

J-PARC ハドロン実験施設における新型標的の運転状況とその解析

OPERATION STATUS AND ANALYSIS OF THE NEW PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

齋藤真慶^{#, A)}, 青木和也^{B)}, 上利恵三^{B)}, 秋山裕信^{B)}, 家入正治^{B)}, 加藤洋二^{B)}, 倉崎るり^{B)},
小松雄哉^{B)}, 里嘉典^{B)}, 澤田真也^{B)}, 高橋仁^{B)}, 田中万博^{B)}, 豊田晃久^{B)}, 広瀬恵理奈^{B)},
皆川道文^{B)}, 武藤史真^{B)}, 森野雄平^{B)}, 山野井豊^{B)}, 渡邊丈晃^{B)}
Masayoshi Saito^{A)}, Kazuya Aoki^{B)}, Keizo Agari^{B)}, Hironobu Akiyama^{B)}, Masaharu Ieiri^{B)}, Yohji Katoh^{B)},
Ruri Kurasaki^{B)}, Yusuke Komatsu^{B)}, Yoshinori Sato^{B)}, Shinya Sawada^{B)}, Hitoshi Takahashi^{B)},
Kazuhiro Tanaka^{B)}, Akihisa Toyoda^{B)}, Erina Hirose^{B)}, Michifumi Minakawa^{B)},
Fumimasa Muto^{B)}, Yuhei Morino^{B)}, Yutaka Yamanoi^{B)}, Hiroaki Watanabe^{B)}

^{A)} Tohoku University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

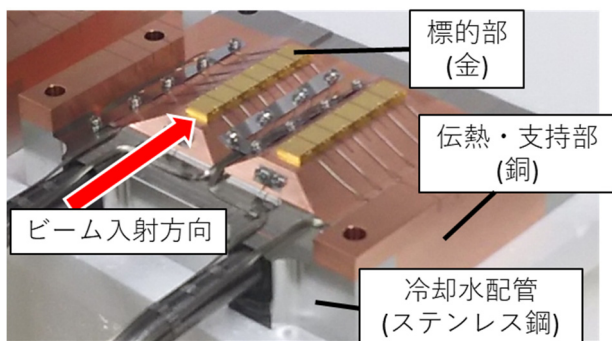
Abstract

A new secondary-production target for the Hadron Experimental Facility at J-PARC has been installed in Nov., 2019. The target is made of gold and is indirectly cooled by water through a copper block. The target is designed to be capable of a primary-proton beam power up to 95 kW for a 5.2-s repetition cycle, in which a beam-extraction period is 2 s. A first beam commissioning with the new target has been successfully carried out with the beam power up to 51 kW in May and June, 2020. Soundness of the target is mainly monitored by temperatures of the gold. In the new target, 24 thermocouples in total are attached on the gold and are recorded every 100 msec. In addition to the soundness monitoring, a transverse temperature balance, which indicates a heat-generation center position in the gold, is expected to be correlated with a beam-injection position. In fact, we have clearly found the good correlation between the temperature balance and the beam position in the beam-commissioning data. Furthermore, a fairly fast transition of the position even during one spill has been observed. In this report, the commissioning results of the target including the detail temperature analysis are presented.

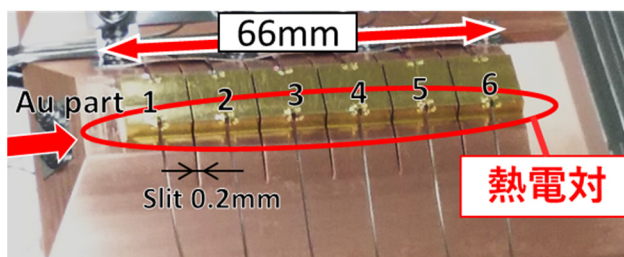
1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設にて運用されている T1 標的の役割は、上流からの一次陽子ビームを受けて二次粒子を生成し下流の原子核・素粒子実験へ供給することである。昨年まで導入されていた標的は 50 kW 程度の入射ビーム強度まで受け入れ可能だった[1, 2]が、今後更なるビーム強度の増強を予定しているため冷却性能を向上させた新たな標的へと交換が行われた。これにより

95 kW 程度の入射ビーム強度まで受け入れ可能と見込まれている[3, 4](以下交換前の標的を 50 kW 標的、交換後の標的を 95 kW 標的と呼ぶ)。新標的への交換後最初のビームコミッショニングが今年 5 月から 6 月にかけて実施され、冷却性能や二次粒子生成数などについての確認が行われた。本発表ではまず 95 kW 標的の運転状況について述べる。次に運転時に得られた標的の温度分布を解析することで発熱位置の変化を推定し、ビーム位置のスピル内変動を再現する試みを行ったので報告する。



(a) Materials and structure of the target.



(b) Positions of the thermocouples on the gold target.

Figure 1: Photographs of the 95 kW production target showing a bottom half before assembling.

[#] saito@lambda.phys.tohoku.ac.jp

2. 標的の構造

Figure 1 は組み立て前の 95 kW 標的の下半分とその各部の写真である。上半分も同じ構造をしており、上下対称に組み合わせて使用する。標的の材質はビームを受ける標的部が金、支持・伝熱部が銅、冷却水配管がステンレス鋼であり、それらを HIP(Hot Isostatic Pressing、熱間等方圧加圧法)接合で一体化している。間接水冷方式であり、ビーム入射部で起こる発熱は主に銅伝熱部を通じて水冷される。金標的部がビーム入射方向に対して 2 列あるのは標的全体を平行移動させることで金標的部の遠隔交換を可能とするためであり、2 列の構造は同一である。1 列分の金標的部は組み立て後の寸法で縦 10 mm 横 12 mm 奥行 66 mm(縦 10 mm 中 4 mm 分が銅部分に埋め込み、6 mm 分がむき出し)で、上下間に 0.3 mm 幅の隙間と 1 列を奥行方向に 6 分割する 0.2 mm 幅の溝が入れている。これら隙間の役割は熱による応力を逃すことである。6 分割された金標的部は入射側から順に Ch.1~6 と番号を振っている。Figure 2 では標的正面から見た熱電対の位置関係を示している。UL、UR、DL、DR と図中で示した点が熱電対の位置を表しており、金標的部の Ch 毎に設置されている。使われている種類は K 型シース熱電対で、これにより金標的部 1 列につき 24 点の温度を 100 msec ごとに取得できる。

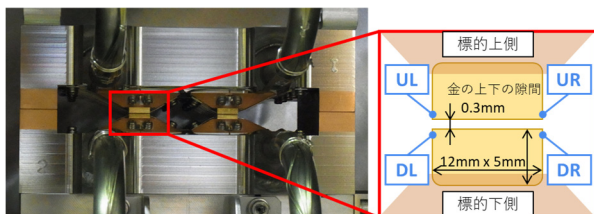


Figure 2: Upstream views of the target. The right figure shows a schematic drawing with dimensions of the gold.

3. 運転状況

95 kW 標的への交換後行われたビームコミッショニングにて、51 kW までのビームパワーによる運転で正しく動作することが確かめられた。Figure 3 は最初のビームコミッショニングで測定された 95 kW 標的の最高温度と、シ

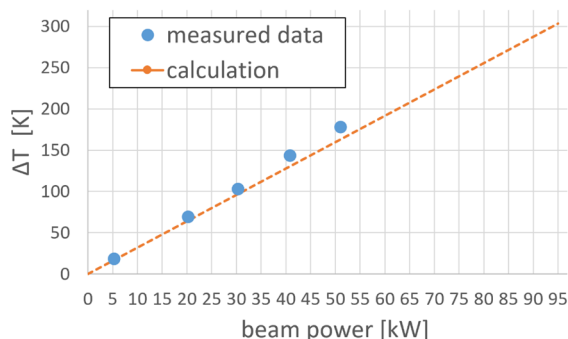


Figure 3: Results of the target-temperature rises at the beam power of 5, 20, 30, 40, and 50 kW. These data show highest temperatures in the target, Ch.5, as shown in Fig. 4. The dashed line shows estimation by the simulations.

ミュレーションによる最高温度の比較である。5 kW と 20~50 kW のビーム入射を 10 cycle 受けたときの UL、UR、DL、DR から測定した温度の差(または平均)が小さくなるようにビーム調整を行い、温度を記録した。測定値と計算値は 10 %以内で一致しており、標的の冷却性能が想定通りであることが確かめられた。

4 スピル内変動と温度分布

Figure 4 は 50 kW で定常運転中に測定した標的の各 Ch 温度である。Ch ごとに 4 個ある熱電対 UL、UR、DL、DR の平均温度をプロットしている。

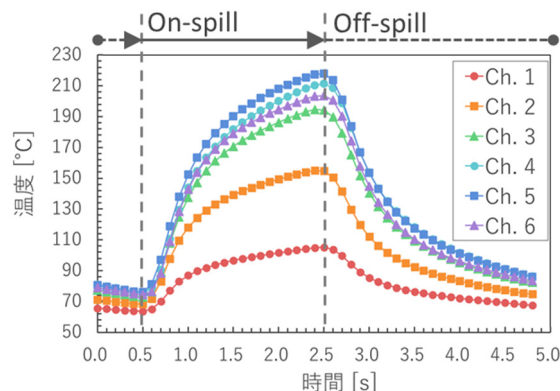


Figure 4: Time-history plots of the target temperature during one spill at 50 kW.

上流側の Ch.1, 2 は温度変化が少ないのに対して、最も温度が高くなるのは Ch.5 である。これは入射する一次ビームだけでなく二次粒子なども発熱に寄与しているため、この奥行方向の温度分布はシミュレーションの結果とよく一致している。現在 1 cycle は 5.2 s で、このうちビーム入射時間が 2.0 s (on-spill)・非入射時間が残りの 3.2 s (off-spill)である。Figure 4 の横軸の時間は加速器主リングのフラットトップの開始を 0 s としており、0.5 s から 2.5 s にかけてビームが入射して標的の温度が上昇、その後の off-spill の間に冷却されているのが分かる。Ch.5 の詳細として、Fig. 5 では同じ測定データから計算した L-R、U-D の温度差を示した。ここで、L と R はそれぞれ UL と

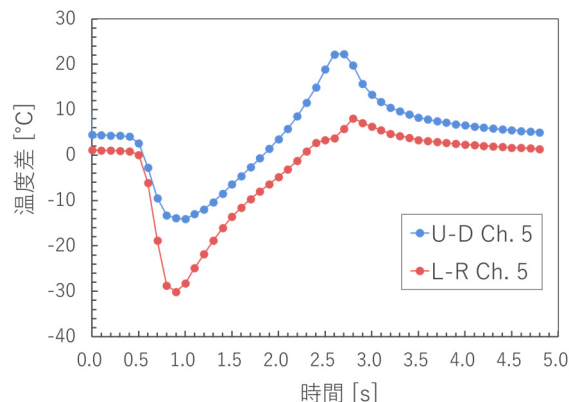


Figure 5: Temperature differences of the Ch.5 between an upper and lower side (blue line), and a left and a right side (red line).

DL、URとDRの平均、UとDはそれぞれULとUR、DLとDRの平均である。

ビーム入射開始時刻に合わせてL-R、U-D共に急激に立下り、その後約2 sかけて一定の割合で変化している。これはビーム入射中におけるビーム中心位置の変化(スパイル内変動)によって発熱中心位置が変化していることを示している。そこでこの温度分布の変化をくわしく解析し、発熱中心位置の変動とその原因であるスパイル内変動について定量的な推定を試みた。

5. 発熱中心位置の推定

5.1 左右方向の推定

まず ANSYS[5]で95 kW 標的の有限要素法による計算を行い、発熱中心の左右位置を変えることでどれだけLR間温度差が変化するかを求めた。結果を Fig. 6 に示す。ここで Ch.5 の LR 間温度差 ΔT_{L-R} を上昇温度幅(その時刻の LR 平均温度 \bar{T} から冷却水温 T_{Wtr} を引いた値)で割った値を規格化温度差 $U[-]$ として使っている。

$$U = \frac{\Delta T_{L-R}}{\bar{T} - T_{Wtr}} \quad (1)$$

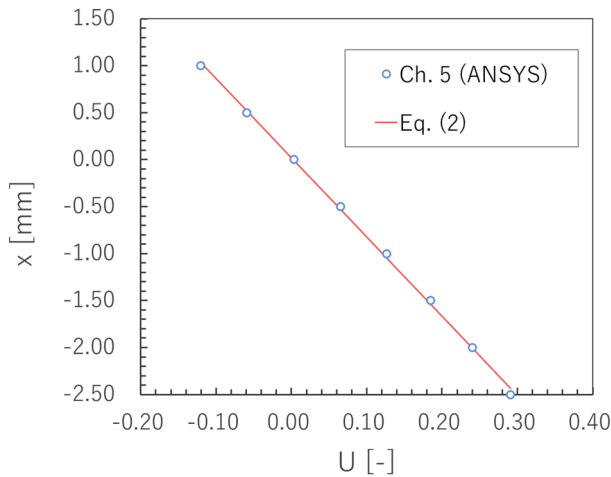


Figure 6: A correlation plot between the heat-generation center position in horizontal, x , and normalized temperature difference, U .

図の直線は計算結果から発熱中心の左右方向位置 x [mm]と U との関係を線形フィットしたもので、その結果

$$x = -8.4 \times U + 2.0 \times 10^{-2} \quad (2)$$

という関係式が得られた。ここで x は L から R への向きを正、原点を金標的部の中心としている。実測した LR 間温度差にこの Eq. (2)を適用することで左右方向のスパイル内変動の推定を行う。Figure 5 で示した Ch.5 での LR 間温度差は、1.6 s 付近を過ぎると一定の値で変化している。入射開始直後の温度差は伝熱の影響が十分に反映されていないため非定常な影響が大きいことを踏まえ、 U を求めた後で 1.6~2.5 s の範囲を定常に近い範囲とみなして一次近似し、その式から 0.5~2.5 s の発熱位置変化を表すこととした。

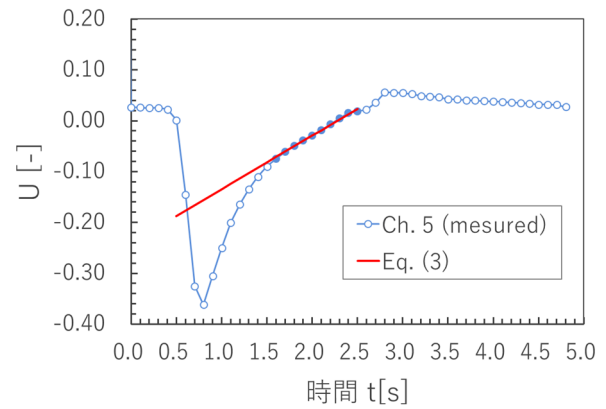


Figure 7: A time-history plot of the normalized temperature difference, U . The line shows a fitting with a linear function result between 1.6 s and 2.5 s.

Figure 7 が LR 間温度差から U に変換したプロットである。 U と時間 t [s]の関係は直線で示した一次近似の結果、次の通りの関係式が得られた。

$$U = 0.11 \times t - 0.24 \quad (3)$$

Equation (2)式に Eq. (3)式を代入することにより、この測定での時間に対する発熱中心位置の変化を次のような一次式で表すことが出来る。

$$x = -0.89 \times t + 2.1 \quad (4)$$

この式によれば、0.5~2.5 s での発熱中心位置は始め 1.6 mm と R 側で発熱し、-0.2 mm の位置まで移動しているという結論になる。この推定結果と、標的から 1 m 程度上流側に設置されているビームプロファイルモニター (PM) によって観測されたビームの中心位置との比較を Fig. 8 に示した。PM で測定したビームの中心位置は図中で白抜きの点として示した。左右の温度分布から推定したビーム中心位置の変動は、PM による測定結果の傾向を再現している。

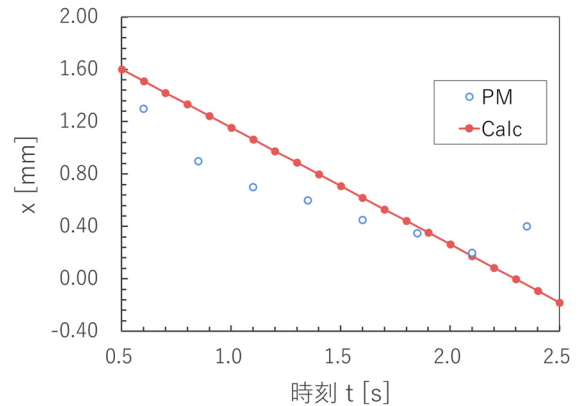


Figure 8: A time-history plot of the heat-generation center positions in horizontal during one spill. The blue-open circles show the beam centers measured by the beam-profile monitor located at 1-m upstream of the target.

5.2. 上下方向の推定

上下の金標的部の間には 0.3 mm の隙間が空けられている。このため、金が連続している場合と比べて上下間の伝熱が非常に少ない。これを利用して温度差を表すモデル式を作り、実測値による温度差と照らし合わせることで発熱中心の上下方向位置を推定した。

温度差は発熱量の差が強く反映されと考え、標的の形状と発熱分布の形状を単純化した条件で発熱量の差を表す式を作った。このとき温度差と発熱量の関係を含め、条件として以下のような仮定をした。

- 標的の大きさに比べビームとそれによる発熱分布は十分小さく、金標的部に収まる。
- 発熱分布は左右上下の平面内で正規分布である。
- 温度差は発熱量の差に比例する。

上記の条件の下では U、D の発熱量はそれぞれ、空隙を境として発熱分布を 2 つの領域に分け、標的に重なっている部分を積分すればよい。こうして求めた発熱量の差 H_{U-D} ならびに温度差 ΔT_{U-D} を表すモデル式が次式である。

$$\Delta T_{U-D} \propto H_{U-D}$$

$$= \frac{f\sqrt{\pi}}{2\sigma} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{d}{2} + y}{\sigma} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\frac{d}{2} - y}{\sigma} \right) \right\} \quad (5)$$

式中の f は係数、 σ は発熱分布の大きさ[mm]、 d は空隙の幅[mm]、 y は発熱分布中心の上下方向の位置[mm]を表す。ANSYS の有限要素法によって発熱中心を上下方向にずらした場合の Ch.5 の上下温度差を計算し、このモデル式でフィッティングした。計算結果のプロットとフィッティングによる線を Fig. 9 に示す。この図から、モデル式は温度差をよく再現できることが分かる。

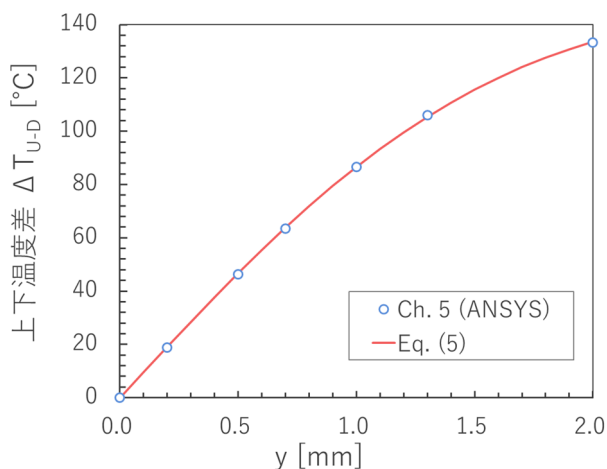


Figure 9: Temperature differences between a upper and a bottom side as a function of the heat-generation center position in vertical, y . These points were obtained by FEM calculation using ANSYS. The line shows a fitting result with a function of Eq. (5).

次に、モデル式のフィッティング結果を用いて実測値の上下温度差を発熱中心の上下位置に換算した。推定結果を Fig. 10 に示す。白抜きのプロットは PM によって観測されたビーム中心の上下位置である。温度分布からの推定によれば上下方向への変動は正の値を上側とし

て-0.15~0.2 mm の範囲であった。PM の観測による変動は-0.2~0.3 mm の範囲であり変動の傾向を良く再現しているが、時刻にすると 0.5 s 程度のずれが表れている。

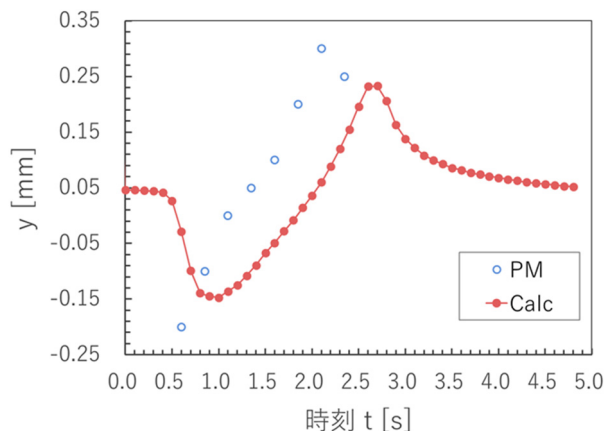


Figure 10: A time-history plot of the heat-generation center positions in vertical during one spill, which were estimated with simulations (red line). The blue-open circles show the beam-center positions measured by the beam-profile monitor.

5.3. 結果の考察と今後の改善点

温度分布からの推定を基に左右上下方向の発熱中心位置の動きを再現した図を Fig. 11 に、PM によるビームの中心位置の観測値を Fig. 12 に示した。Figure 11 と Fig. 12 中のプロットに付記した数値は時刻[s]を表している。両図を見比べると、温度分布からの推定は 2 s 間に DR から UL へとビームの中心位置が移っていく様子を傾向として再現している。今回の発熱中心位置の推定は単純な仮定をしたものであるにも関わらず、ビームの中心位置の傾向を再現できていることは特筆すべき点である。両図から挙げられる相違点としては、まず入射開始

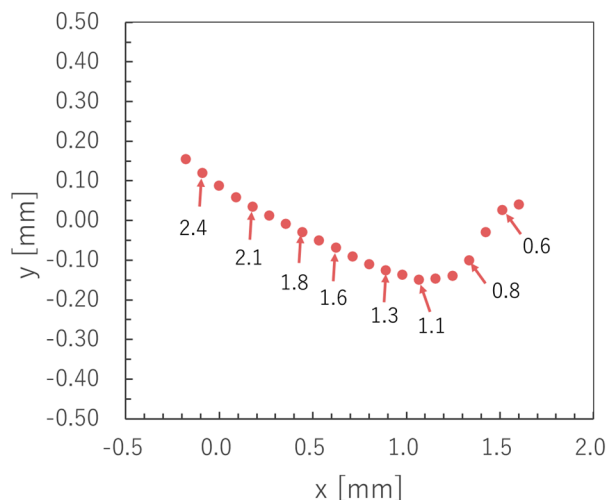


Figure 11: Transitions of the heat-generation center position in horizontal(X) and vertical(Y) plane, which were estimated with the simulations. The numbers shown in the figure indicates the times in second, during the spill, as shown in Fig. 4.

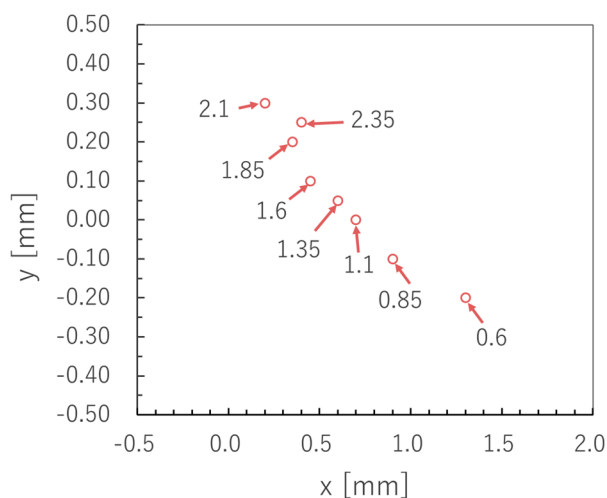


Figure 12: Transition of the beam center position in X-Y plane, which were measured by the beam-profile monitor. The numbers shown in the figure indicate the times in seconds during the spill, as shown in Fig. 4.

後の y 方向に関してであるが、PM による観測では単調に下から上への変位を示しているのに対して、推定結果では中心から一旦下側に下がった後上側へと変位している。これは入射開始直後の温度差がほとんど開いていない点を換算式に代入したためである。一方 x 方向に関しては、観測では入射の最後にわずかに中心へと戻る動きをしているが、推定では再現できていない。

今回の左右方向の推定では、一定の移動量・方向へ発熱分布が移動するという仮定を課しているため、推定結果は一次の変動しか表せない。式による近似は入射直後の温度上昇がまだ少ない時点でのビーム位置を含めた推定が出来るものの、ビームの移動量や向きが大きく変化するには違う推定手法を考える必要がある。一方、上下方向の推定では仮定としてビームによる発熱分布が左右上下の平面上で等方向な広がりを持つ正規分布と仮定しているが、実際にはそうでない。現実には即した推定にするならば実際のビーム分布とその発熱を反映した式にする必要がある。同推定結果にも PM と比較すると時間軸方向にずれているという問題があり、現在原因が明らかでないため解析と考察が必要である。またどちらの方向の推定にも共通する問題として、今回の ANSYS による計算は、モンテカルロコード MARS[6]で計算した、ビームが標的中心に入射している場合の発熱分布を単純に上下左右にシフトさせて行ったものであり、ビーム中心位置によって標的内の発熱分布がどのような影響を受けるかは十分に考慮していない。これについては MARS 計算からビーム位置を変動させてやり直すことでビーム形状および位置が発熱分布にどのような影響を及ぼすかを明らかにできる。

6. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設の新しい生成標的について、最初のビームコミッショニングが今年 5 月から 6 月まで行われ、51 kW までのビームパワーに対する標的の上昇温度が設計時の計算通りであったことから、標的の冷却性能が確かめられた。95 kW 標的に取り付けられた 24 個

の熱電対から取得した 100 msec 毎の温度分布データによって、スパイル中に発熱の中心位置が変動していることが確認された。温度分布をくわしく解析することにより発熱位置の変動を推定した結果、ビームプロファイルモニターによる観測から得たビーム中心位置の変動を傾向として良く再現した。今後標的の温度分布測定がビームポジションモニターとしても利用できるよう、ビームの形状と発熱分布の関係を取り入れる等推定精度の向上を計りたい。

参考文献

- [1] H. Takahashi *et al.*, “Indirectly water-cooled production target at J-PARC hadron facility”, J. Radioanal Nucl. Chem. 305, pp.803-809 (2015).
- [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. 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.
- [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 (2)”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2018, pp.879-882.
- [5] <https://www.ansys.com/>
- [6] <https://mars.fnal.gov/>