

ビームフィードバックシステム

M.Tobiyama

23/Jul/2004

内容

- ビーム不安定と放射減衰
- フィードバックとは
- フィードバックシステムのあらまし
- 個別バンチフィードバックシステム
 - 信号検出
 - 信号処理
 - ビームへのキック
- KEKBバンチフィードバックシステムと関連システム

ビーム不安定

- 加速器真空要素(chamber、空洞、つなぎ等)にビームからの高周波信号が発生する
 - 共鳴構造(ブランコみたいなもの)
 - 鋭さ(Q値、低い方が良いか、高い方が良いか)
- 運悪く、次々来るバンチからの信号が、この高周波信号を大きくするように働くと(共振)、信号はどんどん大きくなり、また、ビームを揺らし始める
- ビームが振動し始めると、さらに激しくエネルギーがたまっていき、ますます激しくビームを振動させる

ビーム不安定(Instability)

電子(陽電子)円形加速器の放射減衰

- ビームは放射光を出すことにより、エネルギーを失う→エネルギー失っただけ高周波加速空洞からエネルギーをもらう
- このことにより、ビームの振動は減衰する
 - 放射減衰という
 - KEKBの場合、進行方向20ms程度、横方向40ms程度(振幅が $1/e$ になる時間)
 - この減衰率より、不安定の成長が早いと、ビームは振動を始めてしまう

大電流加速器では

- 大電流、多バンチ加速器(B-Factory、放射光源)では、
 - 大電流のために、今までは大丈夫だった諸々の不安定源による悪影響が明るみに出やすく
 - 多くのバンチがあるため、いろんな振動モードの不安定がおきやすく、そう簡単に逃げれない
- ため、ビーム不安定がおきやすい
- ひとたびビーム不安定が起きると、電流は積めないし、ビームの性質は悪くなるので加速器の性能を大きく損ねてしまう

ビーム不安定から逃れるには

- がんばって不安定の原因を加速器コンポーネントから取り除く努力をする
 - HOMの無い高周波加速空洞、スムーズな真空チェンバーなど
- ビームが振動したとき、自然に振動の周波数などが変わっていく仕組みを導入する
 - 多極磁石、非線形システム
- **フィードバックシステムで、振動を押さえ込む**
 - **個別バンチフィードバックシステム**

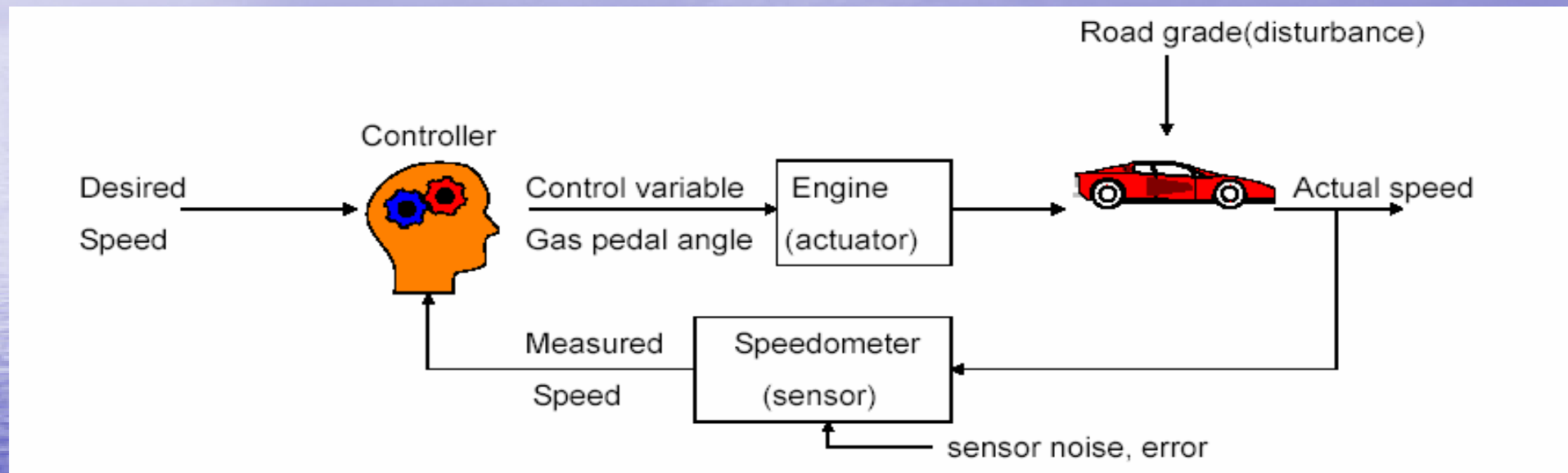
フィードバックシステムは

1. バンチの(重心)振動を検出する、高速位置検出システム
 2. 位置信号からフィードバックに必要な信号を計算する信号処理回路(およびタイミングを合わせる回路)
 3. ビームを蹴り戻すキッカーおよび大出力アンプ
- +
4. 不安定の起こり始め、収まり方を記録する
Transientデータ記録システム

フィードバックシステムがあれば

- 予期しない不安定を押さえ込んでとりあえず運転をすることができる
- ▲ 入射振動を早く押さえることが出来、入射ノイズを下げたり、入射効率を上げることが出来る
- ✗ どんどん大電流が蓄積出来る(フィードバックが破綻したときに大被害となる)
- ◎ 不安定の時間発展観測、不安定の強さの制御が出来るので、非常にクリアに不安定観測が出来る

フィードバックシステムの例(自動車のスピードコントロール)



- Open-Loop(開ループ、フィードバックなし)

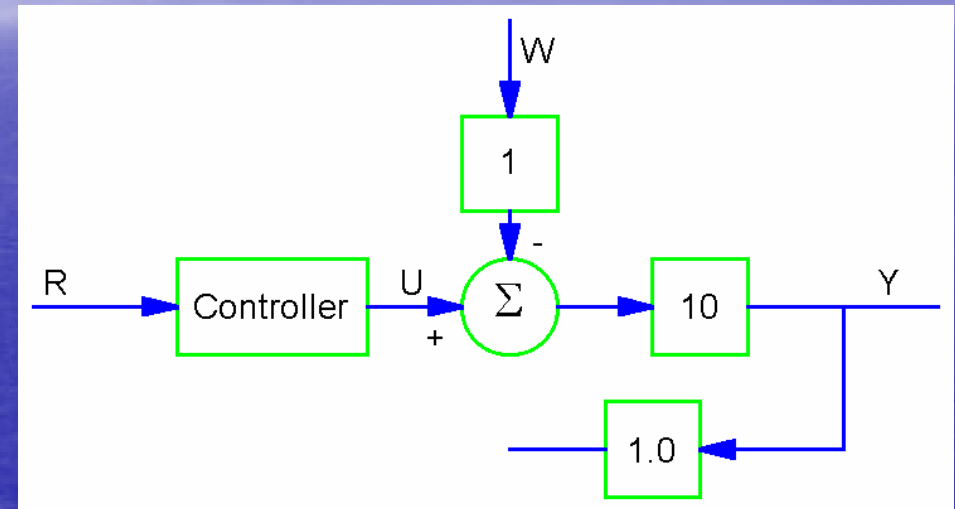
- スピードは周囲の条件によって上がり下がりする

- Closed-Loop(閉ループ、フィードバック)

- 周囲の状況の影響は少なくなる。但し、場合によってはかえってひどいことになることもある(例:ハウリング)

例

- 100km/hに保ちたい
- アクセルを1unit踏むと、speedは10km/h上がる
- 勾配1%でスピードは10km/h下がる
- スピードメーターには誤差は無い



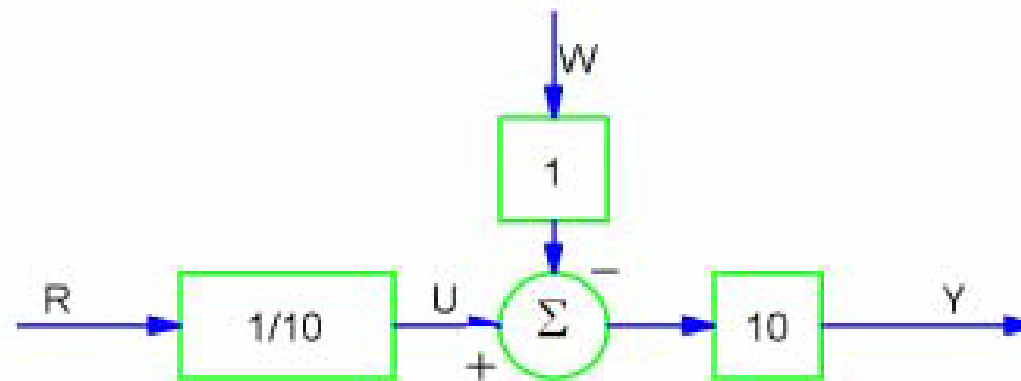
R =reference speed, km per hour (km/h)

U =gas pedal angle, degrees

Y =actual speed, km per hour

W =road grade, percent

Open-loop



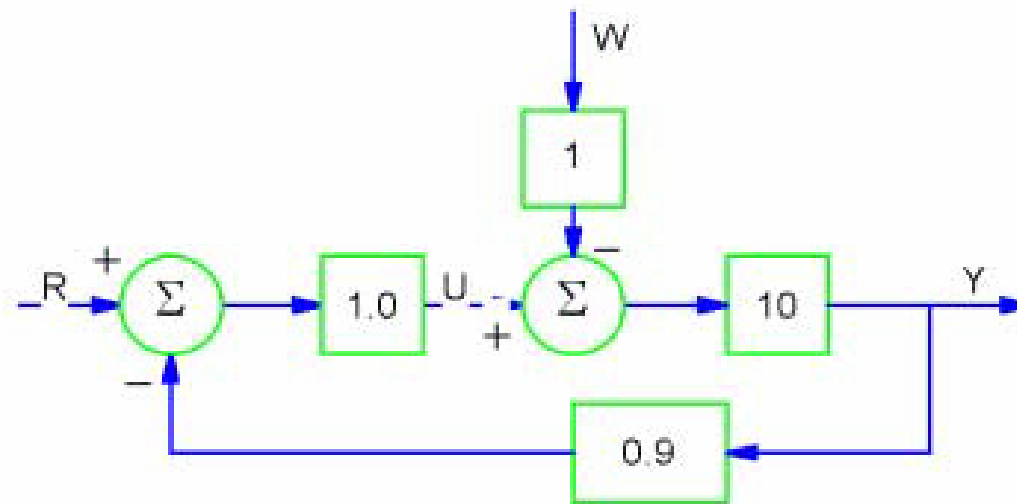
$$\begin{aligned} Y_{ol} &= 10(U - W) \\ &= 10((R/10) - W) \\ &= R - 10W \end{aligned}$$

if $W=0$, $R=100(\text{km/h})$
when $W=1$ (1% grad.)

$$Y_{ol} = 100 \text{ km/h}$$

$$Y_{ol} = 90 \text{ km/h} \quad (10\% \text{ loss})$$

Closed-loop (negative feedback)



$$Y_{cl} = 10(U - W) \quad \&\& \quad U = R - 0.9Y_{cl} \quad \rightarrow \quad Y_{cl} = 10R - 9Y_{cl} - 10W$$
$$Y_{cl} = R - W$$

Again $W=1$, $Y_{cl}=99\text{km/h}$ (1% error!!!)

Error reduced by a factor of 10.

難しい話はさておいて...

- Positive feedback(正帰還)
 - 勝手に飽和する(あるいは非線形で振動が収まる)ものでなければ、制御は非常に困難
 - 発振回路によく利用される
- フィードバックゲインをどんどん上げると...
 - 定常状態のエラーは減る
 - フィードバックの応答が良くなる
 - × フィードバックシステムの安定性を損ねる
 - 不安定になったシステムは振動し始めたり、急速に振動を成長させたりする
 - マージン(ゲイン、位相)が必要。遅いシステムでは、PID制御など安定化の手法あり

- 時間遅れのあるシステム

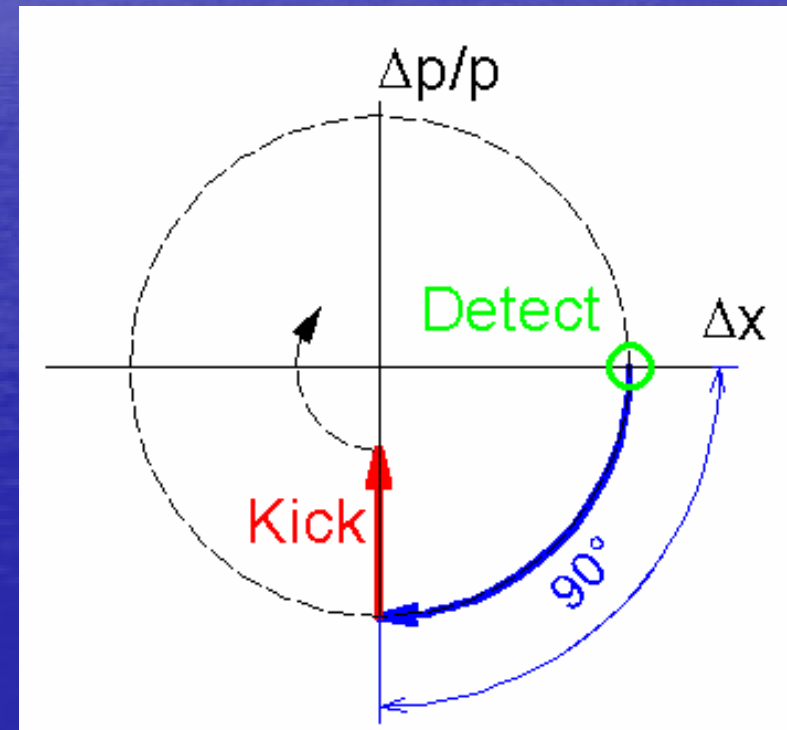
- どんなにがんばっても最短1周おくれ待たなければフィードバックできない
- 計算機を使ってフィードバック量を決めるシステムでは莫大な量の時間遅れが発生する
- 時間遅れは常にシステムを不安定にする
 - 線形計算にのらないので評価は大変面倒
 - 帯域制限が必要(応答が悪くなっても)
 - ゲインをがんばることはできない(基本的にはゲインを下げて対処する)

加速器制御のなかのフィードバック

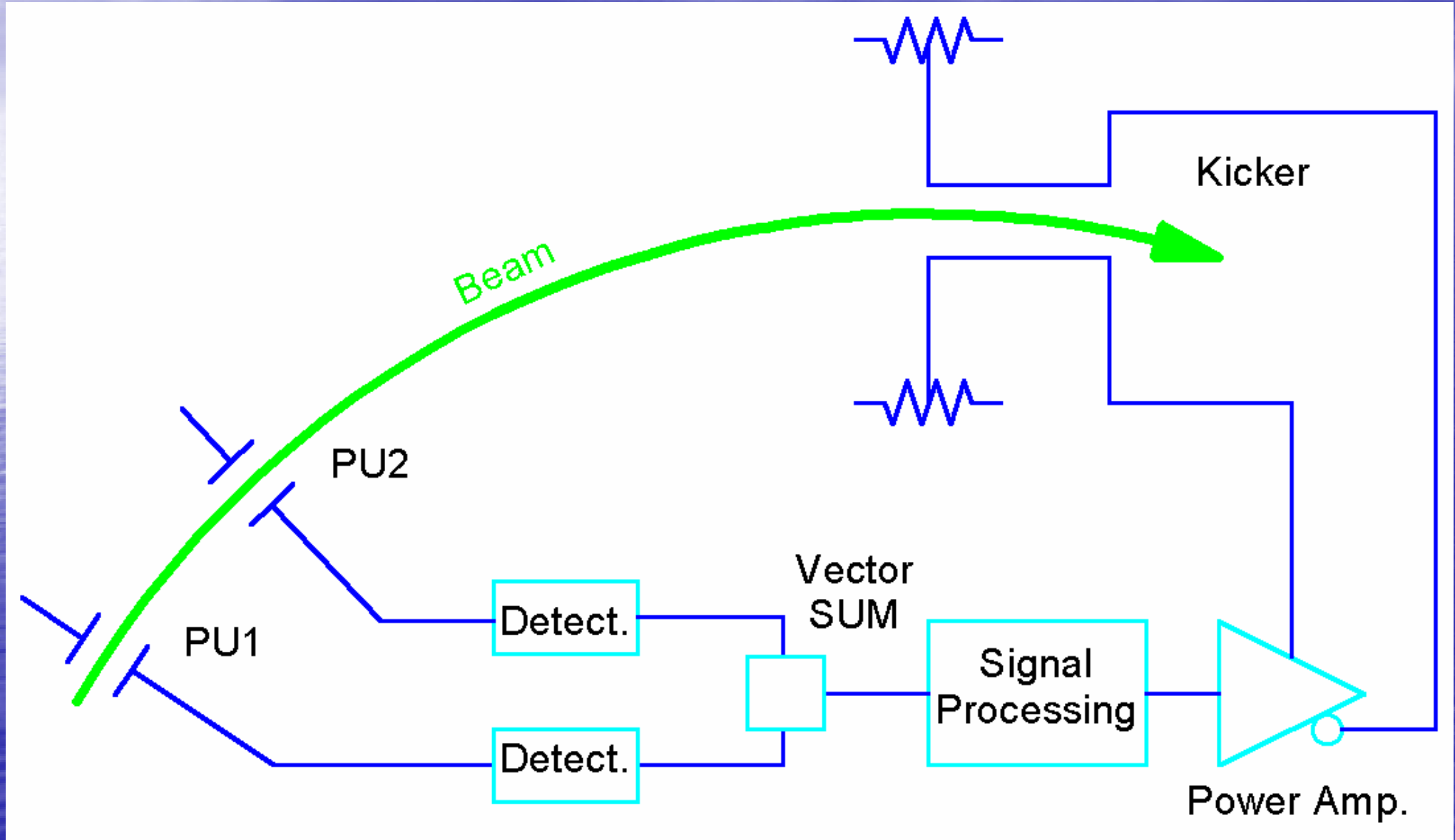
- 個々の機器(電源とか)の安定化
- システム全体としてフィードバックが幾重にもかかっている(例:RFシステム)
- 計算機を使ったフィードバック
 - iBump、CCC、Tune feedback、BT-end feedback、Linac Energy feedback等々
- ビーム不安定抑制のための個別バンチフィードバック

個別バンチフィードバックの方法

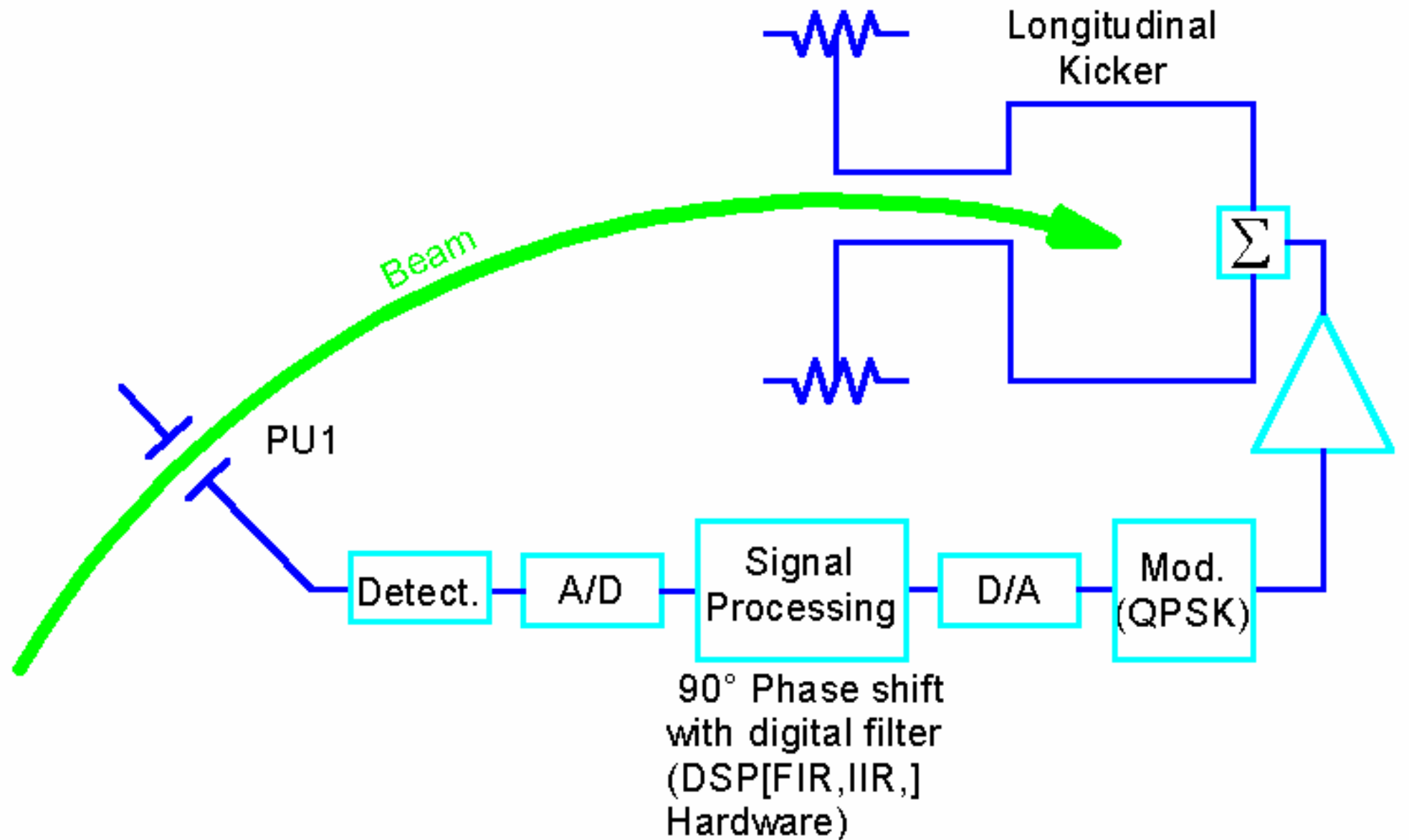
- 各バンチの重心位置を(独立に)検出する
- キッカー位置で位相差が90度となるよう位相シフトを行う。同時に不要な成分(たとえばDC分)を除去する。
- バンチがキッカーの位置に来るまで待つ(1-turn delay)
- バンチを蹴って角度(横方向)あるいは運動量(進行方向)を変える



典型的な横方向フィードバックシステム

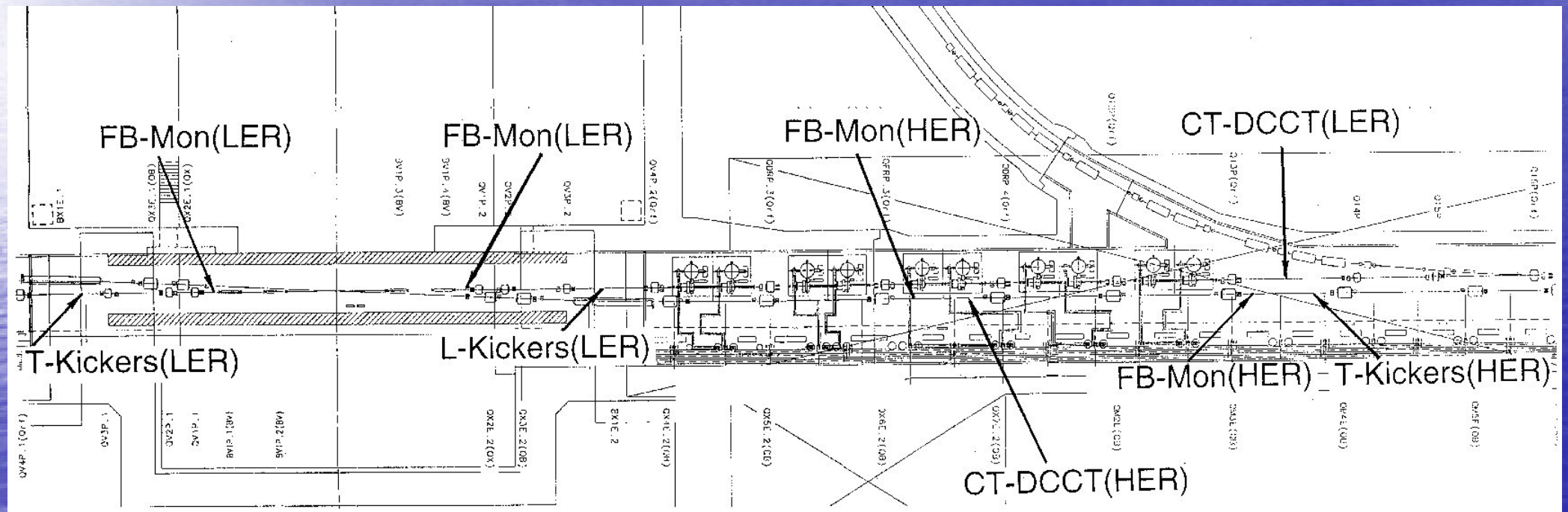


典型的な進行方向フィードバックシステム

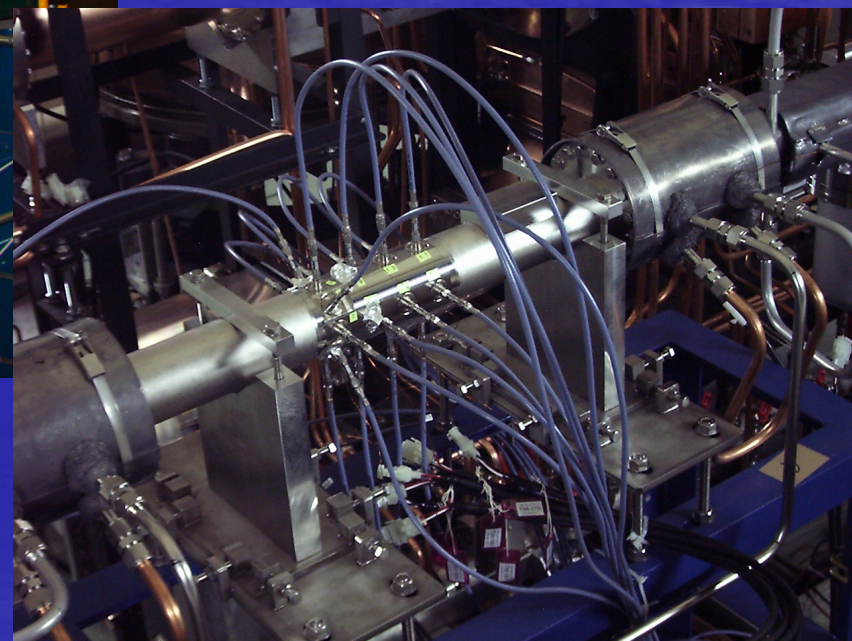
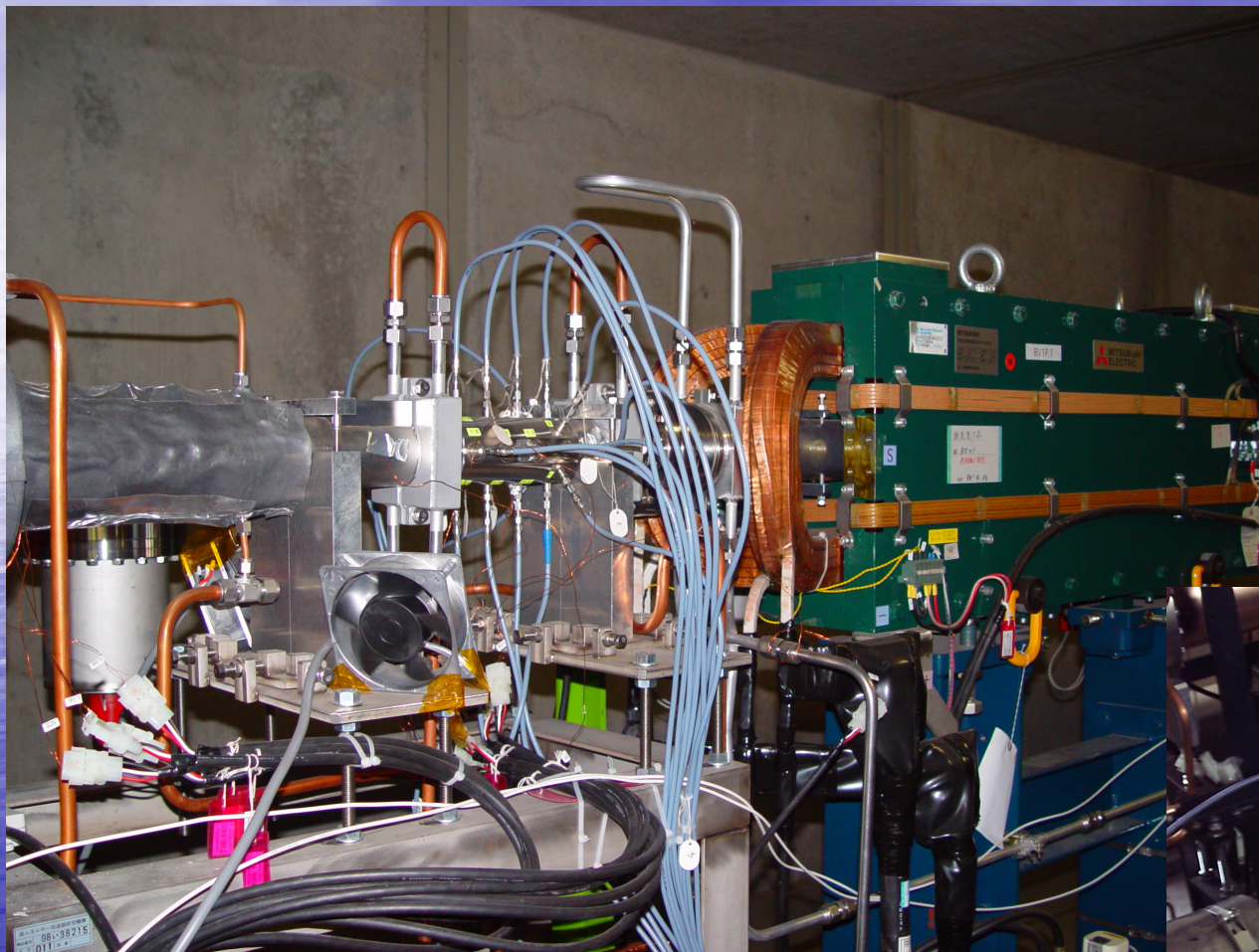


KEKB bunch feedback systems

富士直線部



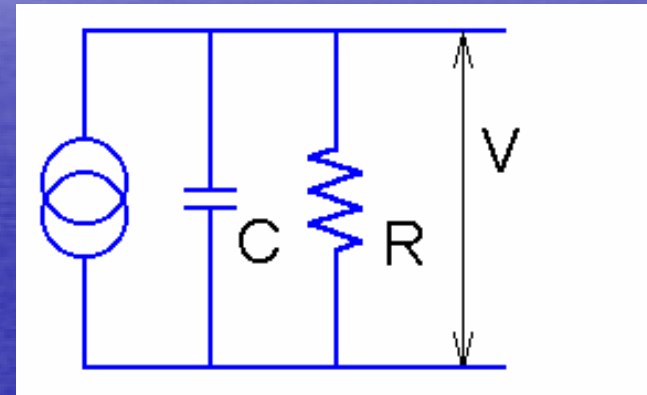
位置検出システム



ボタン電極

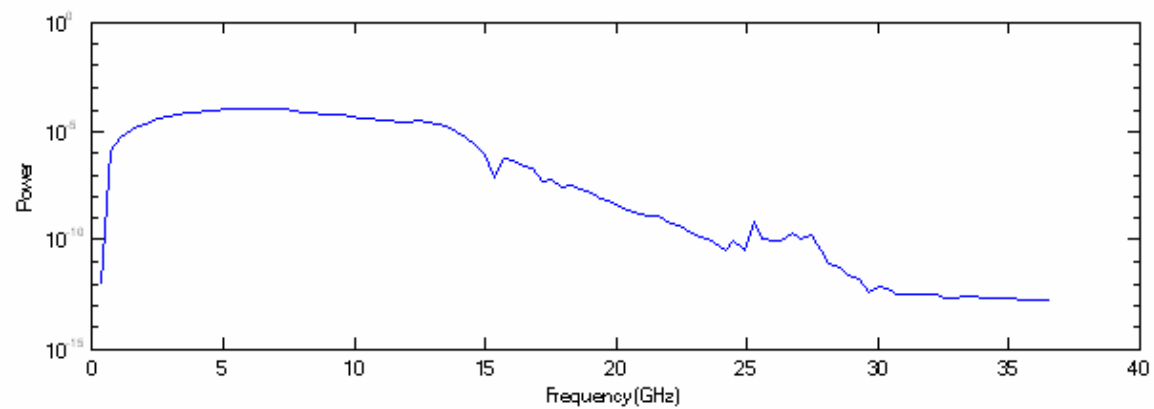
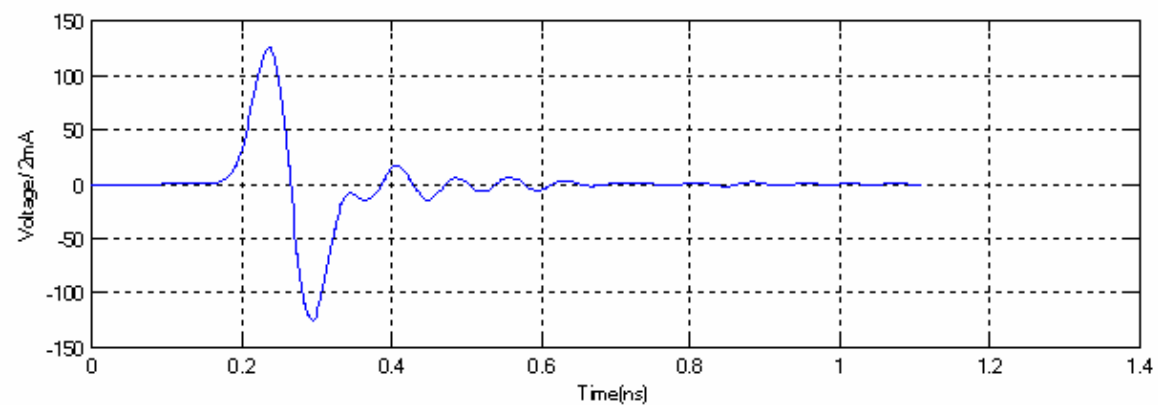


時定数 $1/CR$ のハイパスフィルターになる
(微分波形となる)

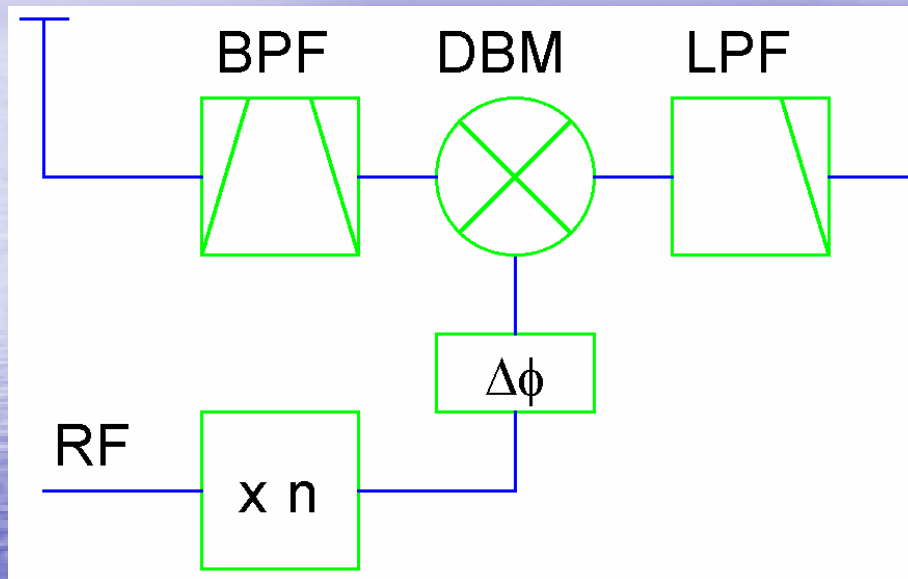


$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R}$$
$$V(s) = \frac{Q(s)}{C} \frac{s}{s + \frac{1}{CR}}$$

電極の出力



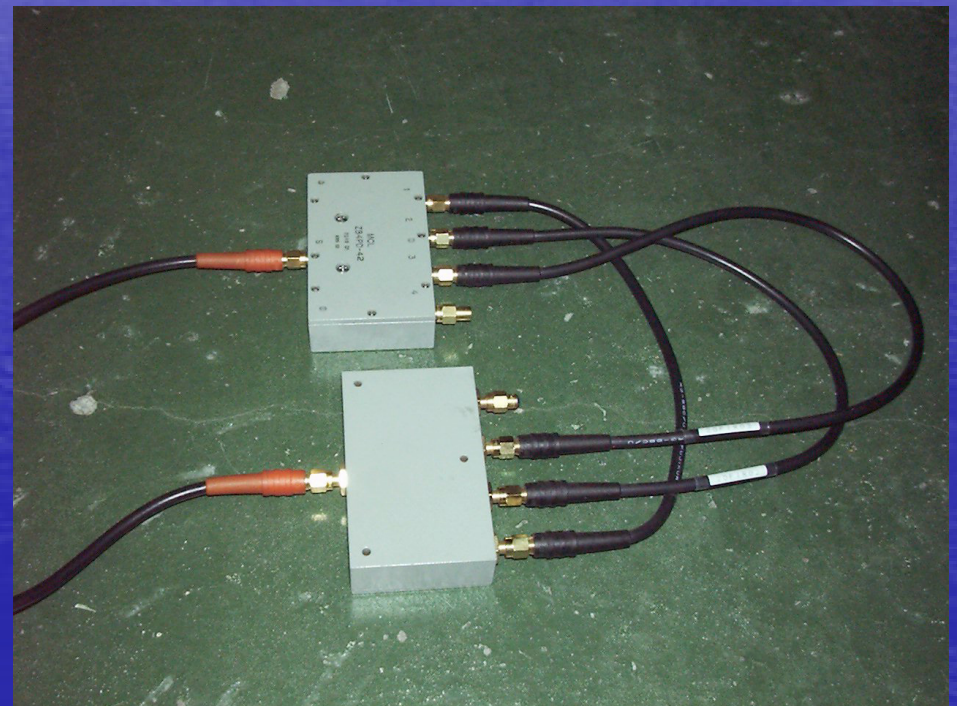
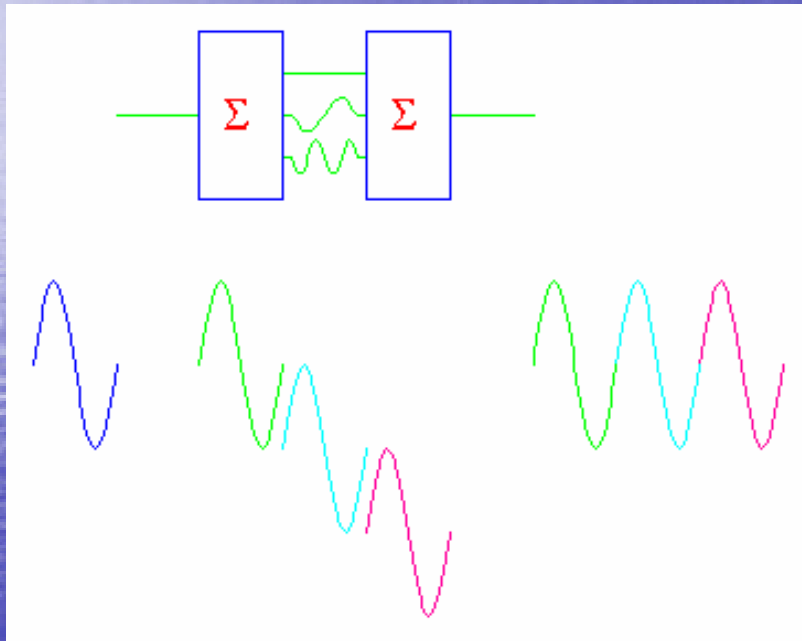
進行方向位置検出



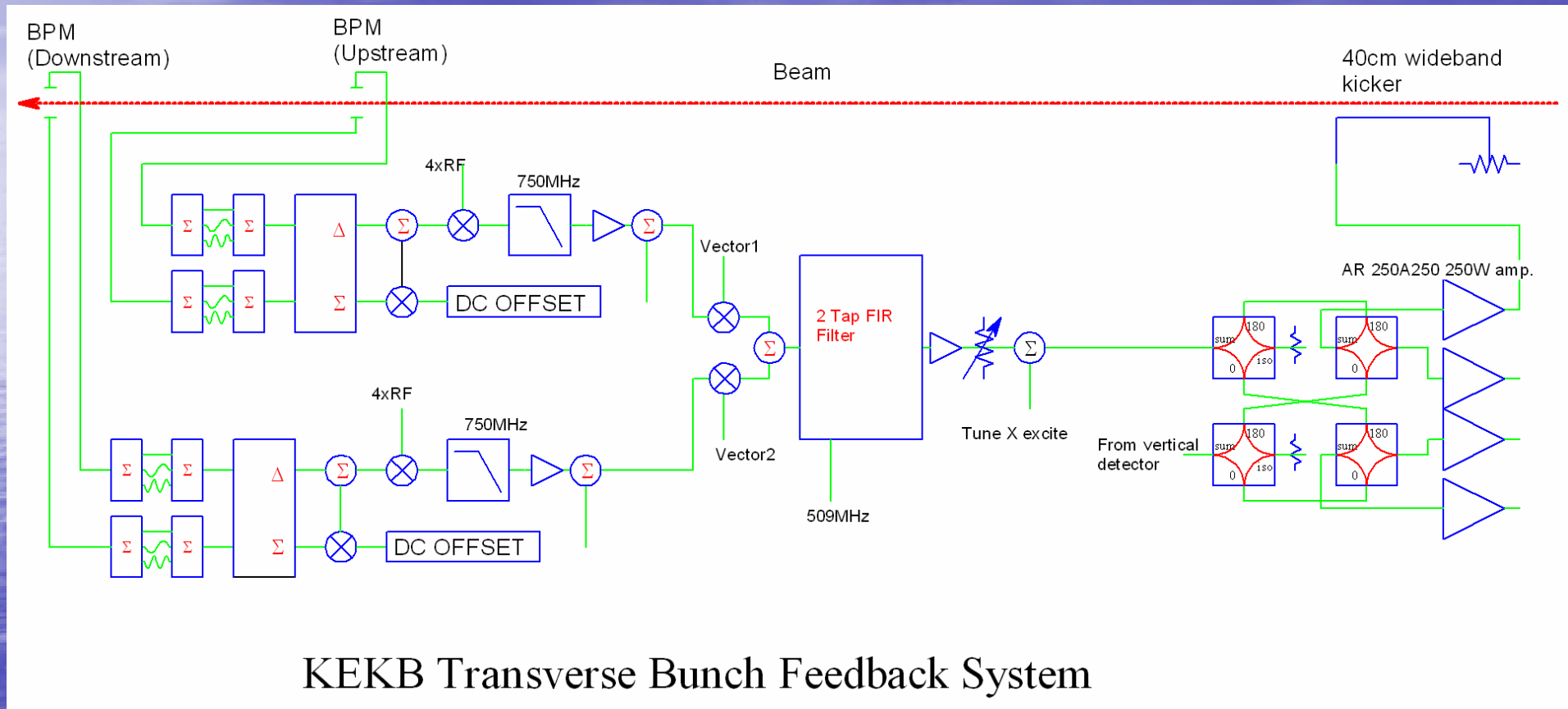
- バンチ電流に比例した出力
- 感度は検出周波数に比例

- バンドパスフィルターの後ろのビーム信号
 $I_b \cos(n\omega_{RF}t)$
- シンクロトン振動があると
 $I_b \cos(n\omega_{RF}t + \Phi \sin \omega_s t)$
- RF信号をn逡倍したものとDBMでかけ算をすると
$$I_b \cos(n\omega_{RF}t + \Phi \sin \omega_s t) \times \sin(n\omega_{RF}t)$$
$$= \frac{1}{2} I_b (\sin(2n\omega_{RF}t + \Phi \sin \omega_s t) - \sin(\Phi \sin \omega_s t))$$
- LPFの後ろでは
 $I_b \sin(\Phi \sin \omega_s t) \approx I_b \Phi \sin \omega_s t$

バンドパスフィルター



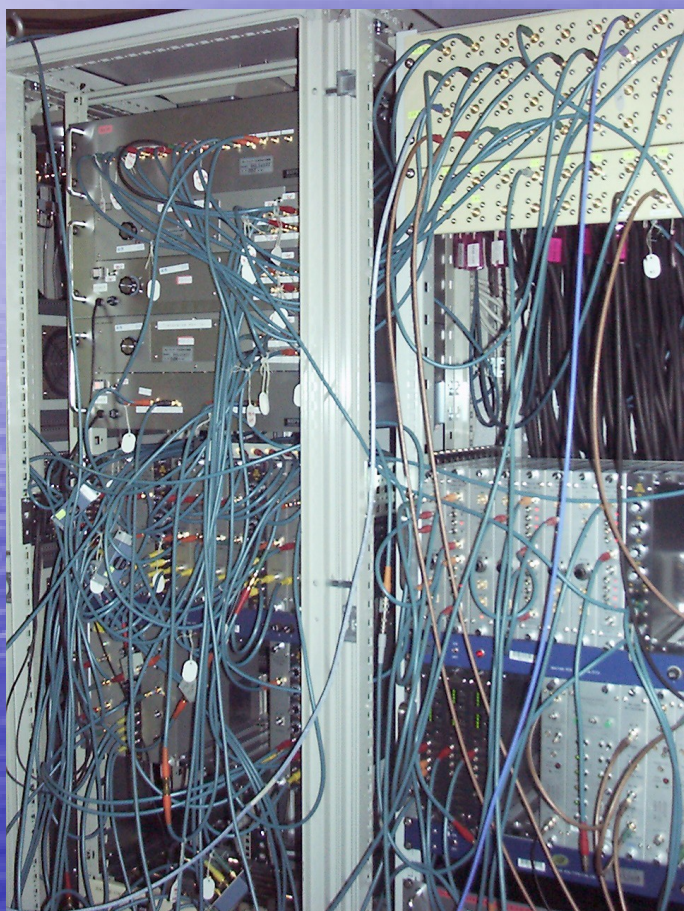
横方向位置検出



$$I_b \cos(n\omega_{RF}t + \Phi \sin \omega_s t) \times \cos(n\omega_{RF}t) = \frac{1}{2} I_b \left(\cos(2n\omega_{RF}t + \Phi \sin \omega_s t) + \cos(\Phi \sin \omega_s t) \right)$$

$$\approx \frac{1}{2} I_b$$

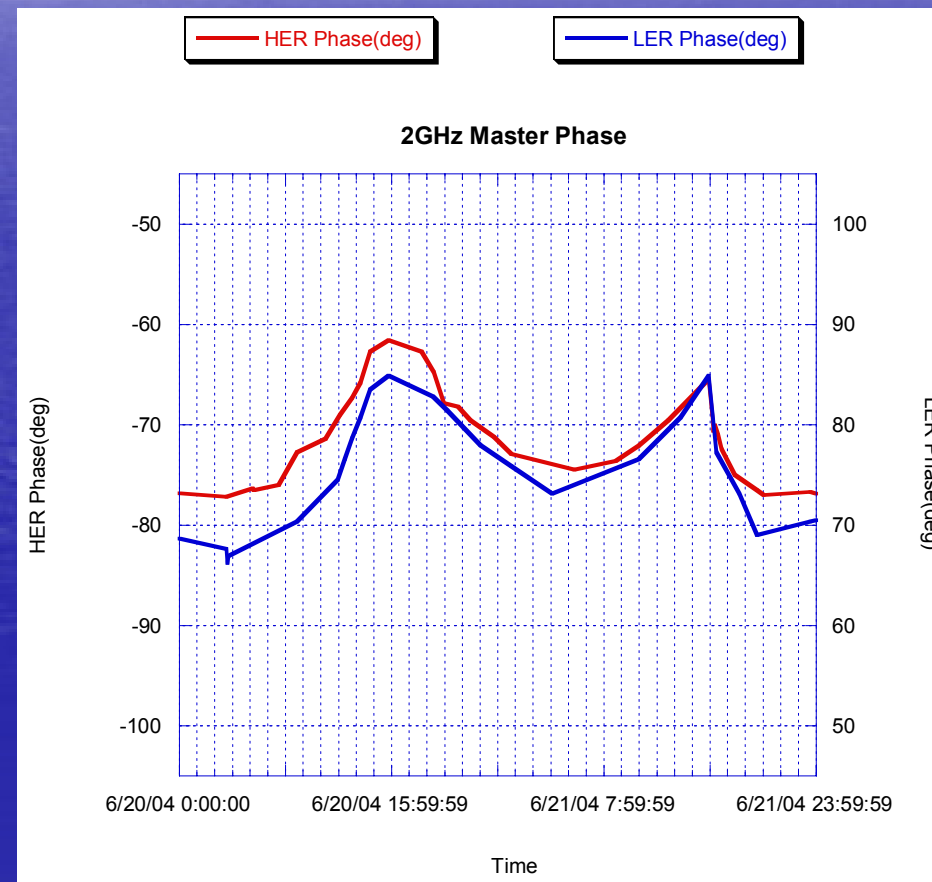
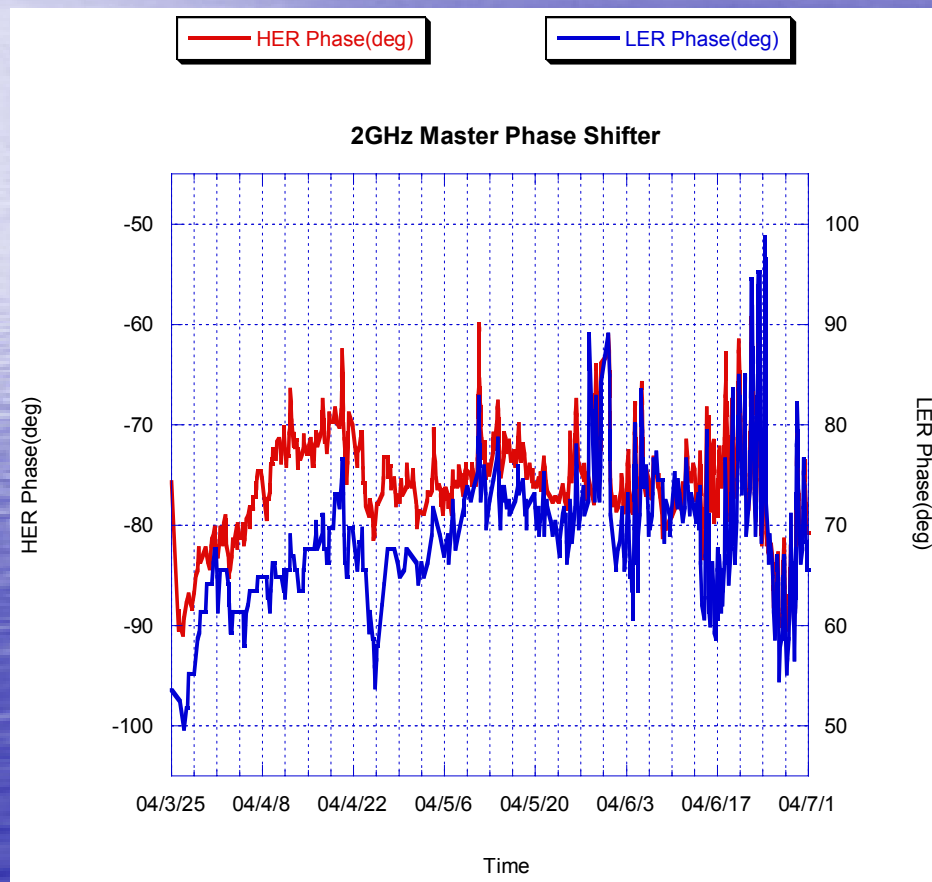
検出用エレクトロニクス



全体の位相基準コントロール

- HERはリング全体基準の509MHzを、LERはD8側室空洞基準509MHzを光ファイバーでもらってきて基準信号としている
- フィードバックシステムの検出系は509MHzを4逡倍した2036MHzを使っている。
- 外気温等の影響で509MHzとビームとの位相差ができると、検出系には**4倍大きく影響する**。
- 位相制御が必要(オシロスコープで進行方向位置検出信号を見て、0になるように位相シフトを変える)

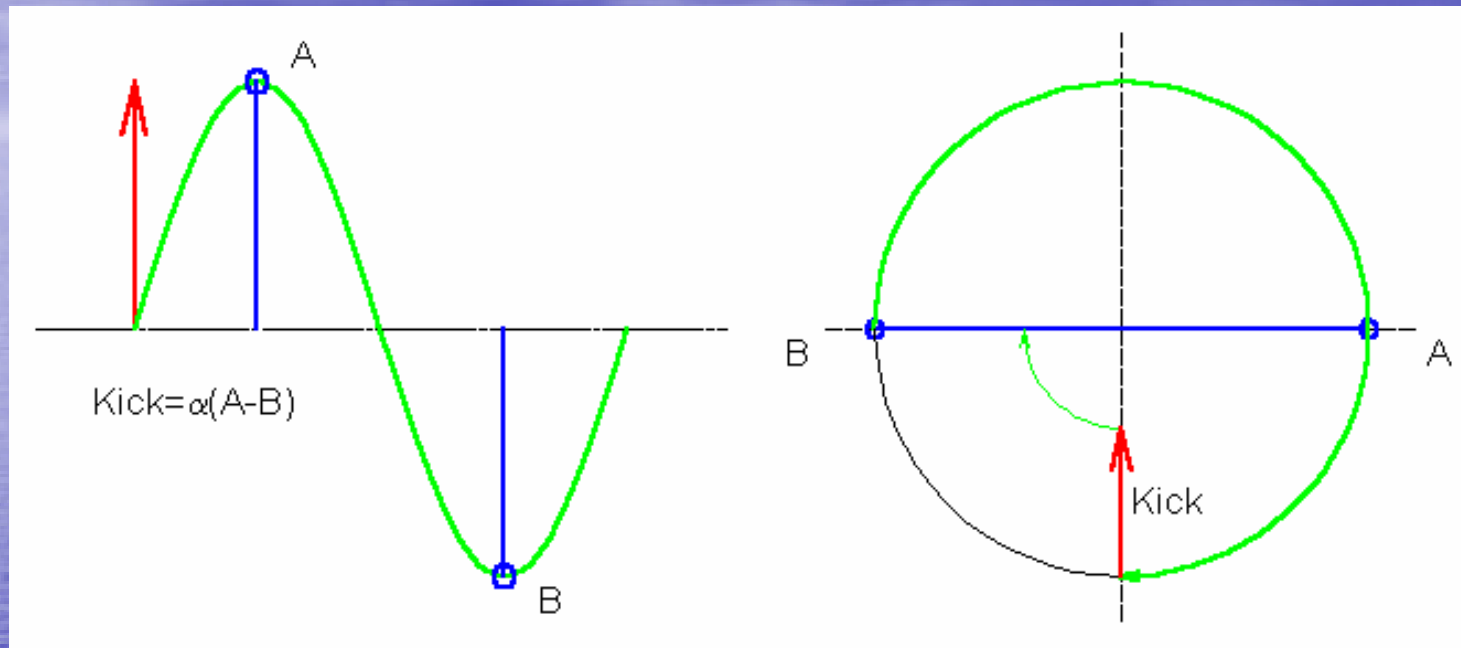
2GHz位相設定値の変化



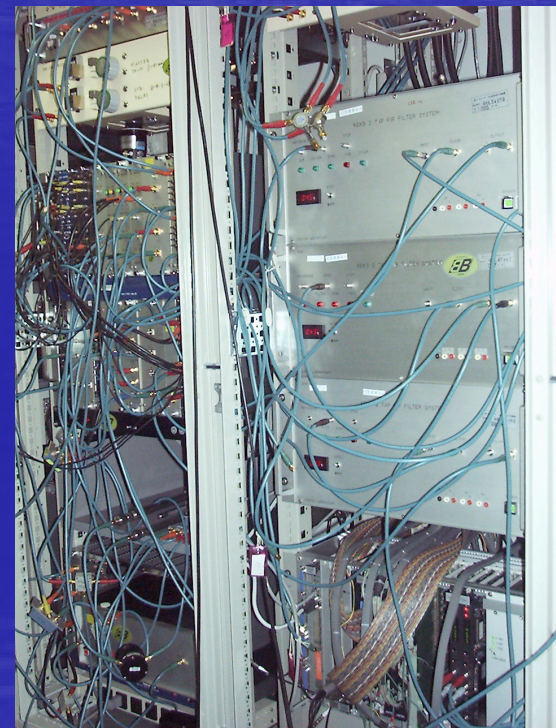
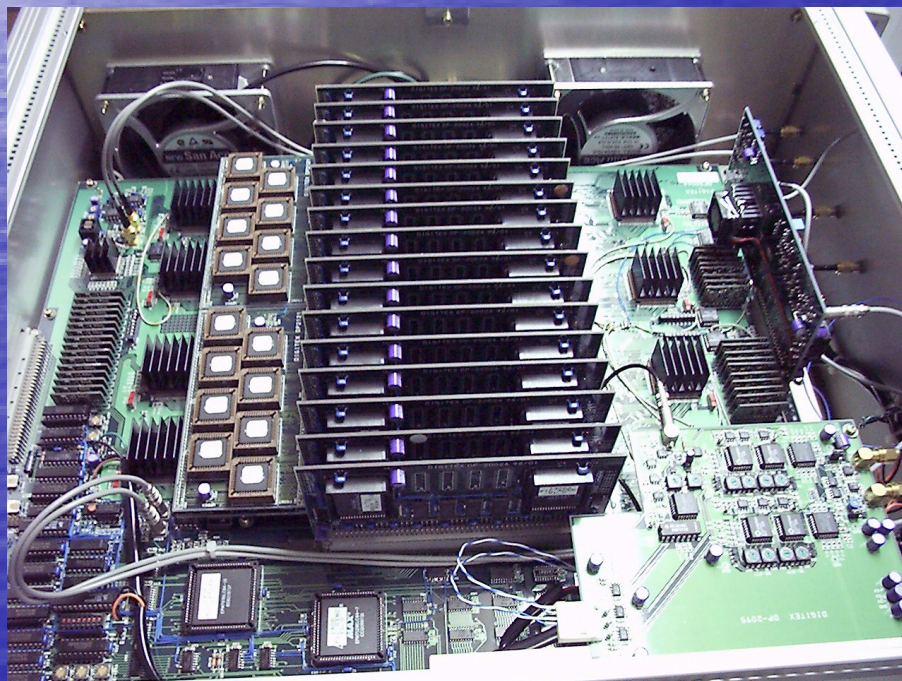
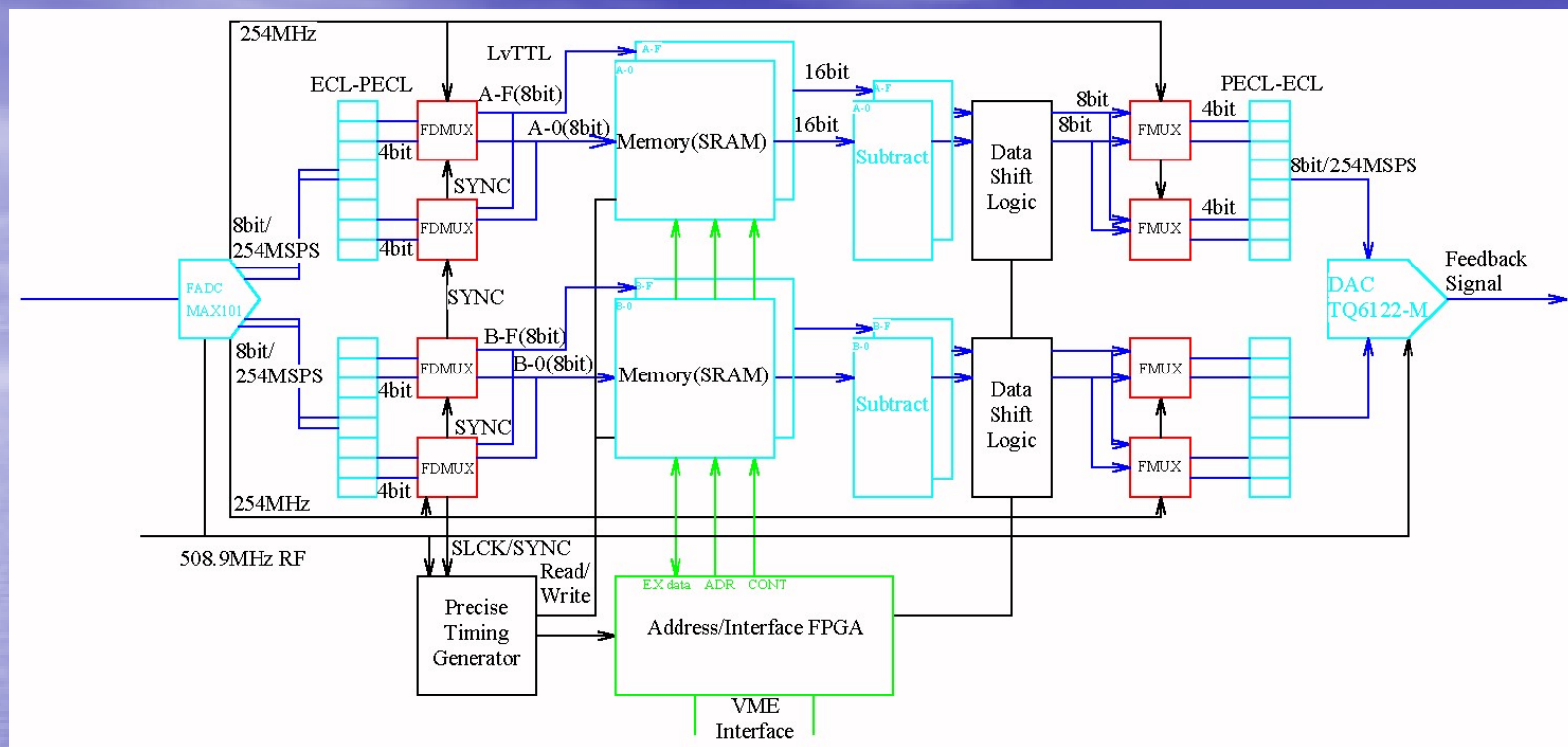
信号処理部

- フィードバックに不要な信号成分(たとえばDC成分とか)を除去する
- フィードバックに必要な90度位相シフトを作り出す
- 検出したバンチに正確にフィードバック信号を戻す、デジタルディレイ

Hardware 2タップFIRフィルター



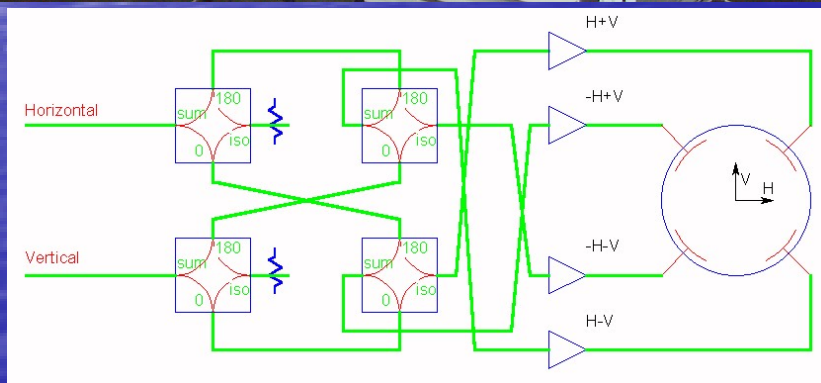
- 1turn前の位置から2turn前の位置を引き算
 - DC成分は除去
 - 中心周波数はtuneで0.5付近



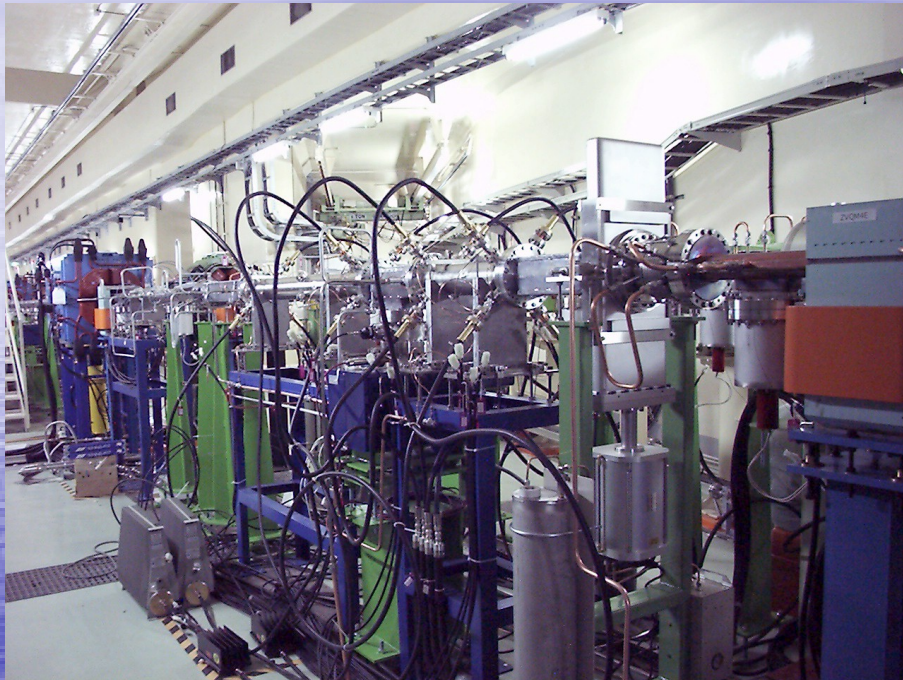
フィードバックアンプ



- 横方向用は10kHz～250MHz帯域、250W出力アンプ(pure-A-class)をリング毎に4台ずつ使用
- 富士架橋下に設置
- カメラでも監視可
- 予備機は3台(AR西)

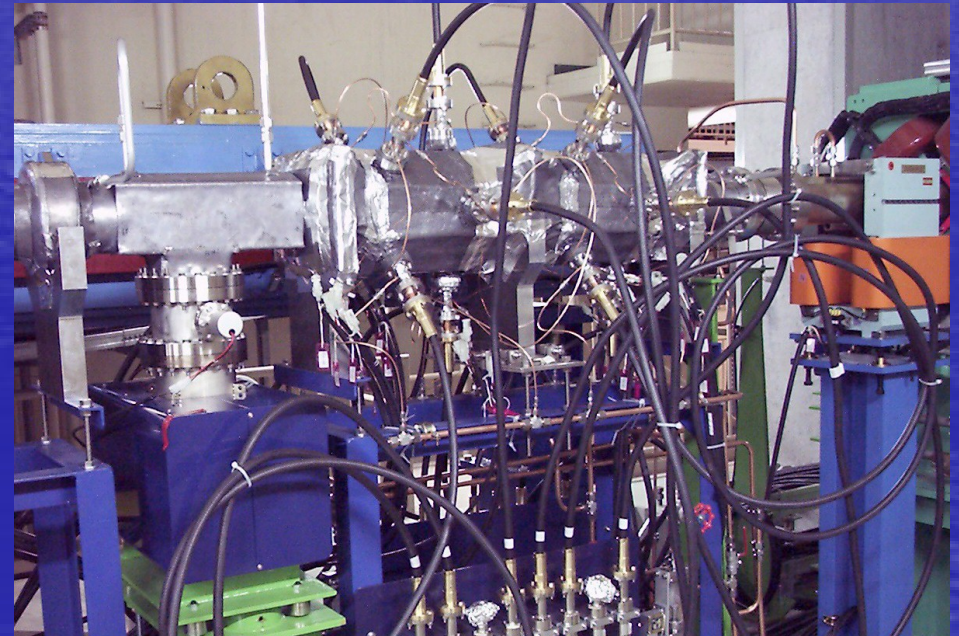


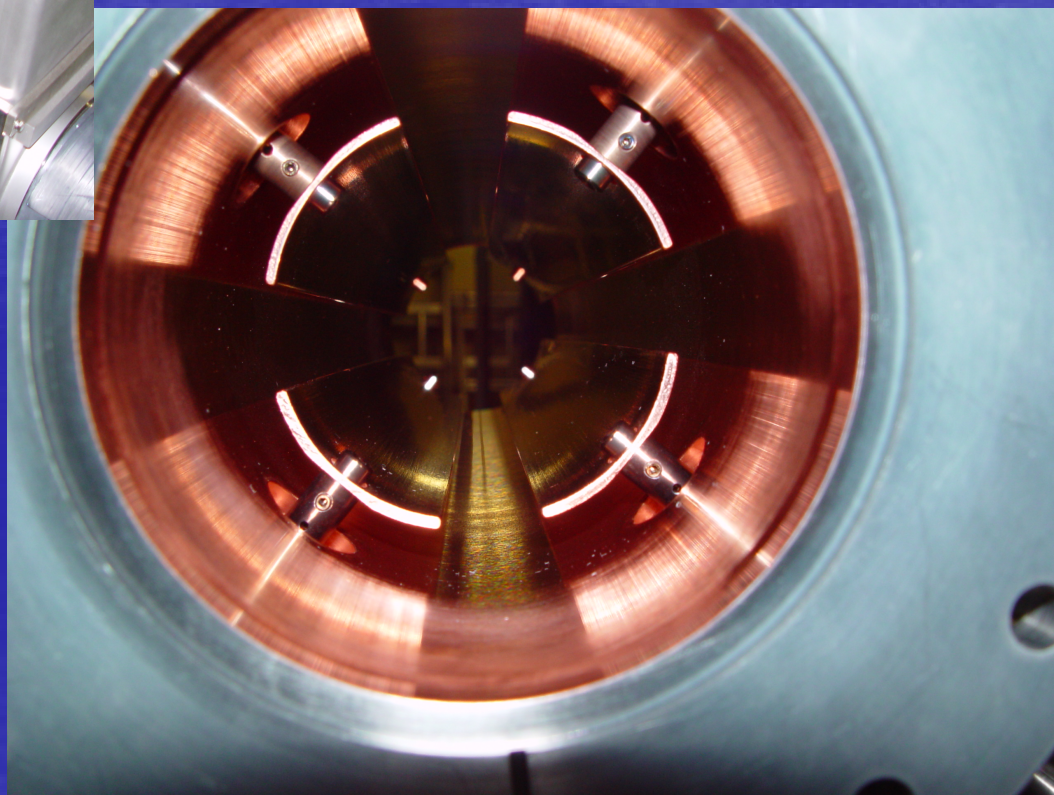
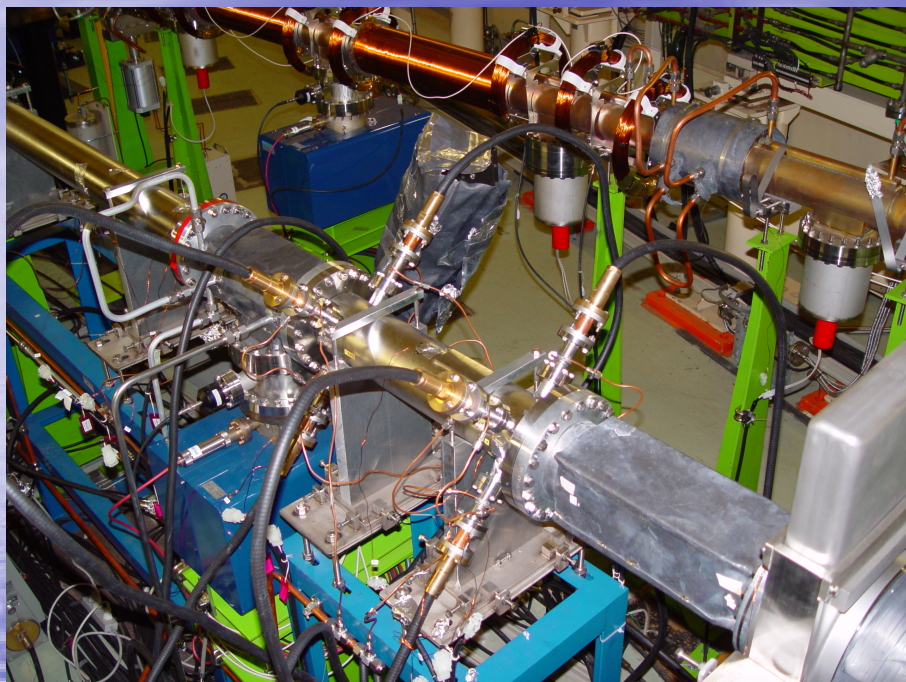
フィードバックキッカー



横方向キッカー

進行方向キッカー

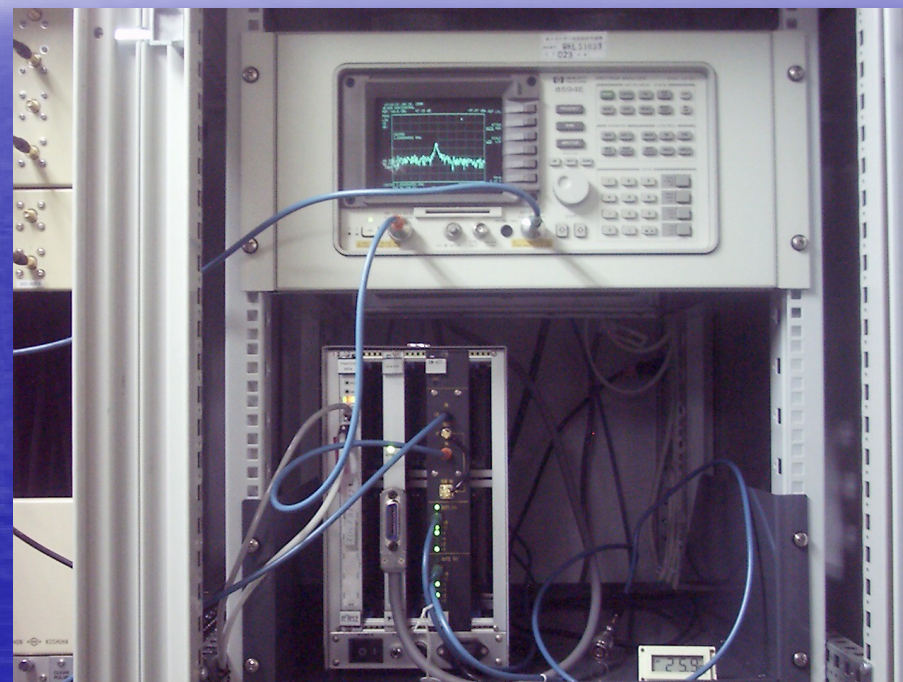
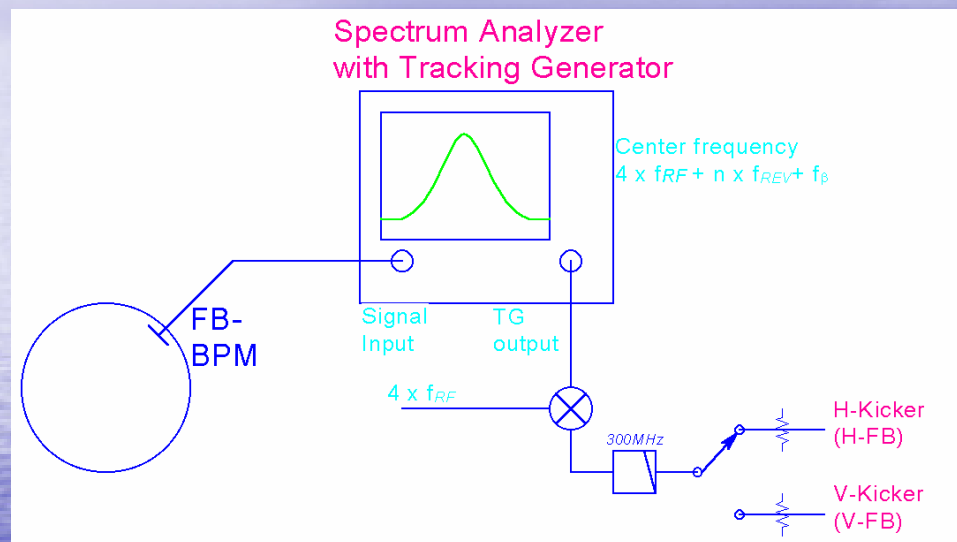




フィードバック関連システム

- ベータatronチューン測定システム
 - Global tune(optics correction時に使用)
 - Gated tune
- バンチ電流測定システム
- Bunch oscillation recorder

ベータトロンtune測定システム

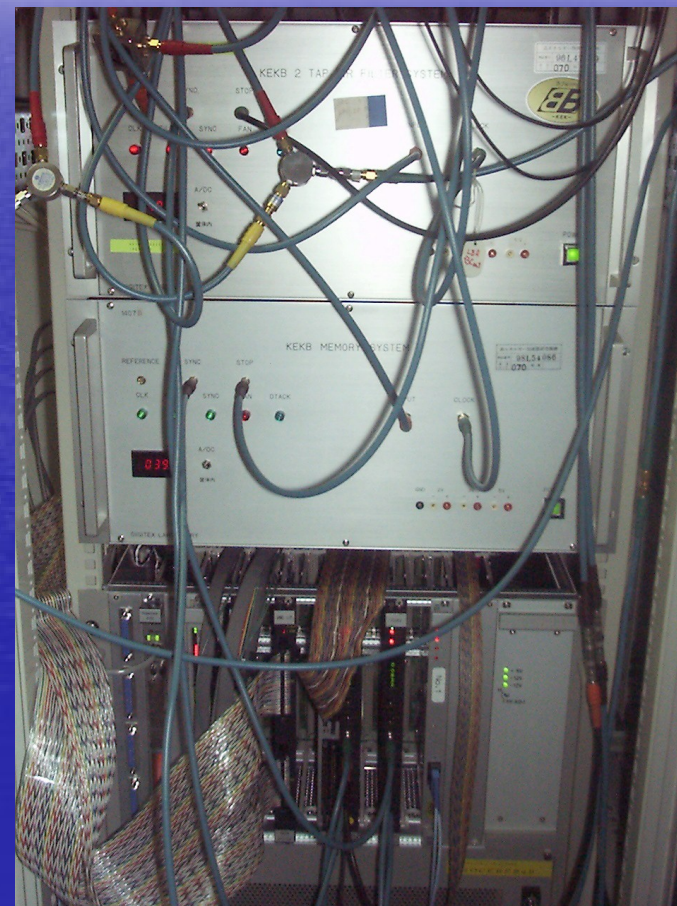
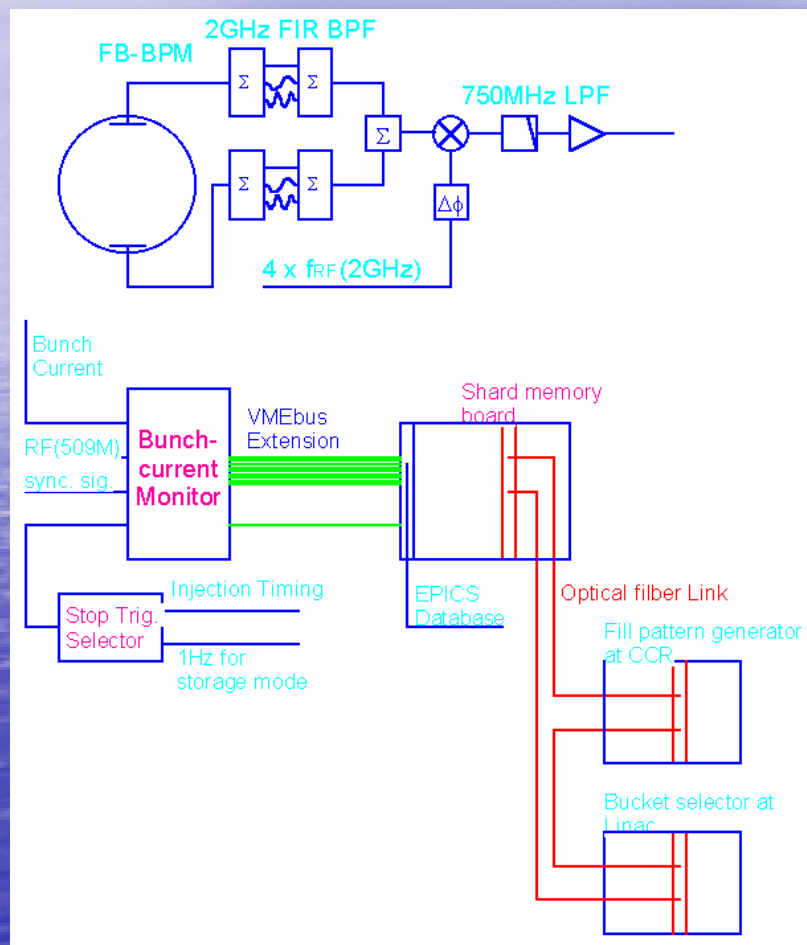


- Gated tune測定システムとは切り替えて使用する
- 時々Tracking調整必要

Gated tune測定システム

- 信号: FB-BPM信号をBODで位置検出
 - BODのAGC-gainについては、現在改造中
- Excite: 一応gateをかけたexcite信号
- 振動を検出しているバンチに関して、FB-ON/OFF可能。通常はFB-OFFで
- タイミングにとっても敏感なので、タイミング事故などの後は担当者による調整が必要
- 問題発生時は飛山、家入、川本が担当

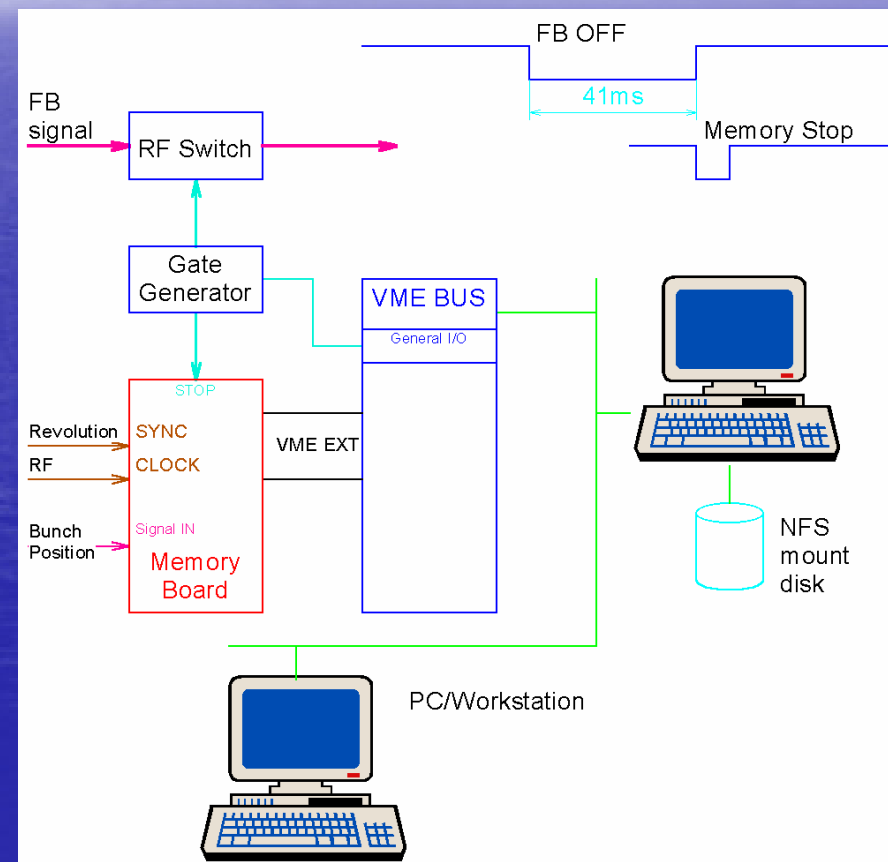
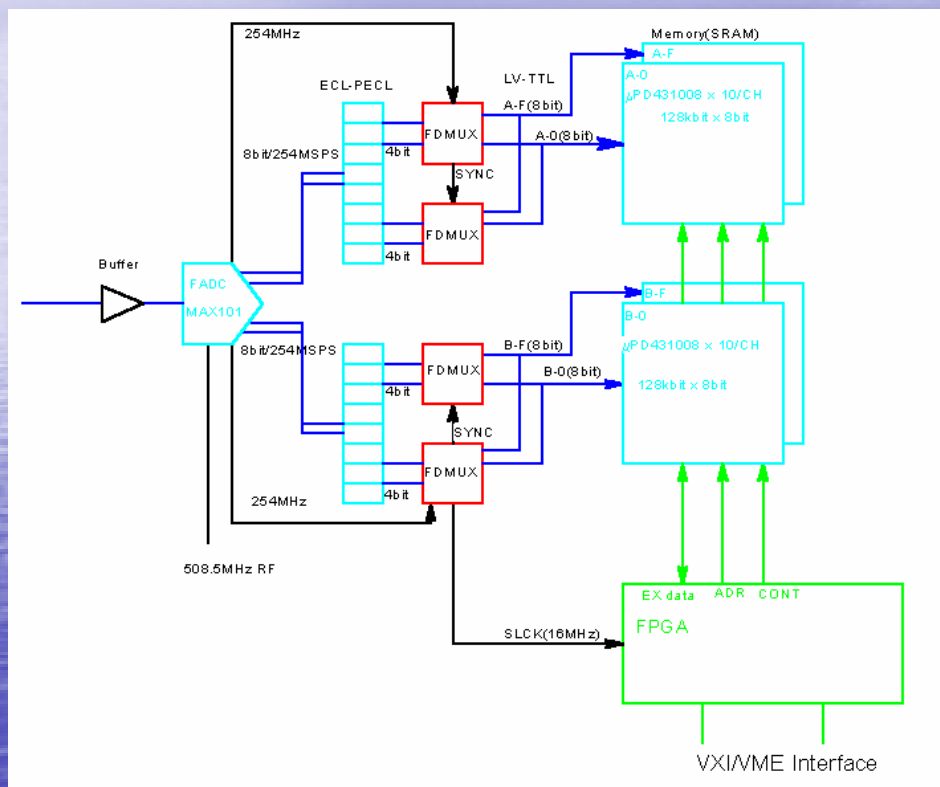
バンチ電流モニタ



バンチ電流モニタ(つづき)

- 過大なバンチ電流はモニター系の重大故障の原因となるので、過大バンチ電流で入射を止めるsoftインターロックが働いている
- 入射時はバンチ電流を計ると同時に、bucket selectionプログラムに入射タイミングを教え
ている
- 停止すると、入射不能になるし、重大事故につながるおそれがある

Bunch振動レコーダー



Bunch振動レコーダー(つづき)

- 通常は、ビームロスで自動的にデータ取得するモードになっている
- スタディ時に、FB-OFFとかInjection時データ取得モードにすることがある
- たまにデータがとれていないこともあるが、今のところ仕方ない

Bunch振動データ例

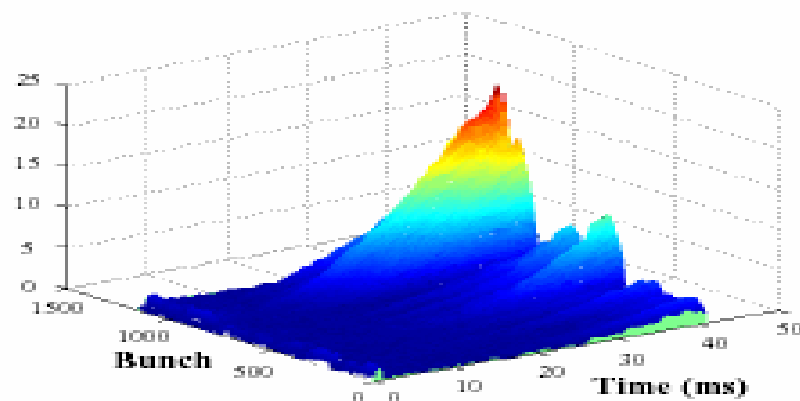


Fig. 3 The horizontal amplitude growth of bunch oscillation in HER at 400 mA

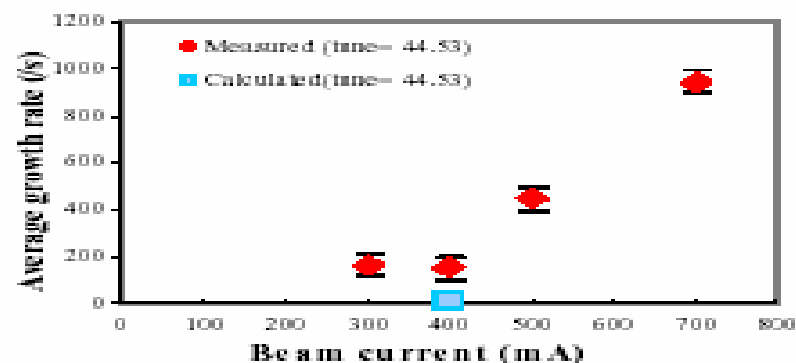


Fig. 4 The horizontal average growth rates in HER as a function of beam current

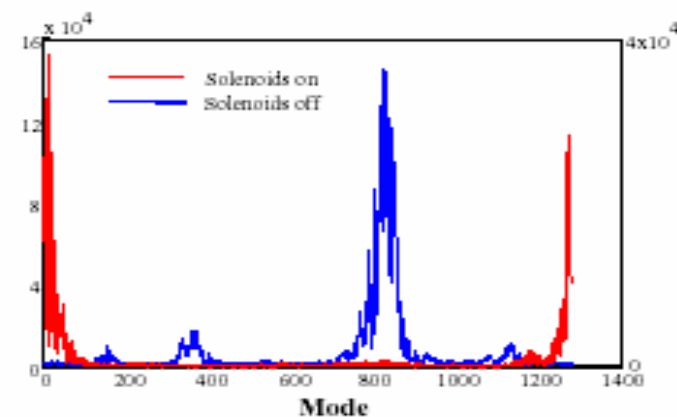


Fig. 6 The horizontal mode distribution of LER at 600mA

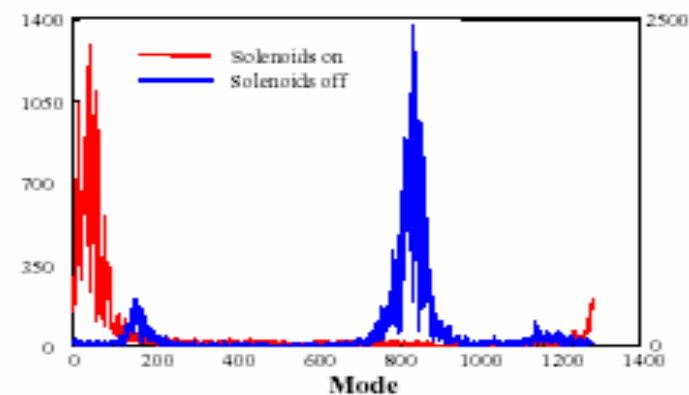
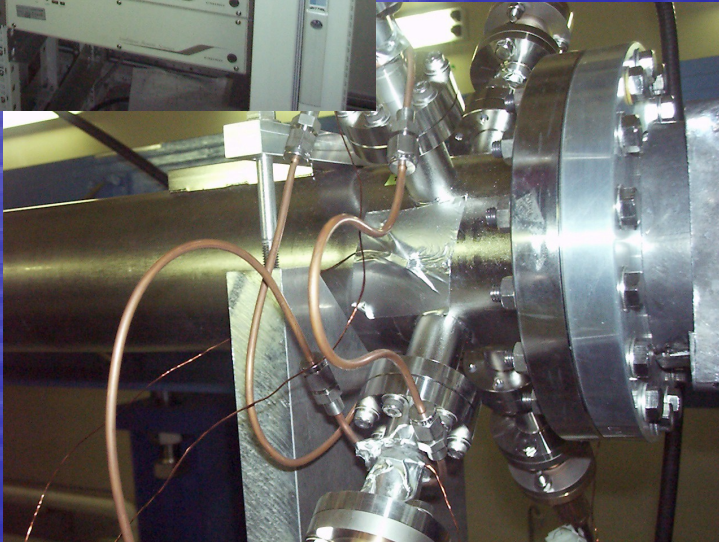


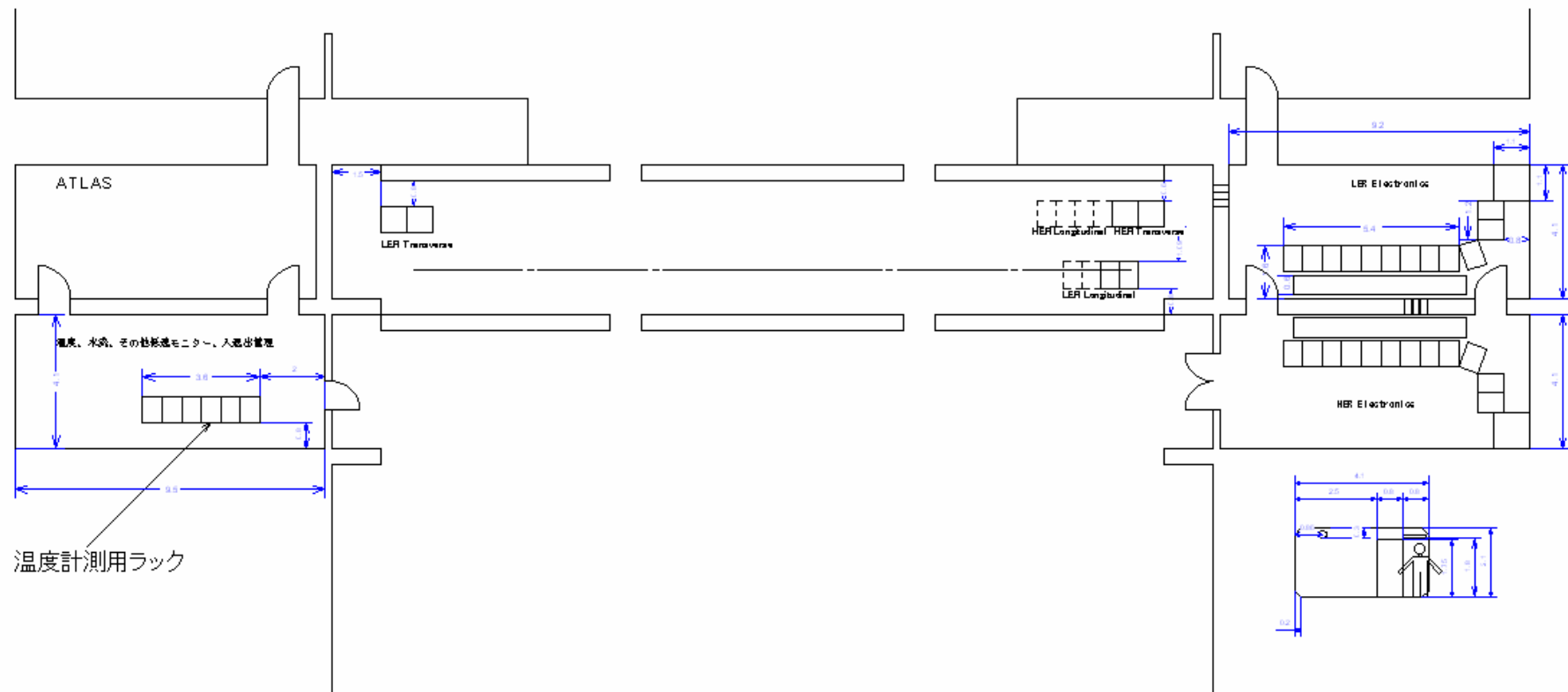
Fig. 7 The vertical mode distribution of LER at 600mA

温度測定システム



- 約200点をPt温度計で測定
- 80度でアラーム、但しアボート等のアクションはなし
- EPICS Archiverで記録、読み出しは専用ソフトで

フィードバック制御室(富士B4)



制御室入室に関する注意

- 床を走っているケーブル、測定器に注意
 - 弱いケーブルが沢山あるので特に注意
- 静電気で誤動作するものもあるので、うかつに機械に触らない
- 温度制御をしている部分もあるので、筐体扉等は操作後はもとの状態に
- 出口は1カ所しかありません

フィードバックのコントロール

- IOCFBFB4A
 - マスター分周器、HER-W3アンプ制御他
- IOCFBFB4B
 - バンチ電流モニタ
- IOCFBFB4C
 - LER用BOR
- IOCFBFB4D
 - LER用2タップフィルタ制御、位相vector制御、gated tuneタイミング制御
- IOCFBFB4I
 - LER用tuneメータ(globalとGated tune)

フィードバックのコントロール(続)

- IOCFBFB4E
 - Turn by tuneモニタ用(準備中)
- IOCFBFB4F
 - HER用BOR
- IOCFBFB4G
 - HER用2タップフィルタ制御、位相vector制御、gated tune タイミング
- IOCFBFB4J
 - HER用tuneメータ(globalとgated tune)

フィードバックのコントロール(続)

- IOCFBFB4H
 - アンプ制御
 - 温度測定
 - Solenoid電源モニタ
- IOCFBTB4(筑波B4)
 - Octopos測定他

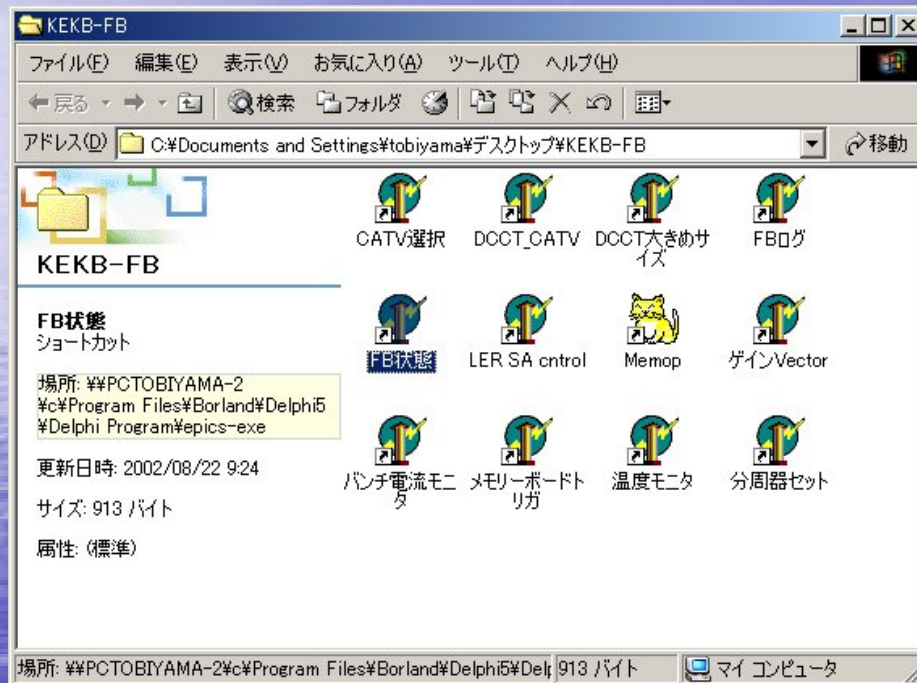
フィードバック制御パネル

KEKB OPERATION v3.0		
AR	Menu/STS.	!
BT	Beam Moni.	☐ !
	Sept./Kick.	☐
	Shutt./Colli.	☐
	Magnet	☐ ! !
	Tuning	!
MG	Momentum	☐
	PS/Solenoid	☐ ! !
	Temp./Water.	! !
VA	BT/RING	☐ !
FB	Cont./Temp.	☐ !
BM	BPM/Tune	☐ ☐
	Bunch/PhotoF	☐ ☐ !
TM	Buckets	☐ !
OP	Injection	☐
	STS./Shift	☐ ! !
	Fill/Physics	!
	Abort/Safety	☐ ☐
	TV/Save	☐ ! !
	Mitsubishi	!
CO	IOC	☐ !
Msc	KBL/Util.	! !
OLD		

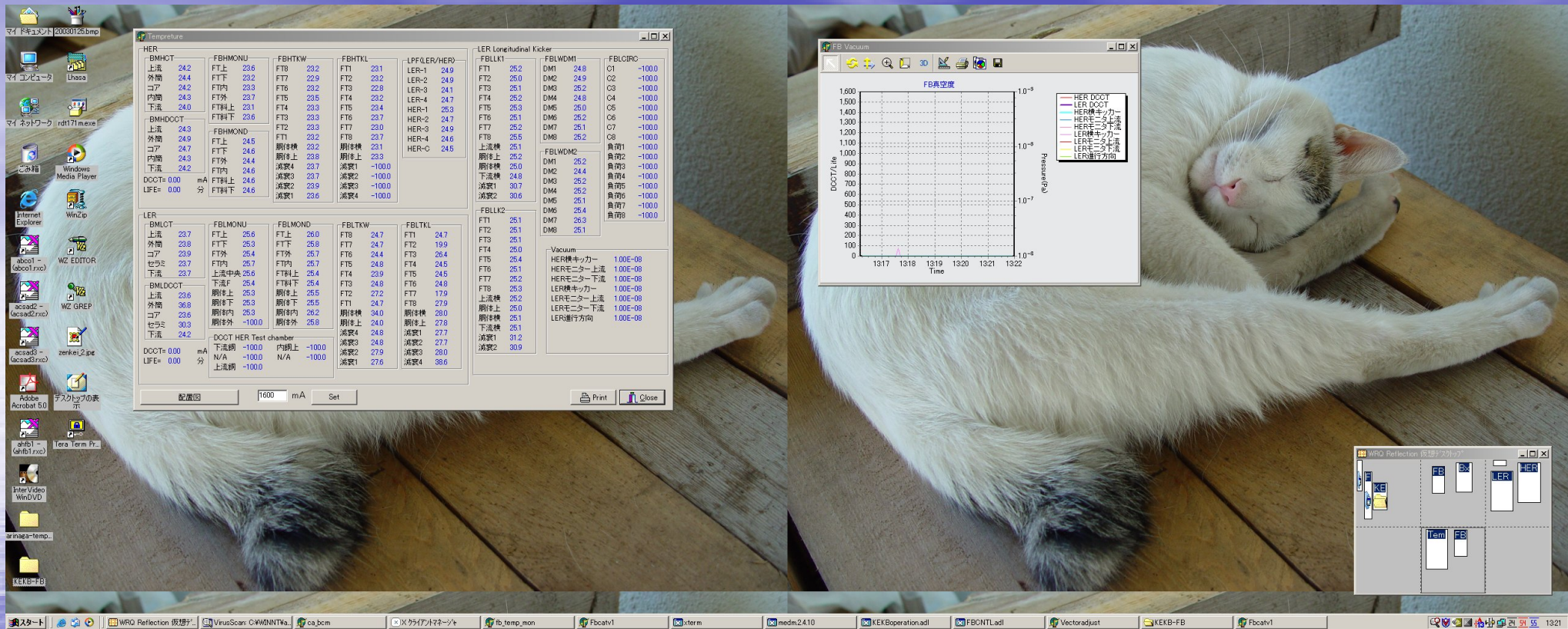
Feedback Control	
LER FB	HER FB
Memory board	
FB status	
LER TW	HER TW
LER L1	HER TW2
LER L2	H L
LER Tune	HER Tune
BCM Inspect	BCM CATV
IR-Temp	SR-Temp
DCCT CNTL	DCCT ZERO
LIFE	!
SCOPE L	SCOPE H
AM/PM TB4	CATV2
D08CT	VAC
OP-Cond	Nb
Excite	SW Stat
HER BOR	LER BOR
FB Phase	
LER GFB	HER GFB
BOD AGC	BCM OVER

- KEBBoperation内パネルで一応のコントロールは可能
- ほとんどのパネルはexpert用なので不用意に操作しないで

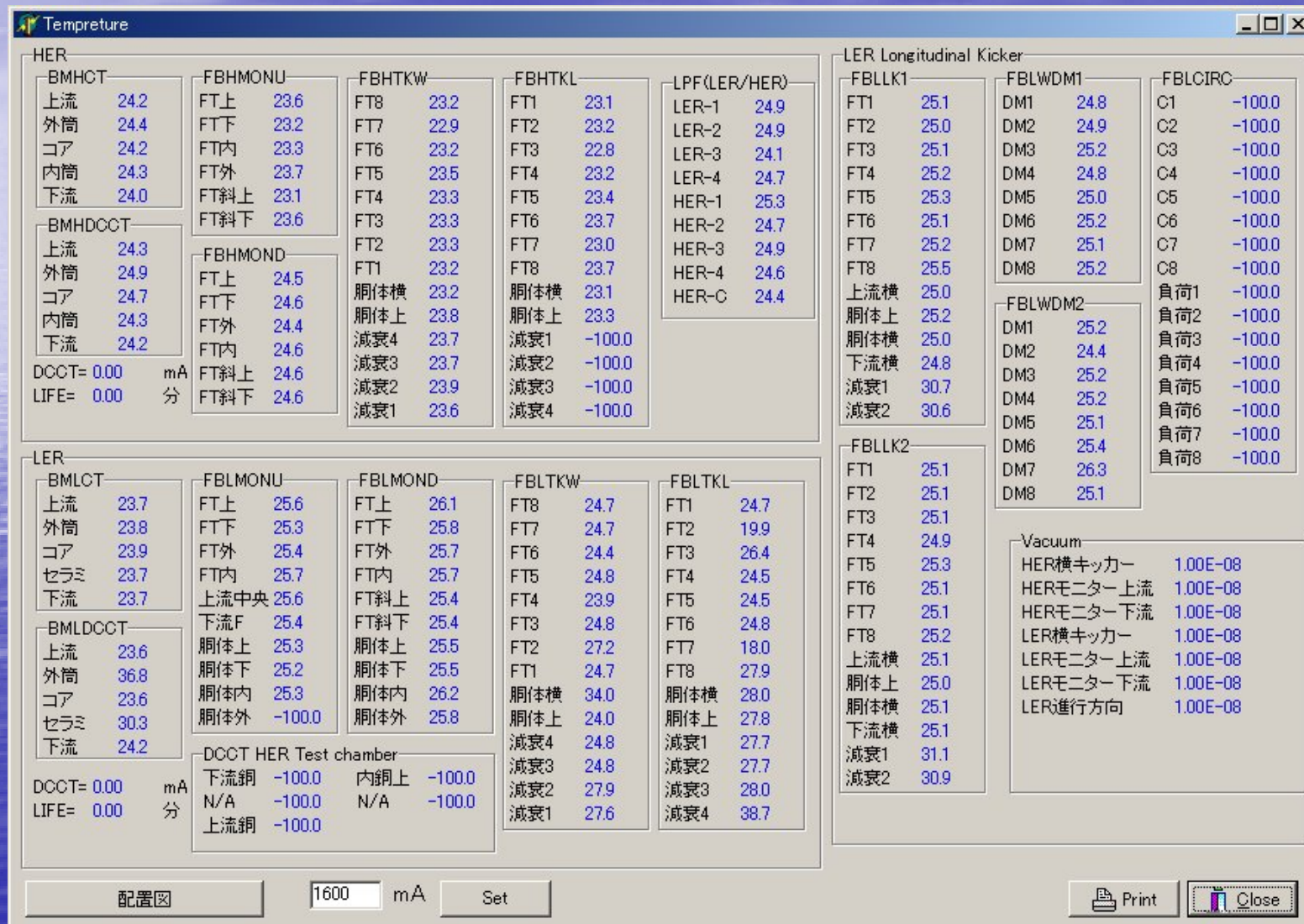
フィードバック操作パネル(PC)



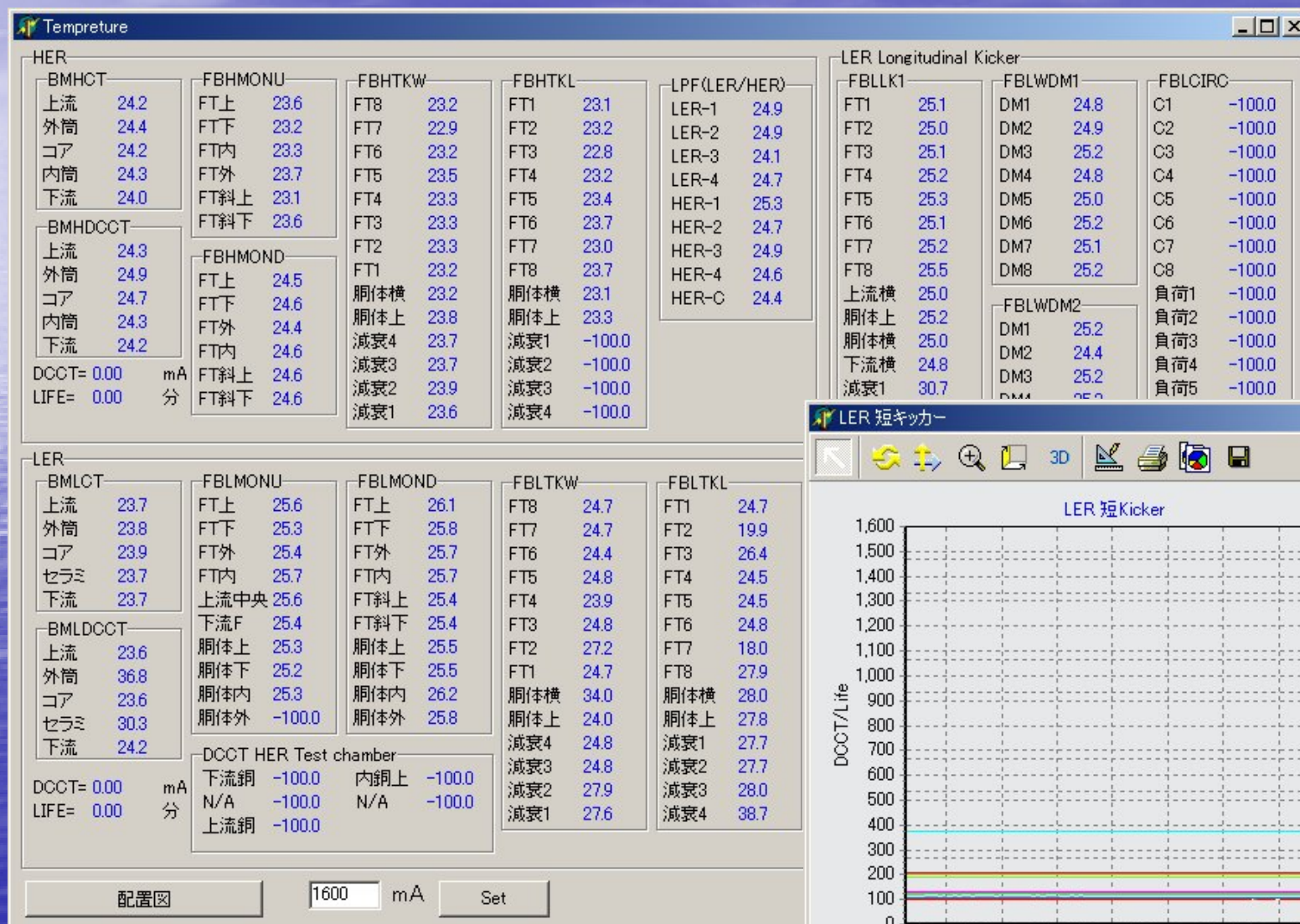
- PC(windows)から直接 EPICS Channel access する
- Windows98以降であれば動作する。所内ネットでもroute設定で可。



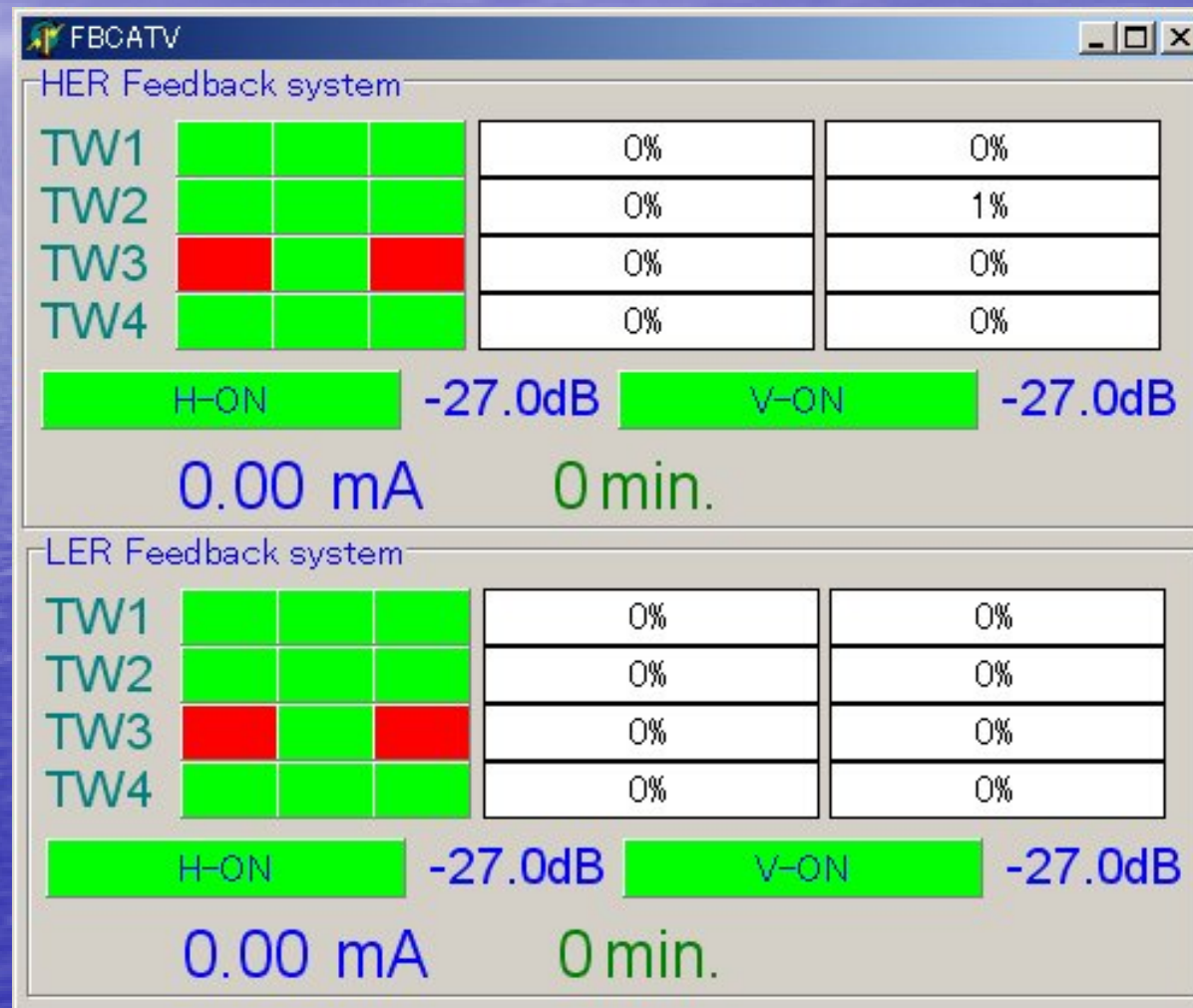
温度表示



温度表示



フィードバックパワー



アラーム

- フィードバックアンプ
 - インターロックダウン
 - 反射波OVER(ビームアボート)
- 温度
 - 80度でアラーム
- バンチ電流モニタ
 - TD4Vダウン
 - Bucket selection abnormal

トラブル発生時

- フィードバック系からのアラームはいずれも重大事故の可能性があるので、軽視しないで
- フィードバック系トラブルは全て飛山に連絡
- Bucket selectionに関しても、飛山へ
- Gated tuneに関しては、飛山、家入、川本

もっと詳しく知りたい方は

- フィードバックの古典制御理論
- OHOテキスト
- <http://ahfb1.kek.jp>
- このslideは
<http://ahfb1.kek.jp/~tobiyama/FB-MELSC.pdf>

Thank you very much for your attention!