

核データ測定用 X バンドライナック中性子源の設計

DESIGN OF X-BAND LINAC NEUTRON SOURCE FOR NUCLEAR DATA MEASUREMENT

田儀和浩 ^{A)*}, 土橋克広 ^{A)}, 山本昌志 ^{B)}, 藤原健 ^{A)}, 上坂充 ^{A)}

^{A)} Faculty of Engineering in University of Tokyo

^{B)} Accuthera Inc.

Abstract

It is important to analyze debris in Fukushima 1st nuclear power plant. Nuclear data of nuclear fuel materials, such as uranium and plutonium, is necessary, but its accuracy is not enough. 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 and neutrons are generated by interactions between bremsstrahlung x-rays and materials. In this research, the thermal electron gun, the buncher and the target for the linac are optimized for generating as many neutrons as possible. The energy from the gun is 20 keV. The buncher is based on traveling wave $2/3\pi$ mode and accelerated energy is 6 MeV. Target material is uranium because its photo fission reaction brings high neutron. The effective depth of target is 3.2cm. By the calculation, the electron beam of 30 MeV, 0.375 kW (50 pps) was gained from the linac and neutron flux was 3×10^{11} n/s.

1. 研究背景・目的

1.1 研究背景

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、原子炉内の溶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、溶融燃料に対する分析が行われた^[1]。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いない。

Figure 1 は Pu-239 の 0.1-10eV における全中性子断面積の実測データをまとめたものである^[2]。核物質の定量を行う上で最も問題となっているのは捕獲断面積などの核データの精度に大きなばらつきがあることである。核データは溶融燃料の測定値から核物質の含有量を求めるのに必要なパラメータであるが、1980 年以降、ウラン・プルトニウム・マイナーアクチノイド(MA)などの核物質の測定がほとんど行われておらず、データが不足していると言える。その原因の一つとして、核燃料物質の測定を行うことができる施設が世界でも限られていることが挙げられる。

そこで、東京大学では核燃料核データ測定のための加速器中性子源の開発を計画している。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(Figure 2)が 2011 年に廃炉となり、廃炉後の設備の利用法について検討されてきた。廃炉後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、核物質の測定の実現を目指す。

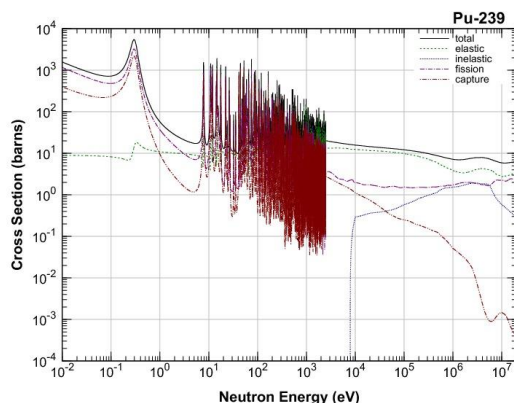


Figure 1 Cross section of Pu-239

1.2 コンプトン散乱 X 線源

加速器には電子ライナックを使用し、制動放射エックス線との光核反応によって中性子を得る。電子ライナックを用いた中性子源の特長として、短パルス性が挙げられる。飛行時間法 (TOF) における中性

*tagi@nuclear.jp



Figure 2 Yayoi Facility in Tokyo Univ.

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。

加速管は、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 (11.424GHz) 30MeV のものを転用する。コンプトン散乱 X 線源の概要図を Figure 3 に示した。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^[3]、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。クライストロンも同システムのものそのまま活用する。しかし、電子銃・プリバンチャー・ターゲットといった他の構成機器については新規に開発する必要がある。

1.3 研究目的

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

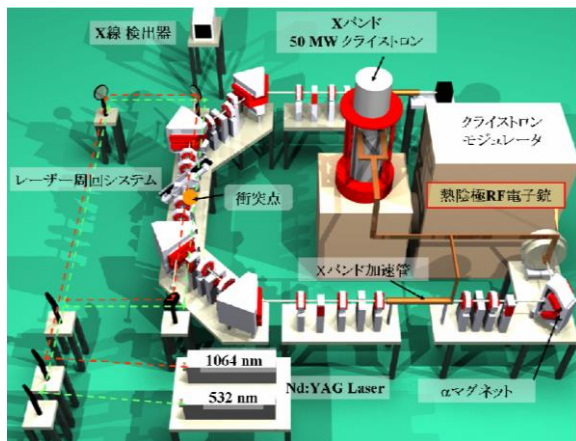


Figure 3 Schematic view of Compton Scattering X-ray Source of Univ. Tokyo

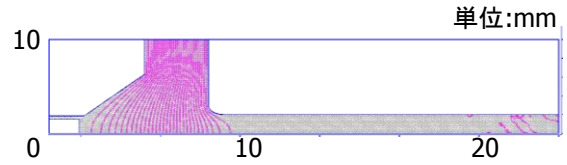


Figure 4 Cross section of Pu-239

必要な電子銃・プリバンチャー・ターゲットの設計を行うことである。

2. 熱電子銃

上述した逆コンプトン散乱 X 線源では、3.5 セル RF 電子銃が採用されている。しかし、出力が 230mA と高くなく上に、電子銃内の真空の状態が悪く、安定して動作しないため、新規に中性子源用の電子銃を開発する必要があった。

そこで、新たに開発する熱電子銃の設計を行った。熱電子銃は RF 電子銃と比較して安定して高い出力が得られることが期待される。計算には POISSON^[4] という有限要素法を用いた静電場の計算コード、GPT (General Particle Tracer)^[5] というビーム輸送計算のコードが用いられ、プリバンチャーの入射部分 (カソード部分から 20mm) におけるビームサイズが最小となる電極構造を決定した。加速エネルギーは 20KeV、カソード半径は 1.5mm である。

計算の結果決定された電子銃の静電場の様子を Figure 4 に、GPT で計算された電子銃内のビームの挙動を Figure 5 にそれぞれ示した。カソードから 20mm の地点におけるビームサイズは標準偏差で 0.224mm であった。

3. プリバンチャー

逆コンプトン散乱 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 20keV 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 20keV のエネルギーを光速付近まで加速するバンチャーが必要になる。

そこで、4MeV 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

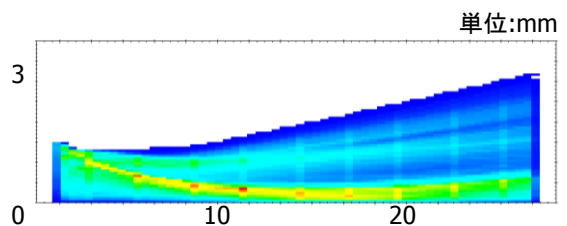


Figure 5 Cross section of Pu-239

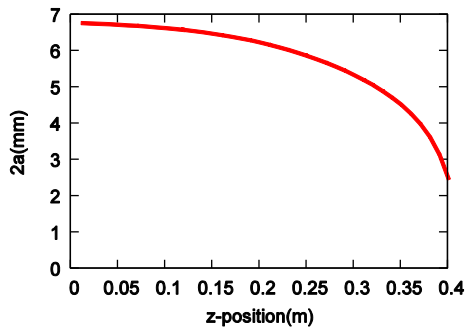


Figure 6 Relationship between position and disc range in pre-buncher

を採用し、RF 入射パワーは 5MW とした。計算には SUPERFISH と呼ばれる高周波の電磁場計算を行うコードと GPT を用いて行われた。

Figure 6 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。Figure 7 はバンチャー入口のディスク内径 (2a) と加速電場の関係性を示したものである。これに基づいてバンチャーの長さを 20cm と設定した。

4. 中性子ターゲット

X-band の特長として装置の小型化が挙げられるが、一方でそれによって、ハイパワーの電流が得られないというデメリットを抱えている。従って、効率よく中性子を得るためのターゲットの設計は非常に重要である。

本研究において、高効率なターゲットの開発を行うために、材質にウランを用いたターゲットの検討を行った。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トシミュレーションコードである PHITS が用いられた。

Figure 8 は様々な材質に 30MeV の電子ビームを入

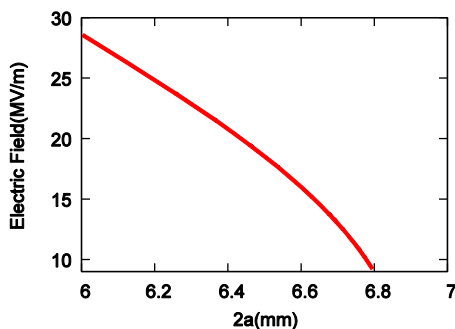


Figure 7 Relationship between disc range and electric field in pre-buncher

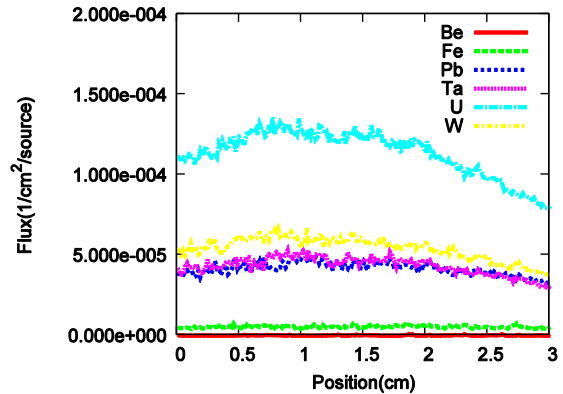


Figure 8 Comparison of neutron flux among several target materials

射した場合に得られる中性子束のビーム進行方向に対する分布を比較したものである。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分かる。

計算されたターゲットの体系を Figure 9 に示した。図は円筒対称に描かれており、ウランには円錐状の切り込みが入っている。これは効率よくターゲットの冷却を行うためだが、わずかに中性子束の増加も期待される。計算の結果、加速エネルギー 30MeV・入射ビームパワー 0.375kW の条件下で中性子強度が 3×10^{11} n/s であった。

5. 結論

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電子銃・プリバンチャー・ターゲットの設計を行った。その結

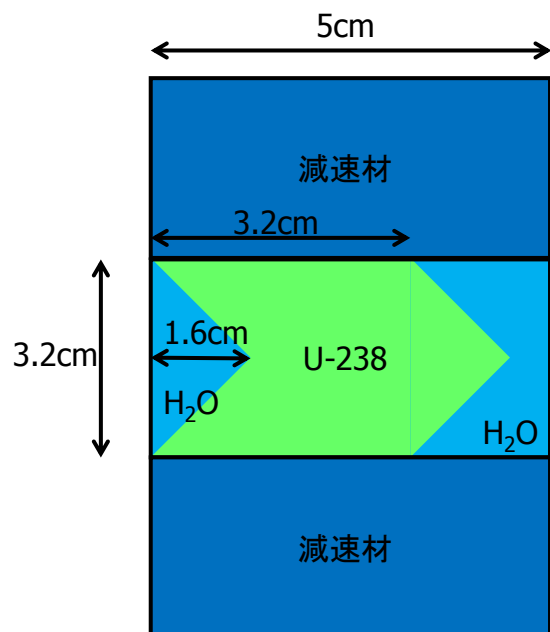


Figure 9 Schematic view of Uranium target

果、加速エネルギー30MeV・入射ビームパワー0.375kWの条件下でターゲットの中性子強度が 3×10^{11} であることが明らかになった。今後は得られた結果をもとに、各構造機器の製作を行い電子ビーム・中性子ビームの計測を行っていく。

参考文献

- [1] H. Uetsuka, *et al.*, "Gamma Spectrometry of TMI-2 Debris", *JAERI-Research* 95-084.
- [2] K. Shibata *et al.*, "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," *J. Nucl. Sci. Technol.* 48(1) (2011) 1-30.
- [3] M. Uesaka, *et al.*, "Monochromatic tunable Compton scattering X-ray source using X-band multi-bunch linac and YAG laser circulation system," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. B* 261 (2007) 867-870.
- [4] K. Halbach and R. F. Holsinger, "SUPERFISH - A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry," *Particle Accelerators* 7 (1976) 213-222.
- [5] M.J. de Loos *et al.*, "General Particle Tracer: A new 3D code for accelerator and beamline design," *Proceedings of EPAC*, Sitges, Spain, p. 1241 (1996).
- [6] K. Niita, *et al.*, "PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23," JAEA-Data/Code 2010-022 (2010)
- [7] V. Makarashvili, *et al.*, "Simulations of a LINAC-based photoneutron source," *Nuclear Instruments and Methods in Physics. Res. A* 696 (2012) 136-140.