233	32	0.1062
8	0.8717	33	0.09128
9	0.82	34	0.07842
10	0.78	35	0.06738
11	0.725	36	0.05788
12	0.67	37	0.04973
13	0.615	38	0.04273
14	0.585	39	0.03671
15	0.54875	40	0.03154
16	0.5125	41	0.0271
17	0.4875	42	0.02328
18	0.44875	43	0.02
19	0.41		
20	0.39		
21	0.3625		
22	0.335		
23	0.3075		
24	0.2925		
25	0.2633		

表 2.14.1(c) エネルギー群構造（線源エネルギー 0.1 MeV ~ 0.015 MeV : 水体系）

GROUP ENERGY BOUNDARIES (MEV)		GROUP ENERGY BOUNDARIES (MEV)	
1	0.1025	26	0.01785
2	0.0975	27	0.017025
3	0.09233	28	0.0162
4	0.08717	29	0.015375
5	0.082	30	0.014625
6	0.078	31	0.01394
7	0.0725	32	0.01326
8	0.067	33	0.01258
9	0.0615	34	0.01190
10	0.0585	35	0.01120
11	0.054875	36	0.01054
12	0.05125	37	0.00986
13	0.04875	38	0.00918
14	0.044875	39	0.00849
15	0.041	40	0.00781
16	0.039	41	0.00713
17	0.03625	42	0.00645
18	0.0335	43	0.00577
19	0.03075	44	0.00509
20	0.02925	45	0.00441
21	0.02633	46	0.00373
22	0.023417		
23	0.0205		
24	0.0195		
25	0.018675		

表 2.14.1(d) エネルギー群構造（線源エネルギー 0.1 MeV ~ 0.015 MeV : アルミニウム体系）

NODE NAME : EG40	
NUMBER OF GROUPS : 40	
GROUP ENERGY BOUNDARIES	
	(MEV)
1	0.1025
2	0.0975
3	0.09233
4	0.08717
5	0.082
6	0.078
7	0.0725
8	0.067
9	0.0615
10	0.0585
11	0.054875
12	0.05125
13	0.04875
14	0.044875
15	0.041
16	0.039
17	0.03625
18	0.0335
19	0.03075
20	0.02925
21	0.02633
22	0.023417
23	0.0205
24	0.0195
25	0.018675

表 2.14.1(e) エネルギー群構造 (線源エネルギー 0.1 MeV)

NODE NAME : EG31
 NUMBER OF GROUPS : 31

GROUP ENERGY BOUNDARYS (MEV)		GROUP ENERGY BOUNDARYS (MEV)	
1	0.101	26	0.0360
2	0.099	27	0.0333
3	0.0973	28	0.0306
4	0.0947	29	0.0280
5	0.0920	30	0.0253
6	0.0893	31	0.0227
7	0.0867	32	0.0200
8	0.0840		
9	0.0813		
10	0.0787		
11	0.0760		
12	0.0733		
13	0.0707		
14	0.0680		
15	0.0653		
16	0.0627		
17	0.0600		
18	0.0573		
19	0.0547		
20	0.0520		
21	0.0493		
22	0.0467		
23	0.0440		
24	0.0413		
25	0.0387		

表 2.14.2 計算条件一覧

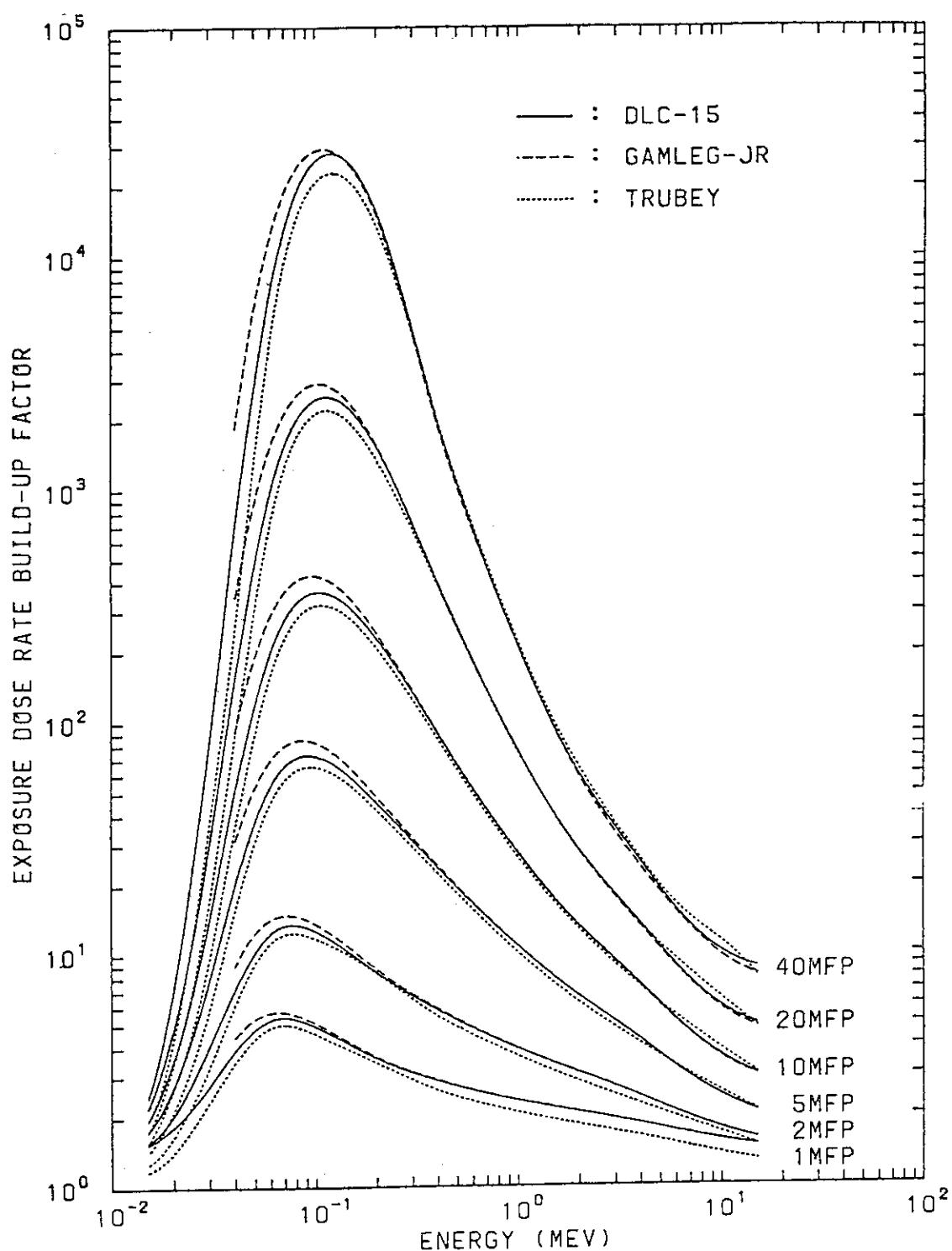
ATOMIC DENSITY	WATER	H : 0.06686 (1/BARN/CM)	
		O : 0.03344 (1/BARN/CM)	
	ALUMINUM AL	: 0.03021 (1/BARN/CM)	
GEOOMETRY	SPHERE	---- RADIUS = 45 (MFP)	
SPACE MESH		0.2 (MFP/MESH)	
ANGULAR MESH		S32	
ENERGY GROUPS	NODE NAME	GROUP NUMBER	ENERGY RANGE (MEV)
	EG50	50	15.375 - 0.02
	EG42	42	1.5375 - 0.02
	EG45	45	0.1025 - 0.00373
	EG40	40	0.1025 - 0.00713
SOURCE	DISTRIBUTED SOURCE (SPACE MESH NO. = 1)		
	ISOTROPIC SOURCE		
	SOURCE ENERGY (MONO ENERGY) (MEV)		
	15	10	6 4 2
			1 0.6 0.4 0.2
			0.1 0.06 0.04 0.03 0.02 0.015

表 2.14.3 エネルギー群幅によるビルドアップ係数の変化

NODE NAME	DOSE RATE (R/HOUR)		BUILD-UP FACTOR		DIFFERENCE (%)
	TOTAL	UNSCATTERED	DLC-15	TRUBEY	
EG45	2.491 -26	9.535 -31	2.61 +4	2.11 +4	24
EG31	2.141 -26	9.538 -31	2.24 +4	-	6.4

表 2.14.4 空間メッシュ幅によるビルドアップ係数の変化

DISTANCE (MFP)	MESH (MFP/MESH)	DOSE RATE (R/HOUR)		BUILD-UP FACTOR		DIFFERENCE (%)
		TOTAL	UNSCATTERED	DLC-15	TRUBEY	
1	0.2	2.145 -10	1.448 -10	1.48	1.28	15
1	0.05	1.798 -10	-	1.24	-	-3.0
2	0.2	2.113 -11	1.332 -11	1.59	1.49	6.5
2	0.05	1.898 -11	-	1.43	-	-4.4

図 2.14.1 H_2O ガンマ線照射線量ビルドアップ係数の比較

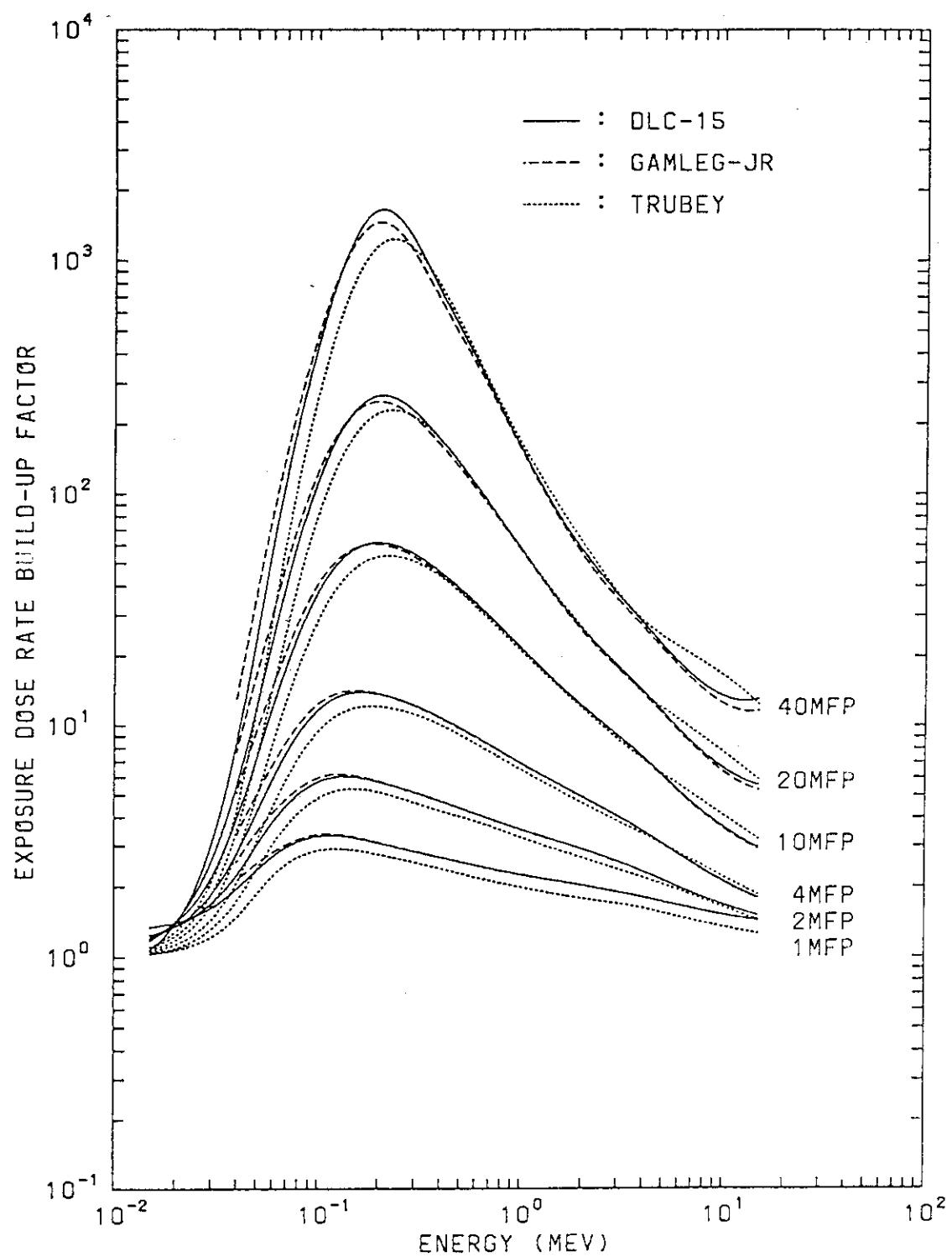


図 2.14.2 A1 ガンマ線照射線量ビルドアップ係数の比較

2.15 多重層ガンマ線ビルドアップ係数問題⁽¹⁾

2.15.1 実験概要

本実験は、Cs - 137 (662 keV のガンマ線) を線源とし、アルミ板と鉛板を 1 層から 4 層組み合わせ、多重層による照射線量ビルドアップ係数を測定したものである。

(1) 線源条件

線源は Cs - 137 (4 Ci) で 0.5 mm 厚のステンレス鋼製のカプセルに入れたもので、単色のガンマ線 (662 keV) とみなしている。また、線源は供試体表面から 5 m 離れさせ、かつコリメートされているため、ほぼ平行ビームとみなせるとしている（入射角は高々 3.5°）。

(2) 供試体

供試体は 51 cm × 51 cm の平板で、板の中心から端辺までアルミの場合でも 5 mfp 以上あり、実質的に無限平板とみなしている（アルミ 1 mfp 厚の場合、モンテカルロ計算によれば 5 mfp × 5 mfp の正方形外からの寄与は 0.1 % 未満である。）。

(3) 検出器

検出器は、LiF 熱ルミネッサンス (TLD) を使用している。

(4) 実験体系

実験体系を図 2.15.1 に示す。なお、測定誤差としては、検出器の測定誤差、実験体系の寸法誤差、部屋からの散乱線の影響が要因となるが、5 ~ 10 % と考えられている。

(5) 照射線量ビルドアップ係数算出式

照射線量ビルドアップ係数は、線量測定結果から次式により求めている。

$$B.F. = \frac{D_{OUT}}{D_{IN}} \times \exp(x) \quad (2.15.1)$$

但し、B.F. : 照射線量ビルドアップ係数

D_{IN} : 供試体内側表面での線量率

D_{OUT} : 供試体外側表面での線量率

x : 662 keV の γ 線に対する供試体の厚さ (mfp)

2.15.2 計算概要

アルミ板と鉛板の厚さと組み合せの異なる 21 ケースの線量率計算を 2 社が担当し、一次元輸送計算コード DIAC 及び ANISN-JR で計算した。計算体系は無限平板体系とし、線源は Shell Source とした。計算の概要を表 2.15.1 に示す。

(1) 群定数

群定数は、JSD 1000 (ガンマ 20 群) と Cs に合わせた群構造 (ガンマ 14 群) のものを用いる。表 2.15.2 にエネルギー群構造と線量変換係数を示す。ガンマ線 14 群の空気、アルミ及び鉛の群定数は、表 2.15.3 に示す物質組成に基づき、FAIRCROSS step 2 により作成した。また、ANISN-JR の計算に必要な P_e 展開群定数は FAIRCROSS step 3 により作成した。

(2) 計算パラメータ

DIAC 計算パラメータは、 S_N 次数 S_8 , S_{16} , S_{32} の 3 つとした。ANISN-JR の計算パラメータは、 S_N 次数 S_8 , S_{16} , S_{32} , S_{64} とし、 P_s 展開次数は原則として P_5 とした。なお線源位置は、A 社の計算では供試体表面から 500 cm としているが、B 社の計算では 10 cm としている。

(3) 照射線量ビルドアップ係数算出式

式 2.15.1 と同じ。但し、照射線量ビルドアップ係数を計算する際に、線減衰定数として A 社の解析では線源のエネルギーに対応するエネルギー群のものとし、ガンマ 20 群では $A\ell$ については 0.197 cm^{-1} , Pb については 1.170 cm^{-1} とした。また B 社の解析では、662 keV の γ 線に対する供試体の線減衰定数を用い、 $A\ell$ については 0.205 cm^{-1} , Pb については 1.191 cm^{-1} としている。

2.15.3 計算と実験の比較

実験による照射線量ビルドアップ係数の値並びに DIAC 及び ANISN-JR を用いた計算による照射線量ビルドアップ係数の値をそれぞれ表 2.15.4 及び表 2.15.5 に示す。

また、実験による照射線量ビルドアップ係数の値に対する計算による照射線量ビルドアップ係数の値 (C/E) を図 2.15.2 に示す。これらによれば、計算による照射線量ビルドアップ係数の値は、実験によるものと良い一致を示していると云える。

2.15.4 評価及び考察

計算による照射線量ビルドアップ係数の値は、24 ケースのほとんどのケースにおいて、10 % 以内で実験によるものと一致している。しかし、一般にビルドアップ係数は検出器に到達した全ガンマ線の検出器に到達した一次ガンマ線に対する割合と定義されるが本実験では供試体内外面における線量率を測定し、これから式 2.15.1 により求めた値を照射線量ビルドアップ係数としている点にそれぞれの結果を比較するに当たっては注意する必要があると思われる。

DIAC と ANISN-JR の計算結果を比較すると、図 2.15.2 に示すように両者とも同じような結果が得られている。また、ケース 4 につき表 2.15.4 の値を図示すると図 2.15.3 のようになる。これより、ANISN-JR の P_s 展開次数が大きくなるにつれて、その結果が DIAC の計算による結果に近づき、 P_5 では両者の結果がほぼ一致することがわかる。

また、ANISN-JR による計算結果では、ほとんどのケースについて、 S_N の次数が大きくなるにしたがって、計算結果の変化は小さくなり、 S_{32} と S_{64} とでは、ほぼ同じ結果となった（表 2.15.4 参照）。

参考文献

- (1) Burke G.P. and Beck H.L.: "Calculated and Measured Dose Build-up Factors for Gamma Rays Penetrating Multi-Layered Slabs", Nucl. Sci. Eng., 53 109-112 (1974).

表 2.15.1 計 算 の 概 要

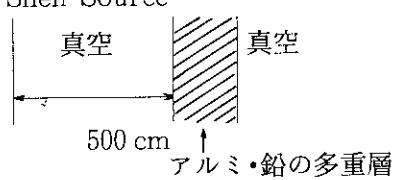
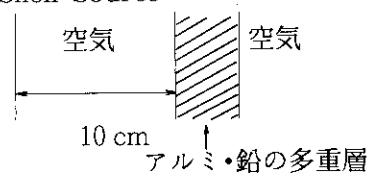
担 当	A 社	B 社
群 定 数	γ 20 群の群定数 : JSD1000 ライブライリー γ 14 群の群定数 : FAIRCROSS step 2 で作成 P_e 展開群定数 : FAIRCROSS step 3 で作成	
物 質	アルミ, 鉛	空気, アルミ, 鉛
使用計算コード	1次元輸送計算コード DIAC 及び ANISN-JR	
線源スペクトル	^{137}Cs 662 keV 単色 γ 20 群 : 第 14 群 600 ~ 800 keV γ 14 群 : 第 1 群 650 ~ 675 keV	
計算体系	無限平板体系  Shell Source 真空 真空 500 cm アルミ・鉛の多重層	
	 Shell Source 空気 空気 10 cm アルミ・鉛の多重層	
	密度 (g/cm^3) 線吸収係数 (cm^{-1}) 平均自由行程 (cm) アルミ 2.702 0.201 4.975 鉛 11.34 1.191 0.840	
計算パラメータ	Sn 次数 (S_8, S_{16}, S_{32})	

表 2.15.2 ガンマ線エネルギー群構造と線量率変換係数

20 - gr				14 - gr			
Group	Energy Range (keV)	Flux-to-Dose Conversion Factors (R/hr/gr/cm ² /sec)		Group	Energy Range (keV)	Flux-to-Dose Conversion Factors (R/hr/gr/cm ² /sec)	
		A	B			A	B
14	600~800	1.43×10^{-6}	1.509×10^{-6}	1	650~670	1.35×10^{-6}	1.483×10^{-6}
15	400~600	1.04×10^{-6}	1.152×10^{-6}	2	600~650	1.27×10^{-6}	1.400×10^{-6}
16	300~400	7.20×10^{-7}	8.778×10^{-7}	3	550~600	1.19×10^{-6}	1.315×10^{-6}
17	200~300	4.90×10^{-7}	6.178×10^{-7}	4	500~550	1.08×10^{-6}	1.219×10^{-6}
18	100~200	2.65×10^{-7}	3.633×10^{-7}	5	450~500	9.80×10^{-7}	1.122×10^{-6}
19	50~100	1.27×10^{-7}	2.587×10^{-7}	6	400~450	8.70×10^{-7}	1.030×10^{-6}
20	20~ 50	2.10×10^{-7}	2.587×10^{-7}	7	350~400	7.70×10^{-7}	9.314×10^{-7}
				8	300~350	6.60×10^{-7}	8.184×10^{-7}
				9	250~300	5.50×10^{-7}	6.949×10^{-7}
				10	200~250	4.35×10^{-7}	5.661×10^{-7}
				11	150~200	3.20×10^{-7}	4.403×10^{-7}
				12	100~150	2.10×10^{-7}	3.310×10^{-7}
				13	50~100	1.26×10^{-7}	2.865×10^{-7}
				14	20~ 50	2.15×10^{-7}	5.816×10^{-7}

表 2.15.3 物質の核種組成

MATERIAL NAME		AIR	A ℓ	Pb
Element	Atomic Numoer	ATOM DENSITY (n/barn · cm)	ATOM DENSITY (n/barn · cm)	ATOM DENSITY (n/barn · cm)
H	1	7.19909E - 9		
C	6	7.58469E - 9		
N	7	3.90993E - 5		
O	8	1.05384E - 5		
A ℓ	13		6.02442E - 2	
Pb	82			3.29603E - 2
Density		0.0012049 g/cm ³ (1 atm, 20 °C)	2.699 g/cm ³	11.340 g/cm ³

表 2.15.4 照射線量ビルドアップ係数 (B.F.) 計算結果 (1)

実験番号	物質と厚さ (mtp)	実験による B.F.						計算コード F						ガンマ線 7 群計算 (JSD1000 ライブライナー)						ガンマ線 14 群構造 (Cs-137に合わせた群構造)										
		第 1 层			第 2 層		第 3 層	第 4 層	総厚さ	S8			S16		S32		S64			S8			S16		S32		S64			
		ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC	ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC	ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC	ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC	ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC	ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC	ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC	ANISN-JR P3 DIAC	ANISN-JR P5 DIAC													
單一層	1 AL 1.040				1.040	1.86				1.84	1.90	1.89	1.92	1.83	1.87	1.90	1.91													
	2 AL 2.080				2.080	2.97				2.61	2.74	2.81	2.82	2.83	2.58	2.71	2.78	2.80												
	3 AL 3.120				3.120	3.78				3.46	3.70	3.85	3.87	3.87	3.38	3.63	3.77	3.80												
3 重層	16 AL 1.040	Pb	AL	Pb	AL	1.040				3.108	2.80	2.46	2.66	2.77	2.80	2.42	2.62	2.75	2.77											
	17 Pb 1.028	AL	Pb	AL	Pb	1.028				3.096	1.97	2.68	2.73	2.78	2.80	2.42	2.62	2.75	2.77											
	18 Pb 1.028	AL	Pb	AL	Pb	1.040				4.136	3.44	1.64	1.78	1.88	1.87	1.59	1.73	1.82	1.83											
4 重層	19 AL 1.040	Pb	AL	Pb	AL	1.040				2.50	2.50	1.79	1.84	3.12	3.12	3.15	2.56	2.86	3.05	3.08										
	20 AL 1.040	Pb	AL	Pb	AL	1.040				4.136	2.94	2.64	2.94	3.12	3.12	3.15	2.56	2.86	3.05	3.08										
	21 Pb 1.028	AL	Pb	AL	Pb	1.028				2.56	2.56	1.89	2.10	2.24	2.23	2.25	1.77	2.00	2.12	2.14										
3 重層	20 AL 1.040	Pb	AL	Pb	AL	1.040				4.136	2.94	2.54	2.75	3.00	3.01	3.03	2.46	2.75	2.92	2.96										
	21 Pb 1.028	AL	Pb	AL	Pb	1.028				4.136	2.56	1.95	2.17	2.33	2.31	2.32	1.85	2.07	2.21	2.22										

表 2.15.5 照射線量ビルドアップ係数 (B.F.) 計算結果 (2)

	実験番号	物質と厚さ (mfp)		B.F.	実験による 計算コード	ガンマ線 7 群計算				ガンマ線 14 群構造	
		第1層	第2層			S8	S16	S32	S8	S16	S32
重層	4	AL 1.040	Pb 1.028	2.068	1.81	ANISN-JR P1 P3 P5 DIAC	1.40 1.44 1.44 1.42	1.48 1.53 1.52 1.52	1.53 1.57 1.57 1.57	1.25 1.30 1.30 1.29	1.33 1.38 1.37 1.37
		AL 1.040	Pb 2.056	3.096	1.72	DIAC	1.50	1.64	1.73	2.25	1.38
		AL 1.040	Pb 3.084	4.124	2.16	DIAC	1.53	1.78	1.91	1.22	1.39
		Pb 1.028	AL 1.040	2.068	2.34	DIAC	2.21	2.34	2.41	2.03	2.15
	8	Pb 1.028	AL 2.080	3.108	3.40	DIAC	3.22	3.50	3.66	2.86	3.12
		Pb 1.028	AL 3.120	4.148	4.62	DIAC	4.36	4.85	5.14	3.73	4.18
	10	AL 2.080	Pb 1.028	3.108	2.30	DIAC	1.72	1.88	1.98	1.49	1.64
		AL 2.080	Pb 2.056	4.136	2.19	DIAC	1.72	1.95	2.08	1.37	1.57
	12	Pb 2.056	AL 1.040	3.096	2.77	DIAC	2.44	2.66	2.79	2.10	2.30
		Pb 2.056	AL 2.080	4.136	3.82	DIAC	3.52	3.93	4.18	2.92	3.29
	14	AL 3.120	Pb 1.028	4.148	2.60	DIAC	2.05	2.31	2.47	1.70	1.93
	15	Pb 3.084	AL 1.040	4.124	2.84	DIAC	2.63	2.95	3.14	2.10	2.38

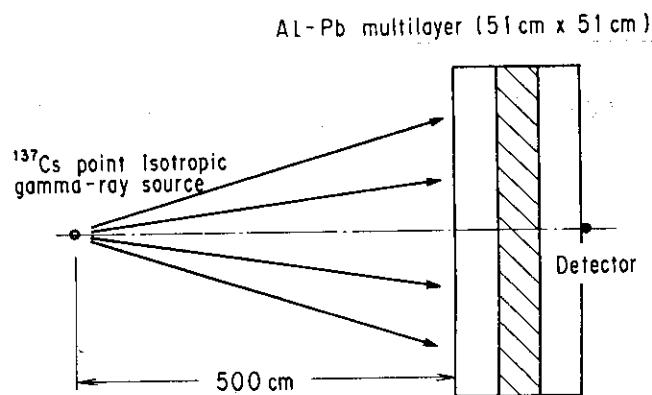


図 2.15.1 実験体系

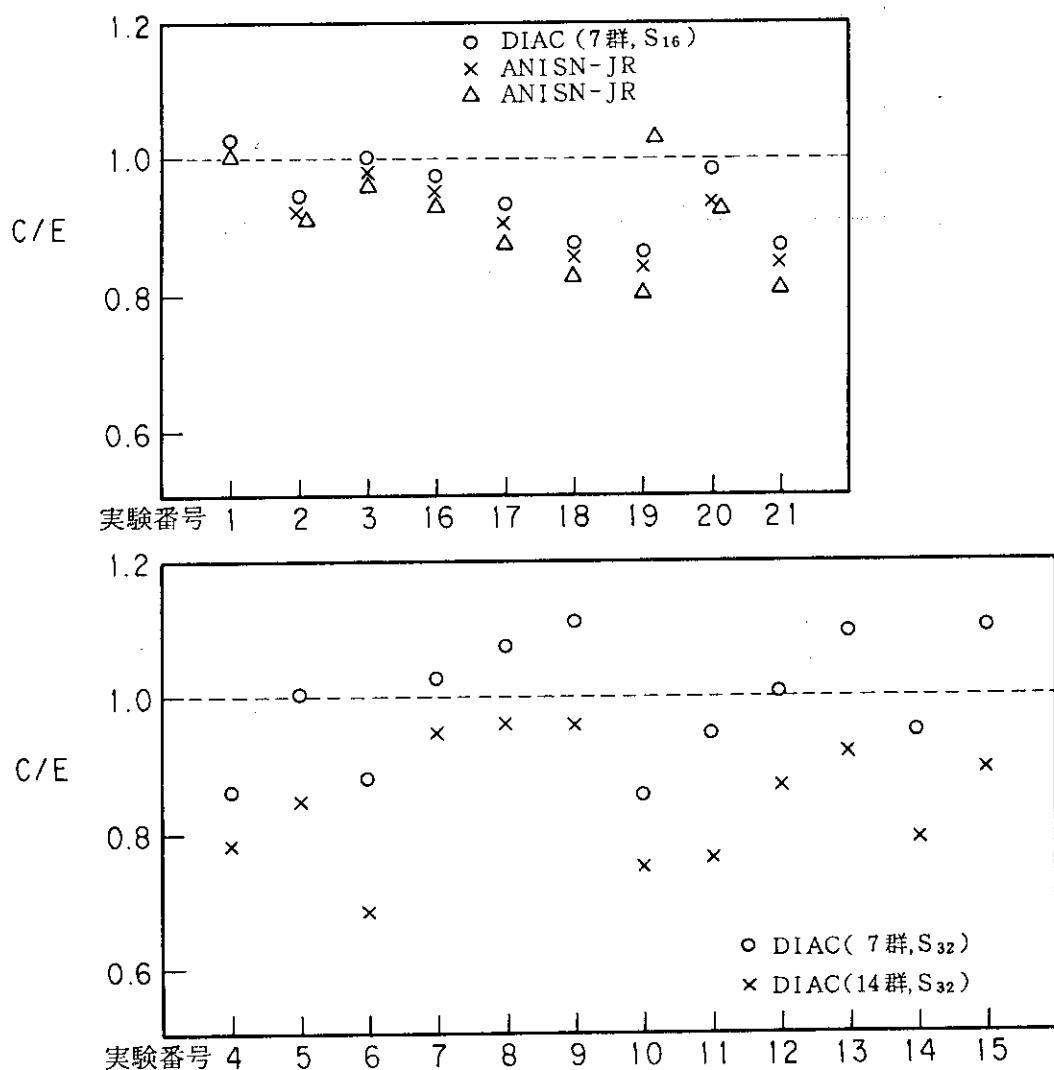
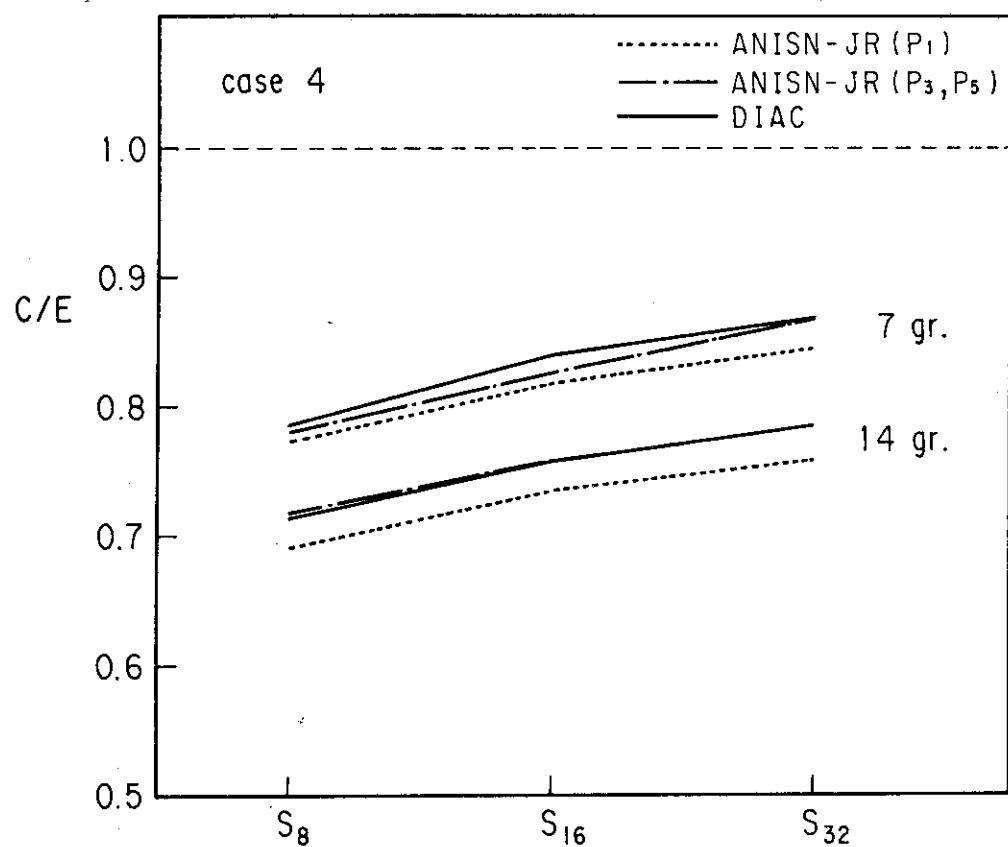


図 2.15.2 計算結果の比較

図 2.15.3 ビルドアップ係数に対する S_N 次数の効果

2.16 ガンマ線のダクトストリーミング問題

2.16.1 実験概要

本問題はガンマ線源がダクトの中心軸上にない場合のストリーミングを評価する実験であり、ストリーミングしたガンマ線がダクト周囲にどのように分布するかを調べたものである。

(1) 線源条件

線源は⁶⁰Co であり、10 Ci と 0.5 Ci の 2 種類が適宜に使用されており、較正を行って強度が求められている。線源にはカバーが付けられているが点線源として見る事が可能である。

(2) 供試体

物質はコンクリートであり、円筒、円環及び矩形ダクトを有する。厚さはコンクリート 3 層構造であり、50.8 cm, 101.6 cm 及び 152.4 cm について測定されている。密度は 2.22 g/cm^3 であるが、組成の記述はない。

(3) 実験体系

図 2.16.1 に配置図を示す。線源はダクト中心軸から 33° , 45° の角度を持つ位置に置かれ、検出器として三次元分布を測定出来るトラバースシステムが用いられている。図 2.16.2 にコンクリート壁の寸法を示し、表 2.16.1 ~ 表 2.16.3 にそれぞれ円筒、円環及び矩形ダクトの場合の実験形状を示す。表 2.16.1 に示すように本実験では散乱壁 (reflecting wall) と散乱室 (reflecting room) が設置された場合の測定も行われており、その形状をそれぞれ図 2.16.3 及び図 2.16.4 に示す。

(4) 検出器

測定器には Reuter Stokes 社製の電離箱が用いられており、測定値は照射線量率に換算されている。

2.16.2 計算概要

(1) 群定数作成

群定数は線源エネルギー (⁶⁰Co 1.33 MeV, 1.17 MeV) を考慮して表 2.16.4 に示すように 19 群構造によるものを FAIRCROSS step 2 で作成している。また、有限項 Legendre 展開法による結果も合わせて評価するために、上記の群定数より P_n 定数を FAIRCROSS step 3 を用いて作成した。

(2) 輸送計算

三次元輸送計算コード MCACE, MORSE-CG により実験形状を厳密に模擬して計算を行った。計算体系を図 2.16.5 及び図 2.16.6 に示す。線源ルーチンは新たに作成した。検出器は主に point estimator を用いているが、MCACE については real crossing estimator 及び expected crossing estimator も使用した。Biasing については Russian Roulette を用いている。照射線量換算係数は表 2.16.6 に示すように空気の吸収係数をもとに作成した。線源と検出器が同一平面にない場合及び散乱室体系では 1 回の計算での評価は困難なため、モンテカルローモンテカルロ カップリング法を採用した。

2.16.3 計算と実験の比較

MCACEによる計算値と測定値の比較を図2.16.7～図2.16.9に示す。実験では線源位置、測定器位置、コンクリート壁厚、ダクト径を変化させて測定が行われているが、ここではその中の代表例を選んで比較した。計算はCPU時間を10分以内とするため、主として検出器の数とヒストリー数を調整している。そのため計算値のFSD(Fluence Standard Deviation)が小さくならない場合がある。図3.18.7はダクト直径20cm、線源点とダクト中心軸のなす角度が45°、ダクト中心軸を含む平面上に線源のある場合に、コンクリート壁からの距離Cをパラメータとした線量率分布を示す(図2.16.5及び図2.16.6参照)。図2.16.8はダクト直径20cm、線源点とダクト中心軸のなす角度が33°、コンクリート厚さ101.6cm、コンクリート壁からの距離150cmの場合に、ダクト中心軸を含む平面からの距離Yをパラメータとした線量率分布を示す。図2.16.9はダクト直径20cm、コンクリート壁からの距離150cm、ダクト中心軸を含む平面上に線源のある場合に、線源点とダクト中心軸のなす角度θをパラメータとした線量率分布を示す。

パラメータCとθに関する結果はいずれも測定値と良好な一致を示し、ダクト壁のWall Scatteringの寄与とCorner Scatteringの寄与を良く再現している。一方、パラメータYに関する結果の不一致が大きい理由としてモンテカルローモンテカルロ カップリング法を用いた時の接続面の選定等が不適当と考えられる。

2.16.4 評価・考察

本問題はコンクリートダクトによるガンマ線ストリーミングを取り扱っており、実際の放射線を取扱う施設の良いモデル実験と云える。線源を直接見込まないダクトからの漏洩線量率を計算したが、モンテカルローモンテカルロ カップリング法を用いない計算法では測定値と良好な一致を示し、MCACEの有効性が確認された。

また、従来のモンテカルロコードMORSE-CGを用いた計算結果(P_3 , P_9)との比較は図2.16.10に示すとおりであるが、MCACEによる計算値(DAR法による)は良好である事が判る。一方、 P_3 によるMORSE-CGの結果はDAR, P_9 に比べて若干差異が生じている。本体系のような一回散乱成分の寄与が大きい場合、MCACEで採用したDAR法は有効であると評価できる。

モンテカルローモンテカルロ カップリング法についてはその接続面の選定方法によって結果が大きく変化する事が示された。比較的低エネルギーの中性子に対するカップリング法は上記のような接続面の選定による影響は少なく、有効な手法である事が示されているが、ガンマ線のように直進性が強い粒子については、容易ではないと思われる。パラメータサーベイの結果は粒子のヒストリー数が少なく、接続面に入射するガンマ線が多くないため、カップリング計算の際の線源として不適当であると考えられ、そのため結果における系統性が見い出せなかったものと思われる。しかしながら、接続面の選定法はガンマ線ストリーミングの場合、特に重要であり、慎重に取扱うべきものである事が明らかとなった。今後接続面の満すべき条件について、詳細な検討が必要と考えられる。

表 2.16.1 円筒ダクトによる実験形状

Configuration Number	Diameter		Length		Conditions	
	cm	in	cm	in		
1	21.1	8.3	50.8	20	Shield Wall	
2	41.9	16.5	50.8	20	"	"
3	4.76	1.88	101.6	40	"	"
4	10.3	4.06	101.6	40	"	"
5	21.1	8.3	101.6	40	"	"
6	41.9	16.5	152.4	60	"	"
7	10.3	4.06	152.4	60	"	"
8	21.1	8.3	152.4	60	"	"
9	41.9	16.5	152.4	60	"	"
10	10.3	4.06	101.6	40	Reflecting Wall	
11	21.1	8.3	101.6	40	Reflecting Room	
12	10.3	4.06	152.4	60	Iron Liner	

表 2.16.2 円環ダクトによる実験形状

Configuration Number	Outside Diameter		Core Diameter		Length	
	cm	in	cm	in	cm	in
13	21.1	8.3	6.03	2.38	101.6	40
14	21.1	8.3	10.16	4.0	101.6	40
15	41.9	16.5	27.62	10.88	101.6	40
16	41.9	16.5	32.39	12.75	101.6	40
17	21.1	8.3	6.03	2.38	152.4	60
18	21.1	8.3	10.16	4.0	152.4	60
19	41.9	16.5	27.62	10.88	152.4	60
20	41.9	16.5	32.39	12.75	152.4	60

表 2.16.3 矩形ダクトによる実験形状

Configuration Number	Height		Width		Length	
	cm	in	cm	in	cm	in
21	15.2	6	30.5	12	101.6	40
22	30.5	12	30.5	12	101.6	40

Configuration Number	Wall thickness
	cm
	in
23	50.8
24	101.6
25	152.4

表 2.16.4 ガンマ線エネルギー群構造

GROUP	UPPER(eV)	LOWER(eV)
1	1.37 + 6	1.29 + 6
2	1.29 + 6	1.25 + 6
3	1.25 + 6	1.21 + 6
4	1.21 + 6	1.13 + 6
5	1.13 + 6	1.05 + 6
6	1.05 + 6	9.50 + 5
7	9.50 + 5	8.50 + 5
8	8.50 + 5	7.50 + 5
9	7.50 + 5	6.50 + 5
10	6.50 + 5	5.50 + 5
11	5.50 + 5	4.50 + 5
12	4.50 + 5	3.50 + 5
13	3.50 + 5	2.50 + 5
14	2.50 + 5	1.50 + 5
15	1.50 + 5	1.00 + 5
16	1.00 + 5	8.00 + 4
17	8.00 + 4	6.00 + 4
18	6.00 + 4	4.00 + 4
19	4.00 + 4	2.00 + 4

表 2.16.6 ガンマ線線量率変換係数

GROUP	mR/h/photon/cm ² /sec
1	2.35 - 3
2	2.21 - 3
3	2.15 - 3
4	2.10 - 3
5	2.00 - 3
6	1.86 - 3
7	1.68 - 3
8	1.50 - 3
9	1.35 - 3
10	1.15 - 3
11	1.00 - 3
12	7.80 - 4
13	5.70 - 4
14	3.60 - 4
15	2.02 - 4
16	1.42 - 4
17	1.23 - 4
18	1.30 - 4
19	2.85 - 4

表 2.16.5 物質の組成

ATOMIC NUMBER DENSITY ($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

CONCRETE

C	6.438 - 3
O	4.116 - 2
Si	9.309 - 3
Ca	8.456 - 3

AIR

N	4,250 - 5
O	1.130 - 5

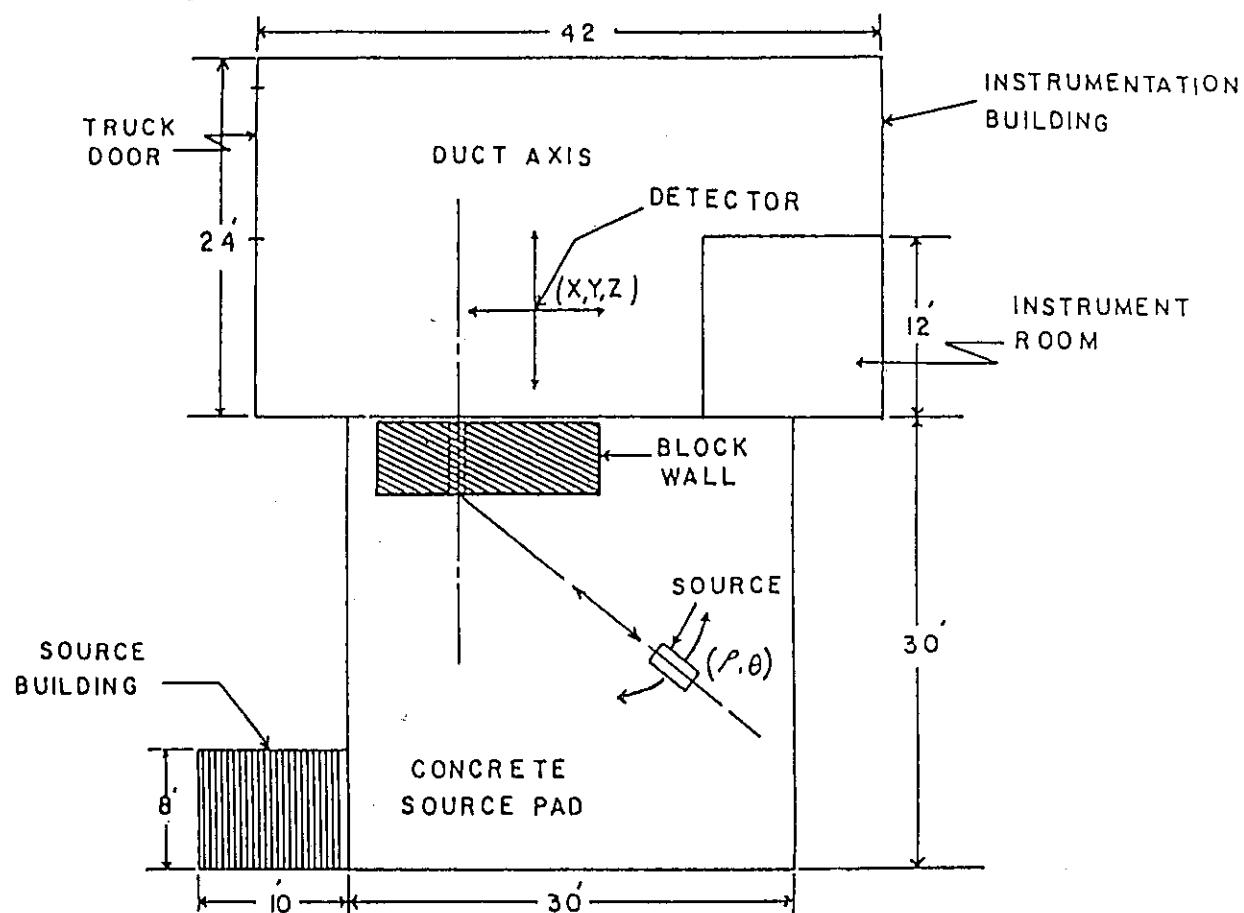
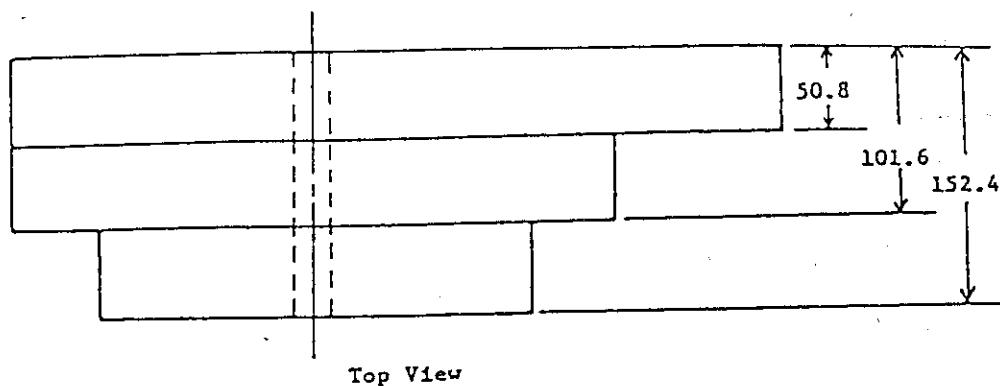
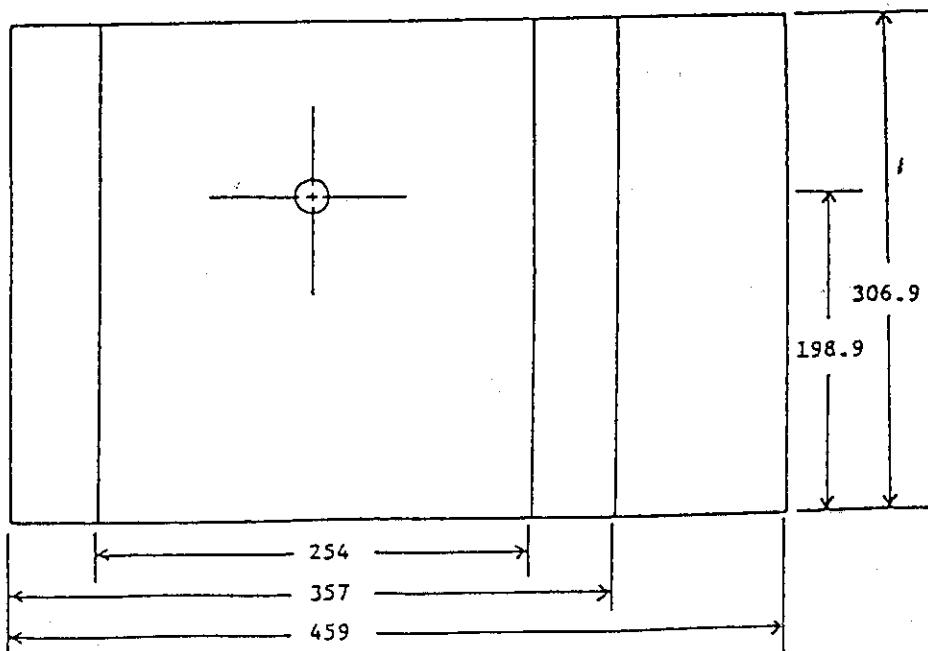


図 2.16.1 ストリーミング実験配置



Top View



Front View

図 2.16.2 コンクリート遮蔽壁の寸法

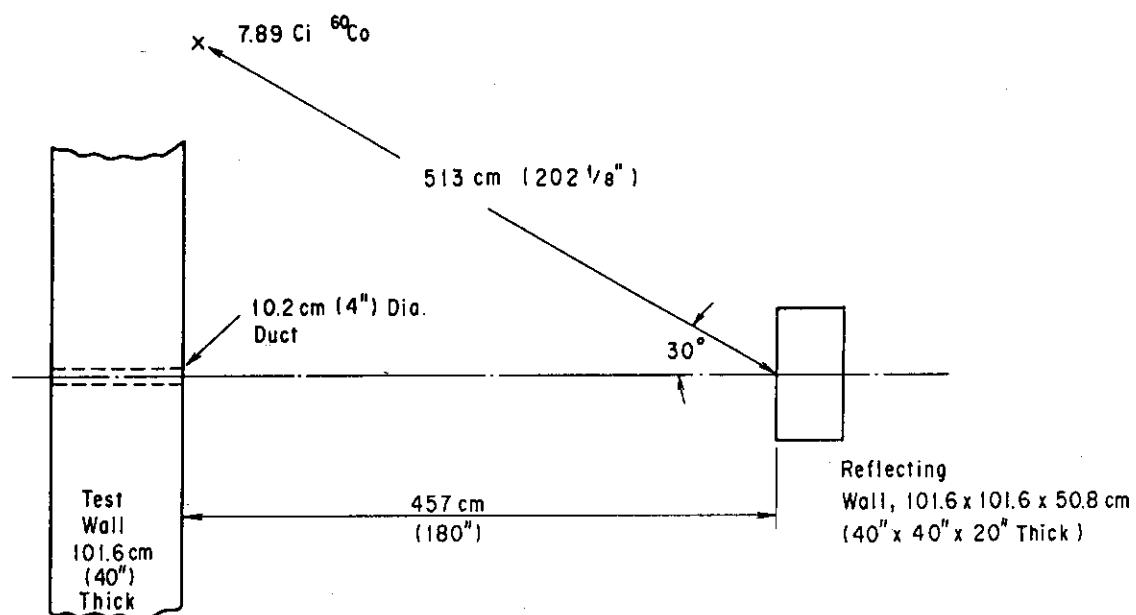


図 2.16.3 散乱壁を含んだ実験配置

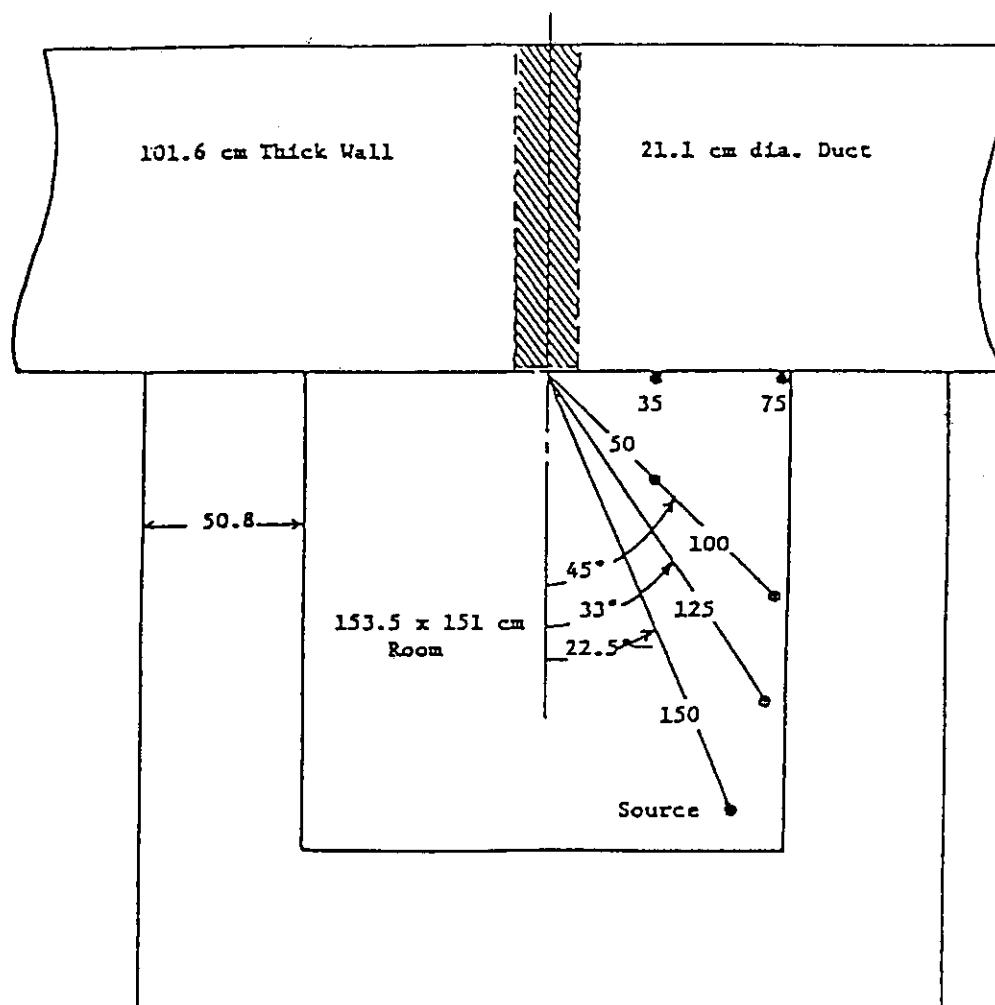


図 2.16.4 散乱室を含んだ実験配置

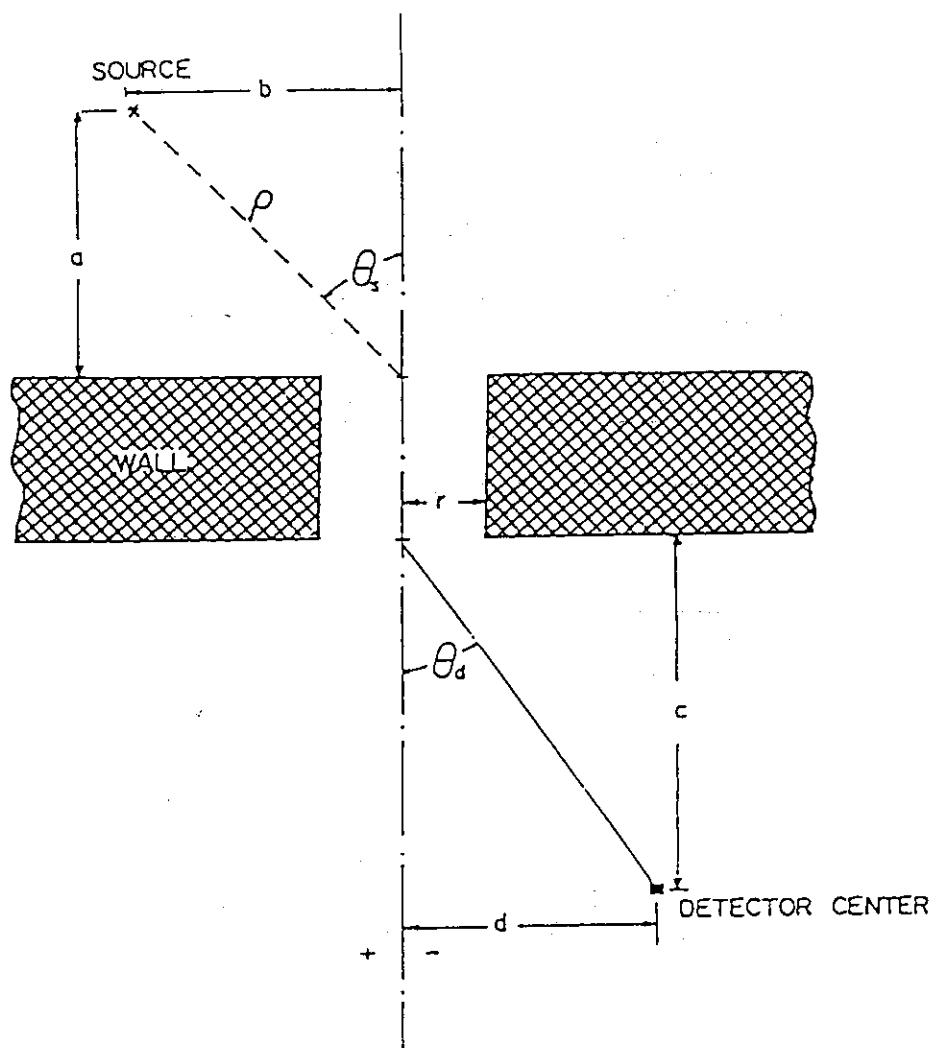


図 2.16.5 ガンマ線ストリーミング計算体系

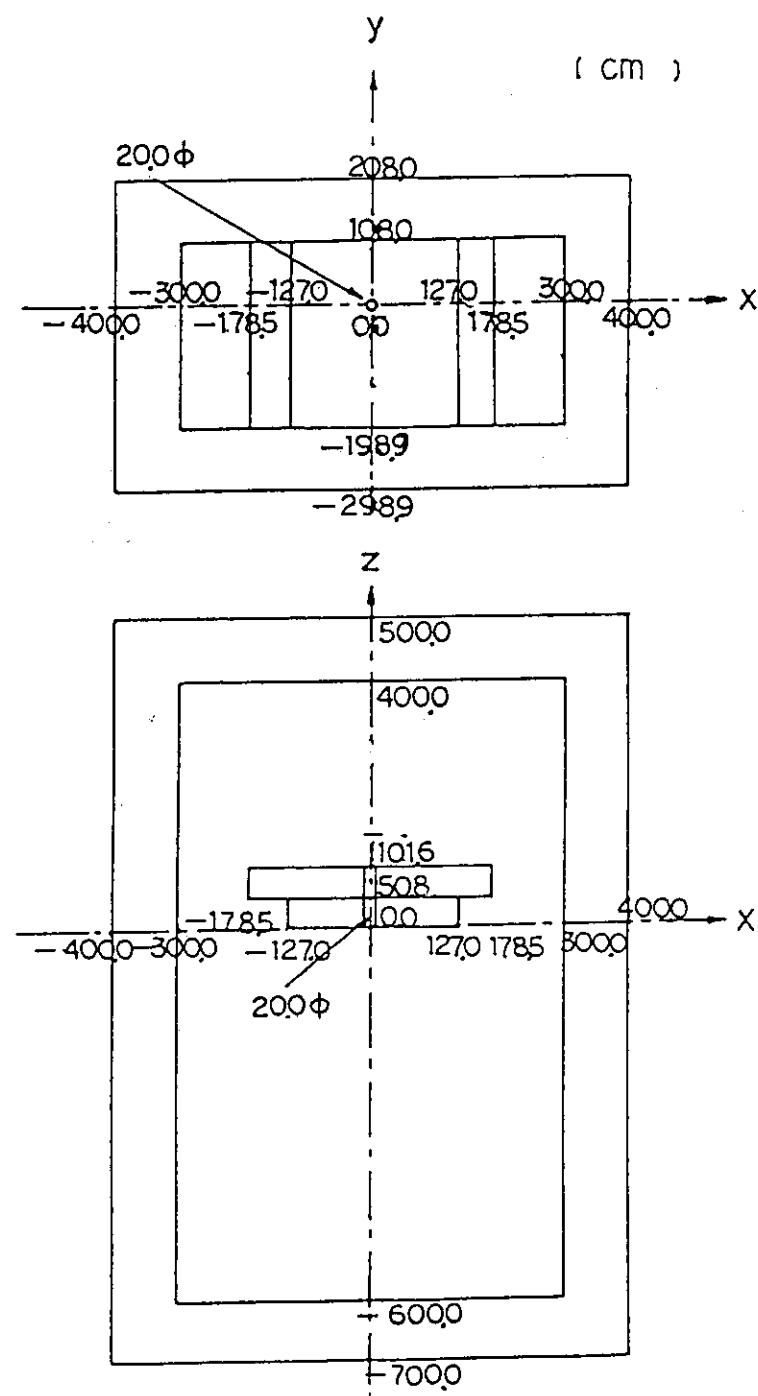


図 2.16.6 散乱室体系におけるストリーミング計算体系

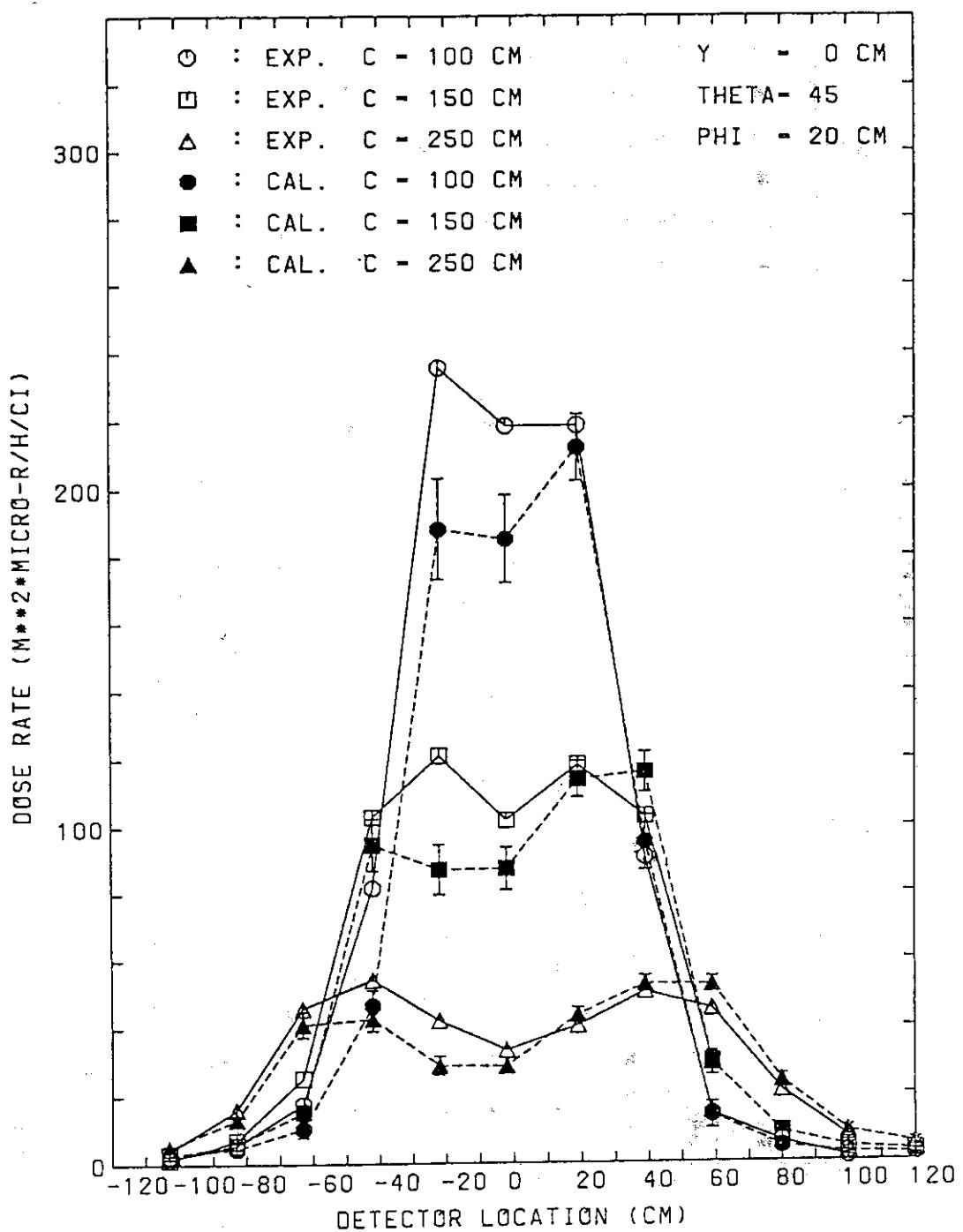


図 2.16.7 ガンマ線線量率空間分布

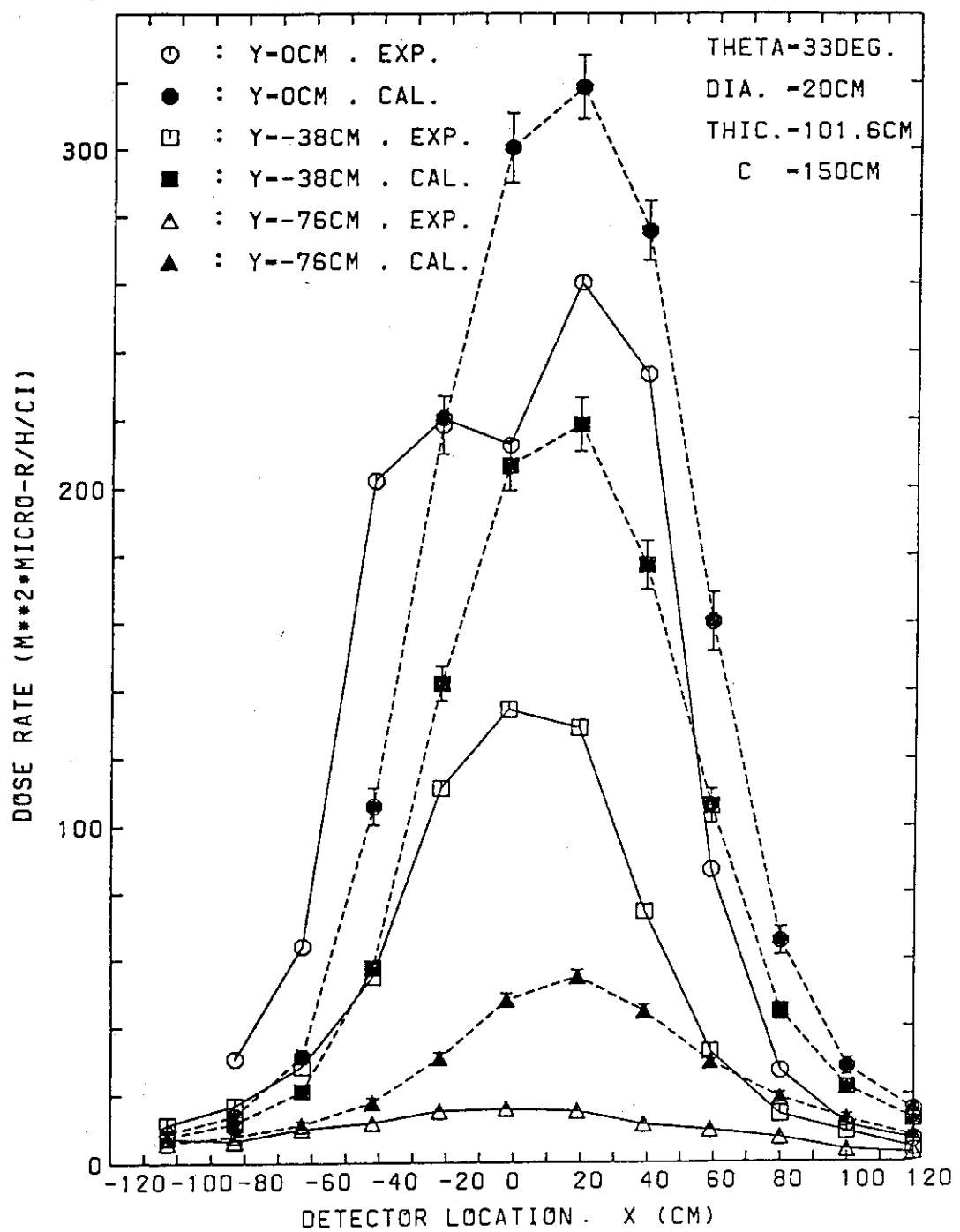


図 2.16.8 ガンマ線線量率空間分布

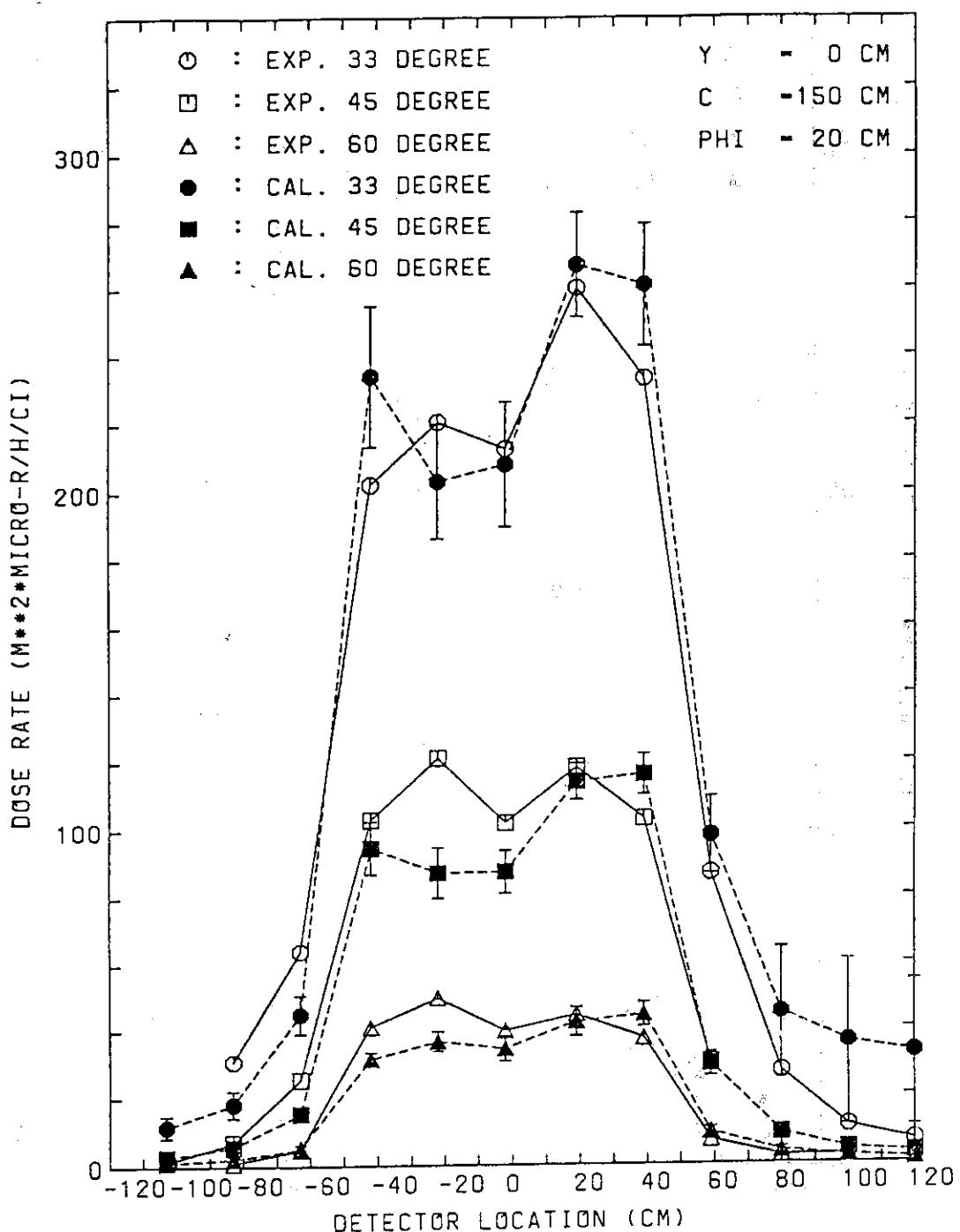


図 2.16.9 ガンマ線線量率空間分布

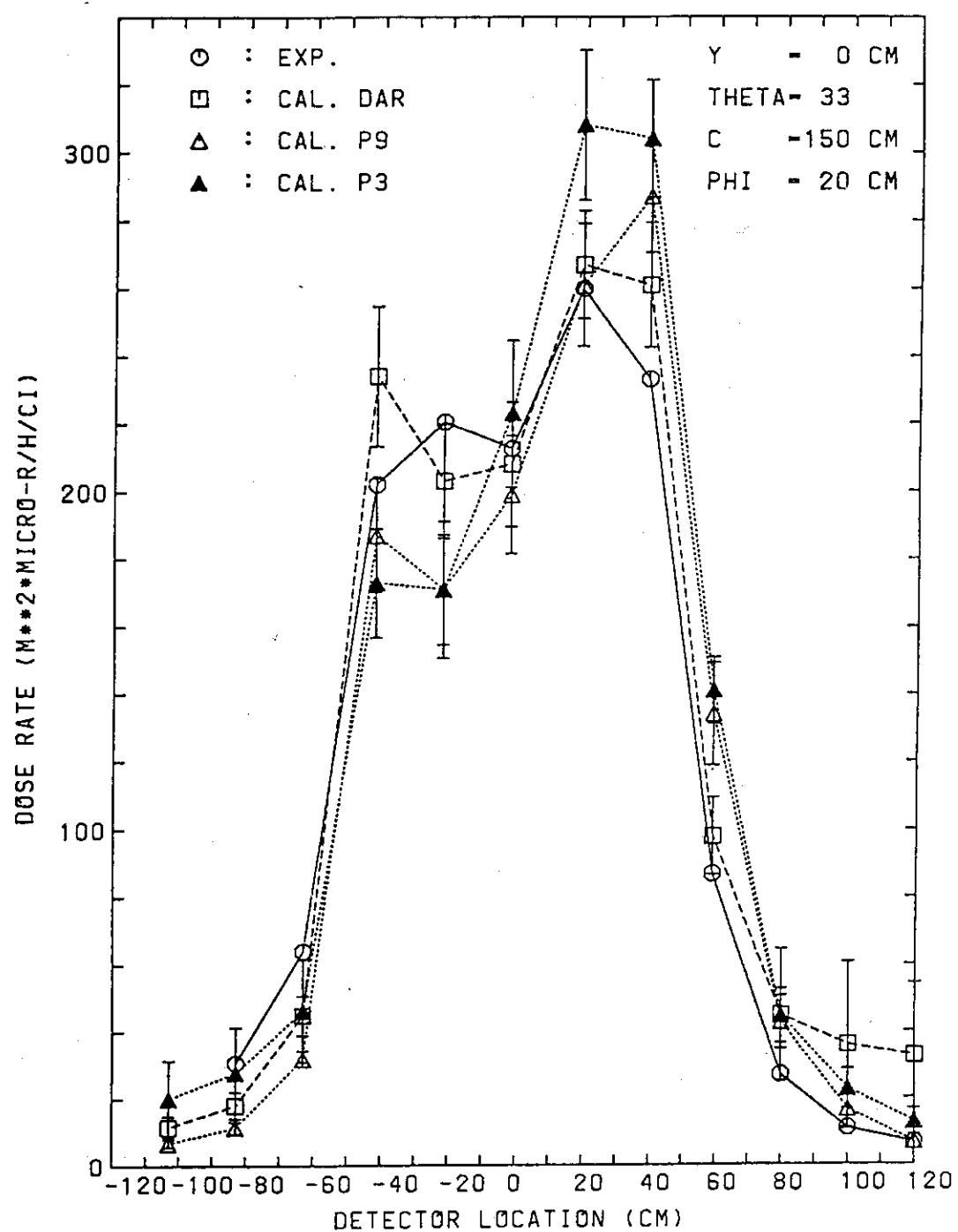


図 2.16.10 MCACE と MORSE - CG による計算結果の比較

2.17 固体廃棄物貯蔵庫からのスカイシャイン問題

2.17.1 実験概要

本測定は A 原子力発電所のタービン建家及び固体廃棄物貯蔵庫を対象に行われ、測定の内容は大きく ① スカイシャイン線源項の測定、② スカイシャイン線量の実測、③ バックグラウンド評価のための測定に分けられている。

図 2.17.1 に A 原子力発電所の概略図を示す。以下に本項での計算対象とした固体廃棄物貯蔵庫についての測定の概要を示す（表 2.17.1 参照）。

(1) 線源条件

線源は固体廃棄物貯蔵庫内のセメント固化ドラム缶等であり、主な線源核種として ^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV) 及び ^{54}Mn (0.835 MeV) が考えられている。

(2) 検出器

固体廃棄物貯蔵庫の天井面及び天井面下 1 m における線量率測定は熱蛍光線量計 (TLD) を用いて行った。

固体廃棄物貯蔵庫屋上においては、2"φ球状 NaI (Tl) を用いた波高分布測定、SCA による測定等を行った。

固体廃棄物貯蔵庫の主な線源核種は、 ^{60}Co (1.17 MeV, 1.33 MeV) 及び ^{54}Mn (0.835 MeV) であるとし測定エネルギー範囲を波高分布測定の場合には 0.05 ~ 3 MeV、SCA の場合には 0.5 MeV としている。

スカイシャイン線量については、3"φ球形 NaI (Tl) を用いた 1 m 高さでの波高分布測定 (0.05 ~ 3 MeV) 及び SCA を用いた測定 (0.025 ~ 0.5 MeV, 0.5 ~ 1 MeV, 1 MeV 以上) を行った。

バックグラウンド評価のための測定としてスカイシャイン線量測定地点付近の土壤を核種分析し、土壤中に含まれる U 系列、Th 系列、 ^{40}K のそれぞれの濃度を求めた。

核種分析には Ge (Li) 検出器を用いた。核種の濃度から 1 m 高さでの線量率を求める換算係数として Gustafson の係数を用いた。また、3"φ球形 NaI (Tl) を用いてスカイシャイン線量を測定した際に引続いて NaI の下方に直径 20 cm の鉛遮蔽体を置き、下方からの成分を遮蔽した状態で測定を行った。施設からの影響のない平坦地では下方を鉛で遮蔽した状態の線量値と遮蔽しない状態での線量値の比は一定であり、また、スカイシャイン成分は検出器の下方から入ってこないため、この測定結果はバックグラウンド評価のための 1 つのデータとなる。更に、SCA における 3.8 MeV 以上の計数からバックグラウンドを推定した。このバックグラウンド推定法は、3"φ球形 NaI (Tl) による波高分析測定及び SCA による測定値を用いる。N は 6.13 MeV, 7.11 MeV の γ 線を放出するが、自然環境では 3 MeV 以上の γ 線を放出する核種は存在しない。また、検出器ごとに N の応答関数標準スペクトルとそれに対応する線量率がわかっているので、3.8 MeV 以上のカウント数と線量率との比を求めることができる。

(3) 実験体系

固体廃棄物貯蔵庫の形状及びドラム缶の形状を図 2.17.2 に示す。また、同図に示されてい

る線源ブロックの線源条件を表 2.17.2 に示す。固体廃棄物貯蔵庫内及び屋上の線量率測定に際してのアドレスを図 2.17.3 に示す。

スカイシャイン線量の測定は固体廃棄物貯蔵庫の北西方向が約 90 m の距離を平坦にとれるためこれを測定ラインとした（図 2.17.1 参照）。

バックグラウンド評価のための測定に用いる土壌は、固体廃棄物貯蔵庫北西側の 2 点で採取された。

2.17.2 計算概要

固体廃棄物貯蔵庫の内部及び屋上の線量率を 1 次元輸送計算コード DIAC, 2 次元輸送計算コード DOT3.5 で計算する。また、貯蔵庫からのスカイシャイン線量率を 2 次元輸送コード DOT3.5 で計算する。

(1) 計算モデル

固体廃棄物貯蔵庫の形状は図 2.17.2 に示すとおりであり、10 個のブロックから成る線源ドラムが 3 段積みになっている。線源ドラムにはキャップ付きとキャップなしの 2 種類があり、各ブロックごとの線源強度は表 2.17.2 に示されるように異なっているので、計算では全ブロックの平均線源強度をキャップ付きとキャップなしの 2 ケースについて計算したものを用いる。表 2.17.3 に計算に用いる線源強度を示す。図 2.17.4 及び 2.17.5 に DIAC 計算モデルを、図 2.17.6 に DOT3.5 の計算モデルをそれぞれ示す。

(2) 群定数

群定数は FAIRCROSS step 2 により、空気コンクリートの 2 物質の巨視的群定数を作成する。また、DOT3.5 の計算に必要な P_ℓ 展開群定数は FAIRCROSS step 3 により作成する。表 2.17.4 にエネルギー群構造と線量変換係数を示す。また、計算に用いる物質の組成を表 2.17.5 に示す。

(3) 計算パラメータ

固体廃棄物貯蔵庫内部及び屋上の線量率について DIAC の S_n 次数を 8, 16, 32 と変えて計算を行う。また、DIAC の空間メッシュを変えてその影響の評価を行う。DOT3.5 の計算は貯蔵庫内の線量率計算からスカイシャイン線量計算までを 1 回で行う。DOT3.5 については、 P_ℓ 展開次数を P_1, P_3, P_5 と変えてその影響を評価する。

2.17.3 計算と実験の比較

測定結果を表 2.17.6 に示す。また、DIAC 及び DOT3.5 による固体廃棄物貯蔵庫の内部及び屋上における線量率並びに DOT3.5 によるスカイシャイン線量計算結果をそれぞれ図 2.17.7 及び図 2.17.8 に示す。

図 2.17.7 より以下のことが云える。

- ① DIAC と DOT3.5 の結果を比較すると DIAC の結果の方が大きい。
- ② DIAC の結果では線量率の減衰が直線的であるのに対し DOT3.5 の結果では貯蔵庫内部での線量率はなだらかな減衰曲線となっている。
- ③ DIAC の結果に対する S_n 分点の影響として S_{16}, S_{32} はほとんど同じ値であり、 S_8 は S_{16} より

りも若干小さい値である。

④ DOT3.5 の結果に対する P_ℓ 展開次数の影響として P_3 , P_5 は同じ結果となった。

⑤ 表 2.17.6 の測定結果を用いて貯蔵庫内部及び屋上での平均線量率を求めるとき、天井面下 1 m で 7.33 mR/h , 天井面で 6.08 mR/h , 屋上で 0.408 mR/h となる。これらと計算値を比較すると貯蔵庫内部についてはキャップなしの結果が $30 \sim 40 \text{ mR/h}$, キャップありの結果が $10 \sim 15 \text{ mR/h}$ であり測定値よりも大きな値となっている。屋上での線量率についてもキャップなしの結果が $10 \sim 14 \text{ mR/h}$, キャップありの結果が $3 \sim 5 \text{ mR/h}$ であり、測定値よりも 1 衍程大きい値である。

また、図 2.17.8 より以下のことが言える。

① DOT3.5 の結果は実測値よりも 1 衍程度大きい。

② 報告書での計算値とはほぼ一致している。

2.17.4 評価と考察

2.17.3 項で述べたように計算値が実測値よりも大きなものとなつたが、その原因として線源強度及び密度の推定の誤差、天井コンクリート密度の誤差等が考えられる。

また、本測定は、数千本のドラム缶を線源としているが、これを一次元コード又は 2 次元コードを用いて計算する際のモデル化において、誤差を生じることも考えられる。

線源項が確定できないので計算コードの評価としては満足できるベンチマーク問題ではないが、実際の問題を取り扱ったデータとして採用した。

参考文献

”スカイシャイン線量評価法確立のための調査研究報告書” 原子力安全研究協会、昭和54年3月

表 2.17.2 各ブロックごとの線源条件

Block No.	線源領域表面積			S cap ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)		S no cap ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)		ρ_{cap} (g/cm^3)	$\rho_{no cap}$ (g/cm^3)
	A total (cm^2)	A cap (cm^2)	A no cap (cm^2)	^{60}Co	^{54}Mn	^{60}Co	^{54}Mn		
1	4.95+5	3.41+5	1.54+5	7.12-4	1.11-4	6.36-5	2.58-7	各ブロック IC線源 1.28 g/cm^3	各ブロック 共通に 0.377 g/cm^3
2	4.61+5	4.54+5	7.5+3	8.89-4	1.36-4	1.27-3	6.82-6		
3	4.95+5	1.31+5	3.64+5	2.14-3	2.11-4	3.59-3	7.54-8		
4	4.54+5	4.09+5	4.5+4	2.03-3	2.24-4	3.24-3	1.66-7		
5	4.95+5	2.81+5	2.14+5	2.10-2	3.92-3	4.15-3	-		
6	4.54+5	4.46+5	7.5+3	1.57-2	2.67-3	2.79-3	-		
7	4.95+5	2.51+5	2.44+5	3.56-2	7.48-3	2.20-3	-		
8	4.54+5	3.71+5	8.3+4	2.96-2	6.05-3	4.42-3	-		
9	3.30+5	1.54+5	1.76+5	1.99-3	4.62-4	2.85-3	-		
10	4.54+5	4.35+5	1.9+4	1.71-3	3.56-4	2.02-2	--		

A total : 各ブロックの表面積

A cap : 各ブロックの表面積のうち図 4.4.2 に示すドラム 1 タイプのドラムの占める面積

A no cap : " 2 "

S cap : ドラム 1 タイプのドラムの平均線源強度

S no cap : " 2 "

 ρ_{cap} : " 1 " 平均線源領域密度 $\rho_{no cap}$: " 2 "

表 2.17.3 計算に用いる線源強度

単位: Photons / $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$

群	UPPER ENERGY (MeV)	CAPあり	CAPなし
1	14.0	0.0	0.0
2	12.0	0.0	0.0
3	10.0	0.0	0.0
4	8.0	0.0	0.0
5	6.5	0.0	0.0
6	5.0	0.0	0.0
7	4.0	0.0	0.0
8	3.0	0.0	0.0
9	2.5	4.24-3	1.41-3
10	2.0	0.0	0.0
11	1.66	3.54+2	1.17+2
12	1.33	3.54+2	1.17+2
13	1.0	6.81+1	3.55-3
14	0.8	0.0	0.0
15	0.6	0.0	0.0
16	0.4	0.0	0.0
17	0.3	0.0	0.0
18	0.2	0.0	0.0
19	0.1	0.0	0.0
20	0.05 (0.02)	0.0	0.0

表 2.17.4 ガンマ線エネルギー群構造と線量率変換係数 (20群)

GROUP		ENERGY RANGE (eV)	Flux-to Dose Rate Conversion Factors (R/hr/photon/cm ² /sec)
1	1.4000E+07	1.2000E+07	1.1770E-05
2	1.2000E+07	1.0000E+07	1.0270E-05
3	1.0000E+07	8.0000E+06	8.7300E-06
4	8.0000E+06	6.5000E+06	7.4500E-06
5	6.5000E+06	5.0000E+06	6.3440E-06
6	5.0000E+06	4.0000E+06	5.3960E-06
7	4.0000E+06	3.0000E+06	4.5930E-06
8	3.0000E+06	2.5000E+06	3.9520E-06
9	2.5000E+06	2.0000E+06	3.4570E-06
10	2.0000E+06	1.6600E+06	3.0150E-06
11	1.6600E+06	1.3300E+06	2.6160E-06
12	1.3300E+06	1.0000E+06	2.1890E-06
13	1.0000E+06	8.0000E+05	1.8240E-06
14	8.0000E+05	6.0000E+05	1.5090E-06
15	6.0000E+05	4.0000E+05	1.1520E-06
16	4.0000E+05	3.0000E+05	8.7780E-07
17	3.0000E+05	2.0000E+05	6.1780E-07
18	2.0000E+05	1.0000E+05	3.6330E-07
19	1.0000E+05	5.0000E+04	2.5870E-07
20	5.0000E+04	2.0000E+04	2.5870E-07

表 2.17.5 物質の核種組成

MATERIAL NAME		A i r	CONCRETE
Element	Atomic Number	ATOMIC DENSITY (n /barn · cm)	ATOMIC DENSITY (n /barn · cm)
H	1	7.19909E-9	4.413E-3
C	6	7.58469E-9	
N	7	3.90993E-5	
O	8	1.05384E-5	4.775E-3
Al	13		2.457E-3
Si	14		9.435E-3
Ca	20		6.612E-3
DENSITY		0.0012049 g/cm ³ (1 atm, 20°C)	2.20 g/cm ³

表 2.17. 6 測 定 結 果

固体廃棄物貯蔵庫屋内測定結果

測定点	天井*	天井下1m**	測定点	天井	天井下1m
1 A	0.33	0.38	1 C	0.48	0.5
2 A	1.09	1.51	2 C	1.77	2.62
3 A	1.48	2.0	3 C	1.98	2.61
4 A	1.93	2.58	4 C	1.01	1.27
5 A	6.33	6.98	5 C	5.88	5.91
6 A	11.4	13.3	6 C	11.4	13.3
7 A	19.0	24.7	7 C	20.3	25.2
8 A	9.59	10.5	8 C	10.4	10.9
9 A	4.84	6.07	9 C	2.81	4.21
10 A	5.36	7.04	10 C	4.17	4.94

*) 天井：天井面における線量率 (mR/h)

**) 天井1m：天井面より1m下における線量率 (mR/h)

固体廃棄物貯蔵庫屋上測定結果

単位: $\mu\text{R}/\text{h}$

測定点	全線量率	測定点	全線量率	測定点	全線量率
1 A	73.7	1 B	28.2	1 C	36.5
3 A	117	3 B	140	3 C	129
5 A	536	5 B	624	5 C	457
7 A	1,519	7 B	1,857	7 C	1,746
9 A	329	9 B	279	9 C	242
11 A	178	11 B	124	11 C	99
13 A	17.2	13 B	17.7	13 C	16.3

固体廃棄物貯蔵庫からの寄与

(スカイシャインおよび建屋からの直接成分)

固体廃棄物貯蔵庫からの距離	通常配置	下面遮蔽法*
80 m	0.35 ($\mu\text{R}/\text{h}$)	0.50 ($\mu\text{R}/\text{h}$)
40 m	0.69	0.90
10 m		
① スカイシャイン+建屋からの成分	1.81	1.45
② スカイシャインのみ	-	1.25

* 地面での散乱成分は含まれていない(ほぼ20%に相当)

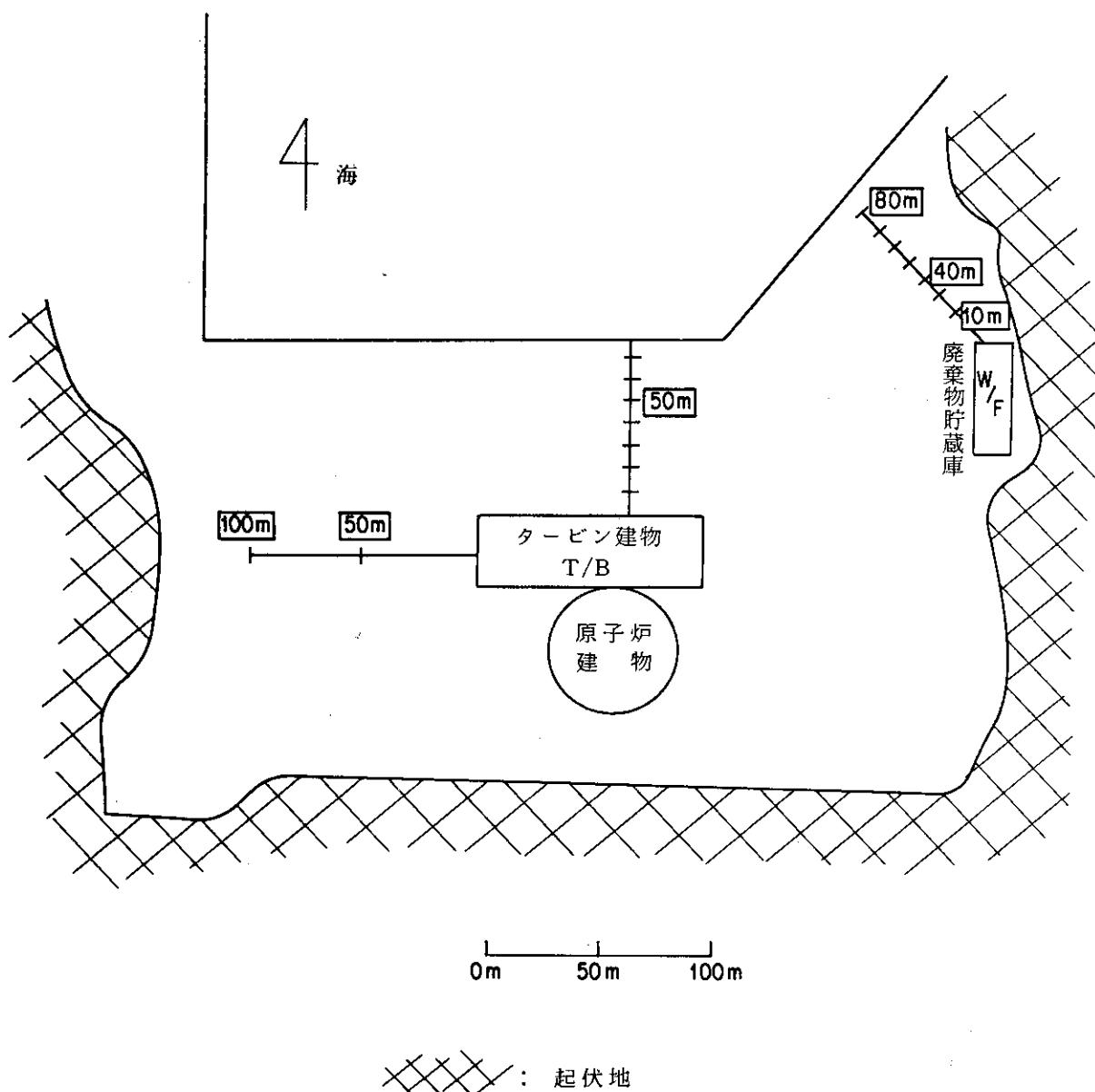
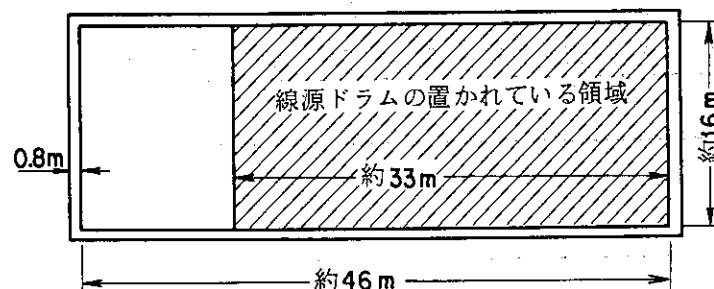


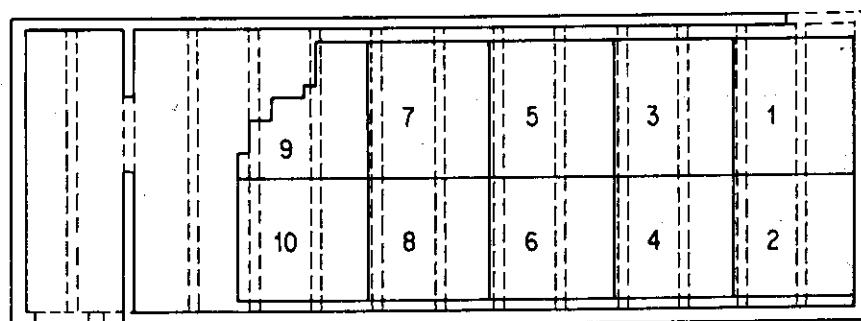
図 2.17.1 A 原子力発電所概略図



(平面図)



(側面図)



ドラム1. キャップ付きドラム

ドラム2. キャップなしドラム

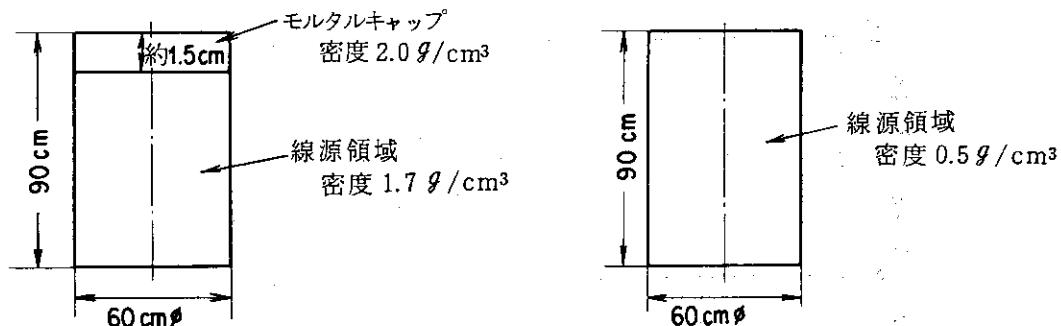


図 2.17.2 固体廃棄物貯蔵庫の形状

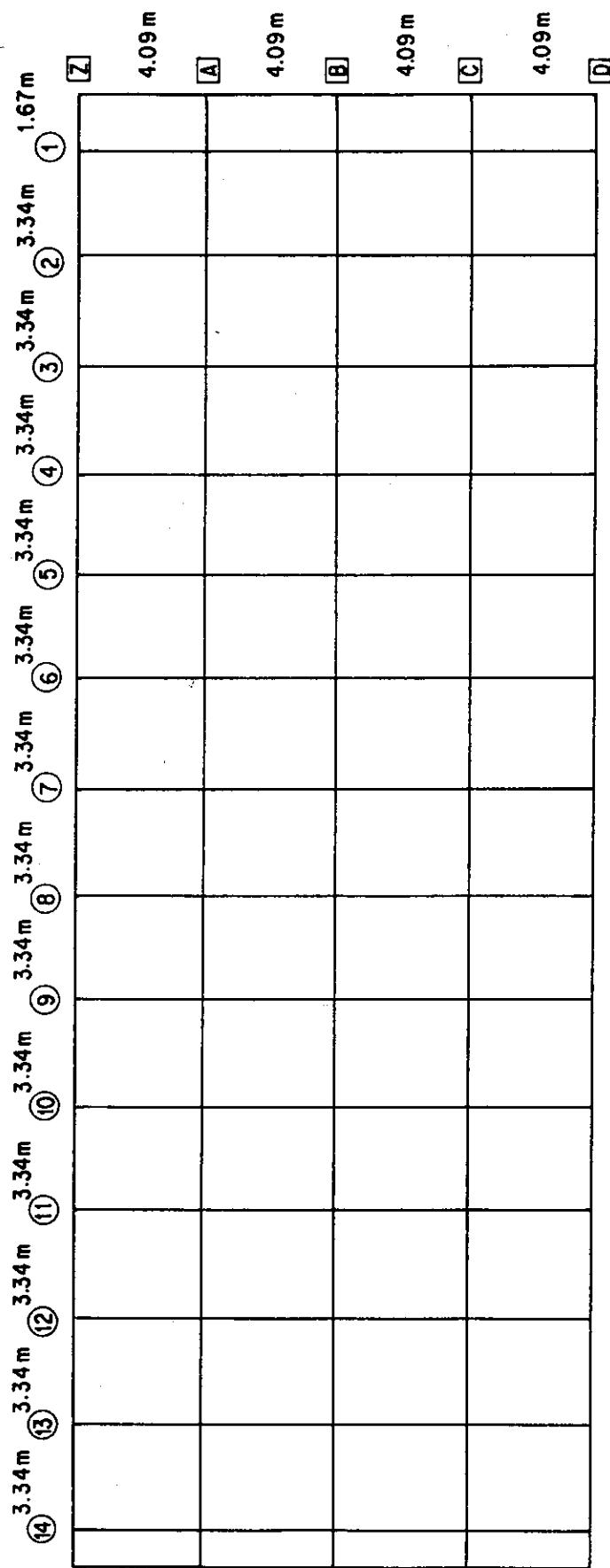
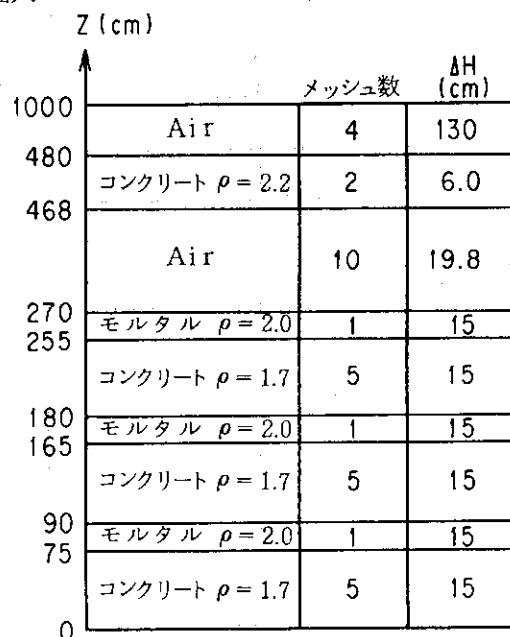


図 2.17.3 固体廃棄物貯蔵庫屋内、屋上アドレス

N

(1) メッシュ幅大



(2) メッシュ幅小

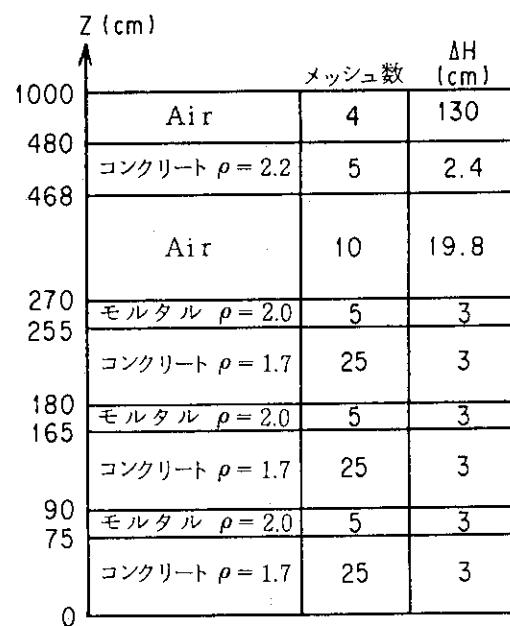
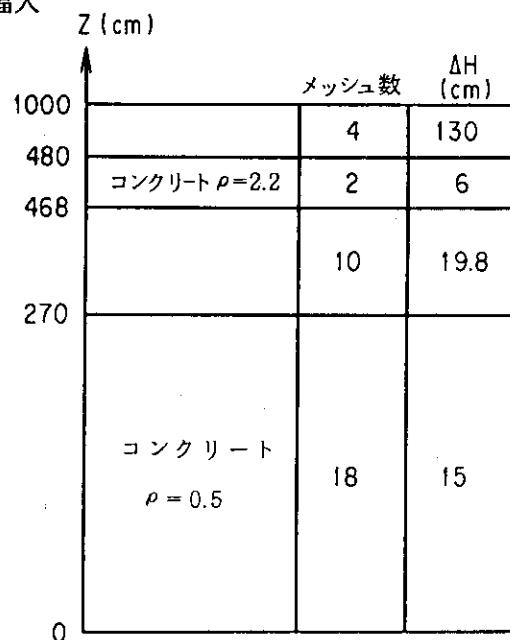


図 2.17.4 DIAC 計算モデル（ギャップあり）

(1) メッシュ幅大



(2) メッシュ幅小

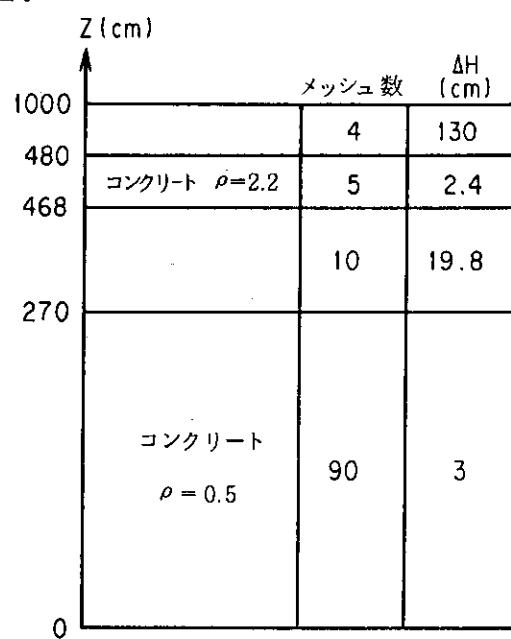


図 2.17.5 DIAC 計算モデル (ギャップなし)

(1) キャップあり

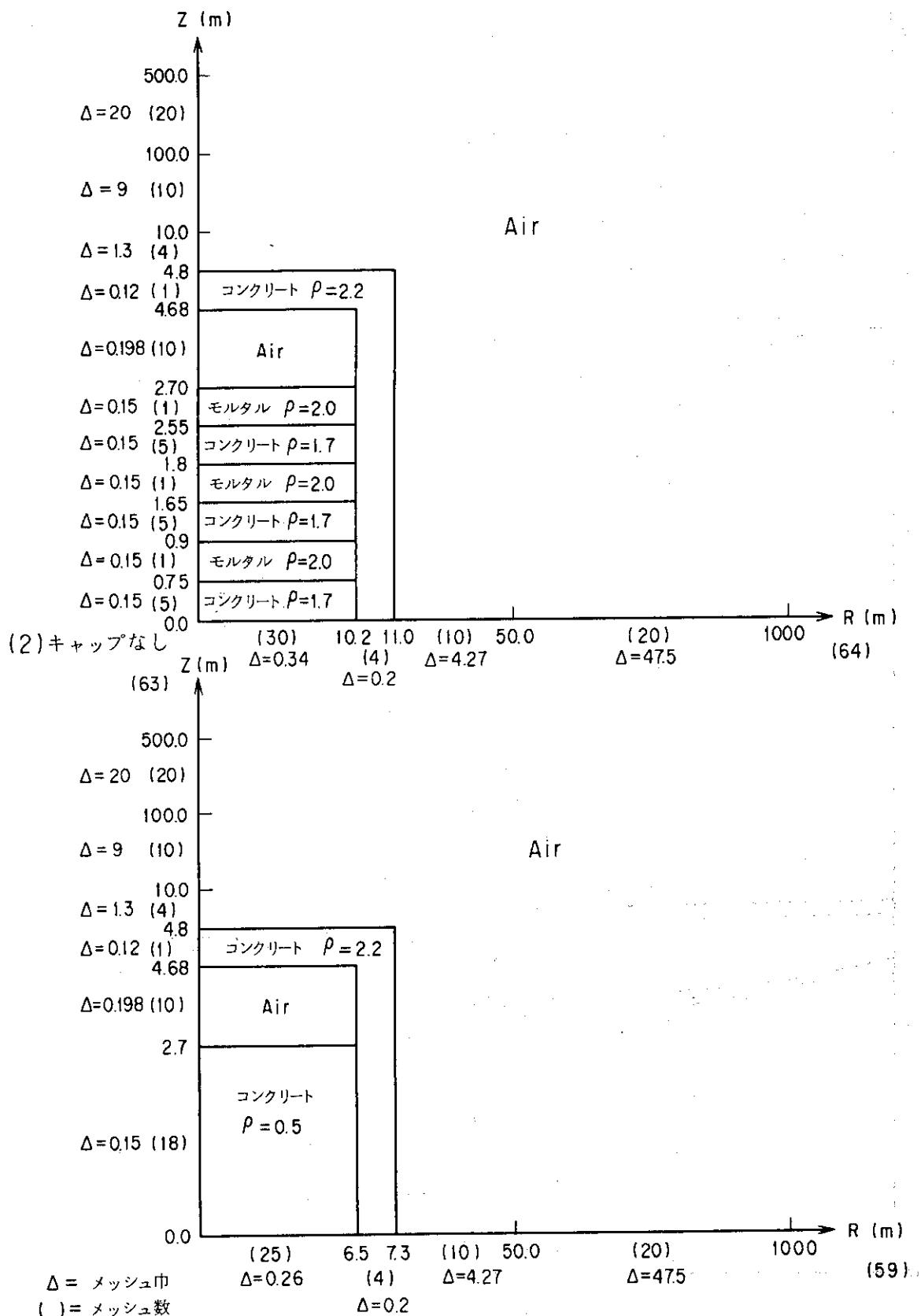


図 2.17.6 DOT 3.5 の計算モデル

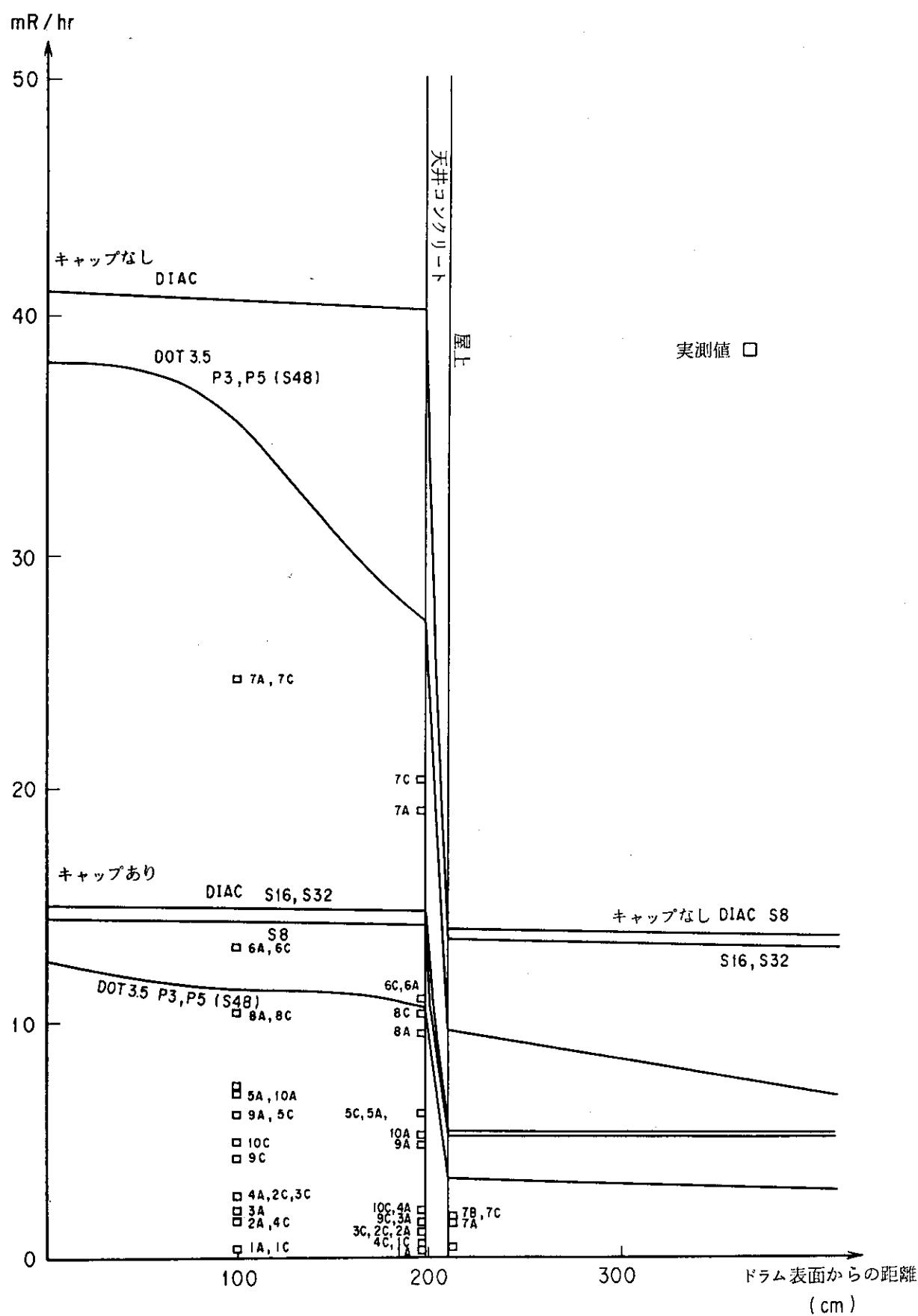


図 2.17.7 固体廃棄物貯蔵庫の内部及び屋上における線量率の実測値と計算値

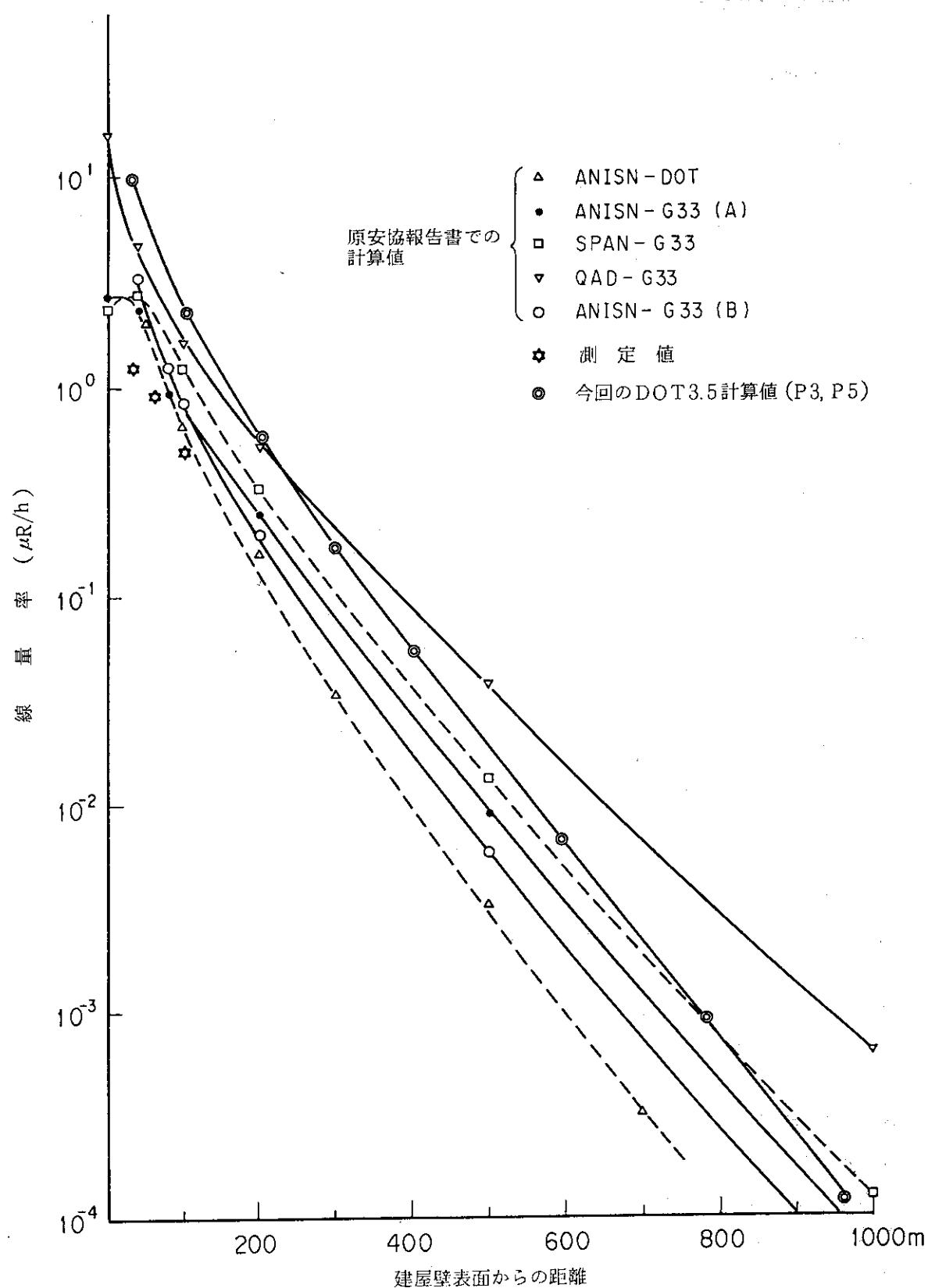


図 2.17.8 スカイシャイン線量率計算結果

2.18 タービン建屋からのスカイシャイン問題⁽¹⁾

2.18.1 実験概要

本問題は(財)原子力安全協会がまとめた「スカイシャイン線量評価手法確立のための調査研究報告書」(昭和54年3月)に含まれている商用BWR原子力発電所のタービン建屋を対象にして実施されたスカイシャイン線量の測定と解析を基にしている。詳細は上記報告書に記載されているため、ここでは簡単な説明にとどめる。

スカイシャイン線量の実測評価は①スカイシャイン線源項の測定②スカイシャイン線量の測定③バックグラウンド評価の測定について実施された。

その結果、スカイシャイン線量は自然放射線のバックグラウンドと分離出来ず、精度の良い測定値が得られなかった。従って、計算コードの精度評価の問題としては不適当であるが、線源条件が確定できない実際的な問題に対するモデル化等の参考となるため本報告書に掲載する事とした。

(1) 線源条件

タービン建屋の線源として高圧及び低圧タービン本体、高圧タービン出入口配管及び低圧タービン入口配管(中間阻止弁)中の蒸気中の¹⁶Nが考えられる。タービン建屋運転床から1mの高さにおけるガンマ線スペクトルをNaI(Tl)検出器とSCAを用いて測定し、サーベイメーターによる線量率サーベイが行われている。また、タービン建屋屋上から高さ約30cmにおけるガンマ線スペクトルがNaI(Tl)検出器を用いて測定されている。

(2) 供試体

タービン建屋の天井は軽量コンクリート(密度0.9g/cm³)及び普通コンクリート(密度2.1g/cm³)で構成されており、天井以外の壁については普通コンクリート(密度2.2g/cm³)を使用している。

(3) 実験体系

タービン建屋の概略形状を図2.18.1、高圧タービンの概略形状を図2.18.2、低圧タービンの概略形状を図2.18.3、タービン建屋運転床面の配管形状を図2.18.4、遮蔽鉄板形状を図2.18.5にそれぞれ示す。

(4) 検出器

タービン建屋外の測定はNaI(Tl)及びSCAを用いている。

2.18.2 計算概要

(1) 群定数作成

群定数はFAIRCROSS step 2を用いて表2.18.1に示す20群構造により作成した。物質の組成を表2.18.2に示す。なお、P₃群定数はFAIRCROSS step 3により作成した。

(2) 輸送計算

線源として配管(高圧タービン出入口配管、中間阻止弁周囲の配管)のみを対象とし、高圧タービン及び低圧タービンの本体は無視している。表2.18.3に各部位の¹⁶N放射能濃度を示した。配管表面からの漏洩ガンマ線は一次元S_N計算コードDIACで計算した。その際のモデル

として配管の線源領域の体積と配管厚及び遮蔽厚を実機と同一にしている。各配管の実寸法及び線源領域の等価半径を求めた根拠を図 2.18.6 (a) ~ (c) に示し、一次元計算形状を図 2.18.7 (a) ~ (c) に示した。DIAC の計算条件は S_8 であり、得られた各配管表面からの漏洩を表 2.18.4 に、タービン建屋内に存在する配管について合計したものを表 2.18.5 にそれぞれ示した。

各配管について合計した漏洩量と等価になる点線源を高圧タービン周囲あるいは中間阻止弁周囲の鉄遮蔽高さに設定した。更に図 2.18.8 に示す各飛程 (PATH1 ~ PATH5) 每に球形状の一次元輸送計算を行い天井表面及び側壁表面でのガンマ線線量率 (タービン建屋の南北方向) を求めた。線源点から真上方向における天井表面 (図 2.18.8 におけるⒶ点) においてはガンマ線束を求める。図 2.18.8 に示す各飛程における計算モデルを図 2.18.9 に示し、DIAC 計算で得られたガンマ線量率及びガンマ線束を表 2.18.6 にそれぞれ示す。

次に等価点線源から天井表面Ⓐに到る飛程において、コンクリート層を空気層に置きかえてⒶ点におけるガンマ線束 PATH1 における DIAC 計算結果と一致するように点線源強度を規格化する。規格化した点線源強度を表 2.18.7 に示す。

以上で得られた点線源条件を二次元 S_N 輸送計算コード ESPRIT, DOT3.5 に与え、first collision source 法によりスカイシャイン計算を行った。線源の角度分布は各飛程と線源点を含む垂直線とのなす角度に対応させてⒶ点での線量率を 1.0 に規格化した時の各飛程での値を用いた。線源の角度範囲は 90° までとしたものと、天井部分のみ含む 44.4° の 2 種類とした。前者には天井を通過した成分の他に側壁を透過した直接成分も寄与すると考えられる。DOT 3.5 の計算条件は P_3 , P_{48} 及び S_{96} であり ESPRIT では S_{48} , S_{70} , S_{96} を使用した。計算範囲は原子力安全研究協会の報告書で解析されている範囲 (1000 m) より拡大させ 2000 m まで考慮した。

2.18.3 計算と実験の比較

DOT3.5 による計算結果を図 2.18.10 及び図 2.18.11 に示す。本計算結果と原子力安全研究協会の報告書に示された値との比較では、タービン外壁から近い点での一致は良いが、距離が離れるにつれて差が大きくなる。この原因として、点線源の放出角を 90° まで考慮した事により、タービン側壁を透過した直接成分がスカイシャイン成分に加算されている事が考えられる。そのため点線源の放出角を 44.4° (天井の範囲に限定) とした場合の結果を合わせて表示した。この結果、測定方向 1 については ANISN-DOT-DOT による結果より、むしろ SPAN-G33 による結果に類似している。SPAN-G33 による計算も点線源の放出角を天井の範囲に限定しており、計算法が類似している所に共通点が見られる。

測定方向 2 については、他の結果と比較して線量率の絶対値、減衰傾向とも過小評価となっている。これは DOT3.5 の計算形状が 2 次元円筒形状であり、かつ点線源の放出角も azimuthal 方向に一様であるため、測定方向 1 についてのみ天井の範囲を見込んで決定した放出角を用いており、測定方向 2 に沿った天井の範囲を見込む角度よりも小さい事に寄因するものと考えられ、過小評価となったものである。また、 S_{48} 分点と S_{96} 分点での差異は約 5 % であり 650 m 以上離れた範囲では、ほとんど両者の差異は見られなかった。

DOT3.5 の結果は、有限項 Legendre 展開を用いているために水平方向約 100 m 以上、垂直方向 10 m 以上でガンマ線エネルギースペクトルに負値が発生している。

この事が計算結果の過小評価につながると考えられるため、直接角度表示法（DAR 法）を用いた二次元 S_N 輸送計算コード ESPRIT による同一計算を行った。

図 2.18.12 及び図 2.18.13 にESPRIT による結果と他の計算結果の比較を示す。これより線源からの距離が約 350 m 以上では明らかに DOT3.5 の結果が過小評価となり、距離が増加するに伴い、その傾向が大きくなる。また、 S_N 分点数を増加させると表 2.18.8 に示すようにガンマ線線量率が減少する傾向が見られた。

2.18.4 評価・考察

本問題は比較すべき実測値がないため、種々の異なる計算法による結果の比較を行った。種々の計算法が使用された理由として、タービン建屋内に存在する線源領域の形状及び建屋の形状が複雑であり、しかも線源の数が多いためモデル化が難しい事が挙げられる。今回の解析では原子力安全研究協会の検討で用いられた計算法と異なる方法を採用して結果を比較したが、その結果はおむね他の手法の結果の中間となっている。しかし、このような体系のスカイシャイン問題では、点線源からタービン建屋の天井を見込む角度に依って結果が大きく変化するため、直接成分の取扱いが重要な問題である。また、DOT3.5 による First Collision Source 法による計算は負の線束が発生し、線源点から遠くなるにつれて線量率を過小評価する事が示された。

以上の結果より、スカイシャイン計算における本コードシステムの評価は困難であるが、有限項 Legendre 展開法を用いる事による誤差は明らかにする事が出来た。問題点はむしろモデル化にあり、点線源近似を用いた場合の放出角度を注意して選定する必要がある。今後はスカイシャイン実測値のベンチマーク解析により、さらに詳細な検討が必要である。

参考文献

- (1) 「スカイシャイン線量評価法確率のための調査研究報告書」原子力安全研究協会、昭和54年3月

表 2.18.1 FAIRCROSS (step 2)
の γ 線エネルギー群構造

GROUP	ENERGY BOUNDS
1	0.14000E+02
2	0.12000E+02
3	0.10000E+02
4	0.80000E+01
5	0.65000E+01
6	0.50000E+01
7	0.40000E+01
8	0.30000E+01
9	0.25000E+01
10	0.20000E+01
11	0.16600E+01
12	0.13300E+01
13	0.10000E+01
14	0.80000E+00
15	0.60000E+00
16	0.40000E+00
17	0.30000E+00
18	0.20000E+00
19	0.10000E+00
20	0.50000E-01
21	0.20000E-01

表 2.18.3 ^{16}N 放射能濃度

位 置	水蒸気比容積 (cm ³ /g)	^{16}N 放射能濃度 ($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)
高圧タービン入口配管	29.0	1.0
高圧タービン給 気 部	32.0	0.88
〃 排 気 部	172.0	0.16
低圧タービン給 気 部	184.0	0.13
〃 排 気 部	2.8×10^{-4}	8.6×10^{-4}
C I V 配 管	172	0.14
高圧タービン出口配管	172	0.16

表2.18.2 物質の組成

		1	2	3	4	5	6	7
	MAT	空気	蒸気1	蒸気2	鉄	コンクリート1	コンクリート2	コンクリート3
		1.293×10 ⁻³ g/cm ³	29.0 cm ³ /g*	172.0 cm ³ /g*	7.8626 g/cm ³	2.1 g/cm ³	0.9 g/cm ³	2.2 g/cm ³
N	1275(7)	4.203×10 ⁻⁵						
O	1276(8)	1.152×10 ⁻⁵	1.1529×10 ⁻³	1.9440×10 ⁻⁴	3.9973×10 ⁻²	1.7132×10 ⁻²	4.1877×10 ⁻²	
H	1269(1)		2.3058×10 ⁻³	3.8880×10 ⁻⁴	1.1234×10 ⁻²	4.8146×10 ⁻³	1.1769×10 ⁻²	
Al	1193(13)				2.7141×10 ⁻³	1.1632×10 ⁻³	2.8434×10 ⁻³	
Si	1194(14)				1.2909×10 ⁻²	5.5323×10 ⁻³	1.3523×10 ⁻²	
Ca	1195(20)				2.7046×10 ⁻³	1.1591×10 ⁻³	2.8334×10 ⁻³	
Fe	1192(26)			8.479×10 ⁻²	7.0190×10 ⁻⁴	3.0082×10 ⁻⁴	7.3533×10 ⁻⁴	
Na	1156(11)				8.1051×10 ⁻⁴	3.4736×10 ⁻⁴	8.4911×10 ⁻⁴	
Mg	1280(12)				4.4330×10 ⁻⁴	1.8998×10 ⁻⁴	4.6441×10 ⁻⁴	
C	1274(6)		9.691×10 ⁻⁸					

* 比容積

表 2.18.4 各配管表面からの漏洩量
(γ/sec)

	CIV廻り配管(30B)	CIV廻り配管(30.5B)	HPT 出口配管	HPT 入口配管
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	2.10297×10^8	2.90481×10^8	4.24938×10^8	6.93982×10^8
5	2.89232×10^9	3.99225×10^9	5.84616×10^9	9.51166×10^9
6	1.29891×10^8	2.25452×10^8	2.60409×10^8	6.38563×10^8
7	1.39786×10^8	2.43289×10^8	2.80383×10^8	6.91817×10^8
8	1.14653×10^8	1.84570×10^8	2.30467×10^8	4.98803×10^8
9	9.02594×10^7	1.57985×10^8	1.80118×10^8	4.49461×10^8
10	6.72860×10^7	1.16789×10^8	1.35251×10^8	3.39973×10^8
11	7.75183×10^7	1.33139×10^8	1.54855×10^8	3.90495×10^8
12	9.13320×10^7	1.56665×10^8	1.82512×10^8	4.60170×10^8
13	6.45712×10^7	1.13240×10^8	1.30841×10^8	3.30456×10^8
14	8.03848×10^7	1.40599×10^8	1.64433×10^8	4.07357×10^8
15	1.03763×10^8	1.79358×10^8	2.09084×10^8	5.10148×10^8
16	7.19064×10^7	1.20979×10^8	1.43862×10^8	3.35256×10^8
17	9.97877×10^7	1.66096×10^8	1.91174×10^8	4.50626×10^8
18	6.12930×10^7	1.02073×10^8	1.18214×10^8	2.76640×10^8
19	1.68169×10^6	2.84355×10^6	2.69513×10^6	7.32751×10^6
20	4.47069×10^3	7.30574×10^3	1.04362×10^4	2.29127×10^4

表 2.18.5 各配管表面からの全漏洩量

(γ/sec)

	CIV廻り配管(30B)	CIV廻り配管(305B)	HPT 出口配管	HPT 入口配管	合計
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	8.41188 × 10 ⁸	1.16192 × 10 ⁹	8.49876 × 10 ⁸	1.38796 × 10 ⁹	4.24095 × 10 ⁹
5	1.15693 × 10 ¹⁰	1.59690 × 10 ¹⁰	1.16923 × 10 ¹⁰	1.90233 × 10 ¹⁰	5.82539 × 10 ¹⁰
6	5.19564 × 10 ⁸	9.01808 × 10 ⁸	5.20818 × 10 ⁸	1.27713 × 10 ⁹	3.21932 × 10 ⁹
7	5.59144 × 10 ⁸	9.73156 × 10 ⁸	5.60766 × 10 ⁸	1.38363 × 10 ⁹	3.47670 × 10 ⁹
8	4.58612 × 10 ⁸	7.38280 × 10 ⁸	4.60934 × 10 ⁸	9.97606 × 10 ⁸	2.65543 × 10 ⁹
9	3.61038 × 10 ⁸	6.31940 × 10 ⁸	3.61436 × 10 ⁸	8.98922 × 10 ⁸	2.25334 × 10 ⁹
10	2.69144 × 10 ⁸	4.67156 × 10 ⁸	2.70502 × 10 ⁸	6.79946 × 10 ⁸	1.68675 × 10 ⁹
11	3.10073 × 10 ⁸	5.32556 × 10 ⁸	3.09710 × 10 ⁸	7.80990 × 10 ⁸	1.93333 × 10 ⁹
12	3.65328 × 10 ⁸	6.26660 × 10 ⁸	3.65024 × 10 ⁸	9.20340 × 10 ⁸	2.27735 × 10 ⁹
13	2.58285 × 10 ⁸	4.52960 × 10 ⁸	2.61682 × 10 ⁸	6.60912 × 10 ⁸	1.63384 × 10 ⁹
14	3.21539 × 10 ⁸	5.62396 × 10 ⁸	3.28866 × 10 ⁸	8.14714 × 10 ⁸	2.02752 × 10 ⁹
15	4.15052 × 10 ⁸	7.17432 × 10 ⁸	4.18168 × 10 ⁸	1.02030 × 10 ⁹	2.57095 × 10 ⁹
16	2.87626 × 10 ⁸	4.83916 × 10 ⁸	2.87724 × 10 ⁸	6.70512 × 10 ⁸	1.72978 × 10 ⁹
17	3.99151 × 10 ⁸	6.64384 × 10 ⁸	3.82348 × 10 ⁸	9.01252 × 10 ⁸	2.34713 × 10 ⁹
18	2.45172 × 10 ⁸	4.08292 × 10 ⁸	2.36428 × 10 ⁸	5.53280 × 10 ⁸	1.44317 × 10 ⁹
19	6.72676 × 10 ⁶	1.13742 × 10 ⁷	5.39026 × 10 ⁶	1.46550 × 10 ⁷	3.81462 × 10 ⁷
20	1.78828 × 10 ⁴	2.92230 × 10 ⁴	2.08724 × 10 ⁴	4.58254 × 10 ⁴	1.13804 × 10 ⁵
計	1.71869 × 10 ¹⁰	2.53033 × 10 ¹⁰	1.73120 × 10 ¹⁰	3.19855 × 10 ¹⁰	9.17877 × 10 ¹⁰

表 2.18.6 天井及び側壁表面における γ 線束と線量率
($\gamma/cm^2 \cdot sec$)

	換算係数 mR/hr/ $\gamma/cm^2 \cdot s$	PATH 1	PATH 2	PATH 3	PATH 4	PATH 5
1	1.206 $\times 10^{-2}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1.049 $\times 10^{-2}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	8.879 $\times 10^{-3}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	7.630 $\times 10^{-3}$	55.068	2.937 $\times 10^1$	1.662 $\times 10^1$	1.938 $\times 10^1$	4.030 $\times 10^1$
5	6.429 $\times 10^{-3}$	697.204	3.658 $\times 10^2$	2.035 $\times 10^2$	2.347 $\times 10^2$	4.991 $\times 10^4$
6	5.328 $\times 10^{-3}$	122.267	7.170 $\times 10^1$	4.372 $\times 10^1$	5.375 $\times 10^1$	1.012 $\times 10^2$
7	4.466 $\times 10^{-3}$	135.556	7.950 $\times 10^1$	4.870 $\times 10^1$	5.960 $\times 10^1$	1.123 $\times 10^2$
8	3.798 $\times 10^{-3}$	82.385	4.756 $\times 10^1$	2.877 $\times 10^1$	3.495 $\times 10^1$	6.687 $\times 10^1$
9	3.315 $\times \times 10^{-3}$	90.875	5.287 $\times 10^1$	3.215 $\times 10^1$	3.918 $\times 10^1$	7.452 $\times 10^1$
10	2.841 $\times 10^{-3}$	71.274	4.132 $\times 10^1$	2.505 $\times 10^1$	3.049 $\times 10^1$	5.820 $\times 10^1$
11	2.448 $\times 10^{-3}$	83.590	4.821 $\times 10^1$	2.911 $\times 10^1$	3.536 $\times 10^1$	6.786 $\times 10^1$
12	2.000 $\times 10^{-3}$	104.431	5.991 $\times 10^1$	3.605 $\times 10^1$	4.379 $\times 10^1$	8.442 $\times 10^1$
13	1.610 $\times 10^{-3}$	79.417	4.535 $\times 10^1$	2.723 $\times 10^1$	3.318 $\times 10^1$	6.421 $\times 10^1$
14	1.294 $\times 10^{-3}$	101.214	5.756 $\times 10^1$	3.455 $\times 10^1$	4.250 $\times 10^1$	8.258 $\times 10^1$
15	9.504 $\times 10^{-4}$	132.021	7.606 $\times 10^1$	4.596 $\times 10^1$	5.828 $\times 10^1$	1.136 $\times 10^2$
16	6.492 $\times 10^{-4}$	85.146	4.842 $\times 10^1$	2.957 $\times 10^1$	3.916 $\times 10^1$	7.663 $\times 10^1$
17	4.473 $\times 10^{-4}$	120.555	6.835 $\times 10^1$	4.189 $\times 10^1$	5.709 $\times 10^1$	1.123 $\times 10^2$
18	2.447 $\times 10^{-4}$	236.937	1.344 $\times 10^2$	8.271 $\times 10^1$	1.150 $\times 10^2$	2.267 $\times 10^2$
19	8.583 $\times 10^{-5}$	64.620	3.658 $\times 10^1$	2.281 $\times 10^1$	3.388 $\times 10^1$	6.723 $\times 10^1$
20	2.488 $\times 10^{-5}$	1.409	8.001 $\times 10^{-1}$	5.051 $\times 10^{-1}$	7.909 $\times 10^{-1}$	1.593
*		7.947	4.342	2.510	2.978	6.038

* 線量率 (mR/hr)

表 2.18.7 規格化した点線源強度

	PATH1におけるⒶでのFlux ($\tau/\text{cm}^2\cdot\text{s}$)	空気の全断面積 (cm^{-1})	$\text{Exp}(-2t \times r)$	S (点線源強度) τ/sec
1	0.0	—	—	0.0
2	0.0	—	—	0.0
3	55.0680	2.94713×10^{-5}	0.961646	1.26717×10^9
4	697.204	3.28986×10^{-5}	0.957283	1.61165×10^{10}
5	122.267	3.71789×10^{-5}	0.95186	2.84242×10^9
6	135.556	4.24496×10^{-5}	0.94523	3.17346×10^9
7	82.385	4.81904×10^{-5}	0.93805	1.94346×10^9
8	90.875	5.36671×10^{-5}	0.93126	2.15937×10^9
9	71.274	5.99676×10^{-5}	0.92351	1.70782×10^9
10	83.590	6.67482×10^{-5}	0.91523	2.02104×10^9
11	104.431	7.59600×10^{-5}	0.90411	2.55600×10^9
12	79.417	8.61991×10^{-5}	0.89191	1.97040×10^9
13	101.214	9.70223×10^{-5}	0.87919	2.54747×10^9
14	132.021	1.12675×10^{-4}	0.86112	3.39259×10^9
15	85.146	1.30149×10^{-4}	0.84138	2.23936×10^9
16	120.555	1.48151×10^{-4}	0.82152	3.24727×10^9
17	236.937	1.78143×10^{-4}	0.78947	6.64125×10^9
18	64.620	2.28184×10^{-4}	0.73875	1.93562×10^9
19	1.409	3.90130×10^{-4}	0.59589	5.23345×10^7

表 2.18.8 ガンマ線線量率における S_N 分点数の効果

線源からの距離	93.75m	156.25m	218.75m	281.25m	343.75m	406.25m	468.75m	550.0m	650.0m	750.0m	850.0m	950.0m
DOT-3.5 S_{48} /ESPRIT S_{48}	1.113	1.116	1.195	1.190	1.068	0.9830	0.9159	0.8476	0.7275	0.5758	0.4008	0.2182
ESPRIT S_{10} /ESPRIT S_{48}	0.9631	1.005	1.021	1.020	1.487	1.008	0.9989	0.9821	0.9703	0.9484	0.9220	0.8906
ESPRIT S_{96} /ESPRIT S_{48}	0.9379	1.006	1.032	1.031	1.025	1.010	0.9933	0.9620	0.9387	0.9009	0.8567	0.8066

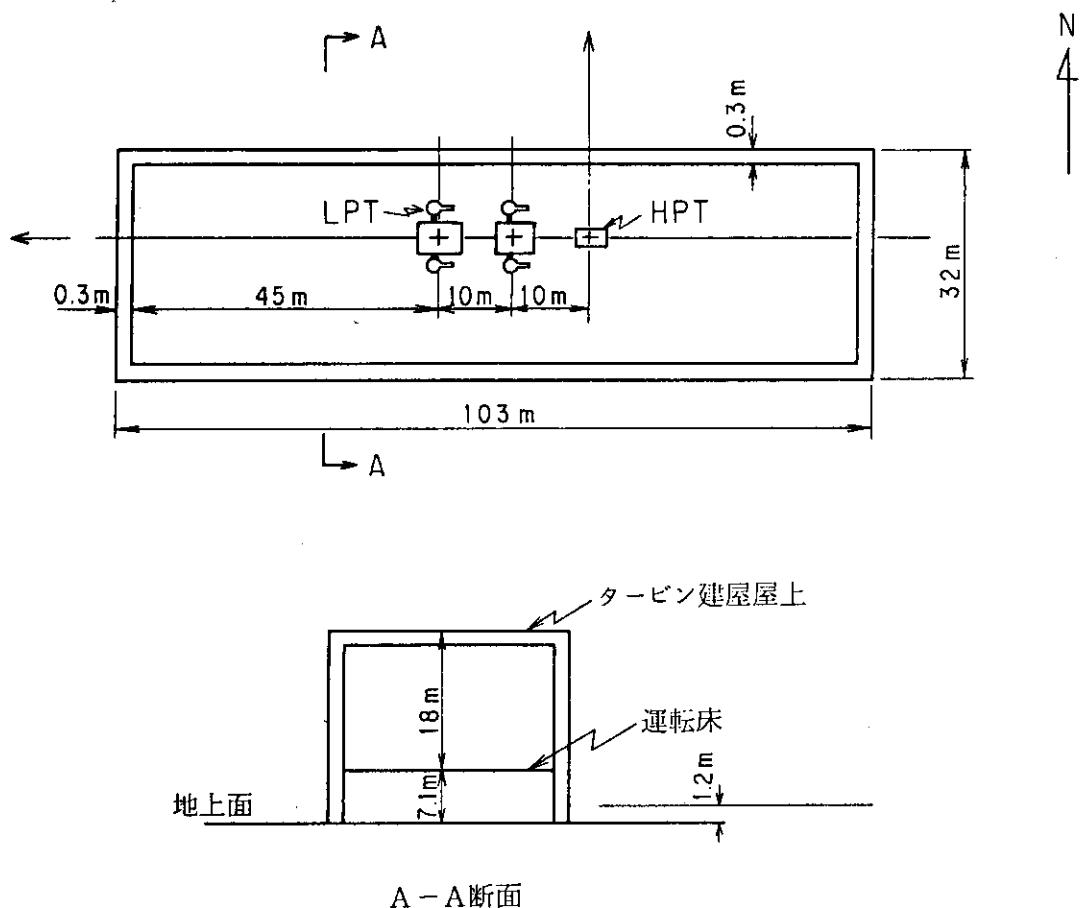


図 2.18.1 タービン建屋の概略形状

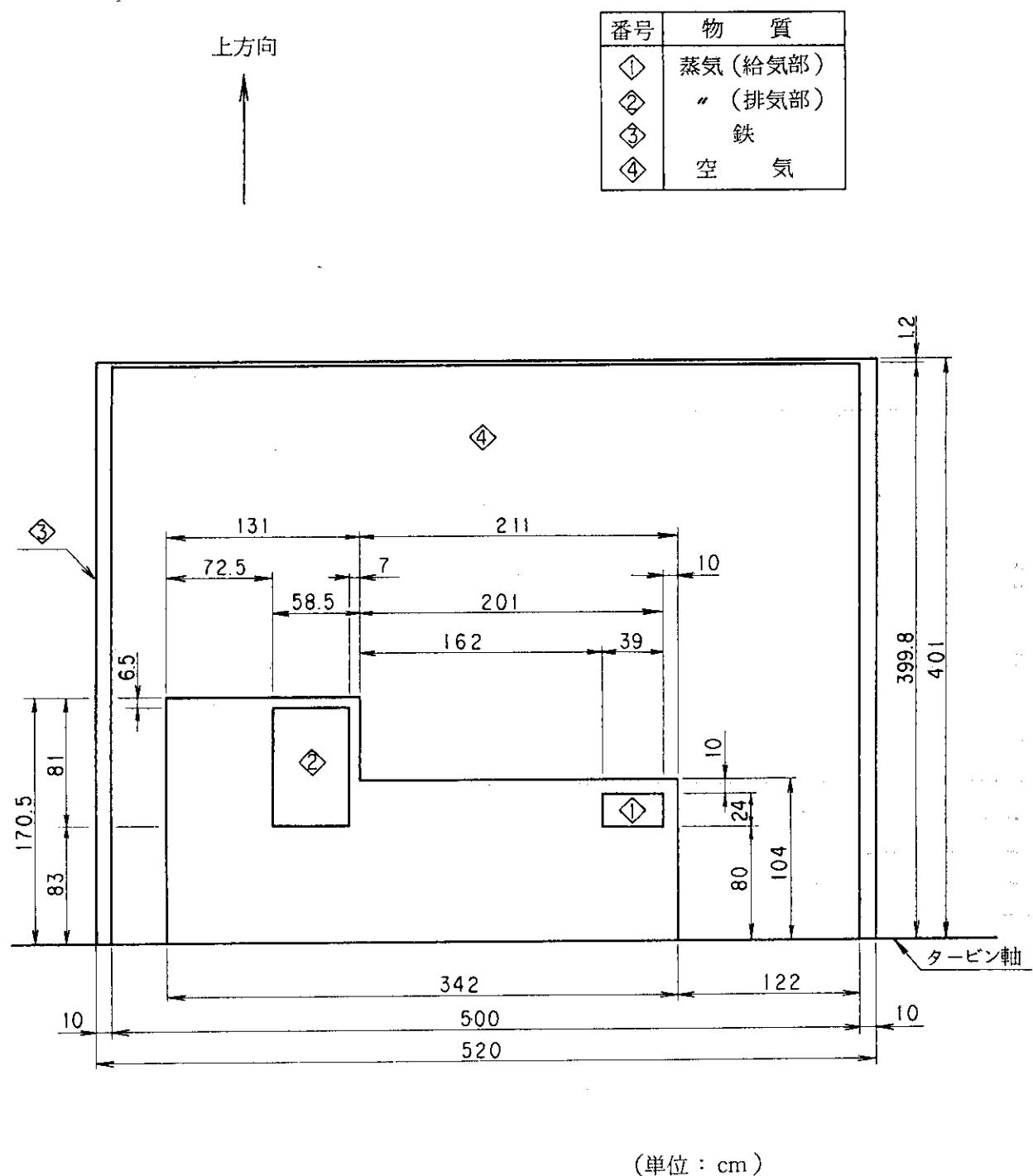
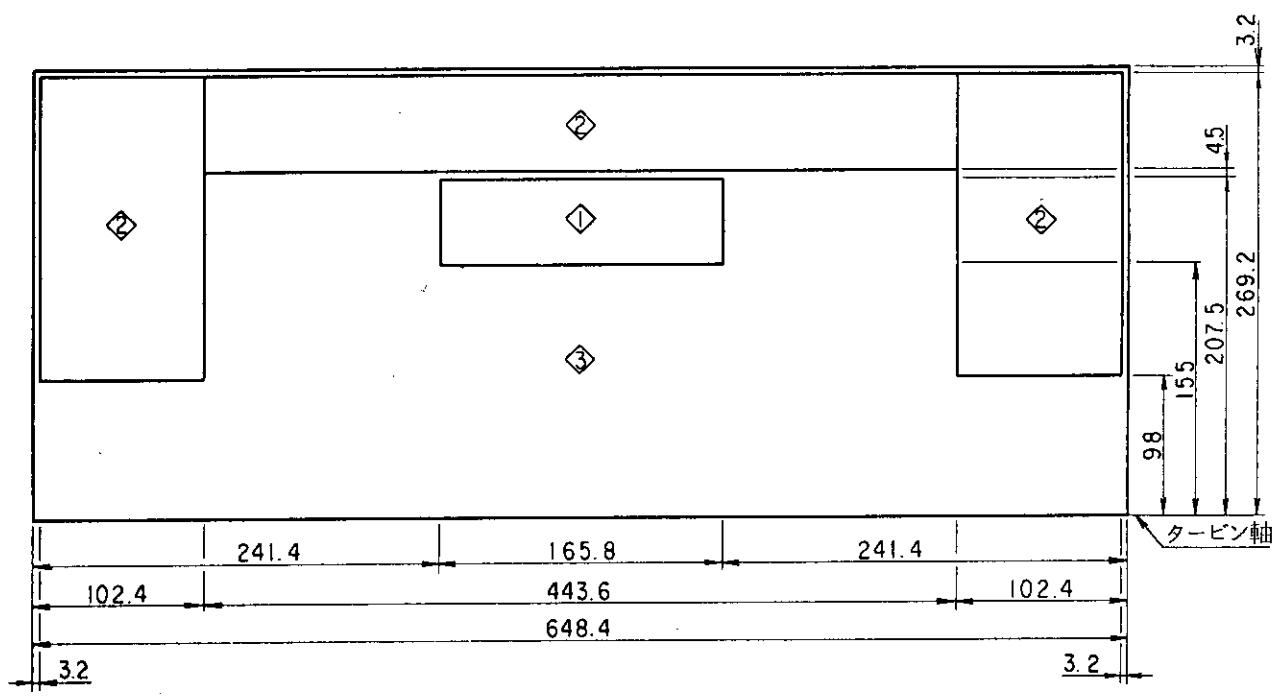


図 2.18.2 高圧タービン概略形状

上方向



番号	物 質
◇	蒸気(給気部)
◇	"(排気部)
◇	鉄



(単位: cm)

図 2.18.3 低圧タービン概略形状

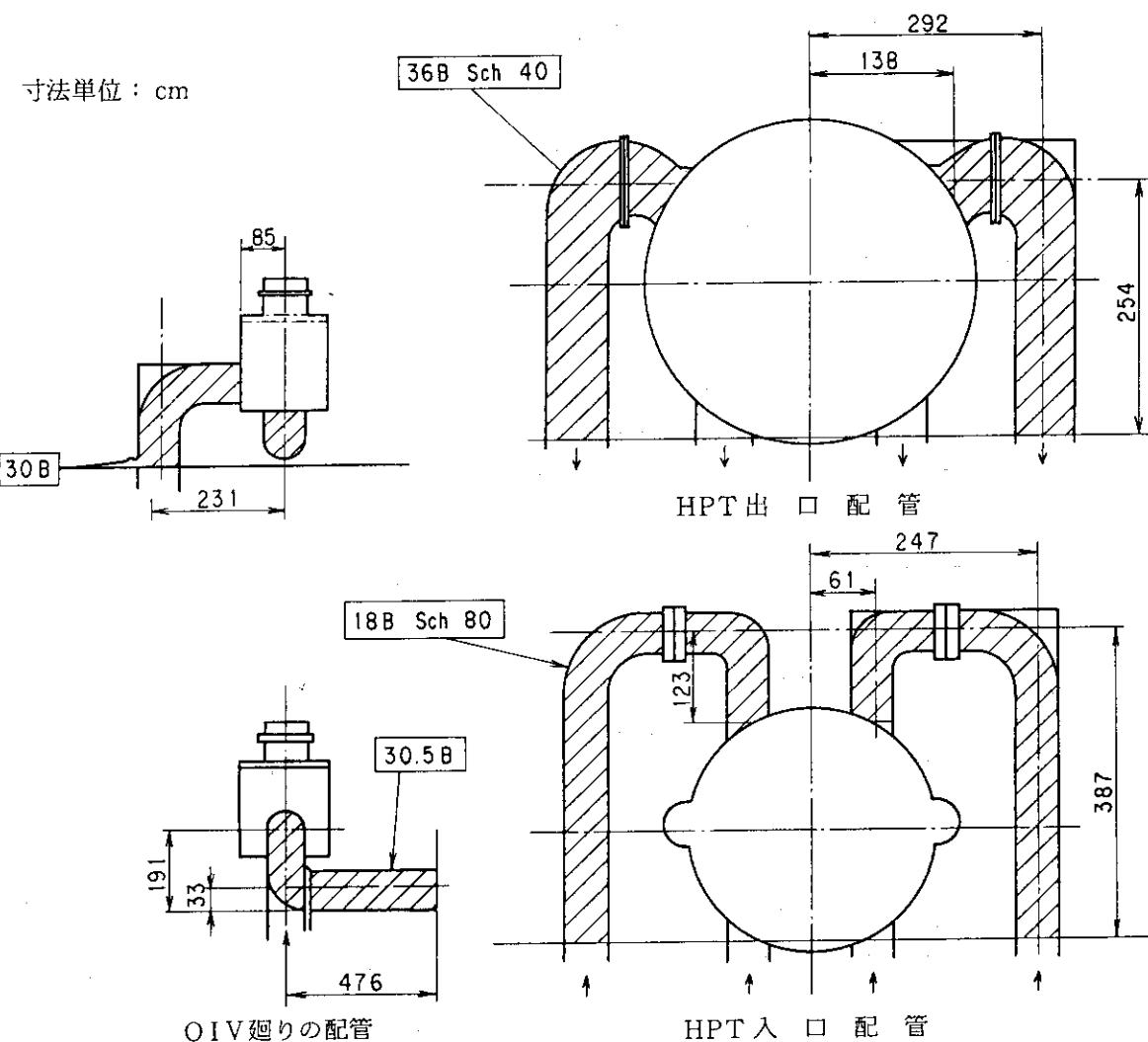


図 2.18.4 タービン建屋運転床面の配管形状（線源領域は斜線部分）

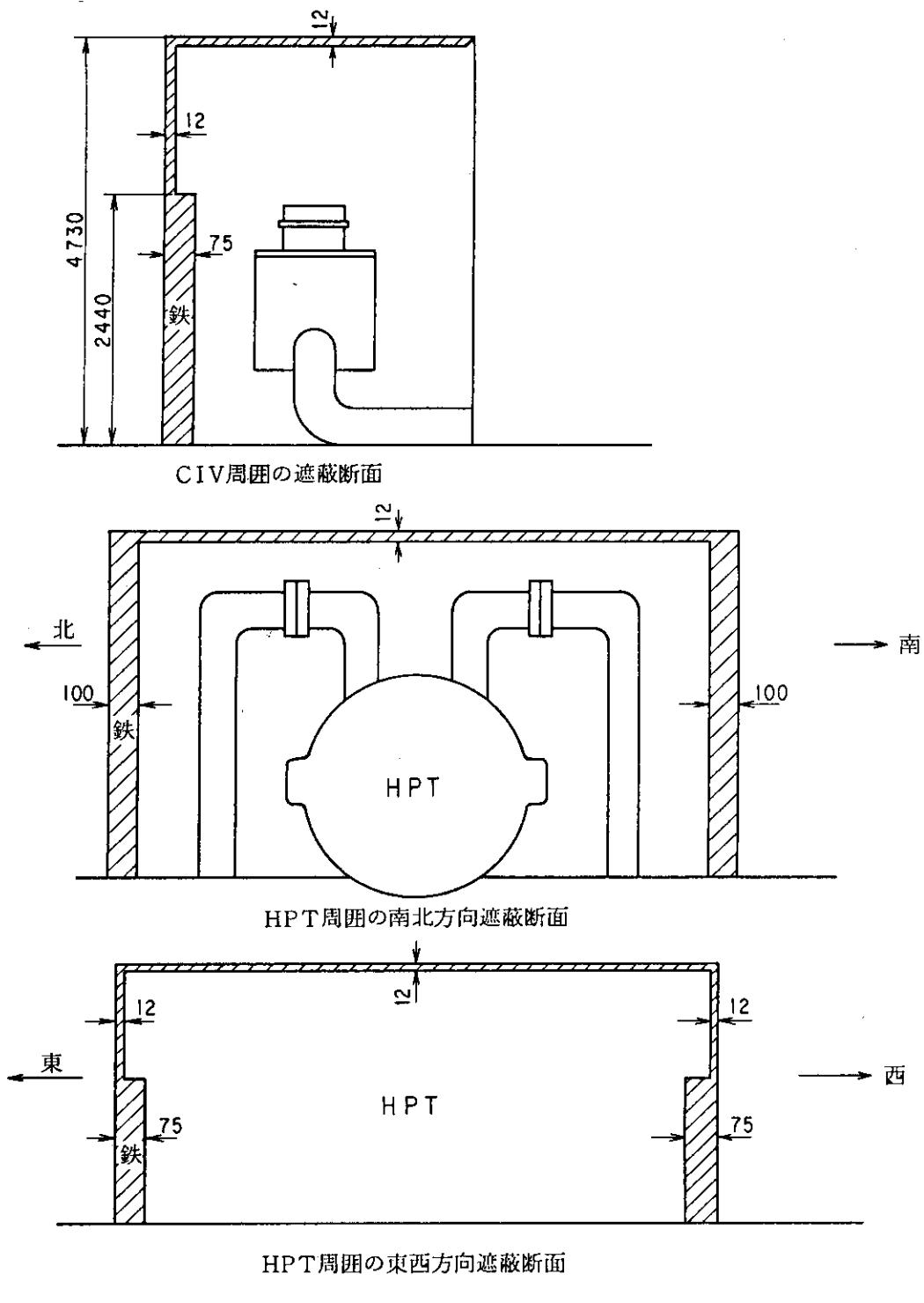
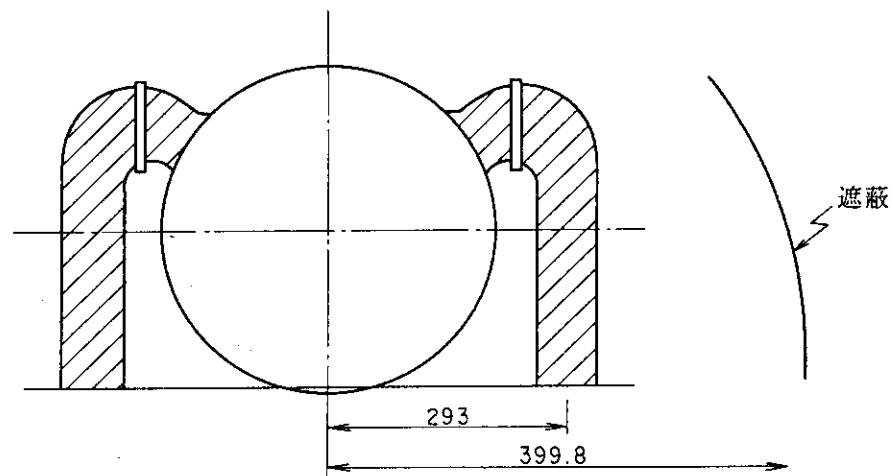


図 2.18.5 遮 蔽 鉄 板 形 状

i) H P T 出口配管の1次元球形状モデル決定根拠



出口配管の長さ $254 + 155 = 409 \text{ cm}$

36B配管寸法 外径 91.44 cm
 厚さ 1.25 cm

線源領域外
の透過距離

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{鉄} \quad 1.25 \text{ cm} \\ \text{空気} \quad 399.8 - 293 = 106.8 \text{ cm} \\ \text{鉄} \quad 1.2 \text{ cm} \end{array} \right.$$

線源領域等価半径

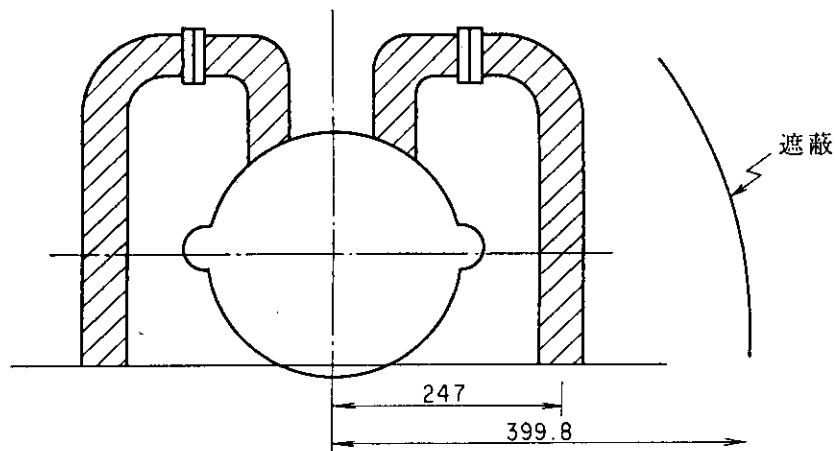
$$\pi (91.44/2 - 1.25)^2 \times 409 = 2541016 \text{ cm}^3 = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$R = 84.65 \text{ cm}$$

$$\text{表面積} \quad 4 \pi R^2 = 90045.86802 \text{ cm}^2 \text{ (球モデル)}$$

$$117492.2979 \text{ cm}^2 \text{ (実機)}$$

図 2.18.6(a) HPT出口配管の一次元球形状モデル決定根拠



HPT 入 口 配 管

入口配管の長さ 677.8 cm

18B Sch 80 外 径 45.72 cm

厚 さ 2.38 cm

線源領域外 鉄 2.38 cm

の透過距離 空気 $399.8 - 247 = 152.8$ cm

鉄 1.2 cm

線源領域等価半径

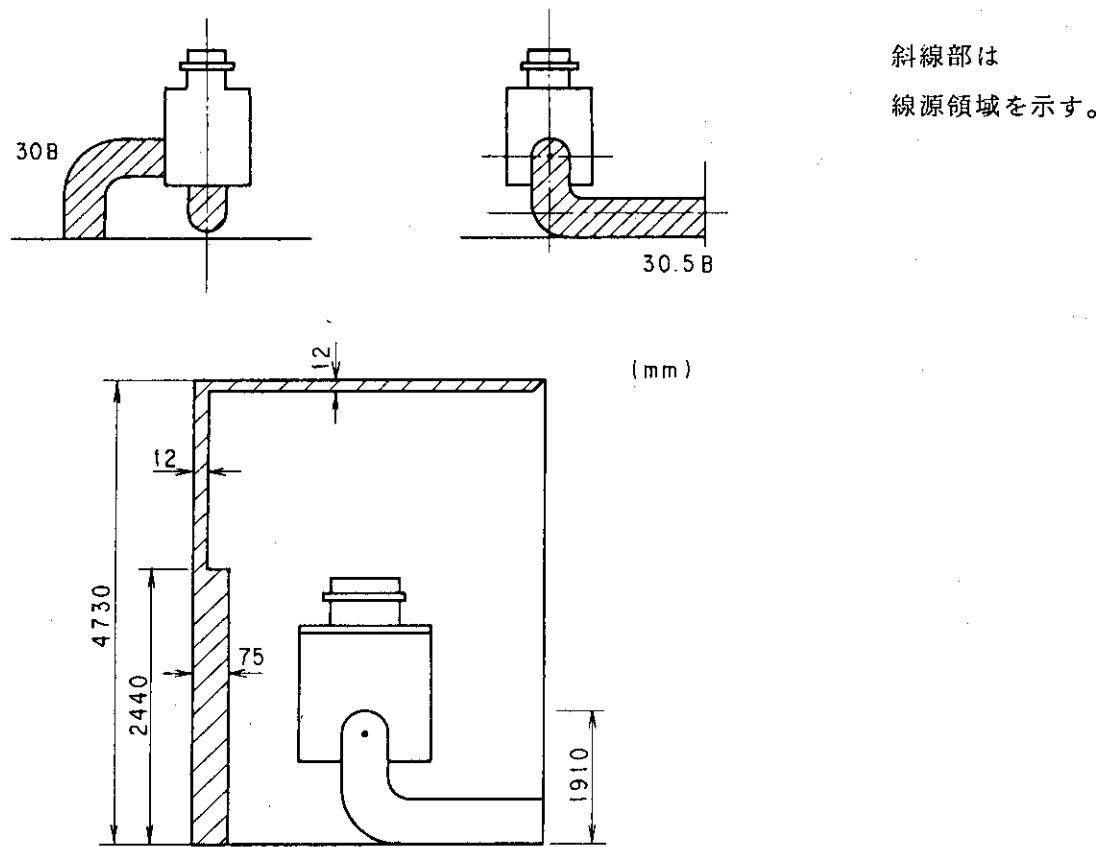
$$\pi (45.72/2 - 2.38)^2 \times 677.8 = 893067 \text{ cm}^3 = \frac{4}{3} \pi R^3$$

$$R = 59.74 \text{ cm}$$

$$\text{表面積 } 4\pi R^2 = 44848 \text{ cm}^2 \text{ (球モデル)}$$

$$97355 \text{ cm}^2 \text{ (実機)}$$

図 2.18.6(b) HPT入口配管の一次元球形状モデル決定根拠



30B 配管長さ 338 cm

30B 配管 外径 76.2

厚さ 1.27

線源領域等価半径

$$\pi(76.2/2 - 1.27)^2 \times 338 = 1440357$$

$$R = 70.05 \text{ cm}$$

表面積 $4\pi R^2 = 61663 \text{ cm}^2$ (球モデル)

$$80914 \text{ cm}^2 \text{ (実機)}$$

30.5B 配管長さ 546.6 cm

30.5B 外径 77.47 cm

厚さ 1.90 cm

線源領域等価半径

$$\pi(77.47/2 - 1.90)^2 \times 546.6 = 2329919$$

$$R = 82.24 \text{ cm}$$

表面積 $4\pi R^2 = 84992 \text{ cm}^2$ (球モデル)

$$133031 \text{ cm}^2 \text{ (実機)}$$

図 2.18.6(c) C I V廻りの配管の一次元球形状モデル決定根拠

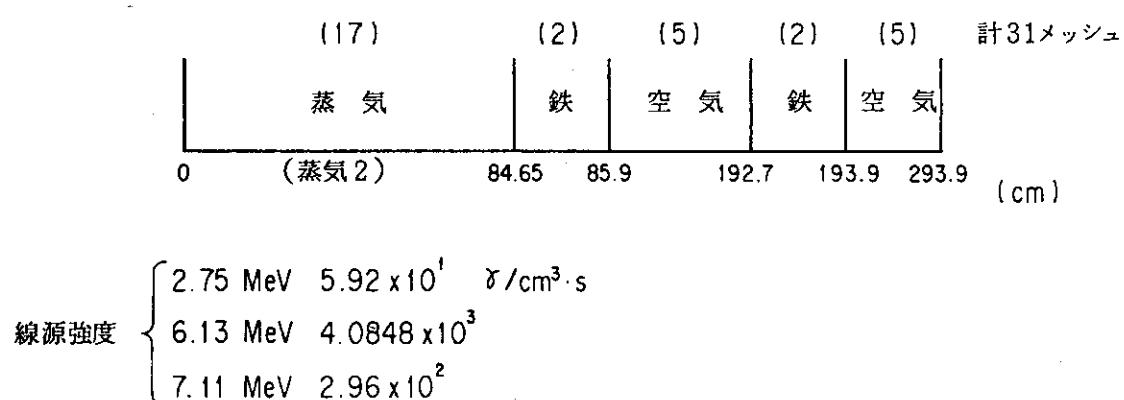


図 2.18.7(a) HPT 出口配管一次元計算形状

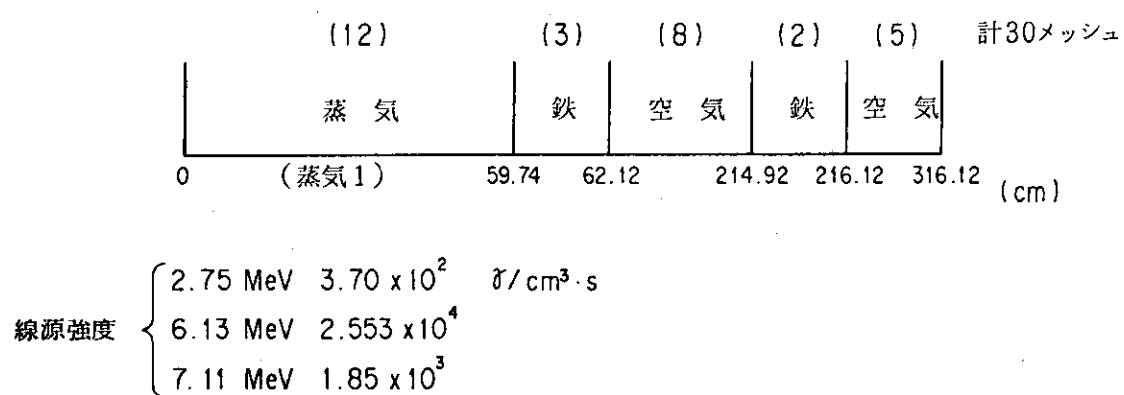
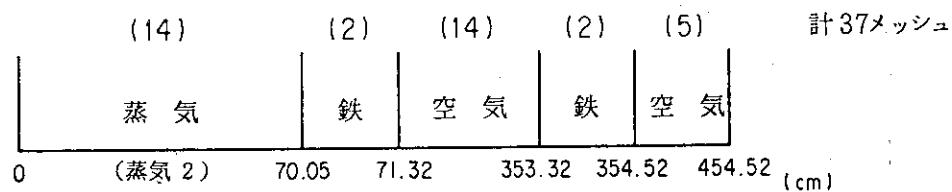


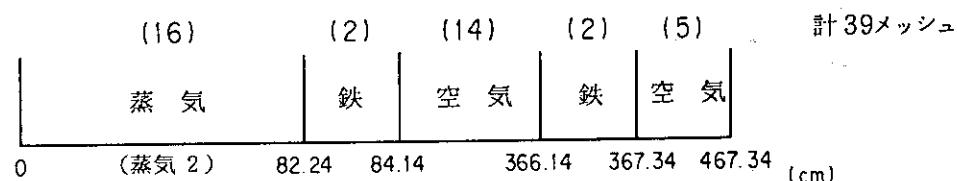
図 2.18.7(b) HPT 入口配管一次元計算形状

1) 30B配管



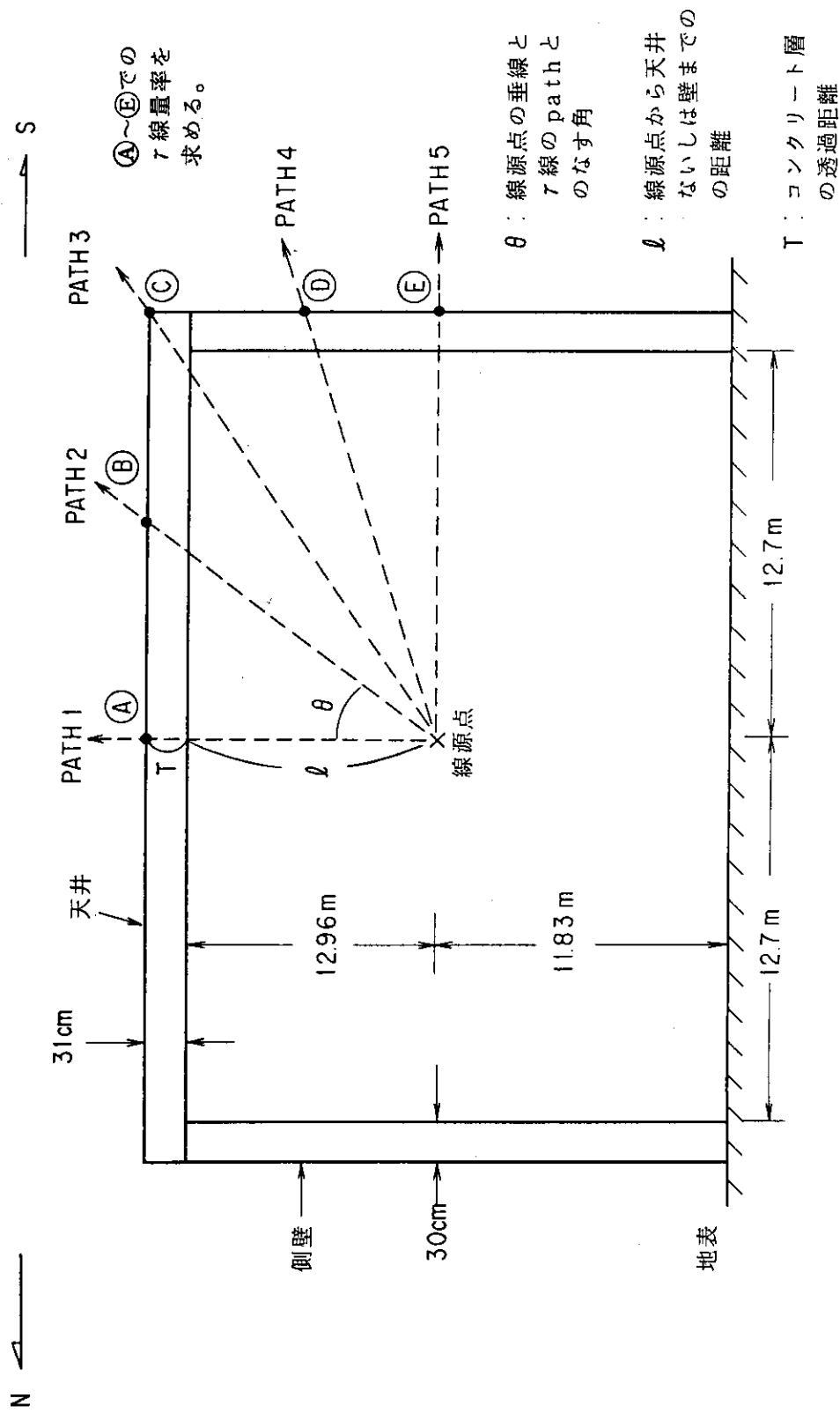
$$\left. \begin{array}{ll} \text{線源強度} & \left\{ \begin{array}{ll} 2.75 \text{ MeV} & 5.18 \times 10^1 \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} \\ 6.13 \text{ MeV} & 3.5742 \times 10^3 \\ 7.11 \text{ MeV} & 2.59 \times 10^2 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

2) 30.5B配管

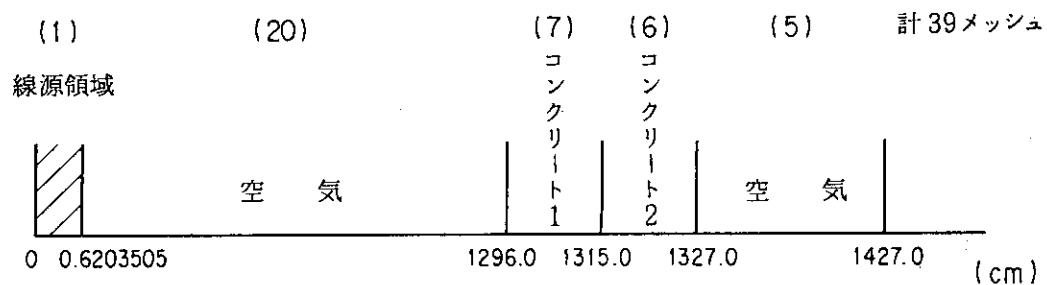


$$\left. \begin{array}{ll} \text{線源強度} & \left\{ \begin{array}{ll} 2.75 \text{ MeV} & 5.18 \times 10^1 \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} \\ 6.13 \text{ MeV} & 3.5742 \times 10^3 \\ 7.11 \text{ MeV} & 2.59 \times 10^2 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

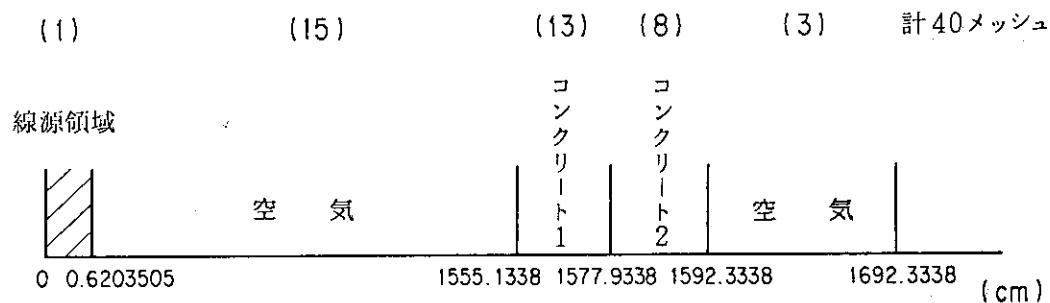
図 2.18.7(c) C I V廻りの配管の一次元計算形状



1) PATH 1



2) PATH 2



3) PATH 3

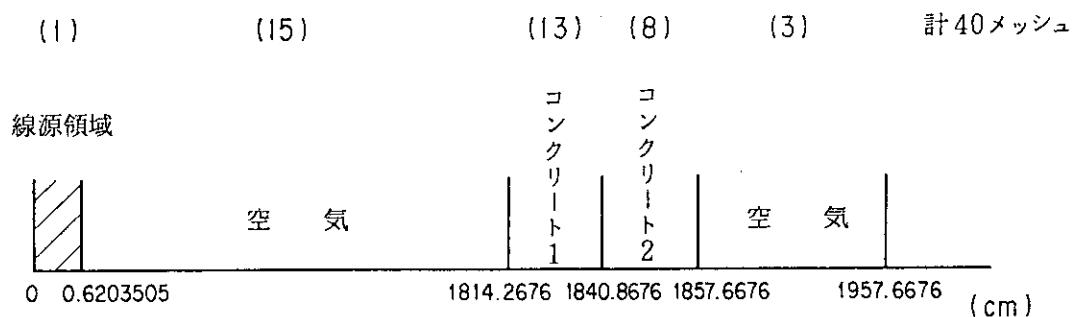
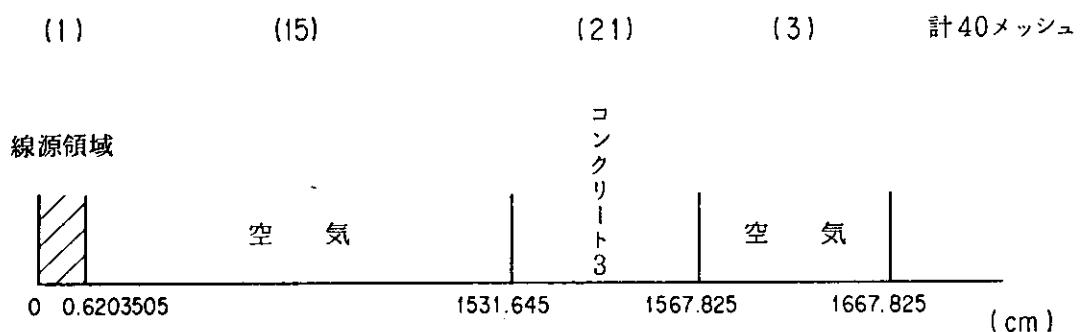


図 2.18.9 各飛程に対する一次元計算モデル

4) PATH 4



5) PATH 5

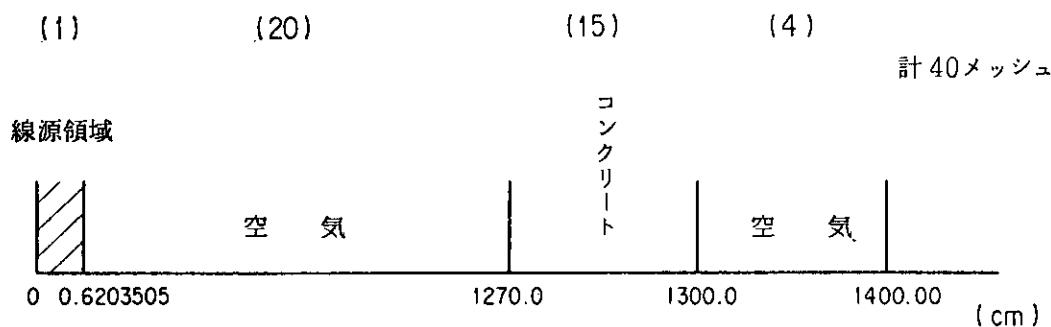


図 2.18.9 (続 き)

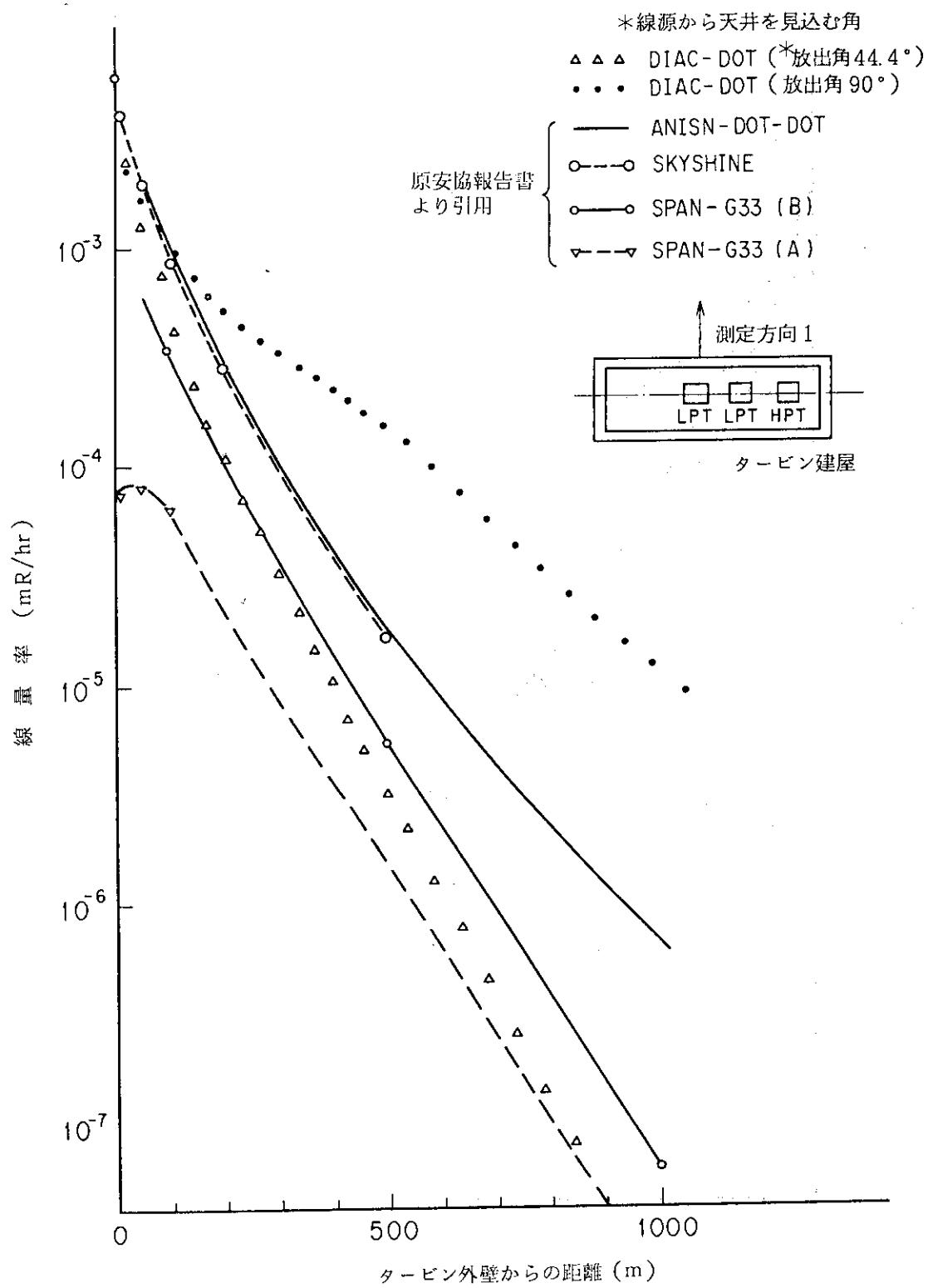


図 2.18.10 DOT 3.5 による計算結果（測定方向 1）

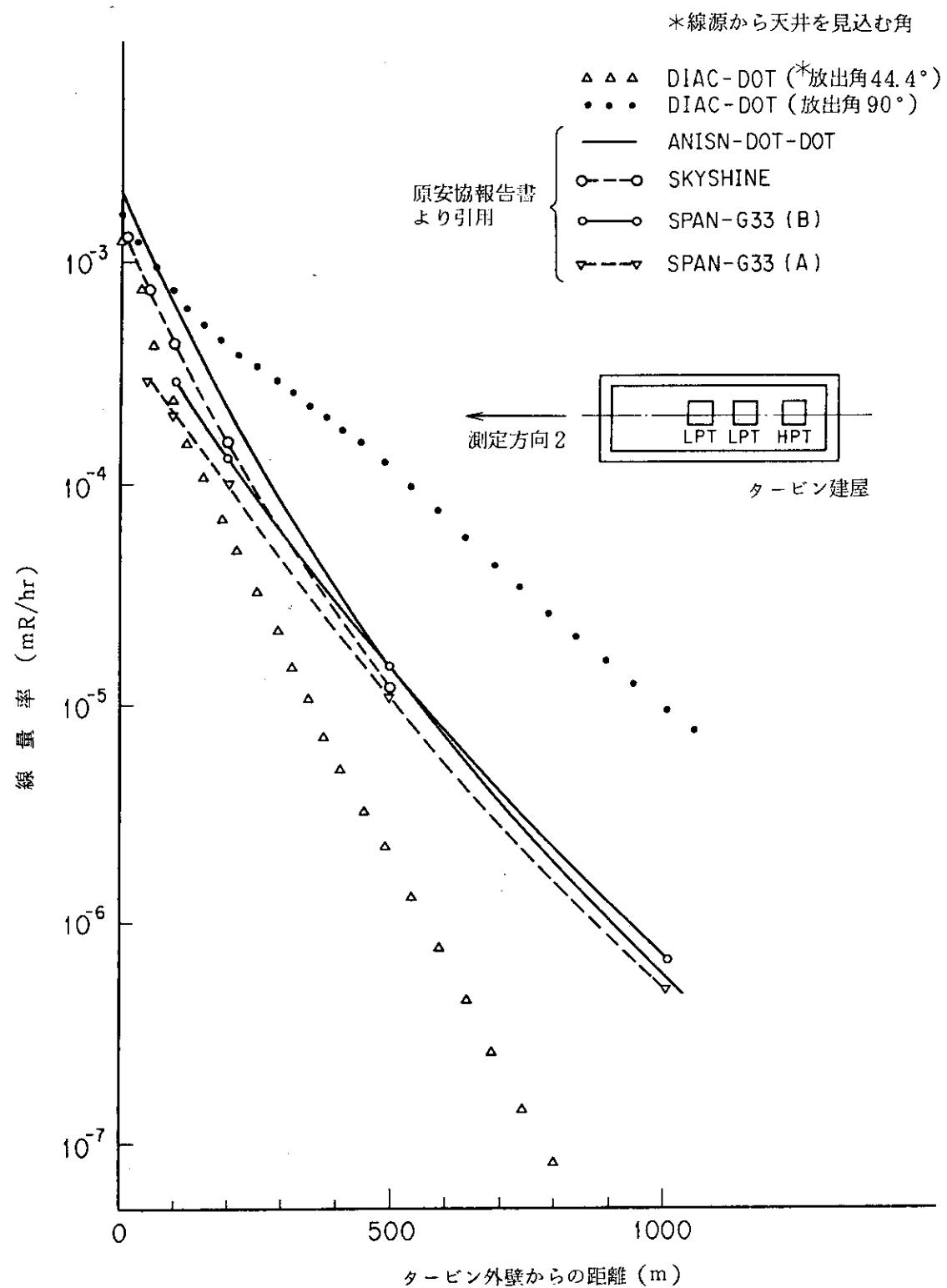


図 2.18.11 DOT 3.5 による計算結果（測定方向 2）

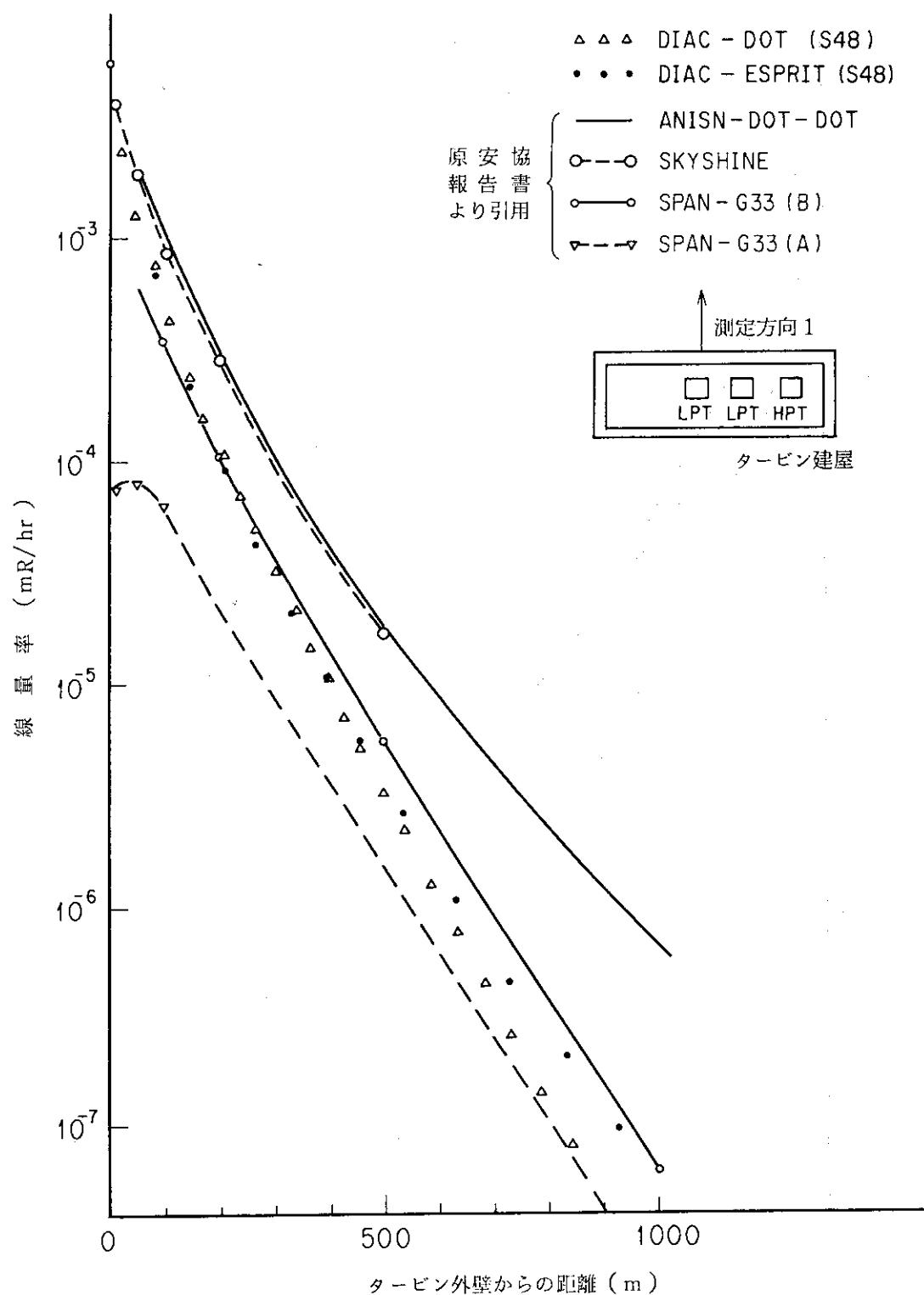


図 2.18.12 ESPRITによる計算結果（測定方向 1）

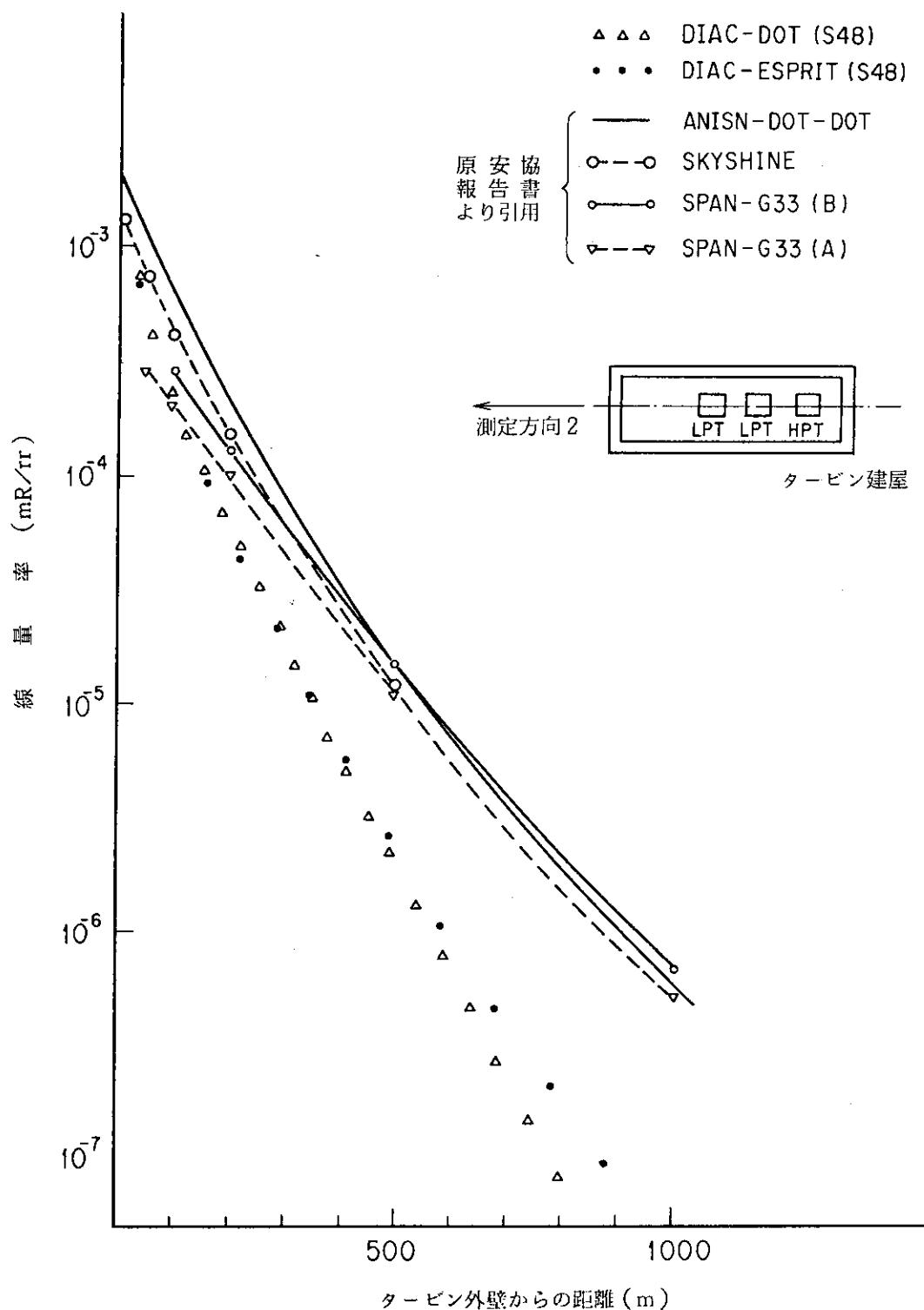


図 2.18.13 ESPRITによる計算結果（測定方向 2）

3. おわりに

核燃料施設の遮蔽安全評価のために RADHEAT-V4 コードを開発した。このコードの計算精度の確認と使用上の問題点を把握するために、18題のベンチマーク問題を選定して解析計算を行った。放射線は中性子とガンマ線であり、問題の種類は透過、ストリーミング及びスカイシャインの3種類である。RADHEAT-V4 では1次元コード DIAC, 2次元コード ESPRIT, 3次元コード MCACE を使用しており、それらによる計算結果と実測値及び在来コード ANISN, DOT3.5, MORSE-CG の計算結果を比較した。

DIAC の計算結果は ANISN-JR の P_5 近似と同程度かそれよりも良好であった。ESPRIT の計算結果は DOT3.5 の P_8 近似と同程度であったが、大きな記憶容量を要すること及び I/O 回数が異常に多いことが問題であった。MCACE の計算結果は、1回屈曲のダクトストリーミングのような1回散乱成分の寄与の大きな対象については、MORSE-CG より良好であった。ガンマ線遮蔽の問題では制動輻射及び電子対創成の効果を組み込む必要がある。また、中性子による反応率の計算については熱群を1群にしているために場のスペクトルを精度良く考慮できていない。そのほかビルドアップ係数を用いる QAD コードについても検討したが、ガンマ線の減衰については良好な結果を得た。また、固体廃棄物貯蔵施設の遮蔽計算においては多くのドラム缶の線源をモデル化する方法について今後十分に検討する必要があることがわかった。

謝 辞

本報告書は原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会の活動の一環として作成したものである。ここに記されている計算結果は多くの企業に発注して行ったものであり、実際に計算を実行された方々に謝意を表します。計算結果はワーキンググループ員が分担して検討するとともに報告書原稿を作成した。この作業は3年間に渡り行われた。この間、資金面及び活動の面でも支援していただいた研究委員会委員の方々事務局の方々に深く感謝いたします。

3. おわりに

核燃料施設の遮蔽安全評価のために RADHEAT-V4 コードを開発した。このコードの計算精度の確認と使用上の問題点を把握するために、18題のベンチマーク問題を選定して解析計算を行った。放射線は中性子とガンマ線であり、問題の種類は透過、ストリーミング及びスカイシャインの3種類である。RADHEAT-V4 では1次元コード DIAC, 2次元コード ESPRIT, 3次元コード MCACE を使用しており、それらによる計算結果と実測値及び在来コード ANISN, DOT3.5, MORSE-CG の計算結果を比較した。

DIAC の計算結果は ANISN-JR の P_s 近似と同程度かそれよりも良好であった。ESPRIT の計算結果は DOT3.5 の P_s 近似と同程度であったが、大きな記憶容量を要すること及び I/O 回数が異常に多いことが問題であった。MCACE の計算結果は、1回屈曲のダクトストリーミングのような1回散乱成分の寄与の大きな対象については、MORSE-CG より良好であった。ガンマ線遮蔽の問題では制動輻射及び電子対創成の効果を組み込む必要がある。また、中性子による反応率の計算については熱群を1群にしているために場のスペクトルを精度良く考慮できていない。そのほかビルドアップ係数を用いる QAD コードについても検討したが、ガンマ線の減衰については良好な結果を得た。また、固体廃棄物貯蔵施設の遮蔽計算においては多くのドラム缶の線源をモデル化する方法について今後十分に検討する必要があることがわかった。

謝 辞

本報告書は原子力コード研究委員会原子力コード評価専門部会の活動の一環として作成したものである。ここに記されている計算結果は多くの企業に発注して行ったものであり、実際に計算を実行された方々に謝意を表します。計算結果はワーキンググループ員が分担して検討するとともに報告書原稿を作成した。この作業は3年間に渡り行われた。この間、資金面及び活動の面でも支援していただいた研究委員会委員の方々事務局の方々に深く感謝いたします。