



季刊誌

NO.20

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX 2025

特集

ミュオンのつくりかた

ミュオン(ミュー粒子、 μ)とは
ミュオンのつくりかた
ミュオン生成標的—固定標的
ミュオン生成標的—回転標的

安全監視系
保守
海外への技術提供—大回転時代—

河村 成肇 牧村 俊助 砂川 光 的場 史朗

ミュオンのつくりかた

J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) では、ミュオンビームや中性子ビームをつくり出して、基礎研究から応用研究まで幅広い研究を行っています。では、それらのビームはどのようにつくられているのでしょうか。

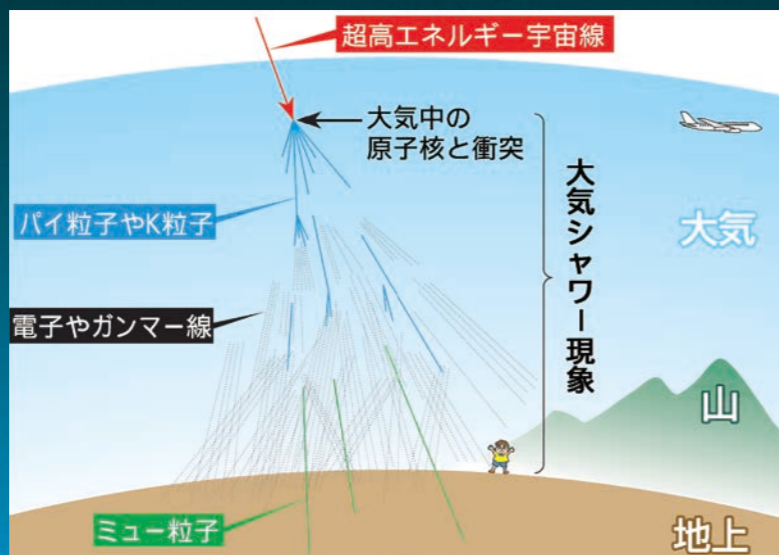
「季刊誌 J-PARC」では、2回に分けて、ミュオンビームと中性子ビームのつくりかたを探っていきます。今回はミュオンビームのつくりかたを見ていきましょう。

ミュオン(ミュ粒子、 μ)とは

ミュオンは高エネルギー陽子ビームと原子核の反応で生成されるパイ(π)中間子が短時間で崩壊することで生まれる素粒子で、質量は陽子の1/9、電子の200倍です。ミュオン自身の平均寿命も約2.2マイクロ秒(μs) (約50万分の1秒)と大変短く、陽電子または電子とニュートリノに崩壊・消滅します。負電荷の μ^- と正電荷の μ^+ があり、電荷の違いにより物質との相互作用が大きく異なります。

ところで、ミュオンは宇宙線ミュオンとして常に私たちに降り注いでいます。地上まで届く宇宙線の約7割がミュオンで、毎秒1個、掌を通り抜けています。ほとんどのものを通り抜ける性質を利用し、火山内部やピラミッド内部の透視に用いられています。

しかし、宇宙線ミュオンはエネルギーが高すぎるうえ、毎秒1個程度しか降ってこないため、ミュオンを使って実験する場合は、加速器を用いて人工的にミュオンをつくる必要があります。



地球に降り注ぐ宇宙線シャワー

KEK web「宇宙線観測と加速器」
<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2008/mayjun/TAlinac.html>

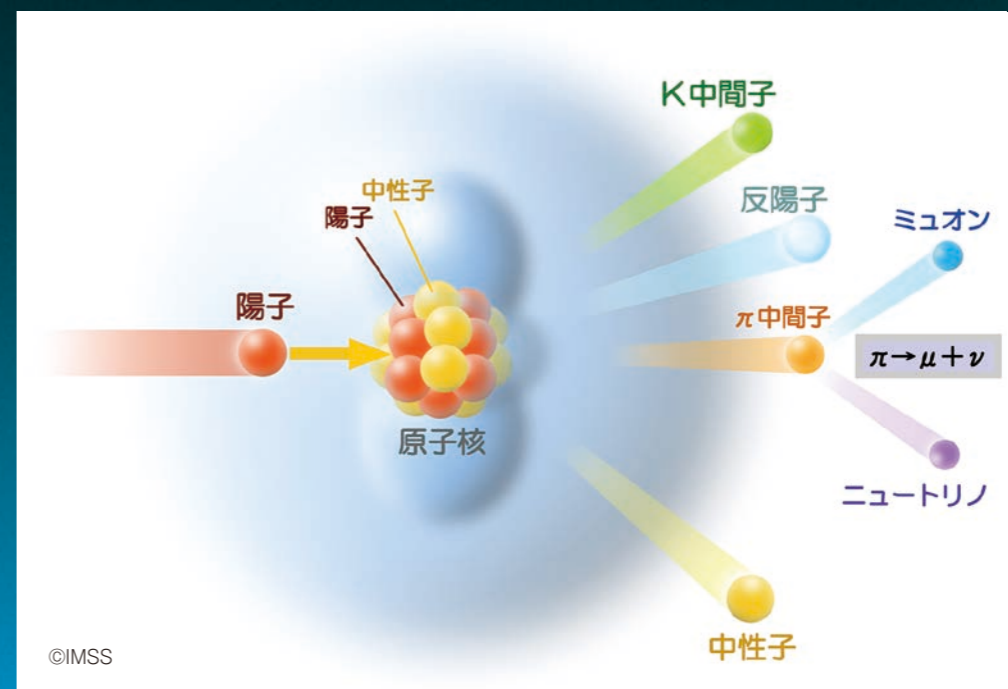
河村 成肇

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系
J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン
ミュオンセクション



ミュオンのつくりかた

J-PARC ミュオン科学実験施設 (MUSE: Muon Science Establishment) では、J-PARC の3GeV シンクロトロン (RCS) で光速の97%まで加速した3GeV (ギガ電子ボルト) 陽子ビームを黒鉛製のミュオン標的に衝突させることにより、 π 中間子を生成しています。 π 中間子は26ナノ秒 (ns) (10億分の26秒) でミュオンとニュートリノに崩壊します。こうしてできた世界最高強度のパルス状ミュオンをさまざまな物性・素粒子実験に利用しています。



©IMSS

ほぼ光速の陽子と原子核の衝突によって発生する様々な二次粒子

ミュオン生成標的 — 固定標的

標的に衝突させる陽子ビームが多いほど π 中間子、そしてそれが崩壊してできるミュオンがたくさん生成されますが、それに比例して標的はより高温になり、より放射線に晒されることとなります。そのため、標的は耐熱、耐放射線の材料を使う必要があります、低放射化で熱衝撃に強い等方性黒鉛が標的の材料として採用されました。

標的材料として優れている等方性黒鉛ですが、唯一の欠点として1MW照射下では放射線損傷によって1年で1%程度の寸法収縮が発生し、破損するリスクがあることが予想されていました。スイスのポールシェラー研究所（PSI研究所）では、標的を回転させることで長寿命化を図っていました。しかし、回転部のベアリングに使用する潤滑剤に開発要素があること、J-PARCでは段階的に陽子ビームの強度をあげることを考慮し、J-PARCで最初に製作する標的はシンプルな固定標的として、ミュオンビーム利用運転の運用経験を積みながら、回転標的の開発のための基礎データを収集していくこととなりました。



固定標的 (左) と回転標的 (右) の試験モデル

POINT 1 HIP法によってステンレスの冷却水配管が埋め込まれた銅フレーム

固定標的では、直径70mmの円盤状の厚み20mm黒鉛の周囲に、ステンレスの冷却水配管が埋め込まれた銅フレームを接合し、熱伝導によって冷却する方式を採用しました。ステンレス配管と銅はHIP (Hot Isostatic Pressing: 熱間等方圧加圧) 技術を用いて原子レベルで接合され、ビーム照射による発熱を効率よく除去することが可能となっています。

POINT 2 銅と黒鉛の間にチタンを挿入

同様の方式の固定標的を採用したイギリスのラザフォード・アップルトン研究所の中性子ミュオン施設では、銅と黒鉛の熱膨張率の違いから、加熱と冷却を繰り返すと接合部で破損してしまったため、J-PARCでは銅と黒鉛の間にクッションとしてチタンを挿入し、両者の熱膨張係数の差を吸収することで標的の長寿命化を図りました。

POINT 3 ビーム位置制御運転

MUSEでは2012年3月から標的は固定したまま、3週間ごとにビーム位置をミュオン標的中心からずらして、黒鉛の照射損傷を分散させるビーム位置制御運転を行いました。

こうした工夫により、2008年から2014年まで固定標的を交換することなく、最大0.3 MWのビーム強度に耐え安定稼働を達成しました。



回転標的用に開発されたベアリング。固定潤滑剤として二硫化タングステンブロックが使用されている。



ミュオン生成標的 — 回転標的

J-PARCではさらなるビームの大強度化を目指していますが、1MW利用運転では黒鉛材の寿命が半年程度と非常に短いことがわかり照射損傷を分散させるために回転標的を開発しました。

回転標的は外径330mm、内径230mm、厚さ20mmのIG-430U (東洋炭素) 製の黒鉛リングで、温度差による熱応力を低減するため3分割されたドーナツ型となっており、毎分15回転させて陽子ビームが当たる場所を変えています。

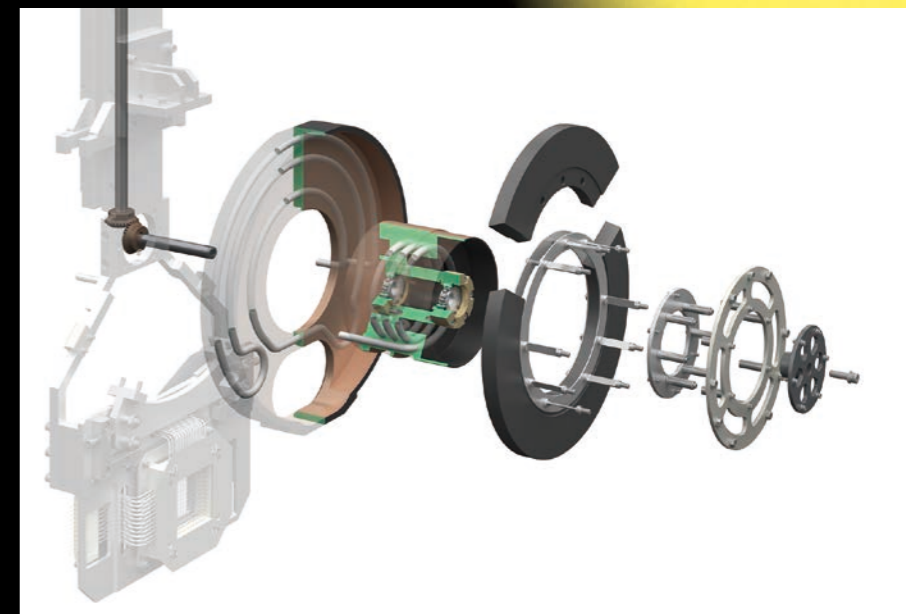
POINT 1 熱応力を吸収し、強さも併せ持つ黒鉛リング

黒鉛リングは軸受で保持されていますが、長寿命化には軸受部の温度をなるべく低くすることが重要となります。陽子ビーム強度が1MWに到達した際、黒鉛部の温度は650°Cを超えますが、軸に伝わる熱を小さくする、高温な黒鉛リングとその支持体との温度差による熱応力を吸収する、駆動系の異常により黒鉛リングの回転が急停止した際のトルクに耐える、など様々な条件を満たすために、黒鉛リングは円周方向に断面の長手を有するフラットバーで支持されています。

POINT 2 潤滑剤として二硫化タングステンを採用

回転標的で軸受が寿命を決定するので、特に潤滑剤の選定が重要となります。回転標的は真空内 (10⁻⁵台)、高放射線 (100MGy/年)、高温 (130°C) で使用するため、固体潤滑剤を用いる必要があります。J-PARCのミュオン回転標的では、二硫化タングステンを軸受の潤滑剤として採用しました。ベアリングの二硫化タングステンのブロックがなくなるまで20年程度と考えられており、その間は取り替える必要はなく長寿命化に貢献しています。

こうして開発された回転標的1号機は2014年から5年間安定に稼働し、2019年から2号機が稼働しています。



回転標的の分解図

牧村 俊助

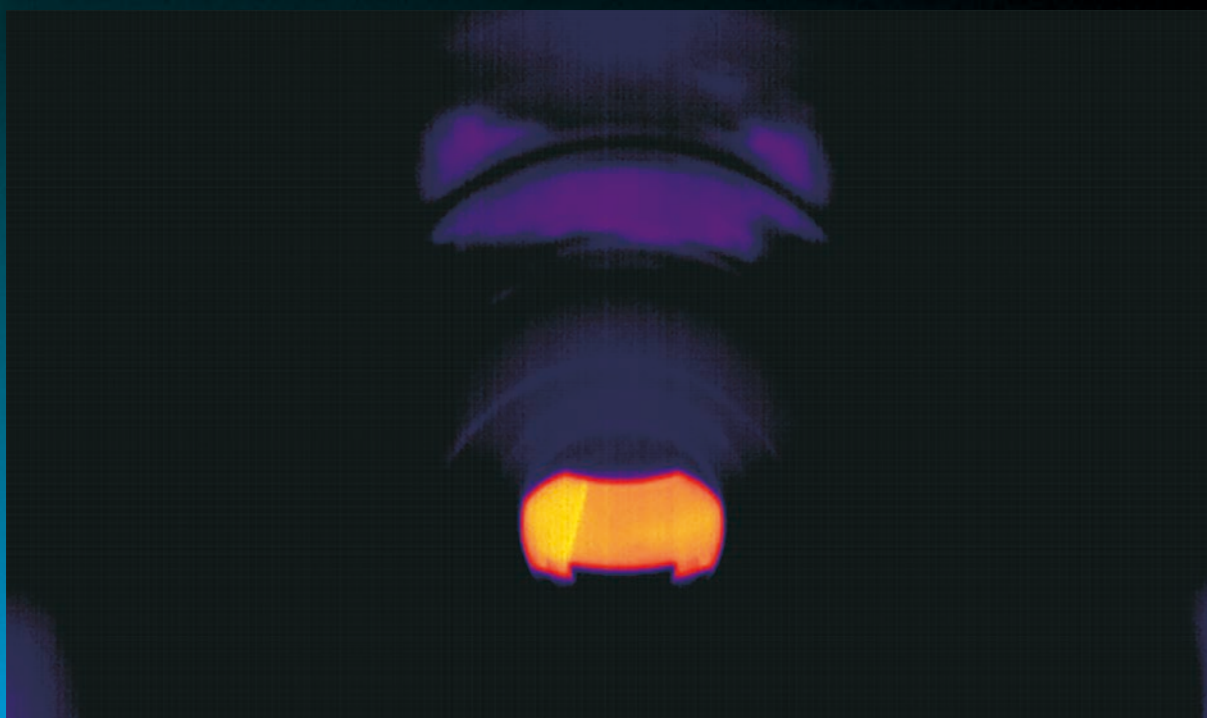
高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所 J-PARCセンター
素粒子原子核ディビジョン ハドロンセクション
開発時の所属はミュオン科学研究系



安全監視系

回転標的の黒鉛部は回転しているため、接触式温度計による温度の直接計測はできませんが、回転軸に熱電対を挿入することで、間接的に回転軸の温度を計測しています。また、回転モーターのトルクと回転速度は常時監視しており、試作機による試験では、軸受の損耗に伴って回転軸の温度が上昇する現象が観測されています。このことから、回転軸の温度計測は軸受の損傷度合いを間接的に計測することに役立つと言えます。さらに、軸受や黒鉛材を輻射により間接的に冷却する冷却ジャケットの温度や冷却水流量も計測し、冷却水の異常を監視しています。黒鉛材からの輻射による温度上昇を常時観測するために熱絶縁された熱電対が冷却ジャケットの左右に取り付けられていますが、標的の温度変化に対する反応温度が遅いという欠点があります。

そこで、回転標的の温度異常を迅速に検出するため、人工衛星用耐放射線赤外線カメラによる温度測定を開始しました。このカメラは照射試験によって1MW 運転で半年から1年程度の照射耐性があると予想されています。この赤外線カメラを用いて、運転中の回転標的の温度イメージを観測し、絶対温度を導出することに成功しました。測定温度は、設計値と概ね一致しました。このことから、シミュレーションの正確性および回転系の健全性の評価が可能となり、今後のさらなる大強度化の可能性を示しました。



赤外線カメラで撮影された回転標的。世界中のミュオン実験施設で初めて照射中の標的の温度分布が観測された

保守

J-PARC では、夏季期間にビーム運転を停止しメンテナンスを行なっています。回転標的のメンテナンスでは、回転系を中心とする動作部の消耗品を交換しています。例えば、回転モーターの寿命は、毎分15回転の運転を年間5000時間行った場合で約2年です。作業はメンテナンスチームによって行なわれます。クレーンや電気技術等の様々な資格を持ったプロ集団で安全に作業に当たっています。

メンテナンスの際、問題となるのは放射線防護です。ビームパワー増強に伴って、線量率が年々増大していますが、運転による知見の蓄積や J-PARC 内外の施設との連携により、課題解決に当たっています。

海外への技術提供 —大回転時代—

J-PARC 同様、ミュオンを用いた研究を行なっている PSI 研究所も黒鉛製の回転標的を使用していますが、回転標的の回転体を支える軸受が故障してしまうため1年間に3回程度、回転標的を交換していました。しかし、J-PARC で開発した二硫化タングステンベアリングを提供したところ、連続運転が過去最長となる1年に達しました。J-PARC MLF 建設時から PSI の研究者や技術者とは交流がありましたが、相互協力により、技術の向上を図っています。

ミュオン標的の全体図。
メンテナンス時は上部に設置されている
回転機構消耗品交換を行なう。



砂川 光

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系
J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン
ミュオンセクション



的場 史朗

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系
J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン
ミュオンセクション

表紙：ミュオン生成加速器の3GeV陽子ビームの黒鉛を置き、核反応で生成された中性子とミュオンカビームの両方を観測している。



ミュオン標的メンテナンスチーム

ご意見、ご感想をお待ちしております。 ✉ web-staff@j-parc.jp

< 編集後記 >

J-PARCでは、ミュオンを使った様々な実験が行われています。本季刊誌やプレスリリースなどでその成果を発信していますが、今回はミュオンのつくりかたに焦点を当ててみました。ミュオンが生まれる場所は、多くの技術と知恵が詰まった小さな標的です。これからも「J-PARCの縁の下の力持ち」について、みなさまにお伝えしていきます。