

## ミュオン生成標的とその運用

○的場史朗<sup>#</sup>、砂川光、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

### 概要

J-PARC 物質生命科学実験施設ミュオン実験装置では、レプトンの一種であるミュオンを生成して様々な実験に利用している。ミュオンは、3 GeV まで加速された陽子と標的材料である等方性黒鉛との核反応によって生成される。この等方性黒鉛は厚さ 2 cm 直径 33 cm のドーナツ形状であり、4 秒に 1 回転させて陽子ビームの当たる場所を変えることによって放射線損傷を分散させて寿命を延ばしている。この黒鉛や回転システム全体をミュオン生成回転標的と呼んでいる。

### 1. 回転標的

大強度陽子加速器施設物質生命科学研究所施設(J-PARC MLF)では、加速器からのパルス陽子ビーム(3 GeV、25 Hz、最大 333  $\mu$ A)により世界最高強度のミュオン及び中性子ビームを発生させ、これらを用いて様々な物質科学/生命科学研究が行われている。3 GeV シンクロトロンから中性子ターゲットまでの間の陽子ビームライン上にミュオン生成用のグラフアイト標的が設置されている。2014 年の夏季メンテナンスにおいて、固定標的から回転標的への更新が行われ、2024 年 2 月現在では 810 kW 利用運転において順調に稼働している。

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、IG430)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[1]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 (Displacement per Atom) 断面積には評価値[2]が用いられ、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。等方性黒鉛材料 IG110 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測定した報告[3]によると、1 dpa に相当する照射量では寸法変化が約 1% 程度の収縮となる。この収縮によって、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り J-PARC 施設運営が成立しない。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分散させることで、標的材料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熱性や耐放射線性の克服等の困難な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。本稿では、回転標的について報告を行なう。

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。全体図の写真を図 1 に示した。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はあるが、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、内壁は輻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、回転体からの輻射による温度上昇を常時測定している。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を焼結した固体潤滑材をセパレータに用いた軸受けを採用した。図2に従来型軸受けと今回開発された軸受けの写真を示す。



図1. 回転標的全体図。



図2. 軸受けの写真

左：従来の固体潤滑剤を利用した軸受けではボール、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

## 2. 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、夏季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2.4 m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500 kW運転時(500°C)で1日約30 MBq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(H<sub>2</sub>)か水分子(H<sub>2</sub>O)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H<sub>2</sub>O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て、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375 MBq、2回目で210 MBq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 $1.3 \times 10^{-5}$  Paに達し、ビーム輸送に影響は生じなかった。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。

## 3. 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、運用経験を蓄積しつつ、現在回転標的2号機が運転を継続している。

## 参考文献

- [1] T. Maruyama et al., J. Nucl. Mater. 195 (1992) 44.
- [2] M. Harada et al., J. Nucl. Mater. 343 (2005) 197
- [3] 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.