

# DESIGN OF RF-DEFLECTOR CAVITY FOR ULTRA-SHORT ELECTRON BUNCH MEASUREMENT

Yuichi Nishimura<sup>†</sup>, Kazuyuki Sakaue, Takenoshin Takahasi, Masakazu Washio

Research Institute for Science and Engineering, Waseda University (RISE)  
3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

## Abstract

An S-band Cs-Te Photocathode RF-Gun system which can produce a high current, high energy, a low emittance and ultra-short bunch, has been developing at Waseda University. For measurement of ultra-short electron bunch, we decided to use RF-Deflecting cavity which can convert longitudinal distribution to transverse distribution. With this technique, the temporal profile of the electron beam can be obtained as the transverse profile. This technique will make it possible to measure ultra-short electron bunch length and electron beam temporal profile. The cavity is a 2856 MHz normal conducting RF-Cavity in a dipole (TM<sub>120</sub>) mode. In this conference, we present the cavity structure design optimization procedure and future plan.

## 極短バンチ電子ビームの時間構造計測用 RF-Deflector の設計

### 1. はじめに

早稲田大学では Cs-Te フォトカソード RF-Gun を用いて高品質電子ビームを生成し、応用研究として逆コンプトン散乱による軟 X 線源の開発<sup>[1]</sup>、放射線化学反応初期過程の解明のためのパルスラジオリシス実験<sup>[2][3]</sup>を行っている。これらの応用研究において、電子バンチ長をフェムト秒領域まで短くすることは非常に大きな意味があり、逆コンプトン散乱においてはルミノシティの向上、パルスラジオリシス実験では時間分解能の向上が見込まれる。また、これらの応用研究以外にもコヒーレント放射によるテラヘルツ光の発生などが挙げられる。

そこで、我々は従来の S-band 1.6 Cell 型 RF-Gun に特殊な形状の Energy Chirp Cell (ECC) を付加することで電子銃から出てくる電子バンチをフェムト秒の時間幅にまで圧縮できる電子銃を設計開発し、現在試験中である<sup>[4]</sup>。

これらの研究開発には非常によく制御された高品質な電子ビームを用いる必要があり、電子ビームのパラメータを計測・評価することは重要である。従って、その電子ビームのバンチ長の測定方法として、早稲田大学では高次(TM<sub>120</sub>)モードの RF cavity を用いた RF-Deflector 法を採用し、RF-Deflector cavity の設計を進めている。RF-Deflector 法は直方体型の空腔内の磁場によって電子の縦方向情報を横方向に投影してバンチ長を測定する方法である。

本研究ではこの RF-Deflector 法の原理と特徴、早稲田大学で検討している RF-Deflector cavity の設計及び、今後の予定・展望について報告する。

### 2. RF-Deflector 法の原理

RF-Deflector 法とは、高周波を印加した空腔を用

いて、電子ビーム軌道上に横方向の磁場を誘起させ、その磁場でバンチを帰引することによってバンチの縦方向情報を横方向に投影し、バンチ長や時間方向構造を測定する技術である。

RF-Deflector 法で用いられる高周波空腔は、まず進行波型と定在波型の 2 種類に分類される。進行波型空腔は高周波との相互作用を大きくすることが出来るため、より高分解能な測定が可能であり、SLAC<sup>[5]</sup>や SPring-8<sup>[6]</sup>で複数セルの空腔が報告されている。定在波型空腔は相互作用は小さくなるが、システムをコンパクトに出来る利点がある。また、形状による分類としては円柱型<sup>[7]</sup>と直方体型<sup>[8][9]</sup>の二つが挙げられる。円柱型空腔は高い Q 値を得られるため、より高分解能な測定が可能であり、ANL では 3 Cell RF-Deflector cavity が報告されている<sup>[10]</sup>。現在早稲田大学で設計している RF-Deflector cavity は定在波型で直方体形状の空腔を採用している。直方体型空腔は円柱型に比べて Q 値は劣るものの、空腔内に誘起される TM<sub>120</sub> モードと TM<sub>210</sub> モードの共振周波数間隔が広がり、電磁場の減衰を抑えることが出来る。以下に早稲田大学で開発中の RF-Deflector 法の原理図を示す。

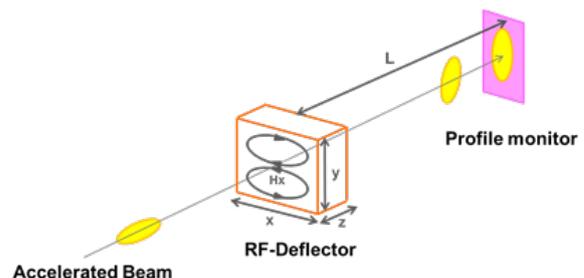


図 1 RF-Deflector 法の原理図

<sup>†</sup> y.nishimura@suou.waseda.jp

RF-Deflector 法によるバンチ長測定では、バンチ長  $\Delta z$  はプロファイルモニター上で観測されるビームサイズ  $\Delta y$ 、空洞出口からプロファイルモニターまでの距離を  $L$ 、空洞内の最大磁場を  $B_0$ 、加速されたビームが空洞に入射するときの位相  $\varphi$  などを用いて、以下の式で与えられる。

$$\Delta y = c \frac{B_0 L}{E} (\cos \varphi - \cos(\omega t_0 + \varphi)) \Delta z \quad (1)$$

バンチが空洞から受ける磁場の合計が zero-cross 付近となるように入射すれば、バンチに対して直線的に変化する磁場として用いることが可能である。このとき、空洞に印加する高周波の周期 350ps に対してバンチ長が十分小さいことを仮定している。

早稲田大学で平常運転している電子銃はエネルギーが約 5MeV、バンチ長が約 10ps である。また、現在試験中の ECC-RF-Gun では PARMELA によるシミュレーションから 2-3m のドリフト区間を経てバンチ長が 100fs の電子ビームが得られることが確認されている。今回報告する RF-Deflector cavity はこれらの電子ビームを測定対象としている。

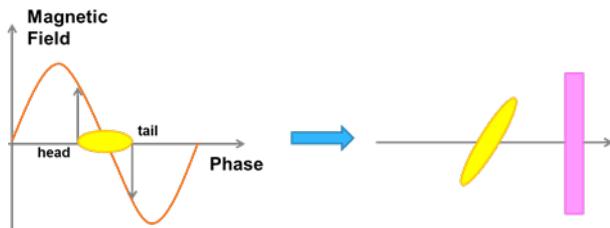


図 2. RF-Deflector zero-cross 付近でのビームの挙動

### 3. RF-Deflector Cavity の設計

#### 3.1 1 Cell RF-Deflector

RF-Deflector Cavity の設計には Ansoft 社の HFSS (High Frequency Structure Simulator) を用いた。空洞の形状は直方体型空洞とし、ビーム軌道上に横方向磁場を生成する  $TM_{120}$  モードを採用した。空洞の共振周波数としては、RF-Gun と同期を取りやすく、かつバンチ長に対して周期が十分に長い周波数である 2856MHz で共振するように設計した。以下にシミュレーションによる空洞の最適化の過程を示す。まず、直方体型空洞の x 方向長さ y 方向長さの比を変えた時のビーム軌道上の最大磁場強度と空洞の Q 値の傾向を見た。図 3 にその結果を示す。

x/y が 1 (正方形) を越えた辺りから磁場強度は一定の値で、Q 値は 20000 近くはかなり良好な値が得られることが分かる。また、x/y = 1.34 の空洞の磁場強度分布を図 4 に示す。図 4 は共振周波数 2856MHz の直方体型空洞に  $TM_{120}$  モードが誘起されていることを示している。

次に空洞製作後のチューニングを想定して、x 方向長さを変えた時の空洞の共振周波数変化をシミュレーションによって求めた。図 5 にその結果を示す。空洞長さに対して共振周波数は線形的に変化し、x 方向長さは 2.3MHz/mm で共振周波数を調整できる

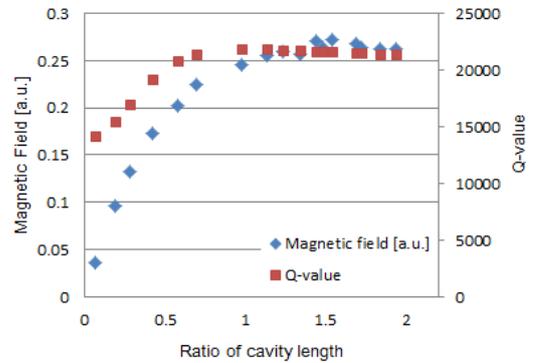


図 3: 空洞の縦横比と磁場強度、Q 値の関係

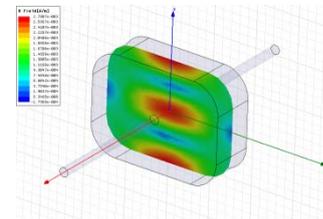


図 4: 1 Cell RF-Deflector の磁場強度分布

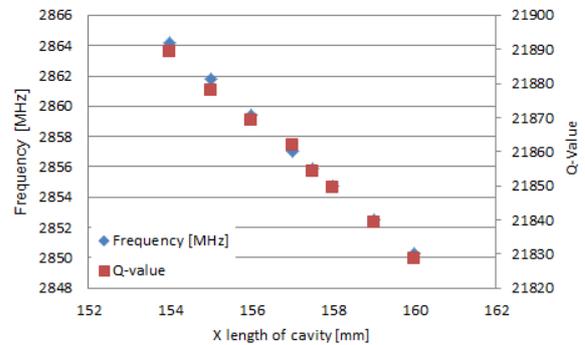


図 5: 1 Cell RF-Deflector の共振周波数変化

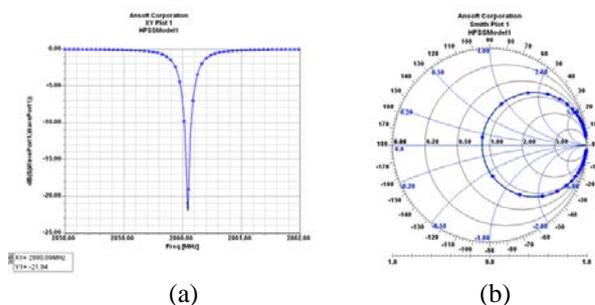


図 6: 1 Cell RF-Deflector の HFSS による結合調整 (a) 反射波振幅, (b) Smith Chart

ことが分かる。この結果を用いて、HFSS 上で 1 Cell RF-Deflector と導波管との結合調整のシミュレーションを行った。図 6 と表 1 にその結果を示す。表 1 の共振周波数はチューナー無し、真空下でのシ

ミュレーション結果である。Q 値は無負荷 Q 値を示して 22192 と、かなり良好な値が得られている。また、これは図 3 の結果とよく合っている。この空洞に導波管を接続し 500kW の電力を供給すれば、パンチ長約 200fs の電子ビームを十分な分解能で測定出来ることが HFSS によるシミュレーション結果から確認出来ているが、パンチ長が 200fs を下回る電子ビームの測定は困難である。

表 1: HFSS による結合調整パラメーター

共振周波数 [MHz]	2860.1
導波管との結合定数 $\beta$	1.17
Q 値	22192

### 3.2 2 Cell RF-Deflector

RF-Deflector cavity の 1 Cell での設計が最適化出来たため、より高い分解能が得られかつ 200fs より短いパンチ長の測定が可能であると考えられる 2 Cell RF-Deflector cavity の設計に着手した。2 Cell RF-Deflector cavity は  $\pi$  モードが 2856 MHz で共振するように設計した。0 モードと  $\pi$  モードの共振周波数間隔を表すモードセパレーションと、これに伴って変化する 2 Cell の磁場強度比の傾向を図 7 に示す。

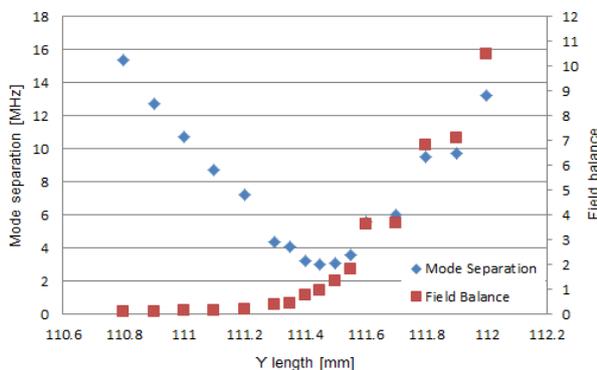


図 7: 2 Cell RF-Deflector の y 方向長さに対するモードセパレーションと磁場強度比

磁場強度比は、導波管を接続した Cell に立ち上がる最大磁場を出口側の Cell に立ち上がる磁場で除した値をとっており、磁場強度比が 1:1 のときモードセパレーションは約 3MHz と十分なモードセパレーションが得られることが分かる。また、図 8 から 2 Cell に  $TM_{120}$  モードが誘起されることを確認した。

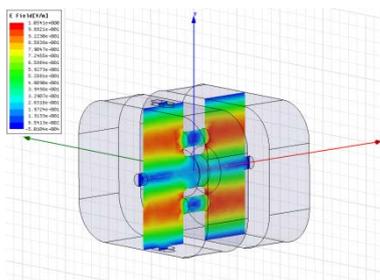


図 8: 2 Cell RF-Deflector の電場強度分布

以上の結果を受けて、現在 2 Cell RF-Deflector と導波管との結合調整のシミュレーションを進めている。現状の結合調整結果を図 9、表 2 に示す。

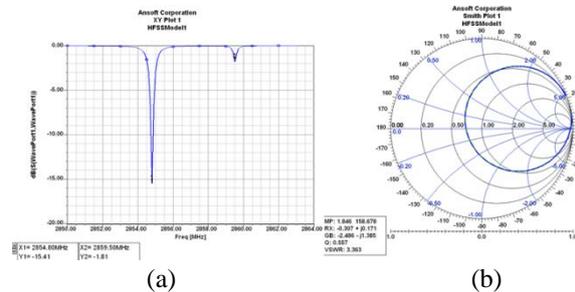


図 9: 2 Cell RF-Deflector の HFSS による結合調整 (a) 反射波振幅, (b) Smith Chart

シミュレーションの境界条件は表 1 と同じである。この設計では、磁場によって 2 つの Cell を結合している。 $\pi$  モードの共振周波数は 2854.8 MHz に調整し、無負荷の Q 値は 20333 とかなり良好な値を取っている。2859.5 MHz で共振している 0 モードとのモードセパレーションと磁場強度比の相関は図 7 の結果とよく一致している。

表 2: HFSS による結合調整パラメーター

共振周波数 [MHz]	2854.8
導波管との結合定数 $\beta$	1.41
Q 値	20333
Mode separation	4.7
Field Balance	2.4

## 4. まとめと今後の予定

RF-Deflector 法に用いる RF-Deflector Cavity として  $TM_{120}$  モードで動作する空洞を設計した。1 Cell の空洞では 500kW の電力を供給することで 200fs 程度の分解能の測定が可能と考えている。

今後、2 Cell RF-Deflector の結合調整シミュレーションを最適化することで電力供給に対する測定分解能を確認する。また、General Particle Tracer を用いて空洞通過後のビーム挙動を計算し、空洞の性能を評価して設計を最適化し、年内には空洞の製作を完了して試験していく予定である。

## 参考文献

- [1] K. Sakaue, et al., Radiation Phys. Chem., 77(2008),1136
- [2] Y. Hosaka, et al., Radiation Phys. Chem., In Press
- [3] Y. Kawauchi, et al., Proc. of this Conference, THPS124
- [4] K. Sakaue, et al., Proc. of this Conference, THPS070
- [5] P. Emma, et al., Proc. of Part. Accel. Conf. 2001
- [6] Y. Otake, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 637(2011)
- [7] S. Belomestnykh, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 614 (2010),179-183
- [8] X. J. Wang, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 356(1995)
- [9] S. Matsuba, et al., Proc. of PASJ 2010
- [10] J. Shi, et al., Nucl Instr. Meth. Phys. Res. A, 598(2009)