JAEA-Technology 2008-055



タンデム加速器高電圧端子内における ビーム通過率の改善のための 再アライメント及び電荷分析電磁石コイルの更新

Improvement the Transmission of Ion Beams and Replacement of Charge Analysis Electromagnet Coil at Tandem Accelerator

> 石崎 暢洋 松田 誠 花島 進 中村 暢彦 沓掛 健一 乙川 義憲 遊津 拓洋

Nobuhiro ISHIZAKI, Makoto MATSUDA, Susumu HANASHIMA, Masahiko NAKAMURA Kenichi KUTSUKAKE, Yoshinori OTOKAWA and Takuhiro ASOZU

> 東海研究開発センター 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center

P

gency 日本原子力研究開発機構

August 2008 Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JAEA-Technology 2008-055

タンデム加速器高電圧端子内におけるビーム通過率の改善のための 再アライメント及び電荷分析電磁石コイルの更新

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

石崎 暢洋、松田 誠、花島 進、中村 暢彦、沓掛 健一、乙川 義憲、遊津 拓洋

(2008年5月15日受理)

原子力科学研究所東海タンデム加速器では、高経年化対策の一環として、高電圧端子上の頂点 に設置された 180 度偏向電荷分析電磁石の中のコイルを更新した。その際、重さ 7t の電磁石を 高電圧端子上より一旦取り外した。これにより、高電圧端子内に多数設置されているイオン光学 系機器の位置を上部から直接測定することが可能となり、加速器設置以後初めて、これらの機器 の精密なアライメントを実施することができた。

高電圧端子の揺れ止めの方法を考案し、さらに、アライメントに使用する標的を光学系機器に 合わせて製作することにより、機器の位置を精密に測定した。アライメント基準軸を新たに確立 し、機器の軸ずれを測定した結果、ビーム光学上の許容範囲を超える位置ずれや傾きのある機器 があることが判明した。これらをアライメント基準軸上に再整列することにより、ビームの通過 率が向上し、安定に加速できるイオンビーム電流を従来の2~3倍に増強することに成功した。

一方、更新した電磁石のコイルは、熱絶縁を施すことにより磁場安定度を向上させた。さらに、 静電シールドや電源配線接続を強化することにより、高電圧放電による電源のトラブルを解消した。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

JAEA-Technology 2008-055

Improvement the Transmission of Ion Beams and Replacement of Charge Analysis Electromagnet Coil at Tandem Accelerator

Nobuhiro ISHIZAKI, Makoto MATSUDA, Susumu HANASHIMA, Masahiko NAKAMURA Kenichi KUTSUKAKE, Yoshinori OTOKAWA and Takuhiro ASOZU

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator, Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 15, 2008)

The JAEA-Tokai tandem accelerator has been operated for 25 years. We have replaced an aged coil inside the 180-degree charge-analysis electromagnet placed at the top of the high-voltage terminal. At this time, we have aligned all optical devices in the terminal by looking down from the top of the terminal. We have measured these positions precisely by suppressing the quake of the terminal and making crosshair targets for individual devices. It was found that some devices were tilted and shifted from the standard beam axis, out of the tolerance level on the beam optics. By aligning these devices, we have improved the transmission of ion beams and increased beam currents, 2-3 times as much as those before alignment, with stable operation.

We have improved the stability of magnetic field of the 180-degree magnet by covering coils with thermal insulation. We also fixed the problem induced by high-voltage discharge by putting electric shields over the coil and tightening the connection of wiring.

Keywords: Tandem Accelerator, Beam Line Optics, Beam Line Alignment

目 次

1. 緒言	1
2. タンデム加速器の概要	2
3. ターミナルビームライン機器アライメント	4
3. 1ターミナルビームライン機器配置	4
3.2アライメント基準の設定	5
3.3ビームライン機器のアライメント確認	6
3. 4ビームライン機器のアライメント	12
4. ビーム通過率試験	13
4. 1水素イオンビーム加速試験	13
4. 2硫黄イオンビーム試験	14
4. 3加速イオンの違いによるビーム通過率	15
5. 電荷分析電磁石 (BM TL-1) コイルの更新	16
5. 1 電磁石磁場の決定	16
5.2コイルの設計	17
5. 3 BM TL-1 の分解・計測	18
5. 4 BM TL-1 の組立・据付	20
5. 5 BM TL-1 の試験運転	21
6. 考察	23
7. まとめ	23
参考文献	24

Contents

1. 緒 言

日本原子力研究開発機構(JAEA)・原子力科学研究所の東海タンデム加速器では、高強度のイ オンビーム加速及び安定運転化を目指して 2007 年に大整備を計画し実施した。

タンデム加速器の高電圧端子(ターミナル)のビームライン上には、負イオン源又はターミナ ルイオン源から入射加速された各種イオンビームを高エネルギー側の加速管へ導くためのビーム ライン光学機器、電荷分析電磁石及びモニタ機器類が設置されている。

電荷分析電磁石は設置から 30 年が経過し、コイルを構成するホローコンダクター(電線中心 部が冷却水用の管となっているもの)の絶縁劣化や管内外の腐食が懸念されることから高経年化 対策としてコイルの更新を行った。コイルを更新するにあたっては電荷分析電磁石の分解及び組 立てが必要となるため、この電磁石を加速器タンク外に取り出して作業を行った。

ターミナルのビームラインについては光学機器のアライメント検査、再アライメントの必要性 が認識されていたが、大がかりなビームライン分解をしないかぎり直接的な測定ができないこと から十分な確度で行われてはいなかった。今回、コイル更新作業のため一時取り外した電荷分析 電磁石のあったターミナル最上部にスペースができ直接的な計測ができるようになり、この機会 を利用しアライメント作業を行った。

電荷分析電磁石取外し後、ターミナルのビームライン上の機器についてビームライン軸とのず れを精密に測定することができた。その結果、最大で約 5mm 位置がずれている機器があること が分かった。このずれはビーム光学上無視できない値である。これらの機器を基準としたビーム ライン軸上に合うよう調整を行った。定期整備終了後タンデム加速器でイオンビームを加速しビ ーム通過率を測定したところ、大幅なビーム通過率の改善がみられた。また、運転時に高エネル ギー側加速管へイオンビームを導く際のターミナル光学機器の調整において、操作性、運転の容 易さが大幅に改善された。

本報告書は、これらのターミナル光学機器のアライメント作業及び電磁石コイルの更新につい て取りまとめたものである。

2. タンデム加速器の概要

原子力科学研究所のタンデム加速器(米国 NEC 製ペレトロン 20UR)は世界有数の大型静電加速器であり、重イオンによる原子核物理、核化学、物性物理の基礎研究を目的に設置され、25年間安定に運転を継続している。Fig.2.1 にタンデム加速器棟を南側から見た断面図を示す。タンデム加速器棟は地上45mのタワーを中心に、地上8階地下2階の構造であり加速器本体は3階から8階までを貫く加速器圧力容器内に設置されている。



Fig.2.1 タンデム加速器棟断面図(南側から)

Fig.2.2 にタンデム加速器の概略(模式)図を示す。負イオン源からは 1 価の負イオンビームを 発生させ、質量分析電磁石で質量分析され負イオン加速管へ入射する。高電圧端子(ターミナ ル)は正の高電圧となるため負のイオンビームはターミナルへ向かって加速される。ターミナル の入口には電子ストリッパーがあり、外殻電子がはぎとられることにより多価の正イオンへと変 換される。電荷分析電磁石で必要とされる電荷のイオンビームを 180 度偏向し、地上電位へ向け 再び加速することで高いエネルギーのイオンビームを得る。加速されたイオンビームはエネルギ ー分析電磁石を経て実験装置等へ導かれる。定常運転時、加速器圧力容器には電気絶縁性の高い 六フッ化硫黄ガス(SF6)が 0.55MPa(ABS)の圧力で充てんされており、高電圧による放電を 防いでいる。



Fig.2.2 タンデム加速器の概略(模式)図

3. ターミナルビームライン機器アライメント

これまでの運転でターミナルにおいてのイオンビームの通過率が低く、特に水素イオンビーム 加速時にはビーム光学機器の可変範囲を超えてしまうためビーム軌道の修正が完全でなく、前後 の光学機器によって補正しないとビームが通過せず、軸をずれたビームの影響で加速電場に歪み を生じるビームローディングが起きて 0.2µA以上の加速は非常に困難なものであった。そのた め、ターミナルのビームラインについてはビーム光学機器のアライメント検査、再アライメント の必要性が認識されていた。今回の整備で取り外した BM TL-1のスペースを利用しターミナル のビーム光学機器を直接精密に測定した。

3.1 ターミナルビームライン機器配置

Fig.3.1.1 にターミナルビームライン機器の配置図を示す。負イオン加速管で片道分の加速を受けたイオンビームは低エネルギー(Low Energy: LE)側の直径 4.8mm 穴のアパーチャ



(Variable Aperture: VA TL-1)を通り、炭素薄膜による電子ストリッパー (Foil Stripper: FS TL-1)を通過することで正の多価イオンへ変換される。

ターミナルの最頂部には電荷分析電磁石(Bending Magnet: BM TL-1)があり、正の多価イ オンとなったビームは、この電磁石の磁場により 180 度偏向される。この磁場は非相対性理論 では次式により近似的に求められる。

$B = \frac{0.144 \sqrt{M \cdot E}}{q \cdot \rho}$	
ただし、	
B: 電磁石の磁場	[T]
M : イオンの質量数	[amu]
E : イオンビームのエネルギー	[MeV]
q : イオンビームの電荷(1 電荷 ρ : 電磁石の曲率半径	あたり 1.60217653×10 ⁻¹⁹ C) [m]

BM TL-1 の磁場をこの計算により求めた値に設定することで、必要とする電荷のイオンビー ムを高エネルギー(High Energy: HE) 側へ導くことができる。

BM TL-1の前後には静電偏向器(Electrostatic Steerer: ES TL-1, ES TH-1)があり、ビー ムの軌道の微調整に使用している。静電四重極レンズ(Electrostatic Quadrupole Lens: EQ TL-1, EQ TH-1, EQ TH-2)は光でのレンズ作用と同様、広がったイオンビームを集束させるた めの機器であり、これによりビームを失うことなく移送する。EQ TH-2は、ターミナルに設置 されているイオン源から正イオンビームを入射する場合に用いられる。

イオンビーム量をモニタする機器としてファラデーカップ(Faraday Cup: FC TL-1, FC TH-1)がターミナル入口と出口近傍にあり、ビームライン上にカップ状の捕集電極を出入れし電流 として測定する。VA はビーム径、位置を制限するもので口径の異なるアパーチャを切替えるこ とができ、FC と対になって設置されている。ここでアライメントにおいて重要な機器は、180 度偏向を行う BM TL-1、集束レンズである EQ、ビーム径を制限する VA である。

3.2 アライメント基準の設定

BM TL-1 を取り外したターミナルは上部からの測定のための作業スペースが十分確保できた。 今回の測定にはレーザーアイピース付自動天底鉛直器、デジタルセオドライト、ラインレーザー 墨出器などを使用した。

アライメントの基準となる位置を次のように取った。

(1)低エネルギー(LE)側

VATL-1 直径 4.8mm 穴選択時の中心(鉛直器による目視)

負イオン加速管の中心と正確に合っている保証はないが、加速管出口直後にあり実際のビ

ーム加速運転時にはここに入射してビーム調整を行うため基準とした。

(2)高エネルギー(HE)側

正イオン加速管直前ダクトの中心(フランジ上に糸を張りその中心を鉛直器で目視) 加速管直前であり加速管にパンケーキバルブのみを挟んで設置されているため、この工作

精度であっていると考えられる。

これらの基準位置からの鉛直線をアライメント基準とした。

3.3 ビームライン機器のアライメント確認

(1)ターミナルの揺れ止め対策

ターミナルは加速器タワー6 階の位置にあり、3 階の圧力タンク底部から絶縁用のセラミック 柱で支えられており横方向の剛性が低い。そのままでは作業者の動きなどによりターミナルが揺 れてしまい精密なアライメント作業が困難であるため、ターミナルとタンク壁面間に Photo.3.3.1 に示すアルミ構造材による突張り棒を3本設置し揺れ止めとした。ターミナル位置 (水平方向)を確認するため、タンク上部の蓋フランジ部に設置したレーザーポインタを使用し ターミナルを自然位置で固定して作業を行った。これにより揺れはかなり小さくなり、揺れの収 束する時間も抑えることができた。



← アルミ構造材

Photo.3.3.1 アルミ構造材によるターミナルの揺れ止め

重量 7.2t である BM TL-1 を取り外したためにターミナル位置の移動(キャスティングの傾き 等)の可能性が考えられたため、HE 側加速管のアライメントボルトの鉛直度を下げ振りで確認 したが、傾きは見られなかった。このアライメントボルトは以前加速管の更新作業をしたときに、 鉛直に整列したものである。

(2) 静電四重極レンズ(Q レンズ、EQ TL-1, EQ TH-1, EQ TH-2)の整列確認
 Q レンズの電極内側に収まるアクリルターゲットを製作し、電極の上下端の水平位置を鉛直

器からの目視により直接測定した。本来、これらのQレンズはフランジ中央に電極をアライメントしてあるはずだが、ビームに影響を及ぼすのは電極とビームの位置関係であるため、電極を 直接確認することとした。Photo.3.3.2 に測定時の様子を示す。鉛直器によるビームライン確認 の様子をPhoto.3.3.3 に示す。



1: EQ TH-2 入口 EQ 内の電極配置

2: ターゲットを装着し、鉛直器からの レーザー光を当てた様子

Photo.3.3.2 Q レンズの軸位置測定



BM TL-1 取外し後、ターミナル最上部に設置した天底鉛直器により 90 度下側を測定しているところ

Photo.3.3.3 天底鉛直器による測定

(3)低エネルギー(LE)側のアライメント測定

LE 側機器のアライメント基準からのずれを測定した結果を Fig.3.3.1 に示す。Fig.3.3.1 中の 丸印は X, Y をアライメント基準軸の中心としたとき、各機器の測定位置においてその軸ずれの 程度を表している。機器名下の数値は基準からのずれであり、括弧内は測定値で第 1 要素が X 軸のずれ南(-)北(+)方向を、第 2 要素が Y 軸のずれ西(-)東(+)方向を表す。全体的にずれは 2mm 以下の範囲に収まっている。



Fig.3.3.1 低エネルギー(LE) 側位置ずれ測定結果

(4)高エネルギー(HE)側のアライメント測定

HE 側機器のアライメント基準からのずれを測定した結果を Fig.3.3.2 に示す。グラフは LE 側と同様であるがイオンビームは 180 度偏向されるため X 軸は反転し、北(-)南(+)方向を表す。

全体的にずれが大きく Y 軸を見ると西側の一方向に傾いていることが分かる。特に EQ が大きく傾いており、VA TH-1 にも大きなずれがあることが判明した。これらのずれはビームハンドリング上特に大きな影響を与えるためこのずれは無視できない。



Fig.3.3.2 高エネルギー(HE) 側位置ずれ測定結果

(5) BM TL-1 の設置作業

BM TL-1 再配置の際のアライメント軸を BM TL-1 の架台である梁上に移すため、梁の上に アルミ板の治具を設置し、鉛直器を用いてアルミ板状に基準を移した。Photo.3.3.4 に罫書き用 治具を示す。このとき LE-HE の 2 つの基準間の距離は 1422.5mm であり設計値である 56 イン チ=1422.4mm とよく一致した。よって X(南北)方向に関しては採用したアライメント基準は 妥当であると考えられる。罫書きを Fig3.3.3 に示す。図中の M'位置で以前からつけてあるポン チ印と罫書きが 0.5mm 以内で一致した。この基準を元に BM TL-1 を設置するための罫書きを 梁上に付けた。Photo.3.3.5 に罫書き例を示す。



Photo.3.3.4 BM TL-1の架台に取付けた罫書き用アルミ板冶具



Fig.3.3.3 BM TL-1 アライメント用罫書きの取り方 (Top view)



 野書き[Fig.3.3.3 A 位置]

 Photo.3.3.5 BM TL-1 架台の梁に付けた罫書き

BM TL-1 本体はヨーク形状から中心を割り出した。ビーム軸となる位置には設置用の脚があ りアライメント時に調整しづらいため、150mm 内側へオフセットした位置にも再設置のために 罫書きを行った。Photo3.3.6 にヨークへの罫書きを示す。



ヨーク側面への罫書き(中心線) ヨーク側面への罫書き
 (ビーム軸及び 150mm 内側へのオフセット線)
 Photo.3.3.6 BM TL-1 ヨークへの罫書き

3.4 ビームライン機器のアライメント

測定した機器についてアライメント基準に合わせるように調整し整列させた。なお、測定器具 や工作の精度から誤差は±0.3mm 程度と考えられる。

アライメント後の測定結果は次の通りである(数値の表示は測定時と同様とする)。

HE 側機器アライメント後の測定 (単位 mm) EQ TH-1 入口 0.1 (-0.1, 0.0) EQ TH-1 出口 0.1 (0.0, -0.1) EQ TH-2 入口 0.1 (+0.1, -0.1) EQ TH-2 出口 0.0 (0.0, 0.0) VA TH-1 0.5 (+0.5, 0.0) VA TH-2 1.0 (+1.0, 0.0) 加速管上ダクト 0.0 (0.0, 0.0)

LE 側機器アライメント後の測定 (単位 mm) EQ TL-1 出口 0.2 (0.0, +0.2) EQ TL-1 入口 0.4 (-0.2, +0.3) VA TL-1 0.2 (0.0, -0.2)

BM TL-1の設置及びアライメント

アライメントは梁上に付けた罫書きを基に行った。X(南北)方向は Fig3.3.3 中の M'部でヨー ク中心線と罫書きが一致するように行った。このとき b 及び g の一致も確認している。Y(東西) 方向は A 及び D を基準に合わせた。

4. ビーム通過率試験

アライメント後に実施したイオンビーム加速試験について述べる。ビーム電流はファラデーカ ップ(FC)による測定で、ここでは主要となる負イオン源出口(II-1)、加速管入口(CB-1)、ター ミナル入口(TL-1)、ターミナル出口(TH-1)、エネルギー分析電磁石入口(03-1)、エネルギー分 析電磁石出口(04-1)における電流値について比較する。負イオン源出口ファラデーカップ(FC II-1)の電流値を基準とした。

CB-1 から TL-1 にかけての通過率が改善されているが、これは 2005 年に負イオン源出口のビ ームラインをアライメントし、また、静電四重極レンズの位置を上流へ移設したことにより改善 されたものである。

4.1 水素イオンビーム加速試験

2008 年 1 月に水素イオンビームの加速試験行った。Fig.4.1.1 に測定データを示す。この時の ターミナル電圧(VT)は 15MV で加速エネルギーは 30MeV である。



Fig.4.1.1 水素イオンビーム通過率 VT=15MV, 括弧内は FC 04-1 の電流

アライメント後のビーム通過率が改善していることが分かる。ターミナル入口(TL-1)とエネ ルギー分析電磁石入口(03-1)の通過率を比較すると、アライメント前が46%でアライメント後は 78%の通過率に改善した。

これまでの水素イオンビーム加速時には、ES TL-1 の電極電圧の可変範囲を超えていたため、 ビーム軌道の修正が完全でなく前後の光学機器によって補正しないとビームが通過しなかったが、 アライメント後は改善された。また、0.2 µ A 以上の加速は非常に困難なものであったが、FC 04-1 において 3.0 µ A を確認した。アライメント前に比べるとターミナルにおいてのビームハン ドリングが格段に向上しており調整が行い易くなった。

4.2 硫黄イオンビーム試験

³²Sのイオンビームにおいて、ターミナル電圧 15MV におけるアライメント前後のビーム通過 率測定データを Fig.4.2.1 に示す。イオン源出口(I1-1)を基準とし、電子ストリッパーでの荷電 変換効率の補正を行っている。ターミナル入口(TL-1)とエネルギー分析電磁石入口(03-1)の通過 率を比較すると、アライメント前が 52%でアライメント後は 82%となり大幅に改善した。TL-1 から 04-1 まではほぼ 100%の通過率であった。04-1 の値が 03-1 より大きいのは、ファラデーカ ップログアンプのゲイン誤差とエネルギー分析後にターミナル電圧の安定化回路が切替わり、よ り電圧が安定化するためと考えられる。



Fig.4.2.1 アライメント前後のビーム通過率 VT=15 MV,³²S

Fig.4.2.2 アライメント前後のビーム通過率 VT=8 MV,³²S

同じ³²S のイオンビームでターミナル電圧 8MV におけるアライメント前後のビーム通過率測 定データを Fig.4.2.2 に示す。アライメント後の TL-1 から TH-1 への通過率は 36%から 69%とな り大きく改善している。ターミナル入口 (TL-1)とエネルギー分析電磁石入口 (03-1)の通過率を比 較すると、アライメント前が 32%でアライメント後は 66%であり大きな改善がみられた。ター ミナル電圧 15MV のときに比べて TH-1 への通過率が低いのは、電子ストリッパーへの入射エネ ルギー(速度)の違いによるものである。

4.3 加速イオンの違いによるビーム通過率

ターミナル電圧 15 MV における加速イオン種別のビーム通過率を測定した。Fig.4.3.1 に測定 結果を示す。¹H、¹⁹F、³²S の軽いイオンビームにおいては、TL-1 以降はほぼ 90%以上の通過率 となっている。

Fig.4.3.1 アライメント後の各種イオン通過率 VT=15 MV

⁵⁸Ni、¹⁹⁷Au についてはこれまで全系の通過率が 10%前後であったが、アライメント後は 20~30%となりアライメント前に比べるとイオンビーム量は約 2~3 倍となった。³²S 以下の軽いイオンに対し通過率が悪くなっているが、これは電子ストリッパーに入射する速度が遅いことによりビームの発散が大きいためである。

5. 電荷分析電磁石(BM TL-1)コイルの更新

電荷分析電磁石(BM TL-1)は昭和53年のタンデム建設時に設置されたものであり、30年が経 過し、コイルを構成するホローコンダクター(電線中心部が冷却水用の管となっているもの)の 絶縁劣化や管内外の腐食が懸念されていたため高経年化対策としてコイルの更新を行った。タン デム加速器に設置された同種の大型電磁石ではコイルが絶縁不良を引き起こし、既に交換されて いるものがある。

5.1 電磁石磁場の決定

今回コイルの更新前に新たに測定した電流と磁場の測定データを Fig.5.1.1 に示す。磁場の測 定はホールプローブ(HPB)センサ型の測定器を使用した。

ターミナル上に設置されている機器の電力は、地上電位上の電動機動力を絶縁シャフトで伝達 しターミナルの発電機を駆動することによって得ている。このため大電力を消費する電磁石の電 流を少くし省電力化することは電源の小型化、発熱軽減、機械負荷の軽減に有利となるため、今 後必要とされる最大磁場を計算により求めた。電磁石電源の最大定格は 250 A, 40 V でそのとき の BM TL-1 の磁場は 1.448 T である。Fig.5.1.2 にターミナル電圧 0.5~20.0 MV において、負 イオン源から入射したイオンビームを電子ストリッパーで荷電変換し、最も変換効率の良いイオ ンビームについて 180 度偏向するために必要な磁場強度を示す。磁場は3.1節(1)式の計算 により求めることができる (ME/q² は必要磁場の2 乗に比例する)。質量が 20 以下のイオンビー ムは荷電変換での電荷量も少ないため必要な磁場は大きくなっている。

Fig.5.1.1 BM TL-1 電流・磁場特性 (コイル更新前)

BM TL-1 の電流定格を必要以上に大きくすれば電力の無駄になる。Fig.5.1.2 から荷電変換効率の最も良いビームを加速する場合必要とされる磁場は1.2 T以下でよいことが分かる。

コイルの抵抗値はほぼ一定であることから電力は電流の2乗に比例するため、Fig.5.1.1から 1.2 Tの時の電磁石電流は190 A であり、電源の最大定格250 A に比べると出力電力比は190²/ 250² = 0.58 となり、約半分の電力で済む。これらのことから必要磁場の最低条件を1.2 T とした。

電磁石電源については小型・高効率であるスイッチング型のものに現在更新作業を進めている が、この決定に従って最大出力 200A で開発を進めている。

Fig.5.1.2 イオン質量毎の必要とされる BM TL-1 磁場

5.2 コイルの設計

使用していたコイルを測定して以下のように推定した。

コイル断面 12mm×12mm 角形 ホローコンダクター
 巻数 9列×10層×2=180

コイル製作に当たっては、コイルが細い方がスペース、価格、加工に有利である。更新に使用 したコイルの材料は電流容量から問題ない範囲で以下の仕様のものを用意した。

コイル断面	11×11±0.1 mm R1角形	ホローコンダクター
	穴径 直径 6±0.2 mm	(Fig.5.2.1 に断面図を示す)
導体断面積	91.9mm ²	
重量	0.821 kg/m	
コイル長さ	$110m \times 10$	

材質	C1020
質別	0
化学成分	Cu >99.96 %
引張強さ	$>205 \text{ N/mm}^2$
伸び	>40%

5.3 BM TL-1の分解・計測

2007年7月タンデム加速器の定期整備期間になり、BM TL-1の分解作業が開始された。

BM TL-1 の外観を Photo.5.3.1 に示す。BM TL-1 を取出すには真空ブレイクし、真空チェン バーとの切離しを行わなければならない。また、コイル冷却水配管の取外しやヨークの側面には ターミナルイオン源用の RF アンプ、冷却用のダイアフラムポンプ、真空排気のリザーバータン クなどの機器が取り付けられているためこれらの取外しも行った。BM TL-1 は加速器タンク内 からタンデム加速器棟 8 階へ取出し、分解作業を実施した。Photo.5.3.2 に取出し作業中の状況 を示す。ヨークは中心部で 2 分割する構造となっている。推定重量は 7.2 t であり、重量物作 業・高所作業・管理区域内作業を伴うため作業は慎重に行われた。

ターミナル上の配置

8階へ取り出した電磁石

ヨークを2分割した片側部分

BM TL-1 を分解しコイルを取外した結果、コイルの巻き方の詳細が判明し、外見から推定したものと相違ないことが確認できた。

新型コイルの形状を決定するために、分解した BM TL-1 のヨーク、ポールピースについて詳細な計測を行った。計測結果を Fig.5.3.1 に示す。磁極の曲線形状を基に測定したところ各部半径の中心にはずれがあるが、真空チャンバーは中央磁極部の十分内側であるため影響はない。

Fig.5.3.1 BM TL-1 計測結果

この計測を基にコイルの巻型を作りコイルを製作した。新型コイルの線径(断面積)は元のコ イルより一回り小さいため、同じ巻数としても BM TL-1 内部の空間にゆとりができるため、元 のコイルと同じ 90×2 の巻数で製作した。8 階への搬入には、エレベータを使用することになる が、寸法がぎりぎりのため Photo.5.3.3 に示すコイルを斜めに固定する専用の台車を用意した。

Photo.5.3.3 コイルの外観(搬入時)

Photo.5.4.1 BM TL-1 磁鉄部片側塗装後の様子

5. 4 BM TL-1の組立・据付

本体は軟鉄製であり、分解した内部は長年の使用により錆が広範囲に発生し塗装がかなりはが れていたため、古い塗装膜をはがし洗浄、下地処理した後ウレタン系の塗料で塗装し直した。塗 装後の様子を Photo.5.4.1 に示す。

電磁石に一定の電流を通電しても鉄部温度が変化すれば磁場も僅かながら変化する。磁場の変 化はイオンビームが不安定となる要因となるため安定度は高い方がよい。コイルに電流を通電す れば銅損分の発熱が生じ、冷却水によって冷却されてはいるが本体に接触していればそこから熱 が伝導する。熱絶縁に配慮することによって熱的な安定度を大幅に改善できる。今回新たにコイ ルに断熱材を巻き熱シールドを施した。材料は加速器圧力容器内のガス圧力の影響を受けないネ オプレンゴムシートを使用した。新型のコイルが一回り小さくなったことで、断熱材を施すスペ ースも確保できた。

Photo.5.4.2 断熱材を巻いたコイルの外観

電磁石コイルを高電圧の不意の放電ノイズから保護するため、露出するコイル部分を覆うシー ルドが必要であるが、Photo 5.4.3 に示すように新たにアルミ板を加工し作り直し、露出するコ イル部分をすべてを覆い放電ノイズの進入を極力抑えるようにして設置した。

Photo 5.4.3 BM TL-1 コイルに設置したシールド

5.5 BM TL-1の試験運転

加速器タンクへ収める前に加速器棟8階においてオフライン試験を実施した。電源は小型のもの3台を並列運転し合計容量55Aを確保して行った。そのときの磁場は369mTであり期待どおりのデータが得られたため、ターミナルへ設置した。

設置後、電源と冷却水配管を復旧しオンラインでテストした結果を Fig.5.5.1 及び Table.5.5.1 に示す。磁場の測定には 3 種類の測定器を使用しているが、ホールプローブ(HPB、Group3 社 製 DTM-151)と核磁気共鳴素子(NMR)センサ型の測定値は良く一致している。

出力電流 225 A、 磁場 1383 mT までは安定度に問題はみられない。最大出力 265 A まで温度 上昇は問題ないが、電源パワートランジスタのドロップアウト電圧(出力段のトランジスタにか かっている電圧でこの電圧が低いと出力制御ができない)が下がり不安定になった。これはコイ ルを細くしたことで直流抵抗が増加したためであるが、新たに決定した最低磁場条件 1.2 T 以上 をクリアしているので問題はない。電流・磁場特性はコイル巻数を同一としたため期待通りほぼ 同一の特性であることが確認できた。

Fig.5.5.1 BM TL-1 電流・磁場特性 (コイル更新後)

	備考							数分後		数分後									不安定	数分後
л,	Hot Point	°	17.0		17.0		17.0		17.0		18.0	18.0	19.0	19.5	22.0	21.0	22.0		23.0	
Π	電圧	>					3.61		7.25		14.65	22.18	30.06	34.54	38.73	44.07	49.7		53.3	
源	Tr Dropout	>		65	62		62		60		55	42	32	28	22	15	8.5		4	
Ē	Tr Hot Point	°	19.5		25		27		40		40	50	50	45	50	44	40		33	
く温度	CST-2	ç	17.6	18.4	18.8		19.7		21.3		25.1	27.9	30.2	33.0	33.6	34.1	34.7		35.0	35.1
冷却力	CST-1	°C	17	18	19		20		22		26	29	31	34	35	35	36		36	37
	NMR *	mT						134.803		267.563	534.588	797.578	1051.917	1170.667	1276.375	1384.793	I		I	I
磁場	GM TL-1	mT	8.8	6.6	6.99	67.1	129.8		261.7		523.7	774.1	1029.2	1145.3	1254.0	1341.7	1454.8		1501.1	1461.7
	НРВ	mT	4.12	4.68	68.34	68.35	134.67		267.36	267.43	534.29	797.26	1051.50	1170.08	1275.59	1383.37	1468.82	1468.87	1512.85	1506.59
	電流読値	A		0.045	9.992	9.992	20.028	20.028	40.097	40.097	80.222	120.357	160.488	180.559	200.624	225.696	250.781	250.781	265.818	263.522
	設定電流	A	Off	0.00	10.00	10.00	20.00	20.00	40.00	40.00	80.00	120.00	160.00	180.00	200.00	225.00	250.00	250.00	265.00	265.00

Table.5.5.1 BM TL-1オンライン試験測定データ

JAEA-Technology 2008-055

※NMRは試験のために設置。通常運転では使用しない。

6. 考察

ターミナルビームライン機器の位置ずれの原因として次のことが考えられる。各ビームライン 機器の個々のメンテナンスや度重なるイオン源設置作業、機器配置変更作業などにより少しずつ 位置ずれが生じ誤差が累積拡大した。建設当時の位置合わせにはレーザー光を使用しその光を基 準としたが、レーザーは地下階から加速管を通し入射したため加速管の電極構造に起因する干渉 によりレーザー光が影響を受け精度が落ちていた可能性も考えられる。アライメント後の加速試 験で TL から TH へのビーム通過率がほぼ 90%以上に改善したことから、ターミナルにおいてビ ーム軸の整列性は良くなったと言える。

タンデム加速器の運転時においては、以前は高電圧放電時のノイズで BM TL-1 の電源制御が 不調になることがあった。今回コイルを更新してから高電圧放電も数回起こっているが、電源制 御の不調は起きていない。これはコイルの容積が減少したこと、ヨークとコイル間を熱絶縁した ことにより静電結合が減少したこと、コイルの放電シールドを新たに作り直しシールド効果が上 がったこと、電源ボックスとコイル間の配線の改良(誘導を受けにくい4線式への配線変更、フ レキシブル電線管接続強化)により電源へのノイズ電流が減少したためと考えられる。

7. まとめ

今回の定期整備において電荷分析電磁石コイルの更新に伴いターミナルビームライン全体の統 括的な再アライメントを初めて行った。

ビームライン機器のアライメントをしたことで、設計上のビーム光学ラインに近づきビームロ スの少ない集束や偏向が可能となり、ターミナル入口(TL-1)から出口まで(TH-1)のビーム通過 率は大幅に改善し、ターミナル電圧 15MV のとき ³²S 以下の軽いイオンビームでは 90%以上に することができた。エネルギー分析電磁石出口(04-1)ではこれまでの 2 倍以上の通過率となった。 また、高エネルギー側の正イオン加速管ヘイオンビームを導く時のビームハンドリングが容易に なり、ターミナル機器の操作性を改善することができた。

アライメントによりビームロスが少なくなったため、より大きな電流を加速しても安定にビームを加速することができるようになり、従来の約2倍の電流を加速できるようになった。水素イオンビームにおいてはこれまでで最大の3µAの加速が可能となった。

参考文献

- 1) M.Matsuda, et al. : JAEA-Tokai TANDEM Annual Report 2005, JAEA-Review 2006-029 p.14 (2006).
- 2) 日本原子力研究開発機構:タンデム加速器 超伝導ブースターRNB(放射性核種ビーム)加速器.
- 3) 松田誠 他 : "原子力機構・東海タンデム加速器の現状", 第 19 回タンデム加速器及びその周 辺技術の研究会報告集, pp.9-12 (2006).
- 4) 花島進 : "原科研タンデム加速器ターミナル 180° 偏向電磁石電源の更新計画",第 19 回タ ンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集, pp.50-53 (2006).
- 5) 研究炉加速器管理部 : 平成 17 年度研究炉加速器管理部年報, JAEA-Review 2006-036 pp.76-79 (2006).
- 6) Department of Materials Science : JAERI TANDEM & V.D.G. Annual Report 1997, JAERI-Review 98-017 pp.10-12 (1998).

表 I. SI 基本单位							
İ .木昌		SI 基本単位					
巫平里		名称	記号				
長	ЮŁ	メートノ	νm				
質	量	キログラ	ム kg				
時	間	秒	s				
電	流	アンペラ	7 A				
熱力学温	度	ケルビン	K				
物質	量	モリ	₽ mol				

度カ

 $^{\rm cd}$

デラ

+; 1

物 質

光

和立量	SI 基本単位				
和工生	名称	記号			
面積	平方メートル	m ²			
体 積	立法メートル	m ³			
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s			
加 速 度	メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数	毎メートル	m-1			
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³			
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2			
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m			
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$			
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2			
屈 折 率	(数 の) 1	1			

表5. SI 接頭語

_

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号					
10 ²⁴	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d					
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с					
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m					
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ					
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n					
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р					
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f					
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а					
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	Z					
10 ¹	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	у					

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位 如子出/

	51 祖立丰位							
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による				
	5H (M)	10.5	表し方	表し方				
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$				
立 体 角	ステラジアン ^(a)	$\mathrm{sr}^{(\mathrm{c})}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$				
周 波 数	、ヘルツ	Hz		s ⁻¹				
力	ニュートン	Ν		m•kg•s ⁻²				
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$				
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$				
工 率 , 放射 束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$				
電荷, 電気量	クーロン	С		s•A				
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$				
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$				
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$				
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$				
磁床	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$				
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$				
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$				
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K				
光東	ルーメン	1m	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$				
照度	ルクス	1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$				
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹				
吸収線量, 質量エネル	ガレイ	Gv	T/ka	$m^2 \cdot c^{-2}$				
ギー分与、カーマ		0 y	J/ Kg	ш 5				
線量当量,周辺線量当		0	т /1	2 -2				
重, 力回性線重当重, 值	レーベルト	Sv	J/kg	m"•s"				
八째里ヨ里, 組織綠重三				L				

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号"1"は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4.単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

如去县						SI 組立単位				
和立里						名称	記号	SI 基本単位による表し方		
粘					度	パスカル秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$		
力	のモ	-	メ	ン	ŀ	ニュートンメートル	N • m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$		
表	面		張		力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$		
角		速			度	ラジアン毎秒	rad/s	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-1} = \mathbf{s}^{-1}$		
角	加		速		度	ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$		
熱	流 密 度		放身	† 照	度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg • s ⁻³		
熱~	容量,	エン	· ト	ΓĽ	-	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$		
質量 質	計熱容量 量 エ	t(出 ン ト	く 熱 叙 、 ロ	序量) ピ	, 	ジュール毎キログラム 毎ケルビン	$J/(kg \cdot K)$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$		
質 (量 エ 比 エ	ネ ネ ル	ル	ギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$		
熱	伝		導		率	ワット毎メートル毎ケ ルビン	W/(m \cdot K)	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{K}^{-1}$		
体	積 エ	ネ	ル	ギ		ジュール毎立方メート ル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$		
電	界	の	弖	隹	さ	ボルト毎メートル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$		
体	積		電		荷	クーロン毎立方メート ル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$		
電	気		変		位.	クーロン毎平方メート ル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$		
誘		雷			率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot k\sigma^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$		
透		磁			率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$		
モ	ルエ	ネ	N	ギ	-	ジュール毎モル	J/mo1	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mo1^{-1}$		
モ	ルエン	/	П	Ľ –		ジュール毎モル毎ケル	T/(1 V)	2 4 -2		
モ	ル	熱	名	\$	量	ビン	J/(mol•K)	m • kg • s • K • mol		
照身	†線量(X 線	及び	;γ線	!)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$		
吸	収	線	톱	È	率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} \cdot s^{-3}$		
放	射		強		度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$		
放	射		輝		度	ワット毎平方メートル 毎ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$		

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)ln10(Np)

表7. 国際単位糸と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が実験的に得られるもの							
名称	記号	SI 単位であらわされる数値					
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J					
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg					
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m					

表8.国際単位系に属さないが国際単位系と

併用されるその他の単位					
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値	
海		里		1 海里=1852m	
1	ツ	ŀ		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s	
ア	_	ル	а	1 a=1 dam ² =10 ² m ²	
ヘク	ター	- <i>i</i> V	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$	
バ	-	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa	
オング	ストロ	ーム	Å	1 Å=0. 1nm=10 ⁻¹⁰ m	
バ	-	ン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$	

素 9 固有の名称を今ねCCS組立単位

	A 5. 回行の石标を含むC63組立単位							
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
工	ル	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポ	ア	ズ	Р	1 P=1 dyn • s/cm ² =0.1Pa • s				
ス	トーク	ス	St	1 St $=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$				
ガ	ウ	ス	G	1 G ≙10 ⁻⁴ T				
工	ルステッ	ド	0e	1 Oe ≙(1000/4π)A/m				
7	クスウェ	\mathcal{N}	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb				
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb } = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$				
朩		ŀ	ph	1 ph=10 ⁴ 1x				
ガ		ル	Gal	1 Gal =1 cm/s ² =10 ⁻² m/s ²				

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例						
名称					記号	SI 単位であらわされる数値
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
\mathcal{V}	ン	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
\mathcal{V}				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
Х	線		単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガ	ガンマ				γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$
ジ	ヤン	/ 7	マ キ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フ	I.		ル	1		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット						1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	
Ξ	ク		D	\sim	u	1 1

この印刷物は再生紙を使用しています