

JAERI-M

6 5 5 2

臨界プラズマ試験装置(JT-60)における
ポロイダル・コイル類の基本配置

(臨界プラズマ試験装置設計報告：XXII)

1976年5月

相川裕史・二宮博正・亀有昭久*・鈴木康夫

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、お申しこしてください。

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.

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) における
ポロイダル・コイル類の基本配置
(臨界プラズマ試験装置設計報告: XXII)

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部
相川裕史・二宮博正・亀有昭久*・鈴木康夫
(1976年4月27日受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) の詳細設計においてグラフィック・ディスプレイを使ったダイアログ型式の計算コード (POPOCO GRADIS) によって, ポロイダル・コイル類 (変流器コイル, 垂直磁場コイル, 四重極磁場コイル, 水平磁場コイル) の基本配置を決定した。変流器コイルの漏れ磁場は26G程度に押さえられるが, 2cmの各コイル設置誤差がランダムにあるとすると, プラズマ周辺で150G程度になると予想される。他の制御用磁場は, 目的関数の5%以内に, 押さえられる。

* 外来研究員: 三菱原子力工業大宮研究所

Standard Positions of the Poloidal Coils in Large Tokamak JT-60

Hiroshi AIKAWA, Hiromasa NINOMIYA, Akihisa KAMEARI*, and Yasuo SUZUKI

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

(Received April 27, 1976)

In detailed design of large Tokamak JT-60, standard positions of the poloidal coils (transformer, vertical field, quadrupole field, and horizontal field) have been determined by code POPOCO GRADIS using a graphic display. It is possible to suppress the stray field due to a current flowing through the transformer coils below 26 G at plasma periphery. however, it becomes as high as 150 G when the position of each transformer coil has a setting error of 2 cm in random directions.

The other control fields can be held within 5 % of the objective functions.

* On leave from Mitsubishi Atomic Power Industries Inc., Omiya

目 次

1. まえがき	1
2. 方法と結果	1
2.1 変流器コイル	1
2.2 垂直磁場コイル	4
2.3 四重極磁場コイル	4
2.4 水平磁場コイル	5
3. あとがき	5

1. ま え が き

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) の詳細設計において、ポロイダル・コイル類 (空心変流器コイル, 垂直磁場コイル, 四重極磁場コイル, 水平磁場コイル) の基本配置を決定したので, ここで, その経過と問題点を述べて今後の設計の参考としたいと思います。

2. 方法 と 結果

方法としては, グラフィック・ディスプレイによって, コイルの位置を適当に置き換えて, try and error で, 最適位置を求めた。¹⁾ 変流器コイルに関しては非線型計画法等^{2), 3)} で小林 (朋) 氏等が求めたコイル配置を第ゼロ近似として, 使用し, これをグラフィック・ディスプレイで, 更に他のコイルとの位置的な相互作用を避け, 精密化するという方法を採用した。というのは, 初めからグラフィック・ディスプレイで求めるには, コイル数が多くて, 自由度がありすぎて時間がかかりすぎるという欠点に依るものである。その他の制御用ポロイダル・コイル類 (垂直磁場コイル, 四重極磁場コイル, 水平磁場コイル) については, 水平面での目的関数を, それぞれ設定し, try and error によって, それに近づけるという方法を採用した。コイル配置を決定するにあたって, 留意した点は

1. 誤差磁場 (基準磁場からのずれ) を可能な限り, 押さえる事
2. ポートをなるべく大きくとる様にする事
3. 真空排気用排出口には, コイルを置かない事
4. コイル内の電流分布を考慮する事
5. コイル組立を考慮して, ターン数を小さくする事

である。

2.1 変流器コイル

小林 (朋) 氏等の求めた, 60 ターン用のコイル配置 (Fig. 1, Fig. 2, 表1) を基にして, これから出発した。Fig. 1 によると, 漏れ磁場の最大値 (B_{\max}) は, 12.9 G と算出されている。ところが, Fig. 1, Fig. 2 の磁場配位は, それぞれのコイルの中心位置のみに, 集中的にコイル電流が流れるという1線電流近似で求めたものである。実際には, コイルはFig. 1 に図示してある如く, かなりの断面積であり, 1線電流近似では, 誤差もかなり大きいものと推測される。そこで我々は, 1コイルを縦横にいくつかのメッシュに切り, そのメッシュ点にそれぞれ分割されたコイル電流を流す事によって, 一様電流分布に近似する方法をとった。少くとも, 変流器コイル電流の変化が小さい時は, 実際の電流分布に近いと思われるからである。Fig. 3 ~ Fig. 7 が, それに対する磁場配位である。Fig. 2 の1線電流近似による磁場配位によると, 確かに漏れ磁場はプラズマ周辺で14 G程度であるが, Fig. 3 (メッシュ数 $2 \times 2 = 4$) によると, $B_{\max} \cong 6.8$ G と増大する。以下

1. ま え が き

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) の詳細設計において、ポロイダル・コイル類 (空心変流器コイル, 垂直磁場コイル, 四重極磁場コイル, 水平磁場コイル) の基本配置を決定したので, ここで, その経過と問題点を述べて今後の設計の参考としたいと思います。

2. 方法と結果

方法としては, グラフィック・ディスプレイによって, コイルの位置を適当に置き換えて, try and error で, 最適位置を求めた。¹⁾ 変流器コイルに関しては非線型計画法等^{2), 3)} で小林 (朋) 氏等が求めたコイル配置を第ゼロ近似として, 使用し, これをグラフィック・ディスプレイで, 更に他のコイルとの位置的な相互作用を避け, 精密化するという方法を採用した。というのは, 初めからグラフィック・ディスプレイで求めるには, コイル数が多くて, 自由度がありすぎて時間がかかりすぎるという欠点に依るものである。その他の制御用ポロイダル・コイル類 (垂直磁場コイル, 四重極磁場コイル, 水平磁場コイル) については, 水平面での目的関数を, それぞれ設定し, try and error によって, それに近づけるという方法を採用した。コイル配置を決定するにあたって, 留意した点は

1. 誤差磁場 (基準磁場からのずれ) を可能な限り, 押さえる事
2. ポートをなるべく大きくとる様にする事
3. 真空排気用排出口には, コイルを置かない事
4. コイル内の電流分布を考慮する事
5. コイル組立を考慮して, ターン数を小さくする事

である。

2.1 変流器コイル

小林 (朋) 氏等の求めた, 60 ターン用のコイル配置 (Fig. 1, Fig. 2, 表1) を基にして, これから出発した。Fig. 1 によると, 漏れ磁場の最大値 (B_{\max}) は, 12.9 G と算出されている。ところが, Fig. 1, Fig. 2 の磁場配位は, それぞれのコイルの中心位置のみに, 集中的にコイル電流が流れるという1線電流近似で求めたものである。実際には, コイルはFig. 1 に図示してある如く, かなりの断面積であり, 1線電流近似では, 誤差もかなり大きいものと推測される。そこで我々は, 1コイルを縦横にいくつかのメッシュに切り, そのメッシュ点にそれぞれ分割されたコイル電流を流す事によって, 一様電流分布に近似する方法をとった。少くとも, 変流器コイル電流の変化が小さい時は, 実際の電流分布に近いと思われるからである。Fig. 3 ~ Fig. 7 が, それに対する磁場配位である。Fig. 2 の1線電流近似による磁場配位によると, 確かに漏れ磁場はプラズマ周辺で14 G程度であるが, Fig. 3 (メッシュ数 $2 \times 2 = 4$) によると, $B_{\max} \cong 6.8$ G と増大する。以下

	メッシュ数	B_{max} (G)
(Fig. 4)	$3 \times 3 = 9$	~ 80
(Fig. 5)	$4 \times 4 = 16$	~ 85
(Fig. 6)	$5 \times 5 = 25$	~ 85.5
(Fig. 7)	$9 \times 9 = 81$	~ 90

となり、メッシュ数81では、90Gにも達する。すなわち、1線電流近似では正確な磁場配位は得られないものと考えられる。Fig. 8に、メッシュ数と漏れ磁場の関係を示す。これによると、漏れ磁場は ~ 90 G程度に収束するものと思われる。しかし、メッシュ数が多い事は、精度は上がるが計算時間が、甚しく増大する。(Fig. 7の計算に要した時間：1620秒)故に、今後我々はメッシュ数を16にして、変流器コイル配置のみならず、他の制御用ポロイダル・コイル配置の決定を行った。これによる誤差は、5.6%程度存在するが精度を上げるために、いたずらに計算時間を多くとっても仕方がないので、メッシュ数16での計算結果に、1.056倍のファクタを乗じてやれば、事足りると考えられる。

以上の事を考慮に入れて、変流器コイルの基本配置を決定した。Fig. 9と表2にその配置図と数値を示す。Fig. 10に漏れ磁場の強さを示す。Fig. 11に、水平面での漏れ磁場の B_z 成分を示す。プラズマ周辺で $B_{max} \sim 25$ Gとわかる。(実際には $25 \times 1.056 = 26.4$ Gと思われる。)これによると、変流器コイルによる漏れ磁場が25 \sim 26Gに押さえられる様に思われるが、以下に述べる様にいくつかの問題点が存在し、実際に組立した後のコイル配置による漏れ磁場を26G程度に押さえる事は不可能に近い。

1. コイル形状は漏れ磁場に大きい影響を与える。たとえば、コイルF8 (Fig. 9)を中心位置は変えずに、コイル形状のみを変化させたとする(水平面に対して上下対称のコイルF8'も同時に形状変化を行っている。)

$$\text{Fig. 12 } (\Delta X = 0.45 \text{ m, } \Delta Y = 0.08 \text{ m}) \rightarrow B_{max} \sim 105 \text{ G}$$

$$\text{Fig. 13 } (\Delta X = 0.08 \text{ m, } \Delta Y = 0.45 \text{ m}) \rightarrow B_{max} \sim 60 \text{ G}$$

となり、Fig. 10の25Gに対して、Fig. 12の場合は4.2倍、Fig. 13の場合は2.4倍の漏れ磁場が発生する。Fig. 9のコイルF8を単に横向きにただけでも($\Delta X = 0.24$ m, $\Delta Y = 0.15$ m) B_{max} は50G発生する。

2. トーラス内側コイル(F7 \sim F16)の位置誤差は漏れ磁場に大きい影響を与える。(特にF7, F8のみ著しい。)

たとえば、F16 (F16'も)をFig. 9の位置に対して水平方向に1cmずらしたとすると、

$$\text{Fig. 14 } (X = 1.531 \text{ m, } Y = 0.061 \text{ m}) \rightarrow B_{max} \sim 32 \text{ G}$$

$$\text{Fig. 15 } (X = 1.511 \text{ m, } Y = 0.061 \text{ m}) \rightarrow B_{max} \sim 34 \text{ G}$$

となり、Fig. 14, Fig. 15の場合、Fig. 10に対して、漏れ磁場が、それぞれ28%、36%の増加となる。以下にFig. 9における変流器コイルの配置に対して、1コのコイル(同時に、水平面に関して上下対称のコイルも)をX方向に1cm、或いは、Y方向に1cmずらした場合の漏れ磁場の強さ(B_{max})を示す。

(単位: ガウス)

コイル番号	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
X方向に+1 cm	24	25	27	27	29	30	55	43
Y方向に+1 cm	25	25	25	25	25	25	40	32

F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
24	26	27	29	29	30	30	32
25	25	25	25	25	24	25	25

上の様より明らかな様に特にF7, F8のコイルが他と比べて, 大きい影響を与える。これはFig. 12より明らかな様に B_{max} を与える点が($X \cong 2.4$ m, $Y = 0.7$ m)付近にあり, これはF7, F8のコイルに最も近い点であり, この付近の磁場配位が B_{max} を与えている事によるものである。また, 上の表より外側コイル(F1~F6)の位置誤差は, 漏れ磁場にあまり影響を与えない事がわかる。この事より, 内側コイルの組立誤差は小さく押さえる必要がある。特に, F7, F8のコイルの組立には精度を必要とする。しかし, プラズマ中心部分の誤差磁場は, いずれの場合でも, 5 G以下であり, これは上下対称のコイルを動かしているので, 水平面付近はちょうど磁場の変動が, 打消し合って, その影響が小さくなると思われる。その結果, プラズマ周辺のみ, コイルの動いた影響が, 単純にでてくると思われる。

3. 上記1, 2において, コイル形状, コイル設置誤差が漏れ磁場に影響を与える事がわかったので, 全コイルの集積効果が, プラズマ中心に及ぼす影響も無視できない。

あるコイル(例えばF3)がd(m)の設置誤差を含むとすると, r(m)離れた所の誤差磁場は ΔB (T) $\sim \mu_0 I d / 2\pi r^2$ の程度となる。I=320KA, d=0.02m, r=0.3m(プラズマ周辺)で, $\Delta B \sim 142$ Gとなる。プラズマ中心位置では(r $\cong 1.5$ m), $\Delta B \cong 6$ Gとなる。プラズマ中心位置への誤差磁場は, 各コイル共通して6 G程度作るとすると, 32本のコイルがあるので, 全体で $6 \times \sqrt{32}$ G $\cong 34$ G程度が予想される。プラズマ周辺の誤差磁場に対しては, 全コイルの集積効果よりも, むしろ, B_{max} を与える点の付近のコイルの設置誤差で決まっており, 150 G程度と考えられる。

以上の問題点を克服して, 変流器コイルによる漏れ磁場を100 G以内に押さえる事はかなり困難な事と思われる。しかし, 周辺での漏れ磁場の大きさは, プラズマの断面形状にはそれ程大きな影響を与えないかもしれない。というのは, Fig. 7の磁力線図が示している如く, 一番問題となるポロイダル・リップルを考えると, モード数mがかなり大きく, m $\cong 6 \sim 7$ と考えられる。この磁場によるプラズマの変動巾 Δr_m は,

$$\Delta r_m / r_p \cong \tilde{B}_m / (m-1) B_p$$

(r_p : プラズマ半径, \tilde{B}_m : ポロイダル磁場の変動分, B_p : ポロイダル磁場)

で与えられ, \tilde{B}_m がある程度大きくても, mが大きければあまり効かない。($B_p = 6.7$ KG, $\tilde{B}_m \cong 200$ G, m=6とすると, $\Delta r_m / r_p \sim 6 \times 10^{-3}$) 幸いな事に, プラズマ中心での漏れ磁場は,

3.4.G程度ならば、問題はないと考えられる。

2.2 垂直磁場コイル

目的関数として、 $Y=0$ の水平面上において

$$X=2.0\text{ m} \rightarrow B_z=4.33\text{ KG}$$

$$X=4.2\text{ m} \rightarrow B_z=3.6\text{ KG}$$

なる値を設定し、その間を直線で結んだ関数を採用した。これは、プラズマ中心 $X=3.1\text{ m}$ で $B_z=3.932\text{ KG}$ を与えるものであり、その点での n -値は 0.259 であり、この値は平衡計算から算出した値⁴⁾ ($n=0.4\sim 0.5$)より、かなり低く $n=0.259$ は電流分布がパラボリックで、 β_p が 1.3 ぐらいの円断面プラズマに相当し、水平方向の安定性を高めようとした結果である。ところが実際に、グラフィック・ディスプレイによって、目的関数に近い磁場配位を達成するのは、変流器コイル配置後にポートを大きくとろうとすると、困難であり、結局Fig. 16, Fig. 17, Fig. 9, 表2に示す様な磁場配位となった。この配位におけるプラズマ中心での n -値 $=0.522$ となる。この値は平衡計算によると、⁴⁾電流分布がパラボリックで $\beta_p=0.25$ の場合の値に相当する。故に、電流維持時間で平衡からずれた場合には、四重極磁場コイル、水平磁場コイルでの補正でおぎなう。垂直磁場コイルは、変流器コイルよりも位置誤差には、鈍感であり表2の位置より、各コイルを 1 cm 動かした程度では磁場配位は変化なく、 5 cm 程度ではじめて影響が現われる。Fig. 18~Fig. 23にそれぞれ、V1, V4, V7をFig. 9の配置に対してX方向に、 5 cm ずらした場合の磁場配位を示す。これによると、V4の変化に対しては影響は殆んどなく、V1とV7の変化に対して特にずらしたコイル付近の磁場配位の変化が激しい。V1コイルの変化に対しては、 $R=2.1\text{ m}$ 付近で n の符号が、逆転してしまう部分もでてくる。

2.3 四重極磁場コイル

目的関数として $Y=0$ の水平面上において

$$X=2.0\text{ m} \rightarrow B_z=660\text{ G}$$

$$X=4.2\text{ m} \rightarrow B_z=-660\text{ G}$$

なる値を設定し、その間を直線で結んだ関数を採用した。これはプラズマ中心 $X=3.1\text{ m}$ で、 $B_z=0\text{ G}$ を与えるものであり、垂直磁場コイルによる垂直磁場にプラズマ端で、約 20% の摂動を与えるものであり、これによる n -値の変化は、プラズマ中心で $-0.11\sim 0.93$ 程度まで変えられる訳である。この目的関数に、一致させるべく、グラフィック・ディスプレイにおいて、試行錯誤をくり返した結果、得られた配位をFig. 24, Fig. 25, Fig. 9, 表2に示す。Fig. 25によると、プラズマ中心で $B_z=40\text{ G}$ 程度存在し、かつターン数が 68 ターンである。この配位を詳細設計用の基本配位としたが、後にこれを改良し、ターン数を 20 ターンに減少させ、プラズマ中心での $B_z\approx 15\text{ G}$ と、 0 G に近づける事ができた。この改良型の磁場配位をFig. 26, Fig. 27, Fig. 28 表3^{*}に示す。四重極磁場コイルの中心位置誤差は、垂直磁場コイルと同じく、 1 cm 程度では変化がなく、 5 cm 程度で影響がでてくる。

* その後の設計の進展に伴い、5月20日(51年)現在で表4の設計値を得ている。

2.4 水平磁場コイル

目的関数として、 $Y=0$ の水平面において

$$B_R (G) = 600/X(m)$$

を設定した。これは $B_Z=0$ をあらわし、 B_R が Z の値に依存しない事を示している。即ち、水平磁場成分のみの磁場配位をあらわす。プラズマ中心で $B_R \approx 193.5G$ となり、 $X=2.1m$, $4.2m$ のプラズマ周辺で、それぞれ、 $285.7G$, $142.9G$ を示す。プラズマ中心で、 $193.5G$ と設定したのは、もし垂直方向に $4Z$ だけプラズマが変位した際にもとに戻すのに必要な B_R は、

$$B_R \approx n \cdot B_Z \cdot 4Z/R$$

と置けるので、2.2節で求めたプラズマ中心での、 $n=0.522$, $B_Z=3.93KG$ を代入してやると $4Z=0.29m$ の時、 B_R は、 $193.5G$ になる。即ち、垂直方向に約30cm程度はもとに戻せる訳である。この目的関数に一致させるべく、グラフィック・ディスプレイによって試行錯誤をくり返した結果得られた配位を、Fig. 29, Fig. 30, Fig. 9, 表2に示す。

水平磁場コイルの中心位置誤差は、垂直磁場コイルと同じく1cm程度では影響はなく、5cm程度で10%程度の誤差が生じる。

3. あとがき

変流器コイルの漏れ磁場が意外と大きく、もし設計通り組み立てられれば、26Gで押さえられるが、1cmの誤差が生ずると、100Gぐらいの漏れ磁場になり、水平磁場コイルによる水平磁場と、プラズマ周辺で同じ程度の値となり得る。これはプラズマ周辺では、プラズマが円形ではなくなる可能性を含んでいる。しかし、プラズマ中心では変流器コイルの漏れ磁場は、2cmの誤差が生じた場合でも、最大34G程度なので、垂直方向の変位には影響はないものと思われる。誤差磁場の影響は、プラズマ電流が小さい時に大きい。又、そのモード(m)がどの様なものになるかが問題であろう。

最後に、グラフィック・ディスプレイ使用上に於て、有益なる助言、便宜をはかって頂いた計算機センターの中村康弘氏、小沼吉男氏に感謝の意を表するとともに、SUBROUTINEプログラムの使用の許可を与えて下さった、名古屋大学プラズマ研究所の渡辺二太氏にお礼申し上げます。また、大型トカマク開発室長、吉川允二氏をはじめJT-60のグループの方々の御協力に感謝致します。

- 1) 亀有昭久, 二宮博正, 相川裕史, 鈴木康夫: JAERI-M 6324
- 2) 小林朋文, 田村早苗, 谷啓二: JAERI-M 5898
- 3) 小林朋文, 谷啓二, 竹田辰興, 小林哲郎, 嶋田隆一, 田村早苗, 吉田吉一: JAERI-M 6451
- 4) 亀有昭久, 鈴木康夫, 二宮博正: JAERI-M 6027

2.4 水平磁場コイル

目的関数として、 $Y=0$ の水平面において

$$B_R (G) = 600/X(m)$$

を設定した。これは $B_Z=0$ をあらわし、 B_R が Z の値に依存しない事を示している。即ち、水平磁場成分のみの磁場配位をあらわす。プラズマ中心で $B_R \approx 193.5G$ となり、 $X=2.1m$, $4.2m$ のプラズマ周辺で、それぞれ、 $285.7G$, $142.9G$ を示す。プラズマ中心で、 $193.5G$ と設定したのは、もし垂直方向に ΔZ だけプラズマが変位した際にもとに戻すのに必要な B_R は、

$$B_R \approx n \cdot B_Z \cdot \Delta Z / R$$

と置けるので、2.2節で求めたプラズマ中心での、 $n=0.522$, $B_Z=3.93KG$ を代入してやると $\Delta Z=0.29m$ の時、 B_R は、 $193.5G$ になる。即ち、垂直方向に約30cm程度はもとに戻せる訳である。この目的関数に一致させるべく、グラフィック・ディスプレイによって試行錯誤をくり返した結果得られた配位を、Fig. 29, Fig. 30, Fig. 9, 表2に示す。

水平磁場コイルの中心位置誤差は、垂直磁場コイルと同じく1cm程度では影響はなく、5cm程度で10%程度の誤差が生じる。

3. あとがき

変流器コイルの漏れ磁場が意外と大きく、もし設計通り組み立てられれば、26Gで押さえられるが、1cmの誤差が生ずると、100Gぐらいの漏れ磁場になり、水平磁場コイルによる水平磁場と、プラズマ周辺で同じ程度の値となり得る。これはプラズマ周辺では、プラズマが円形ではなくなる可能性を含んでいる。しかし、プラズマ中心では変流器コイルの漏れ磁場は、2cmの誤差が生じた場合でも、最大34G程度なので、垂直方向の変位には影響はないものと思われる。誤差磁場の影響は、プラズマ電流が小さい時に大きい。又、そのモード(m)がどの様なものになるかが問題であろう。

最後に、グラフィック・ディスプレイ使用上に於て、有益なる助言、便宜をはかって頂いた計算機センターの中村康弘氏、小沼吉男氏に感謝の意を表するとともに、SUBROUTINEプログラムの使用の許可を与えて下さった、名古屋大学プラズマ研究所の渡辺二太氏にお礼申し上げます。また、大型トカマク開発室長、吉川允二氏をはじめJT-60のグループの方々の御協力に感謝致します。

- 1) 亀有昭久, 二宮博正, 相川裕史, 鈴木康夫: JAERI-M 6324
- 2) 小林朋文, 田村早苗, 谷啓二: JAERI-M 5898
- 3) 小林朋文, 谷啓二, 竹田辰興, 小林哲郎, 嶋田隆一, 田村早苗, 吉田吉一: JAERI-M 6451
- 4) 亀有昭久, 鈴木康夫, 二宮博正: JAERI-M 6027

表1 : 小林(朋)氏等^{2),3)}の求めた60ターン, 80ターン, 100ターンに対する変流器コイルの最適配置のコイル中心の座標と電流値

	60ターン			80ターン			100ターン		
	R(m)	Z(m)	巻数 電流値(kA)	R(m)	Z(m)	巻数 電流値(kA)	R(m)	Z(m)	巻数 電流値(kA)
1	1.521	0.061	2 320	1.522	0.069	3 360	1.521	0.055	3 288
2	1.530	0.162	2 320	1.532	0.183	3 360	1.528	0.146	3 288
3	1.546	0.269	2 320	1.553	0.303	3 360	1.541	0.242	3 288
4	1.570	0.378	2 320	1.585	0.427	3 360	1.561	0.339	3 288
5	1.606	0.490	2 320	1.630	0.554	3 360	1.589	0.439	3 288
6	1.654	0.605	2 320	1.695	0.687	3 360	1.626	0.541	3 288
7	1.715	0.725	2 320	1.780	0.827	3 360	1.673	0.646	3 288
8	1.829	0.887	3 480	1.925	0.946	2 240	1.733	0.756	3 288
9	1.993	1.108	3 480	1.997	1.087	3 360	1.809	0.870	3 288
10	2.298	1.318	3 480	2.289	1.367	5 600	1.906	0.965	2 192
11	2.599	1.505	1 160	2.627	1.584	2 240	1.992	1.084	4 384
12	2.902	1.566	2 320	2.967	1.559	2 240	2.287	1.307	5 480
13	3.467	1.611	1 160	3.547	1.582	2 240	2.638	1.500	3 288
14	3.815	1.656	1 160	4.417	1.345	2 240	3.018	1.626	3 288
15	4.456	1.400	1 160	5.009	0.455	1 120	3.528	1.610	1 96
16	4.980	0.681	1 160				3.792	1.576	2 192
17							4.422	1.335	1 96
18							4.913	0.746	2 192

表2: Fig. 9に対するコイルの位置の座標, 大きさ, 電流値

ポロイダルコイル系 (位置と電流)

空心変流器コイル

中心 X(m)	中心 Y(m)	電流 I(A)	ΔY (m)	ΔX (m)
0.49800E+01	0.68000E+00	0.16000E+06	0.80000E-01	0.15000E+00
0.44560E+01	0.14000E+01	0.16000E+06	0.80000E-01	0.15000E+01
0.38150E+01	0.16560E+01	0.16000E+06	0.15000E-01	0.80000E-01
0.34670E+01	0.16110E+01	0.16000E+06	0.15000E+00	0.80000E-01
0.29020E+01	0.15660E+01	0.32000E+06	0.23000E+00	0.10000E+00
0.25990E+01	0.15050E+01	0.16000E+06	0.15000E+00	0.80000E-01
0.22980E+01	0.13180E+01	0.48000E+06	0.24000E+00	0.15000E+00
0.19930E+01	0.11280E+01	0.48000E+06	0.24000E+00	0.15000E+00
0.18290E+01	0.88700E+00	0.48000E+06	0.15000E+00	0.24000E+00
0.17250E+01	0.72500E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.16540E+01	0.60500E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.16060E+01	0.49000E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15700E+01	0.37800E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15460E+01	0.26900E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15300E+01	0.16200E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15210E+01	0.61000E-01	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00

垂直ジバコイル

0.17550E+01	0.13027E+00	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.18100E+01	0.38780E+00	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.19290E+01	0.66190E+00	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.22945E+01	0.10757E+01	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.34262E+01	0.14617E+01	-0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.43040E+01	0.12972E+01	-0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.48000E+01	0.63700E+00	-0.53243E+06	0.19800E+00	0.19800E+00

四重極磁場コイル

0.17280E+01	0.23600E+00	0.69880E+05	0.07000E+00	0.07000E+00
0.17897E+01	0.50415E+00	0.52410E+05	0.06100E+00	0.06100E+00
0.26050E+01	0.13981E+01	-0.13976E+06	0.10000E+00	0.10000E+00
0.37700E+01	0.15260E+01	-0.87350E+05	0.78500E-01	0.78500E-01
0.44370E+01	0.13200E+01	-0.69880E+05	0.07000E+00	0.07000E+00
0.50986E+01	0.61000E+00	0.17470E+06	0.11100E+00	0.11100E+00

水平磁場コイル

0.20000E+01	0.76500E+00	-0.40206E+05	0.53200E-01	0.53200E-01
0.29100E+01	0.14030E+01	-0.40206E+05	0.53200E-01	0.53200E-01
0.44033E+01	0.15496E+01	-0.40206E+05	0.53200E-01	0.53200E-01

磁気リミタコイル

	X(m)	Y(m)	電流 I(A)	ΔY (m)	ΔX (m)
主磁気リミタコイル	4.64	0.0	1.0 E+06	0.235	0.235
補助 "	4.24	0.35	-0.5 E+06	0.165	0.165
"	4.24	-0.35	-0.5 E+06	0.165	0.165

表3: Fig. 9 に対するコイルの位置の座標, 大きさ, 電流値

ポロイダルコイル系 (位置と電流)

空心変流器コイル

中心 X(m)	中心 Y(m)	電流 I(A)	ΔY (m)	ΔX (m)
0.49800E+01	0.68000E+00	0.16000E+06	0.80000E-01	0.15000E+00
0.44560E+01	0.14000E+01	0.16000E+06	0.80000E-01	0.15000E+00
0.38150E+01	0.16560E+01	0.16000E+06	0.15000E+00	0.80000E-01
0.34670E+01	0.16110E+01	0.16000E+06	0.15000E+00	0.80000E-01
0.29020E+01	0.15660E+01	0.32000E+06	0.23000E+00	0.10000E+00
0.25990E+01	0.15050E+01	0.16000E+06	0.15000E+00	0.80000E-01
0.22980E+01	0.13180E+01	0.48000E+06	0.24000E+00	0.15000E+00
0.19930E+01	0.11280E+01	0.48000E+06	0.24000E+00	0.15000E+00
0.18290E+01	0.88700E+00	0.48000E+06	0.15000E+00	0.24000E+00
0.17250E+01	0.72500E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.16540E+01	0.60500E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.16060E+01	0.49000E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15700E+01	0.37800E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15460E+01	0.26900E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15300E+01	0.16200E+00	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00
0.15210E+01	0.61000E-01	0.32000E+06	0.10000E+00	0.23000E+00

垂直ジバコイル

0.17550E+01	0.13027E+00	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.18100E+01	0.38780E+00	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.19290E+01	0.66190E+00	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.22945E+01	0.10757E+01	0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.34262E+01	0.14617E+01	-0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.43040E+01	0.12972E+01	-0.26622E+06	0.14000E+00	0.14000E+00
0.48000E+01	0.63700E+00	-0.53243E+06	0.19800E+00	0.19800E+00

四重極磁場コイル

0.17132E+01	0.22570E+00	0.60706E+05	0.46000E-01	0.92000E-01
0.17660E+01	0.48550E+00	0.60706E+05	0.46000E-01	0.92000E-01
0.37764E+01	0.15349E+01	-0.12141E+06	0.92000E-01	0.92000E-01
0.41786E+01	0.11767E+01	-0.60706E+05	0.65180E-01	0.65180E-01
0.50123E+01	0.77284E+00	0.12141E+06	0.92000E-01	0.92000E-01
0.26121E+01	0.14079E+01	-0.12141E+06	0.92000E-01	0.92000E-01
0.49455E+01	0.59697E+00	0.60706E+05	0.65180E-01	0.65180E-01

水平磁場コイル

0.20000E+01	0.76500E+00	-0.40206E+05	0.53200E-01	0.53200E-01
0.29100E+01	0.14030E+01	-0.40206E+05	0.53200E-01	0.53200E-01
0.44033E+01	0.15496E+01	-0.40206E+05	0.52300E-01	0.53200E-01

磁気リミタコイル

	X(m)	Y(m)	電流 I(A)	ΔY (m)	ΔX (m)	
主磁気リミタコイル	4.64	0.0	1.0 E+06	0.235	0.235	
補助	"	4.24	0.35	-0.5 E+06	0.165	0.165
	"	4.24	-0.35	-0.5 E+06	0.165	0.165

表4 コイル位置の座標, 大きさ, 電流値の最終値(51年5月20日現在)

ポロイダルコイル系 (位置と電流)

空心変流器コイル

中心 X(m)	中心 Y(m)	電流 I(A)	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$
0.49800000E+01	0.68000001E+00	0.14500000E+06	0.80000000E-01	0.15000000E+00
0.44560000E+01	0.14000000E+01	0.14500000E+06	0.80000000E-01	0.15000000E+00
0.38150000E+01	0.16560000E+01	0.14500000E+06	0.15000000E+00	0.80000000E-01
0.34670000E+01	0.16110000E+01	0.14500000E+06	0.15000000E+00	0.80000000E-01
0.29020000E+01	0.15660000E+01	0.29000000E+06	0.23000000E+00	0.10000000E+00
0.25990000E+01	0.15050000E+01	0.14500000E+06	0.10000000E+00	0.12000000E+00
0.22980000E+01	0.13180000E+01	0.43500000E+06	0.24000000E+00	0.15000000E+00
0.19930000E+01	0.11280000E+01	0.43500000E+06	0.24000000E+00	0.15000000E+00
0.18290000E+01	0.88699999E+00	0.43500000E+06	0.15000000E+00	0.24000000E+00
0.17250000E+01	0.72499999E+00	0.29000000E+06	0.10000000E+00	0.23000000E+00
0.16540000E+01	0.60500000E+00	0.29000000E+06	0.10000000E+00	0.23000000E+00
0.16060000E+01	0.49000000E+00	0.29000000E+06	0.10000000E+00	0.23000000E+00
0.15700000E+01	0.37800000E+00	0.29000000E+06	0.10000000E+00	0.23000000E+00
0.15460000E+01	0.26900000E+00	0.29000000E+06	0.10000000E+00	0.23000000E+00
0.15300000E+01	0.16200000E+00	0.29000000E+06	0.10000000E+00	0.23000000E+00
0.15210000E+01	0.61000000E-01	0.29000000E+06	0.10000000E+00	0.23000000E+00

垂直磁場コイル

0.17550000E+01	0.13027000E+00	0.26622000E+06	0.14000000E+00	0.14000000E+00
0.18100000E+01	0.38780000E+00	0.26622000E+06	0.14000000E+00	0.14000000E+00
0.19290000E+01	0.66190000E+00	0.26622000E+06	0.14000000E+00	0.14000000E+00
0.22945000E+01	0.10757000E+01	0.26622000E+06	0.14000000E+00	0.14000000E+00
0.34262000E+01	0.14617000E+01	-0.26622000E+06	0.14000000E+00	0.14000000E+00
0.43040000E+01	0.12972000E+01	-0.26622000E+06	0.14000000E+00	0.14000000E+00
0.48000000E+01	0.63699999E+00	-0.53243000E+06	0.19800000E+00	0.19800000E+00

四重極磁場コイル

0.17132000E+01	0.22570000E+00	0.60706000E+05	0.46000000E-01	0.92000000E-01
0.17660000E+01	0.48550000E+00	0.60706000E+05	0.46000000E-01	0.92000000E-01
0.26121000E+01	0.14079000E+01	-0.12141000E+06	0.66000000E-01	0.12820000E+00
0.37764000E+01	0.15349000E+01	-0.12141000E+06	0.92000000E-01	0.92000000E-01
0.41786000E+01	0.11767000E+01	-0.60706000E+05	0.65180000E-01	0.65180000E-01
0.49455000E+01	0.59697001E+00	0.60706000E+05	0.65180000E-01	0.65180000E-01
0.50123000E+01	0.77283999E+00	0.12141000E+06	0.92000000E-01	0.92000000E-01

水平磁場コイル

0.20000000E+01	0.76500000E+00	-0.40206000E+05	0.53200000E-01	0.53200000E-01
0.29100000E+01	0.14030000E+01	-0.40206000E+05	0.53200000E-01	0.53200000E-01
0.44033000E+01	0.15496000E+01	-0.40206000E+05	0.53200000E-01	0.53200000E-01

磁気リミターコイル

	X(m)	Y(m)	電流 I(A)	$\Delta Y(m)$	$\Delta X(m)$
主磁気リミターコイル	4.64	0.0	1.0E+6	0.235	0.235
補助	4.24	0.35	-0.5E+6	0.165	0.165
"	4.24	-0.35	-0.5E+6	0.165	0.165

$B_{max} = 12.9 \text{ G}$

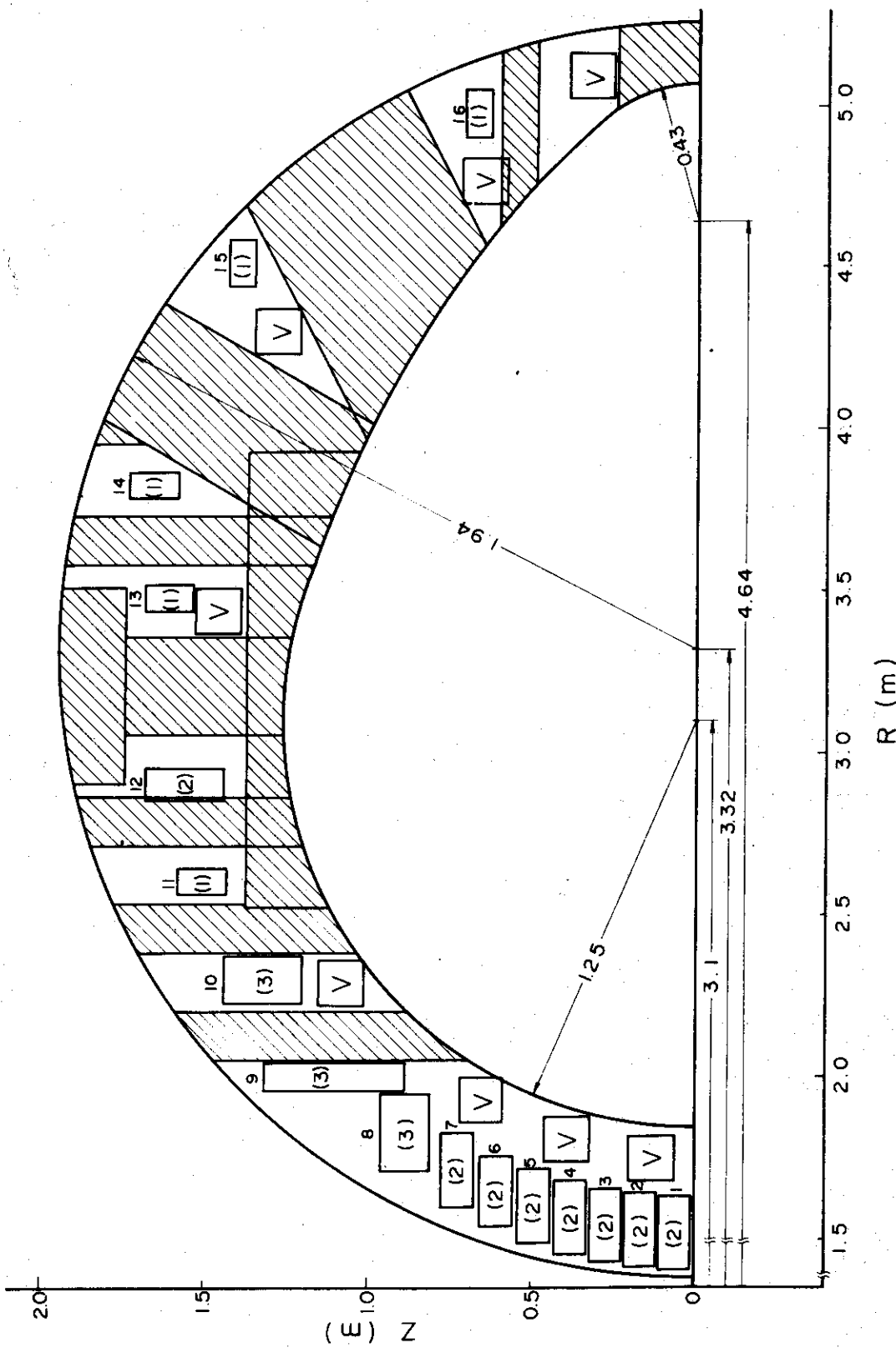


Fig. 1: 表1に於ける60ターンに対する実際のコイル配置と漏れ磁場の最大値 (B_{max}) とプラズマ周辺での漏れ磁場の変動分 (\bar{B})

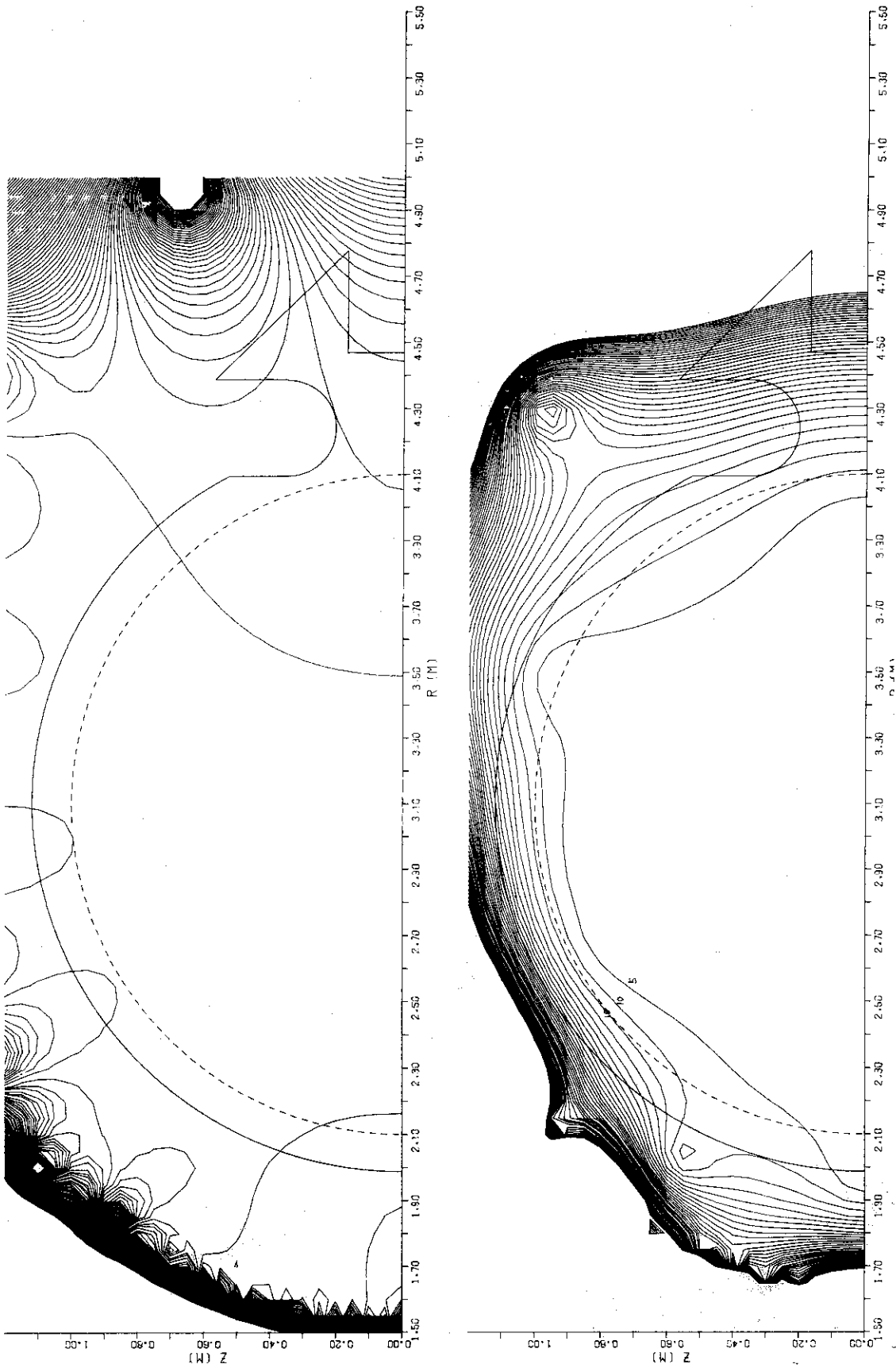


Fig. 2: 表 1, Fig. 1 に対する多線電流近似による漏れ磁場の強さ (1 コのコイルに対して流れる電流を $n \times n$ 等分し

Fig. 7 て, その分割電流をコイルの各点 ($n \times n$ 点) に分配した近似)

点線: プラズマ半径, 上図: 磁力線図, 下図: 磁場の強さの等高線図 (単位: G, 等高線は 5 G 毎)

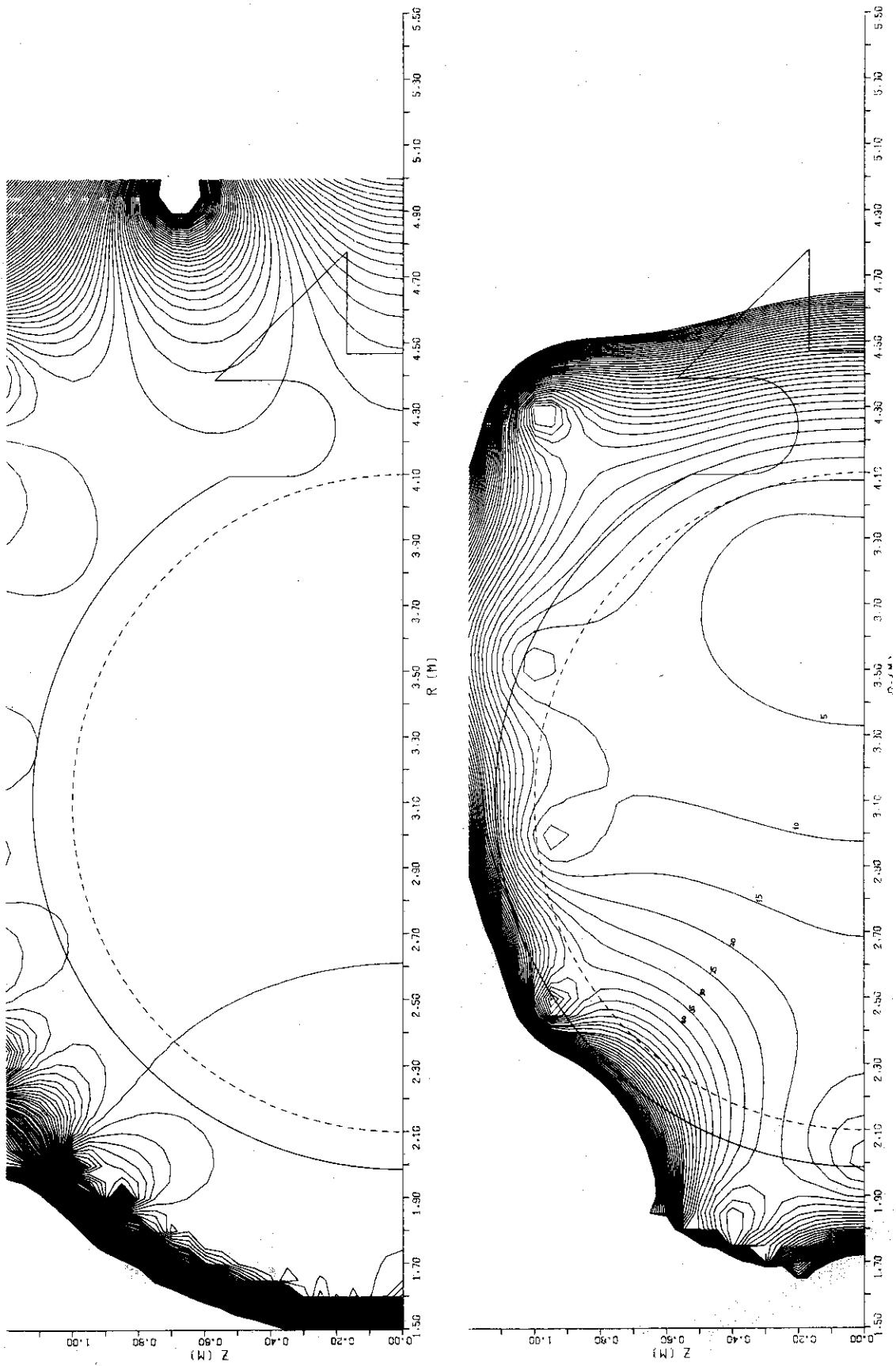


Fig. 3

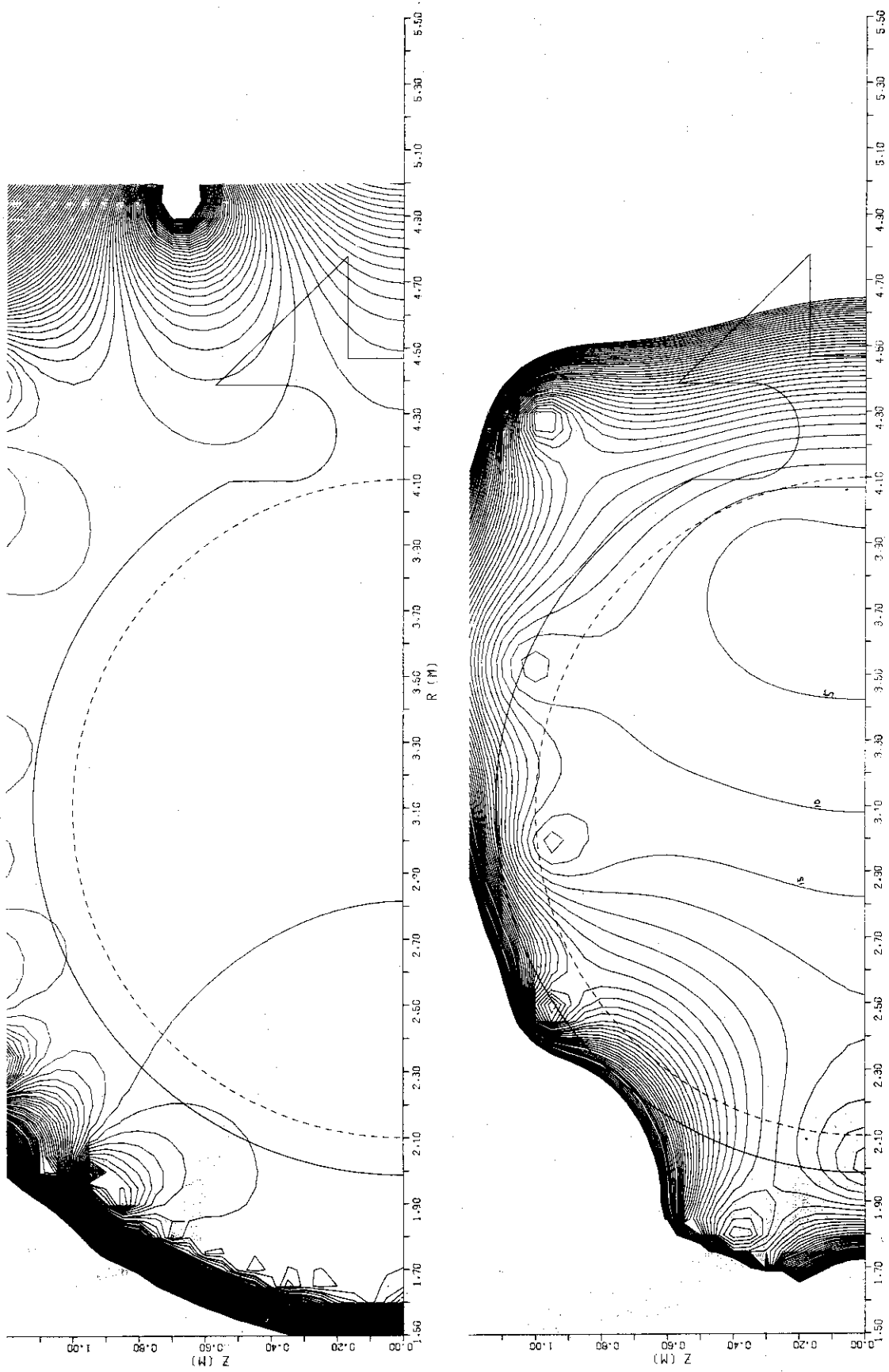


Fig. 4

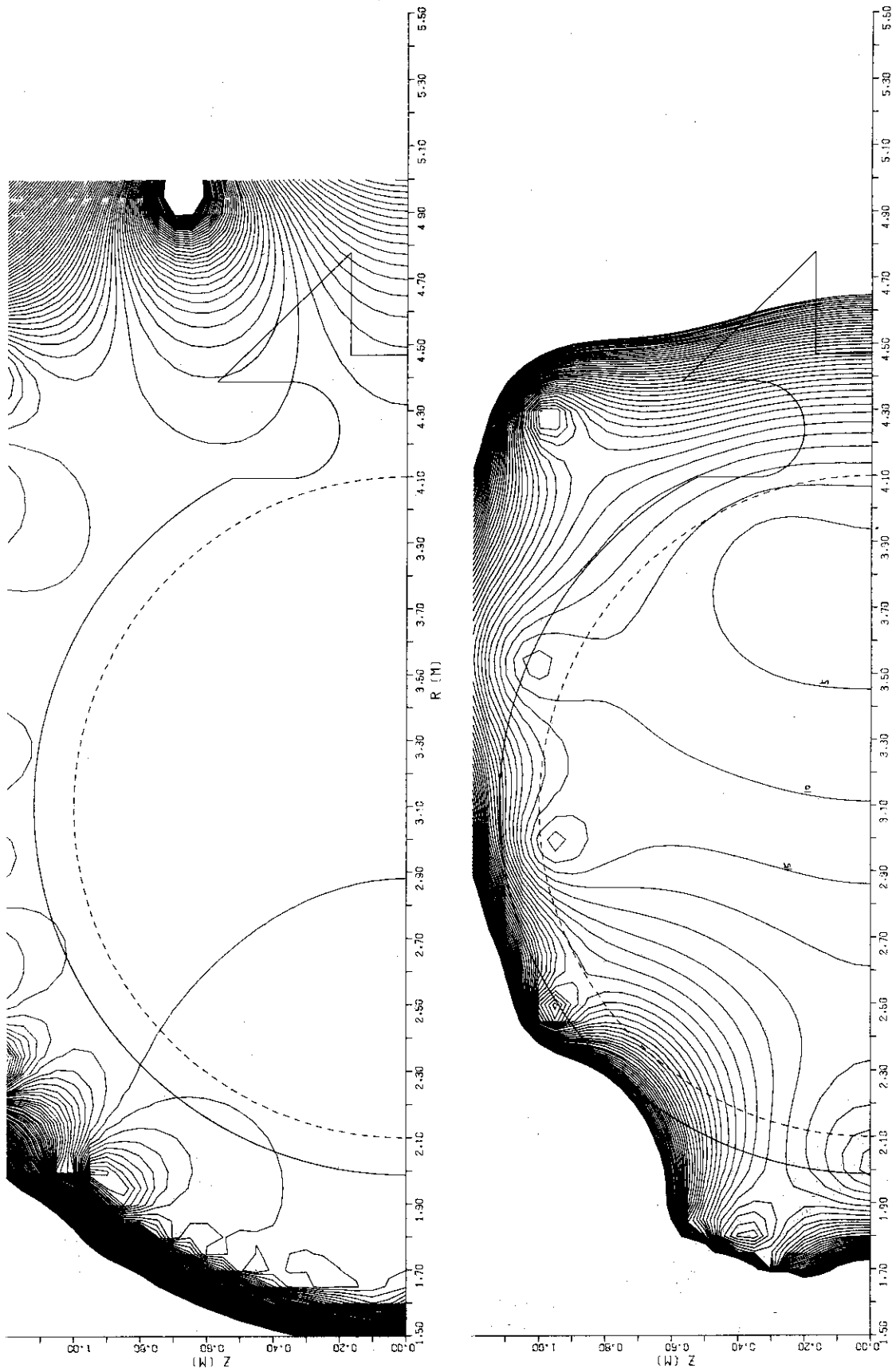


Fig. 5

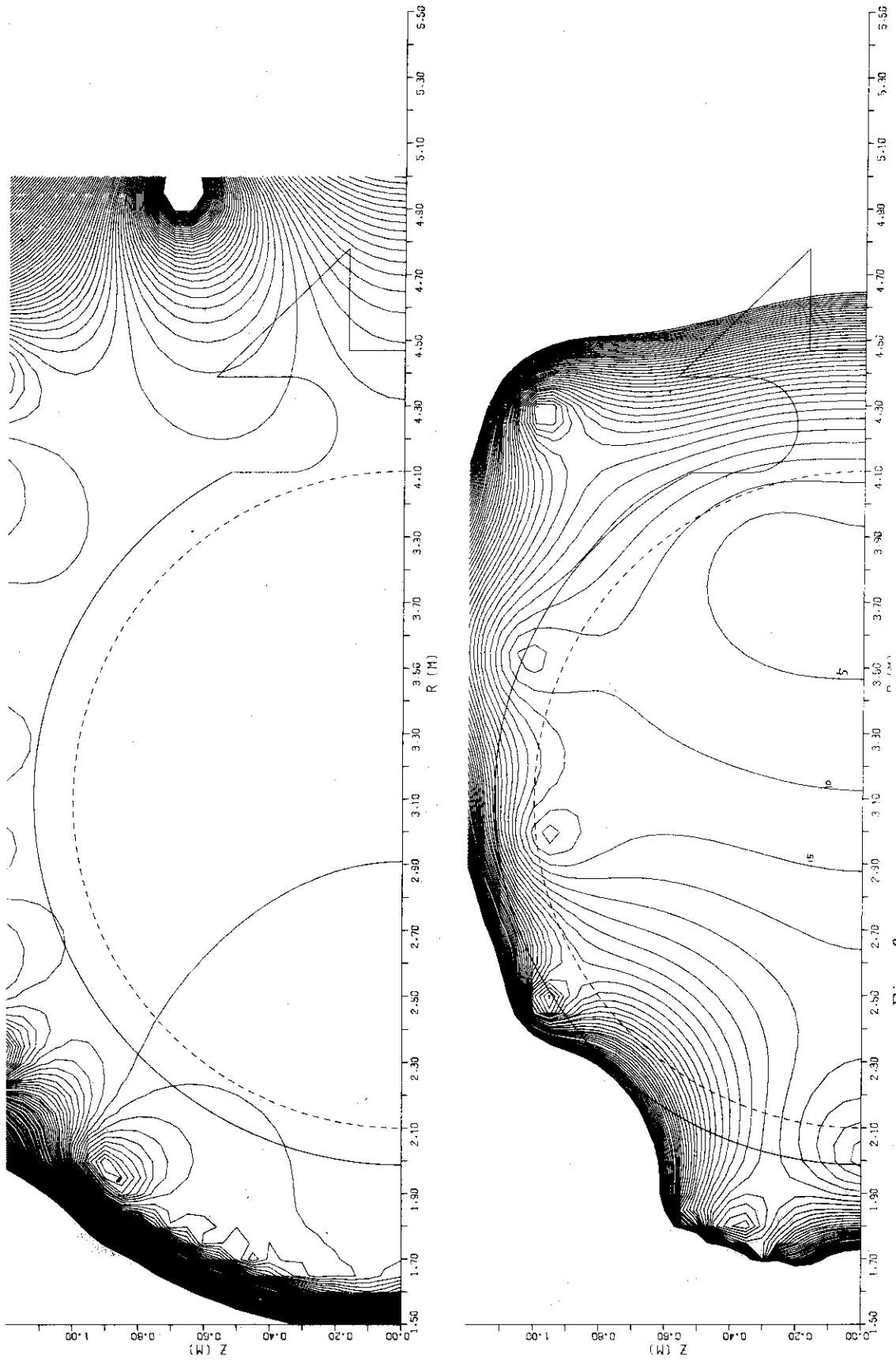


Fig. 6

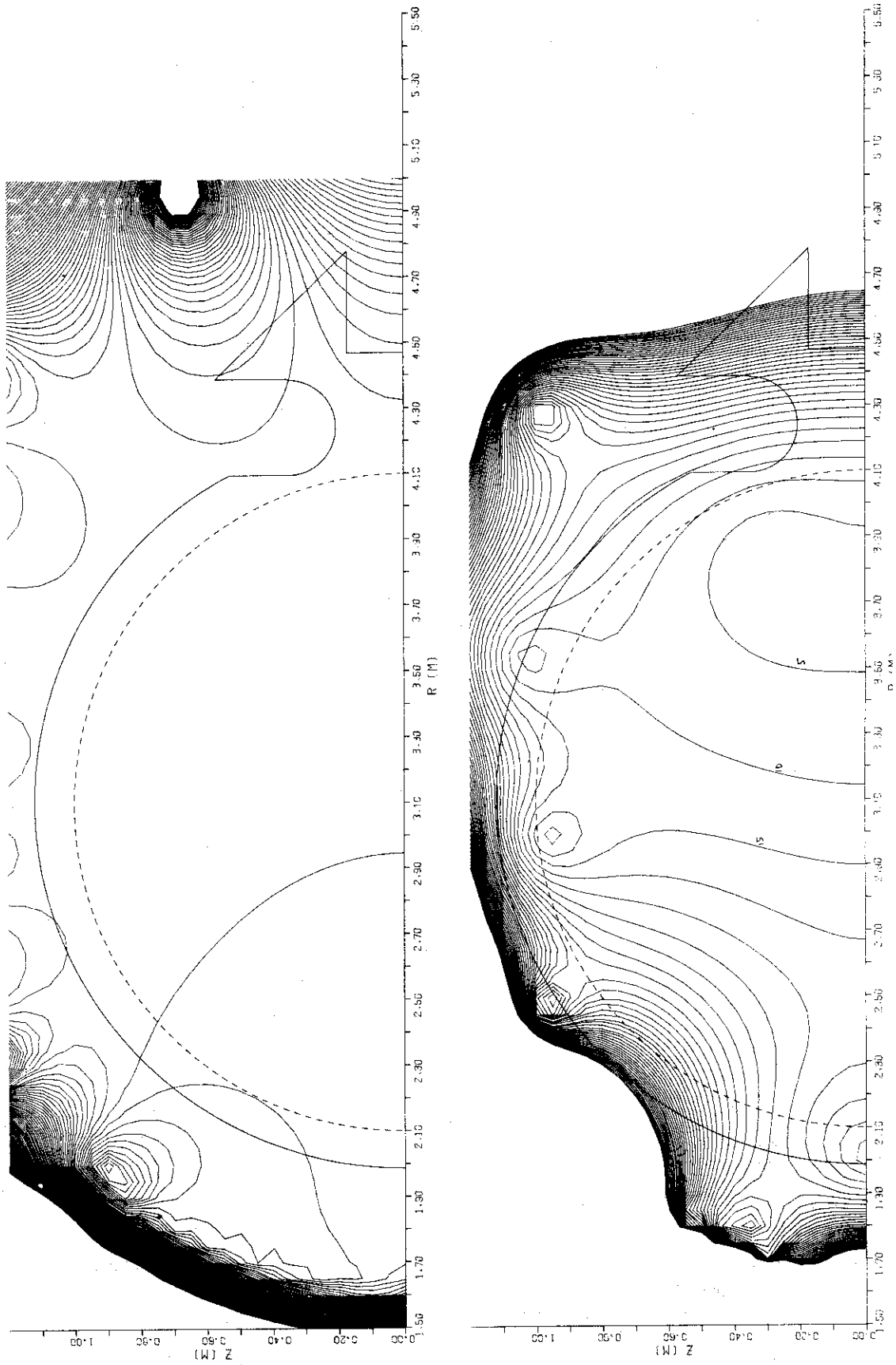


Fig. 7

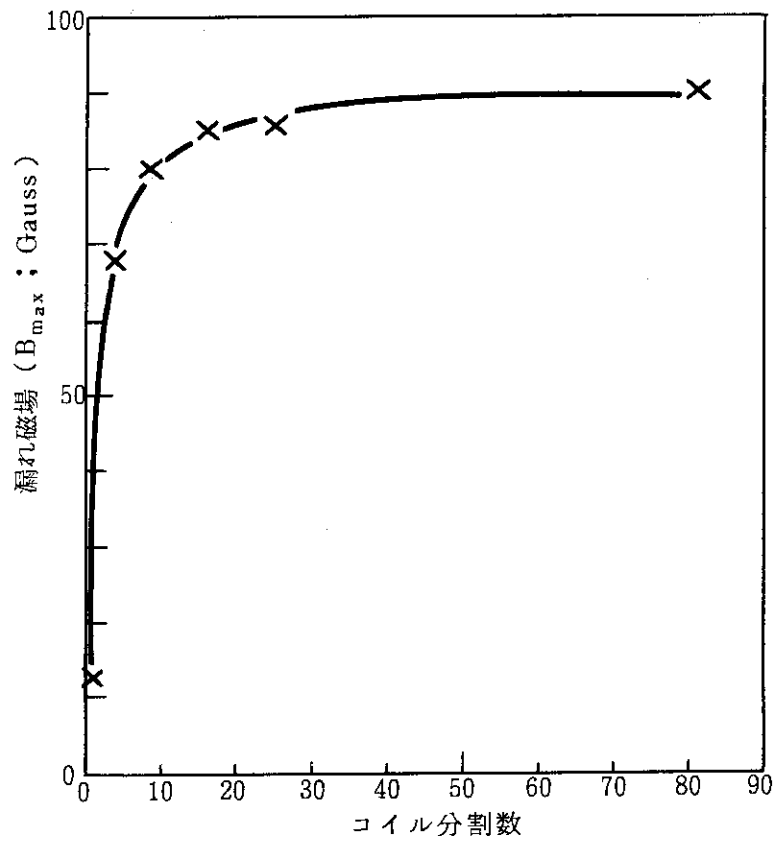


Fig. 8: Fig. 2~Fig. 7におけるメッシュ数 ($n \times n$) と B_{max} の関係

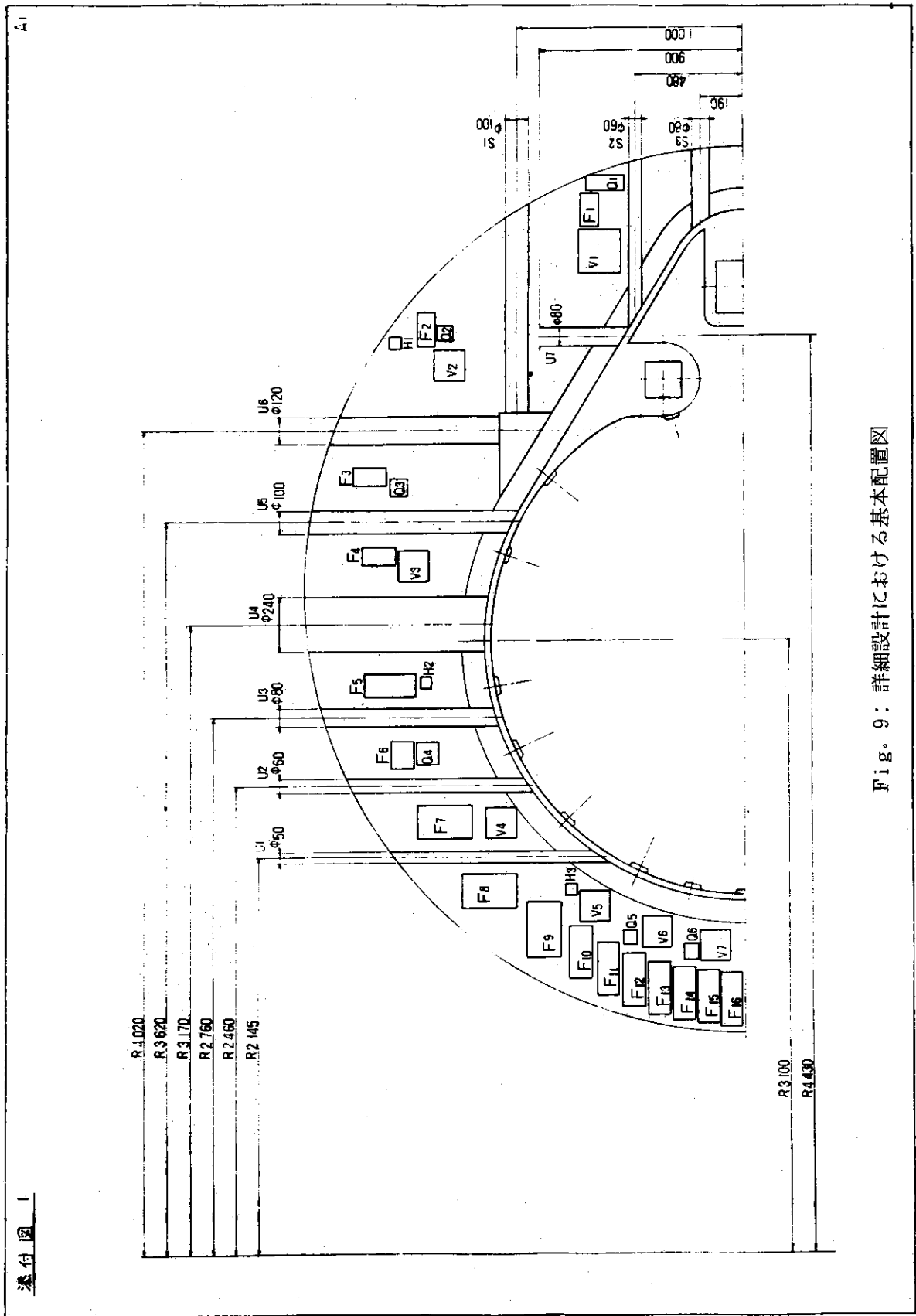


Fig. 9: 詳細設計における基本配置図

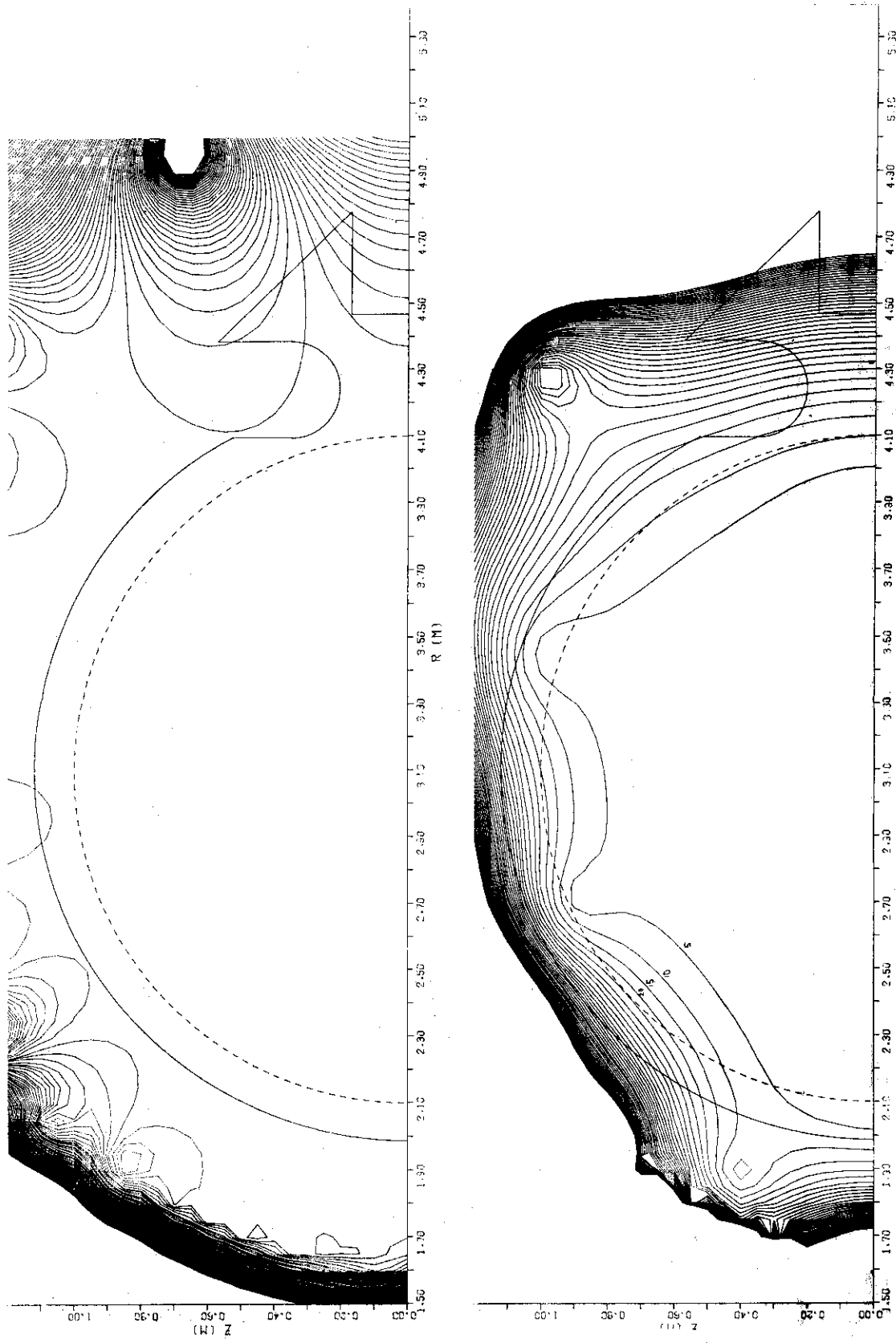


Fig. 10: Fig. 9 の配置に対する変流器コイルによる漏れ磁場の磁力線図 (上図) と等高線図 (下図), 点線はプラズマ半径 (等高線は 5 G 毎)

STEP NO. 7
CASE NO. 2

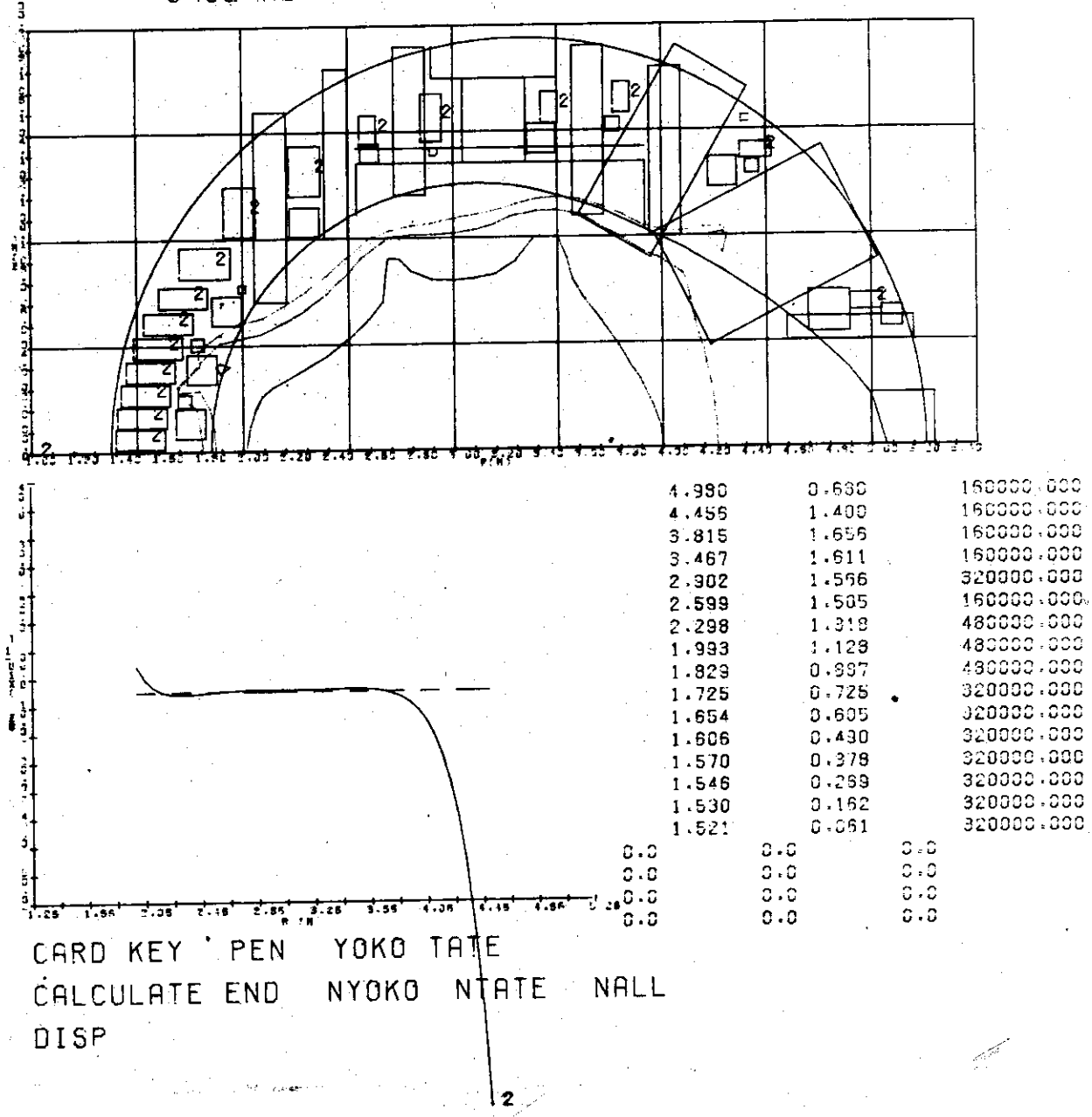


Fig. 11: Fig. 9 の配置に対する変流器コイルによる漏れ磁場の Y=0 上での B_z - プロファイル

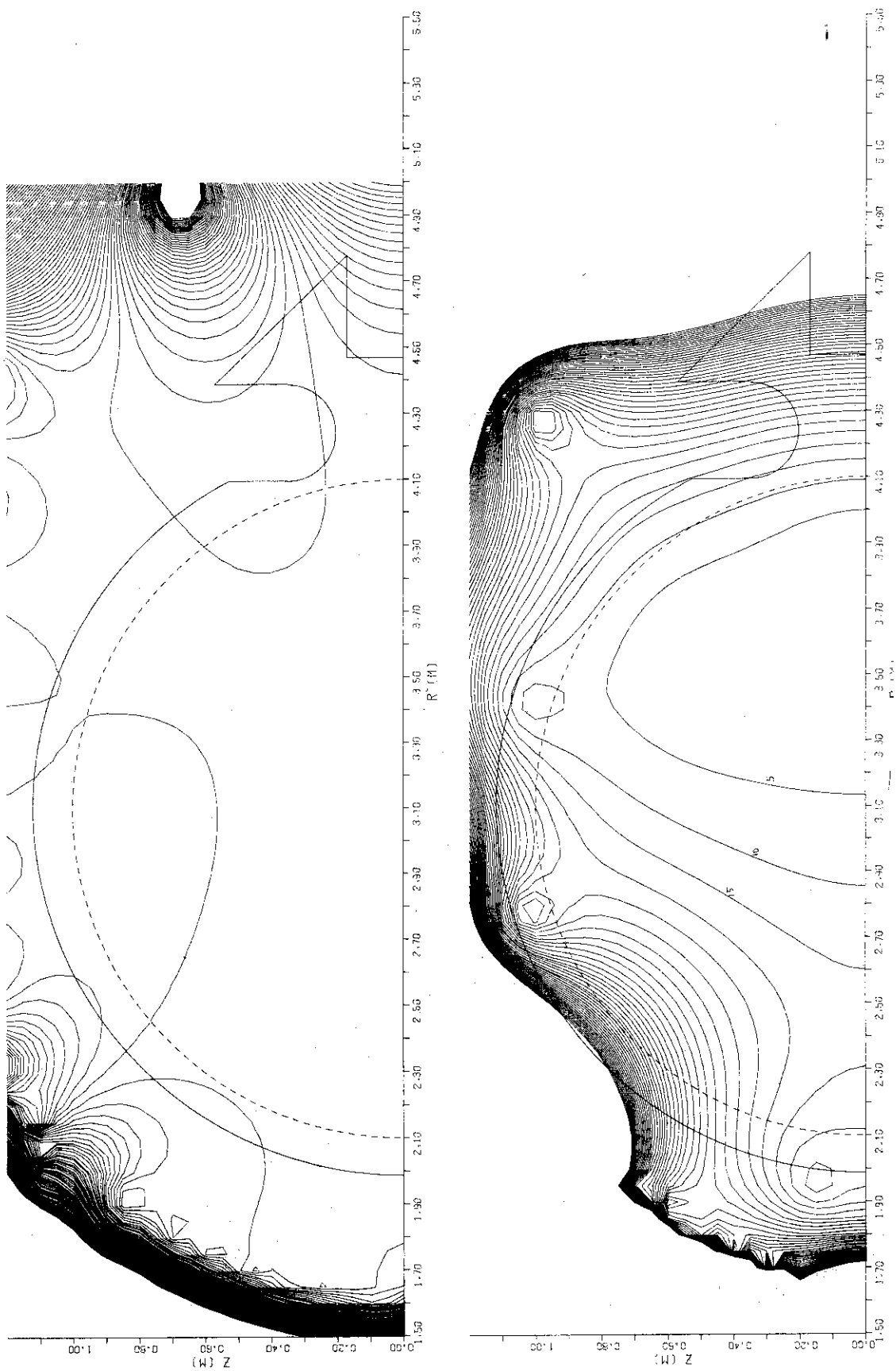


Fig. 12: Fig. 9 の配置において, F-8 を中心位置は変えず
にコイル形状のみを変化させた場合に対する漏れ磁場
の等高線図 ($\Delta X=0.45\text{ m}$, $\Delta Y=0.08\text{ m}$)

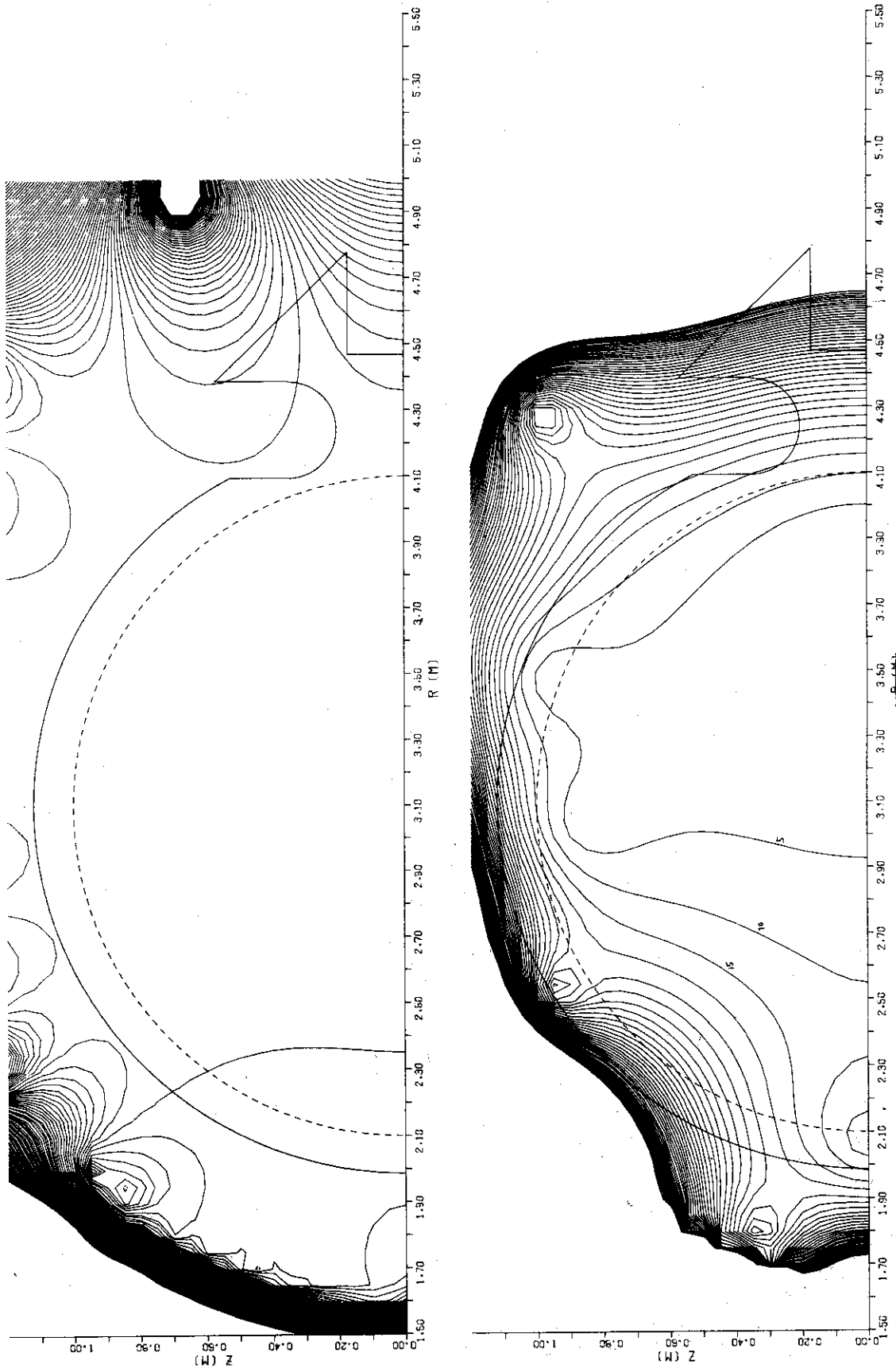


Fig. 13: Fig. 12と同じ, 但し $\Delta X=0.08\text{ m}$, $\Delta Y=0.45\text{ m}$

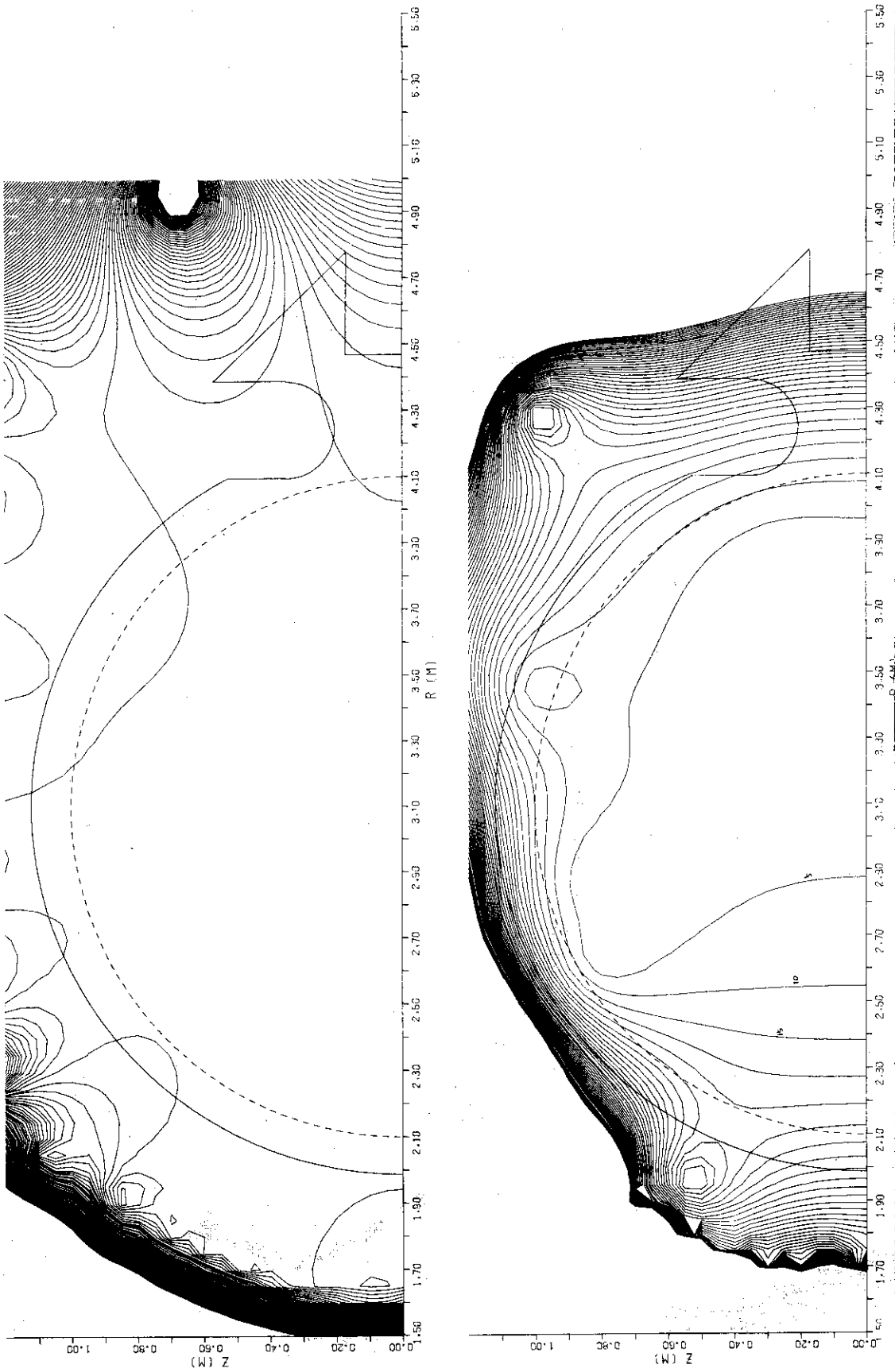


Fig. 14: Fig. 9 の配置において, F-16 をコイル形状は変化させずにコイル中心位置のみを変化させた場合に対する
 漏れ磁場の磁力線図 (上図) と等高線図 (下図) ($X = 1.531 \text{ m}$, $Y = 0.061 \text{ m}$)

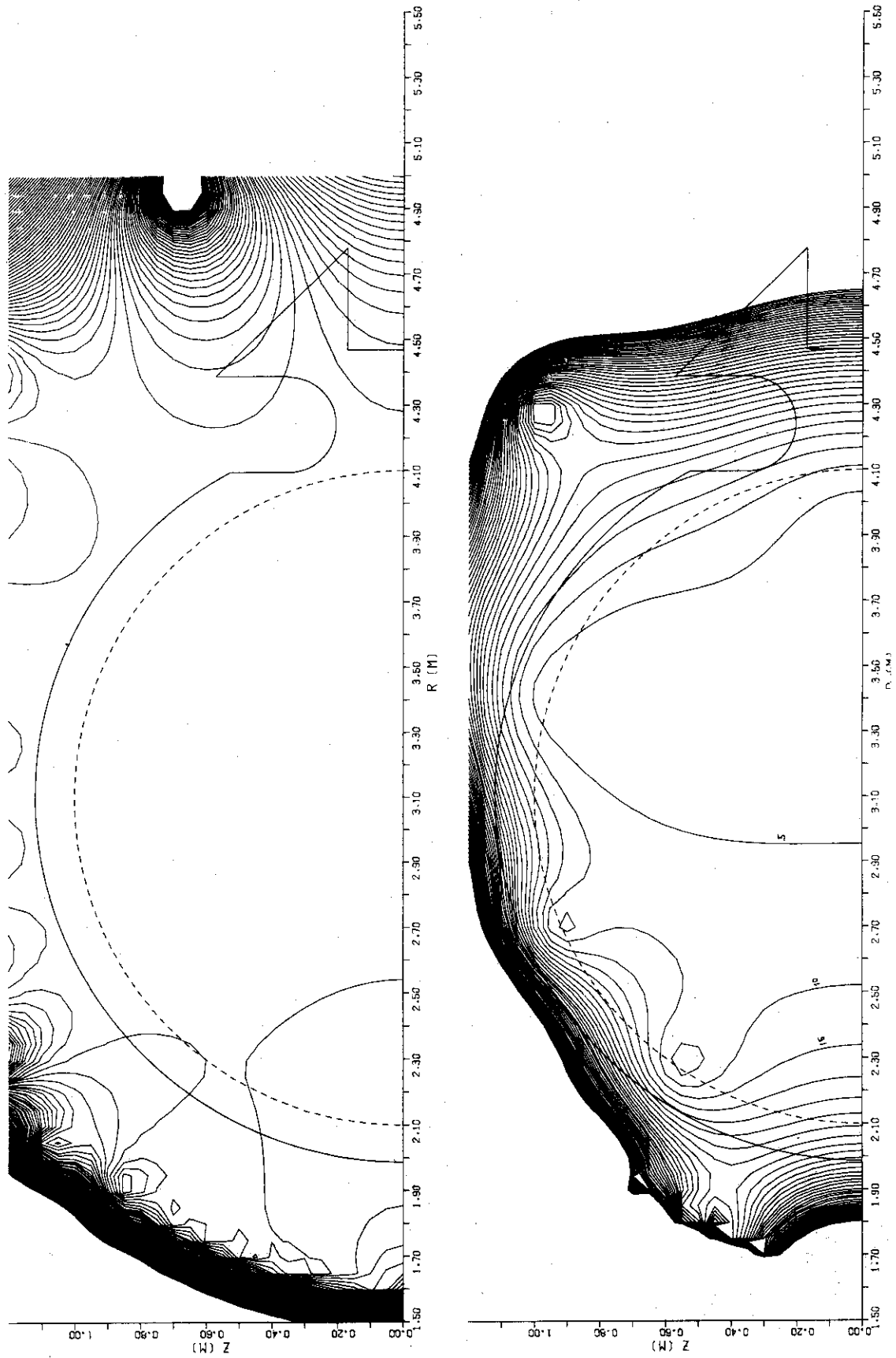


Fig. 15: Fig. 13と同じ, 但し $X = 1.511\text{ m}$, $Y = 0.061\text{ m}$

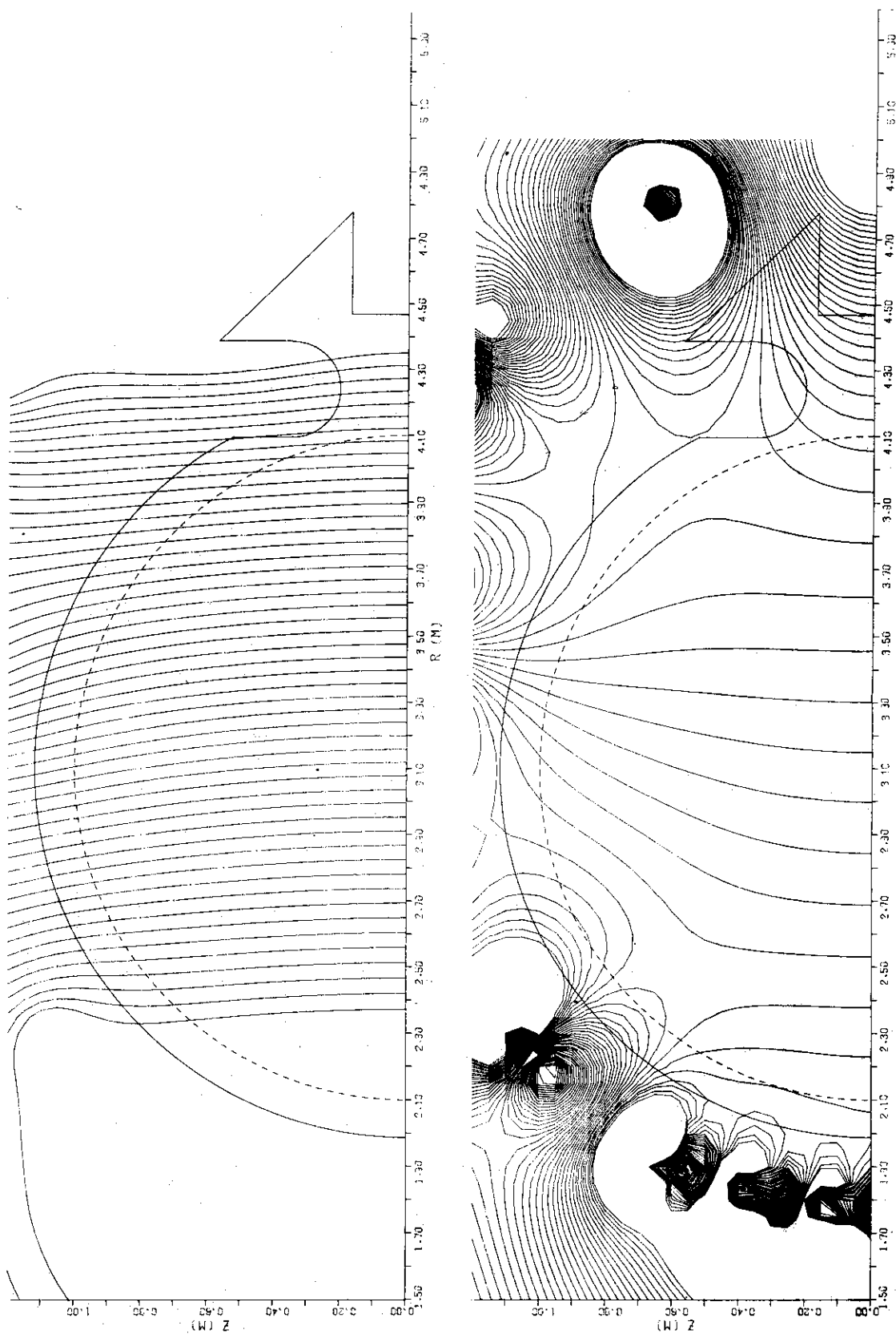
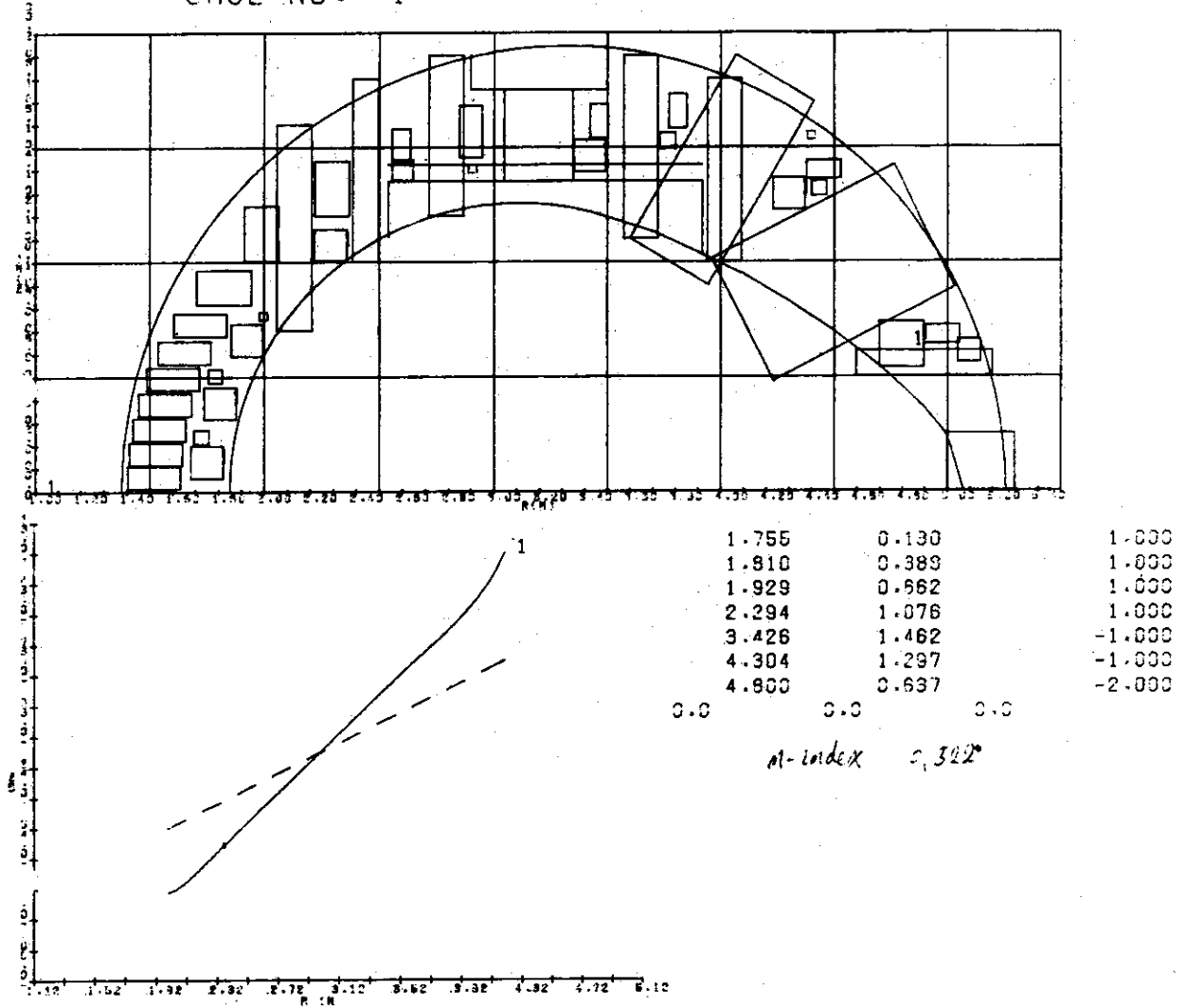


Fig. 16: Fig. 9, 表2の垂直磁場コイル配置に対する磁力線図
(上図)と磁場の強さの等高線図(下図)

STEP NO. 7
CASE NO. 1



CARD KEY PEN YOKO TATE
CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
DISP

Fig. 17: Fig. 16 に対する Y=0 における垂直磁場

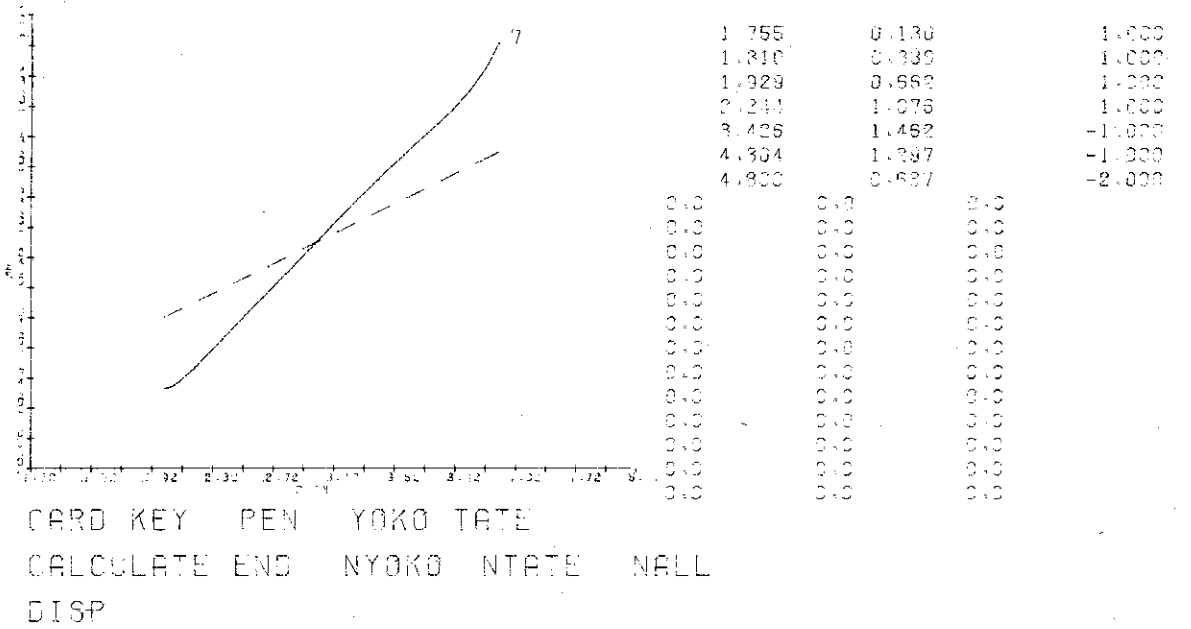
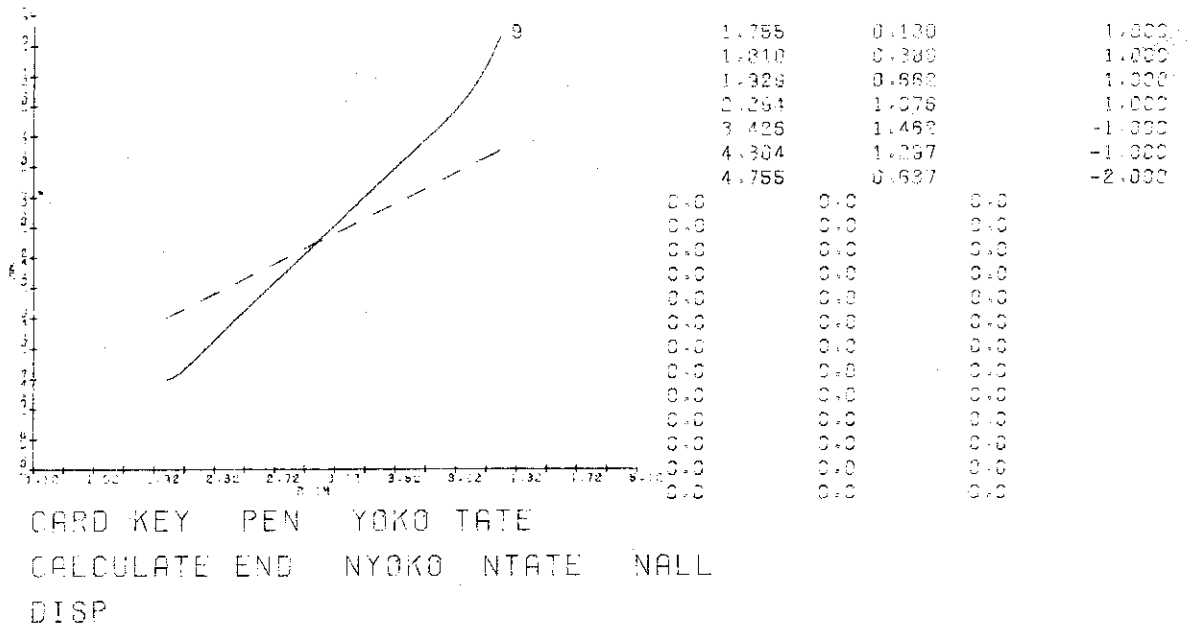
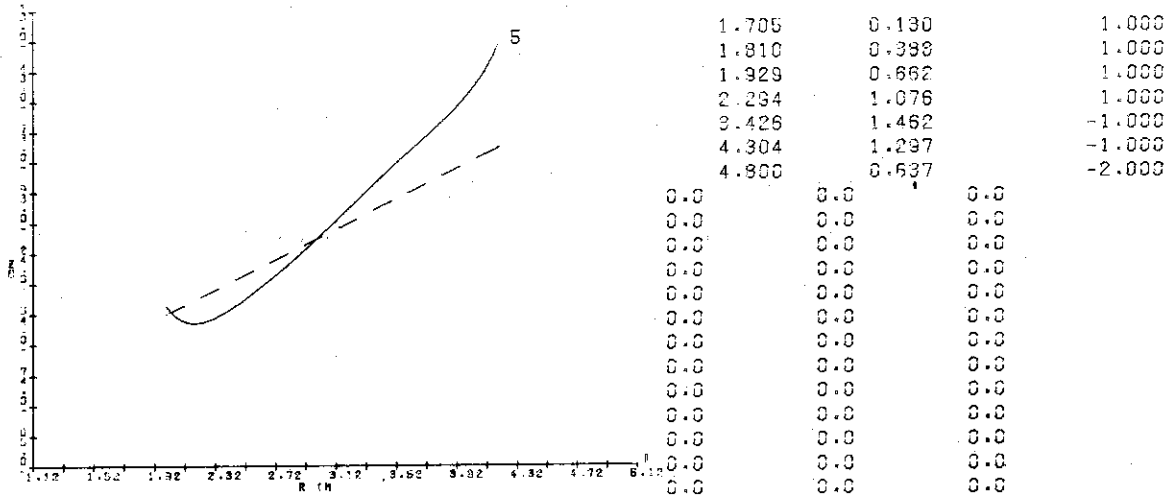
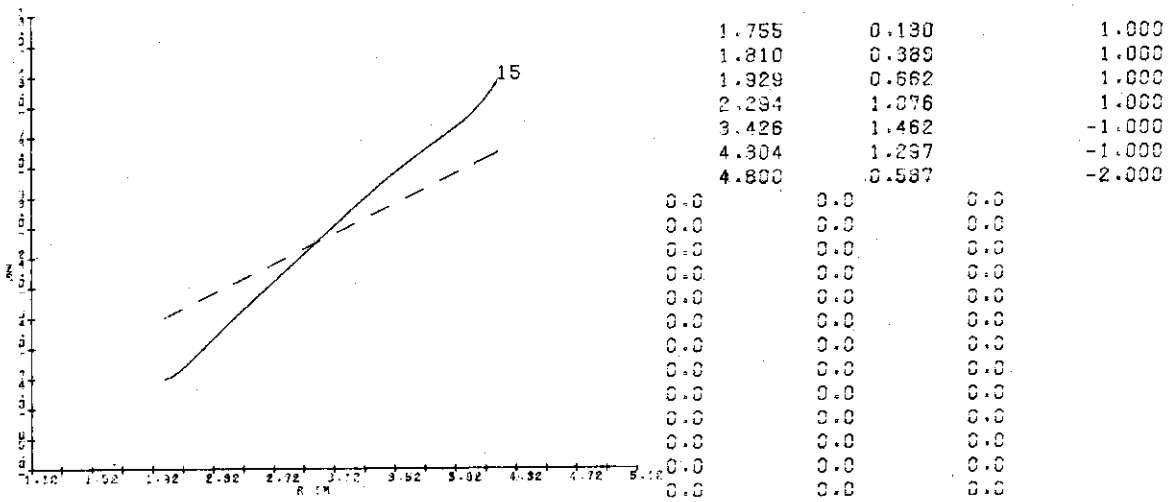


Fig. 18: Fig. 9, 表2の垂直磁場コイル配置を変化させた場合の
Y=0での垂直磁場のR方向のプロファイル
Fig. 23
Fig. 18 (X_{V1}=4.75m), Fig. 19 (X_{V4}=2.245m)



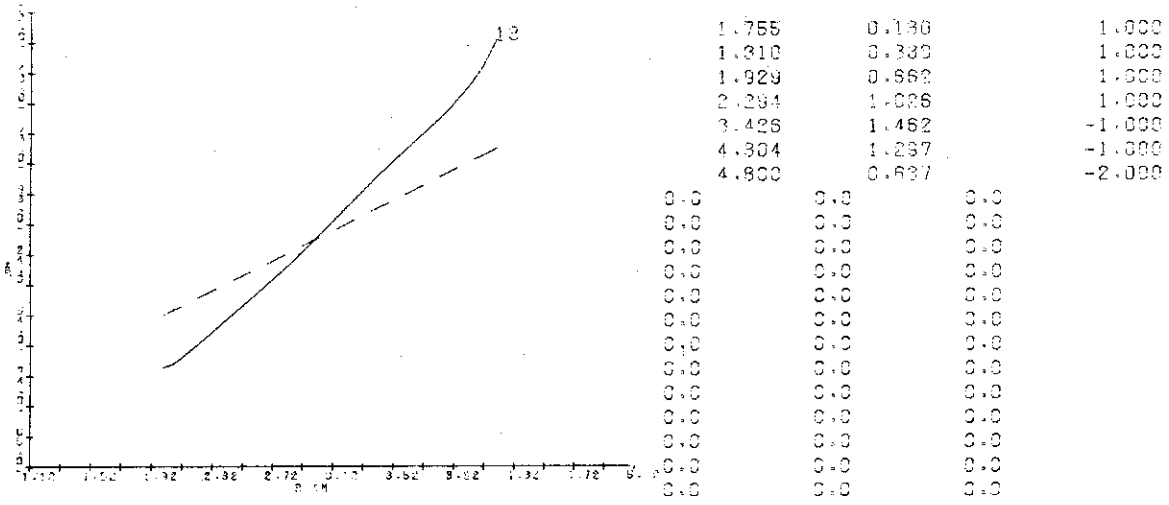
CARD KEY PEN YOKO TATE
 CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
 DISP

Fig. 20 ($X_{V7} = 1.705\text{m}$)



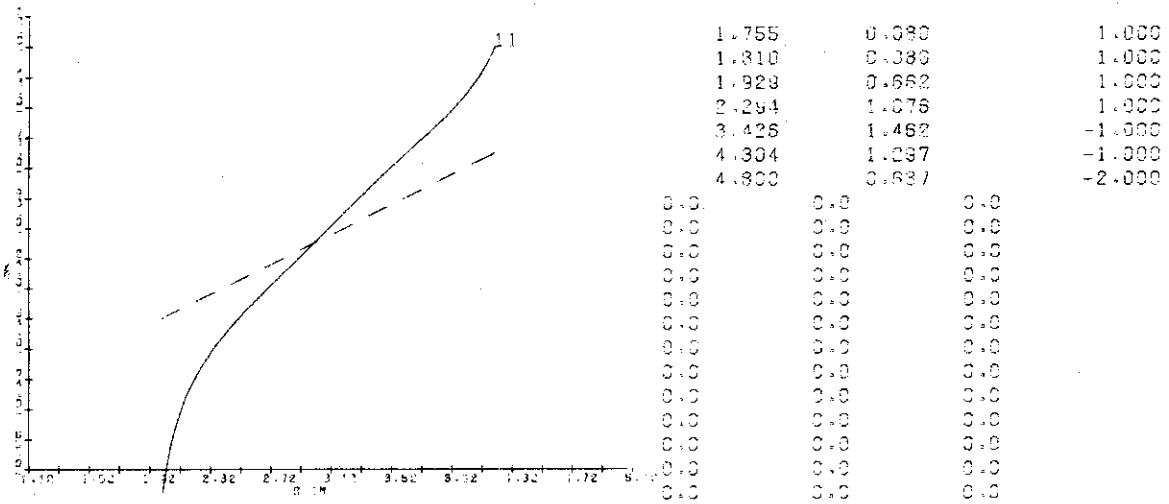
CARD KEY PEN YOKO TATE
 CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
 DISP

Fig. 21 ($Y_{V7} = 0.587\text{m}$)



CARD KEY PEN YOKO TATE
 CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
 DISP

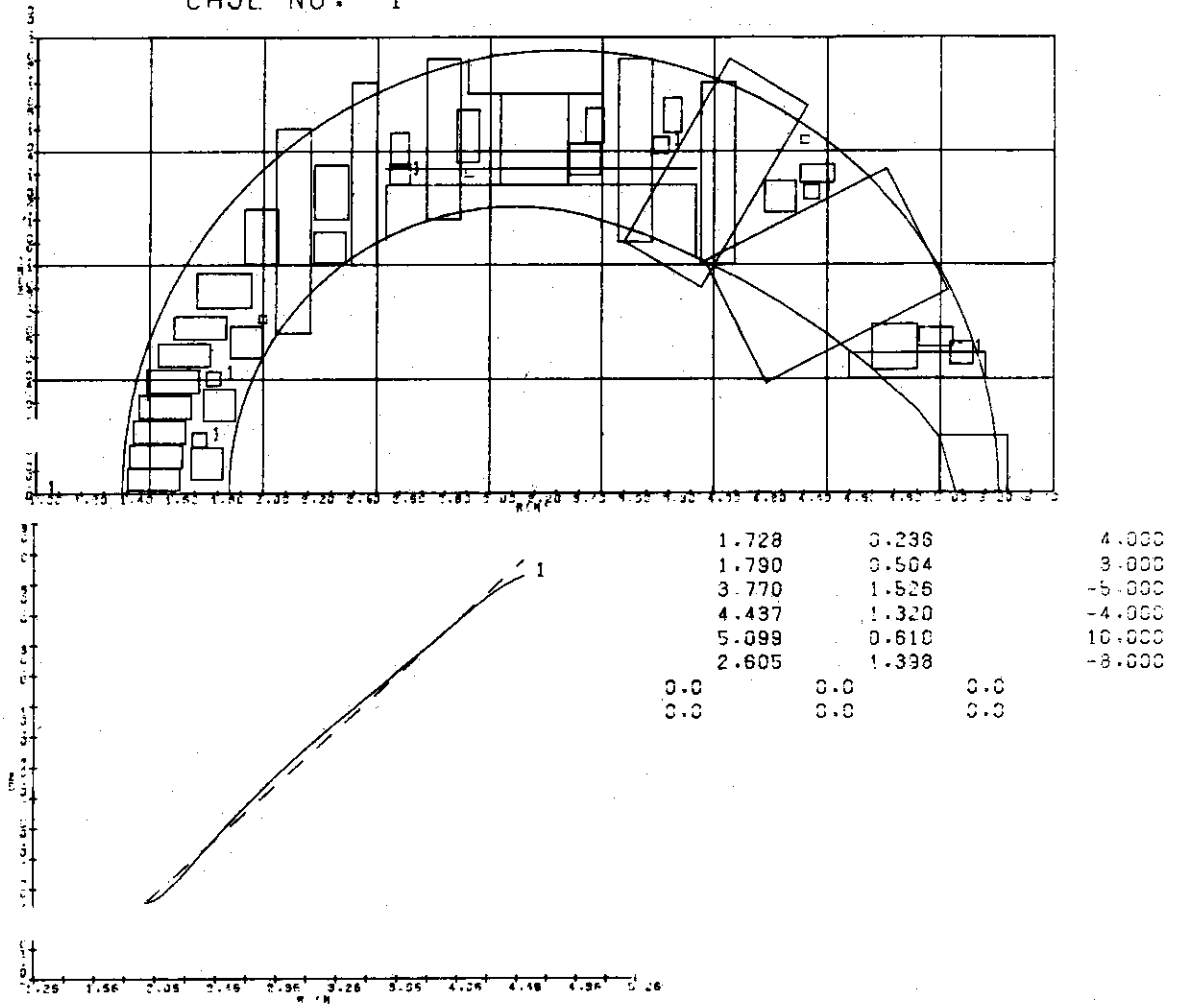
Fig. 22 ($Y_{V4} = 1.025m$)



CARD KEY PEN YOKO TATE
 CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
 DISP

Fig. 23 ($Y_{V7} = 0.08m$)

STEP NO. 7
CASE NO. 1



CARD KEY PEN YOKO TATE
CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
DISP

Fig. 24: Fig. 9, 表2の四重極磁場コイル配置に対する
Y=0での B_z -プロファイル

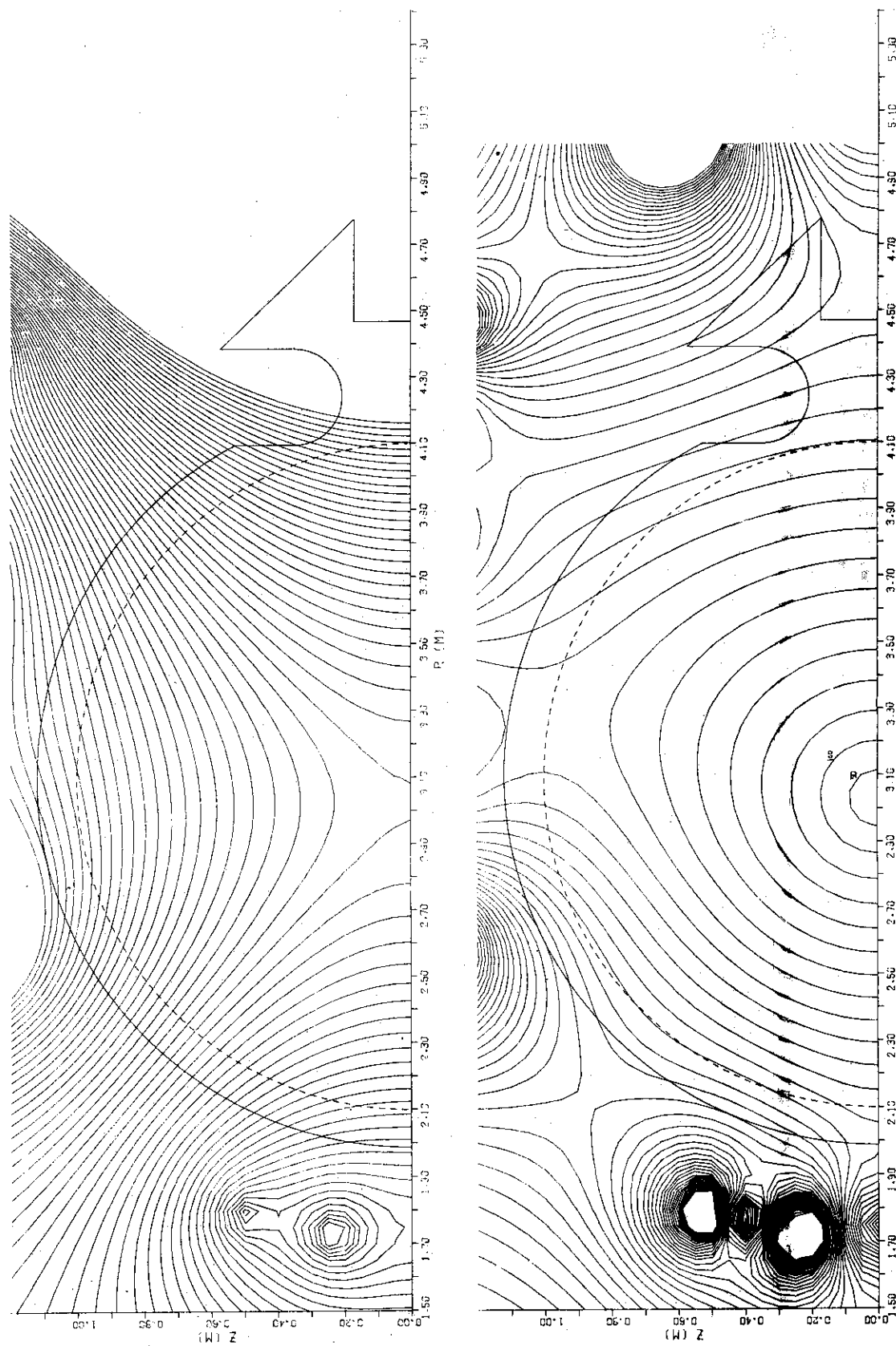


Fig. 25: Fig. 9, 表 2 の四重極磁場コイル配置に対する磁力線図 (上図) と磁場の強さの等高線図 (下図)

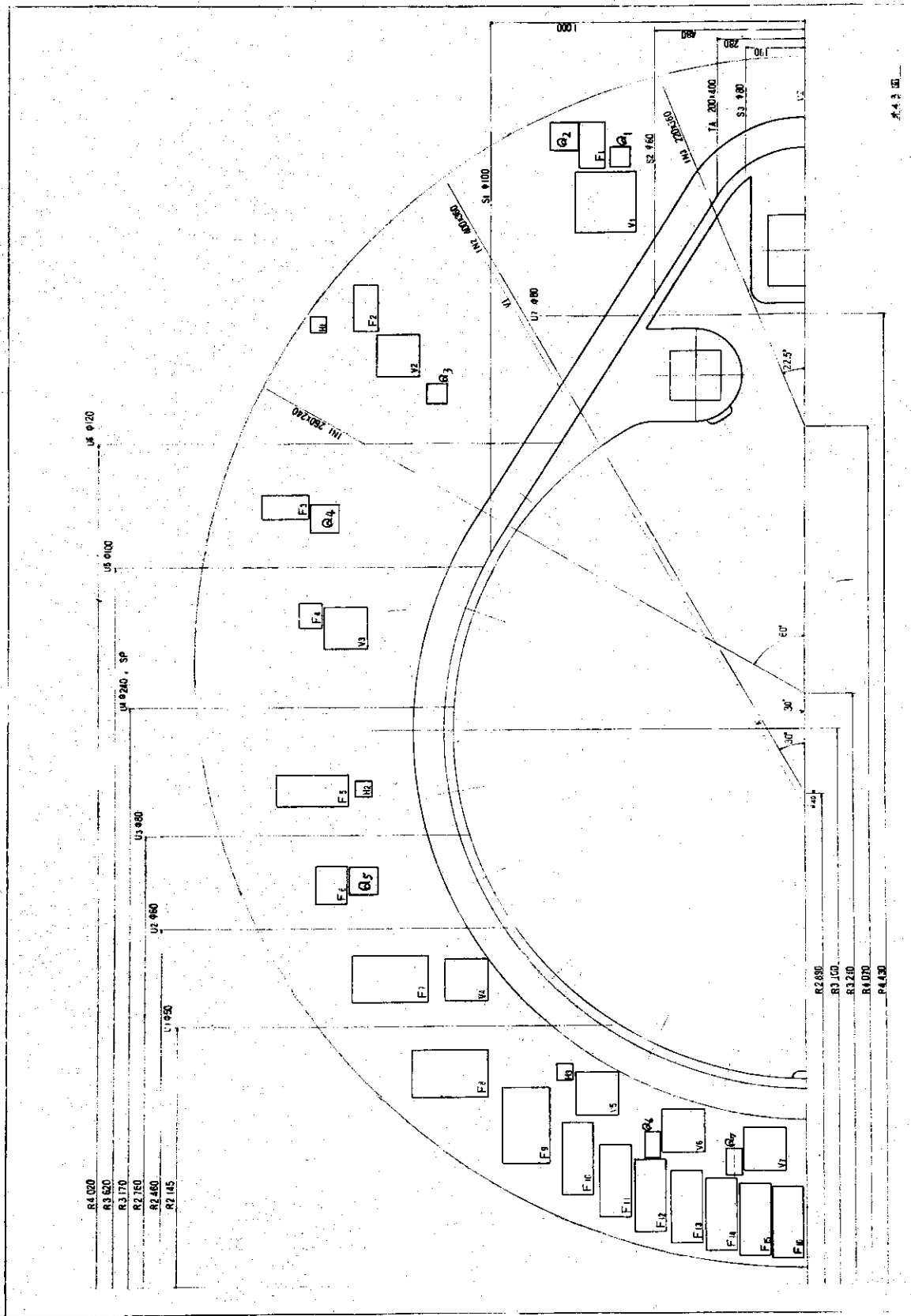


Fig. 26: Fig. 9, 表 2 に対する四重極磁場コイルのターン数
(68ターン)を減少させた場合の配置図

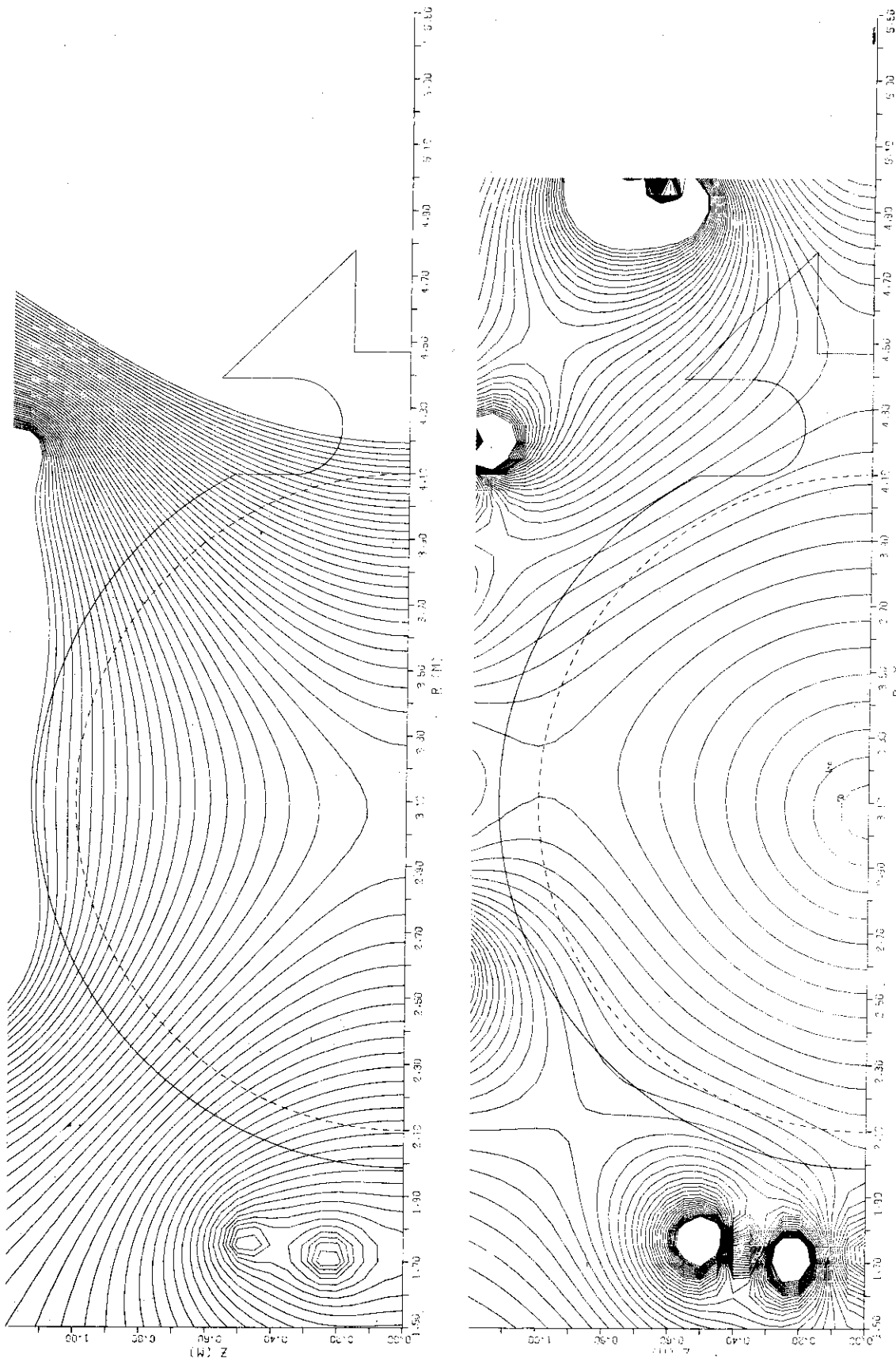
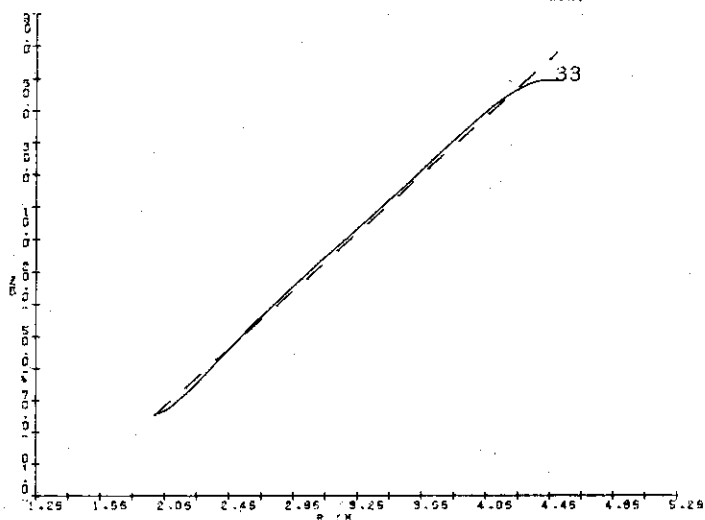
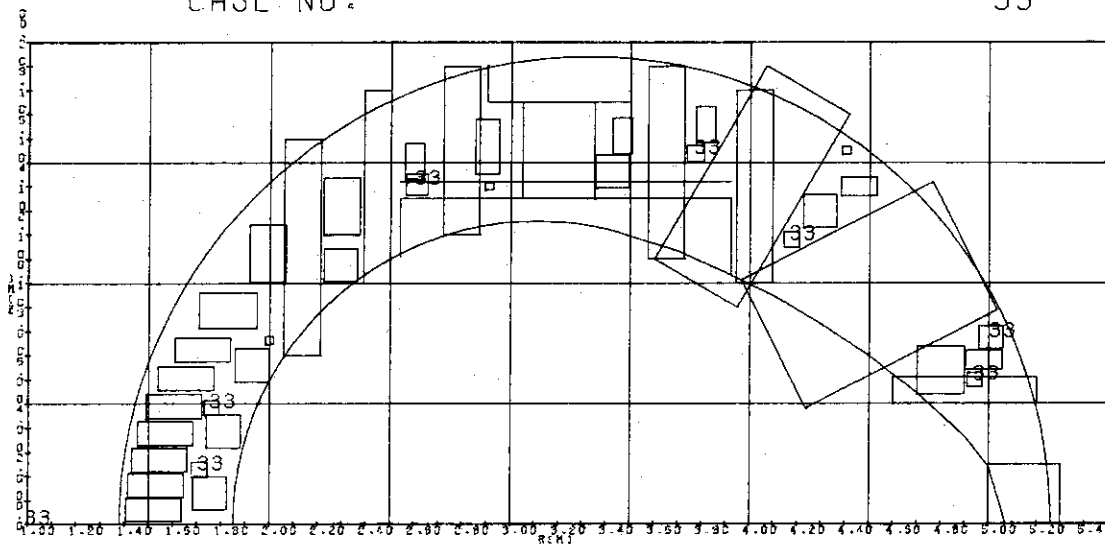


Fig. 27: Fig. 26, 表3の四重極磁場コイルの磁力線図(上図)と磁場の強さの等高線図(下図)

STEP NO. 7
CASE NO.

33



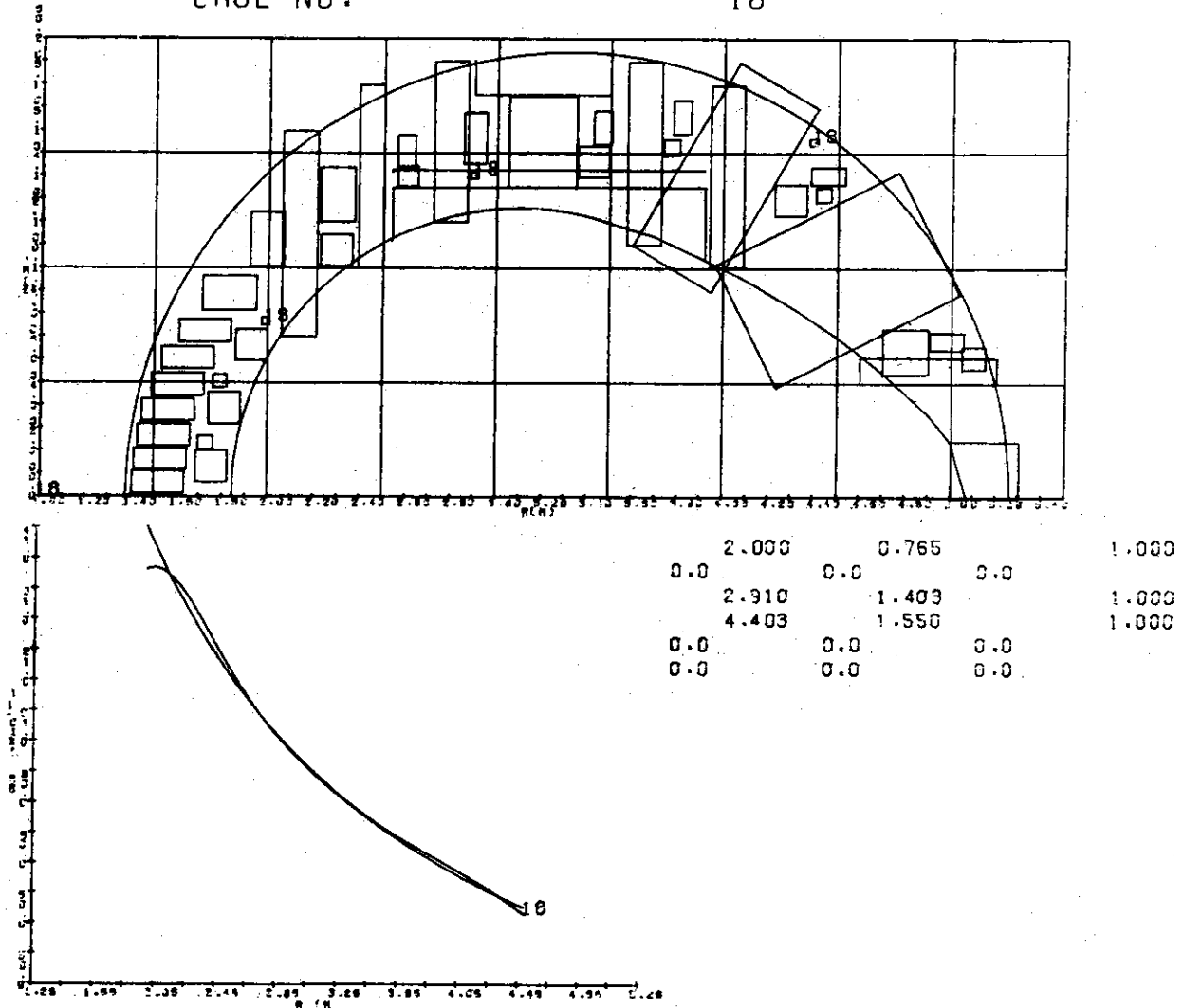
1.713	0.226	1.000
1.764	0.483	1.000
3.776	1.535	-2.000
4.179	1.177	-1.000
5.012	0.773	2.000
2.612	1.408	-2.000
4.946	0.597	1.000
0.0	0.0	0.0

CARD KEY PEN YOKO TATE
CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
DISP

Fig. 28: Fig. 26 に対する四重極磁場コイル配置に対する
 $Y=0$ での B_z - プロファイル

STEP NO. 7
CASE NO.

18



CARD KEY PEN YOKO TATE
CALCULATE END NYOKO NTATE NALL
DISP

Fig. 29: Fig. 9, 表2の水平磁場コイル配置に対するY=0
でのB_R - プロファイル

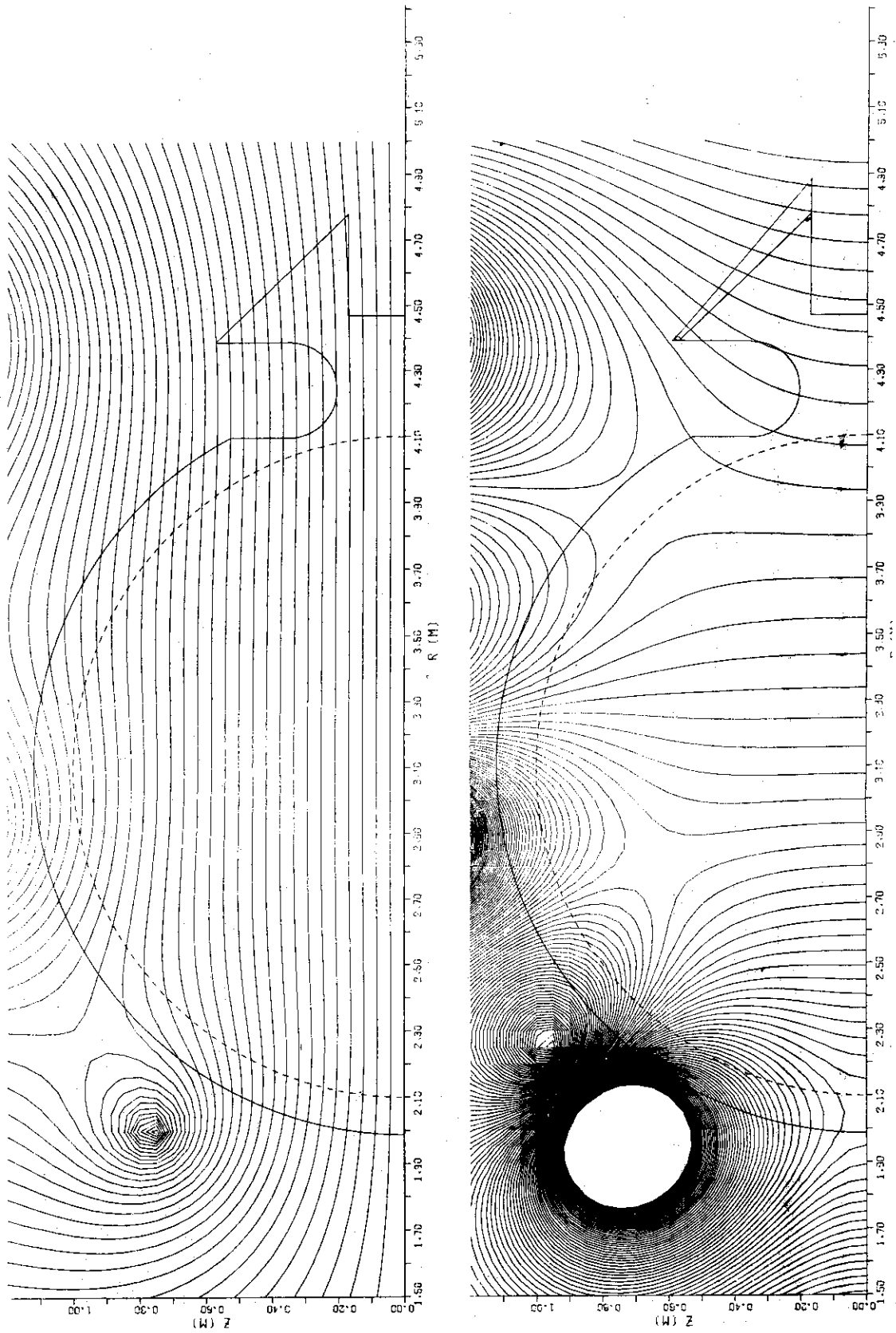


Fig. 30: Fig. 9, 表 2 の水平磁場コイル配置に対する磁力
線図 (上図) と磁場の強さの等高線図 (下図)