

大型放射光施設シンクロトロン
真空系の基本設計

1990年8月

芦田 和雄・大塚 英男・飯塚 元昭
原見 太幹・横溝 英明・鈴木 康夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

大型放射光施設シンクロtron真空系の基本設計

日本原子力研究所大型放射光施設計画推進室

芦田 和雄・大塚 英男・飯塚 元昭

原見 太幹・横溝 英明・鈴木 康夫

(1990年7月7日受理)

1988年度に行なった大型放射光施設シンクロtron真空部の予備設計を中心に、その後の設計検討を反映した形でシンクロtron真空系の基本設計について述べる。

本報告書では、1989年度末時点で設定した設計思想、仕様等について述べ、それ以降の設計研究については次の報告書に譲ることにする。

Basic Design for the Vacuum System of the Synchrotron
in the Large Synchrotron Radiation Facility

Kazuo ASHIDA, Hideo OOTSUKA, Motoaki IIZUKA
Taikan HARAMI, Hideaki YOKOMIZO and Yasuo SUZUKI

Office of Synchrotron Radiation Facility Project
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 7, 1990)

Office of Synchrotron Radiation Facility Project in JAERI had tried to design preliminarily the vacuum system of Large Synchrotron Radiation Facility in the fiscal year 1988.

Concentrating on the preliminary design for the vacuum system and considering the design and investigation after that, we describe the basic design for the vacuum system of the booster synchrotron.

The content of this paper is founded on the design philosophy and specification set by the end of fiscal year 1989. And in the next report we will discuss about the design and research from the fiscal year 1990 on.

Keywords: Synchrotron Radiation, Large Synchrotron Radiation Facility, Booster Synchrotron, Vacuum System, Evacuation, Beam Duct

目 次

1. 緒 言	1
2. 設計条件	2
2.1 一 般	2
2.2 シンクロトロン設計条件	2
3. シンクロトロン真空部の概要	11
4. 真空ダクト	23
4.1 材 質	23
4.2 前 処 理	23
4.3 ダクト形式	23
4.4 渦電流解析	24
4.5 熱 解 析	27
4.6 構造強度解析	29
5. 真空排気システム	43
5.1 一 般	43
5.2 真空排気系設定の基本的考え方	43
5.3 排気時間の検討	44
5.4 圧力分布解析	46
6. 真空ダクトの製作性の検討	54
6.1 薄肉ダクト製作要領	54
6.2 成形ベローズダクト製作要領	54
6.3 補強リブ付き薄肉ダクト製作要領	55
7. 今後の課題	61
謝 辞	61
参考文献	61

Contents

1. Introduction	1
2. Design Requirements	2
2.1 General	2
2.2 Design Requirements for Synchrotron	2
3. Summary of Synchrotron Vacuum System	11
4. Beam Duct	23
4.1 Materials	23
4.2 Pre-conditioning	23
4.3 Types of Duct	23
4.4 Analysis of Eddy Current	24
4.5 Heat Analysis	27
4.6 Structural Analysis	29
5. Vacuum System	43
5.1 General	43
5.2 Principal Philosophy for Vacuum System	43
5.3 Examination of Discharging Time	44
5.4 Analysis of Pressure Distribution	46
6. Examination of Fabrication Sequence of Beam Duct	54
6.1 Fabrication Sequence of Thin Duct	54
6.2 Fabrication Sequence of Hydro-formed Bellows Duct	54
6.3 Fabrication Sequence of Thin Duct with Reinforcement Ribs ..	55
7. Summary	61
Acknowledgements	61
References	61

1. 緒 言

日本原子力研究所大型放射光施設計画推進室加速器系開発グループは、大型放射光施設の入射系の設計を行なっている。

本報告では、1989年度末までに設定されたシンクロトロン真空部の基本仕様について述べる。さらに詳細な検討を必要とする部分も残ってはいるが、シンクロトロン真空部の基本設計の一例を述べており、将来設計パラメータを変更する場合にも基本設計の手法に変わりはない。

2. 設 計 条 件

2.1 一 般

- (1) 可能な限りメンテナンスフリーなハードウェア及び制御システムとする。
- (2) 運転に関してなるべく省力化を図るものとする。

2.2 シンクロトロン設計条件

各条件を以下の図表に表す。

表 2.1; シンクロトロン設計パラメータ

図 2.1; ノーマルセルの電磁石配置及びラティス関数

図 2.2; 直線部のテラリス関数

図 2.3; 入射部の電磁石配置

図 2.4; 出射部の電磁石配置

図 2.5; 偏向電磁石の断面形状

図 2.6; 四極電磁石の断面形状

図 2.7; 六極電磁石の断面形式

表 2.1 シンクロトロンの設計パラメータ

Major parameters of Synchrotron

Injection energy	1.0 GeV
Maximum energy	8.0 GeV
Circumference	396 m
Repetition rate	1 Hz
Natural emittance (8GeV)	192 nm·rad
Momentum spread (8GeV)	0.122 %
Number of cells / Periodicity	40 / 2
Nominal turn (γ_x/γ_y)	11.73/8.78
Natural chromaticity (ξ_x/ξ_y)	-15.3/-12.7

Parameters for Synchrotron magnets

Dipole magnet	
number	68
effective length	2900 mm
pole gap	46 mm
yoke type	C type
edge	rectangular
strength (8GeV)	0.8502 T
tolerance limit of field	0.05 %
Quadrupole magnet	
number	80
effective length	600 mm
bore radius	40 mm
strength F/D (8GeV)	14.598/-12.382 T/m
tolerance limit of field	0.1 %
Sextupole magnet	
number	64
effective length	150 mm
bore radius	50 mm
strength F/D (8GeV)	112.5/-162.8 T/m ²
tolerance limit of field	1 %

RF Parameters of synchrotron

Revolution frequency	756.8 kHz
Radio frequency	508.58 MHz
Synchrotron frequency	30.3 kHz
Harmonic number	672
Momentum compaction factor	9.5×10^{-3}
Energy loss (8GeV)	11.55 MeV/turn
Maximum RF voltage	17 MV
Damping time transverse	1.87 msec
Damping time longitudinal	0.91 msec
Quantum life time	>10 sec
Klystron power	1 MW
Number of Klystron	2

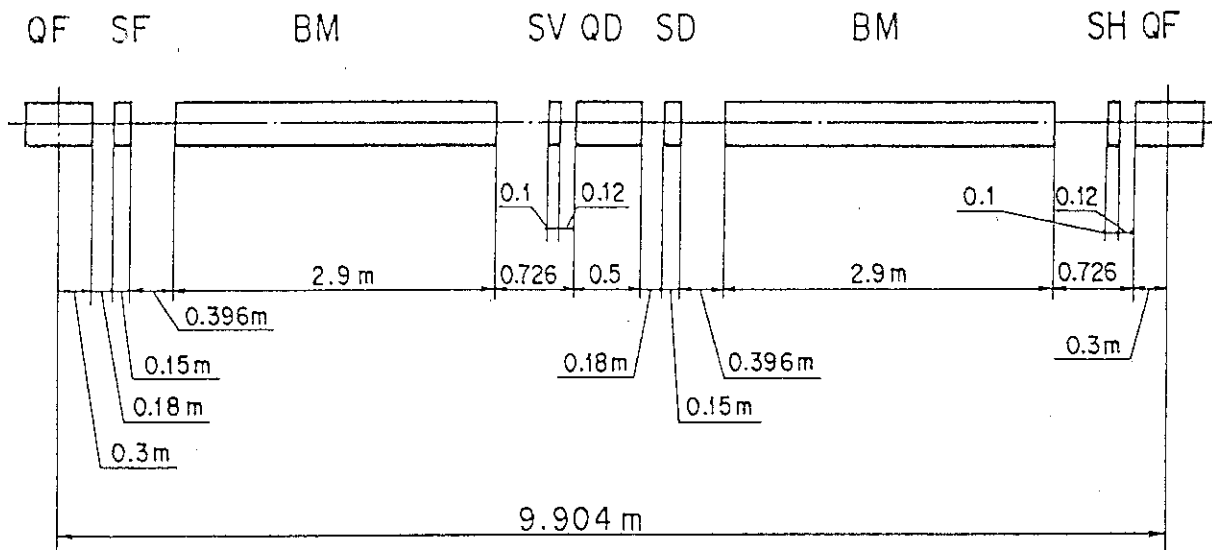
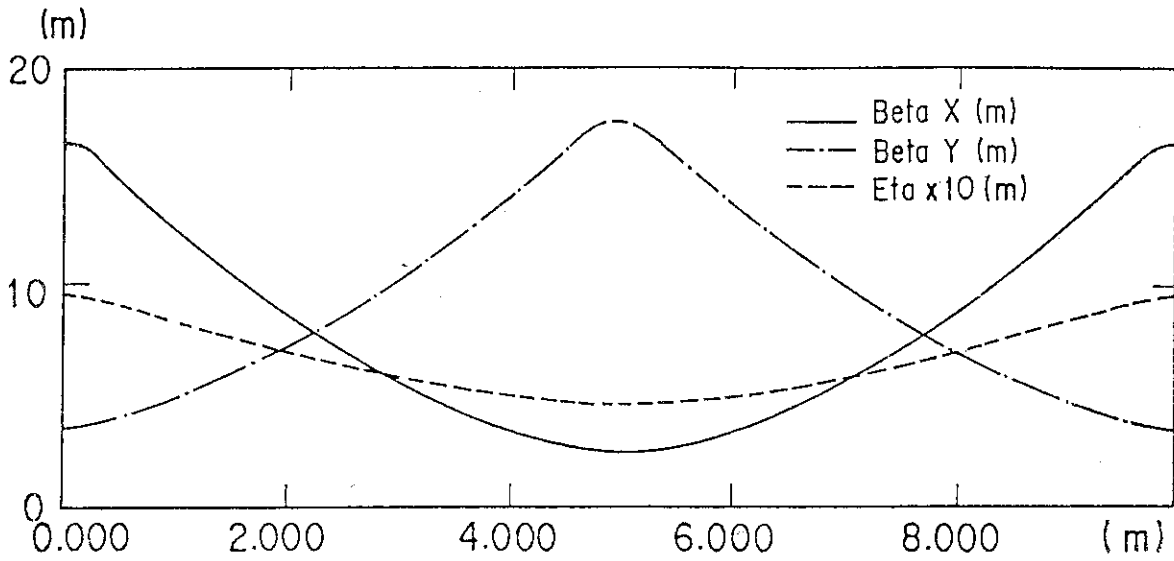


図 2.1 ノーマルセルの電磁石配置及びラティス関数

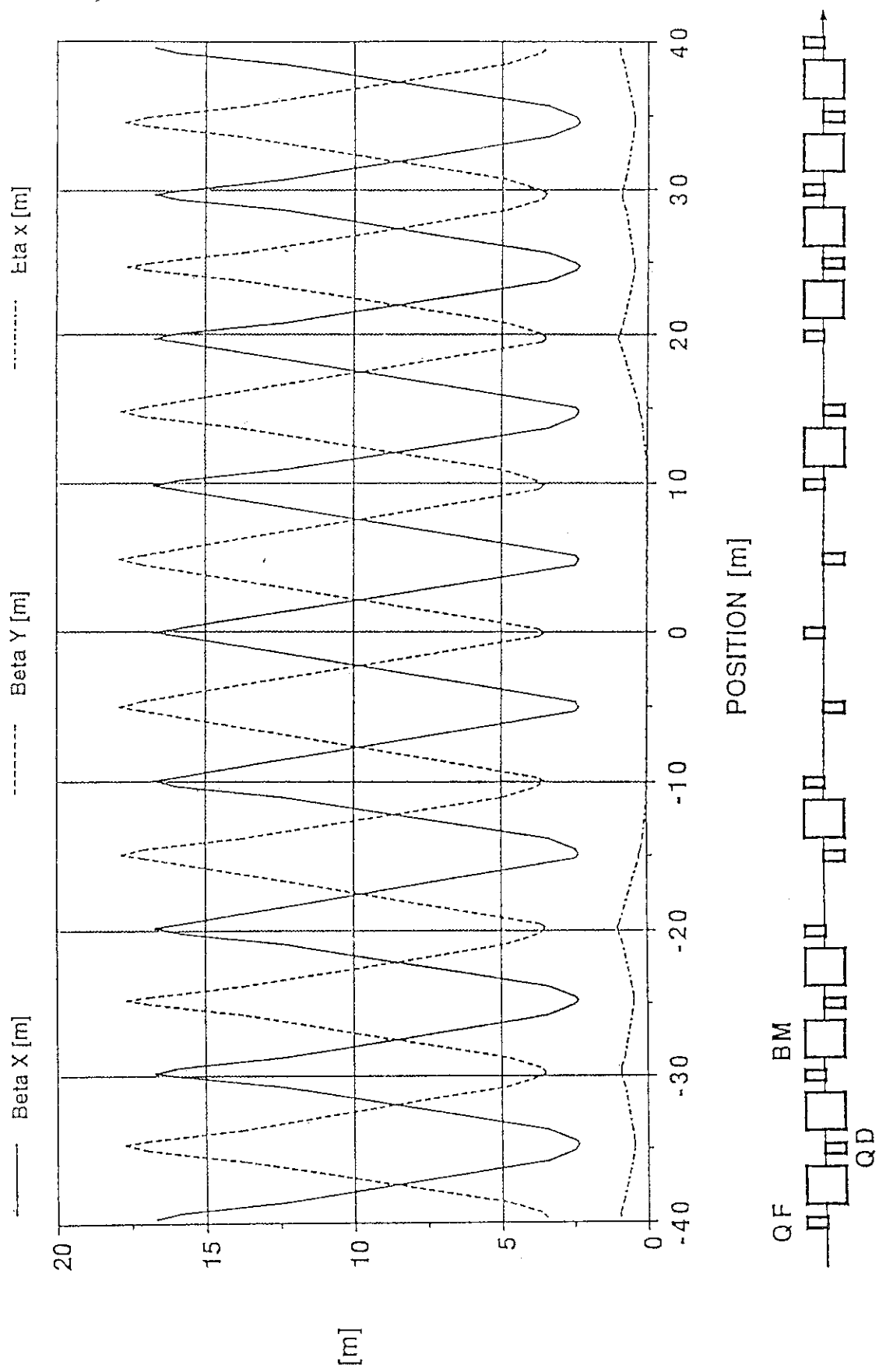


図 2.2 直線部のラティス関数

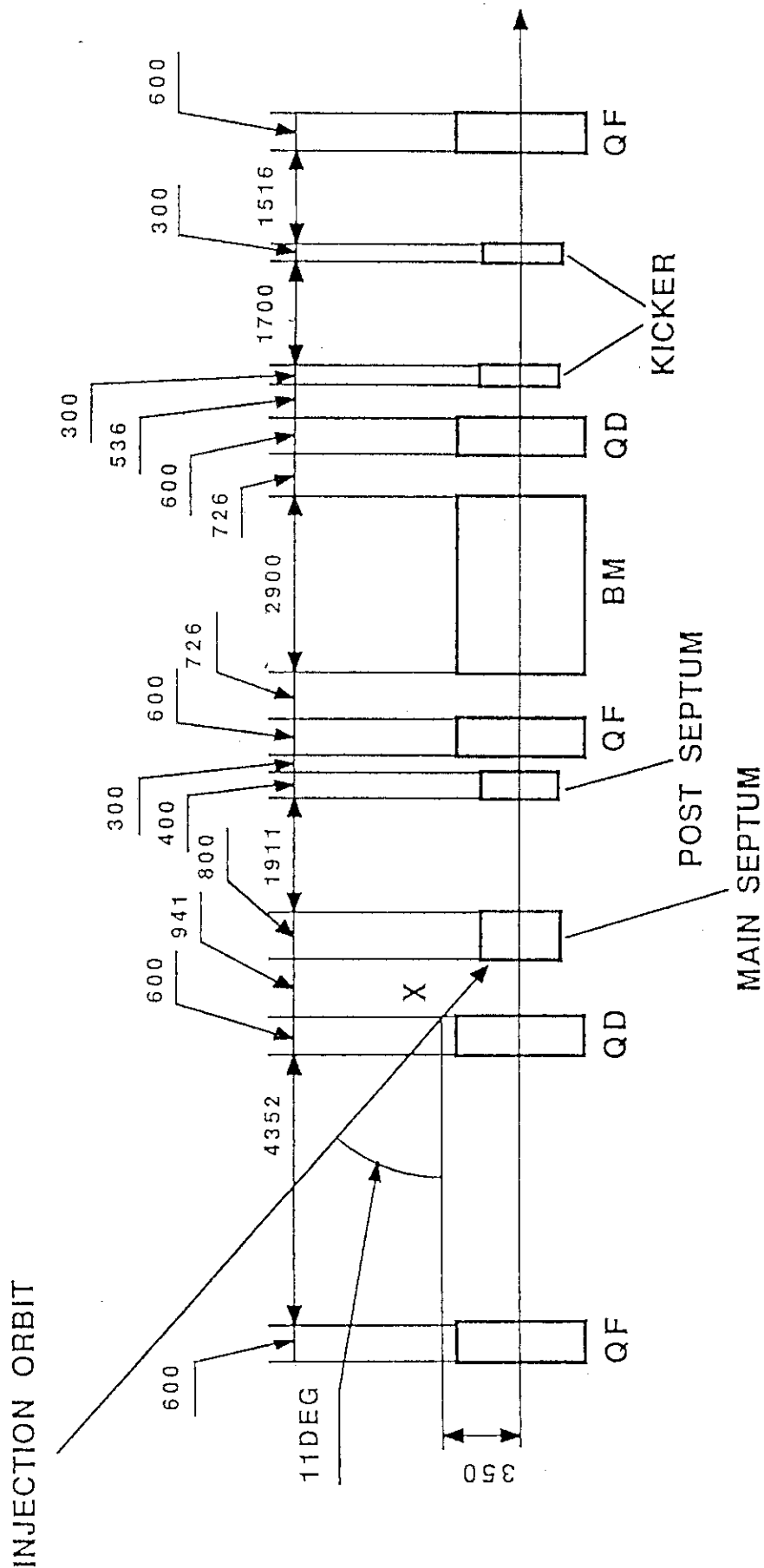


図 2.3 入射部の電磁石配置

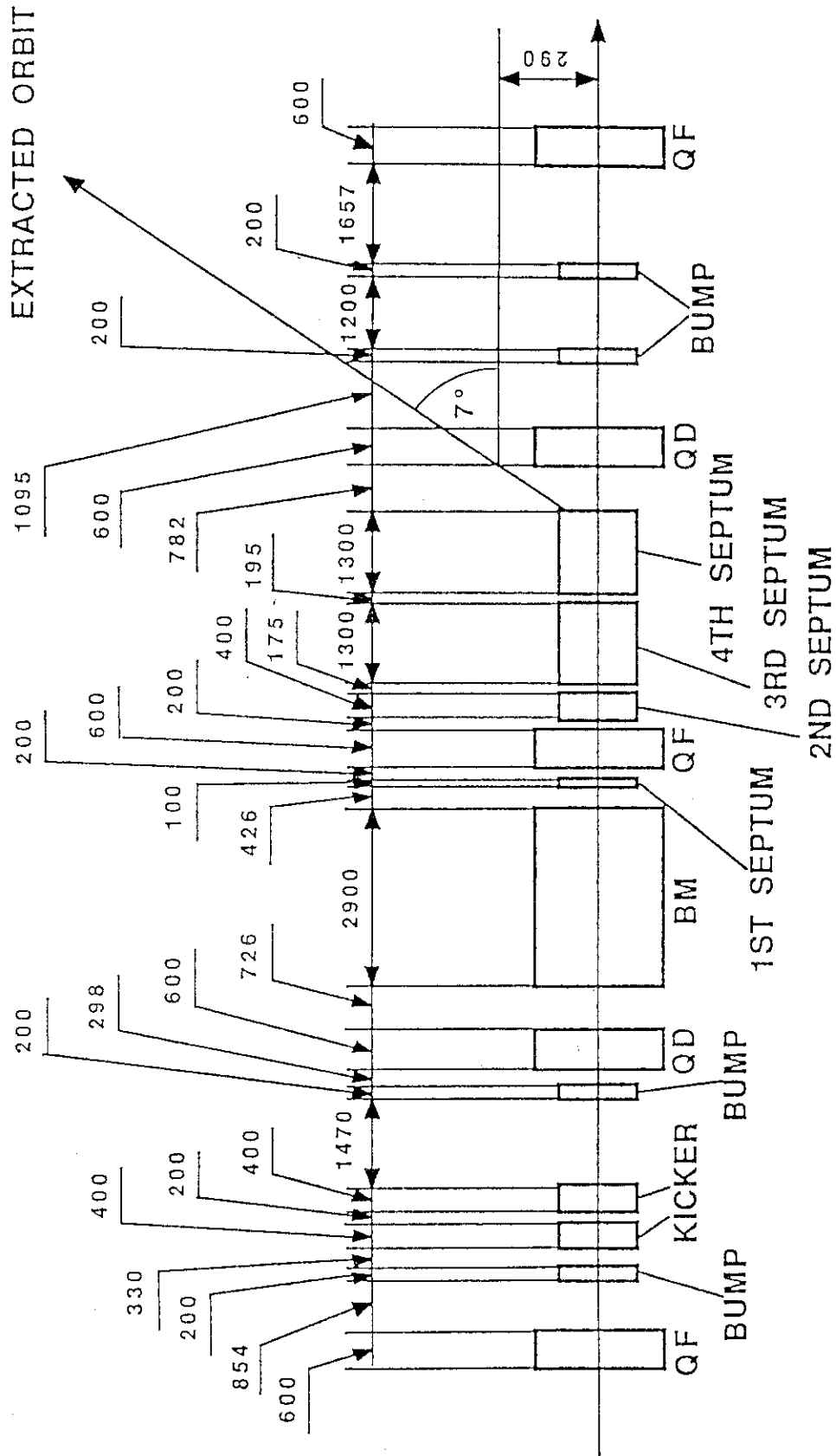


図 2.4 出射部の電磁石配置

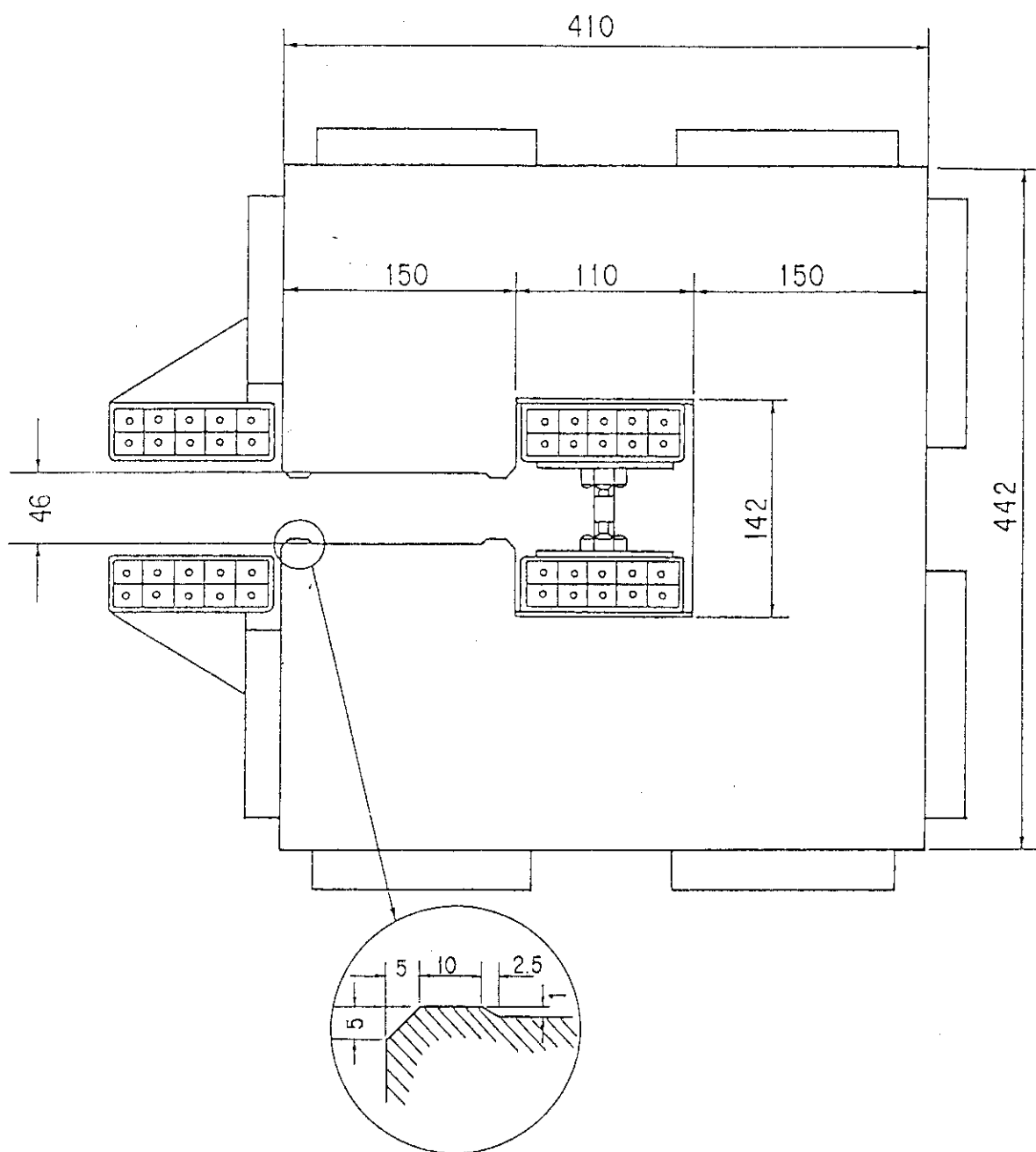


図 2.5 偏向電磁石の断面形状

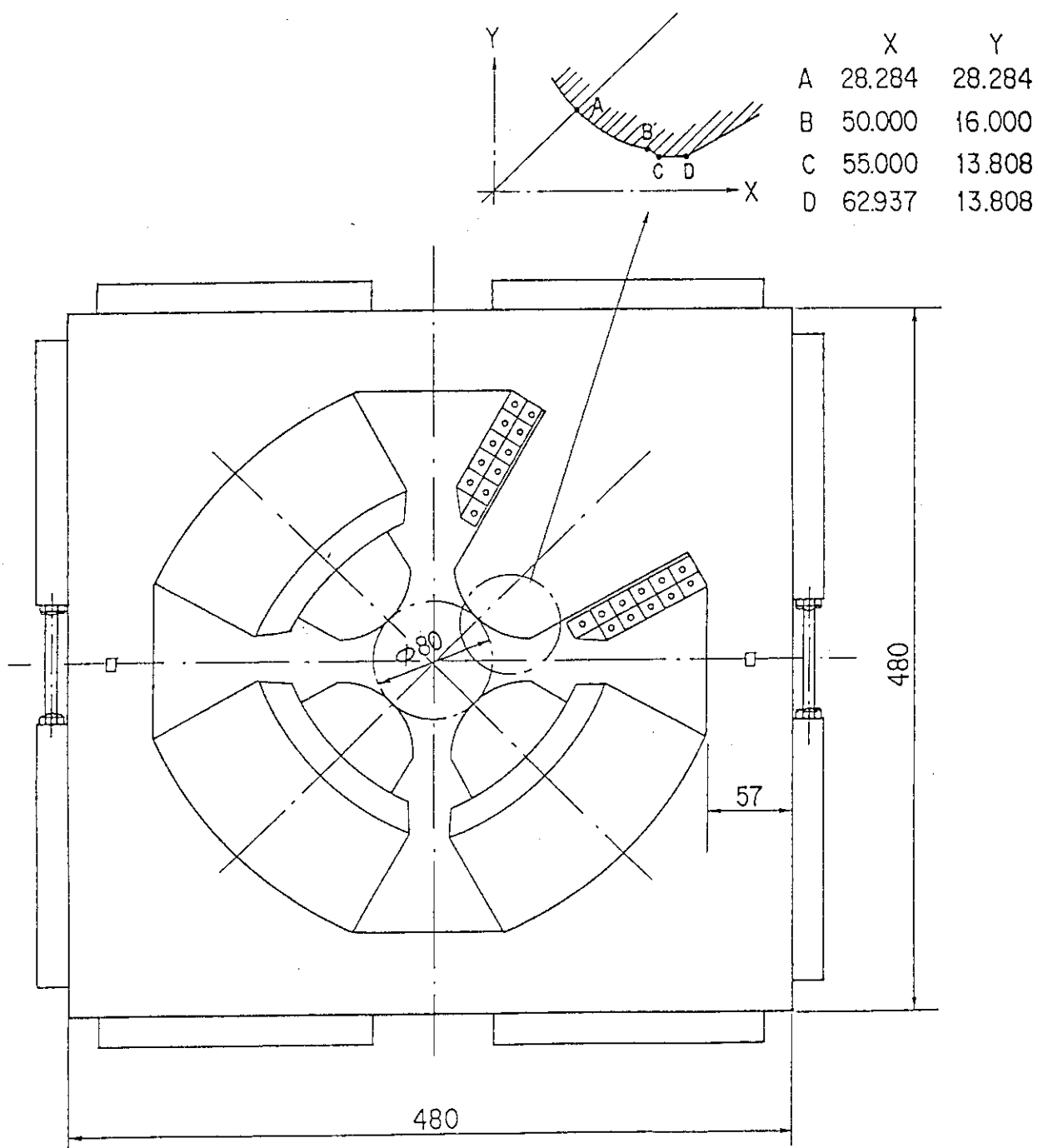


図 2.6 四極電磁石の断面形状

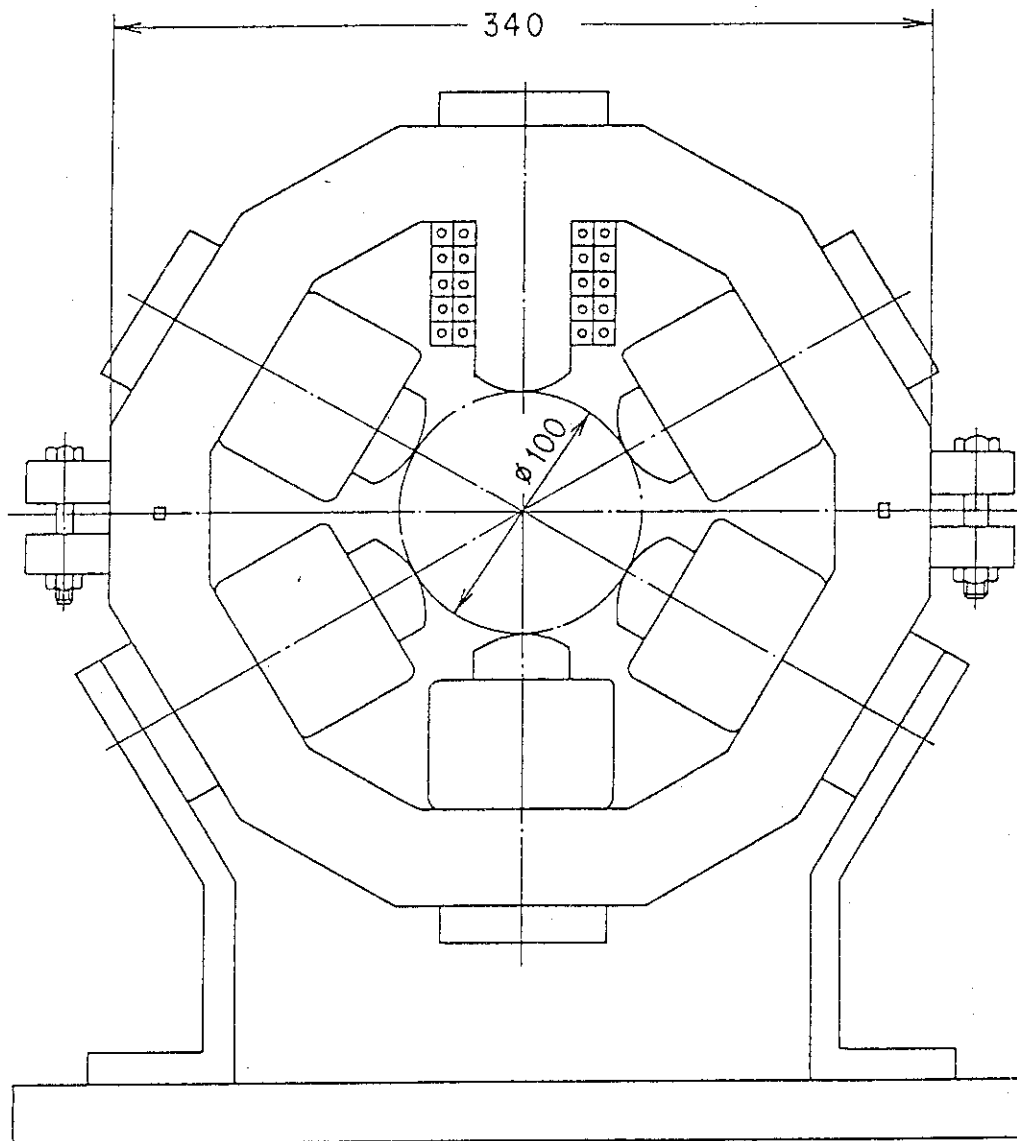


図 2.7 六極電磁石の断面形状

3. シンクロトロン真空部の概要

シンクロトロン内に蓄積された粒子が 0.35 sec の加速時間で入射時の 1.5 GeV から 8 GeV まで加速される時、シンクロトロン偏向電磁石は 0.1063 T (1.0 GeV の時) から 0.8502 T (8 GeV の時) まで励磁される。このような磁場の変化により真空ダクトには渦電流が発生し、電磁石の磁場に影響を及ぼす。このためシンクロトロン真空部の設計に当って、この渦電流の発生を少なくすることが最も重要な課題と考え、渦電流の問題を中心にダクト構造、圧力分布等に関して薄肉ダクト、補強リブ付き薄肉ダクト、ベローズダクトの 3 種類のダクトについて比較検討を行った。

検討の結果、特に真空ダクトの応力解析、圧力分布解析の結果から補強リブ付き薄肉ダクトを採用する方向で 1989 年度の R&D として、1 セル分のダクト及び排気系を製作中である。最終的な構造は試作試験を行なって決める予定である。

補強リブ付き薄肉ダクトを用いたシンクロトロン真空部の構成機器一覧表、シンクロトロンレイアウト、真空排気系統図及びセル構造図をそれぞれ表 3.1、図 3.1 ~ 図 3.7 に示す。

種々の検討内容について次章以下に示す。

表 3.1 シンクロトロン真空部の構成機器一覧表

1. ノーマルセン部の構成機器 (32 セル分)	
イオンポンプ	128 台
ターボ分子ポンプ	32 台
チタンサブリーションポンプ	64 台
超高真空計 (ヌードイオンゲージ)	32 台
コールドカソード真空計	32 台
ゲートバルブ (空操)	32 台
アングルバルブ (空操)	32 台
質量分析計	4 台
2. Dispersion Suppressor Cell 部の構成機器 (4 セル分)	
イオンポンプ	16 台
ターボ分子ポンプ	4 台
チタンサブリーションポンプ	8 台
超高真空計 (ヌードイオンゲージ)	4 台
コールドカソード真空計	4 台
ゲートバルブ (空操)	4 台
アングルバルブ (空操)	4 台
3. 直線セル部の構成機器 (2 セル分)	
イオンポンプ	8 台
ターボ分子ポンプ	2 台
チタンサブリーションポンプ	4 台
超高真空計 (ヌードイオンゲージ)	2 台
コールドカソード真空計	2 台
ゲートバルブ (空操)	2 台
アングルバルブ (空操)	2 台

RF キャビティを含む直線セルは除く。

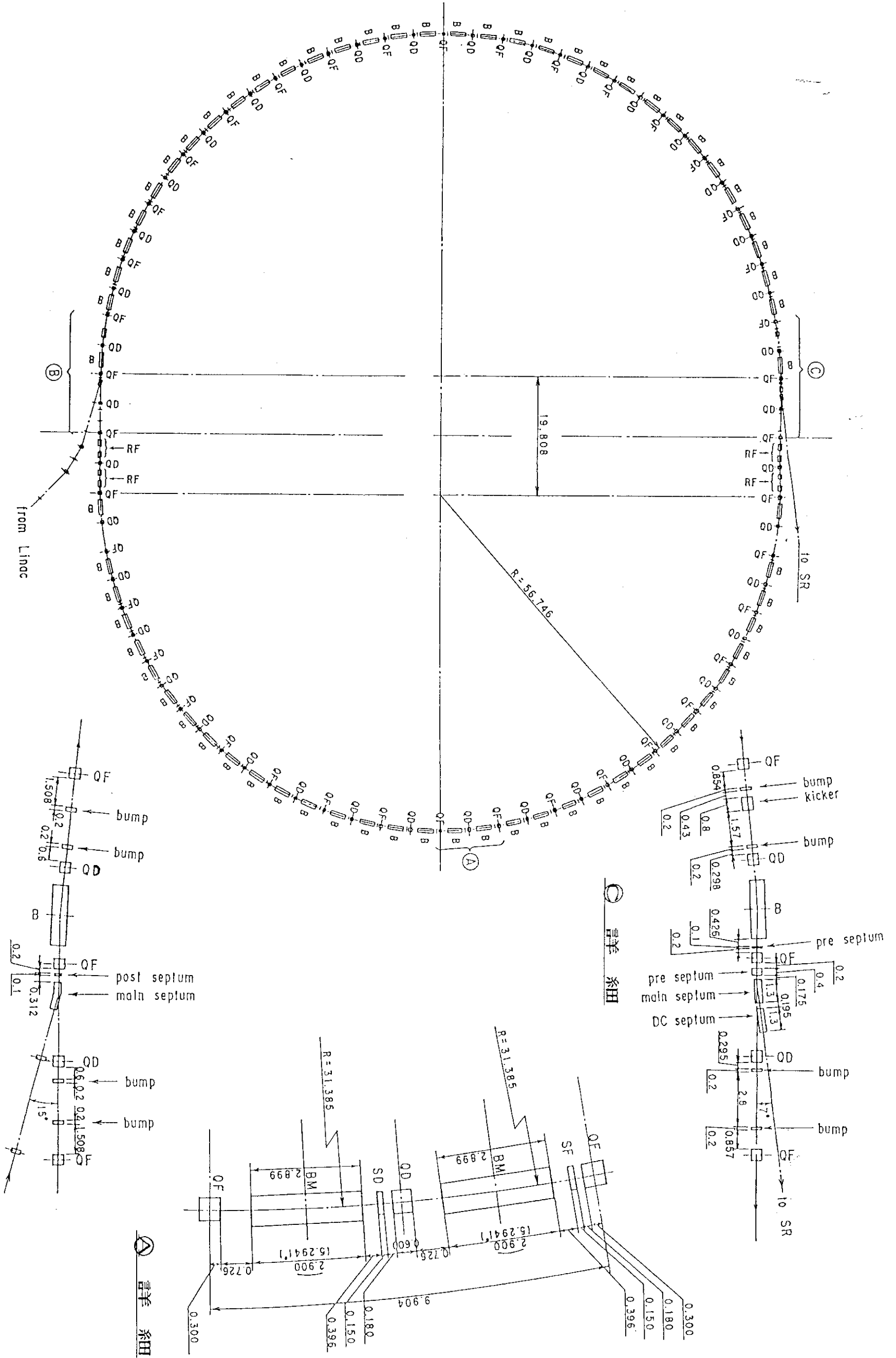
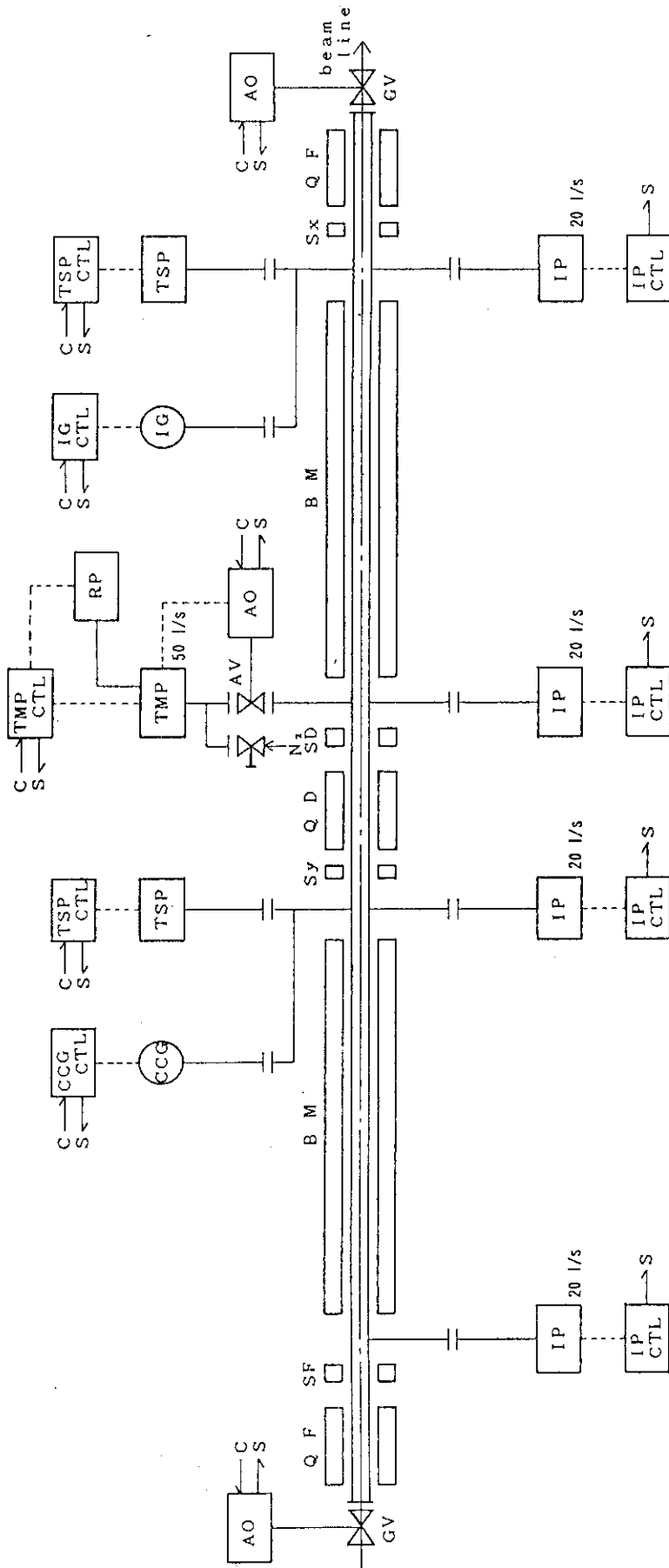


図 3.1 シンクロトロン レイアウト

① 詳 系田

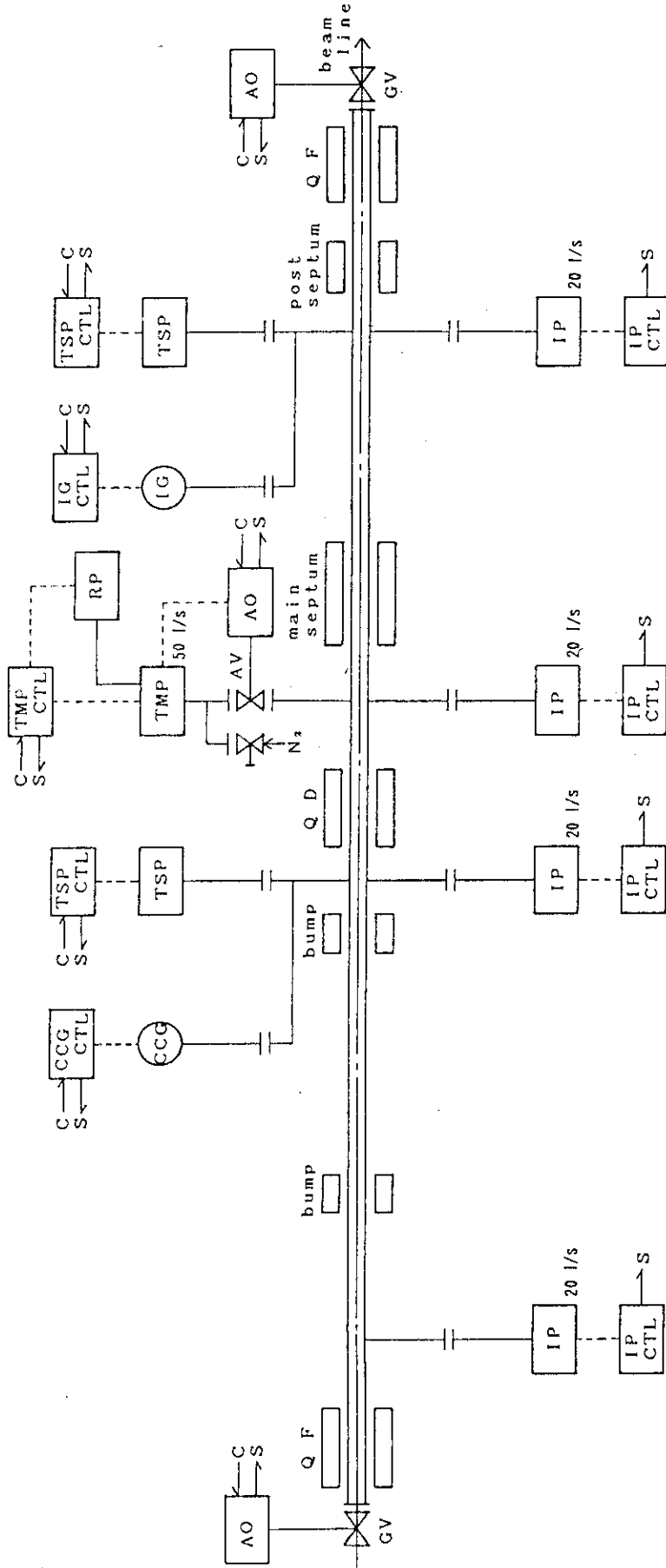


ペローズダクトの場合は排気速度 60 l/s のイオンポンプを使用

S: 状態信号
C: 制御信号

- I P: イオンポンプ
- TMP: ターボ分子ポンプ
- R P: ロータリーポンプ
- TSP: チタンサブリメーションポンプ
- I G: ノードイオンゲージ (高真空用)
- CCG: コールドカソードゲージ (中、低真空用)
- G V: ゲートバルブ
- A V: アンガバルブ
- A O: 空圧駆動

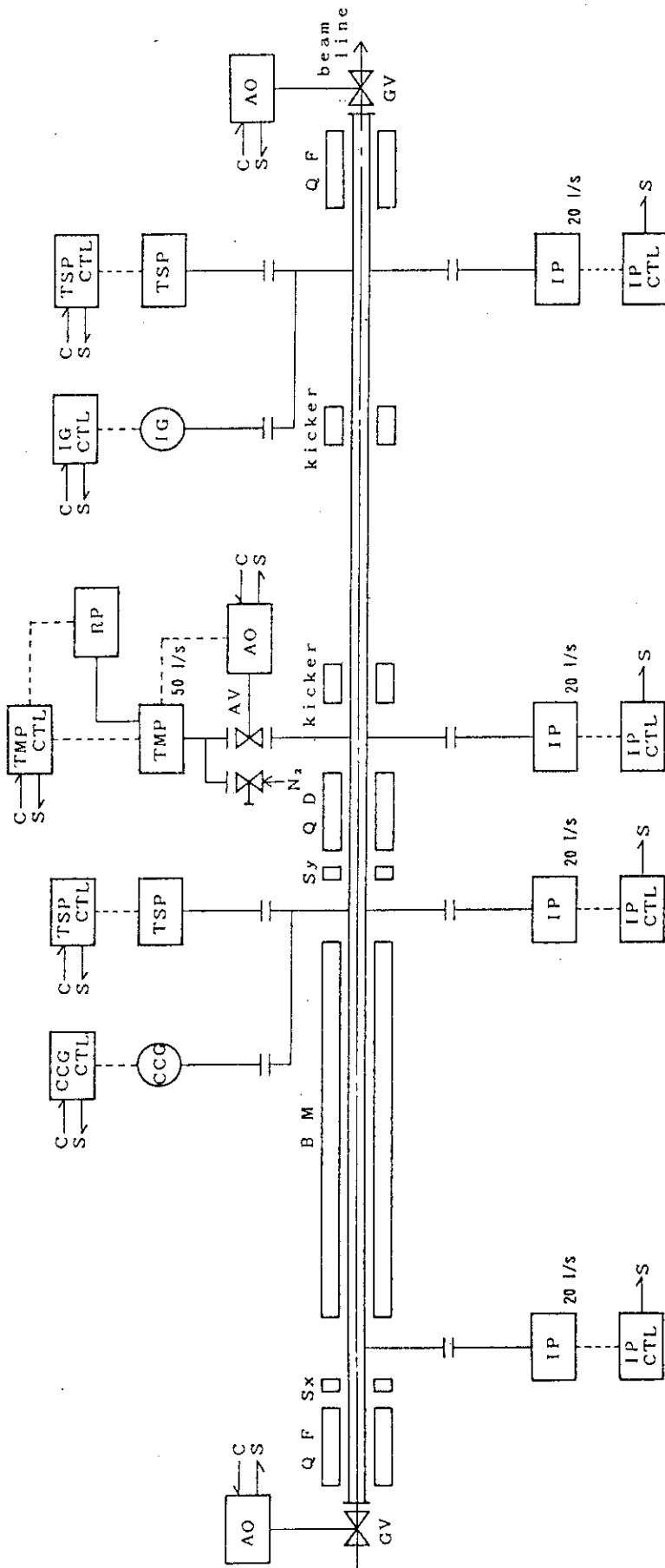
図 3.2 ノーマルセル系統図



(S : 状態信号
C : 制御信号)

- I P : イオンポンプ
- TMP : ターボ分子ポンプ
- R P : ロータリーポンプ
- TSP : チタンサブリメーションポンプ
- I G : スロードイオンゲージ (高真空用)
- CCG : コールドカソードゲージ (中、低真空用)
- G V : ゲートバルブ
- A V : アングルバルブ
- A O : 空圧駆動

図 3.3 入射部直線セル系統図

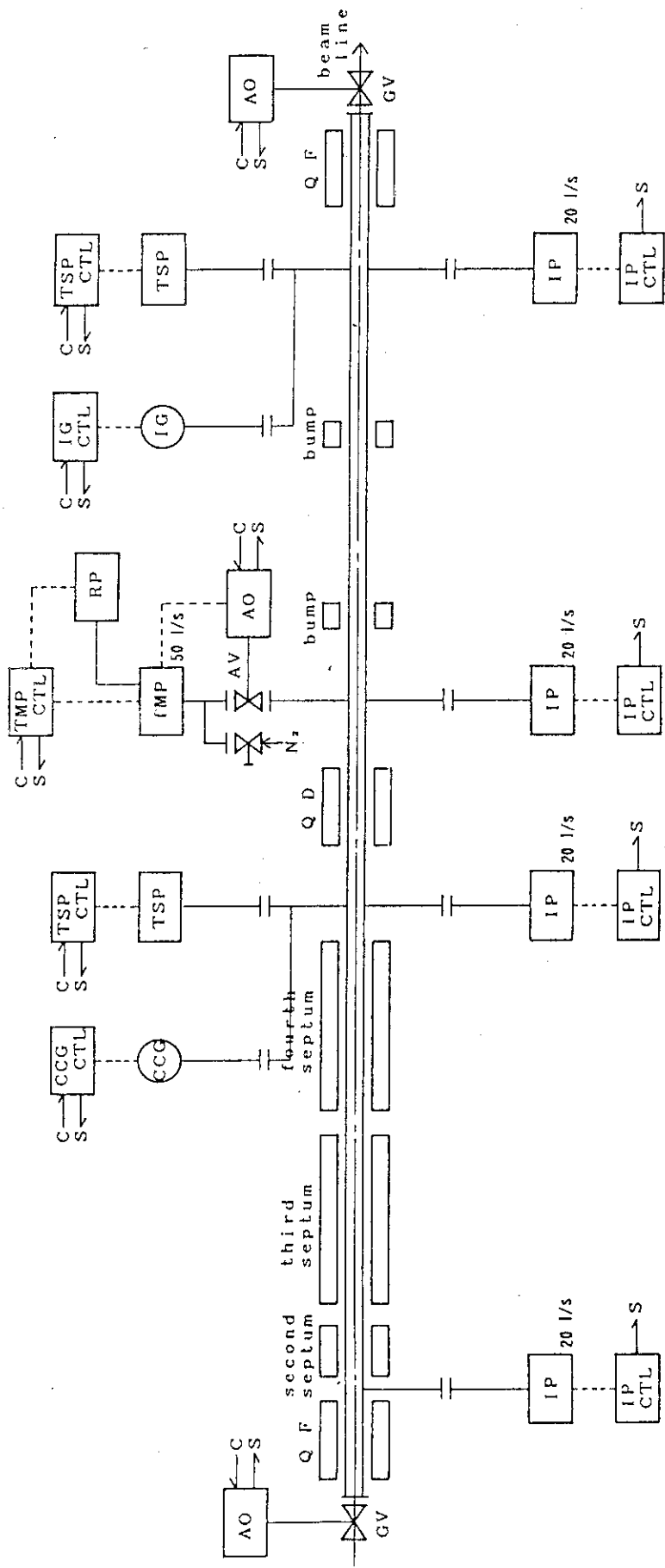


ベローズダクトの場合は排気速度 60 l/sのイオンポンプを使用

- I P : イオンポンプ
- T M P : ターボ分子ポンプ
- R P : ロータリーポンプ
- T S P : チタンサブリメーションポンプ
- I G : ノードイオンゲージ (高真空用)
- C C G : コールドカソードゲージ (中、低真空用)
- G V : ゲートバルブ
- A V : アンクルバルブ
- A O : 空圧駆動

(S : 状態信号
C : 制御信号)

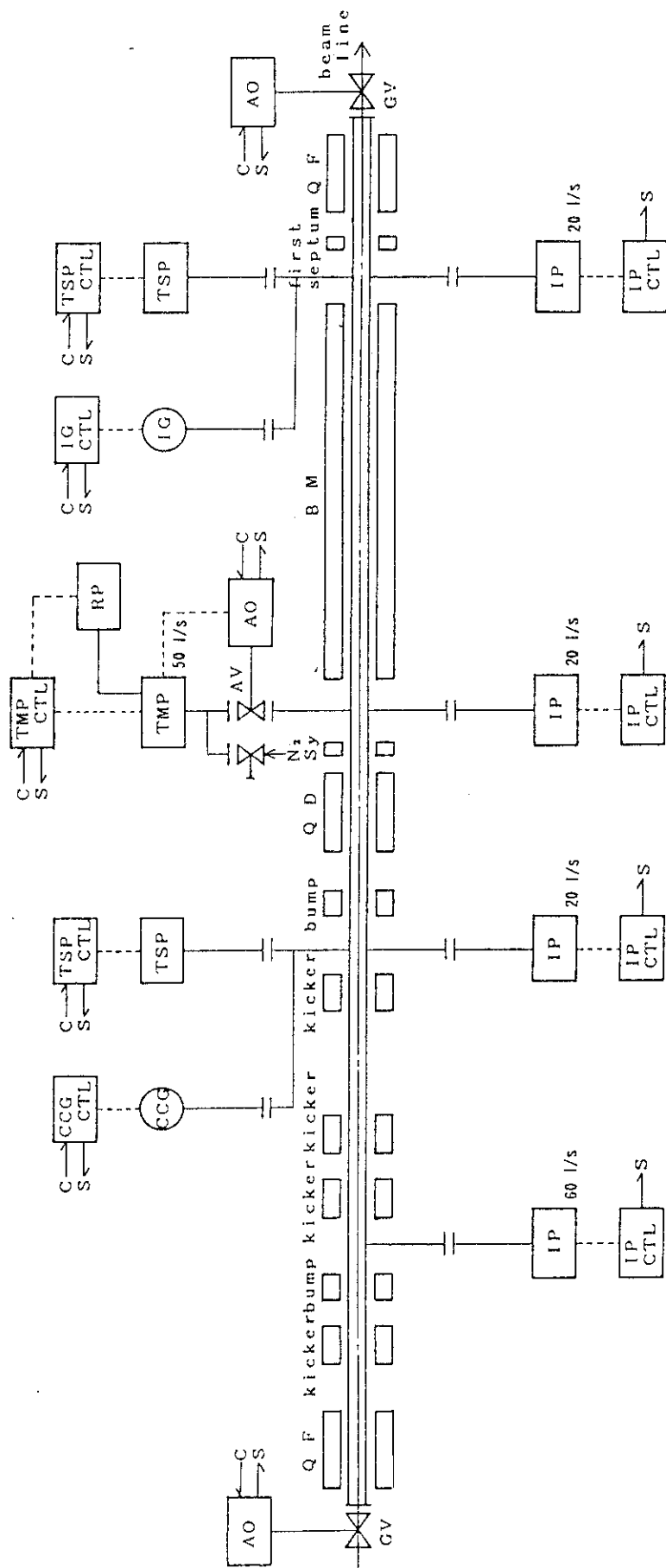
図 3.4 入射部 Dispersion Suppressor セル系統図



S : 状態信号
C : 制御信号

- I P : イオンポンプ
- T M P : ターボ分子ポンプ
- R P : ロータリーポンプ
- T S P : チタンサブリメーションポンプ
- I G : イオナイオンゲージ (高真空用)
- C C G : コールドカソードゲージ (中、低真空用)
- G V : ゲートバルブ
- A V : アングルバルブ
- A O : 空圧駆動

図 3.5 出射部直線セル系統図

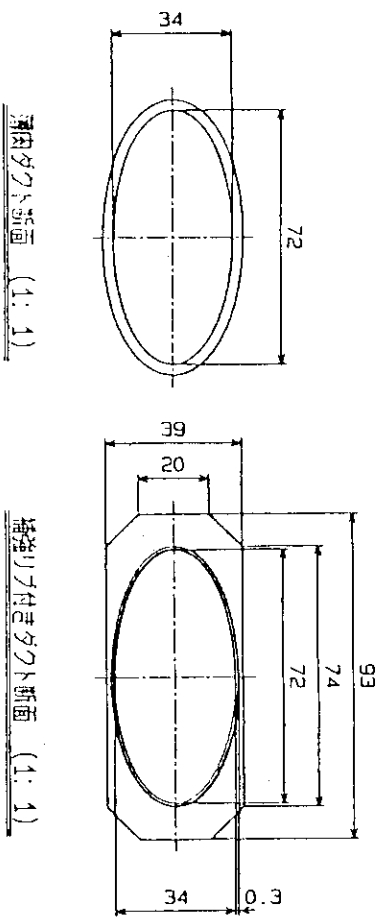
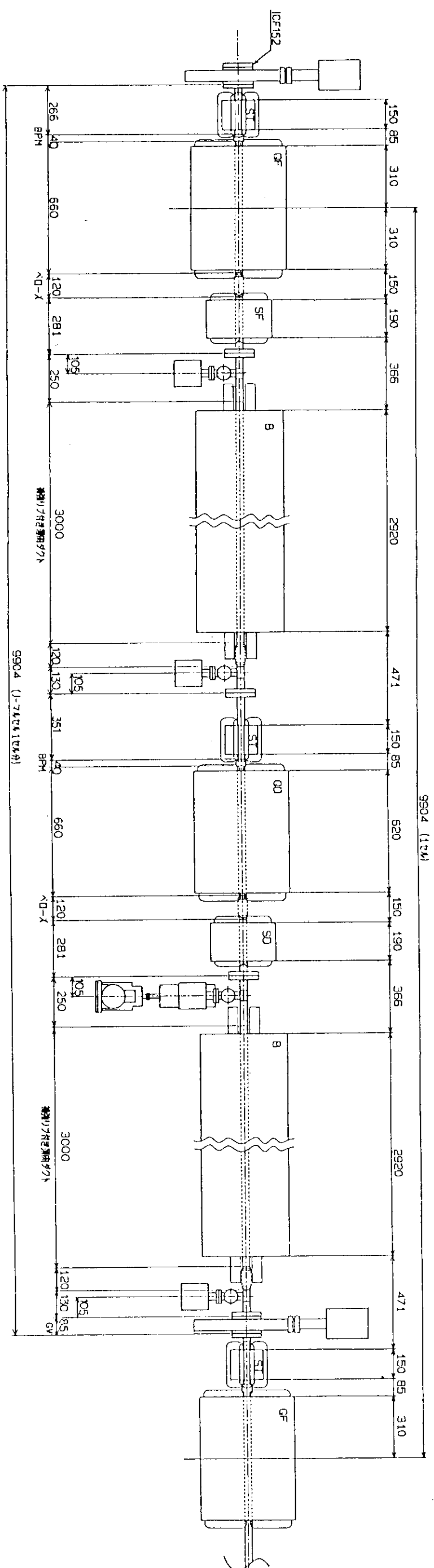
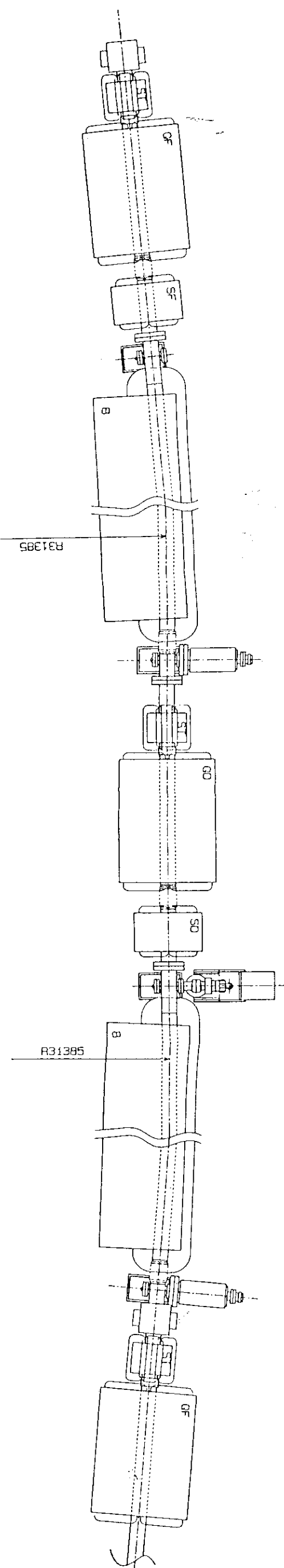


ベロースタダクトの場合は排気速度 60 l/sのイオンポンプを使用

S : 状態信号
C : 制御信号

- IP : イオンポンプ
- TMP : ターボ分子ポンプ
- RP : ロータリーポンプ
- TSP : チタンサブリメーションポンプ
- IG : スーパーストイオンゲージ (高真空用)
- CCG : コールドカソードゲージ (中、低真空用)
- GY : ゲートバルブ
- AV : アンクルバルブ
- AO : 空圧駆動

図 3.6 出射部 Dispersion Suppressor セル系統図



- | | |
|--------|----------|
| 記号 | |
| B | 偏向電磁石 |
| QF, QD | 四極電磁石 |
| SF, SO | 六極電磁石 |
| ST | スチリウム電磁石 |
| BPM | 位置モニター |
| GV | グランド |

図 3.7 ノーマルセル構造図

・ 正逆方向に流す電流の電磁石の構造を参照。
 記号は別添の案内ダクトを参照。

4. 真空ダクト

4.1 材 質

一般に高真空用材料として要求される基本特性として、

- (1) ガス放出率
- (2) 耐食性
- (3) 高温強度
- (4) 製作性（加工性）
- (5) 磁氣的性質
- (6) 比電気抵抗

等が考えられる。1 Hz 運転されるシンクロトロン真空ダクト用材質としては、前記の基本特性を考慮するとともに、シンクロトロン加速時の磁場変化により発生する渦電流を小さくするために、比電気抵抗の大きいステンレス鋼 SUS 316 L とした。

4.2 前 処 理

真空系内を必要な真空状態とするためには、前述した真空用材料として要求される基本特性を満たす材料を真空ダクト用材料として選定するとともに、ダクト内壁面の前処理が重要となる。

真空系を構成する真空部品の洗浄方法としては、図 4.1 に示す洗浄要領を予定している。

4.3 ダクト形成

シンクロトロン真空系を構築するためのダクト形成として

- (1) 薄肉ダクト
- (2) 補強リブ付き薄肉ダクト
- (3) ベローズダクト

が候補として考えられる。

ダクト構造を図 4.2 に示す。

第一の形式は板厚 1 mm の通常の薄肉ダクトである。本ダクトは、コスト的には一番安く、製作性の点でも R&D 的要素もなく既存の技術で容易に製作できるが、製作公差がやや大きいことと渦電流の影響が大きくなることに問題がある。しかし、R&D にて渦電流を実測し、渦電流の影響が許容できる範囲であれば採用し得る形式である。

第二の形式は補強リブ付き薄肉ダクトである。本ダクトは、渦電流の影響を極めて小さくするために板厚を 0.3 mm としている超薄肉ダクトである。外圧によるダクトの座屈を避けるために補強リブをダクトの外周に、長手方向に適当な間隔で取り付け必要がある。補強リブの垂直方

向の高さを小さくすることが電磁石の小型化に寄与する。補強リブの取り付けは真空炉中でのロー付けにより行なわれる。

この製作法は、西独の DESY-II, 放医研で実績があり製作公差もかなり小さくできている。しかし、ロー付けの構造強度上の信頼性は通常の溶接に比べ劣る。また真空炉の大きさの制限から、製作上の単位長さが短く、他のダクト形式に比べコストアップとなる。コストダウンできるか否かはロー付けの工数を如何か減らすかにある。

第三の形式はベローズダクトである。0.15 mm の板厚の成形ベローズで、渦電流の点では補強リブ付き薄肉ダクトより有利となるが、内表面積が他の 2 形式のダクトに比べて大きいため、放出ガスの点で不利となる。又、ベローズの山高さが高くなると電磁石の磁極間隙が大きくなり、電磁石のコストアップとなるので山高さを出来るだけ小さくする必要がある。

ダクト形式を選定するために行なった概略の定量的評価を表 4.1 に示す。

以上より、ダクト形式の第 1 候補として、補強リブ付き薄肉ダクトを予定しているが、1989 年度の R&D として 3 種類のダクトを試作中であり、最終的な構造は試作試験（渦電流、放出ガス、製作性等の評価）を行なって決める予定である。

4.4 渦電流解析

シンクロトロン真空ダクトが各種電磁石による磁場変化にさらされる時、ダクト壁内に渦電流が発生し、この渦電流により作られる磁場は外部磁場の誤差の原因となる。

本節では、偏向電磁石部、四極電磁石部、ステアリング電磁石部及び六極電磁石部の真空ダクトを対象とし、3 種類のダクトについて、IHI 開発の渦電流解析コード: INCANET を用いてダクト壁内に発生する渦電流を解析した。

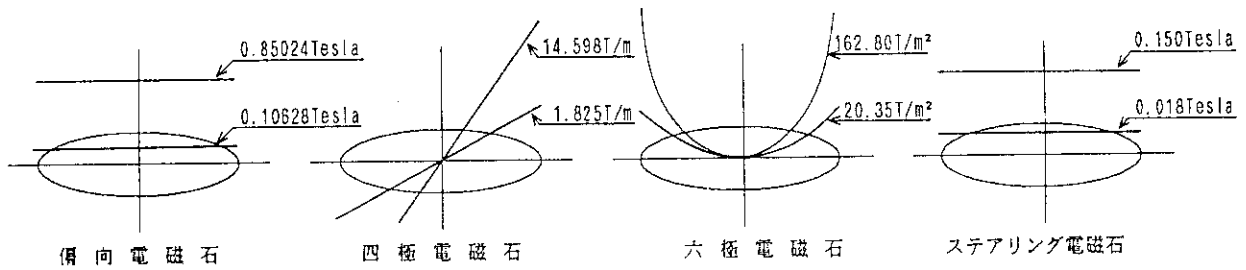
解析途中のものもあり、現時点での解析結果のみについて記述する。

4.4.1 解析条件

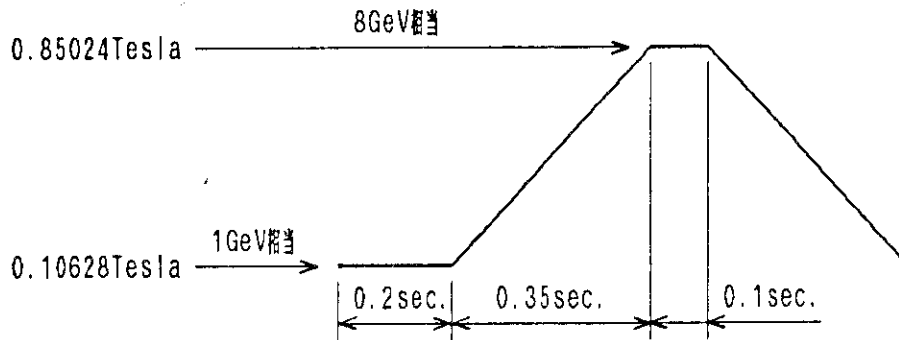
(1) 解析ケース

項 目	偏向電磁石部	四極電磁石	六極電磁石	ステアリング電磁石	
磁 場 有 効 長	2,900 mm	600 mm	150 mm	100 mm	
断面 形状	ダ ク ト 幅	72 mm	72 mm	72 mm	72 mm
	ダ ク ト 高 さ	34 mm	34 mm	34 mm	34 mm
ダ ク ト 形 式	薄肉ダクト (板厚 1.5 mm)	/	○	○	○
	成形ベローズダクト (板厚 0.15 mm)	○	/	/	/
	補強リブ付き薄肉ダクト (板厚 0.3 mm)	○	○	○	○

(2) 磁場分布



(3) 偏向電磁石磁場変化波形



(4) 磁場変化率

- ① 偏向電磁石電磁石 $(0.85024 - 0.10628) / 0.35 = 2.1256 \text{ T/sec}$
- ② 四極電磁石 $((14.598 - 1.8248) / 0.35) * X = 36.496X \text{ T/sec}$
- ③ 六極電磁石 $((162.8 - 20.35) * X * 2) = 407.0X * 2 \text{ T/sec}$
- ④ ステアリング電磁石 $(0.150 - 0.0188) / 0.35 = 0.375 \text{ T/sec}$

X: 横方向距離

(5) 物性値

項目	ダクト形式	薄肉ダクト	成形ベローズダクト	補強リブ付き薄肉ダクト
材	質	SUS 316 L	SUS 316 L	SUS 316 L
電気抵抗率 (Ωm)	長手方向	75×10^{-8}	* 158×10^{-8}	75×10^{-8}
	幅方向	75×10^{-8}	75×10^{-8}	75×10^{-8}
透磁率 (H/m)		0.126×10^{-5}	0.126×10^{-5}	0.126×10^{-5}

注記: *長手方向のベローズ長さ (2.1: 1) を考慮した。

4.4.2 解析結果

(1) 偏向電磁石部真空ダクト

偏向電磁石部真空ダクトに対する渦電流解析結果を下表に示す。

解析結果	偏向電磁石部真空ダクト		
	薄肉ダクト (肉厚: 1.5 mm)	成形ベローズダクト (肉厚: 0.15 mm)	補強リブ付き薄肉ダクト (肉厚: 0.30 mm)
フローパターン			
渦電流変化	図 4.3	図 4.4	図 4.3
磁場分布	図 4.5		図 4.6
最大発生渦電流値 (A)	7.73	0.40	1.77
最大発生磁場 (T)	0.218×10^{-3}	0.115×10^{-4}	0.504×10^{-4}
六極成分 (T/m ²)	0.093		0.021
磁場誤差	2.051×10^{-3}	1.082×10^{-4}	4.742×10^{-4}

(注意)

① 磁場誤差 = 最大発生磁場 / 初期磁場

但し,

初期磁場 : 0.10628 Tesla

最大発生磁場: ダクト断面中心より ± 30 mm の範囲の最大値

(2) ステアリング電磁石部真空ダクト

ステアリング電磁石部真空ダクトに対する渦電流解析結果を下表に示す。

解析結果	ステアリング電磁石部真空ダクト		
	薄肉ダクト (肉厚: 1.5 mm)	成形ベローズダクト (肉厚 0.15 mm)	補強リブ付き薄肉ダクト (肉厚: 0.30 mm)
フローパターン			
渦電流変化	図 4.7		
磁場分布	図 4.8		
最大発生渦電流値 (A)	1.01		
最大発生磁場 (T)	0.145×10^{-4}		
六極成分 (T/m ²)			
磁場誤差	8.056×10^{-4}		

(注意)

① 磁場誤差 = 最大発生磁場 / 初期磁場

但し,

初期磁場 : 0.018 Tesla

最大発生磁場: ダクト断面中心より ± 30 mm の範囲の最大値

(3) 六極電磁石部真空ダクト

六極電磁石部真空ダクトに対する渦電流解析結果を下に示す。

ダクト形式 解析結果	六極電磁石部真空ダクト		
	薄肉ダクト (肉厚: 1.5 mm)	成形ベローズダクト (肉厚: 0.15 mm)	補強リブ付き薄肉ダクト (肉厚: 0.30 mm)
フローパターン			
渦電流変化	図 4.9		
磁場分布	図 4.10		
最大発生渦電流値 (A)	0.77		
最大発生磁場 (T)	0.136×10^{-4}		
六極成分 (T/m^2)	0.0054		
磁場誤差	2.644×10^{-4}		

(注意)

① 磁場誤差 = 六極成分 / 初期六極成分

但し,

初期六極成分: 20.35 Tesla/ m^2

六極成分 : ダクト断面中心より ± 30 mm の範囲の磁場分布より推定される六極成分

4.4.3 考 察

渦電流が作る磁場の誤差 $\Delta B/B$ が、目安としている 5×10^{-4} を満たしているのは、ベローズダクトと補強リブ付き薄肉ダクトである。従って、真空ダクト形式として補強リブ付き薄肉ダクトを採用予定の方向で試作中である。しかし、通常の薄肉ダクトに比べ、製作性、コスト等の面で劣るため、六極成分の評価、トラッキング等を実施し、薄肉ダクトの採用の可否を今後検討予定である。

4.5 熱解析

偏向電磁石部真空ダクトは、放射光に照射され、発熱により温度上昇する。本節では、補強リブ付き薄肉ダクト及び薄肉ダクトについて、放射光による発熱を考慮して実施した温度分布解析について述べる。

4.5.1 解析条件

(1) 解析モデル

1) 補強リブ付き薄肉ダクト

断面形状寸法: 内径 72 mm \times 34 mm 正楕円形

ダクト肉厚: 0.3 mm

ダクト長さ: 20.0 mm

材 質: SUS 316 L
 リブ厚さ: 2.0 mm
 リブ高さ: 2.0 mm
 リブピッチ: 40.0 mm

2) 薄肉ダクト

断面形状寸法: 内径 72 mm × 34 mm 正楕円形
 ダクト肉厚: 1.5 mm
 ダクト長さ: 1.0 mm
 材 質: SUS 316 L

(2) 運転シーケンス

運転シーケンスを図 4.11 とした。

(3) 解析コード

運転シーケンス中のビームエネルギーの変化を平均的なエネルギーで模擬し、真空ダクトの SOR 光照射による定常状態での到達最高温度及びその時の温度分布を確認するため、汎用解析コード: NASTRAN を用いて非定常温度分布解析を実施した。

(4) 境界条件

1) 真空ダクト外表面における熱伝達係数

室内における自然対流伝達を仮定し、熱伝達率は JIS を参考に $11.63 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、外気温度は 20°C とした。

2) 真空ダクト内表面における熱伝達係数

真空断熱とした。

3) 真空ダクトの初期温度

初期温度は 20°C とした。

(5) 材料物性値

熱伝導率: $0.016 \text{ W/mm}^2\text{K}$

熱容量: $3.95 \times 10^{-3} \text{ J/mm}^3\text{K}$

4.5.2 解析結果

NASTRAN による非定常温度分布解析によって得られた、最高温度発生点における温度の時間的推移を図 4.12、図 4.13 に示す。

4.5.3 考 察

解析結果より、いずれのダクトともかなりの温度上昇が見られる。今後は、ビームエネルギーの変化を忠実に模擬した非定常温度分布解析及び熱応力解析等を実施した上で、ダクトの冷却の必要性やその方法について設計検討を加えていく予定である。

4.6 構造強度解析

真空ダクトに発生する渦電流を小さく抑えるために、真空ダクト形状として補強リブ付き薄肉ダクトを予定しているが、補強リブ付き薄肉ダクトの最適形状を設定するために実施した耐外圧強度解析について記す。

4.6.1 解析条件

(1) 対象ダクト形状及び寸法

1) 補強リブ付き超薄肉ダクト (レーストラック型)

- a. 断面形状 : レーストラック型
- b. 断面寸法 : 72 mm × 34 mm
- c. ダクトの肉厚 : 0.30 mm
- d. 補強リブ高さ : 1.0 mm, 3.0 mm
- e. 補強リブ厚さ : 2.0 mm
- f. 補強リブピッチ : 20.0 mm

2) 補強リブ付き超薄肉ダクト (楕円形型)

- a. 断面形状 : 楕円形型
- b. 断面寸法 : 72 mm × 34 mm
- c. ダクトの肉厚 : 0.30 mm
- d. 補強リブ高さ : 1.0 mm, 2.0 mm
- e. 補強リブ厚さ : 1.0 mm, 2.0 mm
- f. 補強リブピッチ : 20.0 mm, 30.0 mm, 40.0 mm

(2) 材料物性値

材 質: SUS 316 L

縦弾性係数: 19,300 kg/mm² at 120°C

ポアソン比: 0.3

(3) 解析コード

NASTRAN による応力解析

(4) 荷重条件

外圧 = 1.033 kg/cm²

(5) 評価基準

MITI 501 号

許容応力強さ: $S_m = 12.0 \text{ kg/cm}^2$ 於常温

4.6.2 解析結果

各種ダクト (72 mm × 34 mm) の NASTRAN による応力解析結果を表 4.2 及び表 4.3 に示す。

4.6.3 考 察

表 4.2 より、楕円形型の場合、リブの形状が同一であっても発生する応力はレーストラック型の約 25% 程度であり、リブ付ダクトに関しては楕円形型ダクトを採用するものとする。楕円形型はレーストラック型のダクトに比べ、ダクトアパーチャーが 87.4% と小さくなるが問題ない範囲と考える。

リブの高さに関しては、ダクトの長尺化のための接合に高さ 2 mm 程度のリップが必要であると考えられ、2 mm を採用する。

表 4.3 より、許容応力 12.0 kg/cm^2 とした場合、リブ高さが 2 mm とすると、リブ厚さ 2 mm ではピッチが 40 mm、リブ厚さが 1 mm ではピッチが 20 mm 程度となる。

しかしながら、ピッチを広げることによる溶接の容易性やコスト面でのメリットは大きく、リブ高さ 2 mm、リブ厚さ 2 mm、リブピッチ 40 mm の場合を採用する。

参考として、他のシンクロトロンで採用している補強リブ付き薄肉ダクトの応力解析結果を図 4.14 に示す。

表 4.1 ダクト形式選定項目の定量的評価

ダクト形式	寸法	磁極間ギャップ	ダクトの変形量	渦電流	ポンプ仕様 日標真空度: 1.0×10^{-6} Torr	備考
薄肉ダクト	ダクト断面形状 72 mm × 34 mm 楕円 ダクト肉厚: 1.5 mm	40.0 mm	鉛直方向 - 0.15 mm 水平方向 0.07 mm	発生磁場 3.55×10^{-4} T 磁場誤差 3.71×10^{-3}	IP 20 l/s × 4 / cell 到達真空度: 9.5×10^{-7} Torr TMP セット × 1 / cell (50 l/s) TSP セット × 2 / cell	最大発生応力 5.7 kg/mm ² 許容応力 11 kg/mm ²
リブ付き 超薄肉ダクト	ダクト断面形状 72 × 34 mm 楕円 ダクト肉厚: 0.3 mm 補強板 リブ高さ: 2.0 mm リブ厚さ: 2.0 mm リブピッチ: 40 mm	42.0 mm	鉛直方向 - 0.06 mm 水平方向 0.02 mm	発生磁場 0.71×10^{-4} T 磁場誤差 7.43×10^{-4}	IP 20 l/s × 4 / cell 到達真空度: 9.5×10^{-7} Torr TMP セット × 1 / cell (50 l/s) TSP セット × 2 / cell	最大発生応力 9.9 kg/mm ² 許容応力 11 kg/mm ²
ベローズダクト	ダクト断面形状 72 mm × 34 mm 楕円 ベローズ山高さ 3.0 mm ベローズ肉厚 0.15 mm	44.0 mm	鉛直方向 - 0.09 mm 水平方向 ——mm	発生磁場 0.15×10^{-4} T 磁場誤差 1.57×10^{-4}	IP 60 l/s × 4 / cell 到達真空度 1.0×10^{-6} Torr TMP セット × 1 / cell (50 l/s) TSP セット × 2 / cell	伸縮と外圧による発生応力の和 5.8 kg/mm ² 許容応力 18 kg/mm ²

* 1. 上下に 1.5 mm ずつのクリアランスをとった値

表 4.2 各種リブ形状による応力解析結果(1)

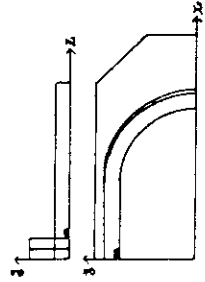
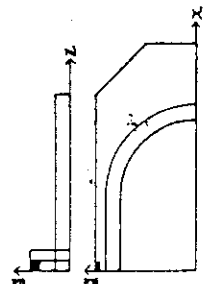
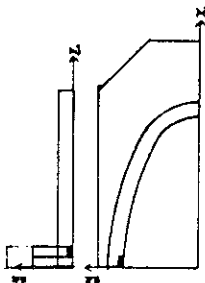
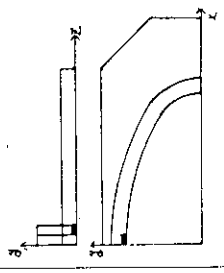
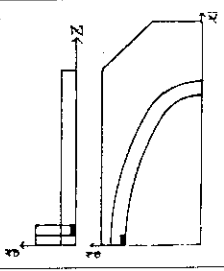
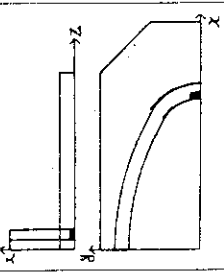
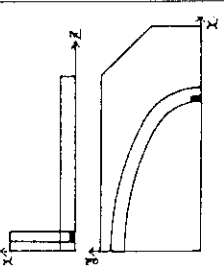
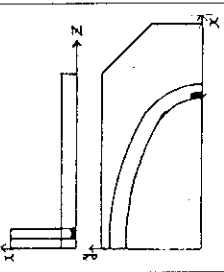
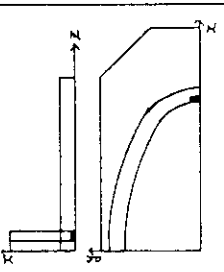
	補強リブ付薄肉ダクト (レーストラック型)	補強リブ付薄肉ダクト (レーストラック型)	補強リブ付薄肉ダクト (楕円形型)
アパーチャー ダクト肉厚	72×34 (mm) 0.3	72×34 (mm) 0.3	72×34 (mm) 0.3
リブ高さ	" 3.0	" 1.0	" 1.0
リブ厚さ	" 2.0	" 2.0	" 2.0
リブピッチ	" 20.0	" 20.0	" 20.0
変位 δ_x max	" 0.02	" 0.11	" 0.01
変位 δ_y max	" -0.11	" -0.25	" -0.04
最大応力強さ	9.4 (kg/mm ²)	19.9 (kg/mm ²)	5.1 (kg/mm ²)
最大応力強さ 発生位置			

表 4.3 各種リップ形状による応力解析結果(2)

	補強リップ付薄肉ダクト (情円形型)	補強リップ付薄肉ダクト (情円形型)	補強リップ付薄肉ダクト (情円形型)	補強リップ付薄肉ダクト (情円形型)	補強リップ付薄肉ダクト (情円形型)	補強リップ付薄肉ダクト (情円形型)
アパーチャー ダクト肉厚	72×34 (mm) 0.3	72×34 (mm) 0.3	72×34 (mm) 0.3	72×34 (mm) 0.3	72×34 (mm) 0.3	72×34 (mm) 0.3
リップ高さ	" 1.0	" 1.0	" 1.0	" 1.0	" 2.0	" 2.0
リップ厚さ	" 2.0	" 1.0	" 1.0	" 1.0	" 2.0	" 1.0
リップピッチ	" 20.0	" 20.0	" 30.0	" 30.0	" 30.0	" 30.0
変位	δ_x max	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
	δ_y max	-0.06	-0.07	-0.09	-0.06	-0.07
最大応力強さ	5.1 (kg/mm ²)	7.7 (kg/mm ²)	9.5 (kg/mm ²)	14.5 (kg/mm ²)	9.9 (kg/mm ²)	14.2 (kg/mm ²)
最大応力強さ 発生位置						

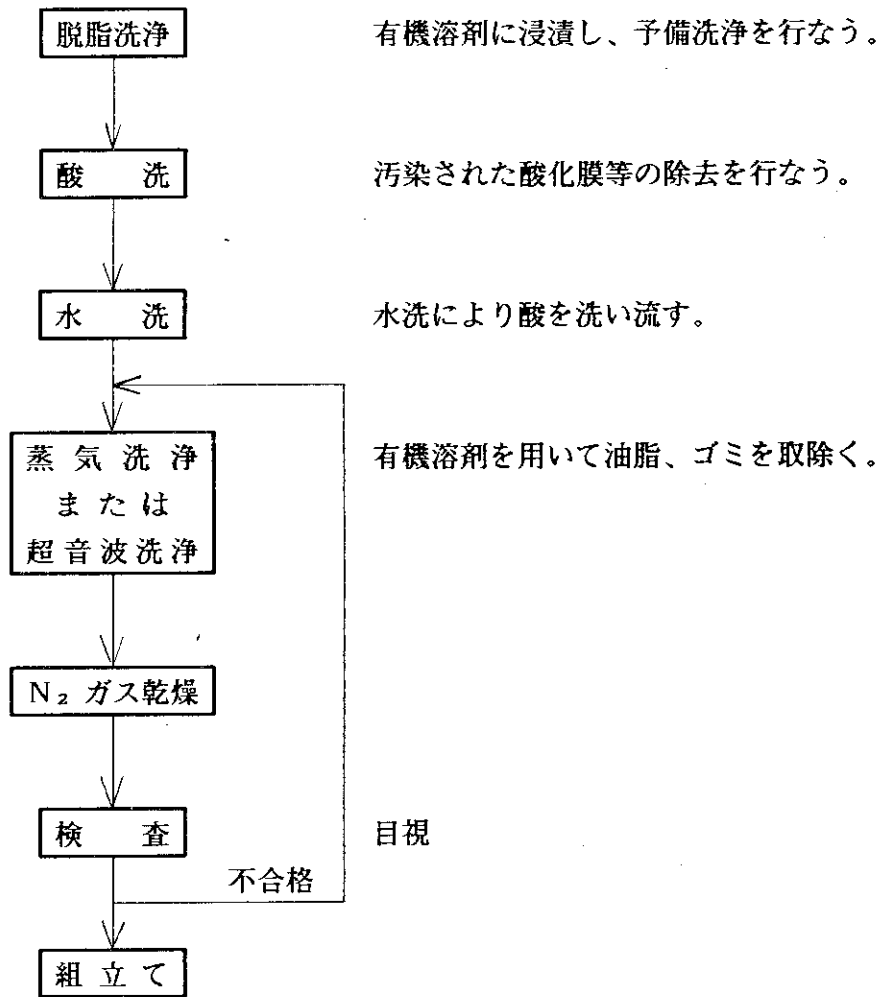
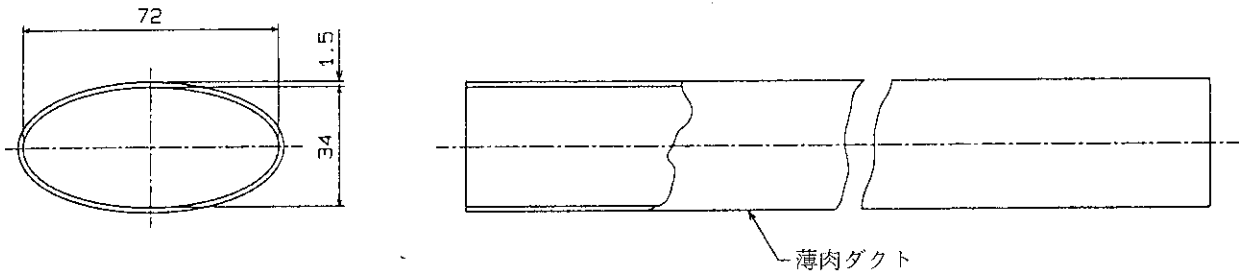
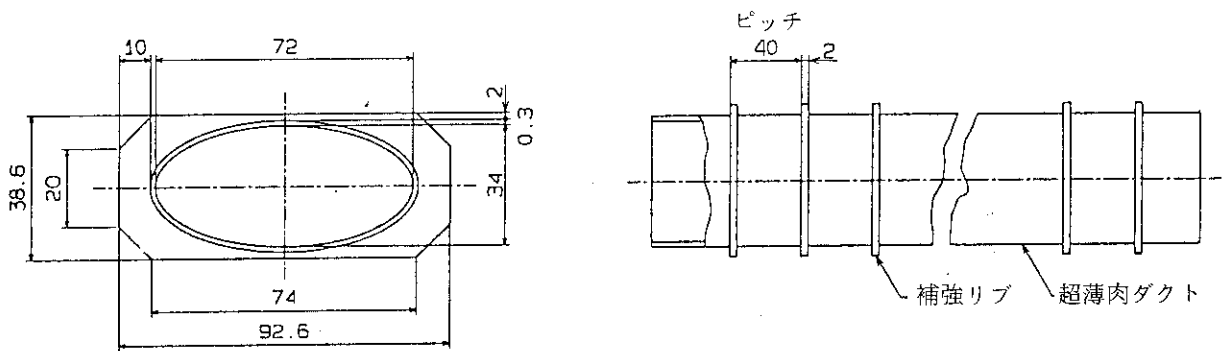


図 4.1 洗浄要領

① 薄肉ダクト



② 補強リブ付き薄肉ダクト



③ ベローズダクト

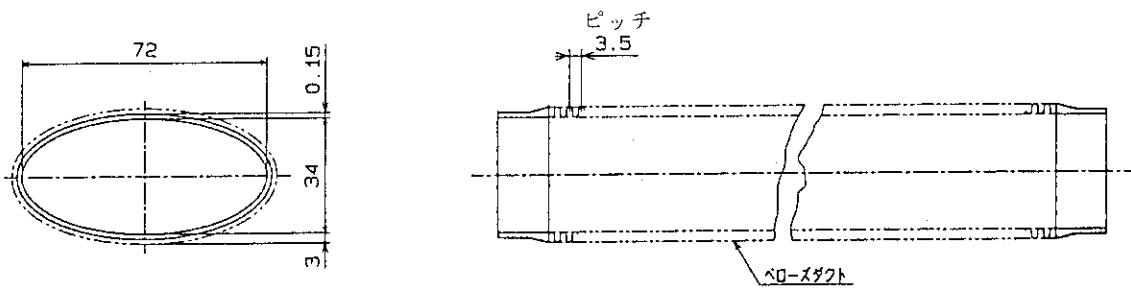


図 4.2 真空ダクト構造

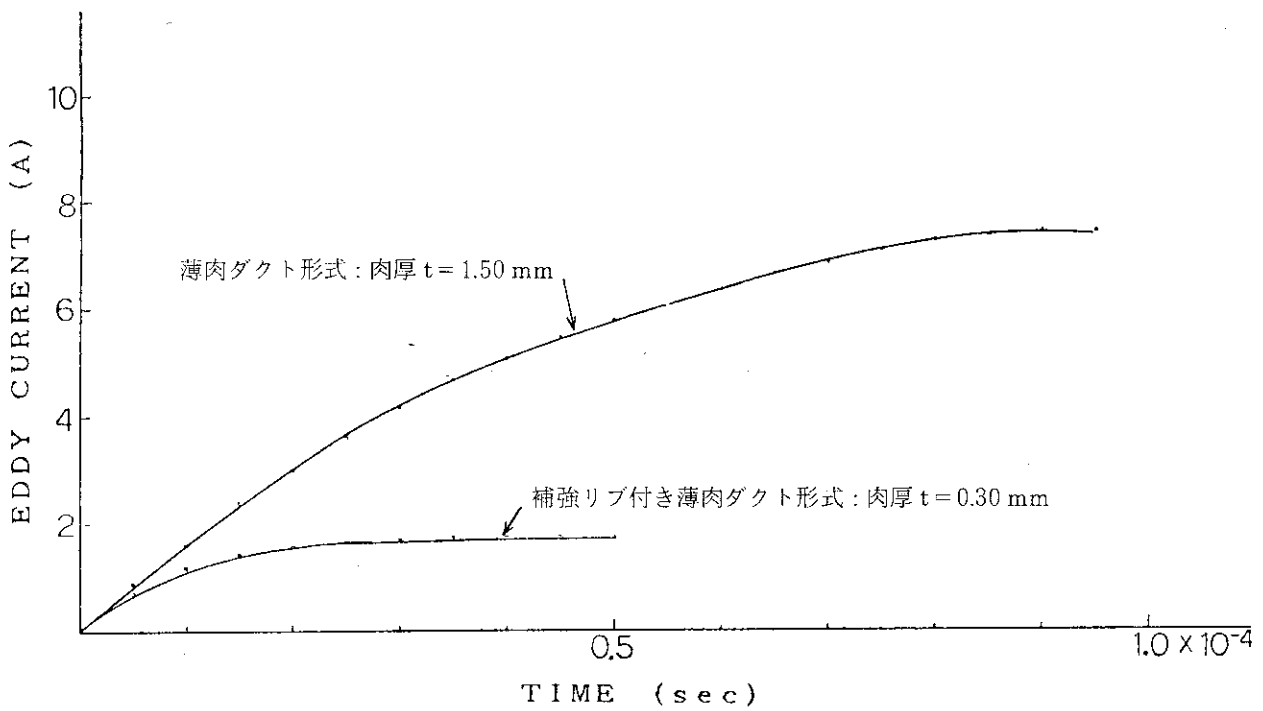


図 4.3 渦電流の時間的变化 (偏向電磁石部真空ダクト)

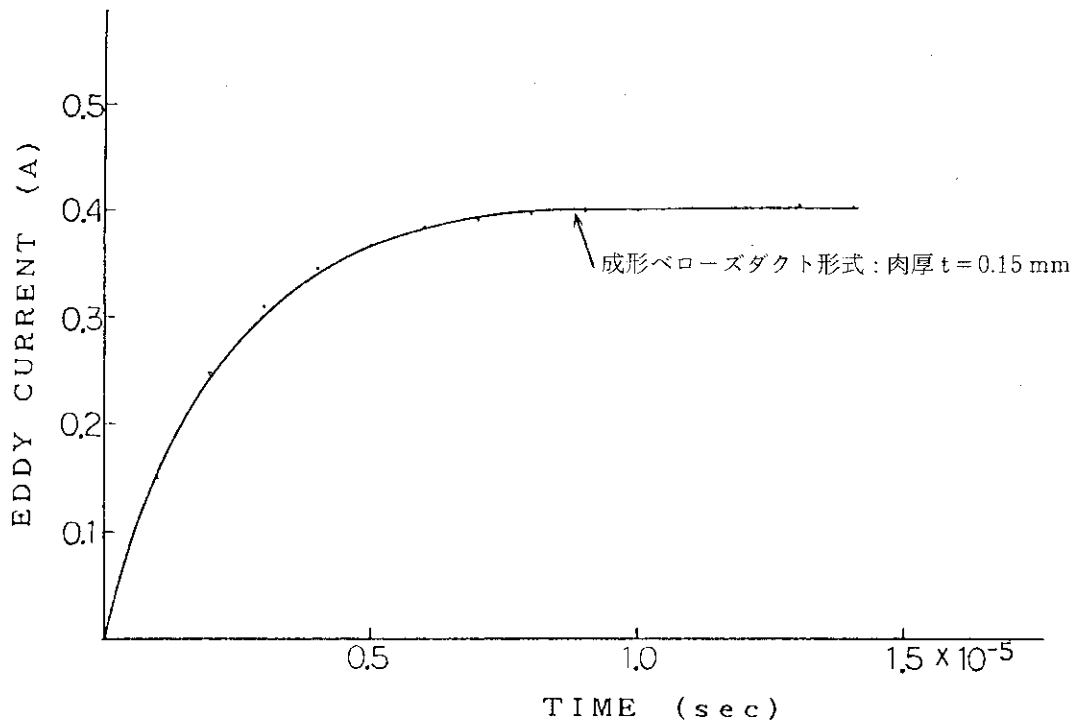


図 4.4 渦電流の時間的变化 (偏向電磁石部真空ダクト)

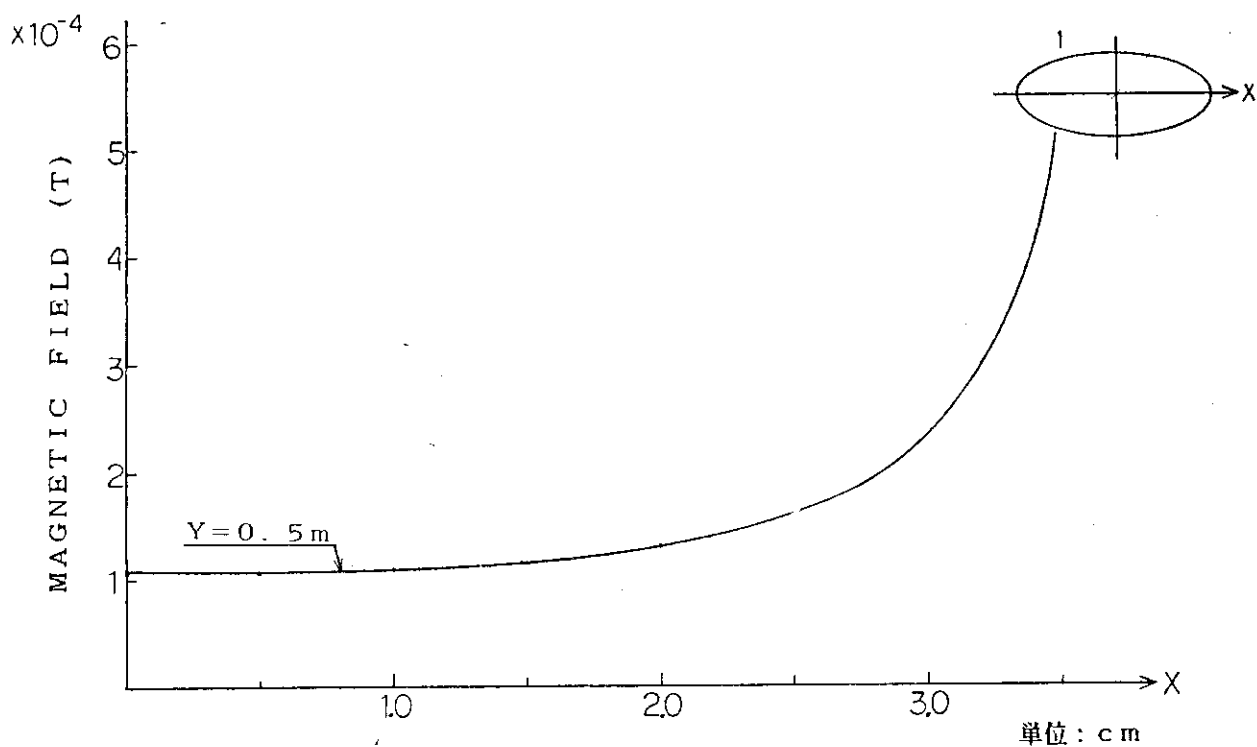


図 4.5 渦電流の作る磁場分布 (偏向電磁石部真空ダクト)
ダクト形式: 薄肉ダクト (肉厚 1.50 mm)

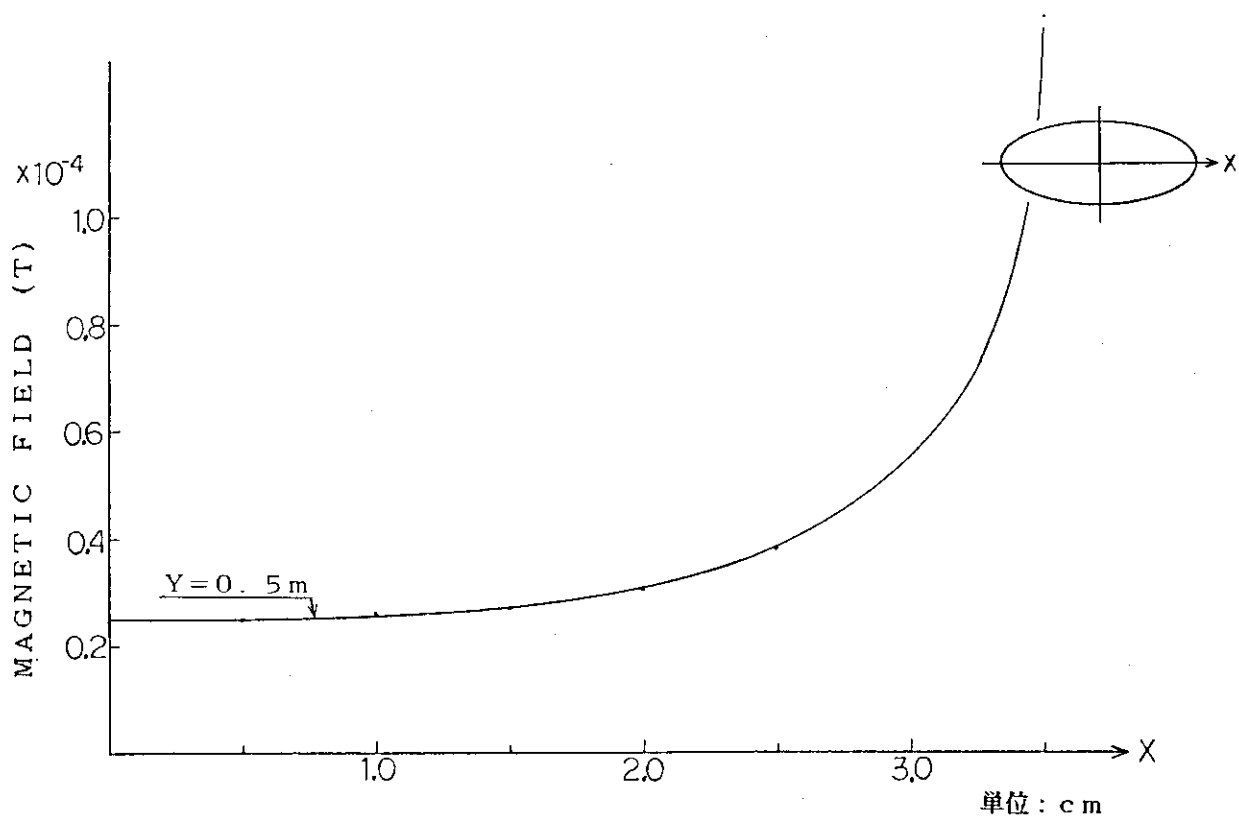


図 4.6 渦電流の作る磁場分布 (偏向電磁石部真空ダクト)
ダクト形式: 補強リブ付き薄肉ダクト (肉厚 0.30 mm)

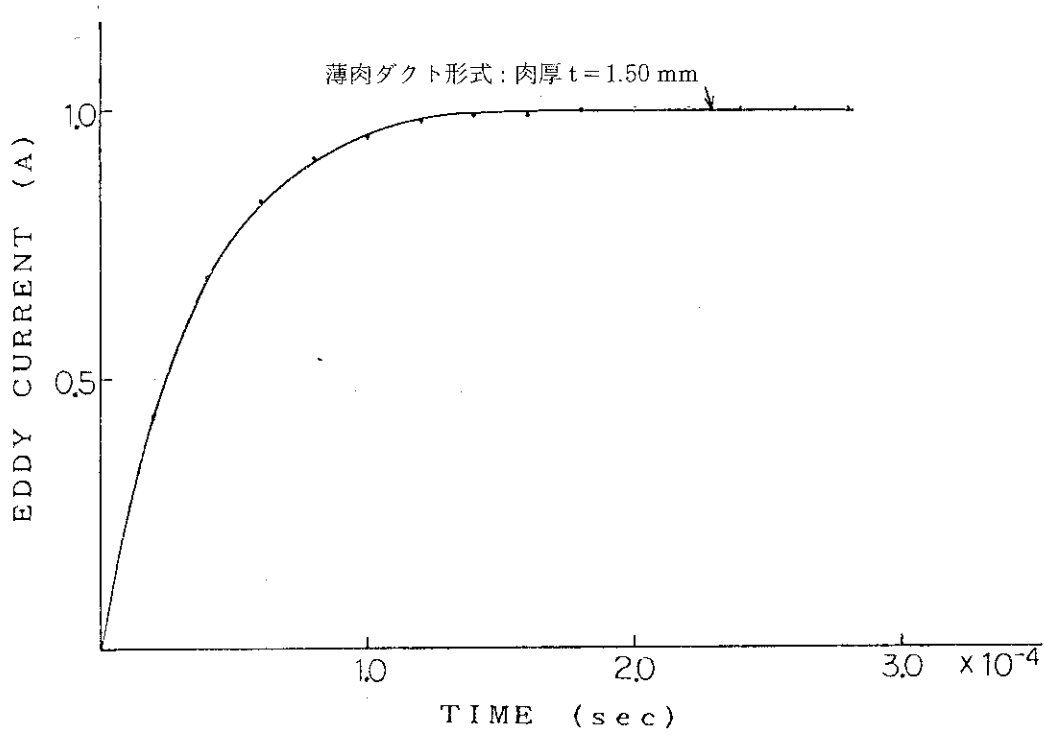


図 4.7 渦電流の時間的变化 (ステアリング電磁石部真空ダクト)

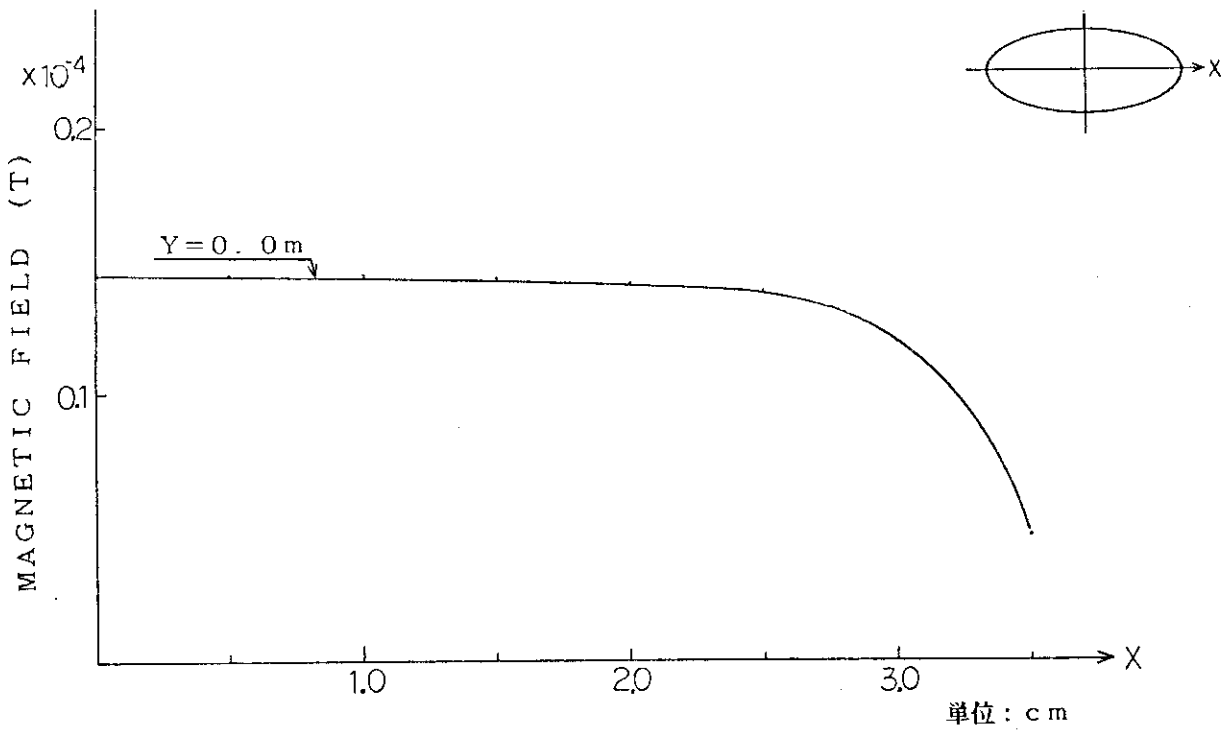


図 4.8 渦電流の作る磁場分布 (ステアリング電磁石部真空ダクト)
ダクト形式：薄肉ダクト (肉厚 1.50 mm)

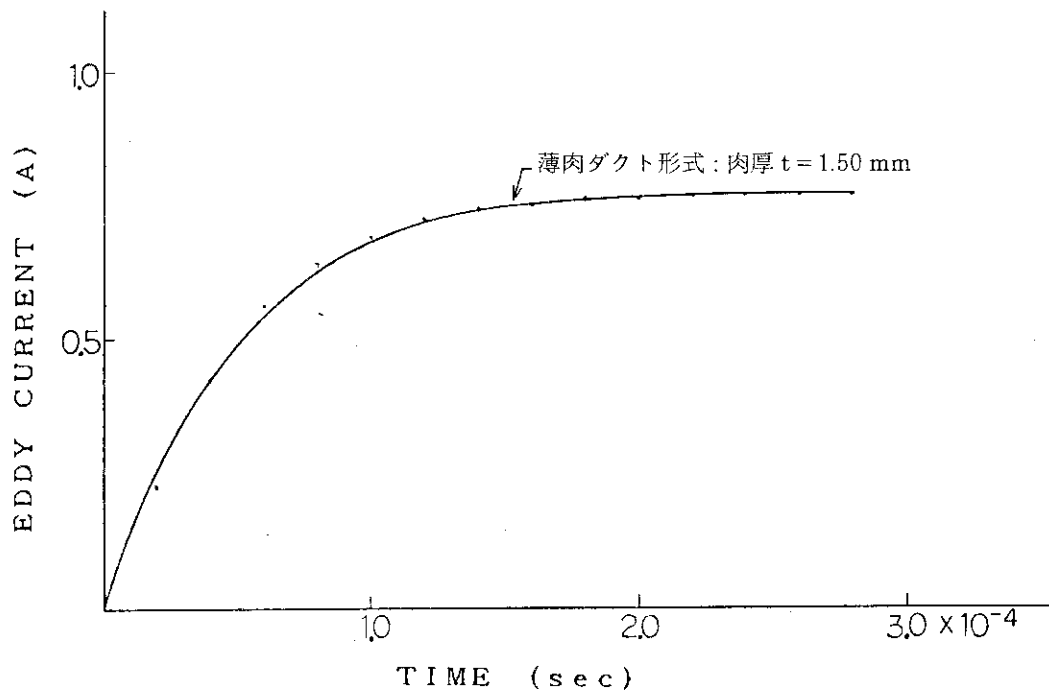


図 4.9 渦電流の時間的变化 (六極電磁石部真空ダクト)

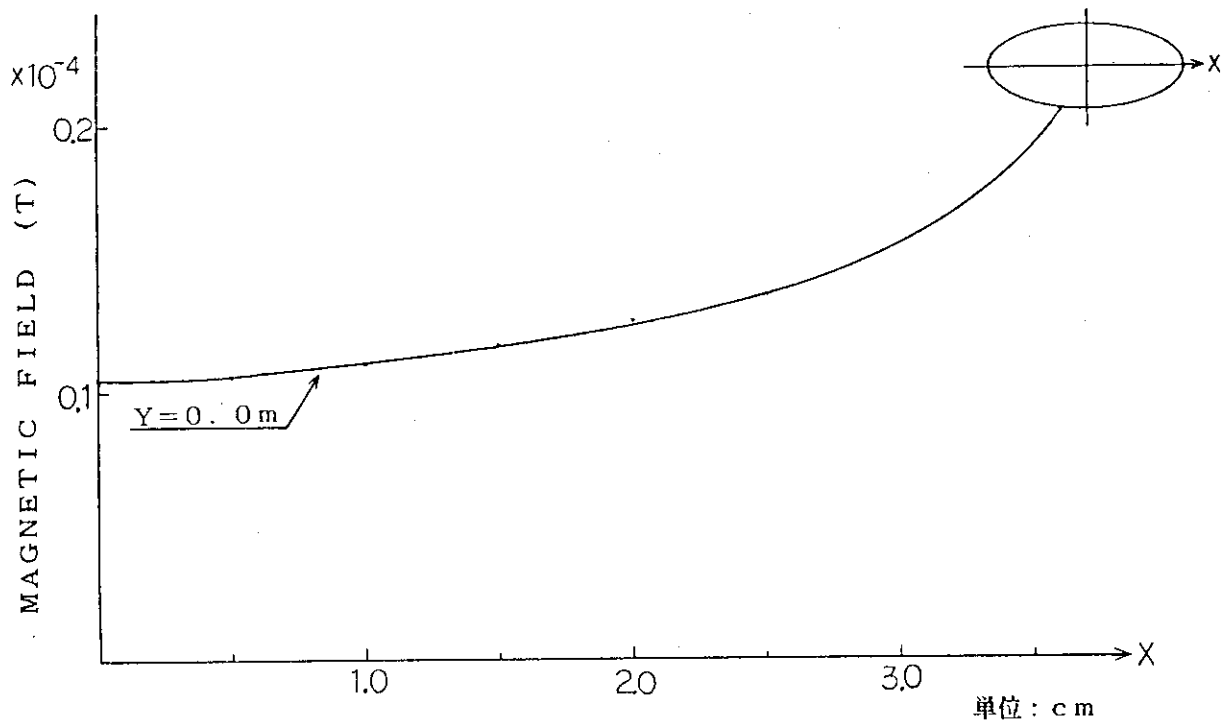


図 4.10 渦電流の作る磁場分布 (六極電磁石部真空ダクト)
ダクト形式；薄肉ダクト (肉厚 1.50 mm)

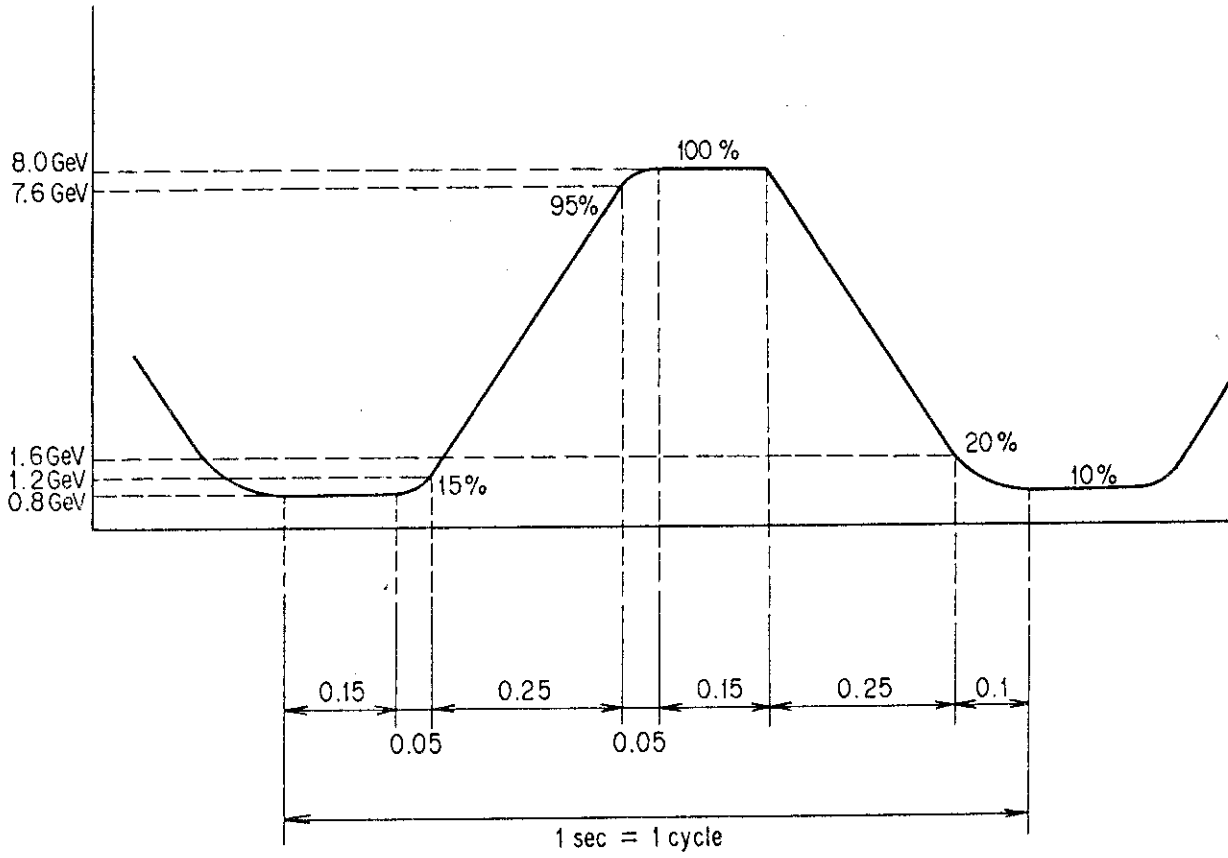


図 4.11 運転シーケンス

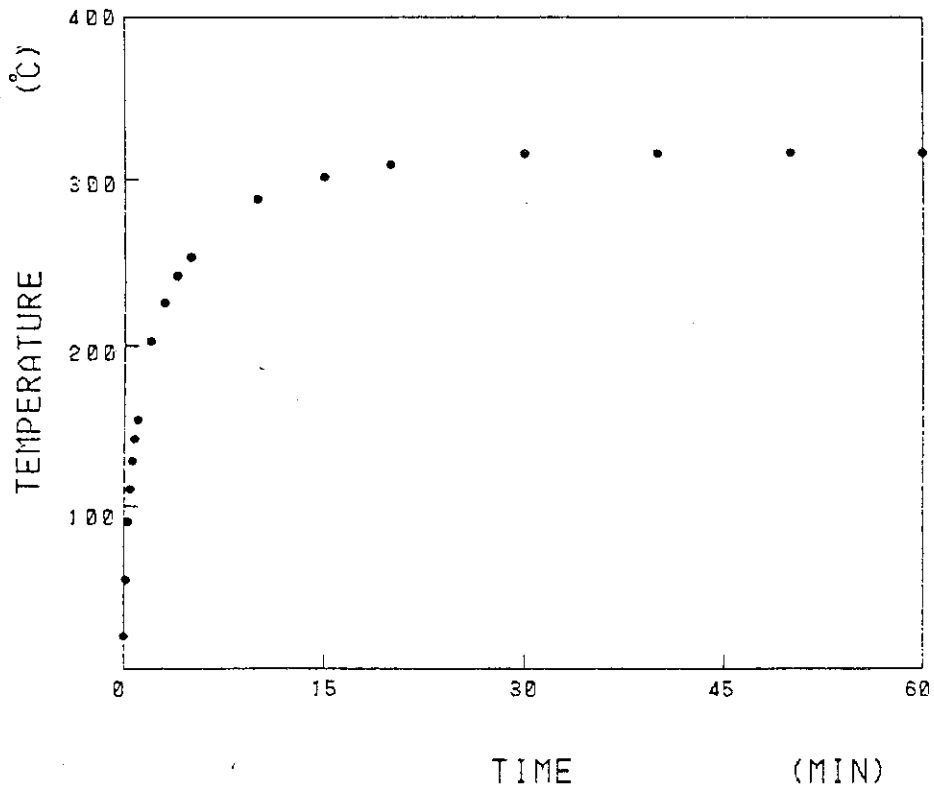


図 4.12 補強リブ付き薄肉ダクト最高温度発生点における温度の時間的推移

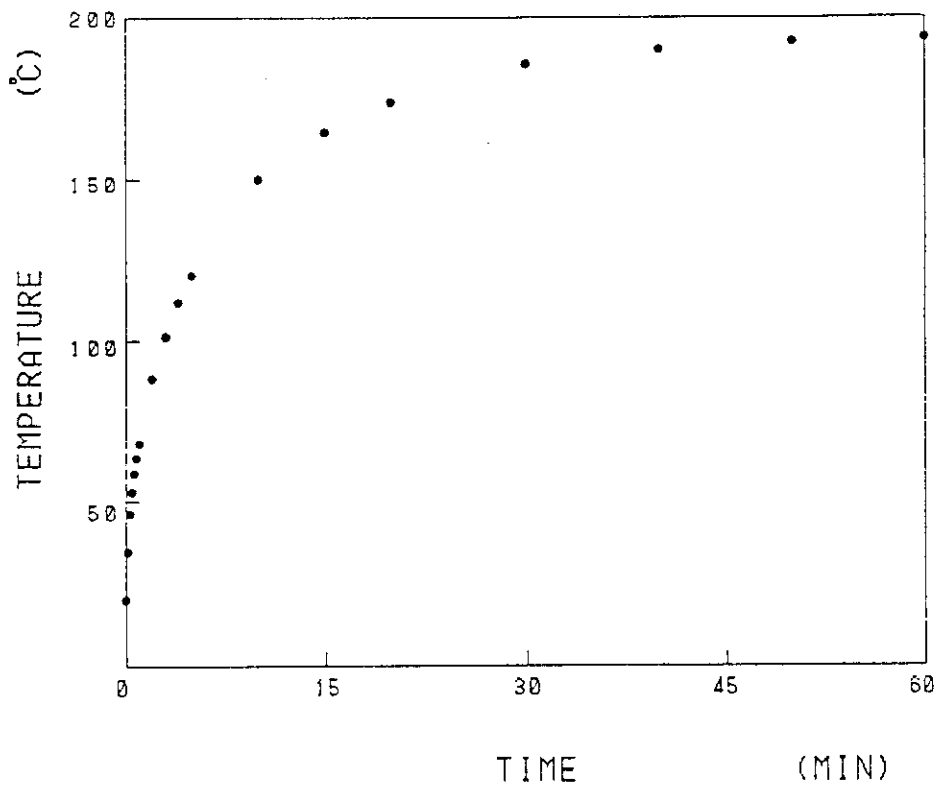
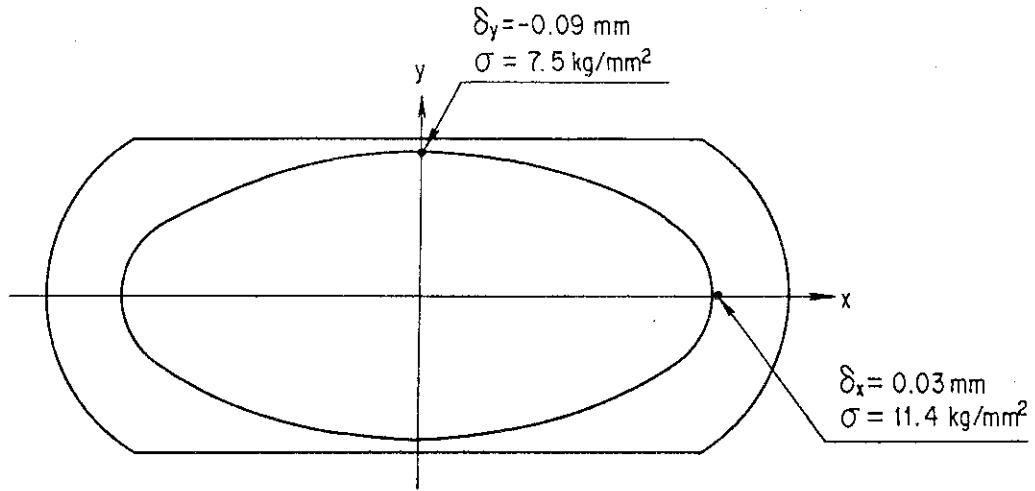


図 4.13 薄肉ダクト最高温度発生点における温度の時間的推移

① DESY



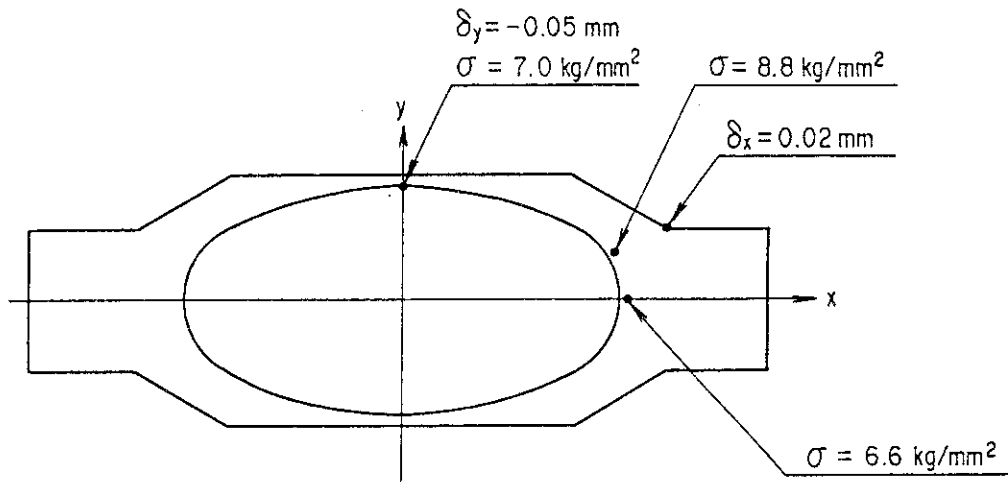
ダクト

断面形状：だ円形
 断面寸法：80 mm×40 mm
 肉 厚：0.3 mm

補強板

リブ高さ：1.0 mm
 リブ厚さ：1.0 mm
 リブピッチ：20 mm

② SLAC



ダクト

断面形状：だ円形
 断面寸法：60 mm×31.9 mm
 肉 厚：0.305 mm

補強板

リブ高さ：1,245 mm
 リブ厚さ：1.0 mm(推定)
 リブピッチ：25.4 mm

図 4.14 他のシンクロトロン用ダクトの応力解析結果

5. 真空排気システム

5.1 一般

真空ダクトの大きさは、ライナックから入射されるビームの質によって主に決められており、ダクト内径として横方向 72 mm, 縦方向 34 mm が確保されている。

真空度に対する要求は、ビームがダクト内の残留ガスと衝突して失われる時の寿命が 10 秒以上となることである。これは、ビームがシンクロトロンの中に滞在する 0.5 秒間に、失われずに残存する確率が 95% に相当する。この条件を満たす真空度は 10^{-4} Torr 以下であれば良い。一方、ビームが残留ガスによって制動放射を発生するので、この影響を極力小さくするには真空度を高める必要がある。また、イオンポンプなどの保守を考えるとある程度良い真空度が必要である。従って、コストを高めることなく、集中型ポンプを使って容易に達成可能な真空度として、 10^{-6} Torr 以下という値を設定した。この値は、10 mA のビームを 8 GeV で運転した時に最も悪くなる場所での値として考えている。従って、真空ポンプヘッドではもっと良い真空度となっており、また、ダクト内面が枯れてくればさらに良い真空になると考えている。

5.2 真空排気系設定の基本的考え方

- (1) 目標圧力を 1×10^{-6} Torr とする。(放射光による熱脱離を考慮した場合)
- (2) ダクト部のコンダクタンスが小さい事を考慮して、主ポンプとして排気速度の小さいポンプを多数設置する。
- (3) 主ポンプはイオンポンプ、粗排気ポンプはターボ分子ポンプとする。
(ターボ分子ポンプは長時間運転の信頼性に欠け、クライオポンプは数十 l/s クラスの小型の物がないので、主ポンプとしてイオンポンプを選択する。)
- (4) 補助ポンプとしてチタンサブリメーションポンプを設置する。
補助ポンプの目的は、ビーム運転後圧力が高くなったものを短時間で運転前の圧力に戻させることにある。
- (5) ノーマルセル 1 セルを真空系 1 単位と考え、ゲートバルブを両端に、ターボ分子ポンプを中央に配置する。
- (6) 直線セル、Dispersion Suppressor セルに関しても、ノーマルセルと同様に 1 セルを真空系 1 単位と考え、真空機器を配置する。
- (7) 直線セル、Dispersion Suppressor セルのセラミックダクトに関しては、それによる放出ガス率の増大を考慮して解析を行ない、真空機器を配置する。

5.3 排気時間の検討

真空排気系を構成するポンプの型式、容量、コスト等の最適化を図るために、ターボ分子ポンプ、イオンポンプの排気能力及び台数をパラメータとして、以下の方法により排気時間を対象に検討した。

5.3.1 検討条件

(1) 形状

ダクト：72 × 34 (楕円)

ポート：φ38 × 250 l

(2) 各ポンプの排気範囲

ロータリーポンプ：760 Torr ~ 1×10^{-2} Torr

ターボ分子ポンプ： 1×10^{-2} Torr ~ 5×10^{-6} Torr

イオンポンプ： 5×10^{-6} Torr ~

(3) 計算式

① 760 Torr ~ 1×10^{-2} Torr の範囲

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-t/T}$$

$$T = KV/S$$

$$1/S = 1/S_0 + \sum_{i=1}^n (1/C_i)$$

② 1×10^{-2} Torr 以下の範囲

$$P(t) = Q(t)/S + \{P_0 - Q(t)/S\} e^{-t/T}$$

$$T = V/S$$

$$1/S = 1/S_0 + \sum_{i=1}^n (1/C_i)$$

$$Q(t) = q(t) \cdot A$$

P_0 : 初期圧力

$P(t)$: t 時間後の圧力

$Q(t)$: t 時間後のガス発生量

$q(t)$: 単位面積当りのガス発生量

次頁の図より $q(t) = 1.5 \times 10^{-8} t^{-1}$

A : 表面積

V : 容積

S : 有効排気

S_0 : ポンプの排気速度

t : 時間

K : 補正係数

(表面吸着の影響)

C : コンダクタンス (ℓ/s)

①では粘性流の式 $C = (5.79/l)[a^3b^3/(a^2+b^2)]P$

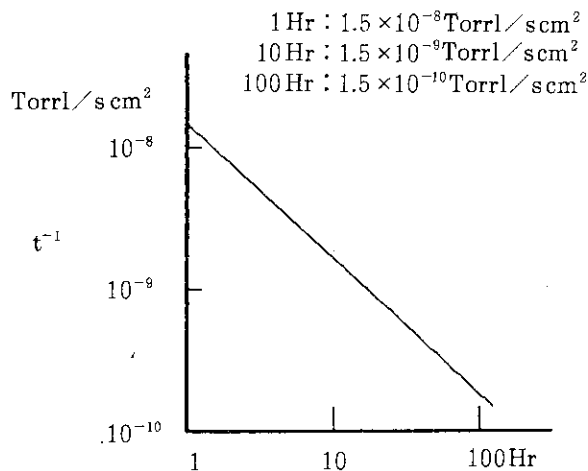
②では分子流の式 $C = 1.375a^2b^2/[l(a^2+b^2)^{1/2}]P$

a : 長径の 1/2 (mm)

b : 短径の 1/2 (mm)

l : 長さ (mm)

P : 平均圧力 (Torr)



5.3.2 検討結果

検討結果を表 5.1 に示す。

5.3.3 考 察

(1) TMP による排気

TMP の台数をセル当り 1 台とした場合、ポンプの排気速度を大きくしても排気時間はほとんど変わらない。

また、TMP の台数を増やした場合、TMP による排気時間は短縮されるが、 1×10^{-6} Torr になるまでの合計時間 (TMP による排気+IP による排気) は変わらない。

TMP による排気は真空を立上げる時のみである事を考えると、TMP の台数をセル当り 1 台としたときの 13 時間という排気時間は妥当であると考ええる。

よって、TMP は 50 l/s のものをセル当り 1 台設置する。

(2) IP による排気

IP の排気速度を大きくした場合、排気時間は数時間短くなる。しかし、ビームの入射を開始してからは枯し運転にかなりの時間を費すことになり、初期における数時間の差はほとんど影響しないと考えられる。

よって、 1×10^{-6} Torr の圧力値を達成できれば良いと考え、IP は 20 l/s のものをセル当り 4 台設置する。

5.4 圧力分布解析

シンクロトロン真空系の運転時の圧力分布解析を以下の通り実施した。ダクト形状は補強リブ付き薄肉ダクトとした。

5.4.1 解析条件

(1) 断面形状寸法

ダクト部: 72 mm × 34 mm (内径) 正楕円形

ポート部: ϕ 38 mm (内径) 円形

(2) 静的放出ガス率

ステンレス部: 5×10^{-10} Torr/scm²

セラミックス部: 5×10^{-9} Torr/scm²

ベローズ部: ステンレス部の2.4倍

(3) 動的放出ガス率

8 GeV 連続運転 1.12 hr 後相当の放出ガス率を採用

(ノーマルセル1セル当り 1.25×10^{-4} Torr/scell)

(4) 解析モデル

解析モデルを図 5.1 ~ 図 5.5 に示す。

5.4.2 解析結果

(1) ノーマルセル

最高圧力: 7.20×10^{-7} Torr

引き口圧力: 2.89×10^{-7} Torr

ポンプ仕様: IP 20 l/s × 4 /cell

(2) 入射部直線セル

最高圧力: 7.93×10^{-7} Torr

引き口圧力: 2.26×10^{-7} Torr

ポンプ仕様: IP 20 l/s × 4 /cell

(3) 入射部 Dispersion Suppressor セル

最高圧力: 7.69×10^{-7} Torr

引き口圧力: 2.99×10^{-7} Torr

ポンプ仕様: IP 20 l/s × 4 cell

(4) 出射部直線セル

最高圧力: 5.63×10^{-7} Torr

引き口圧力: 1.99×10^{-7} Torr

ポンプ仕様: IP 20 l/s × 4 cell

(5) 出射部 Dispersion Suppressor セル

最高圧力: 9.49×10^{-7} Torr

引き口圧力: 3.23×10^{-7} Torr

ポンプ仕様: IP 20 l/s \times 3 + 60 l/s \times 1 / cell

5.4.3 考 察

ノーマルセル, 直線セル及び Bump を含む Dispersion Suppressor セルについての圧力分布解析を行い, 目標真空度 1×10^{-6} Torr を満足するポンプ仕様を, 前節に示す通り決定した。

尚, 今回は, RF キャビティを含む直線セルは解析していない。

また, Dispersion Suppressor セルの残り 2 セル分に関しては, bump などのセラミックダクトを用いる部分はなく, 今回解析を行ったものと同じポンプ仕様で目標真空度は達成できるものとする。

表 5.1 ポンプの仕様と排気時間

	ポンプ仕様	TMP による 排気時間	IP による 排気時間	排気時間 の合計	到達圧力 (Torr)	ポンプの コスト増
現状の設計	TMP 50l/s 1台 IP 20l/s 4台	13Hr	4.4Hr	17.4Hr	5.9×10^{-7}	—
TMP 排気速度の増加	TMP 300l/s 1台 IP 20l/s 4台	12Hr	5.4Hr	17.4Hr	5.9×10^{-7}	33%増
TMP 台数の増加	TMP 50l/s 2台 IP 20l/s 4台	4Hr	13.4Hr	17.4Hr	5.9×10^{-7}	35%増
イオンポンプ 排気速度の増加	TMP 50l/s 1台 IP 100l/s 4台	13Hr	0.2Hr	13.2Hr	4.5×10^{-7}	43%増

- ① TMP による排気は $760 \text{ Torr} \sim 5 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ と考える。
- ② IP による排気は $5 \times 10^{-6} \text{ Torr} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ Torr}$ と考える。
- ③ 放出ガスを $5 \times 10^{-10} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ として圧力分布解析を行なったときの到達圧力は $4.0 \times 10^{-7} \text{ Torr}$ 。
- ④ ポンプのコストはカタログ値を使用。
- ⑤ 放射光によるガス放出（光脱離）は考慮していない。

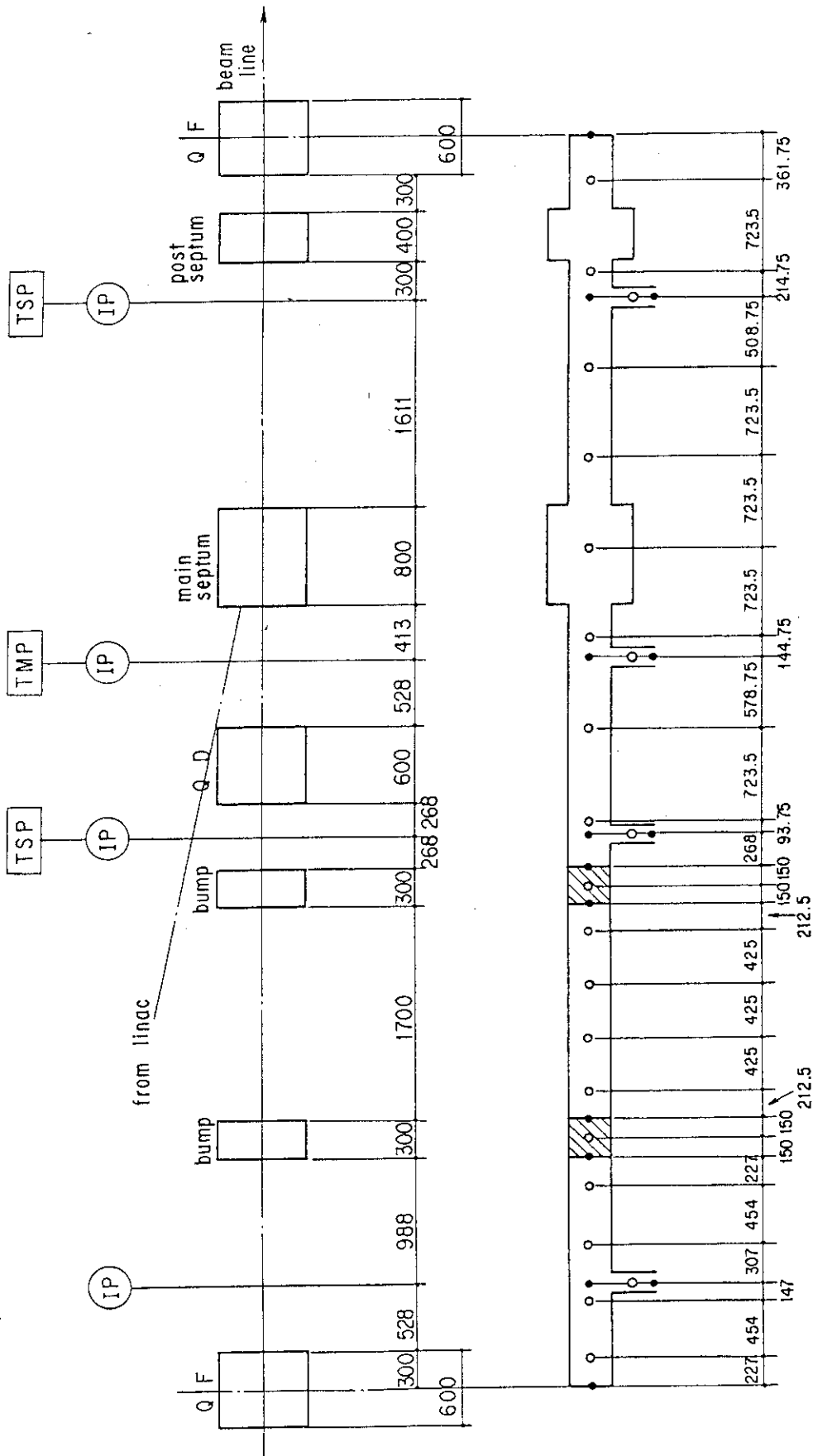


図 5.2 入射部直線セル圧力分布解析モデル

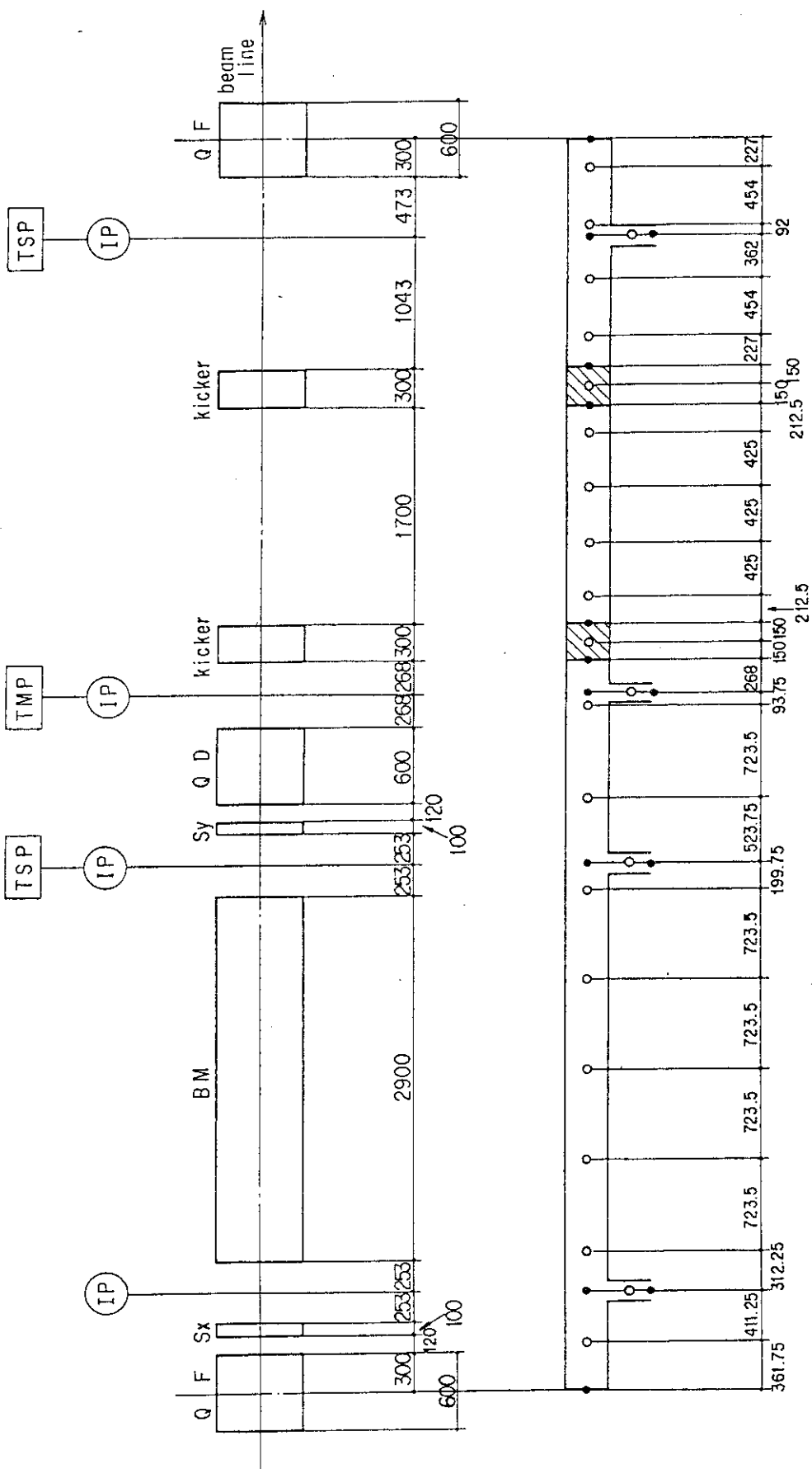


図 5.3 入射部 Dispersion Suppressor セル圧力分布解析モデル

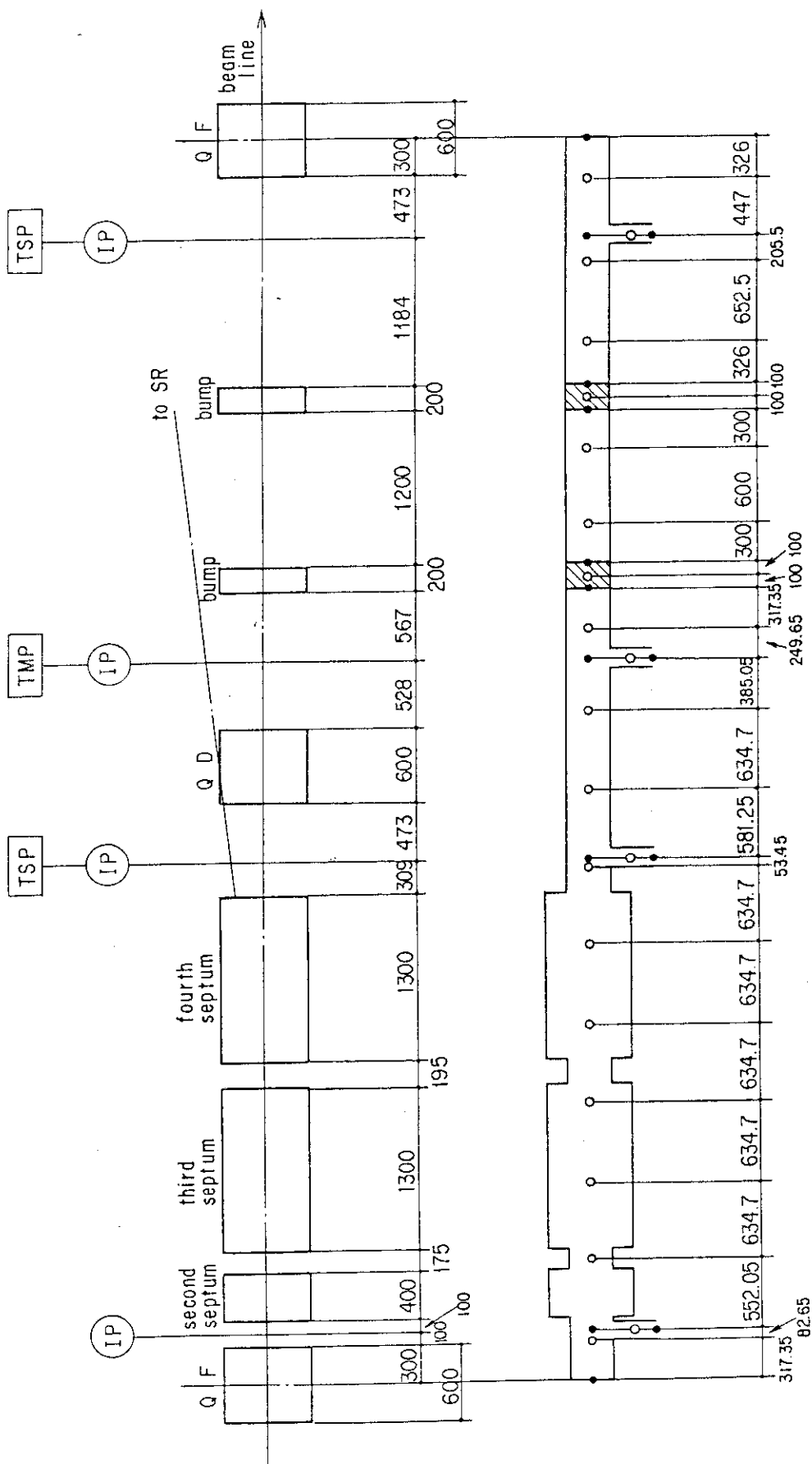


図 5.4 出射部直線セル圧力分布解析モデル

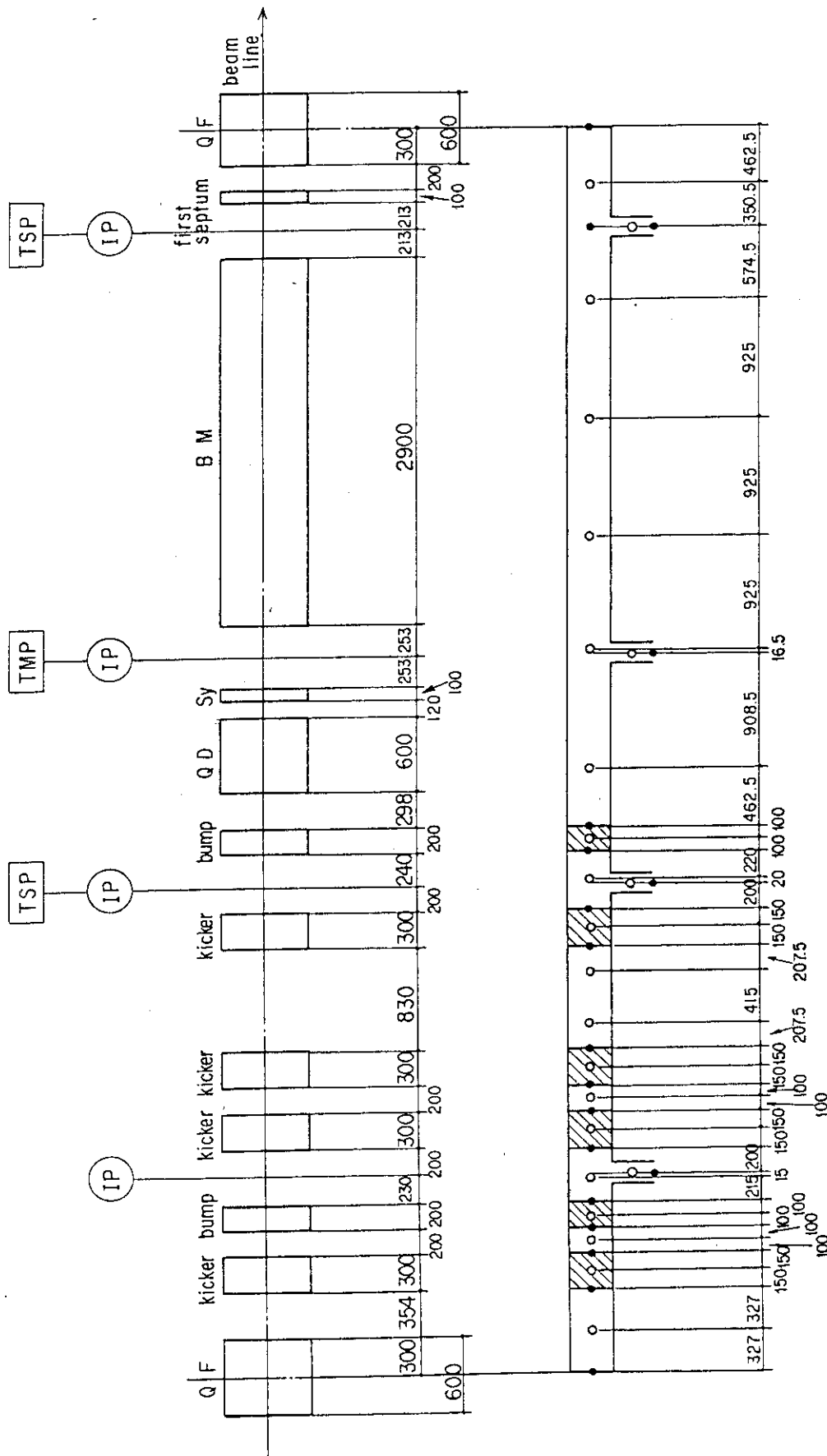


図 5.5 出射部 Dispersion Suppressor セル圧力分布解析モデル

6. 真空ダクトの製作性の検討

6.1 薄肉ダクト製作要領

(1) 製作方法

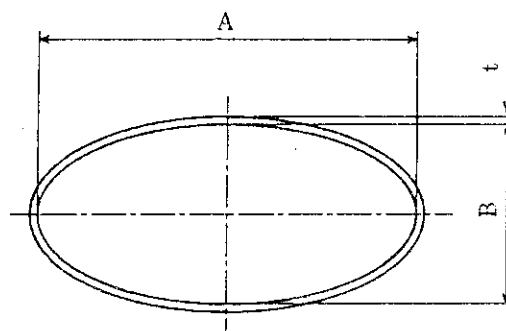
シームレスステンレス鋼管 (SUS 316 L) を冷間ロール成形機に挿入し、多段ロールにより成形する。製作フローを図 6.1 に示す。ロール成形の概念を図 6.2 に示す。

(2) 製作精度

薄肉ダクトの予想製作精度は下記の通りである。

単位 mm

項目	寸法	製作精度
A	72	± 0.2
B	34	± 0.2
t	1.5	± 0.15
曲り		1 mm/1 m 長さ当り



但し、管端部は成形後のスプリングバックがあり、管端から 50 ~ 150 mm の範囲において、B 寸法が大きくなると予想される。(最大 + 0.8 ~ + 1 mm)

6.2 成形ベローズダクト製作要領

(1) ベローズダクトに用いるベローズ

成形ベローズと溶接ベローズについてシンクロトン真空ビームダクトとして特性を比較検討した結果、成形ベローズを採用する。

表 6.2.1 に比較検討内容を示す。

(2) ベローズダクトの製作

a. 製作方法

板厚 0.15 mm ステンレス鋼板を板巻したのち、水圧成形しベローズダクトを製作する。

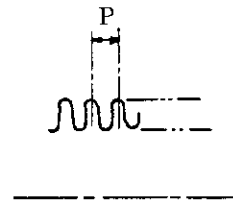
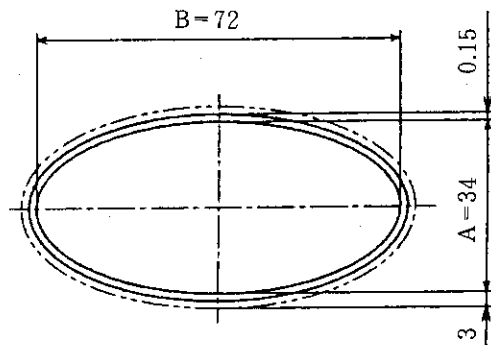
製作フローを図 6.3 に示す。

b. 製作精度

ベローズダクトの予想製作精度は下記の通りである。

単位 mm

項目	寸法	製作精度
A	34	+1 -0
B	72	±1
P	3.5	±0.3

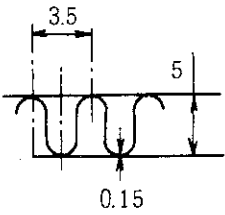
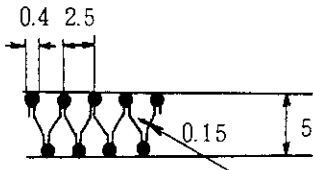


6.3 補強リブ付き薄肉ダクト製作要領

補強リブ付き薄肉ダクトの製作フローを図6.4に示す。

製作構度は図6.5に示す精度を予定している。

表 6.1 成形ベローズと溶接ベローズの特性比較

	成形ベローズ	溶接ベローズ
仕 様	アパーチャー：水平方向± 30 mm ：垂直方向± 15 mm 設 計 圧 力：外圧 1.033 kg/cm ² 設 計 温 度：250℃（ベーキング温度） 伸 縮 量：熱膨脹時 縮み 25 mm 設置時アジャスト± 10 mm	
形 状		
渦電流の発生	○	△ 溶接部が厚肉となるため
放出ガス量	○	△ ピッチが小さくなり、内表面積が成形ベローズの約 1.4 倍となる
製作費用	○ 1 倍	△ 2～3 倍

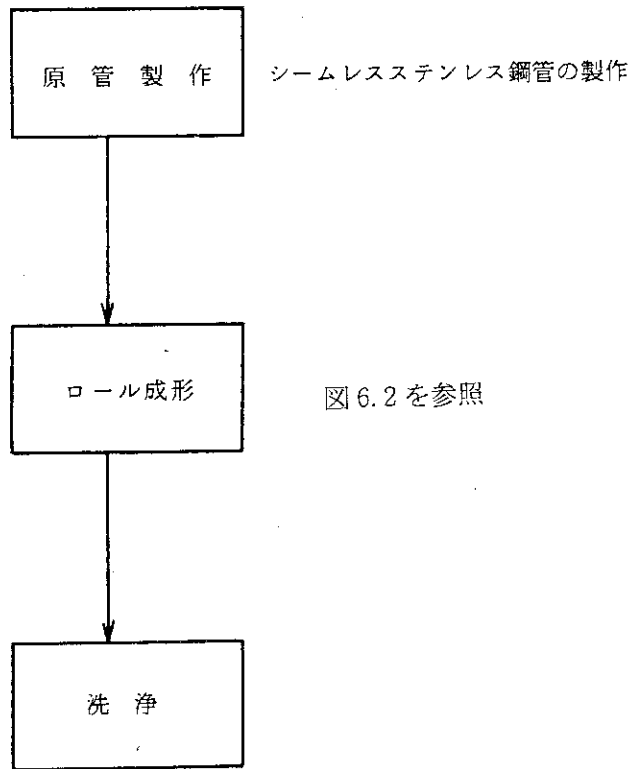


図6.1 製作フロー

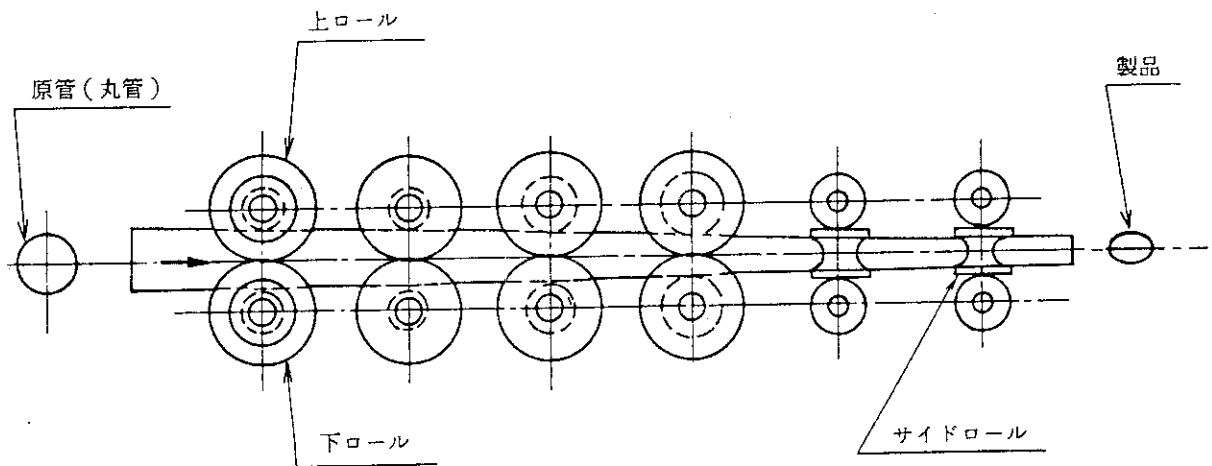


図6.2 冷間ロール成形の概要

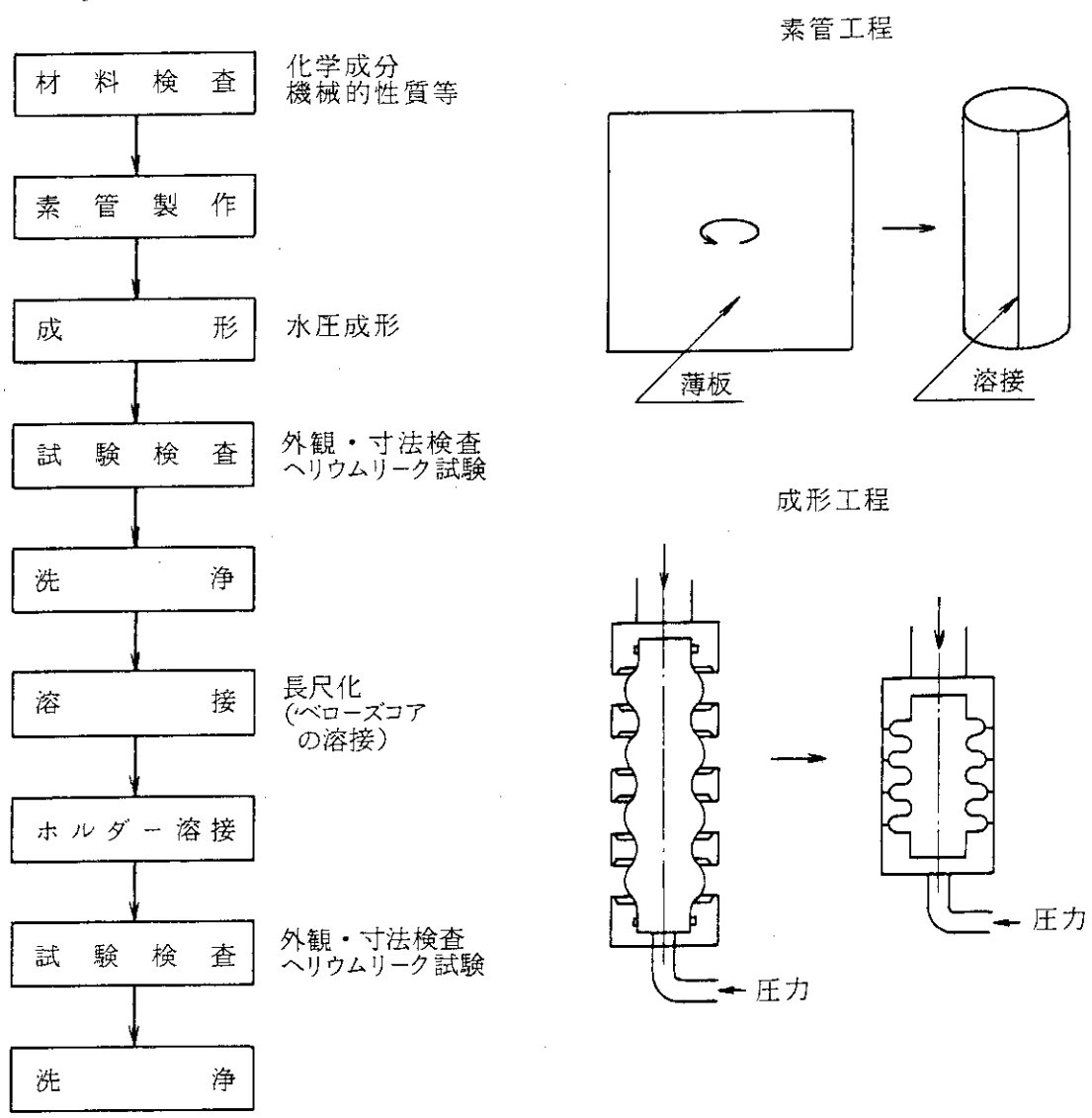


図 6.3 ベローズの製作フロー

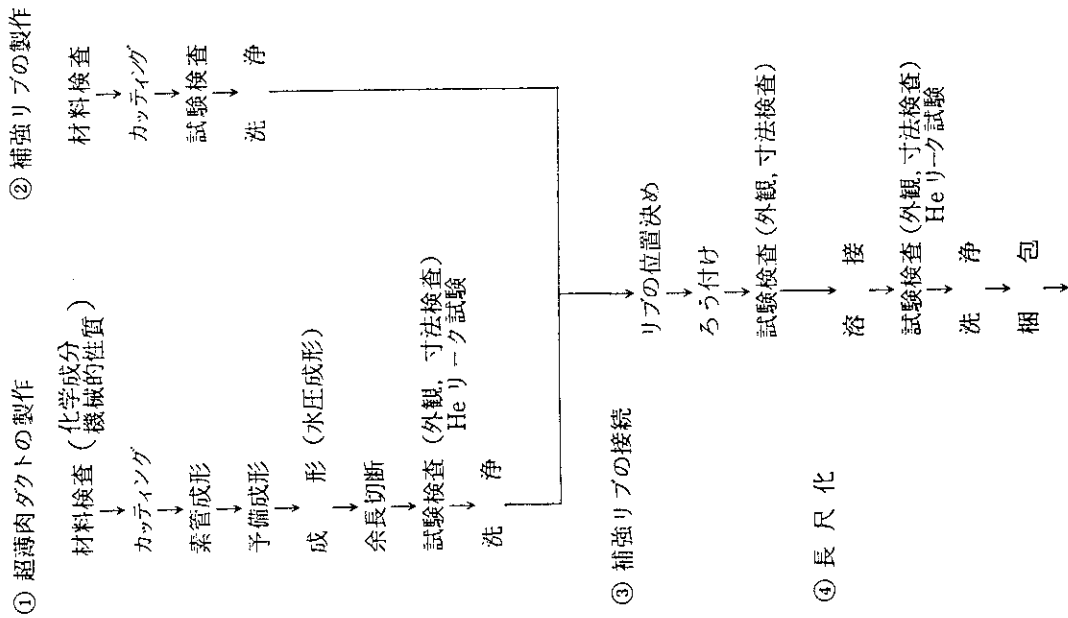
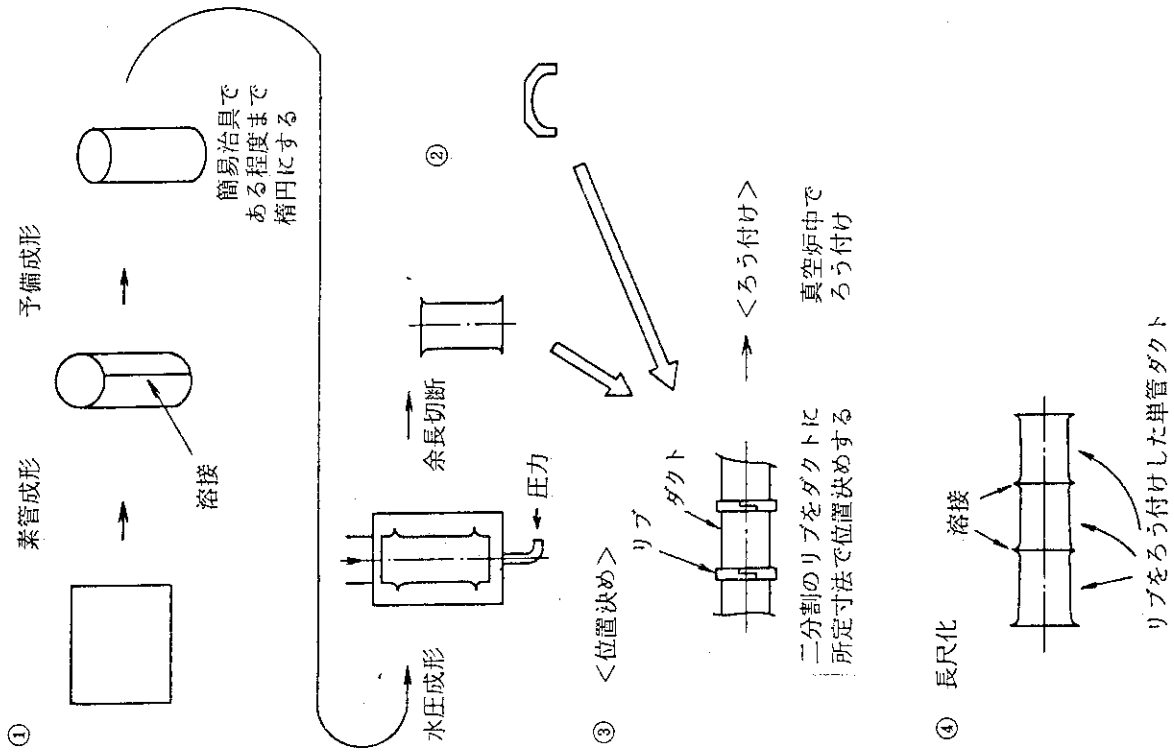


図 6.4 補強リップ付き薄肉ダクトの製作フロー

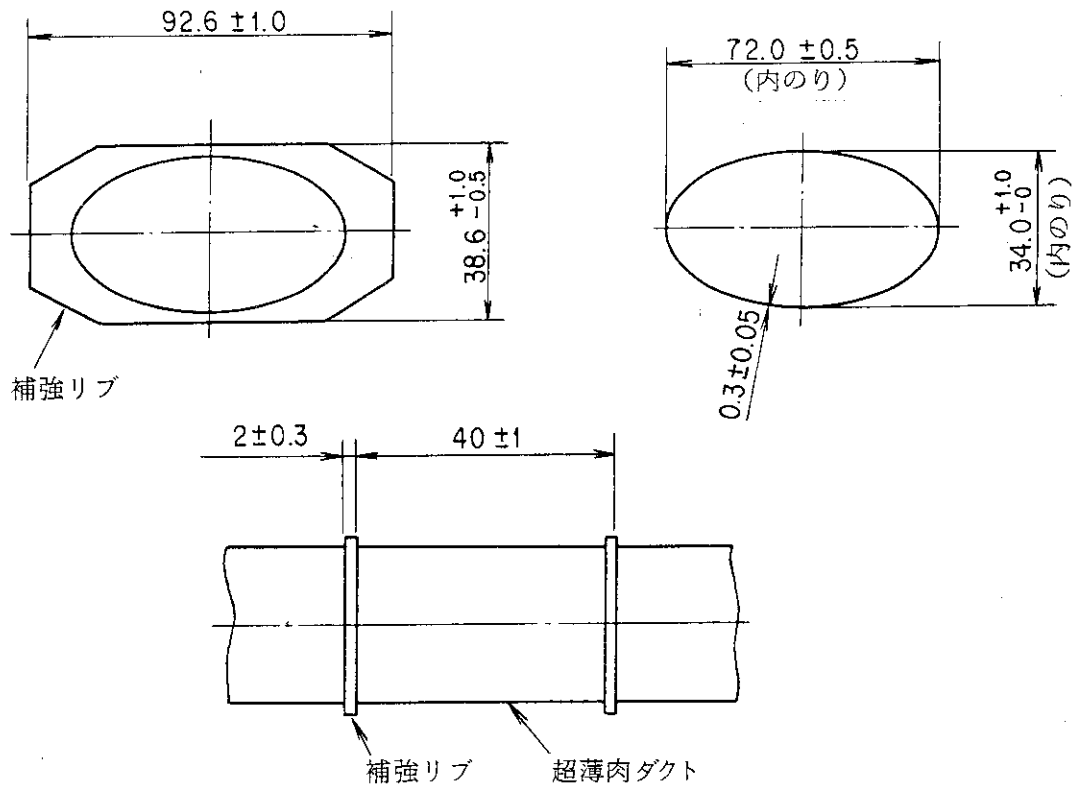


図 6.5 補強リブ付き薄肉ダクトの製作精度

7. 今後の課題

本基本設計にて設定した設計仕様に基づいて、以下に示す R&D を実施中である。

- (1) 製作性評価試験
 - 1) 真空ダクト単体試作試験
 - 2) モックアップ試験 (ノーマルセル真空排気系)
- (2) 性能評価試験
 - 1) ガス放出率の測定
 - 2) 真空排気試験
 - 3) 渦電流測定試験

今後は、製作性評価試験の結果から、シンクロトン真空系の構成要素毎の製作精度、各構成要素間の取合い及び据付手順上の問題点を明らかにし、改善策を講じるとともに、今後の設計に反映させる予定である。

また、性能評価試験の結果から、基本設計において実施した種々の性能解析で使用了各種データの妥当性、これらの解析結果から想定される性能の妥当性、また解析的には十分評価できない性能等を確認し、今後の設計に反映させる予定である。

謝 辞

本基本設計に当り、設計、構造解析等で協力して頂いた石川島播磨重工業(株)に感謝します。

参 考 文 献

1. 放射光学会誌 第3巻第1号 (1990)

7. 今後の課題

本基本設計にて設定した設計仕様に基づいて、以下に示す R&D を実施中である。

- (1) 製作性評価試験
 - 1) 真空ダクト単体試作試験
 - 2) モックアップ試験 (ノーマルセル真空排気系)
- (2) 性能評価試験
 - 1) ガス放出率の測定
 - 2) 真空排気試験
 - 3) 渦電流測定試験

今後は、製作性評価試験の結果から、シンクロトン真空系の構成要素毎の製作精度、各構成要素間の取合い及び据付手順上の問題点を明らかにし、改善策を講じるとともに、今後の設計に反映させる予定である。

また、性能評価試験の結果から、基本設計において実施した種々の性能解析で使用了各種データの妥当性、これらの解析結果から想定される性能の妥当性、また解析的には十分評価できない性能等を確認し、今後の設計に反映させる予定である。

謝 辞

本基本設計に当り、設計、構造解析等で協力して頂いた石川島播磨重工業(株)に感謝します。

参 考 文 献

1. 放射光学会誌 第3巻第1号 (1990)

7. 今後の課題

本基本設計にて設定した設計仕様に基づいて、以下に示す R&D を実施中である。

- (1) 製作性評価試験
 - 1) 真空ダクト単体試作試験
 - 2) モックアップ試験 (ノーマルセル真空排気系)
- (2) 性能評価試験
 - 1) ガス放出率の測定
 - 2) 真空排気試験
 - 3) 渦電流測定試験

今後は、製作性評価試験の結果から、シンクロトン真空系の構成要素毎の製作精度、各構成要素間の取合い及び据付手順上の問題点を明らかにし、改善策を講じるとともに、今後の設計に反映させる予定である。

また、性能評価試験の結果から、基本設計において実施した種々の性能解析で使用了各種データの妥当性、これらの解析結果から想定される性能の妥当性、また解析的には十分評価できない性能等を確認し、今後の設計に反映させる予定である。

謝 辞

本基本設計に当り、設計、構造解析等で協力して頂いた石川島播磨重工業(株)に感謝します。

参 考 文 献

1. 放射光学会誌 第3巻第1号 (1990)