

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 (2) DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY (2)

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、倉崎るり、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 developed 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, the cooling efficiency is improved by increasing the number of the copper cooling blocks. We performed an elastic-plastic analysis for the evaluation of the thermal strength of the new target using the results of tensile tests of the bulk gold. By comparing the result of the analysis to the allowable stress for each type of stress, it was found that the new target is capable of the beam power of 90 kW in maximum in the case of the 5.52-s spill cycle.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設では、主リングからゆっくりと取り出された（「遅い取り出し」）30 GeV の一次陽子ビームを生成標的「T1」に当て、そこから発生する π 中間子、 K 中間子、反陽子などの粒子を二次ビームとして用い、様々な素粒子原子核実験が行われている。遅い取り出しの繰り返し周期は当初 6 秒であったが、一次陽子ビームの平均強度を上げるため 5.52 秒となり、さらに今年に入ってから 5.2 秒へと短くなっている。

大強度加速期施設における生成標的は、一次ビーム強度に耐えられる十分な冷却効率を持ち、かつ、化学的、放射線的に安定であることが求められるが、更に、ハドロン実験施設における生成標的には、

1. 標的物質の密度、質量数が大きいこと。
2. 一次陽子ビームのスポットサイズはなるべく小さいこと。

が求められる。これは二次ビームの質と強度のために要請されるものであるが、これがハドロン生成標的の設計を難しくしている。というのは、現在のハドロン実験施設の一次陽子ビーム強度は J-PARC の他の施設よりも 1 桁低いが、標的でのビームサイズはハドロンの方が面積が 1 桁近く小さいので、ビームのエネルギー密度で言うとほぼ同等、さらに標的の密度はハドロンの方が高いので、標的内の発熱密度で言うとすでに J-PARC 内で最高になっているのである。

以上のような条件のもと、ハドロン生成標的としては、現在、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。金本体の幅は 15 mm で、高さは、銅の外に剥き出しの部分が 6 mm、銅に埋め込まれている

部分が 5 mm の合計 11 mm である。金の総長は 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。温度監視のため、6 分割された各々のピースに K 型シース熱電対が取り付けられている。標的は二山構造になっていて、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は、備え付けられた水平駆動機構を用いて遠隔操作で標的を交換できるようになっている。万が一

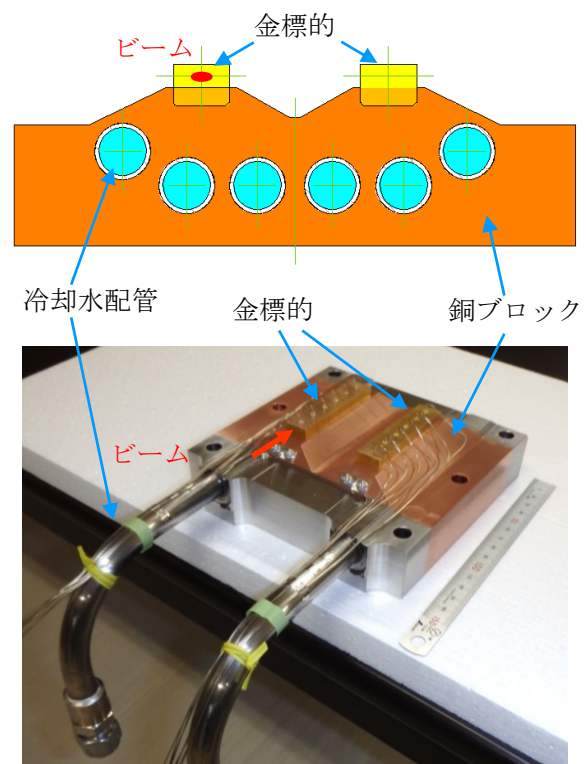


Figure 1: Schematic drawing and photograph of the current gold target.

* hitoshi.takahashi@kek.jp

金が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、標的自体はステンレス製の気密容器の中に収められ、更に、その容器内にヘリウムガスを循環させて放射性物質濃度を測定することで、標的の健全性を常に監視している [1,3]。この標的は、2014 年 9 月に設置、2015 年 4 月からビーム照射を開始して、これまでトラブル無く安定運転を続けている。

現在の標的が受け入れ可能な一次陽子ビーム強度は最大 53 kW である。今年のビームタイムで、連続運転の強度は 51 kW を達成し、現標的のほぼ限界に達した。従って、これ以上ビーム強度を増強するには、それに耐えられる新しい標的に交換する必要がある。

このような状況のもと、我々は現在新標的として 2 種類の開発を進めている。一つが現在の金標的に改良を加えた新しい間接水冷型標的で、もう一つが、将来の 150 kW 以上のビーム強度にも耐えられるような直接冷却型の回転標的である。回転標的には多くの R&D が必要であり実機製作までまだまだ時間を要するが、新しい間接水冷標的は、すでに技術的に確立した製造方法を用いるので、比較的早く製作可能である。従って、まず改良型間接水冷標的を製作、設置してビーム運転を行い、その間に並行して回転標的の開発を進める計画である。

改良型間接水冷標的の設計については、昨年の加速器学会で一度報告した [4] が、今回、高温における金の強度などを測定し、その結果を用いて新標的の熱強度を評価し直した。本論文ではそれについて詳しく述べる。回転標的の R&D の状況については、参考文献 [5,6] を参照されたい。

また、ビーム強度の増強に対応するには、標的自体だけでなく、それが収納される気密容器、特にビームに常に晒されるビーム窓の更新も必要である。現在の標的ではチタン合金 (Ti-6Al-4V) 製のビーム窓が用いられているが、次期標的ではベリリウム製のものを採用する予定である。このベリリウム製ビーム窓の設計開発については参考文献 [7] で報告されている。

2. 改良型間接水冷標的の熱強度評価

新しい間接水冷標的の構造や寸法は、昨年の報告 [4] から変わっていない (Fig. 2)。基本的には現在の金標的と同じく金標的の本体に水冷銅ブロックを接合したものであるが、冷却効率を上げるために、その金+水冷銅ブロックをもう一つ用意して、一方の上にもう一方を逆さまに載せた構造となっている。熱計算より上下の金はそれぞれ約 0.1 mm 熱膨張すると予想されることから、それによって生じる熱応力を逃がすために、上下の金の間には 0.3 mm の隙間を設ける。金の大きさは、横幅が 12 mm で、銅から剥き出しの部分の金の高さは上下合計で 6 mm (隙間 0.3 mm 込み)、銅への埋め込み深さは 2 mm である。ビーム方向の長さは現標的と同じ 66 mm で、同様に 6 分割される。金と銅、およびステンレス製冷却水配管との接合には、現標的と同じく HIP (Hot Isostatic Pressing) による拡散接合を用いる。

前回の熱強度評価 [4] では、金の縦弾性係数を使った弾性解析を行っており、また、金と銅の接合部の応力が最も高くなることから、接合部の発生応力と HIP の接合強度との比較だけで設計裕度を評価していた。しかし

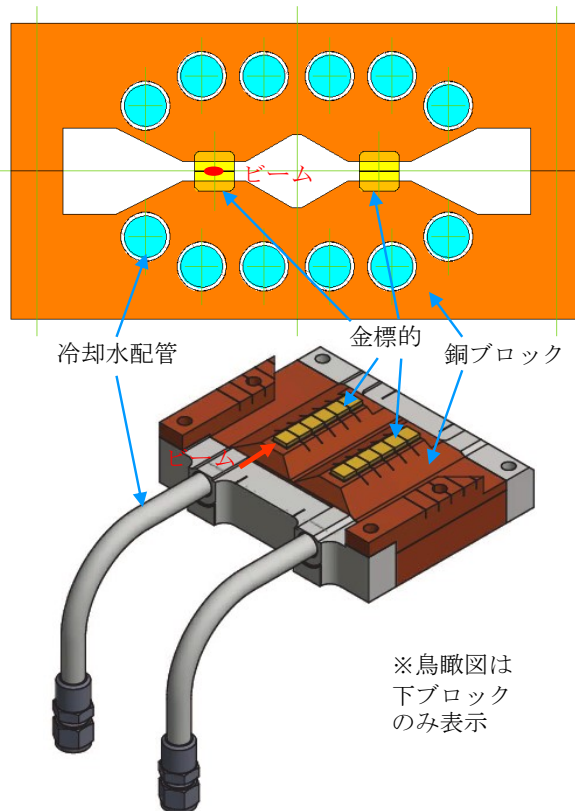


Figure 2: Schematic drawings of the new gold target.

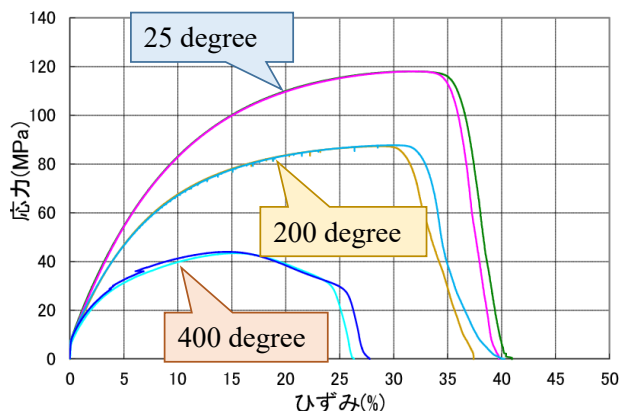


Figure 3: Stress-strain curve of gold (annealed).

ながら、塑性変形により応力が緩和する可能性があること、接合部よりももっと高温となる金本体の評価も必要であることから、今回、金の引張試験を行って、応力-歪み曲線と強度を測定した。実際の HIP で行うのと同じ熱処理を与えた金の圧延材を用意し、それから JIS Z2241 13B 号試験片を作製して引張試験を行った。引張試験は、室温、200 °C、400 °C の 3 つの温度環境でそれぞれ 2 回行った。その結果得られた応力-歪み曲線が Fig. 3 である。また、そこから金の引張強度と 0.2% 耐力は、Table 1 のように得られた。以前測定していた金と銅との接合強度はこの引張強度よりも高かったので、接合部についても今回の引張強度を基準に評価するのが安全で

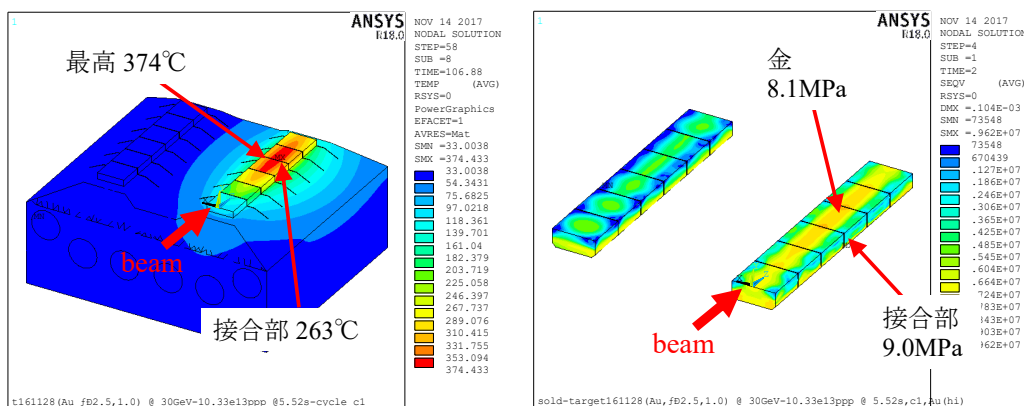


Figure 4: Result of the thermal analysis.

Table 1: Measured Strength of Gold (Annealed)

温度 (°C)	引張強度 (MPa)	0.2% 耐力 (MPa)
25	118	8.6
200	87	7.8
400	43	7.6

ある。

この測定結果をもとに、改良型間接水冷標的の熱強度を再評価した。ビーム条件は、エネルギー 30 GeV、平均強度 90 kW、取り出し時間 2 秒、繰り返し 5.52 秒、ビーム幅 $(\sigma_x, \sigma_y) = (2.5 \text{ mm}, 1.0 \text{ mm})$ である。温度と応力の解析には、まず発熱密度をモンテカルロコード MARS [8] により計算し、その結果を有限要素計算コード ANSYS [9] 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た。その結果の評価には、応力分類の考え方を取り入れ、応力の種類に応じて許容応力を次のように設定した。

$$\begin{aligned} \text{熱応力} &: S_M \times 3 \\ \text{低サイクル疲労} &: 10^4 \text{ 疲労強度} / 2 \\ \text{高サイクル疲労} &: 10^7 \text{ 疲労強度} / 2 \end{aligned}$$

ここで、低サイクル疲労は連続ビームの on/off の繰り返しを、高サイクル疲労はスピル毎の繰り返しを想定している。設計応力強さ S_M は、JIS B8266 (圧力容器の構造-特定規格) における溶接管の基準を参考に、引張強度 $\times 0.85/3$ と 0.2% 耐力 $\times 0.85/1.5$ のいずれか小さい方とした。疲労強度は、過去の文献 [10, 11] では室温での金の疲労強度が 10^4 サイクルでおおよそ引張強度の 0.7 倍、 10^7 サイクルで引張強度の 0.4 倍になっていることから、 10^4 疲労強度として引張強度/2、 10^7 疲労強度として引張強度/3 とした。

ANSYS による温度と応力の計算結果を Fig. 4 に示す。金本体の最高温度は 374 °C、接合部の温度は最高 263 °C となり、ミーゼス相当応力は、金本体と接合部でそれぞれ最大 8.1 MPa、9.0 MPa となった。塑性変形まで考慮した結果、応力の値そのものは前回の熱強度解析よりも小さくなっている。この ANSYS 計算の結果をもとに、応力の種類ごとに評価した結果を Table 2 にまとめた。応力の大きさだけで見ると接合部がもっとも大

きいが、金本体のほうが温度が高い分だけ許容応力が小さくなるため、最大許容ビーム強度は金本体の高サイクル疲労によって制限される結果となった。ビーム強度を 95 kW に上げると、金の最高温度は 394 °C で、高サイクル疲労に対する等価応力振幅が 8.0 MPa となり、その許容応力 7.5 MPa を超える。従って、繰り返し周期 5.52 秒の場合の最大強度は 90 kW となった。

前回の報告 [4] でも述べたように、この改良型間接水冷標的は、上下の水冷却銅ブロックに除熱を分散させることで冷却効率を稼いでいるため、鉛直方向のビーム位置に非常に敏感である。ビーム位置は標的入口に設置されたプロファイルモニターで常に監視されており、実際の連続ビーム運転において測定された鉛直方向のビーム中心位置は、 $\pm 0.5 \text{ mm}$ の範囲で安定している。また、新標的の金の温度についてビーム鉛直位置依存性を計算してみると、2.5 mm シフトした時に温度が最高になることが分かった。そこで、連続的にビームが 0.5 mm 下にシフトした場合と、1 発だけ 2.5 mm 下にシフトした場合の 2 通りについて、標的の熱強度を評価した。Table 3 がその結果のまとめである。どちらの場合も、異常ビームを想定した場合であり、複数のモニターのインターロックでビームを停止できるため、疲労の評価は必要ない。いずれの場合においても、発生する熱応力は許容応力を下回っており、このようなビーム位置のずれが起こった場合でも、標的の健全性は保たれることが分かった。

この標的の最高温度は、平均ビーム強度よりも、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、標的温度が下がり、その結果熱応力も下がる。ただし、取り出し時間を短くすると、除熱が追いつかなくなるので温度が上がってしまう。一つの想定として、取り出し時間の 2 秒は保ったままフラットトップを短くしてスピルの繰り返しを 5 秒にした場合について同様の熱解析を行うと、最大 97 kW のビーム強度まで耐えられることが分かった。また、主リングの電源の更新により、主電磁石の立ち上げ、立ち下げの時間も短くなって繰り返し周期が 3.7 秒になった場合を評価すると、最大ビーム強度は 125 kW となった。

Table 2: Result of the Thermal Analysis

	応力分類	応力計算結果	許容応力
金本体 (374 °C)	熱応力	8.1 MPa	13.0 MPa
	高サイクル疲労 (shot 毎) に対する等価応力振幅	7.9 MPa	8.2 MPa
	低サイクル疲労 (連続運転の on/off) に対する等価応力振幅	8.2 MPa	12.3 MPa
接合部 (263 °C)	熱応力	9.0 MPa	13.2 MPa
	高サイクル疲労 (shot 毎) に対する等価応力振幅	9.0 MPa	12.2 MPa
	低サイクル疲労 (連続運転の on/off) に対する等価応力振幅	9.2 MPa	18.4 MPa

Table 3: Result of the Thermal Analysis In Case the Vertical Beam Position Shifts

		最高温度	熱応力計算結果	許容応力
連続的に 0.5 mm シフト	金本体	430 °C	8.4 MPa	12.9 MPa
	接合部	303 °C	9.4 MPa	13.1 MPa
1 発だけ 2.5 mm シフト	金本体	514 °C	9.6 MPa	12.7 MPa
	接合部	391 °C	10.6 MPa	12.9 MPa

3. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設の次期生成標的である改良型間接水冷標的について、新たに実施した金の引張試験の結果を用いて、その熱強度を再評価した。測定した応力-歪み曲線を用いて熱計算を行い、応力の種類に応じて設定した許容応力と比較した結果、受け入れられる最大ビーム強度は、5.52 秒サイクルで 90 kW となった。さらに、サイクルを早くすることで 100 kW 以上のビーム強度にも耐えられることが分かった。

この改良型間接水冷標的は、現在実機の製作が進行中であり、今年度内に一通り完成させ、来年秋に設置する予定である。

謝辞

本標的の設計にあたっては、J-PARC 内外の多くの方々からご協力を頂きました。特に、名古屋大の鬼柳喜明先生をはじめとするハドロン標的レビュー委員会の皆様には、標的の設計、熱解析について細かくレビューして頂き、非常に多くの助言を頂きました。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.* 305, 2015, pp. 803-809, 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] H. Takahashi *et al.*, “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”, *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2017, pp. 660-663.
- [5] 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.
- [6] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設における二次粒子生成標的の耐放射線回転センサの開発”, *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 2017, pp. 655-659.
- [7] H. Watanabe *et al.*, “J-PARC ハドロン実験施設におけるベリリウム製ビーム窓の設計”, in this proceedings.
- [8] <https://mars.fnal.gov/>
- [9] <https://www.ansys.com/>
- [10] N. E. Frost, K. J. Marsh, and L. P. Pook, “Metal Fatigue”, Clarendon Press, Oxford, 1974.
- [11] R. D. McCammon and H. M. Rosenberg, “The Fatigue and Ultimate Tensile Strengths of Metals between 4.2 and 293K”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* Vol. 242, No. 1229, 1957, pp. 203-211.