

特集2 KEKB B ファクトリーのコミッショニング

バンチフィードバックシステムの立ち上げ

飛山 真理*

Commissioning of KEKB Bunch Feedback Systems

Makoto TOBIYAMA*

B ファクトリーのような、大電流、多バンチ加速器を実現するためには、当時存在しない広帯域で、高速なバンチフィードバックシステムをほぼゼロから作り上げる必要がありました。事情は同時期にフィードバックシステム開発を開始した SLAC/LBNL でも似たようなものだったと思われます（但し、あちらの方が蒼々たる重鎮が多数そろっており、仕事の分担もちゃんと出来ていたし、確実に先行していた上、学術的な検討もしっかりされていました）。当時は、多バンチで 2 ns のバンチ間隔のビーム蓄積自体は KEK-PF などでも実現されていましたが、ビーム不安定については放置、あるいは tune や空洞の調整で逃げる、という方法が主流で、active に抑制する例は UVSOR などの少数の例を除きほとんどありませんでした。私が参加した時点のメンバーは、広島大学から春日さん（現 PF 光源）、私、大学院生の帯名さん（現 PF 光源）、KEK では PF 光源の桂さん、加速器の菊谷さん、末次さん、中国高能研から KEK に長期滞在中だった馬さんで、花岡さんも独自の方式の検討をすすめていらっしゃいました。また、黒川主幹、佐藤康太郎さんにも非常にご協力いただいていた。KEKB 計画スタートとともに、バンチフィードバックシステムはビームモニターグループに所属することになり、ビームモニターグループの皆様にも大いに助けていただきました。

はじめに PF リングに設置させてもらったボタン電極を使って開発をスタートし、その後引き続き AR 南衝突点に電極や、フィードバックキッカーを設置したり、トリスタン MR の日光直線部にモニター、キッカーを設置したりして、システムの開発および試験を続けました。また、当時の残骸があちこちに残っていますが、今から思うと結構スゴイ物が多くて笑えま

す。信号処理回路については、馬さんと菊谷さんとで DSP ベースの信号処理回路の検討をされていましたが、黒川主幹の御提案で、CERN の F. Pedersen が提案したハードウェア 2 タップ FIR フィルターを開発することになり、AR 用の CAMAC 版試作機、高速データデマルチプレクサ、マルチプレクサ用カスタム LSI の開発、そして 2 タップ FIR フィルター本体の試作へと進みました。もちろん開発は全然順調ではなく、試作 0 号機が奇跡的にちゃんと動いたにもかかわらず（基板、配線がジャンパーだらけの超スパゲッティ状態で信号がうまく鈍ったためと思われます）実機の方が絶不調、問題解決のため、AR 大電流実験中で猛烈に忙しかった中、毎週のように会社へ出張し、担当者といっしょにうなっていたのも思い出したくもない思い出です。悪夢のような AR 大電流実験が終わったら今度はすぐに KEKB 本体のフィードバックシステム建設、とよく途中で破綻しなかったものと思われます。建設がかなり見えてきた時期からフラナガンさんがフィードバックシステムのメンバーに加わり、また制御の表示部分を大西さんに手伝ってもらいました。

SLAC のフィードバックグループとは、かなり初期の段階から交流させてもらいました。私が KEK に移った年に SLAC を訪問した時点でも、向こうは ALS 用の横方向アナログフィードバックシステムを動かしており、進行方向フィードバックに関してもキッカーは完成しており、ALS で大規模 DSP 信号処理システムプロトタイプの試験をしているところでした。この時点ですでに不安定解析の方法、デジタルフィルターアルゴリズムに関しても研究が進んでおり、もはや大差がついた状態でしたが、担当の John Fox さんは大変親切で、こちらの相談にも乗ってもらえましてし、

* 高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設
(E-mail: makoto.tobiyama@kek.jp)

有益な情報を気前よく提供していただき、KEKBの建設期、フィードバックシステムの立ち上げ期、そして現在に至るまでの運用期を含めて大変お世話になりました。

さて、いよいよフィードバックシステムのコミッションですが、ビームオンに間に合ったのはベータトロンチェーン測定システム、及びバンチ電流モニターシステムの一部だけでした。他のシステムは、制御室内ケーブル接続さえ出来ていませんでした。個別バンチフィードバック系は、各部のタイミング調整の出来とアナログ系の信号合成部での性能でシステムの性能の大部分が決まってしまうことが多いのですが、この調整を行うためには、ビームが安定にちゃんと回って、ビームの信号がきれいに見えなければ満足いくところまでは調整出来ません。ところが、KEKBでははじめからかなりビーム不安定が強く、いきなりフィードバックががんばらないと先へ進めない状況が起こってしまいました。また、私たち担当者も経験が非常に乏しく、初めのうちはほとんど手探りで進めざるをえなかったため、なかなか調整が進まず、コミッショングループの皆様の堪忍袋の緒がきれたことも一度や二度ではありませんでした。この頃は、精神的にも不満たらたら、運転シフトもきつく、やはり全く思い出したくもない時期でした。ただ、幸いだったのは不安定なのが横方向だけで、進行方向のフィードバックは全く放置でも問題が無かったことで、これに進行方向の問題まで起こっていたら、耐え切れただとは思えません。

不十分ながらも横方向フィードバックシステムが動き出し、電流が積めるようになると、今度はどんどん蓄積電流が上がってきて、あるところでフィードバック

が破綻する、という悪循環がしばらく続きました。それに加えて、色々な部分の故障が発生するようになりました。あるときふとフィードバック用アンプのゲイン及びパワーを測ってみると異様に低く、8台使っていたアンプがなんと全部壊れていたことが判明、予備品が当然足りないのでそのうち少しでもパワーが出る物をのこして修理をまわしたとか（現有アンプは平均2回弱修理のため里帰りしている）、横方向キッカー部分で真空度が強烈に悪化したり、フィードスルー部分の接続構造がビームによる発熱サイクルによる金属疲労でこわれたり、バンチ電流モニターのタイミング部分が不良になりバケットセレクションに問題が発生したり、ハイパワーRF部ケーブルが焼損したり、もう故障だらけが続きました。図1は、LERで起きた横方向ストリップラインキッカーの破損故障で、電極板がビーム熱負荷サイクルによる伸び縮みを繰り返すことで接合部分が金属疲労を起こし破損、板が垂れ下がることによってビームが回らなくなり発覚した故障です。これらは、ほとんど私の設計不良、考慮不足が原因で、多くのご迷惑をおかけしました。別に現時点でも枕を高くして寝られるほど完成している訳ではなく、KEKB運転中は恐怖の夜中の呼び出し電話に怯えています。

私は（当時は夢にもそう思いませんでした）「幸いにも」ボタンヘッド、キッカーの開発といった真空に絡む部分の高周波シミュレーション、実機設計製作設置から、バンチ位置検出回路、高速デジタル信号処理回路（2タップFIRフィルタ）、バックエンド変調回路といったRFからDCまで含むエレクトロニクス、広帯域高出力増幅器、高出力用ケーブルなどちょっとパワーものなど、そしてこれらのEPICSによる

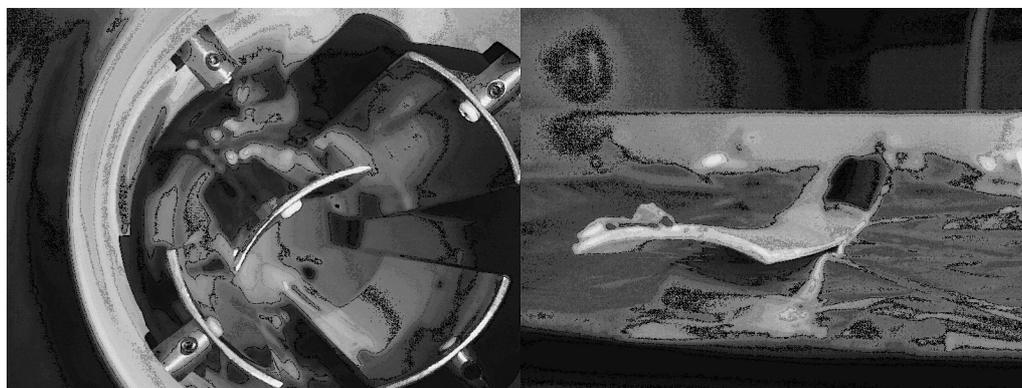


図1 故障したLER横方向ストリップラインキッカー（左）と変形した電極（右）。ビーム負荷による熱サイクルでストリップラインが伸び縮みし、金属疲労によりねじが破壊され、垂れ下がった。真空中でのスライド機構の設計ミスと、材料の選択ミス（銅は軟化点が低すぎで使うべきでなかった）が原因。

制御，ケーブル敷設（の手配，現場作業）など個別バンチフィードバックに関するすべての項目を直接に，最初から完成まで担当させていただきました．それに加え，ビームモニターシステムについても特殊な部分の設計製作をさせてもらい（それが逆にフィードバック系の開発にもつながった），今から思えば大変オトクでおもしろい仕事をさせてもらった，と言えなくもないと思います．ただ，このためちゃんとフィードバックシステムに関して考察を深める余裕（能力にも問題があるが）が無く，一応外に向かつてはフィードバックの専門家のような顔をして偉そうなことを言いつつ，自分ではホントはちゃんとは分かっていない，という劣等感が常にあります．将来，例えば若い人と一緒に再びシステムを開発するような場合には，こうはならないようにしなければなあ，と密かに思っています．

KEKBの横方向個別バンチフィードバックシステムは，システムの規模，フィードバックダンピングタ

イムなど今でも世界最高水準の性能です（PEP-II用システムは，横方向のフィードバックゲインはKEKBよりずっと小さかった：つまりビーム不安定が弱かった）．設計時，及び建設期は今よりずっとフィードバックシステムに対する理解は乏しく，多くの誤解が横行していましたが，設計の初期段階でフィードバックシステムが必要だと考え，試行錯誤を繰り返す私をはじめとする担当者たちを見捨てず大いに肩入れしてくださった黒川主幹をはじめとするKEKBの皆様方の卓見がなければ，システムは決して完成しなかったと思います．今や蓄積リングであれば，バンチフィードバックシステムを備えるのは当たり前となっていますが，それでいてまだ簡単に実現できるシステムとは言えません．KEKBフィードバックシステム立ち上げ，及び運転で得た経験を，それら今後のリングのフィードバックシステム設計及び立ち上げに協力することで生かしていきたいものだと思います．