

JAERI-M  
85-057

20MJ超電導パルスコイルの交流損失評価

1985年5月

高橋 龍吉\* 島本 進

JAERI-M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。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 日立高速印刷株式会社

20 M J 超電導パルスコイルの交流損失評価

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

高橋 龍吉\*・島本 進

(1985年4月12日受理)

最近、当研究室において開発された、3種類の大電流超電導パルス導体をもとに、蓄積エネルギー20 M Jの3種類の超電導パルスコイルを構成し、磁界が+7 Tから-7 Tまで2秒間で変化する両極性運転時での、各コイルの交流損失を計算した。3種類のコイルについて、交流損失はすべて40 kJ以下で、蓄積エネルギーの0.2%以下であり、大電流で大型の導体を使用しているにもかかわらず、十分に低損失であることが分った。

---

\* 外来研究員：日立製作所

Evaluation of Pulsed Losses  
of 20M J Superconducting Coils

Ryukichi TAKAHASHI\* and Susumu SHIMAMOTO  
Department of Thermonuclear Fusion Research , Naka  
Fusion Research Establishment , JAERI

(Received April 12, 1985)

Recently JAERI has developed two pool-cooled 50kA pulsed superconductors and a 30kA cable-in-conduit type pulsed superconductor .

In this paper , the pulsed losses of three 20M J coils designed basically using these three types of superconductors are calculated for the bipolar pulsed operation from + 7 T to - 7 T in 2 seconds .

The results show that the pulsed losses are less than 40kJ for three coils , which are small despite of employing large-sized high-current conductors.

Keywords : Pulsed Losses , Superconducting Poloidal Coil , Fusion

---

\* On leave from Hitachi Ltd .

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 超電導パルス導体 .....	1
3. 20 M J 超電導パルスコイルの諸元 .....	7
4. 交流損失の計算手法 .....	12
4.1 ヒステリシス損失 .....	12
4.2 結合損失 .....	12
4.3 渦電流損失 .....	14
5. 計算結果 .....	19
6. まとめ .....	28
謝 辞 .....	28
参考文献 .....	28
付録「FIELDDEM1」マニュアル .....	30

## CONTENTS

1.	Introduction .....	1
2.	Pulsed Superconductors .....	1
3.	Major Parameters of 20 MJ Superconducting Pulsed Coils .....	7
4.	Calculation Method of Pulsed Losses .....	12
4.1	Hysteresis Loss .....	12
4.2	Coupling Loss .....	12
4.3	Eddycurrent Loss .....	14
5.	Results .....	19
6.	Conclusions .....	28
	Acknowledgement .....	28
	References .....	28
	Appendix .....	30

## 1. はじめに

トカマク型核融合炉に必要な、ポロイダルコイルの超電導化を図るうえで、その交流損失量を定量的に把握することは、コイルの安定性や、冷凍系の設計に当って重要なことである。本報告では、当研究室で開発した、3種類の大電流超電導パルス導体（JA-50, JB-50, JF-30）を基本にし、20MJ規模の超電導パルスコイルを設計し、+7Tから-7Tまで2秒間で磁界が変動する両極性運転時の交流損失量を求めた結果を報告する。

## 2. 超電導パルス導体

当研究室で開発した50kA級のJA-50, JB-50及び30kA級のJF-30パルス導体の諸元及び構成図を各々、表2.1, 図2.1, 表2.2, 図2.2, 表2.3, 図2.3に示す。JA-50導体は熱的安定性を高めるようにしてあり、一方JB-50導体は熱的特性は若干犠牲にしても、機械的剛性を良くしてある。この両者は浸漬冷凍導体である。これに対しJF-30導体は強制冷凍導体である。いずれの導体も、超電導体はNb-Tiで、素線の表面に絶縁を施し、損失時定数を低減するようにしてある。

1Tにおいて実測された各素線の損失時定数及び、これからフルサイズ導体を構成した場合の1Tでの各導体の損失時定数<sup>(1)</sup>を表2.4に示した。JB-50導体とJF-30導体の損失時定数は各々2.9と1.4msと充分低損失な導体となっている。一方、JA-50導体の損失時定数6.1msで他の2者より大きくなっているが、これは現在のツイストピッチ40mmを30mm程度に短かくすることにより、損失時定数を3ms以下とすることが可能である。以下の解析においては、JA-50導体のツイストピッチを30mmとした導体（以下、JA-50M導体と呼ぶ）で20MJコイルを構成した場合を考える。

## 1. はじめに

トカマク型核融合炉に必要な、ポロイダルコイルの超電導化を図るうえで、その交流損失量を定量的に把握することは、コイルの安定性や、冷凍系の設計に当って重要なことである。本報告では、当研究室で開発した、3種類の大電流超電導パルス導体（JA-50, JB-50, JF-30）を基本にし、20MJ規模の超電導パルスコイルを設計し、+7Tから-7Tまで2秒間で磁界が変動する両極性運転時の交流損失量を求めた結果を報告する。

## 2. 超電導パルス導体

当研究室で開発した50kA級のJA-50, JB-50及び30kA級のJF-30パルス導体の諸元及び構成図を各々、表2.1, 図2.1, 表2.2, 図2.2, 表2.3, 図2.3に示す。JA-50導体は熱的安定性を高めるようにしてあり、一方JB-50導体は熱的特性は若干犠牲にしても、機械的剛性を良くしてある。この両者は浸漬冷凍導体である。これに対しJF-30導体は強制冷凍導体である。いずれの導体も、超電導体はNb-Tiで、素線の表面に絶縁を施し、損失時定数を低減するようにしてある。

1Tにおいて実測された各素線の損失時定数及び、これからフルサイズ導体を構成した場合の1Tでの各導体の損失時定数<sup>(1)</sup>を表2.4に示した。JB-50導体とJF-30導体の損失時定数は各々2.9と1.4msと充分低損失な導体となっている。一方、JA-50導体の損失時定数6.1msで他の2者より大きくなっているが、これは現在のツイストピッチ40mmを30mm程度に短かくすることにより、損失時定数を3ms以下とすることが可能である。以下の解析においては、JA-50導体のツイストピッチを30mmとした導体（以下、JA-50M導体と呼ぶ）で20MJコイルを構成した場合を考える。



Table 2.1 Major parameters of JA-50 superconductor

JA-50 CONDUCTORFINAL CONDUCTOR

DIMENSION	144.5 mm × 17.5 mm
NO. OF CABLE	35
TWIST PITCH	1000 mm
S.S. REINFORCEMENT	
DIMENSION	130.0 mm × 2.5 mm
INSULATION	CURED EPOXY FIBER GLASS TAPE 0.1 mmt

CABLE

OUTER DIA.	7.86 mm
NO. OF SC STRANDS	6
S.S. STRAND	
OUTER DIA.	2.62 mm
INSULATION	FORMVAR 30 μmt

STRAND

OUTER DIA.	2.62 mm
DIA. OF NbTi FILAMENT	9.7 μm
NO. OF FILAMENTS	6156
TWIST PITCH	40 mm
NbTi:Cu:CuNi	1 : 9.58 : 1.04
INSULATION	FORMVAR 10 μmt

Table 2.2 Major parameters of JB-50 superconductor

JB-50 CONDUCTORFINAL CONDUCTOR

DIMENSION	117.0 mm × 20.5 mm
NO. OF CABLES	25
TWIST PITCH	760 mm
S.S. PLATE	95 mm × 1 mm
S.S. ARMOR	*SEE FIG. 2.2 FOR DETAIL

CABLE

OUTER DIA.	8.0 mm
NO. OF STRANDS	21
STRAND PITCH	100 mm

STRAND

OUTER DIA.	1.5 mm
DIA. OF NbTi FILAMENT	20 μm
NO. OF FILAMENTS	540
TWIST PITCH	15 mm
NbTi:Cu:CuNi	1 : 9.0 : 0.42
INSULATION	COPPER OXIDE

Table 2.3 Major parameters of JF-30 superconductor

JF-30 CONDUCTORFINAL CONDUCTOR

NO. OF SUBCABLES	7
STRAND PITCH	360 mm
VOID FRACTION	34.2 %
S.S. CONDUIT DIMENSION	34.5 mm × 34.5 mm
THICKNESS	1.8 μmt

SUBCABLE

OUTER DIA.	20.2 mm
NO. OF STRANDS	81
STRAND TWIST PITCH	23 mm (1st) 47 mm (2nd) 90 mm (3rd) 180 mm (4th)

STRAND

OUTER DIA.	1.19 mm
DIA. OF NbTi FILAMENT	12.8 μm
NO. OF FILAMENTS	1344
TWIST PITCH	14 mm
NbTi:Cu:CuNi	1:3.66:1.55
INSULATION	FORMVAR 10 μmt

Table 2.4 Measured loss time constants

	JA-50	JB-50	JF-30
STRAND DIA. (mm)	2.6	1.5	1.18
TWIST PITCH (mm)	40	15	14
MEASURED @ 1T (ms)	14 ± 2	7.5 ± 1	2.6 ± 0.3
RESISTIVITY @ 1T (nΩm)	3.6	0.96	2.4
AVERAGED τ (ms) FOR WHOLE CONDUCTOR @ 1 T	6.1 ± 0.8	2.9 ± 0.5	1.4 ± 0.2

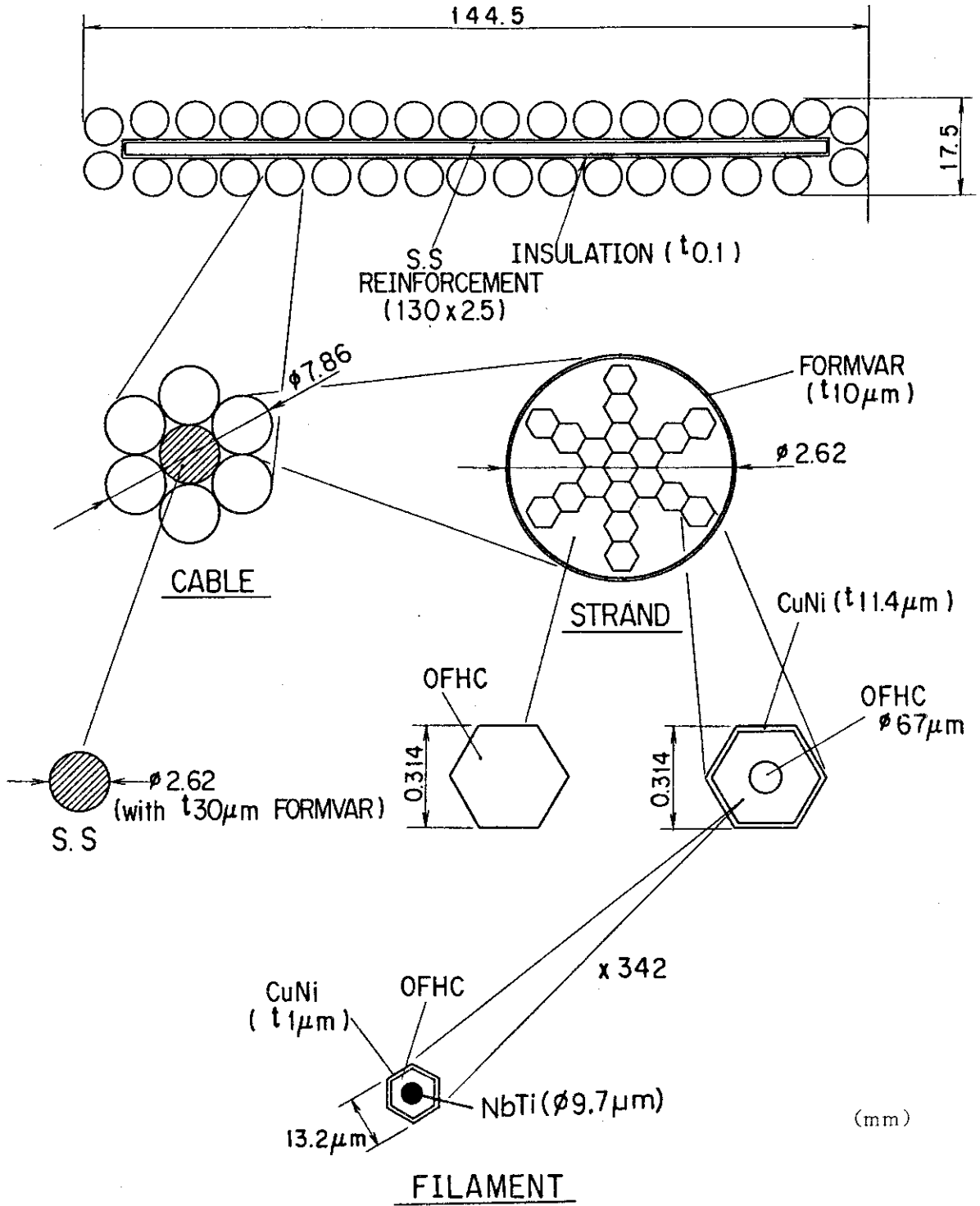


Fig. 2.1 Cross sectional view of JA-50 superconductor

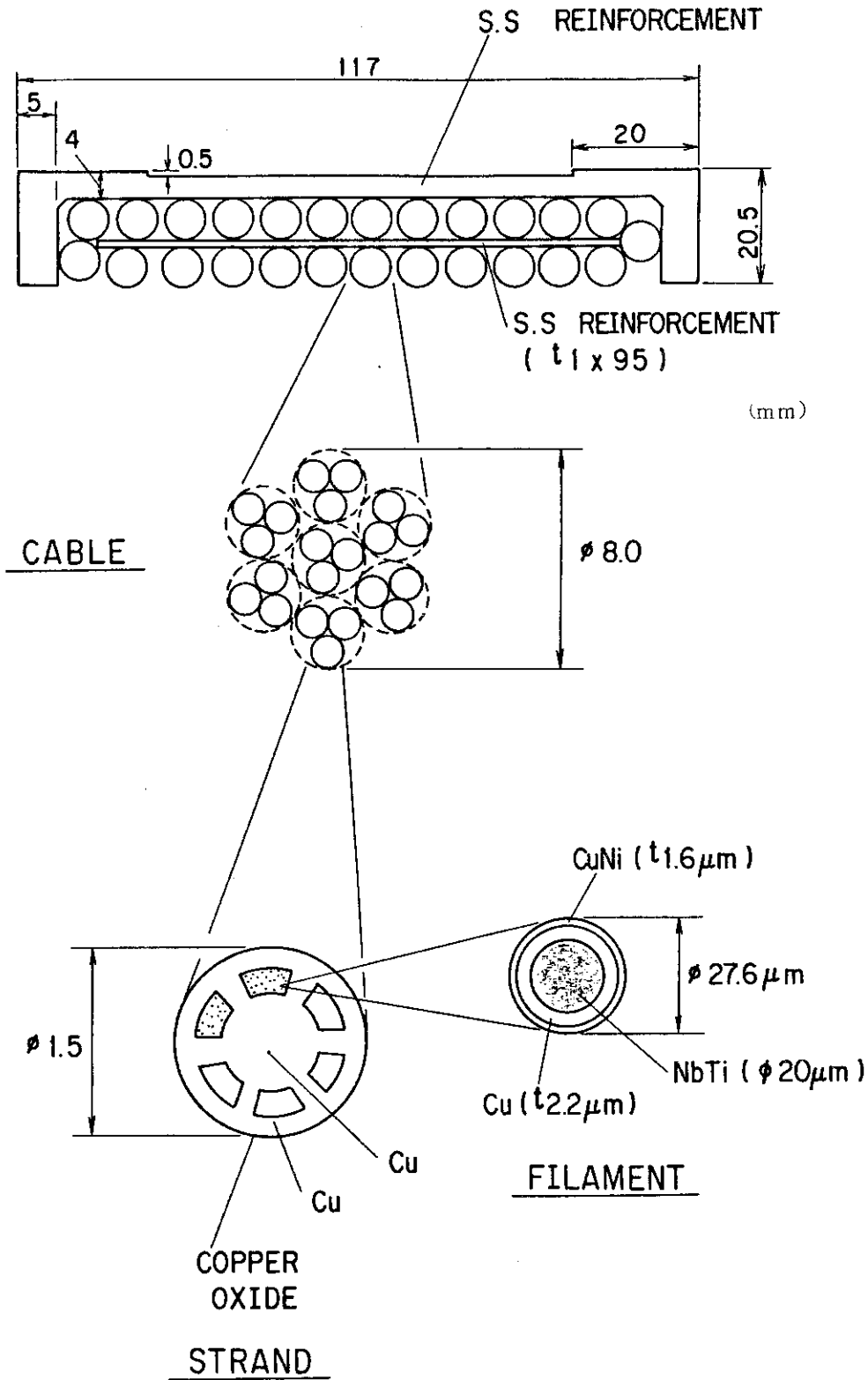


Fig. 2.2 Cross sectional view of JB-50 superconductor

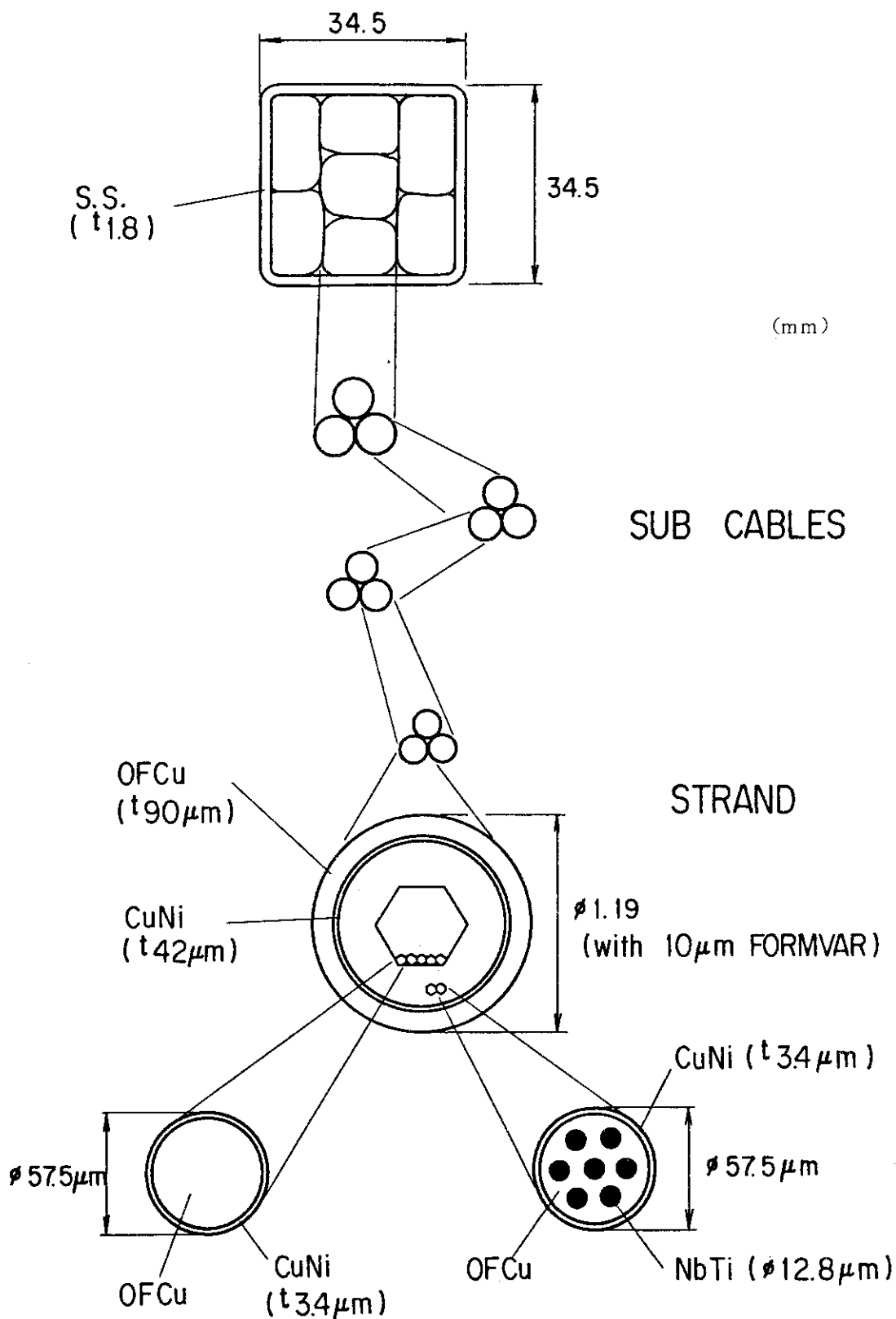


Fig. 2.3 Cross sectional view of JF-30 superconductor

### 3. 20 MJ 超電導パルスコイルの諸元

2章で述べたJA-50M, JB-50, JF-30の3種類の超電導パルス導体を用いて構成した蓄積エネルギーが20MJの超電導パルスコイル(以下各々, JAコイル, JBコイル, JFコイルと呼ぶ)の諸元を表3.1に示す。又, 図3.1~図3.3に各コイルの巻線部の概略図を示した。各コイルとも巻線部内径は700mmに固定した。JFコイルは電磁力によるフープ力支持のために, 導体ターン間にステンレス鋼の補強板を巻き込む構造となっている。

定格電流通電時の各コイルの磁界分布を計算コード, 「FIELD DM1」(第7章付録参照)を用いて計算した結果を図3.4~図3.6に示した。

Table 3.1 Major parameters of three types of 20 MJ coil

	JA-COIL	JB-COIL	JF-COIL
CONDUCTOR	*JA-50M	JB-50	JF-30
COOLING METHOD	POOL COOLING	POOL COOLING	FORCED COOLING
OPERATING CURRENT(KA)	50	50	30.6
N0.OF TURNS	150 (25 x 6)	144 (24 x 6)	231 (11 x 21)
INNER DIAMETER(mm)	700	700	700
OUTER DIAMETER(mm)	1690	1780	1679
LENGTH (mm)	927	750	732.9
INDUCTANCE (mH)	15.9	17.1	42.8
AVERAGED CURRENT DENSITY (A/mm <sup>2</sup> )	16.4	17.8	19.7
STORED ENERGY(MJ)	20.0	21.4	20.0
MAX. OF MAGNETIC FIELD(T)	7.0	7.25	7.4

\* Modified JA-50 Conductor with reduced(30 mm) twist pitch

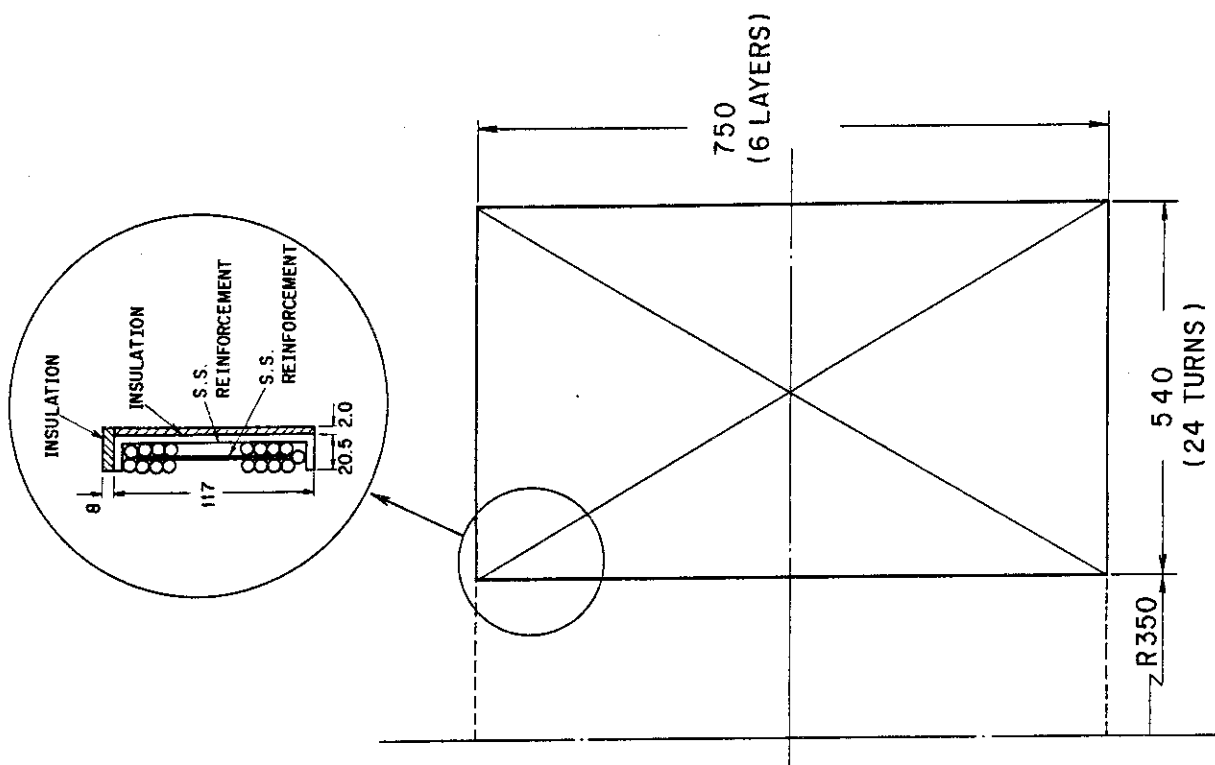


Fig. 3.1 Rough view of winding part of JA-COIL

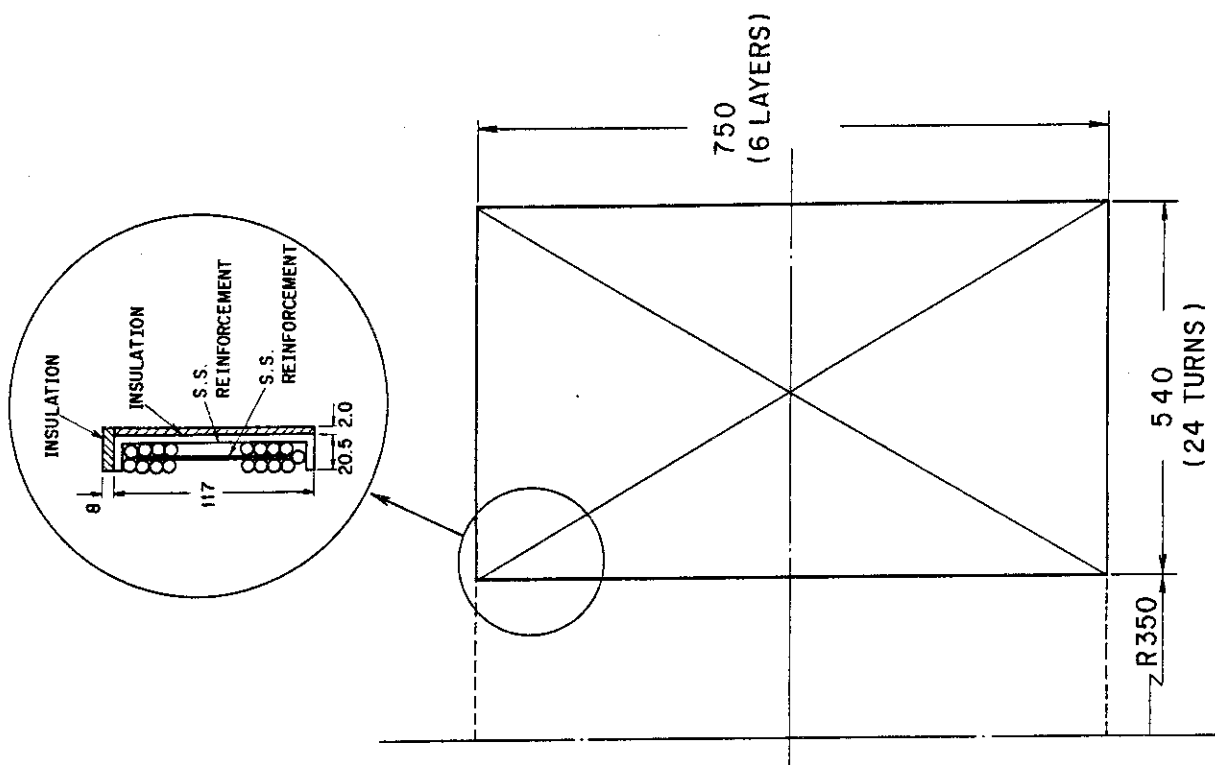


Fig. 3.2 Rough view of winding part of JB-COIL

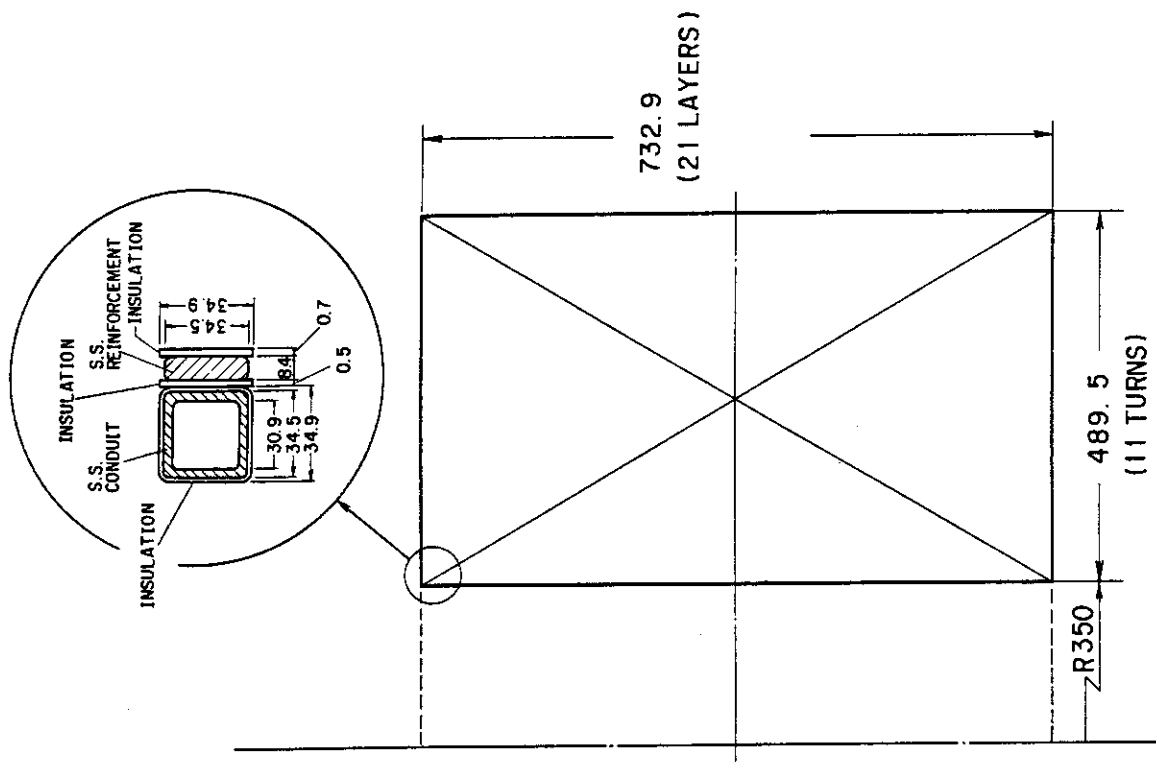


Fig. 3.3 Rough view of winding part of JF-COIL



**\*\* MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION \*\***  
**JA-50 20MJ COIL**

BMAX= 6.920 (T), X = -350.0(MM), Z = -0.0 (MM)  
 BMIN= 0.364 (T), X = 746.0(MM), Z = -0.0 (MM)

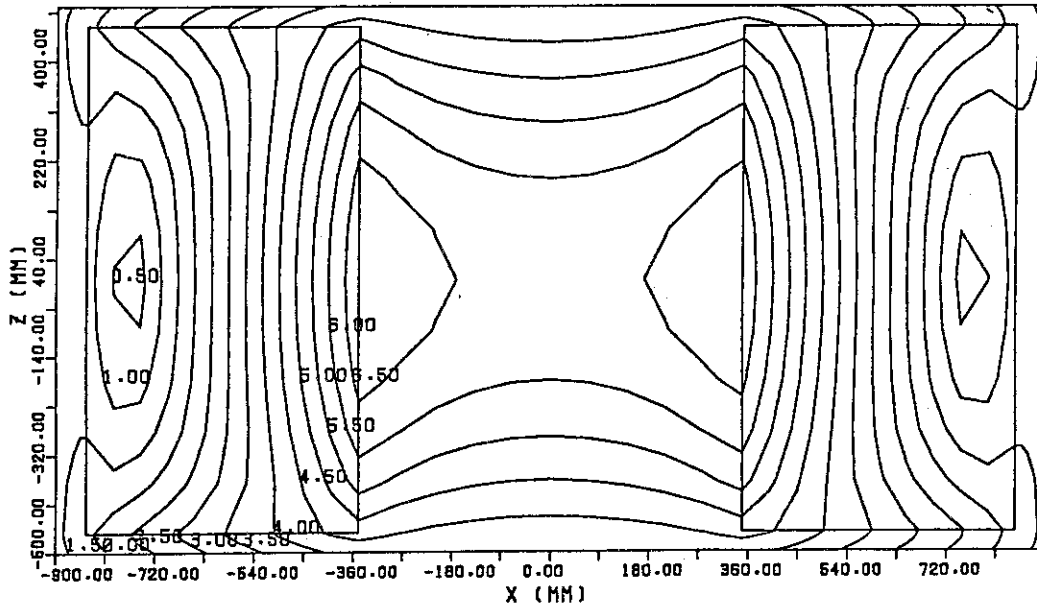


Fig. 3.4 Contour lines of the magnetic field of JA-COIL

**\*\* MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION \*\***  
**JB-50 20MJ COIL**

BMAX= 7.252 (T), X = -350.0(MM), Z = 0.0 (MM)  
 BMIN= 0.259 (T), X = 782.0(MM), Z = 0.0 (MM)

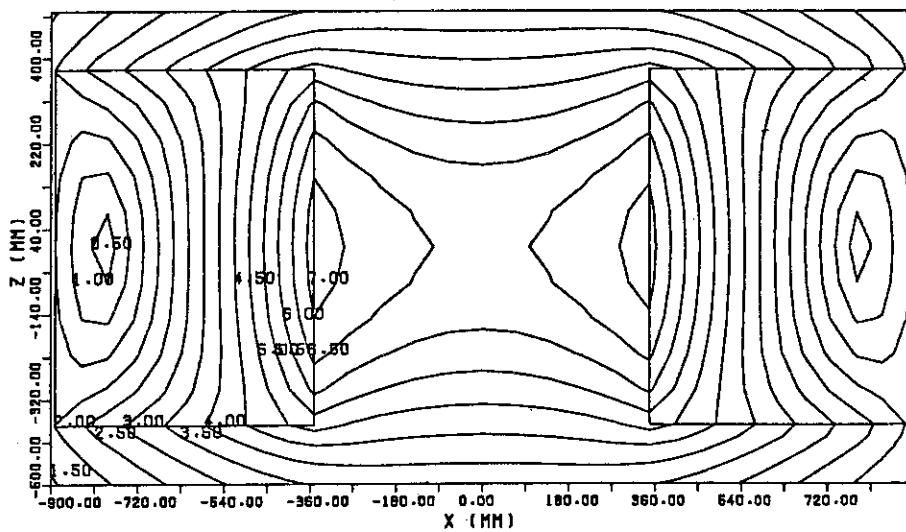


Fig. 3.5 Contour lines of the magnetic field of JB-COIL

\*\* MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION \*\*

JF-30 20MJ COIL

BMAX= 7.398 (T), X = -350.0MM, Z = -0.0 (MM)

BMIN= 0.241 (T), X = 741.6(MM), Z = -0.0 (MM)

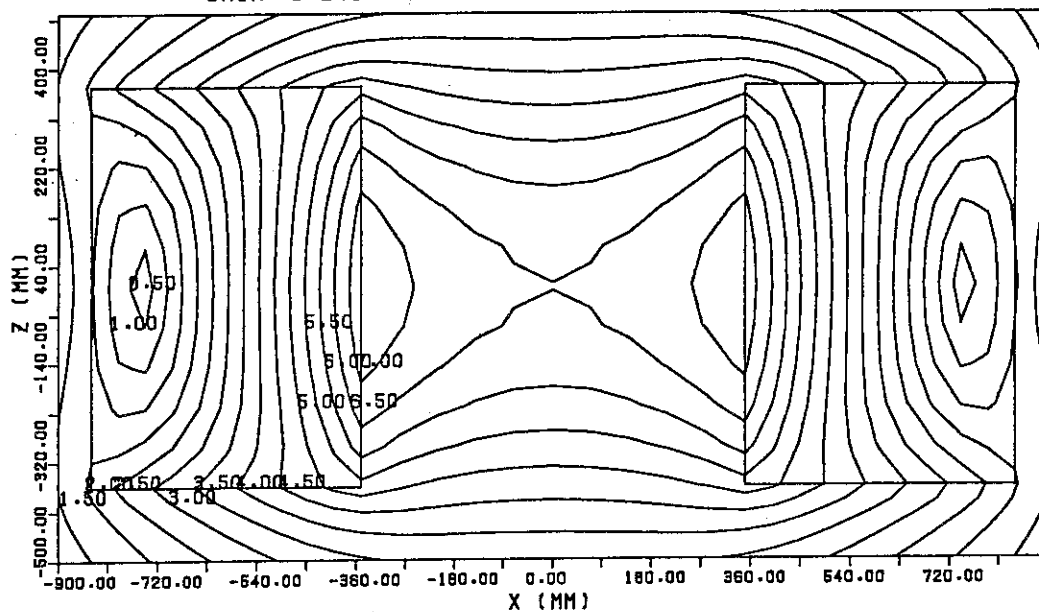


Fig. 3.6 Contour lines of the magnetic field of JF-COIL

## 4. 交流損失の計算手法

3章で述べた3種類のコイルが図4.1に示すように、定格電流プラス  $I_{op}$  からマイナス  $I_{op}$  まで2秒間で変化する両極性運転を行う場合に、各コイルに発生する交流損失（ヒステリシス損失、結合損失、渦電流損失）の計算方法を以下に述べる。

### 4.1 ヒステリシス損失

各コイルの巻線部でのあるターン( $i$ )、あるレーヤ( $j$ )に位置する導体でのヒステリシス損失を  $(dQh)_{ij}$  とすると、

$$(dQh)_{ij} = \frac{4}{3\pi} \times J_c \times \lambda \times D_f \times (\Delta B)_{ij} \times (dV)_{ij} \quad (1)$$

ここで

$J_c$  : 臨界電流密度

$\lambda$  : 超電導体の占積率

$D_f$  : 超電導フィラメントの直径

$(\Delta B)_{ij}$  : コイル内 ( $i, j$ ) 位置での磁界変化の大きさ

$(dV)_{ij}$  : " 超電導素線の体積

で求まる。

よってコイル全体でのヒステリシス損失を  $Qh$  とすると、

$$Qh = \int dQh = \sum_i \sum_j (dQh)_{ij} \quad (2)$$

$i = 1, M$  (コイル巻線ターン数)

$j = 1, N$  (コイル巻線レーヤ数)

で得られる。ここで  $J_c$  は3種の導体について、3.5 Tで  $2.8 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup> と統一した値とした。

### 4.2 結合損失

各コイルの巻線部でのあるターン( $i$ )、あるレーヤ( $j$ )に位置する導体の結合損失を  $(dQc)_{ij}$  とすると

$$(dQc)_{ij} = C(B) \times (1 - C(B) \times (1 - \exp(-1/C(B)))) \times \frac{((\Delta B)_{ij})^2}{\mu_0} \times (dV)_{ij} \quad (3)$$

$$C(B) = \frac{\tau(B)}{\tau_p} \quad (4)$$

ここで

$$\begin{aligned} \tau_p &: (\Delta B)_{ij} \text{ の生ずる時間} \\ \tau(B) &: B \text{ Tでの結合損失時定数} \\ \mu_0 &: \text{真空の透磁率} (4\pi \times 10^{-7}) \end{aligned}$$

で他は 4.1 と同じである。

表 2.4 に示したように、各導体の素線の 1 T での実効抵抗率を  $\rho^*(1)$  は実測されており、各素線とも Cu と CuNi の安定化材を用いていることを考えると、 $\rho^*(1)$  はパラメータ  $\alpha$  を用いて

$$\rho^*(1) = (1 - \alpha) \times \rho_{\text{CuNi}} + \alpha \times \rho_{\text{Cu}}(1) \quad (5)$$

ただし  $\rho_{\text{CuNi}}$  : CuNi の抵抗率、 $\rho_{\text{Cu}}(1)$  : 銅の 1 T での抵抗率と表わすことができる。ここで  $\rho_{\text{CuNi}} = 1.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$  で以下 CuNi は磁気抵抗効果はないと仮定した。又、 $\rho_{\text{Cu}}(1) = 3.16 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$  とした。これらの値を用いて(5)より、各導体に対応する  $\alpha$  が求まり、磁界の値が B (T) における各導体の実効抵抗率は  $\alpha$  を用いて(5)式と同様の表式で

$$\rho^*(B) = (1 - \alpha) \times \rho_{\text{CuNi}} + \alpha \times \rho_{\text{Cu}}(B) \quad (6)$$

と表わせる。 $\rho_{\text{Cu}}(B)$  は B (T) における銅の抵抗率で図 4.2 に示す銅の磁気抵抗効果を考慮した。

(6)式で求まる各導体の  $\rho^*(B)$  を用いて、各々の B (T) での結合損失時定数  $\tau(B)$  は

$$\tau(B) = \tau(1) \times \frac{\rho^*(1)}{\rho^*(B)} \quad (7)$$

で求まる。ここで  $\tau(1)$  は、表 2.4 に示した、各フルサイズ導体の 1 T での結合損失時定数であるが、JA コイルは JA-50 導体のツイストピッチを 40 mm から 30 mm と短かくした JA-50 M 導体を考えているので、結合損失時定数は  $6.1 \times (30/40)^2 = 3.4$  (ms) とした。

コイル全体の結合損失  $Q_c$  は(3)式を用いて

$$Q_c = \sum_i \sum_j (dQ_c)_{ij} \quad (8)$$

$$i = 1, M \text{ (コイル巻線ターン数)}$$

$$j = 1, N \text{ (コイル巻線レイヤー数)}$$

で求まる。

ヒステリシス損失及び結合損失を求めるこれら一連の計算は磁界計算も含めて、大型計算機を用いて行なった。

### 4.3 渦電流損失

ここで言う渦電流損失とは、各コイルに用いられる超電導々体のステンレス鋼の補強材に誘起される渦電流損失のことを示し、コイルに用いられる金属性のボルト、ナット等での渦電流損失を考慮していない。すなわち、JAコイルでは、図3.1中に示す導体燃線中央部のSUS補強板、JBコイルでは、図3.2中に示す導体燃線中央部のSUS補強板（以下PLATEと呼ぶ）と□字形のSUS補強材（以下ARMORと呼ぶ）、JFコイルでは、図3.3中に示すSUSのコンジットと補助板での渦電流損失を考える。

使用した計算コードは、薄板任意形状渦電流解析コード「EDDYARBT<sup>(2)</sup>」である。但し、各コイルの巻線部の $(i, j)$ （ここで4.1, 4.2と同様に $i$ はターン番号、 $j$ はレイヤー番号を表わす）要素のステンレス鋼材の損失をすべて計算するのではなく、図4.3～図4.5に示すように各コイルの巻線をブロックに分割し、各ブロックで代表的な位置でのステンレス鋼材（図4.3～図4.5中で斜線で示している）の渦電流損失を求め、これを各ブロック内の巻線数倍した。又、コイル長さ方向の対称性も考慮した。

又、各々のステンレス鋼材は図4.6にJBコイルの例で示すように、リング状のこの補強材の一部に5度のスリットをいれ、1ターン電流が流れないようにした。JBコイル用JB-50導体のARMORは正確には図4.7に示すように溝があるが、「EDDYARBT」用データ作成が煩雑となるため、本解析では、この溝は無視した。

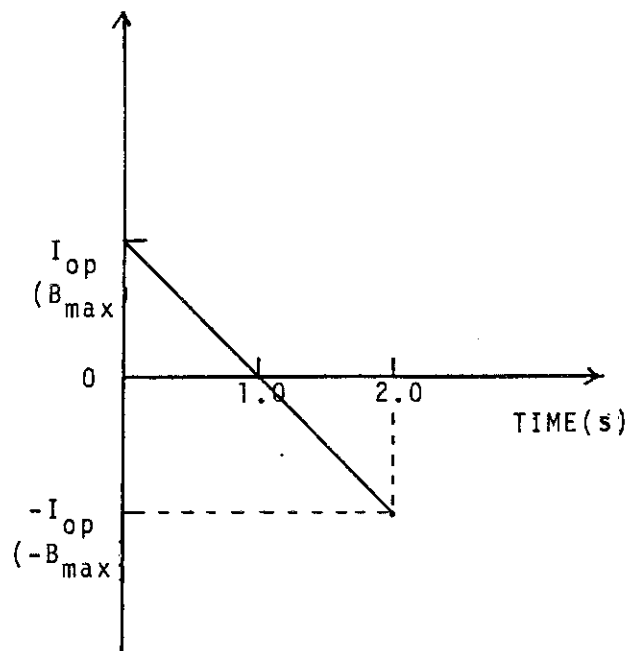


Fig. 4.1 Coil operational mode

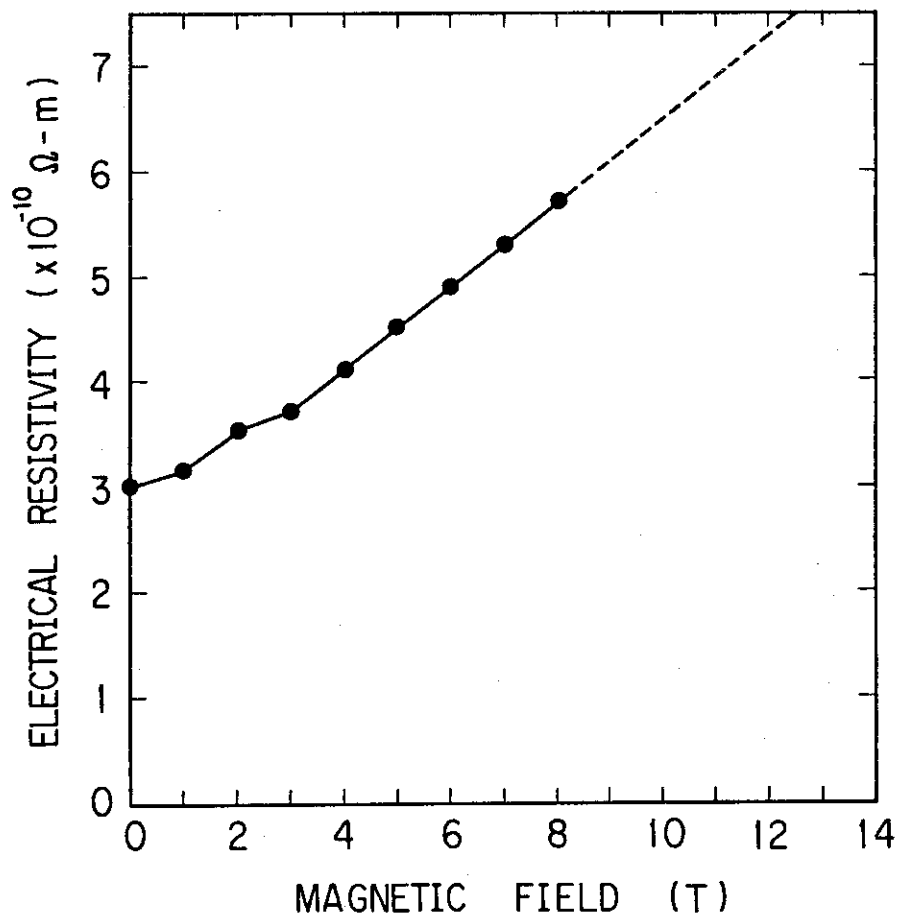


Fig. 4.2 Magneto-resistance effect of copper

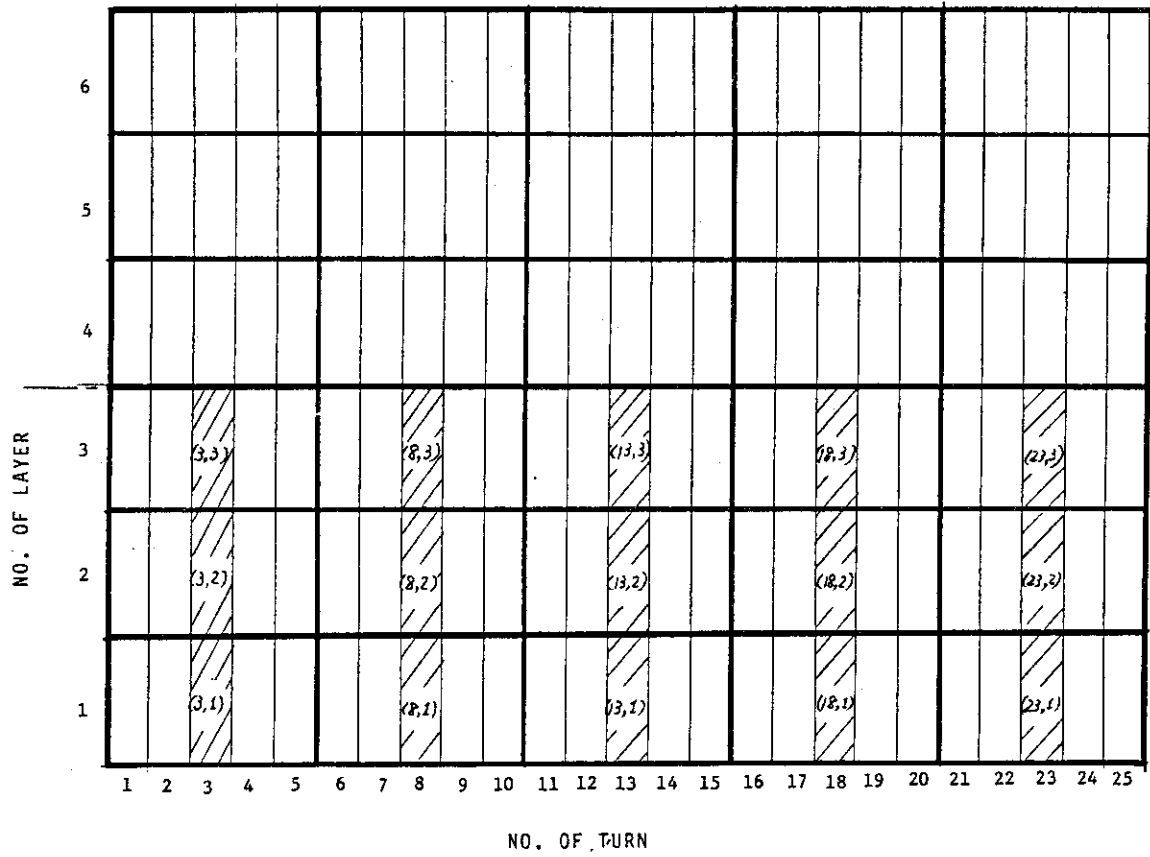


Fig. 4.3 Detailed view of the winding part of JA-COIL

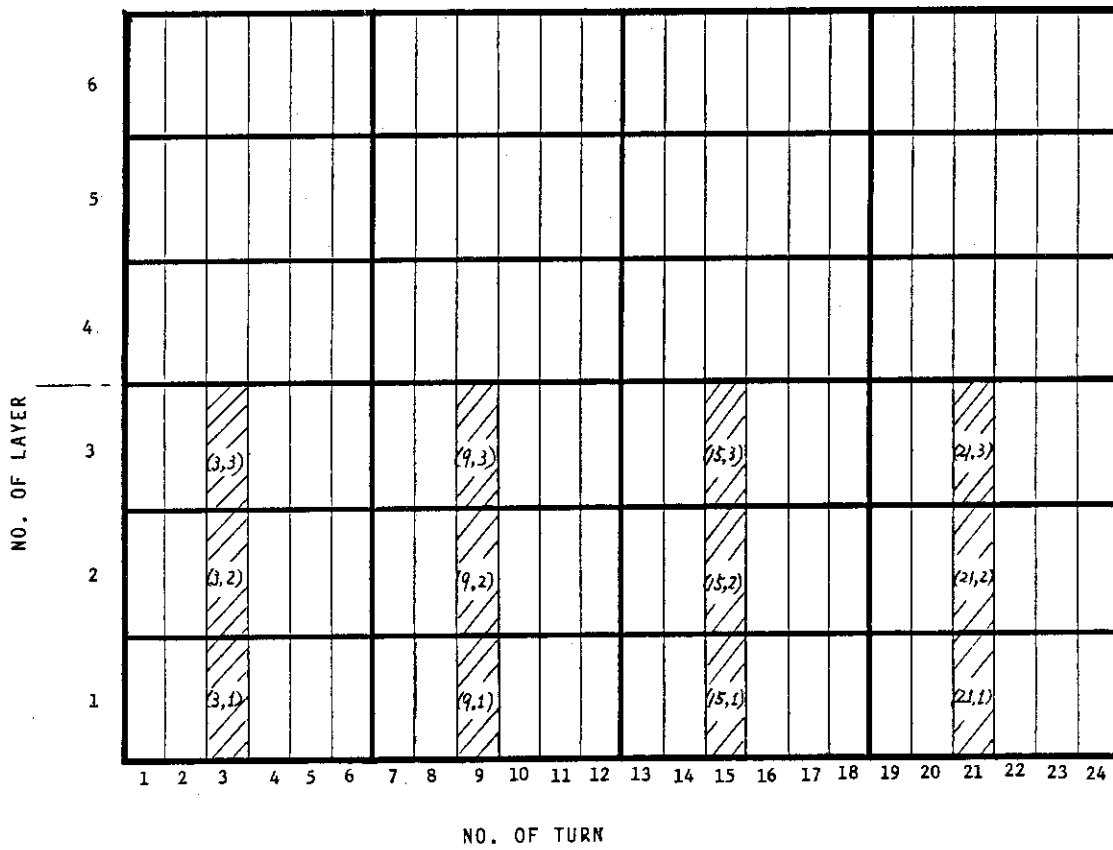


Fig. 4.4 Detailed view of the winding part of JB-COIL

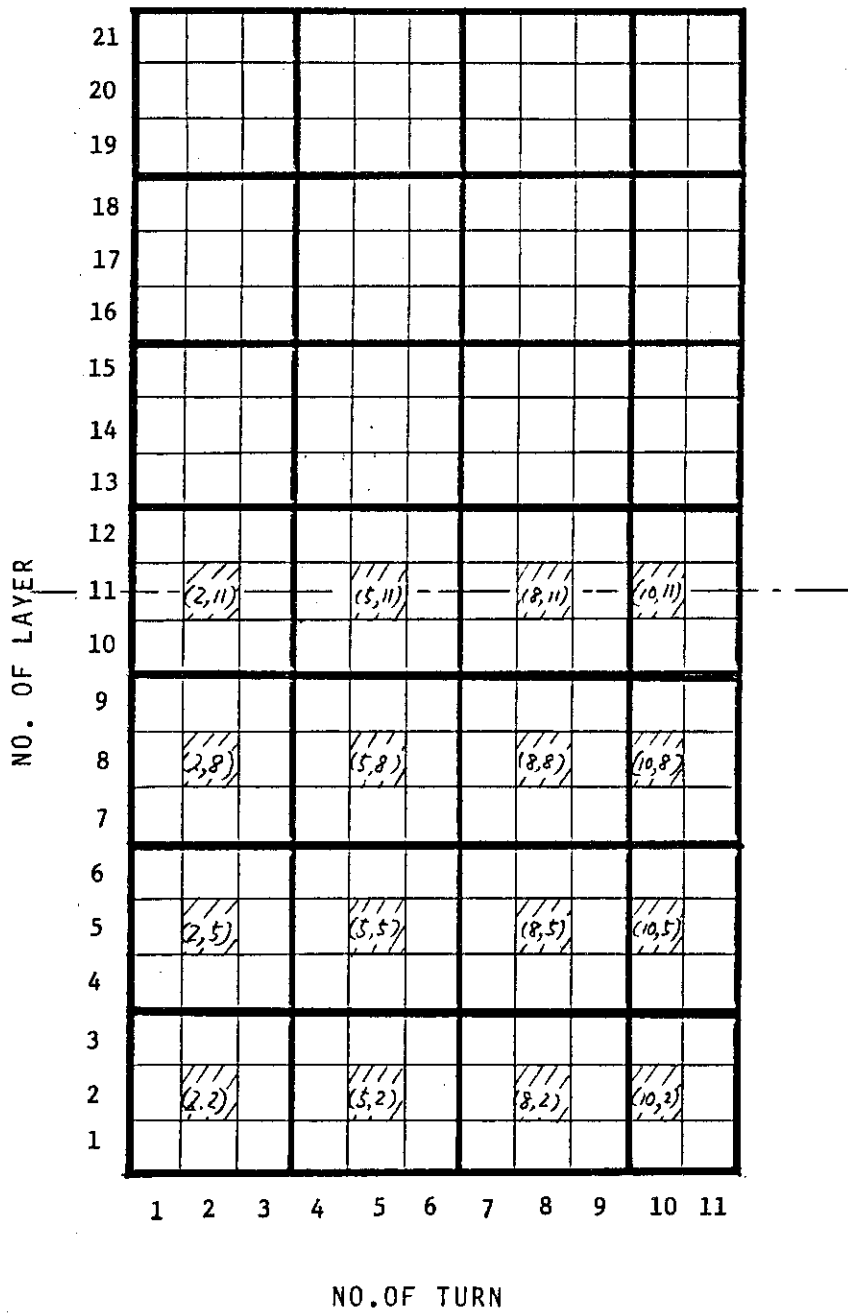


Fig. 4.5 Detailed view of the winding part of JF-COIL



JB50 SUS PLATE EDDY CURRENT

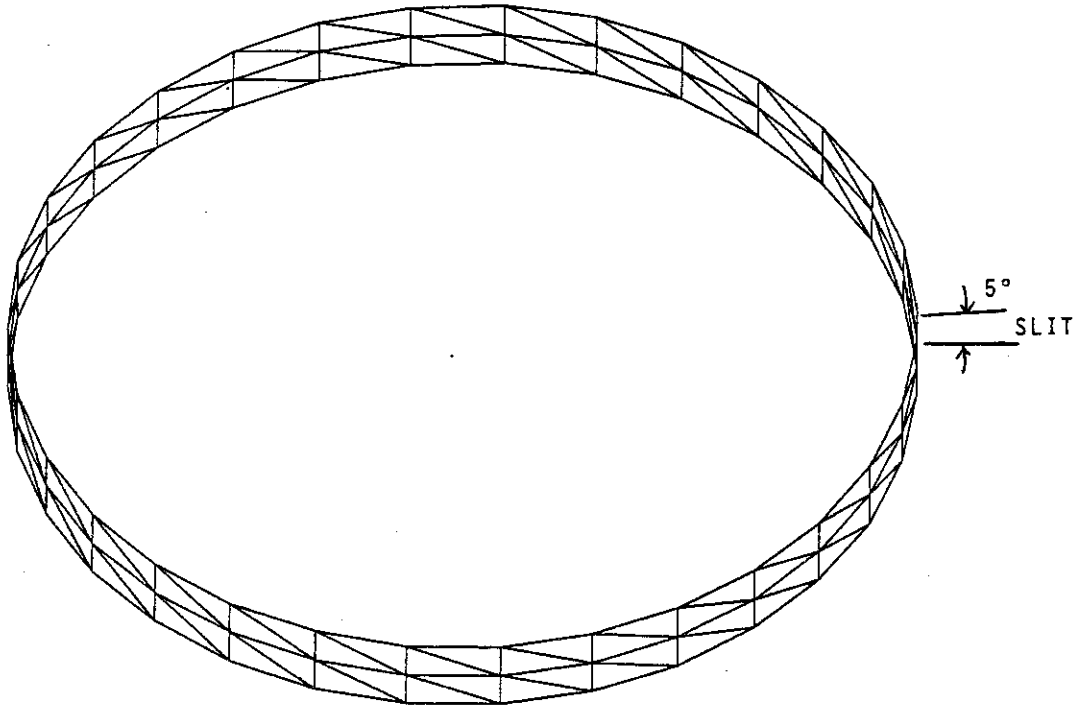


Fig. 4.6 Modeling of S. S. plate for [EDDYARBT] calculation

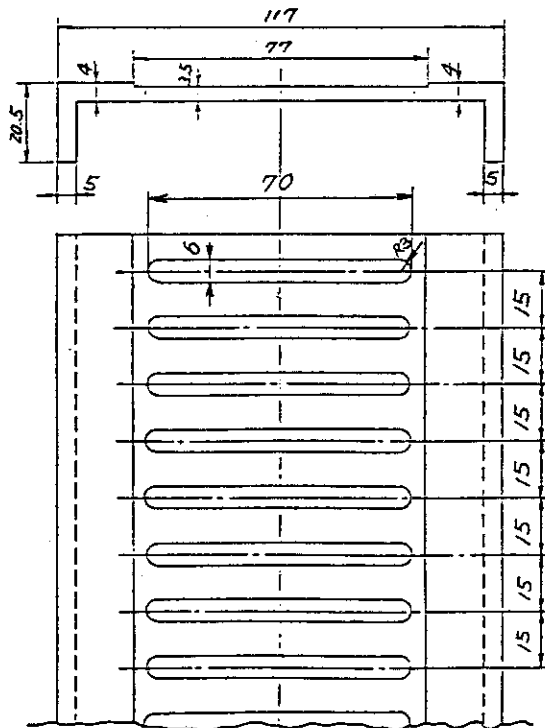


Fig. 4.7 Detailed side view of 'ARMOR' of JB-50 superconductor

## 5. 計算結果

4章で述べた方法によって求めた各コイルの交流損失の計算結果を以下に述べる。

J Aコイルのコイル内でのヒステリシス損失の分布を図5.1に、結合損失の分布を図5.2に示す。J Aコイル全体でのヒステリシス損失と結合損失は各々、1.75kJ、34.1kJであった。又、J Aコイル内の代表的なステンレス鋼補強板での渦電流を図5.3に示す。図5.4にJ Aコイル内のステンレス鋼補強板での渦電流損失分布を示す。総渦電流損失は1.02kJである。よって、J Aコイルの総交流損失は36.9kJで、これはコイル蓄積エネルギーの0.18%である。

J Bコイルのヒステリシス損失の分布を図5.5に、結合損失の分布を図5.6に示す。コイル全体でのヒステリシス損失と結合損失は3.56kJと24.2kJである。S U S P L A T EとA R M O Rでの渦電流の代表例を図5.7と図5.8に示し。コイル内での渦電流損失分布を各々、図5.9、図5.10に示す。総渦電流損失量は、2.39kJであった。J Bコイルの交流損失量の総量は31.0kJで、コイル蓄積エネルギーの0.14%である。

一方、J Fコイルのヒステリシス損失及び結合損失の分を図5.11、図5.12に示す。コイル全体では各々4.2kJと13.8kJである。又、J Fコイルのステンレス鋼コンジットと補強板での渦電流の代表例を各々、図5.13と図5.14に、コイル内での渦電流損失分布を各々、図5.15、図5.16に示した。コイル全体での総渦電流損失は2.39kJである。J Fコイルの総交流損失は20.2kJで、これはコイル蓄積エネルギーの0.1%に相当する。

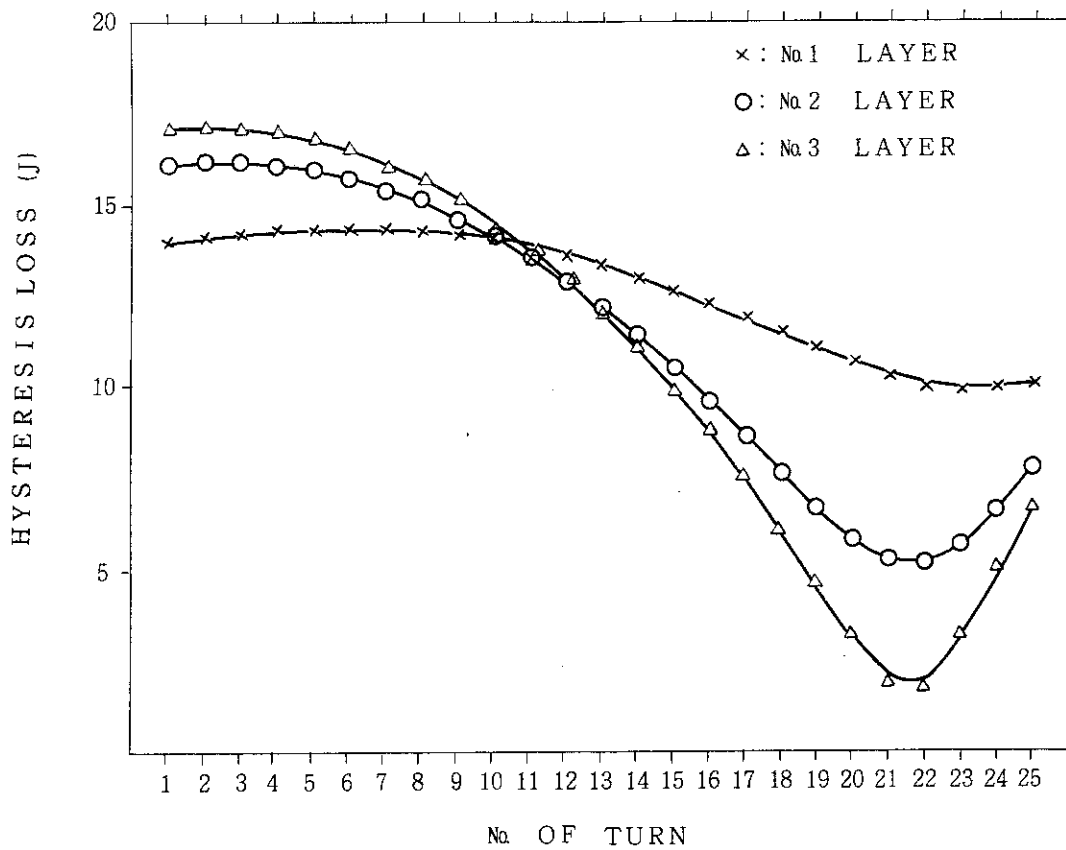


Fig. 5.1 Distribution of hysteresis loss of JA-COIL

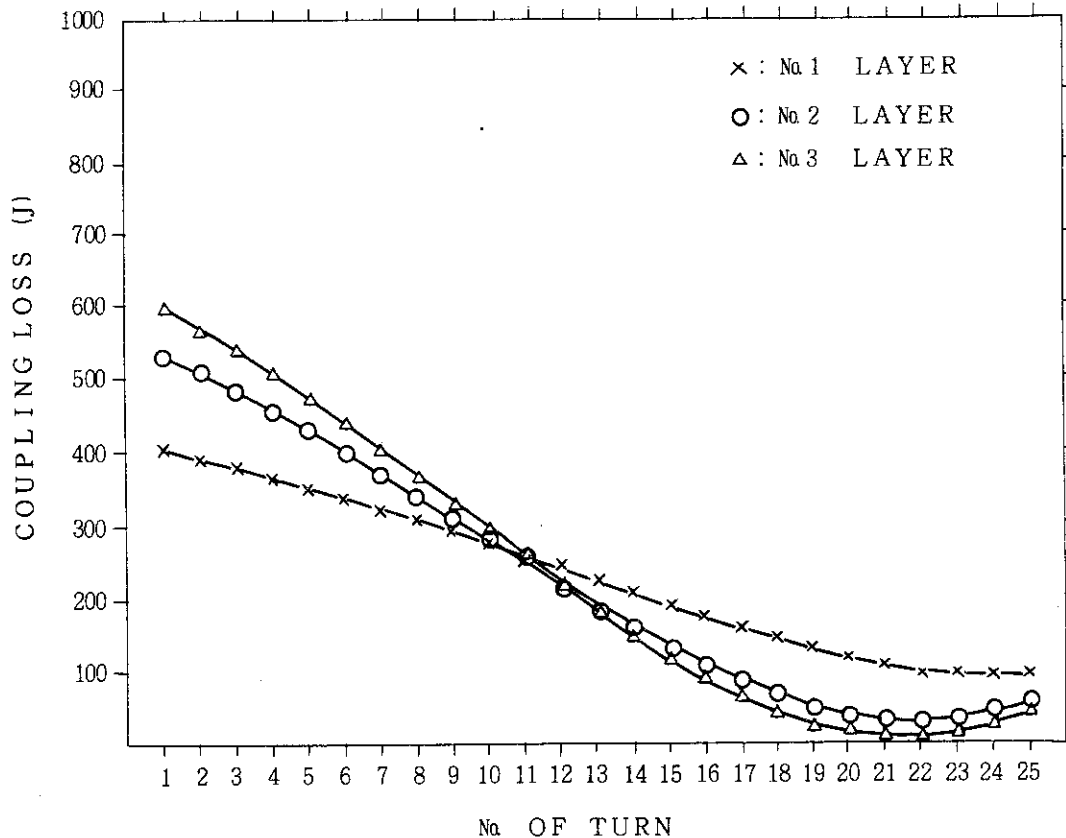


Fig. 5.2 Distribution of the coupling loss of JA-COIL

JASO SUS PLATE EDDY CURRENT  
 TIME(SEC)= 1.00000E 00  
 JOULE LOSS(W)= 8.20987E 00

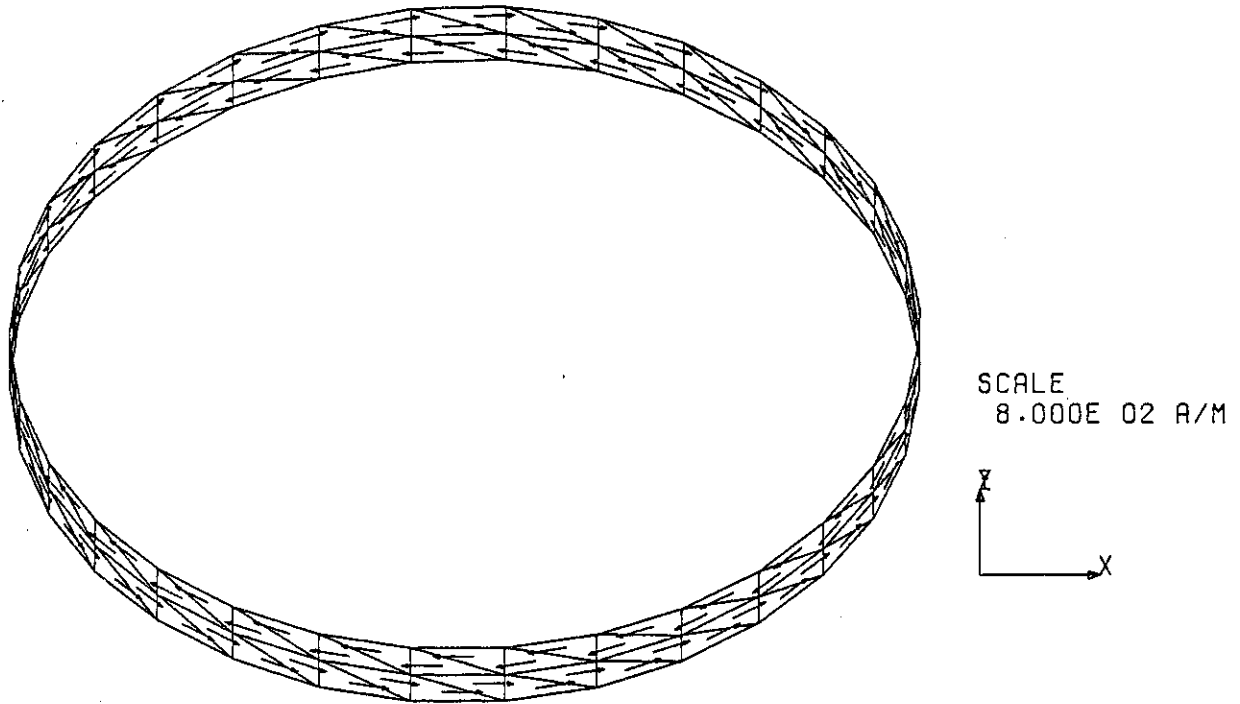


Fig. 5.3 Eddycurrent on S. S. reinforcement of JA-COIL

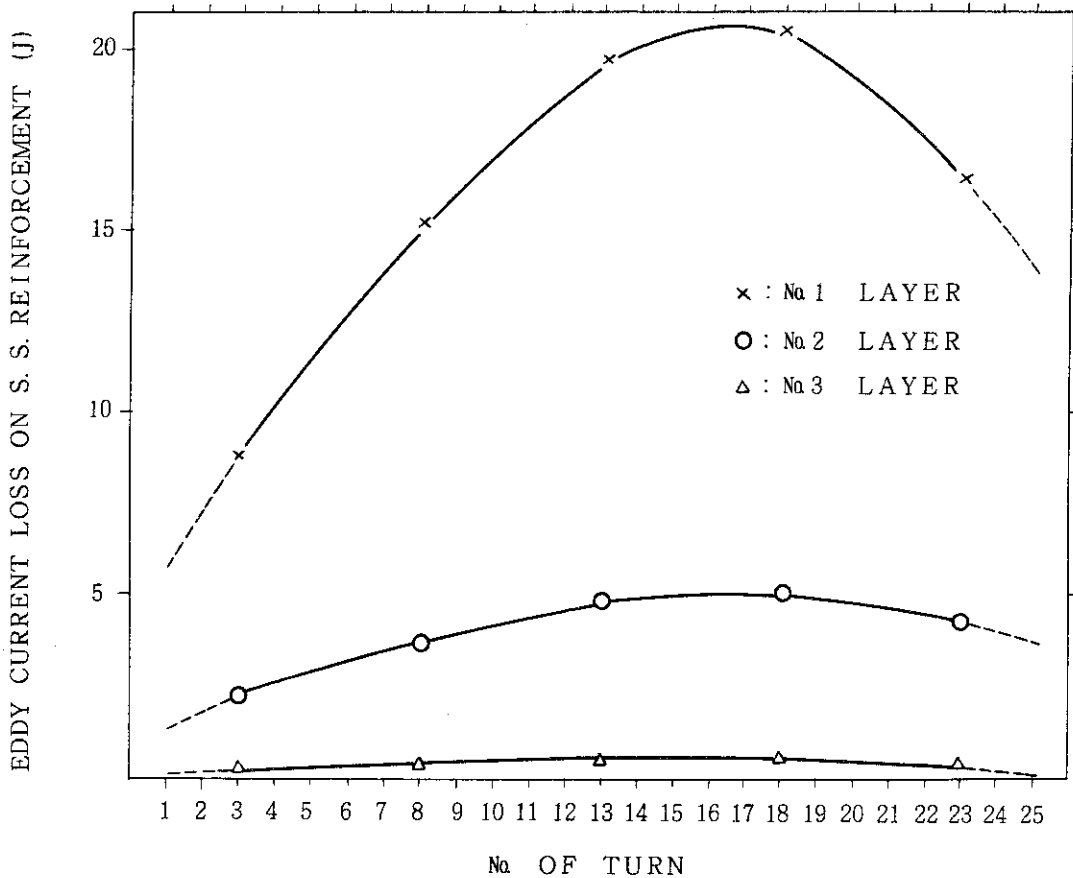


Fig. 5.4 Distribution of the eddycurrent loss on S. S. reinforcement of JA-COIL

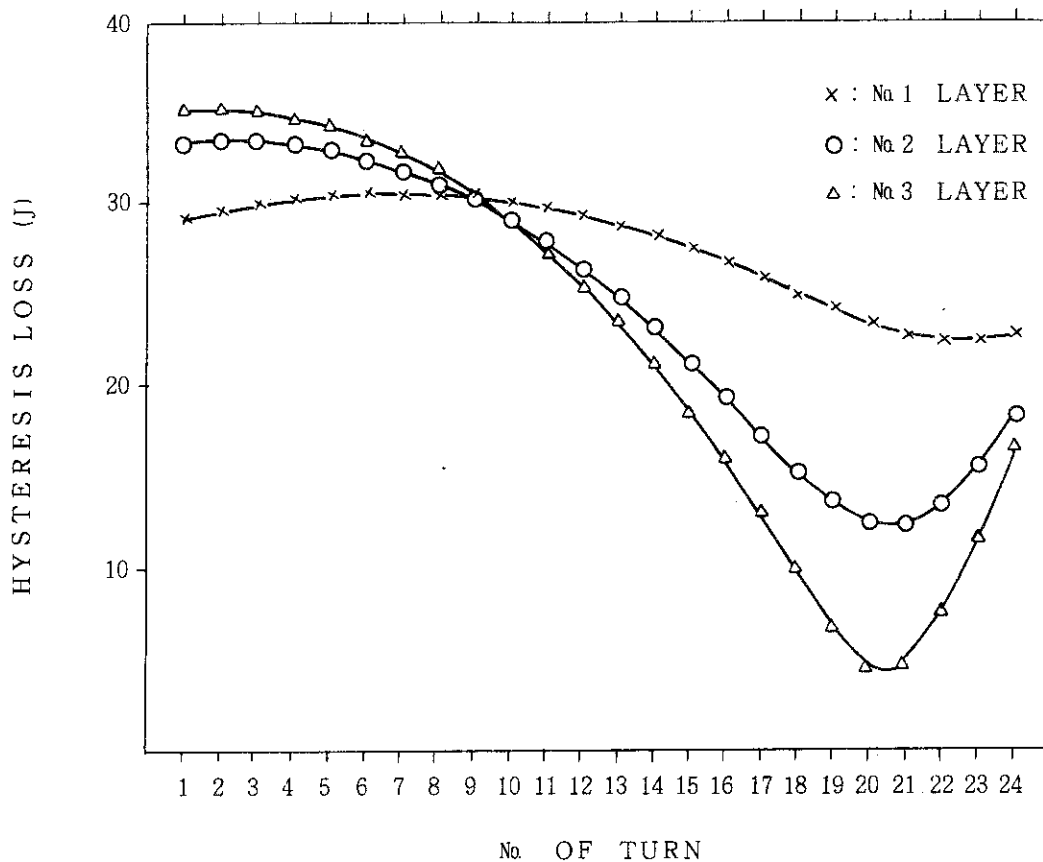


Fig. 5.5 Distribution of the hysteresis loss of JB-COIL

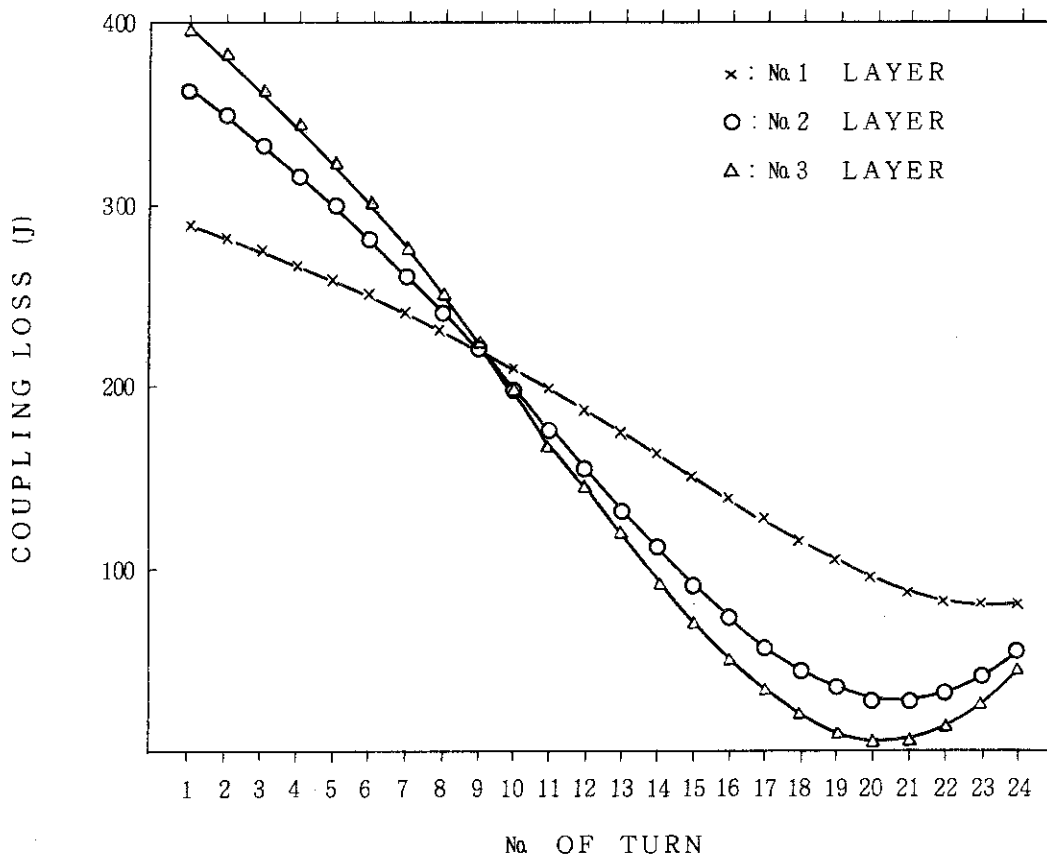
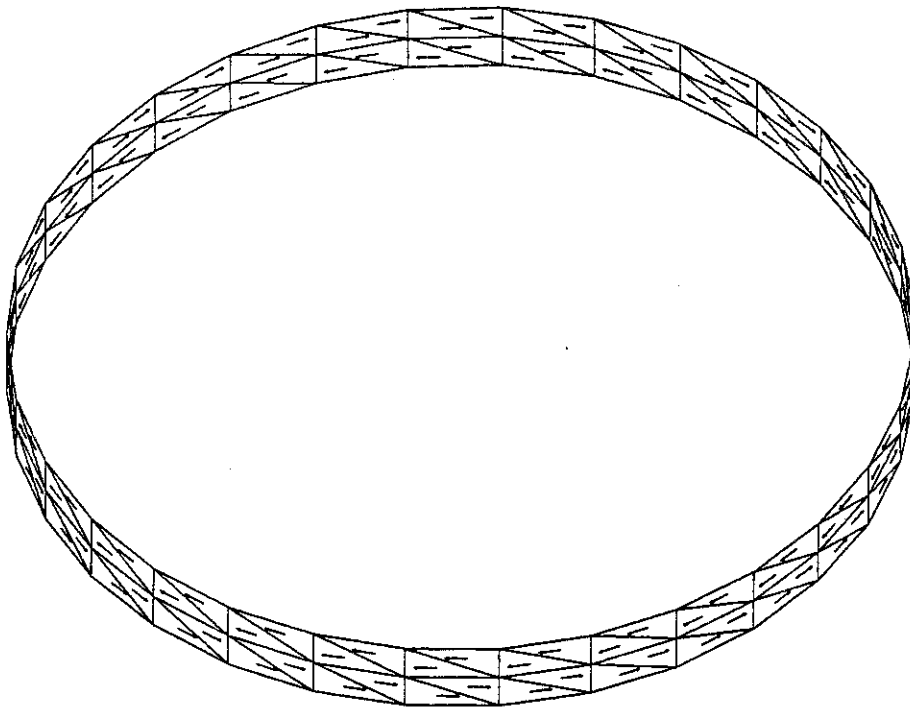


Fig. 5.6 Distribution of the coupling loss of JB-COIL

JB50 SUS PLATE EDDY CURRENT  
TIME(SEC)= 1.00000E 00  
JOULE LOSS(W)= 1.85531E 00



SCALE  
6.000E 02 A/M

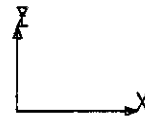
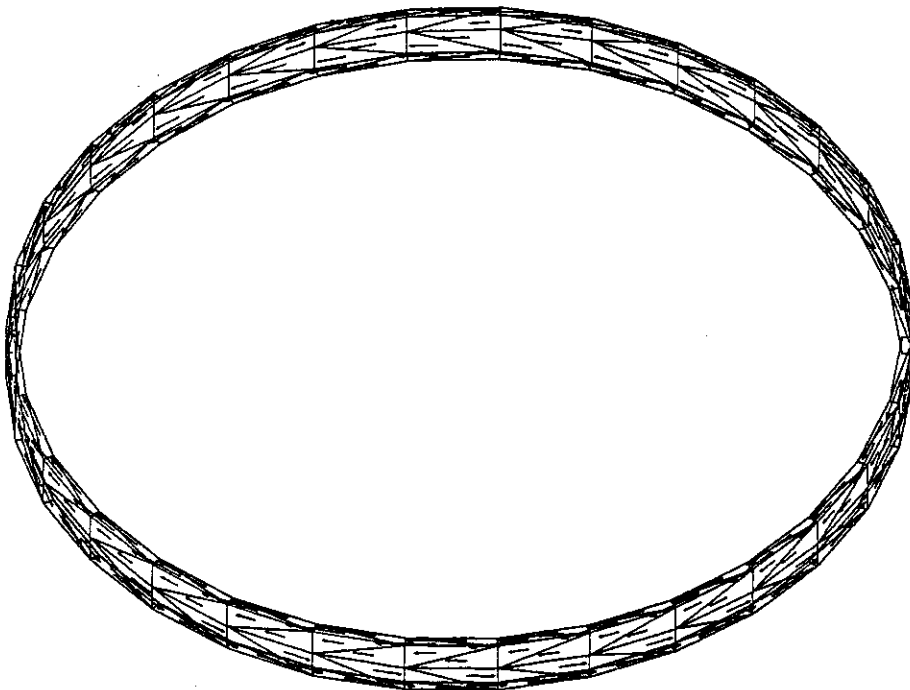


Fig. 5.7 Eddy current on S. S. PLATE of JB-COIL

JB50 SUS ARMOR EDDY CURRENT  
TIME(SEC)= 1.00000E 00  
JOULE LOSS(W)= 2.32598E 01



SCALE  
1.600E 03 A/M



Fig. 5.8 Eddy current on S. S. ARMOR of JB-COIL

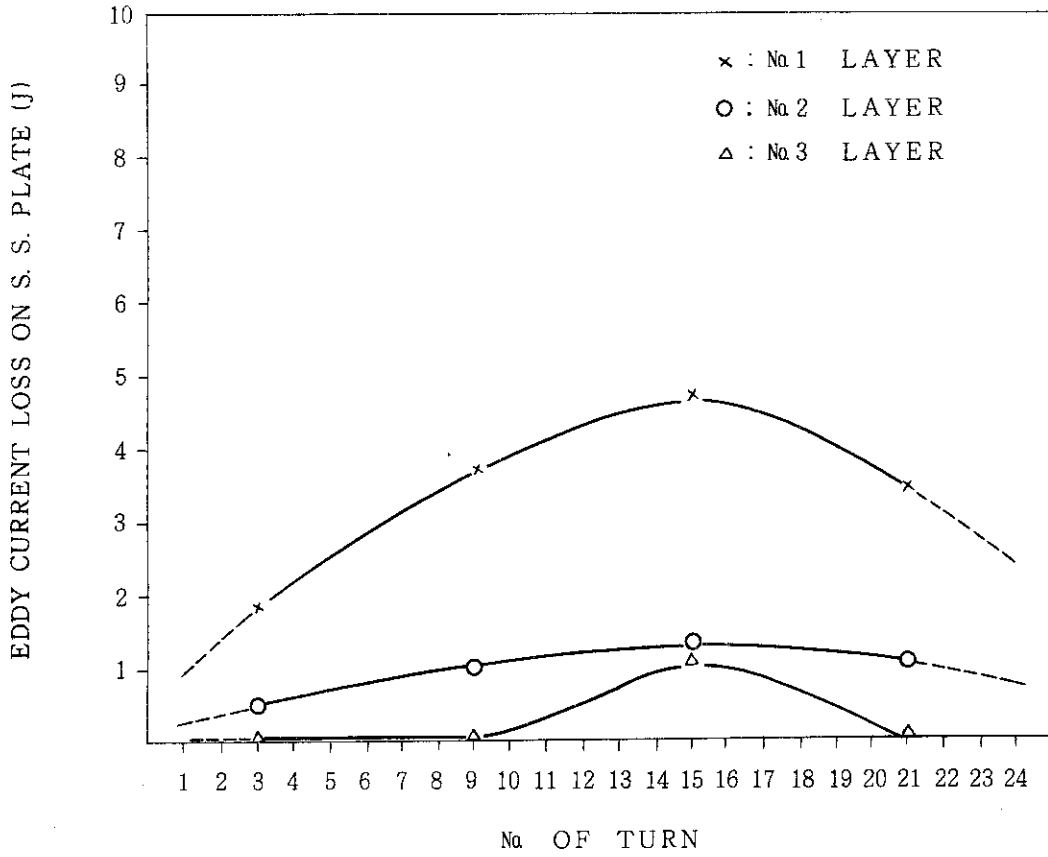


Fig. 5.9 Distribution of the eddy current loss of S. S. PLATE of JB-COIL

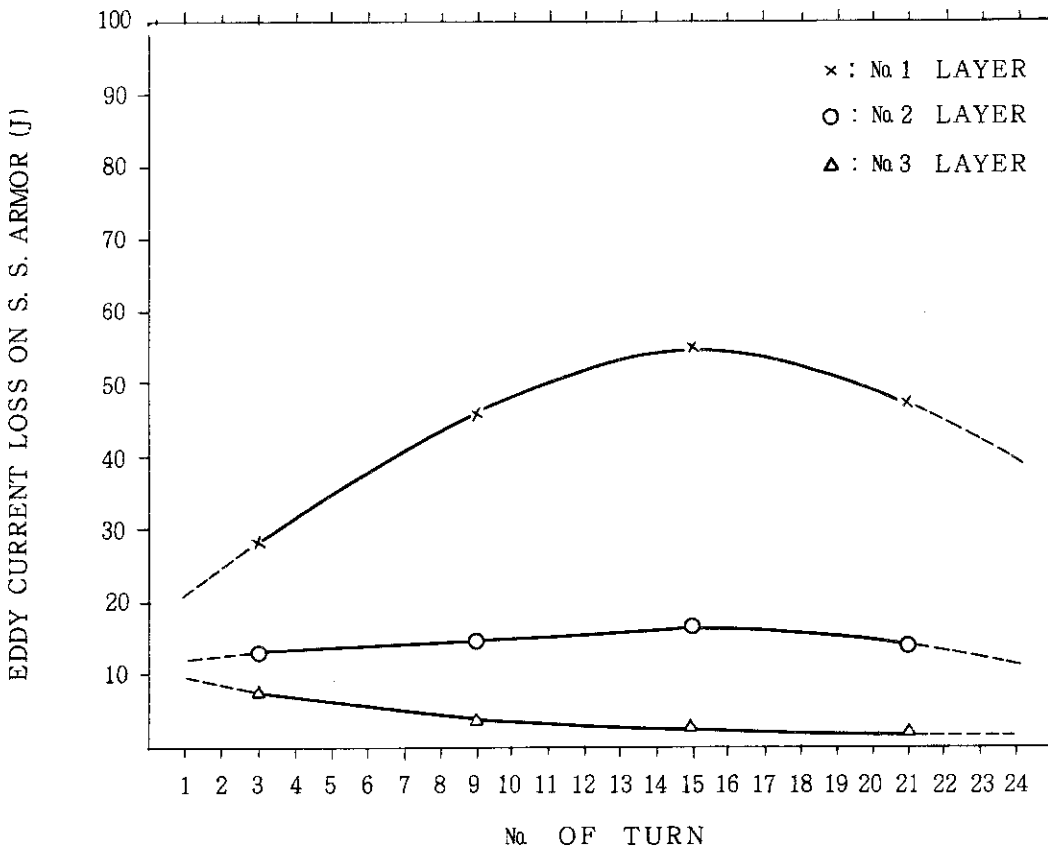


Fig. 5.10 Distribution of the eddy current loss of S. S. ARMOR of JB-COIL

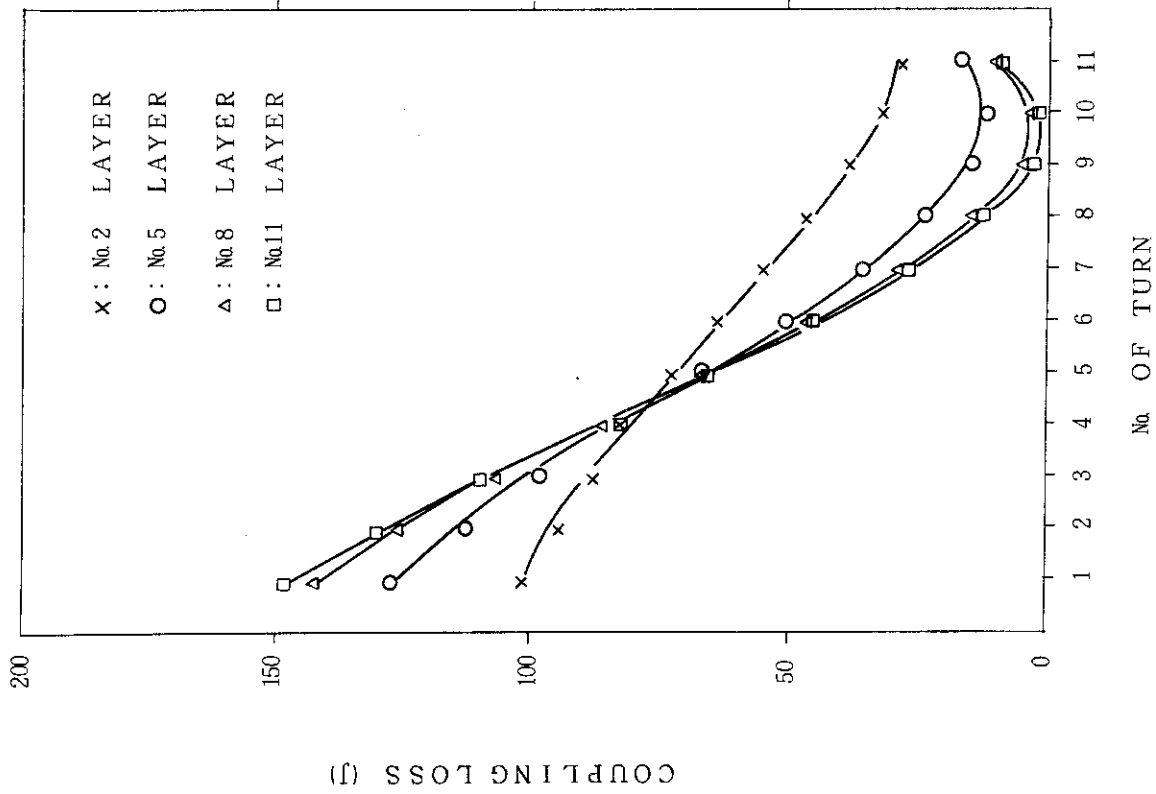


Fig. 5.12 Distribution of the coupling loss of JF-COIL

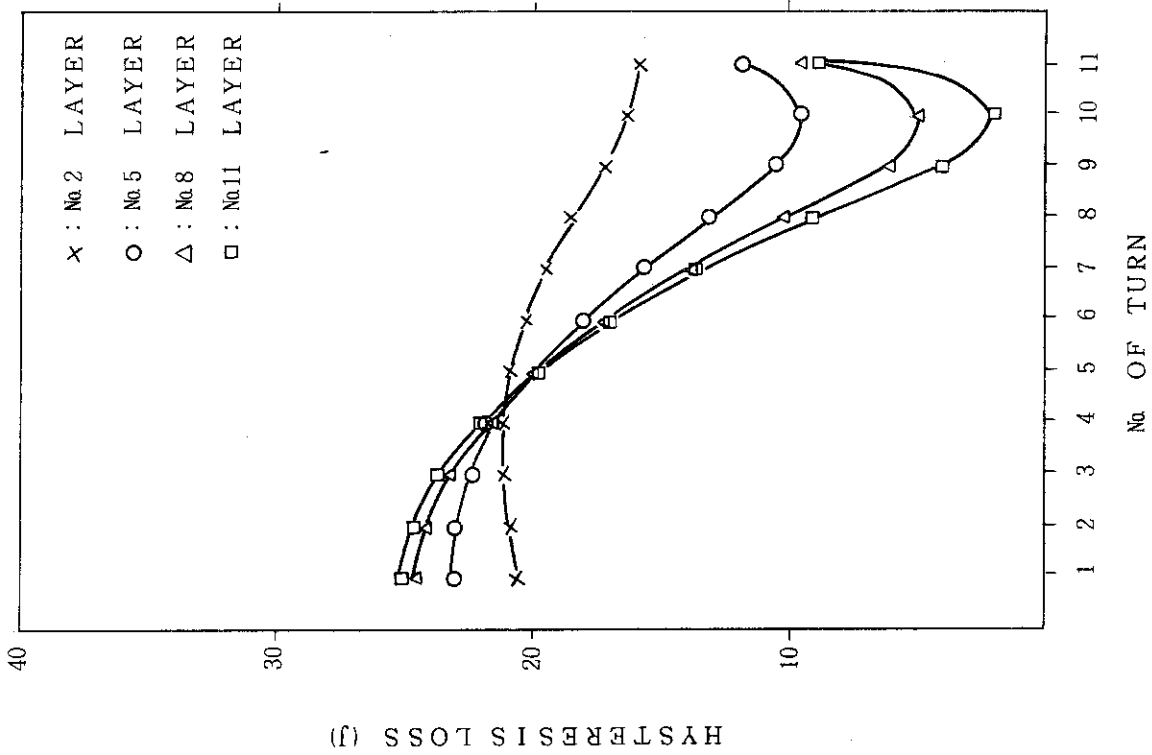


Fig. 5.11 Distribution of the hysteresis loss of JF-COIL



JF30 SUS PLATE EDDY CURRENT  
TIME(SEC)= 1.00000E 00  
JOULE LOSS(W)= 2.48684E 00

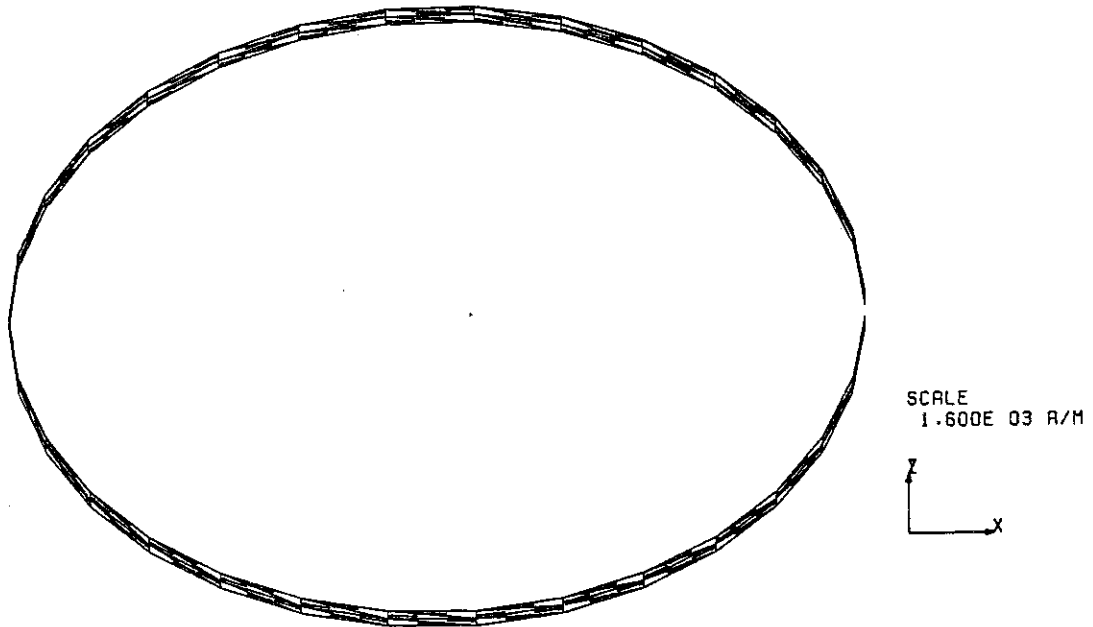


Fig. 5.13 Eddy current on S. S. reinforcement of JF-COIL

JF-30 SUS CONDUIT EDDY CURRENT  
TIME(SEC)= 5.00000E-01  
JOULE LOSS(W)= 4.84801E 00

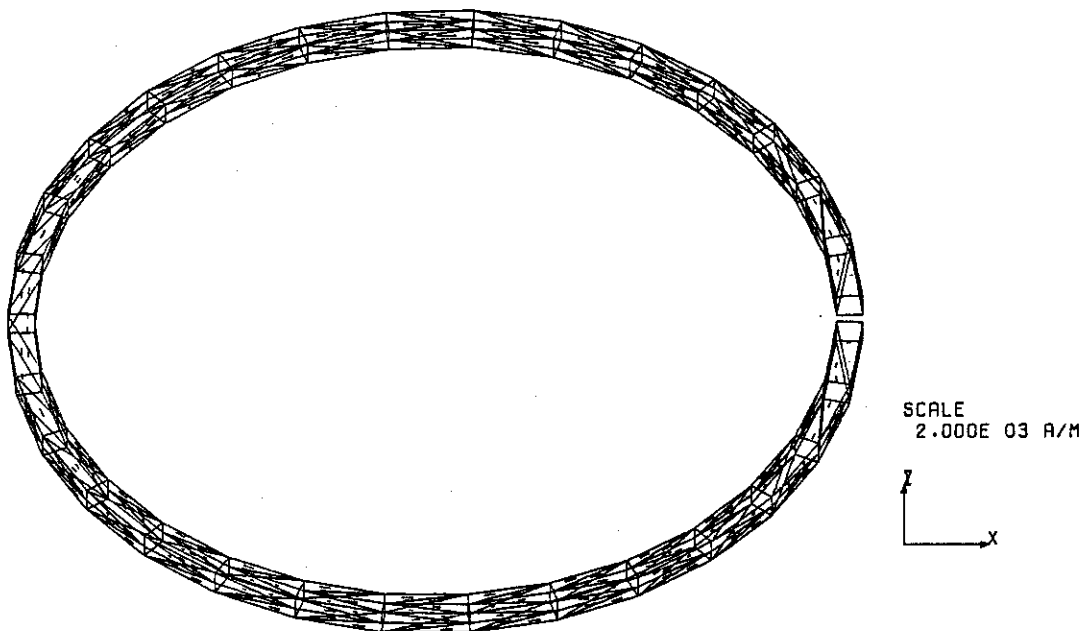


Fig. 5.14 Eddy current on S. S. conduit of JF-COIL

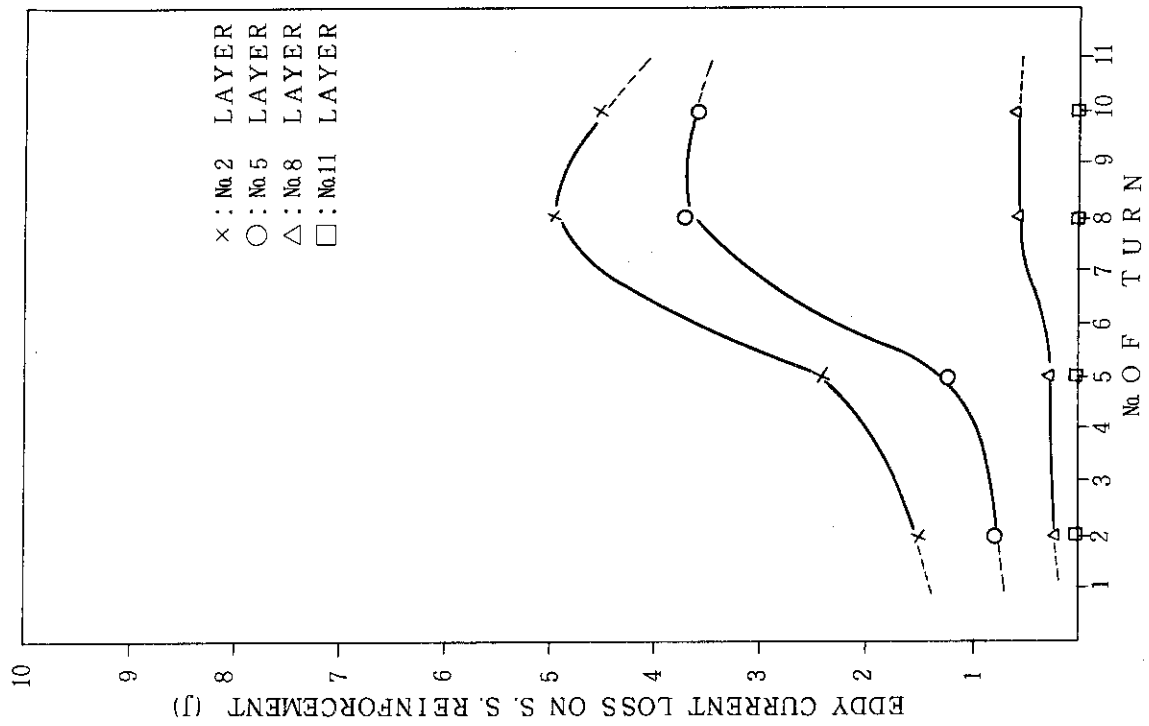


Fig. 5.15 Distribution of the eddy current loss of S. S. reinforcement

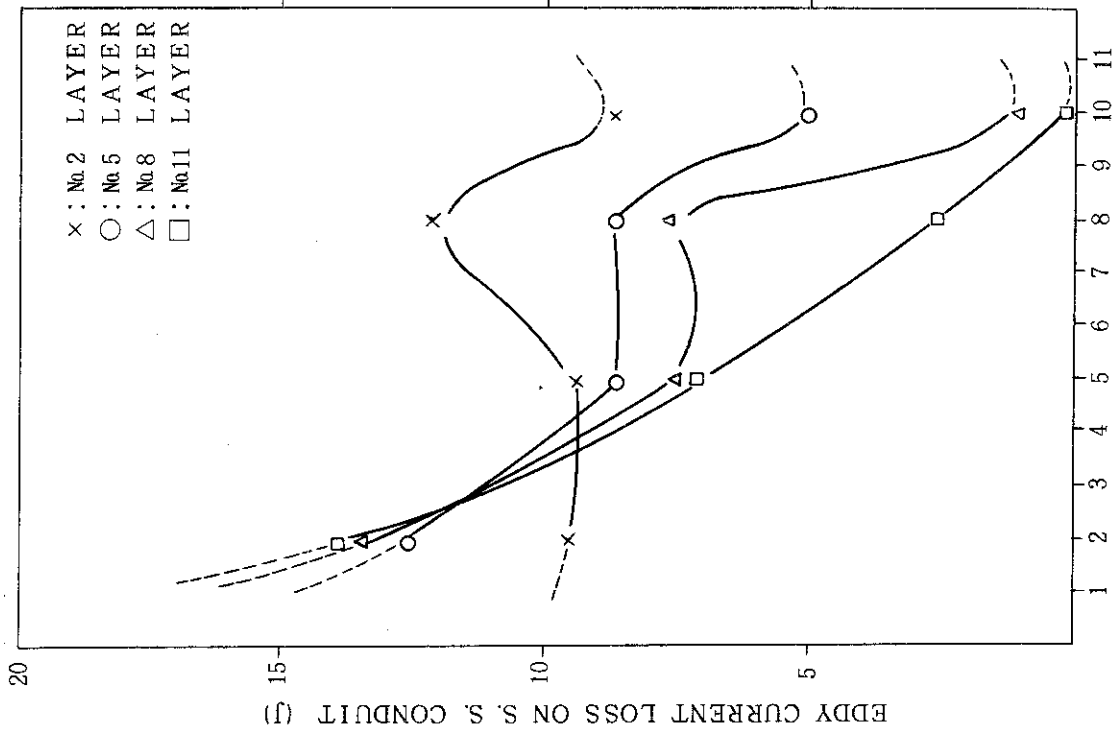


Fig. 5.16 Distribution of the eddy current loss of S. S. conduit

## 6. ま と め

表 6.1 に、以上述べてきた各コイルについての交流損失の計算結果をまとめた。

J A コイルは、他の 2 者に比較して結合損失が大きくなっている。これは素線の直径が他の 2 者よりも大きく、ツイストピッチも、本報告では J A - 50 導体の 40 mm を 30 mm と短かくした J A - 50 M 導体を想定したが、まだ他 2 者と比較し、損失時定数が大きいためである。

J B コイルは、渦電流損失が他 2 者よりもいくぶん大きくなっているが、これは、導体の機械的剛性を上げるため、ステンレス鋼の ARMOR を設けたためである。3 つのコイルの中で、J F コイルの交流損失が最も小さい。特に、結合損失が小さいことが注目されるが、これは素線の直径を小さくし、ツイストピッチを短かくできる C A B L E - I N - C O N D U I T 導体の特徴を示している。

いずれにしても、3 つのコイルについて、交流損失 40 k J 以下でコイル蓄積エネルギーの 0.2 % 以下となっていて、大電流・大型の導体にもかかわらず、十分に低交流損失であることが分かった。

### 謝 辞

本研究の機会を与えていただいた、磯所長、小幡部長並びに田中部長に感謝致します。又、有意義な御討論及びに御助言をいただいた、超電導磁石研究室、辻博史、高橋良和、奥野研究員に感謝致します。

### 参考文献

1. 第30回低温工学発表会予稿集（1983年11月）
2. 私 信

## 6. ま と め

表 6.1 に、以上述べてきた各コイルについての交流損失の計算結果をまとめた。

J A コイルは、他の 2 者に比較して結合損失が大きくなっている。これは素線の直径が他の 2 者よりも大きく、ツイストピッチも、本報告では J A - 50 導体の 40 mm を 30 mm と短かくした J A - 50 M 導体を想定したが、まだ他 2 者と比較し、損失時定数が大きいためである。

J B コイルは、渦電流損失が他 2 者よりもいくぶん大きくなっているが、これは、導体の機械的剛性を上げるため、ステンレス鋼の ARMOR を設けたためである。3 つのコイルの中で、J F コイルの交流損失が最も小さい。特に、結合損失が小さいことが注目されるが、これは素線の直径を小さくし、ツイストピッチを短かくできる C A B L E - I N - C O N D U I T 導体の特徴を示している。

いずれにしても、3 つのコイルについて、交流損失 40 k J 以下でコイル蓄積エネルギーの 0.2 % 以下となっていて、大電流・大型の導体にもかかわらず、十分に低交流損失であることが分かった。

### 謝 辞

本研究の機会を与えていただいた、磯所長、小幡部長並びに田中部長に感謝致します。又、有意義な御討論及びに御助言をいただいた、超電導磁石研究室、辻博史、高橋良和、奥野研究員に感謝致します。

### 参考文献

1. 第30回低温工学発表会予稿集（1983年11月）
2. 私 信

## 6. ま と め

表 6.1 に、以上述べてきた各コイルについての交流損失の計算結果をまとめた。

J A コイルは、他の 2 者に比較して結合損失が大きくなっている。これは素線の直径が他の 2 者よりも大きく、ツイストピッチも、本報告では J A - 50 導体の 40 mm を 30 mm と短かくした J A - 50 M 導体を想定したが、まだ他 2 者と比較し、損失時定数が大きいためである。

J B コイルは、渦電流損失が他 2 者よりもいくぶん大きくなっているが、これは、導体の機械的剛性を上げるため、ステンレス鋼の ARMOR を設けたためである。3 つのコイルの中で、J F コイルの交流損失が最も小さい。特に、結合損失が小さいことが注目されるが、これは素線の直径を小さくし、ツイストピッチを短かくできる C A B L E - I N - C O N D U I T 導体の特徴を示している。

いずれにしても、3 つのコイルについて、交流損失 40 k J 以下でコイル蓄積エネルギーの 0.2 % 以下となっていて、大電流・大型の導体にもかかわらず、十分に低交流損失であることが分かった。

### 謝 辞

本研究の機会を与えていただいた、磯所長、小幡部長並びに田中部長に感謝致します。又、有意義な御討論及びに御助言をいただいた、超電導磁石研究室、辻博史、高橋良和、奥野研究員に感謝致します。

### 参考文献

1. 第30回低温工学発表会予稿集（1983年11月）
2. 私 信

Table 6.1 Summary of the A. C. loss calculation

	HYSTERESIS LOSS $Q_h$ (kJ)	COUPLING LOSS $Q_c$ (kJ)	EDDY CURRENT LOSS $Q_e$ (kJ)	TOTAL LOSS $Q_t$ (kJ)	% OF STORED ENERGY (%)
JA-COIL	1.75	34.1	1.02	36.9	0.18
JB-COIL	3.56	24.2	3.2	31.0	0.14
JF-COIL	4.2	13.8	2.39	20.2	0.10

## 付録 「FIELD DM1」マニュアル

磁界及び電磁力計算プログラム「FIELD DM1」は既存の「JAFUSAC」<sup>(付-1)</sup>を基に入力部分に、計算座標点自動生成ルーチンを、出力部分に等磁界線の描図ルーチンを付加したものである。

## A.1 形状データ

① コイル形状データの入力方法は「JAFUSAC」と全く同じである。(ここでは省略した)

② 形状データ終了の入力データ

この入力データにより、コイル寸法、配置などの形状データの終了を示す。

\* Col. 1 ~ 3 'FIN'

## A.2 電磁力を求めるコイルの指定

本計算コードは電磁力も求めることができる。電磁力を求めたいコイルの番号を入力する。

\* フリーフォーマット

## A.3 タイトル

タイトル等72文字以内で入力する。

\* 18A4

## A.4 計算座標点自動生成用データ入力

## A.4.1 計算点自動生成用平面の入力

自動メッシュ分割によって、座標点を発生させたい平面を入力する。ここで指定されない、もう一つの座標軸は自動的に0.0にセットされる。すなわち、例えば、XZと入力するとY座標は常に $Y = 0.0$ とセットされる。

\* Col. 1 ~ 2 (A2)

## A.4.2 水平軸方向自動メッシュ分割用データ

① 水平軸方向領域分割数：MBUN

計算座標点を発生させたい、水平軸方向の領域の分割数を入力。

$$MBUN \leq 20$$

\* フリーフォーマット

② 水平軸方向領域境界座標点：PM(I) (I = 1, MBUN + 1)

水平軸方向の領域の境界の座標。

ただし、 $PM(I) < PM(I + 1)$

\* フリーフォーマット

## A.4.3 垂直軸方向自動メッシュ分割用データ

垂直軸方向に対しても、水平軸方向と同様にデータを入力する。

① 垂直軸方向領域分割数：NBUN

計算座標点を発生させたい、垂直軸方向の領域の分割数を入力。

$$NBUN \leq 20$$

\* フリーフォーマット

- ② 垂直軸方向領域境界座標点：PN (I) (I = 1, NBUN + 1)  
垂直軸方向の領域の境界の座標。

ただし、PN (I) < PN (I + 1)

\* フリーフォーマット

- ③ 垂直軸各領域の分割数：NDIV (I) (I = 1, NBUN)

②で指定した各領域の分割数を入力する。

\* フリーフォーマット

ただし、以上の様にして自動生成される計算座標点の総和が 8,000 以下であること。

#### A.5 出力オプション

IYN, IGRID, IFIG

\* フリーフォーマット

- A.5.1 磁界等高線描図オプション：IYN

- ① IYN = 1 : 等高線を描く。  
② " = 0 : " を描かない。

- A.5.2 グリッド描図オプション：IGRID

- ① IGRID = 1 : 7.4 で入力した自動メッシュ分割したグリッドを描く。  
② " = 0 : " を描かない。

- A.5.3 コイル等描図オプション：IFIG

- ① IFIG = 1 : 磁界等高線図中にコイル等を描く。  
② " = 0 : " 描かない。

#### A.6 等高線間隔入力：BDIV

A.5.1 の で IYN = 1 の時必要で、描きたい磁界の等高線の間隔を入力する。ただし、等高線は 100 本以下であること。

\* フリーフォーマット

#### A.7 コイル形状等の描図入力データ

A.5.3 で IFIG = 1 の時に必要。

コイル形状等は、直線を結んで構成される、1個もしくは複数個の一筆書きの図形として入力する。よって、本プログラムでは、円、円弧等の描図は行えない。

- ① 一筆書き可能な図形の個数入力：NCOSU

\* フリーフォーマット

以下②～③をNCOSUだけ入力する。

- ② 一筆書き図形上の点の数：IPOINT (I)

ただし、IPOINT (I) ≤ 50

\* フリーフォーマット

- ③ ②で指定した点の水平、垂直座標点

XPOINT (I, J), YPOINT (I, J)

J = 1 ~ IPOINT (I)

I = 1 ~ NCOSU



## \* フリーフォーマット

## A.8 コマンドプロシジャー

「FIELD DDM1」用のコマンドプロシジャー，TSSMAC. CLIST (FIELD DDM1) を作成した。このプロシジャーのフローを図A.1に，リストを表A.1に示した。テクトロニクス社のT 4014 端末を用いて，CRT上に出力結果を得たい場合は，セッションのLOGON時に必ずSIZE (1024) としておく必要がある。一方，バッチ処理の場合のJCLの例を表A.2に示した。

## A.9 例 題

以下に，「FIELD DDM1」を用いて，パルサーCコイルとJB-50，3/5コイルの組み合せ配置での，磁界計算の例を示す。

図A.2にコイル配置を，図A.3に自動メッシュ分割の仕方を（ただし，ここでは，右半分の $X \geq 0$ の領域でのみ磁界を計算する），図A.4にコイルの図形入力のためのデータの作り方を示す。表A.3に入力データを，表A.4に出力リストを，図A.5に等磁界線の出力を示した。

## 参考文献

付-1. 私 信

Table A.1 List of TSS command procedure of [FIELDMM1]

```

00000010 PROC 0
00000020 GLOBAL A B C D E F G H
00000030 WRITE
00000040 WRITE
00000050 WRITE !!!!!!!!!!! FIELDMM1 TSS COMMAND PROCEDURE START !!!!!!!!!!!!!!!
00000060 WRITE *****
00000070 WRITE FFFFF II EEEEEEE LL DDDDD DDDDD MM MM 111
00000080 WRITE FF II EE LL DD DD DD DD M M M M 111
00000090 WRITE FFFFF II EEEEE LL DD DD DD DD M M M 11
00000100 WRITE FF II EE LL DD DD DD DD M M 11
00000110 WRITE FF II EEEEEEE LLLLLL DDDDD DDDDD M M 111111
00000120 WRITE *****
00000130 WRITE
00000140 WRITE
00000150 WRITE
00000160 WRITE
00000170 WRITE
00000180 WRITE
00000190 DD:WRITE
00000200 WRITENR WHICH ARE YOU USING FACOM FULL SCREEN OR TEKTRONIX NOW(F/T) ?==>
00000210 READ &FT
00000220 IF &FT =F THEN GOTO BB
00000230 IF &FT =T THEN GOTO GG
00000240 GOTO DD
00000250 WRITE
00000260 WRITE
00000270 GG:TEKTRO T4014 SC(E,MI,SI)
00000280 WRITE
00000290 WRITE
00000300 WRITE
00000310 WRITE
00000320 WRITENR ????????????? TSS OR BATCH (T/B) ?????????? =====>
00000330 READ &FB
00000340 IF &FB=T THEN GOTO NP
00000350 IF &FB=B THEN GOTO BB
00000360 WRITE
00000370 WRITE !!!!!!!!!!!!! CAUTION !!!!!!!!!!!!!!!
00000380 WRITE !! PLEASE INPUT T OR B CORRECTLY !!
00000390 WRITE !!!!!!!!!!!!!!!
00000400 GOTO GG
00000410 NP:TEKTRO T4014 SC(E,MI,SI)
00000420 WRITE
00000430 WRITE
00000440 WRITE
00000450 WRITENR DID YOU LOGON TSS SIZE(1024) ?(Y/N)===>
00000460 READ &YN
00000470 IF &YN=N THEN GOTO NN
00000480 IF &YN=Y THEN GOTO YY
00000490 GOTO NP
00000500 NN:TEKTRO T4014 SC(E,MI,SI)
00000510 WRITE
00000520 WRITE
00000530 WRITE !!!!!!!!!!!!! CAUTION !!!!!!!!!!!!!!!
00000540 WRITE !! WORK AREA IS TOO SMALL !!
00000550 WRITE !! PLEASE RE-LOGON TSS SIZE(1024) !!
00000560 WRITE !! ==> LOGON TSS J3609/CHUN S(1024) !!
00000570 WRITE !! AND TRY AGAIN !!
00000580 WRITE !!!!!!!!!!!!!!!
00000590 WRITE
00000600 GOTO XXX
00000610 YY:WRITE
00000620 WRITE

```

Table A. 1 (Cont. )

```

00000630 TEKTR0 T4014 SC(E,MI,SI)
00000640 WRITE
00000650 WRITE
00000660 WRITE
00000670 WRITE PLEASE INPUT DATA FILE NAME (EXAMPLE J3609.FRAME1.DATA(STEP2))
00000680 WRITENR =====>
00000690 READ DF
00000700 WRITE
00000710 WRITE
00000720 WRITE
00000730 WRITE
00000740 WRITE !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
00000750 WRITE OK! OK! I WILL ALLOCATE
00000760 WRITE &DF
00000770 WRITE TO FT05F001
00000780 WRITE !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
00000790 WRITE
00000800 ALLOC DA('&DF') DD(FT05F001) REU
00000810 TERMINAL LINESIZE(137)
00000820 TERMINAL LINES(61)
00000830 TEKTR0 T4014 SC(E,SM,SI)
00000840 WRITE *****
00000850 WRITE * MAGNETIC FIELD CALCULATION RESULT (FIELDDM1 TSS MODE RESULT) *
00000860 WRITE *****
00000870 WRITE *
00000880 WRITE *YOUR USING DATA FILE NAME = *
00000890 WRITE * &DF *
00000900 WRITE *
00000910 WRITE * IF YOUR FIGURE OPTION *
00000920 WRITE * IFIG=1 *
00000930 WRITE * THEN CONTOUR LINES WILL BE DRAWN AUTOMATICALLY *
00000940 WRITE * AFTER LISTING OUTPUT DATA *
00000950 WRITE *
00000960 WRITE * DATE=&SYSDATE TIME=&SYSTIME *
00000970 WRITE *
00000980 WRITE *****
00000990 WRITE
00001000 WRITE
00001010 WRITE
00001020 PTSIO
00001030 CALL RYU(FIELDDM1)
00001040 GOTO EX
00001050 BB:WRITE
00001060 WRITE
00001070 WRITE ***** OK! BATCH PROCESSING *****
00001080 WRITE
00001090 WRITE
00001100 IF &FT=F THEN GOTO FF
00001110 ELSE GOTO LL
00001120 FF:WRITE
00001130 WRITE
00001140 WRITE *****
00001150 WRITE *PLEASE MAKE SURE OR CORRECT TIME ETC. AND DATA FILE NAME *
00001160 WRITE * IF YOU NEED !!--> UNDER FULL SCREEN MODE *
00001170 WRITE *
00001180 WRITE * I *
00001190 WRITE * I *
00001200 WRITE * U *
00001210 WRITE *
00001220 WRITE * IF JCL OK THEN PLEASE SUBMIT (COMMAND---) SUB *
00001230 WRITE *
00001240 WRITE * PLEASE ENTER EOM S;END OR EOM N;END *

```

Table A. 1 (Cont. )

```

00001250 WRITE *                               OR  EDM;END *
00001260 WRITE *                               *
00001270 WRITE *   WHEN YOU WANT TO CLOSE UPDATE MODE *
00001280 WRITE * ***** *
00001290 WRITE *
00001300 GEM3 RYU.CNTL
00001310 U FIELDDM1
00001320 FS
00001330 GOTO XXX
00001340 LL:WRITE
00001350 TEKTRD T4014 SC(E,SM,SI)
00001360 WRITE
00001370 WRITE * ***** *
00001380 WRITE *PLEASE MAKE SURE OR CORRECT TIME ETC. AND DATA FILE NAME *
00001390 WRITE *   IF YOU NEED !!--> UNDER TEKTRD MODE *
00001400 WRITE *   I *
00001410 WRITE *   I *
00001420 WRITE *   V *
00001430 WRITE *
00001440 WRITE *   IF JCL OK THEN PLEASE SUBMIT (COMMAND---) SUB *
00001450 WRITE *
00001460 WRITE *   PLEASE ENTER EDM S;END OR EDM N;END *
00001470 WRITE *   OR  EDM;END *
00001480 WRITE *
00001490 WRITE *   WHEN YOU WANT TO CLOSE UPDATE MODE *
00001500 WRITE * ***** *
00001510 WRITE *
00001520 GEM3 RYU.CNTL
00001530 U FIELDDM1
00001540 L
00001550 GOTO XXX
00001560 EX:WRITE
00001570 WRITE *!!!!!!! FIELDDM1 TSS COMMAND PROCEDURE END !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! *
00001580 WRITE * ***** *
00001590 WRITE *   EEEEE  NN   NN  DDDDD
00001600 WRITE *   EE   NN N  NN  DD  D
00001610 WRITE *   EEEE  NN  N NN  DD  D
00001620 WRITE *   EE   NN   NNN DD  D
00001630 WRITE *   EEEEE  NN   NN  DDDDD
00001640 WRITE * ***** *
00001650 X:WRITE
00001660 XXX:EXIT

```

Table A. 2 JCL for [FIELD DM1]

```

GEM-FSD (V01/L06) --- J3609.RYU.CNTL(FIELD DM1) LEVEL=66
==>
ROW SCROLL ==>      PAGE      COLUMN SCROLL ==> 40      NONULLS 50
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
0100 //JCLG JOB
0200 //JCLG EXEC JCLG
0300 //SYSIN DD DATA,DLM='++'
0400 /*****
0500 /****      FIELD DM1.FORT      JCL      *****/
0600 /*****
0700 // JUSER 95783609,HI.NAKAJIMA,0035.100
0800 T.2 C.3 W.2 I.3 SRP GRP
0900 DPTP PASSWORD=CHUN
1000 //FORT77 EXEC FORT77,
1100 // SD='J3136.FIELD DM1',
1110 // A='ELM(*)',NDSOURCE,LC(0)',
1200 // Q='.FORT',
1300 // B='LANGLVL(66)'
1400 //LKED77 EXEC LKED77,
1500 // GRLIB=PNL
1600 //RUN EXEC GO
1700 // EXPAND GRNLP,SYSOUT=E
1800 // EXPAND DISKTO,
1900 // DDN=SYSIN,
GEM-FSD (V01/L06) --- J3609.RYU.CNTL(FIELD DM1) LEVEL=66
==>
ROW SCROLL ==>      PAGE      COLUMN SCROLL ==> 40      NONULLS 50
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
2000 // DSN='J3609.FRAME1',
2100 // Q='.DATA(EXSAM)'
2200 ++
2300 //
*** END OF DATA SET ***

```

Table A. 3 Example of input data for [FIELD DM1]

```

GEM-FSD (V01/L06) --- J3609.FRAME1.DATA(EXSAM) LEVEL=3
==>
ROW SCROLL ==>      PAGE      COLUMN SCROLL ==> 40      NONULLS 50
-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
0100 P-COIL  1  320.    0.    140.    152.    1.7
0200 P-COIL  2  325.   315.   150.   276.    5.
0300 FIN
0400 1
0500 J8-50 3/5+PULSER-C
0600 XZ
0700 4
0800 0 250 390 400 450
0900 5 7 2 5
1000 5
1100 -85 -76 76 177 453 470
1200 2 5 5 10 3
1300 1 0 1
1400 0.5
1500 2
1600 5
1700 250 -76 250 76 390 76 390 -76 250 -76
1800 5
1900 250 177 250 453 400 453 400 177 250 177
*** END OF DATA SET ***

```

Table A. 4 Example of output list of [FIELDMM1]

```

MAGNETIC FIELD CALCULATION RESULT (FIELDMM1 TSS WOME RESULT) *
*****
SETUP USING DATA FILE NAME " J3609.FRAME1.DATA(EASAR) "
*
* IF YOUR FIGURE OPTION
* IFIG=1
* THEN CONTOUR LINES WILL BE DRAWN AUTOMATICALLY *
* AFTER LISTING OUTPUT DATA *
*
* DATE=03-20-85 TIME=18:34:51
*****

*** INPUT CHECK ***

YIP 1 320.000 0.0 140.000 152.000 1.700 0.0 0.0
YIP 2 325.000 315.000 150.000 276.000 5.000 0.0 0.0
ZIP 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

*****
***** INPUT DATA LIST ***** MAGNETIC FIELD CALCULATION ***** UNIT (MM, DEG, KA/CMS)
*****
P-COIL I RADIUS I Z-COORDINATE I WIDTH I THICKNESS I CURRENT I
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
NO. 1 | 320.000 | 0.0 | 140.000 | 152.000 | 1.700 |
-----|-----|-----|-----|-----|-----|
NO. 2 | 325.000 | 315.000 | 150.000 | 276.000 | 5.000 |
-----|-----|-----|-----|-----|-----|

*****
***** TASK NAME *****
J3-50 3/5-PULSER-C
*****
CALCULATION PLANE=XZ

CALCULATE P-COIL ONLY
SEARCHING COIL
*****
X Y Z FX FY FZ BXT BVT BZT BXP BVP BXP BZP BXP BZP B
0.0 0.0 -85.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 -82.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 -78.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 -45.6 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 -15.2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 15.2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 45.6 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 78.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 82.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
0.0 0.0 85.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

```

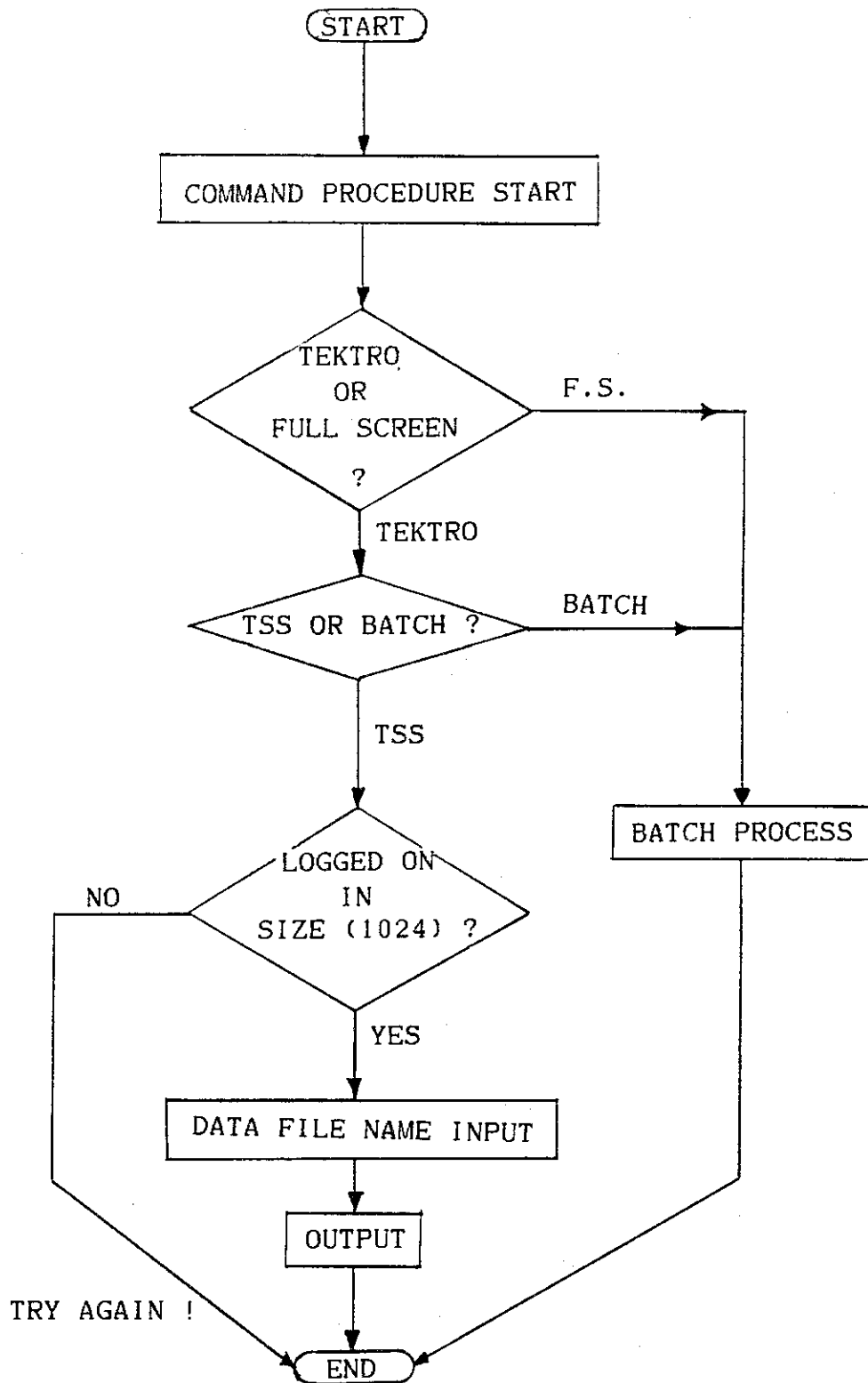


Fig. A. 1 Flow chart of TSS command procedure of [FIELDMM1]

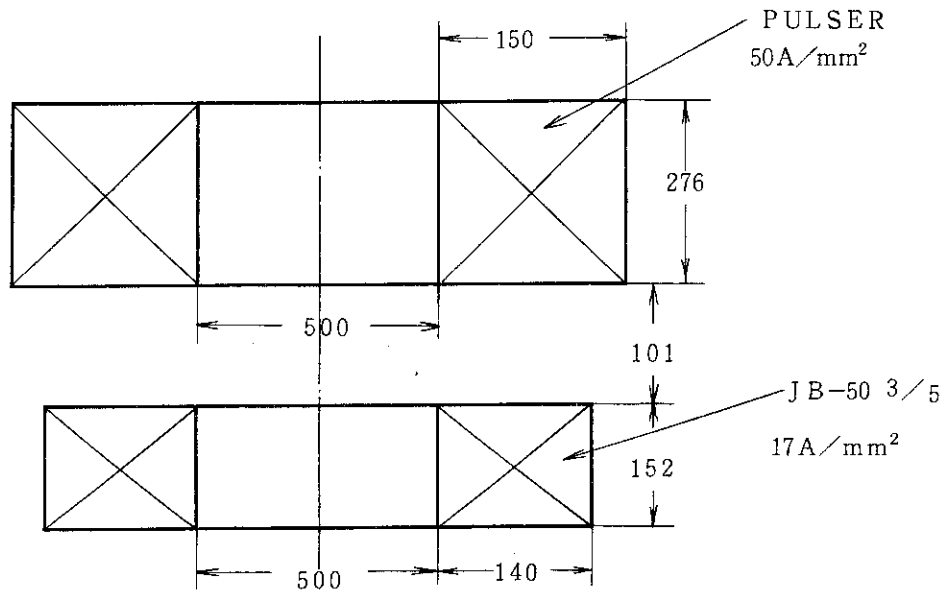


Fig. A. 2 Coil arrangement

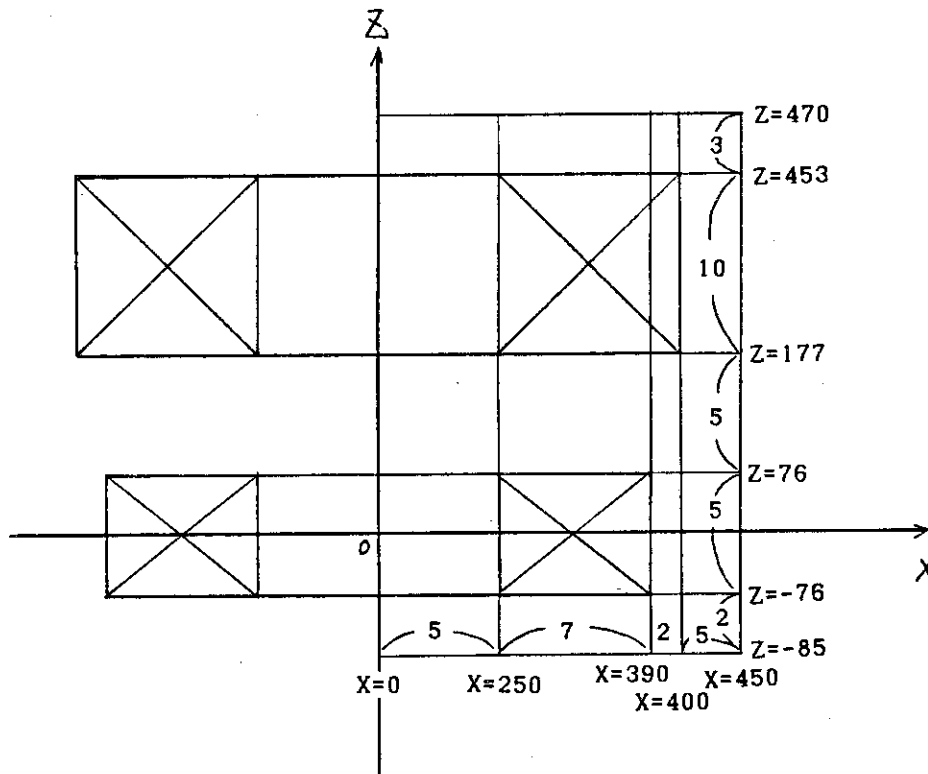


Fig. A. 3 Auto mesh for the input data generation



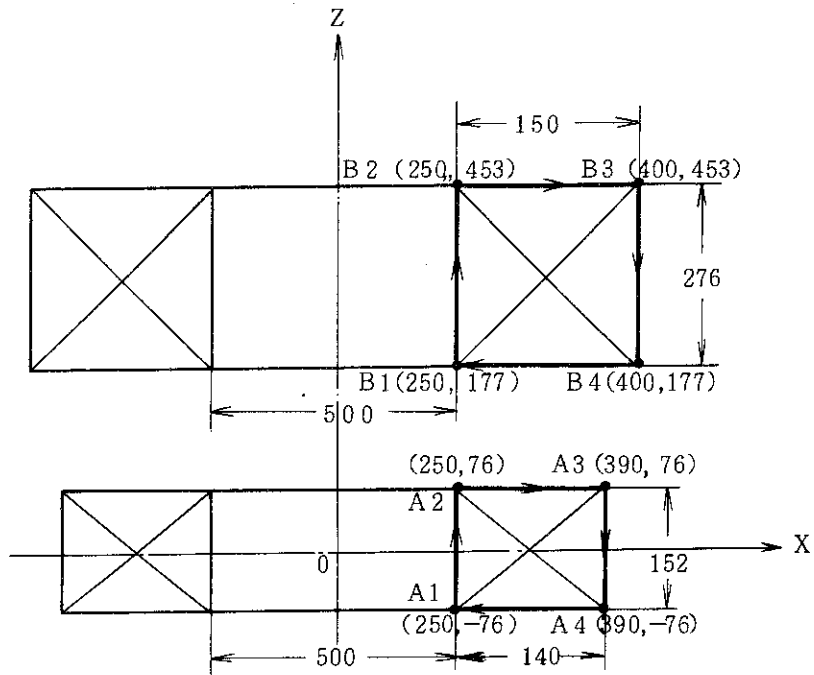


Fig. A. 4 Node data for drawing of the coil figures

== MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION ==  
 JB-60 3/5-PULSER-C  
 BMAX= 5.355 (T), Z = 250.01MM, Z = 315.01MM!  
 BMIN= 0.258 (T), X = 370.01MM, Z = 315.01MM!

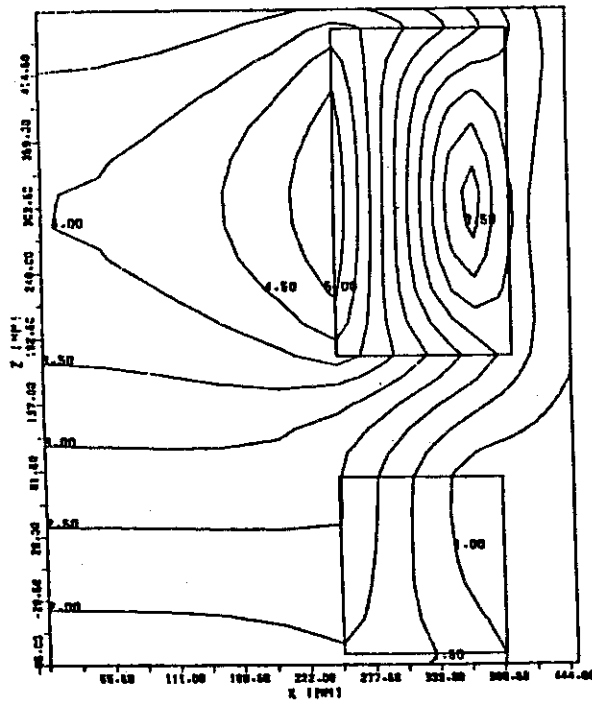


Fig. A. 5 Contour lines of magnetic field