

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19560846

研究課題名(和文) 中性子、陽子および光子入射中高エネルギー核分裂断面積の系統性の研究

研究課題名(英文) Study of Systematic Behavior for Neutron-, Proton- and Photon-induced Fission Cross Sections at Intermediate Energy Region

研究代表者

深堀 智生 (FUKAHORI TOKIO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究主席

研究者番号：50354783

研究成果の概要(和文)：

中高エネルギー領域における中性子、陽子および光子入射核分裂割合を統一的に記述する系統式を求めた。すなわち、核分裂断面積と全反応断面積の比である核分裂断面積比を最大励起エネルギーの関数で表すことにより、各入射粒子と核分裂断面積比を関連付けるパラメータの間に単純な Z^2/A への依存性を見出した。実験データとの比較等により、この系統式の予測精度は数十 MeV から 3 GeV のエネルギー範囲で 10%程度である。

研究成果の概要(英文)：

The systematics of fission probability with unified description of neutron-, proton- and photon-induced reactions has been obtained by using its simple behavior as assumed a functional form which is designed to describe the maximum excitation energy and Z^2/A dependences of fission probability. The present results can describe the fission cross sections in the intermediate energy region within about 10% accuracy in the energy region from several tens of MeV to 3 GeV.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：核データ、核分裂、断面積、中高エネルギー、中性子、陽子、光子、系統式

1. 研究開始当初の背景

(1)必要性

種々の加速器施設設計、宇宙船の電子装置損傷をはじめとする宇宙工学応用、陽子線による医療照射をはじめとする医学利用等のためには、高エネルギー核データが不可欠である。特に、加速器駆動未臨界炉システム(ADS)を用いた核燃料廃棄物核変換処理の研究・開発には、中高エネルギー領域におけ

る核分裂断面積は、核変換率、初期炉心の未臨界度、ビーム入射時の反応度推定のために重要な物理量である。ADSの炉内中性子スペクトルは、高速炉のそれと似ているが、約3%の高エネルギー成分が存在する。これは未臨界量(反応度)推定誤差に影響する。しかし、多くの核物理モデルでの中高エネルギー核分裂断面積予測にはまだ問題が多く、精度も十分検討されていない。また、中高エネルギ

一領域においては、アクチノイド核種以外の中重核でも核分裂を起こすことが知られている。

(2) 実験データの状況

近年、ADS への応用を視野に入れて、米国のロスアラモス国立研究所 (LANL) やロシアのペテルスブルグ核物理研究所 (PNPI) において、中高エネルギー中性子による核分裂断面積の測定が行われている。中高エネルギーにおける核分裂断面積測定には、陽子入射核分裂反応については、質量数領域の広い範囲にわたる多くの実験データが存在する。実験データ間のばらつきの大きな核種が存在するが、大部分の核種については、概して同様の傾向を持つと言える。中性子入射核分裂反応の実験データは陽子に比べて非常に少ない。ここでは、上述した比較的最近測定された実験データを用いることができる。U-235, 238 に対する光子入射核分裂断面積は保障措置との関連で比較的豊富であるが、他の測定は殆ど見当たらない。これは、光吸収断面積が、巨大共鳴領域においても核子入射の場合と比べて 1-2 桁小さいことにより、光子入射核分裂断面積が小さいことに起因すると思われる。また、中高エネルギー領域では、アクチノイド核種以外でも、鉛やビスマス等に核分裂断面積の実験データが存在する。

(3) 系統性に関する予備検討

上記の実験データを俯瞰すると、中高エネルギー領域においては、「核分裂断面積比」(全反応断面積に対する核分裂の割合)の励起エネルギー依存性の比較から次のような傾向を読み取ることができる。①Ag-U の広い質量領域でアクチノイドであるかないかを問わずに核分裂断面積比の励起エネルギー依存性が似ている。②励起エネルギーが大きくなると核分裂断面積比が一定になる傾向があり、質量数の大きなものほど一定領域の値が大きい。③しきい値のようなものが見られ、これは質量数の大きいものほど低い傾向がある。また、核分裂断面積比と最初の複合核の励起エネルギーという標識を設定すると、同様の傾向が中性子や光子入射核分裂反応に関しても見ることができる。したがって、中高エネルギー領域における核分裂断面積比は少なくとも中性子、陽子及び光子入射に関して統一的に記述できる可能性がある。

(4) 波及効果

本研究により得られた経験式により、実験データの無い核種、特にマイナーアクチノイド核種の核分裂断面積を予測できる。これにより、核分裂断面積の直接計算のみならず、これを実験データのように利用することで

核物理理論による核分裂モデルの構築に貢献できる。また、中高エネルギー粒子輸送計算コードに組み込むことにより、より広範囲で精度の高いシミュレーションが可能となる。さらに、ADS を用いた核燃料廃棄物核変換処理の研究・開発における、中高エネルギー領域における核分裂断面積の精度を向上させることで、核変換率、初期炉心の未臨界度およびビーム入射時の反応度推定の精度を高めることができる。経済的かつ効率的な核燃料廃棄物核変換処理に対する寄与は大きい。

2. 研究の目的

中高エネルギー領域における核分裂断面積は、加速器駆動型未臨界炉システム (ADS) を用いた核燃料廃棄物核変換処理の研究・開発に重要な物理量である。しかし、多くの核物理モデルでの予測精度にはまだ問題が多い。本研究では、中高エネルギー領域における中性子、陽子および光子入射核分裂断面積の全反応断面積に対する比を最初の複合核の励起エネルギーの関数として表す経験式を提案する。この経験式により、20 MeV から数 GeV 程度までの中高エネルギー領域において、中性子、陽子および光子入射核分裂断面積を統一的に 10-20% 程度の予測精度で記述することを目的とする。

3. 研究の方法

1. (3) 系統性に関する予備検討を進展させ、中高エネルギー領域における中性子、陽子及び光子入射核分裂断面積の全反応断面積に対する比を最初の複合核の励起エネルギーの関数として表す系統式を提案する。このため、大まかに次の手順で本研究を進める。

- ① 実験データの調査、データベース作成
- ② 系統式の開発
- ③ 系統式に基づくプログラム開発
- ④ 実験データに基づく③のプログラムの比較・検証
- ⑤ シミュレーションコードへの組み込みによる効果の検討を含む他の方法との比較等による結果の検証
- ⑥ 成果発表

4. 研究成果

(1) 系統式の導出

中高エネルギー領域においては、核分裂断面積比の励起エネルギー依存性の比較から次のような傾向を読み取ることができる。① Ag-U の広い質量領域でアクチノイドであるかないかを問わずに核分裂断面積比の励起エネルギー依存性が似ている。② 励起エネルギーが大きくなると核分裂断面積比が一定になる傾向があり、質量数の大きなものほど一定領域の値が大きい。③ しきい値のようなものが見られ、これは質量数の大きいものほ

ど低い傾向がある。また、核分裂断面積比と最初の複合核の励起エネルギーという標識を設定すると、同様の傾向が中性子や光子入射核分裂反応に関しても見ることができる。したがって、中高エネルギー領域における核分裂断面積比は少なくとも中性子、陽子及び光子入射に関して統一的に記述できるとかいていし、次の関数形を定義する。

$$P_{fis} = P_1(1+C^{-1}) \left[\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{P_2 - E_x^{\max}}{P_3}\right)} - (1+C)^{-1} \right],$$

$$C = \exp\left(\frac{P_2 - P_4}{P_3}\right),$$

ここで、 P_{fis} は核分裂断面積比、 E_x^{\max} は最大（最初の複合核の）励起エネルギー、 P_i ($i=1-4$)はパラメータである。

P_1 のフィッティング結果は以下のとおりである。

$$P_1 = 0.26 + 0.14x - 0.66 / [1 + \exp\{(x-35)/0.51\}]$$

$$x = Z^2/A$$

ここで、 Z 、 A はそれぞれ複合核の原子番号および質量数である。 P_1 の振舞いを Z^2/A の関数で表したものを図1に示す。

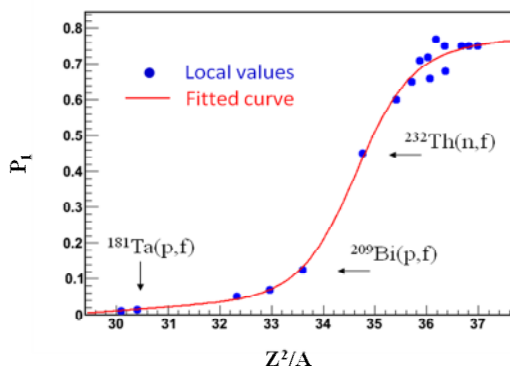


図1 P_1 の振舞い

P_1 は、核分裂断面積比の飽和値を表すが、図1からもわかるように、より重い核が核分裂を起こしやすい傾向を再現しており、その値は0.7-0.8で、高エネルギー端では原子核反応の70-80%が核分裂反応になることを表している。

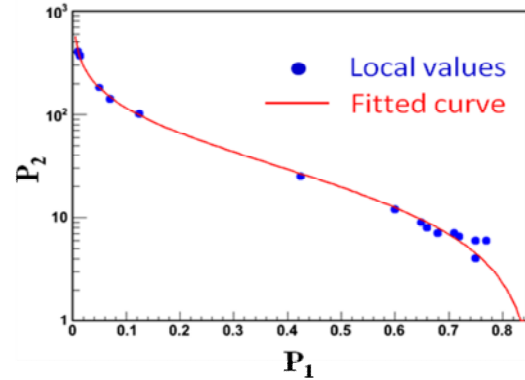


図2 P_1 に対する P_2 の振舞い

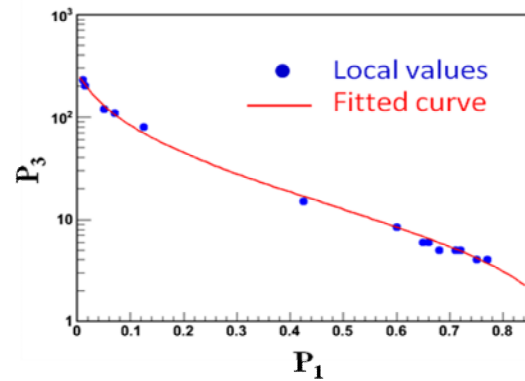


図3 P_1 に対する P_3 の振舞い

P_2 及び P_3 パラメータはそれぞれ核分裂のしきい値及び飽和値への移行の早さを表すが、次式のようなフィッティング結果となり、その傾向を図2,3に示す。

$$P_2 = -62 + 60 / [P_1^{1/2} + 0.027]$$

$$P_3 = -13 + 14 / [P_1 + 0.050]$$

これらからもわかるように、 P_2 及び P_3 パラメータは P_1 パラメータとよい相関を示す。 P_4 パラメータのフィッティング結果は次式で示すことができる。

$$P_4 = \max[-17x + 580, 0.0]$$

(2) 系統式と実験データの比較

中性子入射核分裂反応の実験データはあまり報告されていないが、 $^{235,238}\text{U}$ のようなアクチノイド核種に関しては、最近、ADSの開発に向けたデータの蓄積のため比較的測定されている。また、多くの測定が $^{235}\text{U}(n,f)$ 反応を標準断面積として相対測定で実施されている。したがって、本研究ではあらかじめ $^{235}\text{U}(n,f)$ 反応断面積を我が国の汎用評価済み核データファイル JENDL-3.3 (<20 MeV)、IAEAの標準断面積 (20-90 MeV)、JENDL/HE (>90 MeV)

等から決定し、相対測定の結果から核分裂断面積の絶対値として求めてから、パラメータフィッティング及び比較を行った。図4, 5にそれぞれ、 $^{235,238}\text{U}$ の実験値(丸印等)及び本研究の結果(破線:個別核種のフィッティング結果、実線:全体の系統式の計算結果、以下同じ)の比較を示す。実験値にはばらつきがあり、詳細な構造までは再現できていないが、概ね10%程度の誤差で再現できている。

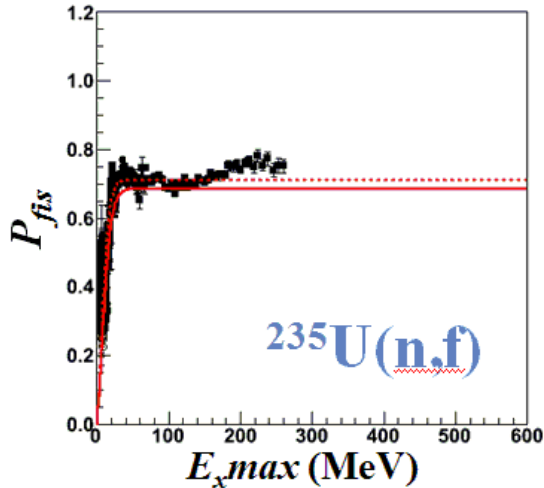


図4 ^{235}U (n,f)の実験値との比較

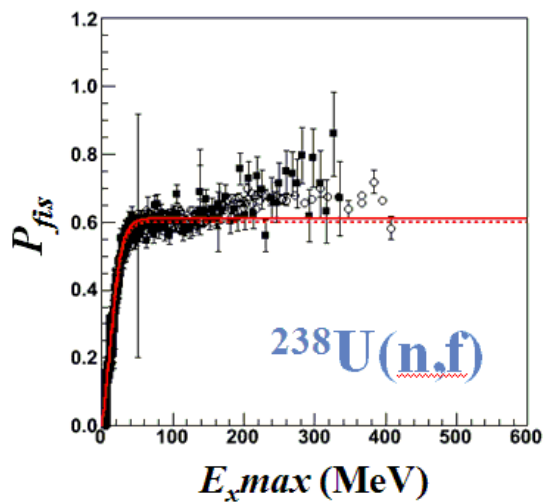


図5 ^{238}U (n,f)の実験値との比較

陽子入射核分裂反応は、比較的広い質量数領域で実験データが存在するが、ここではADSのターゲット及び冷却材候補として有望なPbおよびBiとの比較を行う。これらの核種はアクチノイドではないが、数十MeV以上では核分裂反応が確認されている。図6,7にそれぞれ、 ^{208}Pb 及び ^{209}Bi の実験値と本研究の結果を比較したものを示す。図からもわかるように、これら非アクチノイド核種は、核分裂断面積比は飽和値でそれぞれ0.07、0.12

程度で大きくないが、アクチノイド核種と同じ傾向を示しているのが分かる。本研究結果は、これらの実験値を非常によく再現している。

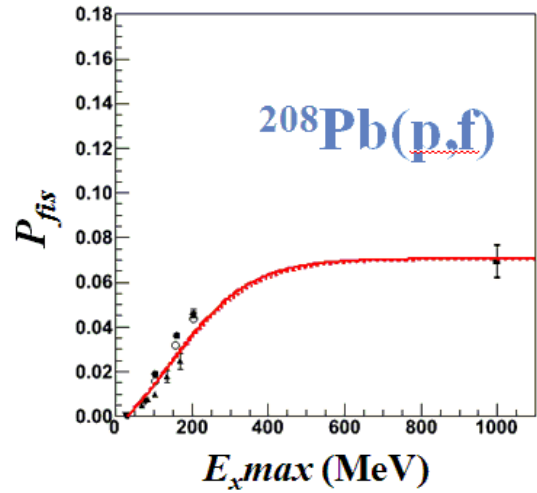


図6 ^{208}Pb (p,f)の実験値との比較

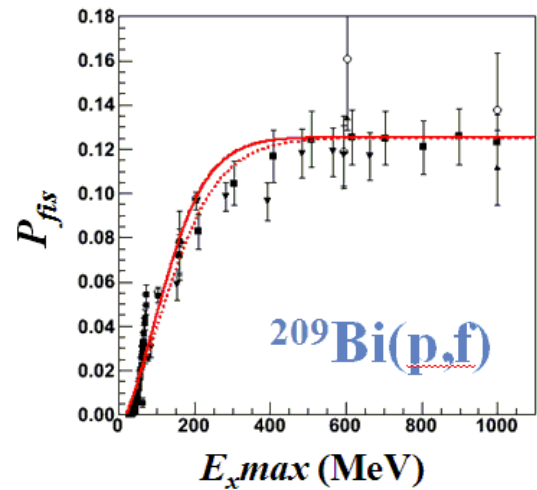


図7 ^{209}Bi (p,f)の実験値との比較

光核分裂断面積の実験データは、そもそも、光吸収断面積が中性子および陽子入射の前反応断面積の1-2桁小さいため、 $^{235,238}\text{U}$ 等のアクチノイド核種を除いてほとんど存在しない。しかし、本研究結果の系統式では、ほぼ実験値を再現することができた。

(3)その他モデル及びシミュレーションコードへの導入効果

マルチモード核分裂の考え方に基づく対称核分裂割合(推定値)との比較を行った(図8)。比較結果を考察することにより、対称核分裂と非対称核分裂との混合がエネルギーとともに解消されるに従って(入射エネルギーが大きくなると対称核分裂の寄与が主たる寄

与になって行くことは実験的により定性的に確認されている)、本研究で得られた系統式に傾向が類似してくることが予測される。より精度の高い系統式を得ることができれば、このような他のモデルとの処理詳細な比較も可能となることが期待される。

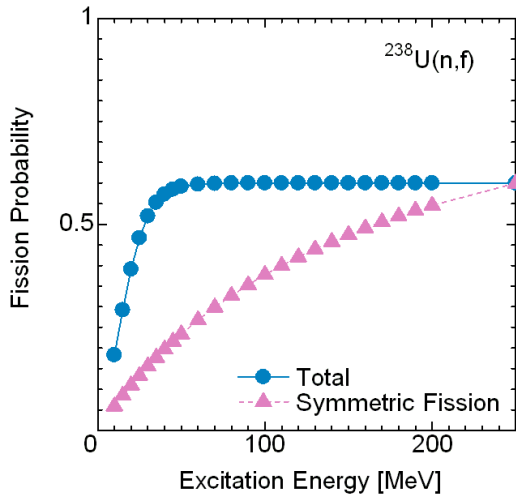


図 8 マルチモード核分裂の考え方に基づく対称核分裂割合(推定値)との比較

また、中高エネルギー粒子輸送計算コードに組み込むことにより、シミュレーション計算で利用を検討した。本研究結果を組み込んだことにより大きく変化が期待できるベンチマーク問題が設定できなかったため、計算は従来の結果とほぼ同様の結果を与えるにとどまったが、より広範囲で精度の高いシミュレーションが可能となった。

核データや積分実験を行っている研究機関が一堂に会する米国断面積評価ワーキンググループ(CSEWG)や核データ国際会議(ND2010)等への参加の結果、本研究で行った系統式及びシミュレーション計算に関して、公開されていないデータに関する適応性等を若干であるが調査できた。すなわち、マイナーアクチノイド核種である ^{237}Np 等に関する新しい実験がCERN等で進んでいることがわかった。これらの実験結果が今後公開されるようになれば、系統式のさらなる精度向上が期待できる。

(4)結論

以上のように、本研究で得られた系統式は、中性子、陽子、光子入射核分裂断面積を統一的に扱うことができ、現状での実験データを10%程度の誤差で再現できた。本研究により得られた経験式により、実験データの無い核種、特にマイナーアクチノイド核種の核分裂断面積を予測できる。これにより、核分裂断面積の直接計算のみならず、これを実験データのように利用することで核物理

理論による核分裂モデルの構築に貢献できる。さらに、ADSを用いた核燃料廃棄物核変換処理の研究・開発における、中高エネルギー領域における核分裂断面積の精度を向上させることで、核変換率、初期炉心の未臨界度およびビーム入射時の反応度推定の精度を高めることができ、経済的かつ効率的な核燃料廃棄物核変換処理に対する寄与が期待できるようになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① T. Fukahori and S. Kunieda, "Unified Description of Fission Probability for the Intermediate-energy Nuclear Data Evaluation," Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol. (ND2010), Apr. 26-30, 2010, Jeju Island, Korea, accepted and to be published as an article of Journal of Korean Physical Society (2011).

[学会発表] (計2件)

- ① 深堀智生、「中高エネルギー領域における中性子、陽子、光子入射核分裂反応断面積の統一的記述(1) 概要及び実験データの現状」、日本原子力学会 2008年春の年会、2008年3月28日、大阪大学
- ② 国枝賢、深堀智生、「中高エネルギー領域における中性子、陽子、光子入射核分裂反応断面積の統一的記述(2) 系統性の調査」、日本原子力学会 2009年秋の大会、2009年9月16日、東北大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

深堀 智生 (FUKAHORI TOKIO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
原子力基礎工学研究部門・研究主席
研究者番号：50354783

(2)研究分担者

国枝 賢 (KUNIEDA SATOSHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・
原子力基礎工学研究部門・研究員
研究者番号：50414553