

[A16a03]

## COMMISSIONING OF THE KEKB INJECTOR LINAC

T. Kamitani, KEKB Linac Commissioning Group<sup>1)</sup>

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

### ABSTRACT

The KEK 2.5-GeV electron/positron linac has been upgraded for the KEKB-factory project to inject 8.0-GeV electrons and 3.5-GeV positrons directly into the storage rings. This report describes the results of the beam commissioning starting from last fall.

### KEKB 入射ライナックのコミッショニングについて

#### 1. 始めに

KEK 2.5-GeV 電子陽電子入射ライナックは、建設以来 Photon Factory (PF) リング及びトリスタン蓄積リング (AR) にビームを供給してきた。トリスタン実験終了に伴い新たに始まった KEKB ファクトリー計画に向けて、8.0 GeV 電子ビームと 3.5 GeV 陽電子ビームを KEKB 蓄積リングへ直接入射可能にするための改造が行われた [1]。改造のための工事は 1994 年度より始まり、4 年間にわたって PF 入射の運転期間を間にはさんで順調に進み、昨 1997 年秋より改造の完了した部分から順次ビームコミッショニングが行われた。

#### 2. ビームコミッショニングの経過

##### コミッショニング第 1 期 (97.10.16~12.23)

\* 大電流電子ビームのシングルバンチ化のためのバンチング部の調整

\* ARC 部手前までの 1.5 GeV ビーム加速テスト

97 年初頭よりの工事期間に KEKB 用前段入射部が所定の位置に設置され、また ARC 部より上流の 1.5 GeV 加速部が完成したので、まずこの部分からビームコミッショニングが始まった。このとき、既設部 (旧 2.5-GeV ライナック) は PF 入射運転を独立に行う必要があり、この新設部分とはまだ連結されていない。

まず最初には電子銃からのビームをシングルバンチ化するための rf バンチング部の調整を行った [2]。この調整の目安として、ビームラインに挿入した金属板より発生する遷移放射光をストリークカメラで計測して、マルチバンチ構造およびバンチ形状を観測した。このためライナックのビーム測定に特化したストリークカメラシステムを KEK と浜松フォトンクスで共同開発して用いた [3]。このシステムではカメラ系と光学系の調整が容易にでき、しかも計測をほぼリアルタイムで行うことができるようになっていた。これを用いて、各サブハーモニックバンチャー、プリバンチャー、バンチャーの rf パワー

値や位相値の最適化がスムーズに行えた。この結果、ほぼシングルバンチ化することができたが、若干 (10% 程度) の分量のサテライトバンチがどうしても残った。検討の結果、SHB1 (117 MHz) の加速電界強度が十分でないことがわかり、後日キャピテーの改作が行われた。

次に下流の Q マグネット収束系へのオブティクスマッチングのために、バンチャー出口でのエミッタンス及び Twiss パラメータを測定した [4]。このため、スクリーンモニターの蛍光板上のビームスポットを (ビーム同期でトリガーのかけられる) ランダムシャッターカメラで観測し、そのビデオ信号を画像処理装置にかけ強度分布をガウスフィットしてビームサイズを求めた。ビームサイズの Q マグネットの強さに対する依存性を放物線でフィットしてエミッタンス及び Twiss パラメータを算出した。こうして得られた値をビームオブティクス計算の初期値として用いて、下流のビーム収束系へのマッチングを取ってビーム加速を行った。なお、得られた (規格化) エミッタンス値は約  $80 \times 10^{-6} \text{ m}$  であった。

1.5 GeV までのビーム調整には、ビーム位置モニター (BPM) が非常に有効であった。これは、ビームが 4 本のストリップラインに誘起する電荷より垂直、水平方向のビーム位置 (約 100 micron の精度) と電荷量の情報を与える [5]。BPM は全ての Q ダブレット或いはトリプレットに 1 台ずつ設置されており、同期トリガーにより同一のビームパルスについての各点での位置情報を測定することができる。これにより大局的なビーム軌道の様子やどの辺りでビームロスが起きているかが一目でわかり、軌道調整も直感的に軌道の様子を把握しながら効率良く行うことができた。こうしたビーム調整により 7 nC の電子ビームを 1.5 GeV までほぼロス無く加速することができた。そこで、この 1.5 GeV ビームについてエミッタンス及び Twiss パラメータ測定を行った。得られた Twiss パラメータはほぼ設計値に一致していたが、エミッタンスの値は水平、垂直方向がそれぞれ約  $300 \times 10^{-6} \text{ m}$ 、 $600 \times 10^{-6} \text{ m}$  であり、初期値に比べてかなり大きくなってい

<sup>1)</sup> コミッショニンググループ: 赤坂展昌、飯田直子、家入孝夫、榎本収志、生出勝宣、大沢哲、小川雄二郎、紙谷琢哉、川本崇、菊池光男、小磯晴代、佐藤康太郎、末武聖明、諏訪田剛、中村達郎、福岡均、船越義裕、John Flanagan、古川和朗

る。この増大の原因としては、エネルギー拡がりからくるベータatron位相進み量の違いによる位相空間の増加によるもの（クロマティックな効果）と横ウエーク場によりバンチ後方が振られて実効的エミッタンスが増える効果が考えられる。クロマティックな効果についてはシミュレーションによる評価を行ったが、観測されている増大量を説明するには十分ではなく、横ウエーク場による影響の方が大きいものと推定された [4]。また、ワイヤースキャナーの試作機によるビームサイズ測定およびエミッタンス測定のテストも行われ、得られたエミッタンス値はスクリーンによる測定と矛盾しない結果を与えた [6]。ワイヤースキャナーは適当な 3~4 箇所に設置すれば、Q の強さを変えずしかも非破壊にビームエミッタンスの測定がリアルタイムにできるので、ビーム特性の時間的変化をモニターするのに使用される予定である。

また、18 度偏向電磁石によるエネルギー分析を行い、加速位相の調整やエネルギー変動の測定が行われたが、予想外の大きな変動が観測された。これに先立って、時間とともに軌道が変動する現象がすでに観測されており、これがエネルギー変動と同期していることもわかった。結局これは rf システムおよび加速管の冷却水温度の変動に起因するものであることがわかり、冷却水系の調整により安定化することができた。

この期の最後には、10 nC ビームの調整及び加速テストも行われた。バンチング部の調整時間が十分でなかったこともあり、サテライトバンチの電荷量が 20% 程度あった。それでも 1.5 GeV まで、ほぼロス無くビーム加速することができたが、エミッタンス増大はさらに激しく、初期エミッタンス約  $100 \times 10^6 \text{ m}$  に対して、1.5 GeV では約  $750 \times 10^6 \text{ m}$  と増大していた。これが後にこの大電流ビームを ARC 部に通すときにビームロスで苦勞する原因となる。

[ ARC 部、BCS 部建設 (97.12.23~98.03.01) ]

コミッシュニング第 2 期 (98.03.02~98.03.20)

**\*ARC 部のビームオプティクス調整**

97 年末よりの工事で 180 度 ARC 部設置されたので、この期のコミッシュニングは主に、これのオプティクス調整が行われた [4]。この ARC 部はビームを 180 度曲げる際にビームの質（エミッタンス、バンチ長）が悪化しないように、アクロマティック（ARC 部以降の軌道がエネルギーによらない=dispersion が無い）かつアイソクロナス（ARC 部での軌道長がエネルギーに因らない）であるように設計されている。これらの性質が満足されればエミッタンス増大やバンチの伸びを起ささない。ARC 部の Q の強さが適切に設定されれば、ビームオプティクスの 1 次の補正が達成され、それ以上の高次成分の補正は 6 極電磁石の調整によって行われる。ARC 部の調整にあたっては、比較的ビームの性質がおとなしい低電流 (2 nC) ビームを用いた。まずは、ARC 部手前までのビームについて、前回同様の調整が行われ、1.5 GeV での Twiss パラメータ測定によりマッチングセクションのパ

ラメータも設定された。こうして準備ができたところで、ARC 部の各偏向電磁石、Q 電磁石に設計値が設定され、ビームを出したところ無事 ARC 部出口までほぼ通っていることがわかった。

そこでアクロマティックになっているかどうかを調べるために、加速位相を少しずらしてビームエネルギーを少し変化させて BPM でビーム軌道の変化を測定した。その結果、ARC 部以降で dispersion があることがわかり、それを消すために Q の強さを補正して再測定したところ満足な結果が得られた。さらに高次成分についても六極電磁石の強さを調整することで補正することができた。次に、アイソクロナス性の調整をするために、ARC 部出口に設置されたストリークカメラを用いてバンチのタイミングを観測し、そのビームエネルギーに対する依存性を測定した。これについても、測定値から Q および六極強さの補正を行い、ほぼアイソクロナスであることを達成した。

また、ARC 部では BPM を用いてビームエネルギー値を常時モニターし、この情報を基にエネルギー調整用の加速ユニットの加速位相にフィードバックを行っている。これにより ARC 部でのエネルギーの時間的変動が抑制されている。

[ 既設部、新設部結合 (98.03.21~98.03.30) ]

コミッシュニング第 3 期 (98.03.31~98.04.28)

**\* 標的までの大電流 (7nC) 電子ビーム輸送  
\* 2 nC ビーム 8 GeV 加速**

98 年 3 月末の工事で、既設部と新設部が結合され、一体の KEKB ライナックとなったので、この期には陽電子生成標的までの大電流ビームの輸送と使用可能な全加速ユニットを用いての 8 GeV 加速試験が行われた。

まず 7 nC ビームの輸送をテストしたが、やはりウエーク場の影響か ARC 部で少しビームロスをする。それにはあまりこだわらず先へとビームを通したが、標的までの C, 1-セクターのところでビームをロスせずに通すために、ステアリングコイルを非常に強くかける必要がありまた軌道も中心からはずれたところを通す必要があった。収束電磁石の磁場に異常があることも考えられたが、ビームラインのアラインメントに問題があることがわかり、これを可能な範囲で修正するとビーム軌道の問題はかなり改善された。しかしまだビームロスがあり、標的までは到達した電荷量は約 4 nC であった。

次に 2 nC ビームについて、使用可能な全加速ユニットを使用してライナック終端までビームを加速する試験が行われた。各ユニットの加速位相などの調整の結果 8.0 GeV のビームエネルギーが達成された。この時点では加速エネルギーの余裕はほとんどなかったが、その後 3 つの加速ユニットを設置することと rf エージングが不十分なユニットについても改善が見込めるので加速エネルギーのマージンは十分に確保できる予定である。

[ SHB1 cavity 交換、ECS 設置 (98.04.28~98.05.13) ]

- \* 標的までの大電流 (10nC) 電子ビーム輸送
- \* 陽電子ビーム生成、3.5 GeV 加速、入射路輸送
- \* 陽電子エネルギー幅半減のため BCS, ECS 調整
- \* チャネリングによる陽電子生成実験

98年4月末よりの工事により、陽電子エネルギー幅半減のための ECS が完成したので、この期は陽電子ビームの調整が行われた。

まず電子ビームの電荷量を仕様値の10 nC に増やした。rfバンチング部について、SHB1を高い加速電界の出るものに交換したとシミュレーションによるパラメータサーチの結果に基づいて調整を行った結果、10 nC ビームでもサテライトバンチをほとんどなくすることができた。しかしビーム輸送にあたっては、電荷量が大いためウエーク場の影響がさらに強く、軌道調整を十分に行った後でもバンチ後方が蹴られることによるビーム形状の変形によって、ARC部でのビームロスが著しかった。これに対する対策として有効であったのは、中心からわざとずらしたバンチ軌道を部分的に作って、ウエーク場によるバンチ後方のキックをわざと起こしてビームの変形を逆に相殺する方向に効かせるやり方であった。ビームスポット形状とロスの様子を見ながらバンチ軌道を微調整することにより、ビームをかなり通すことができたのでARC出口から標的までについてのビーム軌道の調整を行ない、約6 nCのビームを標的に照射することができた。

これを用いて陽電子生成を行い、陽電子ビームの加速調整を行った。陽電子の加速エネルギーには十分の余裕があるので、すぐに設計値の3.5 GeVをクリアした。しかし調整当初は陽電子電荷量が非常に少なく、しかも大きく変動していた。調査の結果、原因は標的直後の加速ユニットのrfパルスのタイミングがずれているためとわかり、これを修正することで陽電子ビームは2倍以上増加した。1次電子ビームおよび陽電子ビームの軌道調整などを詳細に行った結果、ライナック終端(エネルギー幅圧縮用のECSの手前)での陽電子電荷量は最終的には、0.7 nCに達した。

さらにこのビームを用いて陽電子リングまでの入射路の途中までのビーム輸送を行った。軌道調整の結果、ほぼ問題なくビームを通すことができた。現在のところビーム繰り返しが本来の10分の1の5 Hzであることもあって、放射線漏洩量は基準値を十分下回るレベルである。今後、繰り返しを50 Hzに上げるが、その時もビーム調整を進めることで、基準値をクリアできると考えられる。

また、問題である陽電子のエネルギー幅を改善するための1次電子ビームのバンチ圧縮のためのBCS(Bunch Compression System)とライナック終端での陽電子エネルギー幅圧縮のためのECS(Energy Compression System)の調整を行った。BCSについては、ARC部より下流の加速ユニットの加速位相を調整して、バンチ前後のエネルギー勾配を付け、標的直前のシケインを通してバンチ長を圧縮した。さらに、ライナック終端部でシケインと補正加速ユニットからなるECSによりエネルギー幅が最小になるように調整を行った。結果として陽

電子のエネルギースペクトル(特に低エネルギー側のすそ)を狭くすることができ、すそを含めて全幅0.8%程度になり、アクセプタンス値0.5%の範囲に陽電子電荷量の90%が収まるようになった。

また今後さらに陽電子強度を大きくするための一つの方法として、結晶タングステン標的を用いてチャネリング放射を起こさせ陽電子生成量を増加させる実験を行った。現在のところまだ陽電子電荷量の絶対値としては通常標的の半分程度であるが、結晶軸の向きを最適化すると生成量が40%程度増加する結果が得られている。

なお、電子、陽電子の電荷量についてはビーム電流モニターで測定されているが、その較正には実際のビームより時間的に長いテストパルスを用いざるを得ないため、測定の絶対値が10%程度の誤差を持つ。この絶対値較正を行うため、ファラデーカップを用いてビーム電荷量の測定が行われ、現在データ解析中である。

### 3. まとめ

これまでのビームコミッショニングにおいて、大電流電子ビーム(10 nC/pulse)のシングルバンチ化、このビームの標的までのビーム輸送(横ウエーク場対策)、ARC部のアクロマティック、アイソクロナス-オブティックス調整、入射用電子ビームの8.0 GeV加速、陽電子生成量最適化のための調整、陽電子ビームの3.5 GeV加速、陽電子エネルギー幅半減のためのBCS, ECS調整などの重要課題をほぼクリアした。今年(98年)秋からはKEKBリングのコミッショニングに向けて、ライナックビーム特性のさらなる向上を目指して調整が行われる予定である。なお、今回のビームコミッショニングではライナックとリングの双方のメンバーによる合同コミッショニンググループが結成されて、ビーム調整、機器の問題点の洗い出し、測定データ解析、シミュレーション、モニターの較正などが精力的に進められ、コミッショニングの成果が大いに上がった。

### 4. 参考文献

- [1] A. Enomoto et al.: "Construction status of the KEKB injector linac", Proc. The 22-nd linear accelerator meeting in Japan, 1997, p.4
- [2] S. Ohsawa et al.: "Commissioning of the extended part of the KEKB 8-GeV injector linac", APAC98 (Tsukuba), 1997
- [3] Y. Ogawa et al.: "New streak-camera system for the KEKB linac", APAC98 (Tsukuba), 1997
- [4] T. Kamitani et al.: "Beam optics matching in the KEKB injector linac", APAC98 (Tsukuba), 1997
- [5] T. Suwada et al.: "New data acquisition system of a beam-position monitor and a wall-current monitor for the KEKB injector linac", APAC98 (Tsukuba), 1997
- [6] Y. Funakoshi et al.: "Beam tests of a wire scanner for the KEKB injector linac and beam transport line", APAC98 (Tsukuba), 1997
- [7] T. Kamitani et al.: "Energy-spread estimation for KEKB injector linac", Proc. The 21-st linear accelerator meeting in Japan, 1996, p.204