

医療用X-band リニアックのための高分解能ビームモニターの研究

坂本文人^{1,A)}、今井貴之^{A)}、飯島北斗^{A)}、深澤篤^{A)}、上田徹^{A)}、渡部貴宏^{A)}、上坂充^{A)}
土橋克広^{B)}、浦川順治^{C)}、肥後寿泰^{C)}、明本光生^{C)}、早野仁司^{C)}

^{A)} 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22

^{B)} 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設（以下東大原施）でX-bandリニアックを用いた逆コンプトン散乱硬X線源の開発研究が進められている。このシステムには、第一ステップの目標である 10^9 光子/秒を実現するための、高分解能横方向電子ビームモニターが必要である。そのための予備研究として、Wire scanner、OTRモニター、スクリーンモニターの同時計測システムを構築し、次に各々の分解能、機能性を含めた総合評価を行う。それを踏まえて、エミッタンスの異なる手法による計測と、相互比較を行い、最適モニターを決定する。

1. はじめに

東大原施が開発研究を進めている逆コンプトン散乱硬X線源用X-bandリニアック[1][2]は、設計上エミッタンス約 $2\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、エネルギー56MeV、パルスレーザーとの衝突点におけるビームサイズは $\sigma=100\mu\text{m}$ であり、逆コンプトン散乱により効率良く最大量のX線を得るには、電子ビームのサイズ、位置、エミッタンスを精度良く測定することが必要不可欠である。QUAD scanによるエミッタンス測定を考慮した場合、空間分解能は最低でも $10\mu\text{m}$ 程度の保障が要求される。リニアックのビームプロファイルモニターとして一般的に用いられている、蛍光体を用いたスクリーンモニターは、にじみの効果により空間分解能がスクリーンの厚み程度であり、 $100\mu\text{m}$ 程度が限界である。一方、高エネ研で研究が進められている、Wire scannerは、測定体系がやや大がかりではあるが、空間分解能がwireの太さに依存しているため、wireの太さを $100\mu\text{m}$ 以下にすることでX-bandリニアックへの適応は可能と考えられる。この他に有力なものとしては、遷移放射の可視光領域によりビームスポットを測定するOptical Transition Radiation(OTR)モニターは測定限界が測定する光の波長程度であり、 $100\mu\text{m}$ 以下の空間分解能が期待でき、かつ測定体系もシンプルである。しかし、これら2つのモニターはGeVオーダーの高エネルギー電子ビームに対する報告例が多く、X-bandリニアックのような数十MeVの低エネルギー電子

ビームに対しては、エネルギーが小さい分wireからのX線強度も弱く、wire径を小さくすることはS/N比の減少につながり、高い分解能を保障することは出来なくなる。また、OTRに関しても光量が極度に少なくなり、光学系に工夫が必要となる。これらの事を踏まえ、東大原施S-band 18Lリニアック(20MeV)を用いてX-bandリニアックを想定した原理検証実験を行った。

2. 同時計測システムと原理

Wire scanner、OTRモニター、スクリーンモニター各々の詳細な横方向空間分解能の比較評価を行うために、同位置における測定体系の検討を進めている(図1)。これは、Wire scannerのチェンバー内に、ビーム軸に対し45度の角度でOTRターゲットとなるアルミ蒸着ミラーと、蛍光体(デマルケスト社AF995R)を装着し、3種のモニターを1つのチェンバーに収めたCombine型のシステムである。

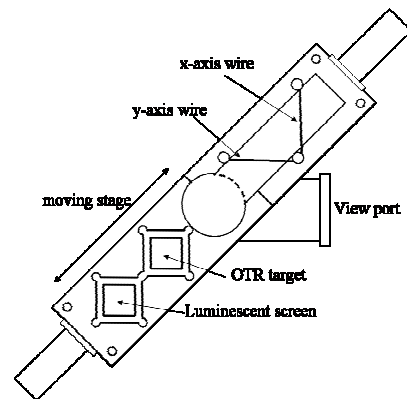


図1: チェンバー概念図

Wire scanner及びOTRモニターについて、その測定原理の概略を以下に記す。

2.1 Wire scanner

Wire scannerは、電子ビームに対し金属wireを相対的にスキャンし、各位置におけるWireと電子ビームによる制動放射X線の強度分布を、Wireの位置関数としてプロットすることで電子ビームのサイズを評価するものである。この際、ある位置における電子

¹ E-mail: saka@utnl.jp

ビームとwireによる単位時間当たりの制動放射X線の強度は式(1)のように記され、電子ビームのエネルギーと材質に依存し、wire径に比例することが分かる。

$$I = nNx \int 4Z^2 r_e^2 \frac{1}{137} \frac{1}{E_0 - E} \left(1 + \frac{E}{E_0} - \frac{2}{3} \frac{E}{E_0} \right) \left[\ln \frac{2EE_0}{m_e c^2 E_x} - \frac{1}{2} - f(z) \right] dE_x \quad (1)$$

r_e : 電子古典半径 Z : wireの原子番号
 E_x : 制動放射X線エネルギー
 E_0 : 入射電子全エネルギー
 E : 衝突後電子エネルギー
 n : 原子密度 N : 電子数(/sec) x : wire径

一方、電子ビームが正規分布 σ_i に従うと仮定すると、制動放射X線の強度分布 σ_m はwire径を x とし、以下のように記される。

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_i^2 + \left(\frac{x}{4}\right)^2} \quad (2)$$

実験では得られた σ_m を式(2)に代入することで、真のビームサイズ σ_i を評価することになる。図2はシミュレーションコードGEANTを用いて、 $x=100 \mu\text{m}$ wireによる計算結果であり、wire径による誤差を

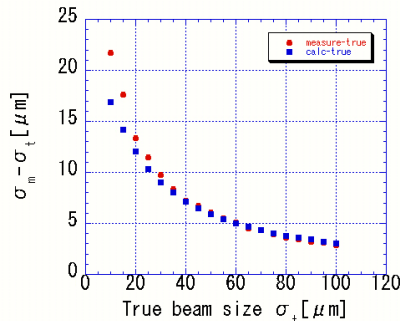


図2: wire径による測定誤差の発生

評価したものである。式(2)を、シミュレーション結果を表し、 $100 \mu\text{m}$ のwireはビーム径 $50 \mu\text{m}$ 以上に対して、誤差1%以内の精度で測定が可能であることを示している。

2.2 Optical Transition Radiation (OTR)

OTRは、誘電率の異なる2つの媒質中を荷電粒子が通過する際に、媒質の境界面上で電磁波を放出する現象[3]であり、その発光強度は式(3)のように記され、 $\theta=1/\gamma$ で発光強度が最大となり、電荷量の2乗に比例する[4]。

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} \quad (3)$$

OTRを用いて電子ビームのプロファイルを評価する場合、一般的なスクリーンモニターの体系と同様に、

OTRターゲットをビーム軌道に対し45度の角度で挿入し、90度の方向に発せられる発光を利用し、レンズの焦点をOTRターゲット上に合わせることで観測を行う。

3. 予備実験

3.1 実験体系

・ Wire scanner 実験体系

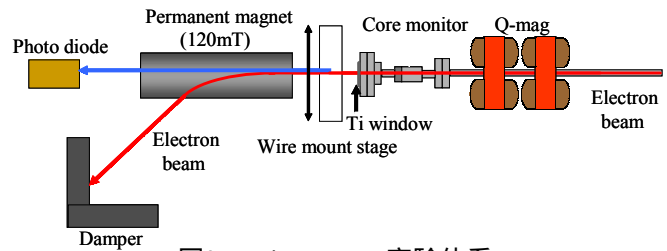


図3: Wire scanner実験体系

図3にWire scanner 実験体系を示す。通常、真空中にwireを置いて測定を行うが、空気中での測定を行った。電子ビームは真空を仕切るチタン窓を通過し、横方向(x軸)のリニアステージにマウントされた、太さ $150 \mu\text{m}$ tungsten wireによりスキャンされる。その後、磁場120mTの永久磁石により起動を反らし、wireからのX線と分離しdumpされる。下流には受光面 $=2\text{cm}$ のPhoto diodeを設置し、X線の強度を測定した。また、測定ごとにチタン窓直前にあるcore monitorを用いてビーム電流を測定し、補正を行った。ここで最も注意が必要なのは、真空を仕切るチタン窓による制動放射X線である。GEANTを用いてこの体系における $150 \mu\text{m}$ tungsten wireとチタン窓によるX線強度比(S/N比)を求めたところ、その比は4.4と計算された。

・ OTR実験体系

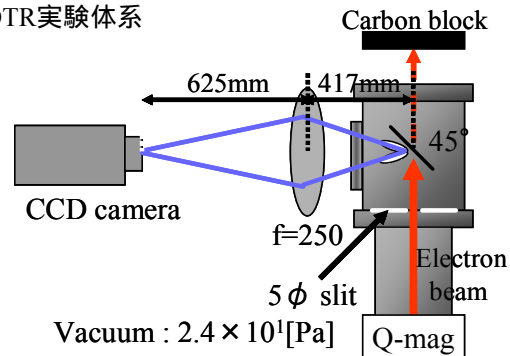


図4: OTR実験体系

図4にOTR実験体系を示す。この実験では、アルミ蒸着ミラーをビーム軸に対し45度の角度で設置し、チェレンコフ光の発光を防ぐためにチェンバーを真空($2.4 \times 10^1 \text{pa}$)にした。光学系は光を効率良くカメラに集光するために、ビューポート直後にレンズを置き、焦点をOTRターゲット表面に合わせた。測定用カメラには高感度且つ高い増倍機能を持つCCDカメラPI-MAXを用いて測定を行った。また、バンド

パスフィルター（ $\lambda_{\text{max}}=456\text{nm}$ ）をカメラに付け、バックグラウンド対策を行った。

3.2 実験結果

・ Wire scanner 測定結果

各wire位置で得られたX線強度をcore monitorのビーム電流値で規格化して縦軸に取り、正規分布でフィッティングした結果を図5に示す。これによりビームサイズは各々 $\sigma=0.53\text{mm}$ と測定された。S/N比は約3.7となり、バックグラウンドによる影響は小さい。ほぼ一致して

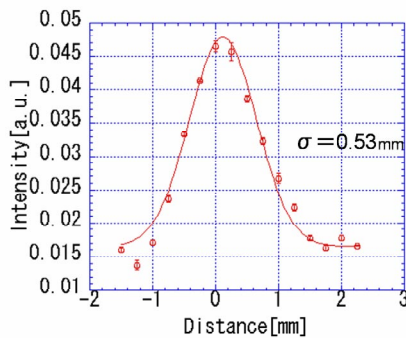


図5：150 μm tungsten wireによるスキャン結果

強度に大きなふらつきが見られ、正規分布からずれている。これはフォトカソード用レーザーが不安定であり、ビーム位置にふらつきが生じた為と考えられる。

・ OTR測定結果

OTRによるビームスポット測定結果を図6,7に示す。

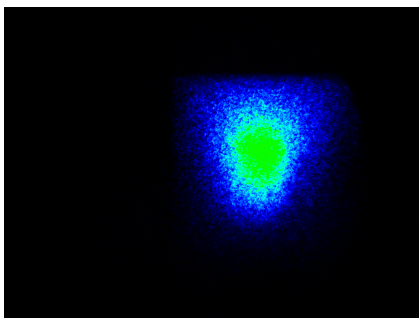


図6：OTRによるビームスポット

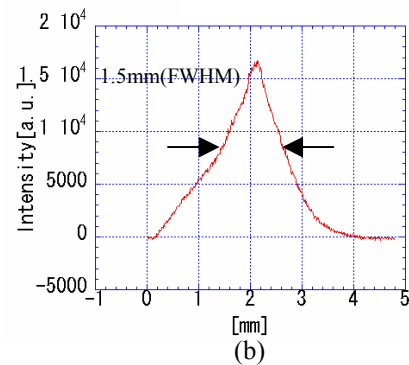
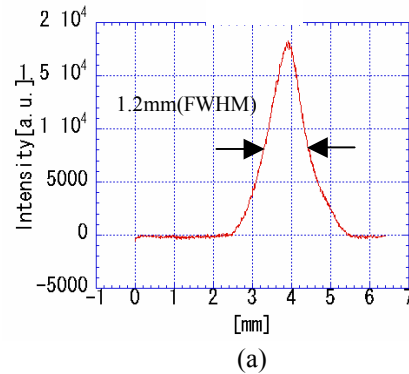


図7：OTRによるプロファイル

(a): Horizontal, (b): Vertical

今回の実験では、CCDカメラの露光時間を3秒とし、約30shotの積算撮影を行った。バンドパスフィルターをカメラに装着したことにより、ノイズ等は確認されず鮮明な像が得られた。

4. まとめ

今回の予備実験では数十MeVの電子ビームに対しても、wireから十分なX線強度が得られ、問題点であるバックグラウンドの影響は少ないものであることが分かった。OTRについても積算ではあったが、ビームサイズを評価することが出来る程度の光量を得ることが出来た。しかし、電子ビームの不安定性により、空間分解能の詳細な評価には至っていないため、BPMによる位置補正やOTRのワンショット撮影のための方策を考慮する必要がある。

5. 今後の予定

次回8月に予定している実験では、各モニター単体でQUAD scan法によるエミッタンス測定を行う予定である。OTRについては、QUAD scanに加え、ターゲットを2枚用いた干渉法[4]によるエミッタンス測定も検討している。また、12月には図1に示したチェンバーを用いて、同位置におけるエミッタンス

ス測定を行い、異なる数種類の手法により、詳細な性能評価を行うことを目標としている。

参考文献

- [1] M. Uesaka , et al LINAC2002, TH410, Gyeongju Korea August 19-23 2002
- [2] K. Dobashi, M. Uesaka, M. Akemoto, H. Hayano, T. Higo, J. Urakawa, A. Fukasawa, H. Iijima 8th European Particle Accelerator Conference in Paris, France, 3-7 June (2002)
- [3] J.D Jackson. Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons, 19
- [4] L.Wartski, S.Roland, J.Lasalle, M.Bolore, and G.Filippi. Interference phenomenon in optical transition radiation and its application to particle beam diagnostics and multiple-scattering measurements. J.Appl.Phys., 46:3644-3653, 1975