

DEVELOPMENT OF HIGH CHARGE LOW EMITTANCE DAW TYPE 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 upgrade KEKB to SuperKEKB now. High charge low emittance electron and positron beam is 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 electron beam source. For this reason, we develop advanced RF gun, which has Disk and Washer (DAW) type cavity. This cavity has focusing electric field by RF at close cathode. Using this focusing field, we can transport 5 nC high charge. We finished a beam acceleration calculation and cavity design. The RF gun and beam transport line is constructed now.

SuperKEKB 用高電荷低エミッタ DAW 型高周波電子銃の開発

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, 電子陽電子入射器表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 |

KEK の加速器の簡単な概要図を図 1 に示す. 入射器棟は, ABC1~5 セクターからなる J 型のビームラインを形作っている. 各セクターは, 基本的に 8 つの S-band クライストロンと, 32 本の進行波型 2 m 加速管を持っている. A セクターで電子源である DC gun からビームを発生し, B セクターで加速後アーク部分を通り, C セクターに続いている.

現在, 陽電子ビームは 2 セクターに置かれたターゲットに電子ビームを衝突させて発生させている. SuperKEKB ではより高電荷が求められるので, Flux concentrator を開発中である. また, 陽電子ビームのエミッタンスを 6 mm-mrad にするためダンピングリングの建設も進められている. ダンピング入射のためにターゲット位置も上流側にシフトし 1 セクターにターゲットを設置する予定である.

電子ビームも現在より高電荷低エミッタンスが求められるので, A セクターに新たに RF gun を導入する予定である. この RF gun で発生したビームで 5 nC, 20 mm-mrad の電子ビームをリングに入射するため Gun 単体の性能としては, ビームラインでのエミッタンス増大の効果も考慮して 5 nC で 10

mm-mrad 以下を目標とした.

RF gun は BNL type の空洞をもとにした on-axis 結合と, Disk and Washer (DAW) type のものの 2 つを並行して開発を進めている. ここでは, DAW type についての開発状況を報告する. 電子銃の要求性能としては, 5 nC, 10 mm-mrad, 10 ps である. 研究用ではない営業運転用として安定に運転可能な電界は 100 MV/m 以下であり, この電界で要求エミッタンスを達成するには, 理論的に数十 ps 以上の長い初期バンチ長が必須であり, バンチ圧縮が必要である. また低エネルギー領域で大きなエネルギー分散を持つ RF 電子銃のビームでは, エミッタンスを悪化させずにビームサイズを縮める事が非常に難しく, 低エミッタンスを得るには電子銃単体ではなく, 下流のビーム輸送系を考慮した設計が必要である.

DAW type RF gun は入射器ビームラインの最上流の A セクターで試験予定であったが震災の影響で 3 セクターに設置する事となった. これに伴って既存のビームラインに斜めに入射する必要に迫られたので, この斜め入射ビームライン設計も含めた現状についても報告する.

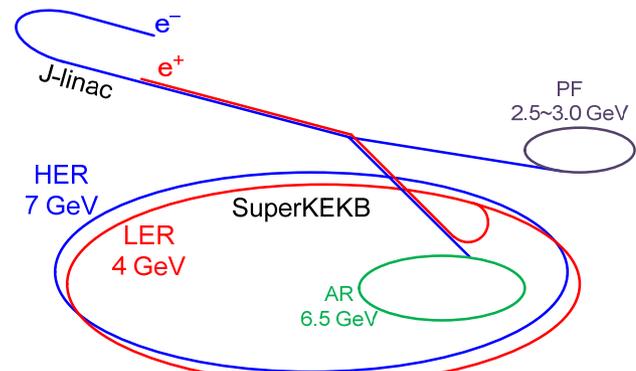


図 1: KEK 加速器概要

[#] takuya.natsui@kek.jp

2. DAW 型 RF gun 概要

2.1 設計方針

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。

ビームトランスポートも含めて低エミッタンスを実現する上では、ビームサイズは非常に重要な設計要素である。ベロシティバンチングとビーム収束を合わせ持つ構造として DAW 型の RF gun は非常に有効である。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 の問題を完全に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 Tranjit 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。DAW 型電子銃は、初期に東京理科大 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、これを元に最適化を行った。計算では 30ps 程度の初期バンチ長を Alternative Phase Focus (APF) によるビーム収束を用いつつ伝搬し、速度変調を用いてバンチ圧縮を行う方法で 6 mm-mrad で 6 mm ϕ と細いビームパイプを外部磁場収束無しで 100 %透過できるという計算結果を得ている。

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な性質を合わせ持つ LaB₆ カソードを第一候補として選択した[1]。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 Cs₂Te 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。LaB₆ 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 Ir₃Ce という LaB₆ と比較して仕事関数が低く、寿命も長い物質についても現在評価を行っている。

2.2 計算結果

RF gun の電磁場計算は 2 次元計算を行った後、Disk をささえる構造体も含めた 3 次元計算を行った。2 次元計算は SUPERFISH を使い、3 次元計算は HFSS と CST MWS を使用した。

この DAW type RF gun は東京理科大 FEL 施設で使用しているものを光陰極で 5 nC の高電荷に対応できるように改良を行った。具体的に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。このため変更点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る。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。

また、RF gun においてカソード面は平面であることが多いが、この gun では DC gun に用いられるような球状凹面のものを採用した。これはカソード面の電界そのものに集束効果をもたせることで、その後の集束電界によるエミッタンスの増加を抑える目的がある。すなわち、位相平面上で楕円型のビームが歪んでしまうことを抑制している。このカソード部分の拡大図を図 4 に示す。

レーザパルス幅は 30 ps の矩形波を想定しているが、入射位相をコントロールすることでバンチ圧縮を狙っている。計算の結果、30 ps だったバンチ長が 20 ps に圧縮されることがわかった。また、時間方向にガウシアン分布にするより、一様分布にしたほうがビーム透過率が向上することも計算で確かめている。レーザの横方向強度分布も、ガウシアン分布にすることが一般的であるが、カソード入射の際は一様分布に成形する。これは、軸中心付近で電荷密度が高まるとスペースチャージの影響でエミッタンス増大の効果が大きくなるためである。

また、DAW 構造を利用し細長いビームパイプを造ることで Alternative Phase Focus (APF) の効果による発散力を抑えたビーム加速を行っている。

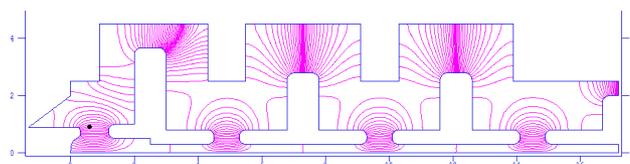


図 2 : DAW type RF gun 2 次元電磁場計算結果

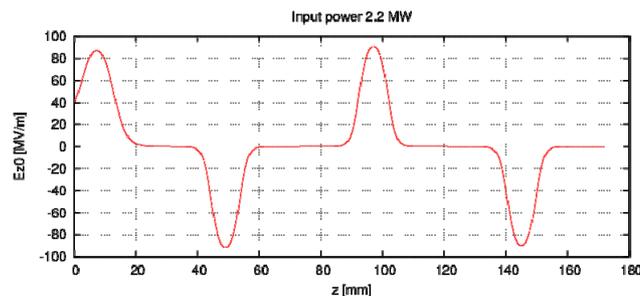


図 3 : 軸上電界強度計算結果

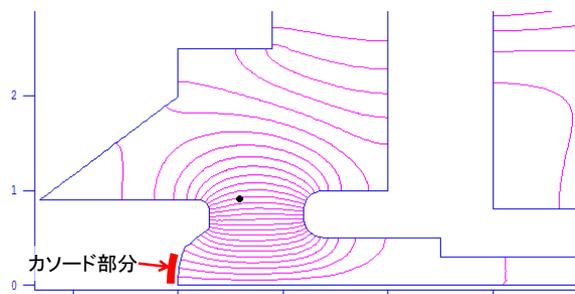
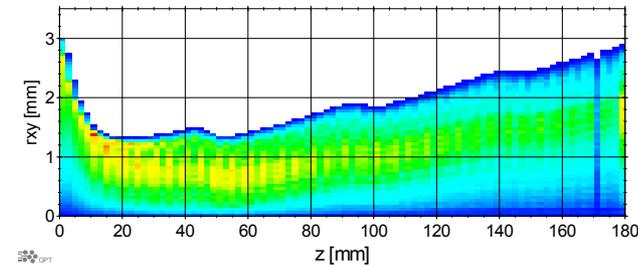


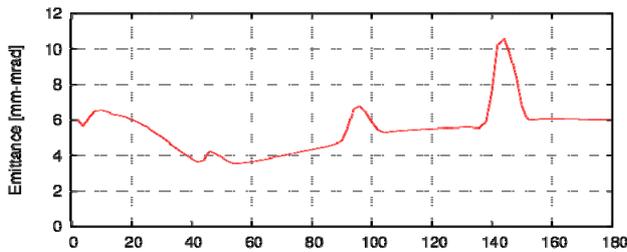
図 4 : カソード部分拡大図

ビーム加速シミュレーションには General Particle Tracer (GPT) 及び CST PS を用いた。設計には主に

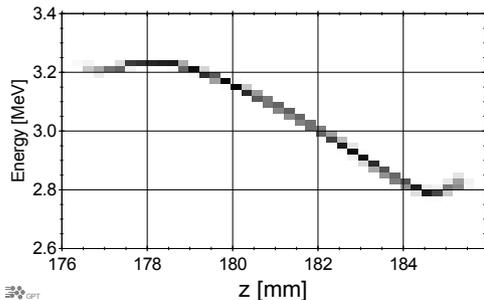
GPT を使い、最後にウェークフィールドも含めたシミュレーションを行うため CST を用いた。GPT での計算結果を図 5 に示す。ビーム径は図 5 (a) を見ると分かる通り、6 mm ϕ のビームパイプを通る非常に細いビームである。また、エミッタンスは目標値の 10 mm-mrad よりもいい値になった。これらビームパラメータの計算結果を表 2 にまとめた。なお、ビームエネルギーは図 5 (c) に示すように最高で 3.2 MeV になり、ビームの後ろのエネルギーが高くなるようなスロープをつけている。これは、後にシケインによるバンチ圧縮を想定しているからである。



(a) r 方向ビームサイズ



(b) RF gun 中でのエミッタンス



(c) Gun 出口でのビームエネルギースロープ

図 5: GPT によるビーム加速計算結果

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(σ) | バンチ長(σ) |
|-----------|--------------------|------------------|
| 6 mm-mrad | 1.2 mm | 8 psec |

また、CST PS によってウェークフィールドやミラーチャージの影響も考慮した計算を行い、GPT の計算結果がほぼこれと一致することも確かめている。

3. 入射ビームライン

この RF gun は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 6 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° ($\arctan 1/2$) 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、シケインでバンチ圧縮を行い 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に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うためである。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。現在は、シケインでのバンチ圧縮はオプションとして調整を行っていく予定である。シケインを使わないビーム輸送においてはベンドマグネット後で 25 mm-mrad までエミッタンスが悪化することを計算で確かめている。

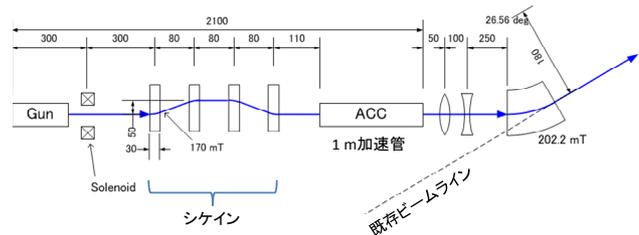


図 6: 斜め入射ビームライン

4. まとめと今後の予定

現在、SuperKEKB へ向けた加速器全体のアップグレードの一環として入射器棟電子ビーム源用 RF gun の開発を進めている。そのひとつの候補として DAW type RF gun の設計を行い、RF gun 単体の性能は計算上 5 nC, 6 mm-mrad を達成している。ただし、試験用の斜め入射ビームラインでは 25 mm-mrad までエミッタンスは悪化してしまうことを計算で確かめている。このことから、RF gun の設計では、その後のビームラインの影響を考慮し、輸送系を含めた設計が重要になることがわかった。

現在、立体回路、ビームラインを構築中であり 9 月からの加速器運転に合わせて試験を開始する予定である。

また、3 MeV 程度のビームエネルギーではスペースチャージの影響も大きく、ビーム輸送中のエミッタンス増大が問題になることがある。そこで、さらに高エネルギーまで加速する Gun を開発し、冬に試験を行う予定である。

参考文献

[1] G I Kuznetsov 1997 *Phys. Scr.* **1997** 39
 [2] Kwang-Je Kim NIMA Volume 275, Issue 2, 15 February 1989, Pages 201-218