

3. ミュオン生成標的とその運用

高エネルギー加速器研究機構

的 場 史 朗

目 次

ミュオン生成標的とその運用

1 はじめに	3-1
2 J-PARC MLF におけるミュオン標的	3-1
2.1 標的設計の指針	3-1
2.2 標的材料の評価	3-2
2.3 固定標的	3-5
2.4 回転標的	3-7
3 安全診断系	3-10
4 保守	3-12
5 おわりに	3-13
参考文献	3-13

ミュオン生成標的とその運用

1. はじめに

放射線における世界で最初の二次粒子の生成として挙げられるのは、WC Röntgen による X 線発生の発見[1]ではないだろうか。1895 年 11 月 8 日の夜遅くに Röntgen がクルックス管の放電を切らずに部屋を暗くしたところ、1 m 程度離れた位置にあるシアン化白金バリウムを塗布した蛍光紙から光が発生していた。彼は、その後研究を重ね、陰極管中の放電電子が陽極の白金との衝突によって放射線が生成され、陰極管外部に到達して蛍光紙を光らせていた事を突き止めた。この放射線を X 線と名付けて発表し、夫人の手の骨と指輪の透過写真と共に世界的ニュースとなった。その後、電子をはじめとして様々な粒子の発見や、加速器技術の大きな発展に伴い、加速器を用いて粒子を加速させ固定された標的に衝突させて生成される二次粒子の研究が数多く行われてきた。今日では、様々な二次粒子を利用した非常に幅広い分野の研究が行われており、二次粒子生成量の大量化が強く要求されるようになっている。本稿では、筆者の取り組んでいる J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)のミュオン科学実験施設におけるミュオン標的に焦点を絞って述べていく。ミュオン標的におけるミュオンや π 中間子生成のメカニズムやミュオンビーム輸送等については本 OHO セミナーにおける河村氏の記事に詳細が記されており[2]、本稿では省略する。また二次粒子生成標的の設計などをまとめた優良な記事も過去の OHO セミナーテキスト[3,4]に複数公開されているので、ここでは、大強度陽子ビーム照射に耐える標的の機械的熱的特性や放射線耐性、さらには大強度の二次粒子生成施設における長期運用におけるメンテナンス作業や安全診断系開発などの経験等の実用的な事柄について記載したい。ちなみに、大強度ビームの定義は存在しないが、2023 年現在においては 1 MW 程度以上のパワーについて大強度と呼称することが多い。

2. J-PARC MLF におけるミュオン標的

2.1. 標的設計の指針

標的設計は、生成される二次粒子の利用目的によって大きく左右される。J-PARC MLF では大強度ミュオン及び中性子ビームを多くのユーザーに提供し、様々な研究に使用してもらおう事が目的であり、当初計画から 3 GeV 陽子ビームの 1 MW 運用が到達されるべき目標として定められた[5]。そこで、パワーフロンティアとしての標的設計という観点から、大強度陽子ビーム照射に耐えるシステムであることが最優先された。

J-PARC ミュオン科学実験施設 (MUSE: Muon Science Establishment) は MLF 内にあり、黒鉛に 3 GeV シンクロトロン (RCS) で加速された陽子を当て、ミュオンを生成しビーム成形して実験に利用している。ミュオン標的は核破碎水銀標的である中性子源の 30 m 上流に位置し、一次ビームである 3 GeV 陽子ビームはミュオン標的を貫通して中性子源に到達するカスケード型と呼ばれる構造となっている。中性子源へ到達させる一次ビームの品質担保や散乱成分による放射化低減のためミュオン標的でのビームロス率は 10%以下とすることが設計の指針として設定されている。MLF では上記の制約に従い、下記に示すような評価を経て、厚さ 20 mm の黒鉛をミュオン生成のための標的材料としている。

黒鉛製ミュオン標的で陽子と炭素原子核が反応して二次粒子である π 中間子を生成し、さらにそれが静止寿命 26 ns で崩壊してミュオンとなる。陽子と炭素原子核衝突による二次粒子生成としては核内カスケードモデルが基本的な考え方として挙げられる[6,7]。現在ではモンテカルロ計算コードが発達し、様々な拡張モデルを用いて二次粒子の収量や軌道等を計算することが出来る。生成された π 中間子やミュオンは標的の周囲を取り囲む電磁石で捕獲され、標的から 20m 以上離れた実験エリアまで輸送される。ミュオンは π 中間子からの崩壊によって得られるため、いわば三次粒子というべきものであり、二次ビームライン設計においては通常の荷電粒子ビームラインとは

大きく異なる特徴を持つ[2]。本稿では π 中間子から崩壊したミュオンも含めて二次粒子と呼称する。Fig. 1に示すように、標的周囲には4本のビームラインが設置されている。標的前後の斜め横方向から二次粒子を取り出す必要があるために冷却水配管等の周辺機器は二次粒子の軌道上に配置しないことが配慮される。次節以降に、標的設計において特に重要とされる伝熱設計と放射線損傷について述べる。

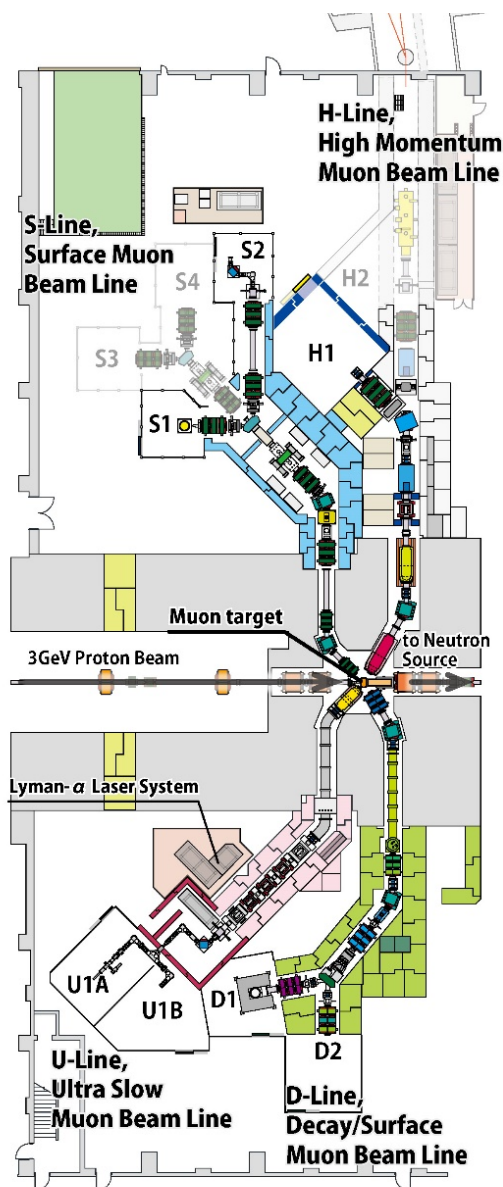


Fig. 1 J-PARC ミュオン実験施設。4本の二次ビームラインの中心に標的が位置する。

2.2. 標的材料の評価

2.2.1. 伝熱構造の評価

大強度二次粒子ビームを生成する施設では、一次ビームの直接照射によって、標的ではkWを大幅に超える熱量が発生する。ミュオン標的では真空中に設置されるため除熱を含めた熱伝達構造には注意を払う必要がある。特にビームスポット付近の急激な温度勾配によって生じる熱応力については繰り返し疲労も含めて十分な安全係数をもった設計を行う事が肝要である。一次ビームが直接照射される標的材料だけでなく、周辺機器への熱伝達や散乱粒子による発熱も考慮に入れた伝熱設計を行う事も重要である。

一次ビーム照射による発熱は、散乱成分や二次粒子による成分も寄与するため手計算による評価は困難であり、PHITS[8]等のモンテカルロ計算コードによって評価されるのが一般的である。J-PARC MLFにおけるミュオン生成標的の設計段階において、3 GeV、0.333 mAの1 MW陽子ビームが照射された場合の厚さ20 mm黒鉛の発熱は、PHITSコードの前身であるNMTC/JAM[9]を用いて計算され[10]、3.9 kWであった。MLFでは最初に固定標的、2014年に回転標的が導入されており、それぞれの伝熱構造評価については有限要素法を用いたシミュレーションによって評価された。詳細は各標的の項に記す。

2.2.2. 放射線損傷の評価

標的や周辺部の材料への放射線耐性の要求は、大強度化に伴って非常に厳しいものとなっている。標的材料は、一次ビームによる非常に強い照射を受け続ける。周辺機器についても散乱成分や中性子等の二次粒子による照射により損傷は無視できない。放射線が物質に与える影響についての指針となる物理量としては、一般的には吸収線量(Gy)が使用されることが多い。しかし、照射によって形成される損傷の量は放射線の種類やエネルギーによって異なるため、それらに依らず損傷量を比較しうる照射量の単位の導入が必要である。例えば同様の事として、人体への被ばく防護を目的として、放射線の種類による人体へ

の影響が数値化されており、吸収線量は放射線荷重計数によって被ばく線量に換算される。ガンマ線は1、アルファ線は20、中性子はエネルギーによって2.5-21という数値が設定されており、実際の被ばく管理に用いられている。

高線量照射における材料の損傷評価においては、原子当たりの平均はじき出し原子数 DPA (Displacement per Atom) が広く用いられている。これは、物質の格子原子が平均で何回はじき出されたかを示すものであり、単位は dpa として表される。1 dpa は材料中の全原子が平均1回は格子位置からはじき飛ばされたことを意味している。材料中の原子の移動が損傷の原因となるので、陽子や中性子、電子などの放射線の種類が異なっても DPA を求めることが出来れば損傷についてある程度規格化できるという考えが基本となっている。質量 M_p 、運動エネルギー E_p の一次ビーム粒子から質量 M_t の標的原子が受け取る最大のエネルギー E_t は、等方的な弾性散乱を仮定すると

$$E_t = \frac{4M_p M_t E_p}{(M_p + M_t)^2} \quad (2-1)$$

となる。一次ビーム粒子に 3 GeV 陽子 ($E_p = 3$ GeV, $M_p = 1$ (amu)), 標的原子に炭素 ($M_t = 12$ (amu)) を適応すると、はじき出された炭素は $E_t = 0.85$ GeV の運動エネルギーを得て本来の格子位置からはじき出される。最初の衝突によって生じたはじき出し原子は Primary knock on atom (PKA) と呼ばれ、自身も他の原子と衝突して再度はじき出しが行われ、二次、三次とはじき出しの連鎖が行われる。この連鎖は衝突カスケードと呼ばれる。はじき出し原子の運動エネルギーがはじき出ししきいエネルギー(結合エネルギーを切るエネルギーであり、黒鉛の場合はおおよそ 30 eV 程度である)以下になるまで衝突カスケードは継続する。したがって、PKA が発生した箇所に近傍の空間には密集して多くのはじき出しが発生することとなり、多くの欠陥がクラスターの的に生じてカスケード欠陥となる。

上記のような過程ではじき出された原子は格子外に位置するようになり、元の格子位置は空孔となる。この対をフレンケル対と呼ぶ。フレンケ

ル対が形成された後に、他の原子空孔や格子間原子と再結合して対消滅すれば欠陥は回復する。一般的には材料の温度が高いほど対消滅の速度も速い。一方、格子間原子同士あるいは空孔同士が会おうとそれぞれのクラスターを形成する。このクラスター成長がポイド形成等に繋がり材料の特性変化の主因である。DPA は以下の式で計算される。

$$DPA = \phi t \sigma_d \quad (2-2)$$

ここで ϕ は入射放射線のフラックス、 t は照射時間、 σ_d ははじき出し断面積である。はじき出し過程には、核的過程、弾性衝突、イオン化や電子励起等の非弾性衝突、中性子増倍・吸収過程等の多くの過程が存在する[11]ため、実用的にはモンテカルロ計算コードによる算出に任せる事が多い。注意点としては、古いバージョンの計算コードの場合にはクーロン散乱による衝突カスケードが考慮されていないことがあるので、計算を実行させる際はよく確認されたい。

DPA を実験的に求める代表的な例としては、照射前後で試料の電気抵抗を測定する手法があげられる。照射によって生成されたフレンケル対の密度 N_f は、対消滅による回復を考慮しない場合、(2-2)式で表される DPA と同じとなる。フレンケル対による電気抵抗の増加 $\Delta\rho$ は

$$\Delta\rho = \rho_f N_f \quad (2-3)$$

となる。 ρ_f は、一对のフレンケル対に対する電気抵抗増加である。DPA = N_f の仮定であることに注意して、(2-2)および(2-3)から、はじき出し断面積は次のように与えられる。

$$\sigma_d = \frac{1}{\rho_f} \frac{\Delta\rho}{\phi t} \quad (2-4)$$

上式の各変数を実験的に求める事で、はじき出し断面積を導出する事が可能である。フレンケル対は常温で自然に対消滅していくので、実際の実験においては試料を冷却する等の工夫が必要である[12]。なお、金属材料においては自由電子が生成されるフレンケル対よりはるかに多いので ρ_f は欠陥の密度に依存しないが、黒鉛では半金属の性質を持ち、電気伝導には正孔と自由電子の両方が係わる上に欠陥の数より十分多いとはみなせない。そのため抵抗値 ρ と $\Delta\rho/\phi t$ の

関係を実験的に導出して、同一の ρ における $\Delta\rho/\phi t$ を比較する事が重要である[13].

ここまで、材料の放射線損傷で広く用いられる DPA の概念について説明してきた。DPA による損傷評価は有益であるが、定量的な議論を行う際には注意が必要である。DPA は空間的に平均的なはじき出し数を示すものであるが、衝突カスケード衝突によるはじき出しは局所的であり、そのダイナミクスに大きく依存する。カスケードのダイナミクスは放射線の種類によって異なる上に、フレンケル対の対消滅は照射温度や照射速度、放射線以外の要因で生成している損傷との相互作用によっても変化するため、DPA と損傷量とは必ずしも対応するとは限らない。DPA は照射の程度を示す参考値として見るのが適切であるが、他により有力な指標も存在しないのが現状である。

MLF のミュオン生成標的の標的材料として、耐熱等の各種物性値に優れる等方性黒鉛（東洋炭素、IG-430U）が選定された。放射線損傷については、中性子による黒鉛材料の損傷の報告を参考にしている。これは、原子炉や核融合炉利用研究のために多角的な視点から多くの報告[14]がある事と、3 GeV 陽子が炭素原子核に衝突する際には原子核同士のクーロンバリアを大きく超えているので、中性子と原子核の相互作用と大きな差がない事が経験的に知られているからである。炭素の DPA 断面積には評価値[15]が用いられ、Fig. 2 の結果を得た。即ち、1 MW かつ 1 年間（利用運転としては 5500 時間に換算される）照射時で標的中心は 1 dpa を超える。なお、ビームプロファイルは RCS 入射ペイントを想定した値を用い、エミッタンスは 81π mm mrad、位相空間上で一様分布、標的位置で直径 24 mm に絞られている。

Fig. 3 は等方性黒鉛材料 IG-110 に対して 1150-1250°C の温度領域で、原子炉からの中性子を照射した場合に起こる巨視的な材料寸法の変化を示している[16]。中性子照射によって寸法が収縮し、収縮率は照射量が増大するにつれ大きくなる。収縮率は約 850°C でもっとも小さく、照射温度がそれより低くても高くても収縮率は増大する。ロッ

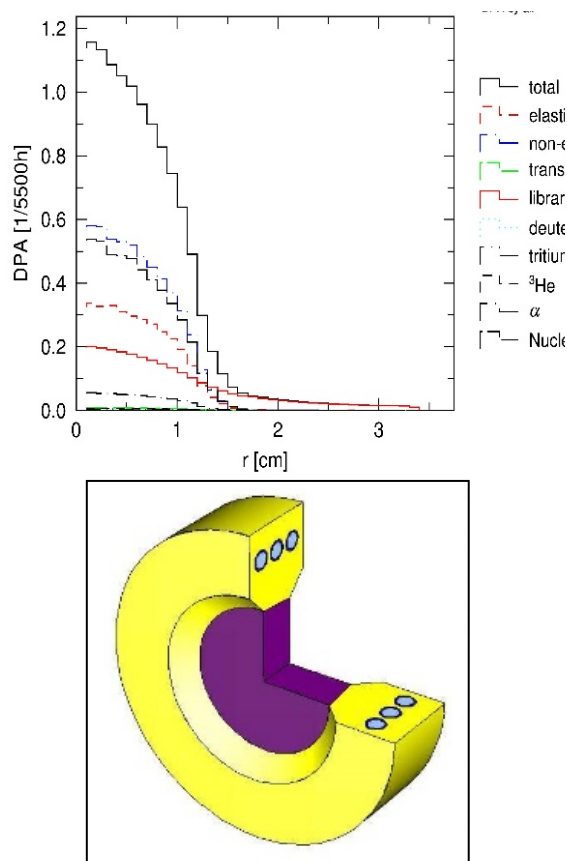


Fig. 2 上図：黒鉛の DPA（横軸は半径）と、下図：計算モデル（固定標的を模してあり、中心に 2cm 厚黒鉛円板、その周囲に銅製フレームと冷却水配管を配置）

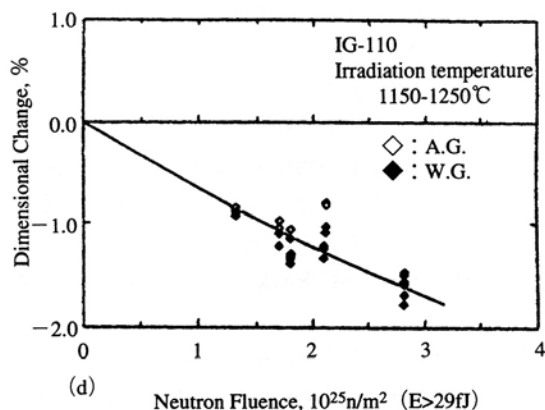


Fig. 3 中性子照射量に対する等方性黒鉛材料寸法の変化量[16]。照射中の温度は 1150-1250°C に保たれている。

トの違い (A.G.,W.G.) はほとんど見受けられない。報告[16]中の中性子照射では、 $1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 = 1 \text{ dpa}$ である。すなわち、ミュオン標的では同じ場所に1年間一次ビームが照射された場合、寸法変化が約1%程度の収縮となる。この収縮によって、後述する黒鉛の照射部分が非照射部によって拘束されることによって生じる応力により標的が破壊される可能性が生じる。黒鉛部の寿命は安全係数も考慮すると半年程度となり、半年毎に標的交換を行う保守シナリオが必要となる。放射線防護やユーザー利用時間の安定確保等の制約要因から毎年の標的交換は避けたい。この問題はスイスのミュオン利用実験施設である PSI でも知られており、円盤状の標的を回転させて損傷を円周上に散らし、標的の長寿命化が図られていた。しかし、回転部のベアリングに使用する潤滑剤の耐放射線性等に一筋縄ではいかない開発要素があることが知られていた。J-PARC では段階的に陽子ビーム強度を上げる計画であることも考慮し、最初に製作するミュオン標的は開発要素の比較的少ない固定型の標的とし、運用の経験を蓄積しつつ、放射線損傷の分散が可能となる回転方式の標的開発を進めることとなった。

2.3. 固定標的

固定標的方式では、直径 70 mm の円板上の厚み 20 mm 黒鉛の周囲にステンレスの冷却水配管が埋め込まれた外径 150 mm の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た(Fig. 4 参照)。この方式は英国 ISIS のミュオン標的で採用されていたが、銅と黒鉛のロウ付けや拡散接合による接合部で破損することが知られていた。そのため、J-PARC のミュオン標的では黒鉛と銅の中間の熱膨張係数を持ち、ヤング率の小さいチタン層を間に挟むことで長寿命化を図った。ただし、黒鉛は金属と比較し濡れ性が悪く、ロウ付けが難しい。そこで、Fig. 5 で示すように前処理として専用の銀ロウ材を黒鉛の接合部に塗布・焼成しメタライズした後にロウ付けにすることで接合している[17, 18]。銅フレーム内には HIP 法を用いて冷却水用のステンレス配管を埋め込んだ。

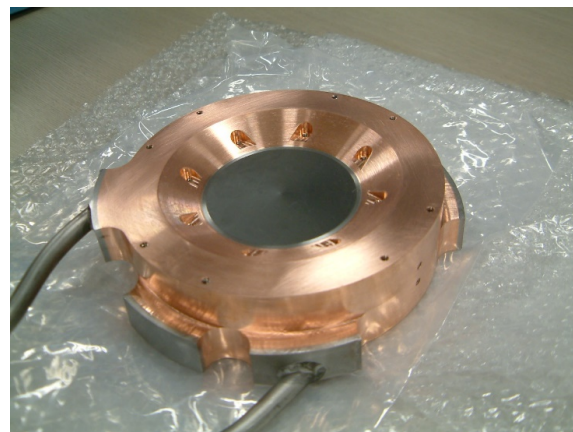


Fig. 4 固定標的実機 銅フレームにチタン層と黒鉛がロウ付けされている。チタン層周辺に温度計測用の熱電対を固定するタップ穴を確認できる

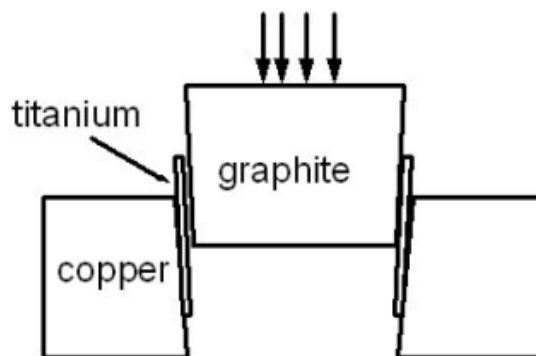


Fig. 5 真空銀ロウ付けの概念図。チタンリング及び黒鉛材は約 3° のテーパで挿入する。この際、50 ミクロンの銀箔が黒鉛-チタン界面およびチタン-銅界面に挿入された。

銀ロウ付けは 700°C に加熱して行われる。この加工の際に押し込まれた黒鉛およびチタンはいわゆる焼きばめ状態となる。高温において黒鉛外径とチタン内径が同寸法、同様にチタン外径と銅内径が同寸法となり、この三種類の材料が常温まで冷却されると熱膨張係数の大きなチタン (9ppm/K)、銅 (16ppm/K) はより大きく収縮し、熱膨張係数の小さい黒鉛材 (5ppm/K) には圧縮応力が発生する事となる。一般に金属が弾性限界を超えると塑性変形を起こすことはよく知られて

おり、高温において弾性限界は小さくなり、特に銅においてはこの事は顕著に表れる。そこで、加工直後の 700℃から常温に至る冷却過程で発生する残留応力の評価を行った。ミュオン標的を模擬した試作機を製作し残留応力の測定を行った。標的表面にひずみゲージを貼り、その周囲を切断することにより応力解放を実施した。このとき黒鉛上では圧縮応力により押し縮められたひずみが解放され変位が計測される。この変位を応力に変換することにより残留応力測定を行った。ひずみゲージは二軸計測型のものを用い、半径方向に 10 個厚み方向に 2 個貼り付けた。また一様性を確認するために各々垂直な半径方向に関しても測定を行った。Fig. 6 に歪みゲージを貼り付け切断を行った試作機の写真を示す。Fig. 7 及び 8 に半径方向応力、周方向応力の測定結果および計算値 [19] との比較を示す。測定の結果、黒鉛上においては約 20 MPa のほぼ様な圧縮応力が発生していることがわかった。また、1 MW の一次ビームによる発熱はビーム中心付近で 1500℃と予想されており、この時の温度勾配による圧縮応力は 40 MPa となる。IG430 の圧縮強さは 90 MPa であるので、評価としては運用上問題の無い結果となった。

次に、黒鉛材料の放射線損傷による寸法変化に伴う応力発生について述べる。前節で記載した通り、等方性黒鉛ではビームパワー1 MW を 1 年間の運転で、1 dpa で 1%の収縮が発生する。ビームプロファイルを考慮すると陽子ビーム照射部で中心より周囲に向かって収縮率は小さくなり、照射部以外ではほとんど収縮しない。ここで 1 MW の半年間の運転として評価を行ってみる。中心部において 0.5%の収縮が起きることとなる。有限要素法 ANSYS を用いた収縮による応力分布評価を Fig. 9 に示す。その結果、標的中心周辺で黒鉛材の引っ張り応力強さ 38 MPa と同程度の引っ張り応力が発生する事となり、固体標的における 1 MW 利用運転では、標的寿命は半年程度と非常に短いことがわかり、1 MW 運転対応のためには回転方式の導入が不可欠であることがわかる。

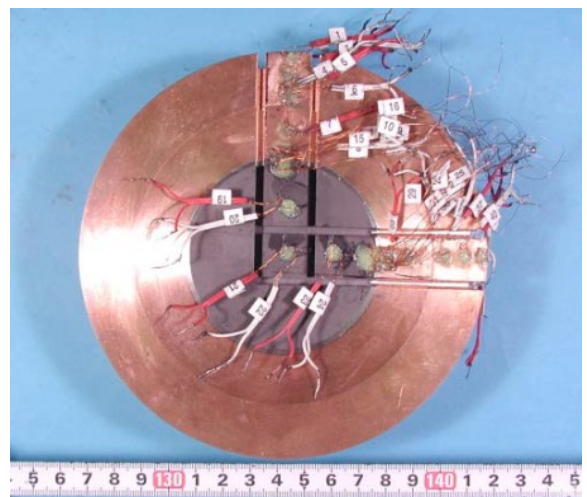


Fig. 6 ひずみ測定のために切断した固体標的試験片

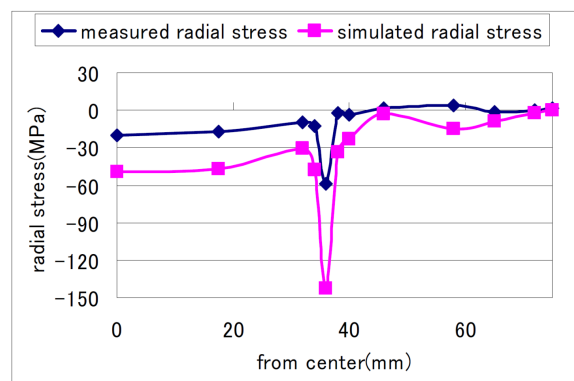


Fig. 7 半径方向の残留応力。●は測定値，■は計算値である。黒鉛部ではおおよそ 20 MPa の圧縮応力が発生している。

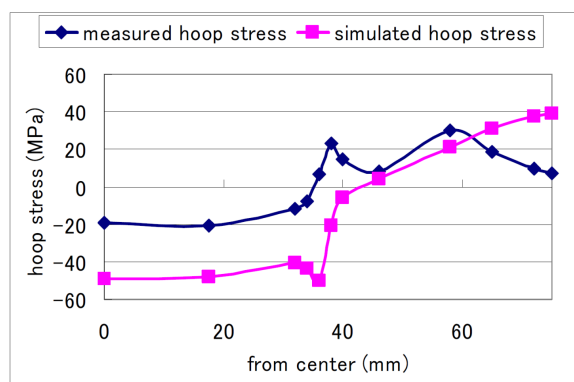


Fig. 8 周方向の残留応力。●は測定値，■は計算値である。

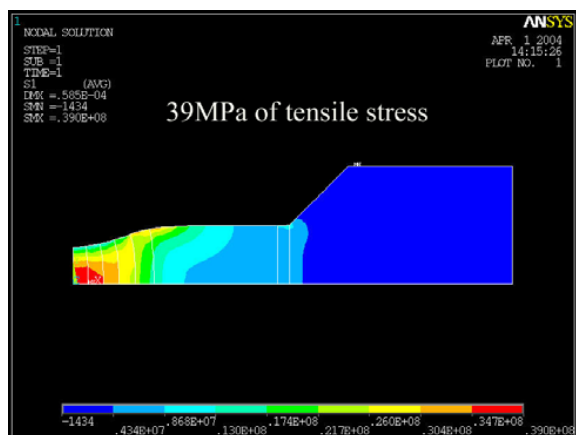


Fig. 9 黒鉛材の放射線損傷による収縮に伴う応力分布図。

当初設計では固体標的での一次ビームのビーム径は 24 mm であった一方、実際のビーム運転では、中性子源である水銀標的容器がピッチングによって損傷してしまう課題が明らかになっていた。そのため、中性子源でのビーム密度を低減するためにはビーム径を大きくする必要があった。このときビーム輸送の都合上、ミュオン標的上のビーム径を 14 mm まで小さくする必要があった。東日本大震災による停止後、2011 年 12 月の運転再開からビーム径を 14 mm とする運転となったが、それを継続すると照射密度が増加するため、黒鉛材の寿命を超えてしまう可能性が高かった。そこで 2012 年 3 月よりビーム径 14 mm を維持したまま、ビームサイクルごとにビーム位置をミュオン標的中心から上、下、左、右、右上、右下、左上、左下に各 4 mm ずらして、黒鉛の照射損傷を分散させる標的上のビーム位置制御運転を行った。ミュオン標的では冷却水の流量・入口・出口温度から標的上でビームロスの評価でき、PHITS による予測と近い値であることが確認できた（陽子ビーム 1MW で 3.9 kW）。また、銅フレーム上の外周に 2 個、チタン層との境界付近には 8 個の熱電対（上下に各 2 個、左右に各 2 個）を配置して温度を計測している。これらから、熱伝達係数が設計値（12000 W/m²/K）とほぼ一致していることと各場所の温度バランス

からビーム位置を推測できることが確認できた[20]。

東日本大震災による長期シャットダウン中、使用中の標的を用いることで、等方性黒鉛の照射による熱伝導率の劣化を非破壊で実測することが出来た。当時はビーム強度が未だ低かったため、照射中の標的の温度も低く、熱伝導率の劣化が著しいことが確認できた[21]。測定後の固定標的は再度、ビーム運転に利用された。固定標的は、回転標的の開発が終了する 2014 年まで大きなトラブルも無く、無事に利用運転を行い、回転標的への引き継ぎを行う事となった。

2.4. 回転標的

2.4.1. 全体の概要

回転標的では外径 330 mm、内径 230 mm、厚み 20 mm の IG430 製の黒鉛リングを使用しており、リングは温度差による熱応力を低減するために三分割している。三分割した黒鉛リングは遠心力をフープ力で受けるためのインコネル製遠心リングで一体化されている。この黒鉛リングは軸受で保持されるが、軸を支える内輪と外輪の温度差が大きくなると破損確率が高まるため、軸受部の温度をなるべく低くすることが長寿命化には重要となる。評価計算では陽子ビーム強度が 1 MW に達した時には黒鉛部の温度は 650°C を超える。軸に伝わる熱を小さくするため、黒鉛リングの支持体は細いほうが好ましい。また、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も吸収しなくてはならない。一方で、駆動系の異常によって黒鉛リングの回転が急停止した際のトルクにも耐えられるように回転二次極モーメントを大きくすることが要求される。このような全ての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る。全体図の写真を Fig. 10 に示した。

中性子源への一次ビーム輸送モード変更のため、ミュオン標的をビーム軸から待避させる機構が必要とされる。遮蔽を兼ねたプラグシールドに上下移動可能なガイドレール付きのスライドテ



Fig. 10 上：回転標的全体図。標的ロッドが上下移動用スライドテーブル付きのプラグシールドに設置されている。下：回転標的黒鉛部 三分割された黒鉛リングをフラットバーと遠心リングで支持

ケーブルを設置し、ミュオン標的全体を上下に移動できるような設計となっている。このため、ミュオン標的全体のシステムとして、2つの駆動機構を有する。1つは黒鉛標的部を回転させる標的回転機構、もう1つは標的機構を上下に移動する上下移動機構である。ミュオン標的に陽子ビームを照射する為にビームチューニングが必要であるので、ミュオン標的回転部の下部に陽子ビームの形状を確認するビームプロファイルモニタが設置されている。陽子ビームの運転状況に対応して機能の切り替えが必要であり、陽子ビームの照射高さ位置に、黒鉛標的が配置される標的位置、プロファイルモニタが配置されるモニタ位置、いずれの装置も配置されず陽子ビームが干渉を受けずに輸送される退避位置の3つの高さ位置に移動できるようになっている。Fig. 11に概略図を示した。

2.4.2. 標的の温度

回転標的では一次ビーム照射による発熱部が回転するので、冷却水によって熱伝導で除熱をする冷却方式を採ることが出来ず、陽子ビームによる発熱 3.9 kW を輻射によって除熱する必要がある。黒鉛の温度を低くするためには、輻射の表面積を大きくする必要があるが、すでに設置されている真空容器(放射化のため交換

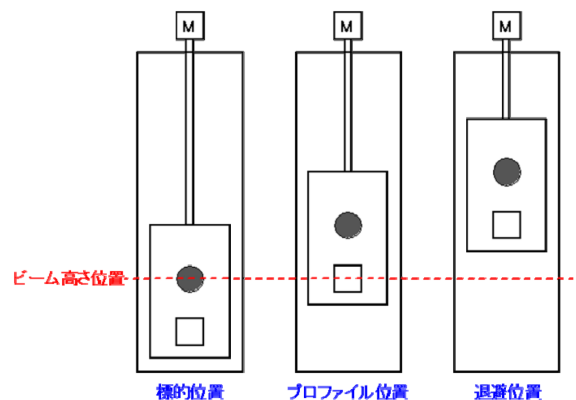


Fig. 11 回転標的の上下移動位置関係。●回転部と□プロファイルモニタは同一の上下移動機構であり、真空外に設置してあるM上下駆動モーターによって、標的位置、モニタ位置、退避位置のいずれかに移動する。

は非常に困難)に収まる設計にする必要がある。真空容器は外壁側に冷却水配管が接触しており、内壁は放射率を向上させるためレイデント処理(レイデント社)を施してある。また、回転体を支持する軸受けが設置される銅製の冷却ジャケットにはHIP法によってステンレス製の冷却水配管が埋め込まれており、表面は黒体化処理を施している。冷却ジャケットには熱電対が設置されており、回転体からの放射による温度上昇を常時測定している。黒鉛及び真空容器の放射率を0.9と仮定しているが、回転標的の下流に設置してある散乱粒子を吸収するための銅製コリメータの放射率は0.2程度となり冷却効率を低下させる。よって、機器構成等を考慮し、真空容器全体として平均放射率を0.6とした。真空容器は散乱粒子による加熱と冷却水による除熱を

考慮して373 Kとして、二体問題と考え、形態係数Fを1とすると、黒鉛部の温度は1000 Kとなる。有限要素法による温度解析も試み、ほぼ同一の結果となる最大温度920 Kも得られている(Fig. 12参照)。ただし、これらの解析はパルスビームであることを考慮されておらず、モンテカルロ計算コードによって得られた平均的な発熱量を代入している。

2.4.3. 軸受け

回転標的では黒鉛材自体の寿命は十分に長くなるが、軸受けがその寿命を決定し、特に潤滑材の選定には注意を払う必要がある。回転標的の軸受は真空内(10^{-5} Pa台)、高放射線(100 MGy/年)、高温(130°C)で使用するため固体潤滑材を用いる必要がある。通常、このような環境下ではSUS440Cの外輪、内輪、ボールに潤滑材として銀または二硫化モリブデンをコーティングした軸受けを使用する。しかし、この場合、潤滑材の量に制限があるため軸受けの寿命は短くなる。例えば、PSIの黒鉛回転標的では、当初銀コーティングの軸受けを用いていたため、寿命は1年未満であった。J-PARCのミュオン回転標的では、より多くの潤滑材量によって10年以上の長寿命化が期待できる二硫化タングステン焼結した固体潤滑材をセパレータに用いた軸受を採用した。Fig. 13に従来型軸受と今回開発された軸受けの写真を示す。

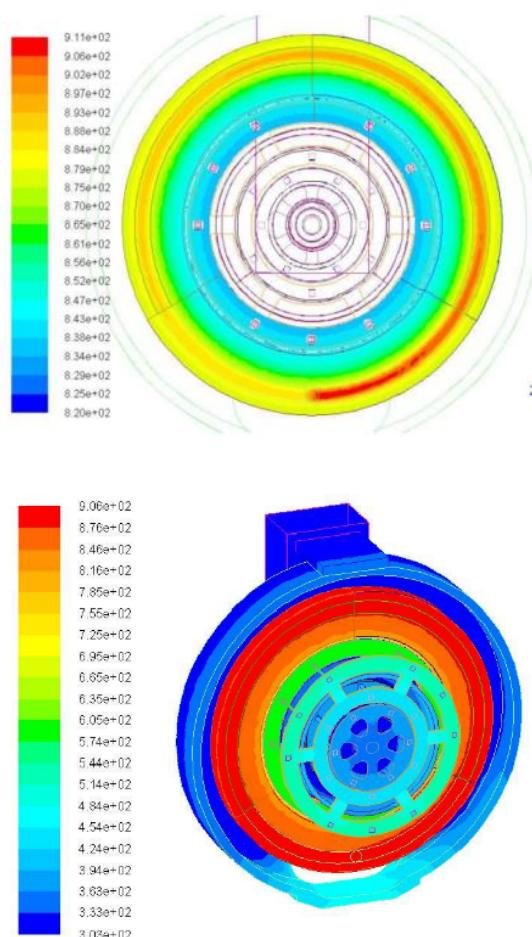


Fig. 12 有限要素法によって求められた回転標的の温度分布。



Fig. 13 軸受けの写真。左：従来の固体潤滑剤を利用した軸受ではボール、外輪、内輪、ボールの保持器に二硫化モリブデンや銀をコーティング。右上：二硫化タングステン固体潤滑剤軸受け。右下：二硫化タングステン固体潤滑剤の塊(右下)

実際の使用前に、回転標的の本体が加熱によって破損しないことの確認および軸受が真空中での長期運転に耐えられるかを確認するために真空中での加熱回転試験を行った。ビーム運転の際には、軸受の長寿命化のために黒鉛上の温度差が問題にならない毎分 15 回転としているが、短期間で回転数を稼ぐために毎分 300 回転での加熱試験を 220 時間行った。これは、毎分 15 回転での 4400 時間（約一年のビーム運転）に相当する。加熱前後で回転標的の本体に塑性変形は確認されず、軸受の損傷によるトルクの上昇も観測されなかった。

2.4.4. 回転軸と回転カップリング

回転標的はビームライン上に設置されるが、回転モーターは遮へい体を挟んだ 2.4m 離れた保守エリアに設置される。そのため、回転を伝達する長尺シャフトの熱伸びによって軸受に軸方向の荷重が負荷される。この熱伸びを吸収するために軸方向には自由度を持ちながら回転を伝達することが出来るスプラインナット(Fig. 14)を採用している。大気から真空への回転の伝達は磁気結合型の回転導入器を採用している。回転軸同士は回転カップリングによって接続されている。

2014 年 9 月にミュオン固定標的はミュオン回転標的 1 号機に交換され、2019 年 7 月末までの 5 年間、運転を継続した。総運転時間は 17000 時間、回転数は 1600 万回転に達し、2019 年 7 月 3 日には、11 時間の 1 MW 相当運転 (935 kW) を実施し、その挙動が想定した範囲に収まっている事を確認した[22]。



Fig. 14 スプラインナットと回転カップリン

3. 安全診断系

3 GeV 陽子による炭素の核破砕反応により標的中には様々な放射性同位元素が生成される。その中でも比較的長い半減期を持つトリチウムの生成量は 0.5 TBq/年 (1 MW 時) と見積もられる。ベータ核種であるトリチウムが標的の内部に留まっている限り運転や保守に大きな影響は及ぼさないが、黒鉛中のトリチウムの拡散速度は温度の上昇と共に急激に上昇することが知られている[23]。従って、ビーム運転中に標的が回転停止した場合等、局所加熱により標的中に蓄積した大量のトリチウムがビームライン真空中に放出されるリスクがある。なお、ビームラインの真空排気は常時、バッファータンクに溜められ、仮に標的中のトリチウムが放出したとしても、外部に漏えいすることを防止している[24]。標的の状態監視は機器の健全性確認の観点に加え、放射線安全の観点からも施設運営における最重要項目である。

回転標的の黒鉛部は、ビーム運転によって 3.9 kW の熱が発生するが、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出来ない。回転していることを担保するため、回転モーターのトルクと回転速度は常時監視しており、トルクがあるしきい値以上になった場合、回転速度があるしきい値以下になった場合、回転モーターの偏差異常の場合はビームを停止する。さらに中空な回転軸に熱電対を挿入し、間接的に回転軸の温度を計測している。これまでの試作機による実験では、モータートルクの上昇、すなわち軸受の損耗に伴い、回転軸温度が上昇する現象が観測されていたので、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。

黒鉛の温度上昇は昇華も早める。従って、ビームラインの真空度劣化によってもビームを停止させる。軸受や黒鉛材を輻射によって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監視しており、冷却水の異常を監視している。回転する黒鉛材の温度を観測するために熱絶縁され

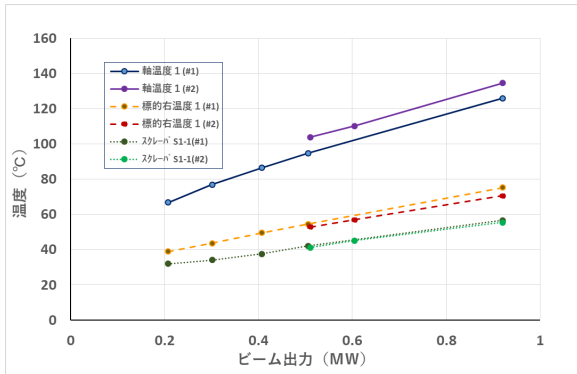


Fig. 15 回転標的系温度のビーム強度依存性. #1は回転標的1号機, #2は2号機のデータ

た熱電対が冷却ジャケットの左右に取り付けられている。しかし標的の温度変化に対する反応速度が遅いため、参考値として計測を開始し、運用の中でしきい値を決定している。Fig. 15は回転標的1号機および2号機の回転軸内部、冷却ジャケット上流から見て右側、ビーム散乱成分をコリメートするため標的後方に設置されたスクレーパーの温度に対するビームパワー依存性を示している。各測定点に対して20度程度の温度異常が検知された場合、陽子ビームを停止させる設定としている。

近年、さらに精度の高い計測のために赤外カメラによる測定を開始した。熱電対の時定数は分単位であるため、急激な温度上昇があった場合、陽子ビームを迅速に停止させることができない。そこで、回転標的の温度異常を迅速に検出するシステムを構築するために、赤外カメラ（ビジョンセンシング社製 ULVVIPS-04171SL）を設置した。回転標的より11 m上流に45度のミラーを、ビーム輸送の障害とならないようにビーム軸から141 mm離れた位置に設置した。そこで反射された回転標的からの輻射を、ダクトと垂直な向きのポートに設置されたZnSe窓を通して、カメラで計測する。焦点距離150 mmのゲルマニウムレンズおよび640x480ピクセルのボロメータによって回転標的を空間分解能2.5 mm程度で撮影可能である。Fig. 16は1 MW運転時の回転標的の温度分

布の赤外イメージである。中心部から回転方向（右側）に向かって高温部（白色）が流れているのがわかる。

Fig. 17は、ビーム動作開始時の回転標的の温度上昇の測定結果である。赤外カメラでは30分程度で温度上昇が飽和しているのに対し、冷却ジャケットに取り付けた熱電対では飽和温度に達するまでに約1時間を要している。また、陽子ビー

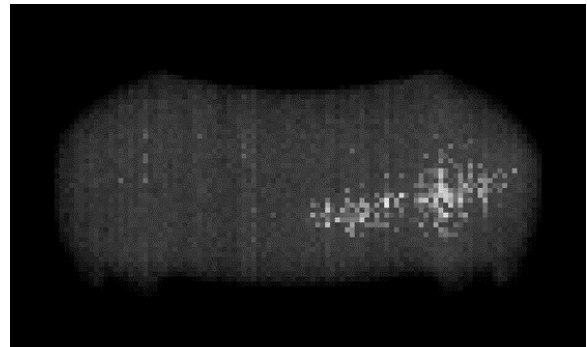


Fig. 16 1 MW 運転時における赤外カメラ画像. 紙面に対して反時計回りに回転しており、白色で表される高温部が中心から流れるように同心円状に分布していることが確認できる

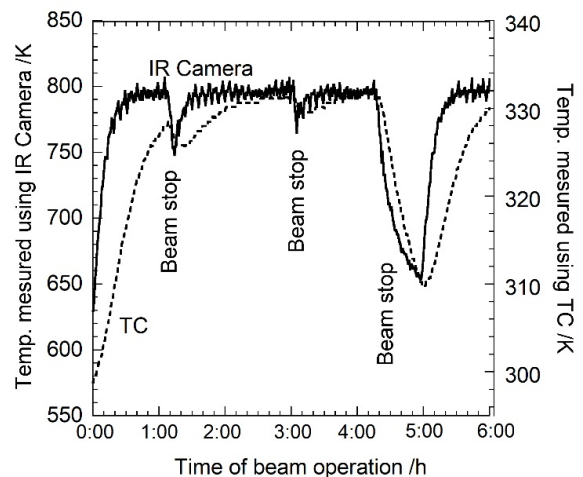


Fig. 17 500kW 運転時におけるビーム運転開始直後からの赤外カメラ(実線)および冷却ジャケットに取り付けた熱電対(破線)の時間推移. 赤外カメラ測定値は熱雑音により温度が振動している

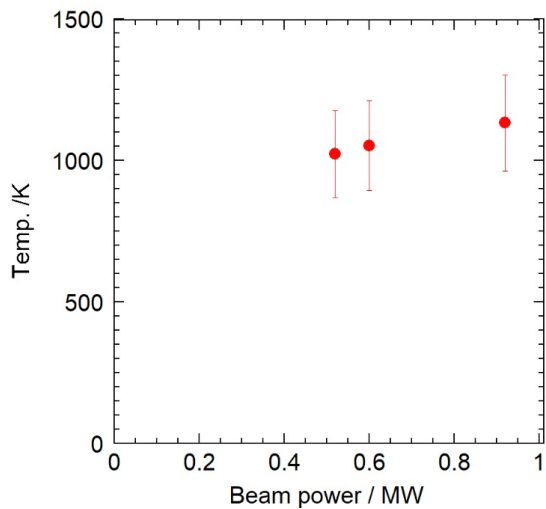


Fig. 18 赤外カメラで測定した回転標的のビーム中心温度の陽子ビームパワー依存性

ムが一時的に停止した際の温度変化に対して敏感に反応し、ビーム照射による温度変動の迅速な検出が可能である。回転標的の中心部温度をビームスポットの温度と見なして、そのビームパワー依存性を Fig. 18 に示す。ビームパワーの増加に伴い回転標的の温度も上昇している。これらのデータや画像解析処理技術を利用することで、陽子ビーム照射による温度と熱伝導率の変化の解析が進行中である。使用している赤外カメラにはコバルト 60 ガンマ線の照射試験が実施されており、5 Gy までの照射耐性があることが確認されている。カメラ付近の線量測定の結果から、カメラの積算吸収線量は 2021 年 3 月末で約 3 Gy と推定されている。しかし、中性子によるシングルイベントアップセットが原因と思われる電子回路のエラーが 1 日数回と頻発しているため、カメラの動作時間はビーム運転時間に対して約 30% と低い。今後は、電子回路の遮蔽等の対策を施した赤外カメラを開発し、カメラ稼働時間の向上を図る予定である。

4. 保守

高エネルギーの粒子が大強度で照射される二次粒子生成標的のメンテナンスでは、残留放射能による被ばく対策が大きな課題である。重粒子であれば核子当たりのエネルギーが小さいので放

射化は少ないが、陽子ビームの場合では放射化が多い。被ばくは大きく分けて外部被ばくと内部被ばくに分類でき、陽子加速器においてはどちらも起こるので対応が必須である。

J-PARC では通常、夏期にビーム運転を停止しメンテナンス期間としている。回転標的のメンテナンスは主に回転系の消耗品を交換する。回転モーター、及び磁気結合型回転導入器の寿命は、毎分 15 回転の運転を年間 5000 時間行った場合で約 2 年である。それらの機器は標的本体から 2.4m 上の保守エリアにあり、ハンズオンでの交換が可能である。回転導入器を交換する際には、陽子ビームラインに窒素ガス等を導入し、真空フランジを開放する。メンテナンスの際に問題となるのはトリチウムである。前節では標的が高温になった際のトリチウムの異常放出に関して述べたが、実際には運転中のミュオン標的から常時、トリチウムが放出され、その量は 500kW 運転時 (500°C) で 1 日約 30MBq であった。この値はトリチウムの既知の拡散速度から予想される量の 10 倍以上で、陽子ビームによるスパッタリング、ラジカル対や空乏の生成等、照射による直接的、間接的な影響は複雑で、機構の詳細は検証中である。標的の内部から放出しビームダクト内部に放出されたトリチウムは、主に水素分子(HT)か水分子(HTO)の化学状態で存在する。大気開放した際、これらが空気中に含まれる H₂O 分子との同位体交換反応により HTO として保守作業の空間内に拡散する。トリチウムの半減期は約 12 年であり、ビームパワー増強に伴って年々放出量が増大している。近年では開放作業を行う前に、窒素に空気を 5% 程度混入させたガスを陽子ビームダクト内に導入し、真空ポンプにて排気する事を繰り返し、トリチウムのフラッシングを行っている。2019 年のメンテナンス作業前のフラッシング (相対湿度 67%, 温度摂氏 25°C) では、1 回目で 375MBq, 2 回目で 210MBq を排出した。ダクト内に空気を導入することで到達真空度の劣化が懸念されたが、ビーム受け入れ時迄には 1.3×10^{-5} Pa に達し、ビーム輸送に影響は生じなかった。また、開放作業時の作業員の内部被ばく防止として、外部から

空気を供給するエアラインマスク、皮膚呼吸によるトリチウム吸収を防ぐためにアノラックスーツ（酢酸ビニール製全身スーツ）を着用して作業が行われている。トリチウムの影響は施設設計時の想定よりも深刻で、年々その度合いを増しているが、運転による知見の蓄積や J-PARC 内外の他施設との連携により課題解決にあたっている。

5. おわりに

J-PARC ミュオン科学実験施設では黒鉛を標的材料に採用し、2008 年から固定標的で運転を開始し、途中、想定外の問題はあったが、現在回転標的 2 号機が無事に運転を継続している。

J-PARC におけるミュオン生成において世界への強みとして強調しておきたいのは負ミュオンの生成効率が高い事である。ミュオンの元となる π 中間子を生成するには近似的に $2m_\pi(1 + m_\pi/4m_p) = 290 \text{ MeV}$ が陽子の運動エネルギーのしきい値となる。実際に、世界的なミュオン施設では 500 から 800 MeV の陽子加速器が主流である。一方、J-PARC は主に中性子収量最大化の観点から比較的高いエネルギーである 3 GeV が採用された。これは Fig. 19 の生成断面積のエネルギー依存性で示されるように、負電荷の π 中間子、ひいては負ミュオンの収量増加をもたらしている。これは J-PARC ミュオン実験施設の『売り』

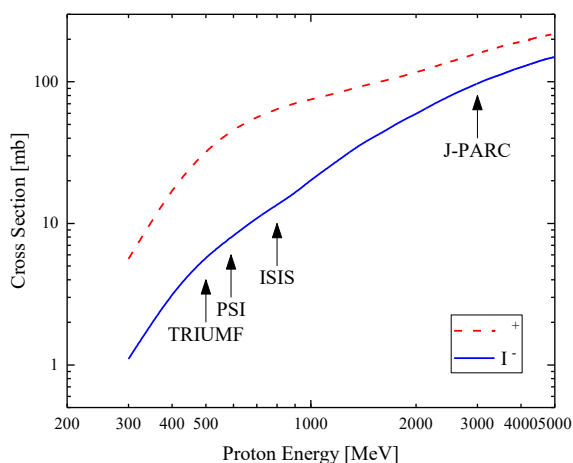


Fig. 19 炭素に対する π 中間子の生成断面積 (JAM モデル[25]による評価値)

の一つである負ミュオンによる元素分析の活況に繋がっている。現在、世界のミュオン施設では大強度は当たり前になりつつあり、特長あるビームや施設を如何に作るかが重要になってきている。我々もそのような状況のなかで、さらなる大強度化と特長あるビーム作りを目指し、物質・生命科学実験施設の第 2 標的ステーションなどにおける新たな標的開発を進めていく予定である。第 2 標的ステーションではミュオン生成標的と中性子生成標的の共通化を目指し、タングステンを標的材料として使用することが検討されている。標的の共通化による建設や運用の効率化のメリットに加え、中性子生成標的に必須の原子番号の大きい元素はミュオン生成標的として π 中間子 (ミュオン) 生成にも優れている。しかし、保守性を考慮した様々な機器の配置、タングステンの脆化性など乗り越えるべき課題は少なくない。施設との連携により課題解決にあたっている。

6. 謝辞

本稿執筆においては、ミュオン標的の開発を一手に担い、現在は KEK 素粒子原子核研究所で COMET 実験のための標的開発を行っている牧村俊助氏に多大な協力をいただきました。物質構造科学研究所の伊東芳紀氏には正確な校正をしていただきました。編集委員の方々には執筆遅延のため大変なご苦勞をおかけしました。全ての関係者に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] W. C. Rontgen, *Nature*, **53** (1896) 274
- [2] 河村成肇 OHO'23 テキスト(2023 年)
- [3] 高橋仁 OHO'18 テキスト Vol.14 (2018 年)
- [4] 高田弘 OHO'18 テキスト Vol.15 (2018 年)
- [5] 藤井保彦、新井正敏 *応用物理* 第 78 巻、第 8 号(2009) 758-764.
- [6] H. Bertini, *Phys. Rev.* **188**, (1969) 1711
- [7] Hugo W. Bertini *Phys. Rev. C* **6** (1972) 631
- [8] T. Sato *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.* **55**, (2018) 684.
- [9] K. Niita *et al.*, "High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM", JAERI-Data/Code 2001-007.

- [10] N. Kawamura *et al.*, Nuclear Instruments and Methods A 600 (2009) 114-116.
- [11] M.T. Robinson, J. Nucl. Mater. 216, (1994) 1
- [12] Y. Iwamoto *et al.*, J. Nucl. Mater. 508, (2018) 195-202.
- [13] 岩田忠夫 日本原子力学会誌 第 16 卷、第 5 号 (1974) 231-764.
- [14] T. Maruyama *et al.*, J. Nucl. Mater. 195 (1992) 44
- [15] M. Harada *et al.*, J. Nucl. Mater. 343 (2005) 197
- [16] 松尾秀人, “原子炉用黒鉛および炭素材料の照射損傷”, 炭素 TANSO 150 (1991) 290.
- [17] S. Makimura *et al.*, J. Nucl. Mater 377 (2008) 28.
- [18] S. Makimura *et al.*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 600 (2009) 146.
- [19] 牧村俊助, Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan (July 20 - 22, 2005, Tosu Japan), 22C06
- [20] 牧村俊助, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 3-5, 2013, Nagoya, Japan), MOOT01.
- [21] S. Makimura *et al.*, Journal of Nuclear Materials 450 (2014) 110-116.
- [22] S. Makimura *et al.*, Proceedings of SCIENCE, Volume 369 - The 21st international workshop on neutrinos from accelerators (NuFact2019)
- [23] 渥美寿雄, “黒鉛中の水素吸収”, J. Vac. Soc. Jpn. (真空) 49 (2006) 49.
- [24] N. Kawamura *et al.*, JPS Conf. Proc. 33 (2021) 011146.
- [25] Y. Nara *et al.*, Phys. Rev. C61 (2000) 024901.