

J-PARC ハドロン実験施設における総重量300トンスペクトロメータ電磁石の設置 INSTALLATION OF A GIANT SPECTROMETER MAGNET WITH A WEIGHT OF 300 TONS AT J-PARC HADRON EXPERIMENTAL FACILITY

広瀬 恵理奈^{#,A)}, 高橋 仁^{A)}, 青木 和也^{A)}, 小澤 恭一郎^{A)}, 武藤 亮太郎^{A)}, 上利 恵三^{A)}, 家入 正治^{A)}, 加藤 洋二^{A)}, 倉崎 るり^{A)}, 里 嘉典^{A)}, 澤田 真也^{A)}, 白壁 義久^{A)}, 田中 万博^{A)}, 豊田 晃久^{A)}, 皆川 道文^{A)}, 森野 雄平^{A)}, 山野井 豊^{A)}, 渡辺 丈晃^{A)}

Erina Hirose ^{#,A)}, Hitoshi Takahashi ^{A)}, Kazuya Aoki ^{A)}, Kyoichiro Ozawa ^{A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Keizo Aagari ^{A)}, Masaharu Ieiri ^{A)}, Yohji Katoh ^{A)}, Ruri Kurasaki ^{A)}, Yoshinori Sato ^{A)}, Shinya Sawada ^{A)}, Yoshihisa Shirakabe ^{A)}, Kazuhiro Tanaka ^{A)}, Akihisa Toyoda ^{A)}, Michifumi Minakawa ^{A)}, Yuhei Morino ^{A)}, Yutaka Yamanoi ^{A)}, Hiroaki Watanabe ^{A)}

^{A)} KEK

Abstract

Construction of a new primary proton beam line, which is called high-p/COMET beam line [1], started in 2013 at the J-PARC Hadron Facility. The new beam line is branched from the existing primary beam line at the middle of the beam-switching yard (SY) between the Main Ring (MR) and the Hadron experimental hall (HD-hall). A large magnet, called the FM magnet, had been used as a spectrometer at the Tsukuba campus of KEK (with the width of about 5 m, the height of about 4 m, the depth of about 2 m, and the weight of about 300 tons). And the FM magnet was relocated after expanding its gap to 1 m and adding a pole of the cone type as a spectrometer magnet of high-p beam line. I report here the successful assembly of the FM magnet with the position precision of $\pm 1\text{mm}$.

1. はじめに

J-PARC ハドロン実験施設において、現在、高運動量 (high-p) ビームラインの建設が進んでいる。この high-p ビームライン実験のスペクトロメータ電磁石として、FM電磁石が使用される[2]。この FM 電磁石は、第二次世界大戦後 1955 年に、田無核物理研究所のサイクロトロン電磁石として製造された。その後 1990 年代にKEK北カウンターホールに、スペクトロメータ電磁石として移設・改造され、実験に貢献した[3]。そして今回、さらに改造されて、J-PARC の high-p ビームラインのスペクトロメータ電磁石として活用されることになったのである。

図1にハドロン実験施設の平面図を示す。high-p ビームラインは、ハドロンスイッチヤードの中間地点で分岐され、ハドロン実験ホールまで輸送される。本件の FM 電磁石は、high-p ビームライン最下流(図中の丸印)に設置され、その下流はビームダンプである。

図1にハドロン実験施設の平面図を示す。high-p ビームライン用のスペクトロメータ電磁石の主な仕様を、表1に示す。また、完成図面を図2に示す。FM 電磁石は、4本組の上下ヨーク、上下ポールサイドヨークが主な部品であるが、田無からKEK北カウンターホールに移設されたときに、黄色色の部品のポールとサイドヨークが追加された。また、今回 high-p 用として、オレンジ色の円錐型ポールとサイドヨークが追加された。これらを表2に示す。これらの部品は、重量が一番重いもので最大26トンである。すべての部品がクレーンを必要とする。

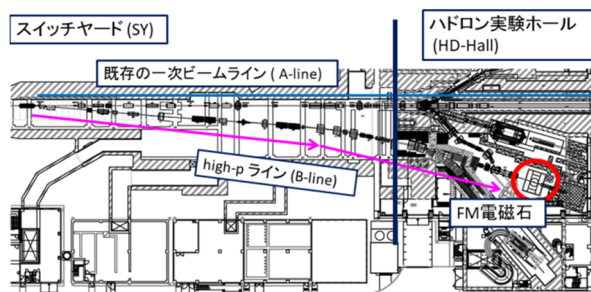


Figure 1: The floor plan of the Hadron Facility.

Table 1: Spec of the Remodeled FM Magnet

大きさ	幅約 5m × 高さ約 5m × 奥行約 2m
定格電流	2500 A
定格電圧	500 V
巻き数	168 ターン / 極
最大磁場	1.75 Tesla
磁極間隔	400 mm
磁極直径	400 mm
総重量	約 340 トン

[#] erina@post.kek.jp

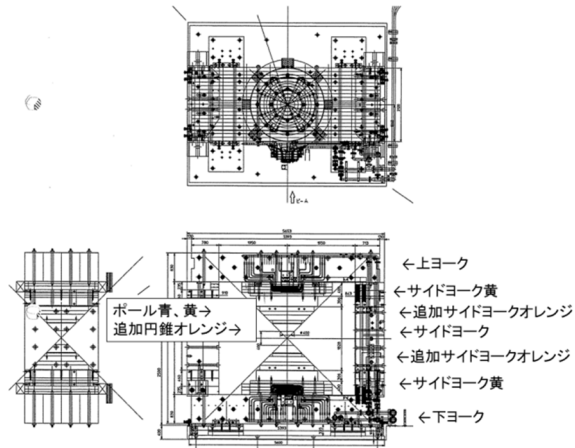


Figure 2: The FM magnet.

Table 2: Main Pieces of the Magnet

	幅[mm] x 長さ [mm] x 高さ[mm]	重 量	数 量
		[ton]	
上下ヨーク	530 x 5395 x 830	18.7	8
上下ボール青	φ 2120 x 399	11.1	2
上下ボール黄	φ 1760 x 306	5.8	2
コイル	φ 2588 x 300	2.5	2
サイドヨーク	1755 x 1060 x 1850	26.4	2
サイドヨーク黄	910 x 2120 x 235	3.3	4
追加部品			
上下ボールオレンジ	φ 1560 x 714	6.3	2
サイドヨークオレンジ	910 x 2120 x 460	6.2	4

2. 床の補強

ハドロン実験ホールの床の耐荷重は 30ton/m² である。総重量約 336 トンであるので、電磁石単体の面積では、床の耐荷重が耐えられないため、面積 4520mm × 5600mm、厚さ 100mm の鉄板を敷き、床への荷重が 30ton/m² 以下に分散されるようにした。この鉄板を床に止めるため、φ 42-360mm のコア抜き 24 か所を行い、M36 のケミカルアンカーを施工した(図3)。鉄板の水平を出すためにスペーサー調整を行い(図4)、床面積を稼ぐため、隙間にモルタルを注入した。FM電磁石設置場所は、400mm 深さの掘り込みとなっている。この電磁石をビーム高さが 2.5m になるように設置すると、床までの高さが足りないため予め掘りこんである。よって、容易にモルタルを注入でき、床面積を稼ぐことができた。

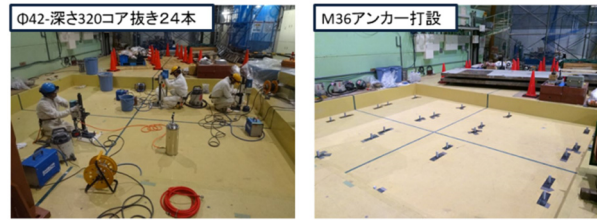


Figure 3: Setting the anchor bolt.

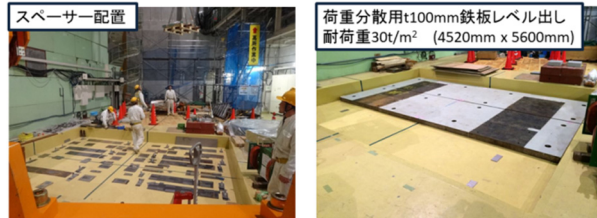


Figure 4: Installation of iron plates.

3. 電磁石組立及び設置

電磁石組立及び設置では、方向 X、Y、Z について、以下の表 3 のように定義する。

Table 3: Definition of the Direction

X	水平方向	南北	南が+、北が-
Y	垂直方向	上下	上が+、下が-
		ビーム高さ	
Z	ビーム方向	東西	上流(西)が+、下流(東)が-

水平方向ビーム中心は、Z 方向中心は、床のケガキを中心として、目標精度を±1mm とする。

3.1 下ヨーク

下ヨークは、幅 5395mm × 奥行 500mm × 高さ 830mm、重量が約 18 トンの鉄ブロック4本から成り、お互いがピン勘合、長さ 2m のボルト締結となっている。よって、Z 中心に置かれることとなる1本目が、電磁石の位置を決めてしまうことになるので、1本目について精度よく設置することが必要である。図5のように、クレーンで荷重を抜き、望遠鏡でX中心とZ中心を見ながらジャッキボルトで押し引きし、レベルで水平を見ながら、スペーサー調整で水平を出した。1本目を設置した後は、1本目が動かないようにして、他3本についてレベルを出し、ピン勘合を行い設置した。最後に4本を連結するボルトを締めた。図6に設置精度を示す。どうしても最後ボルト締結すると位置が動くが、X 方向中心は、ヨークの上流端、下流西端共に 0.0mm、Z 方向中心は、北端で-0.4mm、南端で-0.6mm の精度で設置することができた。ビーム高さについては、+0.2+0.7mm の精度となった。レベルに関しては、重量 330 トンに対して、1mm 程度床が下がることを見越して、+1mm 程度を目標に設置し、下ヨーク上面の何点かで測定して、+0.2~+0.7mm となった。



Figure 5: Alignment of the bottom yokes.

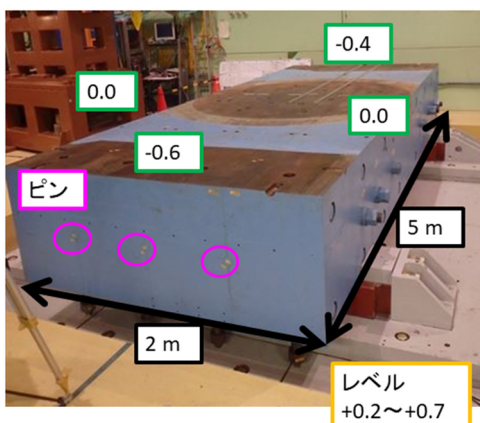


Figure 6: Alignment of the bottom yokes.

3.2 サイドヨーク設置

サイドヨークは、田無核物理研究所時代は、表2のサイドヨークのみであったが、KEK 北カウンターホールに移設された際、スペクトロメータとしてギャップを拡げ、ヨーク黄が付加された。さらに今回ハドロン実験施設の high-p のスペクトロメータとしては、円錐型の上下ポールオレンジを付加するため、ギャップを拡げざるを得ず、サイドヨークオレンジ(高さ 460mm × 2)が付加された。位置決めピンのない3個(サイドヨーク、黄、オレンジ)のサイドヨークを精度よく組み立てるため、分解する前に予め垂線を引いておき、その線を目安としてサイドヨークを組み立てた。最終的には、磁極側になる面について、基準となる鉄ブロックを押し当てて合わせ面を調整し、段差のないように組み立てた。

下ヨークとサイドヨークのX方向については、ビーム中心から、サイドヨーク内面の寸法をケガキ、ケガキにサイドヨーク内面端を合わせた。また、サイドヨークのZ中心については、図7の矢印のように、サイドヨーク上面が見える位置に南北に望遠鏡を置き、サイドヨークの上面の Z 中心ケガキと、側面のZ中心ケガキ、下ヨークのZ中心を合わせた。サイドヨーク設置精度は、下ヨークを基準として、0~0.1mm、サイドヨーク間距離は、3898.5mm に対し、0~+0.2mm で設置できた。

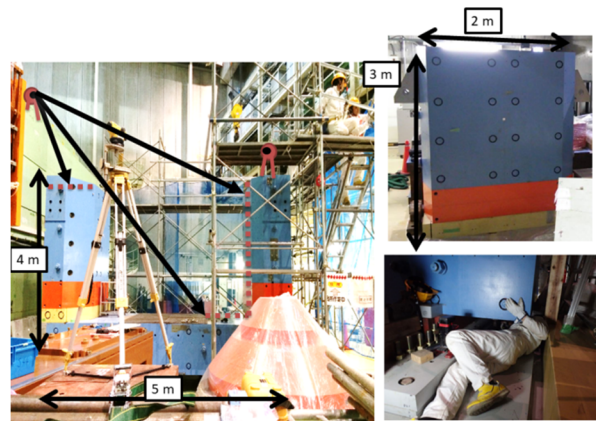


Figure 7: Installation of the side yokes.

3.3 ポール組立

ポールについては、北カウンターホールのスペクトロメータ時代に、高さ 399mm, φ 2120mm 円形(青色)と高さ 306mm φ, 1760mm の円形(黄色)の組み合わせとして使用していたが、今回、high-p 実験からの要請で、円錐型のポールオレンジを付加することになった。円柱の場合は、それほど精度は必要ないが、円錐になったことで、中心を精度よく合わせる必要がある。また、ヨークとポール青の間でピン勘合になっているため、ポール青で上下ヨークとのビーム中心が決まってしまう。よって、少なくともポール青とポールオレンジの中心を精度よく合わせる必要があった。そこで、ポール青については、あらかじめ上下ヨークとのピン勘合しているときにケガキ線を東西南北の十字にとっておいた。ポール黄・ポールオレンジについては、十字にケガキ、ポール青・ポール黄・ポールオレンジを十字に合わせることにした。下ポールは、図8のようにポール青についてレベルを出し、ポール黄・ポールオレンジを載せ、東西南北に望遠鏡を置き、ケガキを合わせた。クレーンで荷重を抜き、4方向に鉄ブロックを置き、鉄ブロックを重りとしてジャッキボルトで押すようにしたが、円なので、調整が非常に難しかった。上ポールの場合、図9のように上下が反転する形で、調整を行った。

上下ポール組立精度は、図8, 9の右図のように、レベルは 0+0.1mm、東西南北精度は、ともに±0.4mm 以内で合わせることができた。

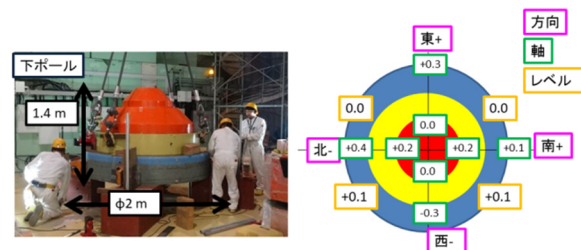


Figure 8: Alignment of the bottom poles.

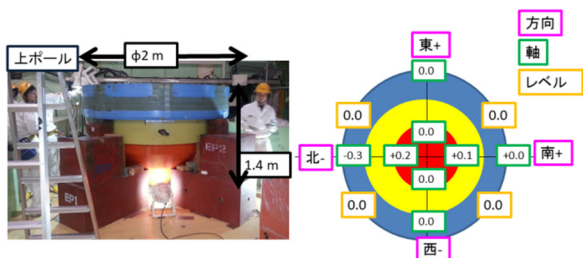


Figure 9: Alignment of the upper poles.

3.4 下ポール・ヨーク位置合わせ

3.3 で組み立てた下ポールを下ヨークにピン勘合でインストールした。X方向はピンで精度よく合わせられるが、Z方向は自由度がある(図10左下参照)。ポールオレンジの磁極中心には、 $\phi 10$ 深さ 15mm の孔があいていたので、図10の中央下に示すような嵌め合い $\phi 10$ の、中心にケガキを引いたアルミ棒を立てて、先端ケガキと、下ヨークのZ中心線を望遠鏡で合わせた。どの位置から見てもケガキが中心を示すように、アルミ棒の先端のケガキは半割とした。

最終的にビームライン中心と Z 方向中心を測定したところ、図10右のようになり、ここまでで $\pm 0.3\text{mm}$ の精度で設置できた。同時に、サイドヨーク、ポールの組み立てた段階での相対的なレベルも測定しており、 $-0.1 \sim +0.4\text{mm}$ の範囲で設置できた。

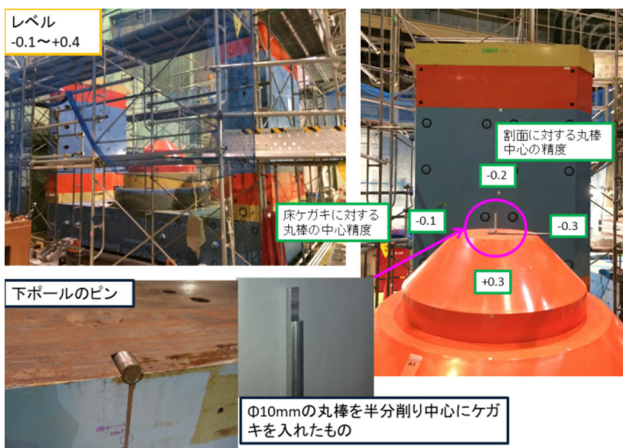


Figure 10: Install of the bottom poles.

3.5 上ポール・上ヨーク・上コイル

上ヨークは、下ヨークと作りが同じで、幅 5395mm × 500mm × 830mm、重量が約 15 トンの鉄ブロック4本から成る。ただ、下ヨークと下ポールの場合、下ポールを下ヨークの載せるだけのピン勘合であったが、上ヨークと上ポールは上ヨークを貫通したピンを上ポールに差し込む構造となっている。よって、次の手順で組立を行った。

1. 下コイルを設置。上コイルを下コイルの上に乗せておく。図11に上コイルを示す。表2の通り、コイ

1. れは、 $\phi 2588\text{mm}$ 、高さ 300mm の円形のコイルで重量は 2.5 トンであり、3層構造となっている。
2. 上ポール(約 24 トン)を支えるための治具を組み立てる。治具上に上ポールを載せサイドヨークのZ中心とだいたい合うように上ポールを合わせて置いた(図13)。
3. 上ヨークのZ中心に近い2本をサイドヨークのZ中心を合わせて設置し、サイドヨークとボルト固定する。
4. その状態で、上ポールを、上ヨークのサイドからクレーンで吊り、ぶら下げるようにして、上ヨークを貫通するピンを上ポールに差し込み、ピン勘合する。その後に、上ヨークからの貫通したボルト止めを行う。
5. そして最後に残りの2本のヨークを設置し、上ポールを完全に固定する。
6. 上ポール支え治具を解体する。
7. 上コイルを吊り、コイル押さえで上ポールに固定する。

ここで難しいのは、組み立てた上ポールの総重量は約 23 トンであり、これを一時支える治具を製作しなければならない。さらに、下ポールとコイルがついている状態で、治具を設置しなければならない。そこで、350mm × 150mm × t24mm の I 型鋼で、3000mm × 2000mm の枠を作り、下ヨークに4本の足を立てて支えとした。また、円錐ポールになったということもあり、上ポールを支えるフラットな面が限られ、青ポール $\phi 2120\text{mm}$ と黄色ポール $\phi 1760\text{mm}$ の間の180mmのリング状の面積に対し、同じく I 型鋼を、枠に組み立てポールを支えるようにした。さらに、上ヨーク、上ポールを組み立てた後に、最後に鋼材を外せるような構造にした。図12に治具図面の側面図を示す。

ポールと上ヨーク、ポールと下ヨークは、位置決めピンで相対位置が決まるので、サイドヨークと上下ヨークの設置精度で、ポールの位置精度は決まる。最終的な上ヨークの、ビーム中心、Z方向中心の位置精度は、図14の通りになり、X方向ビーム中心は、Z方向ヨーク端で $-0.2+0.2\text{mm}$ 、Z方向中心は、ヨーク端で $\pm 0.0\text{mm}$ となった。



Figure 11: Upper coils.

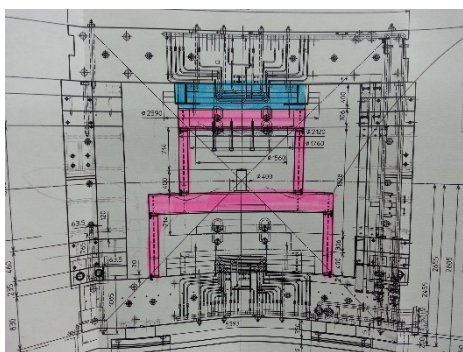


Figure 12: The front view of the pole support.

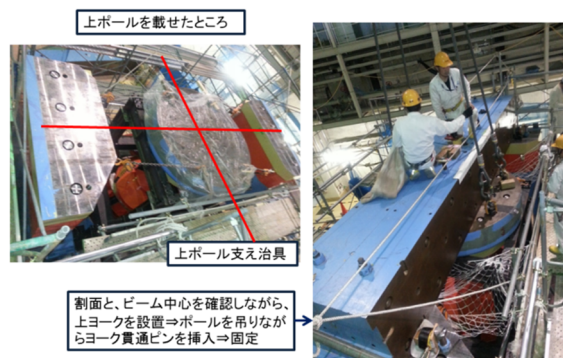


Figure 13: Installation of the upper yokes, and the upper poles.

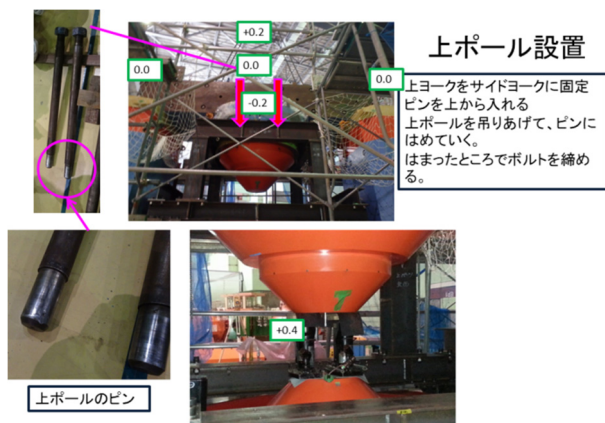


Figure 14: Pin between the upper pole and the upper yoke. And alignment of the upper poles.

4. まとめ

幅約5m、奥行き約2m、高さ約5m、総重量約336トンのFM電磁石について、目標±1mmの設置精度を目指し、移設を行った。工事期間約5か月に渡って、主要な部品26部品に対し、1つ1つを組み立てるごとに、ビーム軸、Z軸、レベルを確認しながら注意深く組み立てていった。

最終的な設置寸法を測定したところ、以下の通りとなった。

- ビーム高さ:
高さ寸法 2500mm に対し、
-0.1~+0.4mm
- X方向ビーム中心:
床ケガキ線に対し、
ヨーク上流端で、+0.3mm
ヨーク下流端で、-0.3mm
+は南側、-は北側を示す。
- Z方向中心:
床ケガキ線に対し
ヨーク南端で-0.6mm
ヨーク北端で-0.4mm
-は上流側を示す。
- 上下ポールのギャップ寸法:
φ400mmの円の東西南北端を測定し、それぞれ基準寸法400mmのギャップに対し、
+0.40, +0.32, +0.38, +0.36[mm]
- サイドヨーク間距離:
サイドヨーク間寸法 3898.5mm に対し、
0~+0.2mm

ビーム高さについては、床が1mm程度沈むことを予測して高めに組み立てていったところ、いいところで、落ち着いてくれた。

図15のように、幅約5m、奥行き約2m、高さ約5m、総重量約336トンの大型電磁石に対し、X、Z方向中心、ギャップ共に目標精度よりもよい精度で設置することができた。

今後は、この電磁石の詳細な磁場測定を行い、実験機器を取り付けていく予定である。



Figure 15: Installation of the FM magnet for the high-p beam line.

参考文献

- [1] H. Takahashi, Nuclear Physics A 914 (2013) 553-558.
- [2] <http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac0606/pdf/p16-Yokkaichi2.pdf>
- [3] M. Sekimoto *et al*, Nucl. Instrum. Meth. A516 (2004) 390-405.