

廃炉にXバンドライナック中性子源設置で福島分析研究

X-BAND LINAC NEUTRON SOURCE AT DECOMMISSIONED YAYOI

FOR FUKUSHIMA ANALYSIS

上坂 充^{#,A)}, 土橋克広^{A)}, 藤原 健^{A)}, 田儀和浩^{A)}, 山本昌志^{B)}, 原田秀郎^{C)},
Mitsuru Uesaka^{#,A)}, Katsuhiro Dobashi^{A)}, Takeshi Fujiwara^{A)}, Kazuhiro Tagi^{A)},
Masashi Yamamoto^{B)}, Hideo Harada^{C)}

A) Nuclear Professional School, University of Tokyo

B) Accuthera Inc.

C) Japan Atomic Energy Agency

Abstract

Just after the decommission of the experiment reactor “Yayoi” of University of Tokyo, the X-band (11.424GHz) electron linac is allocated into its core space as a neutron source for the nuclear analysis for the Fukushima nuclear plant accident in 2014. We should now accumulate more precise nuclear data of U, Pu, TRU and MA especially in epithermal (0.1-10 eV) neutrons. First we plan to perform the TOF (Time Of Flight) transmission measurement of the total cross sections of the nuclei for 0.1-10 eV neutrons.

1. はじめに

東大高速中性子源炉“弥生”(Fig. 1)は平成23年3月11日をもって永久停止し(予定は31日までであった)、現在廃炉措置中である。中性子源としての研究炉は、厳しい核燃料セキュリティ管理のため今後の増加は期待できない。一方、中性子の利用は、核医学用R I製造、パワーエレクトロニクス用半導体イオンドーピング、BNCT、核データ取得などニーズは高くなっている。その要請に応えるためには、小型加速器中性子源の開発と利用が、世界的にも不可欠と言える[1,2]。東大東海キャンパスにて廃炉後原子炉施設は解消するが、核物質使用施設であり続ける。しかも炉室、付随実験室等、新規の加速器・レーザー・放射線源の先進ハードウェアシステムを導入できるスペースがある。核物質使用施設と先進ハードウェアシステムの組み合わせは世界的にも稀有であり、大きな特徴としたい。電子ライナック中性子源を設置して、中性子理工学の基礎基盤研究、原子力工学における物理化学生物学の中核として活動し続ける。本稿で述べる第1, 2期で計画を進める。

2. 30MeV X バンド電子ライナック中性子源

第1期(平成26-28年度)では、既存のXバンド(11.424GHz)30MeV~1kW電子ライナック(現コンプトン散乱X線源)(Fig. 2)を活用する。炉心内部に移設する(Fig. 3)。中性子強度は最大 10^{12} n/sec、電子マイクロパルス幅(マイクロパルス幅2ps)は100ns-1ms, 繰り返し50ppsである。小型Xバンドライナックを使用するため、将来の可搬型加速器中性子源の開発にも相当する。現システムはコンプトン散乱高強度



Figure 1: Fast Neutron Experimental Reactor “Yayoi” of University of Tokyo.

を想定しているため、電子銃は3MeV1 μ s、電子ビームサイズ100 μ m(rms)の低エミッタンス熱高周波電子銃とアルファ電磁石を使用している。しかし中性子源としての電子ライナックでは電子ビームサイズが小さすぎると、中性子ターゲット部で熱負荷による損傷が激しくなってしまう。高出力が求められるため、当グループの経験のある20keV熱電子銃と、Sバンドライナックで実績のある進行波バンチャを採用することとした。



Figure 2: 30 MeV X-band (11.424GHz) Electron Linac.

新Xバンドライナックは、熱高周波電子銃・収束用電磁石・エネルギーフィルタ用アルファ電磁石がなくなるため、加速器本体は小型化が図られ、弥生本体コアの燃料スペースに装填することが可能となる (Fig. 3)。

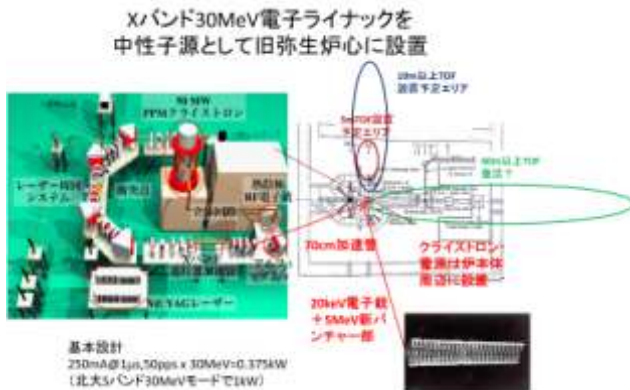


Figure 3: Allocation of the Linac to Yayoi area.

新バンチャ部の基本仕様、および関連RF源、加速管の基本仕様を表1に示す。電子パルスのマイクロパルス幅は 3ps(FWHM)、マクロパルス幅は 100ns-1μs、ピーク電流は 250mA である。電子ビーム出力は最大で 0.5kW である。中性子のパルス幅は、中性子ターゲットにて電子のパルス幅がそのまま中性子のパルス幅になり、最短で 100ns である。

中性子の利用に関しては、その短パルス性を活用して、TOF(Time Of Flight)法による 0.1-10 eV 熱外中性子エネルギーでの核データの取得をメインとする。弥生研究棟は核燃料使用施設であるため、いずれ始まる福島での燃料デブリ中での U, Pu 等の核物質の定量分析のための、核物質の核データを取得する。TOF ラインは炉室内 5m、加速器室まで貫通させて 10m、そのあと野外施設を設置して 40m を計画している。

Table 1: Specification of New Buncher, RF source and Accelerating Structure

Cell Number	30
Tube Length	0.26 m
Q_0	6000
Shunt impedance	85 MΩ/m
Group velocity	%
Decay constant	0.5 Naper/m

(a) Buncher

Pulse width	1 μs
Power in buncher	6 MW
Power in accelerator tube	35 MW

(b) RF source

Cell Number	60
Tube Length	0.524 m
Q_0	6593
Shunt impedance	95.6 MΩ/m
Group velocity	3.97 %
Decay constant	0.478 Naper/m

(c) Accelerating Structure

Fig. 4 に、94-Pu-240 の熱外中性子領域での全断面積データを示す。共鳴領域での精度が~3%とされている[3]。現在コンピュータコードの高度化による、炉設計や出力評価での誤差の主要因は核データと言われている。核データファイルでの相互誤差も~10%程度の部分もある。特に数十 m の TOF ラインが必要な熱外中性子エネルギー領域 0.1-10 eV の、高精度データ取得が必須となる。当グループが J-PARC にて取得した TOF データの 1 例を示す。中性子エネルギーに相当する時間軸である横軸での 0.1eV の位置が示されている。10eV はさらに原点に近い。TOF ラインが長くなればこの領域が広くなり、測定精度が上がる。

中性子発生ターゲットの基本設計を行った。材質として Ta, W, 劣化ウランを検討している。その体系、中性子エネルギースペクトル、パルス応答の PHITS モンテカルロコードの計算結果を Fig. 6 に示す。体系はグラファイト(C)、ボイド、ポリエチレン(PE)、劣化ウラン(DU)、水(W)およびベリリウム(Be)より構成される。Fig. 6(b) より、劣化ウランを使って最適化すると中性子発生量は一桁上がることがわかる。Fig. 6(c) では同時刻に入射した 30MeV

電子に対する発生中性子の時間応答を示している。大部分の中性子が数十 ns 以内に入っていることがわかり、電子の 100ns のパルスからはほぼ同じ中性子パルスが得られることがわかる。中性子量は劣化ウランを使わない場合 $\sim 10^{12}$ n/s、使う場合その約 10 倍である。

検出器として、中性子量が短パルスのため多くないので、当グループ開発の高感度シンチレータ Ce:LiCAF を採用する。その Cf-252 中性子と Co-60 γ 線の対する信号を Fig. 7 に示す。

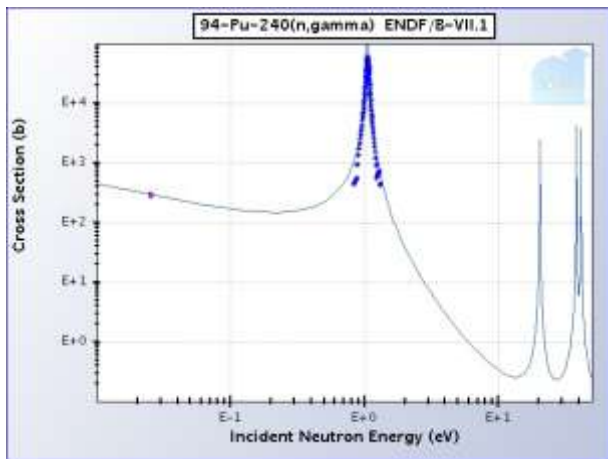


Figure 4: (n, γ) Cross Section of 94-Pu-240 for 0.1-10 eV Neutron.

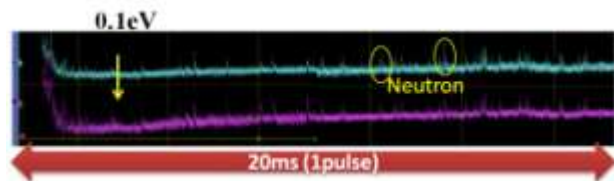
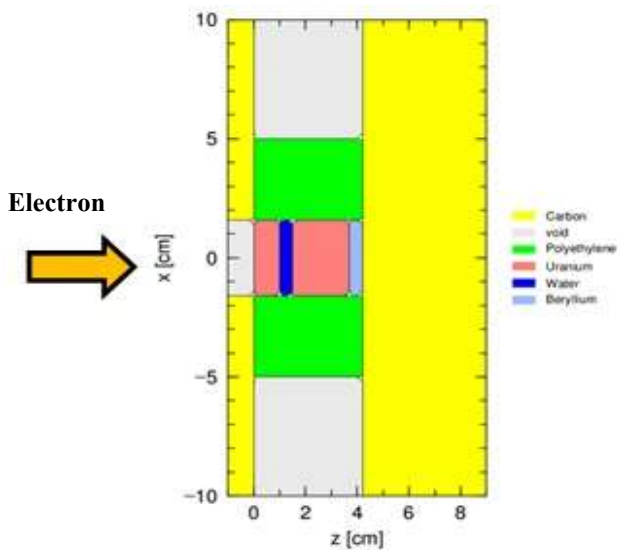
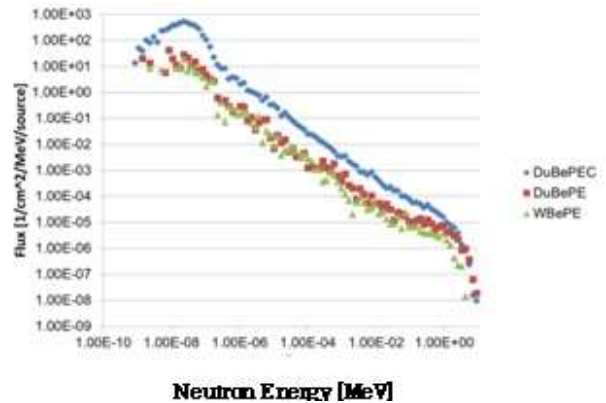


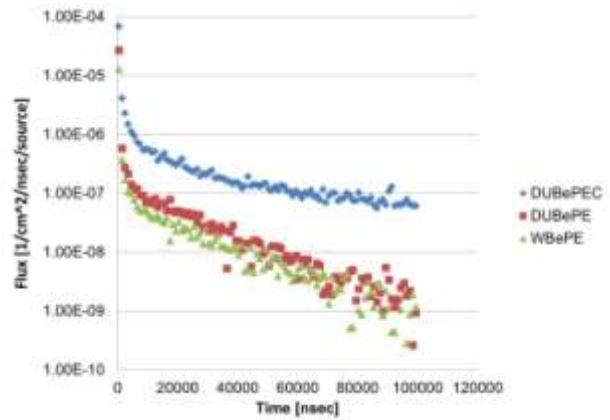
Figure 5: Example of the Time - Energy Relation of Neutron obtained by J-PARC.



(a) Cross Section of the Neutron Target



(b) Neutron Energy Spectra



(c) Relative Neutron Fluxes Calculated by PHITS

Figure 6: Neutron Target Design and Calculated Relative Flux.

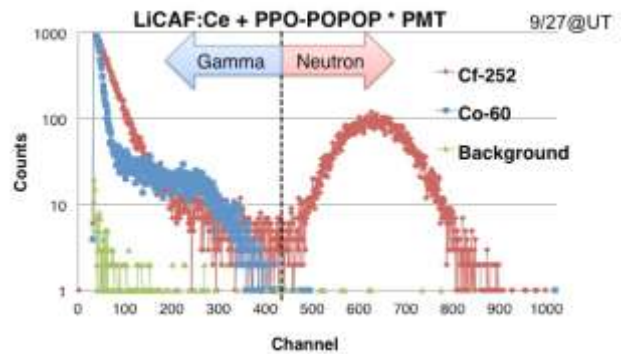


Figure 7: Signals from for Neutrons from Cf-252 and γ rays from Co-60.

3. 60kW30MeV S バンド電子ライナック中性子源

第2期計画として、Sバンド(2.856GHz) 35MeV60kW電子ライナック中性子源 (Fig. 8) を開発と利用を検討する。中性子強度は 10^{14} n/sec 以上、利用強度は 10^{12} n/cm²/s 以上を目指す。電子マイクロパルス幅 (マイクロパルス幅 10ps) は 100ns-10ms, 250pps である。電子ライナック中性子源として世界最高出力となる。本システムは福島での熔融燃料デブリ分析用の実機中性子源に相当する。燃料デブリ中の中性子共鳴透過測定による U, Pu 検出の計算例[4,5]を Fig. 9 に示す。

第2期の利用計画につき、第1期の項目に加え、核医学用 ⁹⁹Mo->^{99m}Tc の生成、Micro Dose 用 RI の生成、小角散乱、時分割分析、イメージングの利用も展開したい。

さらに、加速器質量分析(AMS)とレーザー共鳴分析(RIMS)を組み合わせ、核燃料物質など重元素の極微量分析システムの隣接室設置と利用も検討している。福島第一発電所近隣住民の帰還のために、核燃料物質・アクチノイド物質の環境影響を評価することが必要である。そのための、重元素の極微量分析としての貢献を目指している。

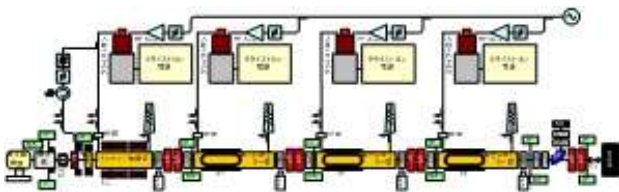


Figure 8: Layout of 60 kW 30 MeV S-band Linac for On-site Neutron Active Method Analysis in Fukushima.

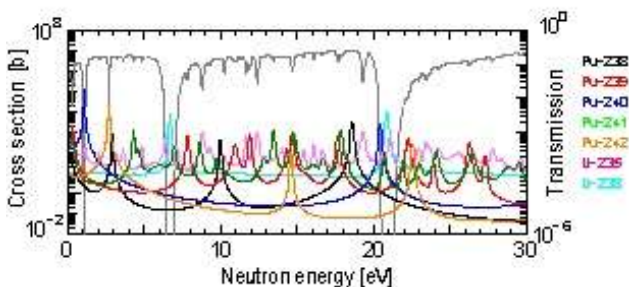


Figure 9: Expected Neutron Transmission Result by Using the Precise Nuclear Data. [4,5]

4. 結言

東大原子力専攻東海キャンパスにおける、ポスト弥生計画である 30MeV X バンド電子ライナック中性子源計画 (第1期)、および 60 kW 30 MeV S バンド電子ライナック中性子源計画 (第2期) について述べた。Xバンドシステムにつき、現設置場所である東海キャンパスブランケット研究棟実験室にて、ライナック改良、ターゲット製作、検出システム製作、TOF予備ライン製作して、中性子発生と利用の予備実験を行う。弥生廃止措置完了後、速やかに炉室に移転し、核データ取得実験を開始したい。

参考文献

- [1] M.S. de Jong, "PRODUCING MEDICAL ISOTOPES USING X-RAYS", THXA01, Proc. of IPAC2012(New Orleans)
- [2] H. Kobayashi, et al., "CONSTRUCTION OF A BNCT FACILITY USING AN 8-MeV HIGH POWER PROTON LINAC IN TOKAI", THPPR048, Proc. of IPAC2012(New Orleans)
- [3] R.R. Spencer et al., Nucl. Sci. Eng. 96, 318-329 (1987)
- [4] M. Koizumi et al., Proc. of INMM 53th annual meeting; 2012.
- [5] H. Harada et al., 2013 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan; 2013; A54.