

# J-PARC ハドロン回転標的監視のための耐放射線変位センサーの開発 DEVELOPMENT OF RADIATION-RESISTANT DISPLACEMENT SENSOR FOR MONITORING ROTATING PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON FACILITY

武藤史真\*, 青木和也, 上利恵三, 秋山裕信, 家入正治, 倉崎りり, 小松雄哉,  
里嘉典, 澤田真也, 白壁義久, 高橋仁, 田中万博, 豊田晃久,  
広瀬恵理奈, 皆川道文, 森野雄平, 山野井豊, 渡邊丈晃  
Fumimasa Muto\*, Kazuya Aoki, Keizo Agari, Hironobu Akiyama, Masaharu Ieiri, Ruri Kurasaki,  
Yusuke Komatsu, Yoshinori Sato, Shinya Sawada, Yoshihisa Shirakabe, Hitoshi Takahashi,  
Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Erina Hirose, Michifumi Minakawa, Yuhei Morino,  
Yutaka Yamanoi, Hiroaki Watanabe  
Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

## Abstract

A new rotating-disk-type target for secondary-particle production is being developed for high intensity beam at J-PARC Hadron Experimental Facility. The expected intensity is 150 kW proton beam. Although the rotating target is advantageous in terms of cooling efficiency and long-term operation, it is challenging to monitor the temperature, rotation speed, and eccentricity of the target. In addition, there are only a few measurement devices that can be used to monitor the conditions due to the harsh operating environment of radiation and high temperatures created by the high intensity beam. To solve these issues, we have developed a radiation-resistant capacitance-type displacement meter, which is capable of monitoring the condition of a rotating target. In this report, we present the development status of a radiation-resistant ceramic-insulated displacement meter.

## 1. ハドロン実験施設の二次粒子生成標的

J-PARC ハドロン実験施設では、30 GeV まで加速された一次陽子ビームを二次粒子生成標的に照射し、生成した K 中間子、 $\pi$  中間子等を用いて様々な原子核・素粒子実験を行っている。実験の統計量増大のためにビームの大強度化が望まれており、それに対応した高い冷却効率を持つ標的の開発が必要である。2022 年現在で使用されているのは間接水冷方式の固定標的である。この標的は 2019 年 11 月にインストールされたもので、最大 95 kW までの陽子ビームに対応可能である。2021 年 6 月時点でビーム強度は 64 kW (加速器からの取り出し周期 5.2 秒) を達成し、今後も更なるビーム増強を予定しているが、100 kW を超えるビーム強度には間接水冷方式の標的では対応できない。そこで新しく直接冷却方式の回転円板型標的の開発が進められている [1, 2]。

Figure 1 は開発が進む回転標的の概略図である。円板の外縁部が金標的、内部が冷却のために無酸素銅で構成されている。回転円盤標的のメリットは、ビームの衝突位置をずらしながら使用することで、熱・放射線の負荷を分散できることである。これにより冷却効率・耐久性が向上し大強度ビームに対応できる。一方で、回転標的の寿命は軸受けの寿命に依存する。通常の耐放射線ベアリングを 150 kW に対応した 200 rpm の回転速度で使用すると約 6300 時間で定格寿命となり、高い頻度での交換が必要となる [3]。そのため、現在開発中の回転標的には He 気体軸受

が採用されており、標的シャフトの回転速度や偏心度の監視がますます重要になる。現在までに標的近傍の放射線環境下で動作可能な耐放射線回転速度センサーが開発され [4]、残るは偏心度の測定という課題を残すのみである。そこで高放射線環境下で動作可能な変位計を開発し、回転標的の偏心度の測定を可能とすることを旨とする。変位計が十分な分解能を有すれば、偏心度の測定だけに留まらず、標的の熱膨張、回転速度、標的チェンバーの He 濃度など複数の物理量をモニター出来ると見込んでいる。これにより日常的なメンテナンスが困難な標的監視システムのメンテナンス頻度を抑えつつ、複数の標的状态を監視を可能にすることで安全性を向上させることを目指す。

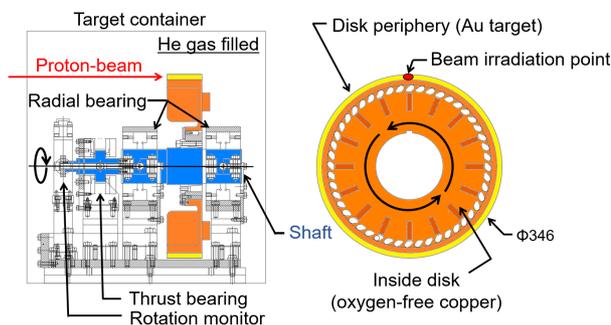


Figure 1: Schematic view of rotating-disk-type target.

\* fmuto@post.kek.jp

## 2. 変位センサーを用いた回転標的監視

### 2.1 変位センサーの運用方法

本研究で開発する変位センサーは複数を組み合わせることで、偏芯度以外の測定が可能となり、回転標的監視システムとして機能する。Figure 2 に変位センサーの運用想定図を示した。He ガスで満たされた標的容器の中で円板標的が気体軸受で回転している。標的へのビーム照射点から回転方向に 90 度、270 度の場所にそれぞれ変位センサーが設置され、標的側面とセンサー面の間隔を測定している。Figure 2 の左図は、変位センサーに静電容量型変位計を用いた時の理想的な出力を計算したものである。静電容量が高ければ標的とセンサーの距離が近いことを意味する。計算は実機を想定して下記の条件で行った。

- 標的外径：φ346 mm (実機と同等)
- 標的回転速度：200 rpm
- ビーム照射による標的熱膨張：0.95 mm (MARS [5] 及び ANSYS(ver 19.0) によって計算した 150 kW ビーム照射時の熱膨張に相当)
- 偏芯度：20 μm (実機での He 軸受クリアランスは 30 μm)
- 回転速度測定のための機械加工：円周方向に幅 5 cm、高さ +30 μm
- センサー設置位置：標的外径 +2 mm (標的熱膨張 0.95 mm + 偏芯 20 μm + 機械加工高さ 30 μm + 安全距離 1.0 mm)
- センサー外径：φ15 mm

この計算結果から、標的の様々な状態を読み取ることが出来る。まず、静電容量の周期的な変動振幅から、回転標的の偏芯度を測定できる。加えて、標的側面に段付きのような機械加工を施しておくことで、標的が 1 回転するごとに静電容量が局所的に変動し、その時間間隔から回転周期を測定できる。また、2 つのセンサーの出力平均値の差は、標的が回転によって冷却した際の収縮度を意味する。標的 He ガスの純度や圧力などの状態については、この状態の変化によって比誘電率が変わるため、二つのセンサーの同期した変化を測定することで評価できる。

### 2.2 変位センサーの要求仕様

2.1 で紹介した運用方法と変位センサーの使用環境から変位センサーへの要求仕様を検討する。まず変位センサープローブは回転標的の直近に設置されるため、耐放射線性が求められる。回転標的周辺では、1 次陽子ビーム強度 150 kW で約 10000 時間の運転を行った時に鉄の吸収線量として累計 200 MGy の吸収線量が計算されており、変位計のプローブはこれに耐えうる無機材料のみで構成される必要がある。また、Fig. 2 に示した回転標的は厚さ数 m の遮蔽体の内部に設定される。それゆえ日常的な補修は難しく、メンテナンスフリーな設計と、低線量区域まで約 30 m の長距離ケーブルでの信号伝送が必要である。加えて、回転標的への負荷を減らすため、測定器は非接触式である必要がある。予想される回転標的の偏芯度約 20 μm から、分解能はその 1/10 の 2 μm 程度が必要であり、標的の回転速度が 200 rpm と想定されていることから、標的 1 回転につき 10 点の測定を可能とするため応答時間は 30 msec 以下である必要がある。また、回転標的の ANSYS を用いて計算した 150 kW ビーム照射時の温度分布計算から、最大で 0.95 mm の熱膨張が見積もられており、変位計が標的に接触しないためのクリアランスを常に約 1 mm 程度確保すると、必要な測定レンジは 0.5 mm~2.0 mm と見積もられる。以上から要求仕様は下記のようにまとめられる。

#### •要求性能

- (1) 測定レンジ：0.5 mm ~ 2.0 mm
- (2) 分解能：2 μm 以下
- (3) 応答時間：30 msec 以下 (200 rpm の場合)
- (4) 非接触での測定が可能なこと

#### •使用環境

- (1) 耐放射線性：200 MGy 以上
- (2) 雰囲気ガス：He ガス中で使用可能なこと
- (3) He ガス、支持架台への熱伝達で冷却可能なこと
- (4) 低線量区画までの約 30 m を信号伝送可能なこと
- (5) メンテナンスフリーであること

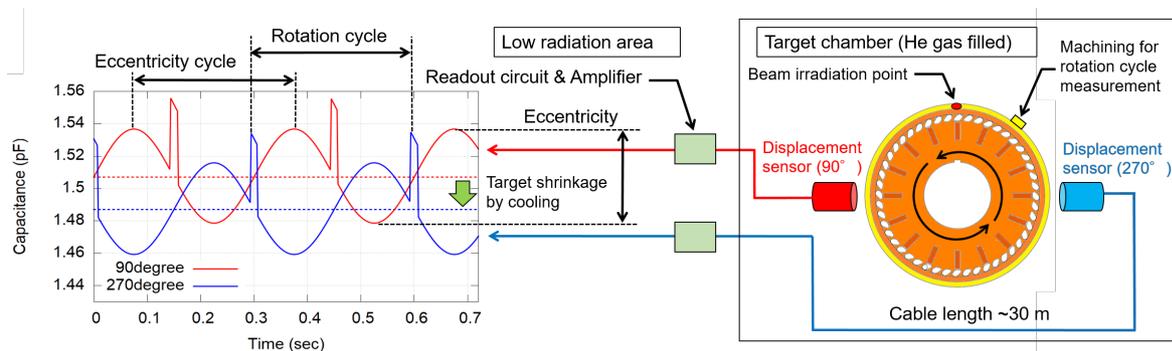


Figure 2: Operational conception of a displacement sensor for rotating target monitoring. Two displacement sensors can be used in combination to measure various physical parameters.

### 3. 耐放射線変位センサーの開発

#### 3.1 静電容量型変位計の動作原理

非接触型の変位計には渦電流変位計やレーザ変位計など種々の方式があるが、本開発では高速回転物のランアウト測定によく利用される静電容量方式を採用した。Figure 3 に静電容量方式の変位計プローブの概略図を示した。プローブは主電極とガード電極の2つの電極から構成される。主電極は円柱状をしており、その底面と標的側面の間には平行な電場が形成されている。このプローブでは、平行平板の原理に基づき、標的側面と主電極の間で構成されるコンデンサの静電容量の変化から変位量を測定する。一方、ガード電極は主電極の側面を取り囲む同心円筒で、測定電極と等電位にしておくことで、主電極の浮遊容量を打消している。また、通常は Fig. 3 にも示したように、電極の端部では曲線を描いて標的側面に向かうフリンジング電場となるため静電容量が理論値から変化して観測される。しかし等電位となっているガード電極によって、主電極のフリンジング電場は低減され、平行電場を形成することができる。これらの効果を最大限発揮するため、プローブの絶縁体のクリアランスは極めて狭く設定され、かつ高い同心精度が要求される。

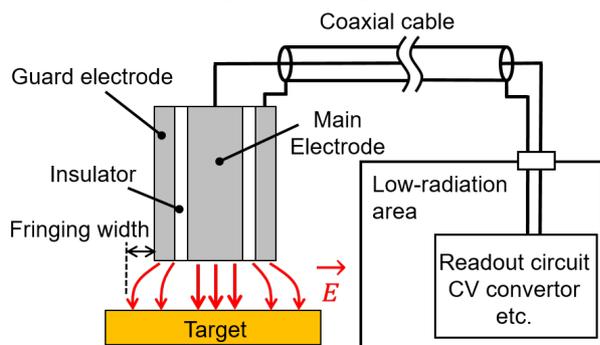


Figure 3: Schematic diagram of the principle of operation of a displacement meter. The displacement is measured from the capacitance between the target side and the main electrode.

#### 3.2 セラミック絶縁プローブの開発

過去に放射線環境下で動作する変位計が開発され加速器機器の監視に有用であることが示されている [6]。しかし、この先例では Fig. 3 の絶縁体にポリエチレン、プローブ被膜に PEEK 材を使用しているため、本件のような標的側面での動作が求められる機器には適していない。そこで、無機材料のみで構成した変位計プローブを開発した。Figure 4 に開発したプローブの写真を示す。絶縁材には快削性に優れ精密な機械加工に適したマシンブルセラミック (マコール [7]) を使用した。円筒状のマコールにネジ切り加工を施して2つの電極を固定する構造とし、絶縁体のクリアランスは市販されているエポキシ絶縁プローブと同じ 0.2 mm を設計値とした。マイクロスコプで製作物の寸法測定を実施し、絶縁体クリア

ランス  $0.21 \pm 0.02$  mm、同心度 0.02 mm が得られた。マコールの絶縁耐力が 40 kV/mm、一般的な高電圧用エポキシ樹脂の絶縁耐力が約 30 kV/mm であることから、エポキシプローブと同程度の絶縁性が期待でき、絶縁抵抗計での抵抗値測定では市販のエポキシプローブ、開発したセラミックプローブのどちらも 500 M  $\Omega$  (測定電圧 250 V) の絶縁抵抗を確認できた。プローブと読み出し回路を繋ぐ同軸ケーブルも無機材料のみで構成された耐放射線ケーブルを使用し、標的側面付近で動作する部品を全てを無機材料のみで構成することが出来た。

また、今回製作したセラミックプローブではガード電極の取付位置があえて可変になるように設計している。これは Fig. 5 に示すように、ガード電極の取付位置によって電場の平行度の改善が期待出来るからである。ガード電極に囲まれた主電極でも絶縁体のクリアランスが有限の値であるため、フリンジング電場として電極面に平行な  $E_r$  成分が発生する。この  $E_r$  をガード電極の取付位置の変位  $\Delta d$  を変えながら電磁場計算ソフトウェア Poisson Superfish [8] にて評価した。Figure 5 の縦軸は、主電極と標的側面に発生する  $E_r$  成分の総和である。 $\Delta d$  を変化させることで、 $E_r$  が減少し、電場の平行度が改善していることが分かる。本件で開発したセラミック絶縁プローブでは、ガード電極の取付位置を可変とすることで調整の幅が広げられるように工夫している。

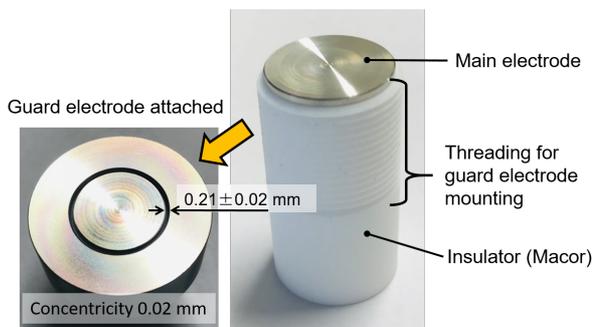


Figure 4: Pictures of ceramic probe. It consists of a machined ceramic and two electrodes.

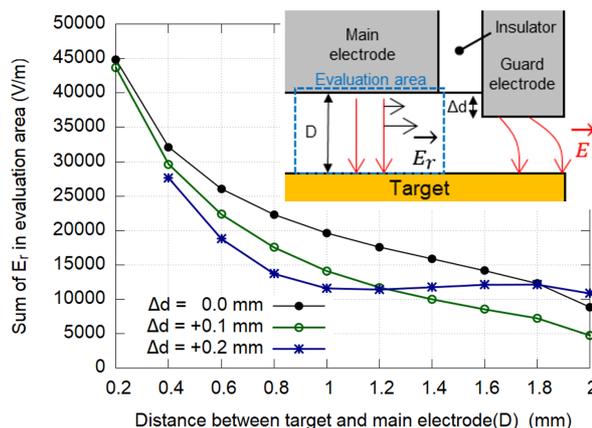


Figure 5: Evaluation of the parallelism of the electric field depending on the mounting position of the guard electrode, showing the parallelism is improved with different  $\Delta d$ .

### 3.3 読み出し回路の開発

先行研究で開発・使用された変位計の読み出し回路 [6] を参考に簡易的な読み出し回路を作成した。Figure 6 に理想的な測定回路を示す。変位量  $x$  によって変化する  $C_x$  と既知の静電容量を持つコンデンサ  $C_0$  を直列に接続し交流電圧を印加することで、 $x$  に比例した出力  $V_{OUT}$  を測定する回路構成となっている。交流電源から印加された  $V_0 \sin \omega t$  の電圧は  $C_0$  と  $C_x$  で分圧される。その電圧  $V_{OUT}$  をボルテージフォロワを経由して読み出す。理想的なオペアンプを用いれば  $V_{OUT}$  は、

$$V_{OUT} = \frac{C_0}{C_x} V_0 = \frac{C_0 V_0}{\epsilon S} x \quad (1)$$

となり、変位  $x$  に比例した出力となるため、測定レンジを広くした場合でも静電容量の変化を測定しやすい。しかし、実際のオペアンプは入力抵抗が  $\infty$  ではなく、1~5 pF 程度の入力容量を持つため、前段の回路に影響を与えてしまう。そこで、Fig. 7 のようにブートストラップ回路を追加した読み出し回路を製作することとした。この回路では  $C_0, V_0$ 、電圧周波数を変更することで、出力電圧の範囲をある程度調整でき、 $C_0 = C'_0$  のように調整することで、信号ケーブルシールド線とガード電極  $C_G$  を芯線と同電位に保ち浮遊容量をキャンセルしている。この回路の応答速度に関しては、LTSpice(ver 17.0.35) による回路シミュレーションで計算を行い、90% 応答速度 21.8 msec を得た。これは 2.2 の要求仕様を満たしている。

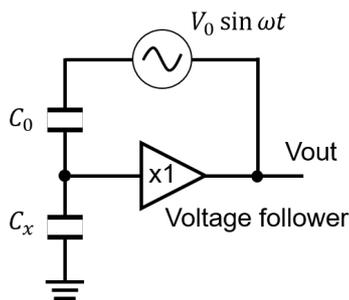


Figure 6: Principle of measuring displacement using an AC power supply and a voltage follower.

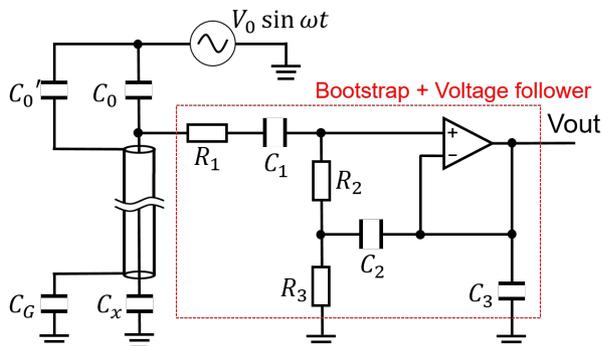


Figure 7: Circuit schematic of the displacement measurement circuit with the addition of a bootstrap circuit.

### 3.4 耐放射線無機変位計の分解能測定

3.2 のセラミック絶縁プローブと 3.3 の読み出し回路を用いて変位量の測定を行い、その分解能を評価した。Figure 8 に示した校正台に変位計を取付け、ターゲットとプローブ間の距離を  $100 \mu\text{m}$  ずつ変化させながら出力電圧  $V_{out}$  をデータロガーで測定する。Figure 9 には変位を  $2000 \mu\text{m}$  と  $2100 \mu\text{m}$  に固定した時の  $V_{out}$  出力の測定結果を示しており、測定時の温度が一定であれば、 $V_{out}$  は非常に安定し  $\sigma$  の小さい正規分布となる。この出力電圧の間隔が  $100 \mu\text{m}$  に相当しているため、各変位ごとの Mean と  $\sigma$  から分解能が計算できる。Figure 10 に各変位ごとに得られた  $V_{out}$  出力値とその分解能の計算結果を示した。変位量が大きくなるにつれて出力電圧も大きくなっているが、Equation (1) のような線型出力は得られなかった。これはまだブートストラップ回路の機能が不十分であり、オペアンプの入力抵抗と入力容量が前段の回路に影響を与えているためと思われる。ケーブル長を延ばし設計仕様と同程度の  $27.5 \text{ m}$  とした場合、出力が非常に小さい値となり、回路素子(主に  $C_0$ ) を調整する必要があった。このことから同軸ケーブルの浮遊容量がまだ十分にキャンセル出来ていないことが推測できるが、回路素子の調整により、ケーブル長  $0.5 \text{ m}$  の時と同様の出力電圧を得ることが出来ている。これにより分解能はケーブル長が長くなったとしても、大きな劣化はなく、最大でも  $0.87 \mu\text{m}$  の分解能となり、2.2 の目標分解能  $2 \mu\text{m}$  を達成できている。

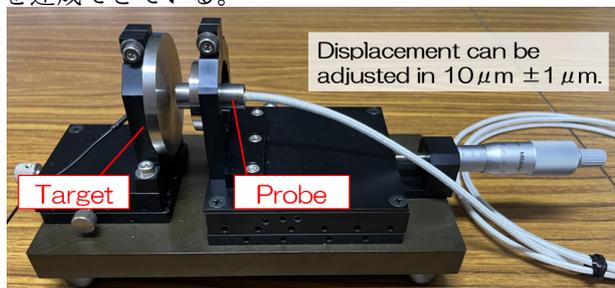


Figure 8: Calibration devices and displacement sensor.

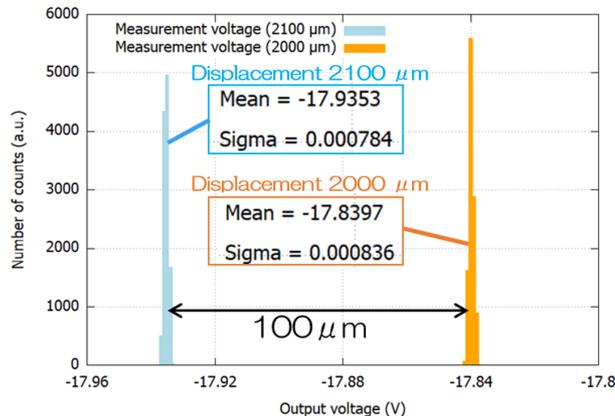


Figure 9: Histogram of  $V_{out}$  at  $2000 \mu\text{m}$  and  $2100 \mu\text{m}$  displacement measured by data logger.

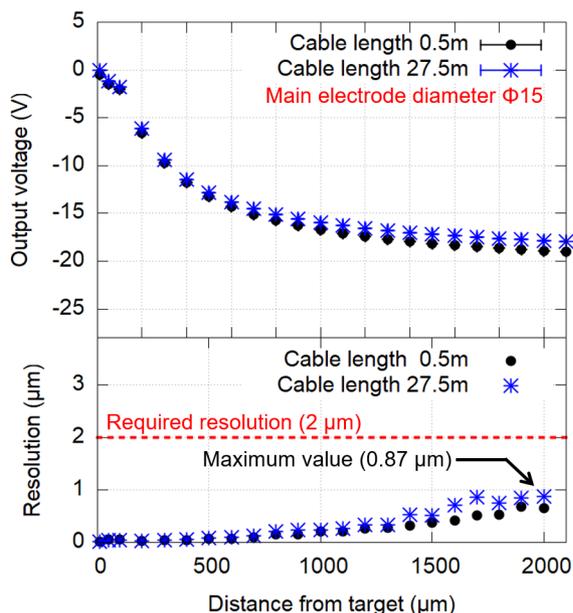


Figure 10: Displacement resolution measured by AC voltage divider method.

#### 4. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設では 100 kW を超えるビーム強度に対応すべく新たに回転円盤型標的を開発している。回転標的の偏芯度、回転速度、熱膨張の監視のため、高放射線環境下で動作できる変位計の開発を行った。標的の直近に設置されるプローブを無機材料のみで製作し、一般的な変位計プローブと同程度の絶縁性を確認した。加えて、27.5 m の長距離ケーブルを経由してその変位量を読み出すことのできる交流分圧式の読み出し回路を製作し、標的監視に必要な  $2 \mu\text{m}$  の分解能を  $0 \sim 2000 \mu\text{m}$  の測定レンジで達成することができた。しかし、同軸ケーブルの浮遊容量が十分に打消せていないことから、ケーブルの温度に依存した出力電圧の変動が確認されており、読み出し回路の改良が必要である。これに加えて、今後は回転標的の実際の偏芯周期に合わせての実測を行い、応答速度と分解能が適切か評価していくことが必要である。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H00143 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] H. Takahashi *et al.*, "Development of new production target at J-PARC Hadron Experimental Facility(2)", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2018, pp.879-882, THP038
- [2] R. Kurasaki *et al.*, "Development of rotating-disk type target for J-PARC Hadron beamline(2)", Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2020, pp.402-406, WEPP55.
- [3] R. Kurasaki *et al.*, "Production Target of Secondary Particles

- for Slowly-Extracted High-Intensity Proton Beams", J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol.18, No.4, 2021
- [4] H. Watanabe *et al.*, "Development of a radiation-resistant rotation sensor for new production target at J-PARC Hadron Facility", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2017, pp.655-659, TUP107
- [5] N. V. Mokhov and S. I. Striganov, "MARS15 overview", vol. 896, pp. 50 - 60. 2007.
- [6] M. Arinaga *et al.*, "BPM displacement measurement by gap-sensors at KEKB", Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2006, pp.904-906, EP55
- [7] CORNING Inc;  
<https://www.corning.com/specialtymaterials/macor>
- [8] POISSON SUPERFISH ver. 7.20; J.H. Billen and L.M. Young, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1834.