

## SuperKEKB のための電磁石電源制御システムの改造

### UPGRADE OF THE MAGNET POWER SUPPLY CONTROL SYSTEM FOR SUPERKEKB

中村達郎<sup>#,A)</sup>, 秋山篤美<sup>A)</sup>, 青山知寛<sup>B)</sup>, 藤田誠<sup>B)</sup>, 中村卓也<sup>B)</sup>, 小田切淳一<sup>A)</sup>, 佐々木信哉<sup>A)</sup>, 芳藤直樹<sup>C)</sup>, 吉井兼治<sup>B)</sup>

Tatsuro Nakamura<sup>#,A)</sup>, Atsuyoshi Akiyama<sup>A)</sup>, Tomohiro Aoyama<sup>B)</sup>, Makoto Fujita<sup>B)</sup>, Takuya Nakamura<sup>B)</sup>, Jun-ichi Odagiri<sup>A)</sup>, Shinya Sasaki<sup>A)</sup>, Naoki Yoshifuji<sup>C)</sup>, Kenzi Yoshii<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.

<sup>C)</sup> East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

#### Abstract

The magnet power supply control system for SuperKEKB has been developed based on the control system of KEKB. In the KEKB control system VME based frontend 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 not only an interface card but also controls synchronous operation of the multiple power supplies with an arbitrary tracking curve. For SuperKEKB we have developed the upgraded version of the PSICM. It has the fully backward compatible interface to the power supply. 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 also the most components of the magnet power supply control system has been upgraded. The construction status and the Phase 1 commissioning status of the magnet power supply control system is presented in this report.

#### 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来た。2016 年 2 月から 6 月までは Phase 1 運転が行われた。Phase 1 運転はビーム衝突を行わない試運転段階の運転である。電磁石電源制御システムも各種の更新を行ない SuperKEKB への改造を進めて来ている。本稿では電磁石電源制御システムについて、改造の概要と Phase 1 運転の状況を報告する。

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。このように KEKB と SuperKEKB とで制御システムの枠組みにおいては大幅な変更は無い。

#### 2. KEKB での電磁石電源制御

この章では SuperKEKB での改造の基礎となる KEKB での電磁石電源制御システムの概要をまとめておく。

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

<sup>#</sup> tatsuro.nakamura@kek.jp

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。

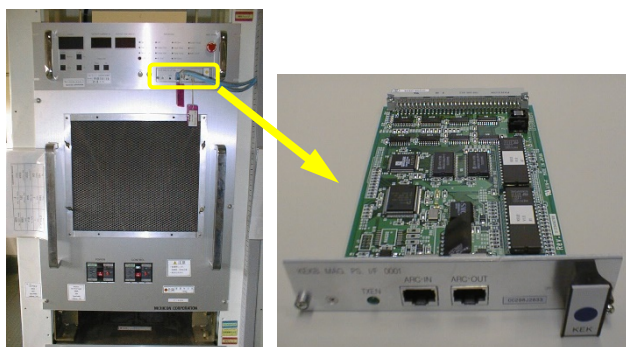


Figure 1: Whole shape of the PSICM (right) and the PSICM plugged in a magnet power supply (left).

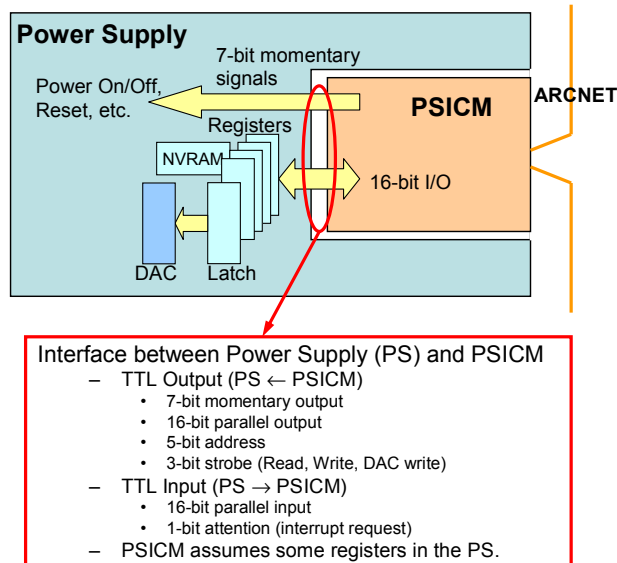


Figure 2: The interface to the magnet power supply.

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	2.5/5/10Mbps
	Backplane mode	Backplane mode
Controller	COM2002	COM20022
Media driver	HYC2485	HYC5000
Power required	5V 0.4A	5V 1A

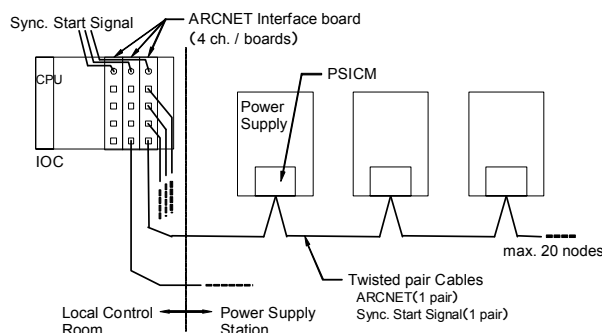


Figure 3: Typical configuration of ARCNET in KEBK.

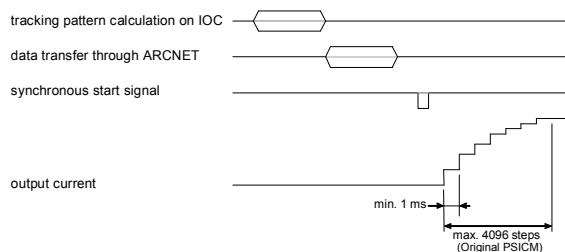


Figure 4: Schematic diagram of synchronous operation.

### 3. SuperKEKB での改造

#### 3.1 改良版 PSICM の製作

SuperKEKB では KEBK 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、新規製作も行われている。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 では配列データは 16 ビットで扱っている。
- 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。2014 年 5 月からはダンピングリング入射路の一部の電源に新 PSICM をインストールし、本運用に近い形で試用運転を行なっている[6]。



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 を用い、OS は VxWorks を使っている。Table 2 に KEBK での構成との差異をまとめた。CPU を更新すると共に VxWorks と EPICS のバージョンを新しくしている。

KEBK では IOC 側の ARCNET インターフェースとして専用の VME モジュールを使っていた。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 の導入に併せて、ARCNET の通信速度の増強と同期スタート信号の冗長化に対応させるため、このモジュールも更新を行なった。また、ARCNET ハブについても同様に更新を行なった。これらの外観を Figure 6 に示す。

Table 2: IOC and Software Configurations

	KEKB	SuperKEKB (Phase 1)
IOC		
CPU board	FORCE PowerCore 6750	EMERSON MVME5500
OS	VxWorks 5.3.1	VxWorks 6.8.3
EPICS	R3.13.1	R3.14.12.3
Python	1.5.2	2.7.6

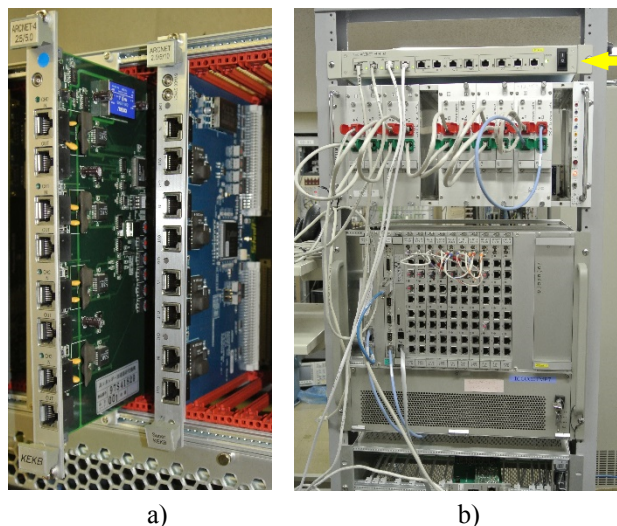


Figure 6: a) 4-ch. ARCNET interface board (VME module) of original version (left) and new version (right); b) ARCNET hub of new version mounted on the top of the test bench (yellow arrow).

### 3.3 新旧混在での運用

改良版である新 PSICM は 2014 年 3 月に 1 回目の量産を完了し、1000 台を製作した。メインリング、ダンピングリング、ビーム輸送路の全ての電磁石電源に新 PSICM を導入するには、予備品も合わせて 3000 台が必要となるが、予算の制約により 2 回目の 2000 台の量産はスケジュールが未だ確定していない。このため PSICM の新旧が混在する構成で運用を開始することとなった[7]。Phase 1 運転ではメインリングの 2155 台の電磁石電源のうち 426 台に新 PSICM を導入した。新規製造の電源、改造 (DAC の高分解能化) を行なった電源、および一部の既設電源に新 PSICM を割り当てた。Figure 7 は新旧の PSICM が混在している例である。

PSICM に使われている ARCNET のメディアドライバは新旧で互換性があるため、同一のダイジーチェーン接続の系統の中で混在させることができる。ただし通信速度は 2.5Mbps に限定されてしまうため、なるべく系統内

での混在は避ける構成が望ましい。しかしながら電磁石電源の配置や配線の都合上、特に小型電源では同一系統内での混在は避けられなかった。これに関連し、準備していた新 ARCNET ハブは、Phase 1 運転の時点では導入を見送った。これは新旧混在状態を経ることによる余分な作業工数の発生を抑えるためである。

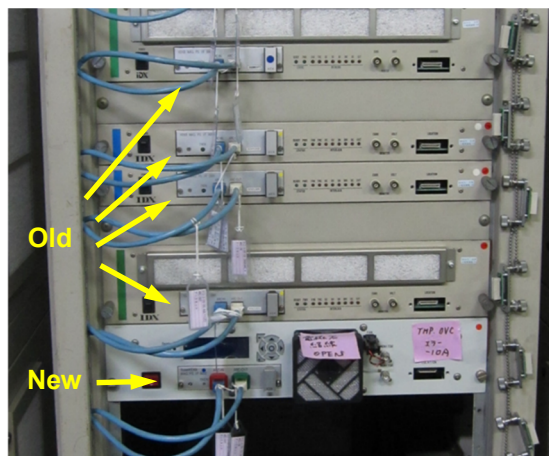


Figure 7: The combination of the old and new PSICM.

### 3.4 インターロックシステムとの通信

KEKB では電磁石のインターロックシステムとの通信は Modbus-plus をインターフェースにして行っていた。SuperKEKB ではインターロックシステムを構成する PLC が Modicon から横河電機の FA-M3 に入れ換えられたため、Modbus-plus を廃して、Linux CPU である F3RP61 を PLC に導入する構成とした。F3RP61 には EPICS を組み込み、IOC として機能させた。Figure 8 は PLC に組み込まれた F3RP61 の写真である。

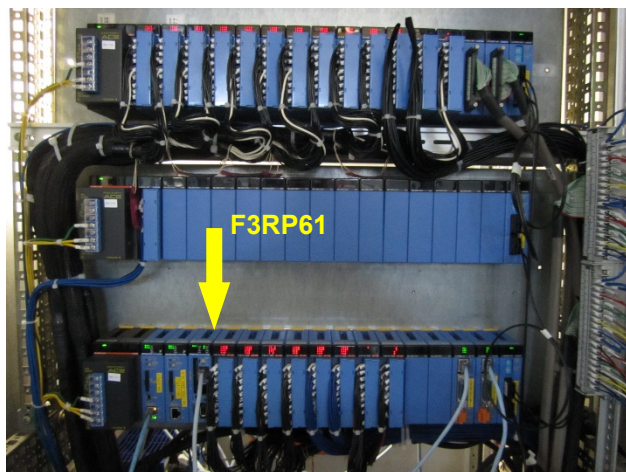


Figure 8: The PLC for the magnet interlock system. The photograph is taken at the D8 power station. F3RP61 CPU module is mounted (yellow arrow).

### 3.5 出力電流モニター・システム

電磁石電源の出力電流モニター・システムは、スキャナとデジボルの組み合わせで行っており、一組のス

キャナ、デジボルで最大 80 台の電源をモニターできる。スキャナ、デジボルへのインターフェースは GP-IB である。この構成は SuperKEKB でも KEKB と全く変わりが無い。将来的には GP-IB から Ethernet への移行を検討しているが、少なくとも Phase 1 運転では KEKB と同様に GP-IB でインターフェースを行なっている。

## 4. Phase 1 運転での動作状況と課題

SuperKEKB の Phase 1 運転では最終的には無事に電磁石電源を制御できた。しかし立ち上げの過程で多くのトラブルに遭遇し、ソフトウェアのバグにも悩まされた。一部のバグは解決が運転開始後になったものもあった。ここでは大きなトラブルを 3 つ挙げる。今後の課題としたい。

### 4.1 ARCNET の通信速度

一つ目の大きなトラブルは、環境により 10Mbps での ARCNET 通信が不安定になる場合があることである。テストベンチでは問題が無かったが、実運用では一部のディジーチェーンの系統で不安定になった。原因としてはケーブル長が想定より長かったこと、ノイズ環境が悪いことが考えられるが、原因の確定には至っていない。実用上、通信速度は 2.5Mbps でも不足はないため、不安定な系統では無理をせず 2.5Mbps で運用することにした。

### 4.2 電流モニター用 IOC の分離独立

二つ目の大きなトラブルは、VME で GP-IB インターフェースと ARCNET インターフェースが干渉しているとみられる現象が起きたことである。頻度は低いながら ARCNET のデータにエラーが出現する症状があった。この時エラーの出現状況を観察すると、電流モニターの読み出し動作と同期していた。何らかのバグの存在が推測されるが、原因追究は深入りせず、Phase 1 運転が迫っていたことからシステムの立ち上げを優先させるため、急遽 GP-IB 系(電流モニター)を ARCNET 系(設定・操作全般)とは別の独立の VME IOC に分離することにした。Phase 1 運転の間はこの構成で運用した。将来的には GP-IB から Ethernet への置き換えを進めていく予定である。

### 4.3 同期スタート信号線へのノイズ混入

三つ目の大きなトラブルは同期スタート信号線にノイズが乗り、誤動作が起きてしまうことである。ノイズの発生源は新規に製作された大型電源であることが判明した。問題の電源は 11 台あり、メインリングの電磁石電源がある電源棟 8 棟のうち 4 棟に設置されている。

同期スタート信号線にノイズが乗ると偽のスタートが指令されてしまう。電流設定を非同期設定モードで行なっても同期スタート信号が来ると設定を開始してしまうため、最初は非同期設定での不可解な誤動作として症状が現れた。これは想定外のタイミングで電流設定が始まってしまうため、プログラムがその動作に対応できていなかったからである。このためノイズによるスタートも想定に入れるようソフトウェアを変更することで非同期設定は正常に動作させることができるようになった。

一方、同期設定モードでは、ノイズによる偽のスタートが発生すると、フライング・スタートとなり同期が取れなくなるため、偽スタートを抑止できるレベルまでノイズを低

減させるほかに解決策は無い。ノイズ発生源は判明しているが、発生源での対処は難しく、またノイズの混入経路も複数あり複雑である。このためノイズ対策は短期間では難しいと判断して、Phase 1 運転では同期設定モードは使わない方針とした。同期設定ができないことから、ビームを蓄積したままでの電流設定では小刻みな変更を積み重ねるよう、上位ソフトウェア(オプティクス設定のミドルウェア)での運用で対応してもらった。

今後の対策として、ノイズを減衰させるためフィルターの導入を検討している。スタート信号も鈍ってしまうが、同期設定のステップ時間は最小でも 1ms と遅いため問題ない。また ARCNET 配線の一部に接地が不適切でグラウンドループを作っている箇所が見られた。ループを切るとある程度改善が見られたため、他に問題箇所は無いか全配線の調査も計画している。ノイズ発生源の大型電源 11 台に対しては、他の電源と分離させるため光ファイバーで接続することも考えたい。

## 5. まとめ

SuperKEKB の電磁石電源制御システムは KEKB でのシステムをベースにして、改良版 PSICM の導入などの改造を行なって来た。Phase 1 運転では新旧 PSICM が混在した運用になるなど、過渡的な状況での運用となった。多くのトラブルはあったが、最終的には無事に電磁石電源を制御できた。同期スタート信号線へのノイズ混入問題をはじめとした課題が残されているため、Phase 2 運転までに解決できるよう取り組んでいきたい。

## 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.
- [6] 中村達郎他, SUP087 “SuperKEKB 用の電磁石電源制御システムの動作試験”、第 11 回日本加速器学会年会、青森、2014.
- [7] T. T. Nakamura *et al.*, “The Construction of the SuperKEKB Magnet Control System”, ICALEPCS2015, Melbourne, 17-23 Oct. 2015.