

# SuperKEKB 用 RF gun のコミッショニング状況

## COMMISSIONING OF RF GUN FOR SUPERKEKB

夏井 拓也#, 吉田 光宏, 周 翔宇, 張 叡, 小川 雄二郎  
Takuya Natsui#, Mitsuhiro Yoshida, Xiangyu Zhou, Rui Zhang, 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. The SuperKEKB phase1 commissioning was started in this year. We used two injectors of DC gun and new RF gun. In this paper, commissioning result of phase1 using the RF gun is reported.

### 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。KEKB と同様に電子陽電子ともに2バンチ運転でリングに入射するが, 表1に示すように SuperKEKB では大幅なビームパラメータのアップグレードが必要になる。陽電子ビームの低エミッタンス化に向けては新たにダンピングリングの建設が進められている。しかし, 電子ビームはダンピングリング無しで 20 mm-mrad という低エミッタンスをバンチあたり 5 nC という高電荷ビームで実現しなくていけない。

Table 1: The Required Injection Beam Parameters

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

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 Ir<sub>3</sub>Ce のカソードの量子効率などを確認することができた[1,2]。

DAW 型の RF gun では, ある程度の高電荷ビーム発生の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[3]。

今年 2016 年2月から6月にかけて, Phase 1 と呼ばれる SuperKEKB コミッショニングが行われた。このコミッショニングでは HER リングに 7 GeV 電子ビーム 1 nC, LER リングに 4 GeV 陽電子ビーム 1 nC の入射ビームが要求される。ただし, エミッタンスに関しては KEKB と同等程度の要求であった。RF gun だけでは, 陽電子ビームのプライマリービームに対する電荷不足 と安定性の不安があったので, 熱電子銃による運転と併用してリング入射と RF gun コミッショニングを進めていくこととなった。これは入射部を2階建て構造として, 1階部分に RF gun のラインをつくり, その上, 2階部分を熱電子銃のラインとした。熱電子銃のラインはバンチャーと加速管2本を通り, 1階部分に合流する。

基本的には, 熱電子銃で SuperKEKB リングへの入射を行い, 並行して RF gun のコミッショニングも行った。また, 6月には RF gun による HER 入射に成功している。

### 2. 擬似進行波 RF gun 基本性能測定

#### 2.1 レーザシステムについて

この擬似進行波型 RF gun は Yb ファイバーを使った発振器と Yb ファイバーによる DC アンプ, Yb:YAG thin disk によるパルスアンプで構成させるレーザシステムで電子ビームを発生させている[4]。レーザ基本波の波長は 1030 nm で約 0.5 nm の帯域をもち, 約 30 psec のパルス長である。BBO 結晶により4倍波を発生させ, RF gun に入射している。パルスエネルギーは基本波で 6 mJ, 4倍波で 200 uJ 程度であった。前回のコミッショニ

# takuya.natsui@kek.jp

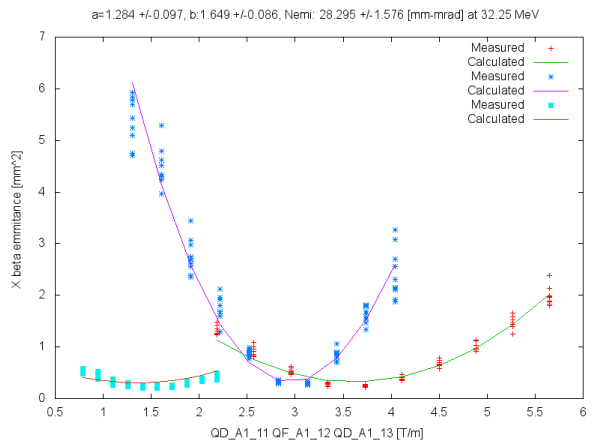
ングではレーザーパワーの揺らぎからビームチャージが変動する問題があったが、この点が大きく改善した。前は 20 %程度ビームチャージの変動があったが、今回は 5 %程度に抑えられている。例えば、約 7 時間のコミッション中に 1.72 +/- 0.07 nC というビームチャージの測定結果が得られた。

しかしながら、スポットポジションの揺らぎは大きく、RF gun 直後のビームポジションを測定すると、このレーザースポットの変動からくる不安定性が測定される。RF gun 直後の BPM でのビームジッター測定結果は、水平方向 0.44 mm、垂直方向 0.23 mm であった。この原因は、光路上での対流であることが分かっているため、今後、対策を行っていけば改善されると考えられている。

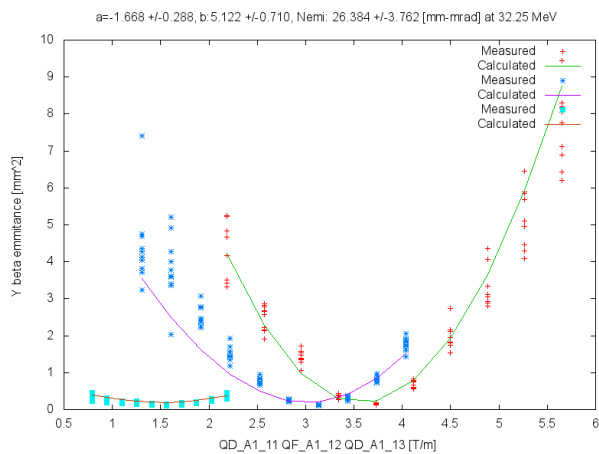
## 2.2 ビーム測定

擬似進行波型 RF gun から発生されたビームのエネルギーをシケインとして使用しているマグネットを使って測定すると約 8.0 MeV であることがわかった。これは、RF パワーから計算されるエネルギーとほぼ一致するので、空洞としては問題なく機能していることが分かる。

ビームのエミッタンスは、Q マグネットとスクリーンモニターを使用した Q scan 法にて測定された。この時の電荷量はおよそ 1 nC 程度であった。測定点は 3 点で、い



(a) Horizontal



(b) Vertical

Figure 1: Q scan result at A1 chicane.

ずれも J-arc を通す前である。Q scan 法はスクリーンの直前のトリプレットまたはダブレットをすべてスキャンし、そのデータすべてを使ってエミッタンスを計算している。例として A1 chicane でのデータを取った結果を図1に示す。また、Q scan の結果を表 2 に示す。

Measurement point	Energy [MeV]	Horizontal [mm-mrad]	Vertical [mm-mrad]
A1 chicane	32	28.3 +/-1.6	26.4 +/-3.8
A1 M	32	20.3 +/-6.4	17.7 +/-2.5
B dump	1500	48.5 +/-2.9	21.7 +/-11.8

Q scan の結果から規格化エミッタンスはおおよそ 20 mm-mrad 程度あることがわかった。この結果は、シミュレーションの結果より2倍ほど悪い結果となった。これは、シミュレーションで想定しているレーザーより、実際のレーザープロファイルが悪かったり、バンチ長の裾が長かったり、斜め入射によるビームの非対称性などが影響するためと考えられる。これらのレーザーの条件を改善していけば計算通りのエミッタンスを得られると考えている。

## 3. RF gun を使った HER リング入射

SuperKEKB Phase1 では、2月の運転開始から熱電子銃による電子ビーム入射が行われていた。しかし、RF gun のコミッションを進めて行くにあたって、熱電子銃と同等の安定度で 1 nC の電子ビームの供給が RF gun でも達成できる見込みが出てきたので、5月の下旬から RF gun での HER リングへの入射の準備を進めてきた。

5/31 に最初の HER リングへの RF gun 電子ビーム試験が行われた。そのときの入射状況のグラフを図2に示す。まず、熱電子銃のビームタイミングに完全に合わせるように RF gun のタイミング調整を行い入射を行ったが、非常に入射率が悪かった。そこで、シケインでバンチ圧縮を行ってから入射すると高い入射効率になった。

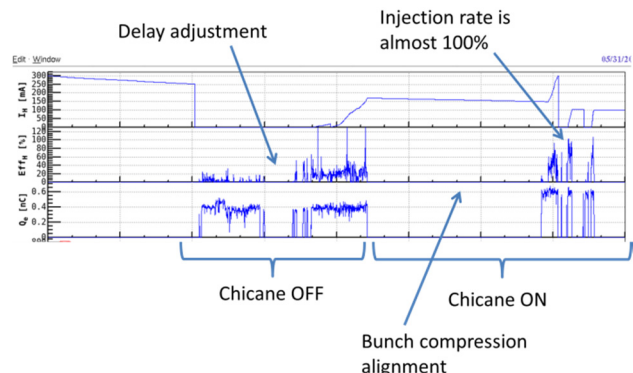


Figure 2: First SuperKEKB ring injection test.

RF gun を使った連続したビーム入射は 6/8 から 6/18 日までの 10 日間の間行われた。しかし、不運なことに 6/18 にレーザーハットで水漏れが起こり、発振器が止まってしまうというトラブルが発生した。この時に熱電子銃による入射に戻し、レーザーの復旧を試みたが、結局6月の末まで同じ状態に復帰させることができなかった。

RF gun による HER の入射は非常に大きな成果であったが、信頼性のある運転にはレーザーシステムの改善が必須であることが改めて示された。

#### 4. 斜め入射ラインの構築について

現在、新しく作った RF gun を試験するためのビームラインの構築を計画している。このラインでは、垂直レーザー入射を試験するために、ビームアパーチャを大きくとった擬似進行波ではない単純な空洞を試験する予定である。入射ビームラインは 45 度ベンドマグネットを2つもっており、アクロマティックにしてビームを既存のラインに合流させるオプティクスになっている。また、ディスページョンがついているところに稼働スリットを設置することでビームバンチ長の整形も行う予定である。

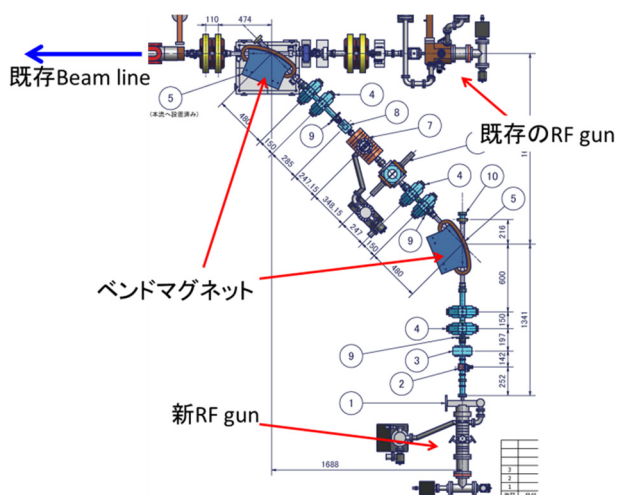


Figure 3: New injection line.

#### 5. 結論

擬似進行波型サイドカップル RF gun を使った SuperKEKB に向けたコミッショニングを行い、1 nC で 20 mm-mrad のエミッタンスのビームを得られることを確認した。ビーム電荷の安定性が以前より改善され、5%ほどの安定度あった。また、SuperKEKB HER リングに初めて RF gun からのビームでの入射に成功した。RF gun で、約 10 日間の連続したビーム入射運転を行うことができた。

また、現在新しい RF gun の試験に使うビームラインを構築中であり、ここで、Phase2 に向けた RF gun のコミッショニングを進めていく予定である。

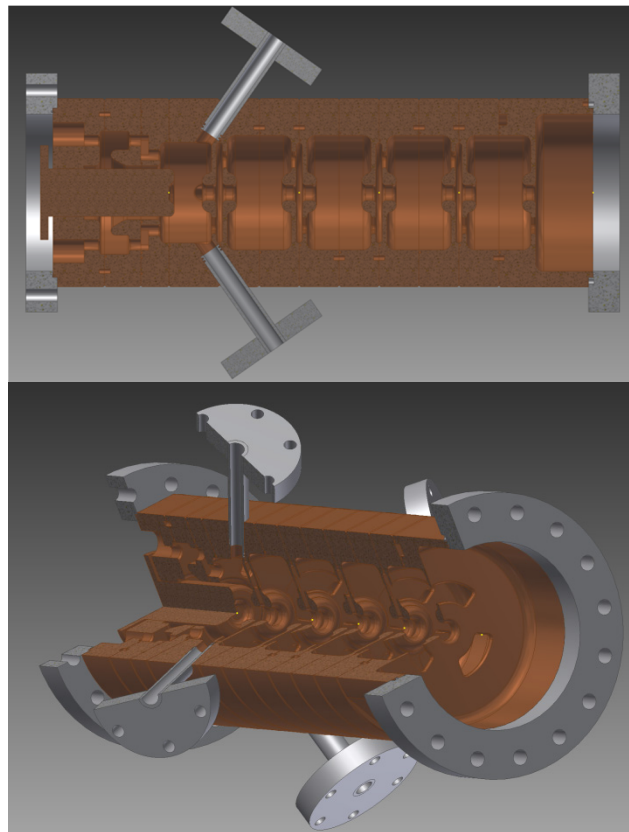


Figure 4: New RF gun.

#### 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] Daisuke Satoh et al., “Development of Better Quantum Efficiency and Long Lifetime IrCe Photocathode for High Charge electron RF Gun” MOPFI023, IPAC13, Shanghai, China (2013).
- [3] Takuya Natsui et al., “Quasi-Traveling Wave Side Couple RF Gun Commissioning for SuperKEKB” MORPI033, IPAC14, Dresden, Germany, 2014.
- [4] X. Zhou et al., “Nd/Yb Hybrid Amplifier Laser System of RF Gun for SuperKEKB”, 第 13 回加速器学会, WEOM02.