

O-2

小型核融合中性子源を用いた医療用放射性同位体生成 Production of medical radioisotopes using a small fusion neutron source

○藤田 朗人¹, 加藤 雅之¹, 高原 優¹, 山縣 宥介¹, 渡邊 響², 渡部 政行³

*Akito Fujita¹, Masayuki Kato¹, Yutaka Takahara¹, Yusuke Yamagata¹, Hibiki Watanabe², Masayuki Watanabe³

Abstract: Radioisotopes (RI) are used in a variety of fields, including medical radiation sources. However, the supply shortage of these radioisotopes is a problem worldwide. The purpose of this study is to manufacture radiation materials using the fusion reaction of a small fusion neutron source. In the experiment, gamma rays emitted from RI activated by neutrons generated in the fusion reaction are measured with a germanium semiconductor detector. In addition, energy is calibrated using existing sealed radiation sources such as cobalt (1173keV, 1333keV) and cesium (662keV).

1. 研究背景と目的

放射性同位体 (RI) は医療や工学など様々な分野で利用されている。この RI は崩壊を伴うため自然界に存在する割合が低い。そのため原子炉や大型の加速器から発する中性子や荷電粒子を用いて RI は人工的に生成されている。しかしながら、その主な施設のほとんどが国外の大型施設であり、国内で使用する RI を海外からの輸入に頼っているのが現状である。加えて、稼働している原子炉の老朽化に伴う生産の停止や輸入の不安定性等の問題点、また近年の国内で使用する量の増加など、特に医療の分野では様々な問題が生じている。そこで本研究室では核融合反応を用いた小型中性子源から発生する中性子線による物質の放射化の実験を開始した。小型の中性子源で RI の生産が可能になれば、国内の RI 供給に関する問題が解消される可能性がある。以上、小型核融合中性子源を用いた放射法による放射線物質を生成することが本研究の目的である。

2. 放射化に伴う放射線の発生^[1]

物質の放射化に伴って荷電粒子や電磁波など、多くの放射線が発生する。また実験で使用する中性子源が発する中性子も高エネルギーの放射線である。放射線は高エネルギーを有する電磁波や粒子線であり、直接または間接的に物質を電離する能力を持つ流れのことを指す。以下ではその放射線の種類について説明する。

2. 1. 荷電粒子

電離を起こしうる電子や陽子といった高エネルギーの荷電粒子は放射線の一種である。原子核からヘリウム原子核が高速に飛び出た流れが α 線である。また β 崩壊によって原子核から放射された電子もしくは陽電子も荷電粒子に分類される放射線である。これら荷電粒子の放射線は比較的、透過率が低い。

2. 2. 電磁波

電磁波に分類される放射線として X 線および γ 線が挙げられる。電磁放射線は透過能力が比較的、高い放射線である。X 線は高速の電子が原子に衝突した際に発生する。また γ 線は放射性核種の崩壊に伴って、核の励起状態からより低いエネルギー状態に遷移する際に、原子核から放射される電磁波である。後述するゲルマニウム半導体検出器では放射性物質から放出される微小な γ 線を計測することができる。

2. 3. 中性子線

中性子とは、陽子とともに原子核を構成する核子の一つである。質量や大きさは陽子とほぼ同じであり、電荷を持たない中性の粒子が中性子である。高エネルギーを有する中性子は放射線であり、この中性子線は原子核が核融合や核分裂を起こした際に放射される。中性子は電荷をもたないため、電子や原子核と電気的な相互作用を起こさない。そのため他の放射線と比べて最も物質中の透過率が高い。中性子と物質の相互作用を考えると、電子は中性子に比べ1836倍、質量が軽いいため、中性子と物質との相互作用は、主に原子核との衝突となる。中性子は原子核との衝突によりエネルギーを失う。

3. 核融合反応^[2]

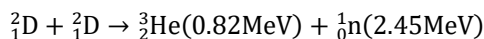
水素、リチウムなどの原子核が核反応し、元の原子核より重い原子核に変わる反応を核融合反応という。この反応は、原子核同士に働くクーロンポテンシャルを超えて核子(中性子等)の間に働く強い引力のことで起こすことができる。地球上で核融合エネルギーを発生できる元素の一つとして主に重水素、三重水素が候補に挙げられる。これらの核反応の種類には、D-D 核

1 : 日大理工・院(前)・量子: Graduate School of Quantum Science and Technology, CST, Nihon-U

2 : 日大理工・物理: Science, CST, Nihon-U

3 : 日大・教員・量科研: Institute of Quantum Science, Nihon-U

融合反応と D-T 核融合反応があり、本研究室では D-D 核融合反応を用いた中性子源の開発を行っている。D-D 核融合の反応式を以下に示す。



この核融合反応によって生じる中性子のエネルギーは 2.45MeV である。ここで $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$ である。この中性子を用いて物質の放射化の実験を行う。

4. 小型核融合中性子源

本装置は核融合反応を起こすために、電極部にリング状の陰極（以下:リング陰極）を用いている。実験装置の中心部にリング陰極を設置し、それらを挟むように左右に陽極を設置している。まず真空容器内の気圧を 10^{-5}Pa 程度まで減圧した後、ピエゾバルブを介して重水素ガスを充填させる。次にリング陰極に高電圧を印加する。その高電圧により、リング陰極と陽極間で重水素ガスはプラズマ化し、重水素の原子核と電子を含むグロー状のプラズマがリング陰極付近に生成される。グロー放電中の重水素はリング陰極の中心部に向かって加速され、リング中心部を通過後、リング陰極の電場により減速され、再びリング陰極の方向に加速される。印加する電圧の増加に伴いグロー放電はビーム状の放電に移行する。リング陰極に印加する電圧が -10kV 以上において核融合反応が生じ始める。

5. ゲルマニウム (Ge) 半導体検出器^[3]

Ge 半導体の検出部である Ge 結晶は、アルミニウム製のキャップ分に覆われている。Ge 結晶に γ 線が入射すると Ge 原子の電子が弾き飛ばされ、この電子が回りの Ge 原子の電子を剥ぎとっていく。最初の電子は全ての運動エネルギーをこれらの電離に消費して停止する。全ての電子と空席の対（電子・正孔対）の数は計測器に入射する γ 線エネルギーに比例する。電子・正孔対を収集するため高純度の Ge に Ga などの第 III 族の元素を不純物として添加した円柱の形をした p 型結晶を用いる。Ge 結晶の γ 線が入射する外側に Li を熱拡散した電極 (n+電極) を作ることで、 γ 線に対して不感層となる。その中心に空けた空洞部分に p+電極を作る。外側の n+電極にプラス、内側の p+電極にマイナスの逆バイアス電圧を印加することによって結晶内部に空乏層が生成し γ 線を有感な領域ができる。

6. 実験結果^[3]

まず中性子源で放射化した RI の計測を行う前に、Ge 半導体検出器を用いて密封線源から放出される γ 線を

測定する予備実験を行った。本実験で使用した密封線源はコバルト 60 とセシウム 137 である。コバルト 60 とセシウム 137 は β 崩壊するとそれぞれニッケル 60 とバリウム 137 に変わる。 β 崩壊後に励起した原子核による γ 崩壊が起こる。ニッケル 60 は 1173keV と 1333keV、バリウム 137 は 662keV の γ 線を放出する。Ge 半導体検出器を用いた計測では、それぞれ計測時間を 1000 秒間とし、マルチチャンネルアナライザ (MCA) を用いて実験を行った。その測定結果を図 1 に示す。サンプルデータとして、放射源を使用しない「線源なし」の場合も同様に計測を行った。

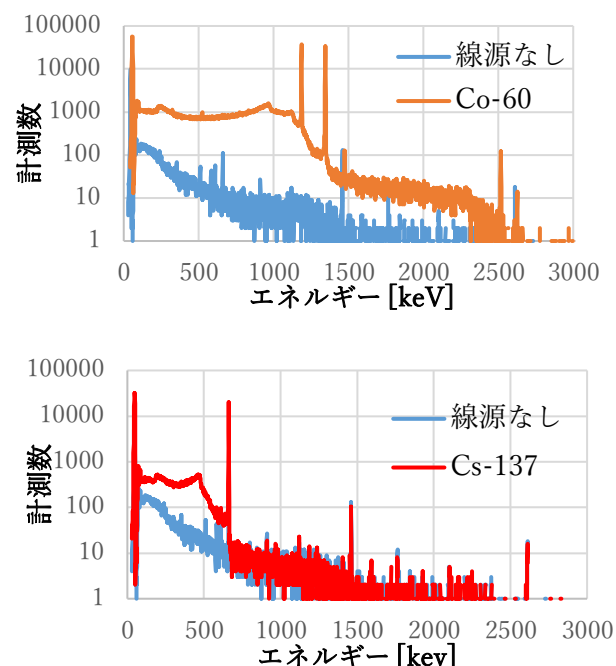


Figure1 Environmental radiation and measurement of each gamma ray

コバルト 60 とセシウム 137 の基礎データからエネルギーの校正を行った結果、それぞれの放射線の放出を確認することができた。今後、Ge 半導体検出器を用いて実際に小型中性子源で放射化した試料を計測する予定である。

7. 参考文献

- [1] 吉野興平：放射線測定の基礎，創英社，2017 年。
- [2] Jeffrey P. Freidberg：Plasma Physics and Fusion Energy, Cambridge University Press, 2008 年
- [3] Richard B. Firestone, Virginia S. Shirley et al：Table of Isotopes 8th ed, New York：J. Wiley, 1996 年