

話 題

原子力機構-東海タンデム加速器の震災からの復旧

松田 誠*・遊津 拓洋*・株本 裕史*

Recovery of JAEA-Tokai Tandem Accelerator Facility

Makoto MATSUDA*, Takuhiro ASOZU* and Hiroshi KABUMOTO*

Abstract

A massive earthquake, named “The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake”, hit us on March 11, 2011. The accelerator building quaked at an acceleration of 1000 gal on the top floor. The accelerator column withstood the earthquake with the help of quake-absorbers attached to its bottom, and no acceleration tubes were damaged. However, thirty eight column posts out of 240 had cracks, a vacuum leak happened at the terminal ion source, and the beam line of the superconducting booster lost its proper alignment. By recovering these damages as quickly as possible, we were able to open the tandem accelerator for experiment on September 15, 2011. We would express sincere thanks for kind support and encouragement received in this severe time.

1. はじめに

あの未曾有の震災から2年以上経過しての震災被害の掲載となり出遅れた感があるが、本稿掲載の機会をいただいたことに感謝する次第である。既に皆様ご存じのことと思うが、原子力機構-東海タンデム加速器の兄貴分である筑波大の12UDペレットロンタンデム加速器¹⁾は、残念なことに損壊してしまった(東海タンデムは筑波大タンデム完成の4年後の1980年に使用開始)。また、米国オークリッジ国立研究所の25 MVタンデム加速器も予算削減により稼働停止となった。このような状況の中、世界有数の大型静電加速器として当施設の特徴を活かした研究・開発を継続できるように努力をしているところである。

東海タンデム加速器施設には、20UR型ペレットロンタンデム加速器と、その後段ブースターである1/4波長型超伝導空洞40台で構成される超伝導重イオンリニアックが設置されている²⁾。また震災時には、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同で開発を進めてきた短寿命核分離加速装置(RNB加速器, 通称TRIAC)が設置されていたが、研究の終了に伴い2012年度に実験室より撤去さ

れている³⁾。現在はその実験室に非密封RIや核燃料を加速ビームの標的として利用できる照射室(第2照射室)の整備を行っている。年間の運転時間は約4000~5000時間であり、核物理、核化学、照射効果の研究などに重イオンビームを供している。

タンデム加速器は、地上電位にある3台の負イオン源と高電圧端子内のECRイオン源により、HからBiまでの約50元素の多様なイオンを5~500 MeVの広範なエネルギー領域にわたって加速することが可能である。また後段の超伝導ブースターで再加速することで、ビームエネルギーを2~4倍に増強することが可能である。

ペレットロン型静電加速器は、高電圧端子部をセラミクス製の絶縁カラムで支える構造となっているため、地震に対しては基本的に弱い(図1)。東北地方太平洋沖地震では、東海タンデム加速器施設も震度6弱の揺れに襲われ、その後も震度3~5級の余震を立て続けに受けた。建家周りの地盤は沈下したものの、加速器本体には深刻な損傷はなかった。加速器タンクが基礎部に強固に固定されていたこと、タンク内の絶縁カラムが免震構造によって支えられていたことが、倒壊を免

* (独)日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部
JAEA (E-mail: matsuda.makoto@jaea.go.jp)



図1 加速器タンク内部の絶縁カラム
多数のリングで白く見える部分が絶縁部。
高さ20mの高電圧端子をセラミクスで支える。

れた要因であると考えている。とはいえ、損傷した箇所の修復・整備が必要であった。加速器スタッフの精力的な復旧作業により、同年9月15日には利用運転を再開することができた。

2. 地震発生時の様子

地震発生時、タンデム加速器は16.1 MVで運転中であり、実験にビームを供していた。地震発生から数秒後、建家の3階に設置された地震計のインターロック信号により加速電圧を発生させるペレットチェーンが停止し、同時にイオン源からのビームも遮断され、加速器は自動停止した。さらに加速管の真空悪化に伴い、加速器圧力タンク直下のガス・コンテイメントバルブ(加速管等が破損した場合に、タンク外の真空ラインにSF₆ガスが流入することを防ぐための耐圧用ゲートバルブ)が閉まった。当施設で最も心配される事故は、加速器圧力タンク内のSF₆絶縁ガスの漏洩による酸欠事故である。容積1200 m³の加速器タンク内には、0.45 MPa・Gに加圧された約40 tonのSF₆ガスが詰められている。SF₆ガスは空気より5倍も重いガスであるため、漏洩した場合には、地階であるターゲット室等が酸欠になる危険性がある。そのため、地震時には速やかに屋外に退避し、建家内に取り残された人がいないことを確認

した。

地震発生と同時に停電となったが、非常用ディーゼル発電機が起動し、管理区域内の給排気系や酸素濃度計、非常灯など、安全系に関わる装置には電力が供給された。なお、超伝導ブースター用のヘリウム冷凍機は停止中であったため、Heガスの漏えいはなかった。冷凍機の運転中であれば、停電によりHeガスの放出は避けられなかったであろう。

SF₆ガスの漏洩は発生しなかったものの、余震でガス漏れが発生する恐れがあったため、貯蔵タンクに早急にSF₆ガスを回収する必要があった。また加速器タンク内部を点検するためにも、ガスの回収は必要であった。しかし、研究所構内の水や電気のインフラは大きく損傷し、復旧に1~2週間を要した。また、高压ガス製造施設であるSF₆ガス関連機器の配管類や圧縮機等の健全性を確認する必要もあったため、SF₆ガスを回収し加速器タンク内に入って加速器本体を確認できたのは、4月8日となった。

3. 加速器建家の加速度応答

東海タンデム加速器施設の建家の断面図を図2に示す。建家は地上45 m、地下16 mであり、建設時に地下の岩盤まで建設杭が到達しなかったため地下部分は人工岩盤として建設された。海岸近くであるため、土壌は砂質土であり、建家は砂の上に浮いたような状態で建っている。浮力とのバランスをとるため、地下2階部分は埋め戻されている。このような構造であるため、これまでの小規模な地震では、建家内では揺れが小さく約1~2ほど震度クラスを低く感じていた。今回の地震ではそんなことを考える余裕もなく、建家外への避難となった。

建家タワー部の地下2階と8階(最上階)に強震計が設置してあり、北南(NS)、東西(EW)、下上(DU)方向の3軸の加速度が記録されている。地震発生後に波形の解析を業者に依頼しようとしたが、機種が古いことと震災のデータ解析で多忙であり、結局我々で解析した。

図3は第一波の本震の波形であり記録開始から160秒までの加速度である。約70秒後に加速度は最大となり、地下2階で最大220 gal(NS)、8階で最大830 gal(NS)であった。8階ではNS方

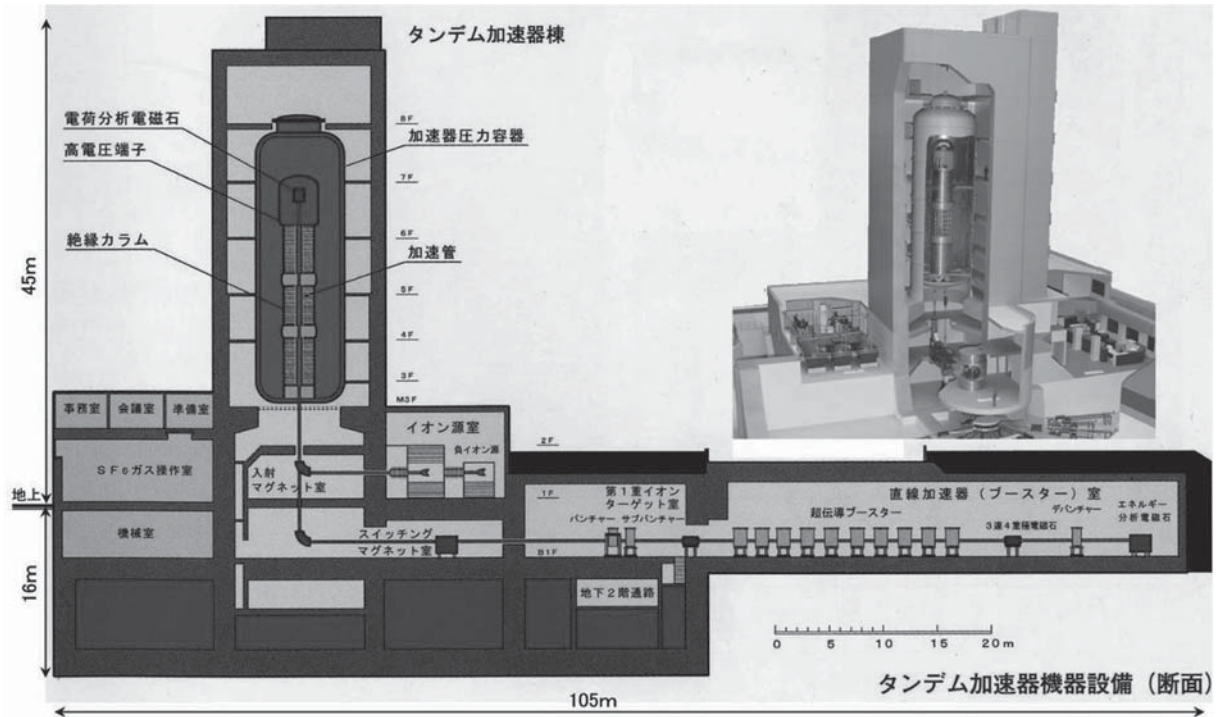


図2 東海-タンデム加速器施設の建家断面と施設模型

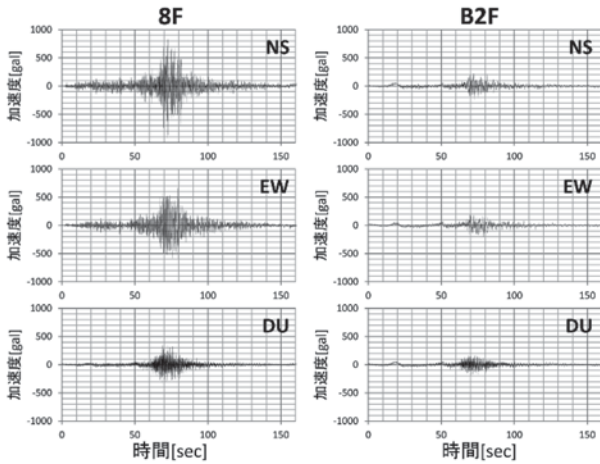


図3 8階および地下2階の強震計がとらえた地震発生時の加速度

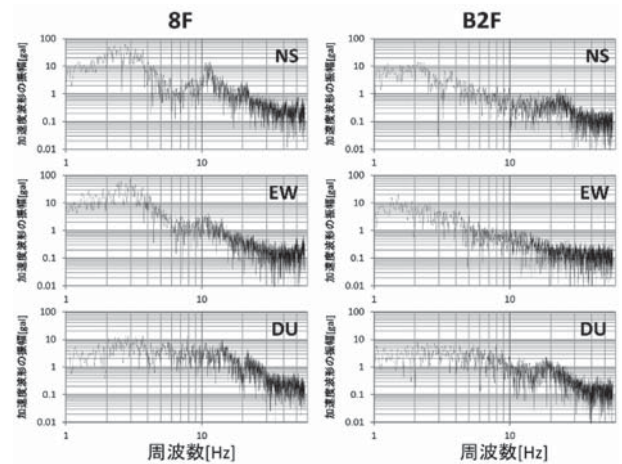


図4 揺れの大きな時間帯の加速度スペクトル

向とEW方向の加速度のピークが一致しており、ベクトル和では最大1000galに達したと考えられる。これは重力加速度を上回る加速度であり非常に強い応力、歪力が建物に加わったといえる。このデータから8階での最大変位を求めたところ約6.5cmであることが分かった。

大きな加速度を示している60～96秒の範囲で周波数解析を行い得られたスペクトルを図4に示す。8階のNS方向では2.8Hz, 11Hz, 20Hz

にピークが見られ、これらがタワー部の固有周波数であると考えられる。タワー部は15m×15mの床面で高さが約30mであるが、固有周波数が2.8Hzというのは30m×30mの床面を持つ鉄筋コンクリート構造の居住用建造物と同等の周波数である。放射線遮蔽のための壁厚が4階以下で1.5m, 5階以上で1.3mと非常に厚いことが、このような剛性を示した理由として挙げられる。地下2階では2Hz付近にピークが存在しており、

これが地震の周波数であるとする、タワー部の固有周波数と一致しなかったことで被害が抑えられたと想像される。

気象庁の発表データによると3成分合計の最大加速度は水戸市で825 gal, 常陸大宮市で461 galである⁴⁾。地下2階は約330 galであり、測定器や解析法の違いから単純比較はできないが建家の揺れは小さかったようである。

直径8.3 m, 高さ26 mの加速器圧力タンク(重量260 ton)は図5に示すように、3階部分で強固に固定されている。上層階では圧力タンクと建物は分離しており、地震の際は別々に揺れていたと考えられる。このため圧力タンクの揺れが抑えられ、筑波大タンデムのようにならなかった一因とも考えられる。

4. 被災状況と復旧作業

地震による加速器の被害状況とその対応および復旧の状況を以下に記述する。

(1) タンク内整備用ゴンドラのカウンタウェイトの支持レールの破損

加速器は縦型タンデムであるので、加速器の整備時には圧力タンク内の整備用ゴンドラを使用する。このゴンドラはバランス型であり、整備用プラットフォームの荷重とバランスさせるために約4 tonのカウンタウェイトを備えている。カウンタウェイトは、非整備時には7階(地上35 m)の高さに保持されているが、地震で大きく揺れたことにより、そのガイドレールが曲げられ、取り付け部のアンカーボルトが破損した。ゴンドラは加速器点検に不可欠であるため優先して修理をした(図6)。



図5 圧力タンクの支持固定部分。M68 ボルト64本で3階基礎部に固定されている。

(2) カラム免震機構のベアリングのずれ

加速器本体の絶縁カラムは、圧力タンクの底部に設置されたカラムベースと呼ばれる支持架台によって支えられている(図7)。高電圧端子などを含めた絶縁カラムの総重量は約40 tonである。支持架台の6本の柱は、ベアリングの上に設置されており、横揺れに対する免震機構となっている。支持架台はバネとオイルダンパーを備えた6本の支桁(ビーム)により横から保持され、横方向の振動を吸収する構造となっている(図8)。この横支桁には、約±4 cmの移動跡が確認され、有効に動作していたことが確認された。免震機構になっていなければ、絶縁カラムが倒壊していた可



図6 ゴンドラレールの破損と補修作業

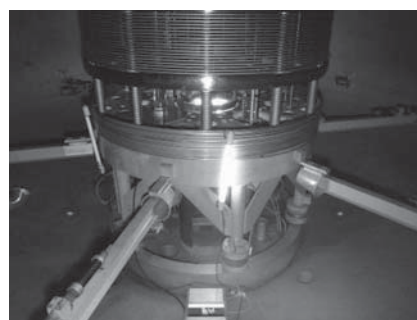


図7 絶縁カラムの支持架台

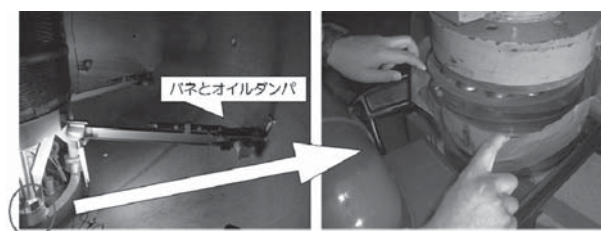


図8 絶縁カラムの免震機構。絶縁カラムはベアリングの上に設置されバネとオイルダンパーを備えた横からの支桁で揺れを抑える。右写真は地震により中心からずれたベアリングである。

能性は高い。免震機構は横揺れを抑えてくれたものの、ベアリングは柱の中心からずれたままで止まっていたため、柱の中心位置に戻す作業を8月初旬に実施した。高さ約20mで、最上部の高電圧端子は約12tonの重量であるため、絶縁カラムを持ち上げる作業はかなり慎重に行われた。結果として、約5分間に僅か1mm持ち上げるだけであったが、その作業には準備も含め3日を要した。

(3) カラムポストの破断とひび割れ

タンデム加速器の絶縁カラムは、1MVのユニットが20段積み重なって構成されている。1MVユニットは、12本のカラムポスト(絶縁支柱)で重量を支える(図9)。カラムポストは長さ489mmで、セラミクスとチタン電極が交互に接着されてできている。地震後の調査で、総数240本のカラムポストのうち、38本にひび割れが確認された。5本のひび割れが確認されたユニットもあり、この状態での整備作業は危険であるので、不具合のあるカラムポストの交換を最優先で実施することにした。予備品及び筑波大、東大の協力を得て、20本のカラムポストを準備することができ、約3ヶ月をかけて交換を行った(図10)。

図11のように完全に破断しているものが4本あった。破断したものの中には、放電痕を伴ったものもあり、地震以前からひびが入っていたと推測されるものもあった。取り外したひび割れカラムポストのうち、比較的健全そうなものは強度(剪断力)試験を実施し、メーカーの基準値を満たしたものは、ひびの状態の悪いカラムポストと交換することで、残り18本の調達出来るまで再利用した。2012年9月には、交換が困難な1本を除いて交換を終えている。



図9 絶縁カラムを支える12本のカラムポスト。

(4) タンク内ビームラインの真空リーク

地震後に、加速管を含むタンク内ビームラインは少なくとも数100torrまで真空が悪化した。当初は本体の主加速管の破損を心配したが、幸いにも無事であった。真空リークは高電圧端子内に設置されたECRイオン源入射装置部の前段加速用の加速管(図12)と、イオン源と真空排気装置を接続する絶縁管の2ヶ所で発生していた⁵⁾。入射装置の架台の強度が、大きな振動に対して不十分であったようである。これらの前段加速管と絶縁管は予備品に交換した。



図10 カラムポストの交換作業。写真は交換準備のためのフープ(電界分布をなだらかにする大きなリング)の取り外し作業。



図11 完全に破断したカラムポスト。1本で最大3.4tonを支える。



図12 リークを発生したECRイオン源入射部の前段加速管。振動でセラミクスが破壊された。

(5) 大型偏向電磁石の移動

タンデム加速器のビームを各ターゲット室に振り分けるための重量 35 ton の振分電磁石 (図 13) が約 15 mm 移動した。架台の移動痕を見ると、揺れに襲われている間は 30 ~ 40 mm 移動したものと考えられる。真空チェンバーは電磁石に固定されていなかったため、チェンバーと磁極がずれて動くことでチェンバーは大きく移動せず、ビームラインを破壊することがなかったようである。また、この電磁石の架台は床に固定されてなかったため、アンカーボルトや架台の破損もなかった。このようなことは稀であろうが、幸いであった。この電磁石については、そのまま基準位置へ戻した。

超伝導ブースターのエネルギー分析電磁石 (重量 14 ton) と振分電磁石 (重量 21 ton) は、地震によって架台固定用のアンカーボルトを一部引き抜いて 30 ~ 40 mm 移動した。そのため、架台の周辺にアンカーボルトを打ち直し、抑え金具を製作して床への固定を行った。ブースターラインの電磁石では真空チェンバーも共に移動したため、電磁石前後のベローズが押し潰され、そのうち 1 つが破損して真空リークを起こしていた (図 14)。



図 13 ビーム振分電磁石

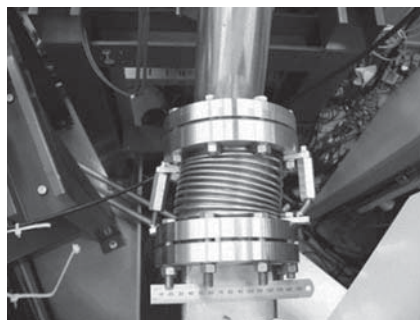


図 14 ブースターの振分電磁石チャンバー出口側の押し潰されたベローズ

また、振分電磁石については、電磁石の位置調整機構のシャフトが引きちぎられて破損したため、一旦、電磁石より取り外して修理を行った。その後、エネルギー分析電磁石、振分電磁石とも基準位置へ戻した。

巨大地震に備えての大型電磁石の固定は、かなり強固な方法を採用しなければならないようである。

(6) 超伝導ブースターの再アライメント

タンデム加速器からの重イオンビームのエネルギーを 2 ~ 4 倍に増強すべく、図 15 に示す超伝導ブースターが設置されている。加速空洞 40 台で構成され、最高加速電圧は 30 MV に相当する。バンチャー、サブバンチャーまで含めた全長は約 45 m である。

ブースター建家は増築建家であり、地震によりタンデム建家との接合部でブースター側が約 10 mm 沈下し段差が生じた。2010 年にブースタービームラインの位置計測を実施しており、ブースター建家がタンデム加速器建家との接続部分に向かって沈降する傾向があることは把握していた。今回の地震で、この傾向を増長したようである。このままではビーム加速が困難であるので、ブースタービームラインの再アライメントを実施した。アライメント前後のクライオスタットの高さを図 16 に示す。加速空洞は 1 台のクライオスタットに 4 台、合計で 10 台のクライオスタットに収められている。約 2 ton の重量のクライオスタットをジャッキで持ち上げて基準高さまで調整した。持ち上げた量は最上流部のクライオスタット

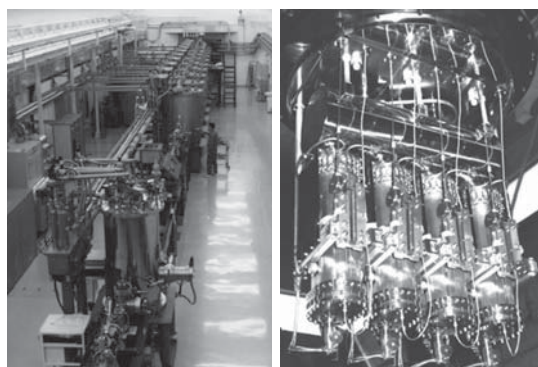


図 15 超伝導ブースター重イオンリニアック。
左：10 台のクライオスタットが並ぶ。
右：クライオスタット内の 4 基の加速空洞。

トで約8 mm, 最下流部のそれでは約3 mmであった。これに合わせヘリウムのクライオスタットへの移送配管を再調整する必要があった。水平方向に関しては最大でも1 mm程度の修正で済んだ。

ヘリウム冷凍機施設については、屋外に設置された冷却塔の基礎が沈下した以外は、地震発生時に停止していたこともあり運転に支障を与えるほどの被害はなかった。

2011年11月には超伝導ブースターの運転を再開することが出来た。ビームの加速試験のデータから、心配していたクライオスタット内部の空洞のアライメントは保持されていることが確認され、ビーム通過率も震災前と同等であることが確認された。

(7) タンデム加速器建家および周りの損傷

タンデム加速器建家については、傾斜角を算定した結果、基礎は「無被害」と判定された。最も被害が激しいのは壁の薄い2階の居室部分であると判定された。建家の上層階は、地震時かなりの振幅があったと思われるが、重要な機器は設置されておらず、また放射線遮蔽のための厚い壁で構築されている為に重大な被害はなかった。とはいえ、建家の壁面には細かいながらも無数のひび割れが生じた。建家周りの地盤は、100から200 mmほど沈下した。特に玄関脇では約2 mの深さの空洞が見つかった(図17)。建家の外階段や、別建家との地下連絡通路などにも亀裂が生じた。

被災調査の結果に基づいた建家及びその周辺の補修工事は、平成23年度3次補正予算による平成24年度の実施となり、11月中旬から3カ月に亘って実施された。建家の壁面のひび割れの補修は限

られた予算内での実施となったため、0.2 mm以上のひびに対して補修を実施した(図18~19)。完全な補修ではないので今後は雨漏り等に注意した施設維持が必要となると考えている。玄関周りの地盤沈下の補修はまだ実施出来ていない。

5. クラスタービーム加速計画

加速器の復旧が完了し、新たな領域のビームを開発すべくクラスターイオンの加速を計画している⁶⁾。静電加速器はどのような重いイオンであっても加速できるという他の加速器にはない利点を有する。既にフランス Orsay や原子力機構-高崎のタンデム加速器^{7,8)}において、数 MeV から数

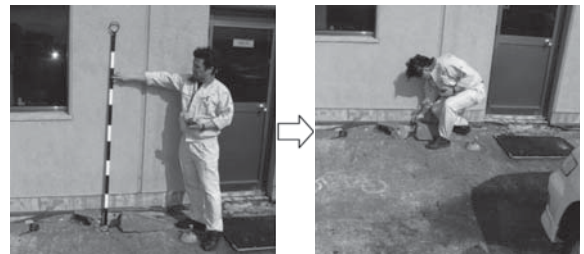


図17 玄関脇に出来た約2 mの深さの空洞



図18 建家外壁の補修。タワー部はゴンドラによる作業となった。

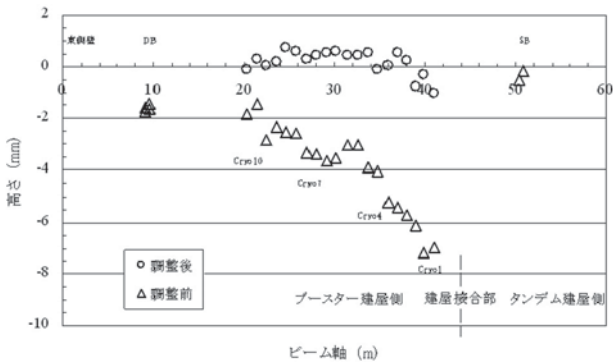


図16 再アライメント前後のクライオスタットの高さ



図19 ブースター室内に組んだ補修用足場。

10 MeV のクラスターイオンの加速が行われているが、どちらも高電圧端子での荷電変換が必要であり、ビーム強度は非常に弱い。東海タンデム加速器では高電圧端子内のイオン源から直接クラスターイオンを加速することで、高強度で、かつ最大 20 MeV の高いエネルギーのビームを得ることができる。計画では C_{60}^+ イオンを数 nA 以上の強度で加速することを目指している。現在、 C_2 、 C_3 イオンを既存実験室に導き実験を開始したところである。

図 20 に本計画での加速器系の概略を示す。高

電圧端子内イオン源からクラスターイオンを生成し、 180° 偏向電磁石で質量分析を行い、加速器の主加速管で最大 20 MV の電圧で加速する。加速されたイオンビームは既存の 90° 偏向電磁石では曲げられないので、加速器直下の地下 2 階の部屋をクラスタービーム専用のターゲット室として整備している。 C_{60} の加速にはイオン源直後の入射電磁石を静電偏向器に置き換える必要があり、検討を進めているところである。

6. ま と め

東北地方太平洋沖地震において、東海タンデム加速器は免震機構を備えていたおかげで損壊を免れることができた。加速器の復旧に約半年を要したが、同年 9 月初旬には利用運転を再開することができ、加速電圧も震災前の 18 MV を保持している。11 月には超伝導ブースターの運転も再開できた。

一方、原子力機構では、福島復興に向けた資源の重点化によりタンデム加速器施設の予算が大変厳しくなり、高圧ガス施設に係る最低限の予算配分となった。現在加速器の運転費は利用者からの負担で実施されている。

東海タンデム加速器は、今や日本で唯一の大型静電加速器となった。タンデム加速器の高輝度かつエネルギー連続可変の重イオンビーム、さらに RI・核燃料標的の利用といった特徴を活かして、ユニークな研究が今後とも展開できると信じている。大地震に耐えた東海タンデム加速器をぜひ有効に活用してもらいたい。

参考文献

- 1) 笹公和, 加速器 Vol.9, No.1 (2012) 14.
- 2) S. Takeuchi et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A382 (1996) 153.
- 3) H. Miyatake et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B204 (2003) 746.
- 4) 気象庁 Web ページ 強震観測結果 <<http://www.seisvol.kishou.go.jp/>>.
- 5) 松田誠, 加速器 Vol.6, No.3 (2009) 213.
- 6) M. Matsuda et al., Proc. of the 7th Annual Meeting of Part. Accel. Conf. (2009) FSRP05.
- 7) B. Waasr et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A382 (1996) 348.
- 8) Y. Saitoh et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A452 (2000) 61-66.

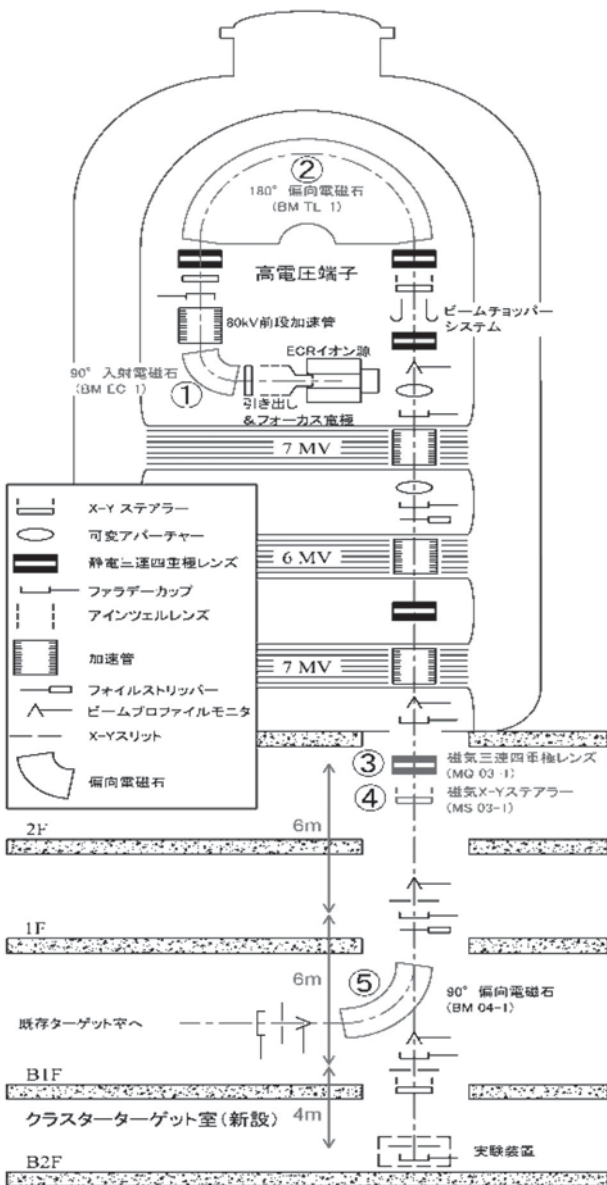


図 20 クラスタービーム加速の概略