

SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス RF gun のコミッショニング状況

COMMISSIONING OF HIGH-CHARGE, LOW-EMITTANCE, RF GUN FOR SUPERKEKB

夏井拓也[#], 吉田光宏, 周 翔宇, 小川 雄二郎

Takuya Natsui, Mitsuhiro Yoshida, Xiangyu Zhou, Yuujiro Ogawa
High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

Abstract

The injector linac of KEK is being upgraded for SuperKEKB. High-charge low-emittance electron and positron beams are required for SuperKEKB. The required injection electron beam parameters are 7.0 GeV at 5 nC 20 mm-mrad. A thermal cathode DC gun had been used for KEKB. However the DC gun could not make low-emittance beam. Thus low-emittance new RF gun is being developed. We are developing an advanced RF gun which has two side coupled standing wave field. We call it quasi-traveling wave side couple RF gun. This gun has a strong focusing field at the cathode and the acceleration field distribution also has a focusing effect. This RF gun has been installed KEK J-linac. Beam commissioning with the RF gun is in progress.

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の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高電荷・低エミッタンス化が求められる. ビームは電子陽電子ともに2バンチ運転を行い, 表1のようなビームパラメータになる. 図1が KEK 入射器の全体図であり, 新規に開発された高周波電子銃(RF gun)は最上流である A1 sector に配置される.

Table 1: The Required Injection Beam Parameters

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

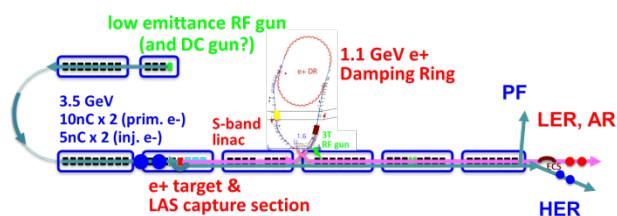


Figure 1: SuperKEKB injector layout.

KEKB では熱カソード DC gun が電子源として使用されてきたが, ダンピングリング無しで 20 mm-mrad 5 nC という高電荷低エミッタンスを達成するのは非常に困難である. したがって, SuperKEKB ではフォトカソード S-band RF gun を使用することに

なった.

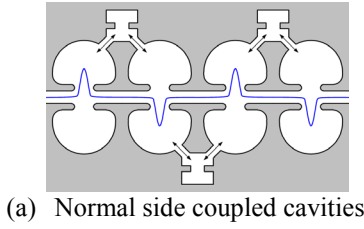
しかしながら通常使用される 1.5 cell on-axis coupling の RF gun では 1 nC 程度の電荷発生が限度であり, 全く新しい RF gun の開発が必要になった. そこで, Disk and Washer (DAW) 型やサイドカップル型の軸外結合の空洞を検討した. DAW 型の RF gun はすでに開発, 試験を終えている. この RF gun の試験を通して狭い加速ギャップによるビーム集束の効果や Ir₃Ce のカソードの量子効率などを確認することができた^[1].

DAW 型の RF gun では, ある程度の高電荷ビーム発生試験は可能であったものの 5 nC のスペースチャージによる発散力に対する集束電場はまだ弱く, 更に強い集束電場を発生させるような RF gun が必要であることがわかった. そこで, サイドカップル空洞を軸上に2つ配置した擬似進行波型と呼ばれる空洞を新たに開発した^[2].

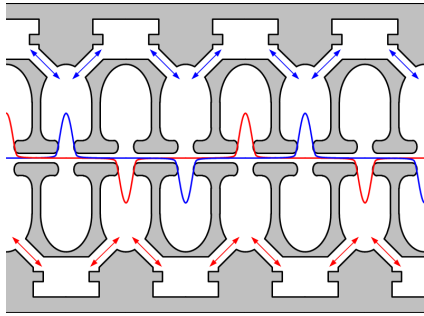
2. 擬似進行波型サイドカップル空洞

DAW やサイドカップル空洞のような軸外結合の空洞は加速ギャップを狭くすることでそこに発生する横向き磁場を利用し, 強い集束電場をビームに与えることができる. しかし, そのような構造では加速空間を短くした分ドリフトスペースが長くなり, そのスペースチャージによるビームの発散が問題になる. 例えば, 図2(a)のように加速ギャップを狭くしたサイドカップル空洞では必然的にドリフトスペースが長くなり, 効率的な加速方法とは言えない. そこで, 図2(b)のようにドリフトスペースに当たる部分に独立したもう一つのサイドカップル空洞を配置してやる. 更に, この2つの定在波空洞に $\pi/2$ だけ位相差をつけて RF を投入すればビームから見ると進行波に乗っているように見える. 故にこの構造を擬似進行波型サイドカップル空洞と呼んでいる. この構造は非常に効率よく加速とビーム集束とを行うことができる.

[#] takuya.natsui@kek.jp



(a) Normal side coupled cavities



(b) Quasi traveling wave side coupled cavities

Figure 2: Structure of the quasi traveling wave cavity.

3. 空洞設計

RF gun においてはカソードセルの設計が非常に重要になる。なぜなら、カソードから発生した直後のビームは相対論領域に達しておらずスペースチャージの影響でビームが発散しやすくなっており、それを打ち消すためには強い集束電場が必要になる。しかし、非線形な集束電場をかけてしまうとエミッタンス悪化の要因になってしまう。また、空洞内での放電リスクを抑えるため空洞表面での電場集中も抑えなければならない。このように空洞設計には様々な要因を考慮する必要がある。基本的な2次元での空洞設計には SUPERFISH と GPT (General Particle Tracer) という計算コードを用いた。

図3に加速空洞全体の計算結果(SUPERFISH)を示す。このRF gun は7つの加速空洞を持ち、これらは2つの独立した定在波空洞が互い違いに配置され、それぞれの空洞数は3と4である。

図3はビームトラッキングシミュレーションの結果である。5 nC の電荷量でエミッタンス 5.5 mm-mrad の結果となった。ビームエネルギーは 20 MW の投入電力で 11.5 MeV になり、この時の表面最大電場強度はレギュラーセルで 100 MV/m, 第一空洞のみ 120 MV/m である。

また、この空洞では 10 nC のビーム発生シミュレーションも行い、10 mm-mrad のエミッタンス, 1.2 mm (standard deviation) のビームサイズの結果を得ている。

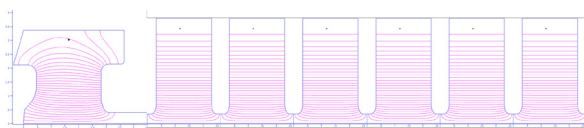


Figure 3: Designed RF gun cavities (SUPERFISH calculation result).

3次元での空洞設計は CST MICROWAVE STUDIO という計算コードを用いた。レギュラーセルの加速モードおよび結合モードを図5に示す。空洞の結合は3%とした。このRF gun では2つのカップラーに $\pi/2$ だけ位相差をつけてRFを投入する必要があるため、Gun本体に90度ハイブリッドが直接つくような設計にした。そのカップラー形状を図6に、空洞全体を図7に示す。

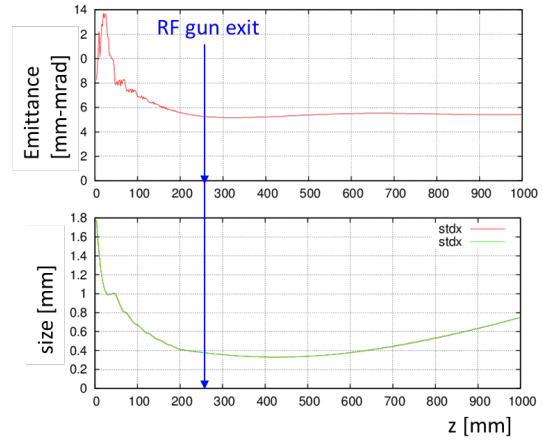
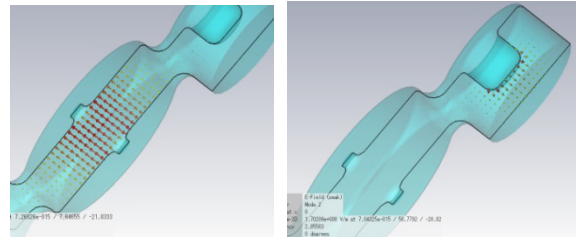


Figure 4: Beam tracking simulation result.



(a) Accelerating mode

(b) Coupling mode

Figure 5: regular cell cavity calculation result.

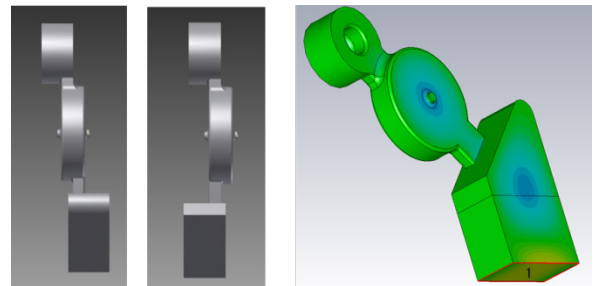


Figure 6: Two type couplers and calculation result.

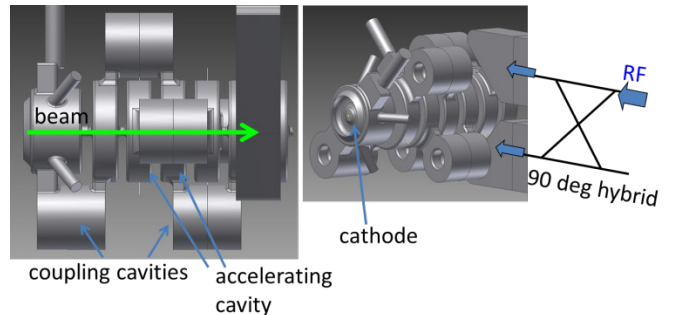


Figure 7: Whole cavity shape.

4. 製造過程と設置

この RF gun は2つのサイドカップル空洞を同軸上に持っているので非常に複雑な形状となっている。セルの設計においてはロウ付けの過程でリスクを少なくするため、一つのセルに加速空洞とサイドカップル空洞の両方を削りこみそれらをスタックすることで RF gun の形状になるような構造とした。一つのセルは大きく多少複雑にはなるがロウ付けの工程が単純化される。図8にこのセルの写真を示す。

2013年の夏に RF gun は入射器 A1 sector にインストールされた。その時の写真が図9である。小型の90度ハイブリッドが直接取りつき2つのカップラーに電力を供給している。



Figure 8: Photo of manufactured cells.

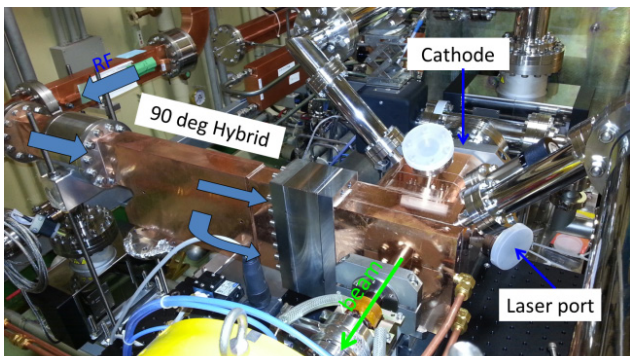


Figure 9: Installed RF gun.

5. ビームコミッショニング

この RF gun を使ったビームコミッショニングが2013年の秋から始まっている。レーザーシステムはイットリビウム(Yb)を使ったファイバー発振器とファイバーアンプ、Thin disk アンプから構成され、1030 nm の比較的広帯域の基本波を用いている^[3]。これを4倍波に変化してカソードに入射している。カソードは Ir₃Ce を用いている。コミッショニングでは最高で 2 Hz 運転において 5.1 nC のビーム発生を確認している。

Q-scan 方によるエミッタンス測定も行っている。これは、ビームを 25 MeV に加速したところでアルミナ蛍光板によるビームサイズを測定して行われた。その結果、1 nC のビーム電荷のときの規格化エミッタンスは水平方向: 32.7 (±3.1) mm-mrad, 垂直方向: 10.7 (±1.4) という結果になった。この値はレーザーの不安定性を含んだ値であり、レーザーが安定に運転できるようになればエミッタンスの測定値は小さくなると考えられる。

また、ビーム繰り返しを 25 Hz に上げての試験を行ったが、Thin disk レーザの熱負荷の変化によって 5 Hz 運転時と大きく条件が変化し、増幅率も低下するということが分かった。現在、25 Hz 運転では 1 nC 程度のビーム発生が限度であり、今後改善の必要がある。

また、RF gun からのビームをプライマリービームとしての陽電子発生試験も進められている。1 nC, 25 Hz, 2 パンチの電子を使って、0.1 nC 程度の陽電子発生を確認している^[4]。

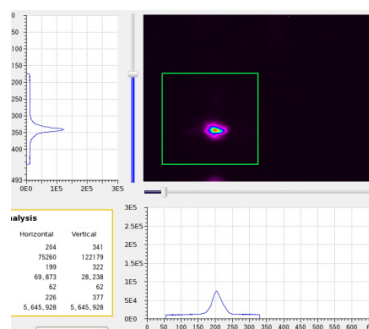


Figure 10: Beam size measurement for Q scan.

5. まとめと今後の予定

高電荷低エミッタンスの電子ビーム発生が求められる SuperKEKB に向けて新しい RF gun の開発を行い、現在コミッショニングを進めている。5 nC という高電荷のビームを 20 mm-mrad という低いエミッタンスで入射するため擬似進行波型サイドカップル空洞を用いた RF gun を開発した。RF gun を運転するためのレーザー開発も平行して進められており、現在は最高で 5.1 nC のビーム発生を確認している。

現在の RF gun では空洞内の放電で想定よりも低い RF パワーしか投入できておらず、ビームのエミッタンスやエナジースプレッドも大きくなっている。そこで、放電の原因と思われるカソード付近の形状を改良した RF gun の製作を進めている。この RF gun を現在の RF gun ビームラインの横に配置し斜めのビームラインを構築し両方の gun を試験できるようなビームラインの構築を行っている。レーザーの改善も行い、新たな RF gun でのフルパワーによる試験を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] T. Natsui et al., “DEVELOPMENT OF HIGH-CHARGE, LOW-EMITTANCE, RF GUN FOR SUPERKEKB”, THPS02, 第9回加速器学会, 大阪, 2012 8 月.
- [2] Takuya Natsui et al., “Quasi-traveling Wave Side Couple RF Gun Commissioning for SuperKEKB” MORPI033, IPAC14, Dresden, Germany, 2014.
- [3] X. Zhou, et al., “SuperKEKB 用 RF 電子銃に向けたレーザーシステムのアップグレード”, SAP114, in these proceedings.
- [4] T. Kamitani, “SuperKEKB 陽電子源の初期コミッショニングの現状”, MOOM07, in these proceedings.