

## 第 5 回 ASRC 国際ワークショップ “Perspectives in Nuclear Fission”

日本原子力研究開発機構  
先端基礎研究センター  
西尾 勝久  
[Nishio.katsuhisa@jaea.go.jp](mailto:Nishio.katsuhisa@jaea.go.jp)

### 1. 会議の趣旨

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター (ASRC; Advanced Science Research Center) は、各研究分野における国際的レベルでの COE を目指す取り組みの一環として、黎明研究制度を設けている。提案された研究テーマに対し、先端基礎研究センターと国内外の研究機関（場合により複数機関）との間で研究取り決めを行い、機関と国籍の枠を超えた協力体制を整えることで、研究を有利に進めるのが目的である。テーマの遂行期間は 1 年であるが、審査を受けることで 2 年目への延長が可能である。黎明研究では、当課題に関する国際会議ワークショップを開催することで、闊達な情報交換を行い、さらなる協力体制の構築をめざすことを課題としている。

筆者の所属する重原子核反応フロンティア研究グループは、平成 23 年度、西スコットランド大学との間で「陽子過剰原子核の新たな核分裂」に関する研究で締結を行い、実験を中心とする研究を行った。また 2012 年 3 月 14～16 日の日程で、第 5 回目となる ASRC 国際会議“Perspectives in Nuclear Fission”を東海村・リコッティで開催した。主催は先端基礎研究センターであり、筆者と西スコットランド大学の A. Andreyev 教授が Co-chair を務めた。また、相手機関が取得した資金 (Daiwa Anglo-Japanese Foundation) の支援も受けた。

ここで、Perspectives を会議名に用いた意図を説明する。核分裂現象は 1938 年に発見されて以来、70 年以上も研究がつづけられている。核分裂が発見された黎明期は、極めてユニークな原子核の崩壊現象であること、及び解放される膨大なエネルギー利用のインパクトの大きさゆえに、短期間で多くの研究論文が出版された。核分裂に関する話題として、形状異性体と核分裂障壁の 2 重構造は原子核のユニークな特徴で、自発核分裂の寿命は元素の存在限界を決めるなど、重要な崩壊様式である。さらに、核分裂では中性子数の過剰な原子核が生成されるため、核分裂現象は世界多くの不安定核生成施設で利用

されている。一方、しばらくの間、核分裂の研究の進展はゆっくりとしたものであり、このことはこの課題に取り組む研究者数が少ないことから推測される。理由として、核分裂をより深く理解するための実験技術の開発が待たれたこと、及び核分裂理論の記述が困難であったために実験データの考察や実験計画を行うための定量的な出力を、基本的なパラメータから出せるものがなかったためと思われる。

近年、実験において進展があった。以下で説明するように、「陽子過剰核における新たな核分裂」は、先端基礎研究センターを含む国際協力の研究成果である。一方、理論でも核分裂片の質量数分布など、実際の観測を良い精度で与えるモデルが開発され、いくつかの原子核に対して特徴的な質量数分布を予測し始めている。実験結果と理論結果が、互いにフィードバックできる仕組みができつつあり、このため核分裂研究も新たな段階に入ったと言える。核分裂研究の新たな段階が来たとの考えから、会議名に Perspectives を使うことにした。

参加者は、国外からの参加者 31 名を含む計 68 名となり、活発な議論がなされた。2 日間目の 15 日午後には、J-PARC の施設見学を催した。



写真 1 ワークショップでの集合写真

## 2. 最近の成果

ここでは、最近の話題として「陽子過剰核の新たな核分裂」について説明する。この成果は、「陽子数と中性子数の比が大きな原子核」としての水銀  $180(^{180}\text{Hg})$  の核分裂を調べたもので、 $^{180}\text{Hg}$  は水銀の安定同位体に比べて 20 個程度も中性子数が少ない。ウラン

238 など、これまでよく調べられているアクチノイド領域の核分裂では 2 重魔法数核  $^{132}\text{Sn}$  で代表されるように閉殻構造を有する核分裂片が分裂過程に大きな役割を果たしていることが分かっている。この影響は、核分裂片の質量数分布や、全運動エネルギー、核分裂片から放出される即発中性子数から推測される。 $^{258}\text{Fm}$  は、鋭い質量対称分裂を示すことが分かっているが、 $^{132}\text{Sn}$  近傍核が生成されることで説明できる。

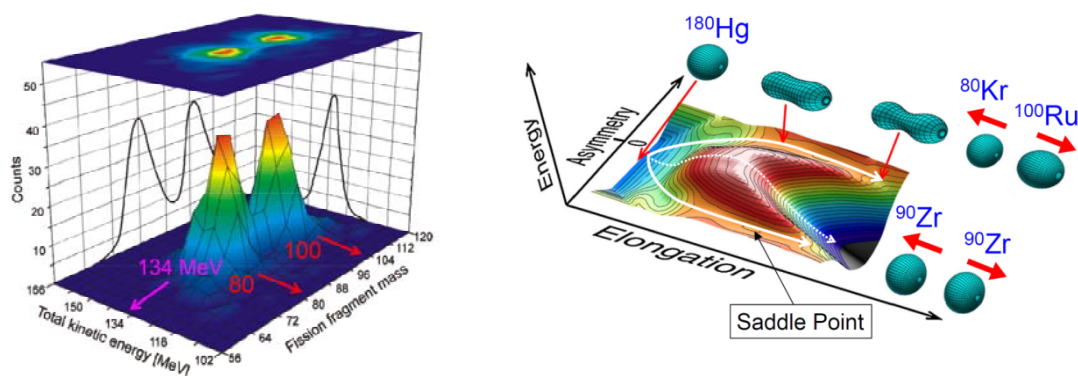


図 1 (左)  $^{180}\text{Hg}$  の核分裂片収率を質量数と全運動エネルギーに対して示した。  
(右)  $^{180}\text{Hg}$  のポテンシャル構造。

この考えに従えば、 $^{180}\text{Hg}$  は 2 つの  $^{90}\text{Zr}$  (中性子数 50 の閉殻) を生成して対称に核分裂するはずである。しかし実際には質量数 80 と 100 に非対称に分かれた[1]。実験の詳細は省略し、結果を図 1 に示す。図 1 の左が核分裂片の収率を質量数と全運動エネルギーに対して示したものである。核分裂を調べるため、 $^{180}\text{Hg}$  を核分裂できる程度に励起する必要がある。このため  $^{180}\text{Tl}$  の  $\beta^+$ 崩壊を用いた。この崩壊の Q 値は 10.44MeV であり、このエネルギーを最大に娘核  $^{180}\text{Hg}$  が励起される。 $^{180}\text{Hg}$  の核分裂障壁の高さは 9.8MeV なので、ある確率で核分裂が起こる。このような崩壊の仕方を  $\beta^+$ 崩壊遅延核分裂という。 $^{180}\text{Tl}$  で代表されるような中性子欠損した鉛領域原子核の  $\beta^+$ 崩壊遅延核分裂は、20 年前に報告されたことがあった[2]。しかし、核種が同定されていないこと、また核分裂事象は飛跡検出器で観測したものであり、決定的な測定とは言いにくいものであった。本研究は、欧州原子核研究機構 CERN の同位体分離施設 (ISOLDE) において高純度の  $^{180}\text{Tl}$  を引き出して測定したこと、シリコン検出器により核分裂片の大きなエネルギー信号を観測した点において、決定的な測定と言える。この手法による核分裂研究は、西スコットランド大学、CERN-ISOLDE、ルーバンカトリック大学等との共同研究で進めている。

図 1 の右に  $^{180}\text{Hg}$  のポテンシャルエネルギー曲面を示す。実際の計算では、原子核の変形を 5 次元で表現しているが、ここでは原子核の伸びと質量非対称度に対してプロットしてある。原子核が大きく伸びた場所では、 $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$  の構造に由来する深い谷ができて

いる。一方、サドル点は質量非対称な場所に位置しており、エネルギーは約 10MeV である。核分裂は非対称な道筋を通過して進むが、 $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$  の谷に転がることなくそのまま核分裂する。このように、核分裂片の閉殻構造が関与することなく質量非対称に分裂することから、新しい様式の核分裂となった。現在、 $^{194,196}\text{At}$  や  $^{200,202}\text{Fr}$  の  $\beta^+$ 崩壊遅延核分裂（それぞれ  $^{194,196}\text{Po}$  及び  $^{200,202}\text{Rn}$  の核分裂）のデータが出始めている。

筆者らは、陽子過剰な水銀領域の核分裂を調べるため、重イオン反応を用いた実験研究も進めている。 $\beta^+$ 崩壊遅延核分裂では、反応の Q 値と娘核の核分裂障壁の高さ、また娘核が  $\beta/\text{EC}$  崩壊する確率などの要因から、観測できる核種は限られる。一方、重イオン融合反応では、標的とビームの組み合わせにより、たとえば  $^{36,40}\text{Ar} + ^{144,150,154}\text{Sm}$  の融合反応を組みあわせることで  $^{180}\text{Hg} - ^{194}\text{Hg}$  に至る水銀同位体の複合核を生成し、これらの核分裂を測定することができる。ここでも、従来のアクチノイド原子核と異なる傾向が得られており、実験データの取得と理解を進めている。

### 3. 会議の内容

会議で取り扱ったテーマと発表タイトルは、以下のとおりである。

#### (1) 陽子過剰原子核の核分裂 Chair : P. Van Duppen (KU Leuven)

A. Andreyev (*University of the West of Scotland*)

“Low-energy fission in proton-rich nuclei in the lead region”

L. Ghys (*KU Leuven*)

“Beta-delayed fission study of  $^{202}\text{Fr}$  and precise energy calibration of silicon detectors for fission fragments”

M. Warda (*Maria Curie-Skłodowska Univ.*)

“Self-consistent description of fission in  $^{180}\text{Hg}$  and  $^{198}\text{Hg}$ ”

T. Ichikawa (*Kyoto University*)

Fission potential-energy structure in the mercury isotopes”

M. Veselsky (*Slovak Academy of Sciences*)

“Fission barriers of neutron-deficient nuclei”

陽子過剰核の核分裂実験として  $^{180}\text{Tl}$  の  $\beta^+$ 崩壊遅延核分裂の他、 $^{202}\text{Fr}$  のデータが報告された。 $^{202}\text{Fr}$  の核分裂のスペクトルは、質量対称の分布を示した。また、この領域の原子核のポテンシャル構造や障壁の高さといった議論がされた。

#### (2) 核分裂の理論 1 Chair : A. Iwamoto (JAEA)

J. Randrup (*LBNL*)

“Fragment mass distributions from strongly damped shape evolution”

P. Möller (*LANL*)

“Asymmetry of fission in the  $74 < Z < 90$ ,  $A < 205$  region”

J. Taieb, (*CEA DAM*)

“Fission of actinides and preactinides in reverse kinematics at GSI: the SOFIA project”

K.-H. Schmidt

“New insights and new puzzles in low-energy fission”

原子核の形状を 5 つの変形パラメータで取り扱うことで形状の自由度を広く持たせるとともに、原子核の分裂過程をランダムウォーク法で記述することで、質量数分布をよく再現できることが示された (Randrup, Möller)。これにより実験とタイアップできる理論が構築されたと言える。多くの核種について質量数分布が計算され、とりわけ鉛より軽い原子核において質量非対称度の極めて大きな核分裂モードが出現することが示された。これを確認する実験を原子力機構で進めている。

### (3) 核分裂の理論 2 Chair : K. Hagino (*Tohoku University*)

H. Goutte (*GANIL*)

“A step towards a microscopic description of the fission process : the Schrödinger collective intrinsic model”

T. Nakatsukasa (*RIKEN*)

“Microscopic approaches to the large-amplitude collective motion”

A. Karpov (*FLNR*)

“Decay properties of heaviest elements”

T. Asano (*Osaka University*)

“Multi-dimensional dynamical calculation for nuclear fission and its problem”

核分裂過程を記述する場合、ポテンシャルエネルギー曲面のみならず、ダイナミカルな効果を取り入れる必要がある。時間依存の座標発生法や、ランジェバン方程式を解く理論結果が示された。低エネルギー核分裂では、質量数分布、全運動エネルギーに加え、個々の核分裂片から放出される即発中性子の数を再現することがモデル構築の目標となっており、原子力機構でも重イオン入射核分裂片と中性子の相関実験を進めている。

### (4) 重元素領域の核分裂及び施設 Chair : M. Schädel (*GSI*)

K. Nishio (*JAEA*)

“Fission research activity at JAEA”

M. Itkis (*JINR*)

“Nuclear reaction mechanism induced by heavy ions”

F.P. Hessberger, (*GSI*)

“Fission properties of heaviest nuclei investigated at GSI SHIP”

J. Benlliure (*Univ. of Santiago de Compostela*)

“Producing medium-mass neutron-rich nuclei using fission reactions”

超重原子核など、ウランより重い原子核の核分裂が議論された。これら原子核は、重イオンどうしの融合反応によって合成される。また、重イオンどうしを反応させると、複合核を経由しない核分裂としての準核分裂が生じ、ここからもポテンシャル構造を理解するための重要なデータが得られている。また、これら実験は超重原子核を合成するための融合反応機構を理解する上でも重要である。

**(5) 中性子入射反応 Chair : M. Ohta (Konan University) and O. Iwamoto (JAEA)**

S. Pomp (*Uppsala University*)

“Design of a neutron converter for fission studies at the IGISOL facility”

A. Al-Adili (*Uppsala University and IRMM*)

“Anisotropic energy- and mass distributions in  $^{234}\text{U}(n,f)$ ”

M. Calviani (*CERN*)

“Overview of neutron-induced fission activities at CERN n\_TOF installation”

H. Harada (*JAEA*)

“J-PARC and accurate neutron-nucleus reaction measurement instrument (ANNRI)”

T. Ohtsuki (*Tohoku University*)

“Cross-section measurements for neutron-induced fission of minor actinides in Japan”

核データとしての中性子入射核分裂断面積や、これらを測定するための施設や手法について議論を行った。CERN の n-TOF、ベルギーIRMM、京大炉での測定が紹介された。また J-PARC での核分裂断面積測定の提案が行われた。

**(6) 重イオン入射核分裂 Chair : H. Ikezoe (JAEA)**

D. Hinde (*ANU*)

“Comparison of experimental time scales of quasi-fission”

J. Khuyagbaatar (*GSI*)

“Study of nuclear structure influencing fusion reactions”

Y. Aritomo (*JAEA*)

“Dynamical approach to heavy-ion fusion-fission reactions with deformed actinide targets at low incident energies”

A. Nasirov (*JINR*)

“Effects of the entrance channel in the formation of quasifission, fast fission, and fusion-fission cross sections”

核分裂片の角度分布、蒸発残留核の測定結果から、重イオン反応機構について議論された。いずれも未知原子核を合成するための反応機構を理解する上で重要と言える。また、揺動散逸理論を用いた理論計算が紹介され、これは原子力機構タンデム加速器施設で行った実験とタイアップした成果である。

#### (7) 核子移行反応に続く核分裂及び代理反応

**Chair: J. Benlliure (University of de Santiago de Compostela)**

S. Chiba (JAEA)

“Surrogate reaction study at JAEA”

X. Derckx (University of the West of Scotland)

“Minor actinide fission induced by multi-nucleon transfer reaction in inverse kinematics”

M. Caamano (Univ. of de Santiago de Compostela)

“Complete isotopic yield distributions from transfer-induced fission of low actinides”

核子移行反応により、未測定核種の核分裂データの取得が可能である。原子力機構から、中性子入射核分裂断面積を重イオン反応から導く代理反応の研究が示された。またフランス・GANIL 施設では、逆運動学的な手法で核分裂データの取得が行われており、新しいデータが示された。

#### (8) 核分裂中性子の起源 Chair : N. Takigawa (Tohoku Institute of Technology)

N. Carjan (NIPNE)

“Emission of scission neutrons and alpha particles during low-energy nuclear fission”

T. Kawano (LANL)

Monte Carlo simulation for statistical decay of compound nucleus

T. Wada (Kansai University)

“Dynamics of fission and neutron emission”

核分裂における 3 体粒子の放出過程に関する理論計算が示された。現在、即発中性子の起源に関する議論が話題となっており、特に scission 時に放出される中性子の存在の有無は、中性子エネルギースペクトルを評価する上でも、また中性子の新たな放出過程としても重要であり、決定的な測定結果が待たれる。

#### (9) 核分裂トピックス Chair : K. Nishio (JAEA)

G. Smith (Univ. of Manchester)

“Fission-fragment spectroscopy with large arrays and STEFF”

F. Minato (JAEA)

“Fission barrier of uranium with  $\Lambda$  hyperon”

C. Petrache (*University Paris Sud*)

K. Talley (*Univ. of Tennessee and ORNL*)

“Improvements in SCALE from Nuclear Physics”

核分裂片から放出される $\gamma$ 線は、核分裂において発生するスピンの起源を理解する上で重要である。スピン発生メカニズムも、解明されるべき重要な課題として残っている。

#### 4. まとめ

核分裂過程においては、今なお未知の問題が多く残されている。近年の実験技術と理論の発展により、核分裂研究も新しい段階に来ている。今後、さらに核分裂の理解が深まることを期待したい。

#### 謝辞

会議の運営にあたっては、(株) 仁木工芸、(株) セイコーEG&G、(株) 日本サンゴバンの協力を得ました。ここにお礼を申し上げます。

#### 参考文献

- [1] A. Andreyev *et al.*, *Phys.Rev.Lett.* **105**, 252502 (2010).
- [2] Yu.A. Lazarev *et al.*, *Europhys. Lett.* **4**, 893 (1987).