

平成 22年 3月31日現在

研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間：2007-2008
 課題番号：19540312
 研究課題名（和文） 変形原子核ウラン238と硫黄34の融合反応による超重元素の合成
 研究課題名（英文） Production of superheavy nuclei in the fusion reaction between S34 and deformed nucleus U238
 研究代表者
 西尾 勝久
 日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹
 研究者番号：70343928

研究成果の概要：変形した原子核であるウラン238に硫黄34を融合させることにより、原子番号108の超重元素の新同位体Hs268（ハッシウム268）を合成した。この生成断面積および核分裂特性の測定から、融合反応における標的原子核の変形効果を明らかにし、超重元素の生成断面積の決定に必要な融合確率の決定方法を導いた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学／素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超重元素、融合反応、クーロン障壁、複合核、ウラン238、硫黄34

1. 研究開始当初の背景

ロシア・ドブナのフレロフ研究所は、アクチノイド標的原子核を用いた融合反応により、原子番号118までの元素を合成した。これらの生成断面積は数ピコ・バーンで、元素112～118を問わずほぼ一定の高い値を示した。我々は、アクチノイド原子核が変形しているため、入射イオンが標的核の赤道面に衝突すると融合反応が有利に働き、結果として断面積が大きくなると考え、これを解明するために²³⁸U（ウラン238）を標的とする反応を系統的に調べることにした。

一方、先の我々の研究で²³⁸Uと³⁰Si（シリコン30）をサブバリヤエネルギーで衝突さ

せることにより、原子番号106の超重元素新同位体²⁶⁴Sg（シーボーギウム264）の合成に成功した。これは、ラグビーボール型に変形した²³⁸Uの先端部に入射イオンが衝突する場合はクーロン障壁を低く感じるため、低エネルギーでも融合反応が起こることを示している。同様に、³⁴S（硫黄34）を²³⁸Uにサブバリヤエネルギーで融合させることで新同位体として²⁶⁸Hs（ハッシウム268、原子番号108）が合成できると考えた。

2. 研究の目的

³⁴Sと²³⁸Uを反応させ、融合反応につづく蒸発残留核としてHs同位体を合成し、この生

成断面積を決定することで、ラグビーボール型に変形した原子核の融合反応機構を解明することを目的とする。はじめに、赤道面衝突がおこる高エネルギー型（赤道面衝突）で²⁶⁷Hsを生成し、さらにサブバリアエネルギー反応で新同位体²⁶⁸Hsの合成を行う。これらの生成断面積から融合断面積を決定し、融合断面積と標的原子核の変形との関係を明らかにする。また、²³⁸Uの変形により、クーロン障壁がどの程度広がっているかを知る必要がある。このため、³⁴Sと²³⁸Uの反応で生成される核分裂片の断面積（捕獲断面積）を測定する。さらに核分裂片の質量数分布を調べることで、融合と核分裂を記述する理論モデル計算を構築し、反応における変形効果を考察する。

3. 研究の方法

³⁴S + ²³⁸U 反応において、(1)捕獲断面積および核分裂特性を測定し、続いて(2)蒸発残留核^{267,268}Hsを合成してこれらの生成断面積を決定する。^{267,268}Hsの生成断面積を、融合と蒸発過程（統計モデル）を取り入れた計算と比較することにより、変形と融合確率の関係を調べる。

(1)捕獲断面積および核分裂片質量数分布の測定

捕獲断面積は、系がクーロン障壁を通過する確率を意味し、この励起関数を測定することで赤道面衝突と先端部衝突に相当するクーロン障壁の高さを明らかにする。³⁴Sと²³⁸Uが一体となって生成した²⁷²Hsはほとんど核分裂で崩壊するので、反応で生成される核分裂片を検出することで捕獲断面積が得られる。検出される核分裂片の起源として、複合核の核分裂のほか、融合することなく反応途中で崩壊する準核分裂があり、捕獲断面積はこれら2種類を含む。これら2つの核分裂成分を分離することができれば、理論モデル構築に有用である。この違いは、核分裂片の質量数分布の差に現れると考えた。そこで質量数分布を測定できる装置を開発した。測定は、原子力研究開発機構(JAEA)のタンデム加速器施設で行った。

JAEAタンデム加速器での核分裂片の測定配置を図1に示す。³⁴Sを加速して天然ウラン²³⁸U標的(約100 μg/cm²)に照射する。生成した2つの核分裂片を同時測定し、照射ビーム量と比べることで断面積を決定する。核分裂片は、平行平板型ガス検出器(PPAC:幅200mm×高120mm)で検出する。入射位置(XとY)を記録することで、核分裂片の放出角度を決定し、³⁴Sの運動量がすべて系に持ち込まれたイベントのみを数える。これはクーロン

励起による核分裂を取り除き、真に²⁷²Hsの核分裂のみを解析することにした。

(2)蒸発残留核断面積の測定

原子番号108の超重元素同位体²⁶⁷Hsと²⁶⁸Hsを、それぞれ先端部衝突と赤道面衝突に相当する反応エネルギーで合成する。Hsの生成断面積は極めて小さいため、大電流ビームが得られる加速器施設での遂行が必要となる。本研究は、ドイツ・重イオン研究所(GSI)の線形加速器施設で行った。実験のため、GSIの超重元素合成グループ(S. Hofmann リーダ)と協力した。

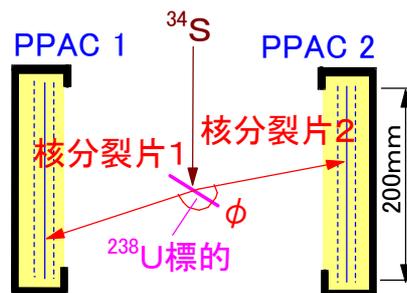


図1 原子力機構タンデム加速器施設における捕獲断面積および核分裂片質量数分布の実験配置。

³⁴Sと²³⁸U標的の融合反応で生成され、反跳によって前方に飛び出た^{267,268}Hsを、図2に示す反跳生成核分離装置(名称:SHIP)でビームから分離して焦点に運び、シリコン(Si)ストリップ検出器(幅80mm×高さ35mm)に打ち込む。^{267,268}Hsはα崩壊すると期待されるので、Si検出器自身でα粒子のエネルギーを決定し、また^{267,268}Hsの打ち込み信号とα崩壊信号の時間差から寿命を決定して核種を識別する。なお、新同位体²⁶⁸Hsが崩壊すると娘核²⁶⁴Sgが生成される。報告者らは、²⁶⁴Sgは120msの自発核分裂核種であることを先に報告しており、核分裂を観測することが期待できる。

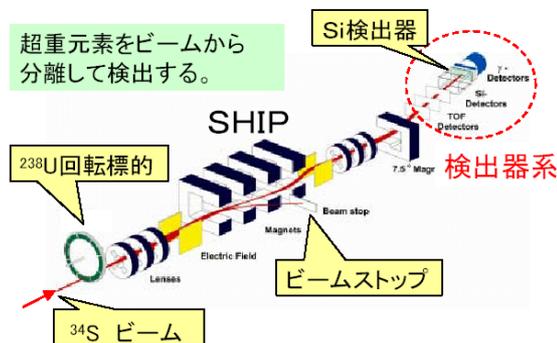


図2 ドイツ重イオン研究所(GSI)における実験配置図。

GSI での超重元素合成実験に先立ち、 ^{34}S のビーム開発を行う。このため、ミュンヘン工科大学と協力し、 ^{34}S 単体の濃縮同位体試料から、 SO_2 ガス試料を作成した。また ^{238}U 回転標的 ($400 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) は、GSI と協力して金属 ^{238}U をスパッタさせて作成した。

(3) 理論計算による考察

得られた実験結果を理論計算と比較することで、変形原子核を用いた反応の融合過程について考察を行う。ここで、クーロン障壁を通過する過程をチャンネル結合法により解析する。また、複合核を生成する過程を散逸揺動モデルで解析し、融合過程をシミュレーションする。また、生成された複合核が、中性子を蒸発して Hs を生成する過程を統計モデル計算で決定し、得られた Hs 同位体の生成断面関と比較する。

4. 研究成果

(1) 捕獲断面積および核分裂特性

実験で得られた $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応の核分裂(捕獲)断面積を図 3 (A) に●で示す。横軸は、重心系の反応エネルギーであるが、上の横軸に複合核の励起エネルギーも示した。図には、変形した ^{238}U の先端部に ^{34}S が衝突する場合のクーロン障壁の位置、および赤道面に衝突する場合の位置を示した。点線で示した一次元モデルは ^{238}U の変形を無視したものであり、低エネルギー側のデータを全く再現しない。

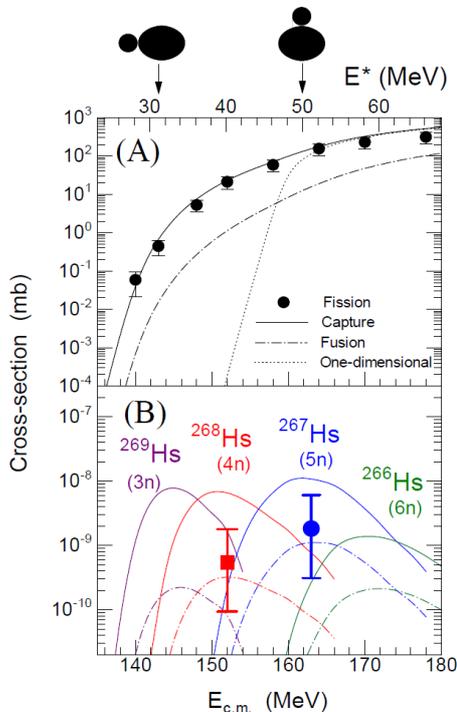


図3 (A) 捕獲および融合断面積と(B) 蒸発残留核断面積の実験および理論計算値。

一方、 ^{238}U の変形を取り入れたチャンネル結合法による計算(実線)は実験値をよく再現しており、変形によるクーロン障壁の広がりを明らかにした。

図4は、 $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ の核分裂片の質量数分布を表す。横軸を核分裂片の質量数、縦軸を断面積で示す。エネルギーの高い領域 ($E_{c.m.} > 160 \text{ MeV}$) では、質量分割が対称である。一方、サブバリアエネルギー領域 ($E_{c.m.} < 160 \text{ MeV}$) では、非対称になることがわかった。このような劇的な変化は、本研究によって初めて発見された。非対称の成分は、複合核を形成しないで分裂するもの、いわゆる準核分裂によるものと結論した。エネルギーが低くなると、準核分裂が増加する。一方、赤道面衝突が生じる高エネルギー側では、複合核に至る確率がより高いことを示唆している。

図4には、散逸揺動モデルによる計算結果を示す(ヒストグラム)。ここで ^{238}U の変形効果を取り入れたことにより、反応初期のコンタクト点および系のポテンシャルエネルギー曲面の変化を記述した。計算は実験データをよく再現しており、反応における ^{238}U の変形効果を明らかにした。

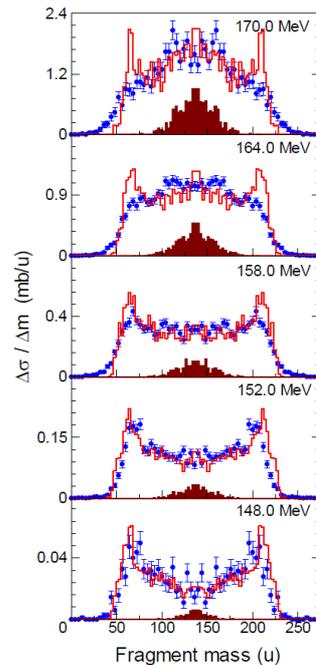


図4 $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ で得られた核分裂片の質量数分布。ヒストグラムは、散逸揺動モデルによる計算値を表す。

(2) 蒸発残留核断面積の測定

GSI で合計 20 日間のビームタイムを取得し、超重元素の Hs の合成実験を遂行した。イオン源の開発により、 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{A}$ の大電流を得た。実験で得られた崩壊イベントを図5に示す。

始めに重心系エネルギー $E_{c.m.} = 163 \text{ MeV}$ で ^{34}S ビームをウラン標的に照射し、図5 (A) の

α 崩壊連鎖を得た。 α 崩壊のエネルギーと寿命は、既知の原子核 ^{267}Hs とよく一致した。また娘核と孫もそれぞれ既知の原子核 ^{263}Sg と ^{259}Rf の α 崩壊特性と一致したことから、5n の蒸発チャンネル ^{267}Hs が合成されたと判断した。続いて、反応エネルギーをサブバリアエネルギーの $E_{c.m.}=152$ MeV に下げて実験を行い、図 5 (B) に示す α 崩壊とこれに続く自発核分裂を観測した。娘核 ^{264}Sg の自発核分裂に対する寿命は、先の結果と一致した。また、反応エネルギーは 163 MeV に比べて 11 MeV 低く、このため 4n の蒸発チャンネルが支配的となる。このことから 9.48 MeV の α 崩壊核種は、新同位体 ^{268}Hs であると決定した。

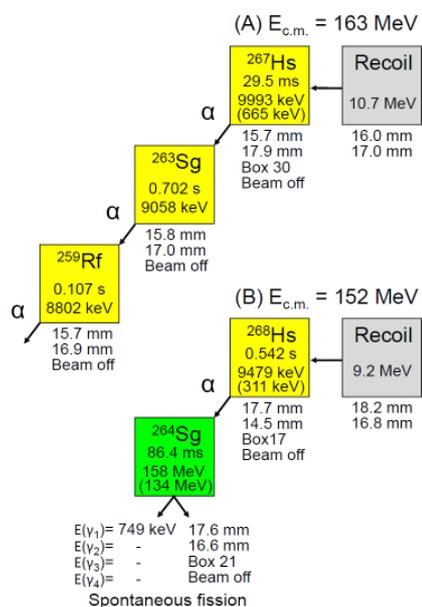


図 5 $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ で生成された Hs 同位体の α 崩壊事象。

実験で得られた ^{267}Hs と ^{268}Hs の生成断面積は、それぞれ 1.8 pb (ピコ・バーン) と 0.54 pb であった。この値を図 3 (B) にプロットした (それぞれ●と■)。

(3) 理論計算による考察

融合反応における標的原子核の変形効果を明らかにするため、 ^{238}U の変形を取り入れた散逸揺動モデルによって複合核が生成される断面積を決定した。図 4 に示した核分裂片の質量数分布は、このモデルで良く再現されることを述べたが、核分裂片のうち複合核に到達してから核分裂するもの、いわゆる融合-核分裂イベントを計算の中で分別することができる。この分布を示したのが図 4 の塗りつぶしたヒストグラムであり、この面積が融合断面積を与え、図 3 (A) の一点鎖線のような励起関数を与えた。この融合断面積と、統計モデル計算で決定した複合核の生き残

る確率 (中性子を蒸発して超重元素を生成する確率) を掛けることで Hs 同位体の断面積を計算した。これを図 3 (B) の一点鎖線に示す。図の実線は、捕獲断面積が融合断面積に等しいと仮定した場合の断面積である。 $^{267,268}\text{Hs}$ の断面積は、一点鎖線に誤差内で一致しており、散逸揺動モデルが融合断面積を記述できることが分かった。本研究により、(ア)赤道面衝突でも融合の阻害は存在すること、(イ)クーロン障壁を通過したのち、先端部衝突に比べて赤道面衝突の方が融合確率が大きいこと、(ウ)先端部衝突であっても融合確率が存在し、このため 4n チャンネルによる同位体合成が可能なること、を明らかにした。

サブバリアエネルギー反応を用いることで、超重元素領域に位置する新同位体の合成が可能になった。本研究の一環として、 $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ 反応により、3n 蒸発チャンネルによる新同位体 ^{271}Hs の合成にも応用された。さらに本研究を進展させ、 ^{34}S や ^{36}S ビームを ^{244}Pu (プルトニウム 244) や ^{243}Am (アメリシウム 243)、 ^{248}Cm (キュリウム 248) の組み合わせにより、サブバリアエネルギーで 15 個以上の新同位体の合成が可能と考えられる。一方、散逸揺動モデルが超重元素の生成断面積を決定するのに有用な理論であり、本研究は重イオン核分裂と超重元素の生成断面積を定量的に一貫して記述できること示した。これは、核分裂特性を測定することにより、超重元素の生成断面積の予測能力が向上することを示したものである。これら成果は、2 件の著名な国際会議の招待講演を受けることになった。

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 6 件)

① K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, Y. Watanabe, Y. Nagame, T. Ohtsuki, K. Hirose, S. Hofmann
 “Effects of nuclear orientation on fission fragment mass distributions for the reactions using actinide nuclei”
 Proceedings of the 4th International workshop on Nuclear Fission and Fission-product Spectroscopy, FISSION2009, Cadarache, France, AIP Conf. Proc. **1175**, 111-118 (2009). 査読無し.
<http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=APCPCS&Volume=1175&Issue=1>

② K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, Y. Watanabe, Y. Nagame,

T. Ohtsuki, K. Hirose, S. Hofmann
“Effects of nuclear orientation on fusion and fission process in heavy ion reactions”

Proceedings of the 6th Japan-Italy symposium on Heavy-Ion Physics, ASR2008, Tokai, Japan, 11-15. Nov. 2008, AIP Conf. Proc. **1120**, 275-279 (2009). 査読無し.
<http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=APCPCS&Volume=1120&Issue=1>

③ K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, Y. Watanabe, Y. Nagame, T. Ohtsuki, K. Hirose, S. Hofmann

” Effects of nuclear orientation on fission fragment mass distributions in the reactions of $^{34,36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ ”

Proceedings of the New Aspects of heavy Ion Collisions Near the Coulomb Barrier”, FUSION08, Chicago, USA, 22-26. Sep. 2009, AIP Conf. Proc. **1098**, 289-294 (2009) 査読あり

<http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=APCPCS&Volume=1098&Issue=1>

④ K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, Y. Nagame, Y. Watanabe, T. Ohtsuki, K. Hirose, S. Hofmann

“Effects of nuclear orientation of the mass distribution of fission fragments in the reaction of $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ ”

Physical Review C, **77**, 064607(5pages) (2008). 査読あり

<http://prc.aps.org/abstract/PRC/v77/i6/e064607>

⑤ J. Dvorak, W. Brückle, M. Chelnokov, Ch. E. Duellmann, Z. Dvorakova, K. Eberhardt, E. Jäger, R. Krücken, A. Kuznetsov, Y. Nagame, F. Nebel, K. Nishio, R. Perego, Z. Qin, M. Schädel, B. Schausten, E. Schmpf, R. Schuer, A. Semchenkov, P. Thörle, A. Türler, M. Wergzecki, B. Wierczinski, A. Yakushev, and A. Yeremin

“Observation of the 3n evaporation channel in the complete hot-fusion reaction $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$ leading to the new superheavy nuclei ^{271}Hs ”

Phys. Rev. Lett., **100**, 132503, (4 pages) (2008). 査読あり

<http://prl.aps.org/abstract/PRL/v100/i13/e132503>

⑥ K. Nishio, S. Hofmann, F. P. Hessberger, H. Ikezoe, D. Ackermann, S. Antalic, V. F. Comas, Z. Gan, S. Heinz, J. A. Heredia, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, B. Lommel, R. Mann, M. Mazzocco, S. Mitsuoka, Y. Nagame, T. Ohtsuki, A. G. Popeko, S. Saro, H. J. Schoett, B. Sulignano, A. Svirikhin, K. Tsukada, K. Tsuruta, A. V. Yeremin

“Orientation effects of deformed ^{238}U

target nuclei on the fusion probability for heavy element synthesis”

Proc. of the 23rd International Nuclear Physics Conference, INPC2007, Tokyo, Nuc. Phys., **A805**, pp. 516-518 (2008). 査読無し

[学会発表] (計 11 件)

① 西尾勝久, S. Hofmann, F. P. Hessberger, D. Ackermann, S. Antalic, V. F. Comas, Ch. E. Duellmann, A. Gorshkov, R. Graeger, S. Heinz, J. A. Heredia, 廣瀬健太郎, 池添博, J. Khuyagbaata, B. Kindler, I. Kojouharov, B. Lommel, R. Mann, 光岡真一, 永目諭一郎, 西中一朗, 大槻勤, A. G. Popeko, S. Saro, M. Schaedel, A. Tuerler, 渡辺裕, A. V. Yeremin, 有友嘉浩, 萩野浩一

“ $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ のサブバリアエネルギー融合反応による新同位体 ^{268}Hs の合成”

日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学(岡山)

② K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, H. Makii, Y. Watanabe, Y. Nagame, T. Ohtsuki, K. Hirose, S. Hofmann

“Effects of nuclear orientation on fusion and fission process for reactions using ^{238}U target nucleus” (Invited)

Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, 16-20. Nov. 2009, Kobe, Japan.

③ K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, Y. Nagame, T. Ohtsuki, K. Hirose, S. Hofmann

“Effects of nuclear orientation on fusion and fission in the reaction using ^{238}U target nucleus”

2nd International Workshop on Compound Nuclear Reactions and Related Topics, 5-8. Oct. 2009, Bordeaux, France.

④ K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, I. Nishinaka, H. Makii, Y. Nagame, Y. Watanabe, T. Ohtsuki, K. Hirose, S. Hofmann

“Effects of nuclear orientation on fusion and fission process for reactions using actinide target nuclei” (Invited)

International Symposium on Exotic Nuclei, EXON2009, 22. Sep. -2. Oct. 2009, Sochi, Russia.

⑤ 西尾勝久, 池添博, 光岡真一, 西中一朗, 牧井宏之, 永目諭一郎, 渡辺裕, 大槻勤, 廣瀬健太郎, S. Hofmann

“ ^{30}Si , ^{31}P , $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ 反応における準核分裂過

程の実験的研究”

日本原子力学会 2009 年秋の大会、2009 年 9 月 16 日、東北大学(仙台)

⑥ 西尾 勝久, 池添博, 西中一朗, 光岡真一, 永目諭一郎, 渡辺裕, 大槻勤, 佐藤弘樹, 廣瀬健太郎, S. Hofmann

“ $^{30}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 反応の核分裂片質量数分布における標的原子核の変形効果”,
日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 28 日, 立教大学(東京)

⑦ 西尾勝久

“アクチノイド原子核を標的とする反応の核分裂反応”

京都大学基礎物理学研究所研究会「原子核の分子的構造と低エネルギー核反応」

2008 年 7 月 3 日, 京都大学(京都)

⑧ 西尾 勝久, 池添博, 光岡真一, 西中一朗, 永目諭一郎, 渡辺裕, 大槻勤, 廣瀬健太郎, S. Hofmann

“ $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応の核分裂片質量数分布に対する ^{238}U の変形効果”,

日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 28 日, 近畿大学(大阪)

⑨ 西尾 勝久, 池添博, 光岡真一, 西中一朗, 永目諭一郎, 渡辺裕, 大槻勤, 廣瀬健太郎

“ $^{36}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 反応のサブバリアエネルギー領域における核分裂片質量数分布の測定”

日本原子力学会 2008 年春の年会、2008 年 3 月 26 日、大阪大学(大阪)

⑩ K. Nishio, S. Hofmann, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, F. P. Hessberger, D. Ackermann, S. Antalic, V. F. Comas, Z. Gan, S. Heinz, J. A. Heredia, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, B. Lommel, R. Mann, M. Mazzocco, Y. Nagame, T. Ohtsuki, A. G. Popeko, S. Saro, H. J. Schoett, B. Sulignano, A. Svirikhin, K. Tsukada, A. V. Yeremin

“Orientation effects of deformed ^{238}U target nuclei on the fusion probability for heavy element synthesis”

International Workshop on Nuclear Structure, NS07, June. 2007, Kyoto, Japan.

⑪ K. Nishio, S. Hofmann, H. Ikezoe, D. Ackermann, S. Antalic, V. F. Comas, Z. Gan, S. Heinz, J. A. Heredia, F. P. Hessberger, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, I. Kojouharov, P. Kuusiniemi, B. Lommel, R. Mann, M. Mazzocco, S. Mitsuoka, Y. Nagame, T. Ohtsuki, A. G. Popeko, S. Saro, H. J. Schoett, B. Sulignano, A. Svirikhin,

K. Tsukada, A. V. Yeremin

“Orientation effects of deformed ^{238}U target nuclei on the fusion probability for heavy element synthesis”

3rd International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements, TAN07, Sept. 23-28. 2007, Davos, Switzerland

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西尾 勝久 (NISHIO KATSUHISA)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号: 70343928

(2) 研究分担者

池添 博 (IKEZOE HIROSHI)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・上級研究首席

研究者番号: 90355058

光岡 真一 (MITSUOKA SHIN-ICHI)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号: 40354881

大槻 勤 (OHTSUKI TSUTOMU)

東北大学・理学(系)研究科研究院・準教授
研究者番号: 50233193

(3) 連携研究者

(4) 協力研究者

S. Hofmann,

F. P. Hessberger,

D. Ackermann,

B. Lommel

GSI, Darmstadt, Germany

A. Yakushev

TU Muenchen