

多核子移行反応を用いた中性子過剰核の核分裂測定

Fission study for neutron-rich nucleus using multinucleon transfer reaction

西尾 勝久 重元素核科学研究グループ
NISHIO Katsuhisa Research Group for Heavy Element Nuclear Science



概要

核分裂はウランを中性子照射することで発見され、この複雑な現象を理解するために様々な実験が行われてきた。未開拓であった領域の核分裂を観測することで新たな発見があり、核分裂の理解に転機を与えた。本研究では、これまで観測されなかった中性子数の多い原子核の核分裂測定方法を実現し、その有用性を実証した。多核子移行反応を用いた本実験手法は、1回の実験で取得できる核種の種類と複合核励起エネルギーの広さ、すなわちデータ量において比類なきアプローチである。また、様々な核データを評価する上で重要となる核分裂障壁の高さや反応直後の原子核の回転など、核分裂と多核子移行反応の両面において豊富な情報が引き出せる。ここでは、特に高エネルギー核分裂で起こるマルチチャンス核分裂、すなわち中性子を放出した後で核分裂が生じる現象を定量的に明らかにして、その重要性を指摘した点を中心に述べる。

1. 研究の背景・経緯

原子核の研究は、自然界に存在しない同位体を生成することで新たな知見が生まれ、発展を続けてきた。魔法数の存在が一つの例であり、これを説明したモデルは未開拓領域に新たな魔法数核の存在を予測し、実験者に新たなチャレンジを与えた。例えば超重元素領域に“安定の島”と呼ばれる寿命の長い原子核領域が存在するはずであり、ここに到達することが核物理の大きな目標の一つであり、研究者を引き付けている。核分裂の理解も同様であり、それまで未到達であった領域の原子核を調べることで新たな発見があり、核分裂の理解を前進させた。その代表的な発見として2つの例が挙げられる。1つは40年ほど前に発見されたフェルミウム (Fm, 原子番号 $Z=100$) で起きる現象である [1]。 ^{257}Fm は、我々が知っているウランやプルトニウムと同様に、重い原子核と軽い原子核を生み出す“質量非対称”な核分裂を示すのに対し、 ^{258}Fm では等しい重さの核分裂片を2つ生み出した。これは、2重の魔法数を持つ原子核 ^{132}Sn (陽子数 $Z=50$, 中性子数 $N=82$) の構造が出現し、分裂の仕方を変えたものだ。もう1つは、2010年に発見した陽子過剰核の水銀 ^{180}Hg で発見した非対称核分裂であり、当研究グループが中心的な役割を担う共同研究から生ま

Abstract

Nuclear fission was discovered during the irradiation of uranium material with a neutron beam. Many experimental attempts have been carried out to understand this complex mechanism. By investigating fission in a new region of the chart of nuclides, deeper understanding of fission has been achieved by finding a new phenomenon. In the present research, we have developed a new method to study the fission of neutron-rich nuclei. The method using multinucleon transfer reaction is a remarkable approach as it provides a large set of fission data in terms of produced nuclides and their excitation-energy range. Also, the method allows us to determine fission barrier height, useful to evaluate nuclear fission data. In this report, the experimental method and results are shown by highlighting the effects of multichance fission on fission observables, i.e., fission after neutron evaporation, as a process known in general but less understood quantitatively.

1. Background

Knowledge of the atomic nucleus has developed with new findings being provided by producing isotopes that do not exist in nature. The discovery of closed shell structure and associated magic numbers in the new region of the chart of nuclides are one of the examples. The theoretical models predict the “island of stability” in the region of superheavy elements, attracting nuclear physicists as one of the largest challenges in nuclear physics. Similarly, deeper understanding was obtained in fission by investigating previously inaccessible regions of the nuclear chart. One of the examples is the fission of fermium isotopes (Fm,

れた [2]。実験当初は、中性子が魔法数となるジルコニウム 90 (^{90}Zr , $Z=40$, $N=50$) 2つを生成する対称核分裂になるだろうと考えた。しかし、結果は、質量数 80 と 100 の原子核を生成する非対称核分裂となった。このことは、核分裂片の殻構造だけで分裂の仕方が決まるものではないとして、新しいタイプの非対称核分裂の発見となった。この 20 年の間に、核分裂に関する測定技術は飛躍的に進歩した。以下で示す成果の一部も併せて、著者らはレビュー論文にまとめている [3]。

本研究では、中性子数の多い原子核の核分裂を調べることを目的とした。中性子過剰核に着目する理由は 2 つある。1 つは、超重元素の安定の島に向かう中性子過剰な原子核領域に、ユニークな核分裂を起こす原子核の存在が予言されているためである。前述の ^{258}Fm で見られる特徴の核分裂はもとより、 ^{208}Pb や ^{78}Ni などの 2 重魔法数の構造が核分裂を支配し、この近傍核が出現することが予測されており、この発見は核分裂の理解を大きく前進させるはずである。2 つ目は、天体での元素合成との関係である。中性子星どうしの合体現象において生じる速い元素合成過程 (r-プロセス) において、中性子過剰側の重元素が次々に合成され、最終的に核分裂を起こす重元素に到達する。これらが中性子吸収核分裂や β^- 崩壊遅延核分裂を起こすと、生成された核分裂片が、r-プロセス核反応のネットワークに組み込まれ、最終的にできる元素の組成に影響を与える。これは、“核分裂片の収率分布”に支配されるが、理論ごとに全く異なる分布が与えられている。一方、r-プロセスの最終段階で核分裂を免れた原子核は、中性子吸収と β^- 崩壊を繰り返して超重元素が次々に作られる。ここでカギとなる物理量が“核分裂障壁の高さ”である。障壁が高ければ中性子を吸収しても核分裂は起こらず超重元素がどんどん生成されていく。しかし、r-プロセスが走るような中性子過剰核の核分裂障壁の高さは理論によって 2 倍も異なっている。

r-プロセスで直接生成される原子核の核分裂は興味深いものの、現在の実験技術を結集してもここまで中性子の過剰な原子核に到達することは不可能である。しかし、少しでも中性子数の多い原子核を生成して核分裂を調べることができれば、精度の高い理論の構築に貢献できる。

本研究では、中性子の多いアクチノイド元素同位体の核分裂を調べることを目指した。ここで多核子移行反応に着目した。多核子移行反応とは、加速した入射核と標的核との間で起こる反応の 1 つであり、原子核どうしの間で中性子や陽子が交換される。図 1 に、実際に実験を行った系として酸素 18 (^{18}O) をウラン 238 (^{238}U) に衝突させる例を挙げた。図では ^{18}O から ^{238}U に 2 つの中性子が渡され、複合核 ^{240}U が生まれている。このように、標的により多くの中性子を渡す (あるいは標的から陽子を奪う) ことで、中性子数の多い原子核が生成される。実際には、移行する中性子と陽子の数のパターンに対応して多くの核種のデータを取得することができる。 ^{18}O ビームを用いた実験でも 23 核種のデータを取得し、最大励起エネルギー 70 MeV までの核分裂の振る舞いを調

atomic number $Z=100$) [1]. While lighter isotopes than ^{257}Fm show a mass-asymmetric shape in the fission-fragment mass distributions (FFMDs), the neutron-rich ^{258}Fm nucleus suddenly exhibits a prominently sharp mass-symmetric shape by producing two fragments with almost identical mass. This was interpreted to be due to emergence of the shell structure of doubly magic nucleus, ^{132}Sn ($Z=50$, $N=82$), driving the system to evolve through a different nuclear shape in fission. Another example is the discovery of the mass-asymmetric fission of the proton-rich nucleus ^{180}Hg ($Z=80$, $N=100$) [2], found in 2010 with a collaborative research program led by our group. In contrast to the initial anticipation that the system would split symmetrically by producing two ^{90}Zr ($Z=40$, $N=50$) nuclei, ^{180}Hg exhibits mass-asymmetric fission by generating fragments with mass 80 and 100. The result indicates that fission is not necessarily regulated by the shell structure of the fragments, but the structure of the fissioning nucleus has a crucial role. This became the discovery of a new type of asymmetric fission. The recent advancement of experimental fission studies is reviewed in our recent paper [3], including the present method.

The study of fission of neutron-rich nuclei is motivated by two reasons. One is related to the appearance of new types in fission in the unexplored neutron-rich heavy-element region on the way to the island of stability. In addition to the fission like ^{258}Fm characterized by the ^{132}Sn structure, a theory predicts a new type of asymmetric fission that is largely regulated by the closed-shell structure associated with ^{208}Pb ($Z=82$, $N=126$) and ^{78}Ni ($Z=28$, $N=50$), thus leading to an extremely massy-asymmetric fission. The finding should have a large impact to understand the fission phenomenon. The second reason comes from the relevance of r-process nucleosynthesis. In the site of neutron-star mergers, heavy elements are produced rapidly by successive neutron capture and β^- decay processes. In the final phase of the r-process, the produced heavy nuclei disintegrate through neutron-capture induced fission and/or β^- -delayed fission. The so called “fission recycle” process is nowadays extensively discussed, as the fission fragments can be a seed entering the r-process network. The process should change the abundance of elements in the universe, which is thus sensitive to the FFMDs. A nucleus which survives against fission can be a source to produce superheavy elements via the successive neutron capture and the β^- decay. The key observable is the fission barrier height, as it regulates the fission probability. Although several models predict fission barrier for such a neutron-rich nucleus, their values deviate with each other as much as a factor of two.

べること成功している [4,5,6]。

本実験は、タンデム加速器施設（東海）で行った。ここは多くの種類の核燃料・RI 標的を所有し、重イオン照射する許認可を持っている。本測定技術とともに、様々な標的を利用することでこれまで未測定だった核種など大量にデータを取得できる。 ^{18}O ビームを用いた実験として ^{232}Th 、 ^{238}U 、 ^{237}Np 、 ^{243}Am 、 ^{248}Cm 、 ^{254}Es の測定を行い、一部は出版し、他はデータ解析が進行中である。今後、さらに ^{226}Ra 、 ^{252}Cf 等の標的を用いた実験を計画している。同施設には、これら RI 試料の化学精製や薄膜標的を作成できる設備があり、実験を有利にしている。

タンデム加速器で得られるイオンビームの特徴も本実験の味方となる。ビームの直径は 1 mm 程度であり、数日間運転してもビームスポットの変動がない。このため、薄膜標的の直径も 1 mm とすればよく、 $0.1\ \mu\text{g}$ の試料があれば実験が成立する。このため半減期の短い RI 核種を利用したり、 ^{254}Es （半減期 $T_{1/2}=276$ 日）など入手量が限られる特別な同位体の照射実験を可能にしている（なお ^{254}Es では、 $0.1\ \mu\text{g}$ でも α 崩壊率は約 7 MBq となる）。

2. 研究の内容

図 1 に実験原理を示す。測定のカギとなるのは、生成される様々な核種（複合核）を事象ごとに識別することである。ここでは、反応で生成される散乱粒子の核種を識別することで複合核を同定する。これを可能にするのが、我々の開発したシリコン $\Delta E - E$ 検出器である（図 1 を参照）。散乱粒子が厚さ $75\ \mu\text{m}$ の ΔE 部を貫通させ、ここに付与するエネルギーが核種に依存することを利用している。図 2 は $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ で得たスペクトルで、横軸は散乱粒子のエネルギー、縦軸は ΔE でのエネルギー

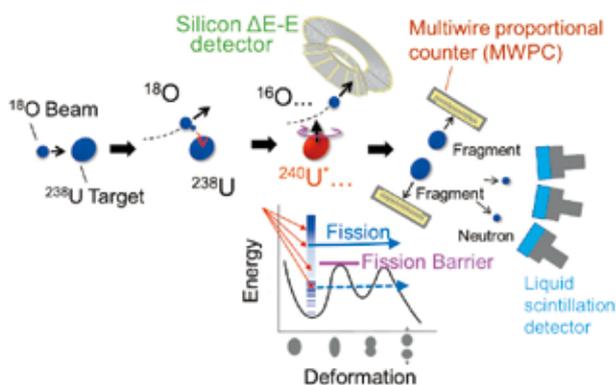


図 1 多核子移行反応を用いた核分裂測定の原理。

Fig. 1 Experimental method to take fission data using multinucleon transfer reaction.

Such a large deviation among fission models comes from an insufficient knowledge in fission mechanism. It is thus important to obtain fission data in the neutron-rich region to provide experimental constraints in the model development.

To study the fission of neutron-rich nuclei, we adopted multinucleon transfer reaction. This is the reaction which can happen in between colliding nuclei by exchanging several neutrons and protons. The process is explained in Fig. 1 using the $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$ reaction. In this example, two neutrons are transferred from ^{18}O to ^{238}U , resulting in the compound nucleus ^{240}U . Depending on the ways of exchanging neutrons and protons, many compound nuclei are produced. In the channel of adding extra neutron to target nucleus (or removing extra protons from target nucleus), neutron-rich nucleus can be produced. Using a ^{18}O beam, we demonstrated that 23 nuclei can be studied in one reaction study [3,4,5], as well as their evolution with excitation energy up to a maximum of 70 MeV.

Our experiment was carried out at the JAEA tandem facility in Tokai. One of the unique features of this facility is that we can use many radioactive actinide target materials. Coupled with our new measurement technique, the number of studied nuclides have been significantly increased. We have carried out experiments using ^{232}Th , ^{238}U , ^{237}Np , ^{243}Am , ^{248}Cm , and ^{254}Es . We plan to continue experiments using target such as ^{226}Ra and ^{252}Cf . Also, it is advantageous for us to have a laboratory to make chemical purification of the material and to make thin target foils.

The sharp beam profile from the tandem accelerator is also essential to our study. Thanks to the small beam diameter of about 1 mm and a drift free property of the beam position through several days, we can perform the experiment by preparing a target-material layer of only 1.0-mm diameter, meaning that the material to be used is minimized down to $0.1\ \mu\text{g}$. This is important when we use isotopes with short half-life and/or rare isotope available in extremely limited quantities, such as ^{254}Es .

2. Contents of research

The experimental method is shown in Fig.1. A key technique to realize the measurement is the identification of the compound nucleus produced in the multinucleon transfer reaction. This was achieved by a newly developed silicon $\Delta E - E$ telescope (see Fig.1). Different ejectile nuclides give a different energy deposition in the ΔE layer ($75\text{-}\mu\text{m}$ thickness). Figure 2 shows an example to cleanly separate ejectile isotopes, thus compound nuclides. In this figure ΔE energy is plotted as a function of ejectile energy. Also, it is noticed that kinetic energy of the ejectile nucleus distributes widely.

一損失である。うまく同位体分離ができていのがわかる。また散乱粒子の運動エネルギーが広く分布しているのがわかる。これは、複合核の励起エネルギーの分布と対応しており、散乱粒子の運動エネルギーが低いほど高い励起状態が与えられたことを意味する。

複合核の核分裂で生成された2つの核分裂片を多芯線比例計数管 (Multiwire proportional counter) で検出する。ここで運動学を組むことで核分裂片の質量数が決定できる。実験で得られた核分裂の質量数に対する収率の分布 (質量数分布) の結果を例として図3に示す。これは、 $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$ [5]、 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ [6] の実験データの一部を使ってまとめたものである。スペクトルの右側に励起エネルギーを示した。励起エネルギーが低い場合 (平均 15 MeV)、アクチノイド原子核に特徴的な質量非対称分裂が見られる。一方、励起エネルギーが増え、この構造が消えていく。これは、励起エネルギーが増えると原子核の殻構造が失われ、原子核が液滴モデルの描像に近くなることを意味している。励起エネルギーを固定して質量数分布をみると、35 MeV-45 MeVにおいて同位体に対する変化が見られる。ここで、ふた山分布の谷の深さ (質量対称分裂した時の収率) に着目する。質量数の多い同位体ほど谷が深い。これら分布の特徴は、以下に示すマルチチャンス核分裂 [5, 7] の概念により初めて説明できる。

The energy is directly transformed into the excitation energy of the exit channel, i.e., lower kinetic energy indicates higher excitation energy.

When fission takes place, two fission fragments are produced. They were detected by a combination of multiwire proportional counters (MWPCs). By applying momentum and mass conservation rules, masses of both fragments were determined. Figure 3 shows FFMDs of the neptunium isotopes and their evolution with excitation energy, taken from the $^{18}\text{O} + ^{238}\text{U}$ [5] and $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ [6] reactions. When excitation energy is low (15 MeV), the FFMDs show a prominent double-humped structure characteristic of fission of actinide nucleus. Toward higher excitation energies, the structure tends to disappear, due to the smearing of the shells responsible for asymmetric fission, and the system behaves as a classical charged liquid drop. Comparing the FFMDs at excitation energy of 35 MeV or 45 MeV, it is evident the valley of the double-humped structure of FFMD systematically changes with the mass of compound nucleus, i.e., heavier nucleus has deeper valley. This can be explained only by introducing the concept of multichance fission [5, 7].

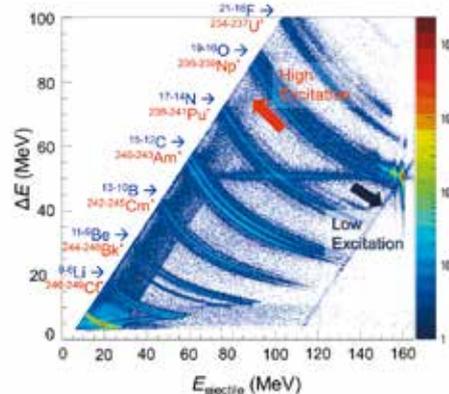


図2 $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ 反応で得られた ΔE - E シリコン検出器による散乱粒子の識別。

Fig. 2 Identification of ejectile nucleus using silicon ΔE - E telescope in the $^{18}\text{O} + ^{237}\text{Np}$ reaction.

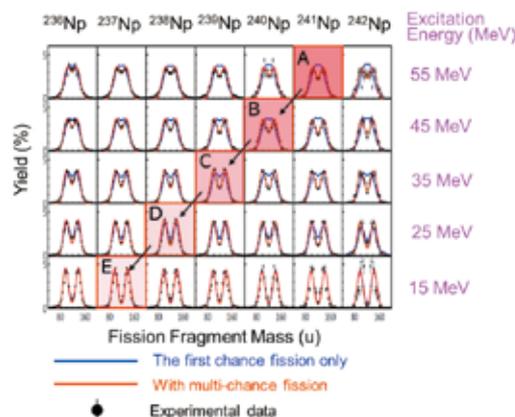


図3 Np 同位体の核分裂片質量数分布。右側の数字は励起エネルギー。

Fig. 3 Fission-fragment mass distributions for neptunium isotopes. Excitation energy of initial compound nucleus is shown in the right-hand side.

マルチチャンス核分裂を説明したのが図4(a)である。高い励起状態にある複合核がそのまま核分裂することを1stチャンス核分裂というが、中性子を放出することもある。中性子が放出されると励起エネルギーが奪われるため、励起状態の下がった原子核ができる。この原子核も十分な励起エネルギーを持っていれば、核分裂と中性子放出が競合する。このように中性子を1つ、2つ、3つ放出した後に核分裂するものを2nd、3rd、4thチャンス核分裂（以下同様）という。図4(b)は、45 MeVの励起エネルギーを持つ²⁴⁰Uの実験データを計算と比較したものである[5]。1stチャンス核分裂の割合は12%だけである。全体の分布は質量非対称であるが、それは主に4th、5th、6thチャンス核分裂によるもの、つまり²³⁷U、²³⁶U、²³⁵Uの核分裂を見たことにほかならない。

図3と図4(b)に示した計算結果は、動力学模型（ランジュバン方程式）による。図3の赤線は、マルチチャンス核分裂の効果を取り入れた結果であり、実験データを良く再現している。35-45 MeVのスペクトルに戻ると、重い同位体ほど谷が深い。これは、この方向に向かって中性子の結合エネルギーが低くなり、中性子を出しやすくなるためである[7]。つまり、殻構造が回復した後の核分裂が多く寄与したためである。一方、青線はこれを無視して、1stチャンス核分裂だけが起こるとしたもののだが、実験データを説明できていない。

Figure 4 (a) explains the process of multichance fission. Direct fission from the initial compound nucleus is called 1st chance fission, but there is a probability that the nucleus emits a neutron. In this case, a nucleus with a lower excited state is populated. When the excitation energy remains still enough, competition between fission and neutron evaporation happens. Fission after emitting one, two, and three neutrons are called 2nd, 3rd, and 4th chance fissions; the same applies hereafter. Figure 4 (b) shows the FFMD of ²⁴⁰U at the initial excitation energy of 45 MeV in comparison to a model calculation [5]. It is found that 1st chance fission has a yield of only 12%. The asymmetric shape of FFMD predominantly comes from higher-order fission chances, 4th (²³⁷U), 5th (²³⁶U) and 6th (²³⁵U).

The calculation shown in Fig. 3 and Fig. 4 (b) is from the dynamical model using Lagnevin equations [7]. The red curves in Fig.3 are the results which takes into account multichance fission. Coming back to the isotope dependence of the FFMDs at 35-45 MeV, the calculation nicely reproduced the measured data, i.e., heavier isotope has deeper valley. As the heavier isotope have smaller neutron binding energy, the nucleus has larger probability to emit neutrons, thus

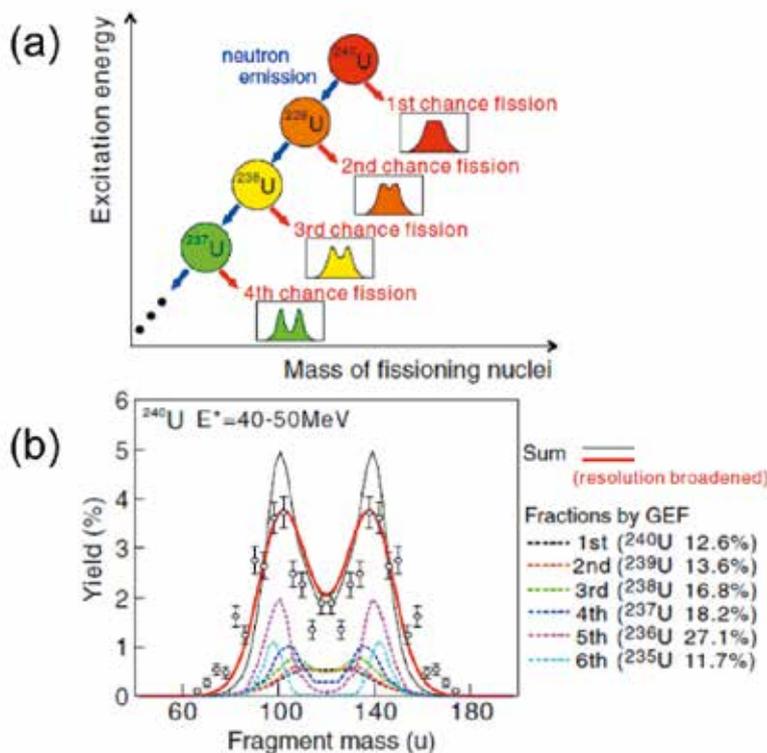


図4 (a) マルチチャンス核分裂の概念。中性子を放出すると原子核の励起エネルギーが下がるため殻構造が回復し、非対称性分裂が顕著になる。

(b) 励起エネルギー平均 45 MeV からの²⁴⁰Uの核分裂片質量数分布で、実験データと計算を比べたもの。計算をチャンス核分裂の各成分に分解してある。

Fig. 4 (a) Concept of multichance fission. Due to neutron evaporation, fission-fragment mass distribution tends to show mass-asymmetric shape due to the revival of the shells.

(b) Fission-fragment mass distribution of ²⁴⁰U from initial excitation energy of 45 MeV. The calculated results are decomposed into yields for different fission chances.

マルチチャンス核分裂の存在は、核分裂断面積の中性子エネルギー依存性に現れるステップ状の構造から自明であるが、はっきり構造が見えるのは高々3rdチャンス核分裂までで、それより高いエネルギーでの実験的な検証はない。本結論の明確さを、図3で示す。Aとして示した²⁴¹Np (55 MeV)の核分裂に着目する。これが中性子を出すと、Bの²⁴⁰Np (45 MeV)が生成される。同様に、中性子放出によってC、D、Eの原子核が作られる。計算値は、²⁴¹Npの核分裂に関与するすべての核種と励起状態からのデータを再現している。この検証は、核種と励起エネルギーにおけるマトリックスのデータを手に入れることで可能となった。従来の実験のように、特定の核種や励起エネルギーのデータを取得するだけでは明確な結論に到達できない。本研究は、高次のチャンス核分裂まで取り入れる必要性を初めて明確に指摘したものであり、高エネルギー核分裂を解釈し、核分裂理論を構築する上で重要な成果を与えた。

本実験データから、核分裂障壁の高さも決定できる。複合核の核分裂確率を励起エネルギーに対してプロットする。図1に示すように、核分裂障壁より低いエネルギーだと核分裂確率はほぼゼロであり、障壁を超えて急に立ち上がる。このしきい値が核分裂障壁に相当する。得られた値は文献値と誤差内で矛盾なく一致した [8]。これまで実験的に得られている核分裂障壁の高さは、Th以上の重い元素で52核種だけであり、最も重い元素はCf (Z=98)にとどまる。本実験を適用すれば¹⁸Oビームを用いただけでもMd (Z=101)まで拡張でき、新たに48核種のデータを取れると見込んでいる。

これまで核分裂片の質量数分布と核分裂障壁の高さについて議論した。さらに我々のセットアップでは、核分裂と多核子移行反応に関し、以下の観測ができる仕組みとなっており、実験と解析を進めている。

- (1) 図1に示すように、核分裂に伴って放出される中性子の数と中性子エネルギースペクトルが測定できる。核分裂の途中に出てくる中性子は核分裂の時間スケールを与える。個々の核分裂片から放出される中性子の数は、分裂直後の核分裂片の変形度を与える。
- (2) 複合核の回転軸に対する核分裂片の角度分布が得られている。ここから、多核子移行反応が与える角運動量を抽出できる。移行する核子の数と角運動量の相関も見え始めており、反応を理解しつつある。

fission fragments are generated from lower excited states in average. On the contrary, the calculation which does not include multichance fission fails to reproduce the data.

The 2nd and 3rd fission chances are well known phenomena as evidenced in the onset of stepwise structure of fission cross section as a function of neutron energy. However, evaluation at higher excitation energy and the role of higher fission chances have been scarcely investigated. The validity of our conclusion is evidenced in Fig. 3 by looking at the fission chain starting from, for example, the initial compound nucleus ²⁴¹Np (55 MeV) marked as A. By neutron emission, the nuclei ²⁴⁰Np (B), ²³⁹Np (C), ²³⁸Np (D), and ²³⁷Np (E) are produced depending on the number of emitted neutrons. FFMDs from every fission chance are well demonstrated in the calculation. Our results are the first to show the importance of higher order fission chances at high energies, important to develop an appropriate fission theory.

We determined the fission barrier height from the present measurement. For this we plot the fission probability as a function of excitation energy of the compound nucleus. In the lower-energy region below the fission barrier, prompt fission does not happen, see Fig. 1. Overcoming the fission barrier, fission probability increases rapidly. The fission barrier determined in our experiment agree with the literature value [8], warranting the validity of our method. We note that available fission-barrier data above thorium isotopes are 52 with the highest element data of californium (Z=98). Using our setup, we expect to derive 48 new barrier data additionally in the ¹⁸O induced reaction by reaching elements up to mendelevium (Z=101).

Our experimental setup offers other fission observables, as well as the mechanism of multinucleon transfer reaction as follows.

- (1) We are measuring prompt neutrons accompanied by fission, see Fig.1. Neutrons emitted during fission provide information on the fission time scale, whereas those emitted from individual fragment tell how much fission fragment is deformed in shape at the time of nuclear rupture.
- (2) We can draw fission-fragment angular distribution with respect to the rotational axis of the compound nucleus, defined by recording the reaction plane. This has information on the angular momentum of the system, and we are finding a correlation between the number of exchanged nucleons and angular momentum.

3. 成果の意義と波及効果

研究の意義と波及効果はすでに述べた。ここでは本実験データが他の核分裂現象の理解につながった例を示す。最初に紹介したFmの核分裂に関するもので、重い同位体 ^{258}Fm で質量数分布が急激に変化する現象である。詳細は省略するが、本実験データを用いることで、前述のランジュバン方程式に含まれるパラメータを絞り込むことができ、得られた計算結果は質量数分布の急激な変化を初めて定量的に説明した [9]。これによると ^{258}Fm など重い原子核では質量対称核分裂につながる鞍点のエネルギーが低下し、従来の非対称分裂の鞍点と競合すること、また、特定の変形軸に対する原子核の集団振動運動がこの急激な変化の原因となっていることがわかった。内容は、日本物理学会誌の解説にも記した [10]。

4. 展望

これまで ^{18}O ビームを用いてデータを取得してきた。より重い入射イオンを用いれば、さらに中性子数の多い原子核の核分裂を調べることができる。

これまでの議論からわかるように、複合核が核分裂をせず、中性子とガンマ線を出すことで重元素同位体が生成される場合がある。これを蒸発残留核と呼ぶ。多核子移行反応による中性子過剰な超重原子核を蒸発残留核として生成することができ、安定の島に向かう新たな領域の開拓が可能となる。タンデム加速器施設には、反応で生成された蒸発残留核をインフライトで質量分離し、約10 m下流の焦点に輸送することのできる反跳生成核分離装置があり、実験を開始した。

重イオン核融合反応に比べ、多核子移行反応は複雑である。蒸発残留核の生成断面積を予測するのに不可欠な複合核の励起エネルギー分布やスピン分布を正しく記述できるモデルが必要となる。このためには多面的に実験データを蓄積していく必要があり、これを進めている。

参考文献 References

- [1] See, for example D.C. Hoffman and M.R. Lane, *Radiochimic Acta*, 70/71, 135 (1995).
- [2] A.N. Andreyev et al., *Phys. Rev. Lett.* 105, 252502 (2010).
- [3] A.N. Andreyev, K. Nishio, K.-H. Schmidt, *Rep. Prog. Phys.* 81, 016301 (2018).
- [4] R. L guillon et al., *Phys. Lett. B* 761, 125 (2016).
- [5] K. Hirose et al., *Phys. Rev. Lett.* 119, 222501 (2017).
- [6] M.J. Vermeulen et al., *Phys. Rev. C* 102, 054610 (2020).
- [7] S. Tanaka et al., *Phys. Rev. C* 100, 064605 (2019).
- [8] K.R. Kean et al., *Phys. Rev. C* 100, 014611 (2019).
- [9] Y. Miyamoto et al., *Phys. Rev. C* 99, 051601(R) (2019).
- [10] 有友嘉浩、宮本裕也、西尾勝久、*日本物理学会誌* Vol.75, p.631 (2020).

3. Significance and impact of research results

The importance of our results in fission research and nuclear data evaluation is apparent in the above discussions. Here, we shown another example of how our data contribute to the understanding of fission process. This is related to the sudden change of the FFMDs in the Fm isotopes explained in the introduction. Our FFMD data for many nuclides are used to fix a parameter entering in the Langevin model. The updated model nicely explained the dramatic change of the FFMD from mass-asymmetric fission to sharp symmetric fission at ^{258}Fm [9]. It is found that heavier nuclei such as ^{258}Fm open a new saddle point leading to the symmetric fission that can compete with traditional mass asymmetric fission. Furthermore, collective motion over the specific degree of freedom in nuclear shape is essential to realize such a sharp transition. Explanation of the mechanism is also described in [10].

4. Perspectives

We have taken fission data using ^{18}O -induced multinucleon transfer reactions. Heavier projectile nucleus has larger chance to reach more neutron-rich nucleus.

It is apparent that excited nucleus which survives against fission results in evaporation residue after emitting neutrons and γ -rays. In the multinucleon transfer reaction, we have a chance to produce neutron-rich heavy and superheavy nuclei in the unexplored region of the chart of nuclides on the way to the island of stability. At the JAEA tandem facility, we have an apparatus called Recoil Mass Separator (RMS), which can make an in-flight mass separation of produced nuclei and guide them at the focal point located about 10 m downstream of the target. We have started the experiment to produce neutron-rich evaporation residues using the RMS.

In contrast to heavy-ion fusion reactions, the multinucleon transfer reaction is a complicated reaction. In order to accurately predict the cross section to produce such a neutron-rich heavy nucleus with a proper model, it is important to promote experiments to derive the excitation energy distribution and spin distributions of the initial excited compound nucleus, and this is our next step.