

Control System for Muon Rotating Target in J-PARC/MUSE

Yasuo Kobayashi^{#A)}, Shunsuke Makimura^{A)}, Akihiko Watanabe^{B)}, Kenji Sakai^{B)}, and Yasuhiro Miyake^{A)}

^{A)} Muon Section, J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
茨城県那珂郡東海村白方白根 203

^{B)} Neutron Source Section, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA)
茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Abstract (英語)

The most intense pulsed muon beam will be generated by a 3-GeV 333- μ A proton beam on a muon target made of 20-mm thick isotropic graphite in J-PARC/MUSE (Muon Science Establishment). The first muon beam was successfully generated on September 26th, 2008, and the most intense pulsed muon beam has been continuously produced with a proton beam of 120 kW since the run cycle in November, 2009.

At present, the fixed edge-cooling method has been adopted for cooling the muon target. However it is predicted that the graphite will break down in six months due to radiation damage. To extend the lifetime of the muon target, we are planning to adopt the rotating target method, which can distribute the radiation damage of graphite to a wider area. In case of the muon rotating target, a lifetime of the bearing is so critical that the rotating motion of the motor system must be monitored carefully. Furthermore, the control system of the muon rotating target must be developed with taking into account that it will be integrated into the MELSEC/NET in Materials and Life science Facility (MLF) control system. In this report, the development of the control system for the muon rotating target in J-PARC/MUSE will be described.

J-PARC/MUSE におけるミュオン回転標的の制御系の構築

1. 回転標的開発の経緯

現在、茨城県東海村の日本原子力研究開発機構の敷地内にて、高エネルギー加速器研究機構は、日本原子力研究開発機構と共同で、大型陽子加速器研究施設である J-PARC を展開している。その中で、ミュオン科学研究施設 (J-PARC/MUSE) では、3GeV, 333 μ A, 25Hz, 1MW の大強度陽子ビームを用いて、世界最高強度のパルス状ミュオンを用いた物

性、素粒子実験を実施している。ミュオン生成する為には、陽子ビームをミュオン標的に照射するが、この標的には、等方性黒鉛材 (東洋炭素 ; IG-430) を用いた固定間接冷却方式が採用されている[1]。

現在 J-PARC は、陽子ビーム強度 120kW で実験運転を継続している[2]。将来計画においては平成 24 年度に陽子ビーム強度が 300kW に到達する予定であり、その後強度増強を行い、最終的には 1MW 運転を予定している。

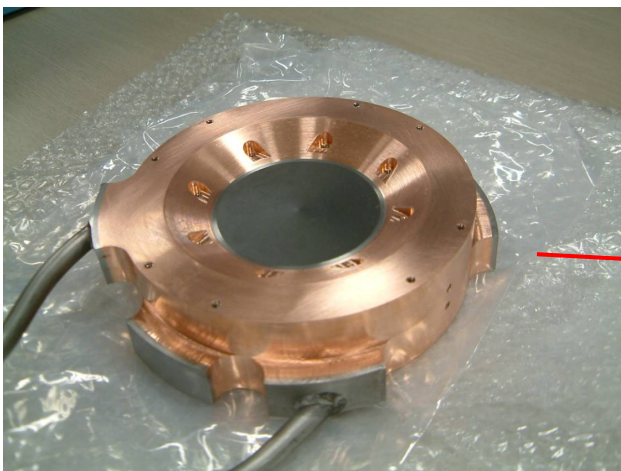


図 1 : 現在使用しているミュオン固定標的

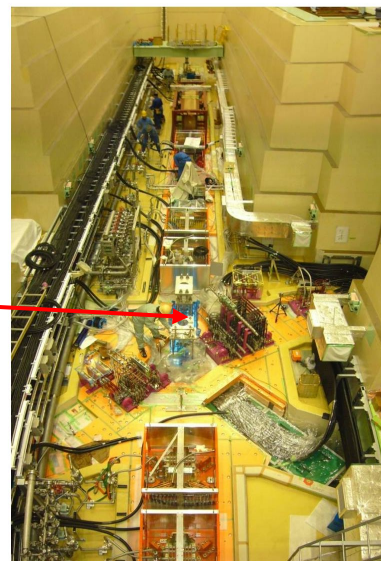


図 2 : 標的が設置されているビームライン

陽子ビーム強度が 1MW に到達した際には、黒鉛標的の $\phi 25\text{mm}$ に 3.3kW、銅フレーム上に 600W の熱が発生すると予想され、また黒鉛材が陽子ビームからの放射線損傷を受け収縮することによって[3]、引張り応力が発生して、わずか半年で破損すると予想されている[4]。

ミュオン標的の寿命を長期化するためには、黒鉛材にて集中している放射線損傷を分散させる必要があり、その為には標的において陽子ビームが照射される部分を分散させる必要がある。よって高強度粒子加速器で採用されることのある、回転標的方式を採用し、黒鉛材で製作したリング状の回転体を回転させる事を計画した。

標的位置での黒鉛材の位置精度を担保し、長寿命化するためには回転体を軸受にて保持する必要がある。回転体方式では、軸受がその寿命を決めることが多く、特に潤滑剤の選定には注意を払う必要がある。今回の軸受は真空内 (10^{-5}Pa 台)、高放射線 (10MGy/年)、高温での使用であるので固体潤滑材を用いる必要がある。J-PARC ミュオン回転標的では最低 5 年、目標 10 年の寿命を目指しており、軸受の寿命に関しては評価式などが軸受メーカーより提供されているが、信頼度はそれほど高くなく、実際の使用条件に合わせて試験を行い、確認する必要がある。この為、加熱及び回転の出来る回転標的試作機を製作し、この試作機において回転機構の挙動を制御・監視する為の制御機構を構築することになった。

本稿では、この制御機構について説明する。

2. ミュオン回転標的試作機の概要

ミュオン回転標的の試作機は、標的が回転している際の軸受などの回転機構部分の消耗を監視することを目的とする。実際の実験に使用するミュオン標的は、陽子ビームライン上に設置されるので、高放射線下に置かれることになる。軸受の潤滑材には二硫化モリブデンなどの高放射線場での使用実績がある材質が使用され、試作機はこれらの材質の高温下・真空下の耐久性などを監視する。

高放射線下では、半導体を使用したセンサー類などは著しく寿命が短いので、フォトセンサーを使用したエンコーダ類は使用出来ない。今回の試作機でも、実機に近い駆動系を採用するためにレゾルバによる回転子の位置検出を採用する。またモーター電流を計測しながら長期間連続運転を行うので、ステッピングモーターではなく、サーボモーターを使用する。高温化・真空下での回転駆動系の監視を行う為、この試作機はヒーターと真空ポンプ、および温度センサーや真空計を持つ。これらの試作機が持つ仕様から、この制御系には以下のような機能が求められる。

- サーボモータードライバーに対する制御機能 (レゾルバによる位置変位に対する検出機能も含む)
- 回転体の温度監視
- 駆動系の真空計の監視

- 回転機構の挙動監視 (モータードライバーからのモーター電流の読み込み)
- これらの監視データの上位制御系への伝送 (後述)

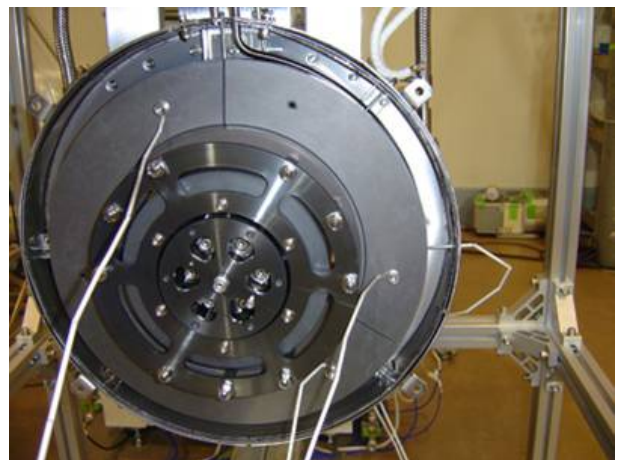


図 3 : ミュオン回転標的試作機

3. 回転標的試作機制御系の詳細

3.1 基本構造

回転標的試作機を試験運転するにあたり、回転機構の耐久性を測る為には、長時間の連続運転が必要になる。回転制御系には、異常加熱時などの停止インターロックを組み込むが、このような緊急事態に速やかに対応する為には、常時オペレーターがいる場所に、試作機の状況データを伝送し監視してもらう必要がある。

また、現在使用しているミュオン標的も、陽子ビーム照射などによる発熱があり、このような標的

システムに異常が発生した場合、安全確保の為、速やかに陽子ビームを停止するインターロック機構が設置されている。

将来的に回転標的を実際に製作する場合には、現行のミュオン標的の制御系と速やかに接続できなければならない。そして、固定標的から回転標的への移行期には、双方が平行に運転可能なシステムが要求される。また、陽子ビームの状態はオペレーターが運転中は常時監視しており、陽子ビームの状態に関連して、現行のミュオン標的制御系からのデータも伝送されている。

これらの事情から、試作機の制御機構は現行のミュオン標的で使用されている制御系と同系列のものを使用することで、現行のミュオン標的への接続の容易さ、オペレーターが常時いる場所へ試作機のデータ転送を行う、これらの条件を満たすことが出来る。よって回転標的試作機の制御系には、現行のミュオン標的の制御系と同じ、三菱電機[5]製のPLC(Programmable Logic Controller)であるQシリーズを採用する。また、回転標的試作機の現場近くでの現場制御はタッチパネルによる制御を行う。

以下に回転標的試作機制御系のブロック図を示す。

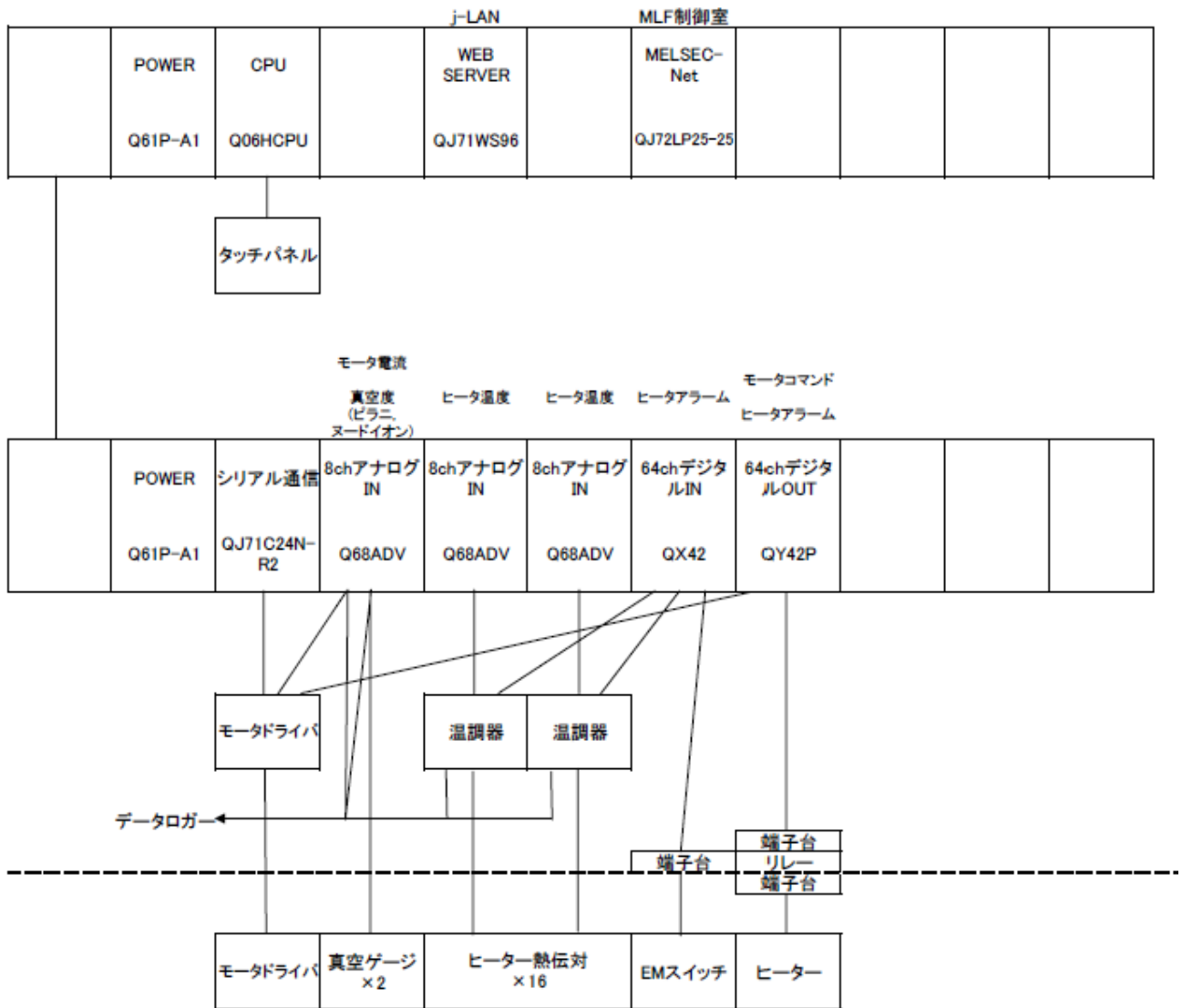


図4：ミュオン回転標的試作機制御系ブロック図

3.2 サーボモータードライバー

回転標的には、放射線環境下で使用実績のあるACサーボモーターBNR II 006C (ワコー技研) [6]に減速比5の減速機を取り付けた汎用モーターを使用するが、今回の試作機においてはケーブル被覆などに汎用の材料を使用した同じ型式のモーターを使用する。当該モーターのドライバーには、アナログ電

圧入力によって制御を行うもの、パルス列を入力するものなどの種類があるが、今回は制御統括をPLCが行うので、シリアル通信によってモーターの制御を行う。

3.3 温度監視・真空計監視

回転標的の回転機構は、ミュオン標的に見立てた回転体、その回転体の保持部、回転伝達部、真空回

転導入機などで構成される。この回転機構には高放射線下で仕様実績のある材質を選択し、これらの機構の高温下での挙動監視の為に、回転標的の試作機はヒーターを備える。回転体には熱電対による温度計が 10 個設置されており、制御系はこれらの信号の監視を行う必要がある。熱電対からの出力線は制御系の入力部に設置されている温調器に入力され、アナログ電圧に変換され PLC のアナログ入力モジュールに入力される。

回転標的試作機で使用されている真空計モジュールは、アナログ電圧変換出力を持っているので、こちらは、そのまま PLC のアナログ入力モジュールに入力される。

3.4 回転機構の挙動監視

回転機構の挙動を監視する為に、モーターの電流を監視する。サーボモーターは回転子の位置（回転角）をフィードバック方式によって制御する。モーターの駆動速度が一定で、回転機構側の抵抗も一定ならば、モーター電流も一定となる。回転機構の抵抗が増加した場合は、モータードライバーは回転子の速度を一定に保つ為にモーターに出力する電流を増加させ、抵抗が減少すれば、モーター電流も減少させる。この様にモーターに流れている電流を監視することにより、回転機構の抵抗を検出することが出来る。今回の試験機にて採用しているモータードライバーには、監視用のテスト端子が設置されており、この端子に、モーター電流をアナログ電圧変換した電圧を出力する設定にし、この電圧を PLC のアナログ入力モジュールに接続する。

3.5 その他に制御系が持つ機能

緊急停止スイッチの入力や、緊急時のモータードライバーやヒーターへの緊急停止出力などを備える。また外部データロガーへの出力を持つ。

4. 回転標的試作機制御系の現状

現在 PLC を使用した制御系を構築中である。

今回使用しているモータードライバーは、シリアル通信機能を有しており、またパソコンからのシリアル通信を介してドライバーのコマンド入力による制御を行う調整用アプリケーションが同梱されている。

現在はこの機能を使用して、PLC を介さずに PC にて直接制御を行っている。また、データロガーによって直接、回転標的駆動機構のデータの収集を行っている。

4.1 モータードライバーについて

今回使用するサーボモーターでは、モータードライバーによる制御を行う為に、予めゲイン調整を行う必要がある。一般的にサーボモーターは低速運転を不得意としており、今回の試験においても数十 rpm 位ずつ、揺らぎが発生している。

駆動機構の性能試験装置である試作機の場合は回転駆動系の総寿命回転数を早く達成する為に、実機のミュオン標的に比べて遥かに高速回転させるので



図 4 ミュオン回転標的制御盤

大きな問題にはならないが、実機を製作する際にはモーターに付属しているギア比を上げるなどの措置を行い、モーター自身は高速で運用する事を計画している。

4.2 モーター電流の一例

以下にモーター電流の変遷データの一例を示す。図 5、図 6 において、縦軸はモーターの電流値、横軸は、モーターの回転開始からの時間を示す。図 7、図 8 において、縦軸はモーターの電流値、横軸はモーターの回転速度を示す。また図 7、図 8 の紫色の線は、それぞれの標準偏差を示している。

今回使用したサーボモーターのドライバーには、位置ゲインと速度ゲインの調整がある（積分ゲイン調整もあるが今回の運用では、外乱抵抗分が概ね安定しているのであまり意味がない）。

フィードバック式なので、モーターの出力調整の過程は以下のようなになる。

レゾルバからのモーター回転子の位置入力→調整→モーター電流→外乱（抵抗）→実際の回転速度→調整

実際の回転速度を調整に戻す（フィードバック）が、この調整は「位置ファクター」と「速度ファクター」で決定している。位置ファクターとしてモーターの回転子の位置のみを見て、調整するために掛ける係数が位置ゲインとなる。また、位置を時間微分したもの、すなわち速度に対して係数を掛ける係数が速度ゲインとなる。

回転系の安定性は、位置、速度、抵抗のバランスで決まってくる。この関係上、モーターの回転速度が異なると出力の安定も変動してしまう。今回の計測では、位置ゲインが 5,000 では図 8 のようにモーター

の回転数によってモーター電流が不安定な領域が発生した。しかし位置ゲイン 3,000 では図 7 のとおり概ねモーターの回転数に比例したモーター電流値となっている。

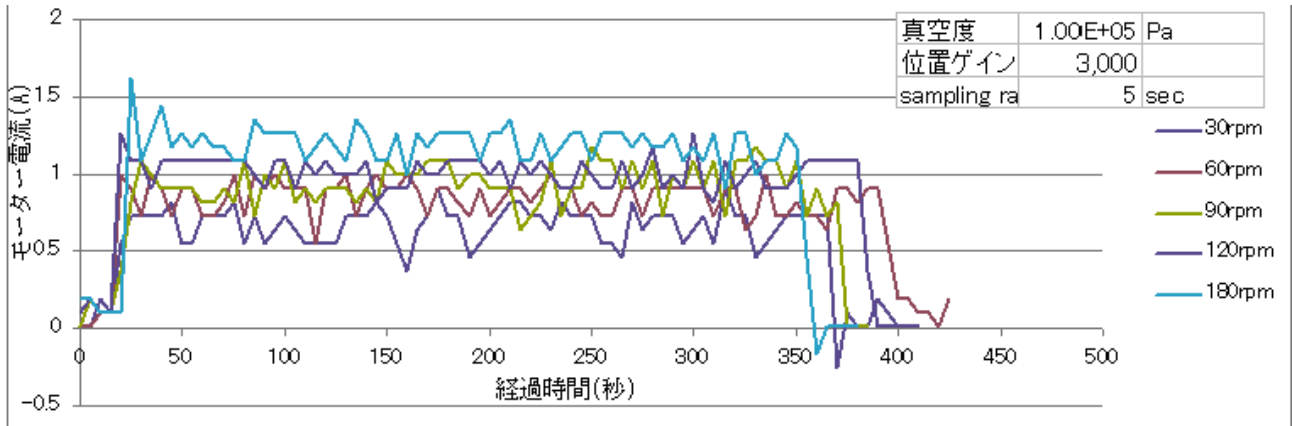


図 5 : 位置ループゲイン 3000 モーター電流値

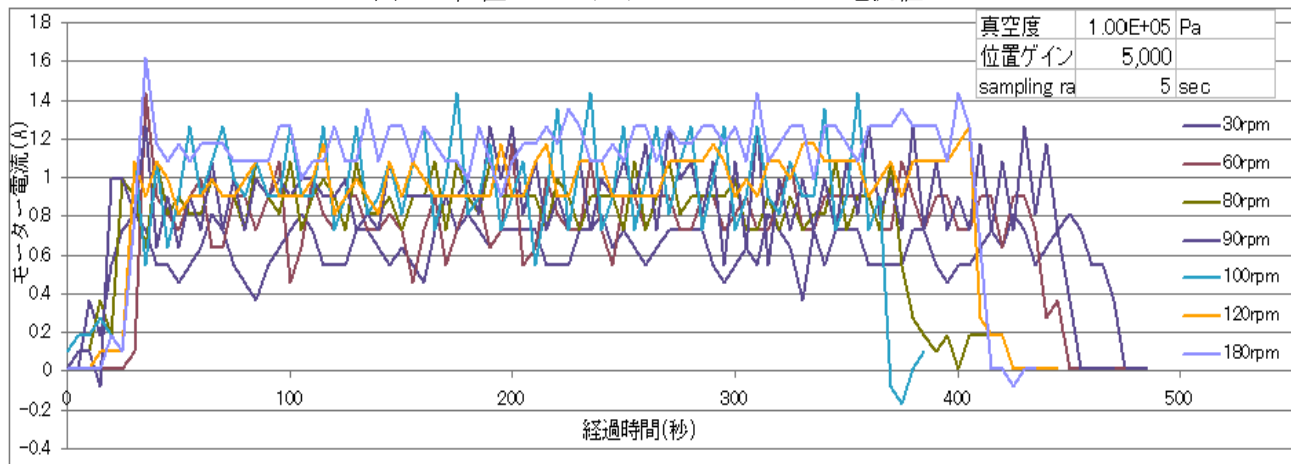


図 6 : 位置ループゲイン 5000 モーター電流値

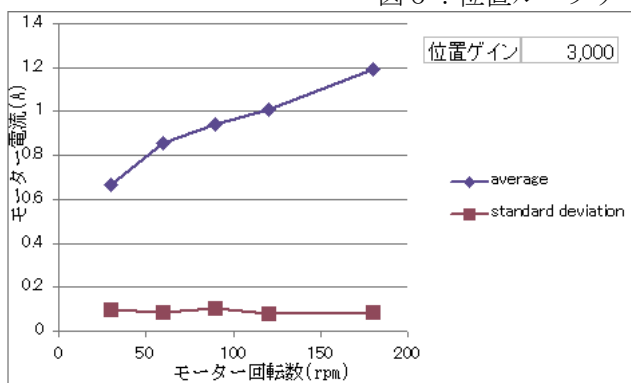


図 7 : 位置ループゲイン 3000 平均値、標準偏差

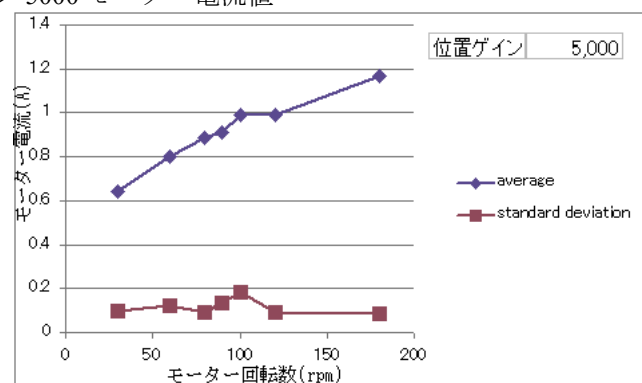


図 8 : 位置ループゲイン 5000 平均値、標準偏差

5. 参考文献

- [1] Muon Production target in J-PARC”, S.Makimura, et al., Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu Japan (2005) p.173-175
- [2] The 100-kW proton beam irradiation test of the

- muon target in J-PARC/MUSE, S. Makimura et al., KEK-MSL Report 2008, (2008) p.15-16
- [3] H. Matsuo, graphite1991 [No.150] 290-302
- [4] "The present status of R&D for the muon target at J-PARC: The development of silver-brazing method for graphite", S Makimura, et al., Journal of Nuclear Materials, 377 (2008) 28-33
- [5] <http://wwwf2.mitsubishielectric.co.jp/>
- [6] <http://www.wacogiken.jp/>