

## O-2

## リング陰極を用いた小型核融合型中性子源の高電圧・電流領域における中性子フルエンス率 Neutron fluence rate of a compact fusion neutron source with a ring cathode in the high voltage and current region

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

Neutrons are a one of radiation that has been applied to various fields of science. The currently main neutron sources are nuclear reactors and large accelerators. The development of compact neutron sources is important for the progress of neutron applications. In our laboratory, development of compact neutron sources based on fusion reactions is underway. In our previous study, it was found that the number of neutrons produced strongly depends on the discharge current and applied voltage. The purpose of this study is to enable discharge experiments in the higher current and higher voltage regions and to investigate the change in the number of neutrons produced in the high discharge current and high applied voltage regions in more detail. In our resent experiment, the neutron fluence rate was confirmed to be about  $7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  under the conditions of a discharge current of 30 mA and an applied voltage of -40 kV to the ring cathode. 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

核反応により発生した高エネルギーの中性子線は放射線的一种である。近年、中性子線は産業・医療・工業・原子力エネルギーといった様々な分野への応用が進み、今後さらに中性子発生装置の需要が高まることが予想される。現在、主に用いられている中性子発生装置は、原子炉に代表される核分裂反応を応用した中性子源である。核分裂反応による連鎖反応により、原子炉は中性子の発生量が多く、原子炉の高出力な中性子を応用することが容易である反面、中性子発生制御が難しく、また核反応自体が暴走する恐れもあるため、一般に広く普及することは難しい。加えて、炉を冷却するため大量の水が必要になることもあり、建設する地域が限定されてしまう。今後の中性子線応用の発展を考えた場合、小型かつ低コストで、運転制御が容易である中性子発生装置の開発が求められる。

本研究室では、核融合反応を応用した小型中性子源の開発を行っている。核融合反応を応用することで、核分裂反応のような連鎖的な核反応が起こらないため、運転制御が容易になり、また、小型であることからコストを抑えることができる。本研究室で考察した中性子源は、リング陰極を用いた小型中性子源であり、先行研究において、中性子の発生数が放電電流や印加電圧に強く依存することがわかってきた。

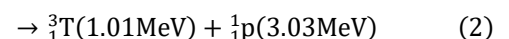
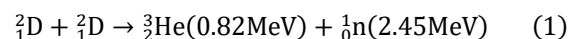
そこで本研究では、ガス導入系等の調整を工夫することで、より高放電電流領域・高印加電圧領域における中性子発生実験を可能とし、そのような領域における中性子発生量を詳細に調べることを目的とした研究を行った。

### 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。そのため中性子にはクーロン力が働かず、原子や分子と電氣的な相互作用を起こさない。また中性子の質量は陽子とほぼ等しく、電子の質量と比べて1836倍重い。その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、中性子は衝突した相手とエネルギーの授受ができず、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性質がある。

### 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。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。

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. 小型核融合中性子源

本研究では慣性静電閉じ込め方式核融合 (IECF : Inertial Electro-static Confinement Fusion) を用いた小型中性子源の開発を行っている。IECF 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場で加速、収束させ核融合を起こす方式の一つである。本研究室で開発中の中性子源について下記で詳しく説明する。

5. 実験装置と実験方法

Figure 1 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発生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。実験ではこの2つの陽極を接地する。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。

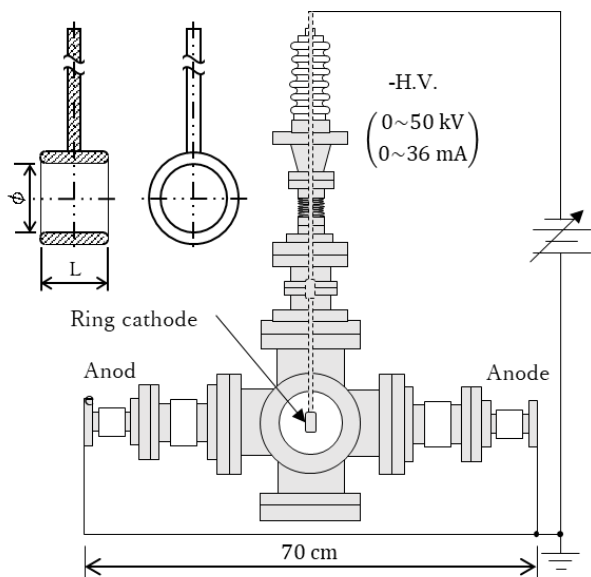


Figure 1 Schematic diagram of the compact neutron source

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  $\phi=25\text{mm}$ ,  $L=20\text{mm}$  で実験を行い、中性子フルエンス率を測定した。リング陰極への放電電流を  $5\text{mA}\sim 30\text{mA}$ , 印加電圧を  $-10\text{kV}\sim 40\text{kV}$  の高電流、高電圧の条件で実験を行った。電流電圧における中性子フルエンス率の依存性を Figure 2 に示す。中性子フルエンス率は中性子線源から  $0\text{cm}$  における値である。

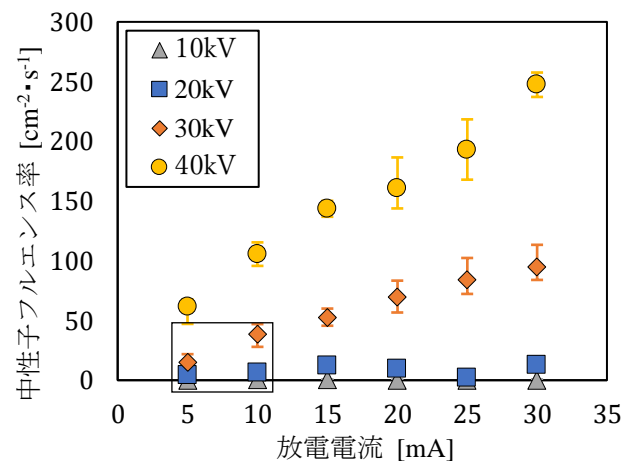


Figure 2 Dependence of neutron fluence rate on discharge current

先行研究では、Figure 2 の点線の四角で囲んだ、放電電流  $5\text{mA}\sim 10\text{mA}$ , 印加電圧  $-10\text{kV}\sim 30\text{kV}$ , の領域において実験を行っていた。本研究ではさらに、放電電流  $30\text{mA}$ , 印加電圧を  $-40\text{kV}$  まで領域を広げることが可能となるようにガス導入系などの実験条件を調整し、印加電圧  $-10\text{kV}\sim 40\text{kV}$ , 放電電流  $5\text{mA}\sim 30\text{mA}$  の領域での実験を行うことを可能にした。実験では Figure 2 に示す通り、高電流領域における中性子フルエンス率の依存性を確認できた。この他、高電圧領域における中性子フルエンス率の依存性を確認できた。講演では実験装置及び手順の改良点やその結果を報告する。

7. 参考文献

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  
 A. Asle Zaem, et al, Journal of Instrumentation, Volume 14, Issue 07, pp. T07007 (2019).  
 R. Bandara and Khachan, Physics of Plasmas 22, 102705(2015)