

核データ部会・「シグマ」特別専門委員会合同企画セッション

(3) 核融合炉関連核データに関する測定の現状と今後の課題

東北大学

サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

馬場 護

babam@cyric.tohoku.ac.jp

1. はじめに

西谷氏によって述べられたように、核融合炉設計では、14 MeV 中性子による照射損傷から機器を保護するとともに、中性子を用いてエネルギーを回収し、トリチウム燃料の増殖を達成する、というエネルギー装置としての成立要件を満たすことが要請される。それには、1)核融合炉内外での中性子スペクトルと 2)関連する核反応断面積、3)及び反応生成粒子のエネルギー分布、角度分布などの微分断面積、を正しく知ることが必要である。中性子スペクトルは 14.1 MeV の核融合中性子が構成材核種と衝突し、減速しながら方向を変えることによって形成されるから、散乱や核反応に伴う二次中性子のエネルギー・角度分布が問題となり、エネルギー回収に関連しては、二次荷電粒子や二次 γ 線によってブランケットに与えられるエネルギーが問題であるので、荷電粒子や γ 線の生成断面積とそのエネルギー分布が必要となる。また、強大な中性子束が存在する核融合炉においては、放射化に伴う崩壊熱が核融合炉の受動的安全性にとって障害となることが懸念され、放射化量と崩壊熱の予測が重要課題となっている[1]。

これらのデータは実験手法の観点からは、1)中性子散乱及び生成エネルギー・角度分布データ、中性子による 2) γ 線生成断面積、3)荷電粒子生成断面積、4)放射化断面積、に大別することができる。1)~3)は強い角度依存性を持つため、角度ごとのエネルギー・スペクトル、すなわち二重微分断面積 (DDX) で与える必要がある。なお、中性子輸送の計算には中性子全断面積も高い精度が必要であるが、ほとんどの核種について 1%程度の精度が達成されており、それについての議論は省略する。

エネルギー的には 14 MeV から、熱中性子領域までにわたって必要となるが、5 MeV 以下の領域は原子炉のための核データとして整備が進められてきたので、5 MeV~14 MeV 領域が核融合炉特有のエネルギー範囲と見ることができる。

一方、 ${}^7\text{Li}(d,n)$ 反応中性子を用いる国際核融合材料試験装置 IFMIF の場合には、中性子スペクトルが 55 MeV 程度まで延び極めて強い角度依存性をもつため、中性子スペクトル

の詳細と 50 MeV 程度までの範囲で(n,p), (n, α)断面積、弾き出し断面積 DPA、核発熱定数 KERMA が必要となる。それも基本的には、上で述べた 1)~4)に帰着するが、エネルギー範囲が大幅に異なり新たな取り組みが必要とされる[1]。

ここでは、核融合炉核データを実験手法の観点から、1)中性子生成 DDX、2)荷電粒子生成、3) γ 線生成、4)放射化、5) IFMIF 関連データ、に分類して、実験手法の概要、データの現状と課題を述べる。

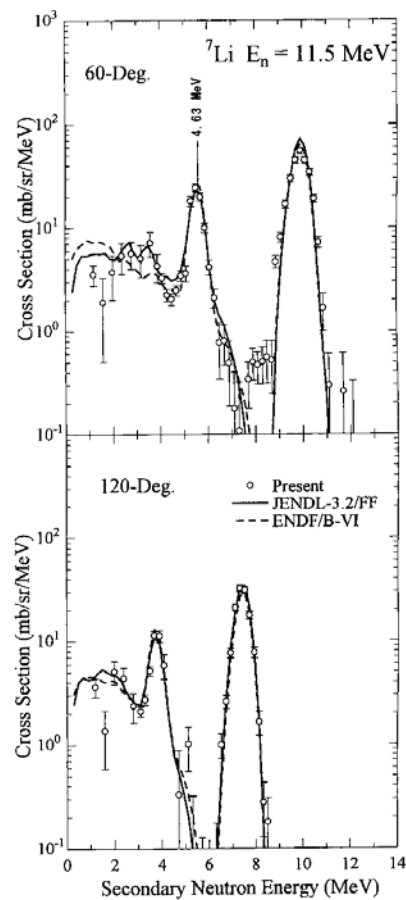
2. 実験手法とデータの現状

(a) 中性子生成 DDX :

二次中性子スペクトルを散乱角度の関数として測定することによって求められる。データの例を図 1 に示す[2]。スペクトルはこの例のように、非弾性散乱ピークなど多くの構造を持ち、かつスペクトルが広範なエネルギー範囲にわたるので、測定系には高いエネルギー分解能と広い測定範囲（ダイナミックレンジ）が必要であり、そのための工夫が種々行われてきた[2,3]。図 2 は、東北大における測定装置[3]であり、サンプルに単色中性子を入射させて、二次中性子を最大 8m 飛行させてエネルギー分布を測定するもので、バックグラウンドを低減する工夫が施されている。

このように測定には単色中性子を入射させる方式が主であるが、連続スペクトル中性子をサンプルに入射させ、サンプルに近接させた中性子検出器で波高分布を測定し、それをアンフォールドする方法も使われてきた。しかしこの方法は、エネルギー分解能が低いため、補助的な役割となっているのが現状である。

14MeV 中性子に関しては阪大[4]、東北大で TOF 法を用いて高いエネルギー分解能で広いエネルギー範囲をカバーする体系的な測定が行われ、それらのデータはモデルの開発や評価にも大きなインパクトを与えた。その結果、JENDL や ENDF の主要な核種についてのデータは微分、積分実験の再現性については、ほぼ満足すべき結果を与えている。



(b) 11.5 MeV

図 1. DDX データの例 [2]

しかし、鉄や Be 等の場合には、大量の材料がバルクで使用されるため、高い精度が要求される。これらについては、ベンチマーク実験との比較でまだ不一致が残っており、評価データの改訂が進められている。また、単色中性子源が存在しない 14 MeV~8 MeV のいわゆる「ギャップ領域」については、データが非常に限られ、評価データの精度も明らかではない。これらの重要度は 14 MeV の場合ほど高くはないが、今後の課題である。

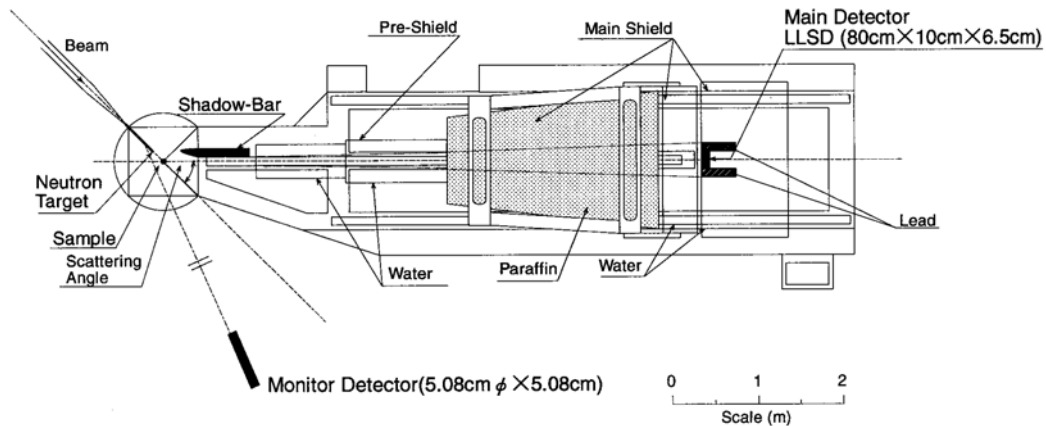


図 2. 東北大における DDX 測定の実験体系 [3]

(b) 荷電粒子生成断面積：

14 MeV 以下では(n,p), (n,α)反応が主であり、数 MeV で反応が起こり始め、14 MeV ではかなりの大きさの断面積となり、核発熱と照射損傷の原因となる。

トリチウム増倍には⁶Li(n,t), ⁷Li(n,n't)反応が用いられるが、誤差が大きかった後者については、トリチウムを測定するトリチウムカウンティング法で精密実験がいくつか行われ低い値で決着がついた。このため、トリチウム増倍を達成するには中性子増倍が不可欠なことが明らかになった[1]。

測定には、1)放射化法、2)ヘリウム集積法、3)カウンター法、が用いられる。1)は手法が簡単であるが残留核が放射性である場合にしか適用できない上に、核発熱や損傷の評価に必要なエネルギースペクトルの情報が得られないなどの限界がある。2)の場合は、生成したヘリウムを質量分析器で計測するため残留核が放射性である必要はなく、強力中性子源を用いて多くのデータを与えたが、エネルギースペクトルデータが得られない点では放射化法と同様である。従って、カウンター法が重要となるが、試料を薄くしなければならず、圧倒的な原子数を有する検出器容器や検出器自身からのバックグラウンドに埋もれないよう、検出器にさまざまな工夫が必要である。検出器が大きな立体角を有し多重同時計数や粒子識別によって検出器におけるバックグラウンドを徐去する性能が

ポイントとなる。'80年代には、図3に示すような検出器をターゲットから1~2m離し目的とする二次荷電粒子を4重極電磁石で検出器上に収束させる測定法[5]が米国LLNLのRTNS-I, IIなどの強力中性子源で活躍したが、全エネルギー範囲を測定するのに磁場を変えた測定を多数回行う必要があり他の手法にとって代わられた。

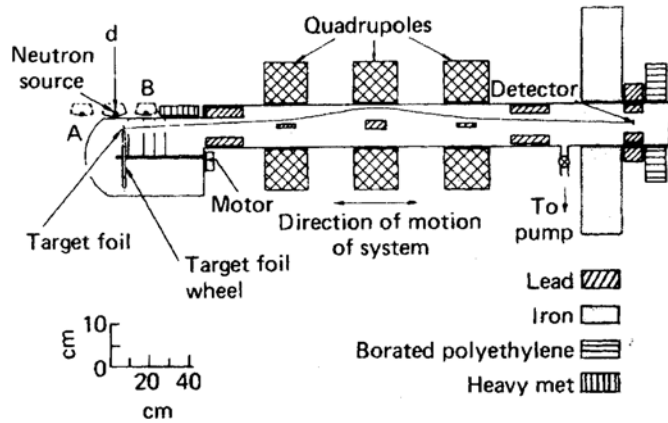


図3. 4重極マグネットを用いた中性子による荷電粒子生成断面積測定の手法[5]

14 MeVについては、4重極電磁石法や大立体角形カウンター法、と放射化法やヘリウム集積法による一連の(n,α)断面積データがあり、評価においてもほぼ収束が見られている。しかし、中性子 DDX の場合と同様、14~8 MeV のギャップ領域では、Ohio 大学 (エネルギーと TOF の測定 : E-TOF 法)、EURATOM-Geel (多重カウンターテレスコープ)、東北大 (4π グリッド電離箱[6]) 等で測定が行われてきたが、データが限られデータの精度もまだ明確とは言えない。図4, 5に測定法[5]と測定結果[6]の例を示す。近年、LANSCE

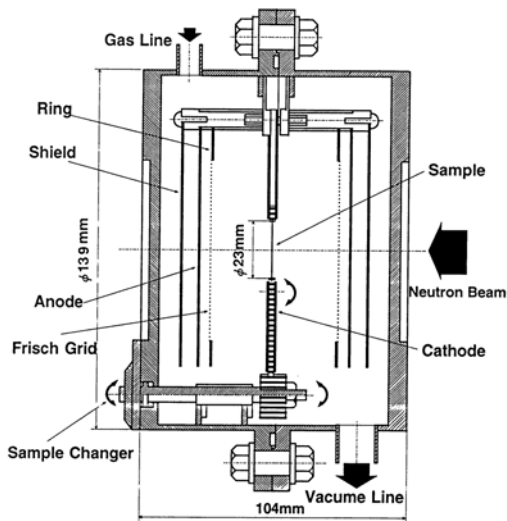


図4. 4πグリッド電離箱を用いた(n,α)断面積測定法 [6]

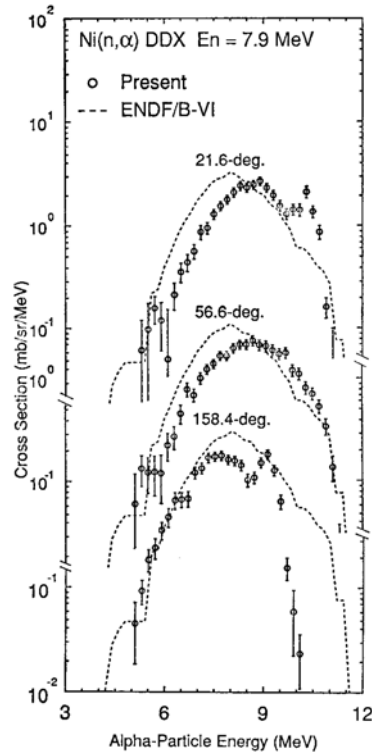


図5. Ni(n,α) DDX の実験値

などの核破碎中性子源で行われている測定[7]ではこのエネルギー範囲もカバーされており、新たなデータ供給源として期待される。

反跳原子スペクトルデータも損傷評価に必要であるが、直接測定は極めて困難で、殆ど例がない。2体反応の場合とはかく、3体反応や(n,n'p)などの2段階反応の場合モデル化自体が問題となる。

(c) γ 線生成断面積：

γ 線発熱評価と γ 線遮蔽とのために必要であり、この1種である中性子捕獲反応は、中性子吸収反応として原子炉で非常に重要なデータなので、低エネルギー領域で多くの測定がなされてきた。測定は、単色または連続スペクトルを持つ中性子をサンプルに入手させ、放出される γ 線を、NaI(Tl)やBGOなどの γ 線スペクトロメータを用いて測定することによって行う。図6、7に単色中性子を用いた場合の実験配置と結果の例[8]を示す。

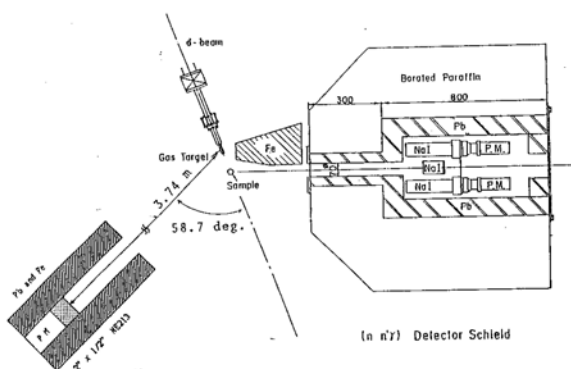


図6. 単色中性子を用いた γ 線生成断面積測定体系[8]

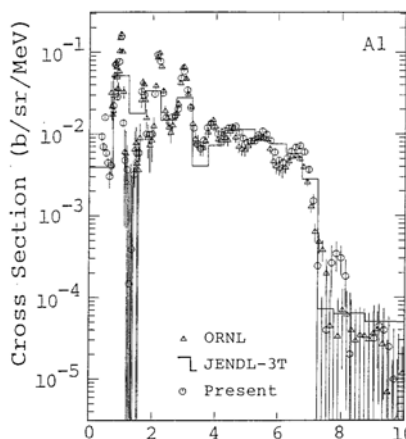


図7. Alの γ 線生成断面積[9]

近年、このような γ 線生成データを直接意図した工学的な実験は少ないが、 γ 線スペクトルからは核構造や核反応機構に関する情報が得られることから、強力な核破碎中性子源やライナック中性子源などの連続スペクトル中性子を用いた γ 線スペクトル測定が数多くなされてきた[9]。その場合にはGeなどの高分解能 γ 線検出器を多数使い、図8のような 4π に近いジオメトリのもとで γ 線間の多重同時計数によってバックグラ

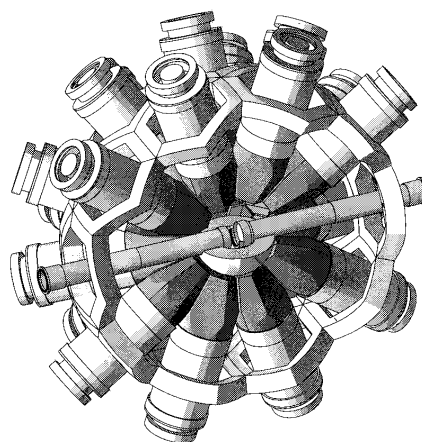


図8. 4π 型 γ 線スペクトロメータ[9]

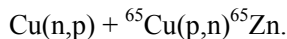
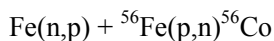
ウンドを低減し、多様な情報を取得する実験が進められている。こうした測定は、数十 MeV 領域までもカバーしているの、そのデータの解析から、従来データの少なかった核融合に特有な 8 MeV 以上の領域でのデータが得られることが期待される。

(d) 放射化断面積：

放射化は実験が比較的容易で、14 MeV 領域では実験値自体は多数存在するが、一貫した手法による系統的なデータは意外に少なく、系統誤差が疑われるデータも少なくない。また、14 MeV 以外のデータが限られているのは、他の場合と同様である。

原子力機構 FNS[10]や大阪大学 OKTAVIAN において強力中性子源を用いた系統的な実験が行われ、断面積の小さい反応や急峻な励起関数を有する反応についても 14 MeV 近傍については信頼できるデータが蓄積されてきた。又この手法で d-D 反応を用いたデータもある程度蓄積された [8]。また、従来データの少なかった 14 MeV ~ 20 MeV の領域で EURATOM IRMM のグループが 7 MV バンデグラフを単色中性子源として精力的な測定を行っており [11]、図 10 に示すようなデータを得ている。これらは、理論計算の参照データとして、そして次節で述べる IFMIF 用のデータとしても貴重なものである。

これらによって、主な一段階反応については、データの信頼性はかなり高いものとなってきたと言えるが、核融合炉の大強度中性子束環境下では 1 ステップ目で生成した核種がさらに反応を起こすカスケード反応による放射化も問題となる [8]。例えば



その評価には中間状態となるアイソマーや不安定核に関するデータも要求されるようになる。こうした現象は、加速器駆

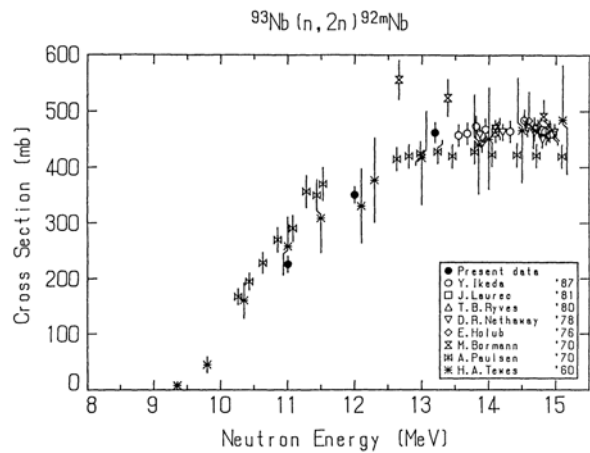


図 9. ${}^{93}\text{Nb}(n,2n){}^{92m}\text{Nb}$ 放射化断面積データ [10]

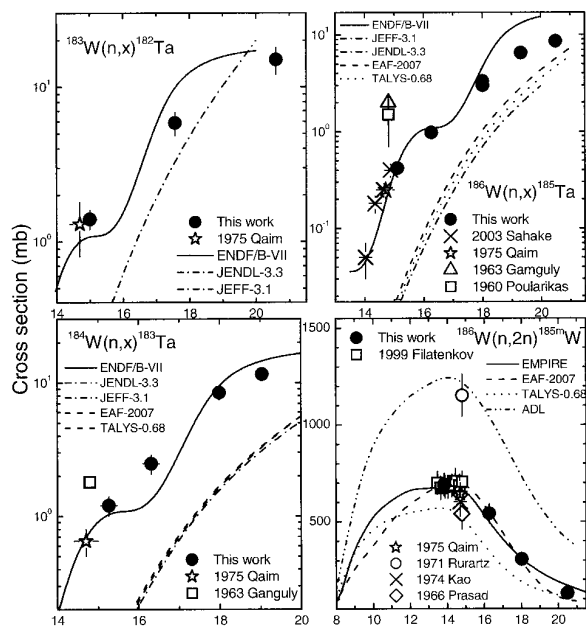


図 10. 14MeV 以上における放射化断面積データ [11]

動システム（ADS）や宇宙核物理学でも問題となり、核データ分野にとっては今後の新しい課題であり、核物理分野との連携が期待される。

(e) IMFIM 関連データ：

IFMIF での中性子のスペクトルは図 11 中の“0-deg”のようなものであり、実際の核融合炉におけるものとは大幅に異なる。そのため、IFMIF において観測された照射効果を核融合炉におけるものと対応づけるためには、

1)中性子源スペクトルの確定、2)そのスペクトルのもとでのヘリウム・水素の生成、DPA、KERMA の評価、3)放射化量の推定等、が必要となる[1]。

1)中性子源スペクトルについては、東北大で厚いターゲットと薄いターゲットに関する系統的な測定が行われ[12,13]、図 11 に示すような結果が得られている。これによってスペクトル形状と角度依存性が明らかになり、ドイツ ZfK で半経験的な解析、九大で理論的な解析が進められているが、まだ十分な再現は得られておらず、新たなモデルの開発を含め今後の進展が期待される。

2), 3)の評価には、55 MeV 近傍までの荷電粒子と γ 線の生成微分断面積、放射化断面積

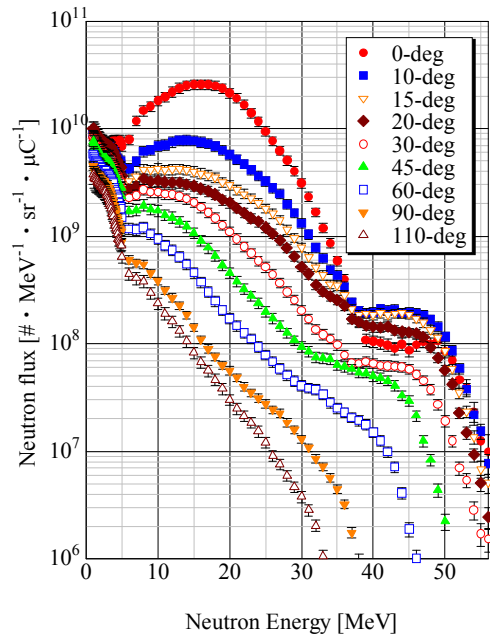


図 11. 40 MeV における Li(d,n)中性子スペクトル[12, 13]

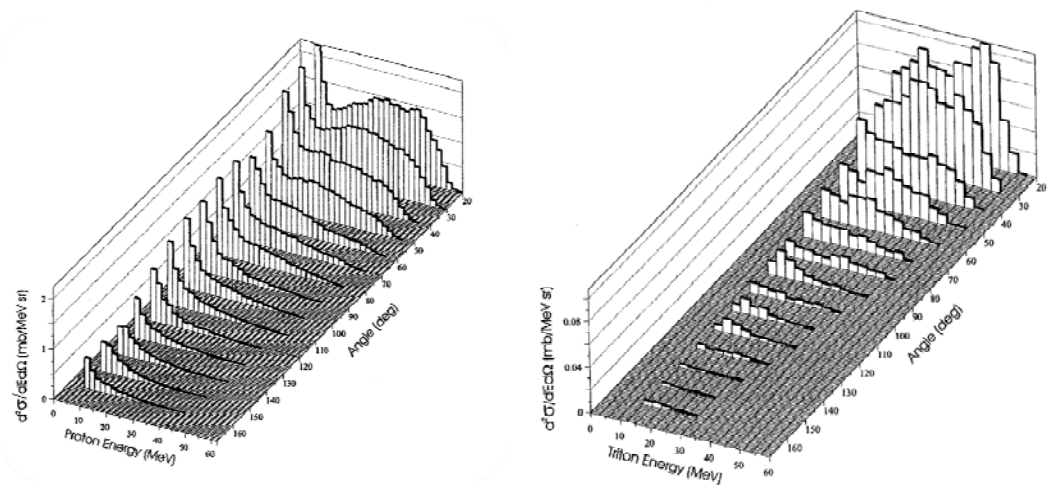


図 12. 62.7 MeV 中性子に対する Al(n,xp)データ（左）と Al(n,xt)データ（右） [17]

等が必要となる。(n,p), (n, α)反応等の荷電粒子生成断面積は、主要核種についてはある程度の実験データが存在し[7,14,15,16]加速器駆動システム (ADS) 等との関連で計算コードの開発も進められてきているので、理論計算を基礎に評価を行うことが可能と考えられる。しかし、理論計算の結果は、(n,d), (n, α)等複合粒子生成については再現性が十分とはいえない[15,16, 図 13 参照]のが現状であり、今後の進展に待つところが少なくない。

また、放射化断面積については、実験データ自身極めて乏しく、またデータが存在しても実験の誤差がかなり大きい[18,19] (図 14)。これは主として、20 MeV 程度を越えると中性子が単色でなくなり、非単色成分によるバックグラウンドを差し引く必要があるからであるが、この事情が急速に改善される見通しはない。一方、陽子入射反応についてはかなりのデータが存在する[20]ので、理論計算を媒介として中性子入射の場合を推定するなどの手法が必要と思われる。なお、入射重陽子ビームによる放射化に関しては、ハンガリー ATOMKI[21]、東北大、原子力機構 FNS 等においてスタックターゲットによるデータが得られており、加速器構成材の選択等に利用されている。

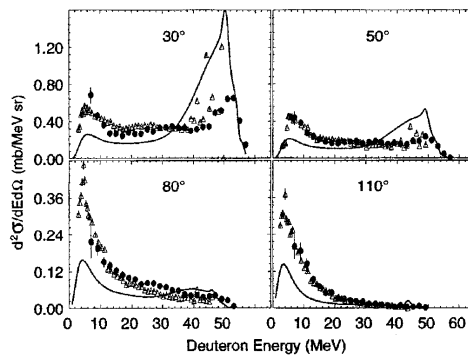


図 13. 62.7 MeV 中性子に対する Al(n,d,x) DDX の実験値と計算値[17]

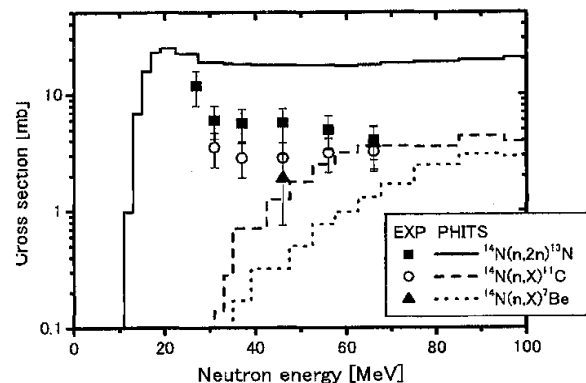


図 14. 窒素に対する中性子放射化断面積[19]

3. 今後の課題

以上見てきたように、核融合炉設計に必要な基本的なデータはほぼそろってきたと見ることができるが、全体としてまだ十分ではなく、今後、データの少ない領域及び実験データが無いが実験が困難な種類のデータに意識的に取り組む必要がある。特に、13 MeV から 8 MeV までのデータの空白領域や、IFMIF で必要な 20 MeV 以上の領域については実験データ自体が少なく、その信頼性を検証するためのデータも十分ではない。また、ITER 等など実機レベルの装置においては、二段階カスケード反応などで生成する放射化や核変換が問題となる可能性があり、それらについての検討も重要となろう。

今後は、直接の測定が困難な対象が多く、理論計算を中心にデータベースの確立を進めることになると考えられるが、信頼性を確保するためにはやはり実験データによる検証が不可欠であり、典型的な条件下での信頼性の高いデータを取得することは従来と同様に重要であり、それによって、着実に計算モデル、データベースの改善を進めていくことが重要と考えられる。

参考文献

1. U. Fisher, *Proc Int. Conf. Nuclear Data for Sci. & Technol.* 2007, Nice, p.973
2. M. Baba et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 31 (8), (1994) 757
3. M. Ibaraki et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 35 (12), (1998) 843
4. A. Takahashi et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 25, (1998) 843
5. M.S. Grimes and R.C. Haight, *Phys Rev.*, C19 (6), (1979) 2127
6. N. Ito, et al., *Nucl. Instrum. Methods*, A337, (1994) 474
7. R.C. Haight, *Proc Int. Conf. Nuclear Data for Sci. & Technol.* 2007, Nice, p.415
8. M. Mizumoto et al., *Proc Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. & Technol.* 1988, Mito, p.197
9. C. Lampoudis et al., *Proc Int. Conf. Nuclear Data for Sci. & Technol.* 2007, Nice, p.595
10. Y. Ikeda, A. Kumar, C. Konno, *Proc Int. Conf. Nuclear Data for Sci. & Technol.* 2001, Jülich, p.364, and Refs therein
11. V. Semkova et al., *Proc Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. & Technol.* 2007, Nice, p.559
12. M. Hagiwara et al., *Proc. 11th Int. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM-11)*, (2004) p.329
13. M. Hagiwara et al., *J. Nuclear Materials*, 329-333, Part 1 (August 2004), 218-222
14. M. Baba, *AIP Conf. Proc. Int. conf. on Nuclear Data for Sci. Technol. Santa Fe* (September 2004), p.884
16. Y. Nauchi et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 36 (2), (1999), 143
17. S. Benck et al., *Phys Rev.*, C58 (3) (1998) 1558
18. H. Yashima et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, Supplement 4, (2004) 70
19. E.J. Kim et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 36 (1), (1999) 29
20. R. Michel, et al., *Nucl. Instrum. Methods*, B129 (1997) 153
21. F. Tárkányi et al., *Proc Int. Conf. Nuclear Data for Sci. & Technol.* 2007, Nice, p.1027