

# COMET 実験用タングステンシールドの開発

○牧宗慶、亀井直矢、山野井豊、鈴木純一、深尾祥紀、江並和宏、飯尾雅実、

吉田誠、三原智

高エネルギー加速器研究機構

## 概要

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、大強度陽子加速器 J-PARC を用いて行われる、COMET 実験「Phase-I」の平成 30 年度の開始を目指し、ミュオンビームラインや実験装置の建設<sup>1)</sup>を進めている。実験では大強度の陽子ビームを用いた、二次粒子としてのパイ中間子生成に伴い、中性子や、その他の放射線が発生する。この放射線によって、超伝導電磁石内の超伝導コイルがクエンチ (超伝導状態の消失) しないように、タングステンシールド (タングステン合金製の放射線遮蔽体) を、パイ中間子生成標的の外周に設置し、放射線を遮蔽する。本発表では、このタングステンシールドの設計と、製造方法に関する検討結果について報告する。

## 1 COMET 実験

COMET 実験(Coherent Muon to Electron Transition) は、ミュオン稀過程の一つである「ミュオン - 電子転換過程」の探索を行う実験<sup>2,3)</sup>で、茨城県東海村 J-PARC のハドロン実験ホールにおいて実験用ビームラインを建設中である。COMET 実験装置概観を図 1 に示す。J-PARC の主リングから 8 GeV の陽子ビームをパイ中間子生成標的に照射し、発生したパイ中間子をパイ中間子捕獲磁石で捕獲する。パイ中間子は、180 度湾曲ソレノイドから構成されるミュオン輸送磁石内部でミュオンに崩壊する。このミュオンを効率良くミュオン静止標的に輸送して、実験に使用する。実験は「Phase-I」と「Phase-II」の 2 段階に分けて計画されており、放射線シールドは Phase-I 実験から必要とされるが、本検討では Phase-II 実験に必要なフルビームでの実験を想定して検討を行っている。フルビームを想定して設計を行う理由

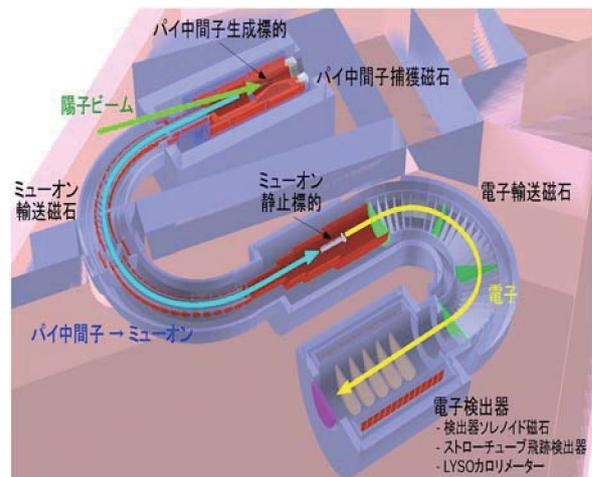


図 1. COMET(Phase-II)実験装置概観

は、Phase-I 実験において、一度ビームを通してしまうと、放射線シールド及び周囲の実験装置は、僅かでも放射化物となる為である。この様な環境下で、Phase-II 実験に向けた改造作業を行うには、放射線作業に対する安全管理や、放射化物を扱う為の特殊重機と作業空間の確保が必要となり、その作業コストは同様の経験からして、非常に大きくなるといった問題がある。

## 2 タングステンシールド設計の要点

パイ中間子生成標的周り概観を図 2 に示す。Phase-II 実験において使用する一次ビームは 8 GeV 陽子ビーム (ビーム強度 56 kW) であり、パイ中間子生成標的 (グラフィイト標的) に当てて二次粒子を生成させる。その際、放射線シールドへの放射線による熱負荷は、おおよそ 22 kW になると見積もられている。この熱負荷が超伝導電磁石にかかると、内部にある超伝導コイル部 (図 2) のクエンチを引き起こす。これを防ぐ為に、タングステンシールド (Wシールド) を超伝導電磁石とパイ中間子生成標的の間に設置し、

この放射線を遮蔽する。遮蔽材としてタングステン合金を採用する大きな理由としては、タングステン合金が高密度の材料で、熱伝導率が高い事が挙げられる。この特性から、狭小空間での放射線遮蔽性と、熱負荷に対する冷却性に優れた材料と言える。以下にシールド設計の重要ポイントを挙げるが、タングステン合金は、これら条件にも合致する材料である。

1.使用する材料は非磁性であること（パイ中間子収束用の超伝導電磁石の磁場空間内（最大磁場 5 テスラ）に設置される為）、2.使用する材料は耐放射線性に優れていること（強度低下、熱伝導率低下）、3.構造物の外径寸法は超伝導電磁石内径  $\phi 1.2$  m 以下であること、4.構造物全体での平均比重が 16 以上を有すること（放射線遮蔽）、5.生産面や経済面において調達可能であること、6.遮蔽及び締結や構造用に用いる材料についても熱伝導率や引張強さ等の物性に優れていること、7.冷却条件が成立すること（水冷の場合は放射線によるトリチウム水の生成が問題となる為、冷却管は出来るだけ標的から離れた場所に配置し、少ない水量で効率的な冷却を行わなければならない）等が挙げられる。以上の条件から構造体寸法は、外径  $\phi 1.18$  m、内径  $\phi 0.24$  m、全長 1.82 m の中空円筒形で、重さは約 30 ton（使用するタングステン合金は約 25 ton）となる。また、コスト削減を考慮して、パイ中間子生成標的に近いエリア（電磁石超伝導コイルに放射線の影響が及ぶエリア）にはタングステン合金を用い、それ以外のエリアには銅またはステンレスを用いる事を検討している。

### 3 タングステン合金とシールド構造

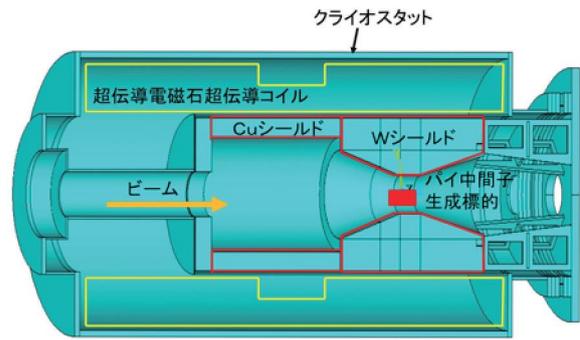


図 2. パイ中間子生成標的の周り概観

タングステン合金は一般的に、一塊で数 100 kg 以上のものを製造することが困難である。その為、タングステンシールドは分割構造となる。構造材及び締結材としては、タングステン合金の他に、ステンレス (SUS304)、銅 (C1020)、鉛の使用を検討している。調査を行ったタングステン合金の物性値として、一例を挙げると、比重：17~18、熱伝導率：104 w/m・K、引張り強さ：620 MPa、熱膨張率：5.6 x 10<sup>-6</sup>/°C といった製品がある。表 1 には、これまでに調査を行ったタングステン合金製造に関する情報の一部を、図 3 には現在検討しているタングステンシールドの分割方法を示す。表 1 からわかるように、製造メーカーによって、製造可能寸法や完成時の寸法精度等の特徴が異なっており、これは製品の物性についても同様である。海外メーカーの場合は大径のタングステン合金の製作が可能で、大径円板や長尺板形状のタングステン合金を用いた分割構造が可能である。また、部

	大径円板	長尺板	集成ブロック
部品形状	大径、薄板円板	長尺、薄板	小径タングステン合金片を寄せ集めてブロック化
製造メーカー	△	△	◎
部品数	少	少	多
冷却効率	◎	◎	○
平均比重	◎	◎	○

図 3. タングステンシールドの分割方法

表1. タングステン合金生産情報

	比重	生産情報
A社	17~18	最大直径 300mm, 最大板厚 50mm, 最大重量 64kg, 月産 240 個
B社	17.2	連続ホットプレス成型, 少変形量, 短期間製造可能, 最大面積 620mm <sup>2</sup> , 最大板厚 25mm, 最大重量 25kg
C社	18	最大寸法 30mmx30mm, 最大板厚 20mm, (過去実績 600mmx500mm)
D社	18	最大直径 1.6m, 最大重量 4ton (中国), 20ton 製造/3ヶ月

品数が少なくなる為、冷却効率（熱伝導率）が良く、構造設計や機械加工の工数も削減でき、コスト面において有利になると予想している。ただし、品質や調達、輸送コストの面については、現状において不確定な部分がある。一方、国内メーカの場合は、海外メーカに比べると製造能力や品質面についての不安要素は少ない。しかし、製作可能寸法が小径である為、多数のタングステン合金片を用いる必要がある。この場合は集成ブロックを用いた分割構造を考えており、現在、その製作方法の開発に向けた試作検討を行っている。これについては次章で述べる。またタングステン合金の周囲には、冷却用に冷却水配管が設置される。その施工方法については、最適化を始めた段階ではあるが、長尺のタングステン合金を用いる場合は、冷却水配管を銅もしくはステンレスの板にろう付けまたはHIP(熱間等方圧加圧法)によって接合して冷却板を作り、これをタングステン合金の表面に密着させることで十分な冷却性能が得られることを確認している。

#### 4 タングステン合金の集成ブロック化

集成ブロック概観を図4に示す。小径のタングステン合金片による製作の場合は、多数のタングステン合金片を組合せて集成ブロックを作った後、構造体として組立てる事を検討している。集成ブロック一個当たりの重量は250kg程度を想定しており、その場合の製作総数は250個、使用するタングステン合金片は約1000個（25kg/個の場合）となる。現在

複数のメーカと協力して、集成ブロックの製作方法の開発を進めている。集成ブロックの製作方法としては、ステンレスの容器の中にタングステン合金片を積み重ね、HIPもしくは鑄ぐるみによって集成ブロック化した後、機械加工によって外形を整える方法を考えている。また、中性子の性質上、間隙または密度の薄い箇所に沿って外に飛び出す事から、集成ブロック内のタングステン合金片は、位相をずらすか、直交して積み重ねる必要がある。HIPは、圧力容器内に被処理体を設置し、数100℃~2000℃の温度と10MPa~200MPaの等方的な圧力を加える事で、拡散現象により接合する方法である。これにより集成ブロック全体が無垢に近い固体となり、間隙も無く、熱伝導や機械強度面で優れた製品が期待される。開発状況としては、50mm角程度の試験片の製作が終わり、これから強度試験を行う予定である。一方、鑄ぐるみによる製作の場合は、焼結後のタングステン合金片を機械加工することなくステンレス容器の中に積層し、そこに溶けた鉛を鑄込む。その為、タングステン合金片に対する工数を大幅に削減する事ができ、鉛が隙間に充填されることで、部品間の熱伝導にも期待できる。こちらの開発状況については、タングステンの特性上、金属表面の濡れ性が悪く、鑄ぐるみ材（鉛）が密着しない事が課題となっていたが、いくつかの化学的、機械的表面処理を試した結果、タングステン合金片への銅メッキの施工が可能となっ

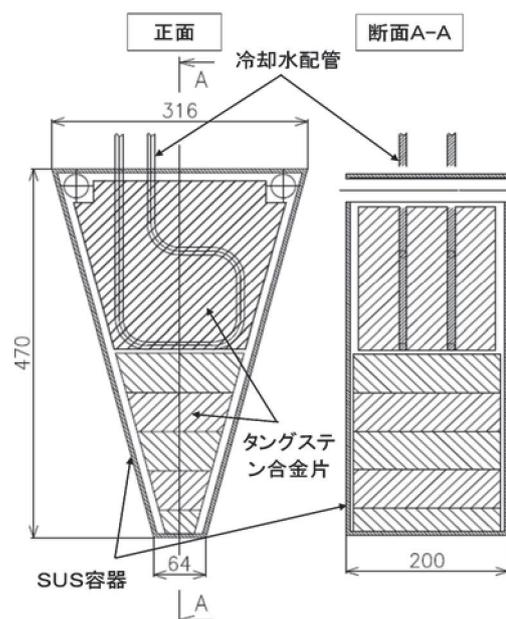


図4. 集成ブロック概観

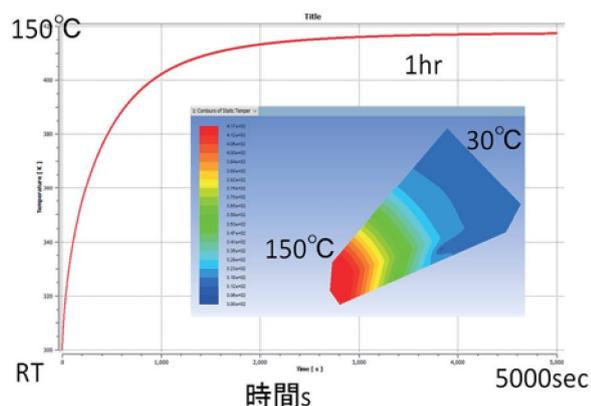


図5. タングステン合金片の標的周辺間接水冷時の温度分布

た。近日中にメッキ処理した試験片に対する、鑄ぐるみ材の濡れ試験を実施する予定である。それぞれにかかるコストについては、HIP の場合、専用炉（炉毎に処理能力やコストが異なる）を使う為、いかに効率良くブロックを処理出来るかがポイントとなる。また、HIP 処理時のタングステン合金片についても、焼結後のタングステン合金片をそのまま使うのか、または機械加工が必要なのか（寸法誤差や歪がどの程度許容されるのか）といった点が、工数の大幅増に直結する為、重要なポイントである。鑄ぐるみの場合、タングステン合金片のメッキ処理から鑄込み作業、機械加工といった工程の中で、どれだけの工程を簡略化できるのかが重要なポイントとなる。また、鑄込み作業工程の具体的な検討が今後必要である。集成ブロックの冷却方法としては、冷却板を、タングステン合金片の間に挟み、冷却水を循環させる事を検討している。この方法による冷却性能を、検証する為に行った簡易解析の結果として、タングステン合金片の標的周辺間接水冷時の温度分布を図5に示す。この図は、3/8 インチの冷却水配管入口から、27 °C、流速 3 m/s の水を流した時の、標的に一番近いタングステン合金片の温度分布を示している。結果は、タングステン合金片の最高温度が約 150 °C、出口側の冷却水温度が 27 °C、冷却水配管の壁面最高温度が 39 °Cであった。この結果から、簡易の解析ではあるが、現在検討している冷却方式をもって、フルサイズのビーム運転が始まっても、十分に安全な冷却効果を発揮し、熱負荷に対する安全性を保てる事が示されたと言える。

## 5 まとめと今後

タングステン合金製造メーカーについて、生産情報や製品特性等についての調査を行い、構造設計や熱設計、製作方法等への反映を様々なパターンで検討している。特に現在は鑄ぐるみと HIP を用いた小径のタングステン合金片での集成ブロックの製作方法について開発を進めている。HIP による検討については、50 mm 角程度のブロックが完成し、これから強度試験や切断面の観察を行う。一方、鑄ぐるみによる検討については、タングステン合金片と鑄ぐるみ材との密着性が課題となっていたが、タングステン合金片への銅メッキの施工が出来るようになった為、近日中に鑄ぐるみ材に対する濡れ性の試験を行った後、強度試験や切断面の観察を行う。また、各材料の熱収縮率の違いが、熱伝導や機械構造面においてどの程度影響するのかといった懸案事項が残ってはいるが、上記の試作検討の結果から、小径のタングステン合金片によるタングステンシールドの製作については、ある程度の目処がついたと言える。最終的なタングステンシールドの設計製作においては、コストと並んで、調達するタングステン合金片の大きさが重要なポイントになる。今後は、HIP 及び鑄ぐるみによる、集成ブロック製作工程の、具体的な検討を進め、タングステン合金の調達に関する調査も引続き行う。これと並行して、タングステンシールド構造体の具体的な構造設計（組立方法、構造解析等）を進め、冷却方法についても詳細な熱解析を行うと共に、モックアップを用いた、熱伝導率の測定や冷却試験等を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 深尾祥紀、高エネルギーニュース 34-1、pp.29-36(2015)
- [2] <http://comet.kek.jp/Introduction.html>
- [3] <http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/research/r001.html>