

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K14159

研究課題名（和文）MeV級二次放射線を予測するための核蒸発過程の直接観測

研究課題名（英文）Direct Observation of evaporation process for prediction of MeV-class secondary radiation

研究代表者

小川 達彦（tatsuhiko, ogawa）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹

研究者番号：20632847

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、主に3つの成果を得た。一つは鉛208と酸素16の核子移行反応から生じる複合核の核分裂を計測し、核分裂片のエネルギーや質量などの分析をする実験結果。二つ目には、フランスの研究機関CEAが保有する核分裂理論モデルFIFRELINの改良や、同コードを使った実験結果の分析を行い、核分裂の背景となる物理の理論的解析を行ったこと。そして、核分裂と競合する過程である蒸発に関しては、JAEAが開発する蒸発反応モデルGEMやEBITEMの改良を行い、最新のデータベースや今まで考慮できなかった物理過程を取り込んで計算可能にしたことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、原子核の分裂や蒸発といった原子力施設・放射線施設において基本的な核反応を正確に、かつ多様な側面を予測できるようにしたもので、既にその成果は論文として公開されただけでなく、世界に8000人以上のユーザーを持つ放射線輸送計算コードPHITSに実装され配布されているため、ユーザーによるモデルの使用によって、本研究は社会で活用されている。また、本研究で得られた基礎的知見についても今後開発されるPHITSのモデルに反映する予定であり、今後長期的にも恩恵を期待できる。

研究成果の概要（英文）：The outcome of this research is featured by 3 parts. The first one is the measurement of fission fragments and secondary neutrons from a compound nucleus formed by nucleon-transfer reactions of Pb-208 and O-16. The second one is the improvement and application of fission reaction model FIFRELIN authored by CEA in France to get insight into the background physics of fission and its verification. As the last thing, GEM and EBITEM, the evaporation models developed by JAEA, were improved so as to complement fission and cover whole processes of statistical decay. New models and databases were incorporated to take into account for phenomena which were not considered in the previous versions.

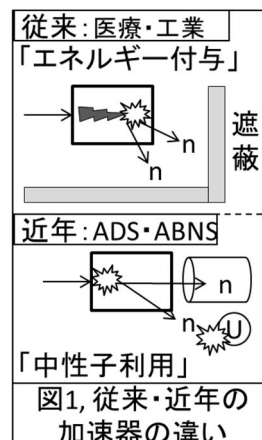
研究分野：核反応物理

キーワード：原子核反応 核分裂 原子核蒸発 モンテカルロ計算

1. 研究開始当初の背景

10MeV以上のエネルギーを持つ放射線は原子核反応を起こすと、非平衡反応と蒸発反応を通して中性子などの二次粒子が発生する。二次粒子は加速器施設で被曝をもたらすため、様々な条件で測定されているが、非平衡反応と蒸発反応は 10^{-18} 秒程度で起こるため、測定時に分離できない。結果として両者の合算が測定されてきた。

殆どの加速器は従来放射線により、物質にエネルギーを付与することを目的としたため、二次放射線の問題は厚く遮蔽することで解決できた。ところが近年研究開発が進む加速器駆動未臨界炉(ADS)や加速器中性子源(ABNS)の



目的は、核反応から二次粒子(特に低エネルギー中性子)を作ることであり、二次粒子の収量は必要なビーム強度を決める重要な因子となる(図1)。したがって、二次粒子の収量は装置の経済性を大きく左右する。

二次粒子収量を予測するための非平衡反応と蒸発反応の理論モデルは多数存在¹⁻³する。このうち非平衡反応は反応の初期に起こり、生じる二次粒子はエネルギーが高いことから、高エネルギー成分を比較により検証できた。一方、蒸発反応はADSやABNSで重要な低エネルギーの二次粒子を放出するが、先に起こる非平衡反応に影響され、蒸発反応だけの検証は不可能と思われてきた(図2)。

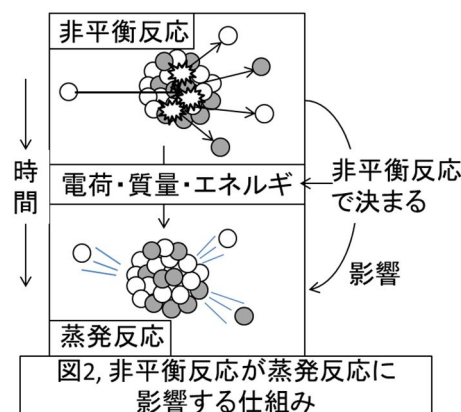


図2, 非平衡反応が蒸発反応に影響する仕組み

2. 研究の目的

本研究では以下の二つ、「蒸発反応起源の二次粒子の収量・エネルギー測定」「蒸発反応のモデル検証・改良」を行い、蒸発反応に由来する二次粒子生成を20%以内の精度で再現することを目的とする。

「蒸発反応起源の二次粒子を分離した測定」を行うには、原子核同士を低速で反応させ、核を平衡的に励起させる。すると、非平衡反応後の励起状態を模擬でき(図3)、蒸発反応だけを起こせる。さらに、低速の反応として重イオン入射による核子移行反応を使えば、入射イオンの残滓が持つ電荷・質量・エネルギーを測定することで、生成核の原子番号、質量数、励起エネルギーが一意に決まる。これと同期して、蒸発反応から放出される粒子のエネルギースペクトルを測定する。

「蒸発反応のモデル検証・改良」にあたっては、世界的に最も使われている蒸発反応モデルGEM¹⁻⁴を使用する。上記の実験で蒸発から生じる二次粒子のエネルギー分布が得られるので、それをGEMの計算結果と直接比較する。

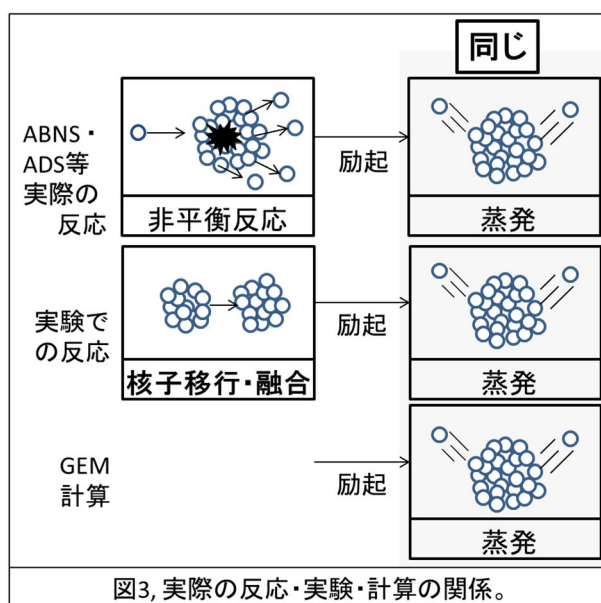


図3, 実際の反応・実験・計算の関係。

3. 研究の方法

実験（体系を図5に示す）

重元素ターゲットに低速の重イオンを照射して核子移行反応・核融合反応を起こし、その複合核から生じる二次粒子のエネルギーと量を原子力機構タンデム加速器 R5 ビームラインで測定する。

入射粒子とターゲットは、ADS で重要な重核（質量数 200 程度）を作る組み合わせと、ABNS で重要な軽核を作る組み合わせを選んだ。また、非平衡反応を避けるために、入射エネルギーは反応閾値に近い 100MeV とする。

測定対象の粒子は、蒸発反応からの発生量が多い 6 種類とした。中性子以外の粒子は水素・ヘリウムとな

り標的材の脆化や放射能汚染を誘発するため ADS や ABNS 等に重要である。

理論計算

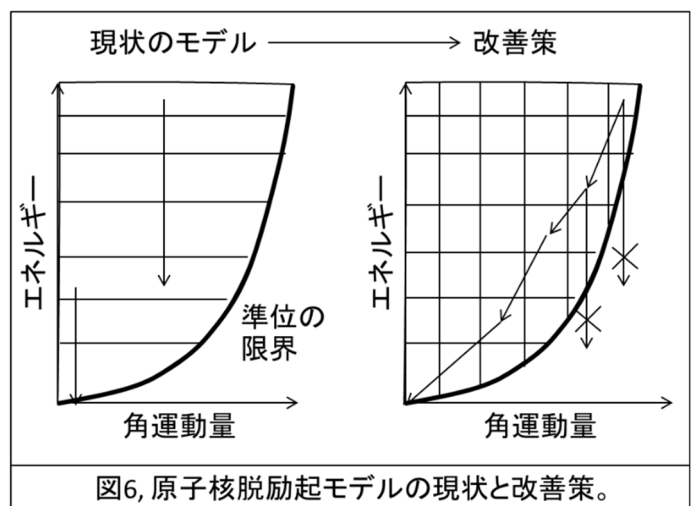
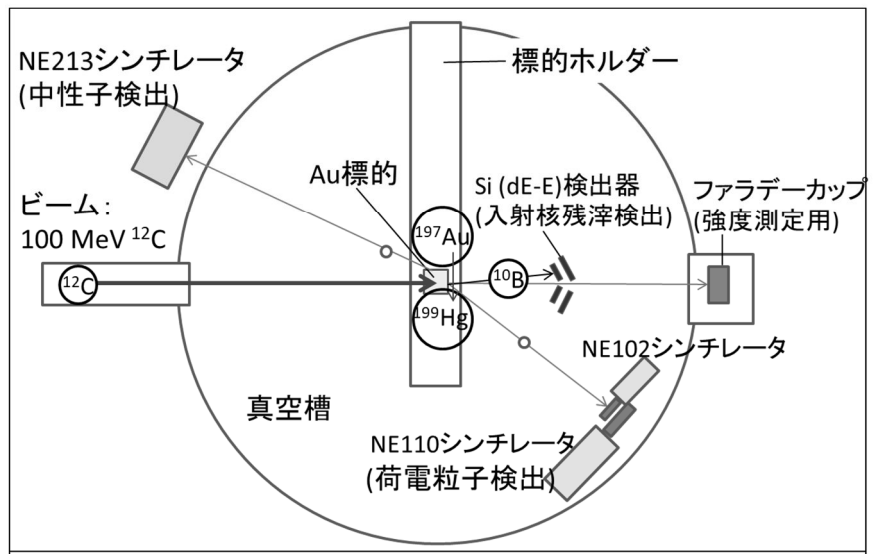
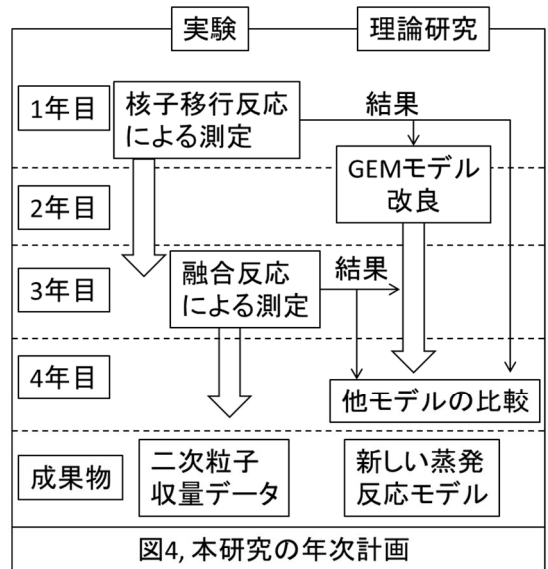
蒸発反応の理論計算モデル GEM を改良し、中性子・陽子・アルファ粒子など二次粒子のエネルギー分布と生成量の絶対値を 20%以内で再現する。そのために特に重要とみられるのは、GEM が原子核の角運動量や変形

度を考慮していない点である。実際には角運動量大きい生成核は角運動量を減らすために、低エネルギーの二次粒子をより多く放出するが、現状の GEM はその効果が考慮できない(図6)。また変形度が大きい核なら、変形に起因する状態を経由することで、少ない二次粒子放出で基底付近まで遷移できる。

4. 研究成果

図7に示したのは核分裂の理論研究に

使ったフランス原子力代替エネルギー庁の核分裂モデル FIFRELIN により U-235(n_{th} , fission)崩壊熱の時間発展を計算した結果である。この計算に当たり、FIFRELIN を燃焼計算コード DCHAIN-PHITS を接続するインタフェースを開発した。FIFRELIN2018 の凡例で示された当初の結果では、緑線の全崩壊熱を過大評価しているが、その後原子核準位密度のデータベースを更新し、分裂時の角運動量分布などが改良された FIFRELIN2021 で計算したところ、図の通り文献値と良く合致



する結果が得られた。

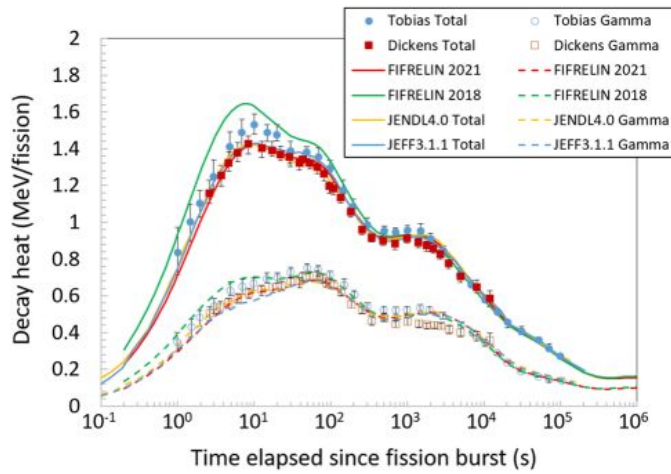


図7、U-235(n_{th} , fission)反応後の崩壊熱計算値と文献値(Tatsuhiko OGAWA et al., Eur. Phys. J. A, (2022) 58:153)。

また、この研究に際して FIFRELIN を汎用放射線輸送計算コード PHITS と接続するインターフェースも作成し、FIFRELIN から得られる核分裂二次粒子の検出器による検知も図8のようにシミュレートできるようになった。

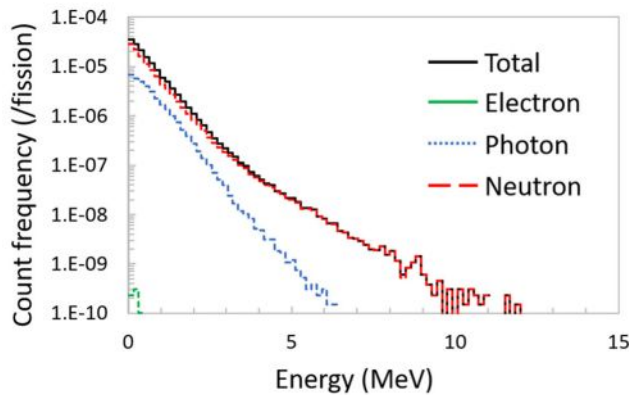


図8、U-235(n_{th} , fission)から生じる粒子を EJ301 検出器で検知した信号強度の分布計算結果 (Tatsuhiko OGAWA et al., Eur. Phys. J. A, (2022) 58:153)。

FIFRELIN は核分裂から生じるガンマ線スペクトルの解析にも適用し、当初の FIFRELIN2018 と FIFRELIN2021 で図9のような結果が得られた。FIFRELIN2018 は9MeV以上の領域ほぼ全体で線収量を過小評価しているが、FIFRELIN2021 は同領域で線収量が多く、実験値に近い値を得られている。

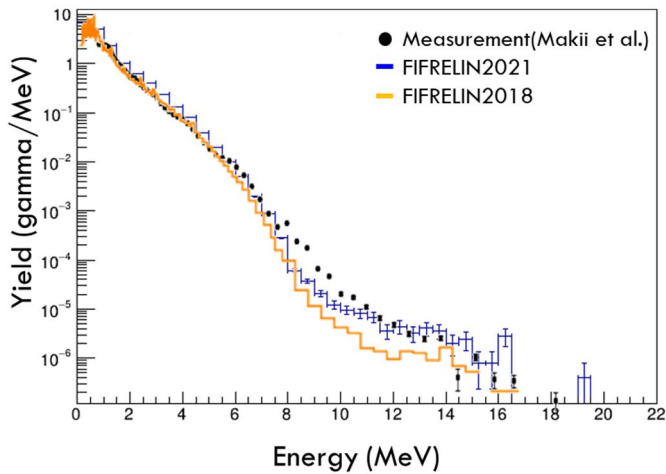


図9、U-235(n_{th} , fission)から生じるガンマ線スペクトルの実験値を FIFRELIN による計算と比較したものの。

統計崩壊については、ガンマ脱励起モデル EBITEM の改良に関する代表的な結果を図10に示す。これはNa-23(n_{th} ,)のガンマ線スペクトルを例に、新旧のEBITEMをReedyらの文献値と比較したものである。

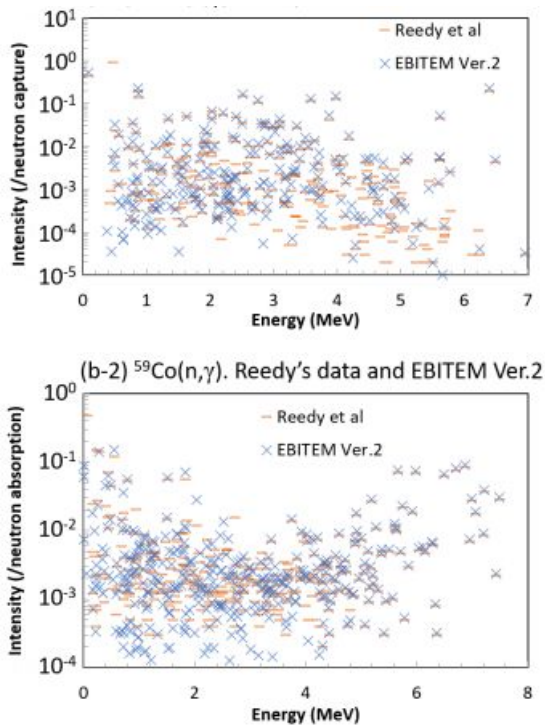


図10、Na-23(n_{th} ,)のガンマ線スペクトルをEBITEMで計算した結果と文献値の比較 (Tatsuhiko OGAWA et al., J. of Nucl. Sci. Tech, submitted)

この比較からわかるように、強度は低いながらも、エネルギーが4MeVを超えるようなピークについて特に、新しいEBITEMの方が良い精度で再現できている。

このように、本研究を通して得られた結果は計算コードに反映され、その開発や精度検証として結実した。本研究で得られた知見は、今後のコード開発にも継続的に反映を続けていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Makii H., Nishio K., Hirose K., Orlandi R., Leguillon R., Ogawa T., Soldner T., Koster U., Pollitt A., Hamsch F.-J., Tsekhanovich I., Aiche M., Czajkowski S., Mathieu L., Petrache C. M., Astier A., Guo S., Ohtsuki T., Sekimoto S., Takamiya K., Frost R. J. W., Kawano T.	4. 巻 100
2. 論文標題 Effects of the nuclear structure of fission fragments on the high-energy prompt fission γ -ray spectrum in U235(nth,f)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.044610	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sato Daiki, Iwamoto Yosuke, Ogawa Tatsuhiko	4. 巻 920
2. 論文標題 Measurement of neutron-production double-differential cross sections of natC, 27Al, natFe, and natPb by 20, 34, 48, 63, and 78 MeV protons in the most-forward direction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 22 ~ 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.12.049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogawa Tatsuhiko, Litaize Olivier, Mancusi Davide, Chebboubi Abdelhazize, Serot Olivier	4. 巻 58
2. 論文標題 Post fission time evolution calculation by FIFRELIN coupled with PHITS and DCHAIN	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-022-00800-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小川達彦, O. Litaize, D. Mancusi, A. Chebboubi, and O. Serot
2. 発表標題 核分裂計算コードFIFRELINの放射線輸送計算コードPHITSとの接続
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ogawa, Tatsuhiko; Litaize, O.; Mancusi, D.; Chebboubi, A.; Serot, O.
2. 発表標題 Development of multi-chance fission module for fission event generator FIFRELIN
3. 学会等名 日本原子力学会2022年秋の大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Litaize, O.; Piau, V.; Chalil, A.; Ogawa, Tatsuhiko; Chebboubi, A.; Gook, A.; Gusing, F.; Kessedjian, G.; Lhuillier, D.; Mancusi, D.; Materna, T.; Oberstedt, A.; Oberstedt, S.; Serot, O.; Thulliez, L.
2. 発表標題 New results in the modeling of fission and radiative neutron capture with FIFRELIN
3. 学会等名 15th International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ogawa, Tatsuhiko; Litaize, O.; Mancusi, D.; Chebboubi, A.; Serot, O.
2. 発表標題 Extension of fission reaction model FIFRELIN for wider reaction conditions and post processing
3. 学会等名 Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2020 (SNA + MC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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			
フランス	CEA			