

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630483

研究課題名(和文)原子力電池用放射線源Po-209の特性・製造に関する基礎研究

研究課題名(英文)Study on polonium-209 as radioisotope fuel for Space Nuclear Power

研究代表者

西山 潤(Nishiyama, Jun)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：70512680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙や惑星探査のための通信機器と科学機器を搭載した探査機において、特に火星より遠くの惑星探査では太陽光が非常に弱く、これまでPu-238を熱源とする原子力電池が主電源として利用されてきた。しかしプルトニウムという特殊な同位体のため、世界で供給不足が懸念されている。そこでPu-238の代替放射性同位体として、Po-209に着目し、その製造方法について検証を行った。加速器を使用する Bi-209(p,n)反応、原子炉を使用する Bi-209(n,)Bi-210(崩壊)Po-210(n,2n)反応の2経路の製造方法について数値解析を行い、製造効率を明らかとした。

研究成果の概要(英文)：This study aims to evaluate the performance of Po isotopes as a radioisotope fuel for use in space radioisotope power generators. Historically, plutonium-238 has been proven to be the best radioisotope for the provision of space nuclear power. However, current concerns over the limited supply and difficult treatment of Pu-238 have increased the need to explore alternative isotopes for space nuclear power applications. Polonium-209 has the possibility to be an alternative material of Pu-238. It has enough half-life of 102 years and the specific power of 490 W/kg. The production rate using the Bi-209 (p, n)Po-209 reaction and the reaction chain of Bi-209 (n,) Bi-210 (decay) Po-210 (n, 2n)Po-209 were estimated.

研究分野：原子炉物理

キーワード：原子力電池 ポロニウム プルトニウム 放射性同位体製造

1. 研究開始当初の背景

宇宙や惑星の探査のため通信機器と科学機器を搭載した宇宙探査機にとって、電源システムは必要不可欠な機器である。火星より遠くの惑星では太陽光が非常に弱く、これまでの惑星探査では Pu-238 を熱源とする原子力電池が主電源として利用されてきた。Pu-238 はα崩壊核種で、半減期が 87.7 年と長期間の宇宙探査ミッションにおいて十分な寿命を持ち、1 kg あたりの熱出力が約 540 W と優れている。しかし、製造には、ウランなどの核燃料、使用済み燃料・照射燃料の処理施設、特殊な照射用原子炉が必要であることから原子力電池に必要な量を製造・取り扱いが可能な国がアメリカとロシアに限られ、さらに近年両国の原子炉施設の老朽化などにより Pu-238 を製造自体が困難となっている。宇宙探査機に搭載することを目的として、単位質量あたりの発熱量、探査ミッション期間に対応する十分な寿命を有すること、核燃料などに関する規制を受けず、核保有国でなくとも研究開発が行える放射性同位体がないか検討を行った結果 (表 1 参照) Po-209 が RTG の熱源として Pu-238 と同等の性能が期待されることを見出した。Po-209 は 崩壊核種で、半減期が 102.2 年、1 kg あたりの熱出力も簡易評価で約 500 W と Pu-238 と同様の特性を持つ。

表 1 代替各種の検討結果

| 核種 | 単位質量あたりの発熱 [W/kg] | 半減期 [y] |
|-------------------|-------------------|---------|
| ²³⁸ Pu | 567.5 | 87.7 |
| ¹⁴⁸ Gd | 660.9 | 70.9 |
| ²⁰⁹ Po | 492.5 | 102.0 |
| ²³² U | 717.5 | 68.9 |
| ²⁴¹ Am | 114.5 | 432.6 |
| ²⁴³ Cm | 1842.4 | 29.1 |
| ²⁴⁴ Cm | 2830.2 | 18.1 |
| ²⁴⁹ Cf | 152.5 | 351.1 |
| ²⁵⁰ Cf | 3965.7 | 13.1 |

半減期 10 年以上、出力 100 W/kg 以上。
¹⁴⁸Gd は天然同位体からの生成パスなし、
²³²U 以上は核燃料が必要

2. 研究の目的

本研究では、宇宙用探査機の RTG 用放射性同位体としての Po-209 を使用するにあたって必要となる基本的な特性と陽子加速器を使った製造に必要な条件を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

Po-209 の生成経路は図 1 に示すように、(1) ²⁰⁹Bi (p,n) 反応、(2) ²⁰⁹Bi(n,γ) ²¹⁰Bi(β崩壊) ²¹⁰Po(n,2n) 反応の 2 種類あり、それぞ

れ想定する体系が異なる。(1)については加速器のみを使用し Bi を含むターゲットに照射する方法。(2)については原子炉内での照射を想定する。

(1) ²⁰⁹Bi (p,n) 反応

Po-209 の製造方法の一例は、Bi-209 (天然存在比 100%) に加速器によって加速した陽子を入射させ、Bi-209(p,n)Po-209 反応によって生成する方法である。この方法は核燃料や原子炉を使わずに製造可能である点が特徴である。Bi-209(p,n)Po-209 反応は陽子エネルギー約 10 MeV に反応断面積のピークを持つ。本研究では、PHITS コード[1]を用いて、Po-209 の生成量のエネルギー依存性の計算を行った。PHITS コードの計算モデルによる核反応断面積を用い、厚い Bi 金属ターゲットに対して単色の陽子ビームを入射させた場合の、Po 同位体の生成率を計算した。

(2) ²⁰⁹Bi(n,γ) ²¹⁰Bi(β崩壊) ²¹⁰Po(n,2n) 反応

原子炉を使用した中性子照射による Po-209 の製造方法では、Bi-209 が中性子を捕獲し、1 度β崩壊した後、(n,2n)反応によって生成する方法である。Bi が大量に炉内にあり、(n,2n)反応が起きる中性子エネルギー範囲であるという条件をもとに鉛ビスマス冷却高速炉の体系について生成量の評価を行った。反応断面積として JENDL-4.0[2]及び不安定核である Po-210 などについては TALYS コード[3]によって理論計算された TENDL ライブラリ[4]を使用し、鉛ビスマス冷却、金属燃料体系での中性子エネルギースペクトルで 1 群縮約した断面積を用いて生成量評価を行った。

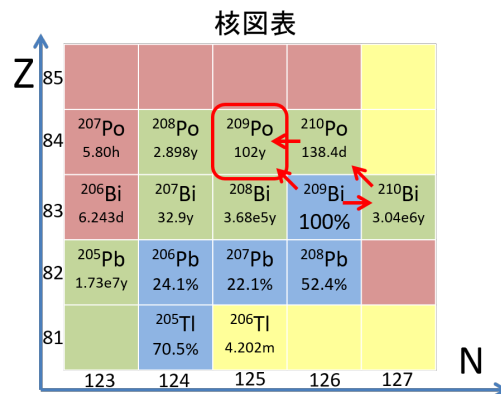


図 1 核図表と Po-209 の生成経路

4. 研究成果

(1) ²⁰⁹Bi (p,n) 反応

図 2 に 1 陽子入射に対する Po 同位体の生成量を示す。(p,n)反応によって Po-209 が生成され、陽子ビームのエネルギーが上がるほどターゲット内での飛程が伸びることでその生成量が増加する。一方で、陽子ビームの加速エネルギーが大きくなると(p,2n), (p,3n)反応のチャネルが開き、Po-208、209 の同位体が生成される。またこれらの同位体は陽子エネルギー 20 MeV 以上に対して Po-209 に対して

4 倍の量が生成されることが明らかとなった。純粋に Po-209 のみを生成する場合には陽子エネルギー 20 MeV 以下の照射が必要となる。

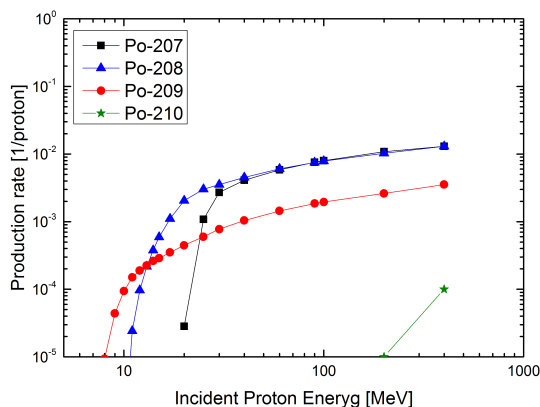


図2 Po-209 及びPo同位体の生成量エネルギー依存性

図 3 に年間 1 kg の Po-209 を製造するために必要となるビーム出力を示す。Po-209 の製造では陽子エネルギー 40 MeV のとき最大効率となり、その際必要なビーム電流は 14 A、ビーム出力 560 MW の結果となった。この値は現状の加速器術では工学的、経済的に厳しい値であり、加速器技術のさらなる発展が要求される。一方で、Po-209 と同出力となる Po-208 の製造に必要なビーム出力を併せて図 3 に示す。今回の想定したケースでは Po-208 は Po-209 の 4 倍生成される。半減期が 2.9 年と短いため同じ量の場合は熱出力が約 40 倍となる。そのため、Po-208 に必要な加速器条件は、陽子エネルギー 25 MeV で最大効率となり、ビーム電流 0.13A、ビーム出力 3.3 MW となった。半減期が Po-209 の 102 年と比較して短く、完全な Pu-238 の代替とはならないが、原子力電池の熱源として適用と製造可能性が示された。

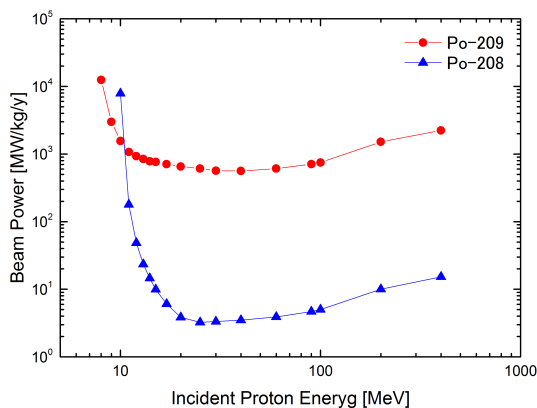


図 3 Po-209 製造に必要なビーム出力

(2) $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}(\beta\text{崩壊})^{210}\text{Po}(n,2n)$ 反応
図 4 に今回参照炉心とした鉛ビスマス冷却高速炉の中性子エネルギースペクトルと

$^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{gBi}$ 反応と $^{210}\text{Po}(n,2n)$ 反応の断面積を示す。 $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)$ 反応は全エネルギー範囲で反応が起き、今回のケースでの平均反応断面積は 1.4 mb となった。また $^{210}\text{Po}(n,2n)$ 反応は閾値が 7.7 MeV となり、高エネルギーの中性子のみで反応が起きる。そのため、反応断面積は大きい平均反応断面積は 1.2 mb となった。この平均断面積を使い、燃焼チェーンを解析的に解くことによって Po-209 の生成量を評価した。Po-210 は半減期が短いため放射平衡となっていると仮定すると、中性子束が $[1/\text{cm}^2/\text{s}]$ のとき、 $1.4 \times 10^{-16} [\text{kg}/\text{m}^3]$ となり、年間の Po-209 生成量は $5.4 \times 10^{-36} {}^2R [\text{kg}/\text{m}^3/\text{y}]$ と評価された。ここで R は炉心内とループ全体の鉛ビスマスの比である。平均中性子束を $10^{16} 1/\text{cm}^2/\text{s}$ のとき、平衡状態における Po-210 の平衡量は $1.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ となり、Po-209 の単位体積当たりの年間生成量は $5.4 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{m}^3/\text{y}$ となった。宇宙探査用原子力電池のため kg 単位の Po-209 の生成には、今回の解析条件では大型炉心、複数基、複数年運転が必要である。特に $^{210}\text{Po}(n,2n)^{209}\text{Po}$ 反応の閾値(7.7 MeV)を超える中性子が重要であり、より効率的な製造条件のためには加速器駆動未臨界や核融合炉などの高エネルギー中性子が多い原子炉が有利であると考えられる。

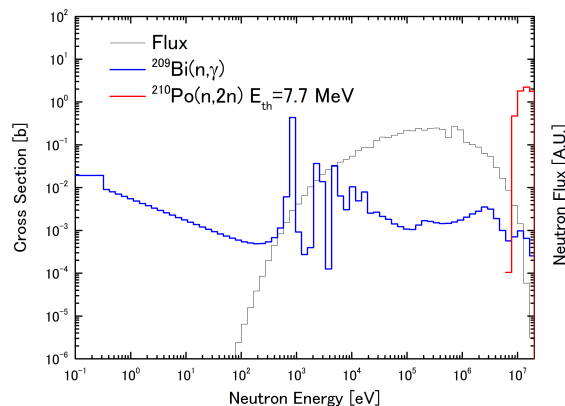


図 4 Pb-Bi 冷却高速炉の中性子エネルギースペクトルと反応断面積

(3) 製造方法検証実験に必要な基礎データの整備

$^{209}\text{Bi}(p,n)$ 反応断面積の測定と評価済み核データライブラリ、計算による評価値を図 5 に示す。この反応は閾反応であり、エネルギーが上がれば他の $(p,2n)$ 反応のチャンネルも開くためピークを持つ方となっている。一方、高エネルギー側では値の異なる測定値が報告されている。これを検証するために、個別の断面積測定実験、及び Bi ターゲットの陽子照射による積分実験が必要である。鉛ビスマスターゲットの陽子ビーム照射ターゲットの予備解析により、ターゲットからのガンマ線を測定することで Po-209 の生成量評価が可能であることが明らかとなった。一方で実験

精度を高めるためには鉛ビスマスではなくビスマスターゲットが効果的であることが明らかとなった。

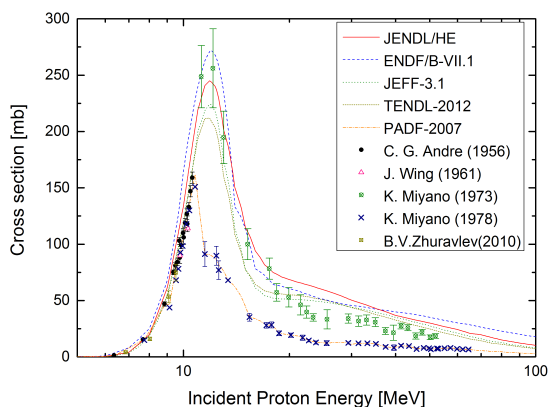


図5 ^{209}Bi (p,n)反応断面積の実験値と評価値

<参考文献>

- T. Sato *et al.*, "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 913-923 (2013).
- K. Shibata *et al.*, "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," *J. Nucl. Sci. Technol.* **48**, 1-30 (2011).
- A.J. Koning and D. Rochman, "Modern Nuclear Data Evaluation With The TALYS Code System", *Nuclear Data Sheets* 113 (2012) 2841
- TENDL-2014 :
<ftp://ftp.nrg.eu/pub/www/talys/tendl2014/tendl2014.html>

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)

[学会発表](計 3件)

Jun Nishiyama, Production of polonium-209 using nuclear reactor as radioisotope fuel for space nuclear power, Nuclear and Emerging Technology for Space 2015(NETS-2015), 2016年2月22日-25日, ハンツビル(アメリカ合衆国)

西山 潤, 宇宙原子力電池用燃料 Po-209の原子炉を用いた製造、日本原子力学会2015年春の年会、2015年3月20日-22日、茨城大学日立キャンパス(茨城県・日立市)

Jun Nishiyama, Feasibility study on polonium isotopes as radioisotope fuel for space nuclear power, Nuclear and Emerging Technology for Space

2015(NETS-2015), 2015年2月23日-26日, アルバカーキ(アメリカ合衆国)

[その他]

ホームページ

<http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~jun-nishiyama/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

西山 潤(NISHIYAMA, Jun)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：70512680