

# Operation status of water-cooling fixed target at J-PARC Hadron Facility

Yutaka Yamanoi <sup>#,A)</sup>, Hitoshi Takahashi <sup>A)</sup>, Keizo Agari <sup>A)</sup>, Masaharu Ieiri <sup>A)</sup>, Yoji Katoh <sup>A)</sup>,  
Yoshinori Sato <sup>A)</sup>, Shin'ya Sawada <sup>A)</sup>, Yoshihisa Shirakabe <sup>A)</sup>, Yoshihiro Suzuki <sup>A)</sup>, Kazuhiro Tanaka <sup>A)</sup>,  
Akihisa Toyoda <sup>A)</sup>, Megumi Naruki <sup>A)</sup>, Erina Hirose <sup>A)</sup>, Michifumi Minakawa <sup>A)</sup>,  
Ryotaro Muto <sup>A)</sup>, Hiroaki Watanabe <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

## Abstract

The experiments of the hadron facility were operated with a slow extraction beam for 2 cycles after the great east japan earthquake on 2011. The maximum intensity was 6kW for RUN#40, 14kW for RUN#43 on 2012. The indirect water-cooling Pt fixed target (50% of beam loss) was designed based on the last report, and it was used for these experiments. The thermo couples with high speed response were installed for a preliminary target design of high intensity beam. The distribution and the rapid transition of temperature were measured successfully. As a result of analyzed with transient temperature data, the heat transfer coefficient is 11293[W/m<sup>2</sup>K] between Pt target and Cu base block, 9282[W/m<sup>2</sup>K] between Cu base block and the SUS pipe of cooling water. FEM analysis which replaced the target material with Au from Pt was executed at 25 kW of beam intensity conditions. The shear stress is reduced one half with replaced the target material, therefore Au target can use to under 70kW within the stress analysis. Au target case also needs to design for the pipe arrangement of cooling water without boiling, for a target not to melt.

## J-PARC ハドロン実験施設における間接水冷標的の運転

### 1. はじめに

東日本大震災後、RUN#40 (2012年1月7日から2月22日まで)、RUN#43 (2012年5月28日から7月2日まで)の2サイクルに渡ってハドロン実験ホールで50GeV主リングから遅い取り出しビームの実験が行われた。実験ホールのビームライン数は、K1.8、K1.8BR、KL、K1.1BRの計4か所である。これらのビームラインに二次粒子を供給する生成標的は、T1標的一か所となっている[1] [2] [3]。RUN#40のビーム強度は、平均強度3.6kW (4.5E+12 ppp)、最大6kW、RUN#43では平均強度6kW (4.5E+12 ppp)、最大14kWであった。

前回の加速器学会では間接水冷標的の設計状況を報告した[4]。その結果を基に間接水冷Pt標的(50%ビームロス)を製作し、実験に使用した。この標的の形状では将来、更にビーム強度が上がっていった場合、Ptと銅ブロックとの接合面におけるせん断応力が問題になることを示した。今サイクルは、今後のビーム強度増強のために、早い応答速度の熱電対を設置し、温度分布を測定している。

本発表では、温度測定の結果と今後の間接水冷標的の計画を報告する。

### 2. 間接水冷Pt標的

図1に製作した標的を示す。標的物質は白金(Pt1000)、形状は、縦横6mm×奥行き60mmの四角柱である。奥行き方向を0.2mmのスリットを入れて6分割している。入射ビームは図1写真左手前から

入射し、右奥に抜けていく。このPt標的は間接冷却するために水冷された銅Cuブロック(C1020)の上に拡散接合(H.I.P.)によって接合されている。

前回の報告にあるように、標的PtとブロックCuは、熱膨張係数がそれぞれ9.37E-6と17.9E-6とで、約2倍も異なるため、熱膨張係数13.4E-6の純Ni材(NW2201)を緩衝材として挿入してせん断破壊を防止している。

冷却水配管はΦ12mm-t1mmのSUS316L材パイプで、幅110mm奥行き130mmの銅ブロックの内部を水平に2往復するように埋設されている。

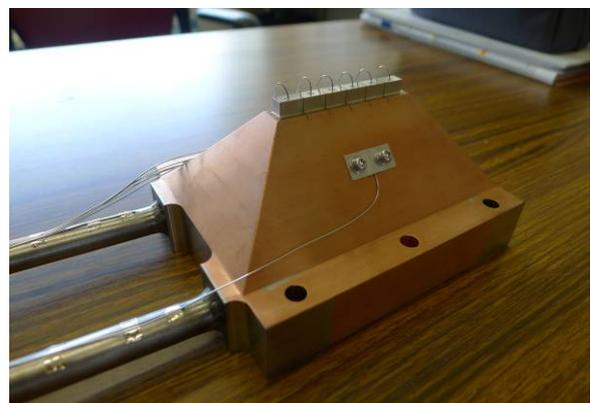


図1：製作した間接水冷Pt標的

入口平均流速1m/s(質量流量0.078kg/s)、配管圧損は約4kPaを仮定し、配管内壁面温度分布がビーム強度50kWでも冷却水が配管壁面で沸騰しないよう

<sup>#</sup>yamanoi@post.kek.jp

に設計した。ビーム強度 75kW 時のシミュレーションでは配管内壁面温度は最大 86.5°C である。

Pt 標的の総重量が 46.332g、Cu ブロックが 4.2kg、SUS パイプが 245g、総重量は約 4.5kg である。

### 3. ビーム照射

#### 3.1 発熱密度

実際の入射ビームは陽子、運動エネルギー 30GeV、入射周期 6 秒、スピル長は約 2 秒、標的部でのビームサイズは Φ 6mm である。例としてビーム強度 10kW (12.5TP) のビームが入射したときの発熱密度をシミュレーションした結果を図 2 に示す。Pt 標的の総体積への総発熱量は、一次ビームのエネルギー損失分と発生した二次粒子エネルギー損失分が加わり 0.382kW となる。

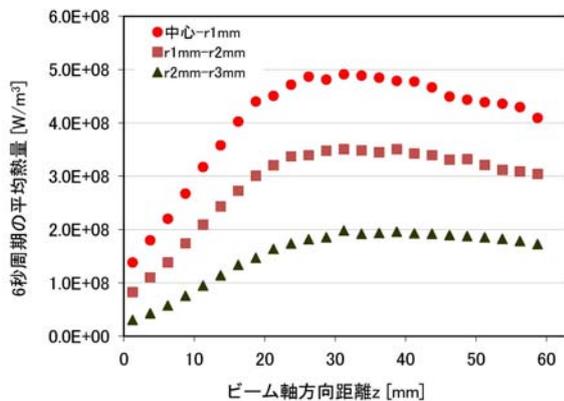


図 2：ビーム強度 10kW 時の Pt 標的発熱密度

#### 3.2 温度変化

図 1 に示した Pt 標的には 6 箇所、Cu ブロックには 1 箇所の熱電対が取り付けられている。詳細な温度測定は 0.8kW から 14kW まで行っており、図 3 にビーム強度 5kW 時の典型的な温度変化を示す。

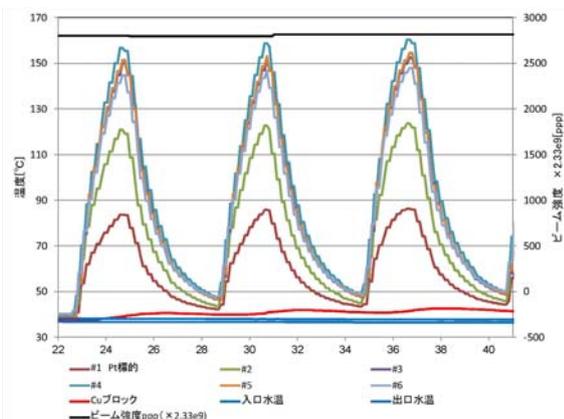


図 3：ビーム強度 5kW 時の温度変化

Pt 標的、Cu ブロックともスピル長の約 2 秒間の温度上昇時（ビーム入射時）は、加熱と冷却がされている状態、ビーム OFF 時（温度下降時）は 4 秒間で間接水冷によって冷却される状態である。

温度変化  $T_{Pt}(t)$ 、 $T_{Cu}(t)$  はそれぞれ式(1)、(2)でフィットし、Pt 標的、Cu ブロックの熱拡散率  $a$ 、 $b$  を求める。今回、密度  $\rho$ 、比熱  $c$ 、熱伝導率等は表 1 のパラメータを用いた。

$$T_{Pt}(t) = T_{Cu}(t) + \Delta T_{Pt} \cdot (1 - e^{-at}) \quad (1)$$

$$T_{Cu}(t) = T_0 + \Delta T \cdot (1 - e^{-bt}) \quad (2)$$

$T_{Pt}(t)$  : Pt 標的温度

$T_{Cu}(t)$  : Cu ブロック温度

$T_0$  : 冷却水温度

$\Delta T_{Pt}$  : Pt 標的の上昇・下降温度変化量

$\Delta T$  : Cu ブロックの上昇・下降温度変化量

$a$  : Pt 標的の熱拡散率

$b$  : Cu ブロックの熱拡散率

温度測定データをフィッティングした結果、熱拡散率  $a=0.645$ 、 $b=0.0897$  であった。ここで熱拡散率  $a$  は、Pt 標的の比熱  $c$  [0.136J/g · K]、質量  $m$  [46.332g]、熱伝達率  $\alpha$  [W/m<sup>2</sup> · K]、Pt 標的と Cu ブロックとの接合面積  $S$  [0.36 × 10<sup>-3</sup>m<sup>2</sup>] を用いて次の様な関係から、

$$\text{熱拡散率 } a = \frac{\alpha \cdot S}{c \cdot m}$$

$\alpha = 11293$  [W/m<sup>2</sup> · K] を得た。

同様に熱拡散率  $b$  は、銅ブロックと SUS 配管側面を通して冷却していて、配管側面面積  $S_b$  [0.01533m<sup>2</sup>]、熱伝達率  $\alpha_b$ 、銅ブロック質量  $m_b$  [4200g] を用いて、 $\alpha_b = 9282$  [W/m<sup>2</sup> · K] を得る。

表 1：標的を構成する材質

	Pt	Au	Ni	Cu	
密度 $\rho$	21.45	19.36	8.902	8.96	g/cm <sup>3</sup>
比熱 $c$	0.136	0.128	0.439	0.385	J/g K
熱伝導率	71.6	318	90.9	401	W/m K
融点	1768	1064	1455	1083	°C
ヤング率	163	79	200	115	GPa
熱膨張係数	9.37	14.2	13.4	17.9	× 10 <sup>-6</sup>
原子量 $A$	195	197	58.69	63.55	g/mol
相互作用長 $\lambda$	8.844	10.14	15.18	15.06	cm
50% ロス長	6.13	7.03	10.5	10.4	cm

### 4. 間接水冷 Au 標的

#### 4.1 Au 標的解析条件

標的部を Pt から Au に代えた解析を、ビーム強度条件 25kW で行った。形状、発熱分布は Pt 標的と同じものを用いているため、表 1 の通り、50% ロスの

標的長で使用する場合は実際よりも 0.9cm 短く、発熱密度が 12.8% 高い条件である。

#### 4.2 解析結果

解析結果は、熱伝導率の大きな違いから、ビーム入射終了直後で Pt 標的の先頭から 4 番目のセグメントで最高温度が約 236°C、Au 標的が約 148°C になった。また、図 4 に示すように、Pt 標的/Au 標的と Cu 台座境界部のミーゼス相当応力の最大値は、Pt では約 75MPa に対し、Au 標的では約 40MPa であった。

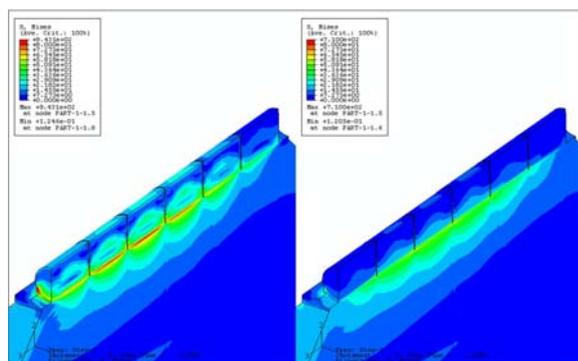


図 4：標的 Cu 台座の境界部の応力コンター図 (左図が Pt 標的、右図が Au 標的)

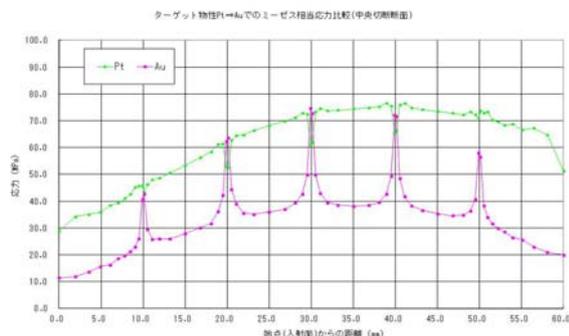


図 5：標的と Cu 台座の境界部の応力を軸方向に拾った分布図

図 5 は、図 4 のコンター図を中央切断面のミーゼス相当応力をグラフにしたものである。特徴的なのが、Pt 標的は中心軸上で発熱した熱が移動し難いため、ビームが通過する軸を中心に Pt 標的自身が前後に伸びている。Pt 標的の最外面部は内部の膨張を抑えて、Pt 内で応力を発生している状態である。Au 標的の場合、標的の熱伝導率が大きいため、すぐに標的全体に広がり、Cu との線膨張係数違う分、その境界面での応力がピークになっている。

#### 4.3 Au 標的の可能性

冷却出来るのかを考慮せずに、融点までの受け入れ可能ビーム強度を比較すると、Pt 標的では 216kW (6 秒周期)、Au 標的では 237kW (6 秒周期) でそれほど変わらない。

Pt 標的では、Cu 台座との間に緩衝材 Ni を挟んでも最大許容せん断力は 110MPa 程度であり、ビーム強度換算ではこの約 35kW が上限であった。

今回、緩衝材としての候補にあった Au そのものを標的にすることで、発生する応力を 1/2 に出来る可能性があり、標的と台座の剥離しない最大ビーム強度は、約 70kW である。

冷却水配管内の壁面温度では、Pt 標的でのビーム強度 75kW 時のシミュレーションで最大 86.5°C であったことから Au 標的にしても同様の結果が予想される。

それ以上の場合、冷却水配管の位置を標的から遠ざけることで壁面温度は下げることが出来るが、温度勾配が緩くなるため標的温度が上昇しない配置を求める必要がある。

### 5. まとめ

間接水冷の Pt 標的を製作し、ビーム入射に依る温度分布を測定し、設計通りの性能であることを確認した。

更に高いビーム強度を受け入れられるように Pt 標的部を Au 標的に代えた場合の解析を行い、Cu 台座との境界に発生するせん断応力を Pt 標的の 1/2 に出来ることが分かったが、その場合でも最大ビーム強度は 70kW 程度と予想される。

### 参考文献

- [1] 田中万博他、“大強度陽子加速器施設原子核素粒子実験施設建設グループ ハドロンビームラインサブグループ中間報告書”、KEK Internal 2002-8 (2002)
- [2] 田中万博他、“大強度陽子加速器施設原子核素粒子実験施設建設グループ ハドロンビームラインサブグループ第 2 次中間報告書”、KEK Internal 2004-3 (2004)
- [3] 田中万博他、“J-PARC 原子核素粒子実験施設技術設計報告書 ハドロンビームラインサブグループ第 3 次中間報告書”、KEK Internal 2007-1 (2007)
- [4] 山野井豊他、“J-PARC ハドロン実験施設における間接水冷標的”、Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 1-3, 2011, Tsukuba, Ibaraki.