

## 名古屋大学加速器中性子源 NUANS の構築 CONSTRUCTION OF NAGOYA UNIVERSITY ACCELERATOR-DRIVEN NEUTRON SOURCE (NUANS)

広田克也<sup>\*A)</sup>、市川豪<sup>A)</sup>、今城想平<sup>A)</sup>、清水裕彦<sup>A)</sup>、土川雄介<sup>A)</sup>、瓜谷章<sup>B)</sup>、鬼柳善明<sup>B)</sup>、土田一輝<sup>B)</sup>、  
山崎淳<sup>B)</sup>、吉橋幸子<sup>B)</sup>、渡辺賢一<sup>B)</sup>、岩下芳久<sup>C)</sup>、山形豊<sup>D)</sup>、  
Katsuya Hirota<sup>\*A)</sup>、Go Ichikawa<sup>A)</sup>、Sohei Imajo<sup>A)</sup>、Hirohiko M. Shimizu<sup>A)</sup>、Yusuke Tsuchikawa<sup>A)</sup>、Akira Uritani<sup>B)</sup>、  
Yoshiaki Kiyonagi<sup>B)</sup>、Kazuki Tsuchida<sup>B)</sup>、Atsushi Yamazaki<sup>B)</sup>、Schiko Yoshihashi<sup>B)</sup>、Kenichi Watanabe<sup>B)</sup>、  
Yoshihisa Iwashita<sup>C)</sup>、Yutaka Yamagata<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>Graduate School of Science, Nagoya University

<sup>B)</sup>Graduate School of Engineering, Nagoya University

<sup>C)</sup>Institute for Chemical Research, Kyoto University

<sup>D)</sup>RIKEN Center for Advanced Photonics, RIKEN

### Abstract

The Nagoya University Accelerator driven Neutron Source (NUANS) are now constructing at main campus of Nagoya University. The electrostatic accelerator is used with the maximum proton energy and power of 2.8MeV, 15mA(42kW). Two neutron beamlines are planned at NUANS. The first beamline is using epithermal neutron for BNCT. The second beamline is constructing for neutron imaging and detector development. The estimated thermal neutron flux in second beamline is order of  $10^5$  n/cm<sup>2</sup>/sec at 4kW proton power. This beam power is one order lower than maximum and the target shield is getting smaller. The incident proton beam is low energy, 2.8 MeV, the Be thickness is set at 0.04 mm to prevent hydrogen blistering, and brazing with V backing plate, which is referred by RANS Be target. The thermal neutron moderator is planning to use polyethylene. In this presentation, we explain about target, moderator structure and present status of this beamline.

### 1. はじめに

名古屋大学では現在、静電加速器を利用した加速器駆動中性子源 (NUANS) を建設している。陽子加速器としては最大エネルギー 2.8MeV、最大電流値 15mA の Dynamitron 加速器を利用し、2つのビームライン及び中性子発生ターゲットを構築する。第1ビームラインでは Li(p,n) 反応を利用して熱外中性子を発生させ、主として BNCT システムの構築のための各種開発を行う。第2ビームラインでは Be(p,n) 反応を用いて熱中性子 (将来は冷中性子) を発生させ、中性子イメージングや検出器開発を行う。加速器駆動中性子源においては中性子発生標的の開発や適切な中性子減速体や遮蔽体の設計、計測する中性子検出器システムの構築などが研究開発の主要な点となる。第1ビームラインの開発状況は第13回年会において鬼柳によって紹介されている [1]。本発表においては NUANS プロジェクト及び現場に関して紹介したのちに、特に多目的中性子利用ビームラインとして設計している第2ビームラインに関して紹介する。

### 2. NUANS の概要

加速器施設内での加速器及び陽子ビームラインの配置は Figure 1 に示すようになっていいる。第1及び第2ビームラインは偏向磁石で陽子ビームが 20度及び70度に曲げられ、中性子発生ターゲットに導かれる。第1ビームラインは最終的に 2.8MeV、15mA (42kW) で運

用する予定であり、第2ビームラインは 1.5mA (4kW) で運用する予定である。第1ビームラインの方が陽子ビーム強度も発生する中性子強度も強いいため第1ビームライン周辺は遮蔽用コンクリート壁で囲まれるように設計されており、第2ビームラインはそれほど放射線発生量が多く無いため、よりコンパクトな遮蔽体で構成されている。この遮蔽体の差が第2ビームラインにおける、測定系の組み替えの汎用性を実現している。

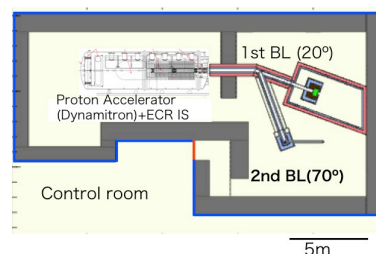


Figure 1: Layout of an accelerator and two beamlines.

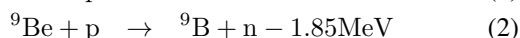
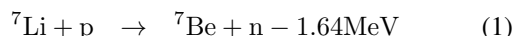
加速器に静電加速器を利用しているため発生する陽子ビームは連続ビームとなる。イオン源をパルス運転することでパルス中性子の発生も可能ではあるが、テスト運転用ともいべきものであり、安定性などは充分では無い。パルスビームと連続ビームに関しては中性子の利用目的から選択する要素であり、本装置のように BNCT 開発や中性子ラジオグラフィ、動画撮影などを中心に運用する際にはなるべく duty が高い方が効率的であり、連続ビームの利用は有意義である。その

\*hirota@phi.phys.nagoya-u.ac.jp

一方で、中性子散乱などを測定する場合には TOF よりエネルギー弁別出来るパルスビームが好ましい。

### 3. 中性子発生標的

小型中性子源で利用される中性子発生標的は、陽子ビーム及び重陽子ビームに対しては Li 及び Be、電子に対しては W などが使用される。陽子入射に対しては核反応閾値があり、 ${}^7\text{Li}(p,n)$  反応に対しては  $E_p=1.88\text{MeV}$ 、 ${}^9\text{Be}(p,n)$  反応に対しては  $E_p=2.06\text{MeV}$  となっているので、閾値エネルギーを超えると (p,n) 反応チャンネルが開き中性子発生量が増大する。反応式で書くと



と書ける。中性子発生時に生成される  ${}^7\text{Be}$  は半減期 53 日で電子捕獲により  ${}^7\text{Li}$  になり、この際に 10% の確率で 480keV のガンマ線を出す。このため Li 標的は陽子ビーム照射後は放射化している。 ${}^9\text{B}$  は非常に不安定で  $10^{-18}$  秒程度の短時間で  $\alpha+\alpha+p$  の 3 体に崩壊する。 ${}^9\text{B}$  の崩壊の際にはエネルギーは全て荷電粒子の運動エネルギーになるために遮蔽を必要とする粒子は発生しない。現実の Be 標的では糊材や不純物の影響があるため、全く放射化しないということはないが Li 標的に比べると扱いは容易である。低い入射エネルギー領域での  $\mu\text{A}$  あたりの中性子発生量に関しては Figure 2 のようになっている [2]。

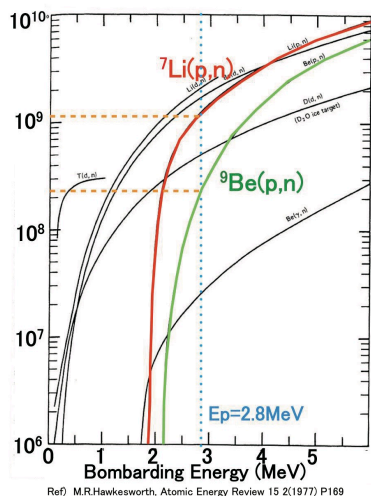


Figure 2: Neutron emission from Li and Be.

NUNAS で用いる陽子 2.8MeV のエネルギー領域では Li による中性子発生は Be に比べて約 5 倍である。BNCT では大強度の中性子ビームを必要とするため、Li が有利であるが、Li 自身はアルカリ金属で反応性が高く、融点が約 180 度のため大強度陽子ビーム照射時に固体のままで維持することは難しく、中性子発生ターゲットとして利用した後は放射化するなど様々な技術的困難が生じる。そのため、Li 標的自体の研究開発が必要であり、NUANS においては第 1 ビームラインで BNCT に使用可能な Li 標的の開発評価を進める。

その一方で Be は中性子発生量は Li に劣るが、融点が約 1300 度あり、化学的にも安定なので中性子発生標的としては Li よりも使い易い。第 2 ビームラインとしては中性子を発生させて汎用的な利用を計画しているため、中性子発生量は少なくなるが Be 標的を選択して安定な運用を行うことを予定している。なお、Be を中性子標的にする際には陽子ビーム照射による blistering によって、Be 標的が破壊されるトラブルが世界中で報告されている。これを回避するためには入射陽子ビームを Be 標的に止めないようにする工夫が必要であり、そのためには標的 Be 箔の厚みをきちんと計算する必要がある [3]。今回のような  $E_p=2.8\text{MeV}$  領域においては  $40\mu\text{m}$  厚以上  $80\mu\text{m}$  以内にするのが良く、NUANS においては  $40\mu\text{m}$  厚の Be 箔を採用している。

### 4. 汎用ビームライン

第 2 ビームラインでは中性子イメージングや検出器開発など、汎用ビームラインとして利用することを想定している。

2.8MeV1.5mA の陽子ビームで Be 標的から発生する中性子量は Figure 2 よりおよそ  $3 \times 10^{11} \text{n/sec}$  と見積もられる。Be 標的の下流側には 10cm 立方のポリエチレン減速体が室温で設置され、熱中性子領域 ( $E_n=25 \text{meV}$ ) まで減速される。実験ビームポートは、減速材に近い側 (short: 約 50cm) と遠い側 (long: 約 2m) の 2 箇所を想定し、移動式の中性子飛行管を利用することで両実験ポートを切り替える。short では減速材に近いため中性子ビームの広がり角が大きく質の良い測定は難しいが、距離が近いことによる大強度中性子照射が可能であり想定される中性子ビーム強度は約  $10^6 \text{n/cm}^2/\text{sec}$  と見積もられる。この short では薄い試料を用いた中性子ラジオグラフィ及び、高計数率中性子検出器の測定を行う予定である。また long では距離を離すことにより比較的質の良い中性子ビームの供給が可能となり、検出器試験や中性子光学素子評価などの測定に利用される予定である。

### 5. まとめ

NUNAS は今年度中の中性子発生を目指して、現在、ビームラインの構築をすすめている。その後 1,2 年かけて最大強度まで上げていく。その間に、Li 標的の評価、冷中性子源の開発なども並行して進める予定である。特に第 2 ビームラインにおいては、中性子イメージングを中心に検出器開発など汎用的に利用出来る実験ポートを設置する予定であり、現在構築中である。

### 参考文献

- [1] 鬼柳, 第 13 回加速器学会年会, PASJ2016 WEOL16.
- [2] M.R. Hawkesworth, Neutron Radiography: Equipment and Methods, Atomic Energy Review 15, No. 2, 169-220, 1977.
- [3] Yutaka Yamagata, Katsuya Hirota, Jungmyoung Ju, Sheng Wang, Shin-ya Morita, Jun-ichi Kato, Yoshie Otake, Atsushi Taketani, Yoshichika Seki, Masako Yamada, Hideo Ota, Unico Bautista, Oinngan Jia. J Rad. Nucl. Chem. (2015) 305: 787-794.