



## 国際シンポジウム n\_BANT に参加して

日本原子力研究所  
核変換利用開発グループ

水本 元治

mizumoto@linac.tokai.jaeri.go.jp

### 1. はじめに

国際シンポジウム n\_BANT (International symposium on the use of neutron beams in basic science and for applications in advanced nuclear technologies) が、2005年3月22日と23日の両日、スイスのジュネーブにある欧州共同原子核研究所 (CERN) で開催された。このシンポジウムは n\_TOF-ND-ADS プロジェクト (加速器駆動システムのための中性子飛行時間法による核データ測定事業) の第一期 (2002~2004年) の終了を機に開催されたもので、この3年間の成果を総括し、今後の研究の進展を見通そうというものである。会議では、n\_TOF プロジェクトの3つの主要な研究分野、(1) 革新技術のための核データ、(2) 天体核物理、(3) 原子核物理に関する発表が行われ、基礎科学の分野への中性子ビーム利用の可能性についての議論 (Intervention/overview) も行われた。

会議にはノーベル賞受賞者で欧州の ADS 活動の牽引役でもある C. Rubbia 博士 (ENEA の所長) の他、欧州を中心とした n\_TOF プロジェクトの参加者、ベルギー Geel 研究所、フランス Laue-Langevin 研究所 (ILL)、ドイツ GSI、スウェーデン Uppsala 大学などの欧州各国の研究所、米国 Oak Ridge や Los Alamos などの主要中性子実験施設の研究者、天体核物理・データ評価・原子核理論の研究者、また IAEA、NEA データバンク等の国際機関などから約 60 名が参加した。なお、アジアからは著者と北京原子能研究所 CIAE の若手研究者が参加した。

会議は R. Aymar CERN 所長の挨拶に続いて、n\_TOF でのマイナーアクチニド (MA) 及び長半減期放射性核分裂生成物 (LLFP) の断面積測定の報告を中心に、各国研究機関の核データ測定・収集・評価の現状、国際機関における核データ活動等に関する発表など多岐にわたって行われた。

## シンポジウムのプログラム

March 22 (Tuesday)

1. Advanced neutron capture & fission experiments
2. Theories and models for neutron induced reactions
3. n\_TOF results for Nuclear Technologies & Astrophysics
4. Dissemination of nuclear data for science and technology

March 23 (Wednesday)

1. Neutron in astrophysics – stellar and explosive nucleosynthesis
2. ADS & waste management – now and in 2010
3. Future data needs for science and nuclear technologies
4. New experimental opportunities at RIB facilities and advances neutron sources
5. n\_TOF-Ph2 plans & General discussion

## 2. n\_TOF の測定と現状

n\_TOF プロジェクトは、フェーズ 1 として 2002 年から 2004 年の期間、加速器駆動システムや天体核物理等で重要な核種に対する中性子捕獲断面積と核分裂断面積が測定された。n\_TOF については既に多くの人が紹介しているが以下の各項目毎に若干詳しく説明する。

### (1) n\_TOF の中性子源

CERN は多くの加速器をもつ加速器コンプレックスである。n\_TOF では陽子加速器 (PS : 陽子シンクロトロン) からの 20GeV 陽子を鉛ターゲットに入射させ、核破砕反応により大量の中性子 (1 陽子当たり 300 個) を発生させる。PS では 16.8 秒のスーパーサイクルの内、n\_TOF 専用モードのバンチ ( $\sim 7 \times 10^{12}$ ) 及び寄生モードのバンチ ( $\sim 4 \times 10^{12}$ ) からなる 3~4 個の陽子ビームパルスが、予め設定した順番に従って鉛ターゲットに照射される。陽子パルス間隔は平均として約 2.4 秒である。中性子発生のための鉛ブロックは  $80 \times 80 \times 40 \text{cm}^3$  の大きさであり、ビームのパルス幅は 6ns である。中性子を減速するモデレータとして水を用いており、飛行距離約 185m でのエネルギー分解能は 100MeV でも 1%と非常に良好な値を有する。原理的に熱中性子から GeV の広いエネルギー領域の測定が可能であるが、中性子飛行管は陽子ビーム前方方向 ( $10^\circ$ ) の角度を持って設置されているために、高エネルギー中性子中に中間子、ガンマ線などによるインビームバックグラウンドの成分が多いことが問題となっており、現状では、250keV 以上の領域については S/N が悪くあまり高い精度のデータの取得は期待出来ない。一方、低いエネルギーについては、データ収集系のサンプリング速度とメモリー容量の関係から 0.7eV 以下での測定は行われていない。

## (2) 測定試料

高強度の中性子が利用可能なことから、極めて少量（10mg～数 100mg）の放射性核種サンプルの測定も可能で、これまでに、天体核物理のためにマグネシウムの同位体、放射能を持った  $^{151}\text{Sm}$ 、 $^{93}\text{Zr}$  を含めた核分裂生成物核種、鉛とビスマスの同位元素、加速器駆動炉用に  $^{233}\text{U}$ 、 $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{245}\text{Cm}$  などのアクチノイド核種の断面積が測定された。ただ、既存の捕獲断面積値に問題があるとされる  $^{241}\text{Am}$  についてはフェーズ 1 では核分裂断面積のみ測定された。n\_TOF フェーズ 1 で中性子捕獲断面積、核分裂断面積断面積が測定された核種を（放射性核種は下線）を表 1 に示す。

表 1 n\_TOF フェーズ 1 で測定された核種（放射性のものは下線）

捕獲断面積測定	核分裂断面積測定
$^{151}\text{Sm}$ $^{204,206,207,208}\text{Pb}$ $^{209}\text{Bi}$ <u><math>^{232}\text{Th}</math></u> $^{139}\text{La}$ $^{24,25,26}\text{Mg}$ $^{90,91,92,94,96}\text{Zr}$ , <u><math>^{93}\text{Zr}</math></u> $^{186,187,188}\text{Os}$ <u><math>^{232,234}\text{U}</math></u> <u><math>^{237}\text{Np}</math>, <math>^{240}\text{Pu}</math>, <math>^{243}\text{Am}</math></u>	<u><math>^{233,234,236}\text{U}</math></u> <u><math>^{232}\text{Th}</math></u> $^{\text{nat}}\text{Pb}$ , $^{209}\text{Bi}$ <u><math>^{237}\text{Np}</math></u> <u><math>^{241,243}\text{Am}</math>, <math>^{245}\text{Cm}</math></u>
$^{197}\text{Au}$	<u><math>^{235,238}\text{U}</math></u>

## (3) 検出器技術

捕獲断面積の測定には  $\text{C}_6\text{D}_6$  検出器と、TAC（ $\text{BaF}_2$  検出器：Total Absorption Calorimeter）が使用されている。特に TAC は、カールスルーエ研究所で使用実績のあるものに改良を加えたもので、バックグラウンドの主要因である散乱中性子に対する感度を低減化するために  $\text{BaF}_2$  は  $^{10}\text{B}$  入りの炭素繊維のフレームに取り付けられ、サンプル周りには  $^6\text{Li}$  入りの遮蔽が施されている。核分裂断面積の測定には PPAC（Parallel Plate Avalanche Counter）と FIC（Fast Ionization Chamber）を用い、電極間の距離を短く（ $\sim 3\text{mm}$ ）するなどにより低いガス圧での動作を可能とし、早い応答時間を達成している。さらに、検出器系の応答速度を速め、検出器が対応出来ない不感時間を減じるために、最新のデジタル技術を利用したフラッシュ ADC を用いている。また、精度の良い中性子束値を得るために、 $^{235}\text{U}$  核分裂、 $^6\text{Li}(n,\alpha)$  などの標準断面積を用いて中性子束強度の相互比較測定が行なわれた。

#### (4) 測定の実況

n\_TOF では 2002 年のプロジェクト開始以来、最初の 1 年半の間に複数の検出器による中性子束の精密な決定、遮蔽の強化（鉄遮蔽 3m とシャドーバー）によるバックグラウンドの低減を達成した。その後、C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> 検出器を用いた天体核物理のための断面積測定を先行的に実施した。実験結果については、一部の核種について論文として報告されているが、国際会議等で生データあるいはプレリミナリーデータとして評価済データファイルとの比較が報告されているのみで、最終的な値にはなっていないものが多い。

<sup>151</sup>Sm については、200GBq もの放射能を持った試料での測定を実施し、計算によって推定された光学モデルを使った予測値(1500~1800 b)と比較して 1.1~2 倍の測定値(3100 ±160mb)を得ており、天体核物理の理論に変更を迫るものとして話題となっている。また、Th/U サイクルにとって重要とされる <sup>232</sup>Th(n,γ)の測定では keV 領域の値が JENDL-3.3 等の評価値と比較して 30%もの大きな値を示す図が報告されている。また、Pb 同位体、Bi の個々の共鳴パラメータについて過去の ORELA のデータとの比較も示されている。なお、2004 年の 5 月から開始された TAC による MA の測定は 10 月中頃に終了しており、スペインが中心となって凡そ 1 年間をかけて大量のデータの解析を実施している。この測定については <sup>237</sup>Np、<sup>240</sup>Pu 等の S/N 比を示す生データが提示され、低エネルギー領域の共鳴について SAMMY の解析結果が示された。

FIC による MA の核分裂断面積の測定については、1950~1960 年代の原爆実験によるデータしか存在しなかった <sup>236</sup>U などについて格段にエネルギー分解能の高い高精度の実験値が得られている。また、<sup>232</sup>Th、<sup>234</sup>U、<sup>236</sup>U、<sup>237</sup>Np についても一部 ENDF/B-VI との比較が示された。

### 3. 各国の測定・理論・評価の実況

#### (1) 測定

各国施設紹介のセッションでは、米国オークリッジの電子リニアック ORELA での最新の実験について P.Koehler 氏が報告した。<sup>147</sup>Sm(n,α)測定、Pt 同位元素の共鳴解析結果、サイクル機構との <sup>99</sup>Tc、<sup>93</sup>Zr(n,γ)の断面積測定、time digitizer の更新などについて紹介した。ロスアラモス研究所での活動については、J. Ullmann 氏が報告した。陽子リニアック LANSCE の WNR 施設で行われた鉛スペクトロメータを用いたナノグラム試料による <sup>239</sup>Pu 核分裂断面積測定結果を示し、最終的には <sup>235m</sup>U(n,f)を測定する計画であることを述べた。また、Lujan Center（核破砕中性子源施設）では DANCE（BaF<sub>2</sub> 検出器を用いた捕獲断面積測定装置）を用いた測定が進んでおり、プレリミナリーではあるが <sup>236</sup>U、<sup>237</sup>Np、<sup>151</sup>Sm などの結果が得られている。また、引き続き <sup>240</sup>Pu、<sup>244</sup>Pu などの実験も計画されていることを報告した。DANCE での測定は、飛行管の距離が短いこと（20m）を除けば中性子源と測定手法共に n\_TOF とオーバーラップするところも多い。ベルギーのゲールでは電子リニアック GELINA を用いた測定の結果を A. Plompen 氏が報告した。ここでも MA 核種 <sup>236</sup>U(n,γ)の測定が行われているが、n\_TOF との役割を分担して、<sup>237</sup>Np の全断面積、<sup>129</sup>I(n,tot)、(n,γ)の断面積等の測定が進んでいる。また、<sup>206</sup>Pb(n,tot)、(n,γ)、<sup>207</sup>Pb(n,2n)、

( $n,n'\gamma$ )、 $Bi(n,n'\gamma)$ などの結果が紹介された。その他、フランス ILL (原子炉) の H. Börner 氏が中性子捕獲ガンマ線スペクトルの測定、スウェーデン Uppsala 大学の J. Blomgren 氏がサイクロトロン施設を用いた高速中性子の散乱断面積の測定等について現状を報告した。

## (2) 理論・評価

核データの理論評価計算コード TALYS について、Petten の A. Koning 氏の解説があり、原子番号、質量数、エネルギー領域、反応の種類などを入力するだけで、パラメータの系統性を用いて必要とする原子核の断面積が計算出来、実験が不可能な放射性核種の核断面積等の評価に威力を発揮することが紹介された。TALYS (FORTRAN77 で書かれている) を用いた、中性子入射反応、角度分布、荷電粒子反応、核分裂収量、Covariance の評価例などが次々に示された。会場から質量数 20 以下の軽い核についての信頼性について質問があったが、一般的には軽核についての計算精度は良くないが、C、N についてはかなり良い結果を出しているとのことであった。

また、バーゼル大学の T. Rauscher 氏が、天体核物理にとって興味のあるドリップラインに近い核種の断面積計算コード Nonsmoker について説明した。エネルギーが 30keV 領域に限定されており、実験値で計算を検証することが出来ないことから、計算の信頼性についての議論は困難で、系統性からの計算の妥当性についての評価が取りあえず必要ということのようであった。

評価活動では、IAEA の R. Capote 氏、NEA データバンクの H. Henriksson 氏が最近の活動を紹介した。2005 年の 5 月に公開される欧州の JEFF-3.1 についての紹介や、実験データ集 (EXFOR) では中性子データのみならず、ADS や粒子線治療用に必要とされる高エネルギー粒子反応や荷電粒子データの収集が精力的に行われていることを説明した。

## 4. ADS 関連研究の進展

セッションの最初の講演として、C. Rubbia 博士が、最近の ADS の動向について、持ち時間 30 分のところを大幅に上回る 1 時間近く熱弁をふるった。講演では、熱中性子炉と比較して高速スペクトル炉が核変換において効率的であることなどの基本的な事項について極めて簡明で分かりやすい概説を行った後、持論である Th/U サイクルを基調としたエネルギー増幅炉の利点、 $k_{\text{eff}}$  値を出来るだけ 1 に近づければ、数 MW 級の比較的小型の加速器 (サイクロトロン) システムが実現可能であること等を強調した。なお、最近話題となっている TRADE 計画 (Rubbia 博士が強く推進していたプロジェクトで、TRIGA 炉にサイクロトロンからの陽子ビームを入射させる実験) がキャンセルされたことについてはなにも触れなかった。他の出席者の観測では、予算的な問題ではなく、イタリア政府が計画に対して興味を無くしたとのことで、明確な理由については判明しなかった。

引き続き行った著者の講演では、原研が提案している ADS の基本パラメータ (窒化物 MA 燃料、 $k_{\text{eff}} = 0.97$  等)、液体 Pb-Bi ループでの実験結果、J-PARC の建設の現状、核データ測定用検出器の概要などを紹介した。講演に対して、Rubbia 博士からは、研究の

進捗への賛辞の後（具体的な実験結果を示せたことが原因だと思われる）、 $k_{\text{eff}}=0.97$  選択の理由についての質問があった。著者は MA の核データ、計算コードの予測精度の不確かさ（～2%）があるため安全裕度の確保のための選択であり、そのためにも MA の核データの高精度化が重要である旨を回答した。このセッションでは、併せて、EU が支援している EUROTRANS（欧州核変換）計画の概要を EC の V. Bhatnagar 氏が、また関連した核データ測定プログラム NUDATRA 活動の現状についてスペイン CIEMAT の E. Gonzalez 氏が詳細に紹介した。

## 5. n\_TOF の将来計画

n\_TOF は、2005 年と 2006 年の間に予定されている加速器 (PS) の停止のためにその間は休止され、以後フェーズ 2 に移行する。実験施設と装置の整備はほぼ終了しているため、フェーズ 1 で明らかになった課題を解決し、エネルギー領域の拡大、積み残した核種の測定などが主眼となる。プロジェクトの継続はほぼ確実であるが、実験の継続については、各研究所からの人的な協力が引き続き望まれている。最大の課題である高エネルギー領域のバックグラウンド低減については、ターゲット中での水素捕獲による 2.2MeV  $\gamma$ 線の低減のための  $^{10}\text{B}$  の混入、陽子入射に対して  $90^\circ$  方向に新たな飛行管（約 20m）を整備すること、非密封線源の取り扱いが可能な測定室の整備などが提案されている。設備の改良などには予算措置が必要とされ、EU への予算の申請、参加研究所の資金的な分担も議論されている。

また、最終討論では、会議の主催者でもある CERN の A. Mengoni 氏が、これまでの経緯と新規の研究テーマの概要について紹介した後、新たに(n, $\alpha$ )、(n,p)反応、 $\mu\text{g}$  オーダーの微小試料の測定などの具体的な提案が、数人のプレゼンターによって説明された。また、核データの測定に限らず、基礎科学への n\_TOF 中性子源利用の可能性の一環として、ダークマター探査と関連したニュートリノによる中性子の反跳を測定する装置の開発などの極めてユニークな実験の提案が行われた。今後、これらの提案は CERN の課題採択委員会で討論が行われる予定である。

## 6. 感想と国際協力について

国際協力プロジェクトとしての n\_TOF では、CERN のこれまでの国際協力における経験がおおいに役立っている。外部機関参加の関わり方、マシンタイムの割り振り、人員の派遣、安全の確保、資金の調達等の仕組みが確立されており、さらに宿泊施設、食堂、コンピューター等のインフラストラクチャーが極めてよく整備されている。実際に計画に参加している CERN の職員の数多くはないが、各国の若い研究者達が常時駐在し、効率よく実験が進められている。また、データの解析には、インターネットなどのコミュニケーション性能をフルに発揮しており、各国からのデータへのアクセスはスムーズである。

CERN はスイスとフランスとの国境線をまたがって位置する研究所で、研究所内の建物間の移動にもパスポートの所持が必要となる。さらに地域的にはイタリアに隣接し、

ドイツやオランダからの移動には車や列車を利用してくる人も多い。また、ジュネーブ空港からも非常に近く、タクシーで約 15 分の距離で（代金 3,000 円位。これが距離と比較して高すぎると不評）極めて便利である。ジュネーブの町へはバスが頻繁に行き来しており、片道 250 円位で容易に出掛けられる。スイスの物価は比較的高めなのと、スイスが EU に加盟していないのでユーロが使えないなどいささか不便な点もあるものの、地の利、研究環境、居住環境共に協力研究の構築には非常に有利である。

振り返って我が国では、現在 J-PARC が建設中であるが、建物、加速器、実験装置、宿泊施設等、居住環境等の優先順位で整備が進んでいるように見える。これらの整備は有機的にかつ一体的に進められどれが欠けても効率的に研究を進めることは出来ない。n\_TOF での経験を大いに参考にして、将来、アジアから多くの研究者が我が国の施設を気持ち良く使えるようになれば、最近問題となっている反日感情を改善するのに大いに貢献するものと思われる。



CERN の構内からみた欧州一の高峰モンブランの頂き（標高 4,808m。ジュネーブからは東南東の方角で約 80km、フランスとイタリアの国境に位置する。2004 年 10 月に訪問した際に手持ちのデジカメで撮影）。