

特集2 KEKB Bファクトリーのコミッショニング

KEKB ビームモニタシステムの立ち上げ

平松 成範*

Construction and Operation of the KEKB Beam Monitor System

Shigenori HIRAMATSU*

1. はじめに

筆者がビームモニタグループの責任者として KEKB 計画に参加したのは、リング建設開始1年ちょっと前である。筆者は KEK に入所以来もっぱら 12 GeV PS の運転改善業務に携わって来ており、電子リングの経験は皆無であったため一抹の不安とともに建設計画に参加することとなったが、ビームモニタグループ諸兄の懸命な努力で図1に示す KEKB ビームモニタシステムをまとめあげることができ、何とか責任を果たせたのではないかと思う。以下、思いつままに筆者が直接関与し印象に残っている幾つかを記させていただくことにする。

2. ビーム DCCT

ビーム電流観測用 DCCT として、TRISTAN 時代には発明者である Unser 氏によるお馴染みの Bergoz 製 DCCT が使われていたが、担当者によると時々故

障し、またバンチ長依存性のある可能性があり、対策に苦慮しているとのことであった。これは KEKB までに何とかしなければならないと思った。そのためには問題発生時の機動性の面で国内メーカーで DCCT を作る必要があると考え、国内で唯一製造経験のある工藤電機に相談したが、KEKB で使えるものではなかった。Unser 氏の方式ではパラメトリック磁気変調のための磁性体コア対には精密なペアリングが必要で、不完全なペアリングでは大きな出力残留変調リプルが発生するためビームに対する応答を極めて遅く制限せざるを得なくなる。コアの高度なペアリングは Bergoz 社以外には事実上不可能である。工藤電機にはにべもなく断られてしまった。それならば回路技術で何とかしようと、半ばむきになって3ヶ月ほど DCCT の回路解析に専念した。その甲斐あって原理的にコアペアリング不要の回路を考案することができ、さっそく工藤電機に製作を依頼、AR 大電流試験にて Bergoz 製と同等性能であることを実証した。実際には Bergoz 製 DCCT でもコアハウジング構造に十分注意することで前記の問題は解決できるので、ここまでの必要があるかと問われるとなんとも言いようがないのが本音であるが、Bergoz 以外のメーカーでも同等の性能の DCCT が作れる状況を作ったのは良いことだと思っている。なんと云っても自分で基本設計した回路であるので回路内部を自由に触ることが出来、改造が自由であること及び問題発生時の機動性が格段に改善された。これはいつも待ったなしの対処が要求される加速器運転にとって極めて重要なことである。

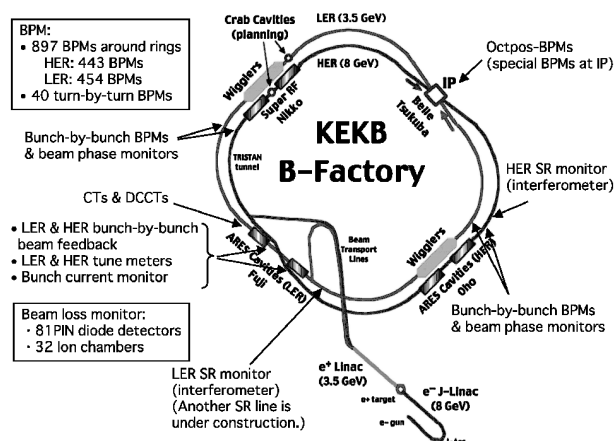


図1 KEKB リングにおける各種ビームモニタ

* 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
(E-mail: shigenori.hiramatsu@kek.jp)

3. ビーム位置モニタ (BPM)

3.1 シングルパスか閉軌道測定方式か

BPM に関してはデザイングループからシングルパス方式とするよう強く要請された。そこで TRISTAN 時代の担当者達にいろいろと話を聞いてみたが、シングルパス方式に関しては KEKB で要求される精度と安定度を実現できるほどの技術レベルには至っていないと判断した。この件については主幹であった黒川君も同じように感じており、これから 1~2 年と云う短い期間で開発するにはあまりにも壁が高いと考えざるを得なかった。また、建設準備段階でのワークショップにおいて BPM に関する議論が熱心に行われたが、特にシングルパスでなければならないと云う強い理由を見出すことができなかった。そこで黒川君とも相談の上、シングルパス方式は採用せず従来の閉軌道測定方式で行くことを決断した。ラティス誤差をベータートロン位相進み誤差で 1° 程度の誤差に抑えて測定するためには、BPM による COD 測定誤差を $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 程度以下に抑える必要があるため、TRISTAN 時代の BPM に比べて大幅に高精度化及び高安定化する必要があり、電子リング未経験の私にとってはそれなりの覚悟が必要であった。

3.2 スペアナ方式信号検出

KEKB の 4 ボタン電極型静電誘導方式 BPM においては、ビーム位置の測定誤差を $1\ \mu\text{m}$ 以下とするには電極間の信号バランス誤差をほぼ $-84\ \text{dB}$ 以下に抑える必要がある。そのため温度環境に敏感な半導体を用いた信号検波回路は排除することが望ましい。そこでオフセット誤差の発生を回避するため、hp 社がスペクトル検出方式を提案してきた。スペクトル検出方式は当時の東大原子核研究所の TARN-II の BPM システムに採用された方法である。TARN-II では市販のスペクトラムアナライザを使用することで、微弱な原子核ビームの BPM 信号を S/N 良く検出することに成功していた。スペアナによるスペクトル検出ならば、オフセットドリフト誤差の心配がなく COD 観測には最良の方法であるが、1000 台に近い BPM が設置される KEKB ではコスト面で不可能であろうと考えていた。そこへ hp 社の提案である、これがコスト面で折り合えば云う事なしである。しかしながら hp 社からの外注で作られた最初の試作器は見事に失敗。その後 hp 社は自社内のスペアナ設計開発部門にて直々にスペアナ方式 BPM 検出回路を開発することとなり、同社の献身的な努力により最高級レベルのスペアナと同等の技術を取り入れた検出回路が完成し

た。しかしながら、本検出回路の開発があまりにも大きな負担であったため、以後このような開発は請け負わないと通告されたことは極めて残念である。次期計画の Super KEKB に向けて頭の痛いことである。

ビームコミッショニングが目前にせまった頃、通電されていた全ベンドの電流が突然異常遮断された。このときの誘導サージにより BPM システムの VXI/VME インターフェースモジュールが故障してしまい、BPM 測定室の BPM データが取れなくなってしまった。測定室のグラウンド回りをチェックしたところ大地接地のみで、サージ性ノイズに対して不適当であると判断し、システム全体のグラウンド電位が動的にも均等になるようシステムを設置しているラックどうしを全て極太のアース線にて直接接続した。その後このような故障は起っていない。ノイズに対して大地接地は要注意である。

3.3 最初のワンターン

コミッショニング開始時の最初のワンターンを観測するために、BPM 信号検出モジュールの前面パネルには BPM のボタン電極信号を出力するためのコネクタが装着されている。ところがセミリジッドケーブル配線工事で注意が行き届かず、このコネクタが使用困難になってしまった。当初はこのコネクタを利用して、中央制御室からボタン信号を確認できるようにと計画していたのであるが、この機能を復活させるまでの必要はないとの担当者の考えによりこの計画は頓挫してしまった。だがこれは大失敗であった。このため最初のワンターンを追跡する作業は極めて消耗する作業になってしまい、未だにジクジたる思いである。リングに最初にビームを通すときには、それまでの調整作業でみんな疲れ果ててしまい、夜になってようやくビームがアーク部を通り始めたころにはビームモニタの担当者は誰もいなくなってしまった。責任上自分がやるしかない、一人でオシロスコープを担いで 20 カ所の BPM 測定室をまわって、中央制御室と PHS で連絡をとりながら BPM のボタン電極信号ケーブルを一つ一つオシロスコープに繋ぎ換え、ビームがどこまで到達しているかの確認作業を行った。ようやく夜が明けて最後の難関であった衝突点をビームが通過し、PHS からの「通ったよ」という生田君の声に「ああこれで責任を果たした」と腰が抜ける思いであった。ただただ疲れた、あのときになぜもっと強硬にオシロスコープシステムの構築を主張しておかなかったのかと悔しい思いをした。最初のワンターンを追跡するシステムは、マンパワーの有無にかかわらず容易に行えるよう周到に準備しておくべきである。

KEKB のビームモニタシステムにおける最大の失敗であった。

3.4 BPM 検出器の変位

2004 年 4 月頃、HER でビームがアバートされると 4 極電磁石との相対位置が mm のオーダーで変化している BPM があることが発見された。TRISTAN 加速器の再利用である HER の電磁石には BPM 固定具の固定台座がなく、位置合わせのために BPM は 3 本の M12 ボルトを介して固定具から数 cm 浮かせて固定されている。そのためビームダクトが強力な放射光照射によって熱変形し、強大な熱変形力が BPM に加わってボルトをたわませ、ビーム電流の増減に合わせて BPM が変位していた。その後多くの BPM がこのような変位をしていることが分かり、BPM データを基にして実施されているビームオプティクス補正が BPM の変位に合わせて変化してしまっていた。不測の事態を避けるためオプティクス補正は低いビーム電流で行い、そこで得た補正パラメータにより大電流運転をしているので、極論すれば大電流時は盲目に近い状態で運転されていることになる。これではルミノシティー改善は困難であることから、オプティクス補正に重要な全ての 6 極電磁石に対する BPM の変位を測定し、リアルタイムでビーム位置データを補正することにした。放射線環境下であること及びコスト面で市販の変位センサーの採用は困難であることから、安価な静電容量型変位センサーを開発し、システムの構築を始めたが、その半ばにて筆者は定年を迎えてしまった。現在システムは完成しており、BPM 変位補正システムを稼働させてルミノシティー調整を行い、その状態で補正システムを停止するとルミノシティーは低下するということは聞いているが、詳細な調査はまだ行われていない。以上の BPM 変位は予想外のことであった。全く加速器とは油断できないしろものである。

4. 放射光モニタ（放射光干渉計）

筆者は放射光に関する経験がなくシンクロトロン放射光モニタの構築をどうしたものかと悩んでいたが、光学の専門家である放射光施設の三橋君が進んで協力を申し出てくれたので大変心強く安心したものである。筆者にとっては初めての経験であったので彼について行くのに精一杯であったが、おかげ様で随分勉強させて頂いた。ちょうど三橋君が放射光干渉計を考案した時期であったので KEKB にも干渉計を設置してもらい、ルミノシティー調整に極めて強力な手段を得ることができ感謝している。KEKB の運転ではデザ

イン値より少ないビーム電流で当初計画の倍近いルミノシティーを実現している。これはパンチの電荷量が大きいこととともに、衝突点におけるビームサイズを当初の計画より小さく絞ることができていることに因る。ビームサイズの調整には放射光干渉計が決定的な役割を果たしており、干渉計で測定されるビームサイズが常に最小となるよう軌道補正電磁石にフィードバックがかけられている。これにより常時小さなビームサイズが安定に保たれ、ルミノシティーアップとその安定化に大きく貢献している。考案されてからたいした時間が経っておらず、まだフィールド試験的な段階にある放射光干渉計をフィードバックループに組み込むことに対して三橋君は反対であったが、ミラー変形の影響の除去に成功して以来、干渉計が安定しビームサイズフィードバックが極めて有用なツールとなった。

放射光モニタの最大の問題は放射光取り出し鏡の熱歪みの影響である。強力な放射光が局所的に照射するので、必ず放射光取り出し鏡の表面が熱変形する。この変形は干渉パターンに大きな影響を与えるため見かけ上のビームサイズが大きく変化してしまう。これまで放射光の分野ではミラーの変形をできるだけ抑えるためにミラーの形状を工夫したり冷却構造を工夫したりと、種々の工夫が成されてきたが決定的な手段はなかったと云ってよいであろう。そこで干渉計にはスリットが二つあることに着目し、干渉パターンを二つのスリットの回折効果を込みにしてフィッティングすることでミラーの表面変形の影響を自動的に分離することに気がつき、フラナガン君の協力によりミラーが多少変形してもその影響を受けないビームサイズ測定法を開発した。これにより放射光干渉計の信頼性が飛躍的に向上し、その後の KEKB 運転に大きく貢献している。

5. 終わりに

以上思いつくままに印象に残っていることを書き連ねてきたが、現ビームモニタシステムは KEKB 運転にとって概ね十分な性能を実現している。ひとえにビームモニタグループ諸兄の努力によるもので心より感謝したい。一方、次期 Super KEKB 計画では 4.1 A (HER) × 9.4 A (LER) もの大電流ビームに対する BPM 検出器、放射光取り出し方法等、詳細な検討を要する問題が山積みであるが、諸兄の活躍により諸問題が一步一步解決され、計画が実現されんことを願うものである。