

KEK Proceedings 2014-4

June 2014

A/H/M/R/D

技術交流会報告集

Proceedings of the Meeting on the Technical Study at KEK

KEK, Tsukuba, Japan

December 5, 2013

編集

藤森 寛、小山 篤、小菅 隆、佐藤 節夫

Edited by

H. Fujimori, A. Koyama, T. Kosuge, S. Satoh



High Energy Accelerator Research Organization

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 2014

KEK Reports are available from :

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi,
Ibaraki-ken, 305-0801
JAPAN

Phone: +81-29-864-5137
Fax: +81-29-864-4604
E-mail: irdpub@mail.kek.jp
Internet: <http://www.kek.jp>

はじめに

技術部門連絡会議

技術調整役 山野井 豊

平成 25 年度の技術交流会のテーマは、5 月 23 日の J-PARC での放射性物質の漏洩事故の反省と安全への再確認を踏まえて「KEK を支える安全技術」としました。機構においても二度とあのような事故を起こすことがないよう、様々な安全に関する取り組みを行っています。この技術交流会も他の部署のトラブルや失敗を見聞きすることで、職場全体の安全への関心を高め、また事故を予防する上でも多少なりともお役に立てれば幸いです。

今回の交流会は二本立てです。就職して 2 年目の若手技術職員の発表 5 件とベテラン職員の発表 4 件の構成です。法人化後、スタッフ制に移行してから 10 年で、研究所、研究施設、各グループ内の技術職員数はその組織の一つひとつが少数となり、隣のグループの仕事がさらに見えなくなっています。また、技術職員が全員集まる機会も減ってしまいました。この交流会を機会にどのような後輩が入ってきたのか、「何々の技術なら誰々さんに相談するのが良い」と言った情報を得ることに役立てて頂ければと思います。

第 1 回の技術交流会は馬場技術部長の時代、昭和 60 年 5 月 15 日のことでした。交流会の開催にあたって、その目的は、「研究所内における技術者の横のつながりをもつこと、技術者の得た知識、技術の交換及び問題解決の場としたい。貴重な知識、技術、データ等を文書にし、蓄積し、今後の技術活動に役立てる。」と伺っております。

あれから 29 年が経ちましたが、基本的にこの技術交流会を開催する目的は変わりません。新規プロジェクトの求める多様な技術要求に対して、更に安全対策が重なり、随所で人手不足の感が年々増大しています。時代を経て加速器技術に関する専門性は増々細分化され、それ故に少し技術分野が異なっただけで機構内でも職員同士話が伝わり難しくなっています。

29 年前の当時は技術、技術知識の交換と言っても「安全」については空気のようなもので、その技術を話すことなどほとんどなく、ほとんどが純粋に実験技術の話でした。実験がより複雑化し、ビーム強度を増強させている加速器では、この「安全に実験が遂行できること」がその実験を成功させる重要な柱となっています。今後の技術交流会でも、この安全に関する講演が増え、技術職員の安全意識がより高まっていくことを願っています。

末筆となりましたが、交流会の企画を実行して頂いた物構研の技術職員、協力頂いた他の研究所、研究施設の技術職員、またご来聴頂いた方々に感謝致します。

2013年度

技術交流会報告集

2013年度 技術交流会報告集

December 5, 2013

平成 25 年度 技術交流会

技術交流会テーマ 「KEK を支える安全技術」

日時：平成 25 年 12 月 5 日（木） 13：30～17：00

場所：つくばキャンパス 4 号館 1 階 セミナーホール

東海キャンパス 1 号館 324 室（TV 会議）

参加者 66 名（うち東海キャンパス会場 3 名）

（素核研 13、物構研 10、加速器 22、共通基盤 20、その他 1）

プログラム：

13:30～13:35	開会の挨拶	野村 理事
13:35～13:40	平成 25 年度新人紹介	寺島 技術調整役

<平成 24 年度新人業務紹介>

13:40～13:55	読み出しエレクトロニクスの開発	庄子 正綱（素核研）
13:55～14:10	一般公開用の展示物制作	竹谷 薫（物構研）
14:10～14:25	自己紹介と業務内容	金枝 史織（加速器）
14:25～14:40	IPv6 対応 DMZ の試験導入	石沢 裕（共通）
14:40～14:55	J-PARC での業務報告	北川 潤一（共通）

14:55～15:00 休憩

15:05～15:25	放射光源加速器の安全システム	長橋 進也（加速器）
15:25～15:45	KEK の高圧ガス（一般）の安全に対する対応	小島 裕二（加速器）
15:45～16:05	J-PARC MLF の PPS インタロック機器	小林 庸男（物構研）
16:05～16:25	KEK における放射線管理	穂積 憲一（共通）

16:25～16:30 講評 山野井 技術調整役

16:30～ 懇談会（全員）

目 次

(1) 読み出しエレクトロニクスの開発.....	1
庄子 正剛（素核研）	
(2) 一般公開用の展示物作成.....	6
竹谷 薫（物構研）	
(3) 自己紹介と業務内容.....	9
金枝 史織（加速器）	
(4) IPv6 対応 DMZ の試験導入	13
石沢 裕（共通）	
(5) J-PARC での業務報告.....	17
北川 潤一（共通）	
(6) 放射光源加速器の安全システム.....	21
長橋 進也（加速器）	
(7) KEK 高圧ガス施設の安全に対する対応.....	28
小島 裕二（加速器）	
(8) J-PARC MLF の PPS インタロック機器.....	33
小林 庸男（物構研）	
(9) KEK における放射線測定と管理.....	40
穂積 憲一（共通）	

読み出しエレクトロニクスの開発

庄子 正剛

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

Abstract

私はエレクトロニクスシステムグループに所属し、4つの重要なエレクトロニクスの開発を行ってきた。1) 時間分解能 100ps、誤差 ± 0.1 ($\times 100$ ps) 未満の Time to Digital Converter (TDC) モジュール、2) 最小時間間隔 10ps の TDC テスターモジュール、3) Belle II 実験 Aerogel-RICH 検出器の 420 台の検出器から信号を読み出すデータ集約モジュール、4) 時間分解能 1ns の TDC を FPGA に実装した TDC モジュールの設計である。

また、私が参加している Open-It 若手の会は若手研究者が集まり、若手同士で技術の共有と発展を目的に活動している。若手の会では Printed Circuit Board (PCB)、Field Programmable Gate Array (FPGA)、Application Specific Integrated Circuit (ASIC) や DATA Acquisition system (DAQ) 等の技術の発展に努め、各技術の理解を深めるだけでなく、測定システム技術を包括的に理解し、測定システムの構築を行える研究者・技術者を目指すため研究会などを行っている。

1. はじめに

私は素粒子原子核研究所エレクトロニクスシステムグループに所属し、読み出しエレクトロニクスの設計・開発を行ってきた。これまでに以下の4つのモジュールを設計・開発している。1) Belle II 実験において、ルミノシティ測定を目的として、Zero Degree Luminosity Monitor (ZDLM) に使用する TDC モジュール、2) TDC の性能評価を行うための TDC tester、3) Belle II 検出器の Endcap 部に設置する、 K/π 識別を行う粒子識別検出器の Aerogel-RICH 検出器の読み出しエレクトロニクス、4) SuperKEKB に使用する TDC モジュールである。各モジュールの開発目的、期待される性能・機能、性能評価の結果について報告する。また、エレクトロニクスシステムグループにおけるエレクトロニクス開発環境について紹介と今後の抱負について述べる。

2. Zero Degree Luminosity Monitor (ZDLM) 用 TDC モジュールの開発

2.1 ZDLM 用 TDC モジュールの開発 [2] [3]

Zero Degree Luminosity Monitor (ZDLM) は Belle II 実験に置いて、Belle II 検出器の近傍のビームライン上に設置し、電子-陽電子の衝突によって発生するガンマ線、散乱電子、散乱陽電子を計測することによってビームのルミノシティをオンライン測定する。既存の TDC では時間分解能が 700ps であり、

新しい TDC には時間分解能が 500ps 以下の精度が要求されている。この時間分解能は加速器のビームバンチ全てに粒子が存在しているとき、各バンチを 4σ で計測するために選択されている。この要求を満たすモジュールとして VME6U の TDC モジュールの開発を行った。TDC モジュール (図 1) の機能と特徴を示す。

特徴

- KEK VME と VME クレーンに接続
- TDC Input 32ch
- Multi Hit TDC
- 分解能 25ps、100ps、200ps、800ps に設定可能
- ダイナミックレンジ : 0.1ms
- TDC の制御は Slow control を用いる
- CP/IP で PC にデータ転送
- FPGA Artix7 XC7A100T
- 8 層基板

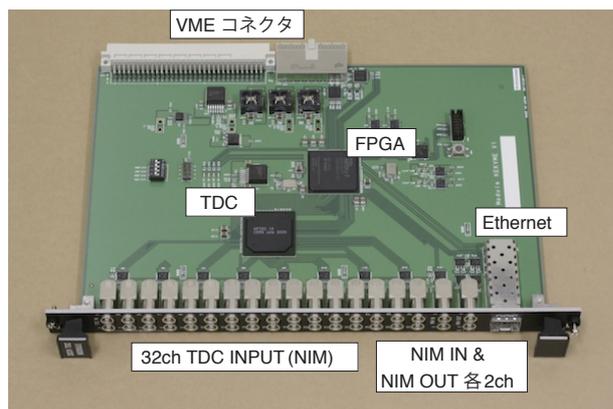


図 1 : TDC モジュール

* mshoji@post.kek.jp

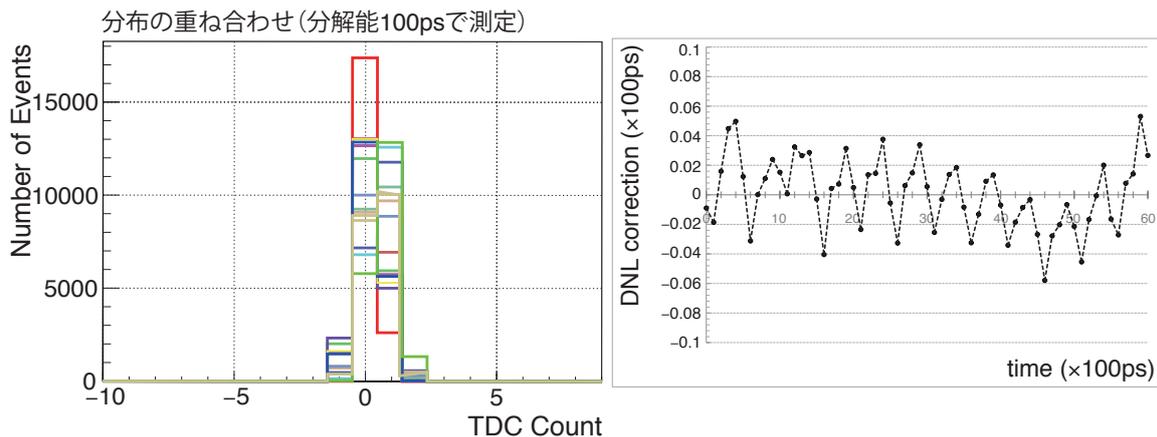


図2：TDC モジュールの性能評価

機能

- TDC 入力 : NIM (LEMO コネクタ : 32ch)
- 汎用入力 : NIM (LEMO コネクタ : 2ch)
- 汎用出力 : NIM (LEMO コネクタ : 2ch)
- 6UVME クレート接続コネクタ : J0,J1

この TDC モジュールに搭載した TDC チップは時間分解能を 25ps, 100ps, 200ps, 780ps のいずれかに設定が可能である。ZDLM では時間分解能を 100ps に設定して使用する。性能評価を行った結果を図 2 に示す。

左図は TDC モジュールの二つの入力に信号を与え、その時間差を横軸に、イベント数を縦軸に示している。右図は時間差を横軸に、理想的な直線から分散の式を用いて標準偏差を求めた

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (x_i - m)^2$$

のずれを縦軸に示している。

分散を用いて評価した結果 $\sigma \approx 43.5ps$ だった。また、理想的な直線からのずれは以下の式を用いて

$$\text{理想直線からのズレ} = (a_{n+1} - a_n) - \text{理想直線の傾き}$$

a : 測定値

算出している。

直線からのずれは ± 0.1 (x100ps) 未満であることが分かった。以上の結果よりこの TDC モジュールは ZDLM で使用するのに十分な性能を持っていることが確認できた。

2.2 TDC テスター

TDC テスター (図 3) はコンパクトで、既存の IC チップを用いて安価に開発し、分解能 (スタートストップ間隔) 10ps を目指して開発した。既存の TDC テスターや、ディレイジェネレータといったモジュールは NIM、VME モジュールなどであり、

手軽に使用することが難しい。しかし、この開発した TDC テスターは +3.3V の単電源で動作するため、ソースメータがあればどこでも使用可能である。

Logic (カウンター部とトリガー部) には ECL (Emitter-coupled logic) を使用しているため電流消費は大きくなるが、Hi レベルと Low レベルの遷移が高速に行えるため、高速の信号を扱える。

TDC テスターのブロック図を示す (図 4)。

TDC テスターの重要な点は、基板上的回路構成がアナログ回路の技術を用いて作成されていることである。FPGA の出力周波数は 300MHz 程度が限界であり、ジッターなどの信号品質の点で TDC テスターを駆動させる CLOCK として使用できない。

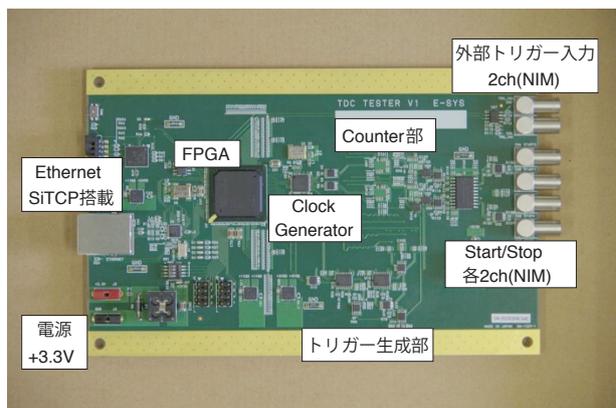


図3：TDC テスター

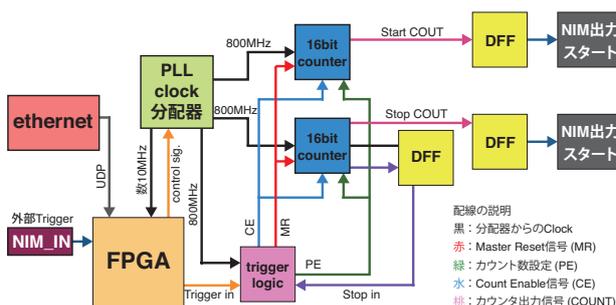


図4：TDC テスターブロック図

そこで我々はCLOCK GENERATOR(C.G.)を使用した。
このC.G. は内部に PLL を搭載し、LVDS の CLOCK 信号を 800MHz まで出力することができる。

スタートとストップの間隔は 16bit のカウンターを使用する。カウンターは FPGA で値を設定する。このカウンターは CLOCK に C.G. の出力を使用する。

この TDC のスタートストップ間隔は以下のように決まる。

$$\text{スタートストップ間隔} = f_{c.g.} * C_{stop} - f_{c.g.} * C_{start}$$

$f_{c.g.}$: C.G. の出力周波数

C_{start} : スタート信号側のカウンター値

C_{stop} : ストップ信号側のカウンター値

性能評価は同グループの濱田氏が行っている。

3. Aerogel-Ring Imaging Cherenkov (ARICH) 検出器 [4] 用読み出しモジュールの開発

3.1 ARICH readout module の開発 [5]

ARICH 検出器の readout module の開発を行っている。ARICH 検出器は Belle II 検出器の Endcap 部に設置される、 k/π 粒子識別器である。ARICH 検出器は Hybrid Avalanche Photo-Detector (HAPD) からの信号を front-end electronic module (FEE) で読み出している。FEE は HAPD とカロリメータの間に設置される。FEE は 420 台使用しているため、そのまま計算機にケーブルを接続すると 420 本の光ファイバーや電源ケーブルが必要になる。HAPD とカロリメータ間は幅 5cm しか無いが、420 本の光ファイバーや冷却管、電源ケーブルを配置しなければならない。この限られた空間を有効活用するために我々は計算機と FEE の間に設置する新しいモジュールを開発した。

我々はこのモジュールをその機能から merger board と読んでいます。

図 5 に ARICH の読み出しシステムを示す。

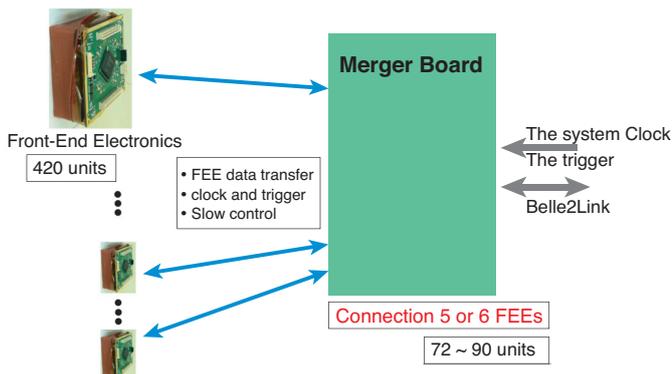


図 5 : ARICH readout system

Merger board の重要な機能は、

- 5~6 台の FEE を merger board に接続
- 計算機と FEE との通信に使用するケーブルの本数を減らす。(Merger board は 72~90 台、FEE は 420 台使用する)
- FEE に搭載している FPGA にファームウェアを書き込む
- Slow control を用いた FEE の FPGA との通信
- 接続された 5~6 台の FEE から送られてくるデータを統合
- ヒットデータがないチャンネルを削減 (Zero suppression 機能)
- 接続された FEE に system clock と Trigger を分配
- 計算機との通信に Belle2Link を使用 [6]

3.2 Merger board の試作機

図 6 は開発した Merger board である。

- サイズ : 150mm × 100mm
- 電源 : 3.8V, 1.5V
- FPGA : Vertex5 (XC5VLX50T)
- FEE I/F コネクタ / ケーブル : 40 極、同軸ケーブル
- 光コネクタ / RJ-45 コネクタ : Belle2Link 用
- 基板 : 12 層

図 7 に FPGA 回路を示す。

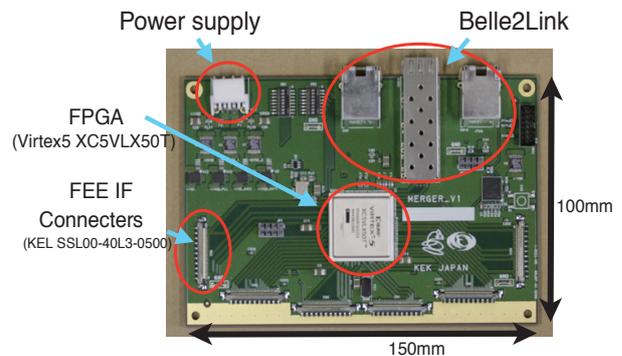


図 6 : Merger board 試作機

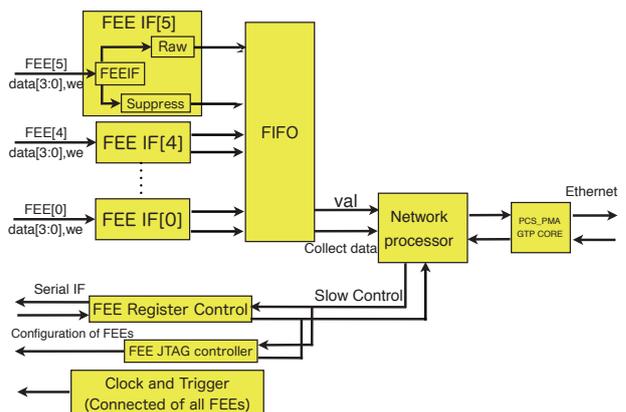


図 7 : FPGA ロジック

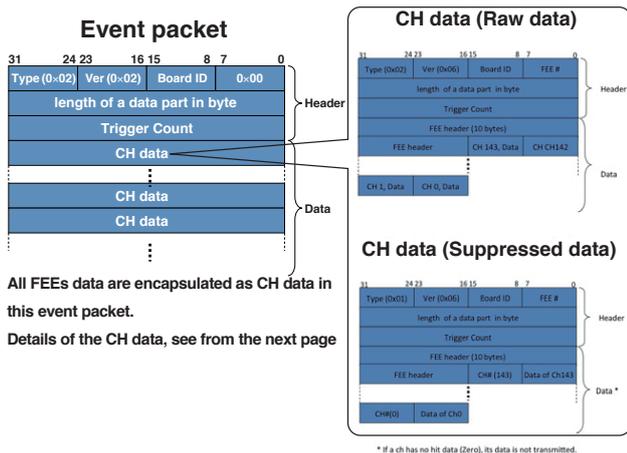


図 8 : Event packet format

Merger board は Hit データが無かった（値がゼロ）の場合に、そのデータは PC に送らない Zero Suppression 機能がある。Zero Suppression 機能を用いることで、不要なデータを削除し、ヒットデータのみを得ることができる。

Merger board から計算機に送られるデータは図 8 に示すパケットフォーマットで送られる。

パケットフォーマットは以下の内容が含まれる。

- Data Type
- FPGA Version
- Board ID (Merger board ID)
- Data length
- Trigger count
- Ch data

この Ch データには RAW モードか Suppressed モードであることを示すヘッダーと FEE から受信した Hit データ（サプレスモードであれば hit ch とデータのみ）が含まれる。

3.3 Merger board 機能試験

以下の機能テストを行った。

- FEE の FPGA にファームウェアを書き込む
- Slow control を用いた FEE との通信
- テストデータ取得と複数の FEE からのデータの集約

FEE の FPGA へのファームウェアの書き込みは、FPGA へのファームウェアの書き込みが正常に終了すると出力する DONE 信号を Merger board で受信することを確認する。また、Slow control を用いて Merger board に接続された FEE のレジスタを読み書きできるか確認した。書き込んだ値は FEE にテス

トデータを出力させるように設定するものであり、FEE にテストトリガー信号を送り、テストデータが FEE から出力されることを確認して、レジスタの書き込みと読み込み、Merger board を介して FEE からのデータを収集できることを確認した。

この Slow control とデータ収集テストは FEE 上の FPGA が正常に動作していなければテスト自体が不可能であり、これらのテストが出来たことで FPGA へのファームウェアの書き込みが正しく行われたことが証明された。

ここまでの動作確認で我々の開発した Merger board は基本的な実験要件を満たすことを確認した。今後、レートテストと Belle2Link の動作試験を行う。

4. SuperKEKB ビームモニター用 TDC

4.1 SuperKEKB 用 TDC モジュール

SuperKEKB ビームモニター用の TDC モジュールの基板設計を行った。TDC モジュールの規格は VME6U である。

- 時間分解能 1ns
- VME 6U
- 信号入力 16ch
- 汎用入出力 各 2ch

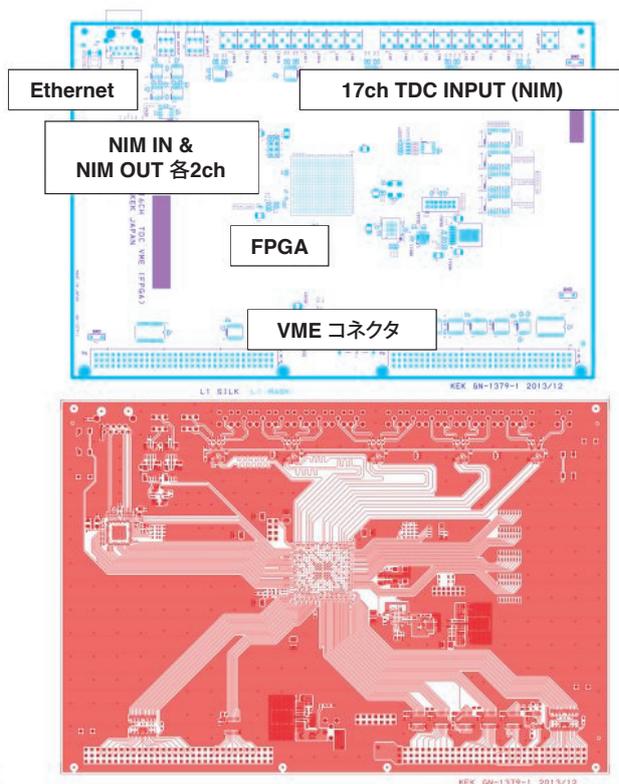


図 9 : SuperKEKB 用 TDC モジュール

- Ethernet
- 6層基板

このTDCモジュールの特徴は、TDCをFPGA内に実装することである。そのため基板設計では以下の事に注意した。

- 基板上の配線を走る信号は6ns/mで遅延する。この遅延を全ての入力チャンネルで一定にするため、TDC INPUTのコネクタからFPGAまでの配線長を一定にしている。
- FPGAの内部構造がTDCの性能に影響するため、設計では特殊なIOピンを使わずに通常のIOピンを選択している。

FPGAロジックはKEK発ベンチャーであるBee Beans Technologies (BBT) [7]が開発を行っている。

5. まとめ

5.1 これまで4つの読み出しエレクトロニクスを開発した。

- Belle II 実験 ZDLM TDC モジュール (2012年～2013年)
- TDC テスター (2012年)
- Belle II 実験 ARICH Merger board (2012年～)
- SuperKEKB TDC モジュール (2013年)

5.2 読み出しエレクトロニクス開発環境

エレクトロニクスシステムグループにはOpen-Itという技術の共有、先端技術の発展を目指した団体がある。そのなかでプリント回路基板(PCB)とFPGA技術について述べれば、熟練の技術者が担っていた高度な基板製作技術の共有を進めている。その活動の一つにOpen-It若手の会[8]がある。若手の会はFPCB, FPGA, ASIC, DAQの開発をしている大学院生や研究機関の若手スタッフや技術職員が参加している。若手の会の参加者は自分たちの研究開発の経験を研究会で発表し、参加者同士で共有している。このように研究を担う若手同士で技術の共有と発展を進めている。

5.3 最後に

回路基板設計をほとんどやったことのない私がこれまで基板を作れたのは、先輩職員の方々から助言や教えを受けたおかげであり、まだ至らないことが多いが、プリント回路基板(PCB)やFPGA技術の習得と発展に努めている。また、PCBやFPGA技

術の理解を深めるだけでなく、ASICやDAQなど測定システム技術を包括的に理解し、測定システムの構築を行える技術者を目指して励んでいきたい。

参考文献

- [1] Belle II Experiment “Belle II Technical Design Report” KEK Report 2010.
- [2] T. Hirai *et al.*, / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **458** (2001) 670-676.
- [3] Belle II 実験 ZDLM 用 TDC ボード 2012 年度 物理学会年次大会 発表 (26pRG-2).
- [4] S. Nishida *et al.*, / Physics Procedia **37** (2012) 1730-1735.
- [5] Dehui Sun *et al.*, / Physics Procedia **37** (2012) 1933-1939.
- [6] Belle II 実験 A-RICH 検出器 merger ボード 2013 年度 物理学会秋季大会 発表 (22aSM-7).
- [7] Bee Beans Technologies (<http://www.bbtech.co.jp/>)
- [8] Open-It 若手の会 (<http://openit.kek.jp/workshop/wakate>)

一般公開用の展示物作成

竹谷 薫

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

Abstract

一般公開で光の回折を説明するために展示物を作りました。その展示物はマイクロミラーアレイを利用することで、来場者が回折パターンを操作できるようにしたものです。

1. 事の起こり

機構の活動に関して一般の方に知っていただくという趣旨で行われている一般公開用に、私は「原子の並び方を測定できる装置が機構にある事」を覚えて帰ってもらえるとよいと考えたので、原子の並び方を測定する方法の一つである光の回折現象を説明するための展示物を作ることになりました。

機構の一般公開で展示する物なので、特に原子の配置を測定するためには加速器を利用して得られる波長の短い光が利用されている事を覚えて帰ってもらいたいと考えました。そこで、光の回折角が「光照射物体の繰り返し構造の周期」と「利用している光の色」によって変化する様子を展示することを考えました。しかし、二つを同時に準備するとどちらも完成しないかもしれないと思い、まずは「光照射物体の繰り返し構造の周期」を変化できるものを作ることになりました。

異なる周期の回折格子を準備しても良かったのですが、繰り返し構造の周期を来場者に操作して頂き、それによって回折角が連続的に変化する様子をご覧頂く方が記憶に残るのではないかと思います。そして、マイクロミラーアレイを利用すれば欲しい物が作れると気づき、マイクロミラーアレイを利用して光の回折を説明する展示物を作成しました。

2. マイクロミラーアレイ

マイクロミラーアレイとはその名の通り小さなミラーを敷き詰めた素子です。ある製品の場合、小さなミラーは一辺が7マイクロメートルの正方形で図1の左側の図のように、一つの軸を中心にプラスマイナス12度回転出来ます。この小さなミラーが

図1の右側の図のように縦3.4ミリメートル横6.0ミリメートルにわたって敷き詰められています。

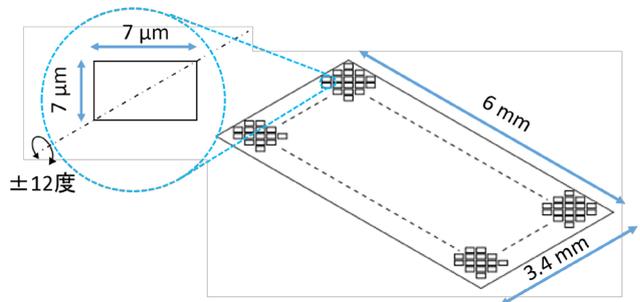


図1: あるマイクロミラーアレイの一つの軸を中心に回転できる小さなミラー（左）とそれを敷き詰めた様子（右）。

これらの小さなミラーは独立に回転角を設定できます。そのため、図2の左側の図のような回転角の場合に光の反射される位置にスクリーンを置くと図2の右側の図のようなミラーの回転角の場合ではスクリーンに光が届きません。つまり、一つのミラーの回転角を調整することで、入射光が届いたり届かなかったりを調整することができます。

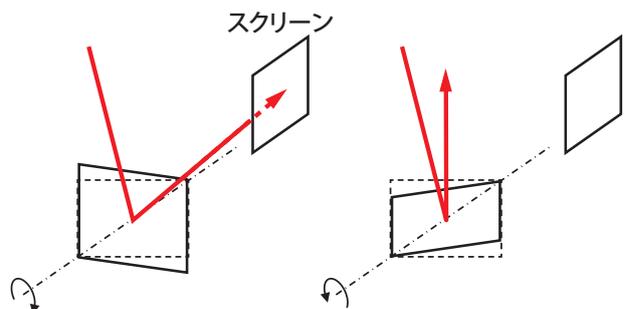


図2: 同じ入射角の光が小さいミラーの回転角によって反射光の向きが変化の様子。

* kaoru.taketani@kek.jp

この原理を利用して、あるスクリーンに光が届く向きに回転角を設定したマイクロミラーと、光が届かないように回転角を設定したマイクロミラーが図3のように一次元の繰り返し構造になるように配置すると、スクリーンに届く光は回折格子を通過した光と同じく回折します。これらのミラーの回転角は計算機から制御できますので、並び方の周期を変化させれば回折角も変化します。従って、計算機を使って繰り返し構造の周期を操作すれば、それに応じて回折角が連続的に変化する様子が観測できます。

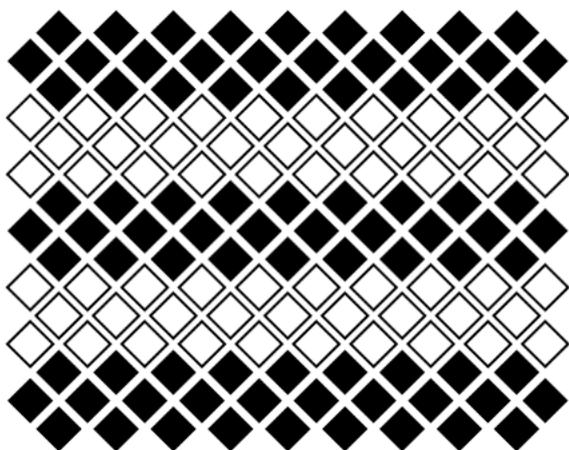


図3：あるスクリーンに光が届くような回転角に設定したマイクロミラー（白塗り）と届かないよう設定したマイクロミラー（黒塗り）を一次元の繰り返し構造を持つように配置した様子。

このマイクロミラーアレイが利用されている身近な製品のひとつはプロジェクターです。プロジェクターに使う場合は三色の発光ダイオードからの光をマイクロミラーアレイに照射し、二方向に光を反射させます。片方の光はビームストッパーで止めてしましますが、もう一方の光は拡大レンズを通して外部へと出てゆくようにします。一つのマイクロミラーが一つのピクセルに対応し、すべてのミラーの回転角と色違いの光の照射タイミングをうまく調整することでプロジェクターとして利用されます。

3. 制作した展示物

実際にマイクロミラーアレイを利用するためにパナソニック製の小型ビューアー（PJ-SJ25U）というプロジェクターを分解してマイクロミラーアレイへレーザーポインタを照射できるようにしました。

これを利用した展示物の全体図が図4になりま

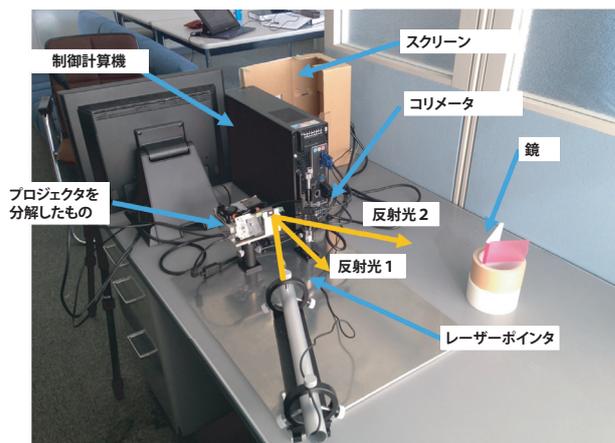


図4：展示物の全体図。

す。レーザーポインタからの光がマイクロミラーアレイに照射され、設定したミラーの向きに応じて二つの方向に光が反射されます。そのうちの片方の光がマイクロミラーアレイを制御する計算機のそばで見るように大きな鏡で反射して紙で作ったスクリーンにあたるようにしました。

マイクロミラーアレイはプロジェクターとして利用されているものを利用しましたので、計算機の画面上に白黒の表示ができればそれに応じてスクリーン上に届くように反射するか、スクリーンに届かないように反射するかを変化させることができます。というわけで、図5のような外見の「図形を表示するプログラム」と「図形を操作するプログラム」を準備しました。「図形を表示するプログラム」は「図形を操作するプログラム」からの通信を受けて「図形を操作するプログラム」に表示されているのと同じ図形を表示します。一方、「図形を操作するプログラム」は表示されている一次元の繰り返し構造を拡大縮小・平行移動・回転がタッチ操作で出来るようにしました。



図5：作成した「図形を表示するプログラム」と「図形を操作するプログラム」。

「図形を表示するプログラム」を分解前ならばプロジェクターで表示される場所へ移動させた後、レーザーポインタからの電源を入れると図6のようにスクリーン上に回折した光が見えます。さらに、図6の右側にある「図形を操作するプログラム」で繰り返し周期を狭めてゆくと回折角が大きくなることが確認できます。

5. まとめ

一般公開で光の回折を説明するために展示物を作りました。この展示物は、マイクロミラーアレイを利用することで、来場者が回折パターンを操作できるようにしたものです。

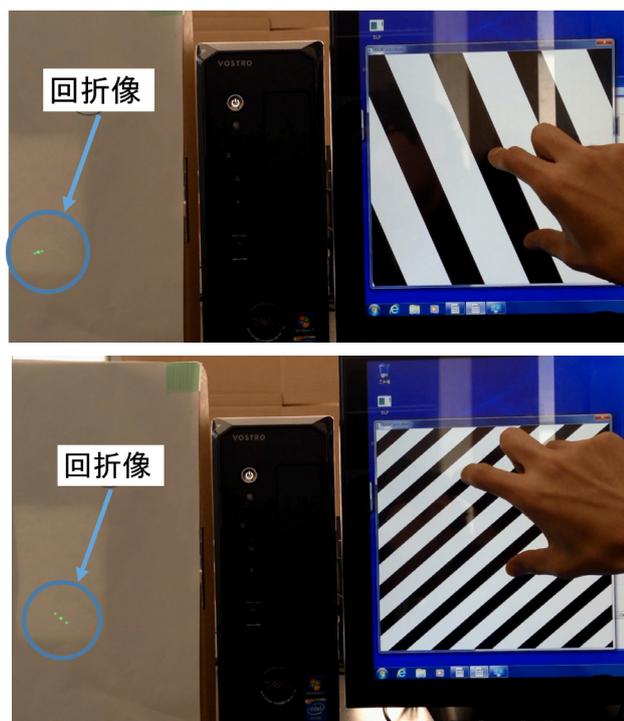


図6：操作画面とスクリーン上の回折光。繰り返し周期が長くて回折角が小さい状況（上）と繰り返し周期が短くて回折角が大きい状況（下）。

4. 一般公開当日

一般公開当日はPF実験ホール内にこの展示物を置くことになりました。来場者に繰り返し構造の周期を操作して頂き、それによって回折角が連続的に変化してゆく様子をご覧頂く事が出来ました。確認するすべはありませんがポスターのみで説明するより記憶に残ったのではないかと思います。これに合わせて「原子の並び方を測定できる装置が機構にある事」を説明することで機構の活動の一端を覚えて帰ってもらうことに貢献できたのではないかと思います。

自己紹介と業務内容

金枝 史織

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

現在 SuperKEKB では 2015 年の運転開始に向け、KEKB 加速器のアップグレードを行っている。SuperKEKB では約 900 台の Beam Position Monitor (BPM) が使用される予定だが、その中でも中帯域検波器とビーム位置インターロックモニターが特殊用途のモニターとして使用予定である。これら特殊モニターは SuperKEKB から新たに導入されるモニターシステムであり、Instrumentation Technologies 社の Libera Brilliance+ が両検波器の候補にあがったため、評価試験を行った。その結果、位置分解能 (RMS) は取得周波数が 100 kHz とし、 $x=0.94\mu\text{m}$ 、 $y=0.74\mu\text{m}$ 、10 kHz のとき、 $x=0.29\mu\text{m}$ 、 $y=0.22\mu\text{m}$ 、インターロック遅延時間は 400 μs となり、中帯域モニターとして Libera Brilliance+ を導入し、ビーム位置インターロックモニターにおいては、Libera Brilliance+ に改造を加え、導入することが決まった。

1. はじめに

私は 2012 年 4 月に KEK に入所し、加速器研究施設、SuperKEKB のモニターグループに配属された。

SuperKEKB は 2010 年に運転を終了した KEKB の後継プロジェクトであり、2015 年の運転開始に向けて建設が進められている。図 1 はつくばキャンパスを上空から見た写真である。1 周 3 km のメインリング (電子リング (HER) と陽電子リング (LER)) を持ち、線形加速器 (LINAC) から電子と陽電子を入射し、メインリングで加速した後に筑波実験棟で衝突させ、B 中間子と反 B 中間子を生成する。そのビームエネルギーは電子 7 GeV、陽電子 4 GeV、衝突エネルギーは KEKB と同じく 10.58 GeV である。KEKB から SuperKEKB へアップグレードにあたり、デザイン・ルミノシティは KEKB 到達値に対し 40 倍の $8\times 10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に設定され、陽電子のエミッタンスを下げるためにダンピングリングが新設された。SuperKEKB には、表 1 に示すように 13 種類のモニターがあり、私の担当はビーム位置モニター (Beam Position Monitor: BPM) と Phase monitor である。本稿はその中の BPM システムについて紹介する。



図 1：つくばキャンパス上空からの写真

表 1：SuperKEKB でのビームモニターシステム

種類	channel 数		
	HER	LER	DR
可視光モニター (SRM)	1	1	1
X 線モニター (XRM)	1	1	
Large Angle Beamstrahlung Monitor (LABM)	1	1	
ビーム位置モニター (BPM)	466	445	84
変位計	100	100	
横方向バンチフィードバック	1	1	1
縦方向バンチフィードバック		1	
Gated measurement	1	1	
Phase monitor	1	1	
Tune monitor	1	1	1
ロスモニター	200		34
電流モニター (DCCT)	1	1	1
バンチ電流モニター	1	1	1

2. ビーム位置モニター (BPM)

表 2 は SuperKEKB 運転開始時に設置予定の BPM である [1]。その中でも、中帯域検波器とビーム位置インターロックモニターは SuperKEKB から新たに導入するモニターであり、本章では、BPM システムの概要とこれら 2 つのモニターについて説明する。

表 2：SuperKEKB 運転開始時に設置予定の BPM

ビーム位置モニター	分解能	繰り返し	台数
狭帯域検波器	3 μm	0.25 kHz	242
中帯域検波器	2-3 μm	10 kHz	4
Turn by Turn	50-100 μm	100 kHz	70
ビーム位置 インターロックモニター	100 μm	100 kHz	4

* shiori.kanaeda@kek.jp

2.1 BPMの概要と原理

図3はBPMブロックを正面から見た写真であり、図4はチェンバーに据え付けられたBPMブロックを横から見た写真である。図4の右方は四極電磁石である。BPMは各四極電磁石に対して1台ずつ据え付けられており、SuperKEKB全周で約900台設置される。図2は、図3のような断面が円形のビームパイプのBPMブロックを模式化した図である。図2のA、B、C、Dに示すようにBPMにはビームパイプ内面に4つのピックアップ電極が配置されており、ビームがチェンバー内を通るとその逆の電荷が電極に誘起され、ケーブルを介し地上へと電気信号が送られる。その後地上の検波器で電圧を読み取り、ビームの横方向の位置を演算する。ビームの変位 x および y がチェンバー半径 r より十分小さいとき、 x と y は(1)式で書ける。ここで V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D は各電極の出力電圧、 K_x 、 K_y はBPMチェンバーの半径、電極の幅、電極の配置で決まる定数であり、(2)式で表される。電極が図2の配置の時は $K_x = K_y \approx r\sqrt{2}$ で近似でき、SuperKEKBでは $K_x = K_y \approx 30\text{mm}$ である。また、 X および Y は x 、 y について非線形であり、ビームが電極に近いときは x/r および y/r の高次項が効いてくる為(1)式では不十分であり、二次、三次程度までの非線形項を考慮する必要がある[2]。今回はビームが中心付近を通るとし、詳しい説明は割愛する。

$$\begin{cases} x = K_x X \\ y = K_y Y \\ X = \frac{(V_A + V_D) - (V_B + V_C)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \\ Y = \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \end{cases} \quad (1)$$

$$K_x = K_y = \frac{r}{\sqrt{2}} \frac{\Delta\varphi/2}{\sin(\Delta\varphi/2)} \quad (2)$$

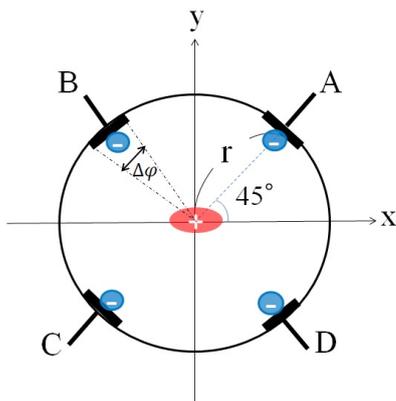


図2：BPMブロックの概略図

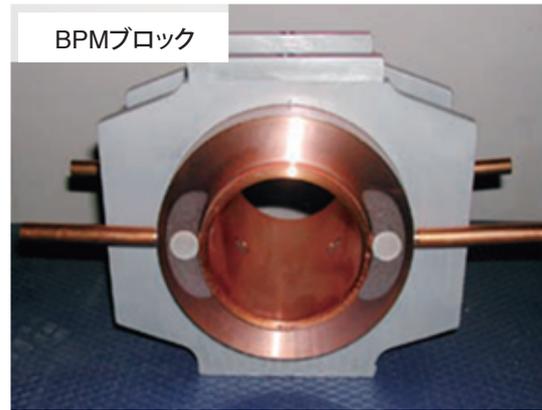


図3：正面から見たBPMブロック

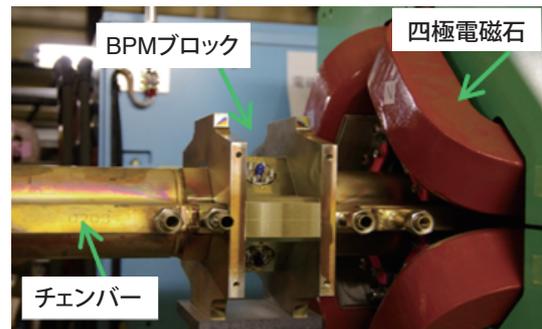


図4：チェンバーに据え付けられたBPMを横から見た様子

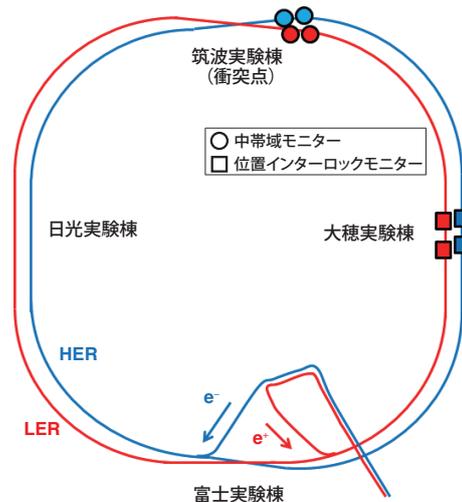


図5：中帯域検波器及びビーム位置インターロックモニターの配置

2.2 中帯域検波器

中帯域検波器は主にビーム起動の振動を測定するモニターであり、衝突点近くの局所クロマティシティ六極電磁石の近傍にHERに2台、LERに2台設置され(図5参照)、1)ビームが六極電磁石を垂直方向にずれて通るときに生ずる垂直エミッタンスの増加を見積もるためと、2)衝突点でのビーム水平及び垂直方向の振動を見積もるために用いられる。ビーム位置取得に求められる繰り返し周波数は10 kHz、分解能は2~3 μm 以下である。

2.3 ビーム位置インターロックモニター

ビーム位置インターロックモニターは軌道の位置が逸脱したときにビームパイプ内にあるビームを捨てるための信号（インターロック信号）を発報するモニターであり、大穂直線部の HER に 2 台、LER に 2 台設置され（図 5 参照）、KEKB 運転時、1) 軌道逸脱によってアポルト窓が破壊されたことがあり、窓の破壊を防ぐためと、2) ロスモニターからインターロック信号が発報される前にビームがコヒーレント振動をしている場合があり [3]、振動が成長する前にビームを捨て、加速器コンポーネントがビームの直撃で破壊されるのを防ぐために用いられる。インターロック信号を出し、ビームを捨てるためのコヒーレント振動の大きさは HER で $6\sigma_x$ (6.8mm)、LER で $5\sigma_x$ (6.8mm) であり、ビームがこれらの大きさを越えた時からインターロック信号が発報されるまでの時間差（インターロック遅延時間）には $100 \mu\text{s}$ 以下（SuperKEKB リング 10 周以下）が要求されている。

これら 2 つのモニターとして Instrumentation Technologies 社の Libera Brilliance+ を使用することが検討された。

3. Libera Brilliance+ の性能評価

この章では Libera Brilliance+ の概要と Libera Brilliance+ を用いて行った位置分解能測定とインターロック遅延時間測定の結果について報告する。

3.1 Libera Brilliance+ の概要

図 6 は Libera Brilliance+ の外観である。Libera Brilliance+ は表 3 にあるように 4 つの測定繰り返しモードを有するビーム位置検波器であり、Libera Brilliance+ 1 台につき 4 台の BPM 信号を測定できる [4]。また、FA



図 6：Libera Brilliance+ の外観

表 3：Libera Brilliance+ の仕様

Data type	Data repetition
Raw ADC	ADC sample frequency (119 MHz)
Turn by Turn	Revolution frequency (100 kHz)
Fast Acquisition (FA)	10 kHz
Slow Acquisition (SA)	10 Hz

モード（10 kHz）の周波数で取得したデータから位置を演算をし、設定した位置のしきい値を超えたときインターロックを発報する機能を持っている。

3.2 位置分解能測定

図 7, 8 は Libera Brilliance+ を用いた位置分解能測定のプロック図とセットアップの外観である。CH A, B, C, D には 508 MHz の continuous wave (CW) の sin 波を 4 つに分けた信号をビームの疑似信号として入力した。Turn by Turn モードと FA モードで測定したビーム位置をヒストグラムに表した結果を図 9, 10 に示す。

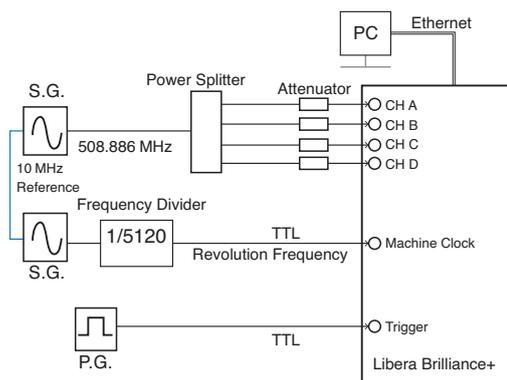


図 7：位置分解能測定のプロック図 (S.G.: Signal Generator, P.G.: Pulse Generator)

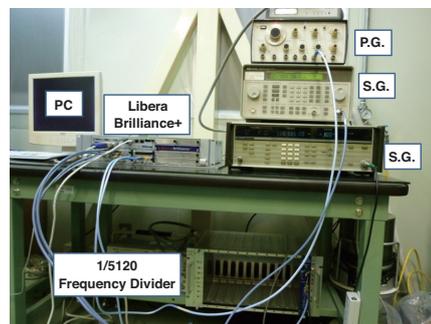


図 8：位置分解能測定の設定アップの外観

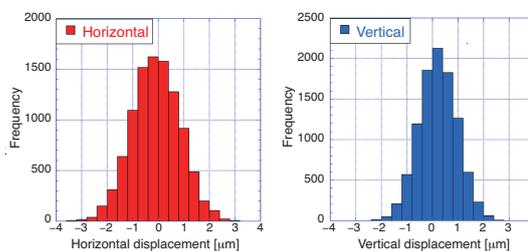


図 9：Turn by Turn モードでのビーム位置の度数分布

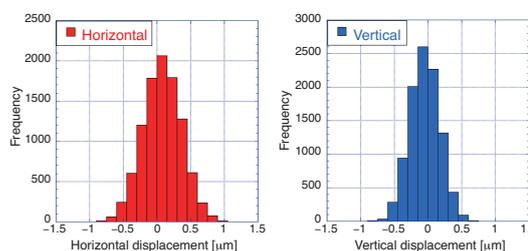


図 10：FA モードでのビーム位置の度数分布

測定の結果、位置分解能 (RMS) は Turn by Turn モードのとき、 $x = 0.94\mu\text{m}$ 、 $y = 0.74\mu\text{m}$ 、FA モードのとき、 $x = 0.29\mu\text{m}$ 、 $y = 0.22\mu\text{m}$ となった。

3.3 インターロック遅延時間測定

図 11 はインターロック遅延時間測定のプロック図である。位置分解測定時同様、S.G. から 508MHz の sin 波を CH A, B, C, D へ入力し、Pulse Modulation で同期させたスイッチにより、S.G. の信号出力を切ること、ビームの位置に変動を与え、インターロック信号を発報する。S.G. の出力と Libera Brilliance+ からのインターロック信号の出力をオシロスコープにつなぎ、S.G. の出力を切った時間とインターロック信号が出た時間差 (インターロック遅延時間) を測定した。

図 12 はオシロスコープで遅延時間を測定した結果であり、Ch1 はインターロックの出力を、Ch2 は

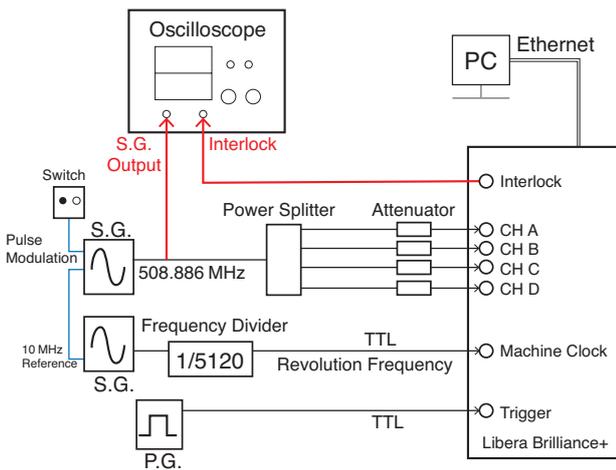


図 11：インターロック遅延時間測定のプロック図 (S.G.:Signal Generator, P.G.: Pulse Generator)

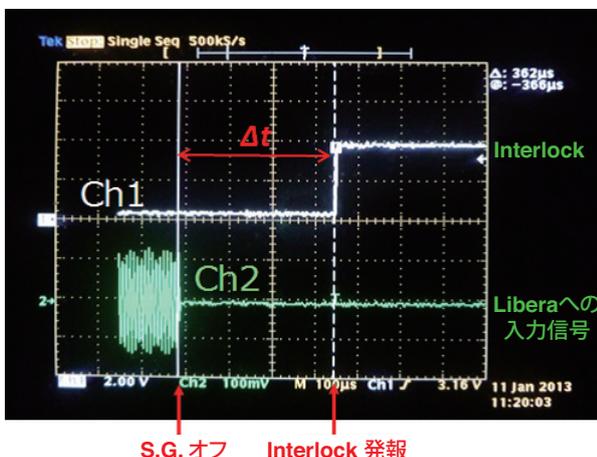


図 12：S.G. の出力を切ったときとインターロックがかかったときの時間差をオシロスコープで測定した結果

S.G. の出力を表している。Ch2 の信号がなくなった時間から Ch1 のパルス信号が出た時間までの差 Δt がインターロック遅延時間である。測定の結果、 Δt は平均して $\Delta t = 400 \pm 40\mu\text{s}$ (SuperKEKB リング約 40 周) の遅延時間が確認された。

4. まとめと今後の課題

Libera Brilliance+ の性能評価の結果、中帯域検波器においては我々の求める分解能 $2 \sim 3\mu\text{m}$ を十分満たしているため、Libera Brilliance+ の導入が決まった。ビーム位置インターロックモニターにおいては、 $400\mu\text{s}$ のインターロック遅延時間が確認できた。しかし我々はより速い時間応答を必要とするため、インターロック信号の出力に用いる位置演算の取得周波数を 10 kHz から 100 kHz に改良することで、 $100\mu\text{s}$ 以下の速いインターロック遅延時間の達成を期待している。今後は、 100 kHz に改良した Libera Brilliance+ を導入し、その性能評価が課題となる。

5. 謝辞

本稿作成にあたりましては、Instrumentation Technologies 社の Peter Leban 氏、Rok Hrovatin 氏より情報の御提供、ならびに種々の御助言を賜りました。また、モニターグループの石井仁先生、飛山真理先生、福間均先生、森健児先生には多くの御指導、御助言を賜り深く感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Fukuma *et al.*, “Beam Instrumentation for the SuperKEKB Rings”, Proceedings of the IBIC2012, Tsukuba, Japan, Oct.1-4, 2012.
- [2] 平松成範加速器のビームモニター
- [3] H. Ikeda *et al.*, “Abort Diagnostics and Analysis during KEKB Operation”, Proceedings of the IBIC2012 in Japan, Tsukuba, Oct. 1-4, 2012.
- [4] <http://www.i-tech.si/>
- [5] S.Kanaeda *et al.*, “SuperKEKB におけるビーム軌道振動測定モニタ及びビーム位置インターロックモニタとしての Libera Brilliance+ の性能評価”, Proceedings of the PASJ10, Nagoya, Japan, Aug. 2-6, 2013.

IPv6 対応 DMZ の試験導入

石沢 裕

高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 計算科学センター

Abstract

IPv4 の枯渇を受けて、IPv6 対応のサーバを立ち上げる必要性があるサーバが出始めてきている。そのため、IPv6 に対応したデュアルスタックの DMZ を新規に構築した。

1. はじめに

IPv4 アドレスは、32[bit] のアドレス空間を持ち 43 億個ほどのアドレスがあったものの、2011 年 2 月 3 日に APNIC(Asia Pacific Network Information Centre) 等のレジストリにアドレスを配布している IANA(Internet Assigned Numbers Authority) の在庫が枯渇した。また、日本を含むアジア太平洋地域のレジストリである APNIC の在庫も 2011 年 4 月 15 日に枯渇し、新しい IPv4 アドレスの入手は非常に困難となった。

古くからインターネットに接続している組織は既存の IP アドレスを使い回すことができるが、新興国の組織からの IPv4 の接続性はプロバイダの用意する巨大 NAT 装置を経由するためインターネット側の IP アドレスが不定であったり、組織毎の NAT の上にプロバイダの NAT が多段で設置されていたりする。このような形態では例えば Grid システムのように終端機器がユニークな IP アドレスで特定できることを前提としたシステムを構築することがほとんど不可能なため、IPv6 を利用することが検討されている。

現状では Grid システムを構築するミドルウェアのすべてが IPv6 に完全対応しているわけではないが、すべての基礎となる認証基盤については最初に IPv6 対応をする必要がある。そのため、グリッド認証局の取りまとめ組織であるところの IGTF(International Grid Trust Federation) から各サイトの Grid 認証局に対して IPv6 の到達性を確保するように要請があった。

これに対応するために本機構でも IPv6 の到達性を確保した DMZ を構築する運びとなった。

2. DMZv6

現状では IPv4 に比較して IPv6 の普及率は非常に低い。従って、IPv4 で実績のあるファイアウォールであっても IPv6 の運用での実績は少なく、機能の実装が同程度を達成しているかには不安がある。また、従来の IPv4 用 DMZ にそのまま IPv6 アドレスを配布した場合、各機器が IPv6 に対して十分な防御策をとっているかが不明であり、IPv6 経由でセキュリティ事象を招く可能性やユーザの混乱が予想される。このため従来の DMZ とは別の IPv4 サブネットを用意し、そこに IPv6 アドレスも付与する形態とした。

Grid 認証局に対してアクセスするクライアントは必ずしも IPv6 の接続性はなく、現時点では IPv4 の接続性しかない場合がほとんどと思われる。そのため、IPv4 および IPv6 両方の到達性を確保したデュアルスタックの DMZ とした。このデュアルスタックの DMZ を DMZv6 として運用を開始した。

従来の DMZ と異なり、DMZv6 からインターネットへの外向きの通信を無制限に許可せず、申請を求めることとしている。これは DMZv6 上の機器が何らかの脆弱性によって侵入を受け、機構内部や機構外への攻撃の踏み台として使用されることを防ぐためである。一方、脆弱性検査については、現時点では IPv4 アドレスについてのみ検査を行っている。

3. DMZv6 の構成

3.1 当初の構成

現在ではポート番号に基づくフィルタだけでは安全性がほとんど担保できない。当然のことながら

* yutaka.ishizawa@kek.jp

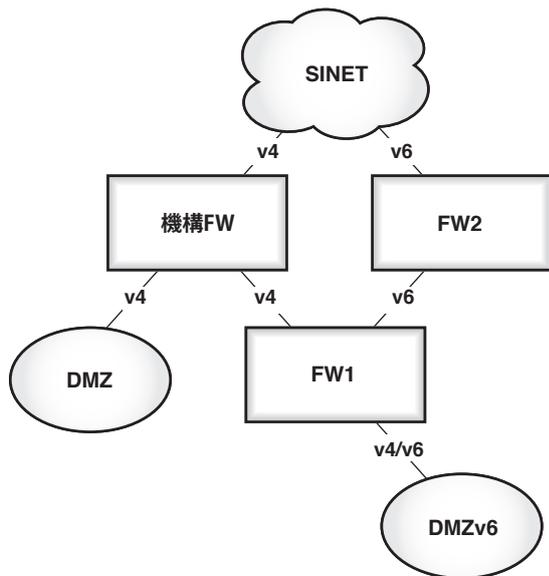


図 1：当初の構成

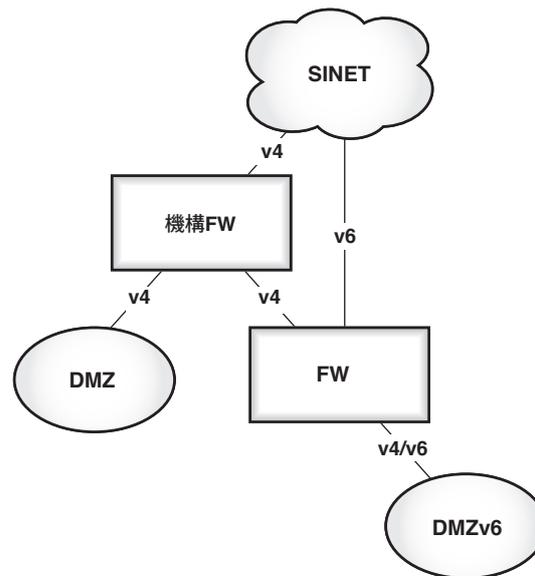


図 2：構成変更後の構成

ファイアウォール自身の IPv6 対応が不可欠である。この時点で機構の有するファイアウォールは IPv6 対応を唄ってはいるが、初期設定では無効化されており、有効化するためには再起動が必要であった。ファイアウォールの再起動は機構内外の通信への影響が大きいため、普段でも夏期計画停電時以外は再起動を行っていない。その他の設定を変更する際にも再起動を要求されるであろうと考えられたので、機構ファイアウォール（機構 FW）とは別のファイアウォール装置を使用することとした。

機構全体のファイアウォールとしては性能不足である退役機器を 2 つ使用して DMZv6 を構築した。2 つを使用したのは操作ミスによって全てのフィルタが無効化された結果、外部からの攻撃を直接受ける事態を避けたいからである。また、ベンダの異なるファイアウォールを使用することで両者の得失を調べる目的もあった。

DMZv6 の構成を図 1 に示す。

IPv4 は SINET から機構ファイアウォールでフィルタリングされファイアウォール 1 (FW1) でフィルタリングし DMZv6 に至るといった構成であり、IPv6 は SINET からファイアウォール 2 (FW2) でフィルタリングされファイアウォール 1 でフィルタリングし DMZv6 に至る状態になっている。

この構成でテスト用のサーバを置き、動作確認と運用試験を行った結果、ファイアウォール 1 において運用上の難点が見つかった。大きな問題はフィルタを設定したにもかかわらず意図しない通信が通ってしまうこと、また管理操作が一般通信と同じ経路

からしかできないことである。

ファイアウォールの管理操作が監視されるべき通信を制御したいネットワークと一緒にしていると管理用の通信を全てのルールに対して特別扱いするように列挙しなくてはならず、非常に煩雑となる。新しいルールを追加する際に特別扱いのルールを正しく挿入するのを忘れて即座にファイアウォールが操作不能になってしまう。結果としてルールの追加は非常に敷居の高い操作となってしまった。管理者の操作端末が DMZv6 配下にのみある場合はあまり問題とならないが、DMZv6 は DMZ である以上、操作端末を設置するネットワークとしては不適切である。そのため、構成を変更することとなった。

3.2 構成変更後の構成

構成変更後の構成は次の通りである。ファイアウォール 1 を撤廃してファイアウォール 2 のみとして、ファイアウォール 2 で IPv6 と機構ファイアウォールからきた IPv4 をフィルタして DMZv6 に至るといった構成とした。これはファイアウォール 2 ではデフォルトルートが設定出来ないことや意図しない通信が通るといったことがなかったためである。

構成変更後の構成を図 2 に示す

この構成にしてから順調に稼働していたものの、しばらくしてから IPv6 の TCP および IPv6 の UDP のみが不通となるバグが発生した。IPv4 通信は ICMP、TCP、UDP いずれも問題なく通信できており、また IPv6 の ICMPv6 も通信が来ていた。ICMPv6 および ICMP を使用して監視しており、IPv6

の TCP・UDP の通信障害を受けなかったため発見が遅れた。再起動させて復旧した後にベンダに問い合わせたところベンダの既知のバグではなかったため、解決には至らなかった。IPv6 の TCP・UDP のサービスポートで監視をするように強化し、再発した際も即座に発見できるようにして様子を見ることとした。

その後しばらくしてから前述の IPv6 のみの不通問題が再発した。状況は全く同じであり、必須とされていた IPv4 のサービスは問題なく出来ているため、ベンダの現地調査のため現状を保存し、ベンダに調査依頼を行った。ベンダの調査によると原因は不明であるもののファイアウォールのメモリ内容が一時的に破壊されており、それにより IPv6 の TCP・UDP のみの通信が不可能になるとのことであった。ベンダが作成したメモリ保護のパッチを適用し、再起動を行い復旧した。

3.3 権威 DNS サーバ

このようにして IPv6 の到達性を確保したが、名前前から IPv6 アドレスを解決できなければその到達性は他の組織にはわからない。KEK での既存の権威 DNS サーバの設置してあるネットワークは当然 IPv6 の到達性はない。従って IPv6 のみのネットワークから KEK のホストの名前解決は出来ない。既存の権威サーバを DMZv6 に移設するよりは、IPv6 の到達性を確保した権威サーバを DMZv6 上に新設する方が遙かに作業量が少ないため、既存の権威 DNS サーバよりゾーン転送を受ける権威サーバを DMZv6 上に設置した。これにより、IPv6 のみの接続性しかないネットワークからでも KEK の IPv6 機器のアドレス解決が出来るようになった。

3.4 キャッシュ DNS サーバ

DMZv6 のホストが名前解決できるようにキャッシュ DNS サーバも構築した。DNS のキャッシュ汚染に強いことや QPS がよいため Unbound とした。また、bind よりも堅牢でパッチ当て等の運用負荷が下がることも利点である。

3.5 現状

3.2 節の最後で述べたパッチ適用により現在まで安定稼働している。図 3 にグリッド認証局の IPv6 到達性および IPv6 の名前解決のチェックサイト (<http://www.particle.cz/farm/admin/IPv6EuGridPMACrIChecker/>) の結果を示す。

IPv6 EUGridPMACrIChecker

Check date: 22.10.2013 [text report \(take a while\)](#)

CA Subject	IPv6 DNSIPv6 GET	
CA CrI url		
CN=AAA Certificate Services, O=Comodo CA Limited, L=Salford, S=Greater Manchester, C=GB		
http://crl.comodoca.com/AAACertificateServices.crl	YES	YES
CN=AddTrust External CA Root, OU=AddTrust External TTP Network, O=AddTrust AB, C=SE		
http://crl.usertrust.com/AddTrustExternalCARoot.crl	YES	YES
~		
E=ca@mail.iucc.ac.il, CN=IUCC, O=IUCC, C=IL		
http://certificate.iucc.ac.il/ca/cacrl.pem	YES	YES
CN=KEK GRID Certificate Authority, OU=KEK, O=KEK, C=JP		
http://gridca.kek.jp/repository/617ff41b.r0	YES	YES
CN=KISTI Grid Certificate Authority, O=GRID, O=KISTI, C=KR		
http://ca.gridcenter.or.kr/CRL/722e5071.crl	NO	

図 3：グリッド認証局の IPv6 対応状況チェックサイト

図に示したとおり KEK GRID Certificate Authority の項目が IPv6 到達性および名前解決のどちらも問題ないことが確認できる。

図 4 に IPv6 について、ファイアウォールでの Deny ログの件数を示す。横軸が宛先ポートで縦軸がその件数となっている。IPv4 との宛先ポートの比較では、同様なポートでスキャンや攻撃が行われているといえる。IPv4 との件数の比較では、期間が 2013 年 1 月～2013 年 7 月までの 6 ヶ月間と長期にわたっての集計結果であるものの IPv4 よりも著しく件数が少ないといえる。これは、現在でも IPv6 を整備しているところが少数であるためと考えられる。

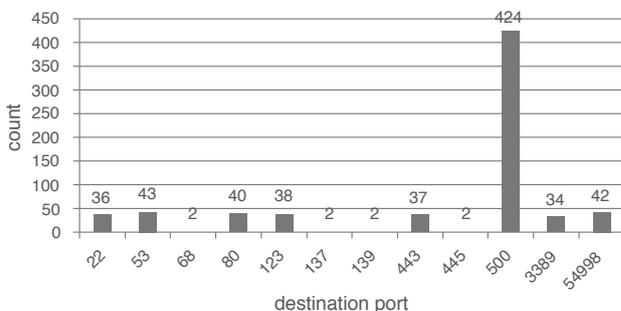


図 4：ファイアウォールでの IPv6 Deny ログの件数 (2013 年 1 月～2013 年 7 月)

3.6 今後

今後としては、機構ファイアウォールへの統合を予定している。現在の構成ではファイアウォールが途中経路に複数設置されているため、複数の地点でのオペレーションが必要であり見通しが非常に悪い。機構ネットワークシステムの全面更新後、現在は機構ファイアウォールで IPv6 機能が有効化した状態で運用されているので、原理的には統合も可能である。ただし、現在の機構ファイアウォール製品は DMZv6 で評価してきた 2 つのベンダとは異なる

ため、まずは同一ベンダ・同一 OS の小型ファイアウォール装置を使用して IPv6 特有の問題が存在していないかどうかを確認している状況である。

図 5 に今後の構成を示す。

4. おわりに

今回 IPv6 対応の DMZ を構築してみて、外部より IPv6 で確認するすべがほぼ無いと感じた。今回は国立情報学研究所から新たに一時的に IPv6 アドレスを割り当ててもらい確認を行った。

DMZv6 では IPv4 と IPv6 のどちらでも通信可能であるが、今しばらくは IPv4 優先で通信していた方がよいと思われる。IPv4 では DNS に逆引きレコードを設定することが一般的であるものの、IPv6 ではアドレスが長いこともあり設定されていないことが多々あるためである。

今回は一つのファイアウォールでまとめてから DMZv6 へという構成で始めたものの図 6 に示すような IPv4 ファイアウォールと IPv6 ファイアウォールを分けた方がよかったのではないかと考えられる。今回起こった障害では IPv6 の障害が IPv4 に波及しなかったため問題が大きくならなかったものの、IPv6 の障害が IPv4 に波及することも十分に考えられるため分けて始めた方が、DMZv6 で必須とされている IPv4 の停止という自体には繋がらないためである。

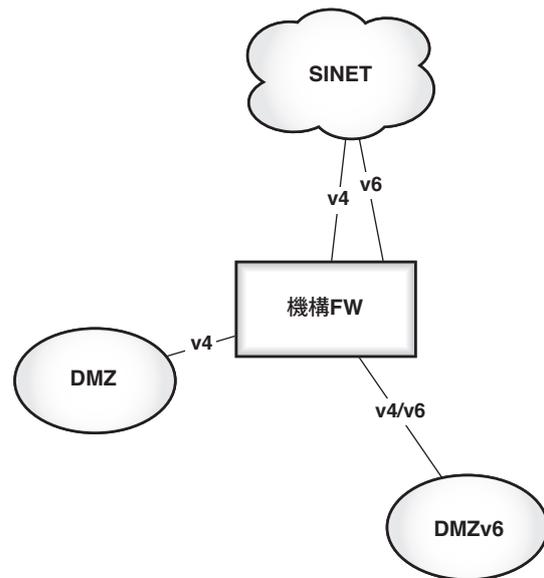


図 5：今後の構成

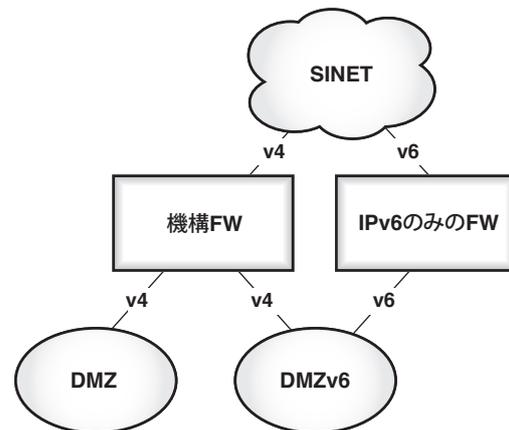


図 6：分離した構成

J-PARC での業務報告

北川 潤一

高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 放射線科学センター

Abstract

平成 25 年度技術交流会において発表した内容について報告する。交流会では 3 つのトピックスを挙げ、それぞれの実施方法と測定結果について解説した。PHITS による放射能計算から金標的中に生成する放射線核種の量を評価することができた。また、イオン交換樹脂を利用して放射性核種除去が効率的に行えることを確認した。さらに、J-PARC 加速器内（複数箇所）のコンクリート試料測定によって、コンクリートの深さに対する放射能分布を示し、その結果から照射粒子の種類による放射能分布の違いを考察した。

1. はじめに

2012 年に KEK に入所しました北川潤一と申します。大学時代は筑波大学と東京大学の加速器質量分析器 (AMS) を用いた研究を行っていました。KEK 入所後の配属先は、J-PARC センターの放射線安全セクションです。簡単にいえば、学生ではユーザーとして関わってきた加速器に、社会人からは管理する側に回ったということになります。研究で関わってきた加速器と J-PARC ではスケールが大きく異なり、また研究と管理では必要となる知識やスキルが違うため、戸惑う場面も多くありました。本稿では、そのような経験を通じて学んだことを報告します。

2. 業務内容

J-PARC は、世界最高のビーム強度を実現し、生成した二次粒子ビームの利用により最先端の研究を行う加速器・実験施設群である。放射線防護の観点からの J-PARC の特色は、高いビーム出力（最大 1 MW）とビームエネルギー（最大 50 GeV）、そして全長約 3.2 km となる加速器施設の規模である [1]。このような特色のため、J-PARC では放射線管理上の通常業務だけでなく、基礎実験などによる対応が必要になる場合がある。技術交流会では、自分の関わった業務として 3 つのトピックスを挙げ、発表を行った。以下、それぞれの内容について解説する。

2.1 PHITS による放射能計算

PHITS とは、放射線の挙動を核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コードである [2]。この PHITS を使用して、金標的に陽子ビ

ムを当てた時に生成される放射エネルギーの計算を行った。

計算に使用した標的の形状は、ビームに当たる面が 6.0×6.0 mm で奥行きが 66 mm の四角柱であり、材質は金である。この標的は奥行き方向に 0.2 mm のスリットで 6 個に分割されている。標的の下部には銅の台座がある。この標的に直径 1.0 mm の 30 GeV 陽子ビームが当たったと仮定し、最も温度が高くなる部分の放射エネルギーを算出した。計算に用いた標的の形状と、得られたフラックスの分布を図 1 に示す。

照射直後における質量数ごとのプロトンあたりの生成量のグラフを図 2 に示す。

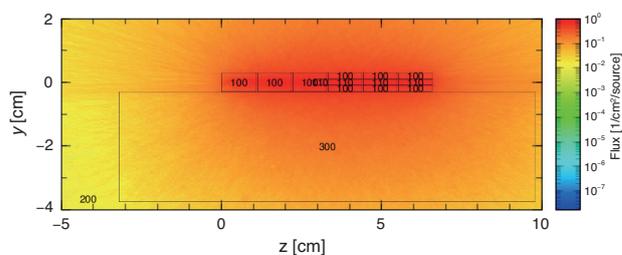


図 1：標的の形状とフラックスの分布

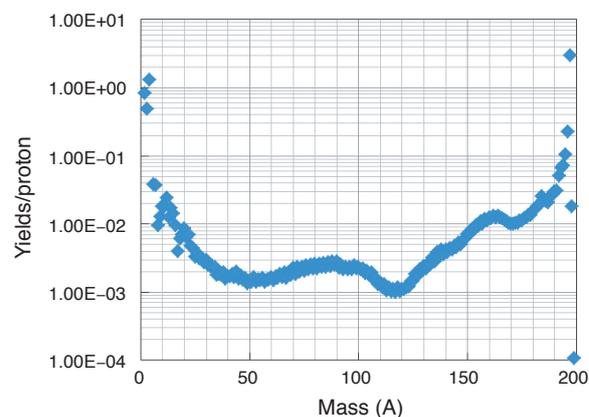


図 2：質量数ごとの核種生成量の計算結果

* kitajun@post.kek.jp

これらの計算結果より、金標的中に生成する放射性核種の量を評価することができた。

2.2 イオン交換樹脂設置のための基礎実験

加速器・実験施設中のタンクに溜まった廃水を流すには、法令で定められている放射能濃度限度の値を順守する必要がある。イオン交換樹脂による水の浄化は、廃水中の放射性物質除去に有用な方法として考えられる。KEKにおいても、電磁ホーン中の冷却水をイオン交換樹脂に通水させることにより、K2K 実験によって発生した放射性核種のうち幾つかは効率的に除去できることが報告されている [3]。しかしながら、イオン交換樹脂の本来の役割はイオン化した核種を吸着することであり、放射性核種を選択的に除去することではない。イオン交換樹脂によって除去できるのはイオン化した放射性核種のみであり、水中の核種の化学状態により除去できるものとそうでないものが存在する。したがって、J-PARC の廃水や冷却水において発生する可能性のある核種に対しても、イオン交換樹脂の利用が有効であるかを確認するための実験が必要となった。

実験には和光純薬工業製 Dowex 50W×8 (H 型, 100-200 mesh) の陽イオン交換樹脂と Dowex 1×8 (Cl 型, 100-200 mesh) の陰イオン交換樹脂を使用した。樹脂を超純水で洗浄しながらガラス製クロマトグラフ管に充填し、樹脂容量が約 17 ml となるようにした。樹脂を通す試料には、主な核種として ^{125}I , ^{183}Re , ^{185}Os が含まれた水を使用した。試料をカラムに充填して流速約 3 ml/min で流し、U-8 容器に約 90 g 回収した。

測定には γ 線を検出する Ge 半導体検出器を用いた。測定結果を表 1 にまとめる。

表 1: イオン交換樹脂通水による放射性核種除去実験の結果

	樹脂通水前濃度 [Bq/ml]	樹脂通水後濃度 [Bq/ml]	樹脂通水後の除去率
^{125}I	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	$< 1.2 \times 10^{-3}$	$> 99\%$
^{183}Re	$(2.9 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	$< 2.3 \times 10^{-3}$	$> 92\%$
^{185}Os	$(5.9 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	$< 2.0 \times 10^{-3}$	$> 96\%$

この測定結果より、 ^{125}I , ^{183}Re , ^{185}Os はイオン交換樹脂によって効率的に取り除くことができることがわかった。この結果を受けて、排水系にイオン交換樹脂が設置されることとなった (図 3)。



図 3: 貯留槽に設置されたイオン交換樹脂

2.3 コンクリート試料の測定

J-PARC では加速器トンネル内のコンクリートや、加速器周辺の土壌・地下水などの環境試料の放射能測定を行っている [4]。図 4 に、J-PARC の全体図と試料採取点を示した地図を示す。C はコンクリート試料設置点、S は土壌試料の設置点である。

環境試料のほとんどは検出下限値以下であるか、福島事故由来など J-PARC 外からの影響が大きい。加速器施設内のコンクリートは、線量の高いと予想されるビームダンプや入射点ビームの分岐点などでは有意な値が検出された。

コンクリート試料は加速器トンネル内の壁に約 6-7 cm $\Phi \times$ 70-100 cm のボーリングをすることで採取した。得られたコンクリートを砕いて 5 ~ 14 個の U8 容器に入れ、それらを一本のステンレス製ケース内に封入した。ボーリングした壁の穴にコンクリート試料を設置し、定期的に放射能の状況をモニタリングできるようにした。測定には、Ge 半導体検出器による γ 線測定を行った。

有意な放射能が確認されたのは、設置したコンクリート 12 試料のうち C1, C2, C3, C5, C9, C11, C12 の 7 試料であった。生成が確認された核種は ^7Be , ^{22}Na , ^{46}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{152}Eu であった。特に放射能濃度が高いのがニュートリノビームダンプ (C11) と MR 入射点付近 (C5)、RCS 周辺 (C1) であった。このような地点の周囲では、加速された粒子がコリメーターやビームダンプと衝突するために高い放射能濃度が検出されたものと考えられる。

図 5 に、C11, C12 コンクリート試料の放射能を壁表面からの深さの関数としてプロットした図を示す。C11, C12 はニュートリノビームダンプ付近に設

置されたコンクリート試料であり、C11 は試料の中でも最も高い放射能濃度が検出されたものである。C11 のようにコンクリート深さに対して放射能が急に減衰するのは、中性子照射によって得られる傾向と同じである。一方、C12 に関しては深さに対して放射能の減衰がほとんど見られない。このような傾向の違いの原因として考えられるのが、ミュオンによる放射化である。ニュートリノ実験施設では、岐阜県飛騨市(旧神岡村)にあるスーパーカミオカンデで検出するニュートリノを生成するため、 π 中間

子を発生させる。 π 中間子が崩壊することにより、ニュートリノとともにミュオンが生成される。高エネルギーのミュオンは中性子よりも長い飛程を持つ [5] ため、ミュオンによって放射化される C12 では中性子によって放射化する他地点のコンクリートの放射化とはかなり異なった傾向を示したものと考えられる。

コンクリートと環境試料の測定は、今後も根気強く続けその変化を調査していく。

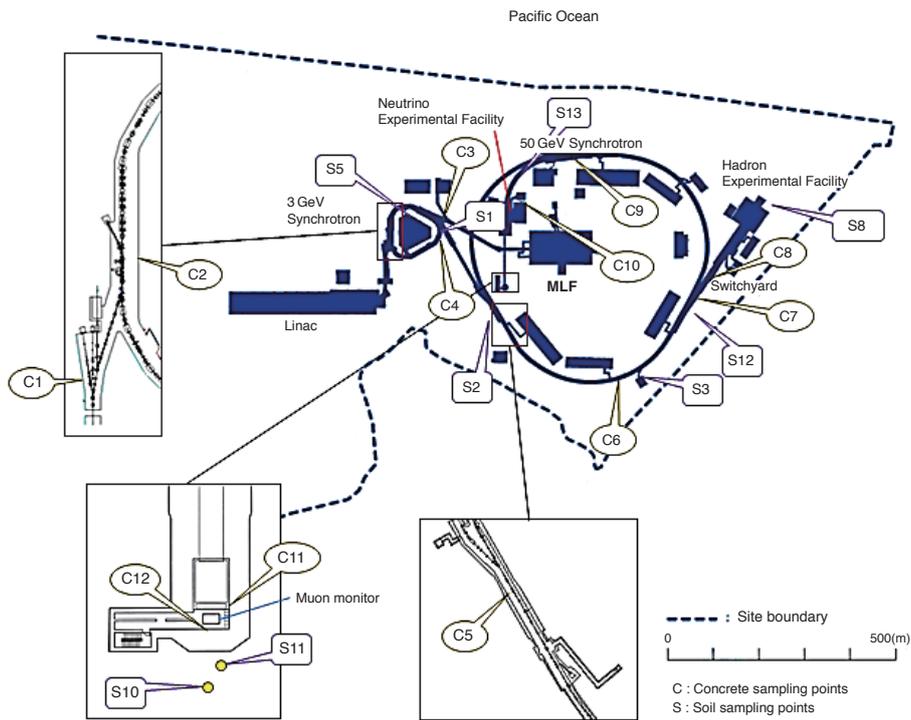


図 4 : J-PARC の全体図と試料採取地点

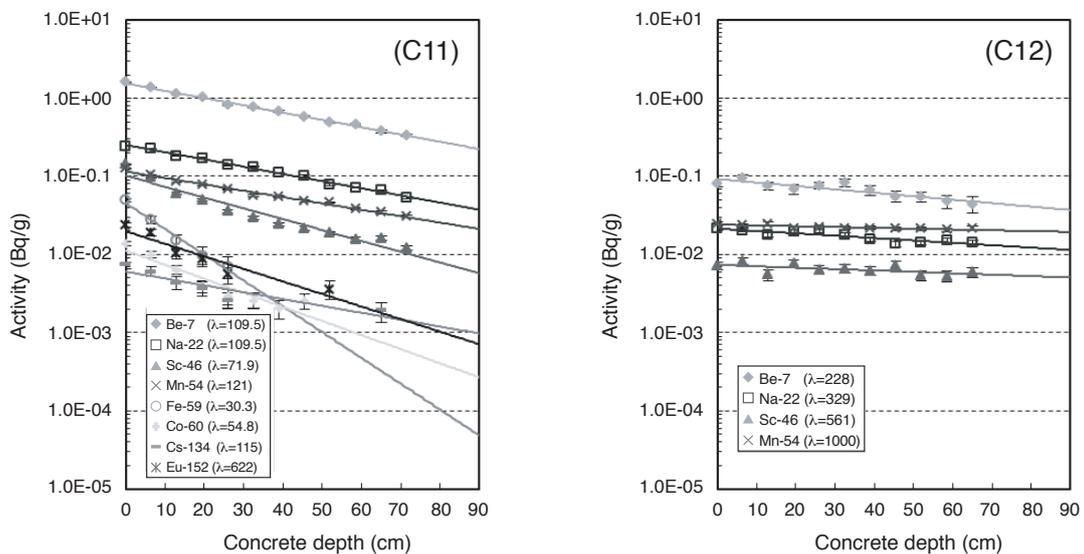


図 5 : C11, C12 試料中放射能の深度分布

3. 今後の抱負

今後の抱負としては、技術職員としての基礎的な技術の習熟、研究的なテーマの進展、管理業務に必要な知識を学ぶことの3つを考えている。

基礎的な技術の習熟としては、Ge半導体検出器を中心に各種検出器、およびシミュレーション計算などPCソフト関係に慣れることが挙げられる。測定器やコンピュータはこれまで「単なる道具」としてしか考えていなかったもので、今後は「学ぶ対象」として捉え直していきたい。

研究的なテーマの進展としては、環境試料測定継続、フェルミ国立加速器研究所にて行った実験の解析をする必要がある。

管理上必要となる知識としては、複雑多岐にわたる法令や施設の規則を学ぶ必要があると日頃感じている。第一種放射線取扱主任者免状は入所一年目に取得したが、試験で学ぶ内容は業務上必要な知識のほんの一部であるし、完全に理解せずに受かってしまったという感は否めない（高校入試から大学院入試まで、いつも私はそんな感じである）。放射線管理棟（図6）の管理区域責任者としての業務を通じて、実際の管理を少しずつ学んでいきたい。

放射線管理業務の技術者とは具体的に何をやる人なのか、大学時代は身近な存在でありながらもうまくイメージできなかったが、課題を挙げてみると実に幅広い知識の必要な業務である。



図6：放射線測定棟の外観

4. 謝辞

本稿では様々な内容を盛り込めたと思いますが、これらの業務は私ひとりではとてもこなせるものではありませんでした。J-PARCセンター放射線安全セクションの皆様には、本稿の執筆にあたっての助言はもとより、業務上種々のご指導を頂きました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Nakashima, Y. Nakane, F. Masukawa, N. Matsuda, T. Oguri, H. Nakano, N. Sasamoto, T. Shibata, T. Suzuki, T. Miura, M. Numajiri, N. Nakao, H. Hirayama, and S. Sasaki, Radiation Safety Design for the J-PARC Project. *Radiation Protection Dosimetry*, **115**, 564-568 (2005).
- [2] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta, and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, *J. Nucl. Sci. Technol.* **50:9**, 913-923 (2013).
- [3] H. Matsumura, N. Kinoshita, A. Toyoda, K. Masumoto, K. Bessho, M. Hagiwara, and Y. Yamanoi, Adsorption Behavior of Radionuclides on Ion-Exchange Resin from Cooling Water for the K2K Target and Magnetic Horns, *Nuclear Technology*, **168**, 979-983 (2009).
- [4] 北川潤一, 萩原雅之, 三浦太一, 金井敦史, 関一成, J-PARC 加速器トンネル内、及びその周辺における放射化とその時間変化, *Proceedings of the 14th Workshop on Environmental Radioactivity*, 386-392 (2013).
- [5] D. E. Groom, N. V. Mokhov, and S. I. Striganov, Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV-100 TeV, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **78**, 183-356 (2001).

放射光源加速器の安全システム

長橋 進也

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

放射光科学実験施設 (Photon Factory, PF) では、2.5 GeV の電子蓄積リングである PF Storage Ring (PF リング) と、6.5 GeV の電子蓄積リングである PF Advanced Ring (PF-AR) の2つの放射光源加速器を運転している。また、現在、次世代放射光源 (Photon Factory ERL Advanced Research laboratory, PEARL) のための実証機であるコンパクト ERL (cERL) 周回部の建設を2013年末のビーム運転に向けて行っている。このような大規模実験施設を安全に運用するために、入念な検討および試験を通して信頼性の高い安全システムを構築し、機器のアップグレードに対応した安全システムの更新も行った。

1. はじめに

PFでは、2つの放射光源加速器を運転しているが、これらの加速器は、運転開始以来、大きな事故等を起こすことなく、順調に稼働を続けている。これは、放射光源加速器だけでなく、他の加速器にも共通して言えることであるが、大きな事故は、人命にも関わることから、運転開始前には、安全システムの入念な検討と試験を重ね、信頼性の高いシステムを構築してきたからこそ成し得たものである。また、加速器のアップグレードに対応させるための改良や、システム自身の更新を行い、常に高い信頼性を保ってきた。加速器は、運転すると強力な放射線を発生することから、一般的に、厚いコンクリート等で出来た放射線防護壁に囲まれている。一方、放射光源加速器は、偏向電磁石により電子の進行方向を変えた時や、特殊な配列の磁石を持った装置 (挿入光源) 内を電子が通過した時に発生する放射光を、その放射線防護壁の外 (壁外) へ導かなくてはならない。しかも、様々な利用実験に対応させるために、壁外までは、放射光を曲げることなく、直線的に効率良く輸送する必要がある。また、同時に複数の実験を行うことが出来る様に、一つの放射光源加速器には、この様なビームラインが複数存在する。この相反するものを両立させているのが、基幹チャンネルと呼ばれる装置群であり、それが放射光源加速器の安全システムの特徴でもある。

2. 放射光源加速器と安全システム

前述の様に、放射光を壁外まで直線的に導く点や、他の加速器と大きく異なる点である。PFが運転している2つの加速器について、歴史や基幹チャンネルに触れながら、簡単に説明する。

2.1 PF リング

PF リングは、1982年に放射光源専用加速器として運転を開始した。国内で初めての大型放射光源加速器であったこともあり、様々な検討や試行が行われた。基幹チャンネルについても、放射線防護壁を電子ビーム軌道の接線方向に貫通しながら安全も担保すると言う部分だけに、より入念な検討が重ねられた。^[1]

2.2 PF-AR

PF-ARは、トリスタンMR (現在のKEKB) の入射蓄積リングとして建設され、1987年よりトリスタン計画と共生する形で、放射光利用実験を開始した。この様な経緯から、加速器の運転は加速器研究施設が行い、利用実験は利用系が行っていたため、基幹チャンネルも、利用系の担当となっている。その後、トリスタン計画の終了にともない、X線領域の放射光源専用の電子蓄積リングとして運転するために、多かった加速器本体の老朽化による冷却水の漏水や真空リーク等の故障や、真空系の基本性能が低いために短かったビーム寿命を回復することが検討された。また、KEKBへのビームの安定供給を確実なものとするため、2002年にリング性能向上のための加速器の大幅な改造 (PF-AR 高度化改造^[2]) を行った。この時、制御系も一新され、ビームライ

* shinya.nagahashi@kek.jp

ン増設に伴いビームラインインターロックシステムにも変更が加えられることから、安全システムの大幅な見直しと改良を行った。

2.3 Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) ^[3]

近年、EPICS を用いた制御が標準となっており、互いの制御情報も EPICS レコードを介して共有している。これにより、安全システムと加速器の状態を同時に見たり、比較したりすることが可能となる。

3. 安全システムの更新

安全システムは、前述の様に、高い信頼性を保つために、改良や更新を行ってきたが、ここでは、筆者が担当した3つの更新について紹介する。

3.1 PF リング安全系インターロック情報表示システムの更新 ^[4]

PF リング安全システムの中枢部は、2005 年の PF リング直線部増強 ^[5] と同時に OMRON 製 PLC へと更新されたが、情報表示システムは旧来のままであったため、2010 年夏の停止期間中に更新を行った。

この情報表示システムは、CAMAC で情報を吸い上げ、旧来のデータチャンネルと呼ばれる PF 独自の情報共有システムを介して各機器に情報を渡し、表示を行ってきた。また、個々の非常停止スイッチの情報やビームダンパーの情報は、インターロックの条件には入っていたものの、制御室で表示させている情報は必要最小限であった。そこで、EPICS レコードを介して各機器に全ての情報を渡し、同時に、全インターロック情報をグラフィカルに表示することを可能にするため、CAMAC から上位のシステムを、EPICS が搭載された横河製 PLC (図 1) に置き換えることを行った。

夏の停止期間と言う限られた期間に更新を行うため、省力化の様々な工夫を行った。2010 年の夏期運転停止前に、PLC 単体での入念な動作試験を行った。運転停止早々には、CAMAC からの置き換えを行い、デバッグを行った後、2010 年 9 月の運転から本格的な運用に入っており、順調に稼働している。

3.1.1 PLC の導入

横河製 PLC (FA-M3 シリーズ) を採用した (図 1)。このシリーズには、EPICS IOC (Input Output Controller) が動作可能な Linux 対応 CPU モジュール (F3RP61) があり、これだけで EPICS 化することが可能となる。また、中枢の OMRON 製 PLC から CAMAC へ送られていた情報は、CAMAC へ接続されていたケーブルを、



図 1：横河製 PLC

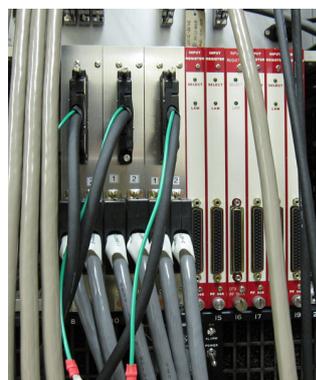


図 2：中継 BOX (左) と CAMAC (右)。更新前は、中継 BOX 下部のケーブルが CAMAC に繋がっていた。中継 BOX 上部のケーブルは横河製 PLC に繋がっており、中継 BOX 内部で下のケーブルと接続されている。

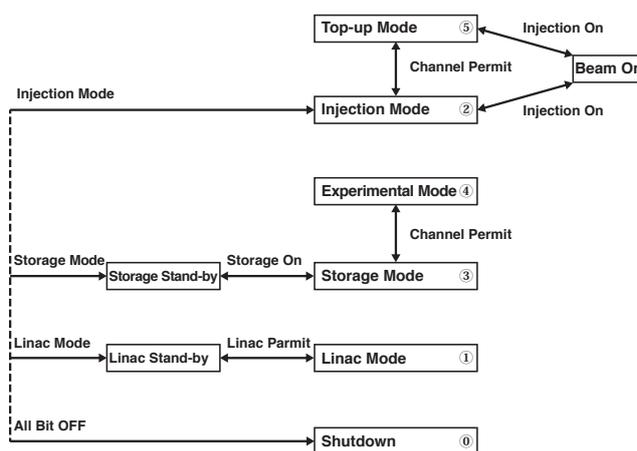


図 3：PF リング状態遷移図

佐藤佳裕氏が製作した中継 BOX (図 2) 等を介してそのままこの PLC へ繋ぎ、中枢の OMRON 製 PLC の変更が不要となる様、更新作業の省力化を図った。その他、情報システムへ渡されていなかった信号も、全て、この横河製 PLC へと繋ぐことによって、全ての情報を同時に参照することが出来るようになった。

3.1.2 運転状態遷移図の作成

CAMAC を廃止すると、同時に運転の状態遷移を制御していたプログラムも使用できなくなる。また、2008 年に蓄積電流値を一定に保つため、放射光利用実験中に、失われた分の電子を継ぎ足しながら入射するモード (Top-up モード) を追加した際、不自然な動作をすることがあったが、解消できずにいた。そこで、新たに Top-up モードを含めた運転状態遷移図を作成 (図 3) し、それに合わせて新しい制御プログラムを作成した。

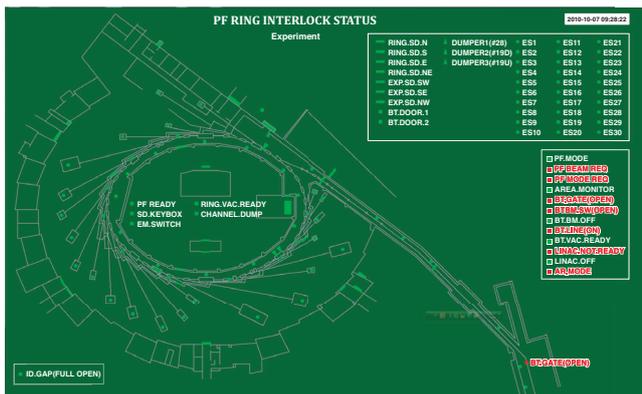


図4：PFリング安全系インターロック

3.1.3 動作試験

PLC 単体での入念な動作試験を行った結果、夏期停止期間中という限られた時間の中でも、混乱することなく、スムーズに更新することができた。PLC 単体での動作試験には、EPICS 標準ツールである EDM を使用して動作試験用の GUI を作成し、横河製 PLC 専用の模擬入力スイッチを使用して、一点一点確認を行った。

3.1.4 GUI

全インターロック情報をグラフィカルに表示させるため、前項と同様に EDM を使用して、GUI を作成した (図4)。PF リング施設図は、EDM を使用すると作成に時間がかかることから、CAD (Vectorworks) を使用して作成し、PNG 化したものを EDM に取り込んで表示させ、その上に EDM の表示を重ねることで、更新作業の省力化を図った。

3.1.5 更新結果

PF リング安全系インターロック情報表示システムの更新は、CAMAC から上位のシステムを更新することにより、短期間で、かつスムーズに行うことができた。また、新たに全インターロック情報をグラフィカルに表示させることに成功した。これらの情報は EPICS レコードを介して、Web の表示や各機器の制御に使用されている。

3.2 PF-AR 安全システムの見直し

3.2.1 Injection Enable 信号

PF-AR ビームラインインターロックシステムから安全系インターロックシステムへ送られてくる重要な信号の中に、Injection Enable という信号があった。この信号は、ビームシャッター等が全て閉じていて入射が安全に行える状態になったときに ON となる。言い換えれば、この信号が OFF となっている時に入射が行われると大きな事故に繋がる可能性

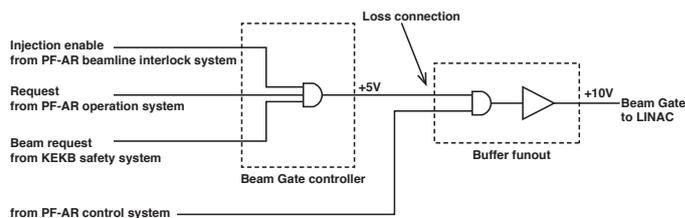


図5：Beam Gate 論理図

があることを意味している。このインターロックは入射器のゲート (Beam Gate) を制御することによって行われていた。しかし、このことが原因でトラブルが発生してしまった。

2000年11月頃、Injection Enable 信号が OFF であったにもかかわらず Beam Gate が Open してしまうというトラブルが発生した。このトラブルは Beam Gate 信号を作り出している Buffer Fanout 入力側の接触不良によるものだった。この Buffer Fanout は入力側が Pull Up されており、入力側を Open にすると (接触不良が起きると) High が入力されたことと同じ動作をしてしまう。入力の接続状態に対してフェールセーフとはなっていなかったのだ。(図5) そもそも、この Beam Gate は計算機から入射を制御するために設けられたもので、入射 Timing システムの一部であった。このシステムに安全系の重要な信号を入れてしまったことが間違いであったのだが、最大の要因は安全に対するグループ間の相違ではないかと想像される。

対策は、PF-AR、KEKB ともに運転中ということもあり Buffer Fanout の入力側にもう一段 Buffer Amplifier を追加しその入力側を Pull Down することにより対処した。

このトラブルは幸いにも KEKB 入射モード中に起きたので重大事故には繋がらなかったのだが、KEKB の入射に影響を与えてしまった。また、トラブルを起こしたモジュールは KEKB の Timing システムと同じラックに組み込まれており、KEKB 運転中に対処することが困難であった。そこで、PF-AR と KEKB を切り分ける意味でもそれら全てのモジュールを PF-AR 専用のラックに移設し、Beam Gate の制御を信頼性の高いものへと変更することにした。

3.2.2 純度確認作業中のインターロック

純度の確認作業は 2.5 GeV 蓄積時に NE-5B ビームラインを使用して行っていた。2.5 GeV というエネルギー状態は入射のエネルギーと同じであり、この時に入射が行われると入射ビームはリングを周回

できてしまう。したがって、この作業中の入射に対するインターロックは万全なものでなければならない。また、全ビームラインに対して Channel Permit を出すことはリスクを増すだけなので NE-5B ビームラインのみ Channel Permit を出せるようにする必要がある。

また、この作業中の加速も危険な行為である。加速によって生じた COD により蓄積ビームがビームラインに飛び出さないとも限らないからである。

3.2.3 インターロック信号の調査と見直し

まず、安全系インターロックシステム全体を把握するために現在使われている信号とその経路について調査を開始した。残されている信号がどのような用途に使用されているのか、その信号の経路がどのようなになっているのか、そのロジックはどうなっているのか等、その調査は広範囲にわたった。しかも、信号によってはその信号を担当する範囲が複数のグループにわたっていて情報が断片的であったり、資料が不十分で信号の経路が特定できなかつたりと、調査はとても困難なものであった。しかし、この調査に長い時間と労力を費やしたからこそ改良後のシステムを明確にすることが出来た。

次にそれらの信号を整理し、より安全で信頼性の高いシステムとなるように担当する各グループと打ち合わせを重ねシステムを構築していった。その打ち合わせでは、各グループ間の信号に対する認識を同じくするために、信号の経路やロジックについて何度も協議し、名前の統一や責任範囲の明確化も行った。

3.2.4 Enable Injection / Acceleration

元は Injection Enable という信号名であったが、加速に関するインターロックが追加されたため、この信号名が変わった。変わったのは信号名と加速条件の追加だけではない。この信号の扱いが Beam Gate という運転に使用する信号の条件としてではなく、Beam Request という放射線安全に係わる信号の条件へと変更されたのだ。この Beam Request 信号は Beam Gate 信号と同じく入射器のゲートを制御しているのだが、放射線安全に係わる信号として定期的に検査している。

しかし、放射線安全に係わる信号であってもゲートの制御だけでは完全に入射を止めたことにはならない。電子銃の高圧まで落として初めて入射が止まったと言えるのだが、入射とユーザー運転を繰り返すたびに電子銃の高圧まで落としてしまうのでは、KEKB や PF の入射に影響を及ぼすかもしれ

ない。そこで、リングのエネルギーが 4.0 GeV 以下では、電子銃の高圧まで落とすが、それ以上では、放射線安全に係わる信号として扱われている Beam Request を落とすだけにした。

この項の最初でも述べたように今回から新たに加速に関するインターロックが追加された。そこで、制御ソフトウェアから送られてくる加減速中を示す信号と偏向電磁石の電流値の変化から加減速状態を判断し、Enable Injection / Acceleration が OFF の時に万が一加速が行われてしまったときには Beam Stopper を入れて Beam をダンプさせるようにした。

3.2.5 純度確認作業時のインターロック

入射に対する信号の扱いが変更され、より安全なものとなった。しかし、2.5 GeV 時にビームシャッター等を開ける純度確認作業中の入射に対するインターロックはより安全なものでなければならない。そこで、この作業中に限り入射器の電子銃の高圧まで落とすようなインターロックを組むことにした。

また、万が一この作業中に加速が行われた場合にはビームシャッターを閉じることにした。

3.2.6 RF Switch の制御

人がリング内に入域するときには Beam が完全にダンプしていなければならない。しかし、Beam Stopper が入っても Beam が完全にダンプしなかったり、Beam Stopper が何らかの原因で入らなかったりすることも考えられる。そこで、人が入域するときには確実に Beam をダンプすることができるように RF Switch を操作して RF 空洞のパワーまで落とすことにした。また、確実に RF Switch が切れたことを確認するために RF Switch のアンサーバック信号をインターロックに加えることにした。

3.2.7 PLC の導入

インターロックの制御には信頼性が高くプログラミングの容易な PLC を用いることにした。この PLC は既に PF-AR ビームラインインターロックシステムに使用されているものと同じ OMRON 製を選んだ。

また、安全とは直接関係のない部分だが Beam Gate の制御も PLC で行うことにした。この部分は 3.2.1 項でも述べたように信頼性の高い制御が必要だからである。

この PLC は PF-AR ビームライン、KEKB の各インターロックシステムや PF-AR コントロールシステムを中継する役目も果たしている。これにより、責任範囲が明確化され、ほとんどのインターロック情報がこの PLC 上で確認できるようになった。

3.2.8 電圧信号に統一

今までは新しいインターロックを導入する度に信号の形式(接点信号、電圧信号等)を決定していた。そのため、信号の形式が混在し複雑なものとなっていた。そこで、今回から安全に関する信号はすべて+24 Vの電圧を送信し、受信側で接点へと変換する方式に変更した。これで、ショートや断線が起きたときにもフェールセーフな動作をするようになる。

3.2.9 アナログ信号の取り込み

今回から新たにリングの運転状態を取り込みインターロックの条件に加えた。取り込む情報は偏向電磁石電源内 DCCT の電流値と、加速器に設置してある DCCT の電流値である。これらの信号は DCCT の電流をアイソレーションアンプで切り分け、同軸ケーブルで PLC まで伝送している。そして、PLC 内部で AD 変換し計算した後、接点情報へと変換しインターロックの条件として使用している。これによって、偏向電磁石の電流値からエネルギー値を計算して加速器のエネルギー状態(ストレージ、加減速)を判断し、加速器に設置された DCCT により Beam Current を知ることができる。

3.2.10 PF-AR インターロックシステム

以上のことを統合し、PF-AR インターロックシステムを構築した。この PF-AR インターロックシステムは KEKB 制御室の側室に設置してあり、状態表示には他の制御ソフトウェアと同様に EPICS を使用している。その情報はネットワークにつながっている端末であればどこからでもリアルタイムに確認できると同時に、ログも取っている。このソフトウェアは PLC に対して情報の読み取りしかできないように設定されているため、ネットワークのトラブルによって PLC の制御が妨害されることはない。

また、重大なインターロックが働いたときにはその状態をラッチするようになっている。安全が確認できたらラックに取り付けてあるリセットキーを回すことで解除することができる。

ここで、新しい安全系インターロックシステム(新インターロックシステム、図6)の概要について説明する。改良前の安全系インターロックシステム(旧インターロックシステム、図7)と比べると PF-AR インターロックシステムが中心となって信号の受け渡しを行っていることがわかる。旧インターロックシステムとの大きな変更点は PF-AR インターロックシステムの追加だが、Beam Stopper の

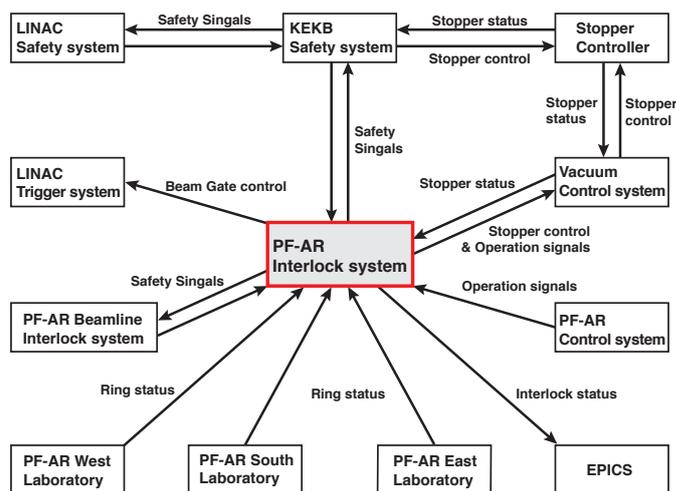


図6: PF-AR 新インターロックシステム概念図

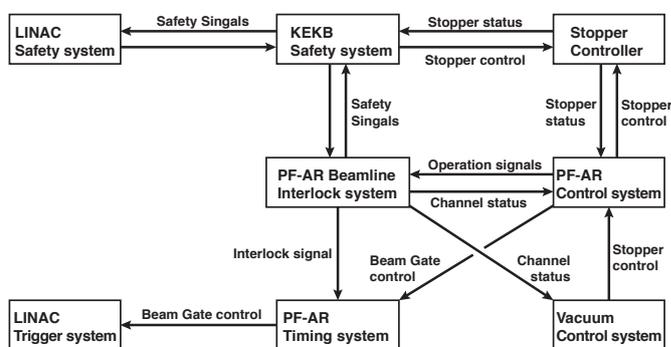


図7: PF-AR 旧インターロックシステム概念図

扱いについても大きく変更された。放射線安全にかかわるインターロックにより Beam Stopper を制御するときは KEKB インターロックシステムより直接 Stopper Controller を制御している。それに対して、加速器の保護や運転のために Beam Stopper を制御するときは、真空グループのコントローラーを介して行っている。実はこのコントローラーにも PLC が用いられており、信頼性が損なわれることはない。それから、この制御は旧インターロックシステムではパルスで行っていたものを、新インターロックシステムでは電圧で行えるように変更されている。また、3.2.7 項でも述べたように Beam Gate の制御もこの PF-AR インターロックシステムが行っている。

3.2.11 PF-AR 電荷制限器の開発と運用

PF-AR において、入射電荷量を監視し、制限する装置を開発し、運用している。^[6]

3.2.12 放射線安全自主検査、総合動作試験、運転開始

動作試験は 2002 年 12 月 17 日に行われた。その時にいくつかのバグが発見されたが、それらは放射線安

全自主検査までに対処することができた。

放射線安全自主検査は12月26日～12月28日(12月27日は総合動作試験)と2003年1月4日に行われた。この検査(試験)ではまた別の問題が発生してしまった。新インターロックシステムには加速器の運転状態が新しく条件として加えられていたため、検査(試験)時にはほとんどのハードウェアやソフトウェアが動作していることが必要であった。また、PF、LINACやKEKBのインターロックシステムと係わりを持って動作しているため、それらのグループの協力も必要であった。しかし、検査(試験)がPF-ARの運転再開前で、かつ、PF、LINACやKEKBのシャットダウン中に行われたため、まだ立ち上がっていないハードウェアやソフトウェアが多数存在していたり、PF、LINACやKEKBへの協力要請が徹底されていなかったりしたために、検査(試験)以外の部分で多くの時間を費やしてしまった。今後、検査(試験)を行う際にはそれらの方法について十分検討してから行うようにしなければならないことが認識された。

改良前と見かけ上はほとんど同じなのだが、システム全体が新しくなっていることから、しばしばその動作に惑わされることがあった。しかし、それもすぐに解消され、現在は混乱もなく順調に動作している。また、EPICSの導入によりインターロック情報を簡単に確認することができ、管理がしやすくなった。

3.2.13 更新結果

安全系インターロックシステムの改造は概ね順調に進んだ。しかし、期間の不足等によりいくつかの課題が残ってしまった。

この時点では、Beam Gate信号の出力にトラブルを起こしたBuffer Fanoutを使用していた。このBuffer Fanoutを使用した理由は、Beam Gate信号を受けているLINAC側のモジュールがKEKBと共通化されており変更が不可能であったため、そのモジュールとの相性を優先し、また、運転再開時の混乱を避けることにあった。そのBuffer Fanoutはフェールセーフ対策を施し安全系から切り離したとはいえ安心はできないことから、後に試験を行い、定電圧電源に置き換えた。

また、インターロックに使用している信号線のうちの何本かがKEKBと共有のラックを經由している。安全系インターロックにそれらの信号線を使用するのは好ましくない。そこで、その後時間をかけてそれらの配線経路を見直し、少しずつ引き直しを行った。

今回の改良は運転再開に間に合わせる事が優先されていたために、資料がまだ十分に整っていなかったが、この資料不足により今後の維持管理に支障が出るのは明らかであったため、この後、資料整理を行った。

4. コンパクト ERL (cERL) とその安全システムの開発

cERLは、蓄積型の加速器とは違い、電子銃で発生した品質の高い電子をそのまま輸送し、加速して様々な実験に利用する。その電子は、その後、加速に使った空洞により減速され、ビームダンプへと捨てられるため、蓄積型の加速器の様な共鳴現象がほとんど起きない。

cERLは放射光源加速器ではないが、安全システムの開発に携わることが出来たので、簡単に紹介する。

4.1 安全システム

この加速器は、実証機であるため、装置や加速器全体の性能によりビームパワーや運転形態等、不確定な部分が多い。そのために、加速器の状態をみながら、徐々にビームパワーを上げ、その都度放射線変更申請を行うことになる。しかし、その度に、安全システムを変更していたのでは、信頼性を保つと言う点で大変な努力が必要となる。そこで、安全システムとしては、放射線変更申請に関わる、人を守る安全システム(Personal Protection System, PPS)やビームパワーを制限するシステムと、装置を守り運転形態を制御するシステム(Machine Mode System, MMS)、に分離することとした。

4.2 PPS

主に、加速器室への入退域や非常停止を制御する。まず、加速器室への入退域は、KEKBやPF-ARの入退域システムを参考に、Free, Limit, Keep Outの3つのモードを採用した。(図8)次に、論理図を作成した。(図9)実際のシステムは、これらのものに従い、より安全を担保するように構築した。^{[7][8]}

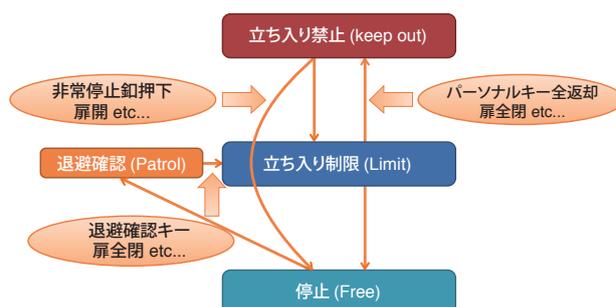


図8：cERL 運転状態遷移図

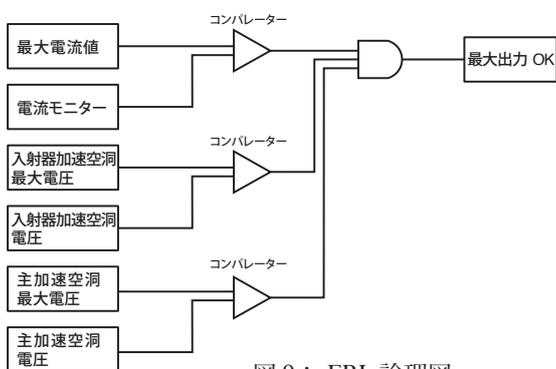
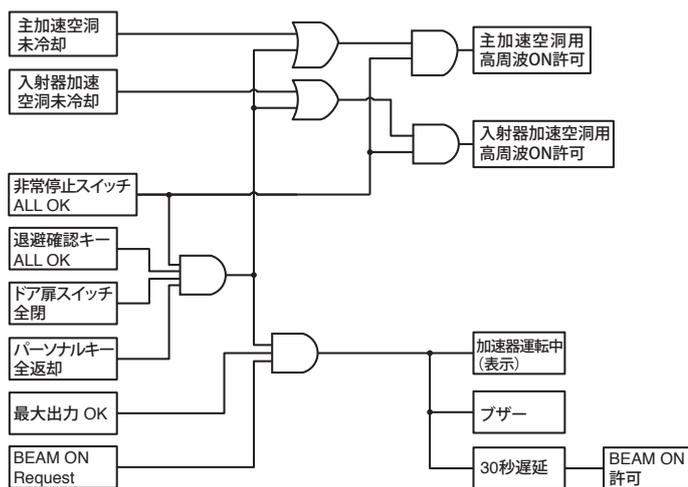


図9 : cERL 論理図

4.3 最大出力制限器

ビームパワーが、放射線申請書の内容を越えない様に運転することを保証するため、最大電荷制限器を導入した。

電流値は、電子銃電源の電流モニター値を使用した。これは、ビーム電流を安定して測定するためには、スタディを重ねていかないといけないため、現時点で、一番確実なモニターとして電子銃電源の電流モニター値を選んだ。

エネルギーは、加速空洞の加速電圧 (Vc) の和とした。これは、エネルギーが低いため、ビームの速度が光速ではないことや、超伝導加速空洞の位相差により、エネルギーが容易に変えられてしまうため、光速の電子が最大限に加速されたことを想定し、より安全になる様に配慮した。

本来は、ビームパワーで制限するため、電流値とビームの運動エネルギーの積で行うのだが、電子銃電源の電流値と入射器超伝導空洞の加速電圧、主超伝導空洞の加速電圧を別々に監視し、いずれかが超えた場合には、電子銃電源の高圧を落とす様にした。これは、論理を複雑にすることを避けるための配慮である。

これらの判断は、独立した1台のPLC上で行い、PPSやMMSに対しては、最大出力OKの信号をハードワイヤーで送るのみとした。アナログ値等の詳細な情報は、全てEPICS上に流し、システムの簡易化に努めた。このPLCには、PPSやMMSと同じ横河製PLCを採用した。判断はシーケンスCPUで行い、EPICSとのやり取りはF3RP61で行うことによって機能を分離し、信頼性を高めている。

4.4 放射線変更申請施設検査

発表時には、cERLの周回部が建設中であったが、その後の、2014年2月21日に放射線施設検査を受け、2月23日に合格となった。

5. まとめ

放射光源加速器と言っても、建設された時期やアップグレードされた時期、それらの性能によって、安全に対する対応は様々である。それらの様々な性格に合わせた安全システムを検討することによって、安定した運用を続けることが出来ている。

参考文献

- [1] N. Kanaya, *et al.*, “Control and Interlock System for Synchrotron Radiation Beam Lines at the Photon Factory”, KEK Internal 91-9, Feb., 1992.
- [2] T. Kasuga, *et al.*, “PF-AR Upgrading Project”, 放射光, 第15巻第6号, 2002.
- [3] <http://wiki-ext.aps.anl.gov/epics>
- [4] S. Nagahashi, *et al.*, “PFリング安全系インターロック情報表示システムの更新”, 第24回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集, Tsukuba, Jan. 7-10, 2011.
- [5] I. Tanimoto, *et al.*, “PFリング直線部増強ーリング改造と立ち上げ状況”, 放射光, Vol.19 No.4, 2006.
- [6] S. Nagahashi, *et al.*, “PF-ARのビーム電荷量制限装置”, Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Nov. 11-13, 2003.
- [7] K. Nigorikawa, *et al.*, “cERL安全管理システム”, 技術研究会報告集, Matsuyama, Mar. 7-8, 2013.
- [8] K. Nigorikawa, *et al.*, “cERL安全管理システム - その2”, 技術研究会報告集, Inuyama, Mar. 13-14, 2014.

KEK 高圧ガス施設の安全に対する対応

小島 裕二

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

Abstract

高エネルギー加速器研究機構には高圧ガス保安法の一般高圧ガス保安規則に準じた一般高圧ガス製造施設が5か所あり、高圧ガス製造事業所として県の認可を得ている。平成9年に子圧ガス取締法から高圧ガス保安法に変わり自主保安的な要素が加わり、事業所として安全に関する自主管理が求められてきている。幸い長年大きな事故（人身事故）は発生していないが、機構内の高圧ガス製造施設は設置後30年以上の製造施設も多く、一般職員の高圧ガス設備の認知度も低くなりつつある。そこで、現状の高圧施設における安全管理体制や安全に対する取り組み方について情報を共有し、安全意識を高めることが重要である。

1. 高圧ガス保安法の概要

高圧ガス保安法とは「高圧ガスによる災害を防止するため、高圧ガスの製造、貯蔵、販売、輸入、移動、消費、廃棄等を規制するとともに、民間事業者及び高圧ガス保安協会による高圧ガスに関する自主的な活動を促進し、公共の安全を確保することを目的とする。」としている。昭和26年6月7日に高圧ガス取締法として公布されていたが、平成9年に現在の高圧ガス保安法と改称され、内容も自主保安管理性が加えられた。ただし、依然として所管が経済産業省で、実質地方自治体（県）が許認可権を持っている。従って、高圧ガス<高圧ガスの定義参照>を製造する場合、県の許可や届出が必要となり、県の指導によって行われている。

現在、高圧ガス保安法には、下記<5種類の保安規則>がある。KEKでは一般高圧ガス製造設備と冷凍設備の許可申請を行って高圧ガスの製造及び冷凍を行っている。

<5種類の保安規則>

- 1) 一般高圧ガス保安規則 ➡ 5施設
(主に液化ヘリウムの製造施設、液化窒素槽)
- 2) 液化石油ガス保安規則
- 3) コンビナート等保安規則
- 4) 冷凍保安規則 ➡ 4施設
(主に冷凍設備+空調設備)
- 5) 容器保安規則

<高圧ガスの定義>

- 1) 圧縮ガス⇒ 常用の温度で圧力が1MPa（メ

ガパスカル）以上になるもので、現に1MPa以上のもの。35°Cで1MPa以上となるもの。常用の温度で圧力と体積の積が4MPa・ℓを超えるもの。

- 2) 圧縮アセチレンガス⇒ 常用の温度で圧力が0.2MPa以上になるもので、現に0.2MPa以上のもの。15°Cで0.2MPa以上となるもの。
- 3) 液化ガス⇒ 常用の温度で圧力が0.2MPa以上になるもので、現に0.2MPa以上のもの。0.2MPaとなる場合の温度が35°C以下であるもの。
- 4) その他の液化ガス⇒ 液化シアン化水素、液化ブロムメチル、液化酸化エチレン

2. KEKの高圧ガス施設及び組織図

図1に一般高圧ガス保安規則に関係する5施設、図2に冷凍保安規則に関係する4施設の保安管理組織図を示す。この表も実は県に危害予防規定という書面を届け済みで、その内容は、高圧ガス製造施設の安全な運営に関する製造の方法、保安教育、緊急時の対応、組織の変更等々が規定されている。従って内容の変更は速やかに届ける義務がある。今回は主に一般高圧ガスについて報告する。

図1で保安統括者（機構長）は高圧ガスの資格（免状）取得の義務はない。しかし、高圧ガスの製造にかかる保安の最高責任者として保安技術管理者、主任保安係員及び保安係員の業務を統括管理する。保安統括者以外は高圧ガスの免状を取得していなければならない。従って、有資格者は保安統括者を補佐し高圧ガスの安全に関する技術管理、保安管理等を

* yuuji.kojima@kek.jp

行っていかなければならない。図1の設備責任者会議は保安技術管理者と各施設（5施設）の責任者が集まり、各施設の現状報告や問題提起を行い、KEK全体の安全に関する共通認識、情報の共有化を促進している。また、KEKでは24時間を3シフトに分けて数か月の連続冷却運転を行う場合もあり、協力会社の業務委託員は長年にわたり設備の運転保守管理に従事しているので、安全管理にも欠かすことのできない存在である。そこで、加速器施設冷凍機（正

式名：液化ヘリウム等製造施設－KEKB）は保安係員を24名中5名、低温工学センターでは9名中2名の業務委託員を登録している。

<参考> 一般高圧ガス製造事業所の保安係員に必要な資格免状

甲種化学、甲種機械、乙種化学、乙種機械、丙種化学（特別試験科目）

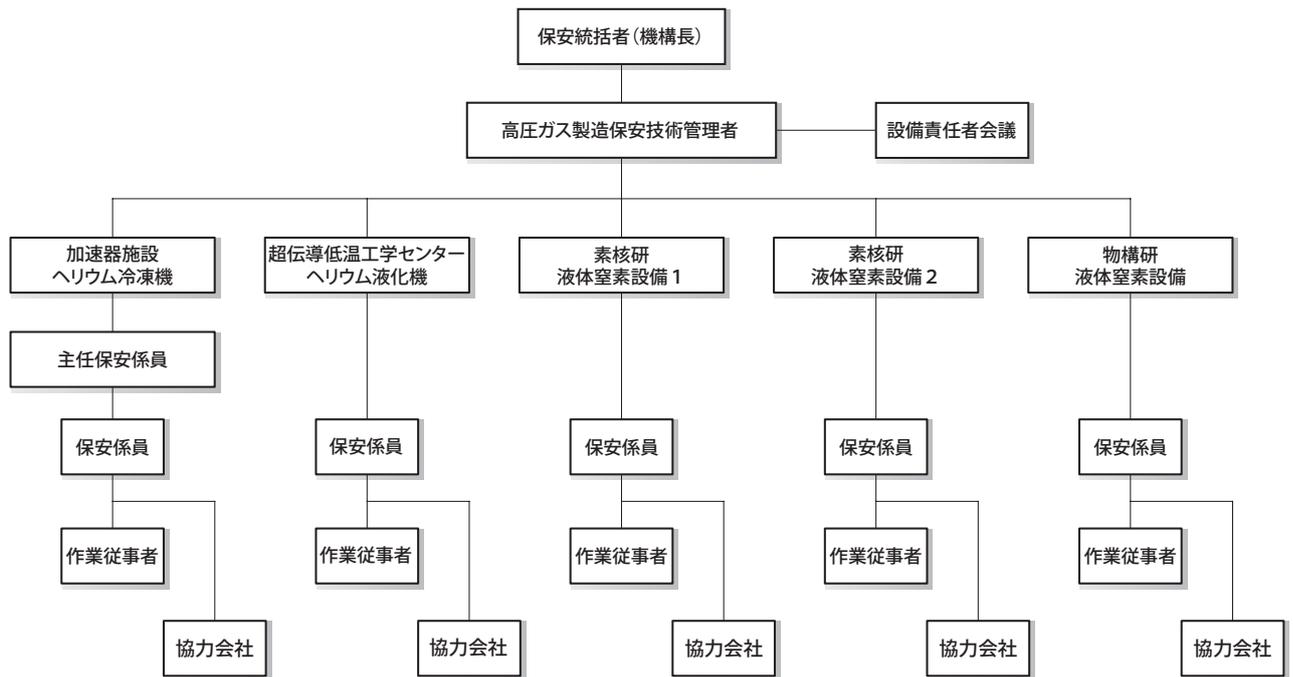


図1：一般高圧ガス保安管理組織

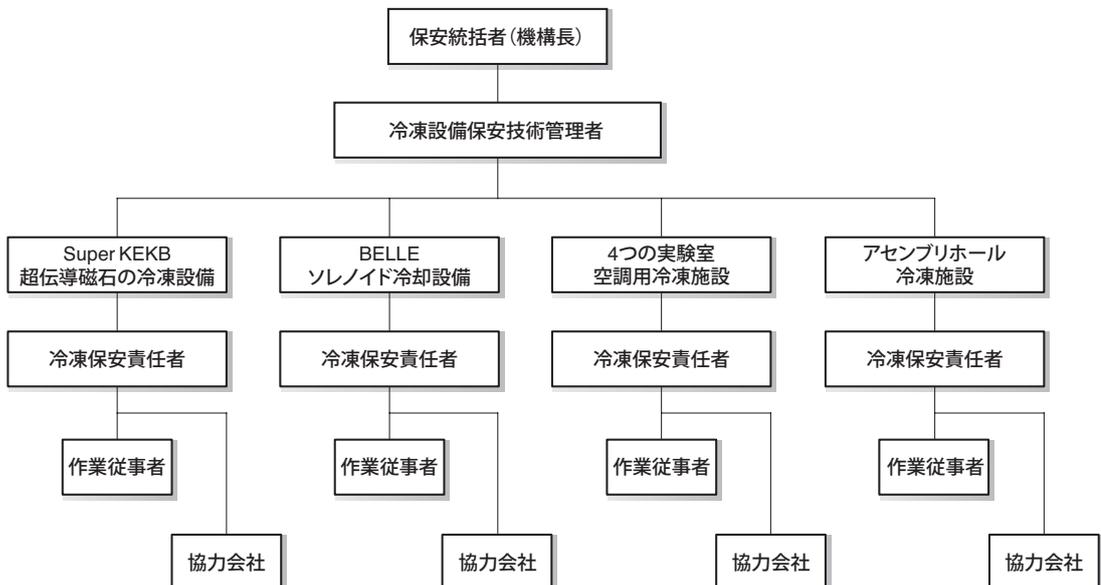


図2：冷凍設備保安管理組織

3. 保安係員の職務及び安全に対する対応

保安係員は高圧ガス保安法及び危害予防規定では高圧ガス製造保安責任者と言われ、主に高圧ガス製造施設の運転保守を行うため、高圧ガス保安法に従って同責任者免状を取得した者を選任することとなっている。その保安係員の職務内容を下記に示す。

- 1) 高圧ガス施設等の運転、保守、安全の管理、監督及び記録（日常点検簿、運転日誌、保安管理記録、緊急処置規定等々）
- 2) 同施設の製造工程等の変更、増設、移設、新設にかかる申請書等の作成及びその完成検査の受検（申請書：機器一覧表、フロー図、強度計算書、材料証明書、その他）
- 3) 毎年、高圧ガス保安検査を県庁立会いのもと実施する。（審査内容：機器の肉厚検査、圧力計、温度計、安全弁作動検査、気密検査等々）
- 4) 当該高圧ガス施設の関係者に保安教育訓練を実施する

上記職務に従い平成24年度に行った活動を表1に示す。6月、11月に行っている学園地区ガス部会は、つくば地区の高圧ガス製造事業所間の情報交換、安全教育の参加、見学等を行っている。毎年8月の一般高圧ガス保安検査は県の担当者が主に上記1)～4)の項目について書類審査及び現場検査を実施する。この時に不備な点があった場合に

は改善報告書を提出し、合格証が発行されるまで高圧ガスの製造は行えなくなる。近年はそのような指摘を受けたこともなく、毎年11月の功労者表彰にはほぼ毎年KEKの保安係員も受賞している。さらに、平成18年茨城県商工労働部長賞につづき平成22年には茨城県知事賞を受賞し優良高圧ガス製造事業所として表彰された実績もある。

その他の安全に関する活動としては表2の様な高圧ガスだけではない地震（震度4以上）、停電後の見回りや、毎日のヒヤリハット活動も行われている。

表1：平成24年度安全活動

平成24年度	安全活動内容
平成24年 4月	
5月	
6月	学園地区ガス部会
7月	高圧ガス保安教育 ^{*1} （関係職員・ユーザー・関連会社が対象） 各施設の定期自主検査及び保安検査事前検査
8月	一般高圧ガス保安検査（主要4施設が対象）
9月	安全業務連絡会（協力会社対象の安全教育）
10月	茨城県主催の高圧ガス保安講習会（1～2回/年）
11月	学園地区ガス部会主催 保安講習会 学園地区ガス部会主催 施設見学会 茨城県高圧ガス保安功労者等表彰 ^{*2}
12月	
平成25年 1月	
2月	各施設の定期自主検査
3月	高圧ガス専門部会（年1回以上）
※	高圧ガス設備責任者会議は毎月1回行われる。
※1	各施設が行う保安教育は別に年1回行われる。
※2	優良高圧ガス製造事業所（H22年茨城県知事賞受賞）

表2：その他の安全活動

◎ 地震対策：震度4以上の地震が発生した時	➡ 担当施設の見回り
◎ 停電対策：停電が発生した時	➡ 担当施設の見回り
◎ 業務委託（協力会社）の活動	➡ ヒヤリハット（危険予知活動） 平日毎朝（ヒヤリハットの資料とする。）

4. 事故例（故障例）

KEKの高圧ガス設備は昭和49年（1974）に届けられ、以来高圧ガス関連では大きな事故（人身事故）も無かったが、近年設備の老朽化の影響もあり2件のヘリウム漏えい事故（故障）が見つかり高圧ガスと直接関係のない部分ではあるが、真空断熱機器の真空劣化や計測器（圧力、温度計）の精度不良も目立ってきた。これらの故障は毎年の保安検査及び年2回の自主検査時に調整、修理、交換を行ってきた。今回、事故例としてヘリウム配管の漏れ事故を紹介する。

保守管理記録より

年月日：平成21年8月24日

施設名：液化ヘリウム等製造施設－KEK

故障箇所：ヘリウム液化機中圧配管

（常用圧力：1.83MPa）〈図3〉



図3：漏えい箇所

経過：

1. 気密検査時に中圧ラインの配管（125A）に漏えい発見。〈図4：石鹼水の発砲試験〉
2. 漏えい箇所を非破壊検査PT（浸透探傷試験）にて漏えい個所に割れを確認。〈図5〉
3. 欠陥部の溶接補修を実施し再度非破壊検査及び耐圧気密試験〈図6〉を実施し漏えいのないことを確認。
4. 原因は振動と経年劣化
5. 県庁に改善報告書を提出。

上記が漏えい発見から事後処理の経過で県庁に報告して製造許可が約1週間後届き製造を再開している。

この期間は液化機の運転が約2週間行えなかったが、夏の検査期間中であり特に実験計画に影響は無かった。ただし、今後同様の故障が起こる可能性もあり、年二回の自主検査時には同様の条件の配管や機器部分を入念に検査していくこととなった。（その後同様の漏えい故障は発生していない。）

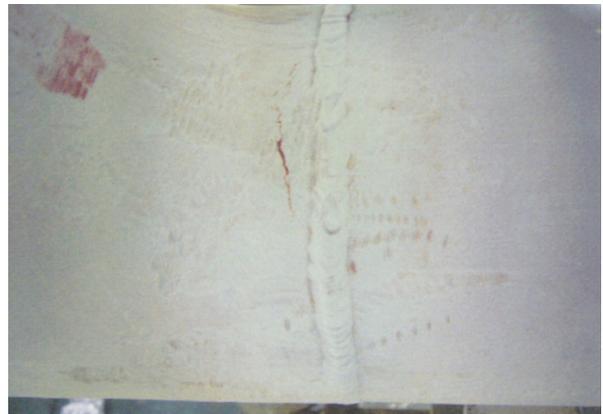


図5：浸透探傷検査



図4：発砲試験

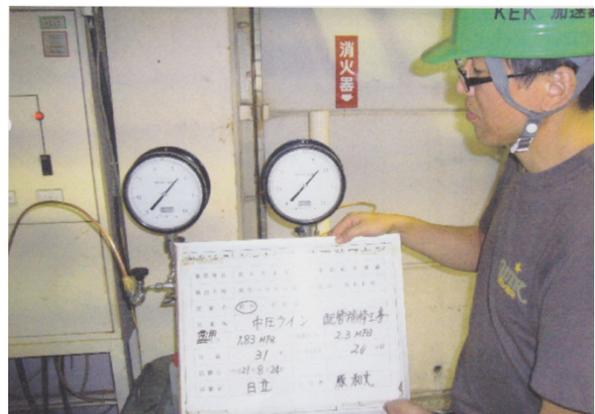


図6：耐圧気密試験

5. まとめ

表3にKEKB関係施設の高圧ガス製造に関する事故件数を示す。この表中で前述の様な故障は事故件数に入れていない。その理由として表3の<事故の定義>では、不活性ガスで気密検査中の少量の漏れは除外されている。従って、KEKの一般高圧ガス製造事業所は1974年に、液化ヘリウム製造施設 - KEKB関係施設は1986年に製造許可を受けてから現在まで、無事故で優良高圧ガス製造事業所として運営されてきた。この功績は業務委託、協力会社の皆様の協力が不可欠であり、今後も老朽化（経年劣化）に注意しながら、この実績を積重ねていきたいと考えている。

おねがい

高圧ガス容器（ボンベ）の使用、購入や圧縮機、ポンプ、貯槽等が付属した装置を新たに購入する際には必ずあらかじめ安全衛生室もしくは使用施設の責任者に相談してください。意外なものが高圧ガス保安法の規制対象となる場合があります。また、同一建屋内の高圧ガスの貯蔵量にも制限数量が決められており、不活性ガスの場合でも300Nm³（ボンベ42本）を超えると届け出が必要になりますので注意してください。

表3：事故件数及び事故の定義

KEKB関係施設

人身事故（高圧ガス一般）：0件

高圧ガス製造に関する事故：0件（近年ヘリウム漏えい故障：2件）

<事故の定義>

- 1) 高圧ガスの製造中に発生した事故等で、高圧法の法令違反があり、その結果として、災害が発生した場合にも高圧ガスが存する部分の事故に限らず「高圧ガスに係る事故等」として取り扱う。
- 2) 高圧ガス設備等が爆発、火災、噴出、漏えいしたものをいう。
- 3) 喪失・盗難（高圧ガス又は高圧ガス容器の喪失又は盗難をいう。以下同じ。）
- 4) 高圧ガスの製造のための施設、貯蔵所、販売のための施設、特定高圧ガスの消費のための施設又は高圧ガスを充てんした容器が危険な状態となったとき

ただし、以下のいずれかの場合は除く。（事故として扱わない）

- 1) 噴出・漏えいしたガスが**毒性ガス又は可燃性ガス（液化石油ガス及び天然ガスを除く。）以外のガス**であって、噴出・漏えいの部位が**締結部**（フランジ式継手、ねじ込み式継手、フレア式継手又はホース継手）又は開閉部（バルブ又はコック）であり、**噴出・漏えいの程度が微量**（石けん水等を塗布した場合、気泡が発生する程度）であって、かつ、**人的被害のない場合**
 - 2) 完成検査、保安検査若しくは定期自主検査における耐圧試験時又は気密試験時の少量の噴出・漏えいであって、かつ、**人的被害のない場合。**
-
-

J-PARC MLF の PPS インタロック機器

小林 庸男^A、河村 成肇^A、下村 浩一郎^A、三宅 康博^A、鳥居 周輝^A、
髭本 亘^B、酒井 健二^B、中谷 健^B、春日井 好己^B

^A 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

^B 日本原子力研究開発機構

Abstract

J-PARC の物質・生命科学実験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility、以下 MLF) では、陽子ビームを水銀ターゲットまたは黒鉛ターゲットに照射させることによって、中性子やミュオンなどの二次粒子を発生させ様々な物性実験を行っている。

各実験装置を運用する上で、実験を行う職員や外部ユーザーの安全を確保する為には、実験装置にて、PPS(Personnel Protection System) や MPS(Machine Protection System) を適切に運用することが求められる。

現在、J-PARC の MLF に設置されている中性子ビームラインおよびミュオンエリアにおける実験装置に対して PPS が構築され、運用中である。

1. MLF 実験施設の概略

図 1 に J-PARC 各施設の配置を示す。

J-PARC の MLF では、3 GeV 陽子加速器リングから取り出された大強度陽子ビームを用いて、中性子やミュオンなどのパルス状の二次粒子を生成して

様々な物性・素粒子実験を展開している。

3 GeV シンクロトロンから取り出された陽子ビームは、3NBT 陽子輸送ビームラインを経て MLF まで輸送される。



図 1 : J-PARC の各施設の配置

* yasuo.kobayashi@kek.jp

MLFには二種類の二次粒子生成用の標的が設置されており、陽子ビームはMLFの上流側（3 GeV陽子加速器側）で、ミュオン生成用の黒鉛標的に照

射され、それを透過した陽子ビームは下流側にて、中性子生成用の水銀標的に照射される。

図2にMLFの施設の概略を示す。

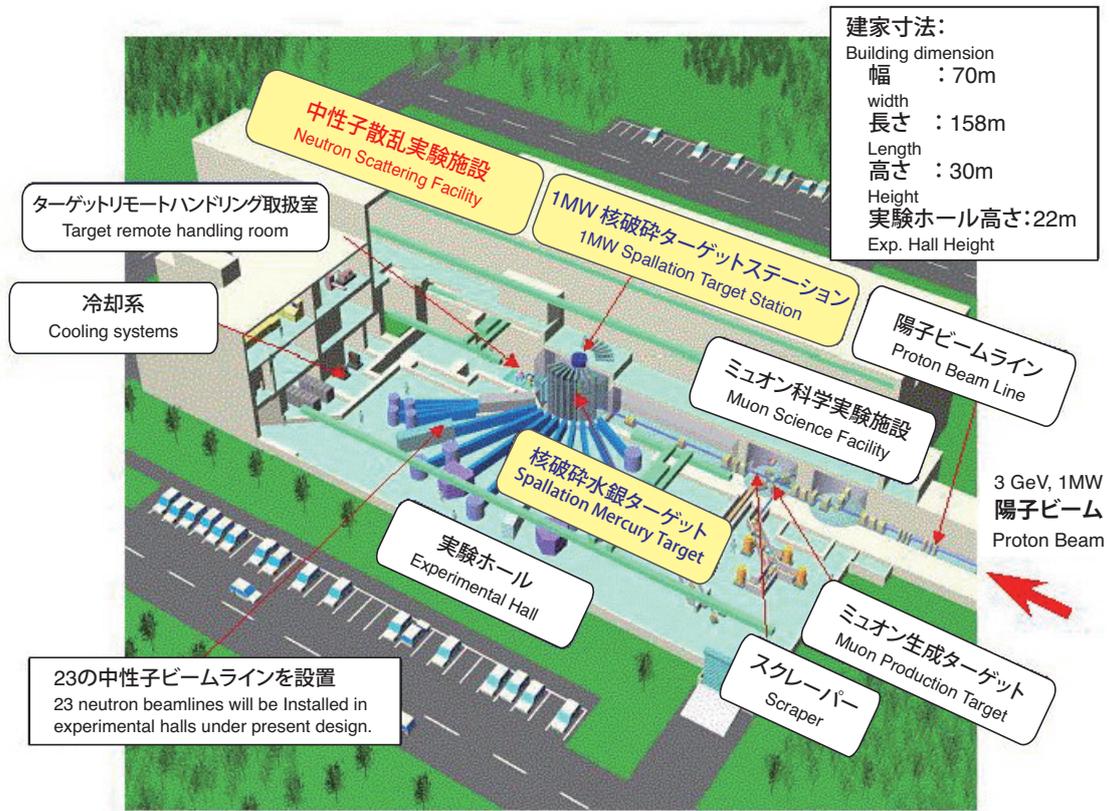


図2：MLFの施設の概略

各標的から取り出された二次粒子は、それぞれの実験施設に向けてビームタクトを介して分配、輸送される。MLFでは最大で中性子ビームラインを23本、ミュオンビームラインを4本設置することが可

能である。

図3にミュオンビームラインの配置を、図4に中性子ビームラインの配置を示す。

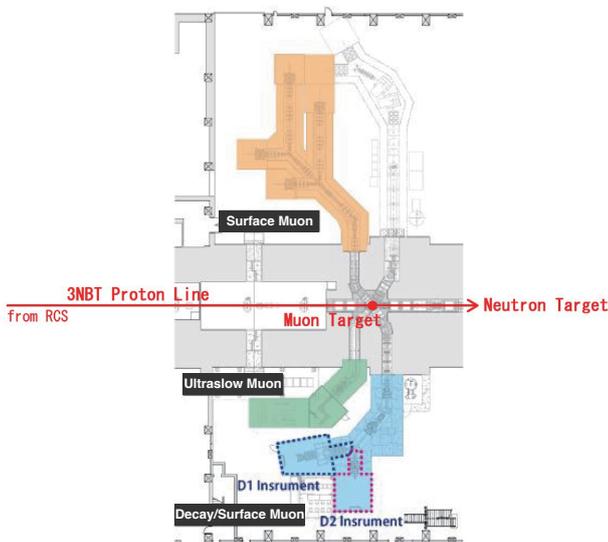


図3：ミュオンビームライン

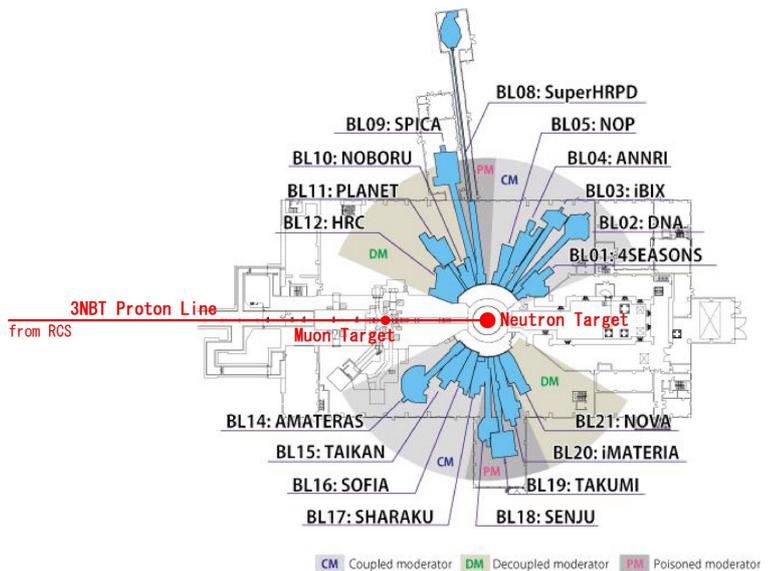


図4：中性子ビームライン

2. インタロックの区分

MLFでは、それぞれの目的に応じて、安全用インタロックを区分している。以下のその区分を示す。

- **PPS (Personnel Protection System)**

MLFの実験者や作業員自身の保護を目的としたインタロックシステムであり、主に作業員の放射線防護を目的とする。放射線発生部への作業員への入退域を管理し入域中にはビーム照射を停止させるシステムである。

- **MPS (Machine Protection System)**

実験装置そのものを保護するためのインタロックシステムである。

一例として、電源保護のための過電流検出や過電圧検出、電磁石の焼損保護のための加熱検出や冷却水流量検出などがある。本報告では詳しく述べない。

- **TPS (Target Protection System)**

中性子発生用の水銀標的を防護するためのインタロックシステムである。本報告では詳しく述べない。

なお、ミュオン発生用の黒鉛標的の防護のためのインタロックはMPSに分類される。

3. PPS について

3.1 基本思想

MLFの実験装置では、二次粒子ビームが各実験装置に導かれるまでの間、あるいは実験装置内部で試料に二次粒子が照射され散乱などが起きた時などに γ 線などが発生する。このような γ 線や二次粒子ビーム自身から、作業員を防護する為、大半の実験装置はビームラインや実験装置本体の周囲を鉄やコンクリート製の遮蔽体で覆っている。一方で実験者は試料そのものを入れ替えたり試料の周囲環境を変更したりする為、試料のすぐ近くで作業を行う。

作業員の放射線防護を行うPPSシステムには、二次粒子ビーム照射中は実験装置があるエリアに入域できないようにし、実験エリアに入域する際には二次粒子ビーム照射を停止する機構が必要になる。

各実験装置のPPSには、ビーム照射中の実験エリアへの作業員立ち入りを禁止するために、実験エリアへの入口部に電気錠施錠が可能な扉が設けられ、ビーム照射中はこの扉を施錠し、立ち入り禁止を実現する。また、各ビームラインの上には可動式のビームを遮断する構造物(ビームシャッター、ビームブロッカー)が設置され、作業員が実験エリアに立ち入る際は、この構造物をビームラインの上に移動して二次粒子ビーム照射がされない仕様となっている。

3.2 設置されている機器

各実験装置のPPSとして以下のような機器が設置される。

- 電気錠扉
前述の通り、実験エリアに入域する為の区域分け用の扉であり、電気錠制御される。
- 扉操作器
電気錠扉の施錠を操作するための操作器である。
- シャッター操作盤、ブロッカー操作盤
前述のビームシャッターやビームブロッカーを操作する為の、操作盤である。
- 退避確認ボタン (SEARCH BUTTON)
作業員の入退域を管理するためのボタンである。実験エリアで作業が終了し作業員が全員退出する際、作業員の退避を確認する者が、全員の退出を確認した時に押すボタンであり、このボタンを押す操作を行わない限り、ビームシャッターまたはビームブロッカーを開けることができない。
- ハッチ錠 (ハッチがある場合)
入退域扉から持ち込みが不可能な大型機器を実験エリア内に持ち込む際に、遮蔽体にはハッチが設置されている場合がある。このハッチの開閉管理を行うために使用されるものである。

この他に、各実験装置の独自判断で放射線線量モニタなどを設置する場合もある。

図5にPPS機器の一例を挙げる。

(a) 非常停止ボタン (Panic ボタン)



(b) シャッター (ブロッカー) 操作盤



(c) 扉操作器



図 5 : PPS 機器の例

4. 中性子実験装置の PPS

4.1 中性子実験装置の PPS 機器の基本構成

図 6 に中性子実験装置の PPS 機器配置の一例 (BL08) を、図 7 に中性子ビームラインの PPS 機器の接続および関連系統図を示す。

実験設備に作業者が立ち入ろうとする場合、電気錠扉から分光器室遮蔽体内部に入域する。これらの扉やハッチを開閉する際には、シャッター操作盤に設置されているサブキーをシャッター操作盤から引き抜いて、扉の解錠、開閉を行うことが基本となる。

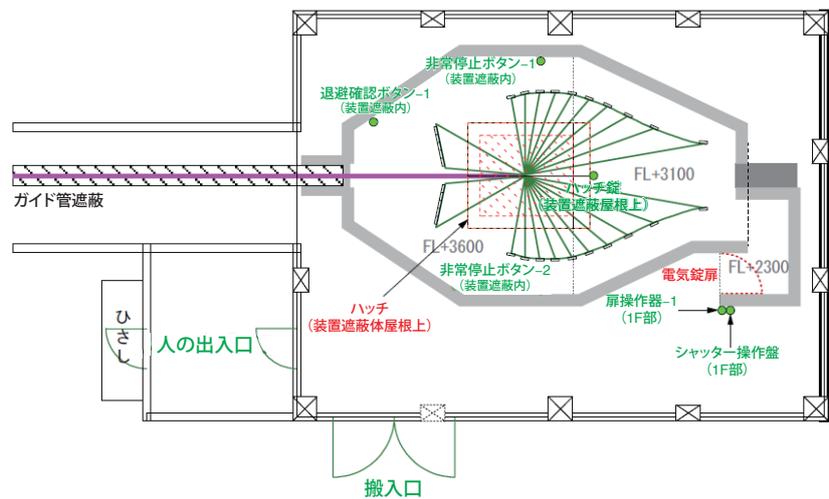


図 6 : 中性子実験装置の PPS 機器配置の一例 (BL8)

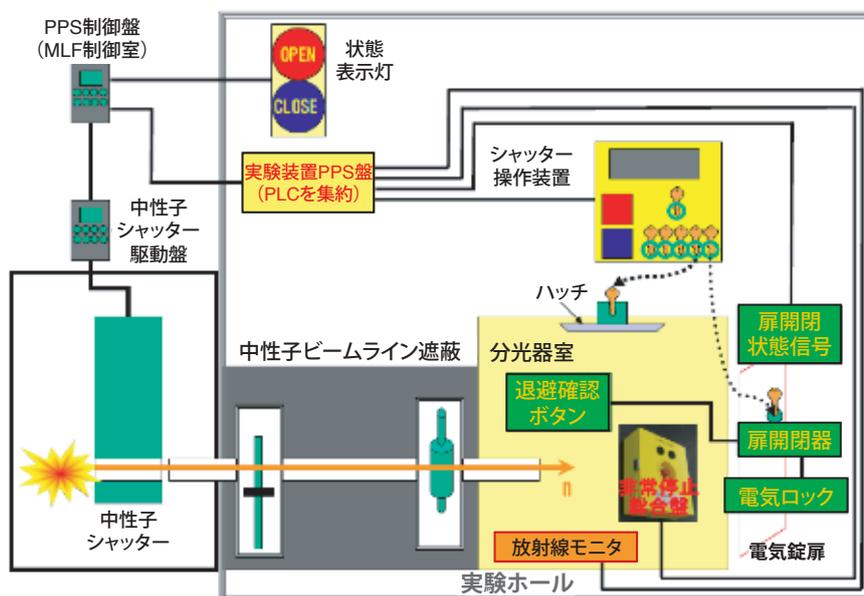


図 7 : 中性子ビームラインと実験装置の PPS 機器の関連

4.2 PPS 機器の運用

図8に、実験中に中性子を一旦止め、遮蔽体内部に入域し、作業終了後、退出して再び中性子を出すことを想定した状態変遷図を示す。

最初に、

- ①「中性子シャッターが開いており試料に中性子が照射」
この状態を想定する。シャッターを閉めると、
- ②「中性子シャッターが全閉状態であり中性子が停止」
の状態に移行する。この後中性子シャッター操作盤に収容されている扉操作器キー（サブキー）を抜く。キーを抜いたことで次の状態に移行する。
- ③「電気錠扉およびハッチ開可能」

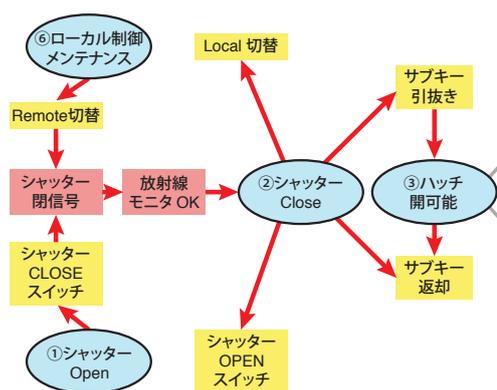
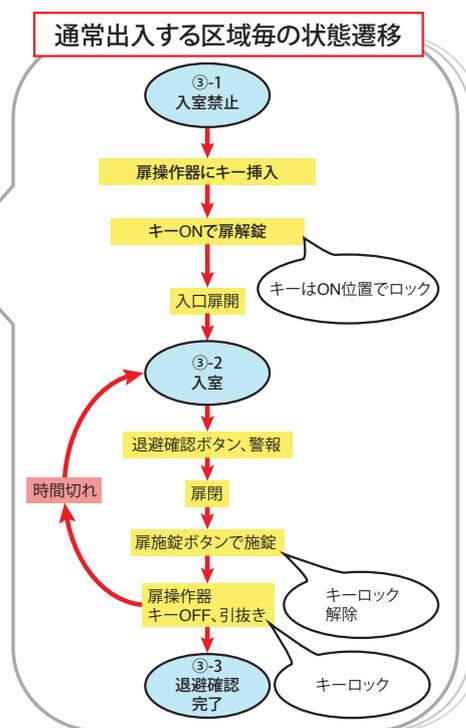


図8：遮蔽体内部に入域する場合の状態変遷図

状態③は、以下の3つの条件(図8右)に沿って推移する。

- ③-1 入室禁止
シャッター操作盤から抜いた扉操作キーを使用して扉操作器で電気錠扉を開ける。
- ③-2 入室
高放射線領域に入室して、作業を行う。
作業が終了したら、退避確認ボタンを押す。
一定時間内（退避確認ボタンのブザーが鳴動している間）に電気錠を閉める。
扉操作器で電気錠扉を施錠し、扉操作キーを扉操作器から引き抜く。
- ③-3 退避確認完了
扉操作キーをシャッター制御盤に戻すことで、状態②に戻る。
シャッター操作盤で中性子シャッターを開け、状態①に戻る。



4.3 ハッチ錠

高放射線場に何らかの大きな器材を持ち込んだりする場合に備えて、遮蔽体にはハッチ錠が設置されていることが多い。このハッチも中性子シャッターに同期した施錠管理は必要であるが、ハッチは遮蔽体の一部が可動部になっている場合が多く、基本的に遮蔽体と同じ素材、同じ質量を持っていることになる。

一般の扉用電気錠は、ハッチのような重量物を扱うのに適していないので、ハッチ錠としてシリンダ一式の機械的な錠を使用する。

図9に、ハッチ錠の例を示す。



図9：ハッチ錠の例

7. PPS 機器について

PPS の基本的な考え方として、

- ① 入域用のドアに電気錠を設置し、ビーム照射中は施錠する。
- ② 入域時はビームライン上にビームを遮断する構造物（中性子シャッター、ミュオンブロッカー）を挿入して、ビームを遮蔽する。

このシステムは、元々 KEK において構築され、J-PARC に受け継がれたものである。作業者の防護という観点から、このようなロジックは普遍的なものと言える。

参考文献

- [1] T. Kai, *et al.*, “Users’ beam interlock system at the Materials and Life Science Experimental Facility of J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A **600** (2009) 176.
- [2] W. Higemoto *et al.*, “J-PARC Muon Control System”, Nucl. Instr. Meth. A **600** (2009) 179-181.
- [3] K. Sakai *et al.*, “Design, Construction and Operation of General Control System of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF-GCS) in J-PARC”, JAEA-Tech 2009-042 (2009).
- [4] K. Sakai *et al.*, “Development status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC”, Physica B **385-386** (2006) 1324-1326.
- [5] K. Sakai *et al.*, “Construction status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A **600** (2009) 75-77.

KEKにおける放射線測定と管理

穂積 憲一

高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設 放射線科学センター

1. はじめに

東電福島原発事故以来、放射線に対する関心が高まるなか、あらためてKEKにおける放射線の測定及び安全管理について述べる。

内容は大きく分けて、

- 1) 被ばく管理
 - 2) 放射線線量率（中性子線、X / γ 線）、放射性物質（排気、排水等）の測定
 - 3) 放射化した物品の管理・測定
- 等に分けられるが、ここでは特に放射線連続監視システム (NORM: Network Of Radiation Monitors) を中心に述べる。又放射線以外の関連する測定についても簡単に説明する。

2. 測定する放射線の種類

高エネルギー加速器では、加速された粒子と加速器構成物質との相互作用により、様々な放射性物質が生成される。これらの殆どは加速器の遮蔽体等に阻まれるが、一部のX線/ γ 線及び中性子線が加速器外に出てくる。また加速器内の空気や加速器電磁石用冷却水には β 線や γ 線を出す放射性物質が含まれるため、それぞれ排気設備・排水設備を通して測定後外部に放出される。

一方、非放射性同位元素を扱う施設では許可された放射性同位元素の種類により、上記の他に α 線も対象となる。

また定期的な放射線測定は法令に基づくものが殆どであるが、管理区域内の実験室など常時人がいる場所では、加速器の運転状況に合わせて行う事も多い。

3. 管理の内容

3.1 被ばく管理

管理区域内で作業する場合、個人被ばく線量計を着用する事が義務づけられている。KEKでは着用する線量計として以下の3種類を使用している。

a) 光刺激ルミネセンス線量計 (OSLD :Optically Stimulated Luminescence Dosemeter:)

※ KEKで使用しているクイクセルバッジは商品名

b) 熱ルミネセンス線量計

(TLD : Thermo Luminescence Dosimeter)

c) アラーム線量計

OSLD及びTLDはX/ γ / β 線用であるが、測定素子の追加等により中性子線の測定が可能となる。アラーム線量計は γ 線用である。

管理区域によって着用する線量計の種類が異なり、OSLD又はTLDのみ、OSLDとTLD両方併用のほか、作業場所により中性子線が可能な線量計を着用している。さらに線量率の高い管理区域ではアラーム線量計も着用する。またTLDの被ばく線量はKEK内で測定している。なお法令で定められた被ばく記録に関しては永久保存となっている。

3.2 放射線線量率等の測定

管理区域内外の空間線量率や放射能濃度に対する測定を以下に述べる。

3.2.1 放射線連続監視システム (NORM) による線量率測定

NORMでは加速器から遮蔽体を通り抜けてくる γ 線と中性子線、排気・排水中に含まれる放射化物からの β / γ 線を測定している。一般的な放射線モニターを図1に示す。

NORMでは放射線検出器として以下を用いている。

- 中性子用 : BF_3 、 ^3He
- X線/ γ 線用 : GM管、NaIシンチレーター、電離箱



図1：放射線モニター（右：中性子線用、左： γ 線用）

* ken-ichi.hozumi@kek.jp

中性子用検出器用として当初は BF₃ 検出器を使用していたが、現在は入手不可のため、³He 検出器を使用することが多い。しかし最近では ³He 検出器も入手が難しくなっている。

X 線 / γ 線用の GM 管は動作原理が放電に近く、このため一度検知すると、およそ 200 μ sec の不感時間ができる。この間に再び放射線の入射があっても検知できない。例えば図 2 の様な場合、本来は多数の放射線（図例では 17 個）が来ているにもかかわらず、計数するのは僅か 2 個になってしまう。この理由から加速器におけるパルス状の放射線発生や高計数率の場所では数え落としに注意する必要がある。

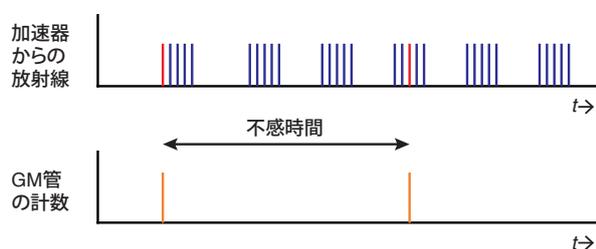


図 2 : GM 管の動作

NORM では管理区域毎を基本に STATION を設置しており、その区域内に設置されている放射線モニターは該当する STATION に接続される。

但し同じ区域であっても、該当区域に実験室が複数あった場合などは、それぞれに STATION を設置している。現在 STATION は 10 カ所に設置されている。

ここで放射線モニターの名称について述べておく。放射線モニターの名称は、設置場所や役割、測定対象別に名称を色分けで割り振る事で区別している。

名称の分け方

- GRN . . . 機構の敷地境界
- YEL . . . 管理区域境界
- ORG . . . 管理区域内で常時人の立入る場所 (実験室等)
- RED . . . 運転中立入禁止の場所 (発生装置室内等)
- WHT . . . 実験室等 (移動型)
- BLU . . . 排気
- VLT . . . 排水
- 最初の数字 . . . STATION 番号

例 : YEL101 \rightarrow STATION.1 に接続された管理区域境界にある放射線モニター。

また YEL 系の放射線モニターは殆どが当該施設のインターロックに組み込まれている。

STATION は、データを収集する CAMAC 規格とインターロックモジュール及びデータを処理するコンピュータで構成されている。各放射線モニターは信号をデジタル化して STATION へ送出すると共に、その場での放射線計数値又は線量率を表示する。設置された場所によってはあらかじめ設定された値を超えた時に、音と回転灯によってそれを周囲に知らせる役割を持つ。モニターからの出力は常時 100mA の電流で送出される。これにより一定時間電流が流れない場合、モニターに何らかのトラブルが発生した事が判明する。

この信号は 50 Ω 負荷で受ける事で TTL 負論理データになり、CAMAC で収集される測定データは 10 秒ごとにまとめられ、データ変換・保存・表示を行う。まとめられたデータは CENTER へ送出すると共に、求められれば他の STATION にデータを送ることで各 STATION 間で相互にデータ参照が出来る (図 3)。

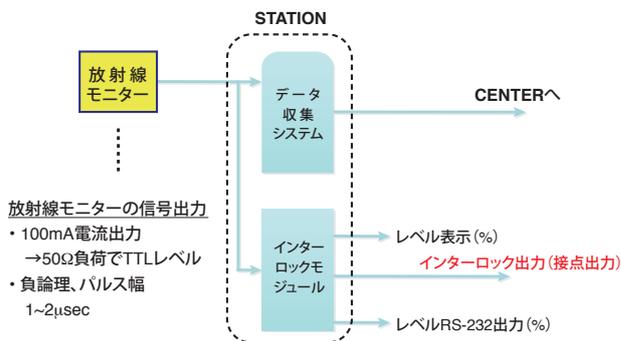


図 3 : 各 STATION の構成図

インターロックモジュールはモニターからの信号を予め設定された値と比較し、それを越えた時、当該施設へインターロック信号を出力する。一方設定値に対してどのくらいの値かを % で表示すると同時に当該施設にも送出している。

正時 (00 分) から次の正時まで 1 時間単位の積算値が設定値を超えた時点でインターロックを出力する。一旦発生した場合、発生時点から次の正時まで解除されない。インターロックモジュール及び STATION を図 4 に示す。

尚つくばキャンパスにおける管理区域境界でのインターロックレベルは、環境の放射線 B.G を除いた中性子線と γ 線の合算値で 0.2 μ Sv/h に設定されている。

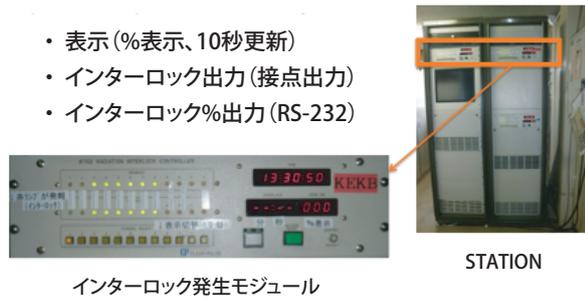


図4：インターロックモジュールと STATION

CENTER は放射線管理棟内に設置され、機構内の 200 台を越える放射線モニター全てのデータを全 STATION から収集・管理・表示している。またここには KEK 敷地境界に設置された放射線モニターを担当する STATION が設置されている。この中の数台のモニターは KEK の Web 上で線量率の状況を見る事ができ、特にこの中の 1 台は東電福島原発直後の放射線線量率を全国に提示した。東電福島原発事故直後における線量率変化の例を図 5 に示す。

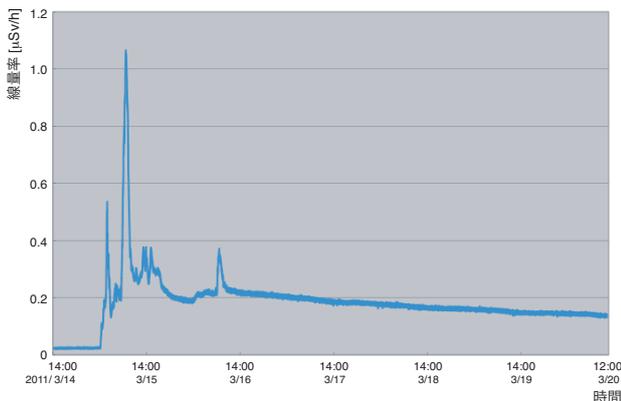


図5：東電福島原発事故直後の KEK における放射線線量率の変化 (2011 年 3 月 14 日～3 月 19 日)

3.2.2 NORM 以外の線量率測定

NORM では放射線モニターは固定設置が殆どであり、また台数も限定されている。このため必要に応じ人による測定も行っている。

加速器運転中の実験室や施設周辺等における測定では X 線/γ 線用に電離箱、NaI や GM 管のサーベイメーター、中性子用に ^3He サーベイメーターを使う。前述した様に機器の特性を考慮してサーベイメーターを選ぶ。

停止した加速器の残留放射能の測定では、線量率の強さに応じて NaI、GM、電離箱を使い分ける。

中性子線用は使用しない。

測定器の種類によっては放射線を検知したときに音を出す機能があり、ホットスポットなどを探するのに有用である。

3.2.3 排気・排水の測定

加速器や非密封放射性同位元素使用施設から排出される排気・排水は設備を通して機構外に放出されるため、非常に重要である。

加速器等からの空気は排気設備内に装着されているフィルターを通してから放射線モニターで連続測定後大気へ放出される。

加速器の冷却水交換や管理区域内の手洗い水、掃除水等で放出される排水は、一旦排水設備の貯留槽に集められる。そこで放流前に Ge 検出器による γ 線スペクトル測定を行い、天然核種以外の核種の有無を調べる。また液体シンチレーションカウンターによる低エネルギー β 線測定 (^3H 、 ^{14}C など) の測定も行う。

ここで排水の放出限度について述べる。機構外に排水を排出する場合、核種毎の放出限度がある。単独核種の場合、その核種の放出限度を守るだけで良いが、複数の核種が含まれる場合は各核種の放出限度に対する比の和が 1 以下となる様にする。

例えば、

- A 核種の放出基準：1.0 Bq/cm³
- B 核種の放出基準：0.5 Bq/cm³

ここで A 核種 :0.5 Bq/cm³、B 核種 :0.3 Bq/cm³ の時その比は、

$$0.5/1.0 + 0.3/0.5 = 0.5 + 0.6 = 1.1$$

となって 1 を越えるのでこのままでは放出不可になり、水を加えて稀釈するか、半減期が短い核種の場合は減衰するのを待って放流する。

ここで重要な事は、機構の放流基準 (濃度限度) が法令の 20 分の 1 であり、かなり厳しい値となっていることに注意したい。

なお排水測定とは別に環境への影響を調べるため、機構内の井戸から地下水を採取して ^3H 濃度の測定を行っている。

3.3 汚染測定

管理区域の中でも放射性物質による汚染が考えられる場合、汚染管理区域として設定し管理する。KEK では旧陽子加速器 (PS) 関係、非密封放射性同位元素使用施設 (PF 光源棟 BL27 など) が該当する。

この様な施設では、入域時には専用の作業服や靴の着用など汚染を避ける事が必要となる。退出時には人体や衣服等に付着した放射性物質を測定するため、人体にはゲートモニター又はハンドフットクロスモニター (HFCM) を、それ以外では物品モニターを使用して測定を行う。また加速器構成機器、例えば加速器遮蔽体壁面や床などの定期的な汚染検査や大型の電磁石等の測定ではスミア法と呼ばれる拭き取り検査を行う。これは通常スプーン型をしたろ紙を用いておよそ 100 cm² 拭き取りを行い、ろ紙に付着した放射能を測る。測定放射線はβ線とX線/γ線で検出器としてはGM管及びプラスチックシンチレーターが使われている。

3.4 放射化した物品の管理

3.4.1 放射化物の保管

加速器で使用している電磁石や電源ケーブル、冷却水配管、壁や床などの構造物は加速エネルギーや加速粒子の違いにもよるが加速器からの放射線によって放射化する。

法令が改正され、放射化した物品は加速器構成機器から外れた時に放射化物として管理する必要がある。

放射化物は以後使用しないのであれば放射性廃棄物として処理するが、今後も使用する可能性がある場合、放射化物保管施設に保管する必要がある。保管する場合、物品ごとに放射線測定を行い、番号を付けて台帳管理する。その後再度加速器に組み込んで使用する場合は、台帳から外れる。

3.4.2 放射化物の加工

放射化した物品の中でも例えば電磁石などを加工して再利用したい場合がある。加工を行う場合、放射化物加工棟のような専用の場所にて行う。加工作業時は内部被ばくを避けるため、マスクの着用と換気を行う。また汚染防止のため専用の作業服、靴、手袋なども着用する。加工作業の内容によっては作業終了後使用したマスクをGe検出器によるγ線スペクトル測定を行って、内部被ばく線量を測定することがある。

3.4.3 放射化物の輸送

放射化物をKEKとは別の場所で再利用する事がある。特にJ-PARCには、多くのコンクリート遮蔽体、鉄遮蔽体、電磁石がつくばキャンパスからJ-PARC施設へと輸送された。

輸送する場合、輸送先への譲渡手続き、J-PARCでは東海村や県への事前報告が求められることや放射能、放射線線量率の強度により、輸送条件が変わるため、輸送前の測定が重要となる。

測定はスミア法にて汚染の無い事を確認し、γ線用サーベイメーターによる線量率測定、NaI又はLaBr検出器によるスペクトル測定で主要核種を測定する。測定結果から放射能を評価しL型やIP-II型などの輸送条件で輸送する。

4. 放射線/放射能以外の測定

加速器施設及び非密封放射性同位元素を扱う施設では、放射能を含んだ気体・液体が放出される場合があるため専用の排気設備・排水設備を持っている。気体については、放出された場合の拡散状況の参考とするため風向・風速が必要となる。

KEKでは測定項目として、風向、風速の他に日射量、気温、地温、雨量、気圧、雷検知器(電位計)を測定する気象観測装置を設置している(図6)。



図6：気象観測装置（手前は雷検知器、奥に見えるのは気象観測塔）

これらの中で、気象変化が環境からの放射線に影響を与えるものとして気圧と雨量がある。中性子は宇宙からの飛来が殆どであるため気圧による影響を受け、気圧が上がれば中性子は大気の遮蔽効果により減少し、気圧が下がれば上昇する。図7に低気圧接近時における中性子線量の変化を示す。また降雨時には大気中に含まれる²²²Rn及び娘核種が雨と共に落ちてきて、γ線のB.Gが上昇する場合がある。このほか最近では雷による放射線の発生とそのメカニズムの研究がおこなわれている。

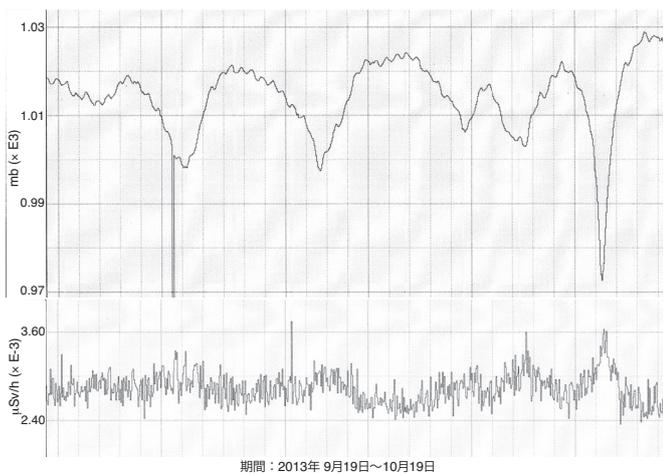


図7: 気圧の変化に伴う中性子線の変化(上:気圧、下:中性子線)

5. 終わりに

KEKでは大型プロジェクトの開始・終了等により当該施設に対する放射線管理が大きく変化する。その施設が廃止になった場合でも放射化物が残っていると、それから管理が続く。また放射線の測定は、人手に頼る部分がまだまだ多く残っているため今後の課題である。

東電福島原発事故では環境放射線レベルが高くなり、管理区域内に外から土などを取り込まない措置をとるという通常とは逆の事象を経験したが、このような事が二度と無い事を願う。

参考文献

- [1] 飯田 博美, “放射線概論”, 通商産業研究社
- [2] “放射線安全管理の実際”, 日本アイソトープ協会
- [3] 伴 秀一, 他, “放射線管理報告” 2009～2011, KEK Internal

編集後記

J-PARCにおける放射線漏えい事故（平成25年5月23日）以来、J-PARC全体の安全意識が厳しく問われ、「安全文化の醸成」の下に安全管理体制の大幅な見直しがなされました。そうした背景の中、今回の技術交流会は「KEKを支える安全技術」と題し、日頃より安全業務に携わっている皆さんから各施設および実験装置における保守点検、整備および技術開発を通して、安全・安心への取り組みを中心に報告していただきました。施設安全、高圧ガス安全、インタロックおよび放射線安全と多岐にわたる内容を賜り、安全意識の共有および安全への再認識において大きな情報交換の場になったと思います。

一方、採用後1年を経過した5名（平成24年度新人）の皆さんからも一年間取り組んだ業務内容についてご紹介いただきました。各部署において精力的に活躍されており、一年間の大きな成長を窺うことができました。今後益々、自己のスキルを磨き、各分野にて貢献されることを期待します。

今回の技術交流会において貴重な報告をいただき、さらに、本報告集の執筆をいただいた上記9名の発表者の皆さんに改めて厚く感謝申し上げます。

最後に、本交流会開催に当たり、発表者の人選や交流会当日の準備等にご協力いただいた各研究所ならびに研究施設の世話人の方々に感謝と慰労の念を表します。

2013年度技術交流会実行委員

藤森 寛

小山 篤

小菅 隆

佐藤節夫

