

平成22年 5月31日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18204026

研究課題名（和文） 超耐放射線電磁石を用いた超大強度二次ビームラインの設計

研究課題名（英文） Design Study of High Intensity Beam Lines using Radiation Resistant Magnets

研究代表者

高崎 稔 (TAKASAKI MINORU)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：70044782

研究成果の概要（和文）：大強度加速器の標的装置近傍においては、ビームライン機器の内、真空チェンバーがビームの最も直近に設置されるがゆえに、その受ける熱量、放射線は莫大なものとなり、技術的にもっとも設計困難な要素のひとつとなっている。そこで発想を大転換し巨大な真空チェンバー中で磁石を運転する事により、真空ダクトそのものをビーム付近から完全に廃する事を着想した。これを検証するため、真空中で大型超耐放射線電磁石を運転しうること、実物大の模型を準備して実証した。一連の成果は J-PARC ハドロン実験施設において実用機的设计、施工、運用に生かされた。さらに 2009 年に開催された電磁石技術国際会議において口頭発表に選ばれた。

研究成果の概要（英文）：It is very difficult to design the vacuum ducts which are used in the magnets near the production target of the high power beam accelerator such as J-PARC. In order to eliminate vacuum ducts from magnet gaps, we developed the magnet system which enabled us to operate large scale radiation resistant magnets in vacuum. The proto-type of the system was constructed and tested by use of the real size beam line magnets. After fixing several problems, we found that the system could work reasonably. This technical result was immediately employed at the real construction of the beam lines near the target station of J-PARC Hadron Facility. The result was also selected the oral presentation at 20th international conference on magnet technology (MT20).

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2006年度 | 11,400,000 | 3,420,000 | 14,820,000 |
| 2007年度 | 13,900,000 | 4,170,000 | 18,070,000 |
| 2008年度 | 6,100,000 | 1,830,000 | 7,930,000 |
| 2009年度 | 5,500,000 | 1,650,000 | 7,150,000 |
| 総計 | 36,900,000 | 11,070,000 | 47,970,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙船・宇宙物理

キーワード：大強度、耐放射線、速着脱、耐熱、K中間子工場、J-PARC、MI ケーブル

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー加速器の利用方法としては、加速されたビームを直接実験に用いるほか、白金等の金属の標的に照射し、核反応を通じ

て、 π 中間子、K中間子、反陽子といった通常われわれの世界には希にしか存在しない粒子（これらを二次粒子という。また加速器から直接得られる高エネルギー粒子の事

を一次粒子という。)を大量に生成して、これらを用いて実験が行なわれている。

ビーム強度が1 MWにも達するような大強度加速器では、そのパワーが従来の加速器施設の10倍から100倍の二次粒子が得られるが、その分二次粒子生成標的の近傍で発生する放射線レベルも高くなり、従来の電磁石等が使えなくなってきた。そこで我々は、これまでに、完全に無機物のみにより構成される超耐放射線電磁石を完成させ、この問題を解決してきた。

これに加えて、メガワット級のビームパワーからくる莫大な熱の問題がある。特に二次粒子生成標的とその周辺に設置される装置群は、必ず標的に解決される数百キロワットの熱エネルギーの影響下に置かれる事となる。良好な熱伝導を仮定するなど、極めて楽観的な仮定を採用したとしても、標的部及びその下流部に設置される装置群は、積極的な除熱を行わない限り、たちまち使用される金属の融点を越えた温度に達する。それゆえ、これらの装置群は、耐放射線性を有するのみならず、耐熱性あるいは良好な除熱性(水冷などの)機能を有しなくてはならない。我々が完成した超耐放射線電磁石は、素材がすべて無機物であるため、この耐熱性と言う点でも極めて優れた特性を有しており、二次粒子生成標的の下流での使用に関しても殆ど問題がない。

しかしながら、ビームを誘導するために必要不可欠な要素である真空ダクトは、ビームに最も近く設置される機器であり、ビームからの放射線、熱の影響を最も深刻に受け止める。それゆえ、この真空ダクトを水冷するとしてもかなりの量の冷却水をビームの間近に循環させなくてはならない。このことは冷却水中に莫大な量のトリチウムを発生させる。また高温になった真空ダクトと冷却水の相互作用で突沸が起こりやすく、システムとして不安定であり、かつ漏水等が起こりやすい。しかしこの問題は真空ダクトをビームの間近に設置しなくてはならないことから、避けて通ることが出来ず、研究開始当時においては非常に複雑かつ堅牢な水冷システムを構築してこの問題に対処している状況であった。

2. 研究の目的

真空ダクトの問題を考察するに、これは真空ダクトが磁石の内側に存在するから発生する問題である。ならばここで発想を大逆転させ、真空ダクトを超巨大化し、その中に磁石を全部入れてしまえばどうか?このように処置できれば、問題となる真空ダクトそのものがビーム近傍から排除できるので、ダクトの冷却という困難は原理的に存在しなくなるはずである。それに加えて、真空ダクトのリモート着脱という技術的な困難も回避出来ることになる。

真空中に磁石などを入れる場合に問題となるのがアウトガスの問題であるが、我々がこれまで開発してきた超耐放射線電磁石は、完全に無機物のみから出来ており、真空中に

入れた場合に置いても、有機物質から発生するアウトガスなどの問題は発生せず、真空中の運転に関しても、原理的な問題は無いはずである。

そうは言うものの、真空中で運転すべき電磁石は数十トンの大きさのものであり、かつ真空中には、数千アンペアの電流を導出し、かつ毎分数百リットルの冷却水をも導入しなくてはならない。しかも磁石は万が一の故障の場合には遠隔にて交換可能でなくてはならない。このようなシステムは、現実問題として設計、製作可能なのであるだろうか?それに加えてビームモニター、コリメータ等も真空中で運転しなくてはならず、かつ大気中の運転では当然に期待できる各種機器の表面からの空気対流による熱除去が全く期待できないなど、従来の常識が通用しないシステム構築が必要となる。

本研究の目的は、二次粒子生成標的の直下流で運転するビームラインシステムとして、真空中で超耐放射線(=完全無機)電磁石等を運転するシステムを設計し、かつその実物大模型を試作し、これらが「システム」として動作する事を実証することであった。

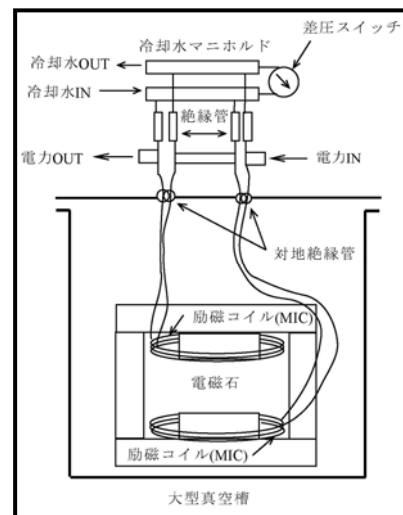
しかもこの研究は、当時建設中であったJ-PARC 加速器の標的部に採用することを目標としたため、実用機開発を前提にした開発研究となった。

3. 研究の方法

研究は次のような方法、手順で行われた。

初年度

(1)真空中での超耐放射線電磁石(完全無機電磁石)の運転のための実証装置を、既存の小真空槽並びにプロトタイプ電磁石を用いて構築し、実施した。実証装置の概念図は以下に記す通りである。



(2)大強度二次ビームラインの最上流部(生成標的の直下流部分)の大型真空槽の設計を、上記試運転の結果を反映させながら行った。

(3)同時進行で、大強度二次ビームラインの最上流部の大型真空システム中で使用する超耐放射線電磁石(完全無機電磁石)の設計

を行った。

(4)超耐放射線電磁石(完全無機電磁石)は、標的直下流に設置するC型双極(D)電磁石とそのもうひとつ下流に設置する四極(Q)電磁石の二種について行った。

(5)大型真空槽への励磁電流(~3000A)並びに冷却水(~200リットル毎分)の導入装置に関する設計、試作に着手した。

(6)大型真空槽内の電磁石等のメンテナンス方式に関する検討を行った。

(7)大型真空槽内の電磁石等のリモートアライメント方式に関する検討を行った。

二年度

初年度の成果を参照しつつ、本番に近いシステムを構築し、総合試運転を実施した。そのために、本番に近い真空チェンバーを新たに製作し、試験の舞台とした。またこの年に(8)システムとしての大強度二次ビームラインの最上流部(標的直下流部)の設計を完了した。

(9)大型真空槽への励磁電流(~3000A)並びに冷却水(~200リットル毎分)の導入装置に関する設計、試作、試験を完了し、実用機製作のめどを得た。

三年度

初年度、二年度の成果を参照しつつ、次のことを行った。

(10)前パーツを実用機グレードの物に装換し、総合試運転を続行した。

(11)総合試運転の結果を参考に、システム全体にわたる手直しを実施し、必要に応じて追加の運転試験を実施した。

最終年度

この年度は、前年度に引き続き、いくつかの追加的試運転を実施し、研究成果のとりまとめをおこなった。

4. 研究成果

研究は比較的順調に推移したが、途中でいくつかの技術的な困難を解決しなくてはならなかった。以下にそれを箇条書きに記す。

(1)電磁石鉄芯の表面処理。

電磁石の鉄芯は文字通り「鉄」でできている。通常の大気中で運転する電磁石は、錆止めを兼ねて表面を有機塗料(いわゆるペンキというもの)や、無機の亜鉛塗料(ジンクリッチペイント、海上の橋脚などの塗装に用いられるもの)を使って被覆塗装されている。しかしこの塗装は鉄表面に亜鉛のポーラス状の塗膜を形成するので、脱ガスの観点から見て真空中での運転には不向きである。検討の結果、真空中で運転される電磁石鉄芯の表面処理にはニッケルメッキを採用することとなった。電気メッキと無電気メッキの双方のサンプルを作って脱ガス等の試験を行ったが、大きな差異は見つからなかった。

(2)真空中で水冷できない部分の温度管理

真空中で用いられる電磁石コイルは、いわゆるミネラル・インシュレーション(MI)ケーブルである。水漏れのリスクを極力下げ

るという観点から、継ぎ目なしステンレスチューブを用いた間接水冷方式を採用している。その結果、MIケーブル以外の通電部分の内、絶縁されていない部分の水冷が不十分になる場所がでてきた。典型的には上下コイルをつなぐバスバーなどである。1000アンペア程度の電流を流すため、たとえ太めのバスバーを採用したとしても、オーム発熱からの熱量が無視できず、表面温度が250度に迫る部分が出てきた。銅の強度などの観点から、無ビーム時の最高温度は200程度に押さえるべきことが判っている。種々の検討並びに試験の結果、非水冷部分の表面にカーボンブラックによる黒化処理を施すことにより輻射による放熱を促進でき、最高温度を20~30度下げられることが判った。さらに無定型カーボン粉末を用いることにより、脱ガスによる真空度の悪化が比較的少なく、実用上問題がないことも判明した。

(3)磁場測定の大困難

原理的に真空中の励磁特性と、大気中での励磁特性に違いがあってはならない。ところが最初に真空中で発生する磁場を、電流の関数として測定した時に、約1%ほど磁場の絶対値が、大気中での測定値に比べて低いという結果が出た。測定はホール素子を用いて行われたので、素子の温度が真空中で上がったために、低めの磁場を示すホール電圧となった(ホール効果は負の音頭係数を持つ。)可能性と、電流がわずかにグラウンドに対してリークしている可能性の二つの原因が考えられた。脱ガスなどにより、部分的に真空が悪化した場合に、ガイスラー管の放電に似た現象から対地絶縁が悪化する可能性は、本研究を開始する時から、最も危険な現象として予想されていたことである。しかしながら電源の接地検出器の設定電流値を10アンペア程度に下げても接地が検出されないことから、電流リークの可能性は低く、ホール素子の局所温度上昇である可能性が高いと推定されたが、決定的な証拠とはなり得なかった。そこでベローズチューブを介して磁極中央に大気圧の測定箱を設置し、その中でホール素子を運転することにした。その結果、検出された磁場の強さは正確に大気中での運転の時の値を再現した。さらに磁場をNMRでも測定し、ホール素子での測定を追認するデータを得た。

以上の結果、大型電磁石を真空中で運転するにあたっての技術的、実際的な問題が解決された。そこで試験は長期安定運転の試験に移行し、それに1年を費やした後、実機の設計、製作に着手した。実機においては磁石本体のみならず、磁石上部の放射線遮蔽体も真空中に設置する事から、遮蔽体の表面処理などに工夫を要したが、本研究の一環として現実的な解が見つかった。設置された実機を用いた加速器からのビーム運転に伴う二次粒子の分離、輸送にも成功し、ビームライン要素として実際に機能することを実証した。

このようにして、本研究は成功裏に収束した。参考のため、以下に、いくつかの研究時の写真を掲載する。

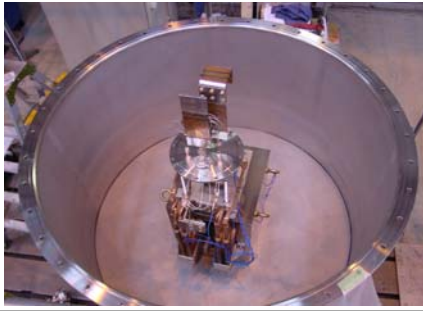


図1, 真空チェンバー中に設置された試験用小型電磁石

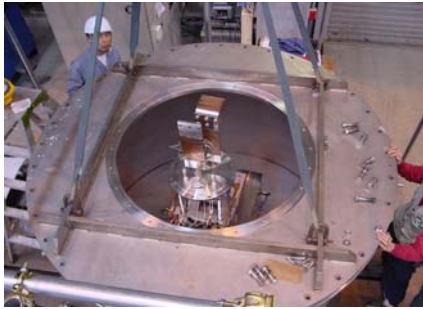


図2, 中間蓋の設置

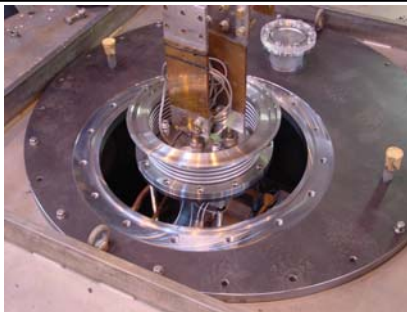


図3, 磁石上面フランジと各種端末の設置

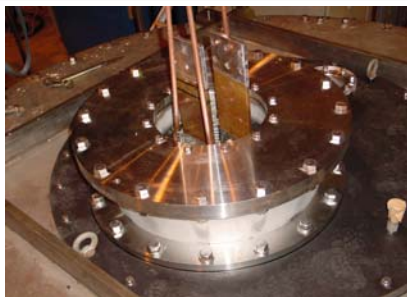


図4, 準備完了

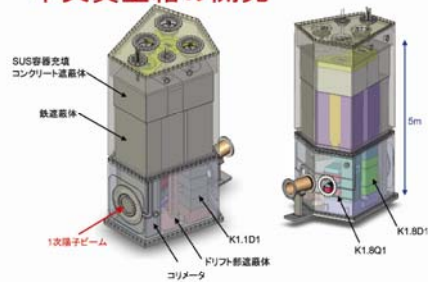


図5, 配線、配管も完了し、試運転中

上記の研究用の真空槽は、超伝導電磁石の開発に用いたものを再使用した。ただし上蓋、端末などは本研究のために徹底的な改装、改造が行われた。試験時に用いられた電磁石も既存品を部品レベルまで解体し、真空中での運転用に改造して用いた。

このようにして得られた成果をもとに、実用機的设计がおこなわれた。以下は実機のご概念図並びに製作時の写真である。

中央真空箱の開発



Plug-in modules

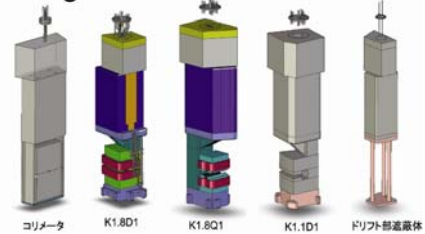


図6, 最終的に設計された J-PARC ハドロン実験施設用大型真空槽と内部に設置される磁石群



図7, 製作された大型真空槽の実機。これが J-PARC に設置された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① K.H. Tanaka, E. Hirose, H. Takahashi, K. Agari, M. Ieiri, Y. Katoh, A. Kiyomichi, M. Minakawa, R. Muto, M. Naruki, H. Noumi, Y. Sato, S. Sawada, Y. Suzuki, M. Takasaki, A. Toyoda, H. Watanabe, Y. Yamanoi, M. Iio, K. Kato, T. Ozawa, M. Saijyo, Y. Saitoh, H. Satoh, K. Yahata, T. Birumachi, Radiation-Resistant Magnets for Hadron Experimental Hall of J-PARC, Accepted for publication in IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 査読有
- ② H. Takahashi, K. Agari, E. Hirose, M. Ieiri, M. Iio, Y. Katoh, A. Kiyomichi, M. Minakawa, R. Muto, M. Naruki, H. Noumi, Y. Sato, S. Sawada, Y. Suzuki, M. Takasaki, K. H. Tanaka, A. Toyoda, H. Watanabe, Y. Yamanoi, K. Ogata, M. Saijo, Y. Saitoh, K. Katoh, K. Yahata Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnets for Hadron Target Station at J-PARC, Accepted for publication in IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 査読有
- ③ R. Muto, Y. Arakaki, K. Fan, K. Ishii, A. Kiyomichi, H. Kobayashi, H. Matsumoto, S. Murasugi, H. Nakagawa, J. Odagiri, K. Okamura, I. Sakai, H. Sato, S. Sawada, Y. Shirakabe, K.H. Tanaka, S. Tokumoto, M. Tomizawa, E. Yanaoka, Construction and operation of the magnetic septa for the slow beam, extraction from the J-PARC 50GeV Proton Synchrotron Accepted for publication in IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 査読有
- ④ K.H. Tanaka, Hadron Experimental Hall. Nuclear Physics News, volume19, issue 4, (December 2009), pp. 15 - 17. 査読無
- ⑤ K.H. Tanaka, Construction and Status of the Hadron Experimental Hall, Nuclear Physics A 835 (2010) 81-87, 査読無
- ⑥ Shinya Sawada, J-PARC Facility, Nuclear Physics A 834 (2010) 701c - 706c, 査読無
- ⑦ K.H. Tanaka, E. Hirose, H. Takahashi, K. Agari, M. Ieiri, Y. Katoh, M. Minakawa, H. Noumi, Y. Sato, Y. Suzuki, M. Takasaki, A. Toyoda, H. Watanabe, Y. Yamanoi, T. Birumachi, K. Kato, T. Ozawa, M. Saijyo, Y. Saitoh, M. Tada and K. Yahata, Radiation-Resistant Magnets for J-PARC, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.18 No.2, pp.244-247, 2008, 査読有
- ⑧ H. Takahashi, K. Agari, E. Hirose, M. Ieiri, M. Iio, Y. Katoh, M. Minakawa, R. Muto, M. Naruki, H. Noumi, Y. Sato,

- S. Sawada, Y. Suzuki, M. Takasaki, K. H. Tanaka, A. Toyoda, H. Watanabe, Y. Yamanoi, M. Saijo, Y. Saitoh, K. Katoh, and K. Yahata, Development of Indirect-Cooling Radiation-Resistant Magnets, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.18 No.2, pp.322-325, 2008, 査読有
- ⑨ E. Hirose, K. H. Tanaka, H. Takahashi, K. Agari, M. Ieiri, Y. Katoh, A. Kiyomichi, M. Minakawa, R. Muto, M. Naruki, H. Noumi, Y. Sato, Y. Suzuki, M. Takasaki, A. Toyoda, Y. Yamada, Y. Yamanoi, H. Watanabe, H. Tanaka, K. Kato, N. Saitoh, and M. Saijyo, Shield Penetrating Water Cooled Bus Ducts for Radiation Resistant Magnets at J-PARC, IEEE Transactions on applied Superconductivity, vol.18, No.2, p1439-p1442, 2008, 査読有
 - ⑩ Shinya Sawada Status and plan of J-PARC, Journal of Phys, G35 (2008) 104029, 6pp. 査読有
 - ⑪ Masaharu Ieiri, Michifumi Minakawa, Keizo Agari, Yohji Katoh, Erina Hirose, Hiroyuki Noumi, Yoshinori Sato, Yoshihiro Suzuki, Hitoshi Takahashi, Minoru Takasaki, Kazuhiro Tanaka, Akihisa Toyoda, Yutaka Yamanoi, Hiroaki Watanabe, Electrostatic separator for K1.8 beam line at J-PARC Nuclear Instruments and Methods in Physics research B266(2008) p4205-p4208, 査読有

[学会発表] (計 14 件)

(1) 国際学会、国際会議 (海外)、8 件

- ① Tanaka Kazuhiro, The first beam from the J-PARC 50 GeV-PS, Oral Presentation at Varenna2009: 12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna (Italy), Villa Monastero, June 15-19, 2009.
- ② Tanaka Kazuhiro, The first beam of the J-PARC hadron experimental hall, Oral presentation at 8th European Research Conference on "Electromagnetic Interactions with Nucleons and Nuclei" (EINN 2009), 27 September - 02 October, 2009, Milos Conference Center George Eliopoulos, Milos Island, Greece
- ③ Tanaka Kazuhiro, J-PARC Facility, Oral presentation at US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC, October 11 - 12, 2009, Hilton Waikoloa Village, Hawaii's Big Island, U.S.A. (日米共同セミナー「JLab と J-PARC における中間子生成反応」)
- ④ Takahashi Hitoshi, Indirectly Cooled Radiation-Resistant Magnets for Hadron Target Station at J-PARC, Oral presentation at MT-21, the 21st

International Conference on Magnet Technology, Held in Hefei, Anhui, China, October 18 to 23, 2009,

- ⑤ Tanaka Kazuhiro, Radiation-Resistant Magnets for Hadron Experimental Hall of J-PARC, Oral presentation at MT-21, the 21st International Conference on Magnet Technology, Held in Hefei, Anhui, China, October 18 to 23, 2009,
- ⑥ Kazuhiro Tanaka, Status of Hadron Experimental Facility and Neutrino Facility of J-PARC 50 GeV-PS, Asia Science Seminar on Frontier Science at High-Intensity Proton Accelerators, October 19 - 25, 2008, Beijing, China
- ⑦ Shinya Sawada, Hadron Experiments at J-PARC, Asia Science Seminar on Frontier Science at High-Intensity Proton Accelerators, October 19 - 25, 2008, Beijing, China
- ⑧ Masaharu Ieiri, Electrostatic Separator for K1.8 beam line at J-PARC, XVth International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications, June 24-29, 2007, Deauville, France.

(2) 国内学会、国際会議 (国内)、6 件

- ⑨ Tanaka Kazuhiro, Construction and Status of the Hadron Experimental Hall, Oral presentation at Hyp-X: 10th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, September 14th - 18th, 2009, "RICOTTI" in Tokai, Ibaraki, Japan
- ⑩ 高橋 仁, J-PARC ハドロンターゲットステーションにおける大型真空箱"ペンタゴン", 第 6 回日本加速器学会年会、2009/8/6、日本原子力研究開発機構、第 6 回日本加速器学会年会報告集 pp. 73-75
- ⑪ 上利 恵三, J-PARC ハドロンビームダンプの設計・開発(3)、第 6 回日本加速器学会年会、2009/8/6、日本原子力研究開発機構、第 6 回日本加速器学会年会報告集 pp. 70-72
- ⑫ 山野井 豊, J-PARC ハドロンビームライン真空窓の開発、第 6 回日本加速器学会年会、2009/8/6、日本原子力研究開発機構、第 6 回日本加速器学会年会報告集 pp. 272-274
- ⑬ 上利 恵三, J-PARC ハドロンビームダンプの設計・開発、第 5 回日本加速器学会年会兼第 33 回リニアック技術研究会、2008 年 8 月 5 日、東広島市中央公民館
- ⑭ 高橋 仁, J-PARC ハドロン実験施設におけるビームコリメータ、第 5 回日本加速器学会年会兼第 33 回リニアック技術研究会、2008 年 8 月 6 日、東広島市中央公民館

[図書] (計 1 件)

- ① 田中万博、里嘉典、青木香苗、上利恵三、飯尾雅実、家入正治、加藤洋二、澤田真也、鈴木善尋、高橋仁、高橋俊行、高崎稔、豊

田晃久、野海博之、広瀬恵理奈、皆川道文、山野井豊、渡辺丈晃、高エネルギー加速器研究機構、J-PARC 原子核素粒子実験施設技術設計報告書(ハドロンビームラインサブグループ 第 3 次中間報告書)、KEK-Internal 2007-1, 2007 年, 301 ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高崎 稔 (TAKASAKI MINORU)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号: 70044782

(2) 研究分担者

田中 万博 (TANAKA KAZUHIRO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号: 90171743

上利 恵三 (AGARI KEIZO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准技師
研究者番号: 30391741

鈴木 善尋 (SUZUKI YOSHIHIRO)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・前任技師
研究者番号: 90391755

高橋 仁 (TAKAHASI HITOSHI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号: 60353372

広瀬 恵理奈 (HIROSE ERINA)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師
研究者番号: 90391763

渡辺 丈晃 (WATANABE HIROAKI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号: 00415043

山野井 豊 (YAMANOI YUTAKA)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・前任技師
研究者番号: 90391739

加藤 洋二 (KATOH YOHIJI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師
研究者番号: 90391740

家入 正治 (IEIRI MASAHARU)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号: 50192472

(H21: 連携研究者)

皆川 道文 (MINAKAWA MICHIFUMI)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師補
研究者番号: 50391743

(H21: 連携研究者)

(3) 連携研究者

澤田 真也 (SAWADA SHINYA)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号: 70311123