

SuperKEKB 用の電磁石電源制御システムの動作試験

OPERATION TEST OF THE MAGNET POWER SUPPLY CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB

中村達郎^{#,A)}, 秋山篤美^{A)}, 青山知寛^{B)}, 中村卓也^{B)}, 佐々木信哉^{A)}, 吉井兼治^{B)}

Tatsuro Nakamura^{#,A)}, Atsuyoshi Akiyama^{A)}, Tomohiro Aoyama^{B)},

Takuya Nakamura^{B)}, Shinya Sasaki^{A)}, Kenzi Yoshii^{B)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

Abstract

For the SuperKEKB, the upgrade of the KEKB, significant number of magnet power supplies are newly manufactured. The modification of the magnet power supply control system is also in progress. In the KEKB magnet power supply control system VME based frontend control computers have been installed and ARCNET has been adopted as the fieldbus connecting to the magnet power supplies. We have developed the intelligent controller module called PSICM (Power Supply Interface Controller Module), which has been designed to be plugged into the magnet power supply in order to provide the ARCNET interface. The PSICM is also designed to control the output current of the power supply according to the arbitrary tracking curve and can perform the synchronous operation of the multiple magnet power supplies using external trigger signal. In SuperKEKB we have developed the upgraded version of the PSICM (New PSICM). The enhancements include the higher communication speed of the ARCNET, 32-bits data handling for the high resolution DAC and so on. Not only the PSICM, but the most components of the magnet power supply control system has been upgraded. In this article the development status and the operation test are described. The first trial of the beam operation with the upgraded system is also reported.

1. はじめに

電子・陽電子衝突型加速器である KEKB 加速器は 2010 年に運転を終了し、更なる高輝度化を目指して SuperKEKB 加速器へと改造を進めている。これに伴い電磁石電源制御システムの更新も進めている。

KEKB の制御システムは EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) ^[1] を基盤として構築したが、SuperKEKB においても引き続き EPICS を基盤とすることには変わりはない。EPICS は制御システムを構築するためのツールキットであり、分散型制御を実現するためのメカニズムを提供している。EPICS では IOC (Input/Output Controller) と呼ばれるフロントエンドの制御用計算機の上で EPICS database を稼働させることで制御を行なう。KEKB では IOC として全体で約 100 台の VME/VxWorks 計算機を設置した。IOC 間はネットワークで結ばれ、中央にはサーバ計算機 (HP-UX、Linux 等) を設置した。サーバ計算機では運転用オペレータインターフェースなどに代表される上位レベルの運転・制御アプリケーションプログラムを実行する。このような上位レベルの計算機を EPICS では OPI (Operator Interface) と呼んでいる。EPICS では IOC と OPI 間、および IOC 間の通信は Channel Access (CA) と呼ばれるプロトコルで統一的に行われる。SuperKEKB では VME だけでなく PLC/Linux、PC/Linux、および EPICS を直接組込んだ機器 (組込み EPICS) も IOC

として使用するが、電磁石電源制御に関しては主に VME/VxWorks を引き続き使用する。

2. KEKB での電磁石電源制御と PSICM

KEKB 加速器では蓄積リングと入射ビーム輸送ラインを合わせて約 2500 台の電磁石電源が使われていた^[2]。電源棟ごとに 1 台の IOC を配置し、計 11 台の IOC で全ての電磁石電源を遠隔制御していた。電源の台数の大半は補正電磁石などの小型電源で占められている。このような多数の電源を制御計算機に接続して遠隔制御するためのフィールドバスとして KEKB では ARCNET を採用し、PSICM (Power Supply Interface Controller Module) ^[3] と呼ぶモジュールを開発した。PSICM は電磁石電源に挿して使うプラグイン・モジュールであり、マイクロプロセッサを搭載して組込み制御を行なう。PSICM は ARCNET インターフェースを搭載して IOC と通信すると共に、複数台の電源を同期してパターン運転するためのコントローラとしての機能も併せ持っている。Figure 1 は KEKB で使われて来た PSICM の外観と、電源への実装例である。Figure 2 には PSICM と電磁石電源間の信号線の詳細を示している。PSICM の主なハードウェア仕様は Table 1 にまとめた。

ARCNET にはメディアの選択肢が幾つかあるが KEKB では STP (shielded twisted-pair) ケーブルを採用し、メディアドライバに HYC2485 を使っている。この構成では最大 20 の ARCNET ノードをディジーチェーン接続することが可能である。これは少ない

[#] tatsuro.nakamura@kek.jp

配線で効率よく多数の電磁石電源を接続するのに適している。STP ケーブルには Ethernet でも使われているツイスト線が 4 対のものを使用するが、ARCNET ではこのうち 1 対しか用いない。そこで残りのうちの 1 対を、同期スタート信号を送るのに使用している。同期スタート信号とは、複数台の電源をパターン運転する時に電源間の同期を取るために使われる外部トリガー信号である。Figure 3 は ARCNET と PSICM を用いた配線の構成を模式的に示したものである。

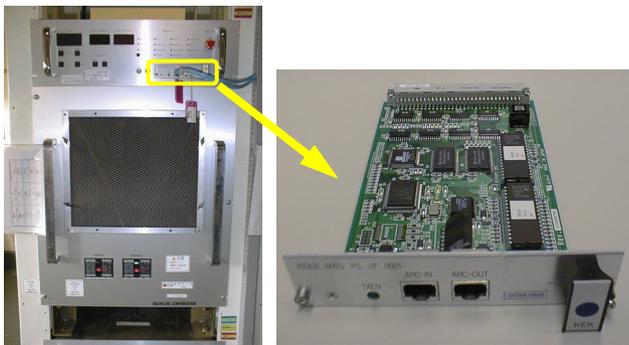


Figure 1: Whole shape of the PSICM (right) and the PSICM plugged in a magnet power supply (left).

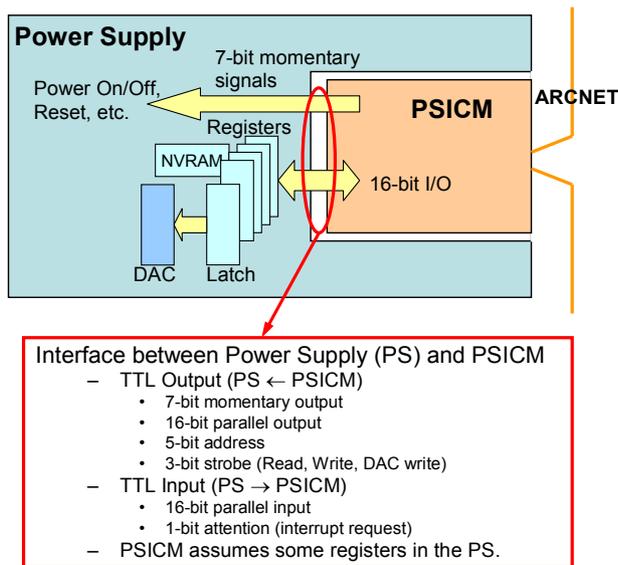


Figure 2: The interface to the magnet power supply.

PSICM では出力電流値を設定する際に、任意のトラッキング曲線に沿って電流値を変化させることができる。トラッキング曲線は電流値を時系列に並べた配列データとして表され、IOC から PSICM へ転送される。PSICM はデータを受信した後、同期スタート信号を受けるとトラッキングを開始する。Figure 4 はこの一連の動作を模式的に表したものである。これにより電磁石電源の同期パターン運転が可能になる^[4]。同期が必要ない場合は外部トリガーではなくスタート・コマンドを送ることによりソフト的にトラッキングを開始することもできる。

Table 1: Hardware Specifications

	Original PSICM	New PSICM
Microprocessor	AM186	MPC8306
Clock frequency	20MHz	133MHz
Data memory	256kB SRAM	128MB DDR2 SDRAM
Program memory	256kB EPROM	64MBit NOR FLASH
ARCNET interface	2.5Mbps Backplane mode	2.5/5/10Mbps Backplane mode
Controller	COM2002	COM20022
Media driver	HYC2485	HYC5000
Power required	5V 0.4A	5V 1A

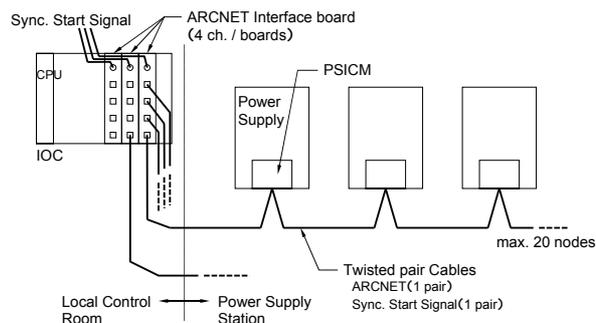


Figure 3: Typical configuration of ARCNET in KEKB.

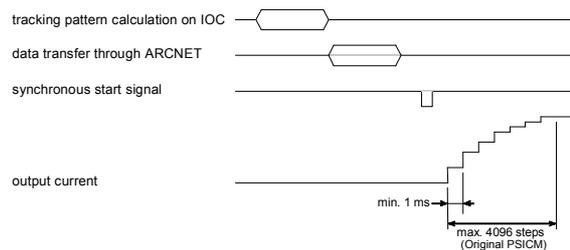


Figure 4: Schematic diagram of synchronous operation.

3. SuperKEKB でのシステム更新

3.1 PSICM のアップグレード

SuperKEKB では KEKB で使用していた電磁石電源の大部分を引き続き使用すると共に、新規製作も行われる。電源の台数増加分の PSICM は新たに製作する必要があるが、入手困難な部品もあり全く同一の PSICM を増産することは不可能なため、再設計を行なって新しいバージョンの PSICM を製作することにした^[5]。また SuperKEKB では DAC のビット数を拡張したり、インターロックの信号点数を増やしたりといった、機能が拡張されている電源もあるため、新 PSICM ではそれにも対応させる必要が

ある。一方で後方互換性を保つため旧 PSICM の機能を全て包含するよう配慮している。

電磁石電源に対する互換性としては、KEKB から使用している既設電源にも新規製作の電源にも共通して使えるよう設計した。IOC に対する互換性としては、旧 PSICM が受け付けていたコマンド・メッセージは全てそのまま新 PSICM でも受け付ける。それに加えて幾つかの拡張機能を追加している。主な拡張機能は以下の通りである。

- ARCNET の通信速度は 10Mbps, 5Mbps, 2.5Mbps に対応させ、ジャンパー・ピンで選ぶ事ができる。旧 PSICM は 2.5Mbps 専用である。
- トラッキングの配列データで扱う電流設定値を 32 ビットで扱うように拡張した。これにより 16 ビットの DAC に加えて、24 ビット、20 ビット、18 ビットの DAC にも自然に対応できる。旧 PSICM では基本データが 16 ビットであった。KEKB でも途中から 18 ビット DAC の電磁石電源が少数導入されたが、特別な仕様のファームウェアを作って対応していた。
- 同期スタート信号の信号線を冗長化した。STP ケーブルの空いているツイスト線のうちもう 1 対を追加の同期スタート信号に割り当てた。二重化の構成でも旧来の構成でも使う事ができる。
- RJ-45 コネクタに防塵カバーを付けられるようにした。
- ファームウェアのアップデートを ARCNET 経由で遠隔で行う機能を追加した。

Table 1 に新 PSICM についてもハードウェア仕様を併記した。Figure 5 は新しい PSICM の外観である。防塵カバーの受け座が装着されている以外は旧版と外観上の違いはあまりない。



Figure 5: The New PSICM.

3.2 VME システムと ARCNET ハブ

SuperKEKB では KEBK と同様に電磁石電源の IOC として VME を使い、OS は VxWorks を使う。IOC 側の ARCNET インターフェースには VME モジュールを使う。このモジュールは ARCNET インターフェースを 4 チャンネル搭載し、外部から入力された同期スタート信号の分配も行う。新 PSICM に併せてこのモジュールもアップグレードを行なった。

また、ARCNET ハブについても同様にアップグレードを行なった。これらの外観を Figure 6 に示す。

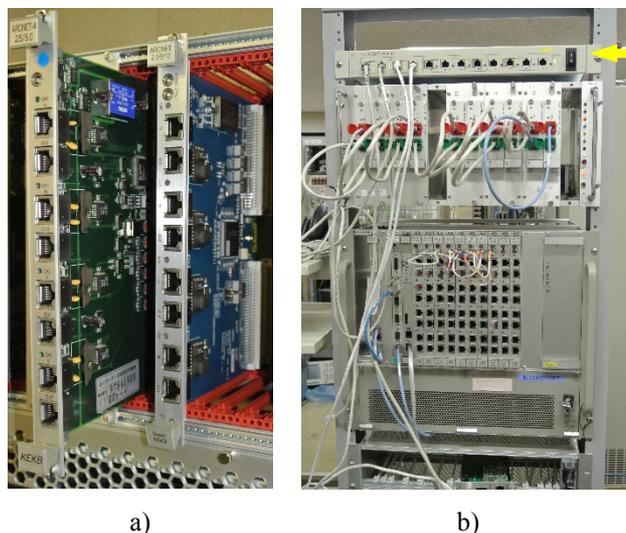


Figure 6: a) 4-ch. ARCNET interface board (VME module) of original version (left) and new version (right); b) ARCNET hub of new version mounted on the top of the test bench (yellow arrow).

4. 電磁石電源単体の遠隔制御の動作試験

4.1 試験用スタンドアロン操作プログラム

前節で述べた VME ベースのシステム構成は多数の電磁石電源を効率よく扱うには適しているが、1 台だけの電磁石電源を現場でテストするような場面では、いささかセットアップが面倒であり小回りが利かない。そこでノート PC の上で動く試験用のスタンドアロン・プログラムを開発した。プログラムは Windows 上の Visual BASIC で開発したもので、EPICS を使用していない。Figure 7 はこのプログラムの操作画面である。ARCNET インターフェースには USB 接続のものを使う。このインターフェースが市販の汎用品である関係上、同期スタート信号を送ることはできないが、それ以外の PSICM の機能には一通り対応しており、簡単な操作が可能である。

4.2 単体動作試験

SuperKEKB 用の新作の電磁石電源は順次立ち上げ試験が行われ始めている。そのうちの主要なものについては、PSICM を使った遠隔制御の試験も行っている。新 PSICM の開発と、新作電磁石電源の開発が並行して進められたこともあり、早期に納入されて立ち上げ試験を行なった電源では PSICM の最終版（量産版）を製作する前のプロトタイプを使って試験を行なったものもある。これにより新作電源の実機での試験結果を速やかに量産版に反映させることができた。今まで行なった試験では概ね大きな問題はなかったが、特殊な状況下では想定外の振舞いをする電源も見られた。対策としては電源側での対処、PSICM 側のファームウェアの修正、運用方法で

の対応、などで解決を図った。

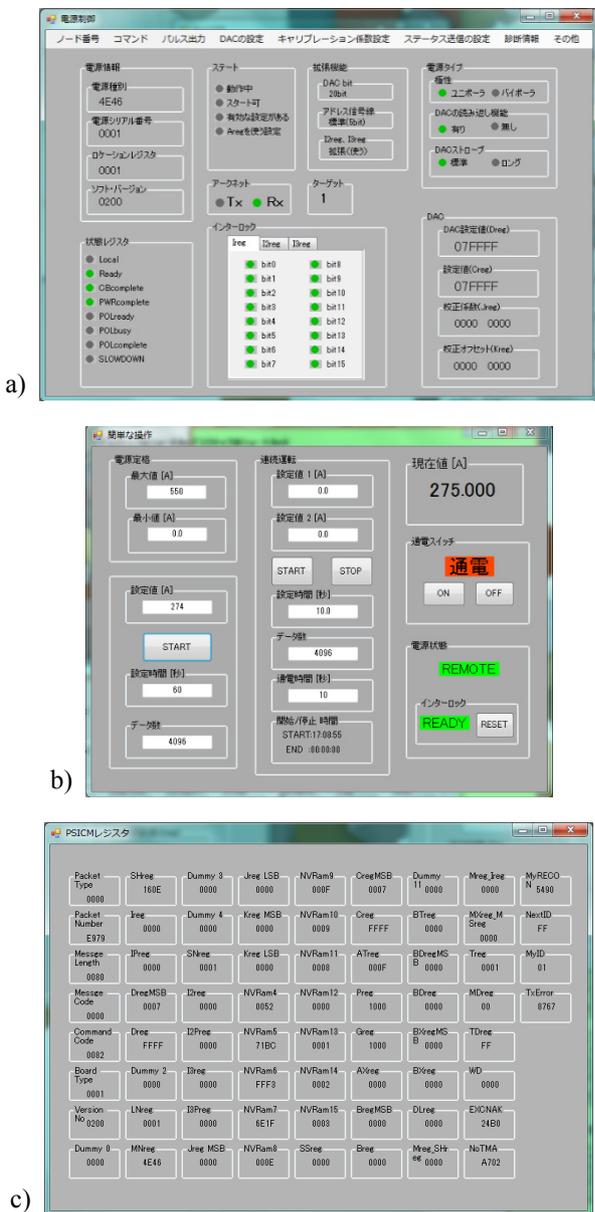


Figure 7: The screen shots of the standalone program for test operation; a) main window; b) setting panel; c) detailed status of PSICM.

5. 本運用の構成での試用運転

SuperKEKB ではダンピングリング (DR) とその入射 BT ラインおよび取り出し BT ラインを建設中である。このうち入射 BT ライン上流部にビームを通す運転が 2014 年 5 月より始まったため、これに合わせて運転対象の電磁石電源を本運用に近い形で遠隔制御を行なった。このビーム運転の目的は入射器 (Linac) での陽電子ビームの試験であり、入射 BT ライン上流部はビームダンプのために必要になったものである。入射 BT ラインで今回制御対象となったのは偏向電磁石 1 台と四極電磁石 2 台で、

それぞれ独立の電源で励磁する。ビームダンプへの輸送路として機能すれば良いので、電流設定の細かい調整や頻繁な調整は求められないが、Linac 主制御室から遠隔操作できることは求められた。そこで VME/VxWorks 上で EPICS を使うという、本運用と同じ構成で制御システムをセットアップした。この構成は KEKB での構成と基本的には同じであるが、SuperKEKB では ARCNET インターフェースのみならず CPU ボード、VxWorks、EPICS など、ハードウェア、ソフトウェア共に多くの点でアップグレードを行っている。特に EPICS は KEKB での R3.13 から R3.14 へとバージョンを上げた点が大きな差である。KEKB との主な差異を Table 2 にまとめた。

一方で電磁石電源制御のプログラムや EPICS データベースは SuperKEKB 用のものはまだ作成していないため、KEKB の運転で使われていたものを流用する方針とし、SuperKEKB 用環境に合わせた修正と動作確認を行なった。また Figure 8 は今回用意した操作画面である。この操作プログラムは KEKB の運転で使われていたものをベースにしており、Python で書かれている。特に電源を個別に操作するパネルは KEKB のものをほぼそのまま流用して使うことができた。Python の環境もまた KEKB の時の HP-UX でのバージョン 1.5 から Linux でのバージョン 2.7 へと大きく変更している。5 月からの運転では特に問題なく遠隔制御を行なうことができています。

Table 2: IOC and Software Configurations

	KEKB	SuperKEKB DR-BT Trial
IOC	FORCE	EMERSON
CPU board	PowerCore 6750	MVME5500
OS	VxWorks 5.3.1	VxWorks 5.5.1
EPICS	R3.13.1	R3.14.11
Python	1.5.2	2.7.6

6. まとめと今後

SuperKEKB の電磁石電源制御システムでは、電磁石電源の増設に伴い、改良版の PSICM を開発することで ARCNET の高速化を図るとともに、互換性を維持しつつ機能拡張を行なった。新 PSICM と新作の電磁石電源との組み合わせの動作試験を順次進めている。IOC についても CPU および ARCNET インターフェースを更新し、ソフトウェアのバージョンアップも行なって来た。2014 年 5 月からはダンピングリング入射路の一部の電磁石電源で本運用の構成での運転を始めており、改良版システムの実証を進めている。

本運用のシステム構成について今後 VxWorks 6.9、EPICS R3.14.12、Python 2.7.8 への更なるバージョンアップを検討している。その上で SuperKEKB 用の EPICS データベースと運転・制御プログラムの整備に開発の中心を移していく予定である。

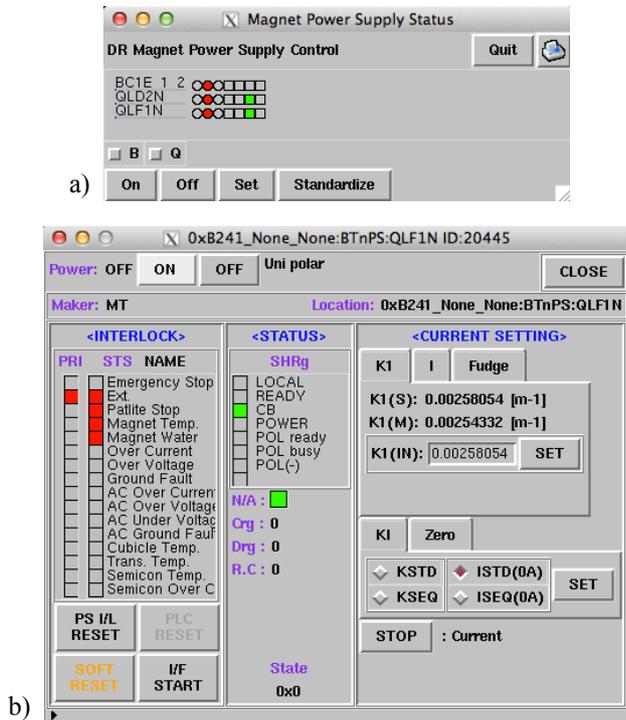


Figure 8: The screen shots of the operation program; a) summary status; b) individual control of a magnet power supply.

参考文献

- [1] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [2] M. Yoshida et al., "Magnet Power Supply System for KEKB Accelerator", EPAC-98, Stockholm, 22-26 June 1998.
- [3] A. Akiyama et al., "KEKB Power Supply Interface Controller Module", ICALEPCS'97, Beijing, 3-7 Nov. 1997.
- [4] T. T. Nakamura et al., "Magnet Power Supply Control System in KEKB Accelerators", ICALEPCS'99, Trieste, 4-8 Oct. 1999.
- [5] T. T. Nakamura et al., "Upgrade of the Power Supply Interface Controller Module for SuperKEKB", ICALEPCS2013, San Francisco, 6-11 Oct. 2013.