ビーム DCCT の特性

橋本 義徳*[1]，荒川　大*[1]，手島昌巳*[1]，外山　毅*[1]，平松成範*[1]

*[1] 高エネルギー加速器研究機構

1.　概要

大強度陽子加速器：J-PARC（Japan Proton Accelerator Research Complex）のメインリングでは，リング内を周回する陽子ビームの粒子数を，DCCT (DC Current Transformer)を用いて計測している．DCCT は，DC から 20kHz の周波数帯域を持ち，その応答特性の平坦性は，30 mdB 以下である．計測できる電流領域は，数 mA から 20A であり，3 レンジ（0.2A, 2A, 20A）でカバーしている．その電流の精度は，基準電流源を用いて校正し，0.8%以下である．ノイズ対策では，メインの 50Hz ノイズを，-70dB 以下に落とした．本報告では，まず DCCT の原理と回路構成について述べ，次に精度を追求した回路調整と周波数などの緒特性の測定とその結果について述べる．

2.　J-PARC Main Ring (MR)

J-PARC は，茨城県東海村にある複合型の大強度陽子加速器施設 [1]（図 1）であり，世界最高クラスの大強度陽子ビームを生成する加速器と、その大強度陽子ビームを利用する実験施設で構成される最先端科学の研究施設である．本 DCCT は，その 50 GeV シンクロトロン(Main Ring :MR)に 2 台設置されており周回するビーム電流を計測する．この DCCT は，KEKB の DCCT [2]を基本的に踏襲したタイプであり，コアやヘッドアンプ，電流レンジなどを J-PARC 仕様に改良したものである．MR では，前段加速器の 3GeV シンクロトロン(Rapid Cycle Synchrotron :RCS)より 3GeV のエネルギーで入射された陽子ビームを現在は 30GeV まで加速し，T2K と称するニュートリノ実験や，特異な原子核や素粒子のためのハドロン実験へビーム供給を行っている．T2K は，MR から取り出された陽子ビームをターゲットに衝突させて発生する中間子からニュートリノが生成され，そのニュートリノを 300km 離れた岐阜県・神岡鉱山内のスーパーカミオカンデに打ち込む実験である．MR を周回するビーム強度の設計値は，3×10^{14} 陽子(p)であり，その実現に向けて調整が行われている．物理実験へのビーム供給は，2009 年 4 月より開始され，2011 年 1 月現在，7.5×10^{13} p／pulse のビーム強度である．MR の 1 加速サイクルでのビームエネルギーとビームの周回時間の変化を図 2 に示す. MR は, 3.5 秒周期で 3GeV から 30GeV までの加速を行う．加速により陽子の速度が高まるため，周長 1675.5m の MR を周回する時間は，入射時に約 5.5 μs であったものが，加速終了時には約 5.29 μs となり，3%程度小さくなる．

図 1. J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

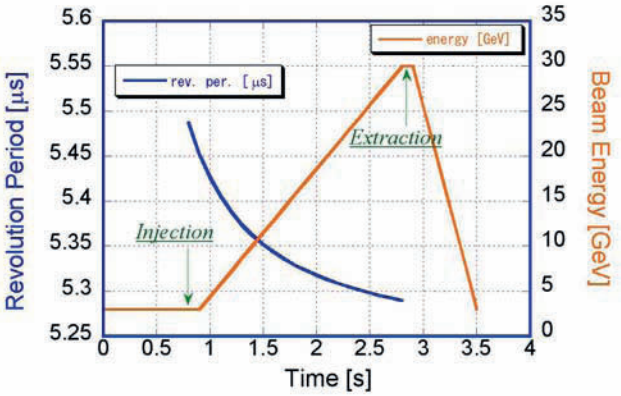

図 2. MR の加速エネルギーパターンと周回時間

3. DCCT　の原理 [3]

図 3. DCCT No.1，No.2 と特性計測機器

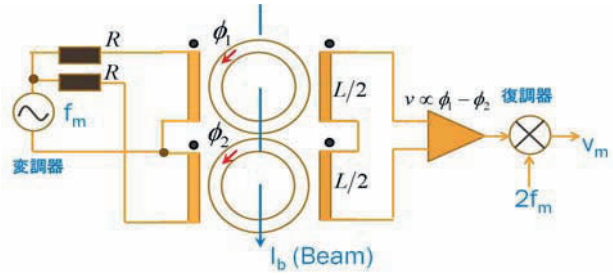

図 6. DC 系電流検出部

DCCT の装置とその基本回路の構成をそれぞれ図 3, 4 に示す．DCCT ヘッドは，DC を計測する専用の２枚１対のトロイダルコアと AC を計測する１枚のトロイダルコアからなる．コアの磁性体として日立金属製ファインメットコア(FT-3M)を用い，その大きさは，内径 175, 外径 180, 厚み 5mm である．コアの円内をビームが通過することにより，コア内にビーム電流に比例した磁束が発生する．その磁束を DC(DC～7Hz 程度)系，AC 系（5Hz～20kHz）で計測する．

はじめに，DC 計測系について述べる(図 6)．DC の２枚のパラメトリックコアを常時 1kHz でそれぞれ逆向きのサイン励磁(変調器)しておきその頂上部ではコアを飽和させておく．コア内をビームが通過することにより，非飽和箇所での磁束が増えるため，検出する磁束はビーム電流に比例して時間方向に拡がった形となる．この磁束はそれぞれのコアの検出コイルにより，励振している 1kHz のサイン波に対する位相差（時間幅）として検出する．この位相差を 7Hz 程度以下の成分をもつ電圧信号に直し（復調器），後述の AC 系で検出された電圧信号(5Hz～20kHz)と併せたものを電流に変換してパラメトリックコアにフィードバックする．フィードバックは，コア内に発生したビーム起因の磁束をすべて打ち消すもので，このようにすることで DC の帯域を確保する．一方の AC 系では，コアで検出したビーム起因の信号をアンプで増幅し，上記の DC 側の電圧信号と併せて，DC～20kHz の信号とし，それを電流に変換して，AC コア内の磁束を全て打ち消すようにフィードバッ

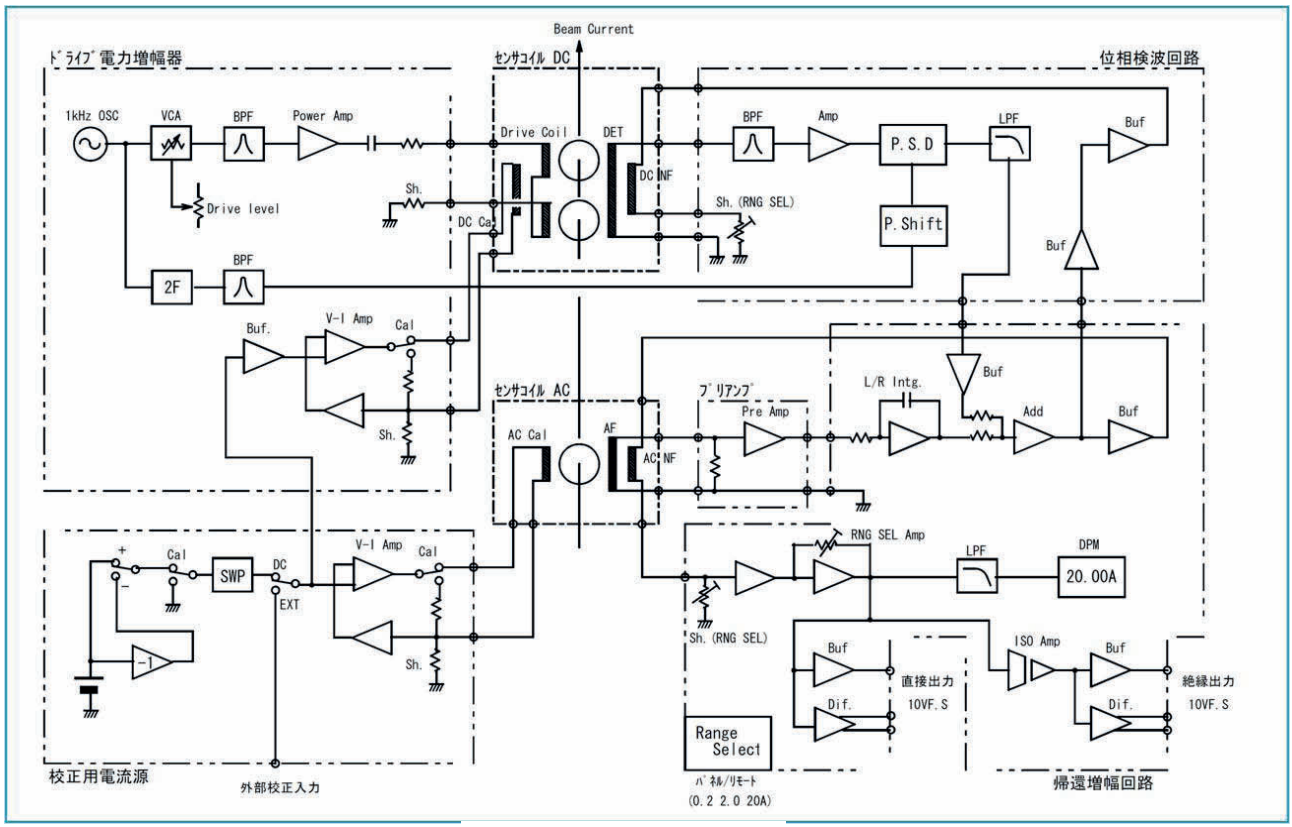

図 4. DCCT 基本回路構成図

クする．このように，コアに巻いたコイル(インダクタンス L)とその両端を結ぶ抵抗(R) で検出し，フィードバックを書ける場合の信号の時定数は，L と R の並列回路の電気容量を C とするとき，低域側で L/R，高域側で，1/CR となる．実際のビーム電流の検出は, AC 側のフィードバック電流を計測して行う. 図のフィードバック後の電流検出シャントには，コア内の磁束を全て打ち消した電流が流れるので，この電流がビーム電流に比例したものとなり，比例値は検出コイルとフィードバックコイルの巻線比である．

4. DCCT　装置

DCCT ヘッド（図 7）は，トンネル内に設置（図 3）され，処理回路は遠隔のローカル制御室(Local Control Room : LCR)に置かれる．ヘッドは，鉄製のシールドに覆われ，その内部のコアハウジングには DC 系コア，AC 系コアが置かれ，それらは独立に静電シールドとパーマロイ製の磁気シールドで囲まれている．ビーム環境下の温度については，例えば 115kW 程度のビームが周回することにより，近辺の壁電流による発熱と思われるが，シールドケースにつけた白金抵抗測温体では，10℃程度の温度上昇が見られている．コア部のビームパイプでは，パイプを走る壁電流をセラミックでカットしてある．

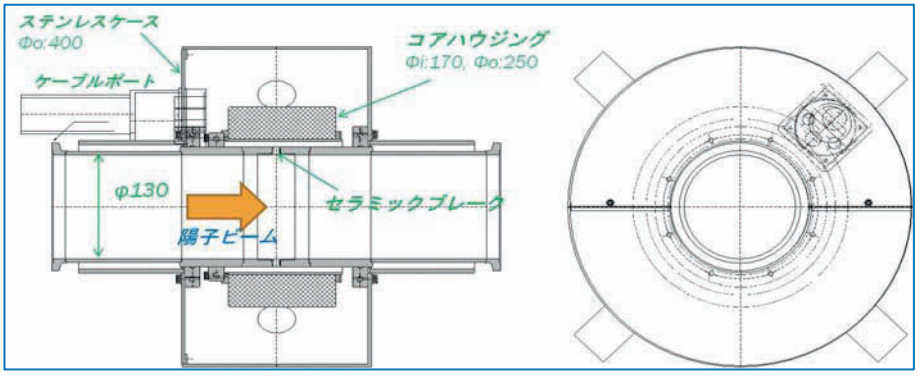

図 7. DCCT ヘッド

DCCT ヘッドと処理回路は, DC 系, AC 系それぞれ独立した 120m 長の多対のシールド付信号ケーブルで結ばれている．AC 系では，そのケーブルの途中のヘッドから 30m のケーブルトンネル内の位置にヘッドアンプを入れてある，ヘッドアンプは，ヘッド直近に設置することが望ましいが，トンネル内は放射線に晒されることになるために，耐久性の無い半導体アンプを使用した回路を置くことができないためである．これらのケーブルでは，シールドを除き，ヘッド側での接地はしていない．ノイズ対策を行い接地は LCR の処理回路を一点のみであることが最良であった．処理回路側では，AC ラインには，ノイズカット用の絶縁トランスを用い，さらに常時インバータ出力の UPS を通すことにより，AC グラウンドとの絶縁を取った．処理回路の接地には，加速器のビームモニター供用で使用する LCR 内の A 種接地ポストに一点接地した．DCCT 出力には，後述のノーマライザが接続されるが，処理回路の出力段にアイソレーションアンプを入れることにより，信号ラインのグラウンド間も後段の機器とは絶縁している．このようにすることで，加速器内で発生する高周波ノイズに対するループが生じることがなく，ノイズを大きく軽減することができた．

5. DCCT　の諸特性の測定

(4-1) クローズドループゲイン

クローズドループゲインの測定は，FFT アナライザー(小野測器 CF5220Z: DC ～100kHz)を用いた．スイープする電圧信号出力を変換器で電流に直し，DCCT ヘッドの DC 系，AC 系のテスト用 1turn コイルに同時に流す．処理回路の電圧出力信号のスイープ信号との RMS 電圧比の絶対値(Magnitude)と位相差（Phase）をプロットしたボード線図を図 8 に示す．20kHz で-3dB 程度であり，良好なフラットネスを持つ．帯域内の位相も安定している．

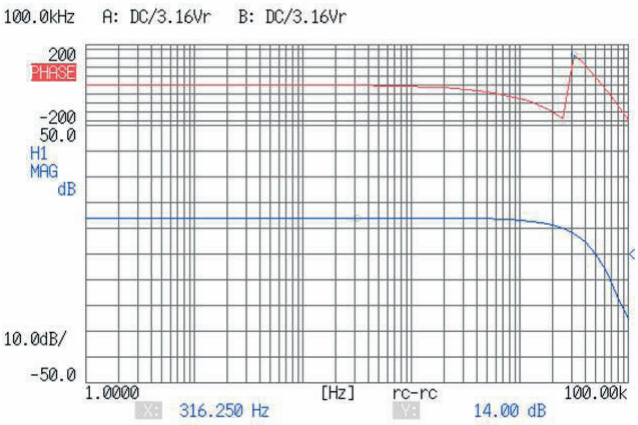

図 8. クローズドループゲイン特性

(4-2) 直線性

直線性の測定には，処理回路内蔵の校正電流源を用いて，DC 系，AC 系共に 50 turn の校正用コイルに DC 電流を流して計測した．校正システムの電流表示(DPM)と DCCT 出力電流表示との相関を取るものであり，相対値として直線性を計測することができる．2A レンジの場合の測定結果を図 9 に示す．直線のフィッティングエラーは，±0.17%の良好な値であった．DCCT の最大レンジではビーム電流が 20A の時に，10V の出力が得られる．

(4-3) 電流値の計測精度(DC)

DCCT の計測精度は，上記の測定では相対的な特性しか得られない．現在，加速器が停止する機会などに，入力基準 DC 電流を 10^{-4} オーダーまで正確に計測することで，それを基準とした DCCT の計測精度の測定を行っている．基準電流を 1 turn テストコイルに流し，4 端子法で 10^{-6} の精度で測定（Keithley DMM 2002）した精密シャント抵抗(220mΩ, tem p.coef ±30 ppm/℃)を用いて，0.1～2A を 100 点計測した測定結果を表 1 に示す. これより，In/Out では，一様に＋0.6～0.8% の小さなシステマティックな誤差を持っていることがわかってきた．DCCT ではフィードバックをしているために，フィードバック電流は，ビーム電流に等しいはずである（コイルの turn 数も考慮して）．この誤差は，DCCT 処理回路内でのフィードバック電流の計測の誤差と考えられており，シャント抵抗の電圧検出部のゲインにずれの疑いがあると思われる．今後確認する予定である．

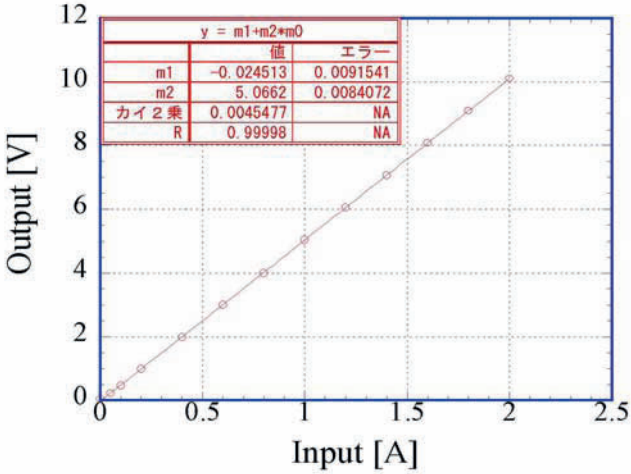

図 9. 入出力の直線性

表 1 精密電流入出力特性

In [A]	Out [A]	Out / In
0.0995	0.1003	1.0083
0.4928	0.4968	1.0080
0.9843	0.9902	1.0059
1.4567	0.2913	1.0077
1.5812	1.5942	1.0082
1.9092	0.3818	1.0066

(4-4) ノイズ測定

加速器の運転に伴い，DCCT 出力には，LCR 近傍の電磁石電源及び商用 50Hz のノイズが多く見られた．ラックマウント型の処理回路もラックから浮かす形とするなどして接地点以外の絶縁を取り，基本的に処理回路 GND の 1 点のみ接地（上述）にすることで，それらの大部分は消すことができた． DCCT 自身が，20kHz までの比較的低域の帯域特性しか持たないことも幸いしている．残っているのは 50Hz であり，現在-70dB 程度以下の大きさである(図 10). 処理回路にどのように侵入するかを調べているが，LCR 室内での DCCT の AC ラインなどの影響よりは，むしろトンネルからのケーブルに乗って処理回路に侵入しているように見られている．このような-70dB 以下となるような精密な 50Hz ノイズの測定には，AC100V を用いる低周波用のスペクトラムアナライザや FFT アナライザでは自らの 50Hz に影響されて S/N が小さく測定にならない．ノート PC 上で動作する音声解析用のスペクトラムアナライザ（ソフトウエア）が最適であり，マイク入力ポートにプローブを接続して使用した．ノイズフロアは-96dB であった．

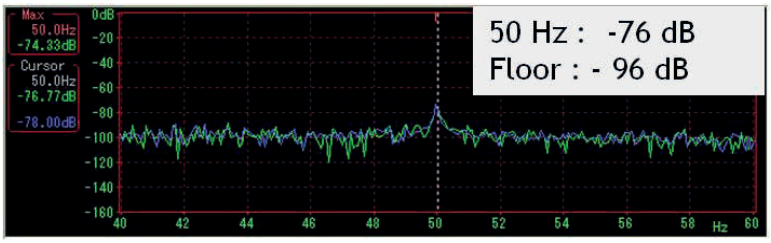

図 10. 50Hz ノイズ

6. ビーム計測システム

ビーム計測システムを図 11 に示す．このシステムは，DCCT ヘッド，DCCT 信号処理回路，ノーマライザ，ADC から構成され，周回するビーム粒子数を出力する．DCCT 信号処理回路では 3. で述べたように周回するビーム電流の時間波形を計測し，それに比例した電圧信号として出力する．ビーム電流は，周回する陽子の速度が早くなるに連れて大きな値となるため，一定の陽子数が周回するとした場合には，加速とともに電流値は大きくなる．したがって，周回する粒子数を求める場合には，ビームの周回周波数で除すれば良い．アナログ回路で構成されたノーマライザでは, RF 加速システムから送られてくる RF 信号の周波数を検出し，それに周回するビームバンチ数をかけて，周回周波数に比例した電圧を作っている．この周回周波数で DCCT 信号処理回路からの DCCT 電流波形を除することにより，粒子数に比例した信号を得る．最終段の ADC では, 粒子数の時間波形を 100kHz サンプリングの 14Bit の ADC でデジタルにする．この信号は，Giga-Bit Ethren et と光通信により中央制御棟にあるデータサーバーにビームサイクル（現在は，3.52s もしくは 6s）毎にストレージされ, J-PARC 加速器で採用されている分散型制御システム：EPICS（Experimental Physics and Industrial Control System）により，加速器運転に参加するメンバーのいずれもが, データの表示･解析を同時に行うことができる．

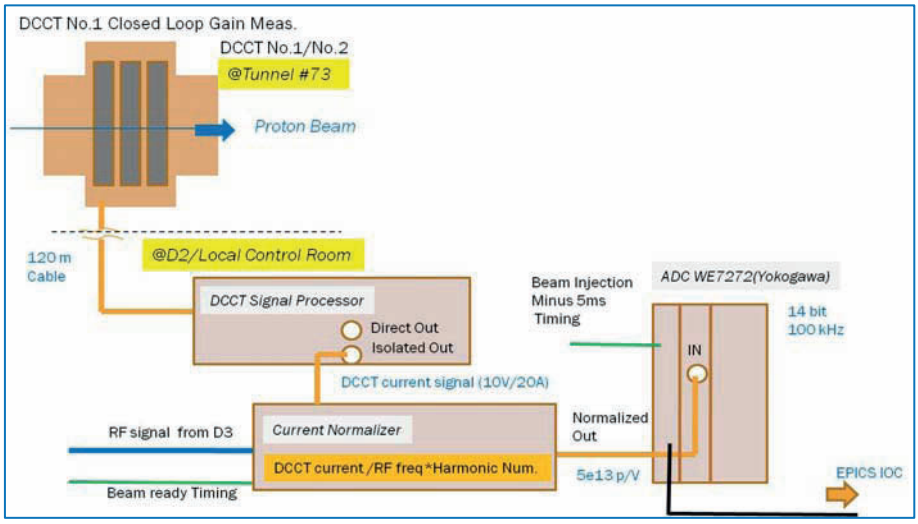

図 11. DCCT 計測システム

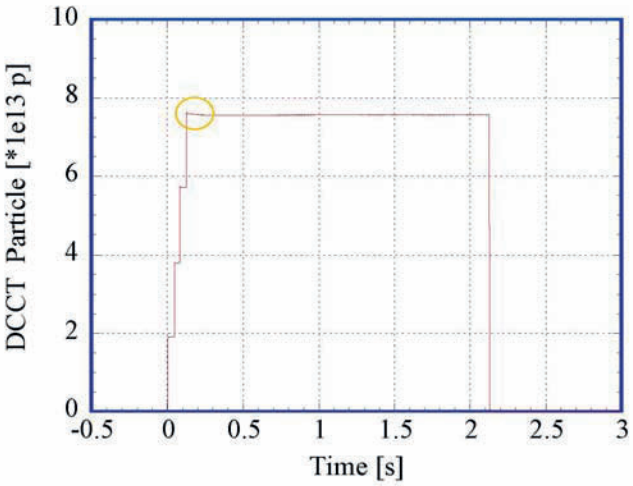

図 12. 2bunch ×4 batch 入射時の粒子数の時間変化

7. シンクロトロンを周回するビーム波形

ビーム DCCT では，上で見てきたように，信号帯域が DC～20kHz である．MR は，シンクロトロンと称する加速器でありそのサイクルは，入射したビームをある一定時間で加速し，その後取り出すというプロセスを持つ．MR への入射では，2 バンチが，それぞれ 40ms 毎に，4 回入射される（図 12）．○印を付けた箇所は，4batch 目のビームが入射された位置であるが，たとえばこのような波形の立ち上がる箇所では立ち上がりの直後に，入射でのロス（粒子数の減少）とともに，0.3%程度の小さな凹みが発生している(図 13)．これは，クローズドループゲインのカーブにおいて 5～7Hz の領域で，30 mdB 程度の僅かなアンバランスが発生（図 14）しているためであることが分かってきた．1%の測定精度を得ることを設計値としているため，その観点からはこの測定エラーは十分に小さい．しかし，大強度加

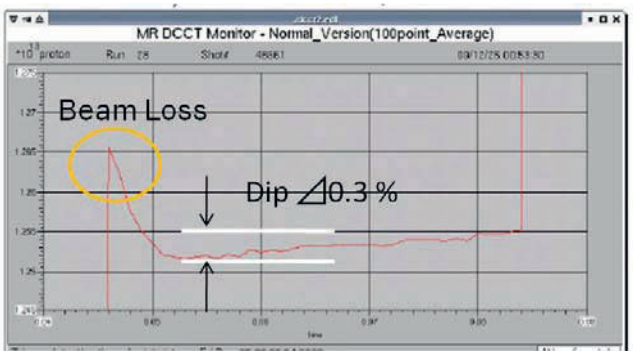

図 13. 入射直後のロスと波形の凹

速器で使用する場合には，僅かな入射部でのロスも減らしたいことがあり（大強度ビームでは僅かなロスでも加速器の放射化につながるため），この凹みが本物のロスかどうか見分けることを加速器運転の高度化の要求に挙げられている．この 30mdB 程度のアンバランスは，DC 系と AC 系の境界で生じている．オープンループゲインが両方共十分に高ければ，フィードバックした場合に完全に 0dB となり境界に乱れが生じないはずである．回路系の診断を開始した当初は，この凹みは 1dB 以上あったが，AC 系のゲインをアップする方法，DC 系の帯域を高域に伸ばすなどの工夫を行い小さくしてきた結果，ここまで小さくなったが，ほぼ限界である．そこで，今夏には AC 系のコアのコイル巻き数を 500 turn から 1000 turn に変更する．AC 系の低域の遮断周波数は，R/L（L:検出コイルのインダクタンス，R はそのシャント抵抗値）と表すことができ，一方 L は，コイル巻き数の 2 乗に比例する．これらのことから，1000 turn への変更により，現在 5Hz である低域遮断周波数は，1.3 Hz 程度まで下げられると予想でき，DC 部とのオーバーラップが厚くなるため, 30 mdB のディップの影響が無くなると期待している．

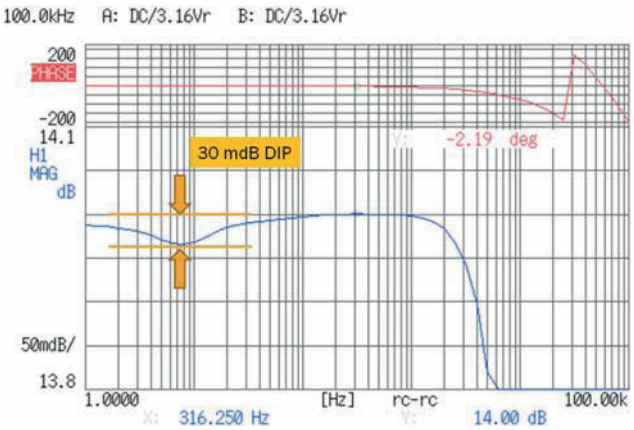

図 14. 周波数特性における 30mdB の凹み

高感度にした計測では，磁場の影響も見えた．ビームを周回させない状態の DCCT の粒子数波形を図 15 に示す．現在の周回粒子数である 7.5e13 p に対して 0.1%程度に変化しているが，これは粒子数測定にはほとんど影響しない値である．また，図の信号の線幅は 0.2mV 相当であり，その周波数成分として 100kHz と 50Hz を持つ，100kHz は, DCCT 処理回路内の出力段のアイソレーションアンプの Chop 信号(100kHz)のノイズであり, 50Hz は，商用ラインのノイズ(図 9)である．いずれも極めて小さくなっているが，フィルターの調整やグラウンドの取り方の調整ではこの程度が限度である．

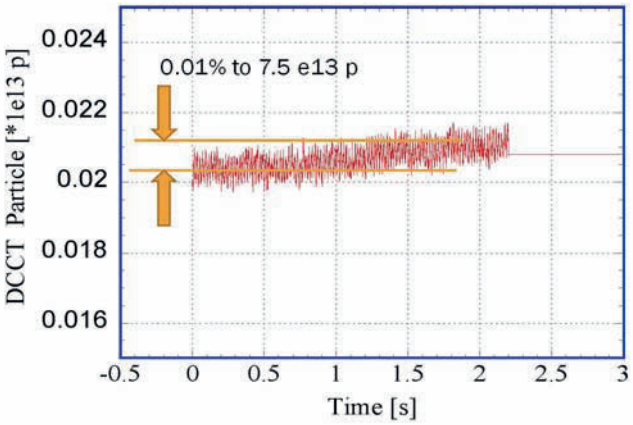

図 15. No Beam ショットでの粒子数波形

8. まとめ

J-PARC MR の DCCT の調整と特性測定を行った．加速器を周回するビーム電流・粒子数を正確に計測することは，特に大強度陽子ビームなどのビームロスが放射化を招くような加速器においては重要である．処理回路の特性を十分に理解し，ノイズなどの影響で測定に乱れが発生しないような細心の調整が必要である．1%の計測精度以内の計測を行っていることは確認できた．現在 0.1%の精度での校正方法の試験を加速器停止期間を利用して行っているところである．DC 系と AC 系を併せた DC から 20kHz までの帯域特性においては，クローズドループゲインの測定から，30mdB 以下でフラットであることがわかった．しかし，パルス入射を行うシンクロトロンであることから，この 30mdB の不均一さは，それを生じている 7Hz 近辺の周波数成分にアンバランスを生じ，パルス立ち上がり部直後に，ピークの 0.3%程度のエラーをもたらしていることも分かってきた．これは，AC 系と DC 系の接続部であり，AC 系の帯域を 1Hz まで下げることをコアの巻き数を増やす方法を用いて今夏に行う予定である． また，ノーマライザ回路を DSP で構成することを検討しており, DCCT 信号処理回路の出力と RF 信号は, DSP でディジタル化して除算を行う予定である．これと同時に, 100kHz の Band Rejection Filter を入れて，Isolation AMP の Chop Noise は消去し，また 50Hz ノイズは位相と振幅を検出して，それに同期した逆位相のディジタル 50Hz を計算して DCCT 信号に加えることにより消去することも今後行う予定である．

9. 参考文献

[1] http://j-parc.jp/ja/aboutJPARC-j.html

[2] M. Arinaga, et al.,NIMA, 499(2003)100-137.

[3] S. Hiramatsu, “Beam instrumentation for accelerators”, KEK Internal 2004-4.