

KEK 入射器用電子銃のスライスエミッタンスモニタ用

C-band 電子ディフレクターの開発

DEVELOPMENT OF C-BAND DEFLECTOR FOR SLICE EMITTANCE MONITORING OF NEW ELECTRON GUN

井上彬^{#, A)}, 吉田光宏^{B)}, 夏井拓也^{B)}

Akira Inoue^{#, A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Takuya Natsui^{B)}

^{A)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The advanced RF electron gun was installed for an electronic source of a high charge and a low emittance in KEK e+/e- Linac, and the sliced bunch monitor is needed to achieve the required emittance for the SuperKEKB injection. In the KEK-Linac, we are monitoring using a fluorescent plate on the beam line. It is possible to measure the projection emittance of the beam in this way, however it is not possible to measure the slice emittance. To develop an electron gun which can be generating a beam of super-low emittance corresponding to SuperKEKB, monitoring of the slice emittance is required. The slice of time direction on a beam can be acquired by measuring the beam sliced with the RF-deflector using a fluorescent plate. RF-deflector performance is square root of RF frequency, has developed a high-powered ones corresponding to 10 GeV beam using X-band frequency at near the end of KEK-Linac. However, because the beam energy is about 10MeV at the RF gun exit, enough resolution is obtained even by low energy. So, we have developed a new low energy RF-deflector using C-band frequency.

1. はじめに

現在、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では次世代電子陽電子衝突加速器 SuperKEKB の開発を進めている。SuperKEKB では従来の KEKB の 40 倍のルミノシティという高い性能の達成を計画しており、そのために多くの革新的な試みが為されている。その一つとして、我々のグループでは電子陽電子入射器において、電子源となる電子銃のアップグレードを行っている。SuperKEKB において高いルミノシティを得るため、電子陽電子入射器では高電荷化と低エミッタンス化が要求される。

Table 1: The Required Injection Beam Parameters [1]

| | KEKB (e+/e-) | SuperKEKB (e+/e-) |
|---------------------|-----------------|----------------------|
| Charge [nC] | 1 / 1 | 4 / 5 |
| Emittance [mm-mrad] | 2100 / 300 | 10 / 20 |

これに対応して現在、電子源として従来の熱カソード DC 電子銃に代わるレーザーフォトカソード RF 電子銃の開発を進めている。KEK 入射器では、ビームライン上に設置した蛍光板の発光を利用してビームをモニタリングしている。この方法ではビームの投影エミッタンスの情報を得ることができるが、時間情報が得られず進行方向のスライスエミッタンスを測定することができない。SuperKEKB に対応した超低エミッタンスビームを生成可能な電子銃を開発

するためには、時間方向のモニタリングが必要である。モニタリングは Figure 1 の★の場所で行う。

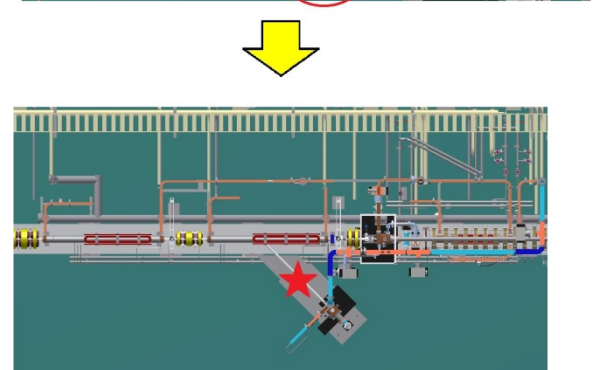
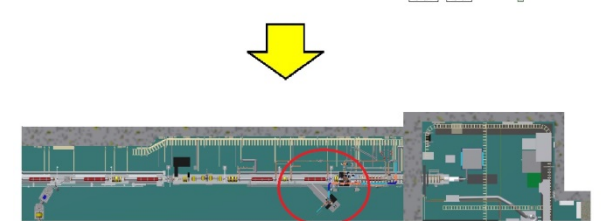
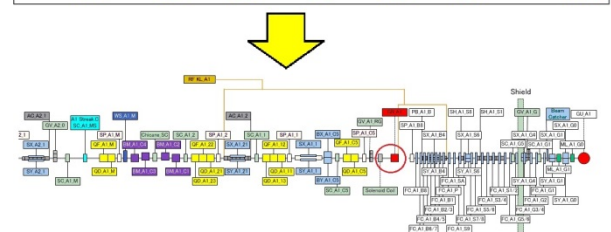


Figure 1: KEK injector map.[2]

[#] ainoue@post.kek.jp

モニタリングは RF ディフレクターによって行う。本稿では KEK 入射器に導入予定の C-band RF ディフレクターの設計、作成物の性能測定結果および今後の予定について報告する。

2. RF ディフレクター

蛍光板を用いてビームの時間情報を取り出すには、ビームを時間方向でスライスし、進行方向の情報を垂直な平面に投影する。電子ビームをスライスするには、進行方向に対して垂直な高周波磁場を印加した空洞をビームが通過するようにすればよい。そのような空洞共振器をディフレクターと言う。

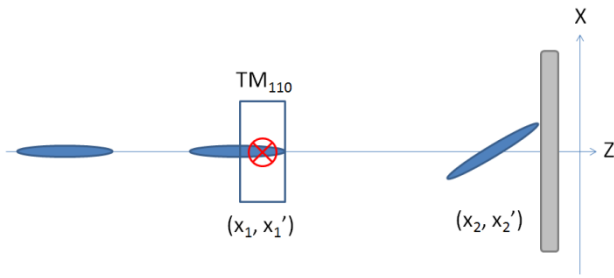


Figure 2: Deflector.

ここで図中の x_1, x_1' はディフレクターにおけるビームの x 方向の位置、速度とし、 x_2, x_2' はスクリーンにおけるビームの x 方向の位置、速度とする。ビームはディフレクターの TM_{110} モードの高周波磁場によって、先頭と末尾が逆方向にキックされる。このとき、Transfer Matrix は以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\beta_2} & 0 \\ -\frac{\alpha_2}{\sqrt{\beta_2}} & \frac{1}{\sqrt{\beta_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{\beta_1}} & 0 \\ \frac{\alpha_1}{\sqrt{\beta_1}} & \sqrt{\beta_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix}$$

ただし、 α, β は Twiss Parameter、 θ は位相差。Transfer Matrix より、

$$x_2 = \sqrt{\beta_1 \beta_2} \sin \theta x_1' + \sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} (\cos \theta + \alpha_1 \sin \theta) x_1$$

が得られる。ここで重要なのは第 1 項のキック角 x_1' による部分である。ディフレクターの性能はキック幅 x_2 とビームサイズの比(S/N)で評価される。ビームサイズ σ_x はエミッタンス ε を用いて

$$\sigma_x = \sqrt{\varepsilon \beta_2}$$

で表されるから、

$$S/N := \frac{x_2}{\sigma_x} = \sqrt{\frac{\beta_1}{\varepsilon}} \sin \theta x_1' + \sqrt{\frac{1}{\beta_1 \varepsilon}} (\cos \theta + \alpha_1 \sin \theta) x_1$$

となって、これは β_1 に依存し、 β_2 に無関係である。従って、ディフレクターは β の大きいビームに対して特に有効である。電子銃で生成された直後のビームは大きい β を持つため、ディフレクターを用いた分析が有効である。

今回、RF 電子銃で生成する電子ビームは以下のようなパラメータを持つ矩形のものを想定している。

Table 2: The Beam Parameters

| Particle type | Electron |
|---------------------|----------|
| Charge [nC] | 5 |
| Energy [MeV] | 10 |
| Bunch length [ps] | 30 |
| Radius [mm] | 2.5 |
| Emittance [mm-mrad] | 5.5 |

理想的なバンチ長は 10ps 程度である。エミッタンスを測定するにはこれを 100 以上にスライスする必要があり、この時スライスされた部分 1 つの長さは 100fs 以下である。一般に極短時間の現象を観測するにはストリークカメラを使用するが、一般的なストリークカメラの時間分解能は高いものでも 500fs ~ 800fs 程度であるため今回は適さない。一方、連続的に変化する磁場を用いるディフレクターの分解能は周波数と投入電力によって上げることができ、今回の性能要求にも十分対応可能である。このようなディフレクターとして、KEK 入射器ではビームラインの終端に設置する X-band 帯(11.424GHz)の高周波を利用した複数のセルを持つ大規模のものを開発している。これは全長 600m の Linac で 10GeV まで加速されたビームをスライスするため、高いエネルギーを必要とする設計となっている。しかし、RF 電子銃から取り出した直後のビームのエネルギーは 10MeV 程度であるため、このような大規模なものには不要である。そこで我々は X-band 帯より周波数の低い C-band 帯(5.712GHz)の高周波を使用し、低いエネルギーで動作する小型のディフレクターを開発した。

3. シミュレーション

3.1 空洞設計

ビームラインに垂直な磁界を発生させるためには、加速で使用される TM_{010} モードより高次の TM_{110} モードの電磁波を使用する。今回は最もシンプルな円筒形のピルボックス空洞とした。ピルボックス空洞の共振周波数は凡そ下記の式で与えられる。[3]

$$R = \frac{j_{11} \times c}{\omega}$$

R は空洞半径、 j_{11} は 1 次のベッセル関数の 1 番目のゼロ点、 c は光速、 ω は角振動数である。

$$j_{11} = 3.832$$

$$f = 5.712 \times 10^9$$

より、 R として約 32 mm が得られる。ただし、これは完全な円筒形の場合に成り立つ関係式であって、実際にはビームが通る穴や導波管との結合部(カプラー)の影響を受けるため、シミュレーション結果を反映して調整が必要となる。

3.2 電磁場解析

電磁場解析には CST 社の MICROWAVE STUDIO

を用い、共振周波数、電磁場の強度、Q 値を計算した。Eigenmode solver のコードで計算した結果を以下に示す。Figure 3 は円筒の中心をビームラインに対して垂直な面で切断した断面における電場、Figure 4 は同じ面の磁場である。図からわかるようにビームラインが通る中心付近では、電場はほぼ 0 であり、磁場は最も強くなっている。

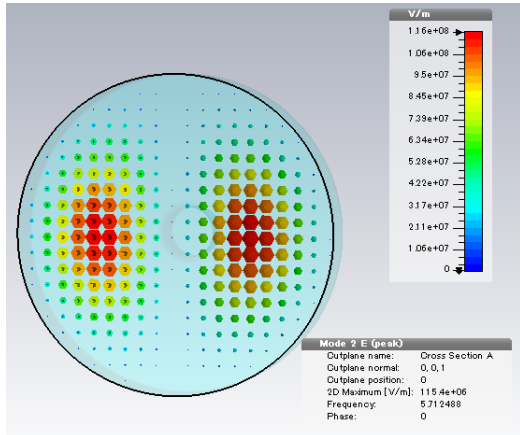


Figure 3: Eigenmode solver result (E-Field).

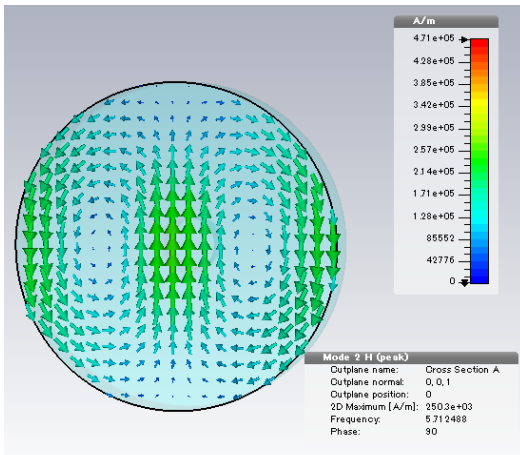


Figure 4: Eigenmode solver result (H-Field).

3.3 粒子シミュレーション

Table 2 のパラメータを持つ電子ビームが高周波を印加した RF ディフレクターの中を通過したと仮定し、ビームの挙動をシミュレーションする。計算には CST 社の PARTICLE STUDIO を使用する。計算コードには Particle in Cell (PIC) solver を用いる。入力は 100 kW とする。空洞から 1 m 先にスクリーンがあると仮定し、ビームバンチの中心が受ける磁場の総和が 0 となるようタイミングを合わせることで、ビームバンチの先頭と末尾が対称な力を受けるように設定してシミュレーションを行った。結果を Figure 5 に示す。

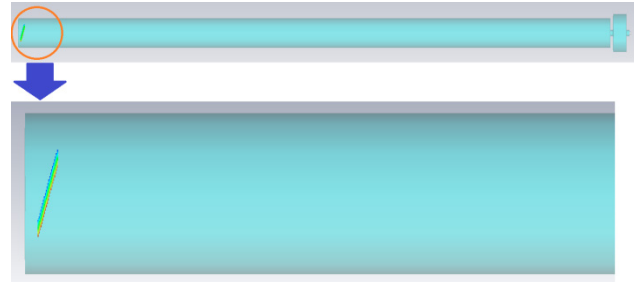


Figure 5: PIC solver result.

図のように RF ディフレクターによってビームがスライスされ、時間情報がスクリーンに投影されることが期待できる。また、このときビームの先頭および末尾は中心軸から 13.5 mm 離れている。この結果から、 $\theta=\pi/2$ 、 $x_l=0$ として S/N を計算すると 31.5 となり、RF ディフレクターとして十分な性能を期待できる。シミュレーション結果を Table 3 に示す。

Table 3: Simulation Result

| | |
|-------------------------------|-------------------|
| Mode | TM ₁₁₀ |
| Frequency [GHz] | 5.712 |
| Cavity diameter [mm] | 63.58 |
| Cell length [mm] | 22.15 |
| Q ₀ factor | 14776 |
| Shunt impedance [MΩ] | 1.345 |
| Input RF power [MW] | 2.429 |
| S/N | 31.5 |
| Maximum electric field [MV/m] | 115.4 |
| Maximum magnetic field [kA/m] | 250.3 |

4. 製作と測定

4.1 製作物

詳細な 3D モデルおよび 2D 図面を作成して、外部の精密加工業者に委託して銅製の共振空洞を製作した。Figure 6 は組み立て前の内側の状態である。これを KEK 機械工学センターの真空炉にて焼付けして組み立てたものが Figure 7 の写真のものである。

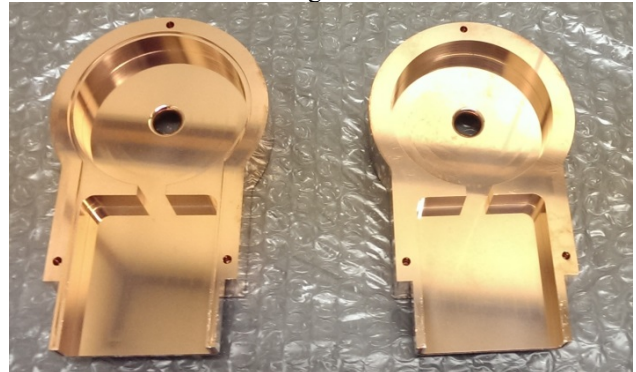


Figure 6: Product before assembling.

各部は①ディフレクター空洞本体、②カップラー部、③C-band 用 MO フランジ、④ビームパイプ(φ10)、⑤チューナーである。

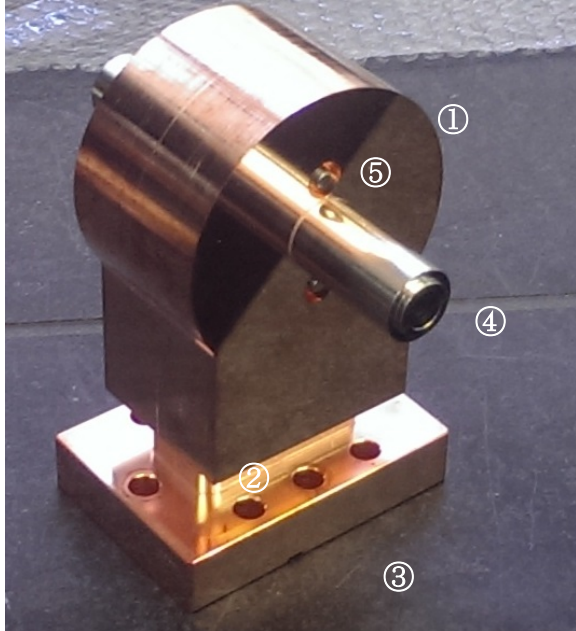


Figure 7: A finished C-band RF deflector.

4.2 測定結果

製作物の S-Parameter を用いて測定した。チューナーによる調整後の S-Parameter を Figure 8 に、Smith Chart を Figure 9 に示す。

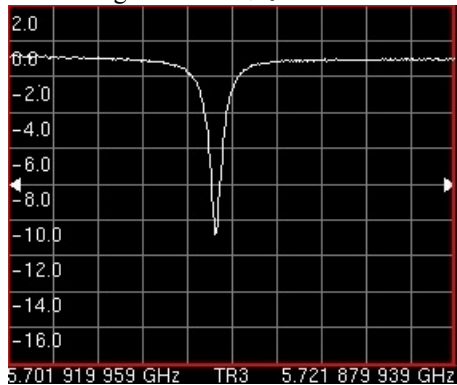


Figure 8: S-Parameter.

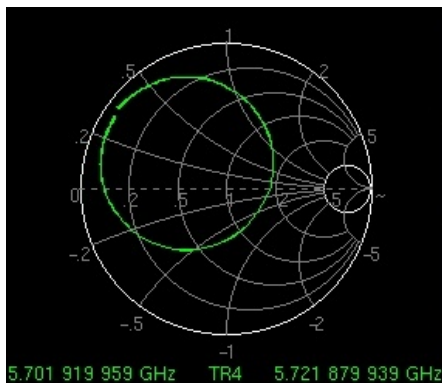


Figure 9: Smith Chart.

S-Parameter の縦軸の単位は dB である。共振周波数は 5.715GHz に合わせてある。これは空気の誘電率により、空气中で測定した場合は真空中より共振周波数が低くなることを考慮している。S-Parameter の値より、 Q_L は 5200 であった。また、Smith Chart より空洞と導波管の結合度はおよそ 1.7 である。

Table 4: Product Parameter.

| | |
|-----------|-------|
| β | 1.7 |
| Q_0 | 14000 |
| Q_L | 5200 |
| Q_{ext} | 8200 |

5. まとめと今後の展望

今後はクライストロン等の実験設備を整備し、反射波の測定によって真空中における共振周波数および Q 値の測定を行う。また、低電力試験によってシミュレーション結果とほぼ同じ Q 値が得られた。そのため、シミュレーション通りに近い成果が得られると期待できる。これについては空洞内の高周波磁場の測定が容易ではないため、ビームライン上に設置して実際にビームを通すことにより確認する。同時に S-band の RF を用いたサイドカップルによるマルチセルのディフレクターの開発も行う。これは KEK 入射器で使用されている RF のほぼすべてが S-band であるため、C-band ディフレクターに比べて高周波源の設置および共振器への接続のための工事が少なく済むため、複数の地点へ導入するためには必要である。

謝辞

今回のディフレクター製作にあたり、KEK 機械工学センターの工藤氏に大変なご尽力をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T.Natsui, et al., “SuperKEKB に向けた入射器アップグレード”, p18, SAOT01, 第 10 回加速器学会年会, 名古屋, 2013 8 月.
- [2] <http://www-linac2.kek.jp/cont/linacement20140511/main.html>
- [3] M.Yoshida, “電子線形加速器における高周波デバイスの基礎 ~シミュレーション~製作・試験”, 高エネルギー加速器セミナー-OHO テキスト, 2008 年.