

SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス DAW 型 RF 電子銃の開発

夏井 拓也^{*1}・吉田 光宏^{*1}・小川 雄二郎^{*1}・佐藤 大輔^{*2}

Development of High-Charge, Low-Emittance, DAW Type RF Gun for SuperKEKB

Takuya NATSUI^{*1}, Mitsuhiro YOSHIDA^{*1}, Yujiro OGAWA^{*1} and Daisuke SATOH^{*2}

Abstract

We are developing a new RF gun for SuperKEKB. High-charge, low-emittance electron and positron beams are required for SuperKEKB. The required injection electron beam has a charge of 5 nC and an emittance of 20 mm-mrad at an energy of 7.0 GeV. In this linac, a photo cathode S-band RF gun will be used as the electron beam source. An advanced RF gun is required for high-charge, low-emittance beam generation. Thus, we developed a Disk and Washer (DAW) type photo cathode RF gun. LaB₆ and Ir₅Ce were tested as photo cathode materials. Normally, LaB₆ or Ir₅Ce are used as a thermionic cathode, however we evaluated the performance of the materials as a photo cathode. The beam commissioning results showed that Ir₅Ce has high quantum efficiency and long life time. Nd:YAG laser was used for RF gun operation. The SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror) mode locked laser was used for oscillator (frequency: 52 MHz). The obtained laser pulse energy was 4 mJ with pulse length of 30 psec at wave length of 266 nm. Finally, we obtained the beam charge of 4.8 nC by using the DAW type RF gun and Ir₅Ce cathode.

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¹⁾. 表 1 に求められるビームパラメータを示す.

陽電子ビームは 10 nC のプライマリー電子ビームをターゲットにて変換し, ダンピングリングで低エミッタンス化させて入射ビームとするが, 電子ビームはダンピングリングを通さずに 5 nC,

20 mm-mrad の高電荷・低エミッタンスビームを入射器 linac で直接作り出す必要がある.

従来, KEK 入射器では電子ビーム源として熱カソード DC gun が使用されてきたが, この電子銃で低エミッタンスビームを作ることは非常に難しい. そこで, 高電荷低エミッタンスビーム用の電子源として S-band フォトカソード RF gun が選択された.

S-band RF gun では, BNL タイプと呼ばれる 1.5 cell の軸上結合型の空洞が一般的である²⁾. しかし, この空洞で我々のビームパラメータを実現することは現実的ではないと結論付けられた. この BNL タイプの RF gun では通常 1 nC 程度のビーム発生が限界であり, 5 nC もの高電荷においては空間電荷効果によりビームが発散してしまう. そうなると, 後のビーム輸送においてエミッタンス保存とビーム集束の両方を考えなくてはならない.

そこで我々は RF gun の中でビームサイズが大きくなるような空洞の設計を進めた. すなわ

表 1 電子陽電子に求められるパラメータ

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

*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: takuya.natsui@kek.jp)

*2 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

ち空洞が作る電場に集束方向の電場成分を加えることで、空間電荷効果の逆電場をかけることを考えた。しかし、軸結合型の空洞では軸近傍の電場分布を自由に設計することは難しい。なぜなら、ビームホールが電氣的結合も兼ねているからである。したがって、軸外結合 (Annular coupling) の空洞が必要になる。軸外結合の空洞として Disk and Washer (DAW) 型の空洞を採用し、RF gun の開発を進めた^{3,4)}。

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。カソードの材質としては熱カソードとして使用されている LaB_6 と Ir_5Ce を候補とした。フォトカソードの量子効率と寿命は逆数関係にあり、一般的なアルカリ系カソードである Cs_2Te 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が量子効率が非常に低い。 LaB_6 や Ir_5Ce 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。測定の結果、比較的悪い真空状態においても汚染されず、高い量子効率を保つ Ir_5Ce を採用することになった。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。266 nm に対する Ir_5Ce の量子効率は 10^{-5} から 10^{-4} であった⁵⁾。SupreKEKB のような常時運転においては、薄膜ではなくソリッドな形状であり真空悪化にも強い Ir_5Ce のようなカソード材料が最適である。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。

2. DAW 型 RF gun の空洞設計

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空洞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、ビームの集束が難しく、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、ビームの集束電場を作り易く、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。

東京理科大学 FEL 施設において、DAW 型熱カソード RF gun が開発され数年前に設置され運用実績がある⁶⁾。これは、DAW 型 RF gun による電場集束により熱カソードから発生したビームを集束しつつ加速する効果を見込んだものである。図 1 に理科大 RF gun の 2 次元モデルの電磁場計算結果を示す。この RF gun においては加速ギャップを非常に狭くすることで Alternative Phase Focus (APF) という集束効果を生み出している。このように加速ギャップを自由に設計できる点が軸外結合である DAW 型空洞の利点である。

また、この空洞には放電頻度を下げるための工夫が 2 点ある。放電頻度を決めているのは電場強度と電場が印加されている時間である。つまり、最大軸上電場強度を 80 MV/m と低く設計することと、結合係数 β を 1 以上にしフィリングタイムを短くするという 2 点である。SuperKEKB で長期運転に使用するには放電頻度が低い安定な電子銃であることが重要なので、この設計思想の DAW 型 RF gun は理想的である。

この理科大熱カソード RF gun を元に高電荷フォトカソード RF gun への改良設計を行った。5 nC という高電荷ビーム発生のためにはビームのエネルギーが低いカソード付近の設計が重要になる。そこで、レギュラーセルはそのまま流用しカソードセルのみ再設計を行ないフォトカソードで高電荷低エミッタンスビームを実現する RF

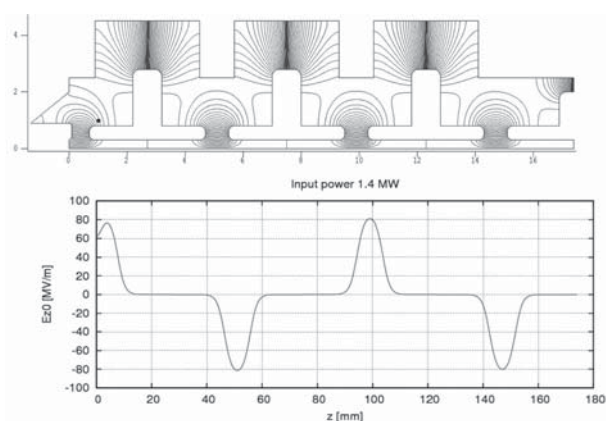


図 1 理科大 RF gun 2 次元モデル SUPERFISH 電場計算結果 (上: 空洞内電場分布 下: 軸上電場強度)

gun の開発を行った. エミッタンスは linac 終端で 20 mm-mrad を実現するため RF gun では 10 mm-mrad を目指すこととした.

レーザのパルス長 30 psec, カソード径 6 mm と空間電荷効果の影響を受けにくいパラメータを選択したが, ビームトラッキングを進めるとやはり 5 nC の発散力は大きくカソード付近には大きな集束方向の電場が必要であることがわかった. そこで図 2 のようにカソードの周りに大きなノーズをもたせることでこの電場を作ることを試みた. しかし, 2 次成分を含む集束電場を作ってしまうと図 2(a) のように位相平面上でビームが歪

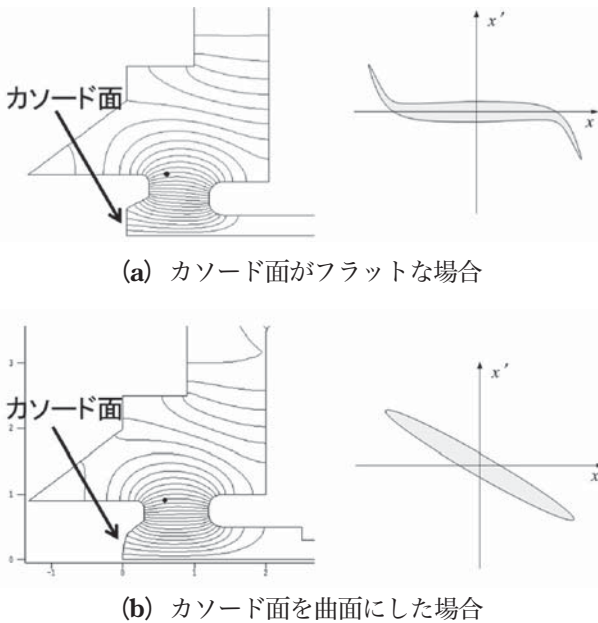


図 2 カソード面形状 (左) と位相平面上のビーム形状 (右)

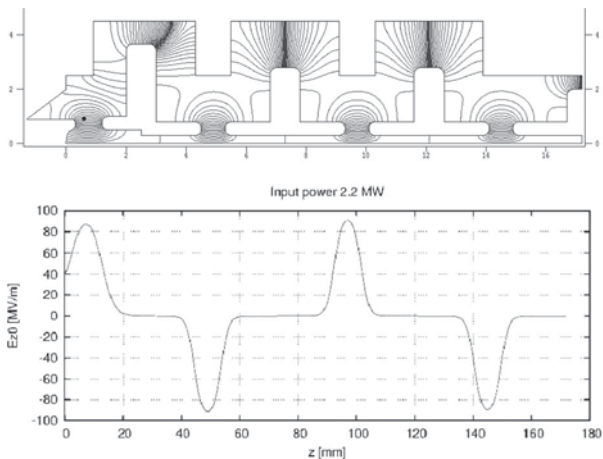


図 3 DAW 型 RF gun 2 次元モデル SUPERFISH 電場計算結果 (上: 空洞内電場分布 下: 軸上電場強度)

みエミッタンス悪化の原因となってしまう. これはカソードの外側部分にのみ強い集束方向の電場が働いたためである. そこで, 図 2(b) のように湾曲したカソードからビームを取り出すこととすると線形に集束力が働き位相平面上のビーム形状を崩すことなくビームを集束させることができる. このようにして設計された空洞の 2 次元計算結果を図 3 に示す.

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パルスは 30 psec の矩形パルスを想定した. ビームシミュレーションの結果より, この加速空洞は Alternative Phase Focus (APF) によるビーム集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集束無しで 100% 透過できるという結果を得ている. この計算結果を図 4, 表 2 に示す. 目標であった 10 mm-mrad を切る 6 mm-mrad のビームが生成できることがわかった. 図 5 が DAW 型 RF gun のカットビューである.

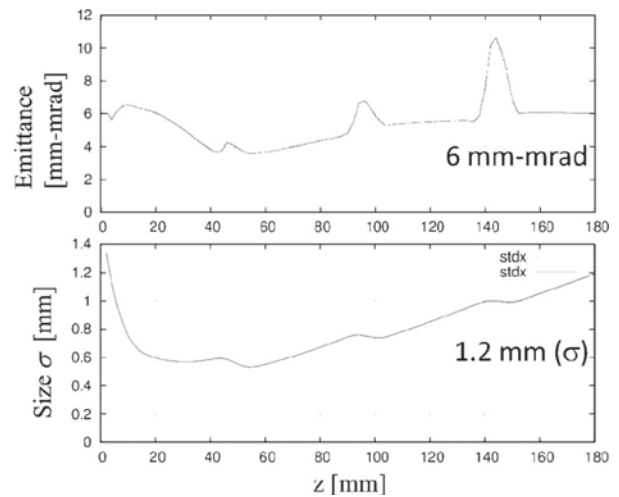


図 4 RF gun 内部でのビームトラッキングシミュレーション結果 (GPT) (上: エミッタンス, 下: ビームサイズ)

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

3. RF gun 製作と周波数調整

この RF gun は図 6(a) のようなセルを組み立て最終的に図 6(b) のような形になる。60° の角度でレーザ入射ポートが 2 箇所付いている。

ロウ付け後に共振周波数を測定し、図 7 に示すカソードロッドの挿入する位置を調整することで入力高周波の周波数 2856 MHz に一致させた。空洞が 4 つと少なく結合度が大きいために、このように第一空洞のみの調整で RF gun 全体の周波数調整が可能になる。

共振周波数の調整はネットワークアナライザを

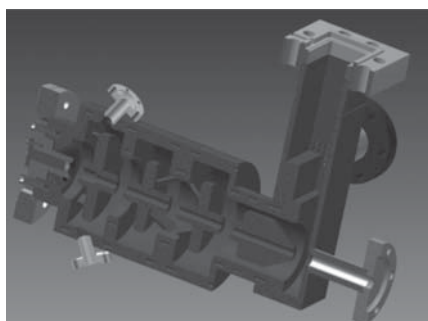
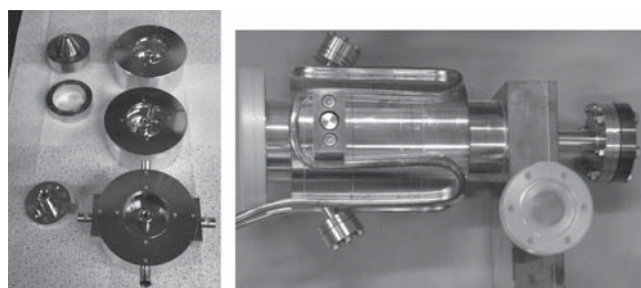


図 5 DAW 型 RF gun のカットビュー



(a) ロウ付け前セル

(b) 完成写真

図 6 DAW 写真

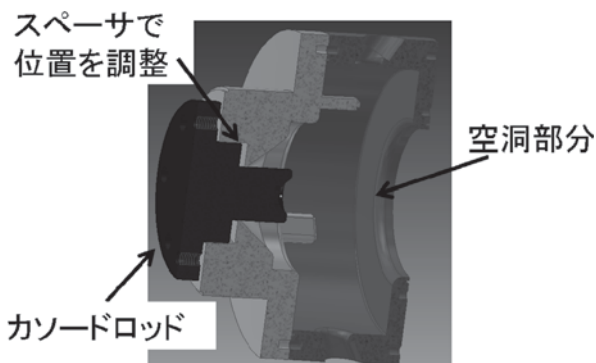


図 7 周波数調整のためのカソードロッド位置調整の機構

使用し、スミスチャートから各種パラメータの測定も行った。その結果を表 3 に示す。この結果は、計算値とほぼ一致している。

4. RF gun インストール

この RF gun は 2011 年夏に 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た。ビームラインの基本構成は図 8 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、バンチ圧縮のためのシケインと 1 m 加速管を Gun 下流に配している。まず、Gun から発生したビームを Solenoid コイルで発生させた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 Q マグネ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、11 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ディスパージョンの影響が大きく、それを戻せないために射影エミッタンスが非常に悪くなってしまいうためである。また、シケインでバンチ圧縮を行うと低エネルギーのために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行っていない。入射器棟 3-2 セクターに設置された斜め入射ビームラインを図 9 に示す。

表 3 空洞の低電力試験結果

反射率	$G = 0.119$
結合度	$\beta = 1.27$
負荷 Q	$Q_L = 2646.4$
無負荷 Q	$Q_0 = 6007.3$

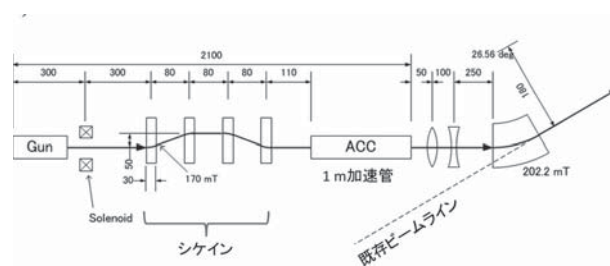


図 8 斜め入射ビームライン

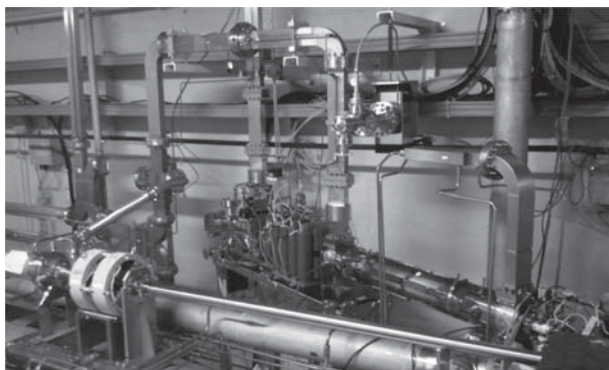


図9 3-2セクター斜め入射ビームライン

5. レーザシステム

レーザはNd:YAGの固体レーザを使用しており、30 psecのSemiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM)を使った52 MHzのモードロック発振器からのパルスを取り出しマルチパスアンプで増幅している。レーザハットは入射器棟クライストロンギャラリーに構築し、地下のトンネル内のRF gunまでは約5 mの伝送距離になる。発振器は52 MHzであるがlinacの加速周波数2856 MHzに精度よく同期させるため、571.2 MHzで同期をとっている。まず、発振器からの信号の11倍高調波を取り出し571.2 MHzを作る。これはlinac制御にも使用されており、加速周波数の1/5の周波数と一致する。このRFとの位相差を見るためにIQ(In-phase and Quadrature)信号を取り出し、この信号により piezo素子を取り付けたミラーの位置を制御することで共振器長を調整し571.2 MHzのなかで位相を一致させている。図10に発振器の写真とレーザ光路・同期回路の簡略図を示す。

この発振器からのパルスをEO(Electro-optics)素子を使ったパルスピッカーで1パルスだけ切り出し増幅段に入射している。増幅にはポンプ用LD(laser diode)とYAG結晶が一体型となったモジュールを使いマルチパスアンプを行なっている。最終の増幅はフラッシュランプを用いた増幅となっている。紫外線への変換はBBO(β -BaB₂O₄)結晶を使って4倍高調波を作り出している。30 psecの266 nm波長でパルスあたり4 mJのレーザエネルギーを達成している。レーザの増幅段の写真とブロック図を図11に示す。

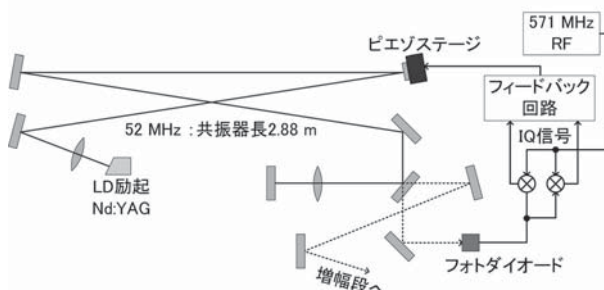
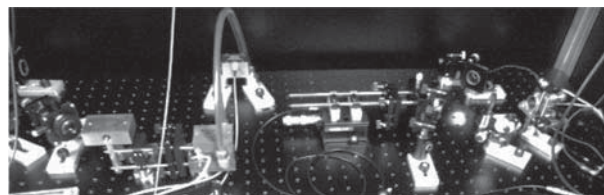


図10 Nd:YAG レーザ発振器

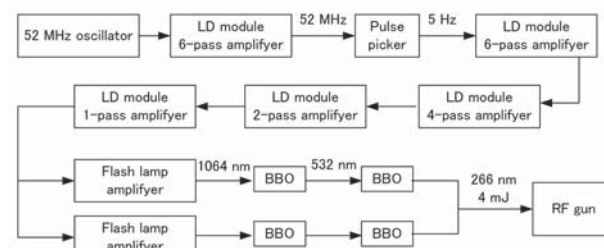
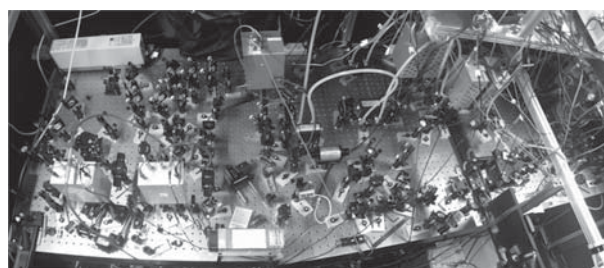


図11 Nd:YAG レーザの増幅部分

6. 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LaB₆を使用した。最高で1.2 nCの電荷しか得られなかった。また、LaB₆は量子効率を維持するためにレーザクリーニングが必要なことと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Ir₅Ceに取り替え試験を行った。Ir₅Ceはレーザク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LaB₆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、反射率を低減させることで量子効

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一時的に上昇した。

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 12)。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。

また、Quadrupole magnets (Q-magnet) の磁場を変化させ、それによるスクリーンでのビームサイズの測定からエミッタンスを試算する Q scan 法も行った。Q scan 法ではビームサイズを測定する必要があるが、KEK 入射器棟で使っているスクリーンは厚さ 1 mm のアルミナ蛍光板であり、像のにじみにより正確にエミッタンスを測定することはできない。また、ワイヤースキャナーでの測定は、位置が遠すぎて輸送途中の射影エミッタンス増加の懸念があり断念した。そこで、既存ラインに入射するビームラインとは別にビーム測定用のラインを構築し、そこに厚さ 30 μm のアルミナ蛍光板スクリーンを設置してビームサイズ測定を行った。これは、既存ビームラインに入射するためのベンドマグネットをオフにして RF gun から見てストレートのビームラインを構築したものである。図 13 がそのラインの鳥瞰図

である。1 m 加速管で追加速された後、約 11 MeV になったビームを Q-magnet により集束する。ストレートビームラインを構築したことで、ベンドマグネットによるディスパージョンの影響がないことと RF gun の近くで測定が行えるため、RF gun のビームそのものの測定ができる。図 14 にそのビームラインとスクリーンの写真を示す。図 15 が実際に取得したスクリーン画像である。この画像を解析し、ビームサイズを測定した。

Q scan の測定では、RF gun からのビーム電荷を 1.0 nC とした。これは、レーザ出力を上げた状態では出力が不安定になりハイパワーを維持できなく、Q scan が正しく行えなかったためである。

Q-magnet の磁場を変化させてビームサイズを測定した結果を図 16 に示す。その結果、得られたエミッタンスは表 4 に示すとおり、x 方向に 19, y 方向に 14 mm-mrad であった。これは、想定されたエミッタンスよりも大きい。この原因はレーザの不安定性によるものだと予想される。現在、レーザの位相とパワーが Pulse to pulse で揺らいでおり、この影響でビームサイズも Pulse to pulse で変わってしまう。図 16 のビーム測定では各点で 20 shot のデータ取得を行ったが、このときのビームサイズの揺らぎ幅をエラーバーとしてグラフに示している。このようにレー

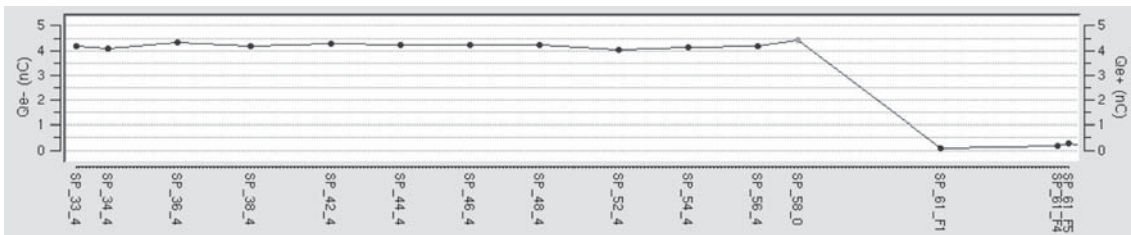


図 12 入射器のビーム輸送時の BPM 信号測定結果

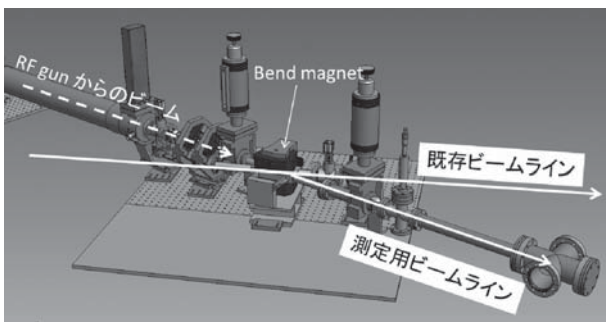


図 13 測定用ストレートライン

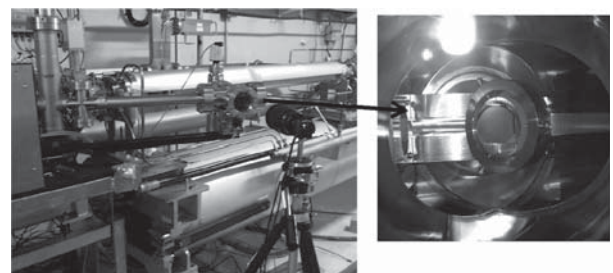


図 14 測定用ビームラインとスクリーン写真

ザの安定化はビーム測定においても重要である。更に, SuperKEKB への入射という意味では時間で積分したビームのエミッタンスが等価的なエ

ミッタンスとなるので, レーザ安定化は非常に重要な要素である。

7. まとめと今後の課題

KEKB から SuperKEKB へのアップグレードに向けて KEK 入射器では, ビームの高電荷低エミッタンス化に向けた様々な開発が行われている。そのなかで DC 熱電子銃を用いて行なっていた電子ビーム発生部分をフォトカソード RF gun に置き換えるべく開発が進められている。RF gun は従来よく使用されていた軸結合型の 1.5 cell 空洞ではなく軸外結合の DAW 型の空洞を用いて開発された。この空洞では軸外結合の特性を生かし, 空洞が作る電場が集束作用を持つように設計されている。5 nC の高電荷を発生させるため空間電荷効果が強くそれに打ち勝つ集束力が必要であった。さらに, カソードセルでは, エミッタンスを悪化させずに強力に集束電場を得られるような設計になっている。ビームトラッキングの結果, この DAW 型 RF gun は 5 nC, 6 mm-mrad のビーム加速が可能であることがわかった。

カソード材料としては, メンテナンス性と量子効率の両面においてバランスのとれた LaB_6 と Ir_5Ce を検討したが, 真空悪化にも強く量子効率も高い Ir_5Ce を選択するに至っている。レーザは Nd:YAG の固体レーザを製作し 4 倍高調波の 266 nm の紫外線を電子発生に使用している。

これら, Ir_5Ce のフォトカソードを持った DAW 型 RF gun と Nd:YAG を用いたレーザ光により 4.8 nC のビーム発生を達成している。電荷量に関しては, 目標の 5 nC をほぼ達成したと考えている。また, 1 nC の電荷量の条件下で Q scan 法によるエミッタンス測定も行い, 20 mm-mrad を切る結果が得られた。ただし, レーザの不安定性のために RF gun そのもののエミッタンス測定には至っていない。今後, RF gun を正しく評価するためにも, またなにより, SuperKEKB で低エミッタンスビームを達成するためにもレーザの安定化は非常に重要な課題である。

DAW 型 RF gun の試験を通して軸外結合を使った空洞の作る電場による集束作用の優位性が示されたことや Ir_5Ce のカソード評価ができたことなど様々な成果が得られた。しかしながら, DAW 型 RF gun は理科大の熱カソード RF gun を急遽

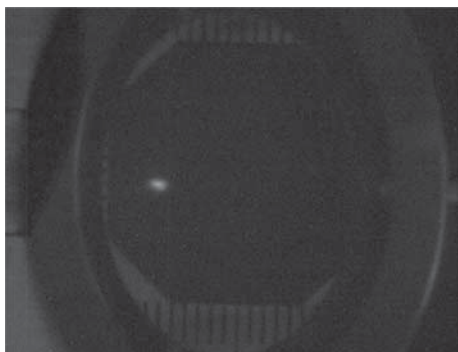


図 15 ビーム測定時のスクリーン画像

表 4 エミッタンス測定結果 (電荷 1 nC)

Normalized emittance [mm-mrad]	
x	19
y	14

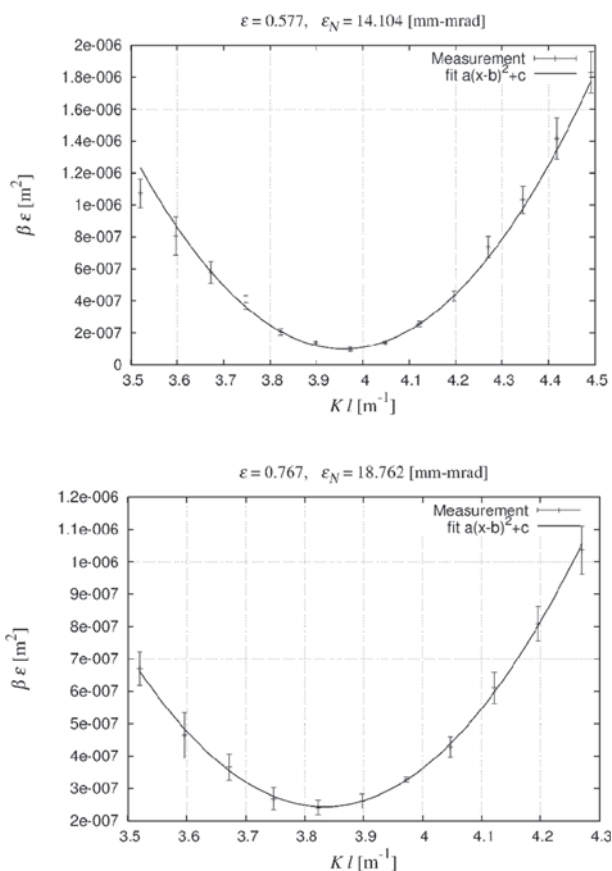


図 16 電荷 1 nC のビームでの Q scan 法でのビーム測定結果 (上: x 方向, 下: y 方向)

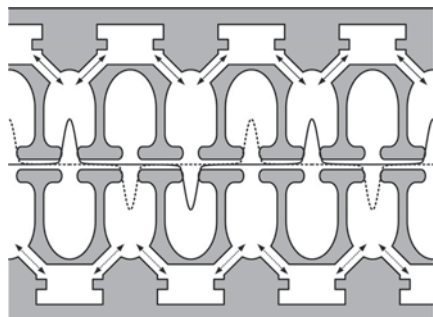


図 17 擬似進行波型サイドカップル空洞の概念図

フォトカソードに改良したもので、高電荷低エミッタンスビーム発生に特化しているとは言いがたい。5 nC が計算上の高電荷発生の上限であり、これは長期安定運転を求められる RF gun としてはマージンが全くなく不安がある。また、計算上でも発散角をもってビームが出力されることが分かっており、ビームエネルギーが 3 MeV 程と低いことと相まって、エミッタンスを保存したままのビーム輸送を行うことを非常に困難にしている。故に、DAW 型 RF gun で得られた知見を生かした高電荷低エミッタンスビーム発生に特化した新たな RF gun が求められる。

そこで現在、新しい加速方式である擬似進行波型の RF gun の開発を進めている。DAW 型 RF gun では電極を近づけ電場を集中させることで集束電場を作り出していたが、この方法の場合は加速ギャップと加速ギャップの間に長いドリフトスペースができてしまう。ここで強い空間電荷効果によりビームが発散してしまう。擬似進行波型 RF gun はこのデメリットを解消した設計で、図 17 のように 2 つのサイドカップル空洞を一つの軸上に互い違いに配置したものである。ここに $\pi/2$ だけ位相差を持った RF を投入することにより加速ビームからは 2 つの定在波が進行波に見える。このように各定在波空洞のドリフトスペースに当たる部分に他方の定在波空洞を配置することで非常に効率よく電場を印加することができる。

また、ビームのエミッタンスに大きく影響するカソードセルでも非常に強い集束作用をもたせることができた。計算では 10 nC のビーム発生も可能となっており、十分なマージンを残している。

この RF gun は図 18, 19 のように空洞設計および機械設計が完了し製作段階に入っている。

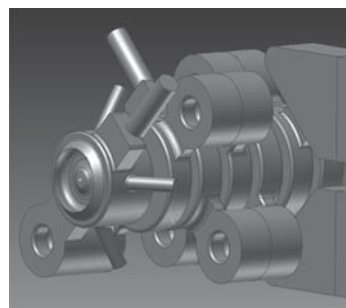


図 18 擬似進行波型 RF gun 空洞形状

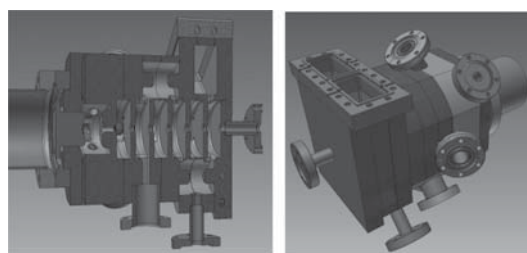


図 19 擬似進行波型 RF gun 機械設計

RF の投入は位相差 $\pi/2$ のハイブリッドを使用する予定で、RF gun に直接接続できる小型のものを開発した。今年中にこの新しい RF gun でのビーム試験を行う予定である⁷⁾。

参考文献

- 1) T. Higo, et al., "LINAC UPGRADE FOR SuperKEKB", WEUH03, 第 9 回加速器学会, 大阪, 2012 年 8 月
- 2) D. T. Palmer, et al., "Microwave Measurements of the BNL/SLAC/UCLA 1.6 cell Photocathode RF Gun", SLAC-PUB-95-6799
- 3) T. Natsui, et al., "High Charge Low Emittance RF Gun for SuperKEKB", Proceedings of IPAC 2012, New Orleans, Louisiana, USA, May 20-25, 2012
- 4) M. Yoshida, et al., "SuperKEKB Injector Upgrade for High Charge and Low Emittance Electron Beam", Proceedings of IPAC 2012, New Orleans, Louisiana, USA, May 20-25, 2012
- 5) D. Satoh, et al., "Development of Better Quantum Efficiency and Long Lifetime Iridium Cerium Photocathode for High Charge electron RF Gun", Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, May, 2013
- 6) T. Hiramatsu, et al., "The Design of DAW Structure for RF Electron Gun", Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako Japan, August, 2007
- 7) T. Natsui, et al., "Quasi Traveling Wave Side Couple RF Gun for SuperKEKB", Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, May, 2013