

# QC1/QC2 磁場の計算

宮本 彰也

KEK

*E-Mail: akiya.miyamoto@kek.jp*

平成 12 年 6 月 2 日

改訂：6 月 7 日

## 概要

測定器シミュレーションに使用されている QC の磁場計算に幾つかの問題点があったので、磁極構造を改良して QC1 と QC2 の磁場の計算を行った。その結果をまとめる。

## 目次

1	はじめに	2
1.1	5 月 15 日版磁場の計算の問題点	2
1.2	B-H 曲線	2
2	QC1 の磁場	2
2.1	新しい QC1 の形状	2
2.2	新しい形状による磁場分布の特徴	6
2.3	磁場勾配の一様性	8
2.4	磁場分布	11
3	QC2 の磁場	15
3.1	新しい QC2 の形状	15
3.2	QC2 の磁場分布	15
4	磁場計算のための FORTRAN プログラム	20
5	まだ検討されていないこと	20
A	座標系について	24

# 1 はじめに

## 1.1 5月15日版磁場の計算の問題点

5月15日版の QC1/QC2 磁場の計算に問題があったので、再計算した。問題点は、

- QC1
  1. 鉄中の磁場が飽和していたので、必要な磁場勾配が得られなかった。そこで、計算結果に 25% を掛けてシミュレーション用の磁場としていた。
  2. 鉄 空気の境界面が  $\theta = 45^\circ$  の対称面に対して垂直ではなかった。そのために、矛盾した境界条件が使用されていた。
- QC2  
QC2 の外径が Compensation Coil の半径を越えてしまっていた。

これらの問題点を解決するために磁極形状を変更して磁場計算を行った。

## 1.2 B-H 曲線

これらの問題点を解決するために、磁場計算をやり直した。計算に使用した B-H 曲線を図 1 に示す。これらのデータは山岡氏から手にいれたものである。図より、SC6, SC7, Belle Iron の順で磁界の強さが小さくても強い磁束密度を生成できることが分かる。しかし、QC1 の中心付近の磁場は Pole Tip 磁場が 2 Tesla 近辺で生成されているので、この近辺では Belle -Iron と SC7 (Pure Iron) はほとんどないが、SC6 では 10% から 20% 高い磁束密度を生成できることが分かる。

これらの B - H 曲線を用いて磁場勾配を計算した結果を図 2 に示す。これにより、Belle Iron と Pure Iron はほとんど差がなく SC6 にすると 10 ~ 20% 程度磁場勾配が上がる事が分かる。SC6 と Pure Iron などとの差が B H 曲線のさほど大きくなるのは磁束が QC1 の中心部へ行く前に横に漏てしまう効果が大きいためと思われる。QC1 では 225T/m の磁場勾配を出さなくてはいけないのでこれでは不十分である。電流密度をさらに大きくすると、漏磁場がさらに大きくなるので現実的ではないと思われる。

そこで、Pole Tip を中心部へ近づけた形状について考えることにした。

# 2 QC1 の磁場

## 2.1 新しい QC1 の形状

QC1 の形状を決めるにあたって次のことを考慮した。

- QC1 の中心部で磁場勾配は 225 T/m となること。
- シンクロトロン光が QC1 の Pole tip をたたかないように十分な開口部があること。

田内氏が評価したシンクロトロン光の広がり大きさは表 1 の通りである。

この広がりを考慮して、QC1 の形状は図 3 に示すような形にした。キーポイントの座標値は表 2 に示す。図 3 において Beam の Crossing Angle は 8mrad および

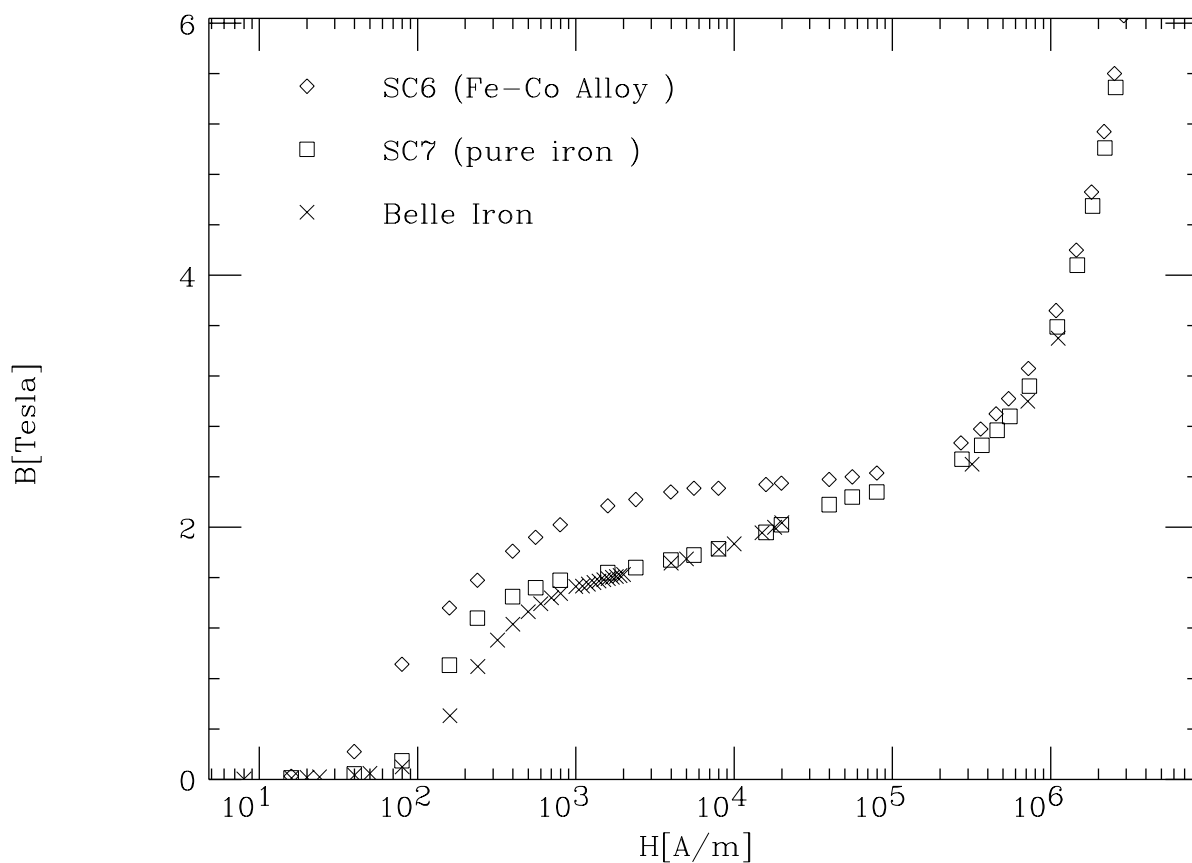


図 1: B-H 曲線。5 月 15 日版の計算では Belle Iron のものを使用していた。

表 1: QC1 領域におけるシンクロトロン光の大きさ (田内氏による)。単位は cm. QC1 入口は IP 側、出口はビームダンプ側を指す。

場所	横方向全幅 (x width)	縦方向全幅 (y width)
IP	0.56	1.12
QC1 入口 (z=200cm)	0.72	1.92
QC1 出口 (z=420cm)	1.04	2.24

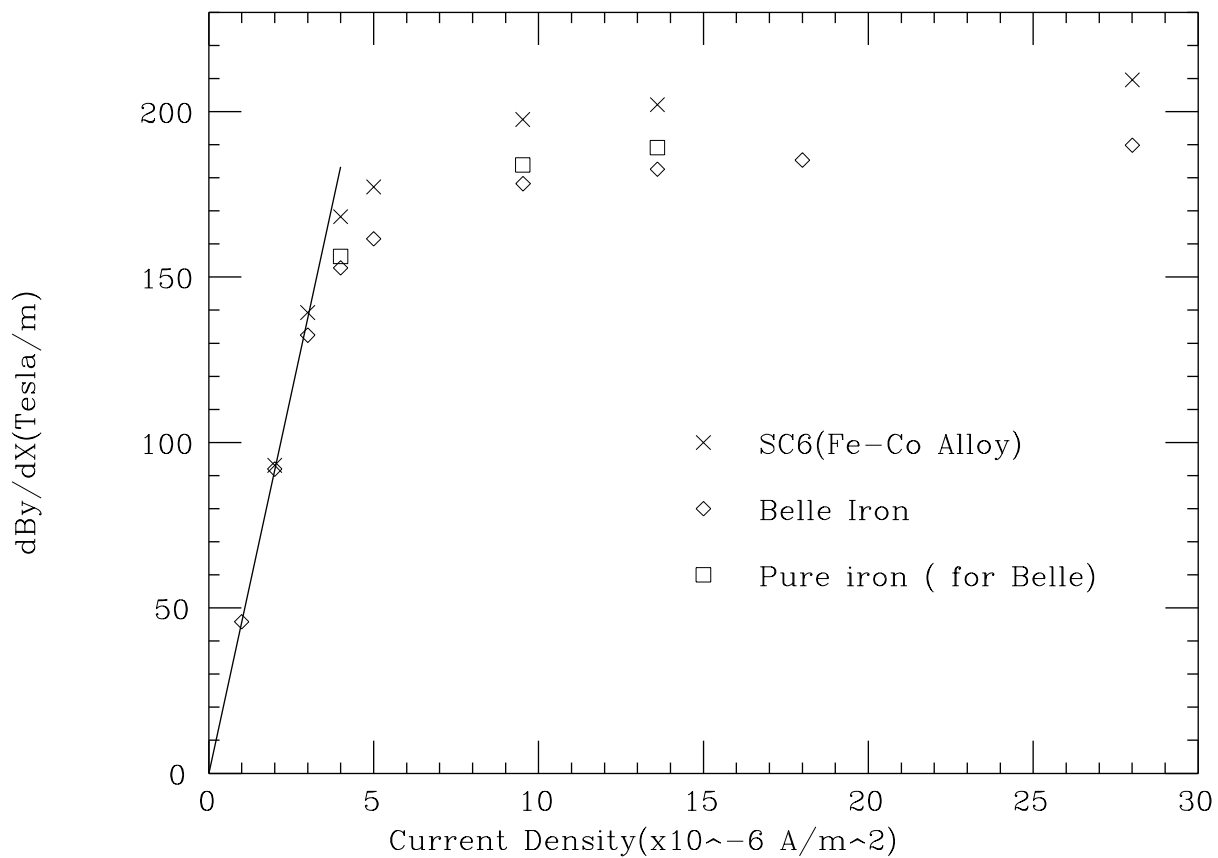


図 2: QC1 の電流密度と磁場勾配の関係。3種類の B-H 曲線の場合について比較した。

表 2: 新旧 QC1 Geometry の比較。P1~ P4 の QC1 Pole Tip 部での位置は図 4 に示す。

キーポイント番号	5月15日版	5月31日版
P1	(0.474,0.474)	(0.37,0.37)
P2	(0.85,0.26406)	(0.47,0.27)
P3	(1.0,0.26407)	(0.70,0.27)
P4	(2.0,1.0)	(1.6,1.1)

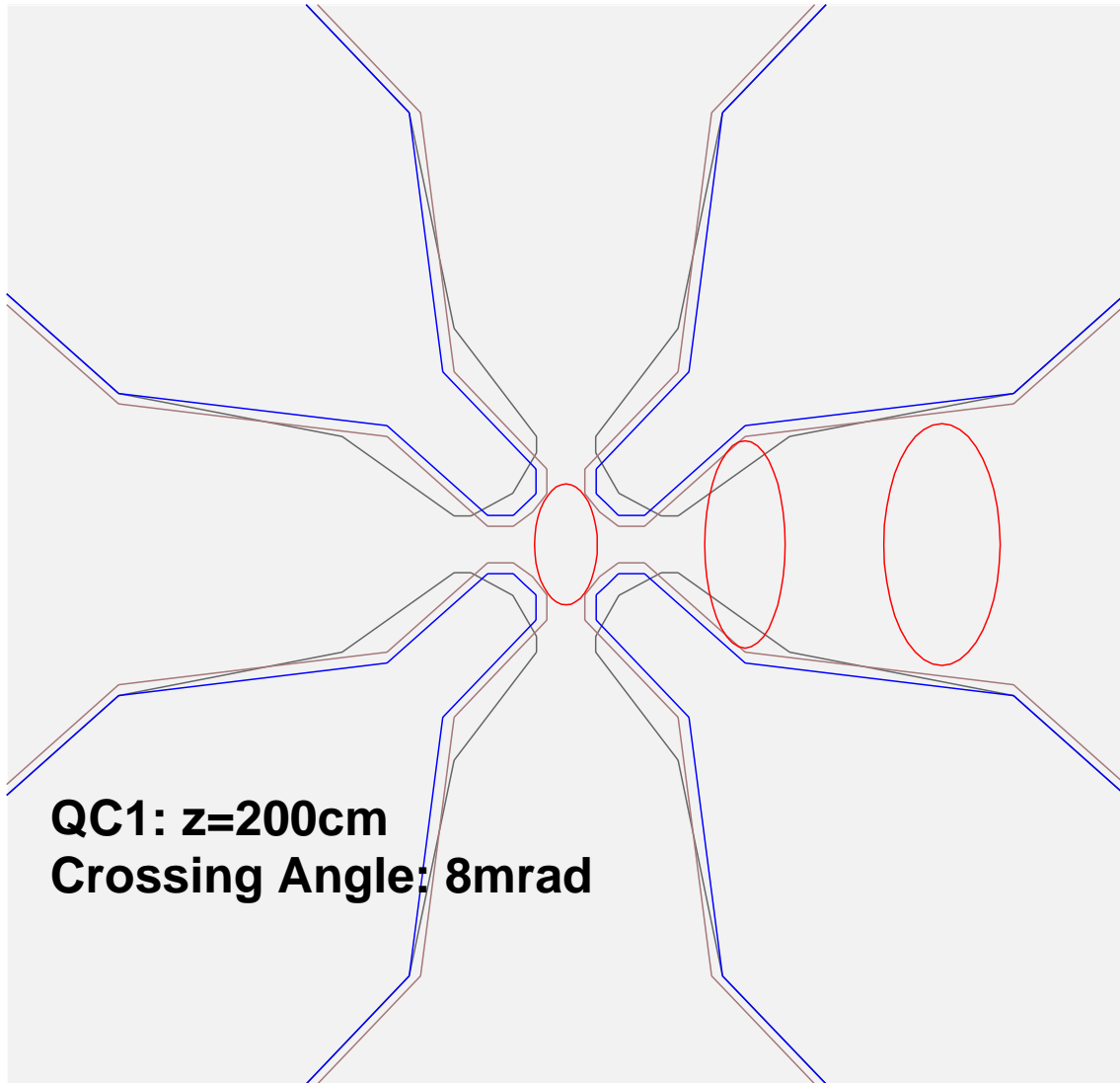


図 3: QC1 の Pole tip の形状。青線は新しい QC1 の Pole Tip, 灰色は古い Pole tip を示す。赤の楕円はシンクロトロン光の、IP, QC1 入り口及び出口での広がりを示す。シンクロトロン光と Pole tip の鉄との余裕を示すために、 Pole Tip から 1mm 離れた線を茶色で示してある。

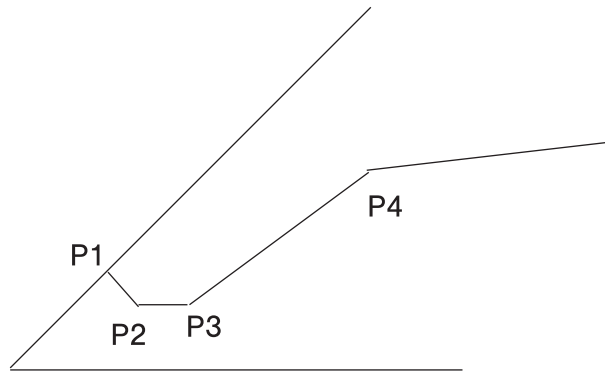


図 4: QC1 の Pole Tip 先端部のキーポイントの位置。表 2 に対応している。

表 3: 磁場分布の比較に使用した Pole tip 形状と磁場強度。キーポイント P1 ~ P4 に位置については図 4 を参照のこと

	5月15日版形状	菱形印のデータ	×印のデータ
電流密度 ( $\times 10^6 \text{ A/m}^2$ )	13.6	5	5
P1 座標	(0.474, 0.474)	(0.40, 0.40)	(0.40, 0.40)
P2 座標	(0.85, 0.26406)	(0.50, 0.20)	(0.50, 0.30)
P3 座標	(1.00, 0.26407)	(0.75, 0.20)	(0.75, 0.30)
磁場勾配 (T/m)	202.09	177.22	250.55

QC1 の入り口の点は  $Z=200\text{cm}$  にあるとして計算してある。

新しい形状では主に QC1 入口でのシンクロトロン光を避けるために、 $X=2\text{cm}$  近辺での開口部は大きくなった。一方、Pole Tip の先端はより内側にはいることになった。今までは半径約  $0.66\text{cm}$  であったが今回は、半径約  $0.52\text{cm}$  である。これにより、少ない電流密度でも高い磁場勾配が実現されている。

Pole Tip の形状により磁場分布がどのようにかわるかについても調べた。その結果を図 5 に示す。図より、Pole tip を中心に近づけると磁場勾配が増すことが分かる。また、P2, P3 を X 軸 ( $y=0$ ) に近づけると  $B_y$  分布のピークの値は増えるこれは磁極が X 軸に近づいた効果によるものと思われる。 $x > 2\text{cm}$  領域の分布は磁極の先端部を変えても電流密度が同じであれば変わらない。電流密度が  $13.6 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  の時には  $x = 3\text{cm}$  あたりに肩 ( $B_y$  の増加) がみられる。これは図 2 でも分かるようにこの電流では鉄心中の磁場が飽和しているために磁束が磁極先端部まで流れずに途中で漏出しているためであると考えられる。

## 2.2 新しい形状による磁場分布の特徴

QC1 の新しい形状の詳細は図 6 に示しておく。

新しい形状(表 2 によるもの)で計算した磁場分布を 5 月 15 日版の磁極形状で計算した磁場分布と比較して、図 7 に示す。どちらの計算でも  $B-H$  曲線としては SC6 (鉄-Co 合金) のものを使用した。5 月 15 日版磁極形状では電流密度  $13.605 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  で磁場勾配は  $202.09 \text{ T/m}$  である。新形状では電流密度  $6.7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  で磁

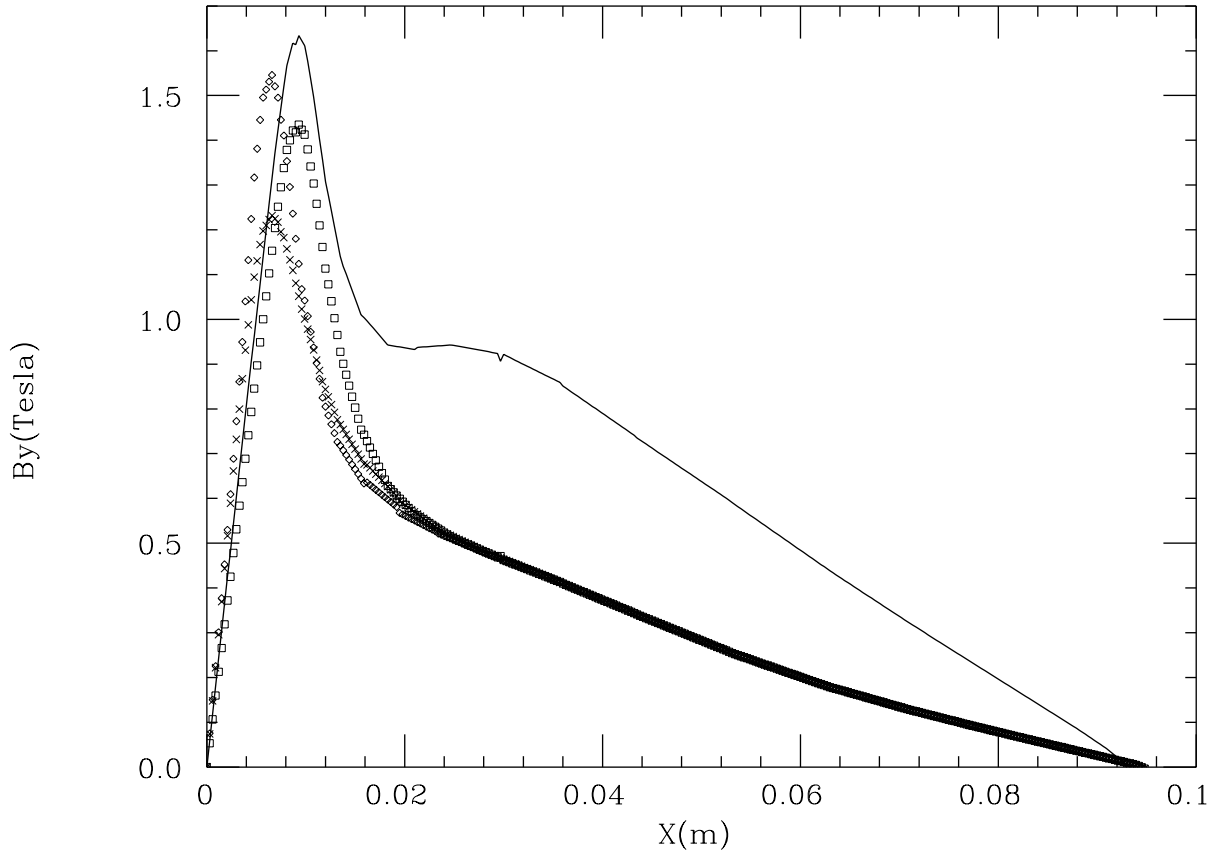


図 5: Pole tip 形状と x 軸上での  $B_y$  の値の関係。実践は 5 月 15 日版の磁場マップに使用した分布。電流密度は  $13.6 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。点の磁場は電流密度  $5.0 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  で計算した分布。四角の点は 5 月 15 日版と同じ形状、菱形と  $\times$  の点は表 3 に示した形状の場合の磁場分布。

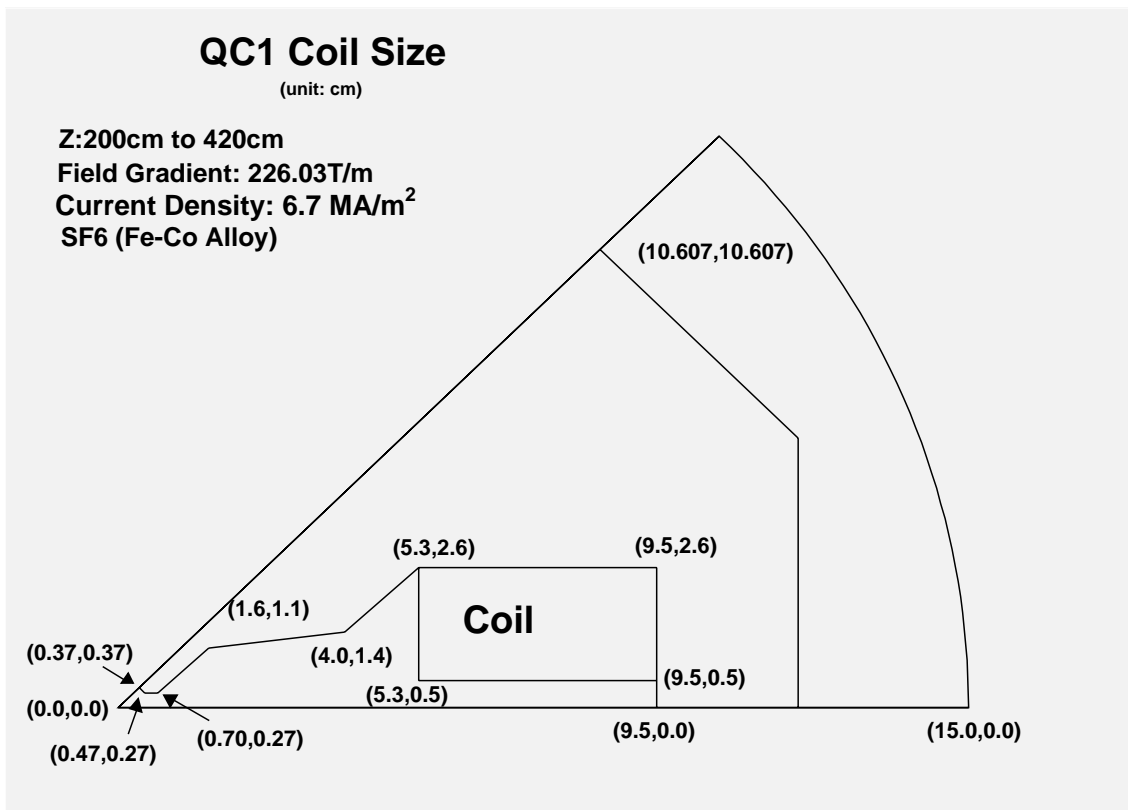


図 6: QC1 形状データ

場勾配 226.03 T/m である。この計算ではコイルの断面は 4.2cm×2.1cm としているので、電流としては前者は約 12kA·turn 後者の場合には約 5.9kA·turn である。前者の形状では磁束が飽和しているのだからこれ以上磁場勾配を上げるには電流密度はかなり上げなくてはならないが、後者の形状では、電流密度を  $10 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  にすることにより磁場勾配は 246.2T/m にすることができる。後者の形状の場合の磁場勾配と電流密度の関係を図 8 に示す。

### 2.3 磁場勾配の一様性

磁場勾配の非一様性を調べるために、 $0 < x < 0.1\text{cm}$  の範囲で x 軸上の  $B_y$  の値を直線でフィットして、各点の直線の値からのずれを調べた。図 9 に使用した  $B_y$  の値とフィットした直線を示す。フィットで得られた直線の式は

$$B_y(\text{Tesla}) = -1.908 \times 10^{-6} + 2.239x(\text{cm}) \quad (1)$$

であった。

図 10 には  $B_y$  の直線からのずれを示す。この図より、 $0 < x < 0.1\text{cm}$  の領域では磁場の直線性からのずれは  $0.3 \times 10^{-4}$  以下であることが分かる。なお、ANSYS の計算の際に、この領域でのメッシュの大きさは 0.02cm 程度にしているため、この直線性はメッシュの設定の仕方による人為的なものではないと考えられる。

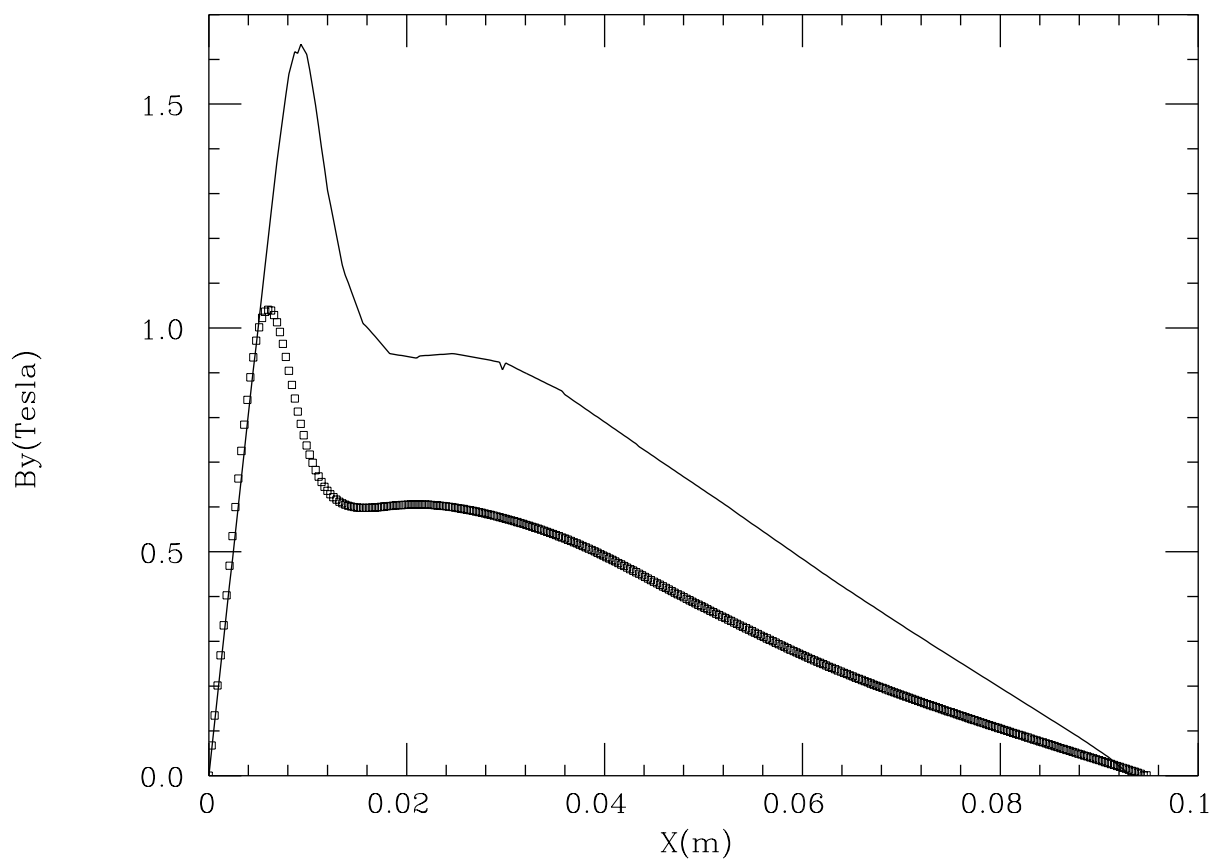


図 7: 5月15日版の磁極形状(実線)と新しい磁極形状(四角印)での磁場分布の比較。

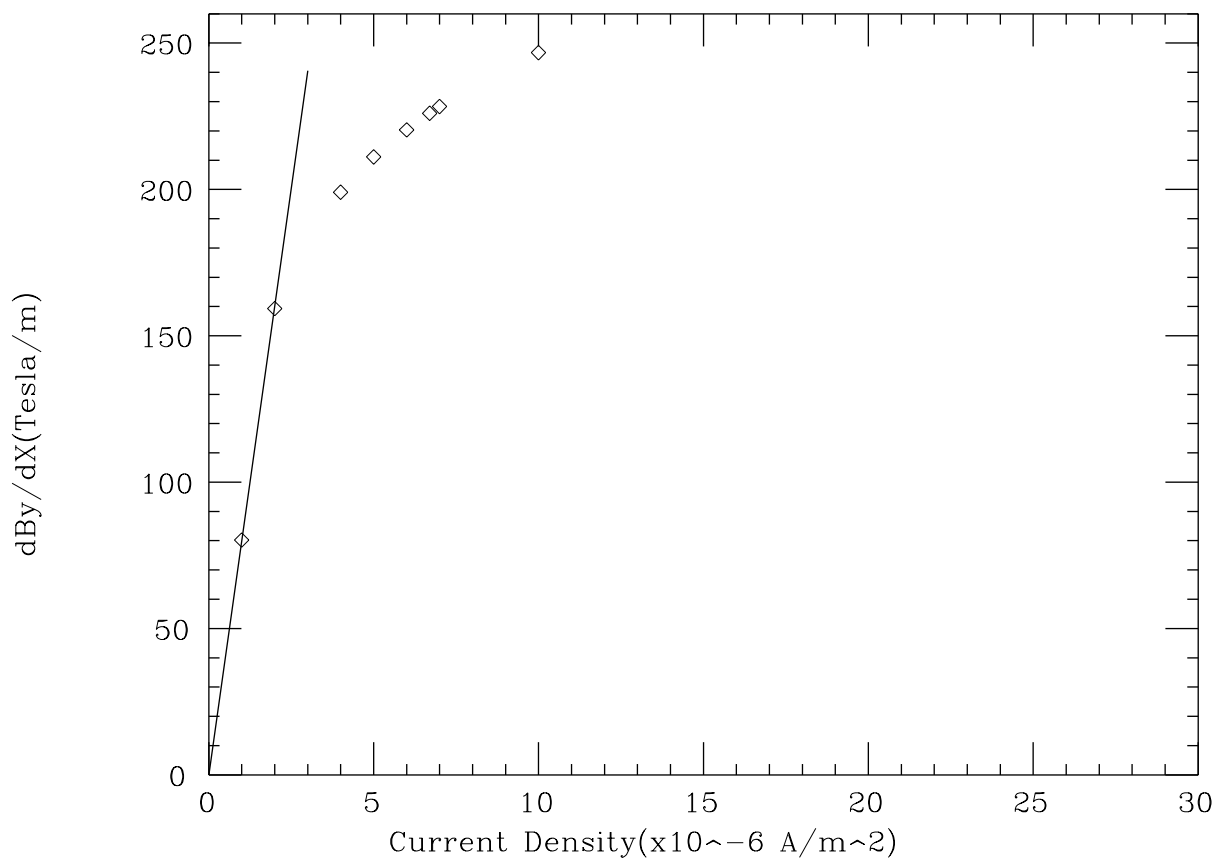


図 8: 新しい形状での磁場勾配と電流密度の関係。直線は  $1 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  を外挿した直線である。

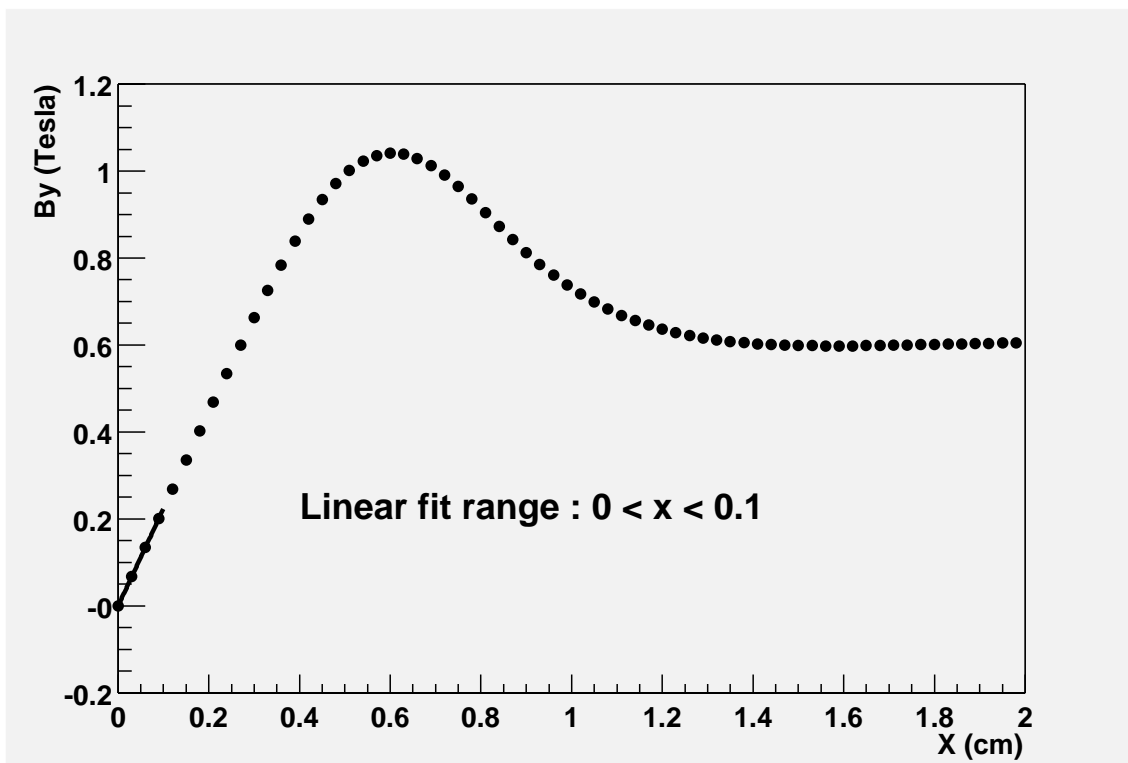


図 9: X 軸上の磁場の値とフィットした直線。

## 2.4 磁場分布

新しい形状での磁束の分布および磁場の強さのコントア-を図 11 と図 12 に示す。

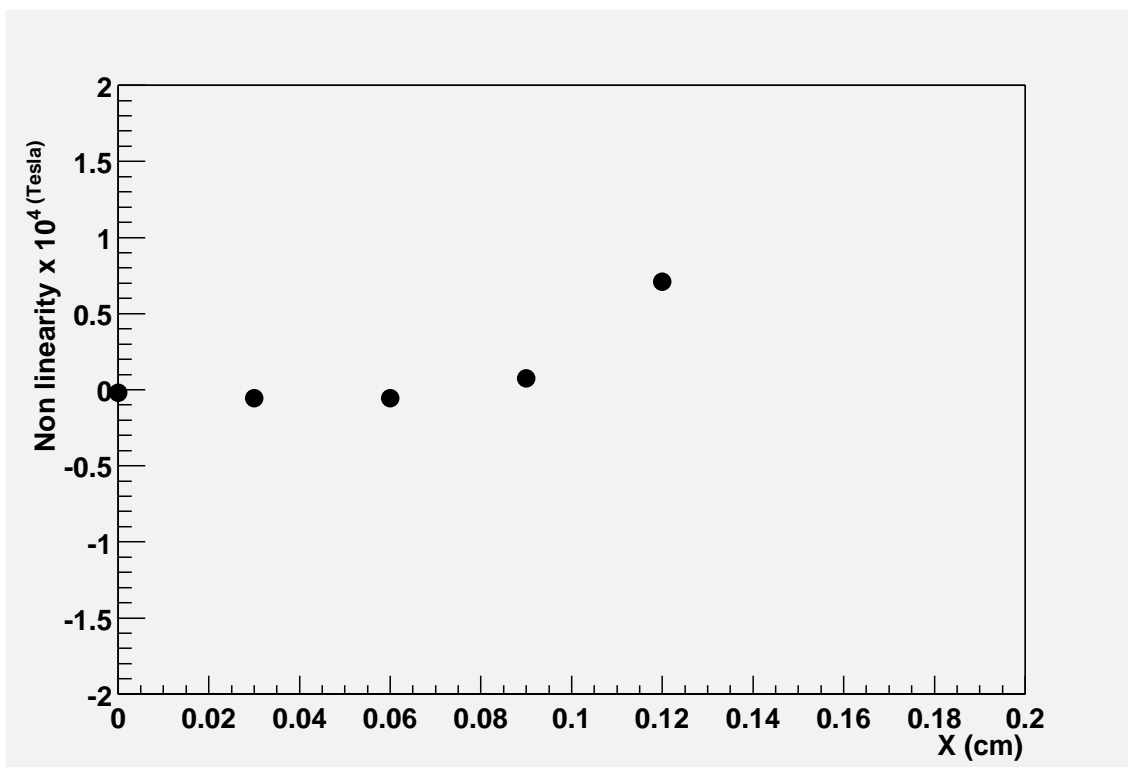
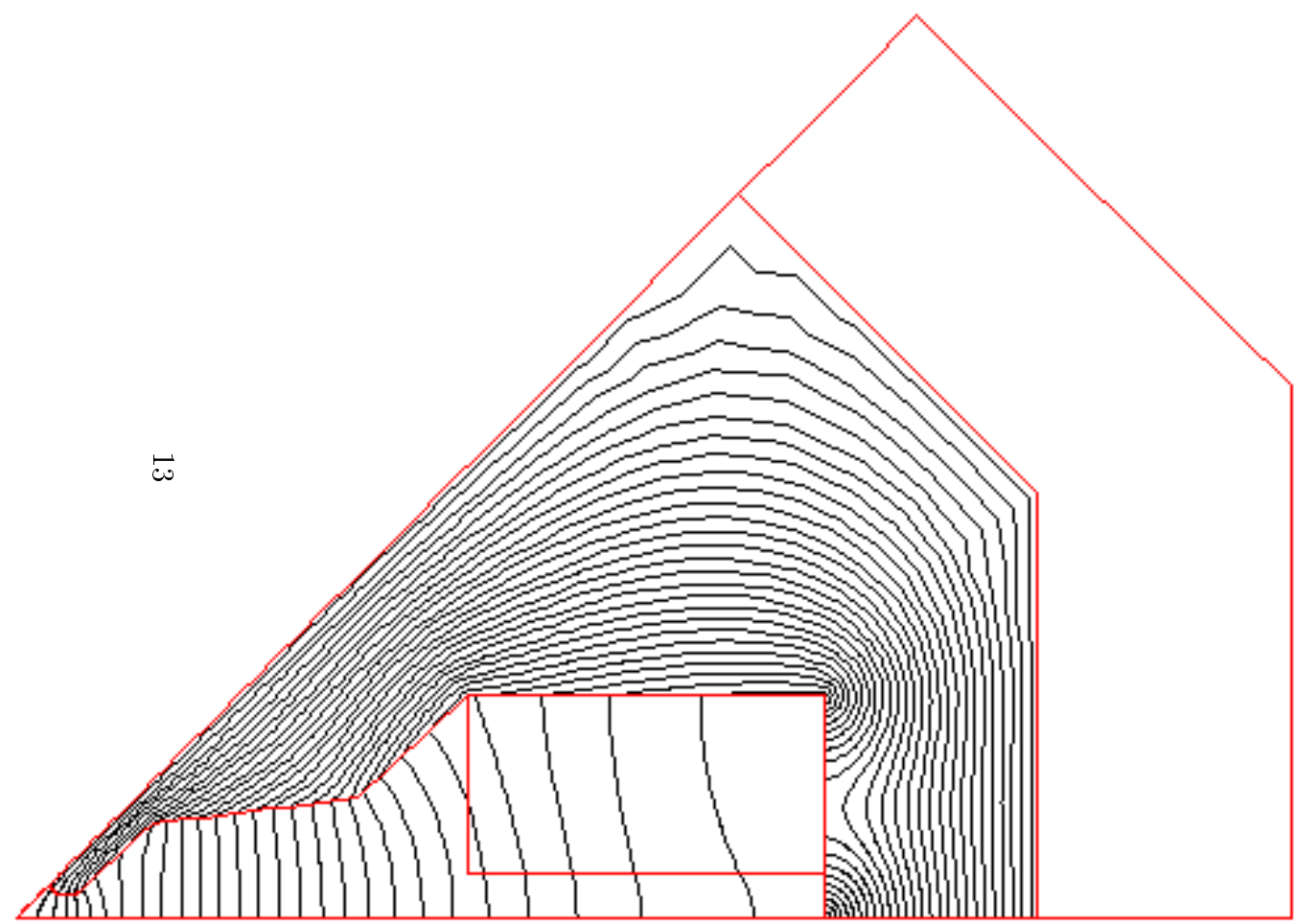


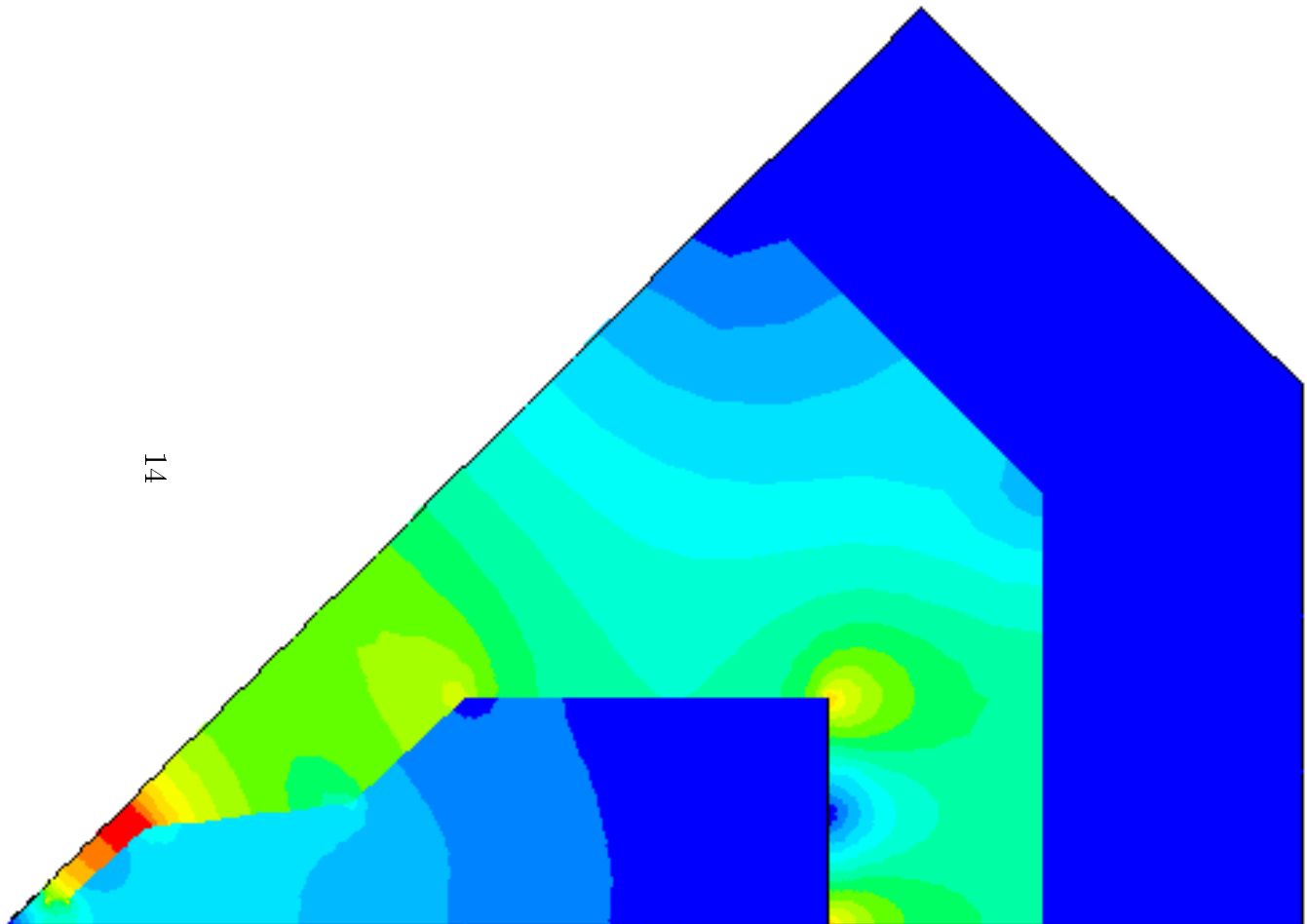
図 10: 磁場の値の直線からのずれ。縦軸は  $((\text{ANSYS で計算された } B_y \text{ の値}) - (\text{式 1 で計算した } B_y \text{ の値})) \times 10^4$  である。

1

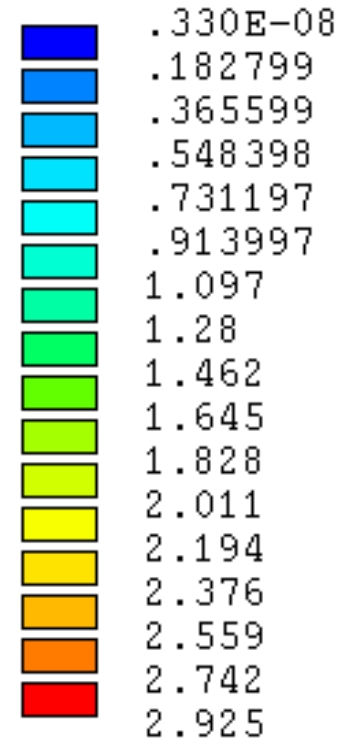


```
ANSYS 5.4  
MAY 31 2000  
13:29:40  
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =6  
TIME=1  
AZ  
RSYS=0  
SMN =-.037289  
      -.036598  
      -.035217  
      -.033836  
      -.032455  
      -.031074  
      -.029693  
      -.026931  
      -.02555  
      -.024168  
      -.022787  
      -.021406  
      -.018644  
      -.017263  
      -.015882  
      -.014501  
      -.01312  
      -.011739  
      -.008977  
      -.007596  
      -.006215  
      -.004834  
      -.003453  
      -.691E-03
```

1



ANSYS 5.4  
MAY 31 2000  
13:36:09  
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =6  
TIME=1  
BSUM (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
SMN =.330E-08  
SMX =2.925



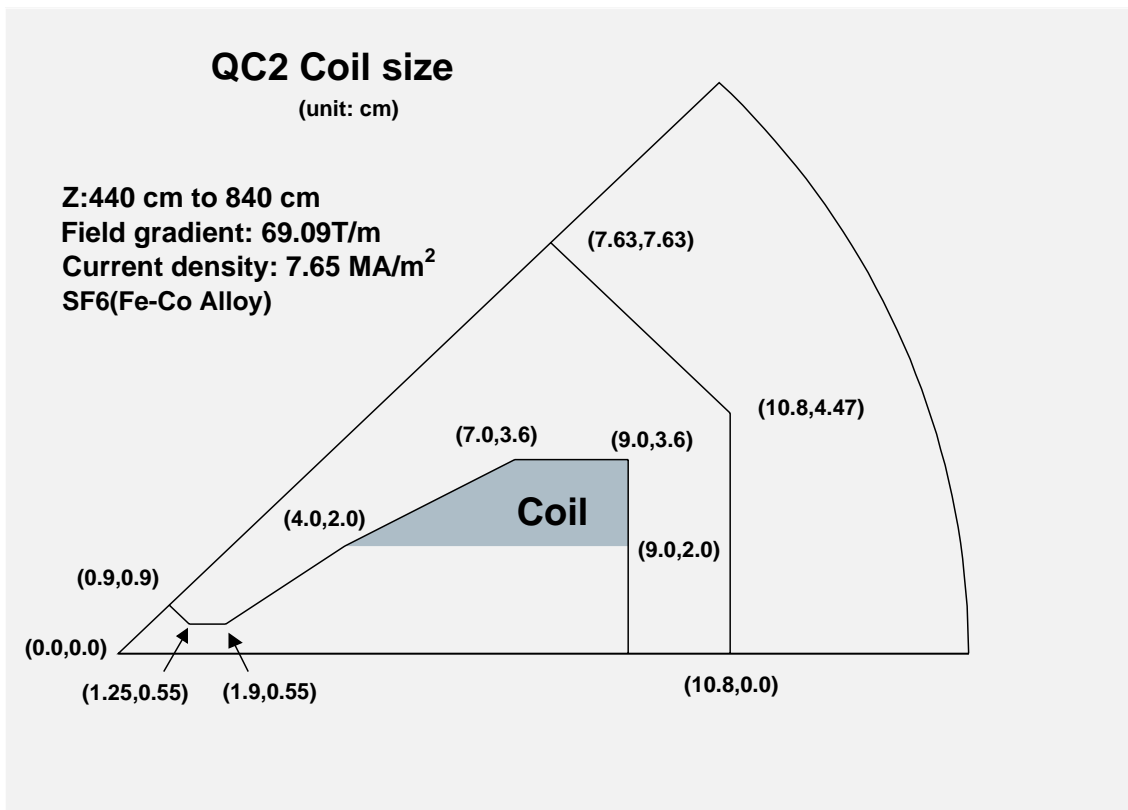


図 13: QC2 形状データ

### 3 QC2の磁場

#### 3.1 新しいQC2の形状

新しいQC2のサイズを図13に示す。また全体図を図14に示す。全体が内径15cmのコンペーションコイルの内側に収まるように鉄の部分を少し薄くした。QC2で必要な磁場勾配はQC1よりも小さいので、QC1よりも小さく磁極開口部が大きくて必要な磁場勾配が作成できる。磁極先端の開口部の半径は約1.27cmであり、その点での磁場は0.74 Teslaである。

この領域は、QC1に対して示されているシンクロトロン光のプロファイルをZ座標に関して直線フィットを行いQC2のところまで外挿して求めた。フィットの様子を図15に示す。

#### 3.2 QC2の磁場分布

新しい形状での磁束の分布および磁場の強さのコントアーを図16と図??に示す。

## QC2 and Compensation coil at Z=840cm

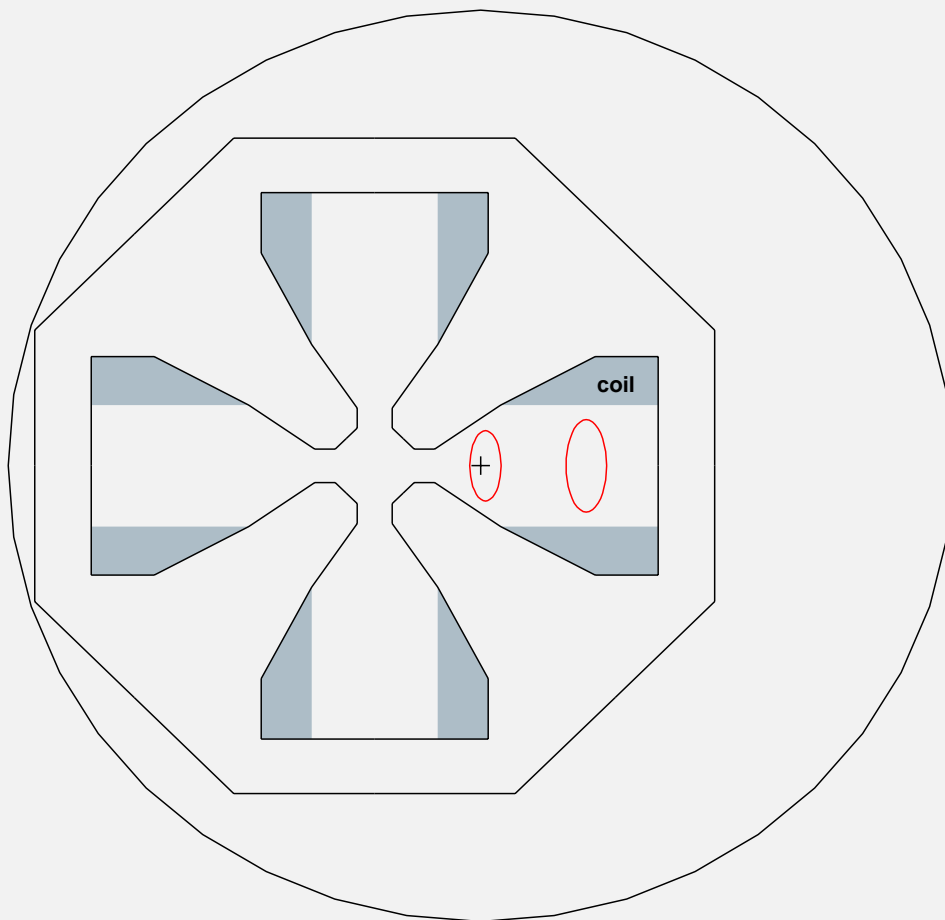


図 14: Z=840cm における QC2 とコンペンセーションコイルの関係。左側（右側）の楕円はシンクロtron光の  $z=440\text{cm}$  ( $840\text{cm}$ ) での QC2 に対する相対的な位置を示している。十字印はコンペンセーションコイルの中心を示す。外側の円は半径 15cm でコンペンセーションコイルの内壁に対応している。

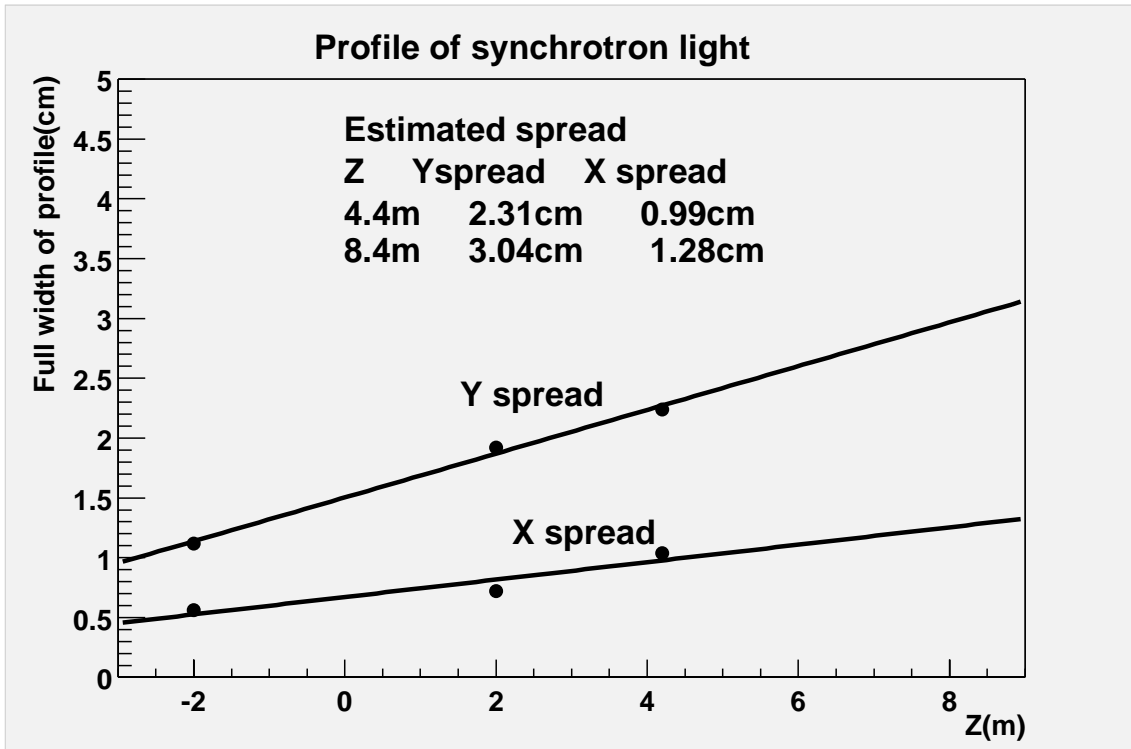
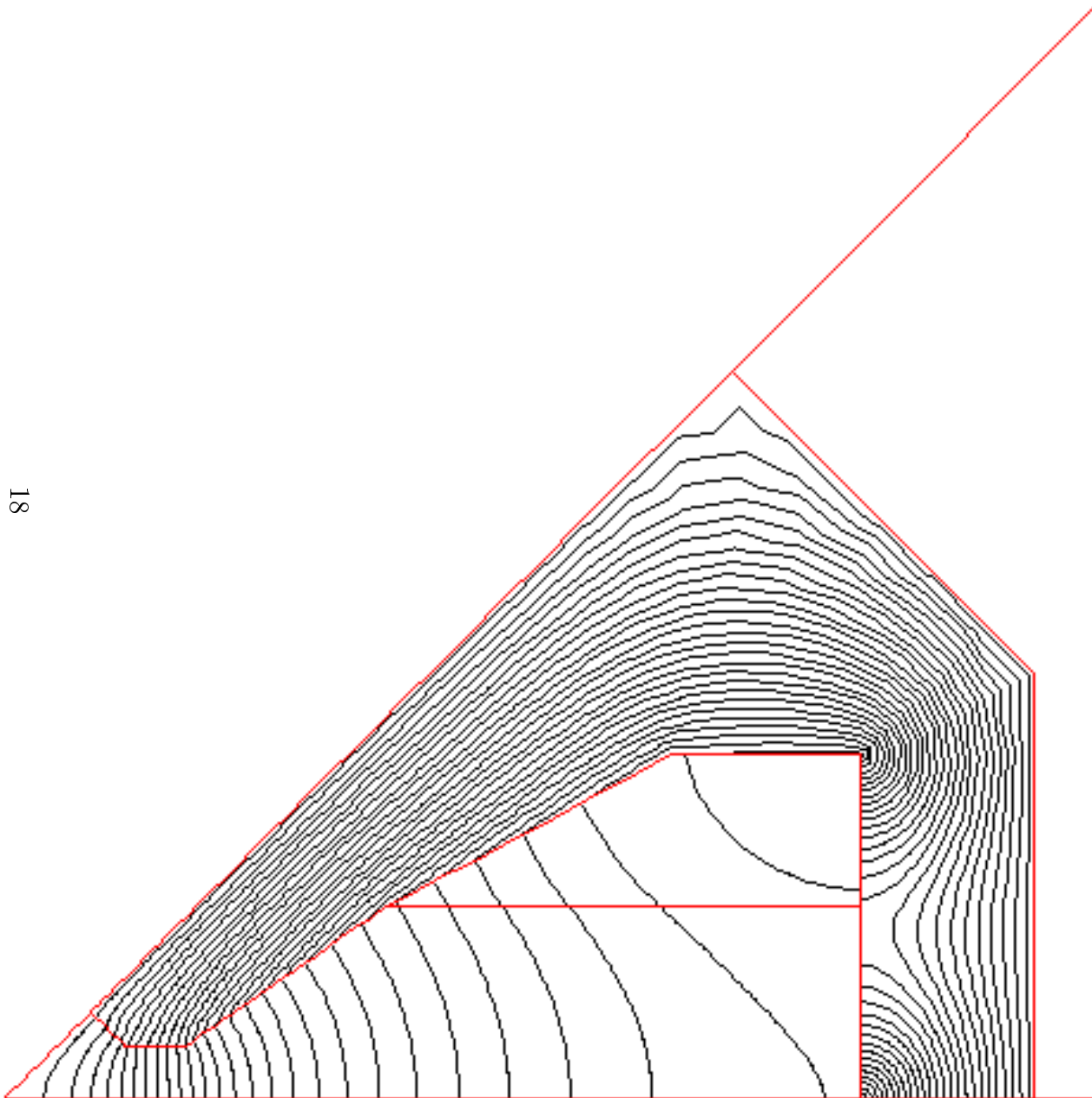


図 15: QC2 でのシンクロトロン光のプロファイルを決める際に使用したデータをフィットした直線。

1

81

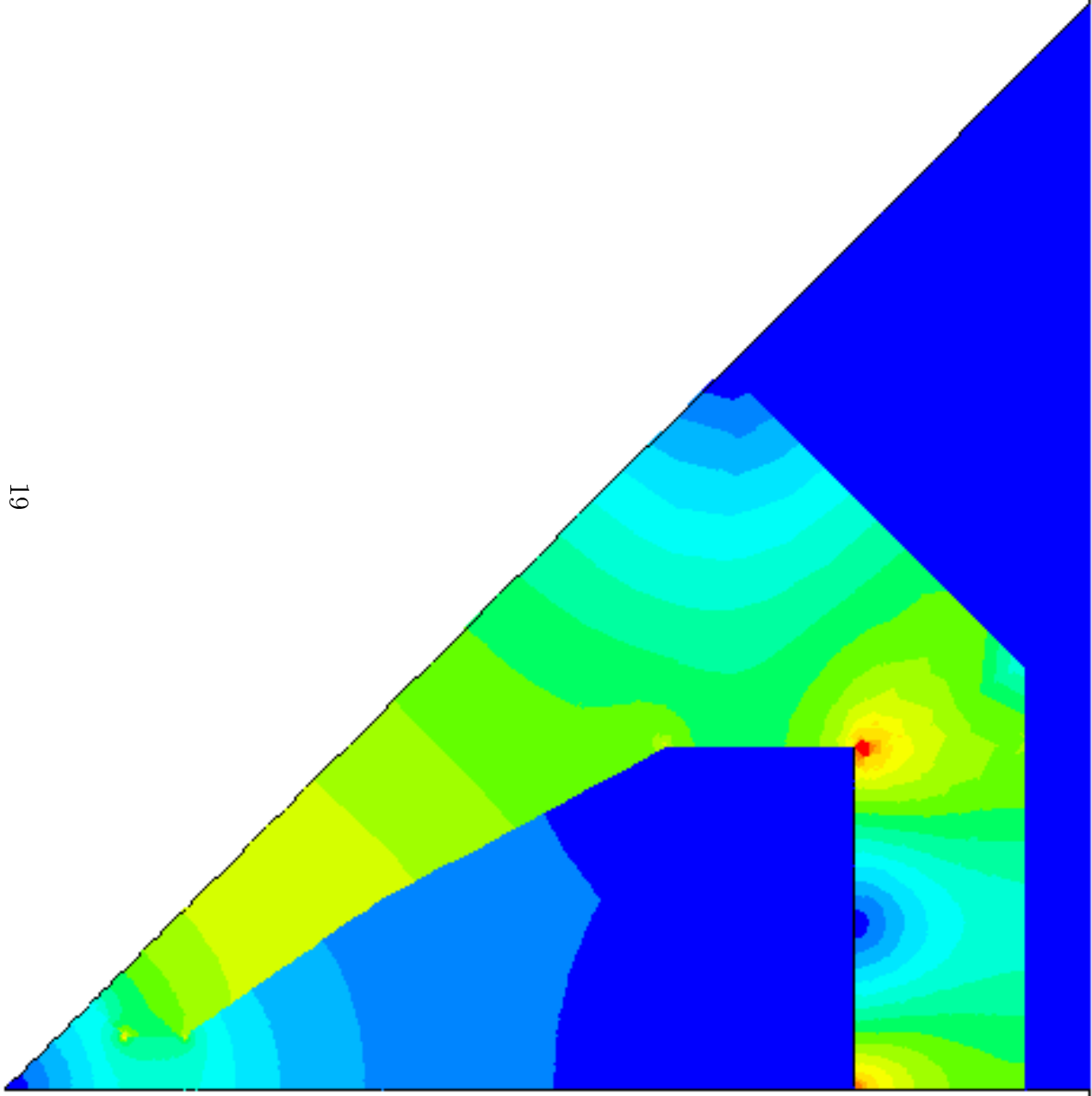


```
ANSYS 5.4  
JUN  2 2000  
15:40:04  
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB  =6  
TIME=1  
AZ  
RSYS=0  
SMX  =.030421  
      .563E-03  
      .00169  
      .002817  
      .003944  
      .00507  
      .006197  
      .00845  
      .009577  
      .010704  
      .011831  
      .012957  
      .015211  
      .016337  
      .017464  
      .018591  
      .019718  
      .020844  
      .023098  
      .024224  
      .025351  
      .026478  
      .027605  
      .029858
```

1



19



ANSYS 5.4  
JUN 2 2000  
15:42:07  
ELEMENT SOLUTION  
STEP=1  
SUB =6  
TIME=1  
BSUM (NOAVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
SMN =.136E-08  
SMX =2.615

	.136E-08
	.16343
	.32686
	.49029
	.65372
	.817149
	.980579
	1.144
	1.307
	1.471
	1.634
	1.798
	1.961
	2.125
	2.288
	2.451
	2.615

## 4 磁場計算のための FORTRAN プログラム

ANSYS で計算した磁場のデータを Geant や Fluka などを使うために fortran プログラム、gufldq.F を用意した。

このサブルーチンの引数は以下の通りである。

```
SUBROUTINE GUF LDQ(XV, BF)
```

(INPUT)

Real\*4 XV(3) : 測定器座標系での位置ベクトル、(x,y,z)  
単位は cm

(Output)

Real\*4 BF(3) : 磁束密度ベクトル (Bx, By, Bz) 単位は kGauss

座標系については Appendix で説明してある。ビームが Crossing Angle をもって衝突しているため、QC の軸と Z 軸は 4mrad の角度を持っている。

GUF LDQ では、QC1 と QC2 の領域の磁場のみを計算しているためそれ以外の場所では、磁場は 0 としている。

このプログラムを使って計算した磁極中心部の磁場ベクトルの分布を図 18 と図 19 に示す。ただし、このベクトルは QC の軸に垂直な平面上でのベクトルの向きを示している。ここでの計算では QC 軸方向に無限長の一様な構造を仮定しているため QC の軸方向の磁場ベクトルの成分は 0 である。

次に、 $z=400\text{cm}$  と  $z=800\text{cm}$  での  $y=0$  における  $B_y$  成分の  $x$  依存性を図 20 と図 21 に示す。

ファイル gufldq.F は <http://www-jlc.kek.jp/miyamoto/export/bmap-mini.tar.gz> にある。このファイルには、測定器ソレノイドの磁場とコンペーンション磁石の磁場を計算するプログラム guflds.F、QC とこれらの磁石の合成磁場を計算する gufld.F などが含まれている。

## 5 まだ検討されていないこと

今回の計算は、ダンプラインでのビームの振る舞いやバックグラウンドの影響を評価することを主眼におき、QC のポールチップ間の磁場を計算したものである。実際の QC の設計としては、

- 機械的強度の検討。磁力や重力による変形を最小限にする仕組みの検討。
- アライメント機構の検討
- 3次元での計算を行い、漏れ磁場による磁気力の低下の割合の検討。
- 冷却系配管、電力系配管等の検討
- 真空パイプの検討

等が必要と思われる。

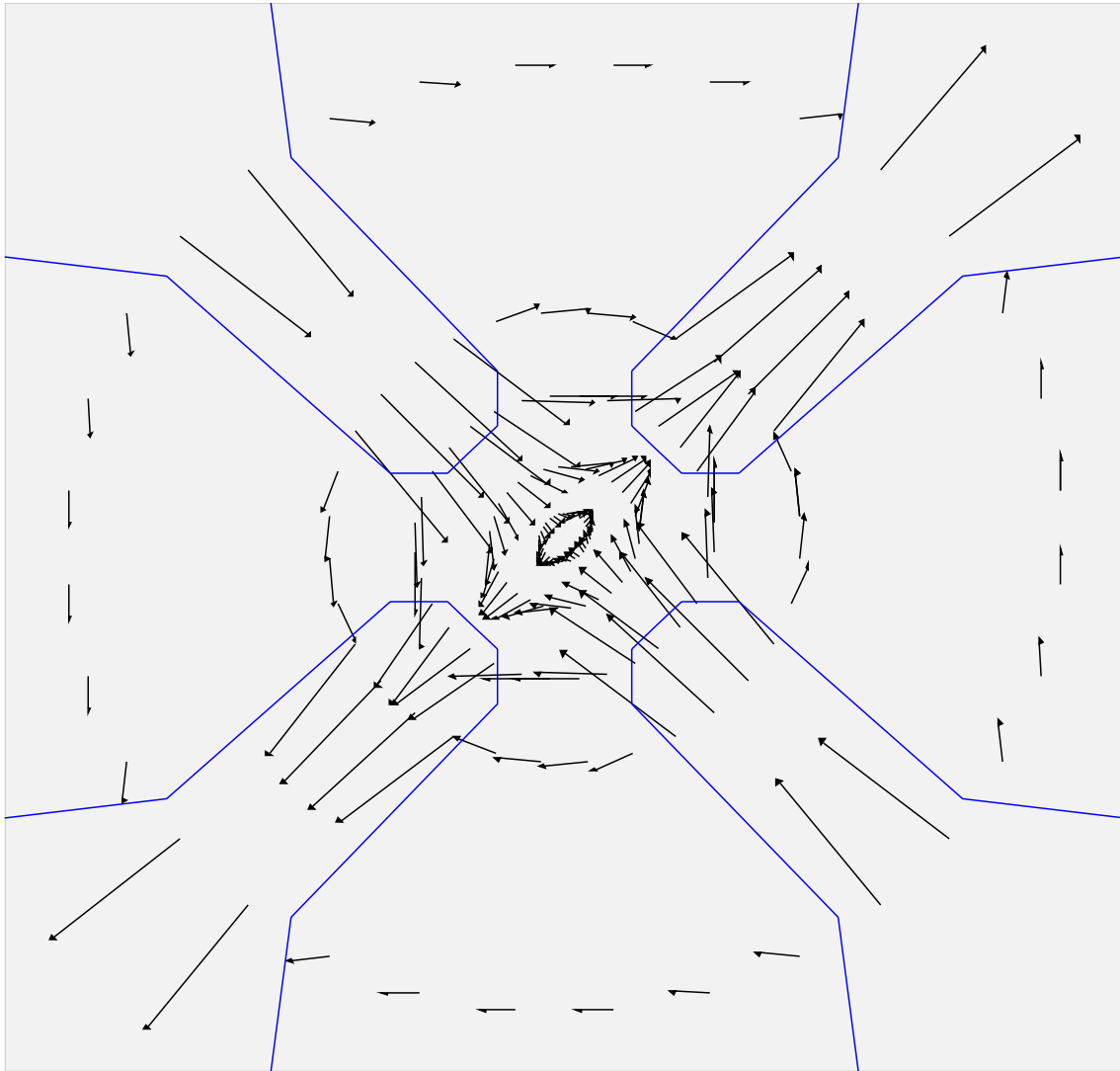


図 18: QC1 の磁極中心部での磁場ベクトルの分布

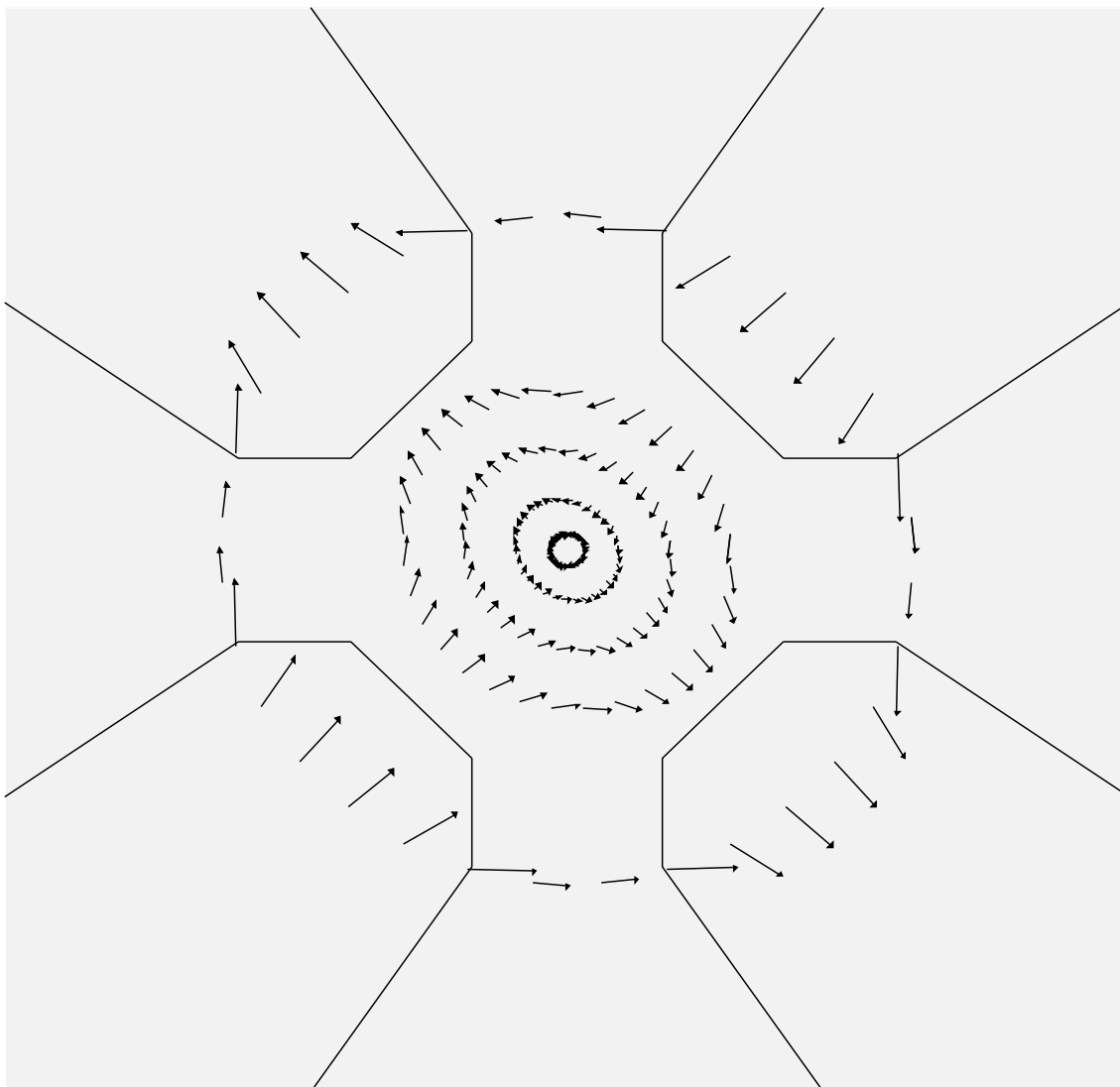


図 19: QC2 の磁極中心部での磁場ベクトルの分布

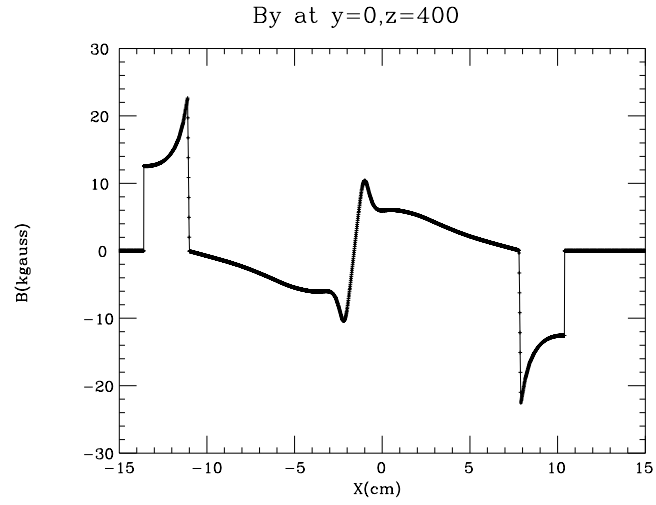


図 20:  $Z=400$  cm、 $y=0$ cm での  $B_y$  成分の  $x$  依存性

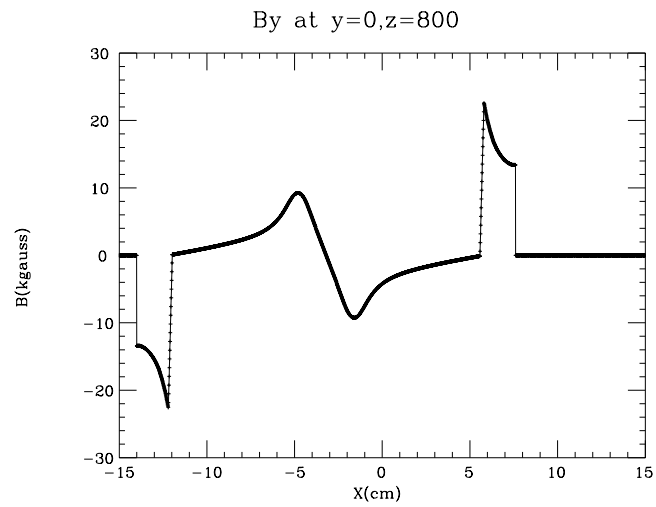


図 21:  $Z=800$  cm、 $y=0$ cm での  $B_y$  成分の  $x$  依存性

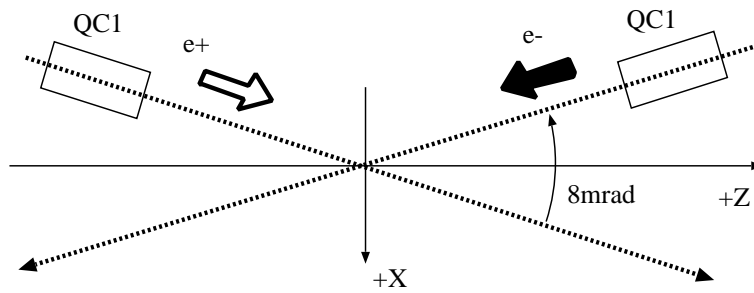


図 22: Z, X 軸とビームの入射方向

## Appendix

### A 座標系について

磁場計算に使用した座標系を図 22 に示す。座標系の Z 軸の方向は測定器のソレノイド磁場の方向にとっている。ビームは角度を持って入射するので、QC1 の軸は Z 軸と 4mrad の角度を持っている。(この座標系は物理の研究に使用しているものと Z 軸の向きが逆になっている。適当な時期に変更することが必要と思われる。)

+Z に設置された QC1 における磁場の向きと電子の収束の向きを図 23 に示す。図に示されているように QC1 は垂直方向の収束になっている。

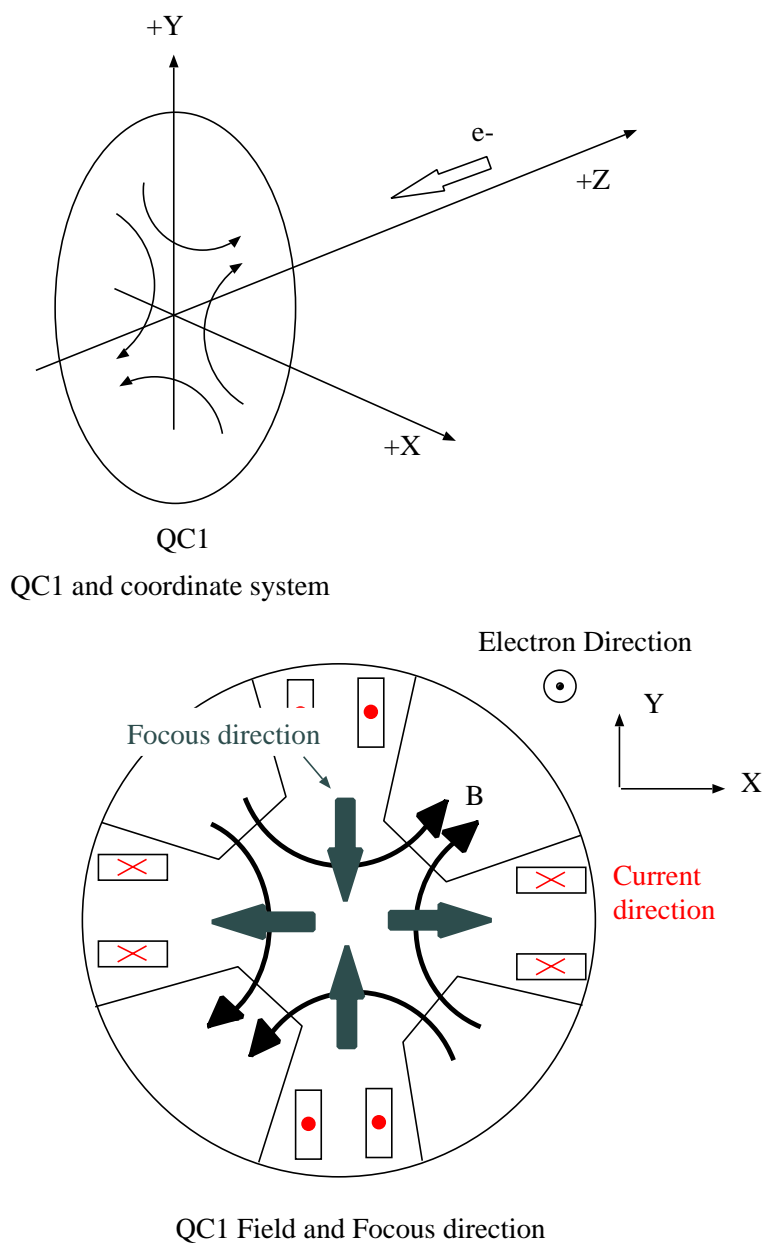


図 23: 磁場計算の座標系とビーム入射方向。下側の図は+Z 位置に設置された QC1 の磁場の向き (細い実線) を示す。電子の収束される方向 (太い幅の矢印) とコイルに流す電流の向き (x と  $\odot$ ) も示す