

JAERI-M

7799

Discrete Ordinates コードおよび
モンテカルロコードによる2次元遮
蔽ベンチマーク計算 (No.1)

1978年8月

日本原子力研究所東海研究所
炉物理研究委員会・遮蔽専門部会

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

Discrete Ordinates コードおよびモンテカルロコードによる 2 次元遮蔽ペ
ンチマーク計算 (No. 1)

日本原子力研究所東海研究所
炉物理研究委員会・遮蔽専門部会

(1978 年 7 月 17 日受理)

中性子ストリーミング計算に対して Discrete Ordinates およびモンテカルロコードの計算精度を検証するためにベンチマーク計算を実施した。今回使用したコードは、DOT-III, TWOTRAN-II, PALLAS および MORSE コードである。ベンチマーク問題が 2 つ選定され、これらは JRR-4において実施された実験にもとづいている。その第 1 は水中に設置された直円筒ダクト速中性子ストリーミング問題であり、第 2 は原子炉の圧力容器と一次遮蔽体との間の間隙を模擬した円環状ボイド問題である。中性子空間分布が放射化法による測定で求められている。

計算と実験との比較がダクトやボイド内およびこれらのボイド周辺における反応率について実施された。全体としてかなり良い一致が得られたが、2, 3 の限られたケースでは極めて大きな差が出ており、あるいは収束しない場合もあった。

-
- 編集責任者：竹内 清（運輸省船舶技研）
 笹本宣雄（原 研）
 - 炉物理研究委員会・遮蔽専門部会
 - DOT-III グループ：[○]西村達雄（MAPI）， 笹本宣雄（原研）， 芦田三郎（MAPI）， 鈴木幾則（動燃）。
 - TWOTRAN-II グループ：[○]川合将義（NAIG）， 岡芳明（東大炉）， 竹村守雄（川重）， 中沢正治（東大）
 - PALLAS グループ：[○]竹内清（船研）， 笹本宣雄（原研）， 金井康二（船研）
 - MORSE グループ：[○]伊藤泰義（船研）， 西原善明（住重）， 金野正晴（フジタ工業）， 石田正次（東海大）， 秦和夫（京大）， 辻政俊（三井造船）， 深野宣伸（CRC）， 山路昭雄（原船団）
 - 群定数グループ：[○]小山謹二（原研）， 笹本宣雄（原研）， 山路昭雄（原船団）， 秦和夫（京大）。
 - 印はグループ責任者

Two-Dimensional Shielding Benchmark Calculations by
Discrete Ordinates and Monte Carlo Codes - No.1

The Committee on Reactor Physics
(The Subcommittee on Shielding)
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 17, 1978)

Benchmark calculations were performed to verify the calculational accuracy of Discrete Ordinates and Monte Carlo codes in neutron streaming calculations. The codes used at this time are DOT-III, TWOTRAN-II, PALLAS and MORSE. Two benchmark problems were selected on the basis of experiments made in JRR-4. The first is a problem of fast neutron streaming through a straight cylindrical air duct in water, and the second deals with neutron streaming through an annular air void simulating a gap between pressure vessel and primary shield of a reactor. The neutron spatial distributions have been obtained by activation measurement.

Comparisons between calculations and experiments are made on the reaction rate within the duct and void, and also around these spaces. Fairly good agreement is obtained on the whole, but extremely large discrepancies or no convergences appear in a few limited cases.

Keywords : Shielding, Benchmark calculation, Neutron streaming,
Annular air void, Cylindrical air duct, Discrete ordinates
code, Monte Carlo code, DOT-III, TWOTRAN-II, PALLAS, MORSE

Editors :

^oKiyoshi Takeuchi (Ship Research Institute)

Nobuo Sasamoto (Japan Atomic Energy Research Institute)

Members of working groups :

*DOT-III Group :

^oT. Nishimura(Mitsubishi Atomic Power Indst.), N. Sasamoto
(Japan Atomic Energy Research Inst.), S. Ashida(Mitsubishi
Atomic Power Indst.), I. Suzuki(Power Reactor & Nuclear

Fuel Development Corp.)

*TWOTRAN-II Group :

°M. Kawai(Nippon Atomic Industry Group), Y. Oka(Univ. of Tokyo), M. Takemura(Kawasaki Heavy Indst.), S. Nakazawa (Univ. of Tokyo).

*PALLAS Group :

°K. Takeuchi(Ship Research Inst.), N. Sasamoto(Japan Atomic Energy Research Inst.), Y. Kanai(Ship Research Inst.).

*MORSE Group :

°Y. Ito(Ship Research Inst.), Y. Nishihara(Sumitomo Ship-building &Machinery), M. Kinno(Fujita Indst.), S.Ishida (Tokai Univ.), K. Shin(Kyoto Univ.), M. Tsuji(Mitsui Shipbuilding & Eng.), Y. Fukano(Century Research Center), A. Yamaji(Japan Nuclear Ship Development Agency).

*Group Constant Group :

°K. Koyama(Japan Atomic Energy Research Inst.), N. Sasamoto (Japan Atomic Energy Research Inst.), A. Yamaji(Japan Nuclear Ship Development Agency), K. Shin(Kyoto Univ.).

°) Group leader

目 次

1. まえがき	1
2. 群定数と線源条件	5
2.1 群定数の作成	5
2.2 線源条件の決定	5
3. 計算条件	11
3.1 DOT-III 計算条件	11
3.2 TWOTRAN-II 計算条件	12
3.3 PALLAS 計算条件	13
3.4 MORSE 計算条件	14
4. 計算結果	21
4.1 DOT-III 計算結果	21
4.1.1 収束状況	21
4.1.2 実験値との比較	22
4.2 TWOTRAN-II 計算結果	23
4.2.1 収束状況	23
4.2.2 実験値との比較	23
4.2.3 検討および結び	24
4.3 PALLAS 計算結果	24
4.4 MORSE 計算結果	25
5. まとめ	47
5.1 N-II-1 ダクト軸上反応率分布	47
5.2 N-II-1 径方向反応率分布	47
5.3 N-II-2 鉄板前面Ni(n, p)反応率分布	48
5.4 N-II-2 ポイド内反応率分布	48
5.5 計算時間および使用計算機コア容量	49
5.6 計算コードの評価の結果	49
謝 辞	52
参考文献	52

CONTENTS

1. Introduction.....	1
2. Group Constants and Neutron Sources	5
2.1 Preparation of Group Constants.....	5
2.2 Preparation of Neutron Sources	5
3. Parameters for Calculations.....	11
3.1 DOT-III Calculations	11
3.2 TWOTRAN-II Calculations	12
3.3 PALLAS Calculations	13
3.4 MORSE Calculations	14
4. Calculation Results.....	21
4.1 DOT-III Results	21
4.1.1 Convergence Behavior	21
4.1.2 Comparison with Experimental Values	22
4.2 TWOTRAN-II Results	23
4.2.1 Convergence Behavior	23
4.2.2 Comparison with Experimental Values	23
4.2.3 Discussions and Conclusions.....	24
4.3 PALLAS Results	24
4.4 MORSE Results	25
5. Conclusions	47
5.1 Reaction Rate Distributions along Duct Axis for N-II-1	47
5.2 Reaction Rate Distributions in Radial Direction for N-II-1.....	47
5.3 Ni(n,p) Reaction Rate Distribution in Front of Iron Plate for N-II-2	48
5.4 Reaction Rate Distributions along Void Space of N-II-2	48
5.5 Computation Time and Computer Core Storage	49
5.6 Results of Computer Code Evaluation.....	49
Acknowledgment	52
References	52

1. まえがき

昭和 52 年度から炉物理研究委員会に遮蔽専門部会を設け 遮蔽設計計算 コードの評価と NEA 国際遮蔽ベンチマーク実験の解析計算を実施することになった。本報告書は 52 年度における遮蔽設計計算コードの評価についての成果報告書である。本専門部会は原子力学会の「遮蔽設計法」研究専門委員会の計算コード核定数評価ワーキンググループと密接な連絡をとりつつ作業をすすめた。学会のワーキンググループでは、遮蔽設計計算コードの評価を目的として幾つかのベンチマーク問題を設定した¹⁾。このベンチマーク問題設定作業は 53 年度も引き続き実施される予定であり、作業の完結後は公表され各種の遮蔽設計問題を計算する際の標準としての役割を果たすものと期待される。そこで本専門部会においては設定されたベンチマーク問題の中から 2 つの問題を選び、詳細遮蔽計算手法である Discrete Ordinates 法およびモンテカルロ法にもとづく計算コードの評価を行った。

計算の対象に選んだ 2 つのベンチマーク問題は、いずれも原子炉の一次遮蔽中性子ストリーミング問題として重要なものである。この 2 つのベンチマーク問題には N-II-1 および N-II-2 というベンチマーク問題番号が付けられており、以降はこの番号を使用して問題の区別を行なう。ここで、N は中性子の意味であり、II は 2 次元形状問題を表わす。この両問題はともに JRR-4 における実験結果^{2),3)}にもとづいている。Fig.1.1 および 1.2 に問題名と実験形状を示す。N-II-1 の問題は遮蔽体貫通ダクトの基本的なものである。一方 N-II-2 の問題は動力炉の一次遮蔽体中性子ストリーミングの代表である圧力容器と一次遮蔽体との間の断熱のために設けられた円環空隙形状を模擬したものである。

N-II-1 のダクトストリーミング速中性子空間分布の実験は、JRR-4 の水中に直円筒空気ダクトを炉心中心位置にダクト軸が位置するように設置して数種類の閾検出器を使用して反応率をダクト内外の位置で測定したものである。直円筒ダクトの壁材は中性子に対してほとんど水と同等と考えられる Plexiglass が使用されているので、今回のベンチマーク計算ではこの壁材を周囲の水で置き換えた。また測定に使用した照射箔および反応は、¹¹⁵In(n, n')^{115m}In, ⁶⁴Zn(n, p)⁶⁴Cu, ²⁴Mg(n, p)²⁴Na, ²⁷Al(n, α)²⁴Na である。

N-II-2 の円環空隙中性子ストリーミングの実験結果は文献(3)の報告書の中から採用したもので、この実験は JRR-4 の水中に供試体を設置して、数種類の照射箔の 9 種類の反応による反応率測定と反跳陽子比例計数管による 30 keV ~ 1 MeV の中性子スペクトル測定を実施したものである。測定に使用した照射箔と 9 種類の反応は、それぞれ ²⁷Al(n, α)²⁴Na, ⁵⁶Fe(n, p)⁵⁶Mn, ²⁴Mg(n, p)²⁴Na, ²⁷Al(n, p)²⁷Mg, ⁶⁴Zn(n, p)⁶⁴Cu, ⁵⁸Ni(n, p)⁵⁸Co, ¹¹⁵In(n, n')^{115m}In, ¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁸Au(Cdカバー), ¹⁹⁷Au(n, γ)¹⁹⁸Au であり、およそ 1 MeV 以上の速中性子による反応率と熱外および熱中性子の反応率を測定している。今回のベンチマーク計算で利用したのはこのうち速中性子による反応率であり、他のエネルギー領域の反応率と計数管によるエネルギースペクトルは時間に余裕がなかったので使用できなかった。なお、測定位置は Fig. 1.2 の中で図示してある供試体の鉄板の前面位置と円環空隙の

中心位置であり、鉄板前面では ^{58}Ni (n, p) ^{58}Co 反応による反応率のみが測定されており、一方ボイド中では前記の全ての反応による反応率が測定されている。

今回のベンチマーク計算に使用した計算コードは、2次元 Discrete Ordinates コードの DOT-III⁴⁾と TWOTRAN-II⁵⁾の S_N コードおよび PALLAS 直接積分コード⁶⁾、さらにモンテカルロコードの MORSE⁷⁾である。これらのコード毎および群定数作製のために作業グループを設けて実際の作業を行った。Discrete Ordinates コードは2次元形状に対するものを使用したので実験形状を2次元形状で近似しなくてはならない。そこで両ベンチマーク問題ともに2次元 (r, z) 形状で計算モデルを設定することにした。まず N-II-1 の問題についてはダクト軸を z 軸に定めた (r, z) 形状でモデル化し、その原点を JRR-4 炉心の中心に定めた。したがって、JRR-4 の直方体炉心を等体積の円柱炉心で近似した。この計算モデルと (r, z) 空間における Discrete Ordinates 計算用の領域の定め方を Fig. 1.3 に示す。ここで Ref. はグラファイト反射体で、W は WATER の略である。一方、N-II-2 の問題は実験に使用した供試体が円柱座標で近似できるように作製されているので (r, z) 形状モデル化は容易である。炉心の高さ方向にその中心を通る軸を z 軸に定めればよく、直方体の炉心の高さをそのままの値にして、縦 × 横の面積が円の面積に等しくなるように半径を定めた。Fig. 1.2 は計算モデル形状であり実験形状とほとんど同じである。

計算コードに対するベンチマーク計算の際には、できるだけ計算条件を同一にした方が計算誤差の評価に都合がよい。そこで群構造および群定数をこのベンチマーク計算用に準備した。群定数は ENDF/B-IV データライブラリーから作製した。しかし、PALLAS コード⁶⁾は S_N タイプの群計算と本質的に異なる計算法にもとづいているために、この準備された群構造や群定数とは別に PALLAS 用の核データライブラリーを利用した。 S_N コードと MORSE コード⁷⁾用群定数は 15 MeV から熱中性子まで 13 群に縮約した P_3 の定数であり、 S_N コードは $S_8 - P_3$ 近似により、設計計算によく使用されるメッシュ選定で計算を行うことに当初決めた。しかし、N-II-1 問題の計算で DOT-III コード⁴⁾による $S_8 - P_3$ 近似は良い結果を算出できなかった。そこで $S_8 - P_3$ 近似に加えて、新たにダクトストリーミングする方向へ極端に密な角度分点を割りあて、反対の方向へ粗な角度分点を割りあてた非対称 124 分点セットを使用して計算を行った。この分点セットは ADOQ コードを使用して作製したもので、今回の計算の z 軸に対する第 1 角度分点の値は S_{96} に相当するものであり、他の z 軸について正の方向の角度分点の値は S_{10} に相当する。 z 軸について負の方向の分点の値は S_6 分点セットのものである。また、TWOTRAN-II コード⁵⁾の計算は $S_8 - P_3$ の他に $S_{16} - P_3$ も実施した。

MORSE コードは多群モンテカルロコードで S_N の群構造と群定数がそのまま使用できる。計算は当初炉心から遮蔽体まで一度に実施したが、N-II-2 の問題のように水層の後に厚い鉄層がある場合、中性子の減衰が激しく良い結果を算出するにはヒストリーアンダードが常識外に多く必要になることがわかった。そこで新たに PALLAS で計算したアルミタンク表面上の角度束を MORSE 計算の境界条件として N-II-2 の問題の再計算を実行した。

以上のベンチマーク計算は一部の MORSE 計算を除いて全て原研の FACOM 230/75 計算機を使用して実施された。この他に PALLAS との結合による MORSE 計算が船舶技術研究所の TOSBAC-5600/120 計算機を使用して行われた。また、ベンチマーク計算に先立って群定数

の作製のための計算が原研のFACOM 230/75 計算機を使用して実施された。

以下第2章では、全部の計算に共通する群定数の作成と線源条件について述べる。次いで第3、第4章では、各々のコードについて計算条件ならびに計算結果について述べ、第5章で全計算を比較検討し、それぞれのコードの得失について述べる。（執筆者：竹内 清）

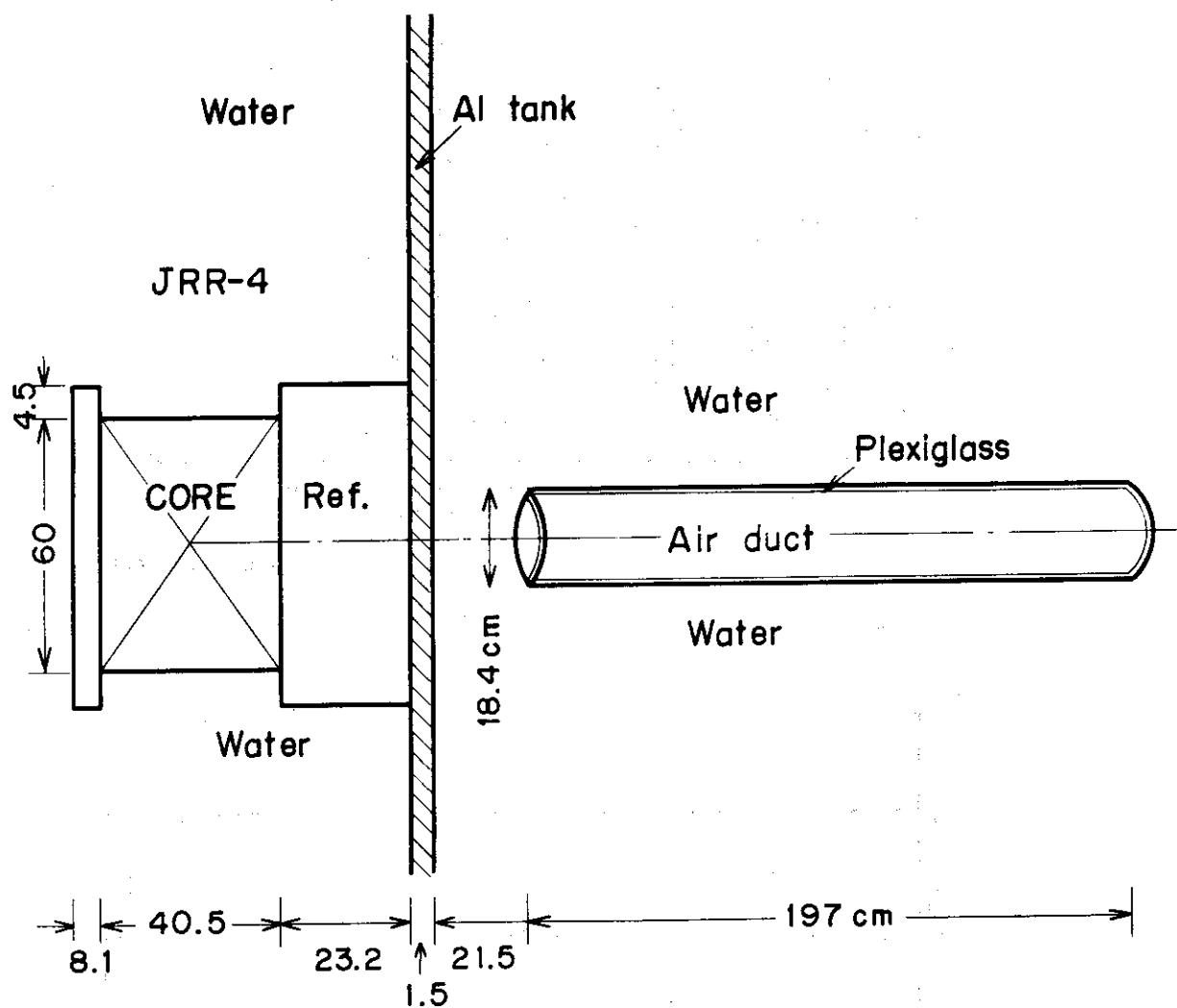


Fig.1.1 Experimental configuration for cylindrical air duct problem

N-II-1

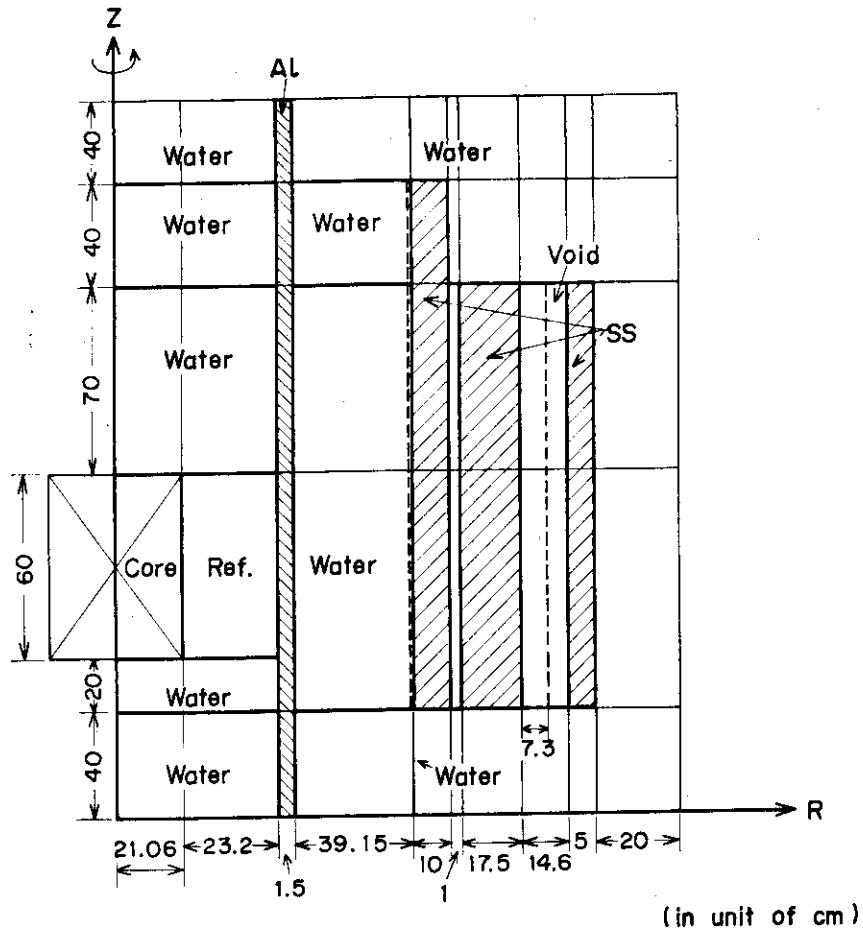


Fig.1.2 Calculational model for N-II-2 problem

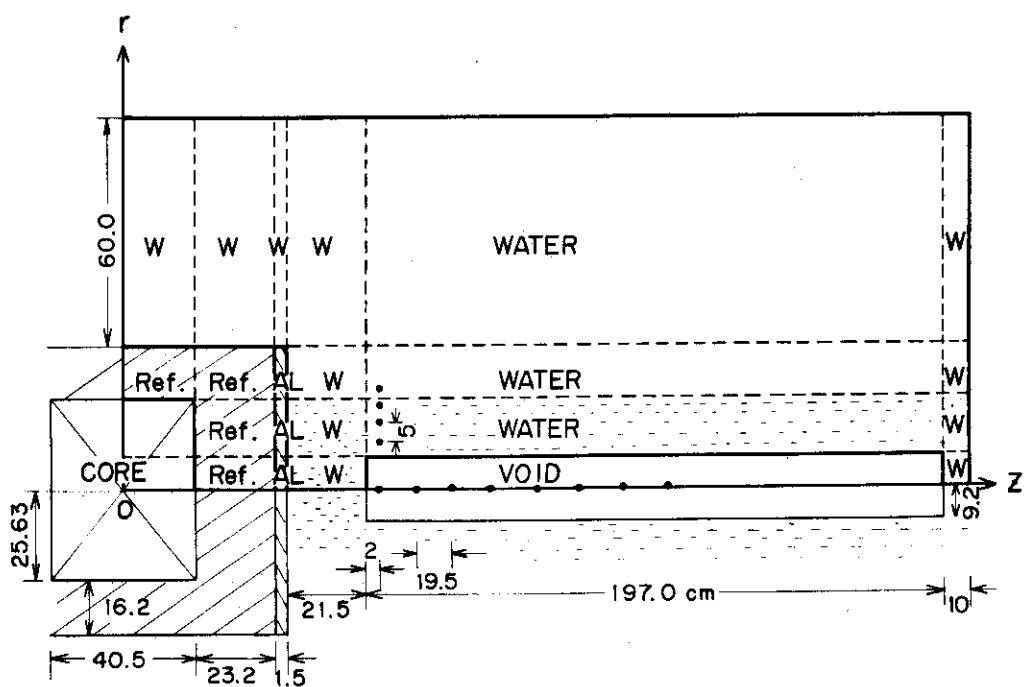


Fig.1.3 Calculational model for N-II-1 problem

2. 群定数と線源条件

2.1 群定数の作成

2次元計算上の中性子縮約群定数は13群、 P_3 近似としてN-II-1, N-II-2 それぞれについて作成した。その群構造をTable 2.1に示す。この群構造は14 MeV から熱中性子領域までを13群に分割した構造となっているが、閾検出器の反応率をなるべく正確に計算する目的で¹¹⁵In(n, n')反応の閾エネルギーに近い200 keV 以上の領域を細かく、それ以下の領域は反応率の計算に関係ないので相当粗くした構造となっている。

縮約計算は、1次元 S_N コード ANISN⁸⁾を用いて、N-II-1についてはz軸方向に沿って、N-II-2についてはr軸方向に沿って、球形状計算により求めた領域毎のスペクトルを用いて行った。N-II-1, N-II-2 それぞれに対する計算体系をFig. 2.1, Fig. 2.2 に示す。なおN-II-1のケースについては、ボイド領域に対する縮約群定数は求めなかったため、N-II-2に対して求めたデータを用いることとした。1次元計算に用いた群定数は、小山ら⁹⁾が100群構造で作成した無限希釈断面積をもとにして RADHEAT-V3 コード¹⁰⁾を用いて作成したものである。各領域の原子数密度 ($10^{24} \cdot \text{atoms}/\text{cm}^3$) で表わした物質組成をTable 2.2 に示す。同表のデータのうち、CORE および SS の組成は参考文献(1)から、Al 壁および REFLECTOR の組成は参考文献(3)からそれぞれ引用したものである。

反応率の計算は¹¹⁵In(n, n'), ⁵⁸Ni(n, p), ⁶⁴Zn(n, p), ²⁴Mg(n, p), ²⁷Al(n, p) ⁵⁶Fe(n, p), ²⁷Al(n, α) の各反応に対して行なった。計算に用いた13群構造のレスポンスは参考文献(3)から引用したものであり、Table 2.3 に示す。

2.2 線源条件の決定

JRR-4 炉心内の核分裂線源分布は、伊勢ら¹²⁾の計算値をもとにして、炉心上下方向の分布を炉心中心を境にして上下対称となるように補正を加え、かつ次式にしたがって炉心全体の出力が1ワットになるようにr方向およびz方向の線源分布 $S(r)$, $S(z)$ を規格化して決定した。

$$\int_z S(z) dz \int_r S(r) \cdot 2\pi r dr = 7.62 \times 10^{10} (\text{neutrons} \cdot \text{sec}^{-1})$$

N-II-1 および N-II-2 に対するr方向, z方向の線源分布をFig. 2.3, 2.4 に示す。核分裂スペクトルはWattの式を用いて求めた。それらの値をTable 2.4 に示す。（執筆者： 笹本宣雄／協力者：小山謹二，山路昭雄，秦和夫）

Table 2.1 Energy Group Structure for Collapsed Group Constants

Group	Energy range (eV)	Group	Energy range (eV)
1	$1.492+7^*$ — $1.000+7$	8	$4.076+5$ — $2.024+5$
2	$1.000+7$ — $6.703+6$	9	$2.024+5$ — $1.931+4$
3	$6.703+6$ — $4.066+6$	10	$1.931+4$ — $9.611+2$
4	$4.066+6$ — $2.466+6$	11	$9.611+2$ — $1.068+1$
5	$2.466+6$ — $1.496+6$	12	$1.068+1$ — $4.140-1$
6	$1.496+6$ — $8.209+5$	13	$4.140-1$ — $1.000-3$
7	$8.209+5$ — $4.076+5$		

*) 1.492×10^7 (eV)

Table 2.2 Material Compositions

	CORE	REFLECTOR	AL WALL	WATER	SS
H	4.577-2	1.638-3	—	6.674-2	—
¹⁰ B	6.500-6	—	—	—	—
C	—	6.405-2	—	—	7.355-4
O	2.291-2	8.190-4	—	3.337-2	—
Al	1.785-2	8.537-3	5.997-2	—	—
Si	—	—	—	—	1.570-4
Fe	4.569-4	—	2.832-4	—	8.377-2
Mn	—	—	—	—	6.627-4
²³⁵ U	1.015-4	—	—	—	—
²³⁸ U	1.13-5	—	—	—	—

(atoms $\cdot 10^{24} / \text{cm}^3$)

Table 2.3 Reaction Cross Sections of Threshold Detectors

Group	$^{115}\text{In}(\text{n}, \text{n}'')$	$^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})$	$^{64}\text{Zn}(\text{n}, \text{p})$	$^{24}\text{Mg}(\text{n}, \text{p})$	$^{27}\text{Al}(\text{n}, \text{p})$	$^{56}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})$	$^{27}\text{Al}(\text{n}, \alpha)$
1	1.190 + 0	5.702 + 0	2.483 + 0	1.950 + 0	9.457 - 1	9.517 - 1	1.138 + 0
2	2.001 + 0	6.444 + 0	2.381 + 0	9.64 - 1	7.744 - 1	3.848 - 1	3.302 - 1
3	2.538 + 0	4.578 + 0	1.350 + 0	1.18 - 2	2.338 - 1	3.346 - 2	3.96 - 3
4	3.388 + 0	2.074 + 0	3.63 - 1	0.0	3.114 - 2	0.0	0.0
5	2.639 + 0	4.00 - 1	7.5 - 3	0.0	0.0	0.0	0.0
6	6.28 - 1	3.10 - 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	9.0 - 2	4.0 - 4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1.5 - 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

(barns)

Table 2.4 Fission Spectrum of ^{235}U by Thermal Neutron Obtained
by Watt's Formula

Energy group	Spectrum (n/group)
1	1.395 - 3
2	1.407 - 2
3	8.231 - 2
4	1.834 - 1
5	2.278 - 1
6	2.267 - 1
7	1.534 - 1
8	6.833 - 2
9	4.123 - 2
10	1.350 - 3
11	1.527 - 5
12	1.778 - 8
13	1.367 - 10
Total	1.000 + 0

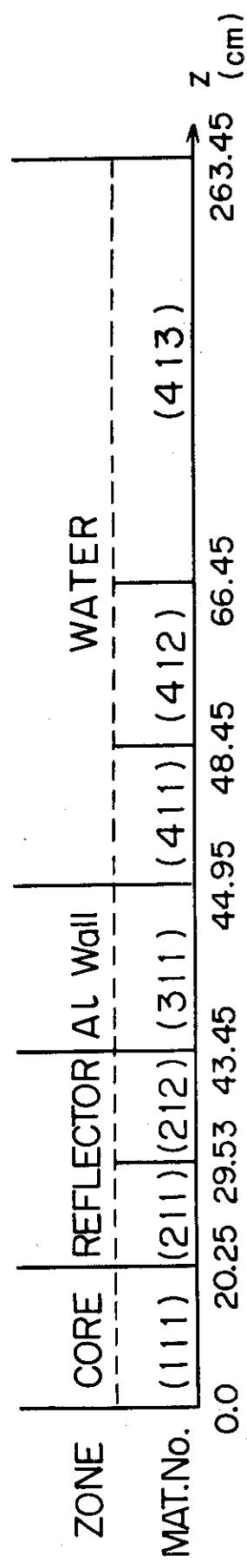


Fig.2.1 One-dimensional configuration of N-II-1 for collapsing
calculation by ANISN

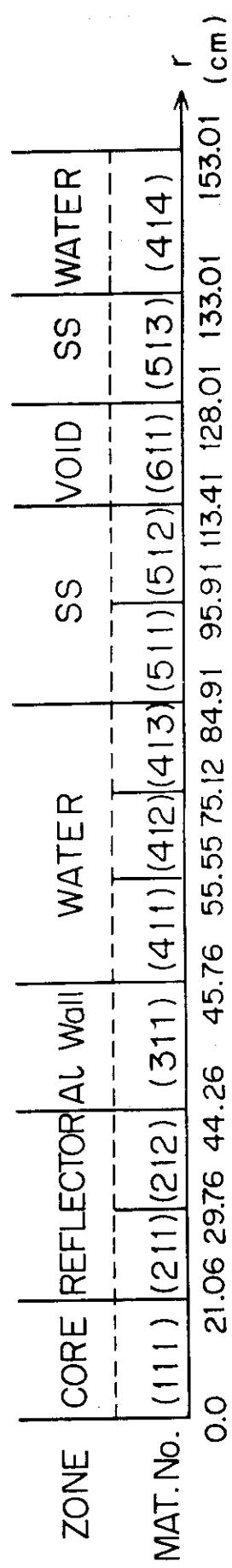


Fig.2.2 One-dimensional configuration of N-II-2 for collapsing
calculation by ANISN

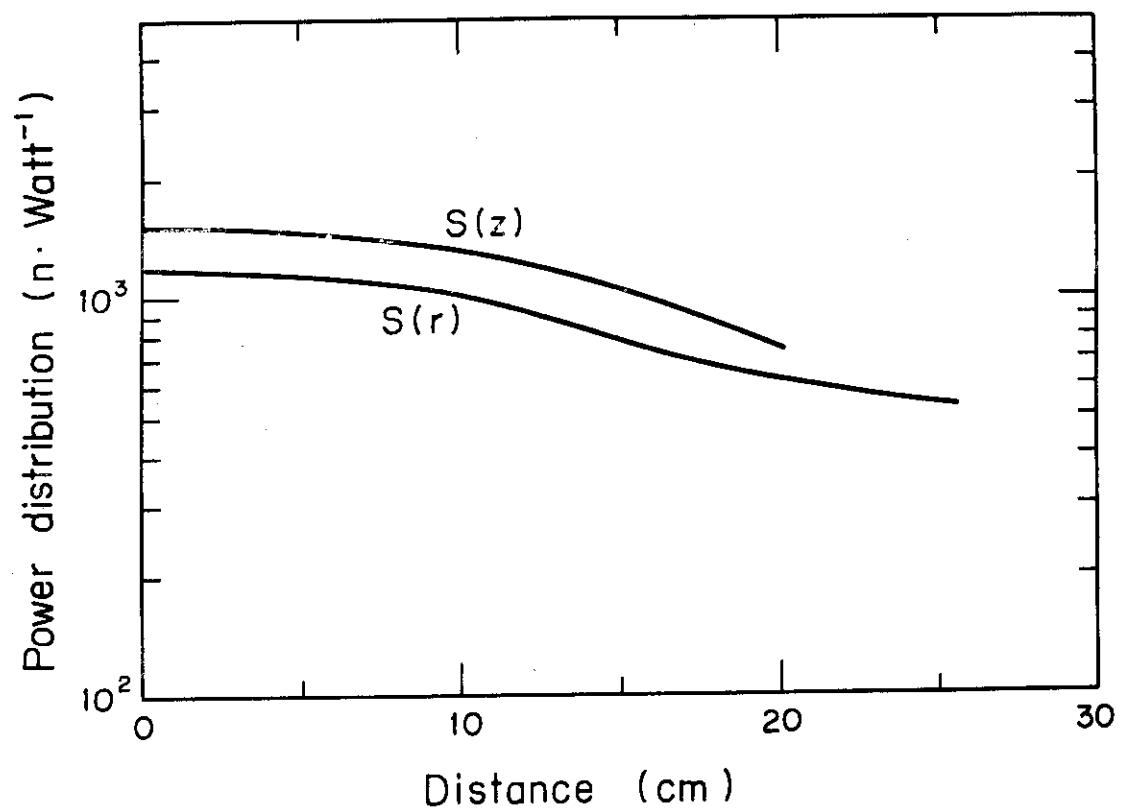


Fig.2.3 Fission source distributions within the core for N-II-1

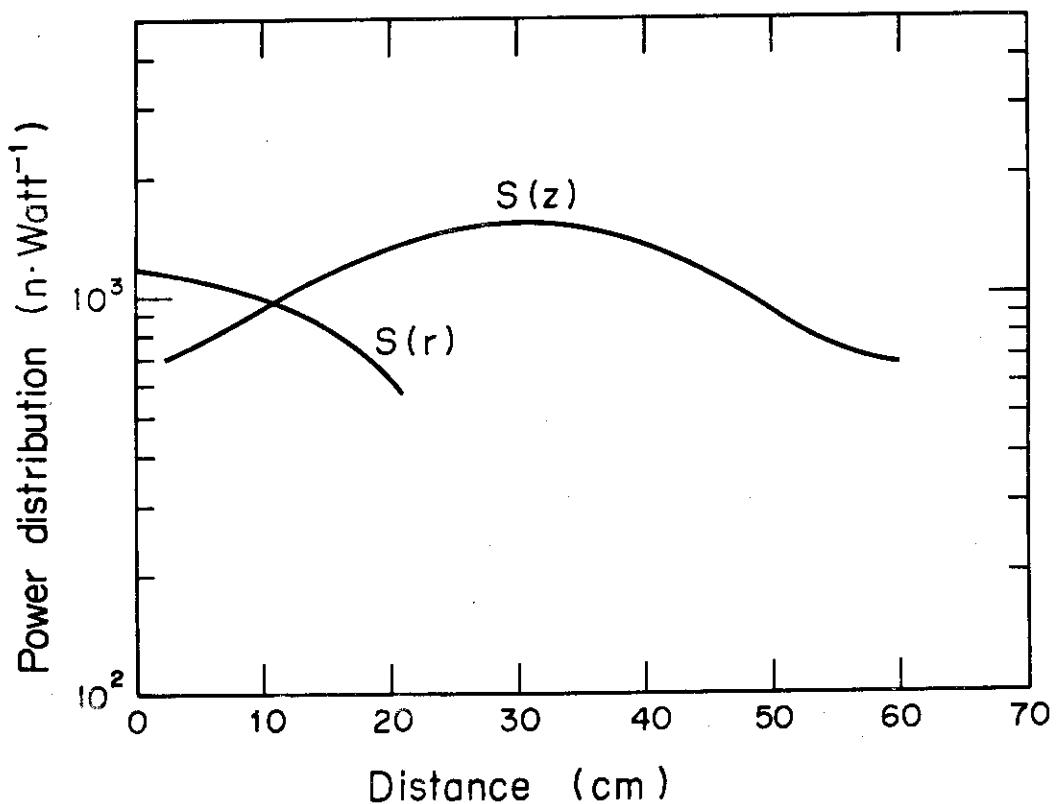


Fig.2.4 Fission source distributions within the core for N-II-2

3. 計 算 条 件

3.1 DOT-III 計算条件

a) 体系モデル

ベンチマーク問題 N-II-1, N-II-2 について, DOT-III による 2 次元 S_N 計算のための体系モデルを, 各々 Fig. 3.1 と Fig. 3.2 に示す。

b) 領域とメッシュ指定

DOT-III による 2 次元 S_N 計算は下記のケースについて実施した。空間メッシュ数の少ないケースは, 後述する TWOTRAN による計算と比較する意味で実施したものであり, 以降粗メッシュという呼称で表現し, メッシュ数の多いケースと区別する。

(1) N-II-1	メッシュ数 65×89	S-48 (対称型)
(2) N-II-1	"	S-124 (非対称型)
(3) N-II-2	メッシュ数 100×108	S-48 (対称型)
(4) N-II-1 (粗メッシュ)	メッシュ数 46×47	S-48 (対称型)
(5) N-II-2 (粗メッシュ)	メッシュ数 38×55	S-48 (対称型)

メッシュ数の多いケースについて, N-II-1, N-II-2 の領域とメッシュ指定を各々 Fig. 3.1 と Fig. 3.2 に示してある。粗メッシュのケースについて, N-II-1, N-II-2 の領域, メッシュ指定を各々 Fig. 3.3 および Fig. 3.4 に示す。

空間メッシュの切り方は diamond difference scheme をとった場合に負の線束を与えない十分条件である, $\Delta R < \lambda/2$ および $\Delta Z < \lambda$ (ただし, ΔR , ΔZ , λ はそれぞれ径方向および軸方向メッシュ幅, 中性子平均自由行路である), さらに計算機コア容量の節約を考慮して標準 (DOT-III 計算にとられた) のものとして下記の如く選んだ。

$$\Delta R = \lambda/2 \sim \lambda, \quad \Delta Z = \lambda \sim 2\lambda$$

ただし, ポイド近辺の中性子束に影響を及ぼさず, また負の線束も出現しないと考えられる周辺領域等については, 上記の規準よりもさらに大きくとっている。 λ の値は高速中性子に対するものとして Table. 3.1 に示す値を採用した。

粗メッシュのケースについてのメッシュ幅の選び方は, 基本的にはメッシュ数の多いケースにおける 2 メッシュを 1 メッシュに束ねたものであるが, 部分的にメッシュ幅を細かくしたままの領域も設けた。

c) $P_1 - S_N$ 次数

DOT-III により実施した 2 次元 S_N 計算の各ケースに使用した $P_1 - S_N$ 次数は下記の通りである。ここで $S-n$ の n は半球当たりの角度分点数であり, 1 次元 S_N コードや TWOTRAN⁵⁾ の場合の呼称とは異なる。

(1) N-II-1 P₃-S-48 (TWOTRAN流呼称では S₈)

(2) N-II-1 P₃-S-124

(3) N-II-2 P₃-S-48

(4) N-II-1 (粗メッシュ) P₃-S-48

(5) N-II-2 (粗メッシュ) P₃-S-48

(2)のケースに用いた S_N 分点は、角度空間座標において、 $\eta = 1.0$ に近い領域に分点を密に取った非対称型 S_N 分点である。

d) 収束条件

DOT-III により実施した 2 次元 S_N 計算で使用した収束条件は全て $\epsilon = 0.01$ とした。また、各ケースに対する inner iteration limit は以下の通りとした。

(1) N-II-1 (S-48) 16 回

(2) N-II-1 (S-124) 16 回

(3) N-II-2 (S-48) 16 回

(4) N-II-1 (粗メッシュ, S-48) 30 回

(5) N-II-2 (粗メッシュ, S-48) 25 回

e) 計算モード、加速法

DOT-III により実施した 2 次元 S_N 計算の各ケースにおける計算モード及び加速法は以下の通りである。

(1) N-II-1 (S-48) linear-step, space-independent scaling

(2) N-II-1 (S-124) linear-step, space-independent scaling

(3) N-II-2 (S-48) linear-step, space-independent scaling

(4) N-II-1 (粗メッシュ) linear-step, coarse mesh rebalancing

(5) N-II-2 (粗メッシュ) linear-step, coarse mesh rebalancing

Linear-step モードとは、通常は 1 次式を使用し、負の線束が発生した場合は step 関数を用いて計算し直すモードである。(執筆者: 西村達雄)

3.2 TWOTRAN-II 計算条件

空間メッシュの切り方は原則として DOT-III 計算における細かいメッシュのケース（標準計算体系）と同一に定めた。しかし計算を実行する際、断面積データを全てコアメモリーに記憶させる形式になっているので、13 群を行うには空間メッシュ数を減じない限り全てのデータをコアに収納し切れなくなる。したがって計算上あまり重要でないと思われる周辺部を中心で空間メッシュを減じて計算モデルを作った。すなわち、DOT-III 用の標準計算体系では N-II-1 の問題については $65(R) \times 89(Z) = 5785$ に対して TWOTRAN-II では $46(R) \times 47(Z) = 2162$ と半減させた。また N-II-2 の問題については、DOT-III の $104(R) \times 120(Z) = 12480$ に対して TWOTRAN-II では $38(R) \times 47(Z) = 1786$ と $1/7$ に減じた。

Rebalance 用の粗メッシュの選び方については、N-II-1 の問題では中性子束の空間的変化の大きい部分ではやや細かくとり、変化の少ない部分では粗メッシュ内に含まれる詳細メッシュが 7 を越えないようにとった。その結果、 $10(R) \times 13(Z) = 130$ の粗メッシュを定めた。一方、N-II-2 の問題では重要と思われる部分について媒質（ここでは、群定数の異なる領域を意味する）が比較的細かく配列されているため、ほぼ媒質の境界と同じに定めた。したがって、 $14(R) \times 10(Z) = 140$ の粗メッシュとなった。Figs. 3.5 ~ 3.7 にそれぞれの問題に対する計算モデルを示す。

計算はいずれも核分裂中性子源を与えて固定線源問題として行った。ただし、TWOTRAN-II コードでは最終的な反応率計算ルーチンに入るのは、各空間メッシュ点の中性子束が rebalancing がうまく収束して outer iteration のルーチンを正常に出た場合であり、それらが収束しない限り何回でも outer iteration を繰り返すことになっている。したがって、最終結果を得るまでに数回の restart を行なった。

中性子エネルギー群は Table 2.1 に示したように 15 MeV ~ 熱中性子を 13 群で、N-II-1 については $S_8 - P_3$ と $S_{16} - P_3$ 近似で、N-II-2 については $S_8 - P_3$ で計算を実行した。階差式は diamond difference であり、角度束に負の値を算出した場合は零にセットし、残りの角度分点について改めてバランス方程式を解き直している。収束加速法は coarse mesh rebalancing 法を使っている。また、1 群あたりの inner iteration の最大回数は $S_8 - P_3$ 近似の計算では 50 回とし、 $S_{16} - P_3$ 近似では 100 回とした。収束の判定は各空間メッシュの中性子束の最大誤差が 1 % 以下とした。（執筆者：川合将義）

3.3. PALLAS 計算条件

ベンチマーク問題 N-II-1, N-II-2 に対して、PALLAS による計算のために設定した体系モデルを Fig. 3.8 と Fig. 3.9 に示す。N-II-2 については、炉心中心を境として体系が近似的に上下対称であるとして、上半分だけの体系を計算上考慮した。これらの図には同時にメッシュ指定が与えられており、メッシュ数は N-II-1, N-II-2 各々について $36(R) \times 55(Z)$, $53(R) \times 51(Z)$ である。計算に用いた角度分点は N-II-1 については、等方 28 分点および非等方 32 分点（前方 20 分点、後方 12 分点）の 2 種類であり、N-II-2 に対しては等方 28 分点だけである。

エネルギー群構造は、14.2 MeV ~ 1.05 MeV の領域を 0.2 レサジー等間隔で 14 エネルギー点に分割したものであり、群定数も PALLAS 用ライブライバー⁸⁾を使用した。PALLAS コードは固定ディメンジョンであり、計算に必要な問題の大きさに関係なく必要なコア容量は 252 kW である。また PALLAS コードは、前節の S_N コードのように輸送方程式の計算に繰り返し収束法異方散乱の取扱いにルジャンドル展開近似を使用しないので、これらに関する入力は不要である。その上 diamond difference を使用しないので空間メッシュの幅について特に制限はない。（執筆者：笛本宣雄）

3.4 MORSE 計算条件

モンテカルロコード MORSE は 3 次元体系も取り扱い可能であるが、Discrete Ordinates コードの 2 次元計算用のベンチマーク問題のために 2 次元の円筒形状で体系を近似した。

まず最初に直円筒ダクトの形状 (N-II-1) について述べる。炉心は S_N 計算、PALLAS 計算と同様横置き円筒で表わし、炉心の中心を原点として軸方向にダクトが置かれているとした。領域はすべて z 軸について対称であり、 r 方向は炉心と水の二領域に分割した。Fig. 3.10 にモデル化した形状を示す。次に円環空隙形状の N-II-2 の場合は炉心を縦置き円筒で表わし、各領域は層状になった円筒の一部で表わされる。 z 軸方向は 3 領域に分割され、炉心上部、炉心下部の水の断面積はアルミタンクに接する水の断面積で代用した (Fig. 3.11 参照)。Fig. 3.10, 3.11 に示された 3 行の数字は群定数により分類された媒質の番号を表わしている。

エネルギーについては N-II-1, N-II-2 とも計算時間の関係から上から 8 群で計算を打ち切った。

線源条件はすでに 2.2 節で述べたように N-II-1, N-II-2 とも直方体炉心形状をそのまま用いたが、出力分布は一様と仮定し、また等方放射で且つ Watt の式で表わせる核分裂スペクトルを使用した。なお使用した角度分点は P_3 であり、極角方向の散乱角度はこの次数に対応して 2 ケとられる。

ヒストリー数と計算時間については、N-II-1 は 1 バッチ 1000 ヒストリーで 15 バッチまで計算を行った。所要計算時間は FACOM-230/70 で約 3 時間 50 分である。N-II-2 は 1 バッチ 100 ヒストリーで 150 バッチまで計算を行った。所要計算時間は約 3 時間 50 分である。

(執筆者：伊藤泰義)

Table 3.1 Averaged Mean Free Path in Each Region

Material	Σ_{tot} (cm ⁻¹) ⁴⁾	λ_{tot} (cm)
CORE	0.77	1.30
REFLECTOR	0.34	2.84
AL	0.36	2.78
WATER	1.0	1.0
SS	0.4	2.5

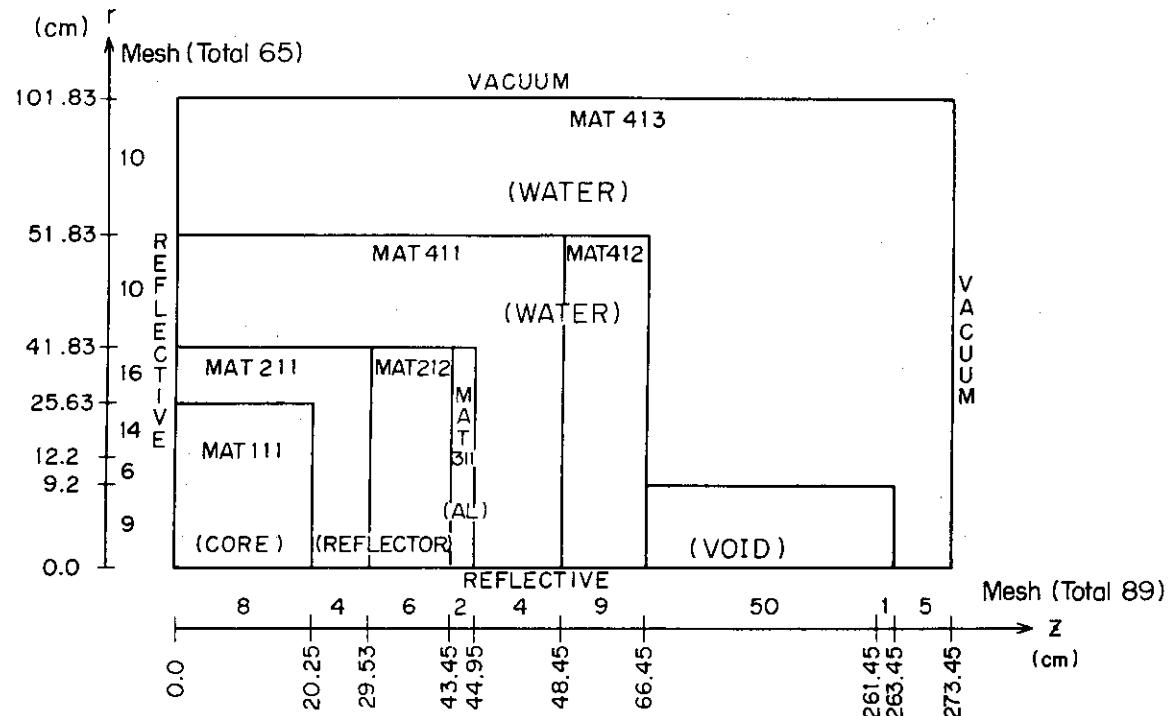


Fig.3.1 N-II-1 model for DOT-III fine mesh calculation

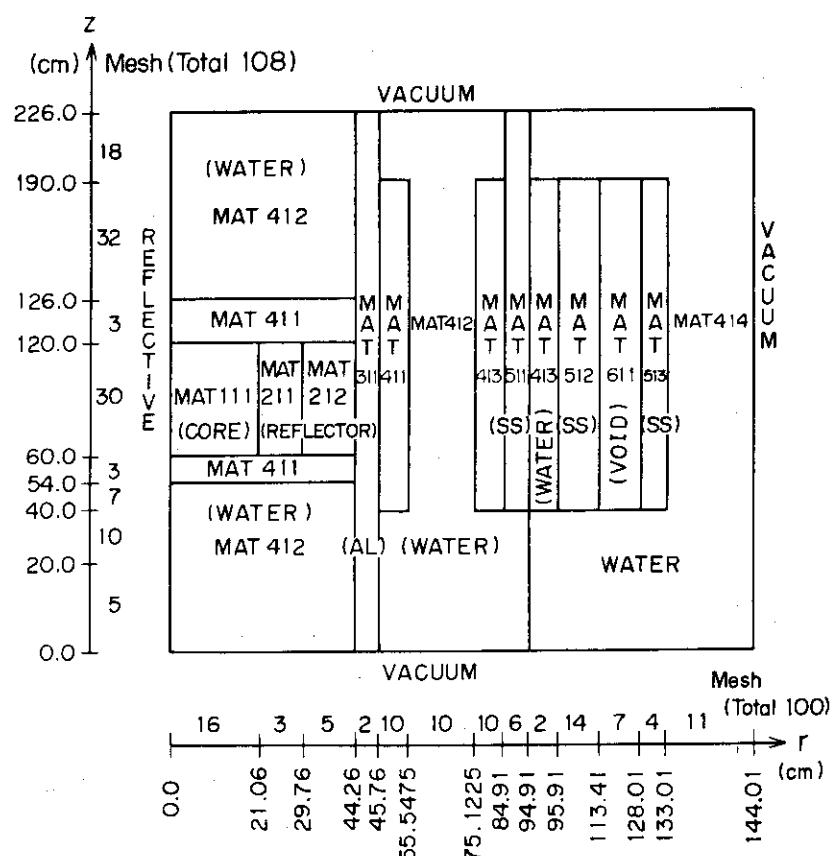


Fig.3.2 N-II-2 model for DOT-III fine mesh calculation

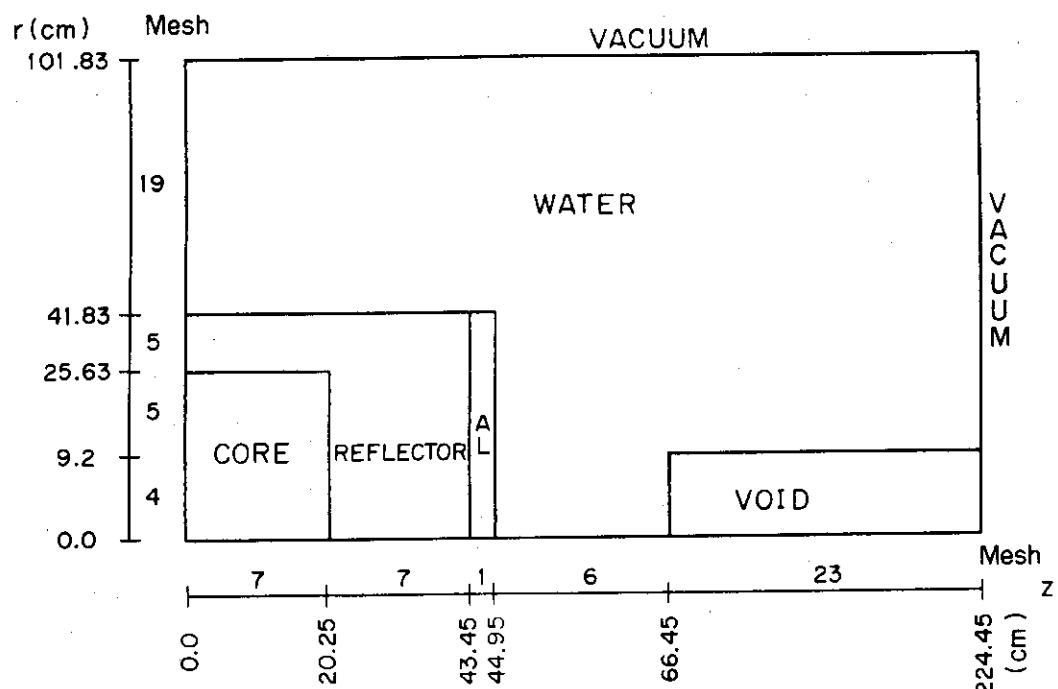


Fig. 3.3 N-II-1 model for DOT-III coarse mesh calculation

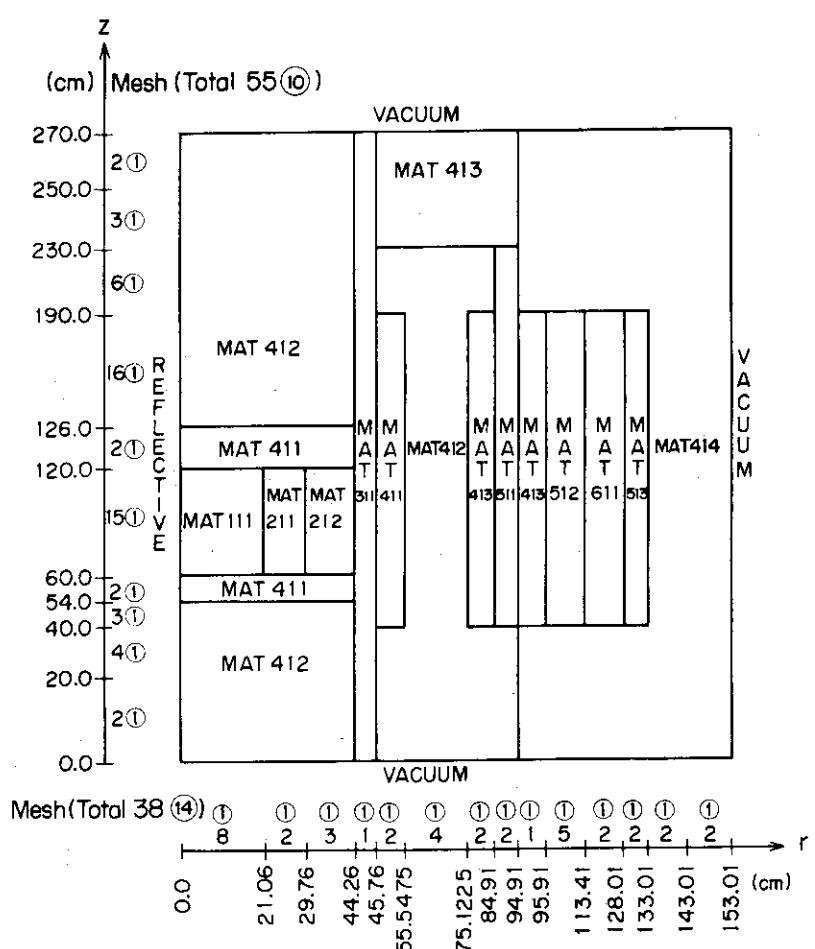
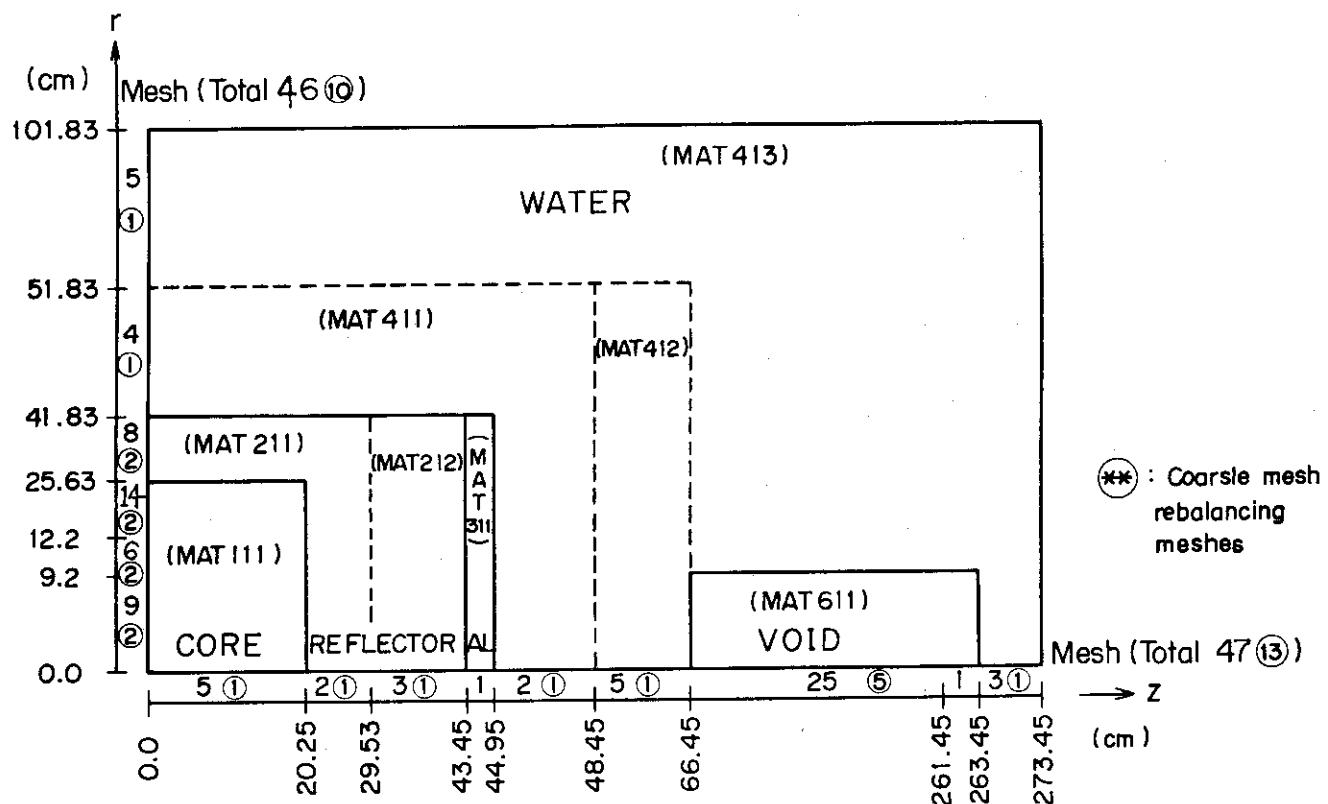
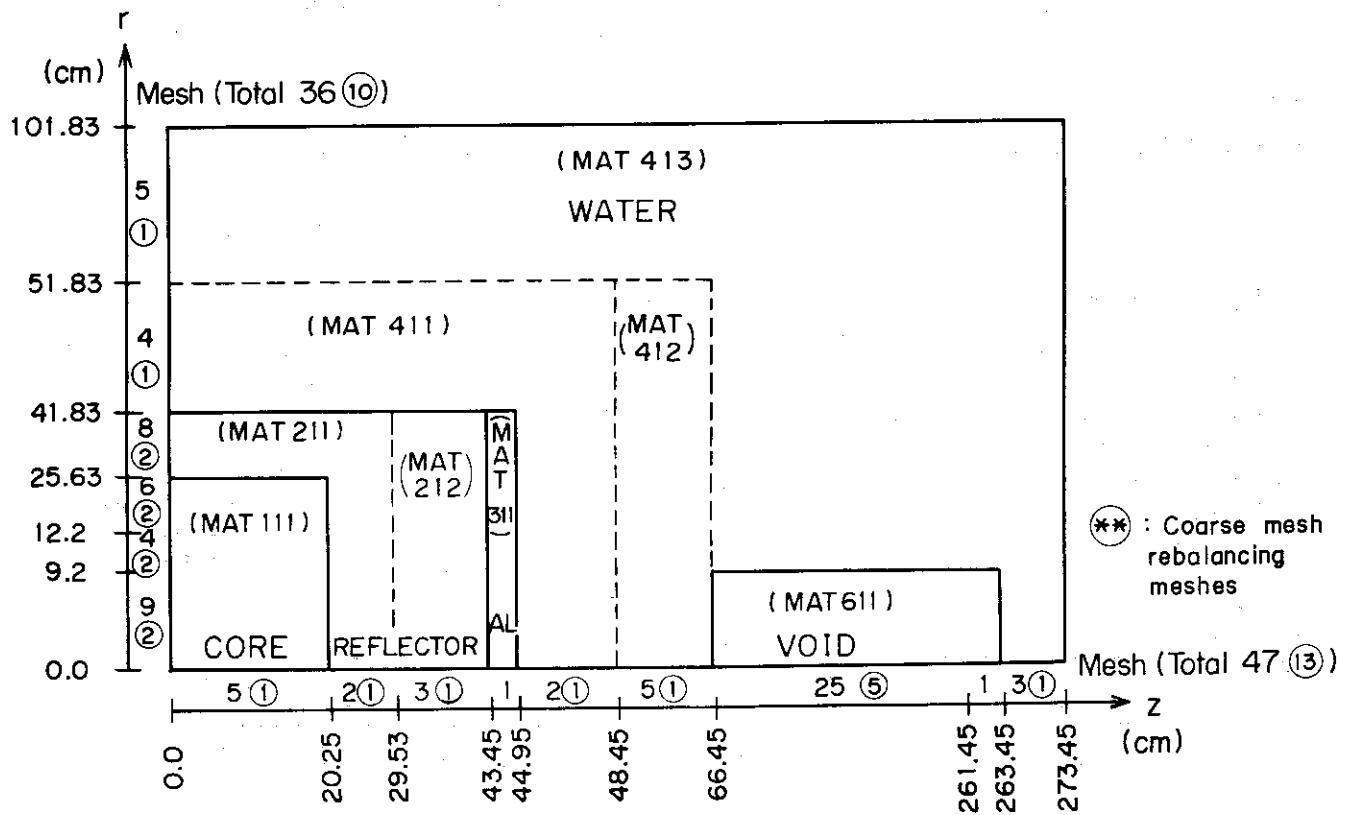


Fig. 3.4 N-II-2 model for DOT-III coarse mesh calculation

Fig.3.5 N-II-1 model for TWOTRAN-II S_8-P_3 calculationFig.3.6 N-II-1 model for TWOTRAN-II $S_{16}-P_3$ calculation

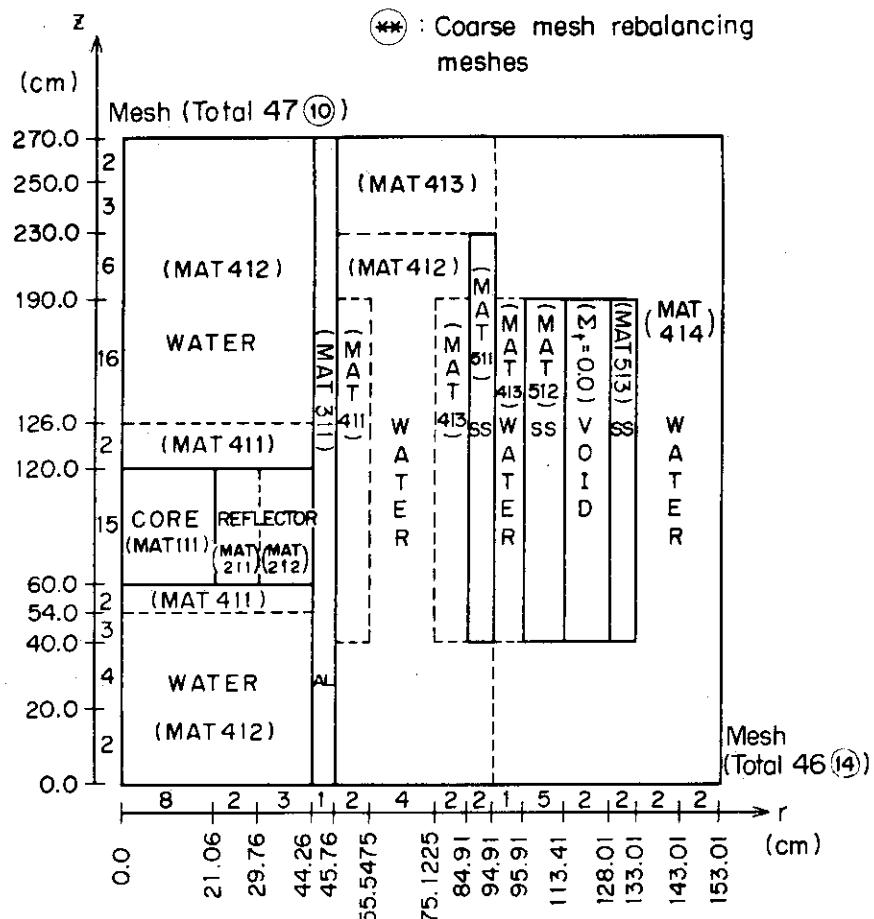


Fig.3.7 N-II-2 model for TWOTRAN-II calculation

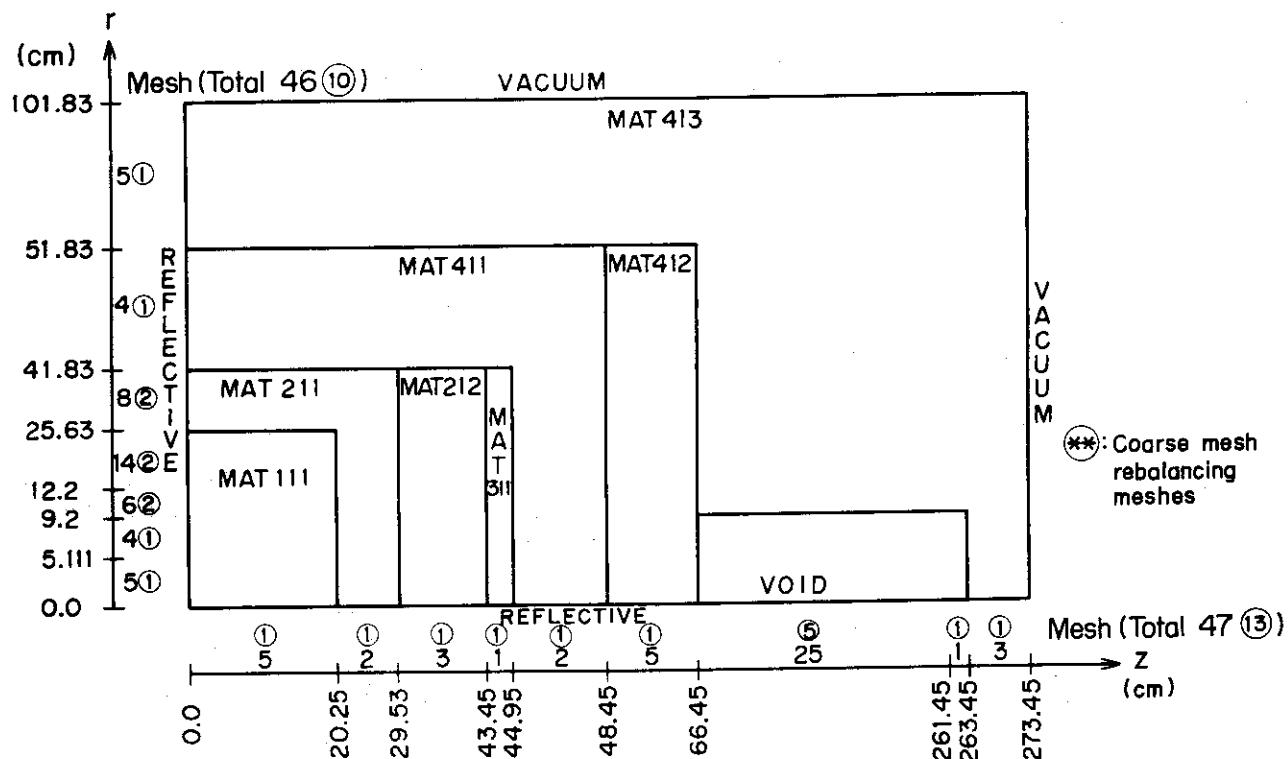


Fig.3.8 N-II-1 model for PALLAS calculation

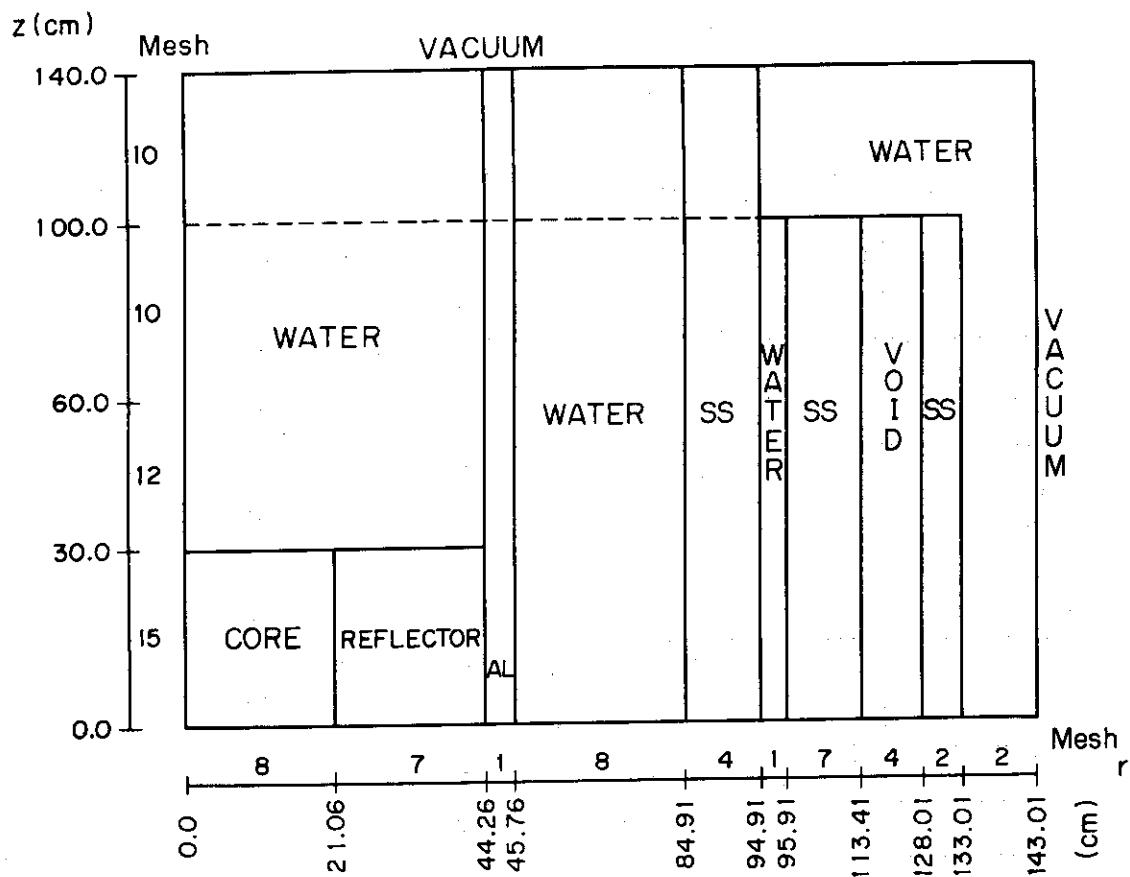


Fig.3.9 N-II-2 model for PALLAS calculation

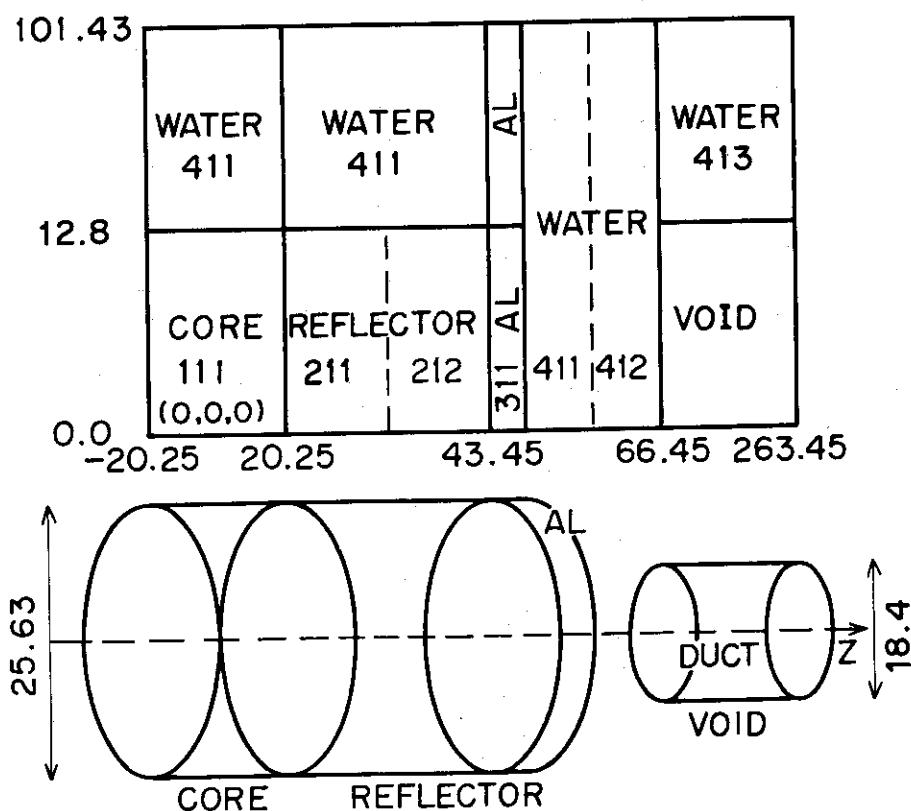


Fig.3.10 N-II-1 model for MORSE calculation (in units of cm)

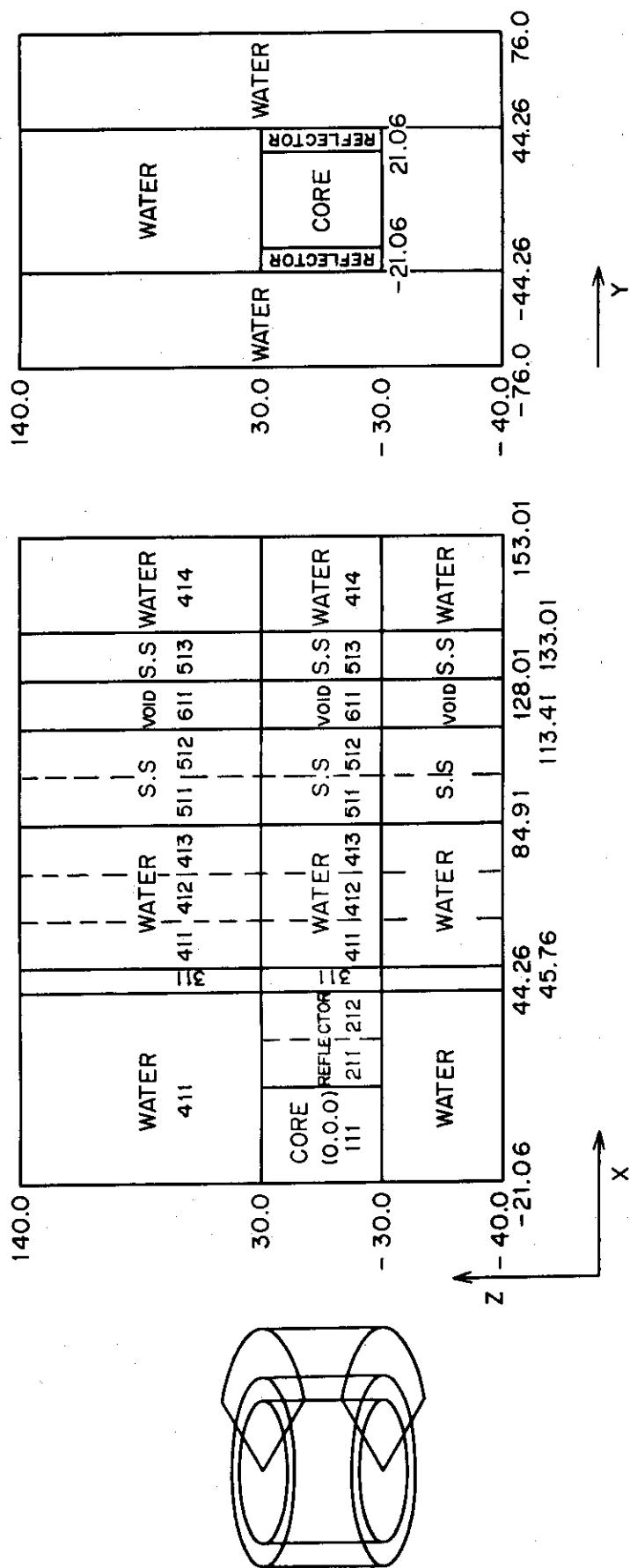


Fig. 3.11 N-II-2 model for MORSE calculation (in units of cm)

4. 計 算 結 果

4.1 DOT-III 計算結果

4.1.1 収束状況

DOT-III による計算は、N-II-1 については細かいメッシュ体系で S-48, S-124 の計算、粗いメッシュ体系で S-48 の計算を行い、N-II-2 については、S-48 近似で細かいメッシュと粗いメッシュの 2通りの計算を行った。それぞれの収束状況を Table 4.1 ~ 4.5 に示す。計算時間の関係で inner iteration の打切り回数を 16 ~ 30 回にせざるをえなかつたが、ほとんどのケースについて iteration は打切り回数に達しておりその時の最大誤差は、Table 4.2 の第 1 群を除くと大体 50 ~ 60 % 以下である。N-II-1 についてはメッシュのえらび方、角度分点のえらび方によって iteration 誤差は大して影響を受けないが、N-II-2 については粗メッシュ計算の方が細かいメッシュよりも明らかに誤差は小さくなる。また N-II-1 については部分的に打切り回数を 50 回にして収束状況を調べてみたが、iteration 回数が増加しても誤差は必ずしも改善される方向には進まないことを確めた。

Table 4.6 にはケース毎の計算機コア容量、C.P.U. 時間をまとめた。C.P.U. 時間を 1 iteration あたり 1 メッシュあたりの時間に直すと S-48 計算で約 4 msec, S-124 計算で約 10 msec であった。これらのデータは同種の DOT-III による計算の所要 C.P.U. を推定するのに使えるであろう。

次に S_N 計算モードと加速法のオプションの選択について述べる。当初、モードは mixed linear-weighted, 加速法として space dependent scaling のオプションを用いて計算を行なつたが、inner iteration の途中でオーバーフローが発生して解を得るに到らなかつた。モードを weighted difference mode にしても事情は同様であつた。そこで次にモードとしては一番単純な mixed linear-step を、加速法としては space independent scaling を用いたところ、収束条件を完全に満足するまでには到らなかつたが、次章で述べるような計算結果を求めることができた。一般的には、モードおよび加速法について advanced technique が有利となるのは、明らかに収束性が保証されている問題に限定されるのではないかと思われる。そして収束が本来むずかしい問題に対しては advanced technique よりもむしろ単純な technique の方が有利の様である。

原研内で現在利用されている DOT-III (JAERI Version) には加速法のオプションとして coarse mesh rebalancing 法が付け加えられている¹⁴⁾。DOT-3.5¹⁵⁾にはこの方法が組みこまれているが、現時点では DOT-3.5 は原研では利用できる状態にはなっていない。そこでベンチマーク問題 N-II-2 を使って、coarse mesh rebalancing 法による収束性に対する効果を、space independent scaling 法による解法との比較で検討した。その結果、収束性は群毎にまちまちであり、この問題に関する限り coarse mesh rebalancing 法の優位性を示すことはできなかつた。

4.1.2 実験値との比較

a) N-II-1について

ダクト中の軸方向反応率分布をFig. 4.1に示す。

S-124 計算は一般に実験値を過大評価している。箔の放射化反応の閾エネルギーの値が低くなる程、計算値は実験値に近づく傾向にある。S-48 計算は、ダクト入口で、実験値を過大評価しているものの、ダクトに入ると、実験値に比べかなりの過小評価になり、ダクト出口に進むにつれ、差が開いていく傾向にある。

ダクト中の半径方向反応率分布をFig. 4.2～4.4に示す。

ダクト中において S-124 計算は過大評価、S-48 計算は過小評価の傾向を示しているが、水中においては S-124, S-48 計算共良く一致している結果を示し、実験値との一致も良い。

以上の結果より N-II-1 の問題はダクト入口からの直視成分がストリーミングの大部分を占めるケースと考えられ、S-48 分点はこのケースの直視成分を評価するための有効な S_N 分点ではなく、S-124 分点がこのケースでは有効であることを示しているものと考えられる。

粗メッシュ計算のダクト中の軸方向反応率分布には揺らぎが見られる。これは、ダクト中における空間メッシュの取り方が、メッシュ数の多い計算と異なる（ダクト中の半径方向メッシュ割りは同じ、軸方向メッシュ割りは、 $\frac{1}{2}$ とした）ことによるメッシュ効果（ダクト問題における）か、収束誤差が大きいことによるものか不明である。明らかになつたことは、メッシュ数の多いケースと粗メッシュのケースにおける収束性を比較すると、粗メッシュのケースの方が収束性が悪くなっている、収束回数を多く要していることである。この問題は、今後引き続き検討を要するテーマであると考えられる。

次節で述べる TWOTRAN の計算も、ダクト中の軸方向反応率分布に揺らぎが見られ、 S_8 分点から S_{16} 分点に代えてもこの揺らぎは消えていない。このことからダクト中におけるメッシュ効果が揺らぎの原因であると推論できるだろう。

TWOTRAN と DOT における違いには、差分方程式における negative flux fix-up scheme の違いが挙げられる。TWOTRAN では、通常、負の中性子束が発生すると、メッシュ境界中性子束が零になる様に、メッシュ中点の角度中性子束を再計算している。これに対し DOT では差分形を変えて再計算する scheme を採用している。この fix-up scheme の違いは、非常に収束し難い体系において、解に与える影響は大きいものとなることが予想される。

b) N-II-2について

鉄供試体前面の水中における Ni (n, p) の反応率分布を Fig. 4.5 に示し、ダクト中の軸方向に沿った各種反応率分布を Fig. 4.6 に示す。DOT による計算は、一般的に実験値を過小評価してはいるものの、測定誤差範囲に入っている。ただし ^{24}Mg (n, p) ^{24}Na , 及び ^{27}Al (n, α) ^{24}Na の反応率については過大評価となっている。

N-II-2 の問題については、ダクト入口からの直視成分よりも、ダクト壁より洩れ出て上部方向にストリーミングする成分が多いケースであると予想される。したがって N-II-1 の様に S-124 分点の様な非対称型 S_N セットを用いなくても、S-48 分点でも充分評価できたと考えられる。（執筆者：西村達雄、笛本宣雄／協力者：芦田三郎、鈴木幾則）

4.2 TWOTRAN-II 計算結果

4.2.1 収束状況

Table 4.7(a), (b)にN-II-1の計算についての収束状況を示す。DOT-IIIとの対応をとるため第1群から6群までは群毎の収束状況を示しそれ以後はひとまとめにしたデータを与えた。

N-II-1のS₈-P₃計算においてouter iteration 3回目まで第1群の中性子束は最大で5%の誤差を示しているがその他の群についてはすべて収束条件が満たされた。第4回目のouter iterationは、rebalancingが収束したため各群のバランス表を出力するために行われたものであり、一応収束したと見なしているが群別の内訳は不明である。従って第1群から6群の中性子束の計算に要した計算時間は34.1分+αであり、全群計算の所要時間80.7分の半分近くも占めていることになる。

N-II-1のS₁₆-P₃計算では、第1回目のouter iterationにおいて第1群のみ収束せず、結局第2回目のouter iterationで1~6群まですべて収束した。したがってそれまでの計算時間は62.5分である。それ以後の計算は、第7群以下の中性子束の収束のためと、群別のバランス表出力のための計算である。第4回目のouter iterationまでに要した計算時間は189分であり、上記の62.5分はそれの約1/3である。

N-II-2に対するS₈-P₃計算の収束状況をTable 4.8に示す。第1群に関しては非常に大きな誤差を示しているが、rebalancingが収束基準を満足したため計算は終了した。第1~6群までの計算について第3回目のouter iterationまでに要した計算時間は35.7分であり、全体91.7分の約1/3である。なお、いずれのケースについても第1群の収束は良くない。以上の計算について、計算条件と計算時間をTable 4.9にまとめて示す。

4.2.2 実験値との比較

N-II-1におけるダクト中心軸に沿って得られた各種反応率分布の実験値と計算値をFig. 4.7に示す。P₃-S₈計算では細かい振動が見られるのに対し、P₃-S₁₆計算では比較的なめらかである。またダクト入口から60~100cmの位置において分布は比較的急激な減衰傾向を示しており、S₈計算の方がダクト入口により近いところで下がる。またこの傾向は²⁷Al(n, α), ²⁴Mg(n, p)のように闇エネルギーの高い反応においてより顕著である。この空間分布の変化は、ダクト入口からその空間点を見る見込み角が計算に用いたS_N分点の天頂角より大きいか否かにより決まるものと考えられる。すなわちこれはray effectを示すものであり、ダクト入口からの直視成分が大きく効くAlやMgの反応でその影響はより大きいと言える。なおP₃-S₈とP₃-S₁₆計算の差異はfactor 5以内である。また実験値と比較した場合、ダクト入口で2~4倍過大評価であり、中間部(60~80cm)で4倍~1桁過大評価である。一方ダクトの奥深く入ったところではP₃-S₈計算は実験値と比較的良く合っている。またP₃-S₁₆計算はP₃-S₈と同程度あるいはfactor 2程度の過少評価となっている。

同様にFig. 4.8~4.10は、ダクト入口から41cmと80cmの距離の位置での3種類の反応率の径方向分布を示したものである。⁶⁴Zn(n, p)については非常に良い結果を示している。同様に²⁴Mg(n, p), ²⁷Al(n, α)についても計算がやや過大評価であるが軽水中では

factor 2 以内で一致している。なお $P_3 - S_{16}$ 計算では、軽水中で分布が細かく振動している点を注意すべきである。これは収束条件をもっと厳しくとれば消失すると言われている。

Fig. 4.11, 4.12 は、N-II-2 に対する実験値と計算値の比較であり、Fig. 4.11 は炉心から 84.91 cm はなれた位置（軽水中）で $^{58}\text{Ni} (n, p)$ の反応率を軸方向に見たものである。計算結果はちょうど測定点に対応するメッシュがないため、測定点をはさむ両側のメッシュをプロットした。測定値はこれら 2 つの曲線の間に入っており、測定誤差内で計算値は一致していると言える。また Fig. 4.12 はダクト中心に沿った種々の反応率分布を示したものであるが、 $^{24}\text{Mg} (n, p)$ で factor 2, $^{27}\text{Al} (n, \alpha)$ で factor 4 程度計算値が過大評価となっていることを除けば、すべて実験誤差範囲で測定値と一致している。ただし炉心中心面より下側領域では多少過少評価となっている。

4.2.3 検討および結び

測定データの再現性の点では N-II-2 の方が N-II-1 より良好であるが、N-II-1 でも軽水中では factor 2 以内の一一致が見られた。これは、N-II-2 のダクトが炉心軸に対して平行に置かれているため、その中の高速中性子は炉心側から直接飛来するものではほぼ決まっているためと言える。さらに、軽水中の高速中性子の透過に関して $P_3 - S_8$ 計算は比較的信頼性が高いと言える。

一方、N-II-1 のダクト中の中性子束分布には明らかに ray effect が見い出されており、したがってこの計算では適当な S_N 分点を与えることが重要と思われる。すなわち現在 TWOTRAN-II に組み込まれている S_N 分点を使う場合にはダクトの大きさを考慮すべきであり、細いダクトの計算には ray effect の程度を見積る必要がある。この点については更に検討を深めることが重要であろう。また本計算はメッシュ幅がやや粗いため、その影響についても若干の検討が必要であろう。（執筆者：川合将義／協力者：岡芳明、竹村守雄）

4.3 PALLAS 計算結果

N-II-1 問題については、ダクト軸に沿ったダクト内の反応率空間分布を Fig. 4.13 に示し、またダクト軸と直角方向のダクト内およびそれを取りまく水中での反応率分布を、 $^{64}\text{Zn} (n, p)$, $^{24}\text{Mg} (n, p)$, $^{27}\text{Al} (n, \alpha)$ の各反応について Fig. 4.14 ~ 4.16 に示す。非等方 32 分点の計算も等方 28 分点の計算もともに実験値と良く一致しているが、比較的 28 分点の計算値の方が良く一致している。また両者ともダクト入口では実験値との一致は良くなく 50% ~ 2 倍の差異が見られる。ダクト軸と直角方向の分布をしらべると、特に水中において、等方 28 分点の計算が非等方 32 分点の計算よりもずっと精度が良いことがわかる。また、非等方 32 分点の計算では、ダクト軸よりもダクト周辺部の方が高い分布を示すというような不合理な結果を与えていている。

N-II-2 については、Fig. 4.17 に鉄供試体前面の水中での $^{58}\text{Ni} (n, p)$ 反応率分布の計算結果と実験値を与えており、また Fig. 4.18 には円環ボイド内における各種反応率分布の計算値と実験値をボイド軸方向に沿って与えている。供試体前面の $^{58}\text{Ni} (n, p)$ 反応率につい

では、実験値のなだらかな分布に対して、計算値は $Z = 40 \sim 80 \text{ cm}$ の領域で明らかに過大評価していることがわかる。またこの領域での過大評価の傾向は円環ボイド内の分布についても見られる。この領域における計算上の不自然なゆらぎは、エネルギーが高くなる程顕著になる。この原因は非散乱線の計算における ray effect である。

FACOM-230/75 での C.P.U. 計算時間は N-II-1 については、等分 28 分点の計算で 410 秒、非等分 32 分点の計算で 459 秒である。また N-II-2 については 588 秒である。このように PALLAS 計算は群数が他の S_N 計算の群数よりも多いにもかかわらず、計算時間が逆に非常に少ないので繰り返し収束法を使用しないで解を得ることができるからである。しかし、厳密に云えば最近の PALLAS は非散乱線束の計算と散乱線束の計算を分離して計算を行うように改定されているので各群の計算を 2 回実行していることになる。この改定はプログラム上不十分であることが、N-II-2 の問題の非散乱線束計算による ray effect の増大により判明した。これはベンチマーク計算によるプログラムの検証の大きな意義の 1 つであると云える。

PALLAS では N-II-1 の問題のように中性子が直円筒ダクト内を直進する問題を少ない分点数で比較的良い精度で計算できる。これは輸送方程式の計算を diamond cell 構造を使用しないで、各角度分点毎に中性子の飛行方向にその飛跡に沿って積分して計算をすすめるからである。これと対照的に S_N 計算では diamond cell 内で中性子角度束の変化を線型近似で表わせると仮定して計算をすすめるので、空間的にも角度分布においても変化が激しい問題についてはセルを小さく選ばないと計算誤差の増大を招く。この計算手法の相異が S_N コードと PALLAS コードで空間メッシュ間隔や角度分点数の選び方に違いが出てくる理由である。なお今回のベンチマーク問題の計算では、ルジャンドル多項式展開近似使用の有無については、計算結果上にこれを原因とする差ははつきりとは現われていないようと思われる。（執筆者： 笹本宣雄、竹内 清）

4.4 MORSE 計算結果

N-II-1 のダクト内での実験値と計算値との比較を Fig. 4.19 に、ダクトの外側の水中での比較を Fig. 4.20 に示した。Fig. 4.19 からわかるように、ダクト内部での計算値と実験値はかなり良い一致を示している。しかし、 $^{24}\text{Mg}(\text{n}, \text{p})$ の計算値だけは 60 cm あたりまで実験値とは減衰の傾向が異なり、その差異も大きいがこの理由は不明である。Fig. 4.20 に示されたダクトの外側の水中での実験値と計算値との比較をみると、その差は 1 衍以上である。この原因は本質的にはヒストリー数の不足である。出力としてプリントされた各領域での散乱回数によると、粒子はアルミタンクの次の領域の水中 (Fig. 3.10 で物質番号 411 の領域) までしか到達していない。しかしダクト内で実験値とかなり良い一致を見るのは MORSE では手法として last-collision 法を用いているためである。この last-collision 法で各測定点への寄与を衝突点からの確率分布を用いて評価しているので、ダクト内のような減衰のない領域では ray-analysis 的な計算でも結構評価できる。しかしダクト外部の水領域では減衰が大きいので ray-analysis 法では過少評価になってしまふ。さらにもう一つの理由として考えられるのは、水のように非等方性の強い物質を P_3 で近似している事である。

N-II-2 の円環空隙形状で、鉄板前面での実験値と計算値との比較を Fig. 4.21 に、ボイド内での実験値と計算値の比較を Fig. 4.22 に示した。Fig. 4.21 の実験値と計算値の比較についても、Fig. 4.19 の場合と全く同じ議論ができる。すなわち鉄板前面あたりでもまだ粒子は到達しておらずこの近傍での散乱は皆無であるが、last-collision 法による寄与の算出である程度の意味のある値が計算されている。しかし鉄板を透過すると鉄板での減衰は減衰係数として全断面積を用いているため ray-analysis 的な方法では過少評価になってしまい、Fig. 4.22 に見られるように 2 衡程度の大きな誤差が出るようになる。

以上の結果からわかるように、大きな体系の問題をモンテカルロ法で炉心から計算を始めて遠く離れた遮蔽体まで直接解くのは、普通考えられるヒストリー数では精度の点で問題があることがわかった。さらにヒストリー数をふやして望ましい精度まで計算を行うには膨大な計算時間を要すると思われる。ここで問題となった点は目的とする測定点に全然粒子が到達していないことである。したがって測定点近くに粒子を到達させる手段が種々考えられる。例えばサンプリング過程にバイアスをかける方法とか分散を低減する方法等である。もう一つの解決方法として大きな体系を一度に計算しないで体系を分割して計算を行う方法がある。まず炉心からある位置までを前もって MORSE または Discrete Ordinates コードで計算を行う。次にその位置での角度束を MORSE の入力として計算を開始する方法である。この手法は一度に膨大な計算時間を必要としないし、2 次元的にモデル化できない領域は 3 次元的に解くことも可能であるという利点をもつ。

次にこの結合計算の方法で計算を実施した例について述べる。ただし現在の MORSE はある位置の角度束をそのまま入力して計算するオプションは用意されていない。可能なのはある一点でのエネルギーと極角をパラメータとした角度束の入力だけである。結合計算では負の角度束が算出されない PALLAS コードを用いた。以下に結合条件と計算値の規格化について述べる。

PALLAS の計算条件として、エネルギーについては 14.2 MeV ~ 1.29 MeV を 0.2 レザージーの 13 群で、角度分点は非等方 32 分点（前方向 20 分点）セットを使用し、空間メッシュについては 27 (R) × 46 (Z) を用いた。なお、この計算における Z 方向は炉心から遮蔽体のある方向 (Fig. 3.11 での X 軸) であり、アルミタンクより 50 cm まで水層を設けて計算を行っている。結合位置はアルミタンク表面位置である。次に MORSE の入力については一点の位置の角度束を Z 軸の中心線（炉心中心線延長上）とアルミタンクが交叉する点における角度束を選んだ。この一点の角度束が炉心中心から上下の炉心範囲内に一様に分布していると仮定し、この範囲の外側における角度束分布は零と仮定した。放出方向（極角）は PALLAS コードの極角を入力して放出方向を決定している。計算値の規格化は JRR-4 で船研が行った実験で、Z 軸の中心線上でアルミタンク表面より 20 cm の位置での実験値があるので、この位置での実験値を用いて規格化している。N-II-2 に対するこれらの計算結果を Fig. 4.23, 4.24 に示す。計算時間は船研 TOSBAC-5600/120 で、PALLAS の計算は 12 分位、MORSE は 25,000 ヒストリーで 7 時間 30 分位である。粒子の到達の様子は領域の最後の水中でも相当数の散乱を経験しているので、粒子を測定点近くにもってくるという目的は達せられた。

Fig. 4.23 が鉄板前面での実験値と計算値の比較で、Fig. 4.24 はボイド内での実験値と計

算値とを比較したものである。Fig. 4. 23 からわかるように中心線上に近い所では実験値と計算値は非常に良く一致しているが、高さが高くなるにつれて計算値と実験値のずれは大きくなる。これは炉心の高さの 30 cm の範囲だけが MORSE 計算の線源入力として考慮されているためで、高さ方向の空間分布が完全に入力出来るようになれば計算値と実験値はより良い一致を示すようになると思われる。次に Fig. 4. 24 の結果を見ると、炉心の高さの 30 cm までは、In に関しては計算値は数倍程度大きい。他の放射箔の場合も炉心の 30 cm までとそれ以上の高さのところでは計算値の傾向が異なっている。この理由の 1 つは中性子の角度分布の MORSE コードでの取り扱いにあると思われる。今回の計算では角度分布を P_3 近似で計算している。この場合炉心から遮蔽体方向へ進む前方方向の中性子角度分布はエネルギーが低くなるにつれて、前方への鋭いピーク分布から次第に一様分布へ近づく筈であるが、 P_3 近似によるモンテカルロ計算では前方方向の散乱角度はほぼ 1 つの角度分点で代表させてしまうのでエネルギーによる前方方向角度分布の変化を精度良く近似することができない。したがって、A1 箔では実験値に対して過小評価であったのが、エネルギーの低い成分まで反応に加わる Ni 箔から In 箔へ進むに従って過大評価になってくる。今後は P_5 かそれ以上の次数による近似計算が望まれる。

今回実施した結合計算は、最初の試みであったのでかなり粗い境界条件の設定と P_3 のような低次数近似による計算を行ったが、炉心からモンテカルロ計算を実施したケースよりも格段の精度向上がみられた。このことはモンテカルロコードによる遮蔽計算には他の計算コードとの結合計算が極めて有効であることを示したものと考えられる。（執筆者：伊藤泰義／協力者：西原善明、金野正晴、石田正次、秦和夫、辻政俊、深野宣伸）

Table 4.1 Iterations and Convergences in the Case of DOT-III S-48 Fine Mesh (65 × 89) Calculations for N-II-1

Energy group	Maximum error	Total iterations
1	0.48667	16 *)
2	0.36125	16
3	0.28348	16
4	0.15890	16
5	0.20471	16
6	0.81131×10^{-1}	16
Total		96

*) Inner iteration limit

Table 4.2 Iterations and Convergences in the Case of DOT-III S-124 Fine Mesh (65 × 89) Calculations for N-II-1

Energy group	Maximum error	Total iterations
1	0.60162×10^1	16 *)
2	0.33689	16
3	0.32170	16
4	0.16164	16
5	0.14649	16
6	0.74339×10^{-1}	16
Total		96

*) Inner iteration limit

Table 4.3 Iterations and Convergences in the Case of DOT-III S-48

Fine Mesh (100×108) Calculations for N-II-2

Energy group	Maximum error	Total iterations
1	0.27626	16 *)
2	0.14263	16
3	0.14202	16
4	0.17625	16
5	0.13353	16
6	0.17750	16
Total		96

*) Inner iteration limit

Table 4.4 Iterations and Convergences in the Case of DOT-III S-48

Coarse Mesh (46×47) Calculations for N-II-1

Energy group	Maximum error	Total iterations
1	0.49046	30 *)
2	0.61710	30
3	0.23581	30
4	0.13522	30
5	0.96724×10^{-1}	30
6	0.10960	30
Total		180

*) Inner iteration limit

Table 4.5 Iterations and Convergences in the Case of DOT-III S-48
 Coarse Mesh (38×55) Calculations for N-II-2

Energy group	Maximum error	Total iterations
1	0.50338×10^{-2}	15
2	0.48943×10^{-2}	17
3	0.41114×10^{-1}	25 *)
4	0.32347×10^{-1}	25
5	0.70044×10^{-1}	25
6	0.25373×10^{-1}	25
(7)	0.49097×10^{-1}	(25)
Total		157

*) Inner iteration limit

Table 4.6 Computer Times and Core Memories for DOT-III Calculations
 by FACOM-230/75

Problem	Core Memory (k word)	C. P. U (sec)	Total iteration	meshes	sec/mesh·iteration
N-II-1 (S-48)	269	2242	96	65×89	4.037×10^{-3}
N-II-1 (S-124)	299	5578	96	65×89	1.004×10^{-2}
N-II-2 (S-48)	445	4202	96	100×108	4.053×10^{-3}
N-II-1 (CM) * S-48	155	1639	180	46×47	4.212×10^{-3}
N-II-2 (CM) * S-48	153	1384	157	38×55	4.218×10^{-3}

* CM = coarse mesh

Table 4.7 (a) Iterations and Convergences in the Case of TWOTRAN-II

 S_8-P_3 Calculations for N-II-1

Outer iteration	Group No.	Inner iteration	Max. error	Time (min.)
1	1	50	5.08 %	7.03
	2	8	—	1.08
	3	9	—	1.22
	4	8	—	1.07
	5	7	—	1.18
	6	8	—	1.08
	1 ~ 6	90		12.66
	1 ~ 13	209		29.1
2	1	50	5.38 %	7.05
	2	6	—	1.07
	3	7	—	0.93
	4	5	—	0.67
	5	5	—	0.68
	6	5	—	0.68
	1 ~ 6	78		11.08
	1 ~ 13	157		23.74
3	1	50	5.08 %	7.03
	2	5	—	0.93
	3	5	—	0.67
	4	5	—	0.68
	5	4	—	0.53
	6	4	—	0.55
	1 ~ 6	73		10.39
	1 ~ 13	129		16.4
4	1 ~ 13	77	Converged	11.5
Total		572		80.7

Table 4.7 (b) Iterations and Convergences in the Case of TWOTRAN-II
 $S_{16}-P_3$ Calculations for N-II-1

Outer iteration	Group No.	Inner iteration	Max. error	Time (min.)
1	1	100	1.44 %	36.9
	2	7	—	2.67
	3	8	—	2.80
	4	9	—	3.12
	5	7	—	2.45
	6	7	—	2.45
	1 ~ 6	138 138		50.4
	1 ~ 13	249 249		90.1
2	1	9	—	3.53
	2	6	—	2.13
	3	5	—	1.75
	4	5	—	1.75
	5	4	—	1.40
	6	4	—	1.58
	1 ~ 6	33 171	Converged	12.14
	1 ~ 13	91 340		33
3	1	7	—	2.78
	2	4	—	1.42
	3	4	—	1.40
	4	3	—	1.05
	5	3	—	1.05
	6	3	—	1.05
	1 ~ 6	24 195		8.75
	1 ~ 13	66 406	Converged	24
4	1 ~ 13	113 519	Converged	42
Total		519		189.1

Table 4.8 Iterations and Convergences in the Case of TWOTRAN-II

 S_8-P_3 Calculations for N-III-2

Outer iteration	Group No.	Inner iteration	Max. error	Time (min.)
1	1	50	765 %	6.82
	2	11	—	1.43
	3	11	—	1.42
	4	9	—	1.17
	5	9	—	1.42
	6	10	—	1.30
	1 ~ 6	100		13.56
	1 ~ 13	344		46.1
2	1	50	1150 %	6.82
	2	7	—	0.92
	3	7	—	0.90
	4	5	—	0.65
	5	5	—	0.67
	6	5	—	0.88
	1 ~ 6	79		10.84
	1 ~ 13	179		24.3
3	1	50	765 %	7.05
	2	8	—	1.05
	3	7	—	0.90
	4	5	—	0.65
	5	5	—	0.67
	6	6	—	1.02
	1 ~ 6	81	Rebalance	11.34
	1 ~ 13	154	Converged	21.3
Total	1 ~ 6	260		35.7
	1 ~ 13	677		91.7

Table 4.9 Computer Times and Core Memories for TWOTRAN-II Calculations

Problem	Core memory (kword)	C. P. U. (min.)		Total iterations		Quadrature
		1 ~ 6 (grps.)	1 ~ 13 (grps.)	1 ~ 6	1 ~ 13	
N - II - 1	760	>34.1	80.7	241	572	S ₈
N - II - 1	620	62.5	189	171	406	S ₁₆
N - II - 2	743	35.74	91.7	260	677	S ₈

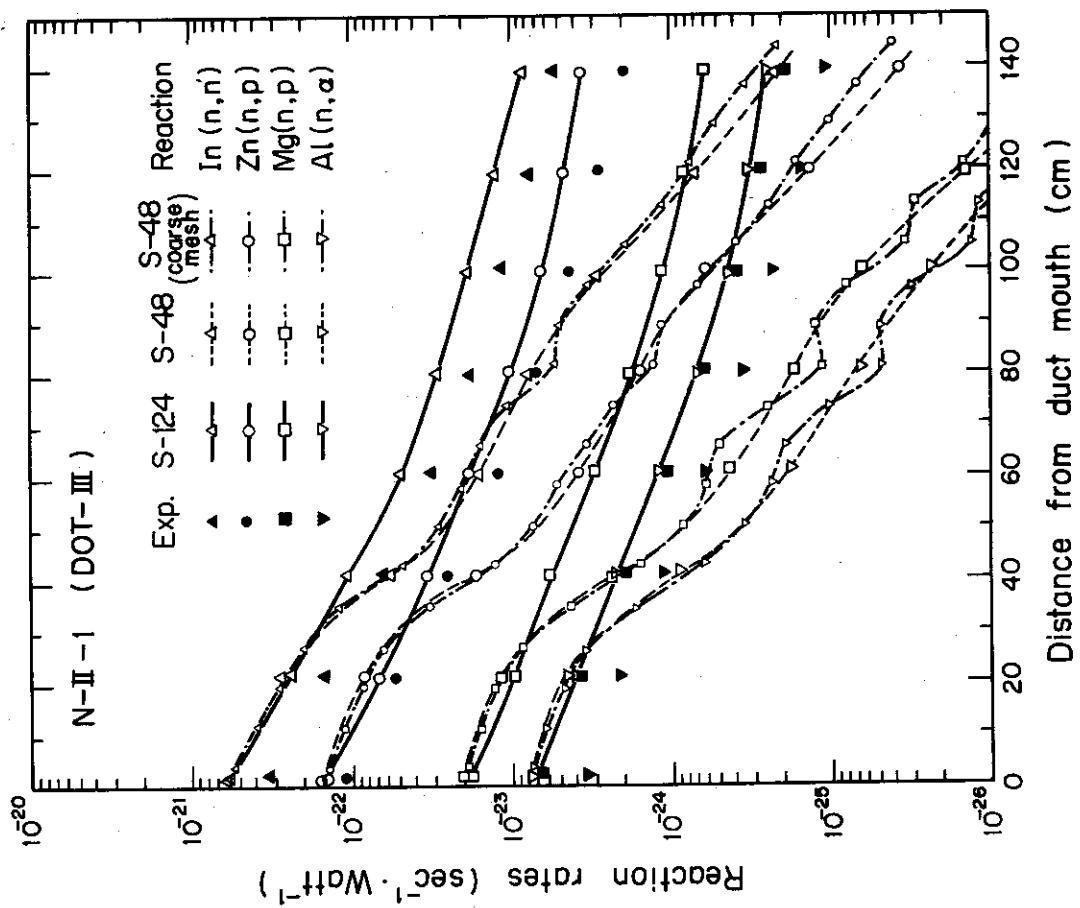


Fig. 4.1 Comparison of DOT-III reaction rates with measured values along duct axis of N-II-1

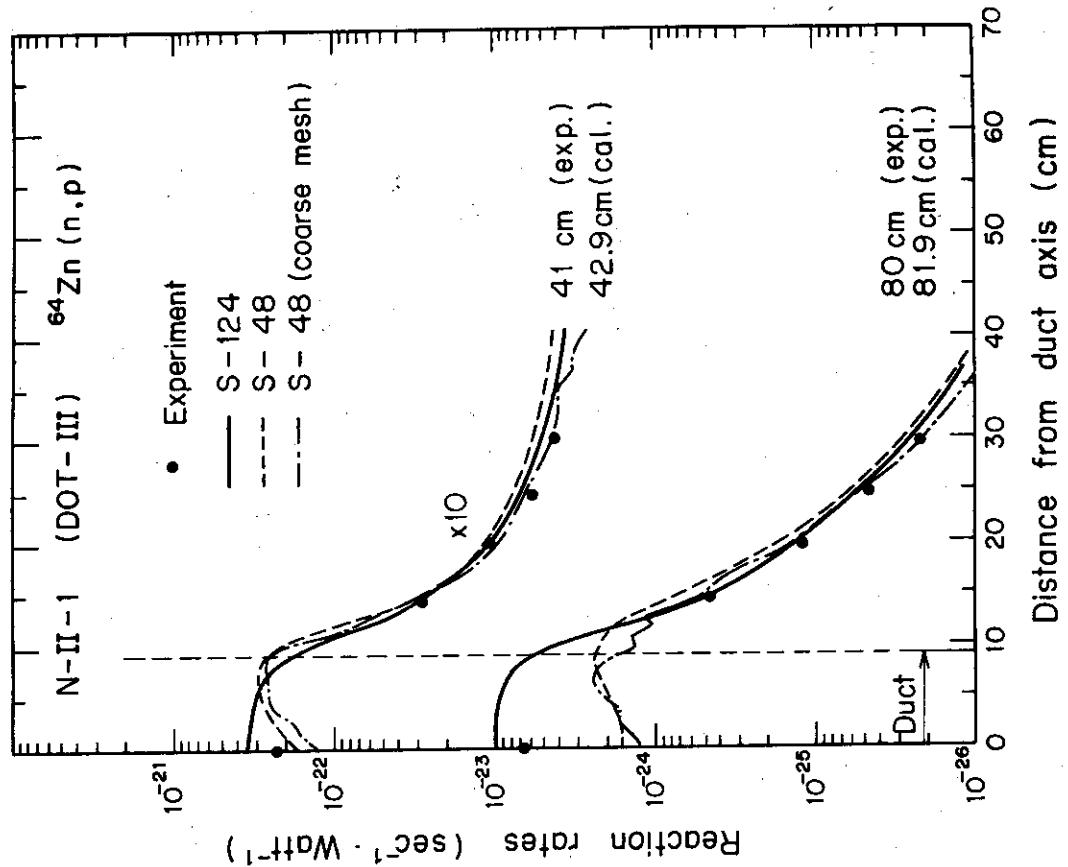


Fig. 4.2 Comparison of DOT-III $^{64}\text{Zn}(n, p)$ reaction rates with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

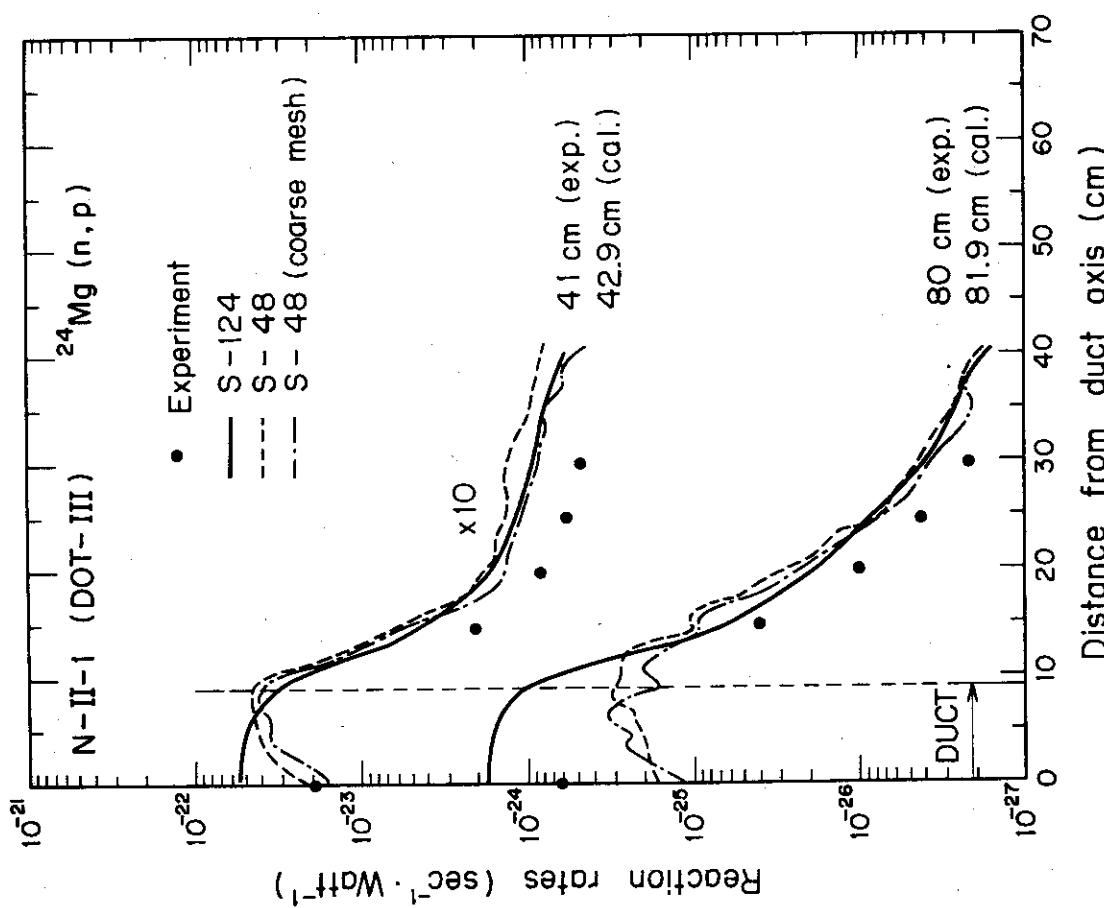


Fig.4.3 Comparison of DOT-III $^{24}\text{Mg}(\text{n},\text{p})$ reaction rates with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

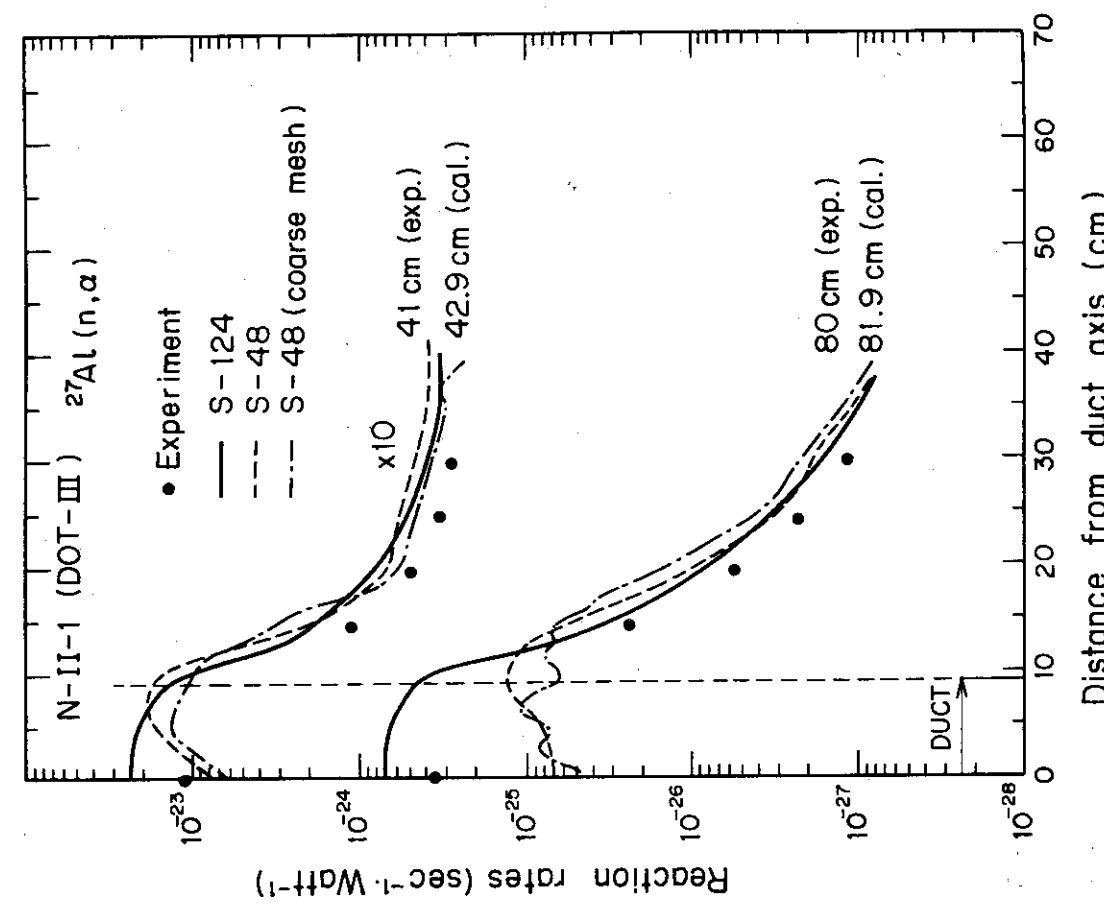


Fig.4.4

Comparison of DOT-III $^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)$ reaction rates with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

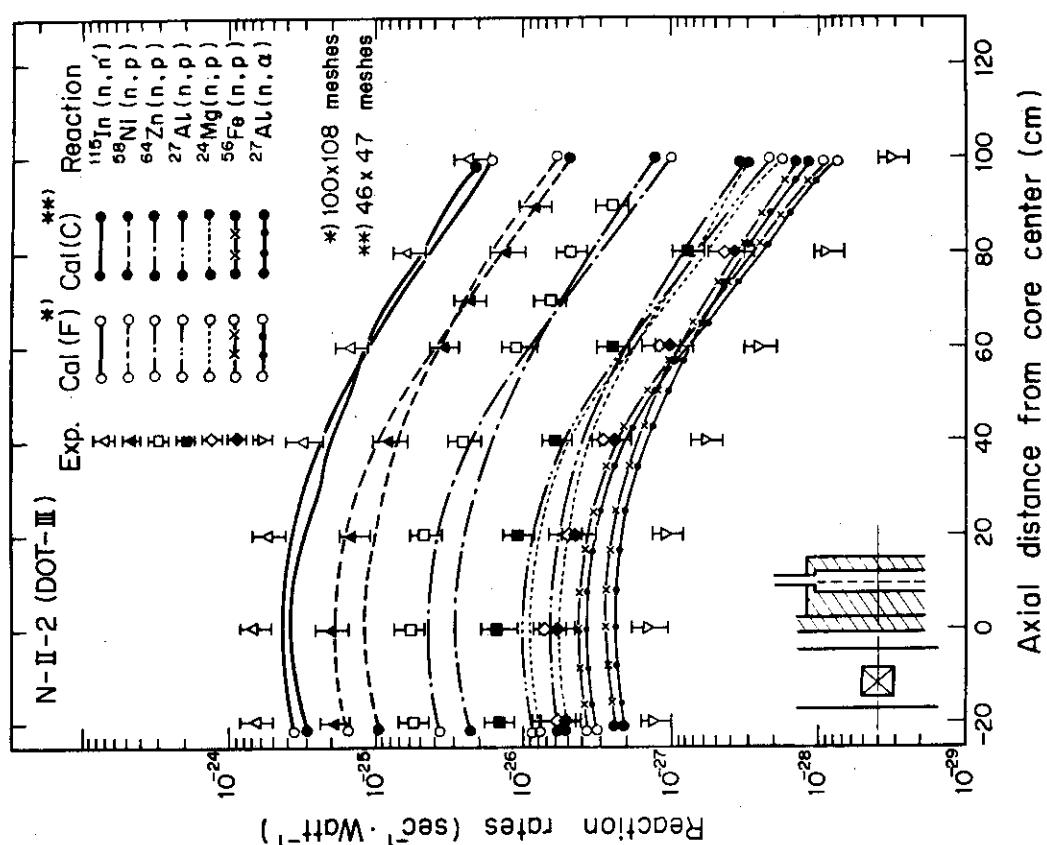


Fig.4.5 Comparison of DOT-III reaction rates of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ with measured values along the dotted line given in Fig.1.2 of N-II-2

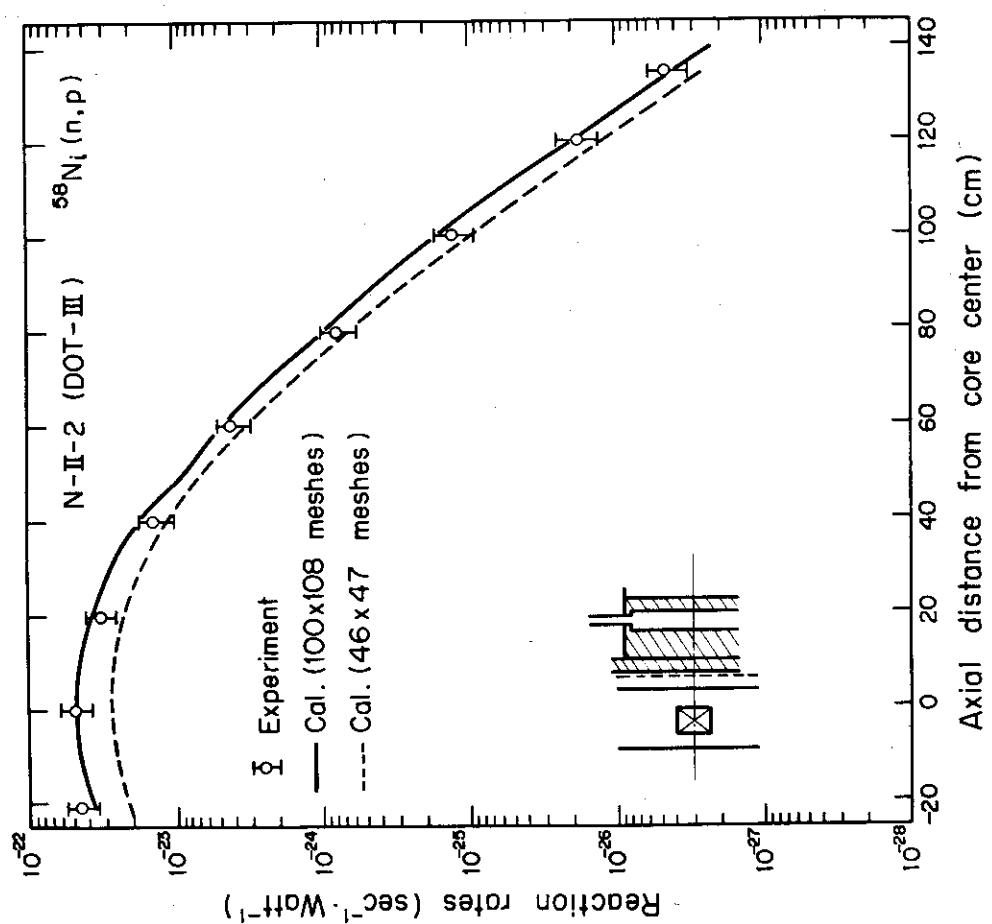


Fig.4.6 Comparison of DOT-III reaction rates with measured values along the dotted line given in Fig.1.2 of N-II-2

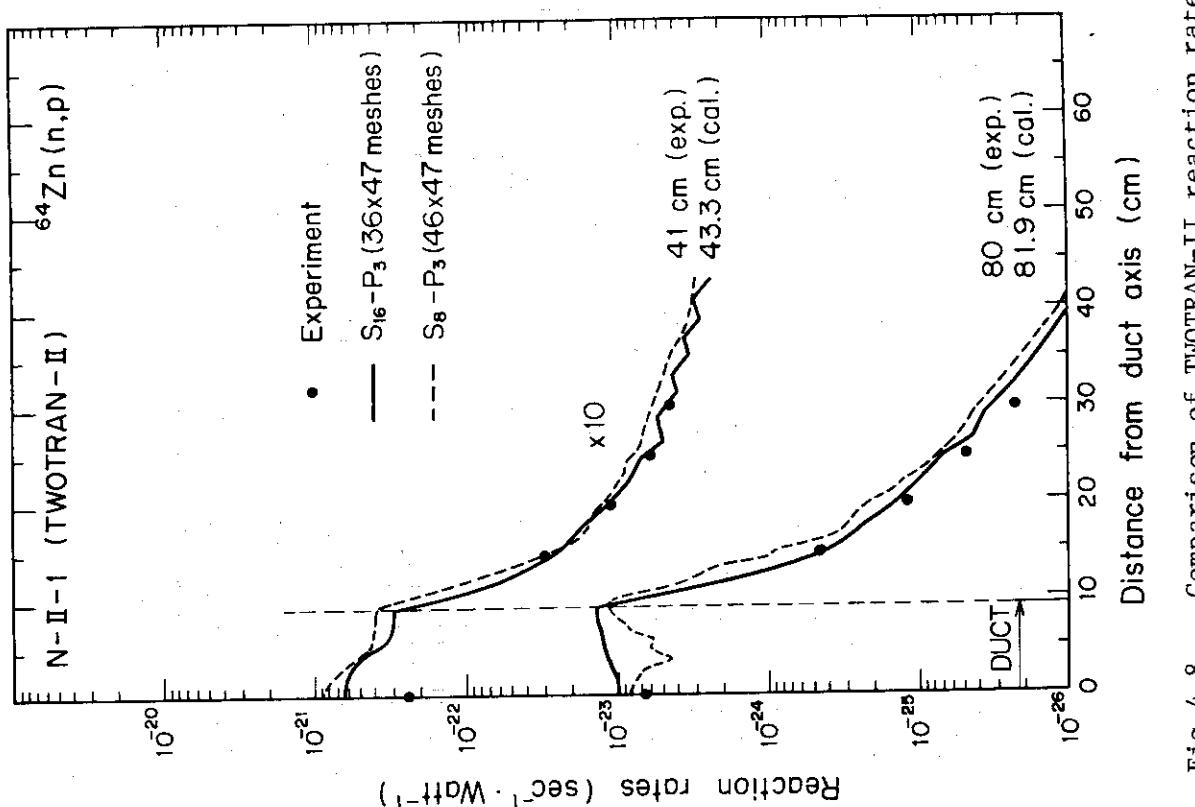


Fig. 4.8

Comparison of TWOTRAN-II reaction rates with measured values along duct axis of N-II-1

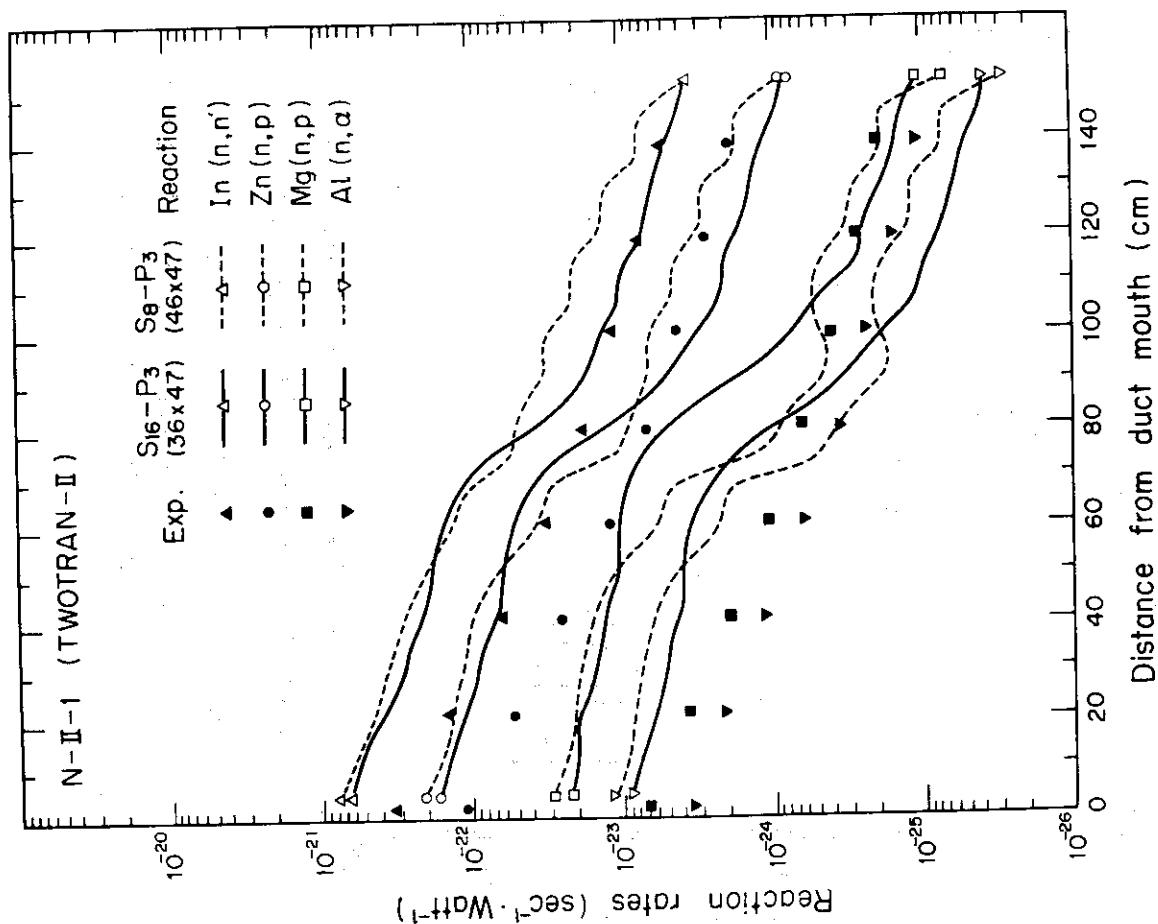


Fig. 4.7

Comparison of TWOTRAN-II reaction rates of $^{64}\text{Zn}(n,p)$ with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

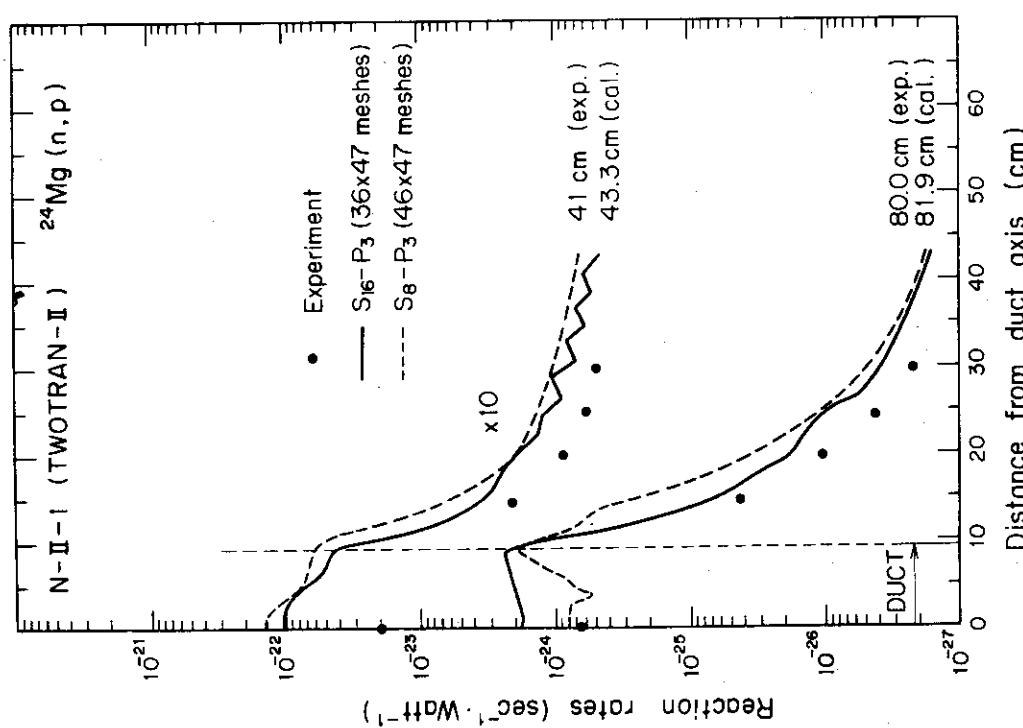


Fig. 4.9 Comparison of TWOTRAN-II reaction rates of $^{24}\text{Mg}(\text{n},\text{p})$ with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-III-1

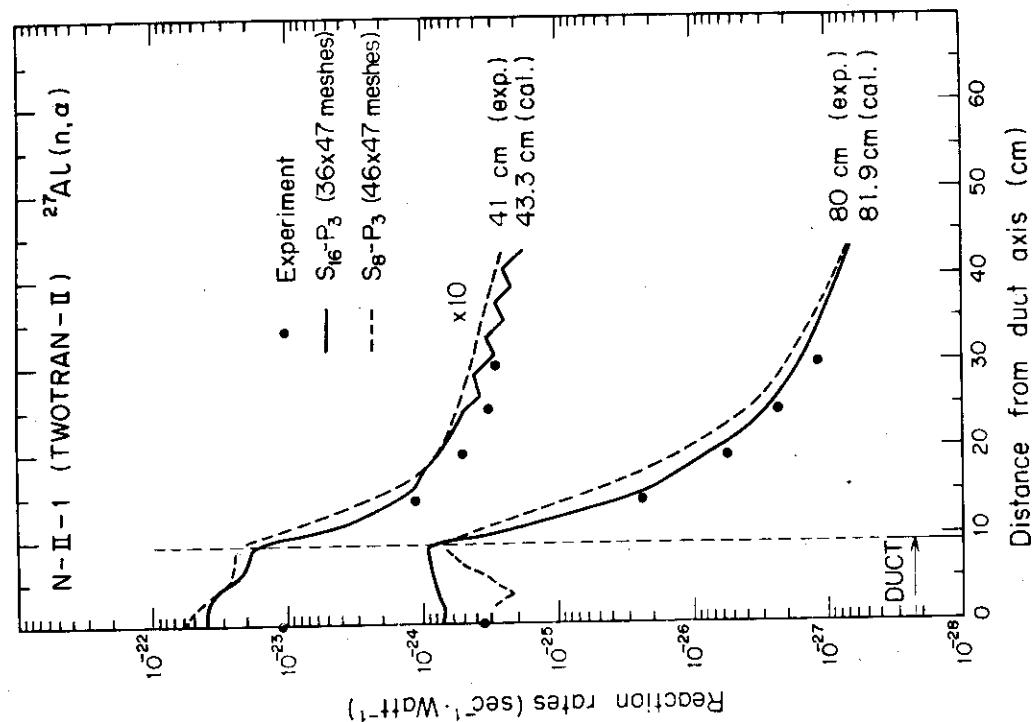


Fig. 4.10 Comparison of TWOTRAN-II reaction rates of $^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)$ with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-III-1

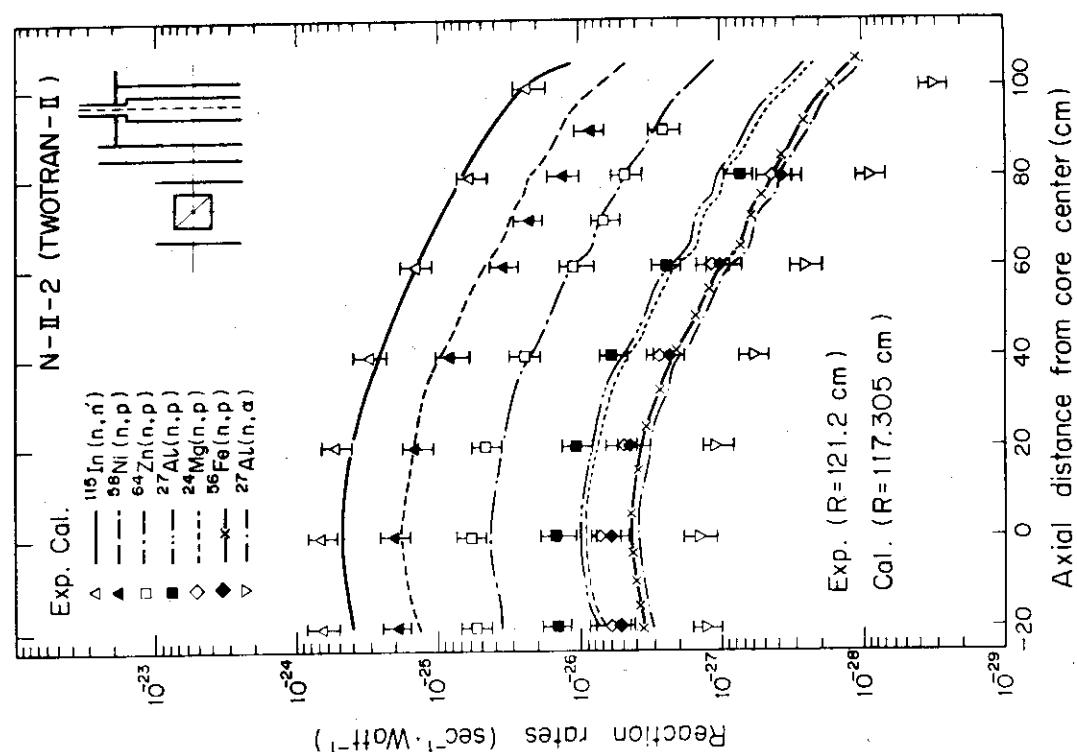


Fig.4.12 Comparison of TWOTRAN-II reaction rates with measured values along the dotted line given in Fig.1.2 of N-II-2

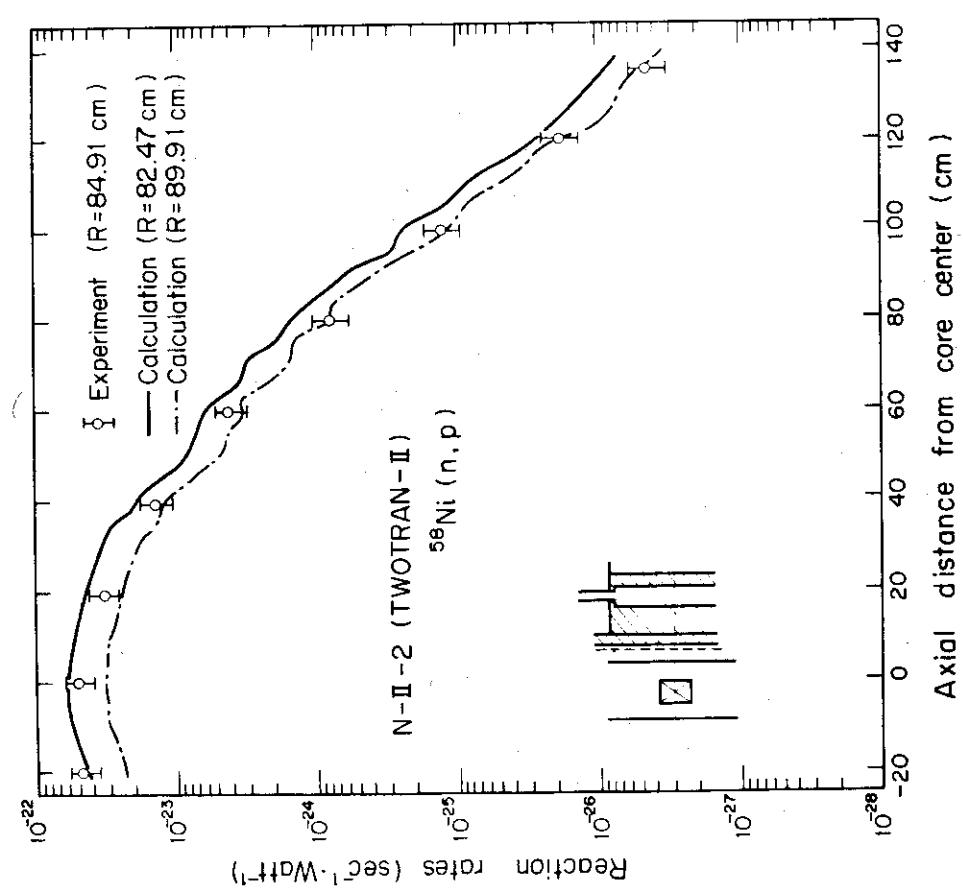


Fig.4.11 Comparison of TWOTRAN-II reaction rates of $^{58}\text{Ni}(\text{n},\text{p})$ with measured values along the dotted line given in Fig.1.2 of N-II-2

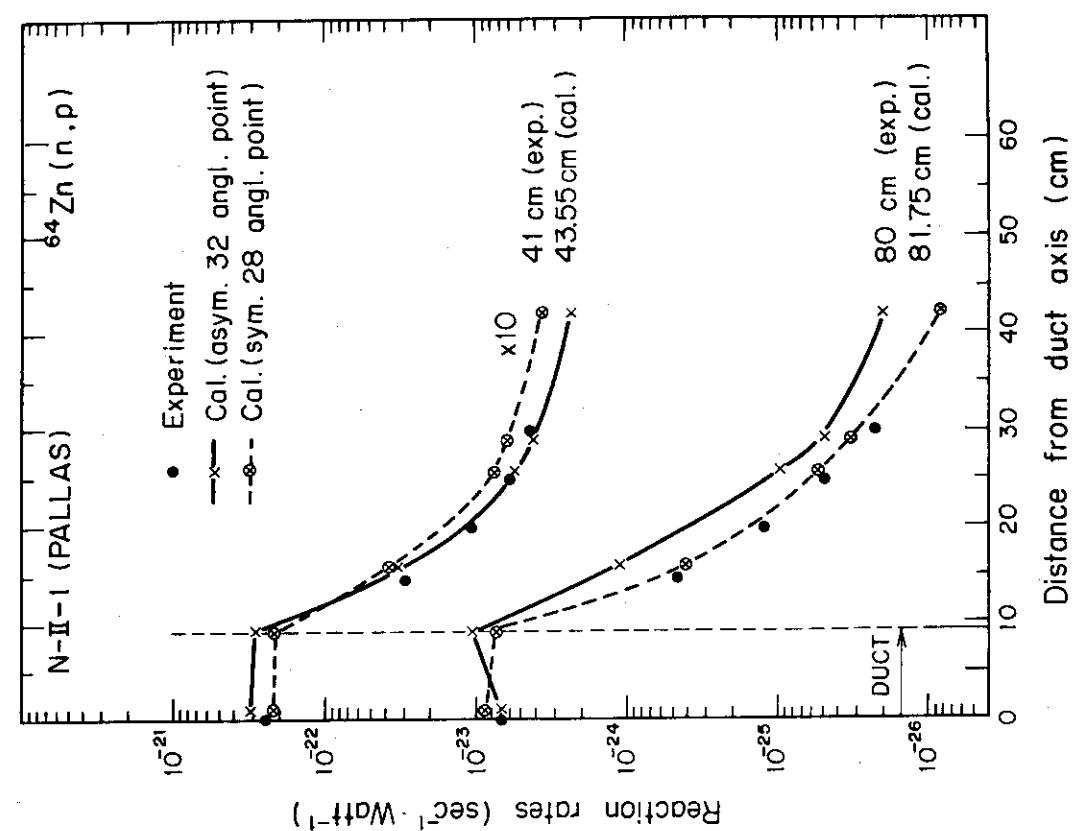


Fig. 4.14 Comparison of PALLAS reaction rates of $^{64}\text{Zn}(n,p)$ with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

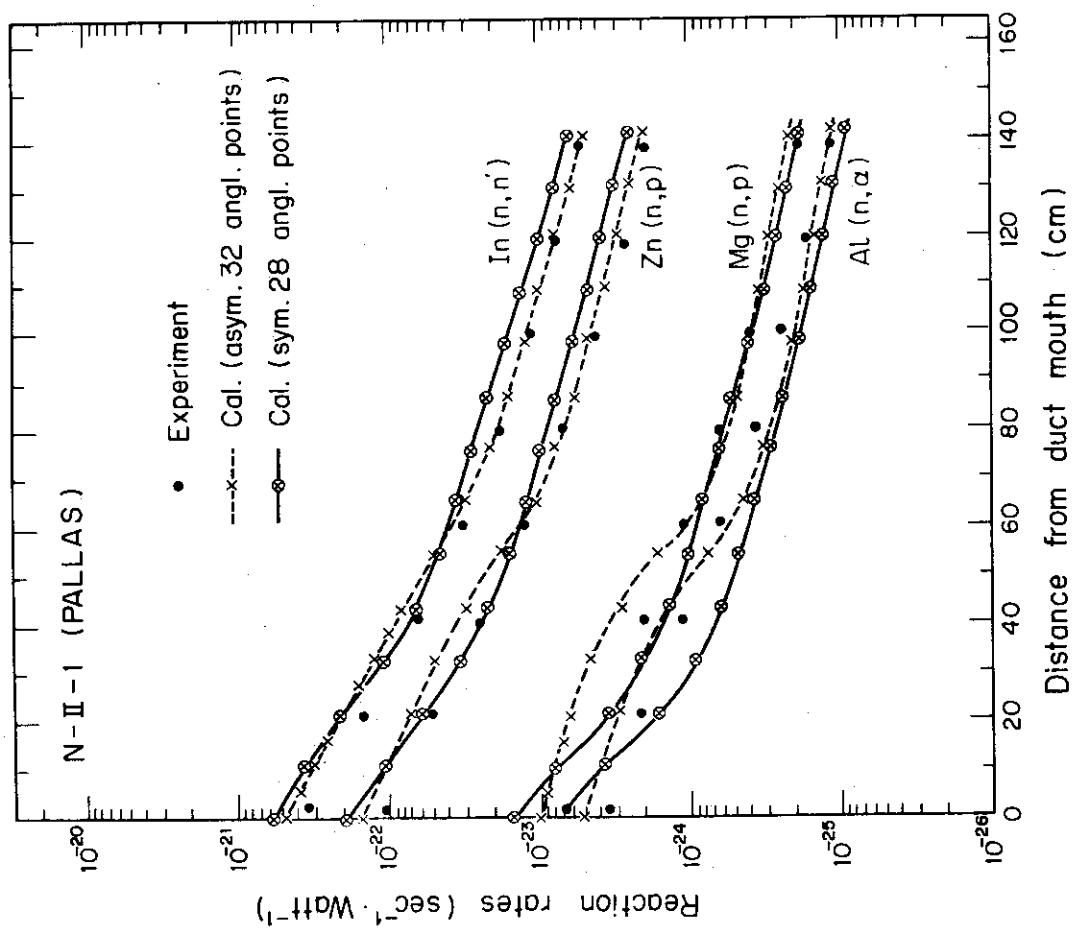


Fig. 4.13 Comparison of PALLAS reaction rates with measured values along duct axis of N-II-1

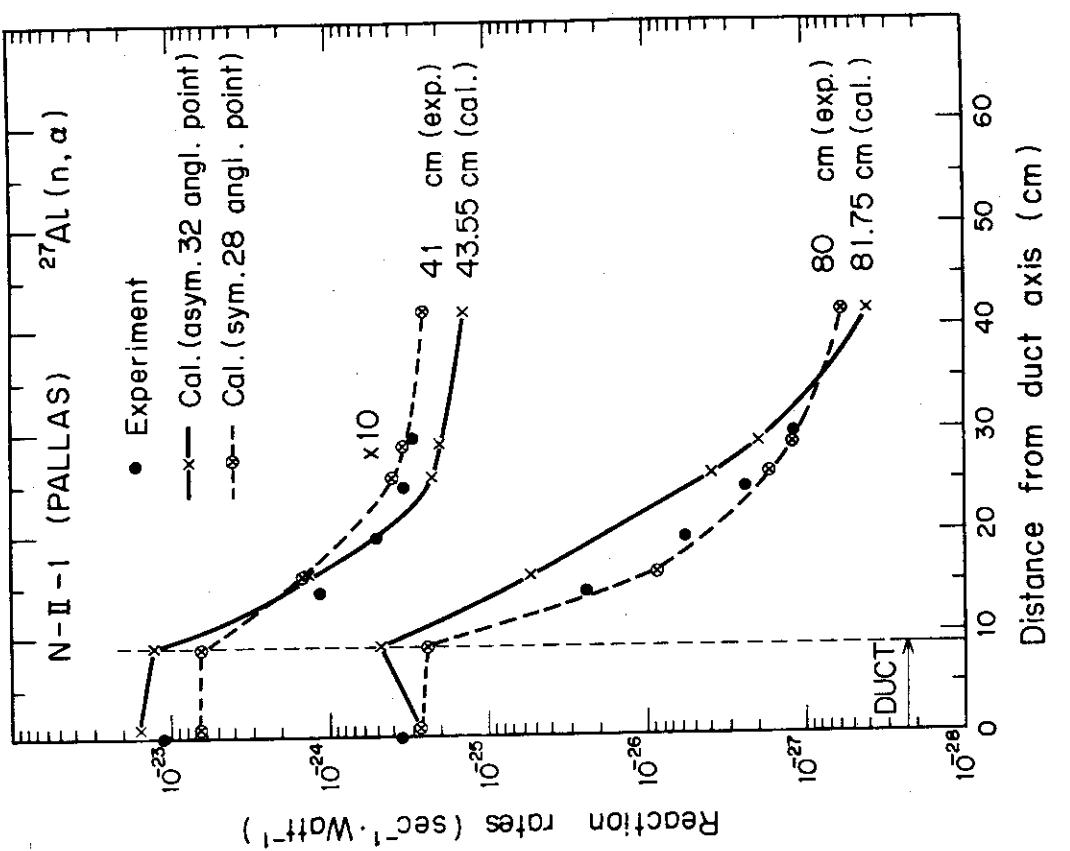


Fig. 4.16

Comparison of PALLAS reaction rates of $^{27}\text{Al}(\text{n}, \alpha)$ with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

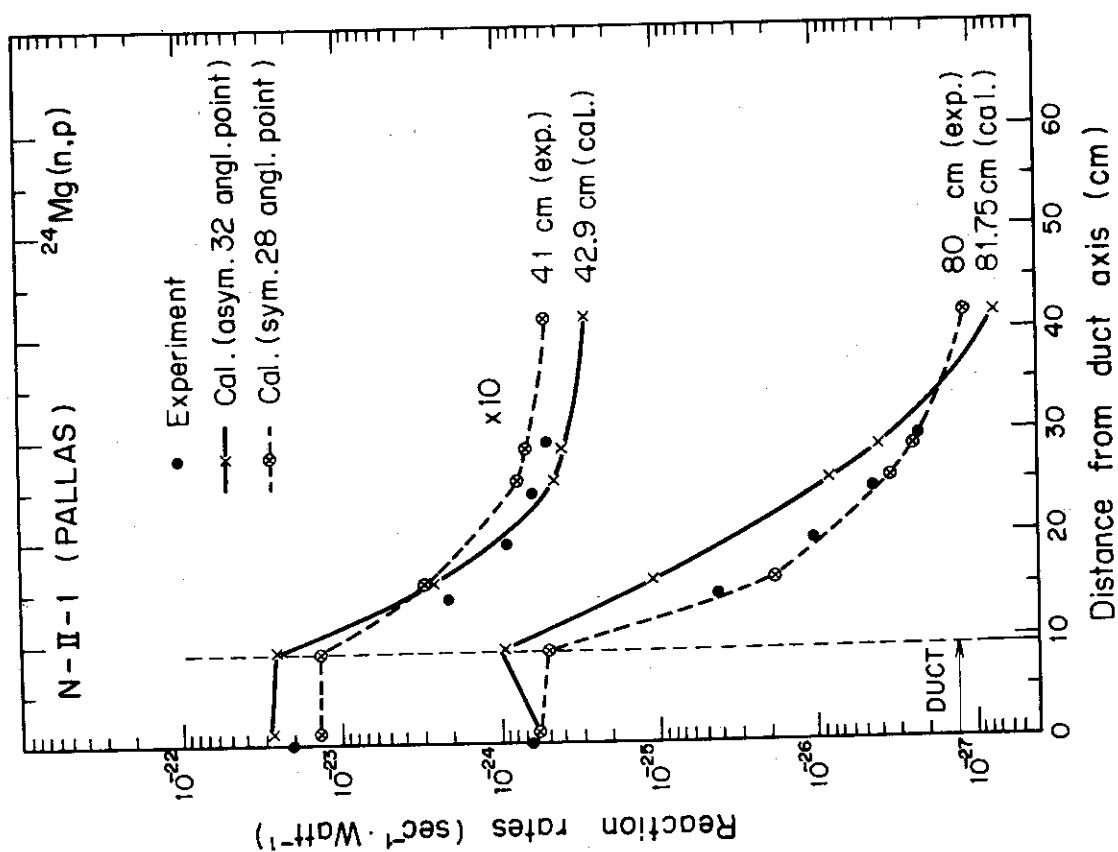


Fig. 4.15 Comparison of PALLAS reaction rates of $^{24}\text{Mg}(\text{n}, \text{p})$ with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

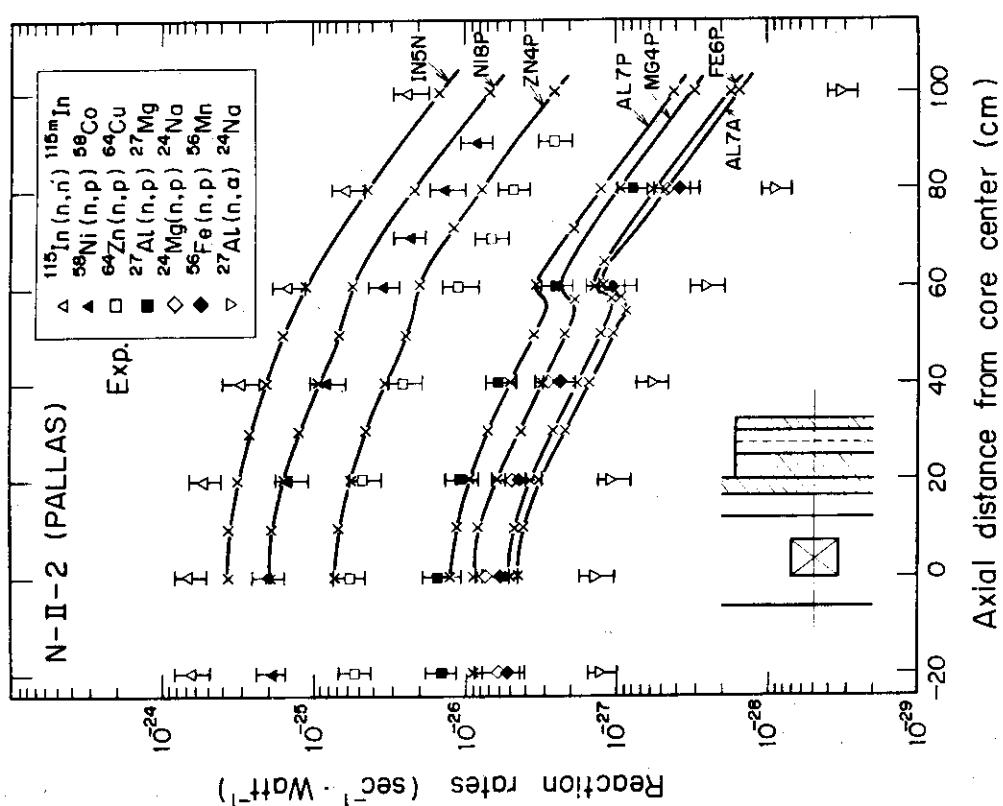


Fig. 4.17 Comparison of PALLAS reaction rates of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ with measured values along the dotted line given in Fig. 1.2 of N-II-2

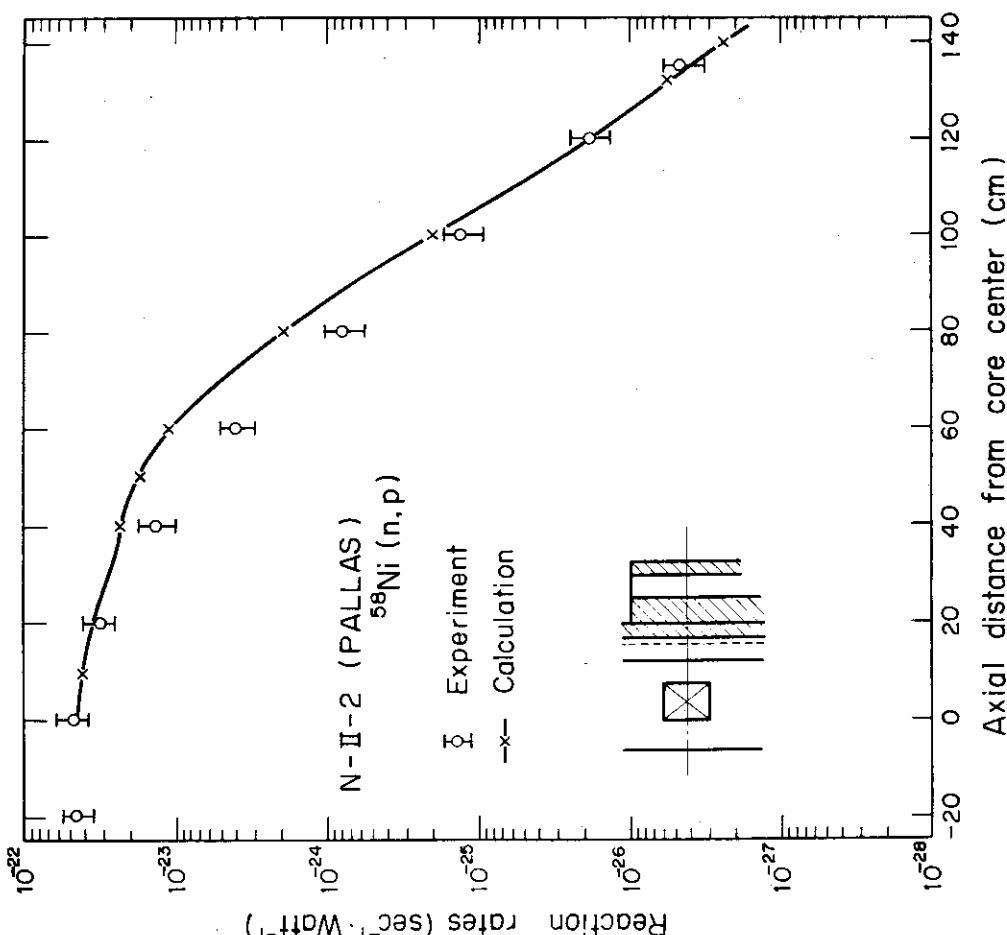


Fig. 4.18 Comparison of PALLAS reaction rates with measured values along the dotted line given in Fig. 1.2 of N-II-2

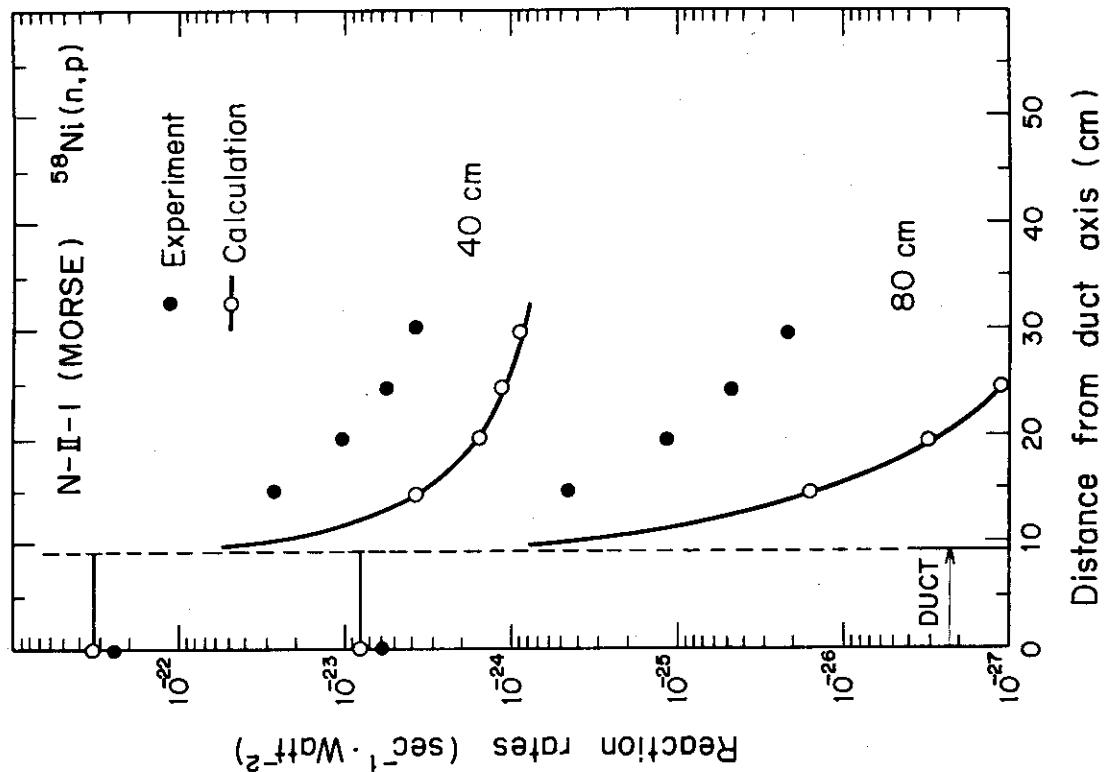


Fig.4.20

Comparison of MORSE reaction rates of $^{64}\text{Zn}(n, p)$ with measured values at radial distances of 41 and 81 cm from duct mouth of N-II-1

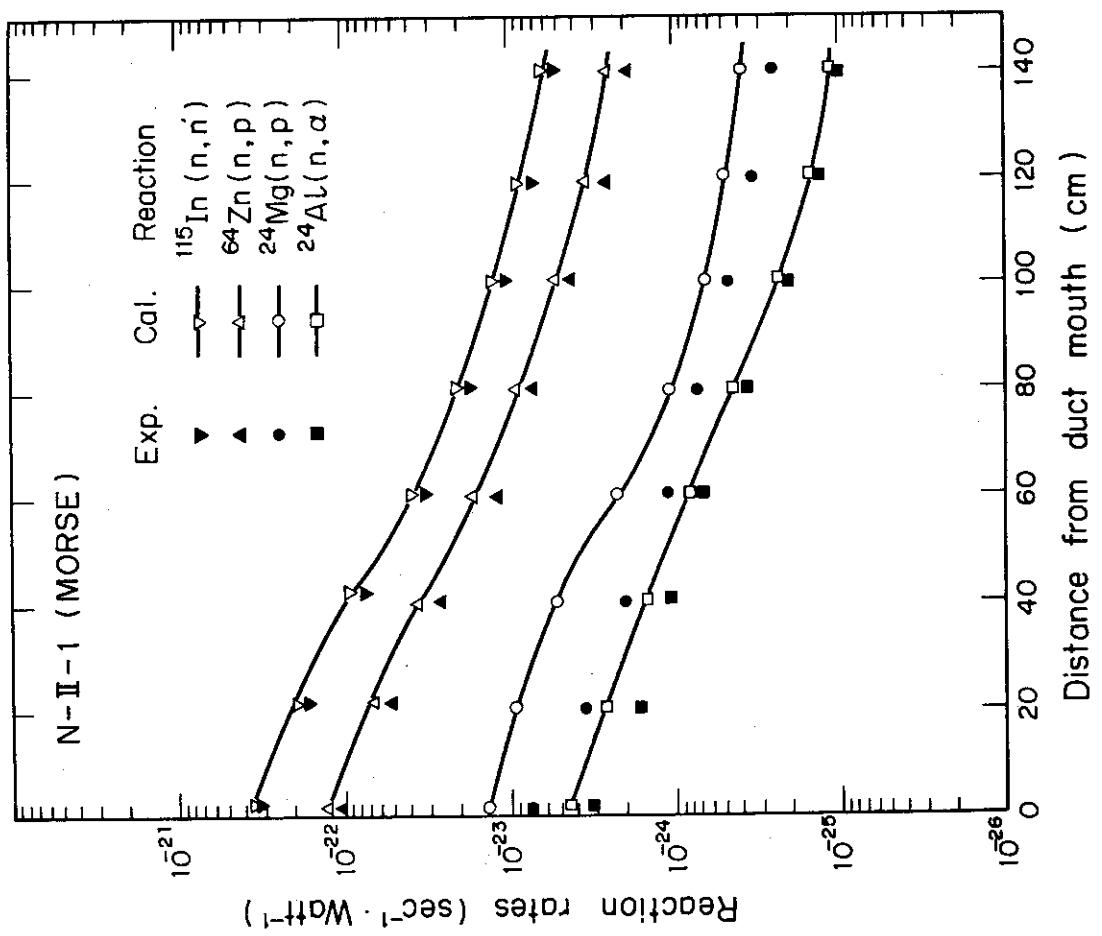


Fig.4.19

Comparison of MORSE reaction rates with measured values along duct axis of N-II-1

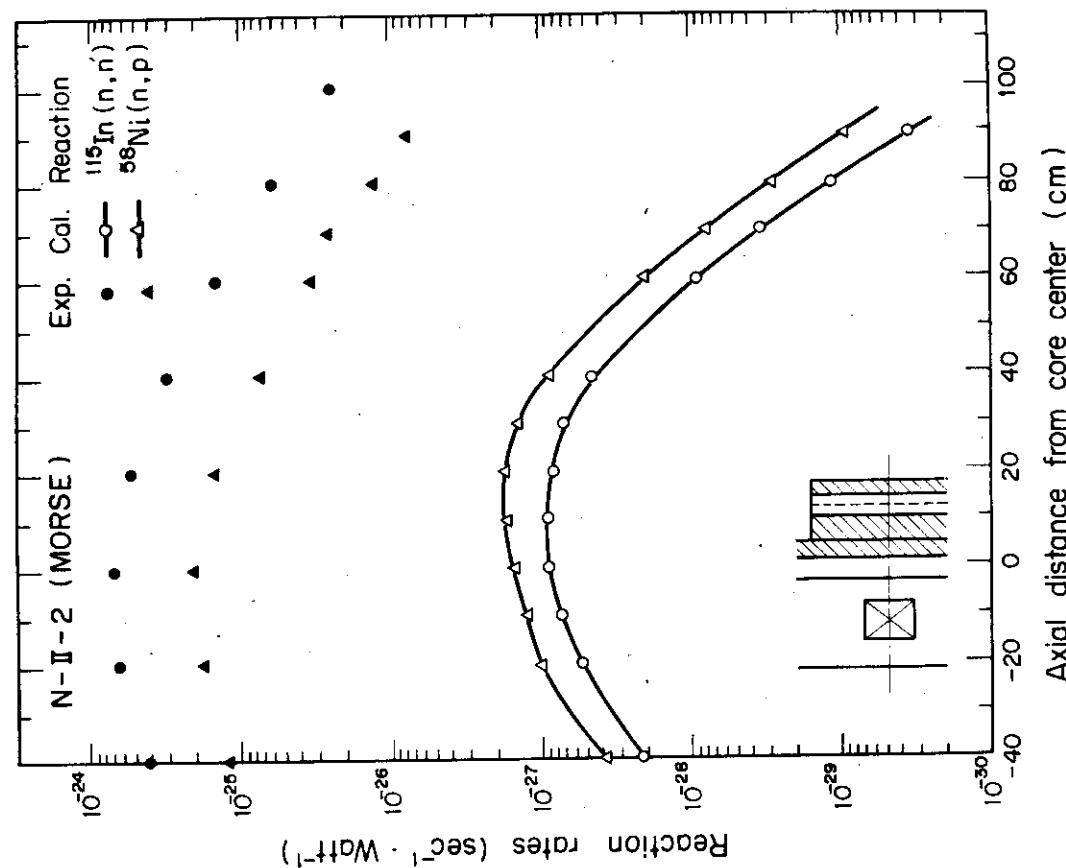


Fig. 4.21 Comparison of MORSE reaction rates of $^{58}\text{Ni}(n,p)$ with measured values along the dotted line given in Fig. 1.2 of N-II-2

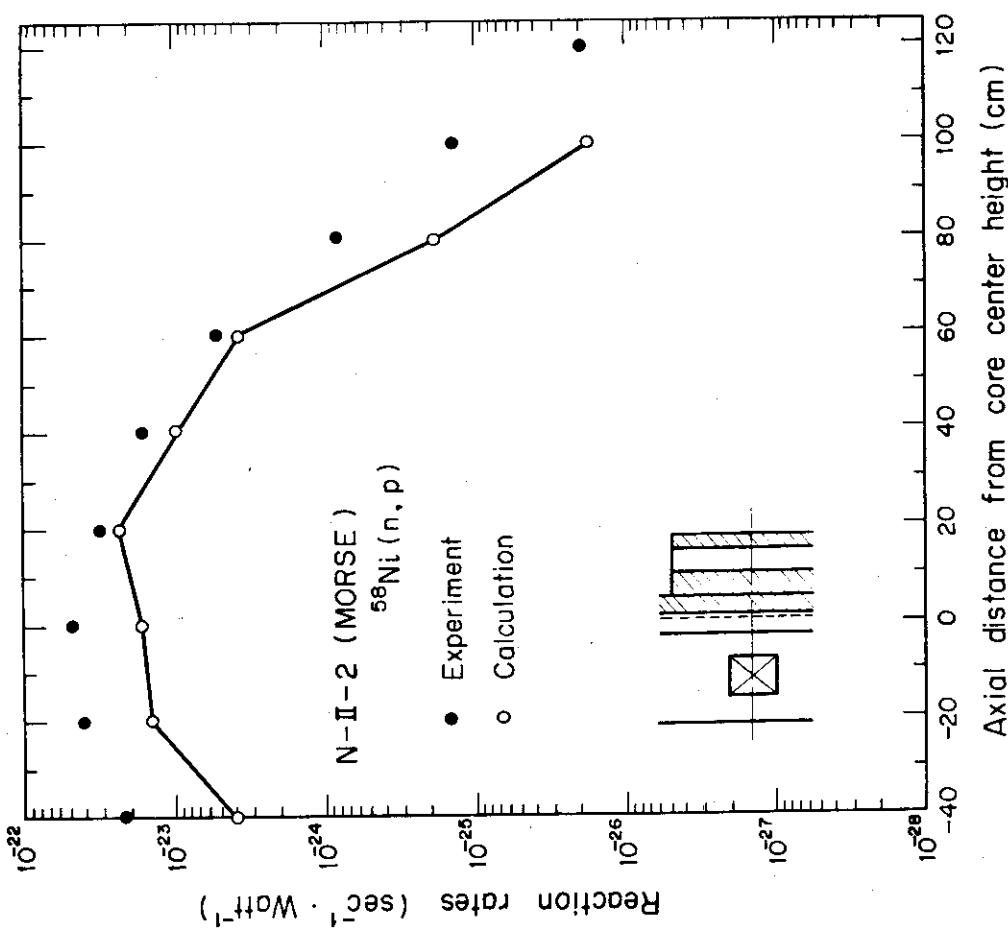


Fig. 4.22 Comparison of MORSE reaction rates with measured values along the dotted line in Fig. 1.2 of N-II-2

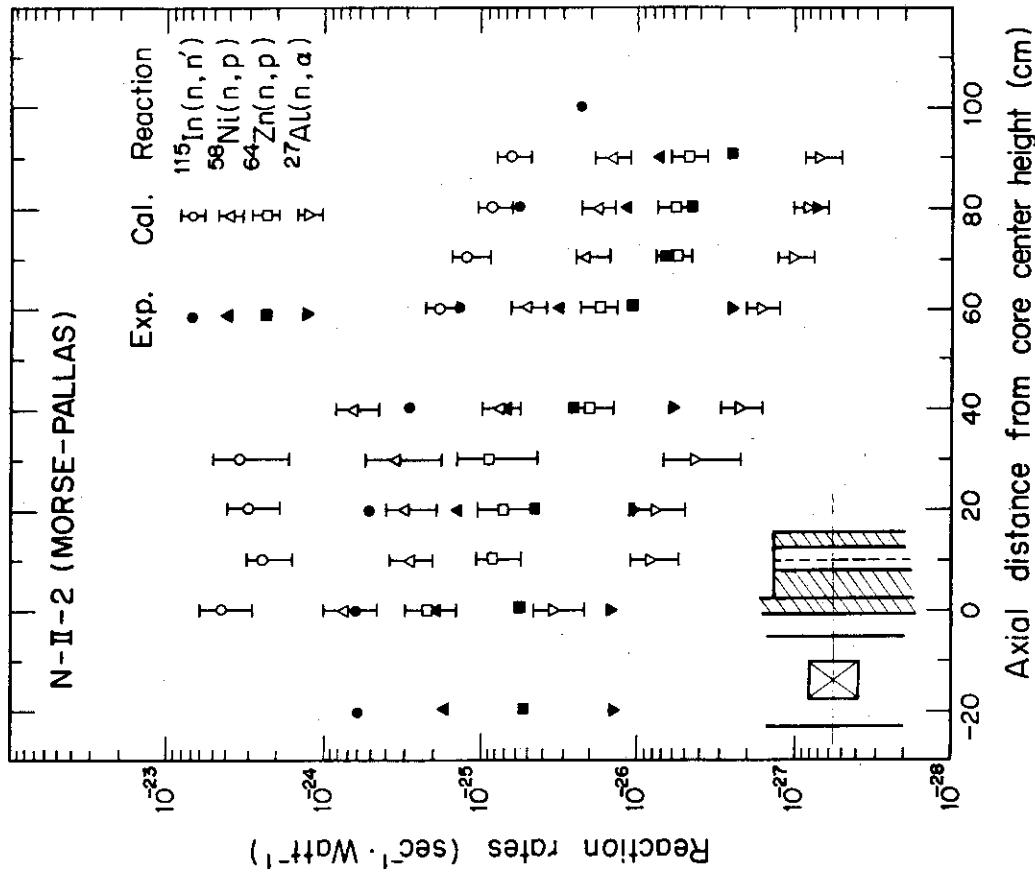


Fig. 4.24 Reaction rates by MORSE-PALLAS coupled calculations along the dotted line given in Fig.1.2 of N-II-2

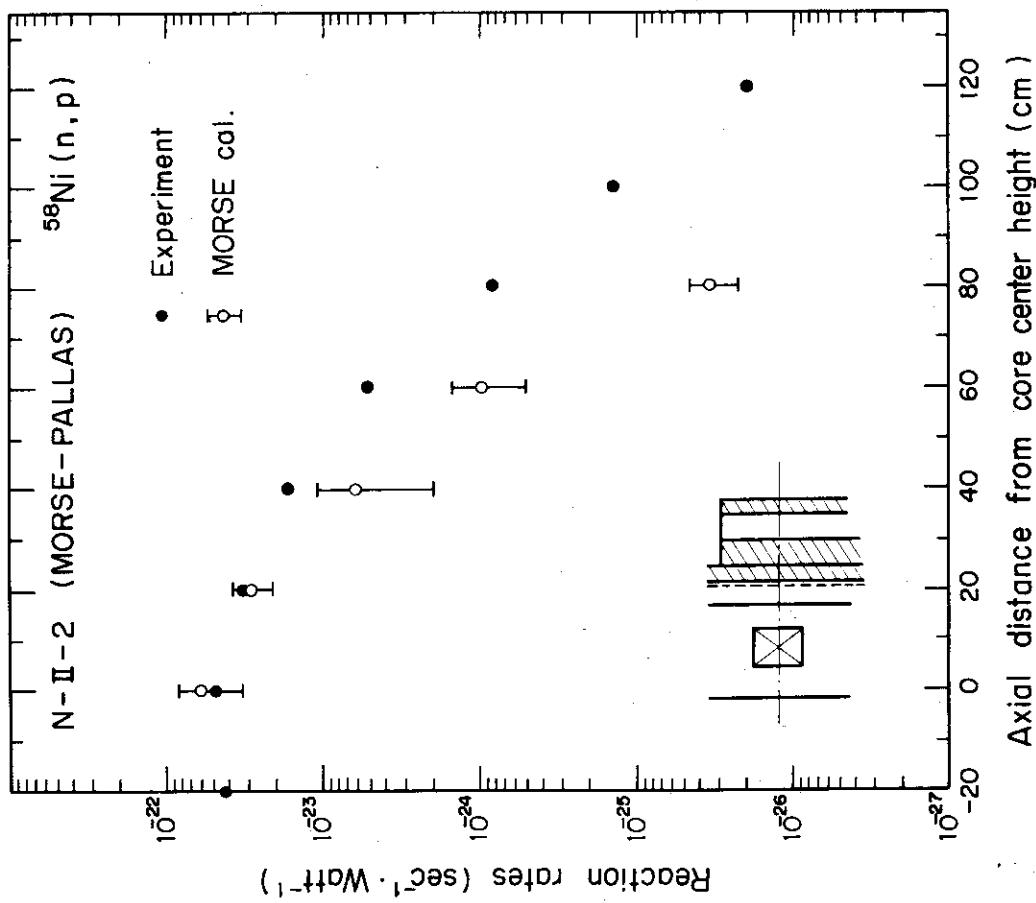


Fig. 4.23 Reaction rates of $^{58}\text{Ni}(n, p)$ by MORSE-PALLAS coupled calculations along the dotted line given in Fig.1.2 of N-II-2

5. ま　と　め

前章の計算結果から明らかな様にある特定の問題についてはコード間である部分は共通し、またある部分は全く反対の傾向を示している。そのため本報をまとめるにあたってコード間の比較を念頭においてベンチマーク問題毎に計算結果を整理した。

5.1 N-II-1 ダクト軸上反応率分布

- a) DOT-III : 非等方 S-124 計算は多少実験値を過大に評価しているが減衰傾向は非常に良く一致している。S-48 計算ではダクト入口より 40 cm 位から減衰が非常に急になり、ダクト入口から 140 cm も入ると実験値を 1 衡以上過少評価するようになる。メッシュを粗くした計算では空間分布に部分的なゆらぎが見られた。角度分点を十分にとればダクト計算は十分精度良く行えることがわかった。
- b) TWOTRAN-II : ダクト入口から 60 ~ 80 cm の領域で S_8 , S_{16} 計算とも急激な減衰傾向を示す。これは ray effect によるものであると考えられる。全体的にはダクト入口近傍で実験値に対して過大評価であり、入口から 140 cm の位置では良く一致している。 S_8 計算の方が S_{16} 計算よりも波状分布の傾向は顕著である。 S_8 計算は DOT-III の S-48 計算に対応するが、実験値との一致は TWOTRAN-II の計算の方が良い。
- c) PALLAS : 等方 28 分点計算、非等方 32 分点計算とも実験値と良く一致しており、この程度の角度分点で十分であることがわかった。ダクト入口近くでは 28 分点計算の方が、またダクトの奥に入るほど 32 分点計算の方が実験値との一致は良い。
- d) MORSE : Mg (n, p) を除くと計算値は実験値とかなり良く一致している。ダクト入口近くまで粒子はほとんど到達していないが、ダクト中の減衰はほとんどないので last - collision 法が有効に活用されたためである。

5.2 N-II-1 径方向反応率分布

- a) DOT-III : ダクト内分布は S-124 計算ではほぼ平坦、S-48 計算では中心軸より周辺部分の方が分布が大きくなる。S-48 計算ではダクト内軸方向、径方向とも反応率分布を正確に求めることは無理である。水中での分布は S-124, S-48 計算とも実験値と良く一致した。S-48 で粗いメッシュの計算をすると、分布に細かい振動があらわれる。
- b) TWOTRAN-II : $Z = 80$ cm の位置におけるダクト内分布は S_8 計算では中心軸上より周辺部分の方が大きい値を算出する。水中での計算値と実験値は良く一致する。すなわち DOT, TWOTRAN 計算とも水中の計算は $P_3 - S_8$ 程度で十分である。 S_{16} 計算では水中での分布上に細かい振動が見られる。この原因が収束条件がゆるいためなのか、メッシュの大きさを粗くしたためなのかは現時点では決められない。

c) PALLAS：ダクト内分布は非等方 32 分点計算では中心軸より周辺部の方が大きい値となるが、28 分点計算ではほぼ平坦である。水中では 28 分点計算は実験値と良く合っているが 32 分点計算では最大 factor 3 のくいちがいがある。DOT, TWOTRAN の計算がこの領域で実験値と良い一致を示していることを考えると、N-II-1 のケースでは非等方 32 分点の計算は行うべきではないと言える。

d) MORSE：ダクト内での実験値との一致は良いが水中では 1 桁以上の過少評価となる。これはモンテカルロ計算上、体系が大きすぎて粒子が測定点近くまで到達できず、しかも粒子の衝突点から測定点の間に水など減衰の大きい媒質があるため last-collision 法が適切に活用できなかったためである。N-II-1 の体系は炉心から一度で計算するには大きすぎる体系である。

5.3 N-II-2 鉄板前面 Ni(n, p) 反応率分布

a) DOT-III：S-48 近似で粗メッシュ計算、詳細メッシュ計算とも実験値との一致は良い。ただし炉心高さ位置近くで粗メッシュ計算値が少し過少評価となっている。また粗メッシュ計算に分布上のゆらぎはほとんどない。

b) TWOTRAN-II：計算値は実験誤差の範囲で実験値と良く一致している。ただし分布に細かいゆらぎが見られる。DOT 計算ではメッシュを細かくしても粗くしても TWOTRAN 計算のようなゆらぎは見られなかった。しかも既述の様に DOT-III の収束状況は TWOTRAN-II にくらべて悪いことを考えると、このゆらぎは TWOTRAN 独得の現象かもしれない。この点は実用上からも将来原因を究明しておく必要のある課題であろう。

c) PALLAS：炉心中心高さから 40~100 cm の位置で計算値は実験値を過大に評価している。

d) MORSE：計算値は実験値にくらべて factor 2~5 の過少評価となっている。これも last-collision 法が不適当である例である。アルミ壁表面で PALLAS の角度束を境界線源として結合計算をすると、炉心中心高さで実験値と良く一致したが、中心位置をはなれると実験値との差は大きくなつた。

5.4 N-II-2 ボイド内反応率分布

a) DOT-III： $^{24}\text{Mg}(n, p)$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ は過大評価となるがその他は実験値と良く一致する。ボイド内は線源領域からの直視成分の割合が少ないので S-48 分点で十分である。またメッシュを粗くしたことによる影響は、多少分布にゆらぎがあらわれることと、炉心中心高さ ($Z = 0 \text{ cm}$) で少し過少評価になること位である。

b) TWOTRAN-II：DOT 計算と同様の傾向を示す。ただし分布にわずかにゆらぎが見られる。本ケースではボイドが炉心軸に平行して置かれていて直視成分が少ないため $P_3 - S_8$ 計算で十分である。

c) PALLAS： S_N 計算と同様に、 $^{24}\text{Mg}(n, p)$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)$ のデータで過大評価とな

っているが、それ以外では factor 2~3 の範囲で実験値と一致している。ただし $Z = 60$ cm 近くで、特に闘エネルギーの高い反応の反応率において顕著である大きな振動は、PALLAS コードの非散乱線束計算における ray effect である。

d) MORSE： 実験値より 2 枠以上も過小評価となり、全く意味のない計算結果を算出した。N-II-1 と同様 N-II-2 の体系も大きすぎて MORSE を用いて炉心から一度に遮へい体まで計算を行うこと自体無理である。したがって、last-collision 法の利点も生かすことができない状態である。PALLAS との結合計算では、 $Z=0$ cm で factor 5 以上の過大評価となるが、そこをはずれると実験値との一致が良くなり、MORSE 計算は大幅に改善された。 $Z=0$ cm での大幅な過大評価の原因は角度分点を P_3 で近似することによるものであろう。

5.5 計算時間および使用計算機コア容量

今回実施した計算について計算機コア容量、計算時間をまとめて Table 5.1 に示した。ただしこれらのデータはコードおよび計算の条件によって変化するものであるため直接コード間の比較には使えない。たとえば DOT 計算では収束まで iteration を行っていないのに対し、TWOTRAN 計算は収束条件を満たすまで iteration を行っている。また両者間でメッシュ数は大幅に異なるものを使用している。ただし Table 5.1 に示したような値によってこれまでまとめてきたような精度で計算結果を算出できることは事実であるので、この意味ではコードの特性を把握するのには役立つであろう。特徴的な点をあげてみると、PALLAS の計算時間は他のコードにくらべて桁ちがいに小さいこと、MORSE の計算時間は予想通り膨大なものになること、原研の FACOM 用に整備されている TWOTRAN-II は大コア容量を必要としこれが相当に計算条件を制約することになること、などである。

5.6 計算コードの評価の結果

(1) 原子炉の遮蔽設計で典型的な中性子ストリーミング問題を 2 つベンチマーク問題として選び、この問題の計算を詳細遮蔽計算コードで実施した。その結果、Discrete Ordinates コードでは N-II-2 の問題のような円環ボイド問題は比較的首尾良く計算できることがわかつた。詳細に実験との比較を検討すれば今後に残される研究課題は幾つも挙げられるが、設計計算の立場からみると満足な結果を与えたと云えよう。特に TWOTRAN-II 計算ではメッシュ幅をかなり粗く選んだので他の計算結果より精度の良くない結果を算出するのではないかと心配されたが、案外良い結果が求められたのは注目に価する。対照的に DOT-III 計算では計算モードと加速法について幾通りものオプションがあり、この選択にあたっては当然のことながら高いオプション番号を選べば最も精度の良い計算値を得ることが期待された。しかし、計算モードについては期待とは反対に最も初步的なオプションを選ばないと計算は収束の方向へ進まないし、また合理的な線束（正の値）を得ることも出来なかった。このことは N-II-1 の問題とも関連して、一般に中性子について核的に全く異なる物質層が隣り合わせにある（例えば水や鉄と空気のように）場合は高度のモードの使用は注意を要する。PALLAS コードの場合

合入力データの選定については特に問題はないが、高エネルギー領域の中性子計算の精度向上を目的として非散乱線束と散乱線束の計算を分離するよう改定を加えたのが逆に ray effect を増大させたことが N-II-2 の問題の計算から判明した。

一方、N-II-1 の問題については、 S_N 計算の精度は使用する角度分点セットに大きく依存することがわかった。特に DOT-III コードの場合 $S-48 (S_8)$ 計算ではこの種の中性子ストリーミング計算を首尾良く取り扱うことは不可能に近いと云わざるを得ない。今回は作業する時間が少なかったので、DOT-III 計算では角度分点セットを種々選んで計算精度を調べることを省いて、ストリーミング計算に理想的と思われる非対称 124 分点セットを使用した。結果的にはこれが成功したことになるが、一般的にどんなダクトや隙間にに対するストリーミング計算に対してもこの分点セットが有効かどうか速断することはできない。現在の TWOTRAN-II は非対称の角度分点が使用できないのでこの種の問題の計算は苦しい。 S_{16} 以上の次数を選ぶことはコア容量の制限から無理であった。PALLAS 計算については実験値との差はみられるが設計計算上特に注意する点はみあたらなかった。

(2) モンテカルロコード MORSE のベンチマーク計算については、当初より予想されたように炉心から遮蔽体まで一度に計算することは現実的でないことが確認できた。N-II-1 のダクトストリーミング問題はダクト内中性子束をかなり良い精度で計算できたが、この結果だけからダクトストリーミング中性子は精度良く計算できると断定することはできない。このケースは ray analysis による計算が有効だからであり、このことはすでに文献(2)でも述べられている。MORSE 計算では粒子が衝突する毎に last-collision 法で測定器への粒子の到達を計数するので、粒子が乱歩で測定器に到達しなくとも測定器は何らかの小さな値をカウントする。カウントすることができれば数学的に結果の分散 (variance) を計算できるので、一見かなり良い精度 (小さい分散値) の計算値を示す。実はこれが問題である。すなわち、設計計算を担当する人が MORSE のこの手法による精度の物理的意味を正しく理解できればよいが、この統計誤差を信じて設計に使用すると遮蔽設計を誤まる恐れがある。数学的には全く正しい手法でも実際の遮蔽問題の解析における物理的な精度は正しくない場合が、last collision 粒子のみをカウントするケースに起り得る。すなわち、N-II-2 の問題の解析での著るしい過小評価はこの不適当のケースである。このケースでも乱歩の粒子が十分に計数されれば統計誤差は物理的な意味を持ってくる。一般にモンテカルロ計算の場合計算時間短縮のために各種の技法を導入して行う場合が多い。その際に重要なことはそれらの技法の導入によって物理現象の記述が不十分になる恐れが生じるので、何も技法を用いない自然のモンテカルロ計算で再評価することが最善の方法であると云われている。MORSE 計算に限って云えば最もよく使用している米国では MORSE 計算の分散値が 10% 以内でない場合は計算値を採用しないと云われ、1% 程度が望ましいとされている。

しかし、計算時間の関係で 10% 以内の分散値にすることは今回のベンチマーク問題ではできなかった。そこで結合計算の実施を試みたのであるが、第 1 回の試みとしては成功を収めたと云える。この結合計算は以前から米国では試みられていた手法であるが、我国では MORSE 計算については初めての結合計算評価であった。今後はこの結合計算が遮蔽計算に効力を発揮するものと期待される。一方、体系が小さく複雑な形状の遮蔽問題には一度にモンテカルロ計算を実施することは有効であろう。（執筆者：竹内清、笛本宣雄）

Table 5.1 Computer Times and Core Memories for the Calculations of
N-II-1 and N-II-2

Code	Core memory (kword)	C.P.U. (min.)	Iteration	Angular point
------	------------------------	------------------	-----------	------------------

[N - II - 1]

DOT	269	37.4	96	S-48
DOT (coarse mesh)	155	27.3	96	S-48
DOT	299	93.0	180	S-124
TWOTRAN	769	>34.1	241	S ₈
TWOTRAN	769	62.5	171	S ₁₆
PALLAS	252	6.8	—	28
PALLAS	252	9.3	—	32 (asym.)
MORSE	100	230.0	—	—

[N - II - 2]

DOT	445	70.3	96	S-48
DOT (coarse mesh)	153	23.1	157	S-48
TWOTRAN	614	35.7	260	S ₈
PALLAS	252	9.8	—	28
MORSE	100	230.0	—	—

謝 辞

本作業を遂行するにあたり、ベンチマーク問題の設定、計算モデル化、計算の実施、計算結果の検討を行って下さった「遮蔽設計法」研究専門委の計算コード核定数評価ワーキンググループの諸氏に深く感謝します。また、MORSEコードの使用法の御指導をいただいた宮坂部会主査、およびDOT-Ⅲ計算について適切な御助言をいただいた朝岡部会委員に特に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 遮蔽設計法研究専門委、計算コード・核定数評価ワーキンググループ ; "Benchmark problems for shielding design calculation," (1977).
- 2) Miura T., et al. : "Fast neutron streaming through a cylindrical air duct in water," Papers of Ship Res. Inst., No. 49 (1975).
- 3) "原子力船「むつ」遮蔽改修のためのモックアップ実験報告書," 日本原子力船開発事業団、日本原子力研究所、運輸省船舶技術研究所 (1976).
- 4) Mynatt F. R. et al. : "The DOT-Ⅲ Two-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code," ORNL-TM-4280, Oak Ridge National Laboratory (1973)
- 5) Lathrop K. D. et al. : "TWOTRAN-II : An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport," LA-4848-MS (1973).
- 6) Takeuchi K. : "PALLAS-2DCY, A Two-Dimensional Transport Code," Papers of Ship Res. Inst. No. 47 (1973).
- 7) Straker E. A., et al. : "The MORSE Code, A multigroup Neutron and Gamma-Ray Monte Carlo Code," ORNL-4585 (1970).
- 8) Engle W. W., Jr. : A USERS MANUAL FOR ANISN : A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1963 (1967).
- Koyama K., et al. : "ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma-ray Transport Calculations," JAERI-M 6954 (1977).
- 9) 小山謹二, 他 : "遮蔽材料の群定数 — 中性子 100 群・ガンマ線 20 群・ P_5 近似 — , " JAERI-M 6928 (1977).
- 10) Koyama K., et al. : "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport," JAERI-M 7155 (1977).

謝 辞

本作業を遂行するにあたり、ベンチマーク問題の設定、計算モデル化、計算の実施、計算結果の検討を行って下さった「遮蔽設計法」研究専門委の計算コード核定数評価ワーキンググループの諸氏に深く感謝します。また、MORSEコードの使用法の御指導をいただいた宮坂部会主査、およびDOT-Ⅲ計算について適切な御助言をいただいた朝岡部会委員に特に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 遮蔽設計法研究専門委、計算コード・核定数評価ワーキンググループ ; "Benchmark problems for shielding design calculation," (1977).
- 2) Miura T., et al. : "Fast neutron streaming through a cylindrical air duct in water," Papers of Ship Res. Inst., No. 49 (1975).
- 3) "原子力船「むつ」遮蔽改修のためのモックアップ実験報告書," 日本原子力船開発事業団、日本原子力研究所、運輸省船舶技術研究所 (1976).
- 4) Mynatt F. R. et al. : "The DOT-Ⅲ Two-Dimensional Discrete Ordinate Transport Code," ORNL-TM-4280, Oak Ridge National Laboratory (1973)
- 5) Lathrop K. D. et al. : "TWOTRAN-II : An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two-Dimensional Transport," LA-4848-MS (1973).
- 6) Takeuchi K. : "PALLAS-2DCY, A Two-Dimensional Transport Code," Papers of Ship Res. Inst. No. 47 (1973).
- 7) Straker E. A., et al. : "The MORSE Code, A multigroup Neutron and Gamma-Ray Monte Carlo Code," ORNL-4585 (1970).
- 8) Engle W. W., Jr. : A USERS MANUAL FOR ANISN : A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," K-1963 (1967).
- Koyama K., et al. : "ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma-ray Transport Calculations," JAERI-M 6954 (1977).
- 9) 小山謹二, 他 : "遮蔽材料の群定数 — 中性子 100 群・ガンマ線 20 群・ P_5 近似 — , " JAERI-M 6928 (1977).
- 10) Koyama K., et al. : "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma-Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport," JAERI-M 7155 (1977).

- 11) 朝岡卓見, 他: 私信 (1977)
- 12) 伊勢武治, 他: 私信 (1976)
- 13) 笹本宣雄, 他: "PALLAS コード用多群中性子群定数ライブラリ, " JAERI-M 7445 (1977).
- 14) Asaoka T. and Tsutsui T. : "Introduction of the Coarse Mesh Rebalance Acceleration into DOT-III, " News Letter NEACPL, No. 20 (1976).
- 15) Mynatt F. R. et al. : RSIC Computer Code Collection DOT-3.5, " CCC - 276, Oak Ridge National Laboratory (1975).