

J-PARC におけるミュオン生成回転標的の開発

○牧村俊助^{A)}、岡部三郎^{B)}、小林庸男^{A)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 ミュオン科学研究施設

^{B)}日立造船株式会社

概要

高エネルギー加速器研究機構においては日本原子力研究開発機構と共同で大強度陽子加速器計画 J-PARC 計画を推進しており、その中でミュオン科学研究施設 (J-PARC/MUSE) では世界最高強度のパルス状ミュオンを用いた物性、素粒子実験を展開している。ミュオンを生成するための黒鉛標的は強い放射線、高温、真空内に設置され、固定された黒鉛材の放射線損傷によってその寿命が決まっている。このため黒鉛材を回転させることによって、その寿命を長期化することを計画している。この場合、固体潤滑材を用いた軸受けが、その寿命を決定しているが、回転、加熱可能な回転標的試作機を製作し、寿命評価試験を開始した。本発表では回転標的の設計、開発状況を報告する。

1 開発の経緯

J-PARC/MUSE では 3GeV, 333 μ A, 25Hz, 1MW の大強度陽子ビームを用いて、パルス状ミュオンを生成して様々な物性・素粒子実験を展開している。現在、ミュオン生成標的としては等方性黒鉛材 (東洋炭素; IG-430) を用いた固定間接冷却方式を採用しており[1]、08/9/19 の初めてのミュオンビーム発生以来、08/12/9 の陽子ビーム 120kW 運転、09/12/7 の陽子ビーム 330kW 運転を行った。なお、陽子ビーム強度が 1MW に到達した際には、黒鉛標的の ϕ 25mm に 3.3kW、銅フレーム上に 600W の熱が発生すると予想されている。現在は、陽子ビーム強度 120kW 運転によって実験を継続している[2]。また、120kW 運転時には実験ポートである D2 ポートに輸送されるミュオン数は 1.7×10^7 個/秒となり、パルス状ミュオン強度が世界最高である ISIS/RAL と同等かそれ以上のミュオン強度を達成している。しかしながら、陽子ビーム強度が 1MW となった時には、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半年で破損すると予想されている[4]。ミュオン標的は高度に放射化 (表面線量; 5Sv/h 程度) するために、遠隔操作による交換が必要とされ[5][6]、多大なるビーム停止時間、作業員の被曝、交換によるコストを伴う。J-PARC 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る。その後、強度増強を行い 1MW 運転を予定している。よって、回転標的のビームライン運転は平成 24 年度に開始する事を目標としている。

ミュオン標的の寿命を長期化するためには、黒鉛材に集中している放射線損傷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。今回、加熱及び回転の出来る回転標的試作機を製作し、実際に固体潤滑材による寿命の比較を開始した。

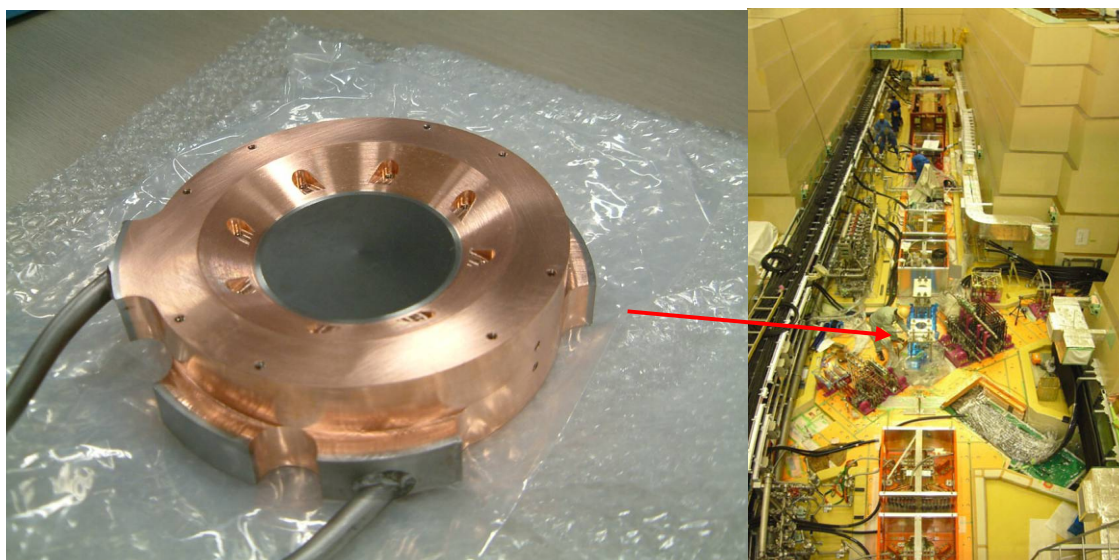


図1. 現在使用しているミュオン固定標的（左側）と標的の設置されているビームライン（右側）の写真。

2 基本設計

2.1 標的の温度

回転標的は回転するので、熱伝導によって冷却水で除熱する間接冷却方式を採ることが出来ない。陽子ビームによる発熱 $Q=4$ (kW) [7],[8] は輻射によって除熱される必要がある。標的の温度 T_g (K) を低くするためには、表面積 A (m²) を大きくする必要があるが、すでに設置されている真空容器内に収まる必要がある。よって、外径 350mm、内径 250mm、厚み 20mm のリング状黒鉛を回転させることとした。黒鉛の輻射率 ϵ_g は常温から 800℃ の範囲で 0.9 程度としている。真空容器は輻射率を向上させるためにレイデント処理（レイデント工業）を施しており [9]、0.9 程度の輻射率と仮定している。しかしながら、回転標的直下流には銅で構成されるコリメーターが設置されており、輻射率は 0.2 程度しか期待できない。よって機器配置などを考慮し、真空容器の平均輻射率 ϵ_c を 0.6 とした。また、真空容器は散乱した陽子ビームにより発熱するが、冷却水により除熱され、 $T_c=373$ (K) となるとしている。このとき回転標的と真空容器は、二体問題と考え、形態係数 F を 1 とし、 $Q=\sigma AF(\epsilon_g \epsilon_c / (\epsilon_g + \epsilon_c - \epsilon_g \epsilon_c))(T_g^4 - T_c^4)$ より、 $T_g=1000$ (K) を得た。J-PARC ミュオン標的の場合、発熱密度を分散させる必要は無く、数ヶ月単位の長期間の放射線損傷を分散させる事が目的であるので、高速回転をさせる必要は無い。回転標的中の温度勾配が大きくならないように 5r.p.m. と決定した。

2.2 軸受の選定

回転体を支持する軸受は、回転標的の寿命を決定する最も重要な要素である。軸受け寿命を決定する主要因子は、温度、荷重、回転数、圧力、固体潤滑材質である。特に我々の場合、温度を低くすることが非常に重要である。回転標的の設置される環境は 10^{-5} Pa 台の圧力である。また、モンテカルロ計算コード PHITS を用いた評価によると、軸受け位置における放射線強度は 10MGy/年程度であり、放射線による発熱はステンレス材で 10^{-1} W/cc 程度である。この発熱は高温化（約 700℃）した回転体（黒鉛標的）から回転体支持構造を介して熱伝導で伝わってくる熱に比べると十分小さい。すなわち、熱伝導を抑制する構造とすることが回転軸受けの寿命を長期化することとなる。回転標的の周囲の真空度、放射線強度、軸受けが高温になることを考え、SUS440C を外輪内輪に、SUS440C または窒化珪素をボールに採用した軸受けに固体潤滑剤をコーティングする方式とした。最も重要なのは固体潤滑剤の選定であるが、二硫化モリブデン、二硫化タングステン、アークイオンプレーティングによる銀コート（以下；銀コート）から選ぶこととする。二硫化モリブデンの

場合には、一般的に放射線環境下で潤滑剤として頻繁に使用されるが 300°Cを超えるような高温には使用できない。二硫化タングステン、二硫化モリブデンと比較して、より高温で使用する事が可能である。しかしながら放射線環境下での使用実績は、ほとんど無い。銀コートの場合には、500°C程度の高温で使用可能であり、真空内使用にも適しており、放射線環境下での使用実績もある。しかしながら、腐食されやすく長期間大気中に曝すことが出来ないという欠点がある。我々の場合、標的交換には遠隔操作による長時間の交換作業が要求されるので、可能であれば二硫化モリブデンなどを選定したい。これらの三種類の固体潤滑剤を用いた軸受に関して寿命比較試験を行うことが、今回の試作機製作の最も重要な目的である。

軸受にかかる荷重は回転体に最も近い軸受が大きく ($F=33N$)、温度も高くなる。よって、この軸受の寿命を評価する。軸受を長期間に使用する場合、基本定格荷重の5%以下に使用荷重を抑えることが望ましい。また、使用実績や軸受寿命評価式の充実などから I.D.=17mm, O.D.=40mm, w=12mm の EXCEV 軸受 (JTEKT 株式会社) [10]を選定した。この寸法の軸受の二硫化モリブデン、銀コートに関して EXCEV 軸受のカタログ状の寿命評価式によって寿命計算を行う。温度 300°C、回転速度 5r.p.m.、一年間の陽子ビーム運転時間 5000 時間とすると、銀コートに関しては 3.5 年、二硫化モリブデンに関しては 65 年となった。しかしながら、二硫化モリブデンに関しては、常温、大気中使用での評価式のみ調査されており、高温、真空内での寿命は実際に計測する必要がある。

3 回転標的試作機

前述の条件にて加熱、回転することにより軸受寿命の計測および回転標的の問題点を洗い出すことが出来るように回転標的試作機を製作した。しかしながら、実際のビーム運転時と同じ回転速度とすると、軸受寿命が 10 年の場合には、10 年間の回転試験が必要になってしまう。軸受寿命評価式によると軸受寿命は回転速度に比例しているため、実際のビーム運転時より高速回転させることによって短期間で寿命を評価する事を考えた。現在、実際のビーム運転時には 5r.p.m.のところを 500r.p.m.まで高速回転させる。例えば、5r.p.m.で 10 年間に相当する 50000 時間運転は 500r.p.m.では 500 時間すなわち 3 週間に相当する。図に製作した回転標的試作機の写真を示す。回転標的は、標的となる黒鉛標的部と黒鉛標的を保持する支持体で構成される回転体、軸受を介して回転体を保持する冷却ジャケット、標的真空容器上部から回転を導入する回転導入機およびモーター、導入された回転の方向を直角に変換するマイタギヤ等で構成される。また、試作機の際には回転標的を加熱するヒーターも製作した。以下に試作機製作の際に留意したことを記す。

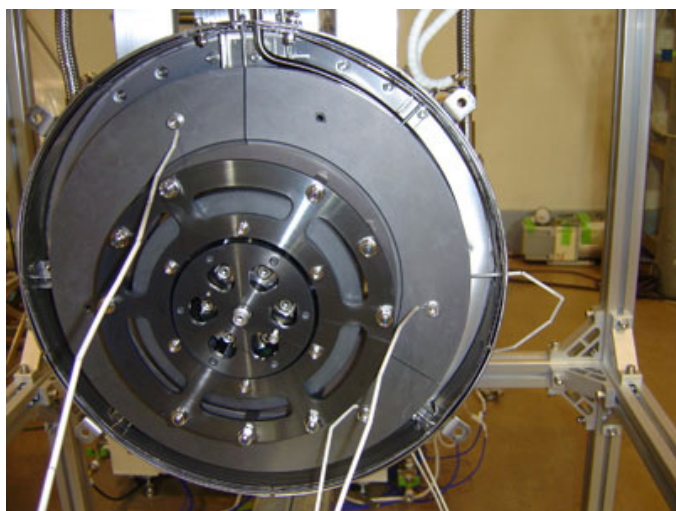


図 2. 回転標的試作機の写真。前面ヒーターは取り外してある。回転させないで温度計測をしている。

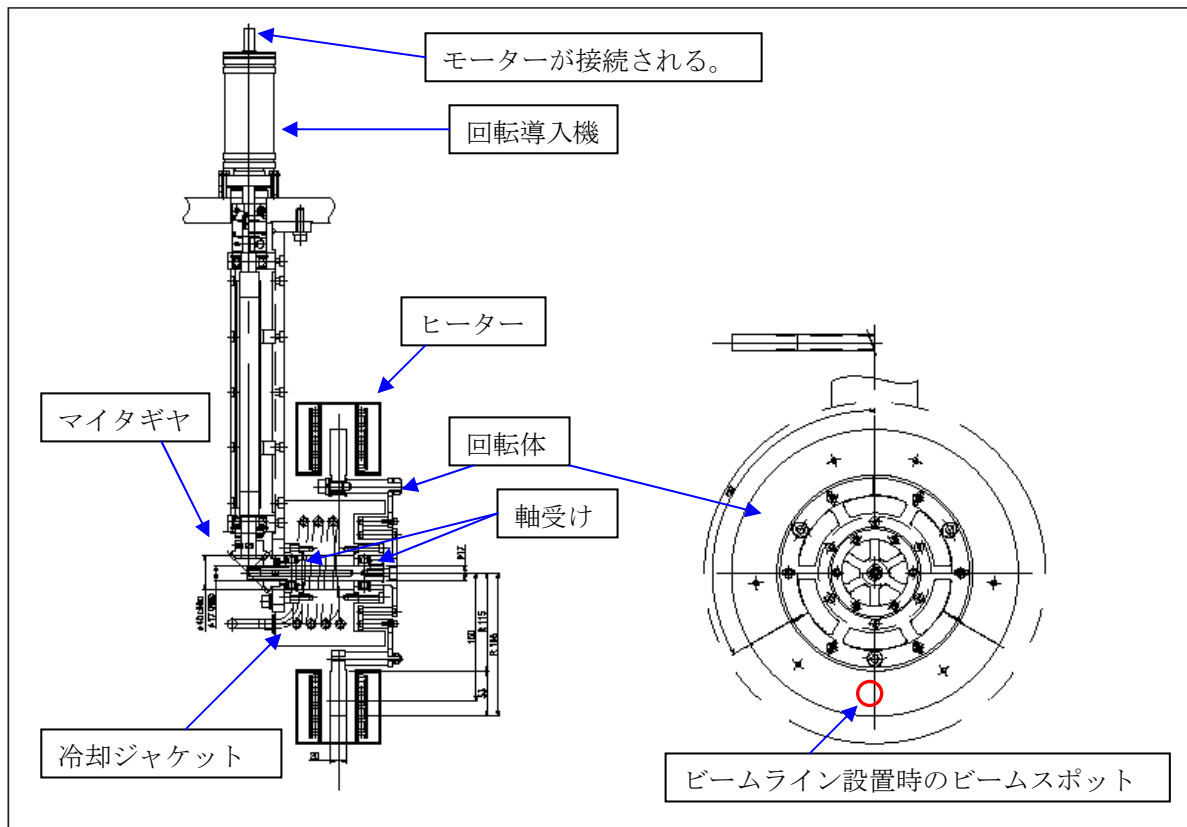


図 3. 回転標的概要図

3.1 回転体

黒鉛標的は熱不均衡によって発生する熱応力によって破損しにくくするために三分割構造とした。また、黒鉛標的から軸受に伝わる熱を小さくすることによって軸受の温度を低温化する必要がある。そのため、いくつかのシャフトおよびシャフトによって保持されたリングを何層かに組み合わせることによって物理的に軸受と黒鉛標的部の距離を遠くするようにした。軸受によって保持される軸シャフトから冷却ジャケットへの輻射と黒鉛標的から軸シャフトへの熱伝導のみを考慮した簡易な評価によると軸受温度は 300°C程度になる。それ以外の構成機器からの輻射まで考慮した時の温度は後述のように 170°C程度になる。軸シャフトの温度は中空にした軸シャフト内に熱電対を挿入することによって計測している。回転時には直接接触しないで輻射にて計測している。非接触熱電対は、回転させないで加熱し、接触型熱電対と比較する事によって校正している。回転体の材質としては高温部にはインコネル 600、温度が上昇しない部分には SUS304 を使用した。また、輻射で冷却する事を考え、黒体化処理 TiA コーティング[11]を施してある。これらの構成部品は温度差が大きくなるので、その熱応力に関しては注意深く評価する必要がある。

3.2 冷却ジャケット

回転体を保持する軸受は低温化することが望まれている。そのため軸受を保持する冷却ジャケットは銅内にステンレス配管を HIP (Hot Isostatic Press) 法によって埋め込んだ。回転体からの輻射光を反射させないで吸収するように回転体同様に黒体化処理を施している。冷却ジャケットの温度は常時、直接取り付けられた熱電対によって計測している。

3.3 回転導入機、モーター

大気から真空内への回転導入にはマグネティッククラッチ方式の回転導入機（キャノンアネルバ 954-7606H）[12]を採用している。本機器は永久磁石やステンレス材中心に構成されており、真空内の回転軸保持には二硫化モリブデンを潤滑剤とした軸受を使用している。大気側の回転軸保持に関しては汎用のグリースを使用している。耐放射線性能を考えると、汎用グリースを耐放射線性グリースに交換して使用する事を予定している。

モーターの耐放射線性を考えるとローターの位置検出器に通常の光エンコーダは使用できない。よって、レゾルバ方式の位置検出器を用いる。モーターは AC サーボモーターBNR II 006C（ワコー技研）[13]に減速比 5 の減速機を取り付けた汎用モーターを開発当初は使用するが、今後、ケーブル被覆やコネクタ類を PEEK 材などの耐放射線性材料に変更したモーターを製作して試験を行う予定である。回転停止や軸受の寿命を検出するためにモーター電流を計測している。

3.4 マイタギヤ

回転駆動を直角に変換する必要があるのでマイタギヤを使用している。軸受などは固体潤滑材をリテーナーに塗布するなどの方式を採ることが出来るが、マイタギヤの場合は潤滑材を導入することは非常に困難である。我々の回転標的の場合、定常回転に至った時には軸受の摩擦のみを考えれば良く、ほとんど負荷は無い。回転開始時および停止時のみ慣性体の加減速のためにマイタギヤ上に負荷がかかるが、最高速または停止状態に達する時間は長く取ることが出来るので、負荷は非常に小さく出来る。よって、SUS440C に焼入れを施したマイタギヤを無潤滑で使用している。マイタギヤの健全性に関しては、今後、運転前と運転後に表面観察を行うことによって確認する予定である。

3.5 ヒーター

ビームライン設置時には $\phi 25\text{mm}$ に 4kW 近くの熱が発生するが、コストや運転の容易さを考え、黒鉛標的の全面を加熱したシースヒーターによって囲み、750°Cまで加熱できるように設計した。消費電力を抑制するために 5 層リフレクタを設置した。6kW の電源によって黒鉛標的の両面から加熱している。約 2 時間で最高温に到達する。

3.6 制御系

ビームラインに設置する際には、MELSEC/NET 上の PLC にて制御を行う。現在の固定標的の制御系に含まれる真空容器やスクレーパーなどの温度計測も包括した制御系を組み上げる必要がある。しかしながら、現在は予算の都合上、KEYENCE のデータロガーNR-2000 にてデータを取り込み、温度や流量の閾値を超えた時にインターロック信号を発報し、ヒーター加熱を停止するようなシステムを組んでいる。モーターの回転に関しては電流を計測し、回転を停止させる予定である。

4 熱解析、構造解析

製作にあたって、黒鉛標的の温度、回転速度計算、ヒーター容量などの基本条件の導出は解析的に決定した。複雑な三次元モデルの輻射を考慮した有限要素法計算は非常に CPU パワーと時間を要する。よって効率的な設計を行うために概略構造が決定した後に、差分法を用いた数値解析によって熱解析を行った。精度は有限要素法に劣るが、実測値との比較によって補正を行うことが可能である。数値解析によって求められた温度分布を元に、構成要素の熱応力を有限要素法で求めた。

熱解析において各要素を必要に応じて半径方向、周方向に 10 分割程度して各要素間の熱伝導、輻射による

熱移動を行った。ヒーター加熱の場合には標的周囲はヒーターによって覆われており、ヒーター表面はリフレクタによってヒーターの消費電力を低減するような構造をしている。一方で、ビームライン上では 750℃ から放射された光がコリメーターによって反射されて戻ってくるために熱の収支が異なってくる。ビームライン上での温度分布は計算によってのみ評価され得るが、試験機での実験結果と計算結果を比較する事で、精度を高めることが出来ると考えている。熱伝導を抑制するような構造を採用するため、特に高温部では輻射の影響が非常に大きく、回転体要素間の輻射による熱移動、回転要素から冷却ジャケットへの熱移動を評価する際に形態係数は注意深く評価した。

構造解析においては、有限要素法コード ANSYS を用いて、熱解析で用いた温度差から熱応力を評価している。

5 真空試験、回転試験、加熱試験

5.1 真空試験

ヘリウムリーク試験およびビルドアップ試験にて真空性能を確認した。ヘリウムリーク試験ではリーク量が $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (検出限度) 以下であることを確認した。ビルドアップ試験ではチェンバおよび構成物からの脱ガス量が $6 \times 10^{-7} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ 以下であることを確認した。加熱試験時には 300l/s のターボ分子ポンプを直接設置しており、常温時で $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ の真空度、750℃にて $2 \times 10^{-4} \text{Pa}$ の真空度を達成している。

5.2 加熱試験

ヒーターによって加熱試験を行った。初めに各構成要素の温度分布を計測するために回転体を停止させたまま熱電対を取り付けて温度計測を行った。計算に近い温度分布が得られた。

表 1.

	① 標的	②外輪	③内輪	④軸端	⑤軸受	⑥冷却	⑦ヒータ
計算	752	324	213	140	130	25	830
実測	746	340	230	155	130	30	840
目標	750				300 以下	30	850

この結果を元に、輻射温度計などの輻射率を決定した。

5.3 回転試験

次に回転試験を行った。大気中にて回転試験を行い、実際に目標としている回転速度となっているかを回転速度計を用いて計測した。5r.p.m.、50r.p.m.、500r.p.m.にて回転できることを確認した。引き続き真空内での回転試験を行い、最後に最高温まで加熱した状態で 5r.p.m.、50r.p.m.、500r.p.m.にて回転できることを確認した。また、回転する事によって輻射温度計の温度が変化しないことを確認した。すなわちヒーターによって回転体が均一に加熱されていることを確認できた。

6 今後の予定

今後、製作した試作機を用いて軸受の寿命評価試験を実施していく。また、平成 24 年度の実際にビームラインでの運転を開始するためには、ビームラインから 2.4m 離れた位置から遮蔽体越しに回転導入を行う必要

がある。そのための試験機も平成 22 年度に製作する予定である。また、運転後は高度に放射化するためにホットセル内で遠隔操作によって交換可能であることを確認する遠隔交換コミッショニングも実施する必要がある。これらは平成 23 年度に実施予定である。ビームラインへの導入当初は、固定標的との併用運転にてビーム運転を行う予定である。

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] "Present status of construction for the muon target in J-PARC", S. Makimura et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A:600 (2009) 146-149
- [6] Replacement of the Muon Components in the Remote Handling Room, S. Makimura et al., KEK-MSL Report 2007, (2007) p.12
- [7] H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura, Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code, J. Nucl. Sci. Technol. 39 (2002) 1142.
- [8] N.Kawamura, KEK-MSL Report 2000 (2000)13
- [9] <http://www.raydent.co.jp/>
- [10] <http://www.jtekt.co.jp/products/bearing.html>
- [11] http://www.nippon-itf.co.jp/products/pvd_ti.html
- [12] <http://www.canon-anelvatx.co.jp/>
- [13] <http://www.wacogiken.jp/>