

我が国の核データ測定施設の展望と世界情勢 (1)

東北大学における核データの実験的研究

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

東北大学では、工学部 4.5 MV ダイナミトロン、原子核理学研究施設 (核理研) 電子リニアック (300 MeV)、サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター (CYRIC) の AVF サイクロトロン (p 90 MeV) の加速器施設において、核データに関連した実験的研究が行われてきた。

ダイナミトロンにおいては、0.1 MeV から 20 MeV までの単色中性子源を用いて、原子炉や核融合炉を対象とした実験が系統的に行われてきた。

核理研においては、制動放射を用いた (γ, n) 中性子の角度依存スペクトルなど光核反応データの測定が行われていたが、最近報告はない。

CYRIC では高分解能 TOF 装置を用いて、(p,n) 中性子スペクトルの測定や $^7\text{Li}(p,n)$ 疑似単色中性子を用いた遮蔽体透過実験などが行われてきたが、平成 10~12 年サイクロトロンが更新され、数十 MeV の p, d ビームと TOF 装置、その他を用いて、数十 MeV 領域で p, d と中性子に対する核データ実験を進めている。

以下、ダイナミトロン及び CYRIC における実験を紹介し、今後の見通しについても触れる。

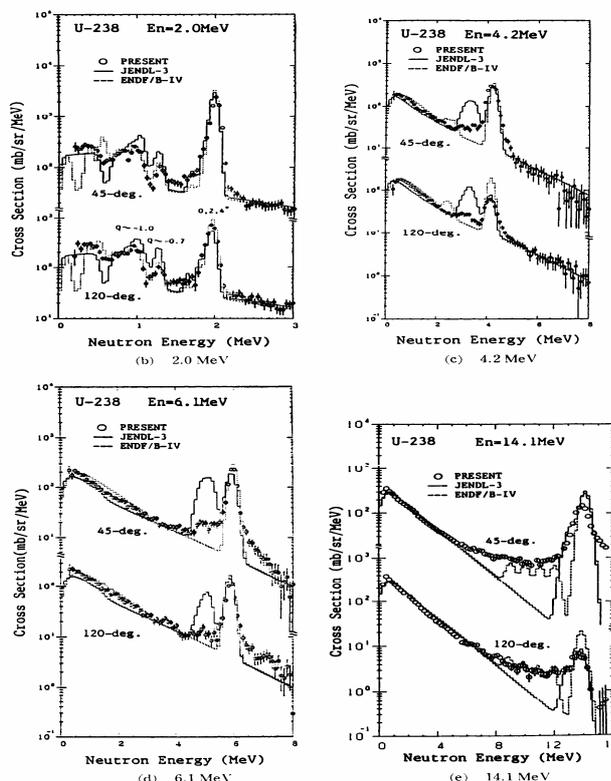


Fig.1: ^{238}U 二重微分断面積

2. ダイナミトロンにおける実験

同加速器では、種々の中性子生成反応を組み合わせることによって、7.5~13.5 MeV を除き 120 keV から 20 MeV までの間でパルス状単色中性子を発生させ、TOF スペクトロメータと組み合わせることによって、1) 中性子生成二重微分断面積(DDX)、2) 核分裂断面積、3) (n,p), (n, α) DDX、4) 放射化 $\cdot\gamma$ 線生成断面積などの系統的な測定を行ってきた。ここにおける実験の特長は、0.5~7 MeV, 14 MeV, 18 MeV など 14 MeV を含む種々のエネルギーに対する系統的なデータであり、これによって DDX や断面積のエネルギー依存性を明らかにし核データ評価に有益な情報を提供した。Fig.1 にその例として ^{238}U についての DDX データの例を示す。2 MeV から 14 MeV まで入射エネルギーによって二次中性子スペクトル及び部分断面積の変化する様子が明らかである。

ダイナミトロンを用いた一連の実験はひとまず終了し、現在主な実験はサイクロトロンを用いて行われている。

なお、単色中性子源は各種中性子検出器の特性試験や半導体のソフトエラー評価などに現在でも有効に用いられている。

3. サイクロトロンにおける実験

サイクロトロン実験室のレイアウトを Fig.2 に示す。p, d, α の軽イオンに加えて、C, N, O, Ar などの重イオンの加速も行われている。a) 5 コースのビームライン、b) ビームスウィンガーと TOF 装置 (フライトパス最長 45m)、c) パルスビームの間引き装置 (ビームチョッパー)、d) $^7\text{Li}(p,n)$ 疑似単色中性子源、e) 自動試料照射装置などが整備されており、これを用いて、1) (p,n), (d,n) 反応による厚いターゲット、薄いターゲットからの角度依存中性子スペクトル、2) p, d, 中性子による放射化断面積、3) フラグメント (重二次荷電粒子) 生成断面積の測定、を行い、また 4) 数十 MeV の陽子、中性子を用いた高速核分裂データ測定の準備、を進めている。

ビームスウィンガーの利用によって、検出器系を固定したまま二次中性子の角度分布を測定でき、角度依存中性子スペクトルの測定に威力を発揮している。これらのデータは、J-PARC や IFMIF (国際核融合炉材料照射試験装置) など加速器施設や中性子源の設計、遮蔽設計などに必要なものであるが、大型加速器周辺や宇宙など高エネルギー粒子環境における半導体素子のソフトエラーや線量の評価にも不可欠である (特に 3))。4) は、「革新的原子力システム」のプロジェクト研究の一部として進めているもので、近々実験を開始できる見通しである。

以下に実験結果の例を挙げる。

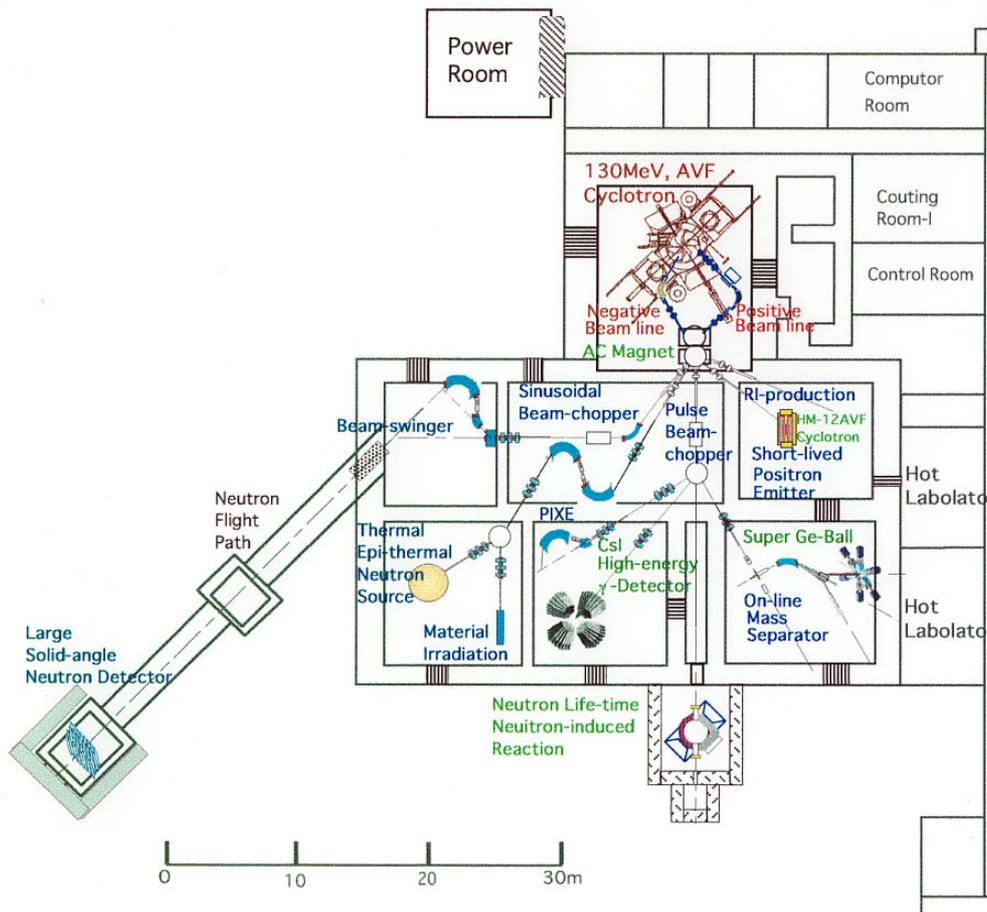


Fig.2: 東北大学サイクロトロン の 平面図

(<http://www.cyric.tohoku.ac.jp>)

1) (p,n), (d,n)中性子スペクトル

これらはターゲット設計や遮蔽設計に直接必要であるが、データは非常に乏しく、特にスペクトル全体をカバーしたデータは数例しかない。

50 MeV 陽子に対する C, W の厚いターゲットからの中性子スペクトルの角度依存性を Fig.3 に示す。二つの実験体系を組み合わせることによってスペクトル全体をカバーしている。実験結果を LA150 と比較している。LA150 は従来のファイルに比べて非常に良く実験値を追従しているが、依然としてかなりの差異を示している。これらの差異は我々が進めている BNCT (硼素捕捉療法) 用減速中性子源のスペクトルに直接影響し、無視できない設計誤差をもたらすことが分かった。現在まで、(p,n)について、35, 50, 70 MeV において、C, Al, Fe, Cu, Ta, W, Pb のデータを得ている。

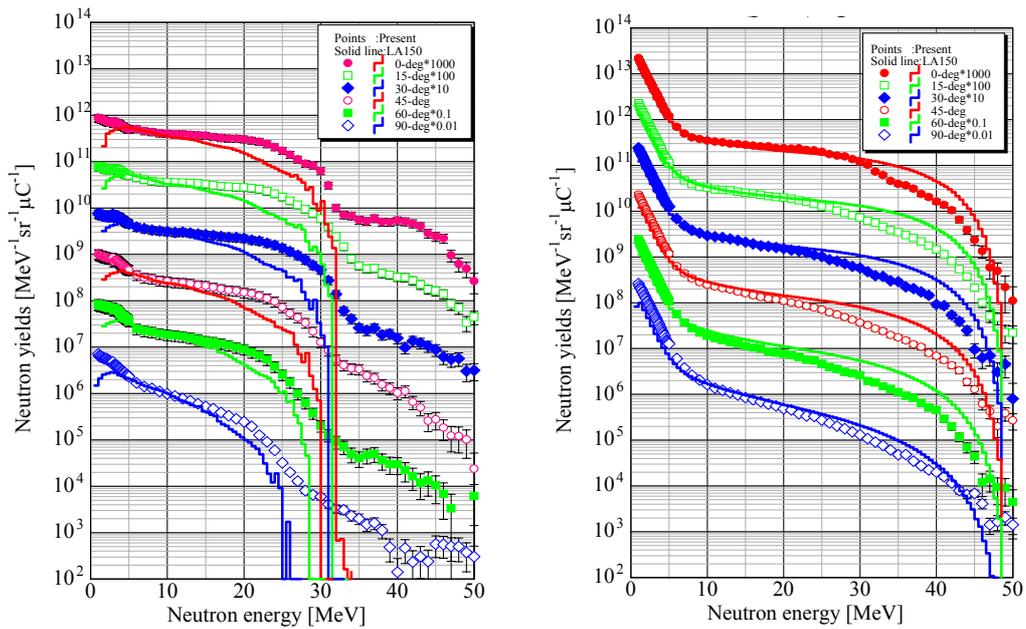


Fig.3: 50 MeV 陽子に対する厚いターゲットからの(p,n)、中性子スペクトル
C ターゲット (左)、 W ターゲット (右)

Li の厚いターゲットと薄いターゲットからの(d,n)中性子スペクトルの実験結果を Fig.4 に示す。厚い Li ターゲットからの中性子スペクトルは、IFMIF のテストセルの設計や照射後解析に不可欠であるが、従来のデータは不完全である上に、データ間の食い違いも大きい。今回のデータによってスペクトルの形状と角度依存性が高エネルギーテイルを含めて明らかになった。現在、KfK のグループなどが中性子スペクトルのモデル化を進めているが、実験結果は彼らの結果とかなり違い、薄いターゲットに対する測定はその原因を調べるために行ったものである。

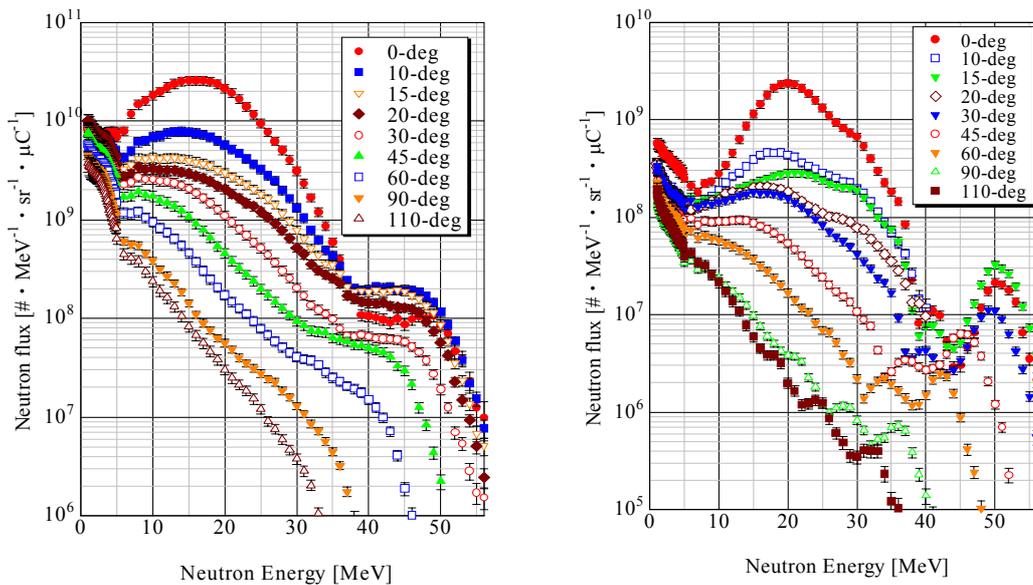


Fig.4: Ed=40 MeV における Li(d,n)中性子スペクトル
厚いターゲット (左) — 5 — 薄いターゲット (右)

2) 放射化断面積

Fig.5 に中性子に対する $^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$ 断面積の例を示す。これは $^7\text{Li}(p,n)$ 疑似単色中性子源を用い、テイル成分の寄与を補正して得たものである。20 MeV 辺を超えるとこのような面倒な手続きが必要となる上、中性子源強度に限りがあるため、実験データは極めて少ない。この反応は中性子による空気の放射化を評価する上で重要であるが、今回の結果は PHITS の計算値の半分程度しかないことが注目される。他の反応の場合も計算値とは違いを示し、実験値の集積が必要と考えられる。

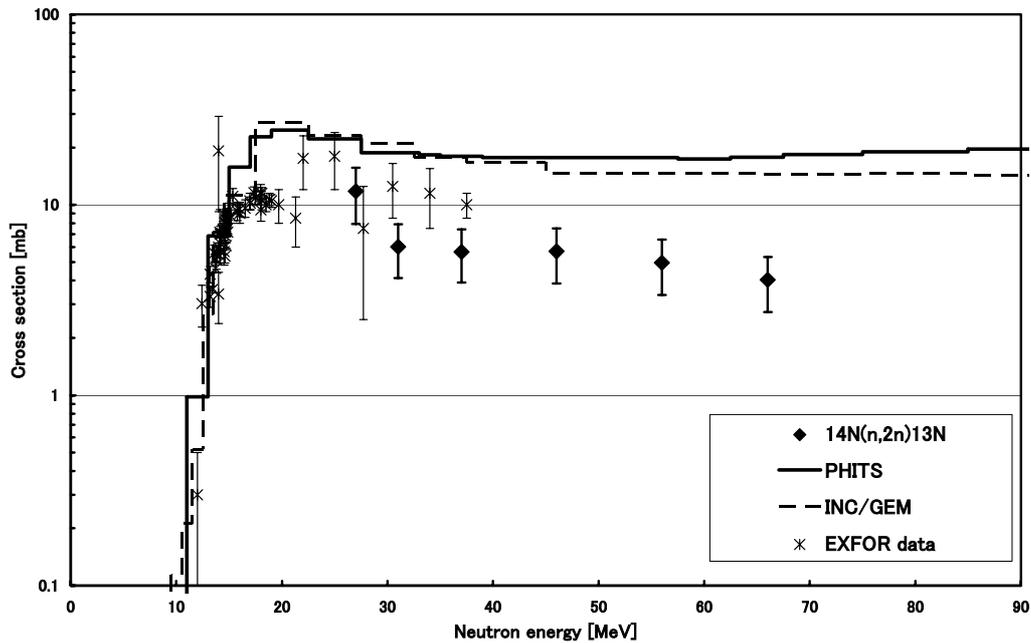


Fig.5: $^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$ 断面積の実験結果

3) フラグメント生成断面積

陽子や中性子によるフラグメント生成の微分断面積データは、大型加速器周辺や宇宙環境における半導体ソフトエラー、照射効果や線量の評価などに必要と考えられるが、実験の困難さからデータは非常に乏しい。我々は、ブラッグカーブスペクトロメータ (BCS) とエネルギー・TOF 法を用いて、数十 MeV 核子に対するフラグメント生成 DDX の測定を開始し、中性子に対するデータを世界で初めて得た。現在実験方法の改良を行いつつデータの集積を進めている。Fig.6 に実験結果の例を示す。実験結果は他のエネルギーにおける実験値とほぼ consistent であるが、Bertini 及び LA150 と大きな差異を示している。なお、このエネルギー領域では PHITS より QMD の方がよい結果を与えるようである。計算値同士にも系統的な差異があり、中性子データも含めて検討を進める予定である。

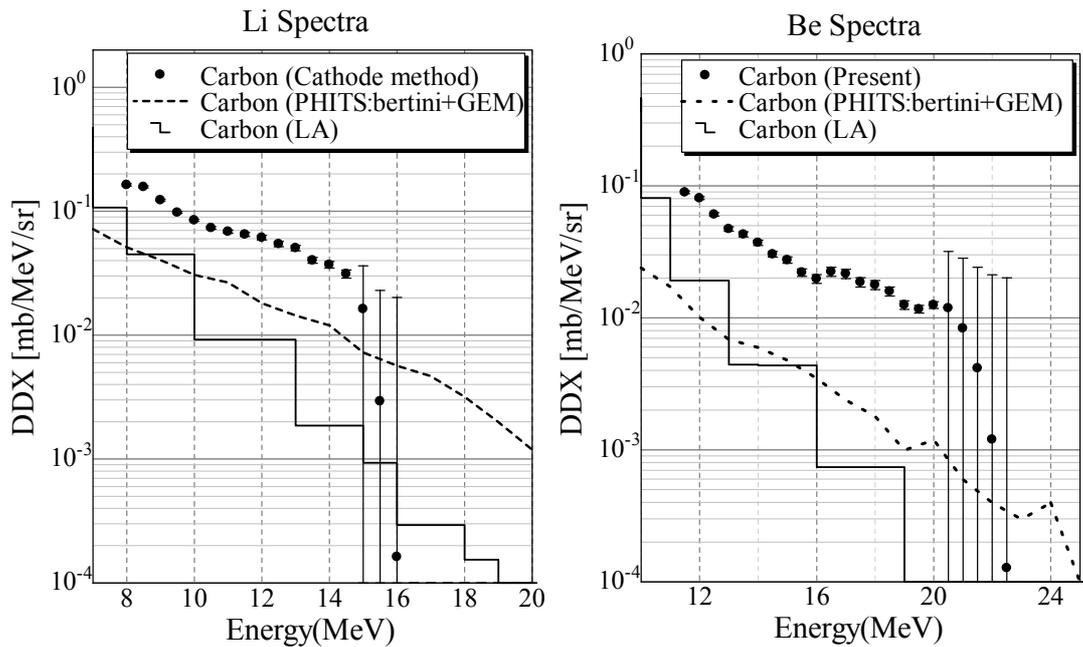


Fig.6: 70 MeV 陽子による C からのフラグメントスペクトル

以上のような中性子に対する実験を行うには、現在の中性子源は非力であるので、大幅な強度増を目指して現在中性子源の改造計画を進めている。大強度中性子ビームは核データ測定のみならず半導体のソフトエラー評価のための照射試験にも大いに有効である。

4. 今後の展望

国立大学法人化に伴って先行き不透明要素感が強いが、現在サイクロトロンで進めている実験は、ADS や加速器利用、宇宙開発など基礎から応用まで様々な分野において不可欠なものであり、しばらく継続すべきものとする。また、サイクロトロンのビームは、陽子と中性子による半導体のソフトエラーや照射効果のシミュレーション、BNCT 用中性子場や粒子線治療の基礎データなど、種々の応用目的に利用可能であり、照射実験の解析にフラグメントデータを適用する、BNCT 用中性子場の設計開発に必要なデータを自前で取得する、粒子線治療のための基礎データを得る、など具体的な課題に核データ活動を連携させて進めることによって、新たなデータニーズを見出す可能性もある。更に、サイクロトロンのビームは、中性子入射反応に類似または代替の反応を誘起するのにも有効であり、核分裂などに関して中性子入射に相補的なデータを提供できる可能性があるためその有効利用も考えたい。それらをふまえて着実に研究を進めることが重要と考える。