

重原子核反応フロンティア研究グループの主な成果

Highlights of Research Group for Reaction Involving Heavy Nuclei

アンドレイ アンドレエフ グループリーダー
Andrei Andreyev Group Leader



概要

エキゾチック原子核の核分裂と殻構造に関する研究を行った。陽子過剰核において、新たな様式の質量非対称核分裂を発見した。これに関連して、中性子過剰核や超重原子核の核分裂を重イオン核反応により多角的に調べた。また、有効核力にテンソル力を導入する事が重要であることを指摘し、殻模型計算により、不安定核における魔法数28の消滅を明らかにした。

1. 研究の背景・経緯

本研究グループではエキゾチック原子核の核分裂と殻構造に関する研究を進める方針を立てた。原子核の性質は、液滴モデルで表現されるマクロな概念の性質に加え、陽子や中性子（核子）のエネルギー準位に起因するミクロ構造によって性質が決まる。とりわけ、ミクロな性質は原子核の質量や崩壊様式、寿命、反応過程など原子核が関与するあらゆる現象を支配し、さらには超重元素など原子核の存在限界をも支配する。本研究では、エキゾチック原子核の核分裂と殻構造における新現象の発見と解明を目指した。エキゾチックとして安定同位体から離れた陽子・中性子過剰核に着目し、(1) 未知領域原子核の核分裂、および(2) 魔法数の出現と消滅に着目した殻構造研究を行った。

(1) 未知領域の核分裂

液滴モデルで核分裂を記述すると、等しい重さの原子核が生成される。アクチノイド原子核は質量非対称に核分裂することが知られているが、これは殻構造によって原子核のポテンシャル構造が変化を受けるためである。

始めに、陽子過剰核の核分裂展開の背景を示す。当該グループは国際協力の一部としてドイツ重イオン研究所(GSI)において重原子核領域の研究を進めていた。陽子過剰な鉛領域原子核の崩壊を調べていたところ、予期せぬ高エネルギーの崩壊粒子を観測した。当初、バックグラウンドの可能性も議論したが、この事象が ^{194}At の β^+/EC 崩壊遅延核分裂であるとの結論に至り、本実験プログラムのきっかけとなった。その時、議論で示した計算の例を図1(左)に示す。

図1(左)は、親核アスタチン(At)同位体の β^+/EC 崩壊のQ値(Q_{EC})を示している(赤線)。これは、崩壊した先の娘核(ポロニウム;Po)がとる最大の励起エネルギーに相当する。また、ポロニウム同位体の核分裂障

Abstract

Research activities of our group were mainly focused on the study of fission and nuclear structure of exotic nuclei. In the fission of proton-rich nucleus, ^{180}Hg , we observed a new type of mass asymmetric fission. We also studied fission of neutron-rich and very heavy nuclei. On the nuclear-structure side, we succeeded in accounting for the breakdown of the magic numbers in the $N=28$ region in a unified manner by carrying out shell-model calculations including the tensor force.

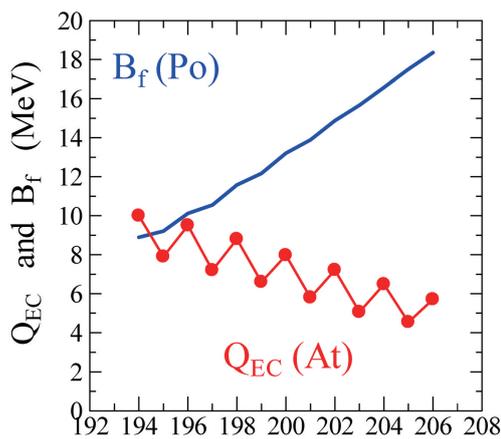
1. Background

The research goal of our group was set to understand nuclear fission and structure of exotic nuclei. Properties of nucleus, such as e.g. mass, lifetime, reaction dynamics, and the limit of existence of nuclei, including super-heavy elements, are largely influenced by the microscopic structure associated with energy levels of nucleon. We focused our interest especially on proton-rich and neutron-rich nuclei located far from stable isotopes.

(1) Fission of exotic nuclei

The liquid drop model of the nucleus predicts that fragments with equal mass should be produced in fission. This is not the case, however, for the fission of actinide nuclei, which show asymmetric mass distributions due to the change of the potential energy surface associated with the microscopic shell energy correction.

Our interest in the study of fission of proton-rich nuclei goes back to collaborative work performed at the SHIP of GSI, Darmstadt, Germany. We observed unexpected high energy events when studying the decay of proton-rich isotopes in the Pb region. We reached the conclusion that the high-energy particles are the fission fragments produced by the β^+/EC delayed fission of



A

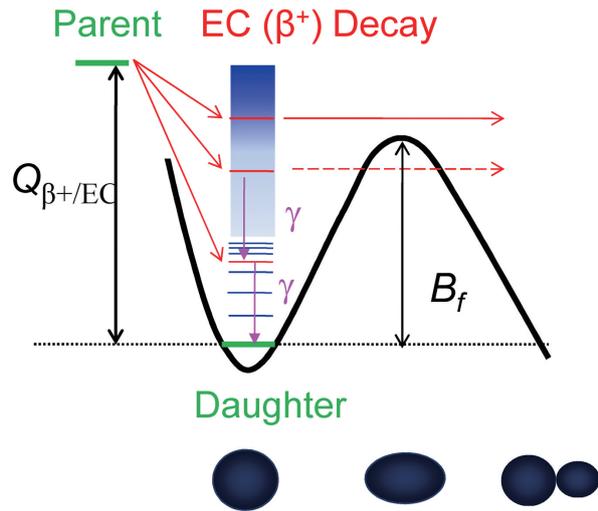


図1 親核アスタチン (At) 同位体の β^+ /EC 崩壊に対する Q 値と、娘核ポロニウム (Po) の核分裂障壁の高さ (左) β^+ /EC 崩壊遅延核分裂を模式的に示す (左)。

Fig.1 Q-value of the parent astatine (At) nuclei and fission barrier height of the daughter polonium (Po) nuclei The figure on the right side shows the process of the β^+ /EC delayed fission.

壁の高さ B_f を示す (青色)。 β^+ /EC 崩壊で生成された娘核が核分裂を起こすか否かは、 B_f と Q_{EC} の相対的な高さで決まる。 図で、中性子欠損核 ^{194}At の Q_{EC} は娘核の核分裂障壁より高く、 β^+ /EC 崩壊遅延核分裂を観測するチャンスが高い。 ロシアのグループがトラック検出器を用いた報告があるものの [1]、情報量は限られていた。 この領域の β^+ /EC 崩壊遅延核分裂の決定的な証拠をつかんだことで、陽子過剰核 (または中性子欠損核) の低励起エネルギー (≤ 10 MeV) の核分裂研究を可能にした。

核分裂研究に関連し、中性子過剰原子核の核分裂に着目した。 重イオン入射による多核子移行反応を用いることで、これまで測定が行われていなかった中性子過剰なアクチノイド原子核を生成し、この核分裂特性を調べることにした。 多核子移行反応では、例えば $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$ の一つの反応でも 10 核種を超える原子核を生成することができ、さらに励起エネルギー依存性まで系統的に調べることができる点に着目した。 開発は、主に外部資金を活用して行った。 また、重イオン反応を用いて超重原子核の核分裂を調べた。 超重原子核の核分裂では、アクチノイド原子核と異なる殻構造が核分裂生成物の収率に変化を与えられられる。 これらは重イオン衝突で生成されるため、衝突初期から始まるダイナミカルな振る舞いが核分裂生成物の分布に影響を与える。 この測定により、核分裂と核反応を記述する理論を向上させることを目指した。

(2) 不安定核の構造研究

現代の核物理における最も挑戦的な課題の一つとして、非常に中性子過剰あるいは陽子過剰なエキゾチック核領域における殻構造の振る舞いの記述・予言が挙げられる。 殻構造は核分裂にも強く影響を及ぼすため、これはエキゾチック核の核分裂の理解にも密接に関わる。 こ

^{194}At . This finding triggered our campaign of fission studies in this region.

Figur 1 (left) shows the Q_{EC} -value for the β^+ /EC decay of astatine (At) isotopes (red line). This Q_{EC} value determines the maximum excitation energy which can be attained by the daughter nuclei, polonium isotopes (Po). Fission barrier height B_f of the Po isotopes are shown by the blue curve. The fission probability of the daughter Po nucleus is largely determined by the Q_{EC} (At) relative to the B_f (Po). The proton-rich (or neutron-deficient) ^{194}At has a larger Q_{EC} value than the fission barrier of ^{194}Po , giving us a chance to observe β^+ /EC delayed fission of ^{194}At . In the past, a Russian group reported this phenomenon in this region using track detectors [1]. The reported physical quantities were, however, very limited. We achieved definite conclusion by detecting directly the high-energy release in fission. The finding opened a campaign to study low excitation-energy (≤ 10 MeV) fission of proton-rich nuclei.

We also extended our research program to include fission of neutron-rich actinide nuclei at the tandem facility of JAEA. Taking advantage of multi-nucleon transfer reactions, we could investigate neutron-rich nuclei not yet studied so far. The reaction $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$, for example, gives access to more than 10 fissioning actinides in a single measurement. This experiment reveals the systematic change of fission-fragment mass distributions across different isotopes, and as a function of excitation energy. This program was promoted using external funds. Heavy-ion induced reactions were also used to study fission of super-heavy nuclei, which is

の問題に対する回答を与えるべく、欧州、北米、日本、韓国にて巨大不安定核実験施設が稼働し、また計画されている。これら不安定核実験施設における最近の実験により、エキゾチック核の殻構造に関して予期せぬ結果が得られた。すなわち、非常に中性子過剰領域では、古典的魔法数8, 20, 28が消滅する一方、新しい魔法数16が出現するというものである。魔法数は隣り合う軌道間の大きなエネルギーギャップとして出現するため、その破れは、殻構造の急激な変化（しばしば殻進化と呼ばれる）を意味する。殻進化の起源を探るには、多体相関を取り入れた最先端の核構造計算が必要とされる。この研究課題では、本グループは大規模殻殻型計算を遂行することによって殻進化の起源を理解することを目指した。多体計算における方法論および計算手法の発展もこの目的の達成に重要である。

2. 研究の内容

(1) 未知領域の核分裂

^{235}U の中性子入射核分裂では、スズ132 (^{132}Sn) 近傍の閉殻性が核分裂過程に影響を与えられている。一方、陽子過剰核 ^{180}Hg の核分裂では、Z (陽子数) / N (中性子数) 比が0.8近傍の核分裂片が生成されるため、 ^{132}Sn (0.61) の影響を受けない。その代わりに、準魔法数核 ^{90}Zr (Z=40, N=50, Z/N=0.8) が核分裂に大きく関与すると考えられ、そのため質量対称な核分裂を観測すると考えられた。

実験はCERN-ISOLDEで行った。1.4GeVの陽子をUC_x 標的 (ウランカーバイド) に入射することで、 ^{180}Tl を含む多くの反応生成物を生成した。 ^{180}Tl 原子核を他の原子核と分離して引き出すため、レーザーイオン源を組み合わ

expected to be regulated by shell structures different from those affecting the fission of actinide nuclei. These super-heavy nuclei are populated by collisions between heavy isotopes, thus the dynamical effects from the entrance channels would be also observed. The observed mass distributions constrain the dynamic fissioning path along the potential energy landscape, and therefore constitute an essential test of theoretical calculations.

(2) Nuclear structure of unstable nuclei

One of the most challenging topics in nuclear physics is to predict the reorganization of shell structure in the very neutron-rich and proton-rich regions. This subject is closely related to the study of fission because it is strongly influenced by shell structure. To answer this question, large-scale radioactive-ion-beam (RIB) facilities are currently being operated and constructed in Europe, North America, Japan and South Korea. Recent experimental studies carried out at RIB facilities have provided unexpected results: in the very neutron-rich region, for example, conventional magic numbers 8, 20, 28 disappear and a new magic number 16 appears. Since the magic number arises as a large shell gap between neighboring orbits, the breakdown of magic numbers indicates sharp modifications of shell structure, often called shell evolution. In order to probe the origin of shell evolution, state-of-the-art nuclear-structure calculations that take many-body correlation into account are needed. In this subject, our group aims at understanding the origin of shell evolution by performing large-scale shell-model calculations. Developing a new methodology and

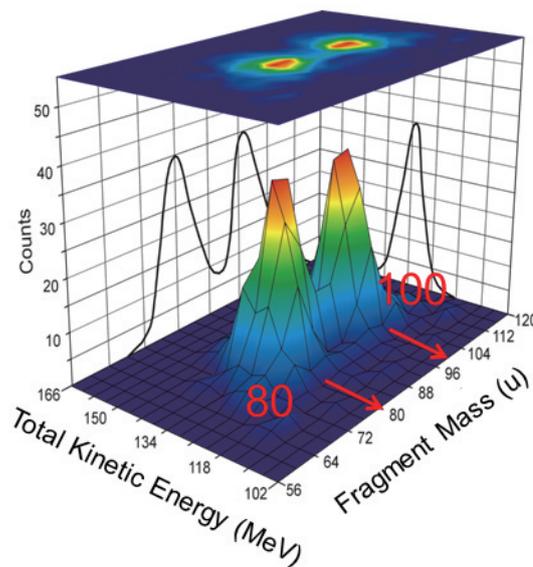


図2 ^{180}Tl の β^+ /EC 崩壊遅延核分裂で観測された ^{180}Hg の核分裂片の質量と全運動エネルギーに対する事象
 ^{180}Hg は質量数80と100を中心とする質量非対称な分裂を示した[2]。

Fig.2 Fission fragment distribution on the mass and the total kinetic energy plane for the fission of ^{180}Hg populated by the β^+ /EC decay of ^{180}Tl

Fission of ^{180}Hg shows the mass asymmetric fission centered at masses 80 and 100 [2].

せた質量分離装置を用いた。 ^{180}Tl の β^+ /EC崩壊で ^{180}Hg の低励起状態をつくり、この核分裂を観測した。実験で得られた ^{180}Hg の核分裂片の質量数と全運動エネルギー (TKE) に対する事象を示したのが図2である[2]。 ^{180}Hg は質量数80と100を中心とする非対称な核分裂を示すことがわかった。核分裂過程において Z/N 値が保存されると仮定すれば、この原子核は ^{80}Kr と ^{100}Ru となる。このことは、 ^{90}Zr の殻構造は、核分裂過程に何ら影響を与えないことを意味し、測定当初の予想を覆す結果となった。

$^{235}\text{U}(n,f)$ などアクチノイド原子核と ^{180}Hg 原子核の核分裂の違いについて考察を行った[3]。このためそれぞれの原子核の変形に対するポテンシャルエネルギーを計算した。まずマクロ量としてのポテンシャルを計算し、ミクロ量としての殻補正エネルギーを適用した。結果を図3に示す。 ^{236}U のサドル点は質量非対称な位置に現れ、さらにこの非対称度を保ったまま切断点 (scission) に至る。 ^{180}Hg もサドル点は質量非対称の位置に現れ、ここを通過して変形が進む。質量対称方向に変形しようとしても巨大な障壁によって阻まれる。一方、大きく変形した極限では2つの ^{90}Zr 原子核の特徴を表す大きな谷が存在する。本実験結果は、scissionでのエネルギー極小値を計算しても質量数分布は予測できないことを意味し、このため新たな様式の核分裂の発見となった。

さらに、 $^{192,194}\text{At}$ [4]、 $^{186,188}\text{Bi}$ [5]、 ^{178}Tl [6]など新たな β^+ /EC崩壊遅延核分裂核種の観測に成功した。これを利用して陽子過剰核の核分裂を系統的に調べた。得られた実験結果を図4に示す[7]。図は、 $^{194,196}\text{At}$ および ^{202}Fr の β^+ /EC崩壊遅延核分裂で測定した $^{194,196}\text{Po}$ および ^{202}Rn の核分裂片質量数分布である。比較のため ^{180}Hg の核分裂特性も示す。 ^{180}Hg は質量非対称な分布を示すのに対し、 $^{194,196}\text{Po}$ および ^{202}Rn は全体的に質量対称な分布を示した。しかしその分布は質量対称と非対称分裂成分の混在として解釈できる。このことから、 $^{194,196}\text{At}$ および ^{202}Fr は、核図

computational framework is also crucial for this purpose.

2. Contents of the study

(1) Fission in new region of chart of nuclei

Closed shell structure around the neutron-rich nucleus ^{132}Sn plays an important role in the fission process of, for example, $^{235}\text{U}(n,f)$. On the other hand, ^{180}Hg is a proton-rich isotope with Z/N value (proton-to-neutron ratio) equal to 0.8. Fission fragments are expected, on average, to exhibit the same Z/N ratio. In the fission of ^{180}Hg , therefore, we expected that the semi-magic nucleus ^{90}Zr ($Z=40$, $N=50$, $Z/N=0.8$) would play a key role and that ^{180}Hg would fission symmetrically into two ^{90}Zr fragments.

Measurement of fission of ^{180}Hg was carried out at the CERN-ISOLDE facility. Proton beams of 1.4 GeV impinged onto UC_x targets to produce the ^{180}Tl parent nuclei, to observe its β^+ /EC delayed fission. The radioactive ^{180}Tl beams were extracted from the target using a resonance ionization laser ion source. The distribution of the fission fragments in the low energy fission of ^{180}Hg is shown in Fig.2 [2]. ^{180}Hg splits mainly into nuclei of mass 80 and 100, showing a surprising asymmetric fission. Assuming the conservation of the Z/N value, the produced isotopes are centered around ^{80}Kr and ^{100}Ru . These results imply that the structure of ^{90}Zr does not play a role in the fission of ^{180}Hg .

Potential-energy landscapes were calculated for ^{236}U and ^{180}Hg to explain the difference in fission as shown in Fig.3 [3]. In the fission of ^{236}U , the saddle point appears at the mass-asymmetric shape, and the asymmetry degree of freedom is conserved from the

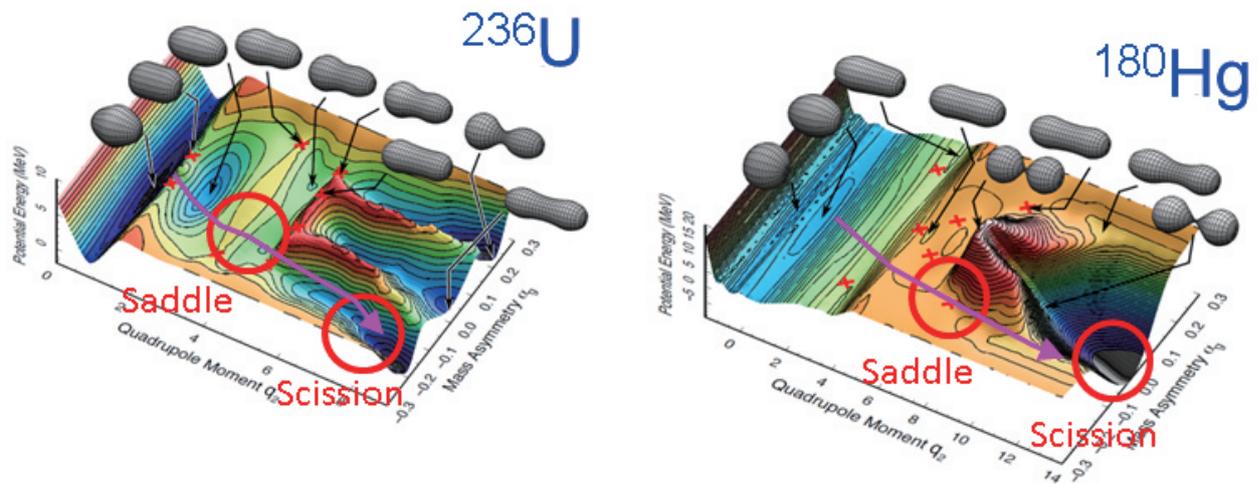


図3 ^{236}U と ^{180}Hg の変形に対するポテンシャルエネルギーの変化
サドル点と分離点 (scission) 領域を○で示している。矢印は、想定される核分裂の進行経路[3]。

Fig.3 Potential energy landscapes for ^{236}U and ^{180}Hg

Saddle and scission points are marked by an open circle. The arrows show the expected trajectory of the shape evolution in fission [3].

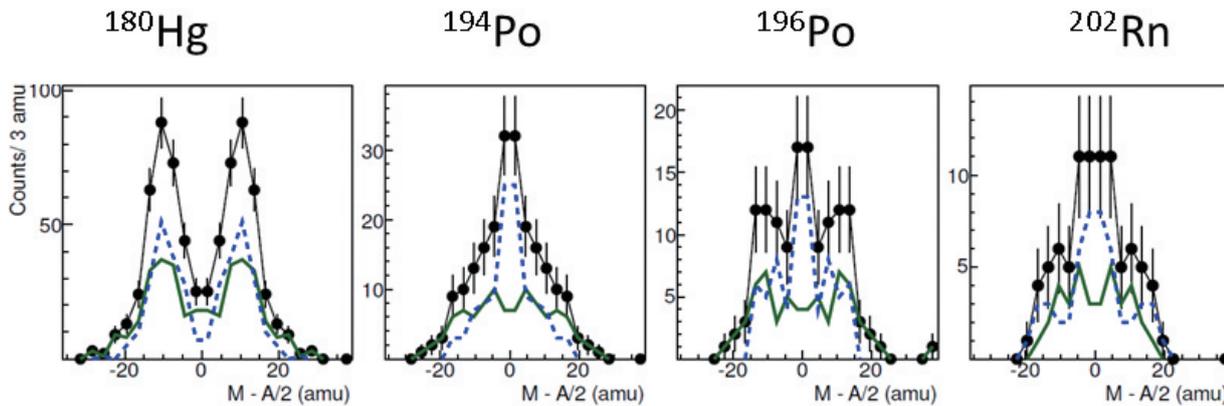


図4 ^{180}Tl , $^{194,196}\text{At}$ and ^{202}Fr の β^+ /EC 崩壊遅延核分裂で観測された ^{180}Hg 、 $^{194,196}\text{Po}$ および ^{202}Rn の核分裂片質量数分布 [7].

Fig.4 Fission fragment mass distributions for ^{180}Hg , $^{194,196}\text{Po}$ and ^{202}Rn obtained in the β^+ /EC- delayed fission of ^{180}Tl , $^{194,196}\text{At}$ and ^{202}Fr [7].

表上、質量非対称から質量対称に遷移する領域に位置すると言える。この様子は、5次元のポテンシャルエネルギー曲面とランダムウォーク法を取り入れた核分裂片質量数分布のモデル計算でも見ることができる [8]。計算結果を図5に示す。計算は、陽子過剰核に質量非対称核分裂の“島”が広がることを示した。図4の質量対称から非対称への変化の傾向は、計算結果と似ている。陽子過剰核の質量非対称核分裂の“島”をさらに調べるため、島を形成する ^{190}Hg の核分裂特性を調べた。この原子核を $^{36}\text{Ar} + ^{154}\text{Sm}$ の核融合反応で生成し、複合核 ^{190}Hg の核分裂を調べた。実験は、原子力機構タンデム施設で行った。

saddle to the scission point. The nucleus ^{180}Hg also shows an asymmetric saddle point. For the extremely elongated shape, the potential energy drops significantly at the mass-symmetry point to create two ^{90}Zr fragments, which contradicts to the experiment data. This experimental result showed that the simple scission point model, which works for actinide fissions, does not explain the asymmetric fission of ^{180}Hg .

We therefore investigated also the β^+ /EC-delayed fission of neighboring nuclei: $^{192,194}\text{At}$ [4], $^{186,188}\text{Bi}$ [5], and ^{178}Tl [6]. The results are presented in Fig.4 [7],

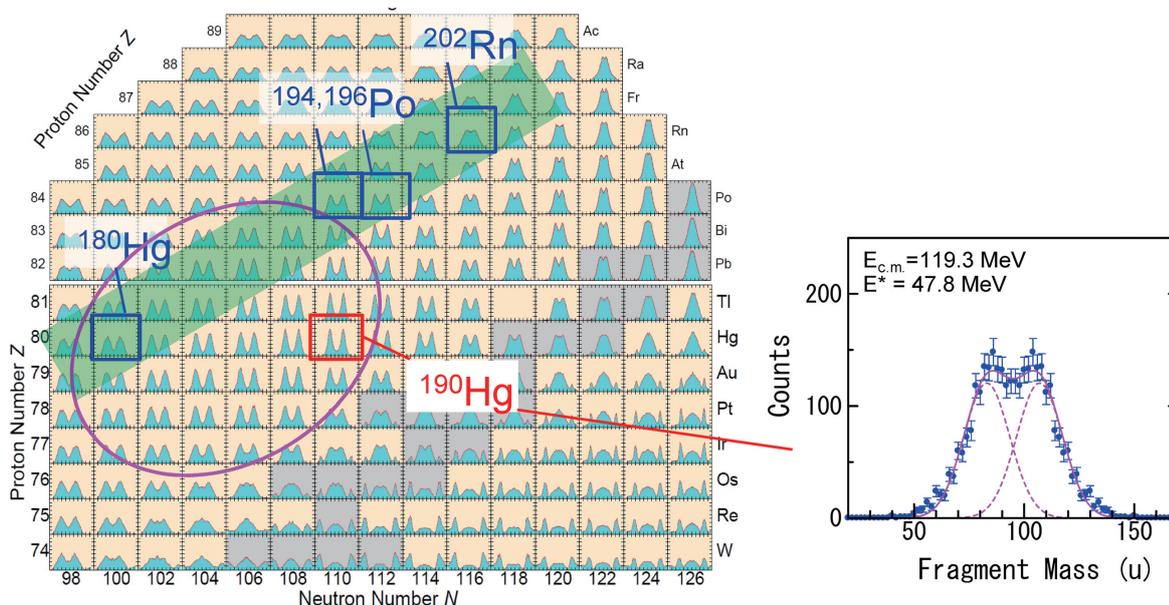


図5 計算で得られた陽子過剰核領域の核分裂片質量数分布の系統的な変化 [8]

β^+ /EC 崩壊遅延核分裂と核融合-核分裂で測定された核種をそれぞれ青と赤の枠で示す。緑のベルトは、 β^+ /EC 崩壊遅延核分裂が観測できる領域を表す。右に $^{36}\text{Ar} + ^{154}\text{Sm}$ で生成された複合核 ^{190}Hg 核分裂片質量数分布を示す [9]。

Fig.5 Calculated fission fragment mass distributions for proton-rich nuclei [8]

Experimental data were measured in our experiment for nuclei marked by blue (β^+ /EC-delayed fission) and red (fusion-fission) boxes. The green belt shows the region, where β^+ /EC-delayed fission happens. Measured fission fragment mass distributions for ^{190}Hg produced by fusion reaction $^{36}\text{Ar} + ^{154}\text{Sm}$ is shown in the right hand side [9].

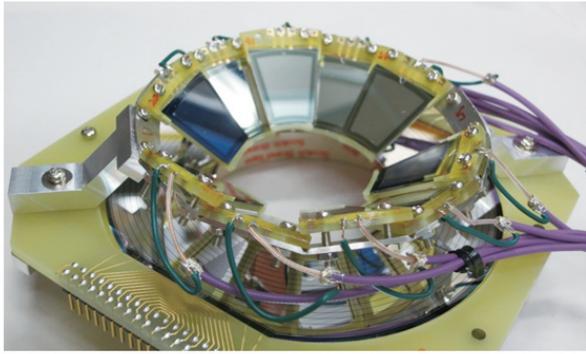


図6 開発したシリコンΔE-E検出器

これにより核子移行反応チャンネルを識別する。

Fig.6 Silicon Δ E-E detector used for the identification of multi-nucleon transfer channels.

結果を図5の右に示す。この反応では励起エネルギーが47.8MeVと高いために分布は広がっているものの、実験データは ^{83}Br と ^{107}Rh を中心とする質量非対称核分裂であることがわかった[9]。本研究により、新たな非対称核分裂領域の分布の様子が明らかになった。

β^+ /EC崩壊遅延核分裂の発見と陽子過剰原子核の核分裂は、Reviews of Modern Physics に投稿する成果となった[10]。また、本研究の一貫として、Atの第一イオン化ポテンシャル (IP) が9.31510(8) eVであることを初めて明らかにした [11]。

次に、中性子過剰核の核分裂に着目した。アクチノイド原子核では ^{132}Sn が核分裂に関与すると考えられている。本研究では原子力機構のタンデム加速器施設を用いた実験により、従来測定された原子核よりさらに中性子過剰なアクチノイド原子核を生成し、また複合核の励起エネルギーを変化させて核分裂に及ぼす ^{132}Sn の効果を調べた。

中性子過剰核の核分裂を多核子移行反応で調べるため、核分裂核種と励起状態を同定するためのシリコン

which shows the fission fragment mass distributions for $^{194,196}\text{Po}$ and ^{202}Rn , obtained in the β^+ /EC delayed fission of $^{194,196}\text{At}$ and ^{202}Fr . $^{194,196}\text{Po}$ and ^{202}Rn exhibit a predominantly mass symmetric shape, with a moderate amount of asymmetric fission mode. These results suggest a smooth transition from asymmetric to symmetric fission. This trend is also found in the calculation using a random walk approach coupled with the five dimensional potential energy surface [8], shown in Fig.5. The calculation shows the “Island” of mass asymmetric fission and the calculations reasonably explain the measured trend of Fig.4.

In order to better understand this island of mass asymmetry, we also measured the fission of ^{190}Hg , located on the right hand side of the island. The compound nucleus ^{190}Hg was populated in the $^{36}\text{Ar} + ^{154}\text{Sm}$ fusion reaction, using the ^{36}Ar beam supplied by the JAEA tandem facility. The results are shown in the upper-right corner in Fig.5. In spite of the wider distribution of the spectrum, due to high excitation of the compound nucleus (47.8MeV), the measured data reveal an asymmetric fission centered on ^{83}Br and ^{107}Rh [9].

Our results on β^+ /EC- delayed fission and the fission of proton-rich nuclei were summarized in Rev. Mod. Phys. [10]. As a part of this work, the first ionization potential for the element astatine was determined for the first time as 9.3158 (8) eV with high precision [11].

The fission program was extended to the neutron-rich actinide nuclei, where ^{132}Sn would play an important role. In the experiment at the JAEA tandem facility, we studied the fission of neutron-rich actinide nuclei not yet known. The fragment mass distribution and its excitation energy dependence was measured for nuclei populated by multi-nucleon transfer. The transfer channels (and associated fissioning nuclei) were identified using our

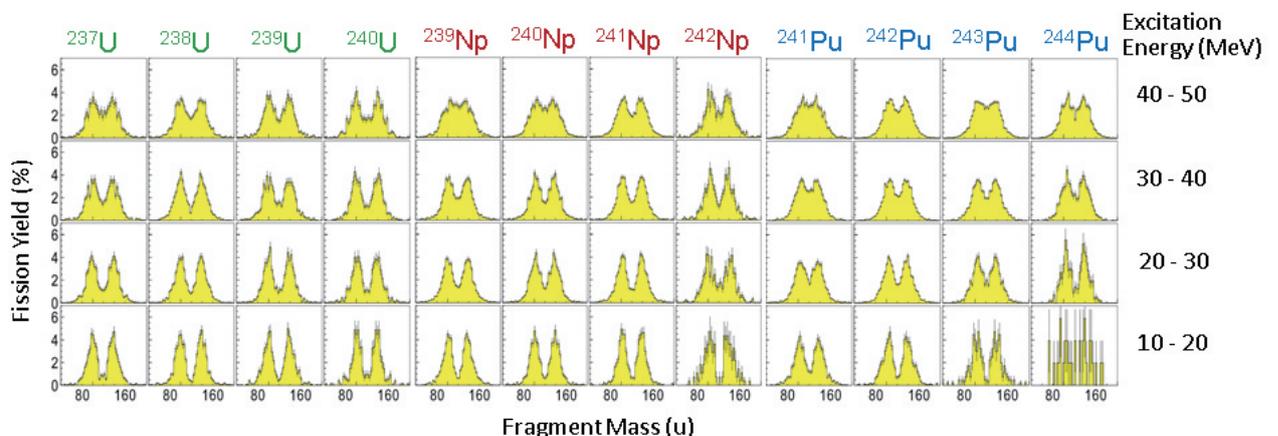


図7 $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$ の多核子移行反応で生成される原子核の核分裂片質量数分布と励起エネルギー依存性 [12]

Fig.7 Measured fission fragment mass distributions of nuclei populated by multi-nucleon transfer reaction $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$. Excitation energy dependence is shown [12]

$\Delta E-E$ 検出器を開発した(図6)。核分裂で生成される核分裂片を位置検出可能な多芯線比例計数管で検出し、飛行時間分析を行うことで質量数を決定した。得られた結果を図7に示す。このうち、 ^{240}U 、 $^{240,241,242}\text{Np}$ 、 ^{243}Pu は初となるデータである。励起エネルギーが10~20MeVと低い領域では、シャープな非対称核分裂を有しているが、励起エネルギーが増加すると谷が埋まっていく。これは、励起によって殻補正エネルギーが消滅するためである。原子番号を固定し、質量数分布の中性子数(N)依存性を見ると、Nが増えるにつれてふた山構造がより顕著になっている。Nの増加に伴って複合核の ^{132}Sn の値1.64に接近する。このため、核分裂片も ^{132}Sn に接近する。ふた山構造が高励起エネルギーに対しても生き残ることから、中性子過剰核では ^{132}Sn の閉殻性が顕著に現れることを明らかにした[12]。

重イオン反応で生成される超重原子核の核分裂を調べるため、さまざまな原子核を ^{238}U 標的に照射し、生成される核分裂片の質量数分布を測定した。実験は、原子力機構タンデム加速器施設で行った。得られた結果を図8に示す。反応ごとに示した4つのパネルは、入射原子核の運動エネルギーの違いを表す。 $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ において、入射核のエネルギーを下げると質量非対称核分裂のピークが現れている。質量対称から非対称核分裂への変化は、 $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応で最も顕著である。重い入射イオンほど非対称成分が顕著になる。この傾向から、非対称核分裂成分は複合核を経由しない核分裂(準核分裂過程)によって生じたと解釈した。準核分裂片の質量数中心は、それぞれ2重魔法数核 ^{78}Ni および ^{208}Pb の近傍核であることが

newly developed silicon $\Delta E-E$ detectors shown in Fig. 6. The fission fragments were detected using position-sensitive multi-wire proportional counters, and a time-of-flight analysis permitted to determine the fragment masses.

The results are shown in Fig.7, which includes data for ^{240}U , $^{240,241,242}\text{Np}$, and ^{243}Pu obtained for the first time. The peak-to-valley (P/V) ratio of the measured distributions decreases for higher excitation energy, as a result of damping of the shell covection. We observed that the P/V ratio also increases with the neutron number (N) of the fissioning nucleus. Heavier isotopes have larger N/Z ratios, thus the fragments approaches to the N/Z value of ^{132}Sn (=1.64). Surviving shell structure even at high excitation for larger N/Z value indicates the dominance of the shell ^{132}Sn in fission.

Fission of super-heavy nuclei was studied at the JAEA tandem facility in different reactions of heavy ions with a ^{238}U target and measuring the distribution of the produced fission products.

The obtained data are shown in Fig.8. Four panels for each reaction correspond to different incident beam energy. In the reaction of $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$, mass asymmetric fission starts to appear at low incident energies. A sharp transition from symmetric to asymmetric fission was seen in the reaction $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$. The asymmetric fission peak is more pronounced when heavier projectiles are used. This observation suggests that mass asymmetric

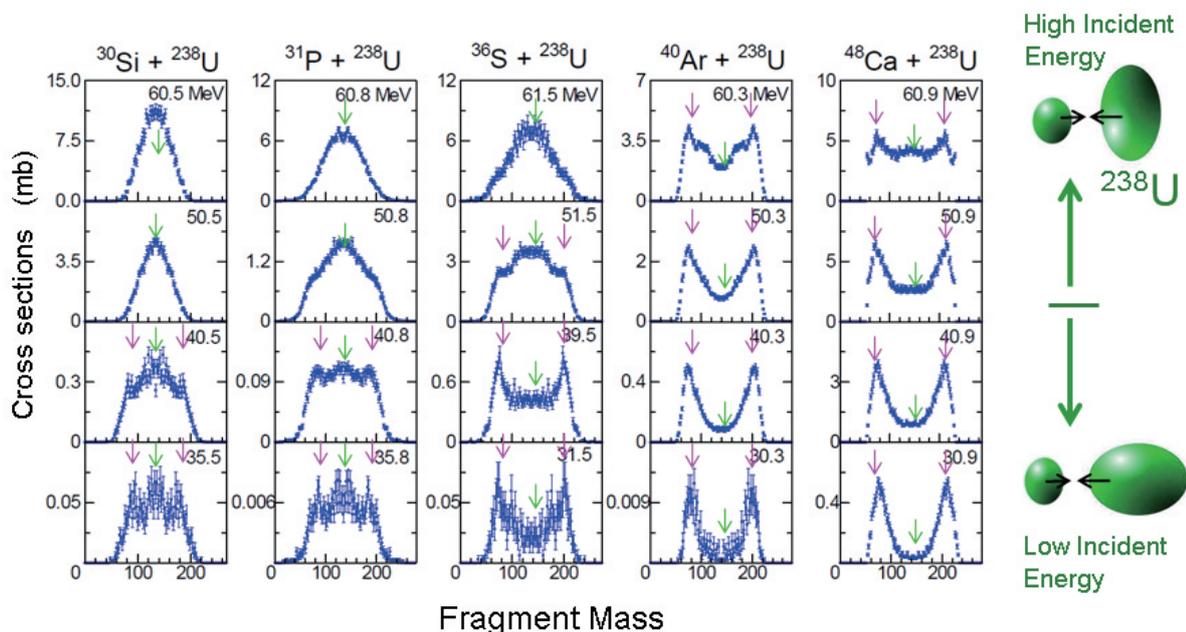


図8 ^{238}U 標的原子核とさまざまな入射核で生成される核分裂片の質量数分布

ピンク色の矢印は準核分裂を、複合核核分裂の中心値を緑色の矢印で示す。先端部および赤道面衝突におけるクーロン障壁の位置を右に示す[13-15]。

Fig.8 Fission fragment mass distributions obtained in the heavy-ion induced reactions involving ^{238}U target nucleus

Pink arrows show the quasifission components, whereas green arrows show the center of the compound-nucleus fission. The configurations for the polar and equatorial collisions are shown in the right side [13-15].

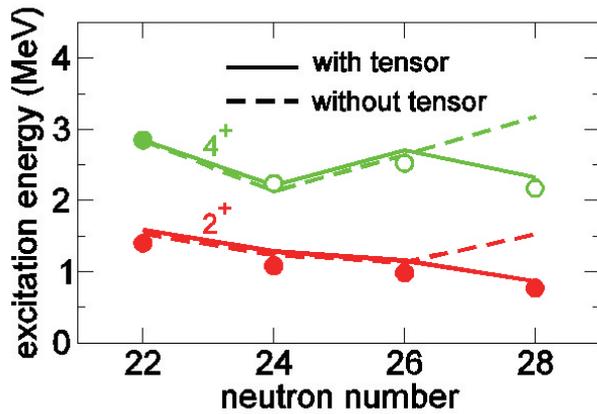


図9 シリコン同位体の励起エネルギーに対する実験値(丸印)と計算値(線)の比較

計算後に出版された実験値を特に白抜きで表す[16]。

Fig.9 Excitation energies in silicon isotopes compared between experimental (circles) and theory (lines)

The experimental data published after the present calculation are shown in open circles [16].

わかった。詳しく調べるため、揺動散逸理論による計算を行った。これは原子核形状の時間変化を計算するもので、重イオン衝突点から核分裂に至るまでの軌跡を求めた。この計算からも、質量非対称な成分は準核分裂であることがわかった[13-15]。また、複合核は対称核分裂に至ることを示した。本研究は、準核分裂の観測によりポテンシャル曲面をより大域的に調べられることを示した。これにより、超重原子核は ^{132}Sn が関与する質量対称成分の他、 ^{78}Ni および ^{208}Pb の構造が関与する非対称な谷が存在することがわかった。

準核分裂への崩壊と複合核の生成割合には、 ^{238}U の変形が影響を与えることを明らかにした。入射エネルギーが低いときは、クーロン障壁の低い先端部衝突とだけ接触が可能となる。実験結果は、このような衝突では準核分裂に流れやすいことを表している。一方、エネルギーを上げると複合核を生成しやすく、このため質量対称成分が増加する。

(2) 中性子過剰核の核構造

中性子数28領域の中性子過剰核の構造を殻模型計算によって研究した。中性子数28は、安定核で知られている古典的魔法数の一つであり、 $f_{5/2}$ - $f_{7/2}$ 軌道間のスピン軌道分離エネルギーに起因する。最近、中性子過剰核 ^{42}Si においてこの魔法数が消滅することが実験的に知られ、その原因に大きな関心が寄せられている。図9に示すように、この研究によって中性子数28魔法数消滅の証拠とされている ^{42}Si における異常に低い第一励起準位を再現するのに成功した [16]。この励起エネルギーはテンソル力なしでは再現しないため、テンソル力が ^{42}Si における魔法数28の消滅に主要な役割を果たしていることがわかった。 ^{42}Si のようなj-j閉殻核ではテンソル力によってスピン軌道分離エネルギーが減少し、そのため軌道間の配位混合が促進されて原子核が変形すると考えられる。

fission occurs without forming a compound nucleus (quasi-fission). The light and heavy mass peaks agree with the masses around the doubly-magic nuclei, ^{78}Ni and ^{208}Pb . These findings were compared with calculations based on the fluctuation-dissipation model. The calculations imply evolution of nuclear shape, and trajectories were tracked from the collision point of the entrance channel down to the scission points. The calculations indicate that the mass asymmetry is indeed due to quasifission [13-15]. It is also predicted that the compound nucleus fissions symmetrically. This study suggested that potential energy surfaces can be investigated more widely by studying quasifission. The analysis showed that static prolate deformation of ^{238}U determines the probability for quasifission. At lower bombarding energies, the nuclear contact is achieved only on the polar side of the ^{238}U nucleus. The data reveal that the polar collision results in quasifission with larger probability. Higher energy enhances the symmetric fission yield due to the larger fraction of compound nucleus formation.

(2) Nuclear structure study for neutron rich nuclei

Nuclear structure around the neutron number $N=28$ was studied using shell-model calculations. $N=28$ is a well-known conventional magic number, originating from the spin-orbit splitting of the $f_{5/2}$ - $f_{7/2}$ orbitals. $N=28$ magicity was recently found to disappear in ^{42}Si , which attracted much interest in the community. Shell-model calculations were performed [16] using a newly constructed effective interaction, which incorporates the tensor force. As shown in Fig. 9, the present study has succeeded in reproducing the anomalously low-lying first excitation energy in ^{42}Si , which is considered as an evidence for the disappearance of the $N=28$ magic number. Since this energy cannot be explained without the tensor force, the tensor force is proven to be the main source of the disappearance. The tensor force decreases the spin-orbit splitting in j-j closed nuclei such as ^{42}Si , and makes them deformed due to correlations between near-lying orbitals. This is the first calculation to point out that the shell evolution due to the tensor force changes even the nuclear shape. The present calculation has also predicted the appearance of a new magic number $N=34$ in the nucleus ^{54}Ca . This prediction has recently been confirmed in the experiment reported in Nature [17].

To calculate the structure of heavier nuclei, further development in methodology and computing is required. This group has developed a new method of calculations, named Monte Carlo shell model, in collaboration with the University of Tokyo. Among a number of papers published in this term, we highlight here, as a work

この研究は、テンソル力による殻進化が原子核の形さえも変えうることを示した初めてのものである。本研究の計算によって、 ^{54}Ca において中性子数34の魔法数が出現することも予言した。この予言は最近実験で確かめられ、Natureに出版された[17]。

より重い核の構造を計算するには、方法論と計算手法のさらなる発展が必要となる。本研究グループでは、東京大学と共同でモンテカルロ殻模型と呼ばれる新しい手法を開発した。本グループ主体の成果のうち主要なものとして、計算速度を5-10倍上げる新しい数値計算手法の発見が挙げられる[18]。こうしたモンテカルロ殻模型計算の発展により、ニッケル（陽子数28）同位体の系統的殻模型計算を初めて遂行することに成功した[19]。また、大規模殻模型計算によって、アンチモン同位体（ $Z=51$ ）の準位構造の変化を説明することに成功し、この変化はテンソル力による殻進化によるものであることを示した[20]。

3. 成果の意義と波及効果

核分裂はその発見から70年以上研究されてきた。アクチノイド原子核が質量非対称核分裂することは発見当初から知られている。 ^{180}Hg の質量非対称核分裂の発見は、核図表上の新たな領域の質量非対称核分裂の発見となった。また、切断点近傍のエネルギー極小値を計算する概念では必ずしも質量数分布を予測できないことを示し、変形経路を詳細に計算する必要性を示唆した。さらに、エネルギー極小値をたどるだけでも不十分であり、より詳細な理解のためには運動学的な手法をとり入れる必要があることを示した。この実験結果は核分裂モデルのベンチマークとなり、核分裂の理論研究を活発にした。

多核子移行反応を用いた核分裂測定技術により、多くの同位体と励起エネルギー依存性を効率よく調べられるようになった。この手法を用いることで、中性子入射核分裂では測定が困難な短寿命原子核の質量数分布などの核のデータを得ることができ、中には原子力核データとして利用価値の高いものも含まれる。励起エネルギーに対する殻エネルギーの消滅割合とその原子核依存性を知ることが可能となった。これは原子核反応を記述するために重要な因子であり、揺動散逸理論など汎用性の高いモデルの構築が可能となる。

重原子核衝突における核分裂過程の研究は、超重元素合成のための反応メカニズムの理解にもつながった。融合核分裂と準核分裂の割合から複合核を生成する断面積を得ることができる。これは、超重原子の生成断面積を評価する第1のステップである。複合核が核分裂することなく中性子を蒸発して生き残れば超重原子核となる。実際、本研究では $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ および $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応でそれぞれシーボーギウム（Sg）とハッシウム（Hs）同位体の生成断面積を評価した[13,14]。そして実際にドイツ重イオン研究所と協力してこれら原子核を合成して断面積を決定した。この結果、上記の評価方法が適切であることがわかった。また、先端部衝突しか生じない低い衝突エネルギーでも超重原子核を生成することを予測し、この

mainly carried out by our group, a new computational method that reduces the computer time by a factor of 5 to 10 [18]. This development allowed us to calculate for the first time the low-lying energy levels in the nickel ($Z=28$) isotopes in the framework of the shell model [19]. The large-scale shell-model calculations have successfully applied to study the evolution of energy levels in antimony ($Z=51$) isotopes, and has demonstrated that it is due to the tensor force [20].

3. Importance of the result and its impact

Study of nuclear fission has a long history of more than 70 years. Mass asymmetric fission for actinide nuclei was already known in the early stages of this research. Studying the fission of ^{180}Hg revealed the new region of mass asymmetry on the chart of nuclei. This result also suggests that conventional methods to search for the energy minimum at the very end of the nuclear elongation cannot always explain the fission yield. Potential-energy-landscape calculations are required to explain the fission observables. The present study reminds that dynamical model calculation is also essential to describe fission. The present data for ^{180}Hg provides a benchmark for various theory models in fission.

The developments were carried out to determine the fission yields for various nuclei and their excitation energy dependence using multi-nucleon transfer reaction. The new technique allowed us to obtain data for neutron-rich nuclei and neutron-induced data of short-lived nuclei, some of which bear repercussions on atomic energy applications. Experimental data also reveal the damping of the shell at high excitation energy, which is a key subject describe not only fission but also heavy-ion induced reactions.

The understanding of heavy-ion induced fission is closely connected to synthesis of super-heavy nuclei. On the one hand, relative yields of fusion-fission and quasifission can be used to determine the production cross section of superheavy compound nuclei as a first step for the element synthesis. We have estimated the cross sections to produce seaborgium (Sg; $Z=106$) and hassium (Hs; $Z=108$) isotopes in the reactions $^{30}\text{Si}+^{238}\text{U}$ and $^{34}\text{S}+^{238}\text{U}$, respectively [13,14]. Our estimate was compared with the measured data obtained in the collaboration between JAEA and GSI. The predictions are consistent with the measured cross sections. The agreement suggests that super-heavy nuclei can be produced in sub-barrier fusion reactions. This knowledge was applied to produce the new isotope ^{268}Hs [14]. The actinide-based reactions are now the major reactions to promote the study for super-heavy nuclei, and the

反応を利用して新同位体²⁶⁸Hsの合成に成功した[14]。現在、アクチノイド原子核を用いた反応が超重原子核合成の主流となっており、断面積の評価方法は超重原子核研究にとって有用である。

スーパーコンピュータを用いた殻モデル計算の発展は、原子核物理コミュニティに大きなインパクトを与えるものとなり、不安定核実験施設における実験研究を行うための強いモチベーションを与える。また、原子力核データをより原理的なレベルから評価できるようになり、従来のモデル計算より高い精度と再現性を得られるようになった。その例として⁴⁸Caの光核反応断面積がある。また、超寿命核分裂生成核の半減期は、廃棄物処分や核変換技術の観点から重要であるものの、実験的に決定することが困難な場合がある。原子核⁷⁹Seの半減期の測定はこれまで10万年～115万年とばらついてきたが、殻モデル計算を適用することにより、30万年程度と見積もることができた。

4. 今後の予定

図5の計算結果によれば、タングステン (W) からプラチナ (Pt) に至る中性子過剰側に質量非対称度の大きな核分裂モードが現れている。Z < 82領域の核分裂では未開拓な核種が多く存在し、ユニークな核分裂様式を発見できる可能性がある。また、既存のデータにおいて、フェルミウムなど重い原子核の核分裂の同位体依存性を見ると、ふた山の質量非対称核分裂からシャープな対称核分裂に遷移することが知られている。これは、2重魔法数核¹³²Sn領域原子核を2つ生成することと関連づけて解釈される。実験データは自発核分裂だけに存在するため、測定された核種が限られている。多核子移行反応を用いることで、より多くの核種を調べることができ、また励起エネルギー依存性を調べることができる。原子核に起きるこの相転移とも言えるべき現象を解明したいと考えている。

present achievement contributed to this field.

The shell-model calculation using supercomputers has potential for providing nuclear data of high accuracy needed for advancing atomic-energy research. Our group has initiated feasibility studies in this direction. An example is the calculation of the photo-absorption cross section in ⁴⁸Ca, as a possible method for transmutation. The calculation was also applied to estimating the half-life of the long-lived fission products, ⁷⁹Se, whose experimental data scatter largely from 1×10^5 to 1.2×10^6 year. Our calculation gave around 3×10^5 year.

4. Perspectives

According to Fig.5, theory predicts very asymmetric fission mode in the region ranging from tungsten (W) to platinum (Pt). In the fission of lighter nuclei with $Z < 82$, limited number of isotopes have been studied so far. Thus we expect to observe new interesting fission properties in this region. Paying attention to the heavy region such as fermium nuclei, sharp transition from asymmetric to symmetric fission was observed by approaching ²⁵⁸Fm. This phenomenon was investigated, by spontaneous fission, so that the studied nuclei are limited. Multi-nucleon transfer reactions are an additional tool to explore this region. We intend to expand the knowledge of fission systematics and to observe their excitation energy dependence, which would shed more light on the transition between asymmetric and symmetric fission.

参考文献 References

- [1] Y.A. Lazarev *et al.*, Europhys. Lett. **4**, 893 (1987).
 [2] A.N. Andreyev *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 252502 (2010).
 [3] T. Ichikawa, A. Iwamoto, P. Möller, A.J. Sierk, Phys. Rev. C **86**, 024610 (2012).
 [4] A.N. Andreyev *et al.*, Phys. Rev. C, **87** (2013) 014317.
 [5] J.F. Lane *et al.*, Phys. Rev. C, **87** (2013) 014318.
 [6] V. Liberati *et al.*, Phys. Rev. C, **88** (2013) 044322.
 [7] L. Ghys *et al.*, Phys. Rev. C, **90**, 041301(R) (2014).
 [8] P. Möller, J. Randrup and A. Sierk, Phys. Rev. C, **85** (2012) 024306. J. Randrup and P. Möller, Phys. Rev. Lett., **106** (2011) 2011.
 [9] K. Nishio *et al.*, to be published.
 [10] A.N. Andreyev *et al.*, Rev. Mod. Phys. **85** (2013) 1541.
 [11] S. Rothe *et al.*, Nature Communications **4**, 1835 (2013)
 [12] R. Leguillon and K. Hirose to be published.
 [13] K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. C, **82**, 044604 (2010).
 [14] K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 024611 (2010).
 [15] K. Nishio *et al.*, Phys. Rev. C, **86**, 034608 (2012).
 [16] Y. Utsuno *et al.*, Phys. Rev. C **86**, 051301(R) (2012).
 [17] D. Stepenbeck *et al.*, Nature **502**, 207 (2013).
 [18] Y. Utsuno *et al.*, Comput. Phys. Commun. **184**, 102 (2013).
 [19] Y. Tsunoda *et al.*, Phys. Rev. C **89**, 031301(R) (2014).
 [20] Y. Utsuno *et al.*, EPJ Web of Conferences **66**, 02106 (2014).