

## GENERATION OF LOW-ENERGY PHOTON USING KURRI-LINAC

Takumi Kubota<sup>1,A)</sup>, Jun-ichi Hori<sup>A)</sup>, Naoya Abe<sup>A)</sup>, Toshiharu Takahashi<sup>A)</sup>, Kiyoshi Takami<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Kyoto University Research Reactor Institute  
Kumatori-cho Sennan-gun Osaka 590-0494

<sup>B)</sup> Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1112

### Abstract

Operation modes in which low-energy photon is generated have been investigated at KURRI-LINAC. The peak energy of electron is decreased to 6.8 MeV by introducing microwave into only the first (upstream) one of two accelerating tubes and by reducing an applied voltage to klystron. The flux of activating photon and neutron, which are generated through bremsstrahlung and photonuclear reaction, is evaluated using Au foil activation and a BF<sub>3</sub> proportional counter. Both fluxes decrease with decreasing energy of accelerated electron. Ultimately the operation in which the lowest electron is generated yields only non-activating photon. Moreover, electron is emitted faster than the standard operation to reduce high-energy component of electron beam. It is ineffective to introduce microwave into only the second accelerating tube or to shift microwave phase in the second one opposite to the first one for decreasing acceleration energy.

## KURRI-LINAC用いた低エネルギー光子照射場の構築

### 1. はじめに

京都大学原子炉実験所電子ライナック(KURRI-LINAC)は、Lバンドの2本の加速管により、定格30 MeV(最高46 MeV)まで電子を加速することができ、現在では、最大5 kW程度の出力で稼動している。本装置は、電子線照射<sup>[1]</sup>、制動放射線照射<sup>[2]</sup>、中性子照射<sup>[3]</sup>、コヒーレント放射光源<sup>[4]</sup>等に使用されてきた。これらの研究では20 MeV以上の高エネルギーの電子を用いるが、この領域のエネルギーの電子を物質に照射すると、光核反応等により放射能を誘導することになる。光子と物質の相互作用の研究において、誘導放射能の発生を望まない場合は、Co-60のようなRI線源の使用、または低エネルギー光子発生に最適化された加速器の使用が考えられるが、高線量線源の保守管理および利用可能な光子線エネルギー範囲が限定されること等の短所がある。

本施設では、加速電子のエネルギーの可変(可変範囲の拡大)による共同利用施設としてのポテンシャルの向上を期待し、加速電子の低エネルギー化による光核反応を起こさないエネルギー領域の電子(制動放射線)による照射が可能となるような加速器の運転方法の検討を実施している。

一般に、加速電子を重金属に照射することで、効率的に制動放射線を得ることができるが、重金属は光核反応の断面積も大きく、また反応の閾エネルギーも低い<sup>[5]</sup>ため、中性子の発生を抑えるためには、制動放射線のエネルギーを低減する必要がある。

本稿では、加速電子のエネルギーを下げることで、制動放射線の光核反応による中性子の発生を抑える加速器の運転方法の検討について報告する。

### 2. 実験方法

加速電子のエネルギーを下げるため、以下の4点についての検討を行った。

(1)KURRI-LINACは通常2本の加速管の両方を用いて電子を加速するが、上流側または下流側の加速管のみを用いて加速を行った。(2)加速管内で電子を加速するマイクロ波のエネルギーを低減するために、PFNの充電電圧(クライストロンへの印加電圧)を下げて加速器の運転を行った。(3)上流側と下流側で加速管内のマイクロ波の位相を変えることで、上流側で加速された電子を下流側で減速させる条件で運転を行った。(4)加速管内にマイクロ波が充填する前に電子銃から電子を射出し、電子が受け取るエネルギーを低減させる運転を行った。

加速電子のエネルギースペクトル測定は、2本の加速管の下流に配置した分析マグネットを用いることで電子の軌道を曲げ、分析マグネットに流す電流値と測定用グラファイトに到達する加速電子の電流値との関係より求めた。

制動放射線の発生には厚さ計2 mmの白金板を用い、除熱のために水冷を施した。照射場に金箔を配置し最長3時間照射を行い、Au-198およびAu-196の $\gamma$ 放射能をGe半導体検出器で測定し、中性子束および高エネルギー光子束を算出した。また、ガンマフラッシュの影響を抑えるため鉛(10cm厚)で覆われたBF<sub>3</sub>比例計数管をTOFモードで測定し、この結果と金箔の放射化の結果との比較を行った。

<sup>1</sup> E-mail: [t\\_kubota@rri.kyoto-u.ac.jp](mailto:t_kubota@rri.kyoto-u.ac.jp)

### 3. 結果

#### 3.1 加速管1本のみでの運転

上流側の加速管のみにマイクロ波を投入した場合、問題なく電子を加速することができた。しかし、上流側にマイクロ波を投入しない場合(下流側の加速管のみを用いる場合)、上流側の加速管内で電子が発散し下流側の加速管まで電子が到達しないため、電子を加速することができなかった。以下、マイクロ波の位相を反転させる実験以外では、上流側の加速管のみを用いて検討を行った。

#### 3.2 PFN充電電圧(クライストロン印加電圧)の効果

定格運転時にPFN充電電圧は27 kVであるが、この電圧を下げることで電子の加速エネルギーが下がること、および問題なく安定にビームを取り出せることを確認した(図1)。充電電圧を24 kVに下げただけでは、ピークエネルギーは定格運転時とほとんど変わらないが、22 kVおよび20 kVまで充電電圧を下げると、電子の加速エネルギーは有意に減少し、エネルギースペクトルもブロードになった。充電電圧が20 kVのときには、ピークエネルギーは6.8 MeVまで減少するが、平均電流は定格の半分程度の30 micro Aであり、十分な電流量を取り出した(表1)。

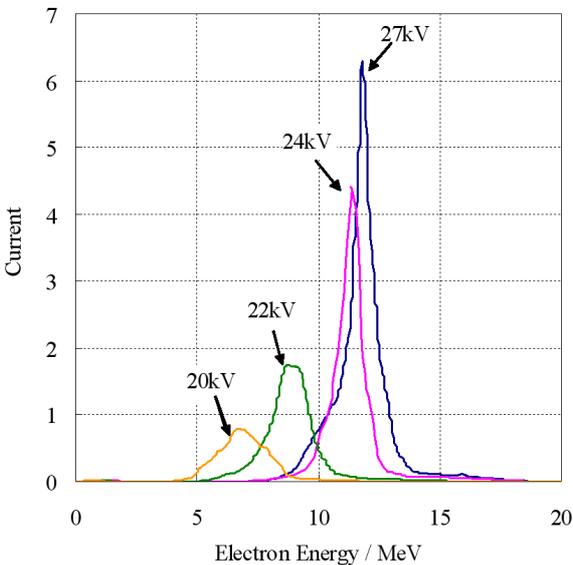


図1 PFN充電電圧と電子のエネルギースペクトル

表1 ピークエネルギーおよび平均電流

充電電圧 (kV)	ピークエネルギー [半値幅] (MeV)	平均電流 (micro A)
27	11.8 [0.80]	62
24	11.3 [0.83]	46
22	8.7 [1.65]	28
20	6.8 [2.22]	30

#### 3.3 マイクロ波の位相変化の効果

2本の加速管を用いる定格運転(充電電圧27 kV)において、ビーム電流が最大になるように調整した後、下流側の加速管のマイクロ波の位相を変えて、電子の減速を試みた(図2)。マイクロ波の位相を変化させることで、電子のエネルギーが低減する効果は現れるが、20~30 MeVの間にピークを複数持つスペクトルまたはピークは11 MeV程度まで下がるが30 MeVまでテールを持つスペクトルを得るのみであった。

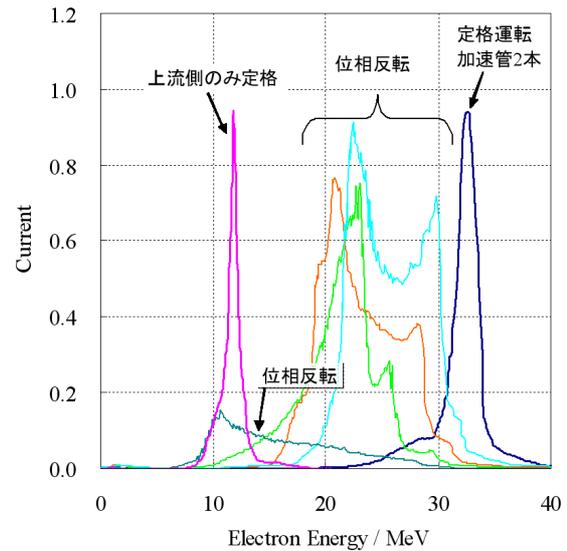


図2 位相反転による加速エネルギーの減速

位相を反転させて運転した場合に得られるエネルギースペクトルには高エネルギー成分を含んでいるが、このような成分は上流側の加速管のみを定格出力で運転した場合には現れなかった。調整の困難さを考慮すると、PFN充電電圧の下げることが低エネルギー化に大いに寄与すると言える。

位相反転による低エネルギー化を困難にする原因について具体的な検討は行っていないが、マイクロ波の質が良くないことが一因であると考えている。

#### 3.4 電子射出タイミングの効果

加速管終端に到達するマイクロ波の振幅と電子のエネルギースペクトルとの関係を図3に示す。図中の振幅Aは、通常運転における電子の射出タイミングのときに得られたもので、振幅Bおよび振幅Cは電子の射出を通常時よりもそれぞれ200 nsおよび400 ns早めたときに得られたものである。振幅Bおよび振幅Cは、振幅Aよりも早くマイクロ波が終端に到達したことを示す。マイクロ波の投入タイミングは変化させていないので、電子はマイクロ波を追い越した後、マイクロ波を放出することが分かった。

マイクロ波が加速管に充填される前に電子を射出することで、マイクロ波から電子へのエネルギー供給が減り、また、電子からのマイクロ波放出によるエネルギー損失が起こることにより、高エネルギー成分の電子が減少し、スペクトルが軟らかくなることが分かった。

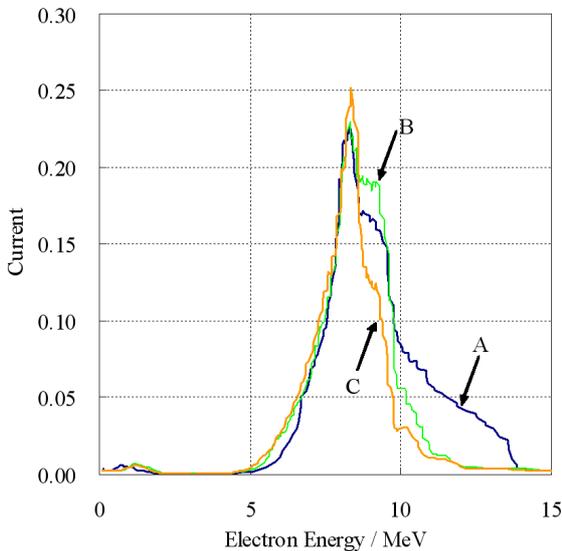
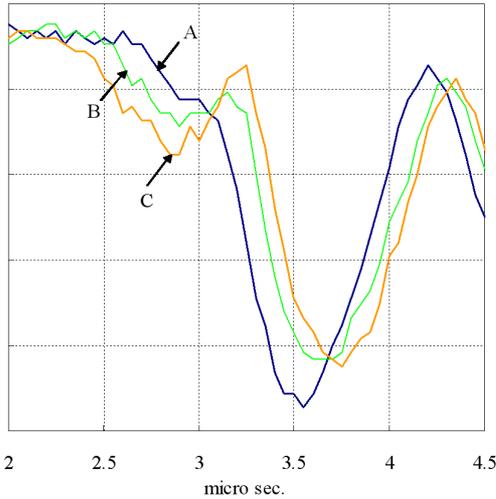


図3 電子射出タイミングと加速エネルギーの関係  
(上) 上流側加速管終端でのマイクロ波の出力  
(下) エネルギースペクトルの変化

### 3.5 中性子および光子の測定

PFN充電電圧と白金板ターゲットから放出する中性子束および光子束との関係を表2に示す。光核反応断面積および中性子捕獲断面積はエネルギーに依存するが、本稿では、それぞれ0.4(b)および97(b)として各フラックスを求めた。前述の通り、充電電圧を下げることで電子のエネルギーは減少し、それに伴い発生する光子のエネルギーが減少し、光核反応が起こりにくくなるため、中性子束が減少することを確認した。充電電圧を20 kVにすると、3時間の照射では金箔(11mg)の誘導放射能(光核反応および中性子捕獲反応)を確認できなかった。

加速電子のピークエネルギーと平均電流当たりのTOF計数値および箔放射化法により算出した中性子束との関係を図4に示す。PFNの充電電圧が20 kVのときは、箔放射化法では検出限界以下となったが、充電電圧が20 kVのときのBF<sub>3</sub>比例計数管の応答は、充電電圧が22

kVのときの3%程度であることより、充電電圧が20 kVのときの中性子束は約30 cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>と見積もることができる。この程度の中性子束であれば、放射化への寄与は無視できる。

表2 PFN充電電圧と中性子束および光子束の関係

充電電圧 (kV)	中性子束 (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	光子束 (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
通常運転 加速管2本	1.7x10 <sup>7</sup>	3.1x10 <sup>11</sup>
22	9.2x10 <sup>2</sup>	< 1.1x10 <sup>5</sup> 検出限界以下
20	< 2.5x10 <sup>2</sup> 検出限界以下	< 1.1x10 <sup>5</sup> 検出限界以下

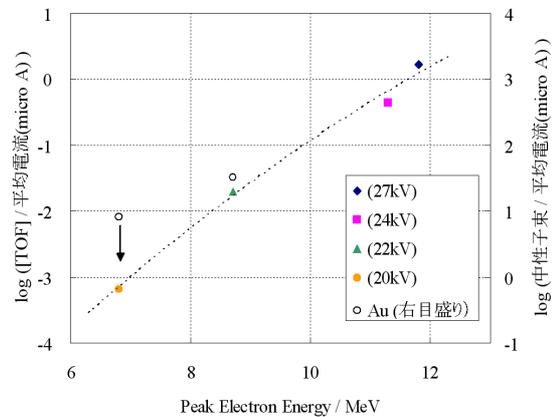


図4 電子のピークエネルギーと中性子束との関係

## 4. まとめ

KURRI-LINACにおいて、2本ある加速管のうち上流側の加速管のみにマイクロ波を供給し、PFNの充電電圧(クライストロンへの印加電圧)を下げることで効果的に電子のエネルギーを低減することができた。この低減化により、照射による誘導放射能を生成しない低エネルギーの光子照射場を構築できた。今後はビーム調整の最適化を行う計画である。

## 参考文献

- [1] M. Hasegawa et al., Proc. of the Int. Symp. on Research for Aging Management of Light Water Reactors, INSS, pp 18-1~18, (Oct, 22-23, 2007, Fukui City, JAPAN)
- [2] T. Kubota et al., Recent Advances in Actinide Science Ed: I. May, R. Alvares and N. Bryan RSC Publishing pp. 68-70 (2006) Royal Society of Chemistry - 'Advances in Actinide Science'
- [3] M. Koizumi et al, Nucl. Instrum. And Methods in Phys. Res. A **562**, 767 (2006)
- [4] T. Takahashi et al., Infrared Physics & Technology **51**, 363-366 (2008)
- [5] B. L. Berman, Atomic Data and Nuclear Data Tales **15**, 319-390 (1975)