

JAERI-M  
7543

ORNL-LCTの磁界と応力の解析

1978年2月

吉田 清・安藤 俊就・島本 進

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

ORNL-LCTの磁界と応力の解析

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

吉田 清・安藤俊就・島本 進

( 1978年1月27日受理 )

現在米国のOAK RIDGE NATIONAL LABORATORYで計画されているLARGE COIL TASKで使用する超電導トロイダル・コイルの磁界及び応力の解析を行いここに報告する。この結果をみるとNb-Ti合金を超電導線材として、本コイルを製作するには磁界及び電流密度の点から克服すべき問題点が多い。又、電磁力によって発生する応力については、低温で材料強度が増加する事を考慮すると十分使用限界内である事が明確になった。

JAERI-M 7543

Magnetic Field and Stress Analysis for ORNL-LCT

Kiyoshi YOSHIDA, Toshinari ANDO  
and Susumu SHIMAMOTO

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 27, 1978)

Magnetic field and stress analysis results are described. For a toroidal field coil in the Large Coil Task at ORNL, Nb-Ti alloy superconducting conductor has number of problems in magnetic field and current density for further study. The maximum Von Mises stress, however, is lower than the yield stress.

Keywords: Superconductor, Large Coil Task,  
Toroidal Coil, Niobium-Titanium Alloy  
Magnetic Field, Stress Analysis

## 目 次

1. はじめに	1
2. LCTの概要	1
2.1 設計条件	1
2.2 実験計画	2
3. 基本設計	9
3.1 コイルの側面形状	9
3.2 巻線部断面形状	9
3.3 電流密度	10
4. 磁界及び電磁力解析	12
4.1 トロイダル磁界	12
4.2 ポロイダル磁界	13
4.3 電磁力	13
4.4 諸量の計算	14
5. 応用解析	24
5.1 計算モデル	24
5.2 支持方法	24
5.3 応力のヤング率依存性	25
5.4 計算例	25
5.5 拡張実験の解析	26
5.6 応力解析の問題点	26
6. むすび	36
謝 辞	36
参考文献	37

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Out Line of LCT.....	1
2.1 Design Requirements.....	1
2.2 Test Program.....	2
3. Conceptual Design.....	9
3.1 Coil Shape.....	9
3.2 Coil Cross-section.....	9
3.3 Current Density.....	10
4. Magnetic Field and Force Analysis.....	12
4.1 Toroidal Field.....	12
4.2 Poloidal Field.....	13
4.3 Magnetic Force.....	13
4.4 Other Properties.....	14
5. Stress Analysis.....	24
5.1 Calculation Model.....	24
5.2 Support Method.....	24
5.3 Dependence of Young's Modulus.....	25
5.4 Results.....	25
5.5 Extended Test Analysis.....	26
5.6 Problems of Stress Analysis.....	26
6. Conclusions.....	36
Acknowledgement.....	36
References.....	37

## 1. はじめに

トカマク型の超電導トロイダル・コイルの設計はすでに多くの所でなされた。しかし、それらのほとんどは概念設計であり実際に物を作ることはなかった。それに対して Large Coil Task<sup>(1)</sup> (以後 LCT と呼ぶ。) 計画は、6 個の超電導トロイダル・コイルを実際に作り実験しようとするものである。実験はアメリカ合衆国のオークリッジ国立研究所 (以後 ORNL と呼ぶ。) で 1980 年から実施される。6 個のコイルのうち、3 個はアメリカ、1 個を西ドイツ、残りの 2 個については参加国が考えられている。

原研はその予備調査として、ORNL が米国三社に提出した仕様条件をもとに磁界と応力の計算を行った。これらをまとめたものが本報告書である。日本がこの作業に参加する場合、本報告書で採用した諸量が最終決定ではないが、この程度の計算モデルでは多少の変更によっても計算結果は大きく変わらないと思われる。

## 2. LCT の概要

トカマク型核融合炉のトロイダル磁界の発生に超電導コイルを利用するためには、核融合炉に近い寸法でその予備実験を行うことが不可欠であると思われる。LCT の目的は、D-T 反応達成を目標としたトカマク装置である米国の次期装置 The Next Step (以下 TNS と呼ぶ。) を想定した設計思想、材料及び製作技術を充分実証し得る規模での設計製作及び実験を行うことである。

### 2.1 設計条件

LCT で使用するトロイダル・コイルに要求される最低限の仕様は以下の項目に示す通りである。

- 1) 定常運転において、Fig. 2.1 で示された場所で少なくとも 8 T の最大磁界を出す。
- 2) Fig. 2.2 で示されるように、6 個のコイル配置で 1 個のコイルをその設計電流値で運転し、残りの 5 個のコイルをその設計電流値の 80% で運転した状態で最大磁界 8 T をテスト・コイルの 1) で述べた場所で発生する。
- 3) コイルは、試験台に設置するために Fig. 2.3 に示す接続面を持つ。さらに、コイルの大きさ及び形状は Fig. 2.4 に示す。
- 4) コイルの重量は 3.8 ton 以下。

以下をまとめたのが Table 2.1 である。LCT で試験するコイルの技術的課題を考慮した結果、そのコイルの形状を TNS のトロイダル・コイルに類似させ、その大きさを約 1/2 としている。

## 1. はじめに

トカマク型の超電導トロイダル・コイルの設計はすでに多くの所でなされた。しかし、それらのほとんどは概念設計であり実際に物を作ることはなかった。それに対して Large Coil Task<sup>(1)</sup> (以後 LCT と呼ぶ。) 計画は、6 個の超電導トロイダル・コイルを実際に作り実験しようとするものである。実験はアメリカ合衆国のオークリッジ国立研究所 (以後 ORNL と呼ぶ。) で 1980 年から実施される。6 個のコイルのうち、3 個はアメリカ、1 個を西ドイツ、残りの 2 個については参加国が考えられている。

原研はその予備調査として、ORNL が米国三社に提出した仕様条件をもとに磁界と応力の計算を行った。これらをまとめたものが本報告書である。日本がこの作業に参加する場合、本報告書で採用した諸量が最終決定ではないが、この程度の計算モデルでは多少の変更によっても計算結果は大きく変わらないと思われる。

## 2. LCT の概要

トカマク型核融合炉のトロイダル磁界の発生に超電導コイルを利用するためには、核融合炉に近い寸法でその予備実験を行うことが不可欠であると思われる。LCT の目的は、D-T 反応達成を目標としたトカマク装置である米国の次期装置 The Next Step (以下 TNS と呼ぶ。) を想定した設計思想、材料及び製作技術を充分実証し得る規模での設計製作及び実験を行うことである。

### 2.1 設計条件

LCT で使用するトロイダル・コイルに要求される最低限の仕様は以下の項目に示す通りである。

- 1) 定常運転において、Fig. 2.1 で示された場所で少なくとも 8 T の最大磁界を出す。
- 2) Fig. 2.2 で示されるように、6 個のコイル配置で 1 個のコイルをその設計電流値で運転し、残りの 5 個のコイルをその設計電流値の 80% で運転した状態で最大磁界 8 T をテスト・コイルの 1) で述べた場所で発生する。
- 3) コイルは、試験台に設置するために Fig. 2.3 に示す接続面を持つ。さらに、コイルの大きさ及び形状は Fig. 2.4 に示す。
- 4) コイルの重量は 3.8 ton 以下。

以下をまとめたのが Table 2.1 である。LCT で試験するコイルの技術的課題を考慮した結果、そのコイルの形状を TNS のトロイダル・コイルに類似させ、その大きさを約 1/2 としている。



Table 2.1 Test Stand Requirements

Number of Toroidal Field Coil	6
Major Radius	2.27 m
Bore (clear opening)	2.35 m × 3.35 m
Maximum Toroidal Field	8 T
Peak Pulse Field	0.2 T

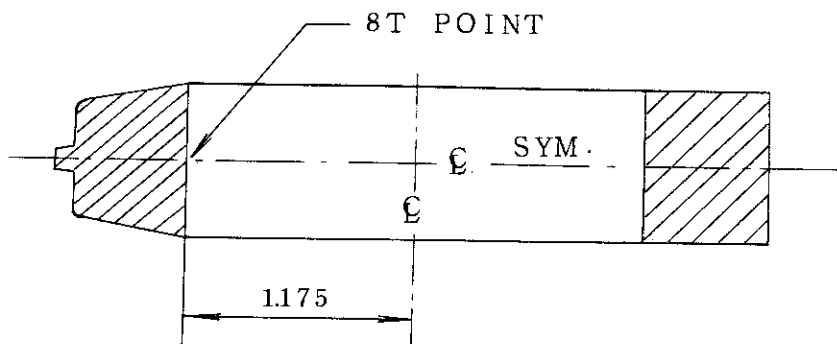
この6個のコイルを乗せる試験台をFig. 2.5に示す。それぞれ設計の異ったコイルを一体として支持できるようになっている。中心柱は向心力及び自乗を支持し、トルク・リングは転倒力を支える働きをする。この試験台は、大形の真空容器の中に設置される。

加えるに、現在の所細詳の設計が決定されていないパルス・コイルがテスト・コイルのコイル内側に設置されて、電源及び冷凍機が準備されている。

## 2.2 実験計画

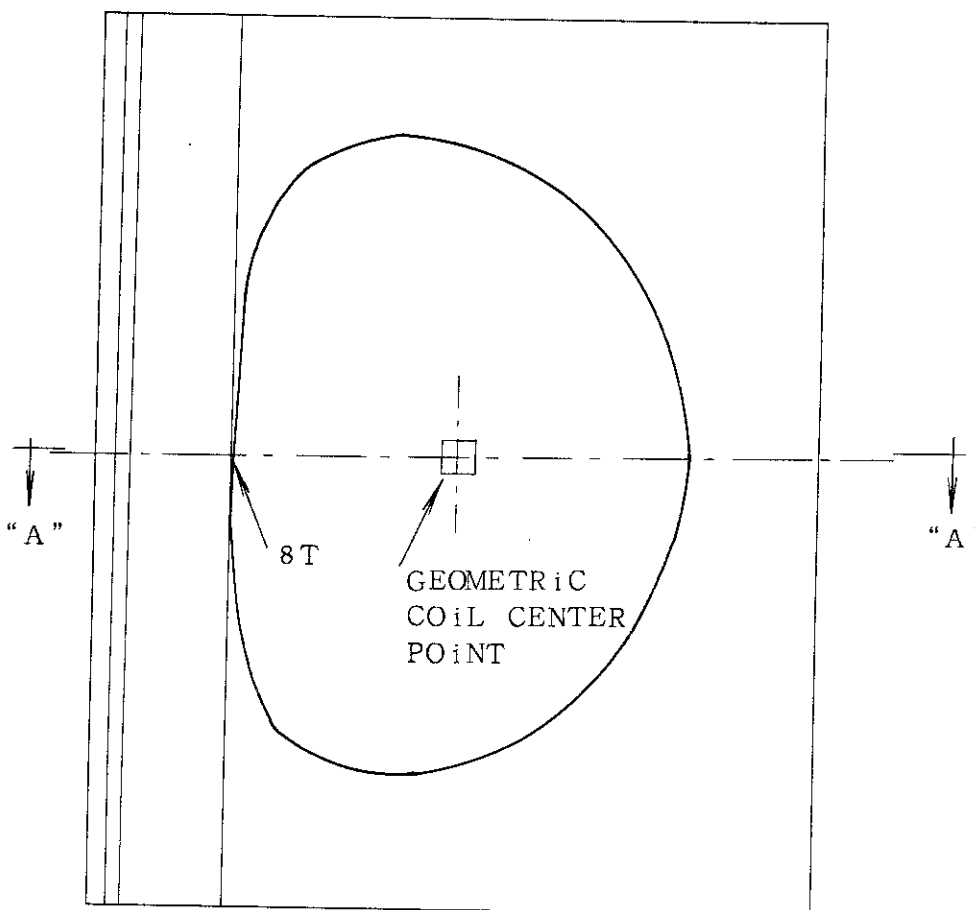
LCTのコイル実験計画は、いくつかの段階から構成されている。最初に到着したコイルはそれぞれ1個で試験され、次にコイルが3個になった時点でより高い磁界を目的として実験を行なう。最後に6個のコイルをトーラス状に配置して、最も実際的な試験と実証を行なう。

次に以上の実験に加えて、さらに厳しい実験が行なわれる。それを示したのがFig. 2.6である。これらの条件を満足することによって始めて実用トロイダル・コイルの製作に着手できるものと思われる。



NOTE:  
ALL DIMENSIONS  
IN METERS

SECTION "A" - "A"



SIDE VIEW

Fig. 2.1 Peak Field Location

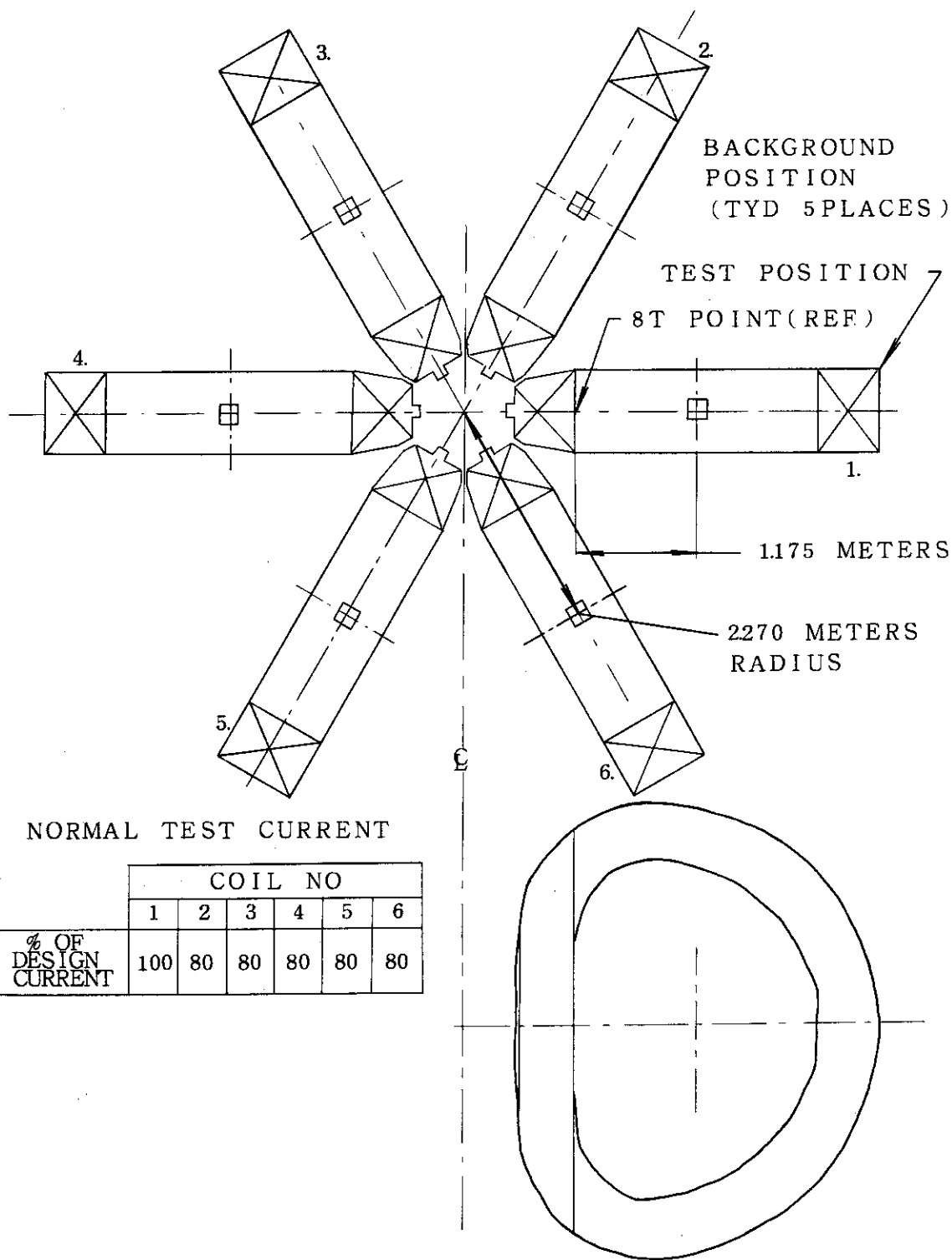


Fig. 2.2 Coil Array

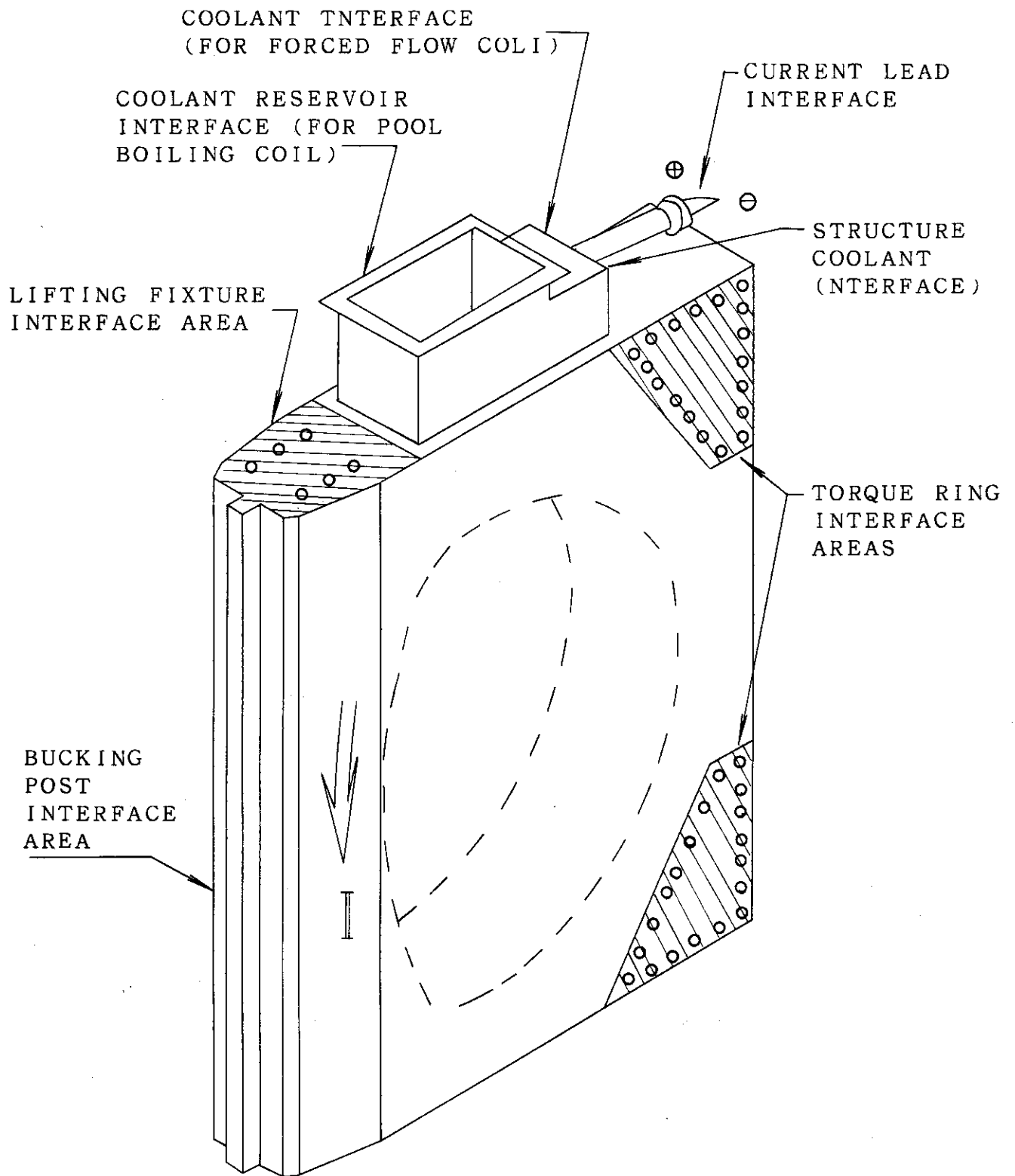


Fig. 23 Interface Features

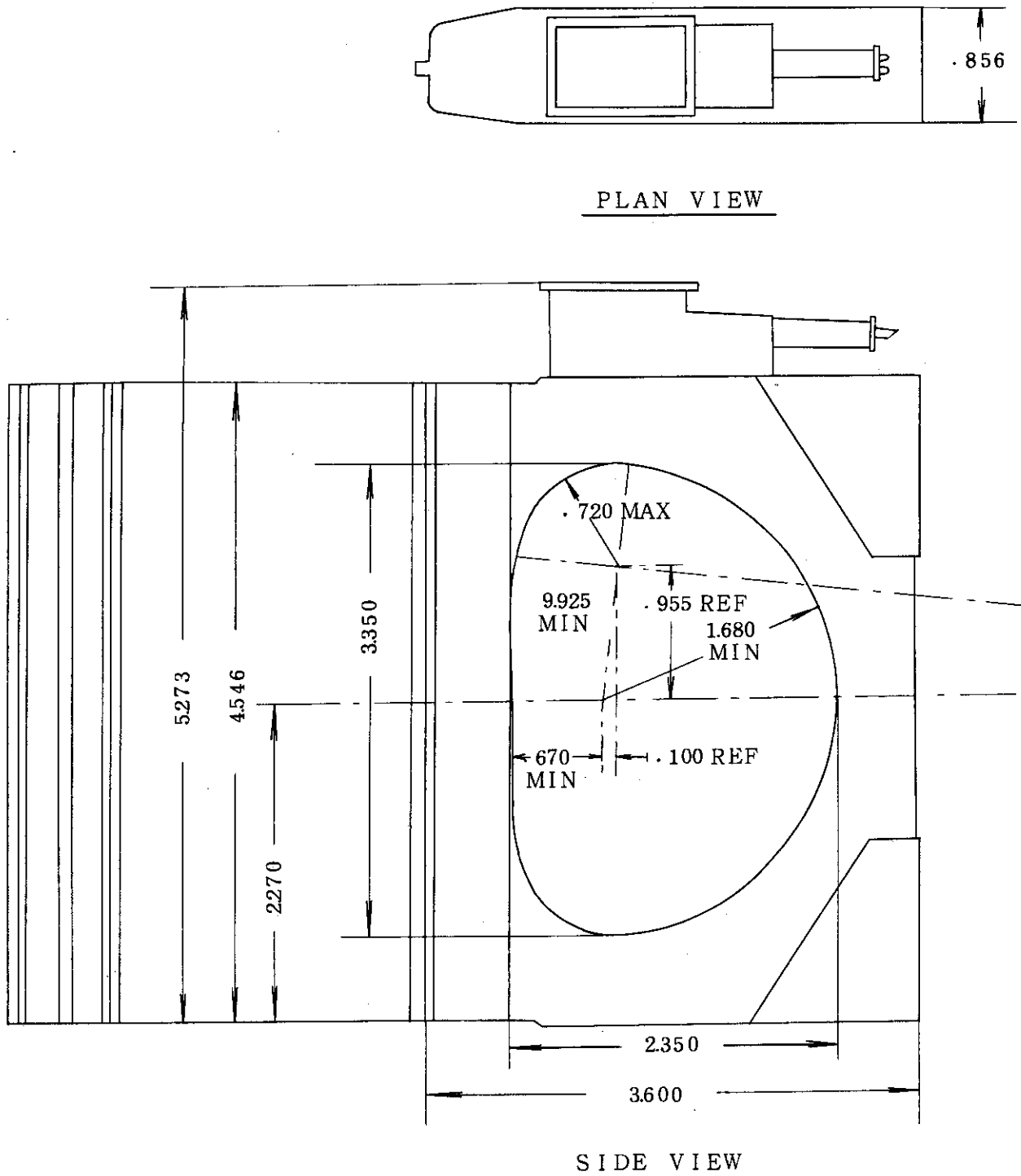


Fig. 24 Interface Dimension for Coil

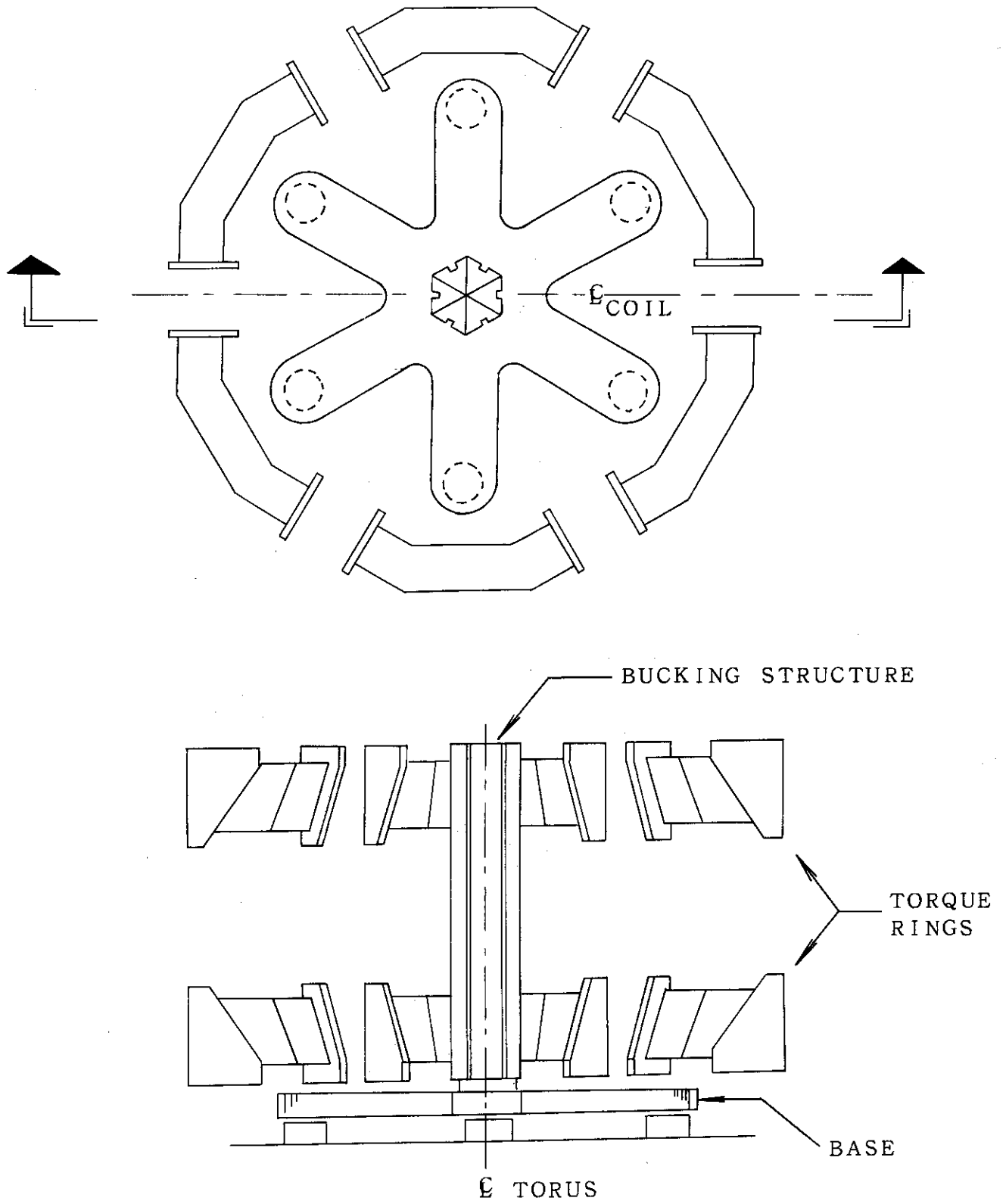
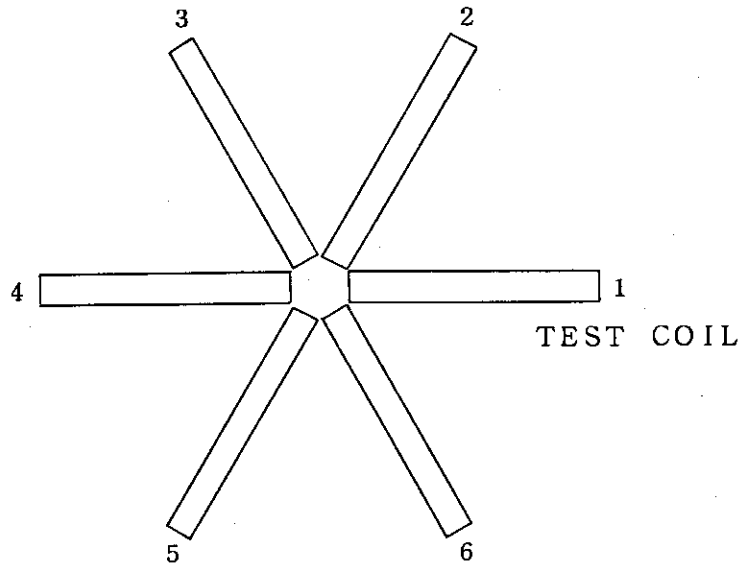


Fig. 2.5 Structural Mounting Arrangement



		COIL NO.						
		1	2	3	4	5	6	
% OF DESIGN CURRENT	ALT#	1	126	0	0	126	0	0
		2	121	0	121	0	121	0
		3	100	100	100	100	100	100
		4	110	80	80	80	80	80
		5	100	100	100	100	100	0
		6	110	80	80	80	80	0
		7	100	80	80	80	80	0
		8	100	80	80	0	80	80
		9	100	0	0	0	0	0

Fig. 2.6 Extended Test Coil Arrays

### 3. 基本設計

本報告書はORNLの出した仕様について研究する事を目的としているため、設計の詳細については議論しない。しかし、計算に際して基本的な項目を決定しなければならない。項目としては

- 1) コイルの側面形状
- 2) 巻線部断面形状
- 3) 電流密度

以上の3点である。以下それぞれについて詳しく議論する。

#### 3.1 コイルの側面形状

LCT計画は、現在建設中であるPrinceton Large Tokamak (PLT)の次期装置として計画されているTNSのトロイダル・コイルを目標とした実験計画である。そのためコイルの側面形状はTNSと相似形である必要がある。

しかし、TNSの設計は緒についたばかりでその具体的最終案は今後何度も検討がつづけながら決定されるものである。TNSはPLTとEPR (Experimental Power Reactor)の中間装置でもあるので、EPRの設計を検討しなければならない。EPR程度の大きさになるとトロイダル・コイルには1個のコイル当り数十万トンもの電磁力が発生する。この力に対して幾何学的制限と冷却重量制限から十分な補強がとれなくなり、最大応力が材料の使用限界を越える結果となっている。その対応策として考えられたのが、D型コイルである。これは応力集中を妨ぎコイルの安全設計をはかるものであるが、現在まで常電導トロイダル・コイルですら実用例もない所で、JET (EURATOM) やJT-4 (原研) でこのD型形状を採用する計画があるのみである。

これらの点を考慮してLCTにおいてもD型又はその変形であるOval型を採用することになっている。今回の解析は仕様に近い形状を計算する事を目的としているためFig. 3.1 (a) に示す数値で計算する。

#### 3.2 巻線部断面形状

トロイダル・コイルの巻線部分の断面形状は、矩形断面を採用する方が設計及び製作上簡便である。しかし、アスペクト比を小さくする必要がある場合には、空間的に巻線断面を台形にせざるを得ないこともある。

仕様で与えられている幾何学的領域はFig. 3.1 (b)の点線で示してある。導体の周囲を補強材がかこみ、その厚さを75mm一定すると、補強材の部分が隣のコイルの領域に入ってしまう。よって、LCTでは導体断面は矩形断面を採用しにくいことがわかる。しかし、本報で



は、製作設計を行うのではなく、基本的物理量を解析することを目的とするので、以下この短形断面を採用して計算をすすめる。

### 3.3 電流密度

電流密度を決定する要因の1つとして、超電導体の冷却方式を決定しその安定性の基準を決定する必要があるが、まだその定式化は議論の段階である。さらに、常電導転移した後のコイルの温度上昇の点からも電流密度制限が加わる事になる。しかし、ここではコイルの幾何学的形状が決定されたので、そこで仕様の上下対称面内で最大磁界 8 T を発生する電流密度  $J = 25 \text{ A/mm}^2$  (他の5個のコイルは  $J = 20 \text{ A/mm}^2$ ) を採用する。

以上の議論から本コイルと現在稼動している最大の超電導コイル (The CERN Liquid Hydrogen Bubble Chamber Magnet<sup>(4)</sup>) との対比とってみたのが Table 3.1 である。磁界及び電流密度の点で大きな技術的発展が要求される事がわかる。

Table 3.1 Comparison of LCT with BEBC

	LCT (normal)	BEBC
Current (KA)	10.0	5.7
Current Density ( $\text{A/mm}^2$ )	25.0	13.5
Maximum Field (T)	8.3	5.1
Coil Inner Diameter (m)	235×335	472

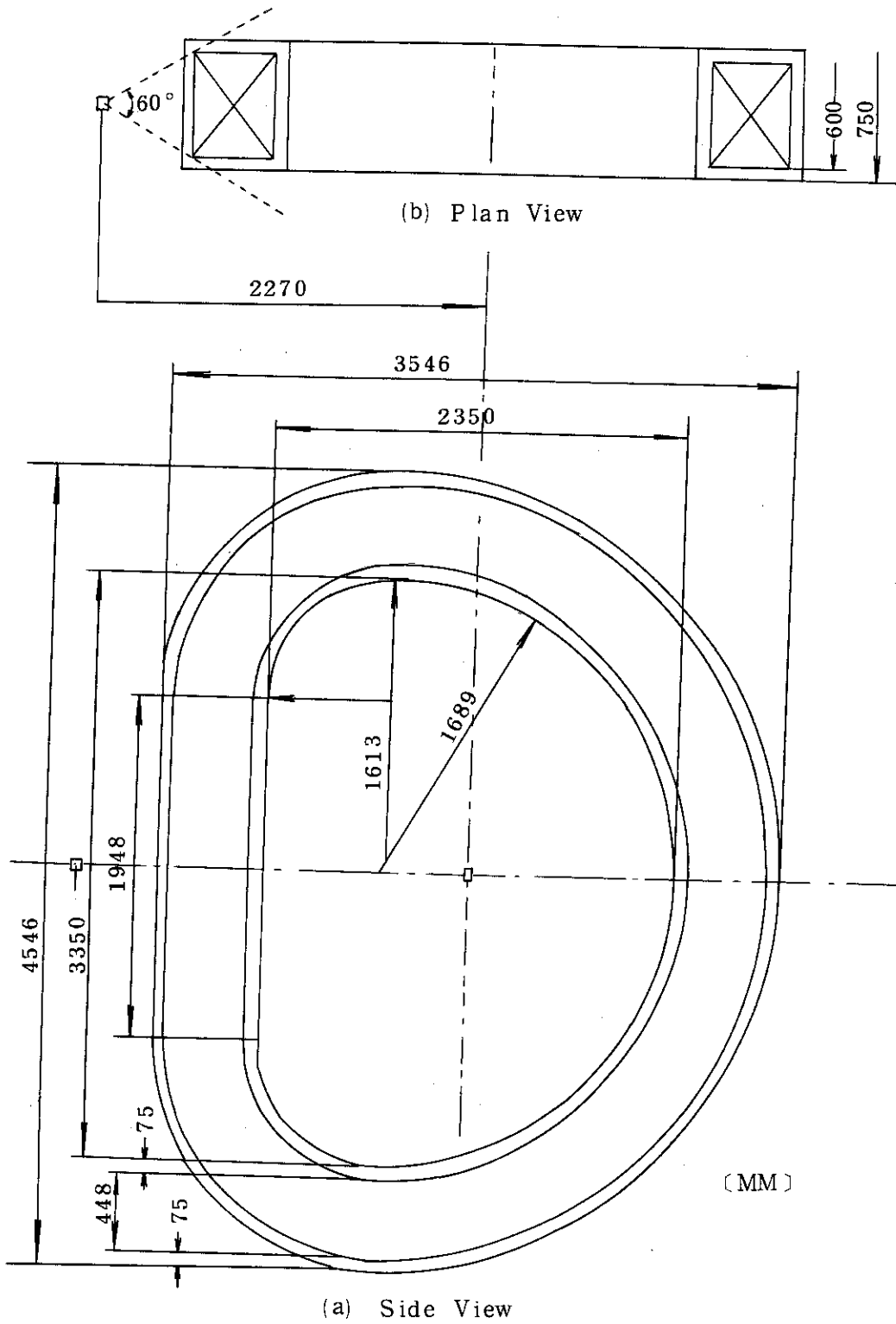


Fig. 3.1 Dimensions of the Coil proposed in this report

## 4. 磁界及び電磁力解析

磁界解析にはビオ・サバルの式を体積積分して求める当研究室が開発した計算コード「FIELD」を用いて計算した。

### 4.1 トロイダル磁界

仕様 Table 2.1 を満足した場合にトロイダル磁界分布及び最大磁界を検討する。まず始めに Fig. 2.2 の配置においてテスト・コイルの上下対称称面の中心における磁界分布を、テスト・コイル自身の磁界、他の5個のコイルによる磁界、及びそれらを合成した磁界について Fig. 4.1 に示した。これを他の実用トロイダル磁界分布と比較すると、特に2つの点で相違がある。ここでの実用トロイダル・コイルとして挙げた数値は当研究室で想定した Superconducting Toroidal Test Assembly (STTA)<sup>(5)</sup> の計算値を用いた。まず、第一点としてトロイダル・コイルの水平分布図から、内側のピーク磁界を  $B_{\text{Max}}$ 、外側のピーク磁界を  $B_{\text{min}}$  とするとし、 $B_{\text{min}}/B_{\text{Max}}$  の比を取ると、LCT の場合は 0.77, STTA の場合は 0.5 となり、水平線上の磁界分布の点で大きな違いがある。さらに、コイル自身で発生する磁界を  $B_{\text{self}}$ 、その他のコイルから来る磁界と合成した磁界を  $B_{\text{total}}$  とし、 $B_{\text{self}}/B_{\text{total}}$  の比を取ってみると、LCT の場合 0.66, STTA の場合 0.32 となり、LCT の場合は注目している単体コイルの発生する磁界がその他のコイルから来る磁界の2倍にもなっている。つまり、LCT では単体コイル試験でも、かなりの意味をもつことになる。

次にコイルの巻線周方向の分布を取ってみる。計算位置はコイルの最も内側であり、横軸にはトーラス中心側から外側に向かって半周だけ図示した。これを Fig. 4.3 に示す。この図で特に問題になる点は、コイルの肩の所で (D型コイルの曲率が最大となっている場所) で最大磁界を発生している事である。上下対称面で 8.0 T を発生する事を仕様で定められているが、最大磁界は 8.3 T となる。仮に超電導線材に Nb-Ti 合金を使用する場合、最大磁界が 8.0 T から 0.3 T 増加する事は非常に多くの技術的問題を発生させる。この点実用トロイダル・コイルの場合は磁界リップルを問題とするためコイル数が 20 個位になるため、このような問題は発生しない。

この配置のままテスト・コイルの隣のコイルについて磁界分布を計算したものが、Fig. 4.3 である。磁界の値としては中心で 7.0 T、最大磁界が 7.3 T となり約 1 T だけテスト・コイルより磁界が弱くなっていて、分布もほぼ類似である。ただし、このコイルの電流密度は  $20 \text{ A/mm}^2$  である。

さらに3個のコイルだけで運転した場合について述べる。トロイダル・コイル数が6個であるために、それぞれのコイルの相互作用は小さく、コイルをクラスター配置 (3個のコイルだけの場合。) とでは磁界及び分布はそれほど大きな違いのない事が判明した。つまり、クラスター配置の場合端部のコイル非対称力が発生し、その支持構造は複雑になるが、中央のコイル

では、磁界および応力に関する実験をかなり良く行える事が言える。標準試験と3個のコイルの比較をしたのがFig. 4.4である。それぞれの図は、1個のコイルを $J=25\text{A/mm}^2$ とし、その両側に $J=20\text{A/mm}^2$ のコイルを配置した場合である。中心磁界は7.2 T, 最大磁界7.6 Tとなる。さらに3個のコイルを $J=25\text{A/mm}^2$ とすると中心磁界7.6 T, 最大磁界8.0 Tとなり、この場合は、6個のコイルによる実験とほぼ同等の実験が可能となる。

以上の3個のコイルだけによる磁界解析から、本研究室で目下計画の中形実験であるクラスター・テスト・コイルの有意性が明らかになる。今後、さらに大型のコイル開発の場合にもこの方式を採用して、種々の方式のコイルを実験した方が経済的であると思われる。

次に、磁界分布を磁界の絶対値を等高線で表わした結果を示す。Fig. 2.2の条件で水平面での分布をFig. 4.5に示し、トーラス中心側の導体断面を拡大したものをFig. 4.6に示した。さらに横から見た分布をFig. 4.7に示す。水平面での分布を見ると一般のトロイダル・コイルの分布とは大きく異なっている。漏洩磁界が大きく、リップルも大きい。よって、このままの配置では今後プラズマとの相互作用の研究に進むことは不可能であろう。Fig. 4.9の巻線断面内の磁界分布はコイルの導体を磁界の強さに応じて変えて製作する分割巻にする場合の基本的資料となる。

最後に、Fig. 2.6に示す拡張実験の場合について述べる。それぞれの計算値をTable 4.1に示し、その数値を磁界と電流密度を関数とした図をFig. 4.8に示す。特にALT<sup>#3</sup>, ALT<sup>#4</sup>を実現するためには非常に大きな努力が必要になるであろう。しかし、今後実用トロイダル・コイルの開発に際して、これらの仕様は克服されなければならない条件なのである。

#### 4.2 ポロイダル磁界

ORNLではポロイダル・コイルに関する最終決定をしていない。それは、ポロイダル・コイルの電源は高価なものであるため一般のトカマクのポロイダル・コイルと同等の配置は取れないためである。まだ試案の段階であるが、テスト・コイルの内側にスプリット・ソレノイド・コイルを配置する計画がORNLにより示されている。これにもとづいてTable 2.1に示してあるポロイダル磁界を発生させるために計算して決定した配置をFig. 4.9に示す。

以上の配置でトロイダル・コイル上の磁界分布を水平成分と垂直成分に分けてFig. 4.10に示す。パルス・コイル上の最大磁界は5.5 Tとなり、パルス・コイル自身の磁界変化は5.5 T/Sとなる。

#### 4.3 電磁力

電磁力はトロイダル・コイルを数十の要素に分割して、その要素の重心位置で電流密度と磁束密度のベクトル積を取ったものである。Fig. 4.11にコイル断面の重心位置での電磁力 $[\text{kg/mm}^2]$ を示した。電流密度が一定であるため磁界分布と相似な関係となった。

現在原研で計画されているJT-60のトロイダル・コイルと比較すると、全向心力と全フープカとをTable 4.2に比較した。JT-60の設計においてもこの巨大な電磁力に対する構造材

の応力が問題となっているのと同様にLCTにおいても応力問題は非常に大きい。

次に、ポロイダル磁界によってトロイダル・コイルに発生する電磁力について計算した。トロイダル・コイル巻線部最内層での最大磁界は0.2 Tと仕様に定められているが、ポロイダル磁界は導体中心で0.1 Tまで減衰して全転倒力は200トン程度しかない。よってトロイダル・コイル自身のフープ力から比べると非常に小さいことがわかる。

しかし、コイル失落時の転倒力は大きい。この力はポロイダル磁界による転倒力とは異なり、コイル全体が一方向に水平移動しようとする力となる。拡張実験のAL<sup>#7</sup>の場合を計算すると総和は5150トンとなる。この力を支持するためにトルク・リングがコイル上下に4本配置されている。

国内で単体試験を行う時の全フープ力は10800トンとなり標準試験の約半分の大きさである。この場合、パルス磁界による転倒力も、コイル欠落時の転倒力もなく、コイルの自重だけを支える架台を用意すればよいことになる。

#### 4.4 諸量の計算

##### (a) 起磁力

電流密度	$J = 25.1 \text{ A/mm}^2$
断面積	$S = 448 \times 600 = 2.69 \times 10^5 \text{ mm}^2$
運転電流	$I = 10,000 \text{ A}$
ターン数	$N = 675 \text{ ターン}$

以上から起磁力は

$$6.75 \text{ MAT}$$

##### (b) 導体長

1巻の平均長	$= 11.25 \text{ m}$
全長	$= 758.7 \text{ m}$

##### (c) インダクタンス

一般のソレノイド・コイルの計算式を用いてD形のボア面積と等しい内径のソレノイド・コイルとして概算する。

$$L = 2.1 \text{ Henry}$$

その他相互インダクタンスがあるが、同等の近似計算によると約1.2 Henryとなる。よって、コイル全体の蓄積エネルギーは約700MJとなる。現時点は概算ではあるが、今後発展させて正密な数値を計算したい。

##### (d) パルス・コイル

このコイルのインダクタンスも(c)と同様な計算で求め、さらにこのコイルの蓄積エネルギーは

$$E = 2.2 \text{ MJ}$$

さらに仕様で示された条件の1秒間で励磁する電力は、

$$W = 4.4 \text{ MVA}$$

となり大容量の電源が必要になってくる。

Table 4.1 Magnetic Field and Stress under Extended Test Conditions

	$B_{\text{MAX}}$ [ T ]	$B_{\text{PEAK}}$ [ T ]	Stress in Stainless Steel [ kg/mm <sup>2</sup> ]	Stress in Cu [ kg/mm <sup>2</sup> ]	Current Density [ A/mm <sup>2</sup> ]
Normal	8.0	8.3	1 0.3	7.0	2 5.
ALT#1	7.1	8.1	1 4.0	7.6	3 1.5
2	7.4	8.2	1 3.5	7.4	3 0.3
3	8.6	8.8	1 1.2	7.8	2 5.
4	8.5	8.9	1 2.7	8.2	2 7.5
5	7.5	7.9	1 0.9	6.6	2 5.
6	7.6	8.1	1 1.5	7.2	2 7.5
7	7.1	7.5	1 0.4	6.0	2 5.
8	7.9	8.2	1 0.5	6.8	2 5.
9	5.4	6.3	8.7	4.8	2 5.

Table 4.2 Comparison of LCT with JT-60

	LCT ( normal )	JT-60
Total In-plane Force ( ton )	5,800	4,700
Total Toroidal Hoop Force ( ton )	15,000	20,400

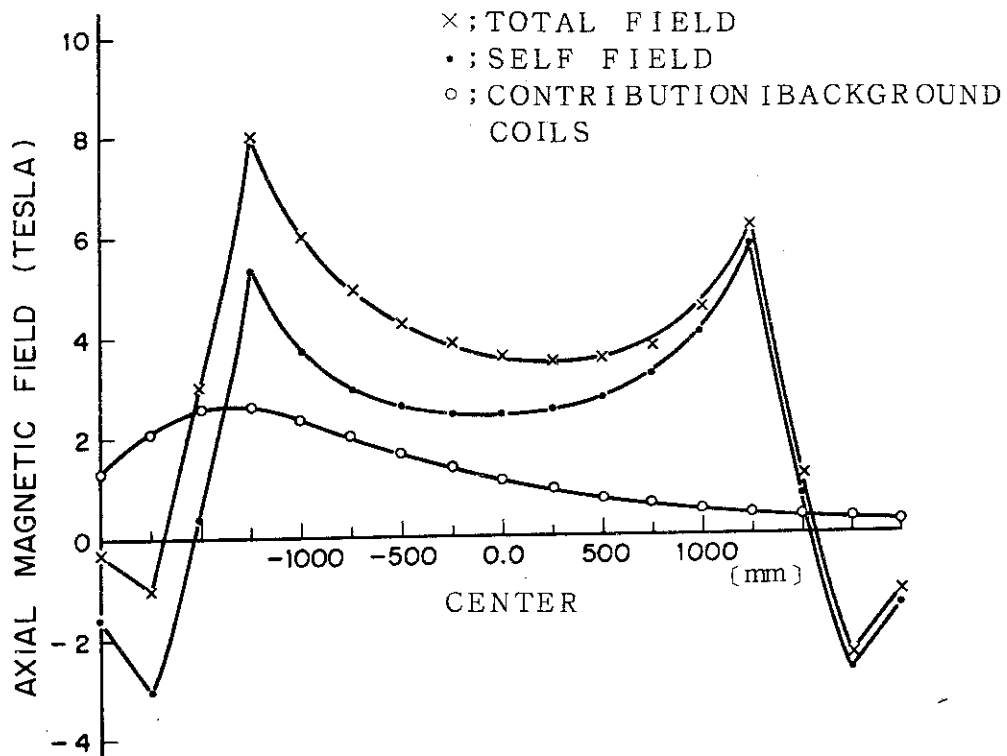


Fig. 4.1 Magnetic Field Distribution along the Horizontal Center Line - Coil Number 1. under Normal Test Condition

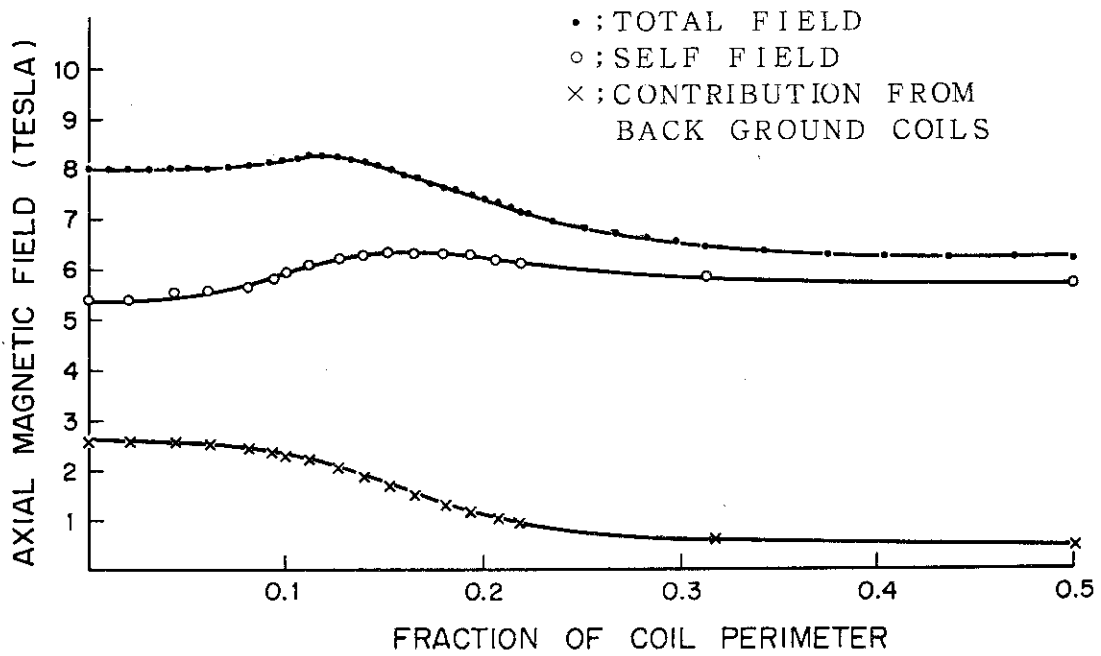
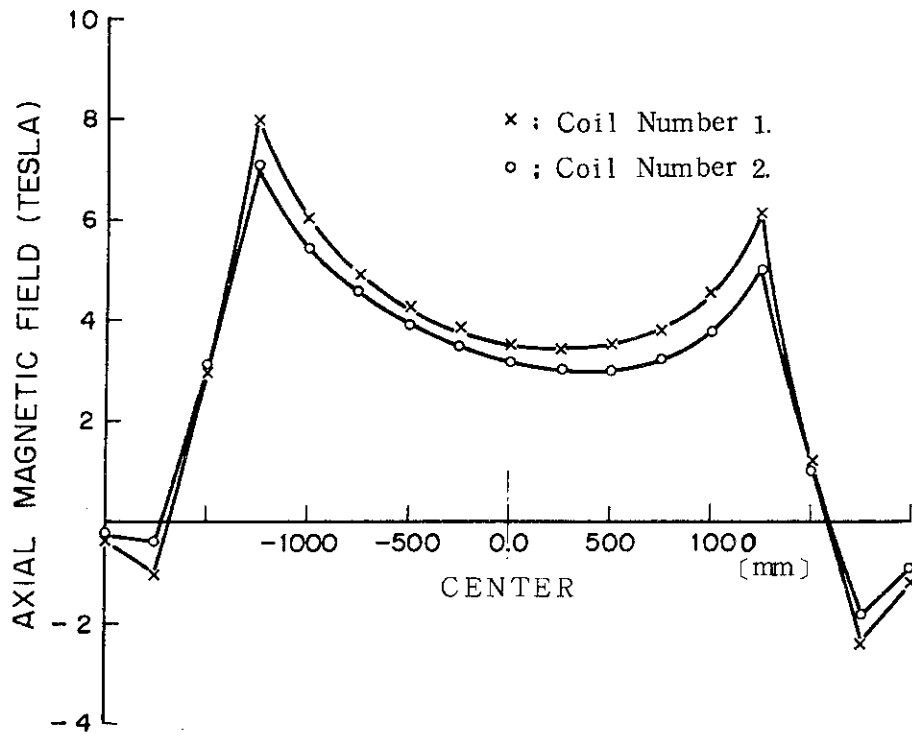
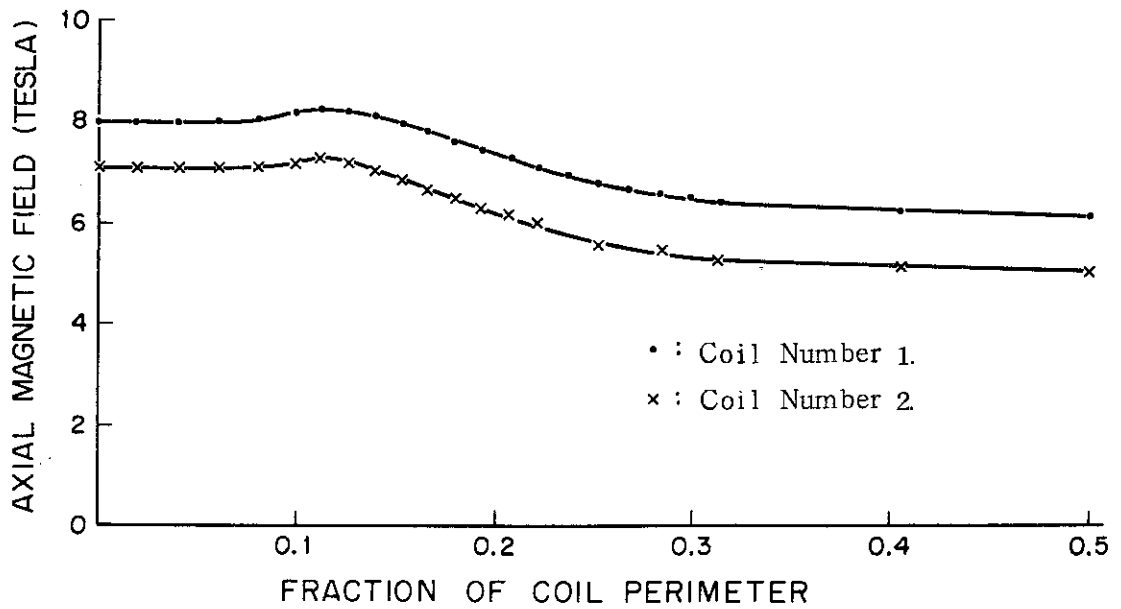


Fig. 4.2 Magnetic Field Distribution along the Coil Inner Perimeter - Coil Number 1. under Normal Test Condition



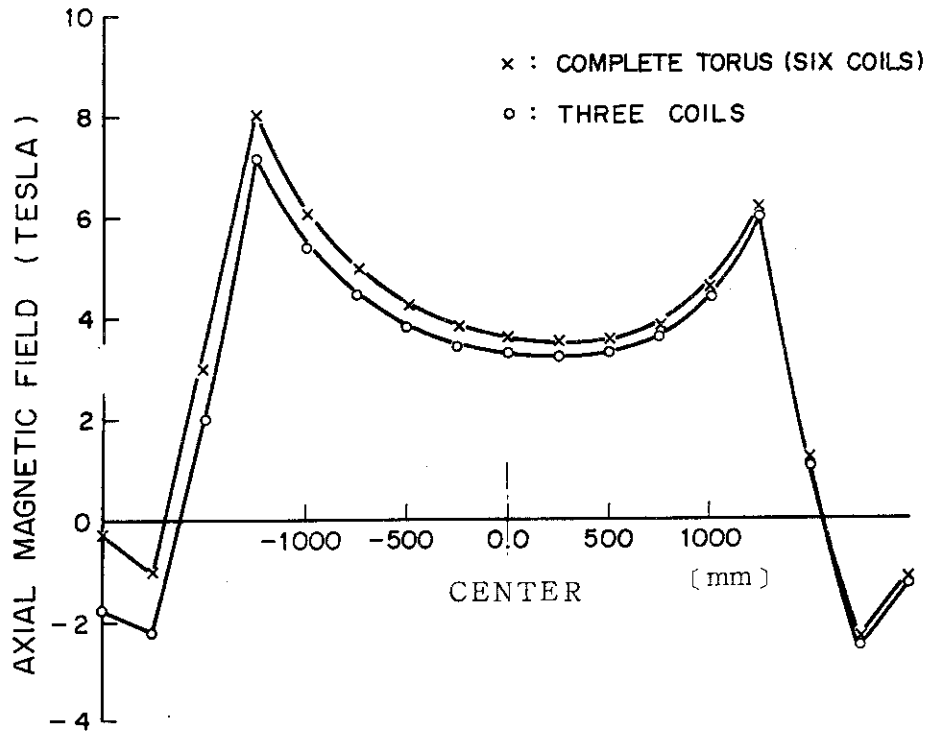
(a) Horizontal Center Line



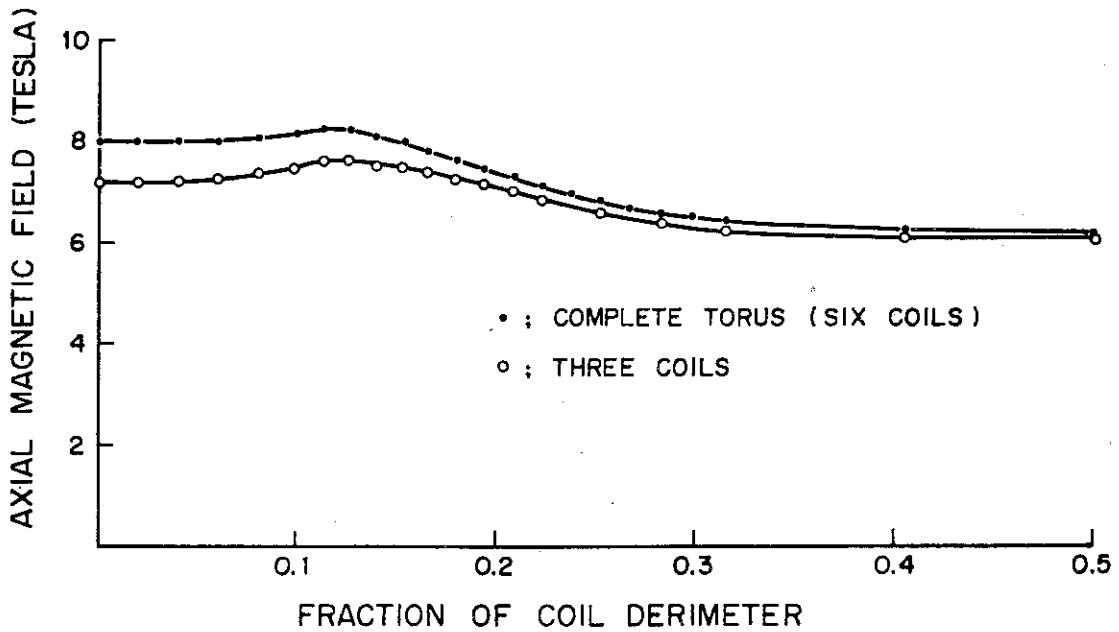
(b) Coil Inner Perimeter

Fig. 4.3 Magnetic Field Comparison of  
Coil Number 2 with Coil Number 1  
under Normal Test Condition





(a) Horizontal Center Line



(b) Coil Inner Perimeter

Fig. 4.4 Magnetic Field Comparison of Three Coil Array with Compact Torus under Normal Test Condition

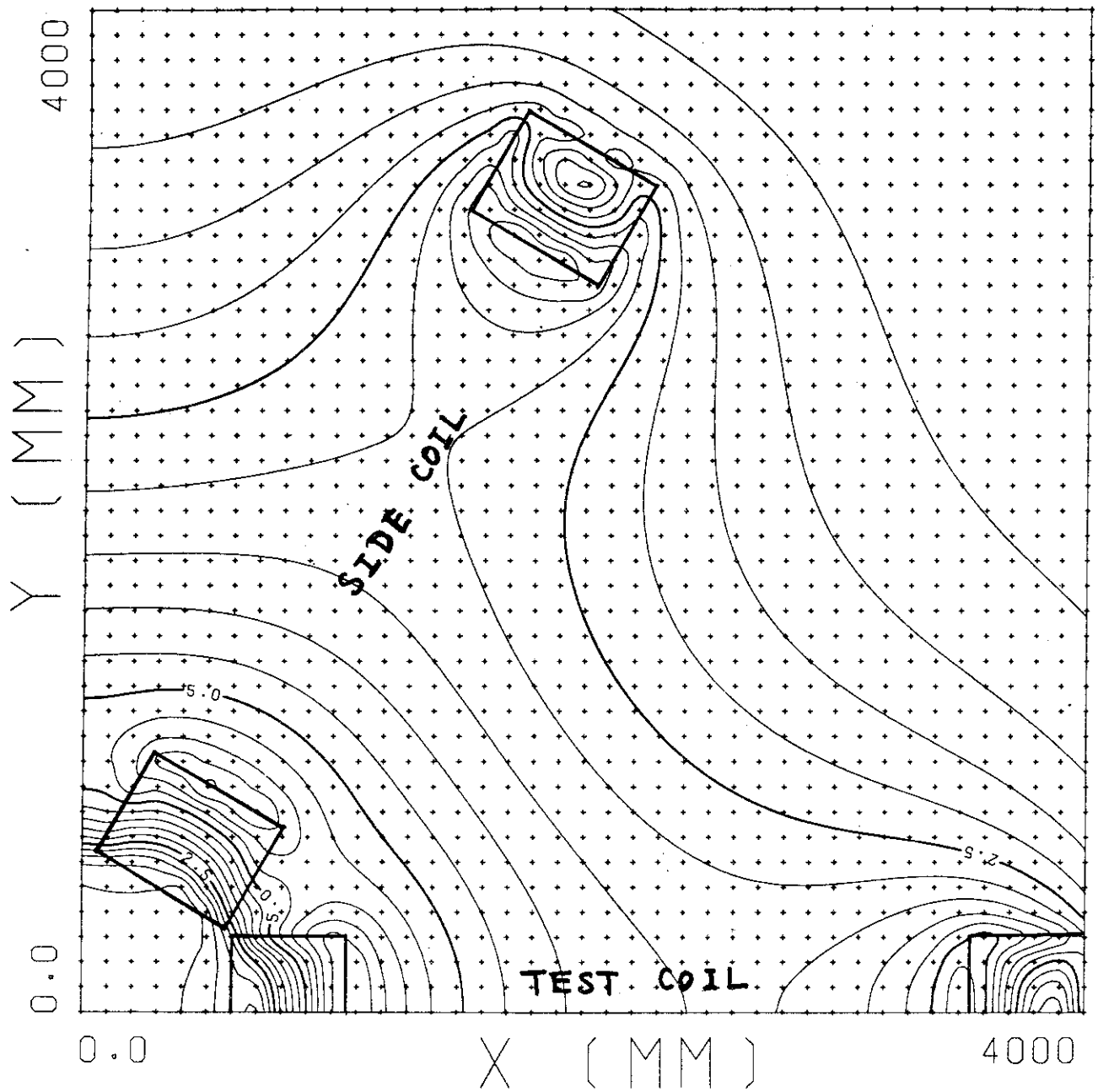


Fig. 45 Magnetic Field Distribution  
at Mid-plane under Normal Test  
Condition

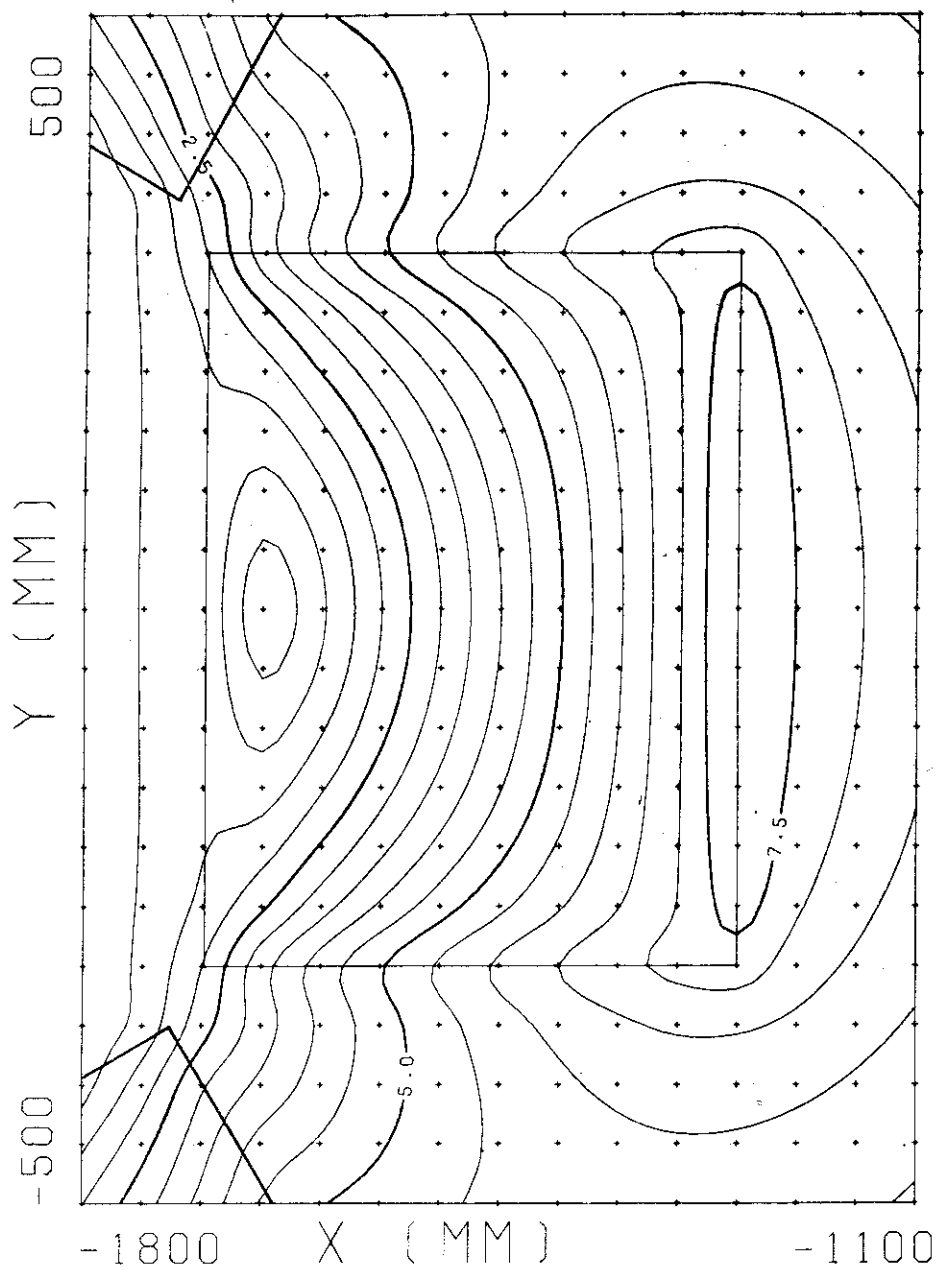


Fig. 4.6 Magnetic Field Distribution  
at Test Coil Mid-plane under Normal  
Test Condition

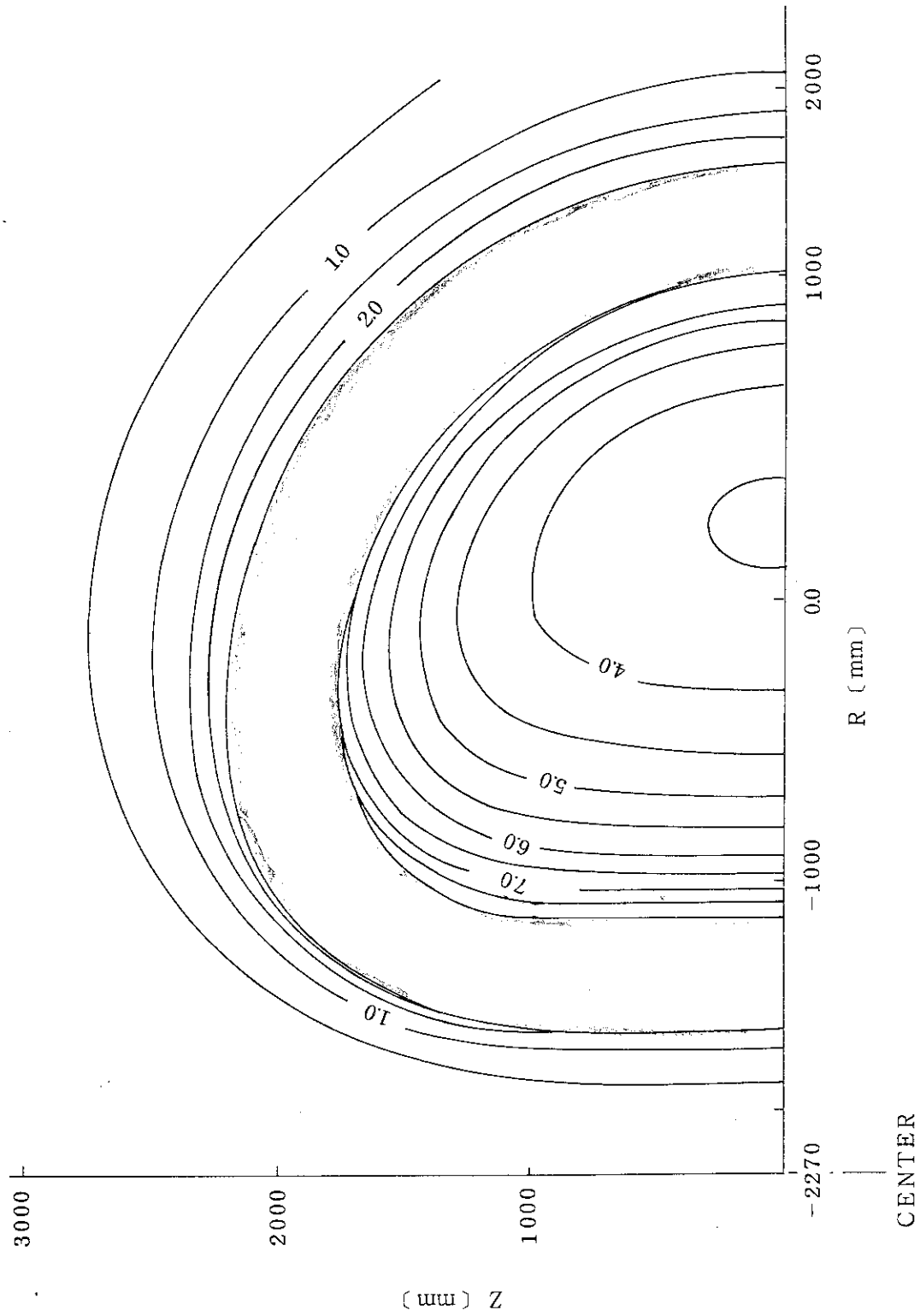


Fig. 4.7 Magnetic Field Distribution at Coil Side-plane under Normal Test Condition

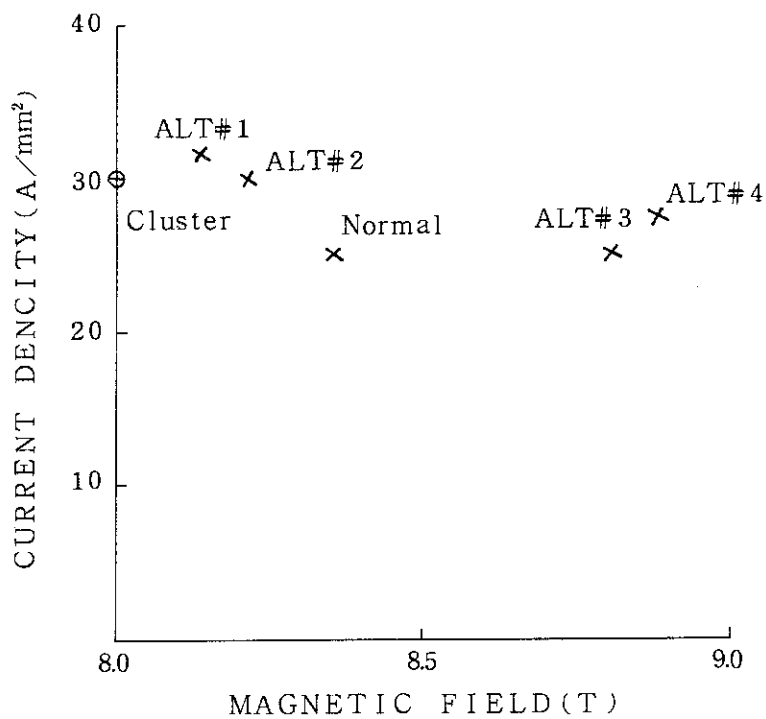


Fig. 4.8 Maximum Magnetic Field and Current Density

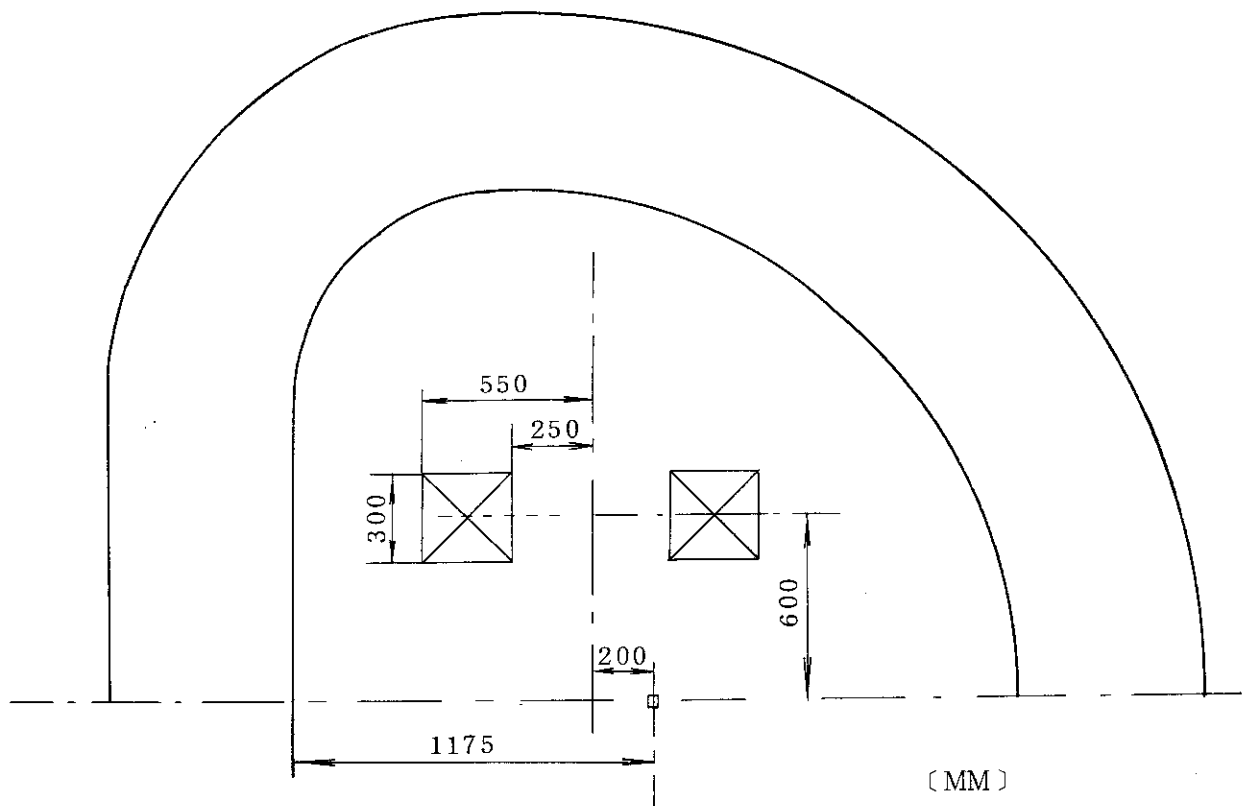


Fig. 4.9 Pulse Coil Geometry

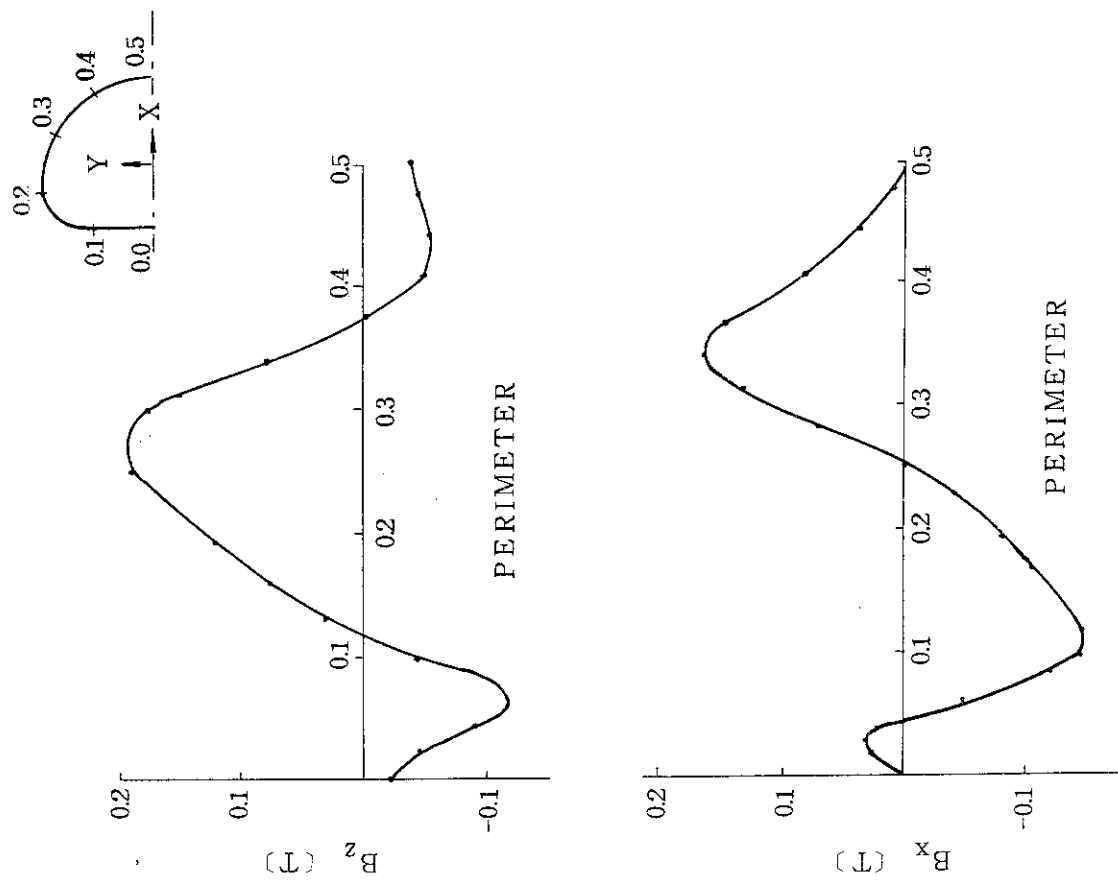


Fig. 4.10 Pulse Magnetic Field Distribution

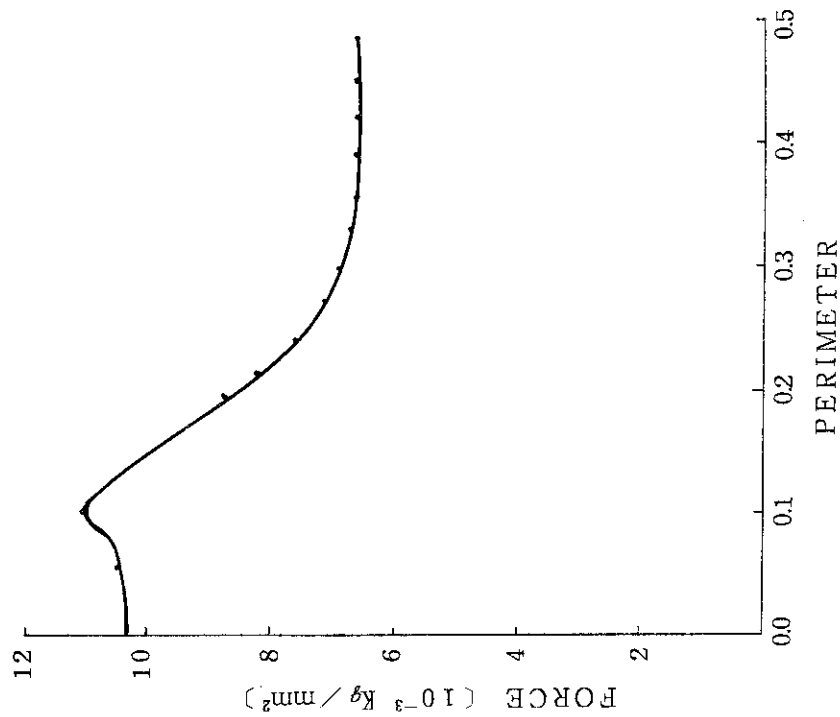


Fig. 4.11 Forces Distribution in Toroidal Coil under Normal Test Condition

## 5. 応力解析

トロイダル・コイルの応力解析で最も重要な点は、使用材料の応力が弾性限界内であるべき補強・支持を決定する事である。超電導磁石は補強・支持を過剰に取りすぎて冷却重量を莫大にして、初期冷却にむやみと時間を要することは望ましくない。又、トカマク型核融合炉は原理的にパルス炉であるので、使用材料の疲労破壊を起す可能性を残すことは許されない。設計上考慮すべき荷重としては次に挙げる点がある。

- (1) トロイダル・コイル自身による電磁力
- (2) ポロイダル・コイルによってトロイダル・コイルに加わる電磁力
- (3) 自重
- (4) 地震及び工事等の水平加重
- (5) 熱応力

これらの荷重条件のうちで最も重要なものは(1)のトロイダル・コイル自身による電磁力である。それについての議論は参考文献(6)に詳しく述べられている。又、(5)の熱応力はまだ不明瞭な点が多く、今後その解析手法を確立する必要があるが、本報告では最も重要な(1)だけを議論する。

なおここで使用した応力解析には三次元有限要素法の計算コード「JAFUSAC<sup>(7)</sup>」を使用した。又、出力結果はすべてフォン・ミーゼス応力 $\sigma_M$ である。この応力は延性材料の破損には有力なものである。 $\sigma_M$ は次式で表わされる。

$$\sigma_M = \left( (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right)^{1/2} / 2$$

### 5. 1 計算モデル

本解析には有限要素法を用い、要素タイプとしては三次元立方体要素を用いている。本計算コードは最大ノード数2000の三次元弾性解析を行う能力を持っている。導体断面の要素の分割及び横断面の分割をFig. 5.1に示し、それぞれの物理定数をTable 5.1に示した。ノード数が多い事が真の応力や変位の結果を与えるが、現時点での計算コードの最大ノード数制限によってこれを以上のより現実的な要素分解は困難である。本報告では補強材の占積率は全体の40%とした。

### 5. 2 支持方式

応力の分布および絶対値は支持の方式により大きく変わってくる。支持方式によっては問題外の数値が出てくる事もある。支持で考慮しなければならない点を次に列挙する。

- (i) 支持の位置
- (ii) 支持の弾性係数

### (iii) 支持の方向性

(ii), (iii) については調査を進めていないが, (i) について述べると Fig. 5.2 に示す様に支持方式の差は歴然と表われている。(a) は D 形コイルの直線部の上下両端の 2 点で支持している。この場合は最大値が顕著に現われている。(b) は (a) の支持に加えて直線部を中心側から支持している。(c) は直線部を中心側から支持し, 自重は下で支えている。以上の三つの例を比較すると, 応力分布が一様に近い (c) が最も良好であるという結論になる。さらに, この解析例から得られた支持方式を現実に製作する場合の問題点と対比しながら最終的なトロイダル・コイルの支持方式が決定される事になる。

## 5.3 応力のヤング率依存性

補強材には SUS 304 L の物理定数を用い, 巻線部には銅の定数を用いて計算した結果 Fig. 5.3 (a) に示す。定数は Table 5.2 に示す。しかし, 超電導コイルは液体ヘリウムの冷却チャンネル及び絶縁材等を含まなければならないので, 巻線部断面中の超電導導体の占積率は 50% と近似してみた。したがって, 巻線部のヤング率を  $1/2$  にした場合を計算したのが Fig. 5.4 (b) である。この場合導体の応力は, ヤング率を  $1/2$  にしたために計算結果を 2 倍しなければならない。

電磁石の巻線部は, 現実にはここで取扱った様な一体物でなく導体を多層に巻き重ねたものであり, その間のすべりやまさつ等がある。したがって, ここで取扱った結果は大きな近似であり, 個々の導体に加わる応力についての問題は更に深く検討する必要がある。そのためには, 導体の一本一本を要素とする莫大な重要数の計算を進めたり, 一方その要素数を増やしながら実験との対応を確認してゆく等の手法が考えられる。

## 5.4 計算例

以上の議論から支持は (c) の方式, 導体のヤング率は (b) の方式を, 今回の解析の代表例とし, その結果を Fig. 5.4 に示す。補強材最大応力  $10.3 \text{ kg/mm}^2$ 、導体内の最大応力は計算値の 2 倍であるから,  $7.0 \text{ kg/mm}^2$  となる。Table 5.2 に示す SUS 304 L の物理量を考慮に入れてもほぼ実現可能である。導体応力は  $7 \text{ kg/mm}^2$  と使用限界を越えているが, 全体の力の  $1/3$  しか担っていないので問題ない。Fig. 5.5 では主応力  $\sigma_1, \sigma_3$ 、及びせん断応力  $\tau$  を示した。

さらに, ポロイダル磁界によって転倒力が生じた場合の応力について調べた。仕様の 0.2 T の磁界をトロイダル・コイルに印加した場合, 応力の変化はほとんど無い。Fig. 5.6 ではポロイダル磁界を 1 T 印加した場合の応力である。これでも応力としては問題ない。

次に, コイルを 3 個で運転した場合の応力解析結果を示す。これは本研究で計画中のクラスター・テスト装置に対応するものである。結果は 3 個のコイルを設計電流値の 100% で運転したもので, 応力は 6 個のコイルによるものとはほぼ一致する。よって, 応力の点からもテスト・コイルは 3 個で実験して十分な結果が得られる事がわかる。3 個のコイルの中央及び側のコイルの応力分布を Fig. 5.7 に示す。



## 5.5 拡張実験の解析

Fig. 2.6に示す拡張実験の応力解析結果をFig. 5.8に示す。数値はTable 4.1にまとめて示した。

それぞれの実験の意味を考察してみると、ALT<sup>#1</sup>及びALT<sup>#2</sup>は単体コイルの場合の実験に近くD型コイル形状にした事が反対に悪く作用している。つまりD形コイルの直線部から最も曲率のきつい所にかけて応力が集中している。ALT<sup>#1</sup>は今回の解析では最も高い14 kg/mm<sup>2</sup>の応力を出している。

次にALT<sup>#3</sup>は、6個のコイルがすべて定格電流で通電されている場合である。この場合はPure Teusien形状の効果が現われて応力集中の無い結果が得られた。ALT<sup>#4</sup>は超電導線材にとっては最も厳しい条件であるが、応力としては12.7 kg/mm<sup>2</sup>となった。さらにALT<sup>#5</sup>からALT<sup>#8</sup>まではコイル欠落時の問題を取扱っており、支持方式が良く数千トンの倒し力があっても大きな応力の発生は見られなかった。最後にALT<sup>#9</sup>は単体試験についてであり、この場合、応力としては大きな値が出なかった。

## 5.6 応力解析の問題点

トカマク型核融合炉のトロイダル・コイルには非常に大きな力が作用する。これに対し、プラズマのパラメーターの設定から幾可学的制約、速やかな初期冷却のため少い重量、材料の経済等の点から検討すべき事が多い。そこでトロイダル・コイルの形状、支持、材料等その他種々の方式を用いて、トロイダル・コイルを破壊させないために応力を使用限界内に押えなければならぬ。本報告書で明らかになった問題点を次に挙げる。

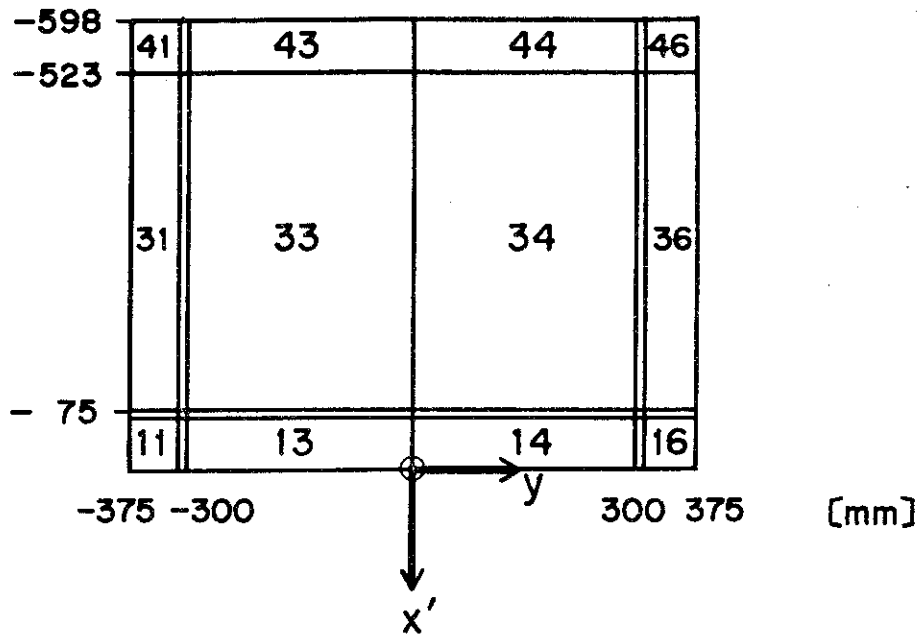
- (1) 有限要素法応力数値解析の実験での実証。
- (2) 集中応力のない形状の選択。
- (3) 現実に合った支持構造の解析及び実験での実証。
- (4) 超電導々体複合材料の材料力学的問題の解明。
- (5) 低温での補強材の物理定数の解明。

Table 5.1 Element and Young's Modulus  
for Stress Analysis

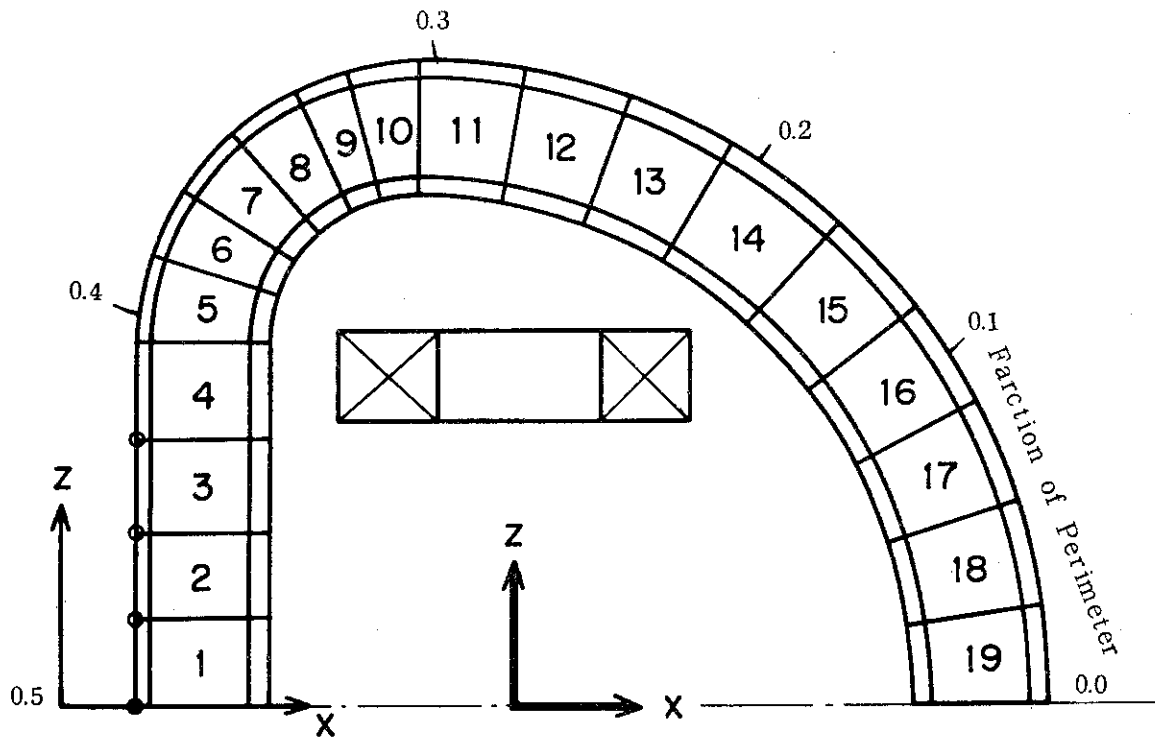
	Element	Young's Modulus [ton/mm <sup>2</sup> ]
Su. +Cu	33,34	14. or 7.
SUS	11,12,13,14,15,16 21, 26 31, 36 41,42,43,44,45,46	20.
Insulator	32, 35	1.3
Gap	23,24	0.

Table 5.2 Properties of SUS304L and OFHC Cu

	Yield Strength [kg/mm <sup>2</sup> ]	Ultimate Strength [kg/mm <sup>2</sup> ]	Young's Modulus [ton/mm <sup>2</sup> ]
SUS304L [297K]	30.1	67.4	19.4
[4K]	41.1	162.0	20.5
OFHC Cu [297K]	3.1	21.1	11.6
[4K]	4.9	42.8	14.1

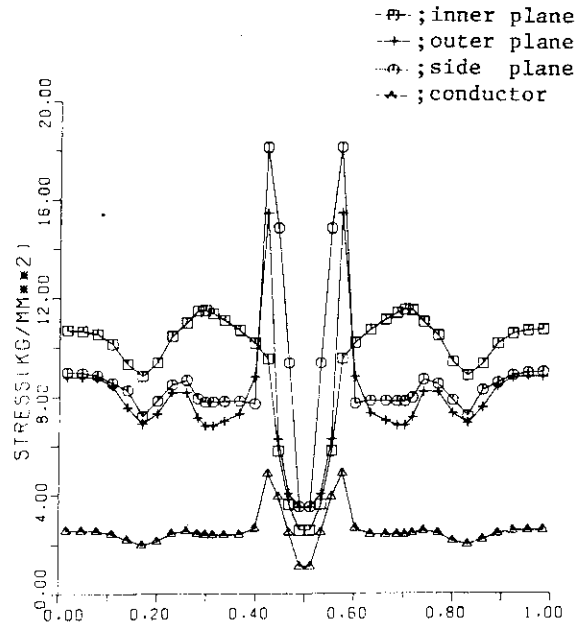


(a) Coil Cross - Section

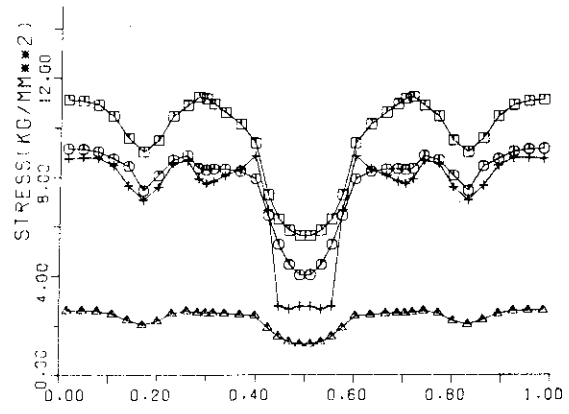


(b) Side View

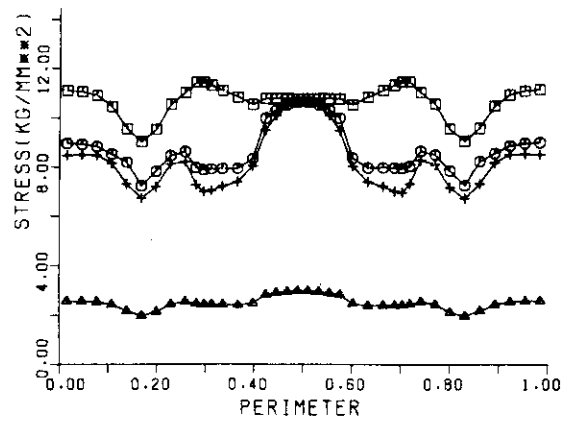
Fig. 5.1 Element for Stress Analysis



(a) 2 point Support



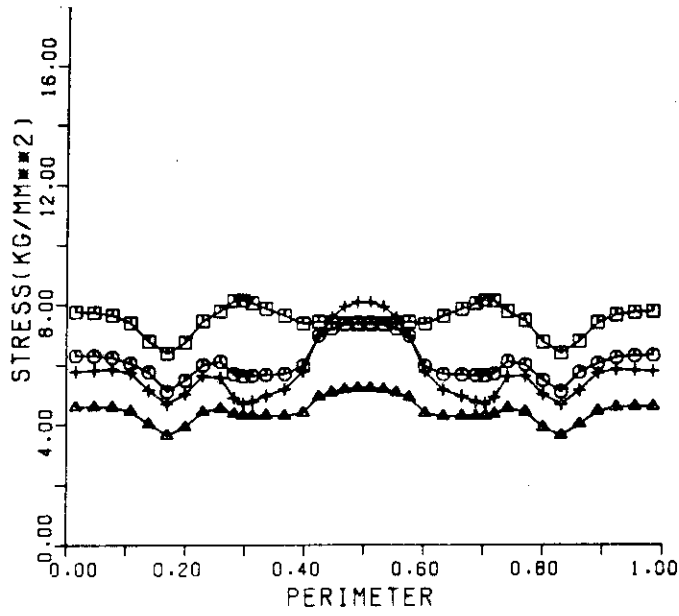
(b) Constant Support No. 1



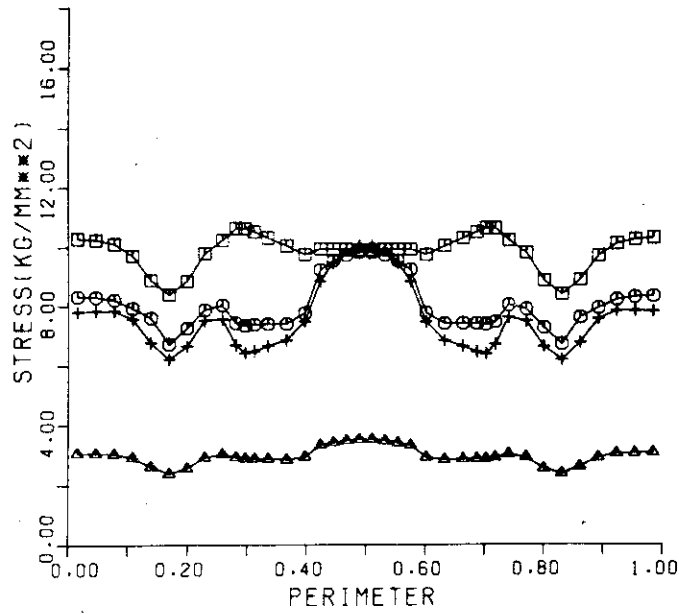
(c) Constant Support No. 2

Fig. 5.2 Stress Distribution Comparison in Different Support Methods

- ; inner plane
- ⊕ ; outer plane
- ; side plane
- ▲ ; conductor



(a)  $E_{con.} = 1.40 \times 10^4 \text{ Kg/mm}^2$



(b)  $E_{con.} = 7.00 \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$

Fig. 5.3 Stress Distribution Comparison in Different Young's Modulus

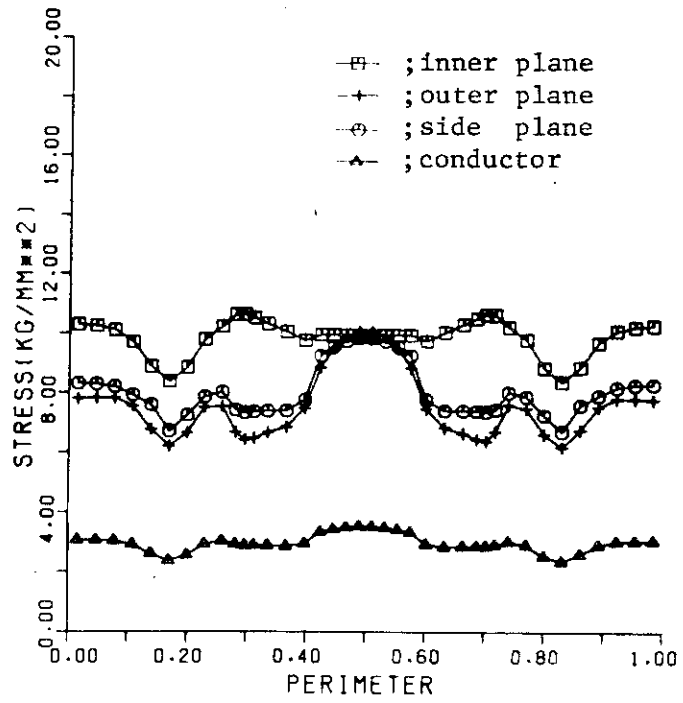
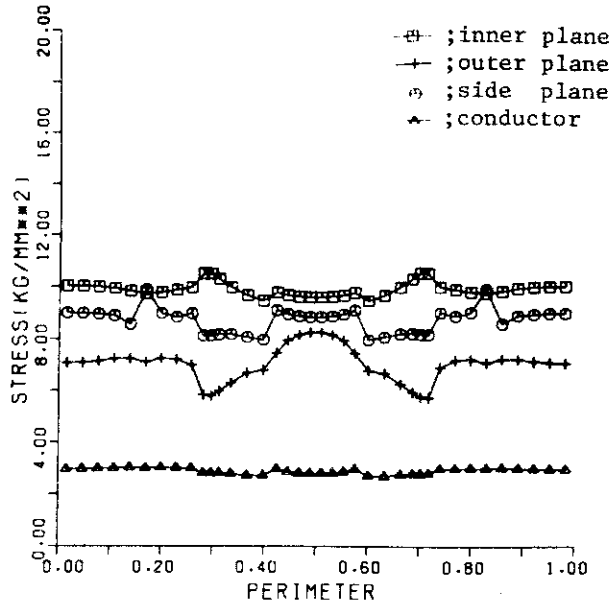
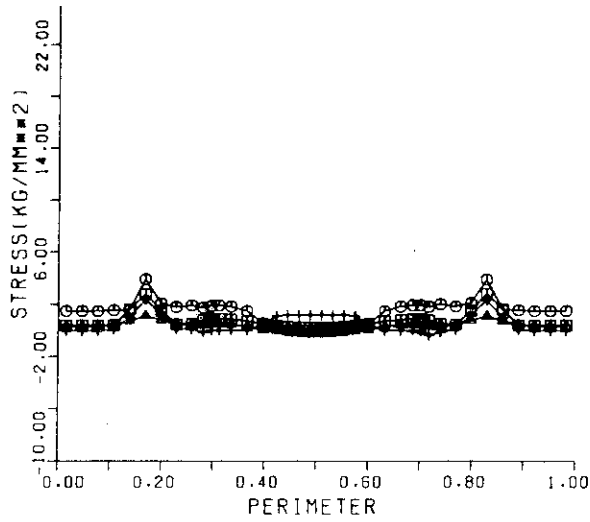


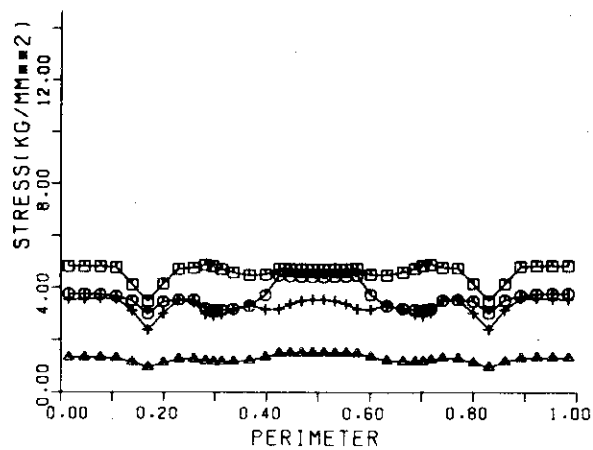
Fig. 5.4 Stress Distribution under Normal Test Condition



(a)  $\sigma_1$



(b)  $\sigma_3$



(c)  $\tau$

Fig. 5.5 Stress Distribution under Normal Test Condition

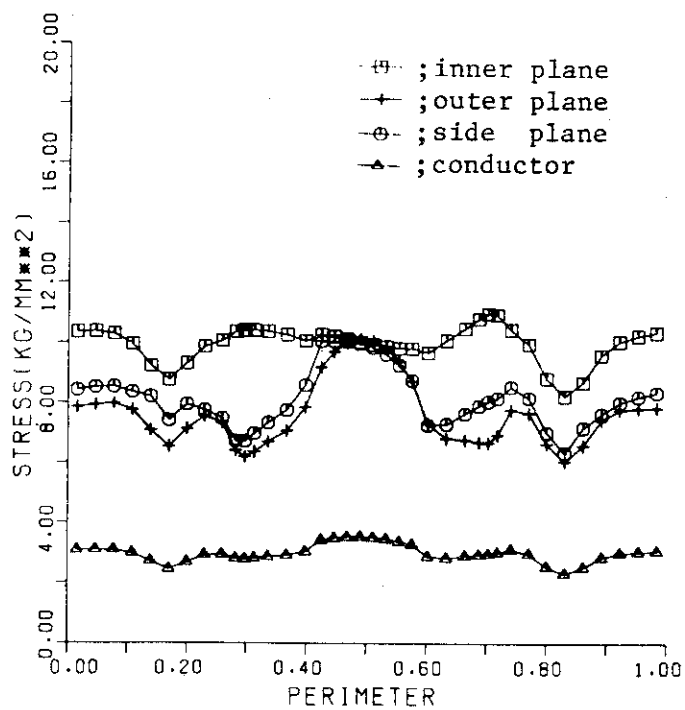
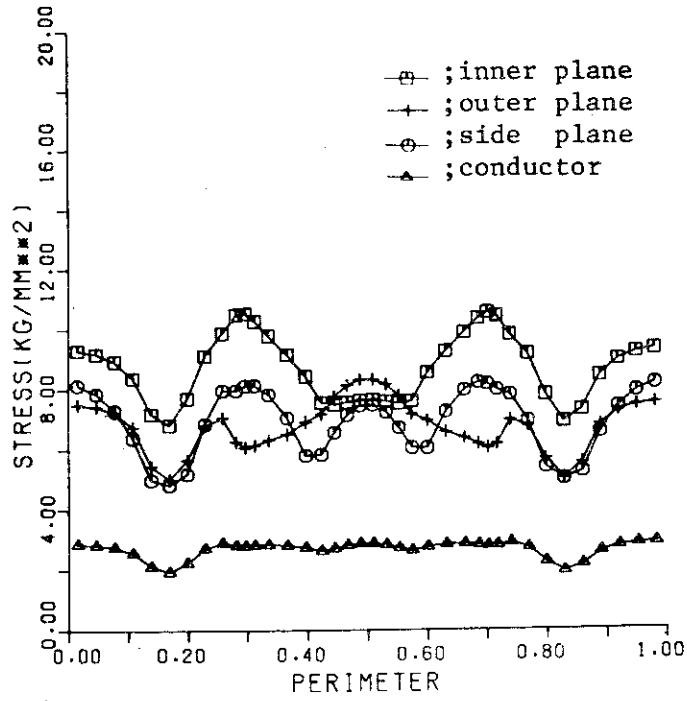
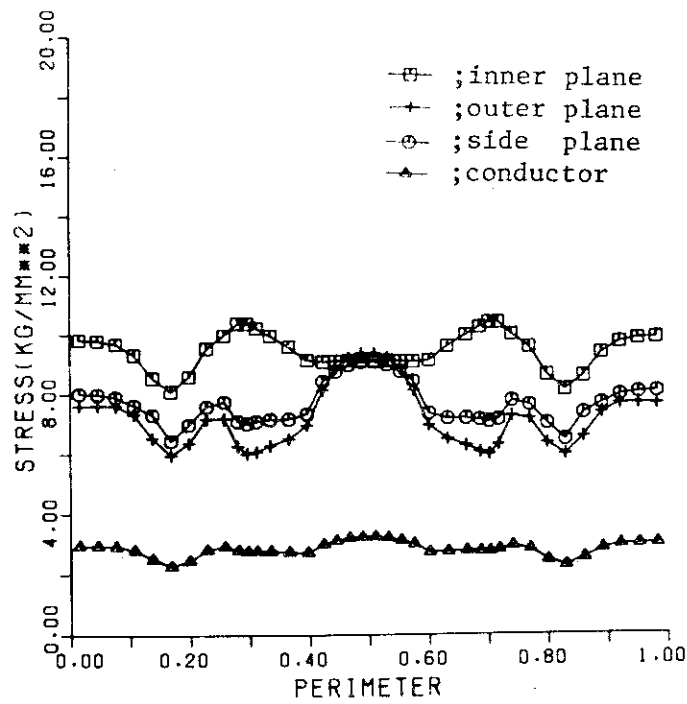


Fig. 5.6 Stress Distribution under Poloidal 1.0 T





(a) Side Coil



(b) Center Coil

Fig. 5.7 Stress Distribution under Three Coils

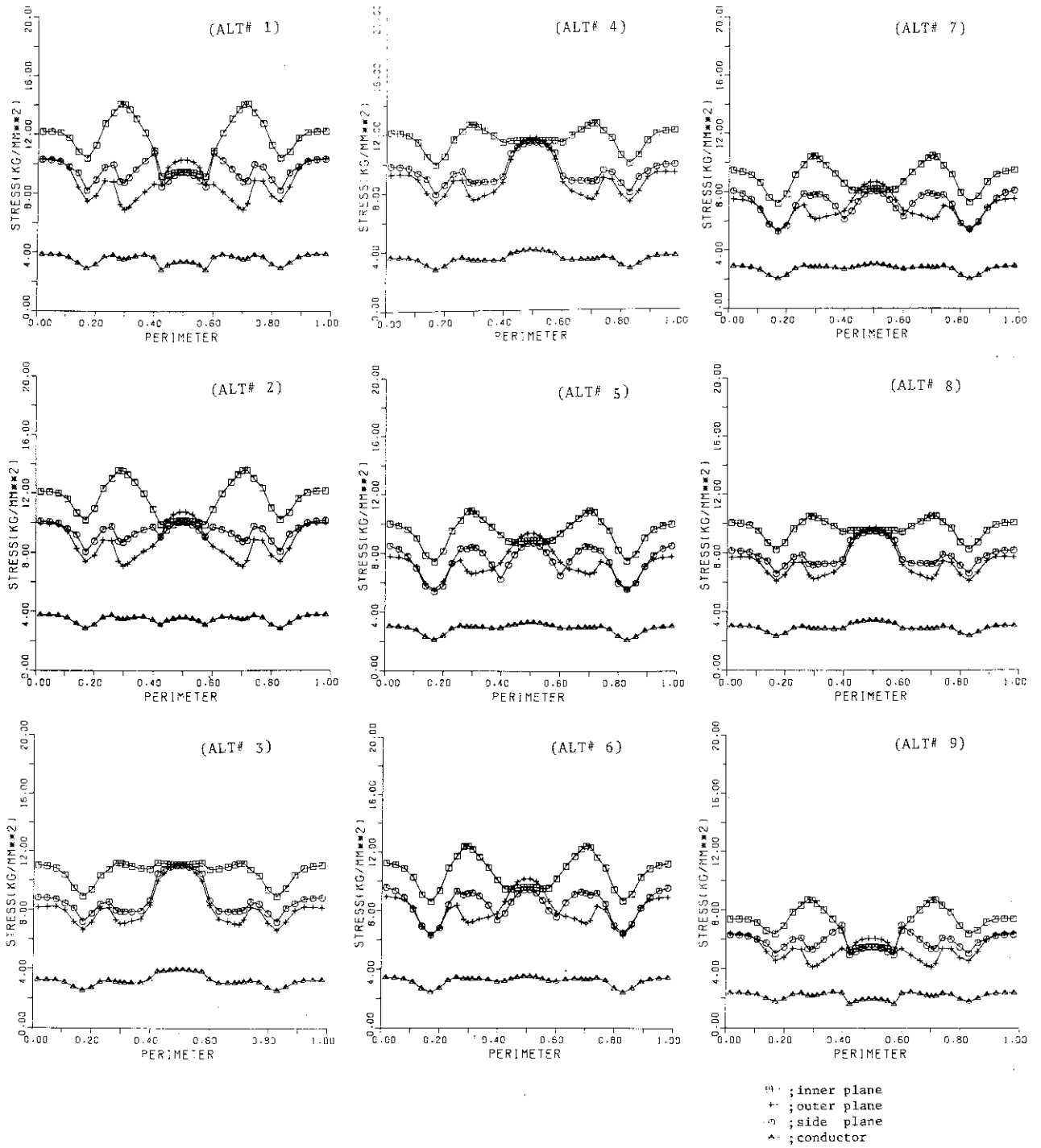


Fig.5.8 Stress Distribution under Extended Test Coil Arrays

## 6. む す び

LCTのトロイダル・コイルの磁界及び応力の解析の結果をまとめると次の点が挙げられる。

### (1) 磁界解析

一般のトロイダル・コイル磁界分布とは数々の点で違がある，

- i) 最高磁界はコイルの肩に発生する。
- ii) 単体コイル自身の磁界が高い。
- iii) 拡張実験での最大磁界は8.9 Tとなった。

という点が判明した。

### (2) 応力解析

今後とも現実に近いモデルでの解析へ発展させなければならないが，

- i) 構造材の最大応力は $14 \text{ kg/mm}^2$ となり，導体の最大応力は $8 \text{ kg/mm}^2$ となった。
- ii) パルス磁界の影響は小さい。

等の結論を得た。

超電導線材にNb-Ti合金を使用するとすれば，非常に厳しい条件であるので，今後とも線材の開発を進めると共に補強材としてのステンレス鋼の低温物性の研究を強力に発展させなければならない。さらに，LCTはトカマク型核融合炉のトロイダル・コイル開発研究の1つの段階であり，JT-60の次期装置のトロイダル・コイルを超電導で製作するための設計手法の確立も大きな目的である。よって，LCTの作業の中での設計研究も大きな項目になるべきである。

## 謝 辞

本報告の作業は，核融合用超電導磁石の開発を熱心に指導されている森 茂核融合研究部長のもとに行なわれたものである。森部長の激励をここに深く感謝します。又，小幡次長には日頃細い点につき指導いただき感謝いたします。本報告で用いたトロイダル・コイル磁界解析・応力計算コード「JAFSAC」の製作は，原研・外来研究員であった西村秀知氏に負う所が多く，特にその取扱い説明と援助について感謝致します。又，当研究室外来研究員細田義門氏にはLCTの仕様の解説につき，種々討論していただいた点に感謝致します。

## 6. む す び

LCTのトロイダル・コイルの磁界及び応力の解析の結果をまとめると次の点が挙げられる。

### (1) 磁界解析

一般のトロイダル・コイル磁界分布とは数々の点で違がある、

- i) 最高磁界はコイルの肩に発生する。
- ii) 単体コイル自身の磁界が高い。
- iii) 拡張実験での最大磁界は8.9 Tとなった。

という点が判明した。

### (2) 応力解析

今後とも現実に近いモデルでの解析へ発展させなければならないが、

- i) 構造材の最大応力は $14 \text{ kg/mm}^2$ となり、導体の最大応力は $8 \text{ kg/mm}^2$ となった。
- ii) パルス磁界の影響は小さい。

等の結論を得た。

超電導線材にNb-Ti合金を使用するとすれば、非常に厳しい条件であるので、今後とも線材の開発を進めると共に補強材としてのステンレス鋼の低温物性の研究を強力に発展させなければならない。さらに、LCTはトカマク型核融合炉のトロイダル・コイル開発研究の1つの段階であり、JT-60の次期装置のトロイダル・コイルを超電導で製作するための設計手法の確立も大きな目的である。よって、LCTの作業の中での設計研究も大きな項目になるべきである。

## 謝 辞

本報告の作業は、核融合用超電導磁石の開発を熱心に指導されている森 茂核融合研究部長のもとに行なわれたものである。森部長の激励をここに深く感謝します。又、小幡次長には日頃細い点につき指導いただき感謝いたします。本報告で用いたトロイダル・コイル磁界解析・応力計算コード「JAFSAC」の製作は、原研・外来研究員であった西村秀知氏に負う所が多く、特にその取扱い説明と援助について感謝致します。又、当研究室外来研究員細田義門氏にはLCTの仕様の解説につき、種々討論していただいた点に感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) P. H. Haubenreich, W. C. Anderson, et al., "Plan for the Large Coil Program", ORNL/TM-5824 (Feb. 1977)
- (2) JT-4 Group, "JT-4 Program", JAERI-M 6666 (1976)
- (3) J. File, R. G. Mills, and G. V. Sheffield, "Large Superconducting Magnet Designs for Fusion Reactors", MATT-848 (June 1971)
- (4) F. Wittgenstein, "Development Program for the Magnet of the European 3.7m Bubble Chamber (BEBC)", Proc. of 1968 Summer Study on Superconducting Devices
- (5) S. Shimamoto, K. Yashukochi, et al., "A Design Study of Cluster Test Apparatus", MT-6 (1977)
- (6) H. Nishimura and S. Shimamoto, "NUMERICAL STRESS ANALYSIS OF TOROIDAL COIL BY THREE DIMENSIONAL FINITE ELEMENT METHOD", JAERI-M 7364 (Oct. 1977)
- (7) H. Nishimura and S. Shimamoto, "JAFUSAC manual" Internal memo