

JAERI-Tech  
98-050



国際熱核融合実験炉 | T E R 磁場補正  
(コレクション)コイルの設計

1998年11月

久保博篤・小峰武司\*・吉田 清

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

## 国際熱核融合実験炉 ITER 磁場補正（コレクション）コイルの設計

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部  
久保 博篤・小峰 武司\*・吉田 清+

(1998年10月13日受理)

日、米、E C、ロシアの4極の協力により国際熱核融合実験炉（International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER）計画が進められている。プラズマを閉じ込めるため、磁場を発生させるコイルとして超電導コイルが使用されている。そのコイルのうち、ポロイダル磁場コイル（P Fコイル）と呼ばれる真空容器中のプラズマ位置や断面形状を制御するコイルが、設置されている。この磁場にはP Fコイル製作による誤差、据え付け公差により磁場の誤差が生じる。この誤差を補正する目的のためP Fコイルの周囲をコレクション・コイルと呼ばれる磁場補正超電導コイルが設置される。コレクション・コイルは、次の3系統の超電導コイルから構成される。そこで、コイルの運転時の応力解析を行いクランプのボルト形状、クランプの位置の検討を行った。検討した結果は次に示すとおりである。

### ①上部コレクション・コイル

- 現設計のクランプ位置では、コイルのケース部分の応力が許容応力を大きく上回る。許容応力内に收めるためには、修正境界条件に示されるクランプ位置に設定する必要がある。

- 現クランプ形状では許容応力を満足しないので、新形状とする必要がある。

- ボルトのサイズは、M16よりも大きなサイズとする必要がある。

### ②側部コレクション・コイル

- 現設計のクランプ位置では、コイルのケース部分の応力が許容応力に対し裕度が小さい。裕度を大きくとるためにには、修正境界条件に示されるクランプ位置に設定する必要がある。

- 絶縁フランジ及そのボルトは、許容応力値以内にある。

- クランプのボルトのサイズは、M 24よりも大きいサイズを用いる必要がある。

### ③下部コレクション・コイル

---

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

\*ITER開発室

\*\*株原子力資料サービス

- ・現設計のクランプ位置でも問題とならない。
- ・クランプの応力は許容応力内である。
- ・クランプのボルトのサイズは、M24よりも大きいサイズを用いる必要がある。

## Design of Correction Coil for ITER

Hiroatsu KUBO, Takeshi OMINA \* and Kiyoshi YOSHIDA +

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 13 ,1998)

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) project is under way among EU, Japan, Russia and US. In order to shut plasma, the magnetic field is applied by the superconducting coils in ITER. The coils which are called "Poloidal field (PF-coil)" are installed to control the location and the cross-section shape for plasma in the vacuum vessel. Incorrect position of Magnetic field (Magnetic error) is occurred by the manufacture tolerance for PF-coil. The coils which are called "Correction-Coil" are installed in order to correct these magnetic error around the PF-coil. The Correction Coils are consist of the 3-sets of the superconducting coil.

The stress analysis for the correction coils is performed and the supporting structure of the coils are designed. The bolts for clamps and the position for clamps are examined from this analysis.

The results are as follows:

① Top Correction Coil

- The stress in the coil case exceed the allowable stress in the reference design. In order to satisfy the allowable stress, it is necessary to change the position for clamps, as shown in the results of the analysis.
- The clamps do not satisfy the allowable stress, as the reference design it is also necessary to change the new designed clamps.
- It is necessary to increase the bolt size than M16 .

---

+ Department of ITER Project

\* Atomic Energy General Service Co., Ltd

② Side Correction Coil

- The stress in the coil case has the small margin for the allowable stress in the reference design. In order to increase the margin, the design changes are proposed for clamps, as shown by this analysis results.
- The bolts in the insulated flange is satisfy the allowable stress.
- It is necessary to increase the bolt size than M24.

③ Bottom Correction Coil

- The stress for clamp is allowable.
- The location of the clamps is acceptable as the reference design.
- It is necessary to increase the bolt size than M24.

Keywords : Correction-Coil, Top Correction Coil, Side Correction Coil, Bottom Correction Coil

## 目 次

1.はじめに.....	1
2.解析モデル.....	2
2.1 コレクション・コイル 電流.....	2
2.2 解析モデル.....	2
2.3 解析対象運転状態.....	2
2.4 物性値.....	4
2.5 境界条件.....	4
2.5.1 強制変位境界条件.....	4
2.5.2 修正クランプ位置における強制変位境界条件.....	5
2.6 荷重条件.....	5
2.6.1 上部 コレクション・コイル.....	5
2.6.2 側部 コレクション・コイル.....	5
2.6.3 下部 コレクション・コイル.....	5
3.解析結果.....	6
3.1 変形.....	6
3.2 応力.....	7
3.2.1 絶縁材.....	7
3.2.2 卷線コイル.....	8
3.2.3 ケース.....	9
4.応力評価.....	10
4.1 絶縁材の剪断応力.....	10
4.2 卷線コイルの引張応力.....	10
4.3 ケースのトレスカ応力.....	11
5.特定箇所についての応力評価.....	12
5.1 上部 コレクション・コイル.....	12
5.1.1 クランプの応力.....	12
5.1.2 クランプのボルト.....	13
5.2 側部 コレクション・コイル.....	13
5.2.1 絶縁フランジ及曲部フランジのボルト.....	14
5.2.2 クランプのボルト.....	14
5.2.3 ケースの溶接部の応力.....	15
5.2.4 フィーダ用アクセス孔の影響.....	15
5.3 下部 コレクション・コイル.....	15
5.3.1 クランプの応力.....	15

5. 3. 2 クランプのボルト.....	16
6. 結論.....	16
謝辞.....	17

## Contents

<b>1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Analysis Model and Condition.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Configuration of Correction Coil.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Analysis Model.....</b>	<b>2</b>
<b>2.3 Current Condition.....</b>	<b>2</b>
<b>2.4 Material Properties.....</b>	<b>4</b>
<b>2.5 Boundary Condition.....</b>	<b>4</b>
<b>2.5.1 Forced Displacement Boundary Condition.....</b>	<b>4</b>
<b>2.5.2 Modified Condition.....</b>	<b>5</b>
<b>2.6 Load Condition.....</b>	<b>5</b>
<b>2.6.1 Top Correction Coil.....</b>	<b>5</b>
<b>2.6.2 Side Correction Coil.....</b>	<b>5</b>
<b>2.6.3 Bottom Correction Coil.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Analysis Results.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Deformation.....</b>	<b>6</b>
<b>3.2 Stress.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.1 Insulator.....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.2 Winding Pack.....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.3 Case.....</b>	<b>9</b>
<b>4. Global Stress Evaluation.....</b>	<b>10</b>
<b>4.1 Shear Stress for Insulator.....</b>	<b>10</b>
<b>4.2 Tensile Stress for Winding Pack.....</b>	<b>10</b>
<b>4.3 Tresca Stress on the Case of Coil.....</b>	<b>11</b>
<b>5. Local Stress Evaluation.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1 Top Correction Coil.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1.1 Stress of Clamp.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1.2 Bolts of Clamp.....</b>	<b>13</b>
<b>5.2 Side Correction Coil.....</b>	<b>13</b>
<b>5.2.1 Bolts of Insulated Flange and Corner Parts.....</b>	<b>14</b>
<b>5.2.2 Bolts of Clamps.....</b>	<b>14</b>
<b>5.2.3 Stress of Welded Zone for Case.....</b>	<b>15</b>
<b>5.2.4 Effect of Access Hole for Feeder.....</b>	<b>15</b>
<b>5.3 Bottom Correction Coil.....</b>	<b>15</b>
<b>5.3.1 Stress of Clamp.....</b>	<b>15</b>

5.3.2 Bolts of Clamps.....	16
6. Conclusion.....	16
Acknowledgement.....	17

## 1.はじめに

日、米、EC、ロシアの4極の協力により国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor:ITER)計画が進められている。プラズマを閉じ込めるため、磁場を発生させるコイルとして超電導コイルが、使用されている。そのコイルのうち、ポロイダル磁場コイル(PFコイル)と呼ばれる真空容器中のプラズマ位置や断面形状を制御するコイルが、設置されている。この磁場には PF コイル製作による誤差、据付け公差により磁場の誤差が生じる。この誤差を補正する目的のため PF コイルの周囲をコレクションコイルと呼ばれる磁場補正超電導コイルが、設置される。

このコレクションコイルに作用する荷重には、通電される大電流により発生する電磁力荷重およびコレクションコイルを支持するクランプが TF コイルに据え付けられることによって、TF コイルの変形によりコレクションコイルに発生する強制変位荷重がある。この荷重によって、大きな応力がコレクションコイルに発生する恐れがある。そのため、この機械特性を評価し設計に結果を反映させる提案を行う目的で、電磁力と TF コイルの変位による応力解析、クランプのボルト、形状等の検討を行い、最適なクランプ位置について評価する。

コレクション・コイルは、上部 (Top) : 4 コイル 側部 (Side) : 8 コイル 下部 (Bottom) : 4 コイルから構成されている。コレクション・コイルの全体の配置を図 1-1 に示す。

側面のコイル ( Side Coil) は、PF コイル 4、5、6 の支持構造物上に設置されている。ITER の運転条件では PF コイル 6において最大電流が発生する。

コレクション・コイルの中では側部コイルが、最大の電磁力を受けると考えられる。

次に、下部のコイル ( Bottom Coil) は、PF コイル 7、8、9 の支持構造物上に設置されている。ITER の運転条件によると PF コイル 7、9において、その次に大きな電流を示している。

上部コイルは、PF コイル 2、3 からの電磁力を受ける構造として設計されている。

解析に用いる運転状態は、コレクション・コイルに最も影響のある PF コイルが発生する磁場から選定する。

本解析は、荷重として電磁力に加え TF コイルによる変位を考慮したケースの発生応力が、許容応力以下であることを確認するとともに解析結果に基づいてクランプ等の構造について検討し、最適な構造を提言することを目的とする。

## 2. 解析モデル

### 2.1 コレクションコイル 電流

コレクションコイル通電電流仕様を表-1に示す。

表-1 コレクション・コイル通電

	上部コイル	側部コイル	下部コイル
総電流 (kA)	45	150	240
1ターンあたりの電流 (kA)	7.5	7.5	7.5
ターン数	6	20	32

### 2.2 解析モデル

コレクション・コイルの図を図-1-1 から図-1-10 に示す。巻線コイルの断面を図-1-5 に示す。 上部コイルのモデルを図-2-9、 側部コイルのモデルを図-2-10、 下部コイルのモデルを図-2-11 に示す。 モデル断面の有限要素は、図-2-1 に示す。

### 2.3 解析対象運転状態

コイルの運転電流条件は、次に示す ITER 運転条件とする。

コレクション・コイルに作用する電磁力荷重に最も影響を及ぼす条件は PF コイルの発生する磁場である。上部、側部、下部コレクション・コイルの各コイルに最も磁場の影響を与える PF コイルで最大電流値で運転される条件とする。表 2-1 にコイルの運転電流条件の詳細を示す。

(1) 上部コイル：運転状態 SOB{Start of Burn (li: 1.1)}

及 運転状態 EOC{End of Cool (li: 0.7)}

(2) 側部コイル：運転状態 SOF{Start of Flat Top (li: 0.7)}

(3) 下部コイル：運転状態 SOF (li: 1.1) 及 運転状態 EOC (li: 0.7)

尚、プラズマの閉じ込めのための運転と各運転状態との関連を表 2-2 に示す。

表 2-1 中心ソレノイド(CS) コイル と PF コイルの電流値

上部コレクション・コイル (MA)											
SOB	li	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8	PF9
電流	0.9	-87.32	0.7	3.93	-8.84	0	-9.43	-14.52	10.76	13.35	5.55
EOC	li	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8	PF9
電流	0.9	-137.94	-1.99	-5.75	-5.59	0	-8.39	-7.04	4.45	6.14	2.46
側部コレクション・コイル (MA)											
SOF	li	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8	PF9
電流	0.7	-81.07	2.29	2.22	-6.91	0	-5.36	-18.27	10.35	16.83	9.96
下部コレクション・コイル (MA)											
SOF	li	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8	PF9
電流	1.1	-106.04	-0.18	0.39	-6.15	0	-13.05	0.7	-4.27	17.1	12.8
EOC	li	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8	PF9
電流	0.7	-137.83	-4.61	-4.95	-5.8	0	-4.96	-16.22	12.2	4.75	-2.74

\* li : プラズマ燃焼パラメータを示す。

表 2-2 プラズマ運転とプラズマ平衡状態[2]

Time(sec)	CS	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6	PF7	PF8	PF9	状態
0	127.62	3.51	13.53	0.6	0	1.52	-3.45	3.27	14.61	3.92	IM
62.5	0	0.67	5.36	-4.02	0	-2.53	-9.12	5.3	10.42	4.26	
85	-33.16	3.62	4.22	-4.73	0	-5.82	-7.6	2.18	17.1	11.44	XPF
152	-92.66	1.81	1.58	-6.84	0	-9.03	-8.98	3.23	17.04	12.49	SOF
202	-87.33	0.36	2.42	-7.82	0	-11.89	-7.92	5.4	14.55	6.68	SOB
1202	-138.29	-0.47	-3.94	-7.82	0	-12.81	-6.5	6.27	6.18	2.31	EOB
1337	-137.94	-1.99	-5.75	-5.59	0	-8.39	-7.04	4.45	6.14	2.46	EOC
1467	-89.3	-1.51	-10.69	-0.43	0	-1.43	3.35	-4.81	-7.8	-3.19	EOP

IM:初期励磁(Initial Magnetisation) XPF:ダイバータ成形(Divertor formed)

SOF:上面均一開始(Start of flat top) SOB:燃焼開始(Start of burn)

EOB:燃焼末期(End of burn) EOC:冷却末期(End of cool down)  
EOP: プラズマ末期(End of Plasma)

## 2.4 物性値

巻線コイルの物性値は、等価剛性にて与える。コイル剛性を直交異方性と仮定しており、導体の 1/4 モデルでの 3 次元有限要素を使用した ITER で解析された結果を用いて与える。絶縁材、ギャップ フィラー、ケースは、等方性と仮定する。それぞれの物性値を表-3 に示す。

表 3 コレクション・コイル物性値

巻線部						
物性	ヤング率			剪断弾性係数		
データ	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{13}$
データ	10.3 GPa	10.3 GPa	48.0 GPa	2.5 GPa	9.3 GPa	9.3 GPa
ポアソン比						
物性	$\nu_{31}$	$\nu_{32}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$\nu_{21}$
データ	0.25	0.25	0.45	0.053	0.053	0.45
絶縁材						
物性	ヤング率			ポアソン比		
データ	20 GPa			0.21		
ギャップ フィラー						
物性	ヤング率			ポアソン比		
データ	4 GPa			0.3		
ケース						
物性	ヤング率			ポアソン比		
データ	205 GPa			0.3		

注：添字 1：コイル径方向 2：コイル垂直方向 3：コイル巻線方向 を示す。

## 2.5 境界条件

### 2.5.1 強制変位境界条件

各モデルの初期設計のクランプ位置において、TF コイルの変位を強制変位荷重として解析する。表-4 に TF コイルの変位を示す。各モデルのクランプ位置は、上部コイルについて図-2-2、側部コイルについて図-2-3、下部コイルについて図-2-4 に示す。

### 2.5.2 修正クランプ位置における強制変位境界条件

初期設計のクランプ位置（強制変位境界条件）によるコレクション・コイルのケース、絶縁材の応力は、許容応力を上回るため不適切である（3.2 項に記述）。応力を低減させるクランプの支持位置を決定するため初期設計のクランプの支持位置から変更した位置での境界条件を修正強制変位境界条件として解析する。初期設計のクランプ位置から変更した点は次の通りである。

#### ①上部コイル

初期設計（強制変位境界条件に示す支持位置）よりクランプ B1,C1,C2,C3 と D の最外端を外した位置（図-2-2 参照）

#### ②側部コイル

初期設計よりクランプ B と E を外した位置（図-2-3 参照）

#### ③下部コイル

初期設計よりクランプ L を外した位置（図-2-4 参照）

## 2.6 荷重条件

### 2.6.1 上部コレクション・コイル

解析対象運転条件 SOB での電磁力分布を図 3-1～図 3-4、EOC での電磁力分布を図 3-5～図 3-8 に示す。荷重を与える対象節点を境にした両要素に負荷する荷重を各々 1/2 ずつ負担させるため隣り合う要素の荷重の合計の 1/2 の荷重を巻線コイルの要素の中心節点に負荷させた。

### 2.6.2 側部コレクション・コイル

SOF での電磁力分布を図 3-9～図 3-12 に示す。上部コイル と同様にして有限要素の隣り合う要素についての平均荷重を巻線コイルの要素の中心節点に負荷させる。

### 2.6.3 下部コレクション・コイル

解析対象運転条件 SOF での電磁力分布を図 3-13～図 3-16、及 EOC での電磁力分布を図 3-17～図 3-20 に示す。他のコイルと同様に有限要素の隣り合う要素についての平均荷重を巻線コイルの要素の中心節点に負荷させる。

表 4 TF 変位

上部コレクション・コイル (mm)			
位置	Ux	Uy	Uz
B	-3.35	14.4	9.08

B1	-3.35	15.2	9.08
B2	-3.35	15.8	9.08
B3	-3.35	16.4	9.08
C	-3.35	21.2	9.08
C1	-3.35	21.9	9.08
C2	-3.35	22.7	9.08
C3	-3.35	23.5	9.08
D	-3.35	24.6	9.08

側部コレクション・コイル (mm)			
位置	Ux	Uy	Uz
A	-0.37	24.2	-8.2
B	-0.37	23.8	-7.3
C	-0.37	22.4	-4.1
D	-1.01	14.68	-1.33
E	-1.27	12.15	-1.33
F	-1.52	9.61	-1.33
下部コレクション・コイル (mm)			
位置	Ux	Uy	Uz
J	-1.7	0.7	-1.1
K	-5.1	3.0	-2.35
KK	-5.1	4.2	-2.98
L	-5.1	5.4	-3.6
M	-8.54	7.7	-3.6

注 : x,y,z の方向は、図-2-2、図-2-3、図-2-4 に示す方向である。

### 3. 解析結果

上部コイルと下部コイルについては、修正境界条件では両運転条件のうちでどちらか大きい応力結果が計算された条件下での結果を示す。上部コイルでは、SOB についての結果を、下部コイルでは、SOF についての結果を示す。

#### 3.1 変形

各コイルでの最大変位量と変形図について、表-5 に示す。  
表-5 に示すように、クランプ支持位置を変更した修正境界条件においても最大変位量は大きく変わることはない。各コイルでの修正境界条件での最大変位の

発生位置は、上部コレクション・コイル：29.5 mm（クランプB2,B3の間）  
 側部コレクション・コイル：26.6 mm（クランプC,Dの間）  
 下部コレクション・コイル：12.1 mm（クランプKK,Mの間）である。

表 5 最大変位量と変形図

上部コレクション・コイル		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
運転条件	SOB	EOC
最大変位量(mm)	29.5	28.5
図	--	--
側部コレクション・コイル		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
最大変位量(mm)	26.39	26.64
図	--	--
下部コレクション・コイル		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
運転条件	SOF	EOC
最大変位量(mm)	12.1	12.2
図	--	--

### 3.2 応力

#### 3.2.1 絶縁材

剪断応力の最大値を表-6に示す。

表-6に示すように、上部コレクション・コイルではクランプ支持位置を変更した効果が顕著であり変更前最大24.8MPaが10.6 MPaの約1/2に低減している。最大剪断応力の発生位置はモデル左サイドクランプ支持位置C、B2付近である。側部コレクション・コイルでは、 $\tau_{12}$ において変更前最大7.3MPaが5.7 MPaに低減した以外は、ほぼ同等である。最大剪断応力の発生位置は $\tau_{12}$ ：モデル左サイドクランプ支持位置A付近、その他：モデル右サイドクランプ支持位置A付近である。下部コレクション・コイルでは、クランプ支持位置を変更した効果が現われており変更前最大16.9MPaが11.0 MPaに低減している。最大剪断応力

の発生位置はモデル左サイドコーナー付近(クランプLを除去した付近)である。

表 6 絶縁材の最大剪断応力

上部コレクション・コイル (MPa)												
境界条件	強制変位境界条件						修正境界条件					
運転条件	SOB			EOC			SOB					
応力成分	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$			
最大応力	-24.81	-23.95	-17.77	-24.81	-23.72	-17.86	-10.58	-12.43	-8.13			
図	--			--			図-5-1	図-5-2	図-5-3			
側部コレクション・コイル (MPa)												
境界条件	強制変位境界条件						修正境界条件					
運転条件	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$			
最大応力	-7.32	9.44	-18.7	5.71	9.45	-18.7						
図	--			図-5-4	図-5-5	図-5-6						
下部コレクション・コイル (MPa)												
境界条件	強制変位境界条件						修正境界条件					
運転条件	SOF			EOC			SOF					
応力成分	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$			
最大応力	-14.44	-16.95	14.38	15.54	-18.52	12.54	-12.23	-11.03	11.44			
図	--			--			図-5-7	図-5-8	図-5-9			

### 3.2.2 卷線コイル

卷線コイルの最大引張応力を表-7に示す。全ての引張応力は許容応力 450 MPa(ITER 設計基準によればステンレス鋼製(SS)板厚 20mm, 応力比 R=0.1 の SN 線図では、運転回数を  $1 \times 10^5$  サイクルとした場合、許容応力は 450 MPa)よりかなり小さいことがわかる。

表 7 卷線コイルの最大引張応力

上部コレクション・コイル (MPa)				
境界条件	強制変位境界条件			修正境界条件
運転条件	SOB	EOC	SOB	
最大引張応力	121.22	121.55	66.02	
側部コレクション・コイル (MPa)				
境界条件	強制変位境界条件			修正境界条件

最大引張応力	26.7	20.5
下部コレクション・コイル (MPa)		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
運転条件	SOF	EOC
最大引張応力	38.88	48.78
		32.1

### 3.2.3 ケース

解析では、ケースのクランプの支持点に相当する節点を拘束したモデルとして行っている。このため拘束点にピーク応力が、計算上現われる。それで、応力評価では、この応力を除いて検討する必要がある。表-8 は、拘束点を除いたケースの最大トレスカ応力を示す。

表-8 に示すように、上部コレクション・コイルではクランプ支持位置を変更した効果が顕著であり変更前最大 640MPa が 380 MPa の約 60% に低減している。側部コレクション・コイルでは、変更前最大 430MPa が 380 MPa の約 90% に下部コレクション・コイルにおいても変更前最大 380MPa が 310 MPa の約 80% に低減しておりクランプ支持位置を変更した効果が現われている。

表-8 ケースのトレスカ応力

上部コレクション・コイル (MPa)		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
運転条件	SOB	EOC
トレスカ応力	640	640
図	--	図-6-1
側部コレクション・コイル (MPa)		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
トレスカ応力	430	380
図	--	図-6-2
下部コレクション・コイル (MPa)		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
運転条件	SOF	EOC
トレスカ応力	380	380
		310

図	..	図-6-3
---	----	-------

#### 4.応力評価

##### 4.1 絶縁材の剪断応力

ITER の設計基準によれば、絶縁材の剪断応力は負荷している圧縮応力に依存しており圧縮応力の存在で許容値は大きくなるので安全サイドに圧縮応力を考えない場合として、絶縁材の剪断許容応力  $S_s$  は 25MPa である。表-9 に解析結果と許容応力の比較を示す。本表に示すように、解析結果は許容応力  $S_s$  より小さい。

表 9 剪断応力評価

上部コレクション・コイル (MPa)											
境界条件	強制変位境界条件						修正境界条件				
運転条件	SOB			EOC			SOB				
応力成分	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$			
最大剪断応力	-24.81	-23.95	-17.77	-24.81	-23.72	-17.86	-10.58	-12.43	-8.13		
判定	○			○			○				
側部コレクション・コイル (MPa)											
境界条件	強制変位境界条件						修正境界条件				
運転条件	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$			
応力成分											
最大剪断応力	-7.32	9.44	-18.7	5.71	9.45	-18.7					
判定	○			○			○				
下部コレクション・コイル (MPa)											
境界条件	強制変位境界条件						修正境界条件				
運転条件	SOF			EOC			SOF				
応力成分	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$	$\tau_{31}$	$\tau_{12}$	$\tau_{23}$			
最大剪断応力	-14.44	-16.95	14.38	15.54	-18.52	12.54	-12.23	-11.03	11.44		
判定	○			○			○				

##### 4.2 卷線コイルの引張応力

卷線コイルは、等価剛性を用いて計算されているため実際の応力に換算

して評価する必要がある。コレクション・コイルの導体部は、絶縁材 28.9%、jacket34%、孔 37%で構成されている。評価する導体の応力は、解析応力/0.34に相当する。許容応力は、ITER 設計基準によればステンレス鋼製(SS)板厚 20mm, 応力比 R=0.1 の SN 線図では、運転回数を  $1 \times 10^5$  サイクルとした場合、許容応力は 450 MPa である。表-10 に最大引張応力の評価を示す。

表 10 最大引張応力評価

上部コレクション・コイル (MPa)		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
運転条件	SOB	EOC
最大引張応力(解析結果)	121.22	121.55
実機相当応力	356.5	357.5
判定	○	○
側部コレクション・コイル (MPa)		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
最大引張応力(解析結果)	26.7	20.5
実機相当応力	78.5	60.2
判定	○	○
下部コレクション・コイル (MPa)		
境界条件	強制変位境界条件	修正境界条件
運転条件	SOF	EOC
最大引張応力(解析結果)	38.88	48.78
実機相当応力	114.4	143.5
判定	○	○

#### 4.3 コイルケースのトレスカ応力

許容応力は、前節と同様 ITER の設計基準から 450MPa である。表-11 に最大

トレスカ応力と許容応力の比較を示す。

表 11 コイルケースのトレスカ応力評価

上部コレクション・コイル (MPa)			
境界条件	強制変位境界条件		修正境界条件
運転条件	SOB	EOC	SOB
トレスカ応力	640	640	380
判定	×	×	○
側部コレクション・コイル (MPa)			
境界条件	強制変位境界条件		修正境界条件
トレスカ応力	430		380
判定	○		○
下部コレクション・コイル (MPa)			
境界条件	強制変位境界条件		修正境界条件
運転条件	SOF	EOC	SOF
トレスカ応力	380	380	310
判定	○	○	○

## 5.特定箇所についての応力評価

### 5.1 上部コレクション・コイル

#### 5.1.1 クランプの応力

クランプに作用する荷重は、有限要素解法では負荷した荷重とバランスするよう拘束節点で作用する荷重として出力される反力解  $R_x, R_y, R_z$  である。クランプに作用する反力を図 2-5 に示す。この荷重によりクランプの薄辺部に曲げモーメントが作用する。この曲げモーメントによる応力を計算し許容応力内にあることを確認する。

#### (1)水平方向反力 $R_x$ による応力

- ・ 解析結果から最大反力  $R_x = 438\text{KN}$

- ・ トレスカ応力 =  $321\text{MPa}$

(曲げ応力 :  $299\text{ MPa}$  剪断応力 :  $59\text{ MPa}$  より計算)

#### (2)垂直方向反力 $R_z$ による応力

- ・解析結果から最大反力  $R_z=505\text{KN}$
- ・トレスカ応力= $1132\text{MPa} > 1.3S_m=624 \text{ MPa}$   
(曲げ応力:  $1102 \text{ MPa}$  剪断応力:  $131 \text{ MPa}$  より計算)

前述の計算から最大反力  $R_z$  によるトレスカ応力は、許容応力より大きいことがわかる。それでクランプの新形状 図 2-6 を提案する。本新形状の場合、最大反力  $R_z$  によるトレスカ応力は、 $230 \text{ MPa}$  に低減し許容応力を満足する。

### 5.1.2 クランプのボルト

クランプに作用する荷重は、拘束節点において出力される反力— $R_x, R_y, R_z$  である。反力  $R_z$  は、クランプからボルトを引き抜く荷重として作用するので、ボルトには引張応力が生じる。反力  $R_x, R_y$  は、ボルトに対し剪断応力を発生させる。反力  $R_x$  は、解析結果から反力  $R_y$  より大きいので応力評価用として採用する。

#### (1)垂直方向反力 $R_z$ による引張応力

- ・解析結果から最大反力  $R_z=438\text{KN}$
- ・使用ボルトサイズ:  $6\times\text{M16}$
- ・引張応力= $1120 \text{ MPa} > 380 \text{ MPa}$  (ITER の設計基準によれば  
SUS316LN タイプにおいて  $10^5$  サイクル時の許容応力は  $380\text{MPa}$ )

#### (2)水平方向反力 $R_x$ による剪断応力

- ・解析結果から最大反力  $R_x=438\text{KN}$
- ・使用ボルトサイズ: 両側で  $6\times\text{M16}$
- ・剪断応力= $972 \text{ MPa}$  からトレスカ応力= $1944\text{MPa}>380 \text{ MPa}$

前述の計算から反力  $R_z$  による引張応力及反力  $R_x$  による剪断応力は、許容応力より大きいことがわかる。それでボルトサイズとして  $10\times\text{M30}$  を提案する。本ボルトサイズの場合の応力は、次に示す。

#### (1)垂直方向反力 $R_z$ による引張応力

- ・引張応力= $187.1 \text{ MPa} < 380 \text{ MPa}$

#### (2)水平方向反力 $R_x$ による剪断応力

- ・剪断応力= $162.3 \text{ MPa}$  からトレスカ応力= $324.7\text{MPa}<380 \text{ MPa}$

## 5.2 側部コレクション・コイル

### 5.2.1 絶縁フランジ及曲部フランジのボルト

絶縁フランジ及曲部フランジの断面で計算される最大引張応力が、断面全体に負荷するとして引張荷重を求める。ボルトが、この荷重により引き抜かれるとして引張応力を計算する。次に、この応力を許容応力と比較する。

#### (1)絶縁フランジのボルト

- ・解析結果から最大引張応力=29MPa
- ・平均引張荷重=82.5KN
- ・使用ボルトサイズ：22×M16
- ・ボルトの引張応力=250 MPa<380 MPa

#### (2)曲部フランジのボルト

- ・解析結果から最大引張応力=6.8MPa
- ・平均引張荷重=140KN
- ・使用ボルトサイズ：8×M12
- ・ボルトの引張応力=219 MPa<380 MPa

以上の計算から、絶縁フランジ及曲部フランジに設定されるボルトは、許容応力内にあり問題ないことが、わかる。

### 5.2.2 クランプのボルト

クランプに作用する荷重は、拘束節点において出力される反力—Rx,Ry,Rz である。クランプに作用する反力を図 2-7 に示す。反力 Rx は、クランプからボルトを引き抜く荷重として作用するので、ボルトには引張応力が生じる。反力 Ry,Rz は、ボルトに対し剪断応力を発生させる。

#### (1)反力 Rx による引張応力

- ・解析結果から最大反力 Rx =979KN
- ・使用ボルトサイズ：8×M24
- ・ボルトの引張応力=362 MPa<380 MPa

#### (2)反力 Ry による剪断応力

- ・解析結果から最大反力 Ry =329KN
- ・使用ボルトサイズ：8×M24
- ・ボルトの剪断応力=122 MPa<380 MPa

#### (3)反力 Rz による剪断応力

- ・解析結果から最大反力  $R_z = 1350\text{KN}$
- ・使用ボルトサイズ :  $8 \times M24$
- ・剪断応力 =  $499 \text{ MPa}$  から トレスカ応力 =  $998 \text{ MPa} > 380 \text{ MPa}$

前述の計算から反力  $R_z$  による剪断応力は、許容応力より大きいことがわかる。それでボルトサイズとして  $8 \times M39$  として剪断応力を計算すると  $179 \text{ MPa}$  である。これからトレスカ応力 =  $358 \text{ MPa}$  であるから許容応力内に収まるため  $M39$  より大きなサイズが必要である。

あるいは、剪断に対してキー溝で受けるような構造として断面積をとれるような構造にすべきである。

### 5.2.3 ケースの溶接部の応力

ケースの最大応力は解析結果より  $311 \text{ MPa}$  である。この応力は、許容応力の  $1/2$  以下である。溶接部の応力集中を考慮外とすれば必要な溶接長さはケース厚さの  $1/2$  である。

### 5.2.4 フィダー用アクセス孔の影響

アクセス孔の近傍の応力は、約  $200 \text{ MPa}$  であり、アクセス孔の近傍の変形も小さいのでアクセス孔から受ける影響はない。

## 5.3 下部コレクション・コイル

### 5.3.1 クランプの応力

クランプに作用する荷重は、拘束節点において出力される反力 -  $R_x, R_y, R_z$  である。クランプに作用する反力を図 2-8 に示す。この荷重によりクランプの薄辺部に曲げモーメントが作用する。この曲げモーメントによる応力を計算し許容応力内にあることを確認する。

#### (1) 水平方向反力 $R_x$ による応力

- ・解析結果から最大反力  $R_x = 953\text{KN}$
- ・トレスカ応力 =  $225 \text{ MPa}$   
(曲げ応力 :  $209 \text{ MPa}$  剪断応力 :  $42.4 \text{ MPa}$  より計算)

#### (2) 垂直方向反力 $R_z$ による応力

- ・解析結果から最大反力  $R_z = 485\text{KN}$
- ・トレスカ応力 =  $254 \text{ MPa}$   
(曲げ応力 :  $239 \text{ MPa}$  剪断応力 :  $43.1 \text{ MPa}$  より計算)

### (3)評価

前述の反力  $R_x, R_z$  による応力は、許容応力  $1.3S_m=624 \text{ MPa}$  より小さい。

#### 5.3.2 クランプのボルト

クランプに作用する荷重は、拘束節点において出力される反力  $-R_x, R_y, R_z$  である。反力  $R_z$  は、クランプからボルトを引き抜く荷重として作用するので、ボルトには引張応力が生じる。反力  $R_x, R_y$  は、ボルトに対し剪断応力を発生させる。反力  $R_x$  は、解析結果から反力  $R_y$  より大きいので応力評価用として採用する。

#### (1)垂直方向反力 $R_z$ による引張応力

- ・解析結果から最大反力  $R_z=485\text{KN}$
- ・使用ボルトサイズ： $12\times M24$
- ・引張応力= $119.5 \text{ MPa} < 380 \text{ MPa}$  ( $10^5$  サイクル時の許容応力)

#### (2)水平方向反力 $R_x$ による剪断応力

- ・解析結果から最大反力  $R_x=953\text{KN}$
- ・使用ボルトサイズ：両側で  $6\times M24$
- ・剪断応力= $469 \text{ MPa}$  からトレスカ応力= $939.6\text{MPa} > 380 \text{ MPa}$

前述の計算から反力  $R_x$  による剪断応力は、許容応力より大きいことがわかる。それで  $M24$  より大きなボルトサイズを採用するか、あるいはキー溝で反力を受ける構造とすることが必要である。必要な剪断面積は、 $5018\text{mm}^2$  である。別 の方法として、クランプを溶接するか、あるいはキー溝で止める方法が考えられる。

## 6 結論

### (1)上部コレクション・コイル

現設計のクランプ位置では、ケースのトレスカ応力が許容応力を大きく上回る。応力を低減させるには、修正境界条件のケースに示すようなクランプ位置に変更することが必要である。更に、クランプ位置の変更により絶縁材の剪断応力も低減することが可能である。この理由から現在の設計のクランプ支持点を変更することが必要である。

### (2)側部コレクション・コイル

現状のクランプ位置では、ケースのトレスカ応力が許容応力に比較して裕度が小さい。そのため修正境界条件のケースに示すようなクランプ位置に変

更することにより許容応力に対し裕度を大きくとることを推奨する。

(3)下部コレクション・コイル

現状のクランプ位置でも、問題はないが、さらに応力を低減させるためクランプ位置を修正境界条件に示すようなクランプ位置に変更することにより、許容応力に対し裕度を大きくとることを推奨する。

(4)コレクション・コイルは、いずれも修正境界条件に示すようなクランプ位置とすることを推奨する。新クランプ位置は、次のとおりである。

新クランプ位置は、上部コイルでは図-2-2 に示す初期設計のクランプ位置からクランプ B1,C1,C2,C3 と D の最外端を外した位置、側部コイルでは図-2-3 に示す初期設計のクランプ位置からクランプ B と E を外した位置、下部コイルについては図-2-4 に示す初期設計のクランプ位置からクランプ L を外した位置として初期設計から修正した位置に設定する。

## 謝 辞

本論文は日本原子力研究所核融合工学部 超電導磁石研究室 辻 博史室長の勧めにより取りまとめたものです。このような機会を与えて頂いたことに深く謝意を表します。

また、本論文の取りまとめの際に有意義な議論を頂いた JCT Stoner 氏、日本原子力研究所核融合工学部 超電導磁石研究室の辻 博史室長、杉本誠氏および皆様に感謝いたします。

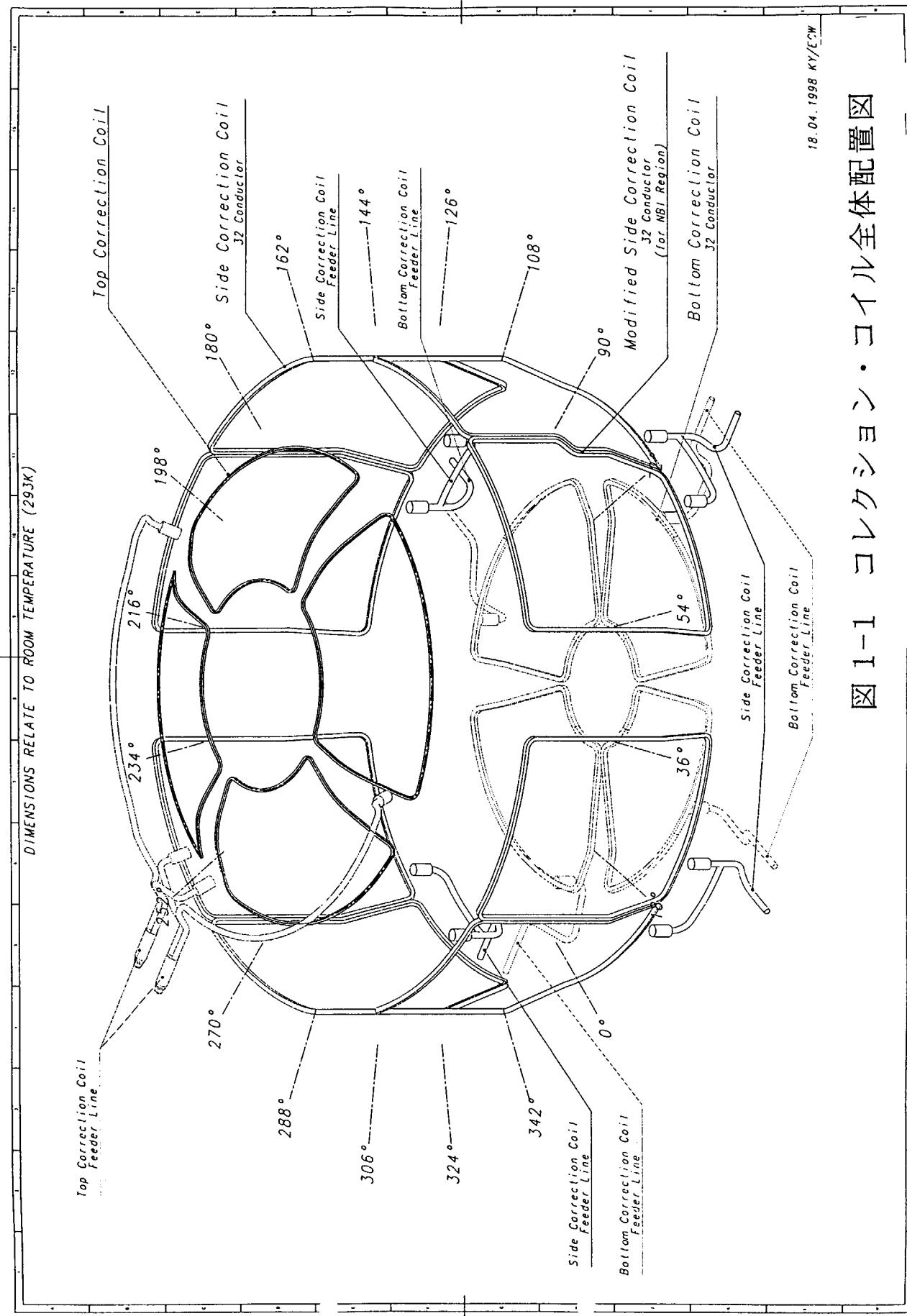


図 1-1 コレクション・コイル全体配置図

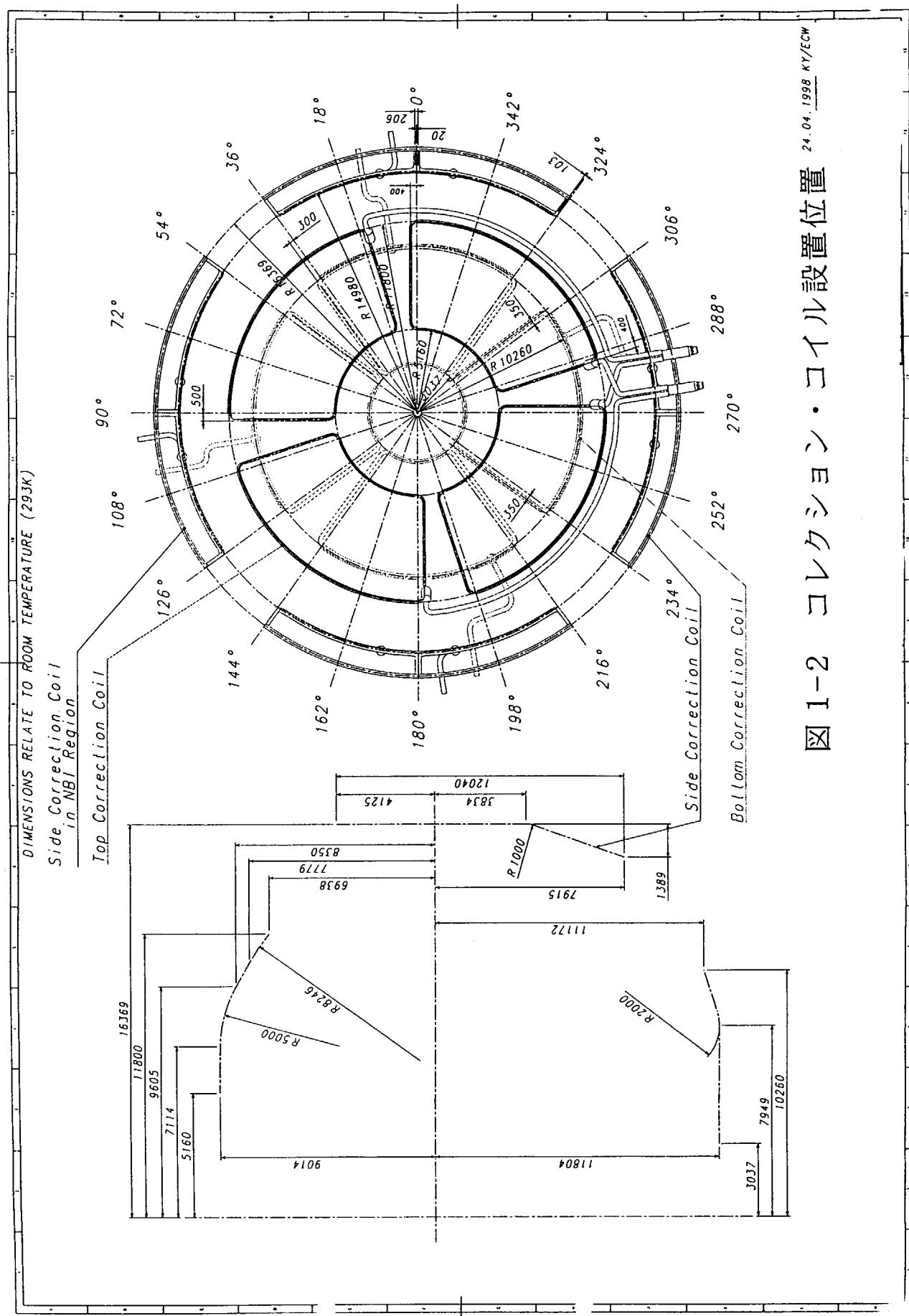


図 1-2 コレクション・コイル設置位置

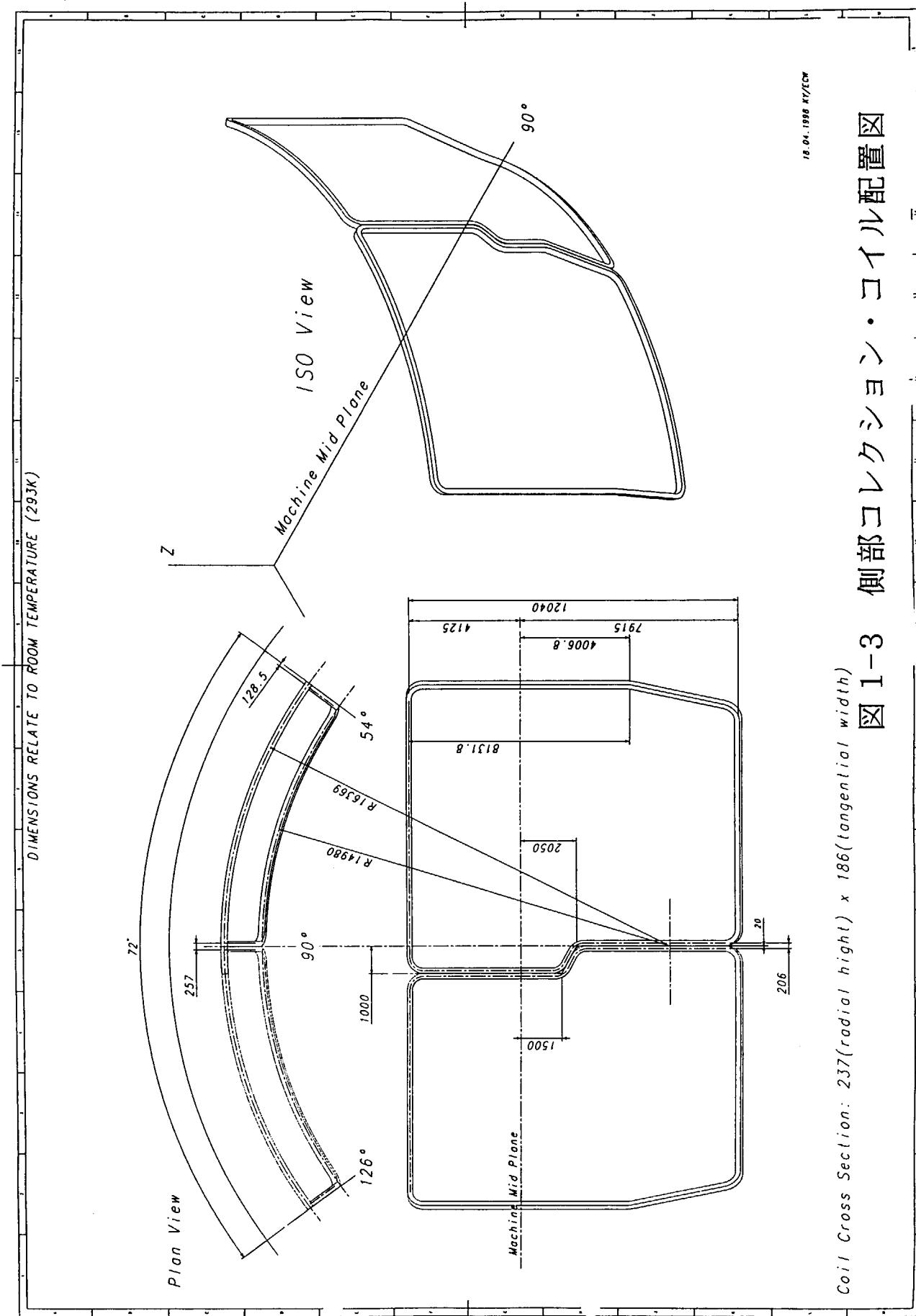


図 1-3 側部コレクション・コイル配置図

Coil Cross Section: 237(radial height) x 186(tangential width)

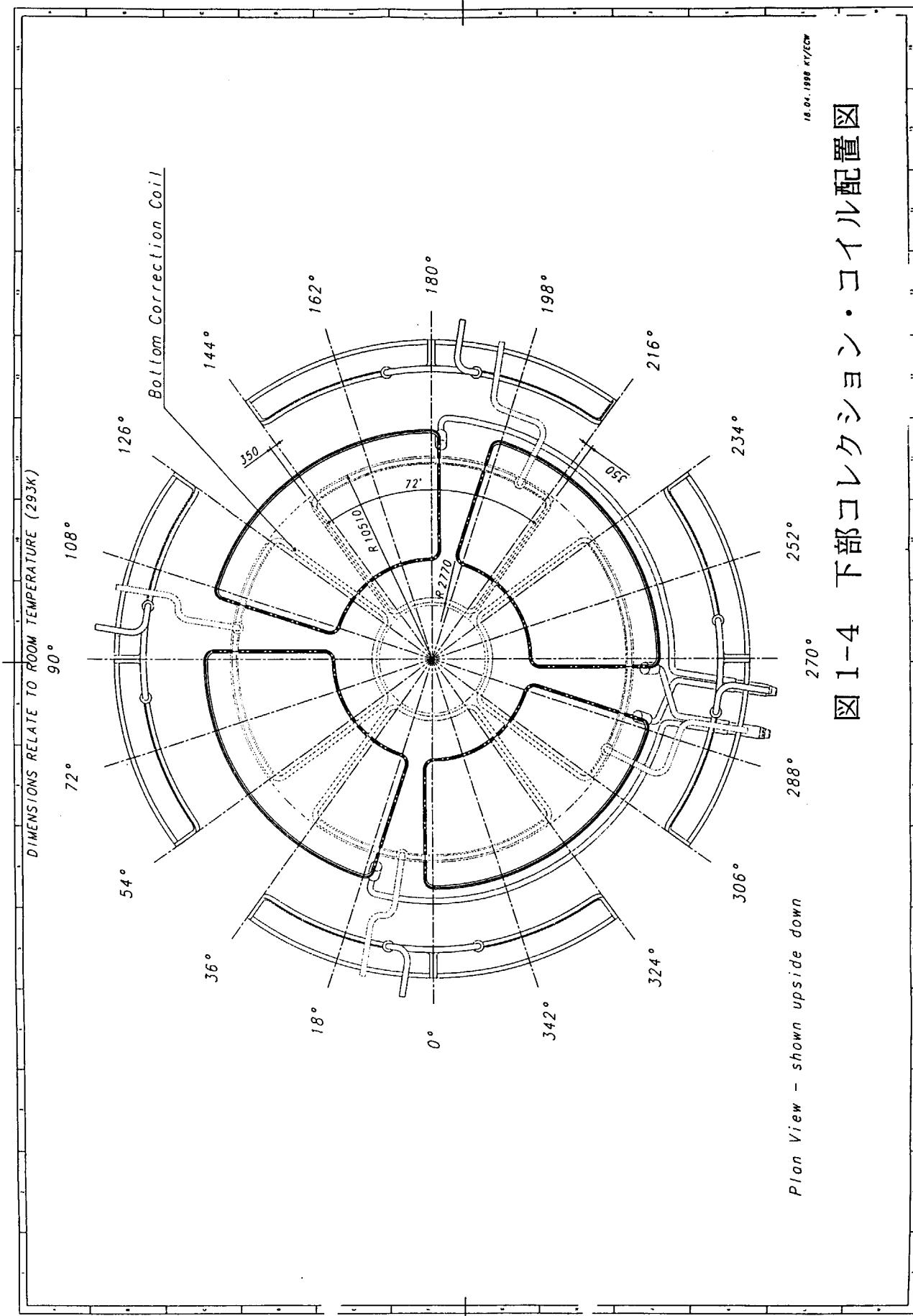


図 1-4 下部コレクション・コイル配置図

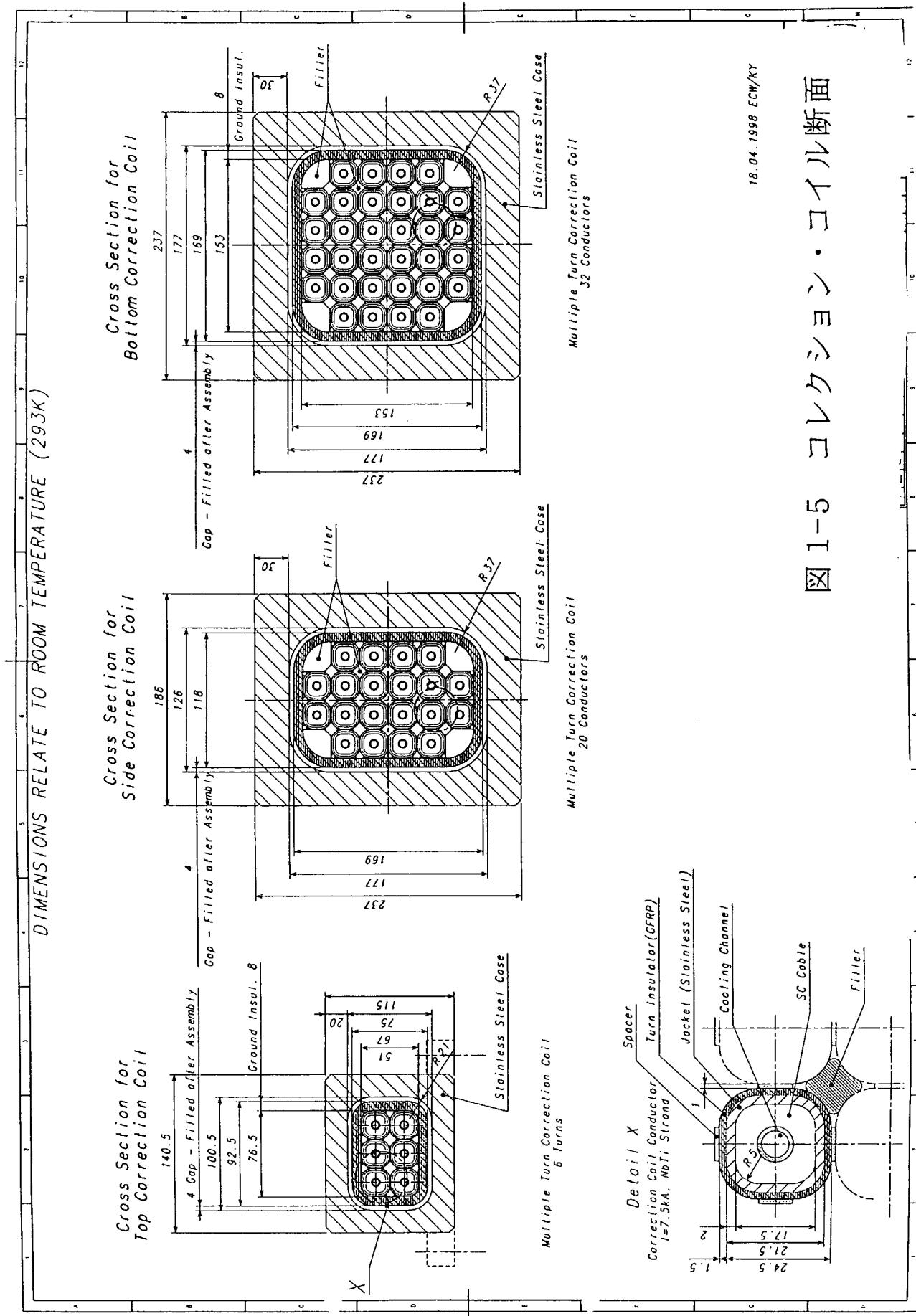


図 1-5 コレクション・コイル断面

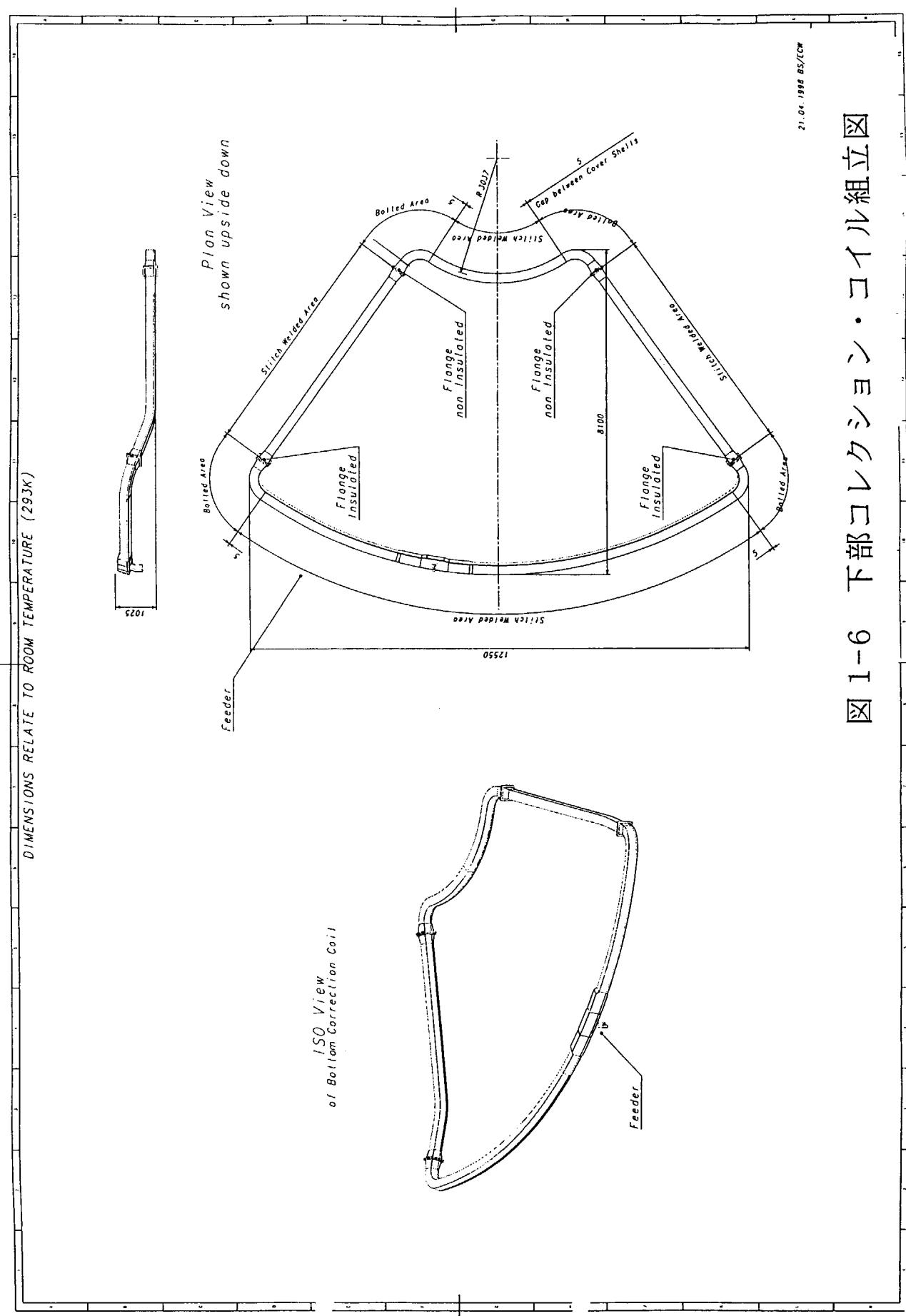


図 1-6 下部コレクション・コイル組立図

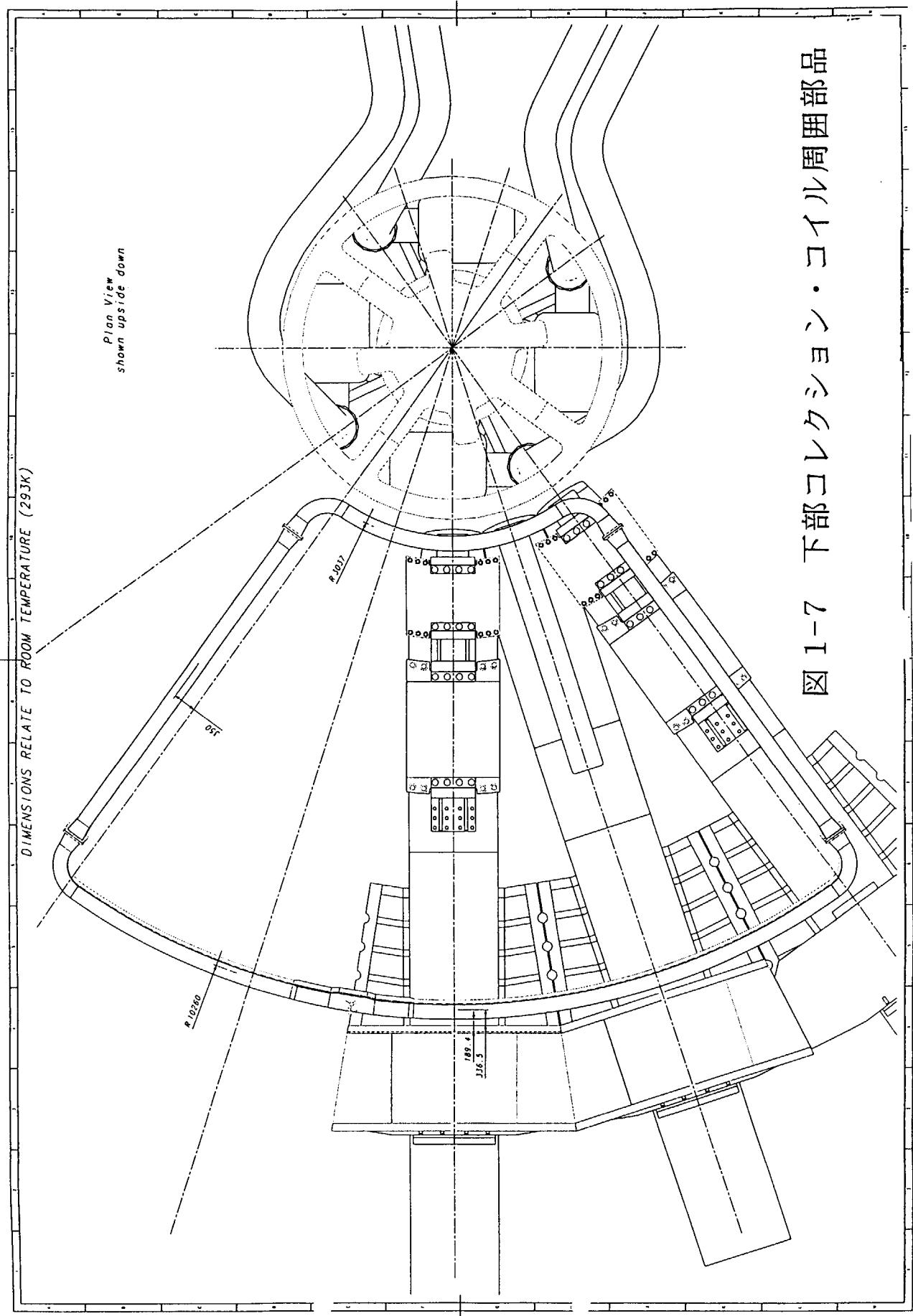


図 1-7 下部コレクション・コイル周囲部品

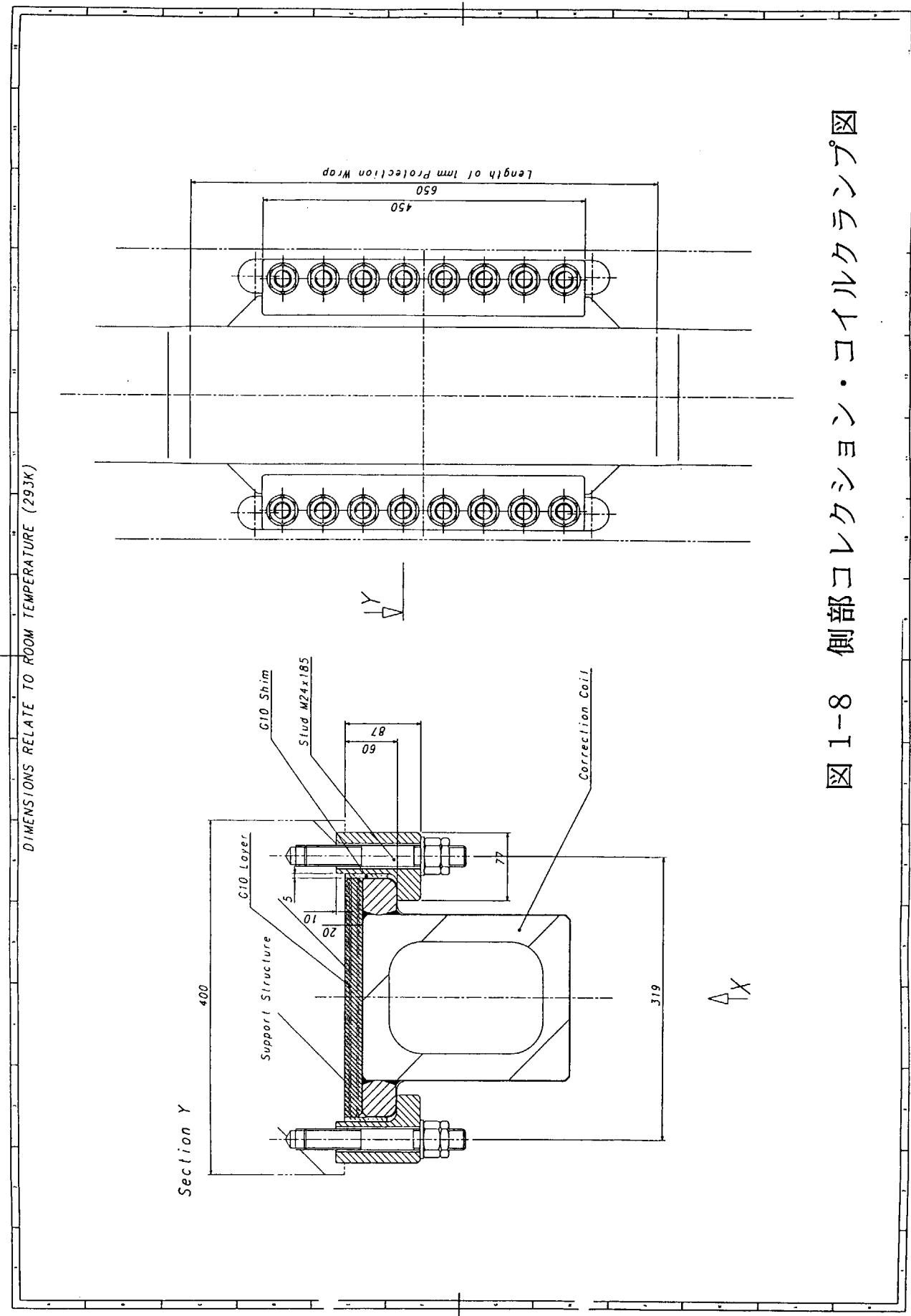


図 1-8 側部コレクション・コイルランプ図

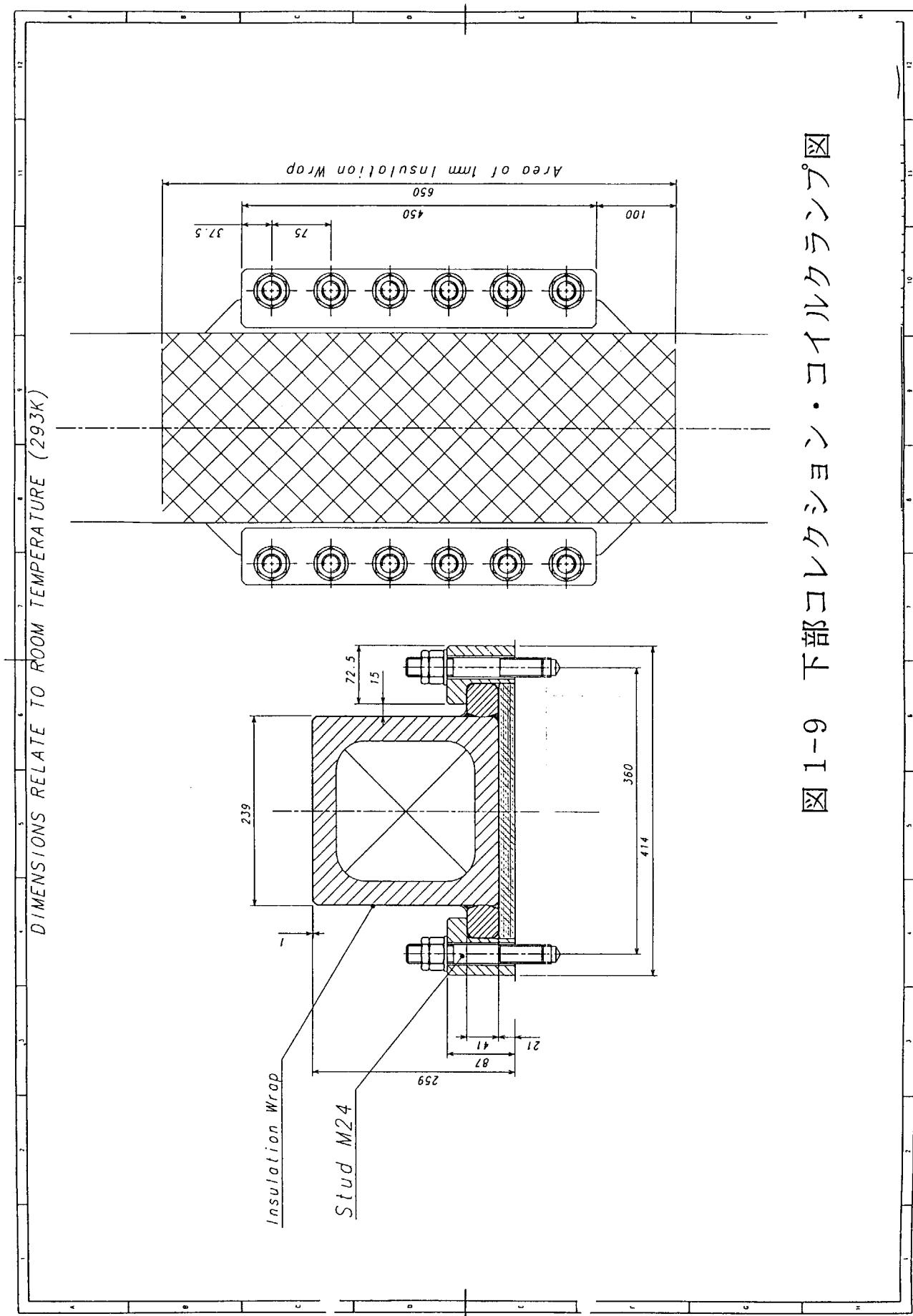


図 1-9 下部コレクション・コイルクランプ図

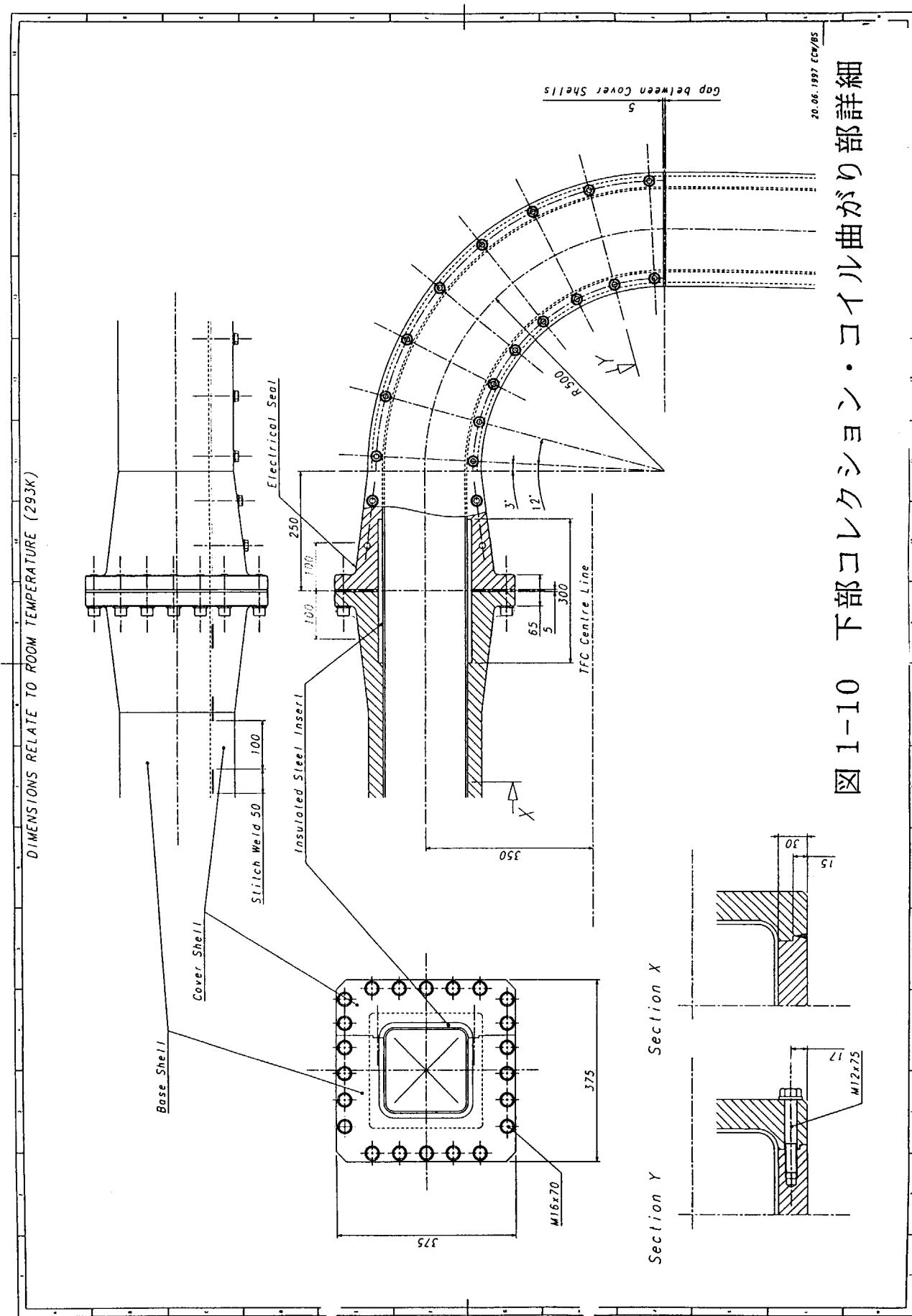


図 1-10 下部コレクション・コイル部詳細

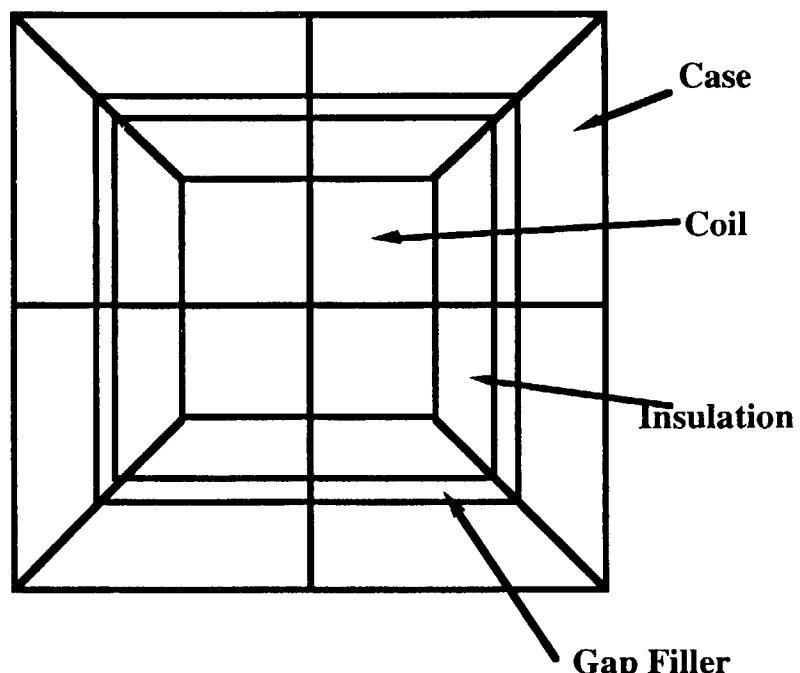


図-2-1 モデル断面メッシュ

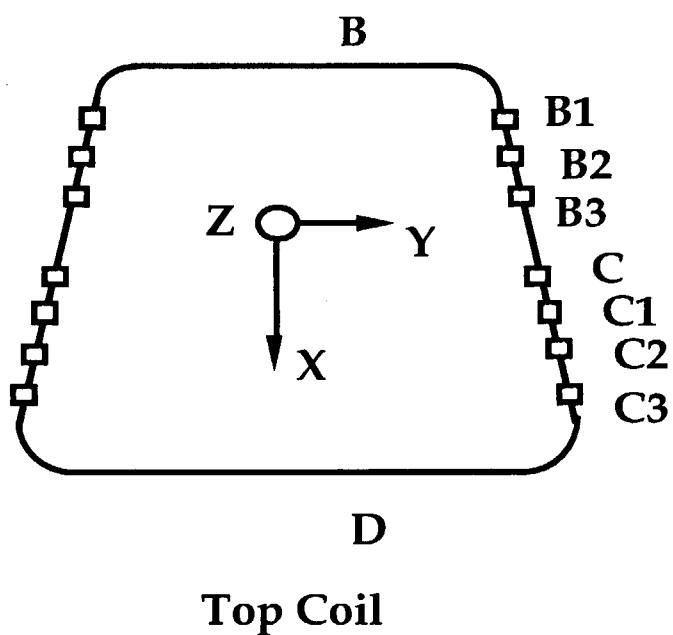
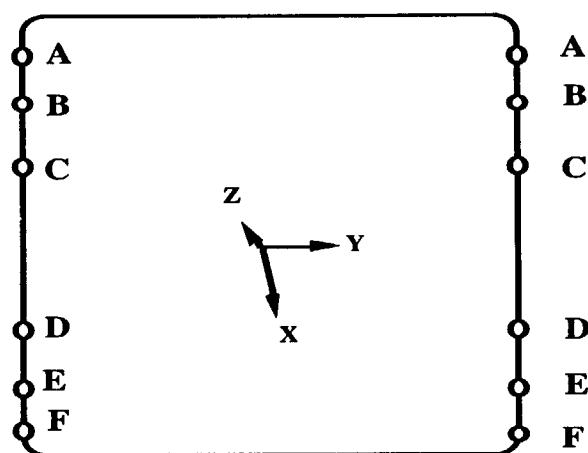
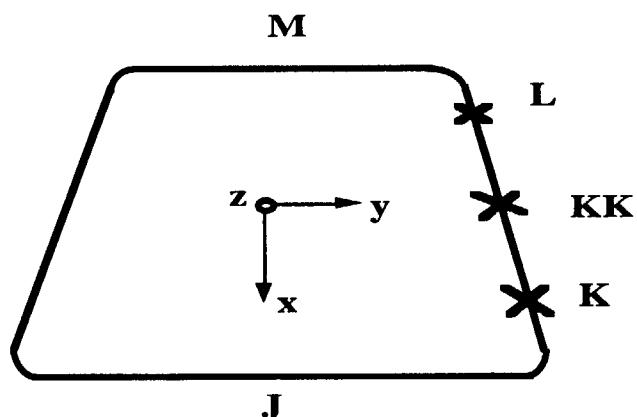


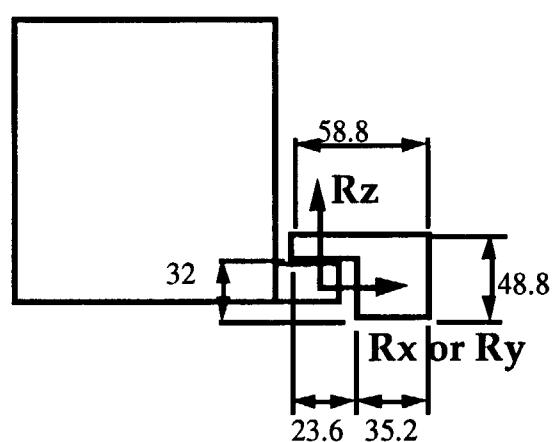
図-2-2 上部コイルモデルのクランプの位置



**図-2-3 側部コイルモデルのクランプの位置**



**図-2-4 下部コイルモデルのクランプの位置**



**図-2-5 上部コイルのクランプに作用する反力**

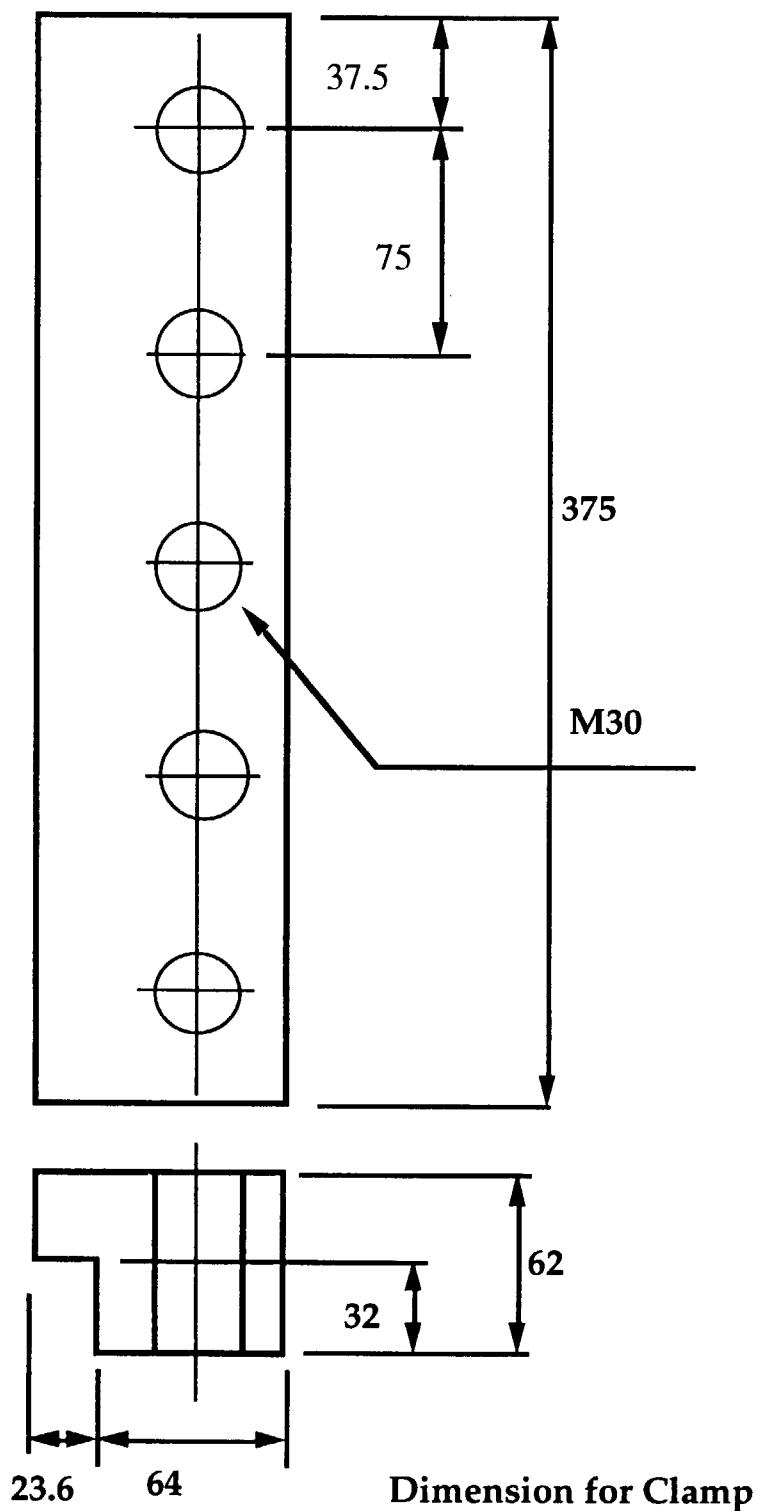


図-2-6 上部クランプ形状

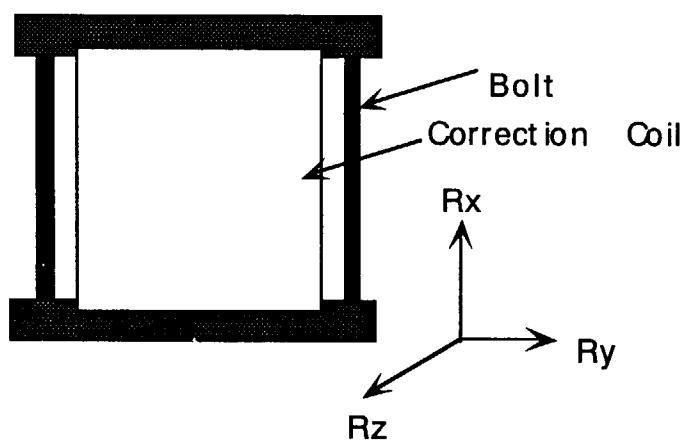


図-2-7 側部コイルのクランプに作用する反力

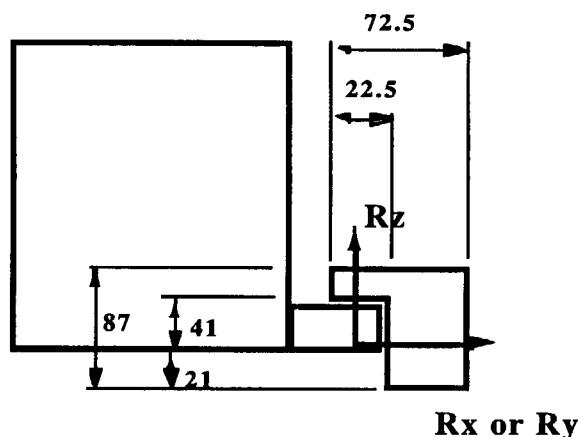
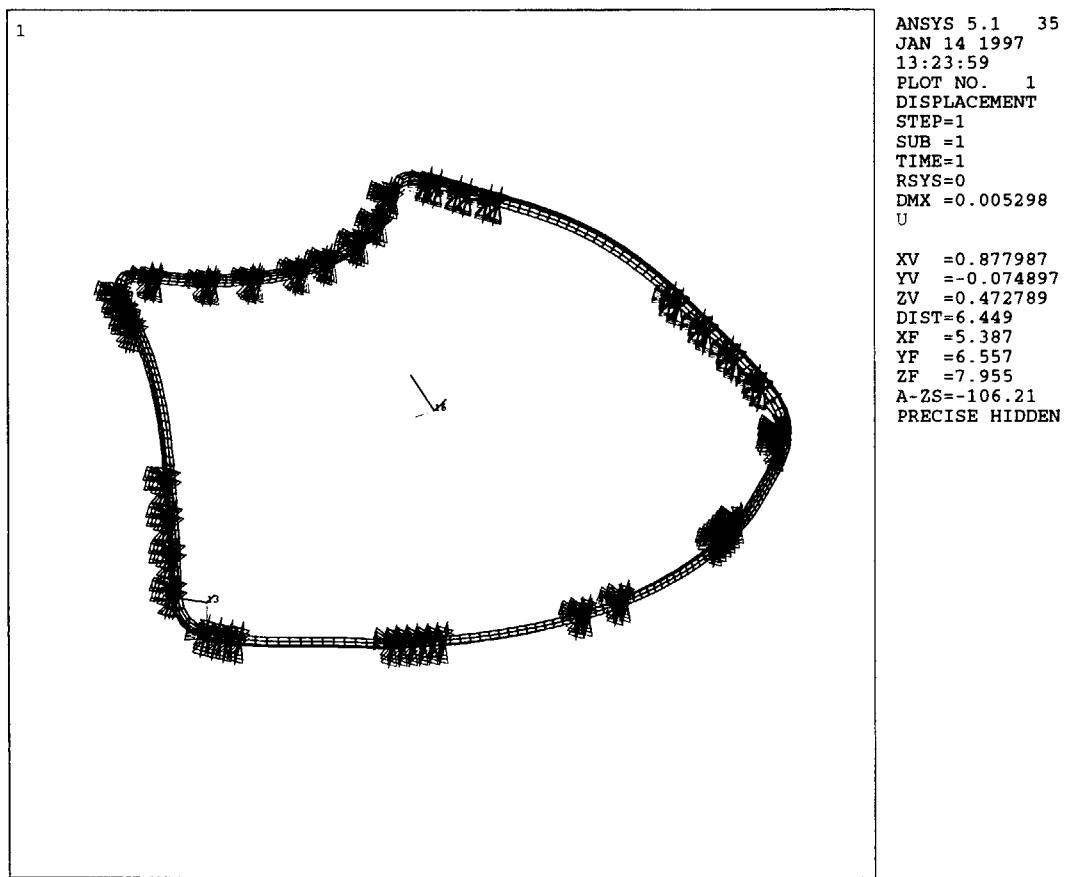


図-2-8 下部コイルのクランプに作用する反力



---

図-2-9 上部コイルモデル

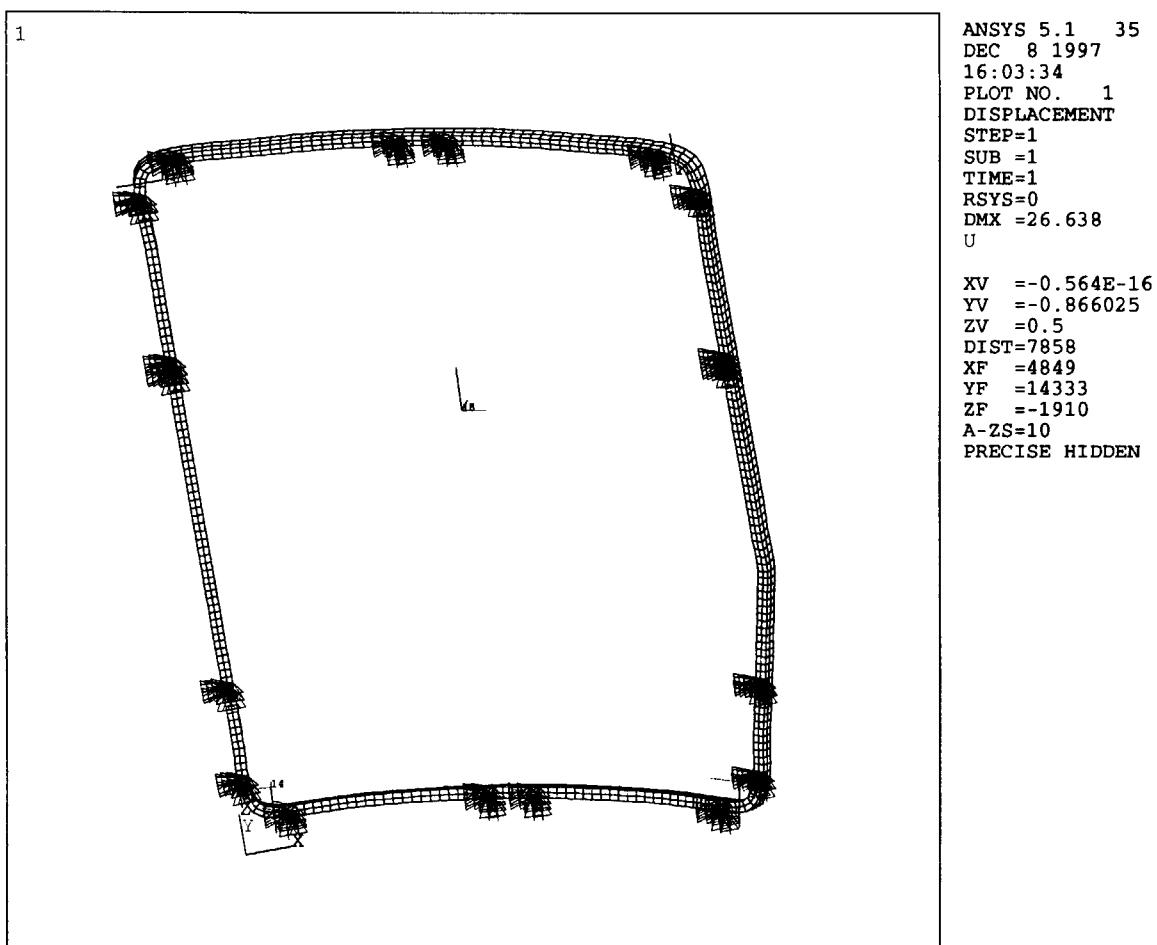


図-2-10 側部コイルモデル

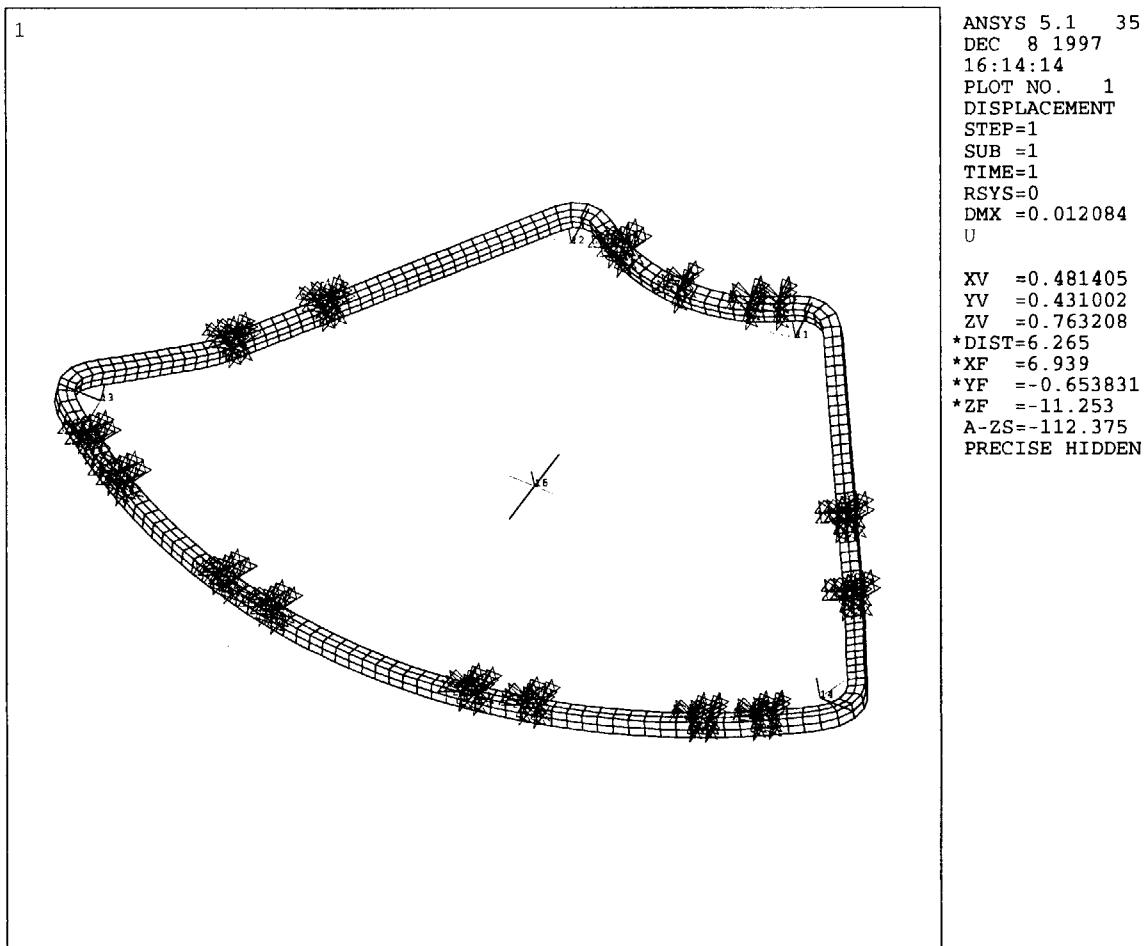
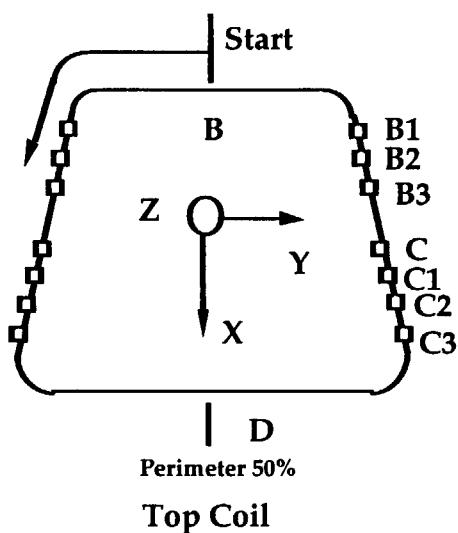
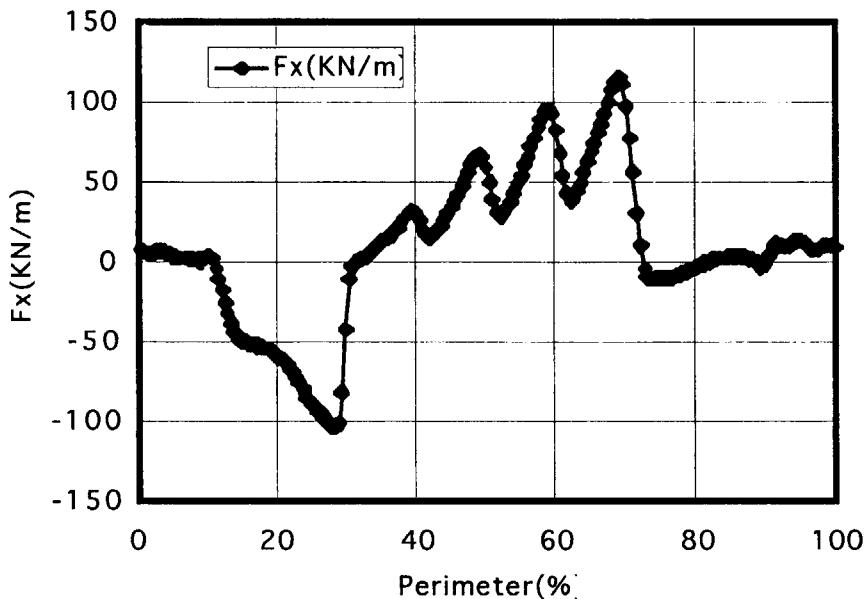


図-2-11 下部コイルモデル

Top-SOB-Fx

図-3-1 上部コイル電磁力 $F_x$ 分布 (SOB)

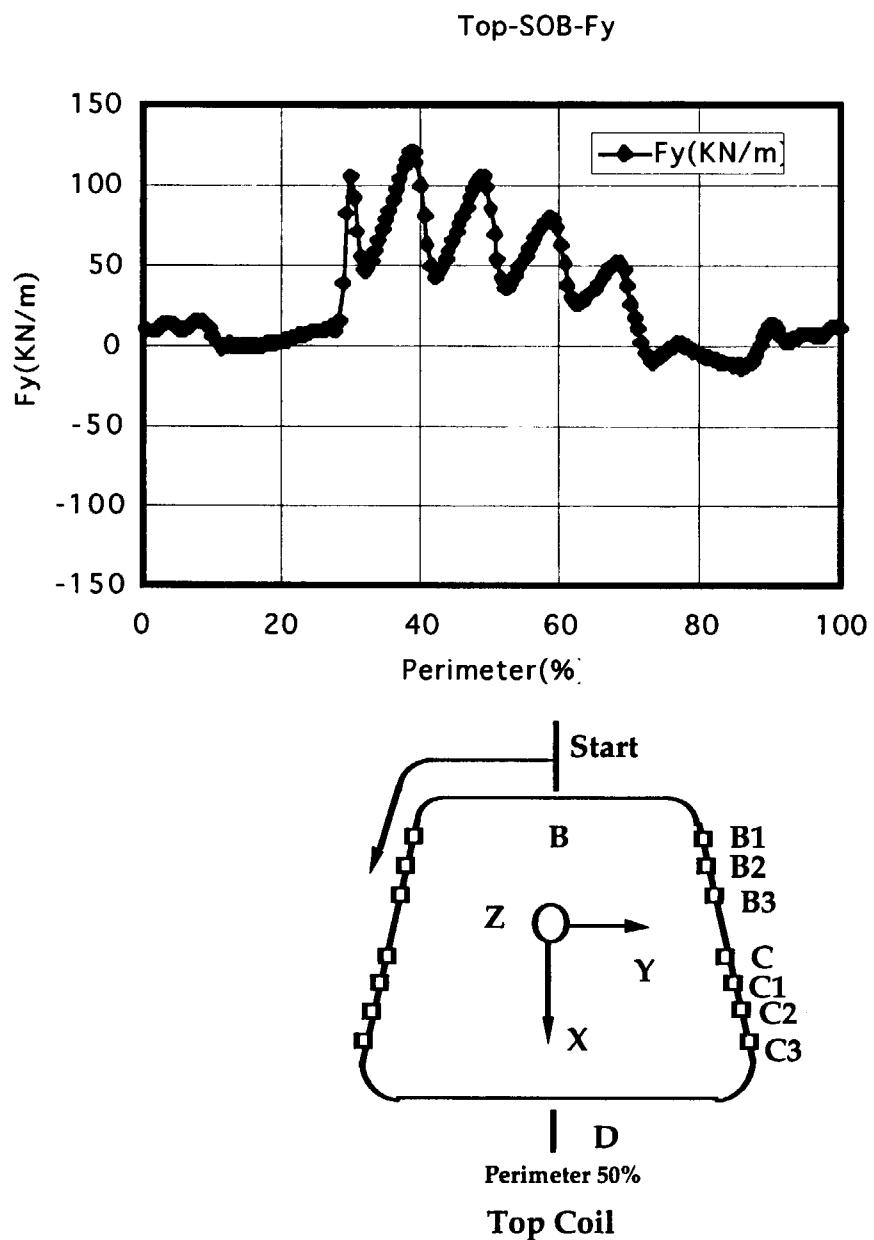


図-3-2 上部コイル電磁力 $F_y$ 分布 (SOB)

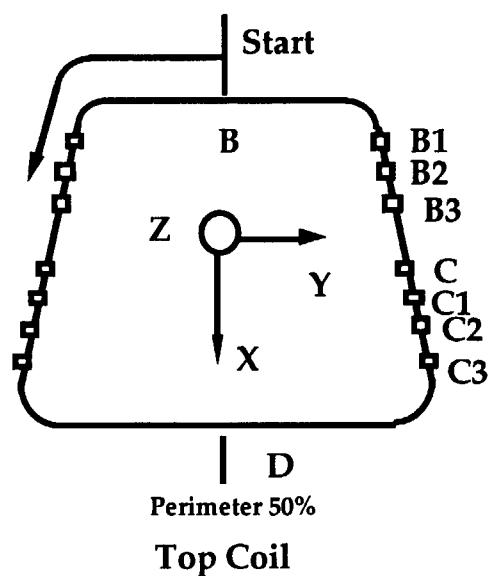
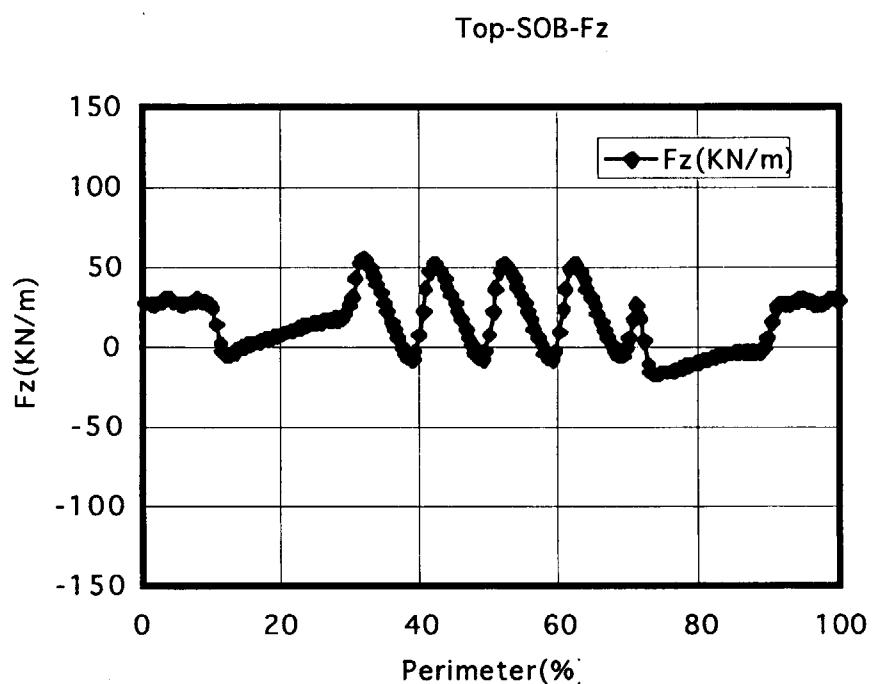


図-3-3 上部コイル電磁力 $F_z$ 分布 (SOB)

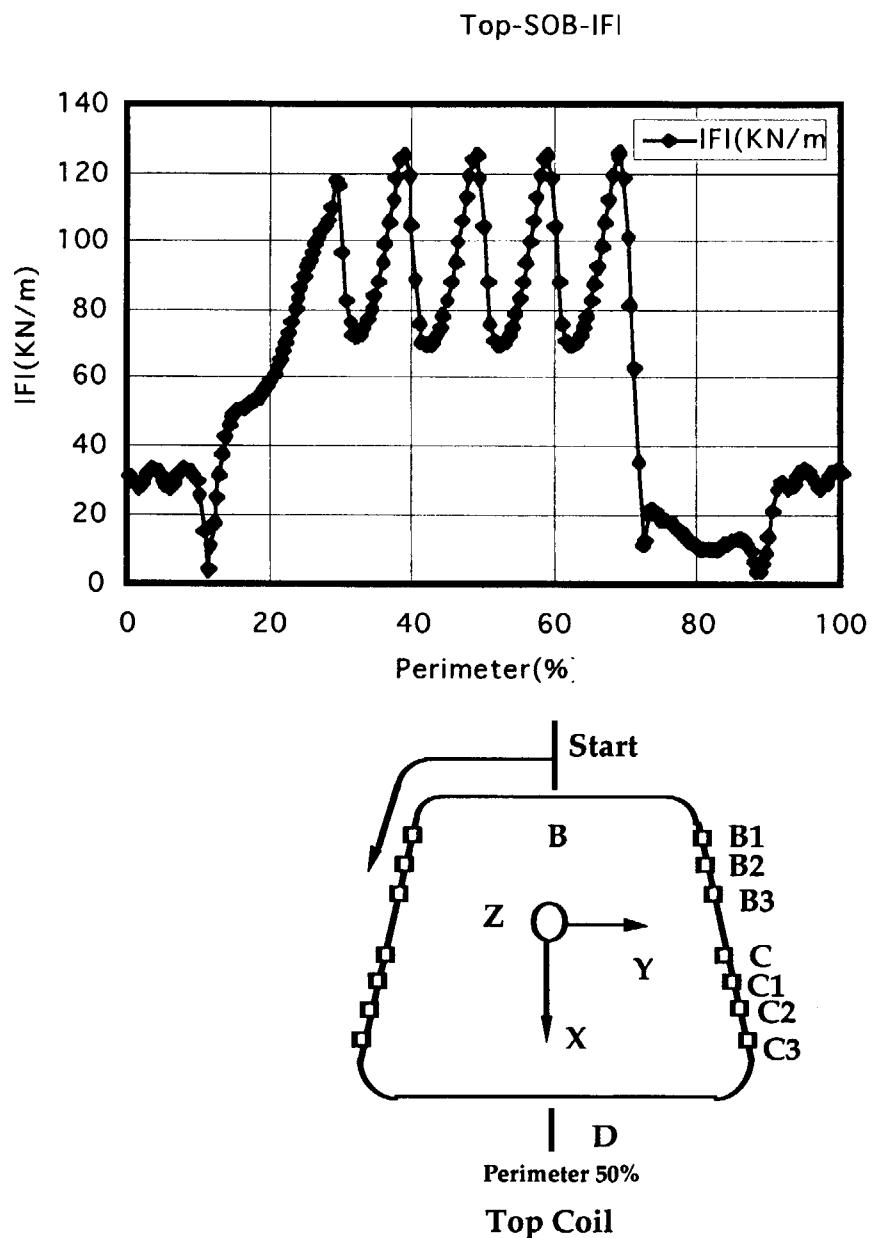
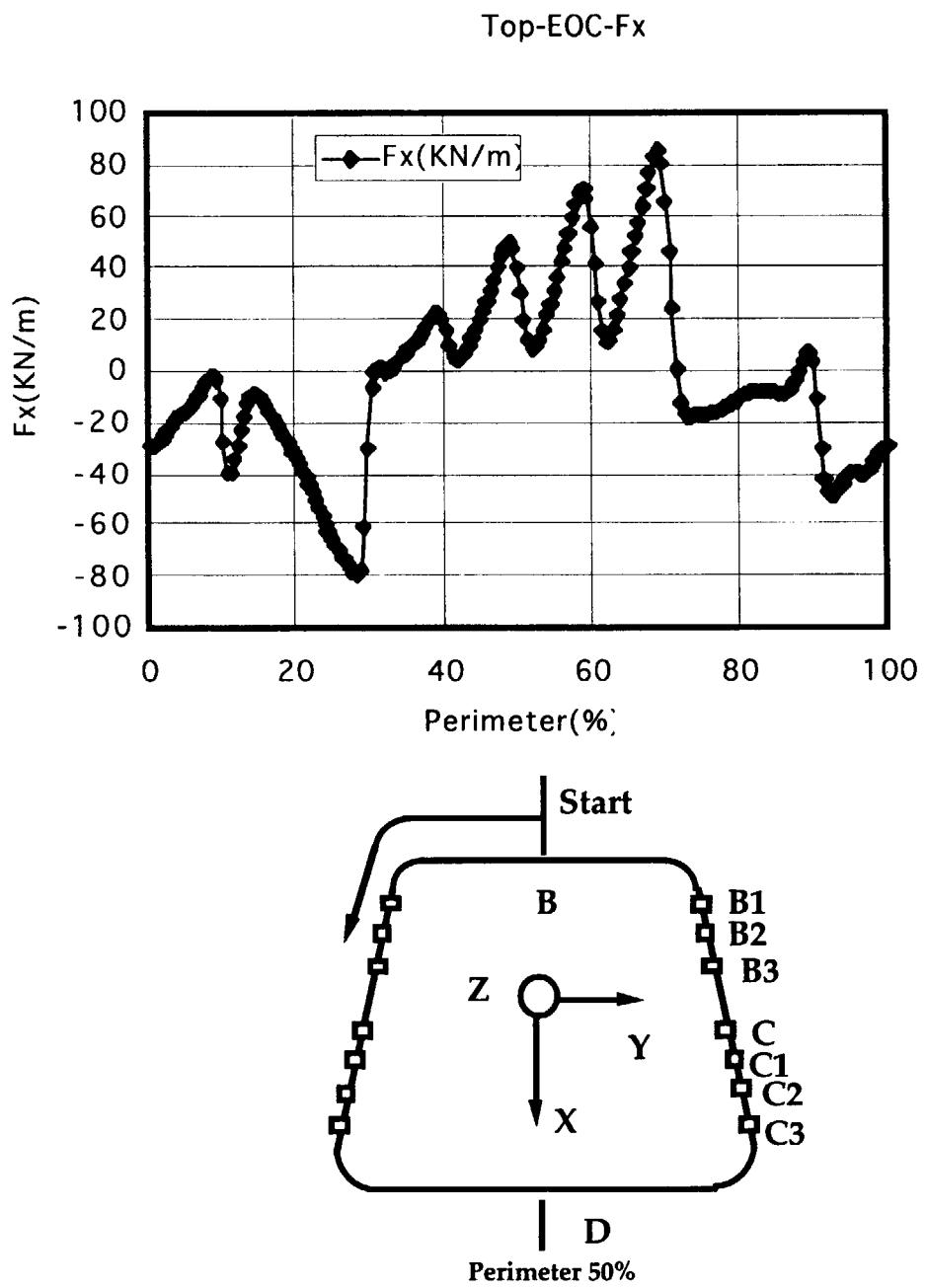


図-3-4 上部コイル電磁力|FI|分布 (SOB)

図-3-5 上部コイル電磁力 $F_x$ 分布 (EOC)

Top-EOC-Fy

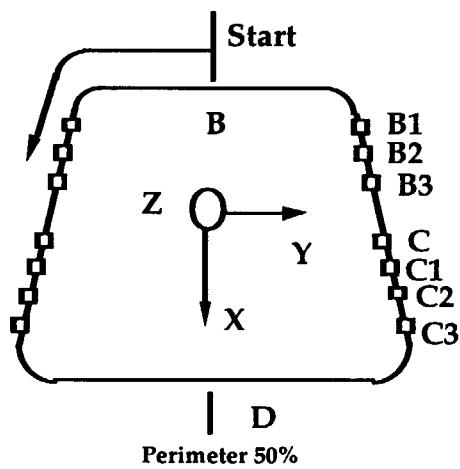
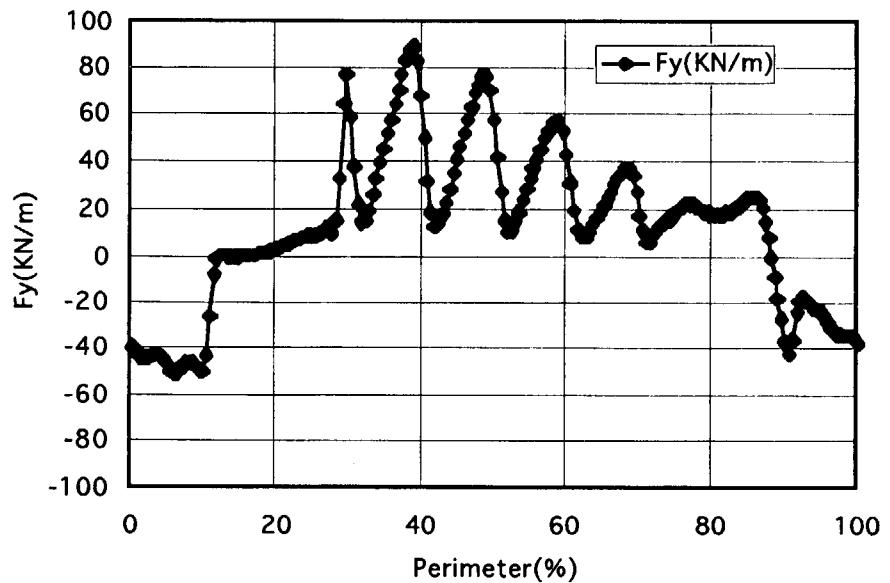


図-3-6 上部コイル電磁力Fy分布（EOC）

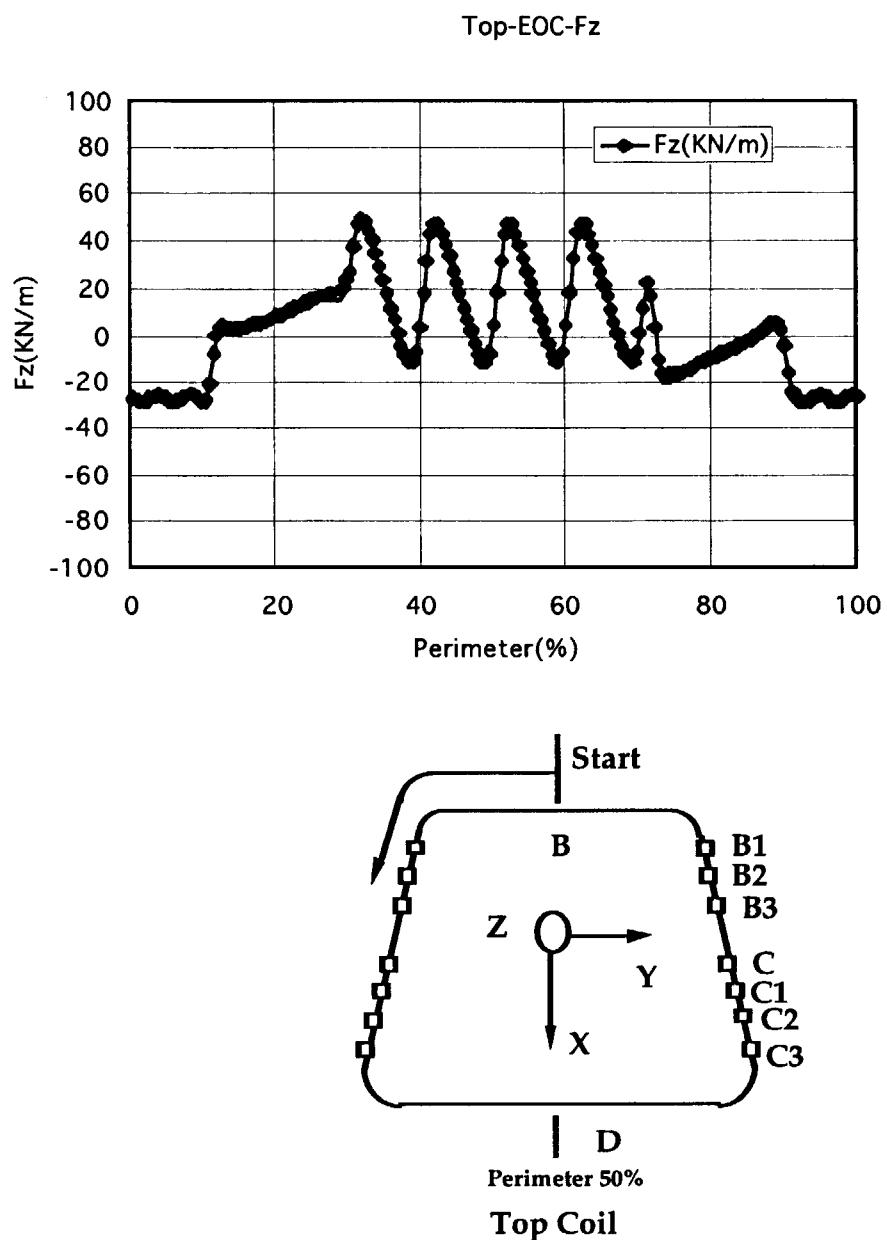


図-3-7 上部コイル電磁力 $F_z$ 分布 (EOC)

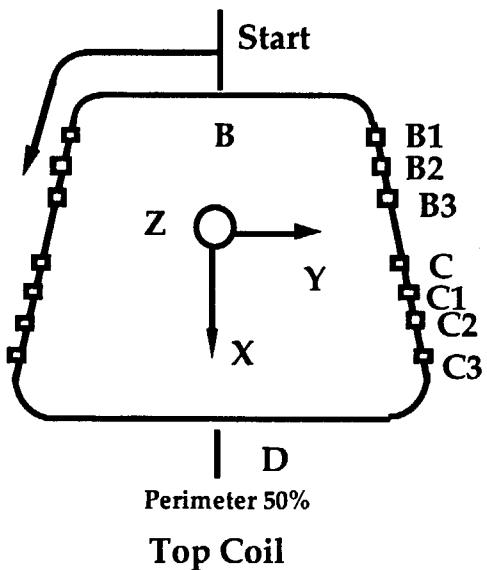
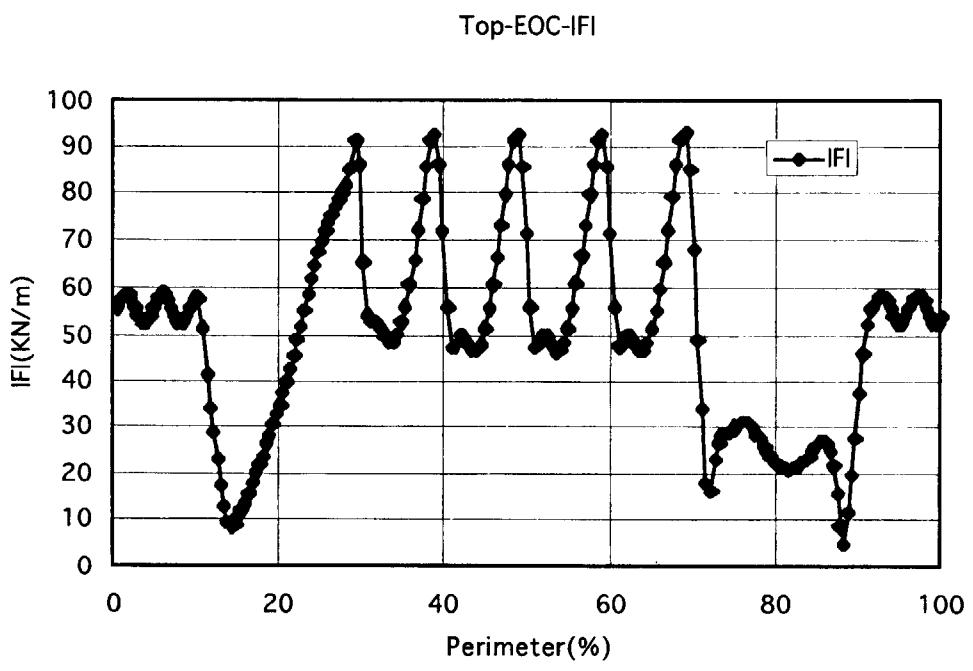


図-3-8 上部コイル電磁力|F|分布（EOC）

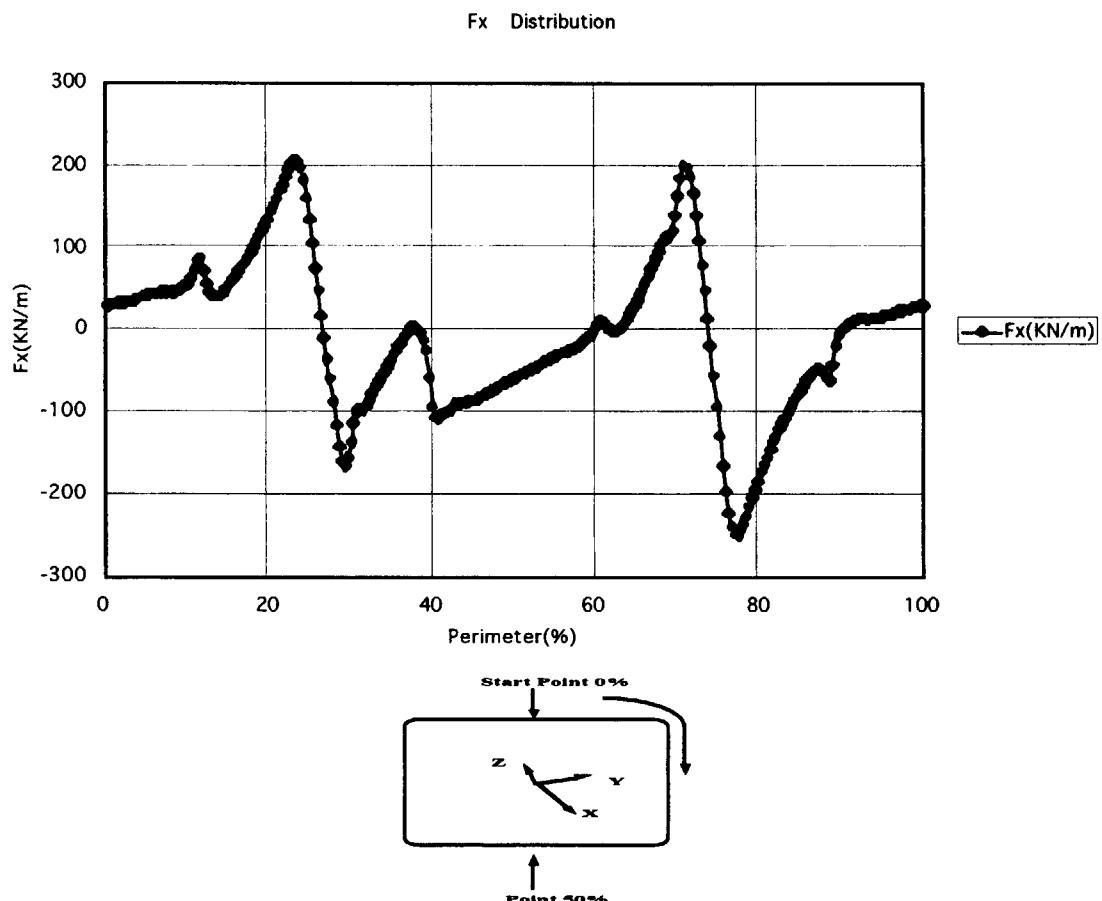


図-3-9 側部コイル電磁力 $F_x$ 分布 (SOF)

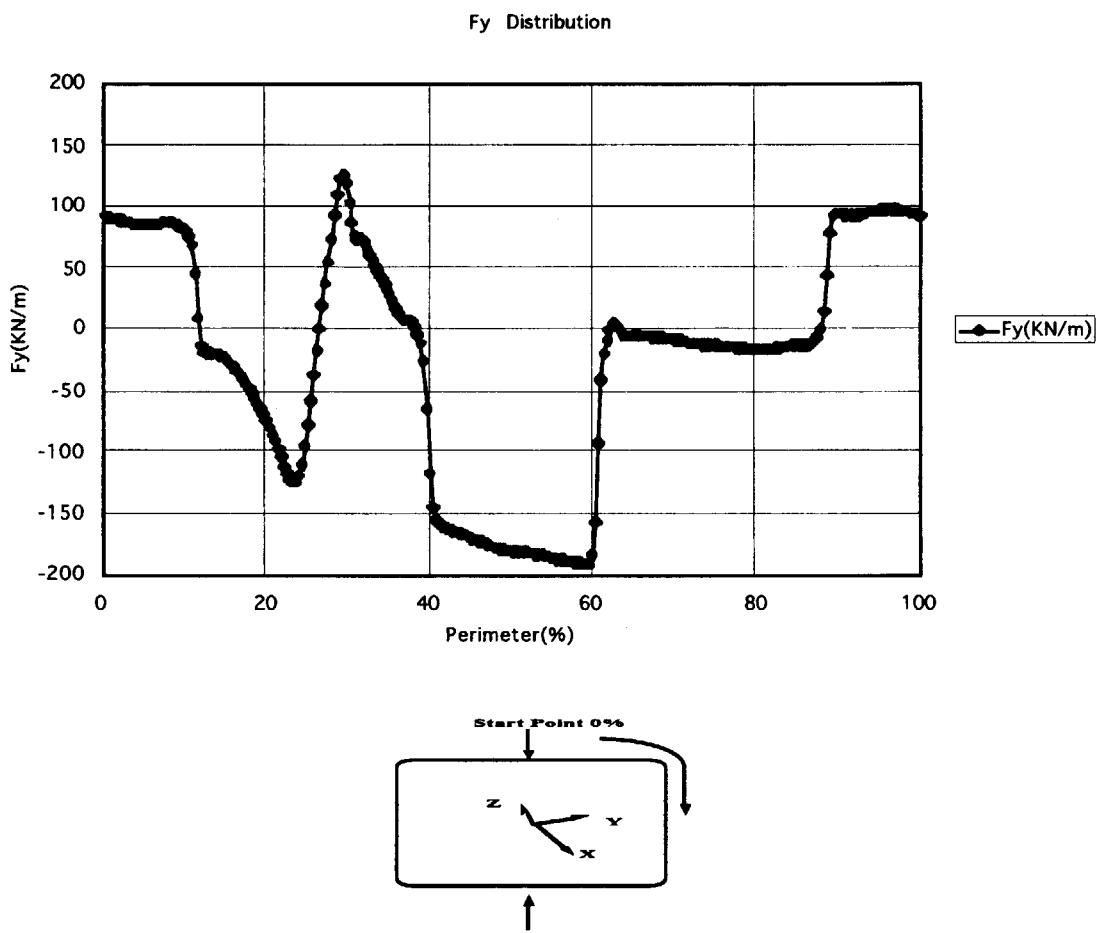
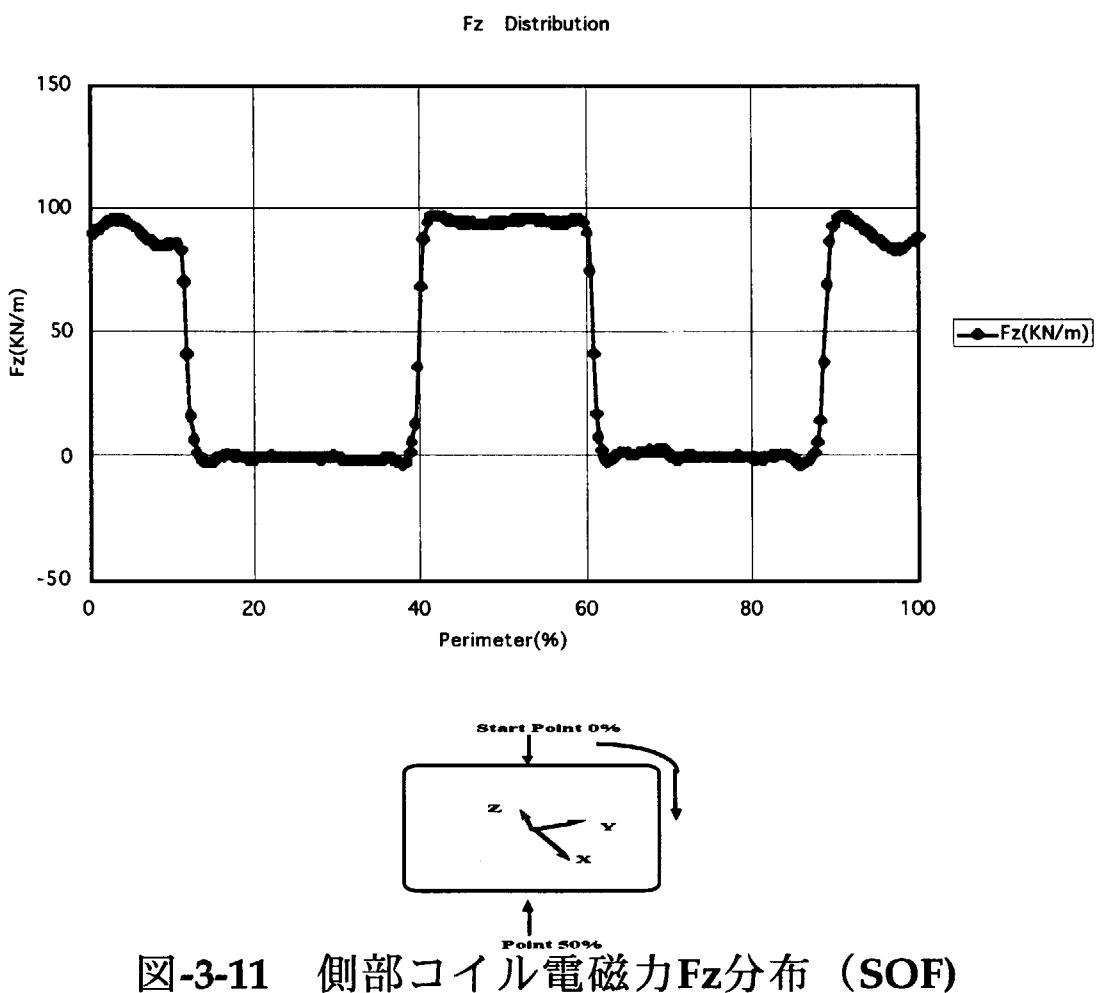
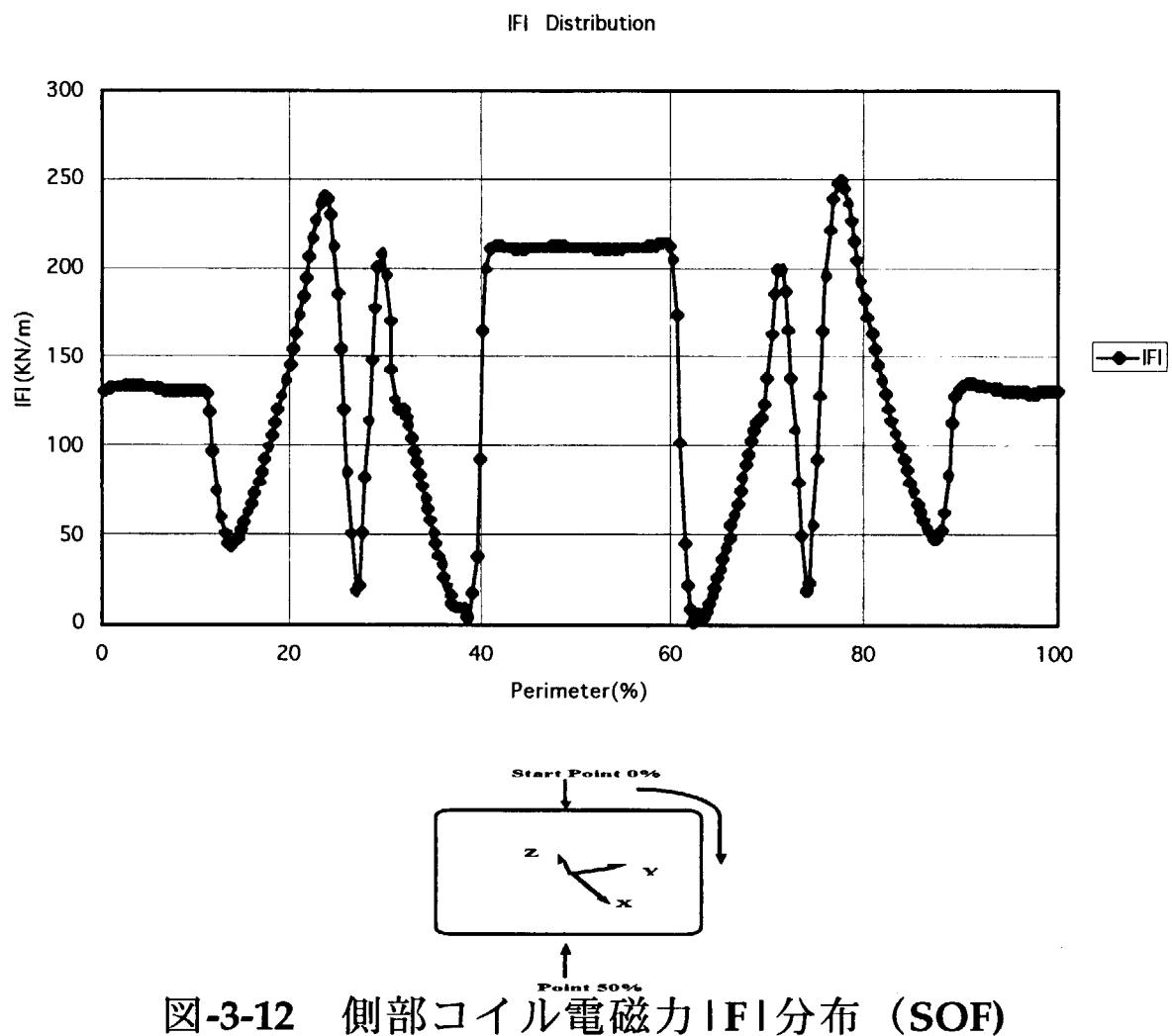


図-3-10 側部コイル電磁力 $F_y$ 分布 (SOF)





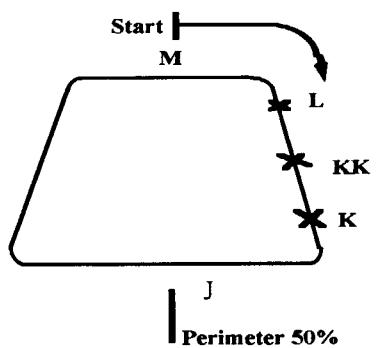
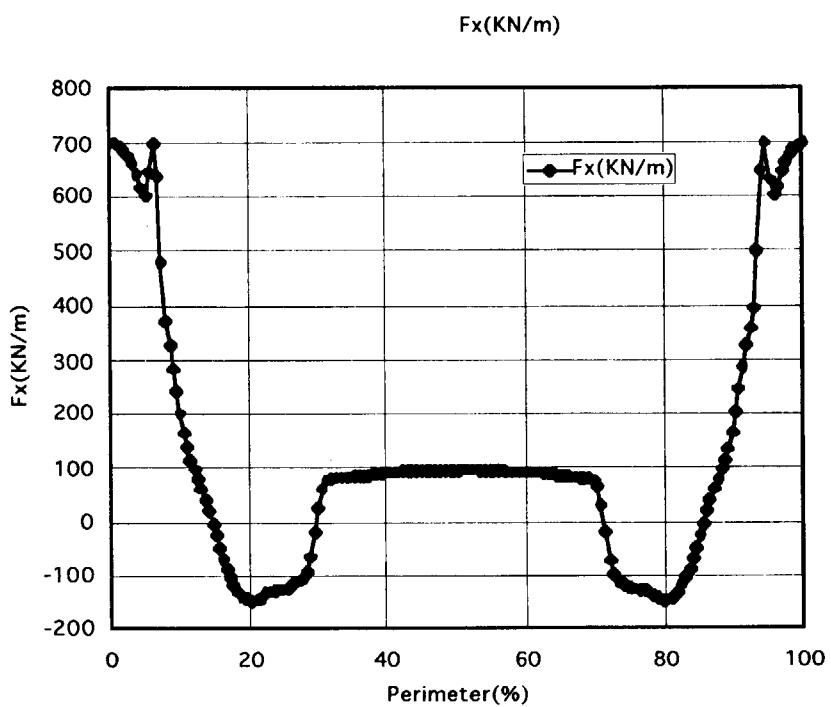


図-3-13 下部コイル電磁力 $F_x$ 分布 (SOF)

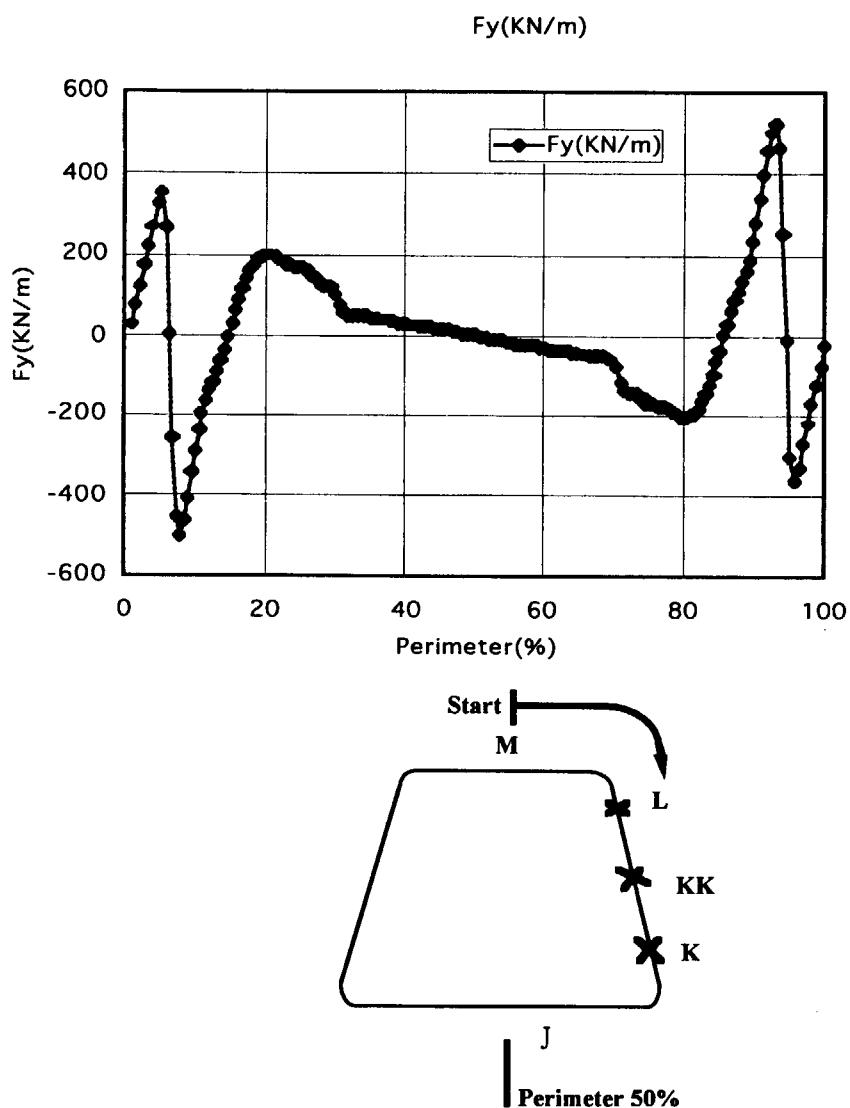


図-3-14 下部コイル電磁力 $F_y$ 分布 (SOF)

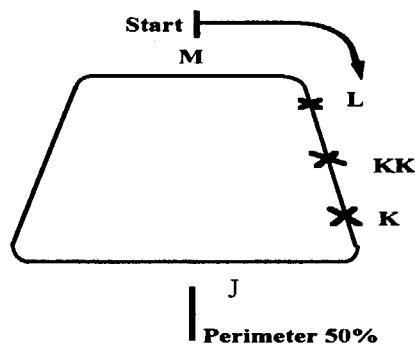
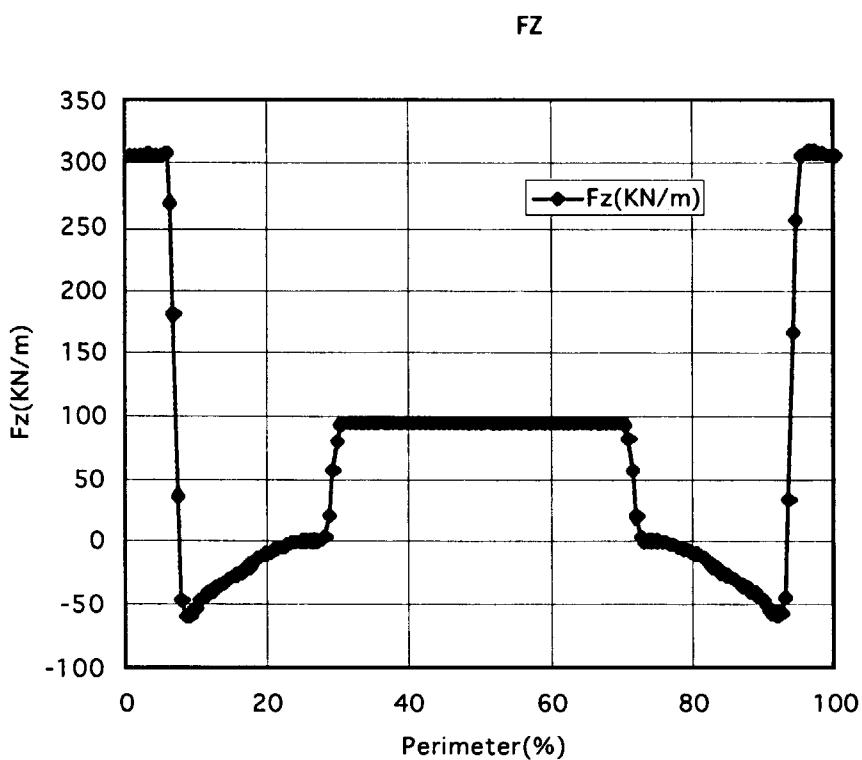
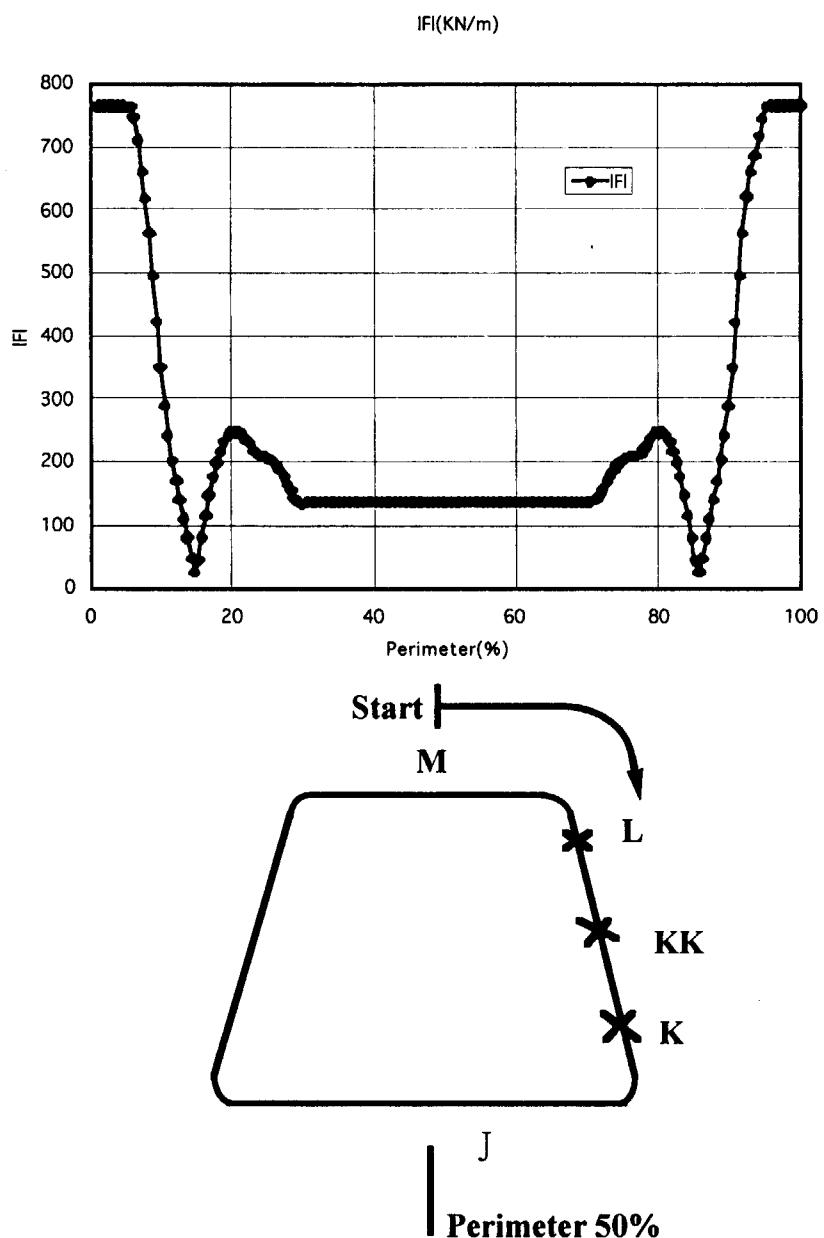


図-3-15 下部コイル電磁力 $F_z$ 分布 (SOF)

図-3-16 下部コイル電磁力 $|F|$ 分布(SOF)

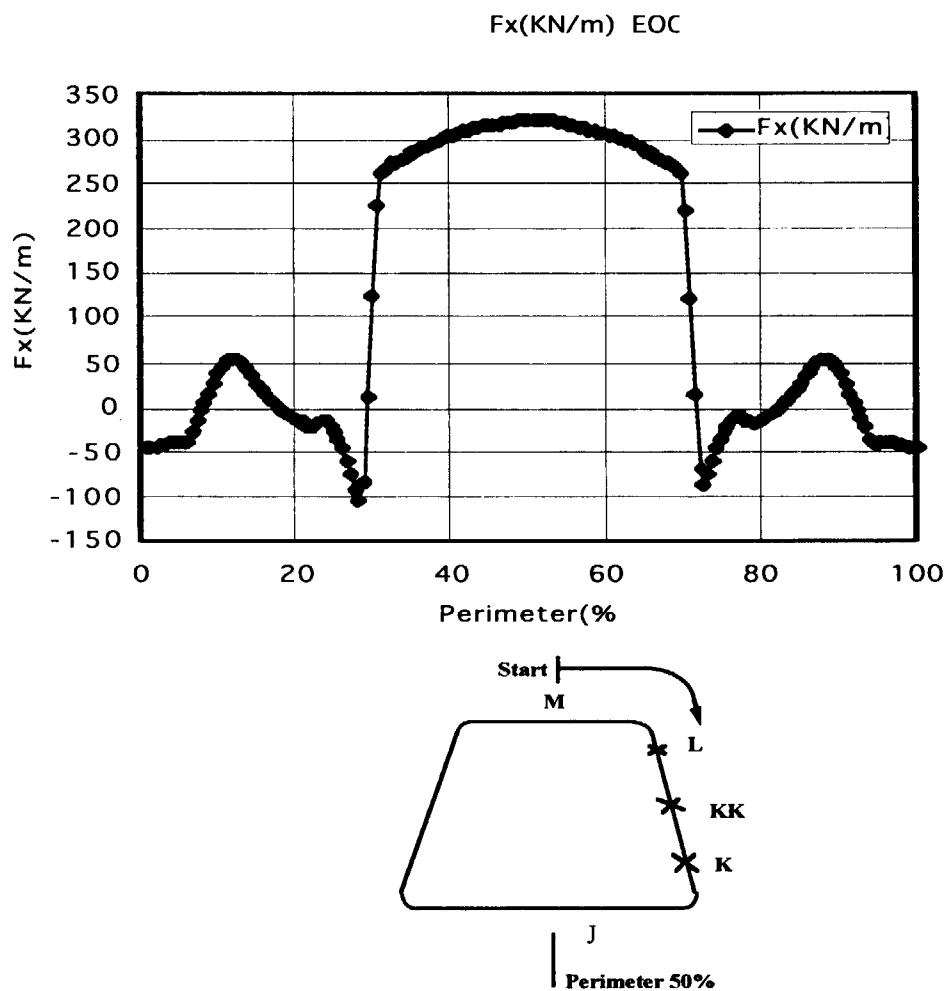


図-3-17 下部コイル電磁力 $F_x$ 分布(EOC)

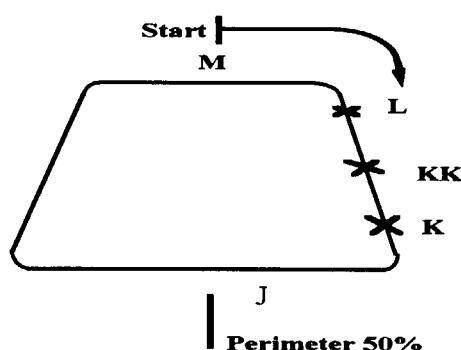
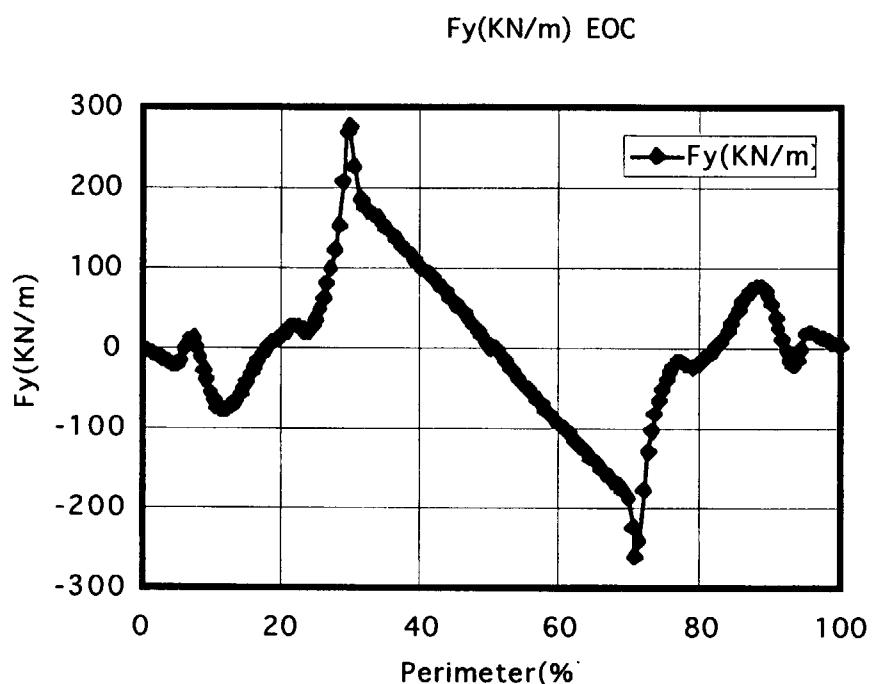


図-3-18 下部コイル電磁力Fy分布(EOC)

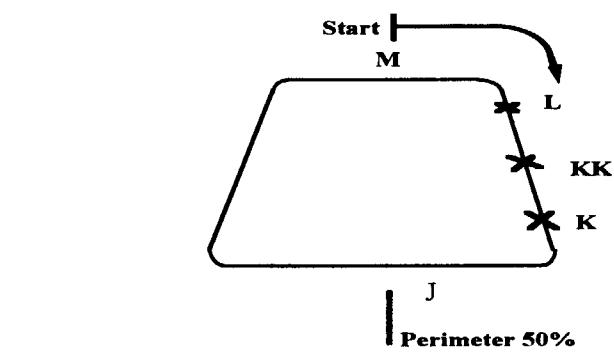
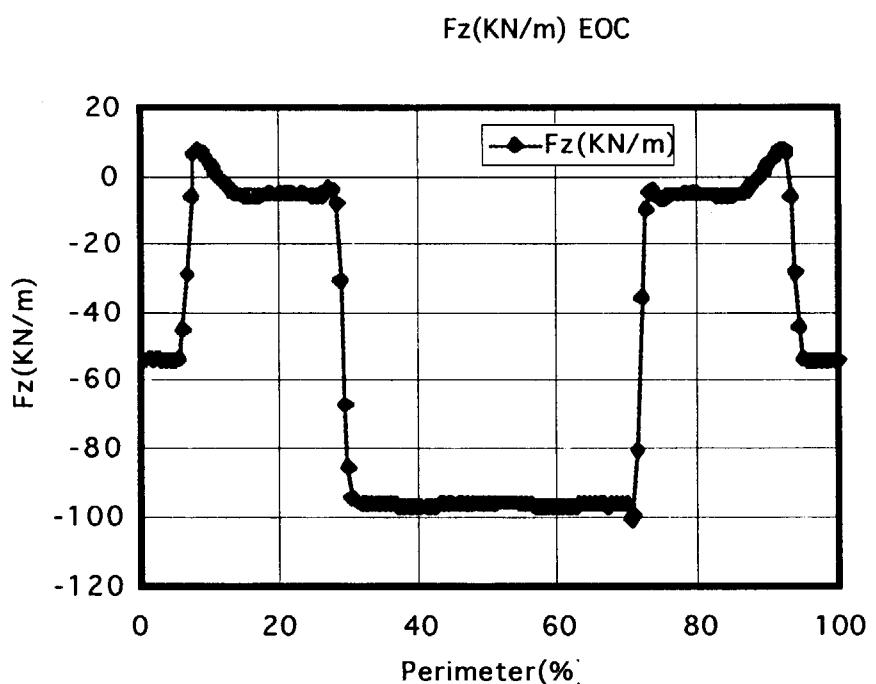
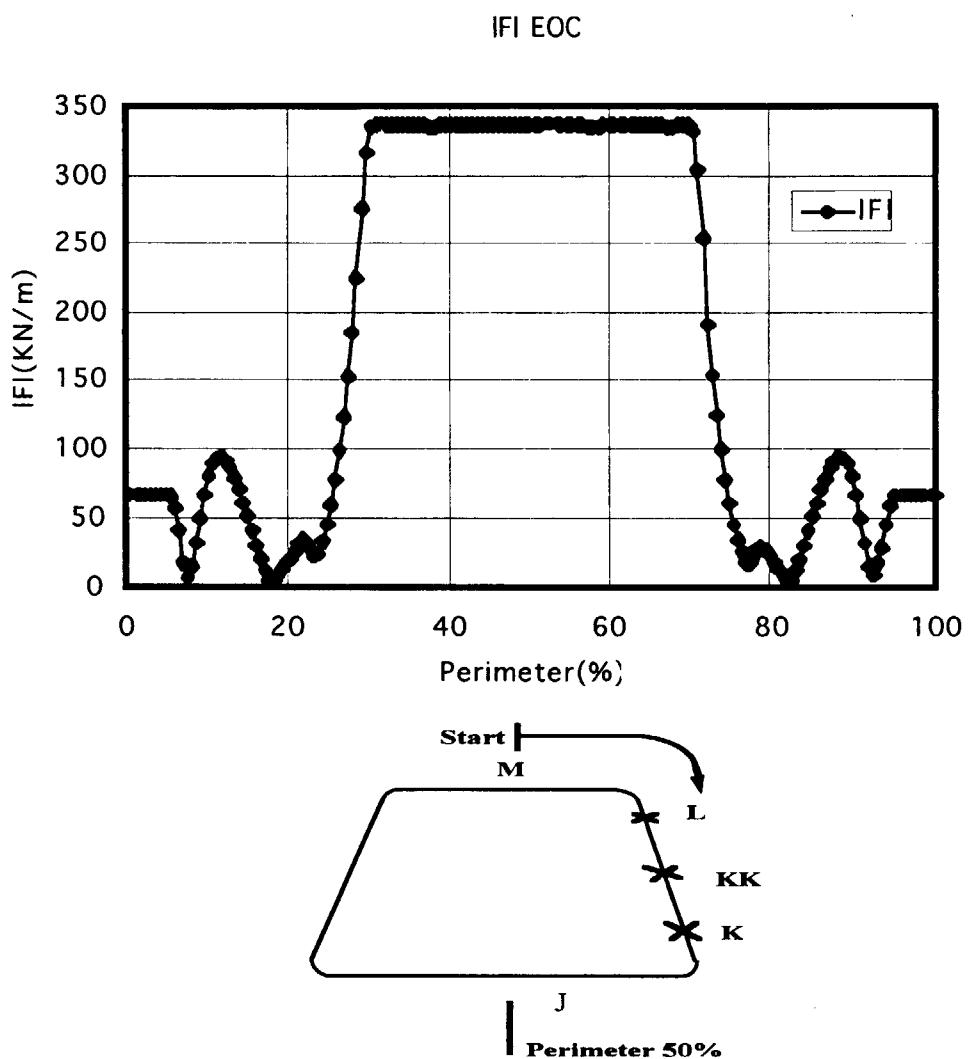


図-3-19 下部コイル電磁力 $F_z$ 分布(EOC)

図-3-20 下部コイル電磁力 $|F|$ 分布(EOC)

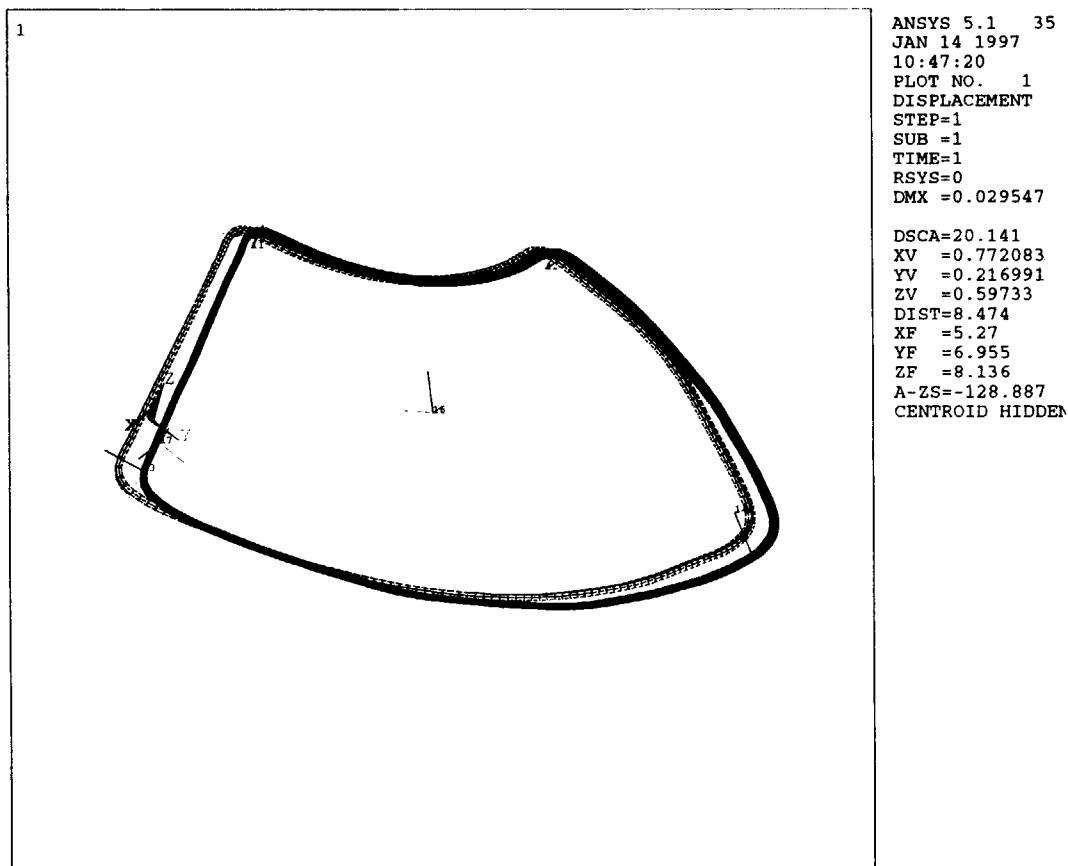


図-4-1 上部コイル変形図

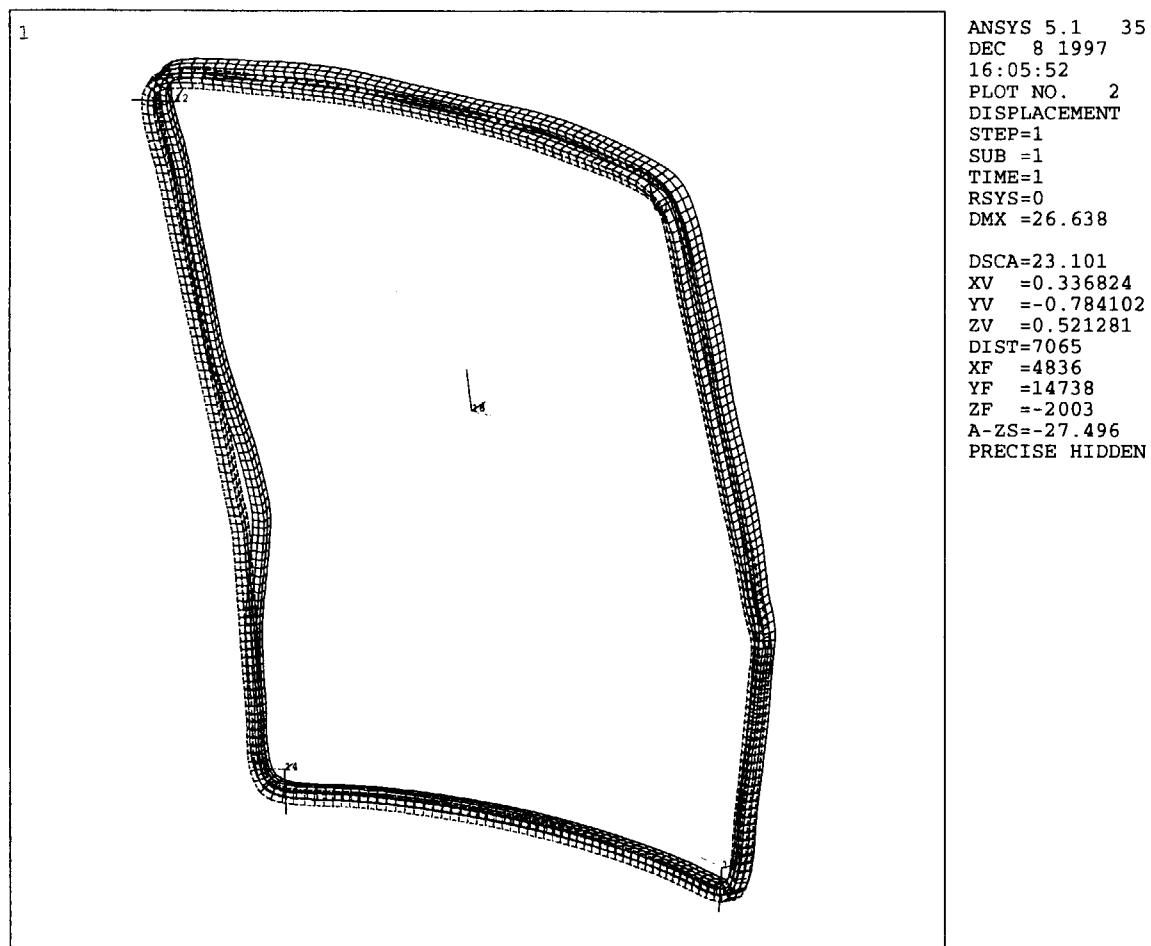


図-4-2 側部コイル変形図

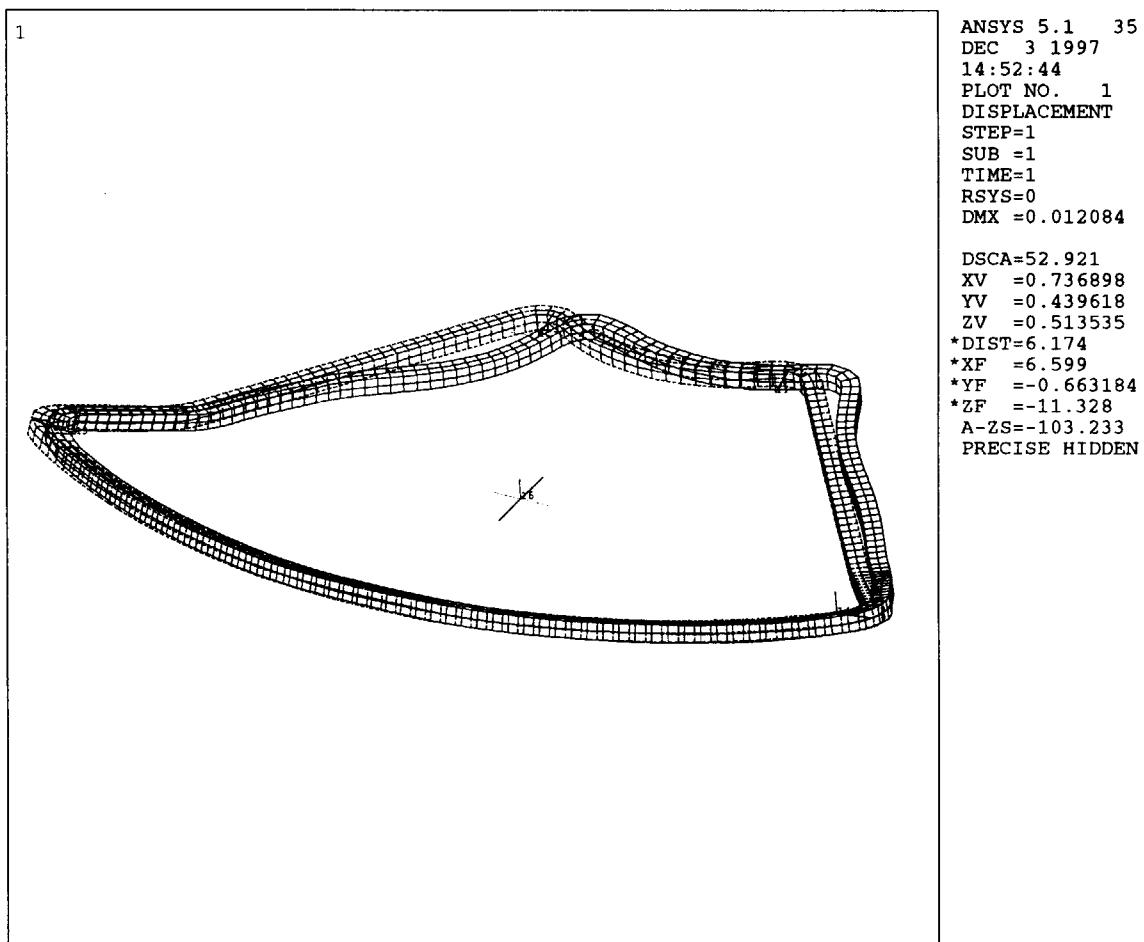
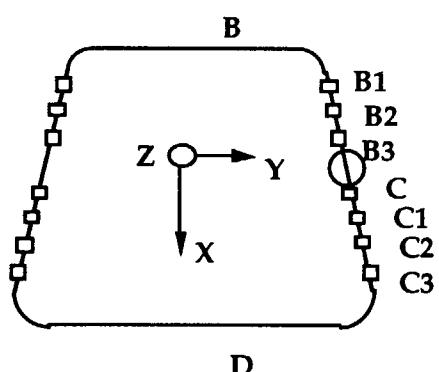
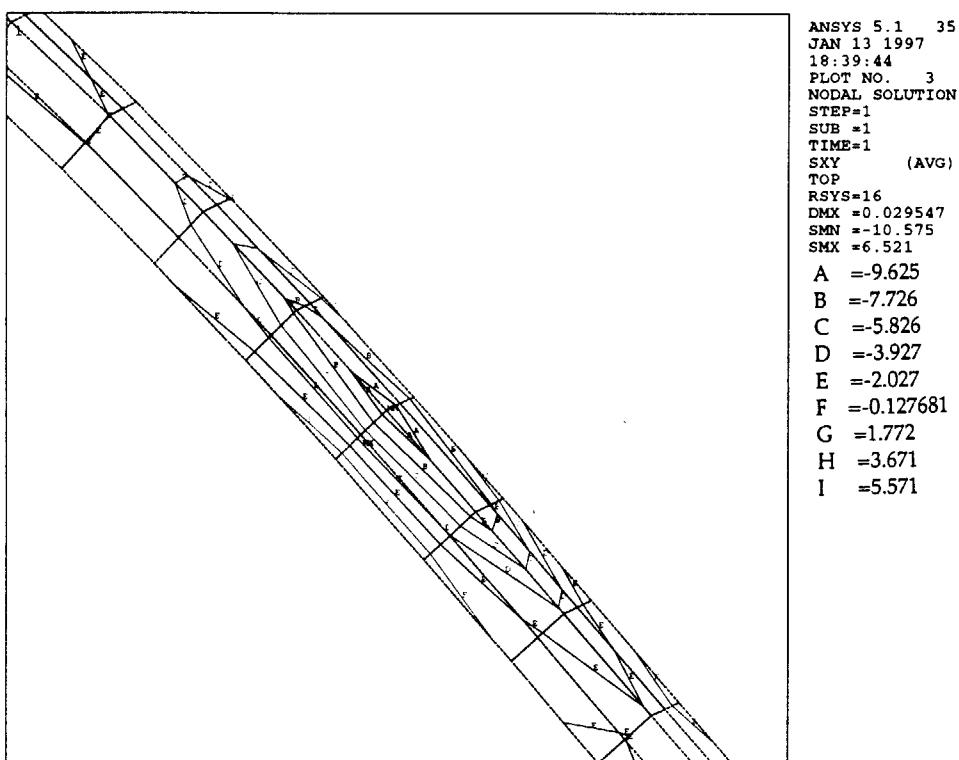


図-4-3 下部コイル変形図



Top Coil  
図-5-1 上部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{12}$

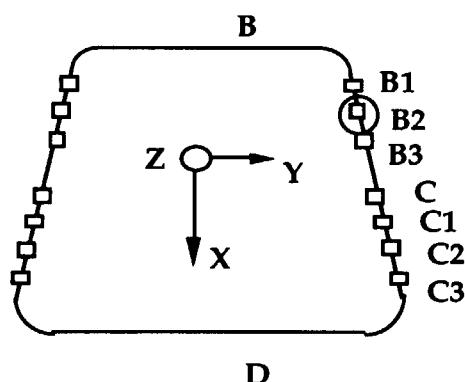
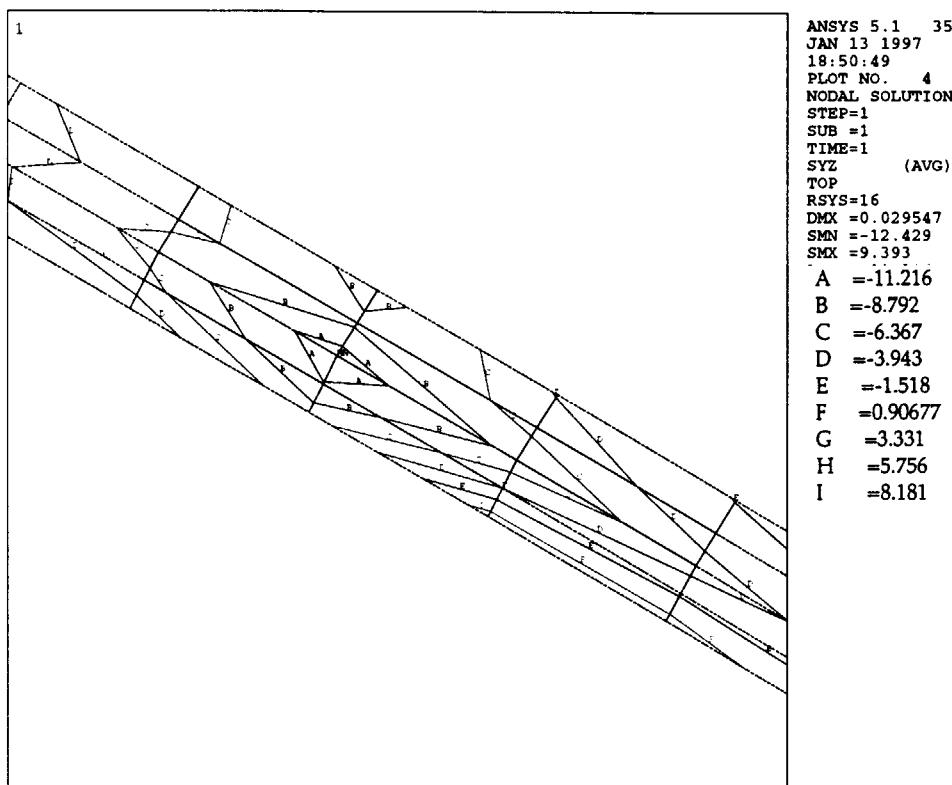
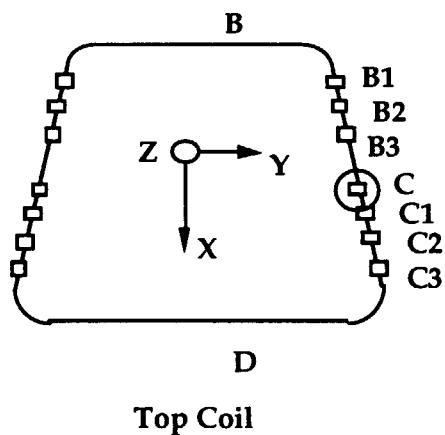
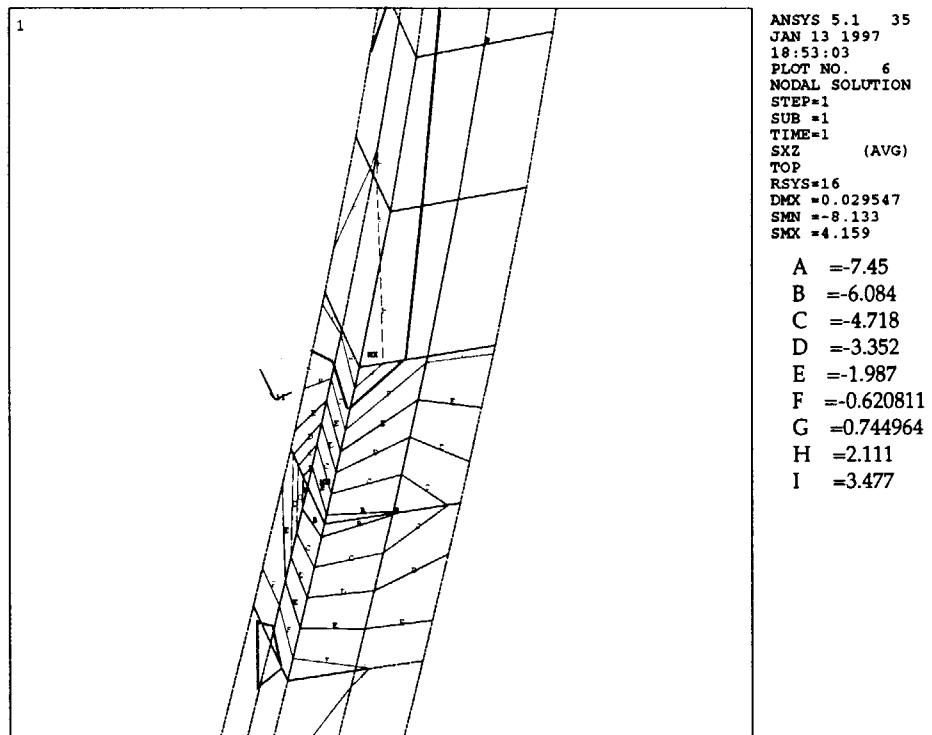


図-5-2 上部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{23}$

図-5-3 上部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{31}$

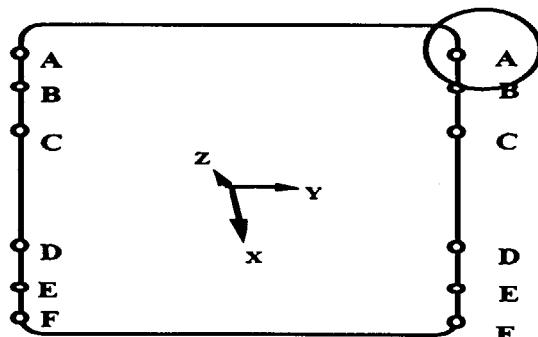
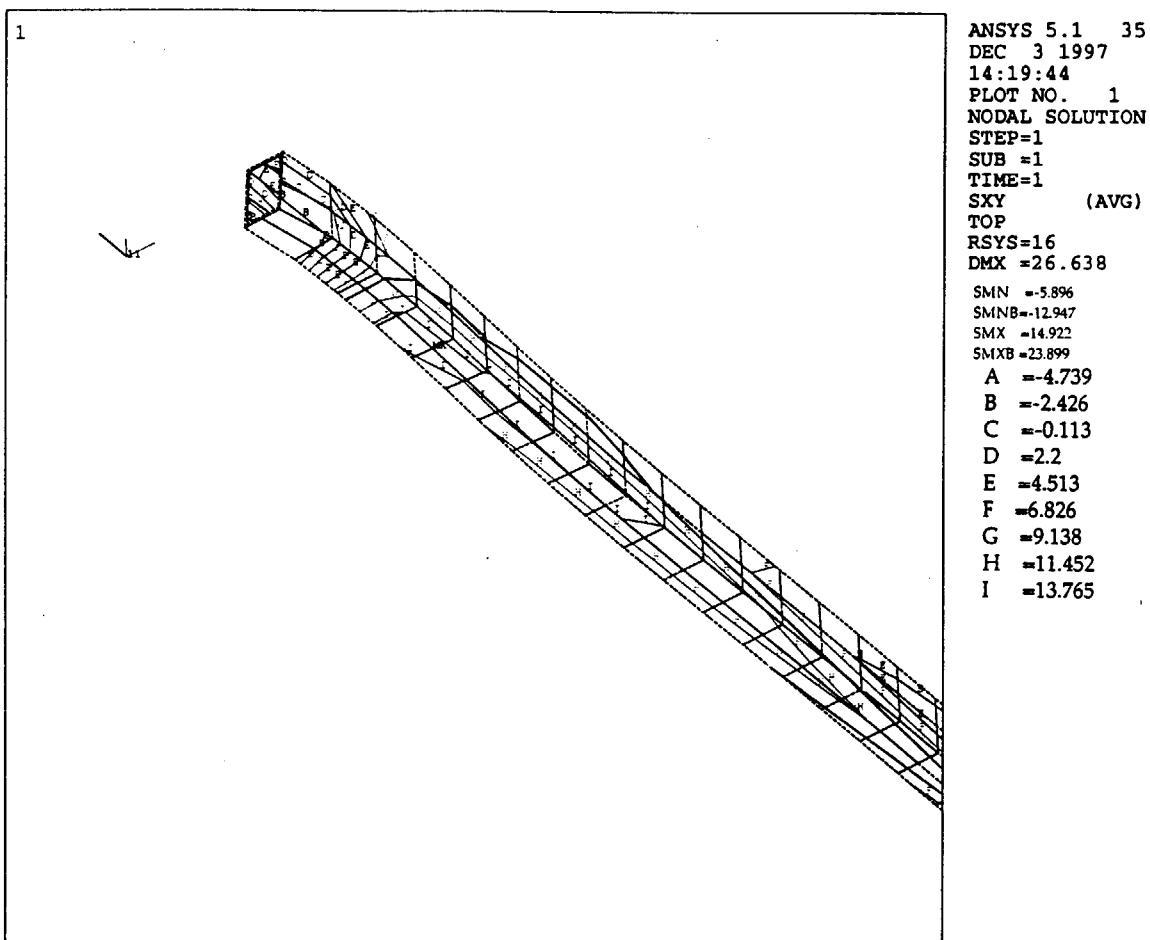
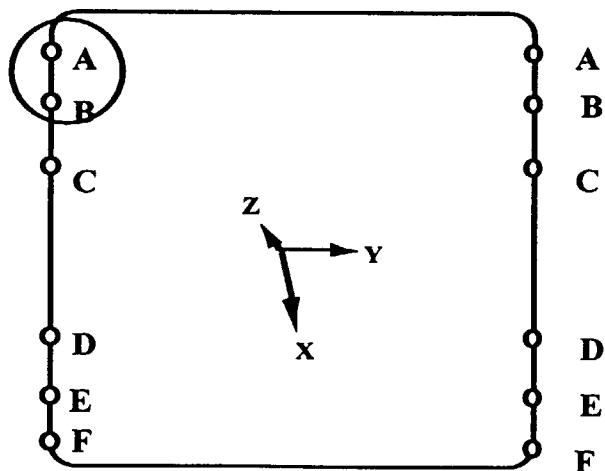
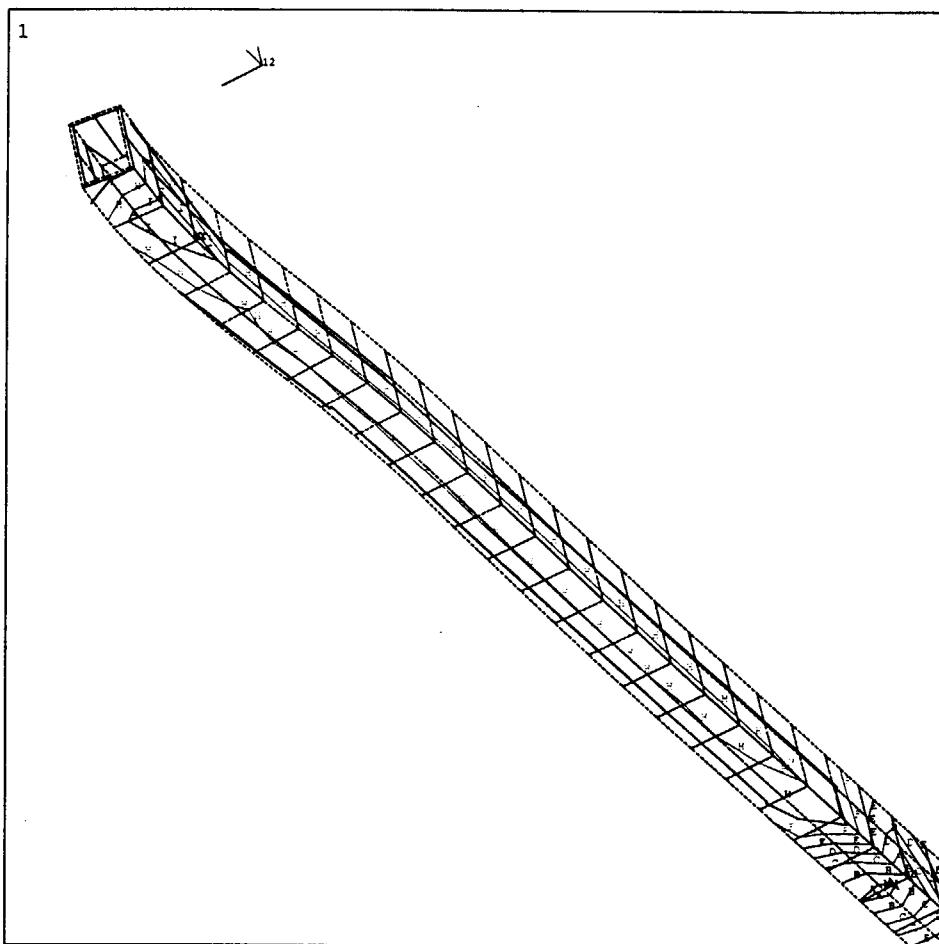
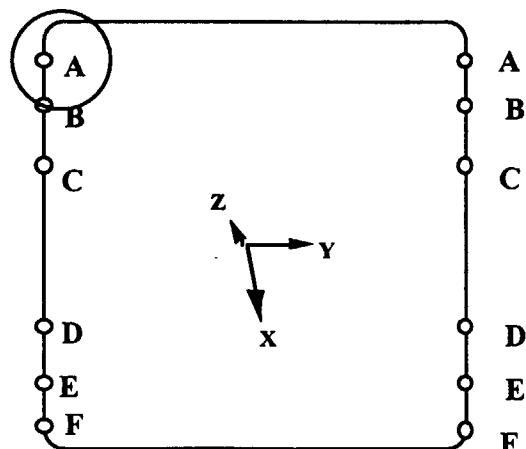
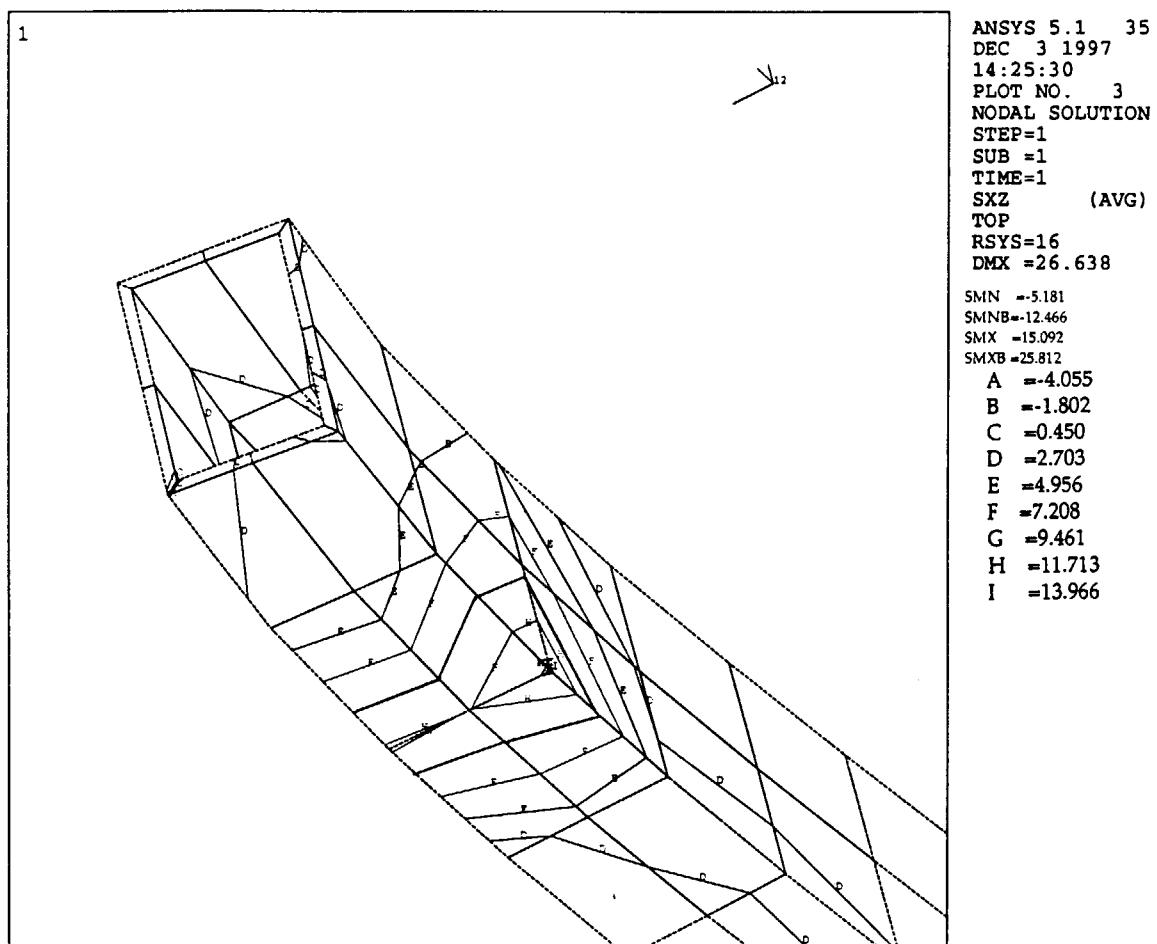


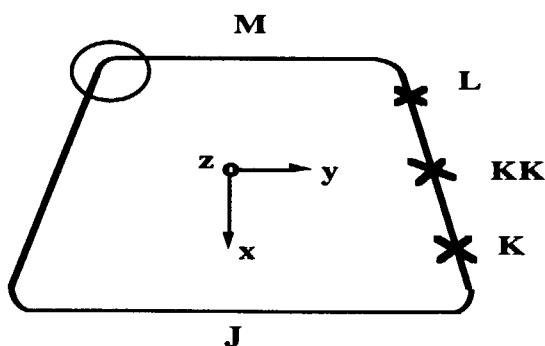
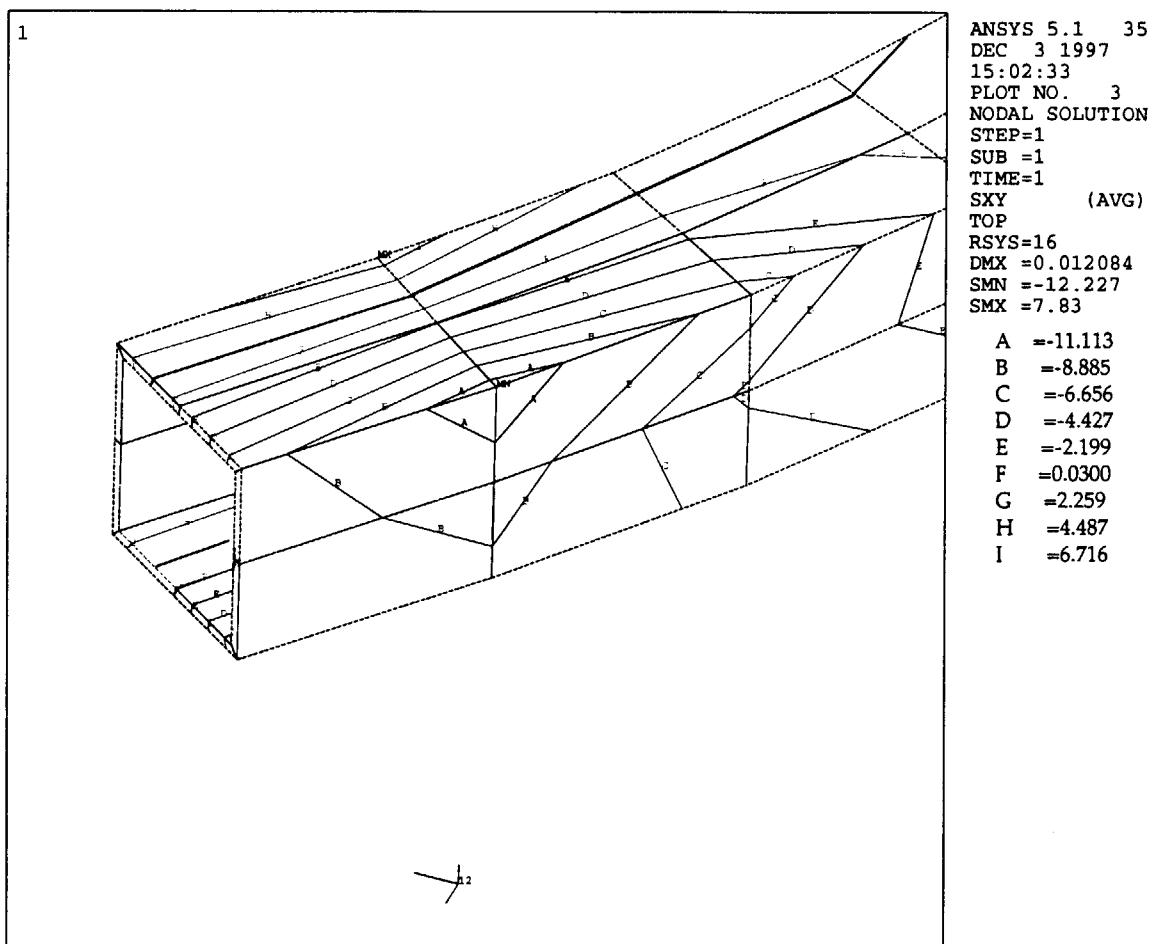
図-5-4 側部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{12}$

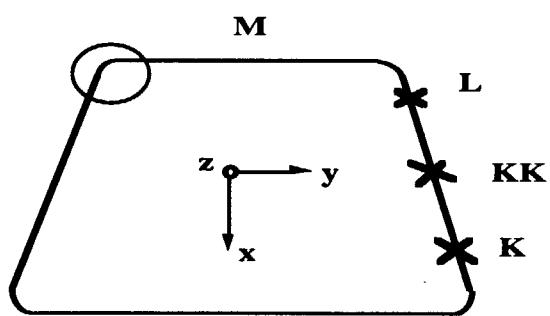
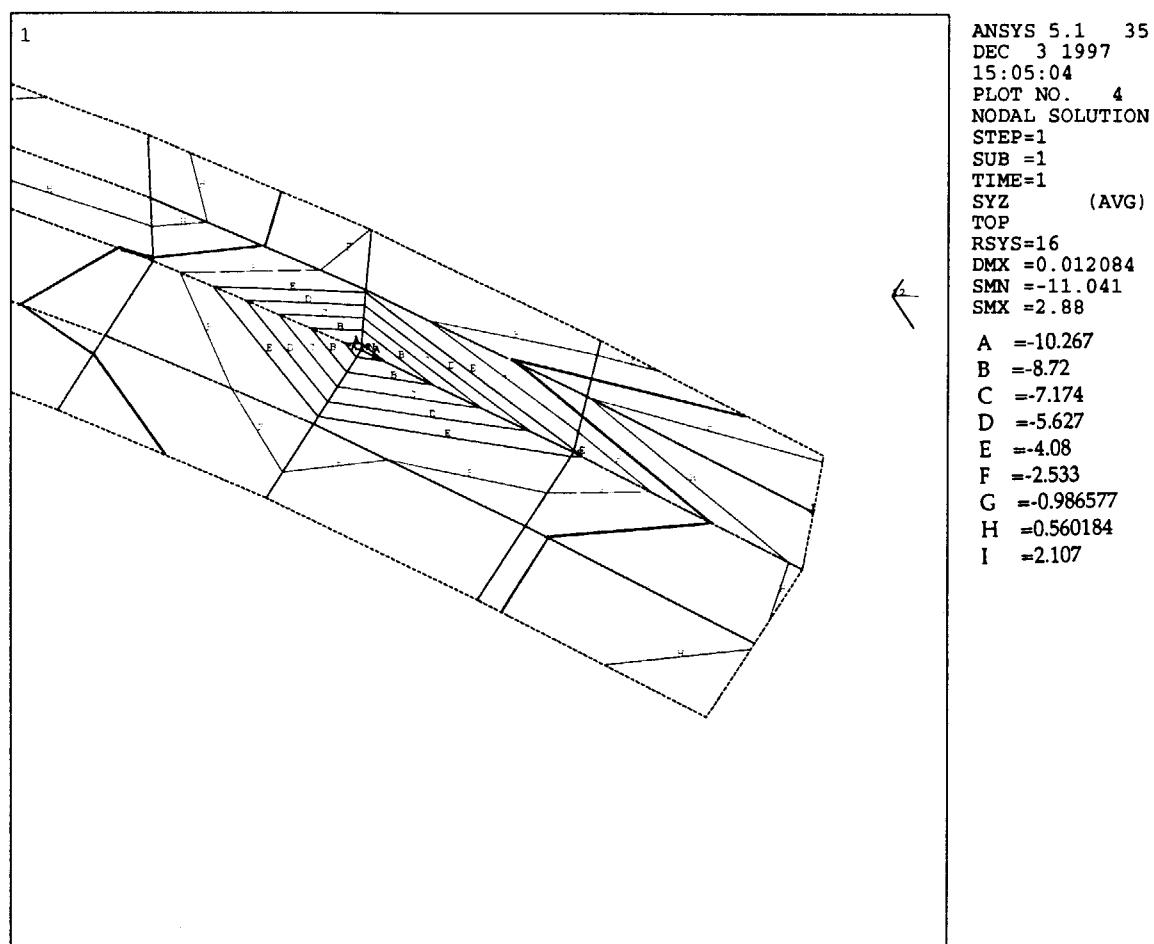


**Side Coil**  
**図-5-5 側部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{23}$**



Side Coil  
図-5-6 側部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{31}$

図-5-7 下部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{12}$

図-5-8 下部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{23}$

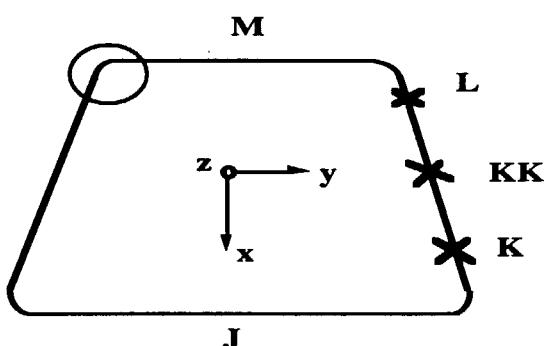
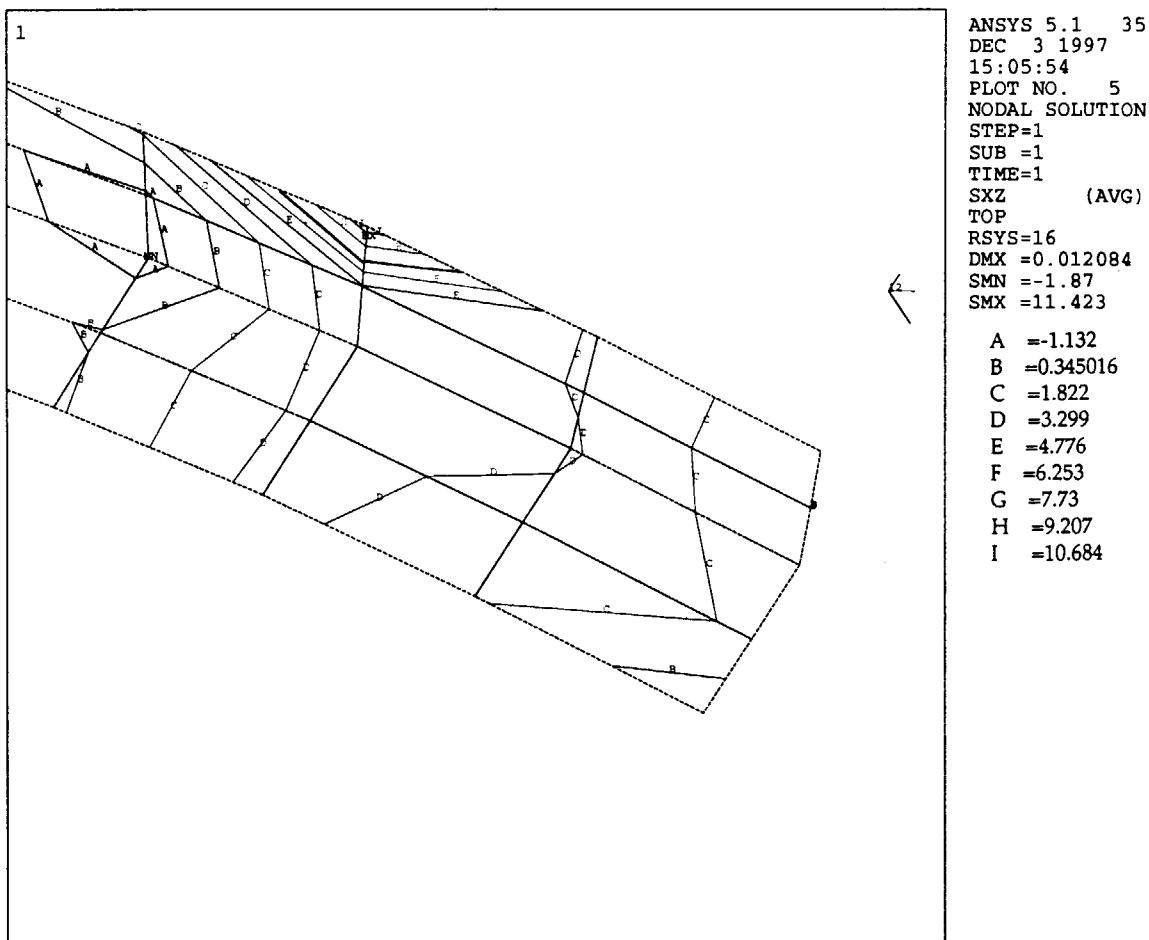
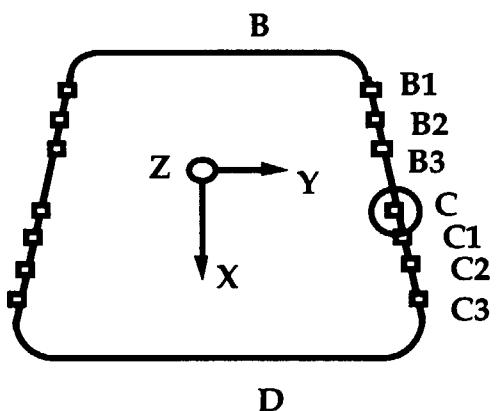
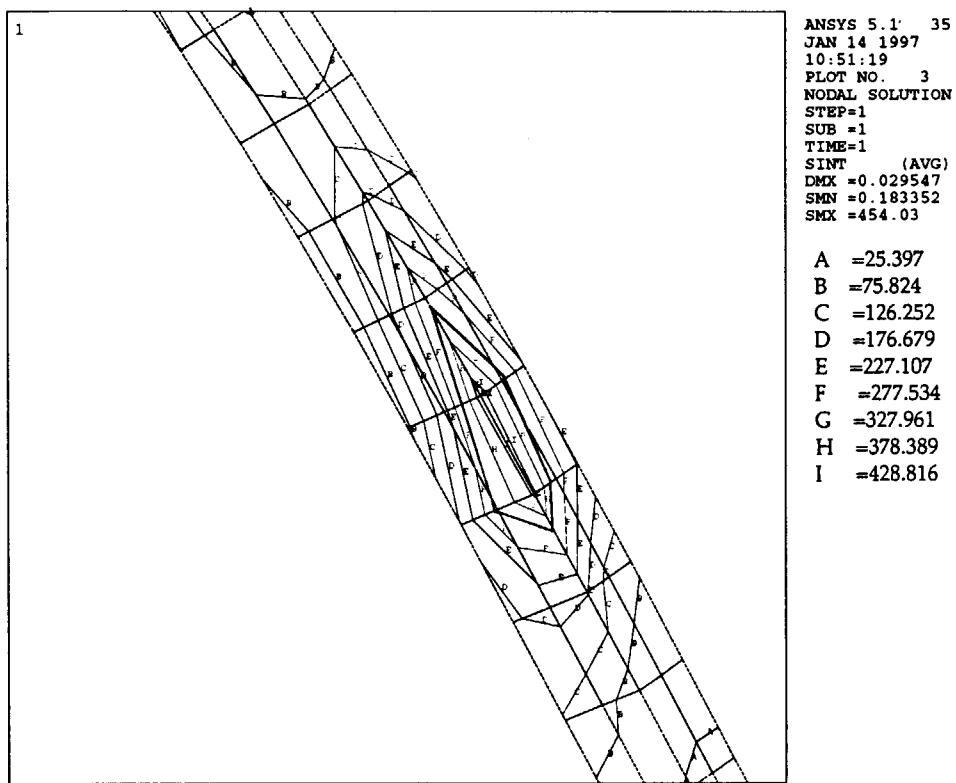
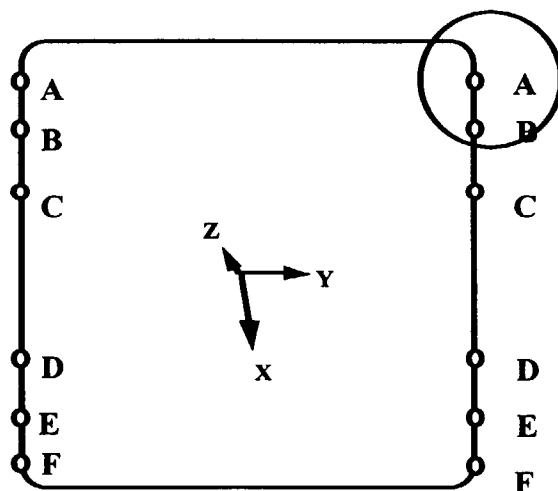
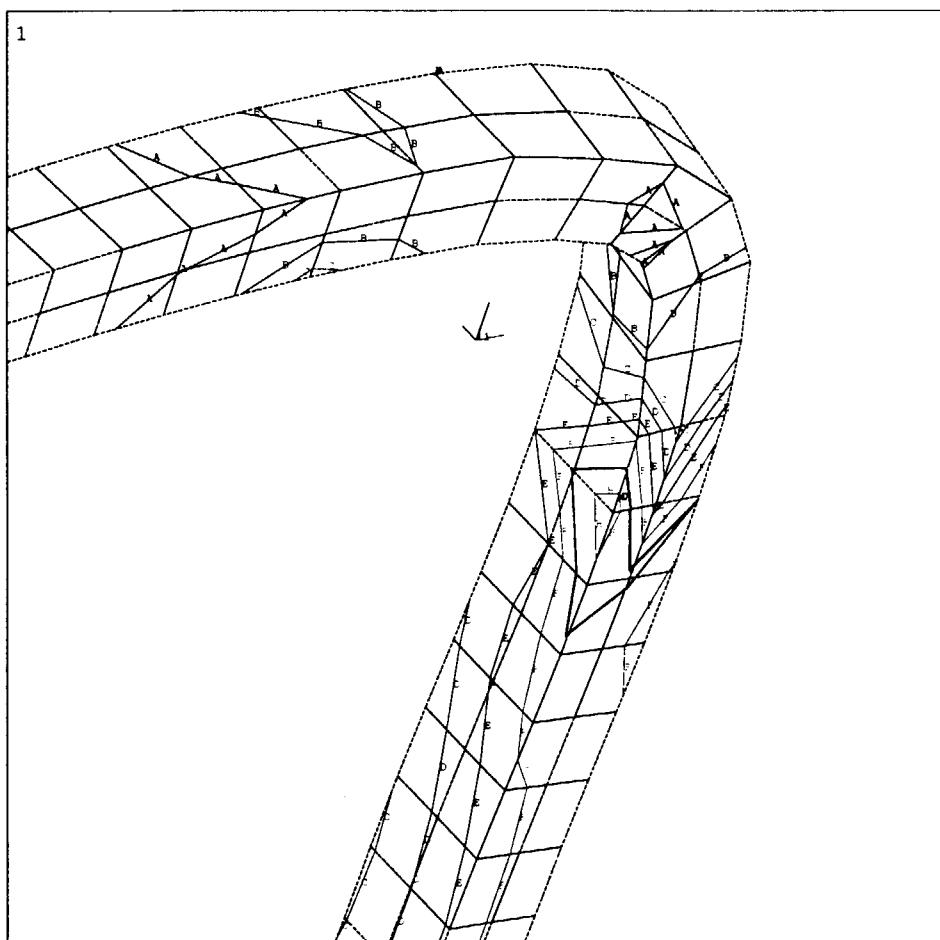


図-5-9 下部コイル絶縁材剪断応力 $\tau_{31}$



Top Coil  
図-6-1 上部コイルケーストレスカ応力



**Side Coil**  
**図-6-2 側部コイルケースストレスカ応力**

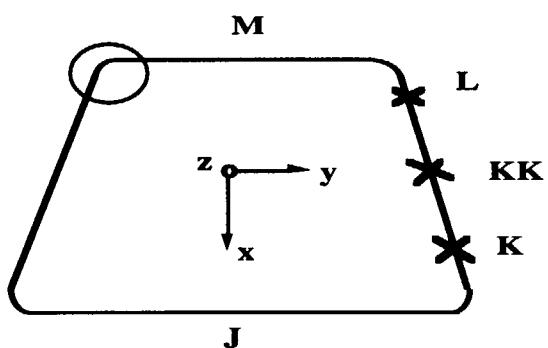
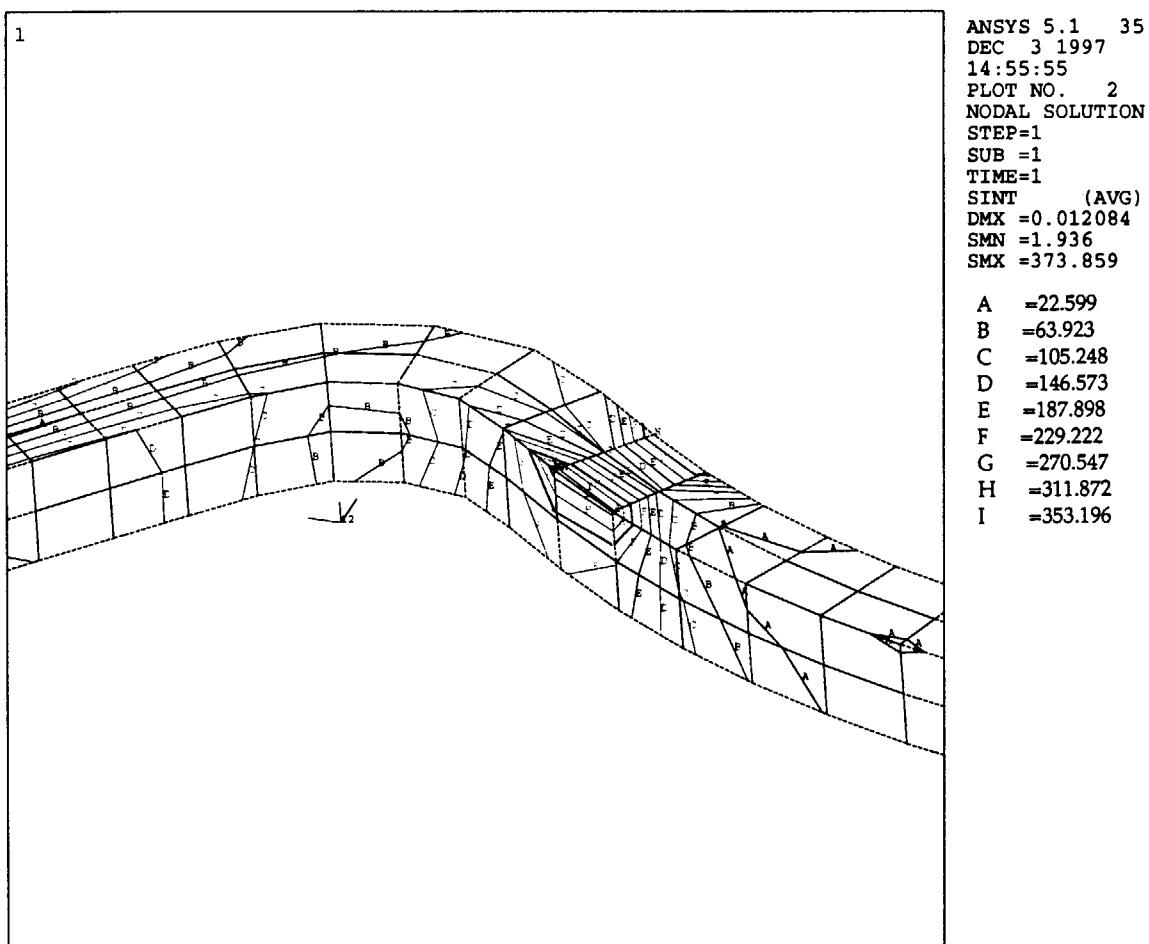


図-6-3 下部コイルケースストレス応力

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放熱束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC開催理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
		1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889				
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>		
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>		
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>		
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>		
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>		
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci		吸収線量	Gy		照射線量	C/kg		R	線量当量	Sv	rem
		1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>		1	100		1	3876				
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	0.01	0.01	1	1	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1	1			0.01	1

(86年12月26日現在)

