

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04843

研究課題名(和文)不安定核ビームと直接反応を用いた核分裂機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of fission mechanism using RI beam and direct reaction

研究代表者

笹野 匡紀 (Sasano, Masaki)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員

研究者番号：10515802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,790,000円

研究成果の概要(和文)：理研RIBFとSAMURAIスペクトロメーターを用いて、核分裂の完全情報を測定するための(p,2p)反応セットアップを開発した。本セットアップは、今だ不十分な核分裂現象の理解を助けるため、核分裂前のエネルギー、核分裂後の生成物を全て同時に測定するためのセットアップである。特に核分裂障壁エネルギー付近で分解能1MeV程度でエネルギーを決定することで、殻構造効果が核分裂に与える影響を詳細に調べることができる。また、RIビームを用いることで、従来調べられてこなかった自然界に存在しない不安定核を系統的に調べることができる。RIBFでの実験提案が採択済みである。原子力やr過程元素合成などの理解に役立てる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核分裂は1938年の発見以来、長らく原子力エネルギーの元として使われてきたが、その詳細な機構は、今だ記述することが難しい。この一つの原因は、核分裂に関する完全なデータが測定されていなかったことにある。また、近年核分裂は、重元素の起源であるr過程において、重要な役割を果たすと考えられており、その理解がますます重要になっている。このような社会的、学術的な要請を満たすためには、核分裂現象を系統的に、かつ、情報の完備性を担保しつつ、測定する必要がある。本研究ではそのためのものである。

研究成果の概要(英文)：We have developed an experimental setup to measure a complete set of the information on nuclear fission via the (p,2p) reaction by using RIKEN RIBF and the SAMURAI spectrometer. In this setup, one can measure the excitation energy of pre-fission nucleus and the fission products simultaneously. In particular, by measuring the nuclear fission barrier energy in the order of 1 MeV resolution, one can investigate the nuclear shell structure effect on the fission. In addition, by using RI beams, systematic studies of fission in unstable nuclei become possible. The first experiment in RIBF is already approved and the preparation is in progress. Obtained information will be used for the nuclear power industry as well as the understanding of the r-process nucleo-synthesis.

研究分野：原子核物理学

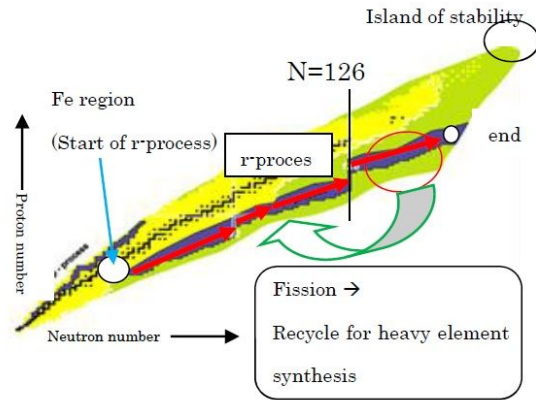
キーワード：核分裂

1. 研究開始当初の背景

(1) 核分裂は 1938 年のオットーとマイトナーによる発見以来、原子力や核兵器などへの応用が幅広くなされてきたが、その一方、最も記述の難しい現象の一つであり、今だ十分な予言力を持った理論模型は存在しない。実験学的には、重い原子核を標的として準備し、中性子などのビームを当てて、核分裂を起こさせ、そこから出てくる原子核片の測定を行うことがもっぱらなされてきた。しかしながら、この方法では核分裂生成物がどの元素やどの同位体だったかを同定することのために、化学的な分析が必要になる。このために核分裂で何ができたかを系統的に知ることは難しかった。また、核分裂前のエネルギーは中性子捕獲によるエネルギー決定されるため、核分裂障壁前後の振る舞いのみを調べることは難しい。[VAN]

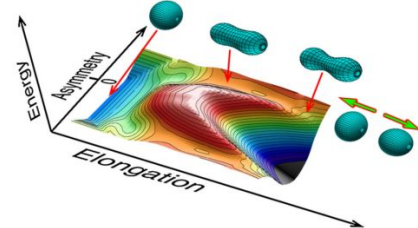
(2) 2001 年ドイツ GSI 研究所の K. H. Schmidt らによって、重い原子核を RI ビームとして供給し、それを鉛標的に当て、クーロン励起により核分裂を起こさせるという手法が用いられた。この手法 (逆運動学) で、核分裂生成物の一つ一つの核種を同定できるようになった [SCH01]。加えて、RI ビームを用いることで、核図表の安定線から離れた領域 (不安定核領域) での核分裂の研究が可能になった。一方で、この手法では核分裂前の原子核の励起エネルギーは決定することができない。このため、核分裂片の分布の形が、親核の性質によるものなのか、励起エネルギーの高低によるものなのかは区別できない。特に励起エネルギーが高くなると、殻構造の効果がなまされて消えてしまう (ウォッシュアウト効果)。このため、核分裂片の分布がどういった機構によるものかは、実験的に調べることが出来ずにいた。また励起エネルギーの情報がないため、折角不安定核領域を調べても、核分裂障壁の系統的变化を議論することができないでいた。

(3) 近年、重元素合成過程である r 過程において、中性子フラックスが大きい状況では、核分裂が r 過程中の元素中でおこり、その生成物が再度 r 過程に利用されるシナリオが検討されている [LEM21] (右図)。また、r 過程において原子核が重くなると、最終的に核分裂障壁がゼロになり、核分裂が即座におこり、それ以上重い原子核が r 過程において生成できない状況になる (r 過程の終点)。また、未知の領域として着目されている安定の島への存在も核分裂障壁の高低に依存する。これらの諸現象を予言するためには、核分裂障壁のエネルギーと核分裂の双方に関する実験データを核図表の広い領域にわたって、測定する必要がある。



2. 研究の目的

(1) 実験学的に核分裂前の励起エネルギーと核分裂後の生成物の測定を同時に行うことにより、右の図に示したような核分裂ポテンシャルエネルギー表面の情報を実験データから取り出すことが目的である。また、この手法を不安定核領域に広く展開することによって、親核の陽子数や中性子数の関数として、核分裂がどう変化するかを系統的に調べることが目的である。



PETER MÖLLER AND JÖRGEN RANDRUP

PHYSICAL REVIEW C 91, 044316 (2015)

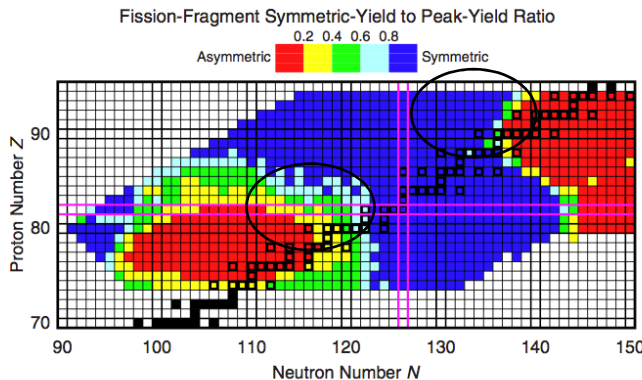
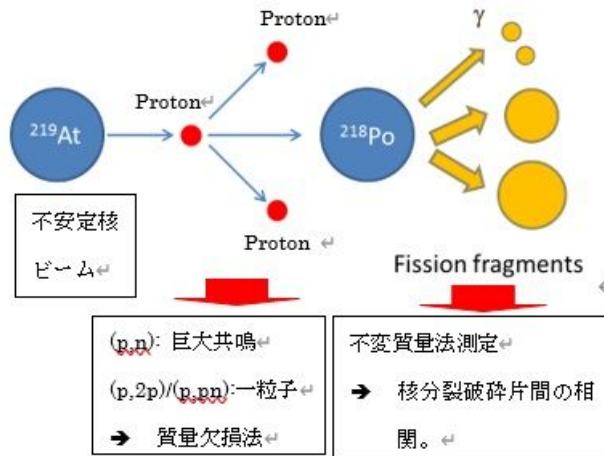


FIG. 3. (Color online) Calculated symmetric-yield to peak-yield ratios for 987 fissioning systems. Black squares (open in colored regions, filled outside) indicate β -stable nuclei. We find a new, contiguous region of asymmetric fission separated from the classical location of asymmetric fission in the actinides by an extended area of symmetric fission.

(2) とくに左の核図表中の楕円で囲まれた領域の測定を系統的に行うことが目的である。核図表の一つ一つの四角の色はその原子核が対称的 (青) に分裂するか、非対称的 (赤) に分裂するかを示している。この二つの分裂のパターンが遷移する領域を調べることによって、核分裂における殻構造の効果を明らかにすることが目的である。

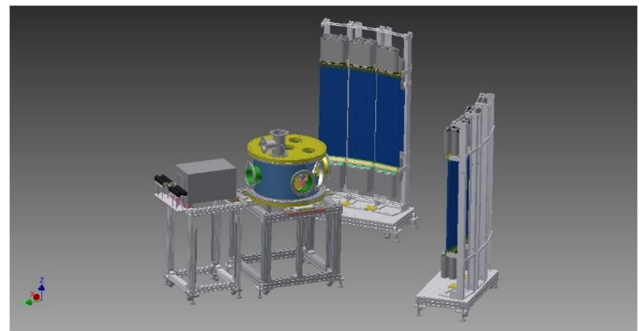
3. 研究の方法



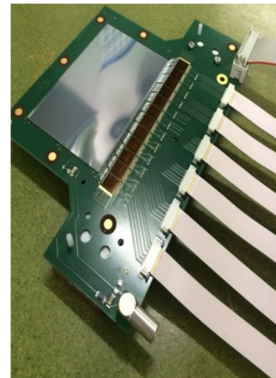
(1)左図で示したように不安定核領域の原子核をビームとして供給する。施設として理研 RIBF を用いる。RI ビームを陽子標的にぶつけ、(p,2p)反応を起こさせる。(p,2p)反応では、RI 内の陽子と標的の陽子が、準弾性散乱を起こし、二つの陽子が高いエネルギー(70~200 MeV)をもって、横方向に出射する。この陽子の運動量を精度よく測定することにより、(p,2p)反応で作られた原子核の励起エネルギーを決定することができる。詳細は省くが、同時に出てきた核分裂片を RIBF の SAMURAI 磁器スペクトロメーターで測定することにより、核分裂が非対称的であったか、対称的であったか、どのような核分裂片が生成されたか、中性子の数はいくつであったか、

などが同時に測定できる。

(2) 本手法におけるキーデバイスは(p,2p)反応測定用のセットアップである。仮に励起エネルギーの分解能 1 MeV を達成するためには、励起このセットアップは出射陽子のエネルギーを 3%の分解能で、その出射角度を 3 mr のオーダーで決定する必要がある。励起エネルギー分解能が悪ければ、先に述べた核分裂障壁エネルギーの決定精度や、核分裂片の分布における殻構造の効果とウォッシュアウト効果の切り分けが難しくなるため、典型的には 1 MeV(sigma)程度の分解能が必要だと見積もっている。

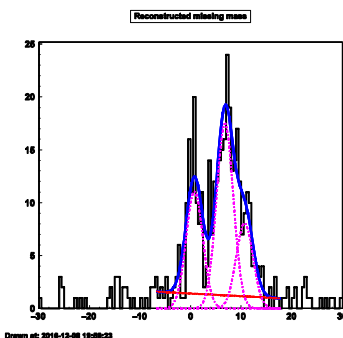


(3) このような条件を満たすために右上図のようなセットアップを開発した。このセットアップでは出射陽子のエネルギーは飛行時間測定法によって得られる。また、出射陽子の角度を精度良く決定するために、右図に示したような Si ストリップ検出器を新たに開発した。



4. 研究成果

(1)本研究では出射陽子の角度精度を向上させるため、右の Si 検出器の薄さを 50 um まで薄くした。このことにより、1 MeV (sigma) を切るエネルギー分解能で測定が可能になるはずである。



左の図は、100 um 厚の Si ストリップ検出器を用いて $^{16}\text{O}(p,2p)$ 反応を測定したものである。デザイン値に比べると若干悪いが 1.5 MeV () の分解能を達成している。この原因は飛行時間測定法に用いたプラスチックシンチレーターの時間分解能にあると考えており、シンチレーターを 2 重化することにより対応しようと考えている。

(2)本研究では先に示した核図表領域における実験提案が RIBF で採択済みである。まだ実施されてはいないため、本実験による成果はない。

引用文献：

[VAN] R. Vandenbosch, "Nuclear Fission", Academic Press.

[SCH01] K.-H. Schmidt et al., "Fission of nuclei far from stability", Nucl. Phys. A 693 (2001)169-189.

[LEM21] J.-F. Lemaître et al., "Fission fragment distributions and their impact on the r-process nucleosynthesis in neutron star mergers", Phys. Rev. C 103 (2021) 025806.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 M. Sasano et al.
2. 発表標題 fission study project in RIKEN RIBF: towards the complete measurement of fission observables
3. 学会等名 Shapes and Symmetries in Nuclei (SSNET'18 Conference) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------