

ミュオン実験エリアの PPS

○小林庸男^{#,A)}、池戸豊^{A)}、山崎高幸^{A)}、幸田章宏^{A)}、河村成肇^{A)}
^{A)}高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

概要

大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex ; J-PARC)の物質・生命科学実験施設(Materials and Life Science Experimental Facility ; MLF)は、リニアックおよび3GeV-RCSで加速され、3 GeV陽子ビーム輸送ライン(3NBT)を介して、MLFに供給される一次陽子ビームをMLF施設内の核破砕中性子源やミュオン標的に入射することで二次ビーム(ミュオン、中性子)を生成し、それらの二次粒子を各ビームライン下流に設置された各種実験装置に供給し、実験を行うことを主目的とした施設である。

黒鉛回転標的に一次陽子ビームを照射し発生した二次ミュオンを利用して各物性実験を行うのが、ミュオン科学研究系(MUSE)であり、現在MLF施設内に4つのビームラインと8つの実験エリアを展開している。

これらの実験エリアにて安全に実験を行うためには、ビームラインや実験装置で発生する放射線などから職員や外部ユーザーの安全を確保する安全防護システム(Personnel Protection System ; PPS)を適切に運用することが必要である。[1]

本報告では、MUSEがMLF内に展開している実験エリアにおける実験装置のPPSについて紹介する。

1. MLFのミュオン実験装置の配置

図1にJ-PARCとMLFの配置を示す。

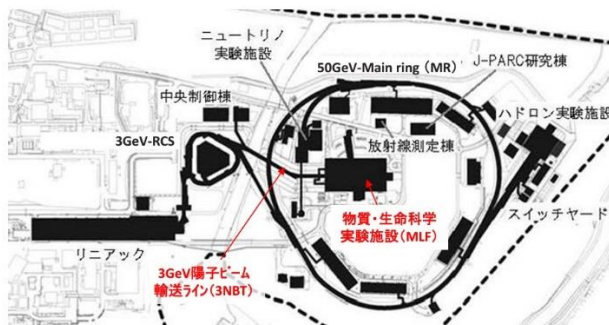


図1. J-PARC施設におけるMLFの配置

陽子ビームはリニアックと3GeV-RCSにて加速され、3NBTを通してMLFに導入される。導入された陽子ビームは、黒鉛回転標的に照射され、二次粒子としてミュオンが生成される。このミュオンをMUSEが展開している各実験装置に導入して、各種実験が行われている。

図2に各ミュオンビームラインと実験装置の配置を示す。

黒鉛回転標的を中心として、4本のミュオンビームラインと、8つの実験エリアが設置されており、各実験エリアにPPSシステムが設置されている。

3NBT陽子ビームライン上の回転標的の下流には、水銀ターゲットが設置されており、こちらでは二次粒子として中性子が生成され、ミュオンと同様に中性子を利用した実験が行われている。

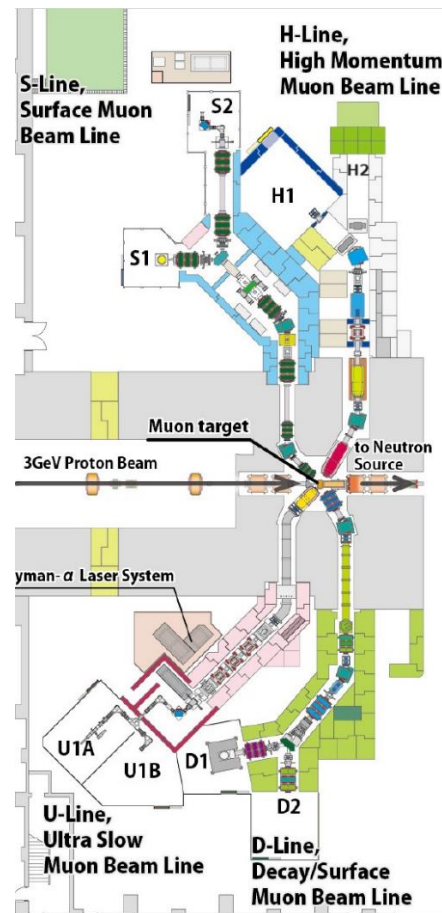


図2. ミュオンビームライン実験エリア

2. 既存の実験エリア PPS

2.1 実験エリア PPS を構成する機器

実験者の放射線防護の為に必要なことは

- ビーム照射中には実験エリアに入域できないようにする
- 実験エリアに入域するにはビーム照射を止める機構を設ける

この二点を確立することが必要である。その為には、以下のような機器が必要になる。

- ビームを遮断するための機構 (ミュオンブロッカー、安全電磁石)
- 実験エリア入口の扉に対する施錠機構 (電気錠扉または電動扉)
- 緊急時にビーム照射を停止するスイッチ (パニックボタン)

また実験エリア入域時に、ブロッカーの開閉操作を制限するため、ブロッカー操作装置には各実験エリア固有のキースイッチが設けられており、このキーによって、ブロッカーの開閉や入口扉の施錠管理を行う。

図3に各装置の外観を示す。

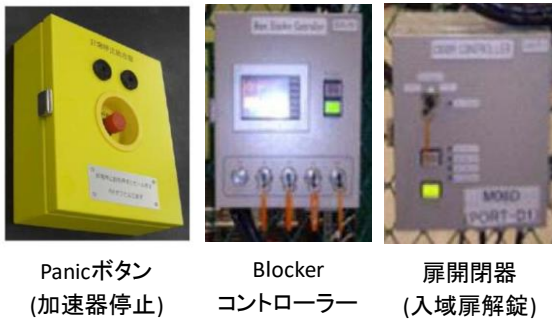


図3. PPS 各操作機器

2.2 実験エリア PPS の構成

図4にミュオン実験エリアの PPS 構成を示す。

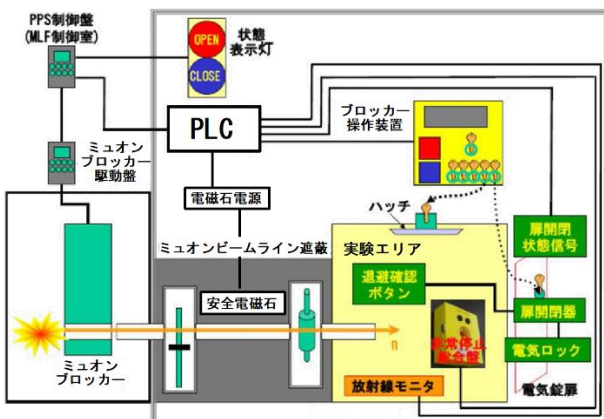


図4. ミュオン実験エリアの PPS 構成

各機器は MLF 実験ホールに設置された PLC に接続され、MLF の3階にある制御室内の PPS 制御盤に機器状況が伝達される。その制御盤で各機器への動作制御が決定され、PLC を介して各制御装置に指令が伝送される。

ミュオンブロッカーはミュオンビームライン上に挿入される金属製のブロックであり、このブロックの位置を操作することで、ミュオン照射の開始/停止を操作するものである。

また安全電磁石は、主に、実験エリアにミュオンを導入するビームラインの偏向電磁石に設定されている。偏向電磁石とはミュオンの方向を曲げる為の電磁石であり、この電磁石の励磁を禁止することで、安全電磁石より下流にはミュオンが導入されなくなり、この結果、実験エリアへのミュオン照射が禁止される。ミュオンブロッカーと安全電磁石による二重性を持たせることで、人体保護に対する確実性を保っている。ただし、U1a, U1b の実験エリアには安全電磁石に相当する電磁石が存在しないので、各実験エリアに付きミュオンブロッカーを2つ設置することで、安全性を確保している。

3. 実験エリア PPS の構成

図5に実験エリア PPS の状態変遷を示す。

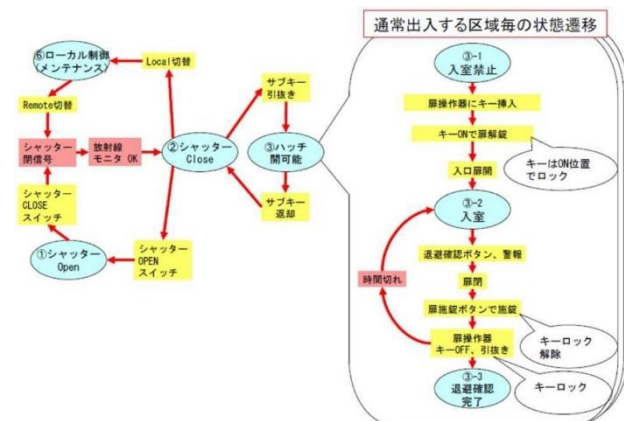


図5. 実験エリア PPS の状態変遷

まず、実験エリアへのミュオン照射が行われている状況を想定する。(図5中の①)

ブロッカーが開状態、安全電磁石が励磁されており、実験装置にミュオンが供給されている。この場合、ブロッカー操作装置にある全部のキースイッチが収容されていて、実験エリアの入口扉が施錠されていて、実験エリアへの入域が不可能な状態である。

この状態から実験者が試料交換作業などの理由で、ミュオンの入射を停止し実験エリアに入域して、作業終了後にミュオン照射を再開する場合を想定する。

放射線防護の為、実験エリアに入域するには、ミュオンの照射を停止しなければならない。実験者は、ブロッカー操作装置を操作して、ブロッカーを閉める。(図5中の②)

ブロッカーが閉まった後、ブロッカー操作装置からキーを1本抜く。またこの時、安全電磁石の電源に対して、電磁石の励磁を禁止する指令が PLC から出され、安全電磁石の励磁が停止する。

キーを抜くことで実験エリアに入域が可能な状態に移行する。(図5中の③、③-1)

抜いたキーを扉開閉器のキースイッチに挿入し、キースイッチを操作する。この時、キースイッチは扉開閉器からは抜けなくなる。この状態で扉開閉器を操作して、実験エリアの入口扉を解錠することで実験エリア入口扉を開け、実験エリア内に入域できるようになる。(図5中の③-2)

実験エリアによっては、ハッチ錠が設置されているエリアがあり、大型の実験機材を実験エリア内に設置する場合は、キースイッチをハッチ錠に差し込んで解錠し、ハッチを開放する。ハッチ錠の例を図6に示す。

作業終了後、実験エリアから退域し、ミュオン照射を再開する際は、実験エリア内に設置されている退避確認ボタンを押す。このボタンは通常実験エリア全体を見渡せる位置か、実験エリアの最奥に設置されており、実験エリアに人が残っていないことを確認した後にこのボタンを押すことで、実験エリア内の放射線防護の安全を確保する。

このボタンが押されてから一定時間(30秒～60秒)、実験エリアに警報音が鳴動する。この時間内に実験エリアから退避確認ボタンを押した最後の作業者が、実験エリアから退出し、実験エリア入口扉を閉め、扉開閉器を操作し入口扉を施錠し、扉開閉器からキースイッチを抜く。時間内にキースイッチが抜かれた場合、退避確認完了状態に移行する。(図5中の③-3)

時間内に扉操作器からキースイッチを抜けなかった場合は、退避完了状態に移行せずにキースイッチも抜くことは出来ない。この場合は、退避確認ボタンを押すところから再開する。



図6. ハッチ錠の例

4. Hライン実験エリアのPPS

4.1 Hライン実験エリアの配置

図7にHラインの実験エリアの配置を示す。

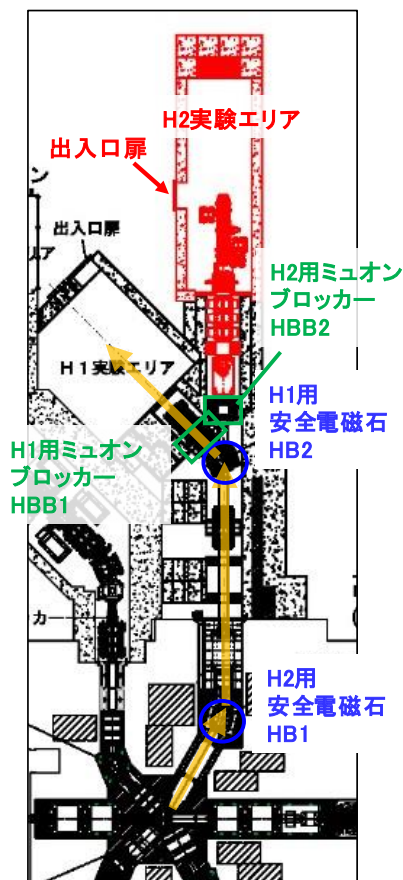


図7. H1, H2 実験エリアの配置

Hラインの配置において、H2実験エリアの位置は他のミュオンビームラインと異なり、ビームラインの直線上に実験エリアが配置されている。

他のビームラインでは、実験エリアは直線上には存在せず、偏向電磁石によって方向を曲げられた先に設置されているので、各実験エリアの安全電磁石の励磁を禁止することで、実験エリアに対するミュオン照射の禁止を確保できるが、H2実験エリアについては、単純に安全電磁石HB1の励磁を禁止してしまうと、H1実験エリアへのミュオン照射まで停めてしまうことになる。

この為、Hラインに関するPPSにおいては、実験ホールH1とH2のどちらの実験エリアに対してミュオン照射を行うかを選択するキースイッチを設け、これによってPPSの回路機能を切り替えることになった。

Hラインは、両実験エリアに対するミュオン照射は排他となり、H1またはH2のどちらかへの実験エリアにしかミュオン照射を行わない。

4.2 H2実験エリアのPPS回路

図8にH2実験エリアにミュオンを照射する場合のPPS回路を示す。

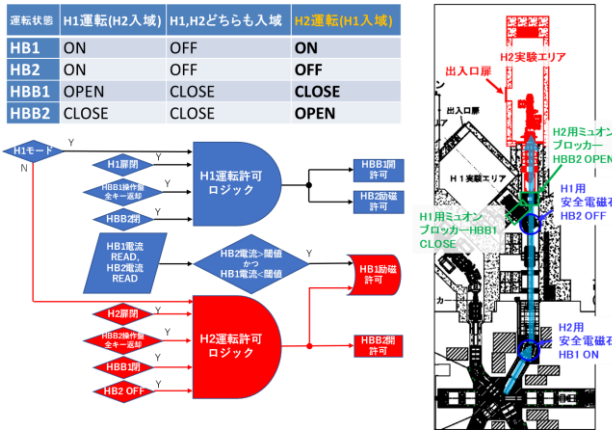


図 8. H2 実験エリアの PPS (赤色部分)

H2 実験エリアにミュオンを照射する場合は、この実験エリアの安全電磁石は HB1 になり、他の実験エリアと同様に、安全電磁石によってミュオンが曲げられた先に実験エリアが存在する、と考えることができる。H2 実験エリアに対してビームを照射する為には HB1 安全電磁石への励磁を許可およびミュオンブロッカー HBB2 を開ける操作が可能になる条件である、H2 エリアの入口扉が閉状態であること、HBB2 用ブロッカー開閉装置のキースイッチが全部収容されていることが満たされていれば、H2 実験エリアへのミュオン照射が可能となる。ただし、H2 実験エリアにミュオン照射中でも H1 実験エリアで作業を行う場合があるので、H2 実験エリアの選択時には、HBB1 ミュオンブロッカーが閉状態であること、および、H1 実験エリア用の安全電磁石である HB2 電源がオフ状態であることが条件に追加される。

4.3 H1 実験エリアの PPS 回路

図 9 に H1 実験エリアにミュオンを照射する場合の PPS の回路を示す。

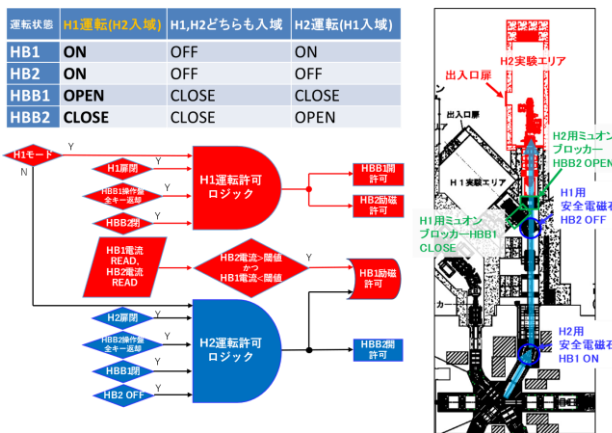


図 9. H1 実験エリアの PPS (赤色部分)

H1 実験エリアにミュオンを照射する場合、H2 実験エリア用の安全電磁石である HB1 は励磁されている

る状態になる。この状況下で H2 実験エリアにて作業を行う際に安全を確保する為には、HBB2 ブロッカーを閉状態にしてミュオンビームの H2 実験エリアへの照射を防ぐと同時に、偏向電磁石 HB1 で曲げられたミュオンビームを偏向電磁石 HB2 で確実に偏向し、H1 実験エリア内に導入する必要がある。

H1 用安全電磁石 HB2 への励磁許可および HBB1 ブロッカーの開操作許可については、H1 実験エリアのブロッカー開閉装置のキースイッチおよび H1 実験エリアの入口扉の閉状態によって、状態を決定する。(更に HBB2 ブロッカーが閉状態であることが条件に追加される)

一方 HB1 への励磁許可は、HB1 電源と HB2 電源の出力電流値と、その電流値に対する閾値設定によって決定される。ここでの閾値は、実験に使用するミュオンの運動量で決定され、閾値が高ければ高い運動量のミュオンを実験エリアに導入することができる。HB1 の出力電流値が閾値設定より高い場合、実験想定より高い運動量のミュオンを HB1 以降に導入することになり、放射線防護上で問題になるので、この条件が満たされないよう、HB1 の電流値を監視し、同電磁石電源の励磁許可を出力しないようにする。また、HB2 電源の電流値も同じ閾値で監視し、こちらの電磁石は、先述の通り HB1 で偏向されたミュオンを確実に H1 実験エリアに導入する為、閾値を超える電流を HB2 が出力していない場合、上流の HB1 電源の励磁許可を出力しないようにしている。この回路により、HB2 によってミュオンが完全に偏向できない場合における、H2 実験エリア側にミュオンが向かっていく危険性を防止している。

5. MLF 制御室での統括管理

MLF の 3 階には MLF 制御室がある。ここでは、MLF 各機器の状況を統括し適切に制御管理および状態ログを取るなどを行っている。このミュオン実験エリアの PPS 機器の状態信号も、この統括制御系に接続されている。[2]

図 10 に MLF の PPS の全体系統を示す。図中の右下赤枠破線内が、ミュオン関連の実験エリア PPS が接続される部分となる。(なおこの図中では、まだ H ライン関連の PPS 系統の図は追記されていない)

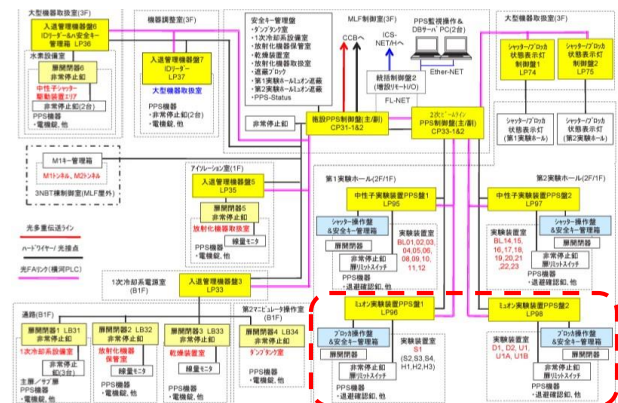


図 10. MLF の PPS 機器の全体系統図

6. まとめ, 謝辞

J-PARC MLF のミュオン実験エリアの PPS について紹介させていただいた。実験装置としての PPS としては、実はかつて高エネルギー加速器研究機構のつくばキャンパスで展開していた、加速器を利用した PPS の構成と大差がない。

このような安全に関わる機器構成は、施設運転開始より長い期間が経過しても、基本的な思想はそんなに変化するものではない、と考察する。

J-PARC の MLF で MUSE が実験装置を展開するにあたり、永年に渡りご教授、ご協力をいただいている、日本原子力開発機構 J-PARC センター物質・生命科学ディビジョン中性子源セクションの酒井健二様、大井元貴様、また同セクションの皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 小林庸男、J-PARC MLF の PPS インタロック機器、H21 年度 KEK 技術研究会
- [2] 酒井健二、他、J-PARC 物質・生命科学実験施設の全体制御システムの進捗状況、DOI:10.11484/jaca-technology-2018-011