

# 短パルス X バンドライナック中性子源のビーム発生シミュレーション

## SIMULATION OF NEUTRON GENERATION IN SHORT PULSED X-BAND LINAC NEUTRON SOURCE

田儀和浩 <sup>A)\*</sup>, 松山大樹 <sup>A)</sup>, 山本昌志 <sup>B)</sup>, 土橋克広 <sup>A)</sup>, 藤原健 <sup>A)</sup>, 上坂充 <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Faculty of Engineering in University of Tokyo

<sup>B)</sup> Accuthera Inc.

### Abstract

It is important to improve the accuracy of nuclear cross section for waste reprocessing and design of new reactors, but facilities where nuclear fuel materials can be measured are limited. So, in Tokyo University, there is a plan of development of electron linac neutron source for analyzing nuclear data. The research reactor “Yayoi” was decommissioned in Tokyo University and by introducing this linac in the core of the reactor, measurement of nuclear fuel materials can be expected. 30 MeV X-band linac is used so this system will be compact and this enables us to introduce the system into the core of “Yayoi.” Pulse width is short in order to measure high energy neutron with TOF method. In this research, generation of electrons, acceleration and interaction with several kinds of target and moderator are simulated.

## 1. 研究背景・目的

### 1.1 研究背景

東京大学東海キャンパスでは、長らく研究炉として利用されてきた弥生炉が 2011 年に廃炉となり、廃炉後の設備の利用法として、炉心への加速器中性子源の導入について検討されてきた。

Table 1 は国内の主な小型中性子源を比較したものである。小型中性子源に有効な中性子発生の原理としては、陽子線、重陽子線、電子線、プラズマ核融合管を用いたものが挙げられる。このうち、陽子線を用いた中性子源は放射化物が少なく、比較的効率よく中性子を発生させることができるため、多くの所で採用されている。一方で、電子線ライナックは、短パルスで利用することができることが大きな特徴である。飛行時間法 (TOF) における中性子計測において、時間分解能はエネルギー分解能に直結するため、高エネルギー分解能が期待される。本研究では電子ラ

イナックを用いた中性子源を採用した。東大中性子源には二つの特徴がある。第一に、X バンドの加速管を使用することである。一般的な S-band のライナックと比較して X-band は加速周波数が 4 倍であるため、装置全体をコンパクトにすることが可能であり<sup>[1]</sup>、これによって炉心内部にシステム全体を導入することが可能になる。

第二の特徴は短パルスの中性子ビームが小型モデレータによって実現されることである。X バンドにすることで、コンパクトになる一方でビーム出力が S バンドのものと比較して 1/2 程度に下がってしまい、測定時間が長くなるというデメリットがある。これに対して、中性子束は距離の 2 乗に比例して減衰するため、TOF の距離を近づけることによって中性子束を増やし、測定時間の短縮を図ることで対応できる。しかし、同一エネルギーの中性子を短い飛行距離で測定するためにはパルス幅が短くなければならない。また、高エネルギーの中性子を測定するためにもパルス幅を短くする必要がある。京大炉では 30

Table 1: Comparison of Small Neutron Source

	加速器の種類	中性子強度	パルス幅	核燃料物質
理研	陽子ライナック (7 MeV)	$10^{12-14}$ n/s	10 $\mu$ s - 1ms	×
北大	電子加速器/S-band (40 MeV $\cdot$ 1 kW)	$- 10^{12}$ n/s	Micro: 10 ps Macro: 2 - 100 ns	×
京大	電子加速器/L-band (30 MeV $\cdot$ 6 kW)	$8 \times 10^{12}$ n/s @ 6 kW	Micro: 40 ps Macro: 2 - 100 ns	○
京大	陽子サイクロトロン (30 MeV $\cdot$ 33 kW)	$1.2 \times 10^9$ n/cm <sup>2</sup> /s		×

keV の中性子に対する測定が行われており、それより高い 100 keV の中性子が測定可能なシステムを構築することで独自性を生み出すことが可能になる。

このような特徴を兼ね備えて中性子源システムを開発することが本研究の大目標である。

## 1.2 中性子源の応用

東日本大震災により発生した福島第一原子力発電所の事故は、多量の放射性物質が外部に漏出するなど社会に対して甚大な影響を及ぼした。今後、福島の復興に向けて、廃炉措置を進めていくことは非常に重要である。そのために、原子炉内の熔融燃料に含まれるウランやプルトニウムといった核物質を定量的に分析し、取り出し作業の際に環境に及ぼす影響を予測しなければならない。

過去に起きた原子炉の過酷事故として米国・スリーマイル島の事故が知られている。スリーマイル島の事故調査の一環として、熔融燃料に対する分析が行われた<sup>[2]</sup>。しかし、核物質を非破壊かつ高精度で計量できる測定技術はまだ開発されておらず、現在 JAEA 原田氏らのグループによって検討されている<sup>[3]</sup>。

本研究で開発される中性子源は燃料分析に必要な核燃料物質の中性子断面積の高精度化に貢献することができる。弥生炉は廃炉後でも炉心では核燃料物質の取り扱いが可能であり、そこに電子ライナック中性子源を設置することで、核物質の測定が実現可能である。

## 1.3 研究目的

中性子源の主要なコンポーネントを Figure 1 に示した。熱電子銃からの電子がバンチャー加速管を通じて光速まで加速し、さらにレギュラー加速管を経て 30 MeV まで加速される。加速された電子はタンダステンターゲットと衝突し、光核反応によって中性子が生じる。TOF の飛行距離は 5 m で、Transmission ならびに即発ガンマ線の測定システムを設置する。これらのシステムをまずはコンプトン散乱 X 線源が設置されていた東海キャンパスのブランケット棟地下に構築し、基礎実験を行っていく。弥生炉は現在廃炉作業中であり、廃炉措置が完了後、

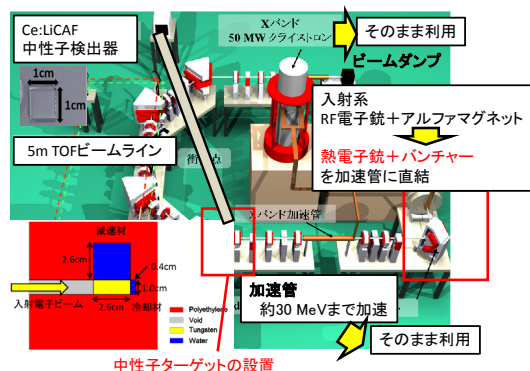


Figure 1: Schematic view of new neutron source of University of Tokyo.

中性子源を弥生炉内に移転する予定である。

本研究の目的は、核燃料核データの精度向上のための中性子源に用いる X-band ライナック中性子源に必要な

- 入射系の検討
- バンチャー加速管の設計
- ターゲットの設計
- 短パルス中性子生成のための減速材の設計

を行うことである。

## 2. 入射系の検討

### 2.1 コンプトン散乱 X 線源での実験

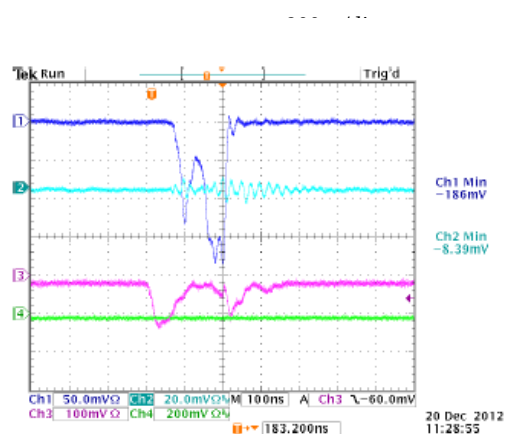
加速管と RF 源であるクライストロンは、東大が所有している逆コンプトン散乱 X 線源で使用している X-band (11.424 GHz) 30 MeV のものを転用する。

2012年12月に11.424 GHz X-band Linac でビーム加速試験等の実験を行った。2011年3月に発生した東日本大震災による損傷から復旧した後初めての実験であった。

電子銃のヒーターと共振周波数のチューニングを行いながら、熱カソード RF 電子銃の加速空洞の特性を調べた。Figure 2 は HV=29.4 kV、Gun 電流=1.35 A 下における電流波形である。1 日後には共振周波数が変化しており、パラメーターの僅かな変化で特性が変化し、また、再現性も芳しくないことが分かった。全てのパラメーターが安定して設定可能であれば運転(operation) は可能と思われるが、空洞の真空度など調整が困難なパラメーターにも影響を受けているようにも見受けられ、安定した運転を困難にしていた。

したがって、中性子源にこの低エミッタンス熱高周波電子銃は利用するべきではないということが明らかになった。

代わりに、安定した出力が得られる熱電子銃を採用した。印加電圧は 20 kV である。



12/20測定 11422.72GHz

Figure 2: Beam intensity of RF gun.

### 3. バンチャー加速管の設計

コンプトン散乱 X 線源では、RF 電子銃が採用されていた。このため、加速管に入射する電子ビームのエネルギーは光速近くに達している。しかし、中性子源用の熱電子銃から得られる電子ビームのエネルギーは 20 keV であるため、逆コンプトン散乱で使用されていた加速管を中性子源に転用するためには 20 keV のエネルギーを光速付近まで加速するバンチャー加速管が必要になる。

そこで、5 MeV まで加速されるプリバンチャーの設計を行った。加速管には進行波の  $2/3\pi$  モードのものを採用し、RF 入射パワーは 5 MW とした。計算には SUPERFISH<sup>[4]</sup> と呼ばれる高周波の電磁場計算を行うコードと GPT<sup>[5]</sup> を用いた。

Figure 3 はビーム進行方向に対して、加速電場を一定にするためのディスク内径 (2a) の大きさの関係を示したものである。表面状態や接合状態に起因する Q 値の減少は 90% であるものと仮定した。これに基づいてバンチャーの構造を決定した。

バンチャーとコンプトン散乱 X 線源のレギュラー加速管を組み合わせたとときのビーム電流とビームエネルギーの関係性を Figure 4 に示した。これにより、エネルギーが 30 MeV、ピーク電流が 250 mA の電子

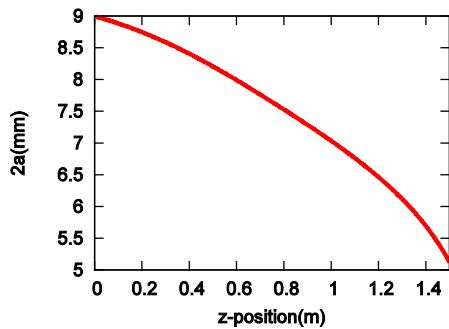


Figure 3: Relationship between position and disc range in buncher.

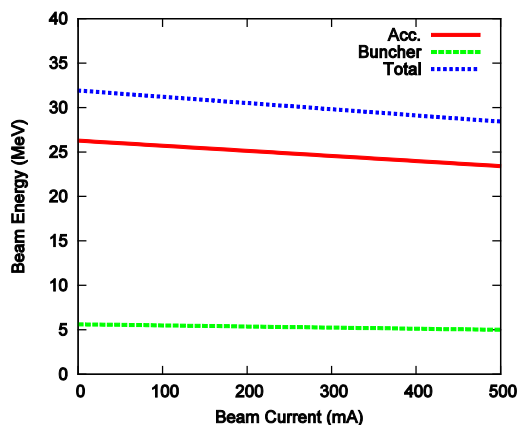


Figure 4: Relationship between beam current and beam energy.

ビームが中性子ターゲットに入射することが分かった。

### 4. ターゲットステーションの設計

#### 4.1 ウランターゲットの検討

ハイパワーの電流が得られないという X バンドライナックのデメリットを解消するため、高効率なターゲットとして、材質に劣化ウランを用いたターゲットの検討を行った。劣化ウランでは、光核反応に加えて光核分裂反応が制動放射 X 線との相互作用によって発生し、これによって高効率なターゲットが実現可能になる。計算にはモンテカルロシミュレーションコードである PHITS<sup>[6]</sup> が用いられた。一般的に電子ライナックで用いられる重金属類と比べて約 2 倍の中性子束が期待されることが明らかになった。しかし、Fission Product の取り扱いが難しく、現実的ではないと判断した。

#### 4.2 小型減速材の設計

100keV の中性子を 5m の TOF において測定するためには中性子のパルス幅を 10 ns 程度にしなければならない。そこで、PHITS を用いて減速材の最適化を行った。Figure 5 はモデレータの材質による時間スペクトルの違いを示したものである。この計算の結果、軽水を減速材の材質とした。また、減速材直後の中性子

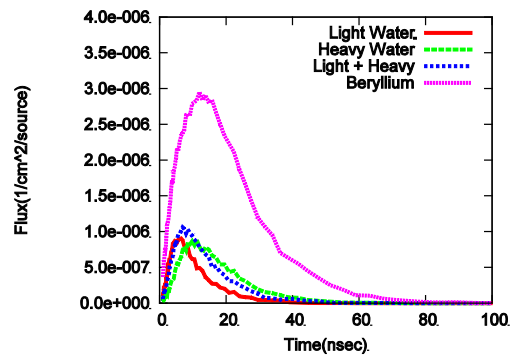


Figure 5: Time spectrum of 10 – 100 keV neutron among some moderator materials.

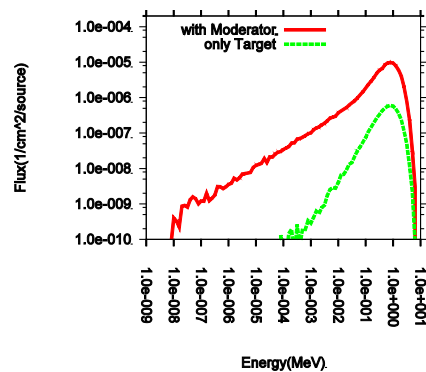


Figure 6: Energy spectrum of neutron source.

Table 2: Parameter of X-band Linac Neutron Source

電子ビームエネルギー	30 MeV
ピーク電流値	250 mA
最大パルス幅	1 $\mu$ sec
繰り返し	50 pps
最大ビーム出力	0.375 kW
最大ターゲット強度	$1.3 \times 10^{11}$ n/s
中性子束(5 m TOF)	$1.1 \times 10^3$ n/cm <sup>2</sup> /s
パルス幅(10-100 keV)	6.6 ns

のエネルギースペクトルを Figure 6 に示した。

#### 4.4 TOF システムの評価

Table 2 に計算された主なパラメーターを示した。結果 5 m TOF の中性子検出器には  $1.1 \times 10^3$  n/cm<sup>2</sup>/s の強度の中性子が入射することが明らかになった。

### 5. 結論

核物質核データの精度向上のための X-band ライナック中性子源中性子源の開発を行っている本研究では中性子源に必要な

- バンチャー加速管
- ターゲット

短パルス中性子ビーム生成のための減速材の設計を行った。また、当研究室で中性子検出器の設計も進められており、これにより、X バンドライナックを用いた小型で弥生炉の炉心に挿入可能な、100 keV までの中性子断面積を短い TOF の飛行距離で測定するシステムが設計された。

今後の予定としては、設計されたバンチャー加速管の製作を当面の目標とする。ターゲットステーションについては、熱伝導計算を行った上で、配管の接合方法などを決定した後発注される。製作されたコンポーネントは、まずコンプトン散乱 X 線源が設置されていた東海キャンパスのブランケット棟地下に構築される。電子ビームの調整などを行って、来年以降に中性子ビームによる測定を行っていく予定である。

### 参考文献

- [1] M. Uesaka, et. al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. B 261 (2007) 867-870.
- [2] H. Uetsuka, et al., JAERI-Research 95-084.
- [3] H. Tsuchiya, et. al., Nuclear Instruments and Methods in Physics A 729 (2013)338-345.
- [4] K. Halbach and R. F. Holsinger, Particle Accelerators 7 (1976) 213-222.
- [5] M.J. de Loos et. al. Proceedings of EPAC, Sitges, Spain, p. 1241 (1996).
- [6] K. Niita, et. al. JAEA-Data/Code 2010-022 (2010).