

# 強磁場発生装置PRISM-FFAG電磁石の安全性について

有本靖、大木俊征、青木正治

大阪大学大学院理学研究科

平成 18 年 4 月 10 日

## 1 強度計算

PRISM-FFAG 電磁石は C 型のトリプレット FFAG 電磁石であり、総重量 19 トンである。F、D 磁極に共通の天板 (200 mm 厚) へ各磁極がボルトで締結されており、これを上下組み合わせで一台の磁石を構成する。上下の天板はリターンヨークとポールピラーによって結合されている。本電磁石の構造は、最大定格の電流をコイルに流した際の磁極間引力と磁石本体の重量を考慮して設計されている。強度計算には必要に応じて ANSYS などを使用している。強度計算の概要を以下にまとめる。

- メディアン平面上での磁場強度は最大 0.6T である。磁場勾配を持つため平気磁場強度はその半分以下となる。
- 磁極ギャップの吸引力は、F 磁極 25 トン、D 磁極 2 トンである。1 台の磁石には F 磁極 1 対、D 磁極 2 対あるため、合計で 29 トンの磁気吸引力となる。
- 天板と各磁極の磁気吸引力は F、D 磁極それぞれ 43 トン、16 トンとなる。天板と各磁極を締結するボルトの締めつけ力はそれぞれ 140 トン、31 トンであり、最大定格励磁のときに天板と各磁極の面圧を 20 気圧以上となるように設計している。これらは前述した磁極ギャップの吸引力よりも十分に大きいので天板と各磁極が分離することは通常あり得ない。
- 最大定格励磁のとき、F 磁極ギャップを支えるポールピラーの変形量は高々 0.06 mm 程度である。
- ポールピラーの無い D 磁極ギャップの変形量は 0.1mm 程度である。
- リターンヨークを貫通して上下を締結するスタットボルトの締結力は、磁気吸引力も考慮したときに磁極部の荷重モーメントよりも 3 割以上大きくなるように設計している。したがって、励磁のときにリターンヨークの上下締結部分が離れることは通常あり得ない。
- コイルの電磁力はコイルを天板へ押しつける方向へ働くので、コイルが磁極から外れることは無い。

以上の結果から励磁によって電磁石が破壊されることはないと考えられる。

## 2 漏れ磁界

電磁石を定格まで励磁した場合の漏れ磁場分布を図1及び図2に示す。磁場強度、1000 Gauss ではスパナ ( $S=125\text{cm}^2$  と仮定) への磁気吸引力は5 kgf 程度となり、磁石に吸引される可能性があり危険である。100 Gauss 程度まで下がるとスパナ ( $S=125\text{cm}^2$  と仮定) への磁気吸引力は0.05 kgf 程度にまで下がり、磁石に吸引されることはない。磁石を励磁するときには、図2で示した100 Gauss 以上の領域を内包するように「立ち入り制限区域」を設け、この立ち入り制限区域内にスパナ、ボルト等の固定されていない磁性体が存在しないことを十分確認する予定である。立ち入り制限区域はコーンポストを配置することによって表示する。また、本立ち入り制限区域は可能な限り10 Gauss 領域を取り囲むようにポールを立てることを検討している。

診療用MRI装置に関する許容静磁場強度の文献などを参照すると、10 Gauss 以下であれば、時計、クレジットカードなどの生活用品への影響を低減できる。また、K2エリアの外では5 Gauss 以下に十分減衰していると考えられるので、5 Gauss 以上で発生するとされているペースメーカーなどへの影響はK2エリアへ立ち入らない限り心配無いと考える。

図1: PRISM-FFAG 電磁石漏れ磁場

図2: K2 エリア内漏れ磁場分布 (電磁石中間平面)

## 3 安全装置と動作試験

本電磁石は、ビームチャンネルグループから借用しているDC電源 (TRANSREX MODEL ISR 2238; 260kW) を2台使用して、F、D磁極別々に励磁できるようになっている。電源の制御はローカルモードで行う。また、FとDそれぞれの系統に独立した赤色回転灯を設置しており、どちらの電源に通電されても容易に視認できるようにしてある。

電磁石を励磁するDC電源 (TRANSREX MODEL ISR 2238; 260kW) の外部インターロックへ本電磁石の異常検出信号を接続する。異常検出信号には、コイル出口での水温バイメタルスイッチ、および冷却水流量スイッチがある。水温バイメタルスイッチは、各コイルに直接取り付けられており、70度以上でスイッチが開いて異常を示す。また、流量スイッチは冷却水分配器に取り付けてある流量計に内蔵しており、あらかじめ設定した規定流量値 (60 l/min および 40 l/min の2系統) 以下でスイッチが開いて異常を示す。これらの異常検出信号をD、F磁極別々の系統でそれぞれ直列に接続し、リレーを介してそれぞれの電源の外部インターロックに接続する。

電磁石の励磁に先立って、本外部インターロックシステムの性能確認作業を行う計画である。まず目視と抵抗メータを併用してインターロック信号の接続検査を行う。次に動作試験を行う。動作試験は、数十Aの微小な電流を出力した状態で規定流量を下回る流量に冷却水を制限して

意図的に異常状態を作り出し、インターロックが作動して電源出力が遮断されることを確認する。出力遮断の確認は、電源本体に取り付けられた出力メーターを視認した上で更にクランプメータ等の電流計を用いて電磁石コイルに電流が流れていないことを直接確認する予定である。

## 4 初期励磁試験

最初に磁石を励磁するときには以下の手順で行なうことを検討している。

1. 初期励磁作業に関する特別なモニター等の準備
2. 励磁前通常点検
3. D コイルを段階的に 1000 A まで励磁する。  
電流値の上昇は、放射熱温度計によってブスバー結合部の温度を確認しながら慎重に行う。
4. F コイルを段階的に 1700 A まで励磁する。  
電流値の上昇は、放射熱温度計によってブスバー結合部の温度を確認しながら慎重に行う。
5. しばらく (10 分程度) そのまま様子を見る。
6. 周囲への洩れ磁場の測定。
7. F コイル電流をゆっくりと下げる。
8. D コイル電流をゆっくりと下げる。

### 4.1 初期励磁モニター

初期励磁に際し、以下のパラメータを常時モニターすることを検討している。()内は使用測量機器。

- コイル温度 (熱電対)
- F 磁極表面の磁場 (ホール素子)
- D 磁極表面の磁場 (ホール素子)
- ブスバー結合部の温度 (放射熱温度計)
- 上側 F 磁極表面の高さ (オートレベル)

## 5 安全管理

電磁石を励磁するとき、ならびに励磁したまま磁場測定を行うときには以下の方針で行う。

1. 励磁前通常点検を徹底する。
2. 磁場測定中はエリア内に測定者が常駐する。

なお励磁前通常点検は以下の手順で行う。

1. 立ち入り制限区域内の安全確認 (スパナ等の置き忘れ確認)
2. 冷却水確認
3. 立ち入り制限区域退避確認
4. 励磁作業は必ず二人で行う。一人が磁石を目視しながらもう一人が電源の操作を行う。