

## 話 題

## 東日本大震災後の J-PARC

小関 忠<sup>\*1</sup>・長谷川 和男<sup>\*2</sup>・金正 倫計<sup>\*2</sup>

## Status of J-PARC after the Great East Japan Earthquake

Tadashi KOSEKI<sup>\*1</sup>, Kazuo HASEGAWA<sup>\*2</sup> and Michikazu KINSHO<sup>\*2</sup>

## Abstract

J-PARC was heavily affected by the March 11 Great East Japan Earthquake. When the earthquake struck, we had a beam study operation of the linac and the machine immediately stopped. We can see subsidence at many places; about 1.5 m over the wide area at the entrance of the linac building, about 50 cm over the area of 1 m × 10 m at the main ring building, etc. Underground water is coming into the linac and the main ring tunnels. The water level at the linac reached a depth of 10 cm, but pumping with a diesel generator successfully saved from further flooding. At the RCS, the circulating road went wavy and the yard area for electricity and water devices was heavily distorted. The current status of the J-PARC accelerators after the earthquake is reported.

## 1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の加速器は、リニアック、3 GeV シンクロトロン (RCS, Rapid Cycling Synchrotron), 主リングシンクロトロン (MR, Main Ring Synchrotron) から構成される。RCS から取り出された陽子ビームは、物質生命科学実験施設 (MLF, Materials and Life Science Experimental Facility) に送られて中性子及びミュオンの生成に利用されるとともに、MR への入射ビームとしても用いられる。MR に入射された陽子ビームは 30 GeV まで加速され、「遅い取り出し」によってハドロン実験施設へ、「速い取り出し」によって T2K 実験 (東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験) を行うニュートリノ実験施設へ送られる。図 1 に施設全体の航空写真を示す。

3月11日朝、当初の計画通りにビーム利用運転を停止し、その後、RCS と MR ではトンネル内の作業が、リニアックではビームスタディが行われた。リニアックのスタディが終了し、RCS に行き先を切り替えようとビームを一時停止しているときに東日本大震災が発生し (東海村の震度は 6 弱)、停電に伴って機器は自動的に停止した。この地震によって J-PARC はライフラインを含めて施設に大きな被害を受け、運転を長期にわたり休止せざるを得なくなった。施設利用を可能な

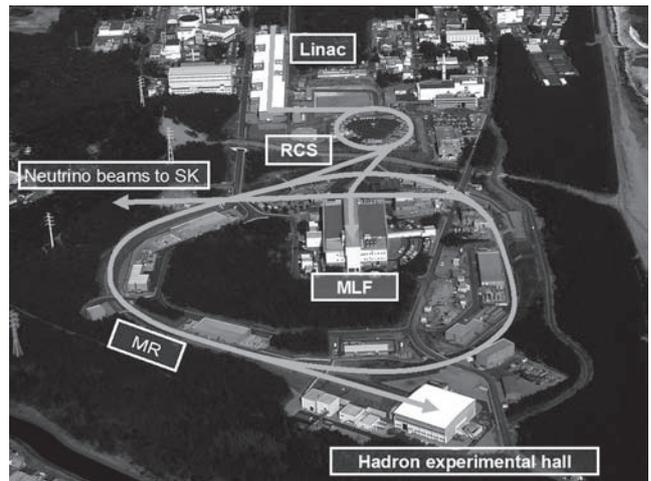


図 1 J-PARC 施設の航空写真

限り速やかに再開するため、現在は点検や復旧作業を実施している

## 2. リニアック

## 2.1 被害の概要

リニアック棟は、地上部が南北約 330 m, 東西約 44 ~ 48 m の建物で、地上 2 階、地下 2 階の構造である<sup>1)</sup>。リニアック棟の被害は、西側上流のエントランス前の崩壊 (図 2) が象徴的であり、広い範囲で深さ 1.5 m の

\*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: tadashi.koseki@kek.jp)

\*2 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency

陥没が起き、給排水系が破断した。地下 2 階の加速器トンネルや地下 1 階の中間トンネルの被害は地上階に比べると比較的小さいように見えるが、加速器トンネルでは地下水の漏水量が増加した。

## 2.2 加速器トンネルの漏水

3月11日の地震の後、強い余震もあり建物には入れない状況にあったが、17日に加速器トンネルに初めて入ることができた。その結果、加速器機器の倒壊などはなかったが、床面から1cmほどの冠水が確認された。

しかし1週間後の24日に再度トンネルに入ったところ、水深は10cmほどに深くなっていた。これは1日あたり1cm強の浸水に相当し、一刻も早い揚水を必要とすると判断した。しかし建家にはまだ電気も来ておらず、主に照明用として翌週から予定していたディーゼル発電機の対応を前倒しし、それをを用いた揚水作業に計画を変更した。

翌25日に発電機の設置、揚水ポンプの試運転を行い、ポンプやバルブ、配管類が正常に動作することを確認した。ところが揚水のPHを測ったところ、コンクリートの壁面を通過してきたため11の強アルカリで、中和しないと排水できない、という次なる課題が判明した。実際に中和作業を行ったところ、25m<sup>3</sup>の揚水に対して濃硫酸が3Lほど必要だった。

これから評価すると、貯まっている漏水量を処理するには20L近い硫酸が必要となる。このときすでに業者には時間外となる金曜の夕方、J-PARCの他の施設、JAEA、KEKに連絡をし、多少は調達できたものの、何リットルも在庫を持っているところはなく、必要な量の確保の見通しが立たない状態であった。中和ができなければ排水ができず、新たな揚水もできない。そうした中、J-PARCの物質生命科学ディビジョン長が近隣の中性子のユーザーに声をかけ、茨城大学の協力を頂けることになった。26日の午前に理学部（水戸）、

午後には工学部（日立）から調達し、それぞれの到着を待って中和作業に取りかかる、という自転車操業で何とか揚水と排水作業を進めることができた。関係各位のご協力に感謝する次第である。翌週には業者とも連絡が取れ、継続的に必要な量の確保も可能となった。

25、26日の作業で約150m<sup>3</sup>の排水を行い、床面が出るところまで水位を下げることに成功した。28日には本設の受電により自動揚水が可能となり、タンクが満杯にならない限りトンネル床面への冠水の心配がなくなった。

30日にトンネルの照明が復帰し、調査が進むようになった。この結果、上流から数十mの位置、ちょうどSDTL空洞のところを中心に、床や壁に横方向に多数の亀裂が入り、そこから漏水していることが確認できた。

## 2.3 加速器トンネル内の機器の状況

漏水によって床面に設置していた機器の損傷が懸念された。その中の一つが真空の粗引きポンプ（図3）である。トンネルから取り出し、目視点検、洗浄や乾燥といった準備の後、絶縁抵抗を測定し通電試験を行った。これは電流や温度を確認しつつ、万一に備え消火器を用意して屋外で行ったが、幸いにも発煙などを起こしたものはなかった。

36台のポンプ中、8台の本体が故障、4台のコントローラが故障していたが、ほとんどはそのまま使えることが確認された。モーターのコイルが浸かるギリギリのレベルで、あと1～2cm水位が高くなっていたら、ほとんど故障した可能性があったと思うと、揚水のタイミングが間一髪であったと胸をなでおろしている。

ケーブル自体は冠水しても、末端が高い位置にあったものはほとんど支障なく使えることが確認できたが、末端が浸水したものや、床面に置いてあったモニター関連の小箱類は、強アルカリで腐食してしまった。



図2 リニアック棟エントランス前の陥没



図3 加速空洞下部の粗引真空ポンプの冠水

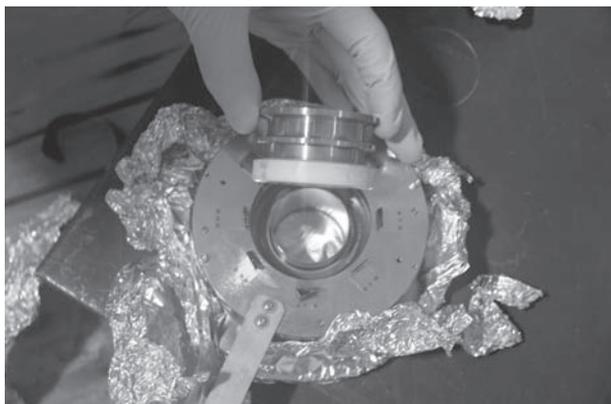


図4 破損した電流モニター

トンネル内機器の被害として、空洞と空洞の間に設置したビーム位置モニタ (BPM) やビーム電流モニター (CT) の破損 (図4) があげられる。これは、加速空洞が地震で振られ、それをつないでいる真空ダクトのベローで変動を吸収できなかったところのモニターが破損したものである。本震時に破損したと考えられ、漏水も相まって水分が多く含まれた空気が加速空洞内部に浸入してしまった。Qマスでの測定結果でも、質量数 18 の  $\text{H}_2\text{O}$  の成分が非常に多く観測されている。現在はイオンポンプを使って連続的な真空排気が可能となったが、大電力での加速空洞コンディショニングの時間を、据付時のようにある程度確保する必要があるようである。

RFQ や DTL, SDDL などの加速空洞では、目視による確認、真空、共振周波数や Q 値などの測定を行った。その結果、のぞき窓からのリークなど小さな故障は認められたが、復旧に時間がかかるような大きな被害は現時点ではなさそうである。原稿の提出段階では、一番上流の DTL のドリフトチューブの位置変化を測定しているところである。

#### 2.4 地上部の建家や機器の状況

地上部の建家では、クライストロンギャラリーなどの柱が傾いたり、その根巻に損傷を受け、クレーンが使えない状態になっている。クレーンは加速器機器復旧の重要な鍵であり、一日も早い復旧が急がれるところである。地上部は基本的には土間床になっており、穿孔の事前調査で床下に空間がある結果が出ている。床面の耐荷重が確保できているかなどは、今後の詳細な調査次第である。また、空調ダクトや配管類の損傷も大きく、これらの復旧が運転再開の律速となる可能性もある。

クライストロンやその電源、立体回路、制御機器、冷却水機器などが地上部の機器として設置されている。

目視や低圧電力の通電で確認できる範囲では、復旧までに長期間かかりそうな大きな損傷は認められていない。ただ、クライストロン電源に使っているイグナイトロンの動作不良が確認され、また、冷却塔の傾きを修正する必要があるなど、いくつか対処すべき課題が見えている。冷却水が復帰し、大電力の通電ができるようになったとき、新たな不具合が発見される可能性もあり、予断は許さない。

#### 2.5 測量結果

トンネル床面の変形を調べるため、水準測量や水平床測量を実施した。その結果、震災前 (昨年夏) に比べ、最大で 40 mm の沈下、東側に最大で 25 mm の変動が観測された。これらは上流から 60 ~ 90 m と、ちょうど浸水が多い位置に相当する。その後も定期的に測量を行っており、3月31日からの2週間で 1 mm の沈下も見られたが、その後の2週間以降は 0.2 mm 以内に収まるなど、変動は落ち着いてきた。

ビーム運転を再開するには、これらの変動に対し、どう再アライメントするかを考える必要がある。震災前のようにまっすぐに並べることは、最大で 40 mm 架台を持ち上げることに相当する。また、電磁石を使っている DTL には、多数の給電線が接続されており、空洞自体を大きく動かすにはケーブルの脱着が要するなど、期間を要することを考慮する必要がある。復旧に許された期間に照らし、ビームへの影響を極力避けて短期間で実施できる整列のシナリオを検討しているところである。

### 3. RCS (3 GeV シンクロトロン)

#### 3.1 被害の概要

3 GeV シンクロトロン棟は、海岸から約 400 m の距離にあり、海拔約 15 m の高台に位置し、地上 1 階地下 2 階の構造で、地下 2 階にある主トンネルに加速器が設置され、その下に電源ケーブル及び冷却水母管が設置されたサブトンネルがある。建屋の柱・はりには鉄骨鉄筋コンクリート、壁は鉄筋コンクリート鋼板パネル、床・階段は鉄筋コンクリート、屋根は鋼板鉄筋コンクリート構造である。この建屋の周りに、主電磁石共振電源用コンデンサーやトランス、高周波加速空洞用変圧整流器、冷却水や空調用のチラー冷凍機や冷却塔、及び、高圧受電盤、等が設置されている屋外ヤードがある (図5)。3 GeV シンクロトロン棟建屋自体の損傷はさほど大きなものではないように見受けられるが、屋外ヤードの被害が甚大である。

受電ヤードが 30 cm ~ 1 m 程度激しく沈降し、建屋高圧受電盤が大きく傾き (図6)、送電用プスバーも破



図5 3 GeV シンクロトロン棟の建屋と周辺の配置



図7 周回道路側に大きく傾いた共振電源用コンデンサーバンクと空洞化が見られる変圧器用基礎



図6 大きく傾いた受電ヤードと高圧受電盤



図8 基礎から浮かび上がった冷却水配管サポート架台

損したため、高圧受電できず、建屋内主トンネルも含めて全区域で停電が続いている。電気が使用できないため、被害状況の詳細な調査もままならず、復旧を急いでいるところではあるが、3 GeV シンクロトロン棟までの取り付け道路及び周回道路の破損が大きく、まずは、その修理から行う必要があり、復旧までには時間がかかりそうである。

受電ヤードと同様に、加速器機器を設置しているヤード部分も大きな被害を受けた。共振電源用のコンデンサーやトランス、高周波加速空洞用の変圧整流器、等を設置した基礎が大きく傾き（図7）、また、空洞化し基礎が浮かんでいる箇所も多数ある。建屋に沿って設置されているケーブルラックも50 cm程度沈下し、破損が大きく、ケーブルの状態を点検中である。また、冷却設備の冷却塔4塔が全て破損、配管サポート架台が基礎から浮かび上がっている状態であり（図8）、修復が必要である。これら基礎の修復及び機器の修理も

周回道路の復旧を待って、早急に行う予定である。

### 3.2 加速器機器の状況

停電している状況下で加速器機器の破損状況の調査を以下の2段階で実施した。まず、発電機を利用しトンネル内のみ電灯を生かし、機器の目視確認を実施した。次に、破損の少なかった装置用受電盤の一部を稼働させ、コンセント程度の電力が使用できる状態を作り、真空排気検査や電源、モニター等の低電力試験を実施した。

加速器構成機器で最も危惧したのは、セラミックスチャンバーの破損である。目視確認では大きな破損は見られなかった。しかしながら、目視確認のみでは、クラック等の小さな破損までは確認できないため、ターボ分子ポンプ6台でリング1周の真空排気検査を行った。結果、4時間排気後の圧力は、場所により1桁近い違いはあるものの、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$  Pa 台であったため、大きなリークはなく、セラミックスチャンバーは概ね

健全であると考えられる。その他、電源やモニターに関して、低電力で可能な点検を継続的に実施しており、いくつかの不具合はあるが、現在のところ、深刻な破損は発見されていない。

屋外ヤードや高圧受電盤の本格的な復旧工事のため、6月中旬から8月末までは完全停電となる予定である。9月の復電後、冷却水設備の復旧を待って、速やかに大電力試験を行い、さらに機器の詳細な点検を行う予定である。

## 4. MR

### 4.1 被害の概要

MR 施設には周長 1.6 km の主トンネルの他に、機器搬入のための大型クレーンを有する搬入棟が 2 箇所、加速器機器の電源や制御系が設置されている電源棟が 3 箇所、空調や冷却水などユーティリティ設備が置かれている機械棟が 2 箇所、さらには緊急時にトンネル

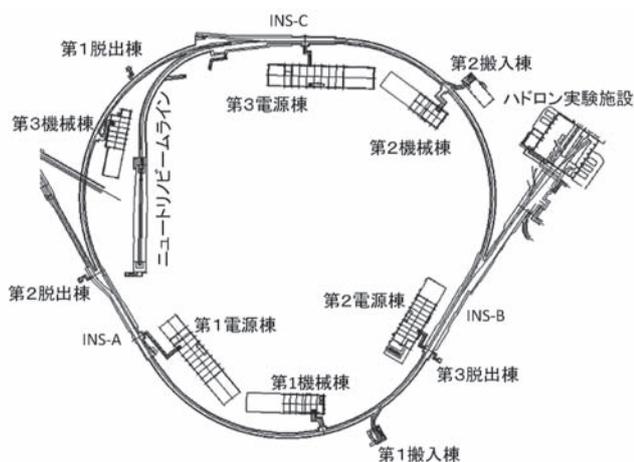


図 9 MR 施設の建屋配置

内からただちに退避するための脱出棟が 3 箇所があり、それらはいずれもサブトンネルで主トンネルにつながっている。図 9 に MR 施設の建屋配置図を示す。主トンネルの床面レベルは海拔 -2.1 m である。

図 10 は震災直後の第 2 搬入棟入り口付近の写真である。MR 施設においても建屋周辺の随所で陥没が見られる。

MR の主トンネルには 30 箇所を越えるクラックが発生し、震災直後にはその一部で地下水の漏水が確認されている。トンネル内の照明が復旧し、トンネル全周の状況を確認できたのは地震発生から 2 週間を経た 3 月 25 日だったが、その間、一部の電磁石は雨のように降り注ぐ湧水の直撃を受け続けた (図 11)。幸い、1.6 km 全周にわたる側構のおかげでトンネルの床面はサブトンネルの一部をのぞき、辛うじて冠水を免れた。漏水が激しい箇所については応急の止水処置を 3 月 31 日と 5 月 9、10 日に実施し、その後は機器に影響を与えるような漏水は解消している。図 12 に MR トンネルから第 2 脱出棟に通じるサブトンネルのエキスパンションジョイント (EJ) 部の写真を示す。脱出棟側が沈降し、EJ 部に 5 cm 程の段差が生じている。EJ 部のゴムはこの変位を吸収して大きく捻れている。今後、余震の影響で捻れたゴムからの漏水も懸念されるため、現在、対応策を検討している。

### 4.2 加速器機器の状況

MR の真空度は 3 月 25 日に全周をコンベクトロンゲージで測定したところ 230 Pa 程度で、ポンプ停止後 2 週間の圧力上昇としては通常よりも 3 桁高かったが、トンネルの低圧電力系が復電した 4 月 1 日に実施したリークテストにおいて、速い取り出し用セプタム電磁石のフランジ接続部に大きなリーク ( $> 10^{-4}$  Pa-m<sup>3</sup>/



図 10 MR 第 2 搬入棟入り口付近の陥没



図 11 MR トンネル内の漏水の様子。トンネル内照明の復電後、電磁石にビニールシートをかけた。

sec) があることが分かった。制御計算機の復旧後に圧力の履歴を調べたところ、このリークが地震発生時に生じたものであることが確認された。その後、リング全周にわたり詳細なリークテストを行ったが、幸いに

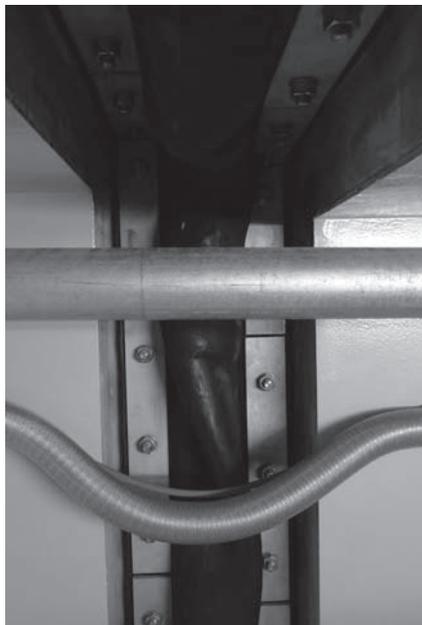


図 12 MR 第 2 脱出棟サブトンネルの EJ 部。左がリング側、右が脱出棟側。

してビームダクト本体の破損が疑われるようなリークはなかった。

MR はリニアックや RCS の状況に比べてインフラの被害が比較的軽度であり、KEK 施設部の多大な尽力もあって、22 kV/6.6 kV の高圧を含むすべての受電と、空調、冷却水は 5 月中にすべて復旧した。5 月 30 日夕方の主電磁石電源の通電試験開始を皮切りに、ビーム輸送系電磁石、ステアリング電磁石、遅い取り出し機器、高周波加速システム、入射機器、速い取り出し機器と、順次、定格運転試験を実施し、概ね問題がないことを確認している。震災直後に地下水に濡れた電磁石も、定格通電で磁場測定を行った結果、層間短絡などの不具合は認められなかった。各種ビームモニタ系についても健全性の確認作業が続いているが、今のところ大きな被害は見つかっていない。

図 13 に 4 月 18 日から 5 月 30 日にかけてレーザートラッカーを用いて測量された主電磁石上基準座の全周測量結果を示す<sup>2)</sup>。トンネル内のクラックやサブトンネルの沈降から懸念された通り、所々にかかなり大きな変位が生じており、水平方向には ± 15 mm 以上、垂直方向にも Peak to peak で 10 mm の凹凸が生じている。クラック箇所、あるいは搬入棟や電源棟などのサブトンネルが接続されている箇所の一部に特に大きな変位

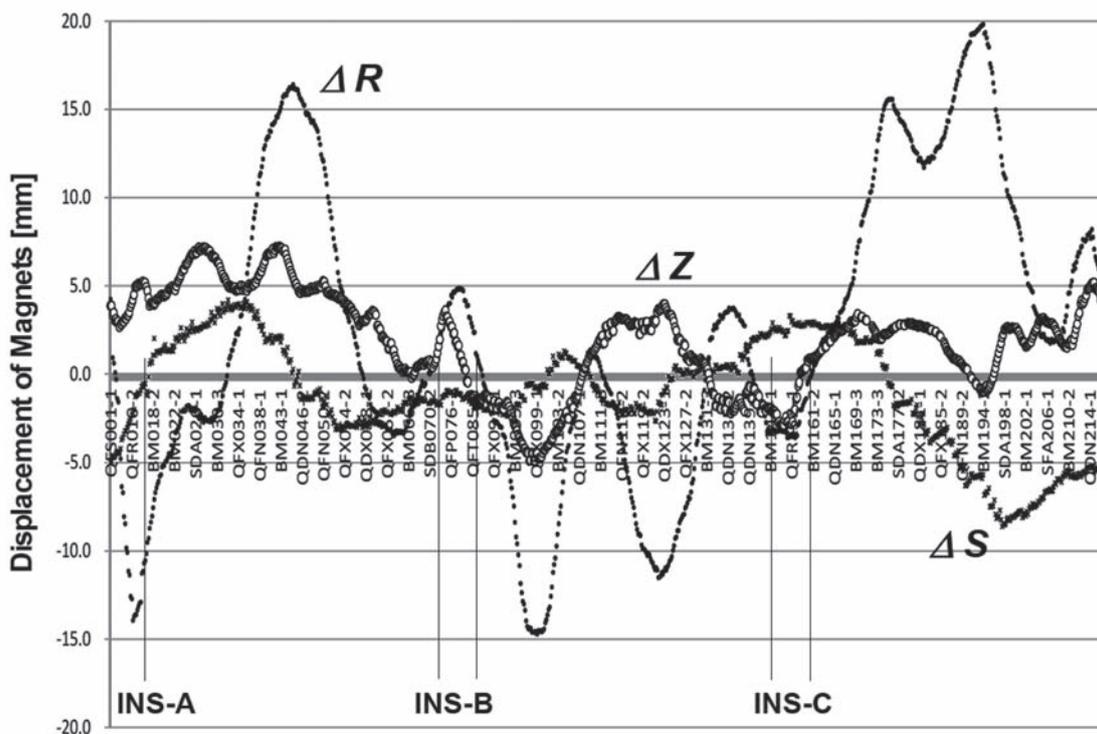


図 13 MR 全周の電磁石基準座の測量結果。水平方向 (R)、垂直方向 (Z)、ビーム軸方向 (S) を示す。INS-A, B, C は 3 箇所直線部 (図 9 参照)。



図 14 中性子ビームラインにおいて崩落しかけていた遮蔽体 (MLF, 新井正敏氏提供)

が認められている。今後、早急に全周にわたるアライメントを実施する方針で、現在は、効率的なアライメントのシナリオを検討している。

## 5. 実験施設

### 5.1 MLF

MLF は東西に延びた中性子の長尺ビームライン建屋が主建屋に比べ 15 cm ほど沈下し、ビームラインに損傷が生じている。さらに中性子を発生する水銀ターゲットを設置したターゲット台車が地震で移動し、接続されているベローズが伸びきってしまった。ターゲットの交換が必要だが、ターゲット容器の製作工場が今回の震災で被災しているために納入が今年の 11 月ごろになる見込みである。中性子ビームラインのシャッター部は半数程度に真空リークが確認されており、さらに詳しい調査が継続中である。また、鉄製前置き遮蔽体の多くが大きくずれており、一部には崩落の危険性が高いものもある (図 14)。数千トンにおよぶ遮蔽体を一度外に引き出し、積み直す必要がある。

### 5.2 ニュートリノ, およびハドロン実験施設

ニュートリノ実験施設でも建屋周辺で大きな陥没が見られ、現在、建設会社による復旧工事が行われている。一方、機器本体は概ね健全で、今のところ大きな問題は確認されていない。震災直後は本国に帰国していた T2K グループの外国人研究者も、5 月中旬ごろからは徐々に東海村に戻りはじめ、担当している機器の点検を開始している。

ハドロン実験施設でも建屋周辺に陥没が生じている。また、ハドロン実験施設の南北梁を固定しているボル

ト (19mm  $\phi$ ) 6 本の全数が破断しており、崩落の危険もあることが判明している。現在、KEK 施設部による詳しい調査と復旧策の検討が進んでおり、7 月から本格的な修復工事が開始される予定である。今のところ機器本体には大きな損傷は認められないが、遮蔽体のずれは随所に見られ、遮蔽体の積み直しが計画されている。

## 6. 復旧計画

5 月 20 日、J-PARC センターとしてのこれからの復旧スケジュールが公表された。その要点は以下の 2 点である。

- (1) 2011 年 12 月から J-PARC 施設はビーム調整運転を開始する。
- (2) 2011 年度内に約 2 ヶ月の共用運転時間を確保する。

ただし、その実現のためには、被害を受けた施設・機器の修復に必要な予算が (補正予算で) 遅滞なく手当てされること、および、特に被害が大きいリニアック、RCS のインフラの回復 (JAEA 建設部が主導) が上記スケジュールに整合して進められることが前提となる。J-PARC は 2008 年度に利用運転を開始して以来、加速器の調整を進めながら段階的にビーム強度を上げ、震災前の 2011 年 3 月の時点では、MLF に対して 220 kW、T2K 実験に対して 145 kW のビームを供給していた。6 月 15 日、T2K グループは震災前までに取得したすべてのデータを解析した結果、ミュー型ニュートリノから電子型ニュートリノへの振動を示す候補事象を 6 事象観測し (バックグラウンドは 1.5)、電子型ニュートリノ出現現象の兆候を世界ではじめて捉えたと発表した<sup>3)</sup>。MLF やハドロン実験施設においても、めざましい成果が続々と出ていただけに、震災による実験中断の影響は計り知れない。少しでも早く利用運転を再開すべく、現在、加速器、実験施設とも急ピッチで復旧作業を進めている。

## 参考文献

- 1) N. Ouchi, "J-PARC Linac Facilities and their Features". *Journal of Korean Physical Society*, 48 (4), 711 (2006).
- 2) M. Shirakata et al., "Alignment Status of J-PARC Main Ring after the Mega Quake", *Proc. 8<sup>th</sup> PASJ*, Tsukuba, 2011.
- 3) [http://www.kek.jp/ja/news/press/2011/J-PARC\\_T2Kneutrino.html](http://www.kek.jp/ja/news/press/2011/J-PARC_T2Kneutrino.html)