

J-PARC Main Ring 主電磁石電源 アップグレード

~大強度ビームにおける高性能電源の重要性と1号
機導入の詳細~

KEK 加速器研究施設

栗本 佳典

目次

- アップグレード概要
- 大強度シンクロトロンと主電磁石
- 新電源実現にむけて～一号機導入～
- 新主電源以外によるビーム品質の向上

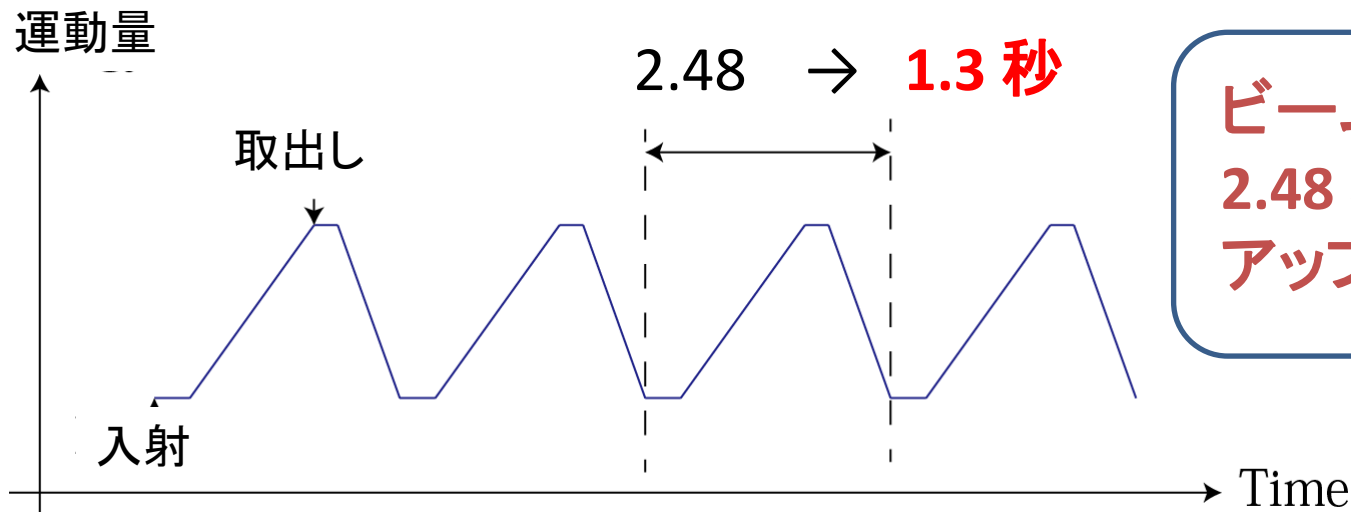
J-PARC Main Ring (MR) とアップグレード



周長	1568 m
入射エネルギー	3 GeV
取出しエネルギー	30 GeV
ビーム取出し周期	2.48 s

加速された陽子は、T2K実験(ニュートリノ)や原子核ハドロン実験に使われている

J-PARC MR 加速サイクル



ビーム取出し周期を
2.48 秒から1.3 秒にする
アップグレードを計画中

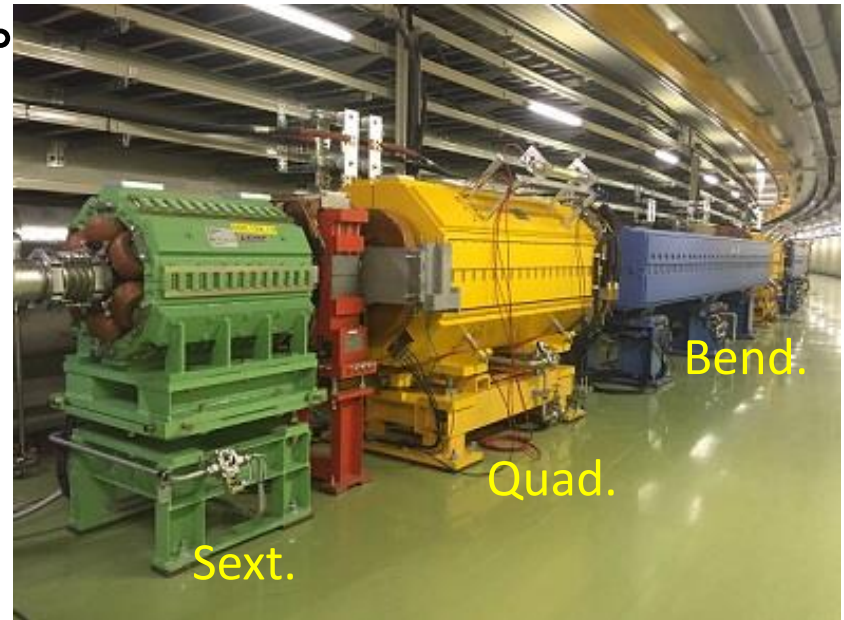
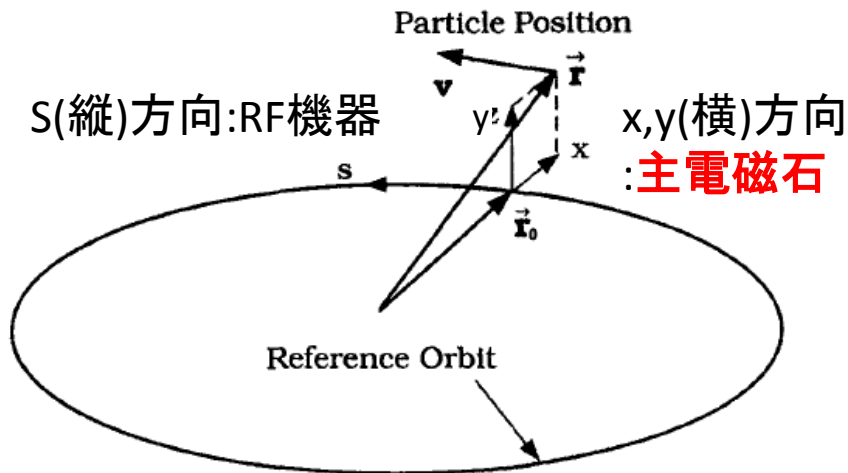
大強度シンクロトロンと主電磁石

なぜ、電源が重要なのか

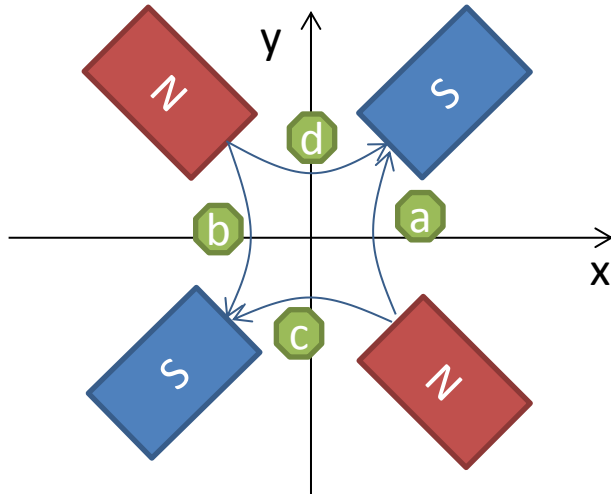
シンクロトロンの主電磁石

- 偏向電磁石 Bending Magnets (イメージしやすいので説明略)
 $p = q\rho B$ p : 運動量 q : 電荷 ρ : 曲率半径 B : 磁場
- 四極電磁石 Quadrupole Magnets
- 六極電磁石 Sextupole Magnets

➡ シンクロトロン加速器では、縦方向(加速等)の制御と共に、横方向の制御も非常に重要であり、その中心機器が主電磁石である。



Quadrupole Magnets



注:スライド面鉛直方向がビーム軸

四極磁場: $\vec{B} = (B^{(1)}y, B^{(1)}x, 0)$

を運動方程式 $m \frac{d\vec{p}}{dt} = qc\vec{\beta} \times \vec{B}$ に代入し、
近似 $\beta_z \gg \beta_x, \beta_y$ を使えば

$$\ddot{x}(s) = -\frac{q}{p} B^{(1)} x(s) \quad \ddot{y}(s) = \frac{q}{p} B^{(1)} y(s)$$

を得る。(s はビーム進行方向に沿った距離
 $s = \beta ct$)

即ち、x方向には**振動し(cos, sin)**、y方向には**双曲線関数を描く(cosh sinh)**、またはその逆。走行距離が短い近似では、互いに、**収束、発散**となる。



シンクロトロンでは極性の違う四極電磁石を上手く配置し、トータルで収束するようにしている。

Betatron Tune

磁場が無い領域、偏向電磁石の領域は、 (x,y,s) 座標系では、 $B^{(1)} = 0$ の四極磁場と近似的に見なせるので、**シンクロトロン**の横方向の運動は異なる(収束力(発散力)が違う)四極電磁石中での運動と見なせる。即ち、

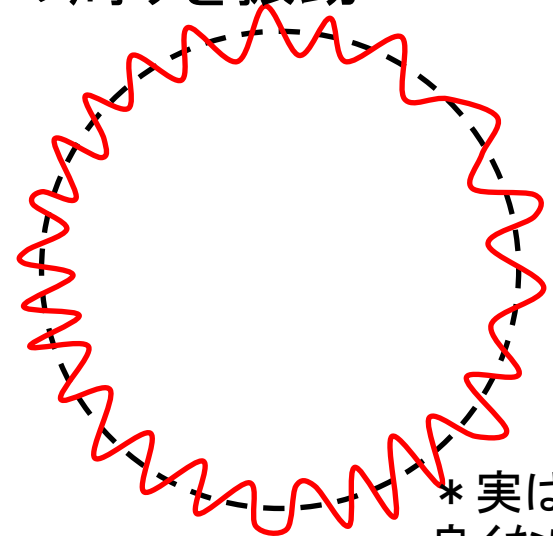
$$\ddot{x}(s) + \underbrace{K_x(s)}_{\uparrow} x(s) = 0 \quad \ddot{y}(s) + \underbrace{K_y(s)}_{\uparrow} y(s) = 0$$

進行方向 s の関数になっている。

→ 解は $x(s) = \sqrt{\epsilon\beta(s)} \cos(\varphi(s) + \varphi_0)$ であり、
ビームは単粒子で見ると中心軌道の周りを振動しながら伝搬している。

$\beta(s)$ はベータ関数とよぶ、また、シンクロトンリング一周の横方向の振動回数($\varphi(s)$ の1周積分)をBetatron Tune と呼び Q_x, Q_y などと書く。

各四極電磁石の強さ $K_x(s), K_y(s)$ で制御する。



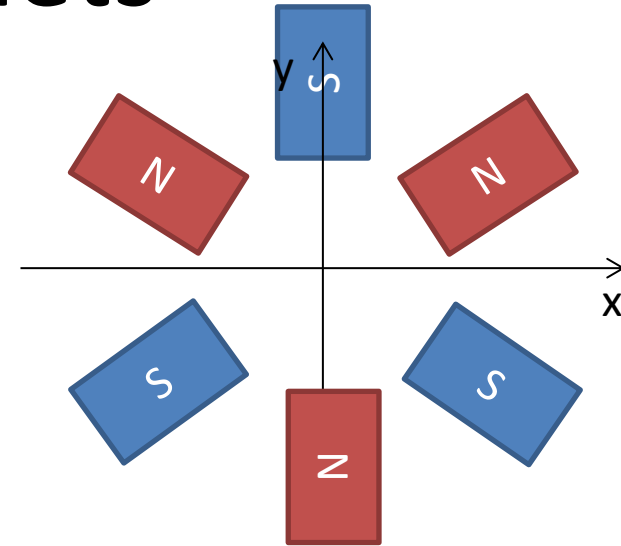
* 実はこれは良くない例

Sextupole Magnets

先ほどの四極磁場中の運動方程式

$$\ddot{x}(s) = -\frac{q}{p} B^{(1)} x(s)$$

振動数つまり $Q_{x,y}$ の運動量依存を補正する必要がある。J-PARC MR では1%以下の運動量広がり



六極磁場 $\vec{B} = (B^{(2)}xy, \frac{B^{(2)}(x^2-y^2)}{2}, 0)$ を軌道のずれ x_c ($x=x_c+\delta x$) の周りで展開すると、

$$B_y = \underbrace{B^{(2)}x_c\delta x}_{\uparrow} + \frac{B^{(2)}(x_c^2+y^2)}{2} + \dots \quad B_x = \underbrace{B^{(2)}x_cy}_{\uparrow} + B^{(2)}y\delta x$$

四極磁場と同じ項！

x方向のずれに比例した収束(発散)力を得ることができる。**運動量のずれに比例して軌道がずれる ($\delta p \propto x_c$) 場所に六極磁石を置けば、運動量のずれに応じた収束(発散力)が得られる。**これをChromatic Correctionと呼ぶ。

* 一般に $\delta p \propto x_c$ となる場所は存在する。たとえば偏向磁石中では運動量が高い程曲がりにくいので、軌道はずれる。

ベータトロン共鳴

Betatron Tune Q_x Q_y を適切に選び制御することは非常に重要

運動方程式を単振動で近似すると C を周長として、 $\ddot{x}(s) + \left(\frac{2\pi Q_x}{C}\right)^2 x(s) = 0$
ここで摂動 $\propto x^2$ (六極磁場)がリング内に周期的に分布すると仮定し、リング1周での繰り返し数を N_s とする。この時、六極磁場の強さは周期 C/N_s の s の関数なので、フーリエ級数で表現可能である。したがって運動方程式は以下となる。

$$\ddot{x}(s) + \left(\frac{2\pi Q_x}{C}\right)^2 x(s) = x^2(s) \sum_m a_m \cos\left(\frac{2\pi N_s m}{C} s + \delta_m\right)$$

これに逐次近似 $x = x^{(1)} + x^{(2)} + \dots$ を行う。即ち $x^{(1)}$ は摂動なしの解
 $A \cos\left(\frac{2\pi Q_x}{C} s + \delta\right)$ で、左辺に $x^{(1)} + x^{(2)}$ 、右辺に $x^{(1)}$ を代入する。(ランダウ著「力学」)

$$x^{(2)}(s) + \left(\frac{2\pi Q_x}{C}\right)^2 x^{(2)}(s) = A^2 \cos^2\left(\frac{2\pi Q_x}{C} s + \delta\right) \sum_m a_m \cos\left(\frac{2\pi N_s m}{C} s + \delta_m\right)$$

二倍角の公式
積 \rightarrow 和の公式

$$= A^2 \sum_m a_m \cos\left(\frac{2\pi}{C} (2Q_x - N_s m) + 2\delta - \delta_m\right) + \dots$$

$2Q_x - N_s m = \pm Q_x$ のとき、右辺に固有周波数で振動する外力の項が現れる。このとき、 $x^{(2)}$ の振幅は増大する。(共鳴条件)

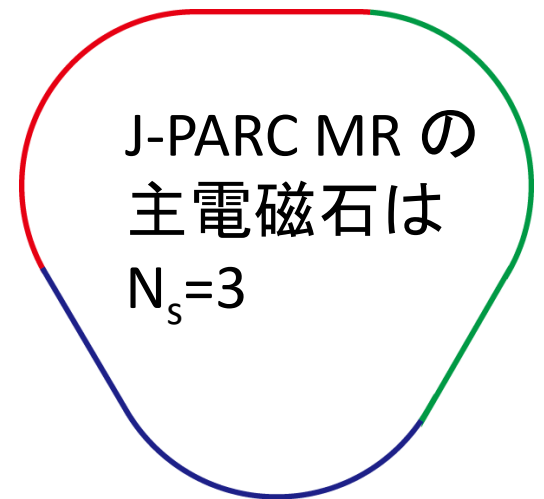
共鳴条件と対称性

共鳴条件 $2Q_x - N_s m = \pm Q_x$ は、 $3Q_x = N_s m$, $Q_x = N_s m$ とかける。
特に、この3という数字は摂動項がxの2乗であることから来ている。四極の摂動(xの1乗)の場合は $2Q_x = N_s m$ が共鳴条件となる。また、x,yが couple する摂動もある。これから共鳴条件は以下となる。

$$mQ_x \pm nQ_y = N_s l$$

もし $N_s=1$ 、即ちリング1周の間に周期構造がない摂動がある場合(ランダムエラー)、全ての整数がNGとなる。J-PARC MRの主電磁石は一周が同じ電磁石の配列パターン3つからなるため六極電磁石や偏向電磁石の六極成分は、右辺が3の倍数になることを避ければ共鳴条件を回避できる。

あとは、如何にランダムエラーを無くすかが重要。入出射機器等は3つの直線部で違うので、その漏れ磁場等がランダムエラーの原因となる。

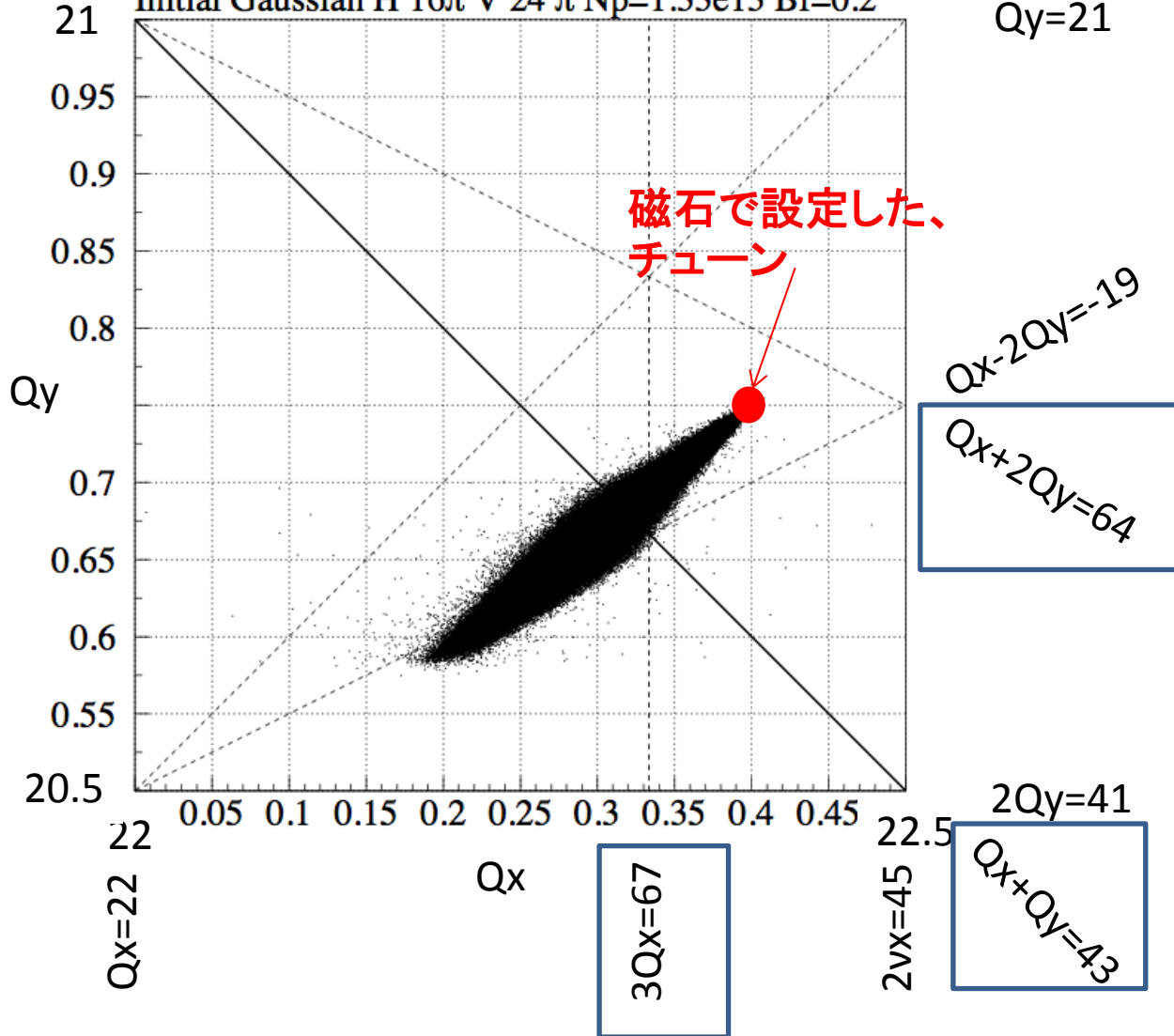


赤、青、緑は全く同じ主電磁石配列になっている。

空間電荷効果と運転チューン

MR SCTR Space Charge Tracking (22.4, 20.75)
Initial Gaussian H 16π V 24π Np= $1.33e13$ Bf=0.2

From Y. Sato
Qy=21



- 大強度ビームの場合、ビーム中の粒子が他の粒子から受けるクーロン力の効果により、発散力が働き、ビーム中の粒子のチューンが左図(シミュレーション)のように広がって分布する。

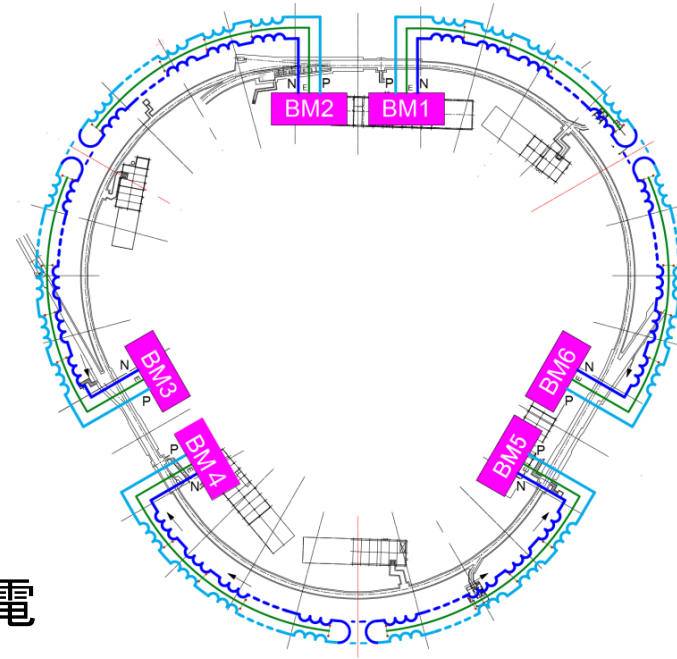
□ の共鳴ラインにもろかぶりしているが、右辺が3の倍数でないので、理想的には共鳴は起きない。

前述のランダムエラー源を見つけて補正し、現実を理想を如何に近づけるかがビーム調整の腕

主電磁石電源の仕様

1. 再現性確保のためデジタル制御が望ましい。

例えば、偏向電磁石96台は図のように分割され、6台の電源でドライブされる。各電源の出力値が違えば、対称性が悪化し共鳴の原因となる。

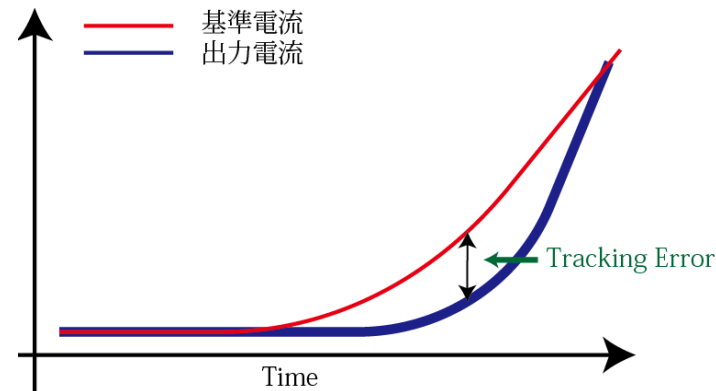


2. 低ノイズ化

共鳴現象を制御する遅い取出し運転では、出力電流に大きなノイズがあれば、直接取出しビームの平坦性に影響する。ppmオーダーを目安にしている。

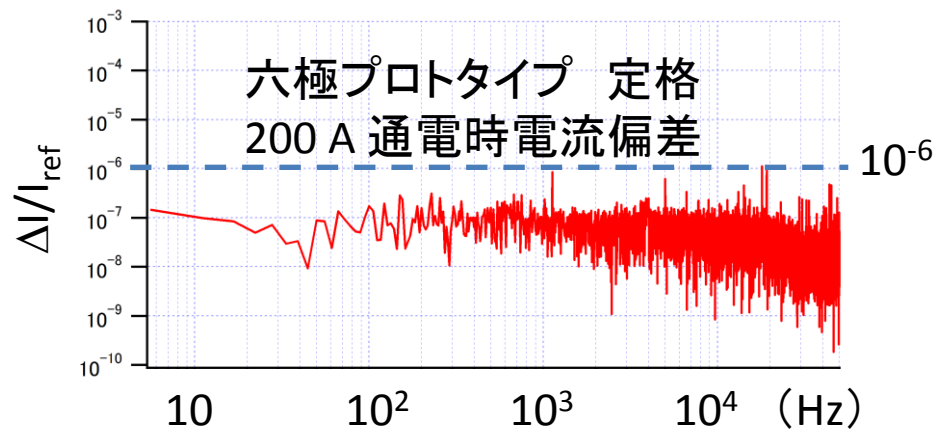
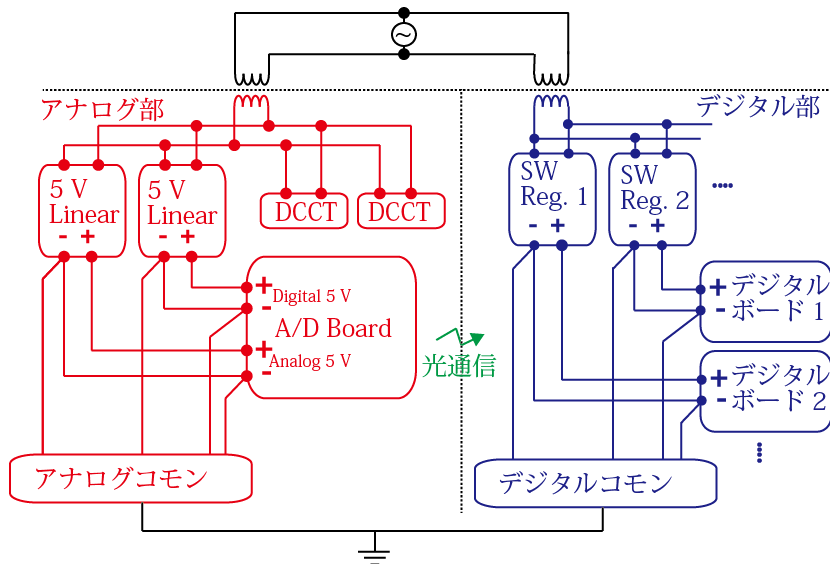
3. 高い追従特性

シンクロトロンは周長が一定なので、同じ、偏向および収束力を得るために加速と共に磁場を増大させる。運動量パタンに対する電磁石磁場の追従性が悪ければ、過渡的に異なる光学パラメタになってしまう。



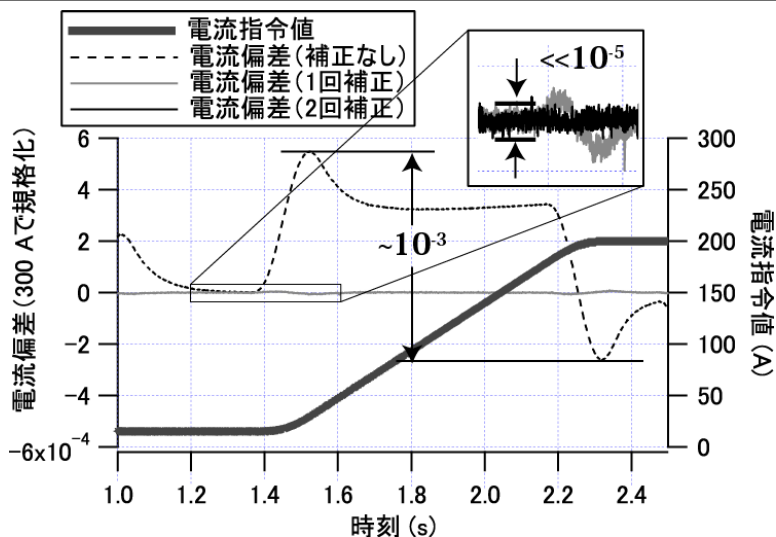
これまでの開発

- 24 bit A/D基板と低ノイズ配線方法

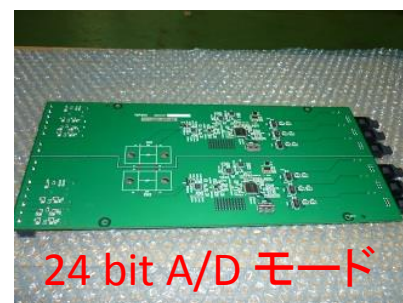


開発したA/D変換器および配線方法を電源に組み込み、全ての周波数領域で1 ppm以下を達成した

- 追従誤差補正のためのデジタル制御ボードの設計開発



追従誤差を計測不能領域 (<<10⁻⁵) まで低減できる方法を確認した

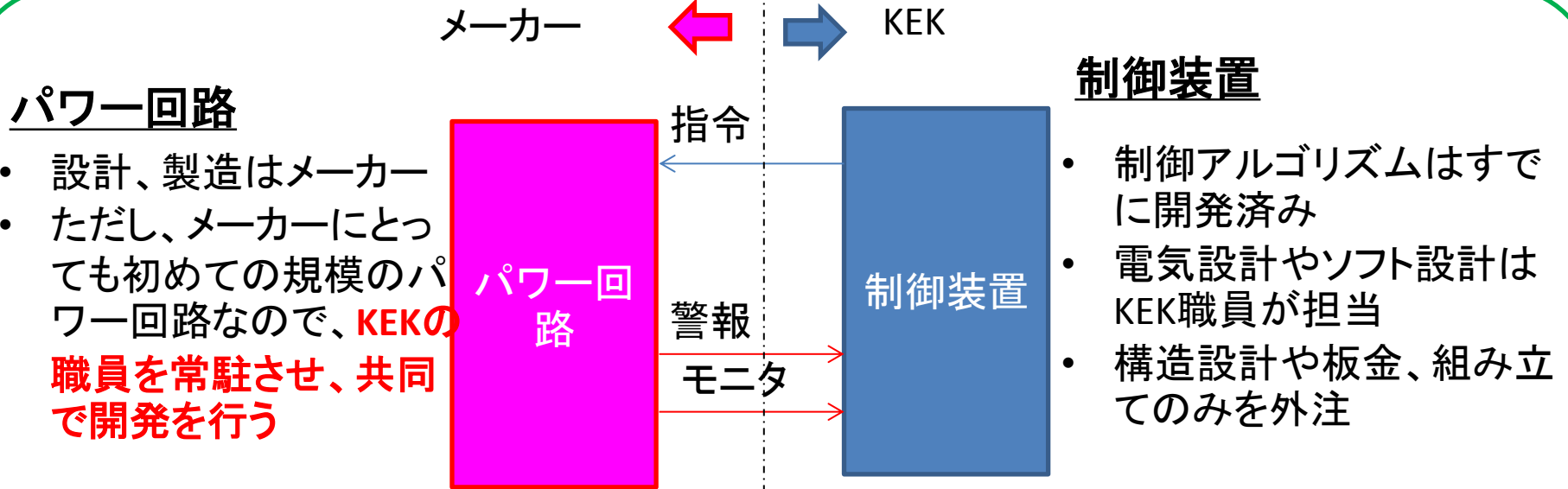


新電源実現にむけて ～一号機導入～

これまでの話から新主電磁石電源の仕様および実現可能性を示すことができたが、実はこれらは2013頃までに済んでいた。
以後の話は、一号機を導入するまでおよび導入後に問題となったことと解決法についてである。

開発体制

メーカーとKEKで分担、協力して開発、設計を行う。

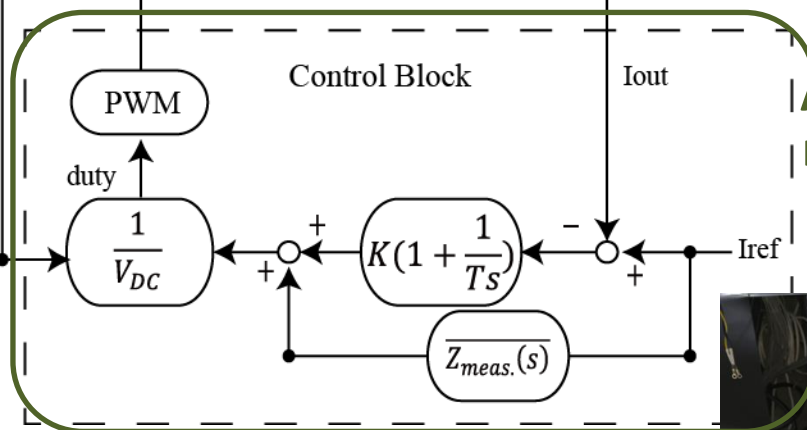
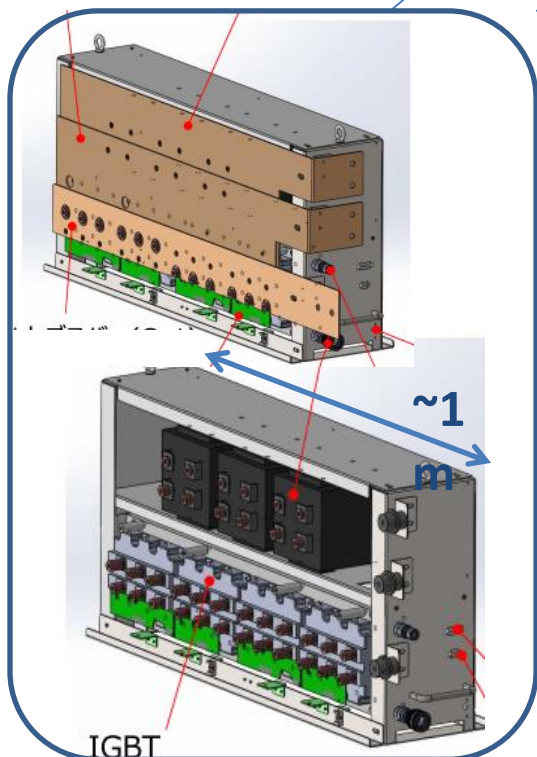
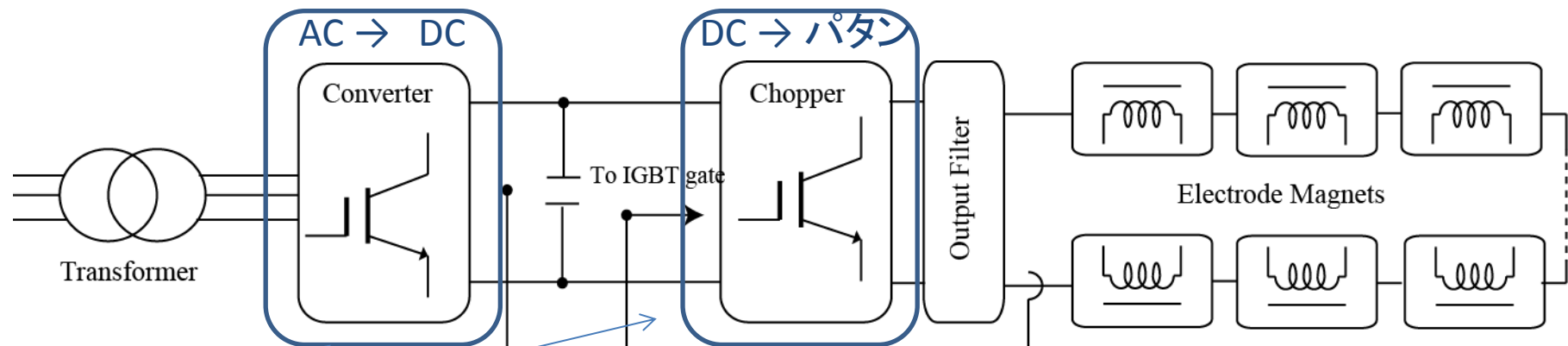


背景

- 仕様を全て満たすような電源を開発、製造可能がメーカーは限られてしまうので、システム丸ごと受注させるのをあきらめ、電源の高精度デジタル制御は仕様から外した。制御装置はKEKで準備しメーカーへの支給品とした。
- 現行電源のようにシステムごと大手メーカーに受注させる場合、制御ソフトなどはブラックボックスになってしまい、簡単な改修すらKEK側でできないという問題があった。

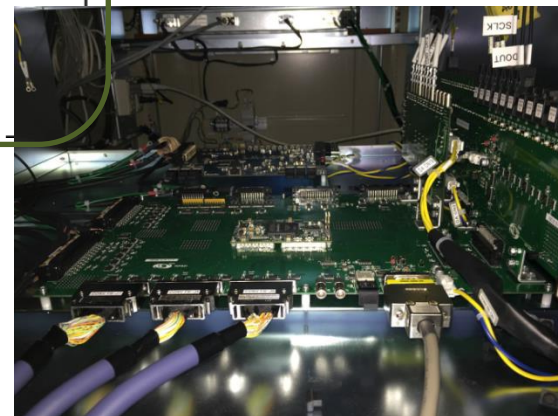
新主電磁石電源の構成

主電源を実現するには、**パワー回路**と**制御装置**を駆使しなければならない。



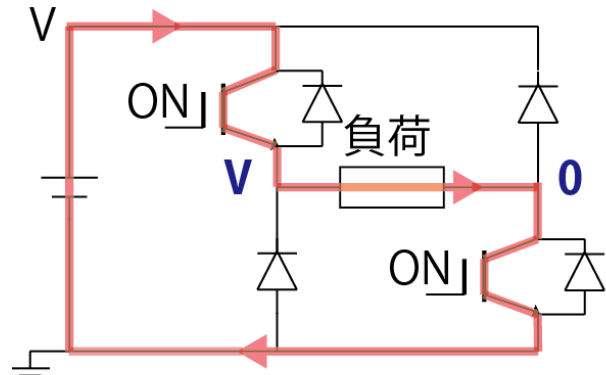
AD変換
リアルタイム制御
(FPGA DSP) システム

← **パワーユニット**
大電力用半導 (IGBT) を使った
パワー回路の最小単位。

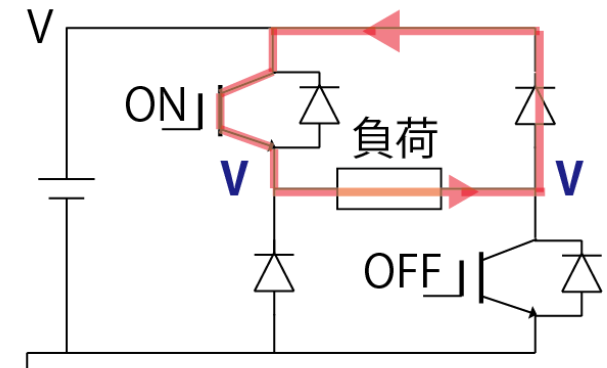


パワー回路(1)

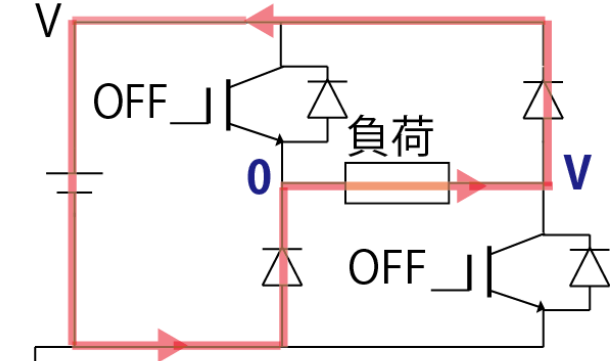
チョツパの動作例



A: 力行モード (V 出力)

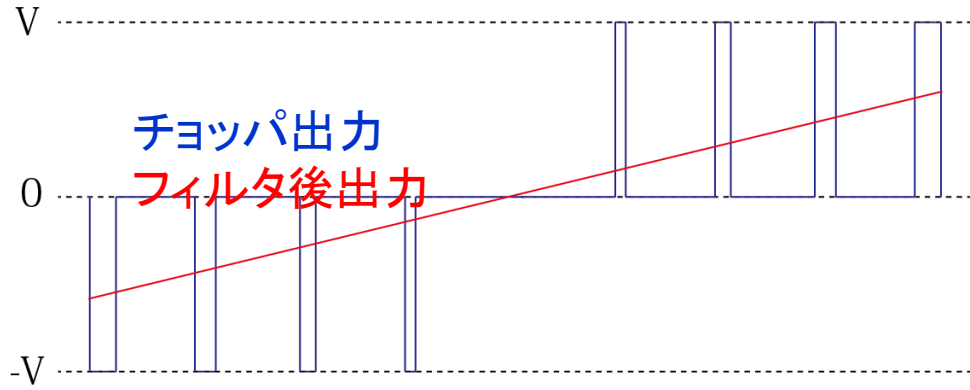


B: 還流モード (0 出力)



C: 回生モード (-V 出力)

前述のチョツパ、コンバータなどは、IGBTと呼ばれる半導体スイッチが図のように接続されており、ON/OFFのパタンを切り替えることで電圧を負荷に印可する。



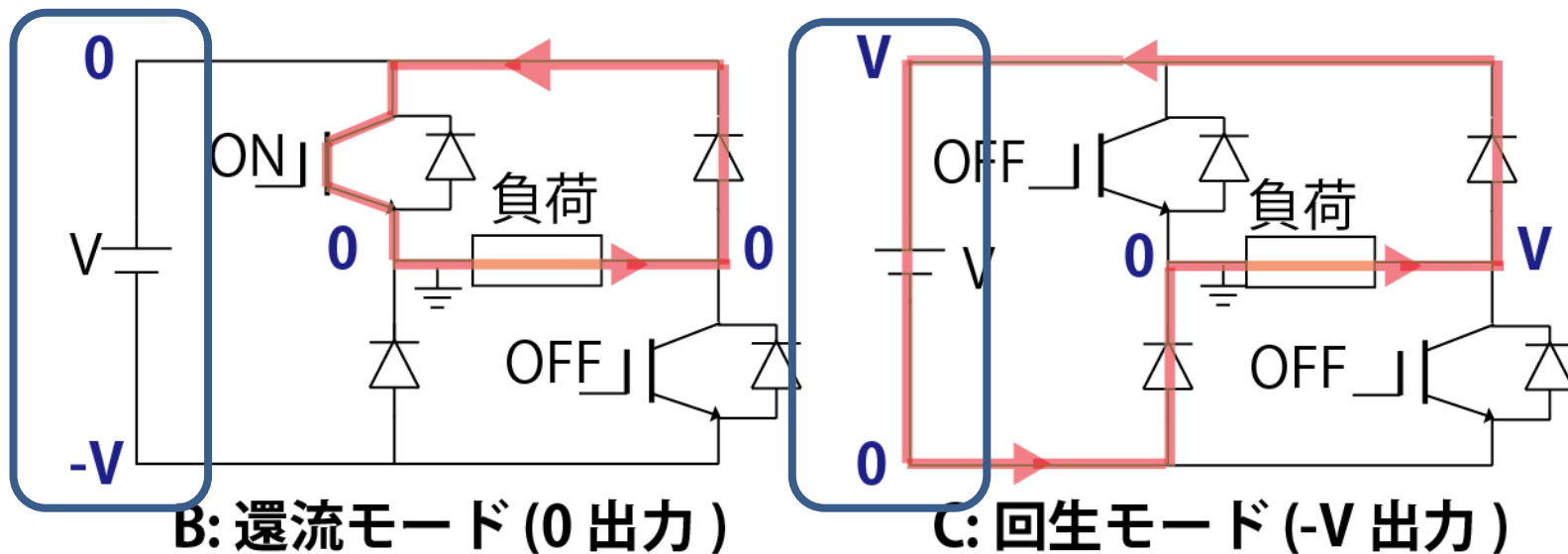
チョツパ自体はパルス電圧しか出力できないが、パルス幅の制御とローパスフィルタで滑らかな電圧制御ができる。

➡ 制御装置は磁石電流をモニタしながら、適切なON/OFFパタンを出力させるのが仕事

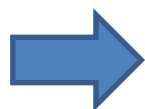
パワー回路(2)

パワー回路の勘所 ~二つの電圧~
「負荷に印可される電圧」と各コンポーネントの「**対地電圧**」

新電源一号機は負荷側をアースに落としている。何が起こるか？



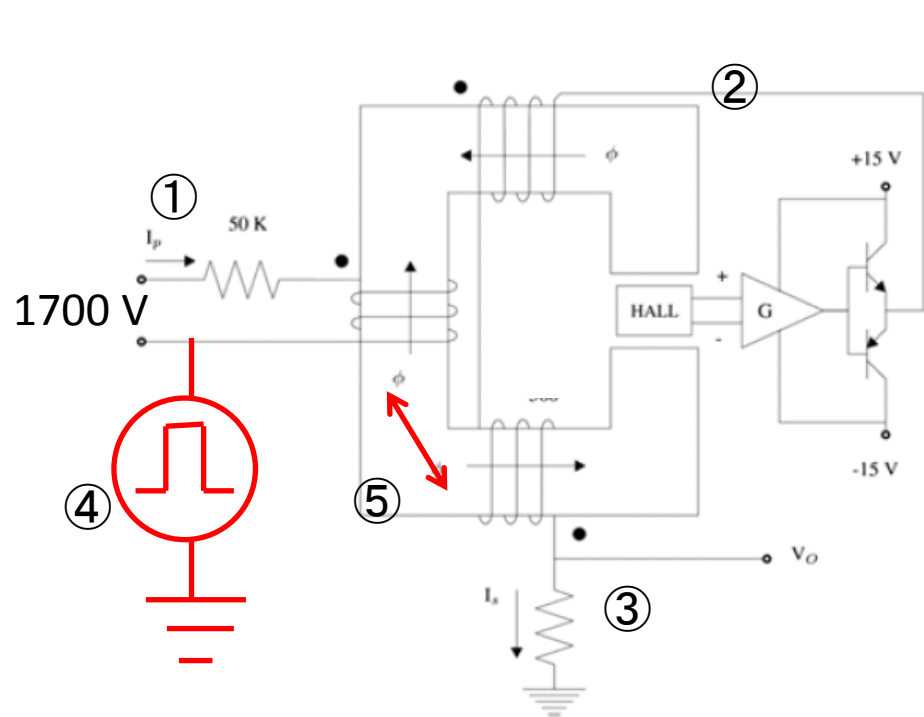
直流電源の両端の対地電圧がパルス的に変動する。変動の周波数は1 kHz (半導体素子のスイッチング周波数) 当然電源電圧は変わらない。V = 1700 V



直流電圧の計測デバイスを壊した。1日強の加速器ダウン 何故か？

パワー回路(3)

直流電圧計測器の故障



電圧検出回路

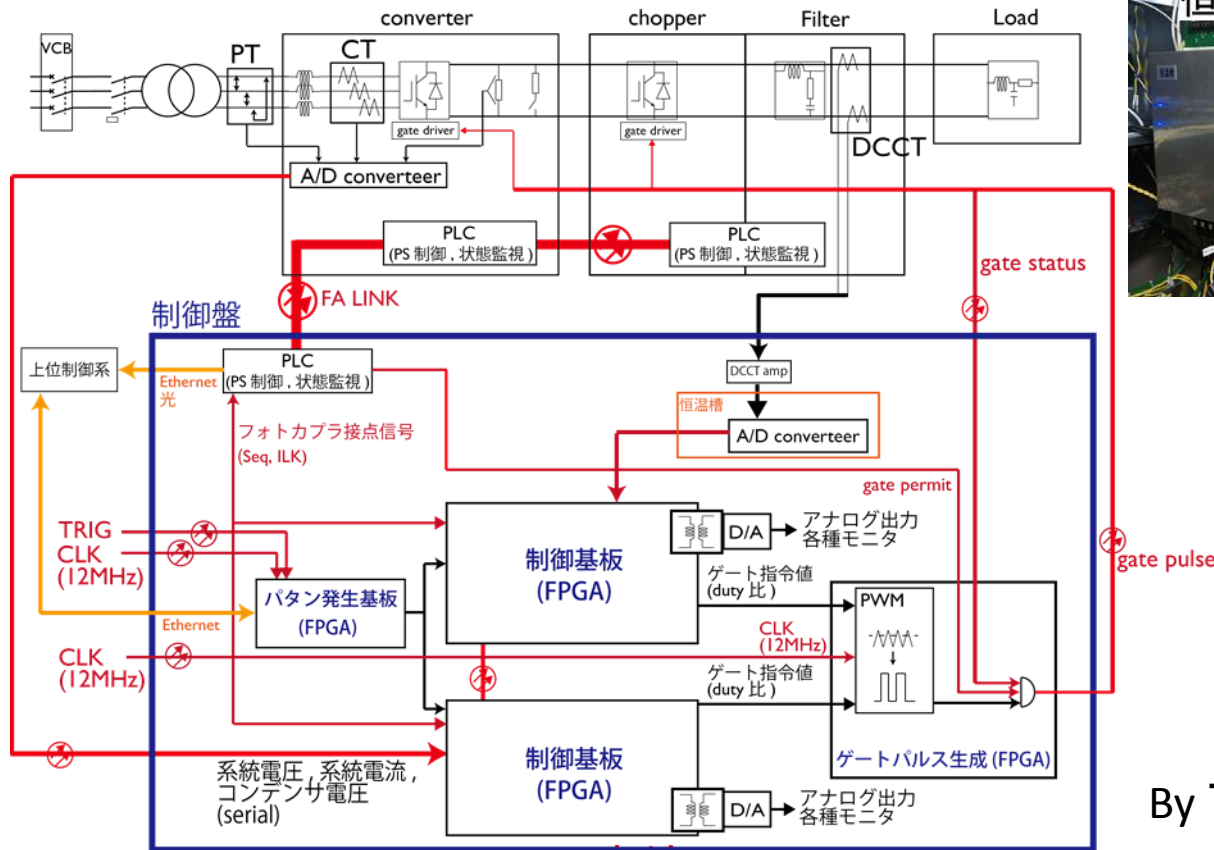
- ① 一次巻線と抵抗に直流電圧を印加する
- ② ホール素子の値がゼロになるように二次巻線に電流を流す
- ③ 二次巻線の電流は直流電圧に比例
- ④ 新電源一号機では、一次巻線とアース間に1700 V 1 kHzのパルス電圧が印加される。
- ⑤ 一次巻線アース間の絶縁は、一次二次巻線間の距離や物質で取られており、**4.2 kV 50 Hz 1min**の耐電圧試験済みのものを選定していた。



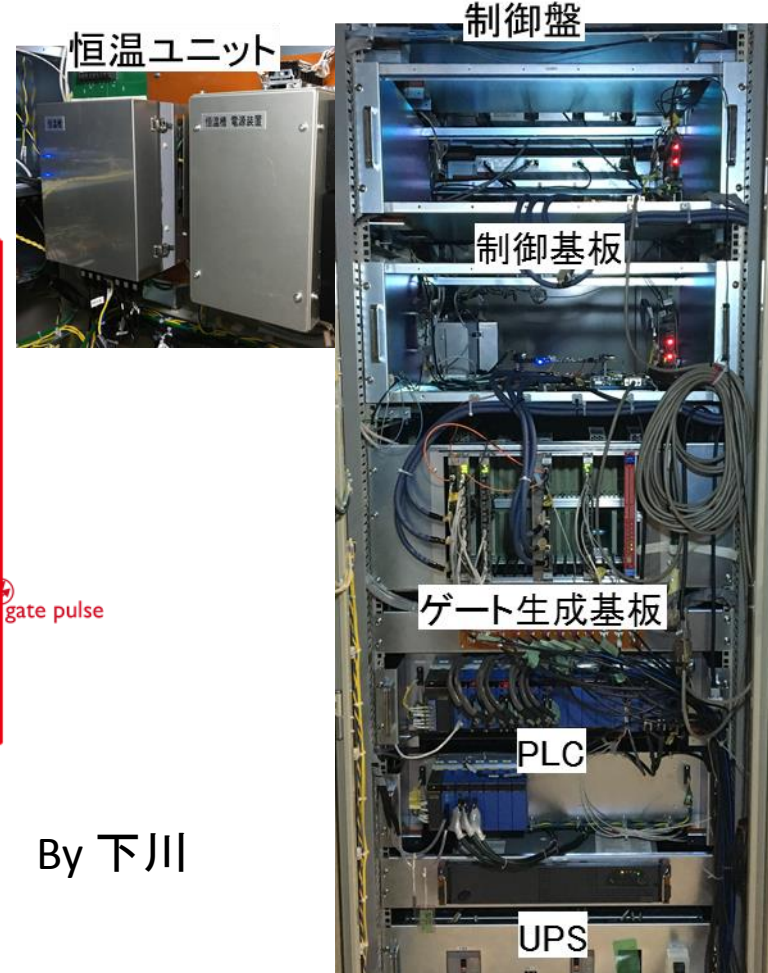
それでも不足だった。2-4 week
の連続運転で壊れる。

対地電圧が高くなると、部品選定にノウハウが必要となり、大手重電メーカーに頼れない現状では、初号機でノウハウを蓄積していくしかない。その意味で、非常に有用なトラブルであった。

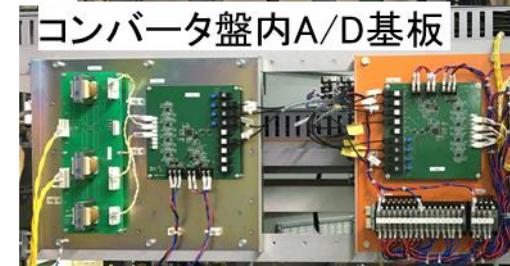
制御システム概要



赤線 : Optical connection



By 下川

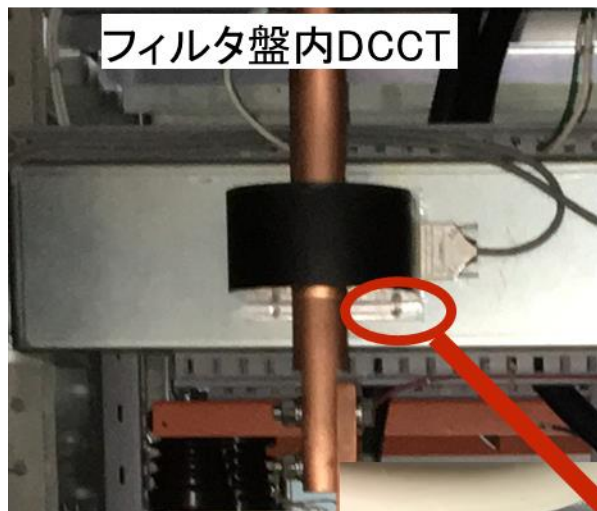


制御部構成

- ✓主回路-制御間を絶縁 (DCCT head-amp間のみ電気信号)
- ✓Full FPGA 制御システム : 膨大な入出力に対応, タイミング制約

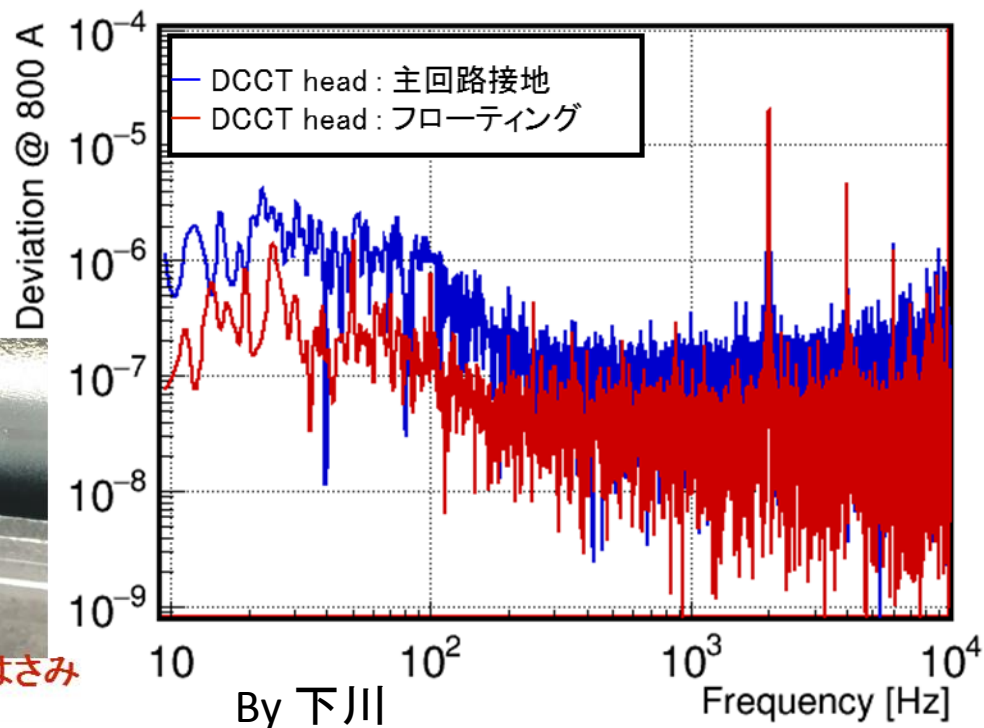
主回路-制御間の絶縁の威力

僕の指示漏れで、出力電流検出器の基準電位が主回路アースにつながっていた。



プラスチックワッシャー(3mm)をはさみ
プラスチックネジで固定

DCCT head 主回路接地/非接地
(電流偏差のFFT)



おかげで、主回路-制御間絶縁の威力を確かめることができた。

制御盤のKEK設計について

2010年: 制御ロジックを検討し、メーカーに提案

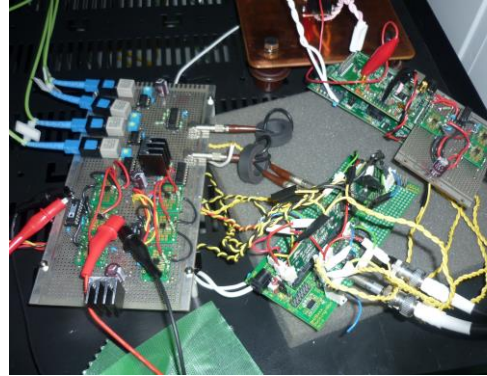
2011年: ミニモデルを自作し、実際に制御ロジックを実験し、メーカーに提案

2013年: 電流制御部(AD基板、FPGA、DSPボード、ソフトウェア)を設計、製造し、メーカーに支給(六極プロトタイプ)

2014年: 制御盤ごと設計、ただし、電力制御部、インターロック受信部はメーカーから支給をうける
→新入射セプタムPS

2015年: 制御盤すべてを設計、製造(ソフト、ハードともに電源メーカーからは切り離す)→新QFRPS

2011 (R&D)



2013 (制御ボード)



2014 (入射セプタム) 2015 (QFR)



メリット: KEK職員が主回路も含め完璧に理解している(主回路構成も知らないと、インターロック、ゲート生成、電力制御の設計はできない)ため変更は容易

リスク: インターロック、ゲート生成、電力制御など高精度出力性能以外の責任も負う。(明らかにメーカーに責任を問えるのは、主回路配線ミス、水漏れ、放電)

新主電源以外によるビーム品質の向上

現時点で一号機は大きな故障もなく運用に成功しているといってよい。しかし、**一方でさらに大型(高電圧)電源の製造も控えており、さきに述べたような定量予測できない対地電圧の影響などが出力特性を悪化させる可能性も否定できない。**

最後に主電源の性能不足をカバーするような試みについて話す。

ビーム計測による追従誤差の補正

- J-PARC MR は加速開始時のビームロスが最も多い。

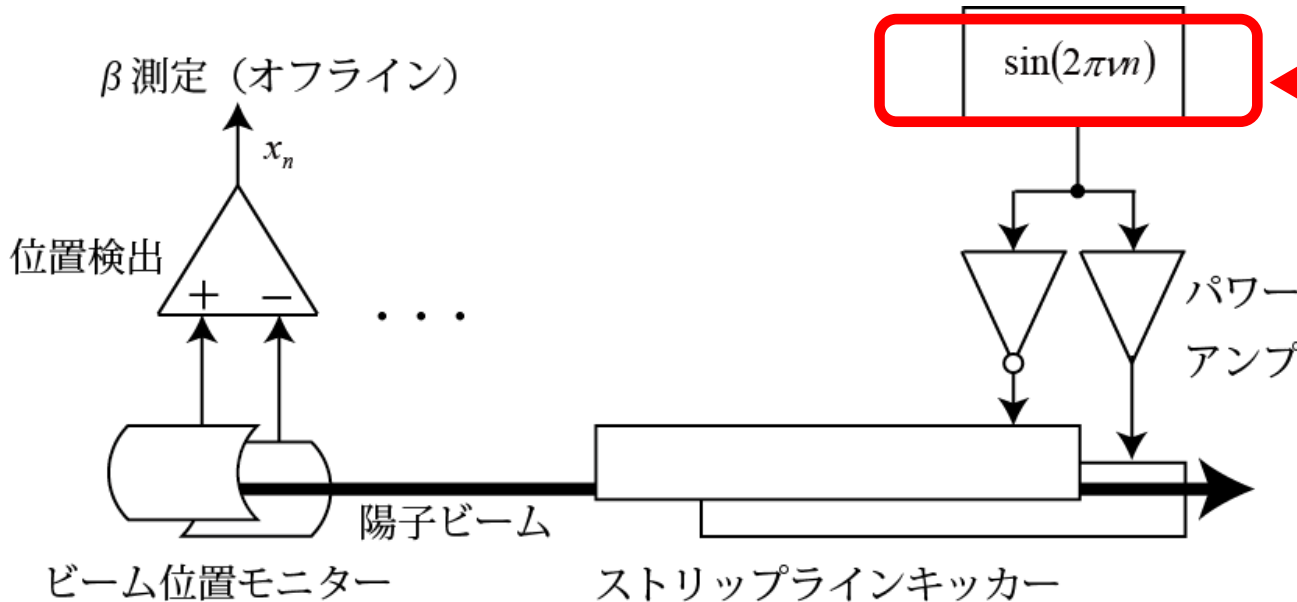
加速途中のベータatron運動を測定し、主電磁石の追従誤差を補正

すればよい。 $x(s) = \sqrt{\epsilon\beta(s)} \cos(\varphi(s) + \varphi_0)$



上式より簡単に測定できそうだがこれは単粒子の話。ビームの塊で見ると各粒子が違う位相で運動するので、そのままビーム位置モニタで計測することはできない。全粒子の平均位置が観測されるだけ。

計画、構築、実施したベータatron振動測定セットアップ

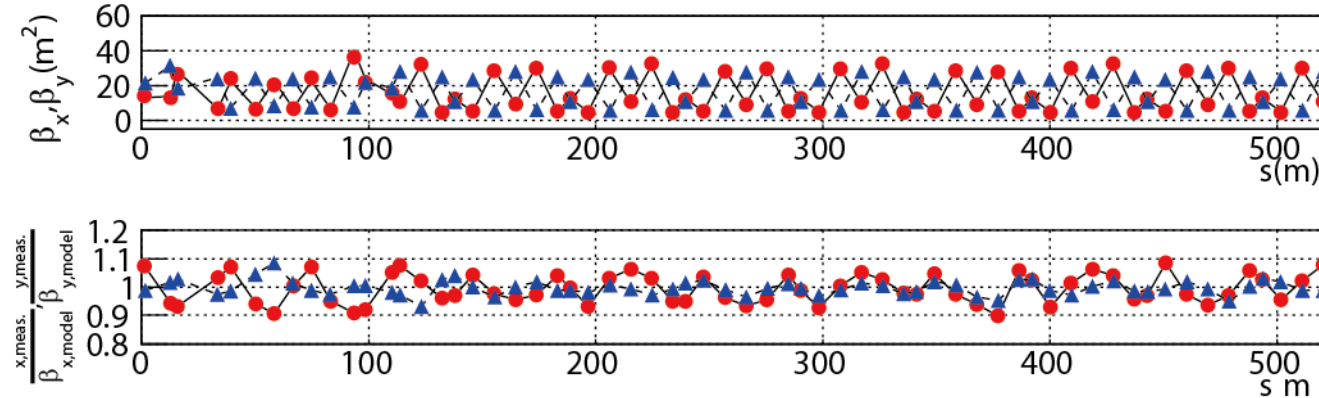


← 開発したデジタルボードを使って、任意のタイミングで任意の周波数の正弦波生成し、ベータatron振動を励起した

測定結果と補正

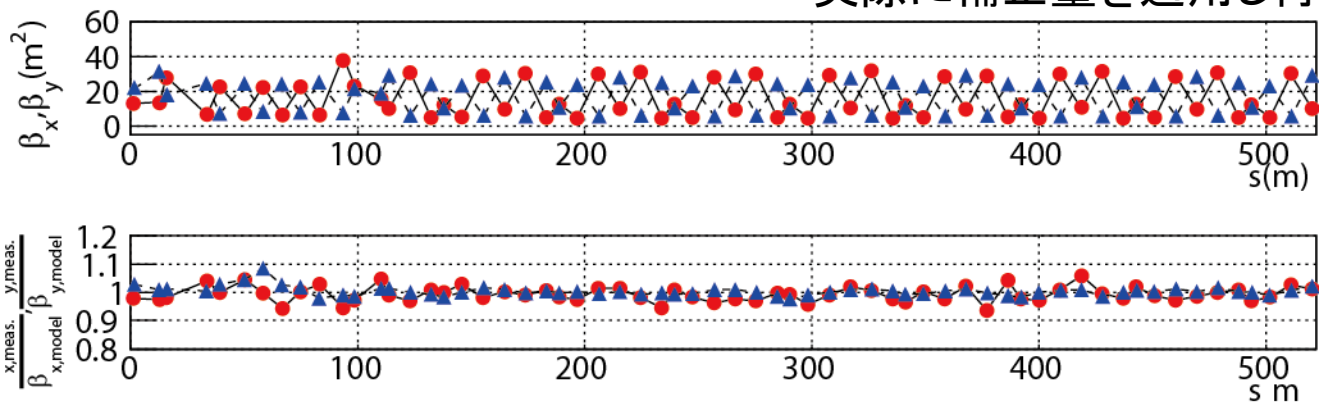
From 仲村(京都大)

J-PARC MRの1/3周分のベータ関数と(上)と、モデルからのずれ



加速途中の8.2 GeV/c 付近でベータatron振動を励起して測定

この結果をQ電磁石の補正量をパラメタとしたモデルでフィット
実際に補正量を適用し再度測定した。



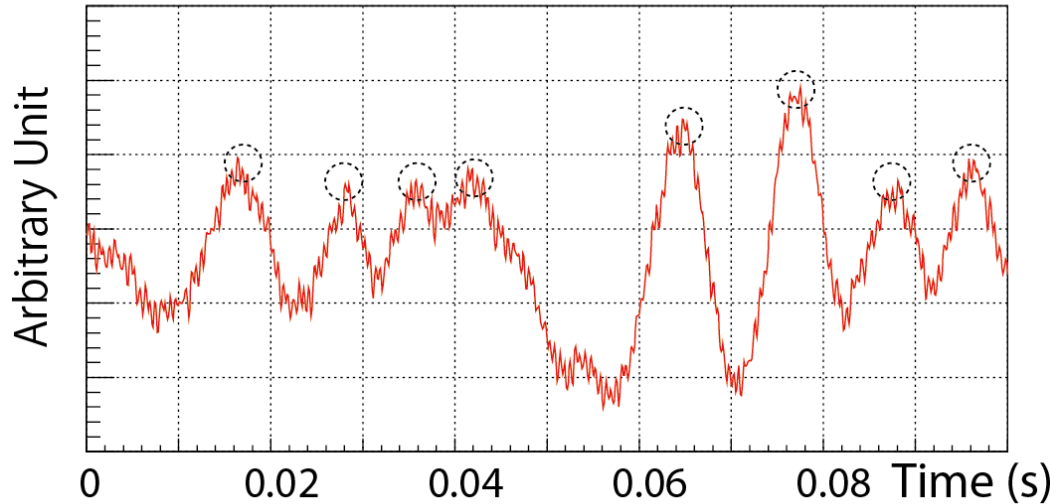
加速中のベータ関数もモデルに近づけることに成功。

成果例:バンチ当たり陽子数 $3.5e13$ の2バンチビームの加速に成功(8 bunch で500 kW超)

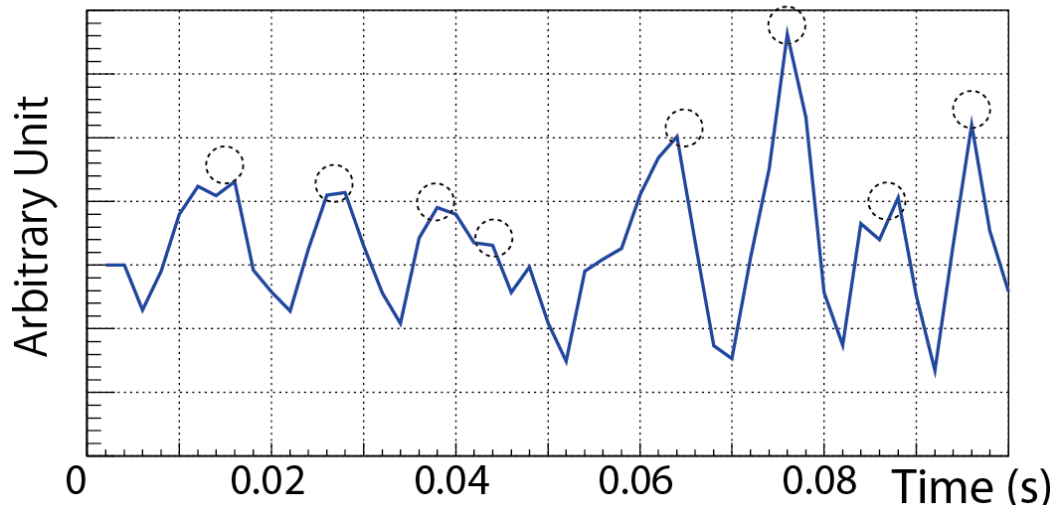
主電磁石電流を使ったリアルタイム光学補正(1)

チューン変動予測

電流偏差から計算したチューン変動



ビーム位置モニタで直接測定したチューン変動



B電源とQ電源の電流偏差をそれぞれ曲げ角エラー、K値(収束力)のエラーとみなし、以下を計算すると

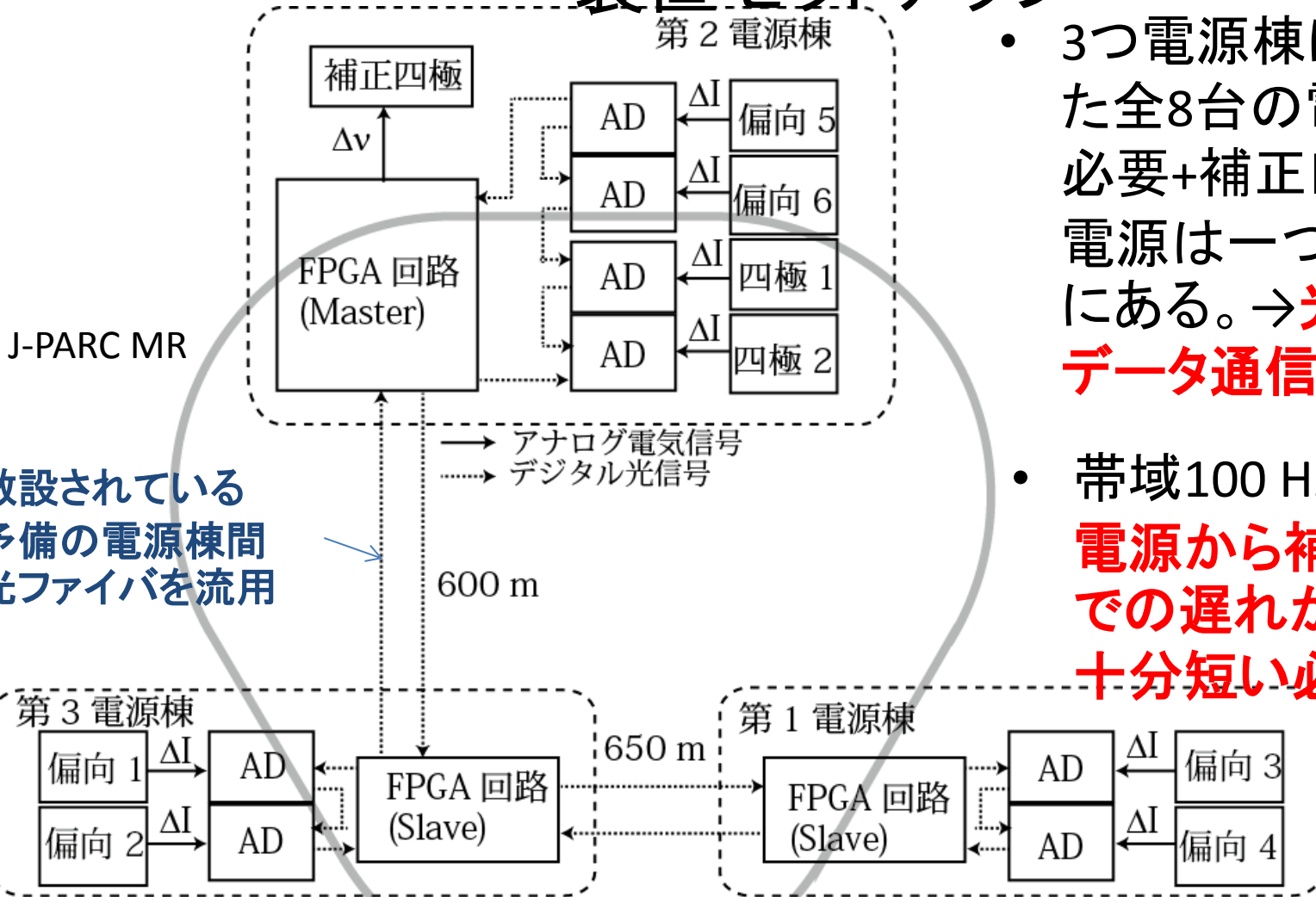
$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta Q_{BM} + \Delta Q_{QM} \\ &= \frac{L_{SM} \theta_{BM}}{8\pi \sin \pi Q} \sum_{k=1}^6 \frac{\Delta B_k}{B} \sum_j^{BMk} \sum_i^{SM} K_{2,i} \\ &\times \beta_i^{\frac{3}{2}} \beta_j^{\frac{1}{2}} \cos(-\pi Q + |\varphi_i - \varphi_j|) \\ &+ \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{11} N_i \beta_i \Delta K_{1,i} L_{QM,i} \end{aligned}$$

➡ 測定チューンをある程度再現する。

以上の計算がリアルタイムでできれば、チューン変動を補正できるはず

主電磁石電流を使ったリアルタイム光学補正(2)

装置セットアップ



敷設されている
予備の電源棟間
光ファイバを流用

- 3つ電源棟に分散された全8台の電流偏差が必要+補正四極電磁石電源は一つの電源棟にある。→**光長距離データ通信**(~ 1 km)

- 帯域100 Hz 程度→**主電源から補正電源までの遅れが10 msより十分短い必要あり**

Delay 2 us (AD) + 10 us (2km ファイバ) + 10 us (DA) + 10 us (光学計算) = 30 us程度 << 10 ms

まとめ

- 主電磁石は横方向の運動を制御する最重要機器である。
- 新電源初号機製作は、制御盤のKEK内製およびメーカーとの共同開発でようやく実現し、導入にこぎつけた。
- その他、主電磁石の性能をカバーする装置や測定法の開発も行っている。