

JAERI-M
93-051

電子シンクロトロン真空系の検討および模擬試験

1993年3月

大塚 英男・米山 勝治・島田 太平

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

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。

入手の問合せは、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, 1993

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

電子シンクロトロン真空系の検討および模擬試験

日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム

大塚 英男・米山 勝治・島田 太平

(1993年2月15日受理)

電子シンクロトロンの真空系を設計するにあたり、基本としておさえておくべき、必要真空度、ダクト中の圧力分布、放射光による温度上昇、渦電流による誤差磁場などの見積もり方法をまとめた。本報告では特に、簡便な手法を指向し、容易に一般への適用が可能であるよう留意した。

実機を模擬したノーマルセル1セル分の真空系を製作し、真空性能の実証試験を行なった。結果として、設計に必要な種々の基礎データを得たばかりでなく、前記の見積もり方法が十分実用的であることが示された。

Basic Study on Vacuum System of an Electron Synchrotron
and Mock-up Tests

Hideo OHTSUKA, Shoji YONEYAMA and Taihei SHIMADA

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team
2-28-8 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received February 15, 1993)

Simple methods which are intended for the vacuum system of an electron synchrotron are applied to the fundamental design study. Those subjects are beam life time as a function of the vacuum pressure, the pressure distribution in the duct, heat problem due to synchrotron radiation, stray magnetic fields due to eddy currents and others.

Mock-up tests of the vacuum system have been also made. Data base which can be utilized at the design work has been obtained. Furthermore, good agreements between the simple analyses and the experimental results are shown.

Keywords : Synchrotron, Vacuum System, Outgassing Rate, Heat Analysis,
Eddy Current

目 次

1.はじめに	1
2.真空系の基礎的検討	1
2.1 ダクトのデザイン	1
2.2 真空度とビーム寿命	2
2.3 圧力分布見積	4
2.4 熱解析	6
2.5 時間変化する磁場の影響	8
3.実機を模擬した装置による実証試験	12
3.1 ノーマルセルのモックアップによる性能試験	12
3.2 ダクトの放出ガス率の測定	16
3.3 湍電流の測定	17
4.まとめ	19
謝 辞	20

Contents

1.	Introduction	1
2.	Basic Study of a Vacuum System	1
2.1	Duct Design	1
2.2	Beam Life Time vs Vacuum Pressure	2
2.3	Pressure Distribution	4
2.4	Heat Analysis	6
2.5	Influence from the Time Varying Magnetic Field	8
3.	Mock-up Tests of the Vacuum System	12
3.1	Performance Test by a Mock-up Normal Cell	12
3.2	Measurement of Outgassing Rate from Sample Ducts	16
3.3	Measurement of Induced Magnetic Field	17
4.	Summary	19
	Acknowledgement	20

1. はじめに

SPRING-8のシンクロトロンの真空系の設計を進めてきたが、特に初期の段階で検討した、ビーム寿命と真空度の関係、ダクト中の圧力分布、熱的解析、渦電流による誤差磁場等を見積る方法について、ここでまとめてみる。これらは、装置の設計のスタートとなる基本的量であるので、現実に近い評価をしておきたいところである。そのためもあってか、コンピュータコードを使った解析が得てして行われる。しかし、そのコードは一般には、だれでも自由に使えるというようにはなっていないし、与えられたもの以外にもデータがほしい場合が多い。そこで、本報告では、プログラム電卓もしくはパソコンで簡単に計算できる範囲までとして上記の課題の簡便な解析法を求め、シンクロトロンに適用してみた。主要なものは、すでによく知られている方法に倣ったが、いくつかはこの報告書で独自に考えた。簡易手法であっても実用上充分使える可能性があり、もしそれが実証されれば、設計変更、他の装置の検討等の時に役立つであろう。

一方、設計上の性能が実現されるのかどうか、実機製作の前に確認しておくことも大切である。実機を模擬したノーマルセル1セル分のダクト及び排気系を製作し実証試験を行った。特に実際の運用で大事なことである、真空系の立ち上げに要する時間を明らかにする事、基礎データとしてのダクトの放出ガス率の測定、シンクロトロン固有の問題である渦電流の測定などを課題として行った。結果の一部は丁度上記の見積りの検証にもなる。次章では基本パラメータの見積、3章では模擬試験、いわゆるR & Dの結果を報告する。

2. 真空系の基礎的検討

2.1 ダクトのデザイン

(1) 内径

シンクロトロンのダクトの内径寸法WはいわゆるBSC (beam stay clear) から決める。

$$W > BSC + \text{ダクトの製作・設置誤差}$$

が必要条件であるが、電磁石のコストを考えると出来るだけ小さくしたい。また、BSCはその位置での β 関数に依存して変化するが、一般にはダクト径は最大BSCを取って一様に作るようである。BSCはオンアクシスのシンクロトロンの場合、以下の条件で最大値をとる；①入射直後、② β 関数の最大の場所、③COD (closed orbit distortion) が残っているとき。とはいへ、BSCは一意的に決まるものでもなさそうであり、以下は見積の一例である。

$$BSC = 2.5 \{ \sqrt{(\varepsilon \beta)} + 2 (\Delta P/P) \eta \} + COD + X$$

$$= 36 \text{ mm}$$

$$\text{ここで、 } \varepsilon = 0.3 \text{ mm mrad} \quad \beta = 16.73 \text{ m}$$

$$\Delta P/P = 0.25\% \quad \eta = 1.0 \text{ m}$$

$$COD = 3.2 \text{ mm} \quad X (\text{coherent osc}) = 14.7 \text{ mm}$$

1. はじめに

SPRING-8のシンクロトロンの真空系の設計を進めてきたが、特に初期の段階で検討した、ビーム寿命と真空度の関係、ダクト中の圧力分布、熱的解析、渦電流による誤差磁場等を見積る方法について、ここでまとめてみる。これらは、装置の設計のスタートとなる基本的量であるので、現実に近い評価をしておきたいところである。そのためもあってか、コンピュータコードを使った解析が得てして行われる。しかし、そのコードは一般には、だれでも自由に使えるというようにはなっていないし、与えられたもの以外にもデータがほしい場合が多い。そこで、本報告では、プログラム電卓もしくはパソコンで簡単に計算できる範囲までとして上記の課題の簡便な解析法を求め、シンクロトロンに適用してみた。主要なものは、すでによく知られている方法に倣ったが、いくつかはこの報告書で独自に考えた。簡易手法であっても実用上充分使える可能性があり、もしそれが実証されれば、設計変更、他の装置の検討等の時に役立つであろう。

一方、設計上の性能が実現されるのかどうか、実機製作の前に確認しておくことも大切である。実機を模擬したノーマルセル1セル分のダクト及び排気系を製作し実証試験を行った。特に実際の運用で大事なことである、真空系の立ち上げに要する時間を明らかにする事、基礎データとしてのダクトの放出ガス率の測定、シンクロトロン固有の問題である渦電流の測定などを課題として行った。結果の一部は丁度上記の見積りの検証にもなる。次章では基本パラメータの見積、3章では模擬試験、いわゆるR & Dの結果を報告する。

2. 真空系の基礎的検討

2.1 ダクトのデザイン

(1) 内径

シンクロトロンのダクトの内径寸法WはいわゆるBSC (beam stay clear) から決める。

$$W > BSC + \text{ダクトの製作・設置誤差}$$

が必要条件であるが、電磁石のコストを考えると出来るだけ小さくしたい。また、BSCはその位置での β 関数に依存して変化するが、一般にはダクト径は最大BSCを取って一様に作るようである。BSCはオンアクシスのシンクロトロンの場合、以下の条件で最大値をとる；①入射直後、② β 関数の最大の場所、③COD (closed orbit distortion) が残っているとき。とはいえ、BSCは一意的に決まるものでもなさそうであり、以下は見積の一例である。

$$\begin{aligned} BSC_x &= 2.5 \{ \sqrt{(\varepsilon \beta)} + 2(\Delta P/P) \eta \} + COD + X \\ &= 36 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{ここで、 } \varepsilon = 0.3 \text{ mm mrad} \quad \beta = 16.73 \text{ m}$$

$$\Delta P/P = 0.25\% \quad \eta = 1.0 \text{ m}$$

$$COD = 3.2 \text{ mm} \quad X (\text{coherent osc}) = 14.7 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 BS Cy &= 3 \{ \sqrt{(\varepsilon \beta)} \} + COD \\
 &= 17.0 \text{ mm} \\
 \text{ここで、 } \varepsilon &= 1.4 \text{ mm mrad} \quad \beta = 17.9 \text{ m} \\
 COD &= 2.0 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

以上から、この場合のダクト内径として、X方向7.2 mm, Y方向3.4 mmが推奨される。用いたパラメータは当時のシンクロトロンの設計値の一例であり、R & D用に製作したビームダクトはこの数値を採用した。

(2) ダクト形状

ダクトの形状としては橜円またはレーストラックのどちらかとなる。ビームからはどちらでもかまわないようである。製作の工程からするとレーストラックのほうが作り易い：たとえばフランジ部など。一方、薄肉ダクトに補強リブを取り付ける場合は、橜円のほうが補強の効果が強く、リブの間隔を広く取る事が出来る。なお、R & Dで製作したダクトは橜円形にした。

2.2 真空度とビーム寿命

本節では、電子加速器のビームダクト中の真空度とビームの寿命の関係を見る。ここでは高工研サマースクールのテキスト [小林正典 OHO' 87] に従って見積もる。ダクト中の残留ガスに電子が衝突してエネルギーを失い、あるいは進行方向を変えられてダクトに当たりビームとしての存在を失うことを基本のプロセスとする。残留ガスによって散乱される過程は以下に見る3つがある。残留ガスとしてはCO (Z = 10) を考えれば十分である。また、RFのパケツからこぼれないための電子のエネルギーの減少率を2/1000 (8 GeVに対して16 MeV) 以下とする。

① ラザフォード散乱の断面積

$$\sigma_R = \frac{e^2 Z^2}{4 \pi \varepsilon^2 \theta_c^2 E^2} = \frac{4.63 \times 10^{-10}}{E^2} \text{ (m}^2\text{)}$$

ここで臨界角 θ_c は

$$\theta_c = \frac{a \cdot 2\pi\nu}{周長} = \frac{0.017 \times 2\pi \times 8.78}{396} = 2.37 \times 10^{-3}$$

(aはダクト半径、νはチューン)

$$e = 1.6 \times 10^{-19}$$

$$\varepsilon = 8.85 \times 10^{-12}$$

Eは電子のエネルギー (eV)

Z = 10 とする (CO)

②原子核による制動放射（ブレムス）の散乱断面積

$$\sigma_B = \frac{4}{137} Z^2 r_0^2 \ln \left(\frac{183}{\sqrt[3]{Z}} \right) \cdot \ln \left(\frac{E}{\Delta E} \right) = 6.4 \times 10^{-24} \text{ (cm}^2\text{)}$$

ここで $E/\Delta E = 500$

$r_0 = 2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$ (電子の古典半径)

③殻電子による散乱

$$\sigma_M = \frac{2\pi r_0^2 n 0.51}{\Delta E} = 1.78 \times 10^{-24} / E \text{ (cm}^2\text{)}$$

ここで n は気体分子中の電子数 (CO で 1.4)

$\Delta E = E / 500$ (GeV)

以上の関係式を使って表2.1 の各断面積を得る。

表2.1 各断面積と全断面積 σ のエネルギー依存性 (単位は cm^2)

	8GeV	4GeV	2GeV	1GeV
σ_R	7.2E-26	2.9E-25	1.2E-24	4.6E-24
σ_B	6.4E-24	6.4E-24	6.4E-24	6.4E-24
σ_M	2.2E-25	4.4E-25	8.9E-25	1.8E-24
σ	6.7E-24	7.1E-24	8.5E-24	1.3E-23

全断面積 σ (cm^2) が求まれば衝突時間 (= 平均寿命) τ は下式のように圧力 P (Torr) の関数で求められる。

$$\tau = \frac{1}{1.05 \times 10^{27} \sigma P} \text{ (sec)}$$

τ と P の関係を図2.1 に示す。

シンクロトロン運転で仮に 1 秒近い蓄積をするとしても、 1×10^{-6} 程度の真空度でまだ余裕があることがこの図から言える。しかし真空装置としては、その真空度は丁度使いにくいところであるので、もう一桁下げた 1×10^{-8} Torr 以下とするのが適当であろう。

表2.1 からは、寿命はほとんどブレムスで決まっていることがわかる。そしてダクト径への依存性はラザフォード散乱に現れるが、それが効いてくるは 1 GeV 以下の話である。よって、図 2.1 に示す結果は、多少の設計変更にかかわらず、このまま使うことができるといえる。

2.3 圧力分布見積

2.3.1 圧力分布

真空システムを設計することにおいては、まずビームダクト中の圧力を要求通りに作ることが肝要である。ただし問題は、圧力を支配するダクトの放出ガス率が、履歴あるいは運転時間によって大きく変化することにある。よって、ある程度排気を行ってからの放出ガスの状態を想定して設計するしかない。ここでは、想定した放出ガス率のもとでシンクロトロンのビームダクト中の真空度の分布を見る。イオンポンプを偏向電磁石の両端に配置した場合と片端にした場合を比較した。

ここでは、ダクトとしてR & Dで用いた形状のものを扱う。いくつかの基本パラメータは以下の通りである。

楕円ダクトの長径を $2a$ 、短径を $2b$ とすると、 $a = 36\text{ mm}$, $b = 17\text{ mm}$

ダクト開口部の面積は、 $\pi ab = 19.2 \text{ cm}^2$

ダクト周囲Uは近似式 $U/4 = 0.987a + 0.311b + 0.2867b^2/a$ により $U = 17.2 \text{ cm}$

(1) 熱的放出ガス

熱的放出ガス率を $1 \times 10^{-10} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ とする。これはR & Dの結果によると、排気開始から1日程度たった時の値である。この値にダクトの周長を掛けてダクト単位長さ当たりの熱的放出ガスを求めるとき、 $1.72 \times 10^{-9} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm})$ となる。

(2) 放射光による放出ガスの見積

次に放射光によるガス放出を見積る。必ずしもまだ十分な経験則は得られていないようであるが、ここではESRF [ESRF Foundation Phase Report 1987] の検討を倣う。

まず、フォトン数 N_p を見積る。

$$N_p = 8 \times 10^{-17} I \cdot E / (2\pi\rho)$$

ここで $I = 10 \text{ mA}$, $\rho = 30 \text{ m}$ とすると

$$N_p = 4.1 \times 10^{14} \text{ Photons}/(\text{s} \cdot \text{cm}) \quad (\text{E} = 1 \text{ GeV} \text{ のとき})$$

$$N_p = 3.28 \times 10^{14} \text{ Photons}/(\text{s} \cdot \text{cm}) \quad (\text{E} = 8 \text{ GeV} \text{ のとき})$$

次に、ガス放出率を、下記の経験式を用いて計算する。

$$Q = 2N_p \cdot 3 \times 10^{-21} \cdot 5 \times 10^{-6} \cdot D^{-2/3} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm})$$

ここでビーム運転の積算を $D = 0.01 \text{ (A h)}$ とすると、

$$Q = 2.64 \times 10^{-9} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm}) \quad (\text{E} = 1 \text{ GeV} \text{ のとき})$$

$$Q = 2.12 \times 10^{-8} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm}) \quad (\text{E} = 8 \text{ GeV} \text{ のとき})$$

1サイクルあたりの平均エネルギーを考慮すると(0.35秒間放射光があるとする)

$$Q = 4.2 \times 10^{-9} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm})$$

(3) 壓力分布の計算

よく知られている下式を用いて、ダクト中の圧力分布を計算する。

$$P(X) = \frac{qL}{S} + \frac{qX(2L-X)}{2C} \quad (2.3.1)$$

ここで、ダクト単位長さ当たりの放出ガスの合計 q は、上記 (1), (2) より、

$$q = 5.9 \times 10^{-6} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm})$$

C は単位長さ当たりのコンダクタンスであり、楕円管についての公式により、

$$C = 137.5(a^2b^2)/1\sqrt{(a^2+b^2)} = 1.29 \times 10^3 \text{ l/s} \quad (1 \text{ cm} \text{あたり})$$

S はポンプの排気速度で、とりあえず 50 l/s とした。 L はポンプ間のダクト長さの $1/2$ である。なお、上式の実用性は R & D で確認された。偏向電磁石の配置の周期を 5 m とした時の (1 セルが 10 m) 計算の結果を図 2.2 に示す。

この図では偏向電磁石の両端と片端にイオンポンプを配置した場合を比較しているが、前節で述べた $1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ 以下という条件は、後者の場合でも充分満足することを示している。

2.3.2 動的解析

前項では、放射光によるガス放出を時間的平均にして取り入れたが、実際にはガス放出はビームのパルスに応じて時間的に変化している。では、それに応じた圧力の最大値はどのくらいになるであろうか。これを計算してみる。なお、ここでは光放出のみ考えて熱放出は含めていない。

圧力の時間変化は下式で与えられる。

$$\frac{dP}{dt} + \frac{1}{\tau}P = \frac{q(t)}{v} \quad (2.3.2)$$

τ はダクトの排気の時定数であり、単位長さ当たりの体積を v とすると、

$$\tau = vL \left(\frac{2}{S} + \frac{L}{2C} \right) \quad (2.3.3)$$

ここで $q(t)$ には前項で計算した 1 GeV から 8 GeV までの光放出の変化をいれる。時間的に 1 次の関数であることを仮定して (光放出はエネルギーに比例するとして) 右辺を $a t + b$ とおけば、解は下式で表される。

$$P(t) = \tau(b - a\tau)(1 - \exp(-t/\tau)) + \tau at + P_1 \exp(-t/\tau)$$

光放出の無いときは τ の時定数で減衰し元に戻る。 P_1 は周期的条件から求められる。

前項で検討したケースに適用してみると、ダクトでポンプから最も遠い所の距離は 2.5 m であるので、時定数は $\tau = 0.65 \text{ sec}$ となる。また、前に見積もってある、 1 GeV , 8 GeV の時の放出ガス量と加速時間 0.35 秒 から、 $a = 2.4 \times 10^{-6}$, $b = 1.38 \times 10^{-7}$ となるので、図 2.3 のような時間変化を得る。光放出を時間的に平均化して計算したときの圧力は $1.44 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ であり、当然その値を中心にして上下に変化している。ピークは平均の 1.4 倍であることがわかった。

2.3.3 粗引き時の圧力分布

大気圧からシステムを立ち上げる、すなわち粗引きの時は TMP (ターボ分子ポンプ) を用いるが、どの程度の数にしたらよいかを検討する資料として圧力分布を調べる。シンクロトロンでは TMP の取付可能な場所は 5 m を周期としてあるといえるので、ここでは 5 m の倍数をパラメータとした。放出ガス率は $7.7 \times 10^{-10} \text{ Torr} \cdot \text{l}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ とした。これは R & D の結果によると排気開始から 2 ~ 3 時間後の値である。またポンプの排気スピードは 30 l/s にした。配管の結果で実際この程度になる可能性はある。上式を使って計算した結果を図2.4 に示す。

一例として、30 m に 1 台 TMP セットを付けるとすると、ポンプから一番遠い場所は 15 m になるが、そのとき圧力は $1 \times 10^{-5} \text{ Torr}$ 強なのでイオンポンプの起動は可能である。ところで、ここで使った放出ガス率は、実は前節で見積もった光放出を含むガス放出率の約 2 倍に相当している。よってイオンポンプを起動するとすぐに図2.2 の約 2 倍の圧力になると言つてよい。

2.4 热解析

渦電流によるダクトの温度上昇は無視できる程度であるので、ここでは放射光による温度上昇を取り扱う。はじめに放射光のパワーを求め、次にそれを熱源とした熱伝導を考える。この時、時間的に平均化しているので、最高温度上昇はさらに断熱近似を加えて見積る。熱伝導の式に空冷の効果を取り込んでいる所は現実的である。

(1) 放射光のパワー

放射光のパワーは下式で求められる。

$$W = \frac{8.85 \times E^4 \times I}{\rho} \quad (2.4.1)$$

ここで $\rho = 29.54 \text{ m}$ 、 $I = 10 \text{ mA}$ とする。

発生熱量はパワーに時間を掛けることによって得られる。各エネルギー状態毎の発生熱量をたし合わせて全発生熱量を計算する。

8 GeV では、 $Q = 122 (\text{kW}) \times 0.15 (\text{sec}) = 18.3 \text{ kJ}$

ただし、8 GeV で 0.15 秒回す場合は満杯バケツではなく、40 バケツ程度であるので、6 % デューティになる。満杯バケツの時は、20 ms 程度で出射してしまうとすると、13 % になるのでここでは、

$Q = 2.4 \text{ kJ}$ とする。

1 GeV では、 $Q = 30 (\text{W}) \times 0.15 (\text{sec}) =$ 省略する

加速中は、 $Q = 30 \times \int_0^{0.35} (20t+1)^4 dt = 9.84 \text{ kJ}$

よって、平均的な(1サイクル間の)パワーは、

$$W = 2.4 + 9.84 = 12.24 \text{ kW}$$

1 mあたりでは

$$W = 12.24 / 2\pi\rho = 0.066 \text{ kW}$$

(2) 温度上昇

上記の熱による温度上昇を見積もる。ここでは簡単のためシンクロトロンの直線部は無視し、光をうける壁は発光と同じ $2\pi\rho$ の長さとする。また、ここではリブ補強付きの薄肉ダクトをとりあげる。

光ビームが線状にダクトに当たるとして、ダクト壁周方向の一次元熱伝導を考える。

$$\frac{dT}{dt} = a \nabla^2 T + \frac{Q'}{c \rho} \quad (2.4.2)$$

$$\text{ここで, } a = \lambda / (c \cdot \rho)$$

時間変化を考えなければ、

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{Q'}{\lambda} = 0 \quad (2.4.3)$$

ここで、 Q' は（熱源以外の所で）冷却効果でとるので符号を反対にした。

自然対流による冷却を、 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{deg})$ とする。

またステンレスの熱伝導係数 $\lambda = 0.016 \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{deg})$ を使う。

Q' の単位は W/mm^3 であるが、冷却は W/mm^2 であることに注意しなければならない。ここで、ダクトの厚さを 0.3 mm として冷却率を単位体積当たりにするには、ダクトの厚さを 1 mm に換算する必要がある。すると 0.3 mm 厚さのダクトに対しては上記冷却率を $1/0.3$ 倍する。

よって、

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - (2.08 \times 10^{-3}) T = \frac{d^2 T}{dx^2} - (0.046)^2 T = 0$$

温度分布は、

$$T(X) = T_0 e^{-0.05X} \quad (X: \text{mm}) \quad \text{の形をしている。}$$

T_0 を求める。上記温度分布を積分して冷却による熱損を求め、入射熱と等しいとする。上記の温度分布をもつ 1 mm 長さ 1 m の線素からの冷却を積分する。ダクト半周を 90 mm として、

$$T_0 \times 10^{-2} \int_0^{90} \exp(-0.05X) dX = T_0 \times 10^{-2} \times 19.8 \text{ W}$$

これを上記入力の 66 W と等しいとする。

$$2 \times T_0 \times 0.198 = 66 \quad \text{これより } T_0 = 167 \text{ 度}$$

これはダクトの照射点での時間平均の温度となる。

実際は熱はパルス的に来るので過渡現象の計算が必要であるが、複雑になるので、ここでは簡単に断熱近似で見積もる。上記の $12.24 \text{ kJ}/2\pi\rho$ の熱量が 1 mm 幅でダクトに吸収されたとする。 0.3 mm 厚のステンレス板の熱容量は 1 cm あたり $0.01 \text{ J}/\text{deg}$ であるので結局 66 度の温度上昇と計算される。最高の温度上昇は上記平均値にこれを加えた 233 度になる。明らかにこれは過剰見積であり、この値でもステンレスとしては耐えられるが、補強リブによる冷却効果も考えれば、実際の照射点での最高温度上昇はおそらく 150°C 程度でおさまるであろう。

2.5 時間変化する磁場の影響

ビームダクトが係わる問題でシンクロトロンで無視してはならないことは、磁場が時間的に変化することによってダクト上に、特に偏向電磁石において、電圧・電流が誘起されることである。一つは渦電流によって内部の磁場が乱されること、もうひとつはダクトが磁石全体をかこむループの一部になって、ダクト両端に電圧が発生することである。ここではそれらの値を計算により見積もることを試みる。

2.5.1 渦電流による磁場の乱れ

(1) 計算式による

知られている計算式にはDESYで提案されたものがある [G.Hemmie and J.Rossbach:DESY M-84-05]。ダクトの中心における渦電流による磁場 ΔB は

$$\Delta B = \frac{\mu \cdot t \cdot a \cdot \dot{B}}{h} \int_0^{\pi/2} \sin \phi \sqrt{(\cos^2 \phi + (b/a)^2 \sin^2 \phi)} d\phi. \quad (2.5.1)$$

ここで $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$

$\sigma = 1.36 \times 10^6$ (1/ $\Omega \cdot m$)

$t = 1.65 \times 10^{-3}$ (m) (ダクト肉厚)

$a = 36.85 \times 10^{-3}$ (m)

$b = 17.85 \times 10^{-3}$ (m)

$\dot{B} = 2.32$ (T/s)

$h = 23 \times 10^{-3}$ (m) (磁極ギャップの1/2) を代入すると

$\Delta B = 2.23 \times 10^{-4}$ (T) を得る。

また、6極成分の定義から ΔB の分布 ($\Delta B = p X^2 + q$ とする) を逆算すると、

$p = \Delta B / (2a^2 \int$ (上式の積分)) と表される。よって

$p = 0.14$ を得る。

(2) パソコンによる数値計算

レーストラック型のダクトについてはよい近似式が見あたらないので、ここではプログラム電卓もしくは小型パソコンレベルで計算可能な、簡単な方法について考える。以下はそのアウトラインである。

図2.5の様にx y面でレーストラックを考える。磁場はy方向に一様に与えられる。磁場の時間変化によってダクト上に誘起される電流*i*はx, ダクトの肉厚*t*, 磁場変化率 \dot{B} に比例し、ダクトの抵抗 ρ に反比例するので結局 $i(x) = x t \dot{B} / \rho$ と書ける。

上記電流線素が作る $y=0$ 面上の、あるXでの磁場を計算し、電流線素をダクト一周にわたって足し合わせればその点での磁場が得られる。

磁場の計算は2手に分かれる。上下のフラットな部分は解析的に簡単に計算できるのでそれを使う。円周部分はむしろ数値積分をしたほうが簡単なようである。

線電流*i*が作る磁場は円周方向に $H_\theta = i / 2\pi l$ (l はお互いの距離) であるので、図の

ようなダクト上 x にある電流 i が X の位置に作る磁場の y 方向の成分は

$$H_y = i \cdot \sin \theta / 2\pi l = \frac{x(x-X)}{l^2} \cdot \frac{t}{2\pi\rho} B$$

磁場はこれを x について積分し、上下対称の分 2 倍する。

$$B(X) = \frac{\mu t}{\pi \rho} \cdot B \int \frac{x(x-X)}{l^2} dx \quad (2.5.2)$$

ここで、 $l^2 = (x-X)^2 + a^2$, a はダクト高さの $1/2$

上下のフラットの部分は $-b$ から b まで (2.5.2) 式を解析的に積分すればよい。公式により、

$$\begin{aligned} \int dx &= 2b + \frac{X}{2} \left[\log \frac{(b-X)^2 + a^2}{(b+X)^2 + a^2} \right] \\ &\quad - a \left[\tan^{-1} \frac{b-X}{a} + \tan^{-1} \frac{b+X}{a} \right] \end{aligned} \quad (2.5.3)$$

円周部分は $x = b + a \cdot \sin \phi$ とおいて (ϕ は円周角)、 ϕ について積分をおこなう。ただし上の式(2.5.2)で、 $dx = a \cdot \cos \phi \cdot d\phi$ として x 方向の積分にこだわることには意味がない。ここでは周に沿って $ds = a \cdot d\phi$ と考えるべきである。

なお、 $l^2 = y^2 + (x-X)^2$ であるが、 y と x の関係は左右の半円で異なる。すなわち、 $(x+b)^2 + y^2 = a^2$ と $(x-b)^2 + y^2 = a^2$ との関係になる。

これらのこと考慮すると (2.5.2) 式の残る円周部分の積分は (2.5.4) 式のようになる。

$$\begin{aligned} a \int_0^{\pi/2} d\phi &\left[\frac{x(x-X)}{2x(b-X) + X^2 + a^2 - b^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{x(x+X)}{2x(b+X) + X^2 + a^2 - b^2} \right] \end{aligned} \quad (2.5.4)$$

この円周上の積分を 20 点くらいに切って、シンプソンなどの近似法で数値的に計算すればよい。このとき x は上記のように ϕ から決まる。

以上の計算においては、実際はごく近くに鉄心があるのにその存在を考えていない。鉄心の影響はよく知られているように、鉄心の先端面を鏡に見立ててその鏡像を重ね合わせれば得られる。プログラム上では、鏡像の位置の y 座標を上記の各式に代入すればよいのでルーチン的に計算できる。すなわち、中心面からの鉄心のある高さを h とすると、すでに求めた電流分布を $2h$ シフトさせて、それが中心面につくる磁場を計算する。この像の下側の鉄心の面による鏡像は $-4h$ シフトさせたものである。このように上下にある何重かの鏡像を重ね合わせればよい (図2.6参照)。実際には 2 重 (合計 5 つの電流分布) ぐらいで十分であろう。

そこで、上方針をプログラム化し (1)と同じパラメータを入れて計算した結果を図2.7に示す。

この図で、2 次曲線 $\Delta B = p X^2 + q$ をフィッティングさせて p を求めると

$$p = -0.1 \quad \text{を得る。}$$

(3) 結果の比較

以上の検討をまとめてみよう。ここでは後に述べるR & Dの結果も含める。計算に用いたパラメータはすべてR & Dのそれに合わせてあり、ダクトの肉厚は 1.65 mmとした。また、数値はダクトの中心での値である。

ダクト形状	方 法	結 果	
		2極成分($\times 10^{-4}$ T)	分布の係数(p)
楕 円	実 測	2.2	0.14
楕 円	DESYの式	2.2	0.14
V-ストラク	数値計算	2.3	0.10

DESYの式と実測のよい一致が印象的である。数値計算と他とに見られる相違はダクト形状の差に起因するものであろう。それでも大きな差でない点は数値計算もかなりよい近似になっていることを示していると思われる。

2.5.2 偏向電磁石によるダクト上の誘起電圧

シンクロトロン運転では磁場が常に変動しているわけであるから、もしその磁場の変化を拾うループがあるとするとそこに当然電流が発生する。偏向電磁石に取り付けられたダクトの磁石の両端に電線をつないで短絡させるとする。その時できるループは図2.8(a)のAもしくはBのようなものになる。この図は磁石の中のフラックスをループがどのように拾うかを表しているが、よく見るとAとBは等価である事がわかる。よって、どのようなものにしろ、偏向電磁石の両端につないだケーブルを接触させると(例えばポンプ電源、位置モニターのアース側) ループを形成するといえる。では、どの程度の電圧が発生するかを見積もってみる。

偏向電磁石の長さを3 m、ポール幅を0.15 m とすると、フラックスの存在する断面積Sは $S = 0.45 \text{ m}^2$ となる。磁場の変化を $\dot{B} = 2.3 \text{ T/s}$ とするとこのフラックス変化で生じる電圧Vは、 $V = \dot{B} \cdot S = 1.04 \text{ Volt}$

このうちループが拾う実効的割合は図2.8(b)で端からの距離に比例するので、 $111/150=0.74$ の分だけ電圧が出る。すなわち $V = 0.76 \text{ Volt}$

後に述べるR & Dにおいてこれに近い電圧が得られ、ここで検討の正しさが確かめられた。64個の磁石では合計 $0.76 \times 64 = 49 \text{ Volt}$ となり、かなりの電圧と言える。よって、シンクロトロンは少なくとも1箇所でビーム方向に絶縁されなければならないが、もっと望ましいのは偏向電磁石ごとにセラミックブレークを挿入することである。この時にも排気系・モニター系で直接ダクトにケーブルをつなぐときはループができないようにしなければならない。コンクリートの抵抗は充分有るとおもわれるので架台は問題ないのである。

2.5.3 セラミック部チタンコーティングのシールド効果

シンクロトロンで多く用いられる電流計は、コイルにより磁束を取り込む原理を使っているので、その部分では磁束に直接触れるよう金属ダクトをさけてセラミックダクトを用いる。一方、セラミック上では電子のチャージアップが生じ、不要な放電が発生する可能性がある。これを避けるために一般にはセラミック表面にチタンをコーティングして電荷を逃がしているようである。

ところで電流は構造を見れば高周波であるのでコーティングはシールドの効果をもたらす。この問題は渦電流と類似しているのでここで評価をしておく。

チタン膜での表皮効果を調べる。スキンデプスは（電磁気の教科書から）

$$\delta = \sqrt{(2\rho/\omega\mu)} \text{ で表される。}$$

ここでチタンは $\rho = 4.2 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$

$\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ そして

$\omega = 2\pi \times 10^9 \text{ rad/s}$ (基本波は508MHzであるので) とすると

$\delta = 10 \mu\text{m}$ となる。

5 μm のチタンコーティングをすると

$$\exp(-5/10) = 0.6$$

すなわち信号は60%になってしまふ（高調波成分はもっと減衰する）。よって、チタンコーティングはなるべく薄いほうがよいといえる。壁電流は当然、コイルの外側にあるシールドまたはバイパスに流すようにする。

3. 実機を模擬した装置による実証試験

3.1 ノーマルセルのモックアップによる性能試験

シンクロトロンの真空系の設計性能を実証するために、あるいは設計に資するために、ノーマルセル1セル分（長さ約10m）を製作し、各種試験を行った。特に重視したのは、ポンプの配置と真空度との関係を見て最適化すること、真空系の立ち上げに要する時間を知ること等である。

なお、ここで製作した真空系は当然ながら最終設計のそれとは同じではない。パラメータスターのしやすいように多少コンポーネントは多めに備えてあるし、ダクト形状も暫定的なものである。

注：以下に示すデータは単位系としてPaを用いている。

$$\text{Torrとの換算は} \quad 1 \text{ Pa} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{m/s} = 7.5 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/(s} \cdot \text{cm}^2\text{)}$$

3.1.1 真空系の構成

ノーマルセルモックアップ用の真空装置は、ビームダクト、ポンプ、真空計等から構成される。構造図を図3.1に、系統図を図3.2に示す。また、図3.3に全体および部分の写真を示す。

①ビームダクトの構成

ビームダクトは、断面が楕円形状（72mmx34mm）をした4本のステンレス鋼製のダクトから構成される。偏向電磁石に挿入される部分は0.3mm厚さの補強リブ付きダクト、その他の部分は1.65mm厚さの厚肉ダクトであり、それぞれがフランジで接続される。ベローズおよび、ポンプ、真空計取り付け用のポートが4箇所ずつ設けてある。

ビームダクトは、製作後、有機溶剤を用いて洗浄し、24時間のベーキングをしてある。ただし、予備測定等を行ったため、今回の試験では長期間大気にさらされた状態のものを測定することとなった。よって、実機より良い状態とはおそらく言えないであろう。

②ポンプの配置

製作した装置の範囲内で、なるべく実機に近いポンプの配置をつくって調べた。

粗引き用ポンプとしてはターボ分子ポンプを用いる。実機のノーマルセルでは、2セルに1台の割合でポンプを配置することになっているため、これを模擬すべく、10mのビームダクト（1セル分）の端部ポートにポンプを取り付けた。

用いたターボ分子ポンプの排気速度は50 l/sである。実機でのポンプの排気速度はもう少し大きい可能性はあるが、ビームダクトのコンダクタンスが小さいので、排気速度の違いによって圧力分布にそれほど大きな相違はできないであろう。

主排気用ポンプとしてイオンポンプを各ポートに取り付けてある。ただし、実機のノーマルセルでは1セルに2台の割合でポンプを配置することになっているため、取り付けた4台のうち2台を用いた。4台を用いた場合の結果は割愛する。

用いたイオンポンプの排気速度は20 l/sである。実機でのイオンポンプの排気速度は60 l/s程度であるため、実機における圧力分布は、今回の測定よりも若干低くなると考えられる。

③測定器

ダクト内の圧力測定のために、ヌードイオンゲージ3個、B-Aゲージ1個、コールドカソードゲージ（CCG）1個を取り付けた。

また、ダクトの温度変化を測定するために、2箇所に熱電対を取り付けた。

各真空計の出力および、熱電対の出力は、ペンレコーダーで記録した。

3.1.2 測定結果

(1)粗引き排気特性（TMPによる排気）

測定は4回繰り返して行った。1回の測定終了後は大気を導入して放置しておき、数日から数十日後に次の測定を行った。時間-圧力の特性を図3.4に示す。ここに示す圧力とは、ダクト内の平均圧力である。

ケース1およびケース2はターボ分子ポンプによる排気を長時間続けたものであり、ケース3およびケース4は粗引き後、引き続きイオンポンプによる排気を行ったものである。（ターボ分子ポンプによる排気データのみを示す。）

4ケースとも同様の特性を示しており、圧力は排気時間 t の関数となり、対数表示で表した場合、ほぼ t^{-1} で減少していることがわかる。

また、粗引き開始後2～3時間で圧力は 1×10^{-3} Pa (7.5×10^{-6} Torr)以下になるが、このくらいだとイオンポンプの起動が可能になる。もっとも、時間があればさらに引いてイオンポンプの負担を軽くすることも考えるべきである。

(2)イオンポンプによる排気特性

2ケースの測定を行った。時間-圧力の特性を図3.5に示す。ここに示す圧力とは、ダクト内の平均圧力である。

また、ベーキングを行った場合の特性を図3.6、3.7に示す。図3.6は時間軸を対数としてベーキングの効果をみたものであり、図3.7は時間軸を線形としてベーキング中の様子をみたものである。実機では据え付け後のベーキングは行わないが、ベーキングによる効果をみるために、参考として行った。ベーキング条件は、ケース3は 250°C -24時間、ケース4は 250°C -12時間×2回である。

図3.5より、排気後100時間程度（4日程度）で圧力が 3×10^{-6} Pa程度になることがわかる。実機において、圧力がこの程度まで低くなていれば、ビーム入射を開始するのには十分であると考えられる。排気開始からビーム入射開始までには電磁石や電源の調整があり、時間には余裕があるので、このポンプ配置であればノーマルセルの排気系の条件を満足できるであろう。

図3.6、3.7では、ベーキングによる圧力をさげる効果を見る能够である。ベーキングを2回に分けた場合にも、連続して行った場合と同様の特性を示している。

また、ケース4においては、試験中に停電があったため10時間程ポンプが停止していた。復電後そのままイオンポンプ電源を入れたが、連続的な排気特性を示した。このことは、イオ

ンポンプ運転中は無停電電源を用意しておく必要も、復電後に粗引きからやり直す必要も無い事を表している。一つの理由は、イオンポンプは電源を切ってもしばらくは排気能力が残っているせいである。

(3)圧力分布

ターボ分子ポンプで排気した場合のダクト内の圧力分布を図3.8に示す。

測定値は、 5×10^{-3} Pa から 8×10^{-5} Pa までの任意の圧力における 5箇所のゲージの圧力を、両端のゲージの圧力差を基準として規格化してプロットしたものである。また、図中の曲線は計算によって求めた圧力分布である。計算方法については下記に示す。

測定値を計算値と比較すると、よい一致を示している。 8.2 m の位置で測定値にばらつきが見られるのは、測定に用いたコールドカソードゲージの動作が少し不安定であったためと考えられる。

<計算方法>

①圧力分布は下式で表される。

$$P(x) = \frac{q \cdot L}{S} + \frac{q \cdot x (2L - x)}{2C} \quad (3.1.1)$$

$P(x)$: x の位置における圧力 [Torr]

x : 排気口からの距離 [cm]

L : 排気口からダクト端部までの距離 [cm]

q : 単位長さ当たりの放出ガス量 [Torr·l/(s·cm)]

S : 実効排気速度 [l/s]

C : ダクトの単位長さ当たりのコンダクタンス [l·cm/s]

②ダクト両端の圧力（実測値）から排気速度 S および放出ガス量 q を計算する。

$$P(0) = \frac{q \cdot L}{S}$$

$$P(x) = \frac{q \cdot L}{S} + \frac{q \cdot L^2}{2C}$$

よって、 $P(L)/P(0) = R = 1 + S L / (2C)$

ゆえに、 $S = 2C(R-1)/L$

$$q = P(0) \cdot S / L$$

③計算式(3.1.1)に S , q の値を代入し、任意の点の圧力を計算し、測定値と比較する。

なお、ここで得られた放出ガス率 q は、別に測定したサンプルダクトからの放出ガス率と一致した。

3.1.3 測定値の補正

圧力測定をする際には、いくつかの補正をする必要がでてくる。これらの補正方法について以下に示す。なお、前項の測定結果には補正後の値を用いてある。

(1) ゲージの較正

ダクト内の圧力分布を測定するために複数の真空計を用いているが、真空計の指示値にはそれぞれ誤差が含まれているため、ある圧力に対して同じ測定値を示すように補正をする必要がある。較正方法を以下に示す。

まず、較正用のゲージと他の圧力測定用ゲージとを、同じ真空容器に取り付けて同時に圧力値を測定する。（真空容器内の圧力は均一とする。）較正用ゲージの指示する値を正しい圧力値とし、各ゲージの測定値をこれに等しくするために乗じるべき係数を求める。実際の測定においては、各ゲージの指示値にこれらの係数を乗じた値を測定値として用いることとする。較正用のゲージとしては、再現性のよいスピニングローターゲージを用いた。

これより、測定結果として用いる補正後の圧力値を下記のように設定した。

I G 1 :	指示値 × 1.3
I G 2 :	指示値 × 1.0
I G 3 :	指示値 × 1.1
I G 4 :	指示値 × 1.05
C C G :	指示値 × 1.0

(2) 温度補正

今回の実験は、部屋の空調をせず、時間帯によって直射日光が当たる条件の下で行った。そのため、真空ゲージの指示値を基に経過時間による圧力変化を調べると、室温の変化によって圧力の値が大きくふらついてしまう。よって、純粋に時間と圧力の関係を調べるために温度補正を行う必要がある。

いま、温度換算を行う前の圧力変化を図3.9に示す。この図より、室温8度での圧力を基準として以下の手順で温度換算を行う。

① 室温8度での<時間-圧力>関数を求める。

T M P 起動後 22.5 H r ~ 71.8 H r 間の室温8度での4点の圧力変化より<時間-圧力>関数を求めると、

$$Y = -9.7129 \log(X) + 21.181 \text{ at } 8^\circ\text{C}$$

X : 時間(H r), Y : 圧力($\times 10^{-8}$ Torr)

となる。 図3.9

備考：8度を基準としたのは、この温度においてなめらかな圧力変化を示したため。

②<温度－補正係数>関数を求める。

T M P 起動後 22.5 H r ~ 71.8 H r の間の各点の測定値と、それに対応する時間を上式に代入した計算値との比から、<温度－補正係数>関数を求めると

$$K = -0.068517T + 1.5523$$

T : 温度(度), K : 補正係数

となる。 図3.10

備考：この検討において、29Hr~37.5Hrの間で圧力が不連続となる部分があり上記の関係が成り立たないため、この部分のデータは削除する。

これより、測定値（ゲージ較正後）に、②に示す換算係数を掛けた値を測定圧力として用いることとする。

3.2 ダクトの放出ガス率の測定

真空的性能はダクトの放出ガス率に大きく依存することは言うまでもない。設計のデータベースにすることを目的として、実機を模擬したサンプルダクトを作り、放出ガス率を測定した。実機大のサンプルをあえて作る意味は、実機とほぼ同等の工程を経験する事により、履歴に影響を受け易い放出ガス率の測定値に現実性が期待できるからである。シンクロトロンのビームダクトに用いる可能性のある3つのタイプのダクト、すなわち、肉厚 $t = 1.65\text{ mm}$ の厚肉タイプ、 $t = 0.3\text{ mm}$ の薄肉で補強リブ付きのもの、全体がペーローズのものにつき、それぞれ実寸大で 1.5 m の長さにaturiサンプルとした。図3.11にサンプルダクトの写真を示す。さらに、高純度材料 [Clean-Z (NKKの商品名)] からなる内径 60 mm 、長さ 1.5 m のパイプも参考データのため調べた。これは、将来より低い真空度を求められたときへの準備という意味もある。

(1)測定方法

サンプルダクトの片端に 10 l/s のオリフィスを張り排気装置に取り付けた。測定のセットアップを図3.12にしめす。図からわかるように現物をサンプルとした単純なオリフィス法を用いている。ガスの流量はオリフィスのところの真空ゲージ G 2 による圧力とオリフィスのコンダクタンスから求めるべきであるが、構造上の困難さからダクトの反対側に取り付けたゲージ G 1 を G 2 の位置の値に換算して求めた。換算計数は、厚肉ダクトにおいて G 2 の位置にゲージポートを実際につくり、実測から求めた。なお、この換算係数は式(3.1.1)から計算した値 1.58 とよい一致をする。サンプルダクトにはヒーターと保温材を巻き温度のコントロールを行った。今回の測定ではダクトの温度は 27°C に保った。ただし、ベーキングは行わず、工場から受け入れたままの状態を調べた。

用いたゲージは通常のヌード型イオングエージで、事前にスピニングローターゲージで較正を行ってある。念のため、ゲージ G 1, G 2 は球の位置を交換して測定された圧力差を確認した。

(2)測定結果・考察

結果を図3.13に示す。ベローズダクトをのぞき3種類ともほぼ同じ値を出している。ベローズの放出ガス率が大きくでているのは、実際の表面積（フラットに比べて3.4倍）で割っていないせいである。Clean-Zが他と全く同じ値を示した理由は、今回はベーキングをしていないので放出ガスがH₂Oの支配する領域にいるせいと考えている。なお得られた値はすでに報告されているステンレス鋼のそれ〔たとえば「真空ハンドブック」日本真空技術KK〕と大きな差はない。

3.3 涡電流の測定

渦電流によって発生する磁場の見積もりは計算上はすでに前章で行ったが、実際と計算が一致するかどうか一度確認しておくことの意義は大きい。そこでR&D用に製作した偏向電磁石（BM）に、サンプルのダクトを取り付けて測定を行った。

(1)渦電流測定システム

シンクロトロン電磁石のR&D用に作った偏向電磁石とその電源を用いて、シンクロトロン実機と同等な条件で測定した。R&D用偏向電磁石と電源の主なパラメータは以下の通りである。

最大磁場強度	0.85	T
有効磁長	2.9	m
磁場精度	0.05	%
磁極間間隔	46	mm (シム間44mm)
磁極幅	150	mm
鉄心形状	C型	ストレート
材料	0.5mm厚無機コートイング付き無方向性電磁鋼板	の積層構造
最大起磁力	31120	AT
コイル巻数	20	ターン
インダクタンス	5.6	mH
冷却	強制循環水	
電源方式	サイリスタ	変換方式
最大電圧	55	V
最大電流	1720	A
最大出力容量	94.6	kW
安定度	±1×10 ⁻⁴	以下
リップル(P-P)	±1×10 ⁻⁴	以下

磁場強度の測定にはサーチコイル（直径6.5mm, 1000ターン）を用いた。サーチコイルをグラスファイバー製の棒の先端に取り付け、その棒をX Y駆動装置に取り付けて空間分布が取れるようにしてある。サーチコイルはダクトの中、BMの端部より約70cmに置かれるので、端部の影響はほぼ無いと考える。ダクトの横内径は72mmあるがサーチコイルが内面にぶつかるため横方向

のスキャンは実質±20mm程度である。渦電流による磁場は、ダクトが無い場合の磁場強度からダクトが有る場合のそれを引いてもとめた。コイルからの信号は市販のアンプ（NF回路設計ブック5321）で100倍にし、かつ内臓の100Hzローパスフィルターを通してA/D変換器（ADC）に入れる。ADCはパソコンの拡張ボード上にあり、パソコンのC言語プログラムでデータの取扱いができる。

ADCの基本性能を以下に示す。

品名	A DM - 1698 BPC マイクロサイエンス社製
入力	16ビット 8チャンネル差動 (16chシングル)
サンプリング速度	25μs / data
ゲイン温度ドリフト	50ppm/°C

図3.14に今回の測定システムを示す。シンクロトロン運転では $B = 2.3 \text{ T/s}$ であるのでサーチコイルには70mV程度の電圧があらわれる。一方、ADCの標準入力はフルスケール10Vであるので信号は100倍されるのが適当である。

(2) タイミング管理

ダクト形状、板厚、磁場の変化から見積もられる渦電流による磁場は、肉厚0.3mmのダクトの場合、ダクト中心で $4 \times 10^{-5} (\text{T})$ 程度である。測定の時の偏向電磁石の磁場は0.2T近くなので測定は 10^{-5} 程度の精度が望ましい。当面可能な精度向上の手段は以下に述べるようなタイミングの管理であった。磁場の高精度測定のためには一般に、測定システムを恒温室に入れ、環境を一定にして測定精度を向上させるようであるが、今回、我々にはその設備は無い。

タイミング管理の要点は、①通常行われるように、acラインの同一位相に合わせて測定を行う（位同期トリガパルスの発生）、②サンプリング用クロックパルスの管理、である。①は、サーチコイルが偏向電磁石からサイリスタノイズをひろうために、是非必要である。図3.15にサーチコイルからの生データを示すが、明らかにサイリスタノイズが乗っているのがわかる。②は信号を積分したものを比較して結果を得るので、サンプリングのタイミングの管理が肝要である。タイミングのズレが積分値に誤差をもたらすからである。サンプリングのタイミングと電流波形の関係を常に一定にするためにはADCのクロックでは不十分であるため、ここでは外部クロックを用いてタイミングをそろえた。

(3) 渦電流の測定結果

測定の対象は、厚肉ダクトとリブ付きダクトとした。

1ショットごとのスタートトリガはマニュアルで与えた。ある点での測定値は30ショットを取り平均した。個々のショットデータにはばらつきがあるものの、30点を平均させれば微少な差も有意に現れてくる。図3.15にはダクトの有無それぞれ5ショットづつ重ね打ちしてある。図3.15(b)は(a)のAの部分を拡大したものである。スキャッタリングは大きいものの、データは2つのグループに分かれている事は見て取れる。これを平均する事によってダクト有無の差、すなわち渦電流の効果がはっきり出るのである。

渦電流による磁場はダクトが無いときと有るときの磁場の差によってだした。磁場測定の結果

を図3.16に示す。測定は中心面上で水平方向にスキャンした。磁場は上げている途中の値である。ここではダクトとして、1.65 t のものとリブで補強された0.3 t の2種類を調べた。図では水平方向で磁場の強さに傾きを持っているが、これは我々の磁石がC型であるためである。この図で各点の値をそれぞれ引き、渦電流によって生じた磁場の強さを求めた結果を図3.17に示す。この図の曲線は理論式（2.5.1で示したDESYの式）から得られた値を示している。理論と測定のよい一致が得られた。さらに薄肉の場合はほぼダクトの肉厚に比例して小さくなっている。

(4) ダクト上に誘起される電圧の測定

ダクトの両端から電線を引きオシロスコープで電圧を測った。結果を図3.18に示す。この図にはD C C Tからの電流の信号も入れてある。電圧は当然ながら磁場（電流）の微分信号として現れている。これより磁場の上昇中は0.7ボルトの電圧が発生する事がわかった。ちなみにこのときテスターを挿入して短絡に近い状態で電流を流すと40A流れた。なおこの電圧はダクトにつながるループが最大見込むフラックスから見積もった誘起電圧とほぼ一致する（2.5.2参照）。

このことは、シンクロトロンでは、ポンプ、ゲージ、モニターなどに関する配線をするときは充分気をつけねばならないことを示している。

4. まとめ

真空系の基礎的検討において、本来言及すべきことがらであろうに割愛した部分がある。

一つは、ダクトの構造強度解析である。とくにリブ補強付きダクトとなると、やはり3次元の応力解析が必要であり、本報告の範疇からはやむを得ずはずしてしまった。もう一つに、いわゆるダクトのインピーダンスの問題がある。一般には一様に作るのが望ましいとされているが、シンクロトロンのように電流が少ない場合はさほど問題にならないとされているので、本報告では検討を割愛した。ただし、今後R&Dで調べる可能性はある。また、渦電流があると当然ダイナミックアーチャーの検討が必要とされるが、これも解析用のコードを動きねばならず、簡便にとはいかない。ただし、これは参考になる解析がすでになされており〔中山光一他 JAERI-M 89-173〕、この結果から類推すると、十分大きなダイナミックアーチャーが取れるようである。さらに実際の設計に当たっては、放射線への対策が重要となる。おそらく構造あるいは材料で対応する事になるが、設計に踏み込むことになるのでこれも割愛した。

ここに報告したものの中で大きな成果と言えるものはやはり、実機を模した装置を作り、現実的なデータを得た事により、設計時に存在したいいくつかの懸念を払拭できたことであろう。以下それらを列挙すると：

1. 排気系の員数、配置などを決めるときの根拠が実証的に得られた
2. ダクトの放出ガス率を基礎データとして得た
3. ダクト中の圧力分布の測定と計算式とのよい一致を得た

を図3.16に示す。測定は中心面上で水平方向にスキャンした。磁場は上げている途中の値である。ここではダクトとして、1.65 t のものとリブで補強された0.3 t の2種類を調べた。図では水平方向で磁場の強さに傾きを持っているが、これは我々の磁石がC型であるためである。この図で各点の値をそれぞれ引き、渦電流によって生じた磁場の強さを求めた結果を図3.17に示す。この図の曲線は理論式（2.5.1で示したDESYの式）から得られた値を示している。理論と測定のよい一致が得られた。さらに薄肉の場合はほぼダクトの肉厚に比例して小さくなっている。

(4) ダクト上に誘起される電圧の測定

ダクトの両端から電線を引きオシロスコープで電圧を測った。結果を図3.18に示す。この図にはD C C Tからの電流の信号も入れてある。電圧は当然ながら磁場（電流）の微分信号として現れている。これより磁場の上昇中は0.7ボルトの電圧が発生する事がわかった。ちなみにこのときテスターを挿入して短絡に近い状態で電流を流すと40A流れた。なおこの電圧はダクトにつながるループが最大見込むフラックスから見積もった誘起電圧とほぼ一致する（2.5.2参照）。

このことは、シンクロトロンでは、ポンプ、ゲージ、モニターなどに関する配線をするときは充分気をつけねばならないことを示している。

4. まとめ

真空系の基礎的検討において、本来言及すべきことがらであろうに割愛した部分がある。

一つは、ダクトの構造強度解析である。とくにリブ補強付きダクトとなると、やはり3次元の応力解析が必要であり、本報告の範疇からはやむを得ずはずしてしまった。もう一つに、いわゆるダクトのインピーダンスの問題がある。一般には一様に作るのが望ましいとされているが、シンクロトロンのように電流が少ない場合はさほど問題にならないとされているので、本報告では検討を割愛した。ただし、今後R & Dで調べる可能性はある。また、渦電流があると当然ダイナミックアーチャーの検討が必要とされるが、これも解析用のコードを動きねばならず、簡便にとはいかない。ただし、これは参考になる解析がすでになされており〔中山光一他 JAERI-M 89-173〕、この結果から類推すると、十分大きなダイナミックアーチャーが取れるようである。さらに実際の設計に当たっては、放射線への対策が重要となる。おそらく構造あるいは材料で対応する事になるが、設計に踏み込むことになるのでこれも割愛した。

ここに報告したものの中で大きな成果と言えるものはやはり、実機を模した装置を作り、現実的なデータを得た事により、設計時に存在したいいくつかの懸念を払拭できたことであろう。以下それらを列挙すると：

1. 排気系の員数、配置などを決めるときの根拠が実証的に得られた
2. ダクトの放出ガス率を基礎データとして得た
3. ダクト中の圧力分布の測定と計算式とのよい一致を得た

4. 粗引きからイオンポンプ運転までの時間スケジュールの見積が可能になった
5. 涡電流による磁場の、測定と計算との一致を見たこと
6. ダクト上の誘起電圧の、測定と計算との一致を見たこと
7. 運転のノウハウを得た：（例）イオンポンプ運転の時は停電でも特別な対応（無停電電源、粗引きからの再立ち上げなど）は必要ないこと
8. いくつかの真空コンポーネントに対する知見が得られた
9. 磁場の高精度測定技術の取得

本報告の前半にまとめた基礎的性状の見積方法のいくつかは、上に挙げたようにその妥当性が確かめられた。その他について以下に、我々の考えを述べる。

1. 真空度とビームの寿命：全くの受け売りで、R & Dで確かめたわけでもない。しかし、多くの経験に裏付けられているので、信頼に足るであろう。
2. 熱解析：R & Dで実証できなかったが、問題が単純であるので、簡易計算でもある程度のことはわかる。ここでは少し過剰の見積をしたが、結果は許容の範囲内であるので、実際でも問題にはならないであろう。
3. 放射光による放出ガスの見積：本文で述べたように、まだ信頼に足る見積り方法ではないと考えている。現在データを蓄積している状態であるので（世界的に）、今後ともそれらのデータを集める必要がある。我々自身でそのためのデータを探る研究計画は、今の所無い。
4. これらのことと総合すると、簡易手法による基礎的な検討は、おおむね妥当性を持つと言つてよいであろう。

謝　　辞

本研究を進めるにあたっては、大型放射光施設計画推進室の方々から、多大なるご支援・ご指導をいただきました。また、渦電流の測定に際しては、加速器系熊谷教孝総主幹に大変お世話になりました。

4. 粗引きからイオンポンプ運転までの時間スケジュールの見積が可能になった
5. 涡電流による磁場の、測定と計算との一致を見たこと
6. ダクト上の誘起電圧の、測定と計算との一致を見たこと
7. 運転のノウハウを得た：（例）イオンポンプ運転の時は停電でも特別な対応（無停電電源、粗引きからの再立ち上げなど）は必要ないこと
8. いくつかの真空コンポーネントに対する知見が得られた
9. 磁場の高精度測定技術の取得

本報告の前半にまとめた基礎的性状の見積方法のいくつかは、上に挙げたようにその妥当性が確かめられた。その他について以下に、我々の考えを述べる。

1. 真空度とビームの寿命：全くの受け売りで、R & Dで確かめたわけでもない。しかし、多くの経験に裏付けられているので、信頼に足るであろう。
2. 熱解析：R & Dで実証できなかったが、問題が単純であるので、簡易計算でもある程度のことはわかる。ここでは少し過剰の見積をしたが、結果は許容の範囲内であるので、実際でも問題にはならないであろう。
3. 放射光による放出ガスの見積：本文で述べたように、まだ信頼に足る見積り方法ではないと考えている。現在データを蓄積している状態であるので（世界的に）、今後ともそれらのデータを集める必要がある。我々自身でそのためのデータを探る研究計画は、今の所無い。
4. これらのことと総合すると、簡易手法による基礎的な検討は、おおむね妥当性を持つと言つてよいであろう。

謝　　辞

本研究を進めるにあたっては、大型放射光施設計画推進室の方々から、多大なるご支援・ご指導をいただきました。また、渦電流の測定に際しては、加速器系熊谷教孝総主幹に大変お世話になりました。

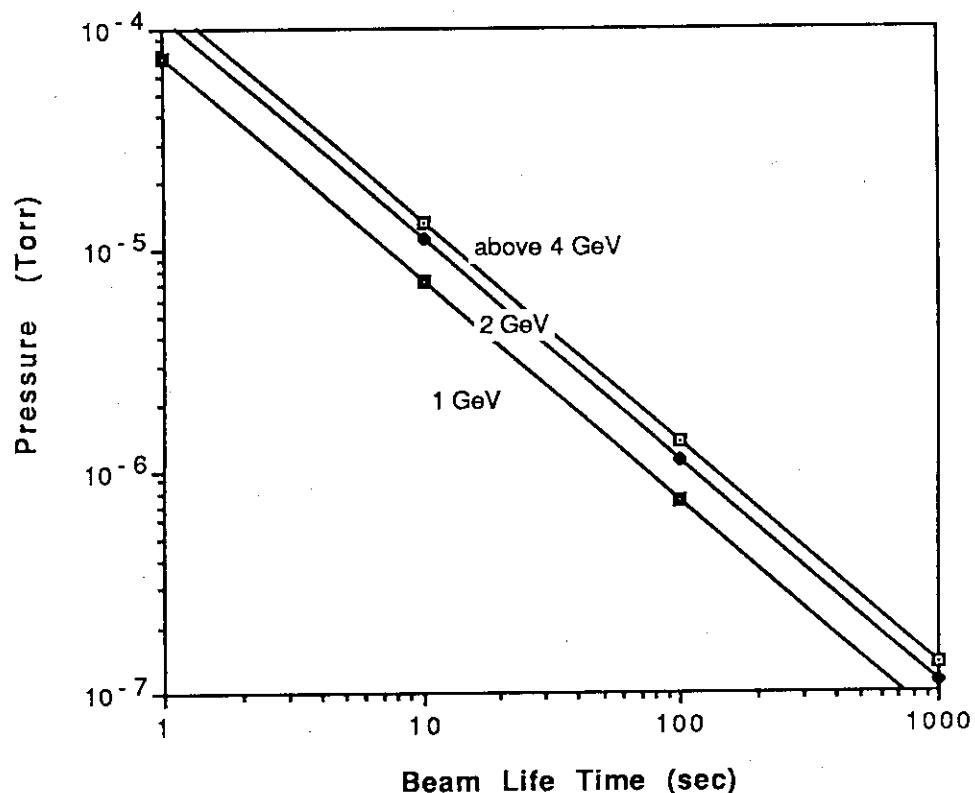


図2.1 ビーム寿命と真空度

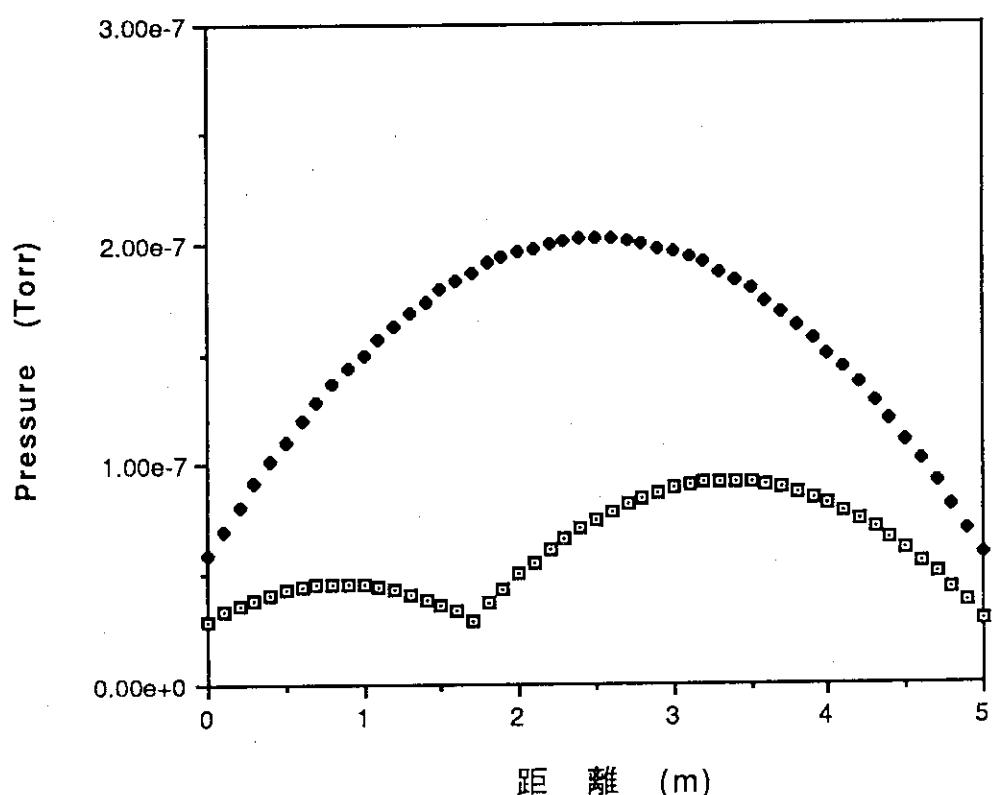


図2.2 ビームダクト中の圧力分布

偏向電磁石の両側（下）にイオンポンプを配置した場合と片側のみ（上）との比較

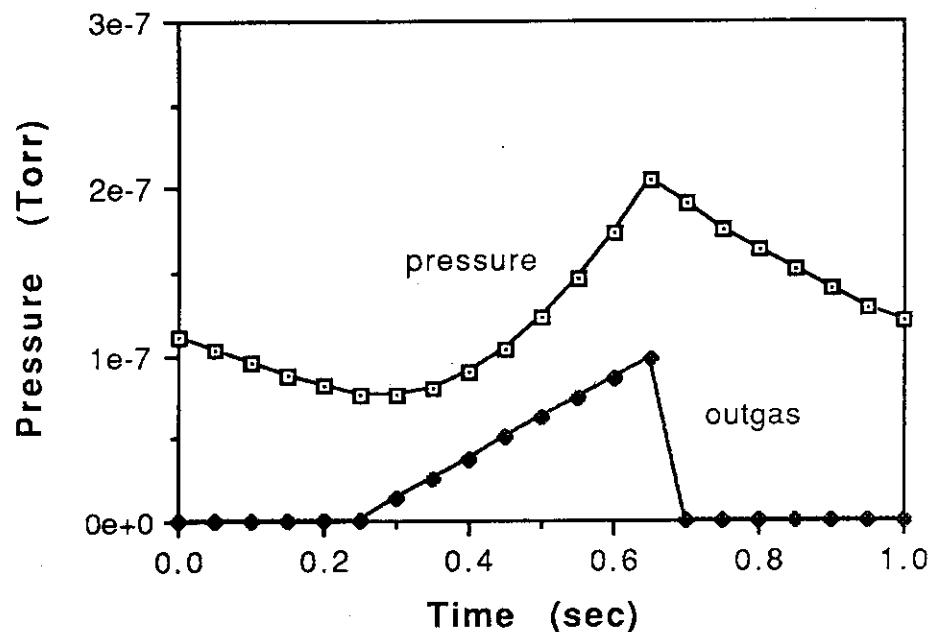


図 2.3 周期的・パルス的な放出ガスがある場合のダクト内圧力の時間変化

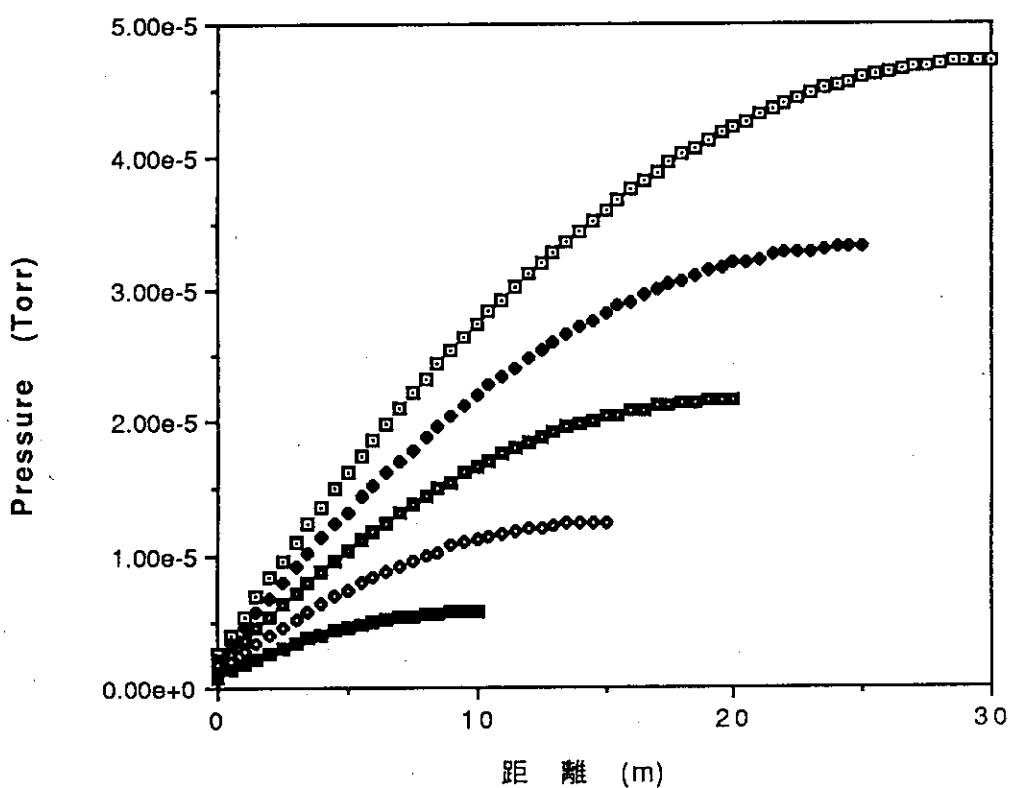


図 2.4 一つのポンプがカバーする範囲をパラメータにした時のダクト中の圧力分布

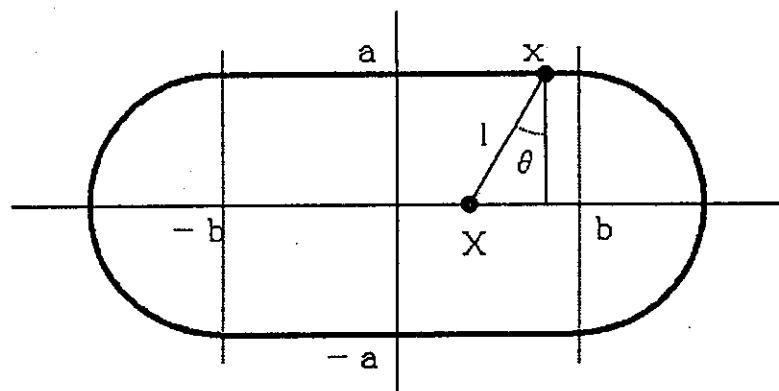


図2.5 漩電流の計算のための変数の定義

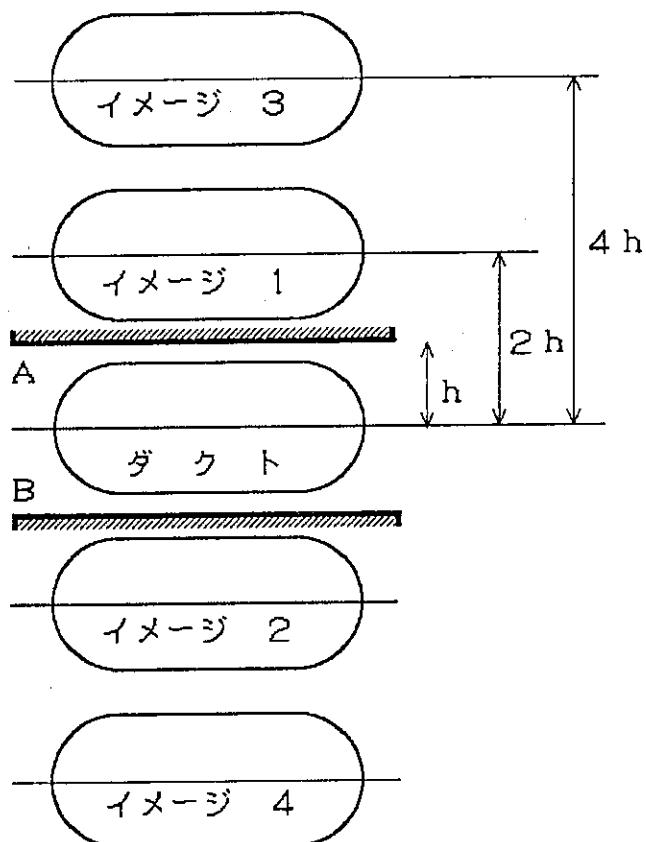


図2.6 鉄心による渦電流の鏡像（イメージ）

A, B は磁極の端面を表す。イメージ1のB面の鏡像がイメージ4になる。

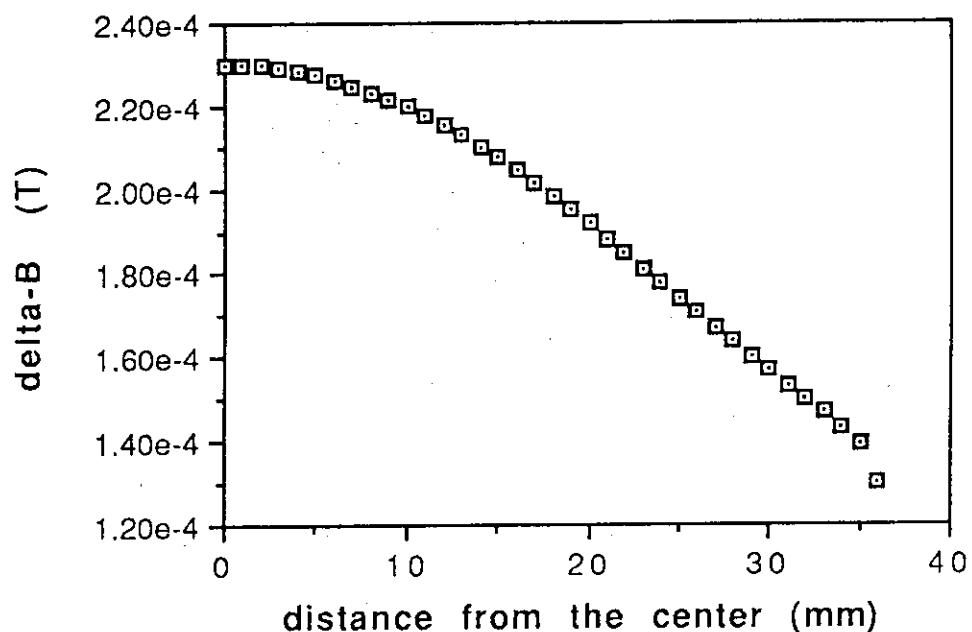
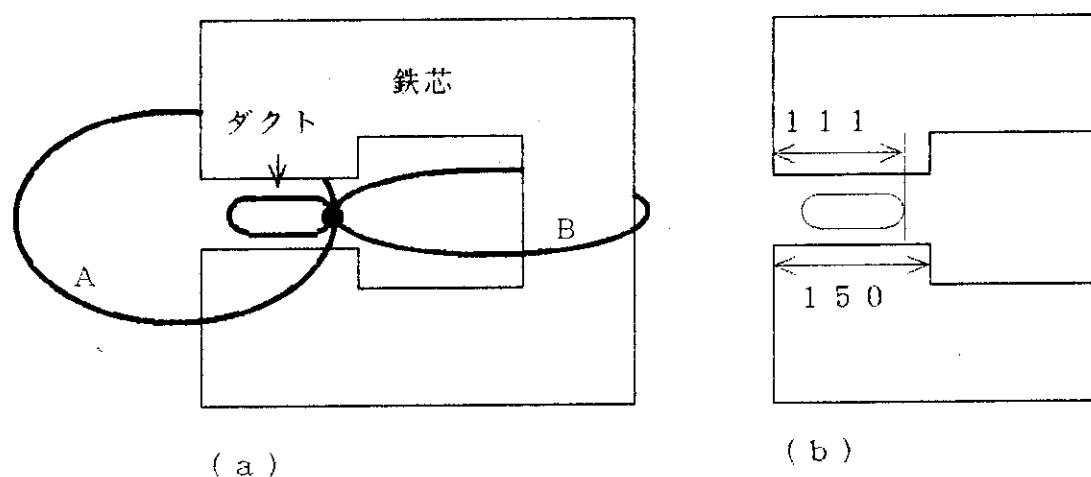
図2.7 湧電流によって作られる磁場の計算結果 ($Y = 0$ 面上)

図2.8 偏向電磁石中のダクト上の誘起電圧の見積り

(a) A, B は鉄心 (または磁束) をかこむループの例, (b) ダクトと磁極の位置関係。

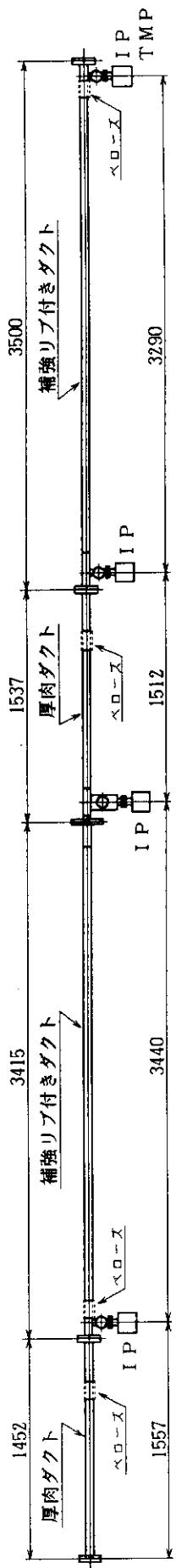
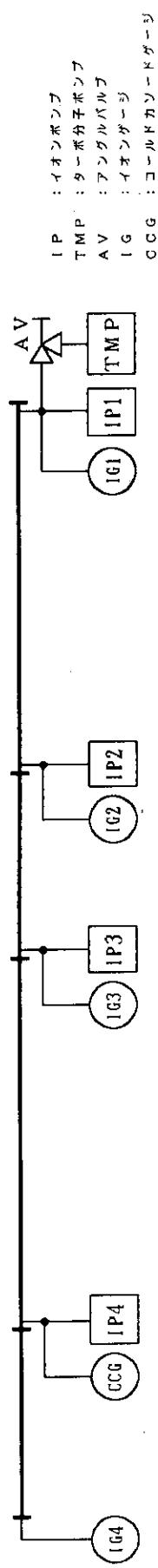


図3.1 モックアップノーマルセル構造図



イオンポンプ運転時には、IP2, IP4のみ運転する（IP1, IP3は停止のまま）

図3.2 モックアップノーマルセル真空装置系統図

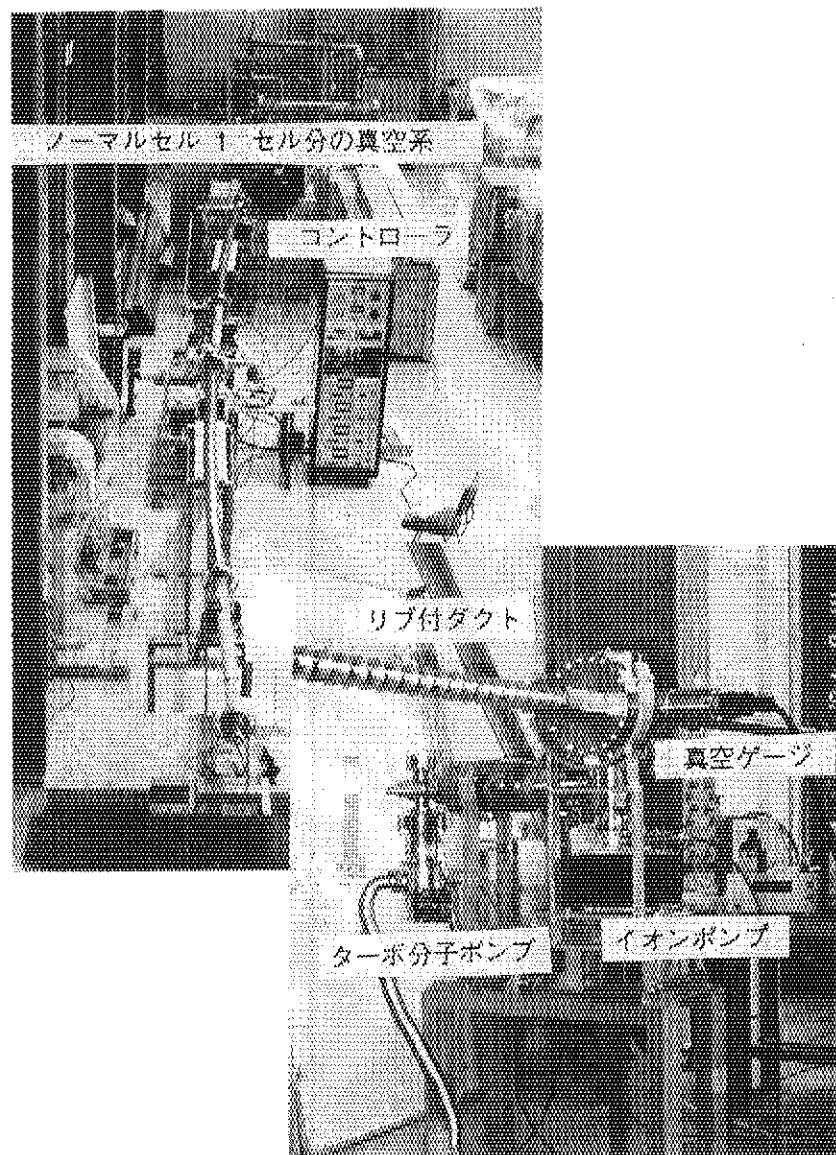


図3.3 モックアップノーマルセル試験風景

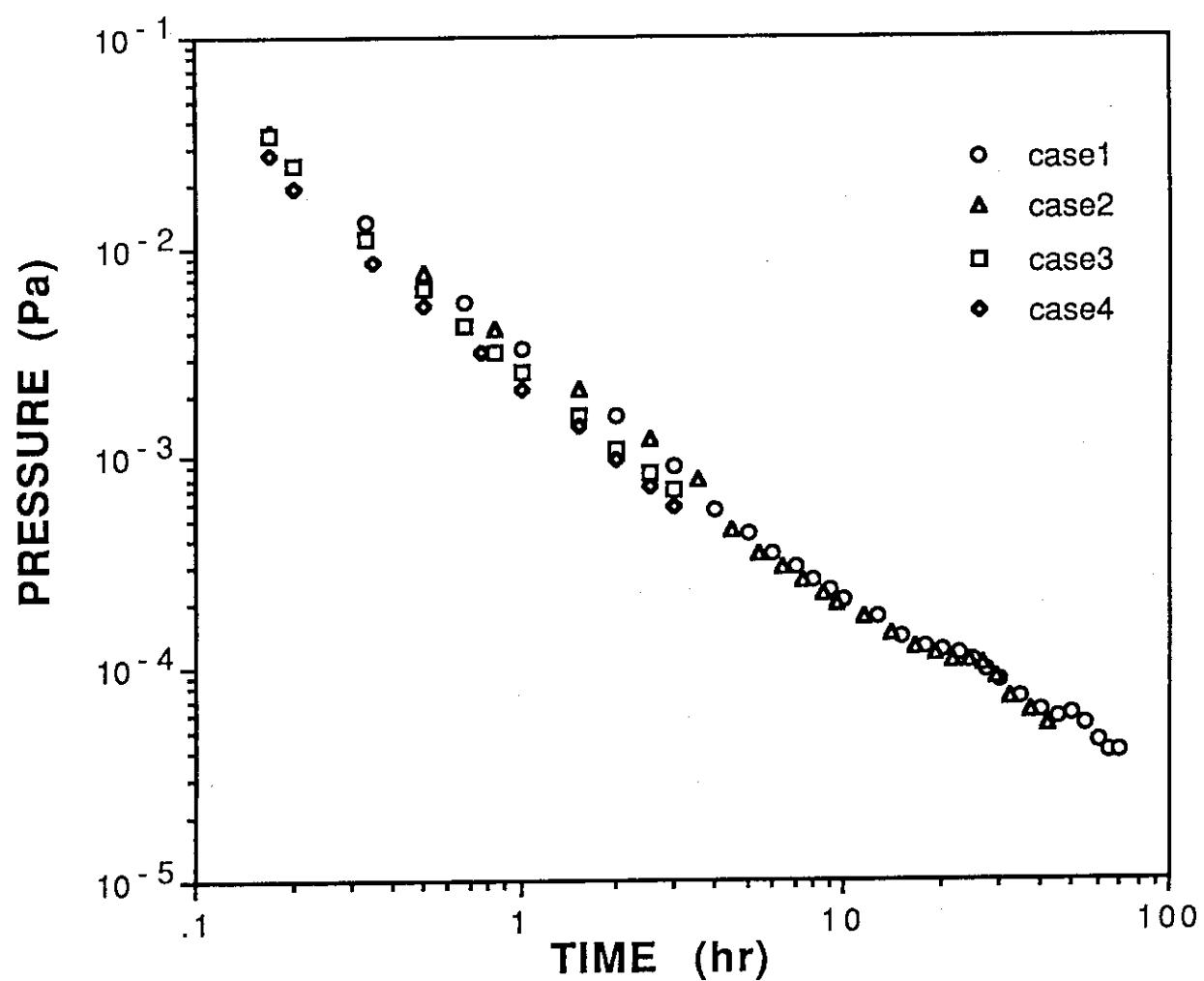


図3.4 粗引き時の排気特性

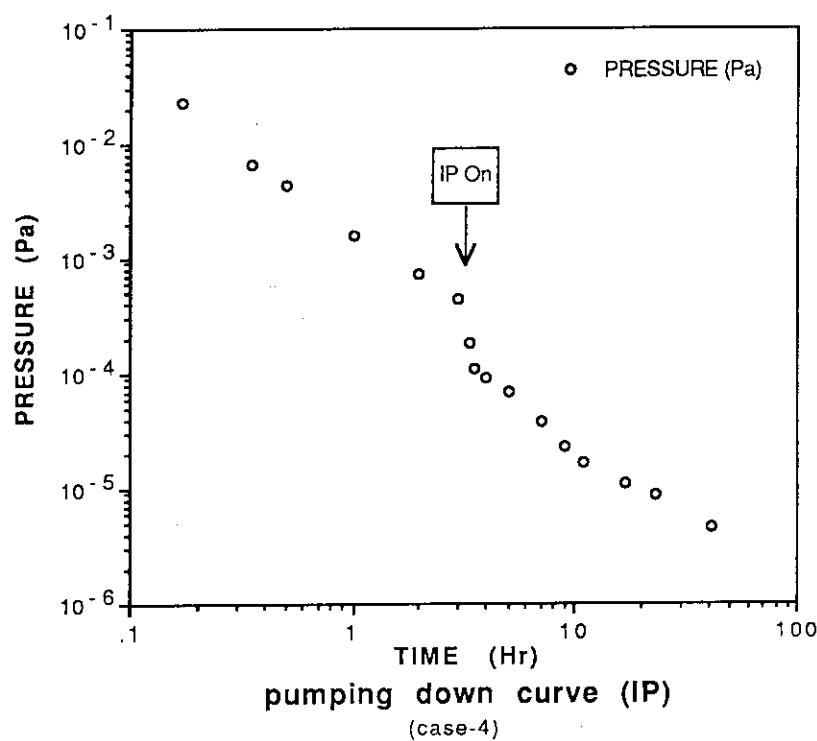
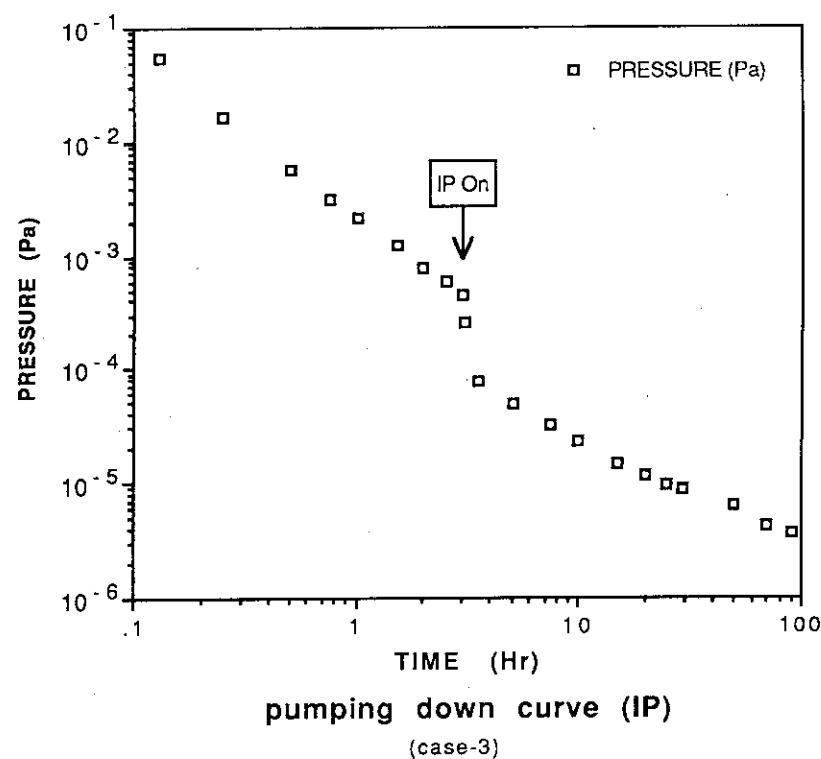


図3.5 イオンポンプ運転時の排気特性

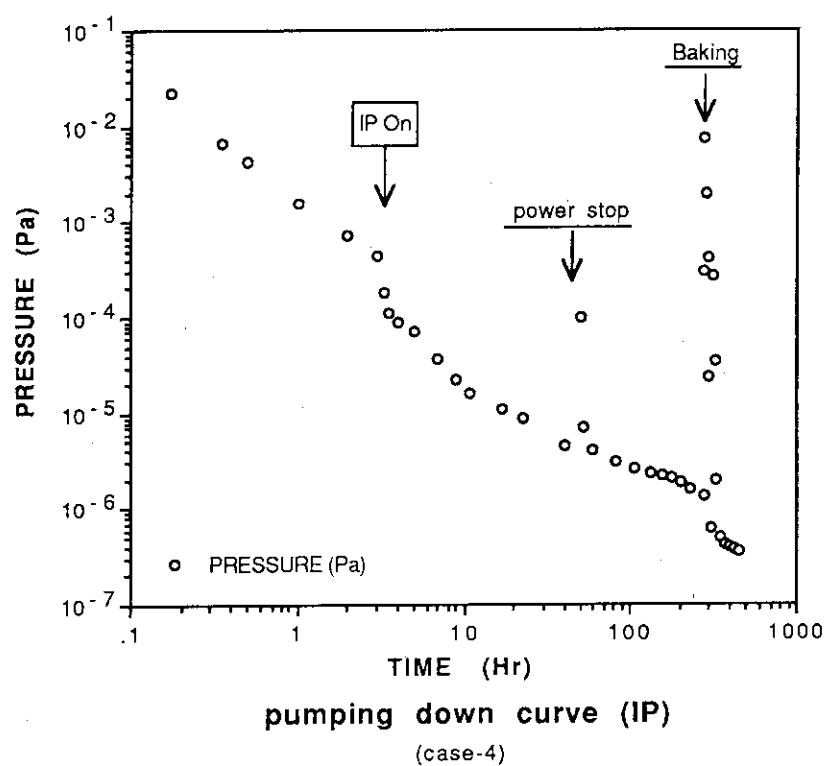
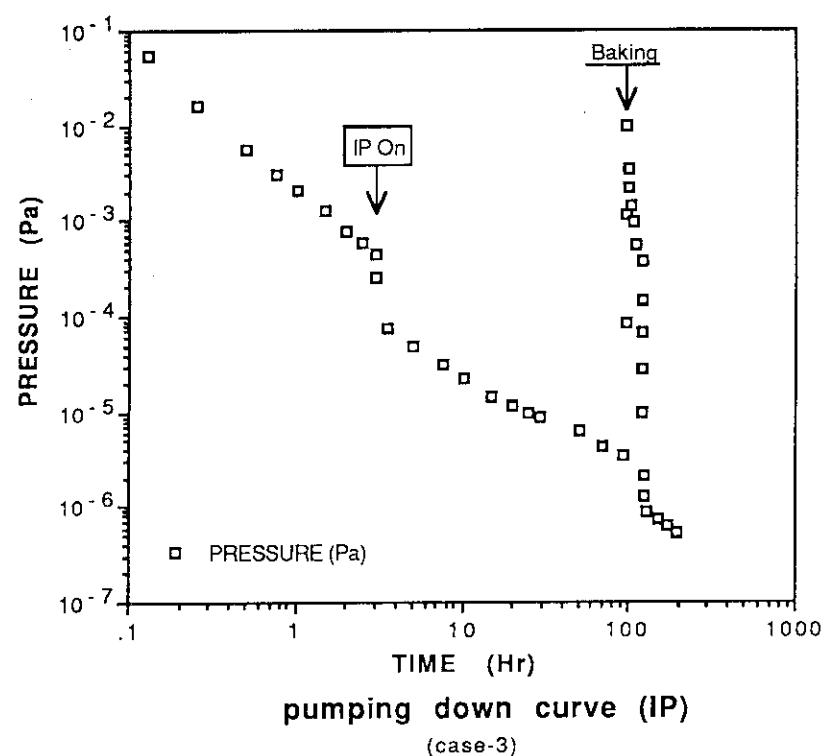
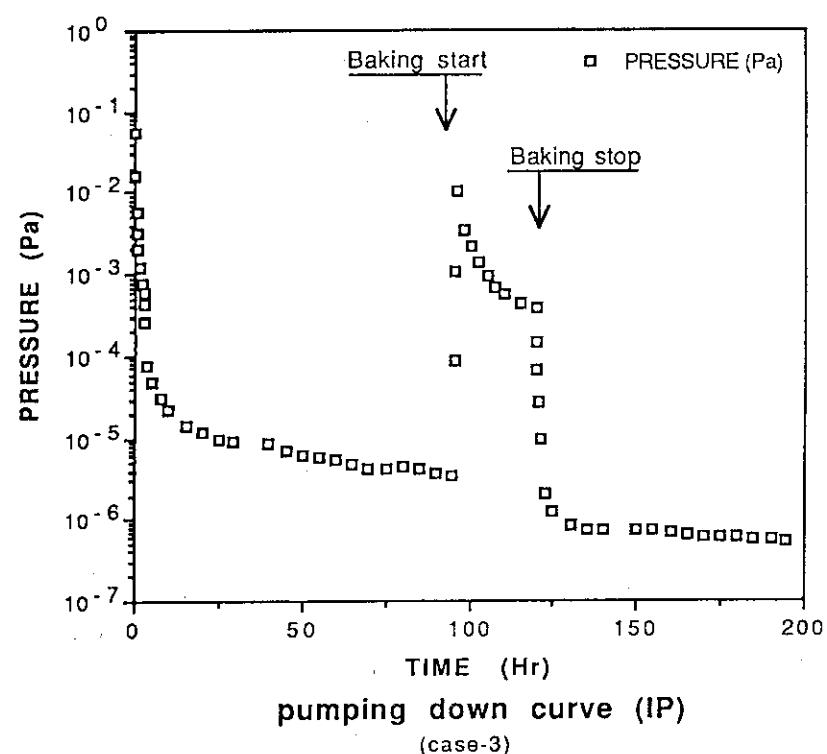


図 3.6 ベーキング時の排気特性（対数表示）



pumping down curve (IP)
(case-3)

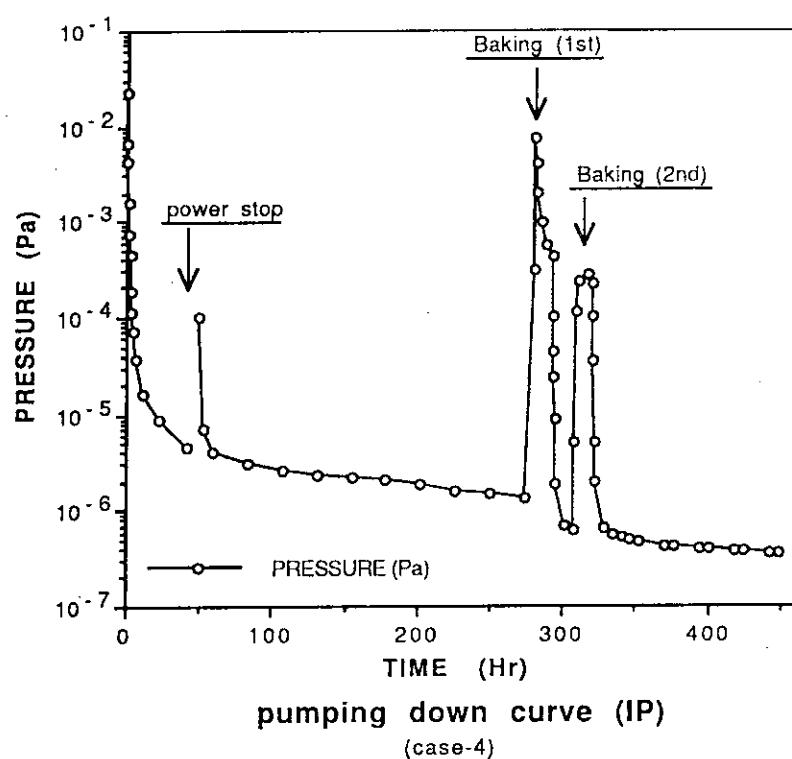


図3.7 ベーキング時の排気特性（線形表示）

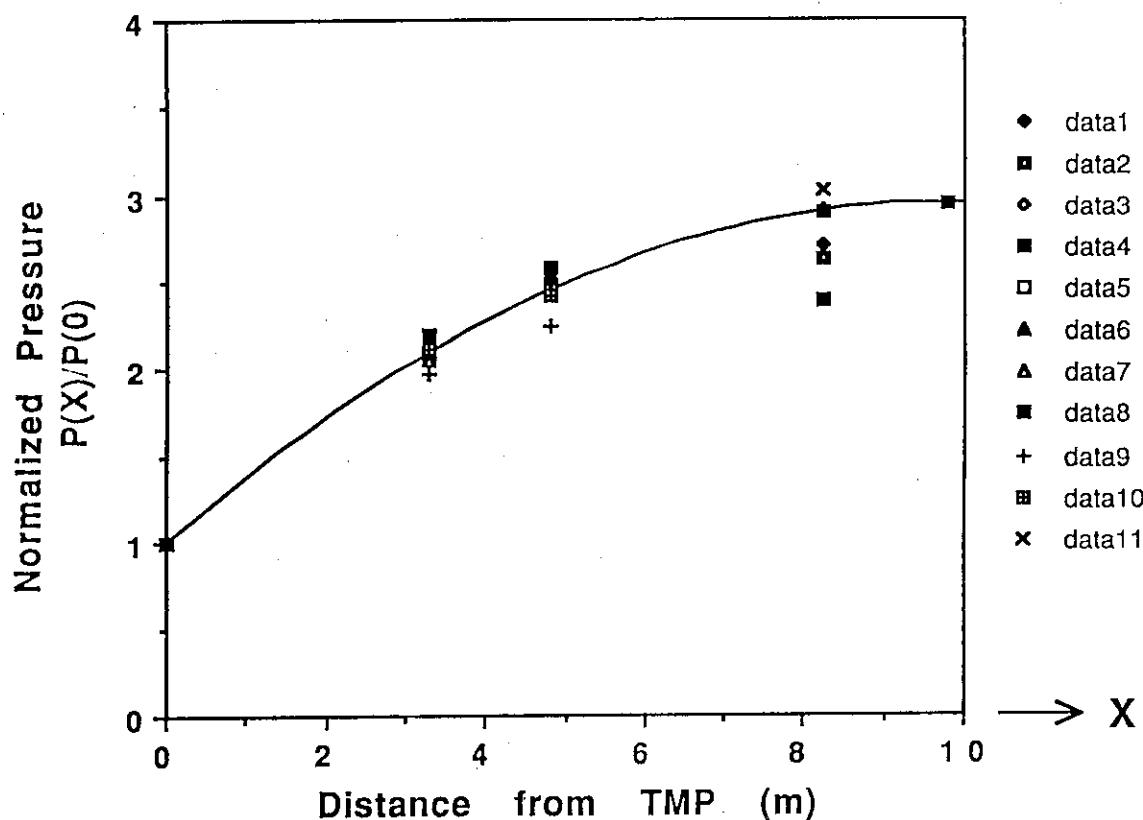


図3.8 ダクト中の圧力分布の測定
曲線は理論的分布、各測定値は規格化してある。

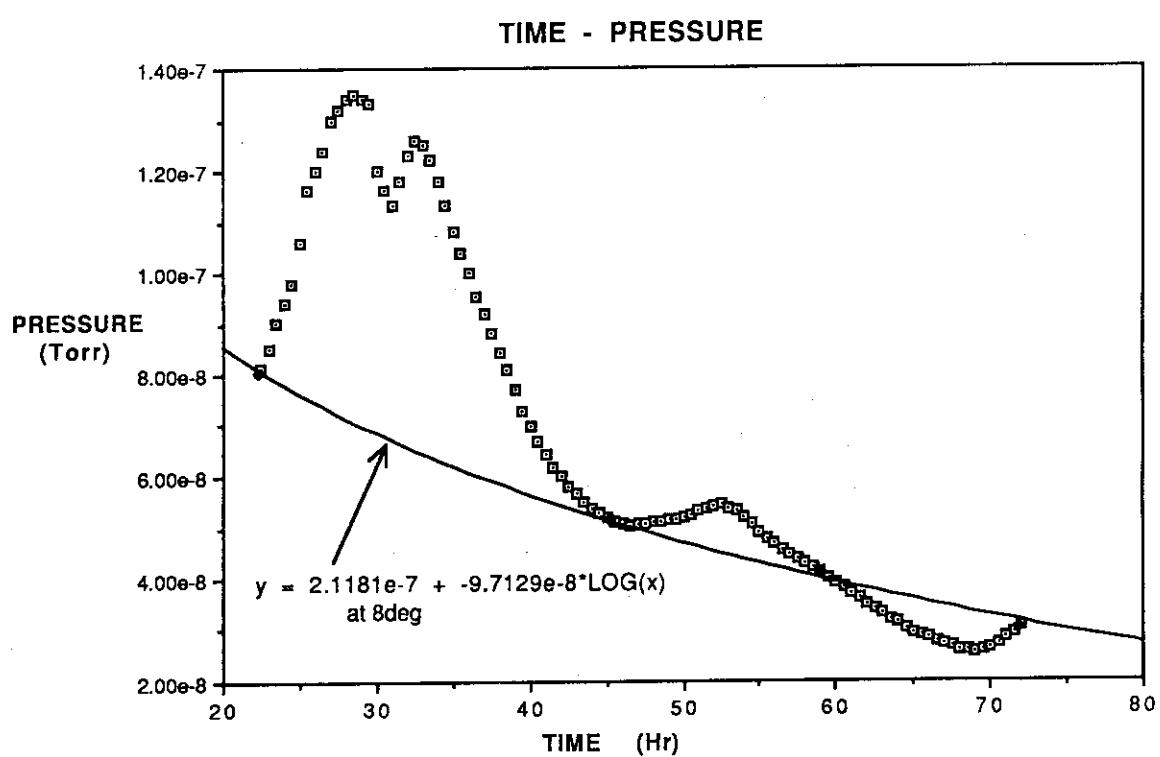


図3.9 ダクト内圧力の時間変化（生データ）
曲線は温度が8°Cの時の圧力を結んだもの。

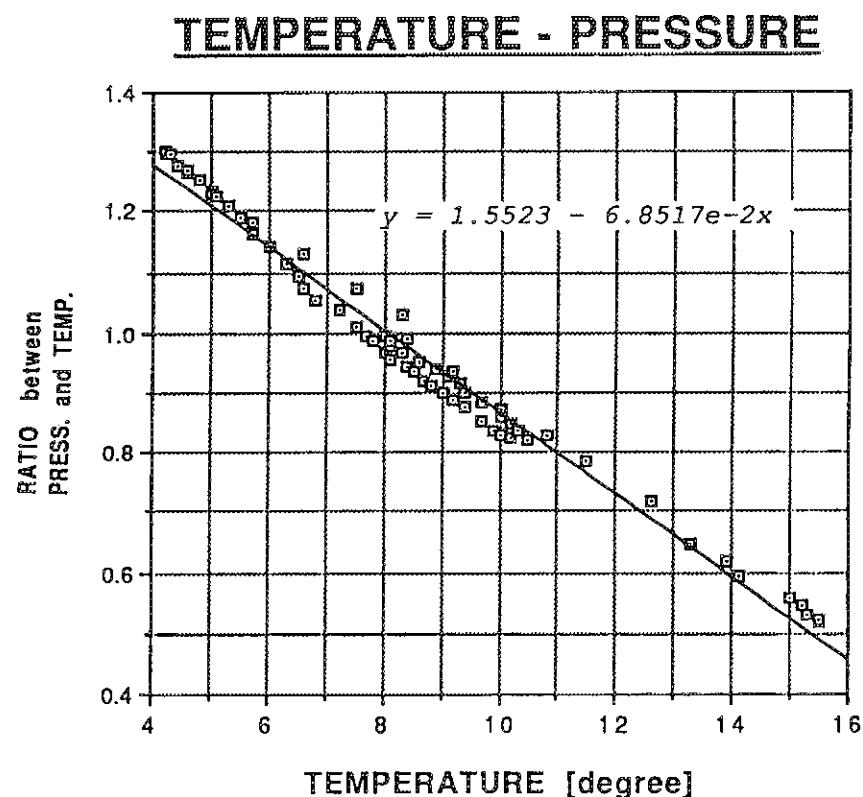


図3.10 溫度補正のための換算係数

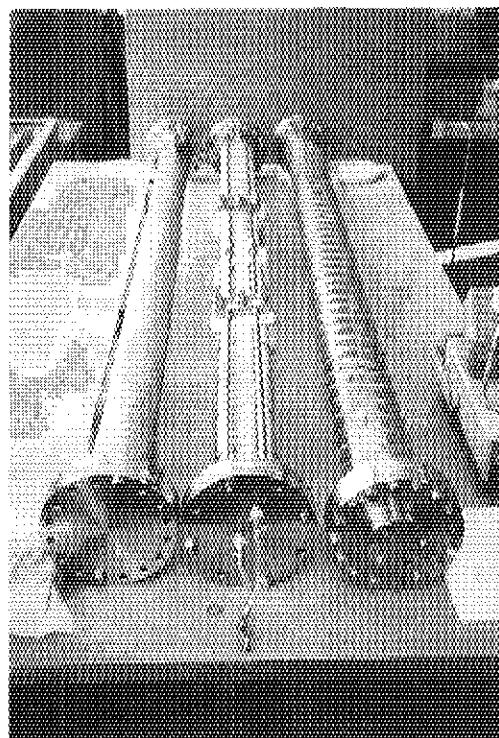


図3.11 サンプルダクトの写真
左より、厚肉ダクト、ベローズダクト、リブ付き薄肉ダクト

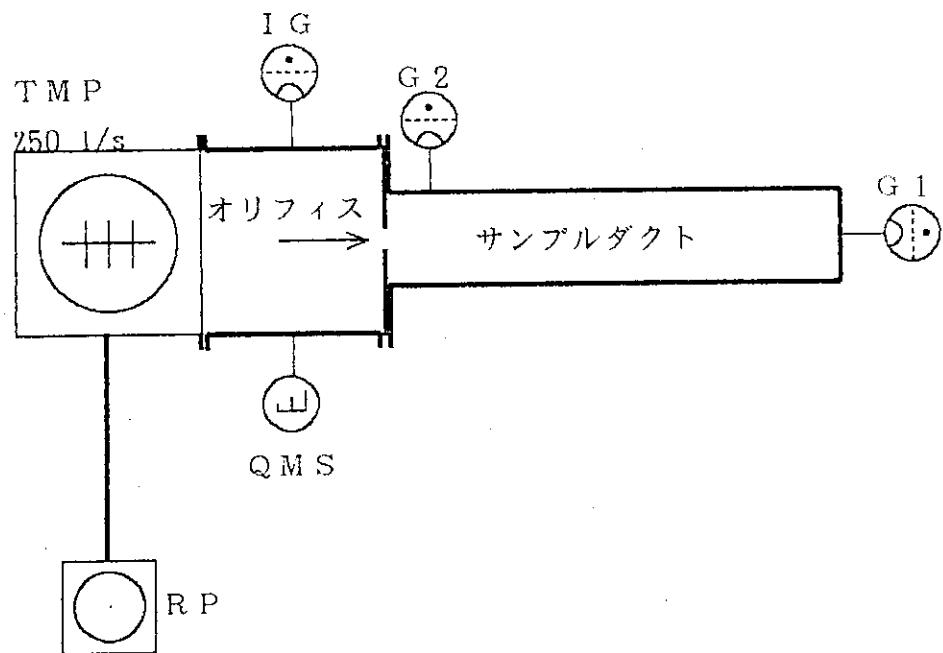


図3.12 ダクトの放出ガス率測定装置の構成

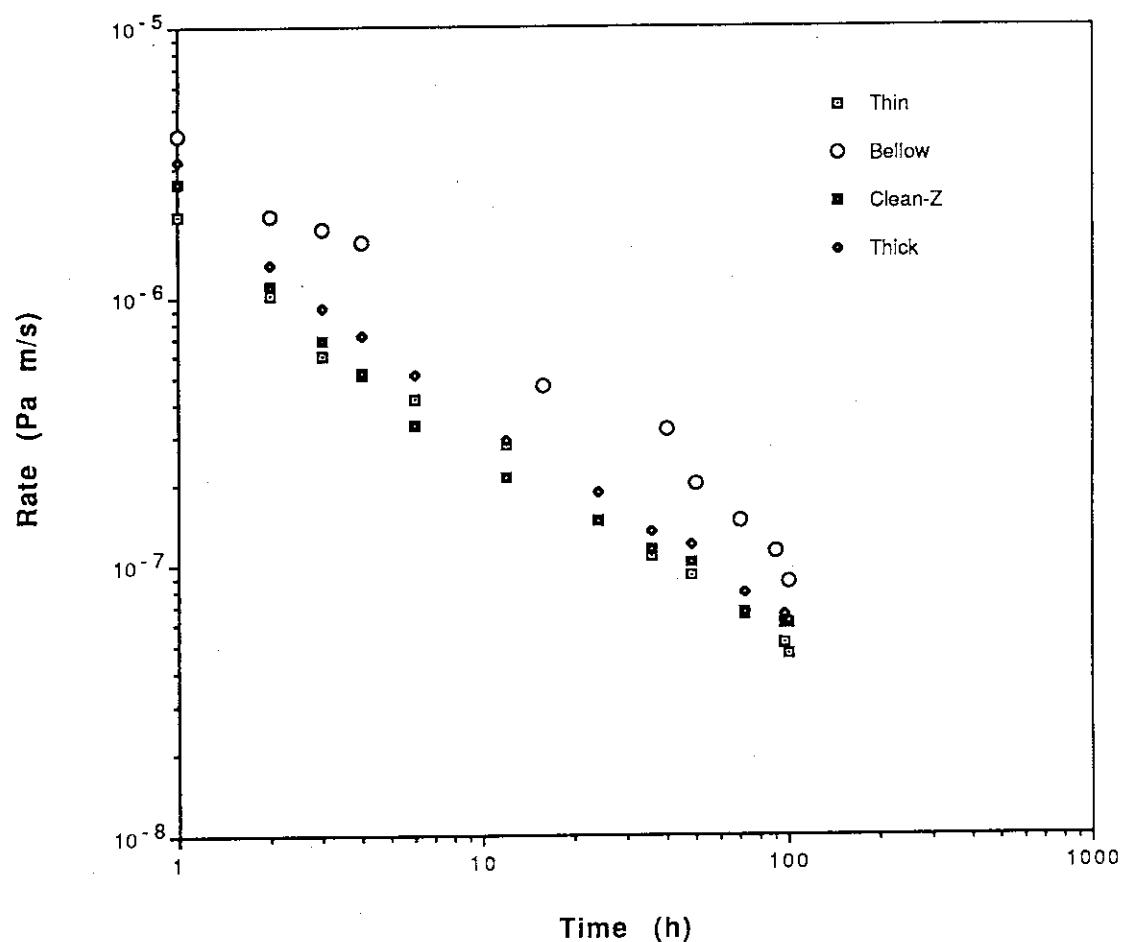


図3.13 ダクトの放出ガス率の測定結果

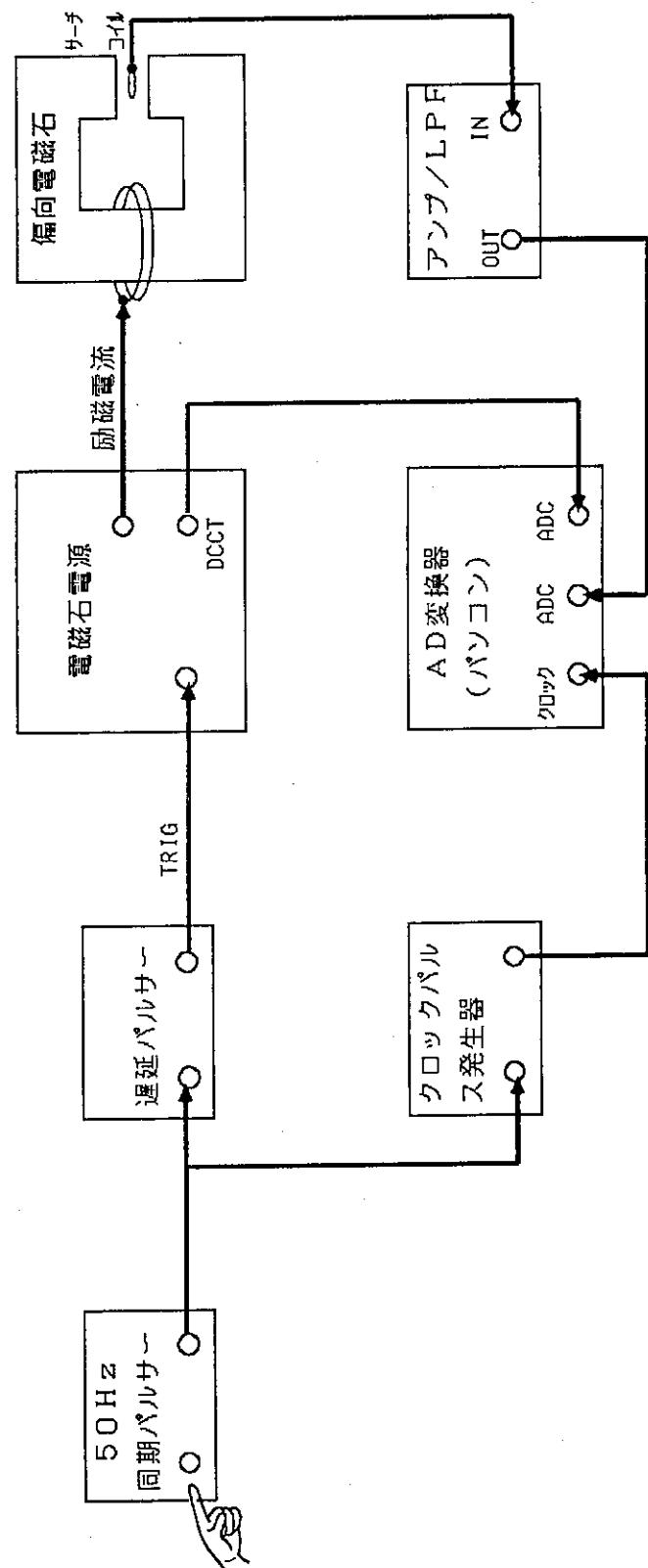


図 3.14 漩電流により磁場の測定システム

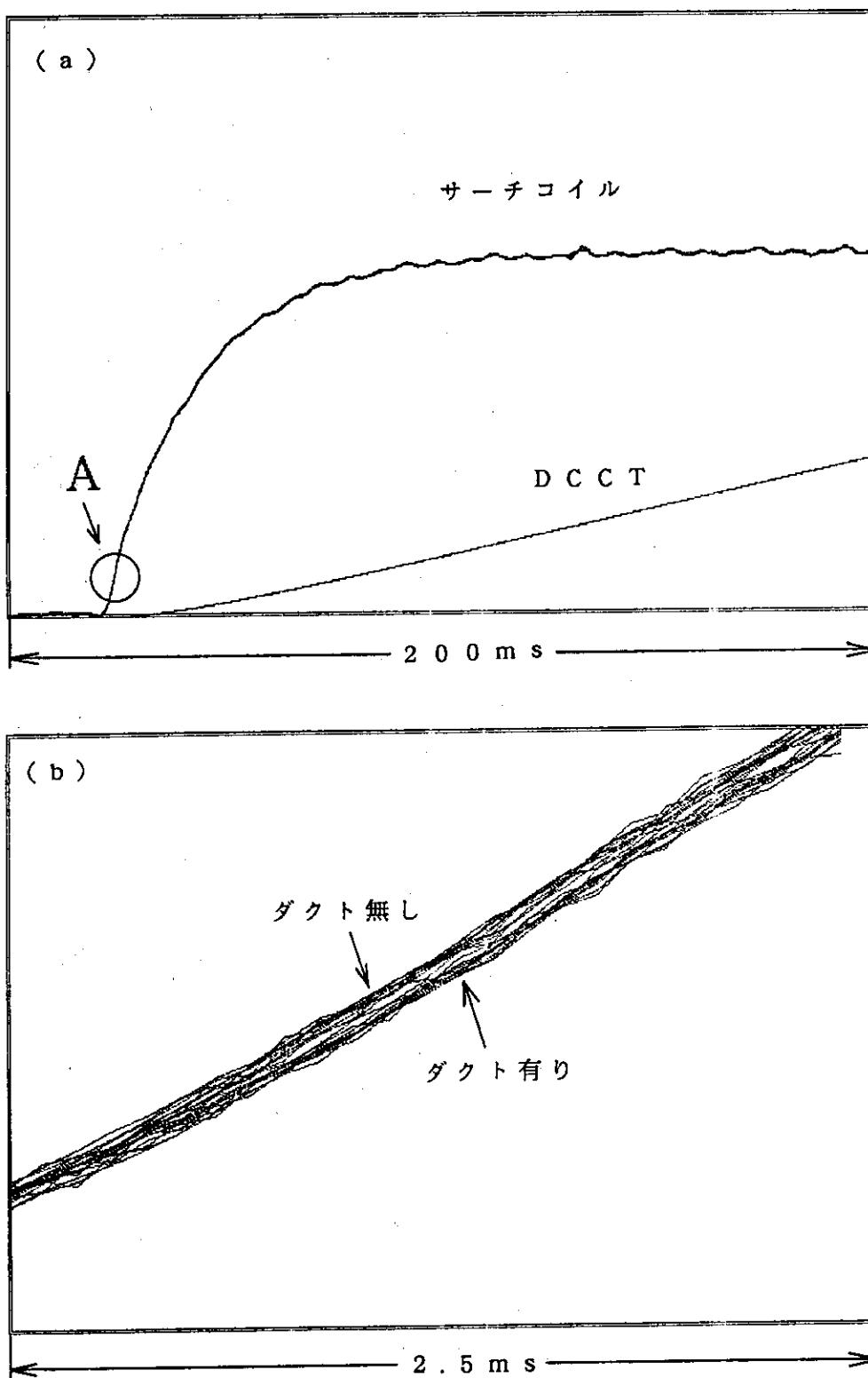


図3.15 磁場測定の生データ

(a) ダクト有無それぞれ5ショットづつの重ね打ち, (b) Aの部分を拡大（縦10倍, 横80倍）した図。

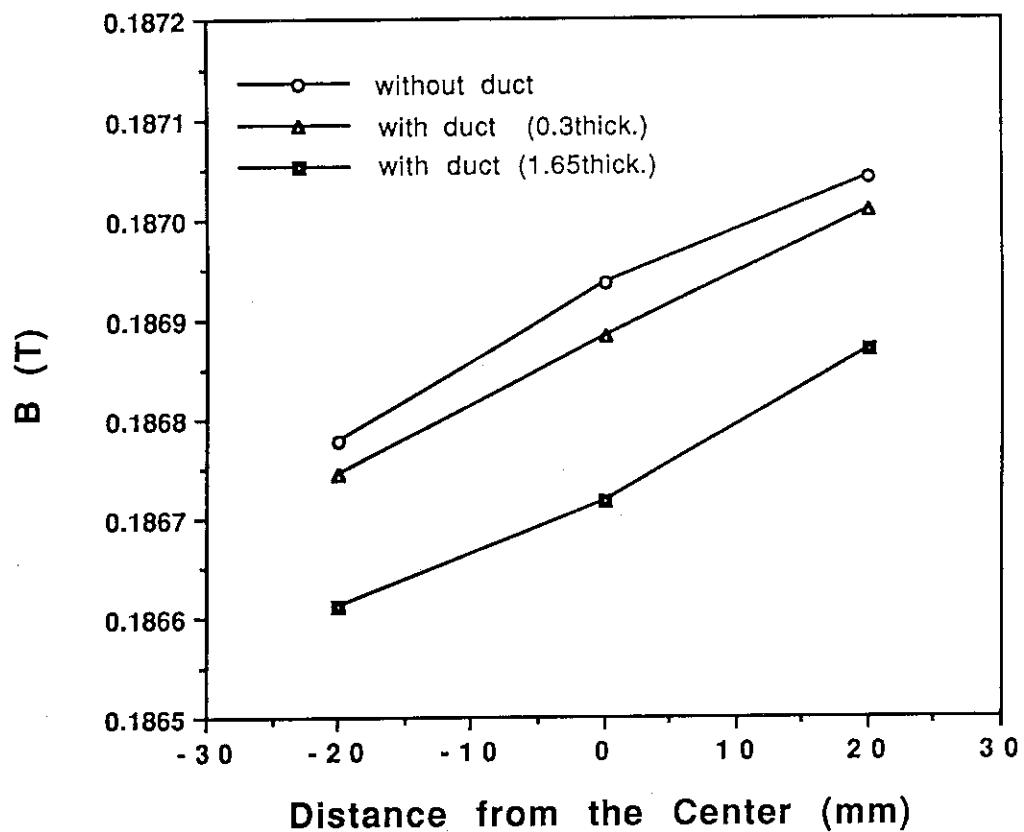


図 3.16 測定された磁場分布

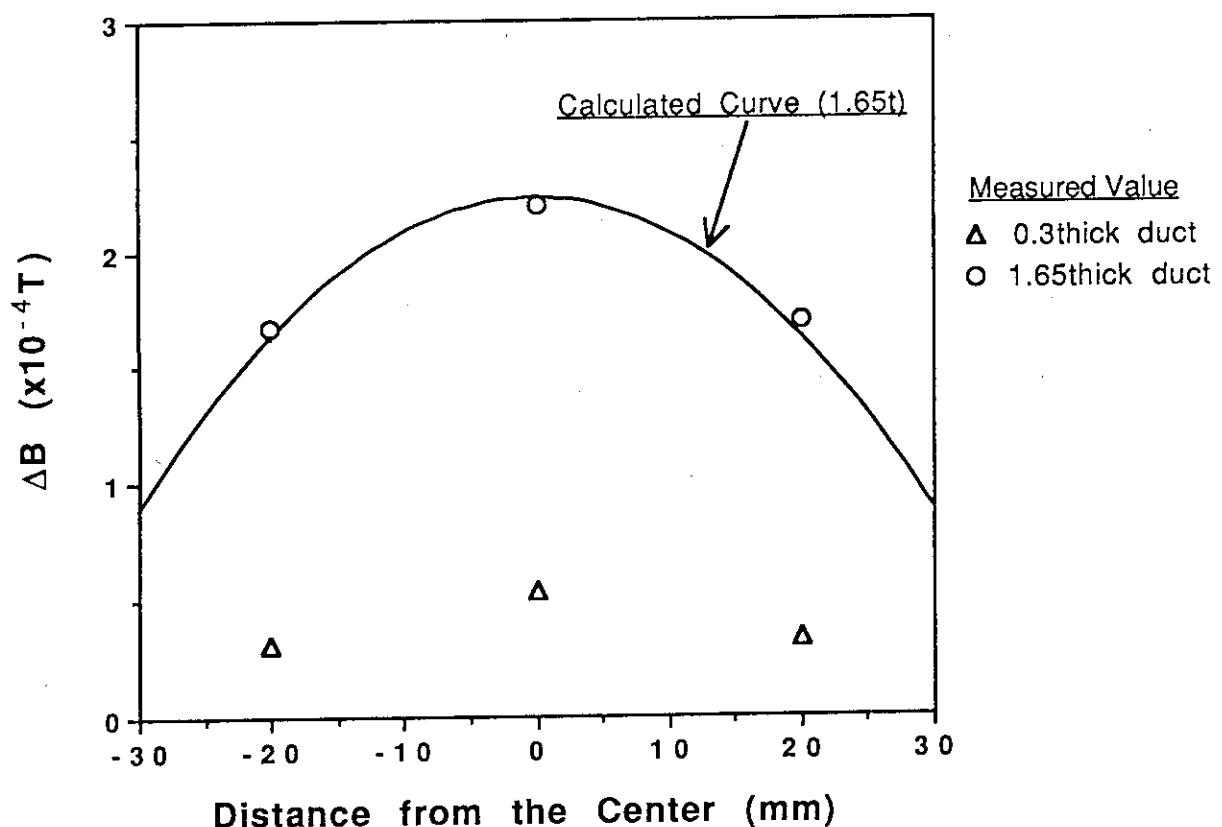


図 3.17 湧電流によって生じた磁場

曲線は DESY の式から得た値。

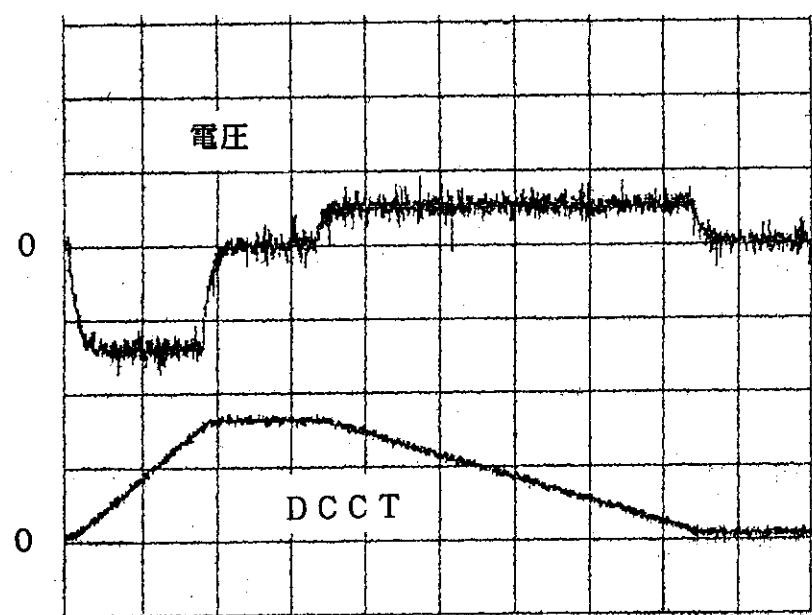


図3.18 ダクト両端に発生する電圧のオシロスコープ波形
DCCTからの電源電流波形も示す。
電圧 : 0.5V/div, DCCT : 1000A/div, 時間 : 200ms/div