

解 説

## 核融合炉ブランケット中性子工学に関する 日米協力実験

(原研) 中 川 正 幸

### 1. はじめに

核融合炉ブランケットの工学的な課題は、熱、構造、材料等と様々であるが、まず初めに中性子工学的な特性を把握する必要がある。それには最重要課題の一つであるトリチウムの自己充足 (self-sufficiency) を達成する事や、核発熱や誘導放射能等の分布を十分な精度で予測する事が含まれる。これらの内容に関してはこれまでベンチマーク的な研究は行われて来たが、核融合炉ブランケットを模擬した体系での系統的な実験はない。ここで以下に紹介する日米協力実験<sup>1)</sup>は原研のFNS (核融合炉用中性子源) を用いて行われており、初めての工学的な実験と云える。本実験は1984年に開始され来年終了する。この間三つのフェーズに分けて異った実験体系が組まれたが、ここでは第一、第二フェーズの実験内容とその解析結果の概容を紹介したい。特に得られた成果の中で核データに関連した知見を主に取り上げる事が本解説の意図に沿ったものであろう。

さて核融合炉ブランケットと云っても御存知の様に、色々な候補が考えられており、従って増殖材の種類、組成、配置などによりその中性子工学的特性も大きく異なる。ここでは、固体酸化リチウム ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) を増殖材として使い、中性子の増倍材として、最も可能性の高いベリリウムを用いた。測定項目としてはブランケットのトリチウム増殖率の予測精度を明らかにするために、体系中でのトリチウム生成率分布があげられる。また空間及びエネルギー依存の積分量を把握するために各種の反応率分布が測定されている。そして、中性子場そのもののデータを得るために空間依存の中性子スペクトルが測定された。またこれらの実験を解析するに当り、出発点となる中性子源特性が十分な精度で予測できているかを確認する必要があるので、この線源特性に関連する実験も行われた。この実験の解析は、原研と米国でそれぞれ独自に行われ結果の相互比較を行っている。原研でもこのために輸送計算コードの改良、群定数の作成や放射化断面積ファイルの作成等を行った。

### 2. 実験概要

#### 1) 実験体系

フェイズ I 及び II<sup>2)</sup> の実験はFNSの0°方向ビームラインを用いた回転ターゲット室に体系を組んだ。図1に実験室内の配置を示した。フェイズ I では既存の設備を用いた比較的簡単な体系を作るため実験室壁にある貫通孔中に酸化リチウムのブロックを組んで円筒体系を作った。

酸化リチウム体系の大きさは等価直径が63cm，長さ61cmであり，この前面に体系に応じて第一壁，冷却材，増倍材を模擬するために，SUS，ポリエチレン，ベリリウムが置かれた。この実験配置では予想される様に体系への入射中性子は（d，t）反応から直接寄与する部分と，実験室の壁で反射されて入って来る部分があり，特に体系前部では後者は重要であるので，実験室全体を考えた解析を行う必要がある。一方，フェイズⅡでは，この様な不確かさを無くすと共に，より実際のブランケットに近い中性子場を模擬するため，図1の中央に示した様に，中性子源と酸化ナトリウム領域を完全に囲む様に，炭酸リチウムを配置している。その水平断面を図2に示す。このフェイズでは，試験領域の配置と組成をフェイズⅠと同じとしたシリーズ，増倍材の効果を明らかにするため体系内面全体に，5cm厚のベリリウム領域を設けたシリーズ，そして増倍材及び水冷却・チャンネルの非均質効果を研究するためのシリーズと実験が行われた。

## 2) 測定項目

各フェイズ並びにシリーズでは大体似た一連の測定が行われたが，それ等の項目と測定法を示すと

- ①線源特性：試験領域前面での中性子スペクトル，中性子源に面した表面での反応率分布（放射化箔を用いて， $^{58}\text{Ni} (n, 2n)$   $^{57}\text{Ni}$ ， $^{58}\text{Ni} (n, p)$   $^{58}\text{Co}$ ， $^{197}\text{Au} (n, 2n)$   $^{196}\text{Au}$ ， $^{197}\text{Au} (n, \gamma)$   $^{198}\text{Au}$ ， $^{27}\text{Al} (n, \alpha)$   $^{24}\text{Na}$ ， $^{93}\text{Nb} (n, 2n)$   $^{92}\text{Nb}$ の反応率を測定)
- ②トリチウム生成率分布：体系中心軸での $^6\text{Li}$ ， $^7\text{Li}$ 及び天然リチウムによるものを，酸化ベレット，Li金属箔，Liガラス検出器，NE 213検出器，酸化リチウムブロックを用いて測定。
- ③反応率分布：上記①で用いた各反応の他に $^{115}\text{In} (n, n')$   $^{115}\text{In}$ と $\text{Ti} (n, xp)$  Sc反応の空間分布
- ④中性子スペクトル：NE 213及び反跳陽子計数管を用いて1MeV以上及び以下をそれぞれ測定。

## 3. 解析法の概要

即ち実験体系の説明の所で示した様に，本実験を解析するには，複雑な構造をしている回転ターゲットや三次元形状の試験体系を扱わなければならない。従って基準的な輸送計算法としてモンテカルロ法以外は使えない。また，中性子エネルギーが10MeVを越えるので散乱の非等方性を精度良く取扱う必要がある。このため，原研では，多群の二重微分型断面積を作るコードとそれを用いる輸送計算コードMORSE-DD及びDOT-DD<sup>3)</sup>を開発した。125群の群定数はJENDL3/PR1から作成している。一方従来の手法による解析も併せて行ったが，これには，二次元コードDOT 3.5と，JENDL3/PR2から作成したP<sub>3</sub>又はP<sub>5</sub>の125群定数を用いた。なお上記二つのファイルでは $^6\text{Li}$ と $^7\text{Li}$ のデータが異っている。そして各種の反応率計算には，当初ENDF/B-IVとVを用いたがその後FNSで測定した断面積

を取り入れて作成した放射化断面積ファイル (FNS file<sup>4)</sup>と呼んでいる)も併用した。一方米国は、核データとしては、ENDF/B-Vとロス・アラモス研の評価 (<sup>7</sup>LiとBe)を使い、輸送計算はMCNPとDOT 4.3で行っている。放射化断面積としてはORACT (ORNL)及びACTL (LLNL)が用いられた。

核融合炉ニュートロニクスの実験では、(d, t)反応によって放出される中性子を線源とするので、まず(d, t)反応のカイネマティックスに基づいてエネルギー、角度依存の中性子をモンテカルロコードで発生させる。従ってモンテカルロ法による輸送計算では高い精度で中性子源強度が決められる。一方Snコードでは、上記モンテカルロ計算で求めた線源の80°方向(フェイズI)又は0°方向(フェイズII)のエネルギースペクトルを線源スペクトルとして使用した。

#### 4. 実験と解析の比較

実験と解析の比較結果を以下に紹介する。

試験領域で測定されたパラメータに関する検討を行う前に、まずそこへの入射中性子の特性が解析で正しく求められている事を確認しておく必要がある。例えば、回転ターゲットから出て来る中性子のスペクトルは、フェイズIにおいてTOF法を用いて種々の条件下で測定された。その一例についてモンテカルロ計算の結果を示したのが図3である。これは絶対値と比較したものである。(d, t)反応による14MeV近傍のピークの高さ、エネルギーが実験と計算で大変良い一致を示しているが、10MeV以下のターゲット構造材や壁からの散乱成分も精度良く予測出来ている事が分る。次にフェイズIIの様な閉体系で、各種の散乱成分を含む入射中性子スペクトルの例として図4にフェイズII b体系の結果を示す。これは、酸化リチウム領域の前面におけるスペクトルであるがベリリウム層からの反射による低エネルギー成分が多いことが分る。数~10MeV近傍に不一致が見られるが、数keV以上での予測精度は妥当なものと考えられる。

次に箔を用いた反応率測定による線源特性の実験と解析からも種々の有用な結果が得られている。この場合、実験と解析の不一致は、後者の放射化断面積に問題がある場合が多い。その例のひとつとして図5に、Ni(n, 2n)反応率に対するC/E(計算値/実験値)比を示す。これは、フェイズII aの酸化リチウム前面で中心を通過して縦、横方向に反応率分布を測った結果である。ENDF/B-IV(Vも同じである)は10%余りの過少評価を持たず、一方、前述のFNSファイルは数%の過大評価になるがB-IVより大巾な改善が見られる。同様な実験からNb(n, 2n)、Ni(n, p)のB-IV又はVの断面積はいづれも修正すべきで、FNSファイルの方が一致が良い。一方、Au(n, 2n)やAl(n, α)反応に関してはB-IVによる結果は実験と良く合う。

次に本実験の最重要項目の一つであるトリチウム生成率分布について触れる。核データの問題を知る上で良い例として図6に、<sup>7</sup>Liによるトリチウム生成率分布に対するC/E値を示す。

この場合は ${}^7\text{Li}(n, n', \alpha)t$ 反応によりトリチウムが生成されるが、図のJENDL3/PR1を用いた結果は少なくとも10%の過少評価となっており、この反応断面積が小さ過ぎる事を示している。これに対して、米国の結果はB/Vを用いると10%以上の過大評価となるがロス、アラモス研の評価データを用いると数%程度の過大評価に収まる。一方 ${}^6\text{Li}$ のトリチウム生成は、トリチウム増殖の殆んどを占めるので最も重要であるが、酸化リチウムのみではその生成率は数%の精度で予測できる(特に重要な前部で)しかし、酸化リチウムは、中性子増倍材なしではトリチウム増殖比を1.05以上にするのは難しいと思われる。従ってベリリウムが増倍材として用いられる可能性が強い。所がこの場合には、予測精度に問題がある。図7は、ベリリウム層(厚さ5cm)を前面に持つフェイズII bでの ${}^6\text{Li}$ によるトリチウム生成率のC/E値を三種の測定値について比較したものである。この図でベリリウム層の直後(5~7cm)でC/Eが0.8以下になっているが、この領域は絶対値で言えばトリチウム生成が極めて大きい所なので積分したトリチウム生成率に対し大きな過少評価の原因となる。この様な不一致の原因は第一にベリリウムの断面積に問題があると思われるが、決定的な事は分っていない。例えば(n, 2n)反応は重要であるが断面積の値にこれ程の誤差があるとは他の実験結果から考え難く、エネルギー分布に関しても感度解析の結果からは、この不一致を説明するのは容易でない。測定値と共に今後の検討課題として残されている。

最後に、JENDL3/PR1の ${}^7\text{Li}$ の断面積に関する事で明らかとなったのは、図6もそうであるが、全てのしきい反応の反応率分布についてC/E値が図6と同じ傾向、即ち表面からの距離が遠くなるにつれC/E値が減少する傾向があった。これは ${}^7\text{Li}$ の全断面積が過大評価である事を示唆している。ちなみにJENDL3/PR2を用いるとC/E値は平坦になる。これは $\sigma_t$ が小さくなったためであり、JENDL3にもこの値がほぼ採用されている。

以上、日米協力実験の内容とそれから得た結果の一部を紹介したが、紙面の都合で概容しか書く事が出来なかった。後にこれまで発表した文献を付けたので、興味のある方は是非参照して頂きたい。これらの実験と解析の結果が核データの評価に反映される事を期待して止まない。

## 参 考 文 献

- 1) Nakamura T. and Abdou M. A. : Fusion Technol. 10,541 (1986)
- 2) Nakamura T. and Abdou M.A. : ISFNT, Tokyo (1988)
- 3) Mori T., Nakagawa M. and Sasaki M. : JAERI - 1314 (1988)
- 4) Ikeda Y. et al. : JAERI - 1312 (1988)

以上の他に本協力実験の成果は下記の文献に発表されている。

- Oyama Y. et al. : Fusion Technol. 10,585 (1986)
- Youssef M.Z. et al. : ibid 10,549 (1986)
- Nakagawa M. et al. : JAERI-M 85-201 (1985)

- Nakagawa M. et al. : JAERI -M 88-177 ( 1988 )
- Nakagawa M. et al. : Proc. Int . Cont. on Nuclear Data for Science and Technol.  
221 ( 1988 )
- Oyama Y. et al. : Fusion Technol. 15, 1293 ( 1989 )
- Youssef M.Z. et al. : ibid, 15, 1299 ( 1989 )
- Oyama Y. et al. : Fusion Eng. Design, 9, 309 ( 1989 )
- Ikeda Y. et al. : ibid, 9, 303 ( 1989 )
- Nakagawa M. et al. : ibid, 9, 315 ( 1989 )

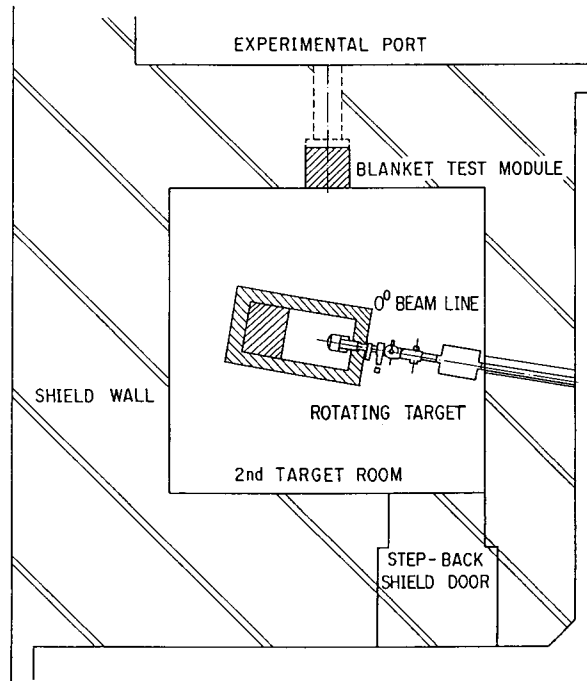


図1 FNS第2ターゲット室におけるフェイズI及びIIの実験体系の配置

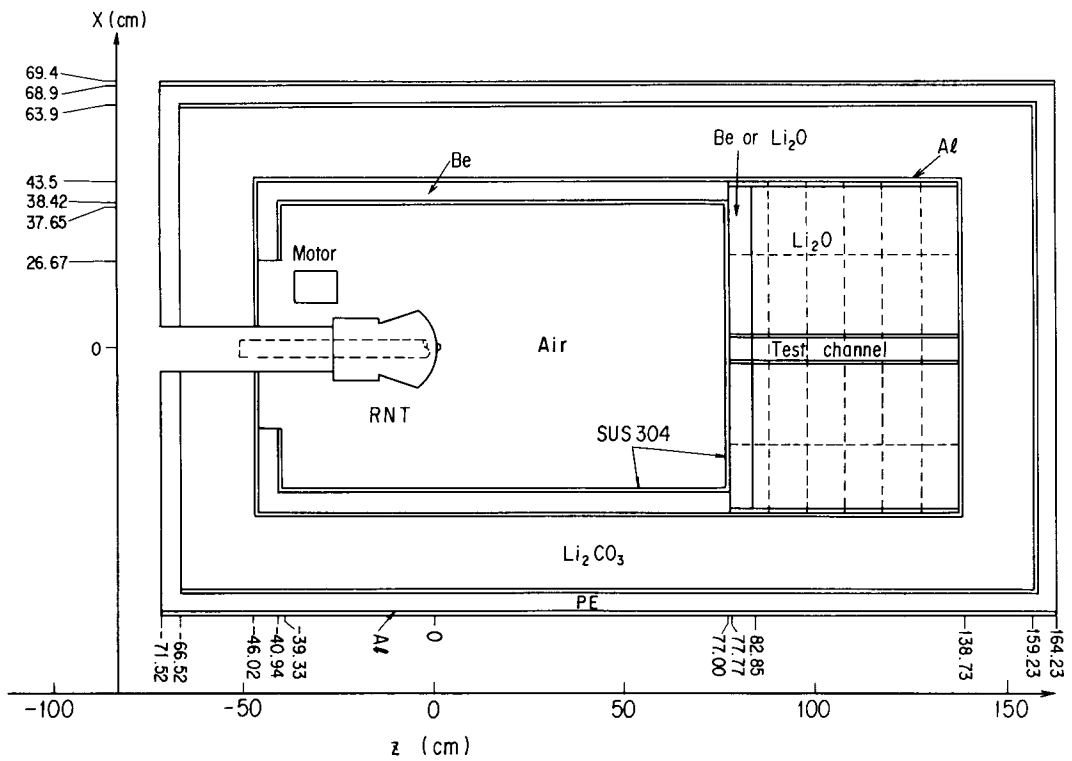


図2 フェイズII実験体系の配置

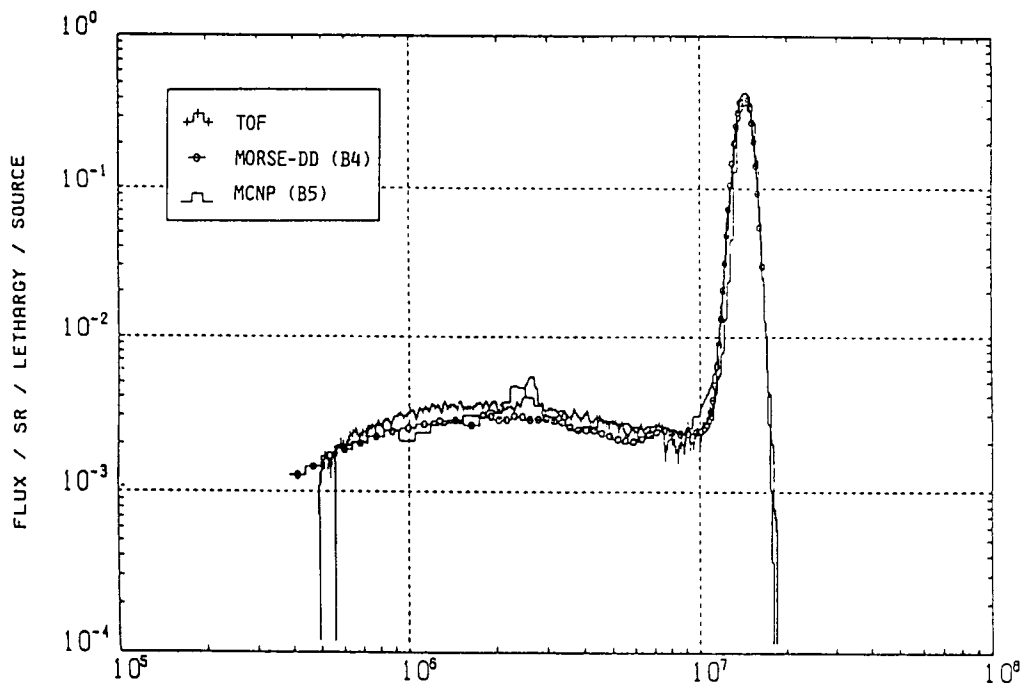


図3 回転ターゲットからの中性子スペクトル, TOF測定と解析の比較

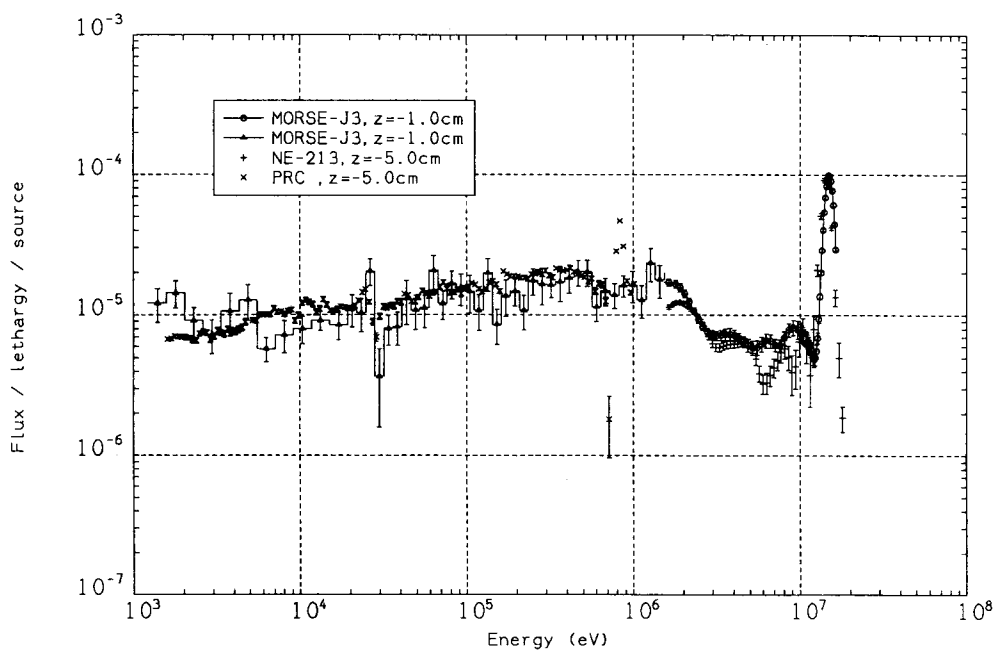


図4 フェイズII試験領域前面における中性子スペクトルの比較

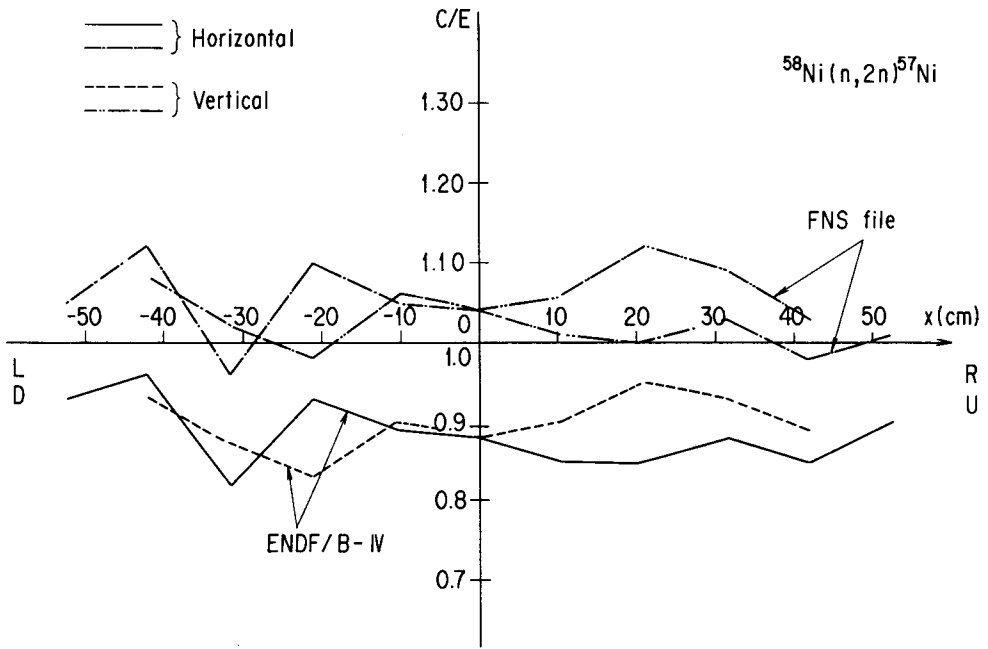


図5 フェイズII試験領域表面におけるNi (n, 2n) 反応率に対するC/E値

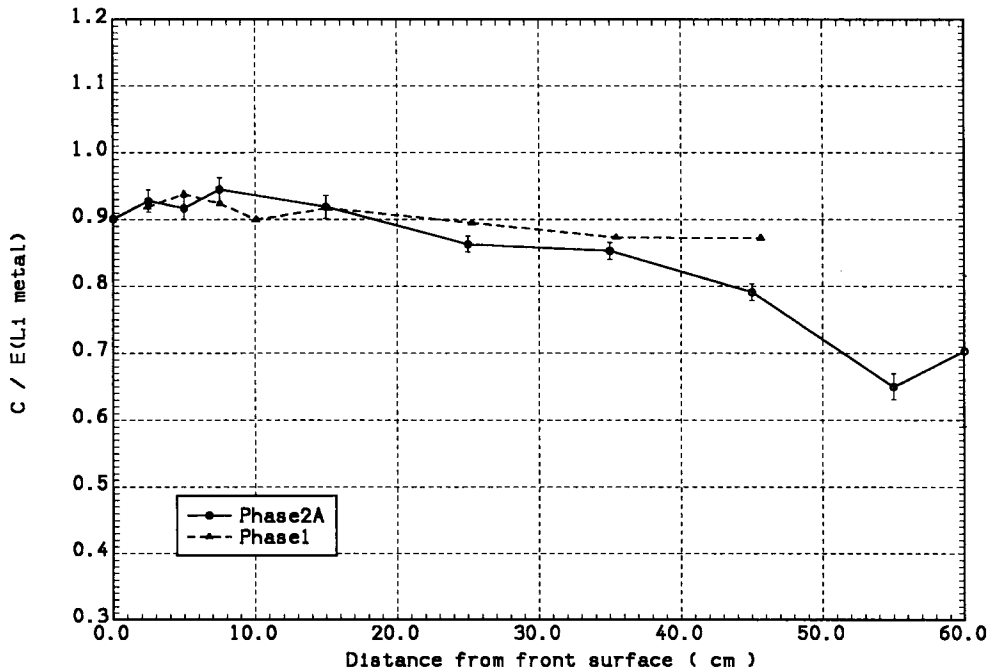


図6  ${}^7\text{Li}$ によるトリチウム生成率分布のC/E値



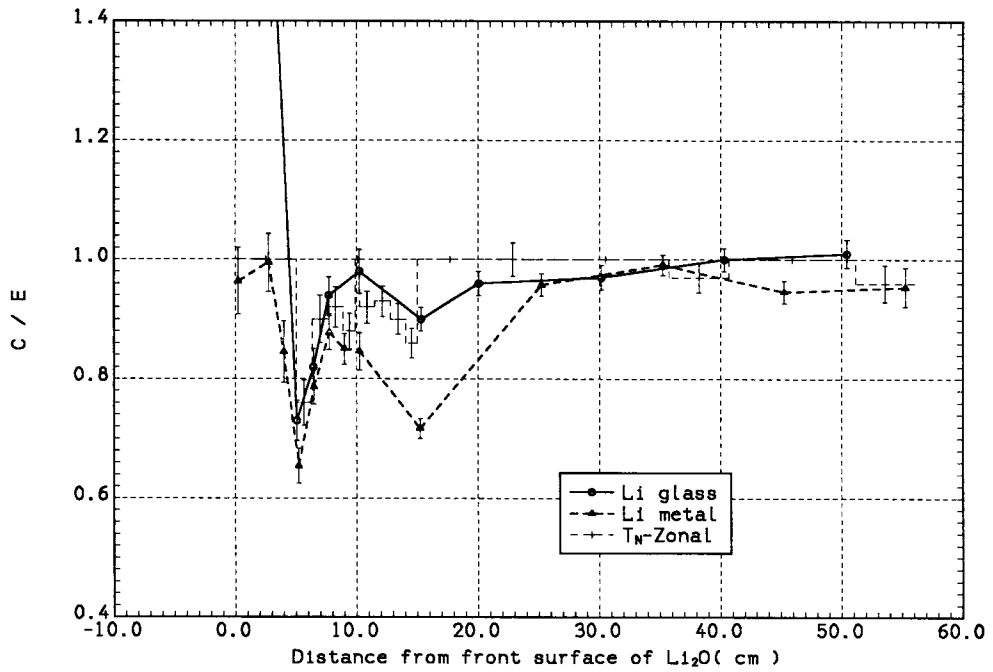


図7 ベリリウム層を前面に持つ体系（フェイズⅡb）における ${}^6\text{Li}$ によるトリチウム生成率のC/E値