

J-PARC 物質・生命科学実験施設内実験装置の PPS・MPS について

○小林庸男^{A)}、下村浩一郎^{A)}、河村成肇^{A)}、牧村俊助^{A)}、鳥居周輝^{B)}、金子直勝^{B)}、
下ヶ橋秀典^{B)}、髭本亘^{C)}、甲斐哲也^{C)}、酒井健二^{C)}、中谷健^{C)}、春日井好己^{C)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 ミュオン科学研究系

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 中性子科学研究系

^{C)}日本原子力研究開発機構

概要

2008 年度に J-PARC の物質・生命科学実験施設(Materials and Life Science Experimental Facility、以下 MLF)において、陽子ビーム入射による最初の中性子、ミュオンが発生してから一年以上が経過した。

実験装置を設置するにあたり、その実験装置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肝要である。

本報告では、KEK 物質構造科学研究所が J-PARC の物質・生命科学実験施設に設置した 5 本の中性子ビームライン、2 つのミュオンエリアにおける実験装置の PPS・MPS について紹介する。

1 MLF 実験施設の概略

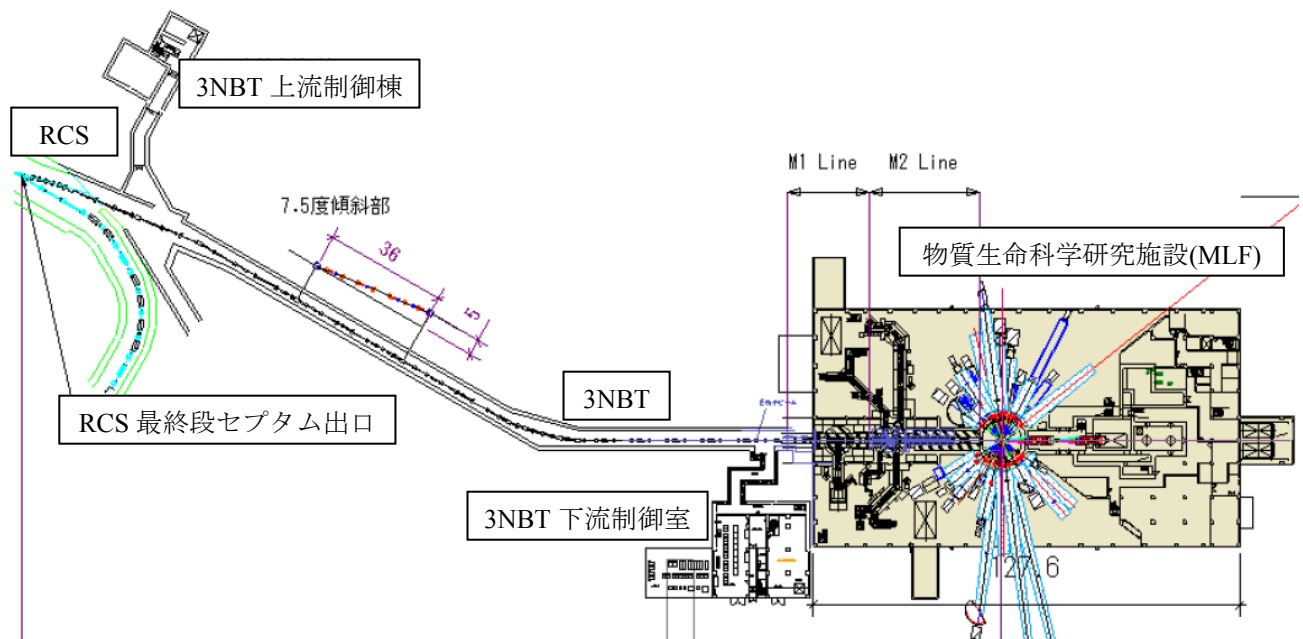


図 1. J-PARC RCS 出口から 3NBT を経て MLF に至るまでの各施設の配置

J-PARC の MLF では、3GeV 陽子加速器リングから取り出された、3GeV, 333 μ A, 25Hz, 1MW の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。

3GeV 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。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 (3GeV 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。各々の標的は、放射線安全や作業員・機器安全用に、独自の安全機構を有する。

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 23 本、ミュオンビームライン 4 本 (ミュオン標的が 1 つだけの場合)。現行のミュオン標的の上流部にもう 1 つミュオン標的を設置することが可能であり、その場合ミュオンビームラインは最大 6 本のビームラインを設置でき、現在のところ 12 本の中性子ビームライン (中性子実験装置 12 台) と 1 本のミュオンビームライン (ミュオン実験エリア 2 エリア) が稼働している。

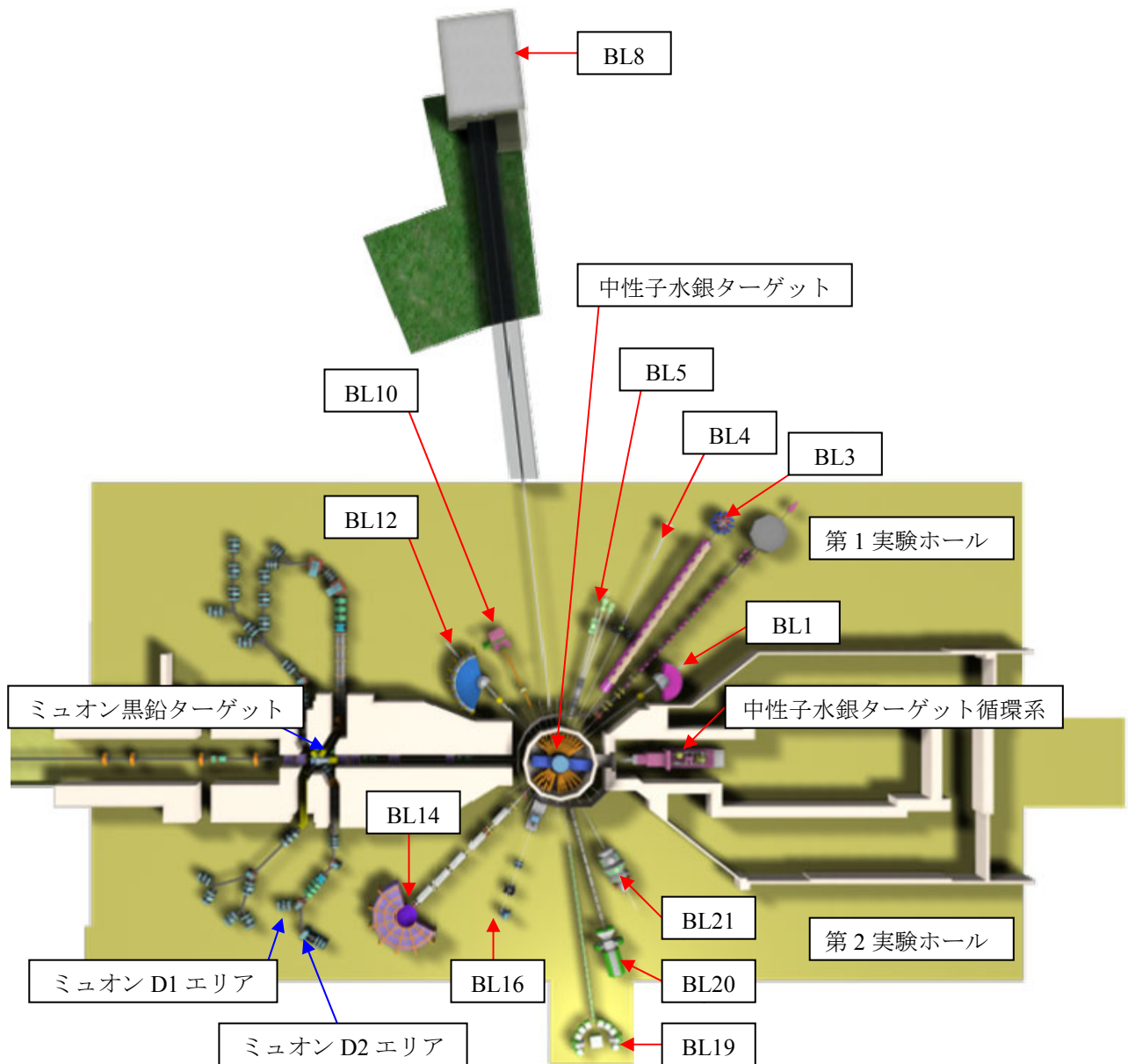


図 2. MLF 内実験装置の配置(矢印/名称がある装置が 2009 年度現在稼働中の実験装置)
実際には各実験装置やそこに至るビームラインは鉄やコンクリート製の遮蔽体に覆われている

2 中性子ビームライン実験装置の PPS

2.1 基本思想

MLF の中性子実験装置では、ビームラインにて中性子線が実験装置に導かれるまでの間や、実験装置内部

で試料に中性子が散乱される時などにγ線が発生する。このようなガンマ線や中性子線自身から、実験装置を使用する職員や外部ユーザーなどの実験者を防護する為、(例外的な構造の実験装置もあるが) 大半の実験装置は、中性子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。実験者の放射線被曝を防止する為には、可動式の中性子シャッターを中性子ビームライン上に設置し、シャッターが開いている間は、高放射線量領域への立ち入りが不可能になり、逆に実験者が遮蔽体内部で作業をしている間は、シャッターを開けることが出来なくなるような機構が必要である。

2.2 設置されている機材

MLFの中性子実験装置では、このような機構を実現する為に、中性子シャッターの開閉操作と、遮蔽体内部など高放射線量領域へのアクセスをリンク付けする機器を、各実験装置に設置している。

各実験装置に絶対に必要とされる機器には、以下のようなものがある。

- 電気錠扉
- 中性子シャッター操作盤
- 扉操作器
- 退避確認ボタン(SEARCH BUTTON)
- 非常停止ボタン(PANIC BUTTON)
- ハッチ錠(ハッチがある場合)

この他に、各実験装置の独自判断で放射線量モニタなどを設置する場合もある。

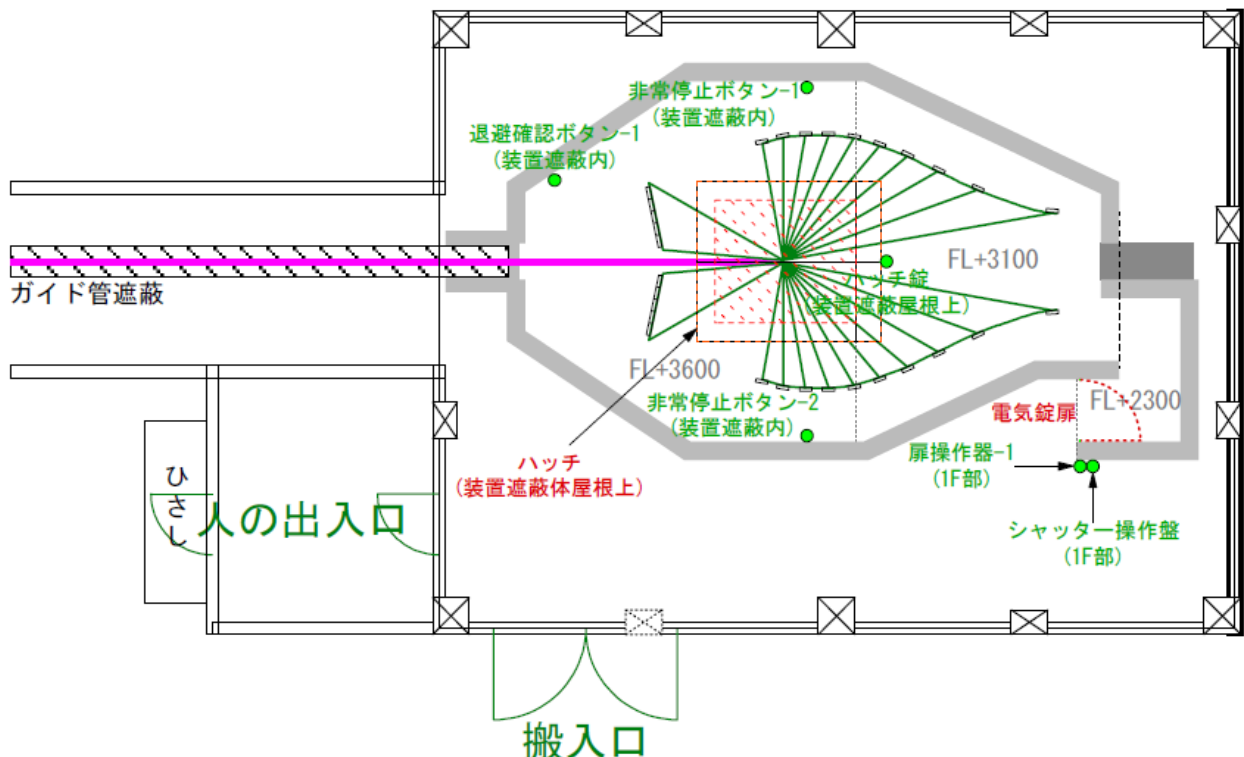


図 3. 中性子実験装置の PPS 機器配置の一例(BL8)

2.3 PPS 機器の基本構成

図 4 に、中性子ビームラインと実験装置の PPS 基本構成の概念を示す。

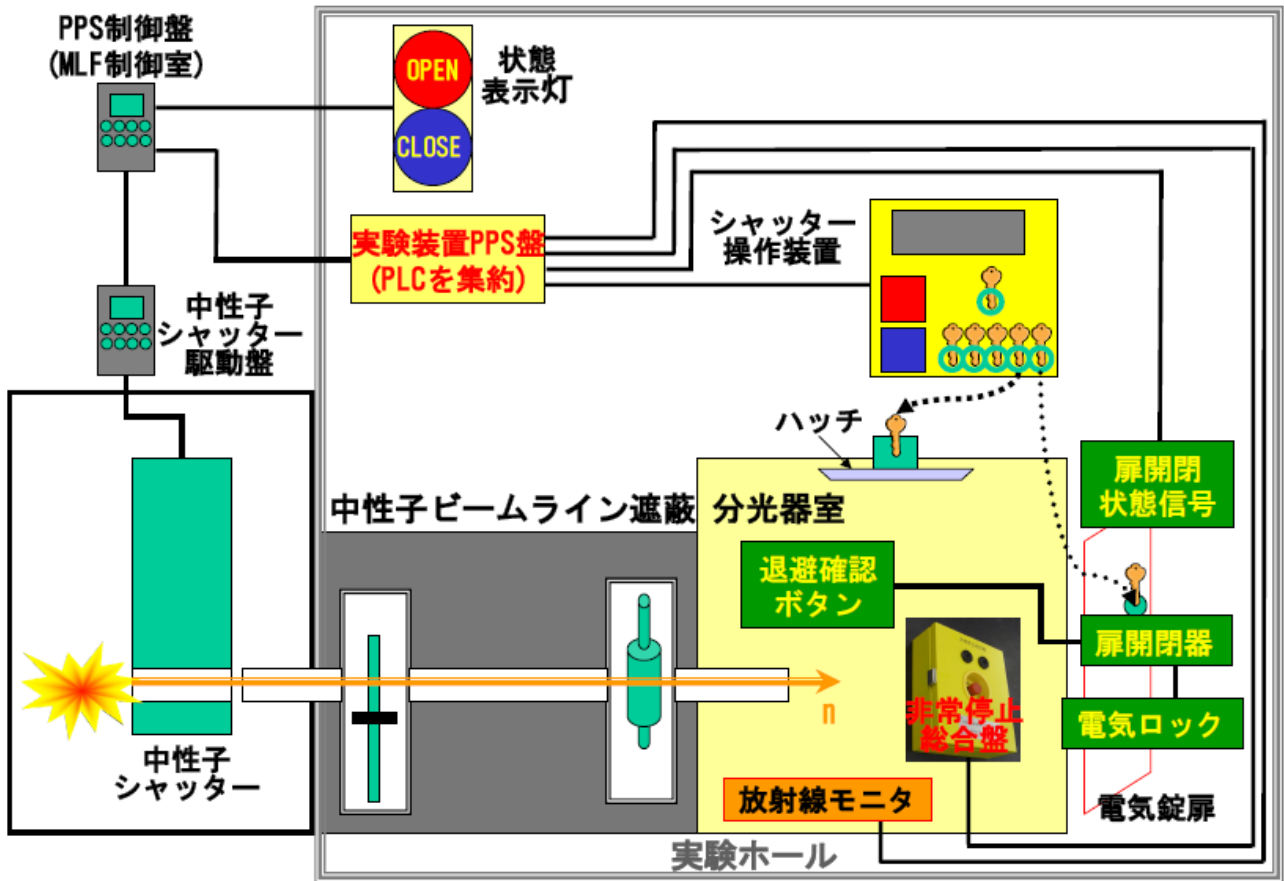


図4. 中性子ビームラインと実験装置の PPS 基本構成

水銀標的から発生した中性子は、中性子シャッターを通して、各実験装置に輸送される。放射線量の高い実験装置遮蔽体内や付帯する実験設備に実験者が立ち入ろうとする場合、通常は電気錠扉から分光器室遮蔽体内部に入域する。また、実験装置そのものをメンテナンスする等の理由で、実験装置そのものに手を入れたい場合などに対して、大型物品搬入を想定したハッチを遮蔽体に設けていることが多い。こちらに対しては、ハッチ錠という機械的なシリンダー錠によって、ハッチの開閉を管理している。

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、扉の開閉を行うことが基本となる。

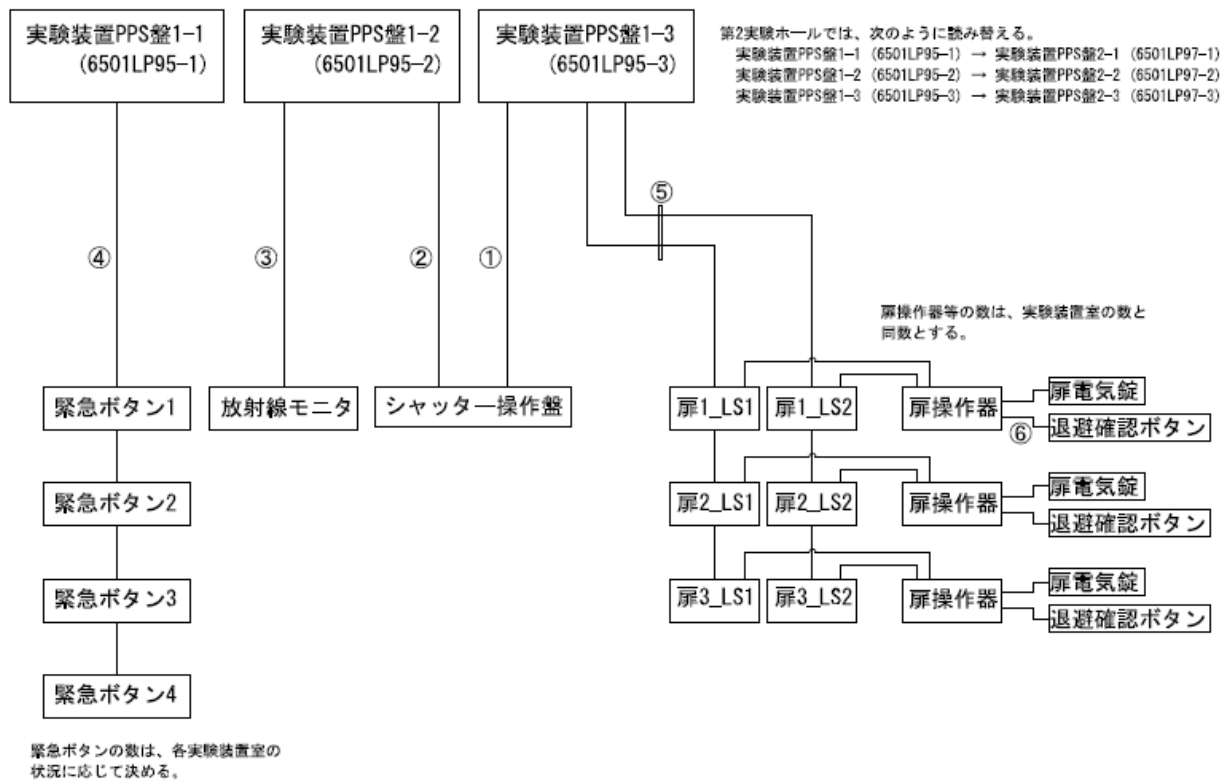


図 5. 実験装置 PPS 盤からの各 PPS 機器への電気的な接続関係

図 5 に、実験装置 PPS 盤からの各 PPS 機器への電気的な接続関係を示す。

全ての PPS 機器は、第 1、第 2 の各実験ホールの 2F 通路部に設置されている PPS 盤に接続される。PPS 盤の内部は PLC で構成されていて、ここで各機器の状況を集約し、MLF 実験棟 3 階の MLF 制御室に送信される。実際に PPS 発報などの制御を行っているのは MLF 制御室である。

2.4 PPS 機器の運用

図 6 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。

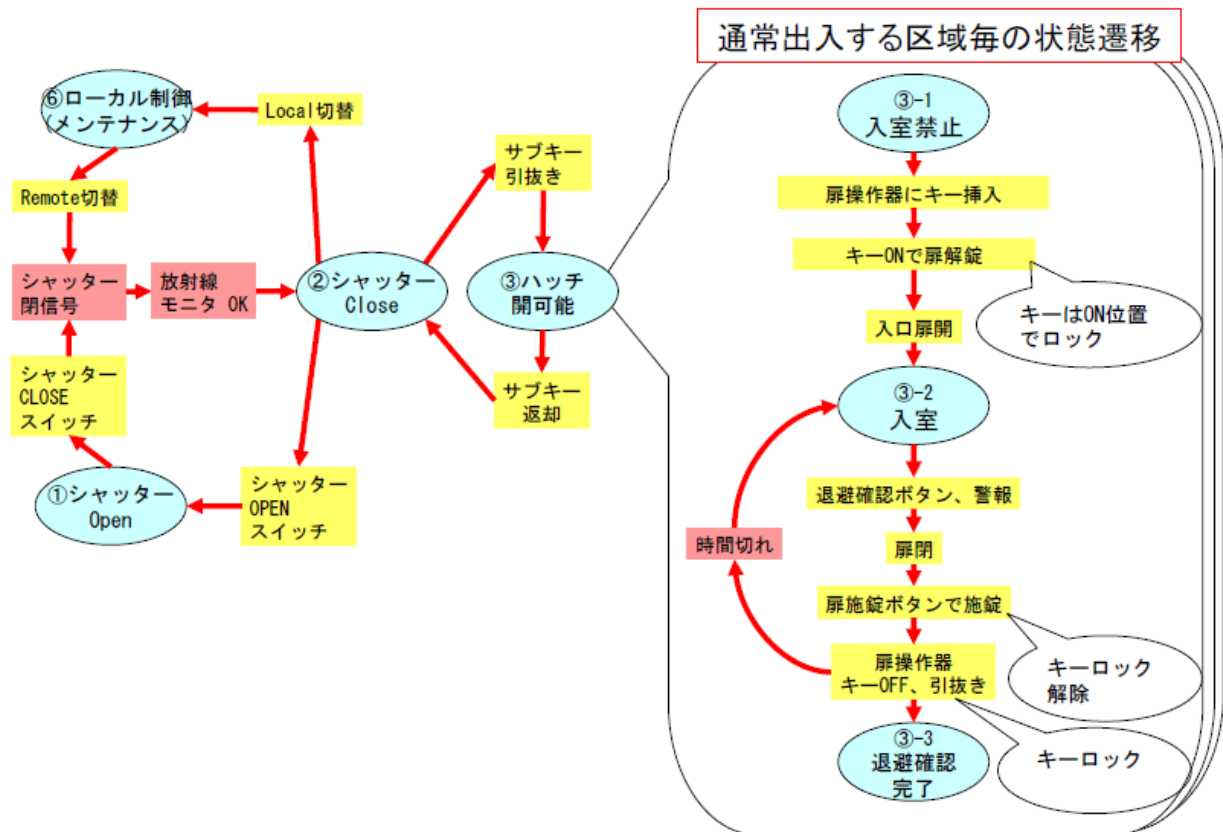


図 6. 遮蔽体内部に入城する場合の状態変遷図

最初に

- (1) 中性子シャッターが開いていて試料に中性子が照射されている。

この状態を想定する。

まず中性子シャッター操作盤を操作して、中性子シャッターを閉める。

- (2) 中性子シャッターが全閉状態であり中性子が停止している。

この状態に移行する。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) 電気錠扉やハッチ錠を開けることができる。

1. 入室禁止

シャッター操作盤から抜いた扉操作器キーを使用して扉操作器で電気錠扉を開ける。

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、扉操作器キーを扉操作器から引き抜く。

3. 退避確認完了

扉操作器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。

図 7 に扉操作器を中心とした各機器のロジック関連図を示す。

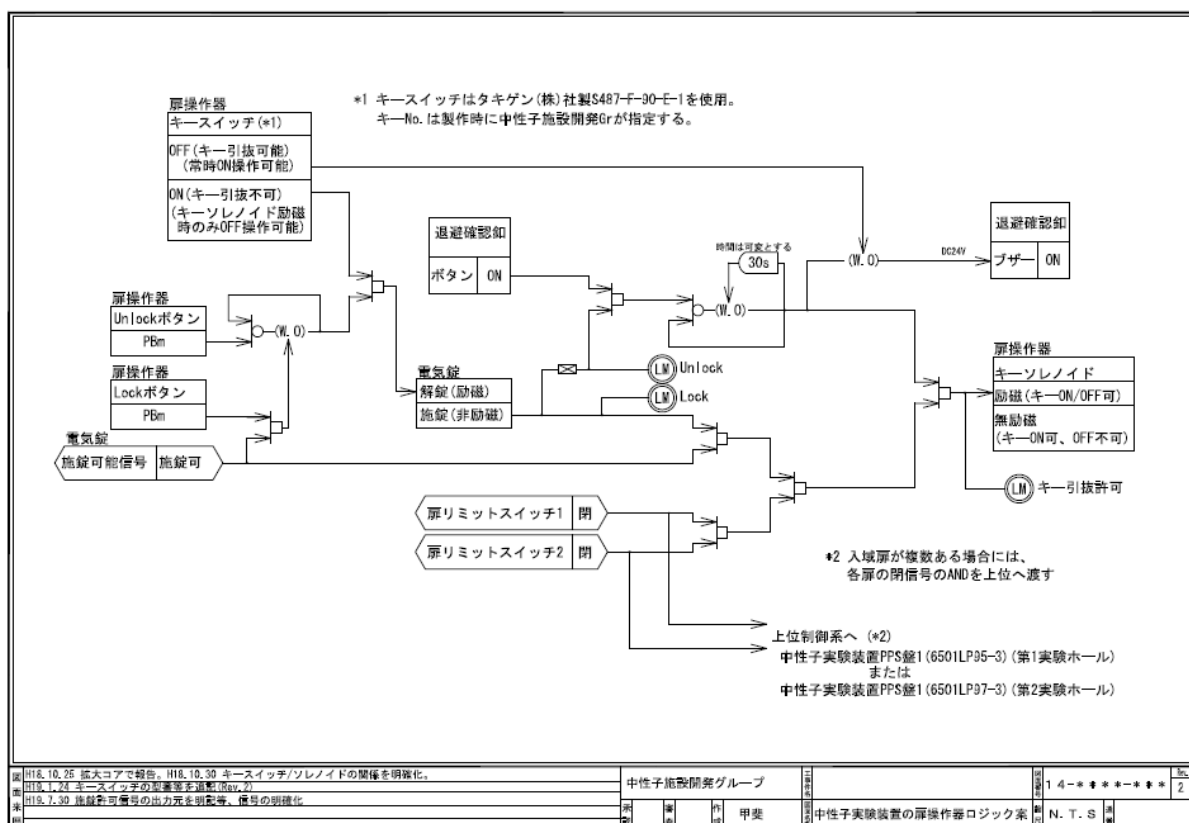


図7. 扉操作器を中心とした各機器のロジックIBD図

2.5 各装置の詳細

2.5.1 電気錠扉

各実験装置の試料近傍への立ち入りの管理の為に、高放射線領域への通路には、電気錠管理の扉を設置することが義務付けられている。電気錠扉を設置しない実験装置の場合でも、その区画へ入域する扉や遮蔽体などに対して、何らかの「キースイッチを使用する、電気的な施錠管理が可能な構造」を持つことが必要であり、これらの扉の電気式な施錠機構を制御し、高放射線量領域への立ち入りを管理することによって、中性子照射中における実験者への放射線防護を確保している。

MLFのPPS系への扉自身の開閉状態は、電気錠から出力される開閉状態信号とは別に、リミットスイッチなどの単純な構造のスイッチを2系列設け、電気錠扉の操作系の電源系とは独立に扉の状態信号を送信することで、安全性の確保に努めている。

また、閉じ込めに備え、扉が施錠されていても、高放射線領域の内側からは扉を開けることが出来るようになっていなければならない。

2.5.2 中性子シャッター操作盤

各装置の中性子シャッターは、各ビームラインの最上流部(水銀標的寄り)に設置されている。シャッター操作器は、この中性子シャッターを開閉制御する為の操作盤である。

この盤には、電気錠扉などを開閉操作する際に必要となる、操作キーを5本収容する構造となっており、この操作キーの状態によって、中性子シャッターの開閉状態と、実験者の放射線防護の関連付けを行っている。全ての操作キーが盤内に収容されてない限り、中性子シャッターを開けることは出来ず、また中性子シャッターが空いている状態では操作キーを盤から抜くことが出来ない。

2.5.3 扉操作器

先記の通り中性子実験装置の遮蔽体や区画フェンスには、中性子照射中に高放射線量になる領域とその外

側との境界に電気錠扉が設置されている。この電気錠の施錠を操作するための操作器である。

扉操作器で電気錠扉を解錠する場合、中性子シャッター操作盤から操作キーを抜き、扉操作器にセットすることで初めて電気錠扉の解錠が可能となり、電気錠扉が解錠状態である間は扉操作器からキーを抜くことが出来ない。

2.5.4 退避確認ボタン(SEARCH BUTTON)

試料交換や周辺環境のセットアップなど実験に関わる作業の終了後は、全作業員の退避後に電気錠扉を施錠して中性子シャッターを開けて実験を再開するが、この際は当然ながら試料周辺の高放射線量領域に作業員が残っていないことが保障されなければならない。

この保障の為に、各実験装置の高線量領域の内部には退避確認ボタン(SEARCH BUTTON)が設置されている。試料周辺での作業終了時、作業員全員の退避を確認後、最後に退却する者がこのスイッチを押し、一定時間内に扉操作器を操作することで、電気錠の施錠が完了する。このスイッチが押されてから電気錠が施錠されるまでの間は、スイッチに設置されているブザーが鳴動し、扉の施錠操作に気づいていない作業員に扉が施錠されようとしていることを報知する。

2.5.5 非常停止ボタン(PANIC BUTTON)

万一、作業員が遮蔽体内部に取り残されたまま電気錠扉が施錠されてしまった場合、その作業員が放射線被爆を被ることは何としても回避しなければならない。

各実験装置に設置されている高放射線領域との区画電気錠扉は、内側からは扉操作器のような機器を介することなく扉を開けることが出来るが、扉からの脱出する以外の安全確保の方法として、緊急的に陽子加速器そのものを停止する為のスイッチが、各実験装置の高放射線領域には設置されている。

このスイッチが押された場合、直ちに PPS が発報して陽子加速器は停止する。



図 8. 非常停止ボタン
(PANIC BUTTON)

2.5.6 ハッチ錠

高放射線領域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場合が多い。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。

一般的な扉用の電気錠では、ハッチの施錠を行うのに適していないので、ハッチにはハッチ錠としてシリンダー式の機械的な錠を使用する。

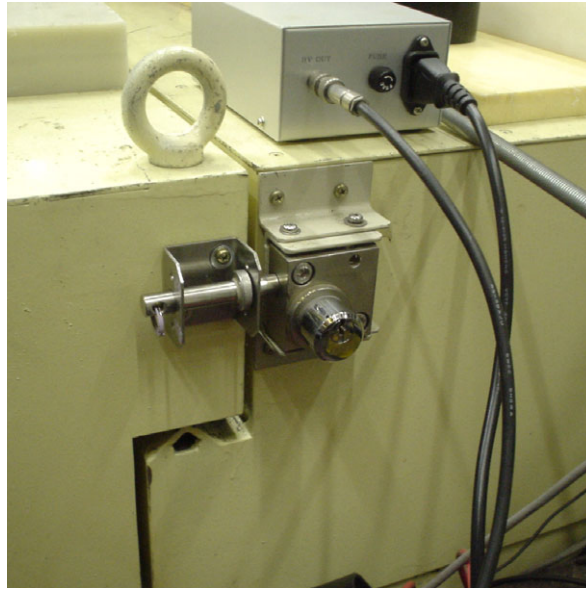


図9. ハッチ錠の例

ハッチ錠の場合、中性子シャッターの開閉と同期を取る為には、ハッチ錠の鍵型をシャッター操作盤の操作キーと同じ鍵型になるようにシリンダー部分を改造する、あるいは鍵型変換の器具を使う、などの必要がある。鍵型変換器具とは、親鍵が一つと子鍵が幾つか一つの箱に收容されていて、親鍵を挿入すると子鍵が抜けるようになり親鍵は抜けなくなる、親鍵は子鍵が全て変換器に戻っている時だけ抜ける、というもので、親鍵部分にシャッター操作盤の操作キーを、子鍵部分にハッチ錠の鍵を使うことによって、ハッチ錠を複数設置することが出来るようになる。

3 ミュオン実験施設の PPS と MPS

3.1 中性子実験施設との相違点

中性子発生用の水銀ターゲットの上流には、ミュオン発生用の黒鉛ターゲットが存在する。中性子実験施設の場合は、中性子の輸送はガラス表面にニッケルなどを蒸着したガイド管を利用して、実験装置まで運ぶことが多いが、ミュオン実験施設の場合ミュオンを実験エリアに導くには、真空ダクトの周囲に適切な電磁石を配置するという 3NBT 陽子ビーム輸送系のような荷電粒子の輸送系と同じような機器構成が必要となる。

また、ミュオン黒鉛標的のように一次陽子ライン上に存在するものに関しては、標的自身及び周囲の機器の保全の為に独自の MPS を構築している。

3.2 ミュオン実験施設の PPS

ミュオン実験施設にも、中性子と同様に二次粒子を止める働きをする可動シャッターがある。ミュオン実験施設では、これをブロッカーと呼んでいる。図9にミュオンブロッカーの配置を示す。

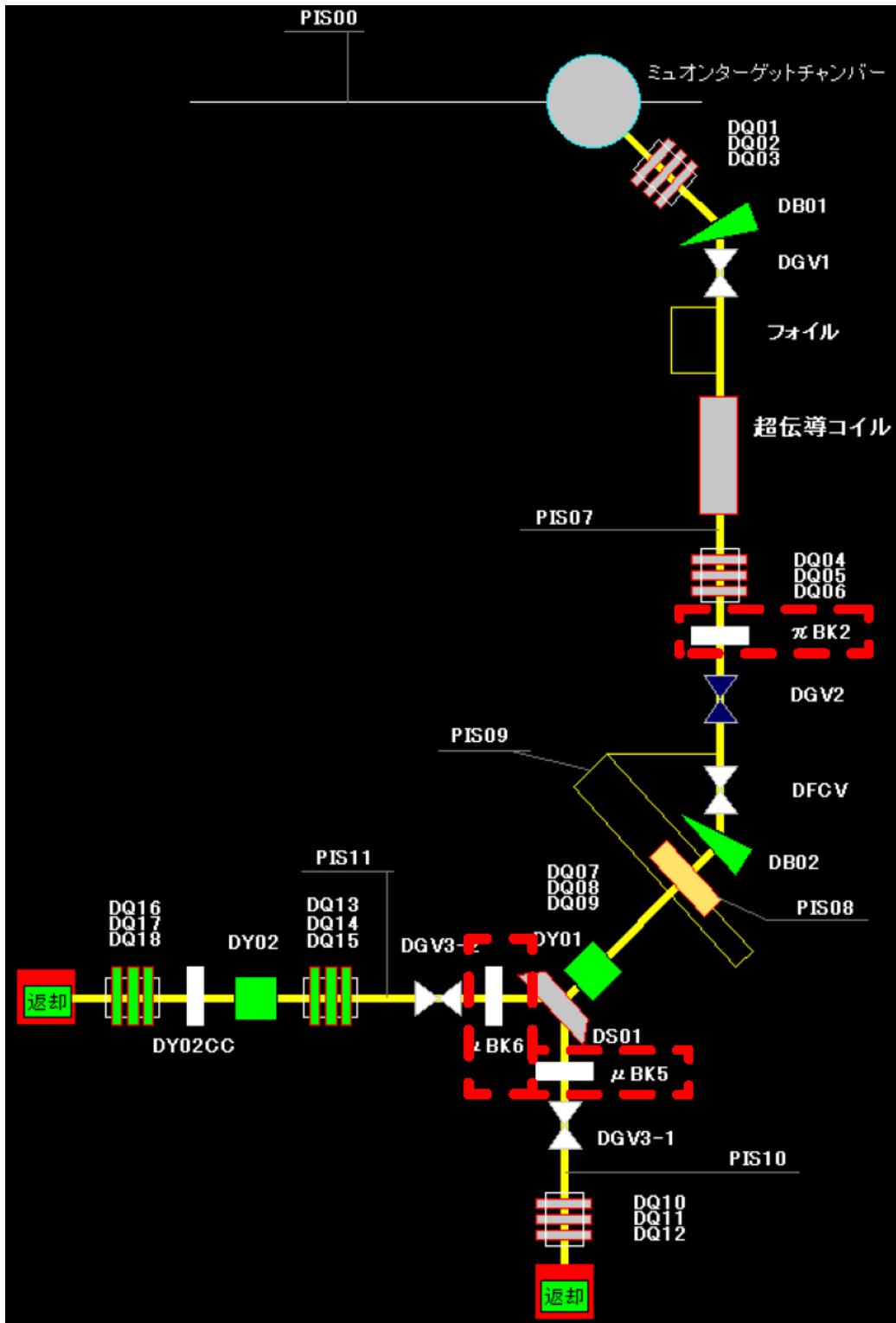


図 10. ミュオン実験施設ブロッカーや各機器の配置

(図中の赤破線枠内がブロッカー)

ミュオン実験施設には実験エリアが 2 つある。図中の横に伸びているのが D1 エリア、縦に伸びているのが D2 エリアである。上流部のミュオン輸送ラインは遮蔽体で覆われているが、実験エリアの直前で遮蔽体は終端しており、実験エリアそのものはフェンスで囲われているだけである。

しかし区画フェンスの出入口の扉は中性子実験施設と同様に電気錠が設置され、扉操作器による電気錠の施錠管理、退避確認ボタン、非常停止ボタンなどといった PPS 機器は中性子と同じものが存在する。

ブロッカーの開閉も中性子シャッター操作盤とほぼ同様の仕様のブロッカー操作盤が設置されており、こ

の操作盤によってブロッカーは制御される。

但しミュオン実験施設は中性子実験施設とは違い、1つのビーム輸送ラインを2つの実験エリアで共有している。各実験エリアへのミュオン供給の切り替えはDB3(図10中のDS01)電磁石に流す電流の極性によって行われる。更にミュオンは正電荷と負電荷のものがあり、それによって磁場で曲がる方向も変化する。ミュオンエリアに対するPPSビーム停止条件はかなり複雑な様相になるが、考え方としてDB2とDB3に流す電流の極性が一致しているか異なっているかによって、D1エリアとD2エリアへのミュオンビーム供給が決定され、ビームが出ているエリアのPPS機器状態によって、PPSは機能する。

DB2電源極性	DB3電源極性	D1エリア	D2エリア
正	正	正ミュオン	—
負	負	負ミュオン	—
正	負	—	正ミュオン
負	正	—	負ミュオン

DB2とDB3の極性が同符号 ⇒ ミュオンはポートD1に出る

DB2とDB3の極性が異符号 ⇒ ミュオンはポートD2に出る

極性の組み合わせによりビームの行き先を判断することが可能。

表1. DB2とDB3の極性組み合わせと各エリアへのミュオン供給

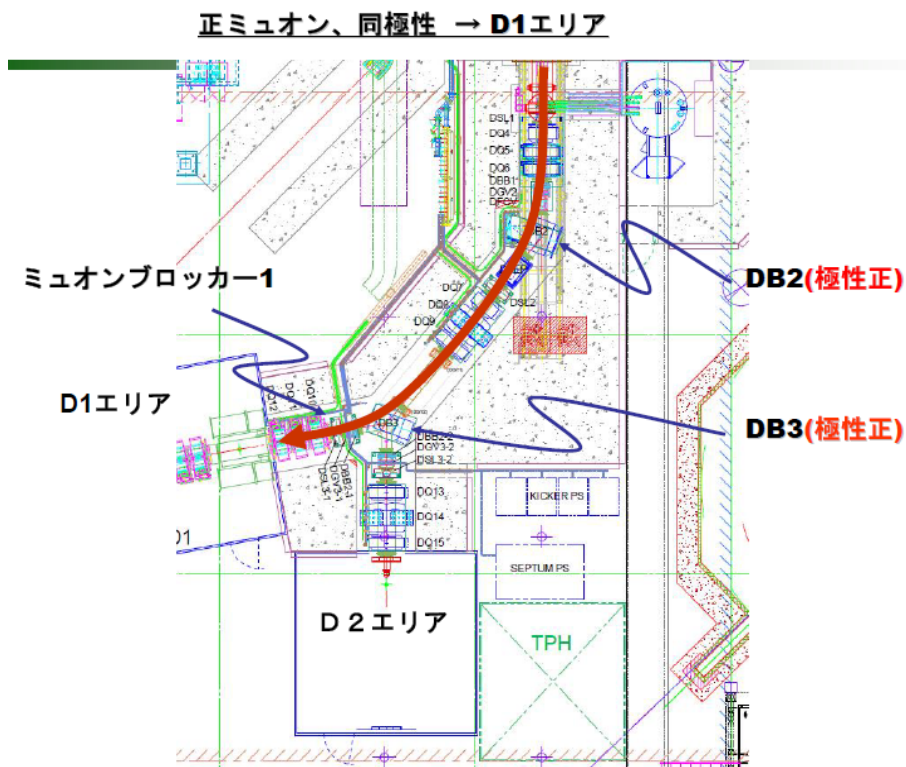


図11. 表1の図解(1/2)

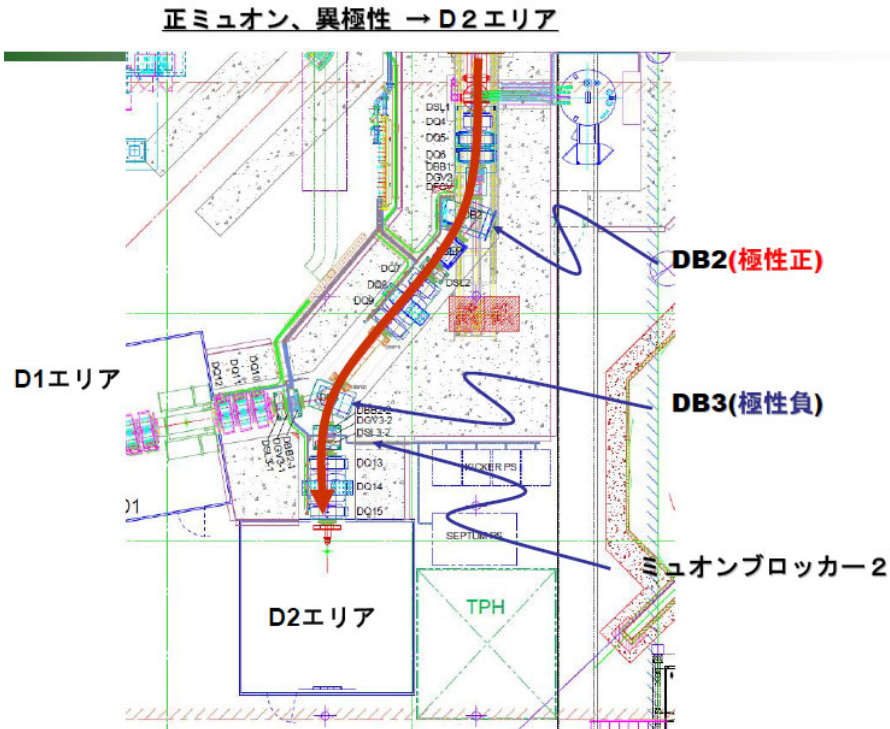


図 12. 表 1.の図解(2/2)

3.3 ミュオン実験施設のミュオン輸送ライン機器

図 10 にはブロッカー以外にも様々な電磁石や真空機器などのコンポーネントが記されているが、各々のコンポーネントにそれらを統括監視する為の外部 PLC が存在する。外部 PLC の用途は基本的に監視目的で、操作や制御は各コンポーネントの制御系が行う。

3.3.1 電磁石と電磁石電源

ミュオン輸送ラインには現在のところ、Q 電磁石 15 台、B 電磁石 3 台、特殊用途の電磁石が 2 台、計 20 台のビーム輸送用電磁石があり、電源も同数ある。

監視項目としては、電磁石が温度上昇と冷却水停止、電源が温度上昇、冷却水停止、過電流、過電圧、設定偏差異常などである。大型の電源ならば 1 台につき 1 筐体、小型の電源ならば 3 台くらいで 1 筐体のパッケージになる。1 筐体に 1 つずつ PLC が内蔵されており、この PLC が電源自身の状態監視を行っている、ビーム輸送ラインとして電磁石と電源を統括する PLC が外部に 1 台存在し、両者間はハードワイヤリングで接続されている。上位の MLF 全体の制御系に対して通信を行うのは、外部 PLC であり、何らかの異常が発生した場合は、MLF 制御室でオペレータの注意を促すアラームが発報するが、この警報で自動的にビームを停止させたりすることはない。

3.3.2 真空系

ダクト内真空度、真空弁の開閉状態などに加えて、一部に上流と下流間の差圧などを監視している場所がある。

電磁石電源と同様に、統括する外部 PLC が存在するが、監視のみを行い制御は行わない。

3.3.3 超伝導ソレノイド

ミュオン輸送ライン上にはヘリウム冷凍機を備えた超伝導電磁石が設置されている。この冷凍機の制御系は独立したコンピュータシステムが行っており、統括 PLC は状態を上位制御系に伝送するのみである。

3.4 ミュオン黒鉛標的

ミュオンの黒鉛標的は、一次陽子ライン上に言えば串刺し状に存在する。この為、ミュオン黒鉛標的上で何か重大な障害が発生すると、それは MLF 全体に影響を及ぼす深刻な事態になる。

このような特性上、ミュオン黒鉛標的では MPS が採用されており、何らかの異常が発生すると直ちにビームを停止させる機構になっている。

またミュオンで実験を行わない期間などがある場合、ミュオン標的は単なる陽子ビームの損失要因にしかならない為、ミュオン標的そのものを、陽子輸送ライン上から外すことが出来る。

3.4.1 標的移動機構

ミュオン黒鉛標的はステッピングモーターによる縦軸移動式であり、次の三つの高さ位置をとる。標的の移動する際は、陽子ビームを一時停止する。

(1) 退避位置

ミュオン黒鉛標的のコンポーネントが上にあり陽子ビームライン軸上から見ると、何も構造物がない状態。陽子ビームは全く損失なく中性子水銀標的に向かう。

(2) プロファイルモニタ位置

ミュオン標的は黒鉛標的だけが縦軸の先部分に付いている訳ではなく、黒鉛標的の直下にはワイヤによるプロファイルモニタが取り付けられている。

先の退避位置から少し下方向に黒鉛標的コンポーネントを軸移動させ、このプロファイルモニタが丁度陽子ビームライン軸上に来る位置を、プロファイルモニタ位置という。

3NBT 陽子ビーム輸送ラインのチューニングを行う際に使用される。

(3) 標的位置

黒鉛標的コンポーネントを一番下まで下ろした状態。黒鉛標的に陽子ビームが当たっていると黒鉛標的を固定している固定ロッドや標的が収納されている真空容器が散乱した陽子ビームなどによって熱変形をしてしまい、標的位置がずれてしまうことが予測されている。よって、標的位置に近い遮蔽体に固定ロッドを押し付けて位置決めをするためにモーター停止後にブレーキをかけず、停止電流もモーターに流さないようにしている。固定ロッドの押し付けは、真空力によって標的コンポーネントが引かれる力を利用する。

3.4.2 ミュオン標的 MPS

ミュオン黒鉛標的は、一次陽子ライン上に位置する機器であり、何らかの異常が発生した場合、速やかに陽子ビームを停止しなければ黒鉛標的の本体や周囲の機器に悪影響を与える。

ミュオン標的で MPS として想定されるのは、概ね以下のようなものである。

(1) 標的移動異常

標的を移動させる時に発生しうるエラー群。先の三点の位置のいずれにも標的がない（=変な高さに標的がいる）、モーターそのものが移動中である、などのエラーがある。

(2) 標的温度異常

陽子ビームが黒鉛標的に当たると、著しい発熱が起きる。この為、標的温度を監視し、温度が高くなり過ぎるようであれば、MPS を発報しビームを止めなければならない。

標的の本体や周辺コンポーネントの温度状態を監視している。

温度の計測には熱伝対を使用する。

(3) 標的冷却水異常

標的の温度上昇を緩和する為、黒鉛標的には冷却水による水冷が施されている。この冷却水の状態

を監視することも、標的自身の温度を監視するのと同様に重要なことである。

標的本体や周辺のコポーネントへの冷却水の流量計の流量低アラーム状態が MPS の条件に入っている。

3.5 M1 ライン/M2 ライン空調

図 1 で示されるように 3NBT の最下流の領域は M1 ライン/M2 ラインとして区分される。この領域の空調を制御する為に独自の空調制御機構があり、この制御系には監視用の PLC がある。

この空調は、高放射線場である M2 トンネルで生成された硝酸による装置の腐蝕を防ぐため、トンネル内の空気を循環させる目的で設置されたもので、MPS として保護機構を持つ。加速器運転中は気密を担保するためのダンパが閉状態での循環運転を行う。放射化した空気の漏洩を防ぐため気密ダンパの閉は MLF の運転条件となっている。

3.6 「リモート」と「ローカル」の制御モードを持つ装置

MLF 全体の運用に関わる機器については、「リモート」と「ローカル」の二つの制御モードを持つ。

基本的な使い分けは、ローカルモードで立ち上げを行い、機器が安定動作に達したらリモートに切り替えて、あとは MLF 制御室から制御を行う、という考え方である。

ミュオン実験施設において、MLF 制御室とのリモート制御モードを備えるのは、3NBT の運転に直結するミュオン黒鉛標的や M1/M2 ライン空調制御盤などの MLF 制御設備である。

図 13 に MLF 制御設備のリモートローカル切り替えの IBD 図を示す。

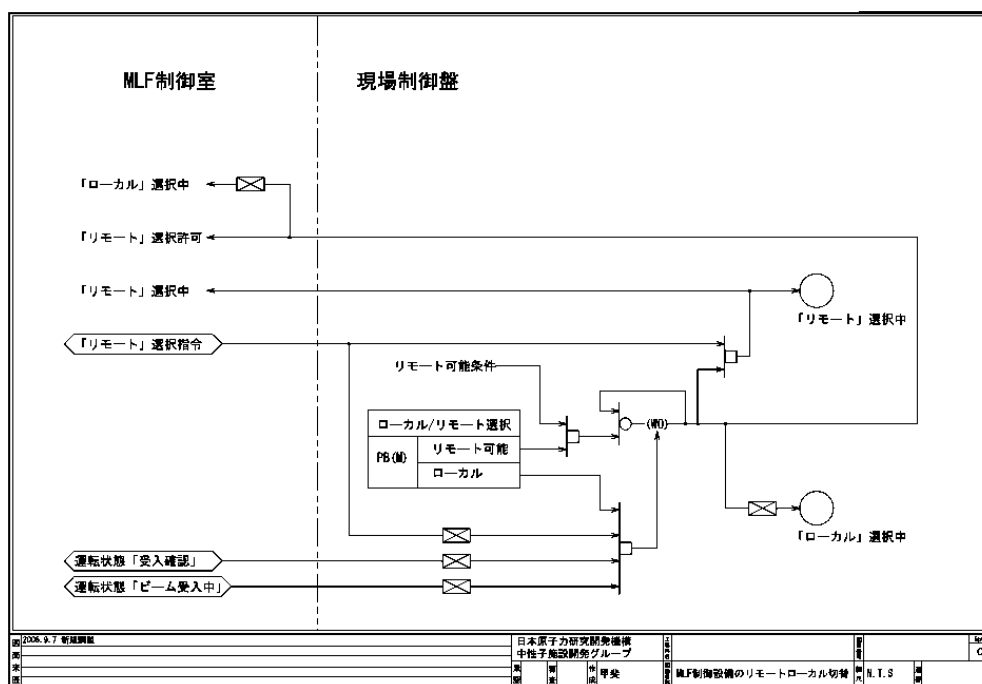


図 13. MLF 制御設備のリモートローカル切替

3.7 ミュオン実験施設関連の MLF 制御系に関わる PLC のリンク形態

MLF 制御系に直接接続される機器の制御用 PLC には、MLF 制御系で採用されているのと同じ、三菱電機製の Q シリーズが採用されている。

通信方法は PPS や MPS やの直接的な統合信号についてはハードワイヤリングを 2 系統使用している。詳細な状態信号は MELSEC-LINK という三菱電機 PLC シリーズ独自のループバック式リンクシステムにて信号の伝送を行っている。

図 14 に MLF 制御機器で使用されている PLC のネットワークリンク図を示す。

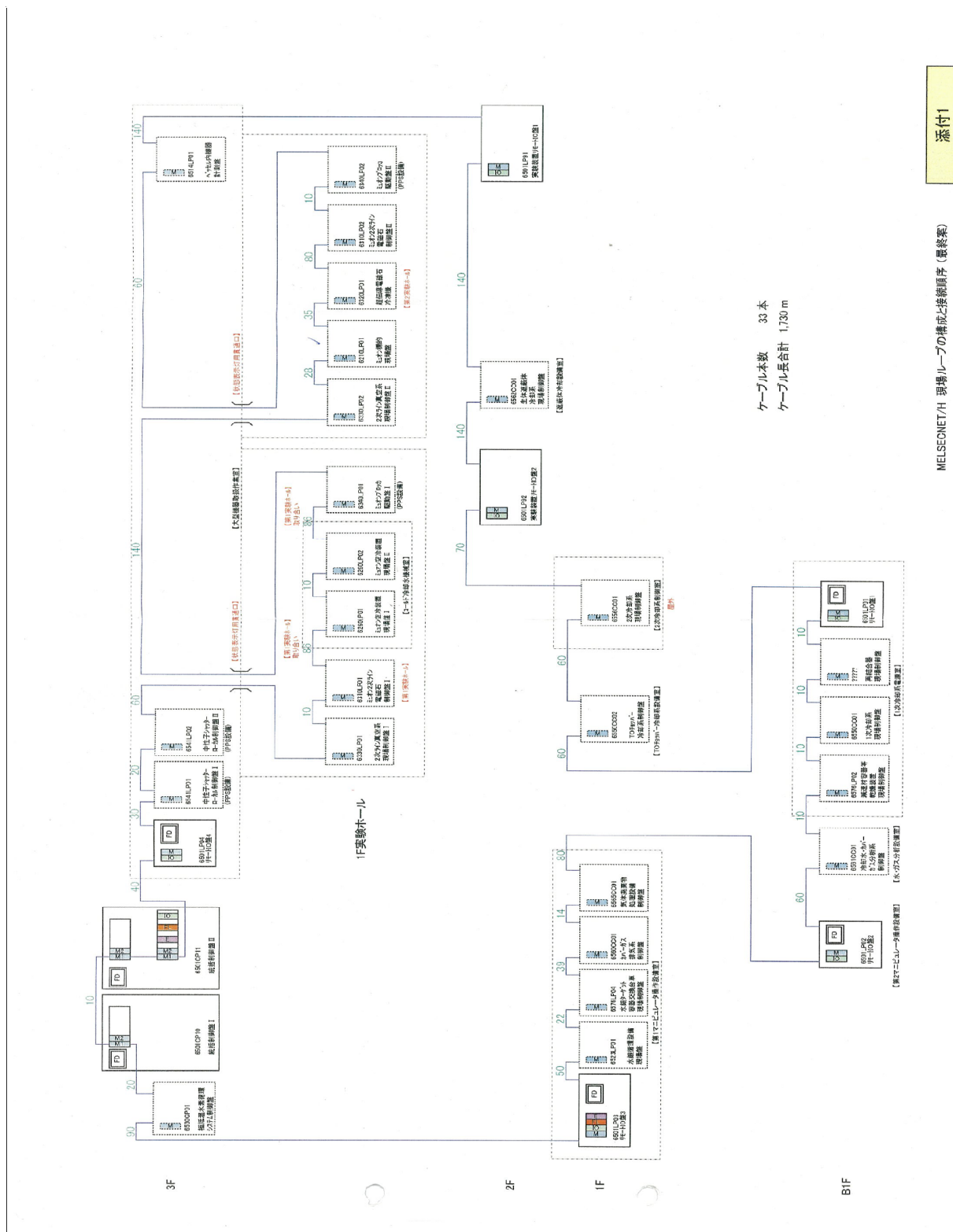


図 14. MLF 制御機器に使用されている PLC のネットワークリンク図

4 MLF 実験施設の PPS/MPS について

MLF の中性子ビームラインは最大で 23 本のビームラインを設置できる。それぞれの実験装置ごとに特性があり、それ故に共通性を持った設備というのは導入しにくい面があると思われる。また、ミュオン実験施設

添付1

に関係する特殊な制御機器は、殆どが独自の仕様を持っている。一方で、MLF のようにいろいろな所属の装置設置者が入り混じって存在する施設では、各実験装置は設置者それぞれの流儀で方式がばらばらになりがちだと思われる。

しかし、安全面に関しては、施設全体で可能な限り統一的なシステムを導入しなければ、管理と運用が困難になり、安全性が損なわれるという結果にもなりかねない。

その点から考えると、現在の MLF の PPS や MPS は全ての機器が同じシステムに乗ることが出来ており、安全面の不統一性を原因とする信頼性の低下という危険性はあまり高くないと考察する。

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. Instrum. Methods, A 600, p.176 (2009)
- [2] J-PARC Muon Control System, W. Higemoto et al., Nucl. Instr. Meth. A 600 (2009), pp.179-181.
- [3] Design, Construction and Operation of General Control System of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF-GCS) in J-PARC, K. Sakai et al., JAEA-Tech 2009-042 (2009) , (in Japanese)
- [4] Development status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC, K. Sakai et al., Physica B 385-386 (2006), pp.1324-1326.
- [5] Construction status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC, K. Sakai et al., Nucl. Instr. Meth. A 600 (2009), pp.75-77.