

O-1

小型核融合中性子源を用いた放射性物質の形成

Production of radioactive materials using a small fusion neutron source

○藤田 朗人¹, 高原 優¹, 山縣 宥介¹, 渡邊 響¹, 渡部 政行²*Akito Fujita¹, Yutaka Takahara¹, Yusuke Yamagata¹, Hibiki Watanabe¹, Masayuki Watanabe²

Abstract: Radioactive isotopes (RI) are currently used in various fields such as engineering, agriculture, and biological sciences. However, a shortage in the supply of these radioisotopes has become a problem in Japan. The objective of this research is to produce radioactive materials using a nuclear fusion reaction in a small fusion neutron source. In the experiment, 2.45 MeV neutrons produced by the fusion reaction were moderated by polyethylene blocks and irradiated to indium plates for 4 hours. As a result, six peaks from activated indium, which were not emitted by environmental radiation, could be detected.

1. 研究背景と目的^[1]

中性子線をはじめとした放射線は工学や農業、生物科学など様々な分野において有用な技術である。また医療の面では核医学診断で使用される放射性医薬品等があり、国民の健康を支える上で欠かせないものとなっている。このような、放射性医薬品等の原料となる⁹⁹Moなどの放射性同位体(RI)は自然界に存在する割合が低い。そのため、一般的に原子炉や大型の加速器で製造されている。しかしながら、現在の日本ではRIの調達に海外からの輸入品に依存している現状がある。さらに老朽化した原子炉の停止や遠方からの輸入の不安定性等でその供給事情に問題が生じている。そのため、これらRIは国産化が望まれている。そこで本研究では核融合反応を用いた小型中性子源を利用した、放射法による放射性物質の形成とその特性評価を行った。放射性物質はRIが含まれた物質である。小型装置で放射性物質の生産が可能になれば、病院内に設置することもできるため、国内のRI供給問題が解消される可能性がある。講演では実際の放射化実験やより効率よく放射化させるためにポリエチレンブロックの厚さの最適化などの結果に関して説明する。

2. 放射線^[2]

放射線とは、高エネルギーの電磁波(γ線、X線)や高い運動エネルギーを有する粒子(陽子、中性子等)の総称である。放射線の中で原子や分子から電子を引き離しイオン化(電離)を起こすことが可能なほどのエネルギーの高い放射線を「電離放射線」、一方で電離を起こさない放射線を「非電離放射線」に分類する。本研究で取り扱う放射線は電離放射線である中性子線を取り扱っている。次節では中性子線について説明する。

2. 1. 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に属し、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. 放射性同位体

元素の種類は陽子の数によって決まり、中性子の数には関係しない。そのため、陽子の数は等しいが、中性子の数が異なる原子核が存在する。このような原子核は、周期表では、同じ位置(原子番号)に属する元素なので、同位元素、または同位体(isotope)という。また、陽子、中性子の数がいずれも互いに等しく、エネルギー準位だけが異なる核種を核異性体という。表記される際は質量数の後にm (metastable)をつける。同位体の中で、放射能を持っている元素を放射性同位元素、放射性同位体(RI: Radio Isotope)と呼ぶ。

4. 核反応

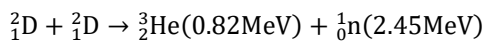
高エネルギーに加速された粒子を原子核にぶつけると、核と粒子が核力により相互作用し、原子核に変化が生じる。これを核反応という。原子核に衝突した入射粒子は、一部は散乱(弾性散乱など)され、残りは吸収(核融合など)される。次節では吸収反応について説明する。

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

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

4. 1. 核融合反応^[3]

水素、リチウムなどの軽い原子核が核反応し、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ある核力が作用するほど原子核同士を接近させる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. 2. 放射捕獲反応 (中性子捕獲反応)

入射粒子が原子核に入射したときに、原子核に捕獲され複合核が生成されることがある。このとき複合核は、励起状態と呼ばれる高いエネルギー状態になる。励起状態の原子核は中性子などの粒子を放出するだけの十分のエネルギーがない場合、代わりに余分なエネルギーをγ線として放出し、基底状態に戻る。この現象が放射捕獲反応である。入射粒子が中性子の時、中性子捕獲反応であり (n,γ) と表記されることもある。高いエネルギーを持つ中性子に比べて、低いエネルギーをもつ中性子の方がより原子核に捕獲されやすくなるため、ポリエチレンブロックや水などの中性子と同じ重さをもつ水素を多く含むものに衝突することで中性子を減速させることができる。

5. 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に、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。

6. 実験結果^[4]

本実験では、まず放射化に適した物質であるインジウムを用いた中性子線の照射実験を行った。核融合反応で発生した 2.45MeV の中性子をポリエチレンブロックで減速し、インジウム (In) 板に4時間照射した。中性子線照射後に放射化されてできた ${}^{116\text{m}}\text{In}$ から発生するγ線をGe半導体検出器で2時間計測した。また、放射化したインジウム板の計測を行う前に、密封放射線源から放出されるγ線を用いてGe半導体検出器のエネルギー校正を行った。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。校正結果を用いてInから放射されるγ線のエネルギー分布を計測した。その結果と環境放射線γ線スペクトルを比較した図1を以下に示す。

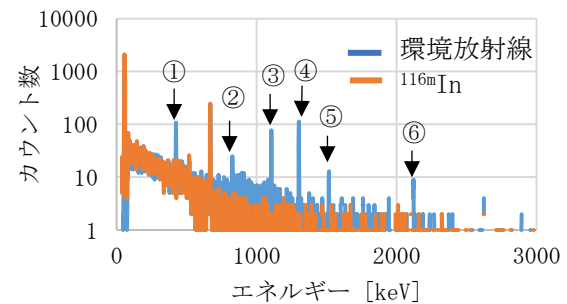


図1 Energy distribution of γ-rays from ${}^{116\text{m}}\text{In}$

- ① : 417 ; ② : 819 ; ③ : 1097 ; ④ : 1294 ;
⑤ : 1507 ; ⑥ : 2112

比較の結果、環境放射線では放出されていない6つのピークを検出することができた。これは ${}^{116\text{m}}\text{In}$ のγ線エネルギーの放出割合と一致する。

7. 参考文献

- [1] IAEA : Manual for reactor produced radioisotopes, 2003年
- [2] 大塚徳勝・西谷源展:Q&A 放射線物理, 共立出版, 2016年
- [3] Jeffrey P. Freidberg : Plasma Physics and Fusion Energy, Cambridge University Press, 2008年
- [4] Richard B. Firestone, Virginia S. Shirley et al : Table of Isotopes 8th ed, New York : J. Wiley, 1996