

# SuperKEKB, 陽電子ダンピングリング及び PF-AR の人的安全システム PERSONAL PROTECTION SYSTEM FOR SUPERKEKB, POSITRON DAMPING RING AND PF-AR

三増俊広<sup>#, A)</sup>, 佐藤政行<sup>A)</sup>, 小野正明<sup>A)</sup>, 工藤喜久雄<sup>A)</sup>, 小田切淳一<sup>A)</sup>, 田中幹朗<sup>B)</sup>, 田中直樹<sup>B)</sup>, 吉井兼治<sup>B)</sup>,  
小川英一郎<sup>C)</sup>, 酒井香一<sup>D)</sup>

Toshihiro Mimashi<sup>#, A)</sup>, Masayuki Sato<sup>A)</sup>, Masaaki Ono<sup>A)</sup>, Kikuo Kudo<sup>A)</sup>, Jun-ichi Odagiri<sup>A)</sup>,  
Mikio Tanaka<sup>B)</sup>, Naoki Tanaka<sup>B)</sup>, Kenji Yoshii<sup>B)</sup>, Ei-ichiro Ogawa<sup>C)</sup>, Ko-ichi Sakai<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Research Organization, <sup>B)</sup>Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd.,

<sup>C)</sup>Cyber Techno Limited Company, <sup>D)</sup>Axio Co., Ltd.

## Abstract

The KEKB personal protection system (PPS) takes care of not only KEKB accelerator, but also PF-AR, Positron damping ring and their beam transport lines. The new beam transport line to the PF-AR was constructed, and it makes possible that the injector supplies the beam to the five storage rings (KEKB LER, HER, PF-AR, PF and Positron damping ring) simultaneously. The positron damping ring was also constructed at the middle of the injector. The injector is not only supply the beam to the damping ring, but also receive the beam from the damping ring. In this way, the accelerator operation scheme changed dramatically. The logic of the PPS has been changed to adapt the new accelerator operation scheme. The PPS is updated step by step. The Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) was introduced into the PPS. The many tools that are developed under EPICS environment, such as CSS (Control System Studio) BOY, CSS Archiver also have been adopted.

## 1. 概要

Figure 1 に示すように、入射器は、PF、PF-AR、KEKB HER(電子リング)、KEKB LER(陽電子リング)にビームを供給している。また、入射器の途中には、KEKB LER に入射するビームのエミッタンスを小さくするための陽電子ダンピングリング(PDR)が、建設されていて、入射器から PDR に入射された陽電子ビームは、再び入射器に戻され KEKB LER へと導かれる。SuperKEKB[1], PF-AR[2], 陽電子ダンピングリング (PDR) [3] 及び それらのビーム輸送路の Personal Protection System (PPS)は、一体となって取り扱われていて、入射器の安全システムと密に連携をとりながら、各リング及びビーム輸送路の安全を確保している。

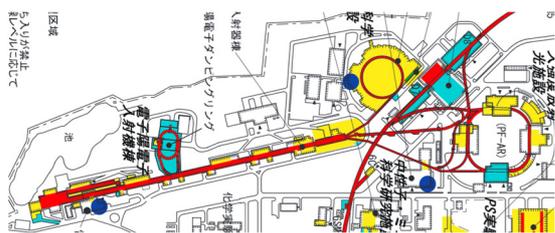


Figure 1: Accelerator complex taken care of this PPS.

## 2. 放射線管理

### 2.1 アクセスコントロール

トンネルへの入域制御は、以下の3段階のレベル

に基づいて行われている。

- 1 : Free
- 2 : Limit
- 3 : Keep out

Free は、長期停止期間等で、中央制御室に連絡することなくパーソナルキーをとって入域できる状態である。Limitは、主に加速器運転期間中、一時的にトンネルへの入域を許可する状態を示す。この場合、入域者は、紙面でシフトリーダーの許可を取り、入域は、監視カメラ、カードリーダー、パーソナルキー等によって、厳しく管理される。Keep out は、ビームが加速器内に入射されるレベルで、トンネル内に立ち入ることは出来ない。

### 2.2 安全の担保

トンネル入域中にビームが来ないことは、少なくとも2重のインターロックによって担保されている。

#### <KEKB 及び KEKB/BT>

KEKB 及び KEKB のビーム輸送路(KEKB/BT)に入域する場合は、KEKB/BT 上流の入射器トンネル内に設置されている安全確保のための偏向電磁石を OFF にすること、及び、ビームシャッターをビームラインに挿入することによって安全を担保している。KEKB/BTに入域する場合は、PF-AR リングへの入射ビームも KEKB/BT の一部を通過するため、PF-AR のための安全偏向電磁石2台も OFF、PF-AR のためのビームシャッター2台も閉状態であることが条件となる。(Figure 2 参照) KEKB のリングに入域する場合は、入射ビームが入射されないことに加えて、リングに蓄積ビームがないことを担保しなくてはならない。アボートキッカーでビームダンプに蹴り出した後に、2台のビームストッパーを挿入すること

<sup>#</sup>toshihiro.mimashi@kek.jp

によってこれを担保している。

<PF-AR 及び PF-AR/BT>

PF-AR も同様に、リングに蓄積ビームがないことを、2台のビームストッパーを挿入することによって担保し、入射ビームが PF-AR Ring 及び PF-AR/BT にこないことは、2台のビームシャッターと2台の安全偏向電磁石を OFF することによって担保している。(Figure 2A, 2B 参照)

### PF-AR直接入射路放射線管理

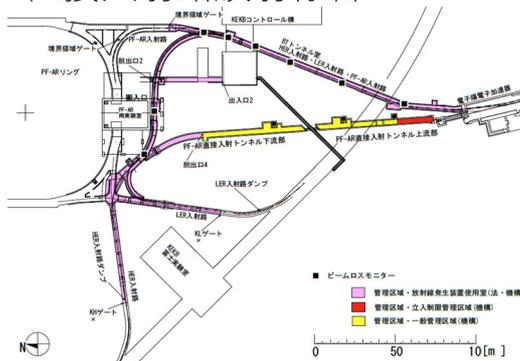


Figure 2A: PF-AR and KEKB beam transport line.

<PDR 及び入射器>

PDR では、ビームストッパーが1台しか設置されていないため、リングのビームが蓄積されていないことは、リングにストッパーが入っていることに加えて、PDR 入射ラインの安全電磁石が OFF かつ、ビームシャッターが閉の状態、PDR の RF を一度 OFF にすることで、担保している(Figure 3 参照)。また、入射器に入域するときには、PDR にビームが蓄積されていないことが要求されている。

### PF-AR安全ベンドとビームシャッター

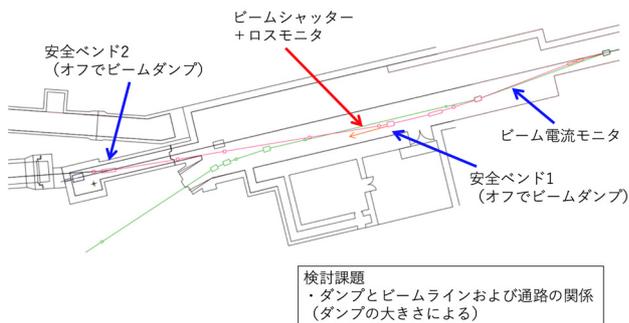


Figure 2B: PF-AR safety magnet and beam shutter.

各々の加速器の境界には、“境界領域”というものを出来るだけ設けて、一つの加速器が稼働中、それに隣接する加速器のトンネルに入域する時の放射線影響を少なくしている。各加速器の境界には、扉が設置され、扉のキーは、ゲートキーとして厳しく管理されている。ゲートキーは、通常は、中央制御室

のコンソールに刺さっていて、鍵が貸し出されている場合には、加速器の運転は、制限を受けるようになっていく。

PDR と PF-AR についての具体的な安全電磁石とビームシャッターの位置を Figure 2 と Figure 3 に示す。

### DR安全ベンドとビームシャッター

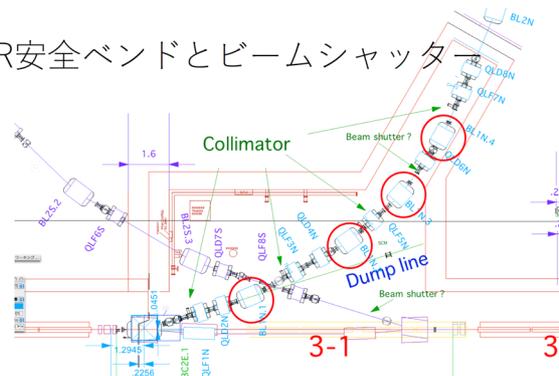


Figure 3: PDR safety bending magnet and beam shutter.

### 2.3 ビーム要求のロジック

入射器は、PF,PF-AR,KEKB HER,KEKB LER,PDR の5リングに同時にビームを供給出来る。PDR へは、ビームを供給するだけでなく、PDR から入射器にビームが戻ってくることになる。運転している加速器と運転休止中で人が入域している加速器が混在していることも多いため、入射ビームを要求するロジックは複雑になる。

PFを除く加速器は、同じ手順でビームを要求するようにロジックが組まれている。

トンネル内が Free の状態から、ビームが出るまでの手順は Table 1 に示す通りである。

Table 1: The Protocol of the Beam Request

手順	状態
Limit	
無人確認パトロール	
Keep Out	
Beam On	Ring Stopper 開許可
ビームを入りたい加速器の Mode を立てる	Linac からの返信を待つ
Mode 成立	安全電磁石通電許可 Beam Shutter 開許可
Beam Request	
Beam Gate Open	(制御システム)

PPS が取り扱うのは、Beam Request までで、Beam Gate を Open するのは、制御システムの方で行う。KEKB 加速器と入射器の制御システムの関係において、ビームを捨てる先が、確保されなければビームゲートを開くことができない。偏向電磁石の設定によって、ビームダンプにビームが捨てられる準備ができていない場合に限りビームゲートを開くことが可能になる。ビームダンプは、KEKB リング内に陽電

子ビーム用と電子ビーム用の二つ、KEKB/BT には、BT 終端に同様に2つ。入射器内には、第2スイッチヤードのダンピングリング上流に1台、第3スイッチヤードに2台用意されている。

### 3. 安全システム

#### 3.1 概要

安全システムに用いられるインターロックは、ハードワイヤーで構成し、ネットワークや汎用計算機は使用しないというポリシーのもとシステム構築されている。シーケンサシステムは、その機能が、単一プロセスに特化されているため、ハードワイヤーと同じレベルの信頼性があるとみなされていて、安全システムの重要な構成要素となっている。シーケンサは、それぞれのローカル制御室と中央制御棟に設置され、インターロックに使用される情報は、光ファイバーケーブルを通して、中央のシーケンサシステムに ON/OFF のロジック信号として集められている。

#### 3.2 シーケンサシステム

シーケンサは、故障率を低く抑えるため、約10年ごとに更新されていて、現在は、横河電機の FA-M3V Leading Edge Controller が使われている。シーケンサは、2つのネットワークに接続されている。Figure 4 にネットワーク概念図を示す。ネットワークの一つは、シーケンサCPU に接続され、プログラムのダウンロードはこのネットワークを通して行われる。このネットワークは、独立なネットワークで、他のネットワークとは、接続されていない。もう一つは、FL-Net という FA-M3V 専用のネットワークで、各々のシーケンサCPU の間に共通メモリを定義して、情報を共有している。FL-Net は、モニターシステムとしてのみ使用され、実際のインターロックには寄与しない。Table 2 で示すように、FL-net cluster は、3つのクラスターに分けられ、情報を共有している。

Table 2: The FL-Net Cluster

担当部署	台数	FL-net クラスター
KEKB Ring	18	KEKB Cluster
KEKB/BT	2	PF-AR Cluster
PDR	2	KEKB Cluster
Center	2	Central Cluster
PF-AR Ring	5	PF-AR Cluster
PF-AR/BT	1	PF-AR Cluster

#### 新システムネットワーク図

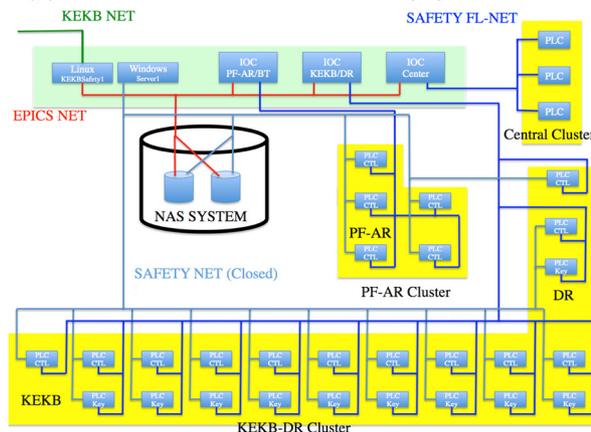


Figure 4: Network configuration of the safety system.

#### 3.3 EPICS の導入

KEKB の加速器制御で採用されている EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [4] を、安全システムの状態をモニターするシステムとして導入した。上記の FL-net を通して取得された情報は、Input Output Controller (IOC)で EPICS Record として定義されている。IOCとしては、Linuxが載った横河電機の Embedded Machine Controller (e-RT3)[5]が、用いられている。

IOC は、Table 2 に示す FL-Net クラスターごとに設けられ、KEKB 用、PF-AR 用、中央システム用がある。これらの IOC は、第3のネットワークを通して (Figure 4 参照) Linux サーバ計算機に接続されている。加速器制御に用いられる安全システムの情報は、Gateway 用の IOC を通じて、KEKB 制御ネットワークに受け渡され、加速器制御システムの中で運転に使用されている。

#### 3.4 ユーザーインターフェース

インターロックに直接影響を与える入力は、全て運転コンソール盤を通して行う。運転コンソールは、基本的には、ボタンとキーからなり、シーケンサの入出力モジュールに繋がれている。ネットワークには直接繋がれていないので、制御室の外からは、制御できないようになっている(Figure 5 参照)。

一方、扉の開閉状態や、パーソナルキーの返却状態、安全電磁石の通電状態、ビームシャッターの開閉状態などは、FL-NET 通して、IOC に集められ、EPICS の枠組みを通して、中央制御室に送られる。送られた情報は、CSS(Control System Studio) [6] の BOY を使用して表示されている。Figure 6 にその一例を示す。旧 KEBK の安全システムでは、販売されている製品を使用して、windows 上で Operator Interface を構築していたが、この場合、製品ライセンスで制限され、windows 上でのサポートがこの先何年続くかは、ソフトウェア製品を開発する会社に全面的に委ねられてしまうので、場合によっては、新しい計算機の上では、動作せず、古い OS、古い計算機の上でしか動作しないこともありえてしまう。そ

こで対応 OS が Linux, Windows, Macintosh と多くコミュニティでサポートしている CSS の BOY に移行することにした[7]。また、収集された情報は全て CSS(Control System Studio) アーカイバーで記録、保存されている。CSS Archiver は、EPICS と親和性が良く、値が変化した時のみ記録されるため、我々のようなアプリケーションでは、ポーリングによる記録に比べてロギングデータのサイズを大幅に節約できる。また、取得されたデータは、リレーショナルデータベースである PostgreSQL を使用して保存されるため、Web ブラウザーで簡単に表示できるようになっている



Figure 5: The safety system console.



Figure 6: Operational interface based on CSS BOY.

### 3.5 入退域管理システム

トンネルへのアクセスコントロールは、パーソナルキーを通して行っている。トンネル出入口には、パーソナルキー、赤外線センサー、監視カメラ、カードリーダーが設置されている。入域者が扉の前に来ると赤外線センサーが感知し、中央制御室のモニターに自動的に映し出される。



Figure 7: The access control system console.

入域者は、インターフォンを通して、入域の要求を中央制御室にする。中央制御室では、パーソナルキーを取る許可と、パーソナルキーを用いて扉を開ける2段階の許可を送ることによって、入域を許可することになる (Figure 7 参照)。

### 3.6 監視カメラ

トンネル全体は、監視カメラで常時にモニターされて、録画されている。監視カメラからの映像は、切り替えられながら中央制御室の4枚のモニターに映し出されている。モニターは、4分割して画像が映されている (Figure 8 参照)。監視カメラの制御は、EPICS の枠組みで、シーケンサーを通して制御されている。トンネル内の監視カメラは、まだアナログカメラを用いているが、トンネル出入口に設置されている入退域管理のカメラから徐々にデジタルカメラに置き換えられてきている。



Figure 8: Display for the monitoring camera.

## 4. システムの移行

本論文で述べている PPS は、PF-AR, KEKB, PDR、及びそれらのビーム輸送路を管理している。また、入射器と密接にかかわりあっていることから、入射器を含めた上記のどれかの加速器が運転されている期間は、システムの変更、更新はできない。つまり、システムの更新、試験できる期間は、加速器の運転によって大きな制約を受けるのである。さらに近年は、PF-AR の新しいビーム輸送路や PDR の建設、

KEKB 主リングの改造が重なったため、建設中に加速器トンネル内で作業する人の安全を担保しながら、稼働中の加速器運転を行わなくてはならなかった。建設が終了した加速器は、すぐに運転状態に移行するので、その都度それに対応した PPS に更新する必要があった。これらのことからわかるように、本システムのような複数の加速器を管理するような大規模な安全システムを限られた時間で、加速器の建設に合わせて改造することは、非常に困難が伴った。このような要求に対応する上で重要になるのは、システムのモジュール化である。

今回のシステム移行は、シーケンサーの交換から始まった。各制御室のシーケンサーシステムと中央のシーケンサーシステムは、光ファイバーケーブルを通して、ON/OFF 信号をやりとりしているだけなので、シーケンサーシステムは、複数のベンダーの機種が混在可能であり実際シーケンサーの交換は数年にわたって、そのような状態で行われた。つまり、ローカル制御室の安全システムは、モジュール化しているの、ローカルシステムごとに変更可能ということである。また、入退域管理システムも、安全システムとは独立に構成され、ON/OFF 信号によって、加速器安全システムと通信しているため、主要な安全システムとは別に更新することができた。中央制御室にあるシーケンサーシステム及び安全コンソールは、一度に改修しなくてはならなかったが、これも、新しいシステムをあらかじめ組んでおいて、そこに、既設のケーブルをつなぎこむことによって、ダウンタイムを最小限に抑えた。

もう一つの問題となってくることは、シーケンサープログラムの開発、及び、その試験についてである。

実際の加速器を使ってプログラムのデバッグを行うと、デバック中には、トンネルにアクセスできないなどの制限が出てくるため、加速器の建設、運転と両立しない。最終的には、実際の加速器を使った試験が必要なのであるが、それは非常に限られた時間に制限される。そのため、プログラムの作成段階では、シュミレーションシステムを用いて、十分な検証をしたのちに、実際の加速器にダウンロードして、試験を行った。

## 5. まとめ

KEKB 加速器の旧 PPS から SuperKEKB 加速器の新しい PPS に移行する過程で、PPS は、大幅に改修された。

新しく建設された PF-AR 直接入射路や PDR は、加速器運転形態を劇的に変化させた。それらの変更に伴い、安全確保のためのロジックも大幅に変更された。安全システムを司るハードウェア、ソフトウェアも新しいテクノロジーを取り入れた。ネットワークも整備され、シーケンサーも更新された。

Windows PC から、Linux ベースのワークステーションサーバーに移行し、監視カメラもアナログカメラからデジタルカメラに徐々に置き換えられてきている。特にソフトウェアは、サポートの切れた古い Windows PC の上でしか動作しなかったソフトウェア製品から、EPICS をベースにした CSS ソフトウェアに置き換えられ、現在は複数のプラットフォームで動作している。

## 謝辞

本システム改修にあたり、いろいろとアドバイスをいただいた放射線センターの佐波氏、大山氏、岩瀬氏、飯島氏、岸本氏、萩原氏には、大変お世話になりました。また、安全システムを共に構築した入射器安全グループの峠氏、白川氏、佐竹氏の協力なしには、スケジュール通りに問題なく安全システムを作り上げることは不可能だったと思います。皆様に心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Y. Funakoshi *et al.*, "Beam Commissioning of SuperKEKB", IPAC 2016, Busan, Korea, May 2016, TUOBA01, pp.1019.
- [2] N. Higashi *et al.*, "Construction and Commissioning of Direct Beam Transport Line for PF-AR", IPAC 2017, Copenhagen, Denmark, May 2017, WEPAB044, pp.2678.
- [3] M. Kikuchi *et al.*, "Design of Positron Damping Ring for Super-KEKB", IPAC10, Kyoto Japan, May 2010, TUPEB054, pp. 1641.
- [4] <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [5] J. Odagiri *et al.*, "第9回日本加速器学会年会", Aug. 8-11, 2012, pp. 206.
- [6] <http://www.aps.anl.gov/epics/eclipse/>
- [7] K. Yoshii *et al.*, "第10回日本加速器学会年会", Aug. 3-5, 2013.