

Beam Energy Feedback of ATF Linac

H. Hayano, T. Naito, S. Takeda, N. Terunuma, S. Kashiwagi*, T. Okugi**, M. Higuchi*** and T. Sakamoto***

High Energy Accelerator Research Organization
Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

*The graduate university for advanced studies

**Tokyo Metropolitan University

***Tohoku-Gakuin University

Abstract

The beam energy feedback system of ATF Linac is installed and used in usual beam operation. The system consists of button-type electrode BPM at downstream of the bending magnet and trigger timing delay module of the last klystron. Since the beam position is proportional to the beam energy, the drift of the beam position which corresponds to beam energy drift is compensated by changing the delay timing of #8klystron rf pulse. The feedback is done by the application software on the operation computer VAX system and V-system control software. The design and performance study of the feedback system has been done and described here in detail.

ATFリニアックのビームエネルギーフィードバック

1. はじめに

リニアコライダー実現のための低エミッタンスビーム開発を行っている試験加速器(ATF)の1.5GeVリニアックでは、現在昼夜および数十分にわたってビームエネルギーが数%ドリフトすることが観測されている。このドリフトは長周期のものはクライストロン室の昼夜の温度変化が基準信号伝送系に電気長変化を起こして発生しているものであり、短周期のものはクライストロン本体の冷却水の温度ドリフトから発生しているものである。いずれの場合も加速rfの位相変化が引き起こされ、その結果ビームエネルギーが変化する現象である。これらの問題点について解決するには時間と費用がかかるので、当面のATFの運転を継続的にこなせるように緊急にソフトウェアによるビームエネルギーフィードバックが適用された。本稿ではATFリニアックのビームエネルギーフィードバックシステムの詳細について報告する。

2. ビームエネルギー測定用ボタンBPMの設置

ATFリニアックのビームエネルギーを測定するためにビームトランスポート(BT)ライン中のベンディングマグネットの下流のディスパージョンのある場所に新たにBPMを設置することとした(図1参照)。すなわ

ちこの位置でビーム位置を測定すればエネルギー変化が有ったときそれに比例してビーム位置も変化する事からエネルギー変化を測定することができる。正確にはQD12Tの下流(QD12Tの中心より)173mmの位置にBPM中心があるように設置された。このBPMは軌道測定システムから独立させてフィードバック専用とし自由度をもたせ、設置する場所も狭かったので30mmの厚みですむボタン型とした。信号処理回路はダンピングリングと同じクリッピング回路とチャージADCとの組み合わせで行ない、ビーム位置の測定はシングルショットで行なうことができる。ボタン極板はビーム通過中心より半径12mmの位置にあり、極板直径は15mmと大きくしてあり高分解能となるようにしてある。なお極板配置はリニアックと同じ水平方向と垂直方向にそれぞれ対向させてある。

3. ビームエネルギー測定

このシステムの場合ビームエネルギーの絶対値は必要なく、与えられたビームエネルギーを偏差が少ないように維持すればよい。したがって、リニアックのビーム軌道がまっすぐでビームエネルギー微小変動により軌道変化しないとしたとき、BTラインのバンドマグネット後

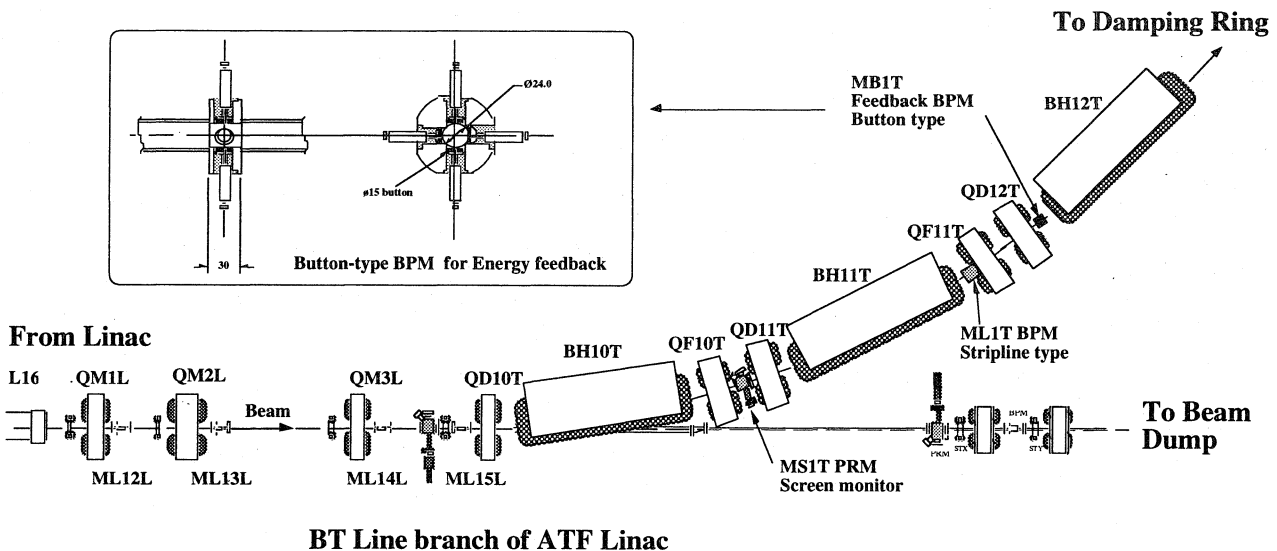


図1 ATFリニアック最下流からBTラインへのブランチ部分/フィードバックBPMの設置部分

のビーム位置を維持すれば、ビームエネルギーを維持したことになる。ちなみにBPMの位置でディスパージョンは0.3mであるので、ビーム位置を300 μm 以内で維持したとき、0.1%以下でビームエネルギーを維持できる事になる。BTラインおよびダンピングリングのエネルギーアクセプタンスが $\pm 0.5\%$ であり、ビームのエネルギーブレッドが現状では全幅で同等程度あるので、エネルギー中心を0.1%以下に抑さえることは効率のよい安定なリング入射のために必要な条件である。

今回設置したBPMが正常にビーム位置を測定していることを確かめるために、ビームエネルギーを変化させすぐ上流の運転に使用しているストリップラインBPMとの相関を測定した。その結果を図2に示したが、200 μm 程度の偏差内で一致しているので、BPMおよび回路、ソフトともに正常にビーム位置を測定しているものと考えられる。

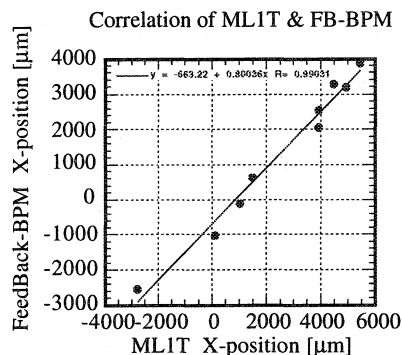


図2 FBBPMのストリップラインBPMとの相関

4. クライストロンrfパルスタイミングによるビームエネルギー制御

ビームエネルギーの可変制御を行なうのに今回使用したのは、リニアック最下流のレギュラーユニットである#8クライストロンのrfパルスタイミングディレイである。現在リニアックはシングルバンチで運転しているのでビームローディング補償を特に考える必要がなく、スレッド出力波形の急峻な変化のどこでも運転できる事を利用して、rf振幅でエネルギー制御を行なう事とした。すなわち、ビームタイミングに対してrfパルスタイミングを動かしてやる事によりビームエネルギーを変える。rfの位相で行なう事も考えられるが、エネルギーブレッドが変化してしまうのでブレッドに敏感なATF-DRの場合、敵していない。rfパルスタイミングディレイはモデレーター電圧パルスとrfパルスとを同時に変える事ができるので、これによるrf位相変化は少ない。

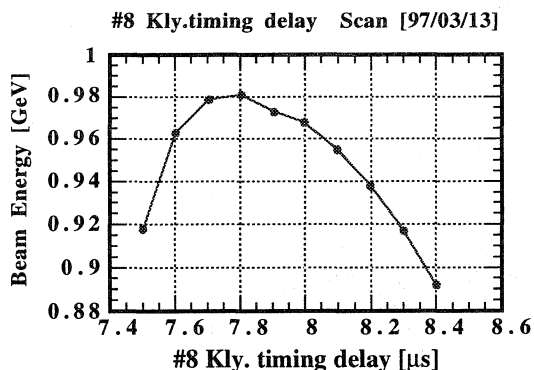


図3 rfパルスタイミング可変によるエネルギー変化

図3に示したのは、#8クライストロンのrfパルス

タイミングを変えた場合のビームエネルギー変化の様子である。これはビームエネルギーが1 GeVの時の測定であるが、これによると7.8 μs のときが最大加速であり、それより大きなディレイの領域が使用可能な領域であり8.5 μs までの700 nsでビームエネルギー100 MeVを制御可能である。ディレイの最小ステップが2.8 nsであるので、最小制御量は0.4 MeVである。ただしこれは#8クライストロンのrf出力が約60 MWのときのものであり、その制御量はrf出力の大きさに依存している。

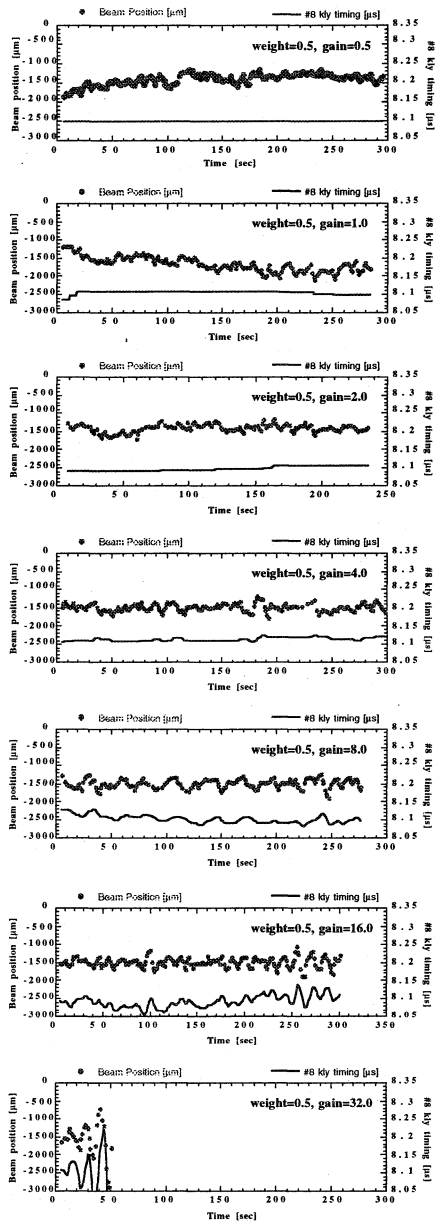


図4 ゲインを変えた時の定常偏差

5. ソフトウェアによるビームエネルギーフィードバック制御

ビームエネルギードリフトは数十分以上と非常にゆっくりとしたものなので、フィードバック制御はオペレーション計算機上のバックグラウンドタスクで十分実用になり、さらに運転上便利であるのでオペレーションデータベースソフトであるV-systemに組み込む事とした。ロジックは簡単なものとし以下のようにした。フィードバック制御量を以下の式で計算する。

$g \cdot A_n = g \cdot (\alpha \cdot \Delta x + (1 - \alpha) \cdot A_{n-1})$
 ここで Δx は現在のビーム位置誤差、 α は0から1までの値をとる重み、 g はゲインである。検出した現在のビーム位置誤差と過去の制御に使用したビーム位置誤差との間で重みつき和をとりそれをビーム位置誤差とし、それにゲインをかけて制御量とする。この制御量からビームエネルギー変化に変換しさらにタイミングディレイ量に変換して、タイミングディレイモジュールにセットする。この一連のループ制御をビームの繰り返しの間でおこなう。現在のATFの運転ではビーム繰り返しが0.78 Hzとゆっくりであるので、これ以上速くしてもパフォーマンスはあがらない。このロジックはFortranでかかれており、V-systemデータベースを介してコントロールパネルと接続されているので、制御状態の監視、フィードバックのオン、オフや制御パラメータの変更などがリアルタイムに可能である。さらにこのソフトウェアには、ビームが停止したり許容量以上に位置変化した場合およびタイミングディレイ量が許容量以上だったときに制御を行わないようなプロテクションがはいっている。

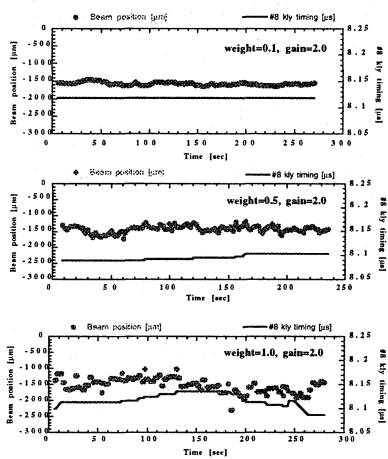


図5 重みを変えた時の定常偏差

6. ビームエネルギーフィードバック制御の特性測定
 このフィードバック制御の重み α とゲイン g とを最適に設定するために、定常偏差量とインパルス応答測定を行なった。図4に示したのがゲイン g をパラメータにした時(重み $\alpha=0.5$ 一定)の定常偏差量測定であり、これによるとゲイン2から8程度までで定常偏差が $\pm 300 \mu\text{m}$ 以内で維持できておりドリフトも補正されている。また、図5には重み α をパラメータにした時(ゲイン $g=2$ 一定)の定常偏差量測定であり、測定パラメータが少なくはつきりとはいえないが重み $\alpha=0.5$ 付近で定常偏差 $\pm 300 \mu\text{m}$ 以内を実現するものと推測

できる。インパルス応答測定は、フィードバック制御動作時にフィードバックに使用していないクライストロンのrfパルスタイミングを100 ns飛ばして設定しビームエネルギーをインパルス的に変化させ、その後のフィードバック動作によりこのエネルギー変化を補正する応答時間を計測する事で行なった。その結果を図6に示したが、通常使用パラメータであるゲイン $g=5$ でインパルス偏差補正に約40秒要する事がわかる。また、周波数特性を知るためにオープンループ特性の測定をソフトウェア上で行なった。これは、タイミングディレイモジュールに振幅50 nsのsin波を入力し、ビームを介してビーム位置を測定し前述の式により計算した制御量をタイミングディレイ量に変換した量の振幅と位相を計測する事で、ループ巡の伝達関数を測定することができる。実際には入力sin波の周波数を変えていきその周波数特性をとることになる。図7に結果を示したがその位相変化より1.2秒の時間遅れがわかるがこれはビームの繰り返しが0.78 Hzであったことから来ている。帯域幅は0.4 Hz程度であった。

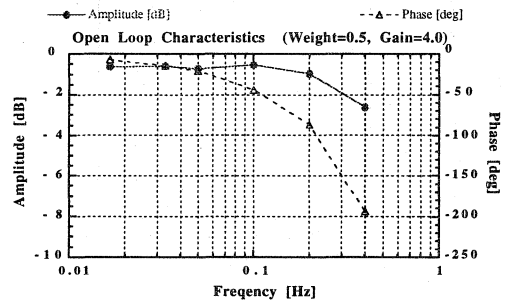


図7 オープンループ特性

7. 今後の課題

このフィードバック制御は通常のATFオペレーションで使用されており、ダンピングリングへのビーム入射がドリフトなく可能となっている。残っている問題点は、定常偏差が大きい事と、リニアックの軌道に敏感であることである。定常偏差が大きい問題は、制御ロジックに大きく依存している問題であり、もっとなめらかでゲインの大きいロジックを開発していかなければならない。もう一つの軌道依存性がでている問題は、BPMを一つしか使用していないところから発生しており、ベンディングマグネットへのビーム入射角変化もビームエネルギー変化と検出してしまふところから来る。これを回避するためには3個以上のBPMからエネルギーを算出するようにしなければならない。また、ビーム繰り返しが上がった場合、フィードバックのバンド幅を広げる必要が生じる可能性があり、その際のループ巡時間を高速化する必要が生じるであろう。その際はSLACの場合と同様に高速のPCを独立して設置する必要もあると考えられる。

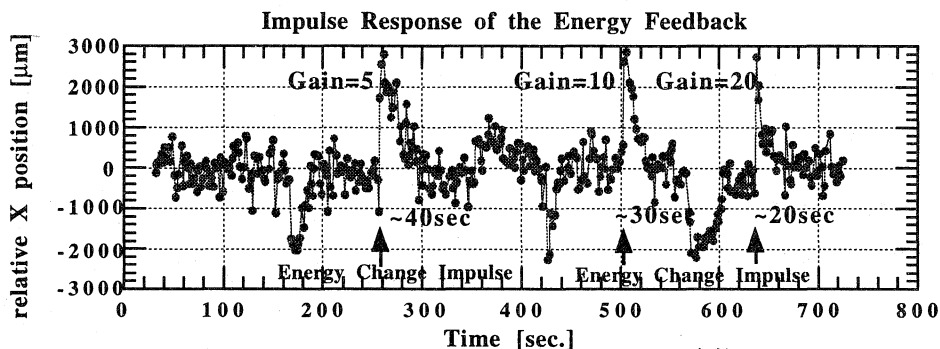


図6 フィードバックループのインパルス応答