

平成 22 年 12 月 24 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740154

研究課題名 (和文) インビーム  $\gamma$  線分光による中性子捕獲断面積導出法の開発

研究課題名 (英文) Development of the measurement system for neutron-capture cross sections using a surrogate reaction

研究代表者

牧井 宏之 (MAKII HIROYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：20425573

研究成果の概要 (和文) : 不安定核の中性子捕獲断面積は恒星内での元素合成を理解する上で重要な物理量であるが、試料の入手性や強い放射能による雑音等の問題から、全ての核種に必要な精度を達成できているわけではない。本研究課題では中性子ビームを用いた直接測定の問題点を回避して中性子捕獲断面積を導出するための手法 (代理反応法) の開発を目指し、新たな測定システムの構築を行った。構築したシステムを用いて代理反応で生成した原子核からの  $\gamma$  線の観測に成功した。

研究成果の概要 (英文) : Neutron-capture reaction on unstable nuclei plays an important role in stellar nucleosynthesis. However, measurements of the neutron-capture cross sections of the unstable nuclei are very difficult. The main reasons of the difficulty are due to the preparation and/or radioactivity of the sample. Hence we designed new experiment in order to measure the  $\gamma$  rays from the nuclei produced by surrogate reaction. With use of this system, we could detect the  $\gamma$ -ray from the surrogate reaction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	0	2,000,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	330,000	3,430,000

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：実験核物理、中性子捕獲断面積、インビーム  $\gamma$  線核分光

## 1. 研究開始当初の背景

中性子捕獲断面積は原子核物理学・天体核物理学等の基礎科学だけでなく、原子力開発の分野でも重要な物理量である。どちらの分野でも鍵となるのは放射性核種の中性子捕獲断面積である。恒星内での元素合成ではい

くつかの放射性核種でベータ崩壊と中性子捕獲反応の競合が起こり、中性子捕獲断面積が精度良く決定できれば恒星内で元素が合成される環境 (温度や中性子束等) への理解が深められる。一方、原子力開発の分野では長期間に渡り放射能をもつ核分裂生成物の

存在が問題となっており、比較的長い半減期をもつ放射性核種の中性子捕獲反応による核変換の可能性を検討するため、精度の高い中性子捕獲断面積の測定が望まれている。このような背景から、過去数十年以上に渡り中性子捕獲反応の測定が行われてきている。近年は強力な核破砕中性子源を用いて半減期が100年未満の放射性核種の測定も可能となりつつあり、日本においてはJ-PARCの核破砕中性子源に中性子捕獲断面積測定用コースが建設中である。しかしながら、現在の技術では試料の入手性や強い放射能によるバックグラウンド等の問題から、全ての核種で測定が可能となるわけではないと考えられる。

このような現状から、中性子捕獲断面積を間接的に導出する代理反応法と呼ばれる手法が考案された。しかしながら、現在においても代理反応法で導出した断面積が実際の断面積をどの程度の精度で再現するか、適用可能な中性子エネルギー範囲はどのような範囲なのか等の重要な情報は得られていない。

## 2. 研究の目的

中性子ビームを用いた直接測定の問題点を回避して中性子捕獲断面積を間接的に求める手法（代理反応法）の開発を行い、直接測定を含めた他の手法では困難であった放射性核種の中性子捕獲断面積導出を行うための枠組みを構築する。

本研究課題で採用する手法は原子力機構タンデム加速器施設で行われてきたインビーム $\gamma$ 線核分光法を応用したものである。ここでは核子移行反応を用いてこれまで測定することが困難であった中性子過剰核からの $\gamma$ 線の観測に成功し、その核構造を明らかにしてきた。本研究課題で代理反応法の開発を行うことで研究対象をこれまでの中性子過剰核の核構造から恒星内での元素合成や原子力開発の分野に広げる。

## 3. 研究の方法

### (1) 代理反応法について

一般に鉄よりも質量の大きい原子核は状態密度が高く、その中性子捕獲反応は複合核の励起状態を経由して進むことが知られている。この場合、中性子捕獲断面積は複合核の励起状態を形成する確率とそれが $\gamma$ 線放出により崩壊する確率の積であらわせる。この両者が独立だと仮定すれば、これらを別々に求めて中性子捕獲断面積を導出することができる。複合核の励起状態を形成する確率は比較的容易に計算できるが、それが $\gamma$ 線放出により崩壊する確率の計算は複合核の準位密度が高く崩壊過程が複雑なため困難である。そのため、中性子捕獲反応によって形成され

る複合核を核子移行反応等の別の反応（代理反応）で生成し、その崩壊確率を求める手法が提案された。この手法は反応を置き換えて断面積を決定するため、代理反応法と呼ばれている。

### (2) 測定手法の概要

本研究課題では代理反応で生成した複合核の励起状態からの $\gamma$ 線崩壊を観測するため、原子力機構タンデム加速器施設に既存のインビーム $\gamma$ 線分光用システムの改良を行った。既存のインビーム $\gamma$ 線分光用システムでは酸素18 ( $^{18}\text{O}$ ) をウランやプルトニウム等のアクチノイド標的に照射し、( $^{18}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) 2中性子移行反応等で生成される酸素同位体 ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  等) の荷電粒子をシリコン $\Delta E$ -E 検出器で観測し、同時に発生する $\gamma$ 線をエネルギー分解能の良いGe検出器で観測して中性子過剰核の核構造の研究を行ってきた。反応で発生する荷電粒子と $\gamma$ 線を同時計測することにより、 $\gamma$ 線を発生する核種と励起エネルギーを特定することが可能となる。本研究課題においては核子移行反応を代理反応として用いて $\gamma$ 線と荷電粒子の同時測定を行い、 $\gamma$ 線を放出する核種の同定と励起エネルギー（対応する中性子捕獲反応の入射エネルギー）を確認した。

### (3) $\gamma$ 線検出器

既存のインビーム $\gamma$ 線分光用システムでは低エネルギー（エネルギー2MeV未満）以上の $\gamma$ 線の観測に重点を置いており、中性子捕獲反応で形成される、中性子分離エネルギー（6-8 MeV程度）の高励起状態からの $\gamma$ 線を観測することは困難であった。さらにこのような高励起状態からは測定対象の $\gamma$ 線だけでなく、中性子も発生する。本研究課題では大型の結晶の製作が比較的容易で $\gamma$ 線に対する感度が高く、適度なエネルギー分解能と時間分解能をもつNaI(Tl)検出器を $\gamma$ 線検出器として採用することとし、東京工業大学理学部が所有する大立体角・高効率のコンプトン抑止型NaI(Tl)検出器をタンデム加速器施設に移設した。また、標的以外の物質からのバックグラウンドを軽減するため、コンプトン抑止型NaI(Tl)検出器周辺に鉛・ボロン入りポリエチレンによる遮蔽を行った。このNaI(Tl)検出器を飛行時間法(TOF法)と組み合わせることで中性子に起因したバックグラウンドを除去し、高い信号・雑音比を目指した。

### (4) 荷電粒子検出器

代理反応で生成した複合核の励起エネルギーを精度良く導出することは対応する中性子捕獲反応の入射エネルギーを精度よく決定することにつながる。既存のインビーム $\gamma$ 線分光用システムでは酸素同位体 ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) 等の重イオンを観測し、( $^{18}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) 反応等

の核子移行反応で生成される中性子過剰核の観測を行ってきた。これに対して本研究課題では断面積の中性子エネルギー依存性を導出するため、散乱エネルギーの高精度測定が容易な水素同位体等の軽イオンを観測することとした。また、標的から生じる荷電粒子に対する検出効率とエネルギー分解能を両立させるため、円環型の電極を持つ粒子識別用の $\Delta E$  シリコン検出器とエネルギー測定用のEシリコン検出器から構成される荷電粒子検出器の整備を行った。

粒子識別用の $\Delta E$  シリコン検出器の分解能は検出器の厚み一様性で決まるため、ELID 研削法で処理したシリコンウェハ（厚みの一様性 $\pm 1\mu\text{m}$ ）から表面障壁型の検出器を製作した。一方、エネルギー測定用のE検出器については飛程の長い水素同位体等の軽イオンを検出するため、厚い空乏層が期待できるシリコン(Li)検出器を使用した。これらのシリコン検出器は高いエネルギー分解能を得るため、冷媒を用いて冷却が可能なようにし、さらにビームコリメータ等の標的以外の物質と入射ビームの衝突によるバックグラウンドを削減するための遮蔽を行った上で標的散乱槽内に設置した。

#### (5) 整備した検出システムを用いた測定

本研究課題で整備した検出システムを用いて、断面積が精度良く求められている金 $^{197}\text{Au}$ の中性子捕獲反応【 $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ 】を模擬する、 $^{196}\text{Pt}(^3\text{He}, p)^{198}\text{Au}$ 反応の測定を行った。構築したシステムが代理反応で生成された複合核からの $\gamma$ 線に対して十分な感度があるかの確認を行った。

#### (6) 理論グループとの検討

代理反応法を用いた中性子捕獲断面積導出の枠組みを構築するため、原子力機構の理論グループと代理反応法の成立性（導出した断面積の精度は十分か等）について検討を進めた。

### 4. 研究成果

#### (1) $\gamma$ 線と荷電粒子の同時測定

原子力機構タンデム加速器施設からの $^3\text{He}$ ビームを照射し、標的から生じる散乱粒子と $\gamma$ 線の同時測定を行った。標的としては $^{196}\text{Pt}$ （濃縮度：約96%）セルフサポート薄膜を使用した。図1は荷電粒子検出器で観測されたスペクトルで、縦軸は粒子識別用 $\Delta E$ シリコン検出器で観測されたエネルギー、横軸は $\Delta E$ シリコン検出器とEシリコン検出器で観測されたエネルギーの合計を表している。図1に示した通り、ヘリウム同位体（ $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ ）及び水素同位体（ $^1\text{H}$ 、 $^2\text{H}$ 、 $^3\text{H}$ ）が観測されている。これらのうち、コンプトン抑止型NaI(Tl)検出器で同時に $\gamma$ 線が観測されたものだけをプ

ロットしたのが図2である。図2より構築したシステムが代理反応で生成された複合核からの $\gamma$ 線に対して十分な感度があることが分かった。

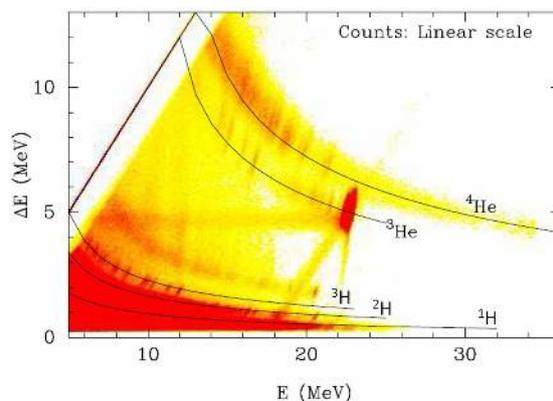


図1 散乱粒子のスペクトル

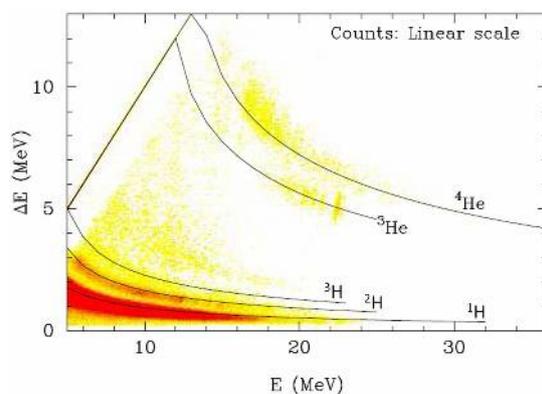


図2  $\gamma$ 線と同時計測された散乱粒子のスペクトル

#### (2) 代理反応法の適用性

千葉・岩本の理論計算（S. Chiba and O. Iwamoto, Physical Review C 81, 044604 (2010).）によると、複合核が $\gamma$ 線放出により崩壊する確率は複合核のスピンの大きさに大きく依存し、代理反応と中性子捕獲反応で複合核のスピンの分布が大きく異なる場合には代理反応法で導出した断面積は実際の断面積を再現できないことが判明した。一方、性質の良く似た二つの複合核について $\gamma$ 線放出により崩壊する確率の比を取ると、スピンの違いが相殺され中性子捕獲断面積比を良く再現できることが予想されている。このことから、代理反応法で中性子捕獲断面積を精度よく導出するためには、本研究課題で行った $^{196}\text{Pt}(^3\text{He}, p)^{198}\text{Au}$ 反応測定だけでは不十分で、二つの標的を用いて $\gamma$ 線放出により崩壊する確率の比を求めることが必要になった。現在、 $^{198}\text{Au}$ と良く似た性質をもつ複合核を生成する反応系の選定を行っている。

## 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 R. Takahashi, T. Ishii, M. Asai, D. Nagae, H. Makii, K. Tsukada, A. Toyoshima, Y. Ishii, M. Matsuda, A. Makishima, T. Shizuma, T. Kohno, and M. Ogawa, “In-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy of  $^{248, 250, 252}\text{Cf}$  by neutron-transfer reactions using a Cf target”, Physical Review C 81, 057303 (2010). 査読有
- ② H. Makii, Y. Nagai, T. Shima, M. Segawa, K. Mishima, H. Ueda, M. Igashira, and T. Ohsaki, “E1 and E2 cross sections of the  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  reaction using pulsed  $\alpha$  beams” Physical Review C 80, 065802 (2009). 査読有
- ③ T. Ishii, H. Makii, M. Asai, K. Tsukada, A. Toyoshima, M. Matsuda, A. Makishima, S. Shigematsu, J. Kaneko, T. Shizuma, H. Toume, I. Hossain, T. Kohno and M. Ogawa, “Observation of high-j quasiparticle states in  $^{249}\text{Cm}$  by in-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy using heavy-ion transfer reactions”, Physical Review C 78, 054309 (2008). 査読有
- ④ H. Makii, T. Ishii, M. Asai, A. Toyoshima, M. Matsuda, A. Makishima, J. Kaneko, H. Toume, S. Ichikawa, S. Shigematsu, T. Kohno, and M. Ogawa, “Z dependence of the N=152 deformed shell gap: In-beam  $\gamma$ -ray spectroscopy of neutron-rich  $^{245, 246}\text{Pu}$ ”, Physical Review C 76, 061301 (2007). 査読有
- ⑤ H. Makii, Y. Nagai, K. Mishima, M. Segawa, T. Shima, and M. Igashira, “Neutron-induced reactions using a  $\gamma$ -ray detector in  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  reaction study”, Physical Review C 76, 022801 (2007). 査読有
- ⑥ T. Ishii, H. Makii, M. Asai, H. Koura, S. Shigematsu, K. Tsukada, A. Toyoshima, M. Matsuda, A. Makishima, J. Kaneko, H. Toume, I. Hossain, T. Shizuma, S. Ichikawa, T. Kohno, and M. Ogawa, “Ground-state bands of neutron-rich  $^{236}\text{Th}$  and  $^{242}\text{U}$  nuclei and implication of spherical shell closure at N=164”, Physical Review C 76, 011303 (2007). 査読有

[学会発表] (計6件)

- ① 牧井宏之、「代理反応による不安定核の中性子捕獲断面積測定」、宇宙連絡協議会主催第3回研究戦略ワークショップ「J-PARC

中性子ビームラインでの宇宙核物理研究及び関連する研究」、2010年11月5日、上野

- ② 西尾勝久、西中一朗、光岡真一、牧井宏之、古高和禎、若林泰夫、高橋竜太、石井哲朗、千葉 敏、廣瀬健太郎、大槻勤、「核子移行反応で生成されるアクチノイド原子核の核分裂片質量数分布」、日本原子力学会2010年秋の大会、2010年9月15-17日、札幌
- ③ 西尾勝久、西中一朗、牧井宏之、光岡真一、古高和禎、若林泰夫、高橋竜太、浅井雅人、石井哲朗、千葉 敏、廣瀬健太郎、大槻勤、「 $^{238}\text{U}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})$ 反応による複合核  $^{240}\text{U}^*$  の核分裂確率の測定」、日本原子力学会2010年春の年会、2010年3月26-28日、水戸
- ③ H. Makii, H. Ueda, Y. Temma, Y. Nagai, T. Shima, S. Fujimoto, M. Segawa, K. Mishima, J. Nishiyama, and M. Igashira, “E1 and E2 cross sections of the  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  reaction at  $E_{\text{eff}} \sim 1.2$  MeV using pulsed  $\alpha$  beams”, 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG10), March 8 - 10, 2010, Osaka
- ④ 牧井宏之、「 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  反応における E1 及び E2 断面積測定」、国立天文台研究会「rプロセス元素合成の統合的理解 - 量子ビームで探る宇宙進化の理解を目指して -」、筑波大学、2008年3月14日
- ⑤ H. Makii, Y. Nagai, K. Mishima, M. Segawa, T. Shima, H. Ueda, and M. Igashira, “E1 and E2 cross sections of the  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  reaction at  $E_{\text{eff}} \sim 1.4$  MeV using pulsed  $\alpha$  beams”, 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG07), 2007年12月5日、札幌
- ⑥ 牧井宏之、「原子力機構における代理反応測定計画」、2007年度核データ研究会、2007年11月30日、東海

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

牧井 宏之 (MAKII HIROYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：20425573