

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

DEVELOPMENT OF INDIRECTLY WATER-COOLED PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

高橋仁^{#,A)}, 上利恵三^{A)}, 青木和也^{A)}, 萩原雅之^{B)}, 広瀬恵理奈^{A)}, 家入正治^{A)}, 岩崎るり^{A)}, 加藤洋二^{A)},
皆川道文^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}, 成木恵^{C)}, 野海博之^{D)}, 里嘉典^{A)}, 澤田真也^{A)}, 鈴木善尋^{A)}, 田中万博^{A)},
豊田晃久^{A)}, 渡辺丈晃^{A)}, 山野井豊^{A)}

Hitoshi Takahashi^{#,A)}, Keizo Agari^{A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Masayuki Hagiwara^{B)}, Erina Hirose^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)},
Ruri Iwasaki^{A)}, Yoji Katoh^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Megumi Naruki^{C)}, Hiroyuki Noumi^{D)},
Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Yoshihiro Suzuki^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)},
Hiroaki Watanabe^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}

^{A)} Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK

^{B)} Radiation Science Center, KEK

^{C)} Department of Physics, Kyoto University

^{D)} Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

We have developed a new production target for J-PARC hadron experimental facility, which is capable of a primary proton beam with the power of 50 kW. For the evaluation of the thermal strength of the target, we have measured thermal and mechanical properties of candidate target materials and calculated temperature and stress. As a result, gold has been adopted as target material. The new gold target was installed in September 2014, and the beam operation started in April 2015. It worked well without any problems, and the measured temperature agreed with the calculation.

1. 放射性物質漏洩事故とその再発防止策

J-PARC ハドロン実験施設は、主リングで 30 GeV まで加速した陽子ビームを約 2 秒かけて直流的に取り出し（「遅い取り出し」）、それを金標的に当てて様々な二次粒子を生成し実験ユーザーに供給している。陽子ビーム強度は、稼働開始当初は低かったものの、その後増強を重ね、2013 年 5 月には 24 kW にまで達した。しかし、その月の 23 日、遅い取り出しを制御する電磁石電源の誤作動により、加速された全陽子のうち約 2/3 が 5 ms という短い時間に一気に取り出された結果、除熱が追いつかない速度で加熱された金標的の一部が溶解するという事態が発生した。そして、標的容器と 1 次ビームライン室の気密が不完全であったために、溶けた金標的から放出された放射性物質が実験ホール内へ漏洩してユーザーらが被曝、さらに換気ファンを通して放射性物質が屋外へ漏洩するという事故に発展した^[1]。

その後我々は、事故再発防止のために実験ホールの改修を行った。その一環として、新しい標的装置の開発・製造、そして事故を起こした旧標的からの交換作業を行った。どんなに短いパルスのビームが当たっても溶けたり壊れたりしない標的を作ることには不可能であるため、標的における事故再発防止策としては、たとえ標的が壊れても放射性物質を外に漏らさないこと、そして壊れていないかどうかの監視を強化することが柱となる。そのために、標的容

器を厳重に気密化した上で、その中をヘリウムガスで満たして循環させ、そのヘリウムガス中の放射性物質濃度を監視するシステムを構築した。気密容器、特に常にビームに晒されるビーム窓の設計、強度評価については文献^[2]にまとめてある。また、ガス中放射性物質濃度モニターは、J-PARC MLF 中性子源のために開発されたもので、文献^[3]に詳しい。

一方、陽子ビームを受ける標的本体についても、より大強度のビームに耐えられるよう、設計、開発を行った。大強度向けには元々、直接水冷方式の回転標的を開発してきた^[4]が、事故後に要求される厳重な容器の気密化など開発項目が多く短期間での実用化が難しいことから、前の標的と同様の間接水冷方式のものを開発することにした。想定するビーム強度は最大 50 kW、使用期間は年 2500 時間×3 年、標的におけるビームロス は 50% とした。

次節以降、この新しい標的本体の設計、開発について詳しく述べる。

2. 標的の構造

まず、事故時の標的の写真と模式図を Figure 1 に示す。標的材である金のサイズは、高さ 6 mm、幅 6 mm、奥行き 66 mm である。その金を、冷却水配管を埋め込んだ銅ブロックの上に接合して冷やす間接水冷型の構造である。金、銅、水配管 (SUS316) の接合には HIP (Hot Isostatic Pressing) による拡散接合を行った。金は、熱応力緩和のために 6 個のピースに分割されていて、その各々に 1 本ずつシース熱電対が取り付けられている。

[#] hitoshi.takahashi@kek.jp

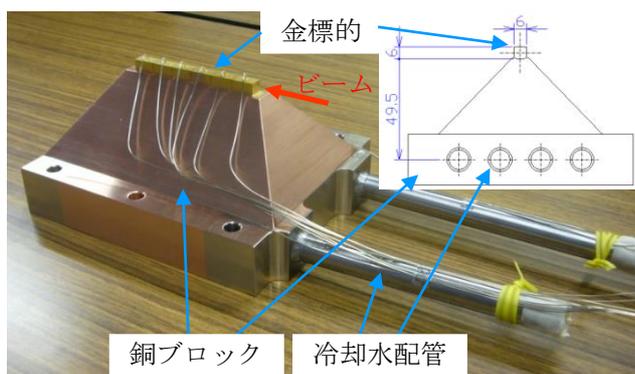


Figure 1: Photograph and schematic drawing of the previous gold target.

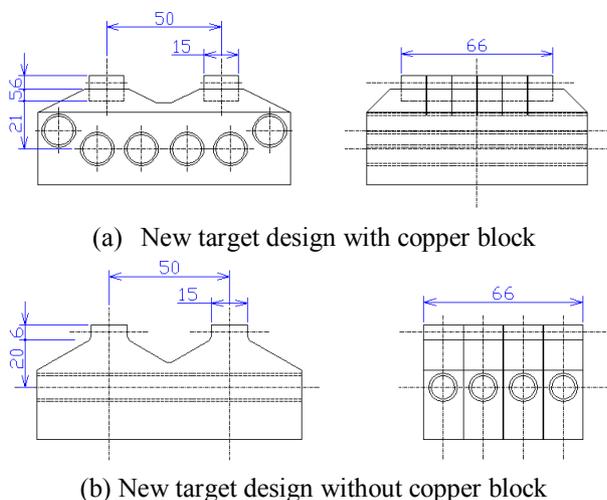


Figure 2: Schematic drawings of the new target with (a) and without (b) copper block.

Figure 2 (a) が、新しい標的の模式図である。前述のとおり、新しい標的の構造は基本的に前の標的と同じであるが、より大強度のビームに耐えられるよう、改良を施した。

第 1 に、発熱密度を下げるために、2 次ビームの品質が許容できる範囲で標的でのビームスポットサイズを大きくした。事故前は RMS で 0.6 mm × 0.6 mm であったのを 2.5 mm × 1 mm とした。それに合わせて、標的材の横幅も 6 mm から 15 mm へと大きくした。次に、冷却効率を上げるため、銅ブロック中の冷却水配管の位置を標的材に近づけた。また、銅と標的材とが一気に剥がれてしまうのを避けるため、標的材の一部を銅ブロックに埋め込む構造とした。さらに、二山構造を採用し、標的容器の側部に設けた駆動装置によって水平方向に動かすことで、万が一標的材に劣化が見られた場合等であっても、遮蔽体を開けることなく遠隔からすぐに標的を交換できるようにした。

しかし、この構造では、標的材として純タングステンまたはタングステン合金を考える場合、その熱膨張係数の小ささが問題となる。銅の 17.9×10^{-6} /K

という値に対してタングステンでは 4.6×10^{-6} /K で、この違いが接合面における大きな剪断応力を生んでしまう。そこで、タングステン（合金）標的の場合は、Figure 2 (b) のように、銅ブロックを使わずに、板状のタングステン（合金）に直接水配管を埋め込む構造を検討した。

3. 標的材の物性値測定試験

ハドロン実験施設の標的材料には以下のような特性が要求される。

- 2 次ビームの品質（点線源が望ましい）と強度のため、質量数と密度が高いこと。
- 冷却効率のため、熱伝導率が高いこと。
- 化学的、放射線的に安定であること。

これらを満たす材料として、事故時の標的と同じ金のほか、プラチナ、金合金、純タングステン、タングステン合金を候補として検討した。これらのうち金合金、純タングステン、タングステン合金については、その熱的、機械的特性で不明なものがあるので、サンプル材を調達して実際に物性値を測定した。

3.1 金-プラチナ合金

金とプラチナとの合金は、主に歯科用途で多くの種類が開発され使われている。純金の数倍の機械的強度を持ち、密度も 19 g/cm^3 程度以上と高く、化学的に非常に安定していることから、標的材料として有望ではないかと考えた。

貴金属メーカーの協力で、我々の要求にあう金-プラチナ合金の候補として、Au65-Pt35 合金（主な組成は金 65%、プラチナ 35%）を選別してもらった。しかし、熱特性とヤング率が不明であったため、Au65-Pt35 合金の物性値測定を行った。

Table 1: Results of Material Property Measurement of Au65-Pt35 Alloy

熱伝導率 [W/m/K]	27.3
比熱 [J/g/K]	0.129
熱膨張係数 [10^{-6} /K]	14.05
ヤング率 [GPa]	14.33
0.2%耐力 [MPa]	370
密度 [g/cm^3]	> 19
融点 [$^{\circ}\text{C}$]	> 1100

室温での測定結果を Table 1 にまとめた。熱伝導率が 27.3 W/m/K と、純プラチナの 71.6 W/m/K よりも低かったのが標的材料として致命的である。また、非常に興味深いのが、0.2%耐力が 370 MPa と高いにも関わらずヤング率が 14.3 GPa と非常に小さいことで、これは伸びやすいのに弾性限界が高いという特徴的な性質を示している

3.2 純タングステンとタングステン-レニウム合金

タングステンの最大の利点は 3422°C という高い融

点である。融点の高さは直接溶融リスクの低減に繋がるため、新標的材として非常に魅力的である。しかし、タングステンは延性-脆性遷移温度が高く室温で低温脆性が見られる他、1250°Cを超えると再結晶化が起こって著しく脆化するという問題がある。このようなタングステンの脆性を改善した高強度合金が数多く開発されており、その中でも最も一般的なのがタングステン-レニウム合金である。

一般に圧延回数を増やして薄くした方がタングステンの強度が増すが、標的として使用するには最低でも 16 mm 程度の厚さを持った材料でないといけない。タングステン製造プロセスによって強度が大きく変わるため、実際に使用する材料の強度を知る必要がある。そこで2つの会社から厚さ 16 mm 以上の圧延材を調達して、引張試験を行った。一つの圧延材から 6 個の試験片を製作し、室温、500°C、1000°Cの3つの温度雰囲気中で2個ずつ試験した。またタングステン-レニウム合金については、厚い圧延材のサンプルが手に入らなかったため、代わりにタングステン-5%レニウム合金のロッド材から3個の試験片を作製し、各温度で1個ずつ試験した。

Table 2: Ultimate Tensile Strength (MPa) of Pure Tungsten (W) and Tungsten-5%Rhenium Alloy (W-Re5)

温度	W (A 社) 20mm 厚	W (B 社) 18mm 厚	W-Re5 φ20mm
室温	(520), (556)	(528), (532)	949
500°C	666, 665	466, 467	713
1000°C	484, 474	346, 349	515

試験の結果を Table 2 に示す。タングステンは伸びが極めて小さく 0.2%耐力の測定が困難であるため、引張強度のみを測定した。純タングステンの場合は、どの試験片も室温では試験片のつかみの R 部で脆性破壊を起こしたため、括弧書きの参考値としている。500°Cと1000°Cのデータを見ると、A社とB社とで大きく強度が異なり、より厚いA社の材料の方がB社の約1.3倍の強度を示した。単純に薄い方が強いわけではないということは、圧延の温度や回数など製造プロセスの詳細に強く依存することを示している。今回はすぐに入手できるサンプル材でプロセスの詳細が不明であったが、さらに開発を進めるためにはプロセスの詳細を押えながら系統的な試験が必要である。一方、タングステン-レニウム合金については、室温でも延性を示した他、高温でも純タングステンより高い強度が得られた。

また、引張強度以外の物性値についても、同じサンプル材を使って測定した。Table 3 が室温における測定結果のまとめである。ヤング率に若干の違いが見られたものの、それ以外はA社とB社の純タングステン材はほとんど同じ値であった。タングステン-レニウム合金もほとんど純タングステンと同じ値だが、熱伝導率だけ大きく違い、純タングステンの約半分の値であった。

Table 3: Results of Material Property Measurement of Pure Tungsten and Tungsten-5%Rhenium Alloy at Room Temperature

	W (A 社) 20mm 厚	W (B 社) 18mm 厚	W-Re5 φ20mm
熱伝導率 [W/m/K]	160, 164	157, 163	82.0, 82.8
比熱 [J/g/K]	0.134, 0.135	0.134, 0.136	0.134, 0.136
熱膨張係数 [10 ⁻⁶ /K]	4.4, 4.4	4.6, 4.6	4.6, 4.7
ヤング率 [GPa]	401, 402	387, 387	408, 407
密度 [g/cm ³]	19.2, 19.2	19.2, 19.1	19.3, 19.2

3. 熱強度評価

前節で測られた各材料の物性値をもとに、新しい標的のビーム運転時の熱強度評価を行った。計算には、粒子シミュレーションコード MARS15 と有限要素計算コード ANSYS12 を用いた。同じ手法を使って、事故前の標的について 24 kW 定常運転時の温度を計算した結果が Figure 2 で、実際に測定された温度とよく一致していることが分かる。新しい標的でのビームロス $50 \text{ kW} \times 50\% = 25 \text{ kW}$ であるが、そのほとんどは下流のビームライン機器に分散し、標的本体に落ちる熱量は 5 kW 以下である。冷却水の温度上昇は 3 K 程度であるため、計算では無視して水温は 30°C 固定とした。冷却水の流速は 2.5 m/s 以上で、配管との熱伝達率は安全側に倒して $5 \text{ kW/m}^2/\text{K}$ とした。ビームの時間構造は事故前と同じ 2 秒取り出し、6 秒周期で、20 スピル照射して温度が十分飽和した時のピーク温度とその時の熱応力を計算した。

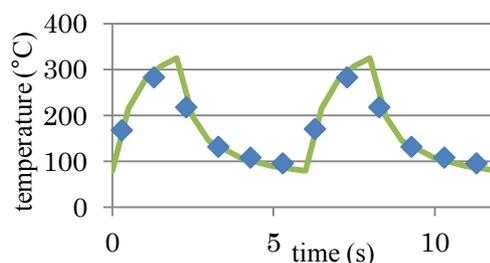


Figure 2: Comparison of the calculated temperature (points) and the measured data (lines) for the 4th piece of the previous gold target.

銅ブロックの付いた標的の中で標的材が金の場合の、温度とミーゼス相当応力の計算結果を Figure 3 に示す。金の最高温度は 347°C、金と銅との接合部の温度は 225°C で、接合部に発生する応力は最大 61 MPa であった。前の標的の開発時に室温、200°C、400°Cにおける金と銅との接合強度が測られており、そこから 225°Cにおける強度は 129 MPa と得られた。

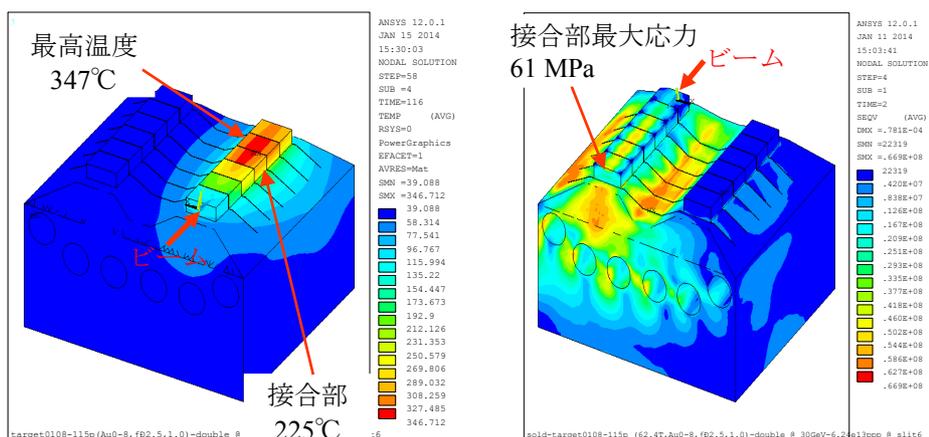


Figure 3: Results of the thermal analysis for the normal operation of the gold target. Left shows the temperature distribution and right the von Mises stress.

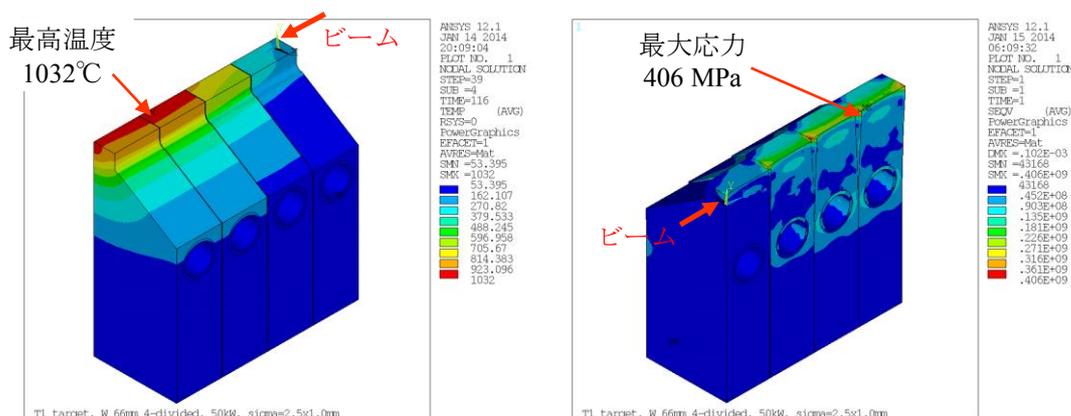


Figure 4: Results of the thermal analysis for the normal operation of the pure tungsten target. Left shows the temperature distribution and right the von Mises stress.

Table 4: Results of Thermal Analyses for Target Materials with Copper Block

	Au	Pt	Au65-Pt35
標的材の最高温度 [°C]	347	783	1268
接合部の最高温度 [°C]	225	243	206
接合部の最大応力 [MPa]	61	319	141
上記温度での接合強度 [MPa]	129	184	
設計裕度	2.1	0.58	

従って、新しい金標的の 50 kW 定常ビーム運転時の設計裕度は 2.1 となった。5 ms の短パルスビームが出た場合は、金の最高温度は 2832°C となって（ただし潜熱や熱輻射は計算に入れていない）、溶けて蒸発することが予想される。金以外の標的材も含めた、銅ブロック付き標的の計算結果のまとめを Table 4 に示す。プラチナは事故時の金標的のさらに前に標

的材として使われていた材料である^[5]が、金とプラチナとを比べると、温度、応力ともに金の方が低い結果となった。これは、金の方が熱伝導率が高いだけでなく、熱膨張率が銅に近いおかげで接合部に発生する剪断応力が低くなるためである。一方、金-プラチナ合金は、熱伝導率の低さが災いして、定常運転時の最高温度が 1200°C 以上にまで達し、残念ながら標的材としては不相当という結果になった。

次に、銅ブロックの付かない標的の計算結果として、純タングステンを標的材として使った場合の温度とミーゼス相当応力の分布を Figure 4 に示す。定常運転時のタングステンの最高温度は 1032°C で、最大応力は 406 MPa となった。強度測定結果の外挿から、この最高温度でのタングステン材の強度は、より強度の高かった A 社のものでも 472 MPa と見積もられ、その結果設計裕度は 1.2 となった。また、短パルスビームの場合の最高温度は 3367°C と、タングステンの融点とほぼ同じ温度にまで達した。この時の発生応力は、引張強度よりもはるかに高い 4.7 GPa となった。従って、タングステン標的の場合でも、5 ms の短パルスビームが出た時は、ギリギリ溶けなくとも応力による破壊は免れない。Table 5

は、タングステン-レニウム合金の場合も含めた、銅ブロックなしの標的の計算結果のまとめである。タングステン-レニウム合金は、熱伝導率が純タングステンの約半分しかないので、最高温度が 1200°C 以上にまで上がった。この温度での引張強度を単純に温度の外挿で計算すると 431 MPa となるのに対し、発生応力はそれを上回る 508 MPa であり、50 kW ビームには耐えられないという結果となった。

Table 5: Results of Thermal Analyses for Target Materials without Copper Block

	W	W-Re5
標的材の最高温度 [°C]	1032	1211
標的材の最大応力 [MPa]	406	508
上記温度での引張強度 [MPa]	472	431
設計裕度	1.2	0.85

以上の結果より、融点の高いタングステンでも短パルスビームで損傷を受けること、金のみ定常運転時に設計裕度 2 以上が確保できたことから、我々は最終的に標的材として金を採用することにした。

4. 新標的の設置とビーム運転

以上の R&D をもとに製作した新しい金標的の本体の写真が Figure 5 である。前の標的と同様、金の各ピースに 1 本ずつシース熱電対が埋め込まれている。

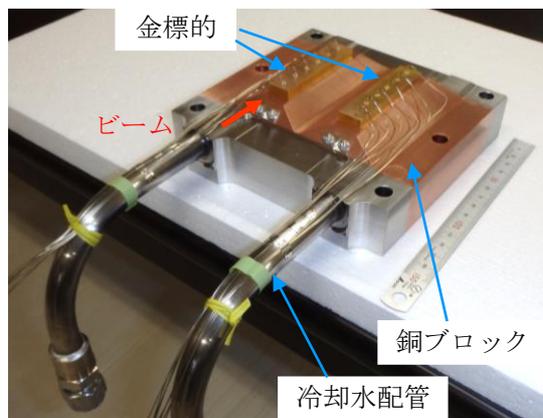


Figure 5: Photograph of the new gold target.

この新標的は、2014 年の 9 月に事故時の標的と交換でビームラインに設置された。交換の際は、事故で溶けた金による放射能汚染が拡がらないよう、また作業者の被曝を最小限に抑えるよう、細心の注意を払って作業が進められた。この他、1 次ビームライン室の気密強化など、2014 年の年末に全てのハドロンホール改修作業が完了した。

2015 年 4 月 9 日、事故後初めて、試験的にハドロンホールへの遅いビーム取り出しが行われ、続く 4 月 10 日に新標的へのビーム照射試験が開始された。その後、様々なビームコミッショニングや試験、そ

して 4 月 17 日の施設検査を経て、4 月 24 日午前 11 時 3 分、ユーザー利用運転が再開された。これまでのところ、大きな問題もなく安定して運転できている。ビーム強度は、利用運転再開時は事故の時と同じ 24 kW であったが、その後徐々に増強され、6 月のビームタイムでは 33 kW まで上がった。Figure 6 は、実際に測定された新金標的の最大温度上昇とビーム強度との相関を表したグラフで、測定値は 10%以下の精度で計算と一致している。

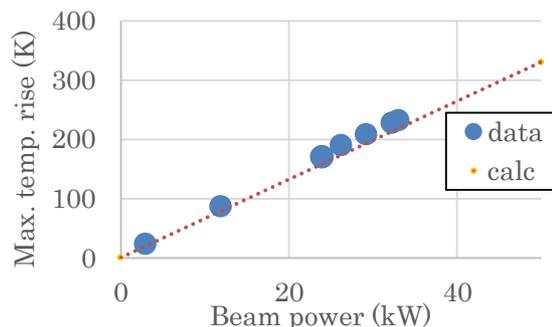


Figure 6: Beam-power dependence of the measured maximum temperature rise of the new gold target.

5. まとめ

我々は、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を開発した。標的材料試験と熱強度計算の結果、標的材として金を採用し、それを水冷銅ブロックの上に接合するという間接水冷方式を採用した。最大 50 kW のビームパワーに対応するため、形状を改善して冷却効率を上げたほか、遠隔から交換ができるよう、二山構造にした。

この新標的は、2014 年 9 月にハドロンホールに設置され、2015 年 4 月からビーム照射を開始し、計算通りの性能を発揮している。

現在我々は、さらに 50 kW 以上の大強度に耐える標的の開発を進めている。冒頭で述べた回転標的の改良のための R&D と並行して、今回の間接水冷標的の発展型も開発中である。

参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html>
- [2] 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.
- [3] Y.Kasugai, K.Otsu, and T.Kai, “MONITORING SYSTEM OF MERCURY TARGET FAILURE USING RADIOACTIVITY MEASUREMENT”, Proceedings of the ICANS-XIX, 19th meeting on Collaboration of Advance Neutron Source, Grindelwald, Switzerland, Mar. 8-12, 2010.
- [4] Y.Yamanoi, et al., “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, pp.1132-1134.
- [5] Y.Yamanoi, et al., “J-PARC ハドロン実験施設における間接水冷標的の運転”, Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.1340-1342.