

3GeV シンクロトロンビーム入射部における 放射線遮蔽体の検討及び設置作業報告

Report of the Design Examination and the Installation Work for the Radiation Shield
at the Beam Injection Area in the 3 GeV Synchrotron

仲野谷 孝充 神谷 潤一郎 吉本 政弘 高柳 智弘
谷 教夫 古徳 博文 堀野 光喜 柳橋 亨
竹田 修 山本 風海

Takamitsu NAKANOYA, Junichiro KAMIYA, Masahiro YOSHIMOTO, Tomohiro TAKAYANAGI
Norio TANI, Hirofumi KOTOKU, Koki HORINO, Toru YANAGIBASHI
Osamu TAKEDA and Kazami YAMAMOTO

原子力科学研究部門
J-PARC センター
加速器ディビジョン

Accelerator Division
J-PARC Center
Sector of Nuclear Science Research

November 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、
下記まで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ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2021

3GeV シンクロトロンビーム入射部における放射線遮蔽体の検討及び設置作業報告

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門
J-PARC センター 加速器ディビジョン

仲野谷 孝充、神谷 潤一郎、吉本 政弘、高柳 智弘、谷 教夫、
古徳 博文*1、堀野 光喜*2、柳橋 亨*2、竹田 修*2、山本 風海

(2021 年 7 月 27 日受理)

J-PARC 3GeV シンクロトロン加速器ではビーム出力の増強に伴い、ビーム入射部付近では放射化による機器の表面線量と空間線量率が年々増加している。一方でビーム入射部には人の手によるメンテナンスが欠かせない機器が多数存在しており、作業者の被ばく低減が重要な課題であった。

そのため、本加速器施設を管理する J-PARC センター 加速器ディビジョン 加速器第二セクションにおいて、作業者の被ばく低減のための遮蔽体設置を目的としたワーキンググループ「入射部タスクフォース」を設立し、遮蔽体の構造や設置方法等について検討を重ねてきた。結果、ビーム入射部の構造を一部更新し、必要な際に容易に取付けが可能な非常設型の遮蔽体を設置することとした。そして、2020 年夏期メンテナンス期間に遮蔽体の設置に必要な更新作業を実施し、遮蔽体の設置を行った。

更新作業は高線量下で長期間に渡るため、作業員の被ばく量を抑えることが重要な課題であった。このため、事前に入念に作業計画と作業手順を作成し、作業期間中も様々な被ばく低減対策と個々の被ばく管理を行った。これにより、作業員の被ばく線量を管理目標値以下に抑えることができた。

本作業の実施により、ビーム入射部に取付け取外し可能な遮蔽体を設置できるようになった。この遮蔽体により入射部近傍での作業時の被ばく線量の低減に寄与できることが確認できた。夏期メンテナンス期間中のほぼすべてで入射部を占有する大規模な作業となったが、今後の保守作業における被ばく抑制のためには非常に有意義な作業であったと考えられる。

J-PARC センター：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

*1 アルバックテクノ株式会社 (2021 年 3 月まで技術開発協力員)

*2 株式会社 NAT

Report of the Design Examination and the Installation Work for the Radiation Shield
at the Beam Injection Area in the 3 GeV Synchrotron

Takamitsu NAKANOYA, Junichiro KAMIYA, Masahiro YOSHIMOTO, Tomohiro TAKAYANAGI,
Norio TANI, Hirofumi KOTOKU*¹, Koki HORINO*², Toru YANAGIBASHI*², Osamu TAKEDA*²
and Kazami YAMAMOTO

Accelerator Division, J-PARC Center, Sector of Nuclear Science Research,
Japan Atomic Energy Agency
Naka-gun, Tokai-mura, Ibaraki-ken

(Received July 27, 2021)

Since a user operation startup, the 3GeV synchrotron accelerator (Rapid-Cycling Synchrotron: RCS) gradually reinforced the beam power. As a result, the surface dose rate of the apparatus located at the beam injection area of the RCS, such as the magnet, vacuum chambers, beam monitors, etc., increases year by year. The beam injection area has many apparatuses which required manual maintenance, so reducing worker's dose is a serious issue.

To solve this problem, we have organized a task force for the installation of the shield. The task force has aimed to optimize the structure of the radiation shield, construct the installation procedure with due consideration of the worker's dose suppression. As the examination result of the shield design, we have decided to adopt removal shielding that could be installed quickly and easily when needed. We carried out shield installation work during the 2020 summer maintenance period.

The renewal work required to install the shielding has been carried out in a under high-dose environment. For this reason, reducing the dose of workers was an important issue. So, we carefully prepared the work plan and work procedure in advance. During the work period, we implemented various dose reduction measures and managed individual dose carefully. As a result, the dose of all workers could be kept below the predetermined management value.

We had installed removal shielding at the beam injection area in the 2020 summer maintenance period. We confirmed that this shield can contribute to the reduction of the dose during work near the beam injection area. It was a large-scale work to occupy the beam injection area during almost of the summer maintenance period. However, it is considered very meaningful for dose suppression in future maintenance works.

Keywords: Radiation Shield, Radiation Management, Synchrotron Accelerator, RCS, Installation Work

* 1 ULVAC TECHNO, Ltd. (Collaborating Engineer until March 31, 2021)

* 2 NAT Corporation

目次

1. はじめに	1
2. 3GeV シンクロトロン加速器と入射部の概要	2
3. 入射部タスクフォースにおける遮蔽体検討	4
3.1 入射部における遮蔽体設置の必要性	4
3.2 遮蔽体の検討	5
3.3 遮蔽体と新架台ユニットの設計	10
4. 更新作業	13
4.1 作業概要	13
4.2 水平シフトバンプ電磁石用作業台の設計と設置	14
4.3 レーザートラッカーによるチャンバーB と MWPM4 の測量	15
4.4 チェンバーB 架台ユニット更新作業	17
4.5 荷電変換フォイル観測系更新作業	23
5. 遮蔽体設置効果の検証	26
6. 作業管理・被ばく管理	27
6.1 事前線量測定と作業準備	27
6.2 被ばく低減対策	27
6.3 線量測定と被ばく管理	29
6.4 被ばく線量の実績	30
7. まとめ	32
謝辞	32
参考文献	33

Contents

1. Introduction	1
2. Over view of 3GeV synchrotron injection area	2
3. Consideration of radiation shielding by task force	4
3.1 The necessity of radiation shielding for injection area	4
3.2 Consideration of radiation shielding	5
3.3 The design of shielding and reinforced new mount	10
4. Replacement work	13
4.1 Overview of replacement work	13
4.2 Design and installation of workbench on horizontal shift bump magnet	14
4.3 Position survey and alignment of chamber B and MWPM4 with laser tracker	15
4.4 Replacement work of mount unit for chamber B	17
4.5 Replacement work of charge exchange foil observation system	23
5. Verification of shielding installation effect	26
6. Work management and radiation control	27
6.1 Dose rate pre-measurement and work preparation	27
6.2 Radiation dose reduction measures	27
6.3 Dose rate measuring and radiation control	29
6.4 Actual result of total radiation dose of workers	30
7. Conclusions	32
Acknowledgment	32
References	33

図リスト

図 2-1	3GeV シンクロトロン加速器ビームライン概略図	34
図 2-2	入射部機器配置図	34
図 2-3	入射部中心付近機器配置図	35
図 2-4	入射ビーム及び周回ビームの軌道模式図	35
図 3.1-1	RCS ビーム入射部における残留線量の例	36
図 3.1-2	チャンバーB 及びシフトバンプ電磁石セラミックスダクトの外観	37
図 3.1-3	入射部における残留線量の測定値及び計算値	38
図 3.1-4	実際にこれまで入射部で行われた保守作業の作業エリアの例	38
図 3.1-5	シフトバンプ用セラミックスダクト撤去時の写真	39
図 3.2-1	ビーム入射点のチタン製真空容器の設置状況及び真空容器単体の写真	40
図 3.2-2	第1 荷電変換フォイル周辺の空間の比較	40
図 3.2-3	第2 荷電変換フォイルの設置位置に対するビームダンプへのビーム軌道	41
図 3.2-4	入射部の系を変更した場合の遮蔽体	41
図 3.2-5	入射部の系を変更した場合の遮蔽体設置前後での図	42
図 3.2-6	改良後の入射点真空容器の検討図	42
図 3.2-7	真空容器の変位と応力の計算結果	42
図 3.2-8	シフトバンプ電磁石の磁場分布の比較	43
図 3.2-9	シフトバンプ電磁石電源系の比較	43
図 3.2-10	シフトバンプ電磁石 2,3 の磁場分布の比較	44
図 3.2-11	電子軌道とエレクトロンキャッチャーの位置の比較	44
図 3.2-12	新しい真空容器とエレクトロンキャッチャーの位置関係	45
図 3.2-13	現行のシフトバンプ用セラミックスダクトの RF シールド施工図	46
図 3.2-14	シフトバンプ用セラミックスダクトの全長の比較	47
図 3.2-15	セラミックスダクト RF シールドのダンピング抵抗の施工図	47
図 3.2-16	各ダンピング抵抗値に対する RF シールドへの誘導電圧	48
図 3.2-17	ダンピング抵抗の励磁電流に対する誘導電圧、消費電力、抵抗温度の関係	48
図 3.2-18	入射部変更における作業工程検討のためのネットワーク図	49
図 3.2-19	現行の系への遮蔽体設置の検討図	51
図 3.2-20	現行の系へ設置する遮蔽体の効果	52
図 3.3-1	入射部全体（チャンバーB 架台更新前）	56
図 3.3-2	既設チャンバーB 架台ユニット	56
図 3.3-3	前面（通路側）からの景観	57
図 3.3-4	上面からの景観	57
図 3.3-5	内周側遮蔽体構造	58
図 3.3-6	外周側遮蔽体構造	58
図 3.3-7	チャンバーB 新架台ユニット全体図	59
図 3.3-8	遮蔽体を設置した状態のチャンバーB ユニット	59
図 3.3-9	ユニット上部計算モデル	60

図 3.3-10	上から見たユニット上部計算方向（図右側が通路側）	60
図 3.3-11	ユニット上部変位量	61
図 3.3-12	ユニット上部応力強さ	61
図 3.3-13	遮蔽体設置時のユニット上部計算モデル	62
図 3.3-14	遮蔽体設置時のユニット上部変位量	62
図 3.3-15	遮蔽体設置時のユニット上部応力強さ	63
図 3.3-16	ユニット下部計算モデル	64
図 3.3-17	上から見たユニット下部計算方向（図右側が通路側）	64
図 3.3-18	ユニット下部変位量	65
図 3.3-19	ユニット下部応力強さ	65
図 4.1-1	更新作業の流れ	67
図 4.1-2	架台ユニット更新前後の模式図	67
図 4.1-3	荷電変換フォイル観測系模式図	68
図 4.2-1	水平シフトバンプ電磁石 2 及び 3 の周辺	69
図 4.2-2	水平シフトバンプ電磁石と作業台の組合せ模式図	69
図 4.2-3	製作した作業台	70
図 4.2-4	作業台設置作業の様子	70
図 4.2-5	作業台設置作業終了後の入射部の様子	70
図 4.3-1	精密アライメントの基準座標系（平面図）	71
図 4.3-2	精密アライメントの基準座標系（側面図）	71
図 4.3-3	位置確認測量作業写真	72
図 4.3-4	アライメント作業写真	73
図 4.4-1	新架台ユニットの組立	76
図 4.4-2	新架台ユニットへの遮蔽体設置	76
図 4.4-3	チャンバーB と架台ユニット（更新前）	76
図 4.4-4	チャンバーB 取外し手順の概略	77
図 4.4-5	MWPM4 専用吊り治具	78
図 4.4-6	MWPM4 取外し	78
図 4.4-7	MWPM4 用 X-Y ステージ取外し	78
図 4.4-8	MWPM4 用架台取外し	78
図 4.4-9	ブランクフランジの取付け	78
図 4.4-10	接続ベローズの切り離し	78
図 4.4-11	チャンバーB の取外し作業（1）	79
図 4.4-12	チャンバーB の取外し作業（2）	79
図 4.4-13	運搬用架台に固定（線量計測）	79
図 4.4-14	架台ユニット取外し中の入射部	79
図 4.4-15	コンクリート遮蔽体による区画	80
図 4.4-16	新型架台ユニットへの仮組込み	80
図 4.4-17	作業ブースの構造	80
図 4.4-18	作業ブース外観	80

図 4.4-19	チャンバーB 内部の除染作業	80
図 4.4-20	除染完了後のチャンバーB 内部	80
図 4.4-21	W1 真空窓の取外し	81
図 4.4-22	取外した W1 真空窓	81
図 4.4-23	M1 反射鏡	81
図 4.4-24	光源反射板	81
図 4.4-25	エレクトロンキャッチャー全体	81
図 4.4-26	エレクトロンキャッチャー拔出作業	82
図 4.4-27	拔出し中のエレクトロンキャッチャー	82
図 4.4-28	チェーンクランプ交換前	82
図 4.4-29	割りプランプへの交換後	82
図 4.4-30	He リークテストの実施	82
図 4.4-31	分割された架台ユニット	82
図 4.4-32	チャンバーB 再設置手順の概略	83
図 4.4-33	ベースプレートの吊り込み	84
図 4.4-34	ベースプレートの設置	84
図 4.4-35	ベースプレート設置完了後	84
図 4.4-36	観測系ダクトの設置	84
図 4.4-37	X-Y ステージの吊り込み	85
図 4.4-38	架台ユニット下部設置完了後	85
図 4.4-39	チャンバーB の搬入	85
図 4.4-40	チャンバーB 再設置	85
図 4.4-41	ガスキットの装着	86
図 4.4-42	MWPM4 X-Y ステージの取付け	86
図 4.4-43	MWPM4 再設置	86
図 4.4-44	MWPM4 フランジ締結	86
図 4.4-45	チャンバーB と新架台ユニット	87
図 4.4-46	チャンバーB 内部構造物の干渉確認	87
図 4.5-1	荷電変換観測系の概略図	88
図 4.5-2	開放した W1-M2 間光路	88
図 4.5-3	レーザー照射治具の外観	88
図 4.5-4	レーザーポインターを回転させてターゲット板に照射した様子	89
図 4.5-5	W1 位置に設置した投影板に対する光軸確認の様子	89
図 4.5-6	観測系光学機器の取外しの様子	90
図 4.5-7	M2 後方での光軸確認	90
図 4.5-8	観測装置取外し	90
図 4.5-9	ガイド管挿入	90
図 4.5-10	M2 反射鏡更新前後の比較	91
図 4.5-11	M2 反射鏡に対する光軸確認	91
図 4.5-12	ダミーフォイルの外観	91

図 4.5-13	更新前後のダミーフォイル像の比較	91
図 4.5-14	観測系更新前後での実フォイル像の比較	92
図 5-1	入射部遮蔽効果の測定ポイント	93
図 5-2	遮蔽体設置前後での入射部内周側の線量率等高線図	94
図 5-3	遮蔽体設置前後におけるチャンバーB、Cからの距離に対する線量率の変化	95
図 5-4	遮蔽体設置前後における外周側各作業点に対する線量率の変化	95
図 6.1-1	入射部作業エリア	96
図 6.1-2	チタンダクトの線量減衰傾向	96
図 6.2-1	作業台上に設置した鉛マット（黄色）	97
図 6.2-2	ビームライン開口部に設置した鉛マット（灰色）	97
図 6.2-3	入射部作業エリア周辺に対する掲示による注意喚起	97
図 6.2-4	シフトバンブ電磁石導入バー保護金網の両側に配置したステップ	98
図 6.3-1	入射部作業エリアごとの線量率の予測値と実測値の経時変化	98
図 6.4-1	チャンバーB 架台更新作業における作業者の被ばく線量の積算値	99
図 6.4-2	荷電変換光路更新作業における作業者の被ばく線量の積算値	99

表リスト

表 3.1-1	セラミックスダクト撤去・据付時の作業者ごとの被ばく線量	53
表 3.1-2	入射部における保守作業例のまとめ	54
表 3.2-1	現行の系へ遮蔽体を設置した場合の各作業と最大被ばく線量	55
表 3.3-1	上部ユニット計算結果	66
表 3.3-2	下部ユニット計算結果	66
表 4.3-1	取外し前と再設置後のトラッカー測定の結果	74
表 4.3-2	取外し前と再設置後の傾斜測定の結果（ベースプレート及びチャンバーB）	74
表 4.3-3	位置確認測定結果	74
表 4.3-4	取外し前と再設置後の傾斜測定の結果（MWPM4）	75
表 4.3-5	真空状態での MWPM4 測定結果	75
表 4.3-6	真空状態での MWPM4 傾斜測定結果	75
表 6.1-1	入射部作業エリアの線量測定結果と予測	100
表 6.1-2	作業手順書の一例	101
表 6.1-3	作業者の被ばく線量の予想（チャンバーB 架台更新作業）	102
表 6.1-4	作業者の被ばく線量の予想（荷電変換光路更新作業）	102
表 6.2-1	作業台上への鉛マット設置前後での線量率の比較	102
表 6.2-2	ビームライン開口部への鉛マット設置前後での線量率の比較	103
表 6.3-1	オフライン作業環境下でのチャンバーB の線量	103
表 6.4-1	被ばく線量の実績値（チャンバーB 架台ユニット更新作業）	103
表 6.4-2	作業局面ごとの被ばく線量の積算値（チャンバーB 架台ユニット更新作業）	104
表 6.4-3	被ばく線量の実績値（荷電変換光路更新作業）	104
表 6.4-4	作業局面ごとの被ばく線量の積算値（荷電変換光路更新作業）	104
表 6.4-5	被ばく線量の実績値（レーザートラッカー測定作業）	105
表 6.4-6	被ばく線量の実績値（エレクトロンキャッチャークランプ交換作業）	105
表 6.4-7	被ばく線量の実績値（シフトバンプ作業台設置・解体）	105
表 6.4-8	被ばく線量の実績値（チャンバーB 遮蔽体設置）	105

執筆分担

1. はじめに	仲野谷 孝充
2. 3GeV シンクロトロン加速器と入射部の概要	仲野谷 孝充
3. 入射部タスクフォースにおける遮蔽体検討	
3.1 入射部における遮蔽体設置の必要性	神谷 潤一郎
3.2 遮蔽体の検討	神谷 潤一郎
3.3 遮蔽体と新架台ユニットの設計	古徳 博文、仲野谷 孝充
4. 更新作業	
4.1 作業概要	仲野谷 孝充
4.2 水平シフトバンプ電磁石用作業台の設計と設置	堀野 光喜、高柳 智弘
4.3 レーザートラッカーによるチャンバーB と MWPM4 の測量	堀野 光喜、谷 教夫
4.4 チェンバーB 架台ユニット更新作業	
.....	古徳 博文、吉本 政弘、柳橋 亨、仲野谷 孝充
4.5 荷電変換フォイル観測系更新作業	仲野谷 孝充
5. 遮蔽体設置効果の検証	仲野谷 孝充
6. 作業管理・被ばく管理	仲野谷 孝充
7. まとめ	仲野谷 孝充

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン加速器 (Rapid-Cycling Synchrotron : RCS) は陽子ビームを 3GeV まで加速し、物質生命科学実験施設 (Materials and Life science experimental Facility : MLF) 及び主リング (Main Ring : MR) に供給するための施設である[1]。前段加速器であるリニアックにて 400MeV まで加速された H⁻ビームを 3GeV シンクロトロン加速器に入射し、H⁻に荷電変換し陽子ビームとして 3GeV まで加速している。荷電変換は H⁻ビームを入射部に設置した極薄い炭素薄膜 (荷電変換フォイル) を通過させることで行うが、この際に核反応により陽子と中性子を主とした二次粒子が発生し周辺機器は放射化する。2008 年に 20 kW で利用運転を開始してから徐々にビーム出力を上げ、2020 年には 600 kW で定常的に利用運転を実施している。このビーム出力の増強に伴い、入射部付近では放射化による機器の表面線量と空間線量率が年々増加している。一方で入射部には人の手によるメンテナンスが欠かせない機器が多数存在しており、作業員の被ばく低減が重要な課題であった。特に今後、本加速器の設計値である 1 MW で定常的な運転をしていくとさらなる機器の放射化が予想されるため、作業員の被ばくを低減するには遮蔽体の設置が必須である[2]。

そのため、本加速器施設を管理する J-PARC センター 加速器ディビジョン 加速器第二セクションにおいて、入射部への遮蔽体設置を目的としたワーキンググループ「入射部タスクフォース」を設立した。入射部には多種多様な機器が狭いエリアに複雑に配置されている。遮蔽体を設置することで予期しない悪影響がないように多角的に検討を行い、実作業を円滑に行うため、タスクフォースのメンバーは真空、電磁石、ビームモニタ、荷電変換の各グループから選出した。入射部タスクフォースにて遮蔽体設置に伴う既存機器やビームへの影響を検証し、遮蔽体の構造、設置の方法、付随する作業、遮蔽効果の確認方法について検討を重ねてきた。結果、入射部の構造を一部更新し、必要な際に容易に取付けが可能な非常設型の遮蔽体を設置することとした。そして、2020 年夏期メンテナンス期間に入射部構造の一部更新を実施し、遮蔽体の設置と遮蔽効果の確認を行った。

本報告書は、入射部タスクフォースが実施した上記項目について総括するものである。

2. 3GeV シンクロトロン加速器と入射部の概要

RCSは3GeVに加速された1パルスあたり 8.3×10^{13} 個の陽子を25Hzで取り出すことで、1MW出力を実現するよう設計されたシンクロトロン加速器である。RCSのビームライン構造を図2-1に示す。RCSのリングの形状は3つのアーク部と3つの直線部（入射部、出射部、RF加速部）から構成された周長約350mのおむすび型をしている。3つの直線部のうち、入射部にはRCSの前段加速器であるリニアックから400MeVに加速されたパルス状のH⁻ビームが入射される。入射したH⁻粒子はここでH⁺粒子、すなわち陽子に荷電変換されて周回軌道に合流する。周回軌道に乗った陽子ビームは約14000回リング内を周回し、RF加速部を通過する度に高周波加速電場により加速される。エネルギーが3GeVに達すると、出射部に設置されたキッカー電磁石により外側に向けてビームは蹴りだされMLF、MRへ向かうビームラインに入射する。

RCSでは大強度陽子ビームを実現するためにビーム多重入射方式を採用している。リニアックから入射したパルス状のビームは順次RCS内を周回する。周回ビームが再び入射部に差し掛かったタイミングに合わせて次のパルスを合流させ周回ビームと一体化させる。これを逐次繰り返してビームを蓄積しビーム強度を増強させている。この際、入射ビームと周回ビームの電荷が同じ場合、両者のビームを同一軌道に乗せるのは原理的に困難であるためビームの蓄積回数が制限される。このため、リニアックからH⁻ビームを入射し、RCS内で荷電変換フォイルを用いてH⁺に荷電変換し陽子ビームとして蓄積している。これを荷電変換入射と呼ぶ。

図2-2及び図2-3に入射部の機器配置の詳細を、図2-4に荷電変換入射の概略を示す。リニアックから入射したパルス状のH⁻ビームは2台のセプタム電磁石と四極電磁石QFL01により軌道を曲げられ周回軌道に近づく。さらにシフトバンプ電磁石1と2により軌道を曲げられ、チャンバーB内部に配置された荷電変換フォイルを通過する際に電子を2個剥ぎ取られH⁺に荷電変換される。その後、シフトバンプ電磁石3と4により再び軌道を曲げられ、RCSの周回軌道に合流する。周回するH⁺ビームは入射するH⁻ビームと電荷が反対であるため、磁場による偏向軌道はお互いに反対方向となり、荷電変換フォイルのある入射点で合流することになる。このように荷電変換を行うことで入射ビームは周回ビームとほぼ同じ軌道でビームの蓄積を行えるため、ビーム強度を飛躍的に増加させることが可能となる。こうして陽子ビームを蓄積しビーム強度を増やしてから3GeVまで加速する。

水平シフトバンプ電磁石1、2、3、4の間にはそれぞれチタン製真空容器のチャンバーA、B、Cが存在する。それぞれのチャンバーにはビーム形状をモニタするための機器としてマルチワイヤプロファイルモニタ(MWPM3、4、5)がそれぞれ設置されている。またチャンバーBの外周側には荷電変換フォイル交換機構が配置されており、接続ポートを介して第1荷電変換フォイルはチャンバーB内部に挿入される。挿入状態の荷電変換フォイルの下流側にはエレクトロンキッカーが設置されている。これは荷電変換の際に放出される高いエネルギーを持った2次電子がチャンバー壁に当たらないよう受け止めるための機器である。

入射粒子の大部分は第1荷電変換フォイルによりH⁺に変換されて周回軌道に合流するが、電子が1個だけ剥ぎ取られた電氣的に中性のH⁰粒子と1個も剥ぎ取られなかったH⁻がわずかながら存在する。これらの粒子はこのままでは電荷が異なるため周回軌道に乗らずダクト内壁に衝突し局所的な放射化を引き起こす原因となる。このため、H⁰粒子は第2荷電変換フォイルにより、H⁻粒子は第3荷電変換フォイルによりそれぞれH⁺に変換してダンプラインへ輸送し廃棄する。

荷電変換フォイルは炭素のごく薄い薄膜（ $\sim 340 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）である。フォイルに入射する粒子の大部分は周回軌道に合流するが、一部は散乱されてチャンバーB や周辺のダクトに衝突する。また、フォイルとの核反応により二次陽子や中性子などの二次粒子が多数生成し、これによりチャンバーB を中心とした入射部周辺の機器は放射化する。特に高いエネルギーをもつ二次粒子は前方に強く放出されるため、チャンバーB 下流側の放射化が大きくなる。荷電変換フォイルやシフトバンプ電磁石は作業者による近接作業でのメンテナンスが不可欠である。このためこれらの機器の残留放射線からの被ばく低減が重要である。

3. 入射部タスクフォースにおける遮蔽体検討

入射部では、リニアックからの H 粒子を陽子へ荷電変換するためのフォイルとビームの衝突により発生する二次粒子のため、真空容器や電磁石等の機器が放射化し、残留放射線量が有意に高くなっている。今後 1 MW のビーム出力の定常的な運転をしていくうえで、入射部における放射線遮蔽体の設置は保守時の被ばくを低減するという観点で必須である。

本章ではまず、入射部の典型的な残留放射線量および保守作業時の被ばく線量を示す。つぎに、入射部への遮蔽体について、入射部タスクフォースで検討を実施した 2 種類の案について説明する。2 種類の案とは、残留線量の最も高い第 1 荷電変換フォイル周りに現状より空間を広げて遮蔽体を設置する案と、既存の系に遮蔽体を設置する案である。結果として空間を広げる案は開発要素が多いこと、および入射部の系を大幅に変えるため通常の定期保守期間内では改修作業が実施できないことから、既存の系に遮蔽体を設置する案を実行することとなった。

3.1 入射部における遮蔽体設置の必要性

3.1.1 入射部の残留線量の例

図 3.1-1 に物質生命科学実験施設へ約 500 kW のビーム出力で数週間定常運転した後、5 時間程度たった後の残留線量を示す。入射点である荷電変換フォイルの直下流では、9 mSv/h という高い残留放射線量となっている。この高い残留線量はエネルギー 400 MeV の陽子と厚さ約 1 μm の荷電変換フォイルを構成する炭素の原子核との衝突による散乱粒子が原因である。当然、前方への散乱の断面積が大きいため、入射点の真空容器は荷電変換フォイルの下流側の残留線量が高い。残留線量に寄与する二次粒子は、PHITS による計算結果および MARS を用いた計算により 100～300 MeV の陽子と 50～400 MeV の中性子であることが報告されている[2,3]。実際に入射部における最も高い線量を示す場所は、図 3.1-2 に示す入射点のチャンバー B とその下流にある水平シフトバンプ電磁石 3 内部のアルミナセラミックス製ビームパイプ（以下、シフトバンプ用セラミックスダクト、あるいはセラミックスダクト）の接続部である。この接続部分でフランジの開口形状は円型から矩形に変わっているため矩形側フランジに二次粒子が当たり高い放射化を引き起こしている。入射部での作業時の外部被ばくを低減するにはこのような高い残留線量の周りに遮蔽体を設置することが基本である。

図 3.1-3 に各運転後の残留線量の実測値およびそれから類推される将来の大強度ビーム出力運転時の残留線量を示す。各運転後の残留線量の実測値は、ビーム運転を停止してから約 5 時間後に計測した先の最も残留線量が高い点での測定値である。

3.1.2 入射部における保守作業実例と被ばく量

図 3.1-4 に入射部においてこれまで行った保守作業のおおよその場所を示す。作業エリア A ではシフトバンプ用セラミックスダクトのコンデンサー交換作業のためのダクト撤去・設置作業、真空容器締結部からの真空リーク対応のためのシール交換作業、およびシフトバンプ電磁石のボルト増し締め作業等を行った実績がある。作業エリア B では、シフトバンプ電磁石の冷却水の漏水保守作業を行った実績がある。作業エリア C では、予備の荷電変換フォイルを入れたマガジンラックの交換作業および荷電変換フォイル交換用駆動装置の取外し作業を行った実績がある。こ

れら保守作業実績のうち、シフトバンプ用セラミックダクトのコンデンサー交換のためのダクト撤去・設置作業に関して、図 3.1-5 にダクト撤去作業時の写真を記す。作業はセラミックダクト撤去（真空フランジ締結用クランプ取り外し含む）、コンデンサー交換作業、セラミックダクト設置（真空フランジ締結、リーク試験含む）という流れで実施した。コンデンサー交換作業は加速器トンネルではない場所で実施した。表 3.1-1 にセラミックダクト撤去・設置における作業者ごとの被ばく線量を記す。

表 3.1-2 に入射部での他の作業における空間線量、作業時間、作業者の最大被ばく量等をまとめる。また、出力ビームパワー1 MW で運転した場合に、同様の作業を行った場合の予想被ばく量も併せて記載する。この予想被ばく量は、各作業時の前の出力ビームパワーと1 MW の比から算出したものである。

以上、例に挙げた作業実績や1 MW 定格ビーム出力での運転時の予想から、入射部における被ばく低減のための遮蔽体設置の必要性は明確である。

3.2 遮蔽体の検討

ビーム入射点のチャンバーBの設置状況および真空容器単体の写真を図3.2-1に示す。荷電変換フォイルは低放射化材料である純チタン JIS 2 種製のチャンバーBに挿入される。チャンバーBはフランジ面間の長さが 390 mm であり、両端のベローズ部を除いた真空容器胴部は 200 mm である。チャンバーBは図 3.2-1 の右側の写真に示すように荷電変換フォイル挿入用、MWPM 用、エレクトロンキャッチャー用、荷電変換フォイル観測用といった各種ポートを有する複雑な構造である。そのため周辺の残留放射線量を低減するための遮蔽体を作業時に設置する空間は少ない。そこで、まず上下流のシフトバンプ電磁石のビーム軸方向の長さを短くすることと入射点の真空容器の断面形状を改良することで、遮蔽体を設置できる空間を確保する方針で検討を実施した。検討の結果、本方針は、入射部の各装置に大きな変更が必要であるとともに装置開発に時間を有すること、並びに機器の入れ替え作業のためには4か月という毎年の定期保守作業期間（約3か月）より長期間必要であることが分かった。そこで次に既存の系をほぼ変更しないで、限られた空間に遮蔽体を設置する検討を実施した。結論として、この既存の系をほぼ変更しない遮蔽体を設置する案を実行することとした。本節ではまず、遮蔽体設置スペースを広げる場合についての検討を記述した後、既存の系をほぼ変更しないで遮蔽体を設置する場合の検討を記述する。

3.2.1 遮蔽体設置スペースを広げた場合の検討

(1) ビーム軌道の検討

図 3.2-2 に現行の系とビーム入射点真空容器の周りになるべく広く遮蔽体設置スペースを確保する変更をする場合の、第1荷電変換フォイル周辺の空間の比較を示す。現状のシフトバンプ電磁石は1台につき2つの鉄心を有している。これをスプリットポール型と呼ぶ。第1荷電変換フォイルでHからH⁺ではなくH0へと変換されたもののほとんどは、第2荷電変換フォイルでH⁺へと変換される[4]。この第2荷電変換フォイルは現行の系ではシフトバンプ電磁石4の2つの鉄心の間に挿入されている。ビーム入射点真空容器の周りに遮蔽体設置スペースを広く確保するために、上下流のシフトバンプ電磁石のビーム軸方向の長さを短くし入射点の真空容器の断面形状を改良することで、遮蔽体を設置できる空間を確保する方針とした。そのために、スプリットポ

ール型のシフトバンパ電磁石を単一鉄心型（コンバインドポール型と呼ぶ）に変更することを検討した。4 台のシフトバンパ電磁石をすべて同一形状のコンバインドポール型にすることは、電磁石製作の観点と入射バンパ軌道の対称性の観点から理想的である。しかしその場合、第 2 荷電変換フォイルはシフトバンパ電磁石 4 の真ん中ではなく、上流もしくは下流に異動させる必要がある。図 3.2-3 に第 2 荷電変換フォイルをシフトバンパ電磁石 4 の上流、下流、および現行系統同様の中心に設置した場合のビームダンプへの軌道を記す。第 2 荷電変換フォイルをシフトバンパ電磁石 4 の上流に設置した場合は、第 1 荷電変換フォイルで H^+ に変換されなかった H^0 のビーム軌道は図中の赤実線で示す軌道となり、ビームダクトの開口よりも左側に逸れてしまう。一方、下流に設置した場合は、図中の赤破線で示す軌道となり、ビームダクトの開口よりも右側に逸れてしまう。いずれの場合もビームダンプまで到達できないことが分かる。そのためシフトバンパ電磁石 4 をコンバインドポール型に変更することは不可能で、スプリットポール型を維持しなければならない。シフトバンパ電磁石 1~4 が形成する磁場は第 1 荷電変換フォイルを中心に対称性を保つ必要がある。そのため、図 3.2-2 (b) に示したようにシフトバンパ電磁石 1, 4 はスプリットポール型、2, 3 はコンバインドポール型という設計とした。

(2) 遮蔽体の検討

遮蔽体を常設とするか、作業時のみ設置するかは遮蔽体自身の放射化の度合いで判断した。PHITS および MARS を用いた計算では、遮蔽体を常設した場合、1MW でのビーム運転後の遮蔽体の残留放射線量は内側で 83 mSv/h と非常に大きく、遮蔽効果よりも自身の放射化により空間線量への寄与が大きくなってしまふことが判明した。そのため加速器運転時は遮蔽体を取り外しておき、作業時に設置する設計とした。1.5 MeV のガンマ線を 10 分の 1 に低減することを基準として、厚み 15 cm の鉄を遮蔽体とする設計とした。図 3.2-4 に検討した遮蔽体を記す。新設計のチャンバー B および架台も記している。図 3.2-5 に遮蔽体設置前後の図面を記す。遮蔽体設置の作業性をよくするため、架台にガイドレールを設ける、遮蔽体を分割構造にするという設計とした。分割構造にすることは、作業場所に効果的な遮蔽体部品だけを設置することで、設置時間を短縮できるという利点もある。

(3) 真空容器の検討[5]

真空容器（チャンバー B）の回りに遮蔽体を設置できる空間を確保するために、真空容器胴部を長くし、真空容器の断面を円から矩形にする構造を検討した。図 3.2-6 に改良後の入射点真空容器の図を示す。胴部の長さを 201 mm から 547 mm へ、断面形状を直径 512 mm の円から 293 mm×479 mm の矩形へ変更することで、真空容器回りの空間を大きく確保することを可能とした。数値はいずれも容器外形寸法である。容器が長く、矩形となった設計に対し検証すべきは大気圧による変位および応力である。有限要素法による計算で変位が 0.5 mm を超えない真空容器壁の厚みを検討し、変位による応力が材料である純チタン 2 種の耐力の範囲内であることを確認した。結果を図 3.2-7 に示す。この結果から 9 mm の厚みとすれば最大変位量が約 0.3 mm 程度であり、ミーゼス応力は約 59 MPa と純チタン 2 種の耐力である 215 MPa より十分に小さいことを確認した。他の検証事項はチタン製真空容器のシフトバンパからの漏洩磁場による発熱である。バンパ電磁石から真空容器中心までの距離が増すことで、漏洩磁場の絶対値は減る。一方で真空容器胴部を円形から矩形にすることで、真空容器壁の位置が中心平面上に近づくため、漏れ磁場の鉛直

成分の割合は増える。解析的な計算の結果、構造変更によりダクト胴部の発熱は 11.7 W から 74.1 W へ増加することが分かった。しかし、これによる真空容器壁表面の温度上昇は 60 °C 程度であり、問題にはならないと判断した。

(4) シフトバンプ電磁石系の検討[6]

先に述べたようにシフトバンプ電磁石は、1 と 4 がスプリットポール型、2 と 3 がコンバインドポール型である。鉄心端面間の距離はそれぞれ 1.06 m と 0.8 m である。そのため、同じ励磁電流だと、スプリットポール型とコンバインドポール型で BL 積が異なる。図 3.2-8 に示したように、例えば励磁電流 32 kA の場合、それぞれ 0.307 Tm と 0.265 Tm であり 1 割程度異なる。新しい系においては、スプリットポール型のシフトバンプ電磁石 1, 4 とコンバインドポール型のシフトバンプ電磁石 2, 3 に対してそれぞれ異なる励磁電流を流し、BL 積を同じにする必要がある。そのため、シフトバンプ電磁石の電源も変更を行う必要がある。図 3.2-9 に現状と変更した場合のシフトバンプ電磁石電源系を示す。現状は図 3.2-9 (a) のように 1 つの電源系でシフトバンプ電磁石 1-4 を直列に励磁させ、同じ励磁電流を流している。バンクと呼ばれる IGBT ユニットについては 16 バンクを並列駆動させている。新しい系では図 3.2-9 (b) のようにシフトバンプ電磁石 1, 4 用電源、2, 3 用電源に分ける必要がある。各電源は 8 バンクを並列駆動させることとなる。現状の電源にこのような変更を行うと、最大電流値は半分となる。そのため、必要な磁場の BL 積を得るために、電磁石側のコイルターン数を倍にする必要がある。具体的には、現状 2 ターンのコイルを 4 ターンへ変更する。

(5) 電子軌道の検討

リニアックから入射した H は 99.7 % 以上が第 1 荷電変換フォイルで 2 個の電子をはぎ取られ H⁺、即ち陽子へと荷電変換される。この時はぎ取られた電子はバンプ電磁石の磁場（荷電変換フォイル位置への漏洩磁場）で軌道を曲げられ、エレクトロンキャッチャーと呼ばれる真空容器中に設置されたコンポジットカーボン製のブロックに導かれる設計となっている。炭素板の背面には銅板がロウ付けされており銅板を冷却することで電子衝突による発熱を抑制している。シフトバンプ電磁石の構造が変更になると磁場分布が変わるため、はぎ取られた電子の軌道が変化する。図 3.2-10 に現状と変更後でのシフトバンプ電磁石 2, 3 の磁場分布の比較を示した。電子軌道に影響するシフトバンプ電磁石 2, 3 の磁場およびそれらの重ね合わせをプロットしている。新しい系では第 1 荷電変換フォイル位置がシフトバンプ電磁石端部から遠ざかるため、その位置でのシフトバンプ電磁石の漏洩磁場が少なくなる。そのため、電子軌道半径は大きくなる。そのためエレクトロンキャッチャーは現状より約 150 mm 下流に設置しなければいけない。図 3.2-11 に現状の系および新しい系における電子軌道とエレクトロンキャッチャーの位置を示す。図 3.2-12 に新しい真空容器とエレクトロンキャッチャーの位置関係を示す。エレクトロンキャッチャーが入射点真空容器のフランジ面よりも下流になると、真空シールの交換に支障をきたすが、幸いそのようなことにはなっていないことが確認できた。

(6) セラミックダクト RF シールドの検討

セラミックダクトの外側表面には、低いビームインピーダンスを得るために RF シールドが施工されている[7]。図 3.2-13 に現行のシフトバンプ用セラミックダクト 1-3 および 4 の RF シ

ールド施工図を記す。先に示したように新しい系にした場合にはシフトバンパ電磁石 2, 3 の長さが短くなるのに伴い、それらのセラミックダクト長も短くなる。一方で、シフトバンパ用セラミックダクト 1 および 4 は現状と同じ長さである。現状の系では、シフトバンパ電磁石 1-4 の磁場の方向は鉛直下向き、上向き、下向き、上向きである。そのため、シフトバンパ電磁石が励磁された時に RF シールドに誘起される磁場は 1 と 2、および 3 と 4 でそれぞれ相殺され、閉じたビーム軌道を形成することが可能である。ただし、磁石やダクトの製作精度等からくる誘導磁場のばらつきがあることや、シフトバンパ電磁石 4 用のセラミックダクトの RF シールドは第 2 荷電変換ポートの面には RF シールドは施工していないことから誘導磁場は完全に相殺はされない。一方で新しい系では、図 3.2-14 に示すように 1 と 2、3 と 4 のセラミックダクトの長さが異なるため、RF シールドに誘導される磁場を相殺することが原理的にできない。また、RF シールドだけを同じ長さにしてもももとの磁場分布が 1 と 2、3 と 4 で異なるため誘導磁場の相殺はできない。そのため、シフトバンパ用セラミックダクト 1 と 2、3 と 4 で RF シールドに流れる誘導磁場を相殺するのではなく、個々のセラミックダクトの RF シールドで消費させるダンピング方式を検討した[8]。図 3.2-15 に誘導磁場を消費させるためのダンピング抵抗の模式図と施工図の例を記す。等価回路に示したようにダンピング抵抗はコンデンサーと並列に施工する。RF シールドに誘起された磁場は回路の時定数で減衰させることができる。

ダンピング抵抗の効果を確認するために、セラミックダクトを模擬したベーク板の四角柱に RF シールドを施工し、新しいシフトバンパ電磁石 2, 3 型（長さが短いタイプ）に設置し磁場測定を行った[9]。実機での励磁電流パターンは立上り 400 μs 、フラットトップ 800 μs 、立下り 370 μs であり、フラットトップ電流は 16 kA である。測定には容量が実機よりは少ない電源を用いたので、立上り 800 μs 、フラットトップ 100 μs 、立下り 800 μs であり、フラットトップ電流は 9.5 kA という制限があった。図 3.2-16 に各ダンピング抵抗値に対しての RF シールドに誘起される電圧の測定結果を示す。少ない抵抗値とすることでダンピングスピードが明らかに早くなっていることがわかる。このように抵抗値を小さくすることは誘導磁場を早くダンピングするためには効果がある。しかしながら、抵抗値を小さくすると抵抗器で消費される電力は、 $P=V^2/R$ の関係により大きくなる。図 3.2-17 (a) にダンピング抵抗値が 50 Ω の場合の励磁電流と誘導電圧および抵抗器での消費電力の関係を示す。また図 3.2-17 (b) に励磁電流とダンピング抵抗器温度の関係を示す。測定値からの計算では、実際の励磁電流である、立上り 400 μs 、フラットトップ 800 μs 、立下り 370 μs であり、フラットトップ電流は 16 kA では 6.7 W の消費電力となり、温度は 400°C を超える。全抵抗値を 50 Ω にしたうえで抵抗器 1 個当たりの消費電力を 1 W 以下に抑えるためには、例えば 7 Ω のダンピング抵抗器を 7 直列にしたものをコンデンサーに並列に設置する等の工夫が必要である。

(7) 作業工程の検討

(1) ～(6) に述べた技術検討と並行して、シフトバンパ電磁石、チタンチャンバーB、セラミックダクト等の入射部を大きく変更して遮蔽体設置スペースを空ける場合の現地作業工程を検討した。本工事には入射部に設置されているほぼすべての機器を撤去し、新しい機器を設置する作業となる。具体的には、シフトバンパ電磁石（電磁石本体、電流導入用バスダクト等）、チタンチャンバーB、セラミックダクト、荷電変換フォイル駆動装置、荷電変換フォイル観測系、MWPM4 が関係する。それらの機器を適切な順序で撤去し、新しい機器の据え付け調整を適切な

順序で実施し、作業工程を見積もるためにネットワーク図と呼ばれる工程表を作成した。図 3.2-18 に検討したネットワーク図を示す。本検討により、新しい入射部の系に変更する場合は 90 日程度の作業日数が必要であることがわかった。

(8) 入射部の系を変更することへの議論と結論

以上の技術検討並びに工程の検討を実施した結果を第 18 回加速器技術諮問委員会（18th Meeting of the Accelerator Technical Advisory Committee for the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) : A-TAC, 2019 年 2 月 28～3 月 2 日）[10]にて報告した。その結果、以下のコメントを得た。

“It is commendable to minimize radiation dose to workers through engineering solutions such as adding movable shielding around highly activated beam line components. However, in the case of the movable shielding planned for the RCS injection area, the committee is concerned about the cost/benefit analysis. The cost will certainly be high (due to extensive redesign of the injection area including new shift bump magnets, the shift bump power supply reconfiguration, radiation dose to workers installing the new beam line components, etc.). However, the benefit was not well quantified. For example, what is the expected dose reduction for the various jobs mentioned in the presentation, given that not all the dose comes directly from the stripper foil, and the shielding does not cover the upstream and downstream portions of the stripper foil region? The cost/benefit may be favorable –it’s just that it was not evident to the committee based on the information presented. The committee suggests that the case for installing the new shielding design should be reviewed to make sure that the new shielding can be justified.”

本コメントを受け、我々は再検討を実施した。以下に検討結果をまとめる。

- ・本改造の利点は残留放射線量の最も高いビーム入射点周りを遮蔽体で覆うことで入射部における作業員の被ばく低減が実行できることである。
- ・しかしながら、シフトバンプ電磁石の磁場の変更、シフトバンプ用セラミックスダクトの RF シールドへの誘導磁場の非対称性等からくるビームへの影響の懸念がある。
- ・そのため、磁場分布測定や誘導磁場測定の結果等をもとにビーム軌道への影響を検証し、結果をシフトバンプ電磁石やセラミックスダクトの構造にフィードバックさせる必要がある。すべての懸念を払しょくするには、さらに数年の期間が必要であると予想される。
- ・一方で保守時の被ばく低減は緊急の課題であるため、上記検討の実施完了前に効果のある対策をとる必要がある。

以上のことから結論として、「現状のビーム入射部の装置を変更しないで、制限された空間に遮蔽体を設置する」ことを現実的かつ効果的な手法として検討・実施することとした。

3.2.2 現行の系への遮蔽体設置

遮蔽体は、先に述べた現行チャンバーBの周りの限られた空間に設置することとなる。図 3.2-19 に現行の系への遮蔽体設置前後でのチャンバー周辺の図を示す。現行の系からの変更は、チャンバーBの架台を遮蔽体設置が可能な構造の架台へ変更をするのみである。そのため、現行系の遮蔽体設置はビームへの影響はない。また、架台を変更するにあたっては MWPM4 やチャンバー

B の撤去等が伴うが、通常の 3 か月の定期保守期間で実施可能であることが検討の結果わかった。表 3.2-1 に現行の系へ遮蔽体を設置した場合の各作業と最大被ばく線量を示す。表 3.1-2 に記載した各種作業に対し、図 3.2-20 の遮蔽体設置前後での残留放射線量をもとに計算した値を載せたものである。チャンバーB 周辺での作業については、効果的に被ばく低減ができていことがわかる。この現行の系への遮蔽体設置について、詳細を以降に記述する。

3.3 遮蔽体と新架台ユニットの設計

3.3.1 入射部周辺機器の 3D モデルの作成

遮蔽体及び遮蔽体設置用架台を検討・製作する上で MWPM4、チャンバーB、セラミックダクト、シフトバンプ電磁石等周辺機器の詳細な情報が必要となるため、まずこれらの既設機器の 3D モデルを作成した。設計の基礎となるため、モデルの作成に際しては既設機器納入図書に含まれる 2D-CAD データと紙図面を基に、不明な寸法については実測を行い作成した。2D-CAD データ及び、紙図面と実際の現状が異なるところが数箇所存在したが、現物確認を重ねることで精度を上げることができた。図 3.3-1 に作成した入射部の 3D モデルの全体図と図 3.3-2 にチャンバーB とその架台ユニットを示す（チャンバー内部は省略）。

チャンバーB は、シフトバンプ電磁石 2 とシフトバンプ電磁石 3 の間の存在し、上部に MWPM4、背面に荷電変換フォイル交換機構を有する構造となっている。また、下部ポートには荷電変換フォイルの観測系の光路管が接続される。シフトバンプ電磁石 2、3 のビームラインはセラミックダクトと成っており、チャンバーB と HELICOFLEX 社デルタシールガスカートで接続している。チャンバーB 架台ユニットはチャンバーB 本体と MWPM 本体を支えるための架台群である。2 組の脚で全体の荷重を支えており、その上部に棒状のベースがある。ベース上には MWPM 架台とチャンバーB 架台が独立して設置されている。チャンバーB は架台ごと XY ステージで位置の調整が可能なのに対して、MWPM4 用架台は固定されており、その架台の上に設置されている XY ステージで MWPM4 のみを調整する構造である。

3.3.2 解体作業方法の検討

チャンバーB 周辺はスペースが非常に限られているため、遮蔽体用の架台を新たに設置することは不可能であり、チャンバーB 架台ユニットで遮蔽体荷重を支える必要があった。このため、チャンバーB 架台ユニット全体の強度の見直しが要求された。チャンバーB へ遮蔽体を設置可能な架台ユニットへ構造変更をするためにどの程度の範囲まで解体する必要があるか、解体可能か 3D モデルをもとに検討した。図 3.3-3 は正面（通路側）から見た形状、図 3.3-4 は上部から見た形状となる。ダクトの各接続部はベローズが有ることから他の部位を解体すること無く切り離し接続が可能である。MWPM4 架台は分割解体可能である。ベース及びチャンバーB の XY ステージについてもセラミックダクトとの干渉により上方向には抜けないが、前面通路側に抜き出すことが可能と判断した。一方、観測系の光路管が外周側の架台脚を貫通しているため、光路管を取り外さなければ外周側架台脚を外すことができない。このため、観測系光路の更新作業に合わせて実施することで、観測系光路の干渉を受けずにチャンバーB 架台ユニットの解体が可能と判断した。これによって遮蔽体及び設置機器の見直しが架台ユニットを含めて可能となった。

3.3.3 遮蔽体とチャンバーB 新架台ユニットの設計

本遮蔽体は、保守・点検時の作業者の被ばく低減を目的としたものであるため、加速器運転時には使用しない。このため、保守・点検時に迅速かつ容易に取り付け・取り外しができることが要求される。チャンバーB、MWPM4 の現行位置を再現し、遮蔽体設置方法を考慮しつつ遮蔽体とチャンバーB 架台ユニットの新構造モデルを作成した。検討を重ねながら、構造モデルの変更・修正を繰り返し実施しモデルを形成した。

図 3.3-5 に内周側遮蔽体構造、図 3.3-6 に外周側遮蔽体構造を示す。また、図 3.3-7 にこれらの遮蔽体を設置可能にしたチャンバーB の新架台ユニットの外観を示す。遮蔽体の構造はステンレス製の筐体に遮蔽効果を大きくするため鉛ブロックを収納している。内周側遮蔽体は縦 870 mm、横 350 mm、厚さ 70 mm で重量 217 kg である。外周側遮蔽体は縦 870 mm、横 350 mm と内周側と同じであるが、遮蔽体の取付け場所の制約から厚さは 50 mm である。また外周側には荷電変換フォイル交換機構の接続ポートが有るため、これを避けるためにコの字型の形状をしている。このため、重量は内周側の約半分となり 114 kg である。

遮蔽体は、周回クレーン（10 t/1 t）の 1 t の補巻を使用して取り付け・取り外しを行う。クレーンの吊り上げ高さの制限により専用の吊り治具を使用する。遮蔽体は、新架台ユニット上部にある MWPM4 架台にボルト固定したフックに引っ掛けて設置する。また、遮蔽体下部先端に設けたガイドピンにより位置決めと横揺れの制限をかけられる構造とした。内周側遮蔽体は、通路側に面し干渉する機器が無いことから、遮蔽体の設置・取外し作業は容易である。一方で外周側遮蔽体はフォイル交換機構のポートを避けながら設置・取外しをする必要があるため、注意が必要である。

新架台ユニットでは全体の荷重は独立した 4 本の脚で支えている。架台の脚の間に荷電変換観測系光路が設置されるため、強度を上げるための筋交い構造が不可能であった。このため、床面にアンカーで固定された厚さ 20 mm のベースプレートを設置し、脚相互の連結を補完している。脚の上部には角柱を枠状に組んだ強化ベース、トッププレート及び XY ステージがある。XY ステージ上にチャンバーB 架台が載り、さらにその上に MWPM4 架台が設置されている。既設の架台では MWPM4 とチャンバーB をそれぞれ別の場所で固定していたため、アライメントの際に両方を調整する必要があった。新架台ユニットではチャンバーB と MWPM4 とともにひとつの XY ステージで位置調整を可能としている。

これら新規に製作した架台ユニット（ベースプレート、架台脚、強化ベース、トッププレート、XY ステージ、チャンバーB 架台、MWPM4 架台）はいずれもオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 製である。架台ユニットの構成要素は強度を考慮すれば溶接構造が望ましいが、狭隘な場所への運搬と設置を考慮してボルトで固定する構造とした。従来の架台ユニットの脚及びベースには一辺 50 mm、肉厚 5 mm の角柱が使用されていたが、遮蔽体の荷重に耐えられるよう新架台ユニットではそれぞれ一辺 100 mm、肉厚 9 mm の角柱を使用している。図 3.3-8 に新架台ユニットに遮蔽体を設置した際のモデル図を示す。

3.3.4 構造体の強度

設計した新架台ユニットは XY ステージを境にしてユニット上部と、ユニット下部に分けて自重たわみと地震発生時の横荷重（震度 7 弱相当=0.4 G）たわみを ANSYS ソフトにより評価した。

ANSYS ソフトは、有限要素法を主体とした解析計算ソフトウェアである。本件では ANSYS 2019R1 を使用して作成した 3D モデルで横荷重に対する変位量と応力のシミュレーションを行った。

まず遮蔽体なしの状態について、MWPM4 本体を質量 100 kg のダミーブロックに模擬して、図 3.3-9 に示すモデルで計算を行った。ユニット上部について加えた横荷重の方向は図 3.3-10 に示す 8 方向である。変位、応力ともに Y-方向の荷重が加わった際に最大を示した（図 3.3-11、図 3.3-12）。次に遮蔽体重量を前面 300 kg、背面 150 kg として図 3.3-13 に示すモデルで計算した。この場合も変位、応力ともに Y-方向の荷重が加わった際に最大を示した（図 3.3-14、図 3.3-15）。ユニット上部の計算結果のまとめを表 3.3-1 に示す。

ユニット下部については、XY ステージ上部の構造物を 2000 kg のダミーブロックに模擬して計算した。計算モデルを図 3.3-16 に、荷重の発生方向を図 3.3-17 に示す。最大変位を示したのは X+ 方向の荷重が加わった場合であった（図 3.3-18）。また、応力が最大になるのは XY4 方向の荷重が加わった場合であった（図 3.3-19）。下部ユニットの計算結果のまとめを表 3.3-2 に示す。

ユニット上部、ユニット下部ともに通常使用時の自重たわみ量は 0.1 mm 以下であった。遮蔽体を設置した状態で震度 7 弱相当の横荷重を受けた際の変位量はユニット上部で 0.6 mm、ユニット下部で 0.2 mm 程度である。発生する最大応力についてもユニット上部で 108 MPa、ユニット下部 36 MPa であり、SUS316 の降伏応力 205 MPa を超えることはなく、十分な耐震性を有していることが確認できた。

4. 更新作業

4.1 作業概要

チャンバーB 架台ユニット更新作業では、チャンバーB とそれを支える架台ユニットをビームラインからいったん取り外して架台ユニットの更新を行う。事前調査により、シフトバンプ電磁石等のチャンバーB の周辺機器と干渉なく取り外せることが確認できた。しかし、チャンバーB 下部には荷電変換フォイルの光学像を観察するための荷電変換フォイル観測装置の光学機器と光路管が設置されており、光路管が架台ユニットの脚の内側を貫通している（図 3.3-2 参照）。このため、架台ユニットを更新するには観測系光路を一時的に解体する必要があった。一方で、近年、荷電変換フォイルの観測像は光学機器の放射線劣化により画質劣化が顕著となっているため、更新が必要とされていた。これらの光学機器はチャンバーB 直下の狭隘な空間に設置されているため、更新するにはチャンバーB とその架台ユニットを一時的に取り外して作業空間を確保する必要があった。

これらの作業は同時期に行うことで効率的に実施できるため、チャンバーB 架台ユニット更新作業と荷電変換観測系の更新作業をタスクフォース管理のもと実施した。この 2 件の作業のおおまかな流れを図 4.1-1 に示す。これらの作業は作業場所が同じであり、互いの各作業を協調しながら順次完了させて進める必要がある。

(1) チャンバーB 架台ユニット更新作業

チャンバーB に対して取り外し可能な遮蔽体を付加するため、チャンバーB の架台ユニットをその重量に耐えられる強固な架台に交換する。図 4.1-2 に架台ユニット更新前後の模式図を示す。

始めに測量と取り外し作業を円滑に実施するため、シフトバンプ電磁石 2 及び 3 の天板に作業台を設置する。次にレーザートラッカーによる現状位置の測量をチャンバーB 直上に設置されている MWPM4 に対して実施する。測量後、MWPM4 をチャンバーB から取り外し、開口部を閉止フランジにて閉止する。次にチャンバーB 上部の閉止フランジに基準座を設けてレーザートラッカーによる測量を行う。合わせて、チャンバーB の再設置時の位置出しのためにチャンバーB 本体にレーザー墨出し器によるマーキングを行う。次にチャンバーB とセラミックダクト等周辺機器との接続を解除し、クレーンにより吊り上げてビームラインより取り外す。取り外したチャンバーB は地下 2 階搬入室へ運搬し、オフラインでの作業を実施する。チャンバーB がオフライン作業を実施している間、荷電変換観測系の更新作業を行う。既設観測系の光軸確認をした後に観測系機器を順次撤去する。オフライン作業終了後、強化架台の設置作業と新観測系の設置作業を交互に順次実施していく。その後、チャンバーB を入射部まで運搬しクレーンにより吊り上げ、ビームラインに戻し、レーザー墨出し器による粗い位置出しを行う。その後、レーザートラッカーにより取り外し前の位置を再現するようにアライメント調整を実施する。アライメント完了後、チャンバーB 周辺のダクトを締結し、MWPM4 を取り付けした後、真空排気と He リークテストを実施する。最後に遮蔽体をチャンバーB に取り付け、設置状況の確認と遮蔽効果確認のための線量測定を実施する。

(2) 荷電変換観測系更新作業

チャンバーB直下に位置する荷電変換観測系の光学機器の更新を実施する。図4.1-3に荷電変換観測系の模式図を示す。更新する機器はW1真空窓、W1-M2間光路管、M2反射鏡、M2側水平光路管である。作業は現状の観測系の撮影状態と光軸を確認後、チャンバーB 架台交換の作業に合わせて M2 周辺機器の更新を実施し、光軸の調整を行って観測系を復旧させる。その後、ダミーフォイルと実フォイルを用いてフォイルの光学像を正常に捕えていることの確認を行う。なお、M3 側水平光路管から観測装置までの光学機器は 2019 年に更新が完了しているため、今回の作業の対象外である。

4.2 水平シフトバンプ電磁石用作業台の設計と設置

チャンバーB の架台ユニットの更新作業を実施する中で、MWPM4 の取外しと取付け作業がある。MWPM4 はチャンバーB 上部に設置されているため、高さ約 1.5 m の位置に立たなければ出来ない作業があるが、限られたスペースの中で多くの装置が設置されている入射部には、脚立などを固定できるスペースが無い。MWPM4 に隣接した水平シフトバンプ電磁石 2 と 3 の天板が作業性から非常に良い高さの位置であるが、この天板は人が乗って作業することを想定していないため、作業用の足場とするには不適切である。このため、転落等の労働災害を防止し、安全な作業エリアの確保を目的とした、水平シフトバンプ電磁石 2 と 3 の天板に設置する作業台を製作し、設置作業を実施した。

4.2.1 作業台の設計

作業台を設置する水平シフトバンプ電磁石天板の床面からの高さは約 1.5 m であり、労働安全衛生法で定める高所作業（2 m 以上）には該当しない。しかし、作業を安全に実施できるように、作業台には労働安全衛生規則で定める足場等の基準に準じる構造を取り入れた。転落防止措置として、作業台の足場となる床板には滑り止め加工の縞鋼板を採用し、さらに、高さ 90 cm の手摺をその足場床板を囲むように入口を除く三方に設けた。ただし、クレーン作業などの際に手摺が干渉する可能性があるため、この手摺は取り外しを可能とし、多種多様な作業に対応できるようにした。また、工具等の落下を防ぐ為に、足場の床板の周囲には高さ 10 cm の巾木を取り付けている。天板に設けた作業台に乗るためには、水平シフトバンプ電磁石導入バー用の保護柵の上面を経由しなければならない（図 4.2-1 参照）。しかし、電磁石天板とこの保護柵は約 60 cm 離れているため、足場床板を 161 cm×81 cm の長方形とし、電磁石天板に設置した作業台と保護柵の橋渡しを兼ねるようにした。

作業台は水平シフトバンプ電磁石 2 および 3 の上部に設置した。作業台の固定は、水平シフトバンプ電磁石天板にある電磁石鉄心の組立時に使用された既存のタップ（M16）を流用した。作業台下部に取り付けた四本の足をボルトオンで容易に、且つ安定して固定できる構造としている。これにより、作業環境が決して良くない中でも、短時間での固定作業が可能である。また、作業台全長を橋渡し用に長くしたため、天板と四本足だけの固定だと片持ち荷重になってしまう。そこで、作業台本体に固定されているスタッドボルトに取り付けた等辺山形鋼を保護柵の天板に乗せ、ボルトを調整する事により、作業台の傾き調整と作業台足にかかる荷重を導入バー保護柵に

分散できるようにした。水平シフトバンプ電磁石と作業台の組合せの模式図を図 4.2-2 示し、完成した作業台の外観を図 4.2-3 に示す。

4.2.2 作業台の設置

作業台設置作業はクレーン運転手を含め 5 人で作業を実施した。製作した作業台は、RCS の主トンネル内に設営されている周回クレーン (10 t/1 t) の 1 t の補巻により、安定、且つ容易に吊り上げ、移動、固定が可能である。主トンネルとは加速器本体が設置されているトンネルである。吊り上げ時は、ナイロンスリングとチェンブロックを用いて、作業台の水平バランスを調整しながら吊り上げた。作業の様子を図 4.2-4 に示す。吊り上げ運搬時、及び設置時には周辺機器との接触がないよう作業員が作業台を囲む形で四方に配置し、周辺機器との接触がない事を確認しながら実施した。設置作業にかかった時間は、一台あたり約 30 分である。また、チャンバー B 更新作業の作業性改善の為に、3 本ある保護柵連結金具の中央部の取り外しを実施した。作業台設置作業終了後の入射部の様子を図 4.2-5 に示す。

4.3 レーザートラッカーによるチャンバー B と MWPM4 の測量

遮蔽体設置に伴う機器の更新作業では、チャンバー B と MWPM4 をビームライン上から取り外し、チャンバー B の架台を遮蔽体が設置できる架台に更新して設置した後に、チャンバー B と MWPM4 の再設置を行う。MWPM4 は機器据付時に設計値に対して、 ± 0.2 mm 以内を目標精度として設置されており、チャンバー B は ± 0.5 mm 以内で設置されている。この様に高精度で据え付けられた機器を一度取り外して再設置する場合、ビームロスを低減させる観点から高精度の位置再現性を確保する必要がある。そのため ± 25 μm の測定精度を有する 3 次元精密測量機器であるレーザートラッカー (ライカ製 LTD600) を用いて精密アライメントを実施した。

4.3.1 精密アライメントの基準

今回の更新作業は入射直線部の局所的なエリアにおける機器の更新であり、レーザートラッカー本体を移動することなく精密アライメントが実施できることから電磁石を基準とした座標を構築してアライメントを実施することとした。基準とした電磁石は、本作業の上下流に設置されている四極電磁石 QFL01 と四極電磁石 QDL02 で、この 2 台の電磁石を基準電磁石に用いた。この四極電磁石は、7.858 m の間隔でビームライン上 (周回) に設置されており、レーザートラッカー LTD600 はその中央部の内周通路側に設置して精密アライメントを実施した。各電磁石の上部には、基準座が 2 カ所設けられており、精密アライメントではこの基準座に測量用専用治具を取り付ける。レーザートラッカーによる測量では、この専用治具の上部にコーナーキューブリフレクター (CCR) というミラーターゲットを置き、CCR の中心を電磁石の基準点として計測する。基準座標は、四極電磁石 QFL01 の上流側基準点を原点とし、QDL02 の上流側基準点を結んだ仮想軸で Z 軸を設定し、鉛直方向を Y 軸、外周方向を X 軸に設定した座標系を基準としてアライメントを実施した。精密アライメントの基準座標系を図 4.3-1 及び図 4.3-2 に示す。

4.3.2 取外し前の位置確認測量

ビームライン上の機器を分解する前に、MWPM4 やチャンバーB の再設置の位置データを取得する目的で、実配置の位置データを取得した。また、MWPM4 やチャンバーB の架台が遮蔽体を設置できる構造に更新されるため、取り外し前の架台の位置データについても取得する必要性が生じた。架台自体は元々 ± 0.5 mm 程度の据付精度で設置されたものであるが、上部に設置する MWPM4 の再現性やチャンバーB の組み込み精度に影響するため、架台の取り外し前に高精度の位置データが必要となった。その為、MWPM4 本体を取り外した MWPM4 用 XY ステージにアライメント用治具として CCR が設置可能なベースプレートを取り付けた。また、チャンバーB についても同様の据付精度で架台内に組み込まれているため、チャンバー上部のフランジ面にアライメント用治具として加工された測量専用の閉止フランジを取り付けた。これら専用治具の上面には傾斜測定が実施できるように面加工が施されている。

位置確認測量では、各測定点が見渡せる高さにレーザートラッカー LTD600 を設置し、四極電磁石の基準点と加速器トンネル内に設置されている壁基準点、MWPM4 本体、ベースプレート及びチャンバーB フランジ上面の各測定点に CCR をおき LTD600 を用いて位置データを取得した。また、取り外す機器の各基準面の傾斜についてもビーム軸方向と水平方向の 2 軸について測定を行った。位置確認測量の様子を図 4.3-3 に示す。

レーザートラッカーを用いた測定では取り外し対象機器の測定点と各基準点を同時に測定する事で、LTD600 を原点とした各点の相対位置を測定結果として出力する。ここで取得された位置データを、レーザートラッカーのソフト内で座標変換し、QFL01 の上流側基準点を原点とした基準座標系を構築した。取り外すタイミングが異なるチャンバーB とベースプレート及び MWPM4 も同様の方法で測定を行い、各々の測定結果を同じ基準座標系に変換し、精密アライメント用の基準座標として用いた。

4.3.3 精密アライメント作業

位置確認測量で取得した基準座標を基に、チャンバーB、ベースプレート及び MWPM4 の精密アライメントを行った。位置確認測量と同様の測定を行い、測定結果をレーザートラッカーのソフト内で QFL01 の上流側基準点を原点とした基準座標系に座標変換し、精密アライメント用の基準座標に合わせた。この操作で、精密アライメント時の各機器の現座標値を精密アライメント用の基準座標系に変換し、現在の座標値と基準座標値との差をリアルタイムでモニタ表示しながら調整することが可能となる。チャンバーB とベースプレートの精密アライメントは、 ± 0.05 mm 以内を目標に機器の調整を行った。精密アライメントの大まかな手順は、アライメント対象機器の上面の高さを基準座標近傍に調整後、基準面の傾斜の値を取り外し前の値近傍に合わせるよう傾きの調整を行い、最後に水平方向の調整を行った。この手順を何度か繰り返し実施して目標値に収まるまで機器のアライメントを行った。精密アライメントの様子を図 4.3-4 に示す。

アライメント調整後、チャンバーB とベースプレートは動かないように締結され、最後に再度位置確認測量を実施し、取り外し前と再設置時の差を確認した。トラッカー測定の結果を表 4.3-1 に示す。また、傾斜測量の結果を表 4.3-2 に示す。トラッカー測定の結果から取り外し前と再設置後の据付再現性は ± 0.1 mm 以内に収まった。

MWPM4 は、上下にマルチワイヤーを移動させる駆動機構を有しており、その駆動機構の上側と下側にレーザートラッカーの CCR を設置する部分を有している。その箇所は傾きも計測でき

るよう基準面が加工されているが、上下に基準があるためチャンバーB やベースプレートと同じような精度での調整には向かない構造となっている。通常、MWPM の測量では、基準点の位置データとその傾きから幾何学的にマルチワイヤーのビーム中心を算出して、ダクト内に設置した時のビーム位置の校正を行うことになっている。そのため、MWPM4 の精密アライメントでは、±0.5 mm の精度で位置調整を行い、傾きについては正負の符号を合わせる程度の調整とした。アライメント調整後、MWPM4 は動かないように締結され、最後に再度位置確認測量を実施し、取り外し前と再設置時の差を確認した。その結果を表 4.3-3 と表 4.3-4 に示す。

精密アライメントの調整は、大気圧の状態で行われたが、最終的には校正用のデータ取得のために真空状態で位置データを取得した。その結果を表 4.3-5 と表 4.3-6 に示す。

4.4 チャンバーB 架台ユニット更新作業

4.4.1 チャンバーB 架台の組立事前試験

作業エリアである入射部チャンバーB 周辺は放射線量が非常に高い場所である。作業を円滑に行うことで作業者の被ばくを極力減らすため、事前に 3GeV シンクロトロン棟地上 1 階組立調整室 1（非管理区域）にて製作した架台の組立及び遮蔽体設置の予行を作業手順書をもとに行った。作業の様子を図 4.4-1 と図 4.4-2 に示す。組立作業の予行の経験を踏まえ、作業手順書の修正及び必要工具、治具の見直しを行い実作業に臨んだ。

4.4.2 チャンバーB ユニットの取外し作業

図 4.4-3 に取外し作業前のチャンバーB と架台ユニットの写真を示す。取外し作業は、天井クレーン、チェーンブロックを用いて上部から順次分解し取り外していく。取外し作業の手順の概略イメージを図 4.4-4 に示す。天井クレーンのフックの最高位位置がフロア床面から約 2700 mm しかなく揚程に制限が有ることと、水平シフトバンプ電磁石 2、3 に挟まれた 390 mm という狭い空間であるため、吊り具の長さや吊り位置がかなり限定される。このため、事前に適切なサイズの吊り具を選定した。

①MWPM4 の測量

始めに、MWPM4 本体に接続されている信号用、モーター駆動用、リミットスイッチ用のケーブルを取り外した。取り外したケーブル類は先端部をビニール袋で包み以降の作業に干渉しない場所に退避させた。MWPM4 本体を引き抜く前に、現状位置の測量を行った。測量ポイントはモニタ本体に装備されている 2 か所の測量基準座で、レーザートラッカーを用いた 3 次元位置測定と、デジタル水準器を用いた基準座の水準測量を行った。

②MWPM 取外し

まず真空締結をしているステンレス製半割クランプを取り外し、MWPM4 本体側のベローズのタイロッドを使って縮め、真空フランジを切り離す。次に XY ステージとの固定ボルトを外して引き上げ準備が完了する。MWPM4 本体の引き抜きには天井クレーン補巻き (1t) を使用した。MWPM4 本体を真空容器から引き抜く際にはクレーンの揚程には余裕がないため、図 4.4-5 に示す専用の吊り治具を準備した。MWPM4 のモニタヘッド部は真空側にあるため、汚染されている

可能性がある。このため、吊り上げた MWPM4 の移動経路上をあらかじめ酢酸ビニールシートによる養生を施し、シートに沿って内周側の作業エリアまで静かに移動させた（図 4.4-6）。作業エリアまで移動させた MWPM4 本体は、モニタヘッド部の汚染検査のためのスミヤを実施した。汚染の程度は 10.0 kcpm (76 Bq/cm²) であった。続けて、密閉ケースをモニタヘッド部に取り付け、再びスミヤを実施して大気暴露面に汚染がないことを確認した。その後、主トンネルに隣接する DSP 交換ブースまで運搬し、再設置までの間保管した。

③MWPM4 用 XY ステージの現在位置の測量

MWPM4 本体とそれを支える XY ステージは勘合構造になっており、XY ステージを動かさない限り、MWPM4 本体を取り外してもアライメント作業を行わずに高い精度で元の位置に戻すことが可能である。しかし今回の作業では、XY ステージを取り外しかつ架台を新しいものに交換するため、再設置後のアライメント作業が必要となる。今回、新たに XY ステージの勘合構造部に取り付ける専用のアライメント治具（ベースプレート）を作成し、MWPM4 用 XY ステージを取り外す前に、現状位置の精密測量を行った（図 4.3-3 (C), (D)）。本治具には、基準となる水平面上に 4 か所のレーザートラッカー用基準座を有している。測量終了後に、MWPM4 用 XY ステージと MWPM4 用架台の撤去を行った（図 4.4-7 及び図 4.4-8）。XY ステージはベースプレートと一体にしたまま、スリングを XY ステージの足に取り付けてクレーンで吊り下し、保管した。MWPM4 用架台は新規作成のものに交換するため、解体撤去した。

④チャンバーB の現在位置のレーザートラッカーによる測量作業

MWPM4 の解体撤去後、レーザートラッカーによりチャンバーB の現在位置の測量を行った。測定ポイントは、MWPM4 接続フランジ上部である。MWPM 取り外し後に測定用のブランクフランジを取り付けた（図 4.4-9）。このフランジは再設置時のアライメント調整確認にも使用するため再設置まで取り外さない。そのためフランジ面のクリーニングを行い、He リークテスト対応可能状態で固定した。レーザートラッカーによる測量とは別に再組立て時の粗位置決めのため、レーザー墨出し器による墨出しをチャンバーB 各所に行った。

⑤チャンバーB 接続のダクト切り離しとダクト開口部の養生作業

ビームラインの開放作業となる。汚染拡大防止をはかるため、あらかじめ、開放箇所周辺部を酢酸ビニールシートで養生を行い、半面マスクとゴム手袋を着用して作業を実施した。チャンバーB に接続されているシフトバンプ 2 用セラミックダクト、シフトバンプ 3 用セラミックダクト、荷電変換側接続ベローズダクトのそれぞれ接続部のベローズを縮めて開口隙間から粘着シートを挿入しダクト開口部を密閉した。なお、チャンバーB のダクト接続ベローズの圧縮拘束及びチャンバーB の吊り上げのために、専用の治具を作製した。本治具によりベローズ標準長 57 mm を 40 mm に収縮しフランジ間に 17 mm の間隙を作った（図 4.4-10 参照）。

⑥チャンバーB 本体の取外し、移動

チャンバーB 本体に吊り上げポイントが無い。このため、新たに作製した接続ベローズの圧縮拘束治具に設けたアイボルトポイントにアイボルトを接続し使用した。吊り上げ時の振れによるダクトの破損防止のため、ダクト開口部の粘着シートの上からさらにプラスチック段ボールシー

トによる養生を施した。天井クレーンにナイロンスリング 1 本とチェンブロック 2 基を掛け、3 点吊りにて水平レベルを保った状態で水平シフトバンプ電磁石に干渉しない高さまで持ち上げ、前面通路側に移動させた。吊り上げの様子を図 4.4-11 と図 4.4-12 に示す。取り外したチャンバー B は、図 4.4-13 に示す運搬用架台に固定し地下 2 階搬入室に運搬した。

⑦ 架台ユニット下部の解体、撤去

チャンバー B を取り外し後、作業台に遮蔽シート設置用治具を取り付けた。治具のフックに厚さ 3 mm の鉛シートを吊り下げ下部を水平シフトバンプ電磁石架台に締結し、セラミックダクトフランジ部を遮蔽した。

XY ステージ上面のチャンバー足を固定していた場所にアイボルトを取り付け、天井クレーンとチェンブロックを用いて水平に浮かせた状態で前面通路側に移動撤去した。XY ステージ撤去後 MWPM4 架台設置ベースの撤去、架台脚を順次分解して撤去した。チャンバー B 及び架台ユニット取り外し中の入射部の様子を図 4.4-14 に示す。

4.4.3 オフライン作業

取り外したチャンバー B を主トンネルから地下 2 階搬入室へ移動させ、オフラインでの作業を実施した。まず、チャンバー B 自身が放射化されているため、3 基のコンクリート遮蔽体を設置してオフライン作業エリアと通路を区画した (図 4.4-15)。チャンバー B から 1.5 m 離れた位置での空間線量は 15 $\mu\text{Sv/h}$ であったが、コンクリート遮蔽体を設置することでバックグラウンド (0.1 $\mu\text{Sv/h}$) となった。

① チャンバー B の組み込み

既設ビームラインから取り外したチャンバー B 本体を新たに設置する架台ユニットに取り付け、高さ調整し、仮固定を行い、干渉等の問題がないことを確認した (図 4.4-16)。再利用する物は、チャンバー B 本体とエレクトロンキャッチャーであり、これまでの架台ユニットで使用していたチャンバー B 本体の支持架台は使用せず、新たに新型架台ユニット用に製作したものを使用した。

② オフライン作業エリアの構築

W1 真空窓の交換作業とエレクトロンキャッチャーのクランプ交換作業を実施する際に、チャンバー B 内部を開放することによりチャンバー内部の汚染が外部に広がる恐れがある。このため、汚染拡大防止の措置としてオフライン作業環境の構築を行った。

新型架台ユニットに組み込まれたチャンバー B 周辺の床を酢酸ビニールシートで覆った後、作業ブースを設置し、周囲と区画化した。作業ブースは 40 mm 角アルミフレームによる枠組みと内面を酢酸ビニールシートで囲う構造である。作業ブースの構造を、図 4.4-17 に、外観を図 4.4-18 に作業ブースの外観を示す。作業ブースは作業室と出入口の前室の 2 部屋から構成される。前室にて汚染防護処置をした上で作業室に入り、作業室から出る際は、作業室で防護装備を外し前室に移動、全身サーベイを行い汚染物付着が無いこと確認した上で退出する。各部屋の出入り口は、汚染の広がりを抑えるため、酢酸ビニールシートを 2 重に重ね合わせて暖簾のように垂らしている。作業者の防護装備は、タイベックスーツ、全面マスク、オーバーシューズ、ゴム手袋、腕カバーを着用した。

③チャンバー内除染作業

チャンバー内面に汚染があるため、可能な範囲で除染処理を施した。除染は開口部に貼り付けた粘着シートをわずかにはがし、その隙間から腕を入れて実施した。チャンバー内を隈なく除染するため、粘着シートをはがす位置を少しずつ替えながら実施した。チャンバー内面の除染は粘着シートの粘着面に汚染物を固着させる方式を繰り返し行い、接合フランジ面はベンコットにアルコールを含侵させて拭き取りを実施した。除染作業の様子を図 4.4-19 に示す。

除染前は、上流側 20.3 kcpm (154 Bq/cm²)、下流側 20.4 kcpm (155 Bq/cm²) であった。除染作業後は、上流側 1.4 kcpm、下流側 1.0 kcpm となった。除染完了後のチャンバーB 内部の様子を図 4.4-20 に示す。

④W1 真空窓の交換と内部光学機器の状態確認

チャンバーB 内面の除染後、W1 真空窓の交換を実施した。W1 真空窓が取り付けられているフランジのボルトを緩め、2 本だけ残した状態にした。次に W1 真空窓をビニール袋で覆い、フランジの首の位置でビニールの口をきつく結んだ後、2 本のボルトを取り外して真空窓、ガスケット、ボルトをビニール袋内に回収した (図 4.4-21)。フランジ開口部にはすぐに除染用ベンコット入りのビニール袋を取り付け、ベンコット拭きによる除染を繰り返し実施した。結果、除染前は、2.7 kcpm (20.5 Bq/cm²) であったが除染作業後は、440 cpm (3.3 Bq/cm²) となった。フランジ面の除染後、準備した合成石英製の W1 真空窓を取り付けた。取り外した W1 真空窓を図 4.4-22 に示す。長期間放射線にさらされたことにより、透明度を失って濃い赤褐色に変色していた。一方でチャンバーB 内部に設置されている M1 反射鏡と光源反射板はともに表面に曇りや変色及び異物の付着等もなく、鏡面状態を維持ししていた (図 4.4-23、図 4.4-24)。このため、これらの機器については特に処置はしていない。

⑤エレクトロンキャッチャークランプ交換

エレクトロンキャッチャーはチェーンクランプにてチャンバーB に真空締結されているが、同型のチェーンクランプは他の箇所でも割れが発生した実績が複数件あり、真空リークを引起こすリスクがあった。このため、割れの心配のない割クランプへと交換した。

取り外しの際には汚染の飛散防止処置として、養生シートでエレクトロンキャッチャー接続ポートを覆うように施した。エレクトロンキャッチャーを支えるための治具と昇降用のジャッキを準備し、養生シート内にてチェーンクランプを取り外してエレクトロンキャッチャーを取り外した。なお、エレクトロンキャッチャーは図 4.4-25 に示す様にクランク形状をしているため、接続ポート内径と干渉しないようエレクトロンキャッチャーを斜めに支え抜き出した。引抜きの様子を図 4.4-26、図 4.4-27 に示す。

エレクトロンキャッチャー本体の汚染状況を確認したところ、コンポジットカーボン製のブロック表面で 7 kcpm (53.2 Bq/cm²)、支柱で 950 cpm (7.22 Bq/cm²)、フランジ内部で 450 cpm (3.42 Bq/cm²) であった。アルコールを含侵させたベンコット払拭によりエレクトロンキャッチャー本体を除染し、汚染がバックグラウンドまで低下したことを確認した。その後、真空シールを新品のものと交換して取り外し時と同様に、エレクトロンキャッチャーを斜めに支えチャンバーB 内に挿入し、割クランプを取り付けてエレクトロンキャッチャーを設置した。交換前後の写真を図 4.4-28 と図 4.4-29 に示す。

⑥補完作業部位の He リークテスト

ダクト接続部に試験用封止フランジを取り付け、可搬式真空排気セットにて排気して He リークテストを行った (図 4.4-30)。リークレートの管理基準は、 $1.0 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下である。特に、W1 真空窓とエレクトロンキャッチャーの取り付けフランジはビームライン据付後のシール交換作業が困難なため、重点的にリークテストを実施し、リークがないことを確認した。

⑦ビームライン組み込み向けの分解

個々の作業が終了した段階でチャンバーB と新型架台ユニット表面、作業エリアの床面、作業エリア側壁のスミヤを行い汚染が無いことを確認した後、作業ブースを解体した。その後、ビームラインに据付を行うにあたり架台ユニットを組み込みの際の単位ごとに分割した (図 4.4-31)。

4.4.4 設置作業

設置作業は、水平シフトバンプ電磁石 2 および 3 の空間に天井クレーン、チェンブロックを用いて周辺機器と接触しない様に注意して架台ユニット下部から順次組上げていく。設置作業の手順の概略イメージを図 4.4-32 に示す。

①架台ベースプレートの設置

シフトバンプ電磁石 2、3 のダクト間距離よりもベースプレートの横幅の方が長いため、据え付ける状態での搬入ができない。このため、立てた状態で吊り込み、床面で水平に展開した。吊り上げの様子を図 4.4-33 及び図 4.4-34 に示す。

ベースプレートには、センター位置のケガキ線を事前に入れており、レーザー墨出し器を使用して位置調整を行い、水平レベル調整には床面との間にライナーを使用して行った。固定は既存のアンカー穴を利用しているが、位置調整を可能とするためにユニバーサルワッシャーを使用している。ベースプレート設置後を図 4.4-35 に、その後の観測系ダクト設置後を図 4.4-36 に示す。

②架台足、強化ベース、トッププレート、XY ステージの組み込み

観測系光学機器の設置が済んだ状態で架台の脚を取り付けた。その後、強化ベース、トッププレート、XY ステージの順番でそれぞれ天井クレーンを使用して取り付けた。一括での組み込みは、高さが水平シフトバンプ電磁石のコイルに干渉する為、分割して組み込んだ。また、幅寸法でシフトバンプ 2、3 用セラミックダクトに干渉する為、内周通路側からブスパー防護柵上部を水平に横に移動させて搬入した。作業の様子を図 4.4-37 に架台ユニット下部の設置完了後を図 4.4-38 に示す。強化ベース、トッププレート、XY ステージには、それぞれ側面にセンター位置のケガキ線を入れており、都度位置の確認を実施して進めた。取り付け完了後に観測系光学機器の光軸調整の際に W1 真空窓と M2 反射鏡を繋ぐ W1-M2 間光路管のベローズと強化ベースの枠が干渉することが判明した。このため、強化ベースを下流側に可能な限りシフトして再度取り付けを行った。

③チャンバーB 架台の組み込み

チャンバーB を組み込んだ架台を水平シフトバンプ電磁石 2、3 に干渉しないよう上部から挿入する形で設置した (図 4.4-39 及び図 4.4-40)。チャンバーB は架台の上部にアイボルトを取り付

け、取り外し時と同様、ナイロンスリングとチェーンブック 2 基の 3 点吊りにより水平状態を維持するように吊りこんだ。チャンバーB のベローズフランジ面とセラミックダクトフランジ面の間隙は取り外しの時と同様に 17 mm である。吊り込む際、ダクトへの接触保護のため 3 方をプラスチック製段ボールにて養生を行った。

吊り込み搬入後、レーザー墨出し器により架台の粗い位置合わせを行い固定した。架台側面センター位置にケガキ線を入れてある。

④チャンバーB へのダクト接続

レーザートラッカーによるチャンバーB の精密アライメント完了後、水平シフトバンプ電磁石 2 側セラミックダクト、水平シフトバンプ電磁石 3 側セラミックダクト、荷電変換フォイル装填側ベローズの真空締結を行った。それぞれのダクトの接続は、開口部の養生用粘着シートをフランジ間から抜き出し、デルタシールガスケットを片方のフランジに装着する (図 4.4-41)。圧縮していたベローズを均等に伸ばしてガスケット、フランジが平行に密着した状態でフランジ用クランプにて締結した。

⑤MWPM4 用 XY ステージの再設置及びアライメント作業

新たに設置された MWPM4 用架台の上に、アライメント治具と一体の状態では保管しておいた MWPM4 用 XY ステージをクレーンで吊り上げて設置した (図 4.4-42)。設置後、XY ステージの高さ及び水平位置についてレーザートラッカーを用いた高精度アライメントを実施した。

⑥MWPM4 本体の再設置

MWPM4 本体の再設置作業は引き抜き作業と同じ作業を逆工程で実施した。モニタヘッド部に付着している放射化物の汚染拡散を防ぐための養生シートを設置し、天井クレーンにて MWPM4 を垂直に吊り上げた状態で、密閉ケースを取り外して、チャンバーB の取り付けポートまで移動した。MWPM4 本体は、XY ステージとの勘合構造に導くガイドに沿わせてクレーンで吊り下ろした (図 4.4-43)。本体を XY ステージに固定した後、MWPM4 のベローズのタイロッドを伸ばして MWPM4 のフランジが真空容器のフランジに着地するまで下げた。そして最後に、新たに準備したネジ脱落防止機能付きのアルミ製半割クランプに交換して真空締結を行った (図 4.4-44)。

架台ユニット更新完了後を図 4.4-45 に示す。

⑦MWPM4 本体再設置後の干渉確認及び再測量

MWPM4 本体の精密測量をレーザートラッカーおよびデジタル水準器にて行った。この測量は、モニタヘッドの位置補正が目的であり、アライメント作業は行わない。測定は真空排気後に実施し、取り外し前の測量結果からの設置位置の誤差は (ΔX 、 ΔY 、 ΔZ) = (0.062 mm、0.449 mm、0.162 mm) となり、これらの値は MWPM4 によるプロファイル測定のアライメント値として利用する。

⑧ビームラインの真空排気と He リークテスト

全ての接続が完了したところで本作業での開放作業箇所及び周辺部の He リークテストを実施した。ビームラインバルブ (GV27、GV02) にて仕切られた入射部セクションを 2 台の可搬式真

空排気セットで排気した後、He リークディテクタで高真空排気し、高感度で安定した状態でリークテストを実施した。He リークテストは個々の接続部をフード法にて実施した。結果、すべてのテスト対象箇所でのリークレートは、 $1.0 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下であった。

⑨内部構造物の干渉確認

リークテストの完了後、チャンバーB 内部構造物の干渉確認を実施した。荷電変換フォイルはチャンバーB の外周側からチャンバーB 内部に向かって挿入して使用するが、挿入時の荷電変換フォイルの 6 mm 下流側にエレクトロンキャッチャーが配置されている。また、MWPM4 の動作時は荷電変換フォイルの 25 mm 上流側を上下に駆動する。今回の作業でチャンバーB 本体、MWPM、エレクトロンキャッチャーそれぞれ取付け・取外しを行ったため、作動時に接触等の干渉がないか確認を行った。確認に際しては荷電変換フォイル、MWPM4 とともにマニュアル操作で少しずつ挿入しながら慎重に行った。図 4.4-46 に荷電変換フォイルと MWPM4 をチャンバーB 内に既定位置に挿入した際のチャンバーB 内部の様子を示す。目視確認の結果、各機器のクリアランスは取り外し前と変わりなく問題なかった。

4.5 荷電変換フォイル観測系更新作業

4.5.1 荷電変換フォイル観測系の概要

荷電変換フォイル観測系の概略図を図 4.5-1 に示す。荷電変換フォイル観測系は荷電変換フォイルを映像で常時観察するための装置である。ビーム運転中、荷電変換フォイルの周辺は非常に強い放射線場となるため、フォイルの近傍にカメラを置くことはできない。このため、フォイルの光学像を光路管と 4 枚の反射鏡及びレンズ群により 8.2 m 離れたサブトンネルまで導き、観察している。荷電変換観測系は光路管と 4 か所に設置された反射鏡 (M1、M2、M3、M4)、真空と大気を隔てる真空窓 (W1)、主トンネルとサブトンネルの大気を隔てる気密窓 (W2)、観測点でフォイル像を結像させるレンズ群及びレンズ群の駆動機構と 3 か所のカメラポートを備えた観測装置で構成される。

更新対象箇所はチャンバーB に締結されている W1 真空窓、M2 反射鏡、W1 真空窓と M2 反射鏡をつなぐ W1-M2 間光路管、及び M2 側水平光路管である。また、主トンネルとサブトンネルの間の光路として使用しているスパイラルシース管の内側にレンズの保護と解像度の向上を目的としてガイド管を挿入する。ガイド管はアルミ製で全長 2.3 m、内径 160 mm 厚さ 3 mm の薄肉管であり、フォイル像の迷光防止対策として内面を黒色塗装し、間に内径 134 mm の絞り環 3 枚を備えている。

4.5.2 荷電変換フォイル観測系更新作業

(1) 光軸の現状確認

光路更新作業では、まず現状の光軸位置の確認を実施した。W1-M2 間光路の一部を取り外し、W1 真空窓面にターゲット板を設置し、サブトンネルにある観測装置末端からレーザー光を照射した。開放した W1-M2 間光路を図 4.5-2 に、観測装置に取り付けたレーザー照射治具を図 4.5-3 に示す。治具の中心軸に対するレーザーポインターの傾きを補正するため、中心軸に沿って

レーザーポインターを回転させることが可能である。レーザーポインターを 360 度回転させてターゲット板に照射した様子を図 4.5-4 に示す。レーザーポインターの輝点が描く円軌道の中心とターゲット板の中心はほぼ一致していた。これより、光軸は W1 真空窓のほぼ中心を通っていることが確認できた。よって、光路更新後の光軸調整では現状の光軸位置と同じく W1 真空窓の中心に合わせることを目標にした。

(2) 既設観測系機器の撤去

チャンバーB 架台ユニットの更新作業では、チャンバーB のビームラインから切り離した後、1 週間程度はオフライン作業のため、入射部エリアでの作業はない。このため、チャンバーB がビームラインから切り離し完了後に、荷電変換フォイル観測系の更新作業を本格的に開始した。

現状の光軸の確認に用いた W1 真空窓はチャンバーB と共に切り離されたため、あらたな光軸確認用のターゲットとして W1 真空窓を模擬した位置にレーザー投影板を設置し、チャンバーB 撤去後の光軸確認を実施した。その様子を図 4.5-5 に示す。その後、W1-M2 管光路、M2 反射鏡、M2 側水平光路管の順に観測系光学機器の取り外しを行った。観測系光学機器取り外し前後の様子を図 4.5-6 に示す。

M2 周辺機器が撤去された状態で M2 反射鏡の後方にあるブスパー保護金網に向けてレーザーを投影し、光軸位置の確認を実施した (図 4.5-7)。その後、サブトンネルに設置されている観測装置の現在位置及び傾きの測量を実施した後、天井に取り付けられている観測装置を取り外した (図 4.5-8)。準備したガイド管を貫通孔に挿入・固定し、観測装置を天井に固定した (図 4.5-9)。ガイド管設置後の光軸のズレを確認するため、ブスパー保護金網に向けて再度観測装置底部からレーザー光を投影した。光軸のズレは下流側に 50 mm、床面方向に 40 mm であった。このズレは M3 反射鏡の角度調節機構を微調することで修正した。

(3) 新観測系機器の設置と光軸調整

チャンバーB のベースプレートを設置するため、観測系の更新作業を中断した。ベースプレートの設置完了後、M2 側水平光路管と M2 反射鏡の設置を行った。M2 反射鏡の更新前後の比較を図 4.5-10 に示す。その後、チャンバーB の強化架台を設置するため、再度観測系の作業を中断した。強化架台設置完了後、M2 反射鏡に対してレーザー光を投影し、M2 反射鏡の中心に輝点が来るよう M3 反射鏡の角度を再調整した (図 4.5-11)。M3 反射鏡の調整完了後、W1 の模擬位置に置いたレーザー投影板に対してレーザー光を投影し、更新前の光軸位置を再現するように M2 反射鏡の角度の調整を実施し、光路更新前とほぼ同じ位置を再現できたことを確認した後、チャンバーB 再設置のため、レーザー投影板を取り外した。

チャンバーB がビームラインに戻され、アライメントの調整完了後、更新した W1 真空窓に対して光軸測定を行い、更新前と同様に W1 真空窓の中心を通っていることを確認した。その後、W1-M2 管光路を取り付けた。

(4) 映像確認

チャンバーB と荷電変換フォイル駆動装置が機械的に接続された後に、チャンバーB 内部の映像確認を実施した。最初に荷電変換フォイルを模擬したダミーフォイルにより大気圧状態で映像確認を行った。ダミーフォイルの外観を図 4.5-12 に、更新前後のダミーフォイルの観測像を図

4.5-13 に示す。結果、観測系の更新前とほぼ同様の位置でフォイル像を捉えていることが確認できた。また W1 真空窓を更新したことにより、これまで不明瞭で全体が暗い赤褐色化していたフォイル像は鮮明かつ自然な色合いになった。ダミーフォイルで映像確認が成功したため、利用運転で使用する予定の実フォイルを用い、真空状態で詳細な調整を実施した。光路更新前後での実フォイルによる映像の比較を図 4.5-14 に示す。映っているフォイルは同種同様の日本原子力研究開発機構製 HBC フォイル[11]であるが、夏期メンテナンス期間中にフォイルの交換をしているため、同一フォイルではない。更新によりフォイルの観測像は明瞭となり色合いもチャンバー内を目視した時と同様に自然になった。また、更新前は画面右端に不可視領域が存在したが、M2 反射鏡の設置角度を注意深く調整することにより可視領域を拡大することができた。

5. 遮蔽体設置効果の検証

利用運転停止直後の残留線量が高い状態で自営作業にて遮蔽体を設置し、その遮蔽効果の確認を行った。作業は利用運転停止後から4日経過した2020年12月25日に実施した。

設置作業は作業監督者1名、クレーン操作1名、玉掛・合図者1名、鉤手によるガイド者1名の合計4名で実施した。設置作業に要した時間は入射部への遮蔽体運搬に約5分、外周側遮蔽体設置に約10分、内周側遮蔽体設置に約7分であった。遮蔽体の取り外しは内外周ともに5分以内に完了した。当初の目的通り、迅速かつ容易に設置できることが確認できた。

設置作業完了後、遮蔽効果の確認を入射部の内外周両側について実施した。測定点を図5-1に示す。内周側はシフトバンプ電磁石のコイル及びチャンバーの中心から30 cm 間隔で格子状に測定を実施した。図5-1の薄ピンクで囲われた場所がシフトバンプ導入バー保護金網を超えてアクセスするチャンバーB直近の作業エリアである。一方、外周側は半分以上が床から80 cm ほどの高さのグレーチングでおおわれており、さらに第1から第3荷電変換装置が設置されているなどしているため立体的な構造をしている。このため、内周側のように格子状に測定することが難しいため、代表的な作業者の作業位置について測定を実施した。測定器はGMサーベイメーター(TGS-R74)を用いた。

内周側の測定結果を図5-2に示す。図5-1で示した作業エリアを白枠で示している。遮蔽設置前はこのエリアの線量は大部分で50 $\mu\text{Sv/h}$ を超えていたが、遮蔽後はおよそ半分以下に低減されている。一方で、入射部が放射化により高線量になっている原因がチャンバーBだけでなくシフトバンプ電磁石3の上流側コイルとチャンバーCにもあることがわかる。図5-3に遮蔽体設置前後でのチャンバーB、Cそれぞれの中心からの距離に対する線量率の変化を示す。チャンバーBから離れるほど遮蔽の効果がなくなるが、近い位置では空間線量を半分以下に低減できていることがわかる。一方、チャンバーCでは遮蔽設置前後でほとんど線量率の変化はなく、この位置では遮蔽体の効果が全くない。入射部の線量をさらに低減するにはチャンバーBだけでなく、チャンバーCにも遮蔽体の設置が必要である。

次に外周側について遮蔽体設置前後での線量率の変化を図5-4に示す。外周側では内周側と比べて遮蔽体の効果はなかったが、チャンバーの直近の⑨、⑩位置では遮蔽体の効果が確認できた。

6. 作業管理・被ばく管理

6.1 事前線量測定と作業準備

放射線作業において、作業者の被ばくをできる限り低く抑えることは放射線管理上非常に重要である。一方でRCS入射部は残留線量が非常に高いエリアであり、ここで作業する以上、一定程度の被ばくは避けられない。そこで本作業を通しての被ばく線量を推定するため、入射部での作業エリアを図6.1-1に示すよう5つに区分し、作業パートごとに作業エリアと作業時間を見積り、各作業エリアの空間線量率の予測値を基に作業員毎に被ばく線量を算出した。

入射部作業エリアの空間線量の測定結果と予測値を表6.1-1に示す。測定値は2020年4月20日の500kWでの利用運転停止直後の値である。運転計画ではビーム強度は後に600kWに上昇する予定であったため、600kWでの利用運転停止直後の推定値として500kWの実測値を1.2倍した上で直近の値に繰り上げた値を使用した。また、事前の線量評価を行うにあたり、被ばく線量の見積もりが過大にならないよう作業期間を3つに区分し、それぞれビーム停止からの経過日数に応じて減衰を考慮した補正を行い、被ばく線量を算出した。

図6.1-2に2016年の夏期メンテナンス時にコリメーター直下流の放射化したチタンダクトの減衰傾向をビームロスモニタとGMサーベイメータで測定した結果を示す[12]。フィッティングにより14日経過で元の値の0.5倍、21日経過で0.4倍、49日経過後は0.25倍になることが予想された。測定箇所はコリメーター直下のチタンダクトであり、入射部とは周辺環境が異なるが、チタン製のチャンバーBにも同様の傾向があると考え、この測定結果を基に入射部の減衰モデルを作成した。RCSのビーム停止は6月29日で、作業期間は7月16日から9月30日までの予定である。このため、ビーム停止から17日経過した7月16日からの作業に対してはビーム停止直後の推定値に対して0.5倍した値を、ビーム停止から28日後の7月27日からの作業に対しては0.4倍した値を、49日後の8月17日以降の作業に対しては0.25倍した線量率を被ばく評価に用いた。

次に入射部で予定している各作業について被ばく線量を推定するため、作業手順書を基に作業内容を細かく作業単位に分解した。作業手順書の一例を表6.1-2に示す。作業単位毎での作業場所に対する人員の配置と作業時間を見積り、推定した作業場所ごとの線量率から各人の被ばく線量を算出した。この方法により算出した各作業の被ばく線量の推定値を表6.1-3及び表6.1-4に示す。事前の推定では全ての作業員について被ばく線量は1mSvを超えず、最大で765μSvであった。この結果より、作業員の被ばく線量を1mSv以下に抑えることを目標に作業を行うことにした。被ばくを低減するために講じた対策を次項に示す。

6.2 被ばく低減対策

(1) 作業開始時期の調整

工程管理上可能な限り作業開始時期を遅らせることでビーム停止からの冷却期間を確保した。特に長時間チャンバーBへの近接が必要な切り離し作業を8月17日以降にしたことで冷却期間を7週間確保することができ、被ばくを低減することができた。

(2) 鉛マットによる遮蔽

チャンバーB 近傍作業での被ばく線量を低減するため、遮蔽用の鉛マットを準備し各所に配置した。図 6.2-1 にシフトバンプに設置した作業台上に配置した鉛マットの写真を示す。厚さ 3 mm、300 mm×600 mm の鉛マットを 2 枚並べている。表 6.2-1 に鉛マット配置前後での線量率を示す。鉛マットの設置により作業空間の線量がおよそ 10%低減できた。また、チャンバーB をビームラインから取り外し後にダクト開口部に対して鉛マットを配置した。図 6.2-2 にビームライン開口部に配置した鉛マットの写真と表 6.2-2 に鉛マット配置前後での線量率の変化を示す。チャンバーが取外されたことで③位置での線量は 2 割ほど減少した。これはチャンバーB 自身が強く放射化されていたため、撤去されたことにより③位置での線量減少に寄与したためと考えられる。さらに上下流セラミックダクトの開口部に鉛マットを設置すると 4 割減少した。

④位置ではチャンバーB の取り外し後に線量が約 4 割増大したが、鉛マットの設置により半分近くまで減少した。一方で⑤位置では取り外しにより 1 割程線量が減少したが、鉛マット設置による効果は 1 割ほど減る程度であった。これは、チャンバーB 下流側のセラミックダクトの放射化による線量への寄与がチャンバーB 以上に強く、チャンバーB 取り外しにより下流側からの寄与に対して遮蔽効果がなくなったため、④位置での線量上昇に繋がったと考えられる。それに対して⑤位置ではチャンバーB 上流側のダクトの放射化による寄与がチャンバーB よりも小さいため、チャンバーB を取り外しても影響が少なかったためと考えられる。

(3) 掲示による注意喚起

入射部では様々な作業グループが作業を予定しており、ある作業が終了次第、すぐに次の作業グループが別の作業に取り掛かることが予想された。また作業の内容によっては機器の立上げや調整に待ち時間が生じる場合や、作業前や作業中の段取りや打合わせなども頻繁に発生する。こうした作業時以外の被ばくを少しでも低減させるため、作業待ち中の待機エリアを区画・明示し、作業員に対して作業中以外は高線量エリアから離れて待機エリアにて待機するよう教育を実施した。待機エリアは入射部の様子が見渡せてかつ空間線量率が 1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下になる場所に設定した。

また、高線量エリアでの作業であること作業者が常に自覚できるよう、入射部の場所ごとに空間線量率の測定値を目立つように掲示した。図 6.2-3 にその様子を示す。

(4) 移動用ステップの配置

入射部作業の多くは図 6.1-1 の③に示すシフトバンプ電磁石導入バーの保護金網とチャンバーB の間の狭い空間で行われる。この場所は放射化した機器に非常に近接しているため空間線量率は 100 $\mu\text{Sv/h}$ を超える。作業での被ばくを低減するにはこの場所での滞在時間をできる限り短くする必要がある。一方でこの空間の手前には高さ 70 cm 程のブスバー保護金網があるため、この空間への出入りの際にはこれを跨ぐ必要があった。これまでの作業経験上、この金網が心理的・身体的な負担となり作業に待ち時間が生じても金網の外側への退避が億劫となり内側で待機する事例が散見された。このため、金網を跨ぐ行為の負担を下げるために金網の両側にステップを配置して容易に跨げるようにした。ステップは速やかに移動や撤去が行えるよう軽量で小型のものを選定した。配置したステップを図 6.2-4 に示す。

6.3 線量測定と被ばく管理

(1) 入射部作業環境の線量測定

減衰モデルの妥当性と被ばく低減対策の効果を検証するため、作業期間中、入射部の空間線量率の測定を実施した。その結果を図 6.3-1 に示す。ビーム停止から 17 日経過した 7 月 16 日の線量率の測定値はすべての測定点で予想値とほぼ同じ値となった。さらに 28 日経過した 7 月 27 日の測定でも同様であった。しかし、8 月 17 日の測定ではすべての評価点で予想よりも実測のほうが大きくなった。減衰モデルに対して入射部の実際の環境では長半減期核種の存在比が多く、その影響が大きくなったためと考えられる。実測の値を基に被ばく評価を再計算したが 1 mSv を超えないことが確認できたため、引き続き被ばく線量に注視し作業を継続した。8 月 19 日にチャンバー B 取り外し後にセラミックスタクト開口部に鉛マットの遮蔽を設置した。鉛マットの設置により入射部の作業環境の空間放射線量を低減することができた。特に③位置は 100 $\mu\text{Sv/h}$ から 49.8 $\mu\text{Sv/h}$ へ半減させることができた。これにより荷電変換観測系の更新作業やチャンバー B の新架台設置作業時の被ばく低減に大きく寄与できた。一方で、9 月 14 日の測定では③位置の線量が大きく増加している。これは 8 月 31 日にチャンバー B をビームラインに再設置した際にセラミックスタクト開口部に設置した鉛マットを取り外したことで、放射化しているチャンバー B がビームラインに戻ったことによるものである。

(2) オフライン作業環境の線量測定

チャンバー B をビームラインから切り離し、地下 2 階搬入室でのオフライン作業の際にチャンバー B 単独での線量測定を実施した。その結果を表 6.3-1 に示す。上下流側及び外周側のフランジ開口部は養生用ビニールシート越しで測定した。最も線量が強かったのは下流側フランジの中心付近で養生用ビニールシートの表面から 50 cm 離れた位置で 67.3 $\mu\text{Sv/h}$ であった。下流側フランジ付近には銅ブロックとコンポジットカーボンからなるエレクトロンキャッチャーが配置されており、これらが強く放射化しているためと考えられる。想定していたオフライン作業場所での線量 (80 $\mu\text{Sv/h}$) と同程度であることが確認できたため、追加の遮蔽等の措置は講じずオフライン作業を実施した。

(3) 個人線量の積算

RCS 施設ではインターロックエリア (主トンネル、サブトンネル) 内での個人線量計としてアラーム付きポケット線量計 (APD) を使用している。この線量計は装着時間とその間の被ばく線量が 0.01 mSv 単位で表示される。被ばく量は積算され 1 週間で 0.5 mSv に達すると警報を発するが 1 週間ごとに積算値はリセットされる。各作業者の被ばく線量の積算を迅速に把握するため、APD 返却時ごとに装着時間と被ばく線量を記録しこれを積算して過剰な被ばくがないことと予測線量との乖離がないかの確認を毎日行った。

6.4 被ばく線量の実績

(1) チャンバーB 架台ユニット更新作業

被ばく線量の実績値を表 6.4-1 に示す。作業日数は 27 日、延べ作業員数は 137 人となった。個人最大被ばく線量及び被ばく線量の合計は予想とほぼ同じ結果となった。当初作業員は 9 名の予定であったが、最終的に作業に携わった人数は 17 名となった。作業員数を増やすことで被ばくを分散させることができた。特に作業後半では 600 μ Sv を超えてきた人が増えてきたが、これらの人については作業役割の入れ替えや、場合によっては作業から外れるなどして 1 mSv を超えることがないように管理した。

表 6.4-2 に作業局面ごとの被ばく線量を、図 6.4-1 に各作業員の被ばく線量の積算値を示す。7 月 27 日から 7 月 28 日にて MWPM4 の取り外し作業を実施した。同様の取り外し作業を 2013 年に実施したことがあったため、滞りなく作業を実施することができた。

8 月 17 日-18 日の 2 日間でチャンバーB の取り外し作業を実施した。取外し作業は経験のない作業であったが、予想よりも順調に進んだ。結果、取り外しが完了した 8 月 18 日作業終了時での作業員全員の被ばく線量の総和は 1.12 mSv であり、予想した 2.01 mSv に対して半分程度に抑えることができた。しかし、8 月 19 日から実施したオフライン作業ではチャンバーの仮組と作業ブースの設営に想定よりも時間を要したため、予想よりも被ばくが大きくなっている。さらにチャンバーB 再設置後の真空締結の際にチャンバーB とシフトバンプ電磁石 3 側のセラミックスタクトとの間でガasket の据付不良によるリークが発生した。これによりリーク個所の特定とガasket 交換・再締結の作業が追加で必要になったため被ばく線量が予想よりも大幅に増えてしまった。

(2) 荷電変換光路更新作業

被ばく線量の実績値を表 6.4-3 に示す。作業日数は 17 日、延べ作業員数は 82 人であった。個人最大被ばく線量、および総被ばく線量の合計は予想よりも大幅に低く抑えることができた。表 6.4-4 に作業局面ごとの被ばく線量を、図 6.4-2 に各作業員の被ばく線量の積算値を示す。7 月 16 日-17 日の 2 日間で W1 真空窓位置での光軸確認を行った。加速器の運転停止から間もない高線量下での作業であったが、予想よりも順調に進んだため、被ばく線量を抑えることができた。一方、ガイド管設置後に M3 ミラーの調整が必要になったため、光軸調整での被ばく線量が予想よりも増えてしまった。

(3) レーザートラッカー測量作業

被ばく線量の実績値を表 6.4-5 に示す。予想と比較して少ない被ばく線量で作業を実施することができたが、各作業員の被ばく線量に偏りが生じた。レーザートラッカーのミラーターゲットを機器に設置する際に高線量エリアに近接する必要があるが、ターゲットの取扱いには熟練が必要のため、特定の作業員がターゲットの設置を行ったためである。

(4) エレクトロンキャッチャークランプ交換作業

8 月 21 日にエレクトロンキャッチャークランプ交換作業を実施した。被ばく線量の実績値を表 6.4-6 に示す。エレクトロンキャッチャー自体はチャンバーB 下部に設置されているため、取付け取外し作業のほとんどがしゃがみこんだ低い姿勢での作業となった。このため、チャンバーB

に近接しての作業であったが、線量が強いビーム軸中心から距離をとることができたため、予想よりも少ない被ばく線量で作業を実施することができた。作業に要した時間は約 5 時間であった。

(5) シフトバンプ作業台構築・解体

シフトバンプ上へ作業台設置と連結金具の取外し作業は7月20日に、作業台解体と連結金具取付け作業は9月14日に実施した。被ばく線量の実績値を表 6.4-7 に示す。両作業とも、順調に進んだため、予想よりも少ない被ばく線量で作業を実施することができた。一方、設置と解体の作業時間にほとんど差はなかったが、設置時はビーム停止からの経過日数が 21 日であり、作業環境の放射線量が高かったため、解体時に比較して作業員の被ばくが多くなった。

(6) チャンバーB 遮蔽体設置

遮蔽体設置作業は9月24日と12月25日に実施した。被ばく線量の実績値を表 6.4-8 に示す。9月24日に実施した遮蔽体設置作業は設置作業の技術習得を目的としたものである。架台交換作業を請け負った業者立会いの下、自営で設置作業を行った。ビーム停止から3か月近く経過し入射部の空間線量率が減少した状態であったため、被ばく線量は作業員全員が 0.00 mSv (APD 表示値) であった。

12月28日に実施した設置作業は遮蔽効果の確認を目的としたものである。遮蔽体設置に要した時間は入射部への遮蔽体運搬に約5分、外周側遮蔽体設置に10分、内周側遮蔽体設置に7分であった。遮蔽効果の確認後、すぐに遮蔽体の取り外しを実施した。内外周ともに5分以内に取り外しが完了した。利用運転終了後4日後の比較的線量が高い環境での作業であったが、遮蔽体取付け・取外し作業での被ばくは作業員4名全員 0.00 mSv (APD 表示値) であった。

7. まとめ

3 GeV シンクロトロン加速器のビーム入射部における作業員の被ばく低減を目的として遮蔽体の設置について検討を重ねてきた。結果、チャンバーB の架台に対して容易に取付け取外しが可能な非常設型の遮蔽体を設置することとした。

2020年夏期メンテナンス期間にてチャンバーB に遮蔽体を設置するために架台ユニットの更新と遮蔽体の設置作業を実施した。高線量下での長期間に渡る作業のため、作業員の被ばく量を抑えることが重要な課題であった。このため、事前に入念に作業計画と作業手順を作成し、さらに現場での作業を円滑に行えるよう非管理区域での予行を実施した。また、作業期間中も被ばく低減対策と個々の被ばく管理を綿密に行うことで当初の目標通り、作業員の最大の被ばく線量を 1 mSv 以下に抑えることができた。

本作業の実施により、チャンバーB には容易に取付け取外し可能な遮蔽体を設置できるようになった。この遮蔽体によりチャンバーB 周辺の空間線量を下げ、今後のチャンバーB 近接作業時の被ばく線量の大幅な低減に寄与できる。また、本作業と合わせて行った荷電変換光路改修作業では W1 真空窓とその周辺光路の更新を行った。これにより放射線曝露により著しく赤褐色化し不明瞭となっていたフォイルの観測像は本来の色合いを取り戻し、明瞭になった。さらに本作業での作業時間実績、被ばく実績等は、今後ビーム強度を増加して運転をしていく RCS の保守作業時の作業計画の確度を上げるうえで大いに役立つものと考えられる。これら入射部の作業に要した作業日数は 31 日、人工数は 219 人日となり夏期メンテナンス期間中の大部分で入射部を占有する大規模な作業となったが、非常に有意義な作業であったと考えられる。

謝辞

本作業の実施にあたり、放射線管理セクションの佐藤浩一氏、渡辺雄一氏には高線量下での作業や汚染された機器の取り扱い方について多大な助言・指導を頂きました。両氏に深く感謝申し上げます。

架台ユニット更新作業を請け負ったアルバックテクノ株式会社、荷電変換光路改修作業を請け負った株式会社 NAT におかれましては安全最優先で作業を実施し、また作業干渉する場面では円滑に作業を進めるため互いに協調して取り組み、予定期間内に無事に作業を完遂していただきました。両社に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Yamazaki ed., “Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project, J-PARC”, KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, 2003, 788p.
- [2] K. Yamamoto et al., “Activation in injection area of J-PARC 3-GeV rapid cycling synchrotron and its countermeasures”, Proceedings of 20th Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division of ANS, US, August 2018.
- [3] E. Yamakawa et al., “Measurements and PHITS Monte Carlo Estimations of Residual Activities Induced by the 181 MeV Proton Beam in the Injection Area at J-PARC RCS Ring”, JPS Conf. Proc., vol. 8, September 2015, 012017.
- [4] P.K. Saha et al. “Measurement of 181 MeV H⁻ ions stripping cross-sections by carbon stripper foil”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 776, 2015, pp.87-93.
- [5] 神谷潤一郎 他, “RCS ビーム入射部における低放射化・保守性向上のための真空容器のアップグレード”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 645-648.
- [6] 高柳智弘 他, “J-PARC RCS 入射バンプシステムの現状と将来計画”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, pp. 699-702.
- [7] M. Kinsho et al., “Titanium flanged alumina ceramics vacuum duct with low impedance”, Vacuum, vol. 81, pp.808-811, 2007.
- [8] Y. Shobuda and Y. Irie, “Analytical estimation of the field modulation during the injection period of the 3 GeV RCS in J-PARC”, Proc. 2nd Int. Symp. Science at J-PARC, Tsukuba, Japan, 2015, 012003.
- [9] J. Kamiya et al., “New Design of Vacuum Chambers for Radiation Shield Installation at Beam Injection Area of J-PARC RCS”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1350, 2019, 012172.
- [10] J-PARC, Report of the 18th Meeting of the Accelerator Technical Advisory Committee for the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)
http://j-parc.jp/c/uploads/2019/J-PARC_ATAC2019.pdf#zoom=100 (参照 : 2021-1-20).
- [11] 仲野谷孝充他, “J-PARC 3GeV シンクロトロン用荷電変換フォイルの作製状況”, Proceedings of 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31-August 3 2019, Kyoto, Japan, pp. 545-549.
- [12] M.Yoshimoto et al., “Relation Between signals of the Beam Loss Monitors and Residual Radiation in The J-PARC RCS”, Proceedings of IBIC2016, Barcelona, Spain, pp.673-677.

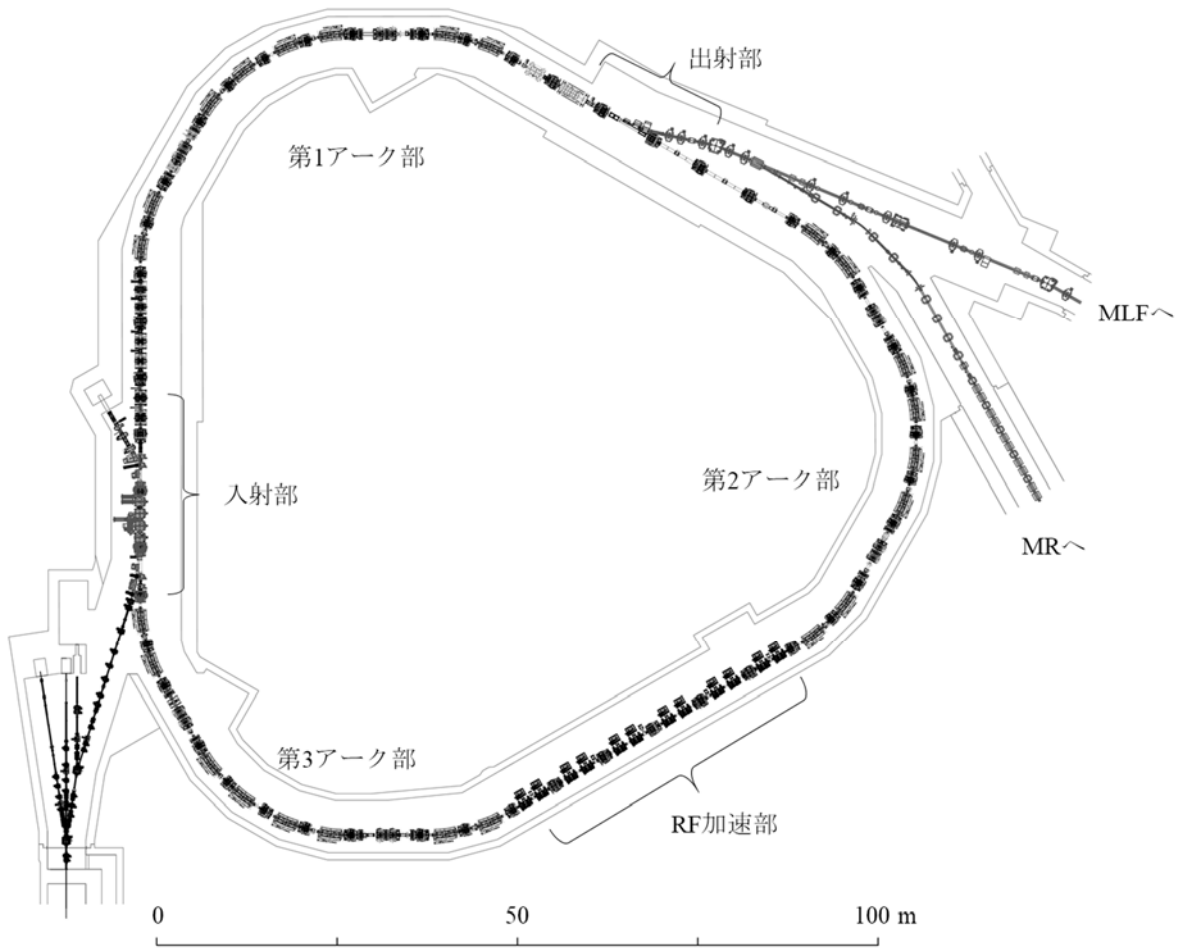


図 2-1 3GeV シンクロトロン加速器ビームライン概略図

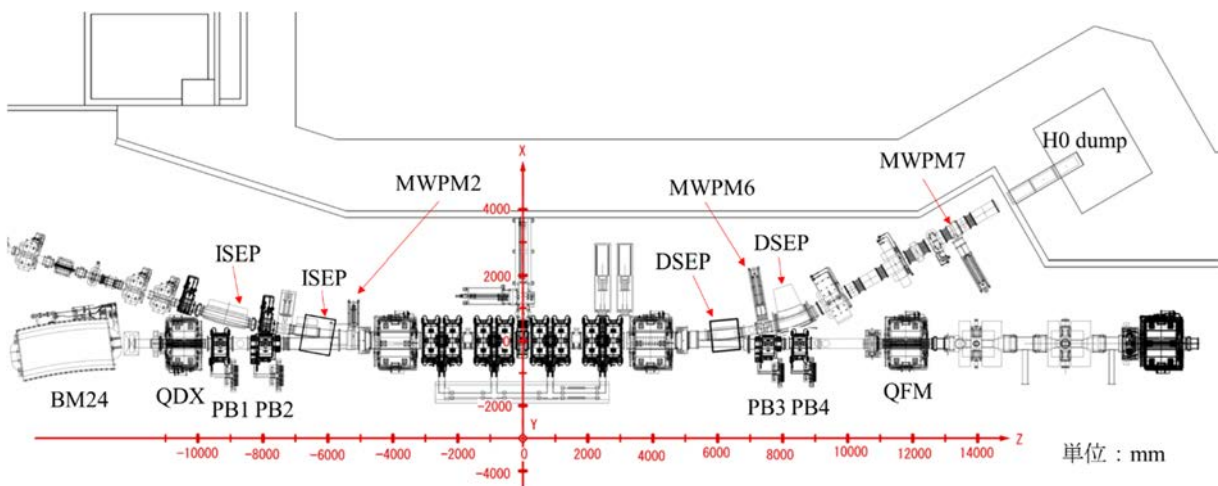


図 2-2 入射部機器配置図

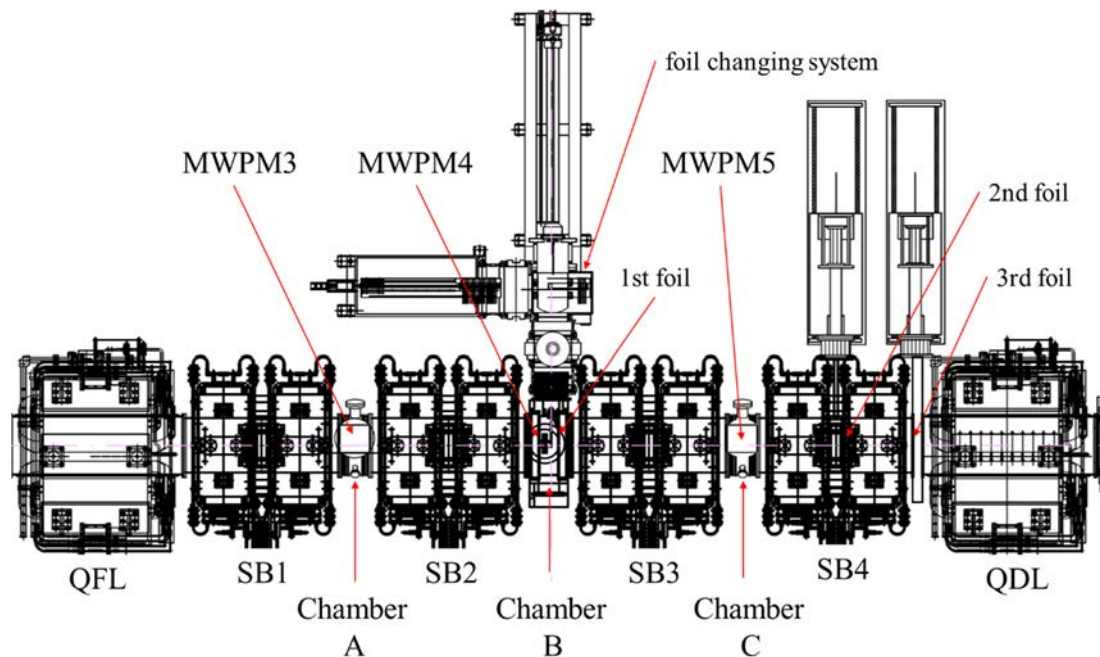


図 2-3 入射部中心付近機器配置図

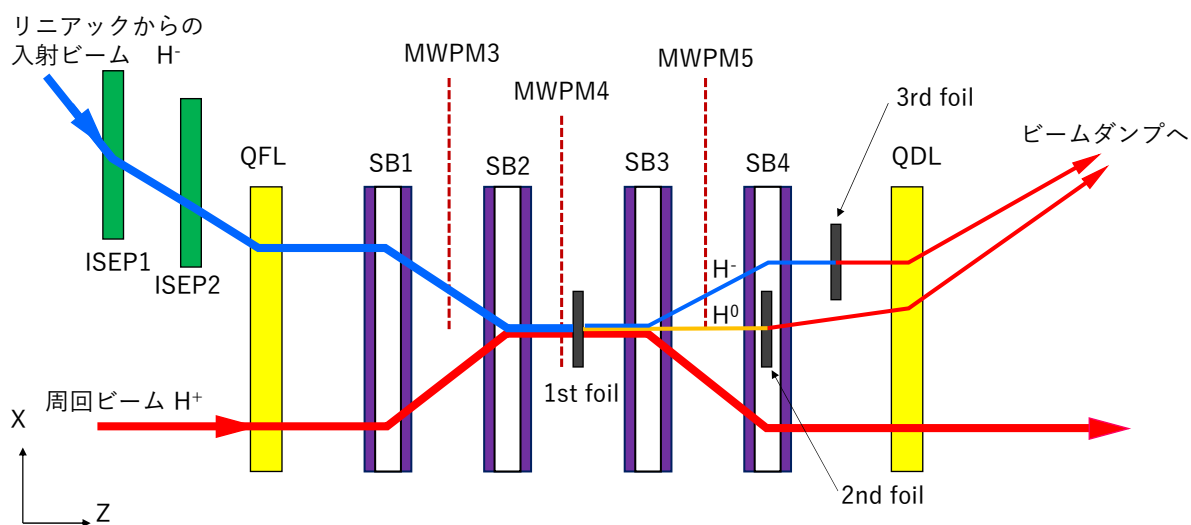


図 2-4 入射ビーム及び周回ビームの軌道模式図

図 2-2、2-3、2-4 中の略語の意味を下記に示す。

BM : 偏向電磁石 (bending magnet)

ISEP : 入射セプタム電磁石 (injection septum magnet)

PV : 水平ペイントバンプ電磁石 (paint bump magnet)

MWPM : マルチワイヤープロファイルモニター (multi wire profile monitor)

DSEP : 廃棄セプタム電磁石 (dump septum magnet)

QDX、QFM、QFL、QDL : 四極電磁石 (quadrupole magnet)

SB : 水平シフトバンプ電磁石 (shift bump magnet)

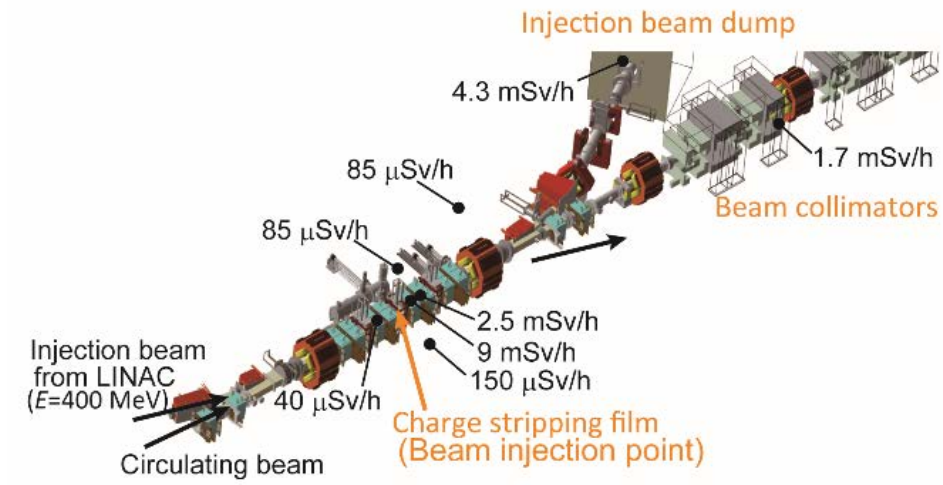
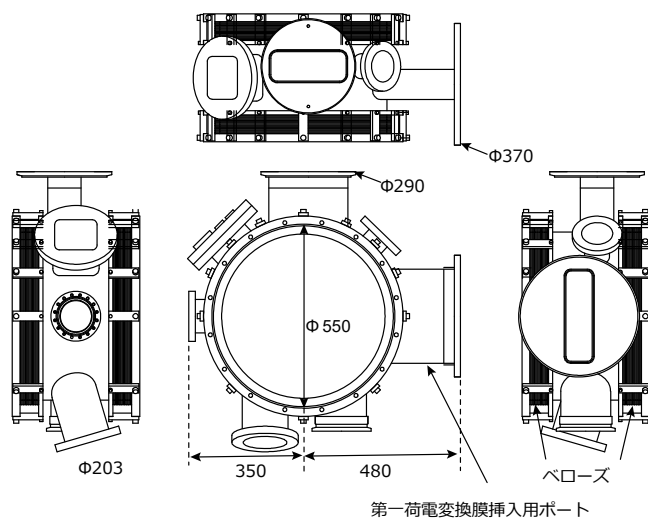


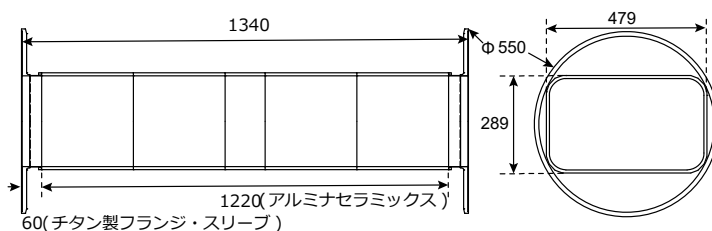
図 3.1-1 RCS ビーム入射部における残留線量の例

図は 500 kW ビーム出力でのユーザー運転後、約 5 時間経過後のサーベイの結果である。

(a) 入射点真空容器 (TiチャンバーB)



(b) 水平シフトバンプ1-3用アルミナセラミックダクト



(c) 水平シフトバンプ4用アルミナセラミックダクト

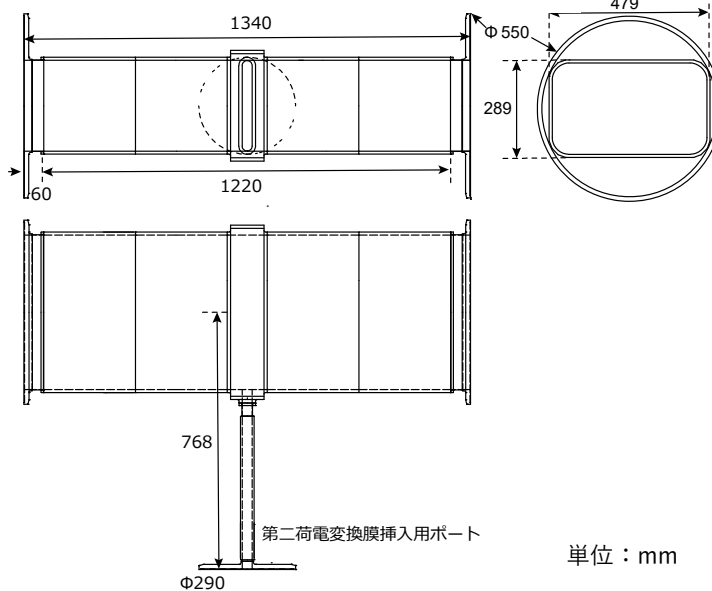


図 3.1-2 チャンバーB 及びシフトバンプ電磁石セラミックダクトの外観

(a) ビーム入射点に設置されているチタン製真空容器 (チャンバーB)

(b) シフトバンプ電磁石 1-3 用セラミックダクト

シフトバンプ電磁石 1-3 用は同形状のセラミックダクトである。

(c) シフトバンプ電磁石 4 用セラミックダクト

シフトバンプ電磁石 4 用は第 2 荷電変換フォイルを挿入するためのポートを有する。

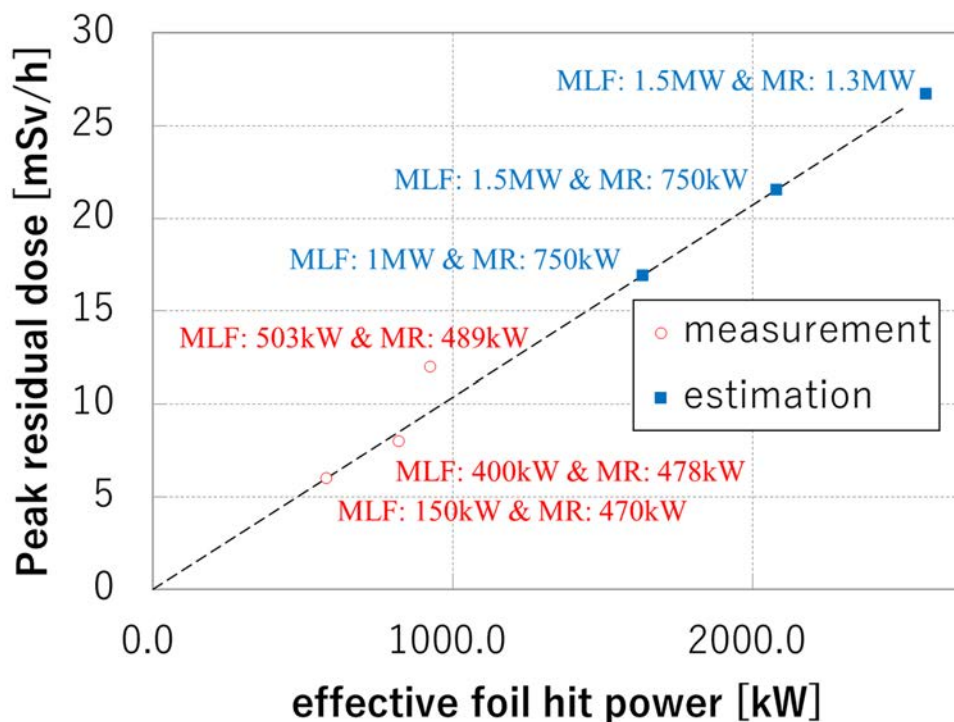


図 3.1-3 入射部における残留線量の測定値及び計算値
 計算値は測定値からの線形増加を仮定したものの。

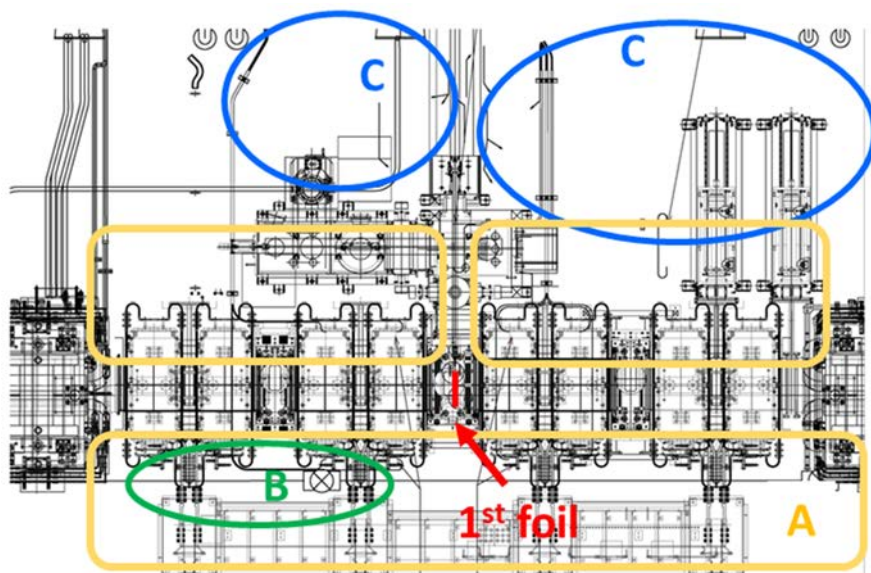


図 3.1-4 実際にこれまで入射部で行われた保守作業の作業エリアの例
 A: セラミックダクトのコンデンサー交換のためのダクト撤去・設置作業および真空締結部からの真空リーク対応のためのシール交換作業のエリア
 B: シフトポンプ電磁石の冷却水の漏水保守作業のエリア
 C: 荷電変換フォイルマガジンラック交換作業のエリア

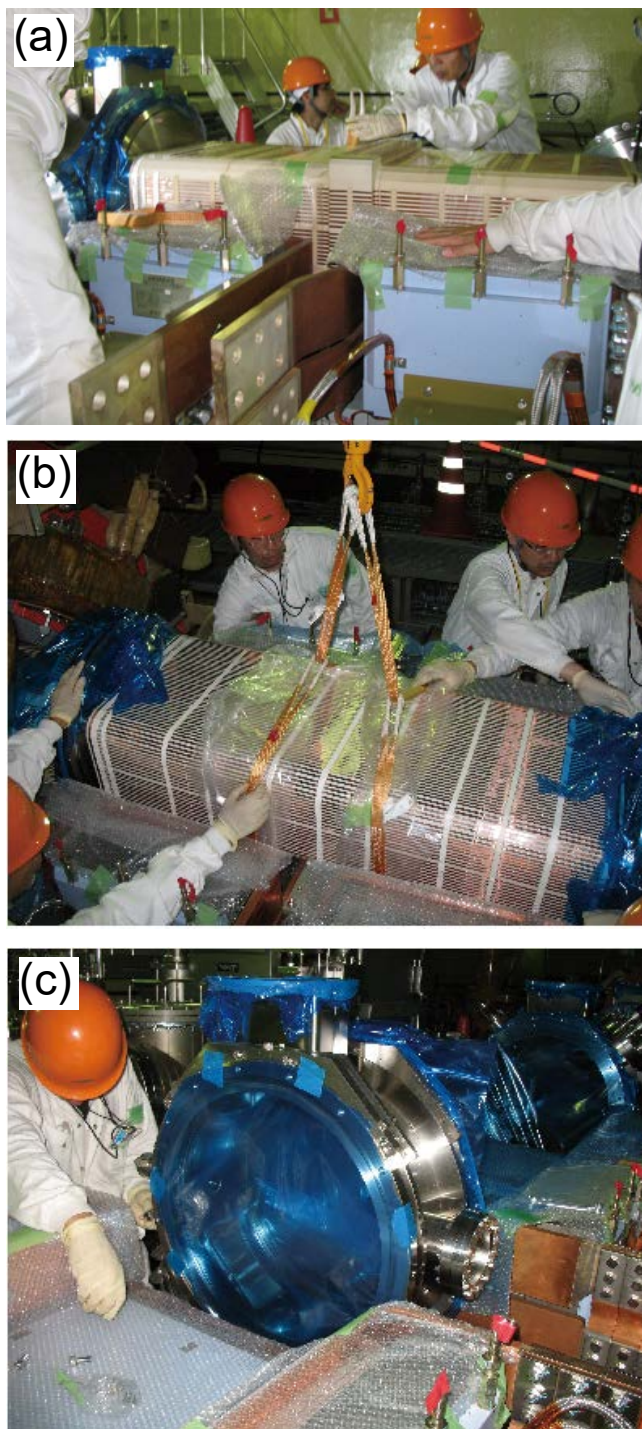


図 3.1-5 シフトバンプ用セラミックスダクト撤去時の写真

- (a) シフトバンプ電磁石上鉄心撤去後玉掛け時
- (b) セラミックスダクトつり上げ時
- (c) セラミックスダクト撤去後

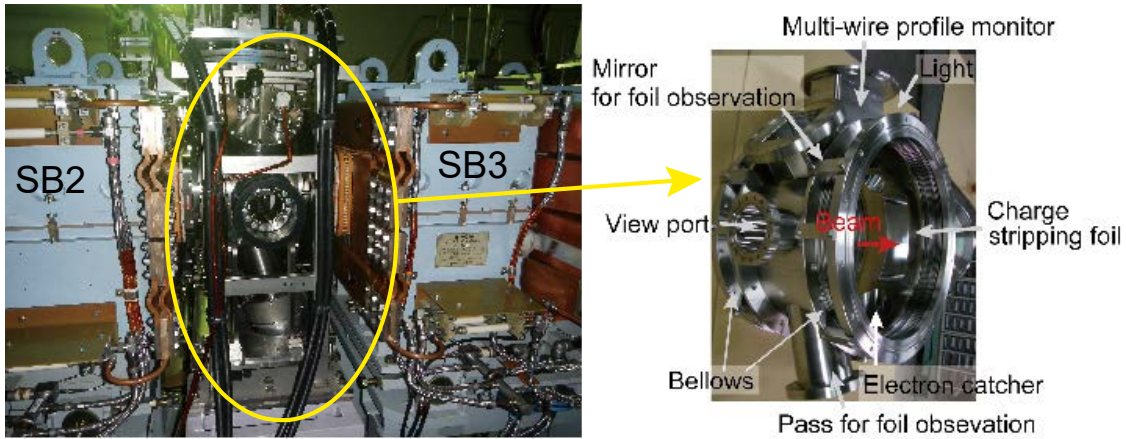


図 3.2-1 ビーム入射点のチタン製真空容器の設置状況及び真空容器単体の写真 (SBはシフトバンプ電磁石を意味する)

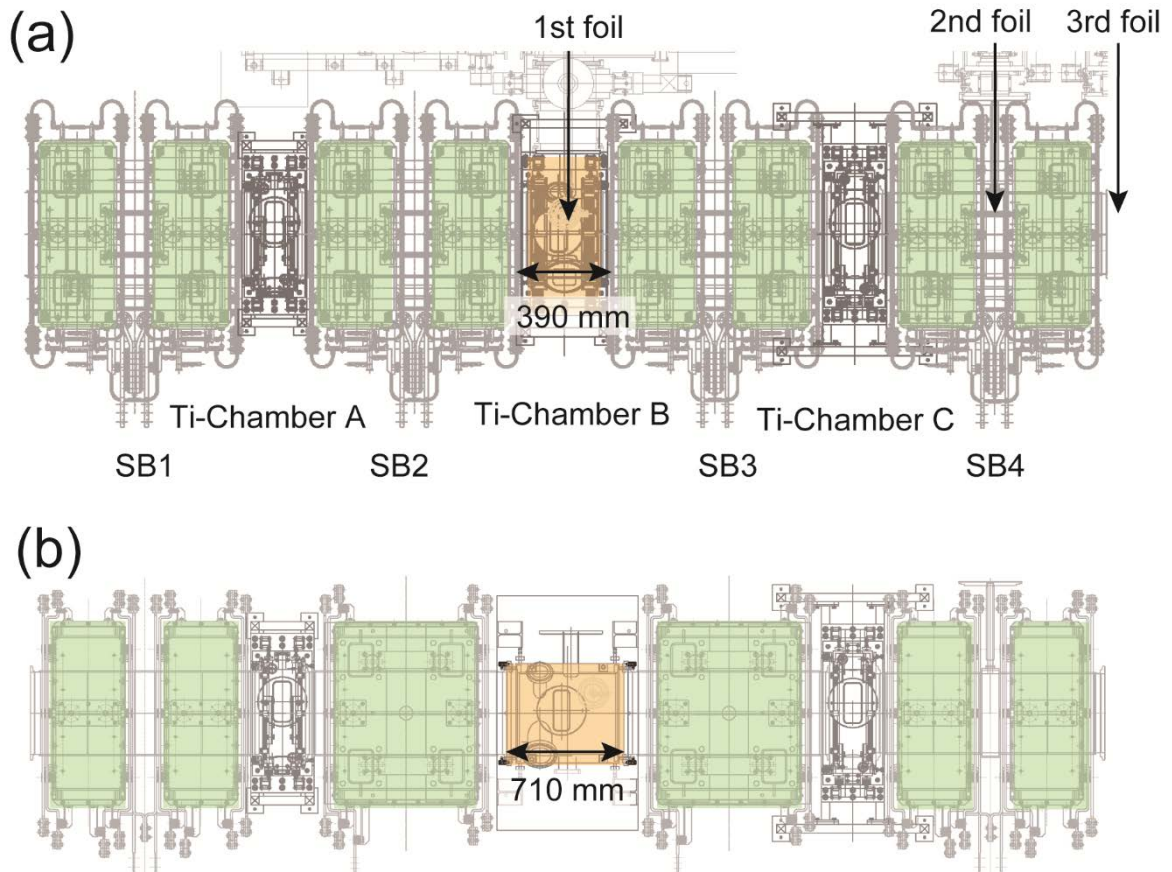


図 3.2-2 第 1 荷電変換フォイル周辺の空間の比較

(a) 現行の入射部

(b) チャンバーBの周りの遮蔽体設置スペースを広げる変更をした場合

(SBは水平シフトバンプ電磁石を表す)

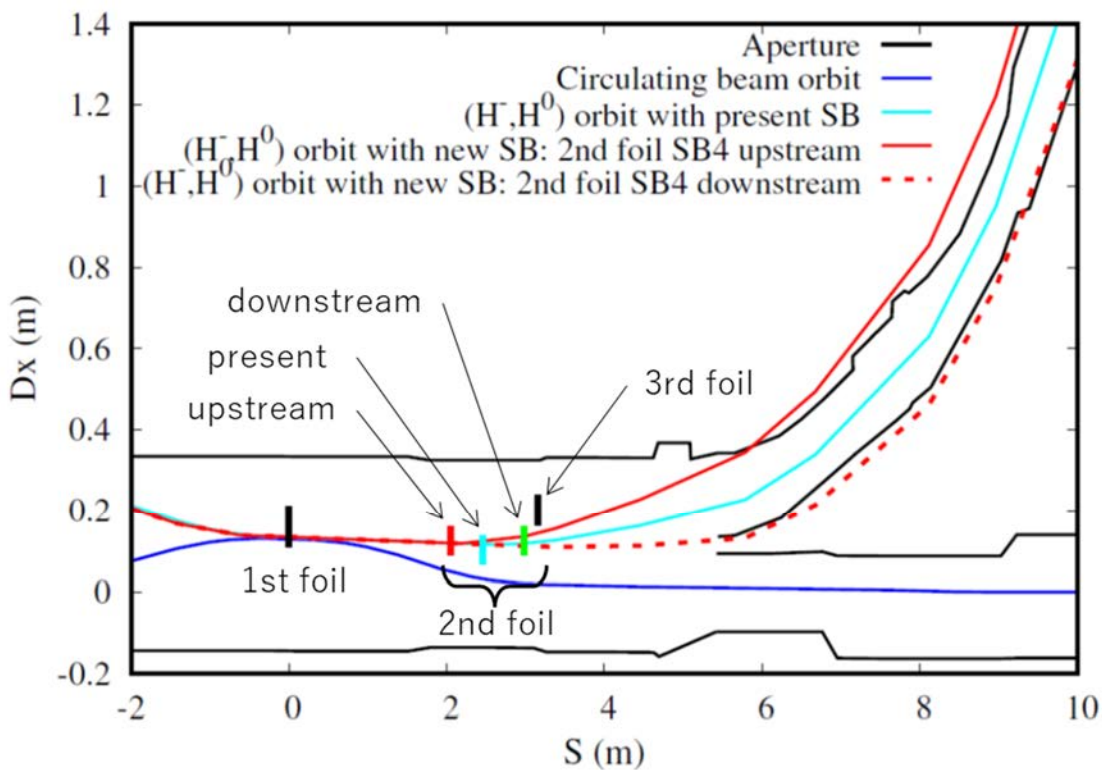


図 3.2-3 第 2 荷電変換フォイルの設置位置に対するビームダンプへのビーム軌道

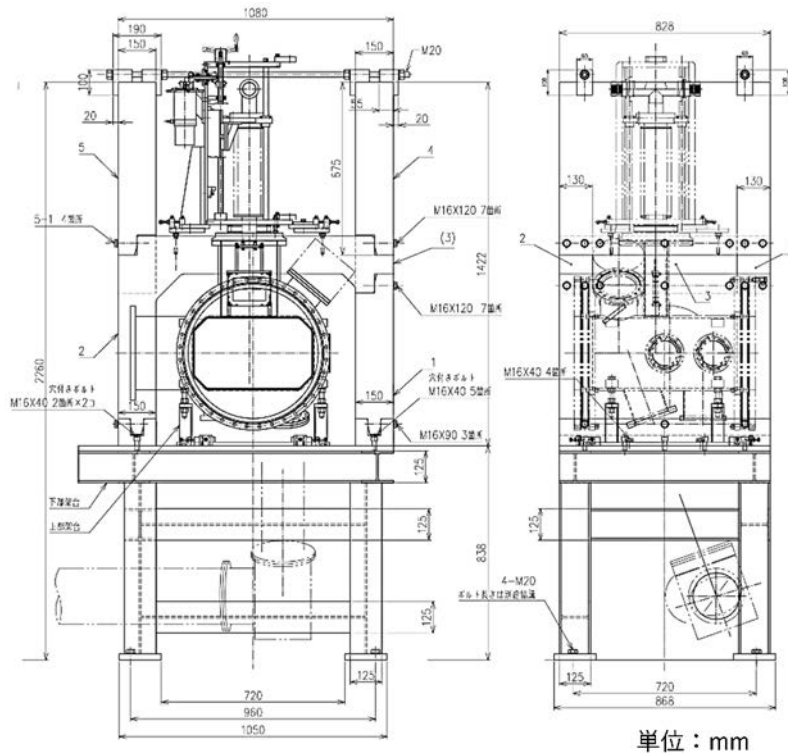


図 3.2-4 入射部の系を変更した場合の遮蔽体

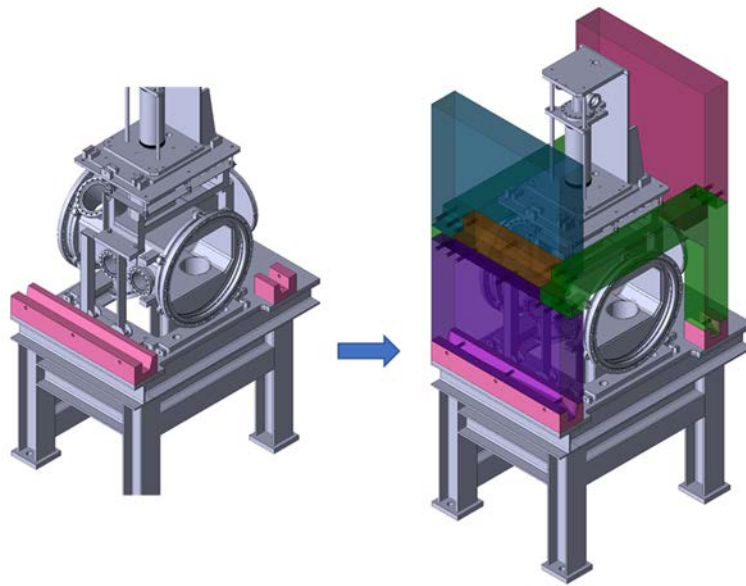


図 3.2-5 入射部の系を変更した場合の遮蔽体設置前後での図

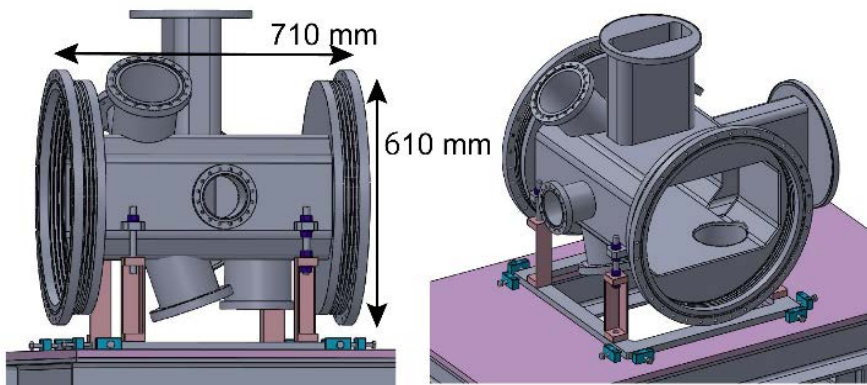


図 3.2-6 改良後の入射点真空容器の検討図

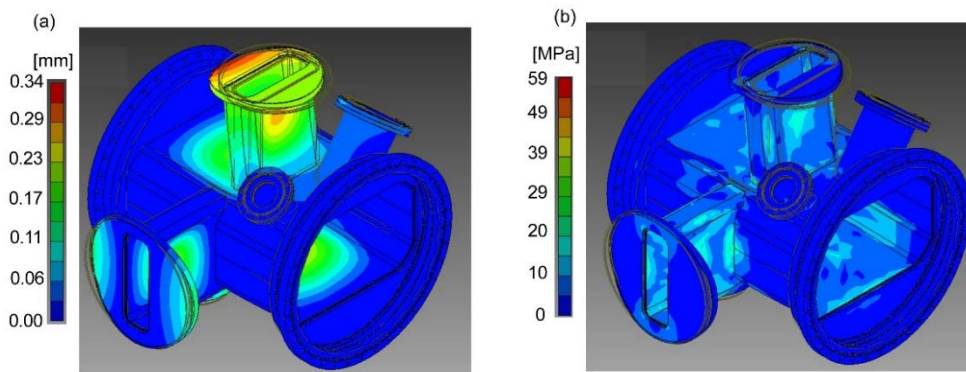


図 3.2-7 真空容器の変位と応力の計算結果

(a)変位 (b)応力

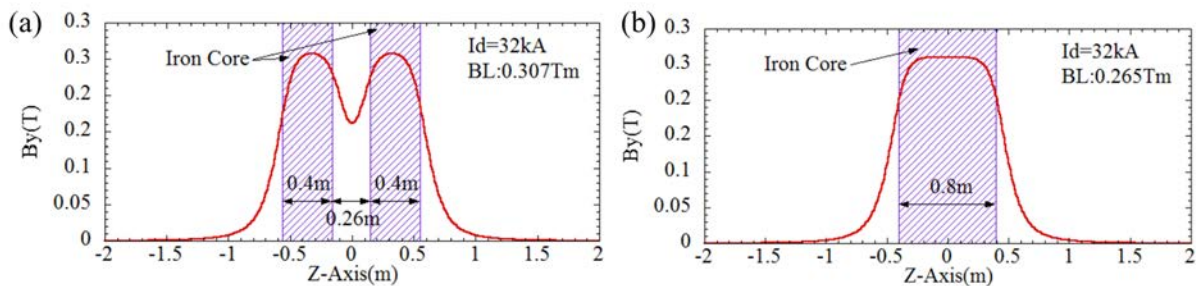


図 3.2-8 シフトバンプ電磁石の磁場分布の比較

(a) スプリットポール型鉄心の場合

(b) コンバインドポール型の鉄心の場合

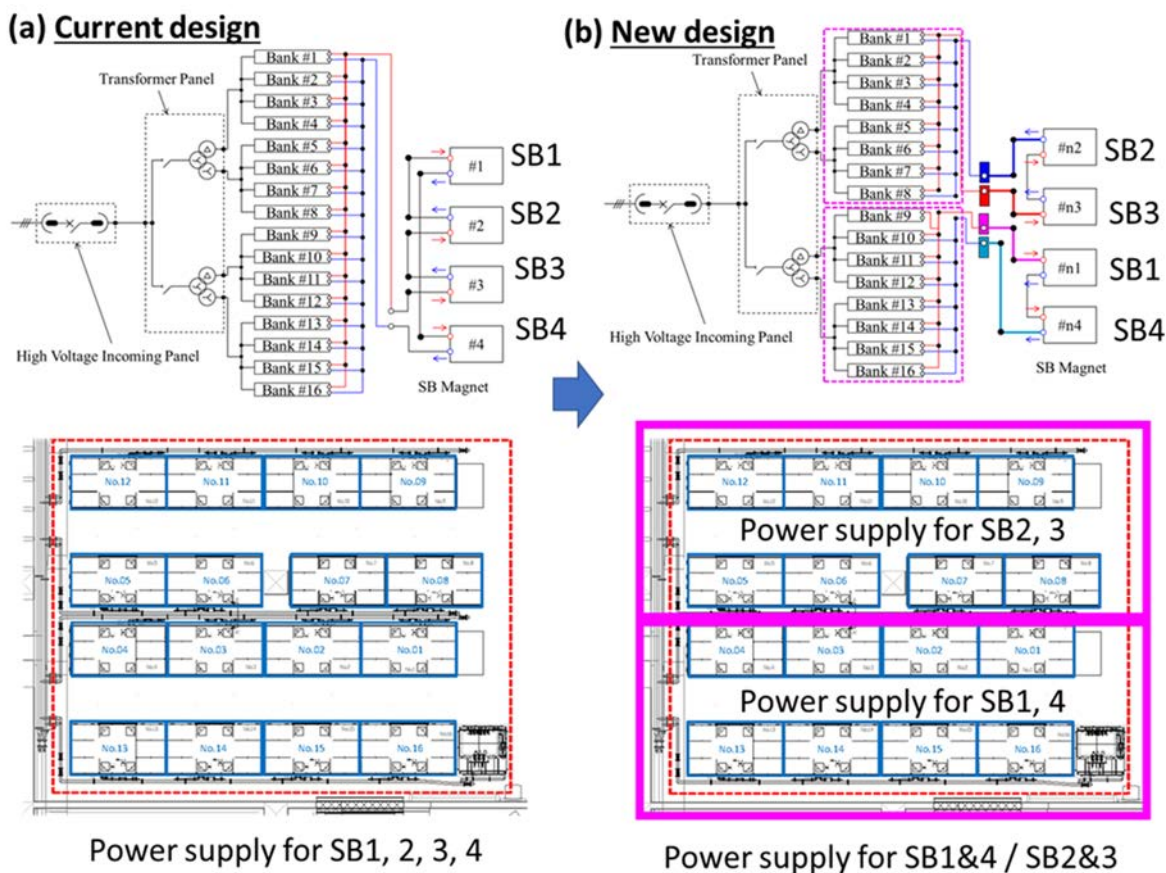


図 3.2-9 シフトバンプ電磁石電源系の比較

(a) 現状のシフトバンプ電磁石電源系

シフトバンプ電磁石 1-4 を直列に励磁する構造である。

(b) 新しいシフトバンプ電磁石電源系

シフトバンプ電磁石 1, 4 と 2, 3 をそれぞれ個別に励磁できる構造である。

(SB は水平シフトバンプ電磁石を表す)

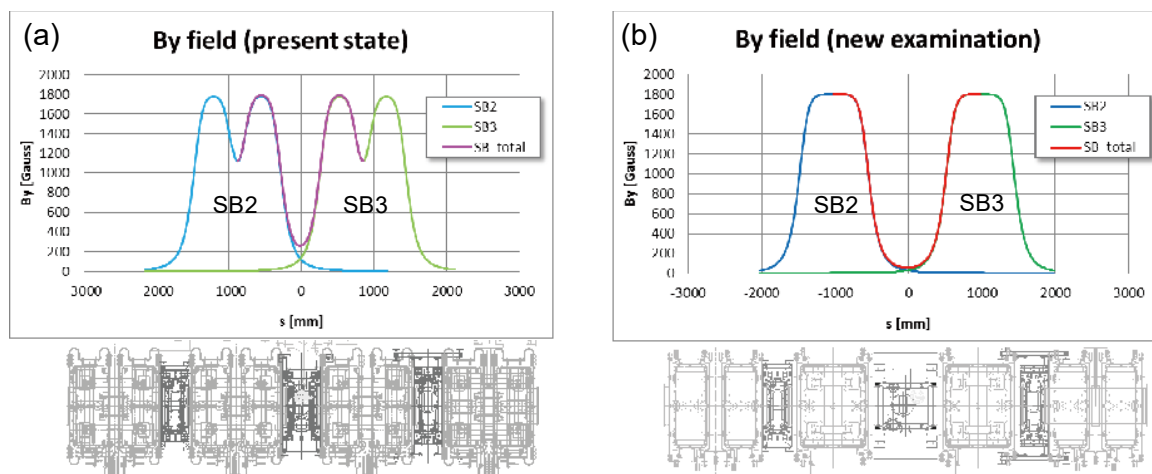


図 3.2-10 シフトバンプ電磁石 2,3 の磁場分布の比較

- (a) 現状のシフトバンプ電磁石 2,3 の磁場分布とそれらの重ね合わせ
- (b) 変更した場合のシフトバンプ電磁石 2,3 の磁場分布とそれらの重ね合わせ
(SB は水平シフトバンプ電磁石を表す)

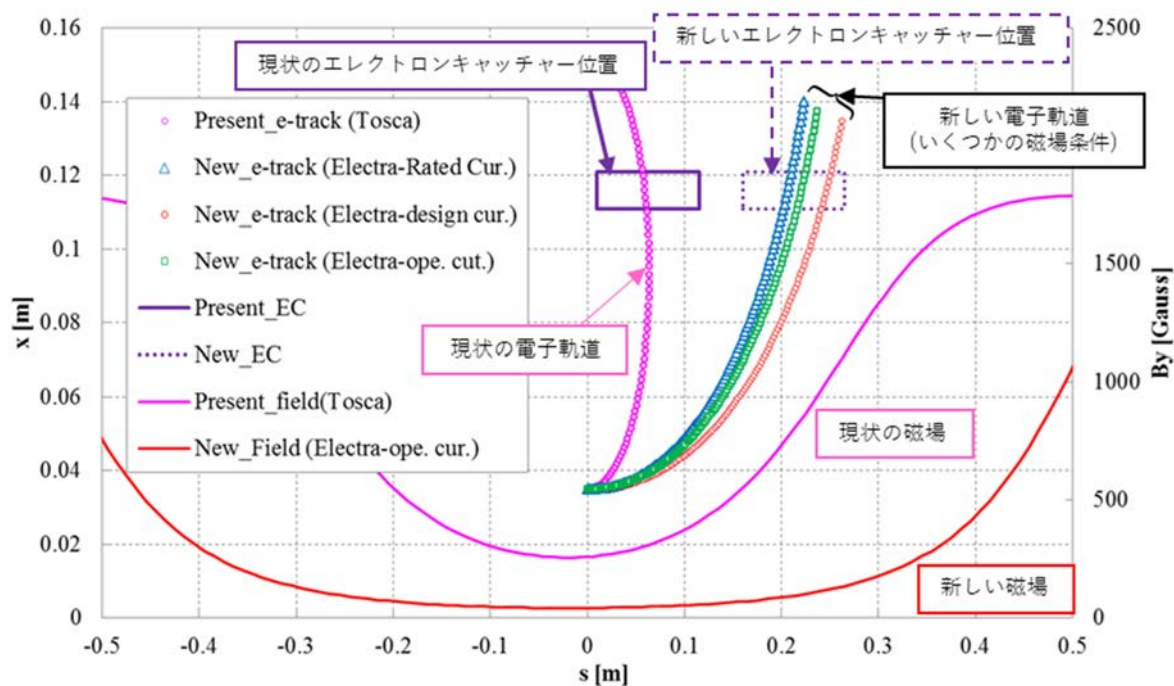


図 3.2-11 電子軌道とエレクトロンキャッチャーの位置の比較

シフトバンプ電磁石の磁場もあわせて示している。縦軸は左が電子軌道の位置、右がシフトバンプ電磁石の磁場。

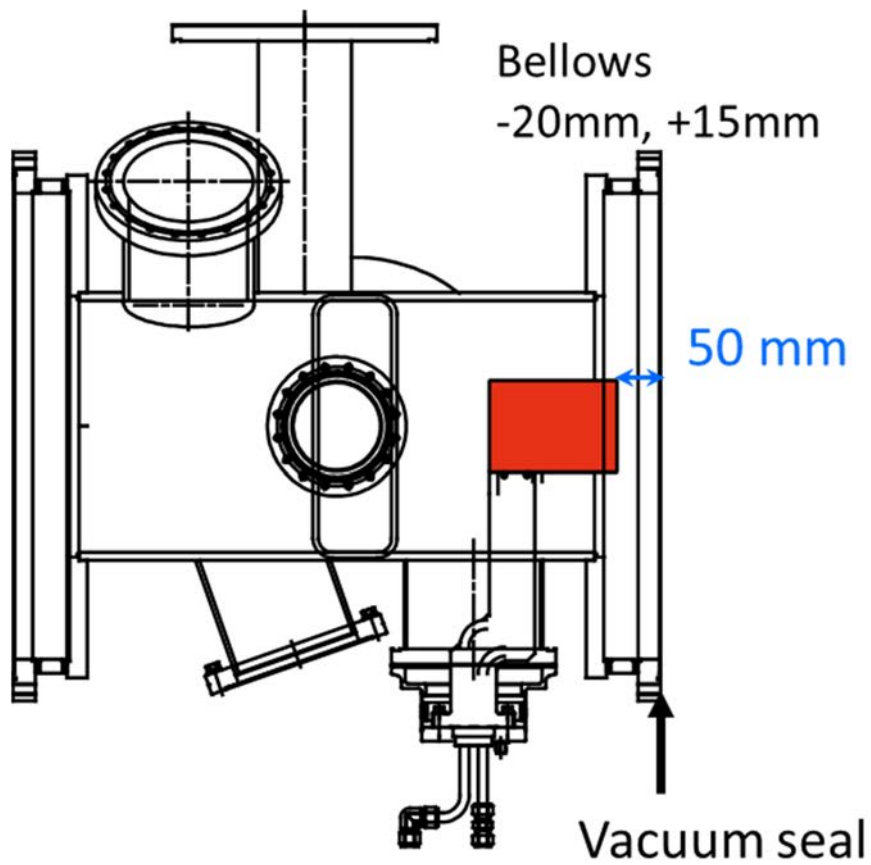


図 3.2-12 新しい真空容器とエレクトロンキャッチャーの位置関係

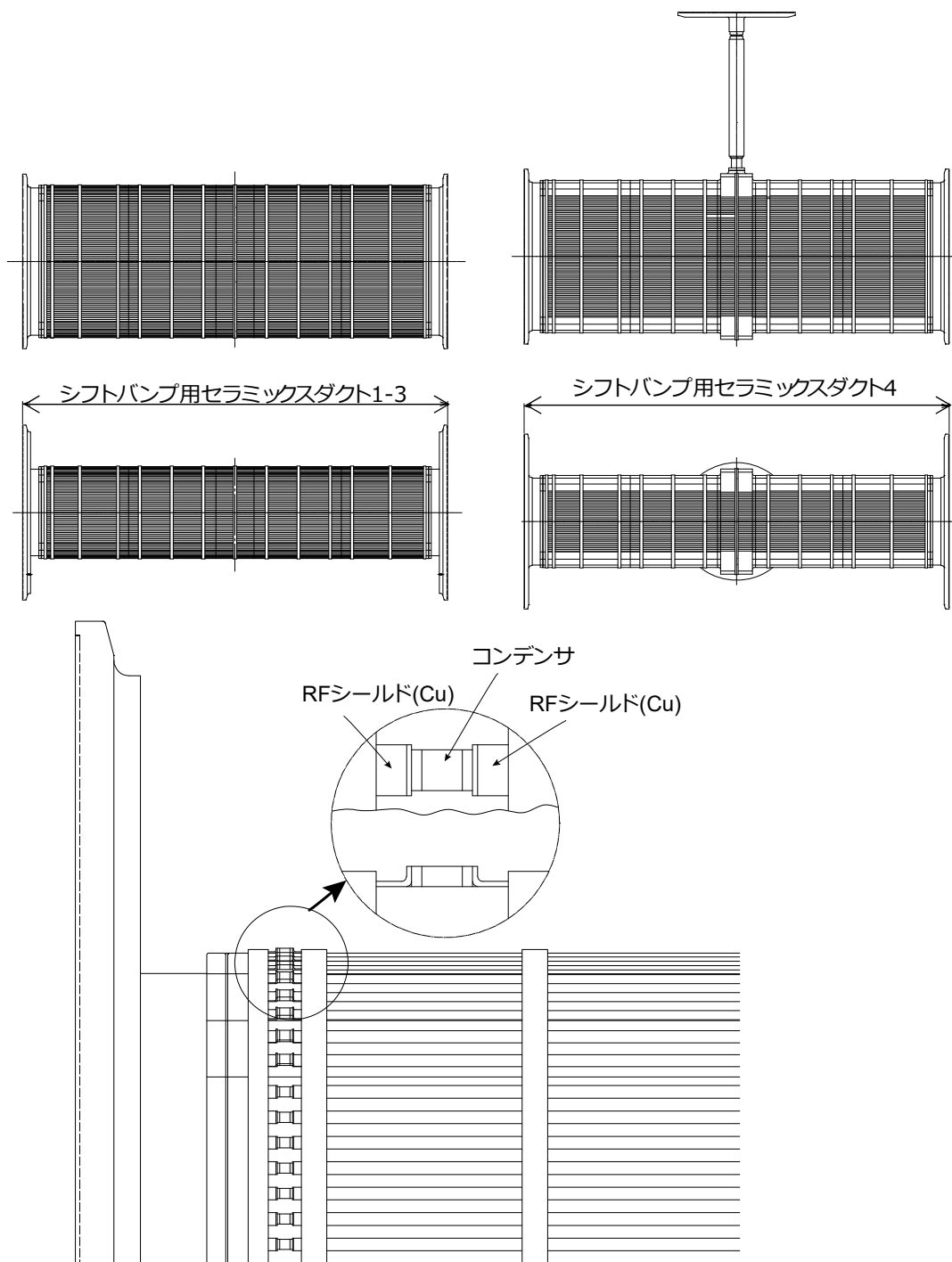


図 3.2-13 現行のシフトバンプ用セラミックスダクトの RF シールド施工図

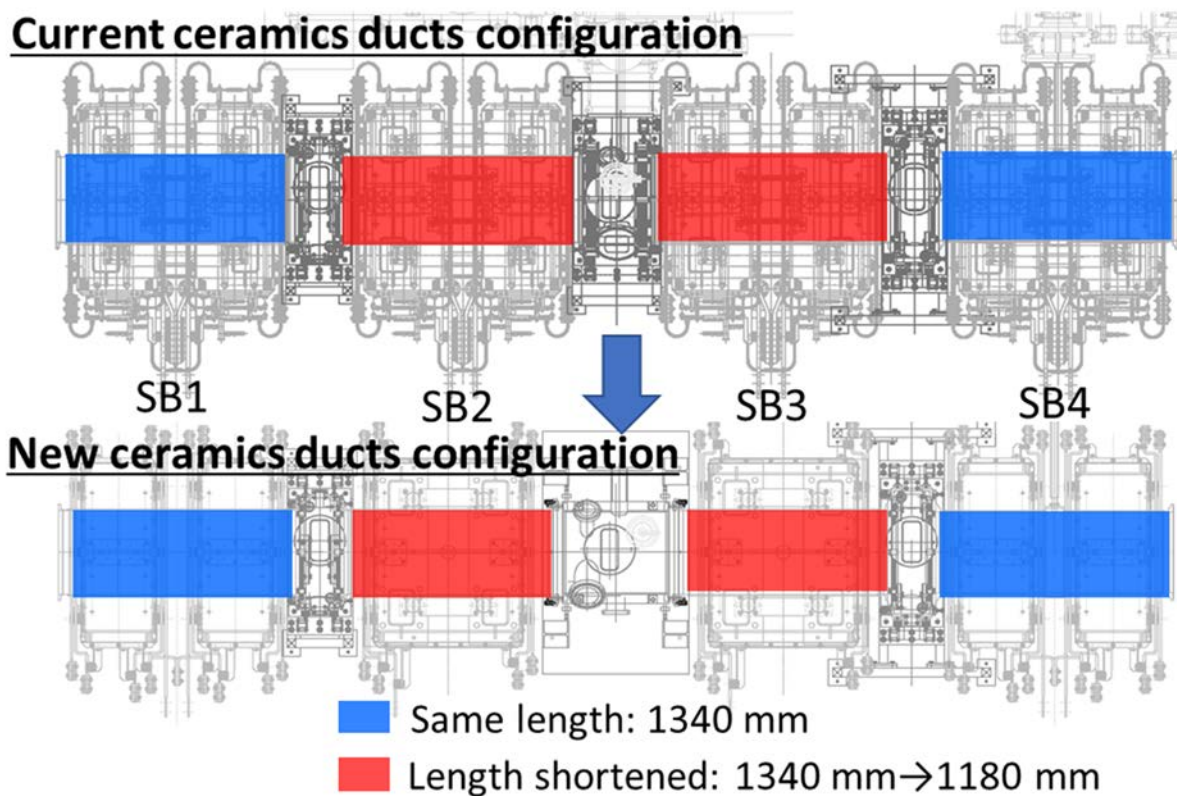


図 3.2-14 シフトポンプ用セラミックスダクトの全長の比較
 (SB は水平シフトポンプ電磁石を表す)

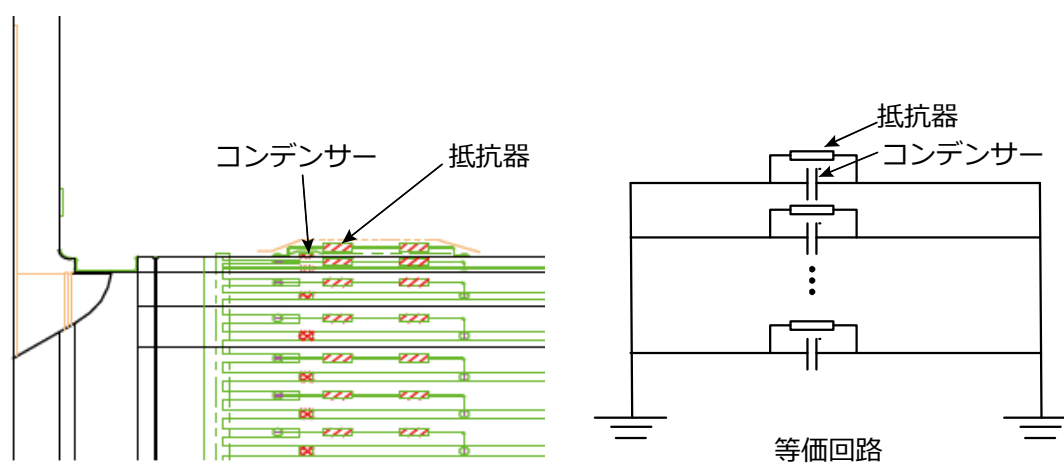


図 3.2-15 セラミックスダクト RF シールドのダンピング抵抗の施工図

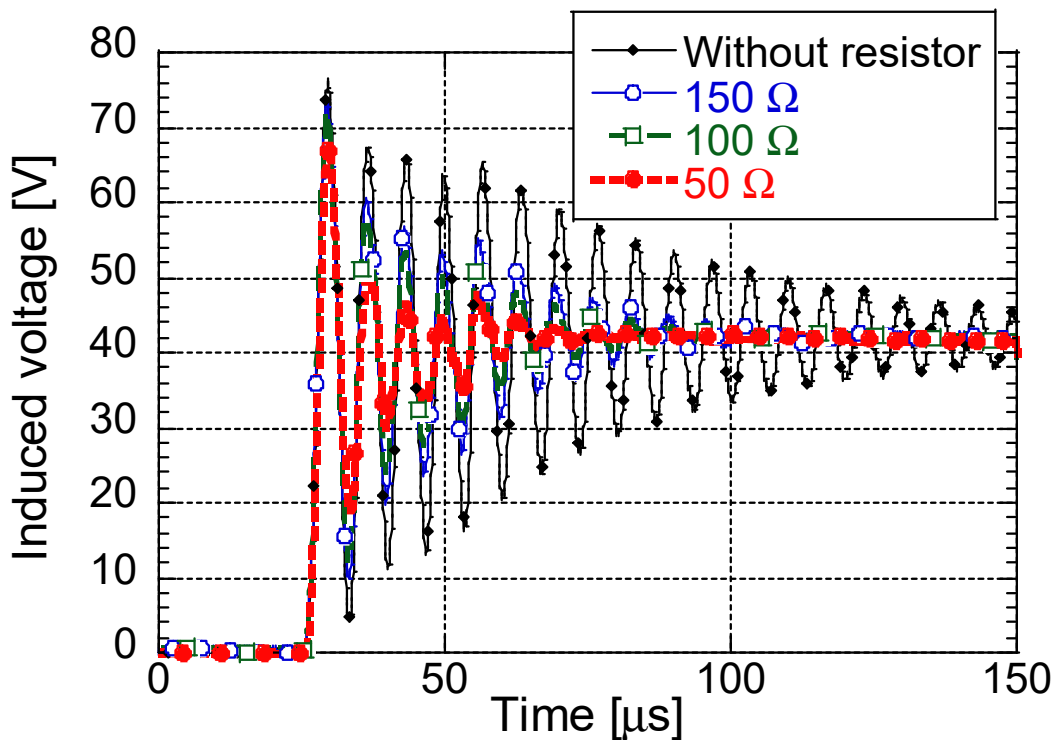


図 3.2-16 各ダンピング抵抗値に対する RF シールドへの誘導電圧

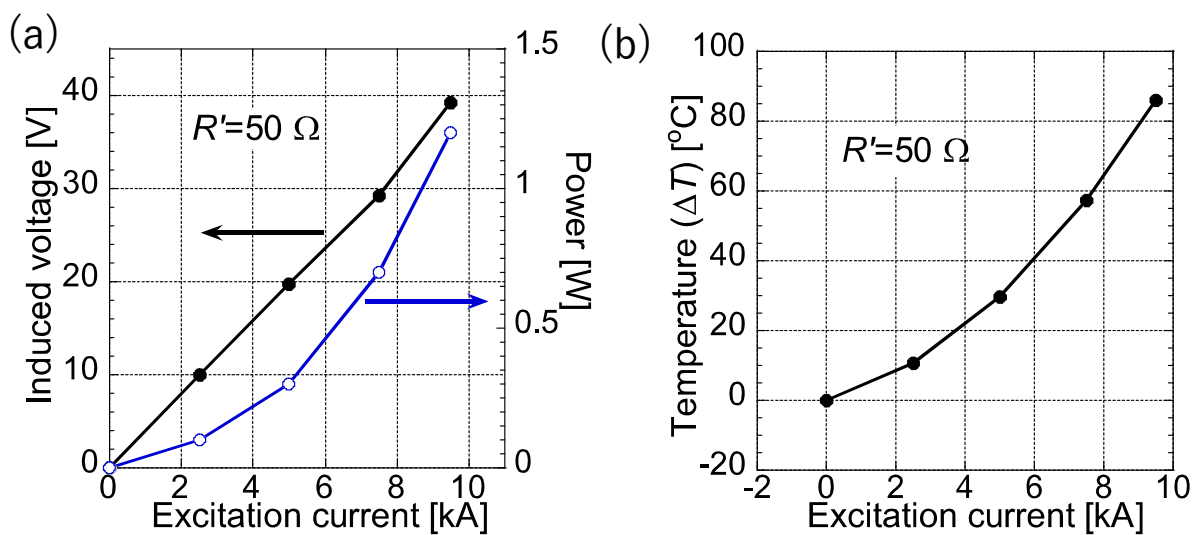


図 3.2-17 ダンピング抵抗の励磁電流に対する誘導電圧、消費電力、抵抗温度の関係

(a) 励磁電流と誘導電圧および抵抗器での消費電力の関係

(b) 励磁電流とダンピング抵抗器温度の関係

どちらもダンピング抵抗値が 50Ω の場合を示す。

ORCS入射部遮蔽体設置のための改修工程検討用ネットワーク図

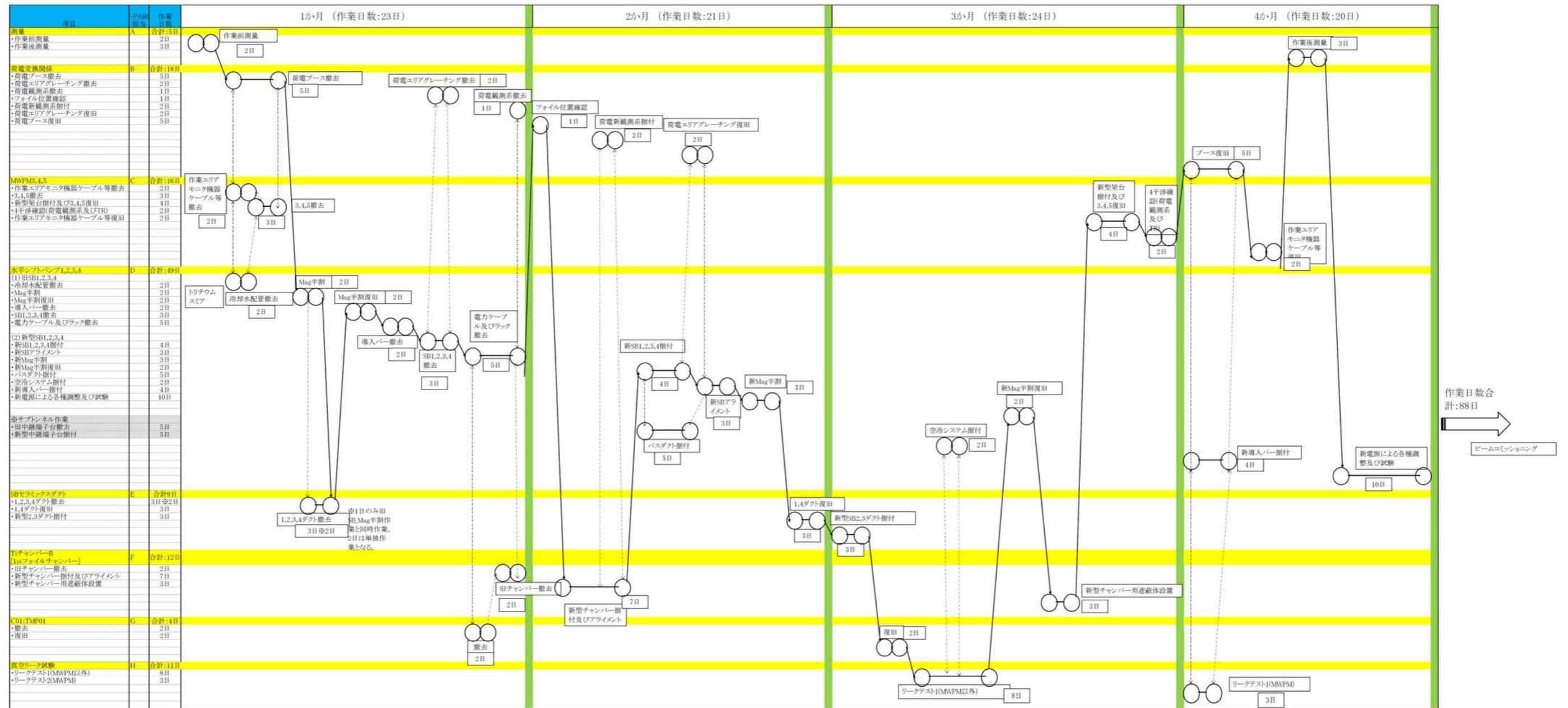


図 3.2-18 入射部変更における作業工程検討のためのネットワーク図

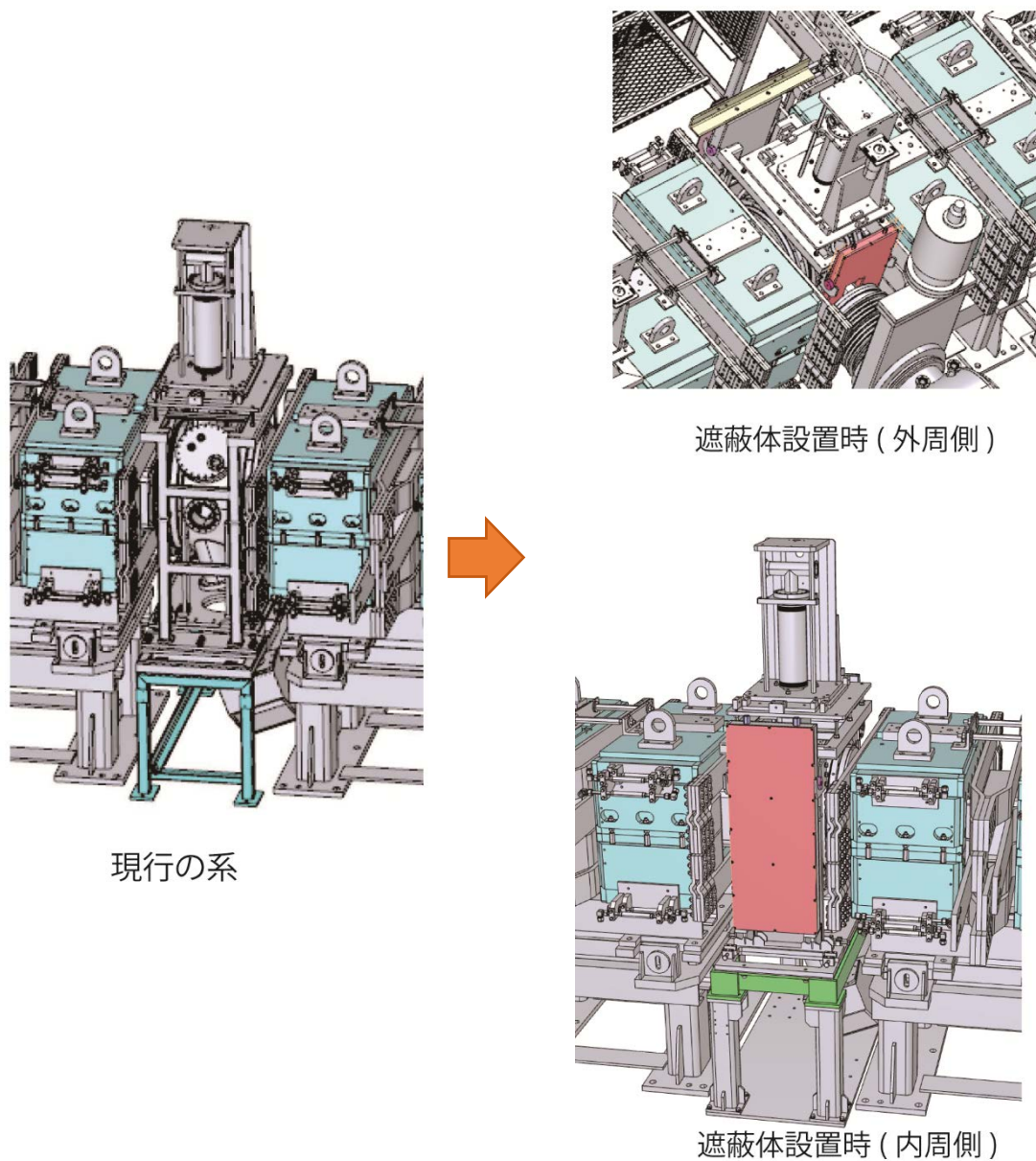


図 3.2-19 現行の系への遮蔽体設置の検討図

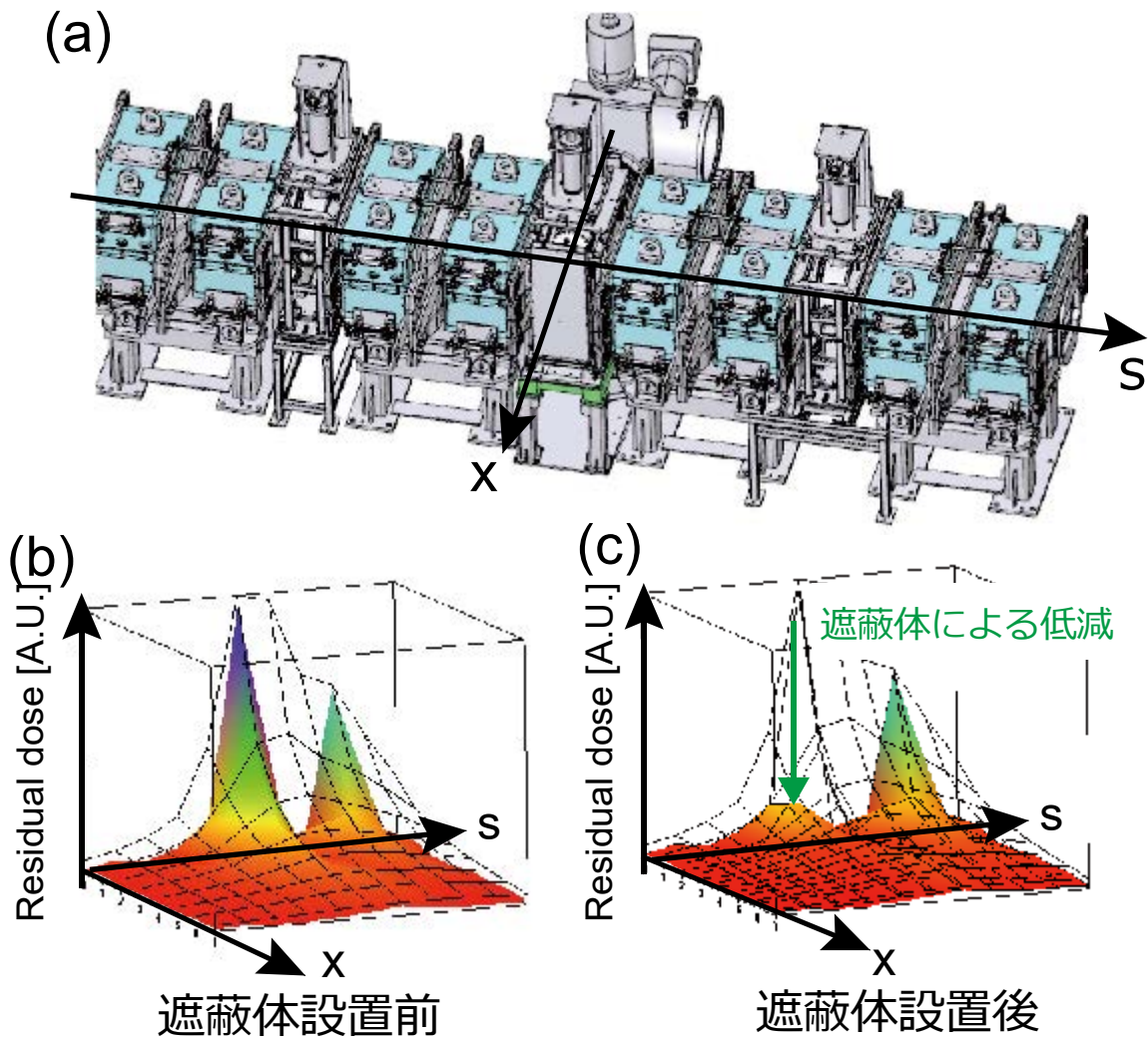


図 3.2-20 現行の系へ設置する遮蔽体の効果

- (a) 座標軸の定義
- (b) 遮蔽体設置前の実測結果
- (c) 遮蔽体設置後の計算結果

表 3.1-1 セラミックスダクト撤去・据付時の作業者ごとの被ばく線量

	日付	被ばく線量 [μSv]					
		A	B	C	D	E	F
ダクト撤去	7/25	40	20	20	0	—	—
	7/26	10	0	0	10	—	—
小計: ダクト撤去時		50	20	20	10	—	—
ダクト設置	8/5	10	0	0	0	0	0
	8/6	10	0	0	0	0	0
	8/7	30	40	20	30	40	20
	8/8	50	0	10	30	30	50
	8/9		30	40	10	0	10
小計: ダクト設置時		100	70	70	100	70	80
リークテスト	8/19	30	40	20	—	—	—
	8/20	20	40	10	—	—	—
	8/21	30	30	20	—	—	—
	8/22	10	30	0	—	—	—
	8/23	20	30	0	20	—	—
	8/24	30	40	0	—	—	—
	8/26	10	0	0	—	—	—
小計: リークテスト時		150	210	50	20	—	—
合計		300	300	140	130	70	80

A-Fは作業者を表す。数値は被ばく線量（単位[μSv]）を表す。

表 3.1-2 入射部における保守作業例のまとめ

	作業名	装置名	作業場所 の空間線 量の代表 値 [μSv/h]	作業時間 [h]	最大被ば く量 [μSv/ person]	条件	1 MW ビーム 出力運転時 の予測最大 被ばく量 [μSv/person]
定 常 作 業	予備フォイル用 マガジンラック 撤去	荷電変換 フォイル	10	3	30	2019年夏季 保守期間 (500kW ビー ム運転後)	60
	予備フォイル用 マガジンラック 設置	荷電変換 フォイル	10	3	70	2019年夏季 保守期間 (500kW ビー ム運転後)	140
			20	5			
	コイル用ボル ト増し締め	シフトバン プ電磁石	2	2.5	65	2019年夏季 保守期間 (500kW ビー ム運転後)	130
			40	1.5			
			15	2.5			
ト ラ ブ ル 対 応	真空リーク 保守	真空容器・ セラミック スダクト	1	10	300	2013年夏季 保守期間 (300kW ビー ム運転後)	1100
			25	10			
			9	10			
	冷却水漏れ 保守	シフトバン プ電磁石	30	2	60	2017年6月 (160kW ビー ム運転後)	380
	荷電変換フォイ ルマガジン ラック交換 (緊急時予測)	荷電変換 フォイル	25	4	420	prediction aft. 500kW	840
			50	4			
25			4				

緊急時のフォイル交換を除いてはビーム運転夏季保守期間に実施した実績である。これらはビーム運転停止後、数週間経過してから作業を実施した。緊急時のフォイル交換はこれまでは実績はないが、ストック用マガジンラックの荷電変換フォイルの予備をすべて消耗し、ビーム運転を停止して緊急に荷電変換フォイルの交換を実施する場合の予想である。

表 3.2-1 現行の系へ遮蔽体を設置した場合の各作業と最大被ばく線量

	作業名	装置名	1 MW ビーム出力 運転時の予測最 大被ばく量 [$\mu\text{Sv/person}$]	現行系への遮蔽 体設置を行った 場合の最大被ば く量 [$\mu\text{Sv/person}$]
定常作業	予備フォイル用マガジ ンラック撤去	荷電変換フォイル	60	30
	予備フォイル用マガジ ンラック設置	荷電変換フォイル	140	90
	コイル用ボルト 増し締め	シフトバンプ 電磁石	130	50
トラブル 対応	真空リーク保守	真空容器・セラミ ックスダクト	1100	410
	冷却水漏れ保守*	シフトバンプ 電磁石	380	380
	荷電変換フォイルマガ ジンラック交換 (緊急時予測)	荷電変換フォイル	840	620

*チャンバーB に対する遮蔽効果が見込めない作業位置であるため、被ばく量が低減しない。

表 3.1-2 に記載した各種作業に対し、図 3.2-20 の遮蔽体設置前後での残留放射線量をもとに計算した値を載せている。

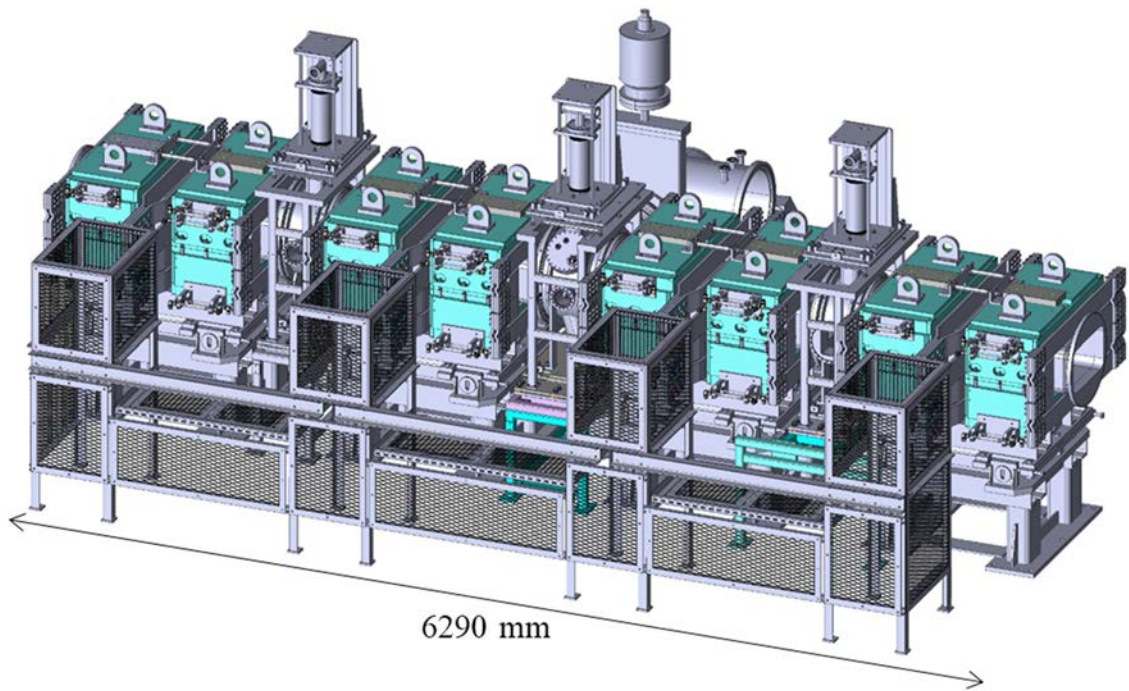


図 3.3-1 入射部全体 (チャンバーB 架台更新前)

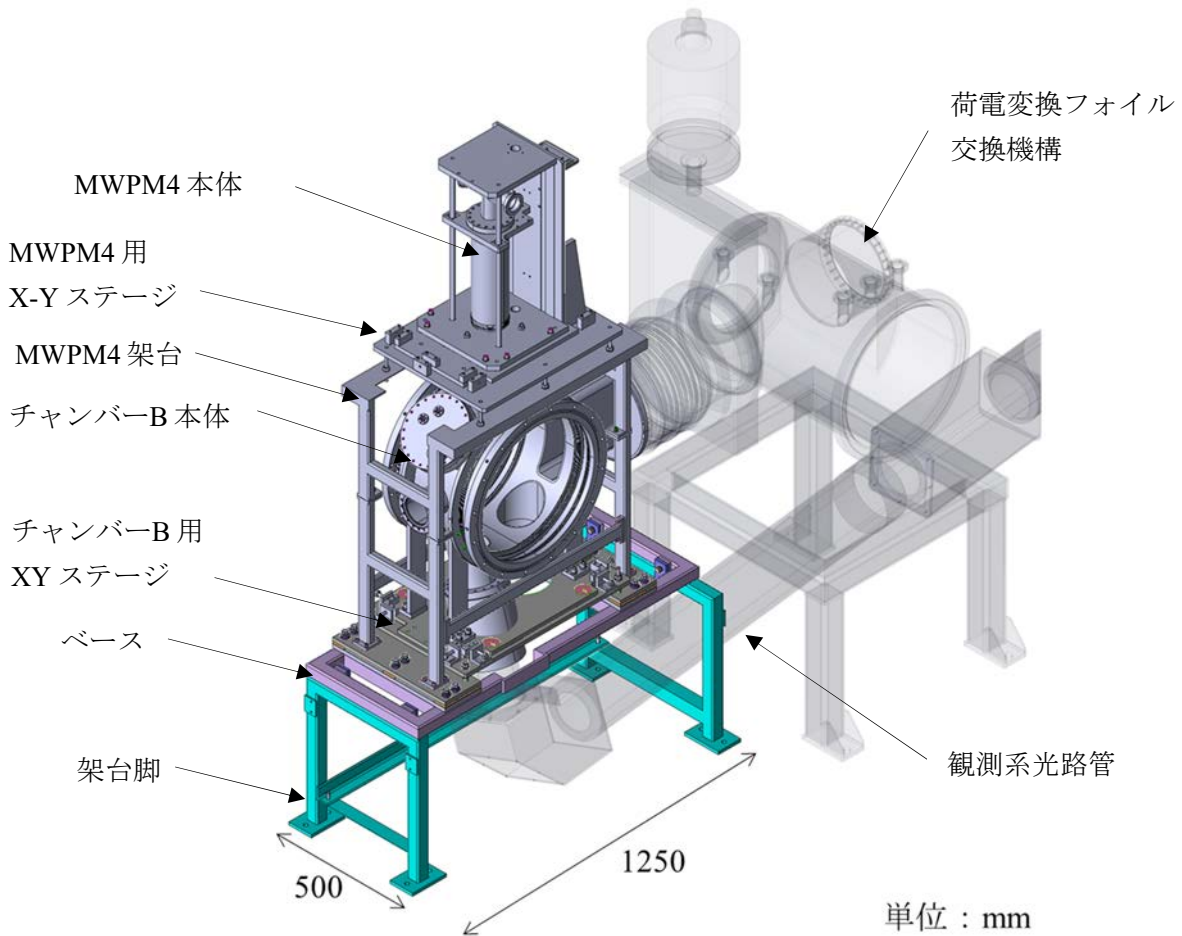


図 3.3-2 既設チャンバーB 架台ユニット

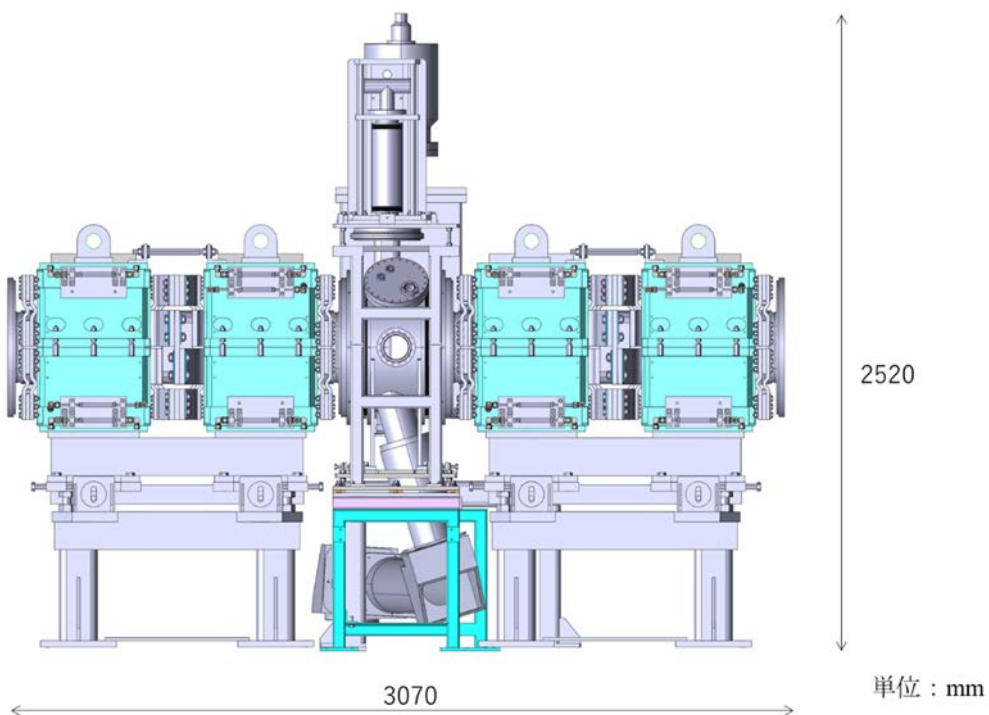


図 3.3-3 前面（通路側）からの景観

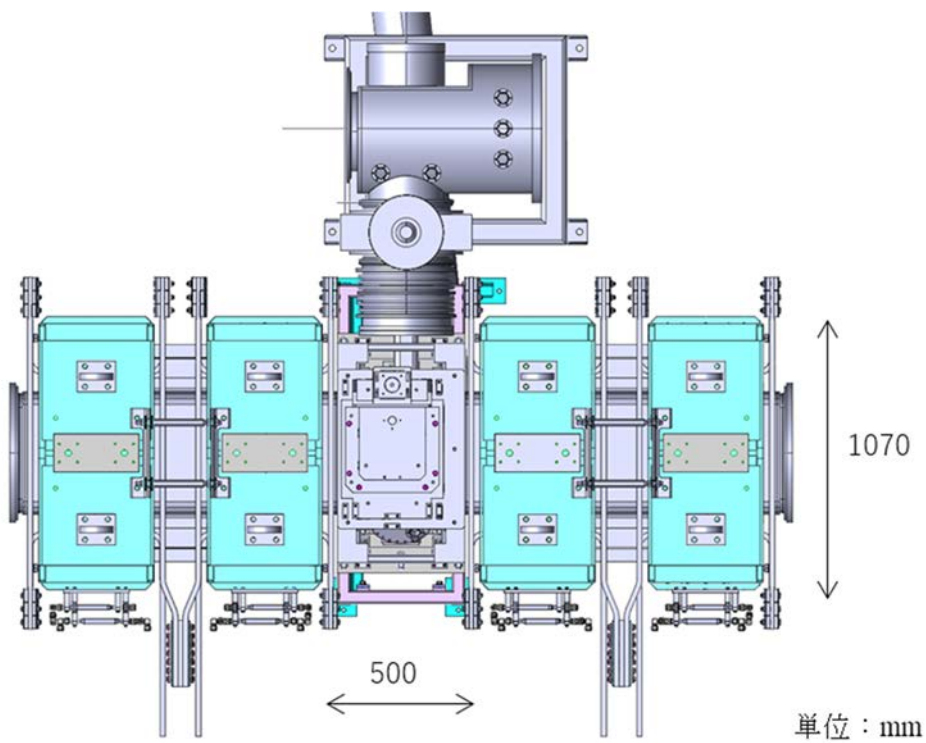


図 3.3-4 上面からの景観

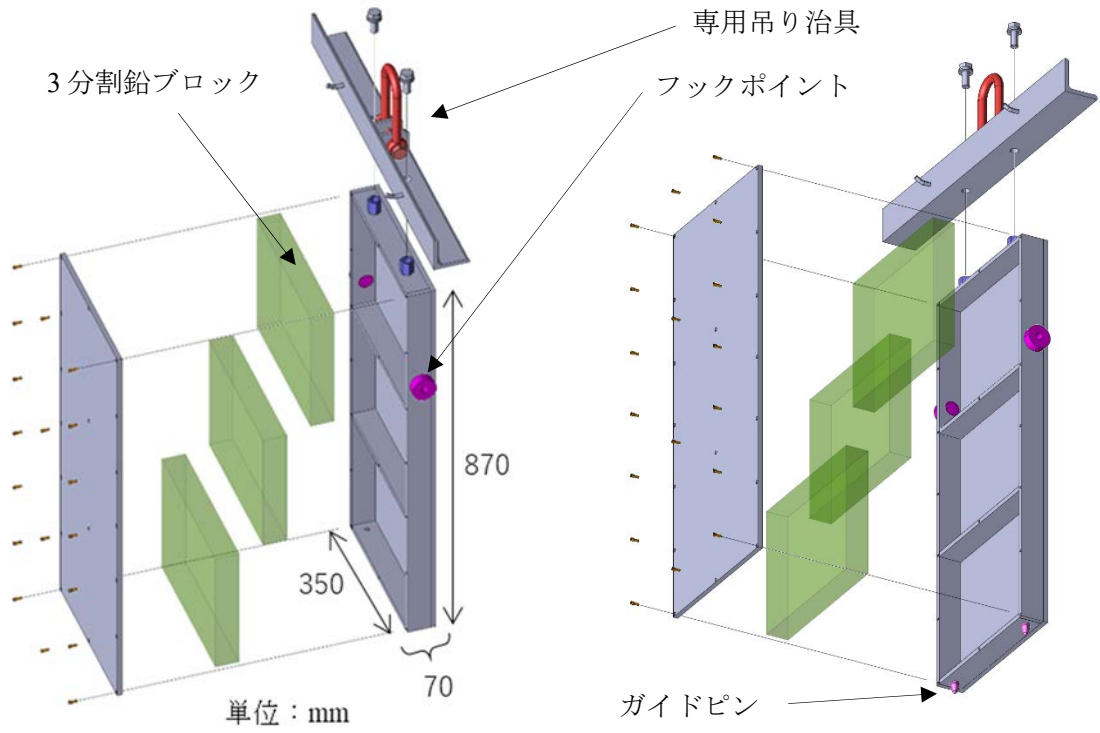


図 3.3-5 内周側遮蔽体構造

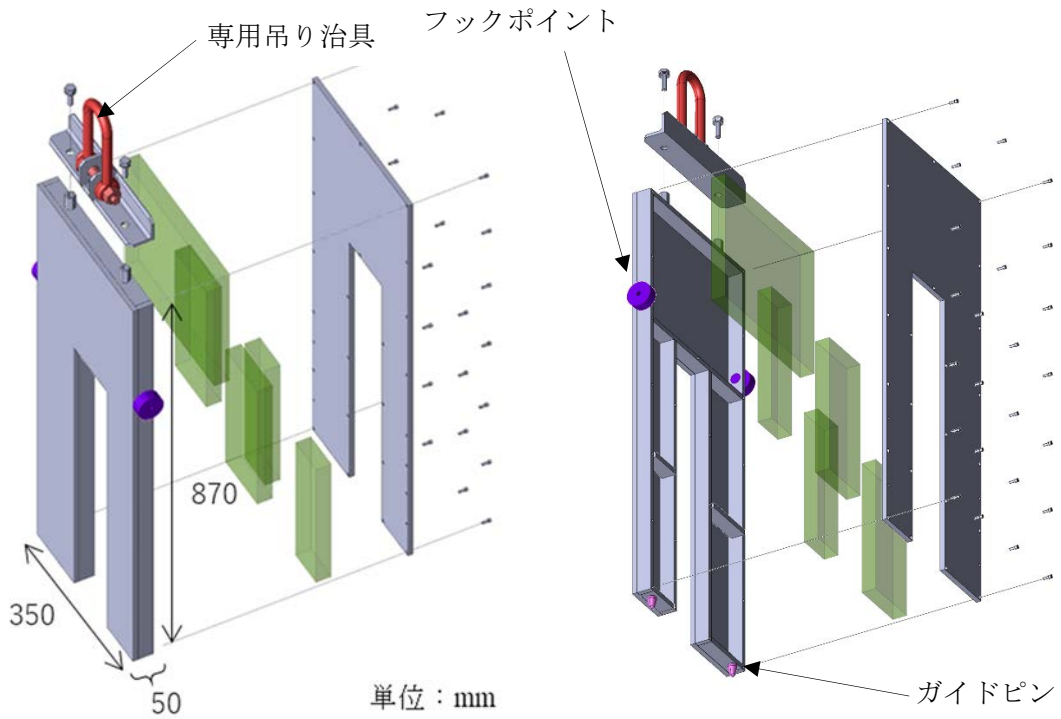


図 3.3-6 外周側遮蔽体構造

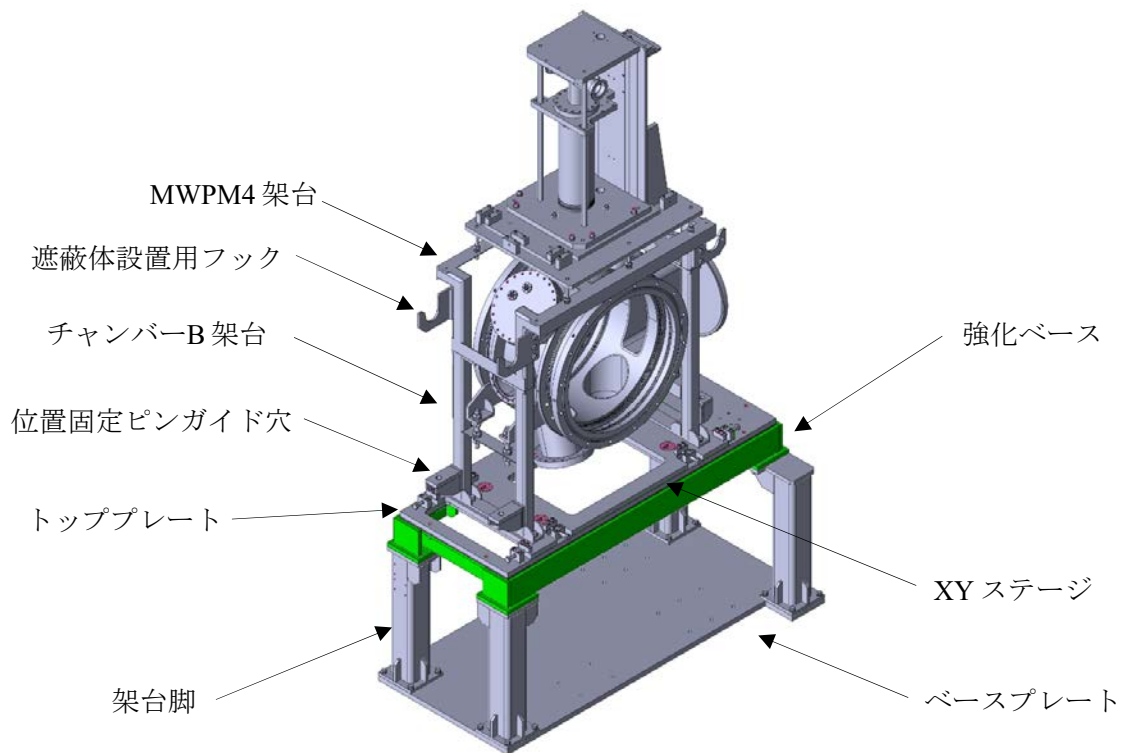


図 3.3-7 チャンバーB 新架台ユニット全体図

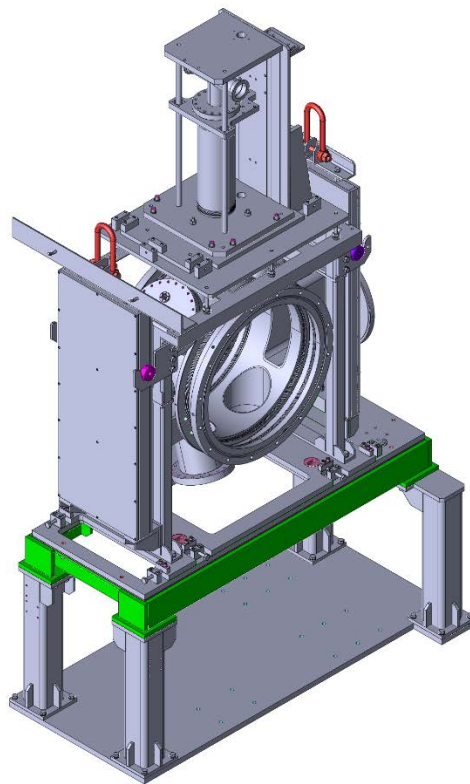


図 3.3-8 遮蔽体を設置した状態のチャンバーBユニット

ダミーブロック
質量：100kg

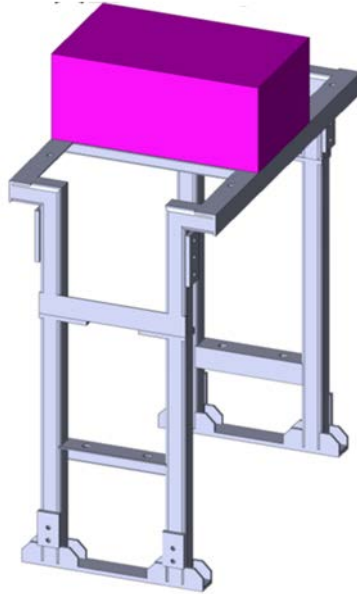


図 3.3-9 ユニット上部計算モデル

耐震荷重方向

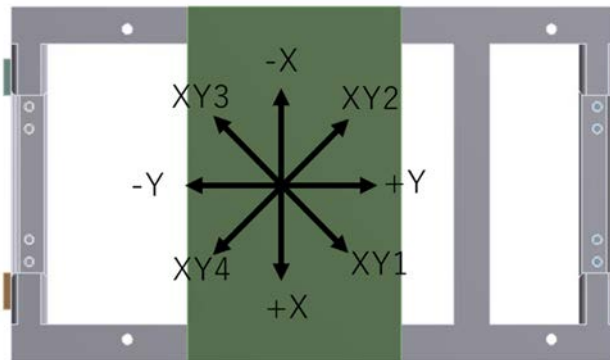


図 3.3-10 上から見たユニット上部計算方向（図右側が通路側）

N: 耐震-Y
 全変形量
 タイプ: 全変形量
 単位: mm
 時間: 1
 2019/05/21 17:22

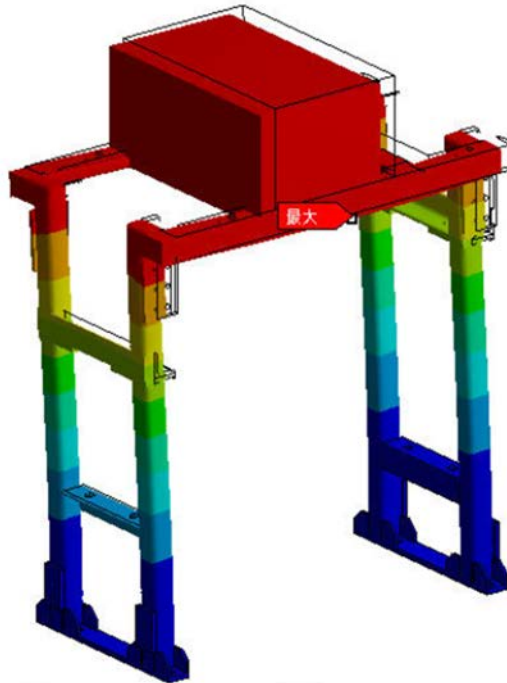
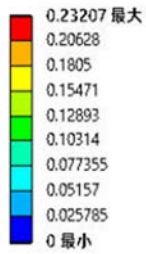


図 3.3-11 ユニット上部変位量

N: 耐震-Y
 応力強さ
 タイプ: 応力強さ
 単位: MPa
 時間: 1
 2019/05/21 17:24

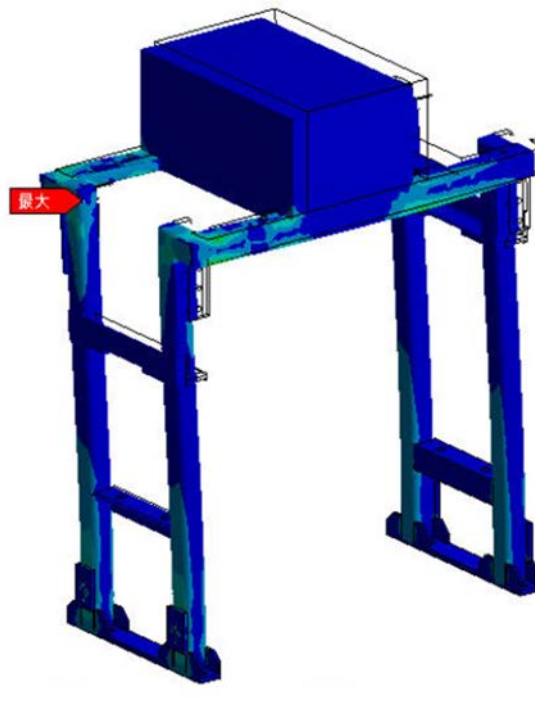
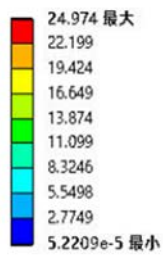


図 3.3-12 ユニット上部応力強さ

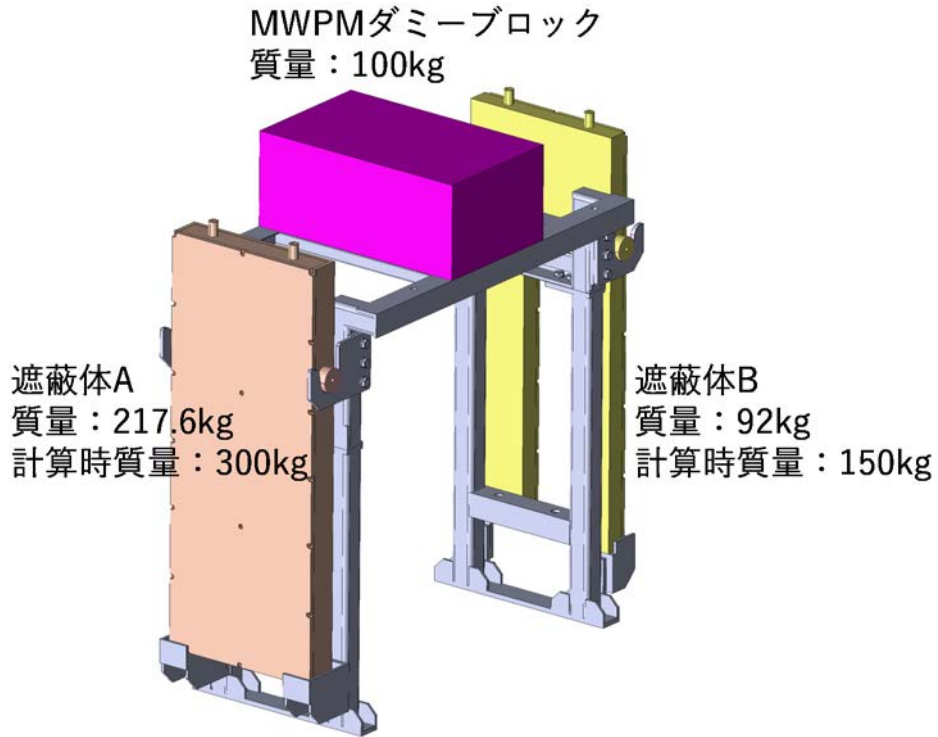


図 3.3-13 遮蔽体設置時のユニット上部計算モデル

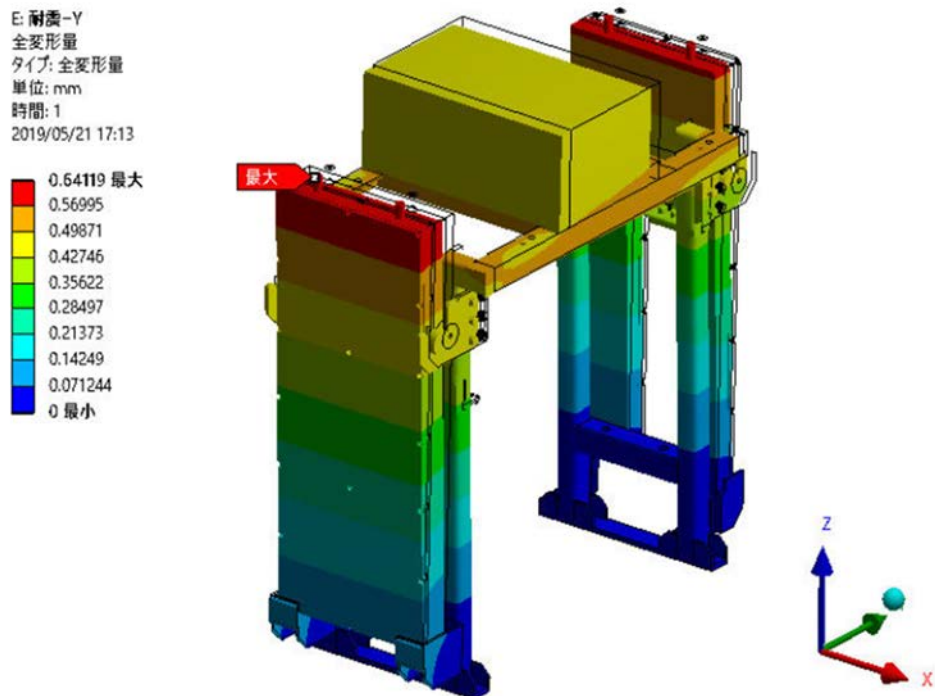


図 3.3-14 遮蔽体設置時のユニット上部変位量

E: 耐震-Y
応力強さ
タイプ: 応力強さ
単位: MPa
時間: 1
2019/05/21 17:14

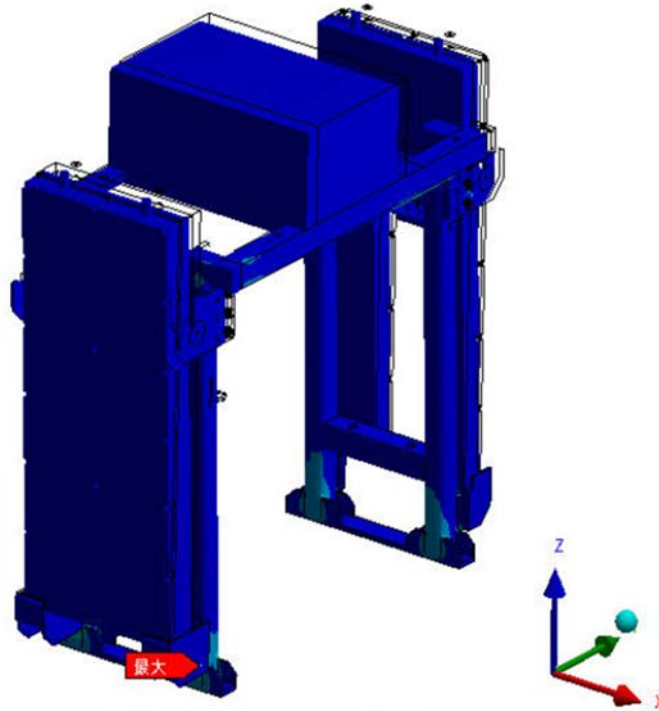
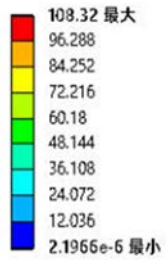


図 3.3-15 遮蔽体設置時のユニット上部応力強さ

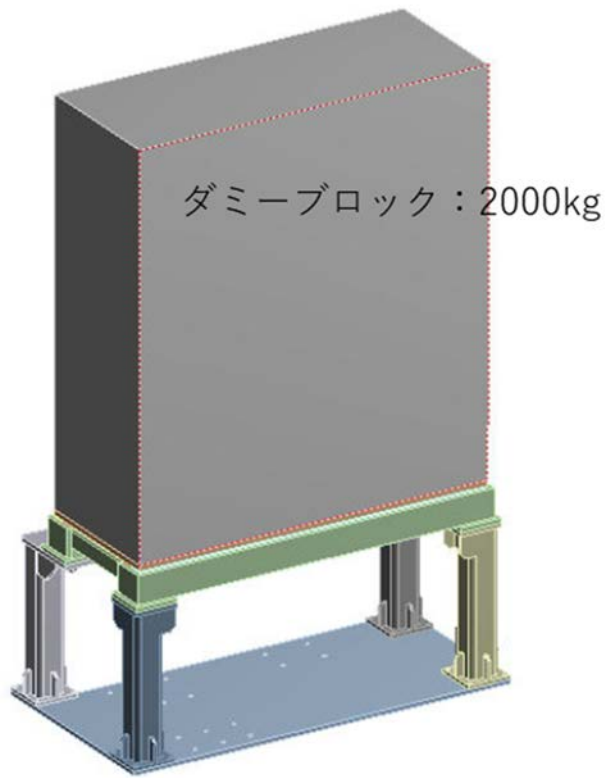


図 3.3-16 ユニット下部計算モデル

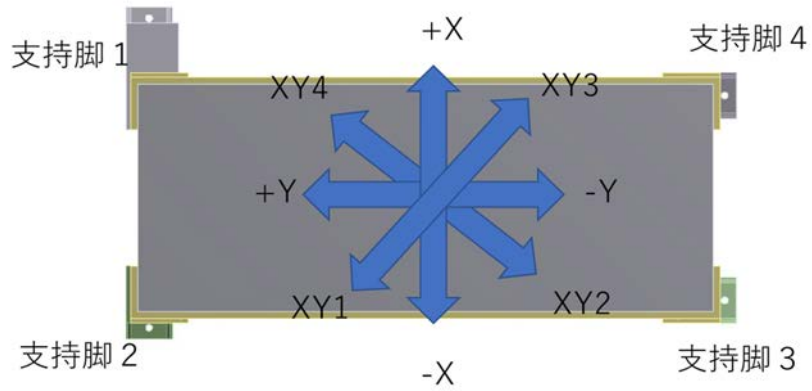


図 3.3-17 上から見たユニット下部計算方向（図右側が通路側）

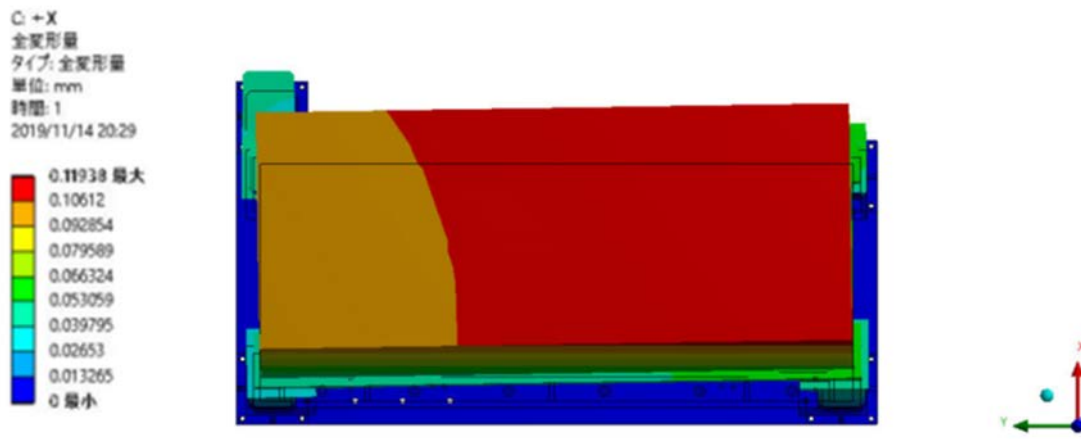


図 3.3-18 ユニット下部変位量

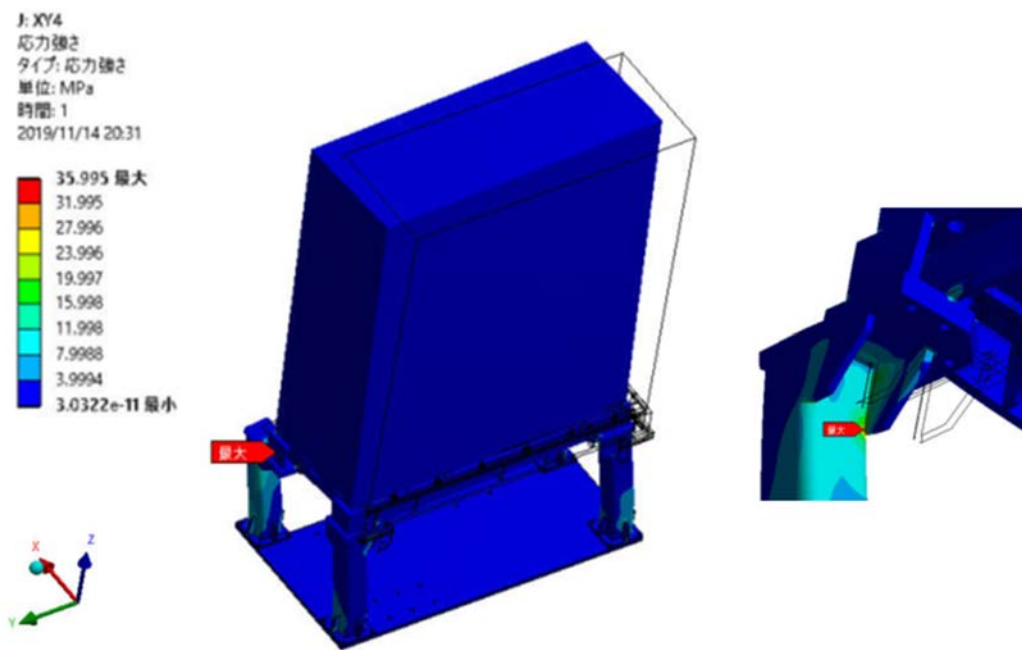


図 3.3-19 ユニット下部応力強さ

表 3.3-1 上部ユニット計算結果

荷重方向	遮蔽体なし		遮蔽体あり	
	最大変位量 [mm] (絶対値)	トレスカ応力 [MPa] (最大せん断応力)	最大変位量 [mm] (絶対値)	トレスカ応力 [MPa] (最大せん断応力)
自重	0.06	14	0.1	29.6
荷重+X	0.15	16.4	0.13	59.4
荷重+Y	0.23	23.7	0.47	49.2
荷重-X	0.15	17.3	0.13	47.2
荷重-Y	0.23	25	0.64	108.3
荷重 XY1	0.19	21.6	0.31	41.6
荷重 XY2	0.19	22.1	0.31	47.1
荷重 XY3	0.19	22.3	0.48	81.6
荷重 XY4	0.19	21.2	0.48	106.3

表 3.3-2 下部ユニット計算結果

荷重方向	最大変位量 [mm] (絶対値)	トレスカ応力 [MPa] (最大せん断応力)
自重時	0.01	9.1
荷重+X	0.12	34.5
荷重+Y	0.1	23.5
荷重-X	0.07	22.5
荷重-Y	0.06	19.7
荷重 XY1	0.09	28.6
荷重 XY2	0.09	23.3
荷重 XY3	0.09	26.9
荷重 XY4	0.11	36

チェンバーB架台ユニット更新作業

荷電変換フォイル観測系更新作業

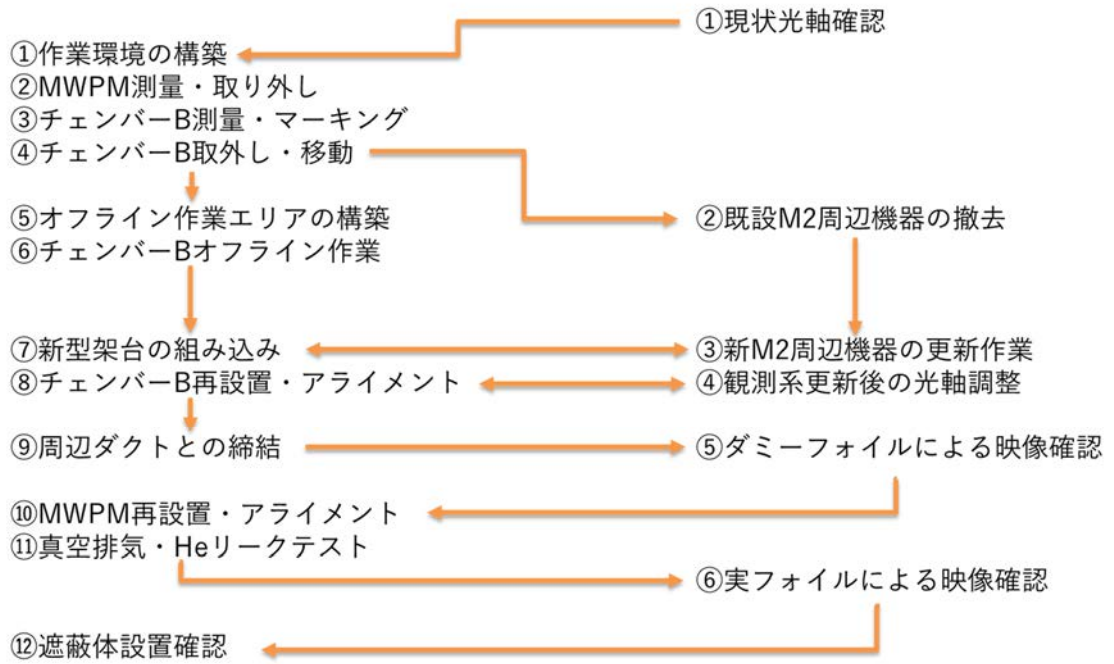


図 4.1-1 更新作業の流れ

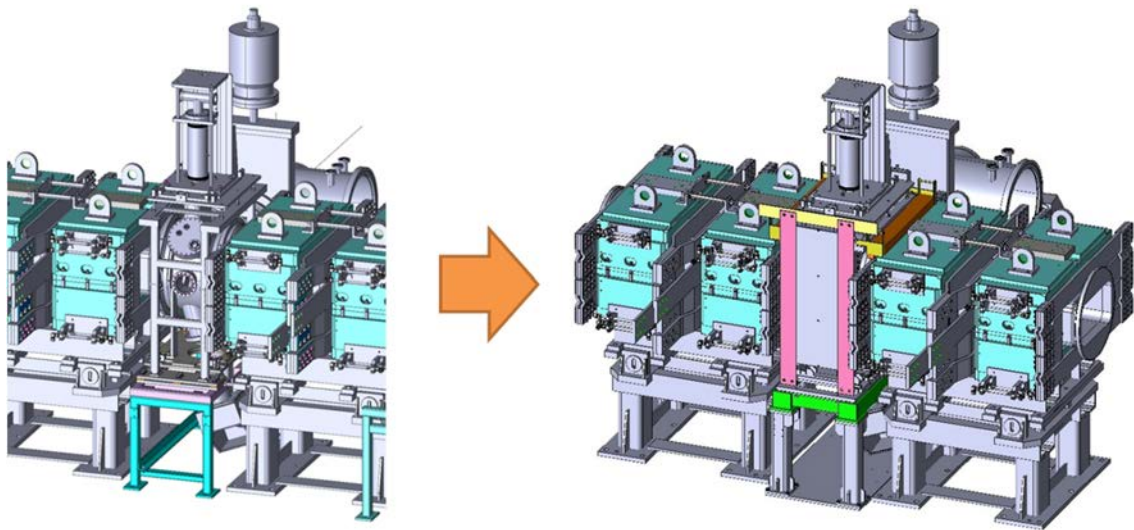


図 4.1-2 架台ユニット更新前後の模式図

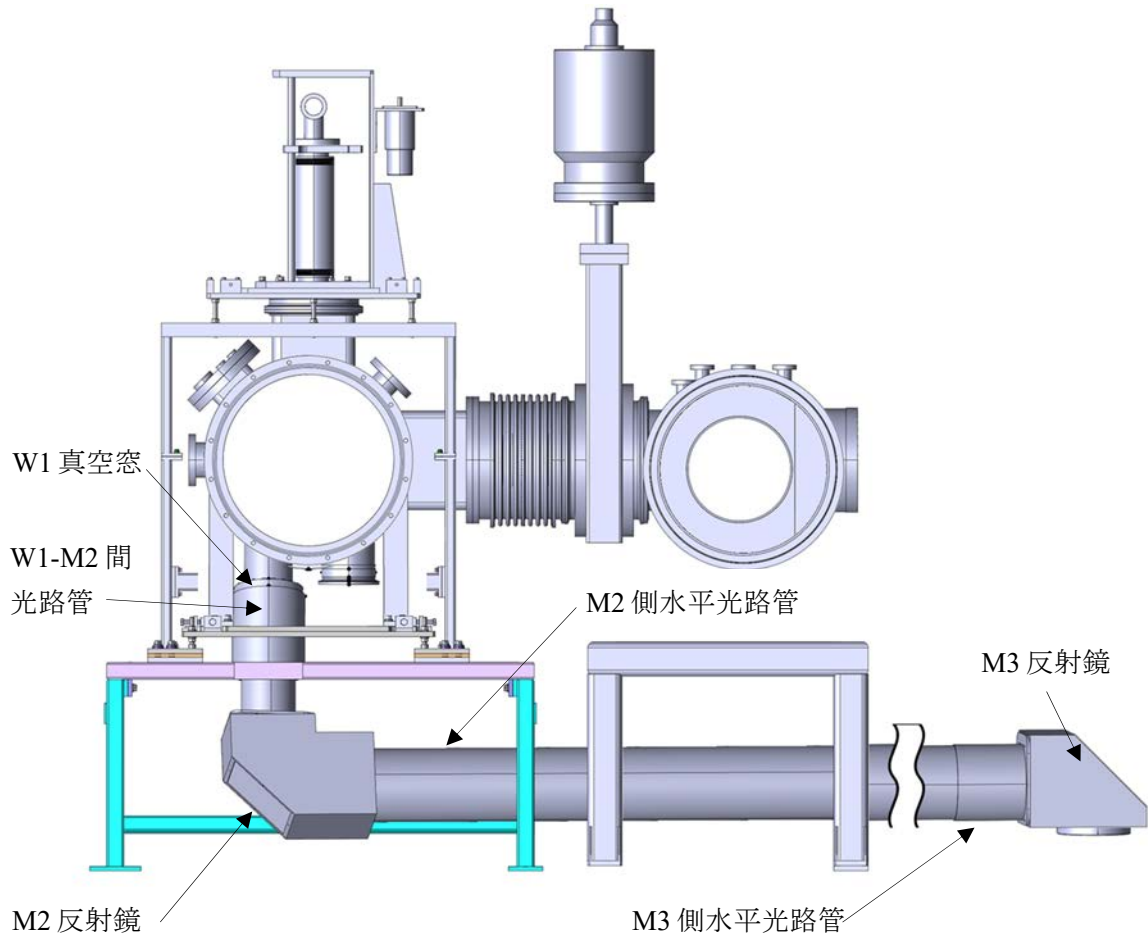


図 4.1-3 荷電変換フォイル観測系模式図

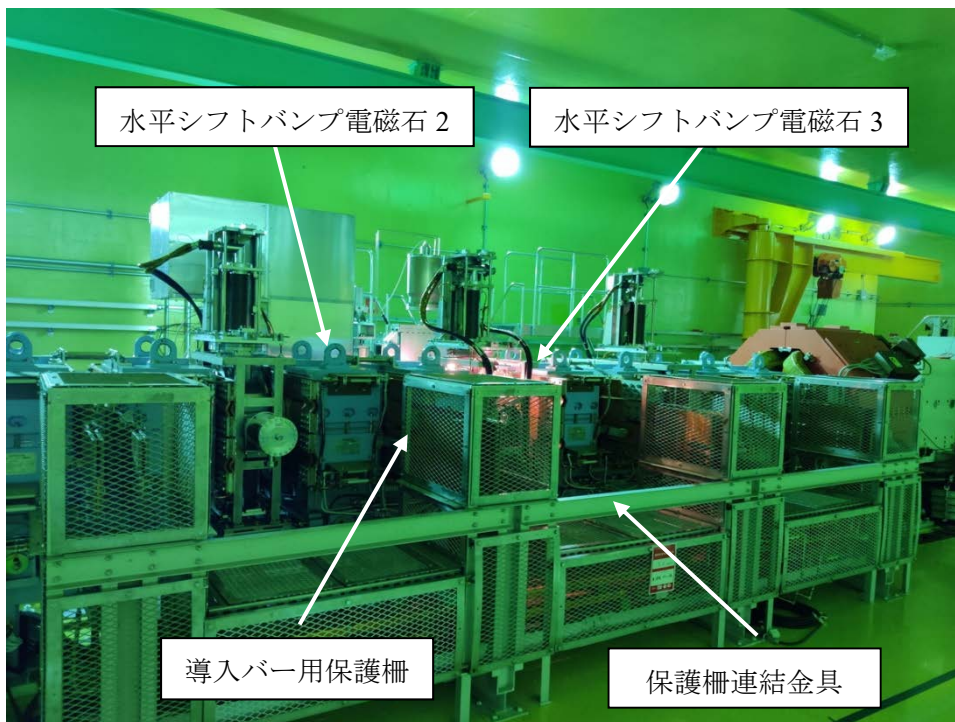


図 4.2-1 水平シフトバンプ電磁石 2 及び 3 の周辺

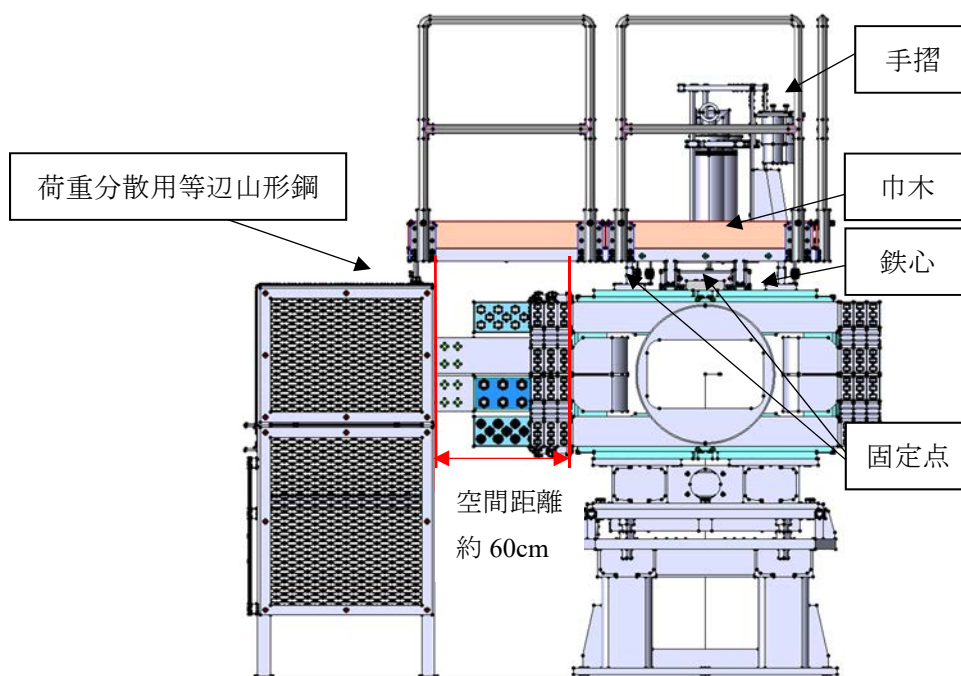


図 4.2-2 水平シフトバンプ電磁石と作業台の組合せ模式図



図 4.2-3 製作した作業台



図 4.2-4 作業台設置作業の様子



図 4.2-5 作業台設置作業終了後の入射部の様子

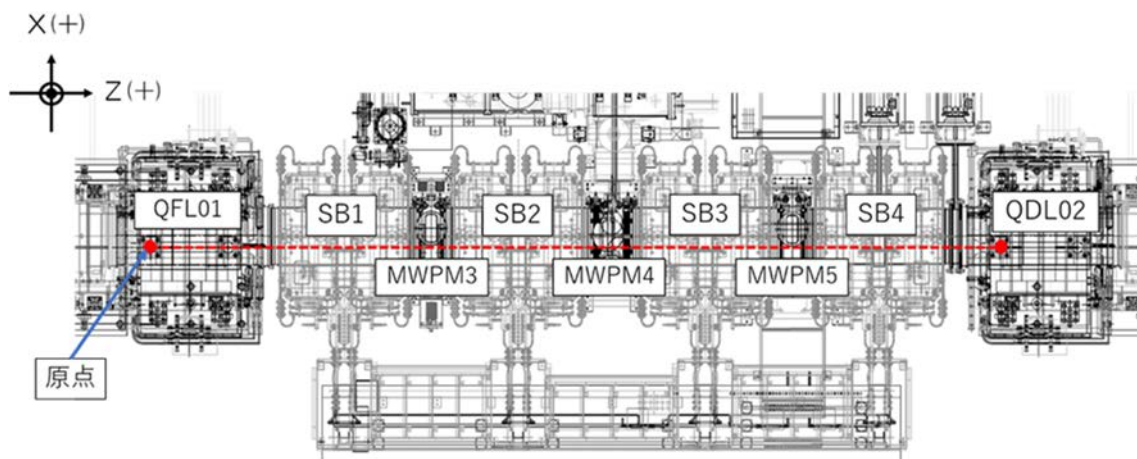


図 4.3-1 精密アライメントの基準座標系（平面図）

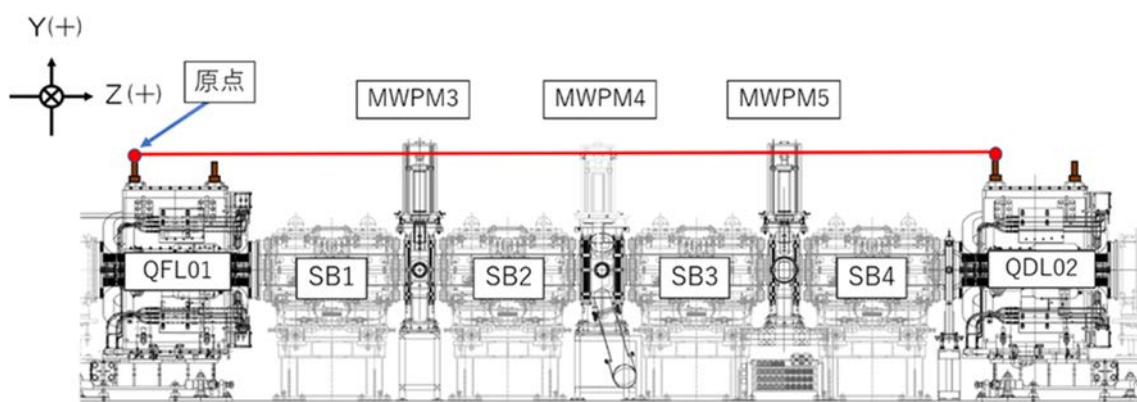
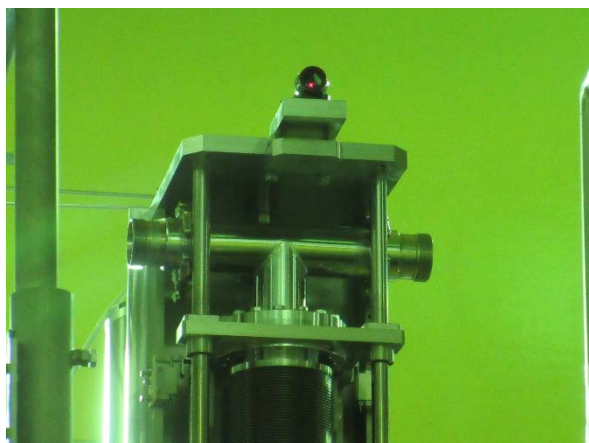
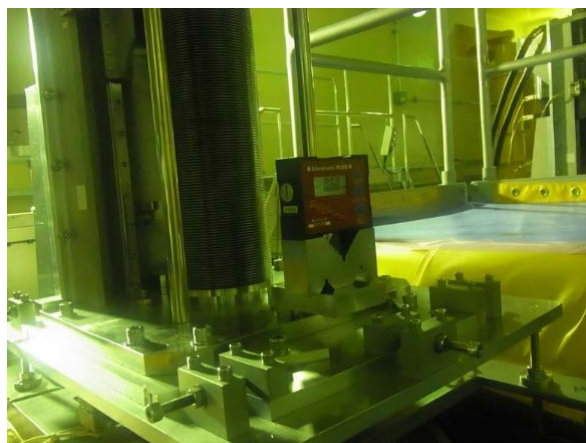


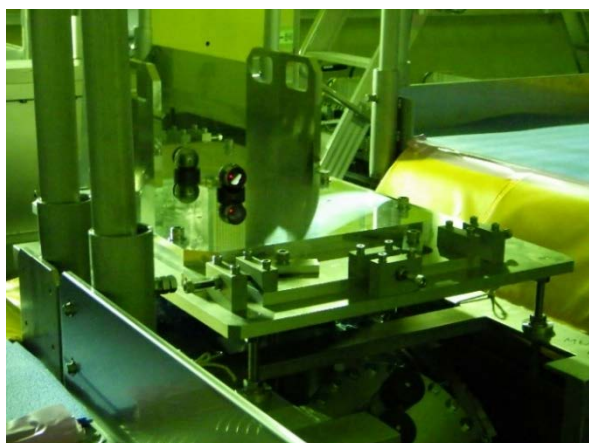
図 4.3-2 精密アライメントの基準座標系（側面図）



(A) MWPM4 位置確認測量



(B) MWPM4 基準座傾斜測定



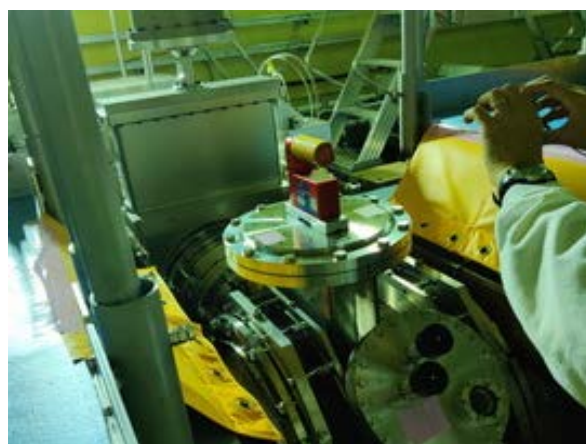
(C) MWPM4 ベースプレート位置確認測量



(D) MWPM4 ベースプレート傾斜測定



(E) チャンバーB 位置確認測量

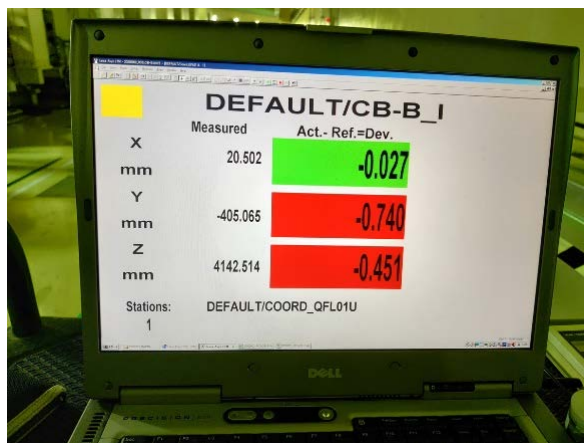


(F) チャンバーB 傾斜測定

図 4.3-3 位置確認測量作業写真



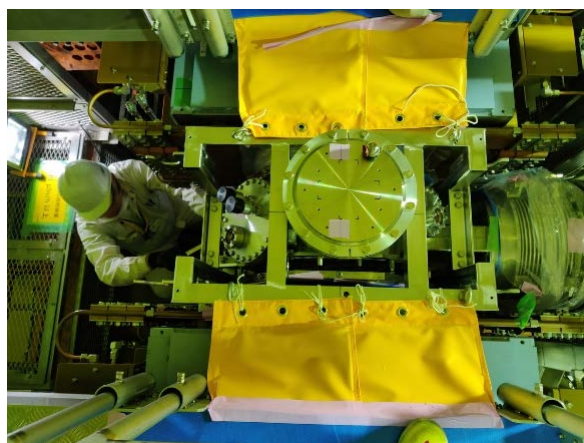
(A) レーザートラッカー設置状況



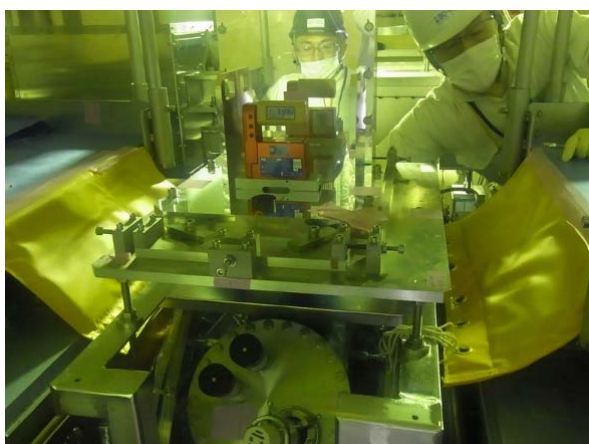
(B) アライメント座標値の表示



(C) アライメント状況



(D) チャンバーBアライメント状況



(E) MWPM4 ベースプレートアライメント状況

図 4.3-4 アライメント作業写真

表 4.3-1 取外し前と再設置後のトラッカー測定の結果

LT 測定機器	QFL01_UのCCR中心を原点とし、Z軸をQDL02_UのCCR中心で結んだ座標系									
	測定点	取外し前 [mm]			再設置後 [mm]			変動 [mm]		
		X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
ベースプレート (MWPM4 XYステ ージ)	BP_U	94.579	-352.549	4133.975	94.607	-352.502	4133.986	0.028	0.047	0.011
	BP_D	94.926	-352.593	4334.005	94.883	-352.534	4333.997	-0.043	0.059	-0.008
	BP_I	-5.256	-352.535	4234.139	-5.267	-352.481	4234.135	-0.011	0.054	-0.004
	BP_O	194.766	-352.624	4233.81	194.747	-352.563	4233.839	-0.019	0.061	0.029
真空チャン バーB	CB-B_UO	164.01	-404.366	4137.7	164.071	-404.420	4137.741	0.061	-0.054	0.041
	CB-B_DO	166.909	-404.011	4328.168	166.895	-404.057	4328.238	-0.014	-0.046	0.070
	CB-B_I	0.488	-404.46	4235.445	0.524	-404.457	4235.463	0.036	0.003	0.018

*ダクト内大気圧状態での測定結果

表 4.3-2 取外し前と再設置後の傾斜測定の結果 (ベースプレート及びチャンバーB)

傾斜測定機器	測定点	取外し前[mm/m]		再設置後[mm/m]		変動[mm/m]	
		θ_z	θ_x	θ_z	θ_x	$\Delta\theta_z$	$\Delta\theta_x$
ベースプレート (MWPM4用 XYステ ージ)	MWPM_BP	-0.331	0.100	-0.407	0.131	-0.077	0.032
真空チャン バーB	CB-B	1.525	-1.972	1.256	-1.928	-0.269	0.045

*ダクト内大気圧状態での測定結果

表 4.3-3 位置確認測量結果

LT 測定機器	QFL01_UのCCR中心を原点とし、Z軸をQDL02_UのCCR中心で結んだ座標系									
	測定点	取外し前 [mm]			再設置後 [mm]			変動 [mm]		
		X	Y	Z	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ
MWPM4	MWPM4_U	-92.879	275.473	4232.492	-92.581	275.940	4232.607	0.298	0.467	0.115
	MWPM4_D	-93.325	-322.287	4232.341	-93.500	-321.856	4232.550	-0.175	0.431	0.209

*ダクト内大気圧状態での測定結果

表 4.3-4 取外し前と再設置後の傾斜測定の結果 (MWPM4)

傾斜測定機器	測定点	取外し前 [mm/m]		再設置後 [mm/m]		変動 [mm/m]	
		θz	θx	θz	θx	$\Delta\theta z$	$\Delta\theta x$
MWPM4	MWPM4_U	-0.090	-0.250	-0.770	-0.170	-0.680	0.080
	MWPM4_D	-0.340	-0.510	-0.570	-0.190	-0.230	0.320

*ダクト内大気圧状態での測定結果

表 4.3-5 真空状態での MWPM4 測量結果

MWPM4	QFL01_U の CCR が原点			QFL01 電磁石中心を原点		
	真空時 [mm]			真空時 [mm]		
	X	Y	Z	X	Y	Z
MWPM4_U	-91.684	275.787	4232.650	-91.684	1175.787	3872.650
MWPM4_D	-92.413	-321.982	4232.570	-92.413	578.018	3872.570

表 4.3-6 真空状態での MWPM4 傾斜測定結果

MWPM4	再設置後	
	θz [mm/m]	θx [mm/m]
MWPM4_U	-0.420	-0.165
MWPM4_D	-0.540	-0.160



図 4.4-1 新架台ユニットの組立



図 4.4-2 新架台ユニットへの遮蔽体設置

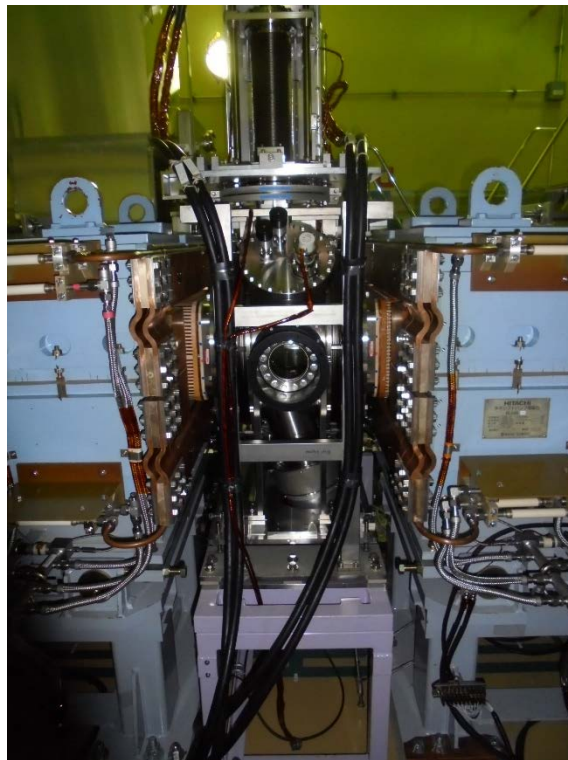
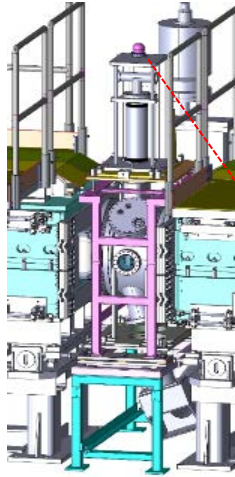
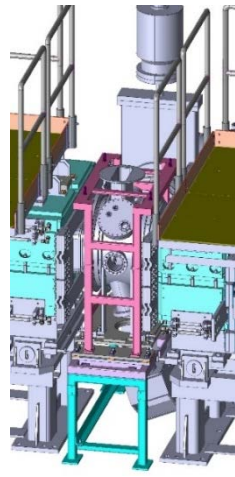


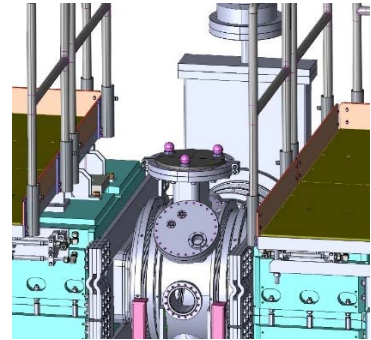
図 4.4-3 チャンバーBと架台ユニット（更新前）



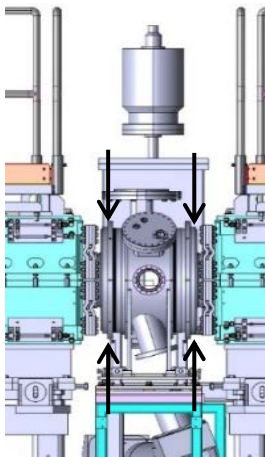
① MWPM 測量



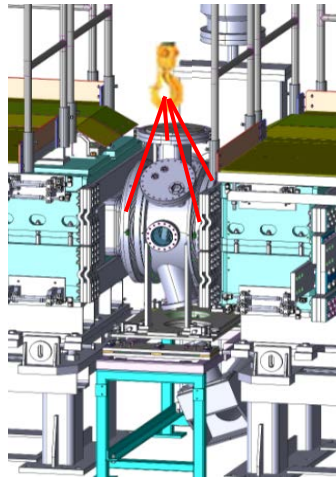
② MWPM 取外し



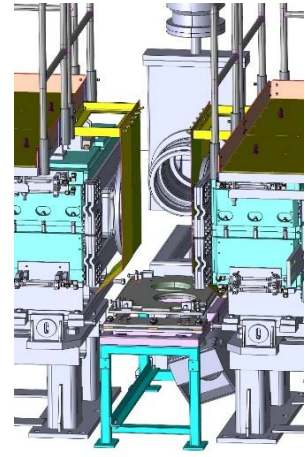
③ チャンバーB 測量



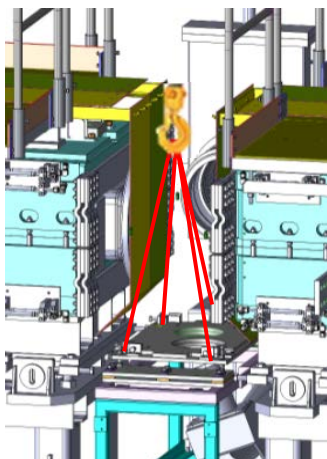
④ チャンバーB 切り離し



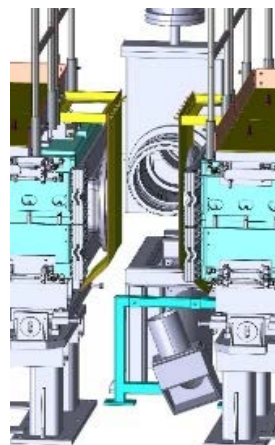
⑤ チャンバーB 取外し



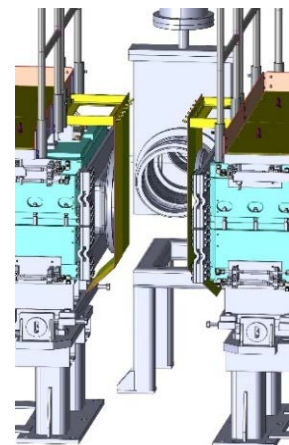
⑥ 開口部養生・遮蔽設置



⑦ 架台下部取外し



⑧ 観測系光路取外し



⑨ 取外し完了

図 4.4-4 チャンバーB 取外し手順の概略



図 4.4-5 MWPM4 専用吊り治具



図 4.4-6 MWPM4 取外し

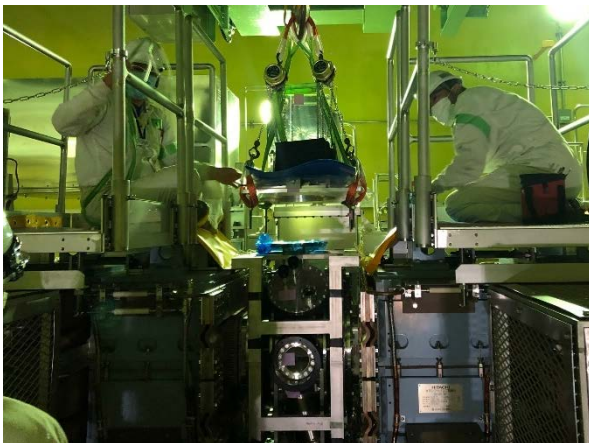


図 4.4-7 MWPM4 用 X-Y ステージ取外し



図 4.4-8 MWPM4 用架台取外し

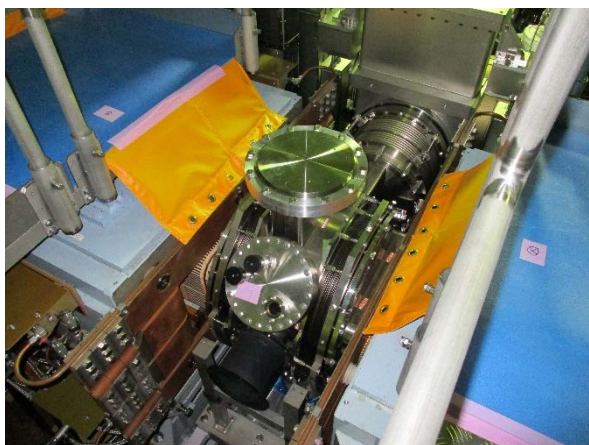


図 4.4-9 ブランクフランジの取付け



図 4.4-10 接続ベローズの切り離し



図 4.4-11 チャンバーBの取外し作業
(1)



図 4.4-12 チャンバーBの取外し作業
(2)

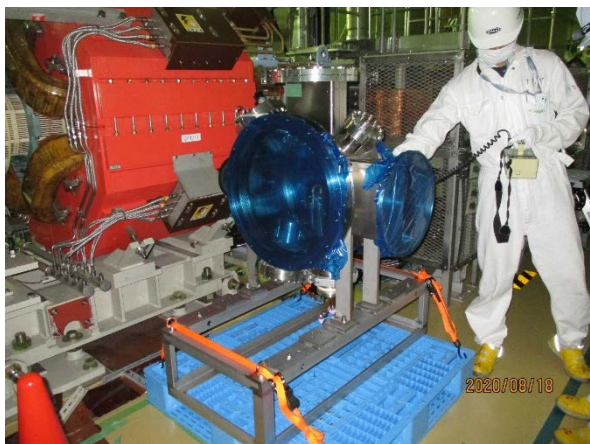


図 4.4-13 運搬用架台に固定 (線量計測)



図 4.4-14 架台ユニット取外し中の入射部



図 4.4-15 コンクリート遮蔽体による区画



図 4.4-16 新型架台ユニットへの仮組込み

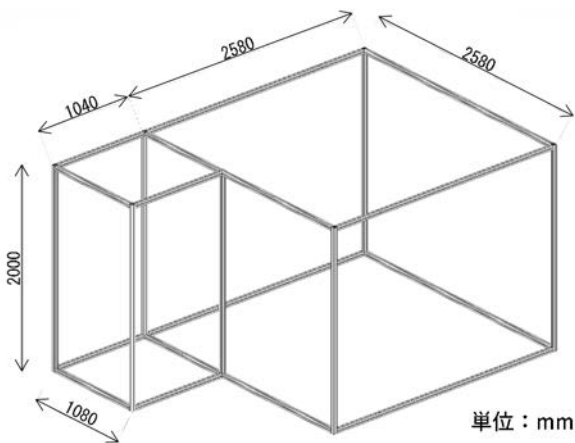


図 4.4-17 作業ブースの構造



図 4.4-18 作業ブース外観



図 4.4-19 チャンバーB 内部の除染作業

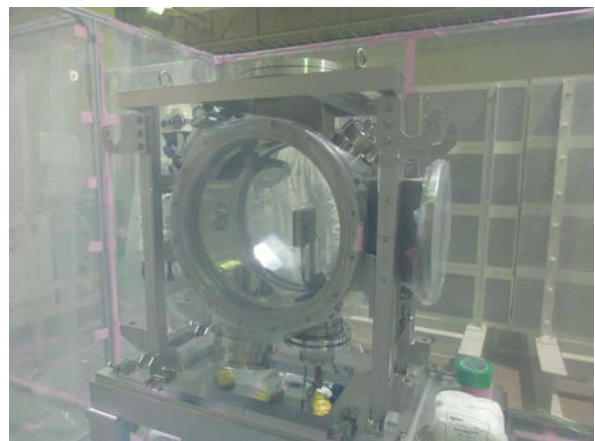


図 4.4-20 除染完了後のチャンバーB 内部



図 4.4-21 W1 真空窓の取外し



図 4.4-22 取外した W1 真空窓



図 4.4-23 M1 反射鏡



図 4.4-24 光源反射板



図 4.4-25 エレクトロンキャッチャー全体（建設時の新品の状態）



図 4.4-26 エレクトロンキャッチャー抜出作業

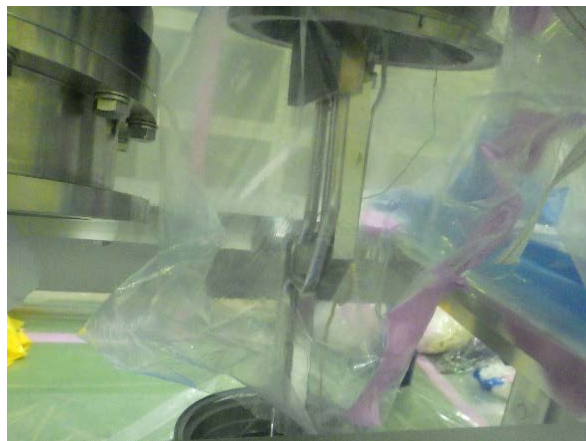


図 4.4-27 抜出中のエレクトロンキャッチャー



図 4.4-28 チェーンランプ交換前

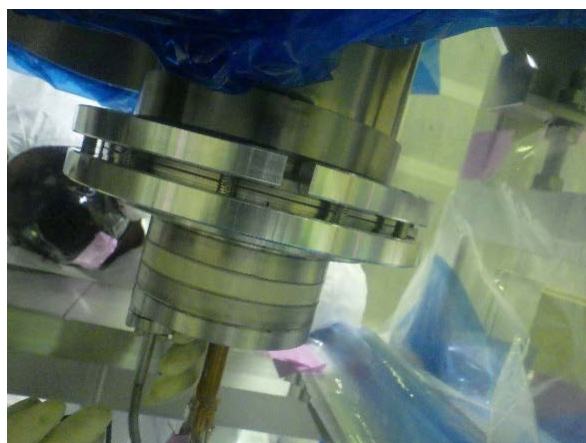


図 4.4-29 割りランプへの交換後



図 4.4-30 He リークテストの実施

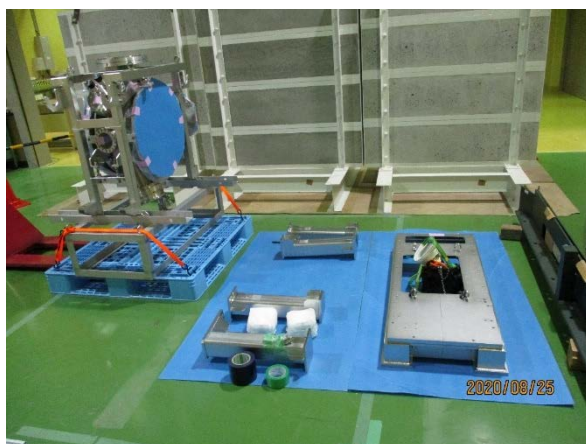


図 4.4-31 分割された架台ユニット

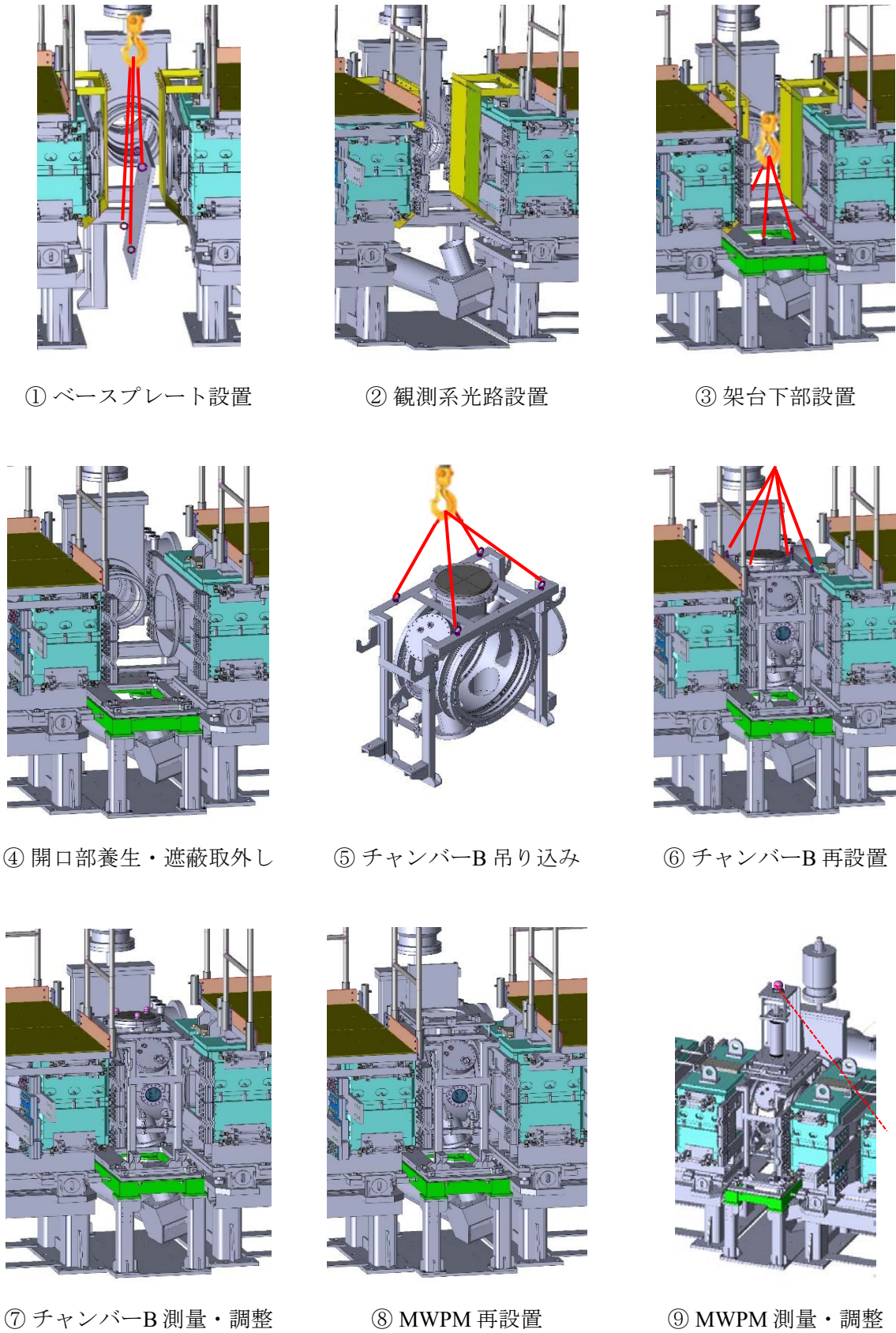


図 4.4-32 チャンバーB 再設置手順の概略



図 4.4-33 ベースプレートの吊り込み



図 4.4-34 ベースプレートの設置



図 4.4-35 ベースプレート設置完了後



図 4.4-36 観測系ダクトの設置

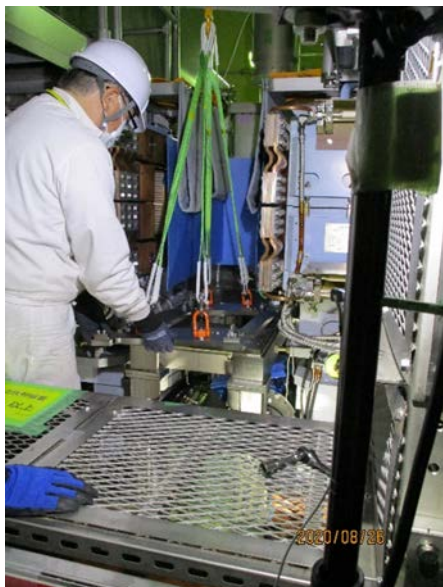


図 4.4-37 XY ステージの吊り込み

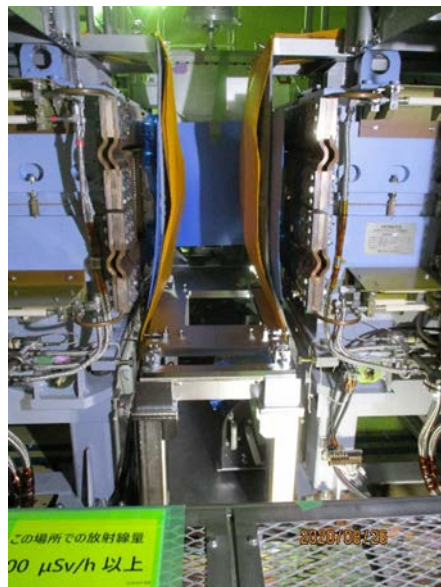


図 4.4-38 架台ユニット下部設置完了後



図 4.4-39 チャンバーBの搬入



図 4.4-40 チャンバーB再設置



図 4.4-41 ガasketの装着

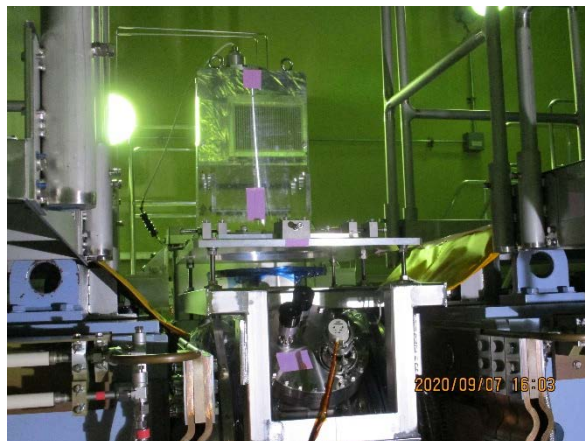


図 4.4-42 MWPM4 X-Y ステージの取付け



図 4.4-43 MWPM4 再設置

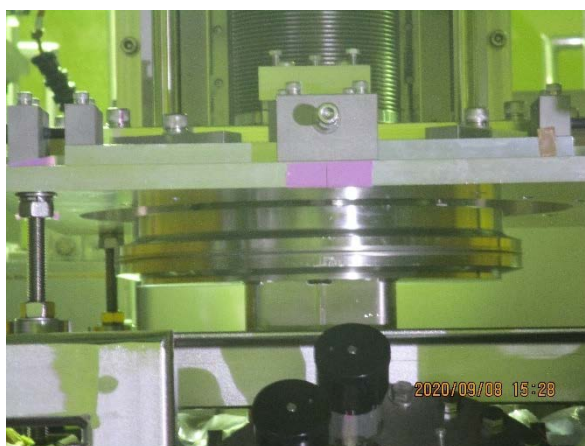


図 4.4-44 MWPM4 フランジ締結

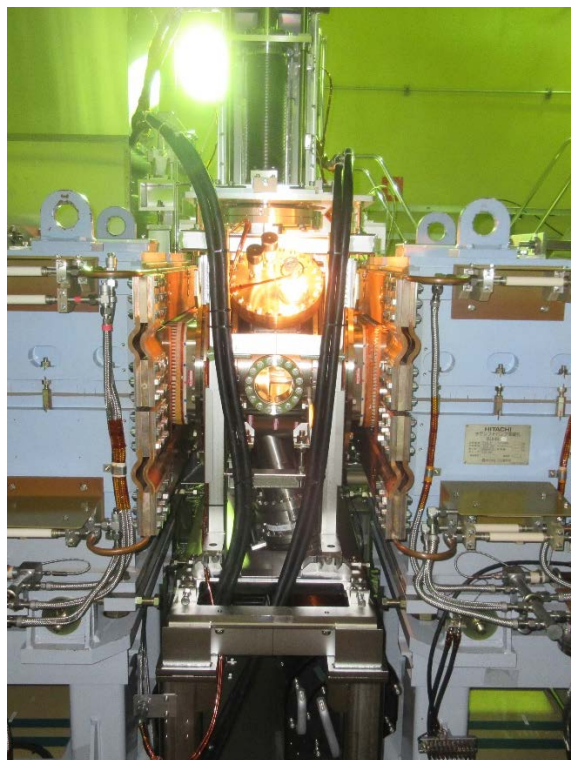


図 4.4-45 チャンバーB と新架台ユニット

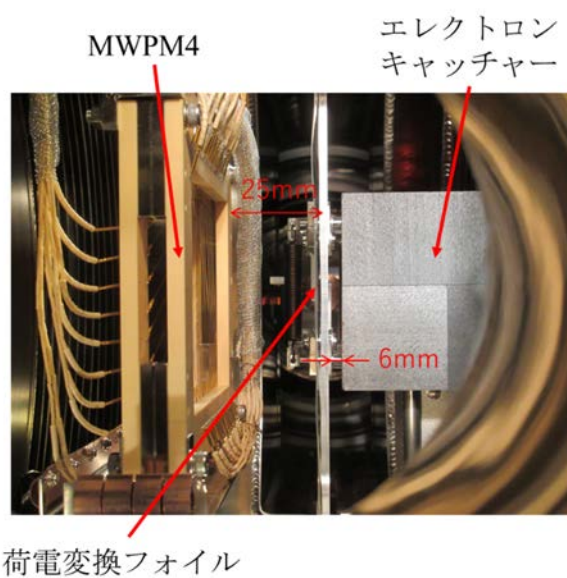


図 4.4-46 チャンバーB 内部構造物の干渉確認

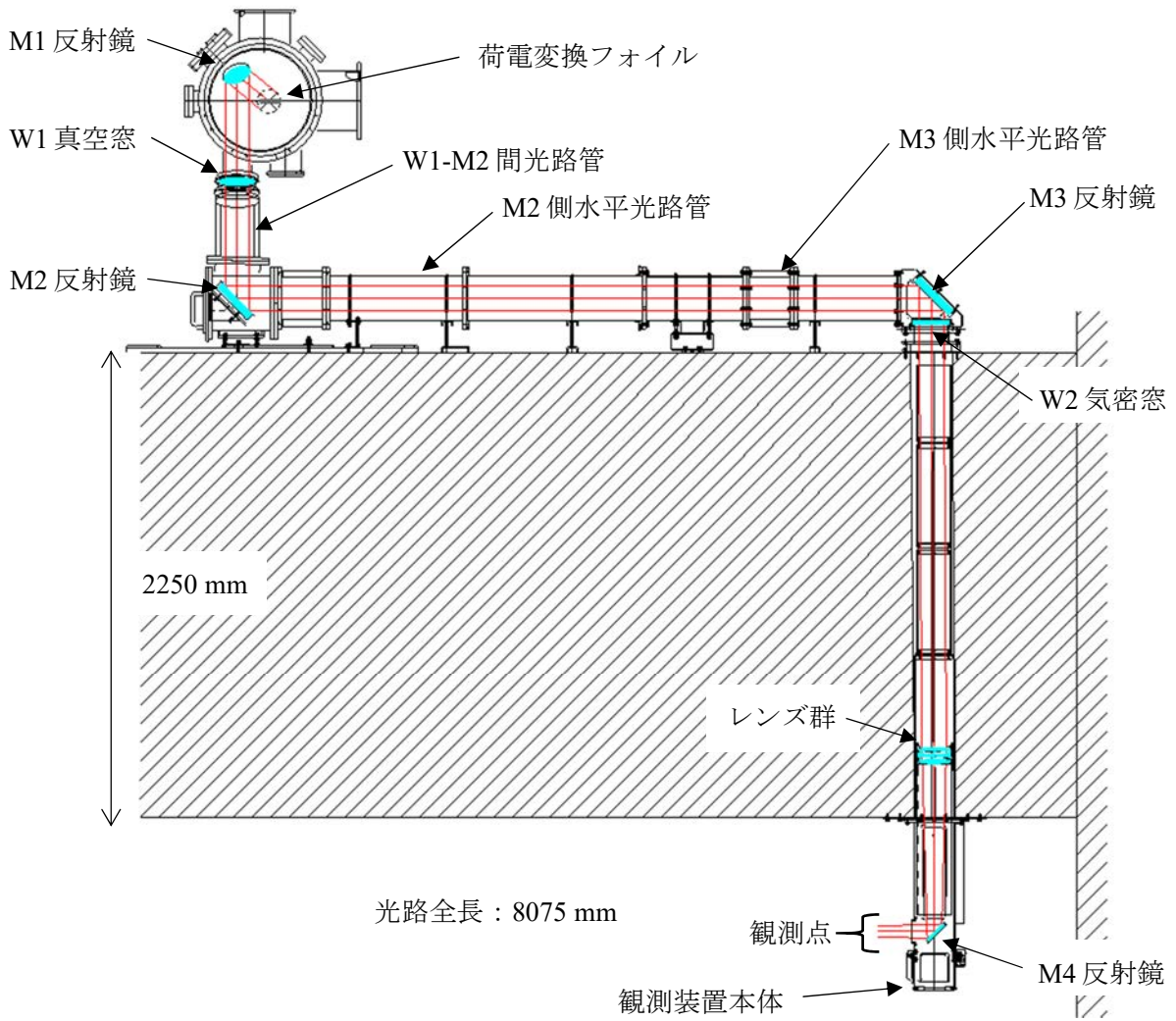


図 4.5-1 荷電変換観測系の概略図

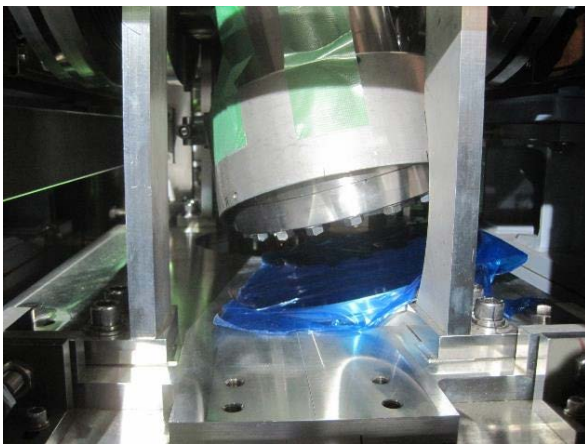


図 4.5-2 開放した W1-M2 間光路



図 4.5-3 レーザー照射治具の外観

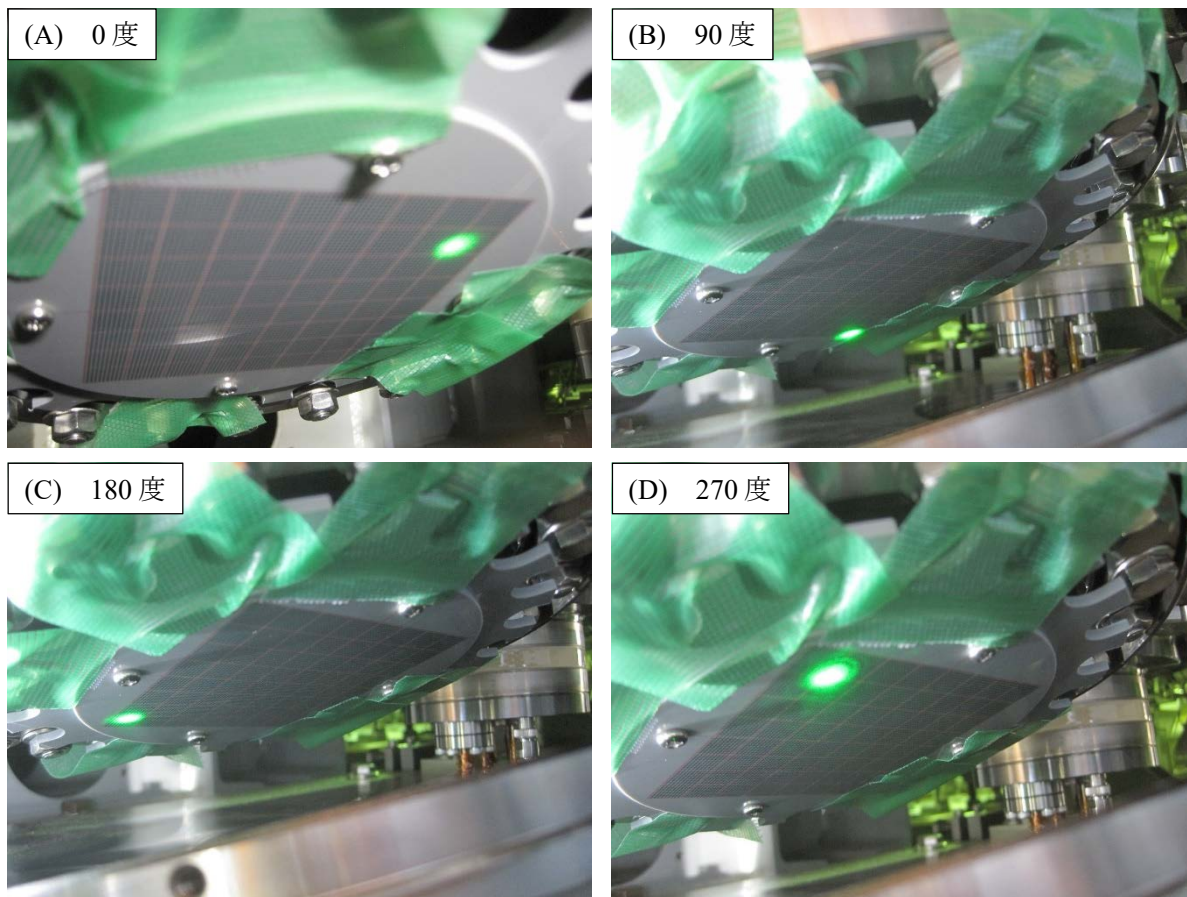
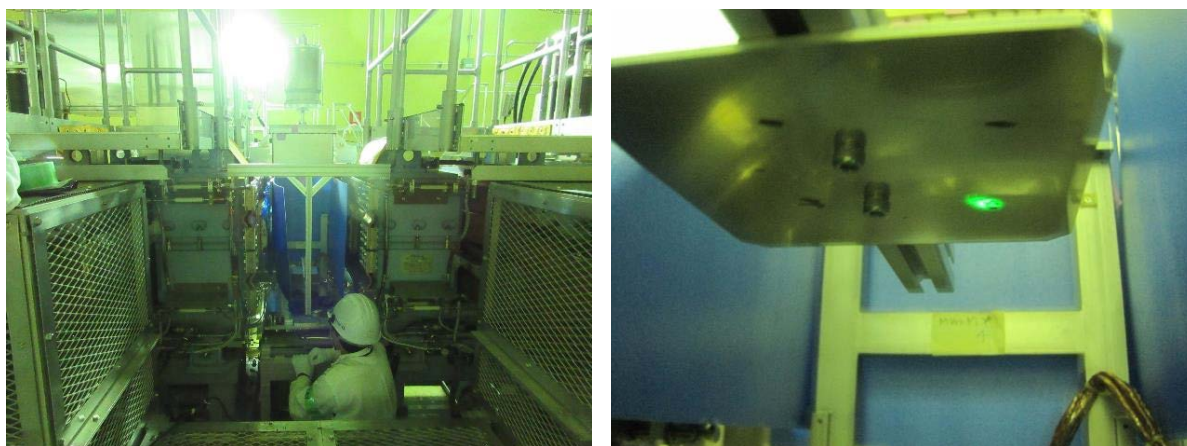
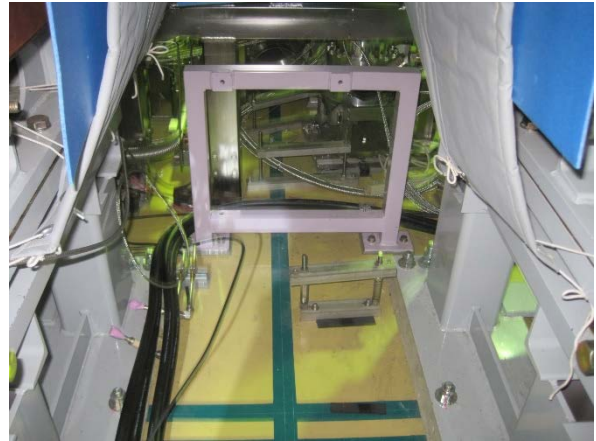


図 4.5-4 レーザーポインターを回転させてターゲット板に照射した様子



(A) 投影板全体図 (B) 投影板拡大図

図 4.5-5 W1 位置に設置した投影板に対する光軸確認の様子



(A) チャンバーBユニット架台取外し後

(B) M2 反射鏡と周辺光路の取外し後

図 4.5-6 観測系光学機器の取外しの様子

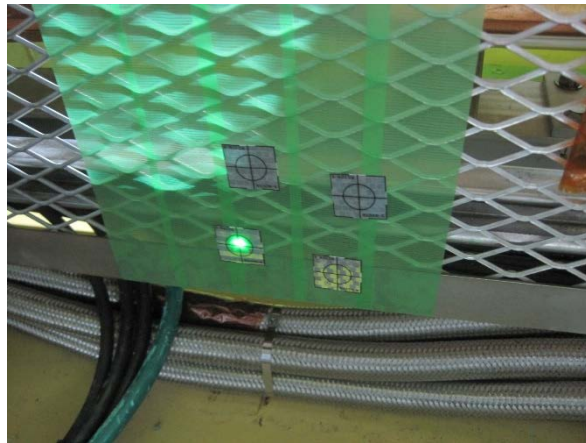


図 4.5-7 M2 後方での光軸確認



図 4.5-8 観測装置取外し



図 4.5-9 ガイド管挿入



(A) M2 反射鏡更新前



(B) M2 反射鏡更新後

図 4.5-10 M2 反射鏡更新前後の比較

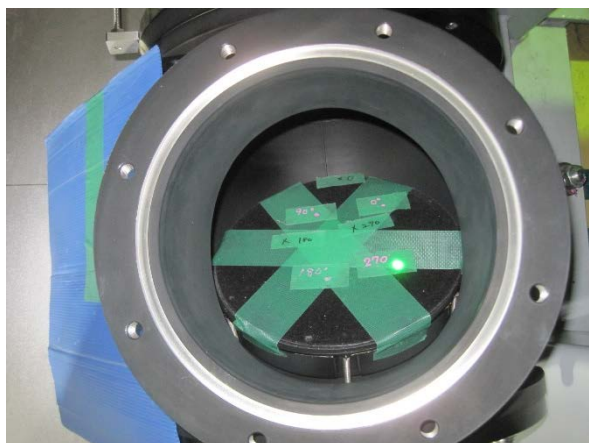


図 4.5-11 M2 反射鏡に対する光軸確認

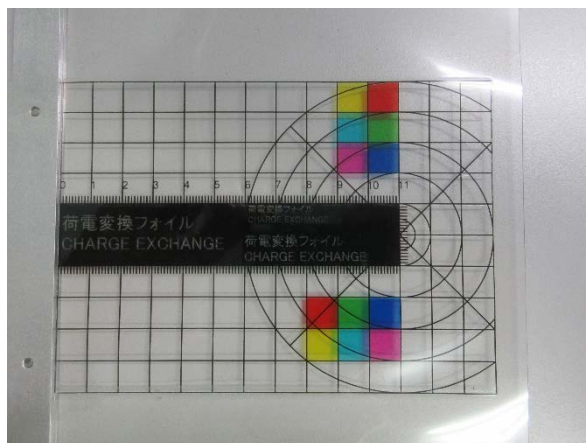
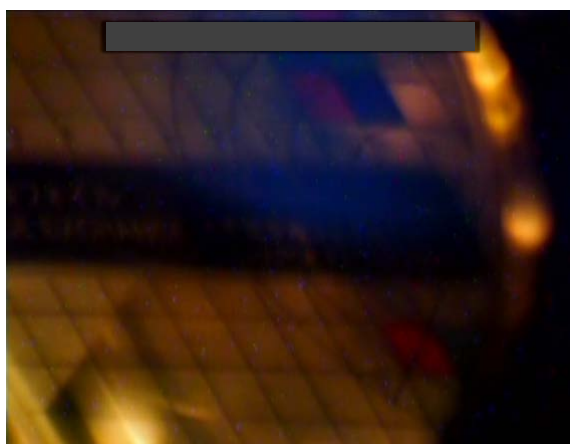
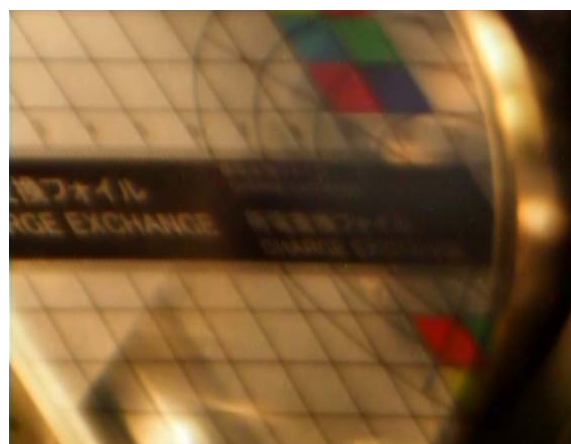


図 4.5-12 ダミーフィルムの外観

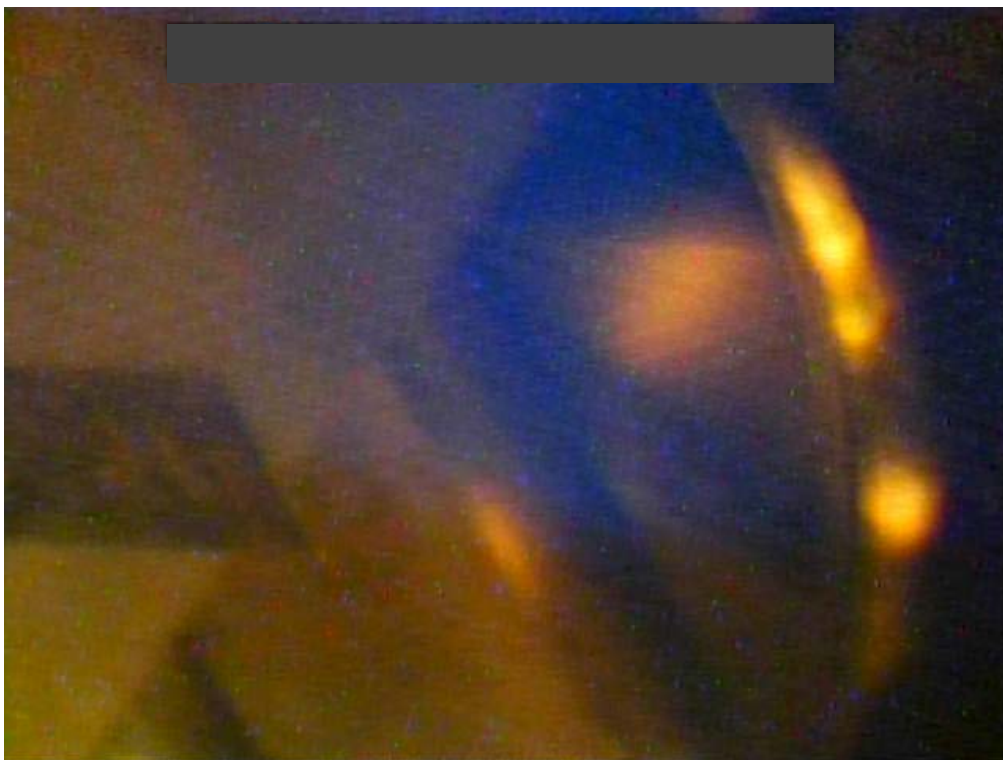


(A) 更新前

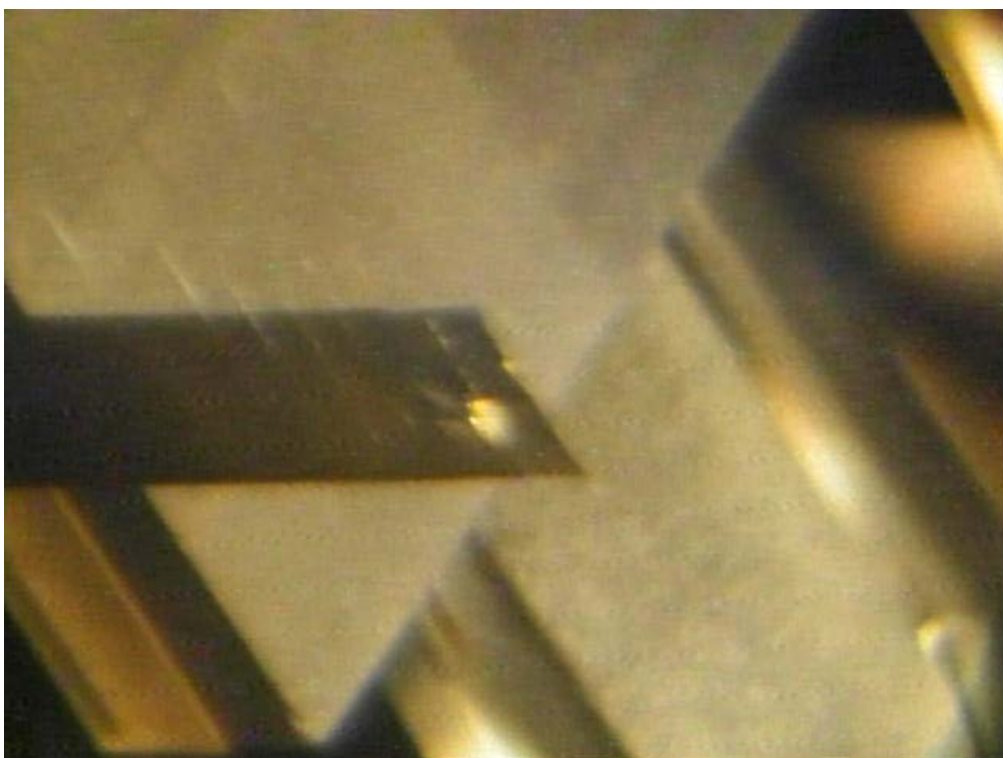


(B) 更新後

図 4.5-13 更新前後のダミーフィルム像の比較



(A) 更新前 利用運転中のフォイル像 (2020/6/25)



(B) 更新後 利用運転中のフォイル像 (2020/12/3)

図 4.5-14 観測系更新前後での実フォイル像の比較

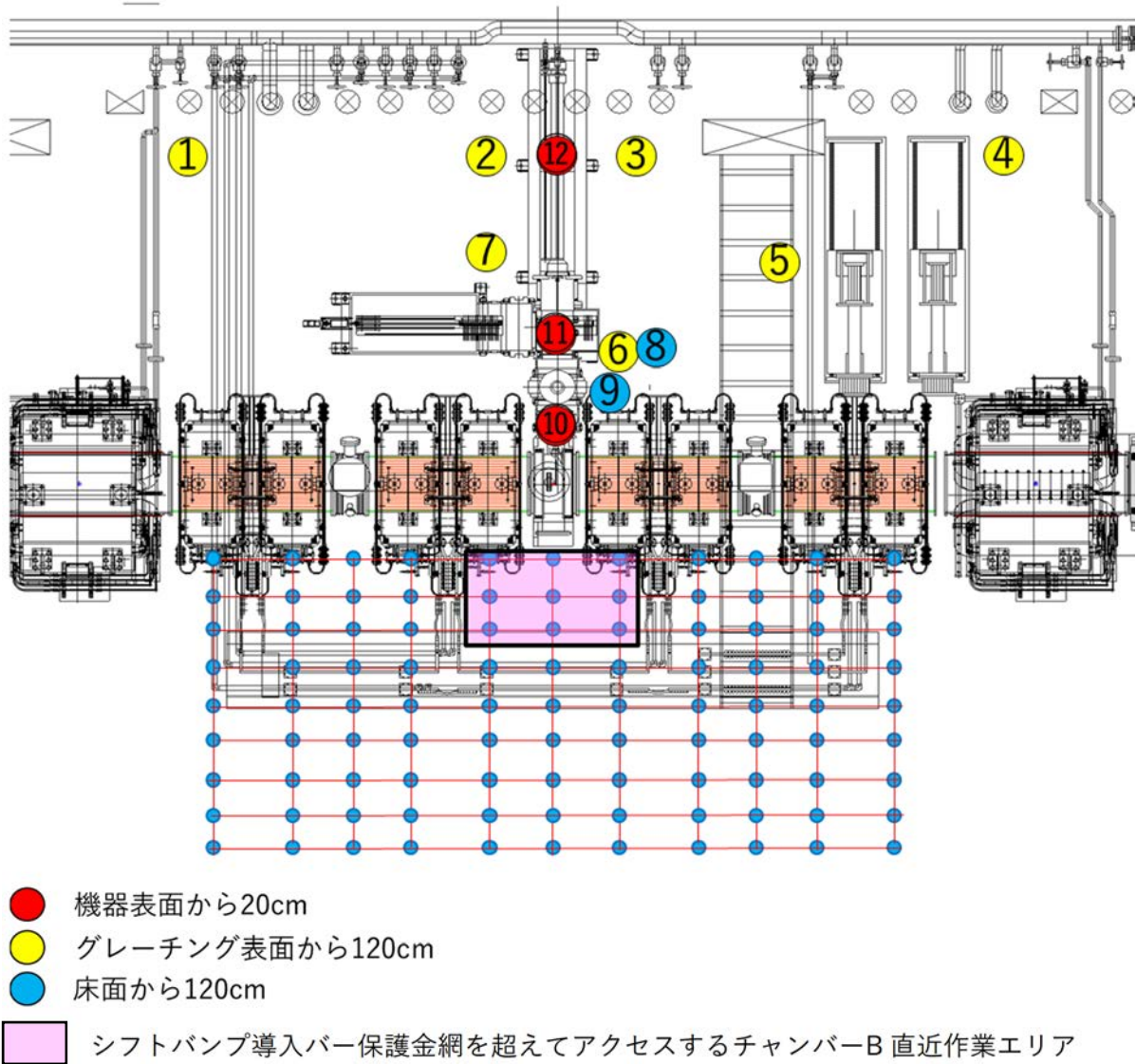


図 5-1 入射部遮蔽効果の測定ポイント

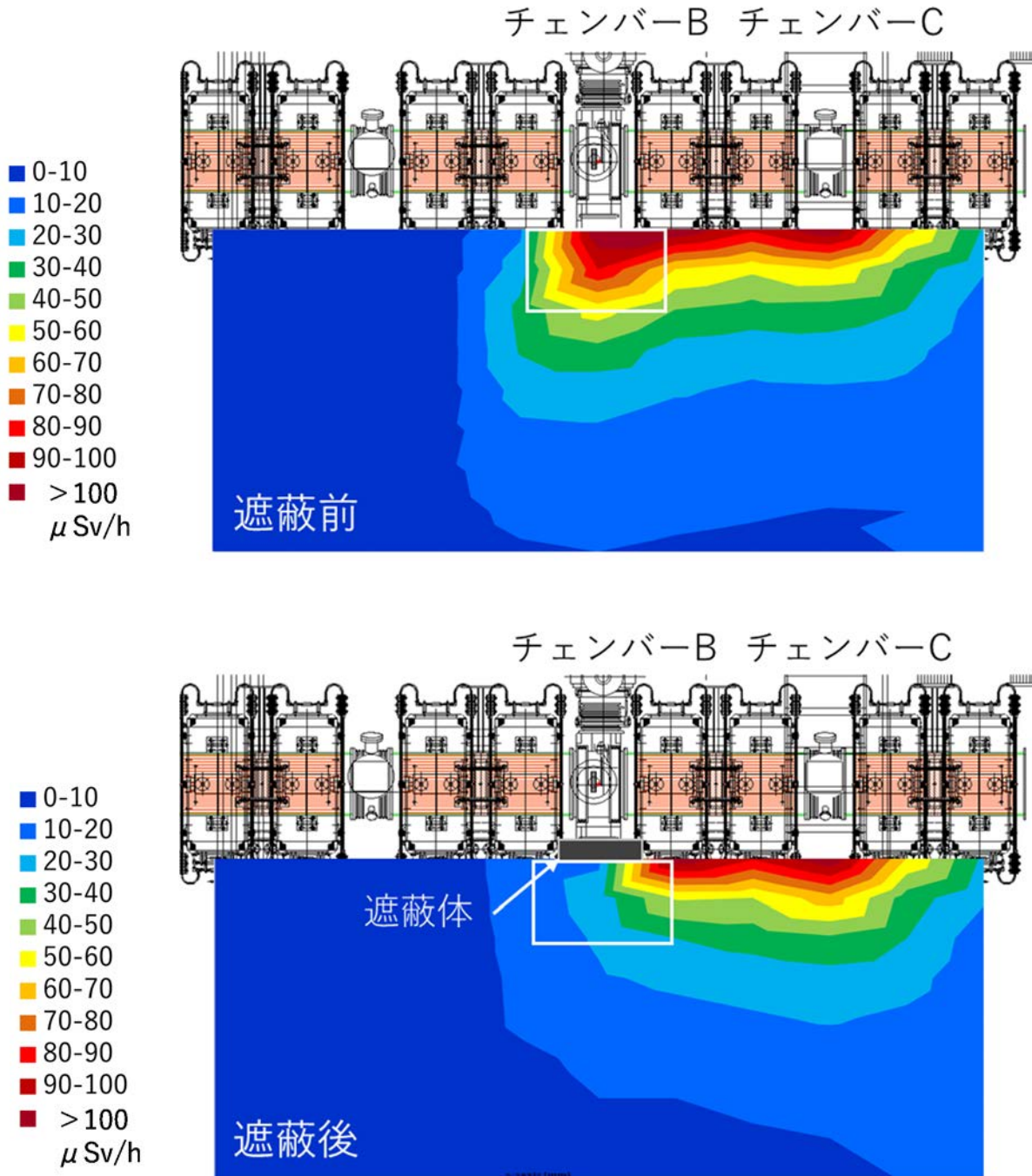


図 5-2 遮蔽体設置前後での入射部内周側の線量率等高線図
白枠は図 5-1 で示した作業エリアを示す。

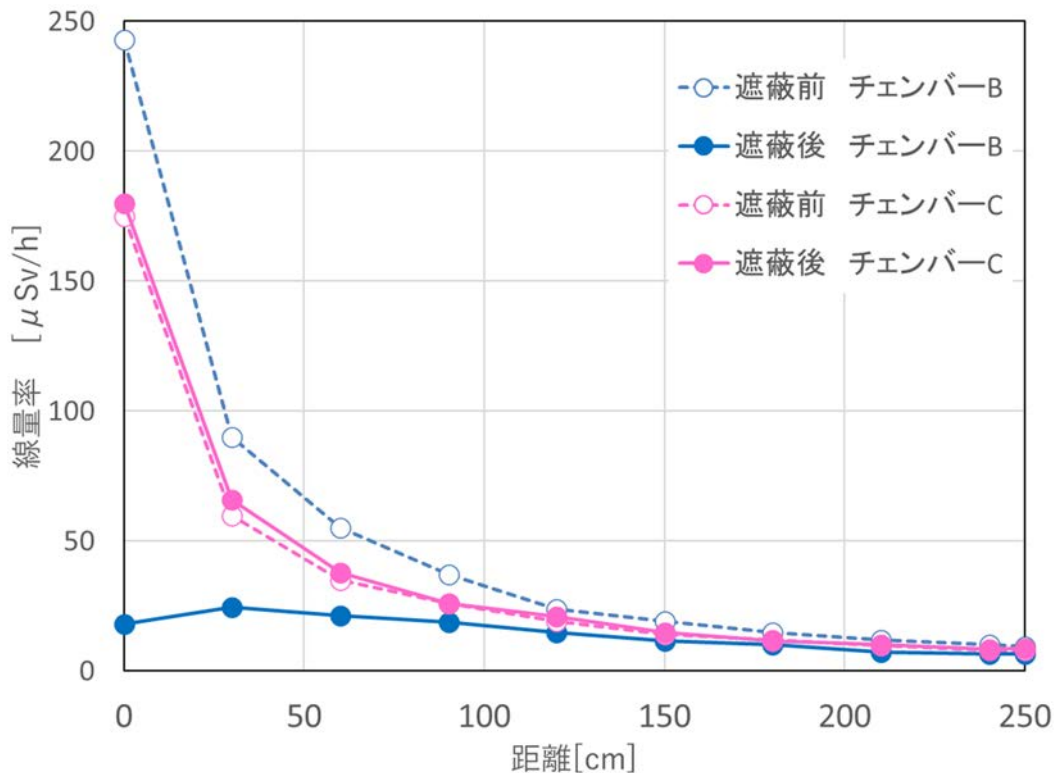


図 5-3 遮蔽体設置前後におけるチェンバーB、Cからの距離に対する線量率の変化

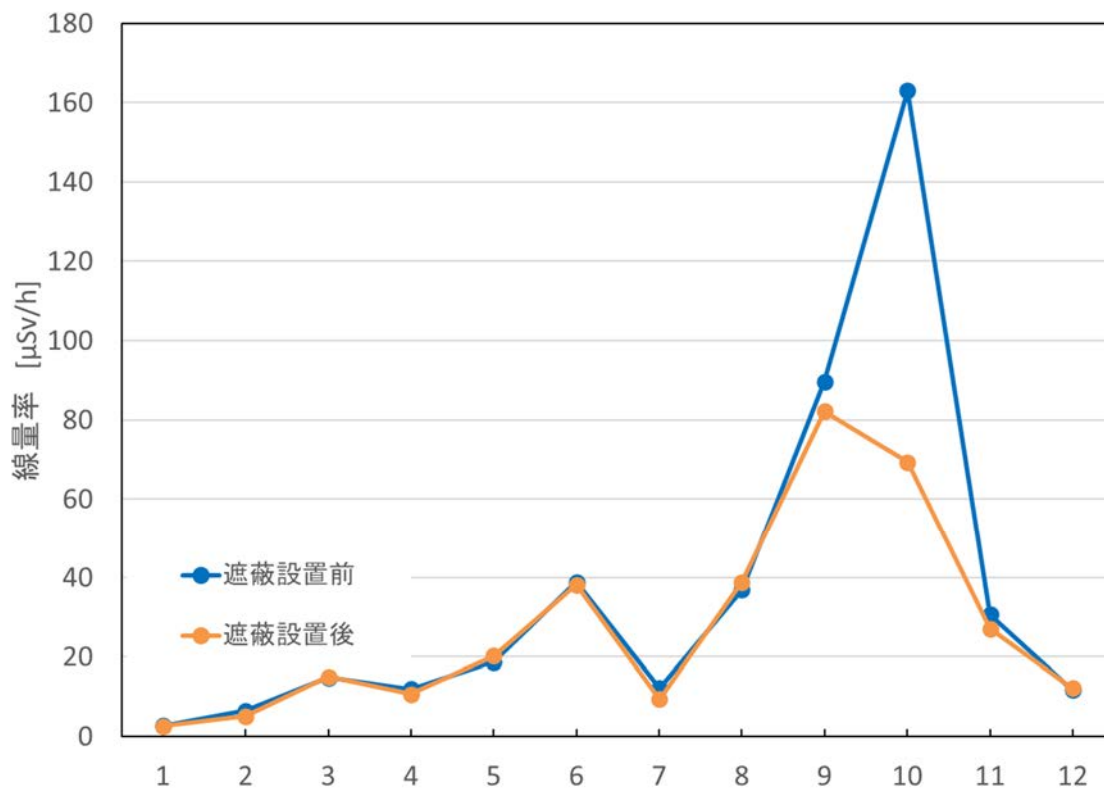


図 5-4 遮蔽体設置前後における外周側各作業点に対する線量率の変化
横軸の数字は、図 5-1 での外周側の測定ポイントの番号に相当する。

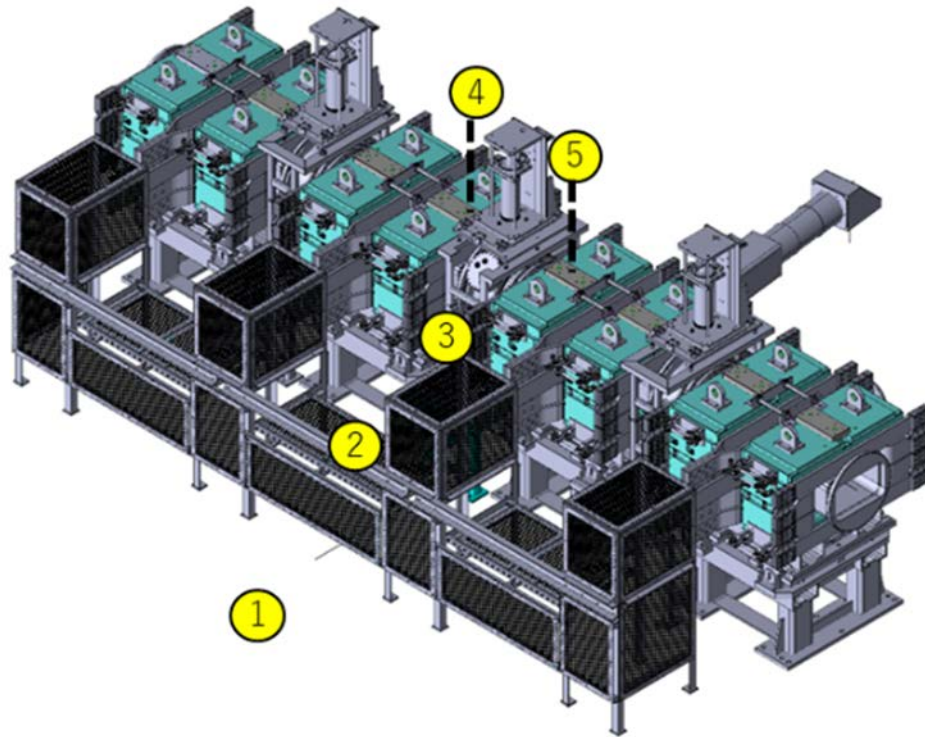


図 6.1-1 入射部作業エリア

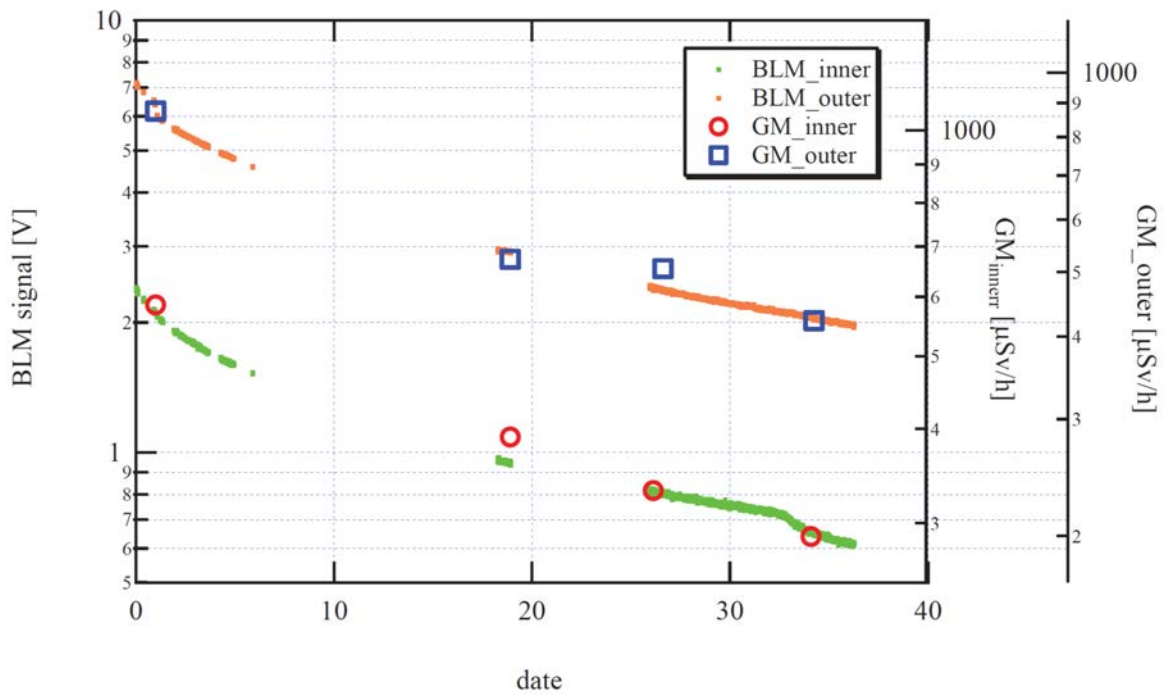


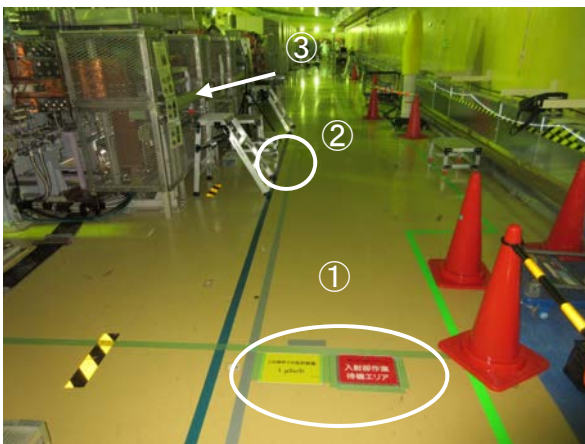
図 6.1-2 チタンダクトの線量減衰傾向



図 6.2-1 作業台上に設置した鉛マット（黄色）



図 6.2-2 ビームライン開口部に設置した鉛マット（灰色）



(A) 入射部作業エリア全景



(B) ①位置における表示

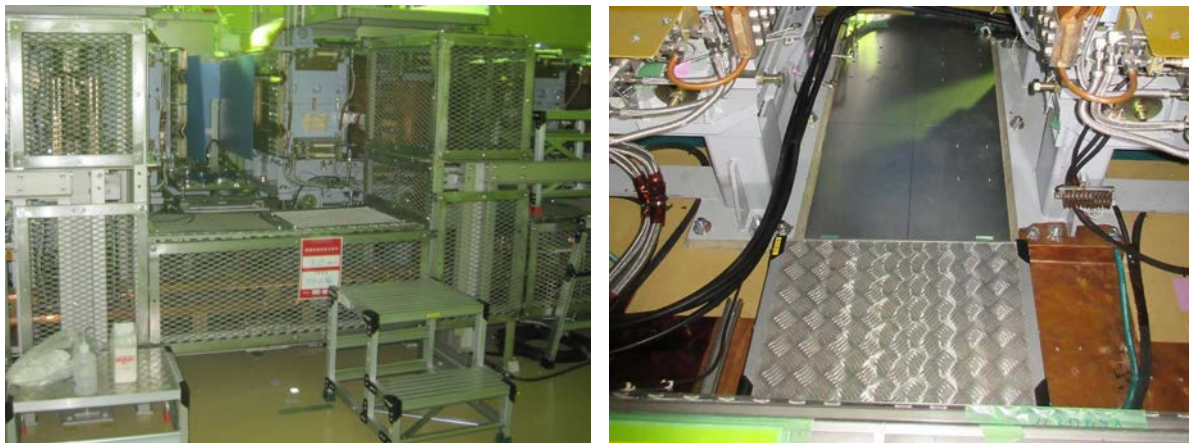


(C) ②位置における表示



(D) ③位置における表示

図 6.2-3 入射部作業エリア周辺に対する掲示による注意喚起



(A) 内周側ステップ

(B) 外周側ステップ

図 6.2-4 シフトバンプ電磁石導入バー保護金網の両側に配置したステップ

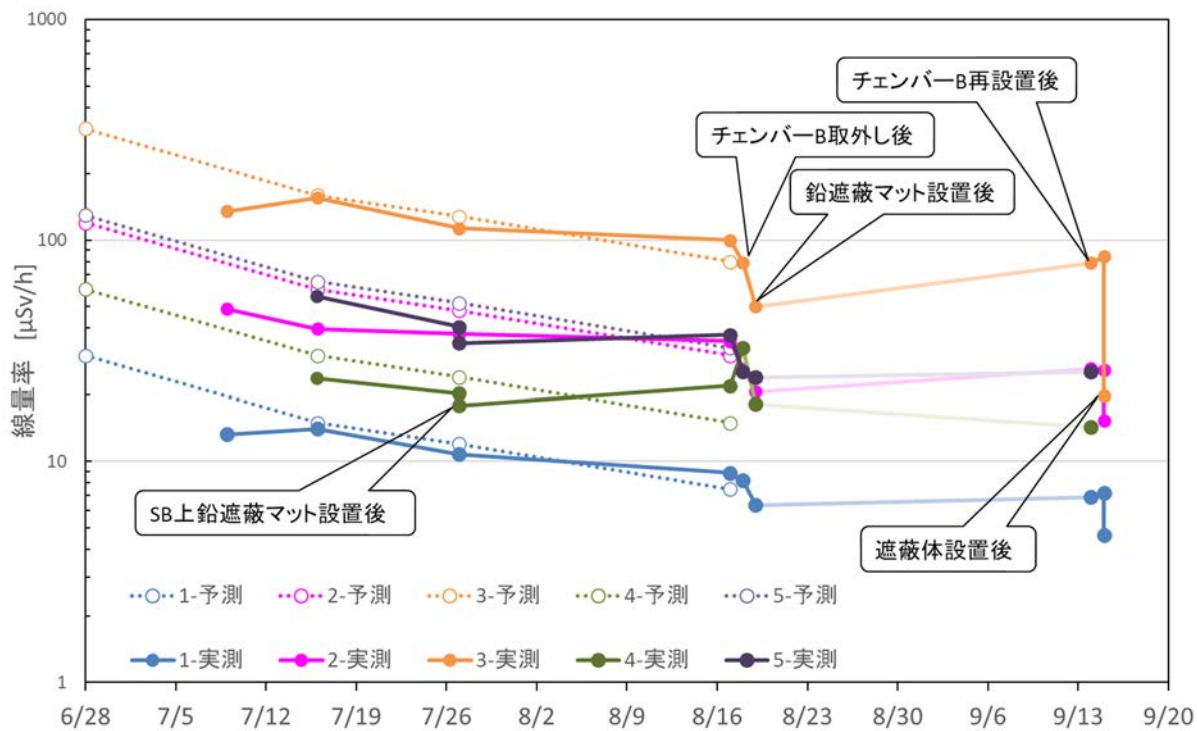


図 6.3-1 入射部作業エリアごとの線量率の予測値と実測値の経時変化
1~5は図 6.1-1 に示した作業エリアを表す。

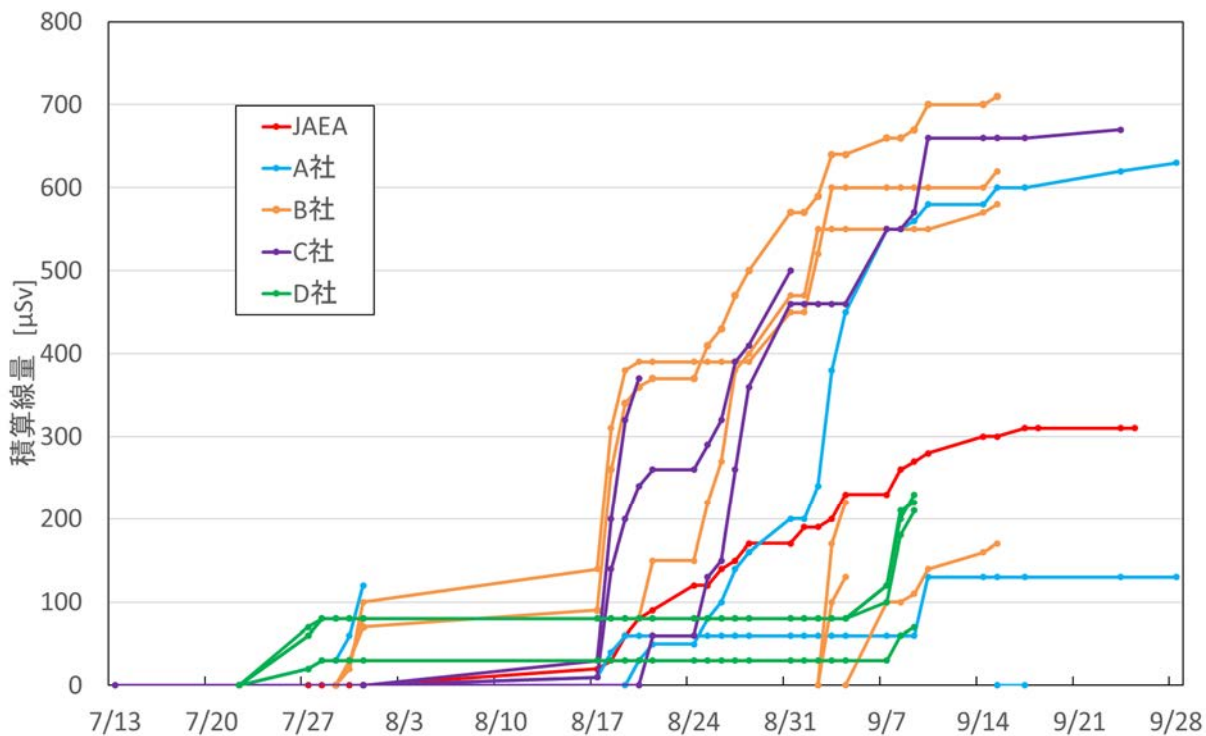


図 6.4-1 チャンバーB 架台更新作業における作業者の被ばく線量の積算値

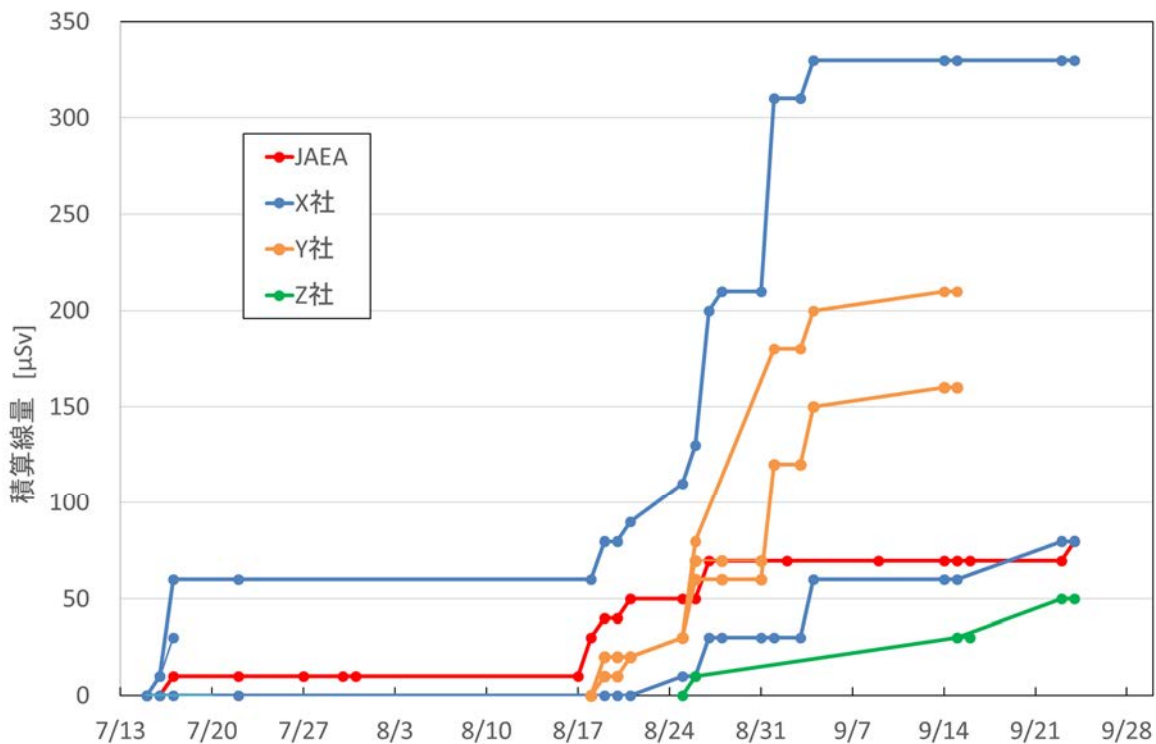


図 6.4-2 荷電変換光路更新作業における作業者の被ばく線量の積算値

表 6.1-1 入射部作業エリアの線量測定結果と予測

測定位置	500kW 運転 停止直後 (4/20) の 実測値	600kW 運転 停止直後 (6/30) の 推定値	7/16 以降 17 日後予想 停止直後の 0.5 倍	7/27 以降 28 日後予想 停止直後の 0.4 倍	8/17 以降 49 日後 停止直後の 0.25 倍
①	23.8	30	15	12	7.5
②	89.4	120	60	48	30
③	259	320	160	128	80
④	48.5	60	30	24	15
⑤	106	130	65	52	32.5

単位：μSv/h

測定位置①~⑤は図 6.1-1 に示す。

表 6.1-2 作業手順書の一例

J-PARC RCS ビーム入射部遮蔽体設置用機器交換作業手順書(放射線量)										
No.	件名	遮蔽体設置手順書 (既設機器解体手順書)					作成年月日	2020/7/9		
1							バージョン	Ver.4		
作業概要		・RCS入射部MWPM4及びチャンバーB、架台を解体する作業					作成/改訂	[REDACTED]		
							作業予定期間		7/15~9/30	
							作業担当部署	第二セクション		
							作業担当者	[REDACTED]		
							予定作業人数	11名		
							予定業者名		アルバックテクノ株式会社	
							放射線作業	12.3 hr		
							全作業時間	69.0 hr		
No.	作業名	作業内容	作業場所	線量測定値	見積時間 hr	使用工具	消耗品	作業者	線量 予測値	
14-5	チャンバーの取り外し	1. ダクト接続開口部にプラスチックダンボール等保護材を挿入固定する。	1	7.5	1	クレーン※	プラ板	C	7.5	
		2. チャンバー上部ベローズ固定ボルトを吊り治具併用(特型)に交換する。	1	7.5	1	ナイロンスリング	酢ビシート	D	7.5	
		3. ナイロンスリング、Uシャックルを使用し、クレーンで軽く張る程度で待機。平行を出すためチェーンブロック(小)を併用する。	2	80	1	Uシャックル	ビニール袋	H	80	
		4. チャンバー足固定ボルト(XYステージ)を緩め、平行・重心位置を確認する。	4	80	1	チェーンブロック	養生テープ	I	80	
		5. クレーンで巻き上げ、通路側に移動する。荷電変換接続フランジが干渉するため、逃げる位置まで巻き上げる。				スパナ				
		6. 通路側に移動させ専用治具で固定する。				ボックスレンチ				
		7. 台車またはハンドリフターを使用してオフライン作業エリアに移動する。転倒防止のため荷役バンド等で固定する。				吊治具				
14-6	チャンバー仮置き治具へ設置	1. 取り外したチャンバーを仮置き治具にボルトで固定する。	1	7.5	0.5	クレーン※	プラ板	A	3.75	
		2. パレット上に固定し、ハンドリフターでオフライン作業場所に移動する。	1	7.5	0.5	ナイロンスリング		B	3.75	
			1	7.5	0.5	Uシャックル		C	3.75	
			1	7.5	0.5	チェーンブロック		D	3.75	
						スパナ				
				ボックスレンチ						
				ハンドリフター※						

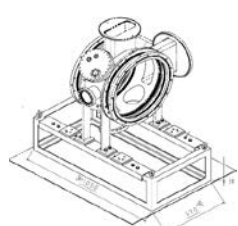
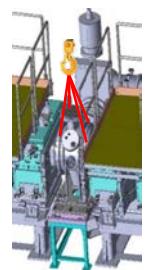


表 6.1-3 作業者の被ばく線量の予想（チャンバーB 架台更新作業）

作業者	被ばく線量 [$\mu\text{Sv/h}$]
A1	765
B1	754
B2	547
B3	538
C1	710
C2	710
D1	567
D2	649
D3	406

A、B、C、Dは作業者の所属会社を意味する。

表 6.1-4 作業者の被ばく線量の予想（荷電変換光路更新作業）

作業者	被ばく線量 [$\mu\text{Sv/h}$]
X1	544
X2	521
Y1	45
Y2	240
Y3	720
Y4	720
Z1	15
Z2	15

X、Y、Zは作業者の所属会社を意味する。

表 6.2-1 作業台上への鉛マット設置前後での線量率の比較

測定位置	7/27 鉛マット設置前 [$\mu\text{Sv/h}$]	7/27 鉛マット設置後 [$\mu\text{Sv/h}$]
④	20.3	17.9
⑤	40.5	34.2

測定位置④⑤は図 6.1-1 に示す。

表 6.2-2 ビームライン開口部への鉛マット設置前後での線量率の比較

位置	8/17 チャンバーB 取外し前 [μSv/h]	8/18 チャンバーB 取外し後 [μSv/h]	8/19 鉛マット設置後 [μSv/h]
③	103	79.4	49.8
④	22.6	32.5	18.2
⑤	27.6	25.3	23.8

表 6.3-1 オフライン作業環境下でのチャンバーBの線量

フランジ面 からの距離	上流側 [μSv/h]	下流側 [μSv/h]	外周側 [μSv/h]	内周側 [μSv/h]
0cm	254	830	172	191
35cm	—	—	—	32.4
50cm	42.5	67.3	21.6	19.4
100cm	15.5	21.1	9.9	10.6

表 6.4-1 被ばく線量の実績値（チャンバーB 架台ユニット更新作業）

作業者	被ばく線量 [μSv]	入域時間 [h:m]
J1（作業責任者）	310	87:40
A1	630	88:28
A2	130	24:01
A3	120	17:28
A4	0	0:20
B1	710	103:21
B2	620	56:13
B3	580	51:43
B4	500	49:34
B5	670	52:52
B6	130	8:14
C1	370	19:35
C2	220	8:15
C3	170	26:28
D1	230	20:16
D2	231	20:22
D3	220	20:22
D4	70	20:18

（Jは JAEA 職員を意味する。）

表 6.4-2 作業局面ごとの被ばく線量の積算値（チャンバーB 架台ユニット更新作業）

	MWPM4 撤去	チャンバー B 取外し	オフライン 作業	チャンバー B 復旧	MWPM 復旧	被ばく線量 合計
被ばく予想	1030	2014	438	1575	592	5649
被ばく実績	300	1120	920	2780	460	5580

単位：μSv

表 6.4-3 被ばく線量の実績値（荷電変換光路更新作業）

作業者	被ばく線量 [μSv]	入域時間 [h:m]
J2（作業責任者）	70	40:30
X1	330	55:11
X2	80	52:27
X3	30	3:28
X4	0	3:28
Y1	160	44:32
Y2	210	37:41
Y3	70	30:01
Y4	0	3:41
Z1	50	11:15
Z2	0	7:08
Z3	30	9:13

表 6.4-4 作業局面ごとの被ばく線量の積算値（荷電変換光路更新作業）

	W1 光軸 測定	M2 周辺取 外し	M2 周辺更新 ・光軸調整	リーク 試験他	映像調整	被ばく線量 合計
被ばく予想	1000	466	1261	30	44	2801
被ばく実績	90	90	580	60	140	960

単位：μSv

表 6.4-5 被ばく線量の実績値（レーザートラッカー測量作業）

作業者	被ばく線量 [μSv]
J3	50
J4	140
J5	50
J6	10
J7	10

表 6.4-6 被ばく線量の実績値（エレクトロンキャッチャークランプ交換作業）

作業者	被ばく線量 [μSv]
J1	30
J8	60

表 6.4-7 被ばく線量の実績値（シフトバンプ作業台設置・解体）

作業者	被ばく線量 [μSv]	
	設置	解体
J4	10	0
J5	10	0
J6	10	0
J9	10	0
J10	10	0
J11	20	10

表 6.4-8 被ばく線量の実績値（チャンバーB遮蔽体設置）

作業者	被ばく線量 [μSv]	
	9月24日実施	12月25日実施
J1	0	0
J2	0	不参加
J4	0	0
J8	0	0
J11	0	不参加
J12	0	0
J13	0	不参加

This is a blank page.

