

DEVELOPMENT OF MAGNET FIELD MEASUREMENT SYSTEM FOR FLUX CONCENTRATOR (2)

Shinji Ushimoto^{#,A)}, Kazuhiko Suzuki^{A)}, Naoyuki Toyotomi^{A)},
Takuya Kamitani^{B)}, Kazue Yokoyama^{B)}, Hirohiko Someya^{B)}

^{A)} Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd.
2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We developed a magnetic field measurement system for a pulse solenoid magnet as reported last year^[1]. This system has been used for a field distribution measurement of a flux concentrator. For this measurement, we introduce a new pickup-coil which enables a simultaneous measurement of the longitudinal and transverse field components and an improved control software. In this paper, we report these improvements in the measurement system.

フラックスコンセントレータ用磁場測定システムの開発(2)

1. はじめに

SuperKEKB に向けた KEK LINAC のアップグレード^[2]において、陽電子源の増強は重要な課題である。SuperKEKB で求められる陽電子生成量は現状のおよそ 4 倍であり、これまで陽電子の収束に使用していたパルスコイルに代わる、新たな収束系の開発が進められている。そのひとつが、フラックスコンセントレータ^[3]である。フラックスコンセントレータとは、一次コイルの内側にある角度方向にのみ狭いスリットを入れた導体を置き、それに円錐状の穴を貫通させた形状をしている。この一次コイルに電流を流すと、導体表面に誘導電流が発生する。この電流はスリットを通して導体の内側表面にも流れ、円錐状の穴の最小部では強い環状電流が流れコイルの役割を果たす。コイル内側の空間には一様に通る磁束が、導体があることにより導体の内側にのみ集中され、磁束密度が飛躍的に高くなり、より強力な収束磁場を発生する仕組みである。

今回、以前の報告^[1]で紹介した磁場測定システムを用いてフラックスコンセントレータの磁場測定を行なった。本報告では、測定状況と実際の測定を通して改良した自動測定システムについて紹介する。

2. システムの概要

本システムは測定系、駆動系、制御系から構成される。使用する機器は測定系がピックアップコイルとオシロスコープ、駆動系がステッピングモータと三次元可動ステージ、制御系が駆動系の IO 機器と制御用 PC である。以下に新たに開発したピックアップコイルと磁場測定の概要について説明する。

2.1 ピックアップコイル

フラックスコンセントレータのような変動するパルス磁場の分布を測るためには、微小なピックアップコイルを用いる。ピックアップコイルでの起電力信号はコイルの向きの磁場の強さに比例する。実際に発生する磁場ベクトルは、中心軸方向と横方向(軸方向に対して垂直)の磁場をそれぞれ別のピックアップコイルで測定し、それらのデータを合成して求める。ここでは各成分を測定するピックアップコイルを以下のように定義する。

- ・ LFPC(Longitudinal Field Pickup Coil)
- ・ TFPC(Transverse Field Pickup Coil)

今回の測定ではこれまで交換して使用していた LFPC、TFPC を同一シャフトに取り付けた複合型ピックアップコイルを作成した。表 1 にコイルの詳細、図 1 にコイル本体を示す。

表 1: ピックアップコイル詳細

	LFPC	TFPC
ターン数	10	23
直径 [mm]	1.1	1.25
有効面積 [m ²]	1.28e-5	2.2e-5
コイル間距離 [mm]	2.34	

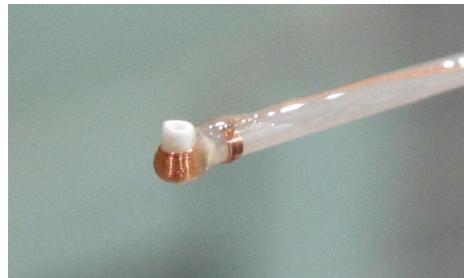


図 1: 複合型ピックアップコイル

[#] ushimoto@post.kek.jp

2.2 磁場測定の概要

ピックアップコイルは長さ約 900 mm のカーボンシャフト先端に取り付けられている。このシャフトは三次元ステージ上に取り付けたステッピングモータに組み込まれており、測定時に角度および測定位置の制御を行なう。フラックスコンセンレータはパルス電流で駆動するため、発生する磁場も変化する。この磁場による電磁誘導でピックアップコイルには電圧が生じる。これをオシロスコープで取り込み磁場の強さを測定する。

駆動系の制御およびデータの保存は制御用 PC 上の測定用プログラムによって全て自動化されている。

3. 制御システム

3.1 EPICS による制御システム構築

本システムの制御は EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)^[4]というオープンソースの制御システムツールキットを使用して構築した。EPICS では基本となるサーバプログラムを稼働させた計算機を IOC(Input Output Controller)と呼ぶ。IOC はデバイスサポートと呼ばれるソフトウェアを用いて各 IO 機器との通信を行なう。デバイスサポートは EPICS の WEB SITE からダウンロードが可能であり、IOC 上のサーバプログラムに組み込んで使用する。本システムでは StreamDevice^[5]と AsynDriver^[6]の 2 種類のデバイスサポートを用いて、LAN と USB 経由で各 IO 機器の制御を行なった。図 2 に制御システムの概要を示す。

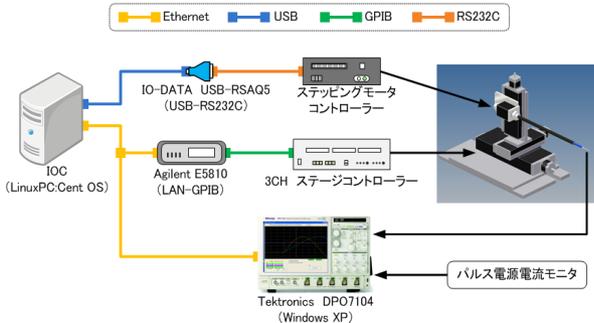


図 2 : 制御システム概要

3.2 測定用プログラム

測定用プログラムは、これまで開発を進めていた Python/Tk によるプログラムを改良して使用した。図 3 は改良を行なった測定用プログラムである。以下に今回新たに追加した機能を記す。

- ・ LFPC/TFPC 各データ収集
- ・ シャフトの回転(ステッピングモータ)自動制御
- ・ 測定値モニターグラフの追加
- ・ 三次元ステージ稼働制限域の適正化
- ・ EPICS を介した計測用プログラムとの連動

このプログラムは、基本的な測定用パラメータ(測定領域、測定回数、シャフト回転量等)を設定した後、自動測定を開始する。測定箇所はこのパラメータとピックアップコイルの可動制限域内を基に軸方

向位置によって径方向の可動範囲を変えるようにきめ細かく制御する。

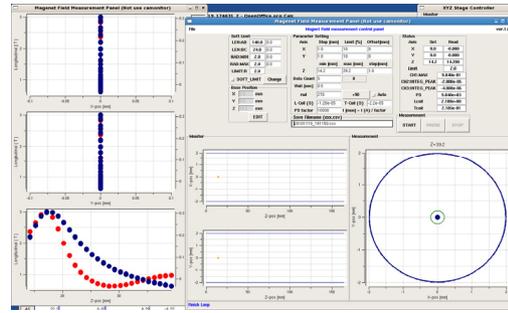


図 3 : 測定用プログラム

3.3 データ計測プログラム

今回データ計測に使用したオシロスコープは、Tektronics 社の DPO7104 で Windows XP が搭載されている。このオシロスコープには LFPC/TFPC とパルス電源の出力信号を接続した。従来のシステムでは測定プログラムから GPIB コマンドをネットワーク経由で送信し、オシロスコープの内部演算機能で処理したデータを取得していた。しかし、データ収集速度は最大 10 Hz であった。

今回は、最大 50 Hz での運転を想定してオシロスコープ上で動作するデータ計測専用のプログラムを開発した。このプログラムは Windows XP での安定動作と波形データのモニタ機能を付加する点を考慮して Visual C++で開発した。図 4 にデータ計測プログラムを示す。このプログラムはまず各チャンネルの信号立ち上りもしくは立下り前のデータをバックグラウンドとして計算し、それを差し引いた波形データに対して処理を行なう。処理後のデータは EPICS レコードにて保持しており、外部のプログラムから EPICS 経由で値が参照できるようにした。実際に使用したデータは、各チャンネルのスパイク信号を除いたピーク電圧、パルス電源のモニタ値から計算した電流値、LFPC および TFPC 信号から計算した磁束と磁場の強さである。

またこのプログラムは、測定用プログラムとの連動により、自動測定時にピックアップコイルが測定点に到達すると、その点での波形データを 5 回サンプリングした後、平均化したデータを CSV 形式のファイルとして任意のフォルダに保存する。



図 4 : データ計測プログラム

4. 磁場測定

図5はフラックスコンцентрレータの試験機を用いた測定の様子である。フラックスコンцентрレータはコーン型の形状によりシャフト可動域が制限される。そのため、測定装置はビーム進行方向下流側(図中の+Z方向)に設置した。設置後はアライメントテレスコープを使用してLFPC/TFPCの偏心量が最少となるようにシャフトの調整を行ない、その後LFPC/TFPCの各座標の原点を設定した。X方向およびY方向の原点(X=Y=0 mm)は、フラックスコンцентрレータの中心軸上とした。一方、Z方向の原点は、Z方向の可動ステージを中心に固定した状態で、ピックアップコイルがフラックスコンцентрレータの軸方向(Z方向)のほぼ中心となる位置に装置を設置し、シャフトを-Z方向の端まで持ってきたところをZ=0 mmとした。この時、フラックスコンцентрレータの上流端(最小開口部)はZ=17.2 mm(ϕ 8 mm)、最大開口部がZ=112.2 mm(ϕ 56 mm)、下流端が179.2 mmとなる。

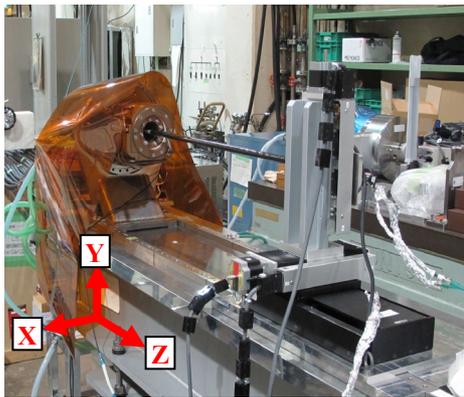


図5：磁場測定の様子

4.1 LFPC 測定

図6は中心軸上(X=Y=0 mm)で、Z方向位置を0 mmから200 mmまで変化させた時のLFPC測定結果(B_z)である。この図からフラックスコンцентрレータの軸方向の磁場は最小開口部の周辺で急激に変化し、強力な磁場が発生している様子がわかる。測定は大気中で行なったので、パルス電流は最大定格値の約3分の1である9.5 kAに制限していた。この時最大磁場はZ=20 mmでおよそ3 Teslaであった。

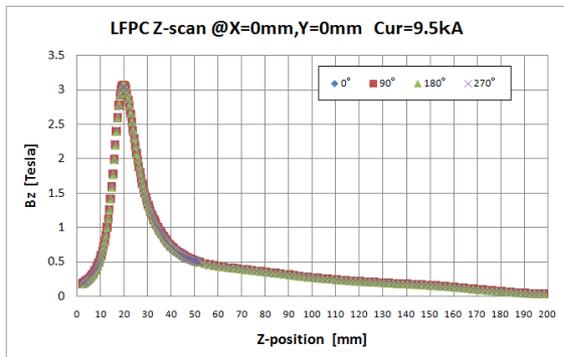


図6：LFPC 測定データ

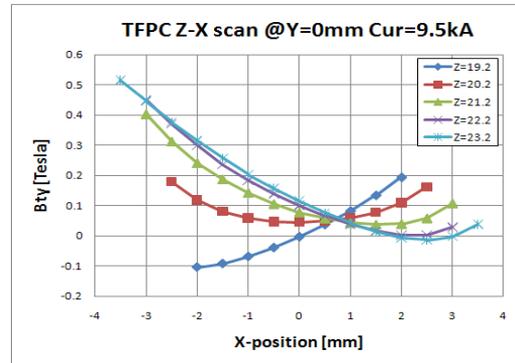
4.2 TFPC 測定

TFPCで測定する横方向の磁場は、軸方向に比べて非常に弱い。そのため、実際の測定値には軸方向の磁場の影響がみられる。これを取り除くため、TFPCは同じ測定位置で測定する角度とそれに対して 180° 反転した状態の測定を行ない、二つのデータの差を取ることで、軸方向成分の寄与を相殺させる。一方、横方向の磁場は2倍となるため、この値2分の1が求めたい横方向の磁場と考えられる。

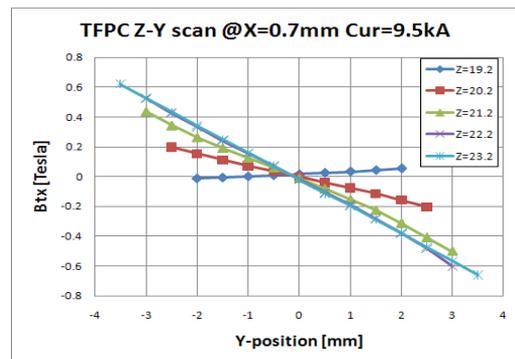
図7はTFPCによる横方向磁場成分の測定結果である。図7-(a)はY=0 mmのとき、ZおよびX方向の位置を変えながら測定した磁場(B_{ty})である。これはTFPCを 0° および 180° 回転させたデータから算出した。この結果よりX=0.7 mmのとき、Z方向の位置を変えても磁場の強さが変化していないことからX方向についてはこの位置が磁場分布の軸中心であることがわかる。

この結果を踏まえて、図7-(b)はX=0.7 mmのときZおよびY方向の位置を変えながら測定した磁場(B_{tx})である。これはTFPCを 90° および 270° 回転させたデータから算出した。この図からY=-0.2 mmのとき、Z方向の位置を変えても磁場の強さが変わらないことがわかる。以上のことから、今回測定したフラックスコンцентрレータの試験機はX=0.7 mm、Y=-0.2 mmの位置が磁場中心であると推測される。

また、図7ではZ方向の位置が変化するにつれて、横方向の磁場が回転している様子が見てとれる。



(a) Z-X scan



(b) Z-Y scan

図7：TFPC 測定データ

5. 実測定におけるシステムの改良

5.1 微小信号測定時の精度向上

フラックスコンセントレータはその形状から最小開口部で磁場が最大となり、開口部が広がるにつれて軸方向の磁場の強さが大幅に減少する。特に LFPC ではより強い磁場を測定する影響でダイナミックレンジが大きくなる。このような状況で微小信号の測定精度を上げるため、LFPC/TFPC のピーク電圧を基にオシロスコープの Vertical Range(以下 V-Range) を自動で切り替えながら計測を行なうようにプログラムの改修を行なった。図 8 は X=0 mm、Y=0 mm の Z 軸を 20 mm から 50 mm まで 0.5 mm ずつ変化させた時の LFPC 測定データから、ひとつ前の測定点との差を示した図である。

はじめに V-Range 60-90% にモニタ信号が収まる状態で測定を行なったところ、レンジが切り替わる前後でデータ飛びが見られた。次に、モニタ信号が常に V-Range 90% となる状態で測定を行なったところ、レンジが切り替わってもデータの飛びは見られなくなった。その後、オシロスコープ本体の校正を行なって再測定したところ、非常に安定したデータが計測できるようになった。これにより、LFPC、TFPC 共に測定精度が向上した。

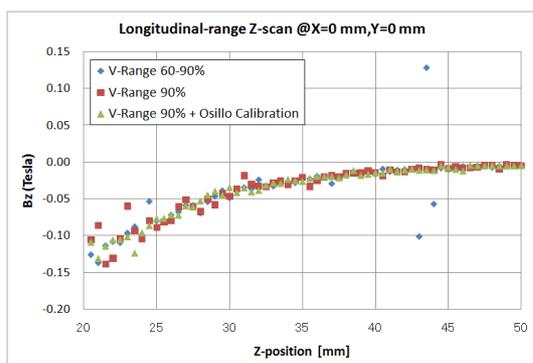
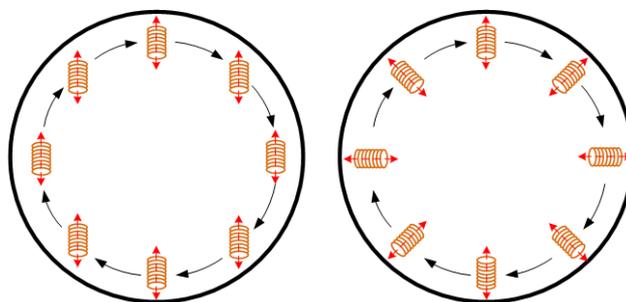


図 8 : V-Range 変更による LFPC 測定データ

5.2 導体部近傍の詳細測定

測定を進めていく過程で、TFPC の角度制御を綿密に行ない、横方向磁場を詳細に計測することとなった。図 9 に改良前後の TFPC の角度制御を示す。図 9-(a)は従来の制御の様子である。TFPC ではある角度に対して 180° 反転させたデータを計測する。このため、測定当初は 90° 毎の回転制御しか行なっておらず、導体面に対して、垂直な磁場の成分の計測は 4 カ所しか行なうことができなかった。

一方、図 9-(b)は改良後の角度制御の様子である。TFPC を円軌道で走査させながら XY 平面上の位置情報から TFPC が中心軸に対して常に動径方向を向くように制御を行なった。これは測定データの多重極展開解析を行うためには非常に重要である。実際にはステッピングモータの分解能により、最小回転角(7.2°)が制限されてしまう。この時、最大 50 点の同心円状のデータ測定が可能である。



(a) 従来角度制御 (b) 改良後の角度制御

図 9 : TFPC 角度制御の様子

6. まとめ

今回フラックスコンセントレータ用磁場測定システムを開発し、試験機の磁場測定を行なった。測定中に幾つかの不具合が見つかったが、その都度開発にフィードバックを行ない、最終的に綿密な磁場測定が可能なシステムを実現した。今後もフラックスコンセントレータの開発を進めながら、より精度の高い測定が行えるようにシステムの改良を進めていく予定である。

参考文献

- [1] S.Ushimoto, "Development of magnetic field measurement system for Flux concentrator", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Japan, Aug. 4-6, 2010
- [2] T.Kamitani, et al., "UPGRADE OF THE POSITRON SOURCE IN THE KEKB INJECTOR LINAC FOR SUPERKEKB", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, tsukuba, Japan, Aug. 1-3, 2011
- [3] T.Kamitani, "Positron Source", High Energy Accelerator Seminar(OHO02), KEK Tsukuba, Japan, Aug.27, 2002
- [4] EPICS WEB SITE "<http://www.aps.anl.gov/epics/>"
- [5] Swis Light Source WEB SITE "StreamDevice" "<http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/>"
- [6] asynDriver: Asynchronous Driver Support "<http://www.aps.anl.gov/epics/modules/soft/asyn/>"