

J-PARC ハドロン実験施設における 2 次粒子生成標的耐放射線回転センサーの開発

DEVELOPMENT OF A RADIATION-RESISTANT ROTATION SENSOR FOR NEW PRODUCTION TARGET AT J-PARC HADRON FACILITY

渡邊丈晃^{†A)}, 上利恵三^{A)}, 秋山裕信^{A)}, 青木和也^{A)}, 家入正治^{A)}, 加藤洋二^{A)}, 倉崎るり^{A)}, 里嘉典^{A)}, 澤田真也^{A)}, 高橋仁^{A)}, 田中万博^{A)}, 豊田晃久^{A)}, 広瀬恵理奈^{A)}, 皆川道文^{A)}, 武藤亮太郎^{A)}, 森野雄平^{A)}, 山野井豊^{A)}
Hiroaki Watanabe^{†A)}, Keizo Agari^{A)}, Hironobu Akiyama^{A)}, Kazuya Aoki^{A)}, Masaharu Ieiri^{A)}, Yohji Katoh^{A)}, Ruri Kurasaki^{A)}, Yoshinori Sato^{A)}, Shin'ya Sawada^{A)}, Toshiyuki Takahashi^{A)}, Hitoshi Takahashi^{A)}, Kazuhiro Tanaka^{A)}, Akihisa Toyoda^{A)}, Erina Hirose^{A)}, Michifumi Minakawa^{A)}, Yuhei Morino^{A)}, Yutaka Yamanoi^{A)}
^{A)} Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

A new rotation-type production target for high power beam in the Hadron Experimental Facility at J-PARC is now under being developed. Since the production target is installed in the airtight chamber, the driving shaft for the rotation has to be connected to a motor unit with a rotation sensor, which is located outside the chamber, via an airtight rotation coupling on the target chamber. In this design, robustness of the airtight-coupling part in long period is a challenging issue. Also, a radiation shield around the motor unit with the shaft tends to be large and expensive. Therefore, a new rotation method, that is a wind-turbine method using a part of helium gas for cooling inside the target chamber, is under being developed. In the wind-turbine method, the compact and robust target chamber can be designed, because the coupling and the motor unit with the shaft outside the chamber are not necessary. However, in the wind-turbine method, the rotation sensor has to be installed in the target chamber. Since radiation level in the target chamber is very high, commercial rotation sensors are difficult to be applied. Therefore, we have developed a new radiation-resistant rotation sensor using a ceramic-insulation cable. In this paper, conceptual design and basic characteristics of a prototype of the rotation sensor are reported.

1. ハドロン 2 次粒子生成標的

ハドロン実験施設では、30 GeV の 1 次陽子ビームを 2 次粒子生成標的 (以下、標的) へ照射し、そこで発生する 2 次粒子 (K 中間子、 π 中間子など) を実験エリアへ輸送しており、各実験エリアでは K 中間子などを使ったパラエティーに富んだ独創的な原子核・素粒子実験が実施されている。現在の標的は純金製となっており、金が銅ブロックに接合され、銅ブロックに冷却水配管を接合して冷却する間接冷却方式となっており、最大約 50 kW の 1 次陽子ビーム強度まで対応している[1]。次期標的も現行と同じ間接冷却方式で最大約 80 kW 対応に改良したものを製作予定となっている[2]。

さらに 150 kW を超える大強度ビームに対応するために、図 1 に示すような回転円板型標的の開発が進められている[3]。標的の本体は金属円板外周に金またはプラチナを接合する形となっており、円板を回転させることでビームによる熱負荷を円周方向に分散させ大強度ビームでの使用を可能としている。標的の本体は気密容器中に設置されている。このため通常であれば放射線に弱い電動機や回転センサー類を気密容器の外部に設置し、気密性のある回転導入機を介して容器内へ回転動力を伝達させる。しかしながら、この方式は回転導入機の寿命などの点で課題が多く、遮蔽体も含めて標的システムの

構成が大規模でコストが高い。そこで電動機を使わずに、図 2 に示すように、標的容器内部で使用する冷却用ヘリウムガスの一部を分岐させて円板に連結したタービンに吹き付けることで、円板を回転させる方式 (以下、風車方式) とすると、気密回転導入機や容器外部の電動機が不要となり全体としてコンパクトで堅牢な設計が可能となる。ただし、風車方式の場合は回転速度を検知する回転センサーが標的容器内部に必要となるが、標的の近傍のため放射線が極めて強く既存のセンサーは適用できない。この点をクリアするために耐放射線性に優れたセラミック絶縁電線を使用した耐放射線回転センサーの開発を実施した。本論文では耐放射線回転センサーの設計および試作機による基本特性の評価について報告を行う。

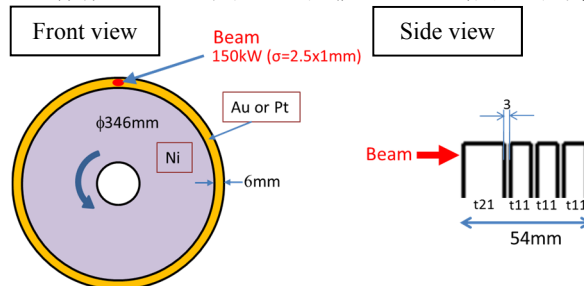


Figure 1: Schematic design for the new rotation-type production target.

[†] nabe@post.kek.jp

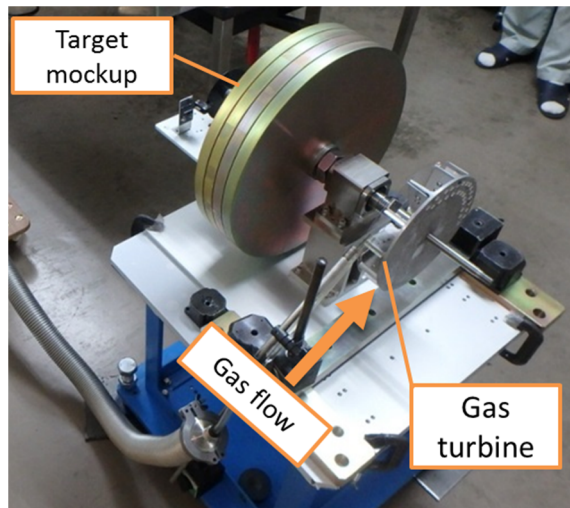


Figure 2: Photograph of a mockup of the rotation target disks with a gas-turbine driver.

2. 回転センサーの設計要件

回転センサーの要求仕様は下記の通りである：

- (1) 回転速度測定条件：
 - ① 40 rpm～200 rpm (定格 120 rpm).
 - ② 測定精度：±5 %以内 (120 rpm の場合).
 - ③ 90%応答時間：3 秒以内.
- (2) 耐放射線性：200 MGy 以上.
- (3) 雰囲気ガス：ヘリウムガス中で使用する.
- (4) 冷却：ヘリウムガスの熱伝達による冷却および架台(鉄)への熱伝導による冷却.
- (5) Robust な設計 (メンテナンスフリー).

まず、(1)回転速度は、現状の回転型標的の設計では定格 120 rpm が想定されている。測定下限は定格の 1/3 として 40 rpm と設定している。回転速度の上限は運用上の調整代として定格速度の 1.5 倍程度を想定して 200 rpm としている。回転速度の測定精度は定格速度で±5%程度であれば運用上十分であると考えられる。応答時間は回転系に異常が発生した場合におけるビーム停止の観点から設定されたものである。

(2) 耐放射線性について、PHITS-ver.2.88[4]による simulation 評価から 1 次陽子ビーム強度 150 kW で 10000 時間程度の運転時間を想定すると、後述する回転センサーの位置で鉄の吸収線量として累計 200 MGy 程度と予想される。従って、樹脂絶縁による電線ではなく 1000 MGy 以上の耐放射線性をもつセラミック絶縁電線を採用することとした。その他の構成材料はすべてオールメタルとし絶縁材はセラミックとする。

(3) 使用雰囲気については化学的に不活性なヘリウムガス中での使用であり、回転センサーへの制限は特にないと考えられる。

(4) PHITS 評価から 150 kW ビーム運転時における鉄中の平均発熱密度は 0.02 W/cm³/sec 程度と見積も

られ、これに計算閾値(cut-off)の影響やモデル(断面積)不定性などで安全率 5 倍として 0.1 W/cm³/sec として概算評価を行った。ヘリウムガスによる自然空冷を想定すると熱伝達率はおよそ 8 W/m²/K であることからビーム負荷による温度上昇は $\Delta T \sim 6$ K 程度と見積もられ影響は小さい。従ってビーム負荷については特別な冷却を考慮する必要がなく、電線で発生するジュール発熱の放熱のみ考慮すればよい。磁気回路としての制限は、鉄のキュリー温度約 770 °C がある。運用上はこの 1/3 程度として 250 °C までは問題ないと想定される。

(5) 最後に全体的な設計思想として、一度現場へインストールされると放射線環境のためメンテナンスができなく、回転センサーのみが故障しても標的容器ごと交換する必要がある。従って、基本的には故障箇所のないようなるべくシンプルで Robust な設計とする必要がある。

3. 試作機の詳細設計

回転センサーの試作機図面を図 3 に示す。これはきわめてシンプルな発電機と同じ構造である。具体的には、円板(標的の本体)の回転軸に固定された 4 極または 2 極の鉄製の回転子、磁場を発生させる励磁コイルを巻いた鉄芯(磁極)、回転子の回転とともに発生する磁場の変動を読み取るためのピックアップコイルを巻いた鉄芯(磁極)、およびリターンヨークで構成される。磁気回路としては、一定電流を励磁コイルへ流して磁場を発生させ、回転子側磁極がコイル側磁極へ近づくとピックアップコイル側磁極へ流れる磁束(ϕ)が増え、回転子が離れると磁束が減る。その磁束の増減($\Delta\phi$)により発生するピックアップコイルでの誘導電圧(=巻線数 $\times \Delta\phi / \Delta t$)を拾うことで回転を検知する。回転子と磁極の隙間(Gap)は狭い方が出力電圧を増やすことができるが、実機の回転標的において多少の熱変形が発生したとしても触れないよう十分な隙間として 0.5 mm と設定した。巻線に使用した線材は、日本耐熱電線製セラミック編組電線で 1000 °C 仕様と十分な耐熱性があり、かつ放射線的にも 1000 MGy 以上の放射線耐性があると想定されている。ただし、セラミック被覆部分が厚く、励磁用の電線として使用した芯線 0.75 mm² の場合で外径約 ϕ 2.3 mm 程度、ピックアップ側で使用した芯線 0.18 mm² でも外径 ϕ 1.9 mm 程度のため巻線数はあまり稼げない。試作機では、磁極への巻線として、後述する計算結果などを勘案し、励磁コイル 110 ターンおよびピックアップ 210 ターンとした。励磁コイルの定格電流は 3A (330 A・ターン) としている。巻線の固定は、通常であれば接着剤などのモールド材を使用するが、強い放射線環境下での使用を勘案して、非磁性のステンレス製針金で絞って固定する方式とした。磁極およびリターンヨークの素材として JIS-C2504 に規

定される電磁軟鋼 SUY-1 (以下、純鉄) の板材および丸棒材を使用した。一般的には渦電流損やヒステリシス損などの鉄損を勘案すると、薄い電磁鋼板(珪素鋼板)を各層間で絶縁しつつ積層した方がより大きな出力が得られるが、後述するよう純鉄でも十分な出力が得られる予想だったこと、および積層のために使用する接着剤が放射線劣化のため適用は困難であることから純鉄を選定した。純鉄には防錆のために無電解ニッケルメッキを施している。ニッケルメッキは化学的安定性、耐熱性および磁性を考慮して採用した。

これとは別に、比較のため安価な一般構造用鉄鋼(SS400)でもデータを取得している。SS400の場合はテストケースのため巻線は励磁・ピックアップコイル共に100ターンである。後述する誘導電圧の比較等ではコイルの巻数分補正(×2.31)して純鉄と比較している。

参考として図4に実際の回転標的に対する取り付け想定図を示す。試作機のサイズで取り合いは問題がないことがわかる。前述した吸収線量および発熱密度の計算は図4の配置で計算したものである。

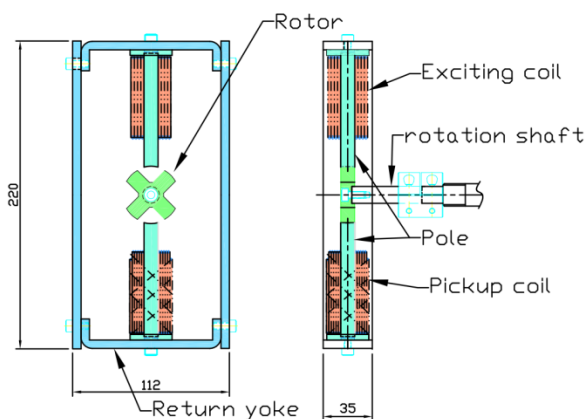


Figure 3: Design of a prototype of a rotation sensor with a 4-poles rotor.

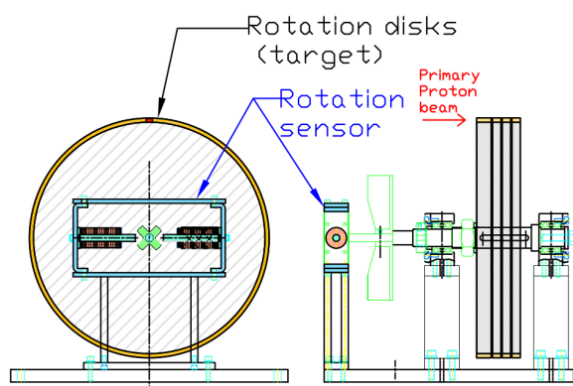


Figure 4: Schematic drawing of the rotation-target unit with the prototype of the rotation sensor.

試作機製作前に、回転計出力の電圧が測定可能な出力(200 rpmで100 mV程度)が得られるか確認するため、図5に示すような有限要素法の2次元静磁場ソルバー[5]により概算の評価を行った。計算上は励磁コイルおよびピックアップコイル共に100ターンとし、励磁コイルには300 A・ターンの一定電流を流す条件である。鉄の比透磁率の入力値は2000で、透磁率のヒステリシス、飽和の効果および渦電流損は考慮されていない。この条件下でピックアップ側磁極には、回転子の対向時に0.30 Tesla、非対向時に0.05 Teslaの磁束密度となり、その間の磁束変分 $\Delta\phi=1.9\times 10^{-5}[\text{Wb}]$ が、200 rpmの場合0.0375秒(45度回転)の時間で発生することから、誘導電圧は $V=(\text{巻数})\cdot\Delta\phi/\Delta t\sim 50\text{ mV}$ 程度と予想される。試作機ではこの結果から巻線数を約2.3倍増やしているため120 mV程度が見込まれており、十分な出力が得られる予想が得られた。実際は45度より手前で回転子のポール部分がコイル用磁極から離れる瞬間に、より短時間で同程度の磁場変動が発生することから、上記の粗い概算より大きな出力であることが予想される。

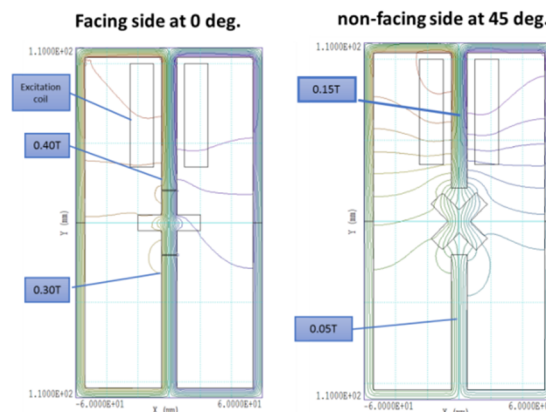


Figure 5: Calculation results for the 4-poles rotor with a simple 2-dimensional model using the static magnetic-field FEM solver [5]. The upper pole is for the excitation coil and the lower pole is for the pickup coil. The left figure shows rotor facing side at 0 degree and the right figure shows rotor non-facing side at 45 degree.

4. 試作機の評価

図6に試作機の写真を示す。写真の右側が励磁コイル、左側がpickupコイルである。励磁側コイルの内側から2層目にはガラス被覆のK型熱電対を巻き込んでおり、コイル内の温度モニターを行っている。試作機の試験のためにステッピングモータ(Empire Magnetics社製IN-U23)により回転速度を0~200 rpmで制御可能なテストベンチを使用した。テストベンチの回転速度はライン精機製レーザー回転計TM-7010を使用して較正を行っている。励磁コイルの電源としては最大5 Aの直流安定化電源A&D社製AD-8722Dを使用し、定電流モードで試験を実施

した。図 7 に測定結果の 1 例として、励磁コイルへ 3 A、回転速度 200 rpm、回転子と磁極間 Gap 0.5 mm の場合における、ピックアップコイルからの誘導電圧をオシロスコープ (Tektronix TDS2104) で測定したものを示す。このうち、純鉄-2 極、純鉄-4 極は生の波高 (電圧) で、一般構造鋼(SS400)-4 極は巻線数の補正を行った波高を示している。図 8 に回転速度ごとに誘導電圧の振幅を示している。4 極の純鉄と一般鋼を比較すると、純鉄は約 30%誘導電圧が大きいことがわかる。これは、透磁率およびヒステリシスの差が原因であると推察される。また、同じ純鉄でも回転子を 2 極にした方が 4 極より 15%程度出力が増える。これは定性的には図 5 右図に示した非対向時の磁束分布にあるとおり、4 極回転子で非対向状態では磁極からの漏れ磁場が回転子の側面を通じてピックアップコイル側の磁極へ流れる成分が多いことに起因する。ただし、2 極の場合は、1 回転あたりの信号出力の回数が少なく実機としての回転速度表示の安定性や応答時間等で不利となることから 4 極を採用するものとした。以後の結果は純鉄-4 極回転子によるものを示す。

励磁コイルの温度上昇は、試作機では励磁コイルへ定格 3 A (330 A・ターン) としているが、5 A(550 A・ターン)まで上げて温度上昇は約 30°Cと十分低く裕度大きい。また機械的な異常振動も 5 A では発生しなかった。従って、仮に何らかの理由 (たとえば放射線劣化等) で、定格電流 (3 A) で使用中に回転センサーからの信号出力 (誘導電圧) が低下したとしても、5 A まで電流を増やすことで回転計からの信号を約 1.7 倍増加させることが可能である。コイル温度としてはまだ余裕があり、仮に $\Delta T \sim 100^\circ\text{C}$ とすると 9 A 程度まで上げられる予想である。実際に温度および機械構造上無理のない最大運転電流値の調査は今後の検証項目の 1 つである。

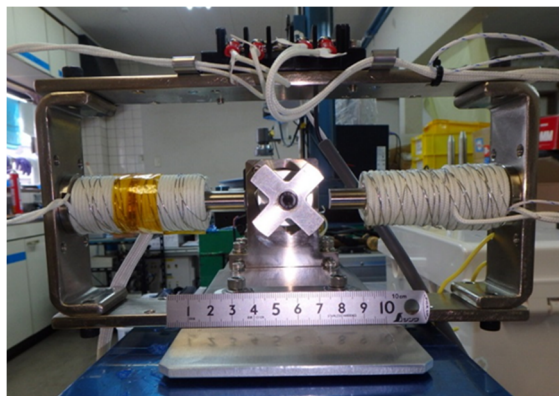


Figure 6: Photograph of a prototype of the rotation sensor with a 4-poles rotor. A gap between the pole and the rotor is 0.5 mm. The right side is the excitation coil, and the left side is the pickup coil.

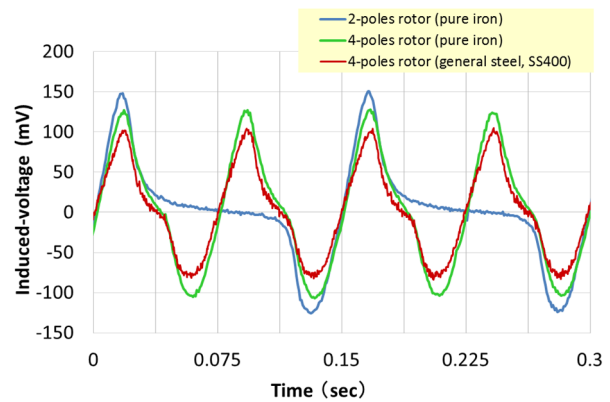


Figure 7: Histories of the induced voltage from the pickup coil at 200 rpm with a current in the excitation coil of 3 A. The voltage output of the general-steel case is normalized to an equivalent number of ampere-turns for the pure-iron case.

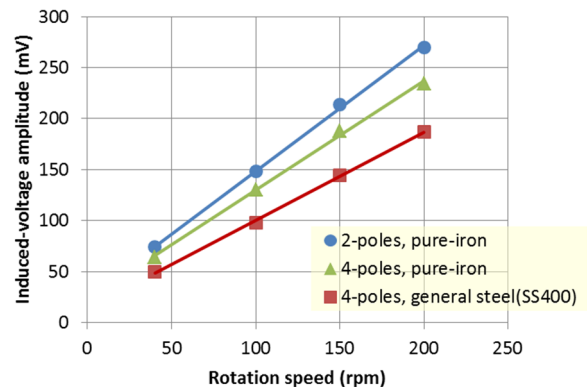


Figure 8: Summary of the induced-voltage amplitudes from the pickup coil.

5. 読み出し回路の設計および評価

次に、回転センサーからの読み出し回路の設計・試作を実施した。回路は、回転センサーから出力する誘導電圧をオペアンプで 10 倍増幅させたものをコンパレータでデジタル信号へ変換させ、デジタル信号の周波数をマルチバイブレータ素子とオペアンプによる周波数-電圧変換回路(F-V convertor)を使って回転速度に比例したリニア電圧出力 (0~10 V) に変換している。回転速度の表示器は、そのリニア電圧を回転速度に変換させるよう設定をしたパネルメータを使用している。なお、リニア電圧出力は実機での回転円板装置においては回転速度制御のためのフィードバック用信号として使用されるものである。アナログ回路の時定数 (コンデンサ容量等) は定格速度である 120 rpm 付近でふらつき (偏差) が最少になるように設計している。パネルメータ上の表示 (平均値) と実際の回転速度の関係を図 9 に示す。40~200 rpm まで誤差 1%以下の非常に良い

Linearity が得られている。回転速度 の出力（リニア電圧出力）の安定性については、リニア電圧出力を0.2秒ごと3000点測定した。その標準偏差の2倍(2σ)を目安とすると表1のようになり、100 rpm で充分良い安定度を得られている。低速度になると若干ふらつきが大きくなるのは回路の積分時定数などの最適化を定格回転速度である 120 rpm に合わせていることによるものであるが、運用上問題となるレベルではない。

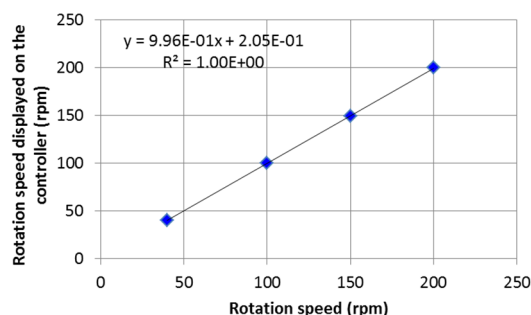


Figure 9: Linearity of the rotation speed displayed on the controller.

Table 1: Stability of the output rotation speed from the controller. The σ in the table means a standard deviation of the output voltage from the controller.

Rotation speed	Stability 2 σ in rpm (in %)
40 rpm	2.2 rpm (5.5%)
100 rpm	0.82 rpm (0.82%)
150 rpm	0.077 rpm (0.051%)
200 rpm	0.44 rpm (0.22%)

回転センサーの応答時間については、回転機構等でトラブルが発生した際に、次のスピルのビーム取り出しを停止させるために使うものである。ビーム取り出し終了から次のビーム取り出しまでの時間が約 3.5 秒であり、ビーム停止（ビームアポート）に要する時間は 0.1 秒以下となっている。従って、1つの目安として 3 秒以下の応答時間であればよいと考えられる。ただし応答時間を短くすると安定度が悪くなるため、そのバランスを取る必要がある。試作回路での応答時間を図 10 および表 2 に示す。図 10 は停止状態から各定格速度に動作させた際のリニア電圧出力の時間履歴で、表 2 は定格の 90% の電圧が出力されるまでにかかる時間（90% 応答時間）である。定格範囲 100~150 rpm では約 1.7 秒となっており、試作回路の設定時定数で十分な応答速度が得られている。

6. まとめ

J-PARC ハドロン実験施設における大強度 2 次粒子

生成標的の開発の一環として、風車駆動方式の回転円板型標的が必要とされる耐放射線回転センサーの開発を行い、その試作機の評価を実施した。その結果、読み出し回路まで含め、実機として適用可能な回転センサーの設計が完成したと考えている。また、本論文では記述していないが、磁極方向に回転軸が偏芯すると回転子と磁極の Gap が変わるため、0.1 mm の偏芯でも誘導電圧の出力が約 20 % 変動する。従ってピックアップコイルからの誘導電圧を記録することで偏芯モニターとしても使用可能である。現状の回転型標的の設計上は必要とされないが、今後、回転角度の絶対値測定や、応答時間をより短くする場合は、励磁コイルに流す電流を直流ではなく高周波を使用することで可能となり、試作機による試験を検討している。

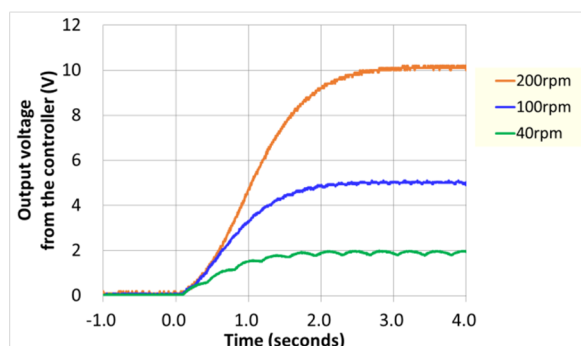


Figure 10: Histories of the output voltage from the controller during a ramp-up period from 0 rpm to each rated speed.

Table 2: 90%-response Periods of the Rotation Sensor

Rotation speed	90% response period in seconds.
40 rpm	1.2 sec.
100 rpm	1.5 sec.
150 rpm	1.7 sec.
200 rpm	1.9 sec.

参考文献

- [1] 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, (2015).
- [2] 高橋仁 他, "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", 第 14 回日本加速器学会, TUP109, (2017).
- [3] Ruri Iwasaki *et al.*, "J-PARC ハドロンビームライン用回転円板型標的の開発", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 949-953 (2016).
- [4] T. Sato *et al.*, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).
- [5] Magnet Design Toolkit, Field Precision LLC, <http://www.fieldp.com/>.