

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400304

研究課題名(和文) r過程元素合成に影響する軽核の(n, )反応測定

研究課題名(英文) Measurement of neutron capture cross sections of light nuclei related to r-process nucleosynthesis

研究代表者

牧井 宏之 (Makii, Hiroyuki)

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 先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：20425573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：鉄よりも重い元素の約半数は中性子捕獲反応が崩壊よりも早く進むr(rapid)過程と呼ばれる元素合成過程で生成されたと考えられている。近年の望遠鏡を用いた金属欠乏星の観測や元素合成の理論計算によると、r過程における元素合成では鉄よりも重い原子核だけでなく、LiやBe等の軽核の中性子捕獲反応も考慮する必要があると考えられている。このため、r過程の模型構築に必要なLi-7やBe-9の中性子捕獲反応断面積の測定を、大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設(MLF)で得られる大強度パルス中性子ビームと高効率のガンマ線検出器を組み合わせて行った。

研究成果の概要(英文)：The neutron capture cross section with light elements such as Li and Be, plays an important role in explosive nucleosynthesis, like r(rapid)-process. Intense pulsed neutron beam provided by the MLF in the J-PARC and gamma-ray detectors with high efficiency, which are installed in the Accurate Neutron-Nucleus Reaction Measurement Instrument (ANNRI) at the Beam Line No. 4 of the MLF in the J-PARC, allow us to study neutron capture reactions with quite small cross sections. We have measured the neutron capture cross sections of Li-7 and Be-9.

研究分野：原子核(実験)

キーワード：中性子捕獲反応 中性子捕獲断面積 元素合成 r過程 核データ

### 1. 研究開始当初の背景

鉄よりも重い元素の約半数は、中性子捕獲反応が崩壊よりも早く進む r (rapid) 過程と呼ばれる元素合成過程で生成されたと考えられる。大口径の望遠鏡を用いた、金属量が極端に少なく古い年代に誕生したと考えられる金属欠乏星の観測結果は、r 過程は中性子と陽子、粒子等から爆発的に一気に進行することを示唆している。この場合、r 過程による元素合成は鉄よりも重い原子核だけでなく、Li や Be をはじめとした軽核においても、

- (1)  $\alpha(an, \gamma)^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C} \dots$
- (2)  $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}(\alpha, \gamma)^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C} \dots$
- (3)  $\alpha(t, \gamma)^7\text{Li}(n, \gamma)^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}(n, \gamma)^{12}\text{B}(n, \gamma)^{13}\text{B}(n, \gamma)^{14}\text{B}(n, \gamma)^{15}\text{B}(\beta)^{15}\text{C} \dots$

のように、中性子捕獲反応[(n, γ)反応]により元素合成が進行する。この時、軽い元素により中性子が消費されるため、重い元素の合成が阻害される可能性がある。実際、Terasawaらは上記(1)の元素合成経路だけでなく、経路(2)・(3)及び中性子過剰な炭素同位体等を考慮することで r 過程により生成される元素の組成比が大きく変化することを示している [引用文献]。

このため、r 過程による元素合成のモデル構築には上記(1)~(3)の経路に含まれる軽核の中性子捕獲断面積を精度良く求める必要があるが、一般に軽核の中性子捕獲断面積は、鉄よりも重い元素と比較すると非常に小さいことが知られており、測定は困難である。このため、 $^9\text{Be}$  や  $^{11}\text{B}$  といった安定核においても十分な精度で中性子捕獲断面積は求められていない。図 1 は  $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$  反応についてこれまで得られている測定結果及び日 (JENDL)・米 (ENDF)・欧 (JEFF) の代表的な核データライブラリに収録されている断面積の評価値を示したものである。これまでの測定では熱中性子 (エネルギー 25meV) に対する断面積の誤差 (異なる測定間で 20% 以上の相違) が大きくそれよりも高いエネルギーにおいては、25 keV での暫定的な測定結果 [引用文献] しか報告されていないため、JENDL では s 波中性子直接捕獲のみを考慮しているのに対して、ENDF では s 波に加えて p 波中性子直接捕獲、JEFF では s・p 波に加えて高エネルギー領域に存在が予想されている共鳴による断面積の増加を予想しており、評価値間に大きな相違がある。このような相違を解消するためにはできるだけ広いエネルギー領域で中性子捕獲断面積を精度良く測定する必要がある。

### 2. 研究の目的

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設 (MLF) では高エネルギー陽子ビームを中性子源に照射して引き起こされる核破砕反応により、meV から keV までの 6 桁以上にわたる広いエネルギー領域で

大強度の中性子ビームを得ることが可能である。この大強度中性子ビームと高効率のガンマ線検出器を組み合わせることでこれまで測定が困難であった軽核の中性子捕獲断面積の測定を行う。

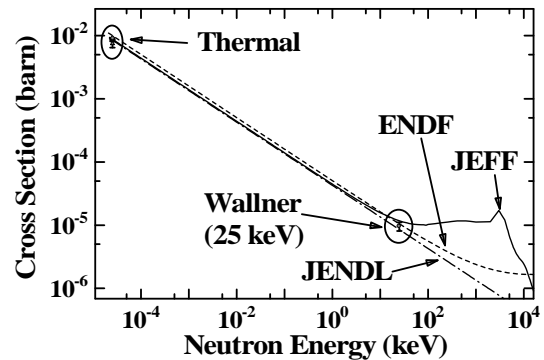


図 1  $^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$  反応断面積の測定結果と代表的な核データライブラリに収録されている評価値

### 3. 研究の方法

本研究では J-PARC / MFL の BL-04 に設置されている、中性子核反応測定装置 (ANNRI) を用いて中性子捕獲断面積の測定を行った。J-PARC / MLF の中性子源には加速器からのパルス陽子ビーム (エネルギー 3GeV、繰り返し周波数 25Hz) が照射され、核破砕反応により大量の中性子が発生する。発生したパルス中性子ビームは中性子源を囲むように設置した減速材でエネルギーを落とした後、ANNRI 上流に設置したコリメータで試料の形状に合わせて成型され、中性子源から 21.5m または 27.9m に設置した試料に照射される。試料から発生するガンマ線を後述のガンマ線検出器を用いて観測し、中性子源に陽子ビームが入射してからガンマ線が観測されるまでの時間差 (中性子の飛行時間) と、中性子の飛行距離 (21.5m または 27.9m) から中性子捕獲反応を引き起こした中性子のエネルギーを決定する。中性子の飛行時間毎に観測されたガンマ線スペクトルを解析することにより、中性子捕獲断面積のエネルギー依存性を導出することが可能である。

中性子源から 21.5m の位置に設置した試料から発生するガンマ線は試料を囲むように設置した Ge スペクトロメータで観測した。Ge スペクトロメータはコンプトン抑止用の BGO 検出器に囲まれた 2 台のクラスター検出器から構成され、試料で散乱された中性子や試料以外の物質から発生したガンマ線に対する遮蔽に格納されている。一方、中性子源から 27.9m の位置においては試料から発生するガンマ線は ANNRI 既設の NaI (TI) スペクトロメータおよび新たに設置した LaBr<sub>3</sub> (Ce) スペクトロメータを用いて観測した。既設の NaI (TI) スペクトロメータはコンプトン抑止用のプラスチック検出器と主検出器である NaI (TI) 検出器で構成されており、試料や試

料上流のコリメータ等で散乱された中性子や試料以外の物質から発生したガンマ線に対する遮蔽に格納されている。2台のNaI(Tl)スペクトロメータが中性子ビーム軸に対して90度及び125度に設置されている。本研究ではこれらのNaI(Tl)スペクトロメータに加えて、新たにLaBr<sub>3</sub>(Ce)スペクトロメータを設置した。LaBr<sub>3</sub>(Ce)スペクトロメータは主検出器であるLaBr<sub>3</sub>(Ce)検出器をコンプトン抑止用のBG0検出器で囲んだ構成となっており、既存のNaI(Tl)スペクトロメータを参考に連携研究者の瀬川が設計した中性子及びガンマ線用の遮蔽に格納されている。LaBr<sub>3</sub>(Ce)スペクトロメータは既存のNaI(Tl)スペクトロメータと干渉を避けるため、中性子ビーム軸に対して55度に設置した。

中性子源から21.5mの位置に設置したGeスペクトロメータはその高いガンマ線エネルギー分解能を利用することで、試料に含まれる不純物に起因したガンマ線や、試料以外の物質で発生したガンマ線に起因したバックグラウンドを真のイベントから分離できるという利点がある一方、中性子飛行時間が少ない(=中性子エネルギーが高い)領域でデータ収集効率が低下するという短所があり、恒星内での温度領域に相当する中性子エネルギー(数十keV)での測定が困難である。これに対して、中性子源から27.9mの位置に設置したNaI(Tl)スペクトロメータやLaBr<sub>3</sub>(Ce)スペクトロメータはGeスペクトロメータと比較するとガンマ線エネルギー分解能は劣るが、時間応答が速く中性子飛行時間が少ない領域でガンマ線イベントを取りこぼしにくいという利点がある。本研究ではmeVからkeVまでの広いエネルギー領域で断面積を測定するため、上記の二つの試料位置で測定を行った。

#### 4. 研究成果

図2に示した通り、<sup>7</sup>Li(n,γ)<sup>8</sup>Li反応の準位構造は単純であり、中性子捕獲反応で発生するガンマ線は捕獲状態から<sup>8</sup>Liの基底状態への遷移に対応する2034 keV、<sup>8</sup>Liの第一励起準位を経由するものに対応する981 keV及び1053 keVのガンマ線が発生する。Geスペクトロメータを用いて観測されたガンマ線スペクトル(中性子エネルギー: 0.39~1.08 eV)を図3に示す。図中の計数の多いデータは<sup>7</sup>Li<sub>2</sub>O試料を用いて得られたスペクトル、計数の少ない実線は炭素試料を用いて得られたものである。炭素試料を用いて得られたスペクトルと比較すると、<sup>7</sup>Li<sub>2</sub>O試料を用いて得られたスペクトルでは981 keV、1053 keV及び2034 keVでピークが観測されている。このように、大強度パルス中性子ビームと高効率のGeスペクトロメータを組み合わせることにより、断面積が微小である<sup>7</sup>Li(n,γ)<sup>8</sup>Li反応によるガンマ線を観測できることを確認した。

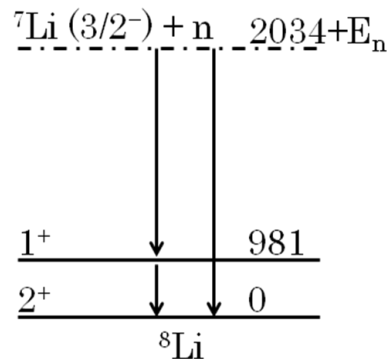


図2 <sup>7</sup>Li(n,γ)<sup>8</sup>Li 反応準位図

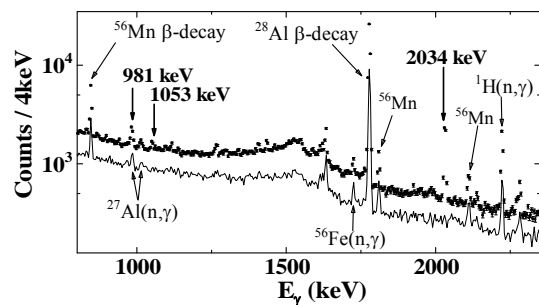


図3 <sup>7</sup>Li(n,γ)<sup>8</sup>Li 反応測定で得られたガンマ線スペクトル(中性子エネルギー: 0.39~1.08 eV)。計数の多いデータは<sup>7</sup>Li<sub>2</sub>O試料で得られたスペクトル、計数の少ない実線は炭素試料で得られたものである。

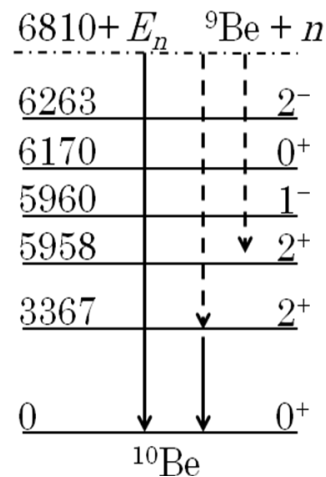


図4 <sup>9</sup>Be(n,γ)<sup>10</sup>Be 反応準位図

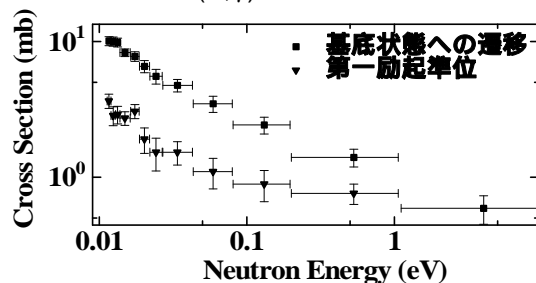


図5 <sup>9</sup>Be(n,γ)<sup>10</sup>Be 反応断面積 (■: 基底状態への遷移、▼: 第一励起準位への遷移)

同様に Ge スペクトロメータを用いて  ${}^9\text{Be}(n,\gamma){}^{10}\text{Be}$  反応を測定した結果、捕獲状態から  ${}^{10}\text{Be}$  の基底状態への遷移及び、 ${}^{10}\text{Be}$  第一励起準位を経由する遷移を中性子エネルギー11 meV から 10eV の範囲で観測することに成功した(図4及び図5参照)。熱中性子(エネルギー25meV)を超えるエネルギー領域で各遷移の断面積の決定に始めて成功した。

一方、NaI(Tl) スペクトロメータや  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  スペクトロメータを用いた測定では、Ge スペクトロメータの下流に設置した中性子ビーム成型用コリメータにより散乱された中性子や、中性子源からのガンマ線バックグラウンドの影響が当初予想していたよりも大きいことがわかり、中性子捕獲断面積を高精度で導出するためには、検出器を囲む遮蔽体の構造を変更して、バックグラウンド計数を低減する必要があることがわかった。しかしながら、これらのスペクトロメータを用いることで Ge スペクトロメータでは測定が極めて困難な中性子エネルギー数 keV 以上の領域で  ${}^9\text{Be}(n,\gamma){}^{10}\text{Be}$  反応で生じるガンマ線を確認することには成功しており、恒星内温度に相当する中性子エネルギー数十 keV の領域で測定を行える目処をつけることができた。今後はバックグラウンド低減の努力を継続して行う予定である。

#### <引用文献>

- M. Terasawa et al., *Astrophys. J.* 562 (2001) 470.  
A. Wallner et al., *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 35 (2008) 014018.

#### 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)

Satoshi Chiba, Katsuhisa Nishio, Yoshihiro Aritomo, Hiroyuki Koura, Osamu Iwamoto, Hiroyuki Makii, Ichiro Nishinaka, and Kentaro Hirose, “A Comprehensive Approach to Determination of Nuclear Data of Unstable Nuclei”, *EPJ Web of Conferences* 106, 2016, 04004-p.1-p.9.

査読有

DOI: 10.1051/epjconf/201610604004

K. Nishio, A.N. Andreyev, R. Chapman, X. Derkx, Ch.E. DuRoi, L. Chys, F.P. Heberger, K. Hirose, H. Ikezoe, J. Khuyagbaatar, B. Kindler, B. Lommel, H. Makii, I. Nishinaka, T. Ohtsuki, S.D. Pain, S. Sagaidak, I. Tsekhanovich, M. Venhart, Y. Wakabayashi, S. Yan, “Excitation

energy dependence of fragment-mass distributions, from fission of  ${}^{180,190}\text{Hg}$  formed in fusion reactions of  ${}^{36}\text{Ar} + {}^{144,154}\text{Sm}$ ”, *Physics Letter B* 748, 2015, 89-94.

査読有

DOI: 10.1016/j.physletb.2015.06.068

H. Makii, S. Ota, T. Ishii, Y. Wakabayashi, K. Furutaka, K. Nishio, I. Nishinaka, S. Chiba, M. Igashira, A. Czeszumaska, “Development of a measurement system for the determination of  $(n,\gamma)$  cross-sections using multi-nucleon transfer reactions”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 797, 2015, 83-93.

査読有

DOI: 10.1016/j.nima.2015.05.005

H. Makii, M. Segawa, S. Ota, A. Kimura, I. Nishinaka, K. Nishio, H. Harada, “Measurement of neutron capture cross section of Li-7 at J-PARC / MLF / ANNRI”, *AIP Conference Proceedings* 1594, 2014, 345-350.

査読有

DOI: 10.1063/1.4874093

H. Makii, S. Ota, T. Ishii, K. Nishio, I. Nishinaka, K. Furutaka, Y. Wakabayashi, S. Chiba, M. Igashira, “Development of Anti-Compton  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  Spectrometer for Measurement of Surrogate Reactions”, *Nuclear Data Sheets* 119, 2014, 361-364.

査読有

DOI: 10.1016/j.nds.2014.08.099

Syuuya Ota, Hiroyuki Makii, Tetsuro Ishii, Christopher Angell, Daniel W. Bardayan, Satoshi Chiba, Ichiro Nishinaka, Katsuhisa Nishio, Milan Matos, Shinchi Mitsuoka, and Steven Pain, “The  ${}^6\text{Li}({}^{22}\text{Ne}, {}^{26}\text{Mg})\text{d}$   $\alpha$ -transfer experiment for the study of low-energy resonance in  ${}^{22}\text{Ne}(\alpha,\gamma){}^{26}\text{Mg}$ ”, *EPJ Web of Conferences* 66, 2014, 07017-p.1-p.4 査読有

DOI: 10.1051/epjconf/20146607017

#### [学会発表](計 7件)

牧井宏之、「大強度重イオンビームを用いた天体核反応率測定」、宇宙核物理連絡協議会(宇核連)研究会、2016年2月22日~2016年2月24日、国立天文台三鷹キャンパス(東京都三鷹市)

牧井宏之、西尾勝久、西中一郎、廣瀬健太郎、Riccardo Orlandi、James Smallcombe、Romain Leguillon、関本俊、高宮幸一、大槻勤、「 $^{235}\text{U}$  熱中性子核分裂における即発ガンマ線スペクトルの測定」、第 49 回学術講演会、2015 年 1 月 28 日～2015 年 1 月 29 日、京都大学原子炉実験所（大阪府熊取町）

牧井宏之、R. Orlandi、廣瀬健太郎、西中一郎、西尾勝久、瀬川麻里子、木村敦、中村詔司、「Be-9 の中性子捕獲断面積測定」、第 3 回 ANNRI 研究会、2014 年 9 月 1 日、いばらき量子ビーム研究センター（茨城県東海村）

H. Makii, R. Orlandi, K. Hirose, I. Nishinaka, K. Nishio, M. Segawa, A. Kimura, S. Nakamura, "Measurement of neutron capture reaction of Be-9 at J-PARC / MLF / ANNRI", 2<sup>nd</sup> International Symposium on Science at J-PARC, 2014 年 7 月 12 日～2014 年 7 月 15 日、つくば国際会議場（茨城県つくば市）

牧井宏之、瀬川麻里子、太田周也、木村敦、西中一郎、西尾勝久、原田秀郎、「J-PARC / MLF / ANNRI を用いた Li-6, 7 の中性子捕獲断面積測定」、日本原子力学会 2014 年春の年会、2014 年 3 月 26 日～2014 年 3 月 28 日、東京都市大学（東京都世田谷区）

H. Makii, M. Segawa, S. Ota, A. Kimura, I. Nishinaka, K. Nishio, H. Harada, "Measurement of neutron capture cross section of Li-7 at J-PARC / MLF / ANNRI", The 12<sup>th</sup> International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies - OMEG12, 2013 年 11 月 18 日～2013 年 11 月 11 日、つくば国際会議場（茨城県つくば市）

牧井 宏之 「鏡映対称性の検証に向けた Li 同位体の中性子捕獲ガンマ線の測定」、第 2 回 ANNRI 研究会、2013 年 8 月 23 日、いばらき量子ビーム研究センター（茨城県東海村）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

牧井 宏之 (Makii, Hiroyuki)  
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 先端基礎研究センター・研究員  
研究者番号：20425573

### (3) 連携研究者

瀬川 麻里子 (Segawa, Mariko)  
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 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹  
研究者番号：00435603

西中 一郎 (Nishinaka, Ichiro)  
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 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹  
研究者番号：70354884

西尾 勝久 (Nishio, Katsuhisa)  
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 先端基礎研究センター・研究主幹  
研究者番号：70343928

廣瀬 健太郎 (Hirose, Kentaro)  
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 先端基礎研究センター・研究副主幹  
研究者番号：20436083

オルランディ リカルド (Orlandi, Riccardo)  
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 先端基礎研究センター・研究員  
研究者番号：50737608