

3GeV シンクロトロンビーム入射部への遮蔽体設置作業

RADIATION SHIELDING INSTALLATION FOR BEAM INJECTION SECTION OF 3GEV SYNCHROTRON

仲野谷 孝充^{#, A)}, 神谷 潤一郎^{A)}, 吉本 政弘^{A)}, 高柳 智弘^{A)}, 谷 教夫^{A)},
古徳 博文^{B)}, 堀野 光喜^{C)}, 柳橋 亨^{C)}, 竹田 修^{C)}, 山本 風海^{A)}

Takamitsu Nakanoya^{#, A)}, Junichiro Kamiya^{A)}, Masahiro Yoshimoto^{A)}, Tomohiro Takayanagi^{A)}, Norio Tani^{A)},
Hirofumi Kotoku^{B)}, Koki Horino^{C)}, Toru Yanagibashi^{C)}, Osamu Takeda^{C)}, Kazami Yamamoto^{A)}

^{A)} JAEA ^{B)} ULVAC TECHNO Co.Ltd ^{C)} NAT Corporation

Abstract

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 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 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 installation work of the shield 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.

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン加速器は 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、Fig. 1 に示す入射部チャンバーB 近傍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、作業者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、作業者の被ばくを低減するには遮蔽体の設置が必須である[1]。そのため、遮蔽設置に向け検討を重ね、2020 年夏季メンテナンス期間に遮蔽体の設置作業と遮蔽効果の確認を行った。

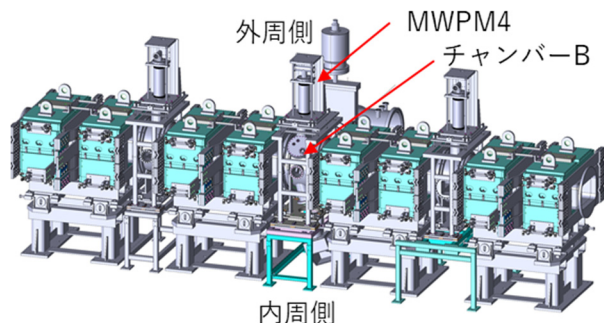


Figure1: Schematic view of beam injection section.

[#] nakanoya.takamitsu@jaea.go.jp

2. 遮蔽体の検討

設置する遮蔽体についてその遮蔽能力、材質、大きさ、構造等について様々な角度から検討を行った。当初はチャンバーB 周辺の空間を広げて常設型の遮蔽体を設置する方針であった。しかし、常設型遮蔽体ではビームによる遮蔽体自身の放射化が大きいこと、さらにチャンバーB 周辺の空間を広げるには開発要素が多く、更新作業に多大な時間が必要となる。このため、既設の機器にできるだけ変更を加えずに、加速器運転時は取り外しておき、必要な際に設置する非常設型遮蔽体を設置することにした。この場合の変更点はチャンバーB の架台を遮蔽体設置可能な構造の架台に変更することのみであり、空間を広げる場合に比べて作業期間を大幅に短縮可能である。

これまでのチャンバーB の架台と更新後の架台の概略を Fig. 2 に示す。更新するのは架台のみでチャンバーB 及びマルチワイヤープロファイルモニター4 (以下 MWPM4) は再使用する。設置する遮蔽体の構造と新架台に遮蔽体を設置した際の概略図を Fig. 3 に示す。遮蔽体はステンレス 316 製の筐体に鉛ブロックを格納した構造である。内周側の重量は 216 kg である。一方で外周側には荷電変換フォイル交換機構が設置されており、設置スペースに制限があるため、外周側遮蔽体は内周側よりも薄くなっている。また、フォイル交換機構とチャンバーB の接続ダクトを避けるためコの字型の形状をしており、重量は 114 kg である。ともに新型架台上部のフックに引っ掛けて設置する。

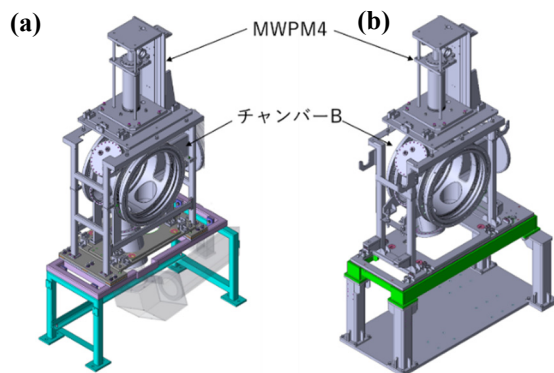


Figure 2: Schematic view of chamber B and its mount. (a) Old mount. (b) New mount.

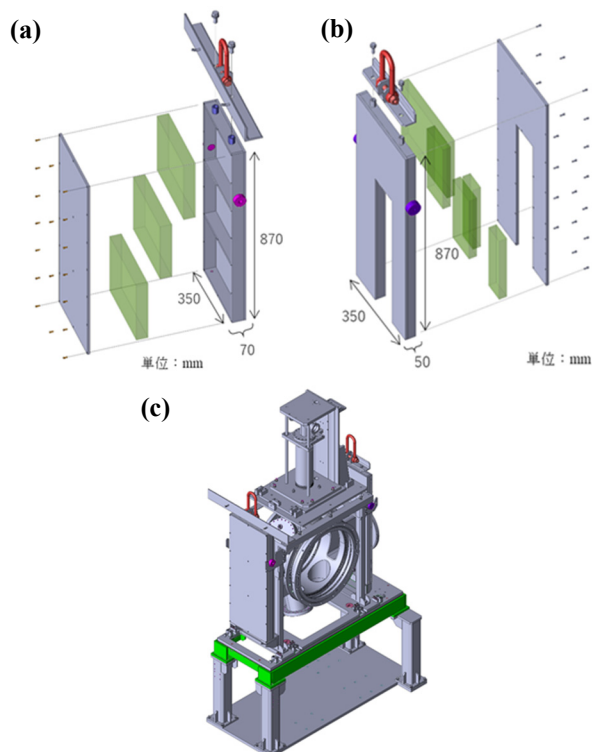


Figure 3: Schematic view of shield and new chamber B mount. (a) Inner shield. (b) Outer shield. (c) Both shield installed on new chamber B mount.

3. 遮蔽体設置のための架台更新作業

チャンバーBの架台を更新するには、これらをビームラインからいったん完全に取り外す必要がある。再設置の際に精度よく元の位置を再現させるため、レーザートラッカーにより取り外し前の位置の測量を実施した。測量時の様子を Fig. 4(a)に示す。測量の基準位置はMWPM4については上部の天板と下部の台座とした。チャンバーBはMWPM4との接続フランジとし、MWPM4取外し後 (Fig. 4(b)) に実施した。再設置時はこれらの測定データを再現するように精密にアライメントを実施した。測量後にチャンバーBをビームラインから切り離しクレーンで吊り上げて取り外した。

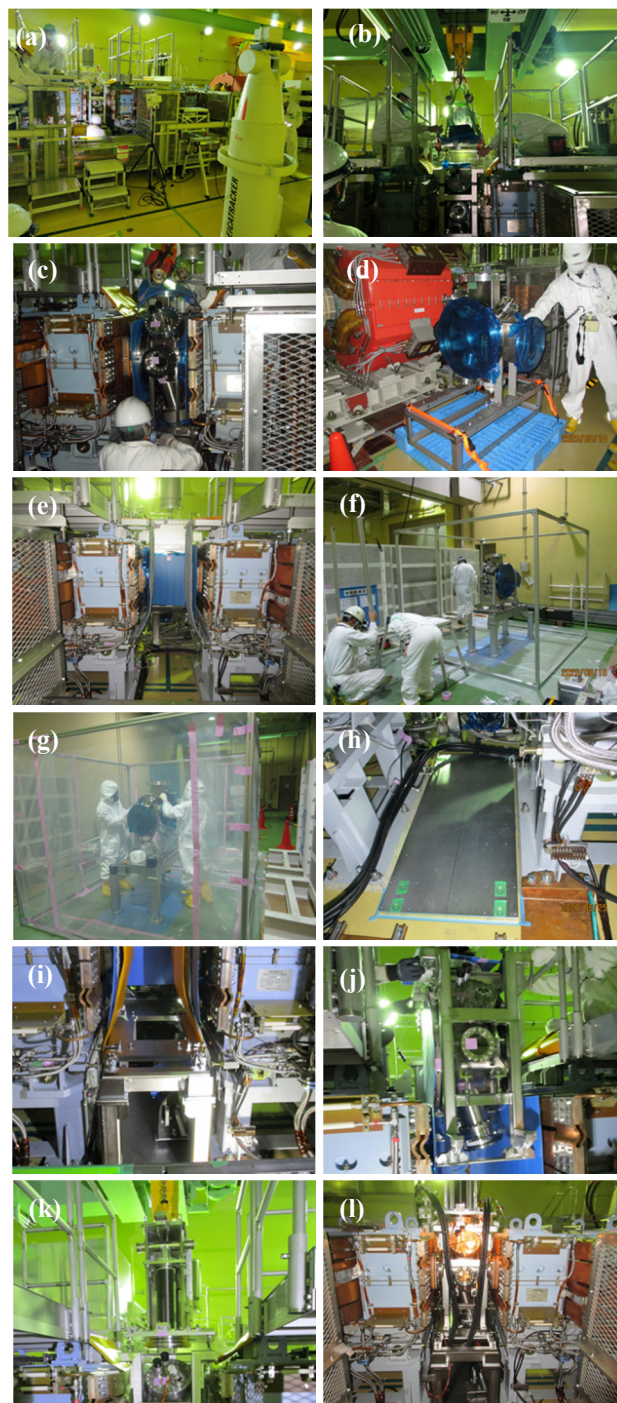


Figure 4: Picture of chamber B mount renewal work.

Figure 4(c),(d)にその時の様子を示す。チャンバーB前後のダクトとの接続ベローとの締結を解除し、ベローを縮めて17mmほどの間隙を作り、汚染拡大防止のための粘着ビニールシートをベローとチャンバーの両側に張り付けた。チャンバーB取り外し後の入射部の様子を Fig. 4(e)に示す。取り外したチャンバーBはオフラインでの作業を実施するため、加速器トンネル入り口付近のスペースのある場所まで運び出した。オフライン作業の目的は新型架台へチャンバーBを仮組立することによる干渉確認、放射線劣化により着色が生じたビューポートの交換等である。チャンバーB自身は高度に放射化されて

いるため、コンクリート遮蔽体を並べて作業エリアの区画を実施した。また切り離し時のスミヤ測定の結果、チャンバーBの内面の表面汚染密度は 155 Bq/cm^2 と高いレベルであったため、アルミフレームと養生シートにより簡易グリーンハウスを構築し、除染を実施した上でオフラインでの作業を行った。グリーンハウス構築時の様子を Fig. 4(f)に、除染作業の様子を Fig. 4(g)に示す。オフライン作業終了後、新型チャンバーB 架台の設置作業を実施した。まず、遮蔽体設置の重量に耐えるため、床面に Fig. 4(h)に示すステンレス製ベースプレートを設置した。ベースプレートの厚さは 20 mm である。次に下部架台を順次組み上げ (Fig. 4(i)参照)、チャンバーB は上部架台にあらかじめ組み込んだ状態にてクレーンで吊り降ろして設置した (Fig. 4(j)参照)。その後、MWPM4 を設置した (Fig. 4(k)参照)。新架台設置完了後にチャンバーB と周辺ダクトとの真空締結とリークテストを実施した。架台更新後の入射部チャンバーB の外観を Fig. 4(l)に示す。架台更新完了後に遮蔽体の設置確認を行い、周辺機器との干渉なく容易に設置できることを確認し更新作業を完了した。

4. 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4名で実施し、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 Fig. 5 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B の中心から 30 cm 間隔で格子状に測定を実施した。Figure 5 の薄ピンクで示した場所がシフトバンプ導入バー保護金網に囲われたチャンバーB 直近の作業エリアである。一方、外周側は内周側のように格子状に測定することが難いため、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 Fig. 6 に示す。Figure 5 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。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 Fig. 7 に示す。横軸の数字は Fig. 5 の測定点番号である。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。

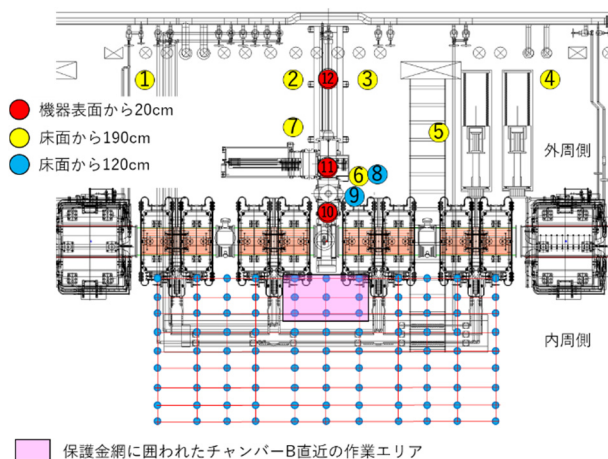


Figure 5: Measuring point of shielding effect at injection section.

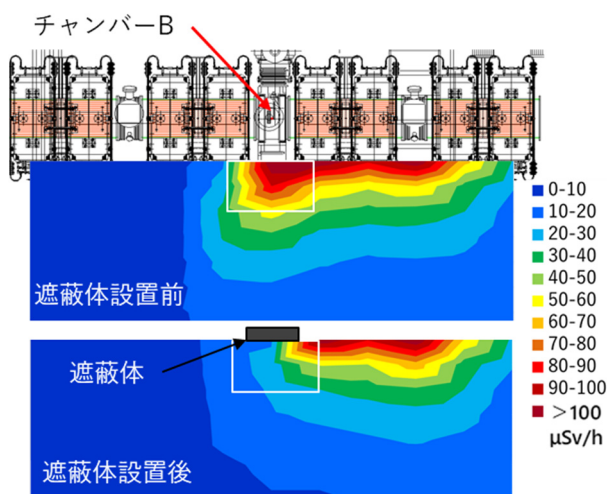


Figure 6: Dose rate distribution map before and after shield installation.

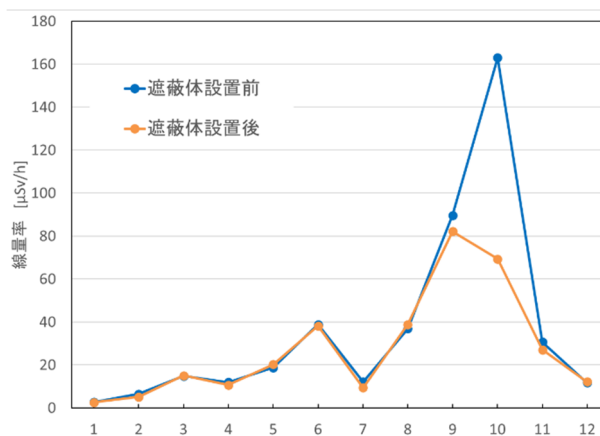


Figure 7: Dose rate of each measuring point before and after shield installation.

5. 作業管理・被ばく管理

5.1 被ばく線量の見積もり

架台更新は残留線量が高いエリアで実施する作業で

あり、作業者の被ばく管理は非常に重要である。そこで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 Fig. 8 に示すよう 5 つに区分し、作業単位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 Table 1 に示す。測定値は 2020 年 4 月 20 日の 500 kW 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 600 kW に上昇する予定であったため、600 kW での利用運転停止直後の推定値として 500 kW 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、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った。減衰傾向は以前に測定したコリメーター直下のチタンダクトの実測値を基に推測した。実測では 14 日経過で元の値の 0.5 倍、21 日経過で 0.4 倍となり、49 日経過後は 0.25 倍になることが予想された[2]。測定箇所はコリメーター直下であるため入射部とは周辺環境が異なるが、同じ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作業者の被ばく予想は最大で 765 μSv であった。この結果より、作業者の被ばく線量を 1 mSv 以下に抑えることを管理目標値として作業を行うことにした。

5.2 被ばく低減対策

被ばくを低減するために講じた対策を以下に示す。まず、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被ばくを低減することができた。また、厚さ 3 mm の鉛遮蔽マットを適所に配置し空間線量の低減に努めた。特に Fig. 9(a) に示すチャンバー B 取外し後のダクト開口部に対して設置した鉛マットは効果的であり、Fig. 8 に示すの③位置の線量を 79.4 $\mu\text{Sv/h}$ から 49.8 $\mu\text{Sv/h}$ へと 4 割程減衰させることができた。また、架台の組立と遮蔽体設置を迅速に実施するため事前に一般区域にて組立デモを実施した (Fig. 9(b))。また、作業時以外の被ばくを少しでも低減させるため、作業現場に待機エリアを区画・明示し、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作業員に教育を実施した。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。さらに、高線量エリアでの作業であることを作業者が常に自覚できるよう、入射部の作業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 (Fig. 9(c) 参照)。また、架台更新作業の多くは Fig. 5 の薄ピンク色で示す保護金網に囲われた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 50 $\mu\text{Sv/h}$ 以上である。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。一方でこの空間への出入りの際には高さ 70 cm 程の保護金網を跨ぐ必要があった。これまでの作業経験上、この保護金網が心理的・身体的な負担となり作業中に待ち時間が生じて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 Fig. 9(d) に示す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。

5.3 線量測定と被ばく管理

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、作業期間中の空間線量率の測定を実施した。その結果を Fig. 10 に示す。7 月 16 日及び 27 日の測定では全ての測定点で予測値と実測値はほぼ一致した。一方で 8 月 17 日の測定では全ての測定点で実測値が予測を上回った。減衰モデルに対して入射部の環境では長半減期核種の存在比が多く、その影響が顕著になったためと考えられる。実測の値を基に被ばくの見積もりを再評価したが、1 mSv を超えないことが確認できたため、引き続き被ばく量に注視し作業を継続した。

架台更新作業の作業日数は 27 日、延べ作業員数は 137 人となった。Figure 11 に各作業員の被ばく線量の積算値を、Table 2 に作業局面ごとの被ばく線量の総和を示す。7 月 27 日、28 日に 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 日の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簡易グリーンハウ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ガスケット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。個人最大被ばく線量は $710 \mu\text{Sv}$ となり予測とほぼ同じ結果となった。また、作業員全員の被ばく線量の合計も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。作業員の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 $600 \mu\text{Sv}$ 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。

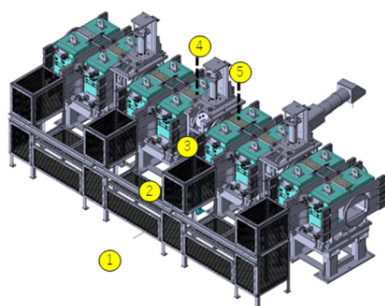


Figure 8: Dose rate measuring point at injection section.



Figure 9: Picture of radiation dose reduction measures.

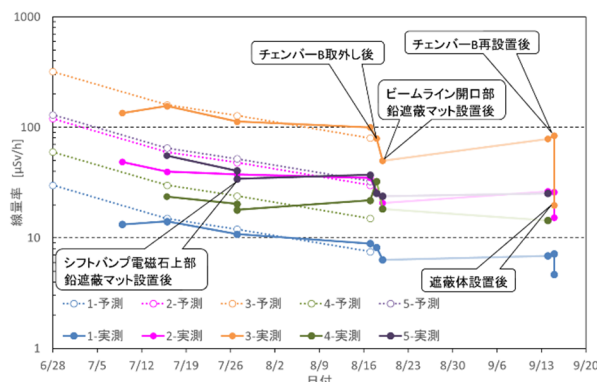


Figure 10: Prediction value and actual measurement of dose rate at injection section.

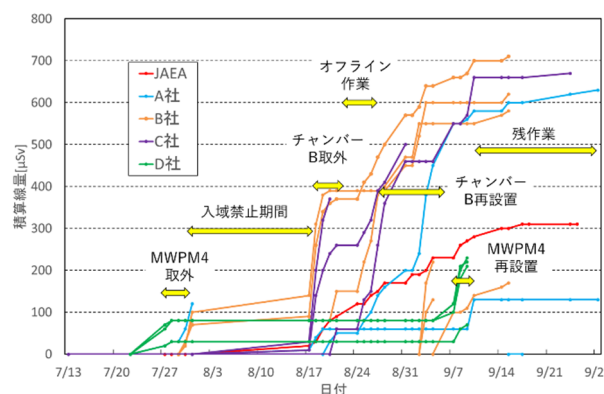


Figure 11: Daily accumulation of radiation dose for each worker.

Table 1: Dose Rate Prediction Based on Actual Measurement

測定位置	500kW運転停止直後の実測値 (4/20)	600kW運転停止直後の推定値 (6/29)	17日後 (7/16~)	28日後 (7/27~)	49日後 (8/17~)
			推定 × 0.5	推定 × 0.4	推定 × 0.25
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: $\mu\text{Sv/h}$

Table 2: Prediction and Actual Result of Total Radiation Dose of All Workers for Each Work Process

	MWPM4 取外	チャンバーB 取外	オフライン 作業	チャンバーB 再設置	MWPM4 再設置	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: $\mu\text{Sv} \cdot \text{人}$

6. まとめ

2020 年夏季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の更新と遮蔽体の設置作業を実施した。高線量下での作業のため、作業員の被ばく低減が重要な課題であったが、被ばく管理を綿密に行うことで、作業員の最大の被ばく線量を管理目標値の 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。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。

参考文献

- [1] 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, Aug. 2018.
- [2] 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 p.673.