

会議のトピックス (II)

アメリシウムの核反応に関するワークショップ NRAm2007 に参加して

日本原子力研究開発機構

原田 秀郎

harada.hideo@jaea.go.jp

1. はじめに

アメリシウムの核反応に関するワークショップ (NRAm2007: Nuclear Reaction Americium Workshop) が、米国ロスアラモス国立研究所の主催により、2007 年 9 月 18 日及び 19 日にかけて、サンタフェのラ・フォンダホテルで開催された。参加者は、約 40~50 名であり、米国内ではロスアラモス国立研究所 (LANL) 及びローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) からの参加者が主であり、ブルックヘブン国立研究所及び Duke 大学からの参加も 1 名ずつあった。また、海外から、イタリアのミラノ大学、欧州の IRMM 研究所 (Institute for Reference Materials and Measurements)、及び日本より各 1 名ずつの招待参加があった。本ワークショップの概要を紹介するとともに、会議に先立ち見学を許されたロスアラモス研究所の核データ測定装置群について紹介する。



写真 1 会場となったラ・フォンダホテル



写真 2 会議の様子

2. ワークショップの概要

本ワークショップは、Am 同位体の核反応断面積研究の現状を総括し、今後の方向性を検討することを目的に、ロスアラモス国立研究所が主催したものである。ワークショップでは、2 日間にわたり海外からの招待講演 3 件を含む 25 件の口頭発表があり、Am 同位体の核反応断面積を切り口として、Am 核データの意義、核データ評価、核反応計算モデル、前平衡核反応理論、(n,2n)断面積測定、中性子捕獲断面積測定、核分裂断面積の理論及び測定について、科学的な討論がきわめて活発に行われた。



写真3 集合写真をとるためにホテルの屋上に
集合した WS 参加者

2.1 総括的報告

Am 核データの意義について、LANL の Chadwick が、核変換システムの中性子増倍係数や核変換効率の正確な予測のための必要性、及び(n,2n)反応を利用した Am-241 のドシメトリーへの応用研究での重要性を指摘した。中性子捕獲断面積については、約 500 keV という高エネルギー領域までデータが整備されることが望ましいと指摘した。ドシメトリーへの応用では、(n,2n)反応の反応閾値領域の核反応断面積が重要となるため、このエネルギー領域で計算と実験値の差を説明するための前平衡過程組み込みの重要性を指摘した。本ワークショップ開催の目的について、Am 核データベースの現状を理解すること、測定値間の差異を理解すること、今後の研究テーマの優先順位を決めることと結んだ。

LANL での Am 核データ測定に関する 2 つのプロジェクトの概況について、LANL の Vieira が紹介した。1 つは、ドシメトリーへの応用研究である。(n,2n)反応については、これまで 8~12 MeV 領域のデータが不足していたことを指摘した。もう 1 つは、GNEP/AFC (Global Nuclear Energy Partnership/Advanced Fuel Cycle) プロジェクトの枠組みで実施しているマイナーアクチノイド (MA) 燃焼評価のために必要な Am-241, 243 の核データ測定研究である。Am-241 についてデータ解析は終盤であり、Am-243 については 2007 年 8 月に実験データを取得したとのことである。また、Am-242m の核分裂断面積について、全立体角型 BaF₂ ガンマ線検出器の内部に全立体角型 PPAC 検出器を挿入し、中性子捕獲反応で発生するガンマ線の平均多重度とガンマ線の平均エネルギーの 2 次元プロットより中性子捕獲断面積と核分裂断面積を判別する研究の進捗を紹介した。

LLNL での核データ測定研究の状況について、複数のクローバー型 Ge 検出器から構成される TIGRESS スペクトロメータ及び核分裂研究のための time projection chamber に関して、LLNL の Becker が紹介した。ちなみに後者は、“An Innovative Approach to Precision Fission Measurements using a Time Projection Chamber”と題して、NERI (Nuclear Energy Research Institute) の 2007 年度から 2009 年度のプロジェクトとして採択されている[1]。

ENDF/B-VII ライブラリーのための Am 核データ評価の進捗状況について、LANL の Kawano が紹介した。更新した核種は、Am-241, 242, 242m, 243, 244, 245 である。低エネルギー領域の共鳴パラメータ情報は、keV 領域の評価にも有益であることを指摘したことは興味深い。

2.2 トピックス

本会議の発表の中から筆者が関心を持った発表を中心に紹介する。

Duke 大学の Tonchev は、TUNL (Triangle Universities Nuclear Laboratory) の D(d,n)反応中性子源を用いた Am-241 の 14 MeV 中性子に対する(n,2n)反応断面積測定について紹介した。生成放射能を Ge 検出器で照射後に測定する放射化法を用いる。1 mg のサンプルで測定可能とのことである。現在、最も大きな誤差要因は、Am-240 のガンマ線放出率であり 5.4 %とのことである。また、(n,2n)反応を予測するために(γ ,n)反応と統計模型計算を適用した研究を計画していることが一言だけ紹介された。この実験には、TUNL の逆コンプトンガンマ線発生装置 HIGS[2]の利用が予定されている。

欧州の IRMM 研究所が実施した Am の核データ測定活動について、IRMM の Plompen が紹介した。Am-241 の(n,2n)断面積測定では放射化法が適用され、中性子捕獲断面積及び全断面積測定では 200 m の飛行長での飛行時間測定法が適用された。飛行長が長いために高エネルギー領域まで測定が可能という特徴がある。放射化法には 40 mg のサンプル、飛行時間測定法には 300 mg のサンプルが sol-gel fabrication process を用いて整備された。また、Am サンプルの整備方法について Al との混合ではなく、酸化 Y との混合方法が提案されるなど、核データ測定用サンプル整備に共通する課題について言及した。

著者は、我が国の MA 核データ測定の最近の話題を紹介した。全立体角 Ge スペクトロメータで導出される中性子捕獲断面積の精度や本スペクトロメータをカロリメータとして利用できる可能性について、また東北大学・京都大学を中心に測定が行われた核分裂断面積結果について関心が寄せられた。

LANL では、核データ測定用に主要な 4 つの実験装置 DANCE, GEANIE, FIGARO 及び鉛減速スペクトロメータ (LSDS) が大強度中性子源加速器施設に整備され、Am 等の核データ測定に適用が進んでいる。

大型実験装置 DANCE を用いた Am-241 の中性子捕獲断面積測定では、これまでに報告されていない中性子共鳴ピークを約 10 eV の位置に観測したと LANL の Jandel が報告し

た。219 μg の Am-241 サンプルを用いて、17 日間連続測定を行った結果とのことである。今後、核種同定が重要テーマとなろう。また、DANCE は、ガンマ線多重度を導出するのに適した装置であるが、Am-241 の場合、共鳴毎のガンマ線多重度の違いは見られなかったと報告した。測定誤差は、熱中性子で 4 %、1 keV 領域で 6 %、10 keV 領域で 18 %とのことである。10 keV 領域の誤差が大きいのは、核分裂の寄与が大きくなることも影響している。

GEANIE を用いた核データ測定研究について、LLNL の Becker が概況を紹介した。GEANIE は、42 台の BGO アンチコインシデンス付き Ge 検出器装置である。エネルギー分解能が高いため、中性子エネルギー毎にディスクリートなガンマ線生成断面積の測定が可能であり、測定結果と GNASH などの計算コードによる計算結果との比較を計画している。適用例として、Pu-238 の高スピン準位 10+ が populate される Pu-239(n,2n)への応用が紹介された。カスケードガンマ線は、核反応で生成された励起状態のスピン分布情報を反映するため、スピン分布を通じてモデル計算の精度向上に貢献が期待できるとのことである。また、fission chamber と Ge 検出器の組み合わせにより、U-235 を必要とする BTB (Back-to-back) チェンバーを使用せずに、正確な核分裂断面積を導出する手法について提案した。

さらに、LANL では半減期が約 2 日と短い Am-240 の核データ測定を実現するため、放射化学部門と連携したサンプル整備の研究が進められていることは特に印象深いものであった。これらの研究は、LANL の Haight と LBNL の Ellison により紹介された。例えば、23 MeV、1 μA の陽子ビームを用い、 $^{242}\text{Pu}(p,3n)$ 反応で ^{240}Am を生成し、これを放射化学施設に運んで Pu と Am を化学分離し、精製した ^{240}Am を LANL の LSDS で核分裂断面積を測定しようとするものである。LSDS を用いた核分裂断面積測定の場合、数 10 ng のサンプル量で測定が可能とのことである。 ^{240}Am の他、 ^{232}Pa (半減期 1.3 日)、 ^{238}Np (半減期約 2 日) の測定を目指しているとのことである。本研究は、ロスアラモス研究所のシニアスタッフとバークレー大学の学生により行われており、大学との連携による若手育成が行われている。

LLNL の Wu は、110 台の Ge 検出器から構成される多重ガンマ線検出器 (Gamma Sphere) の中心に CHICO という gas avalanche counter を組み込んだ装置による Am-242m の核分裂反応研究の進捗を報告した。Gamma Sphere は核構造の研究に使用されてきたものであるが、核データ研究への応用に研究テーマがシフトしていることを示していると思われる。

3. ロスアラモス国立研究所施設見学

LANL の Nelson 及び Couture にご案内いただき、核データ測定装置である DANCE、GEANIE 及び FIGARO を見学することができた。DANCE は、熱中性子から 500 keV の中性子を供給する Lujan センターのビームラインに設置された中性子捕獲及び核分裂断面

積を測定するための全立体角型 BaF₂ 検出器である。GEANIE 及び FIGARO は、100 keV から 800 MeV の中性子を供給する WNR (Weapons Neutron Research) 高速中性子源に設置された装置であり、核分裂断面積及び(n,2n)断面積測定に利用されている。写真撮影は許されないために、写真で紹介することができないのが残念であるが、これらの装置に関心のある読者は参考文献[3]などを参照されたい。記憶を頼りに気のついた点を記すこととするが、以下正確性に乏しいこと、及び、かなりマニアックなメモであることをご容赦いただきたい。

DANCE は、50 cm 厚程度のボロン入りパラフィンブロックの壁で囲まれている。スライド扉を開けて壁の中に入る（天井部に壁もあるので部屋といった方がよいかもしれない）。この中は、温度コントロールされている。DANCE の構成要素である BaF₂ 結晶には、薄いアルミ箔が反射材としてまかれ、それはアルミのテープで固定されている。この壁でできた部屋の直前で、中性子ビームは直径約 1 cm にコリメータで絞られる。DANCE 中心での中性子ビーム直径は約 2 cm に広がるということである。DANCE の設置された壁の外側にデータ収集用の回路が設置されたプレハブがある。この大きさは、結構狭く横 2 m、長さ 4 m 程度である。主要なデータ収集系はフラッシュ ADC を用いてコンパクトであるが、タイミング信号を作るための NIM モジュールが結構な場所をとっている。

GEANIE は、DANCE のような壁の中に入っているのではなく、実験ホールに遮蔽無しで設置されている。検出器全体をアングルで吊り下げる格好になっており、全てを 1 点アースとしている。Ge にノイズの問題は生じていないとのことである。検出器手前のコリメータは凝った構造になっており、ビーム軸方向だけでなく、径方向にも素材を変えている。中心は、Cu, Fe, Pb を組み合わせており、外側はガンマ線遮蔽用に Pb が使用されている。コリメータのビーム穴の形状は、テーパ付きで、コリメータの中心が最も絞られた形になっている。このコリメータ体系の上流に核分裂チェンバーを設置し、これで中性子束をモニターしている。

FIGARO は、20 台の NE213 相当の液体シンチレーション中性子検出器から構成される。サンプルに相当する位置に 16 層の核分裂チェンバーが設置され、ここで発生する中性子を約 1m 離れた中性子検出器で測定する。TOF による放出中性子のエネルギー分解能は、10~20 %とのことである。FIGARO に供給される中性子ビームラインの上流には、外部から XY 位置をコントロール可能なコリメータが設置されており、これで中性子を止めることにより、加速器の運転中であっても検出器にアクセスすることができる便利な仕組みになっている。

4. おわりに

左の写真はサンタフェの会議が行われたホテルの近くの風景である。会議中天候に恵まれ、独特な土色の建物とインディアンの文化を楽しむことができた。サンタフェは、西部開拓時代には東部から来た人々たちにとって終着駅となる町で、ここからロッキー山脈に沿って、新たな可能性を求めて、北と南に分かれていったそうである。

ロスアラモス研究所は中々通常の会議では入ることができないが、Kawano 氏のアレンジのおかげで研究所内の核データ測定施設を見学でき、たいへんに貴重な経験をさせていただいた。

活発な議論と情報交換が行われた本ワークショップを主催された LANL の Chadwick 氏と Kawano 氏のご尽力に敬意を表したい。

また、我が国の Am 核データ測定研究紹介の資料作成に力をお貸しいただきました、東工大の井頭先生、水本先生、東北大の馬場先生、京大の堀先生、及び JAEA の共同研究者の皆様に、この場を借りて感謝します。



写真 4 会場近くの風景（その 1）



写真 5 会場近くの風景（その 2）

参考文献

- [1] <http://www.doe.gov/news/5348.htm>
- [2] <http://higs.tunl.duke.edu/~higs/higsupgrade/>
- [3] Los Alamos Science, Number 30, 2006, 特に
<http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?LA-UR-06-0032.pdf>