

## 我が国の核データ測定施設の展望と世界情勢 (3)

### 京都大学における核データ測定の展望

京都大学 原子炉実験所

中島 健

nakajima@rri.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

京大炉における核データ測定の展望として、関連する実験設備の現状及び今後の実験計画、課題について述べる。

#### 2. 京大炉における核データ関連施設

京大炉の主要な実験施設として、電子線形加速器 (LINAC)、研究用原子炉 (KUR)、臨界集合体実験装置 (KUCA) がある。これら施設の主な性能を表 1 に示す。このうち、後者の 2 つ (KUR、KUCA) は原子炉施設であり、炉の中性子エネルギースペクトルに対応した積分データ (中性子のエネルギーで積分した形のデータ) が取得できる。一方、LINAC では、飛行時間法 (TOF) あるいは鉛減速スペクトロメータの使用により、エネルギー依存性を持ったいわゆる微分データを取得できる。これらの施設を適切に組み合わせることで、統合的な微分及び積分データを取得することが可能となる。

表1 京大炉の主要実験設備

LINAC: 電子線型加速器 (1965 年設置) <ul style="list-style-type: none"><li>- エネルギー: 46MeV(無負荷時), 30MeV(尖頭電流 500mA)</li><li>- 中性子束: <math>3 \times 10^{11}</math> n/cm<sup>2</sup>/s (ターゲット: タンタル) (ターゲット表面、ビーム出力 6 kW 時)</li><li>- TOF 用飛行管, 鉛減速スペクトロメータ</li></ul>
KUR: 京都大学研究用原子炉 (1964 年初臨界) <ul style="list-style-type: none"><li>- 熱出力: 5000kW, 平均熱中性子束: <math>3.2 \times 10^{13}</math> n/cm<sup>2</sup>/s</li><li>- 実験孔、照射孔、中性子設備、圧気輸送管、水圧輸送管 他</li></ul>
KUCA: 京都大学臨界集合体実験装置 (1974 年初臨界) <ul style="list-style-type: none"><li>- 複数架台 (固体減速 2 基、軽水減速 1 基)</li><li>- 実験用燃料 (Th, DU, NU)、核分裂電離箱 (Am, Np, U)</li></ul>

表 1 に示した施設は、いずれも 30~40 年前に設置されたものであり、施設の健全性を維持するためには定期的な設備の更新や保守管理が必要不可欠である。原子炉施設である KUR 及び KUCA については、安全規制上の要求が厳しく、これに対応した設備類の更新や保守が行われている。これに対して、LINAC では、予防保全的な設備の更新・保守を行うための予算が十分ではなく、施設管理はベテランの技術職員の努力に依存する部分が多い。今後の中長期的な実験施設の維持のためには、予算と人員の継続的な確保が必要である。

以下では、LINAC の実験設備である TOF 用飛行管及び鉛減速スペクトロメータの概要について述べる。

## 2.1 TOF（飛行時間法）用飛行管

飛行時間法とは、中性子がある距離を飛行するのに要する時間を測定することにより、その中性子のエネルギーを決定する方法である。図 1 に、LINAC の TOF 用実験機器の配置を示す。LINAC で 30MeV に加速された電子により Ta（タンタル）ターゲットを照射し、中性子を発生させる。発生した中性子は、ターゲットを取り囲んでいる水（減速材）により減速される。減速に要する時間は非常に短く無視しえるので、電子照射と同時に減速された中性子が発生したとみなせる。この中性子（の一部）が、検出器あるいは試料が設置してある位置まで飛行管内を飛行する。飛行距離が正確にわかっているならば、中性子の発生から検出までの時間を測定することにより、その中性子のエネルギーを求めることができる。

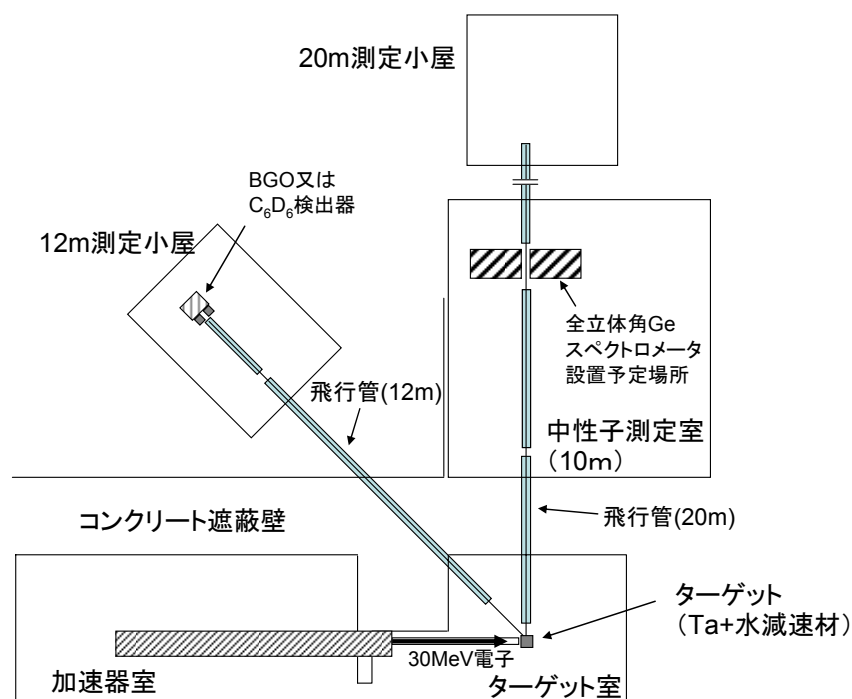


図 1 TOF 用実験機器配置

位置まで飛行管内を飛行する。飛行距離が正確にわかっているならば、中性子の発生から検出までの時間を測定することにより、その中性子のエネルギーを求めることができる。

LINAC では、図 1 に示したように、20m と 12m の 2 つの飛行管を主に使用している。20m 飛行管については、現

在、全立体角 Ge スペクトロメータを設置するために、遮蔽体や設置用治具の整備を行っ

ているところである。

## 2.2 京都大学鉛減速スペクトロメータ (KULS)

鉛は質量数が大きいので、中性子が鉛との衝突によって受けるエネルギーの減速割合は小さい。また、鉛の中性子全断面積はそのほとんどが散乱断面積であり、中性子吸収断面積は小さい。そのため、パルス状の高速中性子が大きな鉛の体系に打ち込まれると、鉛による中性子の吸収がほとんどなく、体系からの漏れが少ないため体系内に長く留まり、中性子束群は減速時間と一対一の対応関係を保ちながら、低エネルギーまで減速されていく。これが鉛減速スペクトロメータの原理である。

LINAC に設置されている鉛減速スペクトロメータ (KULS) は、 $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$  の大きさを持つ高純度鉛 (99.9%) ブロック約 1600 個を一辺 1.5m の立方体形に積み重ねたもので、その総重量は約 40 トンとなる (図 2)。本装置では、その鉛体系の大きさにより、中性子源から数十センチ近辺での実験となるため、通常の飛行時間分析法と比べて分解能は悪くなるが、中性子強度は格段に大きくなる。このような特徴を生かして、以下の測定に利用されている。

- (1) アクチニド核種など、それ自身が放射性の試料であり、実験上のバックグラウンドが高いもの
- (2) 核分裂生成物 (FP) 核種など、試料を多量に入手することが困難な微量サンプルの核種
- (3) 核理論の面などから興味をもたれる反応で、断面積が極めて小さいため従来の実験法では困難であった中性子核データの測定



図 2 鉛減速スペクトロメータ (KULS)

## 3. 今後の計画

京大炉では、マイナーアクチニド (MA) 核種や核分裂生成物 (FP) 等の核データの信頼性向上を目指し、平成 16 年度よりプロジェクト研究「各種中性子源を用いた中性子反応断面積の測定」を開始した。本プロジェクトは外部の 4 機関を含む 7 グループによる分担研究が、電子 LINAC 実験を中心に実施される。以下に、分担研究の概要及び京大炉グループの研究計画を示す。

### 3.1 分担研究の概要

このプロジェクト研究は、以下に示す 7 つの分担研究で構成されている。なお、カッ

コ内は各分担研究の主担当機関を示す。

- ① ガンマ・ガンマ同時検出手法による MA 核種の中性子捕獲断面積の研究（原研）

全立体角・高エネルギー分解能ガンマ線スペクトロメータをパルス中性子飛行時間計測法コースに設置する（図 1 参照）ことにより、精度の高い系統的なデータ取得を目指す。
- ② 高エネルギー $\gamma$ 線分光法による放射性核種の中性子捕獲断面積の研究（サイクル機構）

ペア・スペクトロメータを用いた即発 $\gamma$ 線分光法とそのスペクトルのアンフォールディングによる断面積決定法により、核種の準位図の作成が不要で簡便な断面積測定法を確立する。大型 BGO 検出器の、時間応答特性及び全ガンマ線エネルギーに対する応答特性を正確に把握することにより、放射性核種の断面積測定法の高度化をはかる。
- ③ 鉛減速スペクトロメータを用いたアクチニド核分裂断面積の測定（東北大）

鉛減速スペクトロメータと Back-to-Back 型核分裂計数管を用いて  $^{235}\text{U}$  を標準とする相対測定によって断面積を求める。核分裂計数管を、高速化と時間・波高二次元データ収集法の導入によって、より高いエネルギーまでの測定と新しい情報の取得を可能とし、MA に関する新しい核データを取得する。
- ④ 核データの信頼性向上に向けた放射化学的分析法の研究（京大炉）

核データ測定に対して、化学純度及び同位体純度の高いターゲットを供給することを目的とし、目的とする核種の化学分離のための手法やその測定法の開発を行う。
- ⑤ 光核反応を利用した非破壊分析と中性子挙動の研究（九大）

ガンマ線スペクトロメトリを用いた長寿命放射性核種の光核反応利用非破壊分析技術の適用性を検討する。
- ⑥ 断面積測定における不純物の影響に関する研究（京大炉）

中性子捕獲反応断面積測定における不純物の影響を明らかにし、その不純物の定量及び補正の手法を確立する。
- ⑦ 積分テストに基づく断面積評価に関する研究（京大炉）

積分テストをとおして、核データの評価を実施する。積分データを高精度のベンチマークデータとして整備するとともに、それらデータを用いた積分テスト結果から現状の断面積データの精度評価あるいは検証を実施する。

### 3.2 京大炉グループにおける計画

上記のうち、京大炉グループによる研究（⑥、⑦）について、計画を述べる。

- 1) 断面積測定における不純物の影響に関する研究

中性子捕獲反応断面積測定における不純物の影響を明らかにし、その不純物の定量および補正の手法を確立することを目的とする。研究は以下に示す三段階に分けて進める。

第一段階では、不純物を一定量含ませた試料と化学的純度の高い試料に対して、LINACを用いた TOF 実験による中性子捕獲断面積の測定を行い、補正を施した後の両者の結果を比較することによって、化学的不純物に対する補正法の精度を検証する。また、鉛減速スペクトロメータを用いた微量不純物の定量法を実験的に検討する。用いる試料としては、Nb、Au、Nb+Au、Csなどを予定している。

第二段階では、測定試料中に存在する不純物としての同位体（同位体不純物）の影響を補正するための実験を行う。長寿命 FP 核種や MA 核種の断面積測定では、同位体濃縮された試料を用いているが、この場合にも無視し得ない量の同位体不純物が混在してしまう。この不純物の影響について、適切な補正を行うことが可能となれば、高精度の断面積データが取得できる。ここでは、天然元素とその元素内に含まれる同位体の濃縮試料を模擬的に用いて、各々の断面積を測定し、その結果から同位体不純物の影響を補正する手法を検討する。測定では、天然 Zr、天然 Pd 及びこれらに含まれる同位体の濃縮試料を使用する予定である。

最後の第三段階では、核壊変によって試料中に不純物が蓄積される MA 核種について、異なる時期に複数回の測定を行い、壊変によって生成される不純物に対する補正法を検討し、精度の良い補正法を確立する。

第二、第三段階の測定に使用する試料の入手が今後の課題である。

## 2) 積分テストに基づく断面積評価に関する研究

本研究では、ベンチマークデータ（KUCA 及び他の臨界実験による）を用いた積分テスト結果から、断面積データの精度評価あるいは検証を実施する。KUCA では、これまでに U 及び Th を用いた種々の炉心に関して臨界量をはじめとする各種炉物理量の測定を行ってきた。また、最近では可変スペクトル場をつくり、そこにおける  $^{241}\text{Am}$  核分裂や  $^{237}\text{Np}$  核分裂などを含む各種の反応率測定等を行っている。これらの有用なデータを最新の知見を用いて総合的に評価し、精度の高い積分テストのベンチマークデータとして整備するとともに、それらデータを用いた積分テスト結果から現状の断面積データの精度評価あるいは検証を実施する。

積分テストの事例として、原研

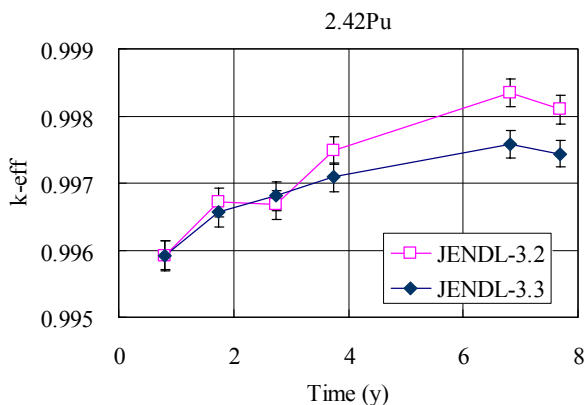


図 3 MOX 臨界炉心における実効増倍率の経時変化

TCAにおけるMOX臨界炉心の実効増倍率の経時変化を図3に示す。MOX中では、時間とともに $^{241}\text{Pu}$ の減少に伴い $^{241}\text{Am}$ が蓄積するが、この組成変化に伴い、本来一定となるべき増倍率が増加している様子がわかる。JENDL-3.3では、 $^{241}\text{Am}$ の熱中性子捕獲断面積を600b (JENDL-3.2) から640bに改訂していることにより、増倍率の時間変化の様子は改善しているが、まだ時間依存性が残っており、核データの更なる改善が必要であると考えられる。但し、この積分テストでは、 $^{241}\text{Pu}$ と $^{241}\text{Am}$ の量が変化しており、これらの核種のうちどちらの核種の、どの断面積をどう改善すべきかは、この結果だけでは判断することが出来ず、他の実験や評価結果、及び感度解析などに基づく総合的な評価が必要となる。本研究を通して、その評価手法を検討する。

#### 4. まとめと今後の課題

京大炉における核データ測定のための実験設備と今後の研究計画について述べた。

新たな研究として、より高精度の核データ取得するための実験（技術開発）・評価を行うプロジェクトを今年度より開始した。このプロジェクトには、5機関が参加し7つの研究テーマを実施する。

実験設備については、設置後長期間が経過していることから、老朽化対策及び人材の確保が必要である。LINACは、全国共同利用施設として全国の研究者が利用しており、ここ10年間の年間稼働時間は、2000～2500時間と非常に多い。しかし、設置後約40年が経過しており、定期的な更新や保守が必要不可欠となっている。現在は、ベテランの技術職員が施設管理を担っているが、今後の長期的な使用のためには、人材の育成と予算措置が必要である。また、ここでは詳細を述べなかったが、実験所最大の施設である研究用原子炉KURは、中性子源として核データ測定の他、幅広い分野の研究者が利用している。しかし、米国が使用済み燃料の引取りをやめることから、現有燃料（高濃縮ウラン）を使い切る2006年3月以降は、当面の間、運転が休止することとなる。実験所では、米国との交渉を行い、休止から2年後を目途に、低濃縮ウラン燃料を用いた炉心の再開を計画しているところである。このためにも、人材、予算の確保が急務の課題である。