

第 10 回 ASRC 国際ワークショップ “Nuclear Fission and Decay of Exotic Nuclei”

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

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。黎明研究制度では、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、さらなる協力態勢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 24 年度、英国ヨーク大学との間で「陽子過剰原子核における新たな非対称核分裂」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 2013 年 3 月 21～22 日の日程で、第 10 回目となる ASRC 国際会議“Nuclear Fission and Decay of Exotic Nuclei”を原子力機構・東海研究開発センターで開催した。主催は先端基礎研究センターであり、筆者とヨーク大学の A. Andreyev 教授が Co-chair を務めた。

会議のホームページ (http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/chiba_gr/workshop2/index2.html) にプログラムの詳細を示してある。また、発表者のプレゼンテーションがダウンロードできる。なお、昨年度も核分裂に関する国際会議“Perspectives in Nuclear Fission” (2012 年 3 月 14～16 日) を東海村で開催している (http://asrc.jaea.go.jp/fission_workshop/index.html)。

本会議は、招待講演を含む講演 25 件から構成され、国外からの参加者は 13 名であった。初日の午後には、J-PARC 施設の見学も催した。

我々のグループは、新たな原子核領域を対象とした核分裂研究を行っており、これをテーマの一つに挙げた。もう一つの課題として、不安定原子核の構造を取り上げた。我々

のグループの新たな研究の対象領域として、陽子過剰な原子核に着目している。現在、陽子数 (Z) = 中性子数 (N) の原子核として、スズ 100 (^{100}Sn) までが合成されている。次の N=Z 原子核として ^{104}Te は未知の原子核として残っている。ここで ^{100}Sn を娘核とする ^{104}Te の α 崩壊は“Super-allowed alpha decay”と呼ばれる現象が顕著に表れると予測されている (後述)。我々のグループは、平成 25 年度から米国オークリッジ国立研究所と協力し、 ^{100}Sn よりも重い N=Z 原子核の合成とこれらの α 崩壊の観測をめざした新たな黎明研究を進めている。具体的には、原子力機構タンデム加速器およびこれに付属する反跳生成核分離装置を用いてこれら原子核を合成する。また中性子過剰核領域において、我々のグループでは原子炉の動特性に大きな影響を与える遅発中性子に着目している。原子力機構は、東京工業大学とともに原子力システム開発事業 (安全基盤技術研究開発) として「高燃焼度原子炉動特性評価のための遅発中性子収率高度化に関する研究開発」を進めており、実験および理論面から議論することを目的とした。



図 1 原子力機構タンデム加速器施設に設置されている反跳生成核分離装置

2. 会議の内容

2.1 核分裂研究

近年、我々のグループでは、水銀 (^{180}Hg) で新たな様式の核分裂を発見した[1]。この原子核が質量対称に核分裂すれば、中性子数 50 の ^{90}Zr が 2 つ生成され、エネルギーが最も多く放出される。しかし、実際の観測では、質量数 80 と 100 (それぞれ ^{80}Kr および ^{100}Ru) に核分裂片の収率が集中し、質量非対称な核分裂を示した。質量非対称な核分裂は、ウランなどアクチノイド原子核では普通の現象である。しかし、安定同位体よりも中性子数が 20 個程度少ない (陽子数が多い) ^{180}Hg が質量非対称に核分裂することは大きな反響を呼んだ。質量非対称な核分裂を示す領域が不安定核領域に広がっていると同時に、不安定核の核分裂を調べることで核分裂現象を理解するための新たな概念 (モデル) が見出せる可能性がある。最近、我々のグループとヨーク大学、CERN-ISOLDE の研

究グループは、 ^{180}Hg の低励起核分裂を調べたのと同様、 β^+ 崩壊遅延核分裂の手法を用いて $^{194,196}\text{Po}$ 、 ^{202}Rn の核分裂片質量数分布を調べた。プレリミナリーな解析の結果、 ^{196}Po 、 ^{202}Rn は質量対称と非対称分裂が混在することが示唆された。

これらの成果は多くの理論研究者に刺激を与えることになった。ロスアラモスの P. Möller とバークレーの J. Randrup は、原子核形状を 5 つの変形パラメータで表し、原子核変形の時間発展をランダムウォーク法で解くことで原子核の質量数分布を予測し、またアクチノイド原子核からタングステンに至るまでの多くの原子核の質量数分布を予測した。その結果、ある種の原子核で極めてユニークな構造の質量数分布が得られることを予測した。現在、この理論計算を確認するため、我々のグループではタンデム加速器を用いた実験を遂行している。

核分裂の実験では、GSI のソフィア (SOFIA) と呼ばれるプロジェクトが進んでいる。このプロジェクトも陽子過剰原子核の核分裂を調べることを目指している。ここでは ^{238}U を 1000 A MeV に加速して標的に当て、質量数 180~205 にいたる重原子核を生成する。生成された原子核をフラグメント・セパレータで同位体分離し、さらに鉛などの原子核標的を通過させることでクーロン励起をさせ、核分裂を観測する。水銀 184 の核分裂を観測したところ、質量非対称に核分裂した。

我々のグループでは、核子移行反応を用いて中性子過剰なアクチノイド原子核を生成し、励起状態にあるこれら原子核の核分裂片質量数分布の測定を行っている。核子移行反応により、ウランからプルトニウムに至る 12 核種のデータが取得できているとともに、質量数分布の励起エネルギー依存性 (最大 50~60 MeV) を調べることに成功している。この実験は、 $^{18}\text{O}+^{238}\text{U}$ 反応で行ったものであるが、タンデム加速器施設では ^{238}U 標的を ^{232}Th 、 ^{248}Cm 、 ^{237}Np に代えて測定する予定であり、短寿命マイナーアクチノイドを含む多くの核種の核分裂データを取得する予定である (発表・西尾)。

また、核分裂に関する実験研究として、理研における核分裂研究の計画が紹介された。ここでは、逆運動学的な手法により、不安定核の核分裂障壁の高さを決定する提案がされている。また、韓国における $p+^{232}\text{Th}$ 反応の核分裂収率の測定が紹介された。

核分裂過程で問題となっている現象として、scission neutron の存在の有無がある。熱中性子入射核分裂において、即発中性子は十分加速された後の 2 つの核分裂片から放出されると考えられている。しかし、わずかな確率で中性子が原子核切断の直後の 2 つの核分裂片の間で放出される可能性が指摘されている。即発中性子の起源を正確に知ることは、中性子エネルギースペクトルを評価するためにも重要である。この中性子放出過程を理論的に記述する試みが紹介された。生成されたこの中性子は、再度 2 つの核分裂片に吸収・散乱される可能性があり、scission neutron が等方的に放出されるわけではないことを関西大学の和田氏が説明した。また、scission neutron がどのようなエネルギースペクトルを有するか? 現在、これを記述するための概念も描けておらず、チャレンジングな

課題として残っている。

会議では、重原子核どうしの反応機構についても取り上げた。核融合反応を用いた超重元素合成に関して、ドイツ GSI における 119 番、120 番元素合成の取り組みが紹介された。まだイベントは見つかっていない。生成断面積を記述する理論によっては、到達すべき断面積の上限値をさらに一桁以上上げる必要があり、新たな開発要素が必要になると思われる。また、重イオン反応を記述する理論として、TDHF (Time-dependent Hartree-Fock) による重イオン衝突における多核子移行反応 ($^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$) の記述が紹介された。多核子移行反応によって中性子過剰な重原子核を合成できる。このため、核図表上の新たな原子核を開拓する方法として注目されており、理論と実験の進展が期待される。

2.2 陽子過剰核および中性子過剰核の研究

^{100}Sn を超える $N=Z$ 原子核の合成は、極限に位置する原子核を合成する点においてシンボリックな意味がある。 ^{100}Sn 領域で合成されている原子核を図 2 に示す。 ^{100}Sn を超える未知原子核として、図に示すように ^{104}Te 、 ^{108}Xe 、 ^{112}Ba (偶-偶核) が存在する。これらは α 崩壊が主たる崩壊チャンネルであると予測されている。 ^{104}Te は、中性子数と陽子数が等しいために原子核内における α 粒子の形成確率が高く、このため Super-allowed alpha decay [2] と呼ばれる特異な α 崩壊が観測されると期待されている。未到達の原子核を生成することは、ユニークな崩壊と構造を観測することにつながる。テネシー大学の R. Grzywacz らは、 $^{109}\text{Xe} \rightarrow ^{105}\text{Te} \rightarrow ^{101}\text{Sn}$ の α 崩壊連鎖を観測し、 ^{109}Xe が 10ms であるのに対し、 ^{105}Te は 1 μs と短いことを示した。この領域の原子核は、融合-蒸発反応 $^{58}\text{Ni} + ^{54}\text{Fe} \rightarrow ^{112}\text{Xe}^* \rightarrow ^{109}\text{Xe} + 3n$ で合成された (約 10nb)。この実験では、生成される蒸発残留核を入射ビームから分離するために反跳生成核分離装置が利用された。また、寿命の短い原子核の α 崩壊を観測するため、最新のデジタル・エレクトロニクス技術が導入された。一方、オークリッジでの加速器停止のため、究極の目標とする $^{108}\text{Xe} \rightarrow ^{104}\text{Te} \rightarrow ^{100}\text{Sn}$ の観測には至っていない (^{108}Xe と ^{104}Te の寿命は、それぞれ 0.1~1ms、10~100ns と推測されている)。我々のグループは、オークリッジ研究所、テネシー大学、英国ヨーク大学とともに、この α 崩壊連鎖を観測するためのプログラムを進めている。実験は、原子力機構・タンDEM 加速器施設で計画しており、図 1 に示した反跳生成核分離装置の性能試験、および標的・ビーム・検出器の開発を進めている。

陽子過剰核 ^{100}Sn の構造研究として、ヨーク大学の Wadsworth 氏が実験研究成果を発表した。原子力機構の宇都野氏は、殻モデルによるスズ同位体の構造を調べている。スズ同位体は、 ^{100}Sn から ^{132}Sn を視野に入れば多くの同位体のデータがそろふことになり、理論モデルの普遍性を確立する上で重要である。我々のグループは、このような視点からも ^{100}Sn 領域に着目している。

オークリッジの K. Rykaczewski は中性子過剰核としての核分裂片の崩壊研究プログラムを紹介した。β崩壊とこれに伴うガンマ線の放出は、崩壊熱にかかわる重要なデータである。また、特定の中性子過剰核ではβ崩壊に続いて遅発中性子が放出される。遅発中性子先行核の寿命と遅発中性子の放出確率は、原子炉の動特性を決定する重要な物理量である。オークリッジの測定では、特定の中性子過剰核 (^{78}Cu , ^{83}Ga など) において、従来の測定に比べて大きな中性子放出確率を報告している。とりわけ、寿命の短い核種 (一般により中性子が過剰な原子核) でのデータの質に問題があることを指摘した。

理化学研究所における中性子過剰核の構造研究プログラム (EURICA) が西村氏から紹介された。新同位体の生成と寿命の測定、β-γ線測定による構造研究やアイソマーの観測などに加え、将来の遅発中性子の測定を見込んだプログラムが報告された。遅発中性子に関し、BELEN と呼ばれる測定プロジェクトの紹介があった。これは、ISOL ベースの不安定核施設 (フィンランド・ユバスキラ大学) と、フラグメンテーション施設 (GSI) を利用した総合的な取り組みである。

ロスアラモスの河野氏は、遅発中性子放出の理論研究を紹介した。原子力機構小浦氏は、遅発中性子に加え、崩壊熱の理論の進展を紹介した。

J-PARC では、ADS 核変換実験施設の建設が計画されており、ここで発生する中性子または 400MeV 陽子の利用を他のコミュニティにオープンにすることが検討されている。陽子ビームを利用することで、さまざまな原子核研究を展開することができる。J-PARC の佐々氏により、この施設の紹介が行われた。この施設を利用することで、我々のグループは J-PARC において重イオン核物理を展開したいと考えている。

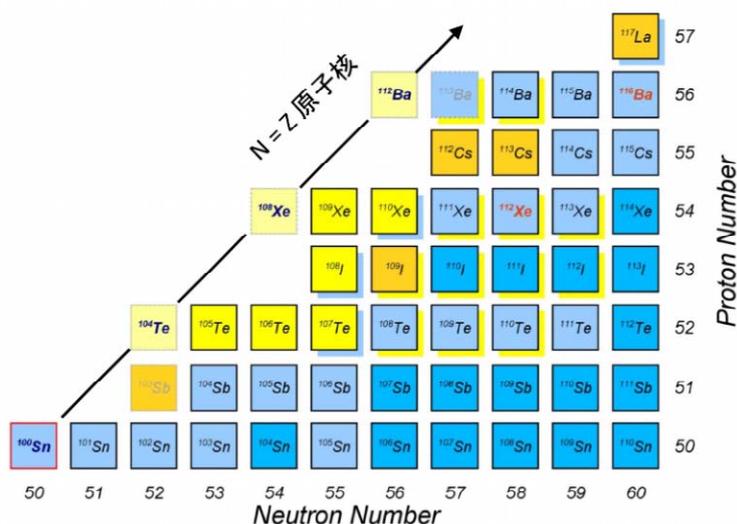
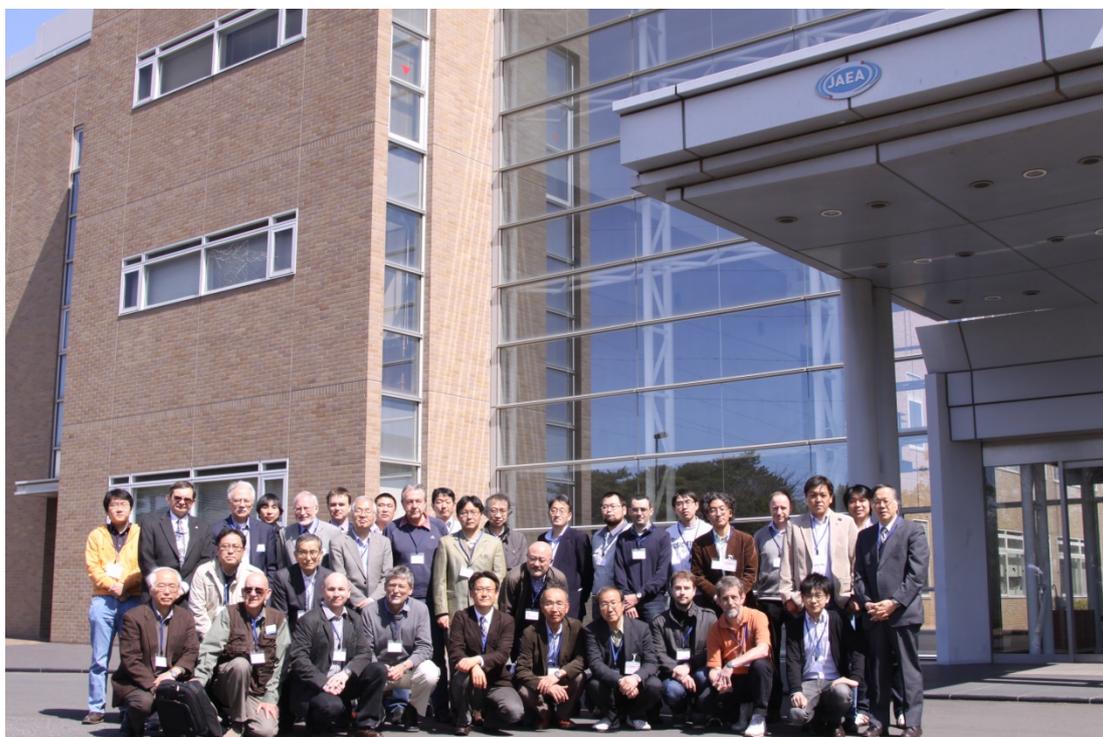


図 2 陽子過剰原子核領域の核図表。実線の□で囲んだ原子核は、これまで合成されている。

参考文献

- [1] A. Andreyev *et al.*, Phys.Rev.Lett. **105**, 252502 (2010).
- [2] R.D. MacFarlane and A. Siivola, Phys. Rev. Lett. **14**, 114 (1965)



第10回 ASRC 国際ワークショップの集合写真 (2013年3月21日)