

SuperKEKB 陽電子源の初期コミッショニングの現状

INITIAL COMMISSIONING OF SUPERKEKB POSITRON SOURCE

紙谷 琢哉^{*A)}、明本 光生^{A)}、荒川 大^{A)}、荒木田 是夫^{A)}、飯田 直子^{A)}、池田 光男^{A)}、一宮 亮^{A)}、岩瀬 広^{A)}、
榎本 収志^{A)}、大沢 哲^{A)}、大西 幸喜^{A)}、岡田 尚起^{A)}、小川 雄二郎^{A)}、柿原 和久^{A)}、風間 慎吾^{A)}、梶 裕志^{A)}、
片桐 広明^{A)}、門倉 英一^{A)}、紙谷 琢哉^{A)}、菊池 光男^{A)}、Qiu Feng^{A)}、倉品 美帆^{A)}、小磯 晴代^{A)}、佐藤 政則^{A)}、
臧 磊^{A)}、設楽 哲夫^{A)}、周 翔宇^{A)}、白川 明広^{A)}、末武 聖明^{A)}、杉本 寛^{A)}、諏訪田 剛^{A)}、高富 俊和^{A)}、
竹中 たてる^{A)}、田中 窓香^{A)}、多和田 正文^{A)}、張 叡^{A)}、中尾 克巳^{A)}、中島 啓光^{A)}、夏井 拓也^{A)}、肥後 寿泰^{A)}、
福田 茂樹^{A)}、船越 義裕^{A)}、古川 和朗^{A)}、本間 博幸^{A)}、松下 英樹^{A)}、松本 修二^{A)}、松本 利広^{A)}、三浦 孝子^{A)}、
三川 勝彦^{A)}、道園 真一郎^{A)}、三増 俊弘^{A)}、宮原 房史^{A)}、森 隆志^{A)}、森田 昭夫^{A)}、矢野 喜治^{A)}、横山 和枝^{A)}、
吉田 光宏^{A)}、佐藤 大輔^{B)}

Takuya Kamitani^{*A)}、Mitsuo Akemoto^{A)}、Dai Arakawa^{A)}、Yoshio Arakida^{A)}、Naoko Iida^{A)}、Mitsuo Ikeda^{A)}、
Ryo Ichimiya^{A)}、Hiroshi Iwase^{A)}、Atsushi Enomoto^{A)}、Satoshi Ohsawa^{A)}、Yukiyo Ohnishi^{A)}、Naoki Okada^{A)}、
Yujiro Ogawa^{A)}、Kazuhisa Kakihara^{A)}、Shingo Kazama^{A)}、Hiroshi Kaji^{A)}、Hiroaki Katagiri^{A)}、Eiichi Kadokura^{A)}、
Mitsuo Kikuchi^{A)}、Feng Qiu^{A)}、Miho Kurashina^{A)}、Haruyo Koiso^{A)}、Masanori Satoh^{A)}、Lei Zang^{A)}、Tetsuo Shidara^{A)}、
Xiangyu Zhou^{A)}、Akihiro Shirakawa^{A)}、Masaaki Suetake^{A)}、Hiroshi Sugimoto^{A)}、Tsuyoshi Suwada^{A)}、
Toshikazu Takatomi^{A)}、Tateru Takenaka^{A)}、Madoka Tanaka^{A)}、Masafumi Tawada^{A)}、Rui Zhang^{A)}、Katsumi Nakao^{A)}、
Hiromitsu Nakajima^{A)}、Takuya Natsui^{A)}、Toshiyasu Higo^{A)}、Shigeki Fukuda^{A)}、Yoshihiro Funakoshi^{A)}、
Kazuro Furukawa^{A)}、Hiroyuki Honma^{A)}、Hideki Matsushita^{A)}、Shuji Matsumoto^{A)}、Toshihiro Matsumoto^{A)}、
Takako Miura^{A)}、Katsuhiko Mikawa^{A)}、Shinichiro Michizono^{A)}、Toshihiro Mimashi^{A)}、Fusashi Miyahara^{A)}、
Takashi Mori^{A)}、Akio Morita^{A)}、Yoshiharu Yano^{A)}、Kazue Yokoyama^{A)}、Mitsuhiro Yoshida^{A)}、Daisuke Satoh^{B)}

^{A)}KEK/SOKENDAI,

^{B)}TITECH

Abstract

KEK electron/positron injector linac is under the upgrade for SuperKEKB. A new positron production target, a flux concentrator for positron focusing, a 15m-long positron capture section composed of six large-aperture S-band accelerating structures inside DC solenoid modules have been installed in the beam line. A rearrangement of the quadrupole beam focusing system in the downstream 64-m region of the accelerator modules has been completed. An initial positron beam commissioning has started. This paper reports on the present status of the positron related upgrade and the preliminary results of the positron beam commissioning.

1. はじめに

KEK の電子陽電子入射用線形加速器では SuperKEKB に向けた増強を進めている。陽電子ビーム増強に関連する改造を進めてきた^{[1][2]}が、2014年4月に陽電子生成部がビームラインに設置された。それに続いて陽電子ビームのコミッショニングを開始し、改造後初めての陽電子の観測に至った。本論文ではこの陽電子ビームの初期コミッショニングの結果について報告する。

SuperKEKB で想定されるような高いレミノシティを達成するためには、陽電子に関してはこれまでよりも格段に小さいエミッタンス ($\gamma\epsilon_x \leq 100\mu\text{m}$, $\gamma\epsilon_y \leq 10\mu\text{m}$) を持ちなおかつ4倍高い電荷量 (4nC/bunch) \times (2bunch) のビームを入射することを要求されている。低エミッタンス化は基本的にはビームエネルギー 1.1GeV のダンピングリングを導入することにより達成されるが、これに適合するように入射加速器の陽電子生成部の位置変更を含めたビームラインレイアウトの大きな変更が必要となった。なお、ダンピングリングは現在建設が進行中であるがその詳細についてはこの論文では記述しない。

また陽電子ビーム強度を増加させるためには、一次電子ビームのエネルギーや強度を上げることはコスト的にまた技術的に困難であることから、標的で生成された陽電子の収集効率を向上させる方針を取ることにした。まず既存のパルスコイルよりも2倍近く強い3.5T (12kA 通電時) のソレノイド磁場を作るフラックスコンセントレータ (FC) を導入する。すぐ外側に設置されるブリッジコイルの磁場 (1.0T) との重ね合わせで標的直後で実効的に4.5Tの収束磁場が生成される。これに続く陽電子捕獲部については横方向位相空間アクセプタンスを2倍に増やすために大口径型 S-band(LAS) 加速管 (開口直径 30mm) を導入し、また加速領域長を2倍にして下流へのビーム透過率を向上される。捕獲部直後には電子陽電子ビームセパレータを設置して、陽電子ビームの正確な位置や電荷量の測定妨げとなる二次電子を取り除く。それより下流の加速ユニットでは四極電磁石系によるビーム収束を行うが、必要とされるアクセプタンスを確保できるように約64m長の領域にわたって四極電磁石を増設してビームラインの再配置を行った。次の節ではこれらのコンポーネントの現状について述べる。

* takuya.kamitani@kek.jp

2. 陽電子関連コンポーネントの現状

2.1 一次電子ビーム

SuperKEKB で要求されるような低エミッタンス ($\gamma\epsilon_{x,y} \leq 20\mu\text{m}$) で高い電荷量 (5nC/bunch) × (2bunch) の電子ビームを線形加速器から直接入射するためにレーザーを用いた光カソード RF 電子銃の開発を進めている [3][4]。陽電子生成のための一次電子ビームはこれほど低エミッタンスである必要はないがより高い電荷量 (10nC/bunch) が要求される。このため高電荷運転用の2台目の光カソード RF 電子銃についても開発を進めており、これら2つの RF 電子銃からの一次電子ビームと低エミッタンスビームとパルス毎にうち分けて入射することを念頭においている。一方で一次電子ビームについてはこれまで使用されていた熱電子銃とサブハーモニックバンチャー等を用いた RF バンチングシステムによる前段入射部を用いる可能性もあり、どちらの方式を取るかについては RF 電子銃の性能向上の成果に基づいて判断する予定である。2014年6月に行われた陽電子生成のビームコミッションの時点では、RF 電子銃のレーザーシステムもまだ初期コミッションの段階であるため電子ビームの電荷量はまだ低いが電子銃直後で約 1nC/bunch、陽電子生成標的直前で 0.6nC/bunch が得られ、これを用いて陽電子ビームのコミッションを行った。標的に照射される一次電子ビームのエネルギーは現状では約 3.1GeV であるが最終的には 3.3GeV になる予定である。

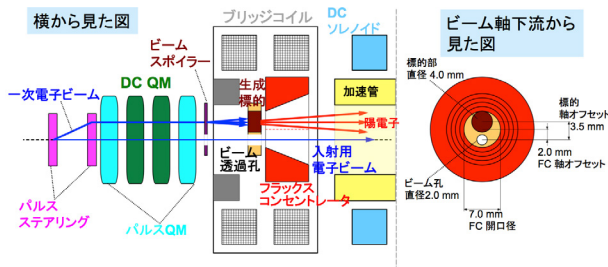


Figure 1: 生成標的周辺レイアウト概念図。

2.2 陽電子生成標的

陽電子生成標的には直径 3mm、長さ 14mm ($4.0 X_0$) のタングステン銅の胴体に HIP 処理で埋め込んだものを使用する。またこれはビームラインからの取り出し機構は備えておらず固定式であるが、陽電子生成と電子入射をパルスごとに電子ビーム軌道を振って切り替えるためにタングステン部の横に直径 2mm のビーム通過用孔を空けている。RF 電子銃からの入射電子ビームの低いエミッタンスを損なわないことを重視して入射電子軌道、つまりビーム用孔がビームライン中心軸上になるように配置している。そのためタングステン標的はその中心がビームライン軸から 3.5mm ずれたところに置かれ一次電子ビームもずれた軌道を通ることになる (Fig.1 参照)。なおこの図は位置関係を示す概念図であり、長さのスケールは実物とは異なっている。これにより陽電子収量は標的を軸上に置いた場合に比べて 20%程度悪化するがやむを得ない。高い電荷量の電子ビームを標的上で小さいスポットにしぼって照射する

と標的内の局所的なエネルギー密度が高くなり、標的の疲労破壊につながる恐れがあるので、これを防ぐために標的の約 3m 上流にビームスポイラと呼ばれる散乱板 (酸化アルミのスクリーンと純アルミのフォイルで実効的な物質量は $0.05 X_0$) を入れてわざとスポットサイズを $\sigma_x \geq 0.7\text{mm}$ 、 $\sigma_y \geq 0.7\text{mm}$ になるように広げることにした [5][6]。またスポイラについても入射電子軌道上には直径 3mm の孔を空けてある。今回の初期コミッションでは一次電子ビームの電荷量が非常に低く標的破壊の恐れがないことを考慮した上で、陽電子収量を少しでも増やすために、あえてスポイラ上の孔を通した後で軌道を曲げて標的に当てて小さいスポットサイズで陽電子を生成している。

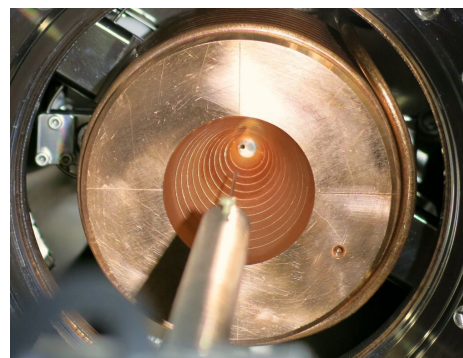


Figure 2: フラックスコンセントレータ。

2.3 フラックスコンセントレータ：FC

標的直後で陽電子を収束するために SLAC、IHEP で使用されているものと同様のフラックスコンセントレータ型パルスソレノイドを使用する [8][9]。誘導電流により強い磁場を作るための FC 本体は直径 100mm、長さ 100mm の円筒形の銅ブロックに円錐形の穴をあけ、さらにスパイラル状にスリットを切ったものであるが、標的直後の磁場の強い部分の開口径は直径 7mm と狭い (Fig.2 参照)。そこでこの範囲に標的 (直径 4.0mm) とビーム孔 (直径 2.0mm) を収めた上でビーム孔はビームライン中心軸上に来るようにするためには FC 中心軸はビームライン軸から 2.0mm ずらして設置することが必要である。

これまでに異なった種類の銅材による試験用プロトタイプを 2 基製作し、クライストロンモジュレータを改造した仮設パルス電源を用いてピーク電流 6kA までの通電試験を行い、基本的な問題が無い事を確認した。その上でビームラインに設置するための実機仕様の 3 号機を製作した。陽電子ビーム生成の運転を長期間行くと FC を含めた生成標的周辺のコンポーネントは高い残留放射能を持つので、標的や FC の交換作業がなるべく短い時間でできるように周辺機器と一体化した構造 (アセンブリ) として設計し、アセンブリ丸ごとの設置、撤去を行えるように配慮した。このアセンブリの中心部には FC と生成標的及びリターンヨークヘッドが真空チャンバーに収められて設置される。その周囲にはブリッジコイル、ステアリングコイルが設置されその外側を円筒状のリターンヨークが取り巻いている。これらが可搬性を考慮した架台上に設置されている。真空チェン

バーの排気ポートを経て2基のイオンポンプが架台下方に取り付けられており、これらもアセンブリの一部として一体で取り外し出来る構造となっている。またFCのパルス電力線はフォークプラグを用いた銅バスバーを介して接続されており短時間で接続を外すことが出来る。またそれ以外の電力線、インターロック信号線、冷却水配管に関しては架台の横に取り付けられたマルチカップリングシステムを介して配線、配管されており、これにより複数の接続部分を短時間で一度に付け外しできるようにになっている。このFC 3号機アセンブリをまず地上のテストスタンドで試験を行ったが、その際パルス電流と伝える同軸ケーブルとスナバー回路との接続方法が適切でなく回路筐体の金属部分との離隔距離が十分でなかったためにケーブルの焼損事故を起してしまった。この反省に立って同軸ケーブルの接続部分について安全性を重視した設計変更を行ったが、それに伴いケーブルの末端処理部分に耐放射線性の低い材料を使わざるを得なくなった。そこで接続部分は放射線レベルの低いところまでFCから離れた場所に置き、その間は距離60mm離れた2枚の平行銅板線(幅240mm、長さ2m)のでバスバーへつなぐようにした。このように改良されたパルス電力線を含めた3号機アセンブリの試験をテストスタンドで行って安全性を確認した上でFC 3号機を加速器トンネル内のビームラインに設置した。

通電開始時には真空度の様子を見ながら徐々に電圧を上げていくコンディショニング過程が必要であるが、ブリッジコイルによる磁場をFCにかけた状態ではガス放出が起きる頻度が高くなるような影響が見られたため、電圧と磁場強度を2次元的にスキャンするような形でコンディショニングを数日間行った。陽電子ビーム運転中は一日に数度の頻度で 1.0×10^{-4} Pa以上まで真空度が悪化するガス放出現象が起きた。これは標的へのビーム照射と発生頻度の増加には関係があるように思われるが、まだ定量的には明らかではない。なおFCの運転電流仕様値は12kAであるが現在の仮設電源では6kAまでしか出せない。2014年内のコミショニングはこの仮設電源で行うが、現在実機用の12kAパルス電源の準備を進めるとともにFC 3号機とほぼ共通な設計の4号機を製作中である。4号機完成後にまずテストスタンドで実機用の電源により12kAまで試験を行い、問題が無ければ2015年春以降はビームラインに設置したFC 3号機を12kA電源につないでビームコミショニングを進めていく予定である。

2.4 陽電子捕獲部用加速管とDCソレノイド

陽電子捕獲部では6本の大口径型(Large Aperture) S-band (LAS) 加速管(開口直径30mm、長さ2.2m)を用いるが^[7]。これらの加速管はDCソレノイドによる磁場の中に置かれるので高電界での運転では放電を起しやすくなる可能性がある。またこれまでの陽電子捕獲部の通常型S-band加速管はSLEDによるパワー増倍は用いないでフラットなRFパルスで運転していたが、LAS加速管はシャントインピーダンスが低いいためSLEDを用いることが重要になるが電界強度のピーク値としてはかなり高くなるので放電に関してはさらに配慮が必要となる。コンディショニングにあたってはソレノイド磁場強度にも依存して状況が変わるので電界強度、RFパル

ス幅、磁場強度、SLEDのチューン状態などのパラメータを変えながら進めていく必要があるので時間がかかっている。陽電子捕獲部にある6本の加速管のうち上流側の2本は加速ユニット番号1-5に、残りの4本はユニット番号1-6に属しておりそれぞれが個別のクライストロンに対応している。ユニット1-6は2013年夏に設置されその秋以降長時間にわたってコンディショニングが行われた。今回のビームコミショニング時にはSLEDチューン状態で約12 MV/mの加速電界値に到達した。一方ユニット1-5は2014年3月に設置された後まだコンディショニング時間が十分でないため、コミショニング時にはSLEDデチューン状態で10 MV/mの電界強度であった。こちらについては2014年秋からの運転でコミショニングを進めることでより高い電界強度に到達できると期待される。DCソレノイドは加速管の外側をおおう形で設置されるが1台の長さが約430mmのモジュールを並べた構成となっている。ユニット1-5に設置されている10台は内直径260mm、外直径590mmのtype-Lであり、ユニット1-6に設置されている19台は内直径200mm、外直径590mmのtype-Sである。これらは単位長さあたりの導線巻き数が異なるため、ユニット1-5の領域は仕様値である650A通電時に0.3~0.4Tの磁場強度、ユニット1-6では0.4~0.5Tとなる。今回のコミショニング時には電力供給系の増強がまだ完成しておらず、これら29台のソレノイドは全て仕様値の約半分の370Aまでしか通電できなかったため陽電子捕獲効率も本来より小さい状態であった。2014年10月以降は定格の650A通電が可能な状態になる。

2.5 電子陽電子セパレータ

陽電子捕獲部のソレノイド磁場による収束系は広いアクセプタンスを持ち、陽電子のみならず標的で生成される二次電子もほぼ同じ程度捕まえてしまう。これらが下流のQマグネットによる長距離収束系に入った後、ビーム軌道を測定するためのストリップライン型ビーム位置モニタには近い時間間隔で通過する陽電子ビームと電子ビームによる信号が混ざり合って打ち消すために、正しいビーム位置情報が得られない。これを防ぐために、捕獲部直後のオプティクスマッチング部の中に偏向電磁石4台でシケインを作って電子と陽電子を横方向に分離し、二次電子の通り道の方にタンゲステン70%+銅30%の合金製のビームストップブロックを置いて陽電子のみ通す(Fig.3)。なお入射用電子はエネルギーが高いのでシケインの中心近くを通過するが、このブロックはこれについては妨げないような位置に置く。捕獲部の陽電子収量はこのセパレータのすぐ下流にあるビーム位置モニタで得られた電荷量から算出している。

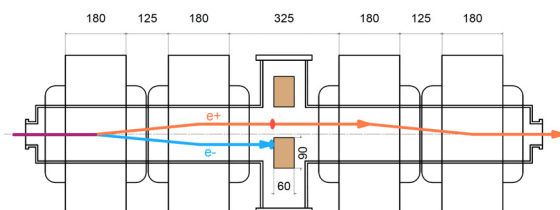


Figure 3: 電子陽電子ビームセパレータ。

3. 陽電子ビームコミッショニング

3.1 SuperKEKB 用陽電子ビームの初観測

2014年5月上旬にビームラインにビームスポイラ、陽電子生成標的、フラックスコンцентрレータ、電子陽電子ビームセパレータ、標的直前のビームプロファイルモニタやビーム位置モニタなどの陽電子の生成及び観測に関わるコンポーネントが設置され、陽電子ビームコミッショニングが開始された。まず陽電子捕獲部の加速管とFCのコンディショニングが進められ、平行して一次電子ビームとして使用するRF電子銃からのビームの調整が行われた。レーザーの調整はまだ初期段階であったが、ひとまず電子銃直後で1.0nC/bunch、標的直前で0.2nC/bunch程度の電荷量が得られたので陽電子ビームを探し始めた。最初は、標的横のビーム通過孔から一次電子の一部分が漏れていたものがスクリーンモニタに映っていたものを陽電子と見間違えるという失敗もあったが、捕獲部出口で陽電子らしきビームスポットが見え捕獲部加速管のRF位相を変化させた時に最大加速位相付近と最大減速位相付近でスポットが最も明るくなるという特徴が捉えられた。しかし決め手となるのは正極性のビーム電荷を観測することであり、このためには電子陽電子ビームセパレータを使用して標的からの二次粒子の電子の成分を除去する必要がある。ビームセパレータをオンにしてビーム位置モニタからの誘起電流波形をオシロスコープで直接監視しながらRF位相などのパラメータを調整すると正極性の信号が現れて確かに陽電子ビームであることが確認された (Fig.4)。ビームセパレータ直後での陽電子ビーム電荷量は0.02nC/bunchであり信号のバックグラウンドノイズレベルよりわずかに高い程度の信号強度であった。陽電子収量 (得られた陽電子電荷量の一次電子の電荷量に対する比) は10%程度であった。その後の調整によ

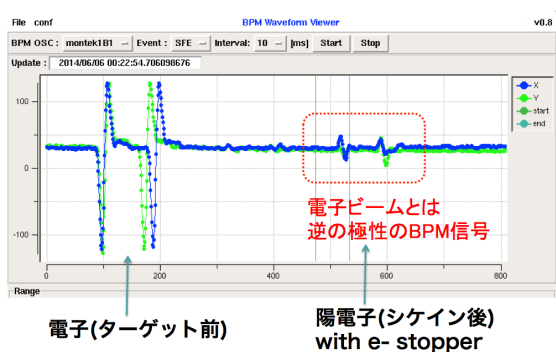


Figure 4: 観測された陽電子ビームの信号。

り標的直前の一次電子電荷量は0.6nC/bunchまで増加した。そこで陽電子ビームに関して標的へのビーム入射位置、標的上でのビームスポット収束、捕獲部のRF位相、ビームに対するFCパルス電流のタイミングなどの最適化、また捕獲部加速管のコンディショニングの進行による電界強度の向上、ビームスポイラをわざと迂回させて標的上でのビームスポットが小さい状態にしたことなどにより、ビームセパレータ直後での陽電子ビーム電荷量は0.18nC/bunchとなり陽電子収量は30%まで向上した。捕獲部以降のビーム透過量についてもQマ

グネットの収束の強さやビーム軌道について調整を進めた結果、線形加速器からダンピングリングへ向かう分岐点である28.4部まで0.12nC/bunchの陽電子ビームを通すことができ、この地点までのビーム透過率を含めた陽電子収量は20%となった。

3.2 陽電子収量のパラメータ依存性

陽電子を捕獲するには加速電界を用いるか減速電界を用いるか2通りのやり方がある。Fig.5に捕獲部のRF位相を変化させた時の陽電子収量の依存性を示す。なおこの時ユニット15 (捕獲部の最初の2本の加速管)とユニット16 (残りの4本の加速管)のビームに対する位相が同じになるように平行して変化させる。位相値の定義としては仮想的に一次電子ビームが標的に当たらずそのまま通り抜けてきた時に、この電子に対して最大加速位相となる値を90度としている。この図のデータでは70度付近と200度付近に陽電子収量の極大がある。200度付近では標的から出た陽電子がそのまま最大加速していくように捕獲される位相である。これに対して70度付近では陽電子は減速されていく、エネルギーが1MeV以下程度になると、光速度で進む進行波加速電界に対して遅れを生じ相対的な位相がずれていき、最終的には再び加速位相に捕らえられて加速していく。この最初は減速捕獲を用いると最終的なバンチの長さが短くエネルギー分布のすその広がりが小さくなるというメリットがあるのでSuperKEKBではこちらの方法を用いる予定である。次には捕獲部の最初の2本の加速

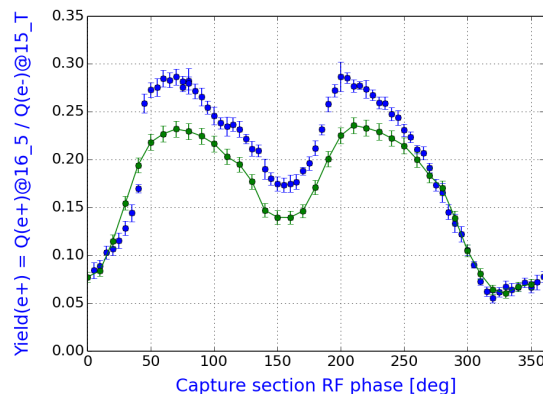


Figure 5: 捕獲部RF位相に対する陽電子収量の変化。

管の電界強度を変化させてみる。Fig.6にクライストロンの電圧値を変化させたいくつかの場合のそれぞれに対する陽電子収量の位相依存性を示す。加速電界が下がるほど陽電子収量の極大値も下がり、最適位相もずれていくように見える。但し、位相についてはクライストロンの電圧を変えると出力されるマイクロ波の位相が変わっていくためにこのプロットではそのように見えるだけで、ビームに対する相対的な位相はほぼ一定であると考えられる。今後ユニット15のコンディショニングがさらに進んで電界が高くなれば陽電子収量もさらに向上すると思われる。次にFCの電流値に対する陽電子収量の変化をFig.7に示す。FC電流値がゼロの場合でも有限の収量があるが、これはブリッジコイルによるDC的なソレノイド磁場(1.0T)が残っているためと思わ

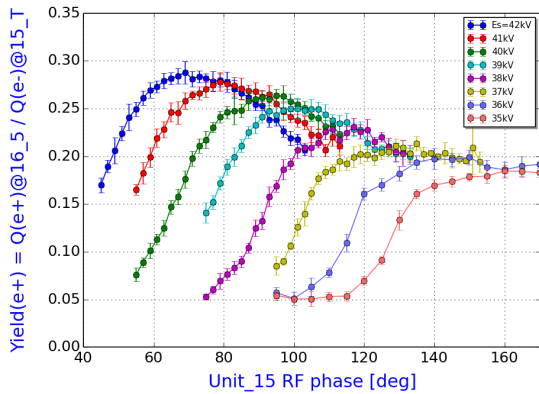


Figure 6: 捕獲部電界、位相に対する陽電子収量の変化。

れる。ちなみに今回達成したの最大電流値 6.42kA での FC による磁場強度は約 1.9T であり、ブリッジコイルの寄与も含めると実効的な収束磁場は 2.9T となる。なお、今回の最大電流値は使用している仮設パルス電源の仕様により制約されているが、現在準備中の実機電源では 12kA まで通電することができるので陽電子収量もさらに向上すると期待される。次にブリッジコイルの電

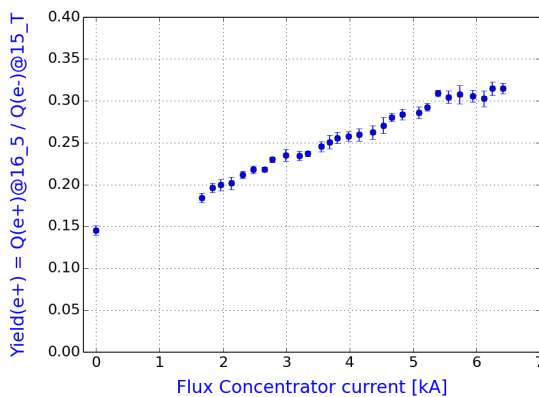


Figure 7: FC 電流値に対する陽電子収量の変化。

流値に対する陽電子収量の変化を Fig.8 に示す。こちらの電流値がゼロになった時の影響は FC よりも大きい。これは FC の強い磁場と下流の DC ソレノイド系との間をつないでいるブリッジコイルの磁場が無くなると磁場のギャップができてしまいそこで陽電子がロスするためと考えられる。また後続の DC ソレノイド系は今回の運転では電力供給系の制約により仕様値の半分程度の電流しかかけられなかったが、2014 年秋からの運転では仕様値まで通電できるようになるので陽電子収量がさらに向上すると期待される。

4. まとめ

SuperKEKB 用の陽電子生成用のコンポーネントを 2014 年 4 月にビームラインに設置し、陽電子ビームの初期コミッショニングを開始した。改造後初めての陽電子を観測した。ビーム調整の結果として、標的に照射す

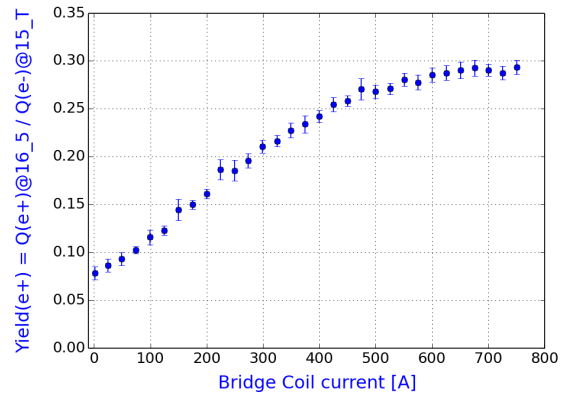


Figure 8: ブリッジコイル電流値に対する陽電子収量の変化。

る一次電子の電荷量 0.6nC/bunch に対して、陽電子捕獲部直後の陽電子電荷量は 0.18nC/bunch が得られ、陽電子収量は 30% となった。またダンピングリング分岐点までビームを通したところでの電荷量と収量はそれぞれ 0.12nC/bunch、20% であった。今回は仕様値の半分の電流で使用しているフラックスコンцентрレータや DC ソレノイド系が本来の電流となり陽電子捕獲部前半の電界強度もより高くなる予定なので、陽電子収量も向上することが期待される。

参考文献

- [1] T. Kamitani *et al.*, THPS069 "SuperKEKB に向けた陽電子源増強の現状", 第 9 回日本加速器学会年会、大阪、2012.
- [2] T. Kamitani *et al.*, "SuperKEKB positron source construction status", MORPI004, IPAC'14, Dresden, Germany, June 2014.
- [3] T. Natsui *et al.*, "Quasi-traveling Wave Side Couple RF Gun Commissioning for SuperKEKB" MORPI033, IPAC'14, Dresden, Germany, June 2014.
- [4] T. Natsui *et al.*, SUP003 "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", 第 11 回日本加速器学会年会、青森、2014.
- [5] L. Zang *et al.*, "SuperKEKB Positron Source Target Protection Scheme", IPAC'13, Shanghai, China, May 2013, MOPFI017.
- [6] L. Zang *et al.*, "Design, Manufacture and Operation of the Beam Spoiler for Positron Target Protection", IPAC'14, Dresden, Germany, June 2014, MOPRI002.
- [7] S. Matsumoto, SAP045 "KEK 電子陽電子入射器の大口径 S バンド加速管", 第 11 回日本加速器学会年会、青森、2014.
- [8] L. Zang *et al.*, "Positron Yield Optimization by Adjusting the Components Offset and Orientation", IPAC'14, Dresden, Germany, June 2014, MOPRI003.
- [9] L. Zang *et al.*, "Design Optimization of Flux Concentrator for SuperKEKB", IPAC'12, New Orleans, USA, May 2012, TUPPD032.