

SuperKEKB 主リング電磁石製作に於けるトラブル報告

PROBLEMS WITH NEWLY FABRICATED SUPERKEKB MAIN RING MAGNETS

大澤康伸^{#,A)}, 飯沼裕美^{A)}, 江川一美^{A)}, 増澤美佳^{A)}

Yasunobu Ohsawa^{#,A)}, Hiromi Iinuma^{A)}, Kazumi Egawa^{A)}, Mika Masuzawa

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

We report on some problems that were found with magnets that were newly fabricated for the SuperKEKB Main Ring. A large quantity of grease was discovered in the flow switches of the wiggler magnets. The same type of grease was also found to be present at every connection point of the cooling pipes for the wiggler magnets. Lamination gluing defects were also found in some wigglers and steering magnets. A description of these problems, along with some lesser issues discovered, are reported in this paper.

1. はじめに

KEKB は 2010 年 6 月に実験が終了し、現在ピーククルミノシティを 40 倍に増強する SuperKEKB 加速器完成に向けて建設工事が進行している。SuperKEKB 主リングでは大部分の電磁石が KEKB から再利用されるが新規製作されるものも多数ある。新規製作する電磁石は水冷式のものだけでも陽電子リングアーク部偏向電磁石の約 100 台、ウィグラー電磁石の約 170 台などを含め合計約 400 台にも上る。この他に陽電子リングの真空パイプが幅広のアンテナチェンバー型になることから 200 台以上の空冷式垂直ステアリング電磁石が新規に製作された。この他にも例えば衝突点近傍の一連の電磁石群については現在設計、製作が進んでいるところである。このように多数の電磁石を国内だけではなく国外でも新規製作したが、グリス混入等のトラブルが発生してしまった。本発表では、情報共有を主目的に、我々が経験した電磁石製作時のトラブル及び対策について紹介する。

2. 電磁石冷却水関係トラブル

2.1 グリス混入トラブル

<混入発見までの経緯>

加速器の性能向上のために、既存のウィグラー電磁石より磁極長が短い 2 種類の電磁石を新規に製作した。既存の電磁石の 1 ポール分の磁極長を持つタイプをシングルポールタイプ(WS)と呼び、半分の磁極長を持つタイプをハーフポールタイプ(WH)と呼ぶ。新規に製作したウィグラー電磁石数は WS で 56(+予備 2)、WH で 112(+予備 2)台の合計 172 台である。これらのウィグラー電磁石設置場所は超伝導、

及び常伝導加速空洞が並ぶ日光直線部、大穂直線部である。この区間は空洞関係の冷却配管や導波管等との取り合いが複雑で、かつ電磁石間隔が狭いことから様々な機器が密集して設置されることになる。Figure 1 にビームラインに設置された WH 型ウィグラーを示す。上下にある矩形の銅板が電極となっている。この電極に床から電源ケーブルを接続するわけであるが上下の同じラインにフロースイッチやストレーナー等があり冷却水関係の保守作業がやりにくい構造となっている。そのため冷却水マニホールド部分からフロースイッチ及びストレーナーの移設を行なった。この移設作業に冷却水マニホールドからフロースイッチを外した際、Figure 2 にあるように大量の緑色の異物が発見された。

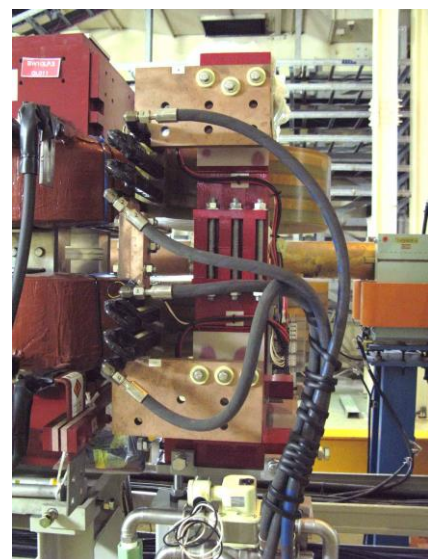


Figure 1: Newly fabricated WH type wiggler in the tunnel.



Figure 2: The location where the green object was found (top) and the contamination found inside (bottom).

<混入の割合と成分>

新規製作のウィグラー電磁石ほぼ全数のフロースイッチを調査したところ、汚染は全て WH タイプに集中していることがわかった。WH タイプの汚染状況を Figure 3 にまとめる。Figure 2 の写真にあるような大量の付着を赤で、全く付着していないものを青で、その中間の汚染を黄色で示した。WH の 3/4 以上が何らかの汚染をされていることがわかる。また WS のフロースイッチ部に汚染がなかったことから、これらの電磁石が複数の生産ラインで組み立てられ、それぞれの組み立てラインでの管理が徹底していなかったことが疑われている。

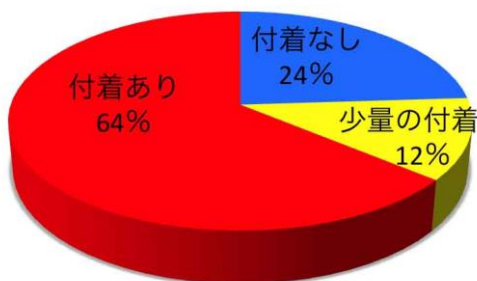


Figure 3: Contamination among the WH type wigglers. Red and yellow correspond to heavily and lightly contaminated WH magnets. Blue indicates WH magnets which are not contaminated. More than three quarters of the WH type wigglers are contaminated.

次に化学センターにてこの緑色の物質の化学分析を行った。試材を KBr 窓板に塗り液膜法にて赤外線吸収スペクトルを測定した。その結果を、Figure 4 に示す。このプロットの青色のスペクトルがフロースイッチ内で見つかった緑色の物質で、カルボン酸塩を含む飽和炭化水素に由来する吸収が見られる。これは一般的なグリス (Figure 4 の赤色のスペクトル) と良い一致が見られた。従って、混入した物質はグリスであると判断した。

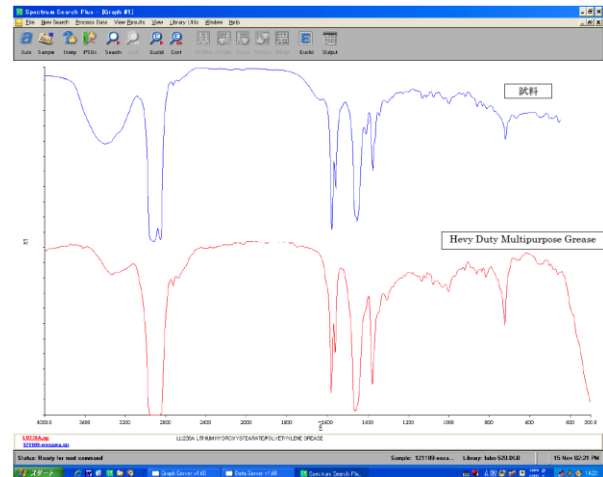


Figure 4: The spectrum of the sample (top) and that of standard grease (bottom).

このようなグリスが冷却水システムに大量に混入してしまった経緯について電磁石製造会社に問い合わせたところ、ステンレスネジの焼き付き防止に油を使ったとの回答であった。しかしながら、塗付してある場所はネジ部ではなく、金属面のタッチ面に塗られており、また Figure 2 にあるように配管内部にべっとりと大量に塗付けられていることから焼き付き防止のためという理由には納得できないものがある。

<ホロコン内汚染調査>

電磁石系冷却水システムにグリスが混入してしまった例については既に加速器学会等で報告を行っている。例えば、2003 年の KEKB 電磁石系冷却水システムで、ポンプのメンテナンス時にグリスが混入しその後の加速器の運転に大きな支障をもたらしたという経験がある^{[1][2]}。トンネル内に設置された電磁石は所内で磁場測定をしているため、一旦通水してしまっている。従って、今回のようなグリスが冷却水システム内で発見された場合には電磁石ホロコンを含めた配管系全ての洗浄をする事が望ましい。しかし既にトンネル内へ設置してしまった電磁石も多数あることから最初に汚染の拡大、つまりはホロコン内部への拡散程度を調べることにした。まずはウィグラー 2 台についてコイル内部にグリスが入っているかどうかの調査を行った。コイルをフッ素(HCFC)系洗浄剤 (アサヒクリン AK-225) で充填し一晩浸液後に排出された液体中の油分量を測

定した。廃液中の油分は 100cc 当り 0.3mg 程度と非常に少なくコイル内部への汚染はなかったものと判断した。

<口金部の汚染>

新型ウィグラー電磁石のコイルと冷却水マニホールドを繋ぐ部分にはゴムホースが使われているが、このゴムホースの口金部全てに於いて上記と同様のグリスが塗布されていることがわかった。1台の電磁石には4本のゴムホースが使われているので口金部の総計は 1376 箇所となる。ゴムホースについては溶剤を使用することができない。そこで、まず洗浄前に直径 2.4mm のファイバースコープを入れて内部の目視検査を行うことにした。ファイバースコープによる画像の典型的な例を Figure 5 に示す。左側が洗浄前のホースで茶色に映る汚れが付着している。これは電磁石の通水テスト等で油が流れその部分に冷却水の汚れや電磁石コイル等の銅の汚れなど付着しているのではないかとと思われる。



Figure 5: The photograph inside a hose. Before rinsing (left) and after rinsing (right).

ホースは容易にとり外すことができるので、口金部のグリス除去も兼ねて、ゴムホースの内部洗浄を行うこととした。洗浄液はゴムホースに影響を与えない物で、フッ素(HCFC)系洗浄剤同等の洗浄効果がある、中性高性能水系洗浄剤(エキストラ MA02)の 10%溶液で洗浄し内部をブラシでこすった。洗浄効果を見るために紫外線ブラックライトを口金部に照射し、口金部に油汚れの反応(青く光る反応)が出ないことを確認し洗浄作業を終了としたこの洗浄作業をホース全 688 本について行った。



Figure 6: Black light examination (left) and rinsing of the hose connection.

ホースが取り付けられているコイル側のグリスの除去も必要で、これについても同じく Figure 6 右側にあるようにトンネル内で洗浄作業をおこなった。

2.2 ゴムホースの口金トラブル

次にウィグラー電磁石のゴムホース洗浄作業の際に発見された問題について紹介する。Figure 7 の左側の写真はウィグラー電磁石に使われているゴムホースの口金部の金属のシールド(フェルール)が正しく装着されている場合である。ところが口金の中にフェルールが逆に取り付けられているものがあった(右側の写真)。図中矢印で示した部分のテーパの向きが反対で、このような状態でのメーカーで行う水圧テストを合格したこと自体が驚きである。塗り付けられているグリスの粘性で水漏れが止まっていた可能性も否定出来ない。このような口金は今のところ1本だけしか見つかっていないのは不幸中の幸いである。

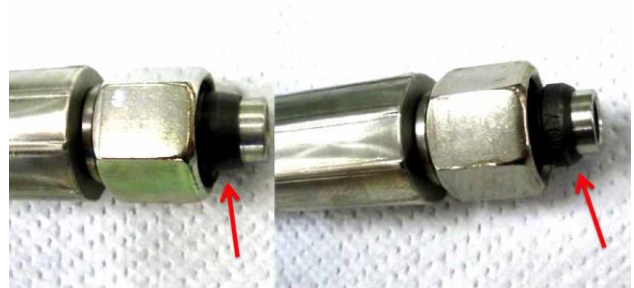


Figure 7: The hose connection part. The ferrule assembled properly (left) and wrongly (right).

また、このシールド面のかしめが不十分で洗浄作業中に脱落してしまう物が 100 個近くあった。口金装着及びかしめ作業の管理が甘いという印象が拭えない。その上口金部にすでに錆が発生しているものも数多くあり Swagelok 社の継手または同等品を使用する事という仕様を満たしているとは言えない様な品質である。

3. 電磁石積層板剥離

3.1 新規製作ステアリングの積層板剥がれ

LER リングでは、真空チェンバーがアンテチェンバーになるために、ワイド型の新型垂直ステアリングが製作され設置された。電磁石をリングに設置する際に電磁石の積層板の一番外側の1枚が剥がれている物が見つかった。Figure 8 に剥がれた積層の写真を示す。これについては製造会社(外国)へ連絡し、担当者が直ぐに調査に訪れ積層が剥がれている電磁石の台数調査を行ったところ。約 200 台のステアリング電磁石中4台にこのような目視で明らかに判る積層剥がれがみつかった。念のため、トンネル内に設置済みの電磁石全てについて打音検査も行い接着面に空隙があるかどうかの調査も行った。異音認められた場合には、積層面の間に薄いヘラを差し込み接着状態の確認を行った。

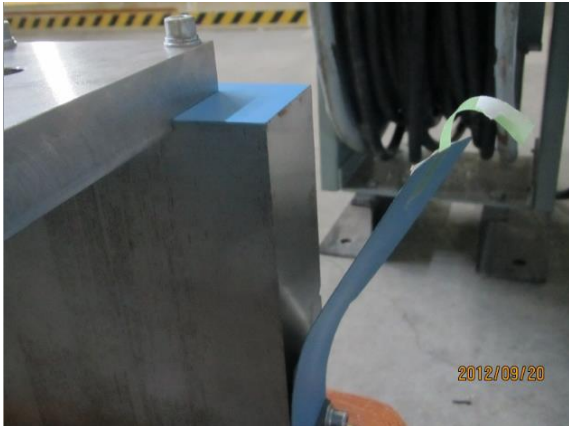


Figure 8: The laminate sheet peeled off from the magnet yoke.

積層剥がれを起こした電磁石の製造番号を調べてみると比較的初期に製作されたものであることが判った。外側の積層 1 枚だけは積層板の接着剤が両面塗られたものではなく片側だけに接着剤処理がされた物を使うことになっていたようであるが、未熟な作業員がその向きを間違えてしまったようであるとの説明を製造側から受けた。これら積層剥がれが見つかったステアリング電磁石についてはスペアと交換することにした。

3.2 ウィグラー電磁石の積層板剥がれ

ウィグラー電磁石を半割している時にも積層板剥がれが発見された。(Figure 9) メーカーとしての調査はなかったのでこの件に関しての原因は不明である。しかし、磁場的な性能上の問題はないと判断し、この電磁石をトンネルから出して修理することはしていない。但し、今後経年変化等で積層間のギャップが広がっていかないことをチェックしていく必要がある。



Figure 9: The laminate sheet peeled off from the wiggler magnet core.

4. 架台及び使用部品の問題

全ての電磁石は、架台の上に据え付けられ、架台の調整機構で、電磁石の高さ及び水平方向の位置や傾きの調整を行なう。今回製作されたウィグラー電磁石では、Figure 10 に示す様に電磁石の架台の高さ調整ネジ部分に通常のスパナが入らない構造となっていた。そのため、特殊に加工したスパナを用意し、位置調整を行った。しかしながら、角パイプの中に

高さ調整のボルトを入れてしまった作りのため、特殊に加工したスパナを挿入しても回転の振り角が極端に少なく、調整がとても困難なものになっている。このようなデザインでは電磁石据え付け作業に支障が出ると言わざるを得ない。



Figure 10: A wrench for turning a screw for adjusting the magnet height barely fits in the space.

この他にも、ウィグラー電磁石では、真空チェンバーを入れるために、上下で半割する構造に成っている。その上下のコイルを繋ぐ電力端子板のステンレスネジに、ノコギリで切ったような跡が付いている物が見つかった (Figure 11)。今の所このように大きく傷ついたネジは 1 本である。

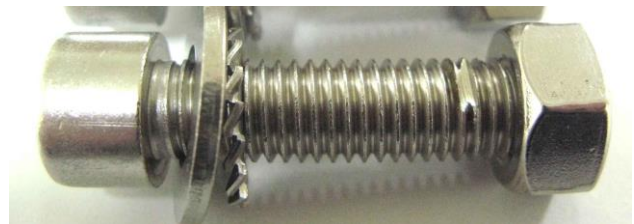


Figure 11: Wiggler bolt with some damage.

5. メインコイル電極面加工不具合

ウィグラー電磁石の電極面の作りも悪く、Figure 12 に示す様に、緑青が付いている物や面が荒れている物が多く発見された。表面が荒れたまま接続してしまうと接触不良が生じる可能性があることから端子面を砥石で磨いて汚れ、キズ等を除去してから端子板の再接続を行なった。

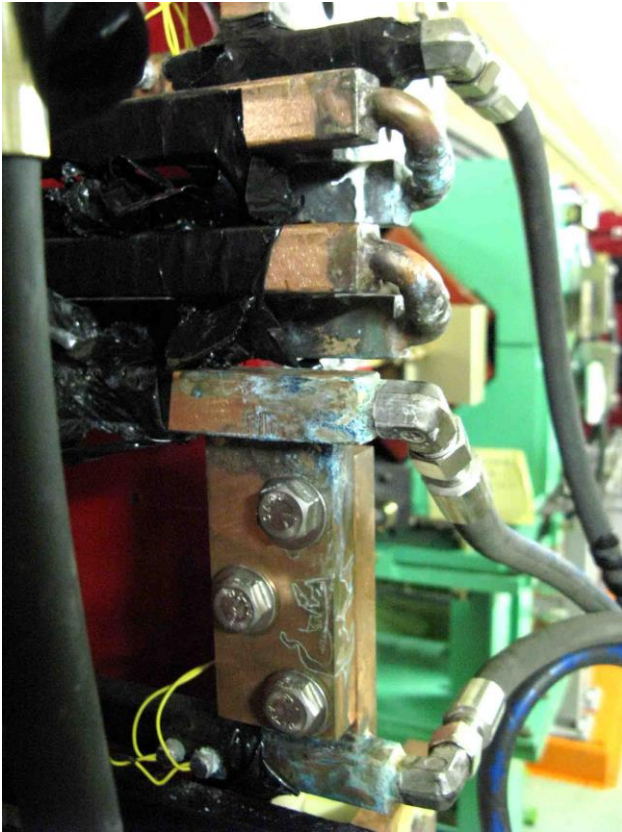


Figure 12: Corrosion found on the wiggler electrode plates.

6. まとめ

SuperKEKB 加速器の主リングに設置する新規製作磁石の不具合事例を報告した。冷却水配管まわりのグリス混入、冷却水用ゴムホース口金の装着ミスや、電磁石本体に付属する金属パーツやメインコイル電極面の不具合など、基本的な作業に関する不注意が目立った。これらのトラブルは国外のある一社で製作された電磁石で発見された。またこの他にも電磁石本体の積層板剥離が国外二社で製作された電磁石でそれぞれ見つかっている。幸い、磁石をトンネルに設置する際に不具合を発見し、適切な処置を行い、水際で被害を食い止めることができたが、想定外の作業が加わり全体の行程作業計画に少なからず影響が出た。今回の一連のトラブルは、我々が期待する磁石製造会社に対する作業の品質管理のレベルと、海外の製造会社の作業品質の実態に大きな開きがあったことに起因する。今後は、今まで以上に電磁石製造会社の設計責任者、工場担当者と綿密な意志疎通をとり、品質管理の徹底を目指す。我々自身も基本に立ち帰り、作業工程のひとつひとつを丁寧にやりたい。

参考文献

- [1] Y.Ohsawa, et al., “電磁石冷却水への油の混入”, 平成 16 年度大阪大学総合技術研究会
- [2] Y.Ohsawa, et al., “KEKB 電磁石冷却水の現状”, 第 4 回加速器学会年会、第 31 回リニアック技術研究会