

SuperKEKB に向けた入射器アップグレード

LINAC UPGRADE FOR SUPERKEKB

夏井拓也^{#, A)}, 明本光生^{A)}, 荒川大^{A)}, 榎本収志^{A)}, 福田茂樹^{A)}, 古川和朗^{A)}, 本間博幸^{A)}, 飯田直子^{A)}, 池田光男^{A)}, 門倉英一^{A)}, 柿原和久^{A)}, 紙谷琢哉^{A)}, 片桐広明^{A)}, 倉品美帆^{A)}, 松下英樹^{A)}, 松本修二^{A)}, 松本利広^{A)}, 道園真一郎^{A)}, 三川勝彦^{A)}, 三浦孝子^{A)}, 宮原房史^{A)}, 中島啓光^{A)}, 中尾克己^{A)}, 大澤哲^{A)}, 小川雄二郎^{A)}, 佐藤政則^{A)}, 設楽哲夫^{A)}, 白川明広^{A)}, 諏訪田剛^{A)}, 杉本寛^{A)}, 竹中たてる^{A)}, 矢野喜治^{A)}, 横山和枝^{A)}, 吉田光宏^{A)}, 臧磊^{A)}, 周翔宇^{A)}, 一宮亮^{A)}, 佐藤大輔^{B)}

Takuya Natsui^{#, A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Yoshio Arakida^{A)}, Dai Arakawa^{A)}, Atsushi Enomoto^{A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Kazuro Furukawa^{A)}, Hiroyuki Honma^{A)}, Naoko Iida^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Eiichi Kadokura^{A)}, Kazuhisa Kakihara^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)}, Miho Kurashina^{A)}, Hideki Matsushita^{A)}, Shuji Matsumoto^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Shinichiro Michizono^{A)}, Katsuhiko Mikawa^{A)}, Takako Miura^{A)}, Fusashi Miyahara^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Katsumi Nakao^{A)}, Satoshi Ohsawa^{A)}, Yujiro Ogawa^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Akihiro Shirakawa^{A)}, Tsuyoshi Suwada^{A)}, Hiroshi Sugimoto^{A)}, Tateru Takenaka^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)}, Kazue Yokoyama^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}, Lei Zang^{A)}, Xiangyu Zhou^{A)}, Ryo Ichimiya^{A)}, Daisuke Satoh^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI)

^{B)} Tokyo Institute of Technology

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. The positron beam will be injected to damping ring for emittance reduction. To obtain positron beam energy of 1.1 GeV at damping ring, primary electron beam energy will be reduced. In addition, charge of positron is 4 nC. Thus positron capture section is very important upgrade point. Some alignment technique has been studied since it is essential for emittance preservation.

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。表 1 に求められるビームパラメータを示す。図 1 が KEK 入射器の全体図である。ビームは電子陽電子ともに 2 バンチ運転が求められる。

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

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リニアックで直接作り出す必要がある。電子ビームに関しては、大幅な低エミッタンス化を実現するための電子銃の開発が重要になる。また、陽電子ビームにおいては、4 GeV の入射エネルギーを確保するため、KEKB の構成よりも上流側にターゲットを移動させる。すなわち、プライマリー電子ビームのエネルギーが下がってしまうにもかかわらず、電荷量を 4 倍にしなければいけない。このため陽電子収集効率を向上させることが重要になる。さらに、低エミッタンスを維持するためのアライメント技術の構築、ビーム診断設備(BPM, Deflector)の開発が求められている。

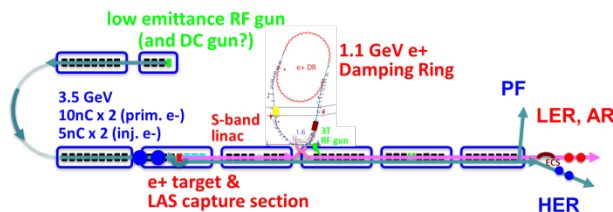


Figure 1: SuperKEKB injector layout

[#] takuya.natsui@kek.jp

2. 電子ビーム

2.1 RF gun 開発

入射器の電子ビームには 3 つの役割があり、第一は、①SuperKEKB HER への低エミッタンス、高電荷バンチの供給、第二に②SuperKEKB LER への陽電子ビーム生成用、高電荷バンチの供給、第三に、③放射光リング (PF や AR) への電子供給である。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、熱カソード DC gun で①に要求される低エミッタンス電子ビームを供給す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 の開発が行われている。②に関しては RF gun を使用するか DC gun で行うかは今後判断する予定である。

フォトカソード RF gun は低エミッタンスビーム生成に有用であり S-band 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に使用されてきた^[1]。しかし、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。そうすると、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 RF gun の中でビームサイズが大きくなるような新しい空洞を持つ RF gun の設計を進めた。昨年度までは、Disk and Washer (DAW) 型の空洞をもつ RF gun を 3-2 セクターで試験運転を行い約 5 nC の電子ビーム発生を達成している^[2]。

この 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 Ir₃Ce 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が、DAW 型 RF gun は理科大の熱カソード RF gun を急遽フォトカソードに改良したものにすぎず、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 の開発を行なっている。これは、新しい加速方式である擬似進行波型 RF gun と呼んでいるものである^[3]。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 DAW 方式で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 2 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 つの定在波が等価的に進行波に見

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加速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ような設計を行った。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。現在は図 3 に示すように機械設計を終え、製作はロウ付けの最終段階まで来ており、秋のコミッションングに使用することを目指している。

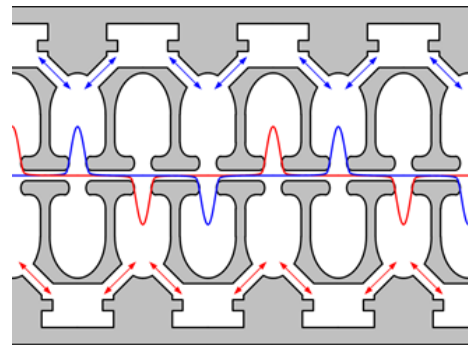


Figure 2: Quasi traveling wave side coupled cavities

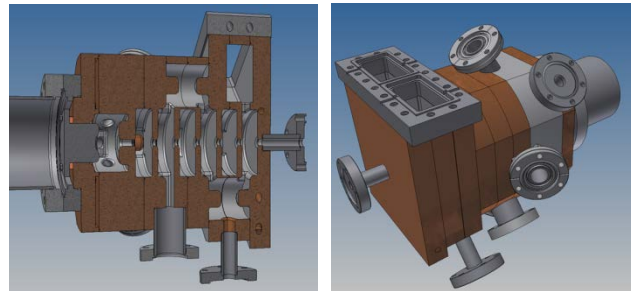


Figure 3: Mechanical design of quasi traveling wave side coupled cavity RF gun

2.2 RF gun 用レーザ開発

3-2 セクターの DAW 型 RF gun の試験のために、Nd:YAG の固体レーザの開発を行った。これは、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 (2856/5) で同期をとっている。

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 4 に示す。

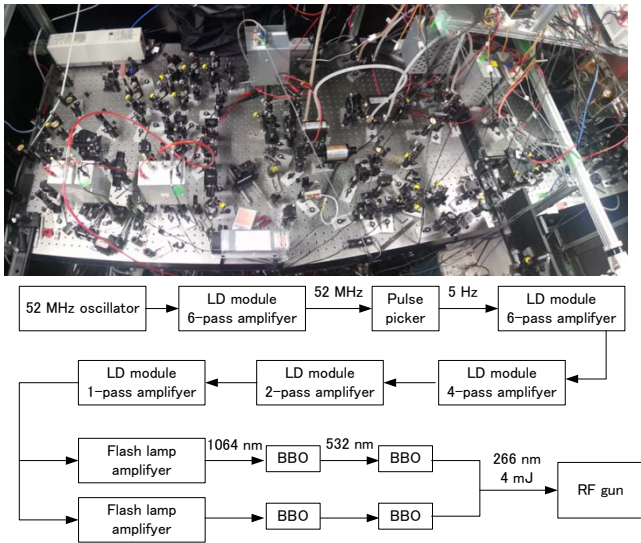


Figure 4: Nd:YAG laser system

また、今年度からは SuperKEKB の入射に使用する A-1 セクターでの試験のために Yb-doped レーザーシステムの運転を開始している^[4]。近年、帯域が広く周波数領域で制御できるイッテルビウム (Ytterbium:Yb) 系レーザーが注目されている。Yb 系は 3 準位系で、上準位寿命が長く、エネルギー蓄積効果が大きい。Nd 系に比べ、LD 直接励起でも、励起状態吸収が生じない。吸収波長が $915\text{nm} \cdot 940 \cdot 976\text{nm}$ であり、吸収帯域が広く、蛍光帯域が $1020\text{--}1120\text{nm}$ であり、広い波長で増幅させることができるので超短パルスレーザーを造りやすい。また吸収波長と増幅波長の差が少ないため、非放射緩和過程によるエネルギーの損失が低い。さらに、熱エネルギーの放出が低いので、冷却装置が簡単という利点がある。帯域が非常に広いということは時間方向のパルス整形を行う上で大きな利点になる。極短パルスからグレーティングを使用してパルス伸張を行う過程でパルス長の制御のみならずパルス内の時間方向における整形も可能となる。この時間方向パルス整形は縦方向ウェークの補償に有効である^[5]。

図 5 に現在の Yb レーザーシステムの概要を示す。発振器は 52 MHz のファイバー発振器である。ファイバーを使った発振器は固体結晶を使ったものより位相の安定度が高くフォトカソード RF gun 用に適している。発振器の中でのパルスは数百 fsec であるので、グレーティングペアを使って 30 psec にパルス伸張した後、ファイバーアンプにより増幅する。その後パルスを切り出し Thin disk を使った再生増幅器とマルチパスアンプで数十 mJ までパルスを増幅し、BBO 結晶により 4 倍波を生成して RF gun にうちこんでいる。

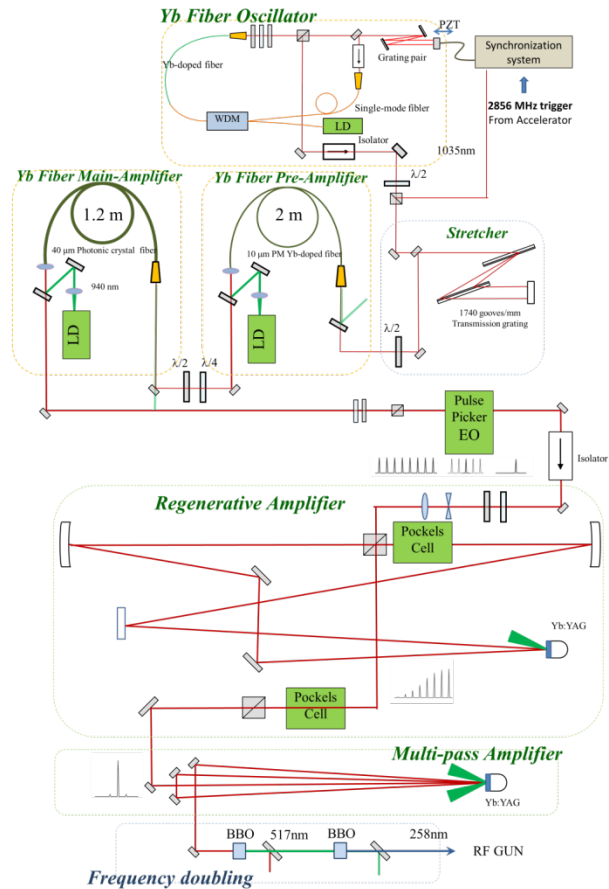


Figure 5: Yb laser system

3. 陽電子ビーム

3.1 フラックスコンセントレータ

SuperKEKB 計画に向けて陽電子ビーム強度増強の方策の 1 つとして陽電子収集効率を向上させるために、これまでの磁場強度 2 T の空芯型パルスコイルに代わるものとして、4 T 級のフラックスコンセントレータ型パルスソレノイドの開発を進めている^[6]。SLAC 及び IHEP で使用されたフラックスコンセントレータの設計に基づいて試作機を製作した。また Linac で使用されているクライストロンモジュレータ電源を改造した試験用パルス電源を用いて、テストスタンドで磁場分布測定や大電流通電試験を行っている。実用運転時に想定される最大電流値 12 kA に対して、テストスタンドでは現在のパルス電源で最大使用可能な 6 kA まで到達しており放電の問題等も特になく順調に通電試験が進んでいる。これと平行してビーム運転用の実用機の製作を進めており、今年 10 月よりテストスタンドで試験を行った後にビームラインに設置して 12 月からの陽電子ビームコミッションで使用する予定である。図 6 にフラックスコンセントレータの写真を示す。

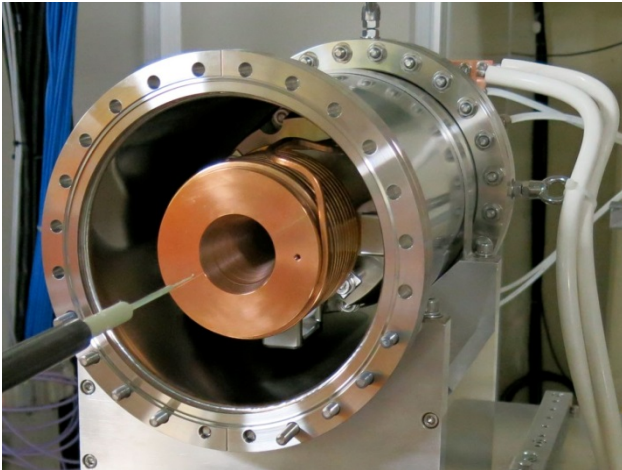


Figure 6: Flux concentrator

3.2 LASによる陽電子収集

フラックスコンセントレータの下流ではLAS (Large aperture S-band linac)により陽電子を収集する。PCS (Positron Capture Section)ではLASは2 m管を計6本使う。ダンピングリングで要求されるエネルギー幅の中にビームを収集する目的で最上流の2 m管は減速位相にビーム乗せる。上流2本のLASでは電力を上げ電界強度は14 MeV/mとすることでサテライトバンチの抑制を行う。下流の4本は10 MeV/mとする。このようなLASのセクションで120 MeVまでの加速を行う。

4. エミッタンス保存

SuperKEKBで要求されているビームエミッタンスを保存するために、入射器の各コンポーネントの設置精度としてローカルで $\sigma = 0.1 \text{ mm}$ 、グローバルに $\sigma = 0.3 \text{ mm}$ が要求されている。入射器は最大直線部で500 mあり、これまでは全体を通しての高精度のアライメントする方法が確立されていなかった。

高精度レーザーアライメントシステムの開発を続けていたが、入射器の最大直線部のアライメントに必要な500m長の長基線レーザーの安定化に成功した。アライメントの基準となる長基線にはHe-Neレーザー(10mW)を用いた。長基線を高安定化させるために新たなレーザー光学系を構築し、さらに計算機制御によるフィードバックを導入することによりレーザーのポインティング安定性を飛躍的に高めた。この結果、500m直線部の終端におけるレーザーの位置安定性は、 $\pm 40 \mu\text{m}$ (1σ)レベルとなり入射器に要求されるアライメント精度を十分満足できることを確認した^[7]。

また、ローカルなアライメントとしてはレーザートラッカーを使ったアライメントも行なっている。水管傾斜計を使った上下方向の位置測定も検討している。

入射器では低エミッタンスビーム輸送のため、ビームの位置測定精度 $10 \mu\text{m}$ 以下を目標としている。入射器のBPMはすべてストリップライン型であるが、現在使用しているオシロスコープを用いた信号の読み出しシステムの位置測定精度は $50 \mu\text{m}$ 程度であり、要求を満たしていない。そこで新しくBPMの読み出しシステムの開発を行っている。帯域制限フィルタを基板としたアンダーサンプリング方式を採用したシステムを開発し、実際にビームを使った測定で分解能 $7 \mu\text{m}$ を達成した^[8]。また、これとは別に2バンチ運転(96 ns間隔)対応とBPMの各電極にパルスを与えることが可能な校正パルス発生器を備えた読み出しシステムの開発も行っている。開発の途中段階ではあるが、パルス信号を用いた測定で $10 \mu\text{m}$ の分解能を達成しており、分解能向上のための開発を継続している^[9]。

また、ストリークカメラによるバンチ長計測やディフレクターによるスライスビームサイズの測定も計画している^[10]。



Figure 7: Schedule

5. スケジュール

2014年度末のメインリングへの入射試験に向けて入射器では、本年度秋から小電流で、さらに来年度秋には本格的なコミッショニングを行う。まず、9月からは電子ビーム、11月からは陽電子ビームのコミッショニングを行う。また、ダンピングリングを含めたビーム入射は2015年度の初めに予定している。その他の予定を含めた全体スケジュールを図7に示す。

参考文献

- [1] D. T. Palmer et al., "Microwave Measurements of the BNL/SLAC/UCLA 1.6 cell Photocathode RF Gun", SLAC-PUB-95-6799
- [2] 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
- [3] T. Natsui et al., "Quasi Traveling Wave Side Couple RF Gun for SuperKEKB" Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, May, 2013
- [4] X. Zhou, et al., "SuperKEKB に向けた DAW 型 RF 電子銃用 Yb 系ハイブリッドレーザーシステム", in these proceedings.
- [5] M. Yoshida et al., "SuperKEKB 入射器用低エミッタンス・高電荷電子ビームに向けたバンチ内時間構造制御", in these proceedings.
- [6] T. Kamitani, "Positron Source", 18th KEKB Accelerator Review Committee, Tsukuba, Japan, March 4-6, 2013. <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2013/>
- [7] T. Suwada et al., "KEKB入射器における高精度レーザーアライメントのための500m長レーザー長基線の伝送及び安定性特性", in these proceedings.
- [8] M. Satoh, "SuperKEKB入射器へ向けたBPMデータ収集系アップグレード (II)", in these proceedings
- [9] R. Ichimiya et al., "SuperKEKB に向けた電子・陽電子入射器 Linac 用ビーム位置モニターの読み出しシステム開発", in these proceedings.
- [10] J. Wang, "X-Band Deflectors Development at SLAC", X-Band RF Structure and Beam Dynamics Workshop - 44th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, December 2008