JAEA-Technology
2011-039

東日本大地震のJ-PARC中性子源ステーションに対する影響

Influence of Great East Japan Earthquake on Neutron Source Station in J-PARC

酒井 健二　坂元 眞一　木下 秀孝　関 正和
羽賀 勝洋　粉川 広行　涌井 隆　直江 崇
春日井 好己　達本 衡輝　麻生 智一　長谷川 勝一
前川 藤夫　及川 健一　大井 元貴　渡邊 聡彦
勅使河原 誠　明午 伸一郎　池崎 清美　圷 敦
原田 正英　高田 弘　二川 正敏

Kenji SAKAI, Shinichi SAKAMOTO, Hidetaka KINOSHITA, Masakazu SEKI
Katsuhiro HAGA, Hiroyuki KOGAWA, Takashi WAKUI, Takashi NAOE
Yoshimi KASUGAI, Hideki TATSUMOTO, Tomokazu ASO, Shoichi HASEGAWA
Fujio MAEKAWA, Kenichi OIKAWA, Motoki OOI, Akihiko WATANABE
Makoto TESHIGAWARA, Shin-ichiro MEIGO, Kiyomi IKEZAKI, Atsushi AKUTSU
Masahide HARADA, Hiroshi TAKADA and Masatoshi FUTAKAWA

J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン

Materials and Life Science Division
J-PARC Center

March 2012

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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（http://www.jaea.go.jp）
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, 2012

JAEA-Technology 2011-039

東日本大地震の J-PARC 中性子源ステーションに対する影響

日本原子力研究開発機構
J-PARC センター　物質・生命科学ディビジョン

酒井　健二、坂元　眞一、木下　秀孝、関　正和、羽賀　勝洋、
粉川　広行、涌井　隆、直江　崇、春日井　好己、達本　衡輝、麻生　智一、
長谷川　勝一、前川　藤夫、及川　健一、大井　元貴、渡邊　聡彦※、
勅使河原　誠、明午　伸一郎、池崎　清美※、圷　敦※、原田　正英、
高田　弘、二川　正敏

（2011 年 12 月 16 日受理）

本報告では、東日本大震災（M9.0）の発生時における J-PARC 物質･生命科学実験施設（MLF）の中性子源ステーションの挙動、被害、復旧状況を調査し、本ステーションの緊急事態に対する安全設計について検証する。

J-PARC/MLF の中性子源ステーションは、加速器から供給される陽子ビームを水銀ターゲットに入射することで発生した中性子を、中性子実験装置に供給する。本ステーションは、水銀ターゲット、3 台の超臨界水素モデレータ、反射体、水冷遮蔽体、ヘリウムベッセル、中性子ビームシャッター、生体遮蔽体などの機器で構成されている。外部電源喪失時には、陽子ビーム停止信号が発報し、非常用自家発電機により本ステーション機器の制御機能は維持され、全ての循環システムはインターロックにより自動停止し、水素は屋外に緊急放出される。

2011 年 3 月 11 日には、茨城県でも至る所で激しい揺れが観測された。当日、中性子源ステーションは、ビーム運転再開に向けて、全機器をスタンバイにしていた。大震災発生時、MLF では、幾つかの機器で大きな揺れを検知した後、外部電源が喪失し、全循環システムが自動停止した。水素は設計通り屋外に放出され、機器異常による水銀、水素、放射性ガスの漏えいも生じなかった。一方、激しい揺れは、遮蔽体ブロックのずれ、建屋周辺の地盤沈下による外部供給配管の破断を引き起こした。この配管破断による圧縮空気の圧力低下は、空気操作弁や水銀ターゲット台車固定装置などに影響を及ぼしたが、主要機器の大きな破損までは至らなかった。これらの結果は、本ステーションの緊急事態に対する安全設計の妥当性を実証できたとともに、いくつかの改善点も見出された。

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
※ 技術開発協力員

JAEA-Technology 2011-039

Influence of Great East Japan Earthquake on Neutron Source Station in J-PARC

Kenji SAKAI, Shinichi SAKAMOTO, Hidetaka KINOSHITA, Masakazu SEKI, Katsuhiro HAGA, Hiroyuki KOGAWA, Takashi WAKUI, Takashi NAOE, Yoshimi KASUGAI, Hideki TATSUMOTO, Tomokazu ASO, Shoichi HASEGAWA, Fujio MAEKAWA, Kenichi OIKAWA, Motoki OOI, Akihiko WATANABE※, Makoto TESHIGAWARA, Shin-ichiro MEIGO, Kiyomi IKEZAKI※, Atsushi AKUTSU※, Masahide HARADA, Hiroshi TAKADA and Masatoshi FUTAKAWA

Materials and Life Science Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 16, 2011)

This report investigates the behavior, damage and restoration of each component in a neutron source station of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC at the time of the Great East Japan Earthquake (M9.0) and verified the safety design for emergency accidents in the neutron source station.

The neutron source station of the MLF at the J-PARC generates neutrons by injecting proton beams into a mercury target, and supplies to user experimental apparatuses. It consists of the mercury target, three moderators filled with supercritical hydrogen, reflectors, water cooling shields, a vessel filled with helium gas, neutron beam shutters, biological-shields and so on. In case of loss of their external electric power supply, a control function for the source station is kept by an emergency power supply. According to interlock sequences in an emergency, a signal for terminating the beam operation is transmitted, the circulators shut down automatically, and the hydrogen gas is released out of the building.

On March 11 in 2011, strong shocks caused by the earthquake were observed all over Ibaraki prefecture. At the date, a status of the source station was ready for the restart of beam operation. In the MLF, after strong quakes were detected at the several instruments, the external power supply was lost, all of the circulators shut down automatically, and the hydrogen gas was released. The leakages of mercury, hydrogen and radio-activation gases did not occur. While, the quakes made gaps between the shield blocks and ruptured external pipe lines for compressed air and water by subsidence around the building. But significant damages to the components were not found though the pressure drop of compressed air lines influenced on the mercury target trolley lock system and pneumatic operation values. These results substantiated the validity of the safety design for emergency accidents in the neutron source station in the MLF, and suggested several points of improvement.

Keywords： MLF, Neutron Source Station, Great East Japan Earthquake, Safety Design

※ Collaborating Engineer

目次

1. 序 1
1.1 中性子源施設の概要 1
1.2 中性子源施設の大震災の影響と復旧について 5
2. 施設各設備の大震災の影響と復旧について 14
2.1 施設建屋・ユーティリティ 14
2.1.1 概要 14
2.1.2 建屋、周辺道路 18
2.1.3 電気、機械設備 20
2.1.4 クレーン設備 22
2.2 水銀ターゲット設備 25
2.2.1 概要 25
2.2.2 水銀ターゲット容器と台車 26
2.2.3 水銀循環システム 30
2.2.4 気体廃棄物処理系 33
2.3 極低温水素設備 36
2.3.1 概要 36
2.3.2 地震発生時の低温水素システムの挙動 37
2.3.3 被害状況調査 40
2.3.4 今後の対応策 45
2.4 中性子源ステーション機器 47
2.4.1 概要 47
2.4.2 モデレータ 48
2.4.3 ヘリウムベッセル・ベッセル内機器 48
2.4.4 ステーション内遮蔽体 49
2.5 中性子ビームライン機器 52
2.5.1 概要 52
2.5.2 ベッセル窓 52
2.5.3 中性子ビームシャッター 54
2.5.4 前置き遮蔽体 61
2.6 中性子源附帯設備 64
2.6.1 概要 64
2.6.2 附帯冷却設備 66

2.6.3　再結合器 70
2.7　遠隔操作機器 74
2.7.1　概要 74
2.7.2　パワーマニピュレータ 76
2.7.3　減速材等遠隔操作設備 77
2.7.4　移送キャスクおよび床上遮蔽体 77
2.7.5　切断装置 79
2.7.6　ターゲット交換台車 80
2.8　MLF 全体制御システム 81
2.8.1　概要 81
2.8.2　MLF-GCS の地震時の挙動 83
2.8.3　統括制御・インターロック系 84
2.8.4　人的安全保護システム（PPS） 86
2.8.5　共有サーバー・LAN・タイミング系 87
2.9　3NBT 90
2.9.1　概要 90
2.9.2　電磁石 95
2.9.3　真空系 98
2.9.4　冷却水設備 100
2.9.5　ビームモニター 103
2.9.6　制御・インターロック 106
2.9.7　陽子ビーム窓 109
2.10　アライメント 111
2.10.1　J-PARC 全体における 3NBT・MLF のアライメント 111
2.10.2　MLF アライメント 113
2.10.3　3NBT 機器アライメント 115
3．まとめ 118
謝辞 118
付録　中性子源施設の復旧前後の状況 119

Contents

1. Introduction 1
1.1 Outline of Neutron Source Facility 1
1.2 Influence of Great East Japan Earthquake and Restoration on Neutron Source Facility 5
2. Influence of the Earthquake and Restoration on each equipment in Neutron Source Facility 14
2.1 Facility Building and Utility 14
2.1.1 Outline 14
2.1.2 Building, Road 18
2.1.3 Electric Power Supply,Water Supply, Air Conditioning, Compressed Air 20
2.1.4 Crane 22
2.2 Mercury Target System 25
2.2.1 Outline 25
2.2.2 Mercury Target Vessel and Target Trolley 26
2.2.3 Mercury Circulation System 30
2.2.4 Off Gas System 33
2.3 Cryogenic Hydrogen Circulation System 36
2.3.1 Outline 36
2.3.2 Behavior of Hydrogen Circulation System at the Earthquake 37
2.3.3 Investigation of Damage 40
2.3.4 Safety Measures in Future 45
2.4 Fundamental Components of Neutron Source Station 47
2.4.1 Outline 47
2.4.2 Moderators 48
2.4.3 Helium Vessel, Instruments of Vessel 48
2.4.4 Shields in Neutron Source Station 49
2.5 Neutron Beam Line Components in Neutron Source Station 52
2.5.1 Outline 52
2.5.2 Neutron Beam Extraction Ports of Helium Vessel 52
2.5.3 Neutron Beam Shutter 54
2.5.4 Pre-shield 61
2.6 Auxiliary Equipment for Neutron Source Station 64
2.6.1 Outline 64
2.6.2 Auxiliary Cooling Equipment 66

2.6.3 Recombiner 70
2.7 Remote Handling System 74
2.7.1 Outline 74
2.7.2 Power Manipulator 76
2.7.3 Reflector-moderator Remote Handling System 77
2.7.4 Transfer Cask and Floor Valve 77
2.7.5 Cutting Device 79
2.7.6 Target Exchange Truck 80
2.8 MLF General Control System (MLF-GCS) 81
2.8.1 Outline 81
2.8.2 Behavior of MLF-GCS at the Earthquake 83
2.8.3 Integral Control and Interlock System 84
2.8.4 Personnel Protection System (PPS) 86
2.8.5 Server, LAN and Timing System 87
2.9 3NBT 90
2.9.1 Outline 90
2.9.2 Electromagnet System 95
2.9.3 Vacuum System 98
2.9.4 Water Coolant System 100
2.9.5 Beam Monitor System 103
2.9.6 Control and Interlock System 106
2.9.7 Proton Beam Window 109
2.10 Alignment 111
2.10.1 Alignment of MLF and 3NBT in J-PARC 111
2.10.2 Alignment of MLF 113
2.10.3 Alignment of Instruments in 3NBT 115
3. Summary 118
Acknowledgment 118
Appendix Status of Neutron Source Facility before and after Restorations 119

List of Authors

1. Introduction	
1.1 Outline of Neutron Source Facility	Kenji SAKAI, Masatoshi FUTAKAWA, Hiroshi TAKADA
1.2 Influence and Restoration of Great East Japan Earthquake on Neutron Source Facility	Kenji SAKAI
2. Influence and Restoration of the Earthquake on each equipment in Neutron Source Facility	
2.1 Facility Building and Utility	Shinichi SAKAMOTO, Hidetaka KINOSHITA, Masakazu SEKI
2.2 Mercury Target System	Katsuhiro HAGA, Hiroyuki KOGAWA, Takashi WAKUI, Takashi NAOE, Yoshimi KASUGAI
2.3 Cryogenic Hydrogen Circulation System	Hideki TATSUMOTO, Tomokazu ASO, Shoichi HASEGAWA
2.4 Fundamental Components of Neutron Source Station	Fujio MAEKAWA
2.5 Neutron Beam Line Components in Neutron Source Station	Fujio MAEKAWA, Kenichi OIKAWA
2.6 Auxiliary Equipment for Neutron Source Station	Hidetaka KINOSHITA, Yoshimi KASUGAI
2.7 Remote Handling System	Hidetaka KINOSHITA, Makoto TESHIGAWARA
2.8 MLF General Control System (MLF-GCS)	Kenji SAKAI, Motoki OOI, Akihiko WATANABE
2.9 3NBT	Shin-ichiro MEIGO, Shinichi SAKAMOTO, Motoki OOI, Kiyomi IKEZAKI, Atsushi AKUTSU
2.10 Alignment	Shin-ichiro MEIGO, Masahide HARADA

This is a blank page.

１．序

東日本大震災では、まず本震 3 月 11 日 14 時 46 分 18 秒に宮城県沖で発生し、その後、断続的に余震が続き、15 時 15 分 34 秒に最大余震が茨城県沖で発生した。地震のマグニチュードは M9.0 であり、未曾有の甚大な被害は関東から東北各地の広範囲に及んだ [1-1)]。この地震により、大強度陽子加速器施設（Japan Proton Accelerator Research Complex；J-PARC）では、地盤沈下、外部電源の遮断、建屋や加速器トンネルの変形、ひび割れ、地下水の漏れ出しなどに被害が生じた。これらの事象に対して、各構成機器がどのような挙動を示し、安全に停止あるいは復帰できたのかを検証しておくことは、今後の改善策として的確に反映させるために肝要である。本章では、まず東日本大震災発生時における J-PARC/物質･生命科学実験施設（Materials and Life Science Experimental Facility；MLF）の中性子源構成機器設備の挙動の調査結果について概説する [1-2)]。各構成機器の地震時の挙動、被害状況、復旧方法などの詳細については、第 2 章に記載する。

1.1　中性子源施設の概要

J-PARC/MLF は、リニアック、3GeV-RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)で加速された陽子ビームを 3GeV 陽子ビーム輸送施設（3NBT）で約 330m輸送し、建屋内に設置したグラファイトや水銀ターゲットに入射することで 2 次ビーム（ミュオン、中性子）を生成し、それらの 2 次ビームを各ビームライン下流に設置された各種実験装置に供給することで、物質科学、材料科学や生命科学に関する様々な実験・研究を行う施設である。

Fig.1.1-1 に MLF の鳥瞰図を示す。MLF 建屋は長さ 146m、幅 70m、高さ 30m という規模をもち、線源エリア、第 1 実験ホール、第 2 実験ホールという 3 つに大別できる。建物の長手方向に、2 つのターゲット装置と陽子ビーム輸送ラインがあり、その両端の部分には、電気設備や非常用発電機、冷却水供給と排水の設備、換気、空調、排気の設備、電話やネットワーク等の通信設備、建屋監視や消火設備等の安全設備のユーティリティが配置されている（2.1 節）。

Fig.1.1-2 は中性子源ステーション内の構造を、Fig.1.1-3 はステーション内の液体・ガス循環供給システムの運転状態を監視する「中性子源全体監視」画面を示す。MLF では、3NBT を通じて陽子エネルギー3GeV、電流 333μA、25Hz のパルス状陽子ビームを受ける。陽子ビームのうち約 10%はミュオン生成ターゲット及びその下流部に位置するスクレーパーで失われ、その残りが陽子ビーム窓を通過し、水銀ターゲットに入射する。陽子ビーム入射による核破砕反応によって発生した中性子は、水銀ターゲット上下に設置された 3 台の超臨界水素モデレータで減速され、中性子ビームライン下流の各中性子実験装置に供給される。モデレータの周囲には反射体や水冷遮蔽体を配置し、それらはヘリウムガスを封入したベッセル内に設置される。ベッセルの外周には中性子シャッター、生体遮蔽体、アウターライナー、前置き遮蔽体などの機器が配置され、中性子源ステーションを形成している（2.4、2.5 節）。中性子ユーザーは中性子シャッターを開閉することで、実験装置への中性子ビームの供給・停止を行う。水銀ターゲットやモデレータの配管経路は循環ループ形状になっており、核破砕反応により発生する熱を除去するために、ステーション外側で冷却された水銀や超臨界水素が一定の流量を保ちながら供給されている。中性子源ステ

ーション内部には、反射体や水冷遮蔽体などのベッセル内機器や生体遮蔽体等の冷却のため、冷却水やガス（ヘリウム、空気）が一定流量で循環している（Fig.1.1-3）。

水銀ターゲットは、ターゲット容器と水銀循環系を可動式の台車上に搭載した設備である。ターゲット容器は、水銀を内包する容器の外側を二重の保護容器で覆う構造で、万が一水銀が漏洩した場合でも汚染拡大を防止する。水銀循環系はサージタンク、電磁式水銀ポンプ、熱交換器とこれらをつなぐ配管やバルブ・センサー類で構成され、定格流量 41m^3/h で水銀を供給する。更に水銀循環系には、核破砕反応により生成された放射性ガスを、外部放出可能なレベルに低減させる気体廃棄物処理設備が接続されている（2.2 節）。

極低温水素設備は、18 K、1.5MPa の超臨界圧の低温水素を 3 基のモデレータに供給してターゲットで発生した中性子のエネルギーを落とすと共に、そこで発生する核発熱を低温水素により強制循環冷却するためのシステムで、ヘリウム冷凍機の冷却端に水素循環システムが熱交換器を介して接続される二元冷凍サイクルで構成される。水素循環システムは、大流量で安定な強制循環を実現するための動圧気体軸受方式の遠心ポンプや、断続的なビーム運転による系統の圧力変化に対応するためのヒーターとアキュムレータ併用システムを採用している。ヘリウム冷凍機は、1 台のタービン膨張機と 3 台の熱交換器で構成している。また水素漏洩に対する防御策として水素配管を窒素ガスやヘリウムガス層でカバーするブランケット構造を採用している（2.3 節）。

中性子源ステーションに水やガスを供給する附帯冷却設備は、中性子源構成機器周りの高放射能レベル機器を冷却する 1 次冷却水循環系、 実験ホール機器を冷却する低レベル冷却水循環系、ヘリウムベッセルや遮へい体を冷却するガス・空気循環系、熱交換器を介して各冷却系の熱を除去する 2 次冷却水系、及びヘリウムガス供給・排気系などで構成される。1 次冷却水系のサージタンクには、放射線分解により発生した水素と酸素を水に戻して系統の圧力増加を防ぐ再結合器が接続されている（2.6 節）。

ターゲット、モデレータ、陽子ビーム窓などの中性子源ステーション内機器は、定期的に交換する設計である。Fig.1.1.1-4 に中性子源ステーションと放射化機器取扱室（ホットセル）の鳥瞰図を示す。ターゲット容器や水銀ポンプなどの水銀循環系機器は、ホットセル内でインセルクレーンやパワーマニピュレータなどの遠隔操作機器を用いて保守・交換される（2.7 節）。反射体/モデレータ集合体は反射体プラグの先端に取り付けられ、ヘリウムベッセル内に設置されている。モデレータ容器や反射体は、反射体プラグと共に移送キャスクを用いて中性子源ステーションから引抜かれ、大型機器取扱室を経由してホットセルに移送される。水銀ターゲット容器などの使用済の放射化機器は建屋地下に設けた放射化機器保管室で一時的に保管される。中性子源ステーションを安全に効率よく運転するために、MLF は独立した全体制御システム（MLF-GCS）持ち、運転状況に応じた機器の監視操作、機器保護システム（Machine Protection System; MPS）やターゲット保護システム（Target Protection System; TPS）という陽子ビーム停止に関わるインターロック系統、及び放射線被曝から人員を保護するための信頼性の高い人的安全保護システム（Personnel Protection System; PPS）などを運用している（2.8 節）。

MLF に陽子ビームを輸送する 3NBT は、平均 1 W/m 以下という厳しいビームロス条件で設計されており、中性子源、ミュオン源に最適なビームプロファイルに整形する役割を持つ。ビームラインを構成する電磁石、真空系機器、ビームモニター等の機器は概ね 0.1 mm より良い精度で

設置され、安全装置、冷却水系の配管、空調ダクトがライン全体に配置されている。電磁石を励磁する直流電源、各種コントローラー、信号取得用のモジュール類は、すべて付属の建屋である3NBT 棟、および MLF 棟北側（3NBT 下流部）に設置されている。これらの 3NBT 機器は、3NBT 棟及び 3NBT 下流部の各制御室に設置された制御・インターロック設備により統括的に運転監視されている（2.9 節）。

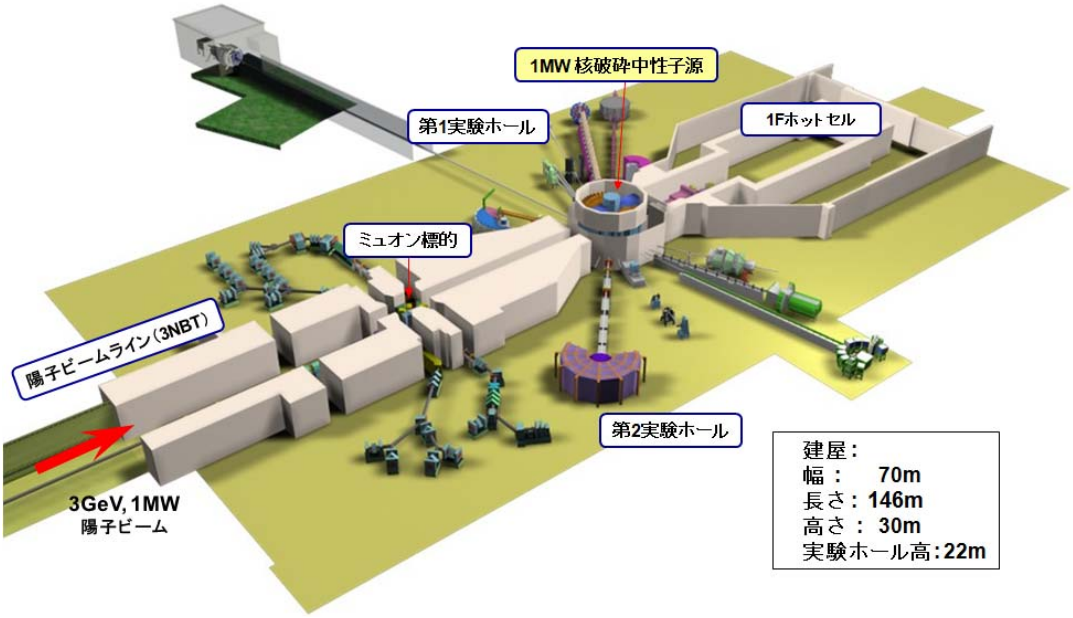


Fig.1.1-1: Bird's-eye view of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF)

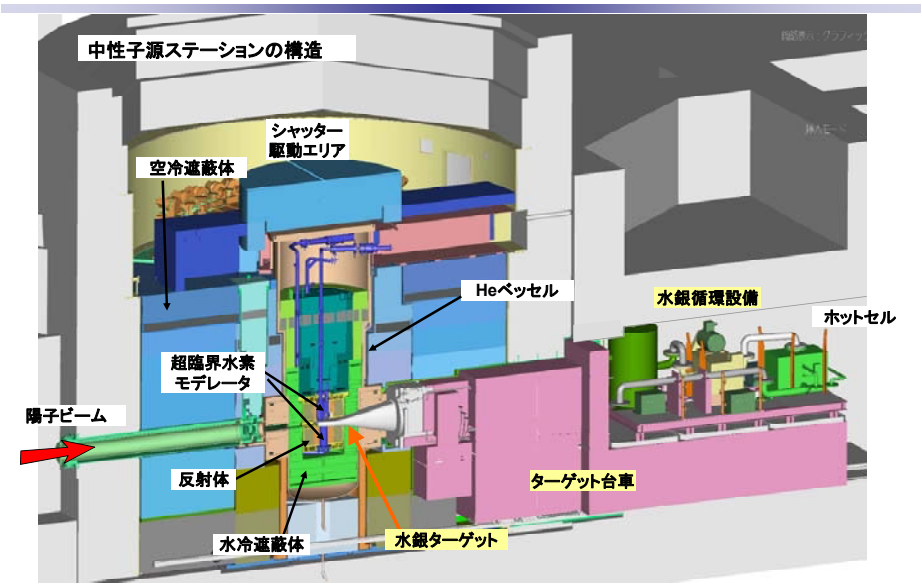


Fig.1.1-2: Inner structure of neutron source station

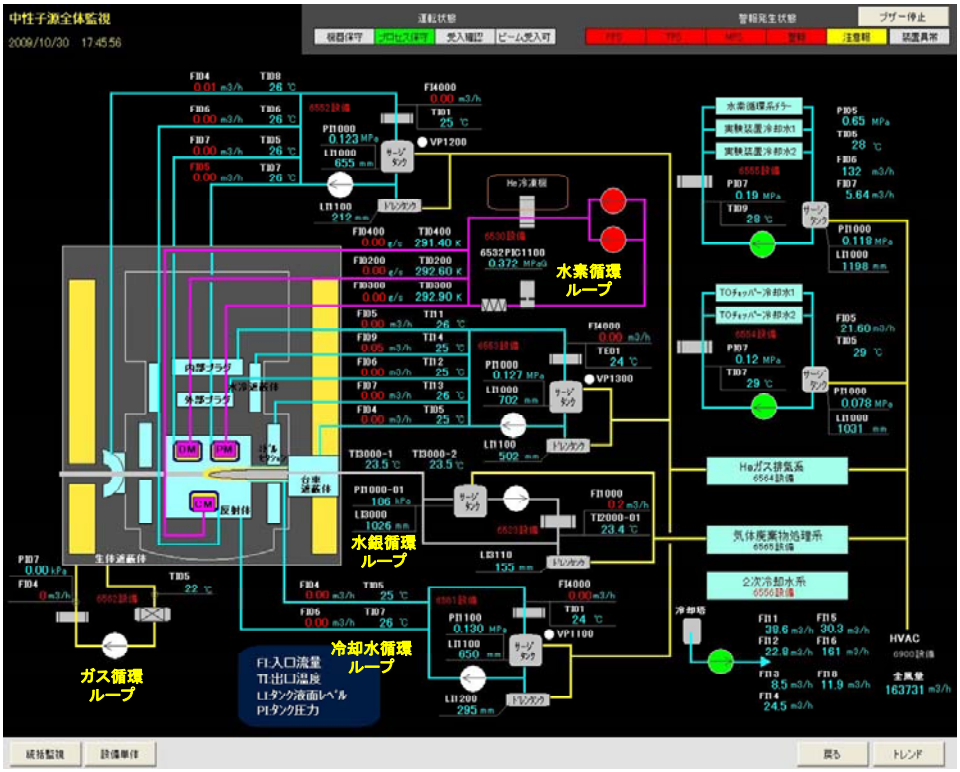


Fig.1.1-3: Integral window of neutron source station for monitoring circulation systems

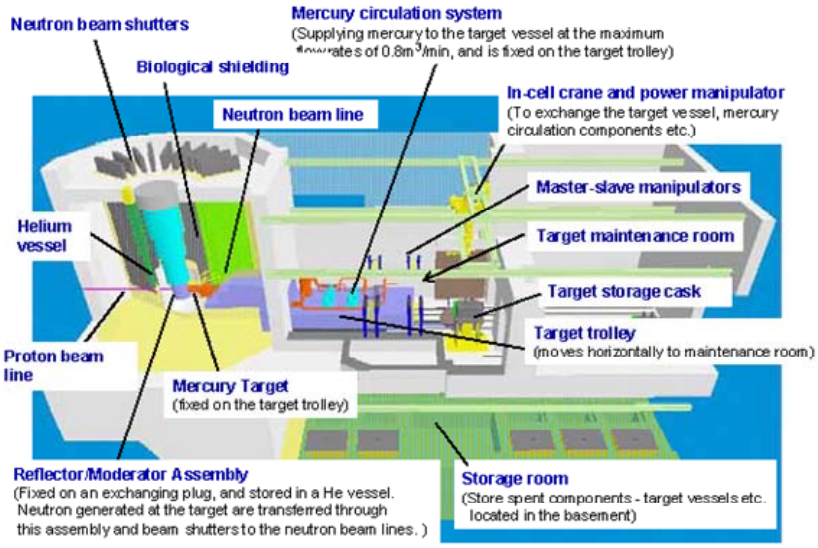


Fig.1.1-4: Bird's-eye view of neutron source station and hot cell

1.2　中性子源施設の大震災の影響と復旧について

MLF 建屋及び中性子源ステーションは、緊急事態に対し様々な安全設計を施している。地震に関連する安全設計を以下に列挙する。なお本施設では、耐火性能や防爆性能についても十分に考慮している。

- 建屋及びステーション機器は、0.25G の耐震強度で設計されている。
- 主要機器の異常検知時には、陽子ビーム停止信号が専用ケーブルを介して発報される。対象機器の電源喪失やインターロック信号線が断線した場合でも同様である。
- 停電時には、無停電電源装置（UPS）と非常用自家発電機が順次稼働し、各機器の制御機能は維持され運転情報も記録される。循環システムは各々のインターロックシーケンスに従い安全に自動停止し、水銀や 1 次冷却水などの各種循環系統及び真空系統の気密は維持され、水素は屋外に緊急放出される。一方、ターゲット台車や中性子シャッターなどの駆動機器は、圧縮空気や機械的な固定機能により停止状態を維持する。
- 圧縮空気ラインの圧力低下が生じた場合、各設備の空気操作弁の開閉状態は、設備機器の安全を担保する方向に移行する。その際、放射性ガスなどの漏洩は生じない様に考慮している。

◇地震発生時の挙動

東日本大震災当日、MLF では、朝 9 時に陽子ビーム供用運転を一時停止し、17 時以降に予定されていたビーム運転に向けて、中性子源ステーション機器をスタンバイにした状態で、14 時 46 分 18 秒の大地震発生時刻を迎えた。以下、発生直前までの主要機器状態を列挙する。

- 建屋ユーティリティは、電気系、冷却水供給と排水、換気、空調、排気系などは、全系統通常稼働中、MLF 棟内の殆どのクレーンは未使用時の停止位置にいた。
- 水銀ターゲットは、ヘリウムベッセル内に挿入されターゲット容器のシール機能でヘリウムベッセルの気密を保持した状態で、ビーム運転位置に固定されていた。ヘリウムベッセル内は微正圧のヘリウムガスで満たされていた。
- 水銀循環系は、定格流量（41m^3/h）で水銀を循環供給していた。気体廃棄物処理系は、ガスホルダー3 基でガスを保持し、残りの 1 基で緊急時のガス受入をできる体制であった。
- 極低温水素設備は、モデレータに超臨界水素を定格流量で循環供給しており、水素ポンプや膨張タービンなどは高速回転していた。
- 中性子源附帯冷却設備機器は全て定格運転中で、中性子源ステーション機器に冷却水やガス・空気を循環供給していた。
- 遠隔操作機器は、全機器が未使用時の停止位置にいた。
- 中性子シャッターは、駆動装置であるサーボモータにより運用中の全シャッターが閉位置で、宙吊状態で停止していた。中性子ビームが透過するシャッター内角型ダクトは真空に保持されていた。
- MLF-GCS も全系統稼働中で、MLF をビーム運転エリアに組み込める状態であった。

・ 3NBT も、電磁石、真空系機器、冷却水、ビームモニター、制御・インターロック等の全機器が稼働中で、ビーム運転再開待ちの状態だった。

本震発生時の中性子源ステーションの挙動は、地震発生時刻（14 時 46 分 18 秒）以降の構成機器の履歴データと復旧時の状態より、大よそ把握することができる。本震発生時の中性子源ステーション各設備の挙動と被害状況を、Table.1.2-1 に列挙する。挙動解析の結果、中性子シャッターや循環システムなどのステーション機器は、本震発生から約 90 秒後に大きな揺れを感知し始め、約 150 秒後に外部電源が喪失し、直後に、殆どの循環システムが自動停止した。水素は設計通り屋外に放出され、機器異常による水銀、水素、放射性ガスの漏えいは生じなかった。機器の監視機能は、17 時頃に MLF 全体制御系を手動で停止するまで非常用自家発電機で維持されていた。一方では、遮蔽体ブロックのずれ、シャッター内角型ダクトの真空の破れ、建屋周辺の地盤沈下、外部供給配管の変形や破断などが起こった。配管破断による計装用圧縮空気圧の低下は、空気操作弁やターゲット台車固定装置などに影響を及ぼした。特に台車固定機能が喪失したことで、最大余震直後に、台車がベッセルから引き抜かれる方向に約 30cm 移動し、ターゲット容器のシール用ベローズが伸びて、塑性変形範囲を超えて使用不可となった。しかし全体としては、復旧に長期間かかるような主要機器の大きな損傷は生じなかった。

Fig.1.2-1 (A)は建屋空調の排気風量、(B)は各種冷却水タンクの挙動を示す。空調は、本震発生から約 180 秒後に外部電源喪失のために全系統が停止したが、非常用電源、空調用圧空機が順次稼働し、重要な 1F ホットセル空調がほぼ定常状態に復旧した。本震と最大余震（1756 秒に相当）の揺れの影響は、Fig.1.2-1 (A)の第 2 実験ホール排気風量及び(B)の各種タンク液位の時間経過に顕著に表れている（時間は 5 秒毎に記録）。特に膨張タンク液位は、90 秒過ぎぐらいから揺れの影響が見え始め、これは中性子シャッターの揺れの感知とほぼ一致している。なお図(B)のターゲット・反射体冷却水サージタンクの約 150 秒後の液位上昇は、停電による冷却水ポンプ停止の影響である。

Fig.1.2-2 は、本震発生から 300 秒後までの水銀、極低温水素、附帯冷却系の各種循環システムの流量、トルク、圧力などの時間変化を表している（時間は 5 秒毎に記録）。図より、本震発生から約 150 秒後に、水銀及び附帯冷却系の循環ポンプが停止し、約 5 秒後に水素ポンプが停止したことがわかる。ポンプや流体の慣性などの違いより停止に至るまでの時間には若干の差があるが、殆どの循環システムで 180 秒以内に停止している。

Fig.1.2-3 (A)は、ターゲット台車位置とヘリウムベッセルの気密に関わる機器の時間変化を、(B)は最大余震発生から 140 秒後までの同じ機器の時間変化を拡大して示す。この図より、圧縮空気の圧力低下で台車固定機能が喪失したため、最大余震発生から約 35 秒後に約 30cm 後方に移動し、その結果、ベッセルの気密が維持できなくなり、ベッセル内圧力やターゲット容器シール供給圧力が低下した一連の挙動が説明できる。一方、陽子ビーム窓側のピローシール機能はある程度維持されていたことも、その供給圧力の挙動より分かる。以上、今回の東日本大震災発生時の中性子源ステーションの挙動の調査結果は、本設備の緊急事態に対する安全設計の妥当性を概ね実証した。

◇健全性確認と復旧作業

J-PARC センターでは、4 月上旬までに各施設被害調査を一通り実施、4 月下旬には施設・設備の回復シナリオの作成、5 月上旬には、J-PARC センター全体の復旧プランを確定させるという復旧マイルストーンが、3 月 24 日の J-PARC 復旧対策会議において示された。中性子源施設の本格的な被害調査･復旧作業は､出勤体制が通常勤務となった 2011 年 3 月 28 日から始まり､3 月 29 日からは､MLF 制御室で毎朝打合せを行い､各設備機器の調査進捗を確認しながら作業を実施した。中性子源ステーションの被害調査は、目視による被害調査、照明、制御機器電源などのユーティリティの復旧、電気信号・計器表示による機器異常の調査という手順で進め、4 月中旬には、各設備機器の被害状況一覧（Table.1.2-1 参照）と復旧計画をまとめた。

MLF･3NBT では、建屋周辺の地盤沈下、液体窒素槽の基礎やヘリウムバッファタンクの傾斜、3NBT トンネルの大きな変動や壁崩落、トンネル土盛りの沈下など、設備機器よりも、建屋に対する被害の方が深刻であった。特に、建屋周辺の地盤沈下のため、外部配管・配線の変形や破断が起こり、その結果、各種ユーティリティ（空調、給排水、給排気、圧縮空気など）は、その全面復旧までの間、場所や時間を制限しながら使用することとなった。従って循環ポンプや空気操作弁などを駆動させた設備機器の被害調査と復旧作業は、駆動機器電源や各種ユーティリティ使用、及びインターロックエリアへの出入などが制限された厳しい環境下で実施した。

大強度の陽子及び 2 次ビームを実験装置に供給する J-PARC では、ビーム強度の維持、及びビーム輸送機器の不必要な放射化を防ぐためビームロスを抑制する必要があり、そのために機器を高精度になアライメントしている（2.10 節）。大震災による地盤の変動は、建屋や設備機器への直接の被害に留まらず､J-PARC の装置のアライメントにも大きな被害を与えたことが推測された。そこで、J-PARC 内の基準に対する GPS 測量と水準測量、3NBT および MLF における基準点に対するトラバース測量と水準測量などを並行して実施し、震災による各基準点や装置の変動量の測定結果を示し、それに基づいて機器アライメントの方針を検討し、その復旧作業を実施した。

Table 1.2-1 (1/3): List of behavior, damage and restoration of each component in the neutron target station

	地震時の挙動	被害状況・復旧
建屋・ ﾕｰﾃｨﾘﾃｨ [2.1 節]	・外部電源喪失後、UPS、非常用自家発電機が順次稼働した。 ・計装・空調用圧縮機が一時停止。空調用圧縮機の再稼働により、ホットセル系統の空調運転が復旧した。 ・殆どのクレーンが停止状態を維持した。	・建屋本体に大きな損傷は無かった。建屋周辺が大きく地盤沈下し、付属建屋との配管、配線の変形、破断が生じた。 ・換気空調設備は、損傷や異常のないことを確認し、4 月中に運転を開始した。 ・圧縮空気設備は、周辺の沈下により給気管が断裂した。しばらくは断裂部分を切り離して運転し、5 月半ばには通常運転に移行した。 ・給排水設備は、周辺の沈下により配管が断裂し給水が不可となった。部分的に配管を接続して運用し、8 月に全面復旧した。 ・建屋内の殆どのクレーンに大きな損傷は無かった。センサーなどの一部破損した部品を交換し、順次使用を再開した。
水銀 ﾀｰｹﾞｯﾄ設備 [2.2 節]	・圧空ライン破断によりターゲット台車固定装置が解除。ターゲット容器シール用ベローズ伸びの反力により、ターゲット台車が約 30cm 移動した。 ・水銀循環システムは外部電源喪失で水銀ポンプが自動停止した。 ・気体廃棄物処理系は、ホルダーにガスを保持した状態を継続した。	・ベローズが過剰に伸びたことで破損した。このベローズ破損に対しては、ターゲット容器自体を交換することで対応した。 ・台車移動装置や固定装置は可動試験で損傷が無いことを確認した。 ・水銀循環設備は、水銀ポンプ稼働や水銀ドレン試験などを通して損傷が無いことを確認した。 ・気体廃棄物処理系に被害はなかった。
極低温水素設備 [2.3 節]	・水素循環系、ヘリウム冷凍機とも定格運転状態を維持した。 ・外部電源喪失後、水素ポンプ、冷凍機膨張タービンなどの駆動系はインターロックが作動し、自動停止した。 ・測定計器や自動弁を含む制御システムは UPS により保護された。 ・ヘリウムガスは、バッファタンクに回収。 ・水素は、窒素ガスによりパージされたラインを介して設計通り屋外に放出された。 ・ヘリウムガス及び窒素ガスブランケット層の圧力降下はなく、水素の漏洩も検出されなかった。	・水素ラインをヘリウムガスで置換してから、復旧作業を開始した。 ・水素ポンプ、膨張タービン、真空用ターボ分子ポンプ、アキュムレータなど稼働機器に損傷は無かった。 ・極低温水素設備の被害は、地盤沈下による屋外のタンクとその基礎の傾斜とその周辺の配管の変形、建屋貫通部配管の変形などの損傷を受けた。

Table 1.2-1 (2/3): List of behavior, damage and restoration of each component in the neutron target station

	地震時の挙動	被害状況・復旧
中性子源 ｽﾃｰｼｮﾝ・ ﾋﾞｰﾑﾗｲﾝ 設備 [2.4,2.5 節]	・水素循環系停止により、モデレータの低温配管は 20K から常温まで徐々に昇温した。 ・モデレータ、反射体、反射体プラグ、水冷遮蔽体、ヘリウムベッセルなどへの冷却水循環供給は停止した。 ・台車が後退したことに伴い、ベッセルの気密が破れた。 ・ベッセル窓は、真空状態を保持した。 ・運用中の中性子シャッターは、閉位置でサーボモータブレーキにより宙吊状態を保持した。 ・中性子シャッターの真空ダクトは、衝撃で閉止フランジ締結ボルトが緩み、真空が破れた。	・モデレータは気密や冷却水循環試験、ベッセル上蓋からの目視確認などの結果、異常は無かった。 ・ベッセル内機器に目立った損傷は無かった。 ・ステーション内の溶接・ボルト固定式遮蔽体には損傷は無かった。一方、積上式遮蔽体で位置決めピンやコンクリートの一部損傷が見られた。 ・中性子シャッターダクト真空の破れの対策として、ボルトや O リングの構造・材質を改善した。 ・前置き遮蔽体は、殆どの遮蔽ブロックが横ズレを起こし、平均 20mm のギャップ幅に 0～50mm のバラつきが生じた。また一部上部遮蔽ブロックが段差からはずれて大きく傾いた (機器の破損は無)。遮蔽ブロックを積み直し正規の位置に復旧した。復旧作業時、遮蔽ブロックの継ぎ目にスペーサを挿入することで、横ズレに対する改善を図った。
中性子源附帯冷却設備 [2.6 節]	・停電で、循環ポンプ、ブロワ等の駆動機器が自動停止した。 ・バルブは循環系緊急停止インターロックに従い自動停止。圧縮空気圧低下後も、安全なバルブ状態を維持した。 ・再結合器は、停止状態を維持した。	・建屋周辺の地盤沈下に伴い屋外部分配管に大きな変形が生じたが、漏れなどは無かった。 ・循環ポンプやブロワ等の稼働機器の目視点検や稼働検査の結果、問題となる損傷は無かった。
遠隔操作機器 [2.7 節]	・殆どの遠隔操作機器で停止状態を維持した。	・パワーマニピュレータに損傷はなかった。但し、地震後の長期間に渡る電源停止により、サーボアンプ位置情報保持用のバッテリーが劣化したため、バッテリーを交換してから動作確認を実施した。 ・減速材等遠隔操作機器に損傷は無かった。 ・移送キャスクおよび床上遮蔽体は、倒れた影響でキャスク内グリッパ接続ジグが変形した。また床上遮蔽体のチェーンに局所的変形が生じ、確認動作中にチェーンが切れたので、チェーンを交換した。 ・切断装置は、駆動モーター減速機が破損し、オイルが漏れたため、これを交換した。 ・ターゲット交換台車に損傷は無かった。
MLF 全体 制御ｼｽﾃﾑ (MLF-GCS) [2.8 節]	・停電時でも、MLF-GCS 機器は非常用自家発電機により稼働していた。 ・PPS エリア機器は、停電時における正常な状態を維持していた。 ・停電後の運転履歴はデータベースに保存されていたが、(不具合のため) 一部のデジタルデータが取り込まれていなかった。	・大きな損傷はなく、4 月初旬には MLF-GCS の運用を開始した。

Table 1.2-1 (3/3): List of behavior, damage and restoration of each component in the neutron target station

	地震時の挙動	被害状況・復旧
3NBT [2.9 節]	・真空系は、圧空低下によりピローシール性能､及びビームダクト真空が劣化し､インターロックで上流側ファーストクロージングバルブ（FCV）が閉止した。下流側 FCV とゲートバルブは、圧空低下に伴い閉止できず、下流側が大気開放となった。 ・冷却水・ガス系統は、停電時に全系統の循環ポンプが停止した。 ・ビームモニター機器は停電時に全機器が停止した。	・3NBT トンネル内の壁が崩落し､トンネル自身も大きく変動した。トンネル内クレーンも大きな被害を受けた。トンネル土盛りが 20cm 以上沈下した。 ・電磁石は、本体や構造物に損傷はなかったが、トンネル自身の変動で、大幅にアライメントし直す必要が生じた。セラミックス製絶縁管部の抵抗が劣化したので、絶縁部パイプを洗浄することで対応した。 ・真空系は、ターボ分子ポンプやバルブに異常は無かった。 ・冷却水・ガス系統は、2 次冷却水系の冷却塔下部水槽に亀裂が生じた｡また電源冷却水系の膨張タンクガス供給配管が破断し冷却水が漏れたので、部品交換や補修を行った。 ・トンネル内壁崩落でガス系統の配管サポートが変形した。変形部分を切断し交換することで対応した。 ・ビームモニター機器は、落下・転倒による一部機器の破損はあったが、モニター自身の損傷は無かった。 ・陽子ビーム窓は、気密シール性能、光学内視鏡による外観確認、冷却水通水などで、損傷が無いことをを確認した。 ・PPS 対象機器のビームプラグのベアリングが破損した。

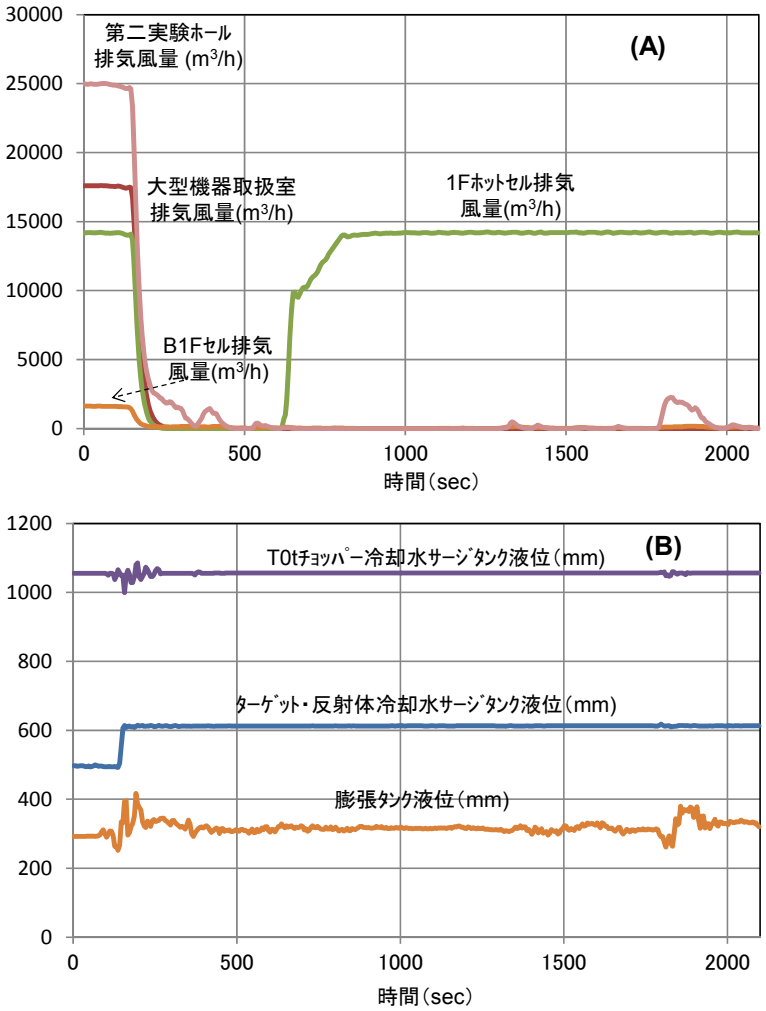


Fig.1.2-1: Values of (A) air flow rate from controlled areas and (B) water level of surge tanks as a function of passing time (sec) from the Earthquake

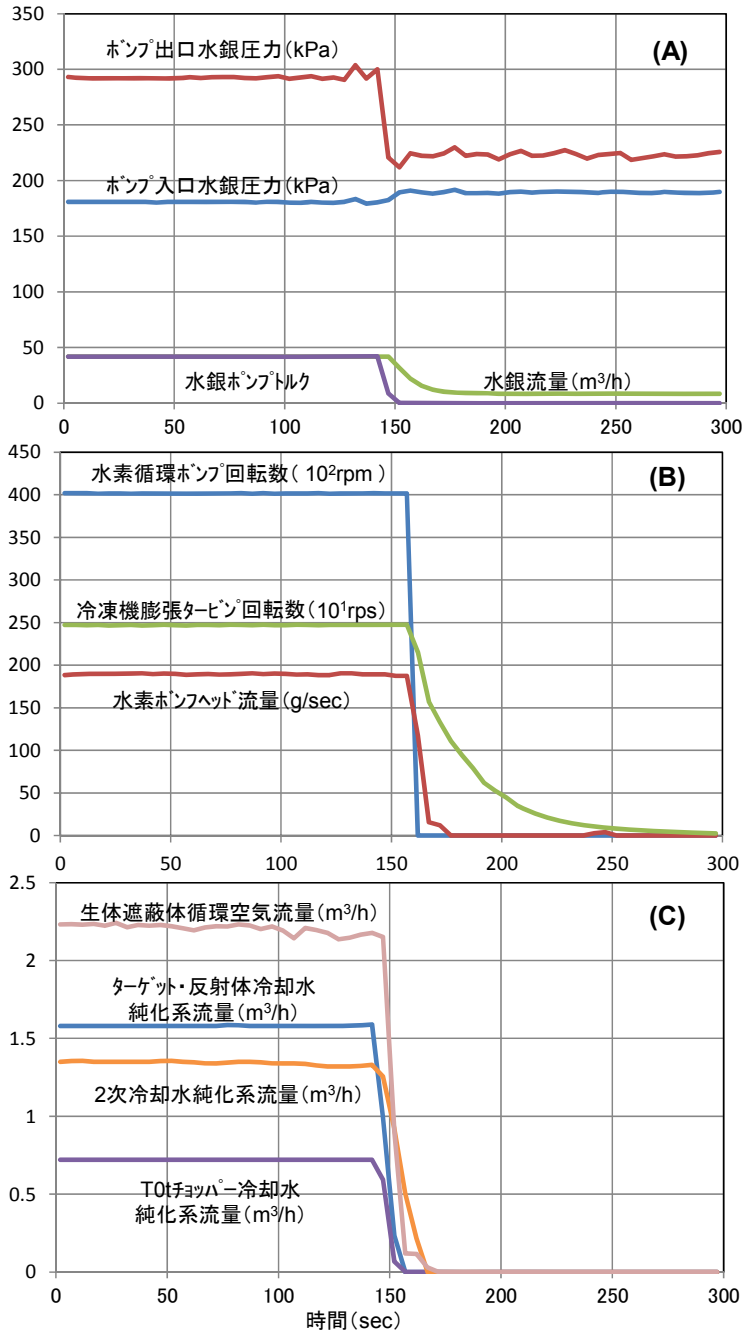


Fig.1.2-2: Values measured by instruments of (A) mercury target, (B) cryogenic hydrogen circulation, and (C) water and gas coolants as a function of passing time(sec) from the Earthquake

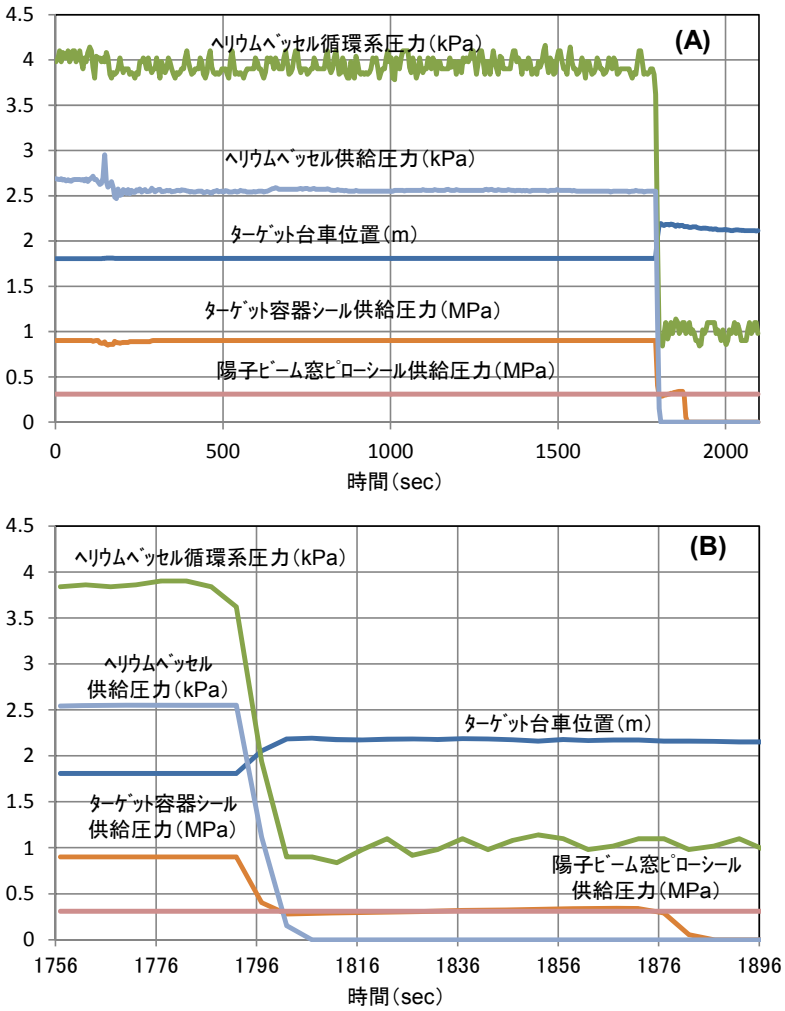


Fig.1.2-3: Values measured by instruments on target trolley and helium vessel as a function of passing time(sec) from the Earthquake; (A): 0 to 2100 sec (B): 1756 to 1896 sec

参考文献

1-1) Monthly Report on Earthquakes and Volcanoes in Japan, March 2011, ISSN 1343-4977, (2011) pp.57-148, (in Japanese)

1-2) Y. Ikeda, “Current Status of 1 MW pulse spallation neutron source (JSNS) of J-PARC”, J. Nucl. Materials, 343 (2005) pp.7-13

２．施設各設備の大震災の影響と復旧について

2.1　施設建屋・ユーティリティ

2.1.1　概要

物質・生命科学実験施設[2.1-1)]は、核破砕中性子源とミュオン源という2つのターゲット装置を備え、生成された2次粒子ビームを用いる多くの実験装置が設置されている。その建屋は、Fig. 2.1.1-1及びFig. 2.1.1-2に示すように、建物は長さ146 m、幅70 m、高さ30 m という規模をもち、線源エリア、第1実験ホール、第2実験ホールという3つに大きく分けることができる。建物の長手方向の中心線上に2つのターゲット装置と陽子ビーム輸送ラインがあり、電気設備や非常用発電機、冷却水供給と排水の設備、換気、空調、排気の設備、電話やネットワーク等の通信設備、建屋監視や消火設備等の安全設備のユーティリティが、その両端の部分に配置されている。ターゲット装置と陽子ビームラインで隔てられた両側に、2つの実験ホールがある。2004年1月に建設が開始され、2007年4月に竣工した。

Fig. 2.1.1-3に中性子源ステーションと放射化機器取扱室（ホットセル）の断面を示す。水銀ターゲットと水銀循環装置はターゲット台車の上に設置され、その補修作業、あるいは水銀ターゲット自体や水銀循環装置の構成機器の交換は、ホットセルにおいて、パワーマニピュレータ、インセルクレーン等を用いて遠隔で作業を行うことができる。反射体・モデレータは反射体プラグの下部に固定され、ヘリウムベッセル内に設置されている。ターゲットで生成された中性子は超臨界水素で満たされたモデレータで減速され、中性子ビームラインとして引き出され、実験装置に供給される。最大23本の中性子ビームラインが設置できるが、中性子実験装置の中には、その性能を確保するため、線源から実験装置までの長い距離が必要となり、実験装置が実験ホール内には収まりきらない場合がある。そのため、本体建屋の竣工後、第1実験ホール、第2実験ホールともに実験ホールを拡張、あるいはビームラインと実験装置を格納する建屋を隣接して建設することで対応した。

2 次粒子ビームを生成させる陽子ビームは、3 GeV シンクロトロン加速器（3-GeV rapid-cycling synchrotron、RCS）において加速され、3 GeV 陽子ビーム輸送施設（3NBT）[2.1-2, 3, 4)]において物質生命科学実験施設まで輸送される。3NBT 施設の配置を Fig. 2.1.1-4 に示す。3NBT トンネルは細くて長く、両端は大きな構造物、つまり RCS トンネルと物質・生命科学実験施設に接続されており、土木上の観点からは脆弱な構造である。そのため、両端の接続部分は、構造上、エクスパンションジョイントで縁を切り、大きな構造物の影響を受けないようにしてある。また 3NBT トンネルは途中で、その真下にある 50 GeV シンクロトロン加速器（MR）トンネルとニュートリノのディケイ・ボリュウムと交差している。それらとも構造上、縁を切り、3NBT トンネルの重量は、自身の杭によってのみ支持されている。

陽子ビームラインは、物質・生命科学実験施設内でも、中性子ターゲットまで 57 m の長さがある。ミュオンターゲットは、中性子ターゲットの手前、M2 トンネル内の陽子ビームライン上に設置される[2.1-2, 3, 4)]。ミュオンターゲット、およびその下流側では大きなビームロスによって

放射線量が高いため[2.1-5)]、M2 トンネルは、3NBT トンネルとは比べものならないほどの厚さの放射線遮蔽壁をもち、さらにビームライン自体もほとんど放射線遮蔽ブロックで埋め尽くされている（Fig. 2.1.1-5）。M1 トンネルは、M2 トンネルの上流側に位置し、将来のミュオン第 2 ターゲットの設置を想定して建設され、M2 トンネルと同様の厚い放射線遮蔽を設置できるようになっている。

Fig. 2.1.1-1: Image of the Materials and Life Science Experimental Facility building

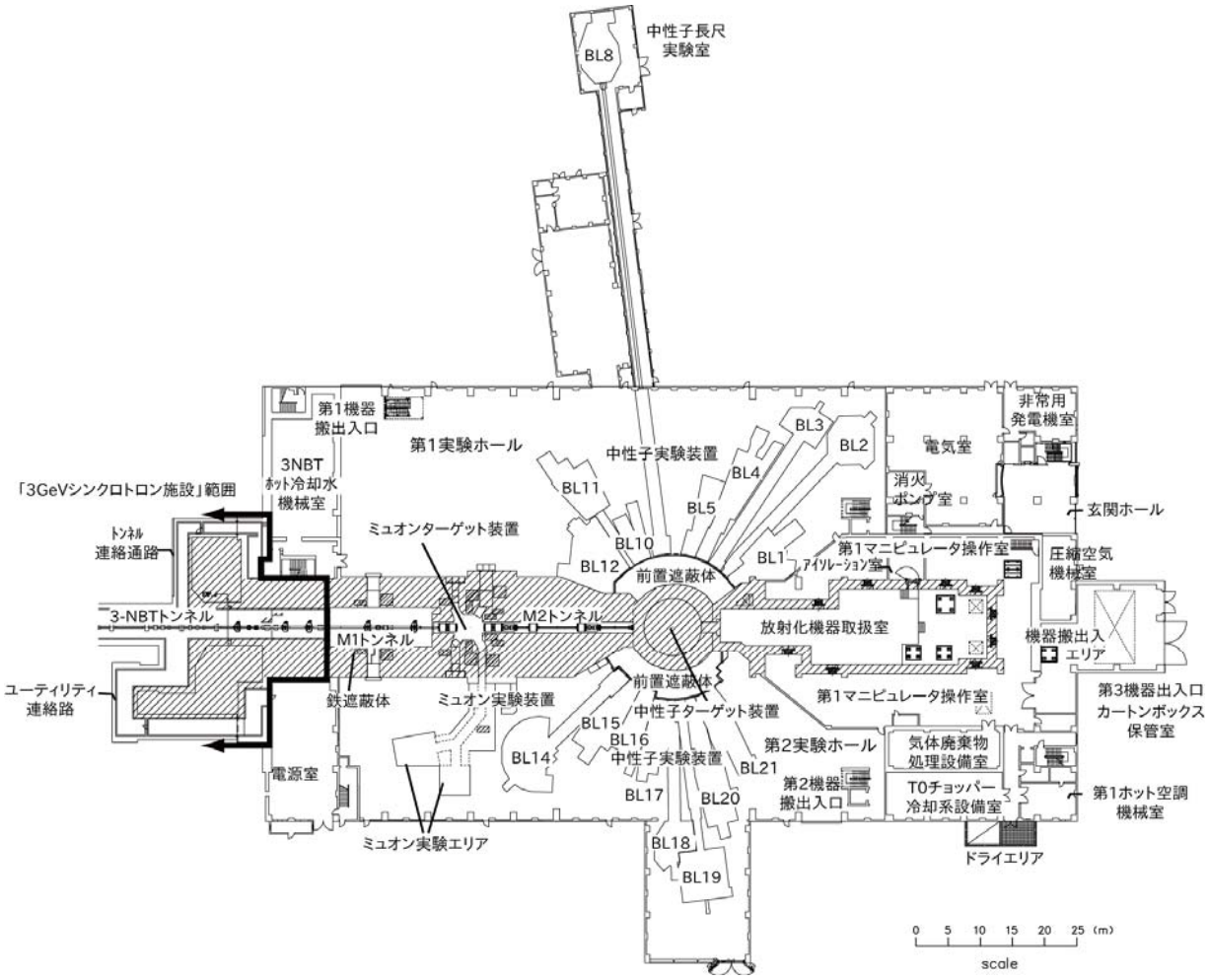


Fig. 2.1.1-2: Layout of the Materials and Life Science Experimental Facility building (first floor)

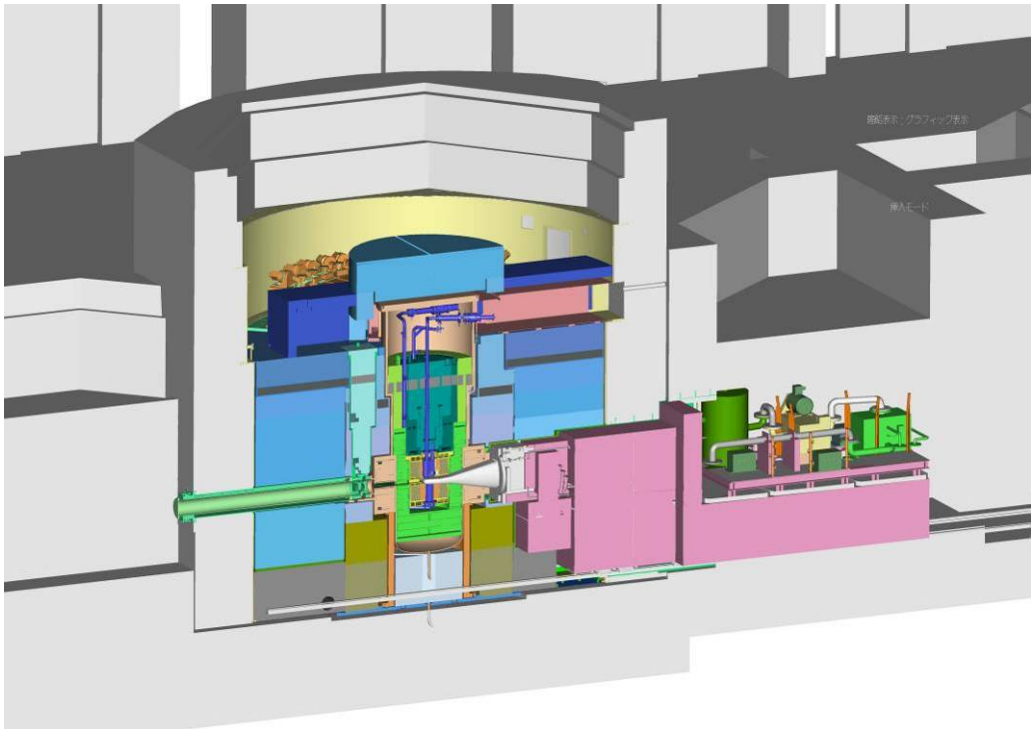


Fig. 2.1.1-3: A cutaway view of the central part of the target station and the target system in the irradiation components handling room

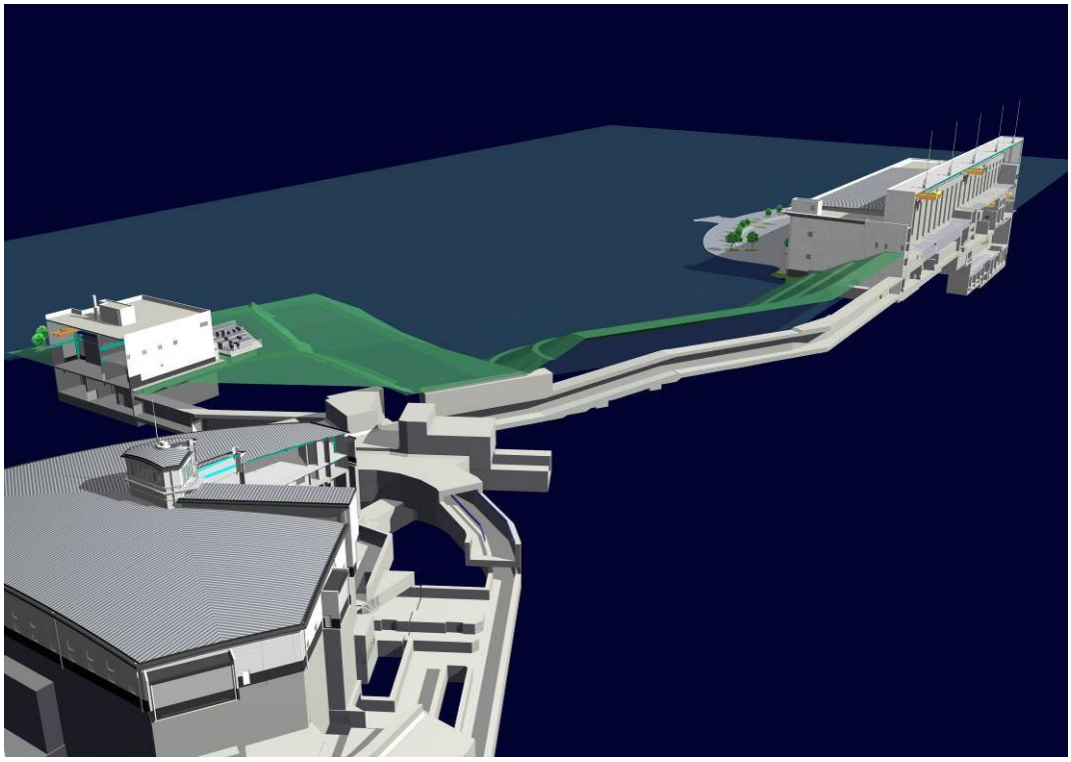


Fig. 2.1.1-4: A cutaway view of the 3-GeV proton beam transport facility (3NBT)

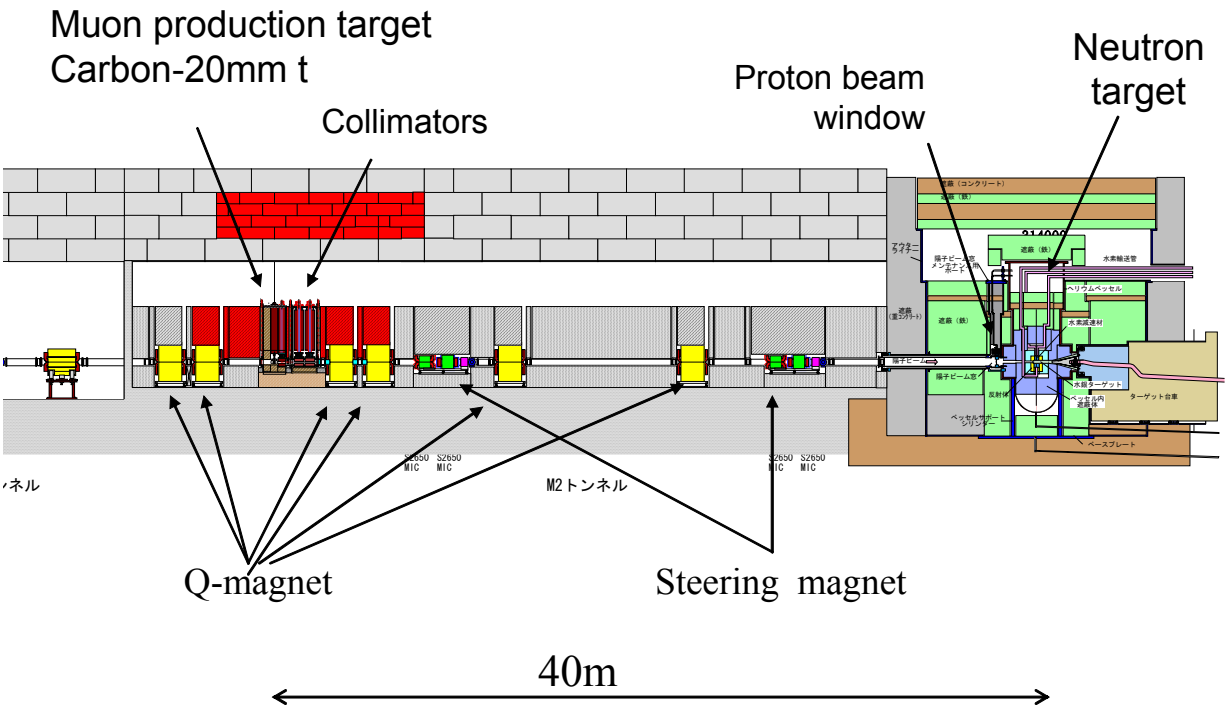


Fig 2.1.1-5: Vertical cross sectional view of beam transport line around muon and neutron production targets

2.1.2　建屋、周辺道路

◇設備概要

物質・生命科学実験施設（MLF）建屋は、鉄筋コンクリート造で、中央に中性子源設備とビームライン機器及びホットセルなどを設置するための高さ約 30m のエリアがあり、その東西に実験ホールが配置されている（Fig. 2.1.2-1）。南側は地下 1 階、地上 3 階で、地下には中性子源附帯冷却設備や排水設備、機器保管エリアが配置されている。建物全体では南北約 150m、東西約 70m で非常に大きな建造物である。陽子ビームラインのトンネルとは北側で接続されている。

陽子ビームラインや中性子ビームラインなどを設置するために、建物全体としてゆがみの出にくい構造となるように床のマットなどは非常に頑強な構造としてある。また、地下の岩盤まで杭を打つことで、建物の耐震強度を保ち、沈下などを防止する設計となっている。建屋全体の耐震設計加速度が 0.25G である。

◇地震時による被害状況

地震により、建屋全体が大きく揺すられたが、構造的に大きな損傷はなく、壁の壊れや柱のゆがみ等は見られなかった。施設の点検時においてひび等が増えているという指摘はあったが、建屋の健全性に影響を与えるものではなかった。一方、建屋周辺の道路等に関しては、建屋が大きく揺すられたことで、建屋周囲の犬走り部分等が大きく沈下し、西側ドライエリア付近では 2m 程度の沈下が確認された。また低温冷却設備の大型タンクや配管基礎、冷却塔が傾くなど大きな地盤変化が確認された。

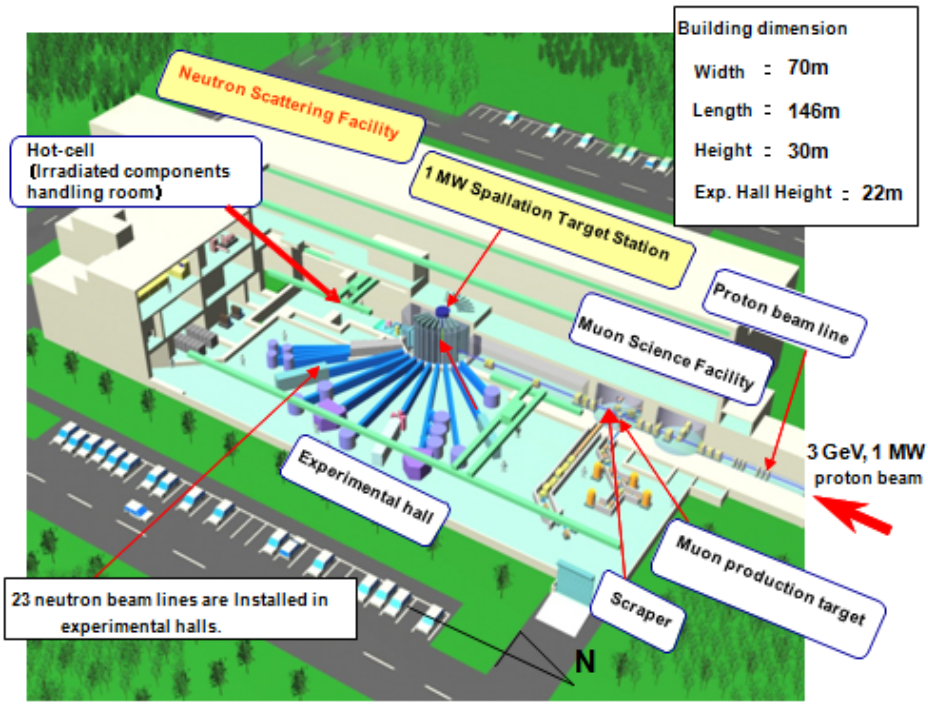


Fig. 2.1.2-1: Image view of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF)

Fig2.1.2-2: Photo of MLF western outside after earthquake

2.1.3　電気、機械設備

◇設備概要

MLF の電気設備は、外部の 6,600V 電源から供給を受けて各使用電圧へ変換する受変電設備と施設各所に設置された共用分電盤、実験盤等の配電設備、非常用発電機設備、UPS などで構成される。総電力は約 3MW となり、400V、200V、100V で各配電盤へ供給されている。上位電源停止時には、非常用発電機設備が稼働し、約 400kW（現状負荷；約 180kW）の発電を行うことで、制御関連設備やホットセル等の換気空調設備を継続し運転できるように設計している。特に MLF 全体制御系（MLF-GCS）、空調及び各設備における制御盤内のシーケンサ等の計測設備は UPS によって電源が停止することなく機能を継続的に維持できるようにしてある。

機械設備は、管理区域及び非管理区域の給排気設備、中性子源関連設備を含む装置計装用の圧縮空気設備、空調用の圧縮空気設備、上水及び工水の給水設備、管理区域排水設備、非管理区域排水設備等で構成されており、施設を運用する上でベースとなる設備である。特に、圧縮空気設備は中性子源設備のバルブ等を操作するために用いられており、定格圧力 0.6MPa を維持するように設計されている。また、給排気システムは、管理区域内の負圧を維持し、施設内環境の維持及び施設外への排気量の管理等の役割を担っている。停電時などには、非常用発電機からの給電を受けてホットセル等の換気（負圧）の維持等、施設の安全確保を行えるよう設計されている。

◇地震時の状態

地震当日の設備の状況の時系列を Fig. 2.1.3-1 に示す。自動起動等に関しては、運転ログ等のデータからの類推を含む。地震発生前は、MLF 電気設備は通常通電状態であり、非常用発電機設備は停止しており、UPS には常用系から通電を行っていた。14 時 46 分の地震発生から約 150 秒後に停電となり、UPS 系及び非常用発電機が立ち上がって制御系及び継続運転の必要な設備の運転を行えるように電源を維持していた。地震直後に、制御室から MLF-GCS が通常通り稼働していたことを、施設外から非常用発電機が稼働していることを確認した。

MLF 機械設備は、全系統通常の運転状態であり、CCR の設備コントロール室から監視を行っていた。地震直後、現場確認では非常用発電機の起動を確認し、17 時 42 分頃に　手動で非常用発電機の停止操作を行った。当日の系統の動き（推定を含む）を、以下に示す。

◆各機器運転状況(推定)

①圧縮空気設備

・装置計装用　　停止(14 時 48 分停電)
　　※配管破断により停止状態のまま

・空調用　　運転(14 時 50 分～17 時 42 分)

②非常用発電機　　運転(14 時 49 分～17 時 42 分)

③空調設備　　運転(14 時 56 分～17 時 42 分)
　　※ホットセル室系統（FS-1201,FE-4101 or FE-4102）のみ運転

◇健全性確認・復旧

建屋内の作業開始にあたって、照明の復旧が急がれたため、電気設備については 3 月 22 日に上位送電が開始された後、MLF 内全体にわたって目視点検、導通・絶縁の確認をテスター及びメガーを使って行った。

目視確認の結果、第 1 マニピュレータ操作室のラックが大きく揺れた形跡があり、照明器具の破損及び一部サポートが外れていることがわかった。また、ケーブルラックの防火区画処理部分が破損したため、応急処置により気密を確保できるよう措置した。最終的にはラックの修理及び防火区画処理の再施工を行っていく。

導通・絶縁に関しては、地震時の揺れによる影響で絶縁抵抗が低い回路が一部あったので、その原因を調査した。しかしながら、全体としては概ね電気的には問題のない状態であったため、照明器具等の破損があるもの以外については、運用可とした。絶縁抵抗が低下した原因は、屋外でケーブルに破損が考えられるものや照明器具のずれなどによるものであり、建物や外構の復旧に伴ってケーブルの張り替えや器具の修理を行い、適切に対処していく。電気設備全体は、4 月初旬の時点で運用を開始し、一部運転していないものを除き、問題なく稼働している。

換気空調設備は、給排気のブロワ、施設内のダクト等の点検を行い、損傷や異常のないことを確認した後に、4 月 18 日より運転を開始した。圧縮空気設備は、コンプレッサー等の点検、施設内配管の点検等を行った結果、建屋外部の付属建屋へ通じる給気管が地盤の沈下により断裂していることが判明したため、断裂部分を手動弁により系統から切り離して運転することにした。手動弁が各階への給気管の大元にしかなかったため、地震後しばらくは 1 階エリアに関しては給気できない状態のまま運転した。その後、4 月 8 日までに外部エリアへ通じる配管に遮断弁を設ける工事を行い、外部建屋のみを隔離することができるようにして施設全体へ供給できるよう対処した。地震後しばらくは、空調の運転が復旧される前に、圧縮空気設備の運転を行う必要があったため、圧縮空気設備室を別途換気し、コンプレッサー等の温度上昇を監視しながら運転を行った。空調が連続運転を開始した 5 月 16 日以降は、順次通常運転状態として運用を行っている。

給排水設備に関しては、外部からの上水配管、工水配管が地盤の沈下等により断裂し、給水が一切行えない状況であった。排水については外部へ排出するための配管や排水枡用のポンプの電気的絶縁の劣化した状態が確認されたため、地震後しばらくは運用排水できなかった。工水は MLF 復旧作業で早急に必要だったため、まず配管を接続し建屋内で制限して使用できるようにした後、8 月 10 日に復旧した。上水は 8 月 18 日に復旧した。非管理区域の排水（トイレ等汚水）は、地震後しばらくは排水されていたが、余震等の影響で 4 月末に建屋からの出口で断裂し、漏れが生じたため工事により復旧を行った。付属建屋に関しては、施設周辺の土木工事による地盤の回復後に復旧を行った。

3月11日 時刻	外的要因	MLF					
		電気室		制御室	空気圧縮機室		空調機械室
		非常用自家発電機	UPS 150KVA	UPS 40KVA	計装用圧縮機	空調用圧縮機	ホットセル系空調
		停止中	インバータ給電中	インバータ給電中	運転中	運転中	運転中
14時46分	地震発生						
14時48分	停電(東電)		バッテリ給電	バッテリ給電	停止	停止	停止
14時49分		自動起動	インバータ給電	インバータ給電			
14時50分		自家発給電				運転	
14時56分							運転
17時42分		手動停止	バッテリ給電	バッテリ給電		停止	停止
22時28分				給電停止			
23時55分			給電停止				

Fig. 2.1.3-1:　Time series of behaviors of power supply, compressor and air conditioner

2.1.4　クレーン設備

◇設備概要

MLF には各種クレーンが設置されており、機器の搬出・搬入や移動などに使用されている。MLF のクレーンリストを Table 2.1.4-1 に示す。3NBT 棟及び 3NBT トンネルには設備の搬入・搬出や機器の移動などに用いるためにクレーンが設置されている。Table 2.1.4-2 に 3NBT 関連クレーンリストを示す。

◇地震時の状況

各クレーンは第 3 実験ホールクレーンを除いて、地震時には停止位置で停止していた。第 3 実験ホールは、遮へい他の設置作業に使用中であったが、吊り上げ対象の遮へい体は着座しており、ワイヤーロープをクレーンに掛けた状態であった。停電等が発生し作業が継続できなくなったこと、施設から避難することを優先したため使用時の状態で停止していた。地震発生時には、実験ホールのクレーンが大きく揺れているように見えたとの報告を受けた。クレーンフックが遮へい体につけられた状態のままでは余震で被害を増やす可能性があったため、チェーンブロックを使ってクレーンフックを離脱させ、無負荷状態として点検作業まで待機させた。

◇健全性確認・復旧

施設全体の目視点検により、MLF 内のクレーンについては落下等の大きな損傷は確認されなかった。上位電気設備の点検を行った後、大型機器取扱室、実験ホールの天井クレーン及びアクセスクレーンについては地震復旧作業に使用するため、工務第 2 課の担当で、通常の月例点検に相当する点検・確認を行った。レール等についてボルトの緩みが確認されたため、(Fig. 2.1.4-1)　固定ボルトの増し締めを行った。3 月 31 日からは、無負荷で動作試験を行い異音等がないことを確認し、機器に負荷がかかる程度の荷重を吊って荷重試験を行った。この結果異

常はなく、通常使用に問題ないと判断した。ただし、アクセスクレーンについてはクレーンとして使用することは構造上問題ないが、先端接触防止のセンサー（リミットスイッチ）が損傷していたので、センサーを外した状態で使用を再開した。このセンサー不良については使用者に十分に注意喚起した上での運用とする一方、リミットスイッチの交換のために早急に機器を調達して対応した。また小型のクレーンについても目視等による確認で問題がなかったため、試験運転により点検を行ってから、運用を再開した。

3NBT トンネルのクレーンについては、トンネルと MLF との接続部において構造物にずれが生じ、その影響でホイスト用のレールの一部においてベースプレートとの接続用ボルトが断裂して固定が外れた状況になっていた。この応急処置として切れてしまったボルトの位置に仮の固定ボルトを入れて固定する処置を施し、余震等で損壊が更に進まないようにした。最終的にはトンネルの補修工事終了後に修理を行うこととした。またトラバーサ部分についても、トンネルのずれが生じたために、トラバーサが作動しない状況となっている。さらには、全体にわたってフィーダー線の緩み等が発生しているため、レール及びフィーダー線の調整を行った上で、運転を行うこととした。

Table 2.1.4-1: MLF crane list

検査証	種類及び型式	定格荷重 (t)	設置場所		設置届	落成検査	製作メーカー
5947	クラブトロリ式天井クレーン	130	大型機器取扱室	3F	H17.11.18	H18.1.20	京和工業
5949	クラブトロリ式天井クレーン	65/5	大型機器取扱室	3F	H17.11.18	H18.1.23	京和工業
5950	クラブトロリ式天井クレーン	50	第1実験ホール	1F	H17.7.22	H18.1.23	京和工業
5948	クラブトロリ式天井クレーン	30	第2実験ホール	1F	H17.11.18	H18.1.20	石川島播磨運搬機械
5954	単梁ビーム・ホイスト付クラブトロリ式天井クレーン	7.5	第1実験ホール	1F	H17.11.18	H18.1.26	石川島播磨運搬機械
5955	単梁ビーム・ホイスト付クラブトロリ式天井クレーン	7.5	第2実験ホール	1F	H17.11.18	H18.1.27	石川島播磨運搬機械
5965	ホイスト式天井クレーン	7	附属建家第一ヘリウム圧縮室	―	H18.3.2	H18.3.23	京和工業
5970	クラブトロリ式天井クレーン	20	放射化機器取扱室	1F	H18.2.23	H18.8.8	京和工業
5971	テルハ	10	第3機器搬出入口	1F	H18.6.30	H18.8.8	京和工業
5972	クラブトロリ式天井クレーン	12	放射化機器保管室	B1F	H17.11.29	H18.9.6	京和工業
6073	ホイスト式天井クレーン	15/5	第3実験ホール	1F	H19.9.26	H19.11.7	KITO
	ホイスト式天井クレーン	2.8	一次冷却系設備室	B1F	(H17.11.11)		京和工業
	ホイスト式天井クレーン	2.8	一次冷却系設備室	B1F	(H17.11.11)		京和工業
	ホイスト式天井クレーン	2.8	乾燥装置室	B1F	(H17.11.11)		京和工業
	ホイスト式天井クレーン	2.8	気体廃棄物処理設備室	1F	(H18.3.2)		京和工業
	ホイスト式天井クレーン	2.8	TOﾁｮｯﾊﾞｰ冷却系設備室	1F	(H18.3.2)		京和工業
	ホイスト式天井クレーン	2.8	遮蔽体冷却設備室	2F	(H18.3.2)		京和工業
	テルハ	2.8	第1ﾏﾆﾋﾟｭﾚｰﾀ操作室	1F	(H18.9.29)		京和工業
	すべり出し式天井クレーン	2.8	機器調整室	3F	(H18.12.1)		京和工業
	ホイスト式テルハ	2.8	制御機器室	2F	(H18.8.17)		京和工業
	ホイスト式テルハ	2.8	ｺｰﾙﾄﾞ冷却水機械室	3F	(H18.8.17)		京和工業

Table 2.1.4-2: 3NBT crane list

検査証	種類及び型式	定格荷重 (t)	設置場所		設置届	落成検査	製作メーカー
5899	ホイスト式天井クレーン	20	機器準備室	1F	H16.11.19	H16.12.10	石川島播磨運搬機械
5935	ホイスト式天井クレーン(トラバーサー付)	10	3NBTトンネル	B1F-1F	H16.10.14	H17.8.3	石川島播磨運搬機械
	ﾎｲｽﾄ式天井 ｸﾚｰﾝ(電気 ﾁｪｰﾝﾌﾞﾛｯｸ式 滑り出しﾃﾙﾊ)	0.5	3NBT上流制御室		(H17.4.19)		石川島播磨運搬機械

Fig. 2.1.4-1: Reparation works of cranes

参考文献

2.1-1) Materials and Life Science Experimental Facility Construction Team: “High Intensity Proton Accelerator Project (J-PARC) Technical Design Report, Materials and Life Science Experimental Facility Construction Team”, JAERI-Rech 2001-001(2004) (in Japanese)

2.1-2) S. Sakamoto et al.: “Advanced design of high-intensity beam transport line in J-PARC”, Nucl Instr. and Meth Phys Res. A 562 (2006) pp.638-641

2.1-3) S. Sakamoto et al.: “Design Report on the 3-GeV Proton Beam Transport Facility (3NBT) of High Intensity Proton Accelerator Facility Project (J-PARC)”, JAERI-Tech 2004-020(2004) (in Japanese).

2.1-4) S. Meigo: “A Study on a 3-GeV Proton Beam Transport Line at the NME Facility in the Joint Project for High-Intensity Proton Accelerator”, JAERI-Tech 2000-088(2001) (in Japanese).

2.1-5) S. Sakamoto et al.: “Study of Technical Issues on Proton Beam Line Tunnel in Material/Life Science Experimental Facility of High Intensity Proton Accelerator Project”, JAERI-Tech 2001-075(2001) (in Japanese).

2.2　水銀ターゲット設備

2.2.1　概要

水銀ターゲット設備は、陽子ビームを受けて中性子を発生する水銀ターゲット容器と、水銀を循環させる装置全体を可動式のターゲット台車上に搭載した設備である（Fig. 2.2.1-1 参照）。これらの機器は水銀を含めて強く放射化するため全て遠隔操作で取り扱う設計をしている。機器は可動式にすることで遠隔操作しやすい位置へ自由に移動させることができる。

水銀ターゲット容器はステンレス鋼 SUS316L 製で、溶接で製作されている。内部は水銀を内包する水銀容器と、その外側を更に二重壁の水冷構造を持つ保護容器で覆い、水銀容器から放射化した水銀が万一漏洩した場合の汚染拡大を防止する。Fig. 2.2.1-2 に示すように、陽子ビームは、ヘリウムベッセルに挿入されたターゲット容器に入射する。ヘリウムベッセル内のヘリウム雰囲気と外部の空気雰囲気との間にバウンダリを形成する目的で、ターゲット容器にはヘリウムベッセルシール機構を設置している。

水銀循環設備はサージタンク、水銀ポンプ、熱交換器、ベンチュリー管流量計とこれらをつなぐ水銀主配管（サイズ：150A）、及び小口径配管、バルブ、センサー類などで構成される。水銀は定格流量 41m^3/h で水銀主配管内の流速は約 0.7m/s である。遠隔操作による着脱を可能にするため、水銀主配管は主要な設備機器をつなぐジャンパー管形状とし、フランジ面は全て水平に設置されている。

ターゲット台車は前半部が水銀ターゲット容器で発生する放射線を遮蔽する構造を有し、後半部に水銀循環設備を搭載する。ビーム運転時は、陽子ビームが水銀ターゲット容器に入射する位置へ、メンテナンス時は、遠隔操作により作業可能なエリアまで水銀ターゲット設備全体を移動する。ターゲット台車は、ほぼ全てが放射線を遮蔽するための鉄ブロックとコンクリートブロック、及び水銀配管から構成されている。

水銀中では、3GeV 陽子ビーム照射による核破砕反応により様々な放射性ガスが生成される。ビーム運転時は水銀循環系を閉ループ運転とし、これらの放射性ガスを閉じこめておくが、メンテナンス時に水銀をドレンする場合、水銀循環系から排気した放射性ガスを外部放出可能な状態にするための気体廃棄物処理設備が接続されており、水銀ターゲット設備の重要な一部となっている。

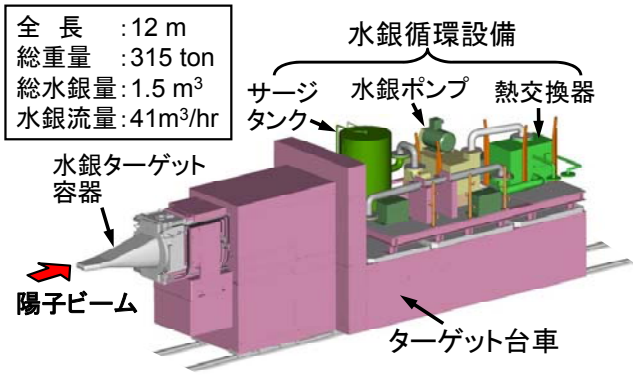


Fig. 2.2.1-1: Outline of mercury target system

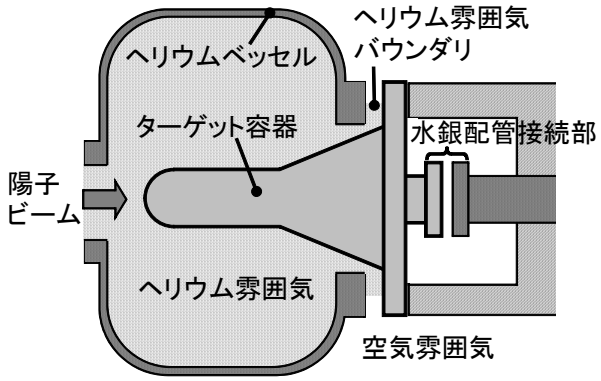


Fig. 2.2.1-2: Conceputual view of target vessel at helium vessel during proton beam injection

2.2.2　水銀ターゲット容器と台車

◇水銀ターゲット容器の概要

水銀ターゲット容器は、ターゲットフランジによりターゲット台車前方に設置され、容器には水銀ライン、冷却水ライン、ヘリウムガスラインおよびセンサーケーブをコネクターで接続している。水銀容器先端部および水銀配管接続部には、複数の水銀漏洩センサーを設置し、水銀の漏洩を検知する。水銀ターゲット容器に設置されているヘリウムベッセルシール機構は Fig. 2.2.2-1 に示すように 2 重ベローズ構造しており、内部をヘリウムガスで加圧する（0.9 MPaG）ことで、シール機能を維持する。ヘリウムベッセルシール機構への He ガス加圧作業は、ターゲット台車がシステム運転位置で、台車固定装置が固定状態になっている時のみ実施できる。

◇ターゲット台車固定装置の概要

ビーム運転時に水銀ターゲット容器を所定の位置に固定するために、ホットセル床面にターゲット台車の移動を防止する固定装置が設置されている。固定装置はターゲット台車の東

側、及び西側の 2 箇所を固定するように、各々1 台ずつ設置されている。固定装置は Fig. 2.2.2-2 のように、固定ロッドの片側を支点とし、エアシリンダを用いて上下方向に駆動させる構造である。エアシリンダは複動型であり、固定ロッドの上下運動各々にシリンダ駆動力が加わる。エアシリンダの駆動には施設で集中管理している圧縮空気を用い、電源喪失時には固定ロッドが固定側になるように圧縮空気によってエアシリンダが駆動される。

◇地震発生前後の設備挙動

Fig. 2.2.2-3 に地震発生前後約 1 時間のヘリウムベッセルシール機構への供給圧力およびターゲット台車位置を示す。

◆地震発生直前の設備状態

・水銀ターゲット容器ヘリウムガス雰囲気部の圧力

セーフティーハル内	：0.1 MPaG
モニタリングライン	：0.1 MPaG
ヘリウムベッセルシール機構加圧ライン	：0.9 MPaG

・水銀容器上面温度：26.6～27.3 ℃

・水銀漏洩センサー：水銀漏洩なし

・ターゲット台車位置：システム運転位置（座標：1806mm）

・ターゲット台車固定装置：固定状態

◆地震発生後の挙動

・　水銀ターゲット容器では、セーフティーハルとモニタリングラインのヘリウムガス圧力の低下が見られたが、値の変動は運転中の場合と変化がなかった。

・　水銀容器上面に取り付けた温度計測用熱電対やセンサーケーブル等に異常はなく、温度計測機能が維持されていた。ターゲット台車についても制御系の電源は UPS により保持され、センサー類も正常に動作していた。

・　水銀漏洩センサーに断線等の異常はなかった。また、水銀容器破損や接続部シール機能低下による水銀漏洩もなかった。

・ 14 時 46 分 18 秒の本震時には台車位置が数 mm 程度変動したが、ターゲット台車固定装置が働いてターゲット台車はシステム運転位置に保持された。

・　15 時 15 分 34 秒の余震時にターゲット台車固定装置が解除された。調査の結果、施設側の圧縮空気供給系統で配管破断が生じ、固定装置のエアシリンダ内の空気圧力が低下したことが原因であることが分かった。通常エアシリンダ内の空気圧力が低下しても、ターゲット容器のヘリウムベッセルシール機構のベローズ反力により、Fig. 2.2.2-2 の台車側固定端が固定ロッドに押しつけられ、固定状態が保持される。しかし今回は、空気圧力が低下したことに加え、地震動によりターゲット台車置が南北に振られ、固定ロッドが台車固定端から僅かに離れた時に、固定ロッドの自重によって解除状態になったと考えられる。

・　ターゲット台車固定装置が解除され、且つ、ターゲット容器のヘリウムベッセルシール機構ベローズへのヘリウムガス加圧が継続していたため、ベローズ伸びの反力により、ターゲット台車が南へ移動した。

・　ターゲット台車固定装置によるベローズ伸びに対する拘束がないため、ヘリウムベッセルシール機構のベローズは過剰に伸びて破損に至り、ターゲット容器の再使用が不可能になった。これにより、ヘリウムベッセルの気密機能が喪失し、ヘリウムベッセル内圧力が 2.55 kPaG から 0 kPaG になった。ベローズの伸び量は約 200mm 程度と推定される。
・　ターゲット台車は、南へ 379mm（座標：2185mm）だけ移動した後、北側へ 85mm（座標：2100mm）だけ戻り、最終的にシステム運転位置より南へ 294mm の位置で落ち着いた。最後に北側へ戻った動きは地震動によるものと考えられる。

◇健全性確認方法

◆目視

・　水銀ターゲット設備は放射化機器取扱室（ホットセル）内にあり、周辺は放射線レベルが高いので、4 月 4 日に第 1 マニピュレータ操作室から鉛ガラス越しに見える範囲で外観確認を行うと共に、インセルカメラを用いて異常の有無を確認した。その結果、ヘリウムベッセルシール機構の過剰な伸び（Fig. 2.2.2-4 参照）を確認した。ターゲット台車については、遮蔽体のライニングの一部（1 辺 5cm の直角三角形）が脱落していることが分かったが、インセルカメラによる調査で、落下場所も特定できた。脱落したライニングはターゲット台車の走行に支障のない位置に落ちており、特に問題ないと判断した。
・　ターゲット台車のレール周辺、ケーブルベアについても目視確認を行い、目立った異常のないことを確認した。本来、ホットセル内に入って直接確認するべきであるが、施設の空調設備が停止しており、ホットセル内の放射線レベルが上昇していたため、入室は出来なかった。
・　4 月 4 日にターゲット台車の最後尾に取り付けた耐放射線性カメラで、ホットセル床面に設置したスケールの値を読み、ターゲット台車の位置を計測した。ターゲット台車駆動装置に設置したエンコーダから出力されたターゲット台車位置座標とスケール値の読みは一致した。これにより、エンコーダの健全性と位置座標の信頼性が確認できた。

◆動作確認

・5 月 23 日にターゲット容器へのヘリウムガスラインに対する加圧試験を実施し、セーフティーハル内およびモニタリングラインでは、圧力の低下は見られず、健全であることを確認した。ヘリウムベッセルシール機構の加圧ラインでは、著しい圧力低下およびセル内カメラによる漏れ音が確認され、加圧ライン又はヘリウムベッセルシール機構ベローズが破損していると推測された。
・6 月 24 日にヘリウムベッセルシール機構と加圧ラインを切り離し、加圧ラインに対する加圧試験を実施して健全であることを確認した。これにより、ヘリウムベッセルシール機構ベローズが破損していることがほぼ確実となった。この破損に対しては、新規水銀ターゲット容器を製作し、11 月以降にターゲット容器を交換することで対応する。
・4 月 4 日にターゲット台車を動作させて、異常のないことを確認した。初めは 4mm/s の最低速度で移動させ、ターゲット台車駆動装置のモータートルクを監視しながら、異常が有ればすぐに停止できる体制で動作確認を行った。定格速度 20mm/s の運転でも、可動範囲

全てに渡って特に問題なく移動できることを確認した。これにより、ターゲット台車駆動装置及びレールに問題ないことが確認できた。

・4 月 8 日に施設の圧縮空気供給系が復旧した時点で、ターゲット台車固定装置の動作確認を行った。解除動作、固定動作いずれについても、インセルカメラによる観察で、特に異常は見られなかった。

◆電気信号

4 月 4 日に全てのセンサー表示値に異常の無いことを確認した。

◇復旧・改良計画

・破損したヘリウムベッセルシール機構を修復することは不可能であるため、新規水銀ターゲット容器に交換する。再発を防止するためには、ターゲット台車固定装置が解除された場合に、ヘリウムベッセルシール機構ベローズへのヘリウムガス加圧を停止し、ベローズ内のヘリウムガスを排気するように弁の構造と制御シーケンスを改良する。さらに固定装置の解除を検知するリミットスイッチに不具合が生じる可能性も考慮し、圧縮空気の喪失も条件に加える。本件はヘリウムガス供給設備側の改造だけで対処可能である。

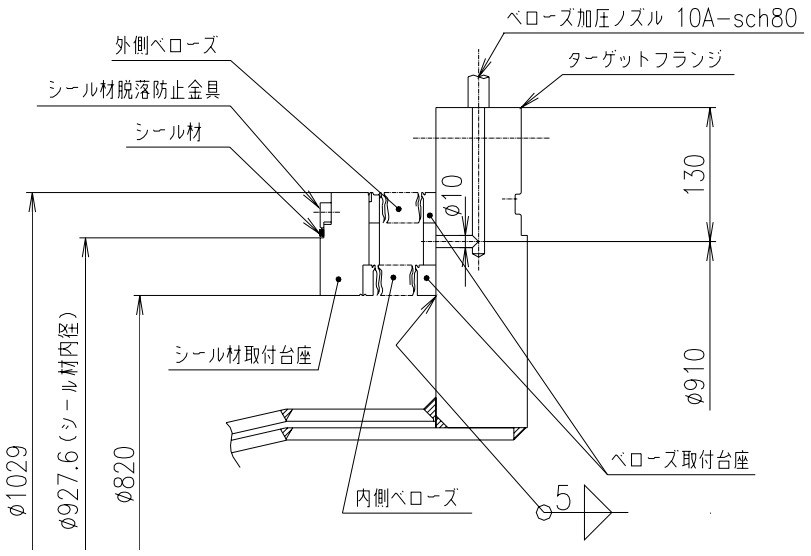


Fig. 2.2.2-1: Structute of helium vessel seal

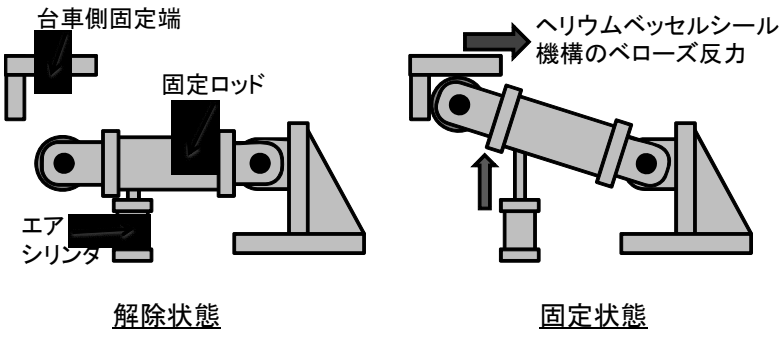


Fig. 2.2.2-2: Principle of locking system for trolley

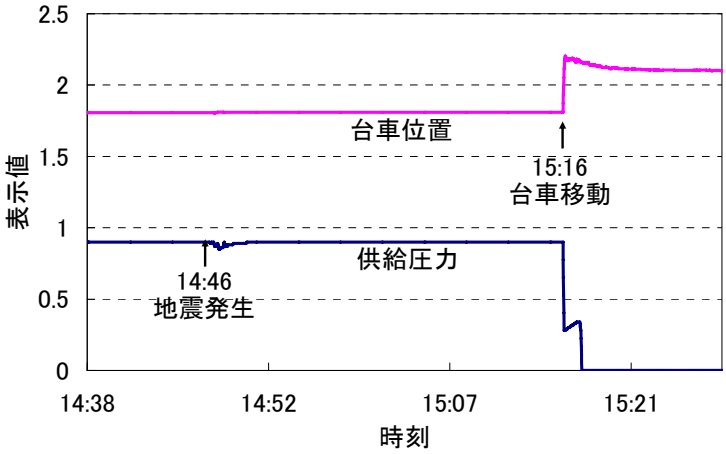


Fig. 2.2.2-3: Time series chart of He gas supply pressure and the target trolley position

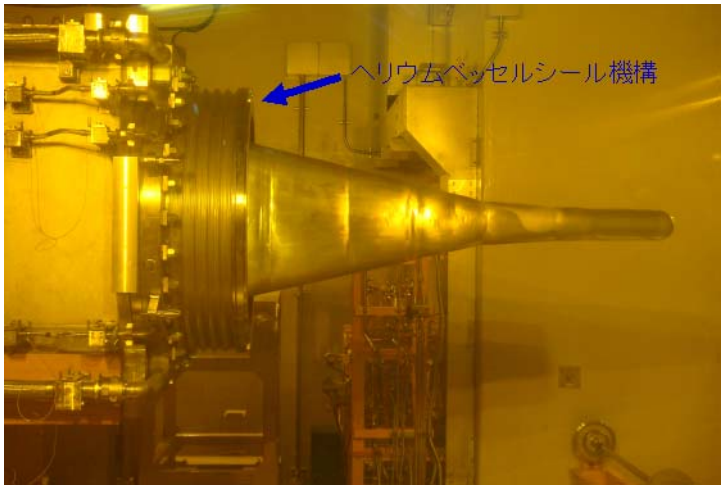


Fig. 2.2.2-4: Bellows of target vessel after the earthquake

2.2.3 水銀循環システム

◇地震発生前後の設備挙動

◆地震発生時の設備状態

地震発生前、水銀循環設備は定格流量（41m^3/h）で運転中であった。また、各バルブはベントバルブ V652 を除き、全て「閉」であった。Table 2.2.3-1 に地震前後での各プロセス値を示す。また、Fig. 2.2.3-1 に主なプロセス値の時系列を示す。

◆地震発生時の挙動

プロセス値に想定範囲外の挙動は見られなかった。水銀ポンプは電源喪失により停止した。この結果、ポンプ入口を除く圧力が低下し、ポンプ入口の圧力が上昇した。水銀液位、温度に顕著な変化は無かった。余震により、水銀圧力、液位、温度に変化は無かった。バルブについては、地震前に「開」であったベントバルブ V652 を除き、「閉」の状態を維持していた。ポンプトルクが低下し始める時刻（本震から約 150 秒後）が電源喪失時刻と考えられるが、モータートルクは約 10 秒で 0 になるのに対し、水銀流量は 0 になるまでに約 1 分かかった。これは、ポンプ内部に大きな抵抗となるインペラ等が無い電磁ポンプの特徴によるものである。即ち、機械的な損失が少ないので水銀が慣性で比較的長時間流動し続けることが可能であることを再度確認できた。

電源喪失、即ちポンプトルクが低下した時刻の約 30 秒前から圧力が変動しており、停電後も約 2 分継続している。これは地震動によるものと考えられる。また、圧力値の変動は、余震時にも計測されている。振動発生時刻は、公表されている地震の発生時刻よりも、本震（14 時 46 分 18 秒、三陸沖）、では約 2 分遅れて、余震（15 時 15 分 34 秒、茨城県沖）では、ほぼ同時に発生している。

◇健全性確認方法

圧力値が変動していることから、水銀循環設備が振動したことが明らかであるため、以下の健全性確認を行った。

◆目視

・ ホットセル内は放射線レベルが高いので、第 1 マニピュレータ操作室から鉛ガラス越しに見える範囲で外観確認を行うと共に、インセルカメラを用いて異常の有無を 4 月 4 日に確認した。各機器の位置ずれ、損傷は確認されなかった。また、ケーブルの遠隔コネクターや圧縮空気供給用のフレキチューブ用カプラーの外れも無かった。

◆動作確認

・水銀ポンプ

ポンプの駆動軸はカバーで覆われているため目視できない。また、ホットセル内に設置されているため、手動による空回しもできない。このため、4 月 6 日に低回転で短時間ポンプを運転し、設置時に比較した流量、及びインバータから出力されるポンプモータートルクを測定し、ポンプ設置時に測定した値と比較した。軸ずれを起こしている場合、負荷が高くなり、回転数が低下するために流量低下とトルク増加が起きるが、確認運転の結果、ポンプ流量やトルクは設置時の計測値と変化がなかったので、軸ずれは発生して無かったと判断した。その後、定格回転数まで増加させ、流量、吐出圧が地震前と同じであることを確認し、ポンプは正常と判定した。同時に、各計器も正常であると判断した。

・空気操作弁

圧縮空気復帰後、各空気操作弁の動作確認を実施した。空気操作弁は、合計 16 台設置されている。最初、開閉をしても水銀ドレンや設備の加圧･減圧等の事象が発生しない 4 台について開閉を 4 月 19 日に行い、異常がないことを確認した。残りのバルブについても、4 月 21 日の水銀ドレン時に開閉を確認した。

・流量計

水銀ドレンの 1 週間後に、流量計の値が異常を示した。すなわち、水銀がドレンされている状態にもかかわらず、流量指示値が急激に上昇し、40m^3/h を示した。8 月 5 日に水銀を再充填し、ポンプインバータ周波数を変化させて流動確認を行った。水銀を充填した時点で、流量の指示値は 0 となり､流量はポンプ設置時にインバータ周波数を変化させて測定した流量と良く一致した。その後、水銀をドレンし、真空引きを行ったところ、流量は 40m^3/h を示した。本流量計は、ベンチュリーの差圧を測定するタイプであるが、差圧計メーカーの見解では、真空状態では、差圧が発生することがあるとの見解であった。以上のことから、水銀充填時には、流量は 0 となり、流量計の値は正常であると判断した。

◆電気信号

・3 月 29 日水銀ポンプ動力ケーブルに関して、対地間の絶縁抵抗を測定し異常がないことを確認した。

・3 月 29 日全ての計器の表示値が、地震前の表示と変化無いことを確認し、計器、及び信号ケーブルに異常の無いことを確認した。

Table 2.2.3-1: Comparison of process values in the mercury circulation system between before and after eqrthquake

	地震（本震）前	地震後
水銀流量（m$^{3/}$h）	41.8	0.1
ポンプトルク（%）	41.8	0
ポンプ出口圧力（kPaG）	292	223
ポンプ入口圧力（kPaG）	180	189
ターゲット入口圧力（kPaG）	261	233
ターゲット出口圧力（kPaG）	242	240
カバーガス圧力（kPaA）	205	207
カバーガス圧力（kPaG）	106	108
サージタンク下部圧力（kPaA）	356	358
サージタンク液位（mm）	1034	1035
ターゲット出口温度（℃）	24.8	24.9
ターゲット入口温度（℃）	24.8	24.9

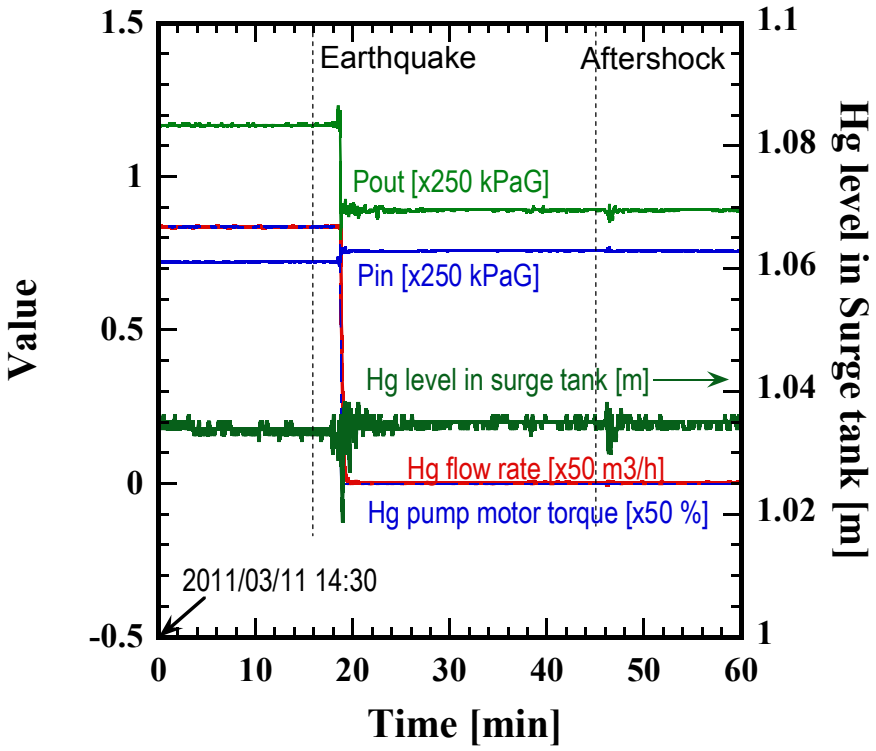


Fig. 2.2.3-1: Time histories of Hg flow rate, pressures at punpu inlet, Pin, and outlet, Pout, and Hg level in surge tank

2.2.4　気体廃棄物処理系

本システムは、水銀循環系等から発生する放射性ガス中の放射能を低減させる装置である。本システムには、容積 2.3 m^3 のガスホルダー4 基（TK3100~TK3400）を備えており、3 月 11 日の地震発生時には、Table 2.2.4-1 に示すように、そのうちの 3 基でガスを保持していた。

ガス中には、トリチウム、^{42}Ar, ^{127}Xe 等の放射性核種が含まれている。ガスホルダー中のガスは、地震時のゆれ等が原因でガスホルダーが損傷した場合、最終的にはそれらは外部へ漏えいすることになる[1]。Fig. 2.2.4-1 に、地震前後における各ガスホルダー圧力変化をグラフで示す。地震後 3 月 11 日～3 月 30 日にかけて停電によりデータが欠測しているものの、地震後の各ホルダーの圧力は、地震前と比べてほとんど変化していないことがわかる。また、地震後に本システムが設置されている「気体廃棄物処理設備室」内の空間放射線量を測定したが、特に異常な値の上昇はなかった[2]。これらのことから、地震によるガスホルダーの損傷はなく、ガスホルダーの気密性は十分保たれていたと考えられる。

気体廃棄物処理システムのユニット架台上には、2 台の水銀吸着ベッドを囲う厚さ 10 cm の

---

[1]ガスは負圧（80 kPa 以下）で保持しているため、微小リークならば即座に放射性ガスがタンク外部へ漏えいすることはない。

[2] ガスホルダーは厚さ 20 cm の鉄遮へい体内部に設置されている。地震後停電のため、管理区域内の空調が停止していたことから、ガスホルダーから放射性ガスが漏えいした場合周辺の空間線量は上昇すると考えられる。

鉄遮へい体が設置されている。遮へい体は、メンテナンス時に取り外しが可能なようにユニット架台にボルトで固定されていたが、地震によって転倒することはなかった。

4 月 11 日 10 時～11 時に、すべての空気操作弁（ガスを保持していた TK3100～3300 ガスホルダー関係の弁を除く）と一部のポンプの動作チェックを行い、すべて異常がないことを確認した。

以上、本システムは震災による目立った損傷や不具合はなく、特に修理等行う必要はなかった。本システムは、4 月 21 日に TK3400 へのカバーガスの受け入れを行った[3]。さらに 5～7 月にかけて、順次ホルダー中のガスのサンプリング測定を行いながら、ガスの環境放出を順調に行っている。

Table 2.2.4-1: Status and radioactive content for each tank when the earthquake occurred on March 11, 2011.

タンク名	ガス受入日	受け入れたガスの種類	圧力 [kPa]	放射能 ^{127}Xe [Bq]
TK3100	2010/6/29	カバーガス 2009/10～2010/6 使用	24	6×10^{7} (2010.6.9 測定)
TK3200	2010/9/14 ～29	水銀吸着ベッドからの離脱ガス／ドレンタンクフラッシング等の作業に用いたガス　他	35	3×10^{7} (2010.5.12 測定)
TK3300	2010/8/20	水銀循環系の圧力計較正に用いたガス	65	7×10^{8} (2010.6.9 測定)
TK3400			0.4	

[3] TK3400 は、水銀循環系の漏えいや他のガスホルダーにリークが発生した場合に、緊急的にガスを受け入れるための「非常用ホルダー」であり、通常は常に空けておく必要がある。今回、水銀循環系のドレンを行うにあたって TK3400 以外のホルダーがすでに埋まっていたため、緊急避難的に TK3400 でカバーガスを受け入れることにしたものである。なお TK3400 に受け入れたカバーガスは、TK3100 のガス放出後、7 月 1 日（金）に TK3100 に移送した。

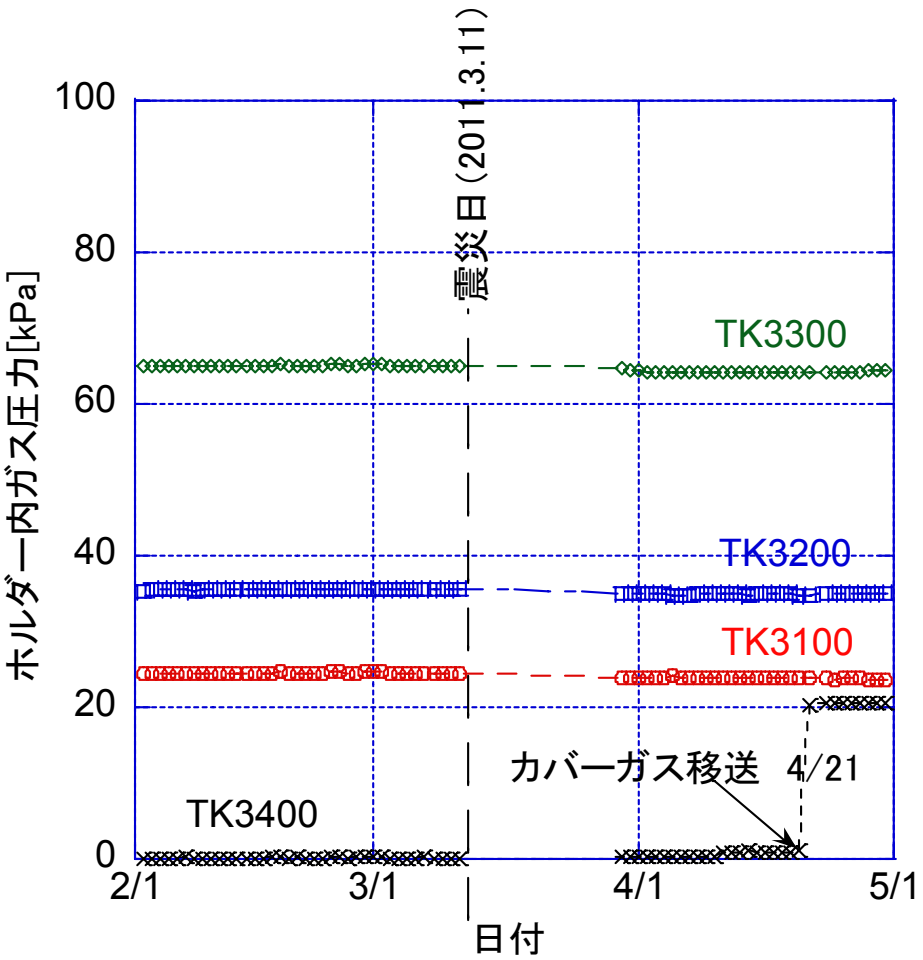


Fig. 2.2.4-1: Time variations of gas pressures in the tanks from Feburary to April, 2011. The eartquake happened on March 11, 2011. The data were not recoreded due to lost of electricical power in MLF from March 11 to 29. The trensfer of the cover-gas from the surge tank on April 21 gave the step-like change of TK3400 gas pressure.

2.3 極低温水素設備

2.3.1 概要

陽子ビーム(エネルギー3 GeV、定格強度 1 MW)を水銀ターゲットに入射させて発生した高速中性子を冷中性子に変換するために、密度が大きい極低温の超臨界圧水素（1.5 MPa、20 K 以下）を減速材（モデレータ）として採用しており、定格時、モデレータで発生する核発熱は 3.75 kW と評価されている [2.3-1)]。冷中性子を効率よく発生させるためには、99%以上のパラ水素濃度を有する 20 K 以下の極低温水素が必要であり、さらに、モデレータでの核発熱による温度変動を 3 K 以内にする必要があった [2.3-2)]。そこで、Fig. 2.3.1-1 に示すように、18 K の超臨界圧の低温水素をモデレータに供給し、そこで発生する核発熱(3.75 kW)を 200g/s の超臨界圧低温水素により強制循環冷却するための低温水素システムを開発した [2.3-3)]。

低温水素システムは、ヘリウム冷凍機の冷却端に水素循環システムが熱交換器を介して接続される二元冷凍サイクルを構成している。水素循環システムでは、3 基のモデレータに入口温度約 18 K の超臨界圧水素を供給するために、モデレータへの水素供給流路は並列流路を採用し、99%以上のパラ水素濃度を維持するために、水酸化鉄触媒のオルソ・パラ水素変換器を設置した。さらに、大流量（190 g/s 以上）による安定な強制循環により、モデレータ出入口温度差を 3 K 以下にするために、動圧気体軸受方式の遠心ポンプを開発した [2.3-4)]。本気体軸受ポンプでは安定なガス膜を形成するために、30,000 rpm 以上の回転数が必要であり、通常は、40,000rpm で運転している。許容ポンプヘッドは 0.1 MPa、最高回転数は 60,000rpm である。また、万が一、1 台のポンプが停止した場合でも、もう 1 台のみで、定格状態で運転継続が可能にするため、ポンプ 2 台の並列運転を行い、冗長性をもたせている。

水素循環システムは、非圧縮性の性質を有する超臨界圧水素（1.5 MPa、20 K 以下）が強制循環する閉ループを形成しており、陽子ビームが入射、停止時には急峻な kW オーダの熱負荷変動に伴う大きな圧力変動を許容値（100kPa）以下に抑制するために、ヒーター[2.3-4), 2.3-5)]とベロー構造を有する容積可変機構のアキュムレータを併用した安定性と応答性に優れた圧力抑制機構を開発した [2.3-7) , 2.3-8), 2.3-9)]。

1 MW 陽子ビーム運転時における水素循環システムに与えられる熱負荷は、4.62 kW（モデレータ部における核発熱：3.75 kW、熱侵入：0.87 kW）と見積り、ヘリウム冷凍機の冷凍能力はマージンを見込んで 6 kW （温度 17 K）と定めた [2.3-10)]。ヘリウム冷凍機は、1 台のタービン膨張機(定格回転数: 2470 rps)、3 台の熱交換器から構成されており、補助寒冷として液体窒素を利用している。圧縮機の吸入、吐出圧力は、それぞれ、0.3 MPa、1.68 MPa であり、ヘリウムガスの循環流量は 260 g/s である。ヘリウム供給温度は、ヒーター（8 kW）により直接制御できる。万が一、水素-ヘリウム熱交換器内で漏洩が生じた場合でも、水素系からヘリウム系への漏洩対策として、ヘリウム系の圧力（1.66 MPa）を水素ループの圧力（ポンプ吐出圧力：1.56 MPa）より 0.1MPa 高い状態にした。

可燃性である水素に対する安全対策として、低温水素システムは、水素を内包する領域は、全てブランケット構造と呼ばれる不活性の窒素ガスおよびヘリウムガス層で覆うことにした。これは万が一、水素が漏洩した場合でも水素と空気との混合を防ぎ、爆発性雰囲気を作らない

ための対策である。また、異常時には、インターロックにより [2.3-11]、水素は、放出ラインを通じてスタックより外気へ希釈放出される [2.3-12]。

低温水素システムは、2007 年の 11 月に現地据付工事が完了し、その後、半年間の低温試験により [2.3-7)，2.3-10), 2.3-13]、設計通りの性能を確認し、さらに、安定な冷却運転方法を確立した。その結果、平成 20 年 5 月 30 日、J-PARC で初めて核破砕パルス中性子の発生に成功した [2.3-3]。以降、陽子ビーム出力は段階的に上昇され、2010 年 12 月から 200 kW の安定な陽子ビーム運転を実施してきた。

2011 年 3 月 6 日に、初期冷却運転を開始し、3 月 8 日以降、共用運転（210kW の陽子ビーム運転）のための冷却運転を行っていた。3 月 11 日 14 時 46 分 18 秒に地震が発生したため、低温水素システムは、自動停止した。地震発生時における低温水素システムの挙動およびその被害状況を示す [2.3-14]。

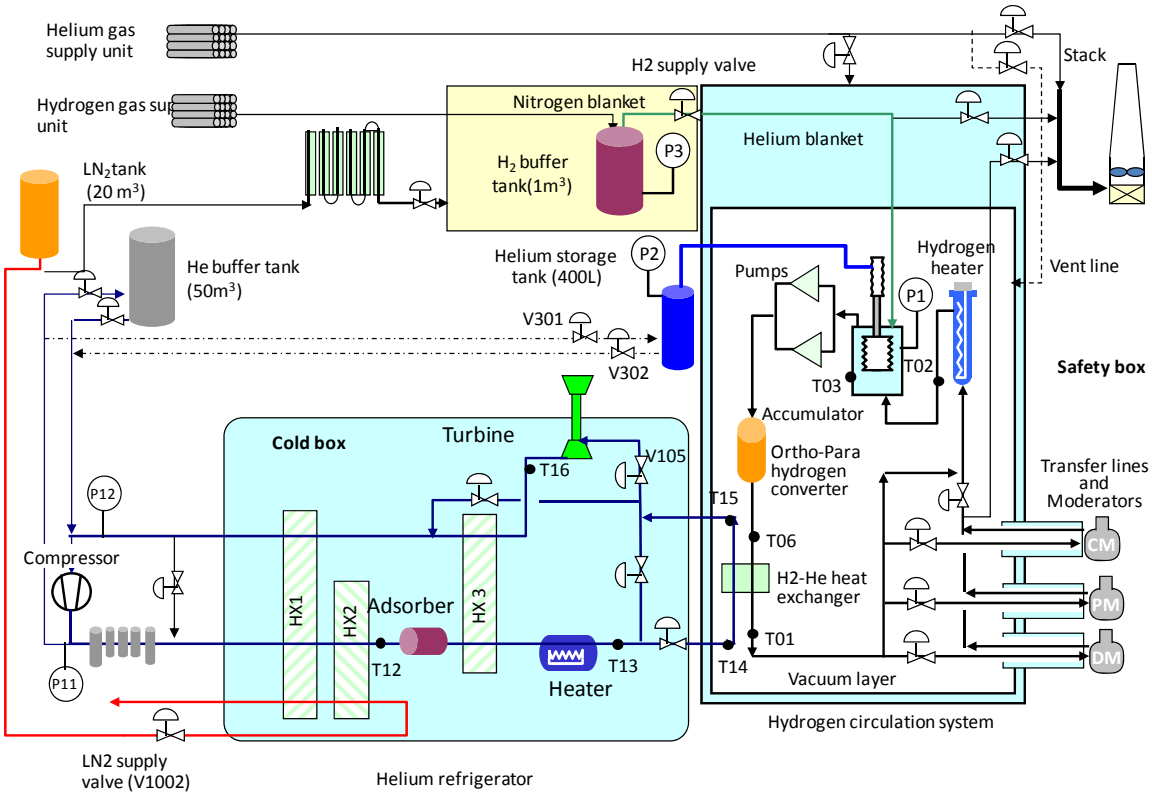


Fig. 2.3.1-1:　Schematic view of the cryogenic hydrogen system

2.3.2　地震発生時の低温水素システムの挙動

地震が発生した 3 月 11 日午前 9 時に、加速器の調整試験のために陽子ビームの運転は停止し、陽子ビーム運転の再開は 17 時からの予定であった。その間、低温水素システムは、定格運転を継続していた。地震発生前後の低温水素システムの挙動を Fig. 2.3.2-1 に示す。地震発生から約 120 秒後に揺れが急に大きくなった。この時、水素系においては、アキュムレータレベルは大きく変動し、フルストローク変動しているかのようにみえたが、アキュムレータのフルストローク（6L）変動による水素系の圧力（P1）およびアキュムレータ内部(ヘリウム)の圧力（P2）の変動（±80kPa）はな

く、アキュムレータレベル計でのレーザーの反射光が、地震による振動により、正確に検知できなかったことが理由であると考えられる。さらに、ヒーター出口温度計(T02)の指示値は、大きく変動したが、その下流に位置するアキュムレータの温度変動(T03)はなかったので、地震による断線の影響であると思われた。その後、水素ループの真空断熱層を開放し、目視点検を実施した結果、Fig. 2.3.2-2 に示すように、温度センサー部でなく、ヒーターサポートと圧力伝送器用導管間の狭い隙間（15mm 程度）に配線された箇所で断線していることがわかった。つまり、地震により、断熱真空層内の水素ループの配管および機器は 15mm 以上の揺れがあったと推定される。再発防止のため、温度計の配線ルートを変更し、断線箇所の復旧を行った。一方、このような大きな揺れが発生した場合においても、動圧気体軸受型の高速回転機械である超臨界圧水素ポンプは、回転数に変化はなく、地震発生後も異常な軸振動や電流値の変動もなく、このような大きな地震発生時においても定格回転数(40,000rpm)で安定な運転が継続されていた。一方、静圧気体軸受型の高速回転機械であるヘリウム冷凍機の膨張タービンは、水素ポンプと同様、2470rps の定格回転数で、安定な運転が継続していた。圧縮機については、ロータの回転数などのデータは計測していないが、大きな揺れが発生した場合でもタービンの回転数に変化がなく、圧縮機の吐出圧力(P11)、吸入圧力(P12)が一定に保持できていたことから、正常に定格運転されていたことが間接的にわかる。水素系、ヘリウム系、ガス供給系の温度、圧力ともに、定格状態を維持していた。

地震発生から約 150 秒後に停電が発生した。その結果、動力系であるヘリウム圧縮機、膨張タービン、超臨界圧水素ポンプ、ヒーターの電源が喪失したため、低温水素システムのインターロック [2.3-11)] が正常に作動し、低温水素システムは自動停止した。測定計器や自動弁を含む制御システムは UPS により保護されていたため、データ収集および遠隔操作が可能であった。圧縮機が停止したため、ヘリウム冷凍機の高圧ラインのヘリウムガス(P11)は、ヘリウムバッファタンクへ回収され、インターロックによる制御下で 1MPa まで降圧されたが、インターロックシーケンスどおり、圧縮機のスライド弁は 100%のまま緊急停止した。膨張タービンは、タービン入口弁(V105)による回転数制御により正常に停止することができた。ヘリウム冷凍機の停止に伴い、冷凍機の温度（T13,T16）は次第に上昇したが、降圧操作により異常な圧力（P11,P12）上昇はなく、安全に停止することができた。一方、水素系では、超臨界圧水素ポンプは、インターロックにより軸振動値や電流値に異常はなく、通常どおり 9 秒以内で正常に停止することができた。これらのデータから、接触等によるインペラの損傷や軸受の損傷はないと判断できる。また、インターロックシーケンスにおいて、ベロー内のヘリウムガス（P2）もヘリウム冷凍機の低圧ラインに回収することにしていたので、ベロー内のヘリウムの圧力（P2）が降下し、その結果、ベローが収縮したため、水素ループの容積は増加し、水素の温度は上昇しているにもかかわらず、圧力（P1）は降下した。そのため、安全弁や破裂板などの安全装置は動作しなかった。しかしながら、アキュムレータのベローが完全に収縮（アキュムレータレベル=0.0mm）してからは、水素系の圧力は徐々に上昇し始めた。仮に圧力が上昇し続けても、1.8MPa になると、放出弁（自動弁）が作動するようになっている。万が一、圧力上昇速度が速く、放出弁の制御が間に合わなくても、2.0MPa で安全弁（4 個）が作動し、さらに 2.3MPa では破裂板(2 個)が作動する 3 重の安全設計となっている。

本地震においては、停電発生から約 180 秒後に、計装空気の圧力が自動弁動作圧力以下まで降下したため、全ての自動弁はノーマル状態となった。例えば、水素放出弁は全開（100%開）となり、水素ループの圧力（P1）は急降下し、約 80 秒で大気圧まで降圧された。放出された水素は、窒素ガ

スによりパージされた放出ラインを介して安全に屋外に放出された。この際、水素系の圧力(P1)が、30 秒以内に 0.7MPa 急降下したため、アキュムレータの内外の差圧(P2-P1)変動も大きくなり、Fig. 2.3.2-1 に示すように、アキュムレータは伸びる方向にフルストローク短時間で変動した。このとき、ベロー内外の差圧(P2-P1)は、Fig. 2.3.2-3 に示すように、0.6MPa であり許容差圧である 0.9MPa 以下であった。

ヘリウムガスおよび窒素ガスブランケット層の圧力降下はなく、また、水素の外部漏洩も検出されなかった。今回の巨大地震では、停電と計装空気の早期喪失という複数の異常事象に遭遇したが、低温水素システムは水素の外部漏洩もなく、構築したインターロックに従って、安全に自動停止することができた。

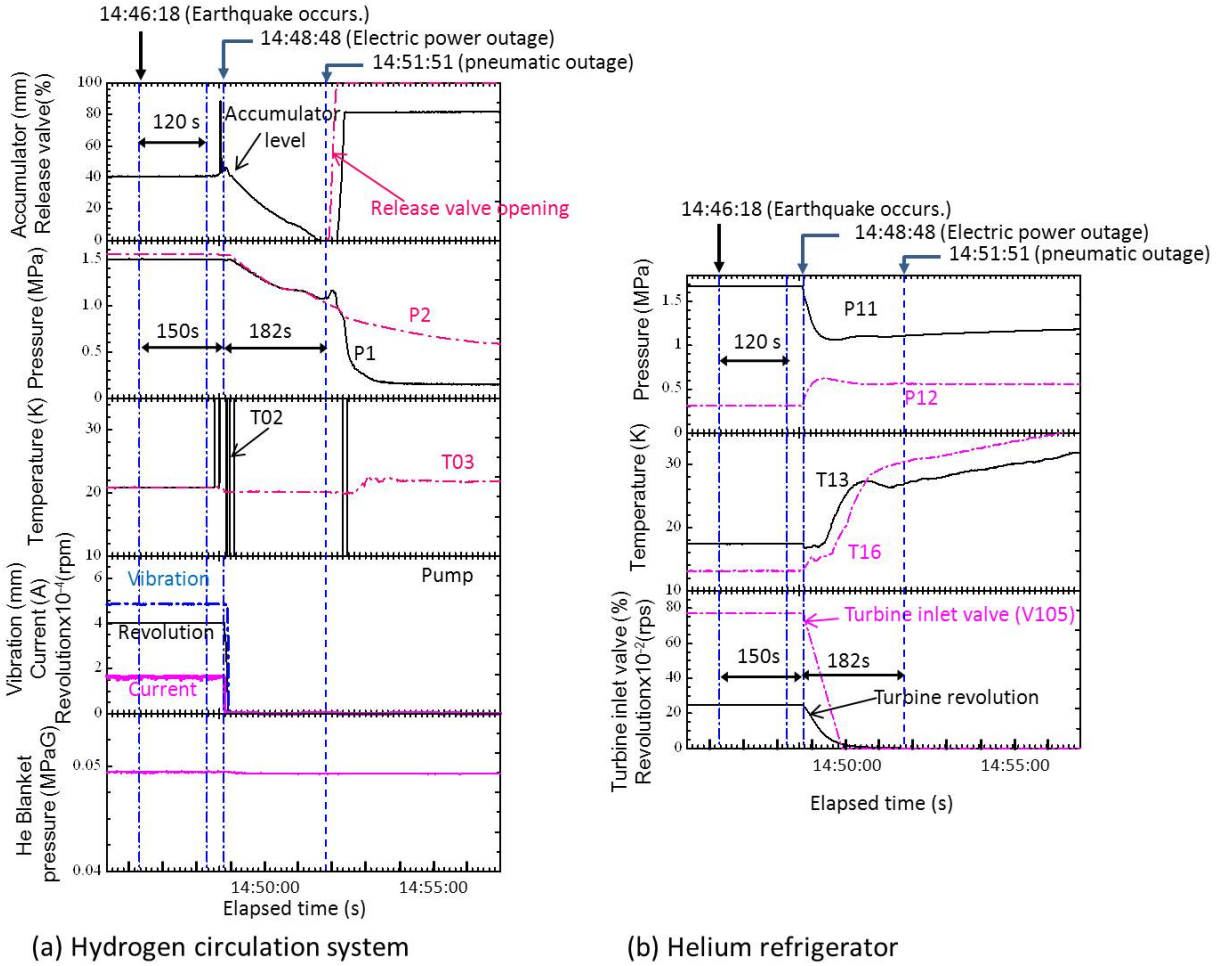


Fig. 2.3.2-1: Behaviors of the cryogenic hydrogen system at the earthquake

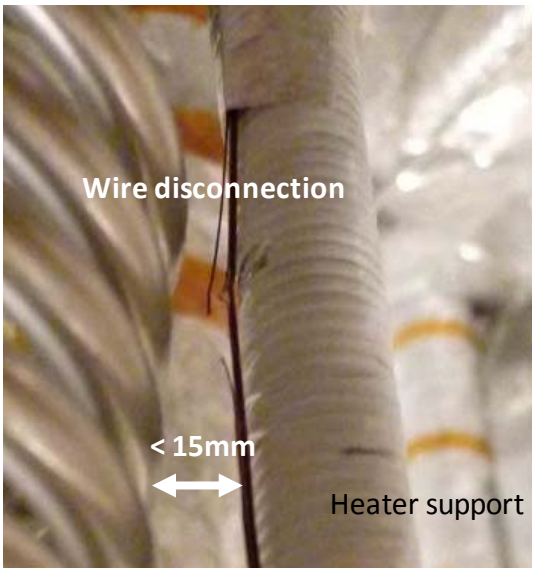


Fig. 2.3.2-2: Wire disconnection for a heater outlet temperature sensor

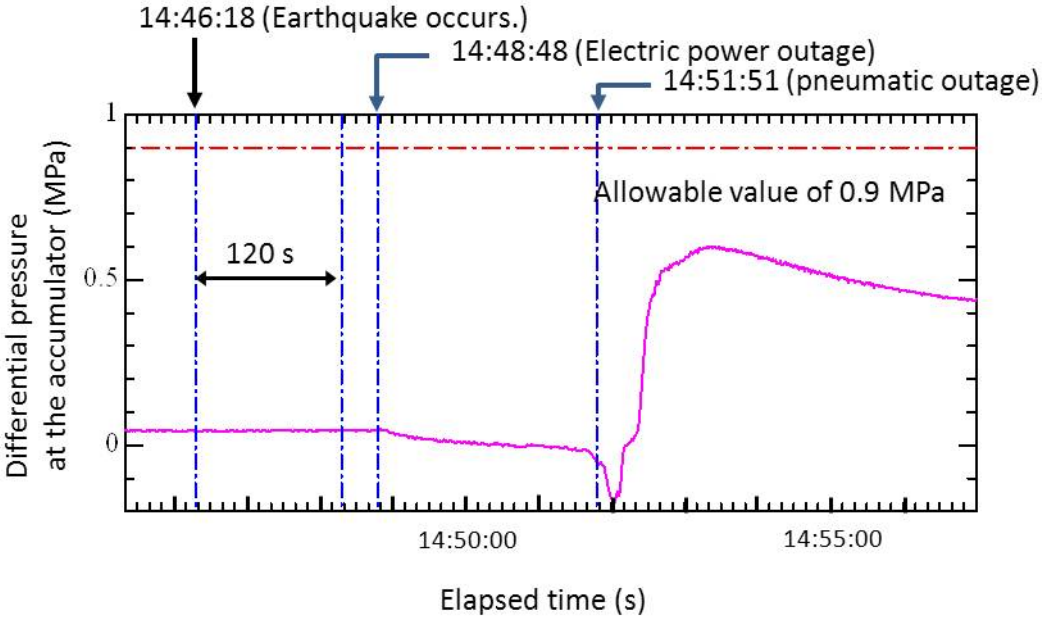


Fig. 2.3.2-3: Differential pressure between inside and outside of the accumulator

2.3.3 被害状況調査

Fig. 2.3.3-1 に低温水素システムの配置図を示す。水素循環システム及びそれを冷却するヘリウム冷凍機は、中性子源の近くの MLF 建屋内 3F 大型機器取扱室に設置し、ヘリウム圧縮機は MLF 建屋に隣接する第一ヘリウム圧縮機室内に設置している。また、付属設備であるヘリウムバッファタンク、液体窒素貯槽、圧縮機用冷却塔とヘリウムガスおよび水素ガス供給設備は、屋外に設置している。地震後の低温水素システムの被害状況調査は Fig. 2.3.3-2 に示す

順に、電気、水道、空調などのインフラの復旧が不十分の中、安全を確保しながら進めた。

◇地震発生直後の目視点検結果

地震後、放射線管理区域外の屋外エリア（液体窒素貯槽、ヘリウムバッファタンク、圧縮機用冷却塔、水素ガスおよびヘリウムガス置き場）について目視点検を実施した。MLF 建屋内の放射線管理区域には、停電、空調停止、さらに度重なる余震のため入室することができなかった。MLF 建屋廻りでは、最大で 1.5m の地盤沈下が発生しており、その影響で液体窒素貯槽（20000L）の基礎が傾斜し、0.34%傾いた(Fig. 2.3.3-3)。液体窒素貯槽は一般高圧ガス製造設備であるため、1%以上の傾斜があった場合使用できなくなり、傾斜が 0.5%以上 1%未満であれば 1 カ月に一度の測量をする必要がある。現状の貯槽の傾きであれば、法律上使用することに問題はない状況であった。一方、ヘリウムバッファタンクの傾斜は 2.14%と大きかった。しかし、ヘリウムバッファタンクは冷凍保安規則が適用される設備であり、タンクの傾きに関する記載はない。法律上の不整合性はあるが、J-PARC では、基礎の傾斜を改修し、タンクの再据付を行った。地震直後の対応として、度重なる余震に対するタンクの倒壊も考慮に入れて、満液状態であった液体窒素貯槽内の液体窒素は、加圧蒸発器によりガスの状態にして放出した。

建屋貫通配管用のサポート部の地盤が 0.75m 沈下し、建屋貫通部のフレキ配管（ヘリウム冷凍機の高圧、低圧配管、水素供給配管、窒素ガス供給配管、ヘリウムガス供給配管、液体窒素供給配管、および、真空配管）とその近傍の配管が大きく変形した(Fig. 2.3.3-4)。本来、このフレキ部は MLF の建屋の沈下対策（1mm/年）として採用したもので、最大 30mm の変位を想定していた。今回 750mm の沈下によって、これらのフレキ配管は大きく塑性変形したことを確認した。しかし、周囲への水素ガスの漏洩はないことを水素漏洩検知器により確認した。

第一ヘリウム圧縮機室は、室内の電気や空調が停止しており、酸素濃度計も所持していなかったため、ヘリウムガスの漏洩による酸欠の危険性があったので、扉付近からの目視確認しか行えなかった。

カードル置き場では、水素ガスおよびヘリウムガスカードルの元弁を閉め、一次圧力約 15MPa 程度のヘリウムガス、水素ガスを放出し、大気圧まで降圧し、ガスの供給を停止した。

制御系の計測制御機器は、UPS により設計どおり電源が維持されていたので、地震発生前後のデータも保存され、地震後点検時における低温水素システムの状態も確認することができた。異常な圧力上昇や大型機器取扱室内への水素漏洩も確認できなかったので、直ちに制御システムをシャットダウンし、退避した。

◇被害状況の詳細調査

地震発生後から MLF 建屋内の電気、水道というインフラの復旧に 2 週間かかり、MLF の管理区域へ入室することができなかった。それまでの期間は、屋外施設の液体窒素貯槽、ヘリウムバッファタンクの傾斜を計測し、余震による影響がないことを確認した。

MLF に電気が復旧した 3 月 28 日からは、まず、制御システムを起動し状況を確認した後、水素循環システム内の残存する水素ガスを不活性ガスであるヘリウムガスに置換し、低温水素システムの停止処置を完了させた。このときの自動弁駆動用の計装空気に窒素ガスを用いて遠

隔操作により実施した。低温で使用する弁は熱侵入量を軽減するために長尺シャフトを採用しているため、シャフト部の変形やシートリークを懸念し、動作試験を実施し、健全性を確認した。

MLF 建屋内の T0 チョッパー室から大型機器取扱室までの配管ルートの外観目視点検および液体窒素配管の断熱真空度を計測した。建屋貫通部で断熱真空配管の大きな変形が確認できたが、真空度は初期値と同様であり真空が維持されていた。それ以外の箇所では異常がないことを確認した。その後、ヘリウムガスおよび水素ガス供給配管、ヘリウムブランケットおよび窒素ブランケット、液体窒素配管の気密試験を実施し、圧力降下と発泡漏洩検査により正常であることを確認した。

一方、建屋貫通配管であるヘリウム冷凍機の高圧・低圧配管の気密試験では圧力降下が確認できたので、貫通フレキ部においてヘリウムリーク試験を実施した。他の配管に比べて配管サイズも 100A、150A と大きく、フレキ部の変形も大きかったが、リーク箇所はフレキ部ではなく、両端のフランジ部であることがわかった。そのリーク量は 2×10^{-1}Pam^3/s であった。

まだ冷却水系統が復旧していなかったが、メンテナンス用に所有していたチラーを用いて、真空ポンプ（ターボ分子ポンプ）の単体試験およびヘリウム冷凍機と水素循環システムの真空層の到達真空試験を実施した結果、通常運転時と同様の到達真空度（10^{-3}Pa 以下）が得られ、健全性を確認できた。

4 月の 2 週目から、ヘリウム冷凍機（上述漏洩箇所は除く）および水素循環システムの高圧ライン（設計圧力 2.0MPaG）の気密試験（圧力降下法）と真空層へのヘリウムリーク試験を実施し、漏洩がないことを確認した。度重なる余震と不十分なインフラの状況の中で、気密試験まで、復旧作業開始から 2 週間以内で完了した。

水素ループとヘリウム冷凍機の気密確認と真空断熱層の健全性が確認できたので、真空層を開放し、内部配管および機器の目視確認を実施した。上述したように、ヒーター出口温度計の断線も確認でき、再発防止対策として配線ルートを変更し、復旧した。高速回転機器である膨張タービンを取り出し、インペラ(羽根車)の損傷がないことと手回しで軸ズレと接触がないことを確認した。動圧気体軸受方式の超臨界圧低温水素ポンプは、取り外し前に軸トルクの計測を行い、軸ずれがないことを確認した。その後、開放点検を実施し、インペラに損傷がないこととポンプケーシングに接触による打痕がないことを、目視とファイバースコープにより確認した。復旧後、常温のヘリウムガス雰囲気下で試運転を実施し、正常に起動および停止できることを確認した。膨張タービンについては、圧縮機が運転でき、ヘリウムガスが循環していないとできないので、実施しなかった。

ベロー構造を有するアキュムレータは、地震発生後、比較的短時間でフルストロークの伸縮があったため、ベローの外側である水素系の圧力を変化させ、連続的にフルストローク変化させて動作確認を行い、動作途中での異常な引っかかりもなくスムーズに動作することを確認できた。

最後に、ヘリウム圧縮機に関しては、地震による地盤沈下の影響による断水のために 6 月 27 日まで試運転を実施できなかった。試運転前には、圧縮機本体のアライメントと 1 次から 3 次フィルターを開放し、設置状況を確認した。これは、フィルターの設置状況が悪いと圧縮機

からの油分が冷凍機側に蓄積され、冷凍能力が劣化するためである。その後、気密試験により気密を確認した後、試運転を行い、健全性を確認することができた。

以上の結果、低温水素システムの被害は、地盤沈下による屋外のタンクとその基礎の傾斜とその周辺の配管の変形、配管サポート沈下による建屋貫通部配管の変形だけであり、それ以外の屋内の機器や配管の損傷はないことを確認できた。したがって、今回の地震に対しては、地盤沈下さえなければ、低温水素システムは健全に保持できたと考えている。

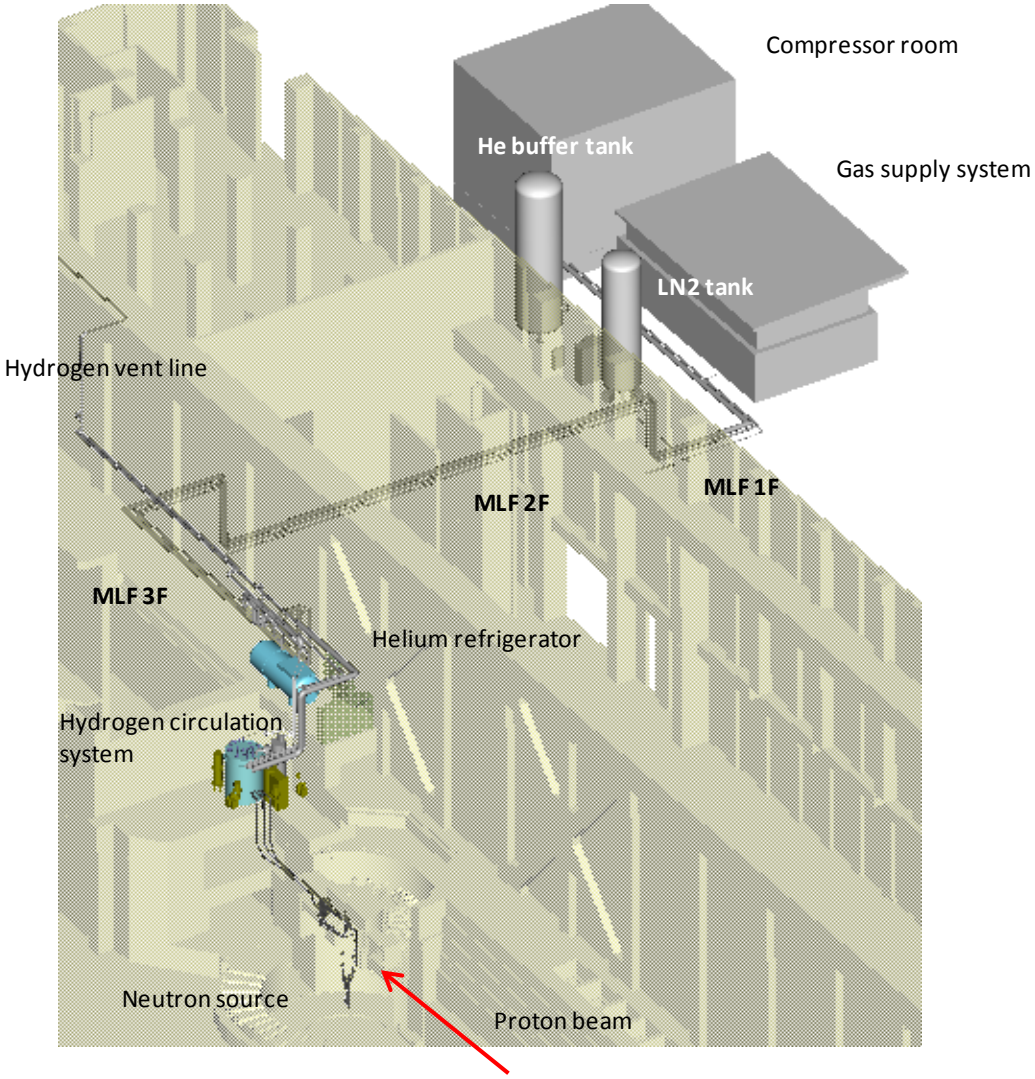


Fig. 2.3.3-1: Layout of the cryogenic hydrogen system at the MLF

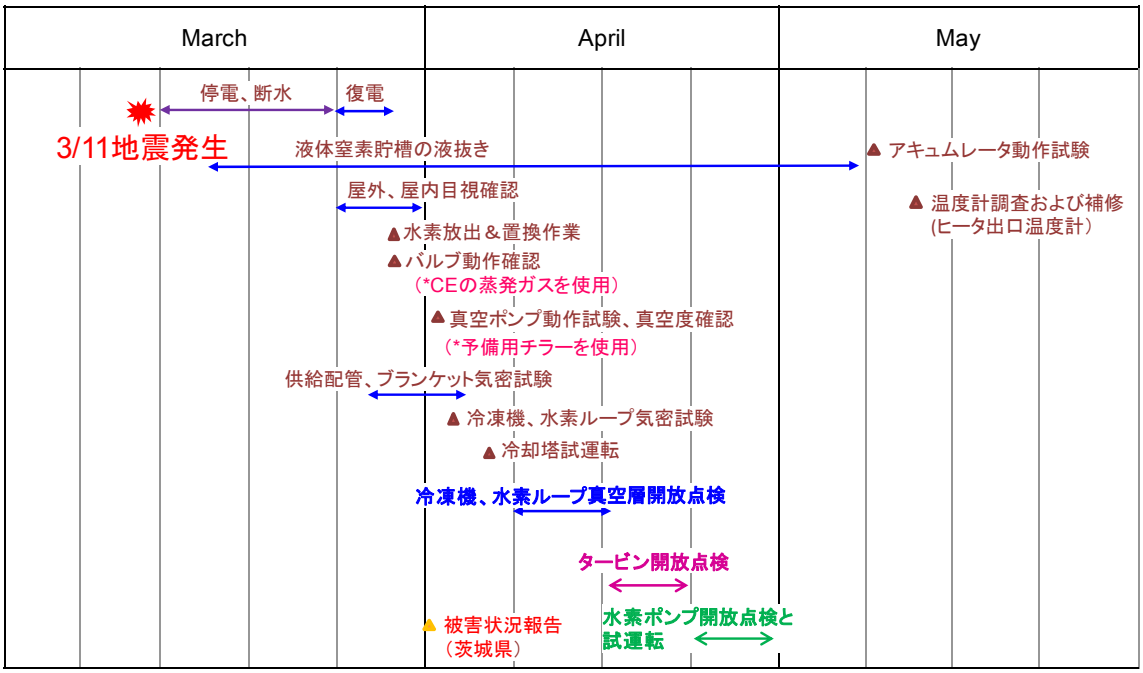


Fig. 2.3.3-2 Schedule of damage investigation of the cryogenic hydrogen system

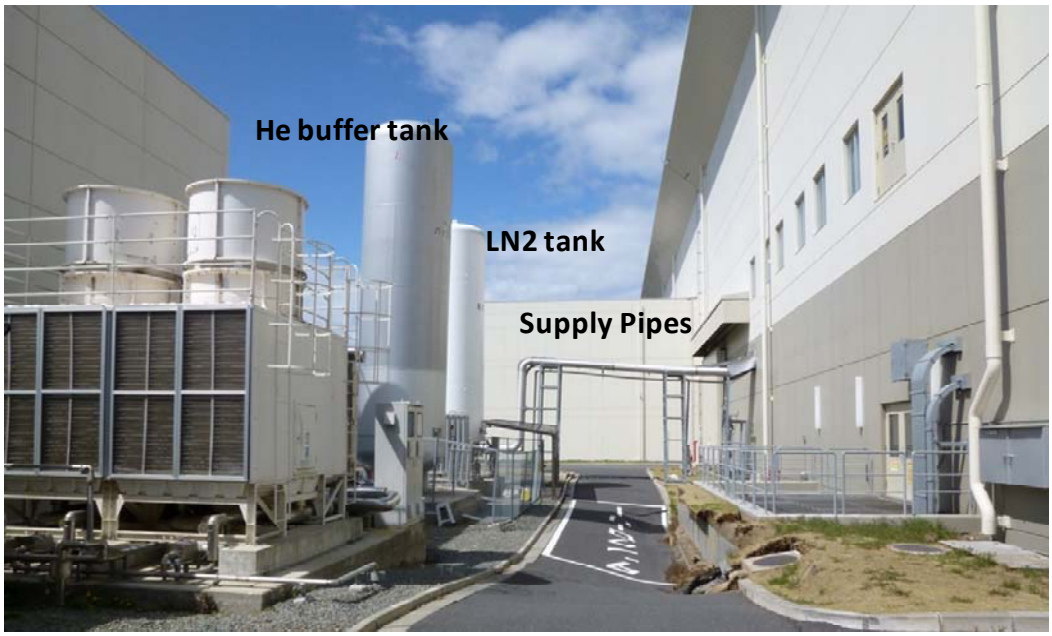


Fig. 2.3.3-3: Damage situation of outside of MLF building

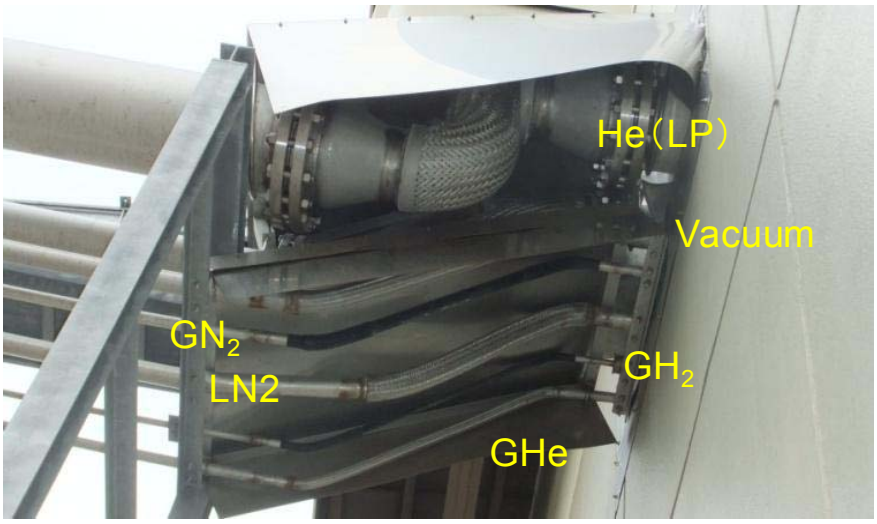


Fig. 2.3.3-4: Damage situation of supply pipes passing through MLF building wall

2.3.4　今後の対応策

屋外のタンクと基礎に関しては、基礎の傾斜を復旧し、タンクの再据付を実施し、建屋貫部の配管サポートおよび配管類も再製作と再据付を実施する。

また、今回の地震では停電後に計装空気が喪失した。仮に、計装空気が先に喪失していたら、自動弁は全てノーマル状態になっていた。例えば、放出弁は全開になると 30 秒程度で大気圧付近まで降圧される。一方、アキュムレータ内のヘリウムガスは圧縮機の低圧系に V302 を介して降圧される。この弁のコンダクタンス（Cv）値が 0.22 と小さいので、ベロー内の圧力降下速度は、Fig. 2.3.3-1 に示すように、水素系に比べて遅くなり、アキュムレータのベローに設計許容差圧（0.9MPa）以上の差圧が与えられる可能性がある。この対策として最大差圧 2.0MPa に耐えうるベローを有するアキュムレータを開発する必要がある。それまでの期間、安定な維持運転のために予備機を持つことが重要であると思われる。

また、計装空気を維持するための対策として、窒素ガスカードルを独自に用意し、非常時に切り替え可能な構成とすることも検討する必要があると思われる。

参考文献

2.3-1) Harada, M.,Teshigawara, M.,Watabnabe, N., Ikeda, Y., “Neutronic study on coupled hydrogen moderator for Japanese spallation neutron source”, in *The Proceedings of ICANS-XVI*, edited by G. Mank and H. Conrad, ISSN 1433-559X, ESS 03-136-M1, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Germany, 2003, pp.657-666

2.3-2) J-PARC 中性子源と低温水素システム、加藤崇; 麻生智一; 達本衡輝; 長谷川勝一; 大都起一、低温工学、42、pp.244-254(2007)

2.3-3) Tatsumoto, H., Aso, T., Ohtsu, K., Uehara, T., Uehara, T., Sakurayama, H, Kawakami, Y., Kato, T. and Futakawa, M., “Development of the cryogenic hydrogen system for a spallation neutron source in J-PARC,” in *Advances in Cryogenic Engineering* 55A, Melville, New York, 2010,

pp.297-304

2.3-4) Tatsumoto, H., Aso, T., Ohtsu, K., Uehara, T., Uehara, T., Sakurayama, H, Kawakami, Y., Kato, T., Futakawa, M., and S. Yoshinaga, “Performance test of a centrifugal supercritical hydrogen pump,” in Proceedings of the 23th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Material Conference 2010, Wroclaw, Poland, 2010, pp.377-382

2.3-5) H.Tatsumoto, T.Aso, T.Kato, K.Ohtsu, F.Maekawa, and M.Futakawa, “Design of a high power heater for the cryogenic hydrogen system at J-PARC “, Cryogenics, Volume 51, Issue 6, June 2011, pp.315-320

2.3-6) オリフィス型温度調節用ヒーター、特願２００８－３０２６８４　特開２０１０－１２９３６８、2008 年 11 月 27 日、達本衡輝、加藤崇、麻生智一、出願審査請求中

2.3-7) J-PARC 中性子源用極低温水素システム、加藤崇、達本衡輝、麻生智一、長谷川勝一、大都起一、低温工学、Vol.43、No.10、2008

2.3-8) Tatsumoto, H., Aso, T., Ohtsu, K., Uehara, T., Uehara, T., Sakurayama, H, Kawakami, Y., Kato, T., Futakawa, M., Pressure fluctuation behavior in the cryogenic hydrogen system caused by a 100 kW proton beam injection, Advances in Cryogenic Engineering, 55A , pp.289-296 (2010)

2.3-9) J-PARC 中性子源用低温水素システムの動的特性、達本衡輝、麻生智一、加藤崇、大都起一、低温工学、45、pp.181-190　(2010)

2.3-10) Tatsumoto, H., Aso, T., Ohtsu, K., Uehara, T., Uehara, T., Sakurayama, H, Kawakami, Y., Kato, T., Futakawa, M.,”Performance test of a helium refrigerator for the cryogenic hydrogen system in J-PARC,” Proc. of the 22nd International Cryogenic Engineering Conference, pp.711-716 (2009)

2.3-11) Tatsumoto, H., Aso, T., Ohtsu, K., Uehara, T., Uehara, T., Sakurayama, H, Kawakami, Y., Kato, T., Futakawa, M., “Safety interlock of the cryogenic hydrogen system at J-PARC,” in Proceedings of the 23th International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Material Conference 2010, Wroclaw, Poland, 2010, pp.601-606

2.3-12) H.Tatsumoto , T. Aso, T. Kato, K. Ohtsu, S. Hasegawa, F.Maekawa and M.Futakawa, Design of Hydrogen Vent Line for the Cryogenic Hydrogen System in J-PARC, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 600 (2009) 269-27

2.3-13) H.Tatsumoto, T.Aso, K.Ohtsu, S.Hasegawa, F.Maekawa, M.Futakawa, Commissioning of the cryogenic hydrogen system in J-PARC:first cool-down operation with helium, Proc. of the 22nd International Cryogenic Engineering Conference pp.717-722 (2009)

2.3-14) 達本衡輝、麻生智一、大都起一、長谷川勝一、櫻山久志、川上善彦、上原聡明、加藤崇、第 84 回 2011 年度春季低温工学・超伝導学会講演概要集 p 166

2.4　中性子源ステーション機器

2.4.1　概要

直径 10mのアウターライナー内に収められた中性子源構成機器のうち、陽子ビーム窓、水銀ターゲット、またシャッター等の中性子ビームライン機器については 2.5 節で記述されており、2.4 節で対象とするのはヘリウムベッセル、ベッセル内機器（水素モデレータ、反射体、反射体プラグ、水冷遮蔽体)、およびアウターライナー内の遮蔽体である。これらの機器には運転時、冷却水や極低温水素が循環され、また真空が保持されているが、これらユーティリティ系の影響についてはそれぞれのユーティリティ設備の章で述べられているので、2.4 節ではそれ以外について述べる。Fig. 2.4.1-1 にターゲットステーション全体像を示す。

3 月 11 日の地震発生時には、日中の時間帯は保守のために加速器運転が休止中であったため、中性子源は陽子ビームを受け入れていなかった。しかし、中性子源の冷却水や水素設備等はいつでもビームを受け入れ可能な定格運転状態であった。ターゲットステーション内機器の地震による影響は、2011 年 6 月時点で確認されている範囲内において軽微であった。ただし、中性子源中枢機器であるモデレータや反射体等は放射化のために容易にアクセスできないこと、また高放射化物を遠隔操作で取り扱うリスクを避けることから、運転時の設置場所から移動させての目視確認作業は行っていない。

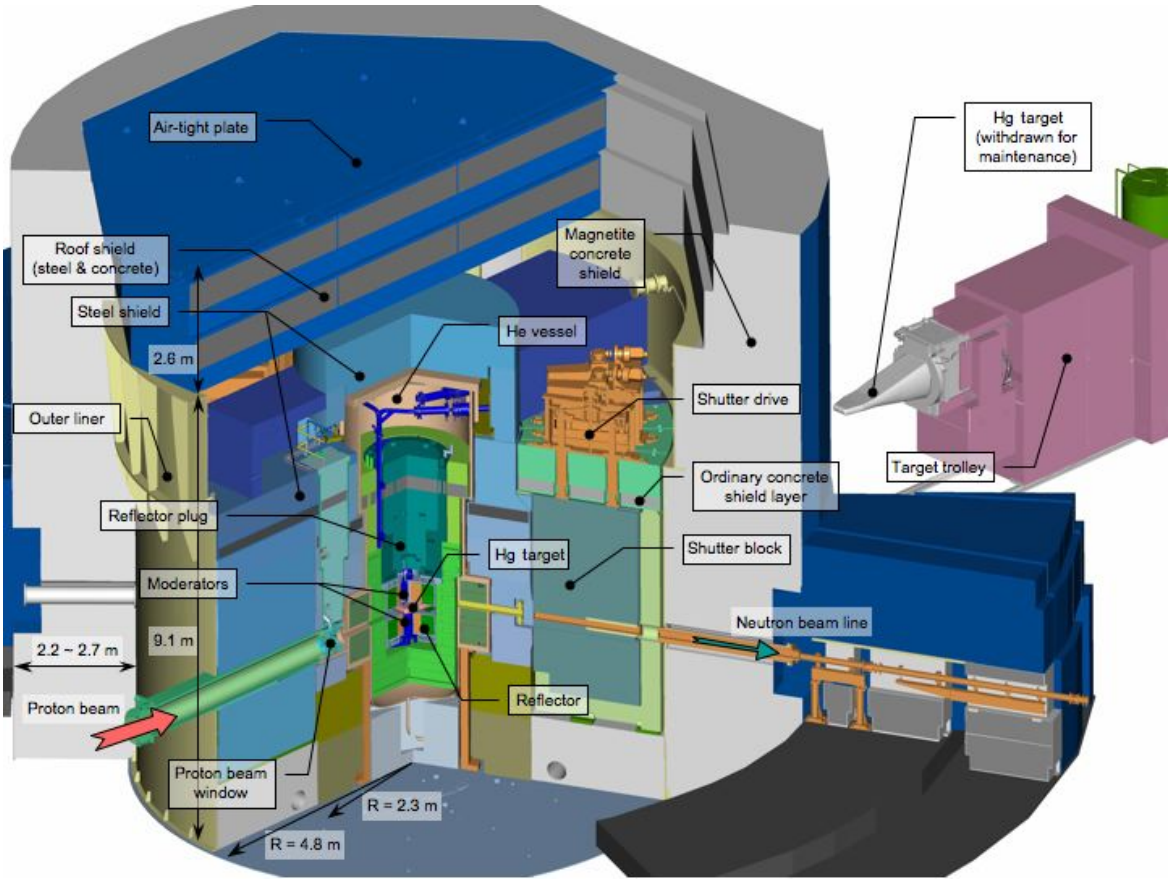


Fig. 2.4.1-1: Overview of the JSJS target station.

2.4.2　モデレータ

◇地震発生時の挙動

地震発生時、3 台のモデレータすべてに極低温水素と冷却水が定格値で供給されていた。2.3 節で述べられているとおり、地震発生により水素は緊急放出されてモデレータの低温配管は 20K から常温まで徐々に昇温し、また冷却水系は循環が停止した。

◇健全性確認・復旧

地震後、MLF の電力回復後にユーティリティ系の復旧が行われた後、3 月 30 日からモデレータの健全性確認が行われた。水素系では、常温状態において水素領域配管で 2.0MPa の耐圧試験に合格、また真空領域の真空引きが通常どおり可能なことが確認された。また、2.4.3 節で詳細に述べるが、冷却水系にも問題ないことが確認された。ベッセル上蓋解放後に、ベッセル上部空間にてモデレータと水素循環系を接続するカプラーの目視確認を行ったところ、異常は見当たらなかった。

今後の健全性確認作業で最も重要なものは、低温水素システム復旧後の低温状態における水素循環試験である。常温から定格の 20K にまで冷却し、低温配管が収縮した状態で耐圧気密性能に問題なく、定格流量の極低温水素を循環できることを確認する。また、ターゲット台車をホットセルに引き出した状態で、カメラをホットセル側から水平に反射体のターゲット挿入孔に挿入し、そこから見える範囲に限定されるが、目視点検を行う予定である。

今のところモデレータに損傷は認められていないが、万一何らかの損傷があった場合には早急にモデレータを交換しなければならないため、モデレータ予備機の発注を急ぐことが広義の復旧対策の 1 つである。

2.4.3　ヘリウムベッセル・ベッセル内機器

◇地震発生時の挙動

地震発生時、2.4.2 節で述べたモデレータ（6552 系）を含め、反射体（6551 系）、反射体プラグ、水冷遮蔽体、ヘリウムベッセル（以上 6553 系）にはすべて、冷却水が循環されていた。地震発生、冷却水循環ポンプ停止とともに、冷却水の循環が停止した。ヘリウムベッセル内は微正圧のヘリウムガスで満たされていたが、地震発生約 30 分後にターゲット台車がホットセル方向に約 300mm 後退したことに伴いベッセルの気密機能が失われ、ベッセル内とホットセルとが同一雰囲気となり、ベッセル内のヘリウムガスはホットセルの空気と置換したと考えられる。ただし、気密機能喪失状態ではビーム運転は行われておらず、特に悪影響はなかったと考えられる。

◇健全性確認・復旧

冷却水循環に係わる以下の健全性確認の結果、特に問題は見当たらなかった。

- 地震後数週間にわたり、冷却水系の圧力が保持されていた。
- ある程度の漏水があれば、ヘリウムベッセルドレンライン、またベースプレートドレンラ

インに設置された漏水センサーが漏水を検知するが、どちらのセンサーにも発報がなかった。

- 冷却水ポンプ復旧後、5 月 27 日に数時間にわたり冷却水循環試験を行った結果、定格状態の運転が行えた。
- ベッセル上蓋解放後、5 月 31 日にベッセル上部空間の冷却水配管フランジ類の目視点検を行った結果、異常は見られなかった。

ヘリウムベッセルの気密性能について、地震後の点検により、陽子ビーム窓のピローシール（1 ヶ所）、またヘリウムベッセル枝管（23 ヶ所）の 2 重シール部の真空引きに問題がなかったことから、これらシール面の気密性能に問題はない。ベッセル上蓋はゴムシールのため問題ないと考えられるが、確認が必要である。シール性能の点で最も重要なのが、ターゲット容器によるシールである。現在、ターゲット容器シール部のベロ–が損傷しているために気密試験を行うことが出来ない。2011 年 11 月以降のターゲット容器交換後、ターゲット台車を線源に挿入してベッセルとのシールを行い、気密試験を実施する。

ベッセル内の上部空間には反射体、水冷遮蔽体の温度計測用熱電対の端子台が設置されている。5 月 31 日の目視点検の結果、端子に緩みはなかった。

2.4.4 ステーション内遮蔽体

◇地震発生時の挙動

地震発生時、ステーション内遮蔽体はすべてビーム受け入れ可の正規の位置に設置されていた。遮蔽体は大きく 2 つに区分できる。一方は保守時においても移動させる可能性が低い遮蔽体であり、動かす可能性がない遮蔽体（陽子ビーム入射部遮蔽、ターゲット台車挿入部遮蔽、枝管部遮蔽など）は溶接により遮蔽体同士あるいはアウターライナーと固定、また動かす可能性がわずかにある遮蔽体（陽子ビームポート上部遮蔽、配管樋遮蔽等）はボルトにより他遮蔽体と固定されている。他方は通常の保守時に頻繁に動かす遮蔽体であり、溶接やボルト固定ではなく、結合ピンや隙間管理等により落下や大きく位置ズレしない配慮をしつつ、積み上げて設置する構造となっている。

◇健全性確認・復旧

地震後、4 月 7 日に天井遮蔽体を移動し、シャッター駆動装置エリア床面より上部の遮蔽体について、目視点検を行った。その結果、溶接またはボルト固定による遮蔽体では、損傷や位置ズレ等の問題は見当たらなかった。しかし、積極的な固定を行わない積み上げ式の遮蔽体では、以下 2 点で損傷が見られた。

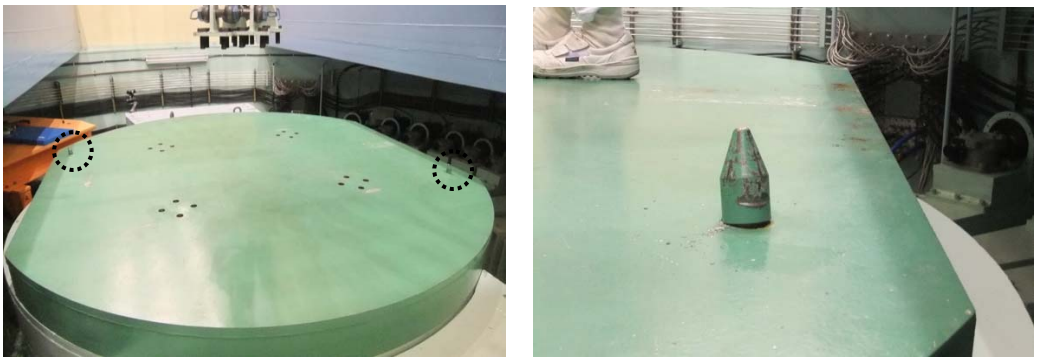
① ベッセル上部遮蔽体

Fig. 2.4.4-1 に状況写真を示す。ベッセル上部遮蔽体は上部リング遮蔽体上に設置され、上段（47.2 トン）と下段（41.9 トン）の 2 体からなる。下段の遮蔽体は上部リング遮蔽体にはめ込む構造であり、両者の間には図面上 40mm の隙間があるが、この範囲内で下段の遮蔽体が横ズレした痕跡が上部リング遮蔽体上に残されている（Fig. 2.4.4-1 左下）。上段と下段の遮蔽体は位置決めピン 2 本により結合されていたが、この位置決めピンが 2 本とも過荷重により曲がっていた（Fig. 2.4.4-1 右上）。

② 天井遮蔽体

天井遮蔽体は、ターゲットステーションのシャッター駆動装置エリアの天井部分に、約 70 トンの遮蔽ブロック 15 体を 2 段に積み上げた構造である。ボルト等による積極的な固定は行っていない。設置時には遮蔽ブロック同士の隙間が均一になるように配置するが、地震後の目視点検の結果、隙間が拡大あるいは縮小していて、地震動による遮蔽ブロックの横ズレが確認された（図 2.4.4-2 左上・右上）。また、この横ズレにより周囲のコンクリート部分が一部損傷した（図 2.4.4-2 左下）。

復旧対策として、損傷したベッセル上部遮蔽体の上段と下段固定用の位置決めピンの交換を行う。損傷した位置決めピンは M30、SS400 製であったが、ピン 2 本あたりの短期剪断荷重は 18 トン余りである。一方、摩擦無しの仮定のもと、上段遮蔽体に設計水平加震力である 0.25G の加速度が加わると 12 トン弱で短期剪断荷重以下であるが、今回の地震では 0.25G 以上の加速度が加わったか、または 2 本のピンに均等に力がかからずに、損傷に至ったものと考えられる。今後、同様の地震動に対する耐力を高めるよう、ピン材料を炭素鋼（S45C）に変更する。



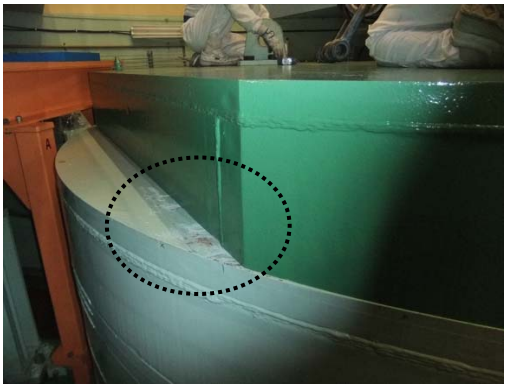


Fig. 2.4.4-1: Pictures of the vessel top shield.
(upper left) Two pins are seen on the lower shield block.
(upper right) The damaged pin.
(lower left) Scrach left on the vessel top ring shield marked by slipping of the lower shield block.

Fig. 2.4.4-2: Pictures of the roof shield.
(upper left) Uneven gaps between the adjacent shield blocks.
(upper right) Top view of the shield blocks. The leftside shield block (G2) was moved to attach the concrete wall.
(lower left) Concrete wall damaged by colisions of shield blocks due to the quake.

2.5　中性子ビームライン機器

2.5.1　概要

MLF の中性子源は、23 本の独立な中性子ビーム取出し孔を有している。上流より「ベッセル窓」及び「中性子ビームシャッター」が、中性子ビーム取出し孔のビームライン部を形成する（Fig. 2.5.1-1 参照）。

中性子源の外側、中心から約 7m 以遠より 12m 位置まで、前置き遮蔽体が各ビームライン周囲の遮蔽体を形成し、その内部には中性子輸送機器や遮蔽体が据付けられている。

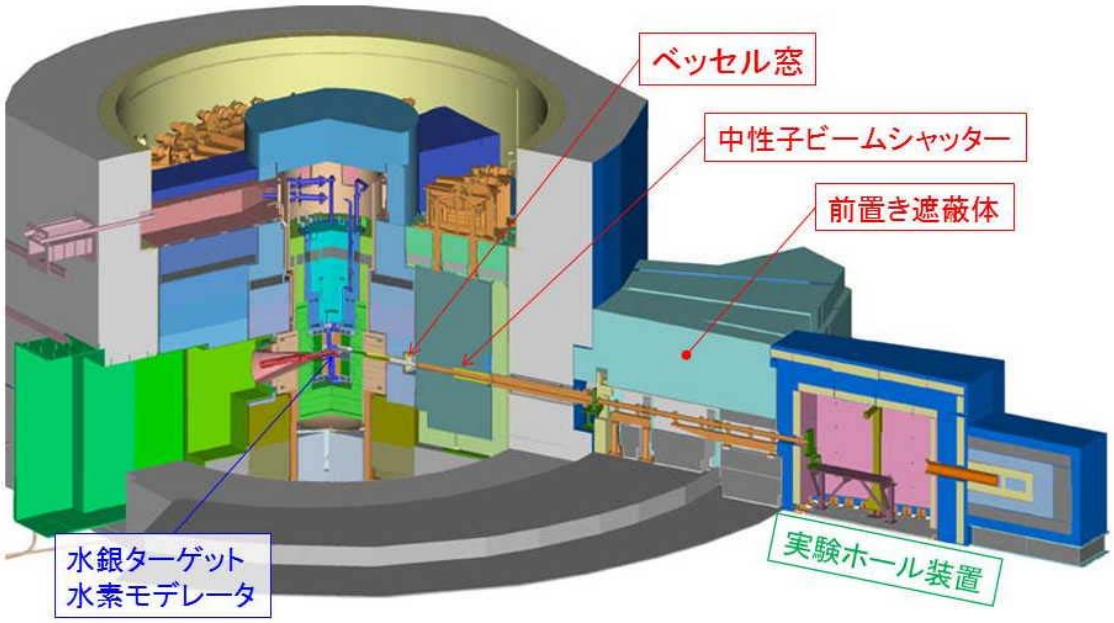


Fig. 2.5.1-1: A beam window of a He vessel and a neutron beam shutter in the target station and a pre-shield at the experimental hall.

2.5.2　ベッセル窓

◇設備概要

ヘリウムベッセルの各ビーム取出し孔部をヘリウムベッセル枝管と呼ぶ（Fig. 2.5.2-1）。これら枝管のフランジには、ベッセル窓と称するヘリウムベッセルのバウンダリを形成する真空容器型のビーム窓が取付けられている（Fig. 2.5.2-2）。シールには二重のメタル O リングが用いられ、4 本の遠隔操作ボルトにより枝管フランジとビーム窓が締結されている。各ビーム窓の真空度は独立にモニターされ、100 Pa 以下であれば各電磁バルブ閉による真空保持、それよりも悪化した場合にはオイルフリーの真空ポンプが自動的に起動して、該当ビーム窓への電磁バルブを開として真空引きを行う。一定時間後、再び該当バルブ閉として真空保持・モニター状態へ移行する（Fig. 2.5.2-3）。

◇地震発生前後の設備挙動

・　発生時の設備状態は真空保持・モニター状態であり、全バルブ閉・ポンプ停止であった。

・　発生後の挙動は、停電によりそのまま真空状態保持となった。
・　発生後、想定外の挙動はなかった。

◇健全性確認方法
・　3 月 31 日からベッセル窓真空系制御盤を再起動し、真空度の悪化状態を確認したところ、通常時と変わらないリークレベルであった。すなわち、リークレートが元々若干高めのビーム窓 3 本において、100 Pa をやや超えていたが、震災の影響によりリークしたものとは認められなかった。
・　電気信号は全て正常であった。
・　分解点検はしていない。
・　稼働試験は、真空系制御盤再起動後に、通常の計画停電後に行う初期排気運転を行い、そのまま真空保持・モニター状態へ移行した。これにより、完全に復帰したものとみる。

Fig. 2.5.2-1:　Neutron beam ports on the He vessel (left), and a vessel window for the beam port (right).

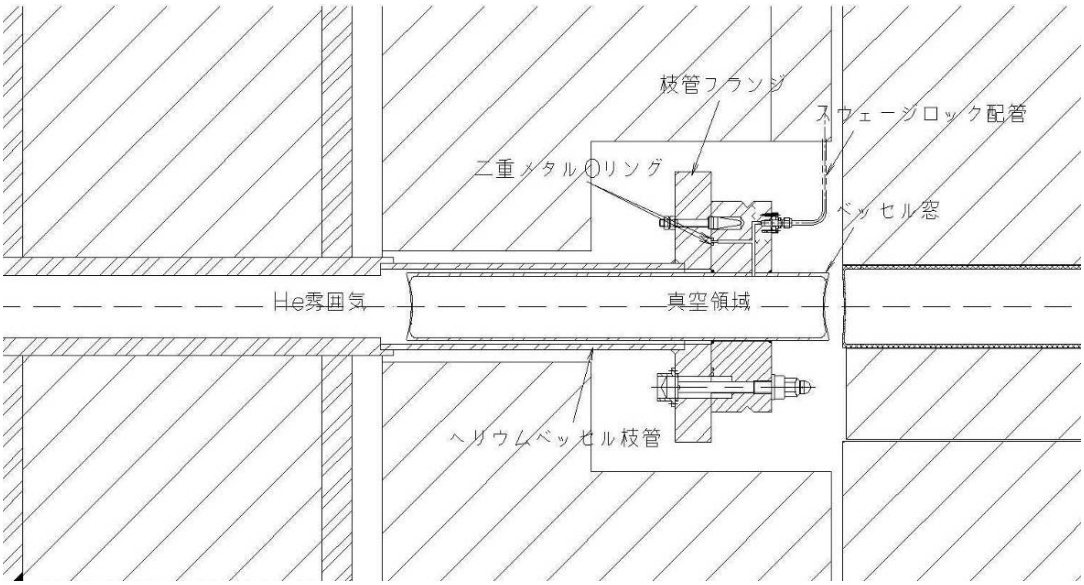


Fig. 2.5.2-2: Cut view of a beam port and a vessel window.

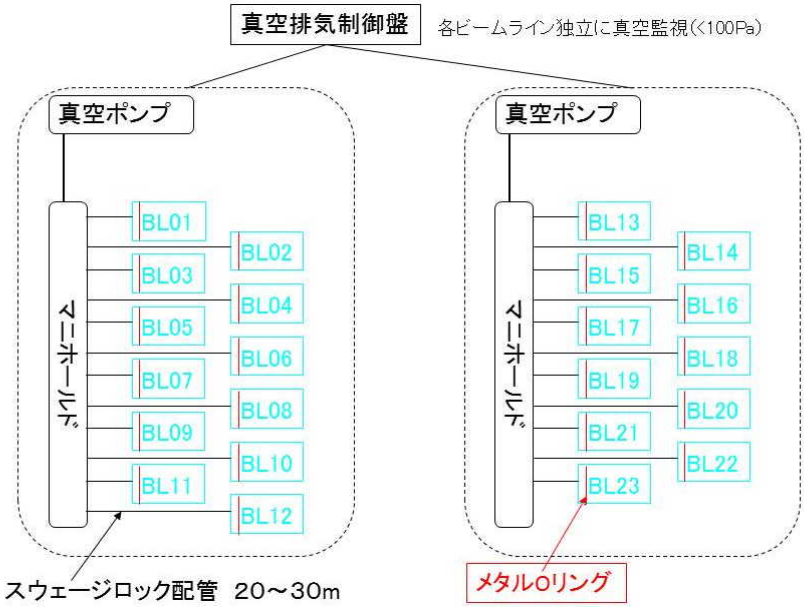


Fig. 2.5.2-3: Schematic diagram of the vacuum system of the vessel window.

2.5.3 中性子ビームシャッター

◇設備概要

中性子ビームシャッターは、実験ホールの各実験装置への中性子ビーム供給または遮蔽を行う設備である。指令信号を受けて、ビームライン毎に 15 トンのシャッターブロックがサーボモータにより独立に上下駆動される（各実験装置からのシャッター開閉操作）。シャッターブロックには、中性子ビームを輸送するためのビーム孔が備えられ、ビーム孔には真空容器型の角形ダクトが据付けられている（Fig. 2.5.3-1）。角形ダクト内部には、各実験装置の仕様によ

り、ガイド管や鉄コリメータなどが収められている。角形ダクトの真空シールにはメタル O リングが用いられ、8 本のボルトにより角形ダクトフランジと閉止フランジが締結されている（Fig. 2.5.3-2）。各角形ダクトの真空度は独立に常時モニターされ、100 Pa 以下であれば各電磁バルブ閉による真空保持、それよりも悪化した場合にはオイルフリーの真空ポンプが自動的に起動して、該当角形ダクトへの電磁バルブを開として真空引きを行う。一定時間後、再び該当バルブ閉として真空保持・モニター状態へ移行する（Fig. 2.5.3-3）。

なお震災発生時、MLF ビーム供給は停止中であり、運用されていたシャッター14 本はすべて閉位置停止、運用開始前のシャッター3 本及び未使用（角形ダクト無し）シャッター6 本は着座状態でサーボモータ電源断であった。

◇地震発生前後の設備挙動

- 発生時の設備状態は、運用中のシャッター14 本はすべて閉位置で、駆動機構サーボモータ制御により宙吊り（停止）状態であった。シャッターブロックと周囲の遮蔽体との隙間は僅か 12.5mm であるため、強い揺れによってブロック底辺稜部は周囲と衝突したものと推察される（水平加振力 0.25G の設計評価でも弾性変形により接触する結果になっている）。角形ダクトは真空保持・モニター状態であったと思われるが、真空引き中に電源断発生でも全バルブ閉・ポンプ停止となるため、詳細は不明である。
- 発生後の挙動は、停電により運用中のシャッターの駆動機構はサーボモータ単体のブレーキシステムにより宙吊り状態保持、真空排気系はそのまま真空状態保持となった。なお、電源復帰時において、シャッターブロックの有意な位置降下は、エンコーダ表示値及び各駆動機構の目視確認からは認められなかった。
- 発生後、駆動機構及び真空排気系に想定外の挙動はなかった。しかしながら、地震による振動衝撃により、運用中のシャッター14 本の角形ダクトのうち、9 本で真空保持ができず大気開放状態となった（Fig. 2.5.3-4）。また、1 本のガイド管において、ガラス基盤の破損が認められた。以下に詳細を述べる。

◇健全性確認方法

- 4 月 1 日~5 月 20 日の間、角形ダクト内部にガイド管を内包するビームライン 7 本（BL01, 02, 05, 12, 14, 15, 16）のガイド管の健全性及び真空ブレーク（7 本のうち BL01, 05, 14, 15, 16 が大気開放状態）を確認した。具体的には、各シャッターブロックを遮蔽キャスクに収め、角形ダクトの閉止フランジを開放することにより、内部のガイド管の様子を直接目視確認するとともに、真空ブレークの部位をリークテスト等により確認した（Fig. 2.5.3-5）。なお、閉止フランジ開放はハンズオンで行う必要があるが、最大でも 85μSv/h の局所的な表面線量であったため、本作業に対して特別な追加遮蔽対策は行わなかった。
- 確認したガイド管のうち、BL05 のガイド管のみ、中央付近に部分的なガラスの欠けが認められた。本ガイド管はビーム断面サイズを角形ダクトの内寸の許す限り大きく取っているため、他のガイド管に比べ構造的に振動に対して弱かったものと推察される。
- 大気開放に至ったビームラインはすべて、程度の差はあったが、閉止フランジ締結ボルト

が緩んでいた。そのためメタル O リングが機能しなくなり、大気開放状態となったことが確認された。なお、震災直前まで数年間、大気開放状態となった角形ダクトは無かった。

・ 角形ダクトのメタル O リングを締め直し、ヘリウムリーク試験を行った結果、シール部で微少リーク発生が確認された。仮のバイトンゴム O リングに交換すると、ヘリウムリーク試験では検出限界以下となった。

・ 閉止フランジ締結ボルトが緩んだトリガは、ガイド管の飛出し防止用平行キーが閉止フランジ内面を叩いたことと考えられる（Fig. 2.5.3-2）。この部位に衝突痕が残っていた（Fig. 2.5.3-6）。

・ また、角形ダクトの長手方向のストッパー機能を有する固定金具のボルトが振動衝撃により目視確認できる程度に曲がっていた（固定金具にも遊びが発生していた；Fig. 2.5.3-6）。本来このボルトは引抜き荷重のみ受けるように検討されていたが、固定金具の形状不具合により、曲げの力がかかったためと考えられる。

・ 23 本のシャッター駆動機構の稼働試験は、閉位置と着座位置の間を 50 ㎜駆動させて確認した。BL02 のみモーター部に異音が発生したが、震災による影響とは考えにくく、製作メーカーによる詳細調査を行うこととした。

・ 真空系制御盤及び真空ポンプ、電磁バルブ等の排気系の健全性は、手動操作により確認した。特に異常は認められなかった。

◇復旧・改良計画

・ BL05 のガイド管はそのまま使うことも不可能ではないが、ビーム運転再開までに再製作し、交換することとした。若干の放射化物が発生するが、ガイド管（ガラス）は砕くことにより減容処分できるものと考えている。スペーサ等は再利用もしくは管理区域内での一時保管となるであろう。

・ 角形ダクトの真空シール耐震機能改良について議論を重ねた結果、以下の改良を行うことで復旧対策とした。

①メタル O リングから耐放射線性 EPDM ゴムへの変更

角形ダクト、閉止フランジともアルミニウム合金（A5083）製のため、メタル O リング（SUS321+錫メッキ）を一度使用すると何らかの変形・キズが生じる。当初設計段階では、耐放放射線性の観点から本部位にはメタル O リングを採用したが、この O リングだけを途中で交換することは放射化の観点から想定していなかった。今回調査した角形ダクトのメタル O リングの締め直しでも実際に微少リークが発生した。一方で、メタル O リングを取外し、仮のバイトンゴム O リングへ交換すると、リークは完全に抑えられた。

そこで、線源集合体系計算モデルを忠実に記述して、該当部の吸収線量評価を行った結果、最大で 0.05MGy/5000MWh（1MW×10 年運転で積算値 0.5MGy）となった（Fig. 2.5.3-7）。大気中での耐放射線性テストによると、通常の EPDM ゴムでおよそ 2MGy、耐放射線性を謳う EPDM ゴムでおよそ 10～20MGy まで機能を保持することから、シャッター部の角形ダクトシール材として耐放射線性 EPDM ゴムを使用することとした（早川ゴム製 355EB）。これにより、現在使用中のフランジを再利用しても、ゴム O リングへの交換によりリークは抑

えられると考えられる。

②閉止フランジボルトに回り止めワッシャー追加

締結ボルトが緩んだことが角形ダクト大気開放の原因と帰着できる。メタル O リングの潰し代をトルク管理により行う必要性から、元の設計ではワッシャーを使用していなかった。上記の EPDM ゴムへの変更により、ある程度ラフにボルトを締め込めるため、実績のある回り止めワッシャー（ノルトロックワッシャー）を追加することとした。なお、本ワッシャー追加による閉止フランジ加工は要しない（Fig. 2.5.3-8）。

③飛出し防止用平行キー部に EPDM ゴムシート追加

閉止フランジ締結ボルトが緩んだトリガを少しでも緩和するため、ガイド管や鉄コリメータの平行キーと閉止フランジ内面の隙間（設計値 0.3±0.2mm）に、0.5mm 厚の EPDM ゴムシートを 1 枚挟むこととした。本シートの収まる位置は、真空内であることと、わずかに押しつぶされる状態になることから、少なくとも悪影響はないものと考える。

④角形ダクト固定金具の形状変更とそれに伴うボルト長変更及び回り止めワッシャー追加

角形ダクトの固定金具の形状を再考し、シム等を用いてボルトが引抜き荷重のみ受けるように再設計した。また、本部位にもノルトロックワッシャーを追加した（Fig. 2.5.3-5）。

・その他、駆動機構や真空排気系には改良を施さない。

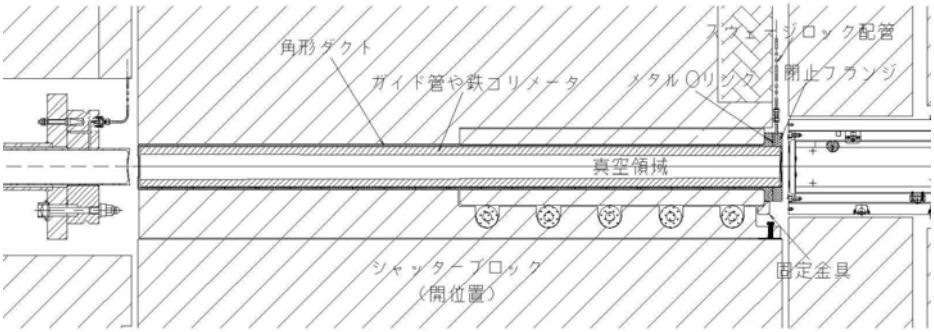


Fig. 2.5.3-1: Cut view of a beam duct in a shutter gate.

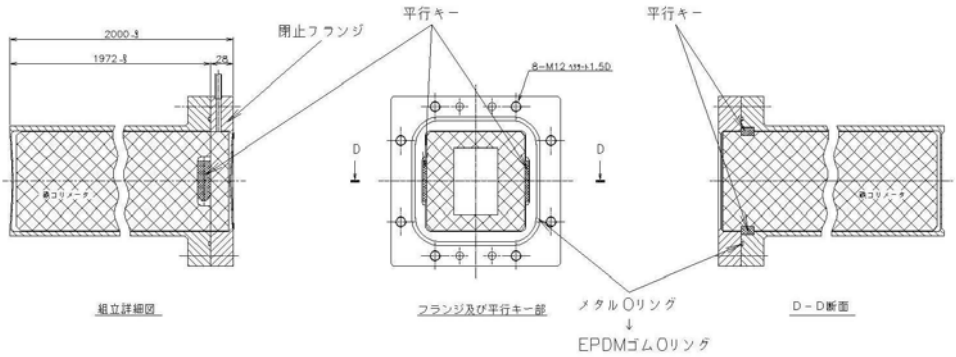


Fig. 2.5.3-2: Detail of the flange of the beam duct.

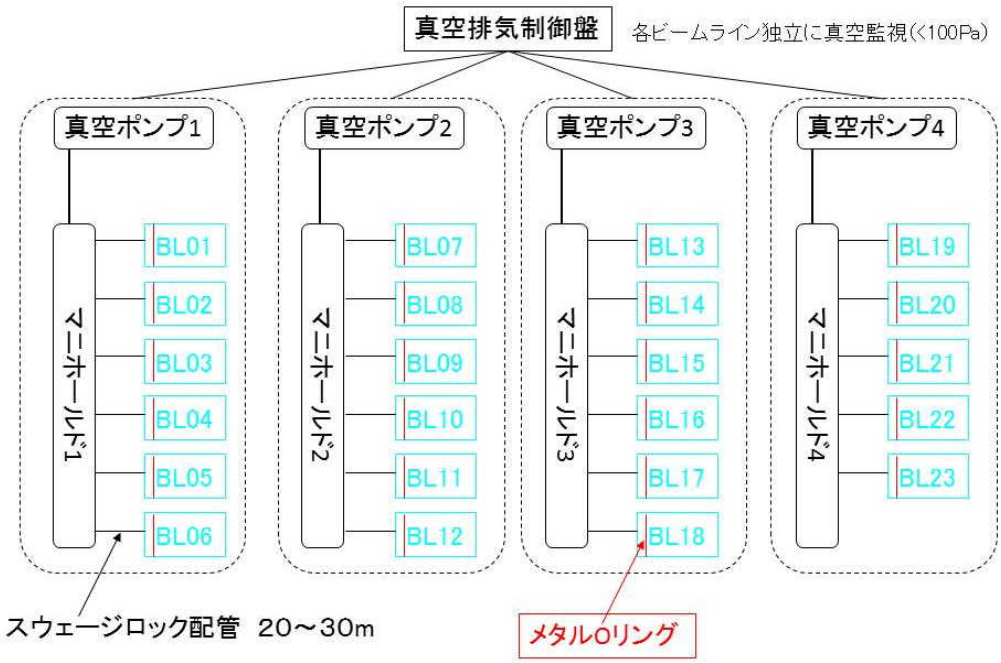


Fig. 2.5.3-3: Schematic diagram of the vacuum system of the beam duct in the neutron beam shutter.

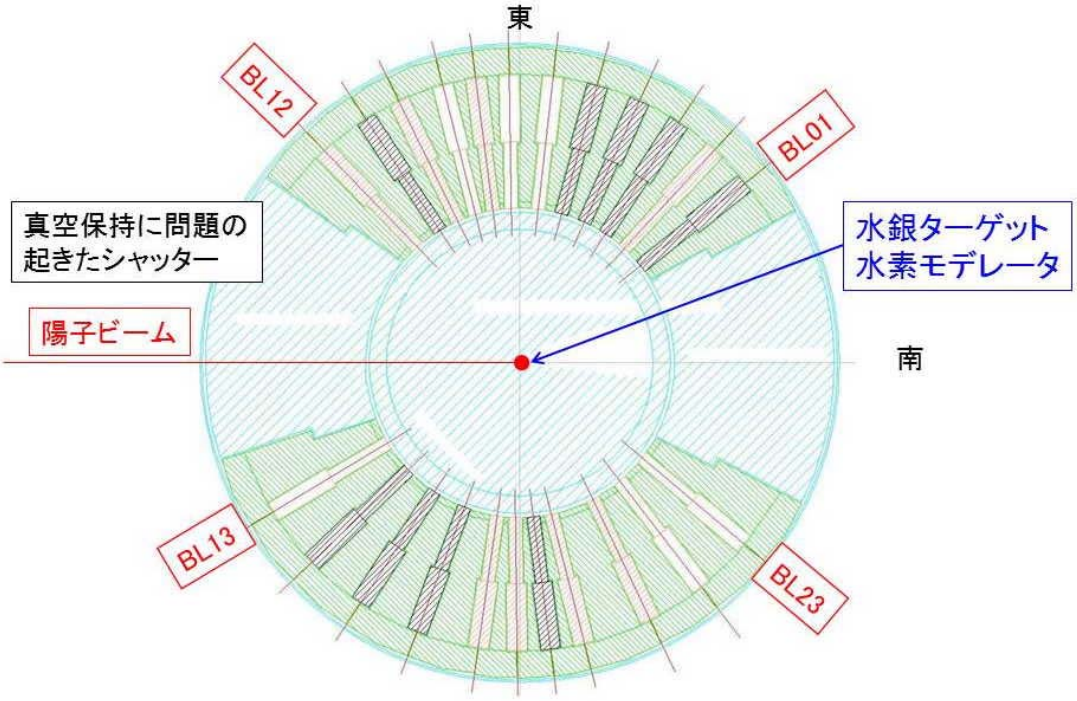


Fig. 2.5.3-4: Layout of the 23 shutter gates.

Fig. 2.5.3-5: Pictures of a vacuum duct flange in a shutter cask. A metal O-ring was fastened by 8 bolts as shown in the left picture. Some bolts were loosened by the earthquake. The right picture shows inside of a beam duct which contains a neutron guide tube.

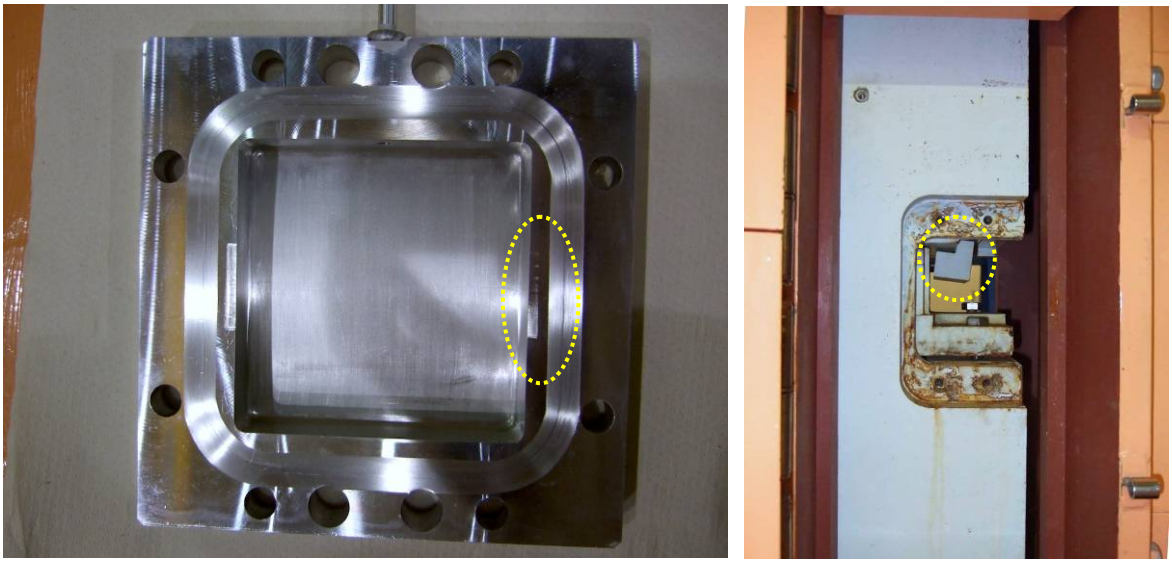
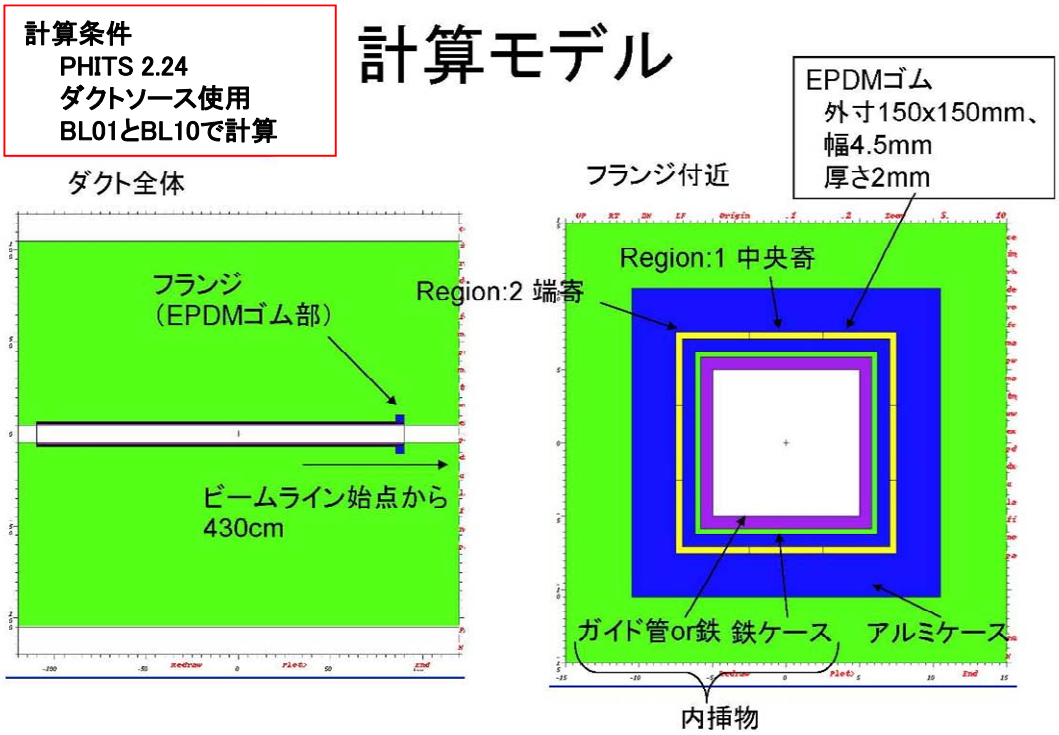


Fig. 2.5.3-6: Pictures of the inner side of a duct flange (left), and a bracket for the vacuum duct (right). Impact scars of parallel keys as shown in the left picture were found in most of the shutter insert. Bolts of the duct bracket were bent as shown in the right picture because the torsional force was affected to them.



ビームライン	内挿物	領域	EPDMゴム吸収線量 ビーム出力：1MW		
			（Gy/s）	（kGy/5kh）	（MGy/50kh）
BL01	無	1 （中央より）	9.31E-03	167.6	1.68
		2 （端より）	7.33E-03	131.9	1.32
	有	1 （中央より）	2.60E-03	46.8	0.47
		2 （端より）	1.62E-03	29.2	0.29
BL10	無	1 （中央より）	4.69E-03	84.5	0.84
		2 （端より）	4.30E-03	77.3	0.77
	有	1 （中央より）	1.47E-03	26.4	0.26
		2 （端より）	1.03E-03	18.5	0.19

Fig. 2.5.3-7: Result of the absorbed dose calculation for the O-ring part at the duct. Beam lines of BL01 and BL10 were selected for the calculation because of their high-dose rate. Because an insert such as guide tube or steel collimator makes beam cross-section smaller, absorbed dose of the O-ring will be saved by them. Maximum absorbed value was estimated ca. 0.5 MGy after 1 MW x 10 years beam-operation.

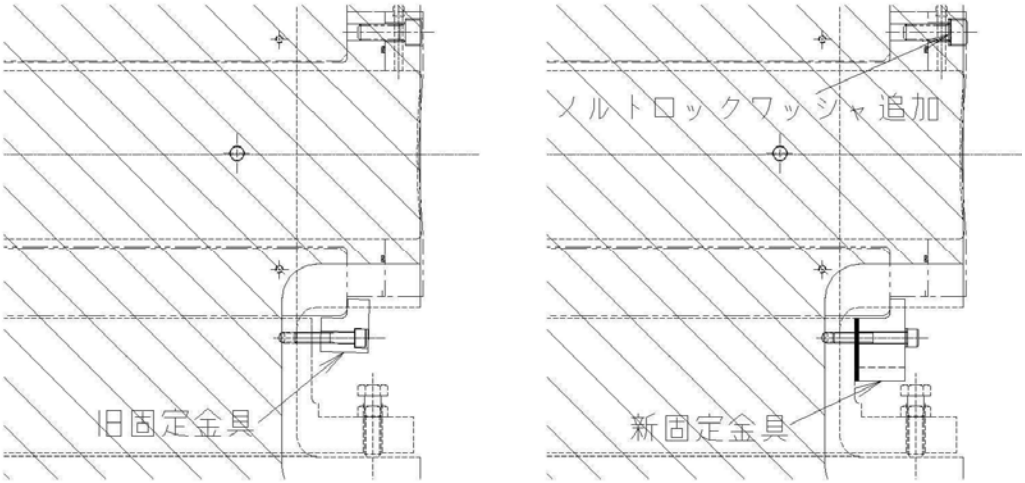


Fig. 2.5.3-8: Improvements of the duct flange and its surrounding.

2.5.4 前置き遮蔽体

◇設備概要

前置き遮蔽体は、第 1 及び第 2 実験ホールの生体遮蔽体外側、線源中心からの距離約 7m から 12m の範囲に設置されている、高さ 4m の鉄鋼およびコンクリート製の遮蔽体である。アクセスクレーンで取り扱える 1 体あたり 7.5 トン以下の遮蔽ブロックを積み上げた構造である。隣接ビームライン間に床から 4m 高さまで積み上げられた楔型の「側部遮蔽体」、各ビームライン上に蓋をするように高さ 2.2m〜4m の範囲に設置された、概ね直方体型の「上部遮蔽体」で構成される。

◇地震発生時の挙動・健全性確認

地震発生時、前置き遮蔽体はすべてビーム受け入れ可の正規の位置に設置されていた。地震時には、遮蔽ブロックが崩落して危険を及ぼすような事象は発生しなかった。しかし地震後の点検により、地震動によりほぼすべての遮蔽ブロックが横ズレした状況が確認された（Fig. 2.5.4-1）。遮蔽ブロック同士のギャップ幅は標準 20mm で設計され、遮蔽ブロック据付け時にも極力この標準ギャップ幅を維持し、またブロック周囲のギャップ幅ができるだけ均一になるように配置されていたが、地震後にギャップ幅を確認した結果ほぼ 0mm であったり、逆に 50mm 程度にまで広がっている箇所が多数確認された。これは、積み上げた遮蔽ブロック同士をボルト等で固定せず、各ブロック 10〜20mm 程度のギャップの範囲内で横ズレする余地のある構造であったことに起因する。

大部分のブロックは横ズレしただけで落下することはなく、これは設計の意図どおりであった。しかし BL20 ではブロックの落下が起こっていた。Fig. 2.5.4-1 左下図の矢印部分では、BL18〜BL20 に跨がる大きな上部遮蔽ブロックが、本来は BL21 側の段差に遮蔽ブロックが載っているべきものが、横ズレにより段差からはずれて落下した。下部の遮蔽ブロックが落下したブロックを支えているため、落下は約 20mm に止まっている。最も深刻な落下は、Fig. 2.5.4-1

右下図矢印部分のように、BL20 上部遮蔽ブロックが段差からはずれて大きく傾いた。幸い、直下の中性子ガイド管にぶつかる直前で止まっていた。

◇復旧作業

復旧作業は中性子利用セクションが主導し、BL20 の落下ブロックの安全な取り外しから始められた。作業安全と中性子ガイド管損傷防止のため、落下ブロックの下に鉄骨製のサポートを挿入し、その後クレーンで上部から順に遮蔽ブロックを撤去、無事完了した。また、並行して各 BL 遮蔽ブロックの横ズレ状況詳細調査が行われた。この調査結果に基づき、2011 年 7 月から 9 月にかけて、横ズレした遮蔽ブロックを積み直し、正規の位置に復旧する作業が行われた。このとき、将来の今回と同様な地震発生時の被害軽減のため、スペーサ挿入により 10 ー20mm 程度のズレ幅を約 5mm 以下とする対策がとられる。これにより、横ズレそのものを防止することはできないものの、横ズレ量を大幅に低減し、その結果として今回生じた BL20 のブロック落下のような事象が起こらないようになる。

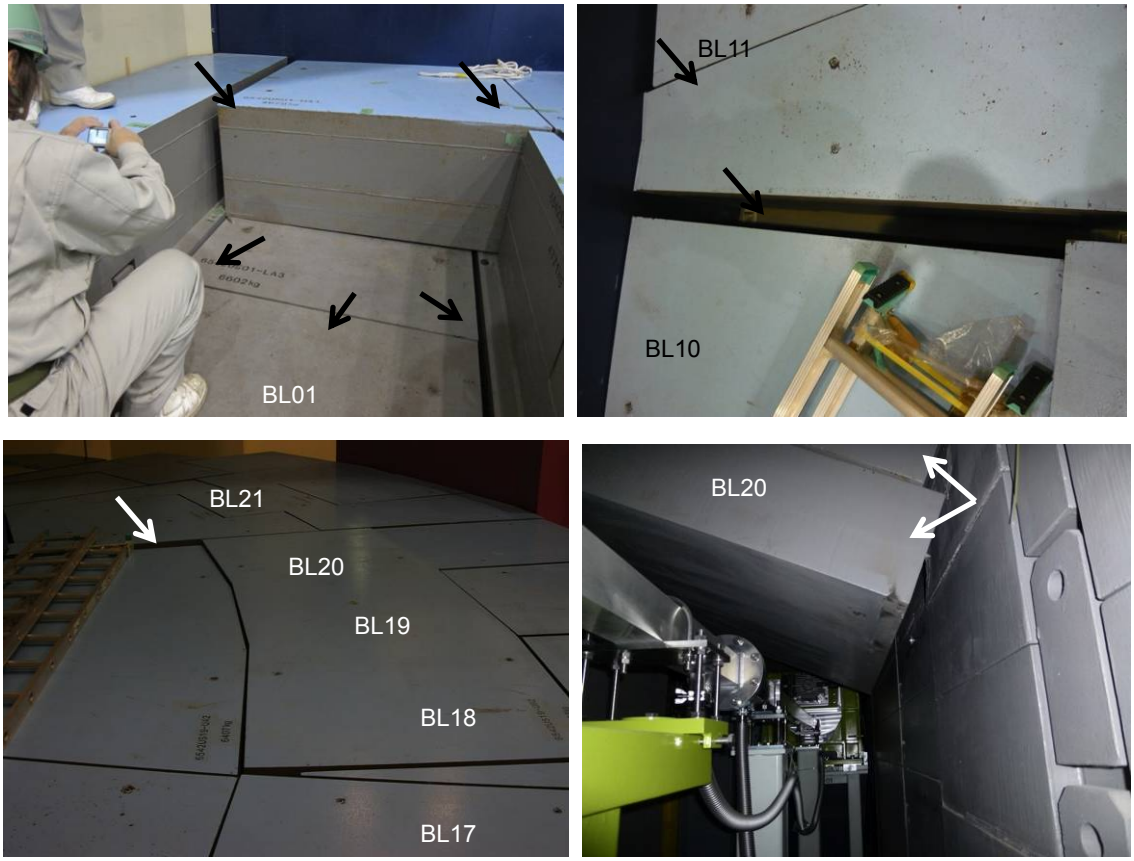


Fig. 2.5.4-1: Pictures of the pre-shield. (upper left & right) Gaps between adjacent shield blocks, of which nominal value was 20 mm, were made uneven by slipping of the shield blocks by the quake. (lower left) A shield block dropped by 20 mm at the arrow position in addition to slipping. (lower right) One side of BL20 shield block dropped, but stopped just before breaking the neutron guide tube.

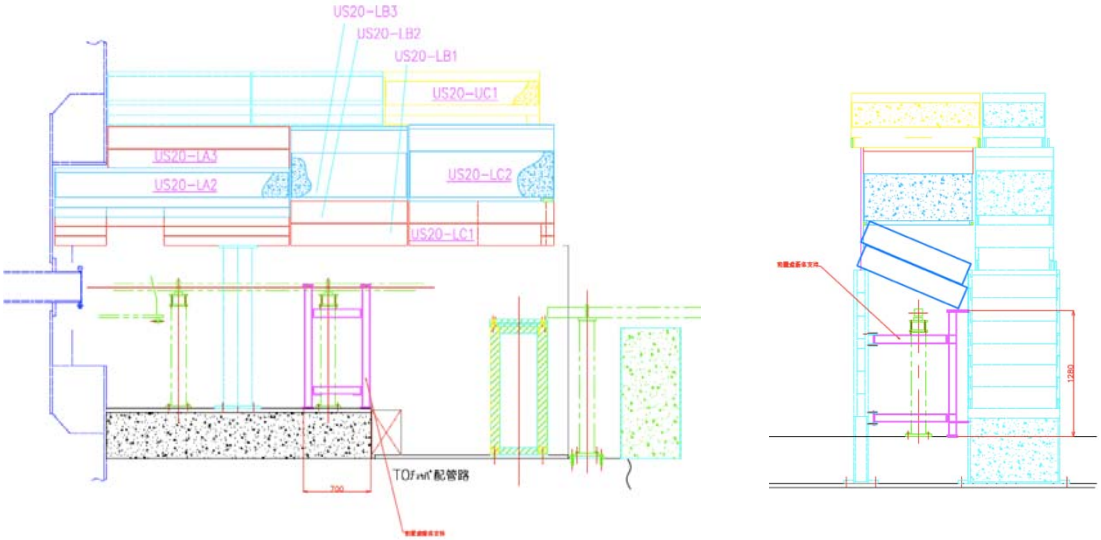


Fig. 2.5.4-2: Drawings to illustrate drop of the BL20 shield blocks: vertical view along the beam line (right) and that perpendicular to the beam line (left).

2.6　中性子源附帯設備

2.6.1　概要

中性子源附帯設備の全体構成を Fig.2.6.1-1 に示す。中性子源附帯設備は、以下の設備群で構成されている。

- ターゲット容器、反射体、モデレータ、陽子ビーム窓及び水冷が必要な中性子源周りの遮へい体に冷却水を循環する高レベル 1 次冷却水設備（6551 設備、6552 設備、6553 設備）
- 中性子源周りの遮へい体へ空気を循環し冷却する空気循環設備（6562 設備）
- 実験ホールへ冷却水を循環する低レベル 1 次冷却系設備（6554 設備、6555 設備）
- 上記設備から施設外部へと熱を放出するために上記設備の熱交換器へ冷却水を循環する 2 次冷却水設備（6556 設備）
- 冷却水設備へ純水を供給する純水供給設備（6567 設備）
- 中性子源での漏洩時に漏洩物のダンプを行うダンプタンク設備（6558 設備）
- 各系統にヘリウムガス供給を行うヘリウムガス供給設備（6563 設備）、
- 各系統のガスを除湿排気するヘリウムバス排気設備（6564 設備）、
- 各系統の水・ガスのサンプリング及び分析を行う水・ガス分析設備（6561 設備）

冷却水設備に関しては、原則としてステンレス配管等を使用した溶接構造のため、ポンプやバルブ等の機器の接続部分を除いては漏洩を極めて抑制する設計とした。また、バルブは空気操作弁を用い、主配管の遮断弁はフェールオープン（FO）、ベント、ドレン及びガス供給・排気のバルブに関してはフェールクローズ（FC）とし、圧縮空気が供給されない場合でも系統を維持し、漏洩を防止する設計としている。ビーム運転中、各設備は上位制御系からリモートにより運転操作及びモニタリングされており、メンテナンス等、必要に応じてローカル、さらには手動へ切り替えて機器の操作を行う。警報及び注意報に関しては、現場計器から発信され、現場盤を通して制御系へと伝達する。MPS、TPS についてはハードワイヤ回路とシーケンサ回路（ソフトウェア回路_光ネットワーク）の 2 重化を行い MLF 全体制御系（MLF-GCS）へ伝達している。

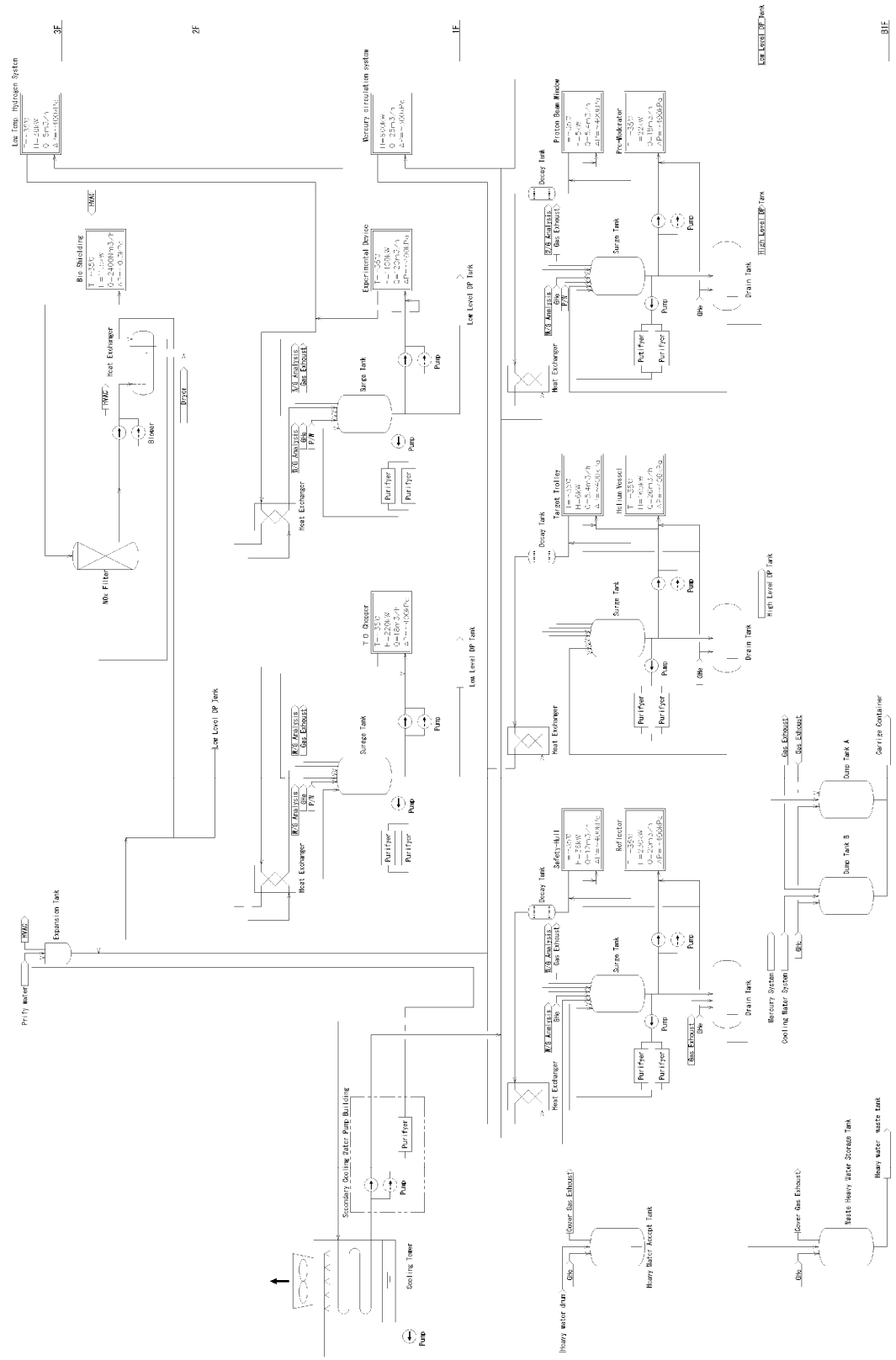


Fig.2.6.1-1: Constitution of the cooling system for neutron source

2.6.2　附帯冷却設備

◇地震発生時状況

3 月 11 日はビーム運転中のコンディショニング日であったため、ビーム受入状況と同様な状態で稼働していた。即ち設備モードはリモート・自動であった。各設備の運転状態は以下の通りである。

・6551 設備　定格運転中（100%流量）
・6552 設備　定格運転中（ 75%流量）
・6553 設備　定格運転中（100%流量）
・6554 設備　定格運転中（100%流量）
・6555 設備　定格運転中（100%流量）
・6556 設備　定格運転中
・6557 設備　停止中
・6558 設備　スタンバイ中
・6561 設備　ブロワ運転中、ターゲット先端部 He ガスモニタリング状態
・6562 設備　定格運転中
・6563 設備　スタンバイ中（加圧安定状態）
・6564 設備　スタンバイ中（チラー運転中・常時運転）

◇地震発生中及び発生後の状況想定

地震発生中及び発生後は一般の系統が停電したため、各設備機器では、ポンプ、ブロワ、チラー等が停止し、流量等は低下し最終的には 0 となっていたはずである。ポンプは一般電源の停電により停止したが、冷却水設備の制御系は UPS を用いているため、停止時の運転命令等は発信されていたと考えられる。また、警報等については流量低やポンプ停止による設備異常などが発報している状況となっていたと考えられる。バルブについては、計装用の圧縮空気が維持されていたため、自動で停止状態となり、その状態を維持していたと考えられる。その後、電源断となったため、一部バルブに関しては圧縮空気の低下等に伴い FC 弁は閉、FO 弁は開となり、過去の停電試験時と同様にバルブの状態は保たれていたと推測される。

地震後の施設確認は制御室の統括監視操作 PC を介して行ったが、地震発生後約 1 時間での状態を確認した結果、流量等は 0 となり、警報等が発報し、各バルブの異常の信号が出ていた。その後、制御系統についても電源が断となり完全停止様態となった。施設が完全に停止していた間は計装用の圧縮空気の圧力の低下があったため、運転状態で励起されていたポンプの前後及び浄化系統の前後のバルブは FO 弁であるため開いた状態へ遷移し、そのまま維持されていたと考えられる。それ以外のベント、ドレン用のバルブ及びガス供給排気用のバルブは FC 弁であり、運転時には閉じていたため動作せずに状態を維持していたものと思われる。

◇地震発生後の機器の状態

被害調査のための点検は、外観等目視点検、電気検査、計器確認、必要に応じた回転機器の

個別点検・調整、試運転という順で作業を 5 月 18 日から 20 日の間で実施した。

◇目視点検

冷却設備に関しては、屋外部分のトレンチ接続部のフレキ接続管（Fig. 2.6.2-1）以外に大きな損傷はなく、地震前と比べて特に変化はなかった。このフレキ接続管では、トレンチが地盤の沈下等に伴って傾き等が生じたため配管のずれが生じ、延びや曲がりが見られるが、フレキ部分からの漏れは確認されなかった。

◇電気検査（導通・絶縁確認）

電気的にはメガー等で絶縁抵抗等の確認を行い、短絡等がないことを確認して制御系の電源を投入した。電気を通電しても特に異常はなく、計器等は正常に動作していることが確認された。

◇計器確認（機器異常の有無、プロセス値変化）

制御系の健全性を確認した後、各計器、バルブの状況の確認を行った。バルブについては、運転直後の確認時には異常等が多発したが、再起動後には異常等は発生しておらず、制御状態であるローカル・手動の状態での正常位置であることを確認した。制御系のログにより確認した結果、地震後にはバルブ異常の信号が検知されていたので、予想通りの動作をしていたと考えられる。各計器についても機器の異常は確認されなかった。

次に各計器の地震前後の値の変化を調べた。地震前の値と、地震後電源が再開た後の各系統の液位・圧力の変化について Table 2.6.2-1,2 に示す。圧力については全系統とも、低下傾向にあるが、低下量に関しては地震前の運転状態での変化率と同等である。液位は殆ど変化がなく圧力の低下に応じてやや上昇している。この結果、系統としては破損やそれに伴う漏洩はないと判断した。なお、ポンプやブロワ、チラーなどについても機器異常は発報しておらず、停止状態となっていた。

◇回転機器等の個別検査・調整

6551，6552，6553 設備のポンプでは、キャンドポンプを使用しているので、モーターとポンプ部分は一体である。外観上異常がなかったため、特別な点検を要しないと判断した。6554，6555，6556 設備のポンプはメカニカルシールポンプであり、ポンプとモーターの接続のカップリングについては地震の震動等によりずれが生じたかどうかを調べるため、5 月 18 日から 20 日の間にセンタリングの確認を行った。確認作業では、カップリング部分の芯のずれ、傾き及びカップリング間の距離を測定し、基準値(ずれ・傾き:5/100mm、距離：設計値±1.5mm)を満たしているかどうかを確認した後、変動があったものについては基準値となるように調整を行った。

◇設備の試運転

◆冷却水設備

冷却水設備については、設備としての漏れ等がないこと、また電気的な異常がないことを確認できたため、5 月 20 日からポンプの試運転を行った。試運転では、運転時の振動及びポンプ電流を計測し、振動が許容値内であること、また、電流が以前の値と大きな変化がないことを判断基準とし、運転の再開に問題がないことを確認した。また、運転再開後、バルブ等の動作確認や警報の発報状況の確認を行い、以前と同様正常に動作することを確認した。

◆ガス供給設備

ヘリウムガス供給設備の稼働に際しては、まずガスカードルから母管までの気密試験を行い、ガス圧力が一定程度保持されることを確認した後、4 月 13 日から各設備へガス供給を開始した。設備稼働後、カードルの圧力等に異常な変化が見られなかったため漏れはないと判断した。

◇地震時の機器の動作分析

MLF-GCS の DB サーバーに記録されたデータを用いて地震時の設備挙動を解析した。電気、機械設備（2.1.3 節）で述べたように停電が発生しており、6551 設備の地震時の状態は、以下のように機器が停止していると推定できる。14 時 48 分のポンプ停止（商用電源　停電）後に、流量は低下し、警報等が発報した。また、サージタンク液位がポンプ停止により上昇した。圧力は流量低下に伴いやや上昇しているが大きな変化は見られない（Fig. 2.6.2-2）。

以下については、デジタル信号の保存など、DB サーバーの問題が発生していたため、信頼性のあるデータに限定した議論を行う。警報等に関しては、流量低下に伴って TPS、MPS がほぼ同時に発報した（Fig. 2.6.2-3）。注意報に関しては、ソフト信号であるため、信頼性は欠けるが流量低下時に消失し、数分後に復活している。また、MPS については、停止後 1～2 分の時点に一旦消失したが、その後発報を継続している。ポンプの運転信号に関しては、起動命令が出されたままの状態であり、電源喪失によりポンプが停止したにもかかわらずポンプ異常は発報していない。6551 設備については通常の停止操作時と同様にポンプ停止時に流量が低下し安定した状態で停止したものと考えられる。ただし、ポンプ停止後のバルブの動作等に関してはバルブの異常等が出ていたこともあり地震時の動きに関しては確認出来ない。注意報に関しては、地震前運転中に発報していたものがあったため地震前から継続して発報しないといけないが、ちょうど地震後の流量低下時に消失していることは、制御シーケンスから考えると異常である。さらに、MPS の断続やポンプ異常に関しては、シーケンス等の検証が必要であると考えられる。

Table 2.6.2-1: Water level and pressure transition of primary water cooling system tanks in electric power outage

	6551		6552		6553		6554		6555	
Surge tank level (mm)	2011/3/7	2011/3/30	2011/3/4	2011/3/30	2011/3/4	2011/3/30	2011/2/24	2011/3/30	2011/2/24	2011/3/30
	618	626	757	768	732	732	1056	1056	1196	1199
Surge tank pressure (MPa)	2011/3/7	2011/3/30	2011/3/4	2011/3/30	2011/3/4	2011/3/30	2011/2/24	2011/3/30	2011/2/24	2011/3/30
	0.134	0.136	0.104	0.121	0.105	0.106	0.088	0.081	0.121	0.103
Drain tank level (mm)	2011/3/11	2011/3/30	2011/3/11	2011/3/30	2011/3/11	2011/3/30				
	282	280	244	241	514	511				

Table 2.6.2-2: Water level transition of secondary water cooling system tanks in electric power outage

6556	
Expansion tank level (mm)	
2011/3/11	2011/3/30
309	279

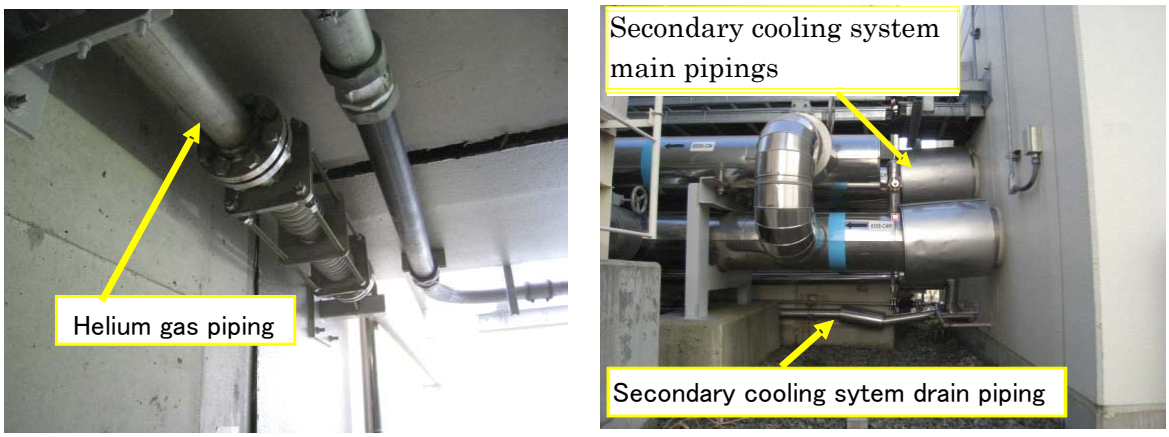


Fig. 2.6.2-1: Flexible pipings at connection part of trench area

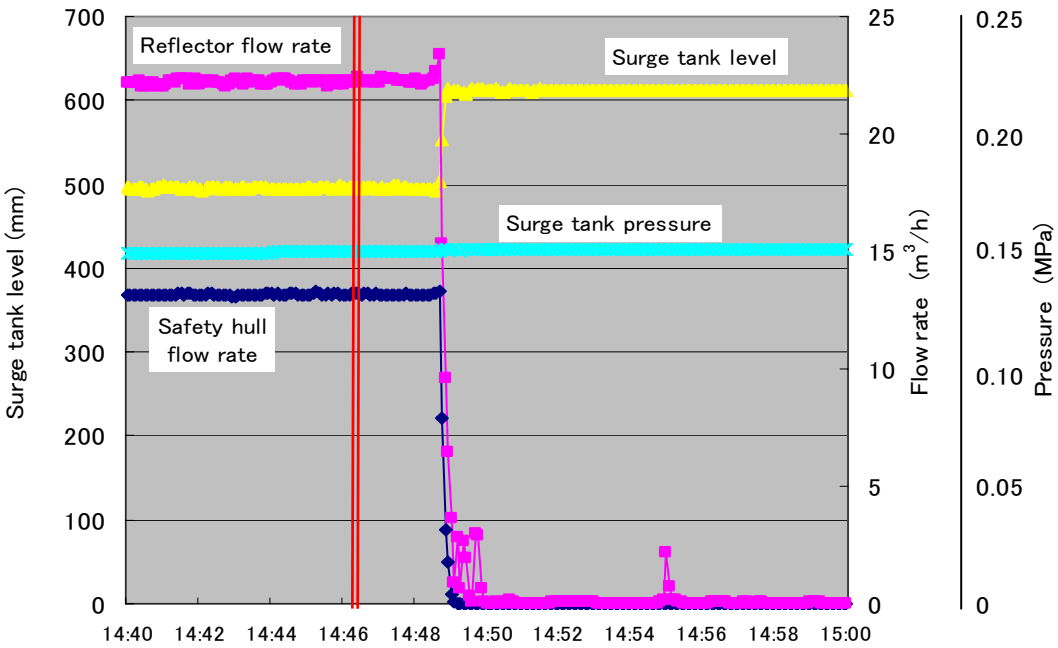


Fig. 2.6.2-2: Trend of flow rate, pressure and water level in surge tank of the 6551 system

Fig. 2.6.2-3: Trend of related alarm signals (Warning, MPS, TPS, Pump signal) of the 6551 system

2.6.3　再結合器

再結合器は一次冷却水から放射線分解により発生した水素と酸素を触媒により水に戻す装置である。装置は 3 系統あり、一次冷却水設備（6551、6552 及び 6553 系）のサージタンクに付随している。

再結合器はポンプ（金属ベローズ型）、加熱器、触媒筒及び冷却器で構成されている。サージタンク気相部のカバーガス（ヘリウム）は循環器によって再結合器系統内を循環する[4]。その際、ガスは加熱器で 60℃まで加熱された上、触媒へ送られ、再結合される[5]。生成された水蒸気は、その後冷却器で 30℃まで冷やされサージタンクに送られる。

本装置は、MLF 運転中は常時稼働させておく計画であった。しかしながら、ポンプに使われているベローズが一部破断しガスリークを起こす事象がこれまでに 3 回発生したため[6]、2011 年の初頭から、常時運転ではなく間欠運転（30 分/日程度）で運用していた。

震災発生時、本装置はポンプ及び加熱器とも停止状態であったが、サージタンク及び再結合器系統は約 2 気圧で加圧されていた。よって、地震後も加圧状態が保持されていれば、系統の健全性は保たれていると判断することができる。

Fig.2.6.3-1 に、2011 年 3 月 5 日から 3 月 11 日（震災当日）までの再結合器系統内圧力の 1 時間毎の時系列を示す。陽子ビームの運転は、3 月 7 日（月）から 3 月 11 日午前 9 時まで行われていた。陽子ビーム強度は 200 kW であった。ビームの高出力化にともなって、6551 及び

---

4 流量は 80Nℓ/分に調整されている。

5 加熱は触媒による再結合反応を促すために行うものである。定格(1MW)運転時には、触媒筒の入口温度 60℃に対して、水素－酸素の結合反応に起因する発熱により、出口温度は 80℃になるように設計されている。

6 ポンプのベローズからのリークは、これまでに 6551 系で 2 回、6552 系で 1 回発生した。ただし。6553 系では、リークは発生していない。破断が発生するまでの運転時間は、いずれも数千時間程度であった。

6552 系サージタンクにおいて放射線分解による圧力上昇が確認できるようになったことから[7]、それぞれに付随する再結合器の運転を 1 日～数日に 1 回実施していた[8]。地震発生（3 月 11 日午後 2 時 46 分）から約 1 時間程度までデータの計測・保持がなされており、その範囲ではガスの漏えい等、大きな損傷が起こった形跡は見られない。

Fig.2.6.3-2 に、3～4 月の期間の各系統の圧力変化を示す。震災後から 3 月終わりにかけて停電によるデータの欠測があるものの、どの系統も正圧が保持されており、系統はほぼ健全に保たれていたことがわかる。ただし、6551 及び 6553 系で、1 月あたり 20 kPa 程度の圧力降下が見られる。この圧力降下率は 2×10^{-3} Pa･m^3/s の漏えい率に相当する。この値を再結合器の仕様で規定した漏えい率（各継手または機器あたり 2×10^{-4} Pa･m^3/s）と比較すると、それほど大きなリーク量とは言えず、必ずしも地震による影響とは言えない。しかしながら、地震直前の圧力をほぼ保っている 6552 系と比較すると、有意な漏えい量である。そのため、次のビーム運転前に、系統の増し締めを行う等の対応を行うこととする。

ポンプ、加熱器等の個々の機器についても目視による確認で特に異常が見られないこと、またこれまでに示したように系統の気密性に関する健全性が保たれていたことから、大きな不具合は生じていないものと考えられる。

以上、地震による再結合器への影響は殆どなく、多少の点検及び調整を行えば次回のビーム運転で支障なく使用できることが確認できた。

---

7 6553 系については、ビーム運転時の圧力上昇が見られないことから、再結合器の運転は行っていない。

8 その際、再結合にる圧力降下（-10kPa 前後）と触媒の温度上昇(+10℃程度)を確認している。

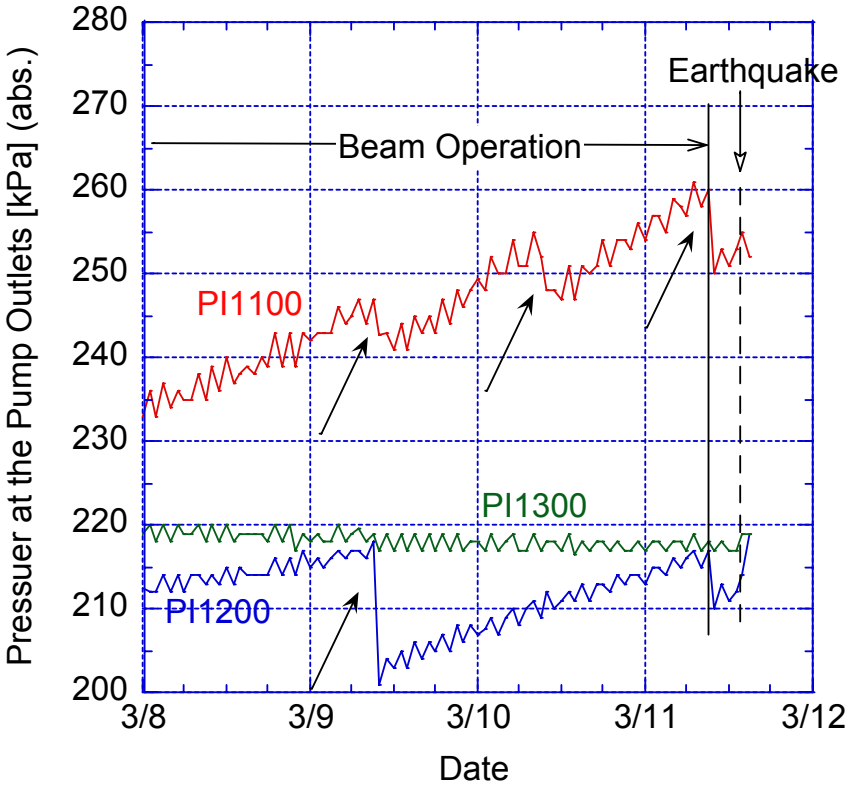


Fig. 2.6.3-1: Trends of the pressures in recombiners from between March 5 to 11, 2011. The symboles of “PI1100”, “PI1200” and “PI1300” correspond to the pressure gages of the recombinres attached to the primary-water coolant systems of 6551, 6552 and 6553, respectively. The black arrows show the pressure drops by recombiner operations. The beam operation was carried out untl 9:00 AM on May 11, 2011, and the earthquake occured at 2:46 PM.

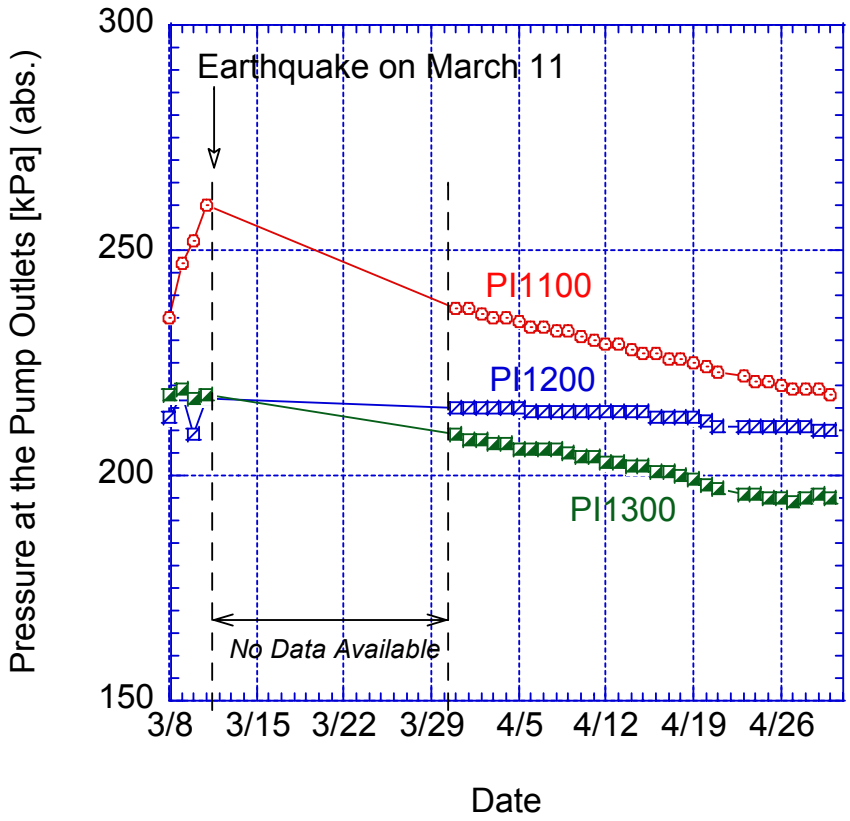


Fig. 2.6.3-2: Trends of the pressures in recombiners between March and April, 2011. The symboles of "PI1100", "PI1200" and "PI1300" correspond to the pressure gages of the 6551, 6552 and 6553 recombinres, respectively. The pressure decreases of PI1100 and PI1300 after the eartquake correspond to the leak rates of 2×10^{-3} Pa·m^3/sec.

2.7　遠隔操作機器

2.7.1　概要

MLF の遠隔操作設備は、パワーマニピュレータシステム、減速材等遠隔操作機器など主にホットセル周辺に設置されており（Fig.2.7.1-1）、水銀ターゲット容器やモデレータ容器等の中性子源構成機器を交換するために用いられる。以下に MLF に設置されている遠隔操作関連機器を列挙する。

・　設置場所　　設備名
・1F　ホットセル　パワーマニピュレータ（Fig. 2.7.1-2）
　　減速材等遠隔操作設備（Fig. 2.7.1-3）
　　切断装置（Fig.2.7.1-3）
　　ターゲット容器交換台車（Fig. 2.7.1-4）
・3F　大型機器取扱室　　遮へいキャスク・床上遮へい体（Fig. 2.7.1-5）

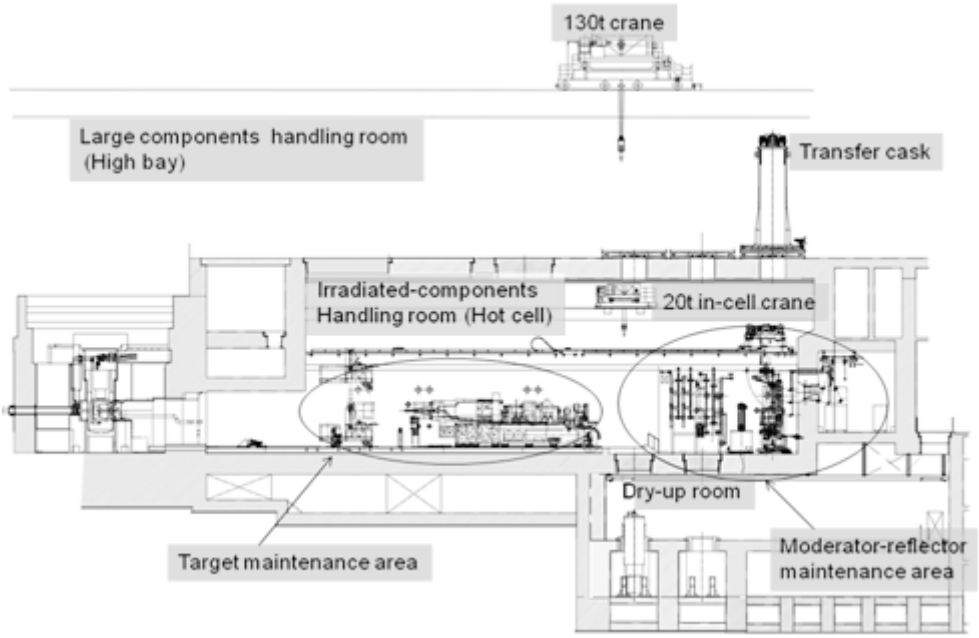


Fig. 2.7.1-1: Vertical cross section of target station and its related rooms

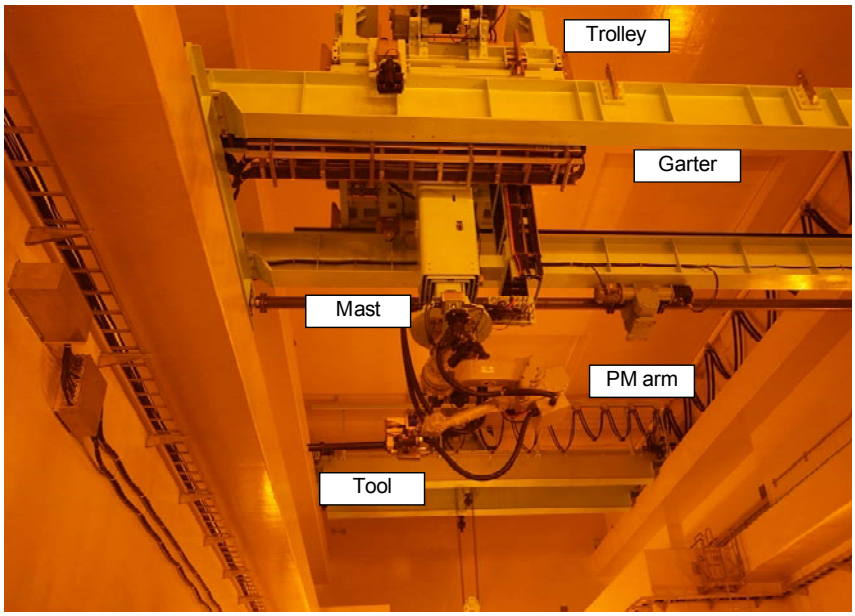


Fig.2.7.1-2: Power manipulator in hot cell

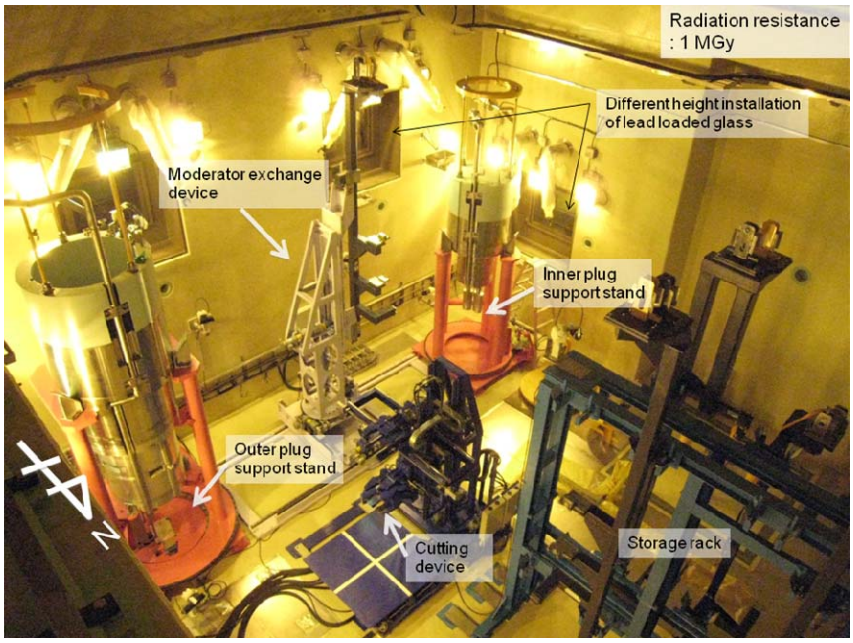


Fig.2.7.1-3: Remote handling devices for moderator-reflector maintenance in hot cell

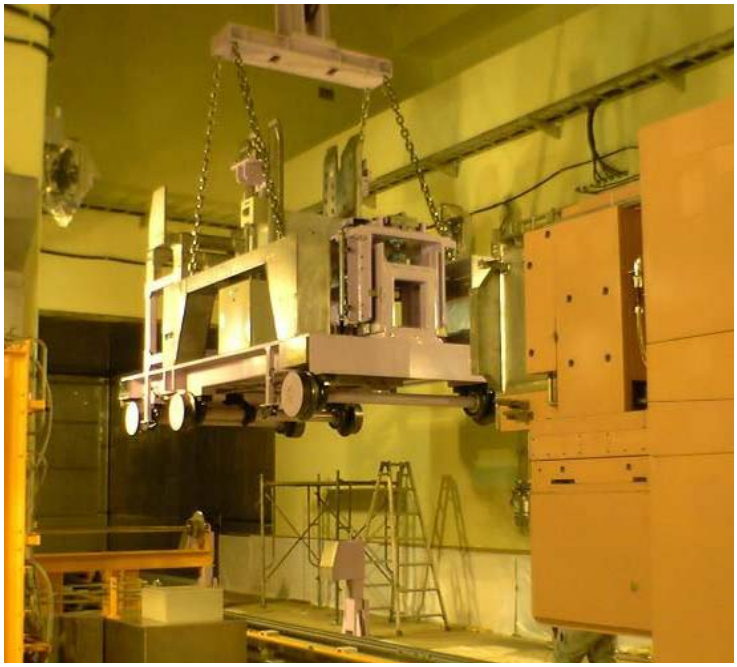


Fig.2.7.1-4: Target exchange truck being hanged up by the in-cell crane

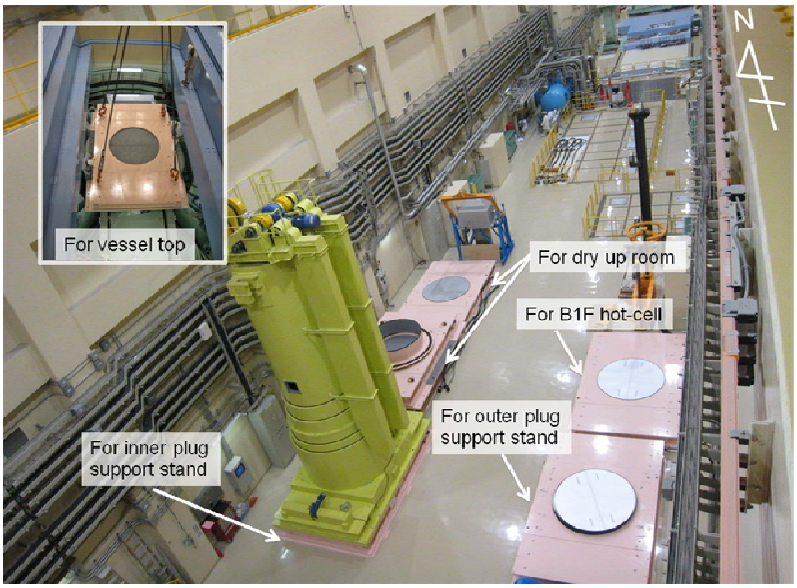


Fig.2.7.1-5: Transefer cask and floor valves in large component handling room

2.7.2　パワーマニピュレータ

◇設備概要

パワーマニピュレータ設備は、ホットセルにクレーンと同様に天井付近に設置され、走行、横行、昇降を行う台車部分とマニピュレータアームにより構成されている。

◇地震時の状態

地震発生時は機器停止状態であり、作業は行っていなかった。電源等についても制御用コン

ピュータ等は電源をオフにした状態としていた。

◇地震後点検結果

地震後の点検は、窓からの目視確認、電気検査を行い、続いて、室内のカメラを使用して異常のないことを確認した。カメラに関しても、特に問題のありそうなものは確認されなかった。セル内に入室が可能となった後、クレーンと同様にレールの緩みや構造上問題のありそうな損傷がないことを確認した。動作確認の際に、各動作軸のサーボアンプが異常となっており通常操作では移動できない状態であることを確認した。原因はサーボアンプの位置情報保持のためのバッテリーの電圧低下であった。これは長期間にわたって電源が入っていなかったことと、バッテリー自体の寿命時期が近づいていたことが原因と考えられる。メーカーによるバッテリーの交換を行い、通常操作をして動作可能とするよう手配した。バッテリーについては寿命を考慮して定期的に交換し、再発防止するとともに、充電式のものを利用するなどの改善案も検討する。動作確認は、救援系で台車を移動することで走行、横行、昇降が移動可能であることを確認した。その後バッテリーを交換し、改めて通常動作による確認を実施した。

2.7.3　減速材等遠隔操作設備

◇設備概要

使用済みのモデレータ、反射体、陽子ビーム窓およびミュオンターゲットを新規のものに交換するためにホットセル内で使用する設備である。

◇ 地震時の状態

地震時は、機器停止中であった。

◇地震後点検結果

セル内の入室が可能になった状態で目視点検では、特に問題がみらなかった。また、電源が投入できる状態に復旧した後、基本的な操作（走行、横行、昇降、回転）も問題なく行えることが確認できた。

2.7.4　移送キャスクおよび床上遮蔽体

◇設備概要

移送キャスクは、使用済みや新規のモデレータ、反射体および陽子ビーム窓をベッセルからホットセルに移送するための機器である。床上遮蔽体は、下方からのガンマ線を遮蔽するために用い、ホットセル上部およびベッセル上部に配置する。ホットセル上部に配置された床上遮蔽体は常設である。

◇ 地震時の状態

地震時は、機器停止中であった。

◇地震後点検結果

目視点検では、Fig. 2.7.4-1 に示すキャスク内グリッパ接続ジグの変形以外、特に問題がみられなかった。接続ジグは、地震の揺れで倒れ、それが原因で変形を引き起こした。変形した部分について再製作による対処を行う。動作確認を行った結果、移送キャスク内のグリッパの昇降、回転については問題なく動作したが、遮蔽扉を開閉させるチェーンが切断する現象がみられた(Fig. 2.7.4-2,3)。約 8 トンもの遮蔽扉が地震により揺すられ、チェーンに過度な負荷がかかり局所的なのび等の変形を引き起こし、動作確認で不具合を起こした。また、3 体の床上遮蔽体についても、チェーンの切断には至っていなかったが、地震の影響によるチェーンの伸びがみられた。チェーンの伸びた床上遮蔽体については、チェーンを新規のものにするなど対処を施した。

Fig.2.7.4-1: Gripper connection jig for transfer cask. It can be seen that some rods were transformed due to fallen down of earthquake.

Fig.2.7.4-2: Broken chaine of floor valve of transfer cask. It was occurred in floor valve fisrt driving test after earthquake.

Fig.2.7.4-3: Chaine slack of floor valve. It was occurred
by earthquake shaking of floor valve.

2.7.5　切断装置

◇設備概要

切断装置は、実際にはホットセルへ設置し、使用済のモデレータ等の配管を交換後に切断し、機器サイズを小さくすることで、保管及び移動などの取扱が行いやすいようにするための装置である。

◇地震時の状態

地震時には、試験のため大型機器取扱室に仮設置されていた。地震時は機器停止中であり、電源も遮断された状態であった。

◇地震後点検結果

機器全体を回転する部分の駆動モーターの減速機が割れており、中のオイルが漏れだしている状態となっていることを 5 月 26 日の目視点検により確認した（Fig. 2.7.5-1）。原因としては、切断装置は回転部分の上部に把持部等を持つため、中心からずれた位置に重心があると考えられる。このため、地震により偏芯している回転部分に揺れが生じ、モーターはブレーキがかかっていたため、減速機部分へ力が集中して減速機の破損に至ったと考えられる。今後の対応については、減速機の交換を行うこととするが、防止対策については検討中である。

その他、大きな損傷は確認されていないため、修理後動作確認等を実施する。

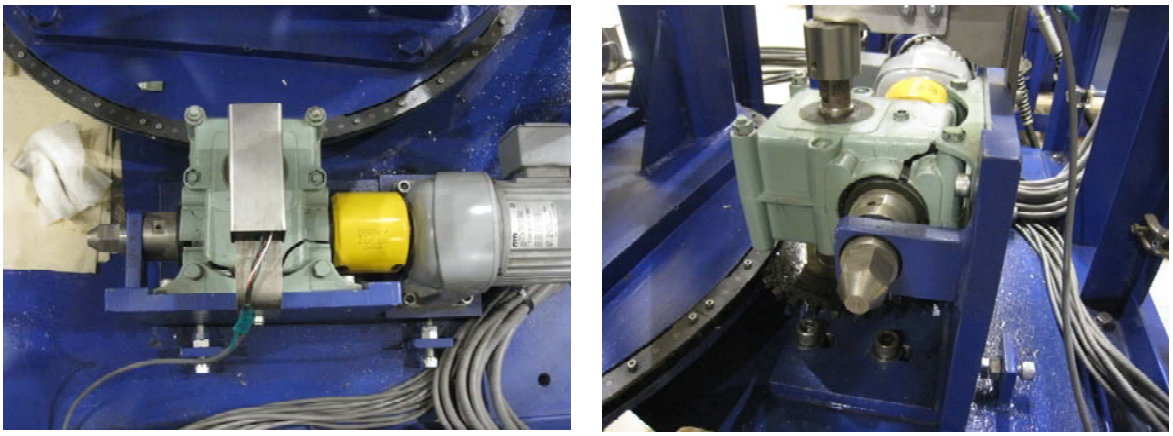


Fig. 2.7.5-1: Broken Gear box of Cutting device

2.7.6　ターゲット交換台車

◇設備概要

ターゲット容器交換作業時に使用されるターゲット容器交換台車は、通常はメンテナンス位置であるホットセル西側のメンテナンス用レール上に電極に接続して停止している。交換作業時は交換位置であるターゲット台車レールと平行に設置されているホットセル中央のレール上に設置して使用する。

◇地震時の状態

地震時はメンテナンス用レール上に給電用電極に接続した状態で停止していた。バッテリーへの充電などの給電は行っていなかった。

◇地震後の点検結果

セル外からの目視等では大きな異常がないことを確認出来ていたが、レール及び電極の部分については、5 月 18 日にセル内へ入室して直接目視により確認を行った。電極部分については特に大きな損傷はなく問題ないと判断した。また、レールに関しては揺れにより一部固定用ボルトに緩みがあることを確認したため、増し締めを行い、健全性を確保した。特に、特別な改善措置等は施す必要がないと判断した。

2.8 MLF 全体制御システム

2.8.1 概要

Fig. 2.8.1-1 に MLF 全体制御システム（MLF - GCS）構成を示す。Fig. 2.8.1-1 において、太枠で示した機器は、MLF 建屋 3 階の MLF 制御室（MLF control room；MLF-CR）にある主要機器である。MLF-GCS は、統括制御・インターロック系、PPS)、共有サーバー系、MLF-LAN、タイミング配信設備などの幾つかのサブシステムより構成される [2.8-1), 2), 3), 4)]。統括制御・インターロック系は MLF 全体を監視操作するとともにインターロックを制御する機能を持つ。PPS は高放射線被曝から人員を保護するために高線量となる PPS 区域への入退域を制限するとともに緊急時に陽子ビームを停止する機能を持つ。共有サーバー系は Web、データベース（DB）など各種サーバーで構成され、運転情報の蓄積、伝達、公開、監視等を行う機能を持つ。統括制御系及び PPS の主要機器は専用の光リンクで接続されている。Fig. 2.8.1-2 に統括制御系、Fig. 2.8.1-3 に PPS の光リンク構成を示す。更に MLF - GCS は、個別に陽子ビームの入射周期に関連したタイミング信号を配信する設備も有する。

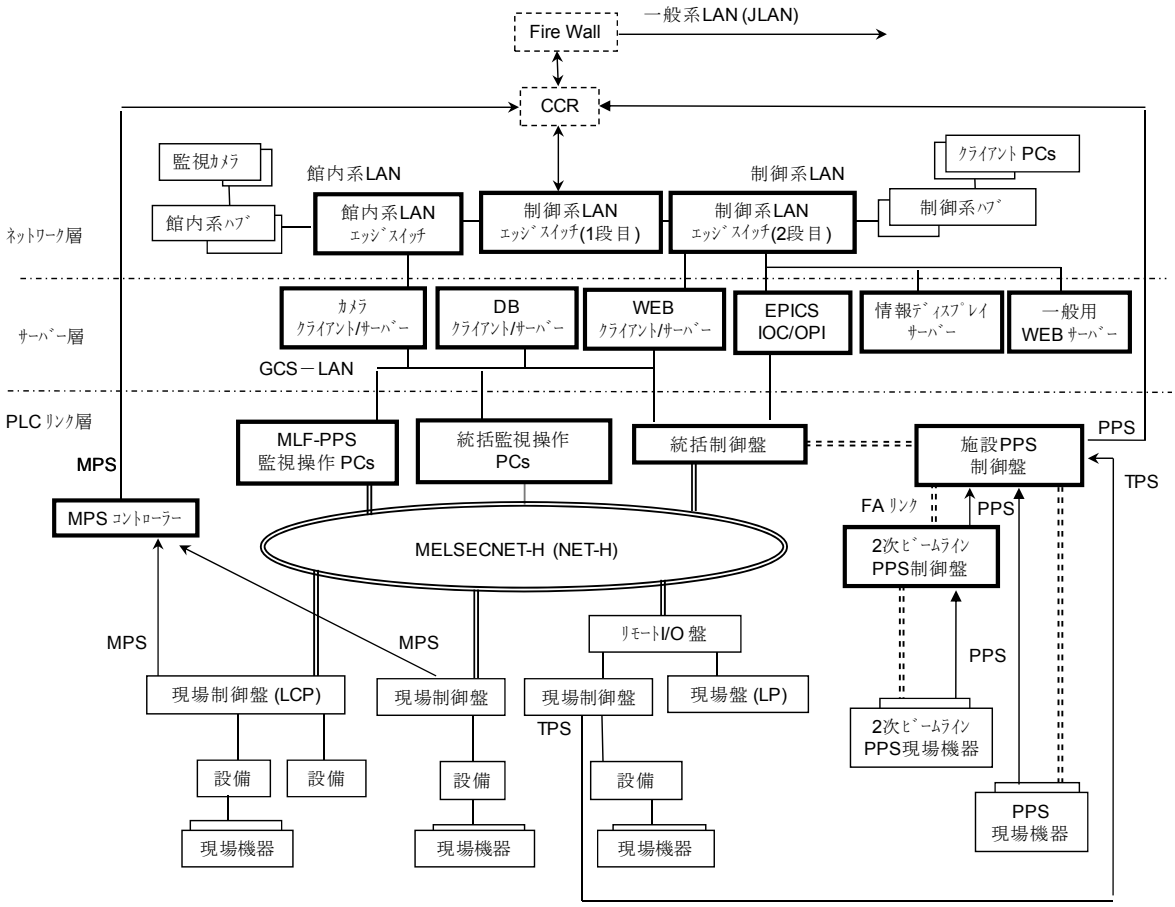


Fig. 2.8.1-1: Structure of MLF-GCS

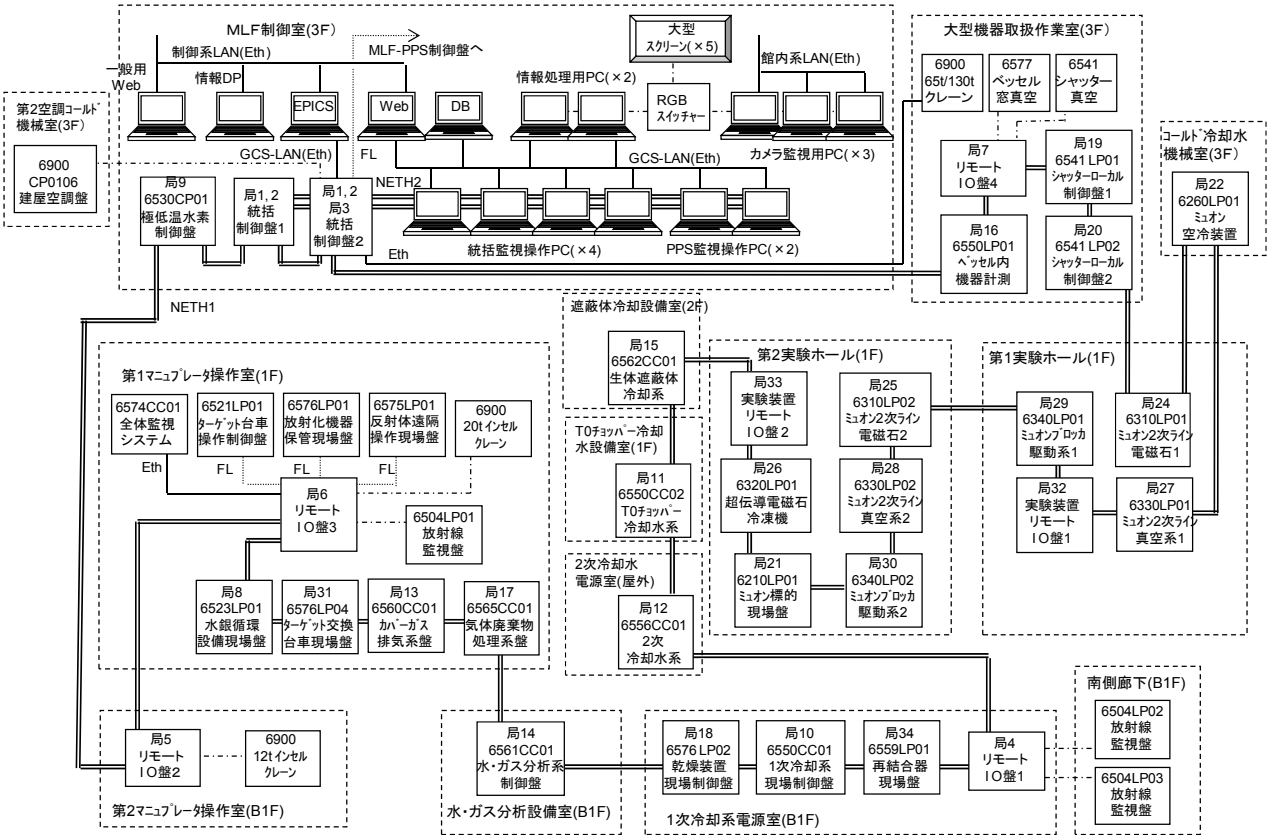


Fig. 2.8.1-2: Structure of MLF integral control system

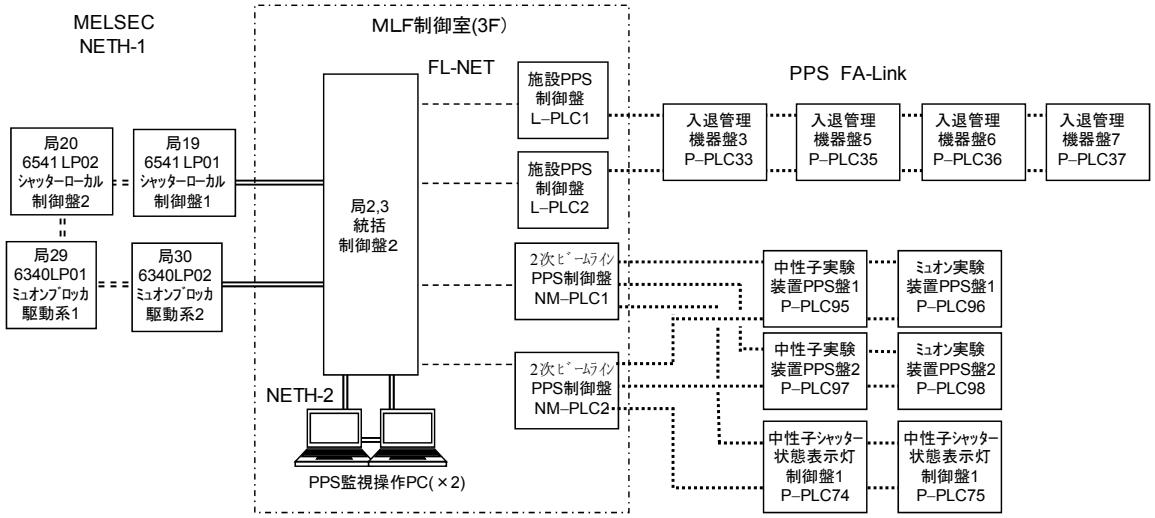


Fig. 2.8.1-3: Structure of PPS PLC-link

2.8.2　MLF-GCS の地震時の挙動

◇地震時の挙動

Fig. 2.8.1-1~3 に示した MLF 制御室内の MLF-GCS 機器（監視操作 PC、各制御盤、インターロック専用シーケンサ、共有サーバー、MLF-LAN エッジスイッチなど）の電源は、非常用無停電電源（UPS）・発電機系統に接続されており、不測の停電時でも制御室内の MLF-GCS 機能は維持される。また、統括制御系及び PPS の各現場制御盤も UPS 系統に接続されているため、専用リンクを介した現場機器から制御室へのデータ伝送機能も維持される。この機能維持は非常用発電機の検査時（2008 年 11 月 21 日など）に確認していた。

地震発生時から仮復旧までの MLF-GCS の各サブシステムの挙動の時系列を Fig. 2.8.2-1 に示す。MLF では、各設備機器や PPS 機器の情報を DB サーバーや PPS データログに常時取り込んでいるので、地震時の目視確認と合わせて各機器の動作状況を把握するこができる。東日本大地震発生当日（2011 年 3 月 11 日）、MLF は朝 9 時に陽子ビーム運転を停止し、ビーム運転エリアから外れていたものの、水銀、水素、冷却水、空冷装置などの各循環系統が殆ど稼働した状態で 14 時 46 分 18 秒の大地震に遭遇し、地震発生後に UPS 未接続の一部現場機器から通信異常が検知された約 150 秒後に施設停電が生じたと判断できる。しかし、大地震による停電でも制御室内の MLF-GCS 機器は正常に稼働していた。その後、17 時頃に、監視操作用 PC や共有サーバー用 PC のシャットダウンと各制御盤の電源 OFF を手動で実施した。

◇健全性確認・復旧

MLF‐GCS の復旧は、統括制御・PPS・MLF-LAN という施設全体の健全性確認に必要なサブシステムの健全性確認を優先し、その後、監視カメラ・情報 DP など LAN 接続端末やタイミング配信設備の通信・単体動作を確認する手順で進めた。復旧作業は 2011 年 3 月 28 日から開始し、まず現場盤のブレーカーを切りながら目視による機器の破損状況確認と盤の電気絶縁検査を行い、次に各制御機器の電源を入れながら、異音、温度、エラー点灯表示など通電時の機器単体の健全性を確認した。並行して、制御室では各監視操作 PC やサーバー用 PC を立ち上げ、PLC （Programmable Logic Controllers）リンク、ネットワーク通信、接点信号などの各サブシステムの通信状態監視を開始することで、機器故障やケーブル断線が生じていないか確認した。4 月 1 日までには、統括制御・PPS・MLF-LAN の運用を開始するとともに、監視カメラ・情報 DP など殆どの LAN 接続端末の通信・動作確認まで実施した。250 台以上ある制御機器の復旧作業を、2~3 名の制御担当が数日間で行うことができたが、これは機器や検査内容を文書やリストで管理・共有化して日頃から自主検査を行ってきた経験が大きいと考えている。次節以降に、各サブシステムの状況について記載する。

日時	時刻	MLF-GCS共通	統括制御・インターロック	PPS	共有サーバー・MLF-LAN・タイミング
3月11日	◆9時頃	◇陽子ビーム停止 *稼働中	◇プロセス保守 *稼働中	◇MLF-Status オフ ◇MLF-Safety 受入可 *稼働中	*稼働中
	◆14時46分18秒 ◆14時47分44秒	◇東日本大震災発生		◇中性子シャッター揺れ検知	
	◆14時48分47秒 14時48分48秒 ◆14時48分56秒 ◆15時15分34秒 ◆15時16分11,13秒 ◆15時23分19秒	◇定常電源ダウン⇒UPS⇒非常用発電 ◇最大余震発生	◇ミュオン関連盤電源ダウン ◇局19, 20盤電源ダウン ◇1次冷却系TPS発報 ◇水銀循環系TPS発報 ◇ターゲット台車TPS発報	◇P-PLC74,75電源ダウン ◇シャッター状態表示灯ダウン *施設PPSエリア施錠は維持 ◇MLF-Safety発報(BL08)	*制御室内の共有サーバー、LANエッジスイッチは起動中。施設内のLANハブやLAN接続端末は電源ダウン。従って、データ配信機能は停止。 *DBサーバーはデータ収集継続。取込機能に一部不具合有。
	◆17時頃	◇手動操作シャットダウン（制御室内機器）	◇機器停止	◇機器停止	◇機器停止
3月29日		◇制御室内機器の通電・機器稼働	◇制御室内機器の通電・稼働確認、及びNETH局通信確認	◇制御室内機器の通電・稼働確認、及びFAリンク通信確認	◇制御室内機器の通電・稼働確認、及びMLF-LAN通信確認
3月30日		◇MLF施設内機器の通電・機器稼働	◇MLF施設内機器の通電・稼働確認、及びNETH局通信確認	◇MLF施設内機器の通電・稼働確認、及びFAリンク通信確認	◇MLF施設内機器の通電・稼働確認、及びMLF-LAN通信確認
3月31日			◇NETH局19, 20通信確認 ◇運用開始	◇P-PLC36通電・通信確認 ◇運用開始	◇MLF-LAN運用開始 ◇監視カメラ、情報DP、パトライト等LAN接続端末の通電・稼働通信確認
4月1日		◇MLF-GCSの運用開始			◇監視カメラ、情報DP、パトライト等LAN接続端末の通電・稼働、通信確認 ◇監視カメラシステムの運用開始

Fig. 2.8.2-1: Time series of shutdown and restoration process by the earthquake of MLF-GCS

2.8.3 統括制御・インターロック系

◇設備概要

統括制御・インターロックシステムは MLF-GCS の中心で、MLF 全体を監視操作するとともにインターロックを制御する機能を持つ[2.8-1), 2), 3), 4)]。本系は統括監視操作 PC、統括制御盤、現場制御盤、現場盤、リモート入出力盤（IO 盤）のようなパーソナルコンピュータ（PC）や PLC で構成される制御機器が、光二重ループの伝送路を持つ PLC リンク用ネットワーク（MELSECNET-H；以下、NETH と記す）を介して接続されている（Fig. 2.8.1-2）。NETH は、統括制御盤と現場制御盤を接続する経路〈NETH1）と、統括制御盤と監視操作用 PC を接続する経路（NETH2）の 2 つの経路を有する。NETH1 は 2 重化された統括制御盤内の PLC ユニット（局 1、2）と、3～34 までの局番を持つ 31 局の PLC ユニットで構成されている。NETH2 には統括監視操作 PC4 台と PPS 監視操作 PC2 台が接続されており、統括制御盤から NETH1

に接続している現場制御盤やリモート IO 盤を介して現場機器を監視操作することで、施設全体の一括集中制御を実現している。MLF 運転状態には、「機器保守」、「プロセス保守」、「受入確認」及び「ビーム受入可」の 4 区分があるが、本系による運管理・運用によって、施設全体を安全に立上/立下する。本系は、MPS や TPS などの機器を保護するためのインターロック系も運用しており、各機器は二重化された専用ケーブルで接続されている。現場機器が MPS 及び TPS を発報した場合、現場制御盤を介して各接点信号が制御室内の MPS 専用コントローラー及び PPS 制御盤内蔵の TPS 専用シーケンサに集約され、ビーム停止信号が CCR に伝送される。MLF では、5 つの現場制御盤から MPS が、3 つの現場制御盤から TPS が発報される。MPS 及び TPS 事象の詳細は、NETH1 を通じて、統括監視操作 PC 上に表示される。

◇地震時の挙動

統括監視操作 PC、統括制御盤、現場制御盤など統括制御系の主要機器を接続する NETH は光二重ループの伝送路を持つネットワークで主副ループがあるために、任意局で通信異常が生じても、異常局の手前で主から副ループに折り返す経路に切り替えることで、異常局を除いた制御システムを維持できる。ただしミュオン関連の現場盤は UPS 未接続のため、停電時には Fig. 2.8.1-2 の局 26 , 21, 30, 28, 25, 29, 32, 27, 24, 22 を除いた現場制御盤に限定された形で制御システムは維持される。今回の地震による停電時は、局 19, 20 のシャッター現場制御盤 1, 2 でも 14 時 48 分 47 秒及び 48 秒に通信異常が出力され、Fig. 2.8.1-2 の既述ミュオン関連局と局 19, 20 を除いた形で NETH1 伝送状態が維持されていた。インターロックに関しては、MPS は専用コントローラーが CCR から直接管理されているので記録確認は難しいが、TPS は PPS データログより確認できた。この結果、TPS は、14 時 48 分 47 秒に 1 次冷却系現場盤 TPS が発報し、専用シーケンサに集約され、陽子ビーム停止インターロック「Target Status」が CCR に伝送された。水銀循環設備 TPS はその 9 秒後に発報した。ターゲット台車現場盤は 14 時 48 分 47 秒に片系のみ一瞬だけ発報し、最大余震（15 時 15 分 34 秒）後に改めて両系とも発報した。MPS 及び TPS 事象の詳細情報が統括監視操作 PC 上で発報表示されていたことは、目視と警報発報データ記録より判断できている。以上、統括制御・インターロック系は、ほぼ想定通りの動作をしていた。

◇健全性確認・復旧

通電前後の目視確認の結果、統括制御・インターロック系機器の破損・故障は無かった。また、制御室に設置された卓上の監視操作 PC や制御盤内の機器に落下や大きな位置ずれなども見られなかった。Fig. 2.8.1-2 の NETH1 は、2011 年 3 月 29 日午後から監視操作 PC や統括制御盤の通電試験と立上作業を始め、17 時までには各統括制御盤（局 3, 2, 1）と極低温水素設備盤（局 8）間で通信を開始した。3 月 30 日からは各現場制御盤の本格的な立上が始まり、3 月 30 日に局 5, 6, 8,31, 13, 17, 14,18, 10, 34, 4, 12, 11, 15, 33、3 月 31 日には局 19, 20 の通信試験を実施し、大地震発生時の NETH1 通信状態までほぼ回復でき、本系の運用を開始した。4 月 4 日には局 22 のミュオン空冷装置を除く NETH1 通信試験まで終了し、最後まで残っていた局 22 の通信試験を 4 月 12 日に実施し、大地震発生時前の NETH1 通信状態まで回復した。5 月 27 日

には、CCR と MLF 間で MPS インターロック取合試験を実施し、正常動作を確認した。その後は、各設備の復旧・試運転状況に合わせて、設備実機稼働によるインターロック試験を適時実施している。

2.8.4　人的安全保護システム（PPS）

◇設備概要

PPS は、MLF-PPS 監視操作 PC、施設 PPS 制御盤、2 次ビームライン PPS 制御盤などの PPS 専用機器で構成されており、それらは専用ケーブルに加えて、FA リンクと呼ばれる専用の二重化された PLC リンク用ネットワークで接続されている（Fig. 2.8.1-3）。PPS は、高放射線被曝から人員を保護するために、ビーム照射や放射化機器により高線量となる PPS 区域への入退域を制限し、緊急時に陽子ビームを停止する。MLF では、施設（線源保守）と実験装置の 2 種類の PPS 区域に大別され、安全キーとインターロックで管理される [2.8-5)]。

MLF-PPS ビーム受入条件は、水銀ターゲットに関する「Target Status」、非常停止釦に関する「Emergency」、PPS エリア入退域に関する「Safety」という 3 種類のインターロック条件が個別に成立した後、「Status」専用キースイッチを手動操作で入れることでビーム受入条件成立を CCR に伝える。なお「Safety」は、施設 PPS エリアでは扉閉・電気錠施錠・安全キー返却が成立条件に、実験装置 PPS エリアではビームシャッター閉であること、もしくは扉閉・電気錠施錠・安全キー返却が成立条件になっている。CCR は条件成立を確認して、「MLF-Entry」、「Beam mode MLF」インターロックを操作し、MLF をビームエリアモードに組み込む。

◇地震時の挙動

PPS では、1 秒間隔で PPS 機器のデジタルデータの変動があったときのみ情報を PPS データログに取り込む。今回の地震発生前の MLF-PPS は、「MLF-Entry」は PPS 入域許可、「Beam mode MLF」はビーム運転エリアから除外の状態であった。施設 PPS エリアは全域扉閉・施錠状態で、実験装置 PPS エリアは運用中のビームラインで全シャッター閉状態であったため、PPS エリア入退域に関するインターロックである「Safety」は発報していなかった。地震発生後の 14 時 48 分 48 秒には、停電により FA リンクに接続された PPS 現場盤の中で UPS 未接続のシャッター状態表示灯制御盤 1,2 が通信異常を出力し（Fig. 2.8.1-3 参照）、それらを除けば PPS の FA リンク通信状態が維持された。このため実験ホールのシャッター状態表示灯ランプも消灯した。

地震発生後の PPS エリア状態は、施設エリアでは全域で扉閉・施錠が維持されていた。一方、実験装置エリアでは多くの実験装置室で扉開・安全キー引抜状態であった。本来、既述の PPS－「Safety」インターロック成立条件より、扉開・安全キー引抜状態でシャッター閉接点が OFF になると「Safety」が発報する。しかし、我々は地震時のシャッターの揺れだけでは不必要に PPS が発報しないように、2010 年 1 月に扉開・安全キー引抜状態でもシャッター閉接点 OFF が 5 秒以上続かなければ「Safety」が発報しないように改良を加えた。そのため、今回の地震では、シャッターが揺れて閉接点スイッチ ON/OFF が頻発したにも関わらず、殆どの実験装置室で不必要な「Safety」を発報することがなかった。このことは図らずも地震対策のた

めの改良が有効だったことを実証した。唯一 BL08 だけが最大余震（15 時 15 分 34 秒）後の 15 時 23 分以降に「Safety」発報を頻発したが、その理由は余震で BL08 のシャッターと閉接点スイッチの位置関係がずれ、シャッター閉接点スイッチ OFF が 5 秒以上続くようになったためと考えている。以上、PPS はほぼ想定通りの動作をしていた。

◇健全性確認・復旧

通電前後の目視確認の結果、PPS 機器の破損・故障は無かった。2011 年 3 月 29 日から 30 日にかけて、PPS 制御盤、PPS 現場盤、PPS 機器の通電試験、立上、及び通信試験を行い、2011 年 3 月 31 日 11 時頃、PPS データログ及び本系の本格的な運用を開始した。ただし CCR から「MLF-Entry」インターロック伝送が切れていたために MLF-PPS 区域への入退域が禁止されていたので、「MLF-Entry」を MLF 側でマスクしてから運用を開始した。施設の 24 時間空調運転が始まった後、5 月 17－19 日にかけて施設 PPS インターロック区域への入退域と放射線診断系機器の検査を定期検査手順に基づいて実施し、地震の影響による機器故障はないことを確認した。11 月 21 日には、CCR と MLF 間で PPS インターロック試験を実施し、MLF をビームエリアモードに組み込めることを確認した。その後は、実験装置側の復旧に合わせて、実験装置 PPS インターロック試験を適時実施している。

2.8.5　共有サーバー・LAN・タイミング系

◇設備概要

MLF 共有サーバーシステムは、Web サーバー、データベースサーバー、EPICS （Experimental Physics and Industrial Control System）サーバー、全体監視カメラシステム、情報ディスプレイ、一般用 Web サーバーで構成される [2.8-6)]。これらのサーバーはそれぞれ目的に応じて異なるネットワーク層に接続されており、情報の蓄積、伝達、公開、監視等の役割を果たす（Fig. 2.8.1-1, 2 参照）。MLF-LAN は、MLF 制御室内専用 LAN（GCS－LAN）、制御系・館内系 LAN、一般系 LAN（J-LAN）で構成される。GCS-LAN は、J-PARC 全体制御グループが統括する LAN とは隔離されており、データ通信の窓口としては EPICS サーバーと Web サーバーに制限されている。MLF 制御系・館内系 LAN は、VLAN として区切られているが、CCR を介して他施設の制御系 VLAN に容易にアクセスできる。全体監視カメラシステムは Web カメラを用いて MLF 施設内の監視を行うシステムである。館内系 LAN を経由して、2 台のカメラサーバーが 60 台の一般 Web カメラと約 30 台の耐放射線カメラを操作し、その画像を表示・記録する。

MLF-GCS は陽子ビームの入射周期に関連したタイミング信号を配信する。J-PARC は標準タイミングシステムとして CCR で生成する 12MHz の高精度マスタークロックを基準としたスケジュールタイミングシステムを採用している。MLF では、標準タイミング信号として、12MHz のマスタークロックと 25MHz の MLF 基準トリガを配信している。また標準タイミング信号に加えて、3NBT-CT トリガ、RCS キッカー出射トリガなどのタイミング信号も配信している。

◇地震時の挙動

DB サーバーは、統括監視操作 PC にインストールされたソフトウェアをデータソースとして、NETH から伝送される運転情報を随時蓄積している。現在 7000 点を超える MLF 運転データを取り扱っており、温度、流量、圧力等のアナログデータは 5 秒周期で、警報発報やバルブ開閉信号等のデジタルデータは 5 秒周期でかつ変動のあったときに取り込んでいる。今回の地震時の DB データ状態を調査した結果、アナログデータ及び警報発報のデジタルデータの取込は正常だったが、警報以外のデジタルデータの取込に不具合が発生していることがわかった。そこで中性子シャッターや MLF 運転状態など、NETH1 経由で PPS ログに取り込んでいる運転データ（Fig. 2.8.1-3 参照）を使って DB と比較解析した結果、地震の影響とは別に、3 月 7 日に取込不具合が発生したことがわかった。3 月 29 日の DB サーバー再立上以降は正常に稼動している。従って今回の地震発生時のデータ解析には、アナログデータ及び警報発報のデジタルデータのみを使用するようにした。

MLF-LAN は、制御室内に設置された制御系・館内系 LAN のエッジスイッチなど主要機器は UPS 系統に接続されており停電時も動作していたので、CCR など外部施設との通信可能な状態は維持していた。一方、施設内各所に設置された多く LAN スイッチやハブは停止したために、Web カメラや情報ディスプレイなどの施設内の LAN 接続端末との通信は切断され、共有サーバーと連動したカメラ監視・情報配信システム機能は停止した。タイミング配信系についても、専用機器を設置している 3 台の現場盤（制御室、第 1、2 実験ホール）は UPS 系に接続されているが、タイミングモジュールは制御系 LAN より制御しているので、配信機能は停電時に停止したと考えられる。

◇健全性確認・復旧

本系統の健全性確認・復旧は、まず施設全体の健全性確認に不可欠な共有サーバーと MLF-LAN 機器の目視・通電・通信試験を 3 月 29 日－31 日に実施し、運用を開始した。その後、監視カメラ・情報 DP・パトライトなど LAN 接続端末やタイミング配信設備の目視・通電・通信試験を 3 月 31 日－4 月 1 日に実施し、情報 DP 1 台の電源アダプター破損と屋外用監視カメラ（HC-31）2 台の回転動作不良を見つけた。前者に対してはアダプターを交換し、後者に対しては運用上の支障はないと判断した。5 月 30 日には、CCR－MLF 制御室－実験ホール間でタイミング機器の通信試験を実施し、設備の正常動作を確認した後、実験装置調整のため 12MHz マスタークロック、25Hz 定常トリガーパルスなどのタイミング信号の配信を開始した。Web, 情報 DP、パトライトなどの情報配信系の運用は、今後、必要に応じて逐次開始していく。なお今回生じた DB サーバーのデジタルデータ取込不具合の対処法として、1 時間周期ではあるがアナログデータと同様にデジタル全データを取り込む機能を追加した。

参考文献

2.8-1) K. Sakai et al., “Development status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC”, Physica B 385-386 (2006), pp.1324-1326

2.8-2) K. Sakai et al., “Construction status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A 600 (2009), pp.75-77

2.8-3) K. Sakai et al., “Design, Construction and Operation of General Control System of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF-GCS) in J-PARC”, JAEA-Technology 2009-042 (2009), (in Japanese)

2.8-4) K. Sakai et al., “Commissioning of Operation and Control System for Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) in J-PARC”, JAEA-Technology 2010-001 (2010), (in Japanese)

2.8-5) T. Kai et al., “Users’ beam interlock system at the materials and life science experimental facility of J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A 600 (2009), pp.176-178

2.8-6) M. Ooi et al., “Developmental status of a server system for the MLF general control system”, Nucl. Instr. Meth. A 600 (2009), pp.120-122

2.9 3NBT

2.9.1 概要

25Hz という早い繰り返しの 3 GeV シンクロトロン加速器（3-GeV rapid-cycling synchrotron、RCS）において生成された大強度陽子ビームは、3 GeV 陽子ビーム輸送システム（3NBT）によって物質生命科学実験施設まで輸送され、中性子標的、ミュオン標的に照射され、2 次ビームを発生する。3 GeV 陽子ビーム輸送システム (3NBT) [2.9-1)] は、RCS から大強度陽子ビームを受け入れ、ビームライン全体の平均として 1 W/m 以下という極端に少ないビームロスにするという厳しい条件のもとで大強度陽子ビームを輸送、最終的に中性子源、ミュオン源に最適なビームプロファイルに整形する[2.9-2)]という重要な役目をもっている。3NBT 施設の配置を Fig. 2.9.1-1 に示すが、必ずしもビーム輸送に適した配置ではない。これは、主に J-PARC が 3 つの加速器、3 つの実験施設からなる複合研究施設であること、J-PARC が既存の研究所敷地内に建設されることになったことにより配置上の制約が大きかったことによる。その結果、3NBT ラインは 258 m の長さを持つことになり、高低差 4.8 m を作らざるを得なかった。3NBT ラインの主なパラメーターを Table 2.9.1-1 に示す。

ビームラインは、Fig. 2.9.1-2 のように電磁石、真空機器、ビームモニター等の機器が概ね 0.1 mm より良い精度で設置され、安全装置、冷却水の配管、空調ダクトがライン全体をカバーしている。電磁石を励磁する直流電源、各種コントローラー、信号取得用のモジュール類は、すべて付属の建屋である 3NBT 棟、および物質・生命科学実験施設 3NBT 下流部に設置され、数多くのケーブルで結ばれている。ビームライントンネルの内部を Fig. 2.9.1-3 に、付属の建屋の写真を Fig. 2.9.1-4, 5 に示す。

3NBT に対する震災による最大の被害はトンネル内の壁が大きく崩落したことである。さらに、トンネル内のクレーンも大きな被害を受けた。クレーンのレールを吊っていたボルトが地震の揺れによりせん断され、レールを固定していたプレートと共に落下した。これらの様子を Fig-2.9.1-6, 7 に示す。震災時では、LINAC のビーム調整が終了するのを待っている状況であった。当日は加速器のコンディショニングの日に割り当てられており、従来通りならば、担当者がトンネルに立入り残留放射線の定期測定を実施することになっていた。地震発生時にはほぼ間違いなく被害が大きかった下流部エクスパンションジョイント付近の線量を測定していたと思われる。幸いにも、担当者は新規に製作する電磁石の工場試験のために仙台に出張しており、トンネル内は無人であったため落下物等による人的被害はなかった。またトンネルの土盛りが 20cm 以上沈下した。この様子を Fig-2.9.1-8 に示す。ビーム運転再開のためには、これら建築物の復旧が重要となる。

Table: 2.9.1-1: Main parameters of 3NBT line

total length of beam line in 3NBT tunnel	258 m
typical internal dimension of 3NBT tunnel	5.0 m (W) × 4.5 m(H)
total length of beam line in MLF Building	57 m
bend angle of 3NBT tunnel	30°
elevation of 3NBT tunnel	4.8 m with gradient of 7.5°
number of horizontal bending magnets	6
number of vertical bending magnets	3
number of quadrupole magnets	54
number of steering magnets	45
inner diameters of beam ducts	204, 242, 282 mm
number of vacuum pump units	7

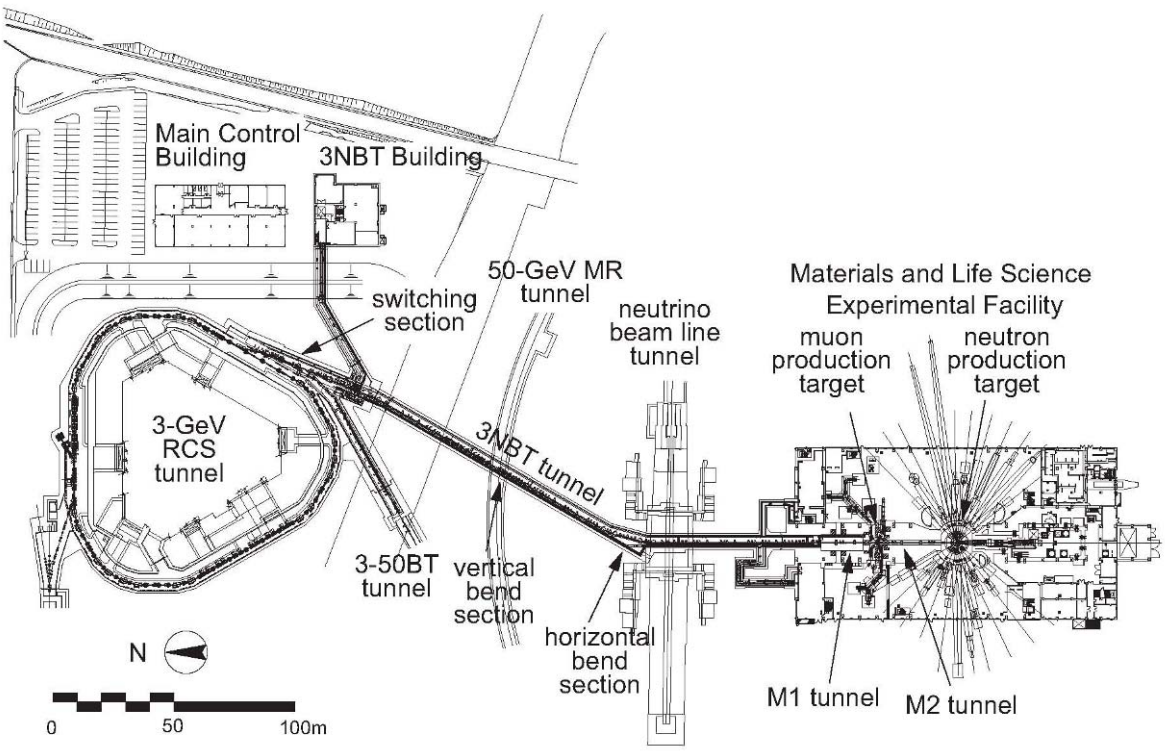


Fig. 2.9.1-1: Layout of the 3-GeV proton beam transport facility (3NBT)

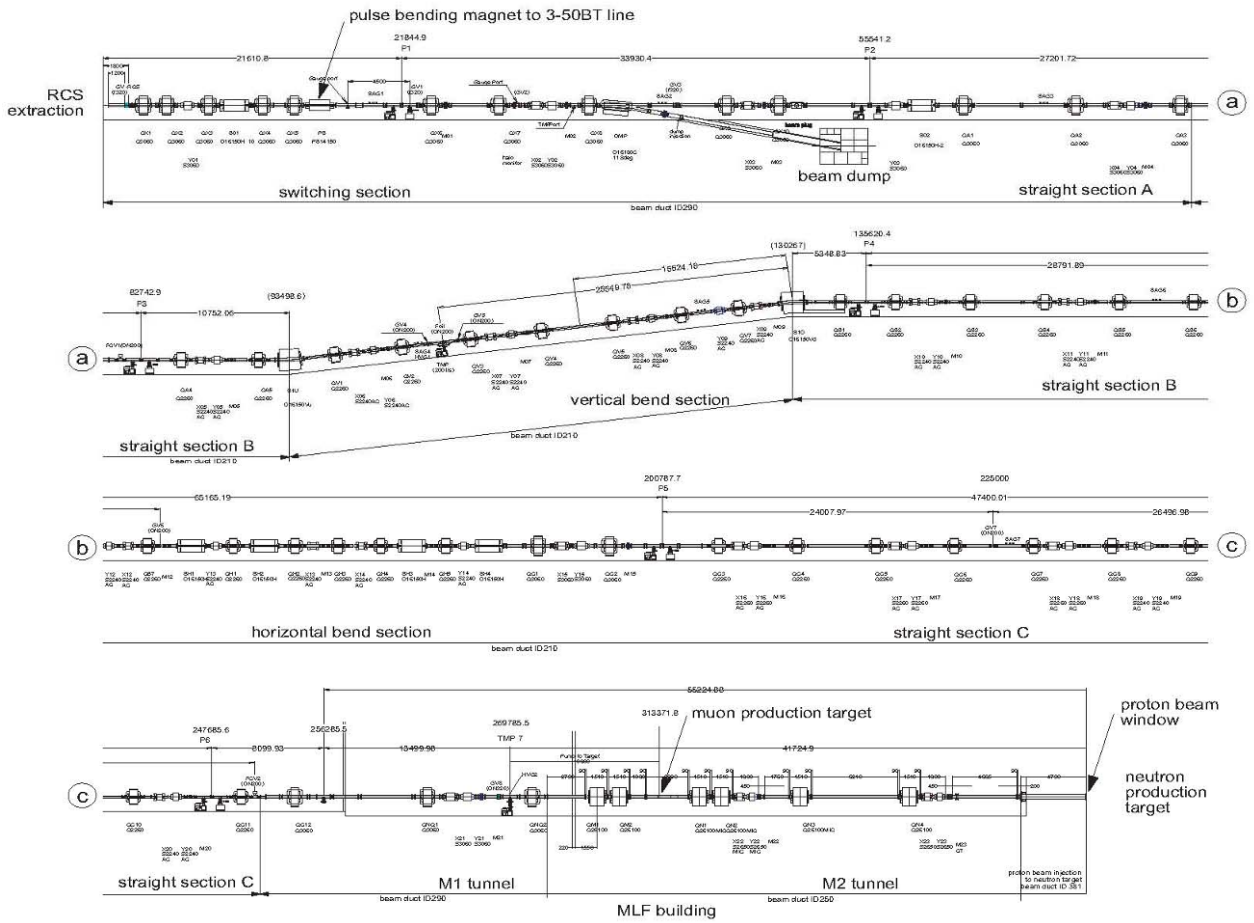


Fig. 2.9.1-2: Layout of beam line components (vertical cross section)

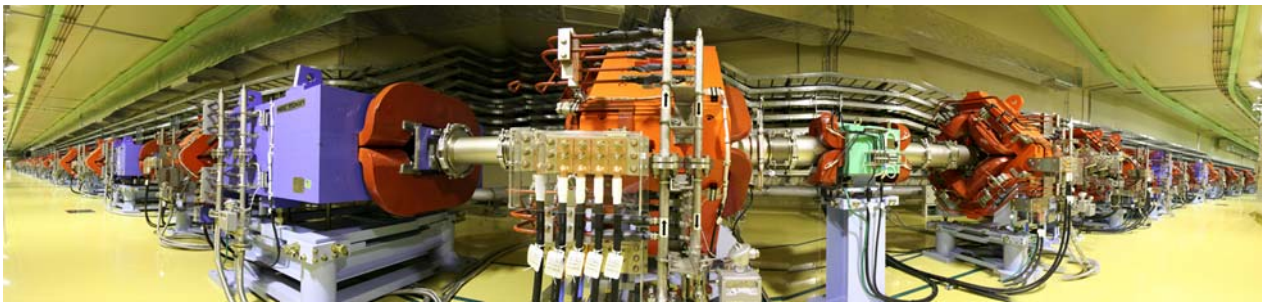


Fig 2.9.1-3: 3NBT line around straight section B and horizontal bend section. The proton beam is transported from right to left.

Fig.2.9.1-4: 3NBT building

Fig.2.9.1-5: 3NBT downstream section of the MLF building

Fig.2.9.1-6: Tunnel wall was collapsed by the the earth quake around at the expantion joint in the 3NBT tunnel.

Fig.2.9.1-7: Bolts for the rail of the supspension crane were subjected to shear by the vivration due to the earthquake. Eventually spacer plates for the crane were not fixed and dropped.

Fig.2.9.1-8: Collaption of the embankment of top of 3NBT tunnel around at the upstream of the MLF building.

2.9.2 電磁石

3 GeV 陽子ビーム輸送システム（3NBT）のビームライントンネルには、陽子ビームの軌道を曲げるための偏向電磁石が 9 台（Table 2.9.2-1）、ビームの広がりを収束、あるいは発散させるための四極電磁石が 54 台（Table 2.9.2-2）、陽子ビームの軌道のずれを修正するための補正電磁石が 45 台（Table 2.9.2-3）、設置されている。それらの配置を、Fig. 2.9.1-2 に示す。

3NBT トンネル、M1 トンネルでは、電磁石の架台が床にアンカーボルトで固定され、電磁石本体は、架台からの 3 本のボルトで支持されている。電磁石の精密アライメントには、この 3 本の脚を調整して行われる。これら架台の耐震設計は、加速度 0.25Ｇの横揺れに対して行われている。今回の大地震の揺れに対して、アンカーボルトや電磁石の脚、その他の機械的な構造には、いっさい損傷は見られなかった。結果として 3NBT の電磁石設計における耐震設計の妥当性を示すものとなった。

架台の影響はなかったものの、トンネル自身は大きく変動しており、特にエクスパンションジョイントにおける変動が 30mm 以上あり、また 12mm 以上も沈下したために、大幅にアライメントし直す必要が生じた。地震前にもアライメントを行ったが、せいぜい数 mm 程度 [2-9-3,4] の範囲であったのに対し、本震災後には経験のない量の調整を行う必要が生じた。このような調整を行うためには十分な期間が必要とされるが、一方では、ユーザーのビーム利用の観点からビーム運転を早急に実現することも重要である。特に先に述べたように、トンネルの壁を補修し、盛土も復旧しなければならないので、アライメントへの外乱が無い時期を設けるのが困難になっている。また地殻変動の影響も継続する傾向にあり、ビーム運転再開までに、どのようなビームコミッショニングを行っていくかが大きな問題となってくる。

一方、M2 トンネル内の電磁石 [2-9-5, 6]は、ボルトによる調整機構は持たす、床の上に直接設置されている。電磁石の上部には遮蔽ブロックを積載しており、電磁石本体を直接見ることは

できないが、その上側から目視した限りでは大地震による損傷はないと思われる。

M2 トンネルの電磁石の設置方式をどのようにするかは、設計時において大きな課題であった。物質・生命科学実験施設技術アドバイザリー委員会（NTAC）からは、電磁石を上部で支持して、上部でのアライメントができる方式を検討するように推奨された。しかし、上部支持設置方式の場合、遮蔽体付きの非常に重い電磁石を高い位置で固定することになるので、耐震強度の点で問題であると判断し、我々は現在の方式を採用した。実際に M2 トンネルの電磁石の水平方向の位置は、本震災による影響を殆ど受けていない（2.10 節）ので、本方式を選択したことは妥当であったと考えられる。再び同規模の地震が来ても、水平方向の変動は大きくないということが予測できる。沈下に関しては、まだどうなるかは予測できないが、最悪の場合でも当初の設計通り、ベースプレートの厚さを変更することにより、十分に対応できる。

震災後に電磁石の絶縁抵抗の測定を行った。その結果、絶縁抵抗の悪化が観測された。詳しく調べると、電磁石のコイルと大地を絶縁するためのセラミックス製の絶縁管の抵抗が悪化していることがわかった。絶縁管の内部を観測すると、茶色の汚れが付着していた。これは恐らく電磁石のコイルに用いられている銅パイプの内部の銅が腐食し、絶縁部に付着したと思われる。この傾向は地震前でも、冷却水を停止している期間に見られた。絶縁部パイプを外し洗浄することで、十分な絶縁抵抗となることを確認した。

Table 2.9.2-1: Main parameters of bending magnets

	unit	D16150H/V	D16150H_10	D16180C
bending angle	deg	7.5	10.3	11.8
magnetic field	T	1.11	1.53	1.46
pole gap	mm	160	160	160
pole length	mm	1,500	1,500	1,800
pole width	mm	580	580	360
number of turns in coil	/coil	120	126	100
Current	A	591	900	1,110
Voltage	V	162	180	125
Conductor		hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper
conductor size	mm	□13-Φ9	□16-Φ10	□17-Φ11
Insulator		polyimide	polyimide	polyimide
Cooling		direct water cooling	direct water cooling	direct water cooling
total weight	ton	14.0(H) / 15.7(V)	18.0	22.2
Quantity		5(H) / 2(V)	1	1

Table 2.9.2-2: Main parameters of quadrupole magnets

	unit	Q2260	Q3060_G6	Q3060_G8	Q2690	Q2690MIC
Bore diameter	mm	220	300	300	260	260
maximal magnetic field gradient	T/m	8.0	6.0	8.0	8.0	8.0
Pole length	mm	600	600	600	900	900
Pole width	mm	239	297	297	262	262
number of turns in coil	/coil	84	129	129	95	49
Current	A	458	416	605	630	1,200
Voltage	V	81	111	127	138	126
Conductor		hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper
conductor size	mm	□12−φ8	□12−φ8	□12−φ8	□13−φ7	□19.8−□7.3
Insulator		polyimide	polyimide	polyimide	polyimide	MgO
Cooling		Direct water cooling	direct water cooling	direct water cooling	direct water cooling	direct water cooling
Total weight	ton	5.1	7.7-7.8	10.4	14.2	13.8
Quantity		30	14	4	3	3

Table 2.9.2-3: Main parameters of steering magnets

	unit	S2240AC	S2260AC	S3060	S2630	S2640MIC
bending angle	deg	0.172	0.172	0.172	0.172	0.172
magnetic field	T	0.0638	0.0638	0.0638	0.1276	0.0957
Pole gap	mm	220	220	300	260	260
Pole length	mm	400	600	600	300	400
Pole width	mm	230	229	340	270	270
number of turns in coil	/coil	176	168	60	36	12
Current	A	31.7	33.0	127	220	520
Voltage	V	14.3	17.1	18	7.74	5.33
Conductor		rectangular copper wire	rectangular copper wire	hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper	hollow conductor of oxygen-free copper
conductor size	mm	4.5×8	3.5×10	□9−φ6	□12−φ8	□19.8−□7.3
Insulator		polyimide	polyimide	polyimide	polyimide	MgO
Cooling		natural convection air cooling	natural convection air cooling	direct water cooling	direct water cooling	direct water cooling
Total weight	ton	0.76-0.81	0.81	0.98	0.40	0.52
Quantity		24	6	11	2	2

2.9.3 真空系

3NBT の真空系統は全長約 320m を 7 台のイオンソープションポンプ(SIP)と 2 台のターボ分子ポンプを用いて真空を保っている(Fig 2.9.3-1)。M2 トンネル付近の下流部はピローシールからの僅かなもれがあるために~10^{-4}Pa となっているが、最上流部では~10^{-7}Pa と高真空を維持している。3NBT ではターゲット、陽子ビーム窓およびミュオンターゲット等からの冷却水が漏れる事態にも備えて、Fast Closing Valve (FCV)を備えている。また、多重防護の観点から 2 台の FCV を設備するとともに、これに必要な圧力センサーも 2 台設けていた。

震災時の詳細な記録が無いが、以下の現象が生じたと思われる。

1) 地震発生
2) ガス供給圧力の低下に伴い陽子ビーム窓または M2 トンネル内のピローシールのシール性能が悪化し多量の空気が真空ダクトに流入
3) FCV の圧力センサー(HV)が圧力上昇を感知しバルブを閉止する動作開始
4) FCV 上流側は問題なく閉止した。
5) FCV 下流側のバルブへの計装空気の供給ガスが絶たれたために FCV 下流側のバルブが閉止できない。また、下流側のみゲートバルブが閉止できない事態となった。
6) 上流側の FCV を境に上流側は真空を維持したが、下流側は大気となった。

震災後に再起動を行った。長いエージング期間を経て、さらに急激な大気曝露のためにSIPの切断されたヒューズを復旧した後に、震災前の圧力に到達することが確認できた。特に、ターボポンプは地震時に36000rpmで高速回転していたが、機器が損傷することなく停止できた。震災後も問題なく動作しており想像以上に耐久性に優れていることが確認できた。真空ポンプおよびバルブは全て動作することが可能であり、到達圧力もほぼ震災前と同じであることを確認した。

改善すべき点として、計装用空気の経路に重要な問題がある。計装空気は建屋の外側の地中に埋設された配管を経て、MLFから3NBTトンネルに来る。地震時にはMLFの周辺に著しい沈下が見られたことから、計装空気などの重要なものは埋設しないことが必要である。

今回の地震では、50GeV シンクロトロン加速器など部分的に大きなリークが発生したものの、加速器としては全体でほぼ40Paの真空を維持していた。3NBTで多重系のFCVのシステムを採用していない場合には、加速器のほぼ全体を大気に曝露する可能性もあった。全体が大気に曝露されるとなると、真空に復旧するには膨大な時間を要することになるので、本震災ででは多重防護のシステムが有効に機能した。

中央制御棟に位置する制御機器が正常に動作することを確認するために、ビームが不用意に入射することを遮るためのビームプラグの動作試験を行ったところ、プラグが移動できないことが判明した。性能検査試験に合格したクレーンによりプラグの真空容器の蓋を持ち上げ、プラグの状態を確認したところ、プラグを支持するベアリングの一部に損壊が見られた。ビームプラグはビーム誤入射防止 PPS インターロックに直結するために、早急にベアリングを交換し動作試験を実施することとした。

一方では、大震災は3NBT真空ビームライン機器のアライメントにも大きな影響を与え、復旧には12mm以上の機器の位置調整が必要な個所も生じている（2.10.3 節参照）。これは使用している真空ベローズの軸直角方向の調整許容範囲を超えており、段階的な調整が必要になる。また調整時に過度に負荷をかけることでチェーンクランプの割れが発生しないように、注意を払いながらのアライメントが要求される。

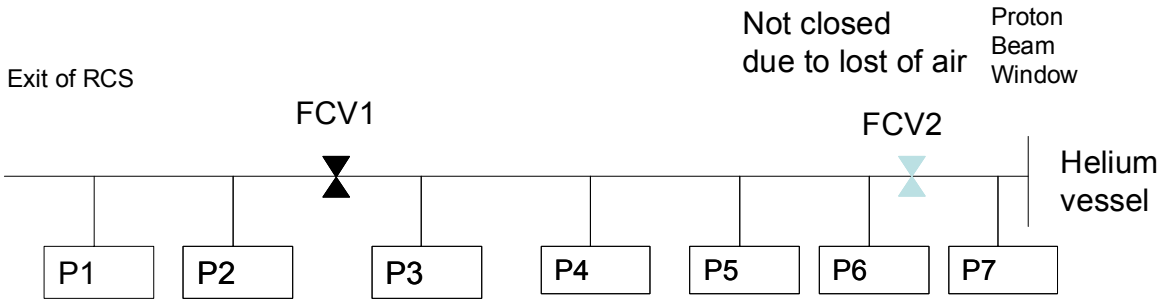


Fig.2.9.3-1: Schematic drawing of 3NBT vacuum system.

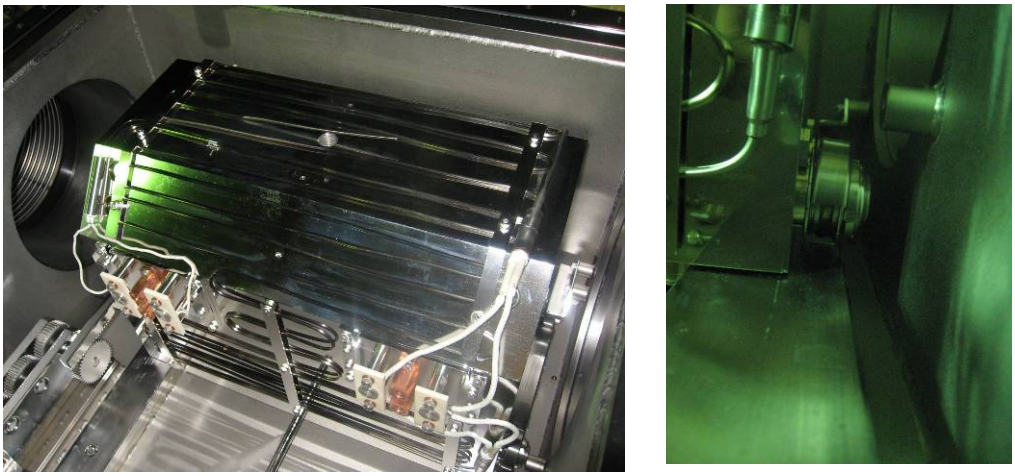


Fig.2.9.3-2: Beam plug and broken bearing for the linear motion of the plug

2.9.4　冷却水設備

◇設備概要

Fig. 2.9.4-1 に 3NBT 冷却水設備構成を示す。3NBT 冷却水設備は、直接負荷（電磁石等）を冷却する 1 次冷却水系 I (10 系)、II (20 系)、III(30 系)と同じく直接負荷（電磁石電源）を冷却する電源冷却水系 I (40 系)、II (50 系)さらに 1 次冷却水系及び電源冷却水系から伝えられた熱を大気に放散させる 2 次冷却水系 I (60 系)、II (70 系)から構成される。10 系、40 系、60 系は 3NBT 棟に、20 系、30 系、50 系、70 系は MLF 建屋 3NBT 下流部に設置されている。

◇地震発生前後の設備挙動

◆発生時(3 月 11 日)の設備状態は全系統運転状態であった。

◆発生後の挙動は、14 時 48 分停電により全系統のポンプが停止した。

◆発生後、想定外の挙動

・　2 次冷却水系 I (60 系)の冷却塔が、激しい揺れにより、ブレスのボルトがせん断し、フレームが傾いた（Fig. 2.9.4-2）。下部水槽に亀裂が入った。

・　電源冷却水系 I (40 系)の膨張タンクカバーガス供給配管が破断した為に、上流側 3 系統のカバーガスが抜けた。これにより 40 系で約 0.5m^3、60 系で 2m^3 の冷却水が漏れ出した。

・　1 次冷却水系 II (20 系)のサージタンク液位計の導圧管継手部のスウェージロックが地震時の振動により緩み、上流側と同じく下流側 4 系統のカバーガスが抜けた。緩んだスウェージロック部より 20 系の冷却水が約 0.5m^3 漏れ出した。

・　3NBT トンネル内の 20 系配管サポートが、壁の崩落しかかっている場所にあったために、サポートごとトンネル内側に曲げられた。また、温度変化による配管の伸縮を制限しているサポートの部分で、配管に溶接された溝型鋼がサポートにぶつかり、配管と共に変形した。

・　上流側及び下流側の窒素供給架台が、地震により傾き、配管が変形した。

◇健全性確認方法

◆電気系

絶縁抵抗の測定及び目視にて異常のない事を確認した。

◆ポンプ、モーター

外観を目視にて確認した。60 系ポンプの軸受け部のオイルが、規定値より少ないことを確認した。その他の系統は異常のない事を確認した。

◆冷却塔

70 系は目視にて異常のない事を確認した。60 系は傾き水槽に亀裂があることを確認した。

◆膨張タンク、サージタンク、熱交換器

目視により異常のない事を確認した。

◆配管

20 系の配管以外は、異常のない事を目視により確認した。

◆窒素供給系

窒素供給架台が上流下流共に傾き、配管が変形していたが、配管からリークがない事を漏れ検出液を使用して確認した。上流下流共に窒素が漏れてしまったために、10 系を除く全系統で冷却水が逆流していた。

◇復旧・改良計画

◆10 系、30 系、40 系、50 系、70 系

窒素供給系配管に逆流した冷却水を取り除き、窒素を供給した後タンクレベルを確認し、レベルの低いものについては補給した。その後、ポンプを起動し漏水等異常のない事を確認した。

◆20 系

緩んだスウェージロックを増し締めし、窒素供給系配管に逆流した冷却水を取り除き、窒素を供給した後タンクレベルが低かったので補給した。20 系については、3NBT トンネル内配管サポートが崩落しかかっていること及び配管が変形してしまっているため、ポンプの起動はサポート及び配管の復旧まで行わないこととした。配管は変形した部分を切断し、交換することとした。

◆60 系

冷却塔はメーカーに依頼して、破損した部品等を交換、補修することとした。他の系統と同じように窒素供給系配管に逆流した冷却水を取り除き、窒素を供給した後タンクレベルが低かったため、補給を行った。補給は冷却塔を系統から切り離した状態で行った。ポンプ軸受けのオイルについては、オーバーホール時に行うこととした。

◆窒素供給系

窒素供給架台の傾きは、据付業者にて修復を行うこととした。

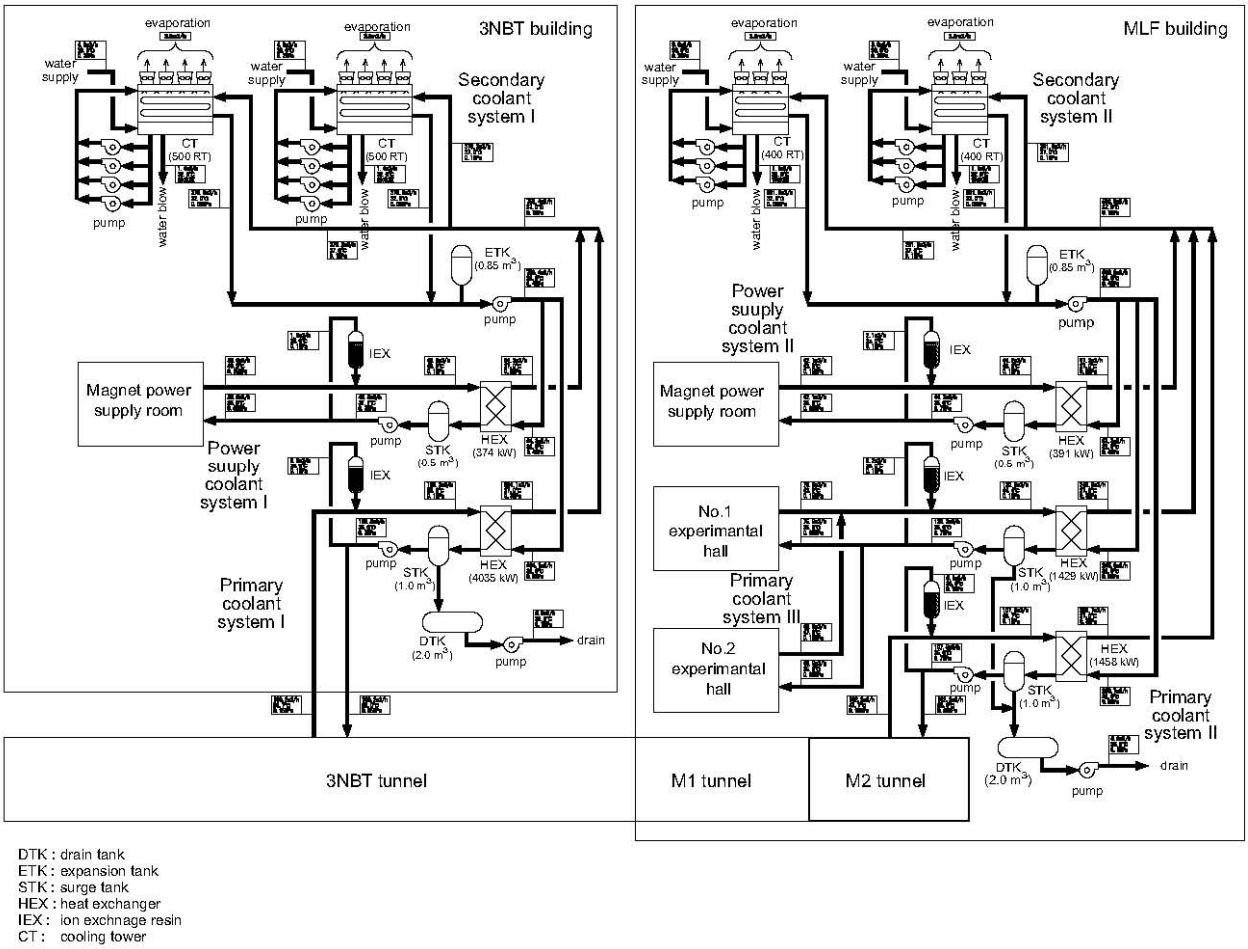


Fig. 2.9.4-1: Block diagram of 3NBT coolant facility

Fig. 2.9.4-2: Cooling tower on the 3NBT building was tilted by the earthquake.

2.9.5　ビームモニター

◇設備概要

3NBT ビームモニターは、ビームラインに設置された各種モニター（電流変換モニター（CT）、ハローモニター（PM）、ロスモニター（LM）、プロファイルモニター（PM）、ビーム位置モニター（BPM））で構成されている。これらのモニターは 3NBT トンネル, M1 トンネルおよび M2 トンネルに配置されている。モニターはアンカーボルトで固定された架台に設置されている(Fig. 2.9.5-1)。

Fig. 2.9.5-2 に 3NBT ビームモニター設備構成を示す。これらの信号は、ケーブルで 3NBT 棟制御室および 3NBT 下流制御室に設置されている信号処理回路（NIM モジュール）に接続されており、読み出された信号は ADC（CAMAC モジュール）または DSO によりデジタルデータに変換されて、EPICS 上で伝達される。NIM モジュールや CAMAC モジュール、DSO は、19 インチラックに装着されている。PC については、卓上に設置している（Fig. 2.9.5-2）。

◇震災時の挙動

震災発生時は、リニアックのビーム調整中であり、RCS のビーム調整の準備中であった。3NBT モニターシステムは、コンディショニング中においても全機器動作可能状態を維持しており、いつでもビーム受け入れ可能であった。地震後の停電に伴い、モニター系の機器は、UPS 系に接続していないので、停電と共に全機器停止している。

◇健全性確認・復旧作業

◆震災の影響

ハローモニター、プロファイルモニターの架台は横揺れ加速度 0.25G で耐震設計が行われているが、アンカーボルトの引き抜きなどは観測されなかった。また、マルチワイヤー型のプロファイルモニター(MWPM)はビーム計測しない場合にはワイヤーメッシュがビームに当るのを防ぐために、振り子状または上下に動作し退避する。震災後において動作試験を行ったが、問題なく動作することを確認した。またロスモニターは全て電磁石上流側に問題なく固定されていることを確認した。

制御系に関しては、2011 年 3 月 11 日の地震により机の上などに置かれていた PC やディスプレイが転倒・落下したほか、19 インチラックが地震の振動によって移動や傾斜するなどの被害があった。転倒により、使用していた PC の 1 台がシステムエラーを起こし起動できなかった。また、プロファイルモニターのアンプに接続されていたケーブル端子の一つが無理な力がかかったために破損した。ラック上に設置されていたパルスジェネレータが、振動により落下し破損したほか、ラックの移動や傾斜などによりラック上のモジュール間を繋いでいた LEMO ケーブル数本の断線が確認された。

◆ケーブルの健全性確認

3NBT のモニターでは、各制御室から 3NBT トンネル内までケーブルが引かれているが、震災の影響により断線または絶縁破壊が起こっていないかについて確認を行った。CT について

は、モニターがコイルで構成されているため、制御室においてケーブルの導通確認が可能である。また、接地ラインとの絶縁を確認し問題のないことが確認された。その他のモニターについては、直接導通の確認を行うことができないため、各ケーブル間の絶縁が確保されていること、および接地ラインとの絶縁が確保されていることをテスターにより確認した。また、ミュオン標的および M2 ラインのプロファイルモニターについては、一方を短絡することにより、個々の信号線の導通の検査を行った。結果、すべて健全であることが確認された。

◆復旧作業

震災により移動や傾斜してしまった 19 インチラックについては、元の位置に再設置した。一部機器の落下や断線についても、ケーブルの交換または補修を行うなど、ほぼ震災前の状態に復旧した。システムエラーを起こした PC については、システムの復旧を試みたが元のシステムへの復旧は困難であると判断し、OS の再インストールおよびバックアップファイルからのシステム復旧により、機能回復を行った。破損したプロファイルモニターの端子（DSUB50 ピン）を修理した（Fig. 2.9.5-5）。

◆動作試験

CCR からのタイミング信号が復旧していなかったため、アウトプットレジスタを用いてパルス信号を発生させ、すべてのモニター機器の動作確認を実施した。陽子ビームに起因する信号は入力されていないが、通常観測されている程度のノイズ信号が観測されていることから、モニターシステム全般として正常に動作していることを確認した。

以上、3NBT モニター設備に関しては、計測システムの落下・転倒により機器の破損はあったが、モニター自身に破損や異常は特に見られず、震災以前の状態にほぼ復旧した。

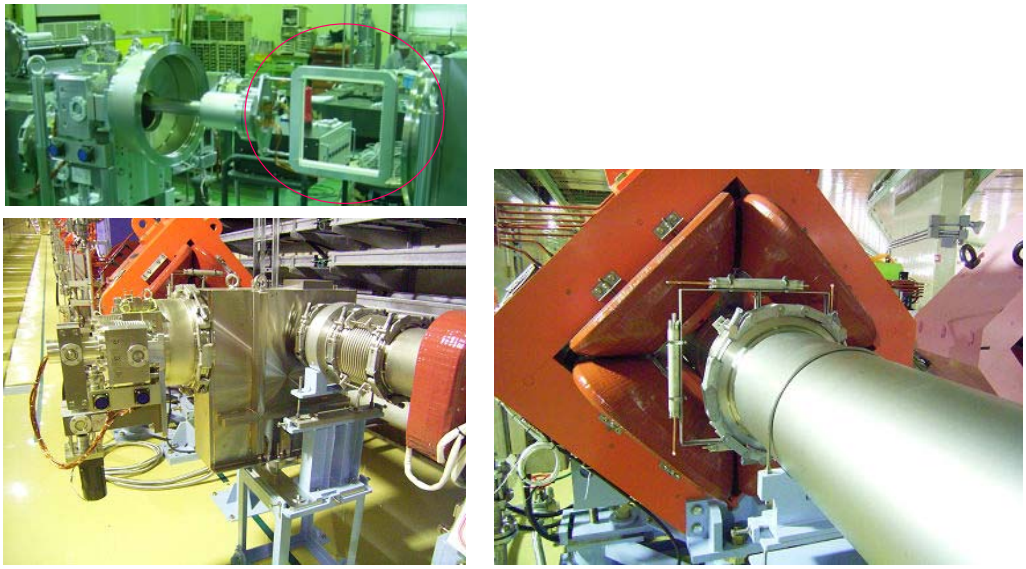


Fig. 2.9.5-1: 3NBT beam monitors (Left: Multi wire profile monitor, Right: Beam loss monitors placed at center of magnets)

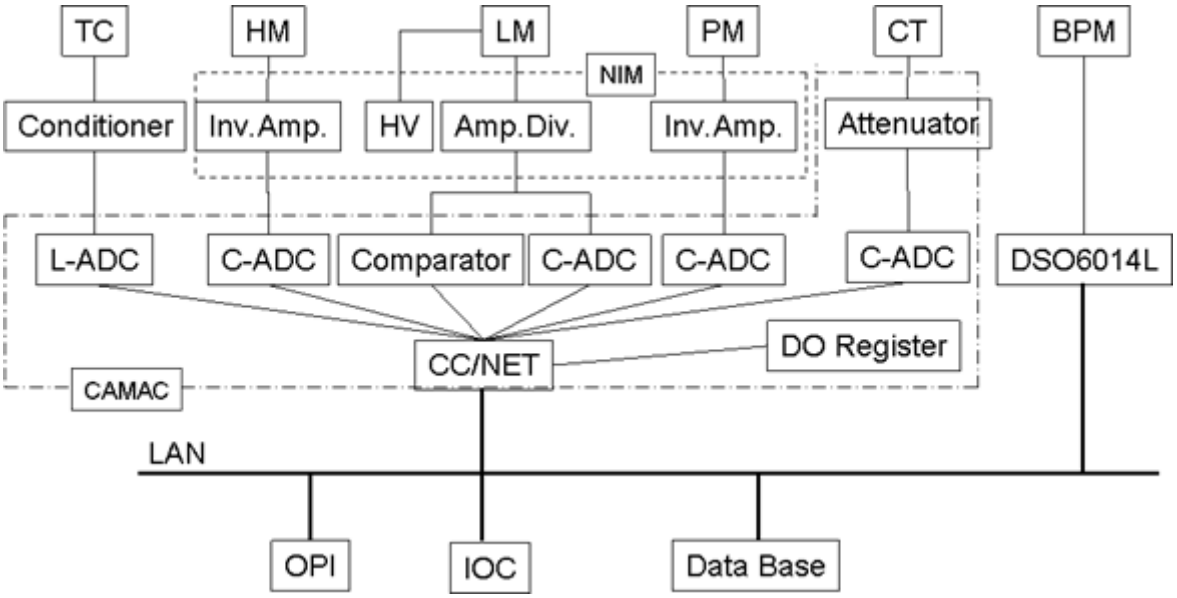


Fig. 2.9.5-2: Outline of 3NBT beam monitor data acquisitions system

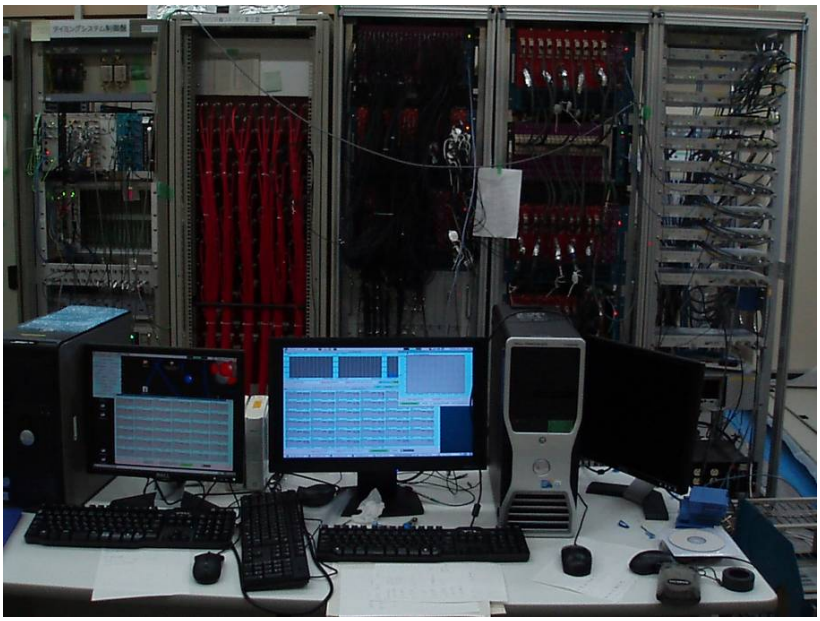


Fig. 2.9.5-3: Data acquisition instruments for 3NBT beam monitor system

Fig. 2.9.5-4: Status of puls generator and cable connectors broken by earthquake

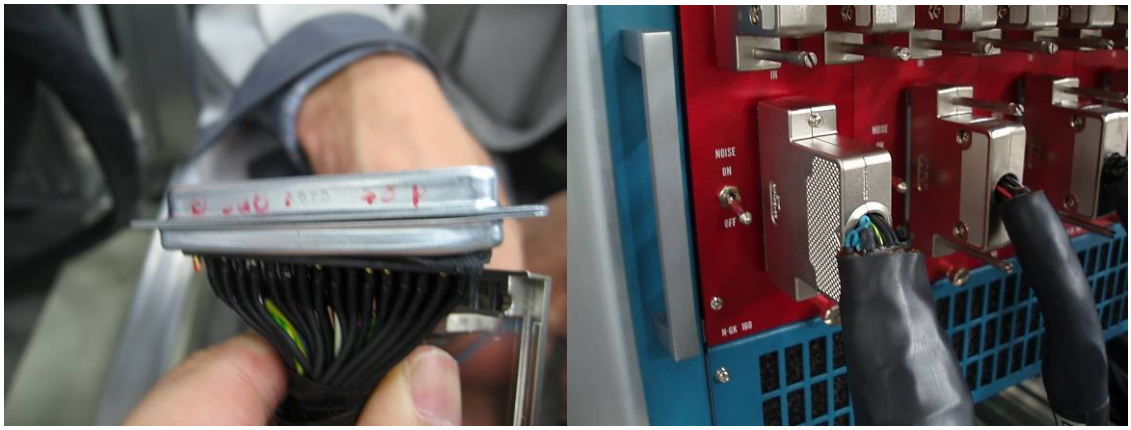


Fig. 2.9.5-5: Status of cable terminals for profile monitors before (left) and after (right) reparations

2.9.6　制御・インターロック

①制御システム

◇設備概要

3NBT の制御システムは電磁石電源、真空機器各種、プロファイルモニター挿引の制御、および冷却水、漏水検知、漏電検知の監視を目的に開発されたものである。制御システムは EPICS を利用して開発した。PLC は機器との通信に使用している。プロファイルモニター挿引と冷却水の動作については、手動操作と制御ソフトによる遠隔操作の両方で操作が行えるように PLC を設定している。PLC は制御ネットワークに接続され、4 つの Input/Output Controllers(以下 IOC)を通して間接的に制御されている。IOC は Linux ベースの PC でハートディスクドライブよりも故障率の低いシリコンディスクを利用している。さらに書き込みを禁止する事でデータの破損を防ぎ、停止操作を行わずに電源を落とす事を可能にしている。4 つの IOC のうち 2 台は電磁石電源の制御に用いて、残り 2 台をそのほかの機器の制御に使用している。

操作用インターフェース(OPI)は Java を用いて制作した。OPI のトップ画面は各機器の簡易的な状態の表示と各機器の制御を行うための画面に移動するためのボタンがある。数値履歴と

状態変移履歴を記録したデータベースサーバーには PostgreSQL を使用した。制御システムのデータの流れを以下の Fig.2.9.6-1 に示す。

◇地震時の状態

震災直前はビーム受入可能な状態だったため、ほぼ全ての機器が稼働中であった。UPS に接続された機器は冷却水を除く PLC とその PLC から給電を受けている漏水検知等と IOC であった。ネットワーク及びデータベースには UPS が接続されていなかったため停電により震災後の履歴は保存されていなかった (プロファイルモニターとバルブは計装空気の供給ガスを利用して動作する。UPS 接続機器と併せて Fig.2.9.6-1 内に肌色で表示、停電後即座に停止したものを水色で表示) 。停電を想定したインターロックは真空系のみ実装しているが、2.9.3 節で説明したように下流側の供給ガス配管の破断により閉止できない事態となっていた。

◇健全性確認・復旧

震災後の復旧において制御システムに異常はなかった。ただし、データベースが CCR で管理している PPS の信号の取得を行えなかったため、履歴データを SQL に送るプログラムが起動せず、急遽ダミーの信号をデータベースに送信する事で稼働させた。

②MPS

◇設備概要

MPS は J-PARC の中で 3NBT 施設も組み込まれている。受け入れ許可信号は元々Linac のために開発された MPS モジュールに接続されている。使用する MPS モジュールは 2 ブロックで、3NBT ダンプと水銀ターゲットの 2 つの陽子ビームの行き先で運転するために用意された。関連する信号は 3NBT 施設に陽子ビームを受け入れ前に準備できてなければならない。もしいずれかの MPS 信号が消失した場合、直ちにビームを停止される。受け入れ許可信号は以下のものを監視している：電磁石電源、通常/高速閉止バルブ、ビームダクトの真空ゲートバルブ、ビームロスモニター、ビームプラグの位置。すべての信号の状態は VME モジュールで稼働している IOC を通して EPICS レコードとして監視されている。

◇地震時の状態

地震時の状態は、ビーム停止中であったためにビームプラグ、偏向電磁石電源は MPS 発報中、その他の機器はビーム受入れ可の状態であった。地震時の停電により各機器からの信号は消失し、MPS 発報状態になっていたと思われる。

◇健全性確認・復旧

震災後の復旧については、今後各機器の復旧を待って、順次確認を行うこととした。

③PPS

◇設備概要

J-PARC の PPS はビーム運転中のインターロックエリアへの人の進入を阻止し、インターロックエリアに人がいるときにビーム運転を許可しないよう設計されている。3NBT 施設の PPS は J-PARC の全体の PPS の一部であり、中央制御室(CCR)で管理されている。RCS と 3NBT のトンネルの間に隔壁がないので RCS と 3NBT は同じインターロックエリアに属している。

ビームストッパは MLF へのビーム輸送を防止するために 3NBT ダンプと垂直偏向電磁石の間に設置している。ビームストッパ内のビームプラグは進行方向に対して 0.5m長さのステンレスの塊である。ビームプラグの挿引には 30 秒の時間がかかる。ビームプラグ下流の 2 つの偏向電磁石は PPS に組み込まれた安全マグネットと位置づけられている。

◇地震時の状態

地震時の状態は、ビーム停止中であったためにビームプラグが「挿入位置」、安全マグネット B02・B1U の偏向電磁石は停止中であった。地震時のログを確認したところ、ビームプラグの「挿入位置」信号が ON／OFF を 2 度繰り返していることが分かった。このことによりビームプラグが地震により動いたと推測される。

◇健全性確認・復旧

制御盤、非常停止総合盤、監視カメラの外観を確認し異常のない事を確認した。制御盤通電後、安全マグネット、ビームプラグへの許可信号が正常に送られることを確認した。ビームプラグについては動作試験を行ったが、2.9.3 節に記載したように、正常動作せず、確認したところベアリングに破損が見つかった。その他、非常停止総合盤、監視カメラ、制御盤は PPS 定期点検にて健全性を確認していった。

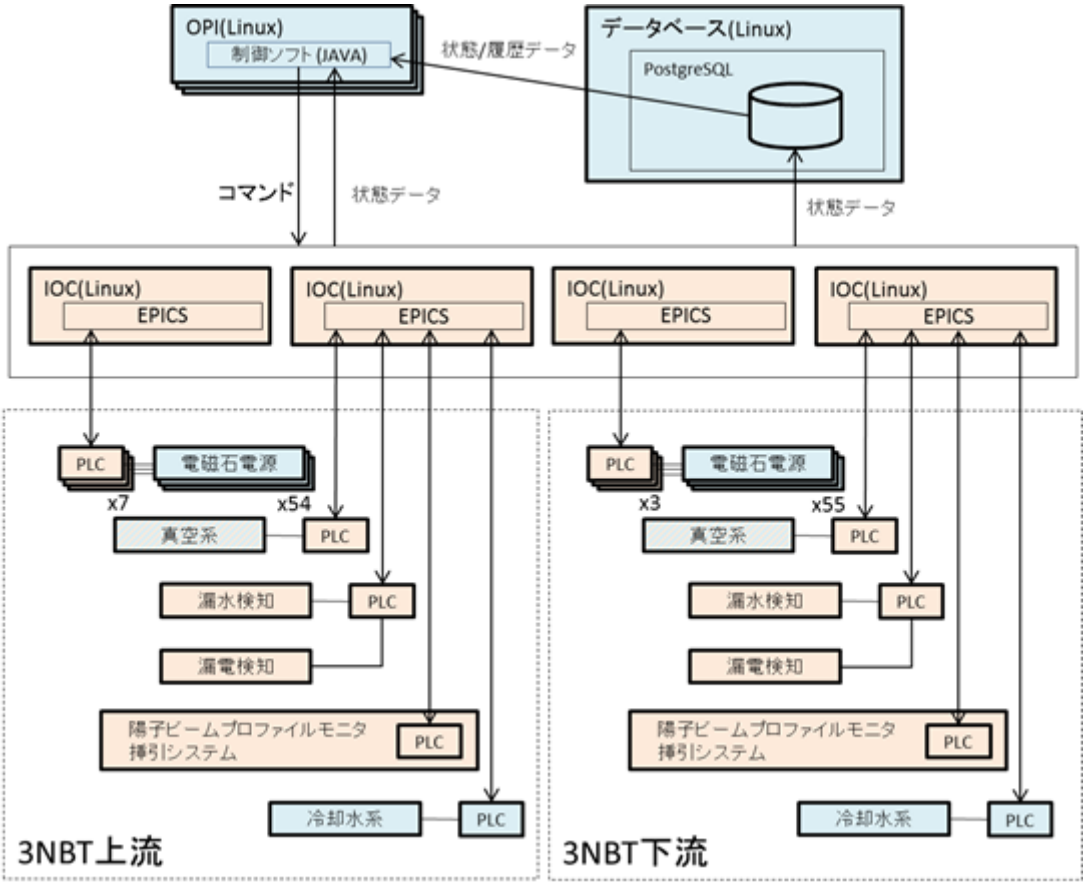


Fig.2.9.6-1: Data flow of 3NBT control System

2.9.7　陽子ビーム窓

加速器の超高真空領域とヘリウムベッセルのヘリウム雰囲気を仕切るために陽子ビーム窓がある。陽子ビーム窓にはダイアフラムを膨らませることによりシール機能を果たすピローシールがある。また、ビームがどのような状態で運転できているか監視するためのビームモニターが内蔵されている。

震災後にはピローシールを加圧しているヘリウムが失われたために、シール機能を果たしていなかった。地震の振動によりシール面が擦れて、シール性能が悪化することが懸念されたので、リーク試験をおこないシール性能の確認を行った。ヘリウムリーク検出器をピローシールの中間排気ラインに接続し、陽子ビーム窓の外周部にヘリウムを拭きかけ中間排気ラインに侵入するリーク測定を行った。この結果、ヘリウムを吹き付けて 30 秒経過した時点での中間排気へのリークが $1.2\mathrm{x}10^{-4}\mathrm{Pam}^3/\mathrm{s}$ となっていることが確認された。これは陽子ビーム窓を初めて据付たときの値とほぼ同じであるので、シール機能としては問題ないことが確認できた。

陽子ビーム窓にはモニターが内蔵されているが、工学内視鏡を用いてモニターの外観状態の確認を行った。内視鏡の分解能が十分でないので、はっきりとは分からないが、プロファイルモニターのセンサーワイヤーが切れている等の不具合は確認されなかった。また運転時には陽子ビーム窓本体に循環供給される冷却水が震災後に長期間停止状態になったため、機器の腐食

等も懸念し、工学内視鏡でその状態確認も試みたがよく分からなかった。その後、冷却水の循環供給試験を行った結果、流量や圧力とも震災前の正常な状態をほぼ再現し、機器の破損や動作異常は特に見られなかった。

参考文献

2.9-1) S. Sakamoto et al.: “Design Report on the 3-GeV Proton Beam Transport Facility (3NBT) of High Intensity Proton Accelerator Facility Project (J-PARC)”, JAERI-Tech 2004-020(2004) (in Japanese)

2.9-2) S. Meigo et al.: “Evaluation of the 3-GeV proton beam profile at the spallation target of the JSNS”, Nucl Instr. and Meth Phys Res. A 562 (2006) pp.569-572

2.9-3) S. Meigo et al.: “Beam Commissioning of Spallation Neutron and Muon Source in J-PARC”, 1st International Particle Acclerator Conference, IPAC 10, MOPEB066 (2010)

2.9-4) S. Meigo et al.: “Beam Commissioning for Neutron and Muon Faclity at J-PARC”, Nucl Instr. and Meth Phys Res. A 600 (2009) pp.41-43

2.9-5) H. Fujimori et al.: “Radiation Resistant Magnets for the J-PARC Muon Facility”, Nucl Instr. and Meth Phys Res. A 600 (2009) pp.170-172

2.9-6) P. Strasser et al.: “Alignment and Shields in the M2 primary proton beamline at J-PARC”, Nucl Instr. and Meth Phys Res. A 600 (2009) pp.154-156

2.10 アライメント

東日本大震災は、建屋や建屋周辺の破損状況から、J-PARC の装置のアライメントへ致命的な損傷を被ったと考えられた。復旧のためのアライメント計画を立てるあたり、まず、震災による建屋や装置の変動量及び変動傾向を把握する必要があった。そこで、J-PARC 全体の変動を確認するために、全体アライメントグループを中心に J-PARC 内の基準に対する GPS 測量と水準測量を行った。それと平行して、3NBT 施設及び MLF 施設内の変動を確認するために、物質生命科学ディビジョンメンバーによる 3NBT および MLF における基準点に対するトラバース測量と水準測量を行った。本節では、震災による各基準点や装置の変動量の測定結果を示し、今後の方針についての考えを述べる。

2.10.1 J-PARC 全体における 3NBT・MLF のアライメント

◇震災による影響

J-PARC 全体座標における 3NBT 及び MLF の水平変動を確認するために、全体アライメントチームにより、震災後の平成 23 年 5 月に、GPS 測量を中心に、トラバース測量を併用して、J-PARC の屋外及び各施設に設置されている基準点の座標を測量した（測量担当業者は株式会社パスコ）[2.10-1)]。主要基準点は、GPS 測量により、付属基準点は、トラバース測量により、座標が測定された。GPS 測量での精度は、±5mm 程度である。その測量結果を平成 22 年 8 月に測定した座標値と比較した結果を、水平変動ベクトルとして、Fig 2.10.1-1 に示す。変動量ベクトルの大きさを見ただけでも、各施設の変動は非常に大きく、震災による施設への影響は甚大であることがわかる。3NBT トンネルは、J-PARC 全体から見て、北から北西方向に、MLF は、南から南東方向にそれぞれ 20mm 以上移動していることがわかる。

同様に、J-PARC における水準変動を確認するために、同じく全体測量チームにより、震災後の平成 23 年 7 月に水準測量により、J-PARC の建屋内外に設置されている水準点の水準データを測量した（測量担当業者は株式会社パスコ）[2.10-2)]。J-PARC の地上水準点における震災前後の水準変動を Fig 2.10.1-2 に示す。JRR-3 の水準点を固定点扱い（変動しない）とし、基準とした。その結果、MLF の近傍にある BUSHITSU、MLF_01、02、03、04 の各点は、20mm～50mm の沈下していることがわかった。

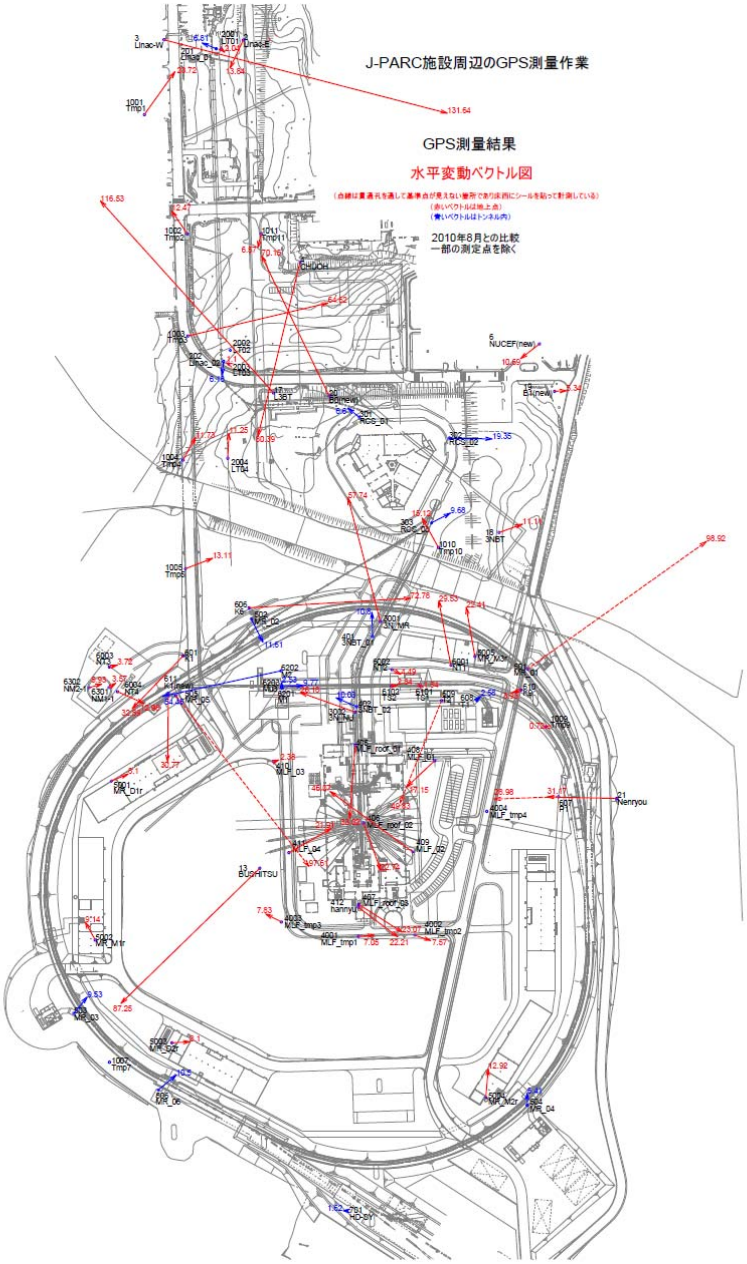


Fig 2.10.1-1: Horizontal displacement vectors of standard points in J-PARC facilities around the earthquake

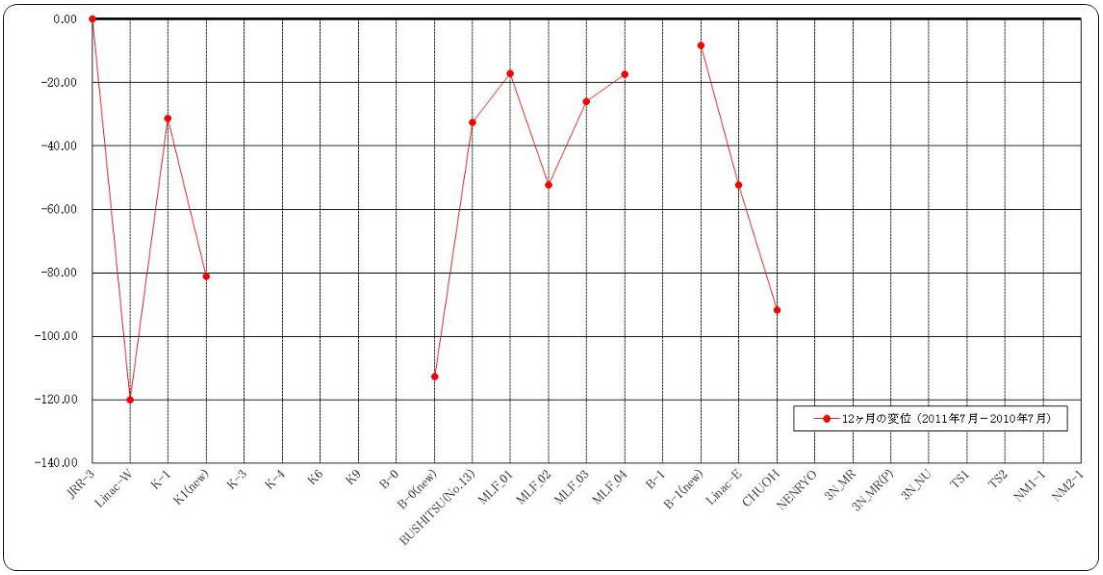


Fig 2.10.1-2: Level displacements of standard points on ground
in J-PARC facilities around the earthquake

2.10.2　MLF アライメント

◇震災による影響

震災による MLF 内外の水平変動を確認するために、MLF 内外に設置されたマーカーや基準点の座標測定を行った。大型機器取扱室は、レーザートラッカーにより、それ以外の実験ホール、屋外については、トータルステーションにより、トラバース測量を行った。1 級基準点測量相当の測量精度を満足するようにレーザートラッカーによる測量では、正反の 2 回測定とし、トータルステーションによる測定では、2 対回測定を行った。全体測量チームにより測量された（2.10.1 参照）外部基準点を固定点とし、厳密網平均計算を行った。これらの測量の座標値を、震災前に測量した座標値から変動量（水平変動ベクトル）を Fig 2.10.2-1 に示す。この図に記載の変動ベクトルは、中性子源中心位置との相対関係を観測できるように、中性子源中心位置を不動点として変換されている。Fig 2.10.2-1 図に示す楕円は、網平均計算から得られた誤差楕円である。この結果から、MLF 建屋内の変動量は思ったより小さい。一方、長尺建屋や第 3 実験ホールは、30mm 以上の変動が見られる。これは、MLF 建屋は杭構造であり、長尺建屋と第 3 実験ホールは、べた基礎であったため、基礎の違いにより、震災の影響が大きく異なったためと考えられる。

震災による MLF 内外の水準変動を確認するために、MLF 内外に設置された高さ基準点の水準測量を行った。Fig 2.10.2-2 に、震災前の値との差を示す。BL23 の生体遮蔽部ダクトにある高さの罫書きが中性子源中心に近く、中性子源中心と同じ変動をすると考えられたので、この罫書きを基準とした。この図から、MLF 建屋内の変動は、最大でも 5 ㎜である。一方、第 3 実験ホールは、最大で 142 ㎜、長尺建屋は、最大で 88 ㎜沈下していることが分かった。とくに長尺建屋は、下流側の実験装置本体部では、30 ㎜程度の沈下量であるのに対し、長尺建屋と MLF 建屋の接続部分で、88 ㎜と最も沈下している。これらの MLF 周辺の建屋の変動が大

きい理由は、やはり基礎構造の違いに起因するものと考えられる。外部基準点も、建屋に近接部を除けば、大きな変動はない。

◇結論と今後の方針

MLF における変動に関する測量から得られた結論と、今後の基準点設置する方針は、次のとおりである。

・MLF 建屋の変動は、思ったほど大きくなかったため、建屋内の基準点に関しては、再設置作業を行わないこととした。実験ホールに設置している床マーカーや生体遮蔽部のダクト罫書きを正としてアライメント行う。
・長尺建屋は、基準点設置を含め、アライメントしなおす必要がある。
・第 3 実験ホールは、基準点設置を含め、アライメントしなおす必要がある。
・今後の変動を監視するために、定期的に、水平座標測量、水準測量を行っていく。
・今後の水平変動の監視を容易にし、測定精度をあげるために、実験ホール内の基準点を増やしていく。

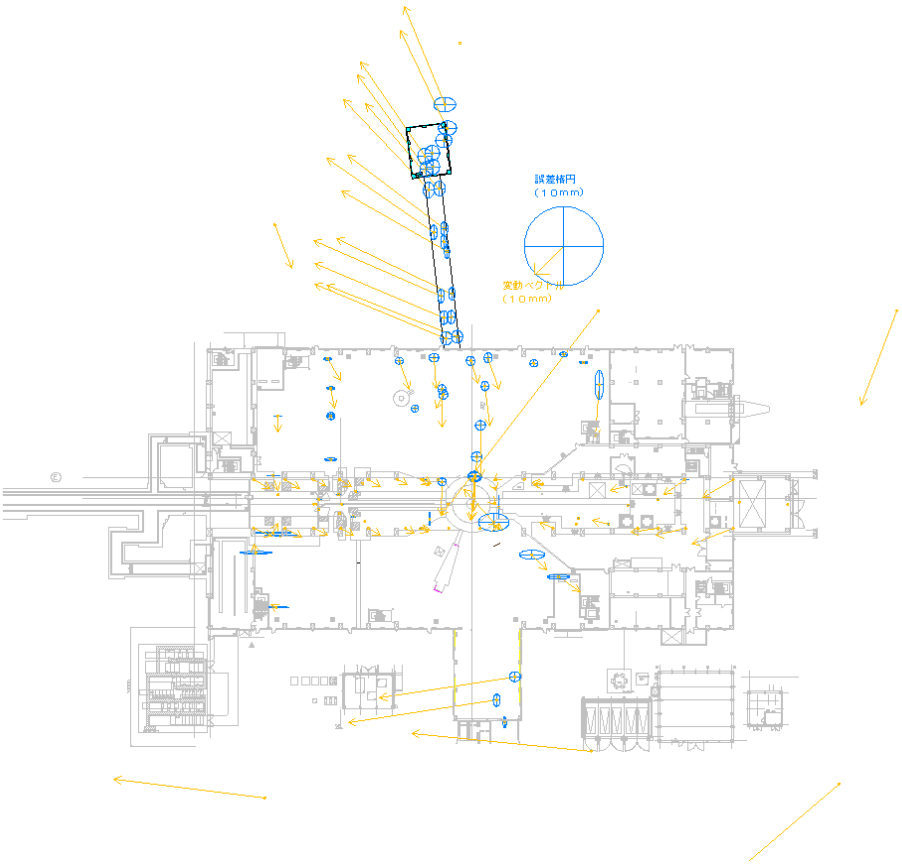


Fig 2.10.2-1: Horizontal displacement vector of standard points and markers in MLF building around the earthquake Ellipses at each vectors display coordinate data errors obtained from the net-adjustment calculation

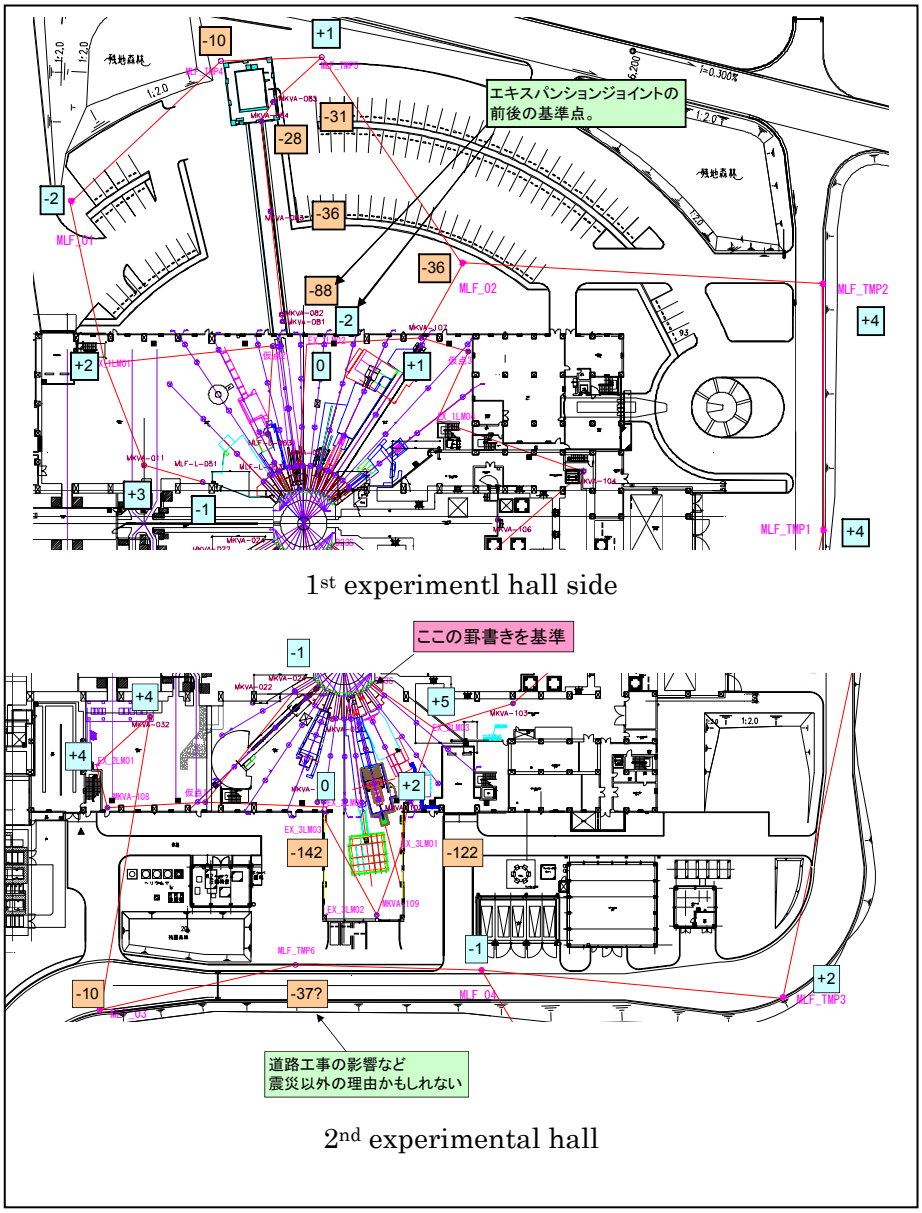


Fig 2.10.2-2: Level displacement of standard points and markers in MLF building around the earthquake

Upper figure: 1st experimental hall side Lower figure: 2nd experimental hall side

Scribe line on duct at biological shieldings in BL23 was used as the standard height.

2.10.3 3NBT 機器アライメント

3NBT の機器は 0.2m 以下の精度でアライメントすることが必要であるが、地震により大きく設計から逸脱したことが予想される。本格的なアライメントは H23 年の 9 月以後に行うが、ビーム受け入れ時期までの準備期間が十分でないので、全体的な様子を早急に捉える必要がある。また、トンネル内では壁が崩壊しているのでレーザートラッカーを用いた測量は簡単にで

きる状態ではなかった。そこで軽量のトータルステーションを用いて多角測量を行った。水平方向の測量の結果を Fig 2.10.3-1 に示す。図では得られた成果と H22 の座標を元にフリーネット解法で計算を行った。この結果、エクスパンションジョイントを境界として、電磁石が大きく変動していることがわかる。上流のエクスパンションジョイントでは、8mm 程度収縮しているのがわかる。また、下流ではビーム進行方向に 30mm 離れ、ビーム直角方向に 6mm 程度ずれているのがわかった。なお座標の精度としては 0.3mm 程度で測定できた。

この成果を元に偏向電磁石の中心位置を基準としてビームラインを新たに構築した。このラインからのずれを Fig 2.10.3-2 に示す。図では垂直方向のずれと水平方向のずれを記載している。垂直方向のずれが最大で 10mm 程度あり、水平方向のずれの最大は 4mm 程度となっている。垂直方向は、上流のエクスパンションジョイント(EXP1)で 2mm 程度の段差を生じており、その後に MR トンネル上部で 1mm 程度の凹みを観測している。また、ニュートリノディケイボリュームにおいても 3mm 程度の凹みを観測している。トンネルは杭基礎の構造となるが、MR トンネルとディケイボリューム上部においては杭の間隔が長くなり、橋脚構造を持つ。このために、このような不等沈下が生じたと思われる。

最下流部ほど沈下は著しいが、ビームラインの高さはターゲットに近い最下流部が基準となる。その一方で、水平偏向部の上流側では 2mm の上昇がみられるので、垂直方向としては最大で 12mm の変動が必要となる。アライメントはほぼ毎年おこなってきたが、12mm という大きな移動は行ったことがないので、かなり長い時間を要すると思われる。

水平方向に関しては全体的に緩やかな移動となる。ただし下流エクスパンションジョイント(EXP2)においては、6mm の段差が見られるので、この移動が必要となる。

地震により地殻変動が活性化されたことが考えられる。3NBT では定期的に水準測量を実施している。8 月になっても月に 0.5mm の変動が観測され、まだ安定した動きは観測されていない。9 月には、トンネル上部で盛土工事が実施されており、その影響も考慮する必要がある。以上のことより、当面は地殻変動を定期的に観測するとともに、ビーム運転が開始されたならば短い間隔でビーム軌道等を観測することが要求される。

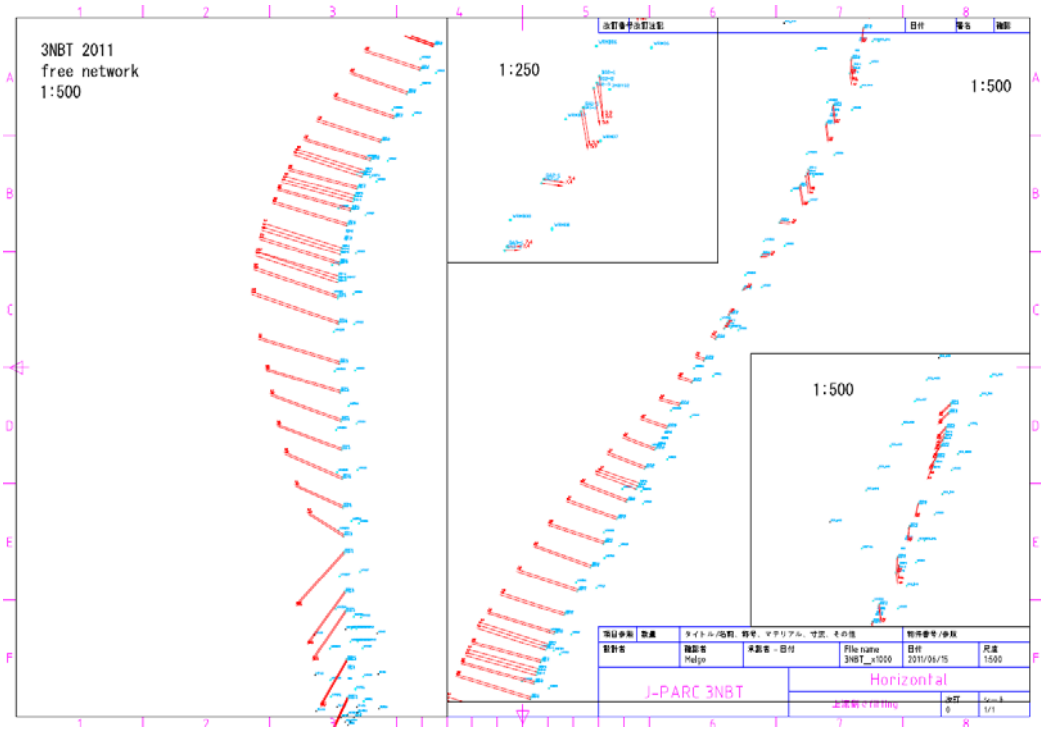


Fig 2.10.3-1: Result of free survey network by the total station

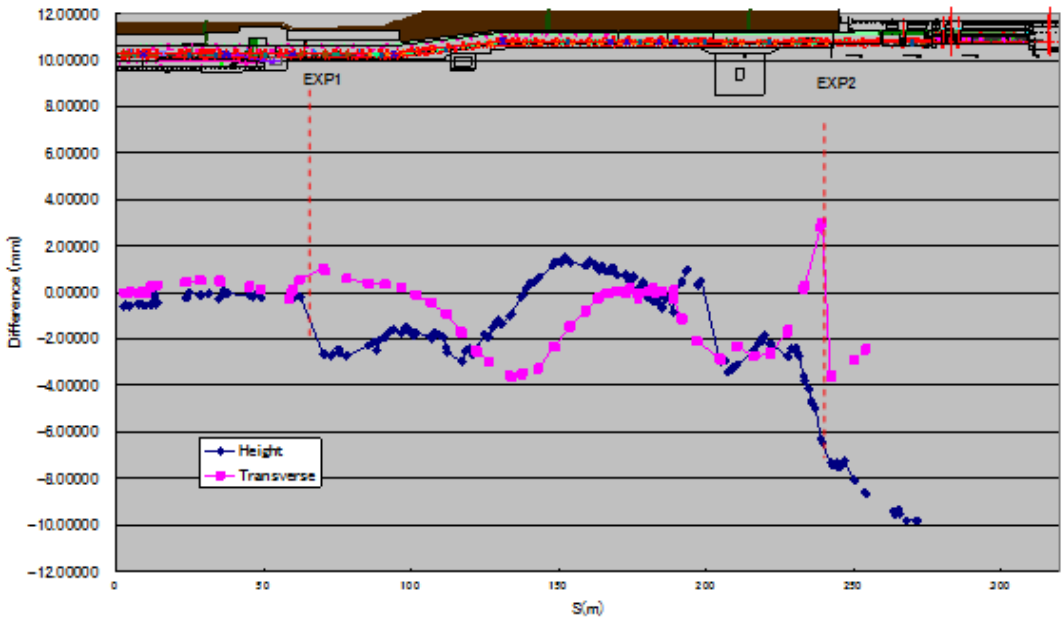


Fig 2.10.3-2: Displacement of beam transfer line in horizontal and vertical

参考文献

2.10-1) 谷ら、第 8 回日本加速器学会年会（2011 年 8 月 1～3 日）、つくば、茨城（2011）
2.10-2) 原田ら、第 8 回日本加速器学会年会（2011 年 8 月 1～3 日）つくば、茨城（2011）

３．まとめ

本報告では、東日本大震災における J-PARC/MLF の中性子源ステーション機器の挙動、被害、健全性確認の調査を行い、被害を受けたものについては復旧方法を検討した。震災当日、MLF では、幾つかの機器で大きな揺れを感知した後、外部電源が喪失し、全循環システムが自動停止した。水素は設計通り屋外に放出され、機器異常による水銀、水素、放射性ガスの漏えいも生じず、大よそ想定通りの挙動を示した。一方、遮蔽体ブロックのずれ、建屋周辺の地盤沈下による外部供給配管の破断などが起こった。この配管の破断による圧縮空気の圧力低下は、空気操作弁や台車固定装置などに影響を及ぼしたが、主要機器の大きな破損までは至らなかった。

3 月下旬からは、目視による点検、照明、制御機器電源などの最低限のユーティリティを復旧させた後に、電気信号・計器表示よる被害調査という手順で進め、4 月中旬には、被害状況と復旧計画を一通りまとめるまでに至った。MLF・3NBT 施設では、設備機器よりも建屋に対する被害が大きく、その影響で、駆動機器電源、給排水、圧縮空気などのユーティリティの使用が厳しく制限された環境下で、機器の実機駆動による被害調査と復旧作業を実施することとなった。また震災は、機器アライメントにも大きな影響を及ぼし、まず施設の各基準点や装置の変動量を測定し、それに基づき機器の再アライメントを実施していった。

今回の大震災に対する中性子源ステーションの挙動や被害状況を解析・調査した結果、本ステーションの緊急事態に対する安全設計の妥当性を概ね実証することができたといえる。更に震災時の挙動、被害、復旧方法を纏めた本報告書は、単に本ステーションの安全設計の実証に留まらず、当該施設の設計・構築・改造に対し、非常に貴重で有用な知見を与えることが期待できる。

謝辞

東日本大地震の J-PARC/中性子源ステーションに対する影響調査及びその復旧作業は、J-PARC センターの永宮正治センター長、池田裕二郎副センター長、さらに新井正敏ディビジョン長、加藤崇副ディビジョン長を始めとする物質・生命科学ディビジョンに所属するスタッフの方々の協力の上で進められました。最後に本報告書を纏めるにあたり、甚大なるご協力を頂いた物質・生命科学ディビジョンのスタッフの皆様、及び J-PARC センターの多くのスタッフの皆様に改めて感謝致します。

付録　中性子源施設の復旧前後の状況

Aerophotography of J-PARC

③ Before Restoration

③ After Restoration

消火栓
④ Before Restoration

消火栓
④ After Restoration

⑤ Before Restoration

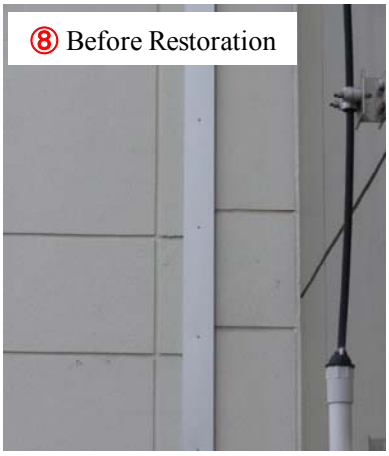
⑤ After Restoration

⑥ Before Restoration

⑥ After Restoration

⑦ Before Restoration

⑦ After Restoration


⑧ Before Restoration

⑧ After Restoration

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	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	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方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
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

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=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています