

# CHARACTERISTICS OF A DCCT FOR THE J-PARC MAIN RING

Yoshinori Hashimoto<sup>#,A)</sup>, Shigenori Hiramatsu<sup>A)</sup>, Dai Arakawa<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Arinaga<sup>A)</sup>,  
Masaki Tejima<sup>A)</sup>, Takeshi Toyama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba Ibaraki, 305-0801

## Abstract

The Beam DC-CT for the J-PARC main ring (MR) is a type of parallel feedback developed in KEK-B<sup>[1,2]</sup>. In this method, negative feedback line for DC and AC part are independent, so ripple canceling and stabilities cannot be disturbed by unbalance of DC and AC cores. Its specifications are: (1) measurable beam current is between about 0.2 mA and 20 A which amounts to  $5 \times 10^{14}$  protons per pulse with three step ranges of 0.2 A, 2 A, and 20 A, (2) frequency response is DC to 20 kHz, and (3) measurement accuracy is below 1%. This paper describes their characteristics of frequency response, pulse response, current dependency, and noise.

## J-PARC MR の DCCT の特性

### 1. はじめに

J-PARC メインリング(MR)は、 $10^{14}$  ppp オーダーのビームを 3GeV から 30GeV まで加速する陽子シンクロトロンである。現在、ビームパワー145 kW を記録し、強度と電流は、それぞれ  $9 \times 10^{14}$  ppp, 2.7 A となった。このような大強度ビームの運転において、本 DCCT は設計通りに安定に動作している。その諸特性についてを、運転状況も合わせて報告する。

また、現在では設計時の測定精度である 1%を超える測定性能を要求されている。特に DCCT の J-PARC のようなシンクロトロンにおいては、ビーム入射時や速い取り出し時のビームパルスの立上りと立下がりでの応答性が問われる。特に MR は大強度加速器であることから、ロスの評価を詳細に行っており、入射時のエラーは正確に評価してやる必要がある。立ち上がり部はステップ応答であり周波数応答特性の均一性が波形に現れる。例えば 40mdB 程度の不均一さがあると、ステップ変化の直後の波形に 0.3%程度の乱れが現れる。このような例とその解析を合わせて紹介する。



図 1: MR の 2 台の DCCT. 2mm<sup>3</sup> の鉄製の磁気シールドで覆われている。横は特性測定セット。

<sup>#</sup> yoshinori.hashimoto@kek.jp

### 2. DCCT の基本性能

#### 2.1 基本構成

MR にインストールされた 2 台の DCCT と基本回路構成をそれぞれ図 1, 2 に示す。

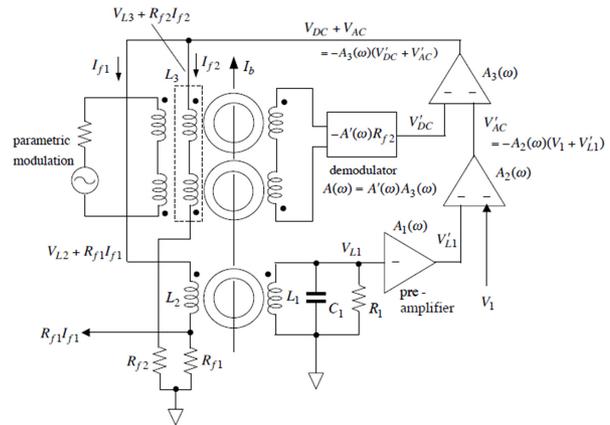


図 2: DCCT 基本回路構成。伝達関数も併記。AC 系のフィードバックループ内の  $A_2(\omega)$  に外部入力を与えてオフラインで回路応答を測定 (後述) する場合の等価回路。

DC 側のコイルを 1kHz で parametric modulation(sine wave)での基本励振を行い、ビーム電流により磁場が付加されるときの変化は、復調器において 2 通倍した基本励振波形からの位相差として検出し、それを電圧差に変換する。AC 側では、L/R インテグレーションを行う。Feedback としては、AC と DC の検出信号は、 $A_3(\omega)$  で一度 SUM され、その後、If2, If3 として DC と AC コアのそれぞれに独立したフィードバックを行う (並列フィードバック型)。周波数は、DC 部  $\sim 5$  Hz, AC 部 5 Hz  $\sim 20$  kHz の応答を持つ。

## 2.2 直線性

DCCT の入出力特性については、製作当初は、その仕様である 1%の精度と安定性を確認したため、それ以上の追及は行ってこなかったが、昨今の精密なビーム電流計測の要求<sup>[3]</sup>もあり、現在  $1e-4$  レベルの測定精度での詳細な校正が行われている<sup>[4]</sup>。その現在までの結果を要約すると次である。DCCT 回路の通常の使用においては、環境温度が 23~26°C で DC 電流の場合について、2A レンジでは±0.01%、20A レンジでは±0.1%の範囲の計測精度の再現性があることを確認した。

入出力の直線性 (図 3) としては、2A レンジでは最大+0.5%程度の非直線性がみられ、20A レンジでは同じく -1.5%程度であった。この非直線性は、2A レンジの場合は、電流検出後の出力段の絶縁アンプの非直線性が主たる要因であり、20A レンジではそれと相まっているが、主にフィードバックループ内での大電流の場合の非線形性が原因であるように見えている。これらの非直線性は、多項式で補正することができ、上記の計測精度の再現性がある<sup>[4]</sup>。

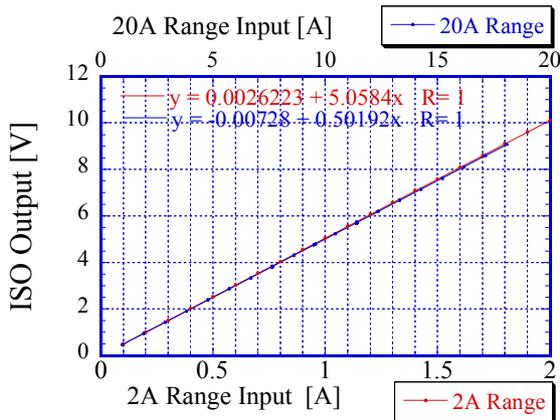


図 3: 2A, 20A レンジの入出力直線性<sup>[4]</sup>

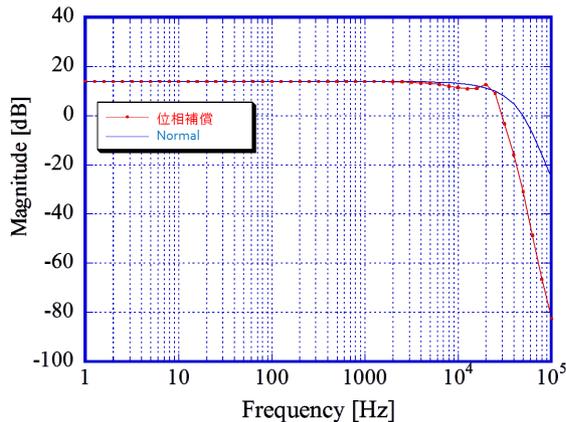


図 4: 周波数応答.

## 2.3 周波数特性

MR の DCCT では、KEK-B で開発された DCCT のコアを FINEMET<sup>[6]</sup>に変更し、周波数帯域を

10kHz から 20kHz に向上させている。周波数応答特性は、AC コアに巻かれている 1turn のテストコイルに、FFT アナライザのスイープ出力を電流変換して入力し、AC 部の電流検出用シャント抵抗での電圧を検出することで測定した。図 4 に結果を示す。通常の状態の場合と、AC フィードバックループ内のオペアンプに 2 次の位相補償をかけた場合の特性を示している。両者は、20kHz まで極めて良好な周波数特性を示している。特に後者は 20kHz 以上の領域からのノイズをカットするのに有効な方法である。ポールの手前の 10kHz 前後に -2dB 程度の小さな窪みが残った。

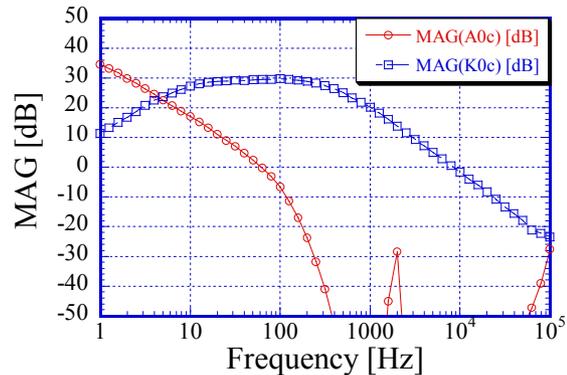


図 5: 回路伝達関数から計算で求めた Open Loop Gain.

## 2.4 Open Loop Gain

図 2 の応答関数を用いて、AC 回路と DC 回路の Open Loop Gain, それぞれ  $K_0(\omega)$ ,  $A_0(\omega)$  は、式(1), (2) となる<sup>[2]</sup>。

$$K_0(\omega) = -1 \frac{V'_{L1} V'_{AC} V_{DC} + V_{AC}}{R_f I_{f1} V_1 + V'_{L1} V'_{DC} + V'_{AC}} \frac{R_f}{R_f + R_c} \quad (1)$$

$$A_0(\omega) = -1 \frac{V_{DC} + V_{AC} V'_{DC}}{V'_{DC} + V'_{AC} R_f I_{f1}} \frac{R_f}{R_f + R_c} \quad (2)$$

尚、ここで  $R_c$  は、回路からコアまでのケーブル抵抗の応答関数であり、別途計測した。

測定は、1 Hz~100kHz のサイン波を外部から同図の位置に入力して (このときビーム電流に相当する入力無し)、伝達関数の区切りの各点での応答を、FFT アナライザ(小野測器: CFZ5220Z)を用いて計測した。これらにより得られたインストール直後の Open Loop Gain の例を図 5 に示す。図より、5 Hz 近傍に DC と AC のクロスオーバー部があることがわかる。両者のゲインは、40dB 程度以上を予想していたが、30dB 程度と低めであった。

## 2.5 最大検出感度

0.2A レンジにおいて、低強度の MR 周回ビームを試験した<sup>[8]</sup>。ノーマライザを通した周回粒子数の

時間波形として視認できるのは  $3e9$  ppp 程度( $120 \mu\text{A}$ )が限界であった (図 6) . このとき, DCCT 回路の出力波高は,  $6\text{mV}$  である.  $50\text{Hz}$  ノイズが支配的であった.

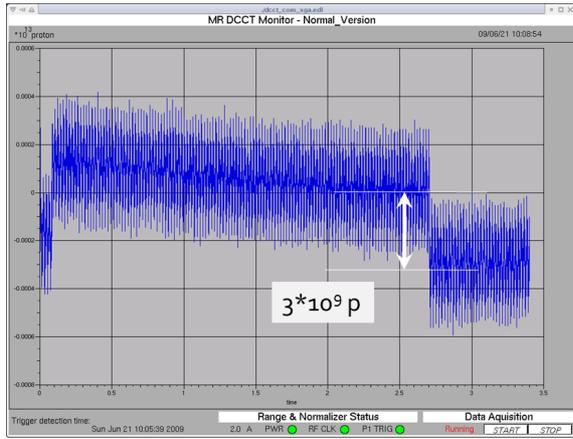


図 6: 最大感度で計測した周回ビーム粒子数の時間波形.

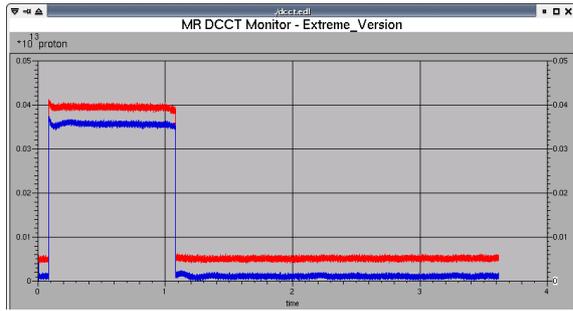


図 7: 2009 年 4 月ごろのパルス立ち上がりや立下り部でのうねり. 赤が DCCT No.1, 青が No.2 のビーム波形. No.2 では,  $200\text{ms}$  にわたり波高の  $4\%$  程度のうねりが見られる. この頃 No.1 に対して後述の対策を開始したため, 多少は小さくなっている. 両者共ノイズも多い状況であった.

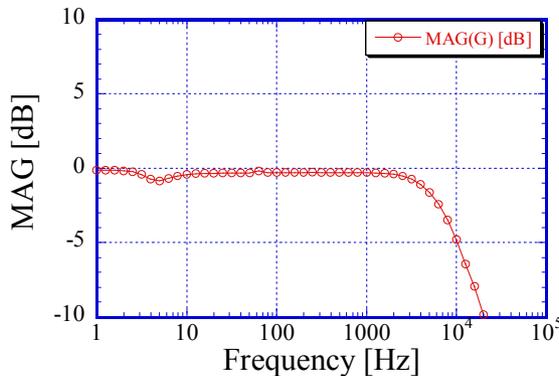


図 8: 初期のクローズドループゲイン. ゲイン調整が不十分であり帯域も  $10\text{kHz}$  の手前までであった.

### 3. パルス応答

#### 3.1 パルス応答における問題

基本特性として, ステップ応答, パルス応答について以下に記す. MR はシンクロトロンであり, 入射, 加速, 取り出しを速い取り出しの場合には  $3.2$  秒周期, 遅い取り出しの場合には  $6.0$  秒周期で行っている. このため, DCCT に入るビームは, パルスである. DCCT は図 4 にあるような周波数特性をもつため, このような遅いパルスの場合には, 良好な応答特性を持つように思われた. しかし, 実際は, 図 7 にあるようにパルスの立ち上がり部, 及び立下り部に, 小さなくぼみが見られた. これは, 周波数応答の DC 部と AC 部の周波数範囲の境目のクロスオーバー部に小さな窪みがあり, それが原因であることがわかった.

初期の伝達関数の測定から Closed Loop Gain を求めると図 8 となった. これより  $3\sim 8\text{Hz}$  のクロスオーバー部に,  $-1\text{dB}$  のくぼみがあることがわかった. シミュレーションとして, 矩形のパルスから,  $5\sim 7\text{Hz}$  の周波数成分を  $-1\text{dB}$  させた場合を図 9 に示す.

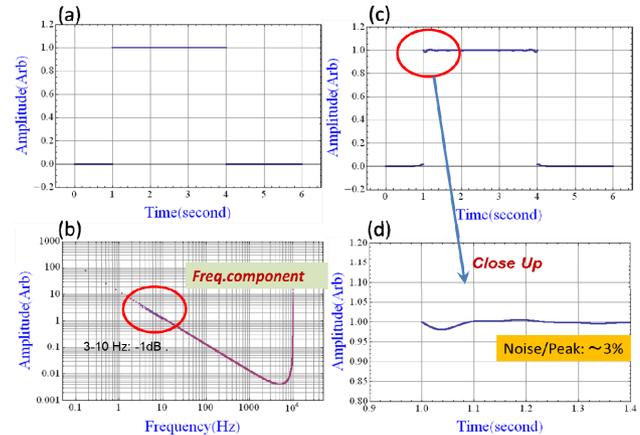


図 9: シミュレーション. (a)矩形のパルス( $3\text{s}$  幅), (b)その周波数成分の  $3\sim 10\text{Hz}$  を  $-1\text{dB}$  した, (c)b の時間波形, (d) c の立ち上がり部の拡大.  $200\text{ms}$  程度にわたり波形にうねり (全波高の  $3\%$  程度) が見られる.

シミュレーションにおいて, うねりの理由がよく説明できる. このように, 立ち上がり部・立下り部のように, 広範囲の周波数成分がポイント的に集中する部分では, その一部の成分のわずかなアンバランスにより, 無視できないような波形の乱れが発生することがあるということがわかった.

#### くぼみ問題の対策

周波数応答において  $3\sim 7\text{Hz}$  のくぼみを除くには, (1) Open Loop Gain を高める, (2) AC 側もしくは DC 側の周波数帯域を広く取る, といった方策が考

えられる。(1)では、特に AC 部の図 2. の  $A_2(\omega)$ ,  $A_3(\omega)$ でのゲインを高めることを行った(図 10)。この部分は計 3 段のオペアンプで構成されており、各アンプのフィードバックループ内の 2 次位相補償部の調整を行うことにより、位相補償と同時に全体で 15dB 程度のゲインアップを行った。

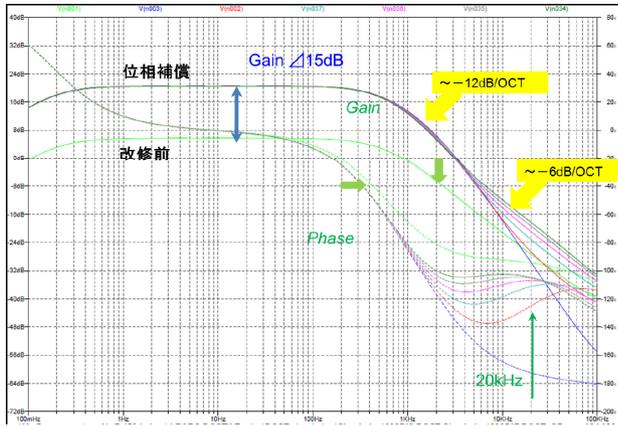


図 10: AC フィードバック部のゲインアップと位相補償調整のためのシミュレーション。

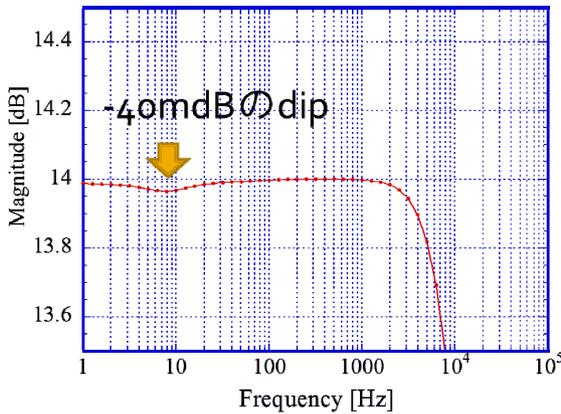


図 11: 調整後のクローズドループゲイン。

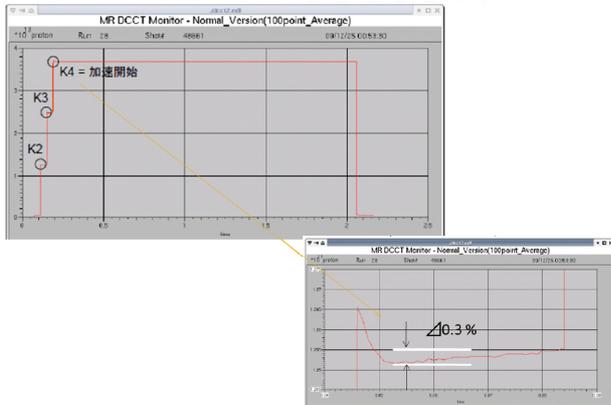


図 12: 調整後のビーム波形。全体と立ち上がり部(拡大)。立ち上がり部の鋭いピークは、ビームロ

スによる急激な減衰である[3]。

また、(2)とし、図 2 の DC 部の検出信号  $V_{DC}$  に対しての LPF の調整を行った。高すぎると波形が不安定な状態になることがあった。時間波形のうねりが小さくなるように調整したところ、カットオフが 7Hz 程度が最適であった。これらの調整を繰り返した結果、図 11 のように周波数応答に見られた -1dB のくぼみは、-40m dB までに小さくすることができた。

その結果、現在のビーム波形(図 12)では、立ち上がり部のうねりは、0.3%程度にまで小さくなった。

ここで述べた回路の基本性能の改善とは別の考え方として、DCCT の波形データを取得した後にデジタルで補正する方法<sup>[5,7]</sup>もあり、現在 MR の運転に用いられている。うねりの応答関数が一定である限りその補正の効果は高い。

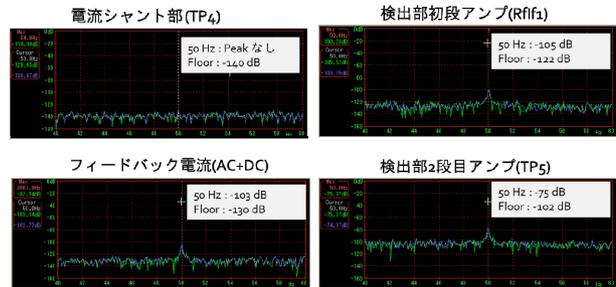


図 13: DCCT 回路での 50Hz ノイズ

#### 4. ノイズ

DCCT 回路の周波数応答範囲は、DC~20 kHz であるので、PickUp の基本性能としては基本的にこの領域でのノイズの対策を行えばよい。しかし、これとは別に、取得した電流の時間波形については、後段の粒子数変換回路(ノーマライザ)や、ADC など構成する一連のシステムでは、この範囲を超えた周波数での問題が出る。前者で問題となるのは、ラインの 50Hz と DC コアのモジュレーション周波数の 1kHz であるが、1kHz は DCCT 回路内に 2 段の BRF を入れてあり、信号に影響しない。後者では、回路の置かれている MR 第 2 電源棟内にある電力機器の主に 100kHz 以上のスイッチングノイズや、DCCT 出力段の絶縁アンプのモジュレーション周波数である 200kHz などである。これらは、DCCT 回路をケーブルトンネル内にあるプリアンプも含めてラックから浮かせ、A 種設置に一点アースとすること、及び DCCT の帯域とは異なるために後段のノーマライザなどの処理回路入口に 20kHz の LPF を付けることで、除去することができた。また、DCCT 回路を含めて連携するビーム電流・粒子数計測システムの給電には、ノイズカットトランス<sup>[9]</sup>と UPS のインバータを通した。結局、現在残っているのは、かなり小さくなった 50Hz ノイズだけとなった。

ノート PC と FFT ソフトを用いてラインからフリーにして計測した (図 13) と同様、DCCT 回路内のフィードバックループ内では Noise Floor に対して  $\Delta 27\text{dB}$  高い 50Hz ノイズが見られる。フィードバック後のシャント電圧には 50Hz はほとんど無く、出力段の増幅アンプ部の初段、 $\Delta 17\text{dB}$ 、2 段目で  $\Delta 27\text{dB}$  が混入していることがわかった。現在、DCCT の信号には、出力フルスケールの 10V に対して  $-70 \sim -75\text{dB}$  程度の 50Hz ノイズが重畳されており、電圧はおよそ 5mVp-p である。

## 5. まとめ

DCCT 実機は当初の設計通りに完成されたことを確認した。入出力特性も良好であり、周波数応答も 20kHz まで良好である。また昨今の 145kW パワーのビームに対しても安定な測定データを提供している。パルスの時間波形の立ち上がり部または、立下り部直後のうねりの問題は、シンクロトロン特有の問題であり、特に DC と AC の周波数応答のクロスオーバー部を、かぎりなくフラットにすることが要求される。このため、ゲインを高めることや、周波数領域を適切化することの調整を繰り返した。その結果、 $-40\text{dB}$  という小さな不均一さまでに追い込むことができた。しかし、ビーム波形においては 0.3% のうねりが残った。大強度化したビームでは、特に入射時刻、すなわち立ち上がり部でのロス情報が重要になるために、DCCT 波形の立ち上がり部に乱れが無いことが要求されている。今夏には、AC コイルを現在の 500 turn から 1000 turn に変更する予定である。AC の低域遮断周波数はインダクタンス反比例するので、低域側を伸ばす効果を期待している。また、ノイズ対策は、 $-70\text{dB}$  の 50Hz ノイズのみが残っているが、後段のノーマライザをデジタル化する際に、50Hz ノイズの位相を検出してのノイズリジェクション処理を組み込むことを予定している。

## 参考文献

- [1] M. Arinaga, et al., Nucl. Instr. And Meth. 499(2003)100-137.
- [2] S. Hiramatsu, KEK Internal 2004-4.
- [3] Y. Sato, et al., "BEAM DYNAMICS SIMULATIONS OF J-PARC MAIN RING FOR FAST EXTRACTION OPERATION", in these proceedings.
- [4] Y. Ohmori, et al., "A CALIBRATION METHOD FOR BEAM DCCT OF J-PARC MAIN RING", in these proceedings.
- [5] T. Toyama, et al., "Beam Instrumentation in J-PARC", proc. of DIPAC 2011.
- [6] FINEMET: Hitachi Metals, Ltd., [http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/p02\\_21.html](http://www.hitachi-metals.co.jp/prod/prod02/p02_21.html)
- [7] T. Toyama, et al., "BEAM-BASED CORRECTION OF A DCCT RESPONSE", in these proceedings.
- [8] K. Yoshimura, et al., proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, p.984.
- [9] ノイズカッターランス : [http://www.denkenseiki.co.jp/datafolder/seihin/nct/nct\\_main.html](http://www.denkenseiki.co.jp/datafolder/seihin/nct/nct_main.html)
- [10] R コアトランス : <http://www.kitamura-kiden.co.jp/rcoretrance.html>