

# DEVELOPMENT OF HIGH-CHARGE, LOW-EMITTANCE, RF GUN FOR SUPERKEKB

Takuya Natsui #, Mitsuhiro Yoshida, Xiangyu Zhou, Yujiro Ogawa  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

## Abstract

We are developing a new RF gun for SuperKEKB. We are upgrading KEKB to SuperKEKB now. High charge low emittance electron and positron beams are required for SuperKEKB. We will generate 7.0 GeV electron beam at 5 nC 20 mm-mrad by J-linac. In this linac, a photo cathode S-band RF gun will be used as the electron beam source. For this reason, we are developing an advanced RF gun. Now, we are testing a Disk and Washer (DAW) type RF gun. Its photo cathode material is LaB<sub>6</sub> or Ir<sub>5</sub>Ce. Normally, LaB<sub>6</sub> or Ir<sub>5</sub>Ce are used as a thermionic cathode, but they are suitable for long-life photo cathode operation. This gun has a strong focusing field at the cathode and the acceleration field distribution also has a focusing effect. We obtained 4.8 nC beam charge with the DAW type RF gun and Ir<sub>5</sub>Ce cathode.

## SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス RF gun 開発

### 1. はじめに

現在, KEK では SuperKEKB に向けた加速器全体のアップグレードが行われている. SuperKEKB では非常に高いルミノシティを得るため低エミッタンス化によりダイナミックアパーチャーの減少とビーム寿命の減少が起こる. これに対応して, 電子陽電子入射器は表 1 に示すような高電荷・低エミッタンス化が求められる.

表 1 : 電子陽電子に求められるパラメータ

	電荷[nC]	エミッタンス[mm-mrad]
電子	1 to 5	300 to 20
陽電子	1 to 4	2100 to 6

そこで, 5 nC で 10 mm-mrad を切る高電荷低エミッタンスのフォトカソード RF gun の開発が進められている. この RF gun は多く用いられている 1.6 cell の軸結合空洞ではなく, Disk and Washer (DAW) 型の空洞を採用している. 現在, KEK 入射器棟の 3-2 セクターではこの DAW 型のフォトカソード RF gun の試験運転を行なっている. カソードの材質は非常に安定かつ 1e-4 近い高い量子効率をもつ Ir<sub>5</sub>Ce を使用している. レーザは Nd:YAG の 4 倍高調波 266 nm を 30 psec のパルス幅で使用している.

これまでのビームスタディーにおいて, RF gun から 4.8 nC の電荷発生を達成し, 入射器棟の最終端までは 4.4 nC のビーム輸送に成功している. また, エミッタンスの測定は Q スキャン法を実施しているが, レーザ発振器の安定性やビームサイズ測定精度の問題から正確に測定するには至っていない.

また, 2012 年秋より A-1 セクターで新しい設計の RF gun も試験する予定である. この RF gun は 2 つの独立した定在波空洞をもち, ビームからは進行波に見える加速電界を発生する新しい加速方式の RF gun である.

### 2. DAW 型 RF gun の設計

DAW 型加速空洞の構造は古くから知られてきたが, その構造の機械加工の難しさから軸結合加速管と比べると実用例は非常に少ない. しかし近年の電磁場解析コードの高精度化と 3 次元機械加工技術の向上で DAW 型加速空洞の実用化も可能になっている.

通常の RF gun では軸上での電磁氣的結合のため, 電極が R 方向にも Z 方向にも遠く, ビームの収束が難しく, また走行中に RF 位相が変化してしまう. このような従来の RF gun の問題を克服できる構造として DAW 型電子銃を開発した. DAW 型やサイドカップルでは高周波は空洞の外側から結合するため軸上を任意の細さのビームパイプにでき, ビームの収束電場を作り易く, また Transit Time Factor を小さくできるためビームから見た RF の位相の変化を抑えられる. 熱カソードの DAW 型 RF gun は, 東京理科大 FEL 施設用に開発し既に数年前に設置して運用実績があり, これを元に高電荷フォトカソードへの改良設計を行った. ビームシミュレーションにより, この加速空洞は Alternative Phase Focus (APF) によるビーム収束によりビームサイズを小さく保つことで 5 nC を 6 mm φ の細いビームパイプを外部磁場収束無しで 100 % 透過できるという結果を得ている.

理科大 RF gun からの改良点は, カソード付近で集束電場を発生させスペースチャージによる発散を抑える構造に変更した点である. 構造変更は第一セルのみとなり後半のセルは既存のものを流用することができた. 図 2 にこの RF gun の SUPERFISH での 2 次元電磁場計算結果を, また, 図 3 にこの計算から得られた軸上電界強度を示す.

ビーム加速シミュレーションには General Particle

# takuya.natsui@kek.jp

Tracer (GPT)及び CST PS を用いた. 設計には主に GPT を用い, 最後にウェークフィールドも含めたシミュレーションを行うため CST を用いた. カソードへ入射されるレーザーパルスは 30 psec の矩形パルス を想定した. ビーム径は 6 mm  $\phi$  のビームパイプを通る非常に細いビームである. また, エミッタンスは目標値の 10 mm-mrad 以下の値になった. 空洞への投入 RF 電力は 4.0 MW で 3.4 MeV のビームになる. これらビームパラメータの計算結果を表 2 にまとめた.

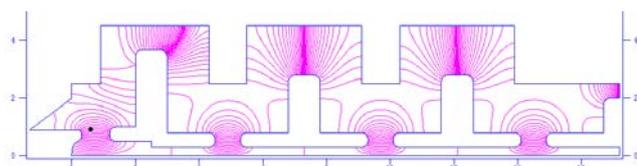


図 2 DAW type RF gun 2次元電磁場計算結果

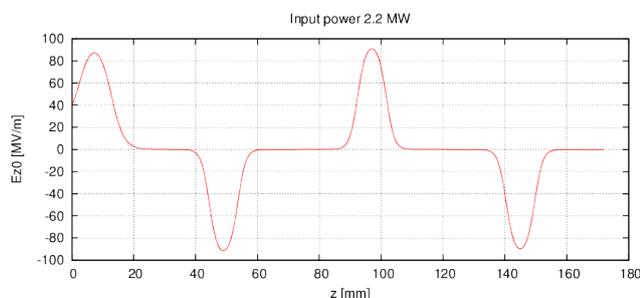


図 3 軸上電界強度計算結果

表 2 ビームパラメータ計算結果

エミッタンス	ビームサイズ( $\sigma$ )	バンチ長( $\sigma$ )
6 mm-mrad	1.2 mm	8 psec

またフォトカソードとしては長期間の営業運転に対応するため, 高融点・低仕事関数という特殊性質を合わせ持つ LaB<sub>6</sub> カソードを第一候補として選択した. フォトカソードの量子効率と寿命は逆数関係にあり, 一般的な Cs<sub>2</sub>Te は量子効率が良いが寿命が短く, また一般的な金属カソードでは寿命は長い量子効率が非常に低い. LaB<sub>6</sub> はこれらの中庸にあり, 十分な寿命と量子効率を合わせ持つ. さらに Ir<sub>5</sub>Ce という LaB<sub>6</sub> と比較して仕事関数が低く, 寿命も長い物質についても評価した. この結果, 現在は Ir<sub>5</sub>Ce を採用するに至っている.

### 3. RF gun インストール

この RF gun は KEK 入射器棟 3-2 セクターで既存のビームラインの横に配置し, 斜めからビームを入射しベンドマグネットによって, 既存ビームラインに合流させる. ビームラインの基本構成は図 4 に示すとおりである. このビームラインの角度は既存ビームラインに対して 26.56° (arctan1/2) になっており, シケインと 1m 加速管を持っている. まず, Gun から発生したビームを Solenoid 磁場によってある程度平行ビームにし, 1 m 加速管で追加速を行う. その後ダブレットでビームを整形してベンドマグ

ネットを通し既存ビームラインに乗せる. 追加速用の加速管は S-band の進行波管で, 10 MeV まで加速する. 追加速を行う理由は, Gun でのエネルギーブレッドが大きいためこのままベンドマグネットを通してしまうとエミッタンスが非常に悪くなってしまったためである. また, シケインでバンチ圧縮を行うとスペースチャージの影響が大きく, エミッタンスが増大してしまうこともわかったため, 現在は, シケインでのバンチ圧縮はおこなっていない.

図 5 が完成した DAW 型 RF gun の写真である. また, 3-2 に設置された斜め入射ビームラインを図 6 に示す.

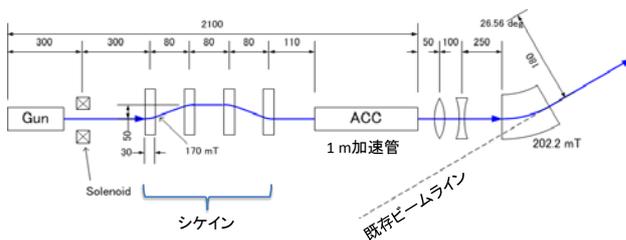


図 4 斜め入射ビームライン



図 5 DAW 型 RF gun



図 6 3-2 セクター斜め入射ビームライン

### 4. ビームスタディー

DAW 型 RF gun においては 2011 年秋からビームスタディーを開始している. はじめはカソード材質に LaB<sub>6</sub> を使用したが, 最高で 1.2 nC の電荷しか得られなかった. また, LaB<sub>6</sub> はレーザークリーニングを行わないと量子効率が低下し, また, 放電しやすいという問題もあった. そこで, 2012 年からはカソード材質を Ir<sub>5</sub>Ce に取り替えた. Ir<sub>5</sub>Ce はレーザー

リーニングを行わなくとも量子効率が低下することもなく、放電頻度も LaB<sub>6</sub> に比べて低かった。

また、当初カソードへのレーザ照射は垂直に入射していたが、量子効率を稼ぐため 60 度方向からの入射に切り替えた。これにより量子効率は数倍上昇した。

レーザは Nd:YAG の固体レーザを使用しており、30 psec の SESAM を使った 52 MHz のモードロック発振器を RF に同期させている。この発振器からのパルスを切り出し、LD とフラッシュランプを組み合わせ合わせて増幅し BBO 結晶を使って 4 倍高調波を作り出している。30 psec の 266 nm 波長で 4 mJ のレーザエネルギーを達成している。

入射器棟のビームラインの輸送では、BPM により電荷量を測定したが、最高で 4.4 nC のビーム輸送に成功している (図 7)。また、RF gun 付近の BPM では最高 4.8 nC の電荷が観測されており、カソードからはほぼ 5 nC の電荷発生を達成したと考えている。



図 7 入射器のビーム輸送時の BPM 信号測定結果

また、Q スキャン法によるエミッタンス測定を行い、その結果、66 mm-mrad という値が得られた。ただし、スクリーンモニタに厚さ 1 mm のアルミナ蛍光板を用いており、ビームサイズが大きく見えてしまったり、レーザ発振器の RF との同期精度の問題でビームが Pulse to pulse で変動する問題がある。これらの原因でエミッタンスの正確な測定には至っていないと考えている。

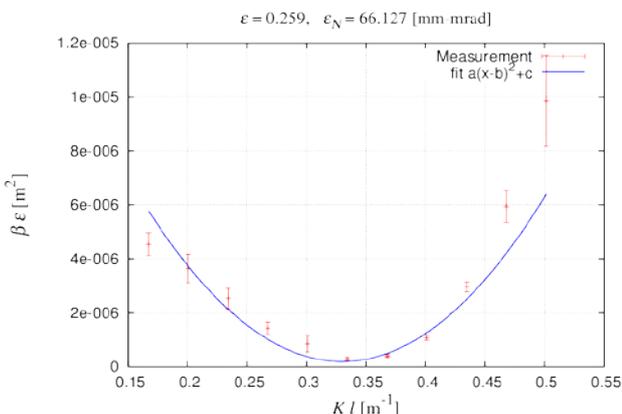


図 8 Q スキャンのビーム測定結果

## 4. 新 RF gun

DAW 型の RF gun は低エミッタンスビームを発生させることはできるがビームエネルギーが 3.4 MeV と低く、その後のビーム輸送に適さない。また、DAW の加速ギャップ間が遠くスペースチャージによるビームの発散が大きく、gun から出射するビームは発散角を持ってしまう。

このような欠点を改善した RF gun として擬似進行波型サイドカップル RF gun を開発している。これは、2つの高周波的に独立なサイドカップル空洞の加速空洞を一つの軸上に配置し、 $\pi/2$ の位相差の RF をフィードする。このようにすると、ビームからは2つの定在波が、位相差を持っているので、あたかも一つの進行波に見える。この空洞の3次元形状を図 9 に示す。この RF gun を秋から KEK 入射器棟 A-1 セクターで試験予定である。

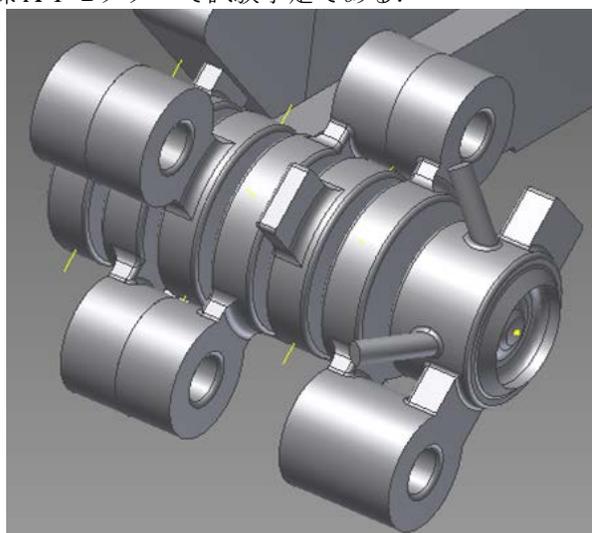


図 9 新たに設計した RF gun の空洞形状

## 5. まとめ

SuperKEKB に向けて高電荷低エミッタンスの RF gun の開発を行なっている。Ir5Ce をカソード材質として Nd:YAG レーザ 4 倍高調波を使い電子をエミッションさせている。現在、DAW 型 RF gun の試験をほぼ終えて、5 nC 近い電荷発生を達成している。また、更に高性能な RF gun を目指して擬似進行波型のサイドカップル RF gun も開発中である。これは 5 nC で 5.5 mm-mrad, 11 MeV の電子ビーム発生する設計であり、現在試験中の DAW gun のエネルギーが低く発散角を持ったビームであるという点を改善した設計になっている。秋から A-1 セクターで新 RF gun によるビームスタディーをはじめの予定である。

- [1] T.Natsui, et al., "High Charge Low Emittance RF Gun for SuperKEKB", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, May20-25, 2012
- [2] M.Yoshida, et al., "SuperKEKB Injector Upgrade for High Charge and Low Emittance Electron Beam", Proceedings of IPAC2012, New Orleans, Louisiana, USA, May20-25, 2012