

角度依存中性子スペクトルの測定と解析の現状

原研 前 川 洋

1. はじめに

2年前、本会合同同じ核データ・炉物理合同特別会合において、「核融合炉用核データの問題点」という題で講演を行った。⁽¹⁾その中でニュートロニクスおよび核データの立場から核融合炉の特徴を述べるとともに、ブランケット模擬実験およびその解析の現状について言及した。

実験と計算の一致度を要約すると、

- i) 積分測定である各種反応率分布の測定結果と、計算結果との間に大きな不一致がある。(10 ~ 50%)
- ii) 漏洩中性子スペクトルでは、全体としてまずまずの一致と言えるが、細部では必ずしも一致しているとは言えない。
- iii) 角度依存スペクトルでは3 ~ 12 MeV の間で顕著な不一致がある。

となる。

上記不一致の原因は状況証拠からみて

- i) 計算における非弾性散乱および角度分布の取扱いが必ずしも妥当ではない。
- ii) 核データ特に非弾性散乱や二次中性子の角度分布のデータの精度が不十分であるばかりでなく、データ自身が不足している。

と予想された。その後の研究、特に国内における精力的研究の成果から、上記の原因が事実であることが明らかとなってきた。

それでは何故、近年になって、非弾性散乱や角度分布の核データが話題となったのであろうか。

これは正に時代の推移であり、炉物理の興味が熱中性子炉から高速炉、核融合炉へと移行してきたからである。炉物理から見た3つの炉型の違いを表にして次に示す。

	熱中性子炉	高速炉	核融合炉
源中性子	核分裂中性子		D-T, 14 MeV
中性子源	炉心全体に分布		炉心プラズマ 第1壁から一方的に入射
スペクトルの型	熱エネルギー (Maxwell分布)	平均エネルギー 100~200 KeV	14 MeVと100~200 MeVにピーク
減速材 冷却材	H ₂ O, D ₂ O, Cなど	Naなど	Li, He, Cなど
重要な反応	²³⁵ U (n, f)	²³⁹ Pu (n, f) ²³⁸ U (n, γ)	⁶ Li (n, α) T ⁷ Li (n, n'α) T

核融合炉の炉物理で非弾性散乱や2次中性子の角度分布が重要となる要因は大きく次の3つと考
えて良い。

- ① 源中性子のエネルギーが14 MeVである。
- ② 中性子が第1壁からブランケットへ一方的に入射する。
- ③ 少数回の散乱で⁶Li (n, α) T反応をする領域に入ってくる。

以前の報告と一部重複するところもあるが、角度依存中性子スペクトルに焦点を合わせて現状
を述べる。

2. 角度依存中性子スペクトルの測定例

角度分布の情報を得るには角度依存の中性子スペクトルを測定するのが最善である。本格的な
角度依存の中性子スペクトルの測定はここ数年、主として日本の各研究機関で実施された。

これらを表にして別紙に示す。

以下、それらの結果を簡単に説明する。(表に示した内容はできるだけ省略してある)

原研, 名古屋大学

Fig. 1に測定系の配置を示す。Li-C体系の中心から28 cmのところre-entrant
holeをあけ、コリメータを経て、NE-213の液体シンチレータで測定している。re-ent
rant holeの底からくる中性子ビームのみを検出するため、かなり厚いコリメータが使われて
おり、検出器の遮蔽も十分ほどこされてバックグラウンドを低減している。

Fig. 2にモンテカルロ法による計算結果を実験値とともに示す。計算値は検出器の分解能を

考慮して補正し、ピークで規格化してある。モンテカルロ法による計算結果は、全体として ANISN の場合と大差がなく、実験結果に現われる 3 ~ 12 MeV の間の構造は再現していない。図中、e1, Q₁, Q₂ …… は ⁷Li の弾性散乱および非弾性散乱の各レベルに対応してスペクトルに構造を持つと予想される範囲を示す。

KFK

実験結果の一部を計算値とともに Fig. 3, 4 に示す。

計算値に測定した中性子源スペクトルが使用されている。

スペクトルは源中性子の 1 回散乱で大部分が決まっていることから、通常の輸送近似では MeV 以上の領域で大きな差を生じる。

T₁ 近似より T₅ 近似の方が実験値に近い。しかし、どの位置どの角度でも十分に一致しているとは言えない。彼らはトリチウム生成率分布との結果とも合せて、ENDF/B-Ⅲの ⁷Li(n, n'α) の値を 15 ~ 20% 減すべきであると提案している。

阪大

測定系の配置を Fig. 5 に、結果の一部を Fig. 6 に示す。

詳細については阪大の高橋氏の報告にまかせるとして、図から明らかなように、ANISN による計算結果では実験結果を再現できない。計算に用いた角度分布に対するデータの精度は必ずしも満足すべきものではないが、Li 法を用いた NITRAN の結果が実験結果に近づいていることは明らかである。

京大, 東大

測定系の配置を Fig. 7, 結果の一部を Fig. 8 に示す。

中性子源に“YAYOI”を使っているため、なめらかなスペクトルとなっている。モンテカルロ法による計算結果は実験結果と良く一致している。しかし、30° 方向では若干の差異がある。

彼らは (n, 2n), (n, n') 反応の取扱いが不十分なためと予想している。

東北大

Fig. 9 に測定系の配置, Fig. 10 に結果の一部を示す。

計算には中性子源として測定した中性子スペクトルを用いている。

Li 体系の場合 (Fig. 10 - a, b) 実験に現われている 9 ~ 10 MeV のピークは第 2 レベル (4.63 MeV) の非弾性散乱中性子によるものと考えられる。

ENDF/B-Ⅳでは、このレベルの反応は連続レベルの非弾性散乱反応に組入れられているため、計算値は実験値と一致していない。2 重微分断面積 (DDX) として最近の測定値を用いた計算結果は、実験結果にかなり近づいている。

黒鉛体系の場合 (Fig. 10-c, d), ENDF/B-IV に第 1 レベルのデータが含まれているので実験値を再現している。

第 2, 第 3 レベルに DDX の測定値を用いて計算した結果はやはり, 実験値とかなり良く一致している。

鉄体系の 30° の場合 (Fig. 10-e), ENDF/B-IV が JENDL-1 に比べて実験値に近くなっているが, 11 MeV 以下の一致は悪い。

138° の場合 (Fig. 10-f), 実験誤差が大きく, 妥当性の判定は難しい。

10 MeV 付近にある小さなピークは鉄中に含まれている約 1% の炭素によるものと予想されるが, 計算では考慮されていない。

東大

測定系の配置を Fig. 11 に, LiF 体系と, C 体系の 30° における結果を Fig. 12 に示す。ANISN による計算では十分に実験を再現していない。

3. まとめ

角度依存中性子スペクトルの測定およびその解析結果をまとめると, 次のようになる。

i) ENDF/B-IV と ANISN などの輸送計算コードでは実験結果を正しく表現できない。これは角度分布のデータが, 核データファイルに十分に含まれていないこと, 計算コードにおける角度分布の取扱い近似が妥当でないことによる。

ii) Ii 法による NITRAN, DDX のデータを用いるモンテカルロ法による計算や I* 法による計算で核データさえ妥当であればかなり良く実験値を再現することが明らかとなった。

今後, DDX も含めた核データの整備が核融合炉の炉物理にとって特に要望される。ENDF/B-IV が日本では今だ公開されず, うわさによれば, 角度分布のデータはまだ不十分であると聞いている。我々ユーザーにとって, JENDL の整備に携わる人々の地道な努力に期待せざるを得ない。

角度依存中性子スペクトルの測定例

研究機関						解 析		備 考	文献
	方 法	実験体系	中核系	検出器	エネルギー角展	断面積処理コード	計算コード		
（学研） 名大	Single Scinti Unfolding FERDORコード	黒鉛及材料 リチウム結晶系 34cm x 21cm	D-T コックローフ 300KV	NE-213 4.6cmφ x 4.64cm	α ~ 15MeV 0°, 20°, 40°, 50°	ENDF/B-IV SPTG4Z, 105群 NJ0Y, 100群	ANISN Ps-S14 MORSE-CG	Fig. 1, 2	2
KFK	TOF l = 10m	1mφ リチウム結晶系	D-T コックローフ	¹⁰ Bγ検出 + NaI(U) ⁶ LiGlass Scinti. NE 213	0.5keV ~ 5MeV 0°, 10°, 50°, 80°	ENDF/B-III KEDAK3 (Fe) GRUCAL, 275群	DTK Te-S14 (S11)	Fig. 3, 4	3
阪大	TOF l = 4.8 ~ 5.8m	黒鉛 50cm x 50cm x 10 ~ 40cm リチウム結晶系 60cm x 40cm x 10 ~ 40cm	D-T コックローフ	NE 213 25cm x 25cm x 10cm	α ~ 14MeV 0°, 20°, 45°, 150°	ENDF/B-IV SPTG4Z, 105群 ENDF/B-IV + (BNL 400 ENL'76	ANISN Ps-S14 NITRAN, S22	Fig. 5, 6	4, 5 10
京大 東大	Single Scinti. Unfolding FERDO	Fe: 20cm x 20cm x 9.6, 19.6cm Na: 50cm x 50cm x 4cm	YAYOI	NE-213 αφ x α°	α ~ 14MeV 0°, 30°, 45°	ENDF/B-IV	CYGNUS (モンテカルロ)	Fig. 7, 8	6
東北大	TOF l = 2.9 ~ 10.5m	Li) 40cm x 40cm C) x 10cm Fe: 38.0cm x 28.5cm x 9.5cm	D-T コックローフ	NE-213 12cmφ x 5cm	1 ~ 15MeV 30°, 128°	ENDF/B-IV JENDL-1 + 測定データ α ~ 108群	SIMON (モンテカルロ) 角度: 41度	Fig. 9, 10	7, 8
東大	TOF l = ~ 4m	黒鉛: 35cm x 35cm x 12.5cm LiF: 40cm x 40cm x 17cm	D-T	NE-213 5"φ x 5"	1.5 ~ 14MeV 0°, 30°	ENDF/B-IV SUPERTO 100群	ANISN, Ps S16 MORSE-CG	Fig. 11, 12	9

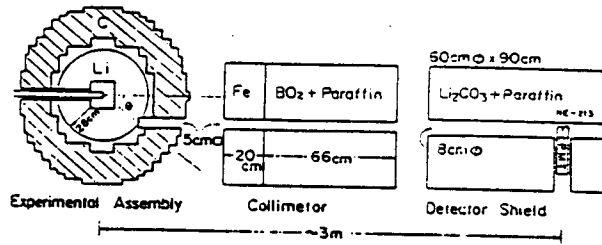


Fig. 1 Experimental Arrangement

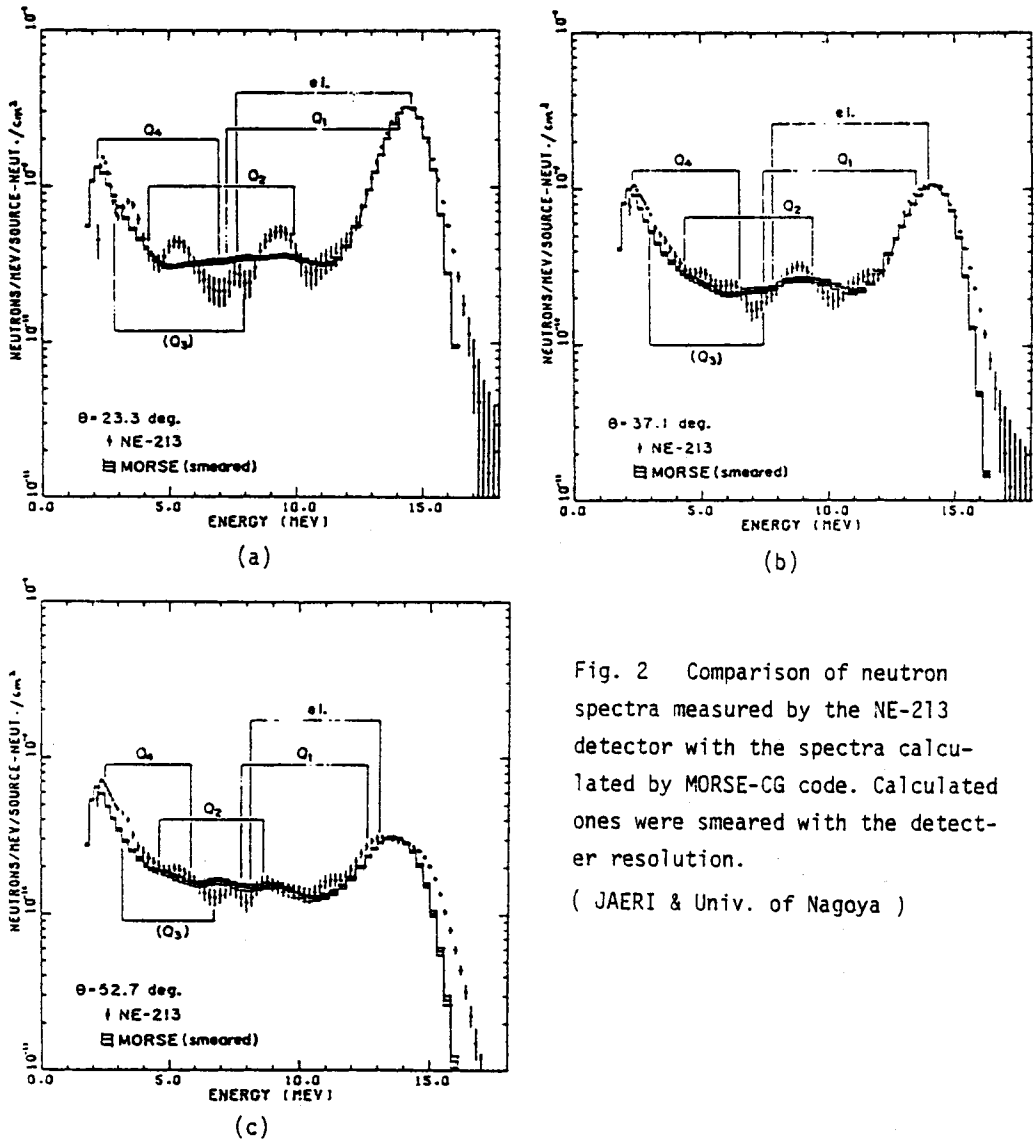


Fig. 2 Comparison of neutron spectra measured by the NE-213 detector with the spectra calculated by MORSE-CG code. Calculated ones were smeared with the detector resolution.

(JAERI & Univ. of Nagoya)

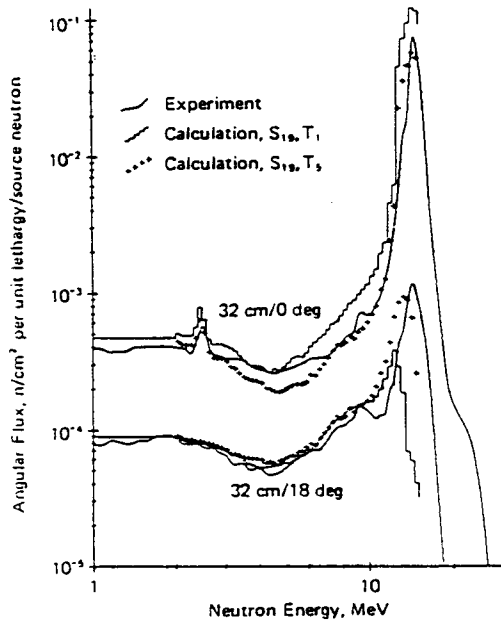


Fig. 3 Measured and calculated directional neutron spectra at position $r = 32$ cm, 0 and 18 deg. Calculated with measured source spectrum.

(KFK)

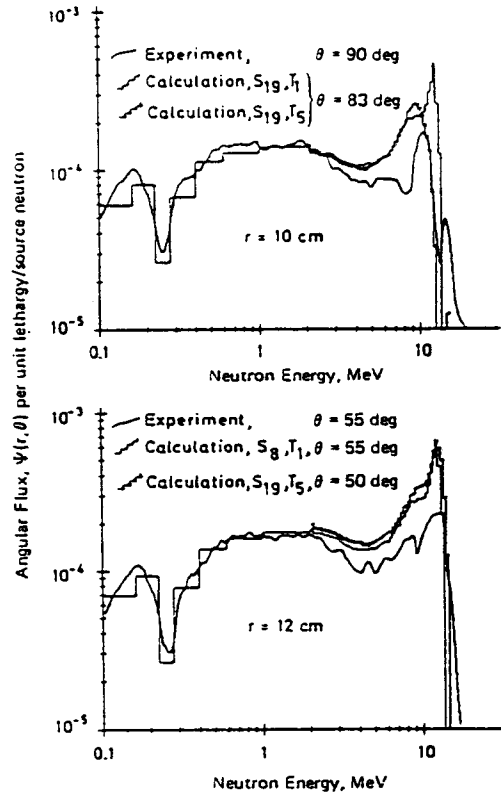


Fig. 4 Measured and calculated directional neutron spectra at the neighboring positions $r = 10$ cm, 90 deg, and $r = 12$ cm, 55 deg. The small differences in the angles of the calculated spectra are caused by the discretization. Calculated with measured source spectrum.

(KFK)

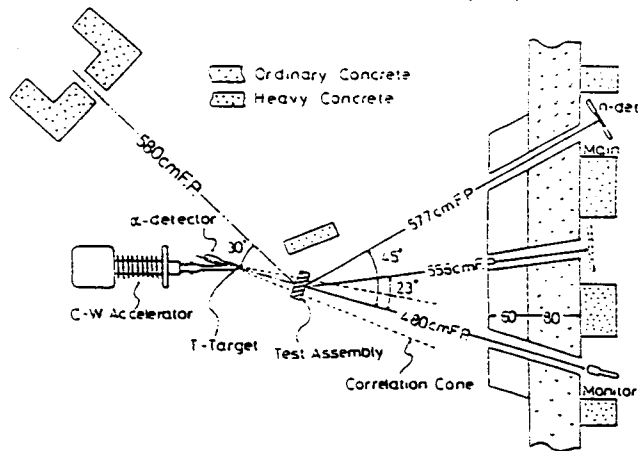
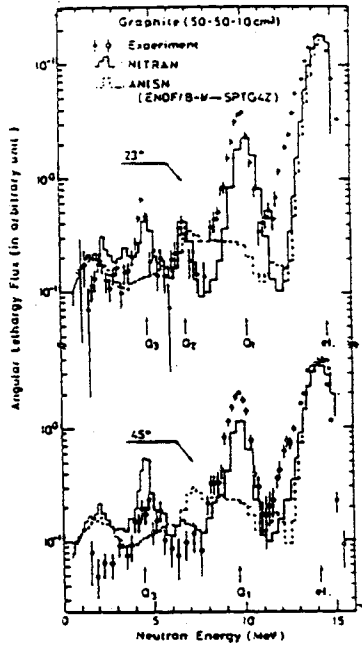
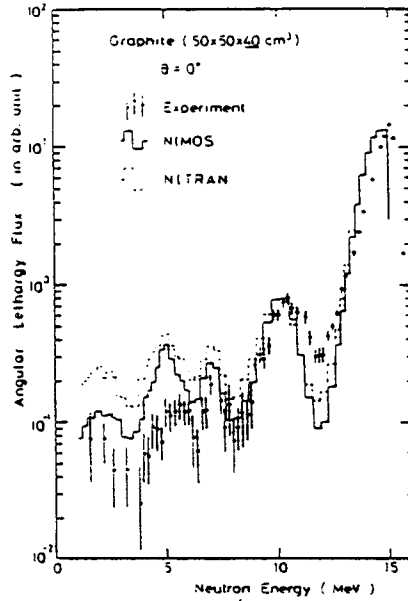


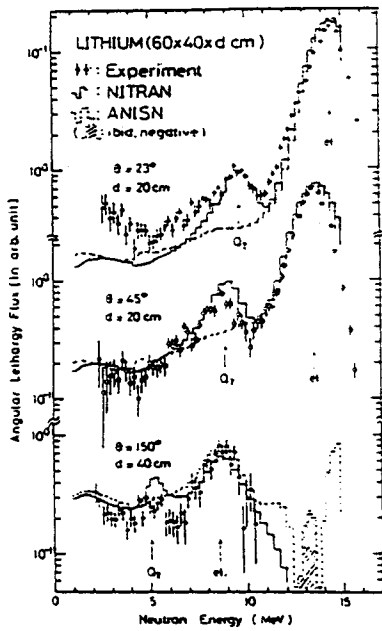
Fig. 5 Lay-out of experimental system
(Univ. of Osaka)



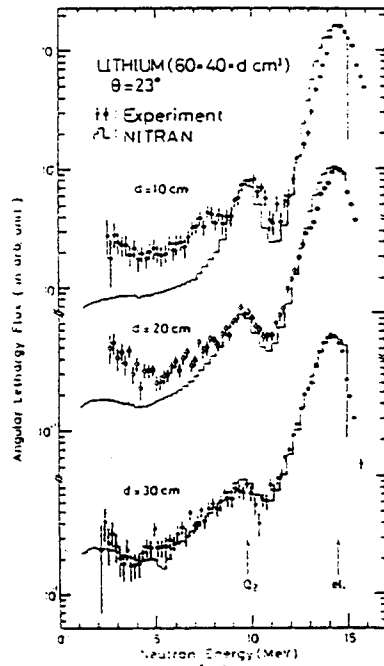
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Comparison of measured and calculated spectra

(Univ. of Osaka)

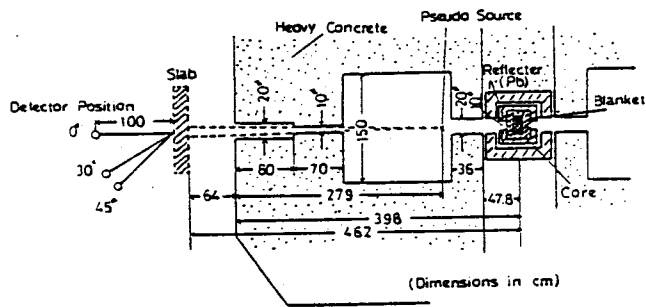
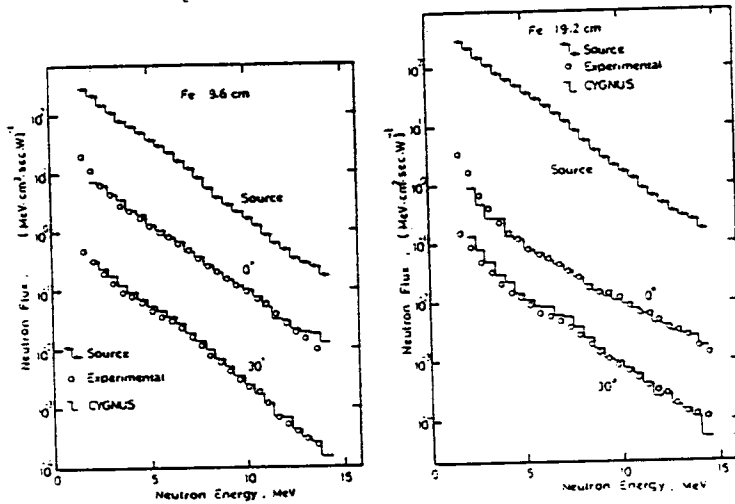


Fig. 7 Schematic diagram of experimental arrangement (Univ. of Kyoto & Univ. of Tokyo)



(a) 9.6 cm thick (b) 19.2 cm thick

Fig. 8 Measured and calculated neutron spectra transmitted through Fe slabs of 9.6 and 19.2 cm thickness (Univ. of Kyoto & Univ. of Tokyo)

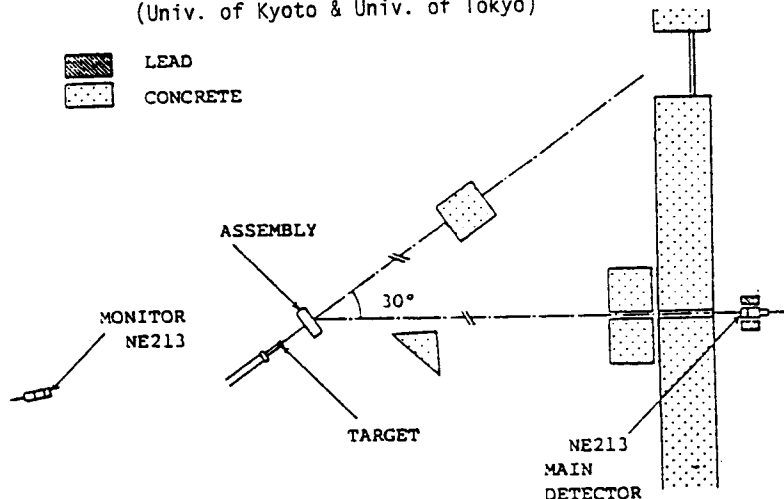


Fig. 9 Experimental arrangement for measurements at 30° (Univ. of Tohoku)

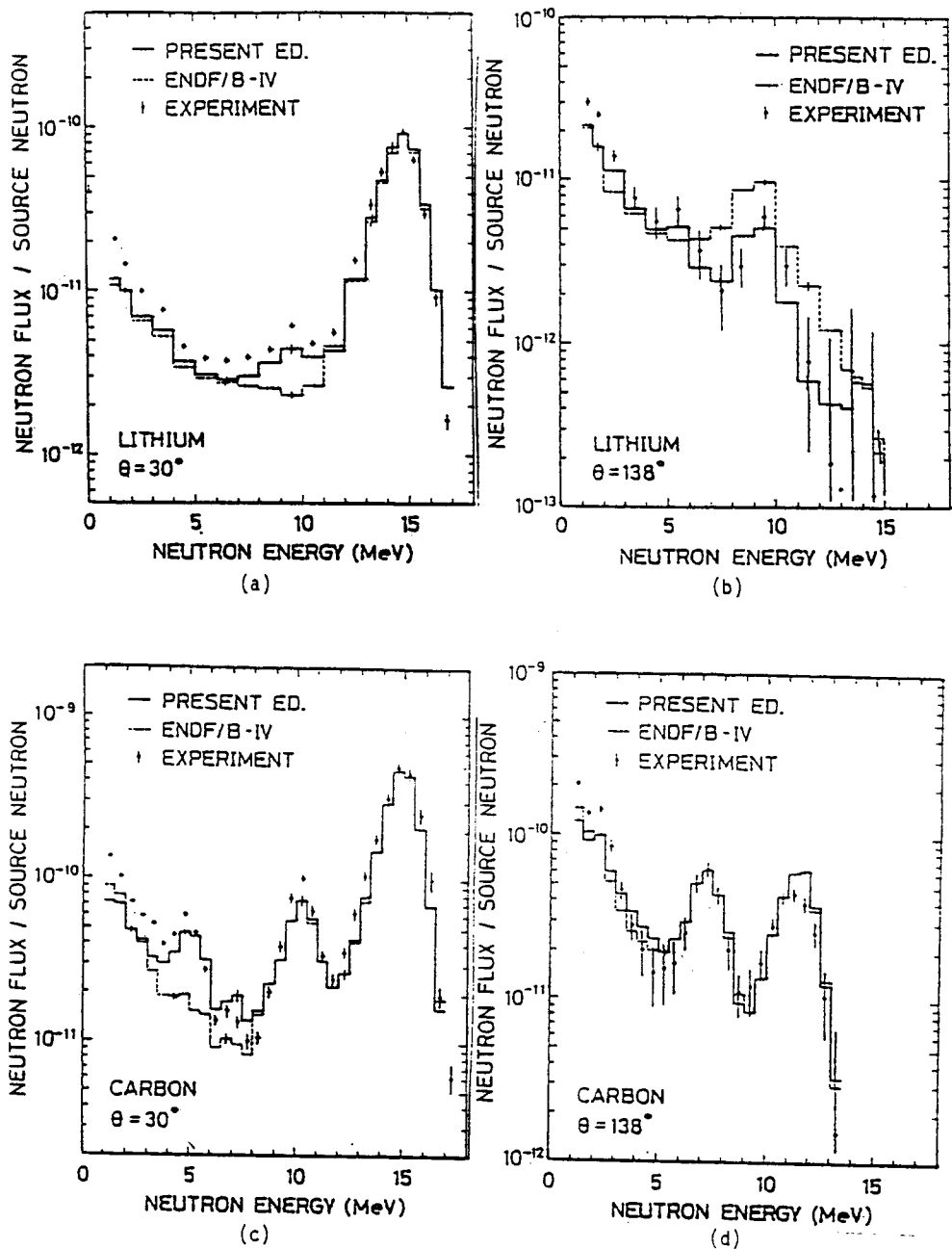


Fig. 10 Comparison between measured and calculated neutron spectra
(Univ. of Tohoku)

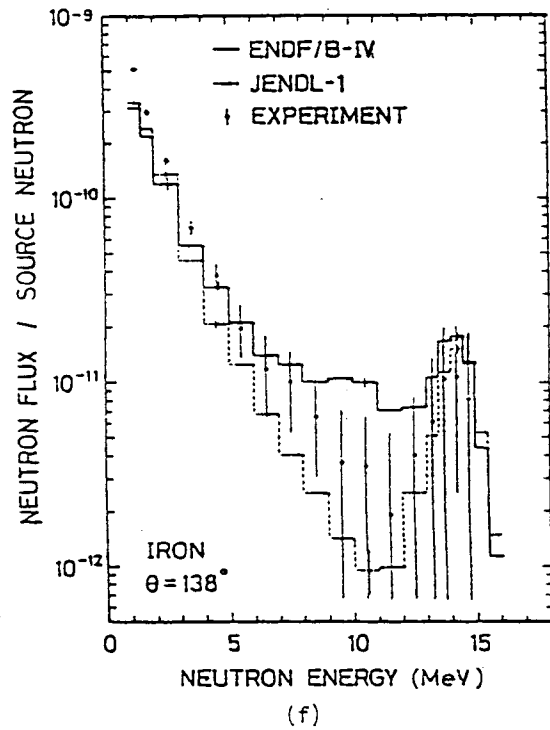
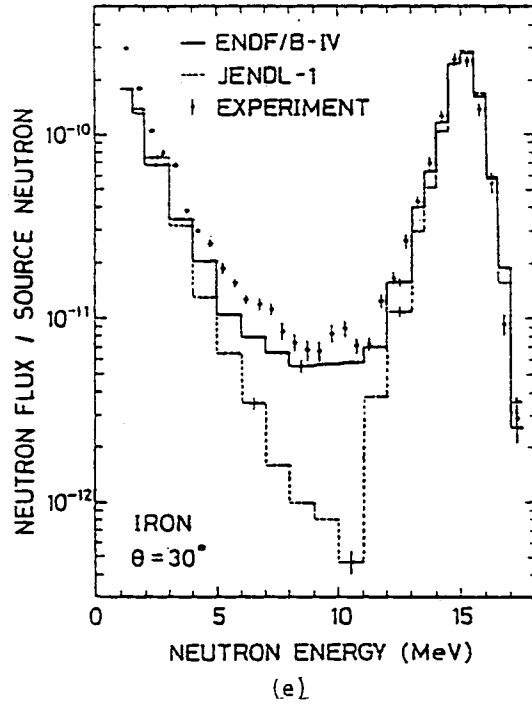


Fig. 10 (continue)

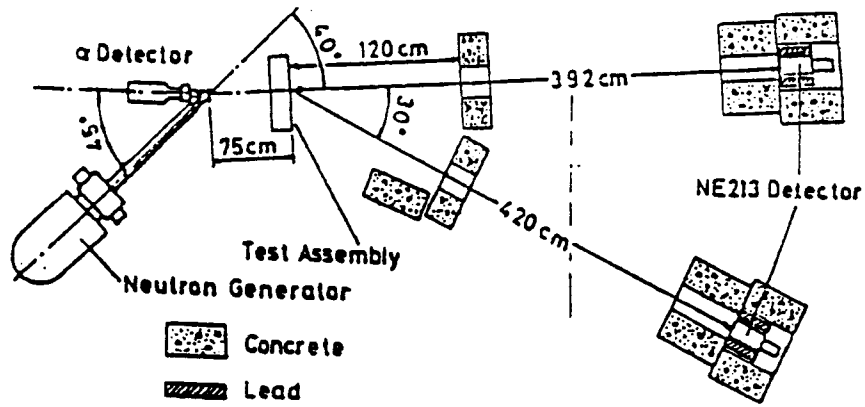
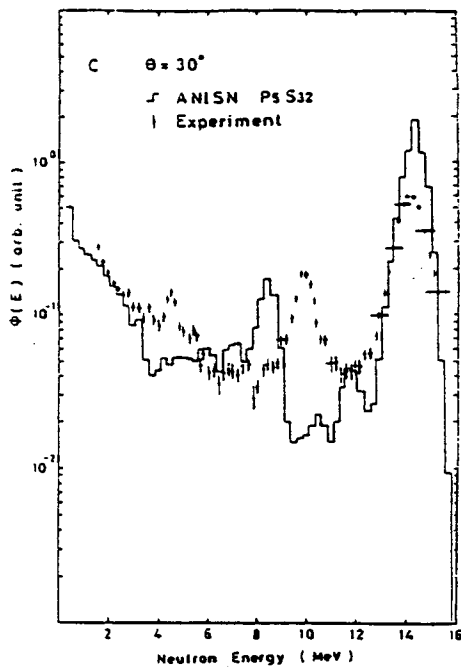
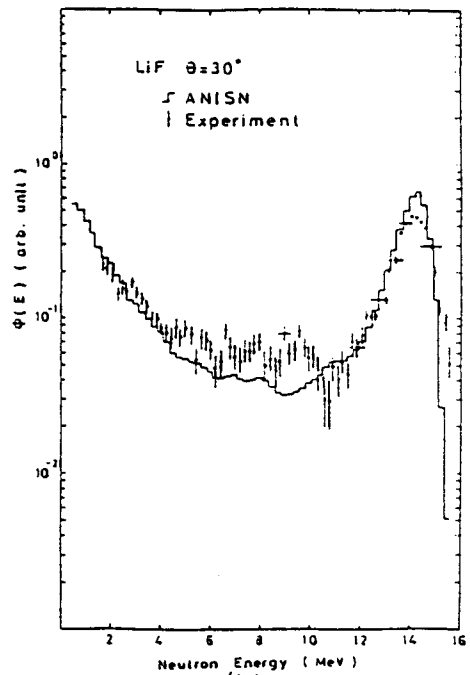


Fig. 11 Experimental arrangement of associated particle TOF method
(Univ. of Tokyo)



(a)



(b)

Fig. 12 Comparison between measured and calculated neutron spectra
(Univ. of Tokyo)

References

1. 前川, 「核融合炉用核中性子の問題点」, シグマ・炉物理研究特別専門委員会資料, 1978, 10.8; 核中性子ニュース No. 8, 1979年2月
2. S. Itoh, et al., "Measurements and Calculations of Fast Neutron Spectra in a Graphite-Reflected Lithium Assembly", Proc. of 3rd ANS Topical Meeting on the Technology of Controlled Nuclear Fusion, Santa Fe, New Mexico, May 9-11, 1978
3. H. Bachmann, et al., Nucl. Sci. Eng. 67 74 (1978)
4. A. Takahashi, et al., J. Nucl. Sci. Technol. 14 308 (1977)
5. J. Yamamoto, et al., *ibid*, 17 255 (1980)
6. K. Shin, et al., *ibid*, 17 37 (1980)
7. 神田, 「TOF法によるリチウム、グラファイト及び鉛体系からの漏洩中性子スペクトルの測定」加速器による中性子実験専門研究会資料, 京大原子炉実験所 1980, 7.21.
8. 林, 他, 原子力学会年会 C44 (1980)
9. 西谷, 他, 同上 C42 (1980)
10. 我妻, 他 JAERI-M 8135 (1979).