

## LFC カメラ用チェレンコフラジエーターの評価

### EVALUATE OF AEROGEL AS CHERENKOV RADIATOR FOR LFC CAMERA

南部健一<sup>#, A)</sup>, 柏木茂<sup>A)</sup>, 日出富士雄<sup>A)</sup>, 武藤俊哉<sup>A)</sup>, 長澤育郎<sup>A)</sup>, 高橋健<sup>A)</sup>, 東谷千比呂<sup>A)</sup>,  
小林恵理子<sup>A)</sup>, 齊藤寛峻<sup>A)</sup>, 阿部太郎<sup>A)</sup>, 濱広幸<sup>A)</sup>

Kenichi Nanbu<sup>#, A)</sup>, Shigeru Kashiwagi<sup>A)</sup>, Fujio Hinode<sup>A)</sup>, Toshiya Muto<sup>A)</sup>, Ikuro Nagasawa<sup>A)</sup>, Ken Takahashi<sup>A)</sup>,  
Chihiro Tokoku<sup>A)</sup>, Eriko Kobayashi<sup>A)</sup>, Hirotohi Saito<sup>A)</sup>, Taro Abe<sup>A)</sup> and Hiroyuki Hama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

#### Abstract

Linear focal Cherenkov ring camera (LFC-camera) has been developed for longitudinal phase space measurement of relativistic electron beam. The LFC-camera employs a thin silica aerogel with water-free hydrophobic treatment as Cherenkov radiator in vacuum. The system requires perfect Cherenkov ring for the LFC-camera. If generated Cherenkov ring is distorted, it may bring large uncertainties in deduced phase space distribution of electrons. In addition, since RF-gun and accelerating structure require ultra-high vacuum around  $1 \times 10^{-6}$  Pa, we have to evaluate impact on the vacuum when the beam is passing through the silica aerogel. For this reason, we have examined characteristic of Cherenkov radiator in the test accelerator, t-ACTS. Preliminary results are described in this report.

#### 1. はじめに

東北大学電子光学研究センターでは、シングルショット計測で比較的低いエネルギーの電子ビームの縦方向位相空間を可視化する Liner Focal Cherenkov ring (LFC) カメラの研究開発を進めている。本測定システムはチェレンコフ光の放出角度と電子の速度の間の強い相関を利用し、ストリークカメラと組み合わせることで電子ビームのエネルギーと時間情報を同時に計測しその縦方向位相空間を直接測定するものである。チェレンコフラジエーターには屈折率が 1.05 程度の疎水性シリカエアロゲルを使用するが、ラジエーターであるシリカエアロゲルの不均一性等の影響でラジエーターから放射されるチェレンコフ光が歪みチェレンコフリングの形が崩れるたり、エアロゲルに電子ビームを入射したときに極端に真空が悪化する場合、測定に大きな影響をおよぼすことが危惧される。そこで保有する試験加速器から得られるビームを用いてチェレンコフラジエーターの評価を行ったので報告する。

#### 2. LFC カメラ

東北大学電子光学研究センターでは、高輝度なテラヘルツ光源加速器の研究開発を行っている[1,2]。高輝度なコヒーレントテラヘルツ光生成のためには、100 フェムト秒以下の極短バンチを安定に生成しなければならない。現在、試験加速器 (t-ACTS: test Accelerator as a Coherent THz Source) を使って極短バンチ生成実験を行っているが[3]、最終的なバンチ長は加速管に入射する電子ビームの縦方向位相空間分布すなわち電子銃から引き出されたビームの縦方向位相空間分布に支配される。試験加速器の電子銃はセンターで開発した ITC-RF-gun を用いている[4]。

ITC-RF gun は 2 つの独立した空洞を有しており、各々の空洞の電力と位相をそれぞれ調整することで、バンチ圧縮に適した縦方向位相空間分布を有する電子ビームを生成することができる。最終的なバンチ長は電子銃から引き出されるビームに大きく依存するため、期待されるビームが生成されているか把握することは極めて重要であるが、従来の測定手法では、十分に相対論的な速度に至っていない電子ビームの縦方向位相空間分布を測定することは困難であった。そこでチェレンコフ光の放射角度と電子の速度 (=エネルギー) の間に(1)式の関係があることを利用したチェレンコフリングカメラ (LFC カメラ) の研究開発を行っている[5,6,7]。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n(\omega)\beta}, \dots (1)$$

ここで  $\theta_c$ 、 $n(\omega)$ 、 $\beta$  は、それぞれ、放射角、屈折率、速度である。

LFC カメラで電子銃から引き出されるビームの縦方向位相空間分布を測定するためには、チェレンコフラジエーターを電子銃の近傍に配置する必要がある。しかしながらベリリウム窓等を用いて加速器とチェレンコフラジエーター間の真空を分離することは測定精度の点から困難であることから、真空中に直接チェレンコフラジエーターを設置しなければならない。我々はチェレンコフラジエーターとして屈折率が 1.05 程度の疎水性シリカエアロゲルを使用する。真空中でも疎水性シリカエアロゲルの屈折率はほとんど変化しないことは確認済みであるが、ラジエーター上でのビームサイズによるチェレンコフ光への影響や不均一性などに起因するチェレンコフ光の歪みなどをあらかじめ把握しておく必要がある。またラジエーターに電子ビームが入射したときにシリカエアロゲルから発生するアウトガスにより真空

<sup>#</sup> nanbu@lms.tohoku.ac.jp

が悪化し、加速器の真空系に大きな影響を与えるような場合は、電子銃近傍への設置そのものが困難となるため、今回試験加速器のビーム診断部にチェレンコフラジエーターを設置し、試験加速器のビームを用いてチェレンコフリングの確認と真空系への影響評価を行った。

### 3. ラジエーターの評価方法

#### 3.1 評価方法

本実験では疎水性シリカエアロゲルを組み込んだチェレンコフラジエーターを t-ACTS のビーム診断部に設置し、それに電子ビームを照射したときに放射されるチェレンコフ光を観測し、チェレンコフリングの幅や曲率半径を評価するとともに、同時に真空への影響評価を目的に実験を行った。Figure 1 に測定システムの概略を示す。

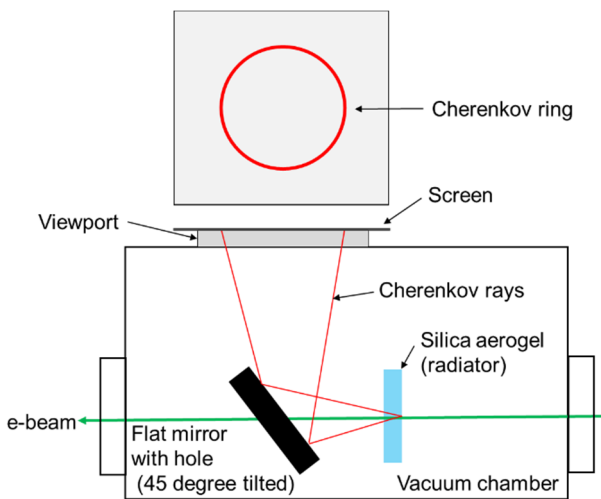


Figure 1: Schematic view of the measurement system for Cherenkov light measurement. Silica aerogel radiator is assembled on the special holder. It has another holder with fluorescent screen for beam profile measurement. The flat mirror with a 4mm hole along the beam axis is installed behind Cherenkov radiator to reflect the light. Cherenkov ring is observed on the screen through the viewport window. This vacuum chamber is evacuated by an ion pump together with a large conductance duct.

#### 3.2 実験のセットアップ

t-ACTS のビーム診断部にはすでに遷移放射(OTR)を用いたバンチ長測定装置が設置されているため、ビームラインからチェレンコフラジエーターを完全に退避できる構造とし、実験を両立できる構成とした。チェレンコフラジエーター上でのビームの位置とプロファイル確認のため、蛍光スクリーン ( $t = 0.1 \text{ mm}$ ) をラジエーターの中心と一致するように設け、チェレンコフ光の取り出しにはビーム軸から45度傾けた穴あき平面ミラーを使った。精度を確保するためにこれらの部品は一体構造となるように設計し、組立および調整が容易な構成とした。真空容

器の中心とチェレンコフ光を取り出す穴あきミラーの中心は一致しているため、まずレーザー墨出し器を用いて、天井に真空容器の中心の指標を移し、その後ビームに見立てたガイドレーザーを使って、平面ミラーで反射されたレーザー光を先ほどの指標に一致するように調整を行った。Figure 2 にチェレンコフラジエーターの写真を示す。今回の実験では、チェレンコフ光の時間構造の測定は行わないため、ゲート付きのCCDカメラを用いてチェレンコフリングの測定を行った。使用したカメラ (BASLER acA1300-30gm) は1/3インチで1296(H)×966(V)ピクセルの画素を持つ。t-ACTSのビーム測定は、エネルギーが50 MeV、ピーク電流が8 mA、マクロパルス幅は3マイクロ秒、マイクロパルス幅は2ピコ秒程度、ビームの繰返しは1 ppsである。

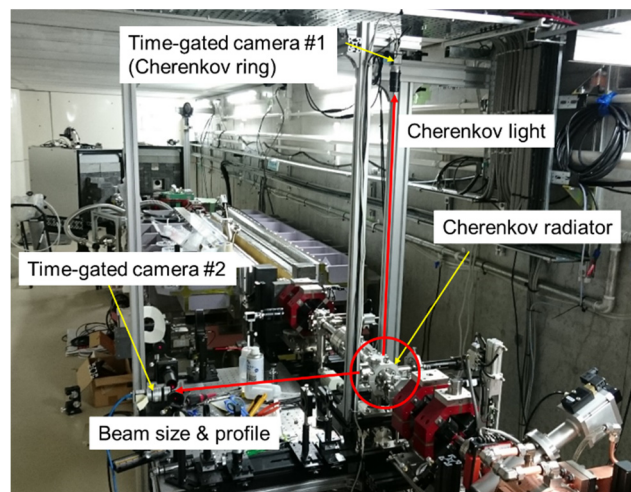
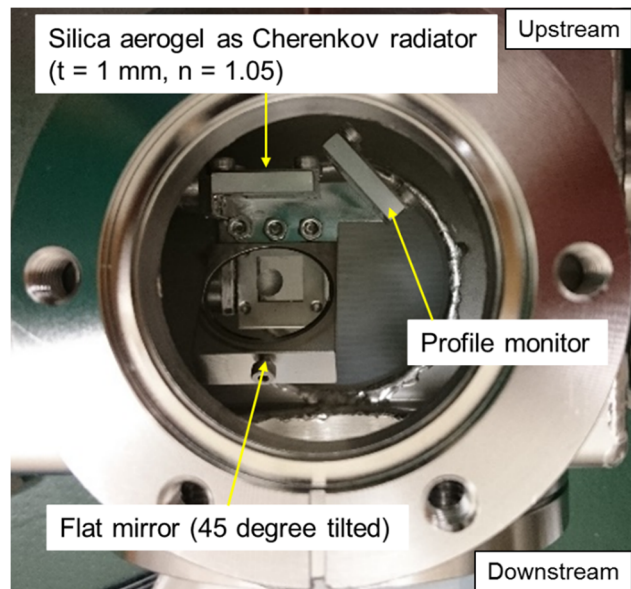


Figure 2: (upper) photograph of Cherenkov radiator (top view). Cherenkov radiator and profile monitor are mounted on the same holder to move on the same axis. Those components is moved by linear manipulator with stepper motor in vacuum. (lower) photograph of diagnosis part of t-ACTS.

## 4. 実験結果

### 4.1 ラジエーターの場所でのビームサイズ

チェレンコフラジエーター上でのビームサイズの調整を行った後に、チェレンコフ光の測定を行った。

チェレンコフラジエーター上でのビームサイズは、蛍光スクリーンを用いて測定された。測定は垂直方向のビームサイズを変え、各々5回測定を行った。Figure 3 に代表的な電子ビームのプロファイルを示し、その測定結果を Table 1 に示す。

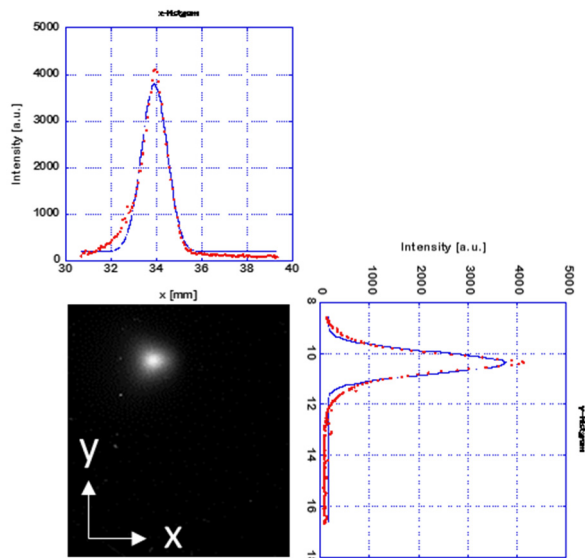


Figure 3: Beam profile on the fluorescent screen. Horizontal and vertical beam size were evaluated by Gaussian fitting.

Table 1: Horizontal and Vertical Beam Size on Cherenkov Radiator

Beam shape on Cherenkov radiator	Horizontal size [mm]	Vertical size [mm]
horizontally defocus	$1.39 \pm 0.08$	$0.21 \pm 0.01$
transverse symmetry	$0.72 \pm 0.04$	$0.51 \pm 0.03$
horizontally focus	$0.29 \pm 0.01$	$0.70 \pm 0.04$

### 4.2 チェレンコフリングの幅

チェレンコフ光は指向性が高いため、今回のセットアップでは直接観測することは出来ない。そこで真空窓の大气側にトレーシングペーパーを置き、そこで散乱されたチェレンコフ光をカメラで測定することにした。測定点でのカメラと光学系から決まる空間的な分解能は、水平、垂直方向ともに  $43 \mu\text{m}$  である。測定点での観測された代表的なチェレンコフ光を Figure 4 に示す。現在は真空窓の制限から一部のチェレンコフ光のみ観測可能であるが、今後より大口径の真空窓を準備し、すべてのチェレンコフ光を観測できるようにする予定である。

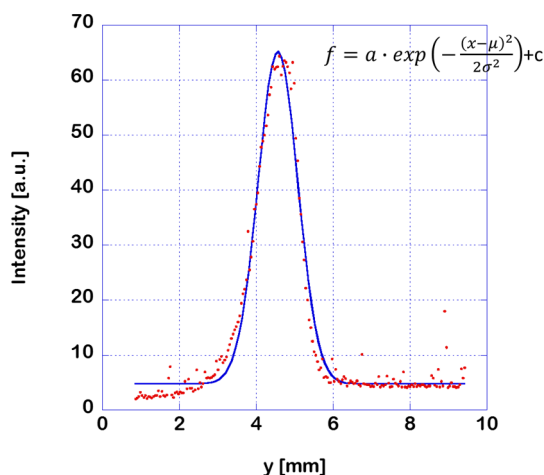
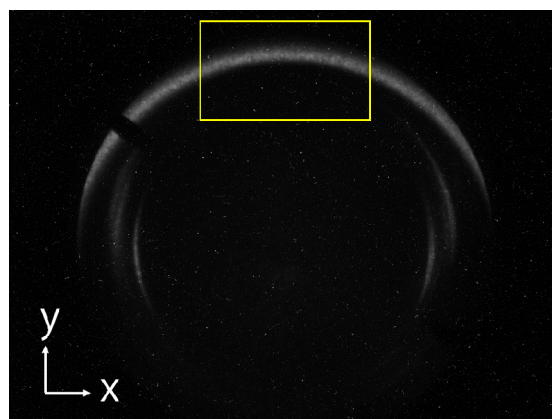


Figure 4: (upper) Cherenkov light observed on tracing paper. Yellow rectangle area shows the region of interest. (lower) Red dots are an intensity distribution of the Cherenkov ring. Solid line shows a fitting result using Gaussian function.

チェレンコフラジエーター上での垂直方向のビームサイズを変化させたときのチェレンコフ光を各々5回取得し、各々Figure 4の黄色の線で囲んだ領域を水平方向に短冊状に35分割し、その一つ一つについて水平方向に射影をとったものを、ガウス関数でフィッティングし、ピーク値をチェレンコフリングの位置、 $\sigma$  値を幅とした。チェレンコフリングの幅は原理的にラジエーターの厚さと垂直方向のビームサイズに依存する。

ラジエーターの厚さによって生じるリングの幅を  $CR_{\text{radiator}}$  とし、ラジエーターの厚さを  $t_{\text{radiator}}$  とすると

$$CR_{\text{radiator}} = t_{\text{radiator}} \cdot \tan \theta_c, \quad \dots (2)$$

ここで  $\theta_c$  はチェレンコフ角である。垂直方向のビームサイズ  $\sigma_y$  はそのままチェレンコフリングの幅に反映されるため、原理的なチェレンコフリングの幅  $CR_w$  は

$$CR_w = \sqrt{CR_{\text{radiator}}^2 + \sigma_y^2}, \quad \dots (3)$$

で見積もることが出来る。Table 2 に測定されたチェレンコフリングの幅を示す。測定値と見積値を比較すると絶対値では異なるが、垂直方向のビームサイズが大きくなるとリングの幅も太くなるという傾向は一致していることは確認できた。絶対値が異なる原因として考えられるのは、チェレンコフ光の測定にトレーシングペーパーを使用して測定しているためチェレンコフリングが実際の大きさよりも広がってしまい、リングの幅を正確に評価できていない点が挙げられる。測定に使用したトレーシングペーパーの厚みは  $50\ \mu\text{m}$  程度あり、その厚み分リングの幅が滲むとすると、垂直方向にビームを絞った時にリングの幅を大きめに評価している可能性がある。今後は CCD の受光面で直接チェレンコフリングを観測するなどより精密な測定も試みたい。

Table 2: Measured Cherenkov Ring Width

Vertical size [mm] on radiator	Measured Value [mm]	Estimated value [mm]
$0.21 \pm 0.01$	$0.52 \pm 0.04$	$0.38 \pm 0.01$
$0.51 \pm 0.03$	$0.54 \pm 0.03$	$0.60 \pm 0.04$
$0.70 \pm 0.04$	$0.58 \pm 0.04$	$0.77 \pm 0.04$

#### 4.3 チェレンコフリングの曲率半径

チェレンコフリングの曲率半径は、ROI 毎の重心を円でフィッティング (Figure 5) して求めた。その結果、測定されたチェレンコフリングの曲率半径は  $22.0 \pm 0.2\ \text{mm}$  となった。ラジエーターの屈折率を 1.05 としたときのジオメトリから決まる測定点でのチェレンコフリングの曲率半径は  $21.6\ \text{mm}$  であり、近い値ではあるが、測定値とは完全に一致しなかった。

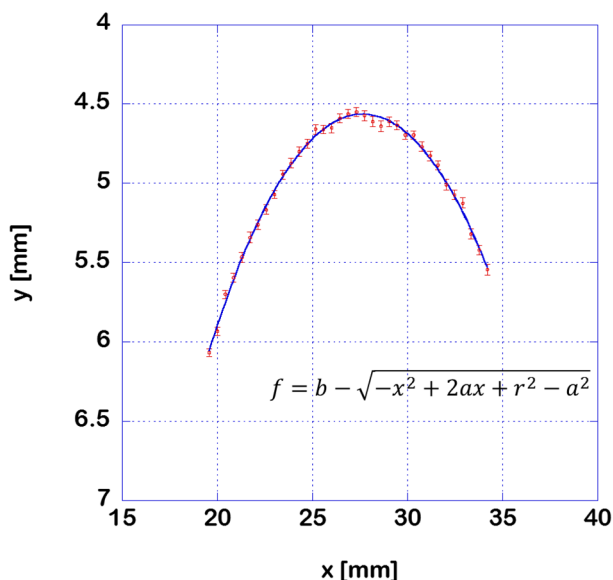


Figure 5: Red dots with error bar are center of gravity at individual ROIs. Blue line is the fitting result using a circle equation.

現在のセットアップでは、ラジエーターであるシリカエアロゲルの屈折率が 0.1% 変化すると、曲率半径が  $0.25\ \text{mm}$  程度変化する。ビームのエネルギーが  $10\ \text{MeV}$  を超えるとチェレンコフ角はほぼ一定となることから、曲率半径はビームエネルギーの変動による影響は受けない。このことから測定値とのずれは屈折率が想定とわずかに異なっていることに起因している可能性が高いと考えられる。

#### 4.4 真空への影響

チェレンコフラジエーターを収容する真空容器は排気速度が  $20\ \text{L/s}$  のイオンポンプで排気されており、内部の真空度をモニターするための真空ゲージが接続されている。Figure 6 に測定を行っているときの真空容器内の真空度の推移を示す。ビーム OFF の場合は、 $5 \times 10^{-6}\ \text{Pa}$  と比較的良好であるが、ビーム入射時は最大  $3 \times 10^{-5}\ \text{Pa}$  程度まで真空が悪化していることがわかる。しかしながら同時にモニターしているほかの場所の真空度は、それほど変化していない。これはチェレンコフラジエーター部とその他の間のコンダクタンスが小さい ( $2\ \text{L/s}$  以下)、差動排気のような状態となっていると考えることができる。このことから、電子銃近傍にチェレンコフラジエーターを設置する際にも、ラジエーター前後のコンダクタンスを下げることで、電子銃や加速管等の超高真空が要求される部分への影響を最小限にとどめることが出来ると考えられる。

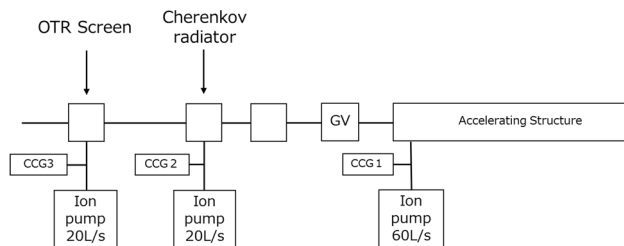
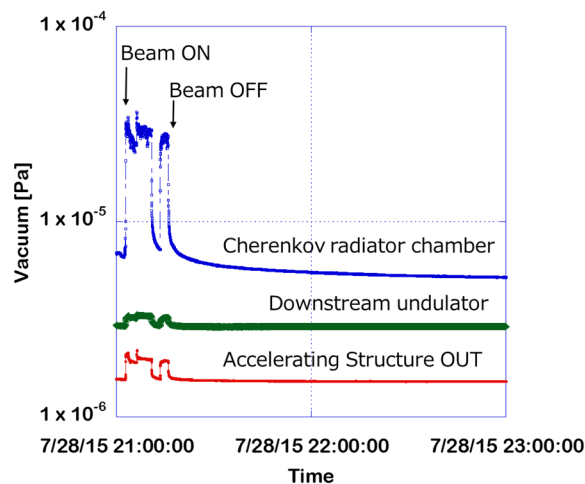


Figure 6: (upper) Vacuum history at various position in the accelerator. (lower) Schematic view of the evacuating system at the t-ACTS beam diagnostic part.

## 5. まとめ

東北大学 t-ACTS のビームを用いて、LFC カメラ用チェレンコフラジエーターの評価を行った。観測されたチェレンコフリングの幅と曲率半径はほぼ想定どおりで、歪みなどは確認されなかった。またラジエーターに電子ビームが入射すると 1 桁程度真空が悪化するが、ラジエーター前後のコンダクタンスを下げるだけで、電子銃など重要な部分への影響を最小限度にとどめられることがわかった。今後、電子銃から引き出された電子ビームを測定する準備を進めるとともに、OTR に比べ圧倒的に明るいチェレンコフ光を用いたバンチ長計測のための準備も平行して進める予定である。

## 謝辞

チェレンコフラジエーターとして使用した疎水性シリカエアロゲルは千葉大学の田端誠博士に提供していただきました。また本研究の一部は、JSPS 科研費 25790078, 15K13394, 15K17486 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] H. Hama et al., N. J. of Phys. 8 (2006) 292.
- [2] H. Hama and M. Yasuda, Proc. of FEL2009, (2009) 394.
- [3] S. Kashiwagi et al., Proc. of LINAC2014, pp.1178-1181.
- [4] T. Tanaka et al., Proc. 27th Int. FEL Conf., Stanford (2005) 371.
- [5] H.Hama et al, Proc of BIW10, (2010) TUCNB03.
- [6] K. Nanbu et al., Proc. of FEL2011, (2011) 576.
- [7] A. Lueangaramwong, “Development of Linear Focal Cherenkov-ring Camera for Direct Observation of Longitudinal Phase Space of Non-relativistic Electron Beam”, Master’s thesis, Tohoku University, 2014.