

## J-PARC RCS 水平シフトバンプ電磁石の現状報告

### Status of the horizontal shift bump magnets at the J-PARC RCS

堀野 光喜<sup>#,A)</sup>, 高柳 智弘<sup>A)</sup>, 飛田 教光<sup>A)</sup>, 植野 智晶<sup>B)</sup>, 金正 倫計<sup>A)</sup>  
Koki Horino<sup>#,A)</sup>, Takayanagi Tomohiro<sup>A)</sup>, Norimitu Tobita<sup>A)</sup>, Tomoaki Ueno<sup>B)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>A)</sup>,

<sup>A)</sup> J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

<sup>B)</sup> Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

#### Abstract

The horizontal shift bump magnets of the J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)<sup>[1]</sup> 3-GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron)<sup>[2]</sup> have been continued steady operation without a trouble for a long period from 2008, which are approximately 23,000 hours. However, in February 2015, two coil support bolts fell off in the one magnet, and the cooling copper pipe of the connection conductor bar has leaked water in March of the year. This paper reports the problem of the magnet, the method of both the condition confirmation and the monitoring and the future measures.

#### 1. はじめに

J-PARC<sup>[1]</sup> 3-GeV RCS<sup>[2]</sup> の水平シフトバンプ電磁石は、2008年の運用開始から7年間(約23,000時間)に渡り、トラブル無く安定した運転を続けてきた。しかし、2015年2月に、4台の電磁石の内、1台の電磁石で2箇所のコイルサポートボルト(4.1.1章参照)が脱落し、同年3月には、4台の電磁石を直列に接続している導体(以下、導入バー)の冷却水配管からの漏水が見付かった。これらの修理には、部品の購入や加工など多くの時間を必要とする。そのため、6月末にユーザー利用運転が終了するまでの期間、電磁石は、残ったコイルサポートボルトを増し締めし、導入バーは、冷却水を停止し強制空冷に変更して運転を継続した。ただし、加速器メンテナンスで運転が停止する時間を利用して、ファイバースコープでコイルサポートボルトの状態を確認した。導入バーは、光ファイバー温度計を使用し、運転中の温度を監視した。本発表では、水平シフトバンプ電磁石に発生した問題、日々の状態確認と監視の方法及び対策について報告する。

#### 2. 水平シフトバンプ電磁石

RCSの入射部に設置された4台の水平シフトバンプ電磁石は、周回軌道の上にバンプ軌道を生成し、LINAC<sup>[3]</sup>からの負水素(H<sup>-</sup>)入射ビームを荷電変換用炭素膜で陽子(H<sup>+</sup>)ビームへと変換して周回軌道へ入射する<sup>[4]</sup>。Figure 1に概念図を示す。水平シフトバンプ電磁石は、4台を導入バー(Figure 2参照)で直列に接続し、1台の電源で励磁することで、励磁タイミングのズレによる磁場誤差は発生しない。また、入射ビーム軌道と周回ビーム軌道の変位量と、エミッタンスが486 $\mu$ mm-mradの周回ビームのフィジカルアパーチャーに対応する大口径のセラミックス真

空ダクトを電磁石に挿入するため、水平シフトバンプ電磁石のギャップの口径は、コイル距離で幅616mm、高さで310mmの大きさになる。これによって、大きい励磁電流が必要となり、電磁石のコイルは、電流密度とインダクタンスを低減するため、銅板タイプの2ターン構造で製作した<sup>[5]</sup>。

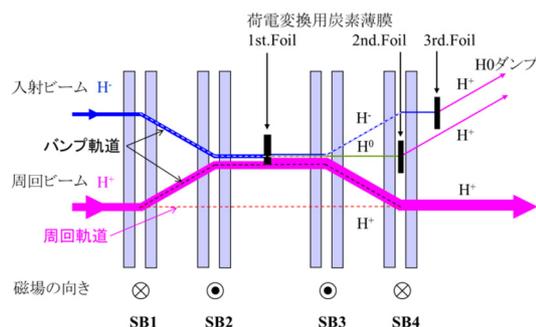


Figure 1: Schematic diagram of the RCS center beam injection system.

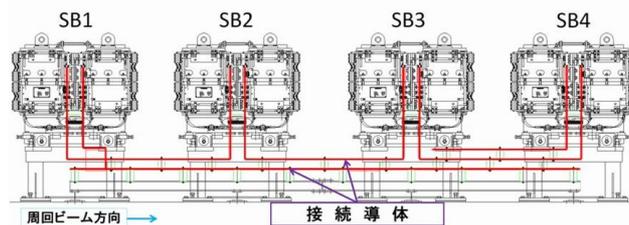


Figure 2: Schematic diagram of the connection conductor bar with four magnets in series.

#### 3. 問題

##### 3.1 コイルサポートボルトの脱落

電流と電圧の出力波形が通常時とは異なる波形を示し、定格での通電ができなくなる事象が発生した(Figure 3参照)。4.5kA出力時の出力電圧波形において、トータルの出力電圧値は約700Vと通常時と変

<sup>#</sup> koki.horino@jaea.go.jp

わらないが、マイナス側が小さくプラス側に偏った中性点がずれた様な波形を示した。そのため、中性点を内部回路に持つ電源の故障を疑った。

Figure 4 に、水平シフトバンプ電磁石と電源の全体接続回路の概略図を示す。電源端にて電力ケーブルを切り離し、全16バンクの電源の内部インピーダンスを LCR メータで個別に測定したが、異常は見付からなかった。また、電源設置時の波形と比較しても、違いは確認されなかった。しかし、負荷側を測定したところ、LCR メータは、インピーダンスの測定不能を示すエラーを表示した。そのため、電源より負荷側のサブトンネル中継端子台にて、調査を行った。中継端子台から電源側の電力ケーブルを切り離し、一括してその電力ケーブルの絶縁抵抗測定を行った結果、使用電圧 500V で  $\infty$  であった。しかし、中継端子台から負荷側は、使用電圧 125V で  $0\Omega$  となった。異常時の出力電圧波形は、全体としてプラス側に偏っている。これより、直列に接続されている4台の電磁石の内、マイナス側の1号機を切り離し、単体で絶縁抵抗測定を行った。その結果、使用電圧 125V で  $0\Omega$  となり、他の2~4号機と中継端子台までの電力ケーブルを一括した絶縁抵抗測定では、使用電圧 500V で  $7M\Omega$  を示した。そのため、電磁石の1号機を現場にて詳細に確認したところ、Figure 5 に示す A 部分のコイルサポートボルトが脱落し、下鉄心の端板とコイルの間に落下しているのが見付かった(Figure 6 参照)。脱落したコイルサポートボルトを取り除いた後、1号機の絶縁抵抗の再測定を行ったところ、使用電圧 500V で  $7M\Omega$  になった。これより、脱落したコイルサポートボルトで端板とコイルが短絡し、出力電圧波形が非対称になったと考える。

さらに、1号機の鉄心を分解してすべてのコイルサポートボルトを確認したところ、Figure 5 の B 位置のコイルサポートボルトが、完全に緩んで脱落寸前である状態で見付かった。

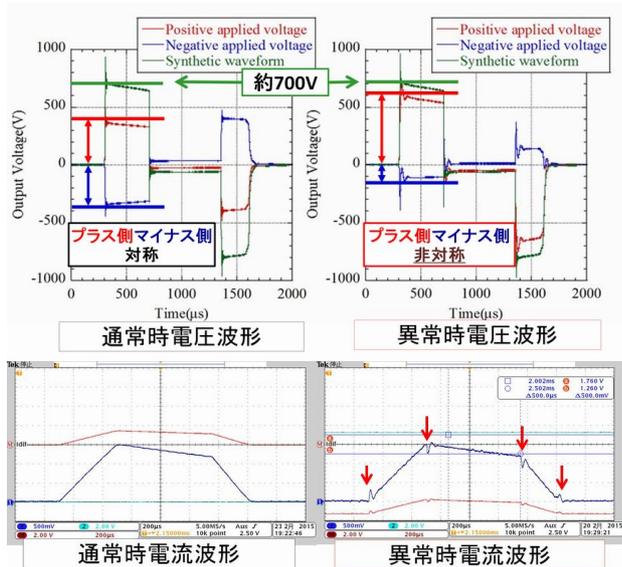


Figure 3: Measurement result of the output current and voltage at normal operation and abnormal operation.

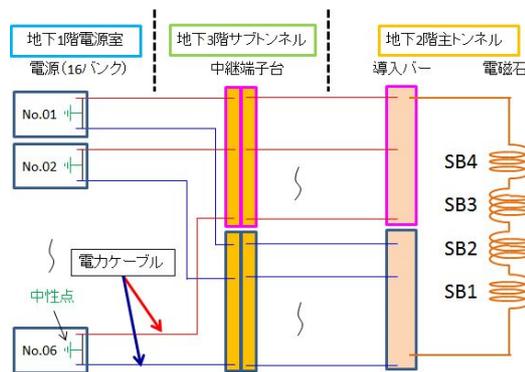


Figure 4: Schematic diagram of the circuit component of the horizontal shift bump system.

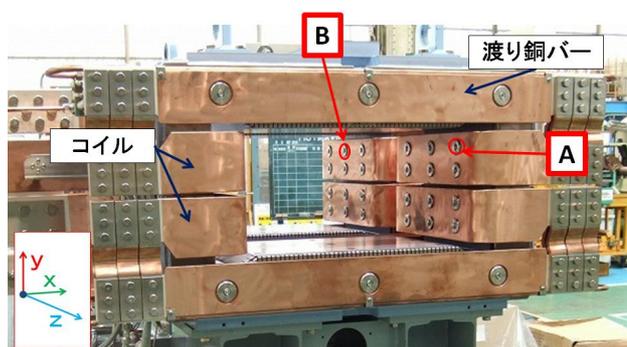


Figure 5: Position of the coil fixation bolt on the magnet.

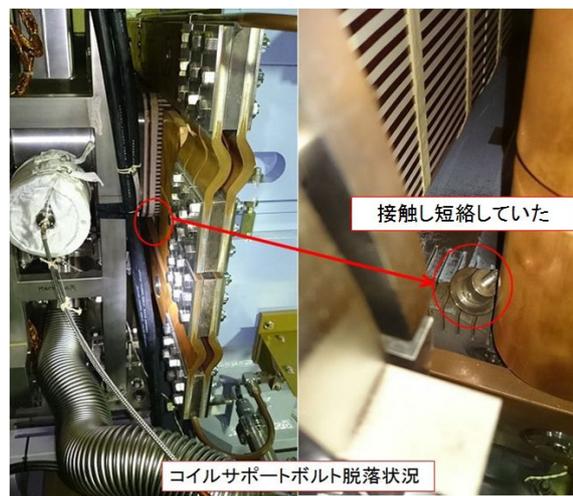


Figure 6: Situation of the dropped coil fixation bolt.

### 3.2 導入バーの冷却水配管からの漏水

コイルサポートボルトの脱落から1ヶ月後に、1号機と2号機の接続導体の側面にロウ付けした冷却水配管からの漏水が見付かった。Figure 7 に、漏水時の状況を示す。冷却水配管の結露やジョイント部からの漏れを疑ったが、溜まった水をウェスで拭き取った後も、配管のロウ付け箇所から水がしみ出るのが確認された。

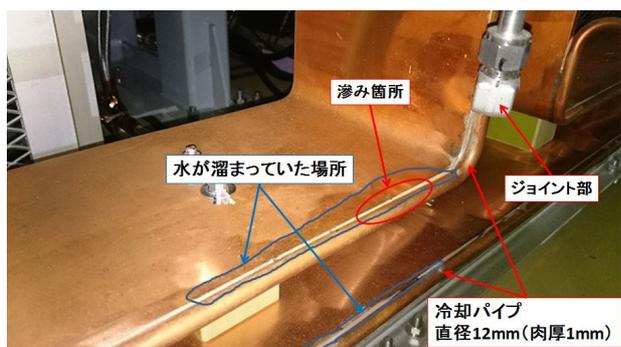


Figure 7: Water leak situation from the cooling copper pipe brazed to the connection bar.

## 4. 原因と対策

### 4.1 コイルサポートボルトの脱落について

#### 4.1.1 固定方法の違い

幅 141mm の銅板のコイルは、直径 40mm の固定ブッシュ、M8 のボルト、そして、絶縁碍子に挿入したジョイントコネクタ丸ナットで固定する。Figure 8 に、固定構造の概略図を示す。水平シフトポンプ電磁石の 4 台は、直列に接続して使用するため、磁場分布に個体差が生じないように同じ構造で製作した<sup>[5]</sup>。しかし、コイルサポートボルトが脱落した 1 号機のみ、固定構造に異なる部分があった。

1 号機は先行機として製作し、磁場測定や温度測定にて詳細な特性データを取得した。この試験中に、ボルトが緩む事象が発生したため、ボルトの緩み防止対策として、固定ブッシュに点溶接で一体化した (Figure 9 参照。この一体化した物をコイルサポートボルトと呼ぶ)。しかし、締め付けが緩かったコイルサポートボルトが、通電時の振動で回転し、ジョイントコネクタ丸ナットから外れて脱落してしまったと考える。

2~4 号機の電磁石は、ボルトの緩み防止対策として、ボルトと固定ブッシュの間に皿ばね座金を入れている (点溶接はしていない)。この部分のボルトには、緩みなどの問題は確認されていない。

#### 4.1.2 電流値の増強による影響

2014 年 2 月に、LINAC の加速エネルギーが 181MeV から 400MeV に増強したユーザー利用運転がスタートした。これに伴い、水平シフトポンプ電磁石の励磁電流値は、13.4kA から 22.1kA と約 1.6 倍に増加した。コイル間に作用する磁気エネルギーは、電流値の 2 乗に比例するため、約 2.5 倍の磁気エネルギーがコイルに印加される。その結果、コイルの振動が大きくなり、ボルトの締め付けトルクが弱くなっていった一部のコイルサポートボルトが緩んでしまったと考える。

#### 4.1.3 コイルサポートボルトの状態確認

コイルサポートボルトが脱落した部分は、上下 2 段に並んだ絶縁碍子の上側であった。そして、1 号機のジョイントコネクタ丸ナットは、下から挿入

する構造になっていたため (Figure 8 中の挿入方向とは逆)、コイルサポートボルトの脱落時に外れてしまった。しかし、下側の絶縁碍子と外に広がるように曲がったコイルが邪魔になり、手を入れてジョイントコネクタ丸ナットを下から挿入することができない (Figure 5 参照)。脱落したコイルサポートボルトの再締め付けは、コイルを分解し、さらに、絶縁碍子を鉄心から取外す必要がある。コイルの分解・再組み立ては、位置の採寸・調整など非常に慎重かつ時間を要する作業になる。

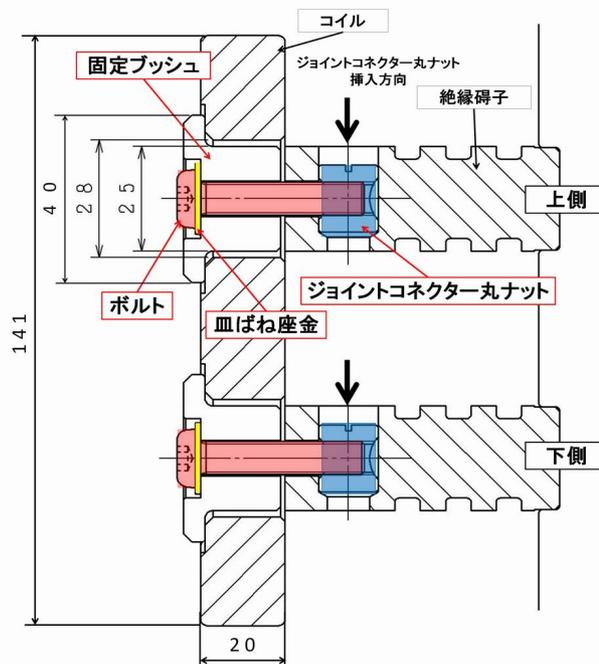


Figure 8: Schematic diagram of the coil fixing structure.



Figure 9: Spot welding point of the bolt and the bush.

電磁石のコイルは、6 箇所て絶縁碍子に固定してあり、脱落したコイルサポートボルトはそのうちの 1 箇所であった (Figure 5 参照)。コイルの固定構造は、最大励磁電流値 32kA で設計している。ユーザー利用運転時の 22.1kA では、磁気エネルギーが約半分になるため (0.7 倍の 2 乗)、数を減らした 5 箇所の固定でも問題は無いと判断した。しかし、運転を継続した場合、他の箇所でもボルトが緩み始め脱落する可能性がある。そこで、一週間に一度の加速

器メンテナンスの時間を利用し、ボルトの状態を確認することにした。通常時は、セラミックス真空ダクトが挿入されているため、全てのボルトに対し、電磁石のギャップ内に顔を近づけての状態確認や、工具を使用してのボルトの増し締めをすることが出来ない。そこで、ファイバースコープを利用し、ボルト、固定ブッシュ、コイルに印した合いマークの状態を確認した(Figure 10 参照)。

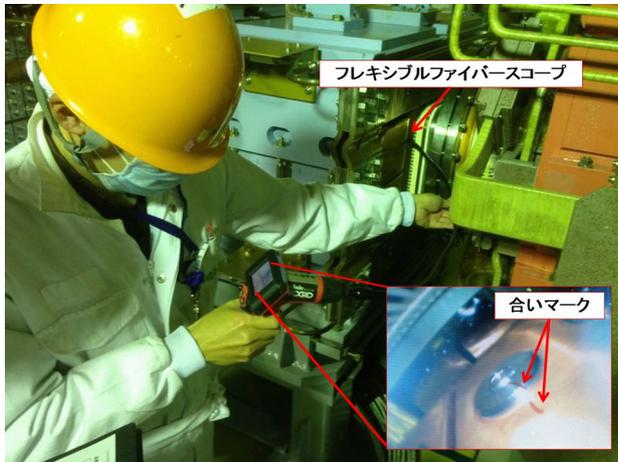


Figure 10: Condition check situation of the marking on the bolt.

## 4.2 冷却水配管からの漏水について

### 4.2.1 冷却用銅配管

直径 12mm、肉厚 1mm の冷却水用の銅配管を、導入バーの側面にロウ付けしている。そして、板厚 10mm の導入バーが 20mm の曲げ R で加工されている部分にも、銅配管が同じ曲げ R でロウ付け固定されている(Figure 11 参照)。バンブ電磁石は、加速器メンテナンスの時に、入射部作業のため電磁石の運転を停止する。そのため、運転と停止の発熱と冷却により、曲げ部分は導入バーの長手方向に沿って縦と横に伸縮する。この時の応力が、厳しい曲げ R で加工した配管部に繰り返し加わることで銅配管が脆化し、通電時の振動で疲労割れを生じた可能性がある。または、ロウ付け作業時の高温で銅配管に潰食が生じ、変形などで配管の一部に薄肉化による弱い部分が生じていた可能性もある。

### 4.2.2 銅配管の流速評価

銅配管を冷却する水の流量は 7.0L/min であり、銅配管の流速は、1.6m/s 以下になる。そのため、速い流速で潰食が発生した可能性は低いと考える。

### 4.2.3 導入バーの監視

導入バーを新たに製作するには時間を要するため、冷却水の通水を停止し、空冷ファンを用いた強制空冷で対応することにした。導入バーを冷却する空冷ファンの設置状況を Figure 12 に示す。

しかし、空冷ファンは、放射線の影響で故障し停止する可能性がある。また、強制冷却ができなくな

り、自然空冷となった場合の導入バーの最高到達温度が確認できていない。そのため、光ファイバー温度計を使用し、運転中の導入バーの温度を常時監視することにした。監視は、光ファイバー温度計の値を付属のアンプで電圧値に変換(150°C/10V)し、BNC ケーブル経由で地上のオシロスコープで行った。これとは別に、導入バーにサーモラベルを貼り付け、トンネル内に設置したビデオカメラによる監視も試みた。しかし、ビーム運転の開始後、放射線の影響ですぐにビデオカメラが故障し、観察が出来なくなってしまった。

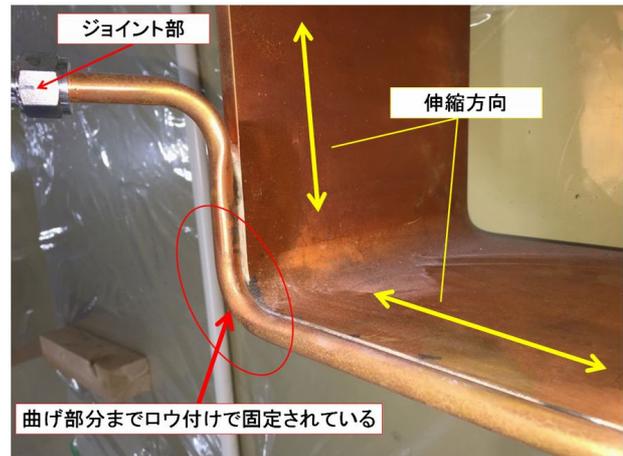


Figure 11: Brazed copper pipe for water-cooled connection bar.



Figure 12: Air blower for forced air-cooling.

トンネルに設置する前に実施した 1 号機の温度特性試験の結果(Figure 14 参照)から、ユーザー利用運転時(22.1kA)の導入バーの温度を推定すると、水冷の部分で最も高い温度差は  $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ 、自然空冷の部分の温度差は  $\Delta T=110^{\circ}\text{C}$  になる。トンネル内の温度は  $30^{\circ}\text{C}$  程度であるから、万が一に空冷ファンが停止した場合の到達温度は  $140^{\circ}\text{C}$  と予想できる。導入バーは、最大励磁電流値を 32kA でボルトの固定構造を設計し、絶縁碍子などの構成部品の耐熱は  $180^{\circ}\text{C}$  で製作した。そのため、22.1kA で運転するユーザー利用運転では、強制空冷をしなくても問題にならないと考える。しかし、一週間に一度の加速器メンテナンスで運転を停止するため、導入バー温度の高低差(推定  $\Delta T=110^{\circ}\text{C}$ )による熱伸びの応力により、固定ボルト等に新たに問題が発生する可能

性がある。そのため、強制空冷と温度監視は、導入バーの健全な状態を維持する意味で行った。空冷ファンを使用したユーザー利用運転時の導入バーの温度は、最も高い部分で 53℃であった。温度差は  $\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$  と小さく、空冷ファンは有効であった。

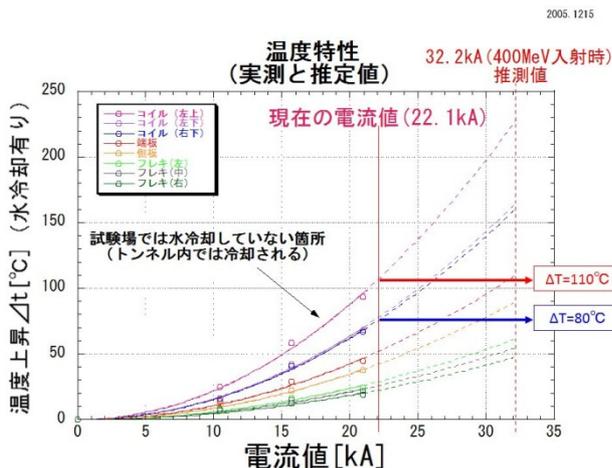


Figure 13: Increased temperature of the measurement and the estimation result.

#### 4.2.4 漏水原因調査

加速器の運転を継続しながら原因調査を進めるため、加速器メンテナンスの停止時間を利用し、漏水した配管がロウ付けされた導体部分のみを新しい導体と交換した。そして、現場から離れた位置で、外観検査、気密試験（アルゴンガスの加圧と漏洩検出液 SNOOP を使用）、PT 試験（浸透探傷試験）の調査を行った。しかし、漏洩箇所は特定できず、漏水の原因を明らかにすることが出来なかった。この要因は、調査時の作業ミスが考えられる。導入バーを取り外す際に、Figure 11 に示す曲げ部分とジョイントの間の銅配管が割れてしまい、その部分をアラルダイト接着剤で修理した。割れた近辺から水漏れが発生していたとすれば、接着材で修理した時に、その部分を塞いでしまった可能性がある。気密試験や PT 試験は、その修理後であったため、有意な結果が得られなかったと考える。

### 5. 恒久対策

#### 5.1 コイルサポートボルト

2箇所のコイルサポートボルトの脱落以降、約4ヶ月の運転期間の間に、新たに緩んだボルトは見付からなかった。しかし、固定ブッシュの断面は円形であるため、ボルトが緩んだ場合は回転して脱落する可能性がある。そこで、固定ブッシュの形状を円形から楕円形に変更し、固定ブッシュ自体が回転しないようにする。また、ボルトを十字穴付なべ小ネジから六角穴付ボタンボルトに交換する。これにより、ボルトの締め付けトルクの管理を行えるようになる。さらに、ボルトの緩み防止対策として、皿ばね座金を入れることにする。対策は、4台の水平シフトバンプ電磁石すべてのコイルサポート部分（288個）

に施す。対策前後の固定構造の違いを Figure 14 に示す。

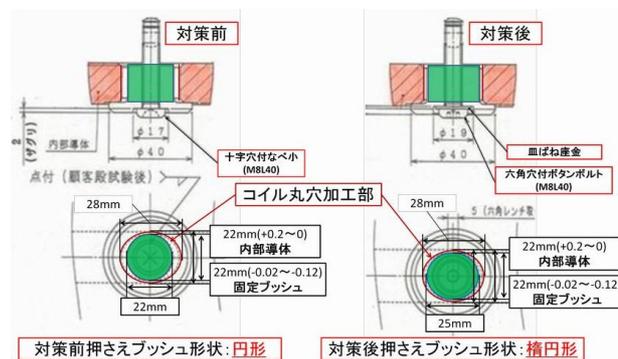


Figure 14: Dropout preventive structure of the coil fixation bolt.

#### 5.2 導入バー

原因調査を実施したが、銅配管から漏水した箇所と原因を特定することはできなかった。しかし、構造上の問題として、肉厚が薄い銅配管を小さい R で曲げ且つロウ付けして固定したため、長期間の運用で脆化や潰食が発生した可能性がある。そこで、直径 12mm（肉厚 1mm）の銅配管から、最薄部で肉厚 3mm になる 16mm×16mm（水路直径 10mm）のホローコンダクターに変更し、また、曲げ R を 60mm に大きくした新しい導入バーを製作することにする。

### 6. まとめ

約 23,000 時間という長期間の運転において、トラブルが発生しなかった水平シフトバンプ電磁石に、コイルサポートボルトの脱落や、導入バーの冷却水配管から漏水が発生してしまった。それぞれ、原因は明確になっていないが、トラブル調査の中で、構造上、改善した方が良い部分が見付かった。コイル部分は、固定ブッシュの形状変更と皿ばね座金を利用した緩み防止対策且つトルク管理を行えるタイプのボルトに交換することにした。導入バーは、銅配管をホローコンダクターに変更し且つ大きい曲げ R で加工する新しい導入バーを製作することにした。

RCS 加速器の長期的な安定運転を実現するため、今後も、適時状態を監視していく。

### 参考文献

- [1] <http://j-parc.jp/index-e.html>
- [2] M.Kinsho, "Status of the J-PARC 3 GeV RCS", Proceedings of IPAC2015, THPF044.
- [3] K.Hasegawa, "Commissioning of Energy Upgraded Linac of J-PARC", Proceedings of LINAC2014, TUIOB03.
- [4] T.Takayanagi et al., "Design of the injection bump system of the 3-GeV RCS in J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1358-1361.
- [5] T.Takayanagi et al., "Design of the shift bump magnets for the Beam injection of the 3-GeV RCS in J-PARC", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.16, No.2, June 2006, pp1366-1369.