

KEKB リニアックに於ける入射部ビームの安定化

池田光男、大沢 哲、古川和朗、白川明広

高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

KEKB 電子陽電子リニアックでは、B ファクトリー実験のために、3.5GeV 陽電子ビームと 8.0GeV 電子ビームを KEKB リングに供給している。安定した入射を保証するためには、リニアックの最初の部分である電子銃から集群装置にかけての安定度が重要である。特に陽電子を発生するための大電流一次電子ビームには、ビーム不安定性を抑えるために厳しい安定性と再現性が求められる。我々は、これらの要求を満たすために、入射部ビームの安定化システムを構築することに努めてきた。このシステムはより高度な要求を満たすべく、今尚前進している。最近 SHB の位相安定化に新たな進展があり、ビームの長期安定度に改善が見られた。このシステムの最新の状況を報告する。

1. はじめに

本件の安定化に関係する機器は、電子銃とその高圧電源、およびビームを集群するための各種加速空洞とその高周波源である。ビームが安定であるためには、これら各種機器の加速電界と位相またはタイミングが一定であることが必要である。

ビームをより安定にするために、各機器に許される変動の許容値をまず測定した。その結果が表 1 に示した値である。これは、大電流である 10nC ビームを標的まで加速し、各機器のパラメータを微小量変化させたときに、これ以上変えると標的まで加速されるビーム電流が最大値の 90%以下に減少してしまう、その範囲を表わしている。条件が変われば、これらの値も当然影響を受けるであろうから、あくまでも一つの目安ではあるが、この測定結果を見る

かぎり、安定化のためには、各機器の位相を 1 度以下の精度で安定化することが不可欠であることは明らかである。

表 1：入射部構成機器の変動許容値

機器	変動許容値
電子銃ビームタイミング	±45 ps
電子銃高圧電圧	±0.38 %
SHB1 位相	±1.1 deg
SHB2 位相	±1.3 deg
バンチャー位相	±1.7 deg

2. 入射部の構成機器と安定化システム

上の許容値はかなり厳しい値である。各々構成機器は、温度変動や電源電圧変動などにより常に変化する。この変動原因を取り除くことは、非常に困難である。そこで、ビーム信号や空洞の RF 信号を測定して、その変動をフィードバックすることで入射部の安定化を図っている。当然ながら、測定データの精密さが重要であり、より高精度な測定を目指した。

この安定化システムは、大別すると次の 3 つの部分で構成されている。まずビームや RF の強度とタイミングを測定するハードの部分^[1]と、その測定値に基づき各機器のフィードバック量を決定するソフトの部分^[2]、及び各機器にフィードバック量を反映させるハードの部分^[3]である。これらが一体となって、デジタルフィードバックの安定化システムを構成している。このシステムの特徴は、なんとと言っても、汎用性と柔軟性であるが、入射部のように要求が年々変化する部署においては、この特徴は特に重要である。またこの特徴の結果として、開発が迅速に行なえることと、安価であることも見逃せない。

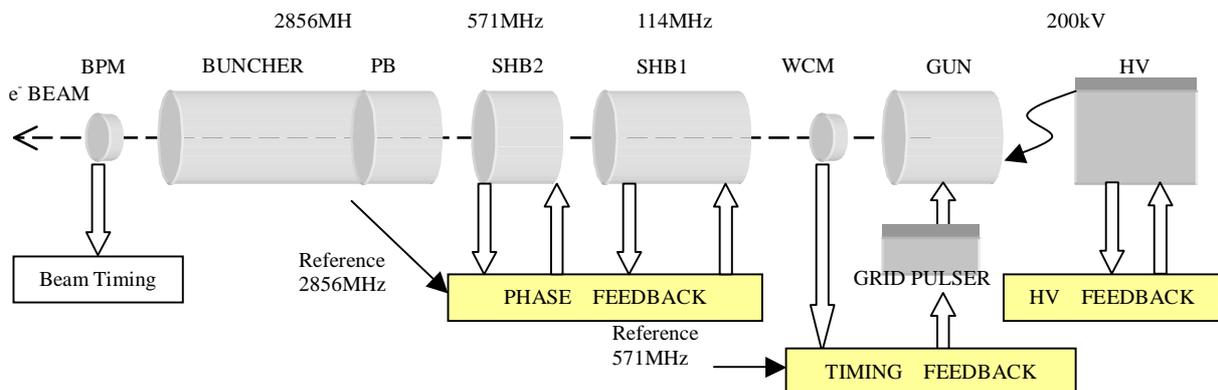


図 1：KEKB 入射部に於ける電子ビーム安定化の概念図

3. 各種機器とビームの安定化

3.1 グリッドパルスとタイミングの安定化

電子銃ビームは、グリッドパルスによって制御される。したがってこれを安定化する事が大事で、そのために、このパルスを送信系を介してモニターし、そのピーク電圧とタイミングを常時測定している。ビームには、陽電子生成用の大電流ビーム (10nC、左目盛) とリングに直接入射する 8GeV 電子ビーム (1nC、右目盛) の 2 種類がある。図 2～5 にこれらのビームの各種履歴を示すが、いずれも測定期間は 2001/06/25 0:00～12:00 である。グリッドパルスの出力電圧変動はいずれのビームも～1% で十分に安定している。そのため、現在のところ、ビーム電流のフィードバックは実施していない。

これに対し、グリッドパルスのタイミングの方は、自然の変動幅が許容値を超えるため、デジタルフィードバックで安定化している。デジタルオシロスコープを用いて、基準トリガー信号の搬送波である 571MHz に対するグリッドパルスの時間差を測定し、これが一定になるようにファインディレイをフィードバックで調整している。測定は 5 秒毎であるが、フィードバックは 1 分毎に行なっている。ゆっくりとしたフィードバックではあるが、グリッドパルスの変動幅が 20ps 程度に抑えられている。

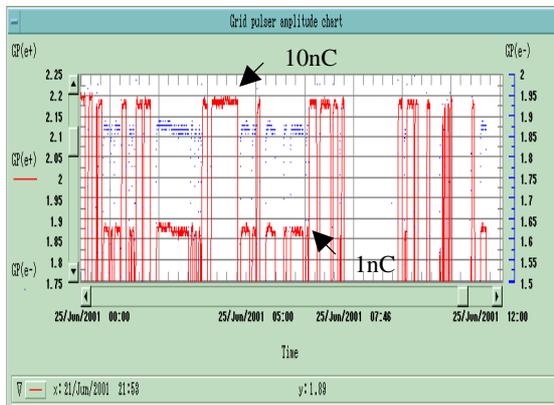


図 2：グリッドパルス電圧履歴

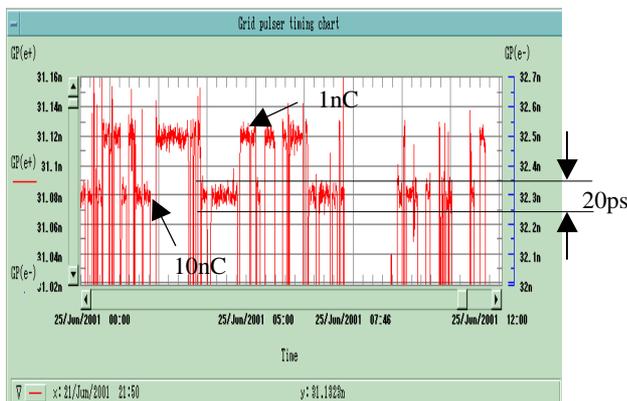


図 3：グリッドパルスタイミング履歴

3.2 電子銃ビーム電流とタイミング

電子銃を出て最初の WC モニターでビーム信号を取り出し、電子銃のビーム電流 (図 4) とそのタイミング (図 5) を常時測定している。グリッドパルスをフィードバックで安定化した結果、電子銃ビームもタイミングの変動幅が 20ps 程度に抑えられている。これは同時に、電子銃の高電圧も安定であることを意味している。

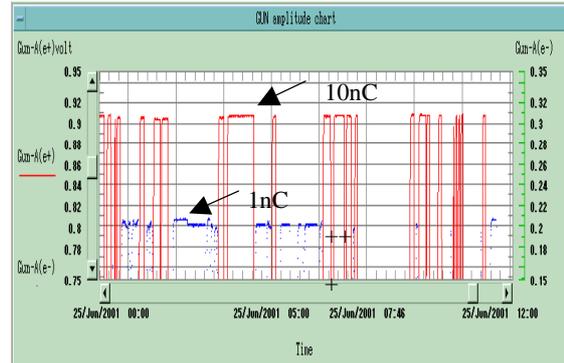


図 4：電子銃ビーム電流履歴

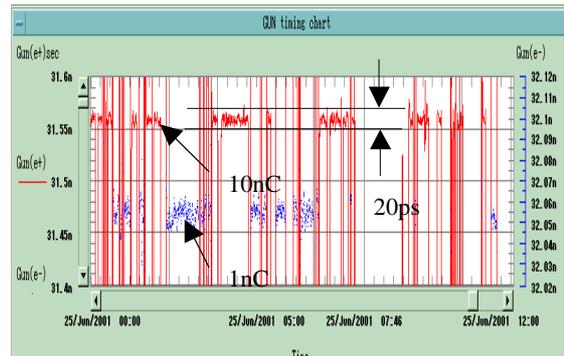


図 5：電子銃ビームタイミング履歴

3.3 SHB1 と SHB2 の位相安定化

バンチャー入口の RF (2856MHz) に対して、SHB1 (114MHz) と SHB2 (571MHz) の RF 位相 (タイミング) を測定し、これらが一定になるように、デジタルフィードバックでそれぞれの移相器を調整している。サンプリングスコープで時間差を測定しているため、以前の手法より高精度の位相測定が可能になり、その結果、位相の長期安定度が大幅に改善した。使用しているサンプリングスコープの場合、実質的な時間分解能はおよそ 2ps である。これは位相にすると、SHB1 では 0.08 度に相当し、SHB2 では 0.4 度に相当する。これらは各機器の許容差に比べて、十分に小さい値である。

図 6 は 10nC ビームの位相履歴を表わしている。“Buncher”と記号で示されているのは、バンチャーの出口と入口の RF の位相差に相当する。また“571MHz z”は、基準トリガー信号の搬送波 (571MHz) とバンチャー入口 RF の時間差を表わしている。約 2 日間にわたって、各機器の位相が安定に保たれている様子が図 6 に示されている。1nC ビームの位相履歴も図 6 とほぼ同様である。

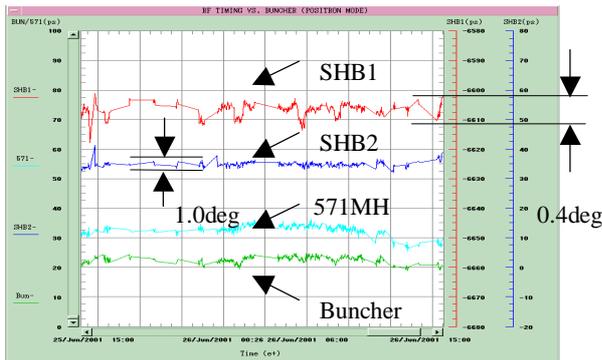


図6：SHB1/2とバンチャRF位相(e+ mode)

3.4 電子銃モジュレータの電圧安定化

電子銃モジュレータ電源は、電子銃に印加される高電圧を一定にするように、デジタルフィードバックで、パルス化する前の充電電圧である E_{PFN} 電圧を変化させている。図7は、この E_{PFN} 電圧の履歴であるが、電源オン直後に毎回40分間程、この電圧が徐々に上昇している様子を表わしている。これは、主に電源の負荷抵抗が温度で変化する効果をフィードバックで補償している結果である。PF/AR入射 (ARは通常2時間に1回)がある場合は安全のために、KEKB側の電子銃は高圧を毎回オフする。このため電子銃電源は、毎回過渡状態になる。しかしフィードバックのお陰で、電源オンしてから2分程で、0.05%の精度まで一定に安定化されており、電源オン/オフの影響をほとんど受けなくなっている。

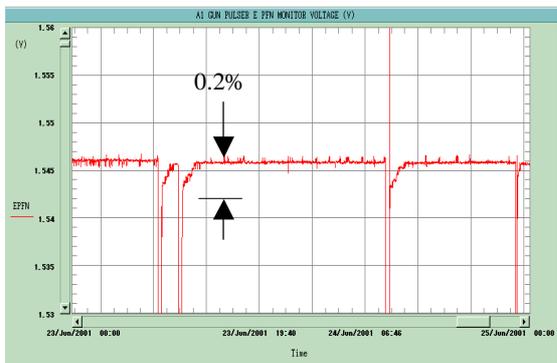


図7：電子銃電源の E_{PFN} 電圧の履歴

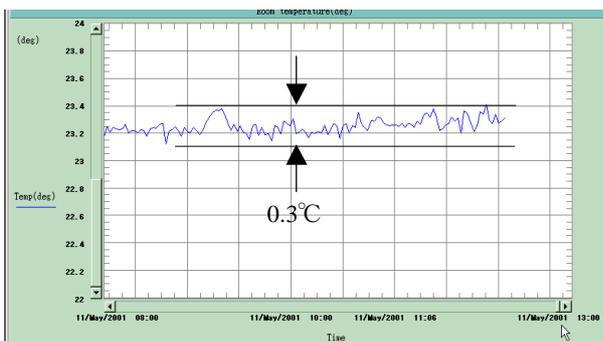


図8：電子銃室内温度履歴

3.5 電子銃室の室内温度監視

位相やタイミングを安定に保つには、環境の変化を抑えることが重要である。またこれらを精密に測定する上でも、電子銃室内の温度変化を最小にすることが求められる。ここ観点から電子銃室の温度を常時測定して監視しており、季節毎の変動があれば、現在はオイルヒータを使って手で調整している。これでは不便であるので、今年の夏季保守期間中に、空調器を無段階の自動調整機構付きに改造し、季節毎の変動も自動的に対応できるようにする手筈になっている。

3.6 大電流単バンチャビームの安定度測定

これまで述べてきた安定化の努力の結果、ビームの状態が極めて安定になった。図9はこの様子を示している。バンチャ出口のビームのタイミングを、バンチャ入口のRF (2856MHz) に対して測定している。変動幅 ± 1.5 ps はバンチャ位相の許容値に近い。

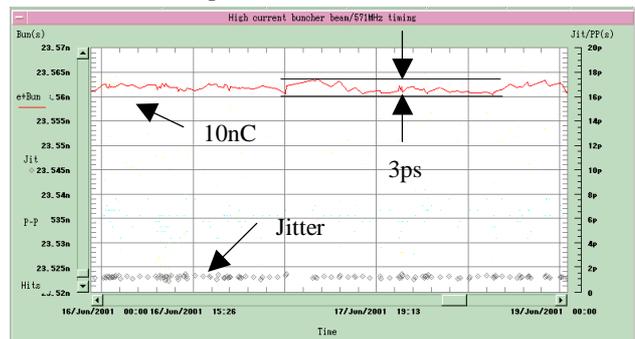


図9：大電流単バンチャビームの時間安定性

4. まとめ

測定精度を上げてより精密なフィードバックを実施したことにより、入射部のパラメータ変動を、許容差以内に抑えることができた。その結果として、ビームの長期安定度が格段に増大した。また各部の状態がほぼリアルタイムで判るので、何らかの異常が発生した場合にも、迅速に原因究明が行なえるような体制になった。

表2：入射部パラメータの許容値と安定化後の変動

機器	許容値	変動範囲
電子銃ビームタイミング	± 45 ps	± 10 ps
電子銃高圧電圧	± 0.38 %	± 0.05 %
SHB1位相	± 1.1 deg	± 0.4 deg
SHB2位相	± 1.3 deg	± 0.5 deg
バンチャ位相	± 1.7 deg	-

参考文献

- [1] M. Ikeda, *et al.*, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July, 12-14, 2000, p264.
- [2] K. Furukawa, *et al.*, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July, 12-14, 2000, p111.
- [3] A. Shirakawa, *et al.*, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug., 1-3, 2001.