KEK 入射部用カットディスク型 RF ディフレクターの設計

DESIGN OF CUT DISC STRUCTURE TYPE RF-DEFLECTOR FOR KEK-LINAC

井上彬[#, A)], 夏井拓也 [A,B)], 吉田光宏 [A,B)]
Inoue Akira [#, A)], Natsui Takuya[A,B)], Yoshida Mitsuhiro[A,B)]
[A)] SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)
[B)] High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The luminosity for SuperKEKB at KEK is 8×10^{35} $cm^{-2}s^{-1}$, which is 40 times higher than that of KEKB. In order to realize this high luminosity, electron beams with a high charge of 5 nC and low emittances of 20 mm-mrad are required. Also, a bunch length is desired to be about 20 ps to avoid space charge effect when electron energy is low. To meet these requirements, we have developed a new type RF gun. To measure this bunch length, we will use a new type RF-deflector which has the cut disk structure for larger coupling effect between cells than that of conventional RF-deflector. We will plan to measure the bunch length with this RF-deflector at the downstream of RF gun. The operating frequency of the RF-deflector is 2856 MHz, and the electron energy at measuring point is 10 MeV. The simulation of electromagnetic field in the cavity with CST studio suite has already been completed, and this RF deflecting cavity is being produced.

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 8×10^{35} $cm^{-2}s^{-1}$ という従来の KEKB の 40 倍のルミノシティを目標とした高性能化を計画しており、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

このため、電子陽電子入射器の最上流にあたる電子銃も高電荷低エミッタンス化が要請され、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。[1]この電子銃開発では、大幅な性能向上を目標としているため、詳細な性能評価が必要となる。この電子銃開発では、大幅な性能向上を目標としているため、詳細な性能評価が必要となる。電子銃を出た直後のビームはエネルギーが 10MeV 程度と低いため、空間電荷効果の影響が大きく、エミッタンス悪化する。この問題を防ぐため、電子銃内部ではバンチ長が 20ps から 30ps となるようにしている。一方、リニアックではウェイク場によるエミッタンス悪化を防ぐため、シケインでバンチ圧縮をかけて 10ps 以下としている。低エミッタンスビームを得るためにバンチ長を細かく操作する必要があり、そのためにはバンチ長の測定が不可欠である。今までは、シケインの下流にてストリークカメラを用いてバンチ長を測定していたが、電子銃の直後の加速されていないビームのバンチ長も測定したい。そこで測定用に新しく RF ディフレクターを開発している。

RF ディフレクターはダイポールモードの電磁場を用いた共振空洞であり、ビーム軸上に電場がなく、ビームの進行方向に垂直な高周波の磁場が発生する。この磁場により掃引されたビームをスクリーンに投影することで、バンチ長を測定することができる。この方法はストリークカメラの原理と似たものであるが、次の2点でストリークカメラよりも優れている。①ストリークカメラは、スクリーン上の発光を光電極に取り込み、生成した電子ビームを進行方向に垂直なパルス電場で掃引して測定している。そのため、二重に空間電荷効果の影響を受けることになる。一方、RF ディフレクターを用いた測定方法ではビームをダイレクトに掃引して測定できるため、空間電荷効果の影響を抑えることができる点で有利である。②ストリークカメラの掃引周波数は最大でも数 10MHz 程度であり、GHz 帯で動作する RF ディフレクターの方が時間分解能においても有利である。

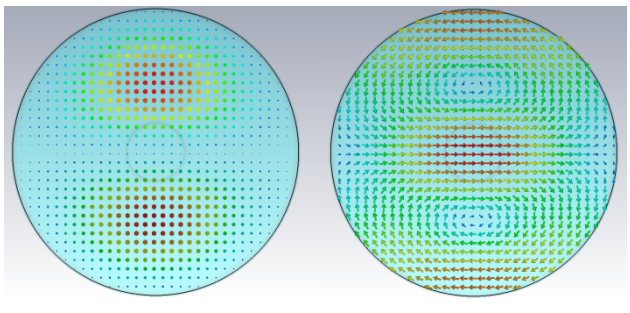
測定は KEK 入射器の A1 セクターの 90° 入射ラインに設置した RF 電子銃の下流で行う。この地点におけるビームエネルギーはおよそ 10MeV である。

本稿では製作中のカットディスク型 RF ディフレクターの設計、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

前節で述べたとおり、RF ディフレクターは TM11 モード（ダイポールモード、Figure 1）の電磁波を溜める共振空洞である。

[#] ainoue@post.kek.jp



(a) Electric Field (b) Magnetic Field

Figure 1: TM_{11} mode.

RF ディフレクターを通るビームは Figure 2 のように掃引される。

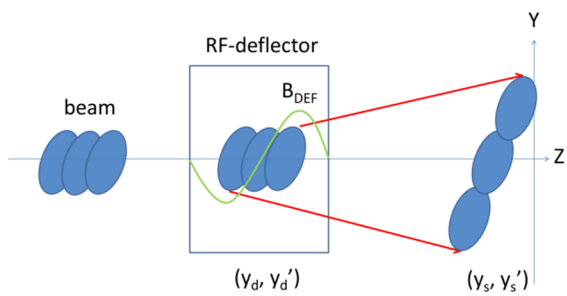


Figure 2: RF-Deflector.

キック角$\Delta y'(\ll 1)$はディフレクターによって与えられる y 方向の運動量と進行方向の運動量の比で表される。

$$\Delta y' = \frac{e l_d B_0}{p_z}\sin(kz+\varphi) \approx \frac{e l_d B_0}{p_z}\left(\frac{2\pi}{\lambda}z\cos\varphi + \sin\varphi\right) \quad (1)$$

$$\left(|z| \ll \frac{1}{k} = \frac{\lambda}{2\pi}\right)$$

ここで

l_d: ディフレクター長 B_0: 最大磁束密度

p_z: 進行方向の運動量 φ: ディフレクターの位相

ディフレクターからスクリーンまでの輸送行列は

$$\begin{pmatrix} y_s \\ y'_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} y_d \\ y'_d + \Delta y' \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} m_{11}y_d + m_{12}\Delta y' \\ m_{21}y_d + m_{22}\Delta y' \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$(y'_d \ll \Delta y')$$

であるから、

$$\Delta y = m_{12}\Delta y' = \sqrt{\beta_d\beta_s}\sin\psi\frac{e l_d B_0}{p_z}\left(\frac{2\pi}{\lambda}z\cos\varphi + \sin\varphi\right) \quad (3)$$

ただし、β_dはディフレクターにおけるベータ関数、β_sはスクリーンにおけるベータ関数、ψはベータトロン振動の位相の進み。

バンチの中心が RF のゼロ交差を通るとき、$\varphi = 0$だから

$$\Delta y = \sqrt{\beta_d\beta_s}\sin\psi\frac{2\pi e l_d B_0}{\lambda p_z}z \quad (4)$$

ここで、*S/N*比はディフレクターなしの状態におけるスクリーン上のビームサイズ$\sigma_{y_0} = \sqrt{\beta_s\varepsilon_y}$で定義され、

$$S/N := \frac{\Delta y}{\sigma_{y_0}} = \frac{\sqrt{\beta_d\beta_s}\sin\psi\frac{2\pi e l_d B_0}{\lambda p_z}\sigma_z}{\sqrt{\beta_s\varepsilon_y}} = \sqrt{\frac{\beta_d}{\varepsilon_y}}\sin\psi\frac{2\pi e l_d B_0}{\lambda p_z}\sigma_z \quad (5)$$

と表される。ただしσ_zは半バンチ長。式(5)より、*S/N*比はβ_dに依存しβ_sに無関係である。電子銃近くではβ_dが大きいため、RF ディフレクターによる測定が有効である。また、式(4)よりスクリーン上に映る影の長さはバンチ長に比例する。このことを利用してバンチ長を測定することができる。

3. 空洞設計

3.1 カットディスク構造

カットディスク構造は 1997 年に INR RAS でライナック用の加速空洞として考案されたものである[2]。Figure 3 のように共振空洞セルの間に結合用の薄いセルが挿入され、結合孔が空いた形状になっている。

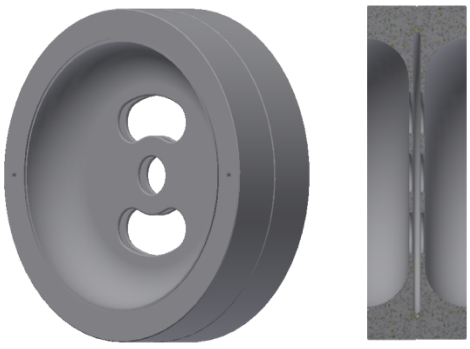


Figure 3: A cavity with cut disc structure.

カットディスク構造の特徴はセル間の結合度を大きくしやすいことである。セル間の結合度は隣接するセルが位相差 π を持つ π モードと同じ位相を持つ 0 モードのエネルギーの比で表され、周波数から以下の式で求められる。[3]

$$\mathrm{k} = \frac{{f_\pi}^2 - {f_0}^2}{{f_\pi}^2 + {f_0}^2} \quad (6)$$

この式から結合度は 0 モードと π モードの周波数の差を表しており、結合度が大きいほどモードの切り分けがしやすくなる。

今回製作しているキャビティの CST MW STUDIO によるシミュレーション結果を Figure 4 に示す。

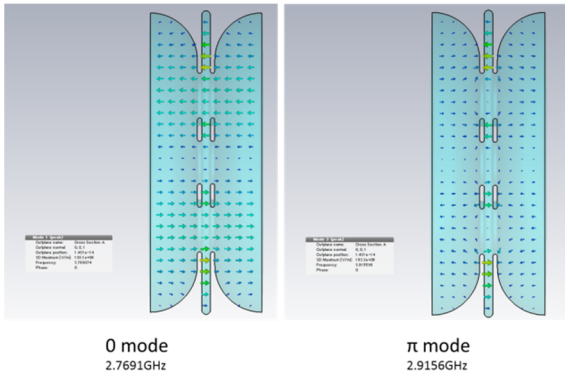


Figure 4: Electric field simulation of 0 mode and π mode with cut disc structure

このとき結合度はおよそ 5%である。

3.2 セル数

今回の測定では、スクリーンを RF ディフレクターの下流 1m に設置する。RF ディフレクター内部のビームホール径が 20mm なので、β_d は最大で 8.5 である。また、今回の実験では RF 源に最大出力 80kW の S-band サブブースター(2856MHz)を使用する。また、測定可能なバンチ長は 10ps 以上としたい。この条件でセル数を 1 から 13 まで変化させて電磁場シミュレーションを行って求めたビーム軸上の最大磁束密度用いて、式(5)より *S/N* を計算した。

Table 2: Simulation of S/N

Cells	RF-deflector length [mm]	peak magnetic flux density on axis[mT]	*S/N*
1	44.3	35.41	4.224
3	149.3	18.92	7.608
5	254.3	15.29	10.47
7	359.3	12.79	12.38
9	464.3	11.29	14.12
11	569.3	10.18	15.60
13	674.3	9.31	16.9

今回の測定で使用するビームラインでは、ビームダクト径が 25mm しかなく、スクリーンにおけるビーム径を 2mm ほどに絞って測定するため、*S/N* は 10 程度あれば十分である。そのため、今回製作する RF ディフレクターのセル数は 5 に決定した。

3.3 電磁場シミュレーション

設計した空洞の電磁場シミュレーション結果をまとめる。シミュレーションは CST MW STUDIO の Eigenmode Solver と Frequency domain solver を用いて行った。S パラメータから、Q_L 値は 8841 であり、結合度 β は 1.5 であった。次式[3]から

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} \qquad (7)$$

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} \qquad (8)$$

Q_0 は 22100、Q_{ext} は 14730 であった。

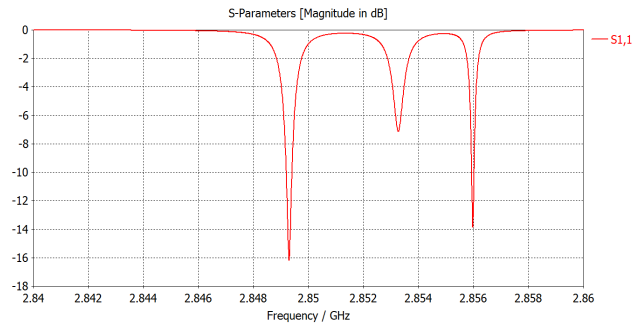


Figure 5: S-Parameter.

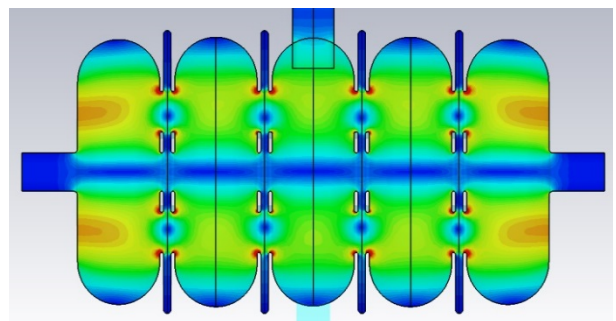


Figure 6: Electric field (abs).

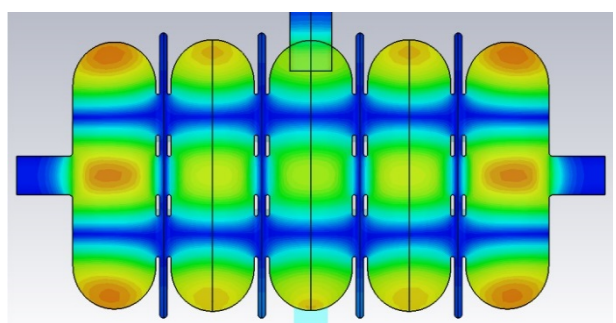


Figure 7: Magnetic field (abs).

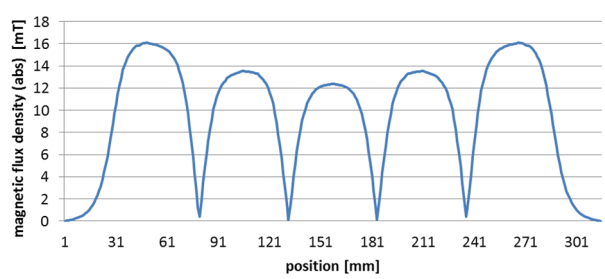


Figure 8: Plot of magnetic field (abs).

- 3.4 仕様まとめ

今回制作するディフレクターの仕様を一覧にする。最大磁束密度の値が Table 2 のものと異なるのは、第 3 セ

ルに取り付けたカプラーと真空ポートの影響である。

Table 3: The Specification of RF-deflector

material	pure cupper
frequency	2856 MHz
mode	TM_{110}
wave type	standing wave
number of cell	5
peak magnetic flux density on axis	16.09 mT (1st cell and 5th cell) 13.53 mT (2nd cell and 4th cell) 12.39 mT (3rd cell) (if input power is 80 kW)
loaded Q	8841
external Q	14730
unloaded Q	22100
coupling factor	1.5
structure	cut disc structure
length	254.3 mm
radius of deflecting cells	69.12 mm (1st cell and 5th cell) 70.31 mm (2nd cell and 4th cell) 69.93 mm (3rd cell)
thickness of deflecting cells	44.3 mm
radius of coupling cells	73.78 mm
thickness of coupling cells	4 mm
beam hole diameter	20 mm
coupling hole size	983.2 mm^2

4. まとめと今後の予定

SuperKEKB 計画に対応した、新しいフォトカソード RF 電子銃の性能評価のため、バンチ長を測定するための RF ディフレクターを開発している。この RF ディフレクターは S-band 帯の RF を使用する定在波管で、カットディスク構造を採用した。カットディスク構造ではセル間の結合を大きく取ることができるため、モードの切り分けが明確になるという利点がある。シミュレーションの結果から 5 セルの RF ディフレクターを設計し、現在精密加工会社にて製作を依頼中である。RF ディフレクターは 9 月末までに組立も含めて完成し、10 月中旬までにインストールする予定である。実験は 10 月下旬から行う。

参考文献

[1] T.Natsui *et al.*, “SuperKEKB 用 RF gun のコミッショニング状況” PASJ2015 WEP006, 第１２回加速器学会年会, 青森, 2015 8 月.
[2] Valentin V. Paramonov, “The Cut Disk Accelerating Structure For High Energy Linacs”, Conference: Particle Accelerator Conference, 1997. Proceedings of the 1997, Volume: 3.
[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.