

## J-PARC RCS 水平シフトバンプ電磁石の現状

### PRESENT STATUS OF THE J-PARC RCS SHIFT BUMP MAGNET

堀野光喜<sup>#, A)</sup>, 高柳智弘<sup>A)</sup>, 植野智晶<sup>A)</sup>, 飛田教光<sup>B)</sup>, 山本風海<sup>A)</sup>, 金正倫計<sup>A)</sup>

Koki Horino<sup>#, A)</sup>, Tomohiro Takayanagi<sup>A)</sup>, Ueno Tomoaki<sup>A)</sup>, Norimitsu Tobita<sup>B)</sup>, Kazami Yamamoto<sup>A)</sup>, Kinsho Michikazu<sup>A)</sup>

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

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

#### Abstract

Beam operation with 400 MeV injection beam energy from the LINAC (Linear Accelerator) was started in February 2014. However, after one year, the coil support bolt of the horizontal shift bump magnet was dropped and the water leakage of the cooling copper pipe of the connection conductor bar was occurred. After the carrying out the permanent measures, a stable operation has been continued without trouble. This paper reports the contents of the trouble and the permanent measures of the magnet.

#### 1. はじめに

2014年2月に、LINAC(Linear Accelerator)からの400 MeV 入射ビームによるユーザー利用運転がスタートした[1]。その約1年後の2015年2月と3月に、水平シフトバンプ電磁石の銅帯コイルを固定しているコイルサポートボルトの脱落と、4台の電磁石を直列に接続している銅バー(以下、導入バー)の水冷配管からの漏水のトラブルが発生した[2]。トラブルの発生直後は暫定対策で加速器の利用運転に対応し、その年の夏期メンテナンス期間に恒久対策を実施した。恒久対策を実施した後は、トラブル無く安定した運転を継続している。本発表では、水平シフトバンプ電磁石に発生したトラブルと恒久対策の内容、及び、その効果について報告する。

#### 2. 水平シフトバンプ電磁石

水平シフトバンプ電磁石は、LINAC からの負水素(H<sup>-</sup>)の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に入射するためのバンプ軌道を生成する[3]。水平シフトバンプ電磁石は、電磁石間で励磁タイミングの誤差が発生しないように、電磁石4台を導入バーで直列に接続し、1台の電源で励磁する構成になっている。

#### 3. 発生したトラブルと原因

##### 3.1 銅帯コイルサポートボルトの脱落

##### 3.1.1 ボルト脱落時の状況

2015年2月に水平シフトバンプ電磁石1号機の銅帯コイルを固定しているコイルサポートボルトが脱落した(Figure 1のA参照)。ボルトが脱落した1号機の鉄心を半割しその他すべてのコイルサポートボルトを点検したところ、完全に緩んだ脱落寸前のボルトが新たに1個発見された(Figure 1のB参照)。

<sup>#</sup> khorino@post.j-parc.jp

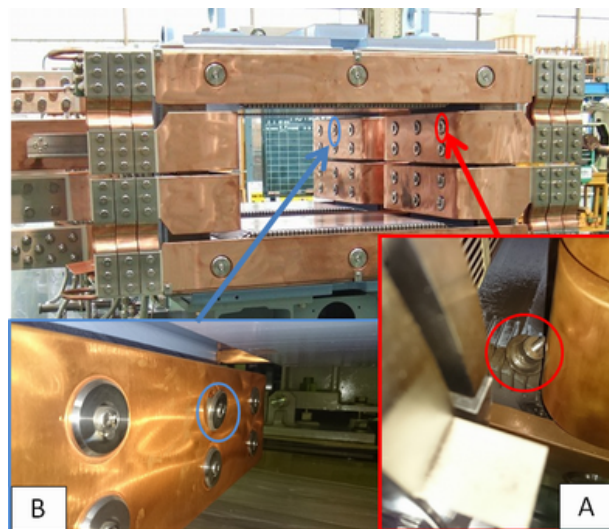


Figure 1: Dropped bolts and those places.

##### 3.1.2 脱落原因

水平シフトバンプ電磁石1号機は入射バンプシステム用電磁石の初号機(2005年10月製作)であったため、様々な運転パラメータを用いて磁場分布や温度分布などの特性データを詳細に取得した。しかし、この試験中に銅帯コイルを固定しているボルトが緩む事象が発生した。この時は、通常の運転では実施しない大小様々な電流値で、且つ、運転と停止を繰り返した過酷な条件がボルトを緩ませてしまったと考え、固定ブッシュとボルトを点溶接しボルトを一体化する緩み防止対策を行った。この一体化したボルトをコイルサポートボルトと呼ぶ(Figure 2参照)。しかし今回、一体化したコイルサポートボルトに緩みが発生してしまった。このことから、使用していたボルトが十字穴付きなベ小ネジでトルクレンチによる締め付け管理が行えなかったため、締め付け方が不十分なボルトが存在していたと思われる。特に、長年の連続通電と、LINACの400 MeVアップグレード化に対応するた

め 1.6 倍に増加した励磁電流による銅帯コイルの振動増幅が、締め付けが不十分だったコイルサポートボルトを緩ませ脱落させたと考ええる。

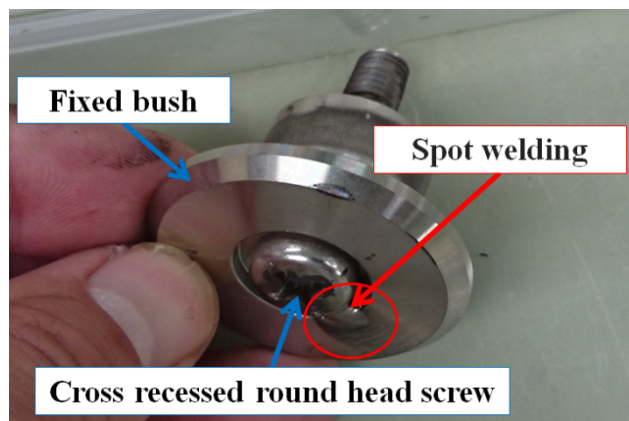


Figure 2: Coil support bolt.

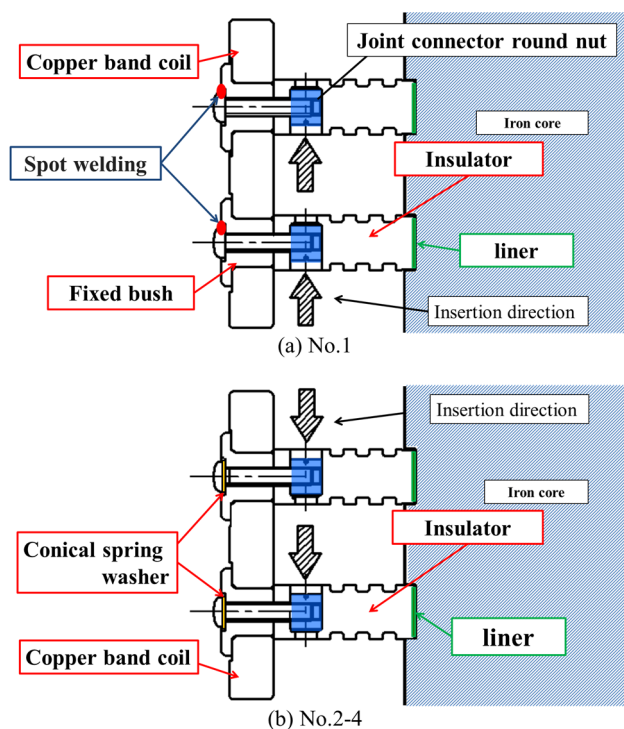


Figure 3: Fixation structure of the coil.

脱落したコイルサポートボルトのジョイントコネクタ丸ナットは、下方方向から挿入する構造になっていた (Figure 3 参照)。その為、ボルトが緩んだ場合、丸ナットは下方に落下し、その結果、コイルサポートボルトが抜けて脱落する構造になっていた。

### 3.1.3 電磁石の振動の影響

ユーザー利用運転中は、電磁石の状態確認や冷却水の流量確認などの点検を隔週に実施している。その作業の中で、2015年2月のサポートボルトが脱落する以前に、水平シフトバンプ電磁石1号機の鉄心周辺に散

乱した黒色の粉が発見されていた。今回のコイルサポートボルトが脱落した事象を受け、この黒色の粉は、コイルサポートボルトが緩んだ際に、電磁石の振動でコイルサポートボルトとコイルが擦れ、削れたコイル素材の銅が酸化した粉だったと考えている。この粉の成分分析を試みたが、必要量が採取できず分析は実現しなかった。Figure 4 に粉の散乱状況と採取した粉を示す。

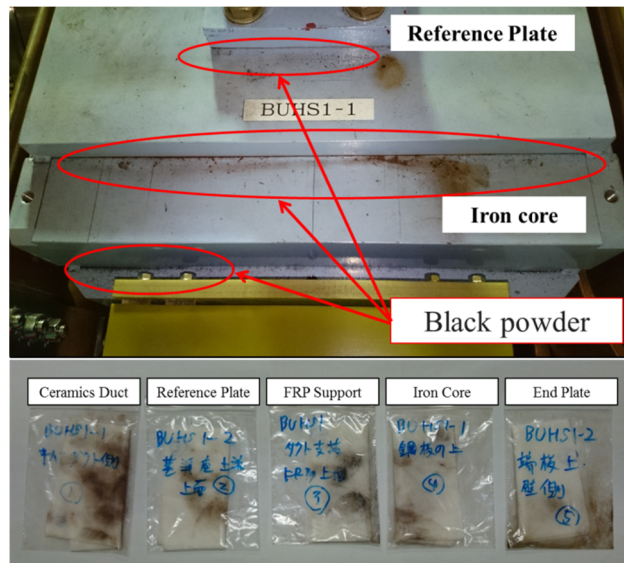


Figure 4: Black powder and get points.

### 3.1.4 ボルト緩み防止対策

水平シフトバンプ電磁石 2~4 号機の電磁石は、ボルトの緩み防止対策として、製作初期からボルトと固定ブッシュの間に皿ばね座金を入れた構造としている。1号機のボルトが脱落した時に、2~4号機の全数点検を実施したところ、ボルトに緩みは確認されなかった。このことから、皿ばね座金は振動による緩み対策として効果的であると考ええる。

## 3.2 水冷却配管からの漏水

### 3.2.1 漏水時の状況と配管構造

コイルサポートボルトが脱落した同年3月に、水平シフトバンプ電磁石の1号機と2号機を接続する導入バーの水冷却配管から漏水が見つかった (Figure 5 参照)。導入バーは、厚さ 10 mm の銅板の側面に直径 12 mm、肉厚 1 mm の冷却用銅配管 (冷却パイプ) をロウ付けして水冷却している。この冷却パイプを導入バーと同じく R20 で曲げて、且つ、導入バーの曲げに沿ってロウ付け加工した付近からの漏水だった。

加速器停止時のメンテナンス毎に入射部で作業を行うため、水平シフトバンプ電磁石は安全性を考え通電を停止する。そのため、導入バーは、運転と停止による発熱と冷却によって伸縮が繰り返される。導入バーの曲げ箇所は、水平方向と鉛直方向にそれぞれ異なる方向に熱伸びするため、ロウ付け加工された銅配管の曲げ部分は、導入バーの伸縮方向に合わせて縦横への伸縮を繰り返す。その結果、配管が脆化し弱くなった部分に亀

裂が生じてしまった可能性がある。また、ロウ付け加工の作業時の高温によって銅配管に潰食が生じ、その部分が伸縮によって更に薄肉化し亀裂が生じ易くなっていた可能性もある。

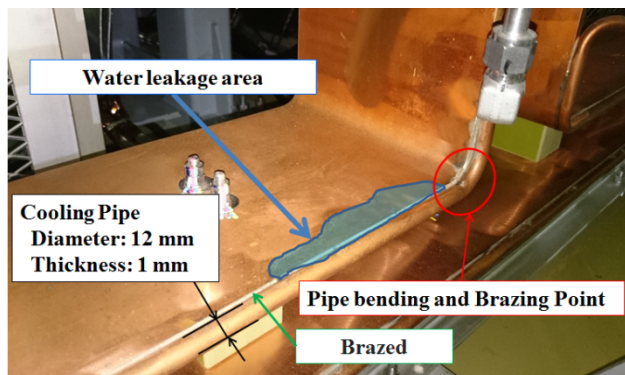


Figure 5: Cooling pipe and water leakage point of the connection conductor bar.

### 3.2.2 漏水調査

漏水の箇所とその原因を特定する為、導入バーを電磁石から取り外し、トンネル外に持ち出して外観検査、気密試験、PT 試験(浸透探傷試験)を実施した。しかし、この調査では漏水箇所を特定する事は出来ず、また、漏水に結びつく直接的な原因を明らかにする事はできなかった。漏水箇所が特定できなかった要因は、導入バーの冷却パイプのジョイントを手作業で取り外す時に冷却パイプを曲げる必要があり、この作業時にパイプの曲げ箇所にひび割れが生じてしまったことが考えられる。気密試験を行う前にアラルダイト接着剤で作業時に入れてしまったひび割れ部分を塞ぐ処置を行ったが、気密試験では漏れが確認できなかった。これは、アラルダイトが元々の漏水箇所までも塞いでしまったためだと考えられる。しかし、他の導入バーの冷却パイプは同様に手作業で曲げてもひび割れが生じることは無かった。これより、ひび割れが生じた部分は他のパイプよりも脆くなっており、ひび割れ付近が漏水箇所、又は、漏水箇所がひび割れを起こしたと考える。

## 4. 恒久対策の実施

### 4.1 新しいコイルサポートボルトの製作

#### 4.1.1 設計内容

脱落したコイルサポートボルトの形状は、断面が円形であった為、ボルトが緩んだ際に一緒になって回転し易い構造であった。そこで、サポートボルトの回転防止対策として、新しい固定ブッシュの形状は円形から楕円形に変更し、万が一にボルトが緩んだ場合でも固定ブッシュは回転しない形状に変更した。また、固定用のボルトを十字穴付きなベ小ネジから六角穴付きボタンボルトに変更し、ボルト締め付け時には、トルク管理を適切、且つ、容易に実施できるようにした(当時は放電に影響しない薄厚タイプの六角ボルトは無かった)。更に、銅帯コイ

ルの振動対策として、銅帯コイルが熱伸び方向にスライドし易いように設けていたコイルと固定ブッシュの間の0.5 mm の隙間を無くす構造に変更した(3 箇所並んだ固定箇所の内、真ん中以外は熱伸び時の逃げの為に隙間を設けていた)。固定ブッシュの厚みを変更し、銅帯コイルと面接触させて固定ブッシュと共に押え付けて固定する(Figure 6 参照)。銅帯コイルの熱伸びを拘束するために必要なボルトの締め付け力( $F_n$ )は、サポートボルト締め付け時のトルク(M8 ボルト:  $T=9.2$  Nm)で押え付けた場合のネジ面と座面の摩擦力より求めた締め付け力( $F_b$ )よりも十分大きいため、隙間が無い場合でも熱伸び時は銅帯コイルが滑り、ボルト固定部が過大な応力で破損することは無い。各締め付け力を(1)式に示す。

$$F_n(1.35 \times 10^6(N)) \gg F_b(3.82 \times 10^3(N)) \quad (1)$$

また、No.2-4 の電磁石で効果が確認された緩み対策用の皿ばね座金をすべてのボルトに使用した。

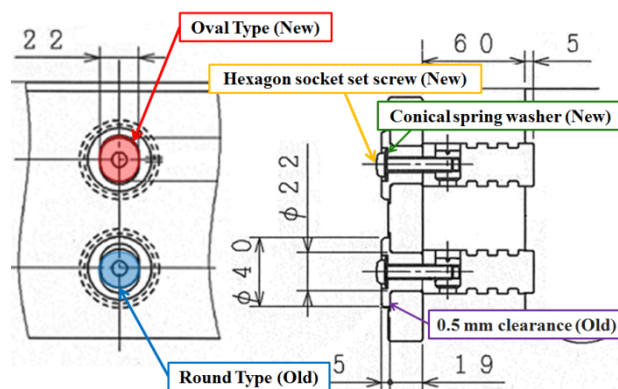


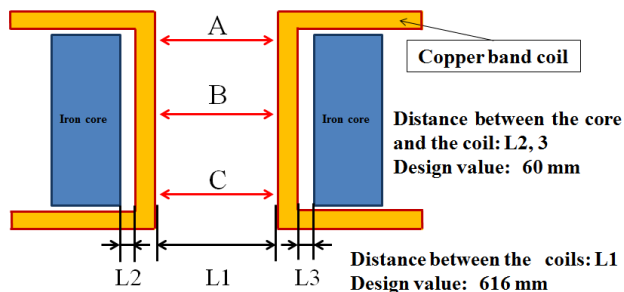
Figure 6: Shape of a coil support bolt and a fixed bush.

#### 4.1.2 交換作業前の精密採寸作業

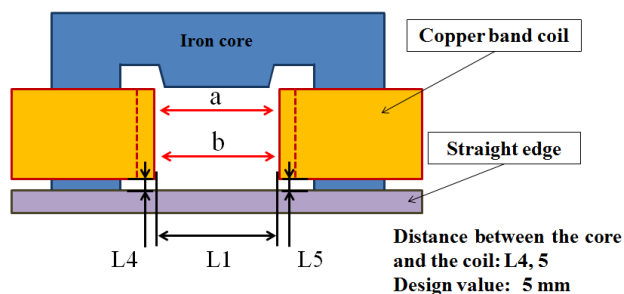
恒久対策用のコイルサポートボルトに交換をする為には、電磁石を半割し、銅帯コイルの分解とコイル内部のサポート部の取り外し作業が必要である。RCS の主要機器である水平シフトバンプ電磁石が交換作業の前後で状態が変わる(磁場分布が変わる)ことは許されないため、現状位置に復帰することは必須条件である。その為、銅帯コイルの現状位置の採寸、及び、位置調整を高精度に行う必要がある。銅帯コイルの分解作業の開始前に、電磁石の鉄心を半割した状態で、再組立て時の基準となる現状位置測定をストレートエッジ、隙間ゲージ、内径・外径マイクロメータを使用し、1/100 mm 単位の精密採寸を行った(工場出荷時は 1/10 mm で測定)。Figure 7 に測定箇所を示す。

ジョイントコネクター丸ナットの脱落防止の為に挿入方向の変更も行った。しかし、挿入方向を変更する為には、取り外したコイルの内部サポート部の上下方向を反転して取り付けるため、鉄心からコイルの内部サポート部を取り外す必要がある。この時、長期運転による経年変化等による歪みで固定位置に公差が生じる可能性がある。そ

の為、公差が生じた場合は、コイルの内部サポート部と鉄心の間に挿入してあるライナーの位置と枚数で調整を行う。



(a) Top view of the core cross section



(b) Front view of the above core

Figure 7: Dimension measuring position.

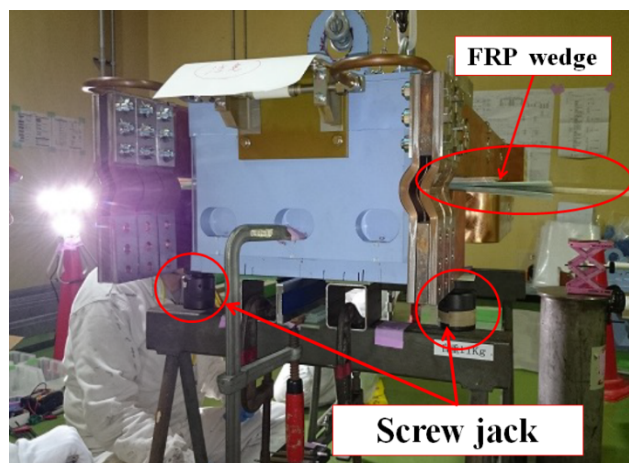


Figure 8: Adjustment work situation.

#### 4.1.3 再組立て作業

再組立て時の調整作業は、経年的な形状変化と分解前の電磁石とビームの関係を考慮し、工場出荷時のデータでは無く解体前の採寸データを基に行った。銅帯コイルの位置決め調整は、FRP製の楔をコイル上部と鉄心の間に挿入して銅帯コイルの仮固定を行い、銅帯コイル本体をスクリージャッキ4台でコイル下部から上方向

に調整して行った(Figure 8 参照)。締結時は、コイルサポートボルトをトルクレンチで規定トルクまで締め付け、締結後の寸法が、3次元解析の計算結果によるビームへの影響が出ない条件と、実作業で現実的に調整可能な範囲として定めた公差範囲内に収まるように調整した。調整作業は、水平シフトバンプ電磁石1号機が最も多くの時間が掛かり、且つ、最終調整後も4台中最も公差が大きくなってしまった。水平シフトバンプ電磁石1号機は他の電磁石より1年前に完成し、初号機として特性データを取得するなど、より長い時間通電試験を実施している。その為、ボルト解放時に生じた経年変化による銅帯コイルの歪みが最も大きかったと考えている。

再組立て作業前後の全体平均の公差は、コイル間距離(L1)で $-0.15$  mm(公差範囲  $-1$  mm $\sim$  $+0.2$  mm)、コイルと鉄心間のギャップ(L2, L3)で $+0.14$  mm(公差範囲  $\pm 0.4$  mm)、分割面からのコイル高さ(L4, L5)で $+0.01$  mm(公差範囲  $\pm 0.1$  mm)となり、再現性良く調整作業を終えることが出来た。そして、分解作業前後に生じた公差の影響が磁場分布に大きな影響を与えていないことを、ビーム試験でも確認した。Table 1に調整した電磁石の中で、最も公差が大きくなってしまった水平シフトバンプ電磁石1号機の採寸測定データを示す。

Table 1: Measurement Result

Unit (mm)	SB1	L1		L2	L3	L4	L5
		a	b				
Tolerance		$-0.1 \sim +0.2$		$\pm 0.4$		$\pm 0.4$	
Design value		616.00		60.00		5.00	
A	Factory inspection	616.2	616.0	60.0	60.0	5.0	4.5
	Before	616.48	616.12	60.03	59.85	4.74	3.82
	After	616.50	616.58	59.76	59.68	4.71	3.75
	Before and after difference	-0.02	-0.46	0.27	0.17	0.03	0.07
	Difference between the design value	0.50	0.58	-0.24	-0.32	0.29	1.25
B	Factory inspection	-	-	-	-	-	-
	Before	616.44	616.19	59.95	59.80	4.72	3.86
	After	616.32	616.45	59.77	59.72	4.65	3.91
	Before and after difference	0.12	-0.26	0.18	0.08	0.07	0.05
	Difference between the design value	0.32	0.45	-0.23	-0.28	0.35	1.09
C	Factory inspection	616.2	616.0	60.0	60.0	5.0	5.0
	Before	616.52	616.13	60.03	59.85	4.74	3.82
	After	616.44	616.67	59.64	59.67	4.53	3.67
	Before and after difference	0.08	-0.54	0.39	0.18	0.21	0.15
	Difference between the design value	0.44	0.67	-0.36	-0.33	0.47	1.33

#### 4.2 新しい導入バーの製作

漏水対策として新しく製作した導入バーの冷却配管は、直径12 mm、肉厚1 mmの銅配管から、外形16 mm $\times$ 16 mm、水路直径10 mm、最薄部で肉厚が3 mmとなるホローコンダクターに変更した。また、450 $^{\circ}$ C以上のロウ付け固定(使用ロウ材: BCUP-5)を止め、250 $^{\circ}$ C以下の半田付け固定(使用半田: 鉛フリー PF305)に変更し、高温加工による冷却水配管の損傷の低減を図った。更に、曲げRを60 mm以上(6D)と大きくすると共に曲げ部分は半田付け固定せず、熱伸び方向に合わせた固定

加工とする事で、伸縮による亀裂発生防止の対策と潰食や脆化の影響を抑制する構造にした(Figure 9 参照)。

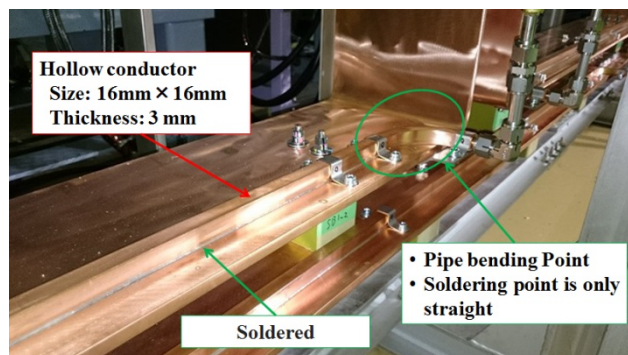


Figure 9: New connection conductor bar.

## 5. 恒久対策効果

### 5.1 新しいコイルサポートボルトの効果

恒久対策を実施した再組立て時に、コイルとコイルサポートボルトの間に合いマークを記した。そして、目視による合いマークのズレや規定トルクで増し締めを行うボルト緩みの確認作業を定期的実施し、ボルト締め付けの健全性確認を加速器が停止したメンテナンス時に隔週で行ってきた。対策後から1年が経過した現在、合いマークのズレやボルトの緩みは確認されていない。また、コイルサポートボルトが脱落する前に発見されていた黒色の粉の発生もなく、振動対策に一定の効果があつたと考えている。

### 5.2 新しい導入バーの状況

熱電対を用いて新しい導入バーの温度測定試験を行い、冷却効果の確認を行った。ユーザー利用運転時の通電条件(22.08 kA)で、①冷却なし、②送風ファンによる強制空冷、③ホローコンダクターによる水冷却の3条件の各温度上昇を測定した。測定結果をFigure 10に示す。新しい導入バーは、定格通電時の温度上昇が3つの条件の中で最も低く、冷却効果が優れている事が確認できた。これより、漏水の要因と考えた運転と停止の繰り返しによる導入バーの熱伸び量は抑制される。更に、新しい導入バーは、熱伸び方向に沿った半田付け加工をすることで、熱伸び時に生じるパイプへの負荷を軽減する構造とした。これより、配管に亀裂が生じる可能性は低減され、安定した運転が可能になったと考えている。

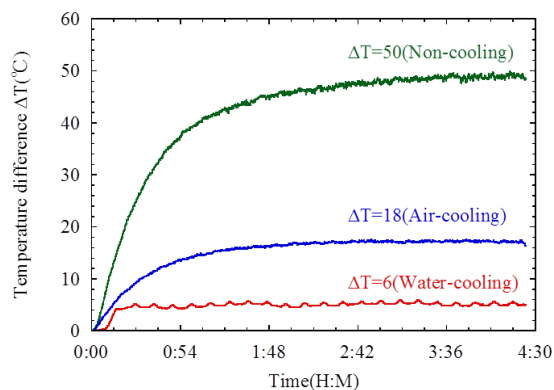


Figure 10: Measurement result of the temperature rise.

## 6. まとめ

2015年の2月と3月に、コイルサポートボルトの脱落と導入バーからの漏水が発生した。そして、同年の夏期メンテナンス期間中に、それぞれ恒久対策を実施した。コイルサポートボルトは回転防止の為に固定ブッシュの形状を楕円型に変更し、且つ、振動対策として固定ブッシュがコイルを直接押え付けることができる様に熱伸び時のスライド用隙間を無くした。また、皿ばね座金を使用する緩み防止対策と、六角穴付きボタンボルトを使用した適切なトルク管理を可能とした。導入バーは、亀裂防止の為に冷却配管を銅配管から肉厚のホローコンダクターに変更し、更に、高温加工による損傷を防止する為にロウ付け固定から半田付け固定に変更した。また、冷却パイプの取り付け部の曲げRを大きくすると共に熱伸び方向に合わせて固定する事で、熱伸びによる亀裂防止対策と潰食や脆化によるひび割れ防止対策を施した。恒久対策後1年が経過した現在でも故障は発生せず安定した運転を継続している。今後も定期的、且つ、長期的に状態確認を行い、安定した運転維持に努めたい。また、レーザー変位計を用いたコイルの振動量の測定を実施し、振動の定量的評価にて確認できた振動対策を今後の電磁石設計に反映したいと考えている。

## 参考文献

- [1] T. Morishita *et al.*, "Upgrade of J-PARC Linac", High Energy News, 33 (4) pp. 270-278 (2015), 加速器 Vol. 12, No.1 pp.22-30 (2015).
- [2] H K. Horino *et al.*, "J-PARC RCS 水平シフトバン電磁石の現状報告", Proceedings of PASJ2015, THP074.
- [3] 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, pp.1358-1361.