

## 乗附の山猿、ブタペストへゆく

### EFNUDAT Slow and Resonance Neutrons, Scientific Workshop on Nuclear Data Measurements, Theory and Applications September 23 - 25, 2009, Budapest, Hungary

日本原子力研究開発機構

中村 詔司

[nakamura.shoji@jaea.go.jp](mailto:nakamura.shoji@jaea.go.jp)

#### 1. はじめに

平成 21 年 9 月 23~25 日 (3 日間) にわたり、Hungary、Budapest 市郊外にある Normafa Hotel にて開催された「第 2 回 EFNUDAT Slow and Resonance Neutrons, Scientific Workshop on Nuclear Data Measurements, Theory and Applications」に参加したので、その会議内容を報告する。

まず、地理的な案内をしたい。図 1 に Budapest 市街地図を示す。Hungary の Ferihegyi (フェリヘジ) 国際空港から市街まで約 15 km と近く、車で 20 分程度と非常にアクセスが良い。空港より Airport Mini Bus (乗り合いバス) に乗り、Budapest 市街へ向う。PEST 地区からエルジェー

ベト橋を渡って、BUDA 地区へ移動する。橋上より、ドナウ川へ落ち込むように切り立った丘に建つ王宮や砦を横目に見つつ、10 km 程西へ山肌を登った所にある Normafa Hotel が会議場所であった。Hotel



図 1 Budapest 市街の航空写真

から南へ2 km 程離れた場所に主催者であるアイソトープ研究所がある。図中の黒く見える部分は森林であり、研究所は、もともと森林公園の半分を切り開いて設立されたようである。この近辺から、通勤時間帯を考慮すれば、20~30 分程度で市街中心へ出られるからであろうか、初秋を匂わせる木々の中に高級住宅が佇み、閑静な場所であった。かくして、遙かドナウの水面に瞬く栄華の巷を低く見て、3 日間のワークショップに参加することとなった。

## 2. 会議の概要

本ワークショップは、ハンガリー科学アカデミー (Hungarian Academy of Science : HAS) 中のアイソトープ研究所 (Institute of Isotopes) が、EU FP6 (the sixth Framework Program) のサポートを受けて主催したものである。EFNUDAT (European Facilities for Nuclear Data Measurements) は、核データ測定のために、欧州の実験施設の多国間での共同利用を支援することを目的としている。EU FP6 は、欧州連合の研究者間の国際的な研究協力の枠組みで、研究機関、大学、産業界、行政機関も研究プロジェクトへ参加することを推奨するものであり、エネルギー、運輸技術、航空・宇宙技術、情報技術、ナノテクノロジー、材料開発、バイオ、ゲノム、食品、農業等、幅広い研究分野を対象としている。EU FP6 のプロジェクトパートナーの研究機関を図 2 に纏めておく。

このような枠組みの中に、EFNUDAT 協力がある。本ワークショップの主対象は、冷中性子から高速中性子を用いた核反応の研究であり、今回は、冷中性子〜共鳴中性子を用いた核データ測

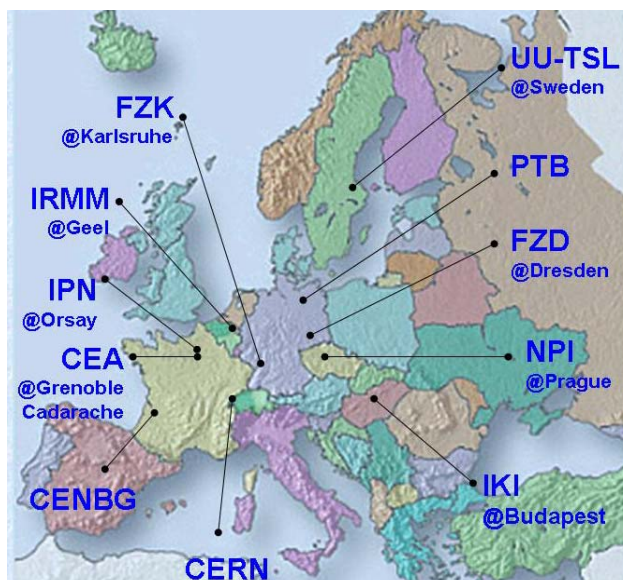


図 2 プロジェクトパートナーである研究機関



図 3 Workshop 会議の様子

定に焦点を絞りつつ、研究施設、実験セットアップ、検出器、新しい DAQ システムにまで話題が及ぶものであった。参加国は、ハンガリー、チェコ共和国、ドイツ、ベルギー、スウェーデン、スイス、米国、スペイン、オーストラリア、日本、英国、フランス、イタリア、オランダ、スロベニアと、多岐にわたり約 40 名の参加者があった。EU FP6 の枠組みでは、日本が参加することを奨励かつ歓迎しており、日本からは著者の他に、東京工業大学の井頭政之教授が招待講演で参加されました。図 3 に会議の様子を示す。Hotel 所有の木造で、少し懐かしさと温かみのある会議場で、形式張らずに参加者が顔を突き合わせて、各セッションで発表と議論が活発に行われた。本ワークショップでは、招待講演も含めて 31 件の発表があり、参加者のほとんどが発表を行った。各セッションから、興味あるトピックスを纏めて、以下のとおりに報告する。

### Time-Of-Flight method

- **日本 J-PARC/ML/BL04** : 井頭教授 (東工大) から、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) のビームライン No.4 における測定装置の建設経緯とそのミッションについて紹介があった。測定装置の遮蔽体、検出器、データ収集システム、試料の準備等について説明された。また、暫定的な測定結果として、Ge 検出器による Cm-244 の TOF スペクトル、及び NaI 検出器による Au-197 のスペクトルを示された。将来計画として、核分裂生成核種 (Tc-99, I-129, Zr-93) やマイナーアクチノイド (Cm-244, Cm-246) の捕獲断面積測定を開始すること、また中性子共鳴を利用した核種定量分析 (Nuclide Quantification) の研究など、J-PARC/MLF/BL04 で実施される研究が紹介された。
- **米国 Oak Ridge National Laboratory** : Guber 氏の発表で、オークリッジ電子線形加速器 (ORELA) の電子銃における長年の不具合 (放電により電子銃の絶縁セラミックに穴が開くこと) が改善され、TOF 法による測定が精力的に再開されていることが分かった。Transmission 測定は、80 及び 200 m コースで、(n,γ) 反応測定は、40 m Flight Station に新たに整備した Flight Path No.6 と No.7 にて行われている。SAMMY コードを用いた共鳴解析について、Mn-55、Pt-192、K-41 の解析結果を示された。特に、K-41 の共鳴パラメータについて、JENDL のパラメータが過大評価されている可能性が指摘された。最近の測定では、nat-Ti の(n,γ)反応と Transmission 測定、Ni-58 の(n,γ)反応データについて、評価値と実験値との検討を行っているとのことである。
- **韓国 Pohang (浦項) Neutron Facility (PNF)** : e-LINAC、100 MeV、水冷却 Ta ターゲット、12 m Flight Path にて、直径 12.5 cm、厚さ 1.6 cm の  ${}^6\text{LiZnS}(\text{Ag})$  glass scinti. を中性子検出器として使用し、Nb 及び Pd の全断面積を 0.1 eV から数百 eV の領域で測定した結果を紹介した。共鳴解析を、SAMMY コードにて行い、良い fitting が得られ

ていた。近年、Ta、Hf、Mo等の全断面積測定の結果を報告しており、今後の研究動向が気になるところである。

- **Geel Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM) の電子加速器施設 (GELINA)** : Transmission 測定では、nat-Cd、Rh-103、Au-197 の共鳴解析を、REFIT コードを用いて行っていた。測定では、バックグラウンドを決定するのにフィルターとして、Ag、W、Co、Na、S を使用していた。
- **CERN n\_TOF facility** : U-234(n, $\gamma$ )、U-238(n, fission)反応のデータを紹介された。また、施設のポテンシャルを上げるために、改良を考えていることが紹介された。例えば、(n, $\gamma$ )反応断面積測定を強化するために、borated water moderator を組み込んだ新しい Pd spallation target の製作を進めている。将来計画として、Fe、Ni、U-235、238 の(n, $\gamma$ )、(n, fission)の測定、また Am-241、243 については全断面積測定を考えているとのことである。n\_TOF\_Ph1 では、Zr 同位体、Zr-93、Np-237、Pu-240、Am-243 の捕獲断面積の測定が実施された。n\_TOF\_Ph2 では、MA のうち Am-241 と Am-243 の捕獲断面積の測定を、核分裂断面積測定として Th-232、U-235、U-238 の核種を提案しているとのことである。

### Activation analysis

筆者は、JAEA で得られた核データの成果として、核分裂生成核種やマイナーアクチニドの中性子捕獲断面積データを報告した。特に、原子炉を用いた放射化法の測定で、ガドリニウム遮蔽を用いた手法について、CEA の Letourneau 氏が関心を示した。彼等は、ラウエ・ランジュバン研究所 (ILL) の高中性子束炉 (58MW 出力、 $1.5 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>s) で、マイナーアクチニドの断面積を系統的に測定している。今回、彼等は Np-237 の捕獲断面積について、我々の値  $169 \pm 4$  (b) より大きい値  $182.2 \pm 5$  (b) を報告した。それについて、Np-237 の第一共鳴は、0.49 eV にあり、ちょうど Cd cut-off energy と一致してしまう。そのため Cd 遮蔽では十分に遮蔽できず、断面積を過大評価している可能性があるのではないかと、議論を行った。彼等もガドリニウムを使って検討してみるとのことであった。また、彼等は、Np-238 の(n, fission)断面積  $2165 \pm 70$  (b)、(n, $\gamma$ )断面積  $450 \pm 150$  (b) を報告していた。今後、Cm-248、Cf-249、250、251 の測定を計画しているとのことである。

Jozef Stefan 研究所 (Slovenia) の Trkov 氏より、TRIGA 炉を用いての中性子放射化分析の発表があった。中性子スペクトルの確認として、Au-197 や Al-27(n, $\alpha$ )等の反応率の C/E を議論していた。信頼のある断面積データから中性子束を求める。そして、信頼ある中性子スペクトルから断面積データを求める、という観点から、熱中性子捕獲断面積、共鳴積分、カドミ比  $F_{cd}$ 、g-factor を測定している。放射化による積分実験が、データの確認

に有効であることを主張された。

National Physical Laboratory (UK) の Hawkes 氏が、slow neutron 施設について発表された。1960 年代に NPL に建設された古い施設であり、3.5 MV Van de Graaff accelerator から重陽子ビームを、Be ターゲットに照射して発生する中性子を、Graphite pile (280×140×160 cm) と water bath (2 mφ×2.4 m H) で熱化させて利用するものであった。Cd 比で 33 と、良く熱化された中性子場  $10^7$  n/cm<sup>2</sup>s を得ていた。1970 年代に熱中性子捕獲断面積 (Na-23、Al-27、Cl-37、V-51)、共鳴積分 (Cu-63、Cu-65、Ag-107、Tb-159、Ho-165) の測定が実施されていたが、現在、施設は使用されていないようであり、新しく測定を開始するためには、施設を再生させなければならないとのことであった。

Nuclear Physics Institute (Czech) の Svoboda 氏は、Uppsala (Sweden) にある the Svedberg Lab. のサイクロトロンを用い、陽子エネルギー 25、50、97 MeV と変えて、<sup>7</sup>Li(p,n)<sup>7</sup>Be 反応により発生させた準単色中性子を放射化実験に使用した。中性子束は、 $10^8$  n/cm<sup>2</sup>/s で、17 MeV から 94 MeV の中性子エネルギーに対して、Au、Al、Ta、Bi、In の閾値反応について、(n,xn)、(n,p)、(n,α) 反応断面積を測定していた。今後、MA 核種について、その閾値反応を調べる計画を持っているとのことである。

### Prompt Gamma-ray Activation Analysis

即発ガンマ線放射化分析 (Prompt Gamma-ray Activation Analysis) では、主催者であるアイソトープ研究の原子核研究部門より 3 件の発表があった。実験は PGAA 施設を用いて行われたものであり、施設の詳細については次章に委ねることとしたい。

Revay 氏より、PGAA 施設で実施されている部分γ線生成断面積の研究について概要発表があった。γ線生成断面積については、1996 年までそのデータベースがなく、その分光データベース整備を目的として、過去 12 年にわたって天然元素の測定を行った。断面積の標準として、以前 Cl の断面積を用いていたが、H の断面積 332.6 (mb) を用いていた。Curved super mirror guide を用いてターゲット位置から直接原子炉を見ないように工夫し、中性子束  $3 \times 10^9$  (n/cm<sup>2</sup>s) 時で、B.G. は 300 cps 程度とのことである。効率測定には、Ba-133、Eu-152 較正線源の他、Cl-35 試料を用いて、50 keV~11 MeV の領域の効率を求めていた。γ線ピークのエネルギー較正は、測定試料と Cl-35 試料と一緒に照射して較正することとされている。

PGAA の具体的な測定については、Belgysa 氏より Cl-35、nat-Cr、Rh-101 核種について、(n,γ) 反応の部分断面積の測定について、Kis 氏より Ni-58(n,γ)Ni-59 反応の測定に関して詳細な発表があった。

### Nuclide identification and Quantification

GELINA にて行われている非破壊分析のために中性子共鳴吸収を用いた分析 (neutron

resonance capture analysis : NRCA) について、発表があった。TOF 測定で、中性子共鳴を利用して、元素、同位体の定性、定量分析を行うというものであった。 $\gamma$ 線スペクトルで、元素に起因する $\gamma$ 線エネルギーとピーク収量から定性・定量分析を行うのに対して、TOF スペクトルで元素の持つ断面積の共鳴エネルギーと共鳴ピークの収量から定性・定量分析を行うというものである。調べたい元素の共鳴ピークに他の元素からのピークが重なっていても、 $\gamma$ 線でゲートをかけることにより共鳴ピークを弁別して多元素同時分析が可能であろう。J-PARC/MLF/BL04 において、将来 1 MW 出力時で、NRCA の分析限度がどこまでいくのか興味を持たれるところである。

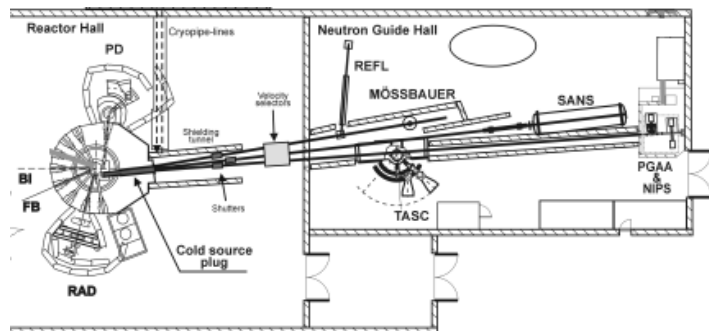
### 3. Facultative Visit

会議 3 日目の午後に、本ワークショップの主催者であるアイソトープ研究所原子核研究部門の Tamas Belgya (タマス・ベルジャ) 氏の案内で中性子ガイドホールの見学会が催された。見学会には、希望者 20 名が参加した。見学の様子を、**図 4** に示してある。Belgya 氏の他、数名のスタッフが二手に分かれて、説明と質問に懇切丁寧に対応していたのが印象的であった。



**図 4** Belgya 氏の説明を受ける見学者

本研究所は、Budapest Research Reactor (BRR) を有し、出力 10 MW 運転で、最大熱中性子束  $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$  を供給する。BRR には、液体水素冷却 (20 K) による 3 本の冷中性子ガイド管が設置されており、中性子ガイドホール (**図 5** 参照) へ導かれた冷中性子を用いて、中性子回折実験、中性子小角散乱実験、メスバウアー測定、そして即発ガンマ線分光法による研究等が精力的になされている。



**図 5** 中性子ガイドホール平面図

即発ガンマ線放射化分析 (Prompt Gamma-ray Activation Analysis) では、効率 25 % の Ge 検出器とサイド BGO 検出器とバックキャッチャ BGO 検出器から構成された検出器を、1 本の冷中性子ガイド管の末端に図 6 のように設置し、Anti-Compton mode にて S/N 比を向上させて測定を行っている。測定システムについては、特に凝ったことをせず、むしろ B.G. の低減に注意



図 6 Thermal-neutron PGAA facility

が払われており、BGO 検出器の周りを 10 cm 厚の鉛遮蔽で覆い、ガイド管の内側を  ${}^6\text{Li}$  入りのシートで内張りし、かつ検出器全体を  ${}^6\text{Li}$  入りのシートでカバーする等して、Beam-ON の条件で、B.G. は 10 cps 程度とのことである。更に、測定を迅速に行うことにも配慮がなされており、例えば様々な試料が、引出し棚に保管用意されており、それら試料を簡便なサンプルホルダーに装荷すれば、ルーチンワーク的にどんどん測定を行えるように工夫されている。技術者も含め、数名のスタッフながら、PGAA の研究をリードしている理由が伺えた。

#### 4. おわりに

CERN の Chin 氏より、European Spallation Source (ESS) の話を聞いた。SNS (ORNL)、J-PARC (Japan)、ISIS (England) の現状を受けて、欧州に大強度の核破砕中性子源をとの要望から、ESS site の候補地として Hungary、Spain、Sweden が検討されていた。大強度中性子源は、中性子散乱を利用した半導体、超伝導、生物、健康、医学研究の目的に利用するそうである。Chin 氏曰く、「CERN に行けば、実験はできだろう。しかし、(大強度核破砕中性子源を得るために、今ある加速器が) 造られた時代には戻れない。だから、(大強度核破砕中性子源を) 造るのだ」。

2009 年 9 月、Sweden の Lund という長閑な大学町が ESS site に決定されたとのことである。ESS site の構想図を、図 7 に示す。陽子ビーム、2.5 GeV、Hg ターゲット、5 MW、20 Hz の核破砕中性子源の設計が進められている。2019 年 (ないし 2020 年) の完成を目指しているとのことである。

最後に再び、Chin 氏の言葉を添えておきたい。「(氏自身の経験であろうか) 病院では、医者と看護師、そして病人 (であった自分) という人間関係の中で、何をすることも医者や看護師に従うしかなく、そこには自由が全くなかった。しかし、科学の世界には自由

がある。科学する自由がある。(Freedom to do Science)」と言っていた。10年後が楽しみである。さて、我々も歩まなければならぬ。



図7 ESS site の構想図

## 5. 謝辞

アイソトープ研究所の Tamas Belgya 氏、及び原子核研究部門のスタッフの方々へ感謝の意を表したい。少人数のスタッフにもかかわらず、本ワークショップを良く組織し、参加者への気配りを絶やさなかった。Hungary という国柄なのだろうか、列強の国々にはさまれた歴史を経て、心は広く世界へ開いているのだろう。

また、開催期間中、体調を崩した筆者に、いろいろとお気遣いをして下さった東工大井頭政之教授に、この場を借りて御礼を申し上げます。

本稿の標題にある「乗附の山猿」とは、筆者のことで、筆者は群馬県高崎市乗附の山のふもとの男子校出身であることに由来する。最後に、本ワークショップに興味をお持ちになった方、さらに詳細な情報が必要な方は、下記を参照されたい。

<http://www.iki.kfki.hu/efnudat/index.shtml>

以上