

WATER-COOLED PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON FACILITY

Yutaka Yamanoi^{*A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Hiroshige Masuo^{B)}, Kaoru Usuda^{B)},
Keizo Agari^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yohji Kato^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shinya Sawada^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Yoshihiro
Suzuki^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Megumi Naruki^{A)},
Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Hiroaki Watanabe^{A)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

^{B)}Metal Technology Co., Ltd.

276-21, Moto-ishikawa-cho, Mito-shi, Ibaraki, 310-0843, Japan

Abstract

There is one production target T1 in the hadron beam line at present. After 2011 Great East Japan Earthquake is recovered, it is scheduled to experiment by the slow extraction beam of tens of kW of MR, and using water-cooled production target. In this target, it is problem that the strong heat stress is caused by incident beam between Pt target and Cu cold block. This heat stress causes the break of any joint by a heat cycle, and cooling effect gradually turns worse more, and a Pt target melts. Therefore, this target was developed by using the sheet material of the nickel to prevent the stress destruction. Pt, Ni, and Cu are joined by Hot Isostatic Pressing (H.I.P.), and the cooling pipe made in SUS is buried in a copper block.

J-PARC ハドロン実験施設における間接水冷標的

1. はじめに

ハドロン実験ホール内のビームライン数は、昨年秋に K1.1 が加わり、K1.8、K1.8BR、KL の計 4 か所となった。このビームラインに二次粒子を供給する生成標的は、現在、T1 標的一か所しかない^{[1], [2], [3]}。ビームラインの設計最大強度は 750kW であるが、徐々にビーム強度を上げる努力が続けられ、東日本大震災の復旧後は数十 kW の陽子ビームを MR より取り出し、水冷 Pt 標的を用いて二次粒子を生成し実験に使用する予定である。

数十 kW のビーム強度時においても出来るだけ K 中間子など二次粒子を多く生成するために、間接水冷式の Pt 標的 (50%ロス) を用いることを計画している。

本発表では、この間接水冷標的の開発、製作について報告する。

2. 二次粒子生成標的

2.1 ビーム強度と二次粒子生成量

ハドロンビームライン運転開始から現在に至る最大ビーム強度は 4.5×10^{12} ppp (3.6kW)、平均強度 3.3×10^{12} ppp (2.7kW) であり、震災復旧後は取り出し強度 50kW を目指しての運転が計画されている。そのため取り出し強度が数十 kW 以下では、フルビームを想定した複雑な構造の標的装置 (Ni 30%ロス標的) を用いるよりも、冷却方法を検討して、二次粒子の生成量を多く出来る標的を用いるほうが震災

でビームタイムが少ない実験にとって重要である。前報告^[4]にある通り、K1.8 ビームラインにおいて、運動量 0.75GeV/c の K⁺、K⁻の生成量を、それぞれの Ni 標的装置と Pt 標的装置で実際に比較した。その結果、フルビーム 750kW で使用できる直接水冷 Ni 標的装置 (30%ロス) を用い続けるよりも、数十 kW の入射ビーム強度では Pt 標的 (50%ロス) を用いる方が実験に対しては収量においておよそ 2.3 倍有利である。

2.2 形状と発熱量

標的を設計する上で参考にした BNL AGS (24GeV) の C4、D6 の標的は、入射ビーム強度は平均 4×10^{13} ppp (30kW) で水冷の Pt 標的(60mm 長から 128mm 長)である。

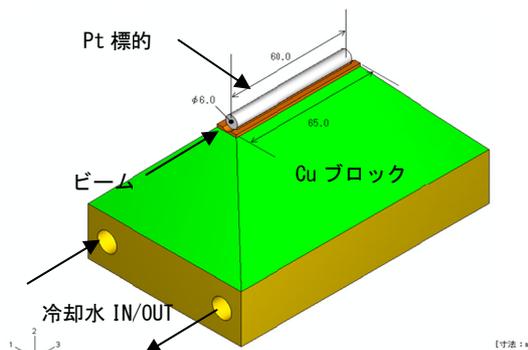


図 1 : Case1 四角錐タイプの標的の形状

* yamanoi@post.kek.jp

50kW (6.25×10¹³ppp) 時の、Pt 標的 (直径 6mm 長さ 60mm) での同型水冷標的 Case1 を検討した (図 1)。MARS による計算によって Pt 標的と Cu ブロックなど周辺構造体の発熱分布は求めた。総量では各部材に Pt 標的 1.9kW、Cu ブロック 0.49kW、合わせて 2.4kW (50kW) の発熱量がある。

また、Pt 標的片側 (下方) だけでなく、Pt 標的 (直径 6mm 長さ 60mm) の全周を Cu ブロックで囲った Case2 の計算も行った (図 2)。

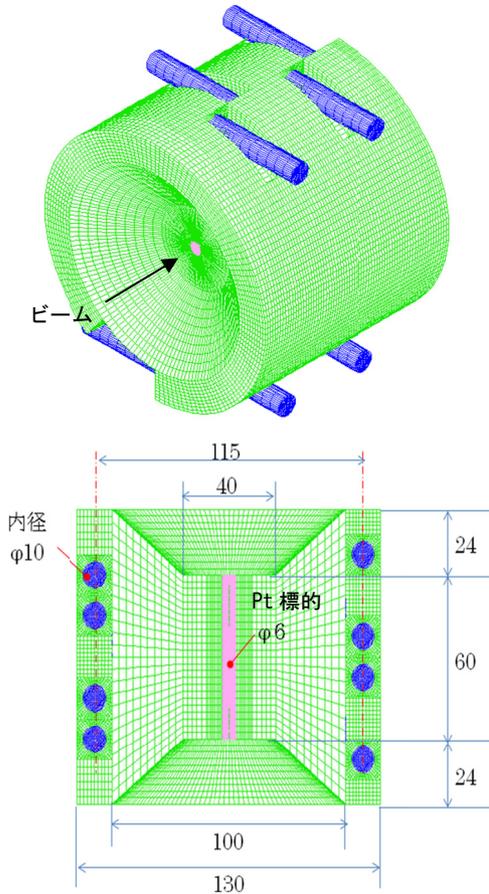


図 2 : Case2 Pt 標的の全周を Cu ブロックで囲むもの

入射ビーム強度と各部位の発熱量、冷却水配管内壁面温度を Case1 と Case2 について表 1 に示す。表 1 より Case1 より Case2 の方が、冷却面積が大きいため同ビーム強度で比較すると Pt 標的の最高温度低い。また、冷却水配管内の壁面温度では入射ビーム数十 kW では、共に壁面で突沸しない程度である。

Case1 ではビーム入射方向から見たとき、標的の下方しか物質が占めていないため入射ビーム強度の 5%程度の総発熱量であるが、Case2 では標的の周りにも物質があるために二次粒子による発熱で 7.4%程度の総発熱量がある。

Case2 では冷却水配管が二次粒子に曝される量も

多いため冷却水中に発生するトリチウムの発生量が多く、周囲の Cu ブロックはハロー成分の増加につながるかと予想される。

工学的に Case2 では Pt 標的円筒側面をすべて拘束する形状なので、温度が上昇した時に Pt と Cu との間に発生するせん断応力が大きく、ビーム照射と停止との熱サイクルで破壊する可能性が大きい。

以上より数十 kW 以下の標的は Case1 の形状で製作することとした。

表 1 : 入射ビーム強度と発熱量、最高温度

形状	Beam Power kW	Heat generation			Pt Target Max. °C	Inside wall of cooling pipe Max. °C
		Pt	Cu	Total		
		W	W	W		
Case1	50	1830	656	2486	428.8	71.6
	75	2745	981	3726	620.2	86.5
	100	3660	1312	4972	813	101
Case2	75	2765	2777	5542	239.5	65.8
	100	3687	3703	7390	305.5	74
	150	5530	5554	11084	436.4	90.2
	200	7373	7405	14778	567.3	105.8

2.3 ミーゼス応力計算

入射ビーム強度と発熱と応力分布は線形なので、形状は Case1 でビーム強度 25kW として、ミーゼス相当応力の分布を求めた。図 3 は計算結果で、温度上昇でアーチ状に変形する。これは Pt 標的の側面下部の Cu と接触している部分の温度上昇が低く膨張が多少小さくなり、Pt と Cu は膨張係数が倍違うが、Cu ブロックは冷却水により温度上昇が 5 分の一以下であるためである。

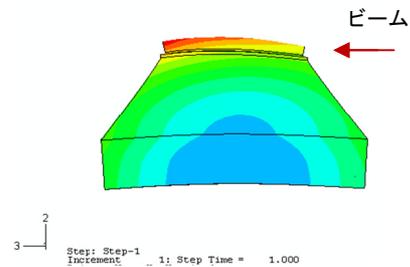


図 3 : 3 方向合成変位分布コンター図 (赤色部分 : 最大変位量 40 μ m)

また、ミーゼス相当応力分布を図 4 に示す。Pt と Cu のヤング率と熱膨張係数の違いから Pt 標的 (最高温度 236°C) と銅ブロックの接合面でおおよそ 80MPa 程度 (緑色から黄色部分) のせん断方向の応力を発生する。計算では温度を変数とした熱膨張係数の近似式^[5]を用いている。

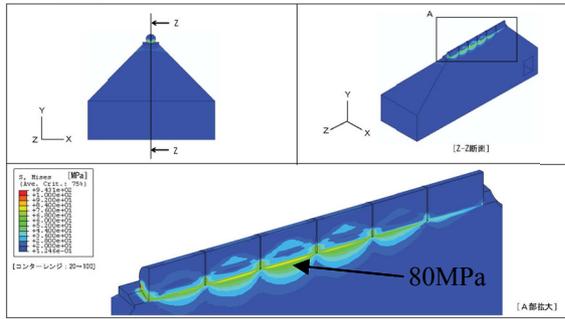


図 4：ミーゼス相当応力分布（縦断面図）

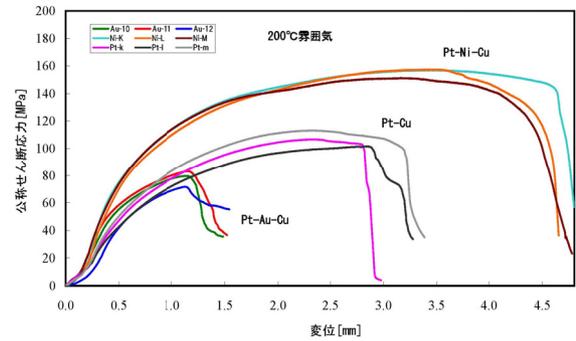


図 5：せん断試験結果

2.4 応力計算

熱伝導性の良い無酸素銅 JIS-C1020 の高温引張り試験の結果では 200°C から 400°C の間で引張り強度 145MPa から 84MPa、0.2%耐力で 50MPa から 43MPa である^[6]。0.2%耐力の 75%を許容最大応力とすると、Pt 標的を直接 Cu ブロックに取り付ける方法では約 40MPa 程度の発生応力になるように設計しなければならない。

このせん断応力の原因は熱膨張係数、ヤング率の差である。そのため Pt と Cu の中間の膨張係数特性を有し、両材料との接合性と熱伝達性を考慮すると Au か Ni を緩衝材として用いて、比較的接合強度が高い Hot Isostatic Pressing (H.I.P) 処理による拡散接合で成型することにした。（表 2）

表 2：各金属のヤング率と熱膨張係数

	ヤング率	熱膨張係数
Pt	163GPa	9.37×10^{-6}
Cu	115GPa	17.9×10^{-6}
Au	79GPa	14.2×10^{-6}
Ni	200GPa	13.4×10^{-6}

3. 接合試験

3.1 接合方法とせん断試験

緩衝材として Au と Ni のどちらを採用するか、実際に Pt-緩衝材-Cu の HIP 処理試験片を作り、室温、200°C、400°C の 3 つの状態においてせん断試験を行った。

各サンプル試験片を作るにあたり、Pt と緩衝材は厚さ 0.5mm の板を用いて、Cu ブロック-緩衝材-Pt-緩衝材-Cu ブロックの順に積層し、実機と同じく HIP 処理により拡散接合した。外形形状は断面 5mm×5mm、全長 40mm である。

測定では固定ホルダーと押しダイスが Cu ブロックと Pt に掛かるように注意して設置して行った。

室温状態での結果を図 5 に示す。また、図 6 に各温度状態の最大せん断破壊力の測定値を示す。

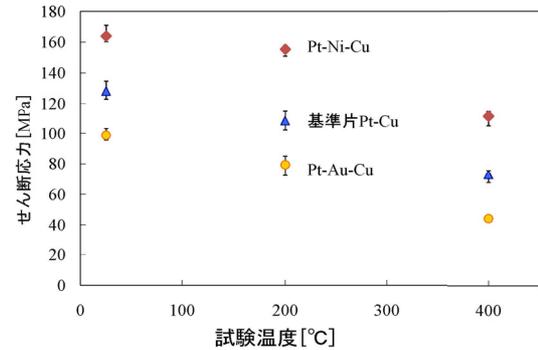


図 6：雰囲気温度当りのせん断試験結果

緩衝材無しの Pt-Cu の接合片では、高温になると接合部よりも、Cu の軟化により Cu 材それ自身が破損する。Pt-Au-Cu では、室温の状態から Pt-Au の接合界面が弱く、界面から亀裂の進展が始まっている。特に、高温になると Au の変形が原因となる。Pt-Ni-Cu はすべての試験条件でも亀裂は生じず、400°C状態でも約 110MPa まで、この中で最も良い結果を示した。この結果より、Ni 材を緩衝材として採用することとした。

3.2 スリット

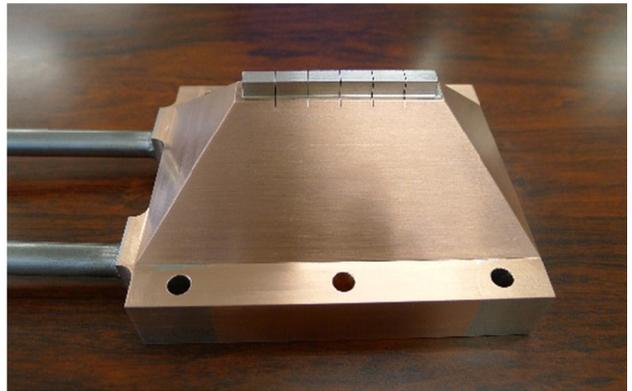


図 7：完成した水冷 Pt 標的

Pt 標的は断面□6mm—全長 60mm である。図 7 のように、標的は 0.2mm のスリット—深さ 7mm を設けて、6 分割した。これは、HIP 処理の過程で

ピーク温度－圧力がおよそ 850°C － 150MPa であり、残留応力を緩和するためである。

50kW ビーム照射時は 500°C 前後で HIP 処理温度に近づくため高温時はより内部応力は緩和される方向である。

4. まとめと今後の予定

- 2 種類の形状で入射ビーム強度数十 kW から 100kW までの Pt 標的 (50%ロス) の発熱温度、応力分布、冷却の可否を検討した。
- 標的 Pt と冷却水配管を埋め込んだ Cu ブロックはビームによる瞬間的な内部発熱により、温度上昇すると共に接合面に強いせん断応力を発生することが分かった。
- せん断応力を緩和するため緩衝材として Au と Ni について、接合性を確認する試験を行い、Ni が選択した。
- 緩衝材に Ni を用いて間接水冷 Pt 標的を製作した。
- 平成 23 年 12 月からの RUN では、この標的を用いて実験を行う予定である。

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、“ハドロンビームラインにおける二次粒子生成標的の計画”、Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 4-6, 2010, Himeji, Hyogo.
- [5] 伝熱工学資料 第 2 章金属の物性値、p281
- [6] 上利恵三、(private communication)