

## Utilization of BPM for operating and controlling the LEBRA linac\*

Ken Hayakawa<sup>1,A)</sup>, Ken'ichiro Ishiwata<sup>2B)</sup>, Toshinari Tanaka<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Takeshi Sakai<sup>C)</sup>,  
Kyouko Nogami<sup>A)</sup>, Keisuke Nakao<sup>A)</sup>, Tsutomu Inagaki<sup>C)</sup>, Isamu Sato<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Quantum Science, Nihon University 24-1, Narashinodai, 7-chome, Funabashi-shi, Chiba, 274-8501

<sup>B)</sup> Graduate School of Science and Technology Nihon University

8-14, Kanda-Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308

<sup>C)</sup> Advanced Research Institute for the Science and Humanities, Nihon University

12-5, Goban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8251

### Abstract

In the LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application) linac, strip line type beam position monitors (BPM) are installed in high density. Using this type of BPM, beam position can be obtained without disturbance. Because of the high-speed data taking, observation of the energy fluctuation during pulse duration becomes possible. To assist the operation and to analyze the characteristics of the linac, we developed the software, which works as a server program that acquires beam position data from the BPMs and distributes them to the clients on demand. And also we developed several client programs.

## LEBRA Linac の運転制御におけるBPMの活用

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)リニアックにおいては、ストリップライン型ビームポジションモニター(BPM)が高密度に設置されている<sup>[1]</sup>。この位置モニターは電荷分布の重心位置を検出するもので、ビームの広がりについての情報は得られないが、位置変動を高速に検出できるため<sup>[2]</sup>、運転制御に非常に有効である。運動量アナライザー内に設置されたBPMの信号から、パルス内におけるエネルギー変動の測定、アクロマティシティの調整が精密にできるようになった。また、測定がビームに殆ど影響を与えないため、運転中常時ビーム位置を把握することが可能になり、手動あるいは自動のビーム軌道の維持が容易に達成されるようになった。また、加速器の挙動の解析に威力を発揮している。

### 2. パルス内のビーム位置変動

#### 2.1 エネルギー変動の測定

FEL及び、PXRのビームラインに電子ビームが入射する際に90度偏向系を通過する。この偏向系は運動量アナライザーとして機能していて、2台の45度偏向電磁石と4台の四極電磁石からなる。最初の偏向電磁石通過後のビームの水平位置を高速のADコンバーターを使って測定すれば、パルス内のエネルギー変動を求めることができる。FELにおいては、パルス内において、エネルギーが安定であることが必須であるので、これは非常に重要な情報である。

LEBRAリニアックでは運動量アナライザー系を利用して、バンチ圧縮を行っているので、電子ビームは、バンチの前後にわたってエネルギー勾配を持つように加速される。すなわち、マイクロ波のピークから少し外れた位相で加速されている。従って、パルス内におけるマイクロ波の位相変動が、顕著にエネルギー変動に反映する。パルス内の位相変動は、主に、クライストロンパルスモジュレーター(PFN)の調整に依存すると考えられる。PFNの調整はクライストロン出力の振幅と位相が、平坦になるように調整するが、複数のPFNを調整した結果は電子ビームの加速エネルギーの変動として表れる。すなわち、パルス内のエネルギー変動の測定はPFN調整の有効性の検証にもなっている。図1にアナライザー部に設置されたBPMによるパルス内エネルギー変動の例

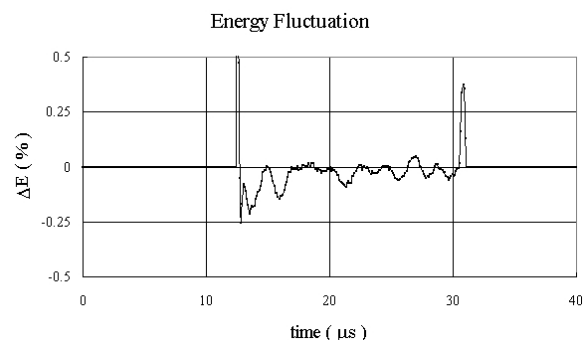


図1. パルス内エネルギー変動。スパイク状の部分を除けば、変動幅は0.25%(P-P)程度である。

\* 本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業（継続）（平成17~19年度）の支援を受けて行った。

<sup>1</sup> E-mail: [hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp](mailto:hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp)

<sup>2</sup> Present affiliation: College of Humanity and Science, Nihon university

を示す。10MHzのADコンバータによって取り込んだBPMの各電極からの電圧波形をビーム位置に変換し、さらに、エネルギー変動に変換したものである。このときの調整では、パルスの先頭と、終端のスパイク状の変動を除いて、変動幅は0.25%程度であった。最初の5 $\mu$ secに現れる変動が小さくなるように調整できれば、FELの出力はさらに向上すると思われる。

## 2.2 アクロマティシティの調整

運動量アナライザーはアクロマティックになるように構成されていなければならないが、この調整を精密に行うのはそれほど容易な操作ではない。LEBRAでは、電子ビームの僅かなエネルギー変動とこれに伴うアナライザー中におけるビームロスによる電流の変動をBPMで観測することによって、精密な調整を実現している。具体的には、アナライザーの下流に設置されたBPMの、水平方向に対置するアンテナからの信号を各々オシロスコープで観測し、その波形が相似になるように調整する。図2に左右のアンテナの出力を検波した波形を示す。(a)は調整前の波形で、細かい凹凸が逆位相になっている。これはビームが左右に動いていることを意味する。(b)は調整後の波形で、凹凸が同位相になっており、ビームが殆ど動いていないことを示している。

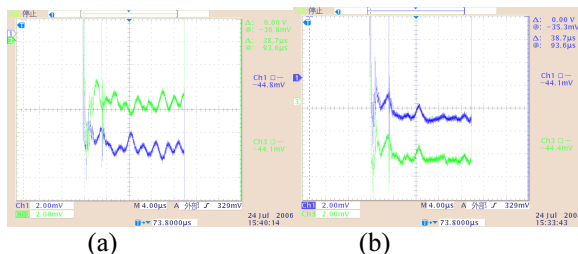


図2. 運動量アナライザー下流のBPMの水平方向アンテナ対からの検波信号。(a)では、波形の凸凹が逆位相になっており、エネルギー変動の影響が軌道の変動となって表れている。(b)では、波形が相似になり、エネルギー変動の影響が取り除かれていることを示している。

## 3. ビーム位置モニターと制御

パルス内のビーム位置変動の測定は非常に多くの情報をもたらされ、加速器の挙動の解析には有用であるが、加速器の運転中、オペレーターがモニターするには情報量が多すぎるくらいがある。また、直線部においては、実際上パルス内でビーム位置が変動することはない。このため、通常データ収集ではパルス内の一点において、全アンテナの信号をサンプリングしてパソコンに取り込み、ビーム位置を求めている。運動量アナライザー内部においては、前述のように、パルス内でビームの位置が変化すが、パルス毎の相対的な位置変動の測定にはこの方式が

有効である。ソフトウェアはクライアント・サーバー方式を採用して、複数のクライアントプログラムが同時にデータを利用できるようにしている。

### 3.1 サーバー

各BPMの各アンテナによりピックアップされたマイクロ波は、検波・増幅された後、PCに装着された12bit、64ch.のAD変換ボードを介して、サーバープログラムにより取込まれる。サーバープログラムはこの生データ、あるいは座標に変換した値を、クライアントからの要求に従ってLANを介して配信する。データの取得レートはパーソナルコンピュータの性能に依存するが、現状の2Hz運転では、全イベントを取り込むことができる。座標値の相対精度はアンプ系のノイズレベルに依存していると思われるが、10~20 $\mu$ mと見積もられている。

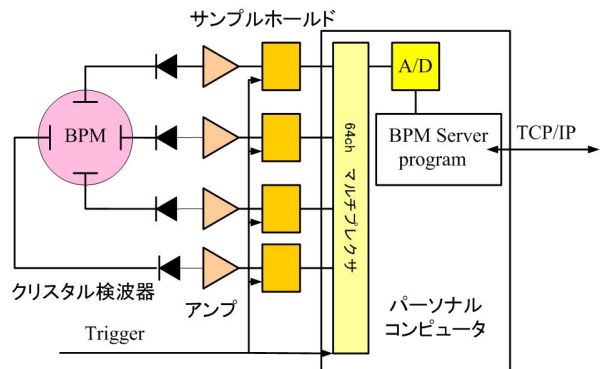


図3 データ集束系のブロック図。アンテナでピックアップされた信号は検波された後、順次AD変換され、サーバープログラムに取り込まれる。

### 3.2 クライアント

現在定常的に使われているクライアントは3種類ある。第1は、オペレーターにビーム位置を表示するインターフェイスを持つもので、分解能が可変で、最小10 $\mu$ m程度の動きまで確認できる。第2は、サーバーから受け取った座標値をひたすらファイルに蓄積するもので、加速器の挙動の解析に威力を発揮している。第3は、ビーム軌道の自動アラインメントプログラムで、様々な要因によってずれた軌道を中心軌道に戻すものである。

#### 3.2.1 ビーム位置表示ウィンドウ

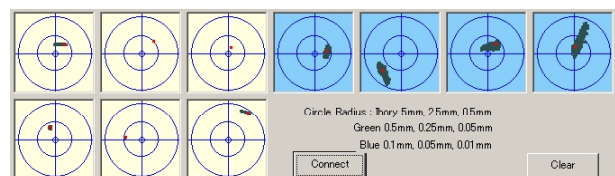


図4 オペレーターにビーム位置を知らせるクライアントプログラムのウィンドウ。

加速器の運転中、オペレーターが常時ビーム位置を把握できるよう、図4に示すようなインターフェイスを持ったクライアントプログラムを製作した。各BPMに対応したボックスを持ち、ビーム位置はこのボックス中の1点として描画される。また、過去のビーム位置は色を変えた点として、表示されるようになっているので、位置変動の履歴についてもある程度の情報が得られる。FELとPXRビームラインで、対応する位置にあるBPMはボックスを共有している。それぞれのボックスには三重の同心円と十字線が描かれている。各々のボックスは相対位置表示と絶対位置表示のモードを持ち、相対位置表示では、表示モード切替直後に取得した点を中心として表示する。また、それぞれの表示モードにおいて、3段階の拡大率で表示できるようになっている。最小の拡大率では、最外円の半径が5mmに相当する。次の拡大率では同0.5mm、最大の拡大率では0.1mmである。従って、オペレーターは、およそ10 $\mu$ m程度の精度で、軌道を確認することができる。

### 3.2.2 データロガー

このクライアントプログラムは、サーバーから取得したデータに時刻を付加してひたすらファイルに書き込むだけのものであるが、加速器の挙動の解析には非常に有効である。最近得られた成果を以下に述べる。

長時間にわたるエネルギー変動を測定し、加速管冷却水温度の時間変化と比較してみた。図4に示すように、エネルギーはこの2時間間に、 $\pm 0.1\%$ 、温度は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、ほぼ同じ周期で変動していることがわかる。従って、この図に現れているエネルギー変動の大部分は加速管の温度変動に由来するものと考えられる。エネルギー変動をさらに抑制するためには、加速管温度の安定化が欠かせないことが明らかである<sup>[4]</sup>。なおこのエネルギー変動のデータは、電子銃のエミッション電流の変動による影響を補正した後のデータである。

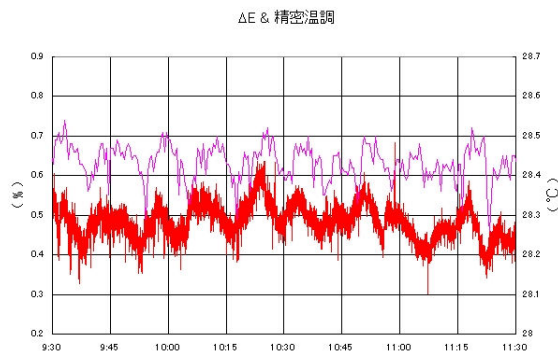


図5 加速管冷却水温度（上の波形、右目盛）とエネルギー変動波形（下、左目盛）。同じ周期で変動している。

前述のビーム表示ウィンドウを監視していて、加速器を起動して、ビーム加速を始めると、必ず毎回同じ向きビームが移動する現象が表れることに気づいた。この現象は、最上流、バンチャー直後に設置されたBPMでも観測されることから、電子銃の挙動が疑われた。データロガークライアントを働かせて確認したところ、最初は急激に、その後次第に緩やかにビーム位置が変動している事が明らかになった。完全に落ち着くのはビーム加速開始後3時間くらい経過した後である。このビーム変動の原因を調べるため、ユーザー実験の合間を利用して、加速器の状態を様々に変化させた時のビーム位置の変動を測定した。結果を図6に示す。この図から明らかなように、様々な条件の変化の中で、電子銃の高電圧のみがこの現象に影響している。因果関係は明白であるが、ビーム軌道を動かすメカニズムについては不明である。現在は、クライストロンのウォーミングアップ開始時から電子銃の高圧を印加するようにして、この変動の影響を軽減するようにしている。

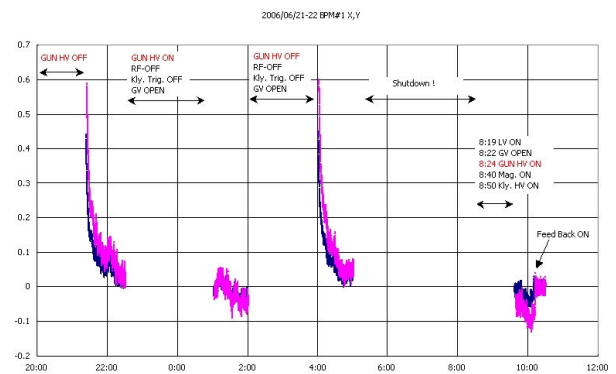


図6 ビーム加速開始直前の状態を様々に変化させた時の軌道変動。電子銃の電圧が影響している。

### 3.2.3 ビーム軌道の自動アライメント

ビーム軌道の自動アライメントに関しては文献[3]に報告されている。

## 参考文献

- [1] K. Ishiwata et al., "Development of Beam Position Monitor Measurement System II", Proc. of the 2<sup>nd</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, 2005 Tosu Japan, pp483-485
- [2] T. Suwada, "Multipole Analysis of Electromagnetic Field Generated by Single-Bunch Electron Beams", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40(2001) pp.890-897.
- [3] K. Nakao et al. "Development of Automatic Beam Alignment System for the LEBRA Linac", Proc. of this meeting
- [4] T. Sakai et al. "IMPROVEMENT OF WATER COOLING SYSTEM FOR LEBRA LINAC", Proc. of this meeting