

フィールドクランプサイズの最適化

有本靖

July 22, 2005

概要

PRISM-FFAG の電磁石には RF コア (FINEMET) への漏れ磁場を軽減するためにフィールドクランプを用いる。このフィールドクランプの重量は 1 枚あたり 1 t である。これは通常の電磁石に用いられるクランプと比較するとかなり重い。今回、機能を保持しながらどこまでフィールドクランプの重量を削ることが出来るのか調べた。

1 3次元磁場計算条件

磁場計算には 3次元磁場解析コード Opera3D(TOSCA) を用いた。今回、計算した際の電磁石・RF コア・クランプの配置平面図を図 1 に示す。計算領域はグレーで塗り潰されていない部分で、F 磁極の中心線から 18° まで開いた扇形の領域である。境界面は Tangential Magnetic とした。

磁極の形状は r を関数として以下の曲線で表わされる。

$$g(r) = g_0 f(r) \left(\frac{r}{r_0} \right)^k \quad (1)$$

$$f(r) = a \left(\frac{r}{r_0} - 1 \right)^2 + 1 \quad (2)$$

$$g_0 = g_{\text{ref}} f(r_{\text{ref}})^{-1} \left(\frac{r_{\text{ref}}}{r_0} \right)^{-k} \quad (3)$$

ここで $g(r)$ 、 r 、 r_0 はハーフギャップ、リング中心からの距離、中心軌道半径 ($r_0 = 650$ cm) を表わす。

今回の 3次元磁場設計で用いたこの式のパラメーター、 k 、 a 、 g_{ref} 、 r_{ref} の値は表 1 に示す。また各磁極のリング内側のシム形状は表 2 に示す。各メインコイルの電流値を表 3 に示す。

	k	a	g_{ref}	r_{ref}	関数有効範囲	コイル電流
F 磁極	-3.36	-4.3533	19.5 cm	715 cm	$586 \text{ cm} \leq r \leq 715 \text{ cm}$	68400 A·T
D 磁極	-2.05	-3.47	19.0 cm	715 cm	$577 \text{ cm} \leq r \leq 715 \text{ cm}$	18500 A·T

表 1: 磁極曲線関数のパラメーター値

	(r, z)	(r, z)	コイル電流
F 磁極シム	(570, 34.104)	(586, 38.104)	F 磁極 68400 A·T
D 磁極シム	(559, 29.718)	(577, 29.218)	D 磁極 18500 A·T

表 2: 各磁極中心軸で切った断面のリング内側シムの両端の座標点。median plane を高さの原点とした。単位は cm。

表 3: メインコイル電流

クランプの最適化パラメーターの位置を図 2 に示す。クランプ開口部の左端の位置は固定した。

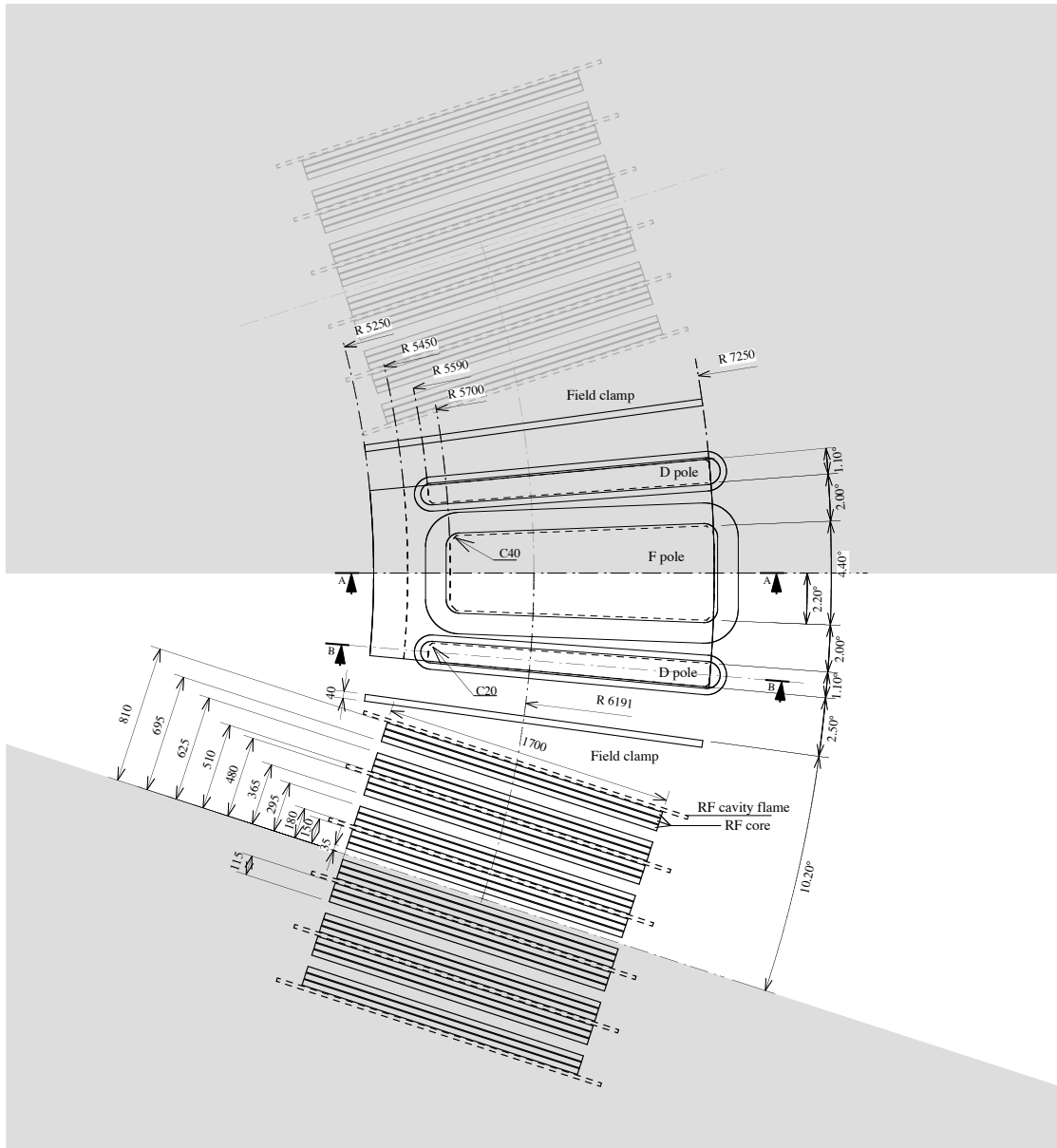


図 1: 計算に用いた電磁石、フィールドクランプと RF コアの配置図。計算領域はグレーで塗り潰されていない部分。(F 磁極の中心線から 18° まで開いた扇形の領域)

図 3 に今回の計算で用いた BH 曲線を示す。図中の”nkjl.bh” は今回の一連の計算を通して RF コア以外の磁性体材料に用いたものである。また、“ft-3kl.bh”, “ft-3km.bh” は RF コアの材質の BH 曲線で、それぞれ FINEMET(日立金属)の型番、“FT-3KL”, “FT-3KM” を想定したものである。

2 3次元磁場計算結果

2.1 W の最適化

W を最適化するために H の値は 57 cm に固定し、W を変えて RF コア内の磁束密度の変化を調べた。RF コアの BH 曲線には”ft-3kl.bh” を用いた。以降の計算では RF コア内の磁場として図 4 に示したレーストラック形状の経路, Path 1,2,3 上のものを参照する。図 5 に RF コア内の磁場をプロットし

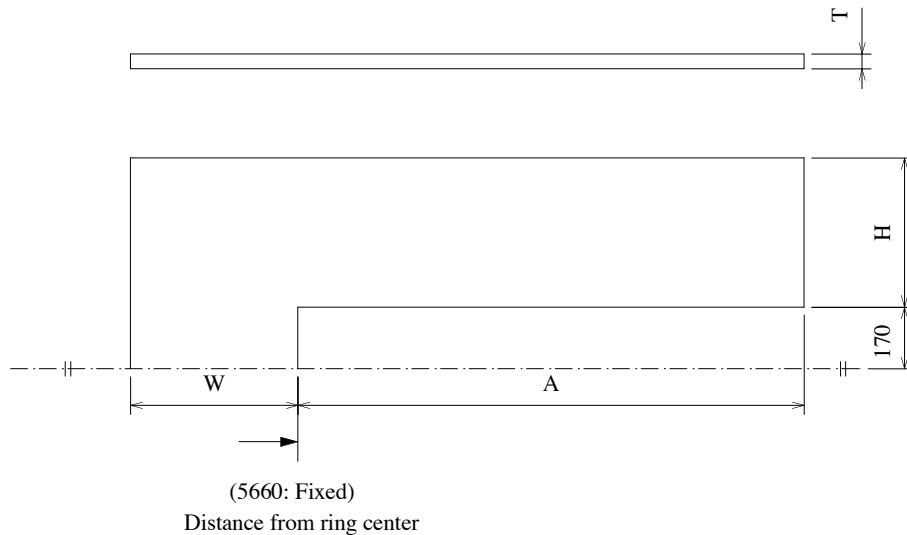


図 2: フィールドクランプ形状と変数の定義

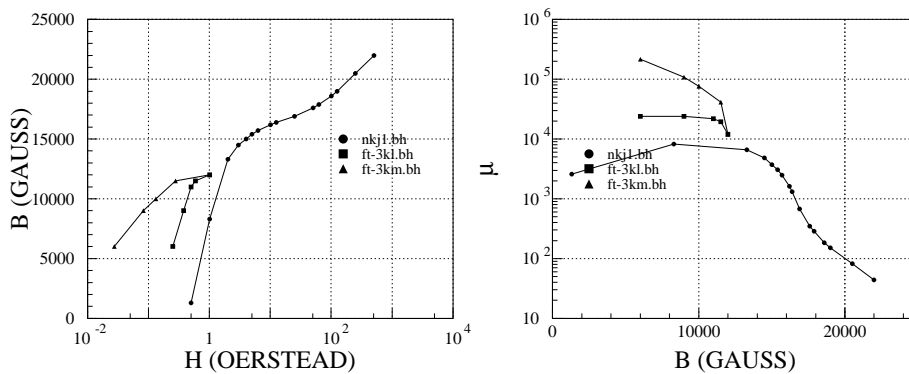


図 3: 磁場計算に使用した BH 曲線。左図: BH 曲線、右図: 比透磁率

たものを示す。図 5-左図, 中図, 右図はそれぞれクランプの厚み, T を 2 cm, 3 cm, 4 cm にした時のものを表わしている。上段は Path1, 2, 3 に沿った距離を関数として、RF コアの磁束密度の大きさをプロットしたものである。下段は W を関数として Path1, 2, 3 に沿った RF コアの磁束密度の線積分の平均値をプロットしたものである。どの厚さでも W が大きくなるにつれて、磁束密度は一定値に近づいていくのがわかる。また一定値になった時の RF コア内の磁束密度の大きさは $T=3$ cm と 4 cm ではあまり変わらないが、 $T=2$ cm では 2 倍以上になるのがわかる。これはクランプが別のところで磁気的に飽和しているためと考えられる。コア内の平均磁束密度がだいたい一定値に近づく所を最適値と考えると、この図からクランプの W は $T=3$ cm では 60 cm 以上、 $T=4$ cm では 45 cm 以上であれば良いことがわかる。

また $T=4$ cm の時のクランプ、RF コア表面の磁束密度のコンター図を図 6-9 に示す。 $W=31$ cm, 36 cm (図 6, 7) ではクランプの磁束密度は飽和していることが分かる。この時 RF コア内の磁束密度も高くなっている。

Median-plane 上での磁場分布を図 10 に示す。縦に並べられた 3 枚のプロットを 1 セットとして、4 セットの図を掲載した。各セットごとに、 W の値が異なっている。左上のセットから順に $W=31, 36, 41, 46$ cm の場合の磁場分布となっている。また、上段は BL 積 (r 弧に沿って F 磁極の中心から RF キャビティの中心まで Median plane での磁束密度を積分したもの) の分布、中段は BL 積から求めた $k+1$

値、下段は BL 積から求めた F/D 比であり、上段、中段の図中の実線は F 成分、点線は D 成分を表わしている。横軸は r 方向の位置である。

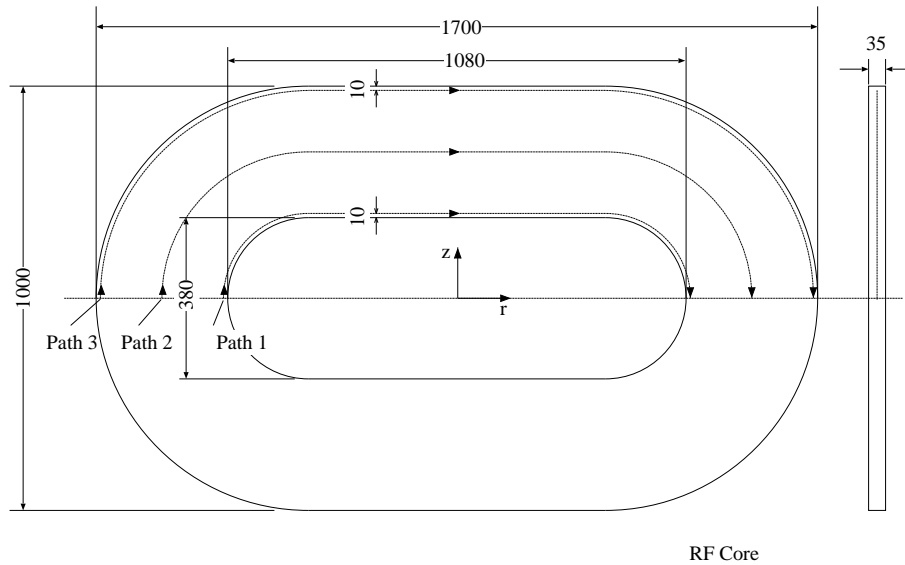


図 4: 経路の定義

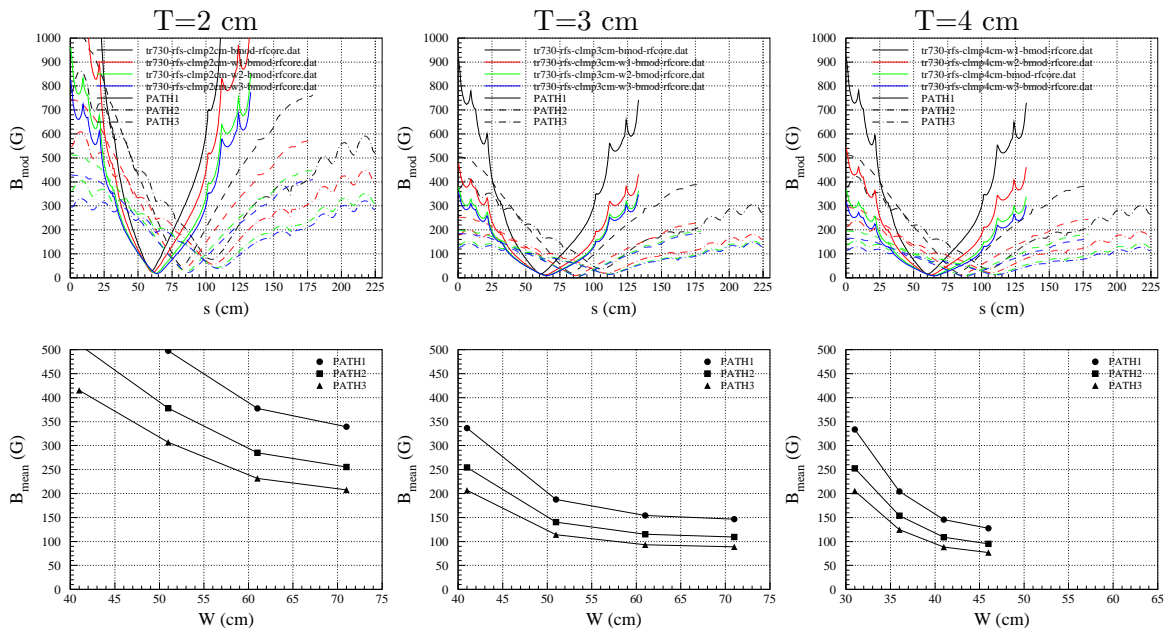


図 5: クランプのリターン部の幅, W を変更。上図: 実線、点線、一点鎖線はそれぞれ PATH1,2,3 上の磁束密度を示す。下図: ●、■、▲はそれぞれ PATH1,2,3 上の平均磁束密度を示す。

2.2 H の最適化

次に H を最適化するために T , W , A を固定して H の幅に対するコア内の磁束密度の変化を調べた。RF コアの BH 曲線には "ft-3kl.bh" を用いた。図 11 にその結果を示す。図の見方については、下図の

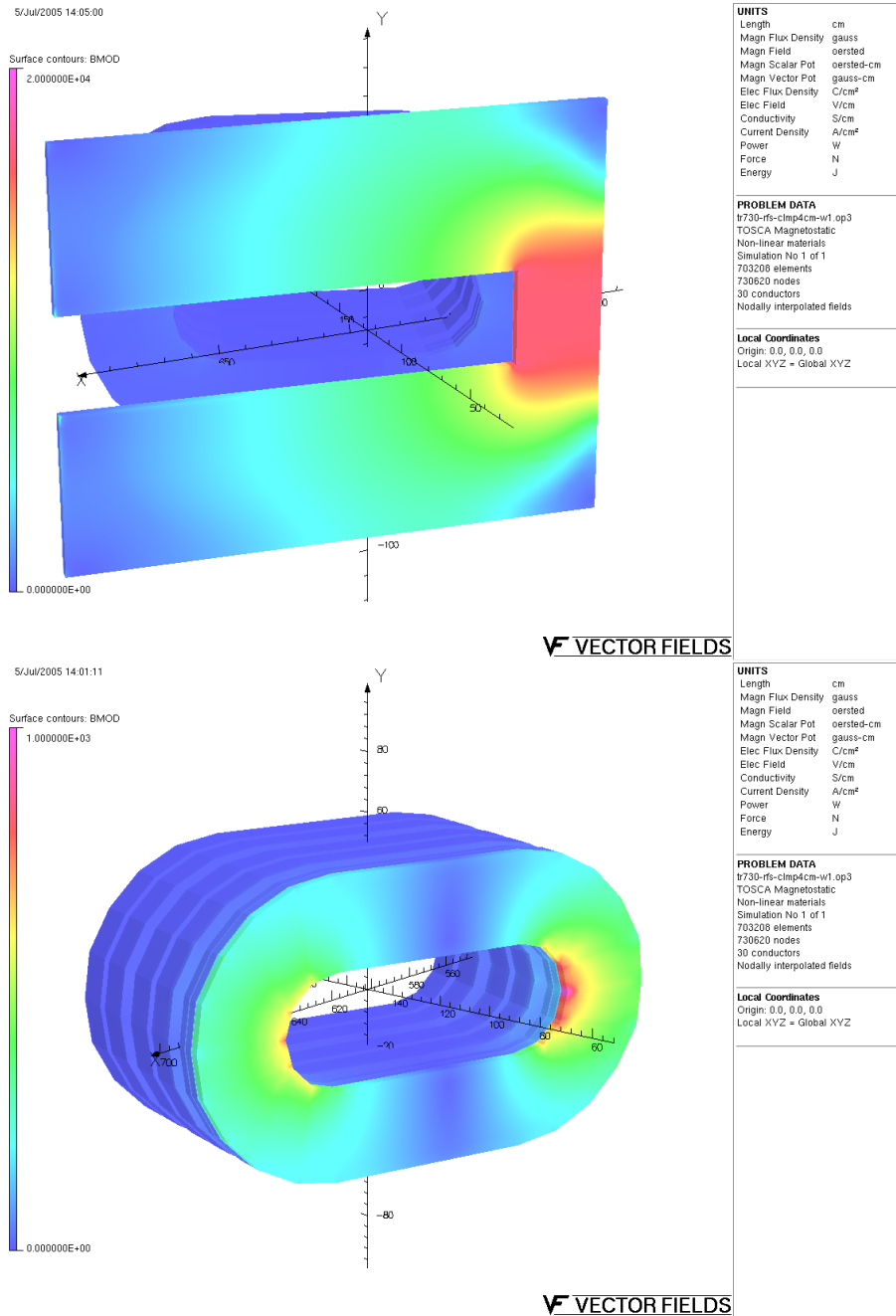


図 6: 上図: クランプの磁束密度のコンター図。下図: RF コアの磁束密度のコンター図。T=4 cm, W=31 cm。

横軸がHであること以外は図 5 と同じである。

左図は T= 3cm, W=61 cm, A=159 cm とした時のもので、右図は T= 4cm, W=46 cm, A=159 cm とした時のものである。

また T=4 cm の時の Median-plane 上での磁場分布を図 12 に示す。図の見方は図 10 と同じである。左上のセットから順に H=36 cm, H=41 cm, H=46 cm, H=51 cm, の場合の磁場分布となっている。

尚、図 10 と図 12 は磁場計算を行なった時の有限要素メッシュのサイズが異なる (図 12 の方がメッシュが粗い) ためこの二つの図を比較する際に注意が必要である。RF コア内の磁束密度については、

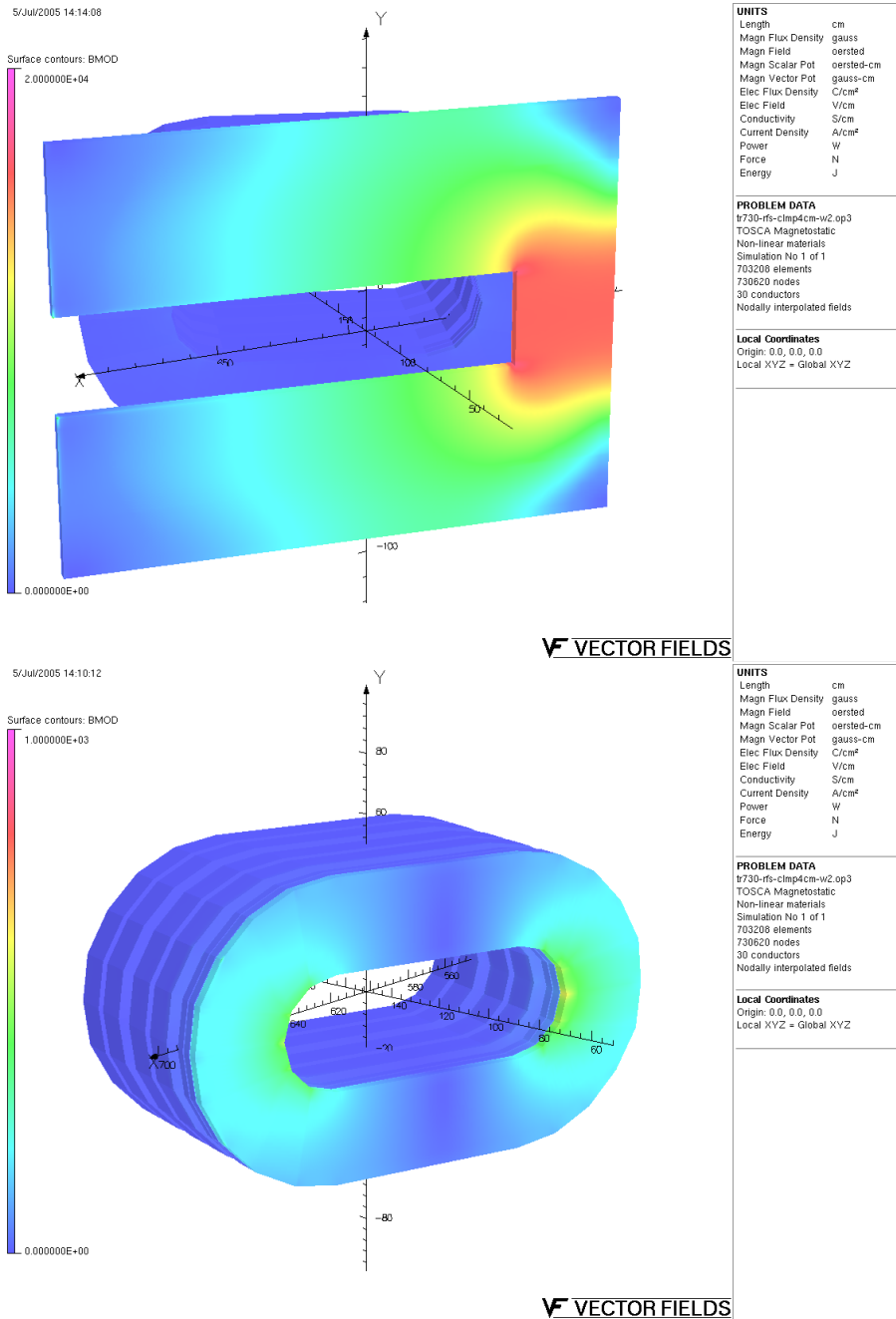


図 7: 上図: クランプの磁束密度のコンター図。下図: RF コアの磁束密度のコンター図。T=4 cm, W=36 cm。

メッシュサイズの違いはほとんど無視出来ることは確認した。

2.3 T の最適化

クランプ板の厚みを最適化するために、クランプの重さがどの厚みでも同程度になるように、クランプの面積と厚みを変えて RF コア内の磁場を調べた。電磁石本体の端面とクランプの距離は一定として厚みを変えた。どの厚さでも約 $H/W=0.9$ 程度となるようにし、A は 159 cm に固定した。これらのパラメーターの値をまとめたものを表 4 に示す。図 13 に計算で得られたコア内の磁束密度をプロットする。

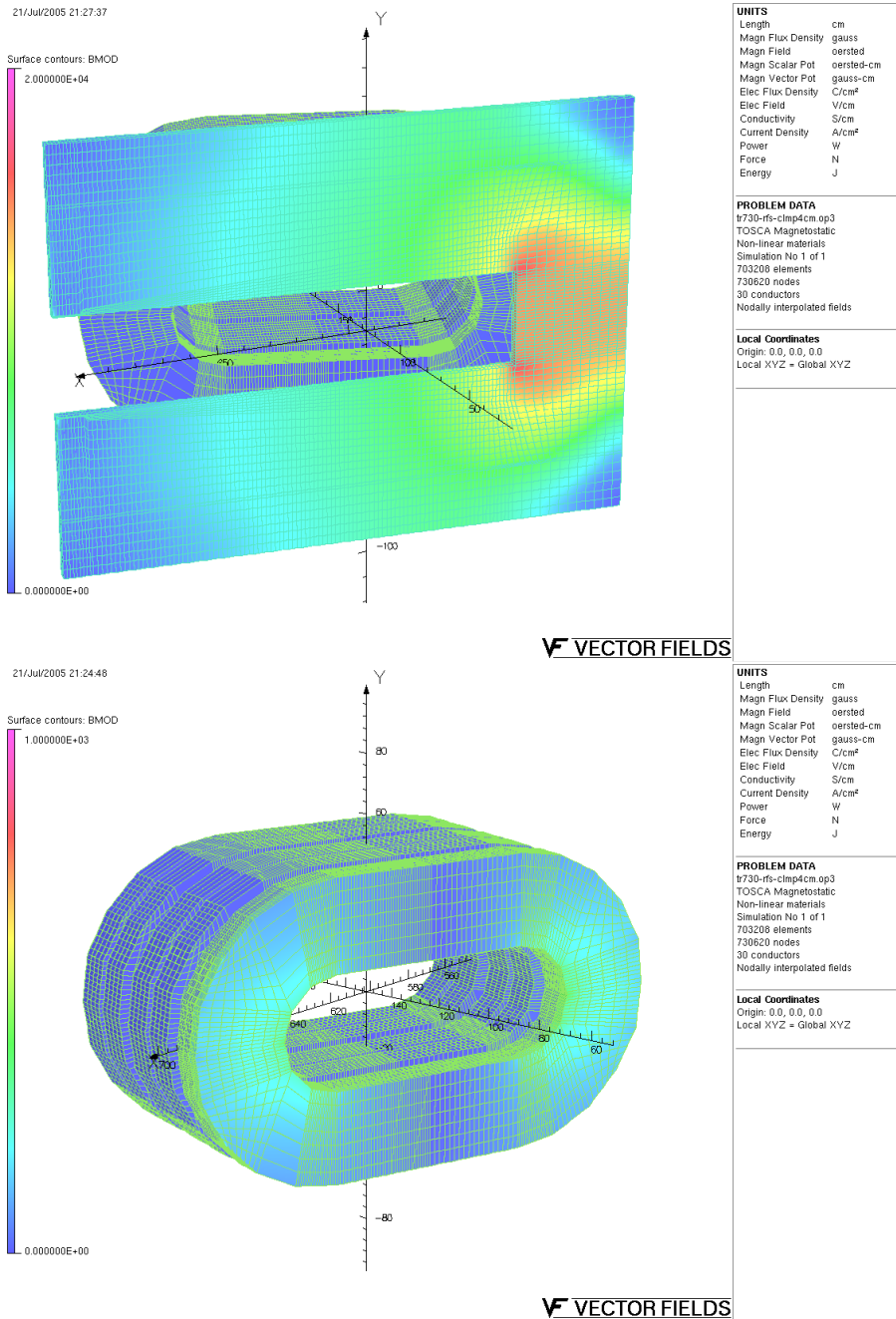
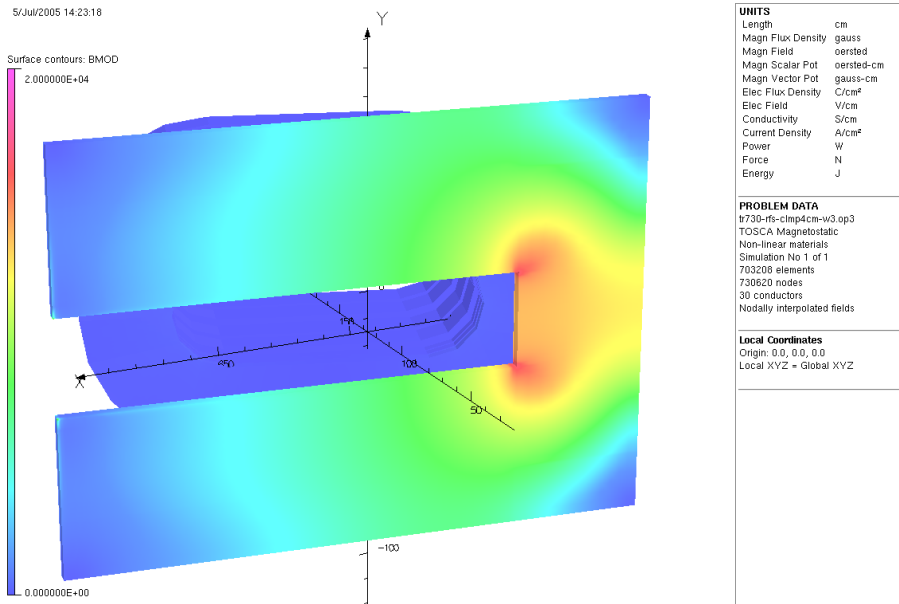


図 8: 上図: クランプの磁束密度のコンター図。下図: RF コアの磁束密度のコンター図。T=4 cm, W=41 cm。

下図の横軸は T である。黒で塗り潰したマーカーはコア内の磁束密度の平均値、白抜きの丸はクランプの重量を表わしている。厚さ 4 cm の方が重量が若干少なくなっているにもかかわらず、RF コア内の磁束密度は低い。このことからクランプは厚い方が良いと言える。しかし、厚すぎると PRISM-FFAG においては RF 空洞との空間的な干渉が問題となるため T=4 cm が適当であると考えられる。

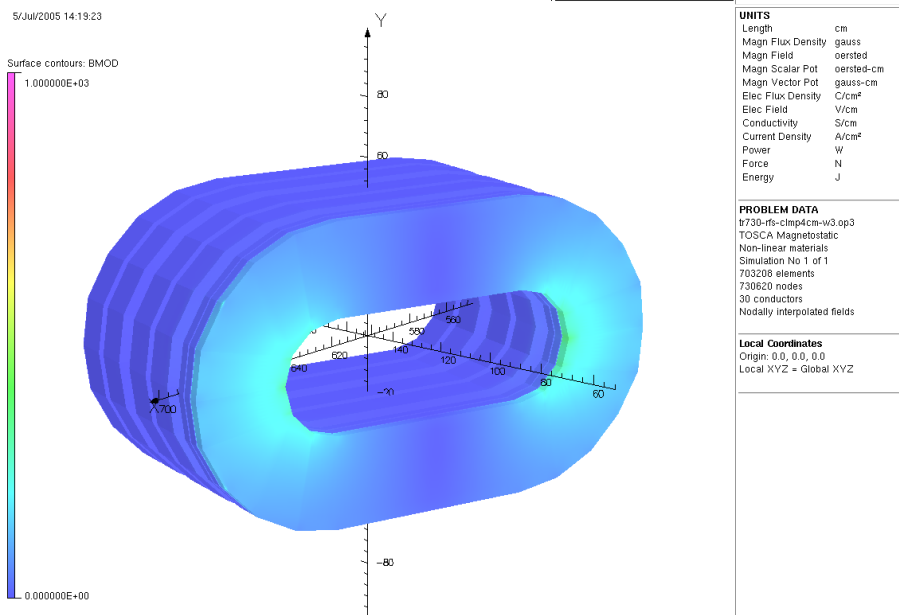


UNITS	
Length	cm
Magn Flux Density	gauss
Magn Field	oersted
Magn Scalar Pot	oersted-cm
Magn Vector Pot	gauss-cm
Elec Flux Density	C/cm ²
Elec Field	V/cm
Conductivity	S/cm
Current Density	A/cm ²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA	
t730-rfs-clmp4cm-v3.op3	
TOSCA Magnetostatic	
Non-linear materials	
Simulation No 1 of 1	
703208 elements	
730620 nodes	
30 conductors	
Nodally interpolated fields	

Local Coordinates	
Origin: 0.0, 0.0, 0.0	
Local XYZ = Global XYZ	

V VECTOR FIELDS



UNITS	
Length	cm
Magn Flux Density	gauss
Magn Field	oersted
Magn Scalar Pot	oersted-cm
Magn Vector Pot	gauss-cm
Elec Flux Density	C/cm ²
Elec Field	V/cm
Conductivity	S/cm
Current Density	A/cm ²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA	
t730-rfs-clmp4cm-v3.op3	
TOSCA Magnetostatic	
Non-linear materials	
Simulation No 1 of 1	
703208 elements	
730620 nodes	
30 conductors	
Nodally interpolated fields	

Local Coordinates	
Origin: 0.0, 0.0, 0.0	
Local XYZ = Global XYZ	

V VECTOR FIELDS

図 9: 上図: クランプの磁束密度のコンター図。下図: RF コアの磁束密度のコンター図。T=4 cm, W=46 cm。

T [cm]	W [cm]	H [cm]	A [cm]
2	91	78	159
3	61	56	159
4	46	41	159

表 4: 厚みの最適化を行なった際のパラメータ

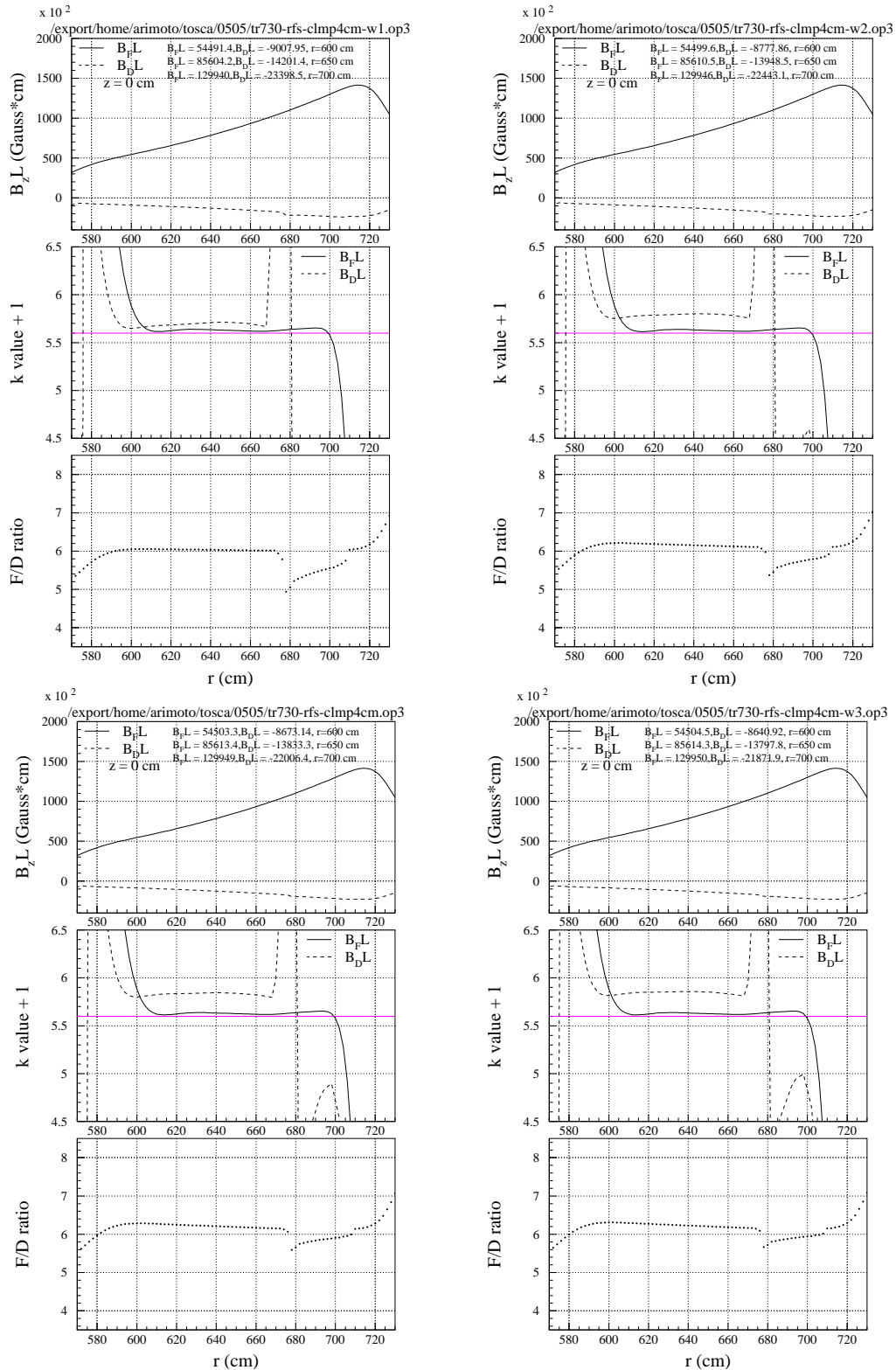


図 10: Median-plane 上での磁場分布。左上より順に、 $W=31$, $W=36$, $W=41$, $W=46$ cm。クランプの厚さはすべて $T=4$ cm。上段: BL 積の分布、中段: BL 積から求めた $k+1$ 値、下段: BL 積から求めた F/D 比。実線は F 成分、点線は D 成分を表わしている。横軸は r 方向の位置。

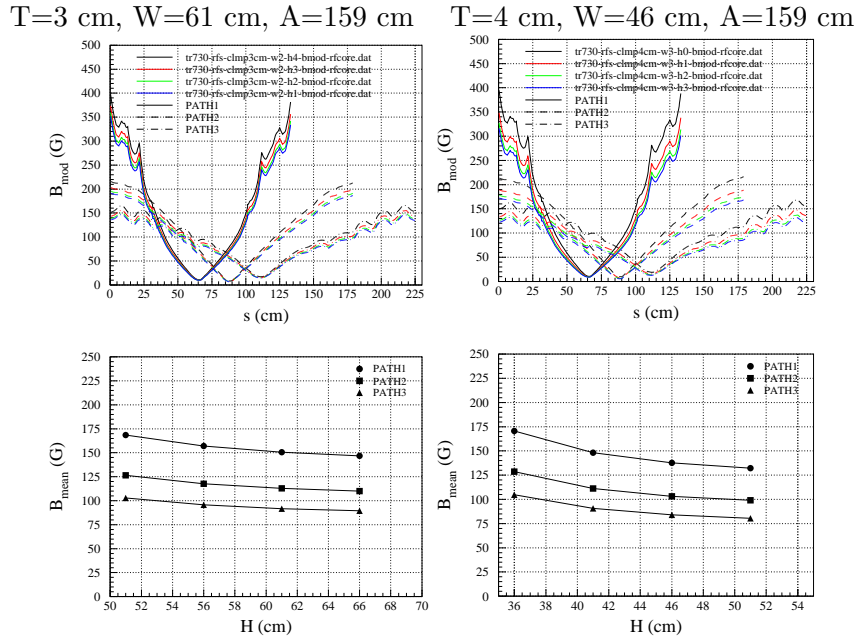


図 11: クランプの高さ方向の幅を変更。左図: $T=3\text{ cm}$, $W=61\text{ cm}$, $A=159\text{ cm}$ 。右図: $T=4\text{ cm}$, $W=46\text{ cm}$, $A=159\text{ cm}$ 。上図: 実線、点線、一点鎖線はそれぞれ PATH1,2,3 上の磁束密度を示す。下図: ●、■、▲はそれぞれ PATH1,2,3 上の平均磁束密度を示す。

2.4 A の最適化

クランプの r 方向の長さ, A の最適化を行った。その結果を図 11 に示す。下段の図を見ると RF コア内の平均磁束密度は A の値に対して極小値を持っている。これは、 A を長くすることで元々 RF コアに入り込まない磁束をクランプが吸い込んでその磁束が RF コアに漏れていると考えられる。ただしこの増加量はあまり大きくはないため、 A の値は極小値の位置以上にしておけば問題はない。

2.5 最適化されたパラメータのまとめ

以上のスタディより RF コア内の磁束密度を抑えるためのクランプの各パラメータの条件は以下の通りとなる。

- $T=4\text{ cm}$
- $W \geq 46\text{ cm}$
- $H \geq 41\text{ cm}$
- $A \geq 139\text{ cm}$

この時の最小値を選んだ時の重さ (クランプ上半分) は

旧	0.495 t
新	0.264 t

となり、これまでの約半分に減量することが出来る。

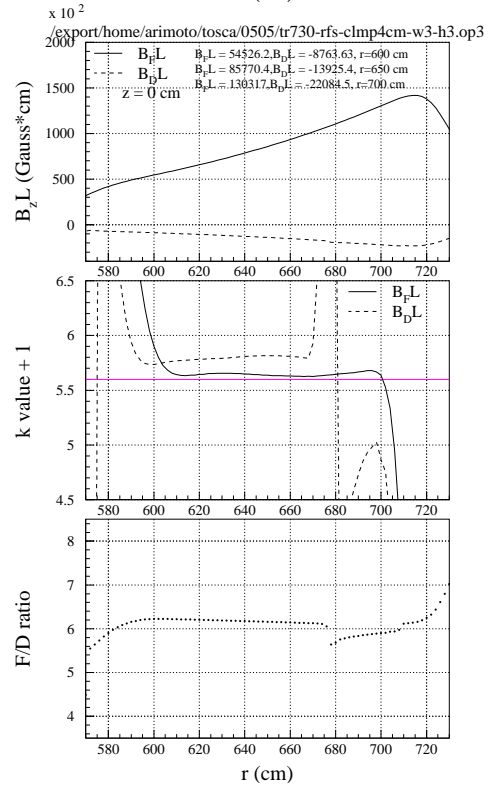
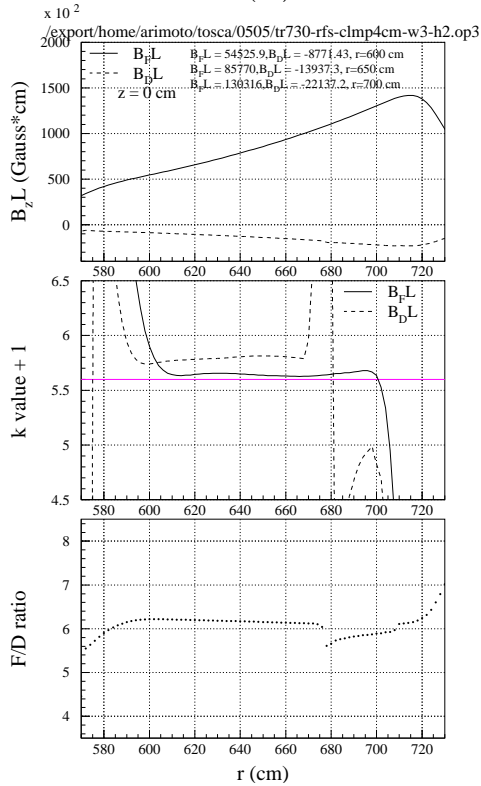
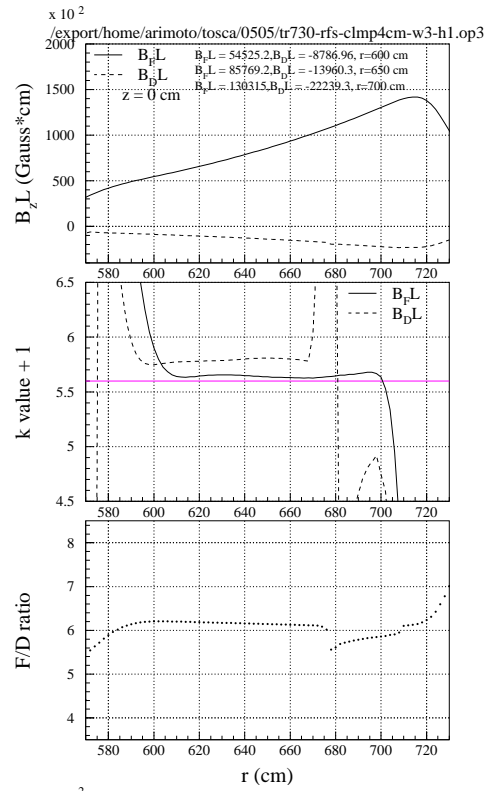
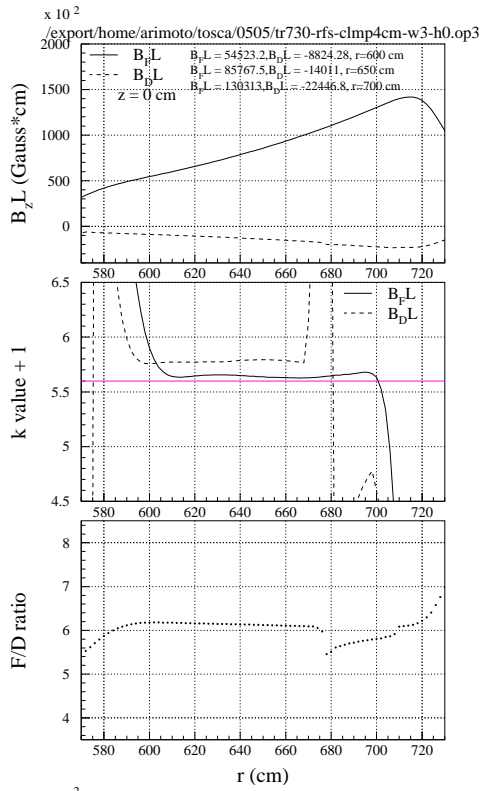


図 12: Median-plane 上での磁場分布。左上より順に、 $H=36$ cm, $H=41$ cm, $H=46$ cm, $H=51$ cm。クランプの厚さはすべて $T=4$ cm。上段: BL 積の分布、中段: BL 積から求めた $k+1$ 値、下段: BL 積から求めた F/D 比。実線は F 成分、点線は D 成分を表わしている。横軸は r 方向の位置。

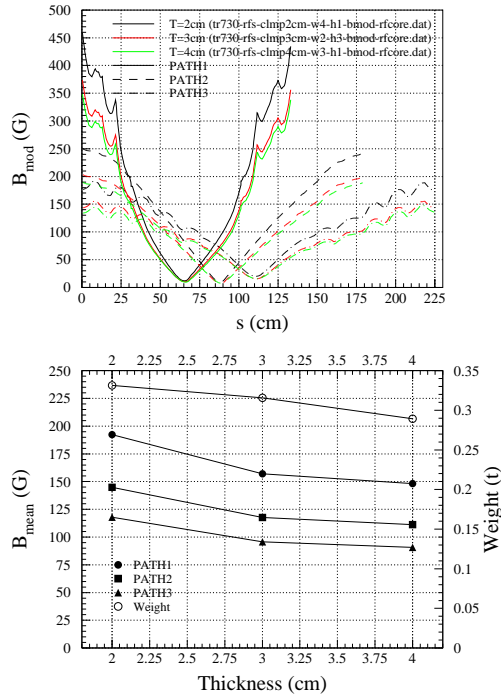
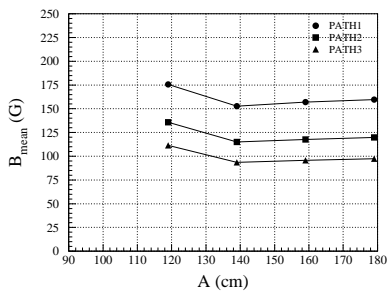
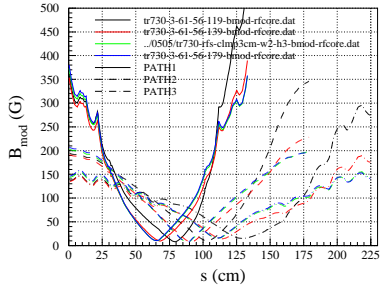
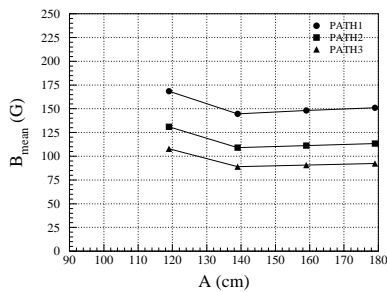
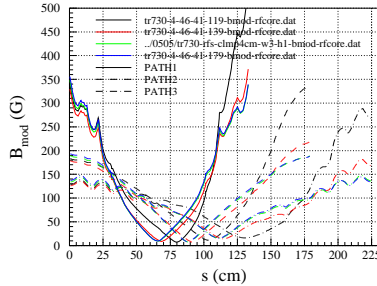


図 13: クランプの厚み, T を変更。上図: 実線、点線、一点鎖線はそれぞれ PATH1,2,3 上の磁束密度を示す。下図: ●、■、▲はそれぞれ PATH1,2,3 上の平均磁束密度を示す。○はクランプの重量を示す。

T=3 cm, W=61 cm, H=56 cm



T=4 cm, W=46 cm, H=41 cm



T=4 cm, W=46 cm, H=51 cm

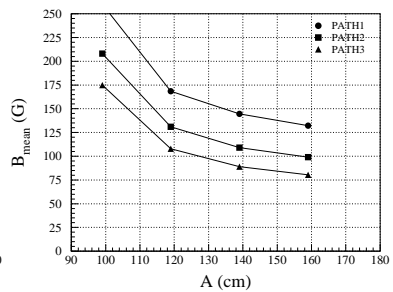
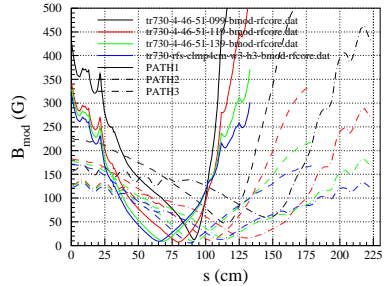


図 14: クランプの長手方向の長さ, A を変更。上図: 実線、点線、一点鎖線はそれぞれ PATH1,2,3 上の磁束密度を示す。下図: ●、■、▲はそれぞれ PATH1,2,3 上の平均磁束密度を示す。

3 RF コアの BH 曲線の違い

次に RF コアの BH 曲線を変更してみた。これまでの計算では RF コア内の BH 曲線として”ft-3km.bh”(図 3) を使用してきたが、もう少し透磁率の大きな”ft-3kl.bh” を使用した場合について計算を行なった。そ

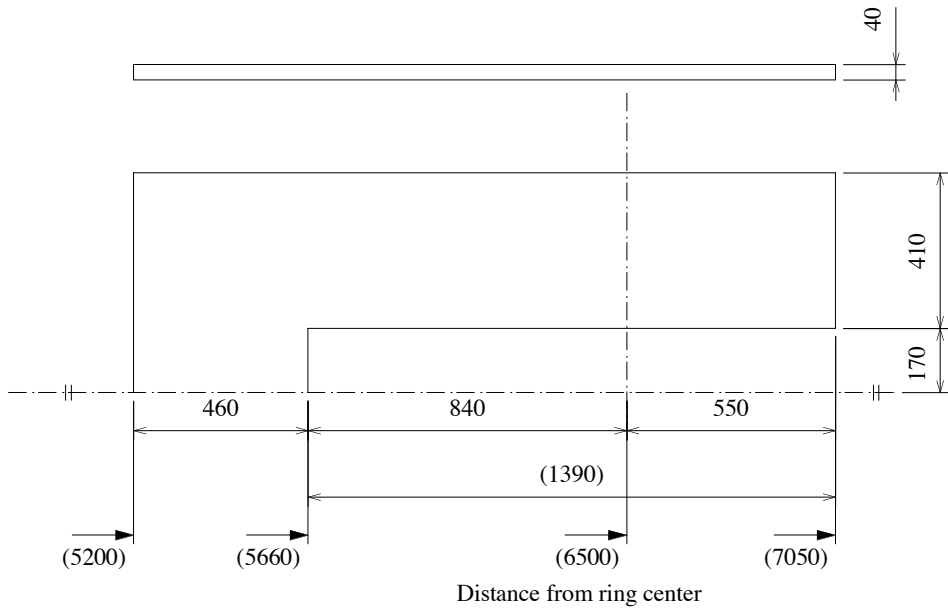


図 15: 最適化されたクランプの形状

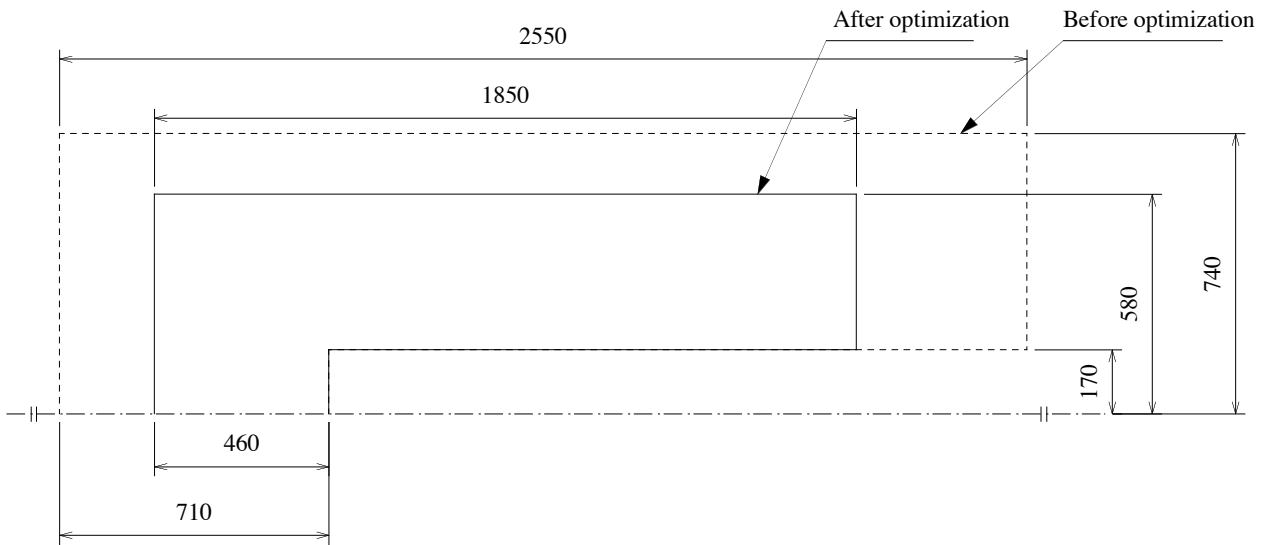
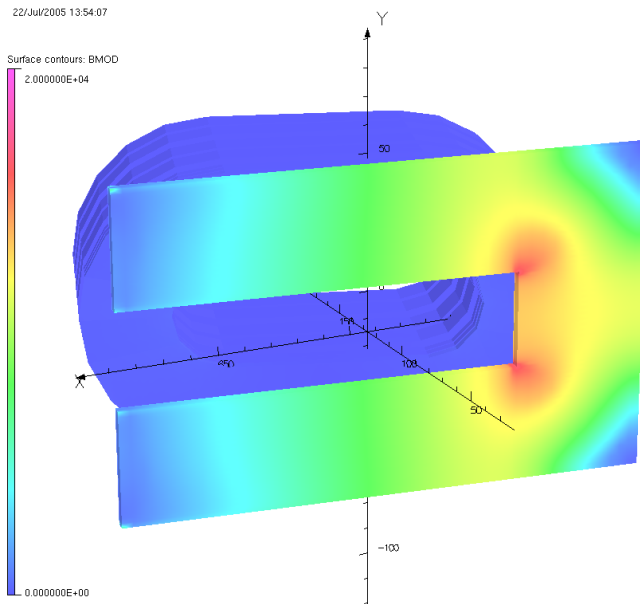


図 16: これまでのクランプとの大きさの比較

の結果を図 18 に示す。BH 曲線の違いによる RF コア内の平均磁束密度の変化量は、5 % 程度であるため、RF コアの透磁率の影響はほとんど無視出来ると言える。

4 クランプ開口部を広げた場合

次にクランプ開口部の高さを変えた場合について調べた。これは真空チェンバを連結するフランジの位置がクランプの開口部にくる可能性があるためである。この場合、クランプの開口部はこれまでより ± 10 cm の高さ方向に広げる必要がある。このようなクランプ形状の変更は、開口部からの漏れを大きくし、その結果、RF コア内の磁束密度の増加につながる可能性がある。そこで開口部を広げた時の磁

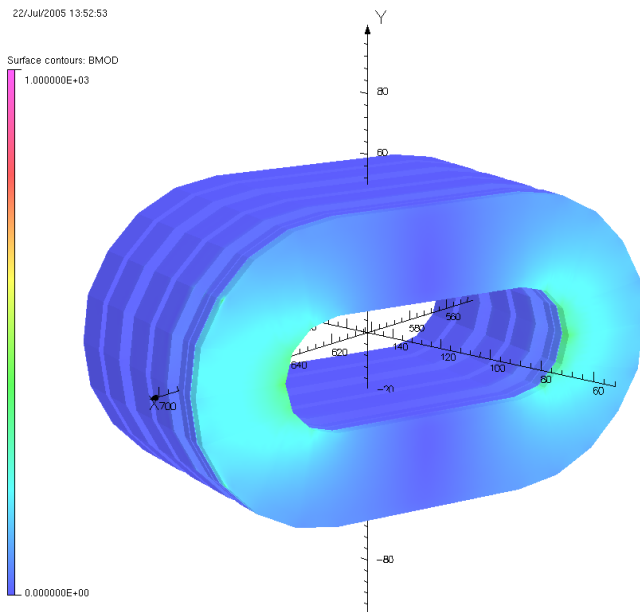


UNITS	
Length	cm
Magn Flux Density	gauss
Magn Field	oersted
Magn Scalar Pot	oersted-cm
Magn Vector Pot	gauss-cm
Elec Flux Density	C/cm ²
Elec Field	V/cm
Conductivity	S/cm
Current Density	A/cm ²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA	
t730-4-46-41-139.op3	
TOSCA Magnetostatic	
Non-linear materials	
Simulation No 1 of 1	
212160 elements	
223491 nodes	
30 conductors	
Nodally interpolated fields	

Local Coordinates	
Origin: 0.0, 0.0, 0.0	
Local XYZ = Global XYZ	

VECTOR FIELDS



UNITS	
Length	cm
Magn Flux Density	gauss
Magn Field	oersted
Magn Scalar Pot	oersted-cm
Magn Vector Pot	gauss-cm
Elec Flux Density	C/cm ²
Elec Field	V/cm
Conductivity	S/cm
Current Density	A/cm ²
Power	W
Force	N
Energy	J

PROBLEM DATA	
t730-4-46-41-139.op3	
TOSCA Magnetostatic	
Non-linear materials	
Simulation No 1 of 1	
212160 elements	
223491 nodes	
30 conductors	
Nodally interpolated fields	

Local Coordinates	
Origin: 0.0, 0.0, 0.0	
Local XYZ = Global XYZ	

VECTOR FIELDS

図 17: 最適化されたクランプを使用した時の磁束密度のコンター図上図：クランプの磁束密度。下図：RF コアの磁束密度。T = 4 cm、W = 46 cm、H = 41 cm、A = 139 cm。

場計算を行なった。この時の W,H,A は図 15 と同じである。ただし開口部の高さは 170 mm → 220 mm に変更した。計算結果を図 19 に示す。RF コア内の磁束密度の増加率は 20 % 程度であり、問題になるほど大きくはないと言える。

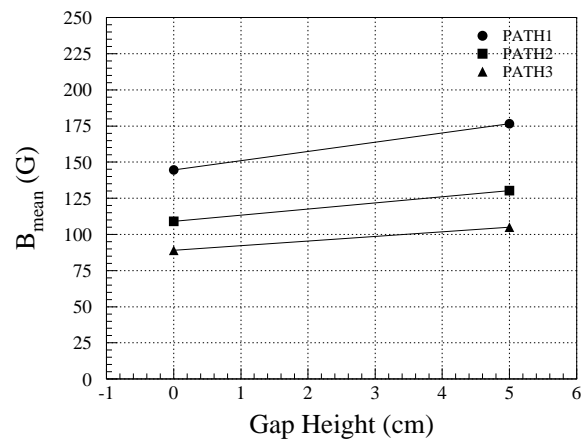
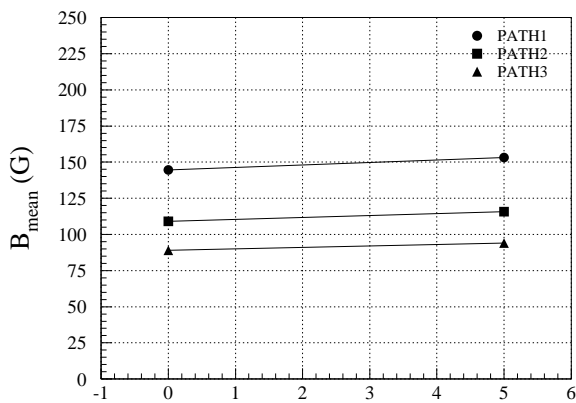
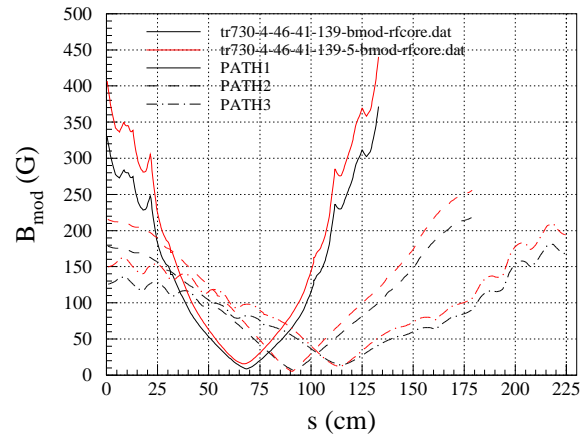
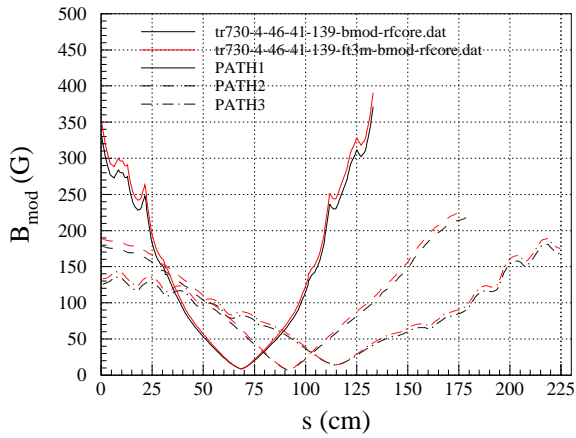


図 18: RF コアの磁気特性の違いによる RF コア内の磁束密度の変化。下図：横軸が 0 の位置のデータは”ft-3km.bh”, 5 の位置のデータは”ft-3kl.bh” の平均磁束密度

図 19: クランプ開口部の高さによる RF コア内磁束密度の違い。

5 まとめ

クランプ形状の最適化によって、クランプの重量は半分まで減量できることがわかった。また、RF コアの透磁率の変化に対するコア内の磁束の増加は 5 %程度でありこれは無視できる程小さい値である。また、開口を ±5 cm 広げた場合でも 20%程度の増加ですむことが確認された。