

名古屋大学における静電加速器を用いた ホウ素中性子捕捉療法用中性子源の開発

DEVELOPMENT OF THE ELECTROSTATIC ACCELERATOR DRIVEN BNCT NEUTRON SOURCE AT NAGOYA UNIVERSITY

鬼柳善明^{#, A)}, 土田一輝^{A)}, 古澤大貴^{A)}, 校條洋輔^{A)}, 山崎淳^{A)}, 渡辺賢一^{A)}, 瓜谷章^{A)}, 辻義之^{A)}, 恒吉達矢^{A)},
市川豪^{B)}, 広田克也^{B)}, 北口雅暁^{B)}, 清水裕彦^{B)}

Yoshiaki Kiyanagi^{#, A)}, Kazuki Tsuchida^{A)}, Daiki Furuzawa^{A)}, Yosuke Menjo^{A)}, Kenichi Watanabe^{A)}, Akira Uritani^{A)},
Yoshiyuki Tsuji^{A)}, Tatsuya Tsuneyoshi^{A)}, Go Ichikawa^{B)}, Katsuya Hirota^{B)}, Maaaki Kitaguchi^{B)}, Hirohiko Shimizu^{B)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} Graduate School of Science, Nagoya University

Abstract

A neutron source based on an electrostatic accelerator, Dynamitron (2.8MeV, 15mA), is under construction at Nagoya University. The neutron source is planned to be used for boron neutron capture therapy and for science and engineering applications. Due to the low proton energy a Li target is used to obtain much higher neutron intensity than a Be target. The accelerator was installed in 20015. The first beam was delivered at 2.8MeV and 11mA in January 2016. Commissioning is underway for stable operation. A design study on a beam shaping assembly (BSA) has been performed under the condition of the IAEA-TECDOC-1223. A BSA that can produce epi-thermal neutron intensity over 10^9 n/cm²/sec was designed fulfilling the condition. Heat removal is one of serious issues of the Li target. Therefore, we performed preliminary experiment using an electron beam heating method. The result indicated that the cooling system developed will be able to remove the heat expected at full power accelerator operation.

1. はじめに

名古屋大学では、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) 用の工学実験を主たる目的とし、理工学応用にも供することができる中性子源、NUANS (Nagoya University Accelerator-driven Neutron Source)、の建設を進めている。加速器は IBA 社の静電加速器ダイナミトロン (最大エネルギー 2.8MeV、電流 15mA、パワー 42kW) で、これと密閉型 Li ターゲットを使用したコンパクトな BNCT 用中性子源 (BSA: Beam Shaping Assembly) を製作し、BNCT 装置としての工学的成立性を検証するのを目的としている。ビームラインとしては、BNCT 実験用の第一ビームラインと理工学実験用の第二ビームラインが設置される。

医療療機器としては加速器の安定運転が最重要課題の一つであるので、アメリカから搬送される前に、フルパワーで 5 時間連続運転の試験を行い、その後、名大に送られ、2015 年夏に設置された。現在、安定運転に向けて調整が進められているところである。これと平行して、BSA と Li ターゲットの開発が進められている。BSA は、IAEA-TECDOC-1232[1]に準拠しながら、低エネルギー陽子と Li ターゲットに最適なものを目指して設計が行われている。Li ターゲットについては、密封型ターゲット製造法の開発、熱除去試験などが行われている。

ここでは、NUANS の概要、加速器の調整状況、BSA デザイン、ターゲットの開発状況について報告する。

2. 施設の概要と加速器の状況

加速器施設の加速器、ビームラインおよびその遮蔽は Figure 1 に示すような配置を考えている。ビームラインの角度は決まっており、BNCT 用の第一ビームラインは、20°、理工学実験用の第二ビームラインは 70° 傾いた配置になる。その周囲に遮蔽体を設置している。第二ビームラインは加速器パワー最大 4kW で Be ターゲットでの中性子発生を考えているため、遮蔽が薄くなっている。加速器とビームラインの分岐部辺りまでの輸送管が

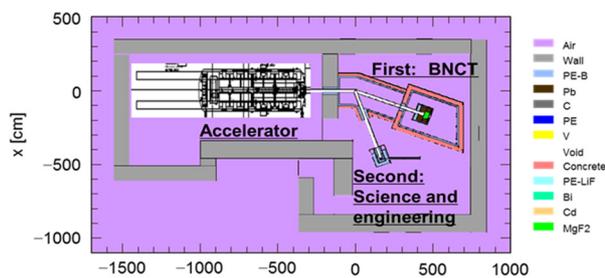


Figure 1: Layout of an accelerator and two beam lines with their shields.

既に設置されている。その写真を Figure 2 に示す。加速器は 2015 年 8 月にアメリカから名大に到着し、調整を続けて、2016 年 1 月に 2.8MeV、11mA、定格の約 73% のパワーのビームを出すことに成功した。ビームサイズの半値幅は、約 30 数 mm となっており、ほぼ予定の径に近い値が得られている。しかし、安定してビームをだすために、現在さらに調整を続けているところである。

[#] kiyanagi@phi.phys.nagoya-u.ac.jp



Figure 2: Photo of an accelerator and a beam transport line.

3. BSA の設計

低エネルギー陽子で Li をターゲットとして中性子を発生すると、中性子エネルギーも MeV 以下となる。発生中性子エネルギーが低い場合には、BNCT 用の熱外中性子 (0.5eV~10keV) を発生させるための減速材としては、MgF₂ が優れていることが知られている [2]。また、反射体としては鉛が優れている。従って、我々はこの二つの物質をベースにし、LiF ポリエチレン (LiF-PE) コリメータを設置したものを数値シミュレーションで検討した。計算には PHITS コード [3] と ENDF/B-VII.1 [4] を用いた。設計の基本方針としては、IAEA-TECDOC [1] の基準を満たして、熱外中性子強度を最大にすることとした。最終的に得られた BSA の断面図を Figure 3 に示す。MgF₂ の最大直径は 50cm、主要部の長さは約 26cm であり、ターゲット後方にも MgF₂ を設置することに依って、熱外中性子強度を大きく増加することができた。Table 1 に TECDOC の基準と我々が開発した BSA の特性を示す。約 2×10^9 n/sec/cm² の熱外中性子束が得られる高性能システムとなっている。今後、製作用構造物なども考慮した詳細設計を進めていく予定である。

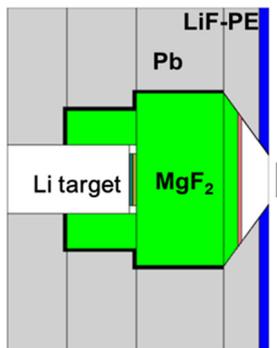


Figure 3: Cut view of a developed BSA.

Table 1: Performance of a BSA and IAEA Conditions

| | Developed BSA | IAEA-TECDOC | |
|--|---------------|-------------|----------------------|
| $N_{epi} [\times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}]$ | 1.89 | ≥ 1 | Epithermal neutron |
| $D_f [\times 10^{13} \text{ Gy} \cdot \text{cm}^2]$ | 1.99 | ≤ 2 | Fast neutron rate |
| $D_\gamma [\times 10^{13} \text{ Gy} \cdot \text{cm}^2]$ | 1.69 | ≤ 2 | Gamma-ray rate |
| N_{th} | 0.047 | ≤ 0.05 | Thermal neutron rate |
| C/F | 0.704 | ≥ 0.7 | Current/Flux |

4. ターゲットの開発

Li は低融点であり、中性子の生成にともなって放射性物質である ⁷Be が蓄積する。液体 Li と ⁷Be の拡散を防ぎ、かつ、コンパクトなターゲットとするために Li 密封型のターゲットを開発することにした。ターゲットは、水素脆化に強い Ta 基板にエンボス構造を作り、それに Ti の薄膜を接合し、その間に Li を封入する構造になっている。Ta 基板と Ti 薄膜は HIP による接合に成功した。一方、除熱に関しては、最大熱流束は 6.6MW/m² となり、高効率の除熱が必要であることが分かっている。銅版に水冷チャンネルを設けて冷却を行う、冷却部を作成し、電子ビームによる加熱予備実験を核融合科学研究所の ACT2 を用いて行った。冷却水チャンネルにリブをつけたものとリブがないものとの、電子加熱による温度上昇を測定した。水冷ジャケットに試験用ターゲットを組み込み、それを実験装置にセットした時の写真を Figure 4 に示す。その結果、6.6MW/m² では、リブ無しでは約 100℃の温度上昇があったが、有りでは約 50℃にとどまっていた。冷却水チャンネルに乱流促進の機構をつけることにより、除熱効率が大幅に向上し、除熱が可能である見通しが得られた。



The test plate is seen at the center of the jacket.

Figure 4: Photo of a test cooling copper plate with water channels covered by a water jacket.

5. まとめ

NUANS の加速器は、第一段階として 5mA 程度での安定運転を目指して調整作業が進められている。その後、フルパワーの 15mA を達成する予定である。これと平行して、BSA の設計・製作とターゲット開発を進めており、必要な熱外中性子強度の達成、熱除去の見通しが得られている。

参考文献

- [1] IAEA TECDOC-1223, Current Status of Neutron Capture Therapy, International Atomic Energy Agency (2001).
- [2] Y. Hashimoto, F. Hiraga, Y. Kiyonagi, Physics Procedia, 60, 332-340(2014).
- [3] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).
- [4] M.B. Chadwick *et al.*, Nuclear Data Sheets, 112, 2887-2996 (2011).