

医療用 X-band リナックにおける高分解能エミッタンスモニターの研究

坂本文人^{A)}、土橋克広^{B)}、今井貴之^{A)}、飯島北斗^{A)}、深澤篤^{A)}、
上田徹^{A)}、渡部貴宏^{C)}、上坂充^{A)}

^{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

^{B)} 放射線医学総合研究所

^{C)} Brookhaven National Laboratory

概要

東大原施が開発を進める逆コンプトン散乱硬 X 線源における、高空間分解能エミッタンスモニターの研究を行っている。遷移放射は電子ビームのエネルギーによって決まる発光角を有することから、ビームウェストにおけるビーム発散角及びビームサイズを同時に求めることで、エミッタンスを測定することが期待できる。通常のエミッタンス測定手法である Q-scan 法との測定比較により、エミッタンス測定可能性を示していく。

1 はじめに

逆 Compton 散乱により効率良く大量の X 線を生成するためには、ビームサイズを小さくすることでルミノシティを最大限稼ぐことと、電子ビームの特性(エミッタンス)を正確に把握し、レーザーとの精度良い正面衝突をさせることが必要不可欠である。硬 X 線源の数値計算結果では、エミッタンス 2.5 π mm mrad、血管造影に必要な X 線強度 10⁸ photons/sec を生成するには衝突点においてビームサイズ 100 μm という結論を得た [1][2]。ライナックで通常ビームサイズ測定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、蛍光体の厚みによるじみの効果により、技術的に空間分解能 100 μm を切ることは難しい [3]。遷移放射(OTR :Optical Transition Radiation)は、蛍光体に比べ発光量が極端に小さいという弱点はあるものの、空間分解能が測定する光の波長程度すなわち回折限界程度であり、100 μm 以下を測定可能と十分に期待される。また、OTR は電子ビームのエネルギーに依存した発光角度分布を有することから、電子ビームの発散角度を求めることが出来る。これにより、OTR 特有のエミッタンス測定が期待できる。OTR モニターと同様に、高空間分解能が期待できるものとして、Wire Scanner がある。Wire Scanner は空間分解能が wire 径の半分程度となるため、数 μm の報告がなされている。しかし、wire scanner を用いた Q-scan 法によるエミッタンス測定には長時間を要し、硬 X 線源システムへの導入は難しい。ここでは、空間分解能の高さと、測定体系のシンプルさを追求し、OTR モニターの採用を検討しており、Wire Scanner との詳細な性能比較を行い、空間分解能 10 μm の達成を目的とする。第一段階として、X-band ライナックを想定し、東大原施 S-band I8L ライナック(E~20MeV)を用いて、OTR の発光強度 (S/N 比) の確認及び、OTR 計測体系構築のための第一実験として、ビームサイズ測定及び発光角度分布の測定実験を行った。これによりエミッタンス計測を行い、OTR モニタ

ーの実現可能性評価を行った。最終的には、現在平行して製作を進めている Wire Scanner と、OTR との詳細な性能比較を行うことで、空間分解能 10 μm を実証していく予定である。

2 理論及び測定原理

・遷移放射 (OTR :Optical Transition Radiation)

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時に、媒質の境界面上で電磁波を放射する現象 [4][5][6] である。実験においては金属薄膜を OTR ターゲットとし、真空との境界面で放射される光を観測することになる。OTR ターゲットからの発光は、前方、後方いずれの方向にも発せられる。それぞれの発光の強さは式(1),(2)のように表すことができる。

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

$$\text{後方放射: } \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} \left| \frac{\varepsilon^{1/2} - 1}{\varepsilon^{1/2} + 1} \right|^2 \quad (2)$$

ここで、β は光速に対する電子の相対速度、θ は電子の進行方向に対する発光角度、ε はターゲット物質の誘電率である。OTR 発光は、エネルギーに依存した特長的な角度分布を持っており、式(1),(2)よりその強度は 1/γ でピークを持つことが分かる(図 1)。また、発光量の積分強度は電子ビームの電荷量の二乗に比例することが分かる。

OTR ターゲットからの OTR 発光をカメラで観測する場合、カメラの焦点の位置により二通りの像を観測することが出来る。焦点をターゲット上に合わせることで、発光位置分布(ビームプロファイル)を表す像が得られ、焦点を無限遠にすることで発光角度分布を表す像(リング)を得ることが出来る。実験においては、ターゲットをビーム軌道に対して 45 度の角度で挿入し、ビーム軌道に対して 90 度方向に放射される、後方放射を観測することになる(図 2)。

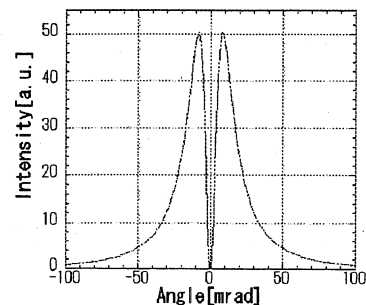


図 1 単一電子による OTR 発光角度分布(E=20MeV)

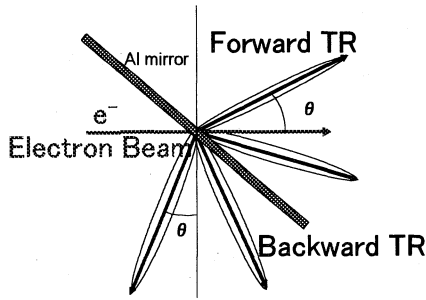


図 2 ターゲットを 45°の角度で用いた場合の OTR 発光

・発散角計測法

前述の通り、OTR は電子ビームのエネルギーに依存した発行角度を持っている。実際の電子ビームは図 1 で示したようなゼロエミッタンスではなく、ある発散角を持って OTR ターゲットに入射することになる。今、電子ビームが持つ発散角度が式(3)に示す正規分布に従うと仮定すると、OTR 発光角度分布は式(1)と式(3)の convolution として表すことが出来る(式(4))。

$$D(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\phi_{rms}} \exp\left(-\frac{s^2}{2\phi_{rms}^2}\right) \quad (3)$$

$$\frac{d^2W'}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2\beta^2}{4\pi^2c} \int \frac{(\theta-x')^2}{\{(\theta-x')^2 + \gamma^{-2}\}^2} \exp\left(-\frac{x'^2}{2\phi_{rms}^2}\right) dx' \quad (4)$$

図 3 に任意の発散角度 ϕ_{rms} における、OTR 発光角度分布の数値解析結果を示す。エミッタンスは電子ビームの waist において式(5)のように表すことが出来る[7]。

$$\epsilon_{rms} = \beta\gamma\sigma_{rms}\phi_{rms} \quad (5)$$

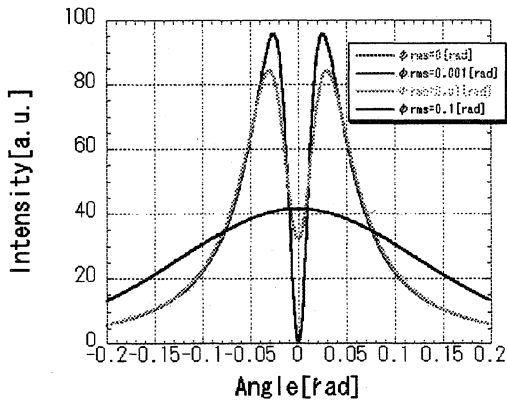


図 3 発散角を持つ電子による OTR 発光角度分布

すなわち、waist におけるビームサイズと、カメラの焦点を無限遠に合わせた時の発光角度分布を同時に測定し、図 3 に示す数値解と照らし合わせビーム発散角を求めることで、エミッタンスを評価することが出来る。ただし、この計測法では電子ビームのエネルギー(エネルギー広がりを含む)を既知のものとする。

3 エミッタンス計測実験

図 4、表 1 にエミッタンス測定実験体系及び、ライナックのパラメータを示す。

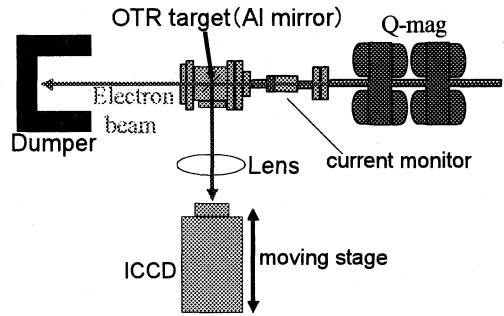


図 4 エミッタンス測定体系

表 1 ライナック実験パラメータ

Energy	18MeV
Charge	1nC
Repetition	10pps
Vacuum @ OTR	2.5×10^{-2} [pa]

この実験において OTR ターゲットとしては、安価で入手しやすいガラス基盤アルミ蒸着ミラーを採用した。電子ビームはフォトカソード RF 電子銃により生成され、加速管でエネルギー 18MeV まで加速される。加速された電子ビームはビームラインと OTR チェンバーを仕切る厚さ 20 μ m のチタン窓を通過し、ダンプされる。OTR チェンバーは空気チレンコフ光が発光しない程度の真空とした。また、数値解析モデルにはエネルギー広がり (ΔE) に関する考慮はなされていないので、この実験ではエネルギー広がり最も小さいと思われる加速位相の元で行った。アルミ蒸着ミラーは OTR チェンバー内にビームラインに対し 45 度の角度で設置し、90 度方向に放射される後方放射を測定する。測定に用いる CCD カメラは、OTR の発光量が非常に小さいことを考慮し、Multi channel plate により光電子増倍機能を有する、高感度 ICCD カメラを使用した。ビームサイズ及び発光角度分布を測定するために、CCD カメラをリアステージに乗せ、カメラの焦点がターゲット表面と無限遠になる点までの移動を可能な体系とした。Shot by shot のビームふらつきを考えると、1shot での計測が望ましいが、OTR の発光量が非常に小さく、1shot 撮影では鮮明なプロファイルを取得することは出来なかったため、カメラの露光時間を 3 秒とし、ゲインを最大として測定を行った。その結果、S/N 比も測定には影響を与えない程度の像を得ることが確認された。

・QUAD scan 法によるエミッタンス計測

この散乱の効果を踏まえて、OTR spot による QUAD scan 法によるエミッタンス計測を行った。その結果を図 8 に示す。Vertical、Horizontal 共に約 100mm mrad という結果を得た。

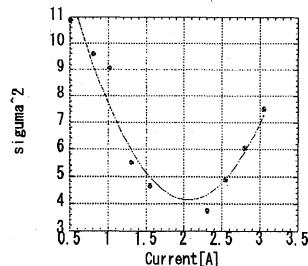


図 5 Q-scan によるエミッタンス計測

・発散角計測法によるエミッタンス計測

まず、OTR 発光角度分布計測の原理を理解するために、CCD カメラの焦点を、OTR ターゲットから無限遠まで測定する

ためにリニアステージで CCD カメラの位置を変え、発光が OTR spot からリングになるまでの形状変化を観測した。この際の光学系を図 6 に示す。焦点距離 f の位置では、平行な光が一点に集光され、入射ソースの大きさ(ビームサイズ)を考慮する必要がないことが分かる。この実験体系においてはチタン窓による前方遷移放射光がアルミミラーに反射し、迷光となって CCD カメラに入射する恐れがあったため、光沢の無い遮光テープをアルミミラー手前に付着させた。図 7 に、カメラの焦点を OTR ターゲットから無限遠にずらしていった際に観測された角度分布(OTR リングパターン)の様子を示す。

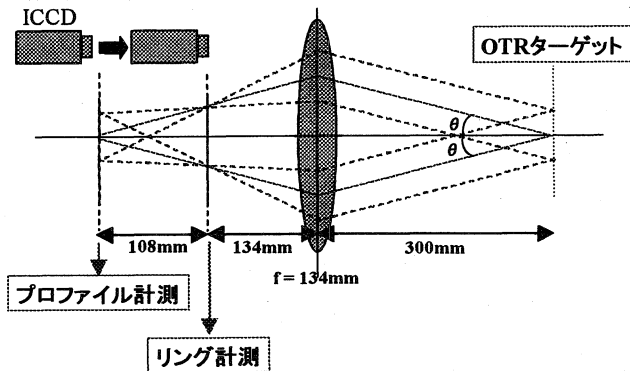


図 6 発光角度分布計測光学系

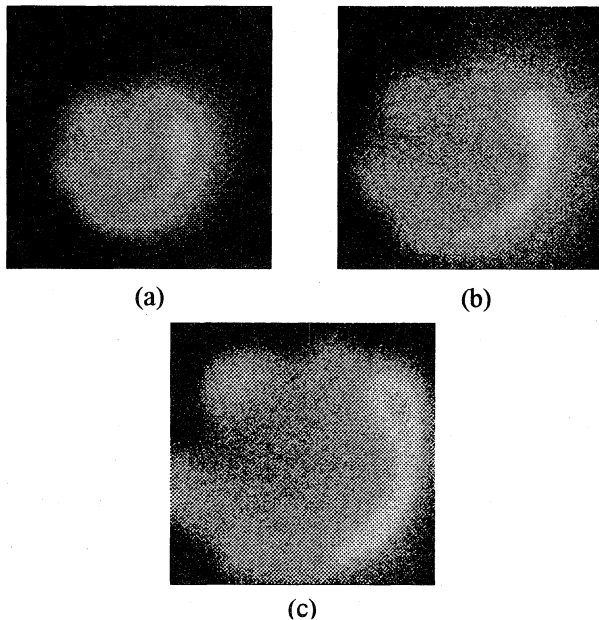


図 7 OTR リングパターンの形成過程

カメラ位置がレンズの焦点距離 f に位置した場合、角度 θ で放射される光は放射ソースの大きさ(ビームサイズ)に関係なく $x=f\theta$ の大きさで結像される。しかし、カメラの位置が f にない場合、放射ソースの大きさが影響してくるので、リングは滲んでしまう(図 9(a),(b))。(c)に示した発光分布が、使用したレンズの焦点距離(130mm)における像であるが、予想された鮮明なリングは得られなかった。これは、光学系のミスアライメントによるものと考えられる。また、OTR の計測において、レンズの色収差によるにじみを避けるために、バンドパスフィルターを用いたが、線幅(60nm)が広がったため、色収差が押さえきれなかった為とも考えられる。(c)からリング強度の最大値 I_{max} 、最小値 I_{min} より、電子ビームのサイズ及び発散角を求めたところ、 σ

$\sigma_{rms}=1.1[\text{mm}]$ $\phi_{rms}=17[\text{mrad}]$ と求めた。これにより規格化エミッタンス ϵ_{rms}^n は $170 \pi \text{ mm mrad}$ となった。しかし、OTR リング形状が大きく乱れていることから、数値解析におけるエラーが大きく、精密な評価は難しい結果と言える。

4 まとめと今後

この実験において、Screen モニタ及び OTR によるエミッタンス計測を行った。その結果を表 2 にまとめる。

表 2 エミッタンス計測結果

	$\epsilon_{rms}^n(x)$	$\epsilon_{rms}^n(y)$
Screen(Q-scan)	115	112
OTR(Q-scan)	120	110
OTR(発散角計測)	170 ± 70	160 ± 70

OTR の最大の欠点である発光量の弱さは、ICCD カメラを採用し、積算することでエミッタンス計測に十分な強度を得ることが確認された。OTR の発光強度は式(1),(2)から分かるように、電荷量の自乗に比例するため、X-band ライナック 200nC/RFpulse(20pC/bunch, 10^4 bunches/RFpulse)においては、1shot による計測が十分に期待できる結果であると言える。

また、発散角計測法においては、OTR パターン(リング)の形状に大きな乱れが確認され、エミッタンスの詳細な評価には至らなかった。この原因としては、この実験で採用したアルミ蒸着ミラーの表面平坦度が極端に悪かったことと、光学系のミスアライメント、及び短レンズを用いたために、収差の影響への対応がなされていなかった等の課題点が挙げられる。

次回 12 月に予定している実験においては、新チェンバーを製作し、ビームラインに対するミスアライメントを最小にする。また、線幅の更に狭いバンドパスフィルター(10nm)及び、アクロマティックレンズを採用することで、単色光を測定対象とし、測定光学系自体の空間分解能を $10 \mu\text{m}$ 程度までの向上を目標とする。また、来年 2 月には X-band ライナックへのインストールを行い、OTR モニタの有用性を明らかにし、8 月には X 線生成実験を行う予定である。

参考文献

- [1]M.Uesaka, et al LINAC 2002, TH410, Gyeongju Korea, 19-23 August 2002
- [2]K.Dobashi, et al 8th European Particle Accelerator Conference in Paris, France, 3-7 June 2002
- [3]榎本収志 “電子リニアックでのビームモニター” OHO 1986
- [4]J.D.Jackson, Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons, 1975
- [5]V.L.Ginzburg and V.N.Tsytoovich, Transition Radiation and Transition Scattering, Adam Hilger, New York, 1990
- [6]R.Hajima, et al Development of an Optical Transition Radiation beam monitors for Free Electron Lasers JAERI-M 92-188 December 1992
- [7]R.B.Fiorito and D.W.Rule “Emittance Measurements of FEL Accelerators Using Optical Transition Radiation Methods” PAC 1991