

## 核融合反応を用いた小型中性子源における中性子出力のリング陰極形状依存性

### Ring cathode shape dependence of neutron fluence rate in small neutron source using nuclear fusion reaction

○高原優<sup>1</sup>, 藤田朗人<sup>1</sup>, 山縣宥介<sup>1</sup>, 加藤雅之<sup>1</sup>, 渡邊響<sup>2</sup>, 渡部政行<sup>3</sup>  
Yutaka Takahara<sup>1</sup>, Akito Fujita<sup>1</sup>, Yusuke Yamagata<sup>1</sup>, Masayuki Kato<sup>1</sup>, Hibiki Watanabe<sup>2</sup>, Masayuki Watanabe<sup>3</sup>

Neutrons are a one of radiation that has been applied to various fields of science. The main neutron sources are nuclear reactors and large accelerators. In this research, a compact, low-cost, and highly controllable neutron source using fusion reactions are investigated. In the previous study, it was found that the number of neutrons generated strongly depended on the shape of the ring cathode. The purpose of this study is to investigate the dependence of the neutron fluence rate on the shape of the ring cathode. The neutron fluence rate was about  $2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  under the condition that the applied voltage to the ring cathode was -30 kV and the discharge current was 10 mA. It was also confirmed that the neutron fluence rate increased rapidly with increasing the voltage applied to the ring cathode.

#### 1. 研究背景と目的

中性子線は放射線の一つであり、産業・医療・工業・原子力エネルギーといった様々な分野に応用されている。現在、主に用いられている中性子発生装置は、原子炉のような核分裂反応を応用した中性子源である。原子炉は中性子発生量が多く、中性子線の高出力化が容易である反面、施設および装置自体が大型となる。加えて、中性子発生の制御が難しく、核反応自体が暴走する恐れもあるため、施設の建設する地域が限定されてしまう。中性子応用の今後の更なる発展を考えた場合、小型かつ低コストで、運転制御が容易な中性子発生装置の開発が求められる。

本研究では、核融合反応を応用した小型かつ低コスト、また運転制御性が高い中性子源の開発を行っている。これまで本研究ではリング陰極を用いた小型中性子源を考察し、先行研究において中性子線の発生を確認してきた。その先行研究において、中性子の発生数がリング陰極の形状に強く依存することがわかってきた。そこで本研究では、リング陰極の幾何学的形状の変化による中性子発生数変化をより詳しく調べることを目的とした研究を行った。リング陰極形状の依存性が明らかになれば、小型中性子源の更なる高出力化が期待できる。

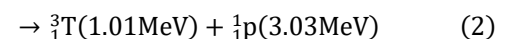
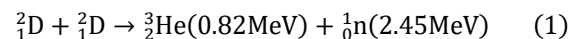
#### 2. 中性子

中性子は電荷をもたない電氣的に中性な粒子である。そのためクーロン力が働かず、原子や分子に電氣的に相互作用しない。中性子の質量は陽子とほぼ等しく、電子の質量に対しては1836倍の質量である。以上より、電子は中性子に比べて非常に軽いため、原子との相互作用において、中性子は電子と衝突しても散乱されず、原子核と衝突したときのみ相互作用を起こす。物質と

中性子との相互作用を考えた場合、中性子は質量数の低い物質の原子核と衝突した場合に、多くのエネルギーを相手の原子核に移し、最終的には停止する。逆に、重い原子核と衝突した場合は、中性子の持つエネルギーの授受はできず、初期のエネルギーを有したまま散乱する。すなわち中性子は重い元素の物質では遮蔽ができず、軽い元素の物質ほど透過しにくい。<sup>[1]</sup>

#### 3. 核融合反応

核融合反応とは、軽い原子核同士が衝突し、融合することによって、より重い原子核に核変換する反応である。本研究では重水素(D)同士の核融合反応を用いて中性子を発生させている。以下にその核反応式を示す。



この2種類の反応をD-D核融合反応と呼ばれ、これらの反応は、ほぼ同じ確率で起こることが知られている。

<sup>[2]</sup> 本研究ではこの核反応で生じる2.45MeVの中性子線を応用する研究も進めている。

#### 4. 慣性静電閉じ込め方式核融合

慣性静電閉じ込め方式核融合(IECF: Inertial Electrostatic Confinement Fusion)とは、真空容器内で放電を起こし、重水素などの燃料となるガスをプラズマ化させ、その過程で発生する原子核を電位井戸内に閉じ込め、核融合を起こす方式の一つである。IECFには大きく分けて二つの種類がある。一つは球状型、もう一つは円筒型である。本研究では円筒型IECFを用いた小型中性子源の開発を行っている。

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: Physics, CST, Nihon-U.

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

5. 実験装置と実験方法

Figure1 に本研究で使用する小型核融合中性子源の概略図を示す。装置中心部に核融合反応を起こさせるリング電極を含む真空容器が設置され、リング陰極の左右両側に陽極が設置されている。この陽極は接地されている。真空装置の周りに放電を発生させる回路系や中性子線などを測定する計測系が配置されている。中性子フルエンス率の計測には中性子サーベイメータを用いた。

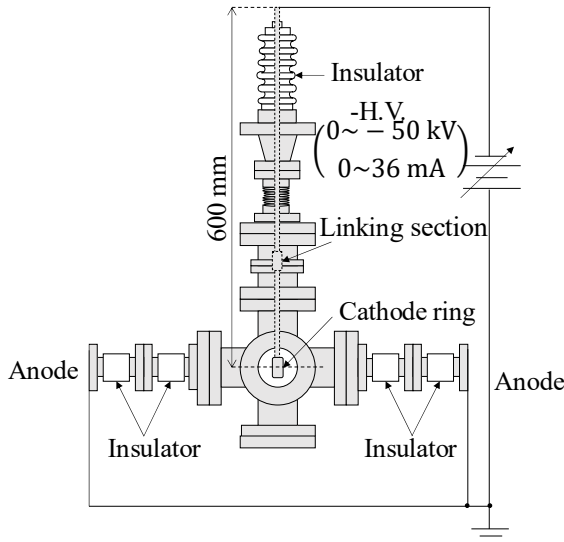


Figure 1 Schematic diagram of the compact neutron source

リング陰極の概略図を Figure 2 に示す。本研究ではリング陰極を用いて重水素原子核を加速・収束し、核融合反応を起こすことで中性子を発生させる。実験ではリングの径 ( $\phi 1, \phi 2$ ) および長さ ( $L$ ) を変化させて中性子フルエンス率のリング陰極形状依存性を調べた。

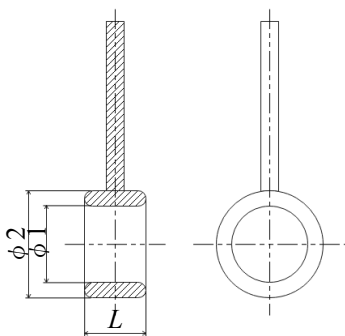


Figure 2 Schematic drawing of a ring-shaped cathode

実験手順として、まず真空ポンプを用いて真空容器内を高真空に保ち、容器内に重水素ガスを充填させる。その後、リング陰極と陽極間で放電を形成し、重水素の原子核を生成する。発生した原子核は高い電場によりリング陰極の中心部に向かって急激に加速される。

リング陰極の中心部を通り過ぎた後、原子核は電場で引き戻され、再びリング陰極の中心部に向かって急激に加速される。その結果、重水素原子核同士の衝突が起こり、核融合反応により式(1)に示す中性子が生じる。

6. 実験結果とまとめ

リング陰極の大きさを  $\phi 1=15\text{mm}$ ,  $\phi 2=25\text{mm}$  で固定し、 $L$  の長さを変化させ、中性子フルエンス率を測定した。リング陰極への印加電圧を  $-10\sim-30\text{kV}$ 、放電電流を  $6\text{mA}$ ,  $8\text{mA}$ ,  $10\text{mA}$  の条件で実験を行った。 $-30\text{kV}$  時の実験結果を Figure 3 に示す。中性子の計測はリング陰極中心部から距離  $90\text{cm}$  の位置で計測を行った。

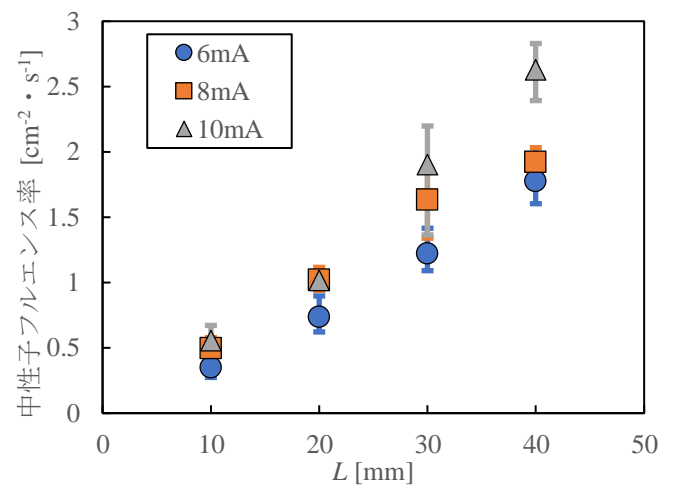


Figure 3 Ring cathode  $L$  dependence of neutron fluence rate

リング陰極の長さ  $L$  の増加に伴い、中性子フルエンス率が線形的に増加することが確認できる。本実験ではこの他、様々なリング陰極の形状の電極を用い中性子の生成実験を行っている。講演ではその結果を報告する。また、印加電圧を  $-45\text{kV}$  まで上げた高電圧条件でも中性子フルエンスの計測実験を行っており、その結果についても報告する。

7. 参考文献

[1] 大塚徳勝・西谷源展:「Q&A 放射線物理改訂2版」, 共立出版株式会社, 2016, p.33, p.148

[2] A. Asle Zaem, H. Ghafoorifard, A. Sadighzadehc and M. Sedaghat Movahhed : “Preliminary results of a miniature cylindrical inertial electrostatic confinement fusion device equipped with inductively coupled plasma generator”, Journal of Instrumentation, Vol. 14, 2019