

## β遅延中性子放出のための参照データベースに関する 第一回研究協力会議参加報告

1<sup>st</sup> RDM on "Reference Database for Beta-delayed Neutron Emission Evaluation"

東京工業大学

千葉 敏

[chiba.satoshi@nr.titech.ac.jp](mailto:chiba.satoshi@nr.titech.ac.jp)

日本原子力研究開発機構

湊 太志

[minato.futoshi@jaea.go.jp](mailto:minato.futoshi@jaea.go.jp)

---

### 1. 背景

表記会合が2013年8月26日から30日にかけてウィーンのIAEA本部において開催された。コーディネーターはNDSのParaskevi Dimitriou氏である。国内からは原子力機構の湊、東工大の千葉が参加した。会議の詳細および参加者の発表ファイルが掲載されているウェブサイトのURLを以下に掲載する。

[https://www-nds.iaea.org/beta-delayed-neutron/index\\_1rcm.html](https://www-nds.iaea.org/beta-delayed-neutron/index_1rcm.html)

β遅延中性子は原子力では単に遅発中性子と呼ばれているものと等価である。すなわち核分裂などで生成した核分裂片の多くが中性子過剰核であるため、β崩壊のQ値が娘核の中性子分離エネルギーより大きい場合に放出される中性子のことである。遅発中性子収率は、原子炉では動特性を決める大事な量であり、炉物理の教科書でも6群の定数が載せられていることは良く知られているが、これらは原子力の初期にGodiva等の装置を使って、核分裂系毎に測定されたいわゆる集成収率 (aggregate yield) である。すなわち核分裂片の収率、その時間変化とそれぞれの崩壊経路におけるβ遅延収率の効果を全て込み込みで含む総和量が装置の測定にかかり、炉物理計算に用いられている。Keepinのデータが有名である。炉物理上では、aggregate yieldが分かっているだけで十分とも言えるが、残念ながら、そのようなデータがある核分裂性核種、中性子エネルギー点は限られている。原子炉の高燃焼度化や、マイナーアクチノイド (MA) の核変換処理で生成・消滅する多くの核種に対しては、そのデータが存在しないのが現状である。aggregate yieldは、原理的には核分裂収率 (核分裂直後のアイソトープ分布) と核分裂片のβ崩壊特性 (半減期、遅発中性子放出確率) を基に計算することができる。このような計算を総和計算

と呼んでいるが、そのために必要なデータは膨大であり、Keepin のデータに比べてまだ多くの不確定性が存在する。しかしながらこのような計算は、中性子過剰核の構造や安定性の観点から、原子核物理のテーマとして多くの関心があり、また宇宙核物理の観点からも、r-過程元素合成における中性子枯渇後の $\beta$ 崩壊による最終的な元素分布量を決定するために重要であり、興味を持たれている。

本 CRP は、遅発中性子という古いテーマに現代的な光を当てるために、世界の様々なグループの研究の現状、将来計画を紹介し、可能な協力体制を構築するために開催されたものである。会議の Agenda を付録 1 に、参加者リストを付録 2 に示す。

## 2. 会議の概要

今回の CRP 会議の目的は、遅発中性子に関するこれまでの国際的な研究成果を総括し、今後 4 年間にわたる研究計画を決定することである。この会議は、計 3 回を予定しているうちの最初の会議であり、およそ 20 名の参加者で構成されている。前半 2 日間は、出席者による各国の遅発中性子研究の現状報告がなされ、後半 3 日間は、出席者間で議論を行い、今後の遅発中性子研究についての指針と研究計画を定めた。この CRP のプロジェクトで達成された成果は、研究計画の最終年に IAEA のレポートにまとめられる予定である。

会議に参加してまず認識したのは、本 CRP が Beta-delayed Neutron Emission の“評価”のためのデータベース、というタイトルであり、その“評価”の分野に、ある大御所が



会議参加者によるグループフォト。後列右から 4 番目が千葉、5 番目が湊。

いる、ということである。その大御所とは、マクマスター大学の Balraj Singh 氏という人物であり、まずこの人が議長に選定され、同時にその弟子と思われるアルゼンチンの Daniel Abriola 氏がその議長補佐のような形で選定された。この人たちは、少なくとも現在は純粹に評価をやっている人たちのようである。というわけで、筆者の全く知らなかった人たちが議長に選ばれたのだが、この人たちの会議運営は非常に適切であった。会議の後半になってから、2013 年 3 月にマンハッタンであった ND2013 でも Singh 氏に会って話をしたことを思い出した。今回の会議で、発表者が使用したプレゼンテーションファイルは以下の URL より参照することができる。

[https://www-nds.iaea.org/beta-delayed-neutron/index\\_1rcm.html](https://www-nds.iaea.org/beta-delayed-neutron/index_1rcm.html)

なお会議の議事録は NDC(NDS)-0643 として出版される予定である。

### 3. 会議内容

会議参加者の研究内容は、大きく分けて 3 つにカテゴライズされる。一つは原子力で、ここに含まれるのはオブニンスクの Piksaykin 氏、英国の Mills 氏と千葉で、このグループはいわゆる aggregate data に興味を持っている。Piksaykin 氏は、基本的には Keepin と同じ aggregate 遅発中性子収率の直接測定を行っている人である。実はこの activity は、故菊池康之氏が始めた MA の核データに関する ISTC プロジェクトがきっかけになっていることを会議の途中で知った。Mills 氏は基本的には炉物理屋さんである。もう一つのカテゴリーは元素合成・中性子過剰核の興味からで、ここには ORNL、ヨーロッパ及びインドから参加した多くの実験物理のグループがここに属し、この会議をほぼ支配した。もう一つは評価のグループで、上記 Singh 氏、Abriola 氏の他に中国の Juang Xiaolong 氏、BNL の Sonzogni 氏、Johnson 氏がここに含まれる。原子力機構の湊は原子力と中性子過剰核の両方にわたるスペクトルを有している。以下、会議の初日と 2 日目で行われたいくつかの発表について紹介する。

原子力機構の湊は、理論的なアプローチによる遅発中性子の研究について紹介を行った。最初に、核分裂片収率の入射中性子エネルギー依存性を考慮した遅発中性子収率を議論した。加えて、微視的モデルである準粒子乱雑位相近似法に基づく、偶々核の 1 中性子放出確率の計算結果を紹介した。微視的理論による遅発中性子の計算手法は発展途上段階であるが、今後の進展が期待される。

一方、千葉は東工大と原子力機構が共同で行っている文科省原子力システム研究開発事業の概要とこれまでの成果を紹介した。この事業では、代理反応で測定した MA の核分裂収率データを基にして、核分裂の多次元ランジュバン模型を高度化し、核分裂収率の理論計算の精度を高めるとともに、 $\beta$  崩壊の大局的理論を改良し、遅発中性子放出率の予測精度を向上させることを目的としており、最終的にはそれらを核データライブラリー化し、炉物理データと比較してベンチマークを行うというものである。

BNL の Sonzogni 氏は、都合が悪く初日だけを欠席した同じく BNL の Johnson 氏に替わり、遅発中性子放出確率  $P_n$  の系統性について発表を行った。統計模型の表式から期待されるように  $P_n$  を  $\beta$  崩壊半減期で割ると、 $\beta$  崩壊の Q 値の関数として非常にきれいな系統性が得られる。有名なものは Kratz-Hermann の式で、これは JENDL の評価にも用いられているが、今回紹介された新しい計算結果はさらに良い系統性を提案している。実はこの系統性は、大局的理論による予測よりもデータを良く再現できている。Sonzogni 氏自身の発表では、遅発中性子に関わる核データの問題点について議論を行い、放出される遅発中性子の数だけではなくエネルギースペクトルの評価データの重要性について議論した。

Singh 氏は  $P_n$  データ評価の現状について紹介した。基本的データベースとしては NuDat、NuBASE が利用可能である。評価データに含まれるべき量などについて議論した。

ORNL の Rykaczewski 氏は HRIBF で行われたごく最近の遅発中性子の実験結果について報告をした。彼のグループは非常に積極的に測定を行っているようで、遅発中性子に関する多くの実験結果を最近の学術論文誌に投稿している。また、スペイン CSIC 大学の Tain 氏はフランスの GANIL やフィンランドのユバスキラで行われている遅発中性子の測定について発表をした。彼は、理研で計画されている BRIKEN プロジェクトのメンバーの一人であり、日本で今後予定されている遅発中性子の測定についても言及をした。ゲルフ大学の Garrett 氏らは、カナダの TRIUMF で計画されている実験について紹介を行った。このように、多くの施設で遅発中性子の測定が計画されている（またはこれからされる）背景には、短寿命中性子過剰核を生成・分離し、崩壊  $\beta \cdot \gamma \cdot$  中性子、それらのコインシデンスの測定を可能にさせている加速器・実験技術の発展が強く関わっている。このような実験には、RI ビームファクトリーが必要であり、必然的に実験装置は大規模化している。会議で紹介されたキーワードをいくつか紹介すると、HRIBF、BRIKEN、MTAS、VANDLE、LeRIBSS、BELEN、MONSTER、JYFLTrap、FRS、ISAC、GRIFFIN、DESCANT、LAMBDA、FAIR、Double CHOOZ、DANCE、SPIDER 等である。これらは施設名と装置名が入り交じっている。いちいち説明できないが、どれも大型の施設及び装置であり、原子力で必要な 1 中性子放出のみならず、2 中性子、3 中性子放出確率の測定も視野に入れているようである。BRIKEN は欧州、米国の研究者が理研の RIBF を用いて行う  $\beta$  遅延中性子放出測定プロジェクトであるが、今後、国内から貴重なデータが生み出されることを期待する。

これらの発表中でも多少は **aggregate data** に言及されており、現状の核データライブラリーの精度が良くないことが示された。参加した実験グループの発表内容の多くは、個々の核種における遅発中性子放出率に関するものであったが、Piksaykin 氏は、中性子励起核分裂における遅発中性子の 6 群・8 群表現の課題について発表を行い、その解決の重要性を強く主張していた。

ナント大学スパテックの Fallot 氏は  $\beta$ -delayed neutron emitters for reactor antineutrino のタイトルで講演を行った。彼女のグループの関心は、総和計算による原子炉ニュートリノ量及びスペクトルの推定である。これは、原子炉ニュートリノによるニュートリノ振動の検証とともに核不拡散手法の構築のためである。基本的には全ての核分裂片からのニュートリノスペクトルが必要になるが、これは  $\beta$  線スペクトルから推定するか、純粋に理論的に推定する必要がある。ちなみに  $\beta$  線スペクトルが測定されているのはごく一部の核であるため、大量の計算が必要になり、それに日本の大局的理論が期待されている。会議途中で協力の可能性を打診されたため検討していたが、会議後、年末になって約 200 核種の計算をして欲しい旨の依頼を受けたため、現在、専門家である橘孝博先生（早稲田）、吉田正先生（東工大）、小浦寛之氏（原子力機構）と共に戦略を練っているところである。

会議 3、4 日目は、次回の会議までに進めておくべき研究課題の設定が行われた。また、遅発中性子に関する現状を正確に把握するため、出席者間で調査の仕事が割り振られた。日本側の出席者の一人である湊は、原子力機構が管理している核データライブラリー JENDL を用いた遅発中性子の再評価と、日本国内の天体物理学者と連携し、重要な遅発中性子放出核を特定するという課題を任された。また、核データ評価研究グループで開発中の微視的理論を用いた遅発中性子の計算を行い、次回の会議までにその成果を発表することになった。さらに、千葉・湊の二人が担当になったもう一つの宿題は、JENDL の aggregate yield に対して、どの核分裂生成物が強い影響を与えているか、その核種リストを作成することである。

会議の最終日 5 日目は、これまでの議論の議事録の確認と修正を行った。

#### 4. 会議の所感（湊）

今回の会議では、aggregate yield への関心は少し小さめで、先行核種各々の遅発中性子放出に大きな関心が注がれていたように感じた。欧米の出席者は、核物理、宇宙・天体物理、材料工学など他分野に応用される前提で研究を行っているようである。というのも、他分野の研究者から支持を得て、大型の共用実験施設をうまく利用したいという思惑があるようだった。また、欧米の出席者は、自国内を含め世界各国の研究機関と強い連携を構築していると感じた。BRIKEN が典型的な例である。これに関しては、日本も国内はもちろん国際的なつながりを深めていかなければならないと思った。次回 CRP 会合から、相対論的平均場理論を用いた遅発中性子研究を行っているクロアチアのザグレブ大学のグループが新たに参加する予定である。

次回の会議は 2015 年の 1 月から 5 月の間の 1 週間を予定している。

## 5. その他（湊）

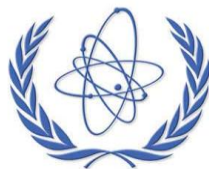
時間がある限りジョギングで出勤しているが、最近はお出張先でも朝にジョギングをするようになった。今回もウィーンの街をあちこち走ってきた。ジョギングなら業務時間に支障はないし、良い具合に体も目覚める。その街の地理にも詳しくなるし、同時に軽い観光気分も味わえる。実際、巷では“朝活”や“エクストリーム出社”という言葉がちらほらと聞かれ始めている。また、ジョギングでは、普通の観光では気づかない街の一面を見ることもある。今回も観光マップに載っていない美しい教会を見つけ、少し幸せな気分を味わった。

ウィーンには、飛行機の乗り換えで過去に何回か訪れたことがあるのだが、市街地に来たのは初めてだった。あまのじゃくな自分は、その知名度の高さの裏返しで、市街地に行きたいという気持ちが湧かなかった。しかし、今回訪れてみて、ウィーンが素晴らしく良い街であることに、愚かにも初めて気付いた。今まで過小評価していたのが申し訳ない。この街ならば、5年、10年と住んでみたいと思った。

核データニュースの出張報告には、キレイな風景や食べ物の写真がたいていあるので、何か無いかと探してみたが、デジカメの中の数枚のデータの中に、掲載にふさわしい写真が見つからない。仕方がないので、手元にある数枚の写真のうち最もキレイだと思うものを、おまけに載せることにする。最終日、予定より早く会議が終わったので行くことができた **Belvedere** 宮からのウィーン市街地の風景である。

最後に、会議が終わってほっと一息。本原稿の共同著者の千葉さんとカフェで飲んだビールはおいしかった。そして帰国前日の夜に楽しい夕食を共にできた IAEA NDS の大塚氏と、北大の牧永氏、ありがとうございます。





**IAEA**

***1<sup>st</sup> Research Coordination Meeting (RCM)  
of the CRP on Beta-Delayed Neutron Emission Data***

IAEA Headquarters, Vienna, Austria  
26-30 August 2013  
Meeting Room VIC A0742

**Preliminary AGENDA**

**Monday, 26 August**

**08:30 - 09:00**     **Registration** (IAEA Registration desk, Gate 1)

**09:00 - 9:30**     **Opening Session**

Welcoming address and Introduction  
Election of Chairman and Rapporteur  
Adoption of Agenda  
Administrative matters

**9:30 - 12:30**     **Presentations by participants (about 40 min each)**

1. *A comprehensive approach to determine delayed-neutron data – mass yield measurement, calculations of independent yield, decay heat and delayed neutrons*, S. Chiba, Tokyo Inst. of Technology, Japan
2. *An analysis of incident neutron energy dependence of beta-delayed neutrons*, F. Minato, JAEA, Japan
3. *Systematics of Pn and P2n decay*, T. Johnson, BNL, USA

*Coffee break as needed*

**12:30 – 14:00**     **Lunch**

**14:00 – 18:00**     **Presentations by participants (cont'd)**

4. *Emission of beta-delayed one- and two-neutrons including neutron-gamma correlations studied at Oak Ridge*, K. Rykaczewski, ORNL, USA
5. *Recent results on Pn-values with the BELEN 4pi neutron counter and future measurements*, J. Tain, IFIC-Univ. Valencia, Spain
6. *Opportunities for measurements of beta-delayed neutron emitters at the TRIUMF radioactive beam facility and the GRIFFIN and DESCANT spectrometers*, P. Garrett, Univ. of Guelph, Canada
7. *Measurements of beta delayed neutron emission probabilities: possibilities at VECC, Kolkata*, G. Mukherjee, VECC, India

*Coffee break as needed*

## Tuesday, 27 August

**09:00 - 12:30** Presentations by participants (about 40 min each)

8. *Towards a reference database for beta-delayed neutron precursors*, B. Singh, McMaster Univ., Canada
9. *Components of a reference database for beta-delayed neutron emission*, D. Abriola, Tandem Lab., Argentina
10. *Plans for evaluation of beta-delayed neutron emission data for some FP nuclides*, X. Huang, CNDC, China
11. *Simple estimates of beta-delayed neutron spectra*, A. Sonzogni; BNL, USA

*Coffee break as needed*

**12:30 – 14:00** Lunch

**14:00 – 18:00** Presentations by participants (cont'd)

12. *Beta delayed neutron data for advanced reactor technologies*, D. Cano-Ott, CIEMAT Madrid, Spain
13. *Absolute total delayed neutron yields, relative abundances and half-lives of delayed neutron groups in 6- and 8-group model format from neutron induced fission of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , and  $^{241}\text{Am}$  in the energy range from 0.35 MeV (or threshold energy) to 5 MeV*, V. Piksaikin, IPPE, Russia
14. *Calculation of delayed neutron emission from fission and fitting results to few group approximations*, R. Mills, National Nuclear Laboratory, UK
15. *Beta-delayed neutron emitters for reactor antineutrino energy spectra*, M. Fallot, SUBATECH-Univ. Nantes, France

*Coffee break as needed*

**19:00** Dinner in a restaurant (see separate information)

## Wednesday, 28 August

**09:00 - 12:30** Round Table Discussion

*Coffee break as needed*

**12:30 – 14:00** Lunch

**14:00 – 17:30** Round table discussion (cont'd)

*Coffee break as needed*



## **Thursday, 29 August**

**09:00 - 12:30 Round Table Discussion**

*Coffee break as needed*

**12:30 – 14:00 Lunch**

**14:00 – 17:30 Round table discussion (cont'd)**

*Coffee break as needed*

## **Friday, 30 August**

**09:00 - 17:00 Drafting of the meeting summary report**

*Coffee and lunch break(s) in between*

**17:00 Closing of the meeting**

### **Topics for Discussion**

- Experimental programs
  - a. Evaluation of experimental techniques
- Theoretical models calculations
  - a. energy dependence of fission fragment (on resonance at epithermal energy, excitation energy)
  - b. beta-decay (macroscopic, macroscopic+microscopic, microscopic models)
  - c. masses (AME, FRDM, KUTY, HFB)
- Compilation of existing and future data
- Evaluation efforts
  - a. Methodology
  - b. Assessment of JEFF, ENDF, ENSDF
  - c. Review of to-date evaluation efforts
  - d. Need for new evaluations
  - e. Evaluations of experimental techniques
- Training of existing and new evaluators
- Structure/form of new reference database
  - a. Formats (EXFOR, new database)
- Competition of one neutron and two-neutron emission after beta decay
- Reliability of integral measurements of  $\beta n$ -emission in a function of time
- Integral measurements of  $\beta n(\text{time})$  dependence vs microscopic analysis ala ORIGIN



1<sup>st</sup> Research Coordination Meeting on  
**“Reference Database for Beta-delayed Neutron Emission Evaluation”**

IAEA, Vienna, Austria  
 26 – 30 August 2013

**LIST OF PARTICIPANTS**

<b>ARGENTINA</b>	
Daniel Abriola	Comision Nacional de Energia Atomica
<b>CANADA</b>	
Paul Garrett	Guelph-Waterloo Physics Institute, University of Guelph
Balraj Singh	McMaster University
<b>CHINA</b>	
Huang Xiaolong	China Nuclear Data Center, China Institute of Atomic Energy
<b>FRANCE</b>	
Muriel Fallot	CNRS/IN2P3-Univ. Nantes
Amanda Porta	CNRS/IN2P3-Univ. Nantes
<b>GERMANY</b>	
Iris Dillmann	Justus-Liebig-Universität, II Physikalisches Institut
<b>INDIA</b>	
Gopal Mukherjee	Variable Energy Cyclotron Centre
<b>JAPAN</b>	
Satoshi Chiba	Tokyo Institute of Technology
Futoshi Minato	Japan Atomic Energy Agency
<b>RUSSIAN FEDERATION</b>	
Vladimir Piksaykin	Institute for Physics and Power Engineering (IPPE)

<b>SPAIN</b>	
Daniel Cano Ott	CIEMAT
Jose L. Tain	Instituto de Fisica Corpuscular, Centro Mixto CSIC-Univ. Valencia
<b>UNITED KINGDOM</b>	
Robert Mills	National Nuclear Laboratory Ltd.
<b>UNITED STATES OF AMERICA</b>	
Krzysztof Rykaczewski	Oak Ridge National Laboratory
Alejandro Sonzogni	Brookhaven National Laboratory
Timothy Johnson	Brookhaven National Laboratory
<b>IAEA</b>	
Paraskevi (Vivian) Dimitrou	NAPC/Nuclear Data Section
Valentina Semkova	NAPC/Nuclear Data Section
Marco Verpelli	NAPC/Nuclear Data Section