



## 革新的原子力開発に向けた 核データ測定ワークショップ

サイクル機構先進リサイクル研究開発部／日本原子力研究所物質科学研究部共催

核燃料サイクル開発機構

原田 秀郎

harada@tokai.jnc.go.jp

日本原子力研究所物質科学研究部

大島 真澄

oshima@nsbox.tokai.jaeri.go.jp

### 1. はじめに

21世紀の原子力開発では、安全性及び経済性の向上を確保しつつ、長期的なエネルギーの確保と環境負荷の低減を効率的に達成するため、革新的な原子力システムの研究が盛んに行われようとしている。しかしながら、革新的原子力システムの研究開発に必要な超ウラン元素及び核分裂生成物等の核データには、データの欠落や不確かなものが多いのが現状である。この問題の解決に向けて、本ワークショップでは、これら核データに関する現状を把握し、今後の課題、展望について議論することを目的とし、核燃料サイクル開発機構東海事業所環境保全・研究開発センター先進リサイクル研究開発部と日本原子力研究所東海研究所物質科学研究部の共催による初のワークショップとして、2002年10月3日（木）、4日（金）の両日、核燃料サイクル開発機構アトムワールド会議室及び日本原子力研究所東海研究所研究1棟会議室において開催した。当日は主催両機関をはじめ、大学、国立研究機関、民間研究機関から、核データの専門家約40名強が集まり活発な議論が行われた。

なお、ワークショップの前後に、サイクル機構の高レベル放射性物質研究施設及び日本原子力研究所のタンデム加速器施設見学を行った。



写真1 会議風景

以下に、各講演における要点を記す。

## 2. 講演の概要

### (1) セッション1 核データ研究の現状

- ・ 米国オークリッジ国立研究所電子線加速器施設(ORELA)における研究の現状がレビューされた。臨界安全及び宇宙物理のための中性子断面積研究が進められている。建設中の大型中性子源施設 SNS が完成しても ORELA は、エネルギー分解能の高いデータを供給できるため有益であり続けるとの議論があった。
- ・ JENDL-3.3 の MA データと、実験データ及び海外の評価済核データ (ENDF/B-VI、JEFF-3) を比較し、中性子エネルギー領域毎にデータの問題点が洗い出され、特に新たな捕獲断面積測定の必要性が強調された。革新炉開発においては、熱中性子や高速中性子だけでなく共鳴領域の中性子断面積も重要となる。また、中性子全断面積の測定も光学模型パラメータの決定に使用するので重要になる。
- ・ 崩壊熱は、原子炉等で核分裂が終了した後の主要な熱源であり、その熱除去は安全性等にとって極めて重要である。核分裂生成物は約 1000 核種あるが、そのうち、約 6 割の核種しか崩壊データの測定値は存在していない。残りの核種の崩壊データは計算等により与えてある。崩壊熱計算に必要な核データは、半減期、分岐比、崩壊エネルギー、核分裂収率、中性子吸収断面積である。これらの精度の良いデータを測定し提供することにより、崩壊熱計算の信頼度向上が達成される。

### (2) セッション2 中性子捕獲断面積の精密測定

- ・ 東京工業大学原子炉工学研究所に設置されている 3UH-HC ペルトロン加速器を

用いて実施した、H-1～Np-237の広い質量領域の核種に関する keV 中性子捕獲断面積について、実験装置、実験方法、データ解析、及び結果の信頼性確認について報告があった。バックグラウンドを低減化するために 200 日かけ最適化した。

- 世界における中性子飛行時間測定の実況についてレビューするとともに、サイクル機構が京大炉ライナックで進めている中性子飛行時間測定法に関して紹介した。Np-237 等の放射性核種に対して、中性子捕獲断面積測定の困難であること、即発 $\gamma$ 線の多重度情報により、核分裂反応と中性子捕獲反応が区別できることが議論された。
- 長寿命核分裂生成核種の核変換研究用基礎基盤データとして、特に Tc-99 の共鳴領域の中性子捕獲断面積について、再測定の必要性があり、高エネルギー加速器研究機構(KEK)施設に設置されたエネルギー分解能 0.38%の DOG と呼ばれるスペクトロメータを用いた測定計画が紹介された。
- サイクル機構の放射性核分裂生成核種に対する熱中性子捕獲断面積の系統的測定結果について、レビューするとともに、最近開発を進めた即発 $\gamma$ 線分光法による中性子捕獲断面積測定技術について紹介した。
- 原研で実施したマイナーアクチニドに対するアルファ線分光及びガンマ線分光法を用いた熱中性子捕獲断面積の研究結果が報告された。特に Am-241 の測定結果について、従来の実験値との大きな差異について、議論が行われた。

### (3) 放射性サンプルの整備

- 京大原子炉において行ってきた、断面積測定のための放射性核種試料の調整の経験を紹介するとともに、断面積測定における放射化学的な手法や視点の重要性について解説した。信頼性の高いデータを得るためには、放射性試料を入手・調整する際での、同位体分析、化学分離精製、中程度の半減期を有するターゲット核種の半減期データの信頼性の確認、必要に応じての試料の同位体分離の重要性などが議論された。
- サイクル機構の高レベル放射性物質研究施設の紹介及びそれを用いた分離研究について総括的な説明を行った。放射性核分裂生成核種を提供することができないか等について議論があった。

### (4) 精密核データ分光技術

- 即発 $\gamma$ 線分光法により中性子捕獲断面積を高精度で測定するために欠かせない即発 $\gamma$ 線強度及び検出器の効率を 1.0%程度の高精度で 11MeV 程度まで決定する方法について、 $\gamma$ 線強度のバランス法を適用することにより、1.0%程度で決定する

ことが可能である。

- ・ ロスアラモス研究所の炉心中で照射したサンプルから発生する即発 $\gamma$ 線を炉外で Ge 検出器により測定した実験及びその解析結果について Tc-99 を例に報告があった。核種が重くなるにつれて解析すべきガンマ線の本数が多くなり、解析に工夫が必要になることが議論された。今後、Zr-93 等の解析も予定している。
- ・ 宇宙における元素合成の謎を解明する観点から、中性子閾値近傍での光核反応断面積測定的重要性が論じられるとともに、レーザー逆コンプトン光を用いた Ta-181 等最新の実験結果について報告があった。光核反応断面積データは、理論計算と組み合わせることにより、測定が困難な核種の中性子捕獲断面積予測にも役立つことが議論された。

#### (5) 新型検出器と将来計画

- ・ サイクル機構が開発した高分解能・高エネルギー光子スペクトロメータの開発とそれを用いた光核反応断面積微細構造測定への適用例を紹介し、核データの高精度化のためにスペクトロメータの革新が大きな寄与をもたらすことを例示した。また、開発された高エネルギーガンマ線分光法の中性子捕獲断面積測定への応用について論じた。
- ・ 原研のタンデム加速器とそこに開発・設置した短寿命核分離加速装置を用いて行った、原子核の存在限界に関する核物理や天体核、物質科学、放射化学に関する研究成果及び今後の研究計画について報告した。
- ・ 崩壊熱評価に当たり、高励起状態へのベータ線遷移が観測されていない場合は、計算による評価が必要になる。日本では、計算手法が確立しているため補正が行われているが、欧州においては、計算に頼らずに大型 NaI 検出器を用いた全ガンマ線吸収分光法により実験的に崩壊熱評価に必要な実験データを測定する計画が紹介された。
- ・ 原研で開発した高感度分析を可能とする多重ガンマ線測定法について研究成果が報告されるとともに、データ収集系の高速化に向けた取り組みが報告された。データ取り込み速度として毎秒 10 万カウントの処理能力を目指して開発が進められている。革新的原子炉開発のための核データ測定への適用についても論じた。

#### (6) 核分裂過程に関わる実験的アプローチ

- ・ 核分裂研究に関する最新の進展について、核データ、核分裂メカニズム、及び核分裂を利用した不安定核の研究の観点からレビューした。核変形による遅延核分裂過程や超短寿命核の電子散乱研究の進展が解説されるとともに、東北大学核理

研及びサイクロトロン施設を用いた研究計画について紹介した。

- ・ 核分裂片の質量数分布と、中性子放出数（及び中性子エネルギー）について、京大炉と原研で行った実験結果を中心に議論した。中性子エネルギースペクトルの評価には、核分裂片のレベル密度パラメータが重要で、原子核殻効果を受けていることなどを議論した。
- ・ アクチニドの陽子誘起核分裂における質量分割機構に関し、U-238, Th-232 の実験データを元に、分裂モードと中性子放出の関係について論じた。特に、中性子放出に関して測定データが極めて少ない点が強調された。
- ・ 京大炉電子線ライナックを用いて行われた安全性研究、核変換研究のための核データ測定について報告した。特に、鉛スペクトロメータを用いた結果と中性子飛行時間測定法を用いた結果を比較し、エネルギー依存性に関しては、良好な一致が得られることを論じた。

#### (7) 2 重微分断面積の測定

- ・ 九大では、ロスアラモスとの共同研究により、大強度中性子源や加速器駆動未臨界炉開発で重要となる数 10MeV 以上のエネルギーに対する中性子断面積を測定するため、反跳陽子検出器を用いた連続エネルギー入射による中性子 2 重微分断面積測定法を開発している。達成できるエネルギー分解能等について議論した。
- ・ 大阪大学核物理研究センターリングサイクロトロン施設で行った陽子入射陽子放出反応の 2 重微分断面積について報告した。本測定用に開発した $\Delta E-E$ 型カウンターテレスコープの性能について論じた。

### 3. おわりに

本ワークショップでは、革新的な原子力開発を目指した核データ研究について、核データ評価、核データ測定の専門家が一同に会し、核データの現状をレビューするとともに、国内外における実験施設の状況、測定結果の現状、今後の計画等について活発な討議を行った。また、核物理分野で活躍する研究者からの発表・参加もあり、本研究分野の広がりを示した。放射化学の専門家と核データ測定の研究者が協力することにより、精度のよい核データが取得されることが示されたが、本ワークショップによりさらに多くの専門家がそれぞれの技術を持ち寄り協力することにより、より高精度で信頼性の高い核データが得られることが期待される。

本ワークショップは、サイクル機構と原研の共同主催であったことも多くの専門家が一同に集まる上で、有効であった。核データの大幅な精度向上を達成するためには、多

くのチャレンジと努力を今後必要とするが、専門家集団の知恵を集結して、この課題を克服したい。本ワークショップは、この大きな目的に向けた、情報交換の場として意義があったと思われる。

表 1 会議プログラム

|   |   |                         |
|---|---|-------------------------|
| 主催  | 核燃料サイクル開発機構<br>日本原子力研究所   |                         |
| 会期  | 2002年10月3日(木)10:30-20:30 ~ 10月4日(金) 9:00-16:10  |                         |
| 会場  | 核燃料サイクル機構東海事業所 アトムワールド1階会議室(10月3日)<br>日本原子力研究所東海研究所 研究1棟第5会議室(10月4日)                  |                         |
| 定員  | 40名程度(先着順)  |                         |
| 世話人   | 井頭政之(東工大)、大島真澄(原研)、長谷川明(原研)、原田秀郎(サイクル機構)  |                         |
| 2002年10月3日(木) 核燃料サイクル開発機構 東海事業所 アトムワールド1階会議室      |   |                         |
| 10:30-11:30                                       | 高レベル放射性物質研究施設(CPF)見学  |                         |
| 13:00-13:10                                       | 開会挨拶  | 内山軍蔵(サイクル機構)            |
| <b>セッション 1: 核データの現状</b> [ 座長:山名 元(京大) ]           |   |                         |
| 13:10-13:40                                       | Current activities on nuclear physics and nuclear data at ORNL                        | S. Raman(ORNL)          |
| 13:40-14:10                                       | マイナーアクチノイドデータの現状  | 中川庸雄(原研)                |
| 14:10-14:40                                       | 崩壊熱評価のための核データ   | 片倉純一(原研)                |
| <b>セッション 2: 中性子捕獲断面積の精密測定</b> [ 座長:原田秀郎(サイクル機構) ] |   |                         |
| 15:00-15:25                                       | ペレトロン加速器による精密測定   | 井頭政之(東工大)               |
| 15:25-15:50                                       | Present Status of Neutron Capture Cross Section Measurements by Time-Of-Flight Method | O. Shcherbakov (サイクル機構) |
| 15:50-16:15                                       | KENSでのFP共鳴パラメータ測定   | 川合将義(KEK)               |
| 16:15-16:40                                       | 放射性核種の熱中性子断面積測定   | 中村詔司(サイクル機構)            |
| 16:40-17:05                                       | マイナーアクチノイド核データの放射化学的測定  | 初川雄一(原研)                |
| <b>セッション 3: 放射性サンプルの整備</b> [ 座長:内山軍蔵(サイクル機構) ]    |   |                         |
| 17:15-17:45                                       | 放射性サンプル整備の現状と課題   | 山名 元(京大)                |
| 17:45-18:10                                       | CPF施設紹介   | 平野弘康(サイクル機構)            |
| 2002年10月4日(金) 日本原子力研究所 東海研究所 研究1棟第5会議室            |   |                         |
| <b>セッション 4: 精密核データ分光技術</b> [ 座長:井頭政之(東工大) ]       |   |                         |
| 9:00-9:30   | 中性子捕獲即発ガンマ線強度の精密測定  | 河出 清(名大)                |
| 9:30-10:00  | Analysis of prompt gamma-rays from $^{99}\text{Tc}(n,\gamma)$                         | S. Raman(ORNL)          |

|   |   |              |
|---|---|--------------|
| 10:00-10:30                                     | 宇宙物理と核データの接点                                | 宇都宮弘章(甲南大)   |
| <b>セッション 5: 新型検出器と将来計画</b> [座長:河出 清(名大)]        |   |              |
| 10:45-11:10                                     | 高性能ガンマ線スペクトロメータ                             | 原田秀郎(サイクル機構) |
| 11:10-11:35                                     | タンデム将来計画と崩壊核分光研究                            | 市川進一(原研)     |
| 11:35-12:00                                     | 欧州における短寿命 FP の崩壊熱基礎データ測定<br>計画              | 吉田 正(武蔵工大)   |
| 12:00-12:25                                     | 新多重ガンマ線検出装置と核構造研究                           | 大島真澄(原研)     |
| <b>セッション 6: 核分裂過程に関わる実験的アプローチ</b> [座長:千葉 敏(原研)] |   |              |
| 13:20-13:45                                     | 核分裂研究の進展                                    | 大槻 勤(東北大)    |
| 13:45-14:10                                     | 核分裂の質量収率と中性子放出                              | 西尾勝久(原研)     |
| 14:10-14:35                                     | アクチノイドの陽子誘起核分裂における質量分割<br>機構                | 西中一郎(原研)     |
| 14:35-15:00                                     | 鉛スペクトロメータを用いた京大炉での核データ実<br>験 —飛行時間分析実験との比較— | 小林捷平(京大)     |
| <b>セッション 7: 2重微分断面積の測定</b> [座長:小林捷平(京大)]        |   |              |
| 15:00-15:25                                     | 中性子入射中性子放出 2重微分断面積の測定                       | 石橋健二(九大)     |
| 15:25-15:50                                     | 陽子入射陽子放出 2重微分断面積の測定                         | 魚住裕介(九大)     |
| 15:50-16:00                                     | 閉会の挨拶                                       | 岩本 昭(原研)     |
| 16:10-  | タンデム加速器及び建設中の不安定核ビーム施設の見学                   |              |