

# 真空チェンバー一体型多極電磁石の検討 R&D OF A VACUUM CHAMBER INTEGRATED MULTIPOLE MAGNET

岡安雄一 \*A)、深見健司 A)  
Yuichi Okayasu\* A), Kenji Fukami A)  
A)Japan Synchrotron Radiation Research Institute

## Abstract

We developed prototype of a vacuum chamber integrated quadrupole magnet for ultrahigh vacuum storage ring with narrow bore radius. Each magnet pole is separated and their tip parts are directly fastened onto the vacuum chamber with metal seals. Repeatability of the magnet pole coordinates are estimated through decomposition and assembling of the magnet. Out gas flow and the gas composition are measured and derived with baking process for ultrahigh vacuum. Magnet field gradient is derived with hole probe measurements and compared with numerical calculation with the finite element analysis.

## 1. 概要

SPring-8に限らず、蓄積リングの高度化検討項目として、水平方向エミッタンスを X 線領域における回折限界まで減少させる案が挙げられる。これを実現させるためには、多極電磁石の挟ボア径は避けて通れない。飽和を回避しながら、例として  $\sim 10000 \text{ T/m}^2$  程度の高磁束密度を実現する六極電磁石の設計開発として、磁極に SUY-0 などの汎用電磁軟鉄の代わりに、45% コバルト合金を用いたパーメンジュールを採用する検討を行ない<sup>[1]</sup>、コストの問題は未だ残るがモックアップでは要求性能を満たすことを確認した。

直線部の真空チェンバーについては、高コスト・メンテナンスの煩雑さを勘案し NEG コーティングの選択肢を排すると、一般的なアンテナ型チェンバーの採用に辿り着く。しかしながら、例として  $\phi 26 \text{ mm}$  程度の挟ボア径を想定した場合、強度・抵抗壁インピーダンス等を勘案した結果、アルミ、ステンレス等の汎用部材を採用する限りでは構造的に限界を迎える<sup>[2]</sup>。

挟ボア径電磁石及び超高真空対応チェンバーの双方を解決する処方箋の一つとして、我々は肉厚の真空チェンバーに直接磁極を埋め込む、真空チェンバー一体型多極電磁石の開発を行なっている。簡単な例として、我々は四極電磁石に真空チェンバーを埋め込んだ試作機を 2013 年 3 月に製作した。本稿では、この試作機の構造設計に加え、試作機を用いて 1) 実際の超高真空チェンバーを想定したベーキング処理を行い、チェンバー・磁極からの脱ガス量・分圧等の真空特性の測定・評価、2) チェンバー・電磁石の組立・解体を複数回行った場合の磁極座標の再現性評価、3) 磁場測定・組立誤差を勘案した磁場勾配への影響評価を行ったので、結果を報告する。また、実機のアライメント方法についての考察も併せて議論する。

## 2. 設計・製作

図 1 と表 1 に真空チェンバー一体型四極電磁石の構造図及び諸パラメータを示す。磁極長 100 mm の電磁石の磁極及びヨークは JIS C 2504 SUY-0 のブロック材を

採用し、ボア径は  $\phi 26 \text{ mm}$  である。無酸素銅製のコイルは磁極あたり 28 巻とし、電流 200 A における設計磁場勾配は  $65 \text{ T/m}$  である。

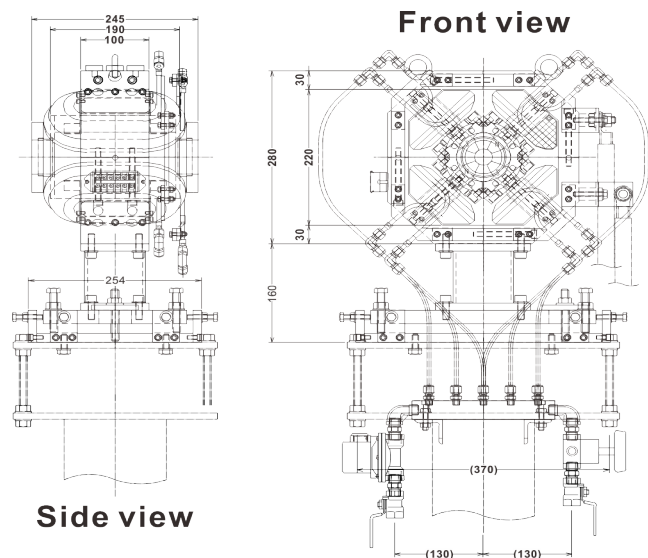


Figure 1: Schematic of the vacuum chamber integrated quadrupole magnet.

磁極は先端部を切離し可能な構造とし、磁極先端部とチェンバーの間にはメタルシール (U-タイトシール: 日井国際産業株式会社製) を挟み込む。メタルシールの外被材はアルミニウム、スプリング材はインコネルで外被外径は  $\phi 3 \text{ mm}$  である。チェンバーは両端を ICF114 とし、面間距離は 280 mm である。チェンバー内部及び磁極のシール接触面は #400 パフ研磨と電解研磨を施工した。また電磁石天面には、電磁石アライメント用レーザートラッカーの標的球 ( $\phi 38.0 \text{ mm}$ ) 3 台をマウントする。

電磁石部の寸法精度は、磁極口径及び対向・隣接磁極間隔寸法が、指定寸法に対し  $\pm 0.1 \text{ mm}$  以内、磁極長

\* okayasu@spring8.or.jp

Table 1: Parameters of the vacuum chamber integrated quadrupole magnet

電磁石	
ボア径	φ26 mm
磁極長	100 mm
磁場勾配	65 T/m (参考値)
コイル巻き数	28 ターン / 磁極
コイル寸法	6 × 3 (ホココン)
電流	200 A
重量	85 kg (架台を除く)
材質 (磁極及びヨーク)	JIS C 2504 SUY-0 ブロック
材質 (コイル)	無酸素銅
コイル流量	2.4 L/min
コイル圧力損失	~0.1 MPa
真空チェンバー	
フランジ	ICF114
フランジ面間距離	280 mm
材質	SUS316L

は指定寸法に対し ±0.5 mm 以内、対向・隣接磁極の磁極長方向位置偏差は 0.1 mm 以内とした。

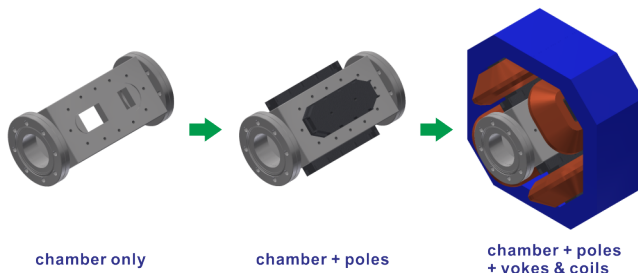


Figure 2: Schematical assembly process of the magnet.

真空チェンバーの加工精度については、JIS B 0419-cL とした。

真空チェンバー一体型電磁石の組立概要を図 2 に示す。真空チェンバーに設けたシール溝にメタルシールを設置し、計 4 台の磁極先端部をそれぞれ順に締結する。磁極先端部の大気側には、位置決めピンが 2 つずつ設けられている。磁極及びリターンヨーク、コイルは 4 分割ずつ 1 ユニットとして固定されているため、それぞれのユニットをチェンバー周りに 1 周するように、順に位置決めピンに合わせて締結する。

真空チェンバー一体型電磁石の分解・組立に伴う磁極の座標再現性を、宮城県立産業技術総合センターの三次元座標測定器 UPMC550 CARA (CARL ZEISS 製) を用いて行った (図 3)。この測定の実績は、測定した磁極座標の情報から電磁石の機械中心を導き出し、この機械中心と電磁石天面に設置したレーザートラッカー標的球 3 台の座標を関係付けることである。一旦真空チェンバー一体型電磁石を加速器に据え付けた後は、機械中心を外部から計測・評価し直すことは不可能であるため、レー

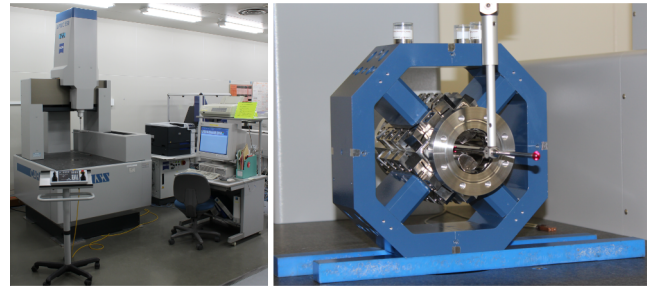


Figure 3: Three dimensional coordinates measurement for magnet poles by UPMC550 CARA, CARL ZEISS.

ザートラッカー標的球の座標を計測することで、電磁石の機械中心を精度よく把握することが可能となる。しかしながら本試験機は電磁石 1 台に真空チェンバーを組み込んだ場合であり、実際に蓄積リングへ導入検討した場合、例えば直線部では、複数台の電磁石の磁極先端部を真空チェンバーに締結することになる。磁極先端部の据付精度は、後に詳細を述べるが 40 μm 以内の精度が得られた。他方、電子パンチから見た磁極によるチェンバー内部の不連続性については、ボア径以下のベリリウム銅製円筒を半割りした構造の RF コンタクトを設置し、終端フランジ部で支持することにより、抵抗壁インピーダンスによる電子パンチに与える不安定効果に対処する。

真空チェンバー一体型電磁石の機械中心の定義方法は図 4 及び以下の通りである。

A) 平面 P1 の決定

磁極間隙面 (i5, i6, o5, o6) の 4 点で平面を定義。  
磁極間隙面 (i7, i8, o10, o7) の 4 点で平面を定義。  
上記 2 平面の対称要素 (中間平面) を計算し、平面 P1 とする。  
平面 P1 は  $x = 0$  を定義する。

B) 平面 P2 の決定

磁極間隙面 (i9, i10, o8, o9) の 4 点で平面を定義。  
磁極間隙面 (i11, i12, o11, o12) の 4 点で平面を定義。  
上記 2 平面の対称要素 (中間平面) を計算し、平面 P2 とする。  
平面 P2 は平面 P1 に直角とし  $z = 0$  を定義する。

C) 平面 P3 の決定

磁極間隙面 (i1, i2, i3, i4) の 4 点で平面を定義。  
磁極間隙面 (o1, o2, o3, o4) の 4 点で平面を定義。  
上記 2 平面の対称要素 (中間平面) を計算し、平面 P3 とする。  
平面 P3 は平面 P1、平面 P2 に直角とし  $y = 0$  を定義する。

D) 機械中心 (座標原点) は平面 P1、P2、P3 の交点とする。

磁極座標測定の手順は以下の通りである。

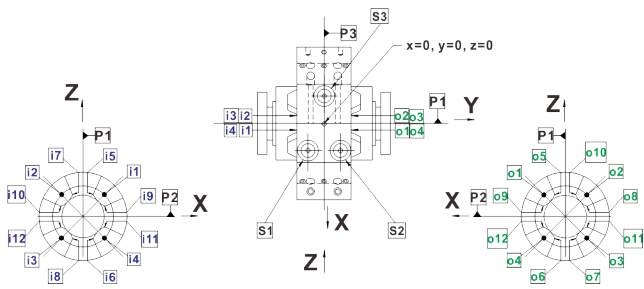


Figure 4: Coordinates definition of the vacuum chamber integrated magnet.

- 1) まず真空チェンバー・電磁石を組み立てる。
- 2) 三次元座標測定器プローブのキャリブレーションを行い、空間座標原点を定義する。
- 3) 各磁極断面の双曲線両端には  $x$  及び  $z$  軸と平行に機械加工面が設けてあるため、これらの面で  $x = 0$ 、 $z = 0$  面を定義する。
- 4) 磁極端 (入口 4 点 ; i1, i2, i3, i4, 出口 4 点 ; o1, o2, o3, o4) の座標から  $y = 0$  面を定義する。
- 5) 機械中心を定義し、2) で定義した空間座標の原点を機械中心座標に再定義する。
- 6) 電磁石天面に設置したレーザートラッカー標的球 3 台の中心座標を測定。
- 7) 電磁石・真空チェンバーを解体。

上記の手続き 1)-7) を 2 回繰り返す、機械中心及び標的球の座標を計測・比較した結果を表 2 に示す。座標再現性測定の結果から、電磁石の機械中心及び標的球の座標再現性は  $40 \mu\text{m}$  以内に収まっていることが判る。

### 3. ベーキング及び真空特性

次に磁極先端部を締結した真空チェンバーのベーキング処理、及び脱ガス・分圧特性について報告する。図 5 に、真空チェンバー排気系の構成図 (左)、及び実際のセットアップ (右) を示す。

真空チェンバーからの脱ガス量はオリフィス法で評価することとし、真空チェンバーとターボ分子ポンプ (150 l/s) の間にオリフィスを設置した。真空チェンバーとターボ分子ポンプの設計到達圧をそれぞれ順に  $1 \times 10^{-6}$ 、 $1 \times 10^{-8}$  Pa とし、オリフィスの径を  $\phi 4.6 \text{ mm}$  とした。真空チェンバーとターボ分子ポンプ直上流にはトリアコートヌードイオンゲージを設置し (順に Gauge1、Gauge2)、また Gauge2 と対向な位置に四重極型質量分析計 (Qmass) を設置した。真空系組立後にヘリウムリーク試験を行い、測定リーク量が  $1.3 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  以下であることを確認した。ベーキングは 7 時間かけて室温から  $140^\circ\text{C}$  に昇温し、その後 12 時間保持した後に降温した。図 6 にベーキング温度と真空チェンバーからの脱ガス流量の測定結果を示す。

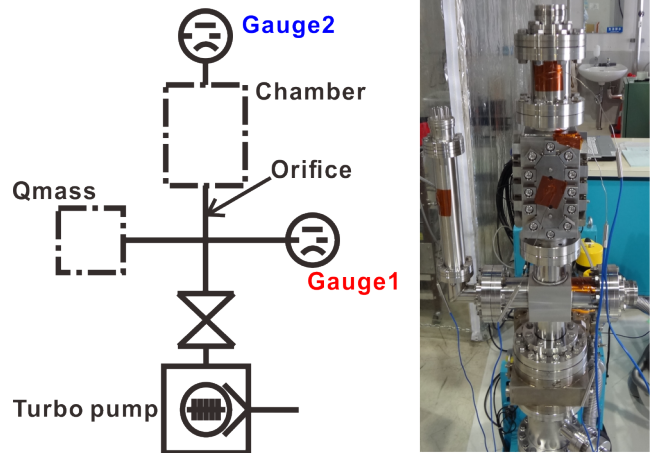


Figure 5: Schematic (left) and actual (right) vacuum setups for baking process.

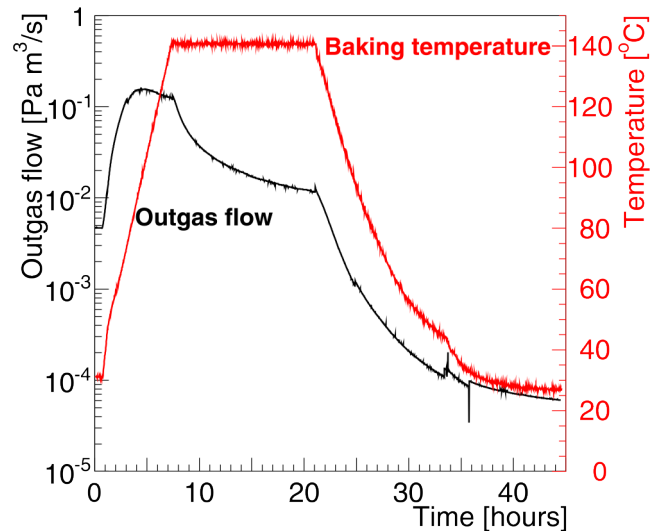


Figure 6: Measured pressure distributions depend on baking temperature.

ここで、脱ガス流量  $Q$  はオリフィスのコンダクタンス  $C$  と Gauge1、2 の圧力  $P_1$ 、 $P_2$  を用いて

$$Q = C(P_2 - P_1) \quad [\text{Pa m}^3/\text{s}] \quad (1)$$

で表され、 $C$  はオリフィスの断面積  $A$  [ $\text{m}^2$ ]、気体定数  $R$  [ $\text{J/mol/K}$ ]、真空チェンバー温度  $T$  [ $\text{K}$ ]、空気の平均分子量  $M$  [ $\text{g/mol}$ ] とで

$$C = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} A \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2)$$

で定義した。

また、ベーキング終了直後から 2 時間程度の各脱ガス組成の分圧平均値を図 7 に示す。使用した四重極型質量分析計はキャノンアネルパ株式会社製 M-101QA-TDM である。ベーキング終了後 2 時間後の脱ガス組成は、水素、水、一酸化炭素及び二酸化炭素が支配的であることが判る。

Table 2: Parameters of the vacuum chamber integrated quadrupole magnet

Unit [mm]	Mechanical center	Sphere 1	Sphere 2	Sphere 3
1st	$x = 0.0805$	$x = 49.7784$	$x = 49.6922$	$x = -50.2707$
	$y = -0.0844$	$y = -29.9709$	$y = 30.0142$	$y = -0.0192$
	$z = -0.1924$	$z = 165.2242$	$z = 165.2081$	$z = 165.0584$
2nd	$x = 0.0543$	$x = 49.8148$	$x = 49.7268$	$x = -50.2313$
	$y = -0.0872$	$y = -29.9464$	$y = 30.0349$	$y = -0.0024$
	$z = -0.1259$	$z = 165.2309$	$z = 165.2073$	$z = 165.0814$
Residual	$\Delta x = -0.0262$	$\Delta x = 0.0364$	$\Delta x = 0.0346$	$\Delta x = 0.0394$
	$\Delta y = -0.0028$	$\Delta y = 0.0245$	$\Delta y = 0.0207$	$\Delta y = 0.0168$
	$\Delta z = 0.0035$	$\Delta z = 0.0047$	$\Delta z = -0.0008$	$\Delta z = 0.0230$

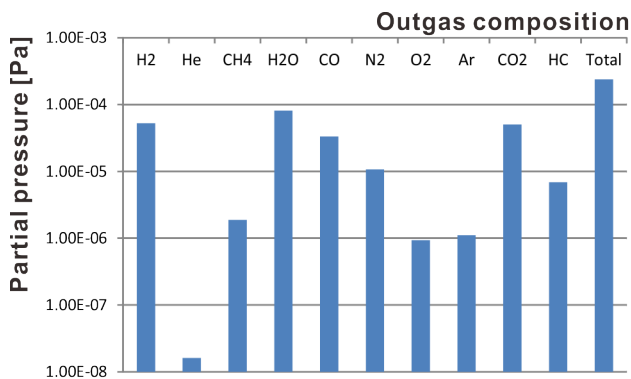


Figure 7: Measured partial pressure for the out gas composition.

#### 4. 磁場測定

真空チャンバーのベーキング及び真空特性試験・評価が問題ないことを確認した後、真空チャンバーを電磁石に組み込み、電磁石の通電・励磁試験及び、磁場測定を行った(図 8)。電磁石を架台に据え付けた後、ホールプローブ(3軸)の駆動通り芯を1台のセオドライト(Nikon 製 TOTAL STATION NST-305N; 精度  $\pm 9 \mu\text{m}$ )及び2台のオートレベル(Leica 製 GPM3; 精度  $\pm 1 \mu\text{m}$ )で定義し、電磁石の機械中心に対するアライメントを行った。続いてホールプローブ(駆動幅:  $1 \mu\text{m}$ (x, y 軸)、 $10 \mu\text{m}$ (z 軸))を電磁石のミッドプレーン上で3軸方向に独立に走査し磁場を測定して磁場中心を定義し、先に定義した機械中心と対応付けた。

図 9(上)に電磁石の機械中心から水平方向に 10 mm 離れた箇所での  $B-I$  カーブ測定結果を、図 9(下)にコイル電流 150、200、250 A について、磁束密度( $B_y$ )を測定・比較した結果を示す。定格とした 200 A では飽和の傾向が確認される。200 A における磁場勾配は 61.4 T/m である。また、図 10 にボア径内部における、磁場勾配分散の測定値と CST Microwave Studio / MAFIA による計算結果を比較した。有限要素法のメッシュサイズは  $40 \mu\text{m}$  に相当する。計算では第一象限の磁極先端のみを磁極延伸方向に対し垂直に  $-500 \sim 500 \mu\text{m}$  シフトした場合(図 10 上; h)と、平行に  $0 \sim 500 \mu\text{m}$  シフトした場合(図 10 下; v)を仮定して計算し、比較した。他

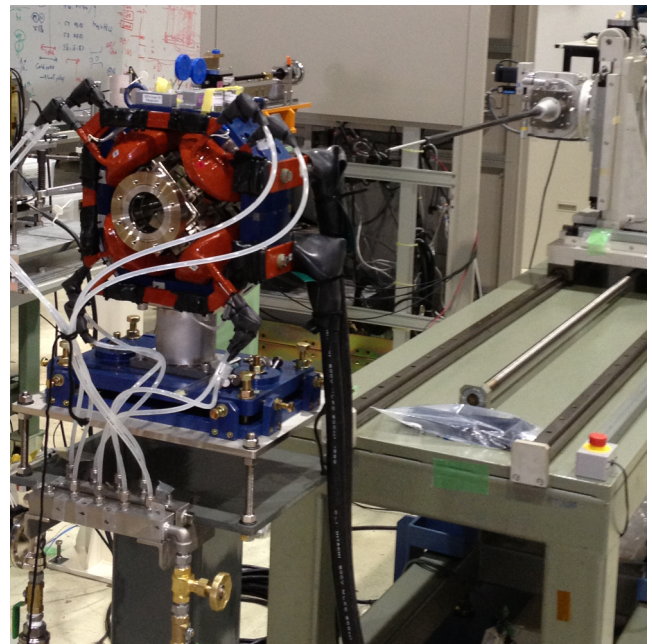


Figure 8: Overview of the magnetic field measurement setup.

方、測定した磁束密度から導出した磁場勾配分散を黒で上書きし、比較した。計算と比較する限り、磁場勾配分散の均一性の乱れは磁極先端部が磁極の延伸方向に対し、垂直にずれた場合の効果が大きいことが判る。また、計算では1台の磁極先端部のずれのみを評価しているが、測定値を参照する限り、実際には磁極先端部が磁極延伸方向に対し垂直にずれている可能性が高いことが考えられる。

#### 5. まとめ

真空チャンバー一体型四極電磁石を設計・製作した。電磁石の分解・組立を複数回行い、磁極先端部の座標再現試験を行った結果、 $40 \mu\text{m}$  以内の精度で座標が再現されることが判った。真空チャンバーと磁極先端部はメタルシールを介して締結し、ヘリウムリーク試験を行った結果、リーク量が  $1.3 \times 10^{-11} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  以下であることを確認した。超高真空仕様のベーキング処理を行い、

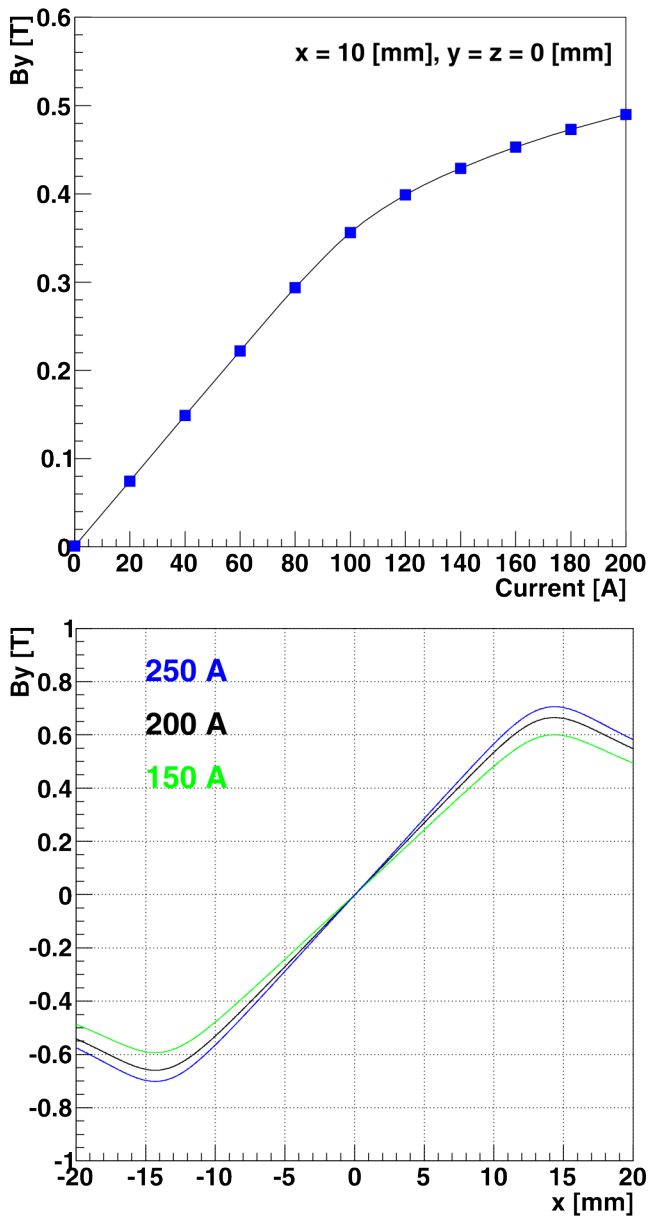


Figure 9: Measured magnetic field ( $B_y$ , upper) and the field gradient (lower) depend on excitation current.

脱ガス量及びその組成を評価した。

3軸ホールプローブを用いて磁場測定を行い、定格200 Aにおいてほぼ設計通りの磁場勾配 61.4 T/m が得られることを確認した。また測定に基づく励磁特性から、100 A 近傍から飽和が確認された。

有限要素法による数値計算を行い、1台の磁極先端部が磁極延伸方向に対して垂直、平行方向にずれた場合についての、磁場勾配平坦度を評価した。平坦度は磁極先端部が平行よりも垂直方向にずれた場合のほうが均一性の乱れに対する効果が大きいことが予測された。また測定値から導出された平坦度の分布は、計算値を参照する限り、磁極先端が磁極延伸方向に平行よりも、垂直方向にずれた可能性を示唆した。

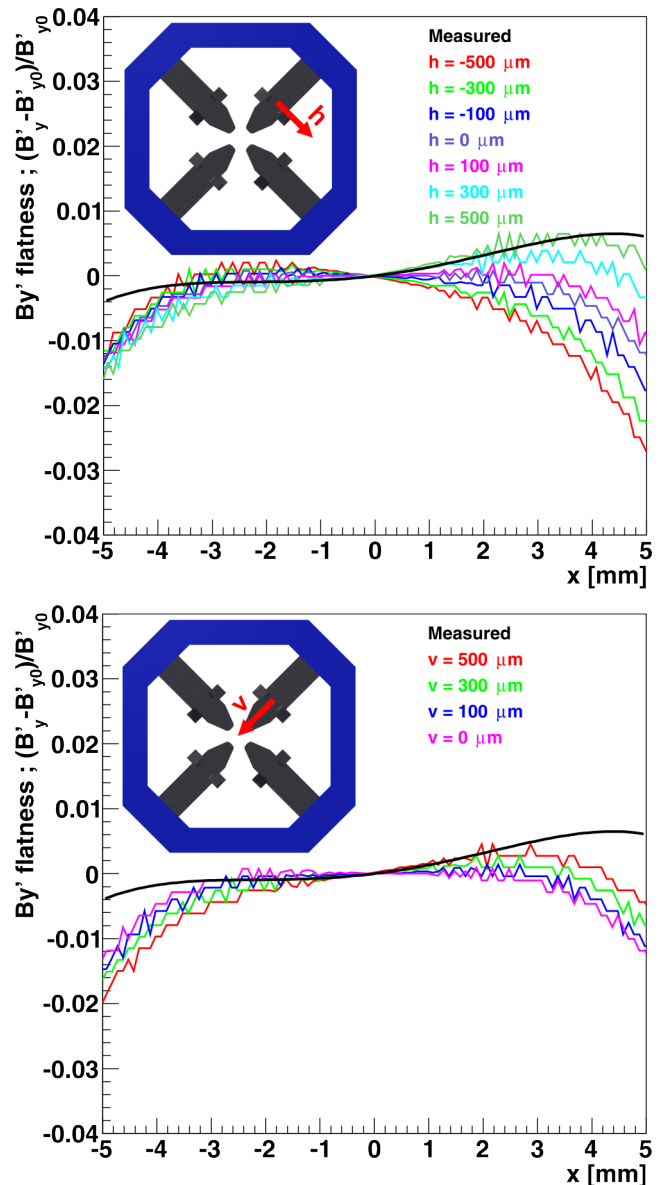


Figure 10: Magnetic field ( $B_y$ ) gradient deviation comparison between measurements and calculation. In calculation, only the first quadrant pole is shifted to horizontal (upper) or vertical (lower) direction by maximum 500  $\mu\text{m}$ .

### 参考文献

- [1] Y. Okayasu, et al., in *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsukuba, (2011), p371
- [2] Y. Okayasu, et al., in *Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Toyonaka, (2012), p785