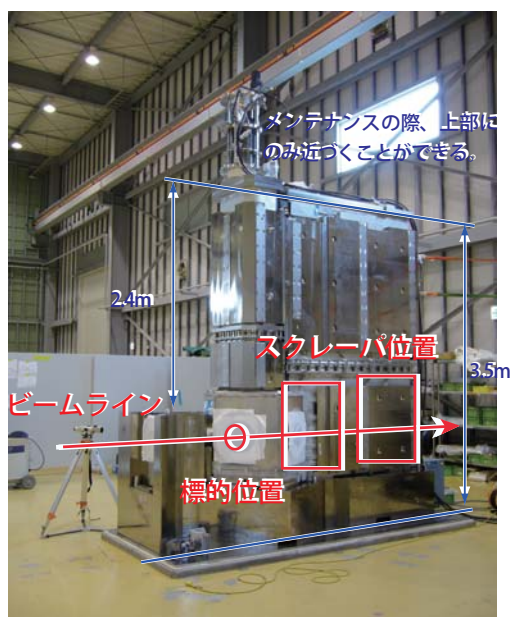


ミュオン生成標的

加速器によって加速された陽子を炭素などの原子核と衝突させることで、ミュオンは生成されます。ミュオン生成標的には黒鉛を用いますが、陽子が衝突することによって、大きな熱を発生します。このため周囲に冷却水配管を埋め込んだ銅を配置し、発生した熱を除去します。銅と黒鉛は温度が上昇したときに膨張する度合いが異なるために、銅と黒鉛のちょうど中間程度の膨張率であるチタンが黒鉛と銅の間に挿入されています。また、一般に黒鉛は金属と接合することが難しい材料ですが、特殊な技法の開発により、その接合に成功しました。本施設のミュオン標的は様々な計算に基づいた設計、試作機による評価を経て、製作されました。



ミュオン生成標的チェンバ



ミュオン生成標的は陽子ビームライン中に挿入されます。ビームラインは空気が存在しない真空状態でなければなりません。そのためミュオン生成標的は標的チェンバと呼ばれる高さ 3.5m、長さ 3.5m の巨大な真空容器の中に格納されます。この容器には、標的で散乱された陽子が下流の機器まで飛んでいかないように止めるため、ビームを通す穴だけしか開いていない厚さ 80cm の銅ブロックが標的の後ろ側(下流側)に二台格納されています。標的チェンバは、高度な真空状態を実現するため、素材の選定・評価が行われました。

また、ミュオン標的は半年に一度、保守のため交換しなければなりません。しかし、ビームラインは放射化のため、人が近づいて交換作業をすることができません。そこで、遠隔操作での交換による標的位置の再現性なども考慮された設計となっています。

ミュオン生成標的の交換

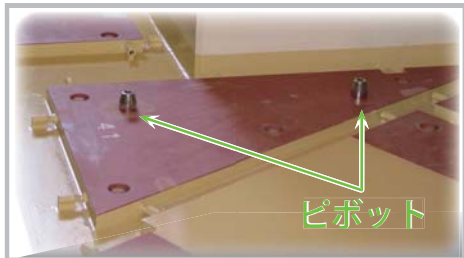
ミュオン生成標的は放射化のため交換の際には人が近づくことができません。そこで、遠隔操作による交換作業を行うことができる物質・生命科学実験棟内の放射化機器取扱室に輸送されます。標的輸送ためには遮蔽機能を持った容器が必要です。また標的の容器への格納を遠隔操作で行う必要もあります。このため、キャスクと呼ばれる、放射化した機器を遠隔操作で格納することができる、遮蔽機能付き輸送容器が開発されました。

キャスクにより放射化機器取扱室に輸送されたミュオン生成標的はマニピレーターと呼ばれる人間の手を模した装置で新しいものに交換されます。取り外された古い標的は廃棄容器内に保管され、放射能が低減されるまで管理されます。



アライメント ～座板とガイド～

ミュオン生成標的が設置され、陽子ビームが通り抜ける一次ビームラインでは強い放射線が発生します。そのため、ビームラインを構成する電磁石や真空ダクトなどの機器は高さ4mのメンテナンスエリアから挿入され、しかも正確な場所に設置される必要があります。そこで、まずピボットのついた座板をビームラインの底に正確に設置し、次にガイドの機能を持った周囲の遮蔽鉄に沿って円滑に機器を挿入します。座板上のピボットで装置の位置は正確に決まります。



遮蔽ガイド

ビームライン真空ダクト

一次ビームラインに設置される真空ダクトもピボットを利用して設置、位置決めがなされます。真空ダクトはコンクリート遮蔽体に取り付けられた厚さ250mmの鉄遮蔽体の下側にサポート機構を用いて取り付けられています。

コンクリート遮蔽ブロック

真空ダクト



サポート機構を用いて取り付けられています。サポート機構と鉄遮蔽体の間にはシム（薄い板）をはさむことによって、短時間で高さ調整を行うことが可能な構造になっています。このように、加速器の運転開始後でも短時間でダクトの交換ができるような工夫がなされています。

未使用のビームライン

標的で発生したミュオンは二次ビームラインを通過して実験室まで運ばれます。二次ビームラインのうち、将来的には利用されるけれども加速器運転開始時には使用されないものはコンクリート遮蔽体で使用される時まで埋めておきます。これらのコンクリート遮蔽体は遮蔽体と遮蔽体の隙間を放射線が抜けてこないように複雑な構造になっています。クレーンで設置することの出来ないトンネル出口の遮蔽体はフォークリフトで実験室から設置を行いました。

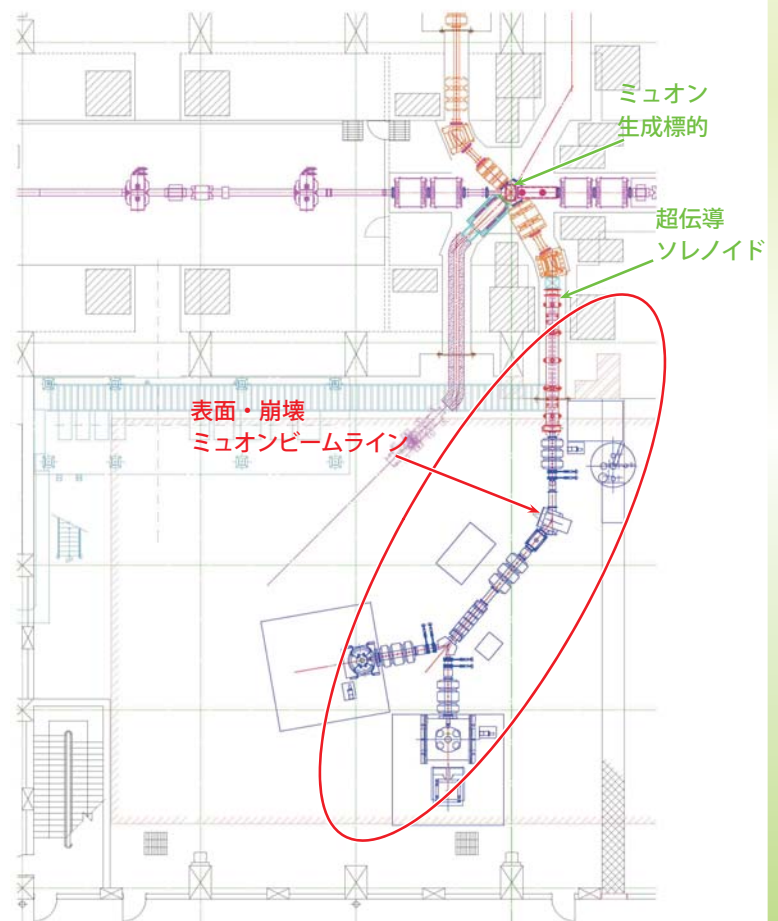


コンクリート遮蔽ブロック

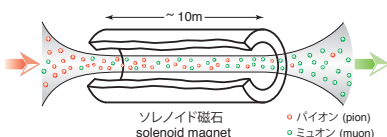
表面・崩壊ミュオンビームとは？

陽子ビームがミュオン生成標的に入射すると、パイ中間子と呼ばれる粒子がまず生成されます。このパイ中間子が崩壊する際にミュオンが放出されます。史上初のミュオンビームは標的中でこれらの反応がすすみミュオンとなったものから作られました。しかし、そのようなミュオン(表面ミュオン)はある決まったエネルギーになってしまうため、限られた実験にしか使えませんでした。実は、ミュオン生成標的で作られたパイ中間子の多くは標的の外に放出されています。これらのパイ中間子は様々なエネルギーを持って放出されるため、崩壊してできるミュオン(崩壊ミュオン)のエネルギーも多様なものになります。

KEK で開発された崩壊ミュオンビームラインでは、パイ中間子がビームラインを飛行中に崩壊してできたミュオンを、超伝導ソレノイド電磁石を用いることでビームとして収束することに成功し、多種多様な研究に応用されてきました。本施設でもその技術は受け継がれ、発展が期待されています。



超伝導ソレノイド電磁石



超伝導ソレノイド電磁石は、円筒状に巻かれた超伝導線に600Aもの電流を流し、5テスラという高い磁場を円筒の中心軸方向に発生させることができます。ミュオン生成標的から放出されたパイ中間子がこの磁石に入射すると、電磁石に沿ってらせん状に飛行し、その間にミュオンに崩壊し、ミュオンビームとして電磁石から取り出されます。

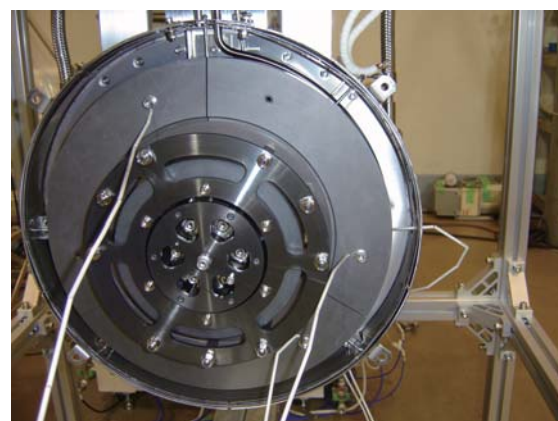
最も重要な部品である、超伝導コイルはKEKで20年以上使用されたものが本施設でも再利用されます。写真の黄色い装置が超伝導ソレノイド電磁石です。

超伝導ソレノイド電磁石は、陽子ビームラインのトンネルを貫通するように設置されるため、実験ホールから専用の移動装置を用いて挿入されます。この移動装置は電磁石本体とともに約50トンの鉄遮蔽体も運び、0.5mmという高い精度でトンネル内の装置に連結されます。

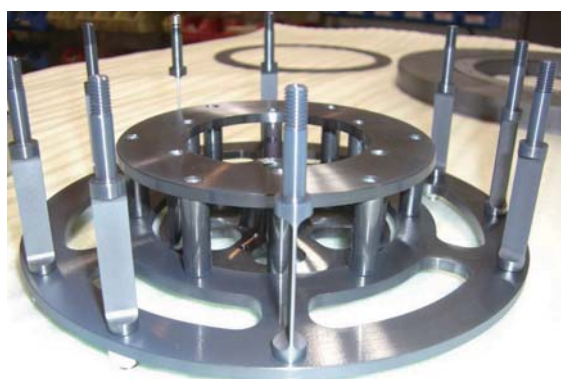
ミュオン回転標的

ミュオン回転標的の設計

これまでの固定冷却方式のミュオン標的では、標的材料である黒鉛材が陽子ビームの放射線損傷によって収縮を起こし、やがて破損します。現在の評価では約半年に一度、ミュオン標的を遠隔操作にて交換をする必要があります。そのため、黒鉛材における放射線損傷を分散するために黒鉛材を回転させる回転標的方式への変更を計画しています。この方式により黒鉛材の寿命は大幅に長く延ばせますが、最終的には回転体を支持する軸受けが寿命を決めてしまうと予測しています。そのため、軸受けは非常に注意深く選定する必要があります。また、放射線環境下において正常に動作するモーターの選定や、異常が発生した場合にその異常を検知する仕組みも注意深く考える必要があります。



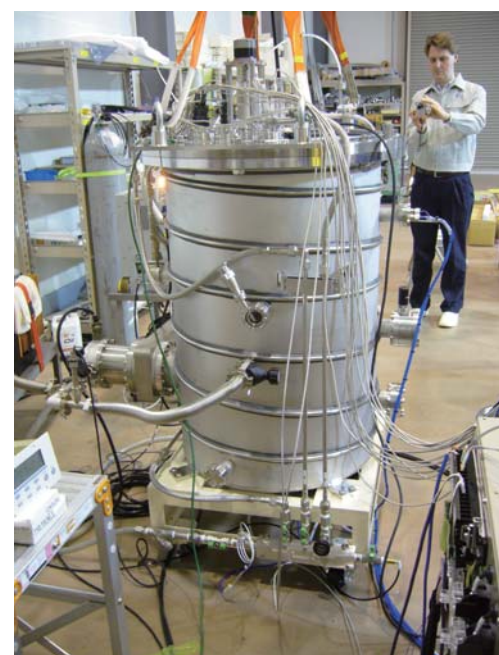
ミュオン回転標的の軸受け



放射線環境下の真空内において高温で回転する回転体を保持するためには固体潤滑材を用いた軸受けが用いられ、無機材質の固体潤滑材を用いることで放射線の影響は低減されます。その場合、軸受けの寿命は使用温度、荷重、回転速度、使用環境圧力などで決まります。軸受けの温度は低いほど、その寿命が延びることが知られています。そこで、温度を低く抑えるために発熱部である黒鉛材から軸受けへ熱が伝わりづらい構造として、また外部に熱が輻射によって逃げやすいように回転体支持部には黒体化処理を施しています。温度分布、熱応力分布はコンピューターを用いたシミュレーションによって評価を行っています。現在の構造では黒鉛標的部の温度が約 750℃となり、そのとき軸受けの温度は約 150℃になると予想されています。

ミュオン回転標的の試作機

軸受けの固体潤滑材の材料候補として二硫化モリブデン、二硫化タングステン、銀が考えられています。現在の条件下で、これらの固体潤滑材を用いたとき 5 年～数十年の寿命になると予想されていますが、実験的に確認することは必要です。そこで私たちは、実際に軸受けの寿命を評価できるように回転標的を加熱しながら回転できるような試作機を製作しました。短期間で寿命が評価できるように実際に用いる回転速度の約 100 倍で回転できるようなモーターを用いています。今後、試作機を用いて軸受けの寿命試験を行い、実際にビームラインに設置する回転標的の構造や固体潤滑材の種類を決定する予定です。



ミュオン標的の交換

ミュオン標的は今の固定冷却方式のままでは半年に一度（陽子ビーム 1MW 時）交換しなくてはならないと予想されています。しかしながら、ミュオン標的は非常に強い陽子ビームの中に置かれるので、高度に放射化してしまいます。そのため人が近づいて交換作業をすることができません。そのため放射化機器取扱室（ホットセル）と呼ばれる場所で、遠隔操作で交換する必要があります。放射化したミュオン標的がホットセルの中にあるときには、人はホットセルの中に入ることができません。よって、分厚い鉛ガラスと呼ばれる窓から目視で見ながら、またはカメラによってホットセルの内部を観察しながら交換作業を行います。



遠隔操作による交換

標的を交換する際には、アタッチメントと呼んでいる支持機器を上下、左右、前後、回転できる駆動装置に設置します。次に標的の固定されているロッドをアタッチメントによって保持



して、その後にロッドを遮蔽体に固定しているボルトを緩めます。このボルトは遠隔操作機器であるパワーニューピレーターによって取り外されるので、特殊な形をしています。分厚い窓やカメラから正確にアタッチメントの位置を人の目で確認することは、困難です。よって、アタッチメントが引っかかったりしたときに、異常を検出できるように駆動装置のモーターにかかる荷重を計ったりしています。

クレーンによる機器の移動

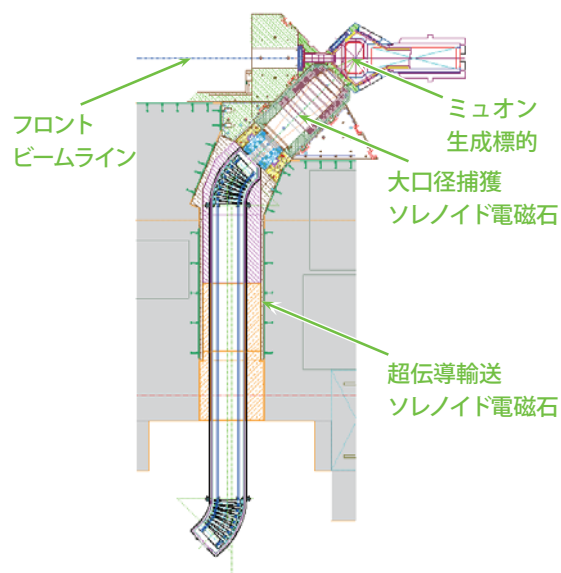
遠隔操作で交換する時には、人が行うような細かい作業をすることが困難です。例えば、ホットセルの中の機器をクレーンで移動する際に、重心調整をするために吊り具の長さを調整することができません。また、アタッチメントは標的が保持されている場合と保持されていない場合で重心位置が異なります。よって、アタッチメントはクレーンによって吊られる位置が二ヶ所あり、さらに機器の重心の上に正確に調整されています。また、機器の回転や振れを手で支えることができないので、慎重な運転をする必要があります。このため、エンコーダと呼ばれる機器で計測されたクレーンの位置はホットセルの外で確認する事ができます。



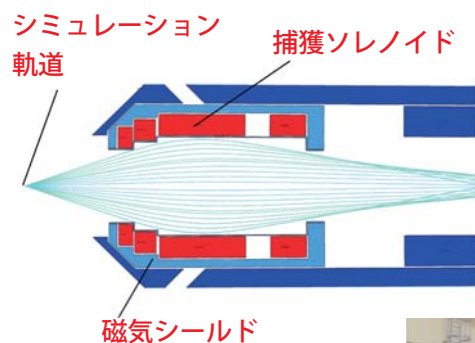
大立体角ミュオンビームライン

生成標的で作られたミュオンはあらゆる方向に放出されます。それらのミュオンは電磁石で収束され、ビームとしての利用が可能になります。しかし、従来は電磁石の大きさや設置場所の制約などにより、0.1%にも満たない数のミュオンしかビームとして使われていませんでした。この点を改善し、従来の100倍以上の数のミュオンを利用することを大立体角ミュオンビームラインでは目指しています。

このビームラインが完成すると、従来のビーム強度では難しかった様々な研究に利用することが可能になります。このビームライン開発の鍵は、標的から放出されるミュオンを最大源に取り込む大口径捕獲ソレノイド電磁石と、ミュオンを効率良く実験室に輸送する超伝導輸送ソレノイド電磁石にあります。



大口径捕獲ソレノイド電磁石



製作した捕獲
ソレノイドの写真



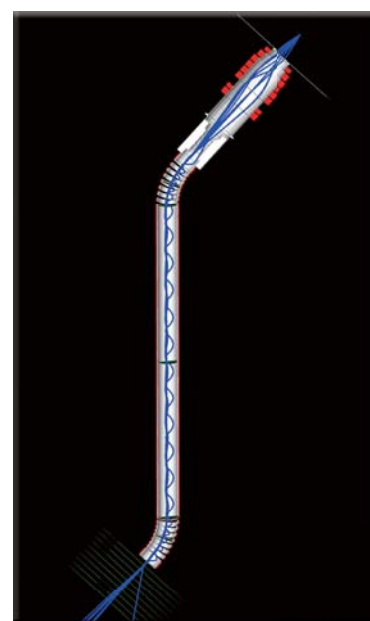
大強度のミュオンビームを作るには、生成標的からのミュオンを可能な限り多く電磁石に取り込む必要があります。そのため、ビームラインの入り口に大きな口径をもつソレノイド電磁石を使用することが計画されています。生成標的から放出されたミュオンはソレノイド電磁石の磁場に取り込まれ、下流側に設置された超伝導輸送ソレノイド電磁石の入り口に向かって収束されます。

ミュオン生成標的の近くは放射線・放射能の影響が深刻なため、そのことを考慮した設計がなされています。

超伝導輸送ソレノイド電磁石

大口径捕獲ソレノイド電磁石で取り込まれたミュオンは超伝導ソレノイド電磁石の作る強力な磁場によって、実験ホールへと10 mほどの距離を輸送されます。

この超伝導輸送ソレノイド電磁石は6 mの直線部分の入口と出口に、各々45度の偏向角を持つ湾曲部分に取り付けられた構造になっています。これによりミュオン生成標的からの放射線が実験室に及ぼす影響を低減することができます。さらに正負ミュオンを同時に輸送することが可能となり、従来は不可能だった様々な実験が可能となります。評価計算によると、輸送ソレノイド電磁石入口に入射したミュオンは、ほぼ100%の効率で輸送できます。現在、湾曲部の超伝導ソレノイドの試作機を製作し、冷却試験・励磁試験を行っています。



ミュオン軌道の
シミュレーション結果

ミュオン制御システムとは？

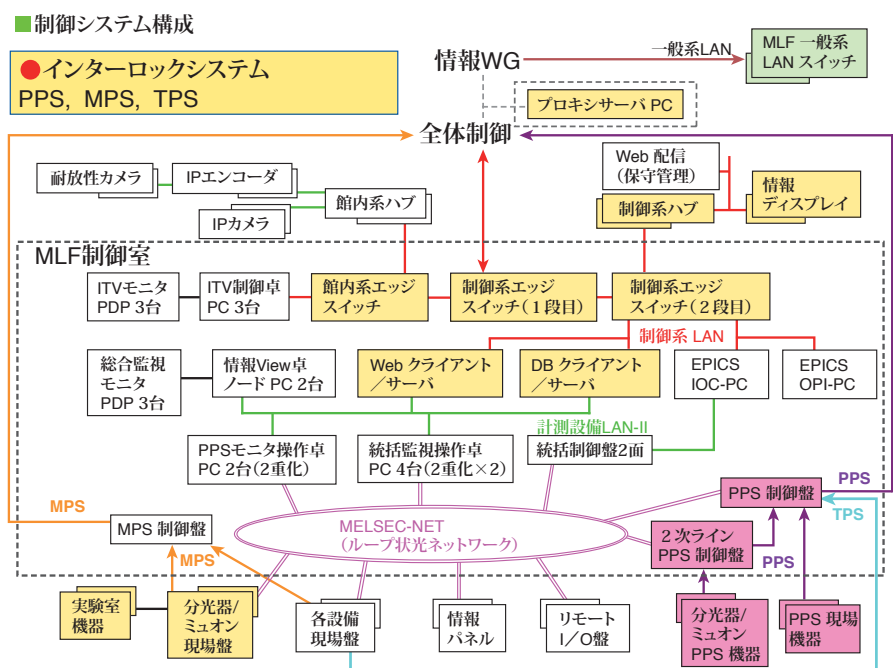


制御機器の一例

本施設には異なる機能を担った多くの装置が備え付けられています。それらの装置すべてが正常な状態で動作してはじめてミュオンビームを得ることができ、様々な実験に利用することが可能になります。すべての装置を正常に、そして安全に使うには、その状態を常に監視し、必要に応じて制御することが必要です。ミュオンビームに関する装置の状態を常に監視、記録しているのがミュオン制御システムです。人の安全を最優先に、装置の動作を監視し、制御しています。

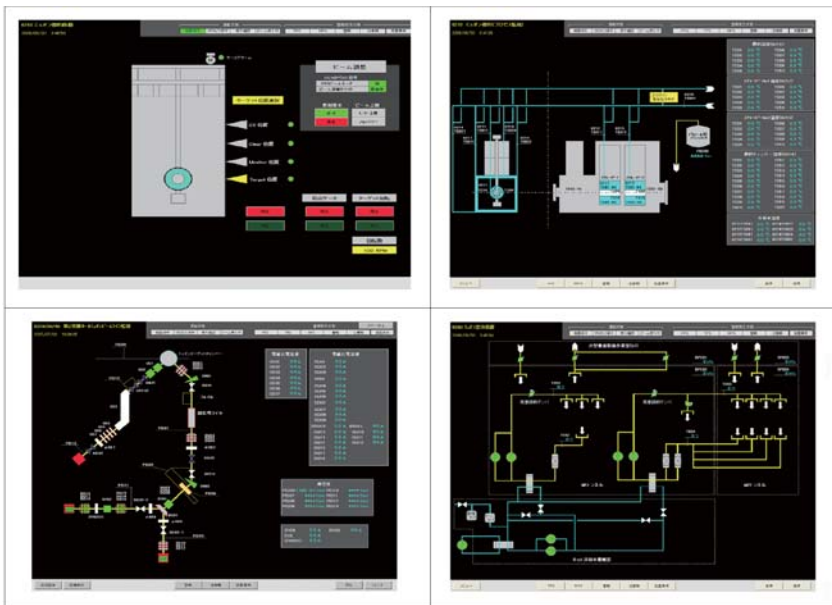
MLF 制御システムとミュオン制御システム

ミュオン制御システムは物質・生命科学実験施設（MLF）制御システムの一環です。MLF 制御システムはミュオンを含んだ MLF の全ての装置を把握し、全ての人が安全に作業できることを最優先としたシステムとして構築されています。これらの情報は人とコンピュータにより監視、制御され、状態が時々刻々記録されていきます。さらに加速器の運転状況など実験者に必要な情報が配信され、実験の一翼を担ってもおります。



ミュオン制御システムと MLF 制御システム

人と機器の安全を保証するシステム



制御用コンピュータ画面の例

ミュオン制御システムは各装置の状態を取り込む専用コンピュータ群から構成されています。これらの情報は①超伝導ソレノイド電磁石、②真空関連の機器、③陽子ビームライン内の空調機器、④陽子ビームライン電磁石、⑤ミュオン生成標的、⑥実験エリアへの入退域の6系統の制御盤から構成され、全ての装置の状態を把握しています。事故を未然に防ぎ、常に人が安全で、装置の正常な動作を保証するシステムとなっています。

陽子ビームライン用の電磁石電源

M2 トンネルの電磁石はミュオン生成標的から中性子生成標的に至る陽子ビームライン用の電磁石と、ミュオン標的から発生するミュオン、パイ中間子を実験ホールまで導くミュオンビームライン用の電磁石に分けられます。これらの電磁石には各々、電流を流すための電源が必要です。右の写真は陽子ビームライン電磁石の電源です。

陽子ビームライン電磁石では、ビームを収束させる電磁石用として 1200A 140V と 600A 150V の電源が使われ、ビームの軌道補正を行う電磁石用としてバイポーラ（両極性）電源が使われています。同規格の電源 2 台を一組として、一方の+極と他方の-極を共通の送電線で接続する方式（3 線式）が一部で採用され、これにより、送電線からの発熱を半分に、敷設スペースを 25% 減らすことに成功しました。



陽子ビームライン用電磁石電源正面



陽子ビームライン用電磁石電源背面

送電線



圧縮処理されたケーブル端子
と引っ張り試験機

圧力不足で抜けた端子

M2 トンネルの送電線は、装置保守用の非常に狭いスペースに敷設するため、細線構成ケーブルという特殊なものが使われました。このケーブルは、直径 0.45mm の細い銅線（素線）を、多いもので 3600 本より合わせて作られています。通常のケーブルに比べて柔軟性に優れ、小さく曲げることができ、狭いスペースへの敷設には最適なものです。しかし、ケーブル端に取り付ける電磁石との接続端子には、素線が細いために素線の切断や端子の緩みが発生する可能性があります。そこで、模擬体での試験を実施し、端子の固定方法として最適な条件が確定・採用されました。

このようにして M2 トンネル内の電磁石用に、総長 6000m もの細線構成ケーブルが敷設されました。

ケーブル貫通孔と電源ヤード

ミュオンビームライン用の電磁石電源は実験ホールの電源ヤードと呼ばれる場所に設置されています。M2 トンネル内の電磁石には、トンネル壁面の貫通孔を通して、送電線が繋がられています。この貫通孔は幅 2m 高さ 1m 奥行き 1m の鉄ブロックに直径 85mm の穴を 50 箇所開けたものです。そのうち 43 箇所は送電線に、7 箇所は制御の信号線用に使用されています。送電線用の穴には、直径 60mm の銅棒が差し込まれ、その両端に送電線は接続されています。

銅棒の絶縁のための材質や、ビームライントンネル内から実験ホールに空気が漏れないようにするための気密材などは放射線耐性のあるものが採用されました。また、将来的な改修に備え銅棒は貫通孔から取り外し、交換が可能な構造になっています。



電源ヤード
ケーブル貫通孔
ケーブル貫通孔と電源ヤード



ケーブル貫通孔(第2実験ホール側)



ケーブル貫通孔(M2トンネル側)

陽子の輸送 ～ M2 トンネル～

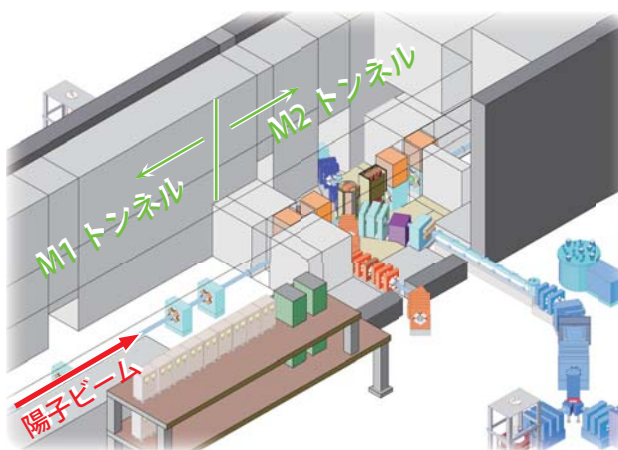
3GeV シンクロトロン^(注1)で加速された陽子はビームラインを通過して物質・生命科学実験棟に入ってきます。物質・生命科学実験棟では、この陽子を黒鉛や水銀と衝突させることによってミュオン^(注2)や中性子を生成し、それらの粒子は様々な実験に応用されています。実験棟内に入射した陽子はまずミュオン生成標的（黒鉛）を通過し、その後33m下流に設置された中性子生成標的（水銀）に入射します。陽子を所定の軌道に収束させながら輸送するため、物質・生命科学実験棟内には電磁石をはじめ多くの装置が設置されています。

ミュオン生成標的ではミュオン以外に中性子などの放射線が大量に発生します。その影響が深刻な区域はM2 トンネル^(注3)と呼ばれ隔離されています。M2 トンネルに設置される電磁石をはじめ多くの装置は、通常の機能に加え放射線遮蔽や放射能耐性など特殊な性能を有したものとなっています。M2 トンネルは床から4mの高さまでコンクリートで埋め尽くされ、ビームラインに沿って1.8m幅の渓谷が切り欠かれた構造になっています。電磁石などの装置はこの渓谷にはめ込むように設置されています。

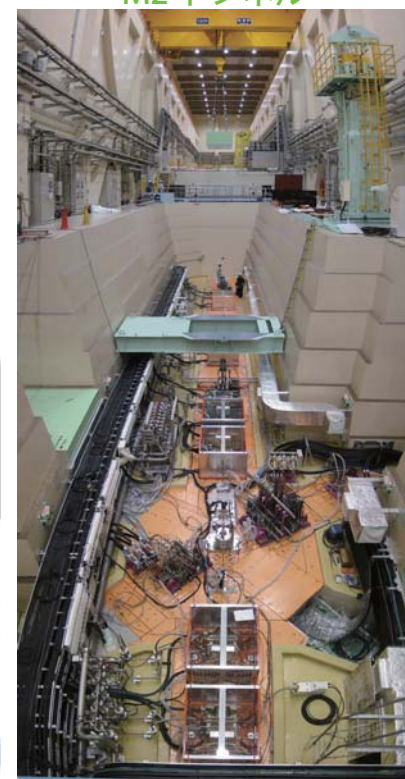
注1：シンクロトロンはリング形状を持つ代表的な加速器の一種です。3GeVは粒子のエネルギーを表し、30億ボルトの電圧で加速された時のエネルギーという意味になります。

注2：ミュオンは電子と同じ種類に属する素粒子の一つです。電子とよく似た性質を持ちますが、200倍重い質量、100万分の2秒の有限な寿命といった異なる性質も持ちます。

注3：放射線の影響が比較的軽度の区域はM1 トンネルと呼び、M2 トンネルとあわせたNM トンネルは放射線管理のため加速器運転時には立ち入り禁止区域となります。



主だった装置の設置が完了した
M2 トンネル



M2 トンネル内の電磁石

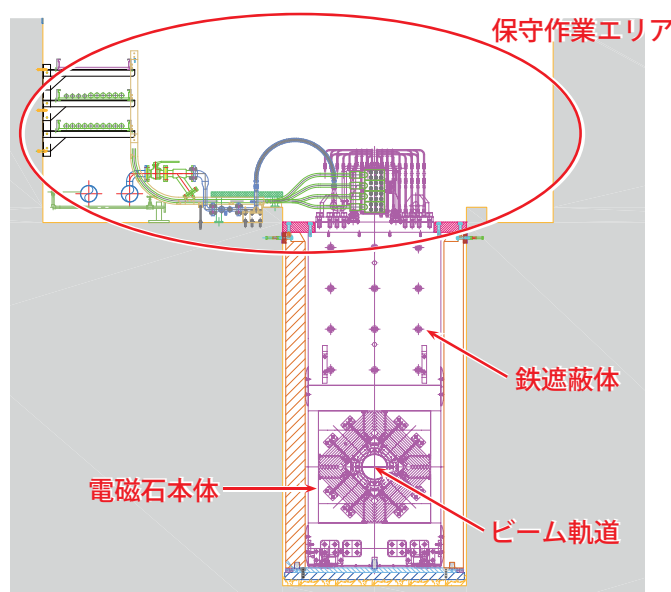
M2 トンネル内には陽子ビームを収束するための電磁石、建屋沈下などの不測の事態に対応してビーム軌道を補正するための電磁石が合計で10台、ミュオン生成標的から発生したミュオンの収束や偏向のための電磁石が合計8台設置されています。M2 トンネルはミュオン生成標的で発生した中性子などの放射線や放射能の影響を強く受ける場所ですから、これらの電磁石は磁場を生成する本体部分の上に遮蔽用の鉄ブロックをのせた縦長の構造をもち、重量は大きいものでは50tにもなります。加速器の運転開始後には激しい放射化のため電磁石本体付近に人が近づくことはできません。そこで、この縦長の電磁石をビームラインに沿った渓谷に落とし、

保守作業は渓谷の上に顔を出した遮蔽ブロックの上面でのみ行う

ように設計されています。また、使用材料は放射線損傷に対して強いものが選ばれ、材料劣化などによる事故を未然に防いでいます。さらに、万一の場合にも対応できるよう、遠隔操作での設置を考慮した設計となっています。



電磁石の設置作業



保守作業エリア

電磁石本体

鉄遮蔽体

ビーム軌道

ビームラインと真空

ビームラインとは粒子ビームの通り道です。空気の分子によって肝心の粒子ビームが通り道の途中で散乱されたりすることのないよう、ビームラインは真空に保たれています。M2 ビームラインと呼ばれる陽子1次ビームラインの真空は運転時にはおよそ0.000000001気圧です。普段の生活では馴染みのない圧力かもしれませんが、粒子ビームを扱う真空としては標準的なレベルです。

ビームラインはさまざまな機器がつながって構成されていますが、この継ぎ目をとって空気の分子が浸入すると真空は保てなくなります。一方、メンテナンスなどでこのような機器を取り外すときには継ぎ目の部分がぶつからないよう十分なすき間が開いていなければなりません。しかしJ-PARCのような大強度陽子ビームの機器では運転終了後も強い残留放射線があり、人が近づいて取り外す作業をするといったようなことは不可能です。しかも、普段、継ぎ目をシールするために使うゴムなどの物質は放射線に弱いので使えません。そこで遠隔から操作してビームラインの継ぎ目を脱着するような装置を新たに開発しなければならませんでした。この問題に対して私たちの採用した解決方法は**ピローシール**と呼ばれるものでした。



図1 ビームラインに設置されるピローシール

遠隔操作機構ピローシール

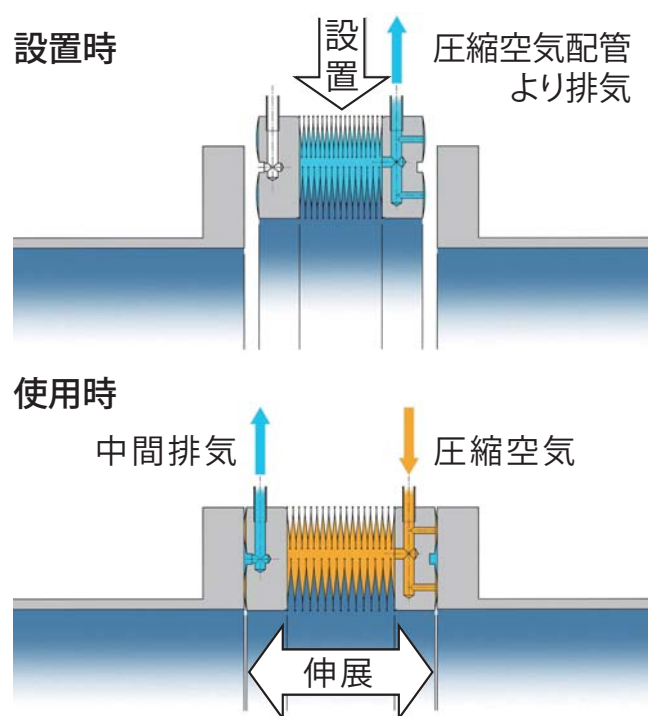


図2 ピローシールの作動原理

ピローシールとは図2にあるように伸び縮みできる「管」です。この「管」をビームラインに設置するときには縮めておきます。そして使うときには圧縮空気で伸ばして両端の継ぎ目に押し当てます。「管」の押し当てられている部分にはダイアフラムという薄い金属の板があり、このダイアフラムが強く押し当てられていることで空気分子の浸入を防いでいます。ダイアフラムが継ぎ目に押し当てられている力は1トン近くにもなります。

もちろん、ダイアフラムや継ぎ目の表面にキズや歪みがあったりすると、その個所をとって空気の分子が浸入してきてしまいます。そこで表面はキズや歪みのないよう特別の注意を払って加工がされています。



図3 ピローシール本体