

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. 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. 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

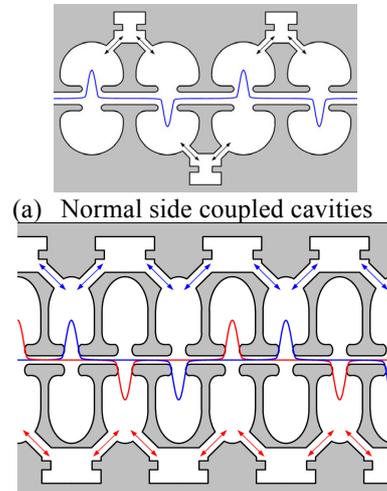
	KEKB (e+/e-)	SuperKEKB (e+/e-)
Charge [nC]	1 / 1	4 / 5
Emittance [mm-mrad]	2100 / 300	20 / 20

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_3Ce 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を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].

例えば, 図1(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1(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.



(a) Normal side coupled cavities
(b) Quasi traveling wave side coupled cavities
Figure 1: Structure of the quasi traveling wave cavity

[#] takuya.natsui@kek.jp

2. コミッショニング状況

KEK 入射器は J-linac と呼ばれる J 型に配置された linac で形成される。RF gun は入射器の最上流である A1 sector に配置され、その側近でレーザーシステムも構築されている。図 2 に A1 の配置図を示す。レーザーシステムは、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^[4]。レーザーの中心波長は 1035 nm で、非線形結晶を用いて 4 倍波を作り Ir₃Ce フォトカソードに入射し電子源とする。Yb 系のレーザーは広帯域であるので時間方向のパルス成形が可能であり、低エミッタンスに最適なパルス形状を実現できる可能性がある。パルス成形とリアルタイムエミッタンス測定を組み合わせることで常に低エミッタンスビームを供給することが最終的な目的である。

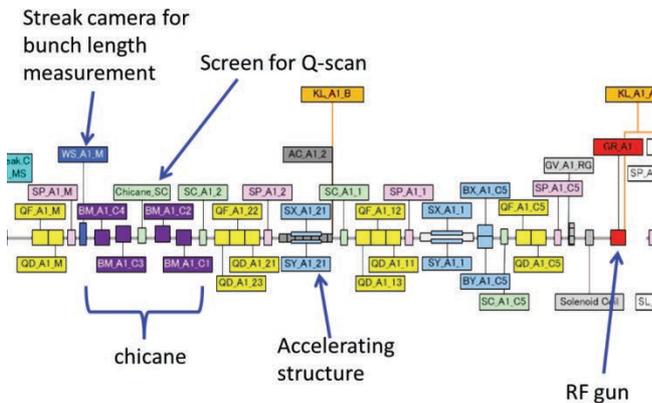


Figure 2: A1 layout

2.1 RF gun への入射レーザーの測定

レーザーハットは A1 の RF gun に隣接して構築されている。レーザーハット内では Yb レーザーの基本波 1035 nm をパルス幅 30 psec で数十 mJ のパワーに増幅する。また、レーザーハット内で BBO 結晶を使い 2 倍波への変換を行い、RF gun 直近までは 2 倍波でパルスを輸送している。

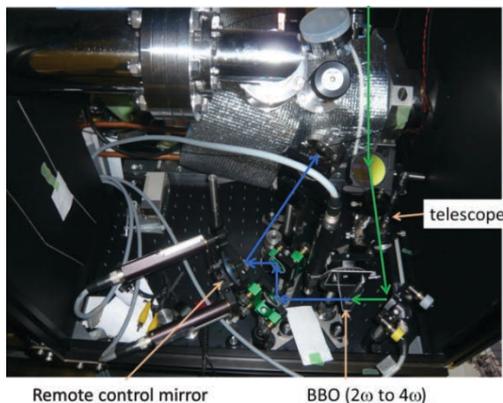


Figure 3: Optics for laser injection

4 倍波への変換は RF gun の直前の BBO 結晶で行っている。図 3 に RF gun 直前の光路の写真を示す。カソードには 60 度の角度で入射しており、電動のテレスコープとミラーにより遠隔でスポットサイズと位置を調整できるようになっている。4 倍波のレーザープロファイルも CCD カメラでモニターできるようになっている。図 4 にランダムに抽出した 10 ショットを示す。レーザープロファイルは非常に汚くパルスごとのばらつきも大きい。このレーザーの不安定性は大きな問題となっている。

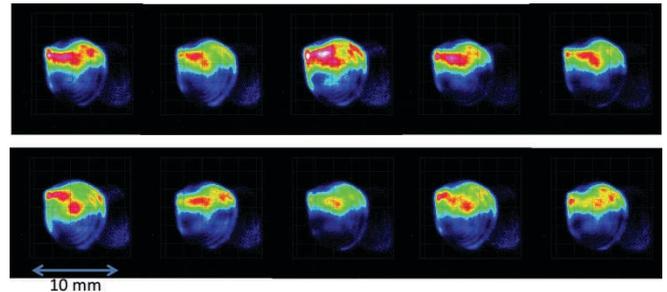


Figure 4: laser profiles of consecutive 10 shots

2.2 Q-scan エミッタンス測定

RF gun で生成したビームのエミッタンスは図 2 に示めされた A1 のスクリーンモニターで Q-scan 法によって測定された。測定された規格化エミッタンスはビーム電荷 0.6 nC のときに水平方向 13.4 +/- 5.9, 垂直方向 8.05 +/- 0.47 [mm-mrad] であった。高電荷 (5.0 nC) でのビーム測定が望ましいが、レーザーの不安定性で現在は測定に至っていない。

2.3 シケインによるバンチ長圧縮

RF gun の中では空間電荷によるエミッタンス悪化を避けるために 20 psec から 30 psec の長いバンチ長でビーム加速を行っている。しかし、linac ではウェークによるエミッタンス悪化を防ぐために 10 psec のバンチ長が望ましい。そのため A1 sector のシケインでバンチ長圧縮を行うこととした。シケインの下流にはストリークカメラが配置され OTR による発光を観測することでバンチ長の測定が可能である。A1 の linac の RF 位相を変化させバンチ長の変化を観測した。その結果、図 5 のように 20 psec から 10 psec へのバンチ圧縮が観測された。

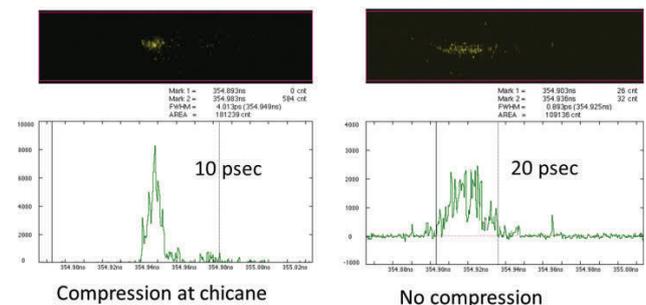


Figure 5: Results of streak camera measurements

2.4 ビーム電荷履歴

前年度の夏以降は 25 Hz 運転のレーザシステムの構築を行ってきた。しかしながら、5 Hz 運転にくらべ thin disk の Yb:YAG 結晶によるレーザ増幅は繰り返しの増加に伴う熱負荷により増幅率が大幅に低下した。増幅率の低下を補うために増幅段の段数を増やしたが、より複雑なシステムになったためにレーザの安定度は著しく低下した。また、レーザ発振器も運転を続けるにつれ位相の安定度が低下し、高周波加速に使う RF との同期が外れる頻度が次第に高くなりビームが全く発生しないようなパルスも増えていった。図 6 は RF gun から発生したビーム電荷の一ヶ月にわたる履歴であるが、長期的にも短期的にもビーム電荷が不安定であることが分かる。ビーム電荷としては最高で 5 nC 近くまでのビーム発生が確認でき RF gun としては目標の電荷量を達成する性能を有していることが示される。しかし、長期運転で使用するにはレーザの安定度を大幅に改善する必要がある。

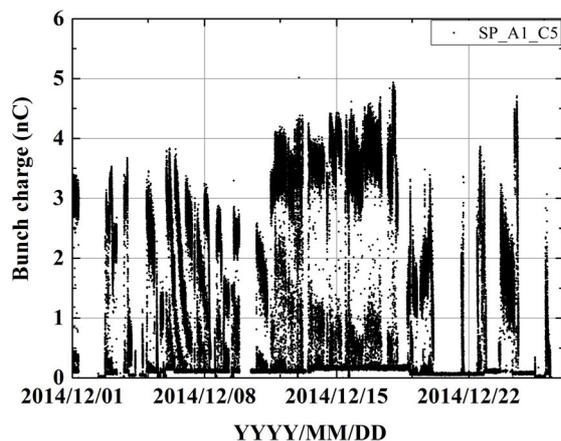


Figure 6: Beam charge of RF gun

2.5 RF コンディショニング

RF gun 空洞の RF パワーの最終目標値は 20 MW 1 μ sec である。しかし、コンディショニングの進捗は遅く、現在は 14 MW 600 nsec を達成するにとどまっている。これは頻繁に空洞内で放電が起こってしまうためである。放電の原因の一つにレーザのミスオペレーションによるアブレーションがあげられる。これは、カソード表面でレーザスポットを小さくしすぎたために起こり、取り外したカソードにはその放電痕が確認された。このアブレーションと放電により空洞内が汚染させた可能性もある。また、カソードを取り付けているカソードロッドの RF コンタクトをとっている部分にも多くの放電痕が残っていた。これはコンタクトが甘く同軸形状になってしまったために RF が染みこんだと考えられる。

3. RF gun 空洞の改善

空洞にパワーが入らないという問題点を改善するため、新たに空洞を制作した。これは、カソード

ロッドの同軸部分をチョーク構造に改良し RF が染み出さないような構造となっている。また、カソードの固定も冷やしバメにし、カソード付近での僅かな公差をなくすようにした。この空洞で RF コンディショニングがどの程度進むかを今後評価する予定である。

また、問題点を洗い出すため加速空洞も複雑な擬似進行波空洞ではなく単純な構造にした RF gun も製作中である。これの空洞でカソードの固定方法やチョーク構造の優位性を確かめたいと考えている。また、現在の空洞はビームホールが小さすぎるため 0 度のレーザの入射には対応していない。新しい空洞では 0 度入射にも対応している。図 7 に空洞の形状を示す。ノーズ付きの加速空洞で APS 空洞になっており、空洞同士の結合はディスクに開けられた穴でとられる軸外結合である。必要な電力も 7 MW と小さく擬似進行波空洞よりも放電リスクは少ないと考えられる。ビームに及ぼす集束電場は擬似進行波空洞よりは小さいが 5 nC のビーム発生が可能であるというシミュレーションの結果を得ている。今後この空洞でのスタディーも行っていきたいと考えている。

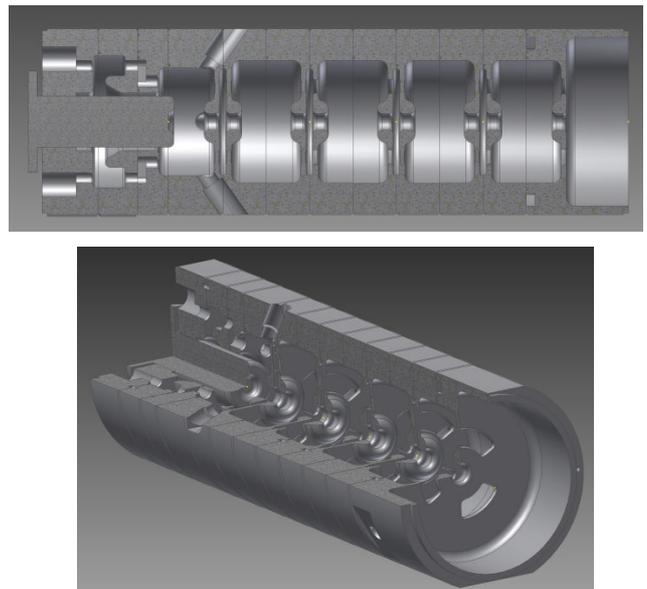


Figure 7: Simple cavity RF gun

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., “25Hz Sub-mJ Ytterbium Laser Source of RF Gun for SuperKEKB” WEPMA044, IPAC15