

J-PARC ハドロン実験施設における新しい二次粒子生成標的の開発 DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

高橋仁[#], 上利恵三, 秋山裕信, 青木和也, 広瀬恵理奈, 家入正治, 加藤洋二,
倉崎り, 皆川道文, 森野雄平, 武藤亮太郎, 里嘉典, 澤田真也, 田中万博,
豊田晃久, 渡邊丈晃, 山野井豊

Hitoshi Takahashi[#], Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Kazuya Aoki, Erina Hirose, Masaharu Ieiri,
Yoji Kato, Ruri Kurasaki, Michifumi Minakawa, Yuhei Morino, Ryotaro Muto, Yoshinori Sato,
Shin'ya Sawada, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Hiroaki Watanabe, Yutaka Yamanoi
Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK

Abstract

We have been developing a new production target at J-PARC hadron experimental facility. It consists of gold, copper, and stainless-steel pipes, and is indirectly cooled by water. Although this structure is almost same as the current production target, additional copper cooling block bonded to the gold target increases the cooling efficiency, and thus enables it to withstand the beam power of 80 kW in maximum. In this paper, the structure and the result of thermal analysis of the new production target are described in detail.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設は、主リングで 30 GeV まで加速された一次陽子ビームを実験ホールへ取り出し、生成標的「T1」に当てることで発生する様々な粒子を二次ビームとして素粒子原子核分野の実験ユーザーに供給している。加速された陽子は約 2 秒かけて少しずつゆっくりと主リングから取り出され（「遅い取り出し」）、その繰り返し周期は当初 6 秒であったが、現在は 5.52 秒となっている。

ハドロン実験施設における生成標的には、次のような性質が求められる。

- ① 二次ビームの質と強度のために、密度、質量数が大きいこと。
- ② 化学的、放射線的に安定であること。
- ③ 一次ビーム強度に耐えられる十分な冷却効率を持つこと。

このような条件から、現在は、金を銅ブロックの上に接合し、その銅ブロックにステンレス製配管を埋め込んで水冷するという間接水冷方式の金標的が用いられている [1,2]。Figure 1 にその断面図と写真を示す。金本体の大きさは、高さ 11 mm（そのうち銅の外に剥き出しの部分が 6 mm）、幅 15 mm、長さ 66 mm で、熱応力緩和のためビーム方向に 6 分割されている。温度環視のため、6 分割された各々のピースに熱電対が取り付けられている。熱疲労や放射線損傷により冷却効率が落ちるなどした場合に、すぐに遠隔操作で標的を交換できるよう、標的は二山構造になっていて、それを水平方向に動かす駆動機構が備え付けられている。この標的は、2013 年 5 月に発生した放射性物質漏洩事故の後の改修の一環として製造、設置したもので、事故再発防止のため、万が一損傷して放射性物質を発生させてもそれを拡散させないように、標的の本体は気密容器の中に収められ、さらに標

[#]hitoshi.takahashi@kek.jp

的の健全性を常に監視するために、容器内にヘリウムガスを循環させてその放射性物質濃度を測定するガスモニターシステムが設置されている [1,3]。

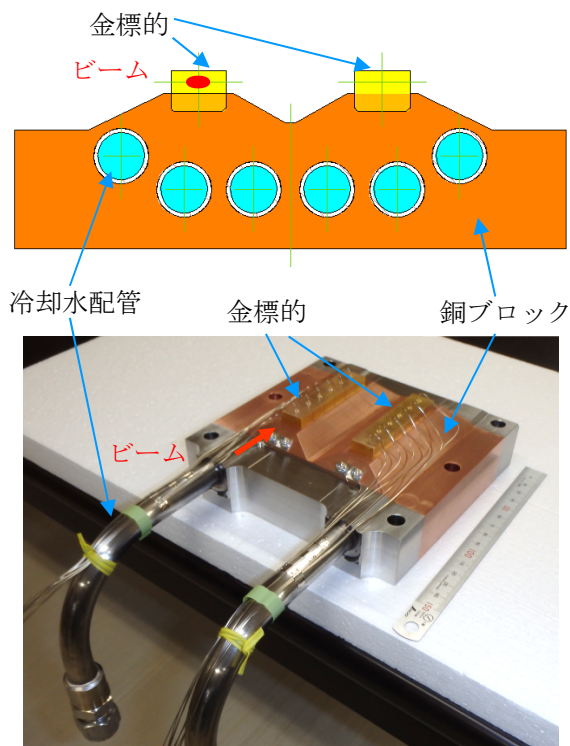


Figure 1: Schematic drawing and photograph of the current gold target.

Figure 2 は、一次ビーム強度と現在の金標的の最大温度上昇との関係を示したグラフである。標的の実測値は事前の熱計算の結果と 10% 以内の精度で一致している。標的が受け入れ可能な最大ビーム強度は、この温

度上昇が生む熱応力で制限されており、現在の標的の場合には最大 53 kW (繰り返し 5.52 秒の場合)である。一方、定常運転における一次ビーム強度は順調に増強を続け、今年度のビームタイムで最高 44 kW にまで達した。このことはつまり、実際のビーム強度が現在の標的の限界に達しつつあるということである。従って、より高いビーム強度に耐えられる新しい標的の開発が急務となっている。

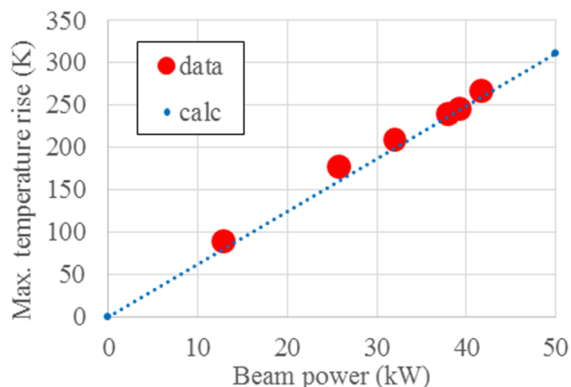


Figure 2: Beam power dependence of the measured maximum temperature rise of the current target.

我々のグループでは現在、新しい標的として2種類開発を行っている。一つは、150 kW 以上のビーム強度に耐えられる直接冷却型の回転標的[4,5]で、もう一つは現在の金標的に改良を加えた間接水冷型の標的である。本論文では、後者の改良型間接水冷標的の設計について、詳しく述べる。

2. 改良型間接水冷標的

2.1 構造

新しい間接水冷型標的の断面図を Figure 3 に示す。基本的には現在の金標的の構造を踏襲しており、標的の本体である金を、水配管を埋め込んだ銅ブロックで冷やす冷却方式は全く一緒である。しかし、より冷却効率を高くするため、金の下だけでなく上にも銅ブロックを接合している点が最大の違いである。この冷却能力の強化により、最大許容ビーム強度は 80 kW まで上がる。

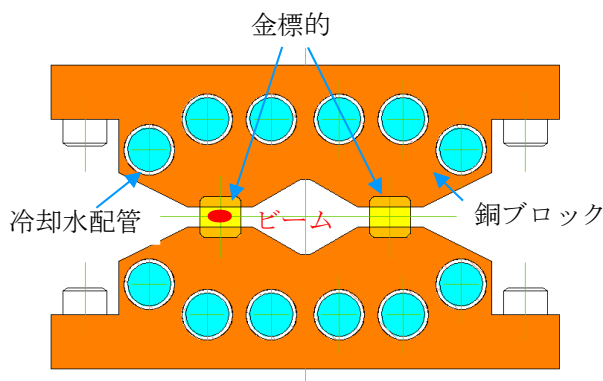


Figure 3: Schematic drawing of the new gold target.

ここで、冷却能力を倍にしたのに、なぜビーム強度は

倍の 100 kW にならないのか、という素朴な疑問が起こる。その答えは、1 スピル当たりの標的の温度上昇は、冷却能力だけで決まるのではなく、標的材料の比熱(熱容量)にも寄っているからである。この新標的の場合、冷却能力は現在の標的の倍になっても、比熱は材質が同じなので変わらない。また、ビームの幅を広げれば発熱密度が下がるので標的の温度も下がるが、標的位置における現在のビーム幅 $(\sigma_x, \sigma_y) = (2.5 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm})$ は、二次ビームライン側からの要請(二次粒子選別やバックグラウンドの抑制のため)により決まっているので、これ以上ビームを広げることができない。従って、最大許容ビーム強度は現標的の倍にまでは至らず、80 kW までとなるのである。

この新標的の構造で1つポイントとなるのは、金をビーム軸方向だけでなく、上下にも分割することである。これを省くと、下だけでなく上も拘束された金に大きな熱応力が発生してしまう。この熱膨張による応力の発生を抑えるため、上下に分割された金同士の間にはあらかじめ隙間を設ける。熱計算によれば、上下の金それぞれの熱膨張は上下方向に約 0.1 mm と予想されているため、余裕代も含めて、隙間の大きさは 0.3 mm とした。しかし、このことにより、その隙間を通ったビームはロスせずに素通りするため、標的でのビームロス率は現標的の 48%ロスから、42%ロス(理想的なガウス分布を仮定した場合)まで減少する。このロスの減少を最低限に抑えるために、ほかの上下分割の仕方を何種類も検討したが、結局いずれも金の最高温度がより高くなる結果となり、最終的にこの設計に落ち着いた。

金本体の大きさも、二次ビーム収量と冷却効率の観点から最適化を施した。ハドロン実験施設では、二次ビームは標的から斜め横方向に取り出されるため、標的の横幅が大きいと、二次粒子の吸収により二次ビーム収量が減ってしまう。そこで、ビーム横幅の $\pm 3\sigma$ をカバーする横幅 15 mm としていた現標的に対し、新標的では 12 mm とした。また、銅から剥き出しの部分の金の高さは、現標的も新標的も変わらず 6 mm であるが、銅への埋め込み深さは、現標的の 5 mm から新標的では 2 mm へと小さくした。これは、金よりも銅の方が熱伝導率が良いため、発熱中心から冷却水までの熱の移動経路としてなるべく早く銅になった方が冷却効率が高くなるからである。ビーム方向の長さ 66 mm は、ビーム幅と同様二次ビームのバックグラウンド抑制の観点から制限されているため、新旧の標的で変化はない。

遠隔操作での標的の交換を可能にするため、左右に2つ金を設けた二山構造になっているのも、現標的からの踏襲である。金と銅、ステンレス配管との接合には、現標的と同じく HIP (Hot Isostatic Pressing) による拡散接合を用いる。このように、技術的には製造方法は現標的のすでに確立しており、すぐにでも製造可能である。

2.2 熱計算

新標的の熱計算のやり方は、現標的の設計時のやり方と同じで、まず発熱密度を粒子シミュレーションコード MARS[6]により計算し、その結果を有限要素計算コード ANSYS[7]に入力して実際のスピル時間構造に合わせた過渡解析を行って温度と応力を求めた。計算したビーム条件は Table 1 にまとめている。冷却水の温度上昇は

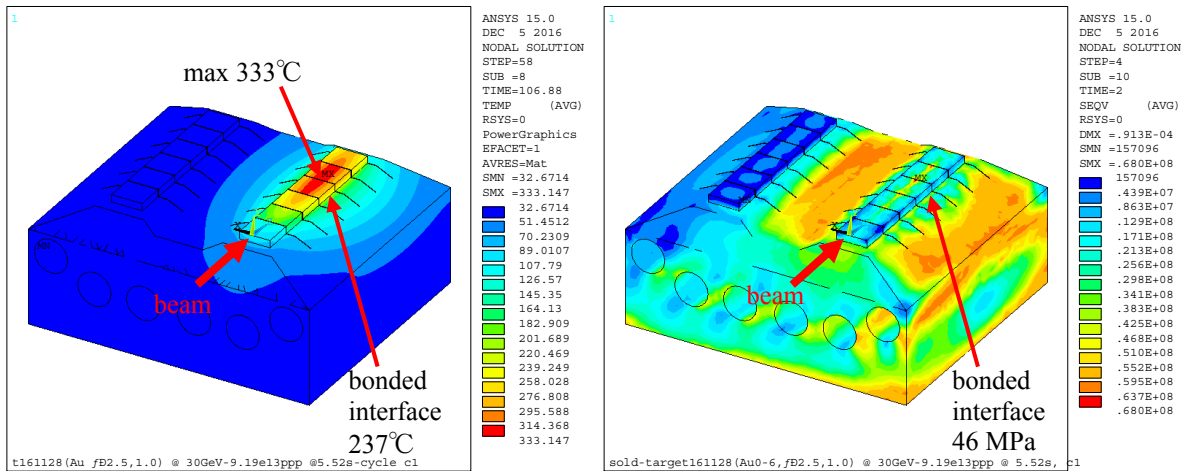


Figure 4: Results of the thermal analysis for the normal operation of the new gold target. Left shows the temperature distribution and right the von Mises stress. Only a lower half is shown.

せいぜい 2 K 程度なので、今回の計算では水温はすべて 30 °C に固定している。水の熱伝達係数は 10000 W/m²/K としたが、この値は、現在使用している水量からすると保守的な数字である。

Table 1: Beam Conditions for the Thermal Analysis of the New Production Target

エネルギー	30 GeV
平均強度	80 kW
繰り返し	5.52 秒
取り出し時間	2 秒
幅	(σ_x, σ_y) = (2.5 mm, 1.0 mm)

熱計算の結果を Figure 4 に示した。分布を見やすくするため、下半分のブロックのみを表示している。標的の最高温度は 333°C、金と銅との接合部の最高温度は 237°C となった。またミーゼス相当応力は、接合部で最大 46 MPa となった。金と銅との HIP 接合の強度は、以前行ったせん断試験により、温度依存データとして得られており、それと今回の熱計算で求めた最大応力との比較により、設計裕度 2.7 が得られた。

新しい金標的は、ビームによる熱負荷を上下 2 つに分散させる構造であるため、ビームの高さ方向の位置変動に非常に敏感である。Figure 5 は、実際の連続ビーム運転で測定された、標的位置におけるビームの高さ方向の中心位置の分布である。ビーム位置は非常に安定しており、中心から ±0.5 mm の範囲に収まっている。そこで、ビームの位置が高さ方向に連続的にずっと 0.5 mm 下にシフトした場合の熱計算を行った。その結果が Figure 6 である。下側の金の最高温度は 375°C、金-銅接合部の温度も最高 266°C まで上昇している。この時、接合部の相当応力も最大 52 MPa まで増大しているが、それでも設計裕度は 2.3 を確保している。注意して頂きたいのは、Figure 5 が示しているのは ±0.5 mm の範囲でのふらつきであって、継続的に 0.5 mm シフトするのはずっと過酷な条件であり、実際には Figure 6 の温度まで達する前に、

温度のインターロックによりビームを停止できる。また、1 発だけ 1 mm ビーム位置が下にシフトした場合も計算した。その結果が Figure 7 である。下側の金の最高温度は 412°C、接合部の温度と応力はそれぞれ 295°C、54 MPa まで上がっているが、それでもなお設計裕度は 2.0 となる。J-PARC の遅い取り出し機器では、取り出しの途中でインターロックがかかった場合に当該スピルでのそれ以上のビーム取り出しを停止する「SX-Abort」と呼ばれる機能が実現されている。標的温度の他、ビームプロファイルモニターや、位置シフトの原因となる電磁石電流値のモニターなど、複数のモニターによりこのような大きなビーム位置の変動は検知できるので、この SX-Abort により実際には Figure 7 の状態まで達する前にビーム取り出しは停止される。

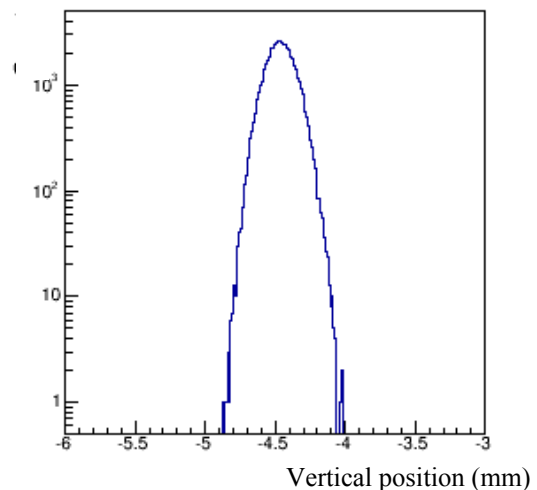


Figure 5: Distribution of the measured vertical position of the primary beam at the production target.

本標的の最高温度は、平均のビーム強度よりも、1 スピル当たりの陽子数に主に依っている。従って、スピルの繰り返しが早くなれば、同じ平均ビーム強度でも 1 スピル当たりの陽子数が少なくて済むので、標的の温度は下がる。簡単な評価では、仮に、今進行中の主リング電源更

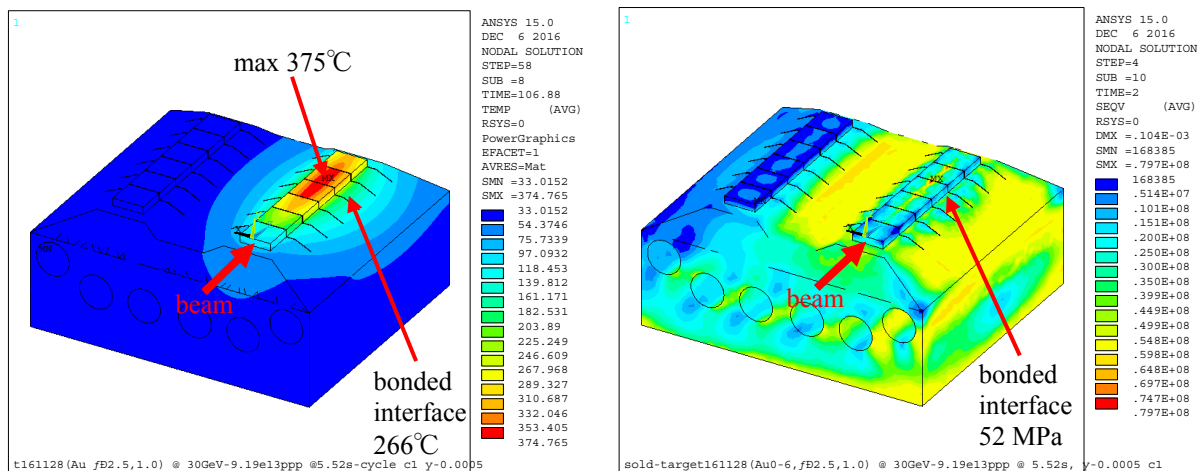


Figure 6: Results of the thermal analysis for the case that the vertical beam position shifts lower by 0.5 mm continuously. Left shows the temperature distribution and right the von Mises stress. Only a lower half is shown.

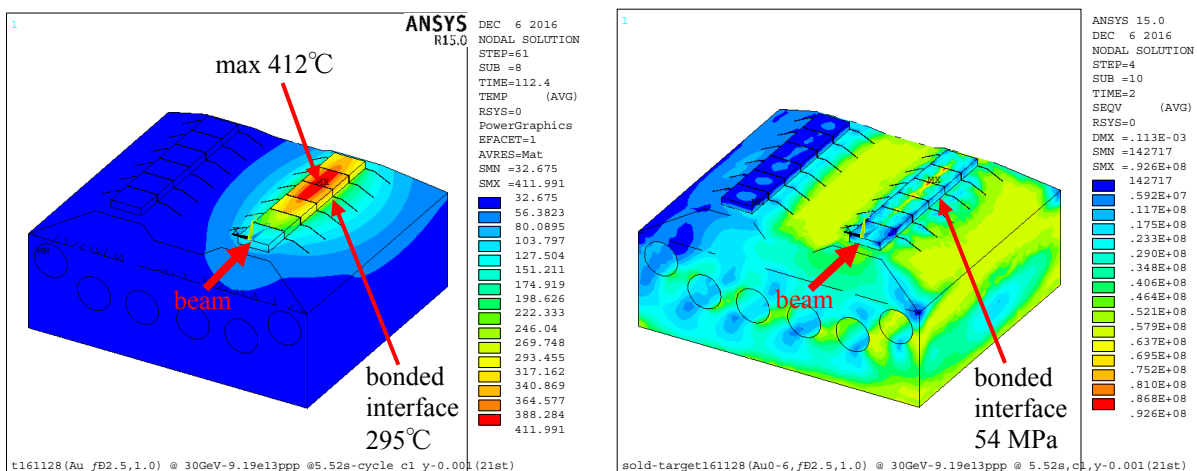


Figure 7: Same as Figure 6 but for the case that the vertical beam position shifts lower by 1 mm in 1 shot.

新により繰り返しが 4 秒になった場合、本標的の許容最大ビーム強度は約 110 kW となった。実際にどこまで強度を上げられるかはより慎重な検討が必要であるが、高繰り返し化により 100 kW 以上にも耐えるポテンシャルを本標的は秘めていると言える。

3. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設において、現在よりも高強度のビームに耐えることのできる、新しい標的を設計した。基本的な構造は現在と同じ間接水冷方式であるが、銅の冷却ブロックの数を増やすことにより冷却効率を上げており、最大 80 kW のビームを受け入れ可能である。この新標的は、早ければ今年度より製造を開始し、2019 年度に現在の標的と交換される予定である。

本標的の設計にあたっては、二次ビーム収量などユーザーからのフィードバックが大きな助けとなった。また設計全般に渡って、J-PARC 及び KEK の多くの方々からたくさんの助言を頂いた。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] H. Takahashi *et al.*, “Indirectly Water-Cooled Production Target at J-PARC Hadron Facility”, J. Radioanal Nucl. Chem., doi: 10.1007/s10967-015-3940-9.
- [2] H. Takahashi *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における間接水冷型生成標的の開発”, Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015, pp. 1045-1049.
- [3] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン施設における標的監視用ヘリウムガス循環装置の構築”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 944-948.
- [4] R. Iwasaki *et al.*, “J-PARC ハドロンビームライン用回転円板型標的の開発”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016, pp. 949-953.
- [5] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における 2 次粒子生成標的耐放射線回転センサの開発”, in this Proceedings.
- [6] <https://mars.fnal.gov/>
- [7] <http://www.ansys.com/>