

JAERI-M
85-009

二重微分型断面積を用いたMORSE-DD
コードのベンチマークテスト

1985年2月

中川 正幸・森 貴正・石黒 幸雄

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）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

二重微分型断面積を用いたM O R S E - D D コードの
ベンチマークテスト

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
中川 正幸・森 貴正・石黒 幸雄

(1985年1月12日受理)

核融合炉におけるニュートロニクスの解析を目的として開発した多群二重微分型断面積とこれを用いる三次元モンテカルロコードMORSE-DDの評価を行うため、各種のベンチマークテストを行った。評価の対象とした問題は、いずれも14 MeV 中性子源を用いたもので、実験のある体系としては、ローレンス・リバモア研究所で測定された9種類の球体系からの漏洩中性子スペクトル、原研のFNSで測定された酸化リチウム平板体系からの角度中性子スペクトル及び黒鉛反射体付酸化リチウム球体系中のトリチウム生成率と、KfKで測定された金属リチウム球体系中のトリチウム生成率である。また、計算手法の評価のために、小体系からの散乱中性子スペクトルと酸化リチウム円筒体系中の各種反応率分布について、本手法とより厳密な連続エネルギーモンテカルロ法との比較を行った。使用した核データは、ENDF/B4であるが、部分的にJENDL-3PR1も用いた。

テストは測定値との比較、ルジャンドル展開法による断面積を用いた結果及び連続エネルギーモンテカルロ法による結果との比較によって行った。その結果、本手法は従来のものより高精度であること、連続エネルギーモンテカルロ法と良く一致すること等が明らかになった。また使用した核データの問題点についても検討した。

Benchmark Test of MORSE-DD Code using
Double-Differential Form Cross Sections

Masayuki NAKAGAWA, Takamasa MORI and Yukio ISHIGURO

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 12, 1985)

The multi-group double-differential form cross sections (DDX) and the three dimensional Monte Carlo code MORSE-DD devised to utilize the DDX, which were developed for the fusion neutronics analysis, have been validated through many benchmark tests. All the problems tested have a 14 MeV neutron source. To compare the calculated results with the measured values, the following experiments were adopted as the benchmark problems; leakage neutron spectra from spheres composed of nine kinds of materials measured at LLNL, neutron angular spectra from the Li_2O slab measured at FNS in JAERI, tritium production rate (TPR) in the graphite-reflected Li_2O sphere measured at FNS and the TPR in the metallic Li sphere measured at KfK. In addition in order to test an accuracy of the calculation method in detail, spectra of neutrons scattered from a small sample and various reaction rates in a Li_2O cylinder were compared between the present method and the continuous energy Monte Carlo method. The nuclear data files used are mainly ENDF/B4 and partly JENDL-3PR1.

The tests were carried out through a comparison with the measured values and also with the results obtained from the conventional Legendre expansion method and the continuous energy Monte Carlo method. It is found that the results by the present method are more accurate than those by the conventional one and agree well with those by the continuous energy Monte Carlo calculations. Discrepancies due to the nuclear data are also discussed.

Keywords: Double-Differential Cross Section, Fusion Neutronics, Monte Carlo Code MORSE-DD, Benchmark Test, Conventional Legendre Expansion, Li_2O , ENDF/B4, JENDL-3PR1

目 次

1. 序.....	1
2. 球体系からの漏洩中性子スペクトル	3
2.1 リチウム 6	3
2.2 リチウム 7	3
2.3 ベリリウム	4
2.4 炭 素	4
2.5 酸 素	5
2.6 鉄	5
2.7 鉛	5
2.8 水及びポリエチレン	6
3. 酸化リチウム平板体系からの角度依存中性子スペクトル	28
3.1 計算方法	28
3.2 実験値との比較	28
4. 連続エネルギーモンテカルロ・コードとの比較	42
4.1 酸化リチウム円筒体系	43
4.2 黒鉛反射体付酸化リチウム球体系及び金属リチウム球体系	43
5. む す び.....	54
参考文献	55

Contents

1. Introduction	1
2. Leakage Neutron Spectra from Spheres	3
2.1 Lithium 6	3
2.2 Lithium 7	3
2.3 Beryllium	4
2.4 Carbon	4
2.5 Oxygen	5
2.6 Iron	5
2.7 Lead	5
2.8 Water and Polyethylene	6
3. Angular Dependent Neutron Spectra from Lithium-Oxide Slab Assemblies	28
3.1 Calculation Method	28
3.2 Comparison with Experimental Results	28
4. Comparison with Continuous Energy Monte Carlo Code	42
4.1 Lithium-Oxide Cylinder	43
4.2 Graphite-Reflected Lithium-Oxide Sphere and Metallic Lithium Sphere	43
5. Conclusion	54
References	55

List of Tables

- Table 1.1 Assemblies for benchmark test
- Table 2.1 Energy-angle distribution of source neutron
- Table 2.2 Comparison of integrated neutron spectra for carbon, oxygen and iron
- Table 3.1 Atomic number densities of lithium-oxide assembly used in the calculations
- Table 4.1 Comparison of reaction rate distributions for $^7\text{Li}(n,n',\alpha)\text{T}$, $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ and $^{238}\text{U}(n,f)$ in Li_2O pile (MORSE-DD/VIM)
- Table 4.2 Comparison of reaction rate distributions for $^7\text{Li}(n,n',\alpha)\text{T}$, $^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ and $^{238}\text{U}(n,f)$ in Li_2O pile with first wall (MORSE-DD/VIM)
- Table 4.3 Comparison of C/E between DDX and P_8 calculations for spherical $\text{Li}_2\text{O}-\text{C}$ pile

List of Figures

- Fig. 2.1 Geometry of lithium 6 and lithium 7 spheres (Ref. 9)
- Fig. 2.2 Leakage spectra from lithium 6 at 30 deg. (0.5 m.f.p.). ϕ shows the experimental value.
- Fig. 2.3 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 6 at 30 deg.
- Fig. 2.4 Leakage spectra from lithium 6 at 120 deg. (0.5 m.f.p.)
- Fig. 2.5 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 6 at 120 deg.
- Fig. 2.6 Leakage spectra from lithium 7 at 30 deg. (0.5 m.f.p.)
- Fig. 2.7 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and modified one for lithium 7
- Fig. 2.8 Comparison of leakage spectra calculated by P_3 and P_8 order cross sections for lithium 7
- Fig. 2.9 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 7 at 30 deg.
- Fig. 2.10 Leakage spectra from lithium 7 at 120 deg. (0.5 m.f.p.)
- Fig. 2.11 Comparison of leakage spectra calculated by P_3 and P_8 order cross sections for lithium 7

- Fig. 2.12 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 7 at 120 deg.
- Fig. 2.13 Geometry of beryllium sphere (Ref. 13)
- Fig. 2.14 Leakage spectra from beryllium at 30 deg. (0.8 m.f.p.)
- Fig. 2.15 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for beryllium at 120 deg.
- Fig. 2.16 Geometry of carbon sphere (Ref. 8)
- Fig. 2.17 Leakage spectra from carbon at 30 deg. (2.9 m.f.p.)
- Fig. 2.18 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for carbon at 30 deg.
- Fig. 2.19 Leakage spectra from carbon at 120 deg. (2.9 m.f.p.)
♦ shows the experimental value.
- Fig. 2.20 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for carbon at 120 deg.
- Fig. 2.21 Geometry of liquid oxygen sphere (Ref. 8)
- Fig. 2.22 Leakage spectra from oxygen at 30 deg. (0.7 m.f.p.)
- Fig. 2.23 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for oxygen at 30 deg.
- Fig. 2.24 Leakage spectra from oxygen at 120 deg. (0.7 m.f.p.)
- Fig. 2.25 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for oxygen at 120 deg.
- Fig. 2.26 Geometry of iron sphere (Ref. 8)
- Fig. 2.27 Leakage spectra from iron at 30 deg. (2.9 m.f.p.)
- Fig. 2.28 Leakage spectra from iron at 120 deg. (2.9 m.f.p.)
- Fig. 2.29 Leakage spectra from iron at 30 deg. (4.8 m.f.p.)
- Fig. 2.30 Leakage spectra from iron at 120 deg. (4.8 m.f.p.)
- Fig. 2.31 Geometry of lead sphere (Ref. 9)
- Fig. 2.32 Leakage spectra from lead at 30 deg. (1.4 m.f.p.)
- Fig. 2.33 Leakage spectra from lead at 120 deg. (1.4 m.f.p.)
- Fig. 2.34 Geometry of water sphere (Ref. 9)
- Fig. 2.35 Leakage spectra from water at 30 deg. (1.1 m.f.p.)
- Fig. 2.36 Geometry of polyethylene sphere (Ref. 8)
- Fig. 2.37 Leakage spectra from polyethylene at 30 deg. (0.8 m.f.p.)
- Fig. 2.38 Leakage spectra from polyethylene at 30 deg. (3.5 m.f.p.)
- Fig. 3.1 Experimental layout for lithium-oxide slab (Ref. 16)
- Fig. 3.2 Calculation model of angular spectrum from lithium-oxide slab
- Fig. 3.3 Comparison of angular spectra at 24.9 deg. from 5.06 cm thick slab

- Fig. 3.4 Comparison of angular spectra at 41.8 deg. from 5.06 cm thick slab
- Fig. 3.5 Comparison of angular spectra at 66.8 deg. from 5.06 cm thick slab
- Fig. 3.6 Comparison of angular spectra at 0. deg. from 20.24 cm thick slab
- Fig. 3.7 Comparison of angular spectra at 12.2 deg. from 20.24 cm thick slab
- Fig. 3.8 Comparison of angular spectra at 24.9 deg. from 20.24 cm thick slab
- Fig. 3.9 Comparison of angular spectra at 41.8 deg. from 20.24 cm thick slab
- Fig. 3.10 Comparison of angular spectra at 66.8 deg. from 20.24 cm thick slab
- Fig. 3.11 Comparison of angular spectra at 0. deg. from 40.48 cm thick slab
- Fig. 3.12 Comparison of angular spectra at 12.2 deg. from 40.48 cm thick slab
- Fig. 3.13 Comparison of angular spectra at 24.9 deg. from 40.48 cm thick slab
- Fig. 3.14 Comparison of angular spectra at 41.8 deg. from 40.48 cm thick slab
- Fig. 3.15 Comparison of angular spectra at 66.8 deg. from 40.48 cm thick slab
- Fig. 3.16 Comparison of angular spectra at 0. deg. from 5.06 cm thick slab
- Fig. 3.17 Comparison of angular spectra at 12.2 deg. from 5.06 cm thick slab
- Fig. 3.18 Comparison of angular spectra calculated by ENDF/B4 and modified one at 24.9 deg.
- Fig. 3.19 C/E of integrated spectra for 5.06 cm thick slab
- Fig. 3.20 C/E of integrated spectra for 20.24 cm thick slab
- Fig. 3.21 C/E of integrated spectra for 40.48 cm thick slab
- Fig. 4.1 Calculation model of neutron spectrum scattered from small sample
- Fig. 4.2 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM original version for lithium

- Fig. 4.3 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM modified library for lithium (forward scattering)
- Fig. 4.4 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM modified library for lithium (backward scattering)
- Fig. 4.5 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM for oxygen (angle 3)
- Fig. 4.6 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM for iron (angle 3)
- Fig. 4.7 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD (ENDF/B4), MORSE-DD (JENDL-3PR1) and MCNP (LASL) for angle $0 < \theta < 20$ deg.
- Fig. 4.8 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD (ENDF/B4), MORSE-DD (JENDL-3PR1) and MCNP (LASL) for angle $75 < \theta < 105$ deg.
- Fig. 4.9 Comparison of total neutron fluxes calculated by MORSE-DD (ENDF/B4), MORSE-DD (JENDL-3PR1) and MCNP (LASL)
- Fig. 4.10 Geometry of cylindrical slab of lithium-oxide
- Fig. 4.11 Comparison of neutron spectra in lithium-oxide
- Fig. 4.12 Geometry of graphite reflected lithium-oxide sphere
- Fig. 4.13 Comparison of spatial distributions for tritium production rate and ^{238}U fission rate
- Fig. 4.14 Comparison of tritium production rates in lithium metal

1. 序

核融合炉におけるニュートロニクスの解析を目的として開発した二重微分型断面積とそれを用いる三次元モンテカルロコード MORSE-DD¹⁾ の評価を目的として、種々のベンチマーク実験の解析を行った。二重微分型断面積は、従来のルジャンドル展開法による断面積の欠点を克服するために作成したものであり、散乱の非等方性が強い媒質中においても精度良くエネルギーと散乱角の相関を考慮に入れることができる²⁾。この断面積セットは PROF-DD コードによって作成するが、その詳細については近く別途報告する予定である。

当初作成した二重微分型断面積 (DDX) セットは、エネルギー群が 100 で、散乱角のメッシュを μ で等間隔の 20 とした。その後種々のベンチマークテストを経て、群構造に関しては 100 群では 14 MeV のピーク近傍を精度良く表わすには群巾が大き過ぎることが分かり、10 MeV 以上を更に小分割し、現在では 125 群構造としている。なお角度メッシュの 20 は充分であることが分かったので変えていない。また従来のルジャンドル展開法による計算結果を比較するために、 SUPERTOG-JR3³⁾ 並びに NJOY⁴⁾ で処理した群定数も用いた。ルジャンドル展開の次数は 5 又は 8 である。前者のコードは古くから使用されているが、問題となるのは非弾性散乱は全て等方扱いとなっている点であろう。一方後者ではその点が改良され、角度依存性も考慮されている。断面積作成に使用した核データファイルは、いづれのコードも ENDF/B4⁵⁾ である。また部分的には最近評価された JENDL-3 PR1⁶⁾ も用いている。ベンチマーク実験の解析では、核データの評価が重要な点である。

次に輸送計算は全て MORSE-DD を用いて行った。このコードは DDX を使うように MORSE-CG を修正したものであるが、合せて P_ℓ 断面積も使用できる。計算法等については参考文献 1 に記されているので省く。

今回行ったベンチマークテストは

- 1) 米国ローレンス・リバモア研究所で測定された球体系からの漏洩中性子スペクトル,
- 2) 原研のFNSで測定された酸化リチウム平板体系からの漏洩角度中性子スペクトル,
- 3) 原研のFNSで測定された黒鉛反射体付酸化リチウム球体系中の反応率分布、及び、カールスルーエ研究所で測定された金属リチウム球体系中のトリチウム生成率,
- 4) 仮想的な直径 70cm、厚さ 80cm の円筒形酸化リチウム体系中の反応率分布

に対するものである。これらの内、実験解析を行った 1), 2) と 3) のケースでは、測定値との比較及び異った断面積セット又は核データを用いた計算値間の比較を行った。また 3) と 4) に関しては、計算手法のみをより詳細に評価するために、より厳密な輸送計算を行うことが可能な連続エネルギーモンテカルロコード VIM⁷⁾ との相互比較を行った。この手法では、断面積を正確に扱うことができると共に、散乱後のエネルギーと角度がカイネマティックスにより厳密に求められるので、断面積セットの評価と MORSE-DD コードの評価が同時に行われることになる。計算法の相互比較では、核データを統一して行うので、実験解析のみによる評価では避けられない核データに起因する不確さが除かれることになる。上に挙げた体系はいづれも単純な

体系であるため、輸送計算法の評価としては不十分な面がある。今後は、複雑な形状や多くの材料で構成される体系についてもテストを積み重ねる必要があろう。

ベンチマーク計算のためには核計算の分野でも多数の問題が提案されたりそのための実験が行われて来た。参考文献 8 及び 9 には、遮蔽計算のための問題が多数収録されており、本ベンチマークテストでもこれを参考とした部分が多い。

Table 1.1 Assemblies for benchmark test

Materials	Geometry	Thickness or Radius	Angle	Nuclear data ^{b)}
⁶ Li	sphere	0.5mfp ^{a)}	30, 120	B/4
⁷ Li	sphere	0.5 "	30, 120	B/4, J-3P
Be	sphere	0.8 "	30, 120	B/4, J-3P
C	sphere	2.9 "	30, 120	B/4, J-3P
O	sphere	0.7 "	30, 120	B/4, J-3P
Iron	sphere	2.9 "	30, 120	B/4
		4.8 "	30, 120	B/4
Lead	sphere	1.4 "	30, 120	B/4
Water	sphere	1.1 "	30	B/4
Polyethylene	sphere	0.8 "	30	B/4
		3.5 "	30	B/4
Li_2O	slab	5.0 6cm	0, 12.2, 24.9	B/4
			41.8, 66.8	B/4
		20.24cm	0, 12.2, 24.9	B/4
			41.8, 66.8	B/4
		40.48cm	0, 12.2, 24.9	B/4
			41.8, 66.8	B/4
Li_2O	cylinder	$70 \times 80\text{cm}$		B/4
$\text{Li}_2\text{O} + \text{C}$	sphere	$23+25\text{cm}$		B/4
Li metal	sphere	50 cm		B/4

a) mfp =mean free path

b) B/4=ENDF/B4, J-3P=JENDL-3PR1

2. 球体系からの漏洩中性子スペクトル

本章では、米国ローレンス・リバモア研究所でハンセン等によって測定された球体系からの漏洩中性子スペクトルを解析した結果について述べる。ここで検討した材料は、⁶Li, ⁷Li, ベリリウム, 炭素, 酸素(液体酸素), 鉄, 鉛, 水, ポリエチレンである。^{10)~14)}これらの測定値は、これまで14MeV中性子源を使ったベンチーマ実験として各方面で計算され、断面積やコードの評価に使われて来た。本章においても同様にMORSE-DDコードの評価と核データの検討を行う。

表2.1に本計算で使用されたD-T中性子源の角度・エネルギー分布を示す。これはハンセン等のレポートに与えられた分布を積分して得たものである。ターゲットアセンブリーが単純なことから、ほぼD-T反応のカイネマティックスで決まる分布となっている。

2.1 リチウム6

リチウム6は天然リチウム中には、7.4%含まれるだけであるが、トリチウム生成に大変重要な核種である。⁶Li(n, α)³T反応断面積は、比較的良好く知られているが、高い精度が要求される。天然リチウム中では輸送計算に余り影響を及ぼさないが、もし濃縮リチウムを使うとすれば、他の反応も重要になって来る。スペクトルを測定した体系には図2.1に示す様な球体系にDビーム入射とTターゲット用の空間が設けられている。球の半径は8.97cmでmean free path(m.f.p.)単位では14MeV中性子に対して約0.5である。30°方向の計算値と実験値を図2.2に示す。12~8MeV及び4MeV以下で計算値の方が小さくなっている。この角度に対するENDF/B4(以下B4と記す)とJENDL-3PR1(同じくJENDLと記す)を使ったDDXによる計算結果を図2.3に示す。11MeV以下で両者は異った傾向を示す。これを実験値と比較して見ると、JENDLは12~8MeVでB/4より更に過少評価となり6MeVで傾向が少し変わることになる。次に120°方向の結果を図2.4に示す。図より明らかな様に計算値は全体に低くなっている。またピークのエネルギー位置がずれているのは、与えられたソースのエネルギースペクトル特に後方のそれに問題があるためと思われる。この傾向は以下の全ての体系に表われている。次にB/4とJENDLの比較を図2.5に示す。両者の差は6MeV以下で顕著である。JENDLを使っても実験値との一致はまだ不十分である。

2.2 リチウム7

リチウム7は、核融合炉ブランケットのトリチウム増殖材として最も重要な核種である。しかし従来の評価核データには種々の問題点がある事が各方面から指摘されている。特にトリチウムを生成する反応⁷Li(n, n', α)³Tは重要である。この断面積はトリチウム生成率等の積分実験を通じて評価する方が直接的である。ここではスペクトルを比較して検討するので、こ

の断面積を評価するのは無理であろう。

測定体系は、図 2.1 に示すような球形で半径 8.97 cm, これは m.f.p. で約 0.5 となる。30° 方向の測定値と計算値を比較したものを図 2.6 に示す。計算値としては、DDX と P_8 の結果が与えられている。10~12 MeV での不一致が大きいが、特に P_8 計算ではこの凹みを再現する事は出来ない。また 3 MeV 以下で計算値の過少評価となっている。その他の領域では計算と実験の一一致は良い。次に 11 MeV 近傍での不一致の原因を検討するため、ENDF/B4 には考慮されていない 4.63 MeV の第 2 非弾性散乱レベルを評価して、追加した断面積で再計算した結果を図 2.7 に示した。これから明らかに第 2 レベルを考慮することによって 11 MeV の凹みは再現できることが分かった。次に、ルジャンドル展開法の打切り次数による差を見たのが図 2.8 である。これから弾性散乱ピークの低エネルギー側で差が生じ P_8 の方が巾の小さいピークを与える事が分かる。また、ENDF/B4 と JENDL-3 PR1 を比較すると、図 2.9 から明らかな様に、11 MeV 付近の谷と 3 MeV 以下の立上り部分で JENDL-3 PR1 が実験値によく合うようになっている。しかし、4~6 MeV では過大評価となろう。総合的に見ると JENDL はかなり B/4 より良いと云える。

次に、120° 方向の結果を図 2.10 に示す。ピークのずれは先に述べたのと同じ理由によるが、10 MeV 以下で計算値の過少評価となっている。またこの方向での P_3 と P_8 計算の差は図 2.11 から分かる様にピークより高エネルギー側で P_3 の方が大きな値を与える。これらはカイネマティックスより説明できる。次に JENDL と B/4 の比較を図 2.12 に示す。この場合も 30° 方向とほぼ似た傾向である。この事は実験値と比較すると、10 MeV 近傍で過少評価となる。また 8 MeV 以下では B/4 より実験に近づくがなお過少評価となり、120° 方向では全区間で実験の方が大きいことになる。

2.3 ベリリウム

ベリリウムは中性子増倍材として重要であるため、特に (n, 2n) 反応断面積とエネルギー分布の精度が要求される。測定は図 2.13 で示す球体で行われた。Be の実効厚さは 0.8 m.f.p. である。計算と実験の比較を図 2.14 に示す。B/4 は 12~4 MeV で実験値より大き目で、それ以下で低くなる。一方 JENDL は 9~5 MeV で過少評価となっているが、他の領域では良い一致を示す。Be は重要な核種であるので、今後も実験値が多く出されることが期待される。図 2.15 は、120° 方向に対する B/4 と JENDL の比較を示す。この傾向は 30° 方向とほぼ同様である。

2.4 炭素

炭素からのスペクトルを解析した体系は、図 2.16 に示す半径 20.96 cm (2.9 m.f.p.) の球体系である。30° 方向の結果を図 2.17 に示す。DDX で得たスペクトルは実験との一致はかなり良いが、4 MeV 以下で過少評価となっている。一方、SUPERTOG-JR3 で作成した P_8 断面積による値は、11~6 MeV にかけてのスペクトルの構造をまったく再現することが出来ない。この原因は主に非弾性散乱に対する非等方分布が考慮されていないためである。一方 JENDL を用いた結果は図 2.18 から分かるように、更に一致が良くなり、4 MeV 以下でも実験値をほぼ再現している。

部分的には 6 MeV 近傍の形に不一致が見られる。次に 120° 方向の結果を図 2.19 に示す。この場合も DDX の結果はかなり良い一致を示してはいるが、30° 方向と似た傾向がある。図 2.20 に同じく JENDL を用いた結果を示す。この場合も $B/4$ より一致は良くなることは明らかである。しかし 9 及び 5 MeV 近傍には不一致が残っている。次に表 2.2 a にエネルギー区間で積分した値を比較する。10 MeV 以下で JENDL の値が実験に近いことが良く分かる。 $B/4$ の結果は 10 MeV 以下でかなりの不一致を示す。

2.5 酸 素

酸素は、図 2.21 に示す様な球体系に液体酸素を満たした体系で測定が行われた。半径は 0.7 m.f.p. である。30° の方向の結果を図 2.22 に示す。 $B/4$ -DDX の結果は比較的良い一致を示す。ただ 6 MeV において測定値に見られる凹みは計算では出て来ない。4 MeV 以下では計算の過大評価となっている。またこの場合も炭素と同様に P_8 計算の結果は 9 MeV 近傍で不一致が大きい。JENDL と $B/4$ の比較は図 2.23 に示す。大きな差は 8~4 MeV に見られる。この領域は $B/4$ でも過大評価気味であったので、JENDL は更に過大評価となる。120° 方向の結果は図 2.24 に示す。ピークを除くと 7 MeV 以下で過大評価となっている。また JENDL との比較は図 2.25 に示す。7~3 MeV にかけて JENDL は更に大きな値を示しており実験とは離れる方向にある。以上の結果から酸素に関しては、JENDL の再評価が望まれる。エネルギー積分した値の比較は表 2.2 b に示したがこれからも JENDL の値が 10~5 MeV 間で大きな不一致を示すことが明らかである。

2.6 鉄

鉄のスペクトルは図 2.26 に示すように 3 種類の半径を持つ球体系で測定されたが、ここでは 2.9 m.f.p. と 4.8 m.f.p. の二種類について計算を行った。図 2.27 は 2.9 m.f.p. に対する 30° 方向の結果を示す。この場合は、両方の計算値共に実験との一致は良好であるが、4 MeV 以下では過少評価となっている。同じく 120° 方向の結果は、図 2.28 に示すように、30° 方向の結果と似ているが、低エネルギー部での過少評価が更に大きくなっている。鉄のように質量が大きい物質では、DDX と P_8 の差は小さいと云える。次に、4.8 m.f.p. に対する 30° 及び 120° 方向の結果を図 2.29 及び 2.30 に示す。実験と計算の間の一一致度は 2.9 m.f.p. の場合と似ている。JENDL を用いた結果は図に示さなかったが、 $B/4$ と良く似た結果であった。またエネルギー積分した結果は表 2.2 c に示す。5 MeV 以下の過少評価がはっきりしているが、この傾向は炭素、酸素についても同様であることが同表から見られる。

2.7 鉛

鉛は核融合炉ブランケットにおいて単体で増倍材として用いたり、あるいはリチウム鉛の化合物の形で増殖材となり、大変重要な核種である。特に ($n, 2n$) 反応は精度が要求される。

測定は、図 2.31で示す半径 1.4m.f.p. の球体系に対して行われた。30°及び 120°方向の測定と計算の比較を図 2.32及び 2.33に示す。まず計算値間の差は殆んど見られない。実験値との比較では、6 MeV 以下の計算の過少評価が明らかである。これは($n, 2n$)反応によって生じる低エネルギー中性子を過少評価している為であろう。従って、この反応断面積は $B/4$ では過少評価していると予想される。これは阪大で行われた鉛の二重微分断面積の測定と解析においても同様な点が指摘されている。¹⁵⁾

2.8 水及びポリエチレン

水に対するスペクトルは図 2.34に示す半径 1.1m.f.p. の球に対して行われた。計算結果との比較は図 2.35に示す。これは 30°方向についての比較であるが、計算では P_8 の方がかなりの過大評価となることが分かる。DDXの結果はほぼ実験と一致しているが、より平坦なスペクトルを与えることが分かる。

次に同じく水素を含有するポリエチレンの結果について検討する。この場合は、図 2.36に示した半径が 0.8 と 3.5m.f.p. の球について計算した。比較はいづれも 30°方向について行った。図 2.37に示す 0.8m.f.p. の結果は DDX は測定値と良く合っているが、 P_8 では過大評価となり、水素を含む体系では P_8 計算は不正確であることが明らかである。また図 2.38に示す 3.5m.f.p. の体系に関しては、計算値間の差は小さくなっているが、これは多数回の散乱を経て角度分布が平均化されるためである。測定値と比べると山や谷の位置に不一致が見られる。また 12 MeV 以上のピークは大きく離れている。これは測定値にもエネルギー軸等に関して問題がある可能性もあり、明確にその原因をつかむことは出来ない。

Table 2.1 Energy-Angle Distribution of Source Neutron

μ	E (MeV)	1 5.488	1 4.550	1 3.668	1 2.840
1.0		0.04066			
0.9239		0.06903			
0.7934		0.09666			
0.6088		0.07625			
0.4617			0.08263		
0.3007			0.08642		
0.1305			0.08749		
-0.04362			0.04318		
-0.1305			0.08369		
-0.3007			0.07830		
-0.4617				0.10286	
-0.6756				0.05600	
-0.7934				0.06134	
-0.9239				0.01386	
-0.9537				0.01063	
-0.9763				0.01102	
-1.0					
S(u)		0.2826	0.4617	0.2557	

Table 2.2 Comparison of Integrated spectra of integrated neutron spectra for carbon, oxygen and iron.

a) Carbon sphere 2.9m.f.p.

	(Calculation - Experiment) / Experiment (%)			
	Total	15-10	10-5	5-2
30°				
DDX (JENDL-3PR1)	5.1	1.2	11.2	9.7
DDX (ENDF/B-IV)	1.6	1.4	17.6	-14.2
P ₈ (ENDF/B-IV)*	2.8	1.6	26.8	-9.6
120°				
DDX (JENDL-3PR1)	-2.6	1.3	7.5	-19.6
DDX (ENDF/B-IV)	-6.6	-4.7	19.4	-33.2
P ₈ (ENDF/B-IV)*	-5.5	-2.7	16.4	-30.4

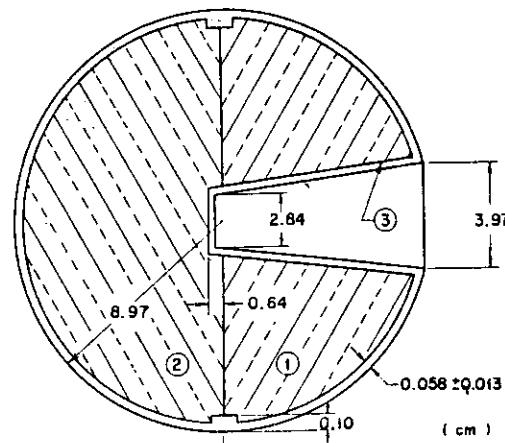
b) Oxygen sphere 0.7m.f.p.

30°				
DDX (JENDL-3PR1)	5.3	5.5	40.9	-15.7
DDX (ENDF/B-IV)	4.3	6.7	15.8	-17.7
P ₈ (ENDF/B-IV)*	5.7	8.5	8.8	-12.7
120°				
DDX (JENDL-3PR1)	7.7	7.2	60.0	-14.1
DDX (ENDF/B-IV)	6.9	9.4	25.7	-18.5
P ₈ (ENDF/B-IV)*	7.9	10.1	25.7	-15.3

c) Iron sphere 4.8m.f.p.

30°				
DDX (ENDF/B-IV)	-8.9	-4.4	-1.1	-16.6
P ₈ (ENDF/B-IV)*	-9.2	-6.1	-11.5	-12.7

• P₈ group constants were produced by the SUPERTOG-JR3 code.



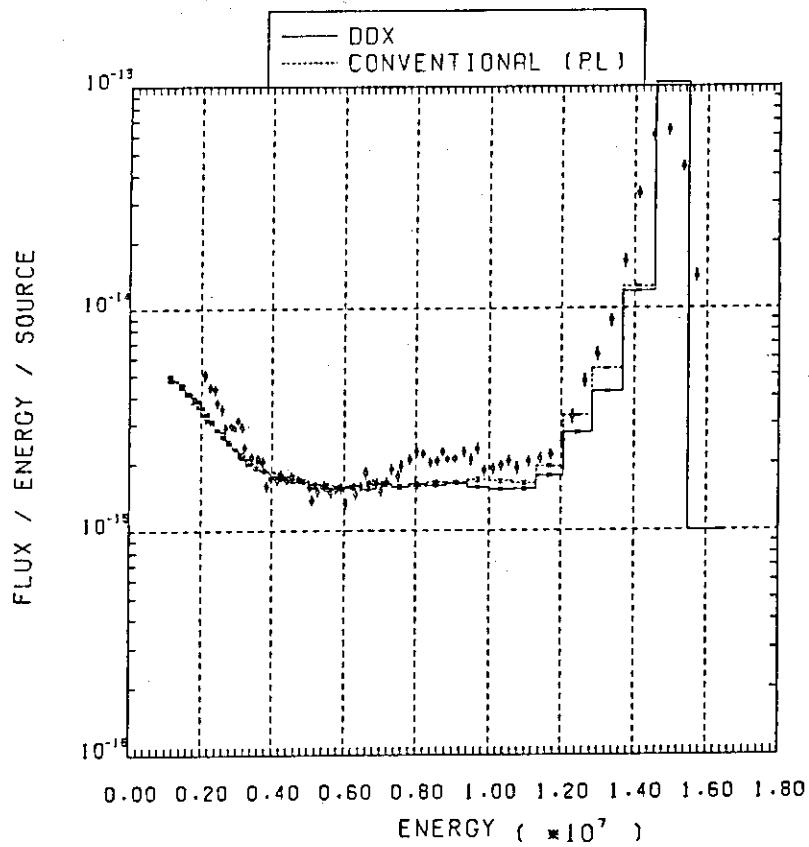
Lithium 6 (0.5 m.f.p.)

Zone	Mass in grams	Material %
①	629	^6Li - 95.0
②	668	^7Li - 5.0
③	578	Fe - 68.6 Cr - 20.0 Ni - 8.0 Si - 2.0 Mn - 1.0

Lithium 7 (0.5 m.f.p.)

Zone	Mass in grams	Material %
①	720	^7Li - 97.39
②	761	^6Li - 22.61
③	609	Fe - 68.6 Cr - 20.0 Ni - 8.4 Si - 2.0 Mn - 1.0

Fig. 2.1 Geometry of lithium 6 and lithium 7 spheres (Ref. 9)

Fig. 2.2 Leakage spectra from lithium 6 at 30 deg. (0.5 m.f.p.).
φ shows the experimental value.

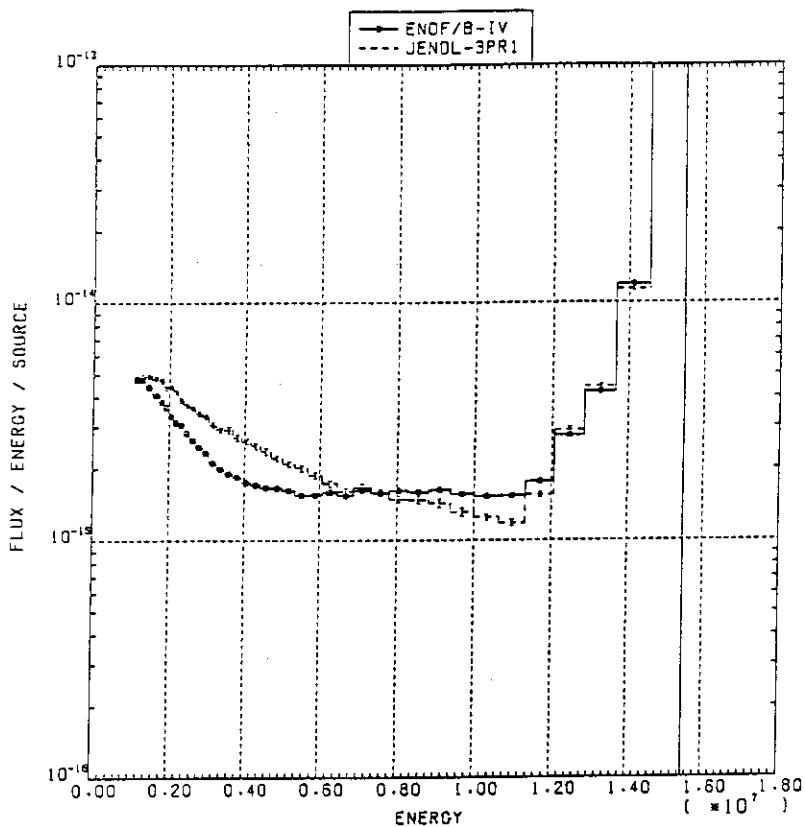


Fig. 2.3 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 6 at 30 deg.

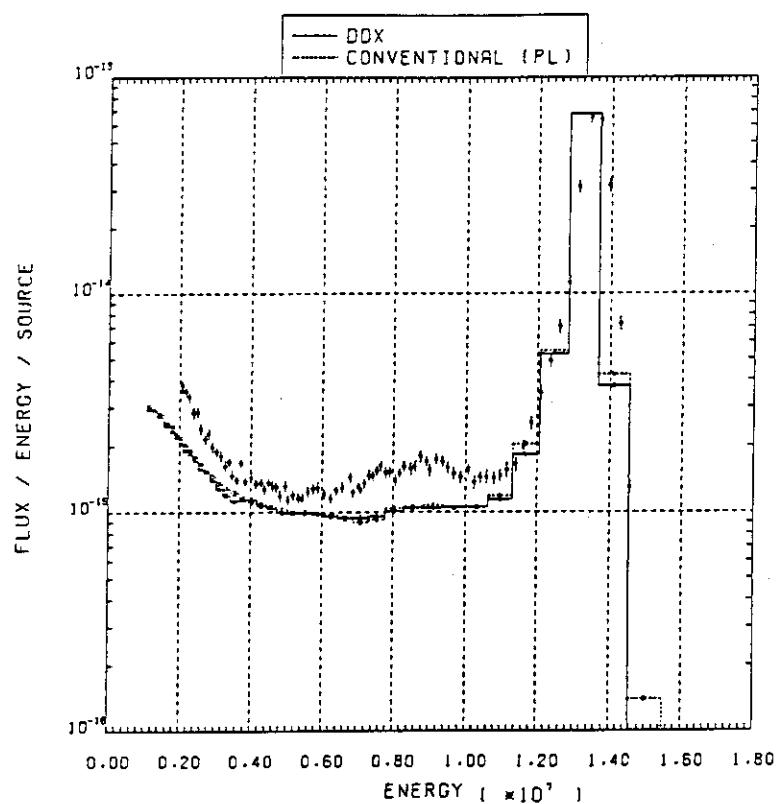


Fig. 2.4 Leakage spectra from lithium 6 at 120 deg. (0.5 m.f.p.)

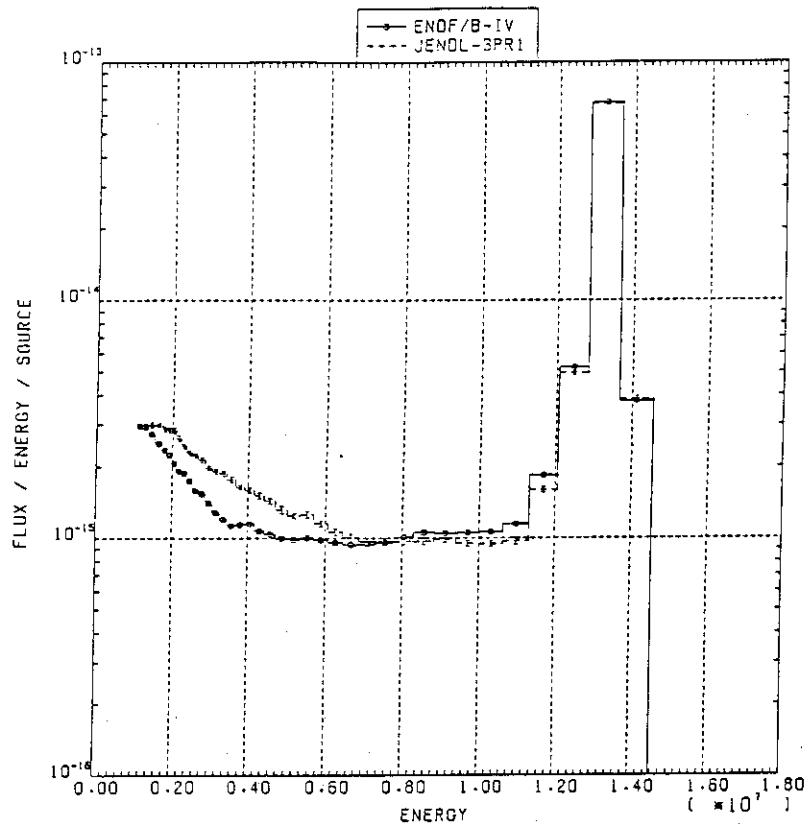


Fig. 2.5 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 6 at 120 deg.

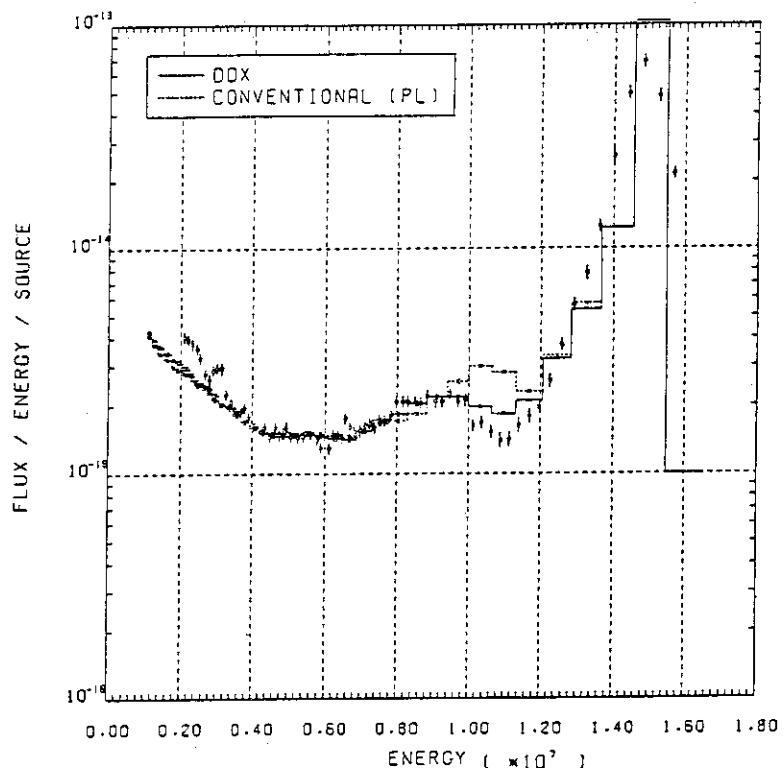


Fig. 2.6 Leakage spectra from lithium 7 at 30 deg. (0.5 m.f.p.)

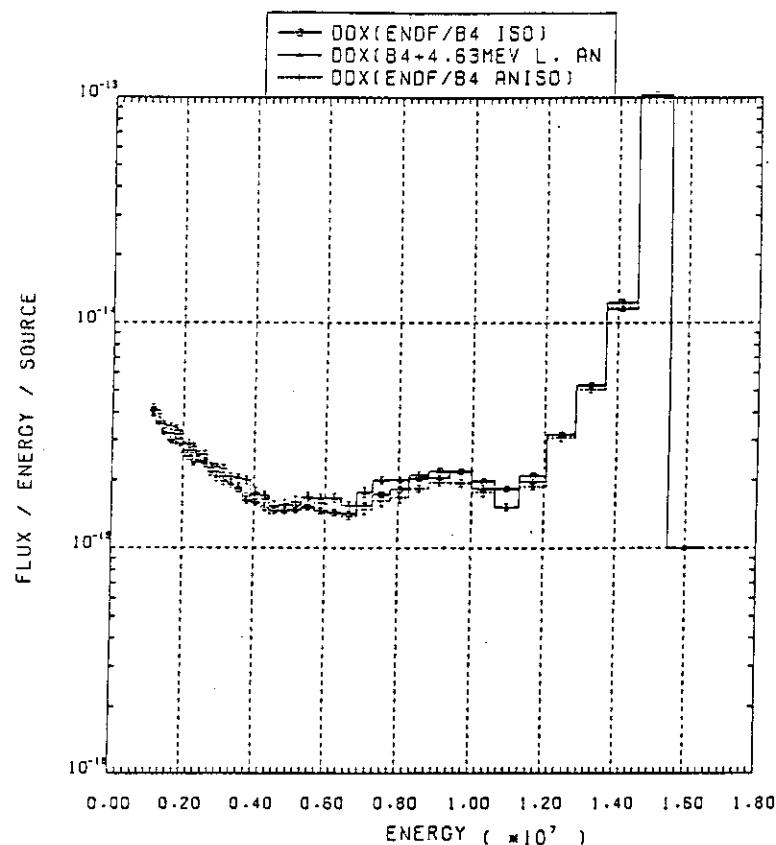


Fig. 2.7 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and modified one for lithium 7

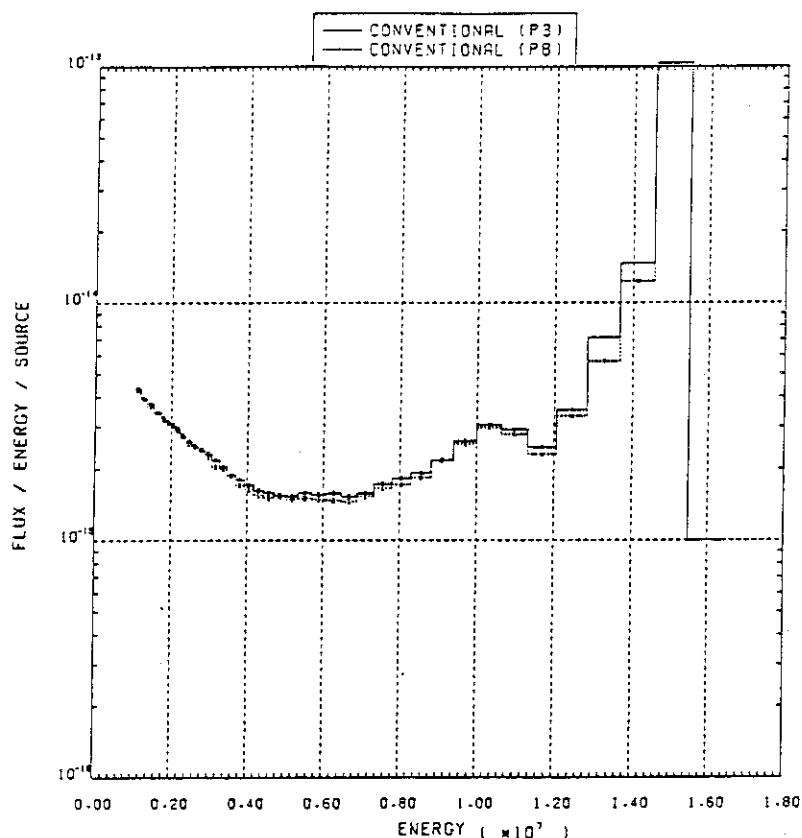


Fig. 2.8 Comparison of leakage spectra calculated by P_3 and P_8 order cross sections for lithium 7

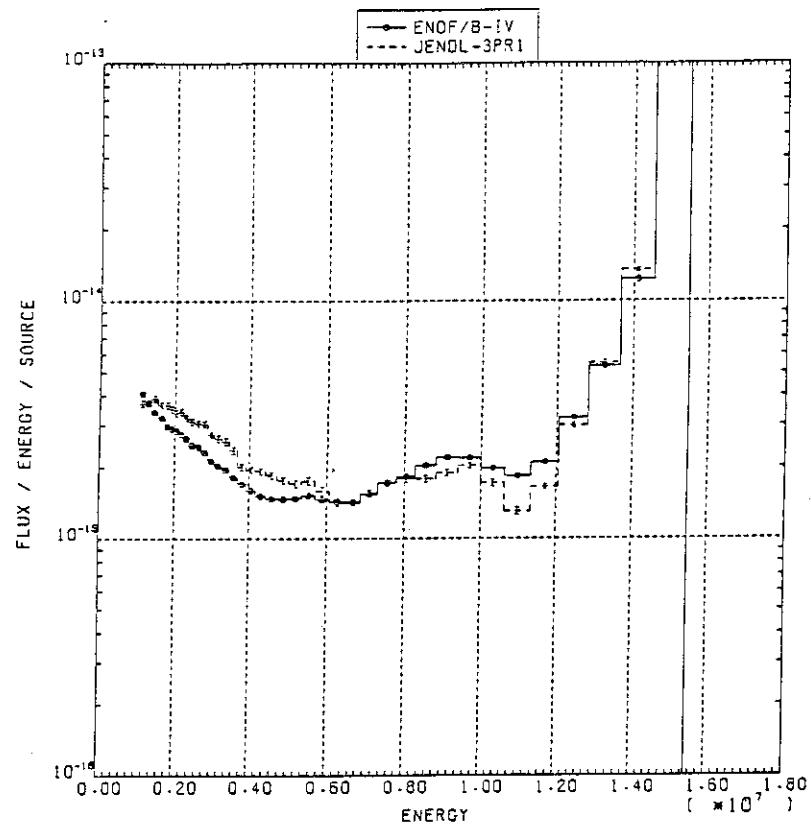


Fig. 2.9 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 7 at 30 deg.

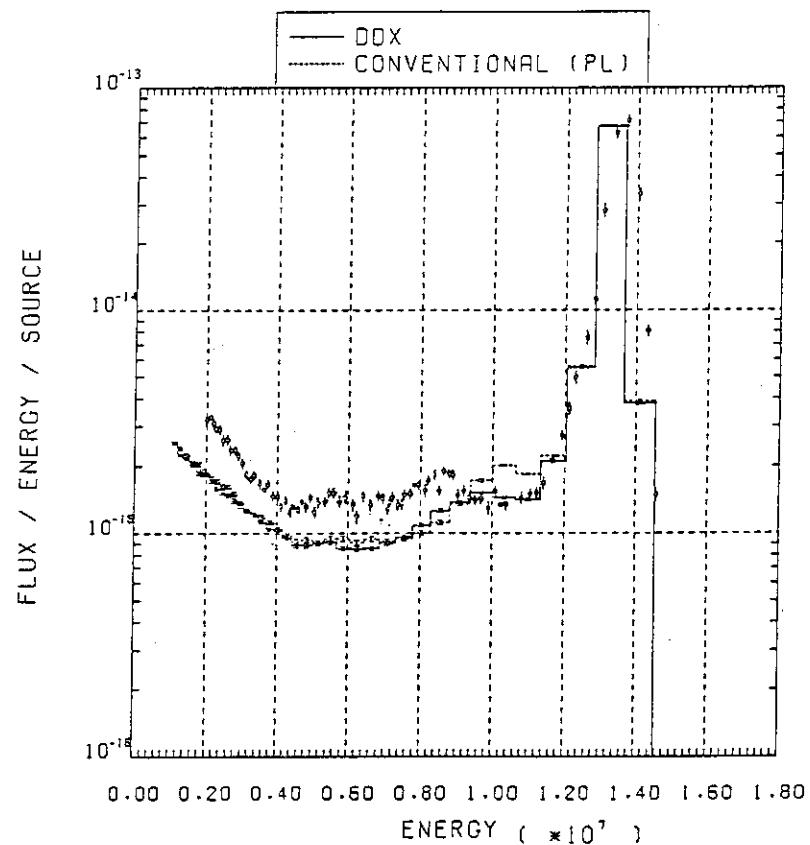


Fig. 2.10 Leakage spectra from lithium 7 at 120 deg. (0.5 m.f.p.)

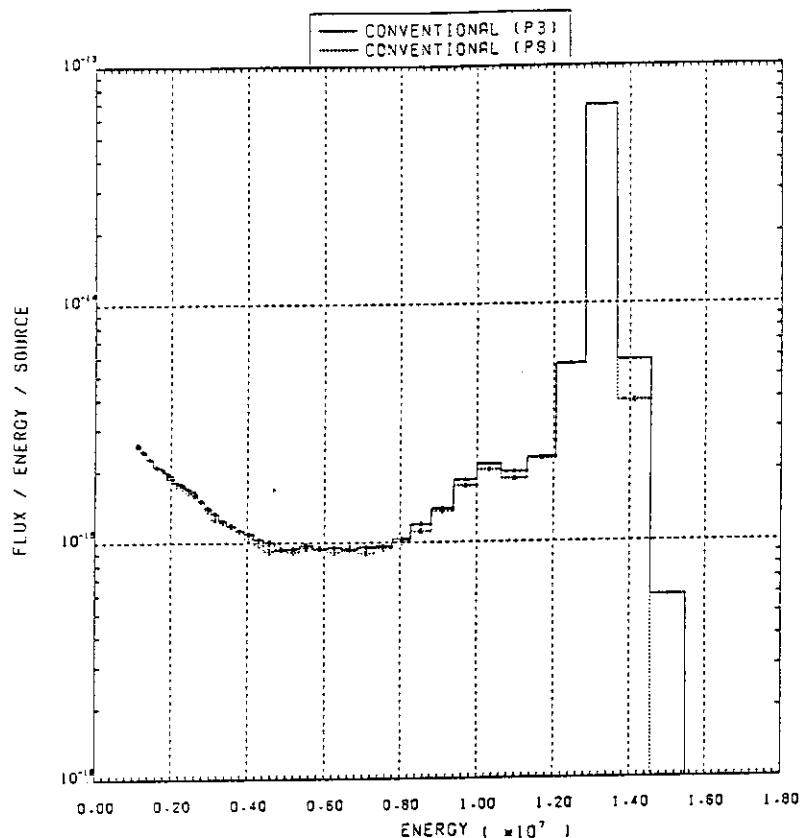


Fig. 2.11 Comparison of leakage spectra calculated by P_3 and P_8 order cross sections for lithium 7

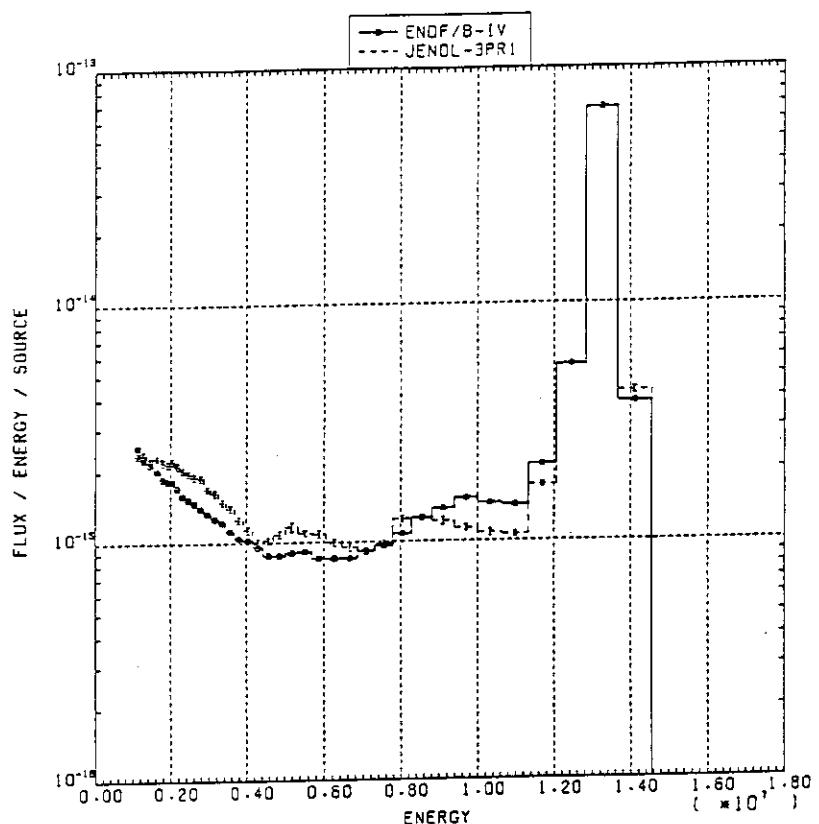


Fig. 2.12 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for lithium 7 at 120 deg.

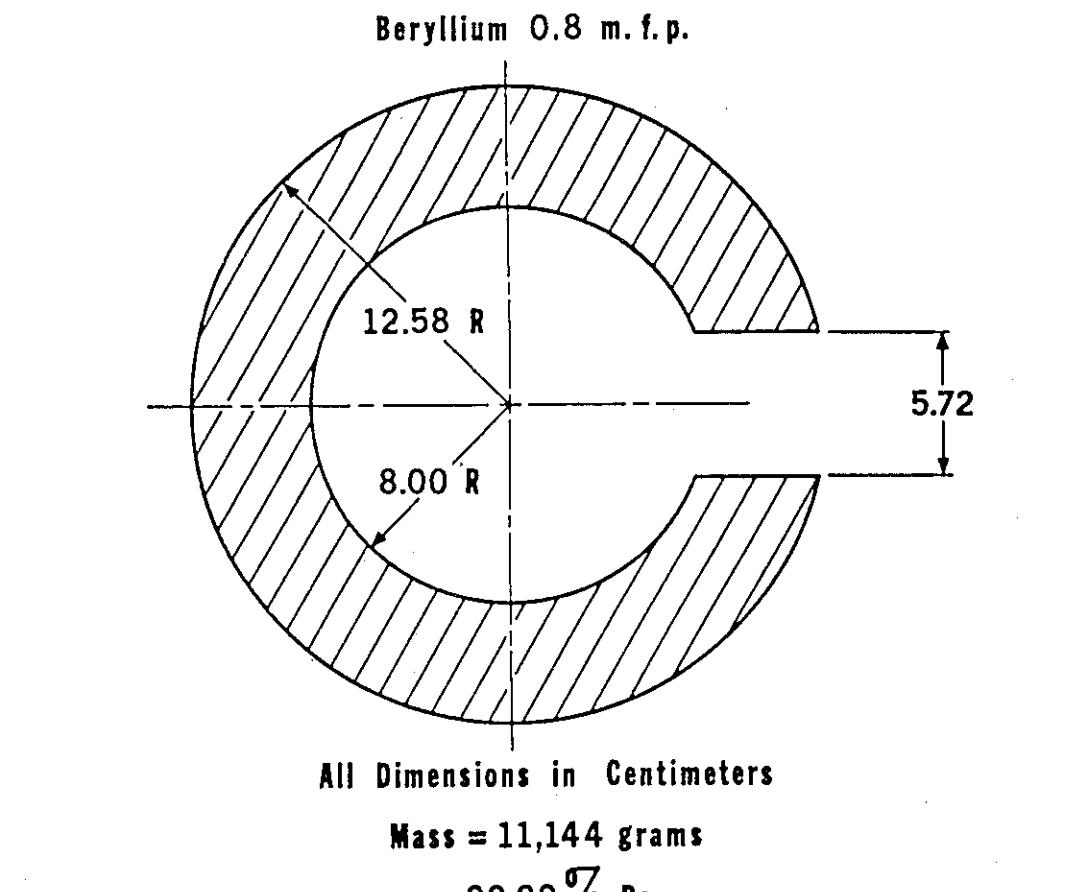


Fig. 2.13 Geometry of beryllium sphere (Ref. 13)

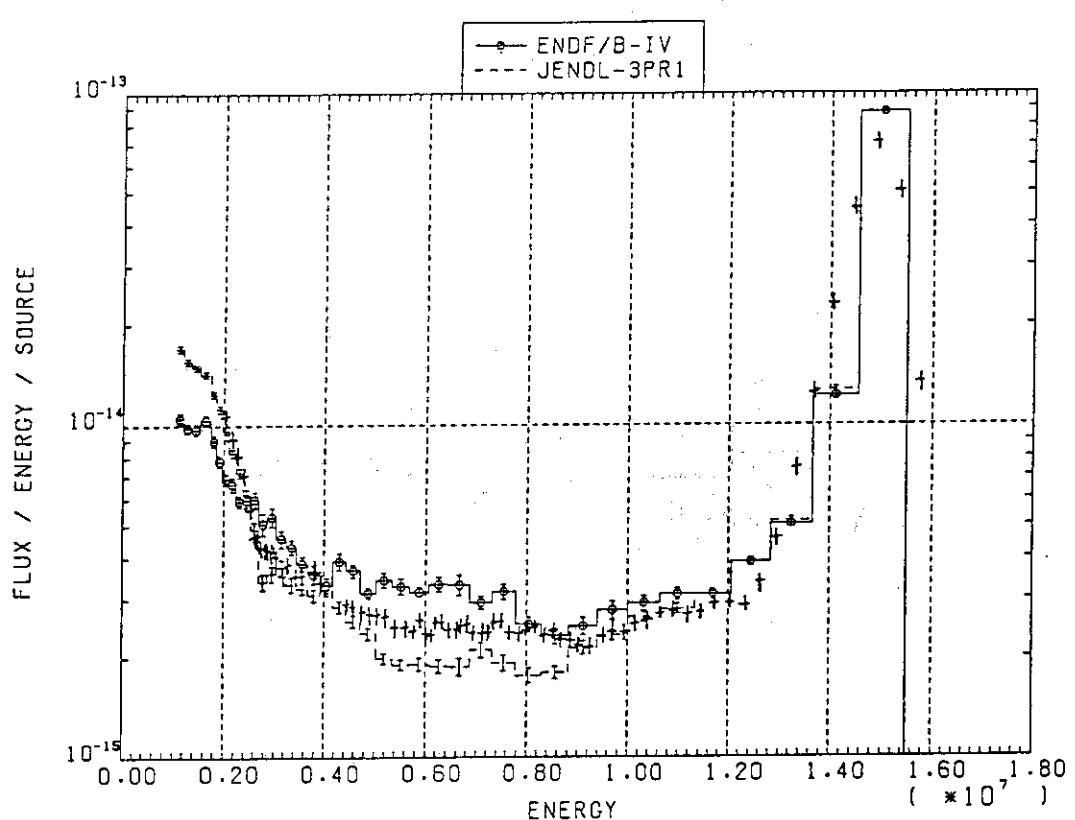


Fig. 2.14 Leakage spectra from beryllium at 30 deg. (0.8 m.f.p.)

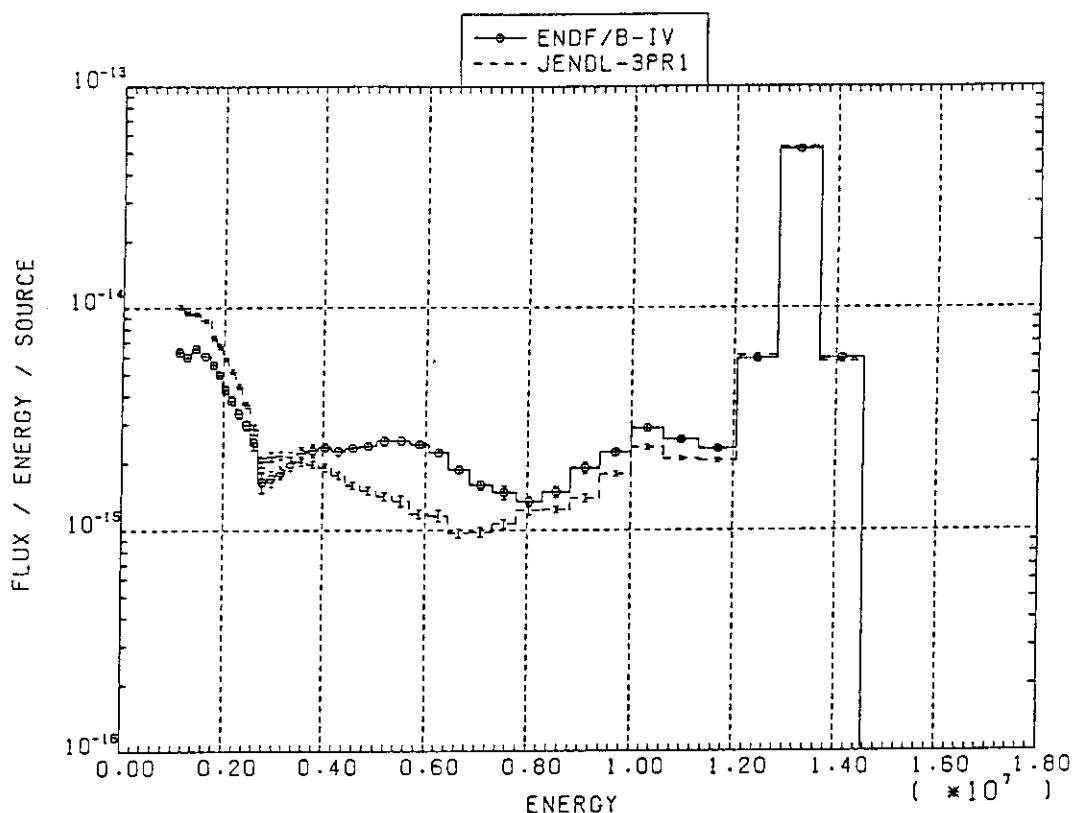


Fig. 2.15 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for beryllium at 120 deg.

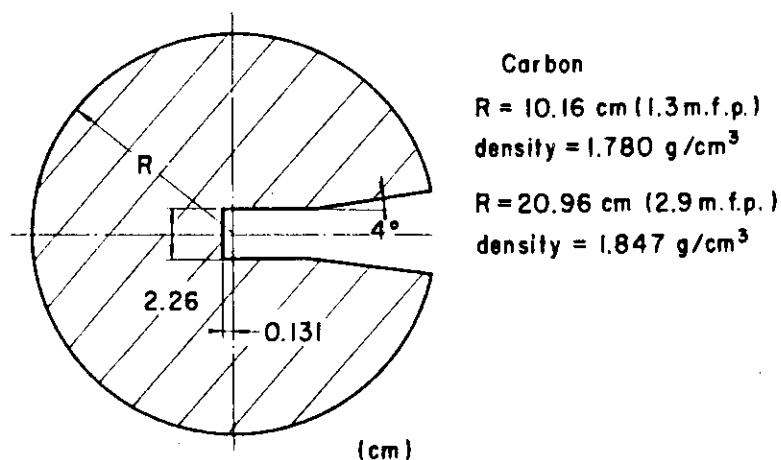


Fig. 2.16 Geometry of carbon sphere (Ref. 8)

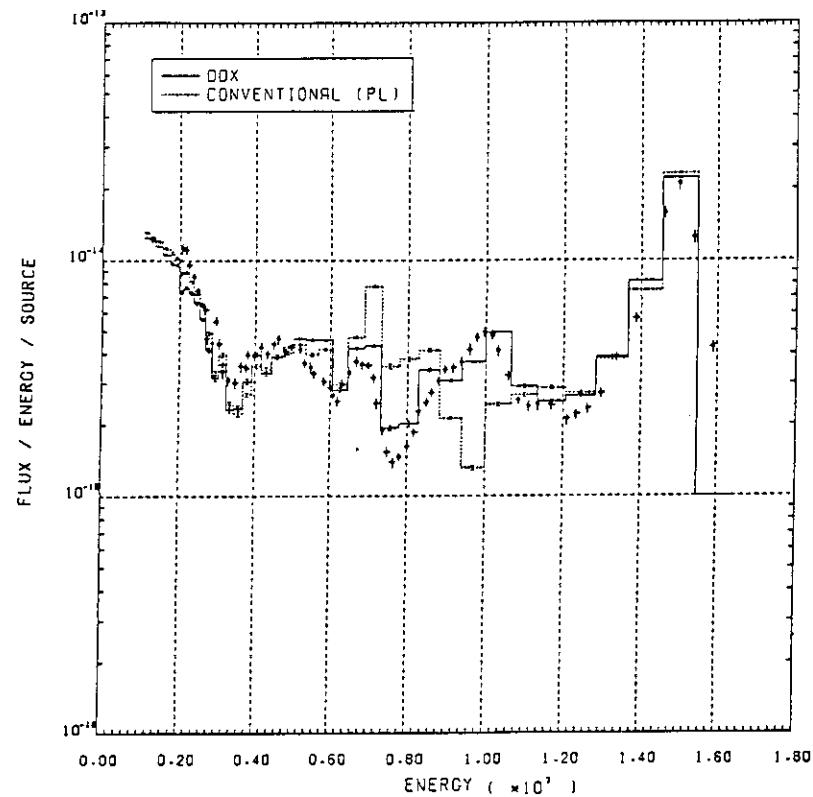


Fig. 2.17 Leakage spectra from carbon at 30 deg. (2.9 m.f.p.)

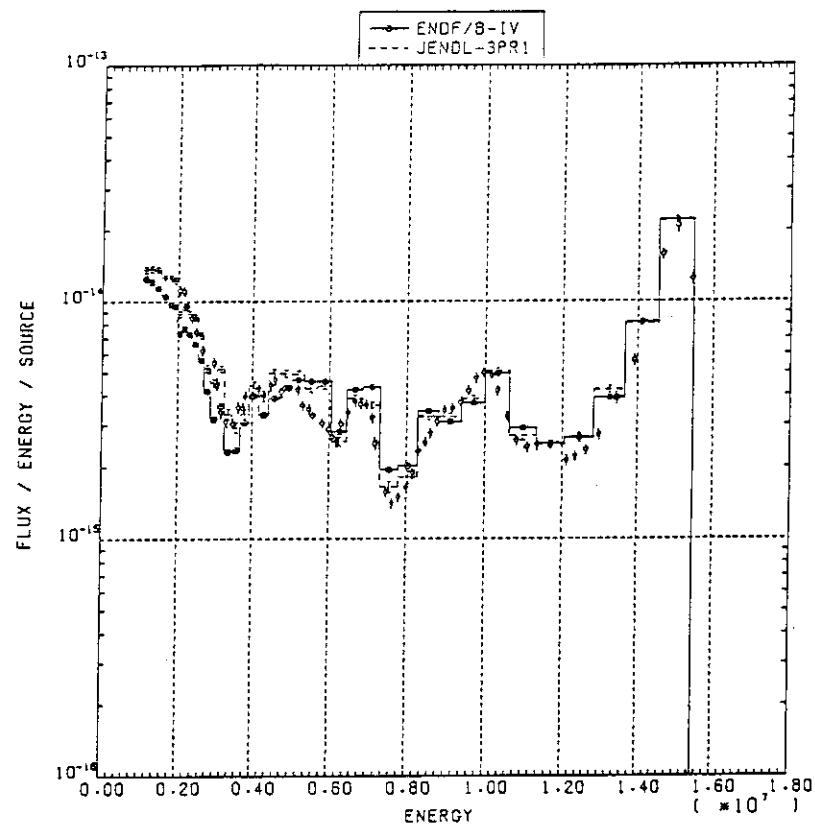


Fig. 2.18 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for carbon at 30 deg.

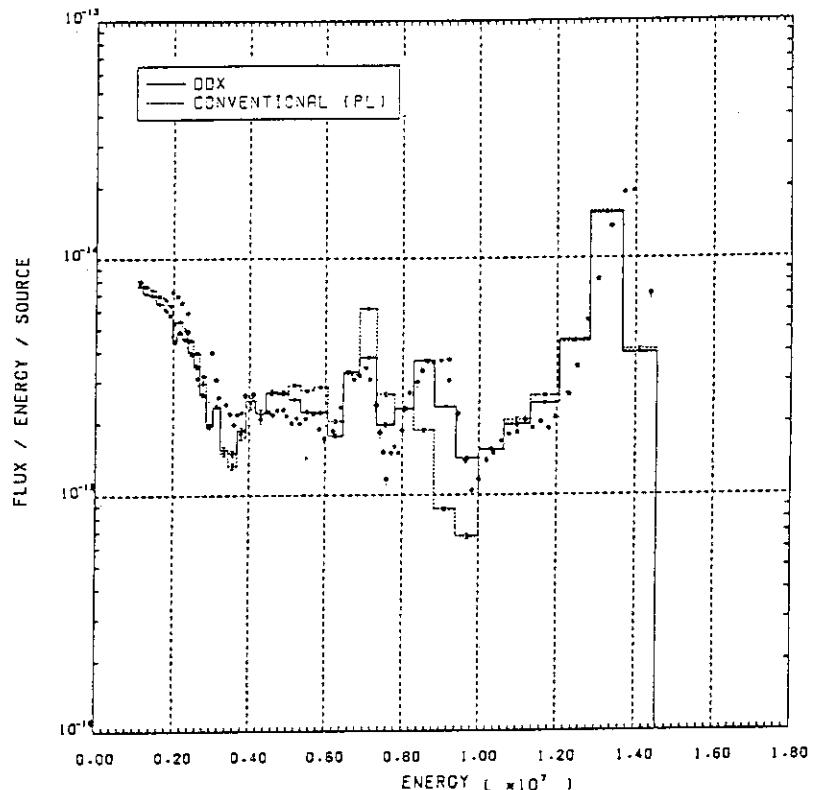


Fig. 2.19 Leakage spectra from carbon at 120 deg. (2.9 m.f.p.)
 ♦ shows the experimental value.

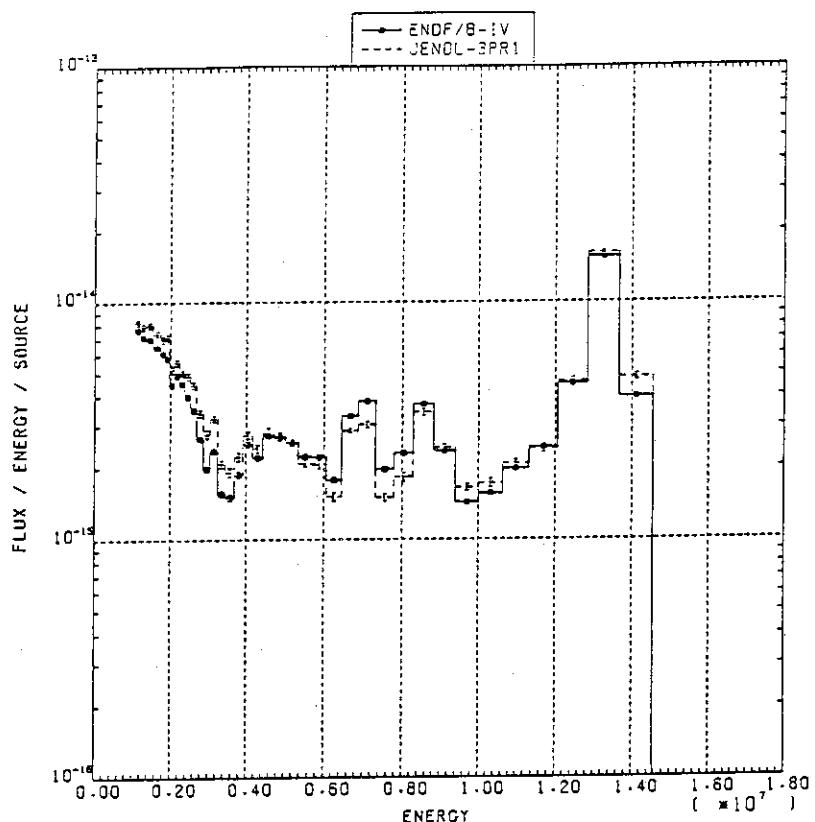
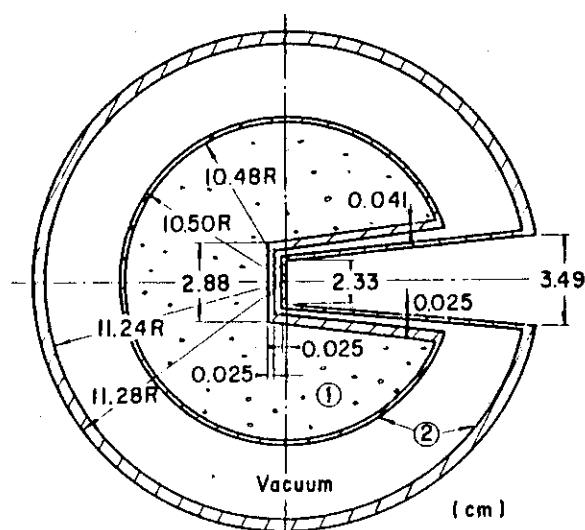


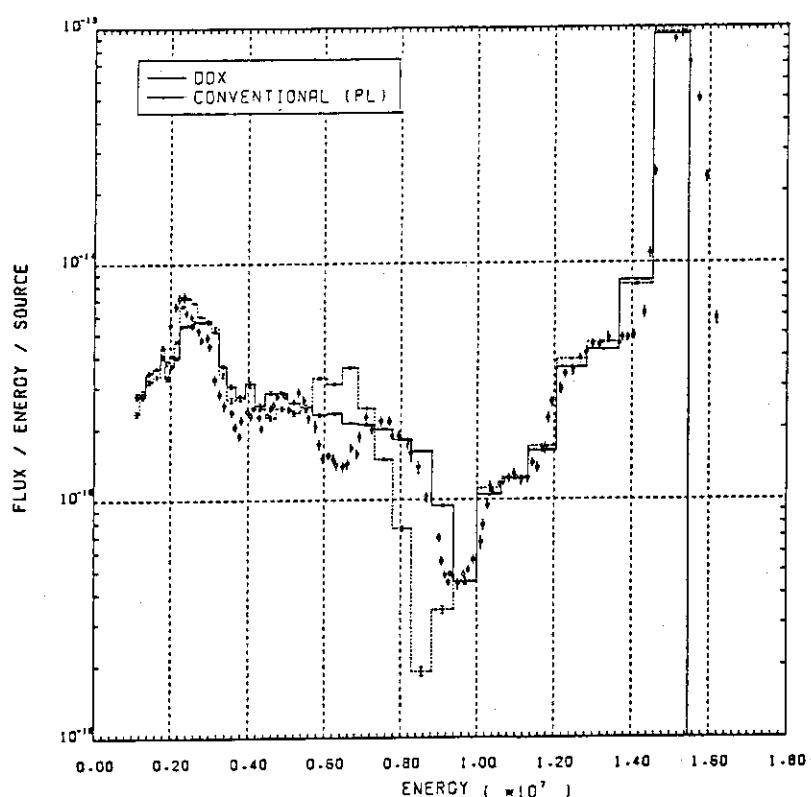
Fig. 2.20 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for carbon at 120 deg.



Liquid Oxygen (0.7 m.f.p.)

Zone	Density(g/cm ³)	Atomic %
①	1.14	O : 100
②	7.9	Fe : 68.6 Cr : 20.0 Ni : 8.4 Si : 2.0 Mn : 1.2

Fig. 2.21 Geometry of liquid oxygen sphere (Ref. 8)

Fig. 2.22 Leakage spectra from oxygen at 30 deg. (0.7⁴m.f.p.)

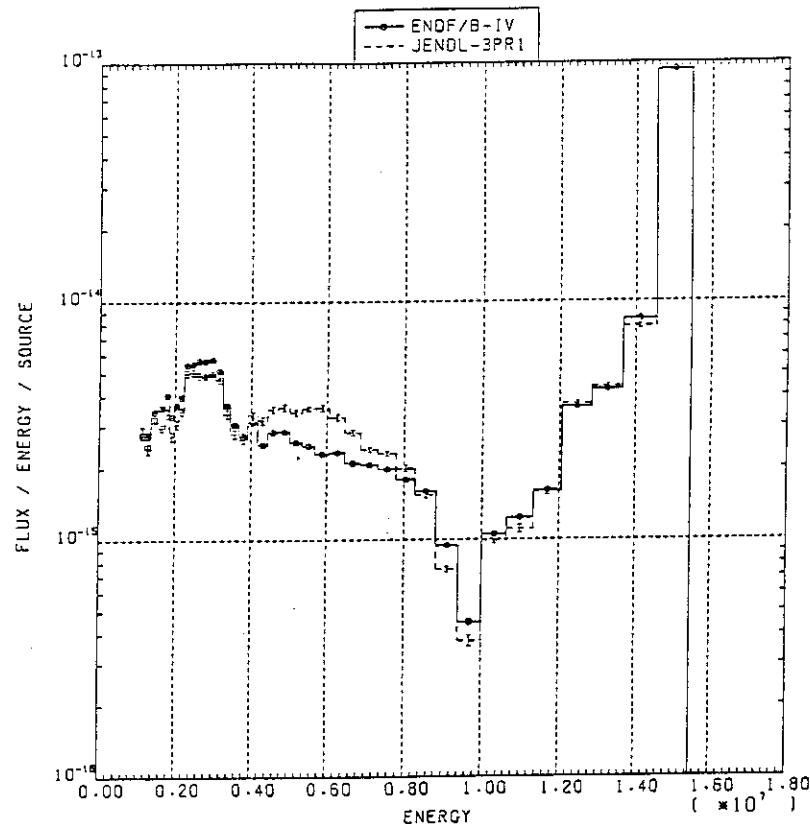


Fig. 2.23 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for oxygen at 30 deg.

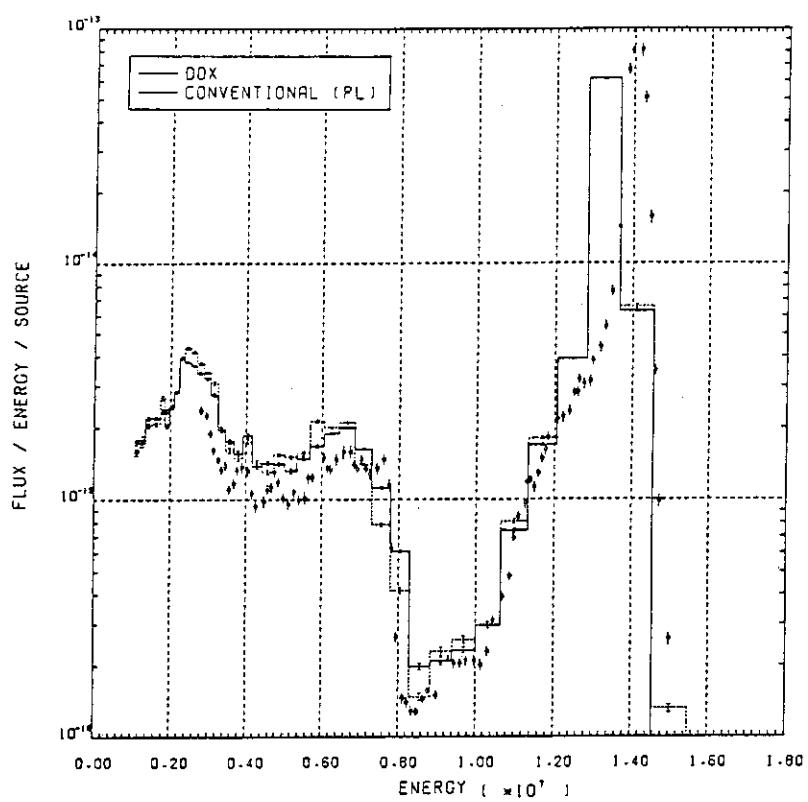


Fig. 2.24 Leakage spectra from oxygen at 120 deg. (0.7 m.f.p.)

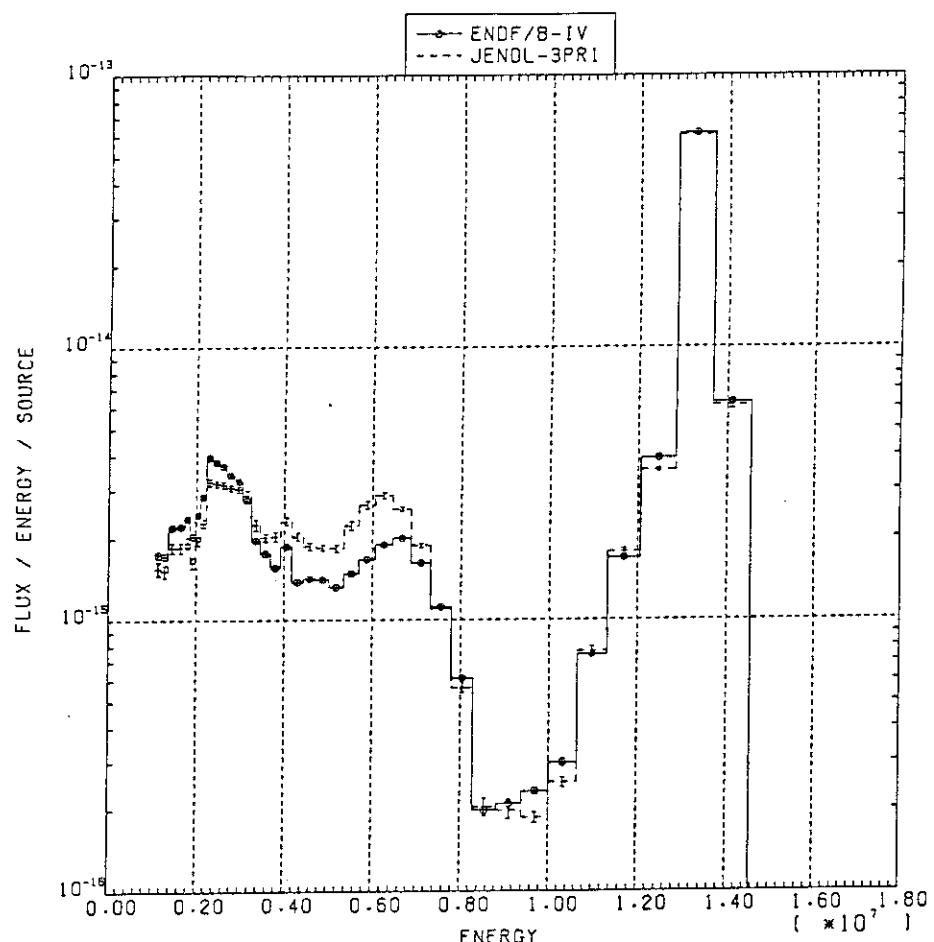


Fig. 2.25 Comparison of leakage spectra calculated by ENDF/B4 and JENDL-3PR1 for oxygen at 120 deg.

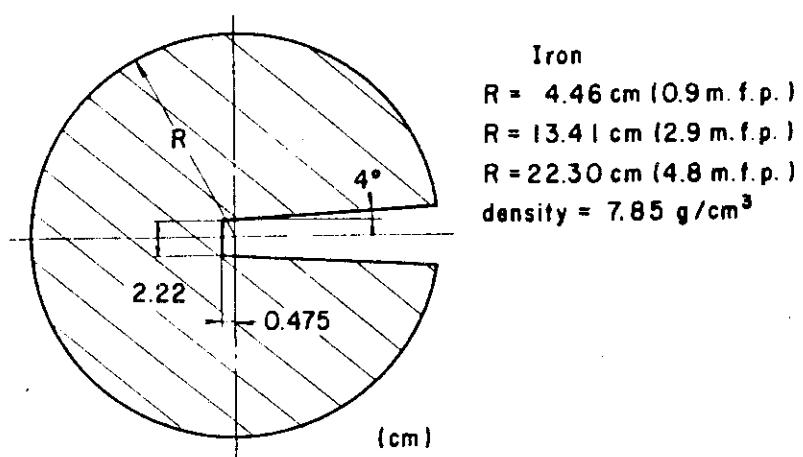


Fig. 2.26 Geometry of iron sphere (Ref. 8)

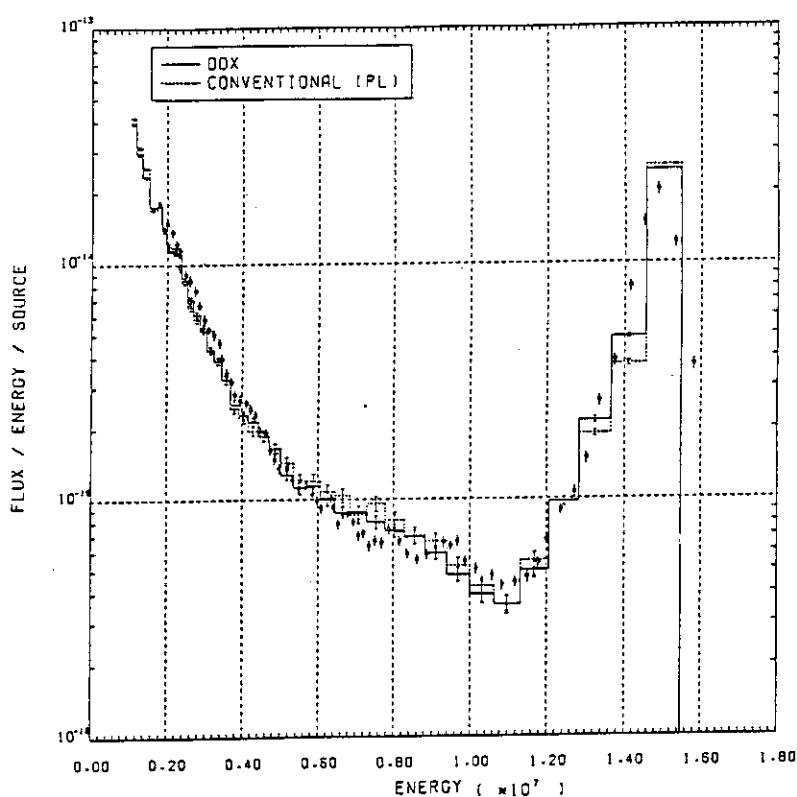


Fig. 2.27 Leakage spectra from iron at 30 deg. (2.9 m.f.p.)

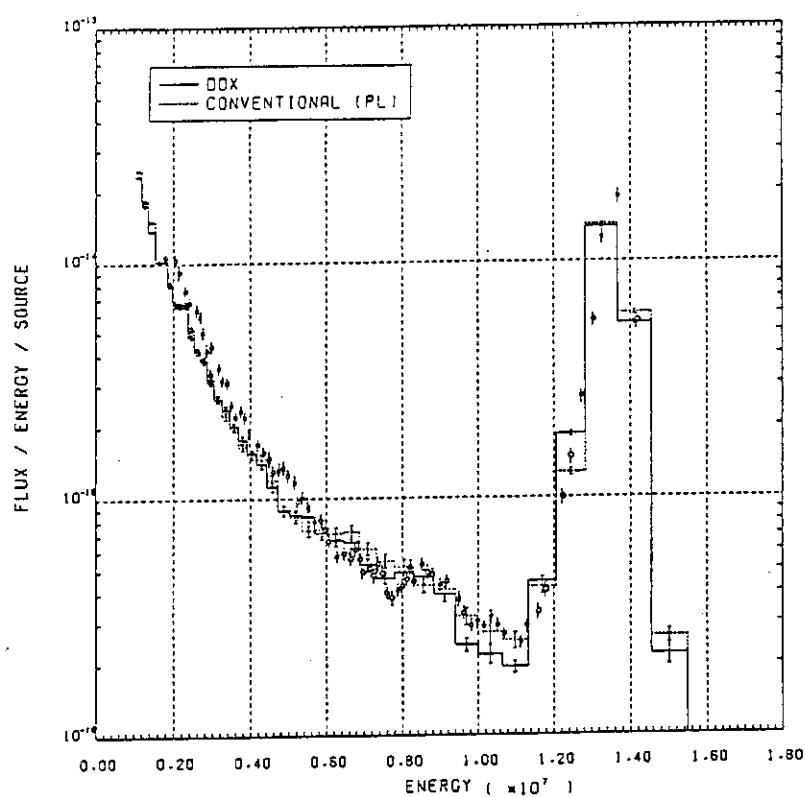


Fig. 2.28 Leakage spectra from iron at 120 deg. (2.9 m.f.p.)

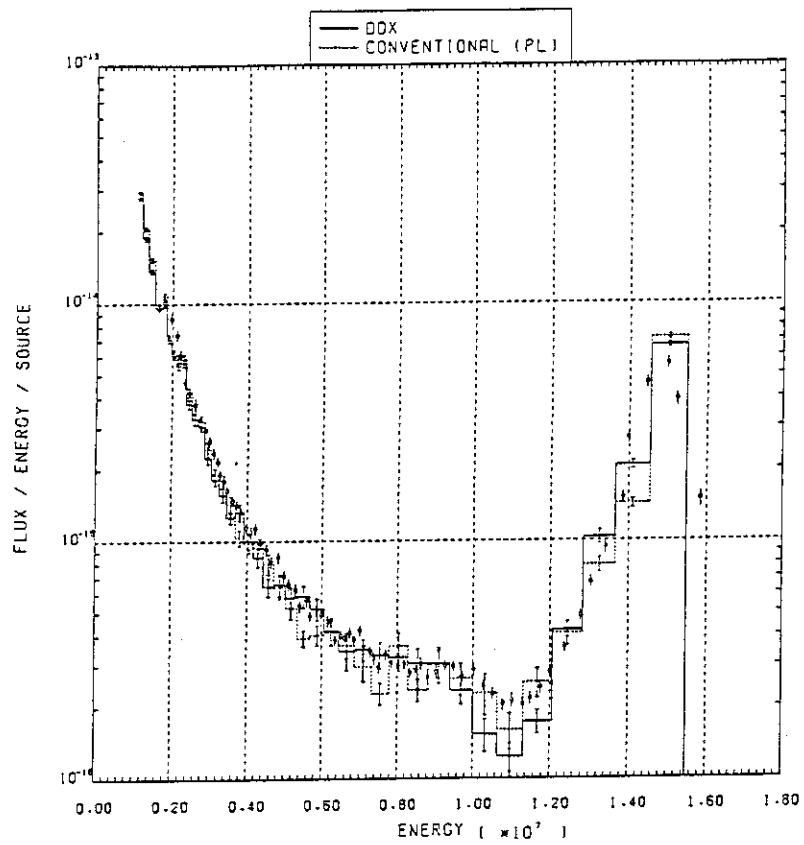


Fig. 2.29 Leakage spectra from iron at 30 deg. (4.8 m.f.p.)

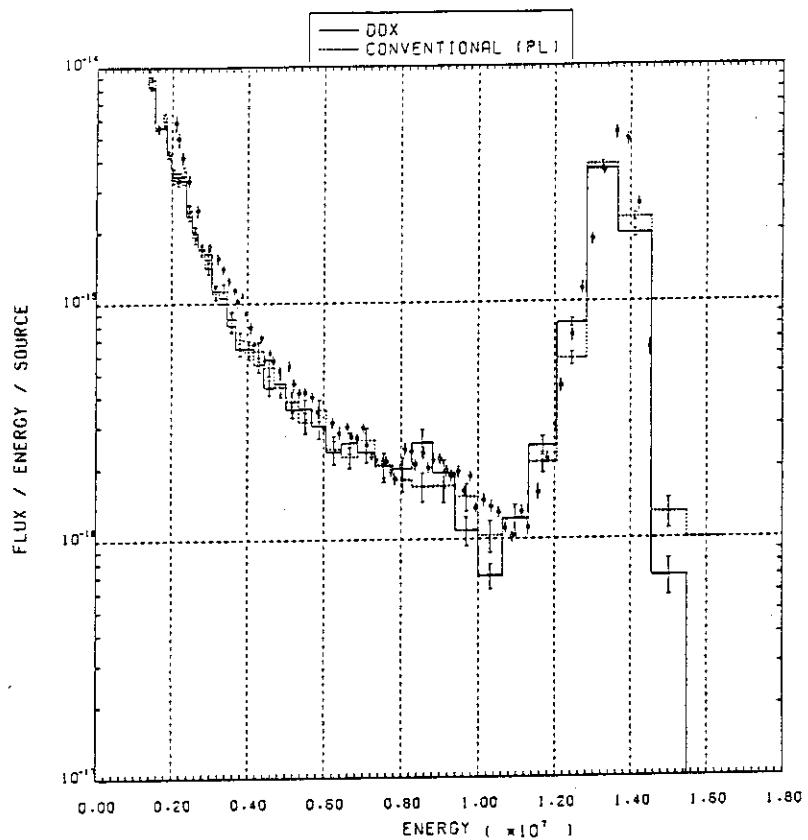
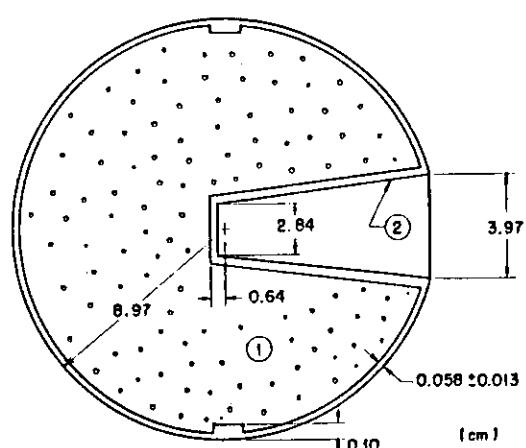


Fig. 2.30 Leakage spectra from iron at 120 deg. (4.8 m.f.p.)



Lead (1.4 m.f.p.)		
Zone	Density (g/cm^3)	Atomic %
(1)	11.34	Pb : 100.0
(2)	7.9	Fe : 68.6 Cr : 20.0 Ni : 8.4 Si : 2.0 Mn : 1.0

Fig. 2.31 Geometry of lead sphere (Ref. 9)

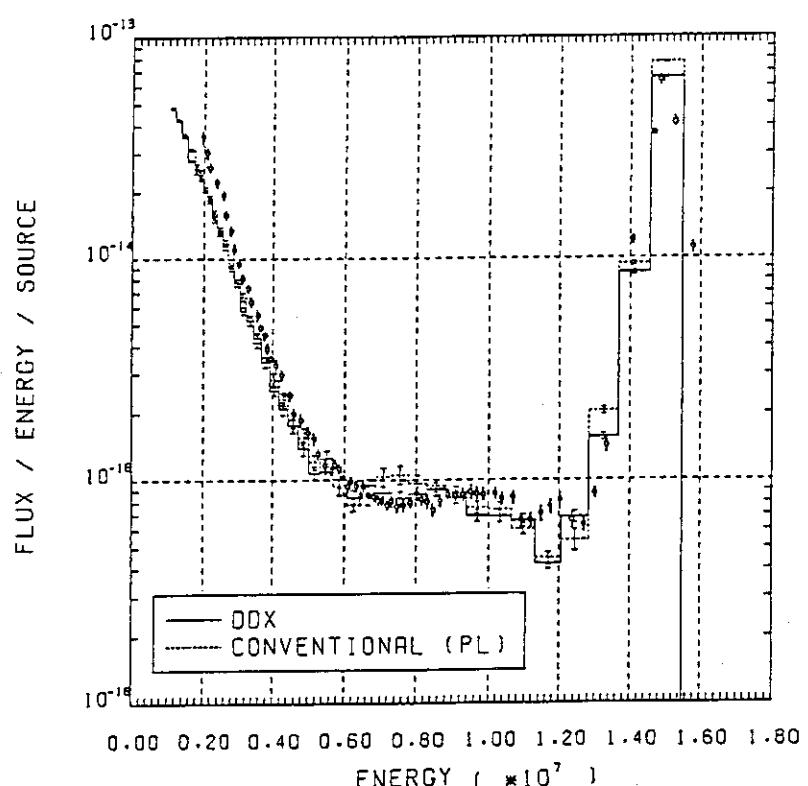


Fig. 2.32 Leakage spectra from lead at 30 deg. (1.4 m.f.p.)

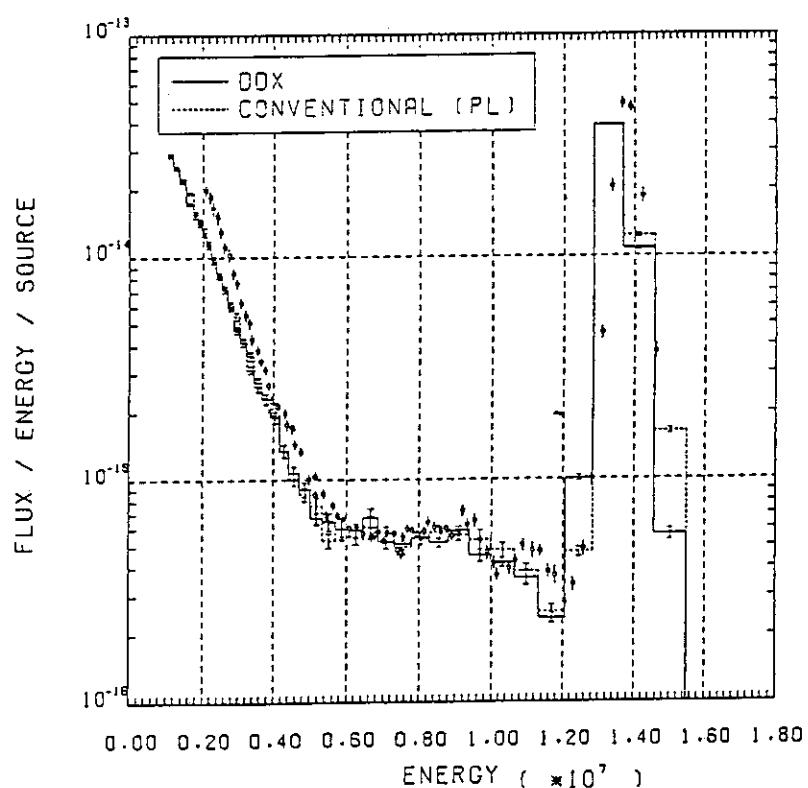
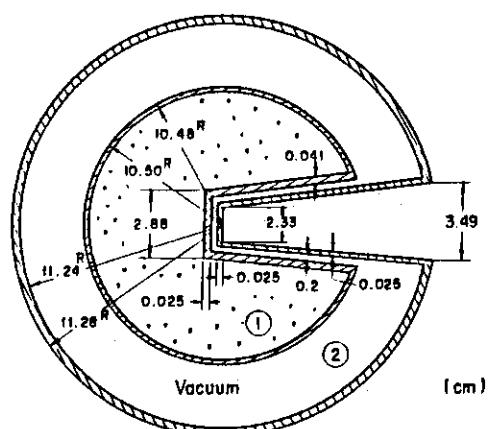


Fig. 2.33 Leakage spectra from lead at 120 deg. (1.4 m.f.p.)



Water (f.l.m.f.p.)		
Zone	Density (g/cm^3)	Atomic %
1	1.0	H : 66.7 O : 33.3
2	7.9	Fe : 68.6 Cr : 20.0 Ni : 8.4 Si : 2.0 Mn : 1.0

Fig. 2.34 Geometry of water sphere (Ref. 9)

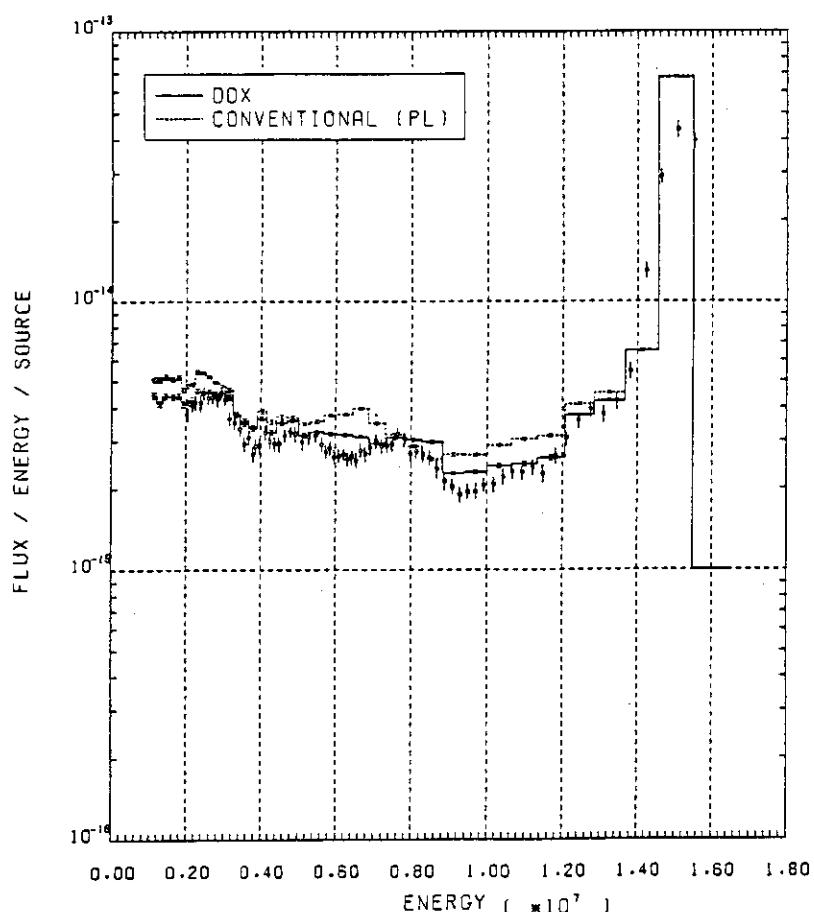


Fig. 2.35 Leakage spectra from water at 30 deg. (1.1 m.f.p.)

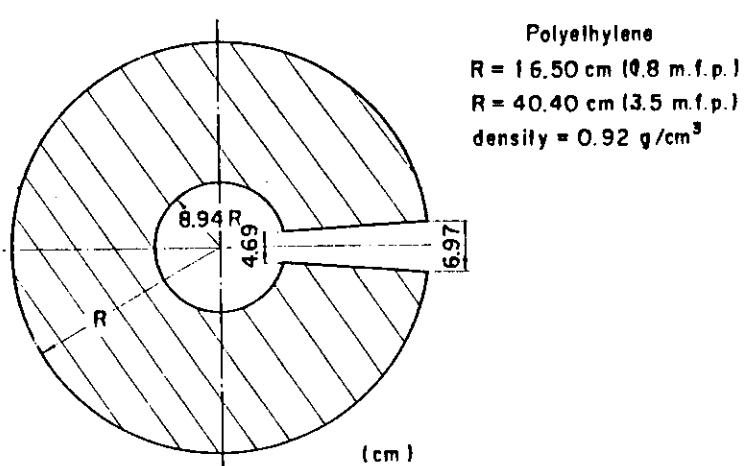


Fig. 2.36 Geometry of polyethylene sphere (Ref. 8)

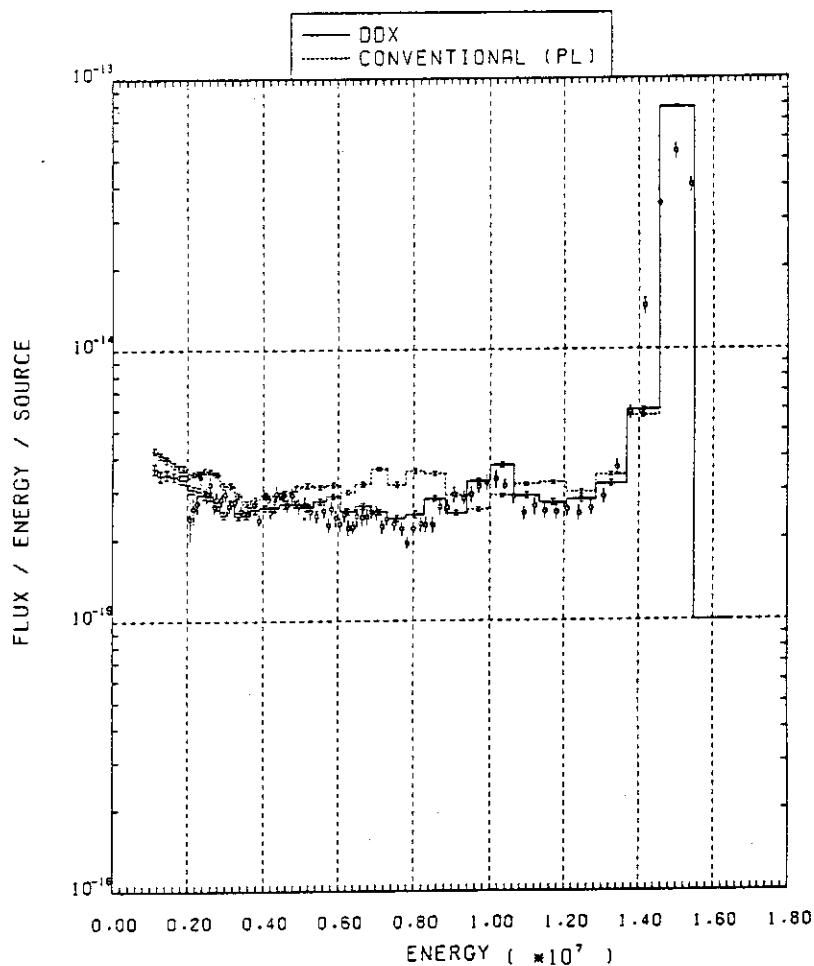


Fig. 2.37 Leakage spectra from polyethylene at 30 deg. (0.8 m.f.p.)

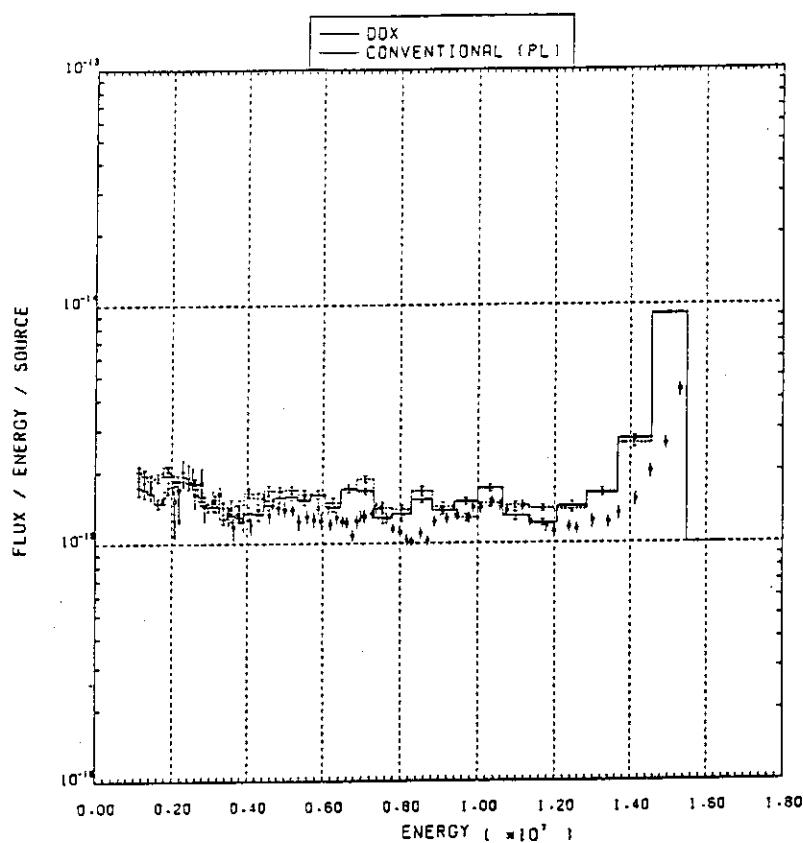


Fig. 2.38 Leakage spectra from polyethylene at 30 deg. (3.5 m.f.p.)

3. 酸化リチウム平板体系からの漏洩中性子スペクトル

核融合炉ブランケットにおけるトリチウム増殖材の有力な候補である酸化リチウムに関する核データ及び計算手法を評価するために、FNSにおいてスペクトル測定が行われた。¹⁶⁾これは、図3.1に示す様に14MeV中性子を発生するターゲットの前方20cmの位置に各種の厚さの酸化リチウム平板を置き、その外側中心点からの角度中性子スペクトルをTOF法で測ったものである。

3.1 計算方法

計算体系は、図3.2に示す様に、中心軸上に等方点中性子源を置き、その前方20cmの位置に半径31.4cm、厚さTの酸化リチウムサンプルを置く。サンプルの原子数密度は表3.1に示した。ここでは酸化リチウムのキャンニングに用いたSUSは均質に希釈した。また、サンプルを支持しているアルミニウム枠は無視している。角度中性子束は、外側表面の中心点Dにおける漏洩中性子を角度メッシュ $\mu = 1.0, 0.99, 0.95, 0.85, 0.65, 0.5, 0.3, 0$ の区間で点検出器によってカウントして求めた。

用いた二重微分型断面積セットはENDF/B4から作成した100群定数であり、中性子源は実験で求められたスペクトルをこの群構造にバンチングして作った。モンテカルロ計算で使った中性子のヒストリー数は、

厚さ5, 40cmの時	250万ヒストリー
厚さ20cmの時	100万ヒストリー

である。また二重微分型断面積の他にもルジャンドル展開法によるP₈断面積セットも比較のために用いた。更に、⁷Liの断面積評価のために特に4.63MeVの第2レベルを考慮して作った修正ファイルから作成した二重微分型断面積セットも用いている。

なお計算では源の中性子の角度分布を等方として行ったが、実際には非等方であり、また測定値は源中性子1個当たり規格化されているので、これに合わせるため計算値は1.15倍(=前方放出中性子強度/平均中性子強度)した。これによって絶対値で計算と実験が比較できる。またこの測定における中性子束の誤差は5~25%と見積られている。

3.2 測定値との比較

計算値と測定値との比較は、測定値を100群構造にバンチングすることによって同じ群構造で比較した。厚さ5.06cm, 20.24cm, 40.48cmに対しそれぞれ角度が0, 12.2, 24.9, 41.8, 66.8度に対する結果を図3.3~15に示す。厚さが5.06cmの時の角度0及び12.2度方向に対する測定及び計算も行ったが、この場合には、検出器にUncollidedな中性子が入り、このためその評価は解析的には困難である。また現在の所実験的にも求められていないので、直接比較す

る意味がない。ただ参考のために、この二つの比較を図 3.16 と 17 に示す。これらの図には、測定値、二重微分型断面積 (DDX) を用いた値及び P_8 断面積を用いた値が同時に示されている。

(1) 厚さ 5.06 cm の場合の比較

三つの角度に対する結果ではいづれも比較的良い一致が得られている。不一致が見られるのは 8 MeV 前後のピークの部分である。ここでは計算値が過少評価となっている。66.8 度の場合は、ピーク部においてやはり過少評価が見られる。 P_8 に比べ DDX を用いた方が全体に良い一致が得られている。8 MeV における不一致の原因の一つは、ENDF/B4 の ^7Li データに不十分な点があるためと予想されるので、特にこのファイルに収められていない 4.63 MeV の第 2 非弹性散乱レベルを追加した DDX を作って計算を行った。その結果は図 3.18 に示されているが、この結果 8 MeV 近傍の計算値は改善され、測定値にかなり良く合うようになった。ただ 1 MeV 近傍の低エネルギー部では過少評価となっているが、これは有意なものか統計誤差に起因するものかは明確でない。

(2) 厚さ 20.24 cm の場合の比較

五つの角度共に比較的一致が良い、8 MeV 近傍に関しては 5 cm の場合と同様な傾向が見られる。12 度～42 度において 1 MeV の酸素の共鳴による散乱によって生じる谷が、測定値では若干低エネルギー側にずれている。3 MeV 前後で計算が若干過大評価となっている。また 67 度の測定値は 5 MeV 近傍では誤差が大きく計算値との一致度を議論するのは無理であろう。

(3) 厚さ 40.48 cm の場合の比較

この厚さの場合、10 MeV 以下では測定誤差が大きくなる。このため特に 41 度、67 度の結果はスペクトルの構造を問題にすることができるない。特徴の一つは、0 度方向つまり衝突なしで抜けてくる中性子の量が過少評価となっている点である。これは全断面積が過大評価となっている可能性を示している。12 度になるとこの様なシステムティックな差は余り見られない。ただし散乱角が大きくなると、弹性散乱ピークの位置が少しづれて来る。これは恐らく測定上の問題と考えられる。

(4) エネルギー積分した角度中性子束の比較

それぞれの厚さの結果に対し、全エネルギー ($> 0.5 \text{ MeV}$)、 $E > 10 \text{ MeV}$ 、 $10 > E > 5 \text{ MeV}$ 、 $5 > E > 0.5 \text{ MeV}$ の各エネルギー区間で積分し、比較を行った。厚さ 5 cm の結果を図 3.19 に示す。低エネルギー部を除き計算の過大評価となっているが、ほぼ実験誤差内に入る、高エネルギーは散乱角度が大きくなると共に C/E 値は減少する。次に厚さ 20.24 cm に対する結果を図 3.20 に示す。この場合 42 度のスペクトル積分値は過大評価となっているが、他は実験誤差内に入っている。厚さ 40.48 cm の結果は図 3.21 に示したが、この場合は角度が大きくなると共に C/E は大きくなる傾向がはっきりと見られる。但し、角度が大きい時は、測定及び計算値共に誤差が大きくなるので、明確な結論は出せない。しかし 12 度の場合計算が過少評価となっていることは有意な差と考えられる。これは同様に 20.24 cm の場合にも云える。即ち少角散乱の透過中性子は過少評価になっている。

以上の結果から全体としては次の評価が得られた。

- 各厚さ及び角度に対し、スペクトルの形は測定と計算は比較的良く合うが、8 MeV 近傍では ENDF/B4 を用いると過少評価となる。

2. エネルギー積分した値は、ほとんどの場合±20%以内で一致する。サンプルが厚くなると、少角散乱方向は過少評価となる。これを更に明確とするためには0度方向のデータが比較出来る様に検討する必要がある。
3. 断面積セットとしてはDDXを用いた方が P_g 計算より一致度は良い。
4. 全ての角度に対して±10%以内の一致を得るために核データの改訂が望まれる。またそのためにも、JENDL-3PR1を用いた解析も行なうことが望ましい。
5. スペクトル測定は、微分量が得られるベンチマーク実験として貴重である。出来れば測定エネルギー範囲をもっと拡げられれば更に有用なデータが得られるだろう。

Table 3.1 Atomic number densities of lithium-oxide assembly used in the calculations (10^{24} atoms/cm³)

Nuclide	Atomic density
⁶ Li	4.274 - 3 ^a
⁷ Li	5.343 - 2
O	2.885 - 2
Fe	1.079 - 3
Ni	1.309 - 4
Cr	2.993 - 4
Mn	2.393 - 5

a read as 4.274×10^{-3}

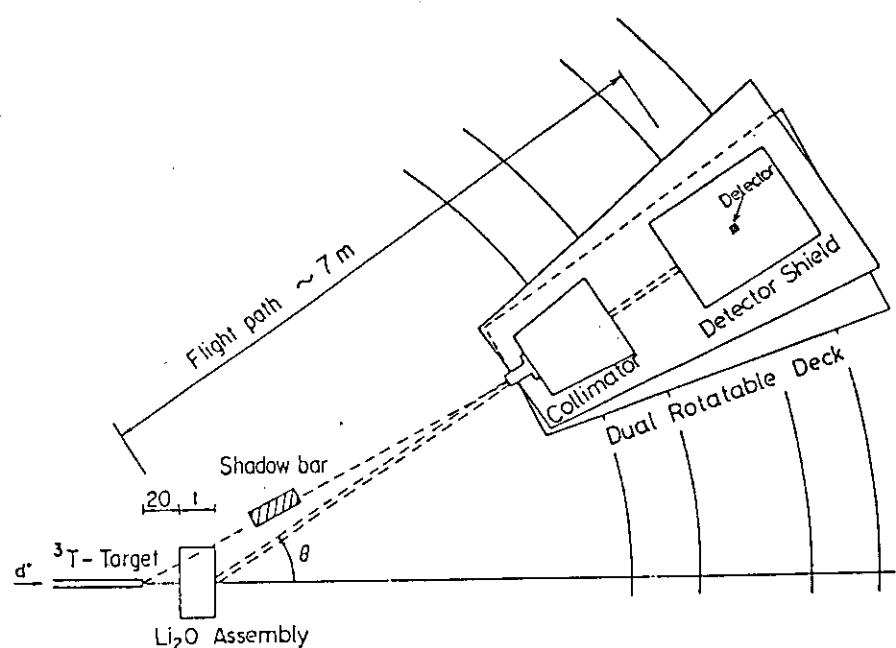


Fig. 3.1 Experimental layout for lithium-oxide slab (Ref. 16)

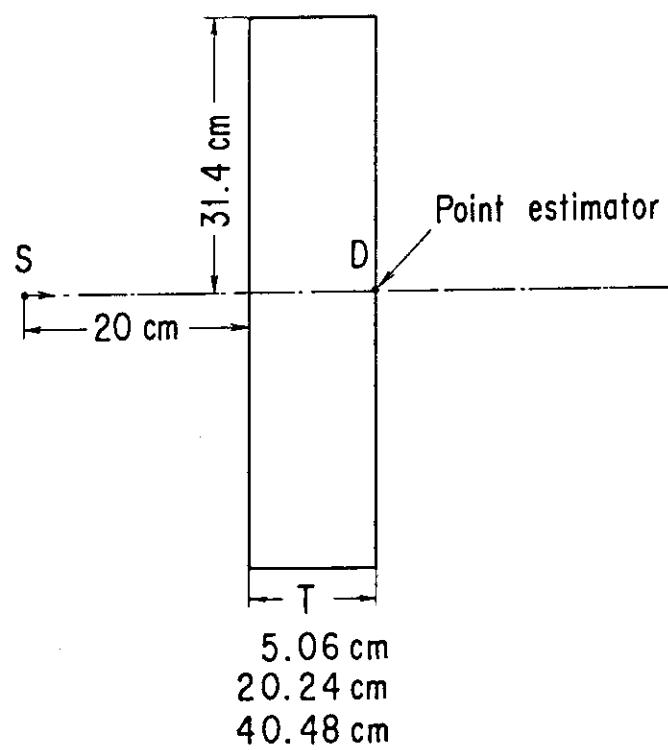


Fig. 3.2 Calculation model of angular spectrum from lithium-oxide slab

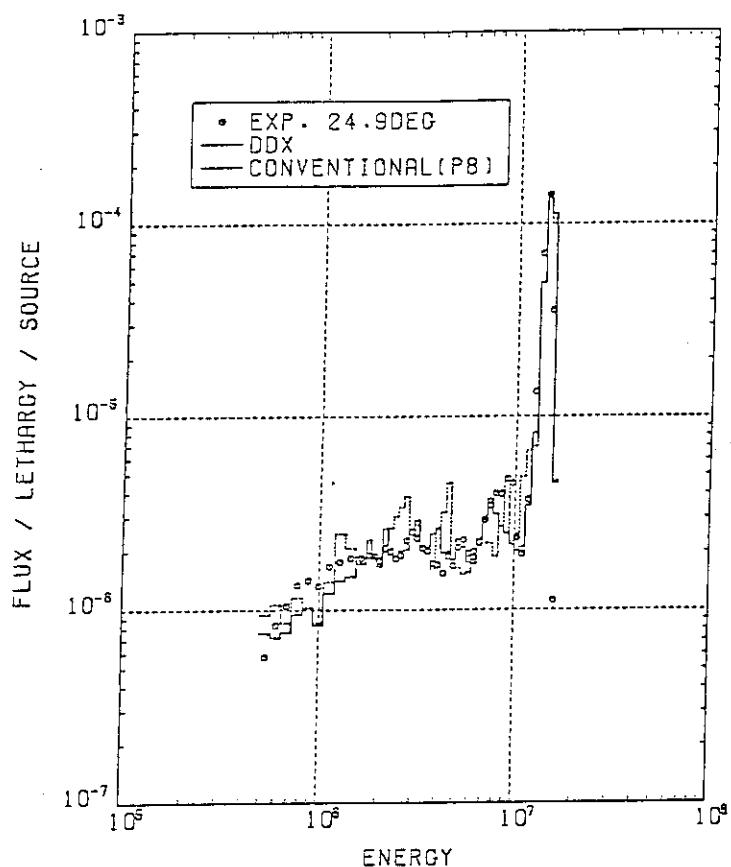


Fig. 3.3 Comparison of angular spectra at 24.9 deg. from 5.06 cm thick slab

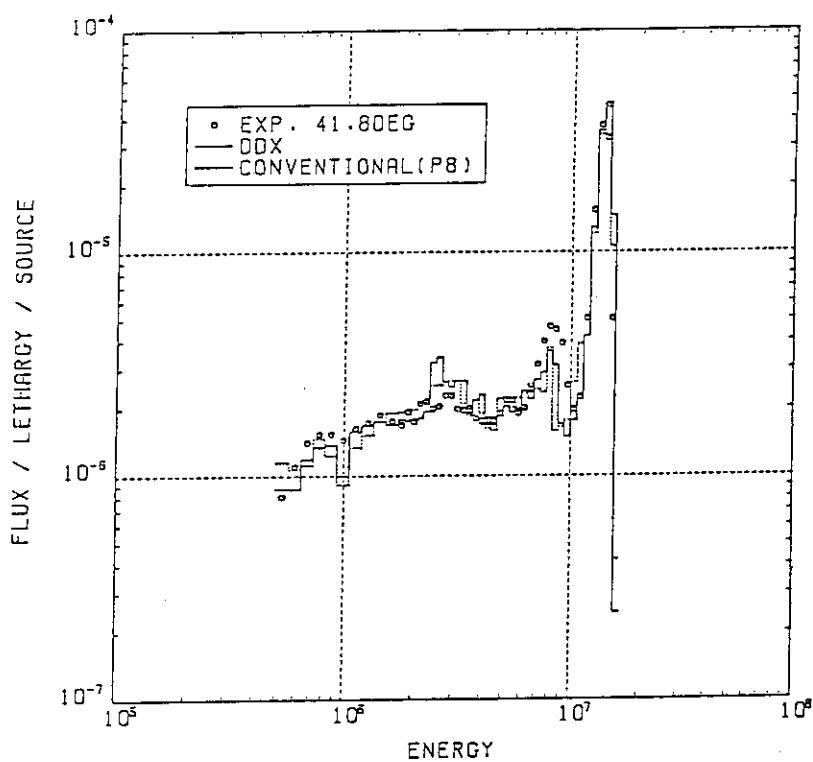


Fig. 3.4 Comparison of angular spectra at 41.8 deg. from 5.06 cm thick slab

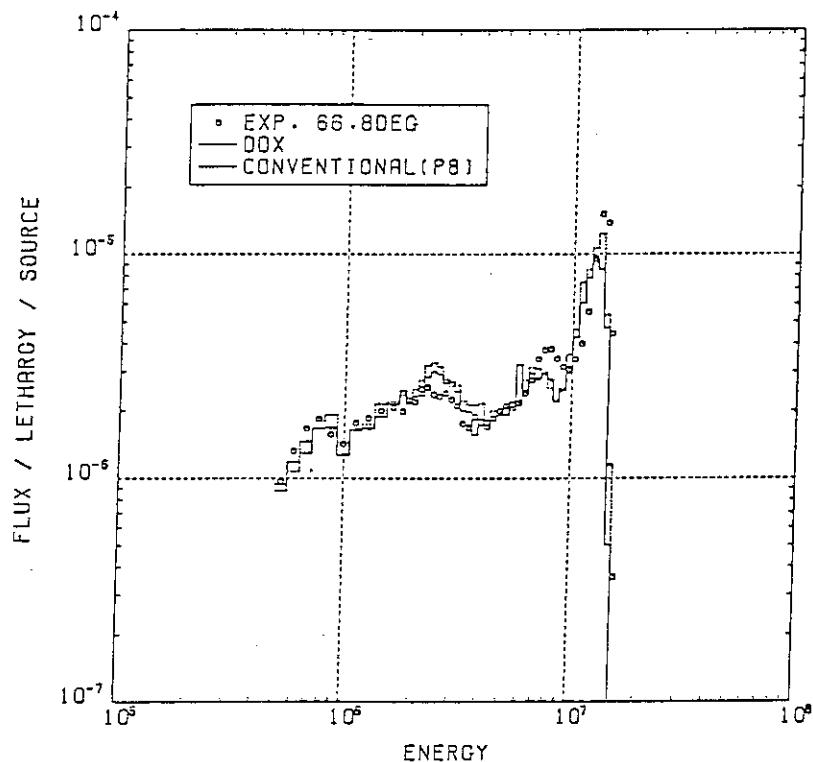


Fig. 3.5 Comparison of angular spectra at 66.8 deg. from 5.06 cm thick slab

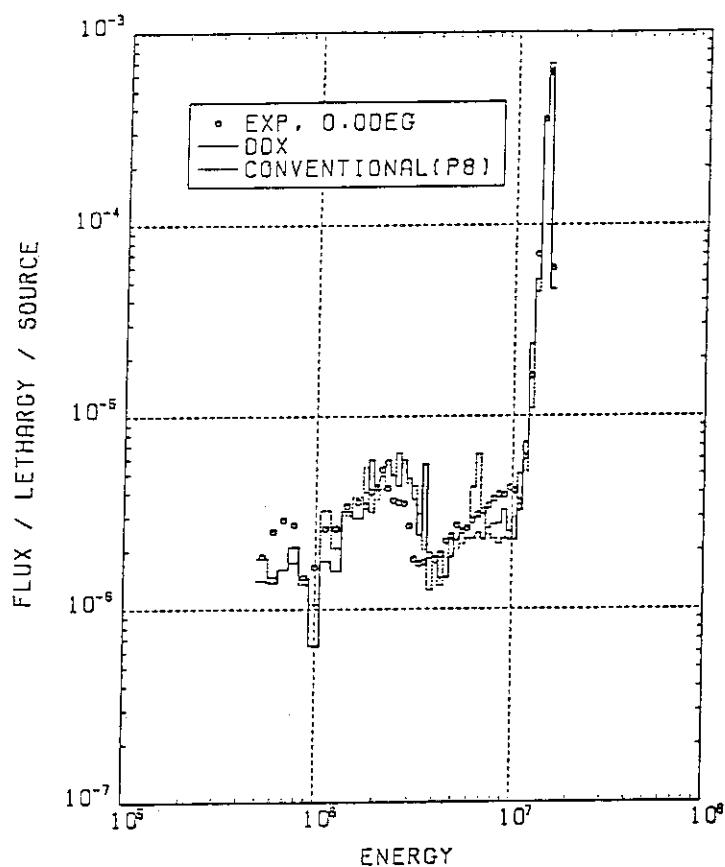


Fig. 3.6 Comparison of angular spectra at 0. deg. from 20.24 cm thick slab

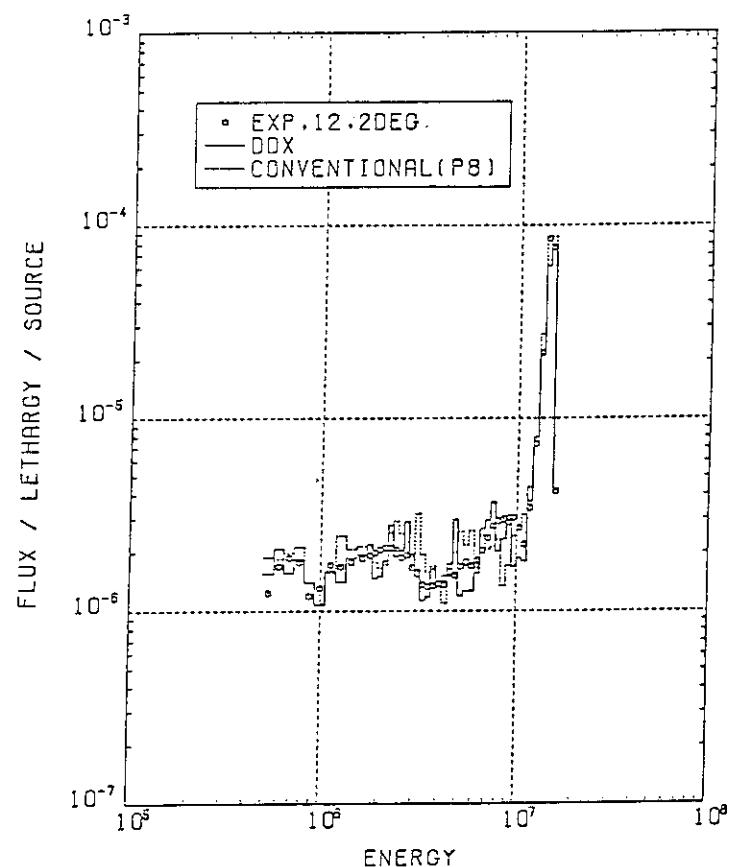


Fig. 3.7 Comparison of angular spectra at 12.2 deg. from 20.24 cm thick slab

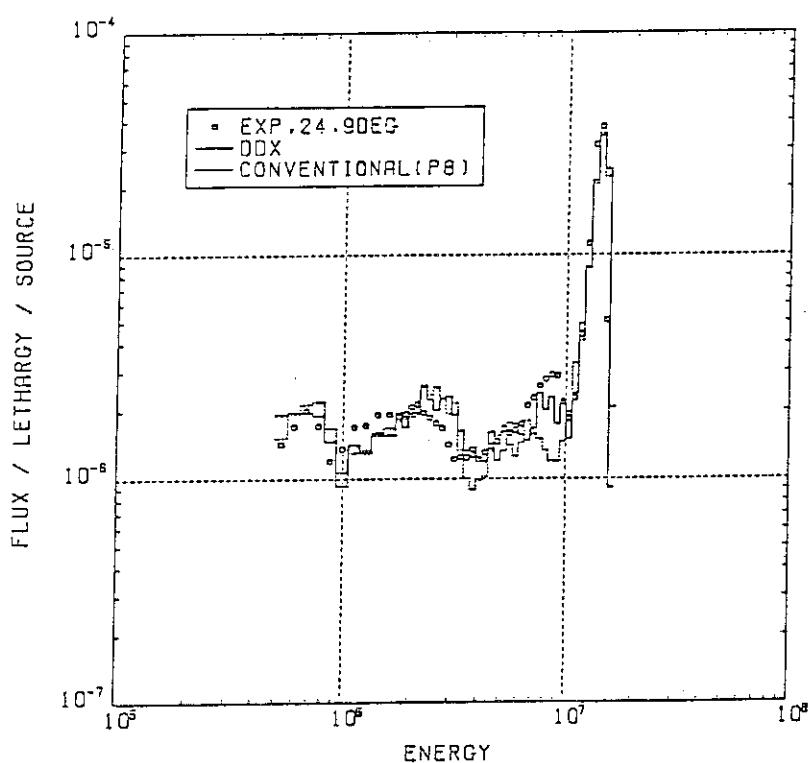


Fig. 3.8 Comparison of angular spectra at 24.9 deg. from 20.24 cm thick slab

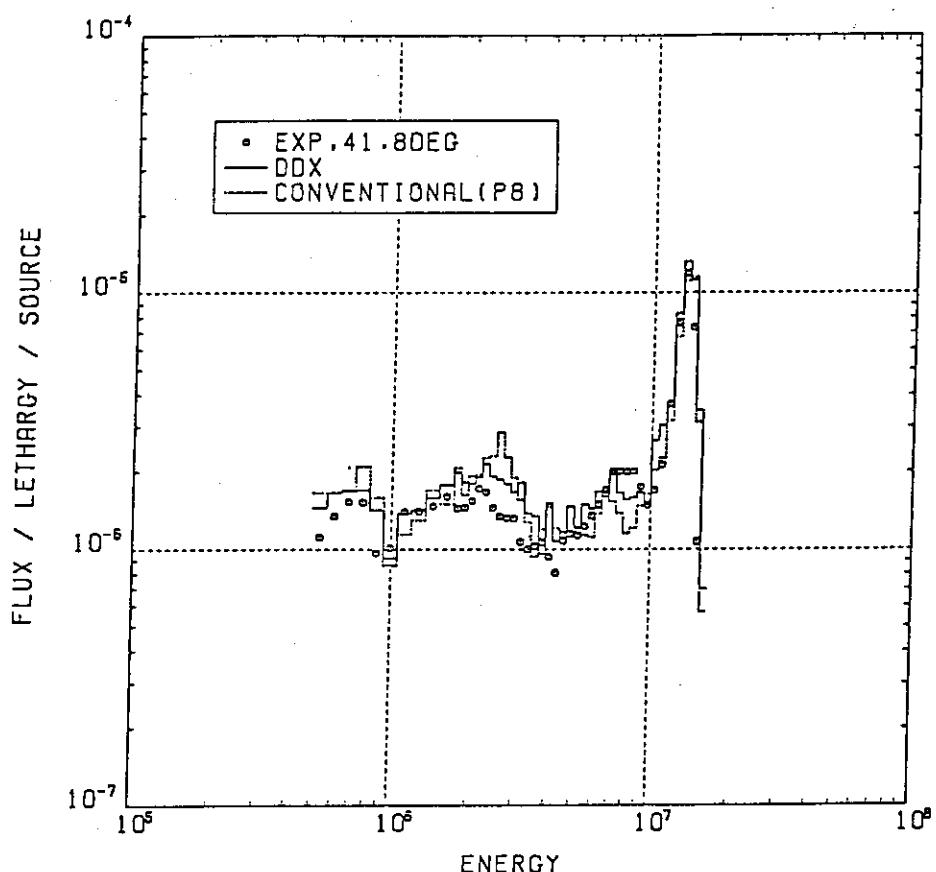


Fig. 3.9 Comparison of angular spectra at 41.8 deg. from 20.24 cm thick slab

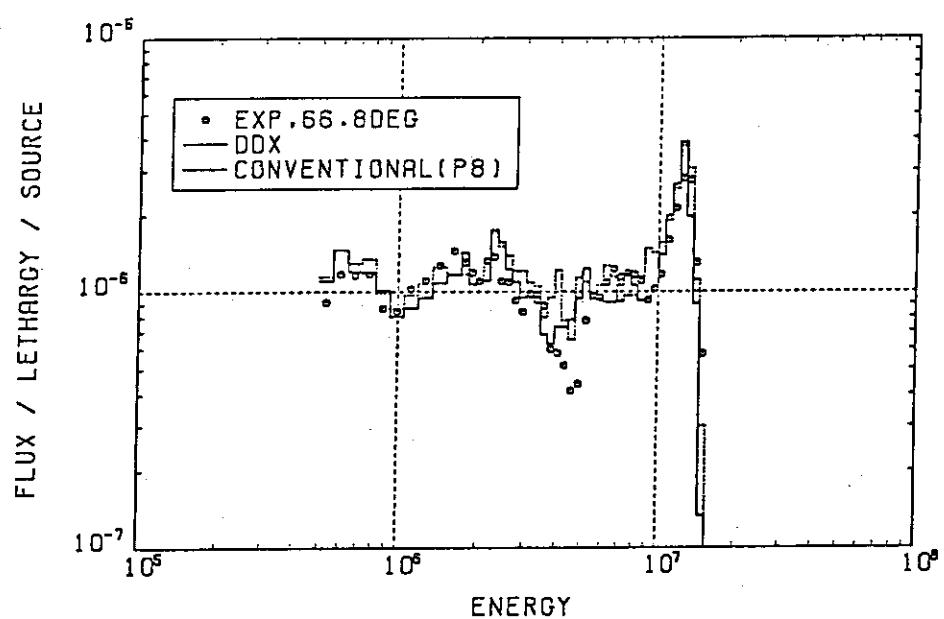


Fig. 3.10 Comparison of angular spectra at 66.8 deg. from 20.24 cm thick slab

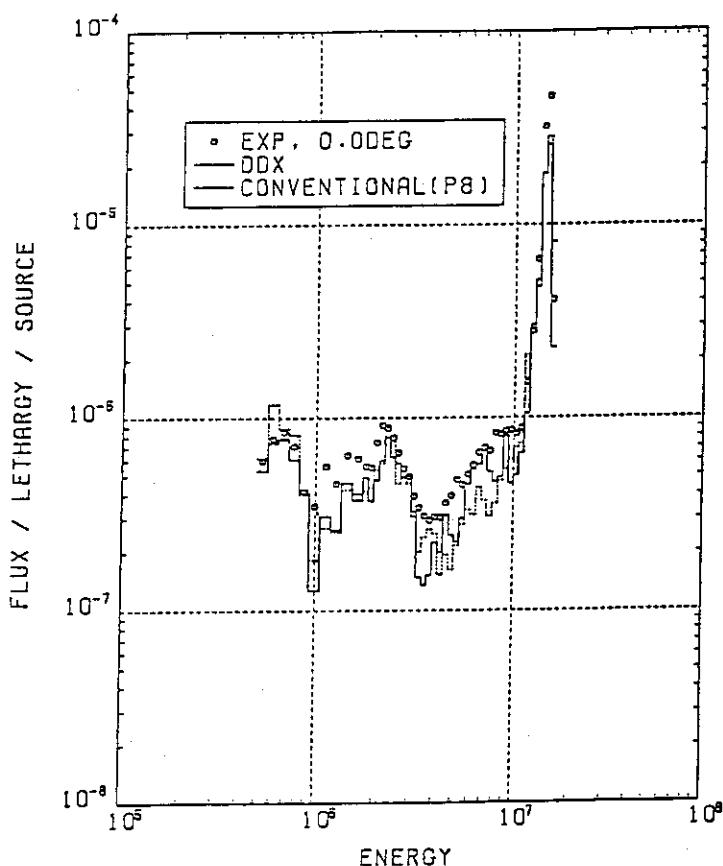


Fig. 3.11 Comparison of angular spectra at 0. deg. from 40.48 cm thick slab

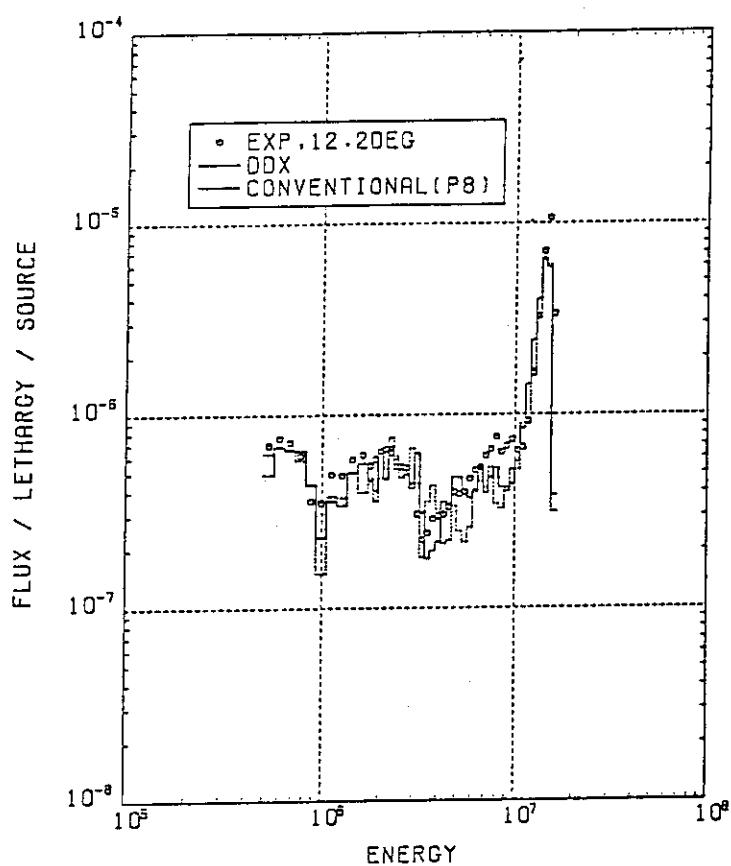


Fig. 3.12 Comparison of angular spectra at 12.2 deg. from 40.48 cm thick slab

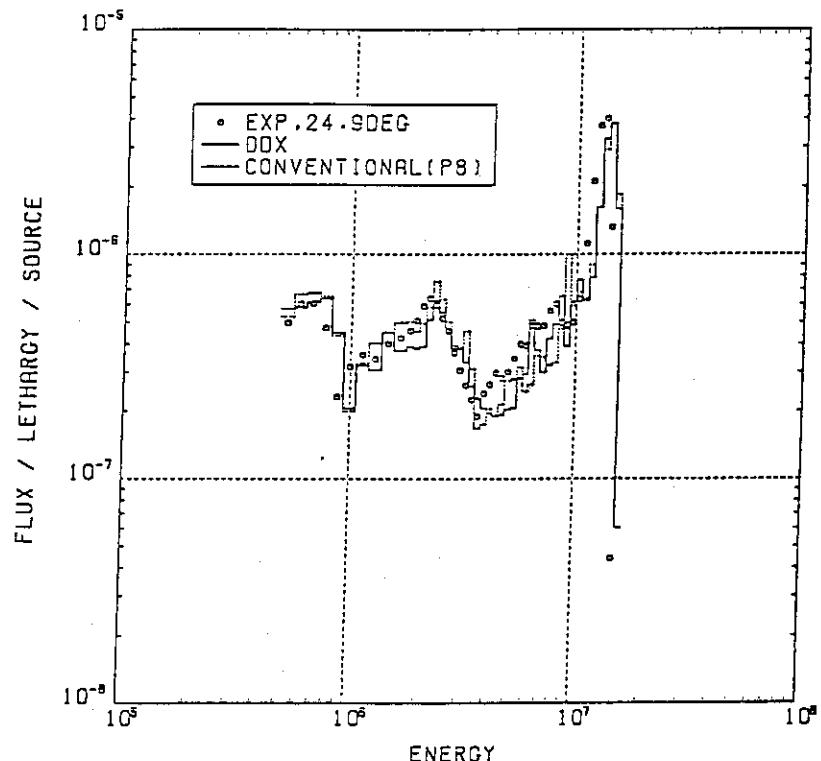


Fig. 3.13 Comparison of angular spectra at 24.9 deg. from 40.48 cm thick slab

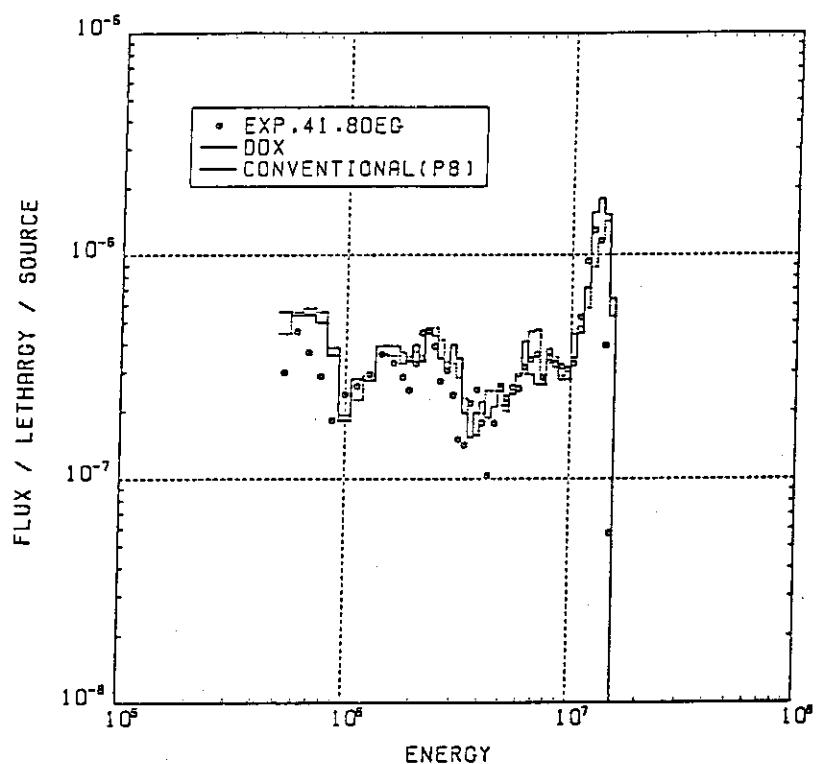


Fig. 3.14 Comparison of angular spectra at 41.8 deg. from 40.48 cm thick slab

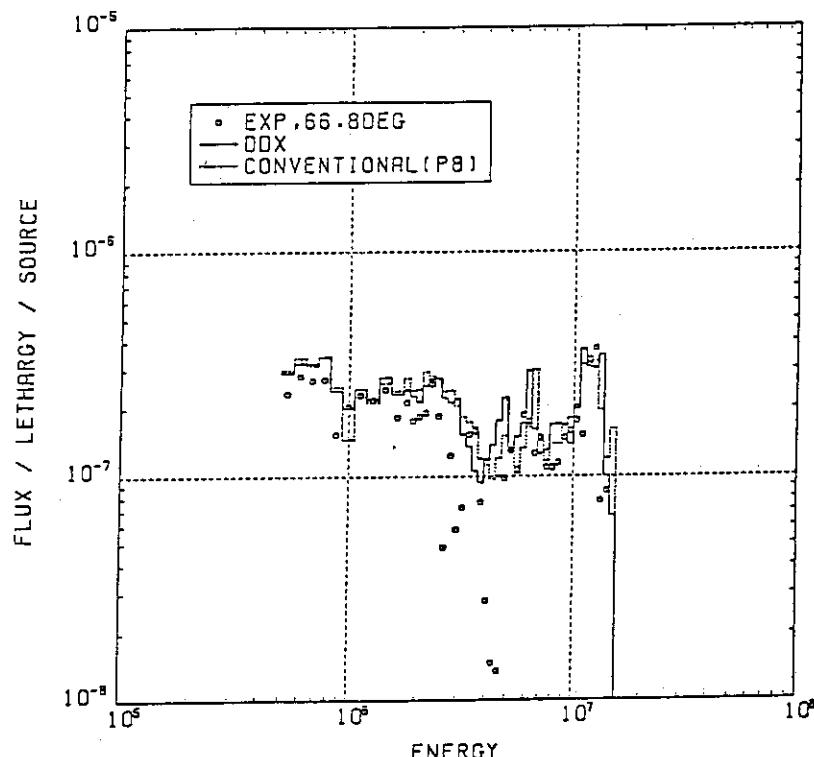


Fig. 3.15 Comparison of angular spectra at 66.8 deg. from 40.48 cm thick slab

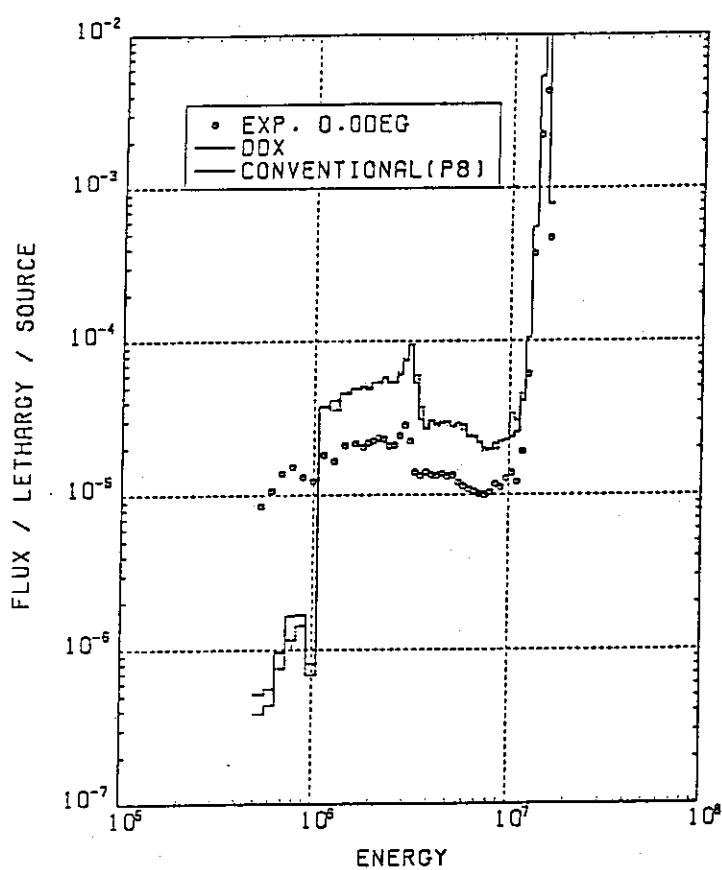


Fig. 3.16 Comparison of angular spectra at 0. deg. from 5.06 cm thick slab

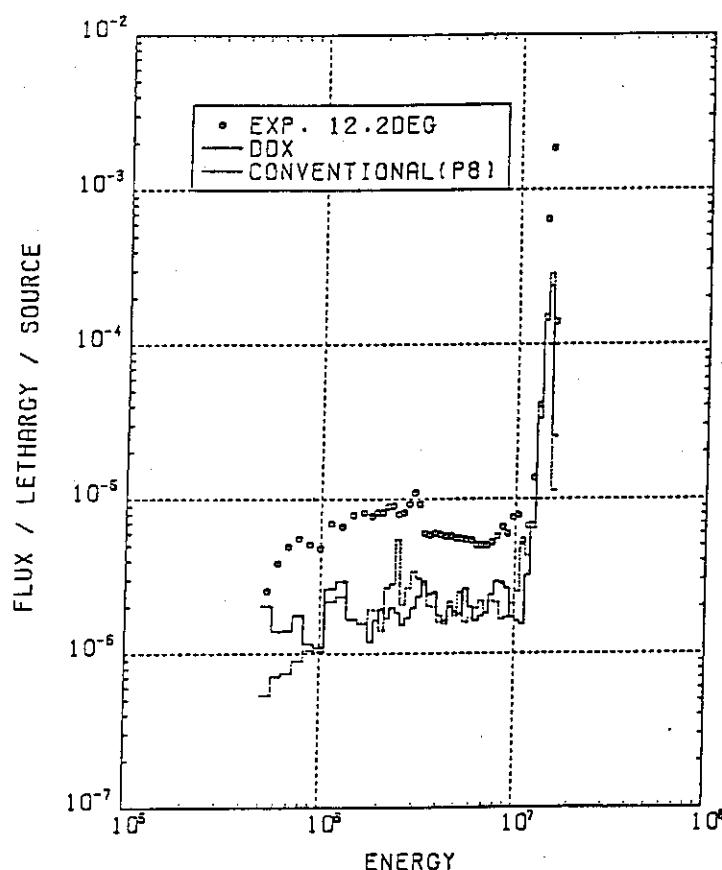


Fig. 3.17 Comparison of angular spectra at 12.2 deg. from 5.06 cm thick slab

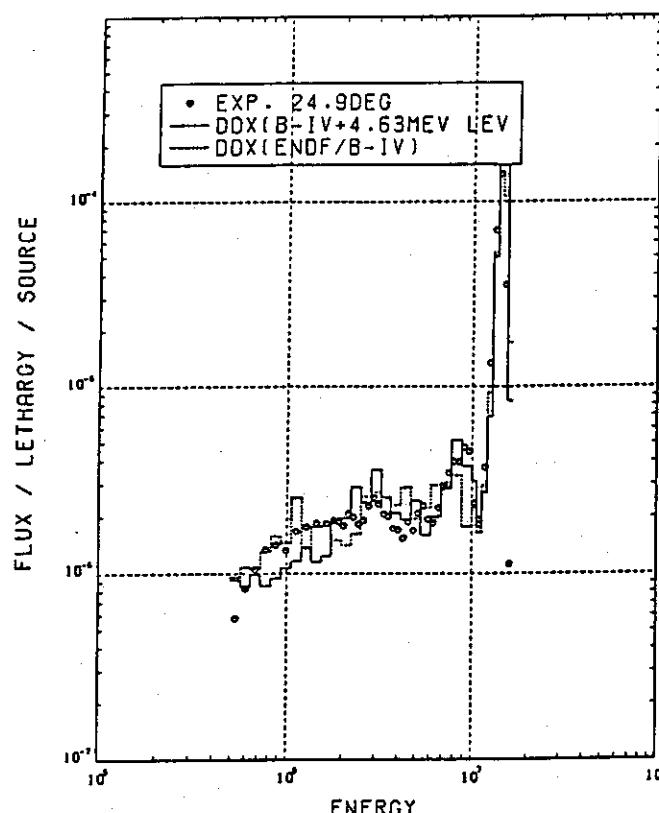


Fig. 3.18 Comparison of angular spectra calculated by ENDF/B4 and modified one at 24.9 deg.

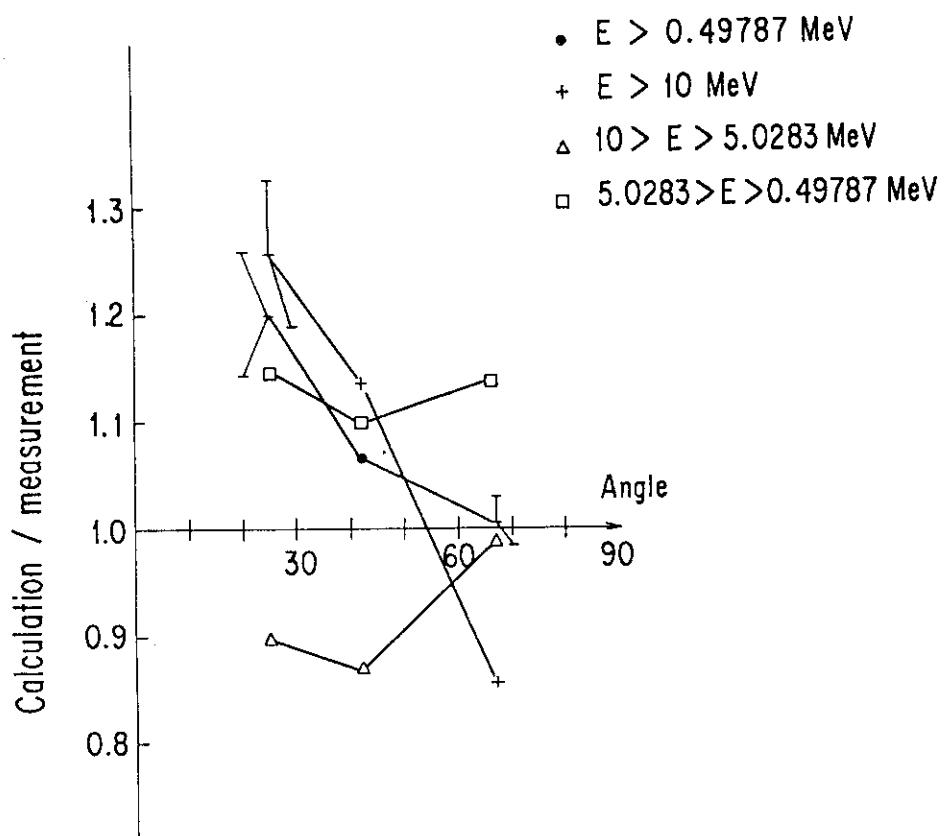


Fig. 3.19 C/E of integrated spectra for 5.06 cm thick slab

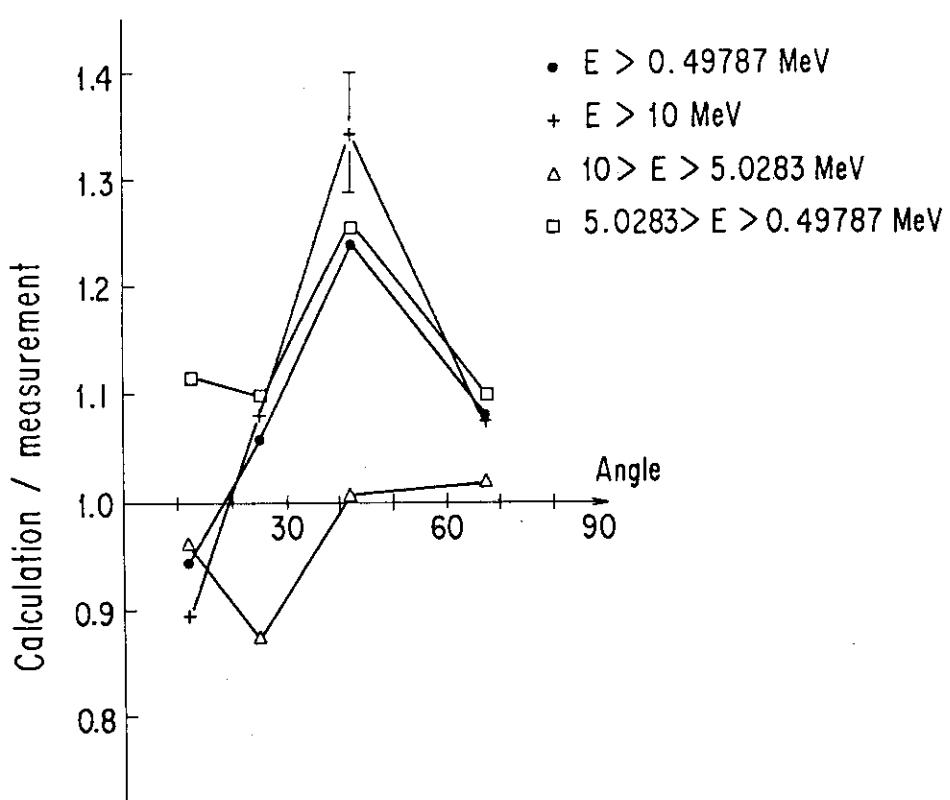


Fig. 3.20 C/E of integrated spectra for 20.24 cm thick slab

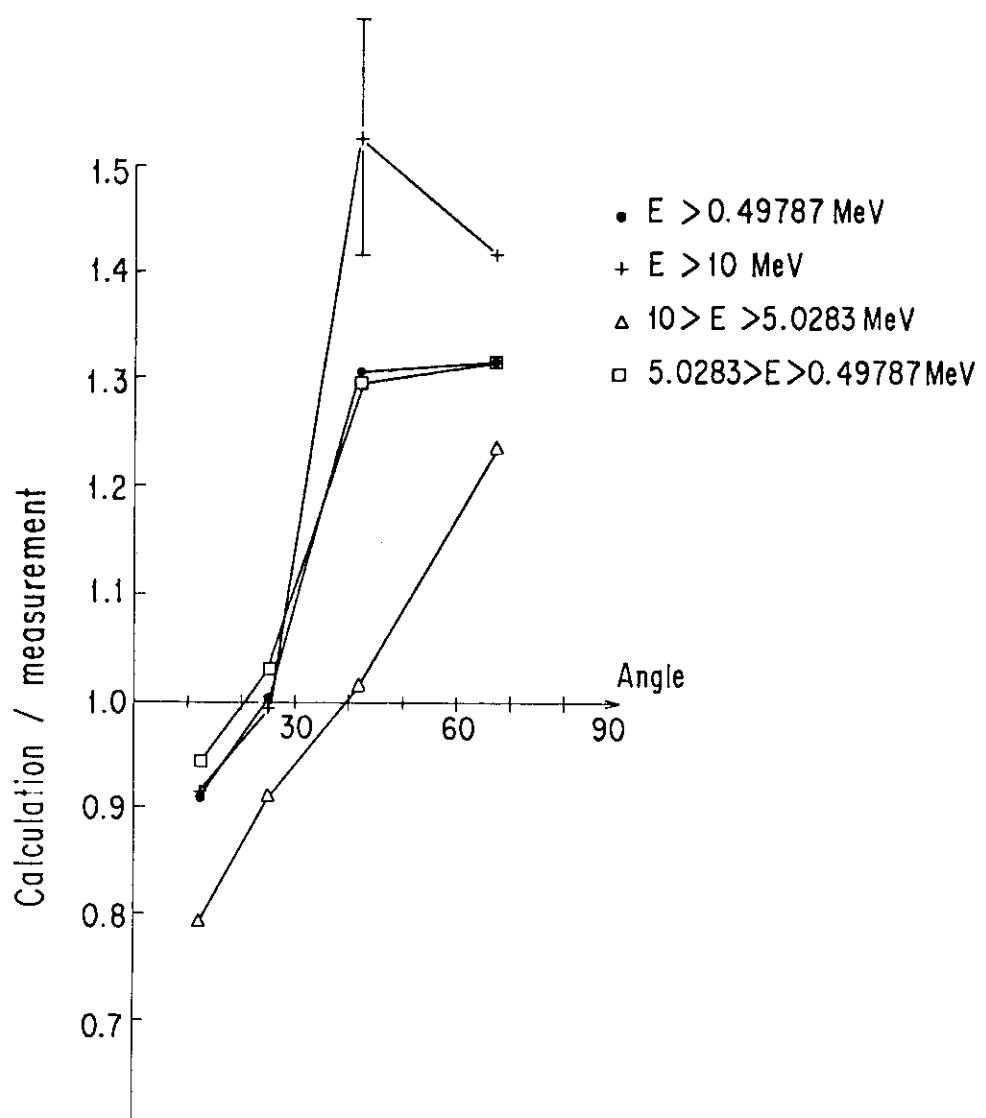


Fig. 3.21 C/E of integrated spectra for 40.48 cm thick slab

4. 連続エネルギーモンテカルロコードとの比較

これまでの章では、実験値及び既存の計算法との比較によって、MORSE-DDの妥当性を検証して来たが、ここでは、より正確な方法との比較を行う。基準計算法としては、ANLで開発された連続エネルギーモンテカルロコードVIM⁷⁾を用い、核データとしては、共にENDF/B 4を用いた。この結果、断面積に伴う不確さを除くことが出来、従って厳密に計算手法の妥当性を検証することが出来る。VIMコードは、全ての断面積を（共鳴部分も含めて）充分に詳細なエネルギー点毎に与えられた値を用いると共に、減速エネルギーや散乱後の角度分布をカイネマティックスを用いて厳密に計算するので、輸送計算に伴う近似が非常に少ない。従ってMORSE-DDで用いている多群近似等に伴う誤差が評価できる。

しかし、現在使用されているVIMコードにも若干問題がある。それは、このコードが本来核分裂炉の解析のために開発されたものであるため、10 MeV以上の断面積の取扱いが不充分な点である。

まず比較の第一ステップとして、一回程度の散乱後の角度中性子束スペクトルを比較することによって、二重微分断面積の検討を行った。体系は図4.1に示す様な直径0.2cm、長さ10cm（約1 mean free path）の円柱を考え、14 MeVの中性子が前面の中心に垂直に入射する場合を考える。散乱された中性子を半径1mの仮想的な球面上で1~7の角度領域について評価する。媒質として天然リチウム、酸素、鉄を考えた。天然リチウムに対するVIMとMORSE-DDの結果を角度3について比較したのが図4.2である。これより明らかに、3 MeV以下で大きな差が見られる。この原因は、先に述べたように、VIMライブラリーに問題があるからで、この場合、(n, 2n)反応断面積が不適当である。即ち⁷Liは、(n, 2n)と共に(n, 2n, α)反応が存在し、かつ14 MeVでは、前者が0.023バーン、後者が0.038バーン（全断面積は1.43バーン）とむしろ後者が大きいにも拘わらずVIMライブラリーは、前者のみ扱っているためである。そこで、(n, 2n, α)反応断面積をVIMライブラリーに追加して再評価を行った。その結果図4.3に示すように両者の角度スペクトルは分散の範囲で良い一致を示す事が明らかとなった。また図4.4は角度6に対するスペクトルを比較したものである。即ち後方散乱によるスペクトルであり、カイネマティックスによりピークエネルギーが低くなっていることが良く分る。次に酸素に対する結果を図4.5、鉄に対する結果を図4.6に示す。この場合も両者は良い一致を示すことが分かるが、酸素の場合には数百keV以下では、MORSE-DDの方が若干硬いスペクトルを示している。この様に、散乱後の角度中性子スペクトルは正しく計算できる事が明らかとなった。なおVIMライブラリーについては、他の核種についても修正を行った。

更に同様な体系でのベリリウムに対する角度中性子スペクトルの比較を行った。ベリリウムに関しては特に(n, 2n)反応が重要であるが、VIMコードでのこの取扱いは不正確である。そこで連続エネルギーモンテカルロコードとしてはMCNP¹⁷⁾を用いた。MCNPにはENDF/B 4のデータが入っていないため、そこに採用されているLASLの評価データ¹⁸⁾を用いて計算を行った。図4.7は0°<θ<20°方向のスペクトルを示すがMORSE-DDではB/4とJENDL-3 PR1の両

方を用いている。同じく $75^\circ < \theta < 105^\circ$ のスペクトルを図 4.8 に示す。明らかに三つの核データの間にはかなりの差が見られる。特に B/4 には大きなピークが表われる。また MCNP の解は低エネルギーが小さくなっている。全角度について積分した結果は図 4.9 に示す。7 MeV 近傍では JENDL が低くこれは先に図 2.15 で見た差と対応する。それ以外は JENDL と LASL の結果は大変良く似ている事が分かる。

次に積分量に関する評価を行うため以下の体系について比較を行った。

4.1 酸化リチウム円筒体系

核融合炉ブランケットの増殖材の候補である酸化リチウム (Li_2O) 体系について評価を行った。形状は図 4.10 に示す様な直径 70 cm 厚さ 80 cm の円筒平板形で、体系前面 20 cm の位置で点中性子を軸方向に発生させ、体形内の各領域について ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$, ${}^7\text{Li}(n, n', \alpha)$, ${}^{238}\text{U}(n, f)$ の反応率を求め比較した。体系内は図に示すように、厚さ方向に 10 cm 每に切り、径方向は $r = 10\text{cm}, 35\text{cm}$ の二つに切り計 16 領域に分割して、各領域毎の積分値を求めた。表 4.1 は、その結果を MORSE-DD/VIM で示したものである。左の欄はその領域の中心の厚さ方向の座標を示す。これより ${}^7\text{Li}$, ${}^{238}\text{U}$ に対しては、全ての領域で、両者は統計誤差内で一致することが分かる。 ${}^6\text{Li}$ に関しては、MORSE-DD の方が最大 5 % 大きい値を示しており、この原因是今後の検討課題となる。しかし、体系全体で積分した値は、更に一致度が良くなり ${}^6\text{Li} + {}^7\text{Li}$ の和では、1 % 以下で両者が一致することが分かる。この様に積分されたトリチウム生成率に関しては、MORSE-DD は、連続モンテカルロ法と同程度の予測精度を有することが明らかとなつた。次に同じモデルで中性子源側の表面 3 cm の部分を第一壁を模擬して SUS で置き替えた体系に対しても同様の比較を行った。その結果を同じく MORSE-DD/VIM の比で表 4.2 に示す。この場合も、第一壁がない場合と同様に ${}^7\text{Li}$ と ${}^{238}\text{U}$ の反応率は、統計誤差内で両コードの結果は一致する。 ${}^6\text{Li}$ の場合には、外側領域での差が拡がる傾向にあり、SUS による減速が MORSE-DD の方が大きいことを示唆している。また全トリチウム生成率は、 ${}^6\text{Li}$ による寄与が増えるため不一致度が 1 % 増加することが分かる。しかしこの場合でも全体系積分量としては、両コードの差は 2 % 以内に収っている。次に体系中のスペクトルを比較した結果を図 4.11 に示す。これは、 $r = 10\text{cm}$ 内で $z = 30 \sim 40\text{cm}$ における積分スペクトルである。数 keV 以上では非常に良く合っているが、それ以下で MORSE-DD の方が少し軟らかくなり、これが ${}^6\text{Li}$ における反応率の差を生じている。

4.2 黒鉛反射体付酸化リチウム球体系及び金属リチウム球体系

次に、黒鉛反射体を付けた酸化リチウム体系中の反応率分布の結果について述べる。この体系は、実際に FNS で行われた実験¹⁹⁾を模擬したものであり、その計算モデルを図 4.12 に示す。中心部は中性子を発生するターゲットの部分に対応し、ここはボイド領域として扱う。厚さ 20 cm 弱の酸化リチウムの外に厚さ約 25 cm のグラファイトが置かれている。その外側は、パイルを作るための格子領域となっている。

計算は、 MORSE-DD, VIM 及び P_g 断面積を用いた MORSE-CG コードにより行った。 ^7Li , ^6Li 及び天然リチウムのトリチウム生成反応及び ^{238}U の核分裂反応について、 MORSE-DD と VIM の比をとり径方向に対して示したのが図 4.13 である。 ^7Li , 天然リチウム及び ^{238}U の反応率は、全ての領域に対し両コードが良く合っていることを示している。一方 ^6Li は、最大 4 % 程度 MORSE-DD の方が大きな値を与えていていることが分る。これは、前に述べた円筒体系中の結果と同じである。また $r = 20\text{cm}$ を越えた領域では、黒鉛からの反射中性子のため担当スペクトルが軟化しているにも拘わらず、全ての反応率は両コード間で良く合っている事は興味深い。次に実験結果との比較を表 4.3 に示す。計算値は、二重微分型断面積と P_g 断面積を用いた結果の差は少ない。ただし $^6\text{Li}(n, \alpha)$ 反応は、 P_g 計算の方が大きな値を与えてている。また実験との比較では、核分裂率に関しては実験誤差内で一致しているが、トリチウム生成率は中心近い程、計算の過大評価となる。この計算では、 ENDF/B4 を用いているので、 ^7Li については 10 ~ 20 % の過大評価は予想されるが、それを越える不一致が部分的に見られる。今後、測定条件と計算条件の不一致等について検討が必要である。

次に、上に述べた体系と良く似た球体系で行われたトリチウム生成率の測定実験を解析した結果について述べる。これはカールスルーエ研究所で Bachmann 達が行った実験²⁰⁾で、増殖材としては金属リチウムを用い、直径 1 m の球体系でトリチウム生成率等を測定している。ここで行った解析は、中心に半径 3 cm の中性子源領域をボイドとして置き、その外に半径 50 cm の金属リチウム、更にそれを厚さ 0.6 cm の鉄で囲んだ体系である。原子数密度は、 ^7Li が 4.258×10^{22} , ^6Li が $3.413 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^3$ である。中性子源は点源で等方分布と仮定した。またそのスペクトルは文献からは得られなかったので FNS での空冷ターゲットからのスペクトルを用いたが、実験では水冷であるので低エネルギー部に不一致があると思われる。しかしこの実験では、トリチウム生成は殆んど ^7Li によって生じるので重要な誤差は生じないと思われる。得られた結果を図 4.14 に示す。この実験の誤差は約 ±5.1 %, そして形状を球で近似する誤差は 5 % 以内と見積られている。計算値と実験値の不一致は中心に近い程大きく 30 % 程度になる。そして距離と共にその差が小さくなって行く傾向にある。これは前に酸化リチウムーグラファイト体系での結果と大変似ていることが分かる。従ってこの場合も、 ^7Li の (n, n', α) 反応断面積の修正が必要な事を示唆している。

Table 4.1 Comparison of reaction rate distributions for ${}^7\text{Li}(n, n', \alpha)\text{T}$,
 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ and ${}^{238}\text{U}(n, f)$ in Li_2O pile (MORSE-DD/VIM)

r (cm)	z (cm)	${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	${}^{238}\text{U}$
0	5	0.998	1.023	0.995
	15	0.998	1.032	0.997
	25	0.988	1.048	0.998
	35	0.992	1.047	0.999
	45	0.969	1.045	0.974
	55	0.968	1.034	0.986
	65	$1.020 \pm 4^{\text{a)}}$	1.003	1.020
10	75	0.936 ± 7	1.004 ± 4	0.968
	5	0.991	1.037	
	15	0.988	1.036	
	25	0.996	1.033	
	35	0.981	1.031	
	45	0.983	1.034	
	55	1.014	1.032	
35	65	0.958	0.996 ± 1	
	75	1.027 ± 4	0.985 ± 2	
	Total	0.994	1.032	

$${}^7\text{Li} + {}^6\text{Li} : (0.3422 + 0.2027) / (0.3441 + 0.1963) = 1.008$$

a) Fractional standard deviation (%)

Table 4.2 Comparison of reaction rate distributions for $^7\text{Li}(n, n', \alpha)\text{T}$,
 $^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ and $^{238}\text{U}(n, f)$ in Li_2O pile with first wall
(MORSE-DD/VIM)

r(cm)	z(cm)	^7Li	^6Li	^{238}U
0	1.5	0.993	1.032	0.996
	6.5	0.994	1.036	0.995
	15	1.000	1.027	1.000
	25	1.006	1.037	1.006
	35	1.010	1.039	1.006
	45	1.021±2 ^{a)}	1.015	1.026
	55	1.030±3	1.030±1.5	1.049
	70	1.036±5.5	1.028±2	1.049±5.5
10	1.5	0.964±2	1.083	0.960
	6.5	0.989	1.067	0.980
	15	0.997	1.054	0.988
	25	1.008	1.038	1.001
	35	1.009	1.035	1.005
	45	1.038	1.029	1.024
	55	1.033±2	1.017±1	1.021
	70	0.973±3.5	0.990±1	0.991±2.5
Total		1.001	1.040	

$$^7\text{Li} + ^6\text{Li} : (0.2610 + 0.2201) / (0.2608 + 0.2116) = 1.018$$

a) Fractional standard deviation (%)

Table 4.3 Comparison of C/E between DDX and P_8 calculations for spherical $\text{Li}_2\text{O-C}$ pile

Reaction type	Method	Radius from source (cm)			
		5.2	10.3	15.6	20.6
$^7\text{Li}(n, n'\alpha)$	DDX	1.33	1.26	1.11	1.11
	P_8	1.34	1.26	1.10	1.09
$^6\text{Li}(n, \alpha)$	DDX	1.22	1.08	1.02	1.06
	P_8	1.28	1.13	1.04	1.16

		Radius from source (cm)				
		9.4	14.5	19.6	29.8	34.8
$^{238}\text{U}(n, f)$	DDX	0.95	0.99	0.98	0.93	0.93
	P_8	0.96	0.99	0.98	0.94	0.93
$^{237}\text{NP}(n, f)$	DDX	1.02	1.01	0.99	0.95	0.98
	P_8	1.04	1.03	1.03	0.97	0.98

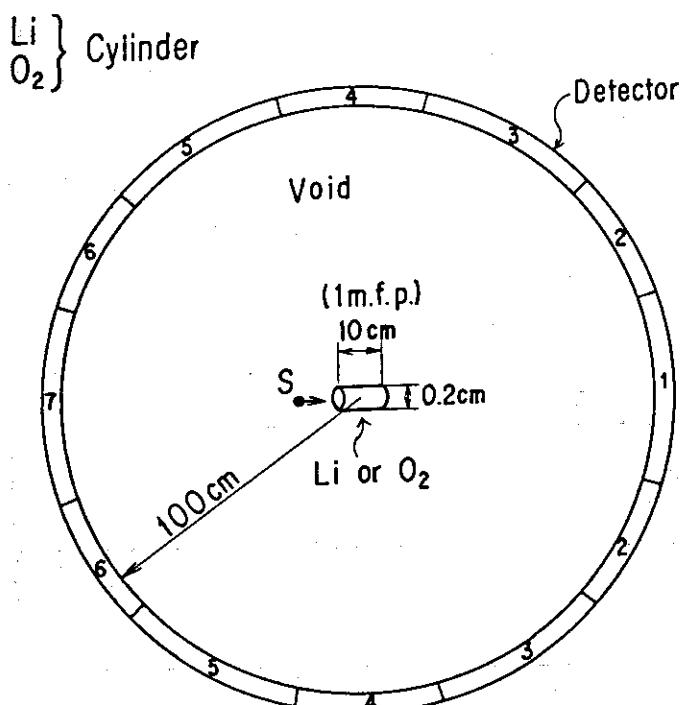


Fig. 4.1 Calculation model of neutron spectrum scattered from small sample

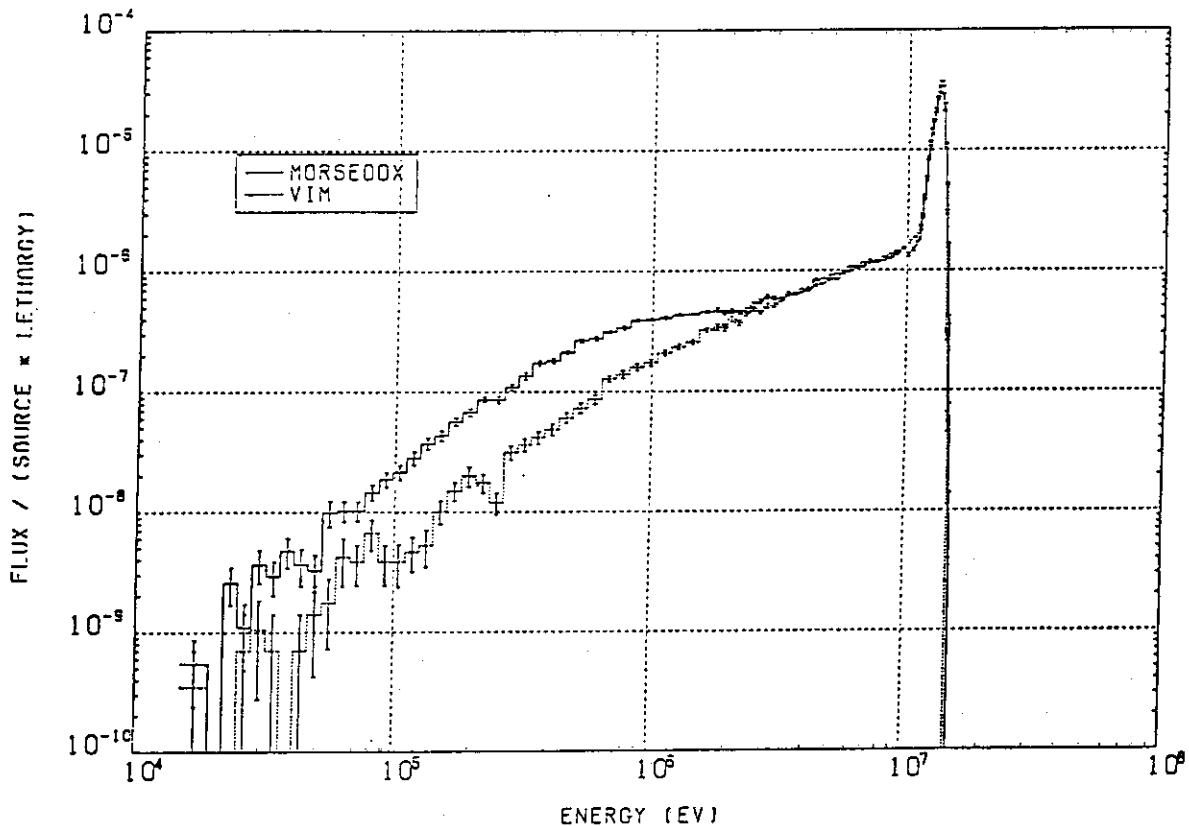


Fig. 4.2 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM original version for lithium

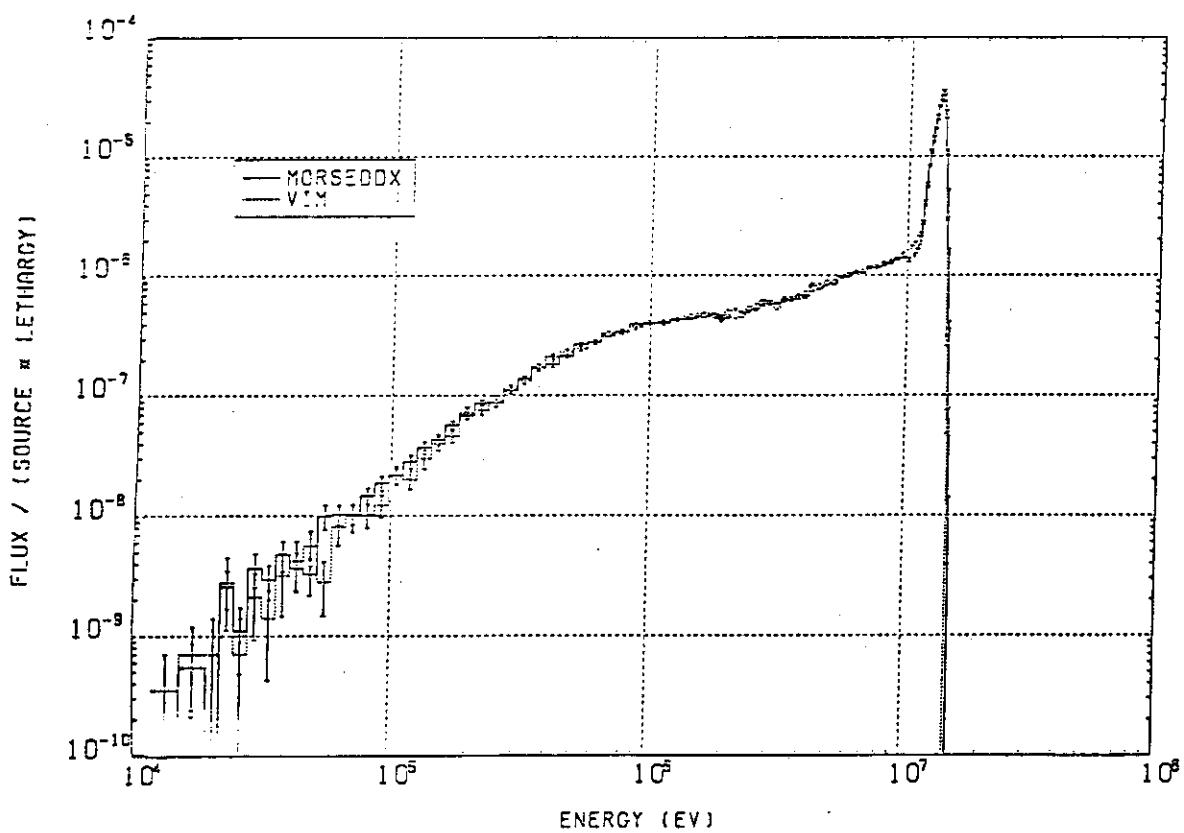


Fig. 4.3 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM modified library for lithium (forward scattering)

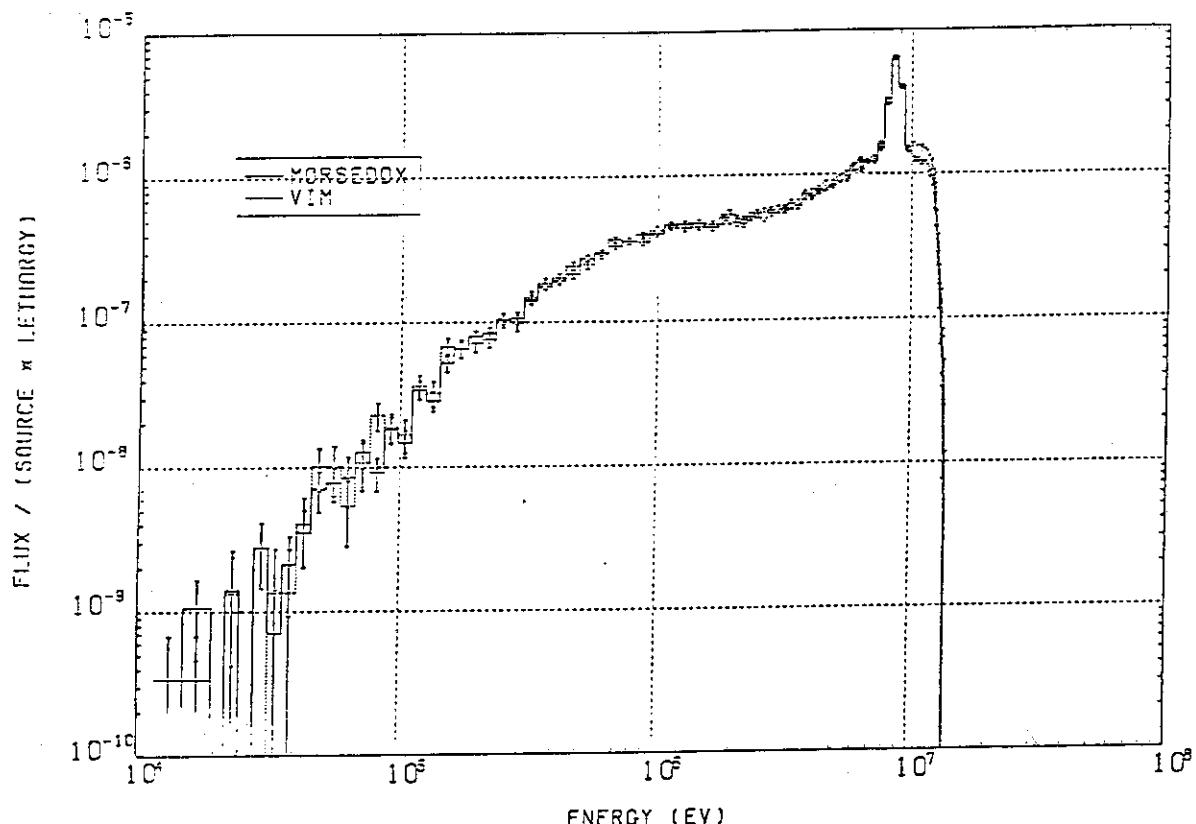


Fig. 4.4 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM modified library for lithium (backward scattering)

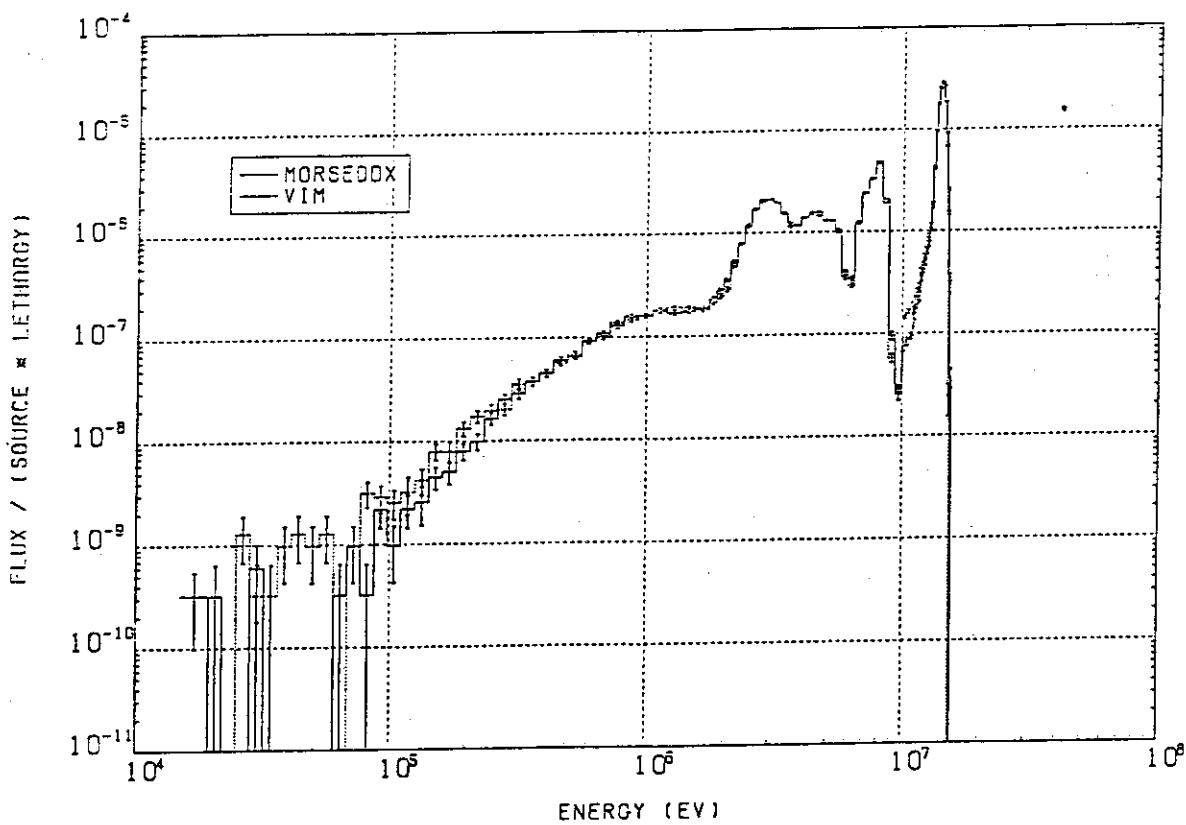


Fig. 4.5 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM for oxygen (angle 3)

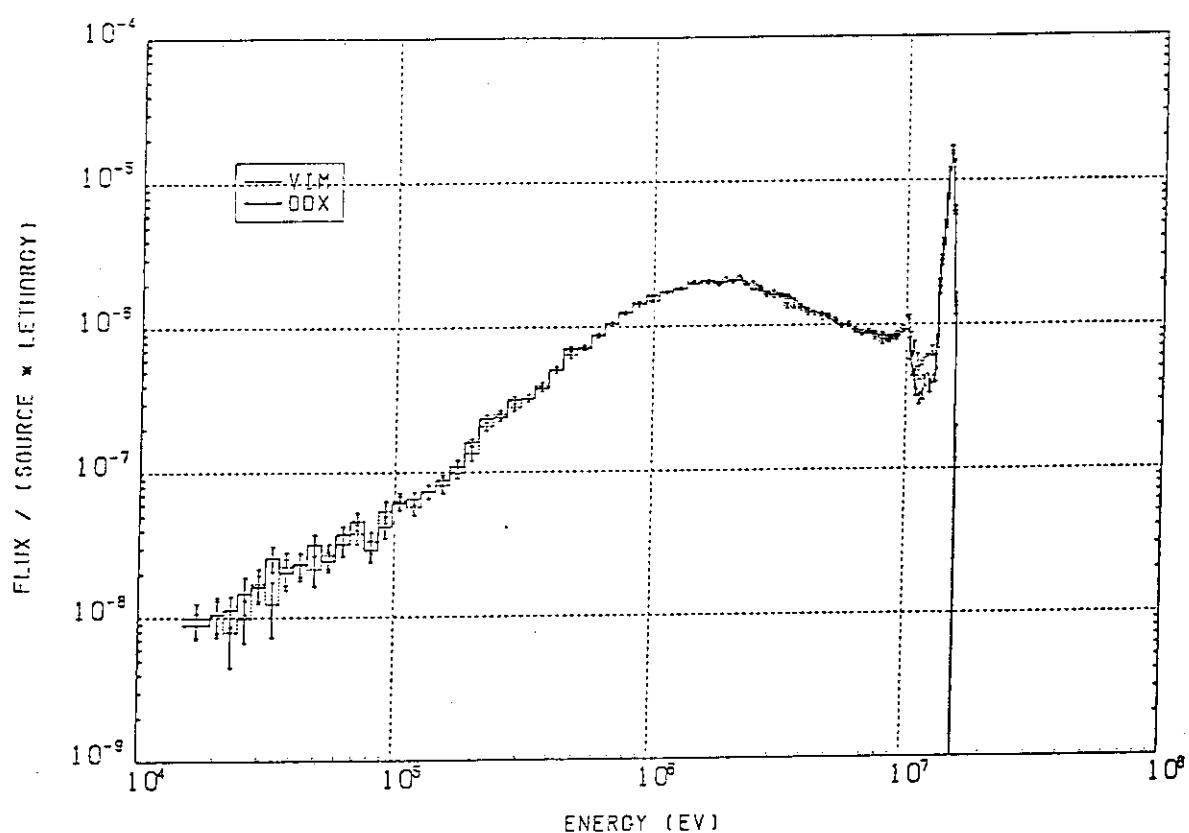


Fig. 4.6 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD and VIM for iron (angle 3)

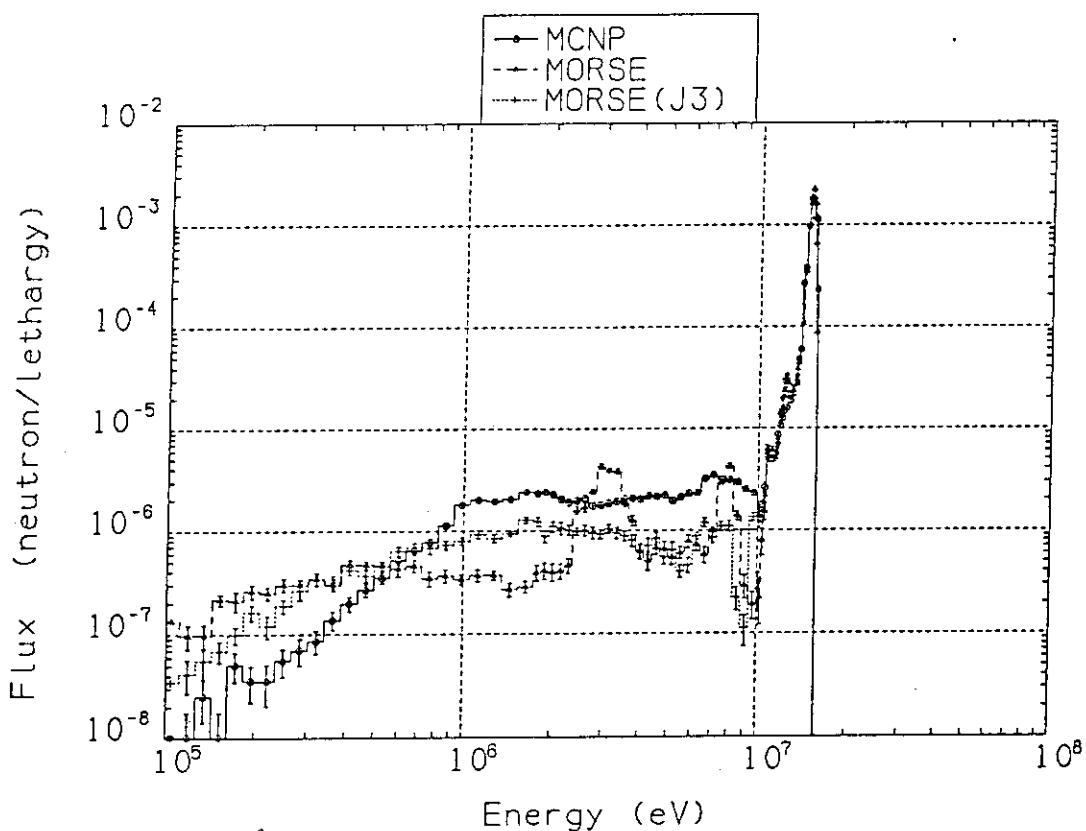


Fig. 4.7 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD (ENDF/B4), MORSE-DD (JENDL-3PR1) and MCNP (LASL) for angle $0 < \theta < 20$ deg.

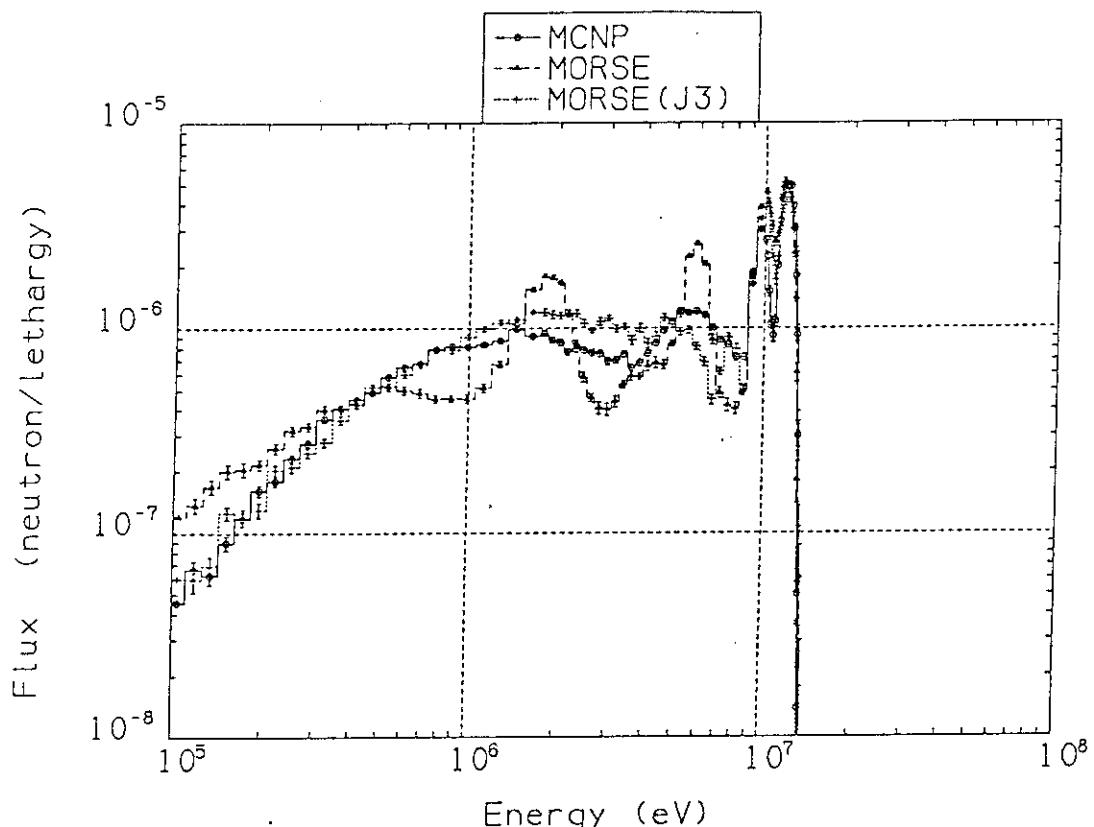


Fig. 4.8 Comparison of neutron spectra calculated by MORSE-DD (ENDF/B4), MORSE-DD (JENDL-3PR1) and MCNP (LASL) for angle $75 < \theta < 105$ deg.

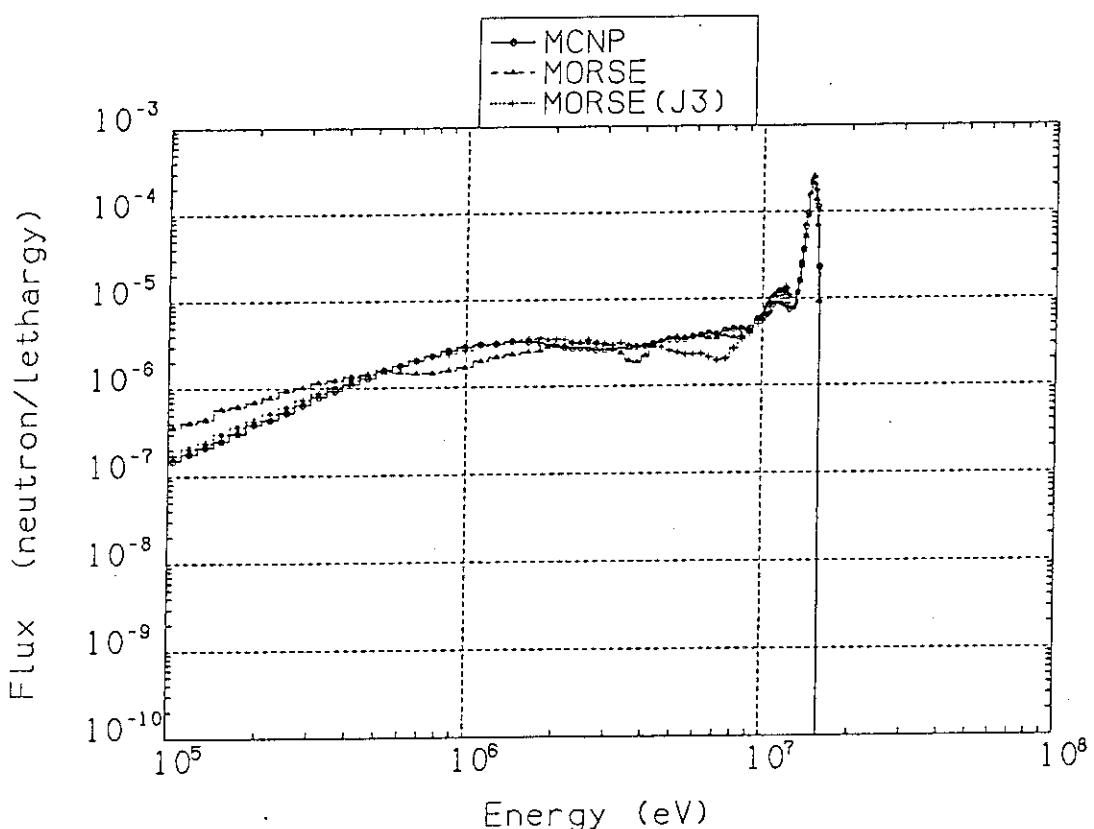


Fig. 4.9 Comparison of total neutron fluxes calculated by MORSE-DD (ENDF/B4), MORSE-DD (JENDL-3PR1) and MCNP (LASL)

Test problem 3
 Li_2O Cylindrical slab

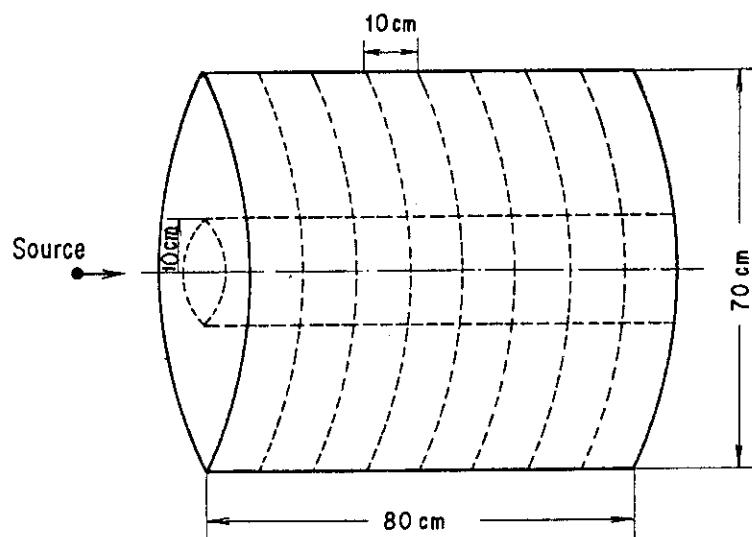


Fig. 4.10 Geometry of cylindrical slab of lithium-oxide

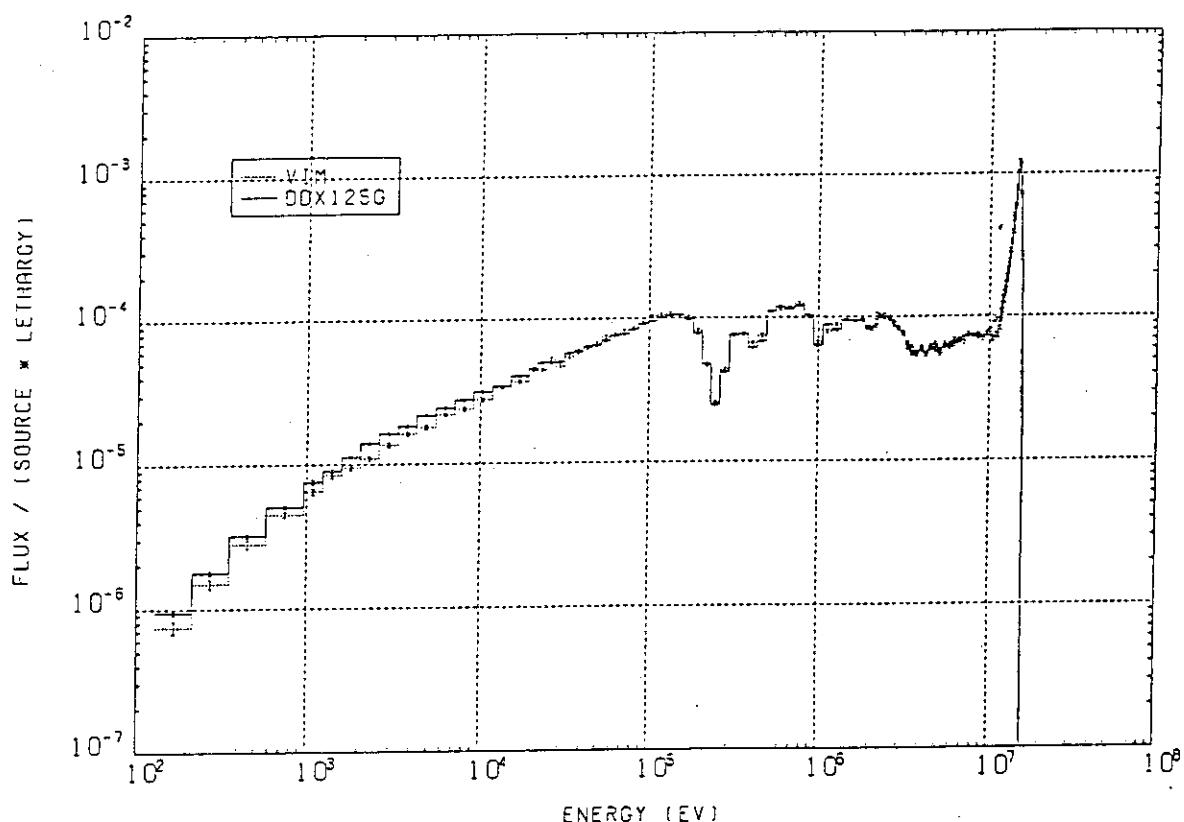


Fig. 4.11 Comparison of neutron spectra in lithium-oxide

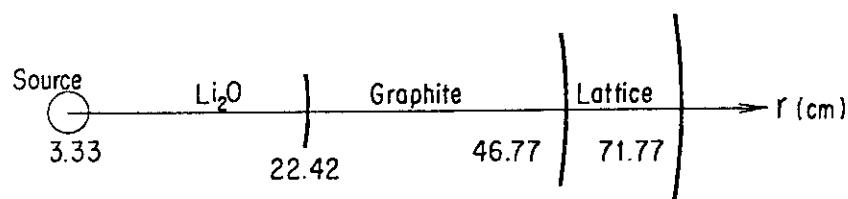
$\text{Li}_2\text{O}-\text{C}$, Sphere

Fig. 4.12 Geometry of graphite reflected lithium-oxide sphere

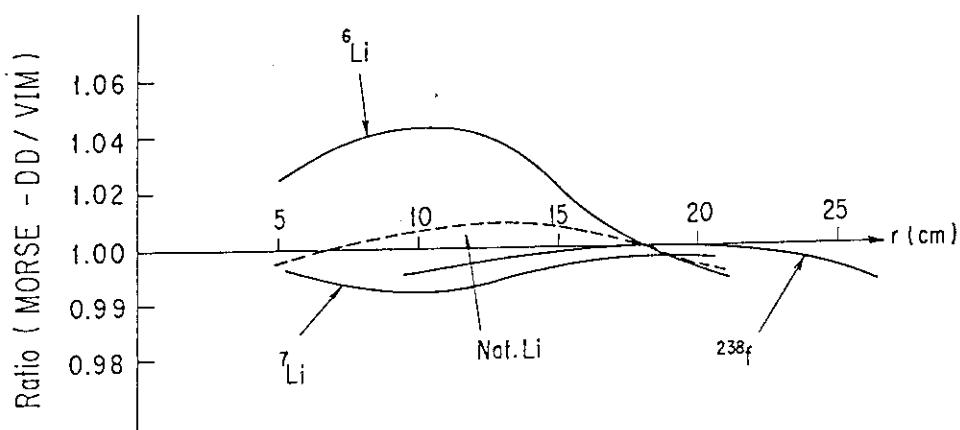
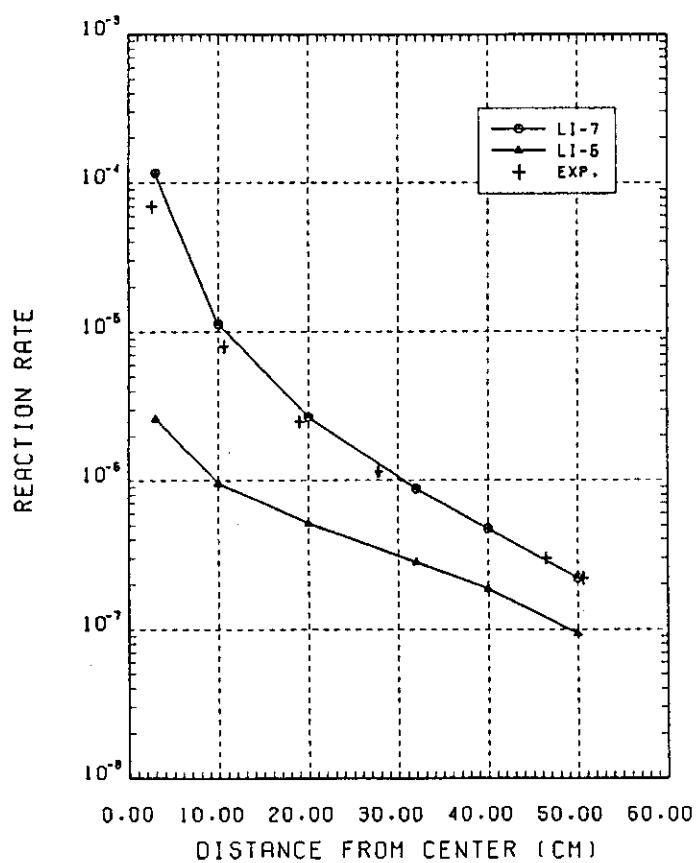
Fig. 4.13 Comparison of spatial distributions for tritium production rate and ^{238}U fission rate

Fig. 4.14 Comparison of tritium production rates in lithium metal

5. む　す　び

核融合炉におけるニュートロニクス解析のために開発した多群二重微分型断面積（DDX）とこれを用いる三次元モンテカルロコード MORSE-DDに対する各種ベンチマークテストの結果について述べた。テストは、各種実験値との比較、従来のルジャンドル展開法による断面積を用いた結果及びより正確に中性子輸送現象を取り扱うことのできる連続エネルギーモンテカルロ法による結果との比較によって行った。核データとしては主に ENDF/B4を使用したが、一部 JENDL-3 PR1も用い、これらの核データの検討を行った。テストの結果の詳細はそれぞれのテストの所で述べたが、それを要約すると、

- i) DDXを用いる手法は、従来のルジャンドル展開法と比較し高精度で、LLNLにおける9種の球体系からの漏洩スペクトルの測定値及び原研のFNSにおける酸化リチウム平板体系からの漏洩角度中性子スペクトルの測定値との一致度は高い。
- ii) 本手法は連続モンテカルロ法とほぼ同じ精度がある。特に、核融合炉ニュートロニクス解析において重要なトリチウム生成率は、 ^7Li , ^6Li , 天然リチウムに対して、それぞれ統計誤差内、5%, 1%内で一致した。
- iii) 使用した核データに関しては、実験値との比較により多くの知見が得られた。JENDL-3 PR1を用いることにより、LLNLの実験解析では、酸素を除いて一般に実験値との一致は良くなつた。FNSで行われた実験のJENDL-3 PR1による解析が望まれる。

参考文献

- 1) Nakagawa M. and Mori T.: "MORSE-DD, A Monte Carlo Code Using Multi-group Double Differential Form Cross Sections", JAERI-M 84-126(1984)
- 2) Nakagawa M. Mori T. and Ishiguro Y.: Proc. Sixth Int. Conf. on Radiation Shielding, Vol.1, 171-179, Tokyo(1983)
- 3) Koyama K. et al.: "RADHEAT-V3", JAERI-M 7155(1977)
- 4) Mac Farlane R.E. et al.: LA-7584-M(ENDF-272)(1978)
- 5) ENDF Summary Documentation, BNL-NCS-17541(ENDF-201) 2nd Ed., compiled by Garber D., BNL, N.Y.(1975)
- 6) Shibata K.: ^6Li in JAERI-M 84-198, ^7Li in JAERI-M 84-204, ^{12}C in JAERI-M 83-221(1984)
- 7) Blomquist R.N. et al.: ORNL/RSIC-44, p. 31(1980)
- 8) 田中俊一他：“遮蔽ベンチマーク問題”，JAERI-M 7843(1978)
- 9) 田中俊一他：“遮蔽ベンチマーク問題(II)”，JAERI-M 8686(1980)
- 10) Hansen L.F. et al.: Nucl. Sci. Eng., 35, 227(1969)
- 11) Hansen L.F. et al.: Nucl. Sci. Eng., 40, 262(1970)
- 12) Hansen L.F. et al.: Nucl. Sci. Eng., 60, 27(1976)
- 13) Wong C. et al.: UCRL-51144(Rev. 1) (1971)
- 14) Wong C. et al.: UCRC-51144(Rev. 2) (1971)
- 15) Takahashi A. et al.: Proc. 12th SOFT Symp. on Fusion Technology, Jülich, p. 687, Pergamon Press, Oxford(1982)
- 16) Oyama Y. and Maekawa H.: "Measurements of Angle-Dependent Neutron Spectra from Lithium-Oxide Slab Assemblies by Time-of-Flight Method", JAERI-M 83-195(1983)
- 17) LASL Group X-6: "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport", LA-7396-M, Revised (1979)
- 18) Young P.G. and Stewart L.: "Evaluated Data for $n + ^9\text{Be}$ Reactions", LA-7932-MS(1979)
- 19) Maekawa H. et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 16, 377(1979)
- 20) Bachmann H. et al.: Nucl. Sci. Eng. 67, 74(1978)