

話題・解説(IV)

ロスアラモスでの中高エネルギー中性子実験

九州大学大学院工学研究院

執行 信寛

shigyo@kune2a.nucl.kyushu-u.ac.jp

石橋 健二

kisibasi@nucl.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

1980年代から90年代にかけて、アメリカ、ヨーロッパ、日本等で陽子入射中性子生成(p, xn)二重微分断面積(DDX)が測定されてきました。筆者らも高エネルギー加速器研究機構(KEK)において3 GeVまでの(p, xn) DDXを測定してきました。これらのデータは、高エネルギー粒子輸送コードの改良におおいに役立てられました。

一方、中性子入射中性子生成(n, xn) DDXの実験データに関して、2000年の時までには、UC Davisで入射エネルギー65 MeVに対する測定[1]が行われていましたが、100 MeV以上の入射エネルギーに対する測定は行われていませんでした。そこで筆者らの次のステップとして、中性子入射中性子生成(n, xn) DDXの測定を行うことにしました。当時、100 MeV以上の高エネルギー中性子が使える施設は、180 MeVまでの準単一エネルギーが使えるスウェーデンのウプサラ大学のThe Svedberg Laboratory (TSL)と、最大800 MeVの連続エネルギー中性子を発生する米国のロスアラモス国立研究所のLANSCE (Los Alamos Neutron Science Center) だったと記憶しています。他にもKEK、大阪大学核物理研究センター(RCNP)や放射線医学総合研究所(NIRS)でも(準)弾性散乱で生成される準単一エネルギー中性子を使うことができたと考えられます。この中で、LANSCEは当時世界最強の中性子源と謳われており、後ほど述べる連続エネルギー中性子源であることのデメリットを差し引いても最終的に実験がしやすいのではないかと考えて、LANSCEで中高エネルギーの(n, xn) DDXの測定を敢行することとしました。

2. 実験

2.1 施設の概要

ロスアラモスはニューメキシコ州最大の都市のアルバカーキから車で 2 時間弱のところ、州の真ん中あたりの標高 2200 m ぐらいの Mesa という台地の上にあります。他のアメリカ中西部よりは緑も多く、冬は雪も積もります。自然を満喫したい人にはうってつけの場所です。LANSCe はロスアラモス国立研究所の中でも大きな区画を占めていますが、街の中心地からは歩いて行くには遠く、急な坂もあるので、ホテルやアパートからも車が必要です。ちなみに研究所本部にはバスが通っているし、居住区からも近いので歩いて行けます。

LANSCe の主加速器は 800 MeV の線型陽子加速器で、200 ps 幅のパルス陽子を 1.8 μ s 毎に生成します。ちなみに、この加速器はニューメキシコ州で電気使用量が最も高い装置だそうです。線型加速器の先には、高エネルギー中性子源の Weapons Neutron Research (WNR) と低エネルギー中性子源の Lujan Center、放射性同位体製造等に使われる Isotope Production Facility (IPF)、陽子ラジオグラフィに使われる pRad などの施設があります。今回の実験では高エネルギー中性子を使いたいので WNR で行いました。

WNR には、線型加速器からの 800 MeV 陽子をサンプルに照射することを想定している Target-2 (Blue Room) と、線型加速器からの 800 MeV 陽子がタングステン製の核破砕ターゲットに入射し最大 800 MeV までの中性子を発生させる Target-4 があります。WNR の Target-4 にはちなみに、Lujan Center には Target-1 というタングステン製核破砕ターゲットがあります。

Target-2、Target-4 には飛行距離の違うビームラインがそれぞれ 6 本、合計 12 本あります。今回はその中で Target-4 から伸びている 4FP15L というビームラインを使用しました。ここは、Target-4 から約 90 m と非常に遠くにあり、他のビームラインに比べて中性子強度が低く、大型装置も設置されておらずユーザーが少ないため長期にわたり実験室を使わせてもらえるのが特徴です。他のビームラインには Fast Neutron-Induced Gamma-Ray Observer (FIGARO)、Germanium Array for Neutron Induced Excitations (GEANIE) などの中性子やガンマ線測定用の大型装置や ICE House と呼ばれる半導体放射線損傷を調べるための照射室などがあります。また、Lujan Center には、Detector for Advanced Neutron Capture Experiments (DANCE) というガンマ線測定装置があり、日々使用されています。

2.2 中性子のエネルギー測定方法

通常、サンプルから放出された高エネルギー中性子のエネルギー測定には飛行時間 (TOF) 法が使用されます。入射中性子が (準) 単一エネルギーであるならば、TOF のスタート信号に加速器からのタイミング信号、ストップ信号に放出中性子検出器の信号を使えば良いので、比較的容易に測定ができます。筆者らも KEK で (p, xn) DDX を測定した際にこの方法を採用しており、勝手が分かっているため、今回も採用したいところです。しかし、WNR では図 1 に示すように、入射中性子が連続エネルギーを持つので、TOF

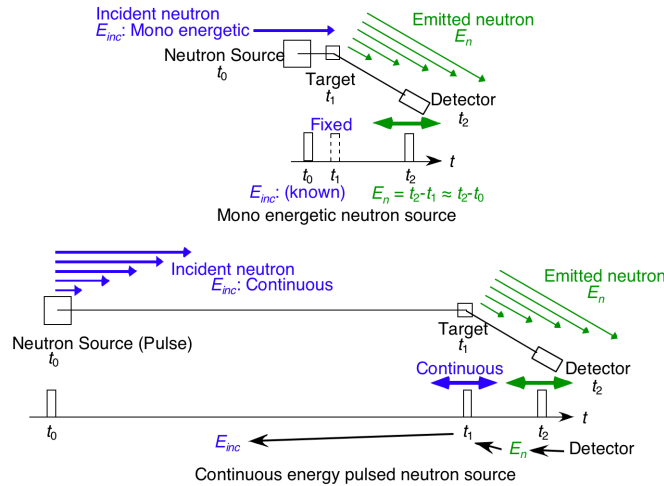


図 1 連続エネルギー中性子を利用したときの、入射中性子と放出中性子の関係

のスタート信号として加速器からのタイミング信号を使うことができません。したがって、放出中性子のエネルギーは別の方法で測定する必要があります。そこで今回は、放出中性子のエネルギーは検出器に付与されたエネルギーから導出することとしました。

一方、今回は入射中性子が連続エネルギー分布を持つために、入射中性子のエネルギーも測定する必要があります。このエネルギーを測るために図 2 にあるように TOF 測定を行いました。この測定では TOF のスタート信号は陽子が Target-4 に衝突したときの信号を使うことができますが、サンプルには検出器を設置していないのでストップ信号を取ることが出来ません。そこで今回は、放出中性子を測定する検出器からの信号を TOF のストップ信号としました。こう書くと、入射中性子が Target-4 で発生しサンプルまで飛行する時間と、放出中性子がサンプルで発生し中性子検出器まで飛行する時間全体を測定しているように見えますが、実際にその通りです。Target-4 からサンプルまでは約 90 m、サンプルから中性子検出器までは約 70 cm にしました。このように距離の差が大きいと、飛行時間のほとんどは入射中性子が Target-4 からサンプルまで飛行する時間になります。

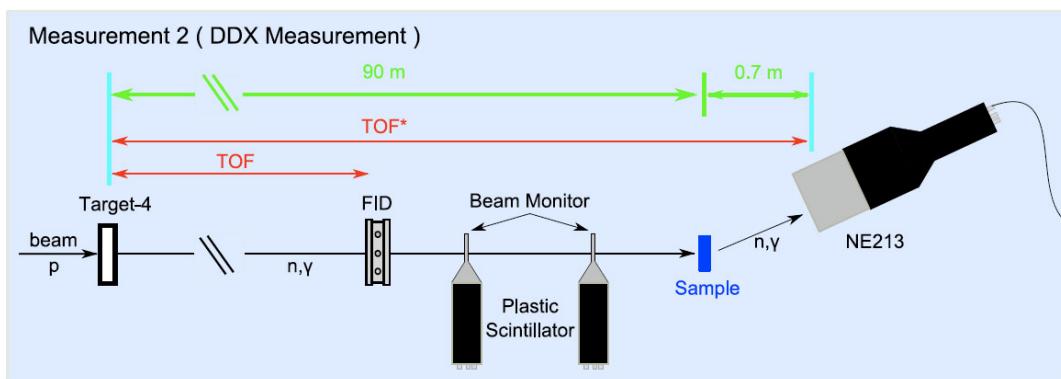


図 2 入射中性子の測定手法

そこで、今回は Target-4 から中性子検出器までの総飛行時間から入射中性子のエネルギーを導出することとしました。

2.3 放出中性子検出器

当初は、放出中性子のエネルギー測定に TOF 法が使えないので、反跳陽子検出器を使うことを想定していました。しかし、図 3 のように 4FP15L ビームラインの検出器小屋 (Detector Shed) は広くないので、反跳陽子を測定するための磁気スペクトロメータを設置するのは難しいことが分かっていました。そこで、反跳陽子を NaI (TI)無機シンチレータで測定することにしました。また、反跳陽子ラディエータには取扱いが容易なポリエチレンを使うことにしました。数 MeV ぐらいから 300 MeV ぐらいまでの中性子 (反跳陽子) を測定したかったので、2 種類の大きさの検出器を作りました。また、反跳陽子が無機シンチレータ内で完全に止まったか、シンチレータ外に飛び出したかを判定するために NaI (TI)の周りにプラスチックシンチレータ NE102A を貼るホスウィッチ構造としました。NaI (TI)と NE102A は信号の減衰時間が異なるために、これらのシンチレーション光を 1 本の光電子増倍管に繋いでも、信号処理をすることでどちらのシンチレータが光ったかを弁別することかできます。

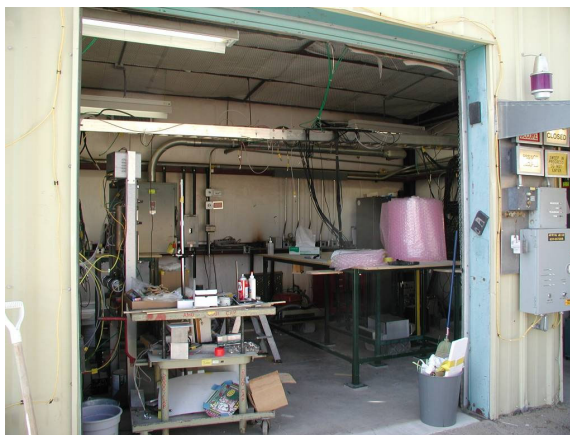


図 3 WNR4FP15Lビームラインの検出器小屋

数MeVから数十MeVまでの比較的低エネルギー中性子を測定する厚さ5 cmのホスウィッチ NaI (TI)シンチレータを主検出器とするセットと数十MeV以上の比較的高エネルギーの中性子を測定する長さ35 cmのホスウィッチNaI (TI)シンチレータを主検出器セットを作成し、図4のように配置しました。これらの検出器で測定を行いましたが、反跳陽子検出器であるために、実効的な検出効率が非常に低く、バックグラウンドが非常に高いことも相まって、測定が非常に難しいことが分かりました。

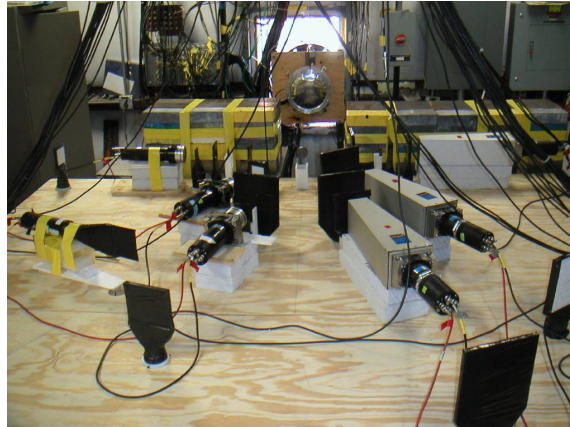


図 4 小型（左側）と大型（右側）ホスウィッチ型検出器セット

2.4 バックグラウンド中性子

WNR は核破碎中性子源施設であるために、線量的には非常に低いのですが、今回のような断面積測定実験に対しては無視できないくらい高いバックグラウンド放射線がありました。4FP15L ビームラインは Target-4 から 90 m 離れている上、途中には図 5 のような岩山があり天然の遮蔽体と呼べる物はあるのですが、そんなに甘くはありませんでした。はじめは、検出器を置く台の上には検出器以外何も置いていませんでしたが、測定したい事象がバックグラウンドに埋もれていたため、検出器から見て中性子ビーム上流側に鉄と鉛ブロックを、検出器小屋の外に図 6 のようなコンクリートブロックを設置しました。これである程度バックグラウンドを減らすことができました。

このような遮蔽体を置いても、なお比較的低エネルギー用の検出器では、測定したい事象はバックグラウンドに埋もれていました。そこで、低エネルギー中性子の測定には反跳陽子法ではなく、以前(p, xn) DDX の中性子検出器として使用した長さ 127 mm の液体



図 5 検出器小屋上流にある岩山



図 6 コンクリートブロックをビームダクトの周りに積んでいる途中の写真。

左から佐藤大樹氏、Robert C. Haight氏、岩元洋介氏

有機シンチレータ NE213 を使用することとしました。NE213 シンチレータは反跳陽子検出器に比べれば実効的な検出効率は格段に高いという利点があります。しかし、このシンチレータはある中性子エネルギーに対して連続的な発光量分布（応答関数）を示します。そのため、発光量を見ただけでは、中性子のエネルギーを知ることができず、得られた発光量分布と応答関数を使ってアンフォールディングする必要があります。また、応答関数を実測する必要があるため実験全体にかかる時間が延びることになりました。

2.5 入射中性子数の測定

断面積測定では、放出中性子の数、エネルギーの他に入射中性子の数、エネルギーを知る必要があります。エネルギーは TOF 法で測定できますが、数までは測定できません。そこで、サンプルより少し上流に図 7 の ^{238}U 核分裂電離箱を設置しました。

この核分裂電離箱は中性子ビームの直径が 12 cm から 20 cm ぐらいの時に最適化されていましたが、今回の測定ではサンプルの直径を 50 mm としたため、鉄と真鍮のコリメータを使って中性子の直径を 40 mm 程度に絞りました。その結果、核分裂電離箱に入る中性子が極端に減ったために核分裂電離箱からの信号が非常に少なくなり、入射中性子数の測定には使いづらいことが分かりました。そこで、あらかじめ核分裂電離箱とサンプルの間に薄いプラスチックシンチレータを 2 枚入れて同時計数を行い、同時に核分裂電離箱の出力の関係を使って、後の断面積測定時の入射中性子数を導出することとしました。

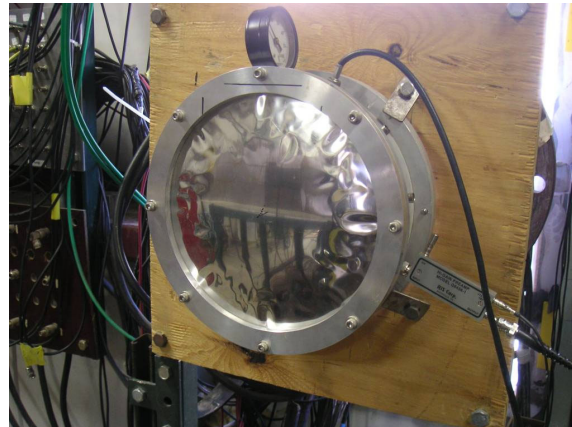


図 7 ^{238}U 核分裂電離箱

2.6 応答関数の測定

NE213 シンチレータやホスウィッチ検出器は中性子のエネルギーに対して 1 対 1 対応ではないので、どのような応答をするかというのを実際に TOF 法で測定しました。図 8 にそのときの写真を示します。検出器をビームライン上に置いていますが、そのまま中性子ビームを当てるには強度が高すぎるので、鉄と真鍮のコリメータでビーム径を約 2 mm から 7 mm に絞りました。中性子のエネルギーは TOF 法で知ることができるので、ある中性子エネルギーに対する発光量分布で表される応答関数を取ることができました。

一連の断面積測定は数年間に亘り行いましたが、ある年の測定が終わると NE213 シンチレータと光電子増倍管を分離梱包して、日本に送り返していました。そして、次の年にアメリカに送った後に、もう一度 NE213 シンチレータと光電子増倍管を接続していました。そのため、実験の度に応答関数の測定を行っていました。

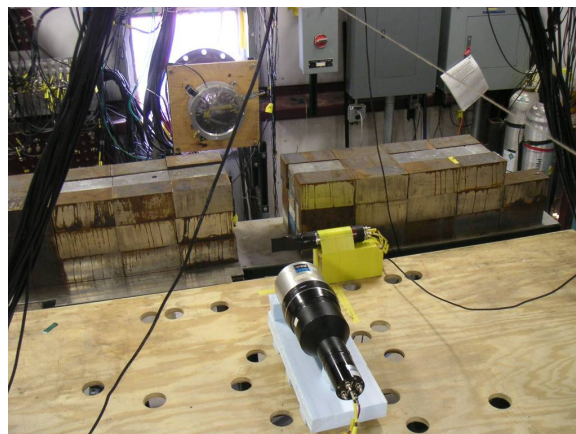


図 8 応答関数測定時の検出器の配置

2.7 検出器全体の配置

最終的な検出器等の配置は、図 9 に示すように 15 度から 150 度の 6 方向にしました。写真には写っていませんが、最大で NE213 シンチレータを 6 台と高エネルギー用ホスウィッチ検出器 2 台の構成のときもありました。核中性子検出器の前にはサンプルからの荷電粒子を弁別するためのプラスチックシンチレータを設置しました。



図 9 DDX測定時の検出器などの配置

また、厚さ 40 cm の鉄ブロックを置いて透過中性子の測定も行いました。このときは 0 度方向にホスウィッチ検出器を配置し、反跳陽子ラディエータには NE213 シンチレータを使用しました。そのときの写真を図 10 に示します。

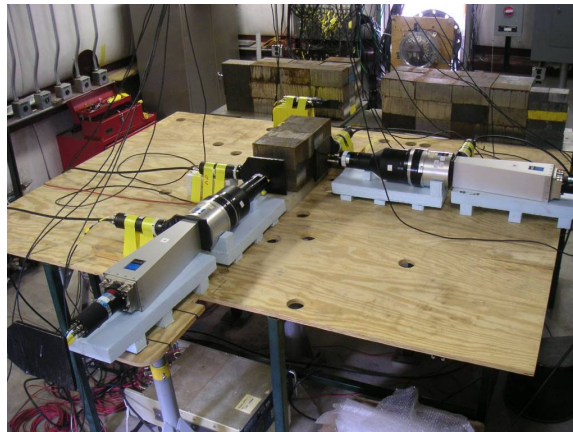


図 10 中性子透過実験のときの検出器の配置

信号線の本数は核分裂電離箱と入射中性子計数用プラスチックシンチレータもあるので、最大 20 本でした。これらのケーブルが検出器小屋からデータ処理装置があるデータトレーラーと呼ばれる所に伸びています。図 11 の左側の写真の通り、本物のトレーラーです。内部は図 11 右側のようにになっており、何ものなれば広く感じられるはずですが、



図 11 データトレーラーの外観と内部

CAMAC クレートや NIM ビン、机などがぎっしり詰まっているためかなり狭く感じます。日本ではこのような光景を目にすることは無いのではないのでしょうか。実験中は一日中ここにいることが多かったです。LANSCE にはこのようなトレーラーがいくつもあります。写真には写っていませんが、検出器小屋やデータトレーラーの近くには野うさぎがたくさんいました。リスや鹿もときどき散歩していました。コヨーテを見ることもありました。幸い（残念ながら）、マウンテンライオンや熊を見ることはありませんでした。

3. データ解析

3.1 放出中性子

NE213 シンチレータは中性子の他にガンマ線にも有感なため両者を弁別する必要があります。幸いこのシンチレータは中性子とガンマ線に対して信号の減衰成分が異なるので、全体の発光量と減衰成分の発光量の 2 次元プロットを取ることで弁別できます。図 12 に例を示します。

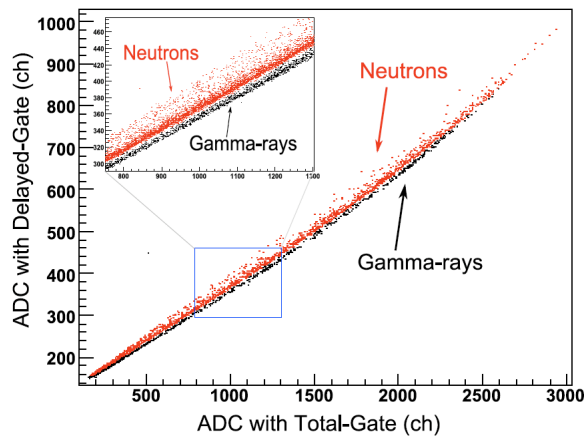


図 12 中性子とガンマ線の弁別の様子

3.2 入射中性子

中性子の成分を取り出した後、入射中性子のエネルギーの選択を行いました。入射中性子の TOF 測定データの例を図 13 に示します。この中から対象とする入射エネルギー部分を取り出しました。入射中性子束の絶対値は核分裂電離箱と 2 枚のプラスチックシンチレータの情報から求めました。

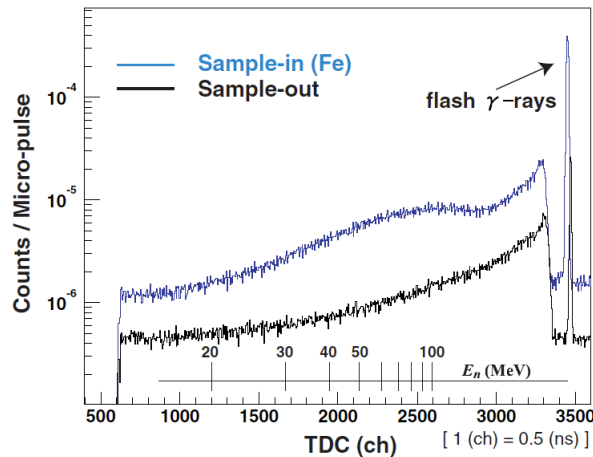


図 13 TOFスペクトルの例

3.3 アンフォールディング

検出器の応答関数のところで述べた通り、検出器の発光量がそのまま放出中性子のエネルギーとはなりません。実験で得られた発光量スペクトルはいろいろなエネルギーの放出中性子が検出器に入って、応答関数に応じて発光した信号の重ね合わせになっています。測定で得られた応答関数の例を図 14 に示します。そこで、検出器の発光量分布と応答関数を使って、求めるアンフォールディングを行い、重ね合わせる前の状態である検出器に入ってくる放出中性子スペクトルを求めました。

解析を始めた当初は、FERDO コード[2]でアンフォールディングを行いました。しかし、15 度や 30 度の検出器では解が収束しませんでした。これは、前方方向では、サンプルで核反応で発生した 2 次中性子成分よりも弾性散乱成分の方が非常に大きいのですが、検出器の応答としては弁別できないために特に中性子のエネルギーが 10 MeV 近辺で矛盾が生じていたためだと考えられました。そこで、アンフォールディングの際に、核子入射核子放出反応のスペクトルをうまく再現できる運動源模型[4]で表されるというスペクトルによるという制限を中性子放出スペクトルに設けました。また、中性子弾性散乱分布を別途考慮することとしました。

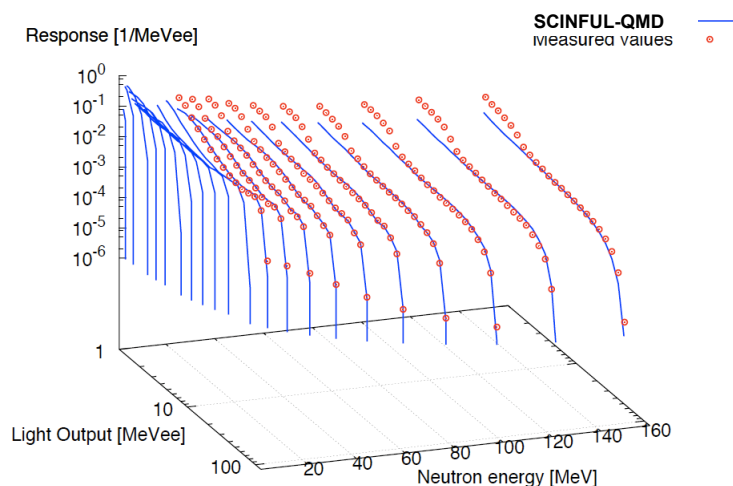


図 14 NE213シンチレータの応答関数の測定結果。
SCINFUL-QMD[3]の計算結果も掲載している。

3.4 測定結果

この結果、解が収束するようになりました。得られた (n, xn) DDX の例を図 15 に示します。これは、入射中性子のエネルギーが 140 MeV から 160 MeV の範囲で、サンプルが鉄の図です。この場合は、評価済核データライブラリ JENDL-HE[5]は実験値と同等の値を示していることが分かりました。現在、他の入射エネルギーやサンプル、中性子透過実験のデータについても解析を行っている段階です。

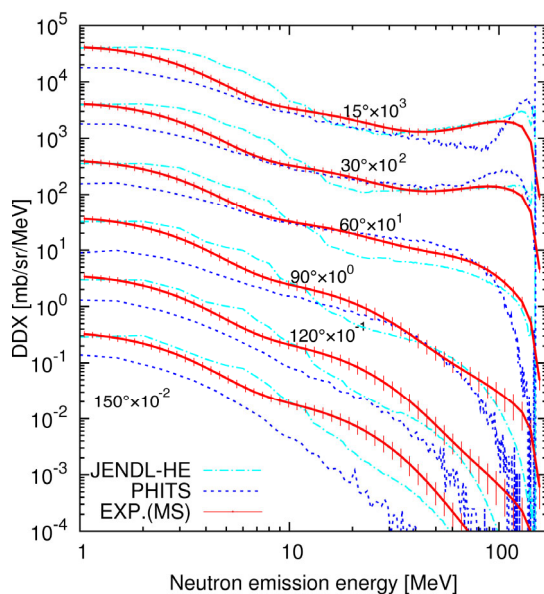


図 15 入射エネルギーが140から160MeVの中性子が Feサンプルに入射したときの (n, xn) DDX測定結果。JENDL-HEの評価値[5]と粒子輸送コードPHITS[6]の計算値も掲載している。

4. まとめ

ロスアラモス国立研究所の LANSCE において、核破碎中性子源からの連続エネルギー中性子を利用した、中高エネルギー領域の中性子入射中性子生成二重微分断面積の測定を行いました。入射中性子のエネルギーは TOF 法で放出中性子エネルギーはシンチレータの発光量分布をアンフォールディングすることで求めました。その結果、サンプルが鉄の場合、JENDL-HE の評価値は今回の実験値と同等の値を示すことが分かりました。

謝 辞

この実験を遂行するにあたり、LANSCE の Robert C. Haight 氏には実験の立ち上げから相談に乗っていただいただけでなく、パラフィン付き中性子源やコンクリートブロック運びなどの力仕事、またロスアラモスにおける生活面の多岐にわたりご指導ご尽力してください、本当にありがとうございました。奥様をはじめご家族の方にもお世話になりました。

LANSCE ではグループリーダーの Steve Wender 氏、ビームライン担当者の Nikolas Fotiadis 氏、テクニシヤンの Art Bridge 氏、Gregg Chaparro 氏、CAMAC やネットワーク関係の John O'Donnell 氏、ユーザーオフィスの Evan Sanchez 氏、Lynn Varoz 氏、Theresa Chavez 氏など多くの方に協力していただきました。

この実験を行っている途中で、河野俊彦氏がロスアラモス国立研究所に着任され、学生共々大変お世話になりました。特に奥様の料理の素晴らしさに全員で感涙に咽びました。ここに改めて感謝の意を表します。

この実験を始めるにあたり、東北大学名誉教授の中村尚司先生に多くの助言をいただきありがとうございました。また当時、中村先生の学生だった佐々木道也氏が現地で実験を手伝ってくれたことに感謝します。実験に参加した時に学生だった、岩元洋介氏、佐藤大樹氏、國枝賢氏、渡邊健人氏、野田秀作氏、荒川弘之氏、梶本剛氏らの頑張りのおかげで実験を遂行することができました。その他、ここに書ききれない多くの方にお世話になりました。良い意味でも悪い意味でも日本では味わうことのできない経験をさせてもらいました。

参考文献

- [1] E. L. Hjort, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C50**, 275 (1994).
- [2] B. W. Rust, *et al.*, ORNL/TM-8720 (1983).
- [3] D. Satoh, *et al.*, JAEA-Data/Code 2006-023 (2006).
- [4] H. Kitsuki, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **38**, 1 (2001).
- [5] Y. Watanabe, *et al.*, AIP-Conf., 769, 326 (2005).
- [6] H. Iwase, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 1142 (2002).