

# Calculation of magnetic field without field clamp for Six ring

Y. Arimoto

Osaka University, 1-1, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka, Japan

平成 19 年 6 月 13 日

## 概要

フィールドクランプのない PRISM-FFAG 電磁石の磁場マップを作成し、磁場分布を確認した。さらに MA コア内の磁場強度も確認した。

## 1 初めに

学術創成研究のための位相空間回転実証試験のために 6 セル FFAG リングを用いた実験が計画されている。現在 (2007.5.29) までに製作された FFAG 電磁石は 5 台である。そのうち 3 台はフィールドクランプが取り付けられており、2 台にはフィールドクランプは取り付けられていない。フィールドクランプは RF 空洞共振器に用いられる磁性体合金が電磁石からの漏れ磁場によって飽和するのを避けるために取り付けられている。10 セル配置ではフィールドクランプがなければコアは飽和してしまう。今回の実証実験では 6 セルであり空洞のある直線部は短かいのであるが、加速ギャップは 1 つしかなく、磁石からの距離は 10 セル+5 ギャップ配置より長くとることが出来る。またフィールドクランプが無ければこの残りの 3 台分の製作費がうく。そこで、フィールドクランプの無くても実証実験が可能なのか調べるために、フィールドクランプの無い磁場マップを作成した。この作成した磁場はトラッキングシミュレーションに用いられる。

## 2 クランプをはずした場合の磁場計算

### 2.1 計算条件

磁場マップは TOSCA を用いて計算した。モデル作成にあたって、oppre ファイル名 ts176-sfm.oppre のクランプの物質定義を AIR に変更したもので計算を行なった。このファイル名を ts186-sfm.oppre とした。フィールドクランプ無しの計算にあたって、コイルの電流値を変更した。これはフィールドクランプが無い場合、クランプに流れ込む磁束が少なくなり、その結果 D 成分の磁場が大きくなるためである。そこで電流値はこの電磁石を 10 セルリングに組んだ時のリング中心からの距離,  $r$  が 6500mm となる位置での BL 積が、収束成分、発散成分それぞれについて

$$B_F L = 85500 \text{ Gauss} \cdot \text{cm} \quad (1)$$

$$B_D L = -14300 \text{ Gauss} \cdot \text{cm} \quad (2)$$

となるように設定した (図 1、2 参照)。

設定電流は表 1 の通りである。クランプへの磁束の流れ込みがない分 D コイルの起磁力は約 30% 少なくなっている。

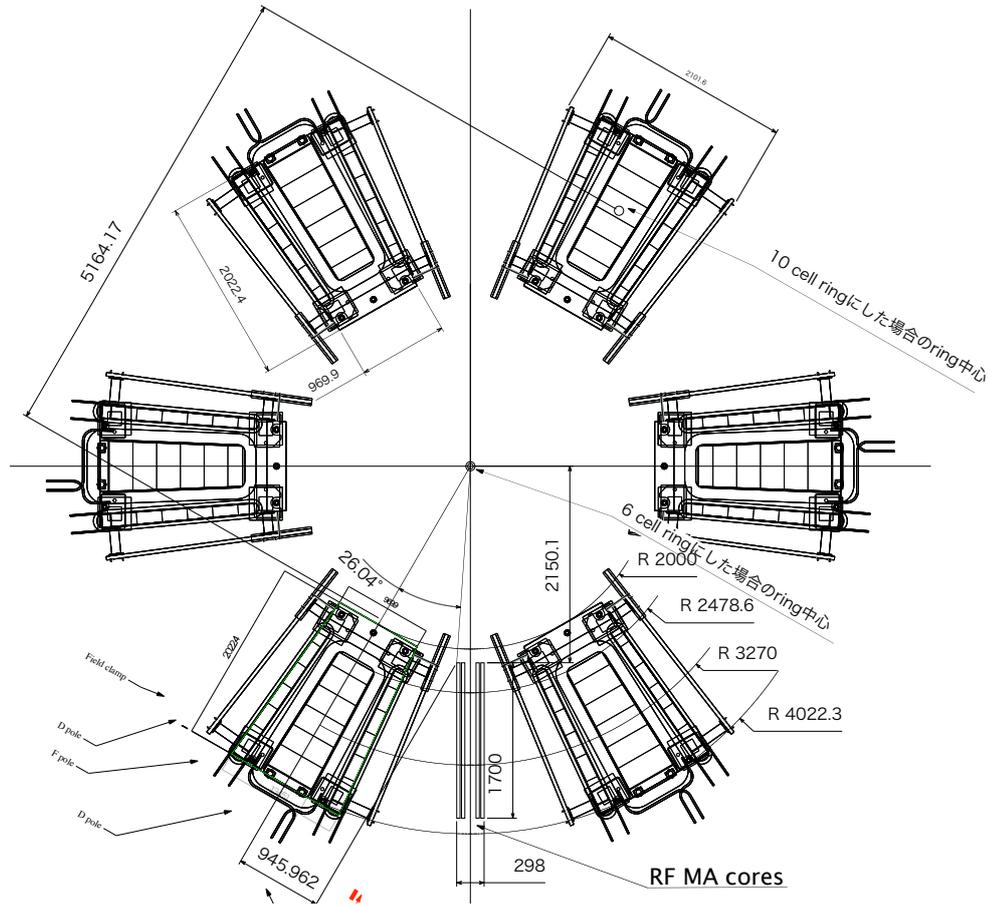


図 1: 6セル配置図

	クランプ有り	クランプ無し
ファイル名	ts176-sfm.oppre	ts186-sfm.oppre
F コイル電流値	68500 AT	66284.3 AT
D コイル電流値	17650 AT	13125.5 AT

表 1: 設定電流

## 2.2 計算結果

10セルリングに組んだ場合のリング中心からの距離、 $r = 6500 \text{ mm}$ におけるBL積の計算値を表2に示す。クランプあり、クランプ無しの場合のクランプ、ヨークの磁束密度をそれぞれ図3、図4に示す。

クランプが無い場合リターンヨークの磁束密度は若干大きくなっているが、リターンの磁束がクランプを流れていた分がリターンヨークへ流れたためと考えられる。いずれにしてもリターンヨークが飽和する程ではない。

次にメディアプレーン上での磁場分布をプロットする。図5及び図6はそれぞれクランプが有る場合と無いモデルで計算された $B_z$ を $\theta$ の関数としてプロットしたものである。クランプ無しのモデルではD成分の極小の位置での磁場の絶対値が小さくなっており、 $\theta$ の大きいところまで磁束が広がっている。縦軸を拡大したものが、図7及び図8である。これを見るとクランプ有りの場合はRFコアの領域( $11^\circ$ )では5 Gauss程度以下となっているが、クランプ無しの場合はRFコアの領域( $11^\circ$ )では25 Gauss程度となる。この漏れ磁場がRFコアにどのくらい流れ込むのかについては後述する。

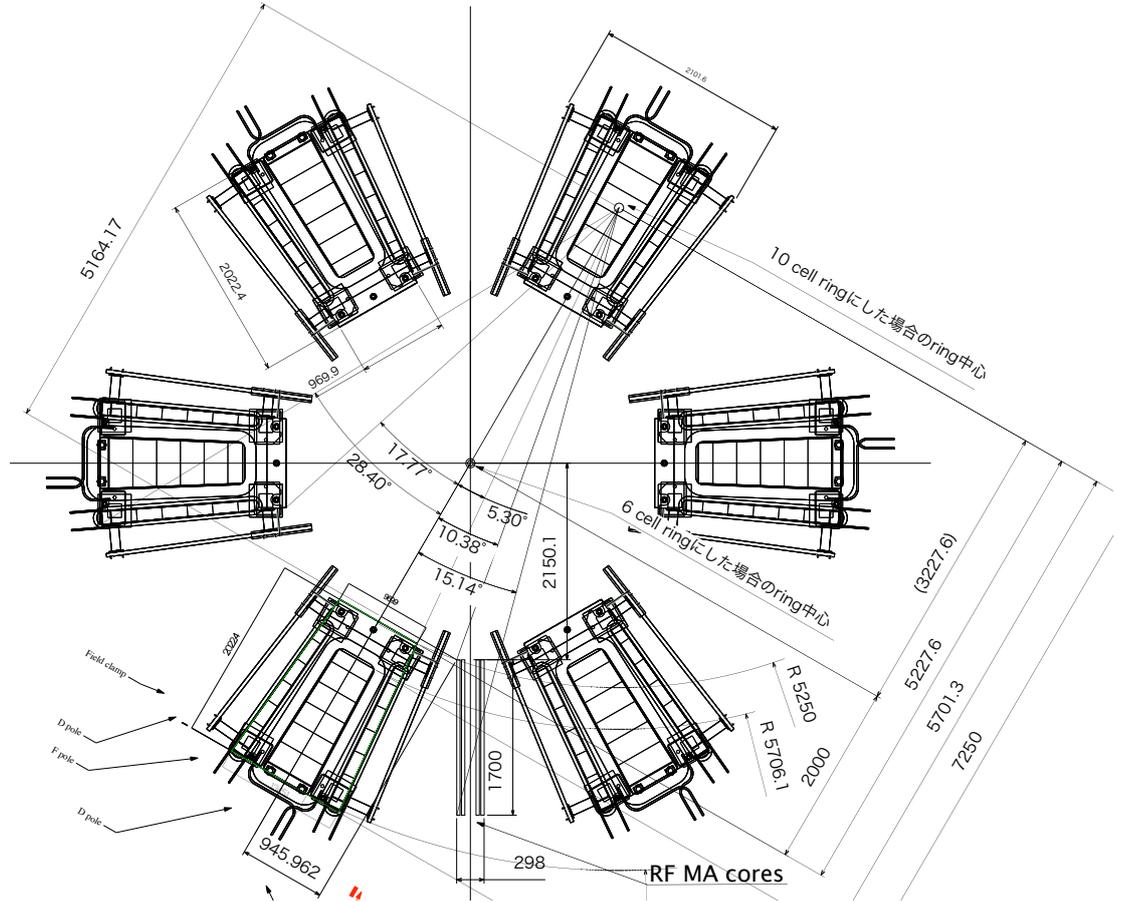


図 2: 6セル配置図と 10セルの場合の座標系

図 9 及び図 10 はそれぞれクランプが有りの場合とクランプが無い場合の BL 積である。それぞれの図の上段が BL 積を  $r$  の関数としてプロットしたものであり、中段が BL 積を使って計算した  $k$  値を  $r$  の関数としてプロットしたものであり、下段が BL 積を使って計算した  $F/D$  比である。上段と中段の図中の実線、点線はそれぞれ F 成分、D 成分についての値を示している。これを見ると D 成分の  $k$  値が小さくなっているのが分かる。これは  $r$  の大きい位置では磁極ギャップが狭いためクランプへの磁束の流れ込み小さい。一方、 $r$  の大きい位置では磁極ギャップが大きくなるため磁束の流れ込みは大きくなる。それ故クランプを無くすと  $r$  の大きい位置では D 成分は相対的に小さくなり、 $r$  の小さい所では大きくなる。この結果 D 成分の  $k$  値が低くなる。F/D 比が  $r$  が大きくなるにしたがい、大きくなるのも同じ理由である。

ここで、円筒座標系の原点を 6セルリングの中心にしてこれまでのグラフをプロットする。この時の配置図を図 1 に示す。この場合  $r_0$ (運動量 68MeV/c のミューオンの平衡軌道) は 3270 mm となる。

図 11, 12 はクランプが有る場合と無い場合の  $B_z$  vs.  $\theta$  分布である。また図 14、図 ?? はクランプが有る場合と無い場合の BL 積の分布である。10セルリング中心のものと比較すると、 $k$  値は半分くらいになっている。一方 F/D 比はあまり変化はない。これは  $k$  値は

$$k = \frac{\partial B(r)}{\partial r} \frac{r}{B(r)} \quad (3)$$

と書けるので、 $r$  が小さくなると  $k$  値はそれにほぼ比例して小さくなるためである。また F/D 比については、図 15 に示すように、積分経路の  $r$  方向の位置は (赤い実線で示した弧) はあまり変化しないためである。

	クランプ有り	クランプ無し
$B_{FL}$	85491 G·cm	84928 G·cm
$tjB_{DL}$	-14252 G·cm	-14021 G·cm

表 2: BL 積計算値@ $r = 6500$  mm

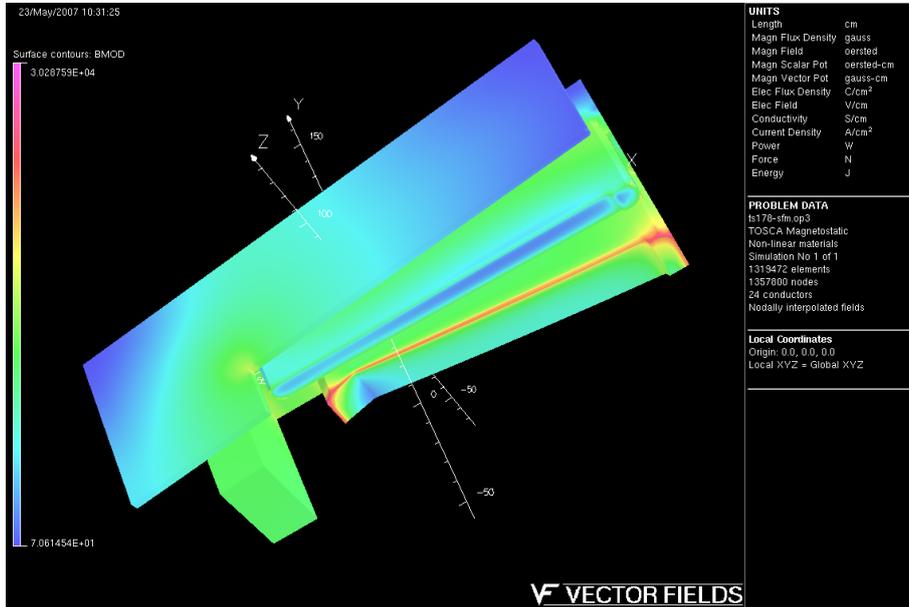


図 3: ヨークの磁束密度。クランプ有り

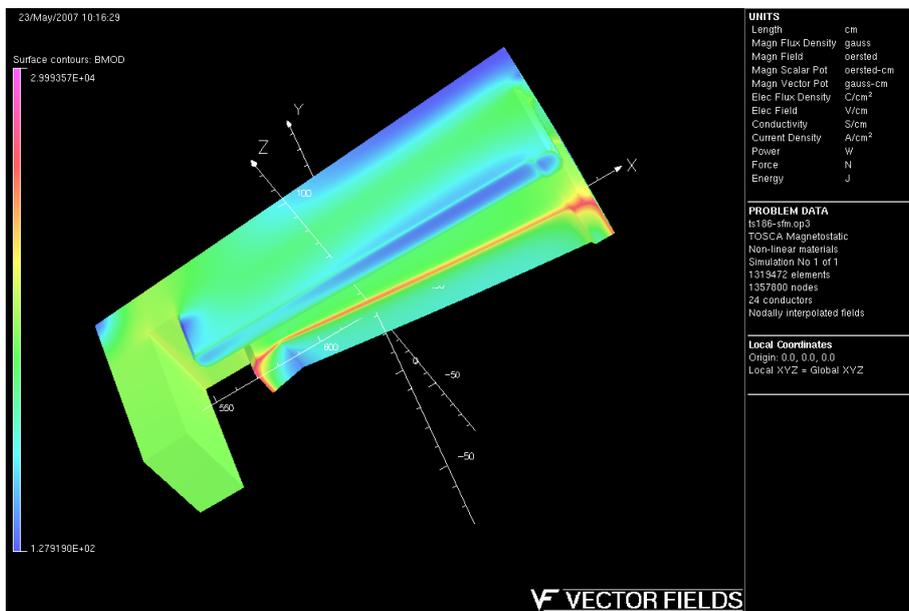


図 4: ヨークの磁束密度。クランプ無し

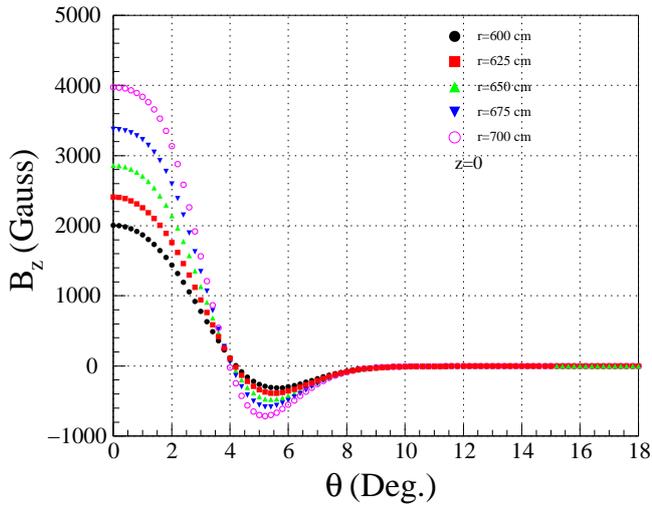


図 5:  $B_z$  vs  $\theta$  (クランプ有り)

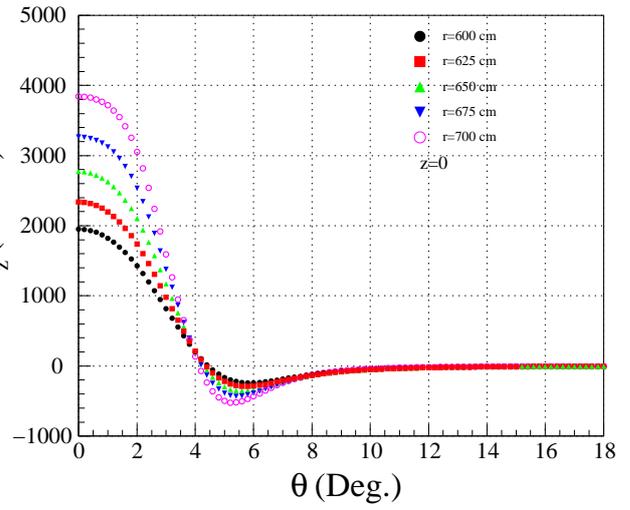


図 6:  $B_z$  vs  $\theta$  (クランプ無し)

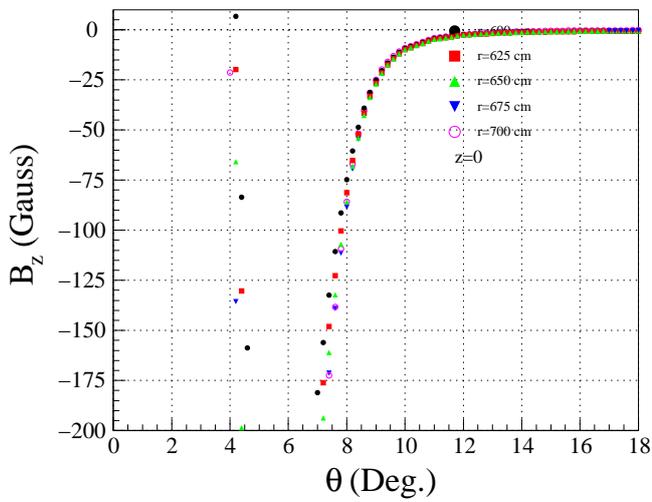


図 7:  $B_z$  vs  $\theta$ ; 縦軸を拡大。(クランプ有り)

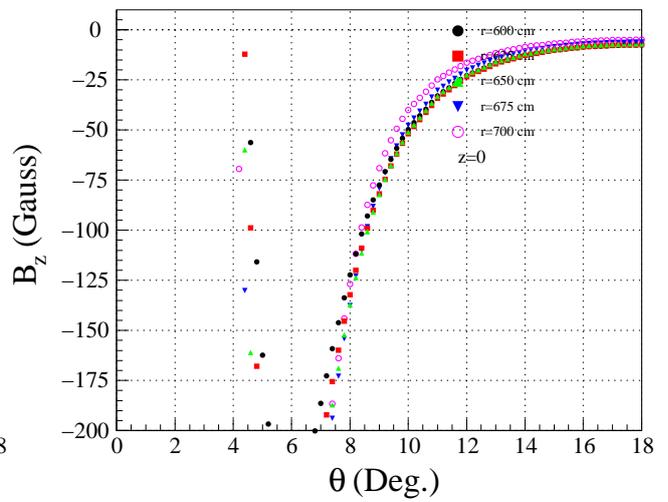


図 8:  $B_z$  vs  $\theta$ ; 縦軸を拡大。(クランプ無し)

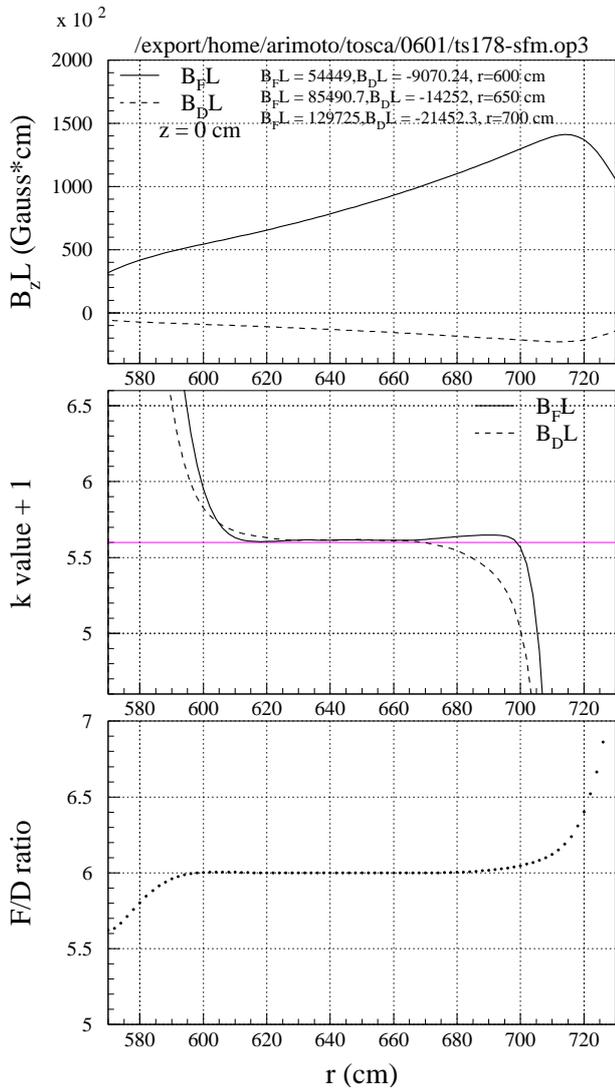


図9: 上段:  $B_z L$  積。中段:  $B_z L$  積から求めた  $k$  値。下段:  $B_z L$  積から求めた F/D 比。横軸は 10 cell リングの中心からの距離、 $r$ 。(クランプ有り)

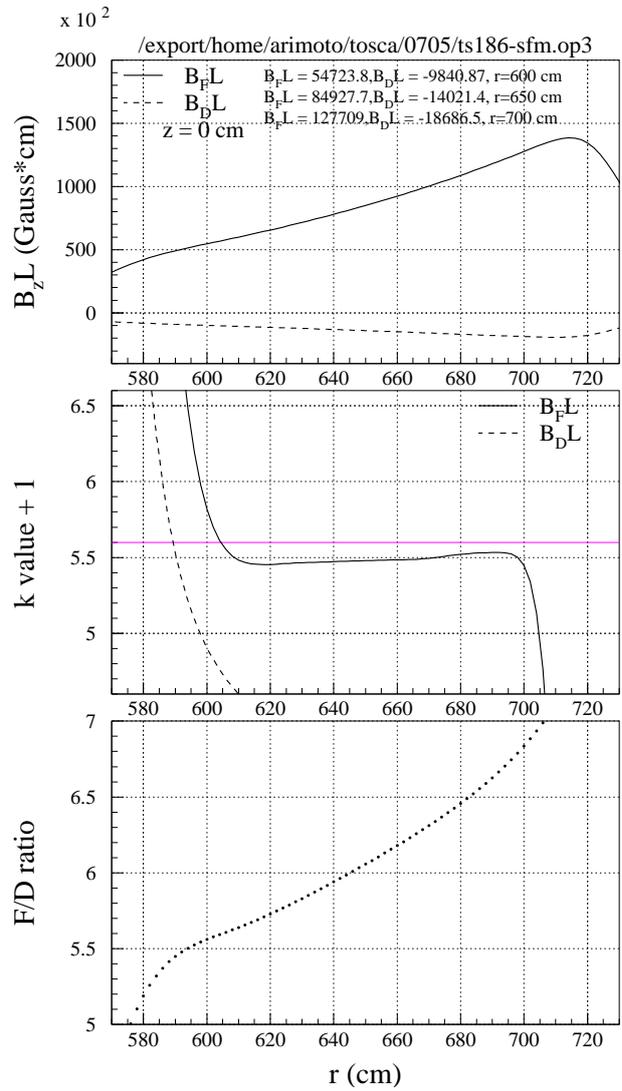


図10: 上段:  $B_z L$  積。中段:  $B_z L$  積から求めた  $k$  値。下段:  $B_z L$  積から求めた F/D 比。横軸は 10 cell リングの中心からの距離、 $r$ 。(クランプ無し)

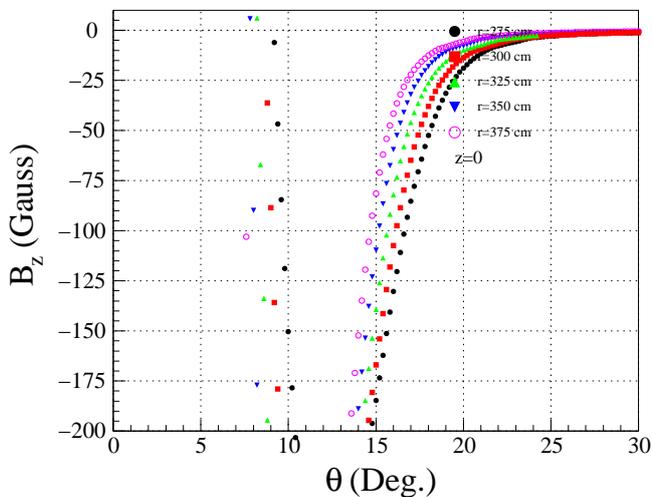


図11:  $B_z$  vs  $\theta$ 。座標の原点を 6 セルリング中心とした。(クランプ有り)

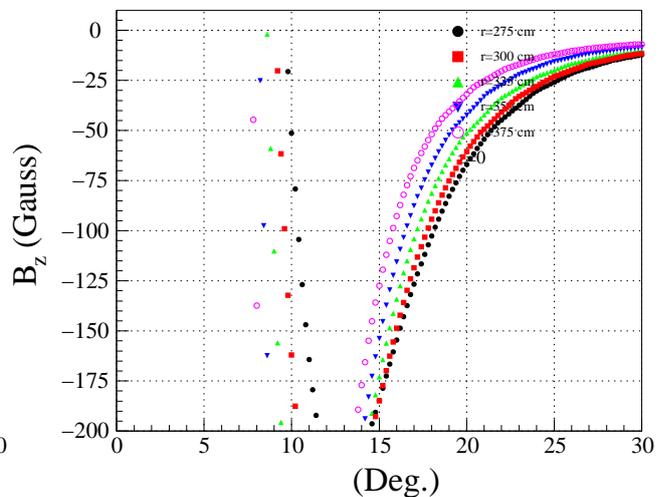


図12:  $B_z$  vs  $\theta$ 。座標の原点を 6 セルリング中心とした。(クランプ無し)

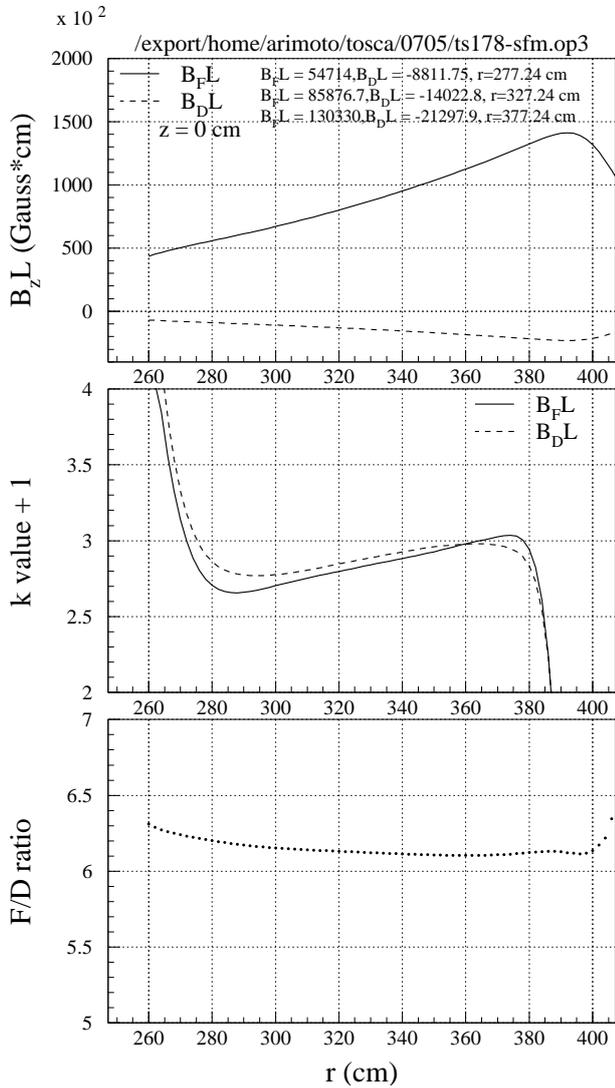


図 13: 上段:  $B_z L$  積。中段:  $B_z L$  積から求めた  $k$  値。下段:  $B_z L$  積から求めた F/D 比。横軸は 6 cell リングの中心からの距離、 $r$ 。(クランプ有り)

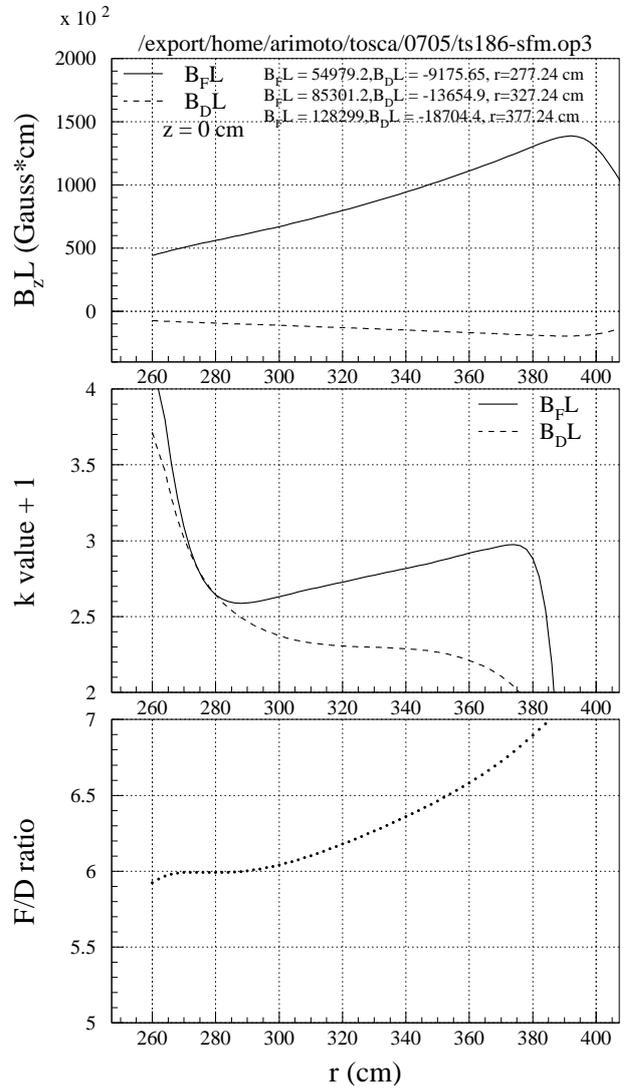


図 14: 上段:  $B_z L$  積。中段:  $B_z L$  積から求めた  $k$  値。下段:  $B_z L$  積から求めた F/D 比。横軸は 6 cell リングの中心からの距離、 $r$ 。(クランプ無し)

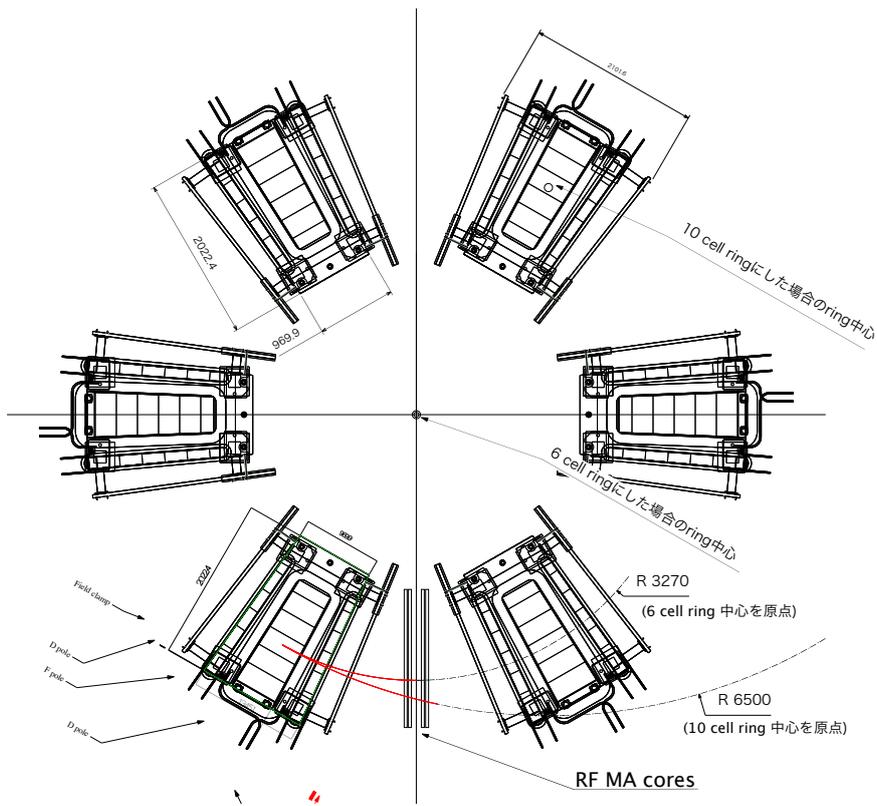


図 15: BL 積分の経路

### 3 RF MA Core内の磁束密度

次に RF MA (Magnetic Arroy) Core を TOSCA のモデルに入れて磁束密度を計算した。6セルリングでは加速ギャップ数は1であり、これは4枚の MA コアから構成されている。コアの位置は図 1, 2 に示したとおりである。また MA Core の Geometry は図 16 に示すとおりである。TOSCA 計算に入力した MA コアは4枚 (1 gap 分) であるが、電磁石は1セル分 (F磁極中心を対称面として、ヨークは 1/2 セルのみ入力した。) のみである。

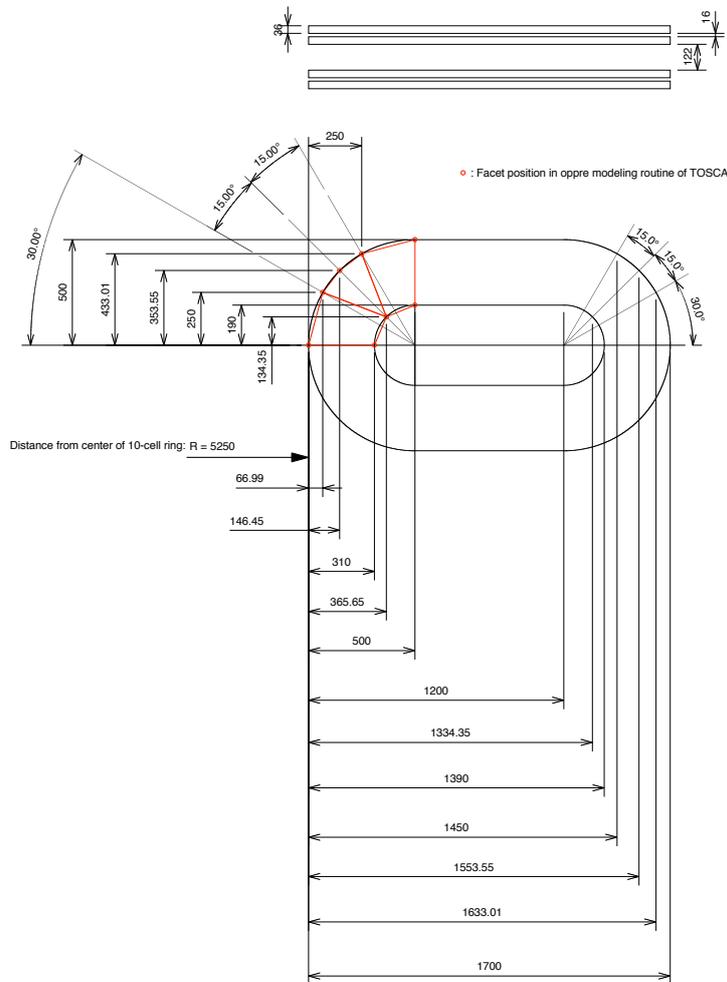


図 16: RF MA Core の Geometry。赤い白抜き丸は TOSCA の oppre 上で入力した FACET のコーナー位置を表わしている。

クランプ有りの場合とクランプ無い場合についての計算された RF コアの磁束密度をそれぞれ図 17、18、に示す。クランプが有る場合はコアの磁束密度は一番大きい所でも 100~200Gauss 以下であるが、クランプが無い場合はコアの磁束密度は大きい所で 500~800Gauss 程度になる。平均値でみるとだいたい 200~500 Gauss 程度になると思われる。KEK150 MeV FFAG グループによって測定された結果 (Appendix) によると 200 Gauss からインピーダンスが減少し始めることが確認されている。ただしこの磁場の測定点は図 17、18 の中で最も磁場が小さい所である。クランプ無しの場合ではこの点の磁場は 100 Gauss 以下となっているのでクランプ無しでも RF Cavity の性能には影響しないかもしれない。しかし、150 MeV-FFAG と PRISM-FFAG の RF コアは形状が異なるので、コアの中の磁場分布も異なると考えられる。従って、RF MA コアへの DC 磁場の影響は測定してみないと分からない。

次にメディアンプレーン上の磁場分布をプロットする。図 19, 20, 21, 22 はそれぞれ“MA コア無し、クランプ有り”、“MA コア無し、クランプ無し”、“MA コア有り、クランプ有り”、“MA コア有り、クランプ無し”の場合

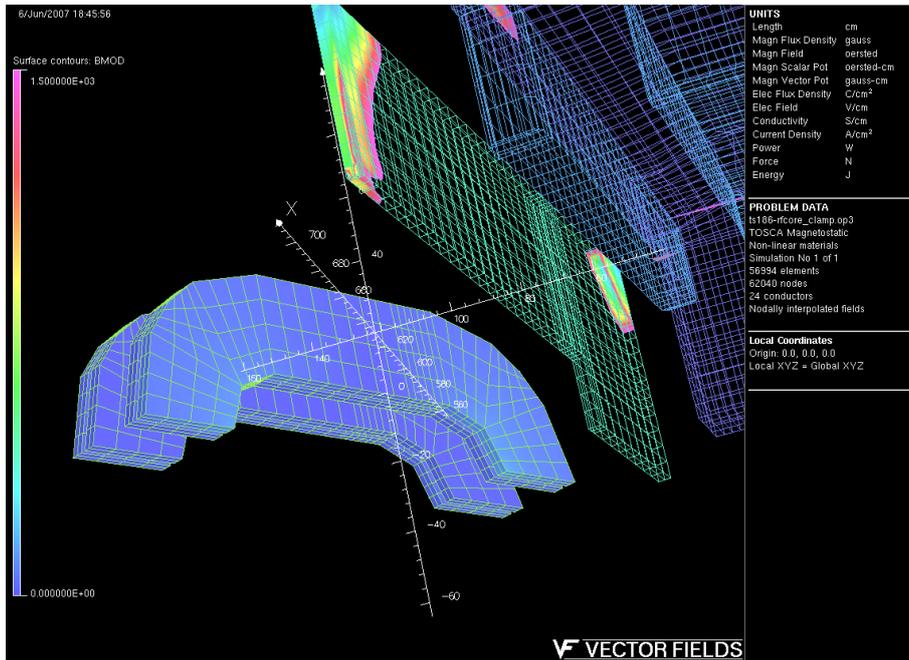


図 17: RF MA Core 内の磁束密度 (クランプ有り)

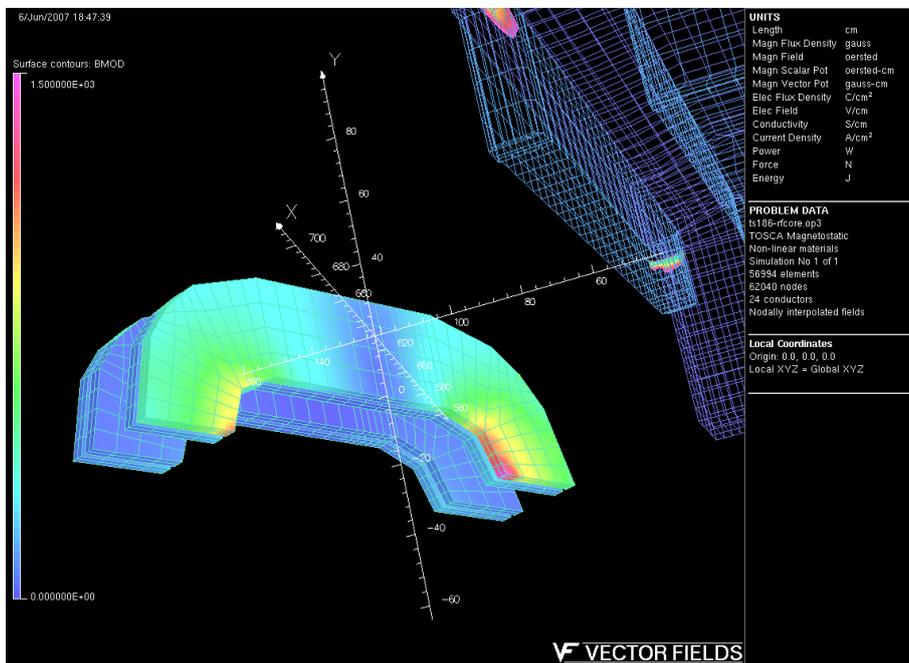


図 18: RF MA Core 内の磁束密度 (クランプ無し)

の  $B_z$  vs.  $\theta$  分布を表わしている。ここで用いた円筒座標系の原点は6セルリングの中心である。比較出来るように全てメッシュ、境界条件は同じものにした。クランプが有る場合はコアがあってもなくても磁場分布はほとんど変化しないが、クランプが無い場合、コアの影響で  $25^\circ$  の位置で約 10 Gauss 程磁場が小さくなっている。これは漏れ磁束が RF コアに流れ込むためである。

次に BL 積の分布をプロットする。上段・中段・下段はそれぞれ BL 積を  $r$  の関数としてプロットしたもの、BL 積から求めた k 値、F/D 比である。クランプ有りの場合は  $r < 340$  mm の領域ではコアの影響による磁場分布の変化はあまり見られない (k 値の変化は 2%以下)。ここで、 $r > 340$  mm の領域で D 成分の k 値及び F/D 比が変化

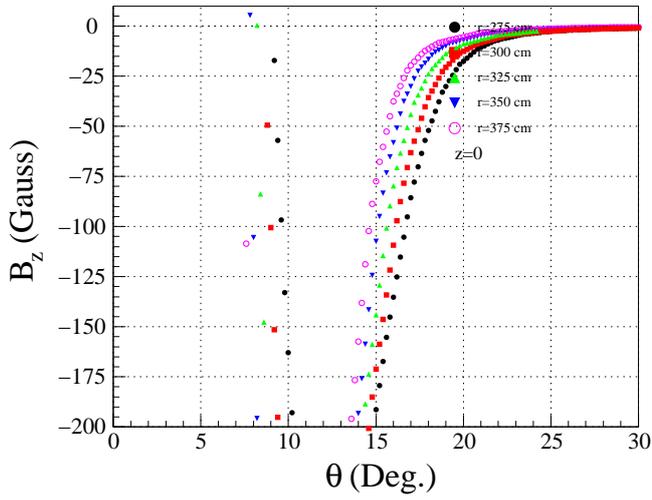


図 19:  $B_z$  vs.  $\theta$  分布。MA コア無し、クランプ有り

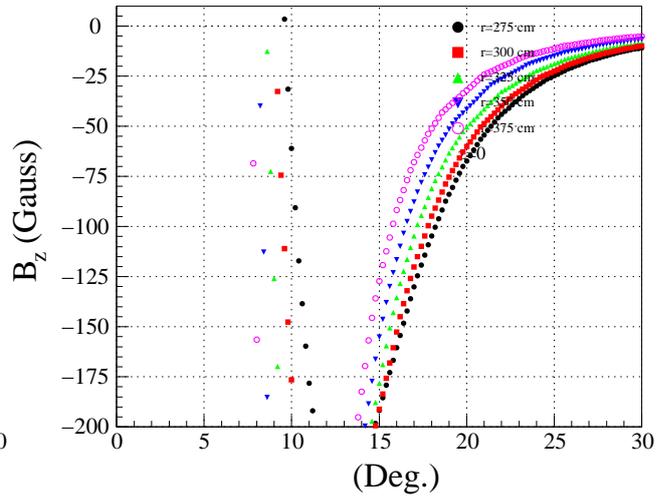


図 20:  $B_z$  vs.  $\theta$  分布。MA コア無し、クランプ無し

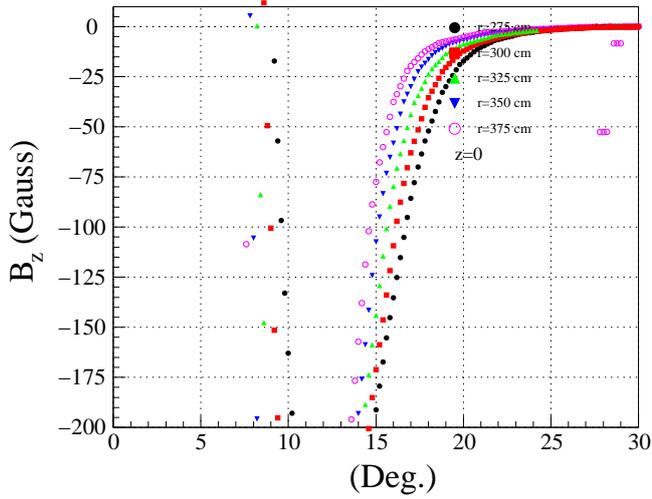


図 21:  $B_z$  vs.  $\theta$  分布。MA コア有り、クランプ有り

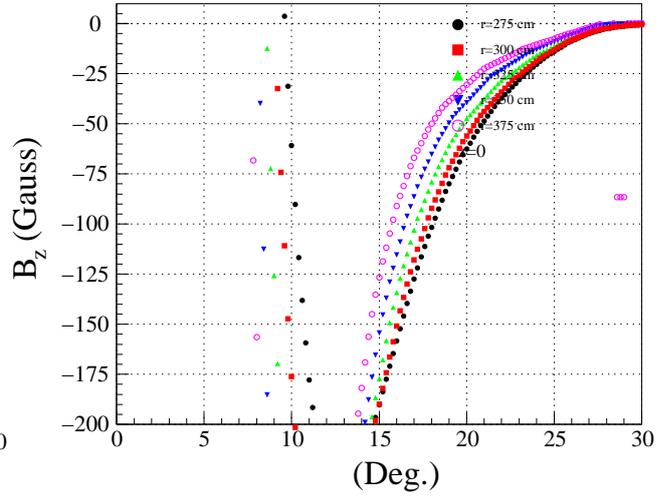


図 22:  $B_z$  vs.  $\theta$  分布。MA コア有り、クランプ無し

しているのは BL 積の積分経路が MA コアの部分を通過するためである。

一方クランプ無しの場合は  $r < 340$  mm の領域でコアの影響による磁場分布の変化は k 値で 10%程度、F/D 比で 5% 程度となる。この程度の変化量のビーム軌道への影響は無視出来るとはすぐには言えない。トラッキングシミュレーションで調べる必要がある。

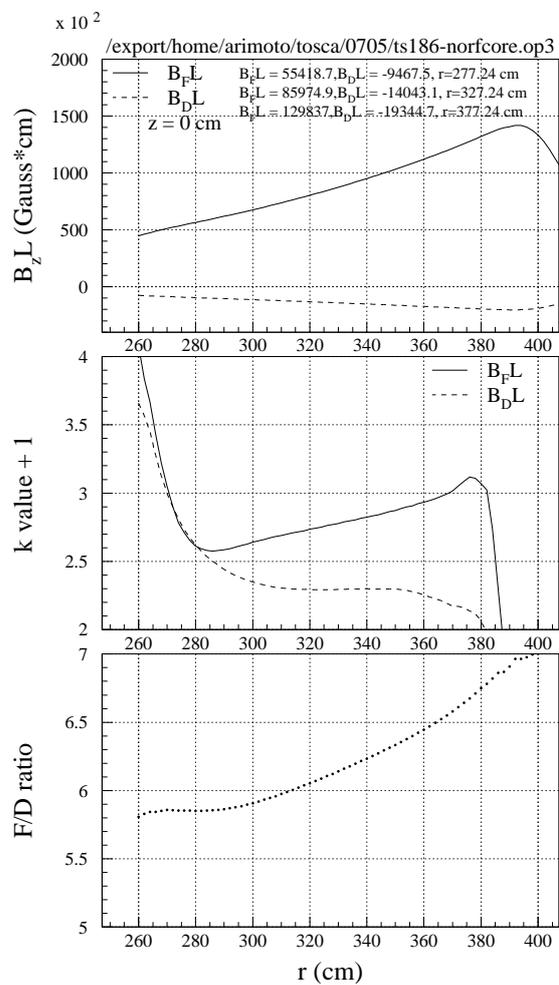
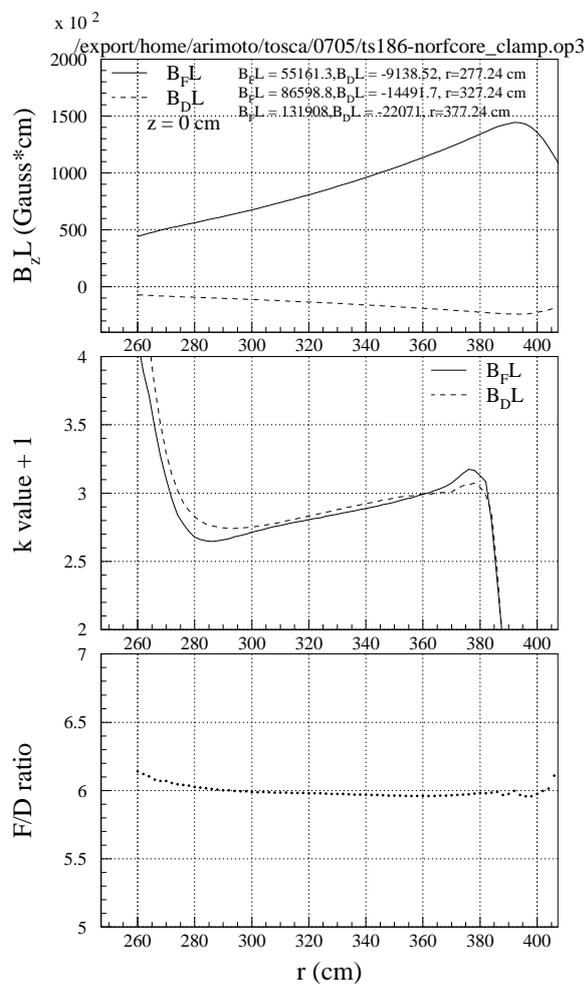


図 23: 上段:  $B_z L$  vs.  $r$  分布。中段: BL 積から求めた  $k$  値。下段: BL 積から求めた F/D 比。MA コア無し、クランプ有り  
 図 24: 上段:  $B_z L$  vs.  $r$  分布。中段: BL 積から求めた  $k$  値。下段: BL 積から求めた F/D 比。MA コア無し、クランプ無し

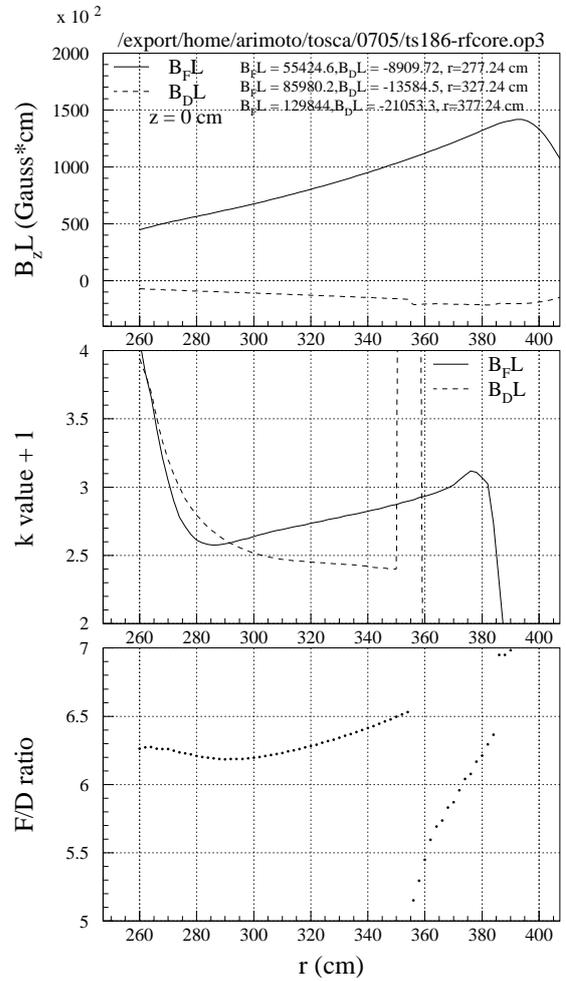
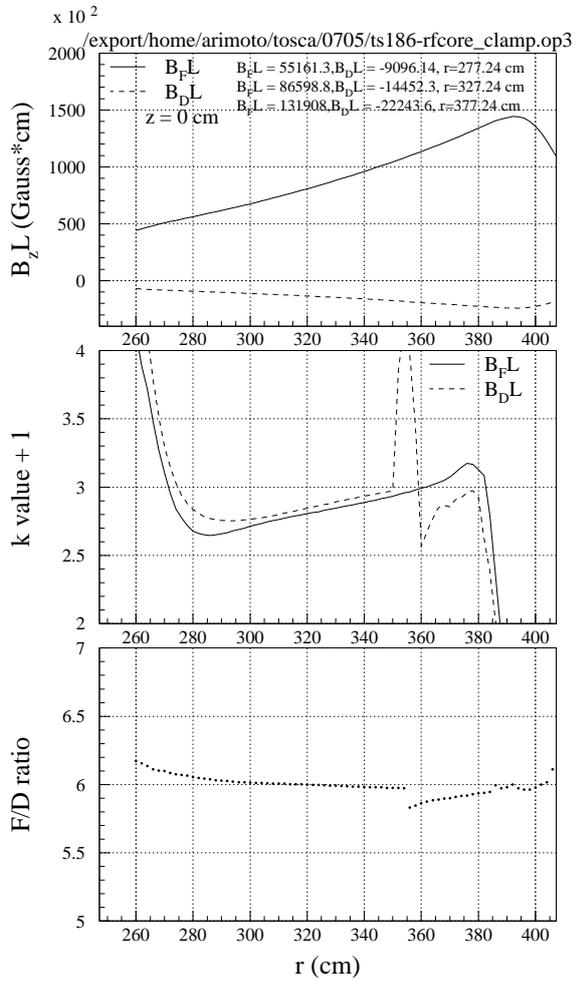


図 25: 上段:  $B_z L$  vs.  $r$  分布。中段: BL 積から求めた  $k$  値。下段: BL 積から求めた F/D 比。MA コア有り、クランプ有り  
 図 26: 上段:  $B_z L$  vs.  $r$  分布。中段: BL 積から求めた  $k$  値。下段: BL 積から求めた F/D 比。MA コア有り、クランプ無し

## A RF Cavity へのバイアス磁場の影響について

MA コアへバイアス磁場と RF Cavity の性能の関係の測定 KEK 150MeV FFAG グループによってなされている。参考資料としてその結果を掲載する。

### 測定方法

- FFAG F 電磁石の電流値を増加させたとき、共振周波数と共振周波数におけるインピーダンスを測定した。
- FFAG F 電磁石電流=883.7A、D 電磁石電流=1181.3A とは 125MeV 取り出しモードにおける電流設定値である。
- Cavity 表面の磁場、共振点およびインピーダンスは 4.2mm の鉄シールドを Cavity の両側に一枚ずつ取り付けたとき測定。
- 鉄シールド 1 枚

表 3 と、図 27 に測定結果を示す。

F cur. (A)	D cur. (A)	$f_0$ (MHz)	Z ( $\Omega$ )	Cavity 表面の磁場 (Gauss)
0	0	1.824	335	15.8
0	1181.3	1.824	335	136.2
100	1181.3	1.821	335	147.8
200	1181.3	1.842	335	164.7
300	1181.3	1.881	331	241.8
400	1181.3	2.142	305	375.3
500	1181.3	2.862	237	508.9
600	1181.3	4.185	167	617
700	1181.3	5.511	139	701.4
800	1181.3	10.29	107	771.45
883.7	1181.3	19.212	115	817.75

表 3: RF MA コアのバイアス (DC) 磁場と共振周波数及びインピーダンスの関係

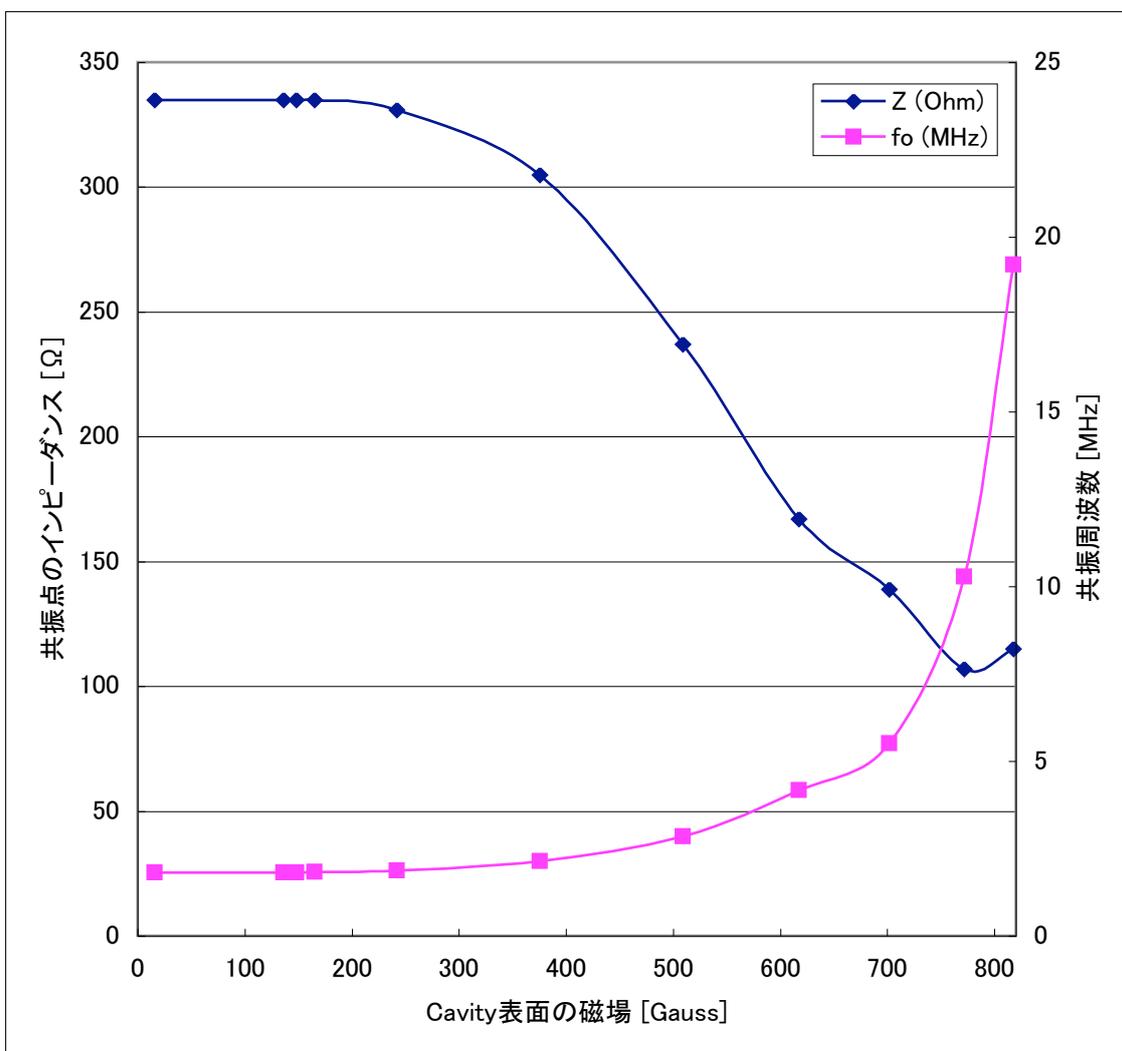
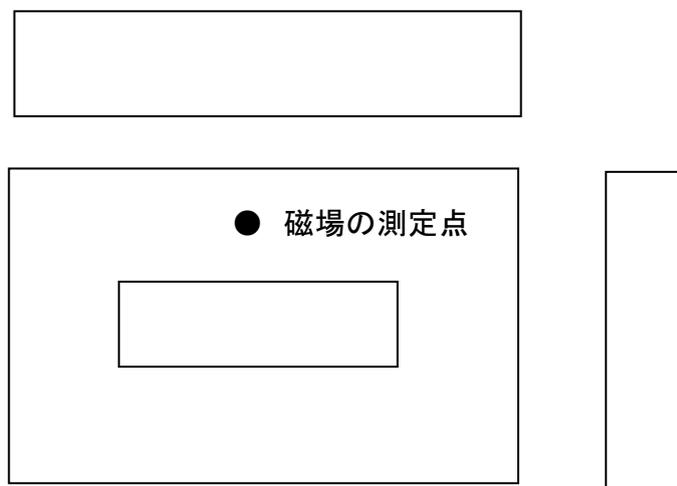


図 27: 上図：磁場測定箇所、下図：RF Cavity 表面の磁場と共振周波数及びインピーダンスの関係