

JAERI-Tech
98-049



JT-60U W型ダイバータの設計と据付け

1998年11月

児玉幸三・正木 圭・筈島唯之・森本将明・高橋昇龍
桜井真治・岸谷和広*・西堂雅博・井上雅彦**
河内俊成**・馬越俊光**・平松貴志**・原 正秀**・細金延幸

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60U W型ダイバータの設計と据付け

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

児玉 幸三・正木 圭・笹島 唯之・森本 将明・高橋 昇龍

桜井 真治⁺・岸谷 和広^{*}・西堂 雅博⁺⁺・井上 雅彦^{**}

河内 俊成^{**}・馬越 俊光^{**}・平松 貴志^{**}・原 正秀^{**}・細金 延幸

(1998年10月6日受理)

JT-60のダイバータは、エネルギー閉込めと放射ダイバータの両立及びダイバータ機能の向上を図ることを目的としてW型ダイバータに改造された。W型ダイバータの改造は、平成7年度から設計作業が開始され、平成9年の5月の据付け作業の完了を持って終了した。本報告書は、W型ダイバータの設計、据付け及び平成9年の運転状況が含まれている。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

+ 炉心プラズマ研究部

++ 高崎研究所放射線高度利用センター

* 開発電気㈱

** 三菱重工業㈱

Design and Installation of W-shaped Divertor in JT-60U

Kozo KODAMA, Kei MASAKI, Tadayuki SASAJIMA, Masaaki MORIMOTO,
Syoryu TAKAHASHI, Shinji SAKURAI ⁺, Kazuhiro KISHIYA ^{*}, Masahiro SAIDHO ⁺⁺,
Masahiko INOUE ^{**}, Toshinari KAWAUCHI ^{**}, Toshimitsu UMAKOSHI ^{**},
Takashi HIRAMATSU ^{**}, Masahide HARA ^{**} and Nobuyuki HOSOGANE

Department of Fusion Facilities
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 6, 1998)

JT-60 divertor was modified to W-shaped divertor to realize good energy confinement and radiative divertor simultaneously, and to improve divertor function. Design activity of the W-shaped divertor was started in 1995. The modification work was completed in May 1997. In this report, the design and the installation of the W-shaped divertor and operation in 1997 are described.

Keywords : JT-60U, W-shaped Divertor, Radiative Divertor, Pumped Divertor, Isotropic Graphite, CFC (Carbon Fiber Composite), Gas Seal, Halo Current, Structural Analysis

+ Department of Fusion Plasma Research

++ Advanced Radiation Technology Center, Takasaki Radiation Chemistry Research

* Kaihatsu Denki CO., LTD

** Mitsubishi Heavy Industries, LTD

目 次

1. 概要	1
2. 基本構造	1
2.1 真空容器及び真空容器内機器	1
2.1.1 真空容器	1
2.1.2 真空容器内機器	1
2.2 W型ダイバータ	2
2.2.1 W型ダイバータの基本寸法	2
2.2.2 W型ダイバータの構造	4
2.2.3 バッフルポート	5
2.2.4 シール	8
2.3 W型ダイバータ領域の計測器類	8
2.3.1 静電プローブ	9
2.3.2 熱電対	9
2.3.3 磁気プローブ	10
2.3.4 ハロー電流プローブ	10
2.3.5 グロー放電電極	12
2.3.6 ボロメータ	13
2.3.7 イオンゲージ	13
2.4 ガス供給及び真空排気	13
2.4.1 ガス供給	13
2.4.2 真空排気	14
3. 設計	14
3.1 設計条件	14
3.1.1 真空容器	14
3.1.2 ダイバータ板及び第一壁の熱負荷条件	15
3.1.3 排気及び気密性に関する条件	16
3.1.4 ディスラプション条件	16
3.1.5 使用材料に関する条件	17
3.2 第一壁の設計	17
3.2.1 第一壁の形状及び配置	17
3.2.2 第一壁の電磁力に対する構造強度	20
3.2.3 第一壁の加速度、振動に対する構造強度	24
3.2.4 第一壁の温度解析	24
3.2.5 タイルの熱応力解析	27

3.2.6 ダイバータ板の芯ずれによる影響	28
3.2.7 タイルのテーパ加工	29
3.2.8 第一壁の空間的取り合い及び干渉	30
3.3 構造強度の解析	32
3.3.1 電磁力解析	33
3.3.2 構造強度解析	35
3.3.3 熱応力の解析	40
3.4 シール構造の検討	42
3.4.1 Ω シールの検討	42
3.4.2 スライド式絶縁型シールの検討	43
4. 据付け	43
4.1 事前調査	43
4.1.1 真空容器内形状の調査	43
4.1.2 取付け品の形状の調査	44
4.1.3 取付け手順の確認	44
4.2 据付け作業	44
4.2.1 据付け工程	44
4.2.2 据付け基準	47
4.2.3 据付け方法	48
4.2.4 タイル調整	51
4.3 据付け寸法	51
4.3.1 構造体の据付け寸法	51
4.3.2 タイルの据付け寸法	52
5. 作業管理	53
5.1 工程管理	53
5.2 作業環境の管理	53
5.2.1 一般的な作業環境	53
5.2.2 放射線管理	54
6. 運転状況	55
6.1 真空容器内の放出ガス	55
6.1.1 真空容器内の放出ガスの要因	55
6.1.2 真空容器内の圧力経過	56
6.2 ベーキング時の温度管理	56
6.3 ハロー電流	56
6.4 真空容器内調査結果	57
7. まとめ	58
謝辞	59
参考文献	59

Contents

1. Abstract	1
2. Conceptual Structure	1
2.1 Vacuum Vessel and Interior Components	1
2.1.1 Vacuum Vessel	1
2.1.2 Interior Components	1
2.2 W-shaped Divertor	2
2.2.1 Fundamental Size of W-shaped Divertor	2
2.2.2 Structure of W-shaped Divertor	4
2.2.3 Baffle Ports	5
2.2.4 Gas Seals	8
2.3 Diagnostics in W-shaped Divertor Region	8
2.3.1 Langmuir Probes	9
2.3.2 Thermocouples	9
2.3.3 Magnetic Probes	10
2.3.4 Halo Current Probes (Rogowskii Coils)	10
2.3.5 Glow Discharge Electrodes	12
2.3.6 Bolometer Cameras	13
2.3.7 Fast Response Ionization Gauges	13
2.4 Gas Fueling and Vacuum Pumping	13
2.4.1 Gas Fueling	13
2.4.2 Vacuum Pumping	14
3. Design	14
3.1 Design Condition	14
3.1.1 Vacuum Vessel	14
3.1.2 Thermal Load Condition on Divertor Plates and First Wall	15
3.1.3 Conditions of Vacuum Pumping and Gas Seal	16
3.1.4 Disruption Condition	16
3.1.5 Requirement of Materials	17
3.2 Design of First Wall	17
3.2.1 Shape and Location of First Wall	17
3.2.2 Structural Integrity of First Wall Against Electromagnetic Load	20
3.2.3 Structural Integrity of First Wall Against Acceleration and Vibration	24
3.2.4 Thermal Analysis of First Wall	24
3.2.5 Thermal Stress Analysis of First Wall	27

3.2.6 Effect of Divertor Plates with Differential Centers.....	28
3.2.7 Tile Edge Adjustments.....	29
3.2.8 Space and Interference between First Walls.....	30
3.3 Structural Analysis.....	32
3.3.1 Electromagnetic Analysis.....	33
3.3.2 Structural Analysis.....	35
3.3.3 Thermal Stress Analysis.....	40
3.4 Study of Gas Seal.....	42
3.4.1 Study of Ω-seal.....	42
3.4.2 Study of Slide Type Insulation Seal.....	43
4. Installation.....	43
4.1 Preliminary Survey.....	43
4.1.1 Survey of Vacuum Vessel Profile.....	43
4.1.2 Survey of Installation Components Profile.....	44
4.1.3 Check of Installation Process.....	44
4.2 Installation Procedure.....	44
4.2.1 Installation Schedule.....	44
4.2.2 Installation Criterion.....	47
4.2.3 Installation Process.....	48
4.2.4 Tile Alignments.....	51
4.3 Installation Measurements.....	51
4.3.1 Installation Measurements of Segments.....	51
4.3.2 Installation Measurements of First Walls.....	52
5. Working Control.....	53
5.1 Schedule Control.....	53
5.2 Working Environment Control.....	53
5.2.1 General Working Environment.....	53
5.2.2 Radiation.....	54
6. Operation State.....	55
6.1 Out Gas from Vacuum Vessel.....	55
6.1.1 Cause of Out Gas from Vacuum Vesel.....	55
6.1.2 History of Vacuum Vessel Pressure.....	56
6.2 Baking Control.....	56
6.3 Halo Current.....	56
6.4 Result of First Inspection in Vacuum Vessel.....	57
7. Summary.....	58
Acknowledgment.....	59
References.....	59

1. 概要

JT-60のダイバータ改造の目的は、エネルギー閉じ込めと放射ダイバータの両立及びダイバータ機能の向上を図ることである。これまでのダイバータ（オープンダイバータ）は、物理研究に重点を置いた単純な構造のため、ダイバータ性能としては不十分であった。また、これまでのダイバータは、ダイバータ周辺に排気装置を備えていないので、ダイバータ周辺制御装置としての工学的な観点からのダイバータ研究には限界があった。ダイバータの性能向上を図るには、ダイバータ形状や排気方法を最適化し、リサイクリング粒子の逆流を防止することが重要である。このため、改造したダイバータは、粒子リサイクリングの逆流防止（局在化）及び不純物発生の低減と混入防止を図るためにドームを配したW型ダイバータ及びバッフル板で構成されている [1][2]。

ダイバータ改造に関する設計製作は、平成7年度から実施され、平成9年の5月に現地据付け作業が完了した。平成7年度の主な作業は、設計とタイル素材及び一部の取付け品の製作であった。また、平成8年度は单品製作を開始し、平成9年2月に開始した据付け作業は平成9年5月に終了した。平成9年6月からは完成した改造後のダイバータによる運転を開始した。平成9年度の運転は10月末まで実施し、平成9年度の定期点検は11月から平成10年1月（真空容器内作業は11月～12月）まで実施した。

本報告書には、W型ダイバータの基本構造、設計、据付け方法及び平成9年の運転状況が含まれている。

2. 基本構造

2.1 真空容器及び真空容器内機器

真空容器及び真空容器内機器の内、ダイバータ改造のために据付ける機器と干渉しない機器類は既存の取付け状態を維持した。また、既存のダイバータ冷却基板は、内側及び外側ダイバータ板を取付けるために再使用した。

2.1.1 真空容器

真空容器は薄板二重構造の一般部、厚肉のポート座等から構成され、ポロイダル断面は、多円弧（13円弧）D型断面の形状をしている。薄板二重構造部分はインコネル625の6.1mm厚の内板と外板、3mm厚の角管から構成され、全厚さは40.7mmである[3][4]。真空容器のポロイダル断面を第2.1図、詳細寸法を表2.1に示す。

2.1.2 真空容器内機器

1) 既設第一壁

W型ダイバータを据付けるために、真空容器内底部の第一壁（Ag～Bc列：内側

第一壁でダイバータ板から5列、Ea～Ej：外側第一壁でダイバータ板から10列）及びダイバータ板（全数：8列）を全て撤去した。残りの既設の第一壁は、W型ダイバータ改造後の第一壁として、再使用した。

2) 既設ダイバータ冷却基板

既設ダイバータ冷却基板（以後「ダイバータ冷却基板」という）は、W型ダイバータの取付け基板として再使用した。また、ダイバータ冷却基板は、冷却材（窒素ガスまたは冷却水）による強制冷却が可能であり、その機能は維持している。

3) 既設電磁気計測器

既設電磁気計測器には、磁気プローブ、熱電対類があり、必要に応じて再配置を行った。

2.2 W型ダイバータ

W型ダイバータは、内側及び外側に配置されたダイバータ板とダイバータ間に配置されたドーム及び内側ダイバータの内側及び外側ダイバータの外側に配置されたバッフル板で構成される。W型ダイバータの構造及び各部の名称を第2.2図に示す。

ダイバータ領域の中性粒子は、内側ダイバータ板とドーム内側タイル間に設けられた排気溝からドーム下部、外側ダイバータの下側及び外側バッフル板の下側を通って排気される。この排気に使用されるポンプはNBIユニットのクライオポンプで、3ユニットが専用に使用されている。W型ダイバータにおける粒子の挙動及びダイバータ領域の実効排気速度の評価については文献[1]、[2]を参照されたい。

ダイバータ板タイル（以後「ダイバータタイル」という）ドーム板タイル（以後「ドームタイル」という）及びバッフル板タイル（以後「バッフルタイル」という）は炭素繊維複合材（以後「CFC」材という）または等方性黒鉛で製作されている。撤去したダイバータタイル及び第一壁と新設したダイバータタイル等の員数を第2.2表に示す。

2.2.1 W型ダイバータの基本寸法

W型ダイバータの基準座標を第2.3図に示す。W型ダイバータの基準座標は、常温（20°C）時の表面位置を定め、高温（300°C）の時の基準座標を計算で算出している。ただし、後述する理由から、W型ダイバータの平面上の中心をP-6側に3mm移動しているので、平面上の絶対位置の評価を行う場合は注意が必要である。また、バッフル板及び支持脚座はインコネル625を使用しているが、既設ダイバータ冷却基板、ダイバータ板及びダイバータ基板、ダイバータ基板取付座はSUS316を使用しているので熱伸びによる基準座標には特に注意が必要である。

1) ダイバータの基本寸法

a. 内側ダイバータ

常温時の内側ダイバータは、内側に 70.657° の角度で設置されている。内側ダイバータの角度は内側バッフル板の角度と一部共有しており、内側バッフル板の変曲点を含めた内側ダイバータの傾斜部分の延長線の長さ（第2.3図B～C点間の長さ）は379.45mmで、この内内側ダイバータタイルの長さは251mm（2枚のダイバータタイル間ギャップ1mmを含む）である。

b. 外側ダイバータ

常温時の外側ダイバータは、外側に 60.843° の角度で設置されている。外側ダイバータの角度は外側バッフル板の角度と一部共有しており、外側バッフル板の変曲点を含めた外側ダイバータの傾斜部分の延長線の長さ（第2.3図H～I点間の長さ）は296.72mmである。なお、外側ダイバータタイルの長さは226mm（2枚のダイバータタイル間のギャップ1mmを含む）である。

2) バッフル板の基本寸法

a. 内側バッフル板

常温時の内側バッフル板は、内側に 45.0° の角度と 70.657° の角度（内側ダイバータと同じ角度）で設置されている。内側バッフル板と内側ダイバータ板の延長線との交点（変曲点）までの長さ（第2.3図のA点からB点の長さ）は539.52mmである。

b. 外側バッフル板

常温時の外側バッフル板は3つの角度で設置されていて、内側から 60.843° 、 30.953° 及び 38.261° の角度である。内側の角度（ 60.843° ）は、外側ダイバータの角度と共有している。外側バッフル板の変曲点間（第2.3図のI点からJ）の長さは908.60mm、外側の変曲点から外側端部までの長さ（第2.3図のJ点からK点）は403.72mmである。

3) ドームの基本寸法

a. ドーム内側の面

常温時のドーム内側の面は、外側に 41.704° の角度で設置されている。ドームの内側の長さ（第2.3図中D～Eの長さ）は127.77mmである。

b. ドームトップの水平面

常温時のドームトップの面（第2.3図中E～F）の長さ（水平）は、33.88mmである。

c. ドーム外側の面

常温時のドーム外側の面は、内側に 49.504° の角度で設置されている。ドームの外側の長さ（第2.3図中F～Gの長さ）は計算上168.217mmである。

2.2.2 W型ダイバータの構造

1) ダイバータの構造

内側ダイバータの構造を第2.4図、外側ダイバータの構造を第2.5図に示す。

a. ダイバータユニットの構成

内側、外側各々のダイバータユニットは、ダイバータタイル、ダイバータ板、ダイバータ基板及びダイバータ基板取付け座から構成される。ダイバータユニットは、ダイバータ基板取付け座を介して既設のダイバータ冷却基板（SUS316）に取付けられる。なお、既設のダイバータ基板は、冷却水または窒素ガスによる冷却が可能である。

b. ダイバータタイル

ダイバータタイルはCFC材（CX-2002U[5]：東洋炭素（株））で製作されている。内側及び外側ユニットとも同一ダイバータ板の上に4枚取付けられていて、トロイダル方向及びポロイダル方向に各々2枚に分割されている。

c. ダイバータ板

ダイバータ板は、ダイバータタイルを取付ける台座である。ダイバータ板はSUS316で製作されている。

d. ダイバータ基板（ダイバータ基板取付座）

ダイバータ基板は、ダイバータ板を取付ける座である。また、ダイバータ基板取付座と一体で既設ダイバータ冷却基板に取付けられる。ダイバータ基板及びダイバータ基板取付座はSUS316で製作されている。

2) バッフル板の構造

内側バッフル板の構造を第2.6図、外側バッフル板の構造を第2.7図に示す。

a. バッフル板の構成

バッフル板には、内側バッフル板と外側バッフル板があり、これらはトロイダル方向に5°間隔で均等に分割されている。内側、外側バッフル板とも1ポートセクタに4ユニット、全体で72ユニット配置されている。バッフル板ユニットはバッフルタイル、バッフル板、タイル台座、支持脚及び支持脚座から構成される。

b. バッフルタイル

バッフルタイルは等方性黒鉛（IG-430U[5]：東洋炭素（株））及びCFC材（PCC-2S[5]：日立化成（株））で製作されている。内側ダイバータタイルと隣接する内側バッフルタイル（ポロイダル方向に2列）はCFC材で製作されている。また、外側ダイバータタイルと隣接する外側バッフルタイル（ポロイダル方向1列）もCFC材（PCC-2S）で製作されている。その他のバッフルタイルは等方性黒鉛材で製作されている。

c. タイル台座

タイル台座は、バッフルタイルを取付ける台座でSUS316で製作されている。タイル台座はタイルごとに取付けられているが、CFCで製作されているタイル

についてのみ2枚のタイルで1個の台座に取付けられている。等方性黒鉛で製作されているバッフルタイルは、台座ごとタイルの取付けボルトでバッフル板に取付ける構造である。CFC材で製作されているバッフルタイルは、タイル台座に取付け後、台座専用のボルトでバッフル板に取付ける構造である。

タイル台座は特殊部（計測器等のため特殊な形状になっている部分）を除くと内側及び外側とも6種類、計12種類の共通した形状である

d. バッフル板

バッフル板はインコネル625で製作されており、台座に取付けられたバッフルタイルを取付けるほか、ダイバータ領域を排気するための排気ダクトの役目も負っている。内側バッフル板は、真空容器に溶接された内側支持脚座に取付けられた内側支持脚に取付けられている。内側支持脚座及び内側支持脚は内側バッフル板ごとに1個取付けられている。外側バッフル板は、真空容器に溶接された外側支持脚座（8個）に各々取付けられた外側支持脚（8本）に取付けられている。

3) ドームの構造

ドームの構造図を第2.8図に示す。

a. ドームユニットの構成

ドームユニットは、ドームタイル、ドーム板、ドーム基板及びドーム固定座から構成される。ドームユニットはドーム固定座を真空容器に直接溶接して取付けられている。

b. ドームタイル

1ユニットのドームタイルはポロイダル断面において3枚、トロイダル方向に2枚で構成される。ドームの中央部のタイル（bタイル）はCFC材（PCC-2S）、両端（a及びcタイル）は等方性黒鉛材(IG-430U)で製作されている。

c. ドーム板

ドーム板は、ドームタイルを取付ける台座でSUS316で製作されている。ドーム板はポロイダル断面で3個に分割されており、ドーム板1個にドームタイルがトロイダル方向に2個取付けられる。

d. ドーム基板

ドーム基板は、ドーム板を取付ける座でインコネル625で製作されている。ドーム基板にはドーム板3枚（a～c）が取付けられる。

f. ドーム固定座

ドーム固定座は、ドーム基板を取付ける座でインコネル625で製作されている。ドーム固定座はダイバータ冷却基板間の真空容器に直接溶接されている。

2.2.3 バッフルポート

バッフルポートは、既設ポートを延長してバッフル板に取付けたポートである。バッフル板と真空容器の間はダイバータ部の排気ダクトになっているので、バッフ

ルポートとバッフル板はダイバータ部の排気速度に影響しない程度の真空シールが必要である。また、プラズマディスラプション時の電磁力に耐える強度が要求される。

既設斜め下の大型ポートの内、NBIポート（P-7及びP-13）はビーム入射角度の観点から、排気ポート（P-14）は排気コンダクタンスの維持から既設の開口部を維持している。P-1、2、15及び17の斜め下ポートは、必要最小限の開口部としている。真空容器下部のU1、2のバッフルポートは、開口部の確保とともに、バッフル板の構造材として使用されている。

1) P-1及び2のバッフルポート

第2.9図にP-2のバッフルポートの構造を示す。

a. 開口の大きさ

P-1バッフルポート：ポロイダル方向677.7mm、トロイダル方向200mm

P-2バッフルポート：ポロイダル方向890mm、トロイダル方向320mm

b. 取付け方法

バッフルポートは、バッフルポートに溶接されているフランジを介して、バッフル板及び真空容器に溶接された固定座にボルト締めによって取付けられている。バッフルポート及びフランジの材質はインコネル625である。

c. バッフルポートタイル

バッフルポートの開口部には、バッフルポートタイル（等方性黒鉛）が取付けられている。バッフルポートタイルの取付け領域は、バッフルタイルのプラズマ側表面から約100mmの範囲である。

2) P-7及びP-13NBI用バッフルポート

a. 開口部の大きさ

NBIバッフルポートの開口部の大きさはポロイダル方向約900mm、トロイダル方向約700mmである。トーラス外側のバッフルポート内の開口部は、バッフルポート内に設置している第一壁と既設第一壁（Ek列）と連続している。P-7はP-8側に、P-13はP-12側に平面上9°のビーム角度があり、バッフルポートの開口部もポート中心に対して偏心している。

b. 取付け方法

バッフルポートは、バッフルポートに溶接されているフランジを介して、バッフル板及び真空容器に溶接された固定座にボルト締めによって取付けられている。バッフルポート及びフランジの材質はインコネル625である。

c. バッフルポートタイル及びポート内第一壁

バッフルポートの開口部には、バッフルポートタイル（等方性黒鉛）が取付けられている。トーラス中心側の側面及びP-7のバッフルポートについてはP-8側の側面、P-13のバッフルポートについてはP-12側の側面の全面にバッフルポートタイルが取付けられている。P-7のP-6側、側面及びP-13のP-14側、側面につい

ては、バッフルタイルのプラズマ側表面から約100mmの範囲にバッフルポートタイルを取付けている。

バッフルポート内の真空容器面については、既設第一壁（一部形状変更）を再取付けしている。

3) P-14排気用バッフルポート

a. 開口部の大きさ

P-14のバッフルポートの開口部の大きさはポロイダル方向約1000mm、トロイダル方向約590mmである。トーラス外側のバッフルポート内の開口部は、バッフルポート内に設置している第一壁と既設第一壁（Ek列）と連続している。

b. 取付け方法

バッフルポートは、バッフルポートに溶接されているフランジを介して、バッフル板及び真空容器に溶接された固定座にボルト締めによって取付けられている。バッフルポート及びフランジの材質はインコネル625である。

c. バッフルポートタイル及びポート内第一壁

バッフルポートの開口部には、バッフルポートタイル（等方性黒鉛）が取付けられている。バッフルタイルのプラズマ側表面から約100mmの範囲にバッフルポートタイルを取付けている。

バッフルポート内の真空容器面については、既設第一壁（一部形状変更）を再取付けしている。

4) P-17計測用バッフルポート

P-17斜め下ポート(IN-2NB-b)の視野を確保するために、斜め下ポートにパイプを溶接し、バッフル板側はボルトで取付けられている。パイプの内径は132mmでバッフル板においてもパイプ内径の視野が確保されている。

5) U1計測用バッフルポート

U1計測ポートの内、開口部のみを必要とするポートは、真空容器にインコネル625の短管を溶接して、バッフル板にボルト取付けている。バッフルタイルは、必要な開口部を確保するために形状変更をしている。U1ポート内にはバッフルポートタイルは取付けていない。

6) U2計測計測用バッフルポート

U2計測ポートの内、開口部のみを必要とするポートは、真空容器にインコネル625の短管を溶接して、バッフル板にボルトで取付けている。バッフルタイルのトロイダル方向の開口部のタイルは、端部の熱集中を緩和するためにテーパを付けている。また、必要な開口部を確保するために形状変更をしている。U2ポート内にはバッフルポートタイルを取付けている。

7) ガス注入用バッフルポート

P-15斜め下ポート (IN-2E-b) にフランジ付短管を溶接し、これにフランジ付L型短管をボルトで接続し、バッフル板の外側 (A2,3列) に開口部を設けて流路を確保している。短管の内径は146.4mmである。

8) その他のバッフルポート

その他のバッフルポートには、軽元素ドップラー用バッフルポート、可視分光用バッフルポート、可動プローブ用バッフルポート等がある。これらのバッフルポートは、計測装置の必要としている最小限の開口部を確保している。

2.2.4 シール

W型ダイバータは、ダイバータ部で高圧になったガスを、バッフル板の下を経て斜め下のNBIポートから排気する構造となっている。そのためバッフル板の下は主プラズマ側に比べて比較的高い圧力になっており、バッフル板下部のガスが主プラズマに逆流しないよう、バッフル板、ダイバータ、ドームはある程度の気密構造が要求される。一方でW型ダイバータは内側バッフル板、内側ダイバータ、ドーム、外側ダイバータ、外側バッフル板という独立した機器から構成されている。そのため、気密構造(以下、シール)は、排気ルートである内側ダイバータとドームの間のすき間を除く、全ての分割部に施される必要がある。

シールはセラミックスを溶射した絶縁板[6]と薄板を組合せた絶縁型シールを採用し、相互間の変位を許容している。絶縁型シールには2種類の構造がある。

1) 薄板を接触させるシール構造

薄板を接触させるシール構造は、ドーム及びダイバータ板相互間(トロイダル方向)のシール、内側及び外側のダイバータ板とバッフル板のポロイダル方向のシール及びドーム外側と外側ダイバータ板のポロイダル方向のシールである。薄板を接触させるシール構造を第2.10図のaに示す。

2) 薄板を溝型に曲げプレートを差込むシール構造

薄板を溝型に曲げプレートを挿入するシール構造は、バッフル板相互間のシールで、薄板を溝型に曲げその中にセラミックスを溶射したプレートを挿入するシール構造である。薄板の溝型に挿入するシール構造を第2.10図のbに示す。なお、バッフル板に使用されている薄板及び溶射プレートはポロイダル方向に交互に分割されており、内側バッフル板は計2箇所、外側バッフル板は計8箇所である。

2.3 W型ダイバータ領域の計測器類

ダイバータ改造に伴って撤去、移設及び新設したW型ダイバータ領域の計測器類の員数を第2.3表に示す。

2.3.1 静電プローブ

1) 静電プローブの構造

静電プローブ（ラングミューラプローブ）の構造を第2.11図に示す。静電プローブのセンサヘッドは、プラズマ側タイル表面から $1.2 \pm 0.3\text{mm}$ 出して取付けられている。このため、センサヘッドは熱負荷が大きいので、CFC材（CC-312[5]：昭和電工（株））で製作されている。また、取付けるタイルと絶縁するために、絶縁ブッシュで囲われている。なお、静電プローブは、ダイバータ改造前のオープンダイバータで使用されていたものに、若干の改良を加えて取付けられている。

2) センサヘッドの配置

静電プローブの配置図を第2.12図に示す。静電プローブは内側と外側のダイバータ板に各々32個、内側と外バッフル板に各々4個、合計72個取付けられている。

2.3.2 热電対

1) 热電対の種類

热電対の種類は、CA（クロメル-アルメル）で、シース（NCF600）の中に収納されて取付け、配線されている。また、NBIの対向面に取付けられる热電対は、モリブデンのキャップにロー付けされ、中性粒子の突抜けによる热負荷から保護されている。热電対の構造を第2.13図に示す。

2) 热電対の配置

a. ダイバータ板用热電対

P-10のダイバータ周辺にはダイバータ板用热電対が19個取付けられている。これらの取付け位置を第2.14図に示す。ダイバータ板用热電対は、内側ダイバータタイルに4個、外側ダイバータタイルに3個、ドーム内側、顶部及び外側タイルに各1個、及び内側と外側のバッフル板に各2個取付けられている。このほかに、内側と外側のダイバータ板（台座）に各1個、ドーム板（台座）に1個及び内側バッフルタイル台座に2個取付けられている。

b. NBI用热電対

NBI用热電対は、プラズマを突抜ける中性粒子による対向面の热負荷を評価するものである。ダイバータ改造に伴って、接線NBI（P-4及びP-16）とN-NBI（P-3）の热電対の内、外側バッフル板と干渉する热電対を外側バッフル板上の対向面に移設した。接線NBIの対向面（P-9及びP-11）の外側バッフル板には各々2個、N-NBIの対向面（P-9）には1個移設した。

c. ベーキング監視用热電対

ダイバータ改造に関連する構造物でベーキング時に最も温度変化がしにくいものは外側バッフル板である。従って、外側バッフル板の温度を監視するため、热電対をポロイダル断面のほぼ中央に取付けた。P-7の外側バッフル板上に

はプレートにロー付けされた熱電対（能動粒子線用熱電対を転用）を取り付け、P-1のバッフル板下には、ダイバータ板用熱電対と同じものをクリート止めで取付けている。

d. リップルロス用熱電対

リップルロス用熱電対の内、外側バッフル板の据付けと干渉する熱電対は全て撤去した。この熱電対はNBI用熱電対と同じ構造をしていることから、NBI熱電対の予備として保管している。

2.3.3 磁気プローブ

ダイバータ改造に伴って、移設または新設した磁気プローブは、TCプローブ、TMプローブとNプローブである。ワンターンコイル及びサドルコイルは、支持脚座等と干渉した場合、極力新設部品で干渉を避け、それでも回避できない場合に限って軽微な配線ルートの変更を行った。その他のロゴスキコイル及び反磁性コイルは、変更または移設を行っていない。

TC、N、TMプローブは、ポロイダル断面において数カ所に別れて取付けられている。第2.15図及び第2.4表にP-13と14間に設置されている制御用磁気プローブの配置を示す。

1) TCプローブ

TCプローブは、制御用の検出器で、第2.16図に示すポロイダル磁場の B_ω 成分（ポロイダル断面における接線方向の成分）を測定するものである。検出部は、 $\phi 18.6\text{mm}$ 長さ121mmの保護管に収納されており、コイルの巻かれている長さは53mmである。Tプローブの形状を第2.17図に、電磁気的特性を第2.5表に示す。

2) Nプローブ

Nプローブは、制御用の検出器で第2.16図に示すポロイダル磁場の B_ρ 成分（ポロイダル断面における半径方向の成分）を測定するものである。検出部は、トロイダル方向の幅49.4mm長さ72.9mmのケースに収納されており、コイルは内径22mm、厚さ5.5mmのセラミックボビンに巻かれている。Nプローブの形状を第2.18図に、電磁気的特性を第2.5表に示す。

3) TMプローブ

TMプローブは、プラズマ周辺の B_ω 成分のMHD揺動を測定する検出器である。検出部は、 $\phi 17\text{mm}$ 長さ93mmの保護管に収納されており、コイルの巻かれている長さは15mmである。Tプローブの形状を第2.19図に、電磁気的特性を第2.5表に示す。

2.3.4 ハロー電流プローブ

ハロー電流は、プラズマが垂直方向に変位した場合、周りの構造物と干渉して、

プラズマ電流の一部が構造物とそれに接触するスクレイプオフ層に流れる。このハロー電流は大きな電磁力を生じさせ、JT-60においては内側下部の第一壁を破損させたケースがあり[7]、JETにおいても構造強度上の大きな問題となっている[8]。従って、ハロー電流を測定し、評価することは設計の検証をする上で重要なことである。なお、ハロー電流による電磁力の構造評価については第3章で詳細に記述している。ハロー電流プローブは、ダイバータ改造前に、ダイバータ（オープンダイバータ）タイルに4個取付けていたが、これらを全て撤去し、ダイバータ改造時に6タイプ18個、平成9年の定期点検時（11月～12月）に2個のハロー電流プローブを取付けた。第2.6表に新設したハロー電流プローブの員数、電磁気的特性及び設置場所を示す。

1) ハロー電流プローブの構造

ハロー電流プローブはロゴスキコイルである。ロゴスキコイルは一般的に、信号強度を高めるためには大きな断面積及び多くの巻数が必要である。一方、測定場所に直接取付けることから空間的に制限される。また、導体間及び真空容器内においては絶縁が必要であることから、素線は細い（ $\phi 0.5$ または1.0）MIケーブル（Mineral Insulated Cable）を使用している。

第2.20図にハロー電流プローブ（タイプA）の構造を示す。ハロー電流プローブは、ボビン（SUS316）にMIケーブルを数層巻、更にアーキングを防止するために、絶縁クロス（シリグラス）を巻いている。

2) ハロー電流プローブの取付け位置

ハロー電流プローブは主にP-6に取付けられている。P-6のポロイダル断面の配置を第2.21図に示す。

また、ハロー電流はトロイダル方向に非対称性をもっており、このトロイダル方向の非対称性を検証するために、ハロー電流プローブはトロイダル方向に分散して取付けられている。トロイダル方向に分散して取付けられているハロー電流プローブは、内側バッフル板支持脚、ドーム固定座及び外側バッフル板支持脚に取付けているプローブである。

a. 内側バッフル板支持脚

P-6の内側バッフル板支持脚にはトロイダル方向に連続して4個、P-6から一定の間隔（ 60° ）でP-9、P-12、P-15、P-18、P-3に各々1個取付けられている。

b. ドーム固定座

P-6の反対側に位置するP-15のドームに1個取付けられている。

c. 外側バッフル板支持脚

P-6バッフル板の支持脚にはドーム側支持脚2本にハロー電流プローブが取付けられている。これに、平成9年の定期点検時（11月～12月）に同じバッフル板のポロイダル方向に同じ位置でトロイダル方向に2個追加取付けされている。

2.3.5 グロー放電電極

ダイバータ改造前は、P-3及びP-11の斜め下ポートに専用のグロー電極（専用電極）とP-6水平ポート上部に第一壁を兼ねたグロー電極（第一壁電極）が3個取付けられていた。斜め下ポートは、ダイバータ改造に伴って従来通りの使用ができなくなることから斜め下ポートに設置されている2つのグロー電極を斜め上ポートに移設した。また、グロー放電による洗浄効果領域を拡大するとともに、グロー放電全体の信頼性を向上させるために、P-3とP-11の外側バッフル板に第一壁電極を追加した。第2.7表にグロー電極の諸元を示す。

1) 専用グロー電極

専用電極は、設置ポートの光学的な視野を制限するとともにグロー放電のスパッタリングにより周辺の光学系（窓、反射板等）または露出している絶縁物に悪影響を及ぼす。従って、プラズマ計測装置とのポートの共有には制限があり、プラズマ計測装置が設置されていないP-3の斜め上ポートとP-15の斜め上ポート（電磁気ケーブル引出しポート）に設置した。

電極リード線は、P-3についてはポートからトロイダル磁場を横切って配線され、P-15についてはP-11斜め下ポートからMIケーブルを使用して、第一壁と真空容器のスペースを利用して配線されている。特に、P-15の電極の配線においては、露出部分のクリート止めができないことから、露出部分がトロイダル磁場と平行になるように配線している。

2) 第一壁グロー電極

JT-60において、第一壁電極は、平成7年の定期点検時（11月～12月）にP-6の水平ポート上に取付け、1年間の健全な使用実績があった。第一壁電極は、真空容器と第一壁プラズマ側表面（P-6の場合は40mm）のスペースに電極、台座及び絶縁材を組合わせて取付けられる。従って、第一壁の厚さ、絶縁層の厚さ及び絶縁のためのギャップの確保をするための設計が必要であった。特に、タイルの厚みの確保及び絶縁（セラミックス）の確保は、熱的及び機械的な破損を防止する上で最も重要である。

ダイバータ改造に伴い新たに設置する第一壁電極は、バッフル板とバッフルタイルのプラズマ側表面のスペースに設置される。タイルの厚みの確保及び絶縁層の信頼の確保の観点からバッフル板間の絶縁シールに使用しているものと同等な溶射したセラミックス[6]を使用している。なお、第一壁電極の表面は、隣接しているバッフルタイルよりも2mm低くしている。第一壁グロー電極の構造を第2.22図に示す。なお、第一壁電極をP-3及びP-11の外側バッフル板に取付けた理由は、電極リード線の引出しポートがP-3斜め下及びP-11斜め下にあるからである。

2.3.6 ボロメータ

ボロメータは、温度上昇による電気抵抗の変化から放射量を測定する計測器である。受熱チャンネルは、1ユニットあたり4個で4チャンネル設置されている。9DM6と9DM7のドーム間の内部には3チャンネル設置され、各々内側ダイバータ領域、ドーム頂部（ヌル点附近）及び外側ダイバータ領域の放射量の測定が可能である。また、外側バッフル板の下部にも1チャンネル設置され、ヌル点附近の計測が可能である。P-9のドーム下に設置されているボロメータ配置を第2.23図に示す。

ボロメータの受熱部は、測定領域（ダイバータ及びヌル点附近）を直視することから、ドームタイル等に開口部を設ける必要がある。開口部のトロイダル方向の幅は、ドームタイルで40mm、外側バッフルタイルで20mmである。当然ながら開口部のタイルには、端部に熱負荷が集中しないようにテーパー加工（外側バッフルタイル：144mmのトロイダル方向の長さに対して6mmの段差）が行われている。

2.3.7 イオングージ

イオングージ（アステックスゲージ）は、強磁場における真空容器内の各部の圧力を測定するために取付けられた圧力計である。W型ダイバータの改造後の各部の圧力を測定することは、W型ダイバータの特性を評価する上で極めて重要である。

イオングージは、真空容器内全体で11個取付けられている。W型ダイバータ周辺では、P-8の内側バッフル板K列に1個（A）、ドーム下部に3個（B、C、D）、外側バッフル板E列に1個（E）及びP-4及び18のドーム下に各々1個（B）取付けられている。この他に、P-3、P-9、P-18の斜め下ポートに1個及びP-5の水平ポートに1個取付けられている。A～Eのゲージは各々タイル表面に開口部を設け、プラズマ側の圧力を測定できる導入管が取付けられている。なお、ドーム下部に設置されているイオングージの内、Bは排気溝の入口、Cはドーム頂部及びDは外側ダイバータの下部の圧力を測定する。第2.24図にP-8のドーム下部に設置されているイオングージの配置を示す。

イオングージのフィラメントは、当初仕様として最大DC30Aで検討されていたことから 5.5mm^2 のケーブル2本で1組みを構成し、計4本のケーブルが配線されている。その他のイオン及びグリッド電流用ケーブルは各々 1.25mm^2 のケーブルが配線されている。なお、これらのケーブルは、ガラス/マイカを主絶縁とし、ガラス編組で外装され、最終的にはSUSの編組で外装されたケーブルである。

イオングージ及びボロメータ等真空容器内に設置されている機器のリード線は、真空容器のポート部分に取付けられたフランジの絶縁部から外部に引出される。引出し部分のフランジに真空リーク等の不具合が生じた時、このフランジの交換またはガスケットの交換が容易にできるように、真空容器の外側からケーブルを取り外すことができる専用フランジが取付けられている。

2.4 ガス供給及び真空排気

2.4.1 ガス供給

プラズマへのガス供給は、プラズマの頂部、サイドポート及びダイバータ領域に

供給される。

1) プラズマ頂部へのガス供給

プラズマ頂部へのガス供給は、P-3、P-11及びP-14のU2ポートから供給される。

2) プラズマサイドへの供給

プラズマサイドへのガス供給は、P-15の斜め下ポートから外側バッフル板を貫通する専用のバッフルポートを設け、これによって供給される。

3) ダイバータ領域への供給

ダイバータ領域へのガス供給は、P-18の下側U1ポート及びP-7の下側U2ポートから供給される。P-18下側U1ポートから供給されたガスは、内側ダイバータとドーム内側間の排気溝を通ってプラズマに供給される。また、P-7下側U2ポートから供給されたガスは、ドーム下部を通り、内側ダイバータとドーム内側間の排気溝を通ってプラズマに供給される。

2.4.2 真空排気

真空容器の真空排気は、既設の真空排気設備による排気と新たに設置されたダイバータ粒子排気装置がある。

1) 既設の真空排気設備

既設の真空排気設備は、P-14の斜め上（C系）及び斜め下（D系）ポートから真空容器を排気する。D系の排気ポートは、外側バッフル板に専用のバッフルポートを取り付けて、C系とともにプラズマ領域を直接排気する。

2) ダイバータ粒子排気装置

ダイバータ粒子排気装置は、内側ダイバータとドーム内側の開口部（排気溝）を排気する。斜め下ポート（P-12、P-16及びP-14斜め下ポート）に設置されているNBIポートから外側バッフル板の下部、外側ダイバータ下部及びドーム下を介して排気される。なお、排気ポンプは、既設のNBIの排気ポンプ3台が専用ポンプとして転用されている。設計上の排気溝における実効排気速度は圧力が0.1～1Paの範囲において35～70m³/sである[1][2]。

3. 設計

3.1 設計条件

3.1.1 真空容器

1) 真空容器の温度条件

室温から300℃

2) 真空条件

真空容器の許容リーク量 : $1 \times 10^{-9} \text{ Pam}^3/\text{s}/\text{箇所}$

真空容器内設置機器の許容放出ガス量 : $1 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}/\text{m}^2$

3.1.2 ダイバータ板及び第一壁の熱負荷条件

Wダイバータの熱負荷条件を第3.1図及び以下に示す。なお、これらの熱負荷条件に関する運転周期は20分である。

1) ダイバータ板の熱負荷条件

a. 高放射損失運転 (High radiative steady operation with 70%)

$5 \text{ MW/m}^2 \times 10 \text{ 秒}$

b. 低放射損失運転 (Low radiative steady operation with 30%)

$10 \text{ MW/m}^2 \times 4 \text{ 秒間}$

プラズマへの加熱入力を H_p (MW) 、放射損失係数を R 、ダイバータ領域の平均半径を R_d (m) 、タイルにおける熱流幅を d_R (内側外側とも:m) とした場合のダイバータ領域の熱負荷 W_d は以下のように求められる。

$$W_d = \frac{H_p(1-R)}{2 \times 2\pi R_d d_R} \quad (\text{MW/m}^2) \quad (1)$$

ここで H_p を30MW、 R_d を3.2m、 d_R を0.05mとした場合のダイバータ領域の熱負荷 W_d は以下の通りとなる。

$$W_d = 15 \text{ MW} \times (1-R) \quad (\text{MW/m}^2) \quad (2)$$

高放射損失運転の熱負荷は放射損失 R が0.7とし、(2)式より計算すると約 5 MW/m^2 となる。この運転が10秒間維持するとしてダイバータ板の熱負荷条件を定めている。また、低放射損失運転の場合は、放射損失 R を0.3とし、(2)式より計算すると約 10 MW/m^2 となる。この運転が4秒間維持するとしてダイバータ板の熱負荷条件を定めている。

2) ドーム頂部の熱負荷条件

ドーム頂部にストライクポイントが当たった時、ダイバータ板と同じような熱負荷条件となる。従って、ドーム頂部の熱負荷条件は以下の通りとしている。

a. 高放射損失運転 (High radiative steady operation with 70%)

$5 \text{ MW/m}^2 \times 10 \text{ 秒間}$

b. 低放射損失運転 (Low radiative steady operation with 30%)

 $10 \text{ MW/m}^2 \times 4 \text{ 秒間}$

3) 内側バッフル板のダイバータ側端部

高 β 運転において内側のストライクポイントが内側バッフル板のダイバータ側端部に当たった時を想定し、ダイバータ側端部の熱負荷条件は以下の通りとしている。

 $4 \text{ MW/m}^2 \times 10 \text{ 秒} \text{ または } 5 \text{ MW/m}^2 \times 4 \text{ 秒間}$

4) その他のW型ダイバータ周辺の熱負荷条件

- a. ドーム部（頂部を除く） : $1 \text{ MW/m}^2 \times 10 \text{ 秒間}$
- b. 外側バッフル板のダイバータ側端部 : $1 \text{ MW/m}^2 \times 10 \text{ 秒間}$
- c. リップル損失受熱部 : $0.5 \text{ MW/m}^2 \times 10 \text{ 秒間}$
- d. 上記以外の場所 : $0.15 \text{ MW/m}^2 \times 10 \text{ 秒間}$

5) 既設第一壁の熱負荷条件

最大加熱入力が40MW以下、加熱時間が5秒の条件で既設第一壁の熱負荷条件は、以下の通りである[5]。

A領域第一壁（主として真空容器中心側） : 3 MW/m^2 (5秒間)B領域第一壁（主として真空容器上部及び外側） : 1.5 MW/m^2 (5秒間)

6) 運転周期

運転周期 : 20分

3.1.3 排気及び気密性に関する条件

1) ダイバータ各部のコンダクタンスの目標値

重水素ガス、300°Cの条件で以下の通りである。

- ドーム下 : $20 \text{ m}^3/\text{s}$
(内側ダイバータ部開口部からドームと外側ダイバータ板接続部の間)
- ドームと外側ダイバータ板接続部下 : $5 \text{ m}^3/\text{s}$
- バッフル板下 : $30 \text{ m}^3/\text{s}$

2) 気密条件

ダイバータ板、ドーム、バッフル板及び真空容器壁との間に生じる隙間のコンダクタンスの総和は $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下。

3.1.4 デイスラプション条件

1) デイスラプション直前のプラズマ条件

プラズマ電流 : 3MA ($R=3.35\text{m}$ 、 $Z=0$ 、 I_p 方向 : 時計まわり)

トロイダル磁場: 4T (R=3.32m、Bt: 時計まわり)

プラズマ平衡配位: 標準配位のコイル結線

ポロイダル磁場コイル電流

If=-90kA、Iv=25kA、Ih=21kA、Id=100kA

2) デイスラッシュの起こり方

- a. 内側へ移動するデイスラッシュ (ケース1)

消滅時間: 5 ms

移動条件: -1 m / 5ms (R方向)

- b. 斜め下側へ移動するデイスラッシュ (ケース2)

消滅時間: 10 ms

移動条件: -0.5 m / 10 ms (R方向)、-1 m / 10 ms (Z方向)

3) ハロー電流

ハロー電流については、これまでのJT-60の運転経験により以下のように定めた

[2]。

- a. ハロー電流: プラズマ電流の26%

- b. トロイダル分布

内側バッフル板 : 2.5倍 (1セクション当たりの集中率)

内側バッフル板以外: 一様分布

4) デイスラッシュ回数

プラズマ電流: 3 MA、消滅時間: 5 msの条件で200回

3.1.5 使用材料に関する条件

1) 撤去するダイバータ板タイル、第一壁タイル及び台座は再使用しない。

2) 放射化低減対策

○ SUS材は低コバルト (コバルト含有率が0.05%以下) 材を使用する。

○ 電気絶縁材には臭素等の放射化しやすい材料を極力使用しない。

3.2 第一壁の設計

3.2.1 第一壁の形状及び配置

ダイバータ板は既設ダイバータ冷却基板の上、ドームは既設ダイバータ冷却基板間に取付けることからそれぞれのトロイダル分割角度は統一されておらず、ダイバータ冷却基板の設置角度の種類からタイプ別に分割されている。さらにタイル間のギャップを管理するためにタイル側面のテープ加工を行っているので、タイプ数はさらに細かくなっている (~18タイプ)。

ダイバータタイル、バッフル板タイル、ドームタイルはいずれも渦電流、ハロー

電流による電磁力及び振動に耐えられるようにタイルの厚さ、幅等が決められている。ただし、他の第一壁タイルについてはJT-60大電流化改造時（平成3年3月竣工）に設置されており、当時（平成4年以前）はハロー電流について認識されていなかったのでタイルのハロー電流に対する強度評価は行われていない。

各タイルには、タイルエッジ部に熱が集中しないように、予めテープ加工を施し（ダイバータタイル、バッフル板タイルの一部）、かつエッジ部にはR加工を施している。ここでは、ダイバータタイル、バッフル板タイル、ドームタイル、その他の第一壁タイルの代表的な形状、タイルの取り付け構造等について述べる。第3.1表に各セクションのタイルユニット数及びタイル枚数を示す。

1) ダイバータタイル (CFCタイル)

ダイバータタイルは第3.2図に示すように、1ユニットにタイルが4枚取り付く構造になっている。内側ダイバータ、外側ダイバータとともに125ユニット（ダイバータ冷却基板と同数）あり、合計250ユニット、タイルにすると約1000枚になる。
(計測用に特殊部があり、厳密には第3.1表を参照のこと。)

ダイバータタイルは、台座の後からボルト（M6）、ナットによって一箇所で取り付けられている。このボルトは、回転防止のために台座に点付け溶接されている。ダイバータタイルを台座に取付けた後、その台座をプラズマ側からダイバータ基板にフランジ付き六角穴付きボルト（M8）により4カ所で取付けられている。台座は4ヶ所でボルトにより取付けられているので、回転防止の構造は取っていない。また、ダイバータ板（台座）を取付けるボルトはプラズマ側表面から直接見えないような構造になっている。これは、ダイバータタイルにはプラズマが直接流れ込むので、ボルトがタイル表面から直接見えないようにし、ボルトへの直接の熱負荷を避けるためである。

2) ドームタイル (CFC及び等方性黒鉛タイル)

ドームタイルは第3.3図に示すように、1ユニットにタイルが2枚取付く構造になっている。ドームタイルは内側、頂部及び外側の3列から成り、トロイダル方向には125ユニットある。1ユニットは各々の列において2枚のタイルから成ることから、タイル枚数にすると750枚（125×3列×2枚）になる。タイル取付け構造はダイバータタイルと同様に、台座の後からボルト、ナットによって一箇所で取付けられている。回転防止のために取付けボルトを台座に点付け溶接されている。タイルをドーム板（台座）に取付けた後、その台座を上からドーム基板にフランジ付き六角穴付きボルトにより1～2カ所で取付ける構造となっている。また、台座に取り付けたピンによりドーム基板との回転を防止している。

3) バッフル板タイル

バッフル板タイルは、ダイバータと隣接する先端部と一般部から成っている。内側バッフル板先端部のタイルは第3.4図に示すように、ポロイダル方向に2列

(J,K列) 及びトロイダル方向に2ユニット取り付けられている。また、外側バッフル板先端部のタイルはポロイダル方向に1列（E列）及びトロイダル方向に2ユニット取り付けられている。内側バッフル板のユニット数は288ユニット（72バッフル板×2×2ユニット）で、外側バッフル板のユニット数は144ユニット（72バッフル板×2×1ユニット）である。1ユニットについて各2枚のCFCタイルが取付けられているが、タイル枚数については特殊部があるので、詳細は第3.1表を参照されたい。

先端部のタイル取付け構造はダイバータタイルと同様に台座の後からボルト、ナットによって一箇所で取付け、回転防止のためにボルトを台座に点付け溶接している。タイルを台座に取付けた後、その台座を上からドーム基板にフランジ付き六角穴付きボルトにより1ヶ所で取付ける構造となっている。バッフル板には台座の形状に合わせた薄板が溶接されており、これが台座の回転防止となっている。

一般部のタイルは第3.4図に示すように、1ユニットに1枚のタイルが取付けられる。基本的に内側バッフル板1つに8枚、外側バッフル板に20枚のタイルが取付けられる構造となっている。このタイル取付け構造はダイバータタイルとは異なり、タイルのプラズマ側表面から直接六角穴付きボルト（M8）、バネ座金及び平座金によりバッフル板に固定する構造となっている（タイル台座はバッフル板に点付け溶接されている）。一般部のバッフルタイルの六角穴付きボルトはタイルを直接取付けるために、タイルの機械的な破損が懸念され、十分な締付けができない。このためバネ座金を使用し、さらにバネ座金によるタイルの機械的な破損を防ぐために平座金を使用している。この構造ではプラズマ側に大きな開口部（ $\phi 24$ ）を有しているが、一般部のタイルが取付けられる位置ではボルトが高熱負荷に晒されることないと判断し、このような構造を採用している。

回転止め対策としては台座に薄板を溶接し、タイルの回転を防止している。ただし、外側バッフル板においては一部（A1,A2,B1～C4）台座に取付けたピンにより回転を防止している。

4) バッフルポート内壁タイル

バッフルポートの開口部には、タイルが取付けられている。タイルの取付け領域は、バッフル板タイルのプラズマ側表面から約100mmの範囲である。この位置では、1ユニットに1枚のタイルが取付け、タイル枚数は、各バッフルポートにより異なる（第3.1表を参照のこと）。このタイルの取付け構造は、タイル上部から直接六角ボルトによりバッフルポート内壁に固定する構造となっている。

5) その他の第一壁タイル

ダイバータタイルと同様に、台座の後からボルト、ナットによって一箇所で取付けられ、回転防止のためにボルトを点付け溶接している。タイルを台座に取付けた後、その台座を上から真空容器に固定した第一壁用固定座に六角穴付きボル

ト（M8又はM10）及びさらばね座金により1ヶ所で取付ける構造となっている。固定座の周りにはL型の薄板を溶接し、これが台座の回転防止になっている（ただし、全数ではない）。バッフルポート内タイル（真空容器側）についても同様な構造となっている。

3.2.2 第一壁の電磁力に対する構造強度

大電流化改造後（JT-60U）のこれまでの運転では数回にわたって第一壁タイルの破損が認められている[9]。原因はハロー電流とトロイダル磁場とのカップリングによる電磁力が作用したと考えられている。ダイバータ改造にともなって取付けられる新規タイルは渦電流、ハロー電流等が流れた場合にもタイルが強度的に耐えられるように設計する必要がある。以下にその強度評価例を示す。

1) タイルのハロー電流の電磁力に対する構造強度

a. バッフル板タイル

ハロー電流については第3.5図に示すようなモデル（ハロー電流路）を考える。

この場合のタイルは、内側バッフル板上で最も幅の広いタイルを選んでいる。

タイルの電磁力による等分布荷重 f_b は、以下のように求められる。

$$f_b = \frac{I_h B_t l_p}{9.8 l_t} \quad (\text{kg/mm}) \quad (3)$$

ここで、 I_h はハロー電流（A）、 B_t はトロイダル磁場（T）、 l_p はポロイダル方向の長さ（m）、 l_t はトロイダル方向の長さ（mm）である。内側のバッフルタイルが強度的厳しいので、このタイルの等分布荷重を評価する。タイル取付け位置での B_t は5（T）、タイルの l_p は0.107（m）、 l_t は56.5（mm）であるので、

$$f_b = 9.65 \times 10^{-4} I_h \quad (\text{kg/mm}) \quad (4)$$

となる。曲げモーメント M_b は、片持ちばかりの全長に等分布荷重を受けるモデルを考えると、

$$M_b = \frac{f_b l_p^2}{2} \quad (5)$$

となる。また、断面係数 Z_b は、このモデルにおいて取付け穴を補正するために簡易的に以下の式で求めた。

$$Z_b = \frac{(bt_0^2 - d_1 t_1^2 - d_2 t_2^2)}{6} \quad (6)$$

ここで b は加重を受けるタイルの幅106.9（mm）、 t_0 はタイル厚さ21.7（mm）、

$d_1 t_1^2$ 及び $d_2 t_2^2$ は取付け穴の補正で各々取付け穴の直径25及び10 (mm) と深さ10.7及び11 (mm) である。(6)式で断面係数を計算すると Z_b は7710になる。従って、曲げ応力 σ_b は

$$\begin{aligned}\sigma_b &= M_b / Z_b \\ &= 2.00 \times 10^{-4} \times I_h \quad (\text{kg/mm}^2)\end{aligned}\tag{7}$$

となる。このタイルは等方性黒鉛 (IG-430U) であり、その曲げ強度 T_{sb} は約4.5 kg/mm²である。よってタイルが破損に至るハロー電流値 I_{hb} (A) は、

$$\begin{aligned}I_{hb} &= \frac{T_{sb}}{\sigma_b} \\ &= 4.5 / (2.00 \times 10^{-4}) = 23 \quad (\text{kA})\end{aligned}\tag{8}$$

になる。これをタイル1枚に換算すると、 $113 / 56.5 \times 23\text{kA} = 45\text{kA}$ となる。ハロー電流の設計条件 I_h は、プラズマ電流 I_p の26%、トロイダル分布の集中率 R_{tpf} については、内側バッフル板は1セクション当たり2.5、その他は一様としている。また、トロイダル方向に設置されているタイルの数 N_{tile} は72ユニット×2枚であることから

$$\begin{aligned}I_h &= \frac{0.26 I_p R_{tpf}}{N_{tile}} \\ &= 0.26 \times 3 \times 106 \times 2.5 / (72 \times 2) = 13.5 \quad (\text{kA})\end{aligned}\tag{9}$$

となる。この評価結果 (13.5 kA) はタイル破損に至る電流値 (45 kA) に対して約3倍程度の余裕があり、問題ない。

バッフル板先端部は、CFC材を使用しており、その形状はこれまで評価したバッフル板タイルとは異なるが、基本的にダイバータタイルと同等であるのでダイバータタイルの評価を参照されたい。

b. ダイバータタイル

バッフル板タイルと同様にダイバータタイルが破損に至る電流値を評価する。モデルとして、片持ちばかりの全長に等分布荷重が掛かっている場合を考える。ダイバータタイル取付け位置での B_i は4 (T)、タイルの l_p は0.0625 (m)、 l_t は62.5 (mm) であるので、ダイバータタイルに流れるハロー電流を I_{hd} とすると等分布荷重 f_d は、(3)式から $f_d = 4.08 \times 10^{-4} I_{hd}$ (kg/mm) となる。曲げモーメント M_d は、(5)式からタイル幅を62.5mmとして求めると0.797 kg · mmとなる。

断面係数 Z_d はタイル取付け用の半月ナットの挿入穴を補正し、以下の式で求めた。

$$Z_d = \frac{b_{d2}t_{d2}^3 - b_{d1}t_{d1}^3}{6t_{d2}} \quad (10)$$

ここで b_{d2} は加重を受けるタイルの幅59.3 (mm) 、 t_{d2} はタイル厚さ22.9 (mm) 、 b_{d1} は半月ナットの挿入穴を模擬した高さ10 (mm) 、 t_{d1} は半月ナット挿入穴の幅43 (mm) である。(11)式で断面係数を計算すると Z_d は4870になる。従って、曲げ応力 σ_d は(7)式から $1.63 \times 10^{-4} I_{hd}$ (kg/mm) となった。このタイルはCFC材 (CX-2002U) であり、その曲げ強度は約 3.3 kg/mm²である。よってタイルが破損に至る渦電流値 I_{hdb} は(8)式と同様に、

$$I_{hdb} = 3.3 / (1.63 \times 10^{-4}) = 20 \quad (\text{kA}) \quad (11)$$

となる。ダイバータタイルのハロー電流の設計条件は、プラズマ電流 I_p の26%、トロイダル分布の集中率については一様 ($R_{ppf}=1$) としている。また、トロイダル方向に設置されているタイルの数 $Ntile$ は125ユニット×2枚であることからダイバータタイルに流れるハロー電流 I_{hd} は(9)式から3kAとなる。この評価結果はタイル破損に至る電流値に対して7倍近くの余裕がある。また、仮にトロイダル方向の集中係数 R_{ppf} を2.5とした場合でもダイバータタイルに流れるハロー電流 I_{hd} は8kAとなり、2.5倍程度の余裕があり、問題ない。

c. 特殊部

特殊部の場合、タイルとバッフル板の間に磁気プローブなどを設置する必要から、タイルの形状が一般部と異なってくる。これにより主として断面係数に差が現われ、強度が弱くなってしまう。これらのタイルについては、その形状をできるだけ小さくし、かつ厚くして断面係数を稼ぎ強度を保っている。

2) タイルの渦電流に対する構造強度

渦電流を評価する上でのモデルを第3.6図に示す。このタイルは外側バッフル板の最も外側に位置するタイルであり、最もトロイダル方向に長いタイルである。タイルとバッフル板の間には幅50mmの台座があるが、渦電流の場合タイルを剥がすような力も掛かるので、破損位置はタイル取付けボルトの位置とした。まず、円板に流れる渦電流 $j(r)$ を評価する。

$$j(r) \approx \frac{\pi r^2 \dot{B}}{2\pi R\rho} = \frac{r\dot{B}}{2\rho} \quad (\text{A/m}^2) \quad (12)$$

ここで

r : 渦電流の半径 (m)

\dot{B} : 単位時間当たりのポロイダル磁場の変化量 (T/s)

R : 電磁力の働く半径方向の位置 (m)

ρ : タイルの電気比抵抗 (Ω/m)

また、タイルに流れる渦電流 I_e はタイルの厚さを t (m) とすると以下の通りである。

$$I_e = \int_0^a j(r) t dr = \int_0^a \frac{r \dot{B}}{2\rho} t dr = \frac{\dot{B} t a^2}{4\rho} \quad (\text{A})$$

ここで \dot{B} : 2×10^2 T/s、タイル幅 a : 8.8×10^{-2} m、タイル厚さ t : 2.4×10^{-2} m 及び ρ : 8.5×10^{-6} $\Omega \cdot m$ とすると渦電流 I_e は 1.1kA となる。また、曲げモーメント M は、

$$\begin{aligned} M &= \int_0^a B_t r j(r) t dr = B_t t \frac{\dot{B}}{2\rho} \int_0^a r^2 dr \\ &= B_t t \frac{\dot{B}}{2\rho} \frac{a^3}{3} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \end{aligned} \quad (14)$$

ここでトロイダル磁場 B_t を 4T とすると曲げモーメント M は、 $98.7\text{N} \cdot \text{m}$ (約 $10000\text{kg} \cdot \text{mm}$) となる。断面係数 Z は、このモデルにおいて取付け穴を補正するために簡易的に以下の式で求めた。

$$Z = \frac{(bt_0^2 - d_1 t_1^2 - d_2 t_2^2)}{6} \quad (15)$$

ここで b は加重を受けるタイルの幅 (mm) t_0 はタイル厚さ (mm) 、 $d_1 t_1^2$ 及び $d_2 t_2^2$ は取付け穴の補正で各々取付け穴の直径と厚みである。(15)式で断面係数を計算すると Z は 11535 になる。従って、曲げ応力 σ は(7)式と同様に 0.87 (kg/mm^2) になる。この値は、等方性黒鉛 (IG-430U) の許容曲げ応力 $4.5\text{kg}/\text{mm}^2$ と比較して、 $1/5$ 程度低いので問題ないと思われる。また、内側バッフル板の場合、トロイダル磁場 (B_t) は $\sim 5.5\text{T}$ 程度であるが、仮にタイル寸法がこのモデルと同様としたとしても、モーメントは 1.4 倍程度なので曲げ応力は許容値の $1/4$ 程度である。他のタイルにおいては、タイル幅が短くなることから、曲げ応力はさらに低くなるので破損に至ることはない。従って、渦電流については、バッフル板一般部タイルにおいては問題ないと思われる。

本来、渦電流が流れ、かつハロー電流が流れるモデルを考える必要があるが、評価した結果からもわかるように、渦電流は大きくても 1kA 程度、主に数 100A 程度なので、タイル強度評価の際はハロー電流のみを考えている。

3.2.3 第一壁の加速度、振動に対する構造強度

ここでは主に外側バッフル板タイルについての評価を行う。外側バッフル板が最も振動が大きく、数10Gの加速度が予想されている。また、支持脚の少ない排気用NBIポート部の外側バッフル板については最大±4.5mmの変位が想定されていた。

1) 加速度に対するタイルの強度評価

加速度に対するタイルの強度評価は第3.7図に示すような片持ちばかりに一点集中荷重が掛かった場合のモデルを考える。外側バッフル板先端部のタイルには動解析の結果から、数10Gの加速度が予想されている。かりに100Gとして、バッフル板上のタイルについて曲げ応力を評価すると、最も寸法の大きい等方性黒鉛タイルで 0.33kg/mm^2 （荷重46kg）、形状の異なるCFC材で 0.21kg/mm^2 （荷重14kg）とそれぞれ許容応力と比較して1桁以上小さい値となっている。よって加速度に対する強度は問題ない。

2) 振動によるタイルの変形、ボルト部の強度評価

外側バッフル板は第3.3.2項「構造強度解析結果」に示すように、最大±4.5mmの変位が想定されている。この場合、台座は変形しないと思われるので、第3.8図に示すような場合にのみタイルのボルト部に荷重がかかることになる。この場合、台座とバッフル板の隙間は~0.055mmと推定される。つまり、ボルトが強制的にタイルを~0.055mm押しつぶすことになる。ただし、実際の据付けにおいては、強度を上げるために、構造強度解析に用いた支持脚の位置をタイル一つ分外側にずらしている。その分のバッフル板変位量を再評価すると、変位量は約±3mmとなる。これより、台座とバッフル板の隙間は、~0.037mmと推定される。

タイルを止めるボルトはSUS316であり、タイルとの熱膨張の差から、約0.04mmボルトが伸びる（ゆるむ）。ばねワッシャーのつぶし代は0.4mmであり、この0.04mmのゆるみは問題ない。むしろ振動によるボルトのタイルへの荷重をなくすることが期待される。実際には、圧縮荷重によるタイルのひずみがある程度（0.09mm以下）許されるので、常温運転でも問題はないと思われる。

3.2.4 第一壁の温度解析

1) 第一壁の温度解析

第一壁の熱解析（FEM解析）の結果を以下に述べる。また、解析モデルの寸法及び解析メッシュ図を第3.9図～3.11図に示す。

a. 热解析条件

○ 解析タイルと熱負荷条件

熱負荷条件は3.1項の設計条件であるが、以下に熱負荷解析を行ったタイルと熱負荷条件を示す。なお、ドーム(DMb)タイルの領域1はドーム内側タイルのプラズマ側の面と同じ面、領域2はドーム頂部のプラズマ側面で、詳細に

については第3.12図を参照のこと。

- ・ 内側バッフル板 (J) タイル : $4\text{MW}/\text{m}^2 \times 10\text{秒}$
- ・ ドーム頂部 (DMb) タイル : $5\text{MW}/\text{m}^2 \times 10\text{秒}$ 、領域1+2
: $10\text{MW}/\text{m}^2 \times 4\text{秒}$ 、領域1+2
: $10\text{MW}/\text{m}^2 \times 4\text{秒}$ 、領域2
- ・ ドーム外側 (DMc) タイル : $1\text{MW}/\text{m}^2 \times 10\text{秒}$
- ・ 外側ダイバータ (DVa,DVb) タイル : $5\text{MW}/\text{m}^2 \times 10\text{秒}$
: $10\text{MW}/\text{m}^2 \times 4\text{秒}$

○ 解析上の冷却条件

解析上の冷却条件はダイバータタイルのみ既設ダイバータ冷却基板にて水冷却を行うこととした。この時の解析条件は以下の通りである。

- ・ 热伝達率 : $412\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
- ・ 冷却水温度 : 100°C
- ・ その他 : 輻射冷却のみを考慮

なお、既設ダイバータ冷却基板上での熱伝達率 λ は、冷却基板とダイバータ支持脚の接触面積と冷却パイプの有効冷却断面積との比（冷却管直径 p_d （6mm）×2本と基板幅 p_w （65mm）との比）を実際のパイプ内面における熱伝導率 q_w （ $12.7\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ ）に掛けたものと、接触熱抵抗 t_{cr} （ $2 \times 10^{-3}\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ）の合成とし以下の式により計算した。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda} &= \frac{1}{q_w} \frac{p_w}{2p_d} + t_{cr} \\ &= \frac{1}{12700} \times \frac{65}{2 \times 6} + 2 \times 10^{-3} \\ \lambda &= 412 \quad (\text{W}/\text{m}^2\text{K}) \end{aligned} \tag{16}$$

○ 境界条件

- ・ 境界条件図：第3.12図による。
- ・ 霧囲気温度 : 300°C
- ・ 初期温度 : ダイバータは霧囲気温度及び冷却条件により、タイルの平均温度を求め、それを初期温度とする。それ以外は 300°C とする。
- ・ 輻射率 : タイル : 0.7、金属 : 0.1
- ・ 接触熱抵抗 : $500\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ （ドーム頂部タイルの場合 : $50\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 、これは再計算の際に現状に近い条件にするために変更している。）

○ 運転条件

- ・ 加熱時間 : 4秒または10秒
- ・ 加熱後放置時間 : 1200秒（20分）

・ 運転サイクル : 3サイクル（ドーム頂部タイルの場合は1サイクル）

○ 材料物性値

温度解析に用いた金属の物性値を第3.2a表及び各タイルの物性値を第3.2b表に示す。

b. 解析結果

熱解析の結果、設計熱負荷ではタイル表面温度は1000°Cを超え、タイルの損耗は避けられない。しかし、ダイバータタイル、バッフル板端部タイルは全てCFC材で製作されているので即破損に至ることはないと思われる。ただし、ドーム頂部タイルについては短時間での破損が懸念されている。詳しくは、第3.2.5項「タイルの熱応力解析」を参照のこと。

第3.3表に各運転サイクル時の加熱後のタイルと金属部の最高温度と到達するまでの時間を示す。また、第3.13図にバッフル板（4MW/m²、10秒）の温度の時間変化を示す。ただし、ダイバータタイルと金属部の温度は、水冷却をした場合として評価しているので注意を要する。水冷却しない場合のダイバータタイルと金属部の温度は、断熱温度上昇と考えられることから第3.3表の温度に入熱前のベース温度の差（200°C）を加える必要がある。

2) ダイバータタイルの温度上昇によるボルトの健全性評価

ここでは、タイルを止めるボルト（SUS316）の健全性について検討する。第3.2図に示すように、ダイバータタイルは台座に背面からM6のボルト（SUS316）で取り付け、その台座をダイバータ基板にプラズマ表面側から取付ける構造になっている。熱の移動はタイルから取付けボルト、台座へ、さらにダイバータ基板へと移っていく。

設計条件ではダイバータタイルへの熱負荷は、5MW/m²×10秒および10MW/m²×4秒と規定されているが、ボルトの位置での温度上昇を考えた場合、第3.3表に示した通り、総熱量の多い5MW/m²×10秒がより大きい。また、ダイバータ板の熱解析では水冷却を考慮していたが、水冷却なしの場合のダイバータ板各部の温度上昇は正確には評価していない。水冷却なしの条件で実施した熱解析結果の内、ダイバータタイルの設計条件に最も近い熱解析結果は、内側バッフル板Jタイルの結果であるので、これを用いてダイバータ板の温度上昇を評価する。

バッフル板の熱解析条件は、 H_p が4MW/m²、 t_h が10秒であり、取付け位置 R_{bin} が2.7m、タイル幅 w_t を0.12mとした場合の総熱量 W_{bin} は、以下により 82MJとなる。

$$W_{bin} = H_p t_h 2\pi R_{bin} w_t \quad (\text{MJ}) \quad (17)$$

ダイバータへの熱負荷を評価すると、30MW加熱入力、30%放射損失により、内外比（4:6）を考えても最大12MWの入熱となる。つまり、バッフル板の熱負荷条件は、ダイバータ板の熱負荷条件で12MW×7秒に相当することになる。この条件はダイバータ板にとっても十分に過大評価となっている。

熱解析結果から、止め金部の位置の温度上昇は、1ショットあたり約400°Cとなっている。つまり、ベース温度が300°Cであることを考慮するとすでに700°C程度になっており、ボルト単品の強度としては第3.14図のように、常温時の6割程度に減少していることになる。しかし、ボルトのピーク温度は運転終了後（約100sec）であり、温度が下がった場合、強度もほぼ回復する。問題となるのは連続ショットでベース温度が上昇した場合である。ベース温度は運転のたびに上昇していくわけではなく、輻射等の影響により一定の温度に落ち着くことになる。 $4\text{MW}/\text{m}^2 \times 10\text{秒}$ の20分周期の場合、第3.13図からベース温度は約400°C程度と予想される。これによりボルト位置でのピーク温度は800°C程度が予想される。15分周期の場合を考えてもベース温度は数°C程度の温度上昇と考えられる。数分で500°C程度まで温度が下がることからボルトの組成が大きく変化することはないと思われる。また、ボルトのピーク温度は放電終了後（約100秒）であり、この熱負荷条件がある程度過大評価（バッフル板、ダイバータにとっても）であることから、総熱量の多い $5\text{MW}/\text{m}^2 \times 10\text{秒}$ の条件及び水冷却なしの条件でも大きな問題にはならないと考えられる。なお、P-10のダイバータタイル（タイルの表面から6mmおよび台座に取り付けられている）に熱電対が設置されているので、実際の温度上昇について評価することが可能である。

3.2.5 タイルの熱応力解析

タイルの熱応力解析（FEM解析）の結果を以下に述べる。特にドームタイル（DMb）については、短時間での破損が懸念されている。

1) 解析条件

3.2.4項で行った温度解析結果をもとに熱応力解析を行った。熱応力解析のための条件を以下に示す。

a. 解析時間

タイル最高温度が入熱開始から1200°Cを超えた時間。ただし、タイル最高温度が1200°Cを超えない場合は、2410sec（4サイクル目の加熱終了後）としている。

b. 解析モデル

タイルを応力解析の対象とし、第3.15図に拘束条件を示す。

c. 物性値

第3.4表に熱応力解析に用いたタイルの物性値を示す。

2) 解析結果

第3.5表及び第3.6表にタイル最大変位、最大トレスカ応力及びドームの各方向の応力成分を示す。また第3.16図にドーム頂部タイル（DMb）のトレスカ応力分布を示す。

ドーム頂部タイルに対する $10\text{MW}/\text{m}^2$ という解析条件は通常運転では想定されて

いない過剰な熱負荷ではあるが、なんらかの要因により外側ヒットポイントがドーム頂部タイルに乗った場合にダイバータと同様な熱負荷 ($10\text{MW}/\text{m}^2$) が予想される。この場合の解析結果から、ドーム頂部タイルは短時間 (0.66秒) で熱応力による破損が懸念される。

その後、ドーム頂部タイルの熱負荷条件 ($10\text{MW}/\text{m}^2$) に対する検討から、 30MW の加熱入力、放射損失30%の場合のドーム頂部タイル（一般部CFC材）への熱負荷は約 $4\text{MW}/\text{m}^2$ で、最大でも～ $7\text{MW}/\text{m}^2$ であると想定された。この場合でもドーム頂部タイルは1.3秒程度の加熱時間で破損することが懸念される。計測用の開口部を設けた特殊部タイルについては、やはり～ $10\text{MW}/\text{m}^2$ 程度の熱負荷が予想された。よって、対策としては、ドーム頂部タイルの繊維方向を深さ方向に変え（熱伝導率を上げ）て、できるだけ深さ方向の温度勾配を付けないようにする、またはタイル形状を変える等をして熱応力を緩和する必要がある。このモデルにおいて、Z方向の変位が拘束され、その結果Z方向の応力が過大に評価されている。これに伴い、トレスカ応力も実際よりも大きな値となっている。そこで、熱応力的に厳しいとされるドーム頂部タイルの場合、より厳密に評価するために応力成分を分けて保証値と比較している。

3.2.6 ダイバータ板の芯ずれによる影響

ダイバータ改造において、W型ダイバータの設置位置は、当初設計位置より大半径方向に最大3mmずらして設置している（4.2.2項「据付け基準」の項を参照のこと）。これにトロイダルコイル中心のズレが加わることにより、プラズマ中心とW型ダイバータ中心のズレは最大4.3mmとなる。この場合のタイルへの熱負荷の影響について評価する。

1) W型ダイバータの芯ずれの影響

この場合、プラズマに対して第3.17図の様にずれていると考えられる。ずれ量を $x\text{ mm}$ （ポロイダル方向）、 $y\text{ mm}$ （トロイダル方向）とすると、 $\theta = \tan^{-1}(x/y)$ である。かりに、 x 方向に4.3mm、 y 方向 4712 mm ($2\pi R/4$) とすると、 $\theta = 0.05^\circ$ となる。

この値は、熱負荷を考えた場合問題となる。タイルに入射する単位面積当たりの熱負荷を Q_0 、入射角度を θ とした場合のタイルの熱負荷を q とした場合、

$$q = Q_0 \sin \theta \quad (18)$$

となる。従って、タイルに入射する熱負荷 (q) は入射する単位面積当たりの熱負荷 (Q_0) と同じとした場合、 $\sin \theta$ の比で表せる。ダイバータタイルの芯のずれにより約 0.05° のずれが生じたと仮定し、磁力線ピッチが 1° の場合は、 $\sin 0.95 / \sin 1.05 = 0.90$ となり最大約10%の熱負荷の差が出てくることになる。また、 2° の磁力線ピッチの場合は、約5%の熱負荷の差が出てくることになる。

実効的安全係数 (Q_{eff} 値) はダイバータタイルに対する磁力線ピッチに大きく関係している。 Q_{eff} 値が4以上の運転が多いことから、外側の足については 2° 以上の運転が多く、内側の足については 2° 以下の運転が多い。つまり内側ダイバータタイルについては、外側に比べて熱負荷のバラツキが大きくなると予想される(1割以下)。

2) 芯のずれと段差(タイル端部の熱負荷)の関係

ダイバータタイルには、端部に熱負荷が集中しないよう、また真空容器内での作業工程を少なくする必要から、予めタイルにテープ加工を施している。すべてのダイバータタイルにおいてプラズマの侵入する側の端部を0.5mm下げている。この値は設置精度によって多少変動する。タイル端部は3Rで加工し、タイル間ギャップを1.5mm、段差を0.5mmとすると、 $\theta = \tan^{-1}(0.5/7.5) = 3.8^\circ$ となり、磁力線ピッチ角度が 3.8° 以上($Q_{eff} =$ 約4以下)となるとタイル端部に当たりだすことになる(第3.18図参照)。

0.5mmという値は、設置精度によるので、仮に0.2mmとした場合、 $\theta = \tan^{-1}(0.2/7.5) = 1.5^\circ$ となり、端部への熱負荷の集中は、設置精度に大きく左右されることがわかる。言い換えれば、タイル取付けの精度のバラツキ分、タイル端部への熱負荷集中にもバラツキがあるということである。ただし、正極性運転については必ずタイルエッジ部が隠れるようにタイルの段差を調整している。

以上の熱負荷の集中及び非一様性は避けられないものであり、十分に認識した上で運転を行う必要がある。

3.2.7 タイルのテープ加工

タイルの一部には、作業の効率性(現地加工量の削減)、及び熱負荷の観点から、予めテープ加工を施している。テープ加工を施したタイルは、内外ダイバータタイル、バッフル板タイル(H,I,J,K及びD,E)である。以下にテープ加工について述べる。なお、真空容器内の具体的な段差調整については第4.2項「据付け作業」を参照のこと。

1) 一般部

a. ダイバータタイル

タイル面は、ダイバータ形状図で与えられるダイバータ板位置を通る円弧に外接(内側ダイバータ板)、内接(外側ダイバータ板)するようにタイルの厚みを調整し、かつタイル端部は熱流方向に対して熱集中を避けるように加工を行った(内外共)。第3.19図にその概念図を示す(内側ダイバータ板)。

ダイバータ板はトロイダル位置によって長さが異なることを考慮して加工寸法を設定している。端部に熱集中が起きないようプラズマ進入側のタイルを0.5mm下げている。これにより極力現地加工量を少なくして、第4.3.2項「タイルの据付け記録」に示すような精度範囲内にタイルを設置している。外側ダイ

バータタイルにおいても同様である。

b. バッフル板タイル

トロイダル方向に対して、タイルは、それぞれ円弧に外接（内側バッフル板部 H, I, J, K タイル）、内接（外側バッフル板部 D, E タイル）するように厚みを加工している。その際、端部の熱集中を避ける形状に加工した。第3.19図にその概念図を示す（内側バッフル板タイル：1つのバッフル板に4分割のタイル）。ダイバータタイルと同様に、端部に熱集中が起きないよう両端のタイルで厚さ0.5mmの差をつける。同一バッフル板上のタイルにおいては、バッフル板間の段差よりも正確に段差調整ができるので、R加工のみによって端部の熱集中を避けている。外側バッフル板においても同様である。

2) 特殊部タイルテーパー加工

プラズマ計測のために開口部を設けている箇所があり、その部位はタイルのエッジ部に熱負荷が集中する。そこで、出来るだけその熱負荷の集中を避けるために開口幅に合わせてテーパ加工を施している。

プラズマは最大 $\theta = 7^\circ$ の角度でトロイダル方向から侵入してくるものとして考える。タイルに開けた穴のトロイダル方向の幅をAとすると、 $B = A \tan \theta$ の分だけプラズマが下に侵入することになる（第3.20図参照）。よってこれを考慮したタイル加工をする必要がある。具体的には、Bの長さ分だけタイルを削り、タイル他端までテーパー加工を行った。このテーパー加工は、タイル開口部のトロイダル方向について行い、ポロイダル方向については、深さに合わせてR加工を行っている。

3.2.8 第一壁の空間的取り合い及び干渉

真空容器は300°Cペーキングを行うので構造物の熱伸びがあり、かつディスラプションの振動による変位がある。ダイバータ及びバッフル板等の構造物は、これらの変位に対応するため十分なギャップを確保している。黒鉛系タイルはこれらの構造物を熱負荷から保護するために、熱伸びによる変位及び振動による変位等によりタイル間で干渉しないようにギャップ管理をして出来るだけ金属構造物を覆うように設置されている。

1) トロイダル方向ギャップ

全てのタイルはSUS316の台座の上に設置されている。この内、タイルを台座に止め、その台座をバッフル板、ダイバータ基板およびドーム基板に止める構造になっているタイル（ダイバータタイル、ドームタイル、バッフル板先端部タイル）は、異なる基板間において、SUS316の熱膨張係数が真空容器（インコネル625）に比べ大きい値であることから、タイル間のギャップが縮む方向にあり問題となる可能性がある。そこでタイルを台座に取付ける構造のものについてそのギャップ変位量を評価した。その他のバッフル板タイルについては、タイルと台座が同

じ支点でバッフル板に固定されており、タイルの熱膨張係数はインコネル625のそれに比べて小さいのでギャップが広がる方向にある。また、同一基板間のタイルについては、タイルの熱膨張係数はSUS316（またはインコネル625）のそれに比べて小さいのでギャップが広がる方向にあるので問題とならない。

台座を止めるボルト及びタイルを止めるボルト位置の距離 L は最大55mm程度（外ダイバータ部）である（第3.21図参照）。常温 T_r から運転温度 T_o の温度差により生じる温度差及びSUS316の線膨張係数 α_{sus} とインコネル625の線膨張係数 α_{inc} の差によって生じるギャップ ΔL は

$$\Delta L = L(\alpha_{sus} - \alpha_{inc})(T_o - T_r) \quad (19)$$

である。 α_{sus} が $17.2 \times 10^{-6}/\text{°C}$ 、及び α_{inc} が $13.4 \times 10^{-6}/\text{°C}$ であることから、運転温度300°Cのときに生じる最大のギャップ ΔL は0.058mmであり、両脇のタイル位置が伸びたとしても約0.12mmのギャップの変位量である。

一方、タイルの熱膨張はインコネルと比較すると小さく $5.2 \times 10^{-6}/\text{°C}$ である。タイル取付け位置からタイル端部までの距離（台座固定ボルト、タイル固定ボルト間と同程度かそれ以上）を55mmとし、室温と300°Cでは約0.13mmの変位がある。両脇のタイルが縮んだとして考えると、約0.26mmギャップが広がる方向にある。つまり、真空容器（インコネル）と比較して台座（SUS）の熱膨張は大きいが、タイル（CFC、黒鉛）の熱膨張は小さいので、 $0.26 - 0.12 = 0.14\text{mm}$ ギャップが広がる。振動による変位を考えても $0.64 - 0.14 = 0.50\text{mm} < 1.5\text{mm}$ となり干渉はない。

ダイバータ基板単独では、0.32mmの変位であるが、振動周期がバラバラになり隣接するダイバータ基板も変位することを考えると、この倍の0.64mmを考える必要がある。ここで、異なる基板間の外ダイバータタイルのギャップ管理値は、冷却基板のガタも考慮して1.5mm～2.5mmとしている（第4.3.2項「タイルの据付け寸法」を参照のこと）。実際にはこのギャップ分の熱伸び量だけタイル間のギャップがさらに広がるのであるが、 $0.0056\text{mm} \sim 0.0094\text{mm}$ と小さいので、ここでは考慮していない。また、常温運転においても $0.64\text{mm} < 1.5\text{mm}$ と干渉なく運転が可能である。内側ダイバータタイルについても同様に考え、常温運転においても $0.42\text{mm} < 1.0\text{mm}$ と干渉はない。

2) ポロイダル方向ギャップ

同一金属構造部に取り付けてあるタイルについては変位は少なく、タイル間の干渉はないと思われるが、構造材の違うダイバータ板及びバッフル板間のギャップが問題となる。各部材が同一材料であった場合には、300°C均一の状態でのギャップ量は室温均一状態でのギャップ量より小さくなることはない。しかし、真空容器及びバッフル板（共にインコネル）と異なる材料を使用しているダイバータ板（SUS316）は、異なった熱膨張を示し、バッフル板とダイバータ間のギャップが変化する。

常温から各部材が全て300℃均一になった場合のギャップの変化量は、インコネル625の熱膨張量とSUS316の熱膨張量の差で生じる。第3.22図に示すダイバータ冷却基板の中央固定部からダイバータタイル先端までの長さを考えた場合、移動量は(19)式から以下の様になる。

a. 内バッフルと内側ダイバータ

- トーラス半径方向の距離が259mmであるのでギャップは0.28mm広がる。
- 上下方向の距離が315mmであるのでギャップは0.34mm縮む。

b. 外バッフルと外側ダイバータ

- トーラス半径方向の距離が169mmであるのでギャップは0.18mm広がる。
- 上下方向の距離が264mmであるのでギャップは0.28mm縮む。

トーラス半径方向については、ギャップが広がる方向であるので問題ないが、上下方向については、ギャップが縮む（最大0.34mm）方向にある。振動による変位（第3.3.2項、「構造強度解析」の項を参照のこと）を考えても最大 $0.335+1.05=1.385\text{mm} < 3.5\text{mm}$ である。ここで、タイル間ギャップは冷却基板のガタも考えて3.5~4.5mmとしている。この場合もトロイダル方向ギャップと同様に考えると、タイルとインコネル625の熱伸びの差から~0.1mm程度ギャップが広がる方向（つまり $1.385-0.1=1.285\text{mm}$ ）にあると思われるが、十分にギャップを取っているのでこれを考慮しなくとも問題にならない。常温運転においては、熱伸びによる変位はなく、設計値のギャップを考えれば、振動による変位においても干渉なく運転が可能である。

外側ダイバータ、ドーム間のギャップは十分に大きく、熱伸びにおいてもドーム部を中心に冷却基板が伸びるので変位は明らかにギャップが広がる方向である。

3.3 構造強度の解析

構造強度の解析は、ハロー電流による電磁力と誘導電流による電磁力について行った。ハロー電流によって生じる電磁力は従来の真空容器の設計に考慮されてきたディスラプション時の誘導電流によるもの[4]と同程度のオーダーで、しかも局所的に荷重が集中する可能性がある。

W型ダイバータは、プラズマ配位によっては部分的にプラズマに非常に近い場所ができるところから、これまでの構造に比べてハロー電流が構造体に流やすくなる。また、負磁気シア配位の放電を行うと、プラズマの垂直位置制御が失われる現象（Vertical Displacement Event； VDE）が比較的起きやすくなり、ディスラプションが発生しやすくなつて、ハロー電流が流れる確率を高めている。

そこでW型ダイバータの設計では、従来の誘導電流の解析から求められる電磁力に加え、ハロー電流による電磁力を加えた構造強度解析を実施することとした。また、その荷重に対して既設の真空容器やダイバータ冷却基板に問題が生じることのないことを確認した。

3.3.1 電磁力解析

構造強度解析の第1ステップとして電磁力解析を実施した。本ステップにおいて真空容器及び新設のW型ダイバータに生じる誘導電流を求め、次いで誘導電流とトロイダル磁場及びポロイダル磁場とのカップリングによる電磁力を計算した。しかるのち次のステップにおいて、この電磁力を別途仮定したハロー電流による電磁力を外力として与えて各部の応力を評価した。なお、本解析は、"EDDYCUFF" コードを使用して行った。

誘導電流の解析ではポロイダル磁場コイルによるパッシブ効果（注1）を考慮した。ディスラプションは、プラズマが内側に急速に消滅するがハロー電流の生じないケース（ケース1）と、プラズマが内下側に比較的ゆっくり消滅しつつハロー電流の生じるケース（ケース2）の二つの条件を設定した。

（注1）パッシブ効果：ディスラプションにより放出される磁気エネルギーは、第一壁や真空容器のみならず、コイルなど真空容器外の機器にも伝達される。JT-60ではポロイダル磁場コイルが真空容器の近傍に設置されているため、ポロイダル磁場コイル導体にトロイダル方向の起電力として伝達されるエネルギーの割合が比較的大きい。このトロイダル方向の起電力として与えられるエネルギーの分だけ、真空容器に与えられるエネルギーは小さくなる。この現象をパッシブ効果と呼ぶ。

1) 電磁力解析条件

電磁力解析条件は、3.1.4項のディスラプション条件及び第3.23図による。

2) 電磁力解析モデル

- a. ポート中心線からセクター分割線までのトロイダル方向 10° 分をモデル化し、対称条件及び周期境界条件（18回対称）により全トーラスを模擬した。第3.24図に解析モデルを示す。

- b. 真空容器の薄肉二重壁部は、抵抗の非等方性を導入することによりモデル化した。

- c. プラズマ電流は1本の線電流で近似した。

- d. 境界条件及び対称条件

- 境界条件

- ポート先端部絶縁条件

- 対称条件

- ・ ポート中心線（y = 0面）に関して対称条件

- ・ Z軸まわりに周期境界条件

- W型ダイバータ導通条件

- 第3.25図に電磁解析用モデルの電流路を示す。

- e. 主要構成部材

- 構成材料は、SUS316とインコネル625である。これらの比抵抗は常温時の値

を使用し、以下の通りである。

- インコネル625 : 1.3×10^{-6} [Ωm]
- SUS316 : 7.5×10^{-7} [Ωm]

3) 電磁力解析結果

a. 内側に移動するディスラプション（ケース1）

第3.26図に真空容器に生じるトロイダル電流の時間変化を示す。誘導電流はプラズマ電流消滅時間と等しい5msで最大になり、その値は約2MAである。ディスラプション発生後40msで誘導電流はほぼゼロになる。ディスラプション発生後5ms時点での各部の電流分布を第3.27図に示す。誘導電流のほとんどは真空容器のインボード側に流れしており、その誘導電流の分布は最大でほぼ1MA/mである。また、真空容器上の誘導電流は、大口径ポートの周辺を除き、トロイダル方向に一周するように流れている。

一方、W型ダイバータ領域の誘導電流の分布は、外側バッフル板の支持脚周辺で0.1MA/m程度が最大値で、その他の部分は更に低い値となっている。バッフル板はトロイダル角度5°分を1ユニットとして構成されており、隣のユニットとは電気絶縁されている。また、ダイバータ、ドームも同じく隣のユニットとは電気絶縁されている。このため、これらの表面に流れる誘導電流は、真空容器とは異なり、1ユニットの板の面内で渦を巻くように流れている。

支持脚においては、外側バッフル板はトロイダル方向に2列の支持脚を持つことから、誘導電流がトロイダル方向に流れるときに、真空容器から支持脚を経てバッフル板に登り、また支持脚を介して真空容器に戻る電流パスが形成されている。一方、内側バッフル板やドーム・ダイバータのように、1ユニットに一本の支持脚しかないものは外側バッフル板のような電流パスは生じない。このように、支持構造物と誘導電流の流れ方には密接な関係があり、ハロー電流の流れ方にも影響を与えることが予想される。

この誘導電流とポロイダル磁場及び誘導電流自身が作る磁場（自己磁場）とのカップリングにより、バッフル板等の板部では面内の荷重を受け、支持脚部は左右（トロイダル方向）に力を受ける。トロイダル磁場とのカップリングによっては、板部は面外のねじりの力を受け、支持脚部は前後（ポロイダル方向）に力を受ける。特に外側バッフル板支持脚においては、前述のような誘導電流により、隣り合う支持脚同士が互いに逆向きに力を受ける。これらの力は、トロイダル磁場によるもののほうがはるかに大きい。一例として、外側バッフル板1ユニットにかかる電磁力とトーラス全体にかかる電磁力の時間変化について第3.28図に示す。ここで、polo+self_Fxは誘導電流とポロイダル磁場及び自己磁場のカップリングにより発生する電磁力を表し、toro_Fxは誘導電流とトロイダル磁場とのカップリングにより発生する電磁力を表す。ここで、Frは大半径方向の電磁力で、Fzは上下方向の電磁力である。±はそれぞれの方向のプラス成分とマイナス成分を表す。すなわち、Fr+は大半径方向の外向きの力（フープ

力) を、Fr-は向心力を表す。Fz+は上向きの力である。

b. 斜め下側へ移動するディスラプション (ケース2)

第3.29図に真空容器に生じるトロイダル一周電流の時間変化を示す。誘導電流の傾向はケース1の場合と同様であり、プラズマ電流消滅時の10msで最大値1.4MAに達し、40ms後にはほぼゼロになる。また、誘導電流の分布状態もほぼ同様である。外側バッフル板1ユニットにかかる電磁力とトーラス全体にかかる電磁力の時間変化について第3.30図に示す。

c. ディスラプションケース1及び2の比較

ケース1及び2において各部にかかる電磁力の積算和を第3.7表にまとめる。なお、 360° (トーラス全体) にかかる電磁力の積算和は、ケース1の場合のほうが大きく、向心力が約450ton、上下力が約150tonとなった。また面圧の最大値は、真空容器ではケース1のときの 0.11kgf/mm^2 、新設部はケース1のときの外側バッフル板支持脚で $5.5 \times 10^{-2}\text{kgf/mm}^2$ であった。

積算和、面圧ともに新設ダイバータのインボード側ではケース2の方が大きな値を示すが、アウトボード側及び、モデル全体ではケース1の方が大きくなる傾向を示す。前者は、ケース2ではちょうど内側バッフル板に向かう方向にプラズマが移動しつつ消滅する効果によるもので、後者はケース1のほうが dI_p/dt が大きいために、全体としては発生する誘導電流が多くなり、外側バッフル板や真空容器など広い領域の積算和ではその傾向が顕著に現れるためと考えられる。

3.3.2 構造強度解析

1) 構造強度解析条件

前項で求めた電磁力を荷重の入力条件として、W型ダイバータ及び真空容器の動的応答をMSC/NASTRANを用いて解析した。また、ケース2についてはハロー電流による電磁力も加えて解析を行った。

a. 解析モデル

第3.31図に示すような 20° セクター モデルを用いて解析を実施した。モデル化に際しては、構造部材をシェル(板)でモデル化した。但し、真空容器の二重壁部分については、JT-60大電流化改造時の真空容器強度解析用の等価剛性データを用いて、二重壁と等価な剛性を持つ一枚板としてモデル化した。

b. 境界条件

○ セクター間境界条件

トロイダル周方向の連続性を考え、第3.32図に示すように両端面の変形が等しくなる条件とした。

○ 真空容器支持部の境界条件

- ・ 外側水平支持部：上下方向及び周方向固定
- ・ 内側水平支持部：上下方向のみ固定

c. ハロー電流条件

○ 発生条件

前項のケース2（斜め下移動ディスラプション）において発生するとした。

○ ハロー電流経路

第3.33図に示すように、内側バッフル板と外側バッフル板上を、インボード側からアウトボード側に向かって、30cmの経路長で流れるものとする。

○ ハロー電流の大きさ

ハロー電流の大きさは(9)式による。ただし、 N_{tile} はタイルの数であるので、これに代わってユニット数を用いた。

○ ハロー電流による電磁力

ハロー電流による電磁力は(3)式による。

○ ハロー電流による電磁力

ハロー電流による電磁力はトロイダル磁場とのカップリングのみを考える。また、トロイダル磁場は4 Tで一様とした。

2) 構造強度解析結果

a. 電磁力

ハロー電流による電磁力はハロー電流の大きさに比例する。ハロー電流の時間変化の模式図を第3.34図に示す。プラズマ電流消滅時間の40%の時から直線的に立ち上がり、プラズマ電流消滅時間の60%の時にピークになる。以降は直線的に減少してプラズマ電流消滅時に0になる。

算出されるバッフル板一枚あたりのハロー電流の電磁力のピーク値は内側バッフル板で3.3 ton、外側バッフル板で1.3 tonである。

b. 変位

各ケースにおける各部位での変位を第3.8表に示す。なお、斜め下ポートの真上にある外側バッフル板（中央の2枚）については、ポート開口部のために支持脚がないとしたため、通常のバッフル板に比べて支持脚の本数が少なくなっている。この支持脚がない部分での変形量が大きくなっている。また、内側バッフル板は中央の一本の支持脚で支持する構造のため、左右に倒れるような変形をしている。これらはいずれのケースでも同様の傾向である。

この解析結果に基づき、ディスラプション時の振動によって隣接するタイルやシール構造が干渉しないように、隣接機器間のギャップを決定した。タイル間ギャップについては3.2.7項「タイルテープ加工」にて詳述している。

c. 応力

各ケースにおける各部の応力を評価した結果、いずれの部位においても許容応力を越えている箇所はない。なお、応力の判定は通産省告示501号第一種容器及び第一種支持構造物の規定に準じた。以下に各部の概要を示す。

○ バッフル板

第3.9表に内側及び外側バッフル板の応力評価結果を示す。

バッフル板の端部支持部の応力は、FEM解析によるトレスカ応力の値である。

外側バッフル板の端部支持部には許容応力（33.5kgf/mm²）ぎりぎりの大きな

応力 (30.7kgf/mm^2) が生じている。これは、第3.35図に示すように評価モデルの形状において、支持脚がバッフル板の上下方向の変形により端部支持脚の上面に引っ張られ（または押され）るためで、主としてボルトで固定されている位置から端部支持脚までの固定端間での距離（垂直距離）によりモーメントが生じ、比較的大きな応力が発生したと考えられる。ただし、実際の形状では、第3.35図に示すように2箇所を真空容器に溶接するために、モデル化されている形状に比べ変形が少なくなり、モーメントが生じにくくなり、発生する応力は低減される。

板部と支持部もまた、FEM解析によって算出されたトレスカ応力の値をそのまま示している。内側バッフル板の支持部及び端部支持部、外側バッフル板の板部で 10kgf/mm^2 を越える応力が発生しているが、インコネル製であるため許容応力値に対して十分な余裕がある。

バッフル板端部支持部のボルトは、FEM解析時にモデル化してあるので直接部材力が得られるため、部材力に対する応力を評価している。内側バッフル板は部材力の最大軸力が 97kgf 、最大せん断力が 443kgf に対し、M8のボルト1本で荷重を受ける構造である。また、外側バッフル板は最大軸力が 233kgf 、最大せん断力が 759kgf に対し、M12のボルト3本で荷重を受ける構造である。応力が比較的高いのは内側バッフル板支持脚を真空容器に取付けるボルトで、引張応力が 12.5kgf/mm^2 生じているが、許容応力 17.5kgf/mm^2 を下回っているので特に問題ない。また、外側バッフル板の取付ボルトも 17.4kgf/mm^2 の応力が発生しているが、インコネル625製であることから許容応力が 38.2kgf/mm^2 と高いため、発生応力は許容応力値を十分下回っており、特に問題はない。

○ ダイバータ板

第3.10表に内側及び外側ダイバータ板の応力評価結果を示す。

FEMにより得られるダイバータ各部の加速度は、ケース1に比べてケース2の方が大きいので、発生する応力はケース2の方が大きくなっているが特に問題とならない。

ダイバータスライド支持部のボルトについては、FEMにより求めた加速度に、重量を乗じて荷重を評価し、それによる応力を求めた。応力評価の結果からダイバータ取付ボルトはSUH660を使用している。

○ ドーム

第3.11表にドームの応力評価結果を示す。ほとんどの場所で応力は非常に小さいレベルに収まっている。唯一、底部の溶接部における曲げ応力のみ 28.5kgf/mm^2 と高い値を示す。この場所の応力が頂部や中央部に比べて高い理由としては、ドームの底部は冷却基板の耳金との干渉を回避するために切り欠きが設けられており、真空容器との設置面積が少ないこと、ポロイダル方向の転倒モーメントを評価するときのモーメント長が長いこと、ドームの全重量に相当する荷重が底部にかかることが挙げられる。しかしこの場合でも溶接脚長を確保することで（この場所で4mm）、応力を許容値以下に收め

ることができている。

○ ダイバータ冷却基板

第3.12表にダイバータ冷却基板の応力評価結果を示す。

ダイバータ冷却基板（既設）の板部では最大 12.8kgf/mm^2 の応力が発生しており、許容応力（ 18.1kgf/mm^2 ）に比べて余裕は少ないが、問題になるレベルではないと考えられる。

一方、ダイバータとダイバータ冷却基板の耳金部等、ダイバータ冷却基板のスライド支持部については、FEMにより求めた加速度をもとに、対象とする部位にかかる重量を乗じて荷重を評価し、それによる応力を求めた。対象部位の加速度はケース1に比べてケース2の方が大きいので、発生する応力はケース2の方が大きくなる。ダイバータ冷却基板の誘導電流はバッフル板等に比べて比較的小さく、ハロー電流も直接流れないとしているにもかかわらず、スライド支持金物には許容応力（ 6.9kgf/mm^2 ）に比べて比較的高い応力（ 4.5kgf/mm^2 ）がでている。この原因としては、これらの電磁力によって真空容器が振動し、中央固定ボルトを支点としたたわみが生じるためと考えられる。

さらに、ダイバータ冷却基板の両端には重量物（内側ダイバータ約8.3kg、外側ダイバータ約13.4kg）が取り付けられているために、振動によってダイバータ冷却基板にかかるモーメントが大きくなることも一因であると考えられる。

上記の条件ではダイバータ冷却基板には直接ハロー電流は流れないとして評価しているが、万が一ハロー電流が流れた場合についても強度評価を実施した。ハロー電流の経路と大きさは第3.36図のような条件を想定した。ハロー電流の条件は第3.1.4項のデイスラップション条件で述べられているハロー電流の条件と同じである。従って全ハロー電流 I_{halo} は、

$$I_{halo} = \frac{I_p \times 0.26 \times R_{ipf}}{n_{DCBP}} \quad (20)$$

第3.36図において、ハロー電流 I_{halo} は、ダイバータ冷却基板と真空容器に分流する。従って、ダイバータ冷却基板に流れる電流、I1及びI2は、真空容器の該当部分の抵抗比から $0.833 \times I_{halo}$ となる。例えば、 $I_p = 3\text{MA}$, $R_{ipf} = 2.5$ の時、 $I_{halo} = 15.6\text{kA}$, $I_1 = I_2 = 13.0\text{kA}$ となる。この時、トロイダル磁場とのカップリングにより、各部にかかる電磁力の荷重の方向は、第3.37図のようになる。この領域でのトロイダル磁場を4Tとし、各部の電流経路距離について内側ダイバータ：35.2mm、冷却基板：555.6mm及び外側ダイバータ：116.6mmとした場合、各部の電磁力荷重は、 $F_1 = 224\text{kgf}$, $F_2 = 2948\text{kgf}$, $F_3 = 742\text{kgf}$ （等分布荷重）となる。このハロー電流とトロイダル磁場とのカップリングによる電磁力を静荷重として与えた場合の応力に、動解析FEM及び、それから求まる加速度、軸力により算出した各部応力を加えたものを最大応力として評価した。また、この時の動解析等によって得られた応力は、プラズマ電流に比例すると仮定した。

応力が降伏応力（1.5Sm）を越えた場合は、通産省告示501号の手順に従つて疲労評価を行い、許容繰返し回数を求めた。評価の対象としたのはダイバータ冷却基板の他、これに付随するスライド支持部及びダイバータ取り付けボルトとした。

プラズマ電流とトロイダル方向の集中率をパラメータとし、各ダイバータ冷却基板のスライド支持ピン（インコネル625）、スライド支持金物（SUS316）、耳金部（SUS316）、固定ボルト（SUH660）及びダイバータ冷却基板（SUS316）の各部位の許容繰返し回数を評価した。第3.38図にダイバータ冷却基板スライド支持ピンの許容繰返し数を示す。当然ながら、プラズマ電流と集中率の値が大きくなるにつれて許容繰返し数が減少する。集中率が2.5、プラズマ電流が3MAの時は、いずれの箇所においても数万回程度の許容繰返し数が確保されるが、集中率が4になるとダイバータ冷却基板スライド支持ピン、外側ダイバータ取付ボルトで許容繰返し数が2000～4000回に低下する。

○ バッフルポート

バッフルポートに発生する応力をまとめたものを第3.13表に示す。いずれのバッフルポートに於いても許容応力を越えているものはない。小バッフルポート（U1, U2, P9/U2, P15斜め下, P17/斜め下）に生じる応力は、FEM解析により得られるバッフルポート取付部近傍の加速度に、バッフルポートなどの重量をかけて得られる加速度による応力（表中(1)）と、ポート自体の誘導電流がトロイダル磁場と相互作用して生じる電磁力荷重による応力（表中(2)）と、ハロー電流がバッフルポートに流れたときトロイダル磁場と相互作用して生じる電磁力荷重による応力（表中(3)）のそれぞれについて求め、それらの合計の応力にて評価した。なお、溶接部の継手効率は0.6として評価している。一般形状をしたU1、U2ポートで比較的大きな応力が発生している（最大で 28.6kgf/mm^2 ）が、これはディスラプション時（ハロー電流を含む）の加速度によるものの寄与が大きい。また、大バッフルポート（P1, P2, P7, P13, P14斜め下）については、バッフルポートを含む解析モデルを作成しFEM解析によって応力を評価した。解析対象部位は、大バッフルポートの代表として、P-14の主排気用ポートとした。解析条件は、3.3.1項2)に示した電磁力解析モデル及び第3.3.2項1)に示した構造強度解析条件と同じであるが、バッフルポート、ハロー電流の経路及び集中率が異なる。解析モデルを第3.39図に、ハロー電流経路を第3.40図に示す。集中率は、アウトボード側でもトロイダル方向の非対称性はあるものと考え、バッフルポート無しの場合の条件を見直して、全経路について2.5とした。解析結果によると、大バッフルポートに生じる最大トレスカ応力は 27.5kgf/mm^2 となり、許容応力（ 33.5kgf/mm^2 ）を下回る。最大応力発生時のバッフルポートの応力分布を第3.41図に示す。最大応力はバッフルポートとバッフル板を接続するフランジ部で発生していることが分かる。

○ 真空容器

内外バッフル板とドームは真空容器に溶接されるため、これらに加わる荷重

は、真空容器に伝達される。この荷重は真空容器インナースキンから角管を介して、最終的には角管とアウタースキンを接続するプラグ溶接部にかかるものと考えられる。そこで、FEM解析の結果から追設部と真空容器の接続部にかかる軸力、せん断力、モーメントを求め、これらが一箇所のプラグ溶接部に集中するものと仮定すると、バッフル板支持脚から伝わる荷重により、プラグ溶接部は約3000回の疲労寿命を有するものと評価された。

実際にはバッフル板から伝わる荷重は、一箇所のプラグ溶接部に集中するわけではなく、角管を介して複数のプラグ溶接で受けることになると考えられることから、実用上特に問題になることはないと思われる。

3.3.3 熱応力の解析

W型ダイバータは、熱応力を軽減するために、真空容器に溶接されるバッフル板・ドームについては、真空容器と同材料であるインコネル625を使用している。またダイバータについては、既設冷却基板にボルト締結されるため、同材料のSUS316を使用している。更にこれらは分割構造にして、300°C時にも他機器と干渉することのないようなギャップを確保して据え付けられている。これらの対策により、各部が均一な温度を保つ場合は、いずれの箇所においても熱応力が発生することはないよう配慮されている。ただし、ベーキングの昇温・降温時には各部が均一な温度とならず、場所により温度差が生じる。温度差が生じた場合は熱応力が発生することになる。JT-60大電流化改造時の真空容器の許容温度差は50°Cとして評価されていて、ここから、真空容器とバッフル板の間で温度差が50°Cになった場合の熱応力を評価した。

一般的に熱伸び量は、以下の式で求められる。

$$\varepsilon = (T_1 - T_0) \alpha l \quad (21)$$

ここで、 ε ：熱伸び量 (mm)

T_1 ：ベーキング時温度 (°C)

T_0 ：常温時温度 (°C)

α ：熱膨張係数 (インコネル625で $1.3 \times 10^{-5}/\text{°C}$)

l ：常温時の長さ (mm)

ベーキング前は全ての機器が20°C均一とし、ベーキング中に真空容器が300°C、バッフル板温度が250°Cになったと仮定する。このとき、真空容器とバッフル板はともにインコネル625製であるから、温度差分だけ熱伸び量が異なる。外側バッフル板アウトボード側端部から最もインボード寄りの支持脚までの長さは、常温 (20°C) で1153mmであることから、この領域の熱伸び量は、バッフル板が3.45mm、真空容器が4.20mmである。従って、真空容器に対する外側バッフル板の相対変位量 $\Delta\varepsilon$ は、

0.75mm (=4.20 - 3.45) である。

1) バッフル板支持脚の応力

外側バッフル板の相対変位量が最もインボード寄りの支持脚に強制変位として働くと考える。この支持脚に生じる曲げ応力（片持ちばり）をはりとして考えるとき以下の式で求められる。

$$\sigma_{bb} = \frac{3\Delta\varepsilon E_{inc}d_b}{2l_b^2} \quad (22)$$

ここで、 σ_{bb} : 応力 (kgf/mm²)

E_{inc} : ヤング率 (インコネル625で21000kgf/mm²)

d_b : はりの直径 (mm)

l_b : はりの長さ (mm)

支持脚の $d_b=40\text{mm}$ 、 $l_b=250\text{mm}$ であることから $\sigma_{bb}=13.2\text{kgf/mm}^2$ となる。インコネル625の許容応力は、 $1.5Sm=33.5\text{kgf/mm}^2$ があるので、支持脚に生じる曲げ応力は、許容応力を下回っている。

2) バッフル板の取付けボルト

バッフル板の取り付けボルトには、支持脚を $\Delta\varepsilon$ だけたわませる力がせん断力 W_s として働くものと考えると以下の式で求められる。

$$W_s = \frac{\Delta\varepsilon E_{inc} I_s}{l_s^3} \quad (23)$$

ここで丸棒の直径を d_{bs} とすると丸棒の2次モーメント I_s は $\pi d_{bs}^4 / 64$ であることからせん断力 W_s は以下となる。

$$W_s = \frac{\Delta\varepsilon E_{inc} \pi d_{bs}^4}{64 l_s^3} \quad (24)$$

丸棒の直径 d_{bs} を40mm、支持脚の長さ l_s を250mm とすると丸棒に働くせん断力 W_s は127kgfとなる。このときの丸棒のせん断力 σ_{bb} は、断面積を A_{bb} とすると

$$\sigma_{bb} = \frac{W_s}{A_{bb}} \quad (25)$$

となり、最も径の小さい丸棒のボルトの部分 (M20、谷径: 17.3mm) では σ_{bb} が 0.54kgf/mm^2 となる。第一種支持構造物のせん断に対する許容応力は、インコネル625の場合、 13.4kgf/mm^2 なので、発生応力はせん断応力を十分下回る。

3) その他の部位

真空容器との温度差が50°Cの場合における、その他の部位も含めた評価結果を第3.14表に示す。熱応力は内側バッフル板の取り付けボルトで最大となり、許容応力13.4kgf/mm²に対して、発生応力は11.0kgf/mm²となり、真空容器とバッフル板の温度差が50°Cであれば、許容応力に収まることがわかった。逆に、この部位の熱応力が許容応力と等しくなる条件は、温度差が63°Cの場合である。

以上の検討結果を踏まえて、当面はバッフル板、ダイバータ、ドームに設置された熱電対を使用して、ベーキング時には真空容器に取り付けられた熱電対との温度差を監視し、温度差が50°C以上にならないように昇温／降温の速度を制御することにした。

3.4 シール構造の検討

各ユニットはディスラプション時には独立した挙動を示すため、シール部はこれらユニット間の変位を吸収しつつそれ自体の構造健全性を保てる構造でなくてはならない。そこで、当初隣り合うユニット間をΩ型の金属薄板で溶接接続した構造（Ωシール構造）を考え構造成立性を検討した。次に、スライド式絶縁型シールを検討した。

3.4.1 Ωシールの検討

隣接するバッフル板及びダイバータ板のシール部は当初、Ωシールで行うことを見た。Ωシールの構造の一例を第3.42図に示す。Ωシールは熱応力の発生を避けるために、バッフル板、ドーム部ではインコネル625、ダイバータ部ではSUS316で製作することを検討した。このとき、バッフル板やダイバータなどの隣接するユニットは、互いに電気的に接続される。そこで、このような電気接続条件を模擬した電磁構造解析を実施した。このときの各シール間の相対変位量を第3.15表に示す。

外側バッフル板間でZ方向（バッフル板に垂直に上下方向）に最大で+6.12mm, -3.66mmの変位が、X方向（シールの長手方向：せん断変形）に+1.06mm, -0.83mmの変位が生じていることが分かる。この変位量を強制変位としてΩシール部をモデル化したFEM解析を実施した結果を第3.16表に示す。厚さ0.1mm、長さ300mm、高さ30mmのインコネル製シールでは284.8kgf/mm²のせん断応力が発生することが分かった。これは許容値256kgf/mm²を上回る。この応力はX方向変位によるものが支配的である。また、シールの板厚が薄いほど発生応力は小さいことが分かった。

シール自体は薄板であるため、押さえ板などによりバッフル板に押し付けて固定する必要があり、このためにせん断変形に付随して生じるZ方向の局所的な変形を完全に拘束してしまう。この結果、高い応力が発生しているものと解釈される。押さえ板の構造を工夫することによりある程度は応力の低減を図ることはできるものと考えられるが、そのことによる構造の複雑化、ベーキング時の熱膨張による不測の変形などを総合的に考慮した結果、後述のスライド式絶縁型シールの方が成立性が高いと判断した。

3.4.2 スライド式絶縁型シールの検討

1) スライド式絶縁型シールの構造

バッフル板に採用されたスライド式絶縁型シール構造を第3.43図（詳細寸法は第2.10図参照）に示す。シールは差し込み側と受け側に分かれている。差し込み側は絶縁のために板厚1mmのSUS316にセラミックコーティング（膜厚約0.2mm）を施したものを使用しており、受け側の板厚0.2mmのインコネルの薄板により、差し込み側シールの変位を吸収しつつ、ガスシールの機能を維持することができる構造となっている。この構造は隣り合うバッフル板等が独立に変位しても、シール部がスライド可能であるために、過大な応力が発生するのを防ぐことができる。

隣接する機器間でのアーキングの発生を防止するために、差し込み側シールにはセラミックコーティングが施されている。このコーティングにより、隣接する機器間は電気絶縁されるので、トロイダル方向の一周期電流の発生を防止している。従って、ディスラプション時にバッフル板、ダイバータ等に生じる電磁力を低減することになる。

ディスラプション時の各部位の変位量は第3.8表を参照されたい。シールは、この変位によって差し込み部が外れたり、0.2mm厚さの薄板以外の部分が接触することのないように寸法や差し込み部と受け部の間隔を設定した。

2) 絶縁シール

絶縁シールにおいて重要なことは、コーティングされたセラミック被膜の信頼性である。そこでセラミック被膜の機械的強度、電気的特性及び温度特性について調査し、実用上問題がないことを確認した。なお、溶射型セラミックスの諸特性については文献[6]を参照されたい。

4. 据付け

4.1 事前調査

真空容器内の予備調査は、平成7年の定期点検の時（11月）に実施した。

4.1.1 真空容器内形状の調査

真空容器内に設置されている機器の内、大電流化改造時に最も精度よく据付けられた機器は、ダイバータ冷却基板（窒素ガスまたは冷却水切替え）であった。また、W型ダイバータの当初の検討においては、水冷によるダイバータ板の強制冷却を検討していた。これらのことから、W型ダイバータのダイバータ板は、既設のダイバー

タ冷却基板上に据付けることで、設計が進められた。

一方、既設の真空容器は平成3年に完成し、運転開始後の平成4年度の定期点検の時に最大19mmの変形が確認された（ただし、その後の定期点検では変形が確認されていない）。また、ダイバータ冷却基板は、真空容器内に6ユニット（#1～#6）で据付けられているが、#1と#2間（P-2とP-3間）が半径方向に若干ずれていることが事前に分かっていた。これらを確認し、据付け品の調整代を設計に反映し、据付け作業の軽減を図る必要があった。

1) ダイバータ冷却基板の高さのばらつきの調査

4つのダイバータ冷却基板（全数：125）の高さ方向のばらつきを調査した。その結果、高さの差は3mm以内であり、据付け記録から予想される値であった。

2) ダイバータ冷却基板の半径方向のずれの調査

ダイバータ冷却基板間に#1と#2、#2と#3及び#3と#4間に約3mmの半径方向のずれが確認された。

4.1.2 取付け品の形状の調査

真空容器内の取付け品は、搬入口の養生等の観点からP-1の作業用ポートから搬入しなければならない。また、真空容器内の取付け品は、搬入用ポートの大きさでその外形形状が制限される。P-1の作業用ポートの大きさは、内径約530mmである。取付け品で最も大きいものは、外側バッフル板であることから、外側バッフル板のモックアップを用いて、P-1の作業用ポートから搬入できることを確認した。

4.1.3 取付け手順の確認

W型ダイバータを構成するダイバータ板、ドーム及びバッフル板のモックアップを真空容器内に搬入し、既設のダイバータタイル及び第一壁を取り外して据付け手順の確認を行った。また、高さ方向及びずれの調整は以下の方法で行うことを確認した。

1) ダイバータ取付け時の高さ方向及び傾きの調整はシームの厚さ及び形状（傾き）で調整する。

2) ダイバータ取付け時の半径方向のずれは取付け部のボルト穴を半径方向に大き目に製作し、調整する。

4.2 据付け作業

4.2.1 据付け工程

W型ダイバータの据付けの真空容器内作業は、平成9年2月10日に開始し、平成9年

5月15日の閉止板取付けをもって終了した。最終的な真空容器の真空リーク試験は6月3日に終了し、W型ダイバータに関する一連の据付け作業が終了した。第4.1図にW型ダイバータに関する現地工事の実績工程を示す。また、以下に真空容器内作業の概要を示す。

1) 真空容器内作業準備、後仕舞い

真空容器内作業準備は、P-1の水平ポートを作業用ポートとする真空容器内作業用管理出入口設備（以後「管理出入口」という）の養生及びP-1水平ポートの開放作業を行った。この作業と並行してP-11ポートの斜め下ポートの養生、閉止板の開放及び非常口の設定作業を行った。これらの作業用ポート及び非常口の設定終了後、真空容器内の換気を開始した。真空容器内の換気速度は3,000m³/hである。真空容器内の換気を開始した後、真空容器内養生、照明の取付け作業を行った。

真空容器内の据付け作業が終了した後、真空容器内の養生撤去、非常口の後仕舞い及びP-1の作業用ポートの閉止板の取付け作業を実施した。

2) ステージ取付け、盛替、解体

ステージ（真空容器内作業用ステージ）は、真空容器上部の作業を実施するために必要である。真空容器内作業の初期にステージを取付け、真空容器内作業の終盤に実施した計測装置の光軸等の調整に合わせてステージの盛替を実施し、解体した。なお、ステージの上には厚さ8mmの鉛遮蔽板を敷き詰め、放射線の上下成分を遮蔽することにより、作業者の放射線被ばく線量当量を低減している。

3) 第一壁及び固定座外し、清掃

W型ダイバータの据付けと干渉する第一壁（既設ダイバータタイルユニットを含む）及び固定座を撤去した。撤去した第一壁等は第2.2表に示す通り5,519枚（2,714ユニット）で撤去した固定座は約300であった。なお、固定座の撤去には、空圧式の切削工具を使用し、最終的には撤去面をグラインダで仕上げた。第一壁等の撤去及び干渉する固定座の撤去終了後、真空容器内を拭取り等で清掃した。

4) 真空容器内形状測定、芯出し

真空容器の形状は前述したように大電流化の改造後、2年目（平成4年度）の定期検査で確認されている。ただし、その後の定期検査時の測定では変形の進展が確認されていなかった。真空容器の形状を確認するとともに、据付けのための芯出し及びマーキングを行った。真空容器の形状測定は、トランシット3台を真空容器内に配置し、3次元的に行った。

5) ダイバータ取付け座取付け

W型ダイバータで最も精度の要求する構造物は、ダイバータ板である。従って、最初に真空容器内に取付けたマーキングに合わせてダイバータ取付け座を設定し

た。

6) バッフル支持脚座取付け

ダイバータ取付け座の設置後、ダイバータ取付け座に合わせて外側、内側のバッフル支持脚を取付けた。

7) ドーム固定座取付け

ダイバータ取付け座の設置後、ダイバータ取付け座に合わせてドーム支持脚を取付けた。

8) バッフルポート、シール取付け

バッフルポート及びシールを取付けた。

9) タイル取付け、調整

タイルを取付け、隣接するタイルのギャップ及び段差を調整した。最終的には、タイル端部を加工して調整したが、想定した以上の作業時間を要した。

10) 磁気プローブ一部撤去

干渉する第一壁の撤去とともに、干渉する磁気プローブも一部撤去した。撤去した磁気プローブは再取付けするものもあった。

11) 磁気プローブ再取付け、新規取付け

磁気プローブ等は検出端から引出しポートまで延線の必要があり、バッフル板等の設置後は作業ができなくなることから、これらの据付け作業と並行して実施した。

12) イオングージ、ボロメータ取付け

イオングージ及びボロメータは、W型ダイバータの新設に伴う新たな計測器である。また、ダイバータ近傍に設置することから、ダイバータタイル及びドームタイルに一部開口部を設けて設置された。これらの作業も、ダイバータ板及びバッフル板等の設置の進捗状況に合わせて取付けられた。

13) 真空排気、ベーキング

真空容器内作業終了に伴って、真空容器の排気を開始した。ただし、本体真空排気設備も一部更新の作業があったので、単体試験終了後に真空容器の排気が開始された。常温でのリークテストが終了した後、真空容器及びポートのベーキングが開始され、リークテストのために再度常温に戻された。

14) リークテスト

リークテストによって、ベーキング前に数カ所、ベーキング後に数カ所のフランジにリークが検出された。リークが検出されたフランジの修復は真空容器の大気が必要なものもあった。最終的に、リーク箇所は全て修復し、W型ダイバータの据付け作業が終了した。

4.2.2 据付け基準

理想的な据付けを行うには、JT-60本体の基準に沿って据付けることである。しかしながら、JT-60の基準は、真空容器の幾何学的形状から求められる基準、トロイダル磁場から求められる基準、ポロイダル磁場から求められる基準、本体の組立て中心から求められる基準等がある。これらの基準は、全て一致していることが理想であるが、各々据付けにおける許容値を持っており、実体は必ずしも一致していない。また、通電して得られるトロイダル磁場及びポロイダル磁場の基準を求めるることは、極めて困難である。しかしながら、W型ダイバータの構成部品を据付けるには、据付けの基準を定義する必要がある。

1) 各部中心の調査

据付けの基準を決定するために、可能な範囲で各部の中心を調査した。調査結果を第4.2図に示す。

a. 中心支柱上部中心

JT-60本体は、下架台上に卦書かれた基準を基に組立てられている。各装置が据付けられている状態での下架台の基準を求めることは容易ではない。本体上架台には、中心に据付けられた中心支柱の上部が露出しており、この部分にM48のボルトが取付けられている。これを、仮の測定上の中心とした。また、仮の測定上の中心とP-4U2上ポート中心を結ぶ線を仮のX軸とし、仮の測定上の中心でX軸と直交する線を仮のY軸とした。

b. トロイダル磁場コイル押さえ板中心

18個のトロイダル磁場コイルは、上架台で押さえ板で結束されている。この中心と中心支柱上部中心との相対位置を調査した。トロイダル磁場コイル押さえ板の中心は、中心支柱上部中心からP-11方向に2.1mm離れていた。

c. ポート卦書き線から求められる中心

真空容器内の各ポートの中心には、真空容器製作時に真空容器中心から3320mmの位置が卦書かれている。前述したように、真空容器が若干変形しているので、卦書かれた3320mmから求められる交点は一点に収束しない。3320mmの卦書きから求められる中心の平均は、中心支柱上部中心からP-9の方向に1.4mm離れていた。

これらの測定から、相互関係は把握できたが、調査した3点は必ずしもトカマク本体の中心を保証しているものではないことから、据付けを考慮し3320mmの

ポート卦書きから求められる中心を仮の据付け中心とした。

2) ダイバータ冷却基板の調査

ダイバータ冷却基板は、125ユニット取付けられており、事前調査で3mm程度の高低差と3mm程度のずれが確認されている。既設のダイバータタイルユニットを全て撤去した後に125ユニット全数の実測を行った。その結果、仮の据付け中心からの相対差が最大6mmであった。幸いにもこのずれは、真空容器内全域に分散しているのではなく、P-2～P-7の範囲では外側に集中しており、ほぼ反対側のP-13～P-18側では内側に集中していた。調査結果を第4.3図に示す。

3) 据付け基準の決定

据付けの基準を決定するために、真空容器の外側の調査及び真空容器内の卦書きの調査を行い仮の据付け基準を決定した。また、事前調査により、ダイバータ取付け座の調整代を3mmとして関連部品の製作を終了していた。しかし、ダイバータ冷却基板の調査の結果、ダイバータ取付け座の調整代を超える相互間のずれが確認された。仮の据付け中心を据付け基準とした場合、関連部品の調整代に関する部分の手直しが必要となり、真空容器内作業が開始されている時点での工程に重大な影響が生じる。

現状の調整代において据付ける場合は、据付けの基準をP-6側に3mmずらし、若干の据付け調整を加えることで据付けが可能である判断した。そこで、仮にトーラス本体の理想形状から据付けの基準を3mmずれたとして最も熱負荷の厳しいダイバータ板におけるタイルの影響を評価した（3.2.6項、ダイバータ板の芯ずれの影響を参照）。その結果、最大約10%の熱負荷の違いであり、ダイバータタイルにとって重大な問題が生じないと判断された。

以上のことから、W型ダイバータの据付けの基準は仮の据付け基準（R3320mmから求められる基準）よりP-6側に3mmずらした位置を「据付け基準」とすることに決定した（第4.3図参照）。

4.2.3 据付け方法

1) 外側、内側ダイバータ基板取付け座の据付け

外側及び内側ダイバータ基板取付け座は専用のテンプレート、Rゲージ、水準器、トランシット及び下振りを使用して据付けた。外側及び内側ダイバータ基板は各々トロイダル方向に125ユニットある。

- ステージ下部に置いたRゲージを据付け基準に基づいてマーキングされた位置に合わせる。
- 専用テンプレートを設定する（第4.4図参照）。
 - Rゲージから下振りを下しテンプレートの卦書き線に合わせる。
 - 真空容器水平基準線からテンプレートの距離を合わせる。
 - 水準器でテンプレートの水平を確認する。

- c. ダイバータ冷却基板にダイバータ基板取付け座を取付ける（第4.4図参照）。
- 専用テンプレートに合わせて外側及び内側ダイバータ基板取付け座を取付ける。
 - 専用テンプレートと外側及び内側ダイバータ基板取付け座のギャップは各々2箇所（合計4箇所）において0.5mm以下とする。
 - 必要に応じてシームを挿入する。

2) 外側バッフル板支持脚の据付け

外側バッフル板支持脚は、外側専用のテンプレート、設定用ゲージ及び支持脚歪防止用治具等を使用して据付けた。外側バッフル板は、5°間隔でトロイダル方向に72ユニットあり、バッフルポートを取付けないユニットは、8本の支持脚及び外側端部のシールを兼ねたバッフル板台座により固定される。

- a. 専用テンプレートに支持脚を事前に仮付する。
- b. 専用テンプレートの設定
 - 外側ダイバータ基板に設定用ゲージを合わせる。
 - 真空容器内のマーキングにテンプレートの中心を合わせる。
- c. バッフル板台座、支持脚取付け座及び支持脚の溶接

外側バッフル板を固定する支持脚は、インコネル625で $\phi 40\text{mm}$ 、長さ250mm（8本の内最も長いもの）である。溶接による変形（傾き）は、専用テンプレートで仮設定した位置を逸脱する恐れがある。

 - バッフル板台座を仮付け溶接する。
 - 支持脚取付け座を仮付け溶接する。
 - 支持脚を支持脚取付け座に仮付け溶接する。
 - 支持脚歪防止治具を設定する。
 - バッフル板台座を溶接する。
 - 支持脚取付け座及び支持脚を溶接する。

3) 内側バッフル板支持脚の据付け

内側バッフル板支持脚は、内側専用のテンプレート及び設定用ゲージ等を使用して据付けた。内側バッフル板も5°間隔でトロイダル方向に72ユニットあり、バッフル支持脚座及び内側端部のシールを兼ねたバッフル板台座により固定される。

- a. 専用テンプレートに支持脚座を事前に仮付する。
- b. 専用テンプレートの設定
 - 内側ダイバータ基板に設定用ゲージを合わせる。
 - 真空容器内のマーキングに専用テンプレート位置を合わせる。
- c. 支持脚座を溶接
 - 支持脚座を仮付け溶接する。
 - 専用テンプレートを取り外し、溶接する。
- d. 支持脚の取付け

- 内側ダイバータ基板に設定用ゲージ再取付けする。
- 支持脚をボルトで固定する。

4) ドーム固定座の据付け

ドーム固定座は、ダイバータ冷却基板間の真空容器に溶接で取付けた。ドームはトロイダル方向に125ユニット取付ける。

- a. 外側、内側ダイバータ板にドーム固定座取付けゲージ（ダイバータ専用テンプレートを改造したもの）を取付ける。
- b. ドーム固定座を設定する。
- c. ドーム固定座を仮付け溶接する。
- d. 専用ゲージを取り外し、溶接する。

5) バッフルポートの据付け

バッフルポートは、真空容器底部のポート（斜め下ポートまたはU1、U2ポート）からバッフル板を貫通する視野を確保するために設けるものである。バッフルポートは、バッフル板と一体構造であることから関連するバッフル板と一緒に据付ける必要がある。

- 代表例として第2.9図に示したP-2のバッフルポートの据付けについて述べる。
- a. 関連する外側バッフル板の支持脚座及び支持脚を据付ける（2)項参照）。
 - b. バッフルポート取付け治具を使用し、真空容器側フランジ固定座を溶接し、真空容器側フランジを取付ける。
 - c. 別途バッフル板側フランジにバッフルポートリブ、バッフルポートを組立てる。
 - d. 関連する外側バッフル板を定位置に設定する。
 - e. 組立てたバッフル板側フランジをバッフル板にボルトで固定する。
 - f. 固定座と真空容器側フランジの隙間のシームを挿入する。
 - g. 関連する外側バッフル板を一時撤去し、ガスシールを行う。
 - h. 関連する外側バッフル板とバッフル板側フランジにシームを挿入して固定する。

6) 電磁気計測器の据付け

電磁気計測器は以下の特徴があり、据付け手順においては、直接取付けられるダイバータ板、バッフル板等の据付け手順との調整以外に、ケーブルの引回しのための手順を調整して実施した。また、据付け後に行われるリークテストで万一リークが検出された場合に備えて引出しポートフランジのガスケットの交換ができるような構造を採用している。

a. 耐熱負荷

静電プローブのセンサー部（CFC材）以外は全て金属で製作されているので、プラズマ近傍で熱負荷が高い場所では溶融する可能性がある。

b. 設置スペースの確保

センサーは、設置場所が指定される。従って、設置場所を確保するために構造物の干渉部分を切欠く必要がある。

c. 据付け位置の精度

プラズマの制御及び解析上から取付け位置の精度が要求される。

d. ケーブル固定

ケーブルのアーキングによる断線または絶縁劣化の防止から一定間隔（約100mm）でのクリート止めが必要である。また、ノイズ対策から必要に応じてツイストして延線する必要がある。

4.2.4 タイル調整

タイルは単体では工場にて精度良く加工されるが、据付け後の段差及びギャップを確保するために、バッフル板、ダイバータ板等の設置精度によっては、タイルの現地加工が必要になってくる。ダイバータ改造で、段差、ギャップにおいて最も厳しい設置精度が要求されるタイル（ダイバータタイル、バッフル板先端部タイル等）については、予め工場でテーパ加工を施すなどして出来るだけ現地加工作業量を削減するようにした。また、タイルを台座、バッフル板等に取付ける際には締めつけトルクを管理している。タイル取付け時の締付けトルク及びその他の構造物の締付けトルクを第4.1表に示す。

4.3 据付け寸法

4.3.1 構造体の据付け寸法

1) 外側及び内側ダイバータ基板据付け寸法

外側及び内側ダイバータ基板は既設ダイバータ冷却基板に専用テンプレートを使用し、同時に据付けられた。

a. ダイバータ基板据付け寸法（第4.4図参照）

- 測定箇所：第4.4図におけるa～d点のギャップ
- 許容値：0.5mm以下

b. ダイバータ基板間段差

- 測定箇所：ドーム側で上端部と下端部2箇所
- 管理値：±1.0mm

2) 内側バッフル板据付け寸法

a. バッフル板支持脚据付け寸法

バッフル板支持脚座と支持脚の間（第4.5図参照）に挿入したシーム

- シームの種類：2種類（トロイダル方向にボルト2個用及び1個用のシーム）
- シームの厚さ：0～16mm

b. バッフル板と内側ダイバータ板の距離（第4.6図参照）

バッフル板設定用設定ゲージと内側ダイバータ基板の距離：17.5mm

3) 外側バッフル板据付け寸法（第4.7図参照）

a. バッフル板と外側ダイバータ板の距離

バッフル板設定用設定ゲージと外側ダイバータ基板の距離：17mm

b. 支持脚ボルト

バッフル板上面の支持脚（M20）の出代：12～21mm

4) ドーム固定座

a. ドーム固定座高さ

○ 測定箇所：第4.8図におけるドーム固定座上面と専用ゲージのギャップ

○ 管理値：20～30mm以下

b. ドーム基板取付け

○ 測定箇所：第4.9図における固定座上面と専用ゲージのギャップ、a～cの各点

○ 管理値：30±1mm

5) ガスシール（バッフル板、ダイバータ板）の隙間

a. 隙間

測定箇所：第4.10図におけるシール間のポロイダル方向のギャップ

b. ガスシール隙間のコンダクタンス評価

○ 評価方法

シール間のポロイダル方向のギャップ（約1100箇所）をスリットとし、分子流のコンダクタンス（ C_{13} ）の形算式（常温、空気）[10]を用いて計算し、集計した。コンダクタンスの計算に使用した模擬形状を第4.11図に示す。

$$C_{13} = 116K_6ab \quad (26)$$

K_6 はスリットの深さ（バッフル板の厚さ：6mm）とポロイダル方向のギャップ（スリット幅） b （実測値）で定まる常数、 a はスリット長さでトロイダル方向のギャップ（10mm）である。

○ 評価結果

ギャップの計算結果は、内側バッフル板で $1.09\text{m}^3/\text{s}$ 、外側バッフル板で $0.966\text{m}^3/\text{s}$ 、合計 $2.06\text{m}^3/\text{s}$ になった。これを 300°C 、重水素に換算すると換算係数が3.75倍であることから $7.7\text{m}^3/\text{s}$ になる。ただし、トロイダル方向のギャップ（10mm）に薄板の効果（約4mmコンダクタンスが小さくなる）を含めていないので、過大評価になっている。

4.3.2 タイルの据付け寸法

1) ダイバータタイルの据付け寸法

- a. 測定場所：第4.12図に示す。
 - b. 管理値を第4.2表に示す。
- 2) 内側バッフルタイルの据付け寸法
- a. 測定場所：第4.13図に示す。
 - b. 管理値を第4.3表に示す。
- 3) 外側バッフルタイルの据付け寸法
- a. 測定場所：第4.14図に示す。
 - b. 管理値を第4.4表に示す。

5. 作業管理

5.1 工程管理

ダイバータ改造に関する真空容器内作業は、JT-60に関連する作業の中で、最も被ばくを伴う放射線作業である。このため被ばく線量当量の低減に努める必要があった。また、実験計画上から、現地の据付け期間が設定されており、設定された作業期間内で最大限の作業時間を確保する必要があった。

5.2 作業環境の管理

5.2.1 一般的な作業環境

真空容器内は閉じられた空間である。従って、閉じられた空間の作業を円滑に遂行するために必要な作業環境を整える必要がある。

1) 真空容器内作業者数の管理

真空容器内作業者は、空間的制限及び酸素欠乏危険作業（酸欠作業）の観点から最大入室者数を18名として管理した（終盤において一時20名とした）。

2) 真空容器内入退室口の設置

真空容器室入退室口は、P-1の水平ポートに専用の作業口を設け、トロイダル方向のほぼ反対側のP-11に非常口を設けた。

3) 真空容器内の換気

真空容器内の換気は、作業口及び非常口から高性能フィルタ（HEPAフィルタ）を介した空気を取り入れ、ほぼトロイダル方向90°にある専用換気ポート（P-5斜め下、P-14斜め上排気ポート）から高性能フィルタを介して実験棟屋上のスタックから排気される。真空容器の換気速度は3,000m³/hである。第5.1図に真空容器内の換気系統を示す。

4) 危険作業の管理

a. 酸素濃度の管理

真空容器内に酸素濃度計を設置し、作業の開始時及び1時間ごとに記録した。

b. 有機溶剤の管理

有機溶剤の使用に当っては作業主任者を専任し、管理させた。

c. 火災防止対策

真空容器内で有機溶剤を使用している時は真空容器内の溶接作業を禁止し、逆に溶接作業中は有機溶剤の持込みを禁止した。

5) 持込み品の管理

工具等の持込み品は、記帳し管理した。

5.2.2 放射線管理

1) 真空容器内線量当量率

真空容器内の線量当量率は、真空容器内構造物の放射化に依存する。中性子の発生の伴う運転（重水素運転）停止後、数日以降の線量当量率は ^{60}Co (^{59}Co (n, γ) ^{60}Co) と ^{58}Co (^{58}Ni (n, p) ^{58}Co) の γ 線に依存する。従って、真空容器内作業の開始前の中性子の発生量の管理は、真空容器内の線量当量率を低減するためには極めて重要である。第5.2図に平成8年10月末（重水素運転終了時）からダイバータ改造期間の真空容器内線量当量率（計算値）の推移を示す。平成8年10月28日の重水素運転終了時の線量当量率は $48 \mu\text{Sv/h}$ でこの内 ^{60}Co の寄与分が約1/3、 ^{58}Co の寄与分が2/3である。 ^{60}Co の半減期は5.27年、 ^{58}Co の半減期は70.8日であることから、平成9年2月10日の作業開始時点（105日経過後）の線量当量率は、 $27 \mu\text{Sv/h}$ で ^{58}Co の減衰効果によるものでこの期間の ^{60}Co 減衰はほとんどない。

2) 放射線の遮蔽

真空容器内線量当量率を可能な範囲で低減するために、遮蔽を行った。ただし、遮蔽のために、作業エリヤを制限し、遮蔽材の設置及び移動で作業時間を多く費やすことは、逆効果である。従って、最も効果的な遮蔽方法を検討し対策を施した。第5.3図は、実施した真空容器内の遮蔽状況を示したもので、ポロイダル断面ほぼ中央に設置されたステージに厚さ8mmの鉛板、真空容器底部の作業をしていないエリアに8mmの鉛板を敷いている。2月12日（遮蔽前）の線量当量率が $27 \mu\text{Sv/h}$ であったが、2月21日（遮蔽後）の線量当量率は $20 \mu\text{Sv/h}$ （74%）であった。これは、9日の減衰による線量当量率の変化は4%、底部の第一壁（台座）の撤去による線量当量率の変化は7%が見込まれることから、遮蔽効果は15%と見込まれる。3)項に示すように実績集団線量当量（フィルムバッジ評価）が $71.5\text{mSv} \cdot \text{人}$ （平成8年度）及び $46.6\text{mSv} \cdot \text{人}$ （平成9年度）であったことから、遮蔽効果の15%は集団線量当量を低減するのに十分効果を発揮した。

3) 被ばく管理

被ばくの管理値は、個人においては2.5mSv、集団線量当量については平成8年度は129mSv・人、平成9年度分（ダイバータ改造工事分）は73mSv・人であった。これらの管理値を達成するために、個々の作業者にAPD（アラーム付ポケットドジメータ）を装着させ、毎日毎の線量当量を集計し管理した。ただし、経験的にフィルムバッジの評価値とAPDの評価値の間には一定の差があるので、これを補正するためにAPDの評価値に1.2の係数を乗じて管理した。APDの評価値とフィルムバッジの評価値の比較を第5.1表に示す。APDの評価値は平成8年度73.9mSv・人、平成9年度分60.5mSv・人であり、フィルムバッジの評価値である平成8年度71.5mSv・人、平成9年度分46.6mSv・人を若干上回っている。このことは、毎日の管理が過大評価にならず妥当な管理をしたことを示している。

4) 内部被ばくの管理

内部被ばくは、残留しているトリチウムの吸入及び真空容器内の溶接部品の撤去時の塵埃の吸入及び溶接ミストの吸入に起因する。内部被ばくの評価は、事前に実施し、ダイバータ改造の全期間（2月～5月）において $12\mu\text{Sv}$ 以下である。ただし、この評価は真空容器内の換気量が $3,000\text{m}^3/\text{h}$ であることが前提条件である。また、内部被ばくの可能性を低減するために、作業者は半面マスクを着用して作業を行った。

6. 運転状況

6.1 真空容器内の放出ガス

6.1.1 真空容器内の放出ガスの要因

1) 真空容器内表面積の増加

ダイバータ改造に伴い、真空容器内に設置した機器は、撤去した機器の表面積より大きくなっている。この表面積は、改造前の表面積が約 $1,000\text{m}^2$ であるのに対して約10%増加し、 $1,100\text{m}^2$ に相当する。

2) 構造物の熱処理の影響

ダイバータ基板及びバッフル板等新規の構造物は、 300°C のアルゴン雰囲気で熱処理しているが、黄銅色に変色（酸化）している。黄銅色に変色した構造物の放出ガスの影響が懸念されていた。このため、黄銅色に変色した構造物の放出ガスを昇温脱ガス試験で測定し、放出ガスが無垢材よりも少ないことを確認している。

3) 電磁気ケーブル等の影響

電磁気ケーブル等真空容器内に布設するケーブルは、従来MIケーブルを多く使

用していた。ダイバータ改造においては、ケーブルの電流容量（アステックスゲージ）、布設本数（ボロメータ）及び可とう性等からシリコンワニス・ポリイミドテープを絶縁体とするケーブルを多用している。ただし、事前に300°C、～1時間の脱ガス処理を行っている。

6.1.2 真空容器内の圧力経過

真空容器の圧力経過を第6.1図に示す。この図は、JT-60の大電流化改造直後の真空容器の圧力及び平成7年度の真空容器内定期点検後の圧力とダイバータ改造工事後の圧力変化を比較したものである。真空容器の圧力は、JT-60の運転の影響を受けやすいので、影響の少ないと思われる月曜日の朝方（7時）の圧力を引用した。3ケースのいずれの場合でも、JT-60の運転開始前には真空リーク試験を行うために真空容器を300°Cにベーキングし、常温に戻されている。真空リーク試験終了後、再度300°Cのベーキングが行われ、JT-60の運転が開始される。なお、ダイバータ改造後の排気ポンプは、大電流化改造当時の排気ポンプを更新し、液体窒素トラップを撤去している。ただし、水素に対する排気速度は同じである。

ダイバータ改造後の圧力変化は、当初JT-60の大電流化改造直後よりも高い圧力になったが、その後順調に降下し6週間経過した時点では平成7年の定期点検後の圧力変化に相当している。前述したように、約10%の表面積の増加を加味すれば、ダイバータ改造後の圧力変化は妥当である。なお、ダイバータ改造後の真空容器内の残留ガスはM/e：2が最も多く、その他に18、28、44が顕著である。

6.2 ベーキング時の温度管理

第3.3.3項で述べたように、真空容器とW型ダイバータの構造材との温度差は当面50°C以下で管理することが望ましい。W型ダイバータの構造物のベーキングは、真空容器からの熱輻射及び熱伝導によって行われることから、モニタ用として外側バッフル板に熱電対を取付けた。この熱電対による測定と真空容器の温度をモニタしてベーキングを実施した。一般的に熱伝導は温度差に比例し、熱輻射は絶対温度の4乗の差に比例することから、低温では、高温に比べて温度差が付きやすい。

第6.2図にダイバータ改造後の最初のベーキングの温度変化を示した。実際のベーキングにおいてもベーキング開始時には温度差が付きやすく各部の温度が高くなるにつれて温度差の制御が容易になった。第6.2図は、真空容器温度150°C附近でポートのベーキングのため（真空容器と接続されているポートの熱伸びによる応力低減のため）に約40時間同じ温度を維持している。ポートのベーキングを伴わない真空容器のベーキングについて、ダイバータ改造前と改造後の比較を行うと、改造前では常温から290°Cに昇温するのに32時間要していたが、改造後は温度差を維持するために44時間（12時間長い）必要であった。

6.3 ハロー電流

設計上のデスマッシュョン条件（第3.1.4項参照）は（ハロー電流／プラズマ電流）が

0.26、集中率（トロイダル分布）が内側バッフル板で2.5倍としていることから、集中率×（ハロー電流／プラズマ電流）は0.65になる。平成9年の運転で収集された内側バッフル板のデータ（プラズマ電流1.8MA以下）では、（ハロー電流／プラズマ電流）が小さくなると集中率が2.5を超えるものがあるものの、集中率×（ハロー電流／プラズマ電流）は0.58以下であった[11]。この値（0.58）は設計条件（0.65）を十分に満足している。

6.4 真空容器内調査結果

平成9年6月～10月の期間の運転終了後、ダイバータ改造後の最初の定期点検を実施した。ダイバータ関連機器については入念な点検を実施した。定期点検においては、軽微な不具合があったものの、全体的には健全であった。以下に点検結果及び対策を示す。

1) 不具合箇所

- a. 外側ドームタイルの内2枚（P-5、15）が止め金物の位置で破損していた。ただし、このドームタイルは、2枚とも取付け位置から動いていなかった。また、外側ドームタイルに35枚、ドーム頂部タイルに10枚程度の損耗（エロージョン）が見られた。破損したタイル及びその周辺の写真を第6.3図に示す。
- b. 内側ダイバータと比較して外側ダイバータにより多くの局部的な損耗があった。また、内側ダイバータ周辺に堆積物が多くあった（ただし、排気溝下部には堆積物がほとんどなかった）。
- c. P-15ガス注入ポート（外側バッフルポート）のガスシール部が溶融していた。
- d. P-3斜め上グロー電極のリード線が真空容器内で断線していた。

2) 実施した対策

- a. ドームタイル
 - ドーム外側タイルの内破損及び損耗したタイル（35枚）はCFCタイルで再製作し交換した。
 - ドーム頂部タイルは、より熱伝導特性の良いCFC予備タイルと交換し（10枚）、軽微な損耗をしているタイルは、損耗部のテーパー加工を行った。
- b. ダイバータタイルの損耗部

内側、外側ダイバータタイルの損耗部は、テーパー加工を行った。また、タイル表面の付着物は拭取り清掃を行った。なお、数枚の内側ダイバータタイルの付着物を除去し重量計測を行い、内側ダイバータ全体に外挿した結果は25g程度であった。

 - c. P-15外側バッフルポートのガスシールの溶融部

溶融部には、タイルを追加取付けし溶融の進展を防止した。
 - d. P-3斜め上グロー電極のリード線の断線

断線したグロー電極のリード線は再接続し、真空容器外部での対策を検討している。

3) 特記事項

a. ガスシールの健全性

P-15のバッフル板のシールを除くガスシール部は確認できる範囲において健全であった。

b. タイルの緩み、構造体の変形

タイルの緩み及び据付け後のバッフル板等の構造体の変形はなかった。

7. まとめ

- 1) W型ダイバータに改造する設計製作は、平成7年度から実施され、平成9年5月に真空容器内の据付けが終了した。
- 2) W型ダイバータの設置に伴って新たに据付けた各タイルは、デイスラップション時の渦電流及びハロー電流による電磁力に耐えられるように設計されている。
- 3) ダイバータ板への熱負荷は、 $10\text{MW}/\text{m}^2 \times 4\text{秒}$ 程度が想定され、この場合でも強制冷却なしで20分間隔の運転が可能である。
- 4) W型ダイバータの構造体はデイスラップション時の電磁力解析と構造解析を実施し、強度設計を行った。プラズマ電流3MA時のデイスラップションにおいてもW型ダイバータの各構造体は健全性が保たれるように設計した。
- 5) 据付け作業に関しては、予備調査を行うなどして事前の検討を十分に行った。実際の据付け作業に関しては、精度良く据付けることができた。
- 6) 真空容器内の作業に当たっては作業環境に十分配慮し、作業者の被ばく低減に努めた。
- 7) ダイバータ改造後の運転は関連データを収集しながら慎重に進めた。
- 8) 運転開始後の最初の定期点検において軽微な不具合が見つかったものの、W型ダイバータの健全性が確認できた。

謝　辞

W型ダイバータの設計に当たっては、「W型ダイバータチェック＆レビュ委員会（委員長：嶋田道也主任研究員）」において有益な議論及びコメントを頂いた。現地据付けに関しては、長谷川安全管理課長の御指導及び格別な御協力を頂いた。関連する他の設備との工程等の調整に関しては、JT-60第2試験室及び炉心プラズマ計画室の諸氏に御足労頂いた。また、設計、製作及び据付け作業を実施した三菱重工業（株）の皆様に深く感謝するものです。

なお、本報告書のとりまとめにあたって、JT-60第1試験室松川副主任研究員から有益な議論及びコメントを頂いた。

参考文献

- [1] Hosogane, N., et al., "A compact W-shaped pumped divertor concept for JT-60U" 16th Int. Conf. IAEA Vol.3 (1996)
- [2] S. Sakurai, et al., "Design of a compact W-shaped pumped divertor in JT-60U" 19th Symposium on Fusion Technology (1996)
- [3] H. Horiike, et al., "Design and development of JT-60 upgrade - Vacuum vessel and first wall" Fusion Engineering and Design 16 (1991) 285-292
- [4] 内川他、JT-60Uの薄板二重真空容器の設計・製作試験、日本原子力学会誌、技術報告255（1993年）
- [5] 山本他、JT-60Uダイバータ板及び第一壁材料の特性試験、JAERI-M 90-119（1990年）
- [6] Onozuka M. et al., "Development of electrical insulation and conduction coating for fusion experimental device" 18th Symposium on Fusion Technology (1994)
- [7] K. Masaki et al., "Investigation of plasma facing components in JT-60 operation" Journal of Nuclear Materials 220-222 (1995) 390-394
- [8] Enzo Bertolini, "Engineering experience in JET operation" Fusion Engineering and Design 36 (1997) 119-133
- [9] H. Hitatsuka et al., "Effects of plasma behavior on in-vessel components in JT-60 operation" 19th Symposium on Fusion Technology (1996)
- [10] 日本真空技術（株）、真空ハンドブック（1992年11月）
- [11] Y. Neyatani et al., "Characteristics of halo current in JT-60U" to be published in J. of Nuclear Fusion

第 2.1 表 真空容器の詳細寸法（第2.1図参照）

円弧 i	Ri変位点の座標		円弧半径 Ri	円弧角度		円弧原点の座標		円弧長(Li) $Ri \times \theta$ (RDS)
	ri	zi		θi (RDS)	θi (DGS)	(r)i	(z)i	
1	2206.80	0.00	1986.90	0.533	30.528	4193.70	0.00	1058.660
2	2482.23	-1009.27	3435.85	0.165	9.474	5441.79	736.01	568.117
3	2809.86	-1472.60	299.00	0.873	49.998	3038.90	-1280.40	260.916
4	3038.90	-1579.40	947.90	0.422	24.166	3038.90	-631.50	399.796
5	3426.95	-1496.33	2088.67	0.800	45.836	2571.90	409.30	1670.893
6	4534.62	-305.03	891.90	0.349	19.999	3696.50	0.00	311.318
7	4588.40	0.00	1264.23	0.159	9.112	3324.17	0.00	201.051
8	4572.44	200.20	3789.28	0.190	10.893	831.00	-399.86	720.456
9	4341.64	896.47	838.54	0.611	34.995	3603.70	609.60	512.161
10	4084.66	1296.49	3383.47	0.192	11.001	2144.00	-1475.10	649.627
11	3520.13	1615.88	705.47	0.908	51.997	3233.20	971.40	640.217
12	2902.03	1594.29	1270.60	0.993	56.888	3498.49	472.41	1261.565
13	2232.95	585.66	6571.10	0.089	5.113	8777.90	0.00	586.405

特記事項

- 1 真空容器外表面は円弧原点の座標 (ri) 及び角度 (zi) を同一とし、円弧半径 (Ri) に真空容器の厚さ (40.7mm) を加算する。
- 2 トーラス中心の座標を0とし、rは水平方向軸、zは垂直方向軸を示す。

第 2.2 表 撤去及び新設した第一壁の総数

	改造前		取外し		据付け		合 計	
	ユニット	タイル	ユニット	タイル	ユニット	タイル	ユニット	タイル
ダイバータ (既設)	1,000	2,895	-1,000	-2,895			0	0
第一壁 (既設)	6,863	9,515	-1,703	-2,613	48	78	5,208	6,980
内側ダイバータ					125	501	125	501
外側ダイバータ					125	500	125	500
ドーム					375	750	375	750
内側バッフル					864	1,150	864	1,150
外側バッフル					1,474	1,619	1,474	1,619
ポートタイル	77	79	-11	-11	190	215	256	283
合 計	7,940	12,489	-2,714	-5,519	3,201	4,813	8,427	11,783

第 2.3 表 W型ダイバータ領域の計測器類の撤去、移設及び新設数

項目番	検出器の種類	撤去数	移設数	新設数
1	TCプローブ	2	10	6
2	Nプローブ	0	5	3
3	TMプローブ	10	16	0
4	突抜けモニタ用熱電対	0	1	0
5	接線NBI用熱電対	0	4	0
6	リップルロス用熱電対	26	0	0
7	ダイバータ板用熱電対	1	19	2
8	ベーキング監視用熱電対	0	2	0
9	静電プローブ	46	0	72
10	ハロー電流プローブ	4	0	18
11	グロー放電用予備電離電極	0	2	0
12	グロー放電電極	0	2	2
13	ボロメータ	0	0	4
14	イオングージ	0	0	7

第 2.4 表 制御用プローブの配置 (P-13~14間)

プローブ	常温		高温 (300°C)		プローブ	常温		高温 (300°C)	
	R	Z	R	Z		R	Z	R	Z
PBTM01-L2	4514.7	-332.6	4531.2	-333.8	PBTM01-L18	4530.3	-287.3	4546.8	-288.4
PBTC12-L4	2515.4	-1063.1	2524.5	-1067.0	PBTM08-L17	4540.3	-270.3	4556.8	-271.3
PBTC16-L4	4033.7	-1055.5	4048.3	-1059.3	PBTC18-L13	2344.8	-686.8	2353.3	-689.3
PBTC15-L4	4187.4	-897.3	4202.6	-900.6	PBN14-L13	4185.5	-890.6	4200.8	-893.9
PBTC14-L4	3874.9	-1212.0	3889.0	-1216.4	PBTC01-B14	2658.3	-1055.5	2668.0	-1059.3
PBTM01-L4	4526.3	-292.3	4542.8	-293.4	PBN01-B14	2658.4	-1053.8	2668.0	-1057.6
PBTM01-L10	4536.3	-279.3	4552.8	-280.3	PBN03-B14	3814.6	-968.0	3828.5	-971.5
PBTC14-L13	3857.4	-1215.6	3871.5	-1220.0	PBTC03-B14	3814.8	-967.4	3828.7	-971.0
PBTC13-L13	3518.3	-1442.5	3531.1	-1447.8	PBTC02-B14	3489.8	-1167.4	3502.5	-1171.7
PBN11-L13	2513.1	-1041.8	2522.2	-1045.6	PBN02-B14	3490.6	-1164.0	3503.3	-1168.2
PBN13-L13	3863.4	-1217.1	3877.5	-1221.5	PBTM12-L15	2682.2	-1076.5	2692.0	-1080.4
PBN12-L13	3489.8	-1450.2	3502.5	-1455.5	PBTM18-L15	3816.1	-979.1	3830.0	-982.7
PBTC12-L13	2453.3	-935.9	2462.2	-939.4	PBTM19-L15	3978.1	-881.1	3992.6	-884.3
PBTC18-L13	2344.8	-686.8	2353.3	-689.3	PBTM20-L15	4249.6	-688.6	4265.1	-691.1
PBTC19-L13	4185.2	-884.9	4200.4	-888.1	PBTM17-L15	3489.7	-1162.6	3502.4	-1166.8
PBTC20-M13	4588.1	3.1	4604.8	3.1	PBTM16-L6	4540.1	-259.8	4556.6	-260.7
PBTC16-L13	4533.3	-295.5	4549.8	-296.6	PBN15-L13	4535.7	-279.5	4552.2	-280.5
PBTC15-L13	4185.2	-884.9	4200.4	-888.1	PBTM01-L12	4540.3	-269.3	4556.8	-270.3
PBTM15-L15	4510.2	-352.6	4526.7	-353.9	PBTM16-L15	4520.2	-188.5	4536.7	-189.2
PBTM01-L16	4538.3	-272.3	4554.8	-273.3	PBTM21-L15	4536.3	-279.3	4552.8	-280.3

第 2.5 表 磁気プローブの電磁気的特性

項目	単位	TCプローブ	Nプローブ	TMプローブ	備考
コイル素線径	mm	0.17	0.17	0.17	セラミック線
NS	m^2	0.334	0.659	約0.012	
巻数	ターン	6220	1088	176	
層数	層	20	34	2	
インダクタンス	mH	34.6	24.1	0.115	
電気抵抗	Ω	1300	752	41.1	常温

第 2.6 表 ハロー電流プローブの員数及び電磁気的特性

項目	単位	A	B	C	D	E	F	備考
素線(MI)外径	mm	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	
鎖交面積	m^2/m	0.630	0.600	0.824	0.585	0.774	0.805	計算値
抵抗	Ω	17	12	59	10	37	8	計算値
コイル巻数	ターン	1245	813	2870	693	1718	371	設計値
員数	個	9	2	1	1	2	3	合計：18
記号(DRKC-)		8~16	4、17	3	5	1、2	6,7,18	
							19、20	追加*
用 途	内、外	内側		内側	外側	内側	外側	
	名称	バッフル	ドーム	ダイバ-タ		バッフル	バッフル	
	部位	支持脚	固定座	基板取付座		支持脚	支持脚	

追加* : 平成9年定検時（11月～12月）に追加

第 2.7 表 グロー電極の諸元

項目	単位	#1	#2	#3	#4	#5
取付け位置	--	P-3	P-15	P-6	P-11	P-3
取付け場所	--	斜上ポート	斜上ポート	水平ポート	外バッフル	外バッフル
用途種別	--	専用	専用	第一壁兼用	第一壁兼用	第一壁兼用
電極材	--	等方性黒鉛	等方性黒鉛	等方性黒鉛	等方性黒鉛	等方性黒鉛
電極表面積	cm ²	502	256	231	362	362
主絶縁 ¹	--	成形	成形	成形	溶射	溶射
絶縁試験	V	1kV	1kV	1kV	1kV	1kV
最大電流 ²	A	15	15	10	10	10
リード線	--	より線	MIケーブル	MIケーブル	MIケーブル	MIケーブル

主絶縁¹ : アルミナセラミックスの成形または金属板の溶射を示す。

最大電流² : 電極リード線等を含めた最大電流を示しており、必ずしもグロー電流の最大値を示していない。

第 3.1 表 各ポートセクションのタイルユニット及びタイル数

ポート番号	ダイバータ				ドーム		バッフル				バッフルポート				小計	
	内側		外側				内側		外側		内壁		真空容器側			
	組数	枚数	組数	枚数	組数	枚数	組数	枚数	組数	枚数	組数	枚数	組数	枚数	組数	枚数
P- 1	6	24	6	24	18	36	48	64	83	91	16	16			177	255
P- 2	8	32	8	32	24	48	48	64	74	82	20	20			182	278
P- 3	7	28	7	28	21	42	48	64	88	96					171	258
P- 4	7	29	7	28	21	42	48	64	88	96					171	259
P- 5	7	28	7	28	21	42	48	64	88	96					171	258
P- 6	5	20	5	20	15	30	48	64	88	96					161	230
P- 7	7	28	7	28	21	42	48	64	60	68	38	38	16	24	197	292
P- 8	9	36	9	36	27	54	48	64	88	97					181	287
P- 9	7	28	7	28	21	42	48	64	88	96	4	4			175	262
P-10	7	28	7	28	21	42	48	64	88	96					171	258
P-11	5	20	5	20	15	30	48	64	88	96	4	4			165	234
P-12	7	28	7	28	21	42	48	64	88	96	4	4			175	262
P-13	9	36	9	36	27	54	48	64	60	68	38	38	16	25	207	321
P-14	5	20	5	20	15	30	48	64	56	64	18	18	8	16	155	232
P-15	6	24	6	24	18	36	48	64	86	94					164	242
P-16	7	28	7	28	21	42	48	62	88	96	4	4			175	260
P-17	8	32	8	32	24	48	48	64	87	95					175	271
P-18	8	32	8	32	24	48	48	64	88	96	4	4			180	276
合計	125	501	125	500	375	750	864	1150	1474	1619	150	150	40	65	3153	4735

第 3.2a 表 温度解析に使用した金属の物性値

材 料	温 度 (°C)	热伝導率(W/mm・K)		比 热 (J/kg・K)	密 度 (kg/mm ³)
		X	Y		
SUS316	20	1.47E-02	←	4.63E-02	7.96E-06
	100	1.56E-02	←	4.94E-02	↑
	200	1.70E-02	←	5.23E-02	↑
	400	1.97E-02	←	5.53E-02	↑
	600	2.24E-02	←	5.78E-02	↑
	800	2.50E-02	←	6.15E-02	↑
INCONEL625	20	9.80E-03	←	4.10E-02	8.44E-06
	100	1.08E-02	←	4.27E-02	↑
	200	1.26E-02	←	4.56E-02	↑
	400	1.57E-02	←	5.11E-02	↑
	600	1.92E-02	←	5.65E-02	↑
	800	2.28E-02	←	6.20E-02	↑

第 3.2b 表 温度解析に使用した黒鉛材の物性値

材 料 (用途)	温 度 (°C)	热伝導率(W/mm・K)		比 热 (J/kg・K)	密 度 (kg/mm ³)
		X	Y		
CX-2002U (ダイバータ)	20	4.05E-01	←	7.00E+02	1.70E-06
	300	2.40E-01	←	1.37E+03	↑
	500	2.00E-01	←	1.63E+03	↑
	700	1.70E-01	←	1.78E+03	↑
	1000	1.40E-01	←	1.92E+03	↑
PCC-2S (ドーム頂部) (バッフル板 :先端部)	20	3.12E-01	1.90E-01	6.95E+02	1.83E-06
	100	2.60E-01	1.56E-01	9.23E+02	↑
	200	2.10E-01	1.30E-01	1.17E+03	↑
	300	1.78E-01	1.10E-01	1.36E+03	↑
	400	1.52E-01	9.50E-02	1.51E+03	↑
	500	1.35E-01	8.60E-02	1.63E+03	↑
	600	1.23E-01	8.00E-02	1.71E+03	↑
ETP-10* (ドーム外タイル)	20	1.05E-01	←	6.91E+02	1.76E-06
	200	8.96E-02	←	1.15E+03	↑
	400	7.79E-02	←	1.48E+03	↑
	600	6.98E-02	←	1.67E+03	↑
	800	6.28E-02	←	↑	↑
	1000	5.82E-02	←	↑	↑

ETP-10* : 解析時に実際に使用したIG-430UのデータがなくETP-10で解析した。

第 3.3 表 運転サイクル時のタイルと金属部の最高温度と時間

対象タイル (熱負荷条件)	部位	運転サイクル-1		運転サイクル-2		運転サイクル-3	
		温度	時間	温度	時間	温度	時間
バッフル板 (4MW/m ² ,10sec)	タイル	1800	10	1864	10	1869	10
	金属部	679	114	735	114	739	114
ドームDMc (1MW/m ² ,10sec)	タイル	565	10	606	10	623	10
	金属部	381	222	419	168	435	168
ダイバータ (5MW/m ² ,10sec)	タイル	948	10	984	10	995	10
	金属部	239	1199	258	1058	270	899
ダイバータ (10MW/m ² ,4sec)	タイル	1188	4	1224	4	1236	4
	金属部	235	1199	252	1058	263	899

対象タイル (ドームDMb)

熱負荷条件	熱負荷入射場所	部 位	温度	時間
10MW/m ² ,4sec	ドーム内側面(1)と頂部(2)	(1)と(2)の境界	1952	4
10MW/m ² ,4sec	ドーム頂部(2)	ドーム頂部	1357	4
10MW/m ² ,4sec	ドーム内側面(1)と頂部(2)	(1)と(2)の境界	1601	10

注意：温度は部位の最高温度 (°C) である。

時間は熱負荷入射から最高温度までの時間 (sec) とする。

第 3.4 表 热応力の解析に使用した黒鉛材の物性値

	温 度 (°C)	ヤング率 (GPa)		热膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		ポアソン比
		X	Y	X	Y	
CX-2002U	20	11	←	1.5	←	0.205
	1000	↑	↑	↑	↑	↑
PCC-2S	20	21	5	1.1	5.8	0.185
	1000	↑	4	↑	↑	↑
ETP-10	20	7.3	←		←	0.14
	750	10.2	←	5	←	↑
	1300	12.3	←	5.9	←	↑

第 3.5 表 各タイル（ドーム頂部を除く）の最大変位とトレスカ応力

解析ケース	熱負荷条件	解析時間	変位(ΔX)	変位(ΔY)	応力(σT) ^{*2}	保証応力値 ^{*1}
	MW/m ² × sec	sec	mm	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²
バッフル板	4×10	4.2	4.81E-02	9.36E-02	0.913	2.0 (0.4) ^{*3}
ドーム (DMc)	1×10	2410.0	-1.38E-01	4.37E-02	0.448	3.0
ダイバータ	5×10	2410.0	1.87E-02	6.66E-02	0.223	2.5 (0.8)
	10×4	1203.0	1.72E-02	6.20E-02	0.192	2.5 (0.8)

^{*1} : 保証応力値はCFC材の場合、繊維方向の引張保証応力値を、() 内は繊維垂直方向の引張保証応力値を示している。

^{*2} : この評価モデルでは、Z方向の変位が拘束され、その結果、Z方向の応力が過大に評価されている。これに伴い、トレスカ応力も実際よりも大きな値となっている。

^{*3} : バッフル板の場合、トレスカ応力は繊維垂直方向の引張保証応力値を超えており、引張りは主に繊維方向であるので繊維方向引張保証値と比較する。
圧縮の場合、保証値は2.8kgf/mm²であるので解析結果は十分保証値内である。

第 3.6 表 ドーム頂部タイルの最大変位とトレスカ応力

解析ケース	熱負荷 MW/m ² × sec	領域	解析時間 sec	最大変位 mm	応力成分 (kg/mm ²)				保証応力値 (kg/mm ²)	保証値到達 時間(sec)		
					X成分		Y成分					
					min	max	min	max				
10×4	1+2	1.0	0.1	-1.4	0.4	-1.0	0.6	2.0	0.4	0.66		
10×4	2	2.8	0.08	-0.3	0.2	-0.4	0.2	2.0	0.4	問題なし		
5×10	1+2	4.6	0.1	-0.8	0.5	-0.5	0.6	2.0	0.4	3.1		

第 3.7 表 各部に生じる電磁力の1ユニット当たりの積算和

コンポーネント	ケース 1				ケース 2			
	$F_{\text{polo+self}}$		F_{toro}		$F_{\text{polo+self}}$		F_{toro}	
	F_r	F_z	F_r	F_z	F_r	F_z	F_r	F_z
内側バッフル板	-0.47	0.88	±109	±102	1.35	-1.03	±225	±202
内側ダイバータ	0.36	2.77	±157	±55.0	-0.67	4.46	±282	±98.9
ドーム	-0.26	0.68	±25.1	±29.1	0.60	1.06	±40.8	±45.2
外側ダイバータ	1.08	7.17	±222	±116	1.03	5.54	±201	±113
外側バッフル板	-31.9	40.0	±500	±758	-27.0	15.5	±228	±350

Unit:kgf/mm²/unit

第 3.8 表 デスラプション時の変位

位置	方向	ケース 1 (mm)				ケース 2 (mm)			
		相対変位量		単独での変位量		相対変位量		単独での変位量	
		Max値	Min値	Max値	Min値	Max値	Min値	Max値	Min値
	X	0.50	-0.59	0.32	-0.93	0.74	-0.72	0.55	-0.86
外側バッフル板	Y	0.54	-0.67	0.64	-0.52	0.67	-0.71	0.73	-0.74
	Z	5.21	-6.51	3.93	-3.40	8.15	-8.18	4.46	-4.45
	X	0.29	-0.34	0.31	-0.21	0.22	-0.34	0.96	-0.39
内側バッフル板	Y	0.19	-0.19	0.70	-0.85	0.66	-0.65	0.65	-0.63
	Z	0.98	-1.17	0.57	-0.68	1.25	-0.76	1.14	-1.56
	X	0.24	-0.21	0.50	-1.03	0.20	-0.20	0.62	-0.72
内側ダイバータ板	Y	0.07	-0.07	0.32	-0.31	0.11	-0.09	0.22	-0.22
	Z	0.24	-0.21	0.65	-1.09	0.22	-0.24	0.82	-0.86
	X	0.07	-0.11	0.47	-0.09	0.22	-0.23	0.84	-0.69
内側ダイバータ板	Y	0.09	-0.07	0.21	-0.18	0.16	-0.14	0.34	-0.31
	Z	0.14	-0.11	0.36	-0.33	0.49	-0.49	1.58	-1.66
	X	0.04	-0.02	0.39	-0.48	0.05	-0.04	0.43	-0.43
ドーム	Y	0.01	-0.02	0.03	-0.08	0.03	-0.03	0.04	-0.05
	Z	0.004	-0.04	0.16	-0.65	0.02	-0.05	0.38	-0.57
外側バッフル板	X	0.49	-0.47	0.49	-1.02	0.56	-0.51	0.62	-0.86
と	Y	0.37	-0.36	0.47	-0.47	0.42	-0.45	0.53	-0.53
外側ダイバータ板間	Z	0.65	-0.57	0.53	-0.49	0.61	-0.63	0.55	-0.64
外側バッフル板	X	0.16	-0.20	0.18	-0.36	0.31	-0.32	0.24	-0.33
と	Y	0.13	-0.12	0.12	-0.13	0.09	-0.09	0.09	-0.08
ドーム間	Z	0.51	-0.50	0.65	-1.09	0.62	-0.60	0.82	-0.86
内側バッフル板	X	0.16	-0.20	0.44	-0.14	1.05	-1.05	0.96	-0.68
と	Y	0.58	-0.12	0.62	-0.76	0.71	-0.68	0.58	-0.56
内側ダイバータ板間	Z	0.56	-0.50	0.54	-0.68	1.62	-1.91	1.57	-1.65

第 3.9 表 バッフル板の応力評価結果

部 位	材質	応力 種類	許容 応力	内側板バッフル		外側バッフル板	
				ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
板部	INC625	トレスカ	33.5	3.2	7.7	12.1	13.1
端部支持部	INC625	トレスカ	33.5	4.3	13.8	30.0	30.7
支持部（溶接部底部）	INC625	トレスカ	33.5	17.9	14.6	5.9	5.9
溶接部	頂部	INC625	膜 ^{*1,*2}	22.4	<C2	4.1	---
			曲げ ^{*1}	33.5	<C2	19.3	---
溶接部	底部	INC625	膜 ^{*1,*2}	22.4	<C2	4.4	<C2
			曲げ ^{*1}	33.5	<C2	18.0	<C2
取付 ボルト	バッフル板取付	SU316	引張	17.5	<C2	8.5	---
			せん断	13.4	<C2	2.3	---
	バッフル板取付	INC625		38.2	---	---	16.9
支持脚取付	SU316		引張	17.5	<C2	12.5	---
			せん断	13.4	<C2	1.6	---
端部支持脚取付	SU316		引張	17.5	<C2	0.9	<C2
			せん断	13.4	<C2	3.9	<C2

<C2 : ケース2以下の値 単位 : kg/mm²

第 3.10 表 ダイバータ板の応力評価結果

部 位	材質	応力 種類	許容 応力	内側ダイバータ		外側ダイバータ	
				ケース1	ケース2	1	2
板部	SUS316	トレスカ	18.1	0.2	0.7	0.1	0.1
支持部	SUS316	トレスカ	18.1	0.4	1.1	0.2	0.3
取付ボルト	SUH660	引張	29.0	<C2	8.9	<C2	7.0
		せん断	22.3	<C2	4.9	<C2	3.5
耳金部	SUS316	膜 ^{*1}	12.1	<C2	5.1	<C2	4.6

<C2 : ケース2以下の値 単位 : kg/mm²

第 3.11 表 ドームの応力評価結果

部 位	材質	応力種類	許容応力	ケース1	ケース2
板部	INC625	トレスカ	33.5	0.2	0.2
支持部	INC625	トレスカ	33.5	1.5	1.3
溶接部	頂部	INC625	膜 ^{*1,*2}	22.4	<C2
			曲げ ^{*2}	32.5	<C2
溶接部	中央部	INC625	膜 ^{*1,*2}	22.4	<C2
			曲げ ^{*2}	32.5	<C2
溶接部	底部	INC625	膜 ^{*1,*3}	22.4	<C2
			曲げ ^{*3}	32.5	<C2
取付ボルト	SUS316	引張	17.5	<C2	2.1
		せん断	13.4	<C2	0.4

<2 : ケース2以下の値 単位 : kg/mm²

第 3.12 表 ダイバータ冷却基板の応力評価結果

部 位	材質	応力種類	許容応力	ケース1	ケース2
板部	SUS316	トレスカ	18.1	6.3	12.8
中央固定ボルト	SUH660	引張	29.0	<C2	12.5
		せん断	22.3	<C2	4.2
耳金部	SUS316	内側	12.1	<C2	9.2
		外側	12.1	<C2	7.0
スライド支持ピン	INC625	せん断	16.2	<C2	5.3
スライド支持金物	SUS316	せん断	6.9	<C2	4.5

<C2 : ケース2以下 単位 : kg/mm²

第 3.13 表 バッフルポートの応力評価結果

ポート	評価部位	許容応力 (kg/mm ²)	バッフルポートに生じる最大応力 (kg/mm ²)			
			加速度 (1)	誘起される 渦電流(2)	ハロー電流 (3)	合計
U1	真空容器との現地溶接部	33.5	16.5	5.6	6.5	28.6
U2	真空容器との現地溶接部	33.5	15.2	5.0	1.5	21.7
	中間溶接部	33.5	13.6	4.8	6.6	25.0
P-9/U2	真空容器との現地溶接部	33.5	16.2	8.7	3.4	28.3
P-15/斜下	支持脚座	33.5	6.8	1.5	2.2	10.5
	バッフルポートaとd	33.5	0.7	1.7	0.5	2.9
	バッフルポートbとd ¹	33.5	5.6	---	2.4	8.0
	バッフルポートcと真空容器	33.5	1.6	1.6	0.7	3.9
P-17/斜下	バッフルポートbと台板	33.5	1.3	1.2	3.8	6.3
	バッフルポートbとc	33.5	1.3	1.2	3.8	6.3
	バッフルポートcと真空容器	33.5	4.1	3.6	12.2	19.9
大バッフルポート		33.5				27.5

バッフルポートbとd¹：差し込み構造のため、引張応力のみ考慮した。

第 3.14 表 真空容器と50℃の温度差が生じた時の各部位の発生応力

評 価 部 位		発生応力 (kgf/mm ²)	許容応力 (kgf/mm ²)
外側バッフル板	支持脚	13.2	33.5
	支持脚取付ボルト	0.2	13.4
	支持脚座	9.8	33.5
	端部支持部	0.3	13.4
内側バッフル板	支持脚取付ボルト	11.0	13.4
	端部支持部	9.7	13.4

第 3.15 表 Ω シールにおける各シール間の相対変位量

	外側バッフル板			内側バッフル板			外側ダイバータ板			内側ダイバータ板		
	max	min	変位幅	max	min	変位幅	max	min	変位幅	max	min	変位幅
x	1.06	-0.83	1.89	0.47	-0.97	1.44	0.09	-0.40	0.49	0.15	-0.15	0.30
y	0.46	-0.56	1.02	0.54	-0.22	0.76	0.05	-0.63	0.68	0.17	-0.17	0.34
z	6.12	-3.66	9.78	3.04	-1.49	4.53	0.28	-0.22	0.50	0.63	-0.63	1.26

第 3.16 表 Ω シールの応力解析結果

	高さ mm	長さ mm	厚さ mm	強制変位による発生応力 (kgf/mm ²)		発生応力 (kgf/mm ²)	
				x=1	z=6	x	z
バッフル板 許容応力= 256 kgf/mm ²	10	300	0.1	615.7	---	1163.7	---
			0.05	76.6	25.5	144.8	41.6
			0.1	150.7	51.1	284.8	83.4
			0.2	283.8	101.5	536.4	165.6
	500	0.1	248.2	---	469.1	---	
ダイバータ板 許容応力= 256 kgf/mm ²	30	300	x=1	z=1	x	z	
			0.1	1166.0	---	571.3	---
			0.05	105.6	6.1	51.7	7.7
			0.1	202.9	12.3	99.4	15.5
			0.2	349.3	24.5	171.2	30.9
	500	0.1	323.0	---	158.3	---	

x :せん断方向、x=1 :変位が1mm

Z= :高さ方向、z=1、6 :変位が1または6mm

第 4.1 表 各種ボルトの締付けトルク

サイズ	材質	タイル	台座	一般構造部
M 3	SUS	---	---	10
M 4	SUS	---	---	20
M 5	SUS	---	---	40
M 6	SUS	30	---	60
M 8	SUS	40	80	140
M10	SUS	---	140	280
M12	SUS	---	---	490
M16	SUS	---	---	1150
M20	SUS	---	---	2260
M6	SUH660	---	---	80

単位 : Kgf-cm

第 4.2 表 ダイバータ及びドームタイルの据付け寸法

対象箇所	位置	記号	管理値 (mm)		備考
		第4.12図	最小	最大	
ギャップ					
内側ダイバータDVaユニット間	T方向	G1	1.0	2.0	切欠有
内側ダイバータDVbユニット間	T方向	G2	1.0	2.0	
ドーム内側DMaユニット間	T方向	G3	0.5	2.0	切欠有
ドーム頂部DMbユニット間	T方向	G4	0.5	2.0	切欠有
ドーム外側DMcユニット間	T方向	G5	0.5	2.0	切欠有
外側ダイバータDVcユニット間	T方向	G6	1.5	2.5	
外側ダイバータDVdユニット間	T方向	G7	1.5	2.5	
ドーム頂部と内側(DMb～DMa)間	P方向	G8	0.5	2.0	
ドーム頂部と外側(DMb～DMa)間	P方向	G9	0.5	2.0	
内、外側ダイバータ同一ユニットタイル間	T方向	G10	0.1	1.0	
内側ダイバータ同一ユニットタイル間	P方向	G11	0.1	1.0	
外側ダイバータ同一ユニットタイル間	P方向	G12	0.1	1.0	
段差					
内側ダイバータユニット間	T方向	△1	0.0	1.5	
ドーム内側ユニット間	T方向	△2	-2.0	2.0	
ドーム頂部ユニット間	T方向	△3	-2.0	2.0	
ドーム外側ユニット間	T方向	△4	0.0	2.0	
外側ダイバータユニット間	T方向	△5	0.0	1.5	
内側ダイバータDVa,bユニットタイル間	T方向	△6,7	0.0	1.5	
内側ダイバータDVa,b-p～qタイル間	P方向	△8,9	---	1.0	
外側ダイバータDVc,dユニットタイル間	T方向	△10,11	0.0	1.5	
外側ダイバータDVc,d-p～qタイル間	P方向	△12,13	---	1.0	
ドーム頂部と内、外ドームタイル間	P方向	△14,15	---	1.0	

第 4.3 表 内側バッフル板の据付け寸法

対象箇所	位置	記号	管理値 (mm)		備考
		第4.13図	最小	最大	
ギャップ					
隣接バッフル板のタイル間	T方向	G1	1.5	2.5	
同一バッフル板のタイル間F,I	T方向	G2	0.5	1.5	等方性黒鉛
同一バッフル板のタイル間J,K	T方向	G3	0.1	1.0	CFC
既設第一壁とバッフルタイル間	P方向	G4、5	1.0	>4	
ダイバータタイルとバッフルタイル間	P方向	G6～9	3.5	4.5	
既設A領域(主としてインボード側)	T/P方向	---	0.5	5.8	
段差					
同一バッフル板のタイル間F,G	T方向	△1	-0.5	0.5	
隣接バッフル板のタイル間F,G	T方向	△2	0.0	2.0	
同一バッフル板のタイル間H,I	T方向	△3	0.0	1.0	
隣接バッフル板のタイル間H,I	T方向	△3	0.0	1.0	
同一バッフル板のタイル間J,K	T方向	△4	0.0	1.0	
隣接バッフル板のタイル間J,K	T方向	△4	0.0	1.0	

第 4.4 表 外側バッフル板の据付け寸法

対象箇所	位置	記号	管理値 (mm)		備考
		第4.14図	最小	最大	
ギャップ					
隣接バッフル板のタイル間A	T方向	G1	1.5	20	
同一バッフル板のユニットタイル間E	T方向	G2	0.5	1.5	等方性黒鉛
同一バッフル板ユニットのタイル間E	T方向	G3	0.1	1	
同一バッフル板のタイル間E～D	P方向	G4	0.5	---	CFC
既設第一壁とバッフルタイル間	P方向	G5、6	1	>10	
隣接バッフル板のタイル間E	T方向	G7	1.5	4.2	
ダイバータタイルとバッフルタイル間	P方向	G8～11	3.5	4.5	
既設B領域（主にアウトボード側）	T/P方向	---	0.5	5.8	
段差					
同一、隣接バッフル板のタイル間A1～3	T方向	△1、△2	-2	2	
同一、隣接バッフル板のタイル間B1～C2	T方向	△1、△2	-1	2	
同一、隣接バッフル板のタイル間C3～C4	T方向	△1、△2	-1	1	
隣接バッフル板のタイル間	T方向	△3	0	1	
同一バッフル板のタイル間	T方向	△4	0	1	

第 5.1 表 ダイバータ改造作業に関する被ばく実績

作業期間		計画値	APD管理値	被ばく値	備考
年度	期間	mSv・人	mSv・人	mSv・人	
平成8年度	2月～3月	129.0	73.9	71.5	
平成9年度	4月～5月	73.0	60.5	46.6	
平成9年度	11月～12月	30.0	31.9	29.4	平成9年度被ばく 合計76 mSv・人

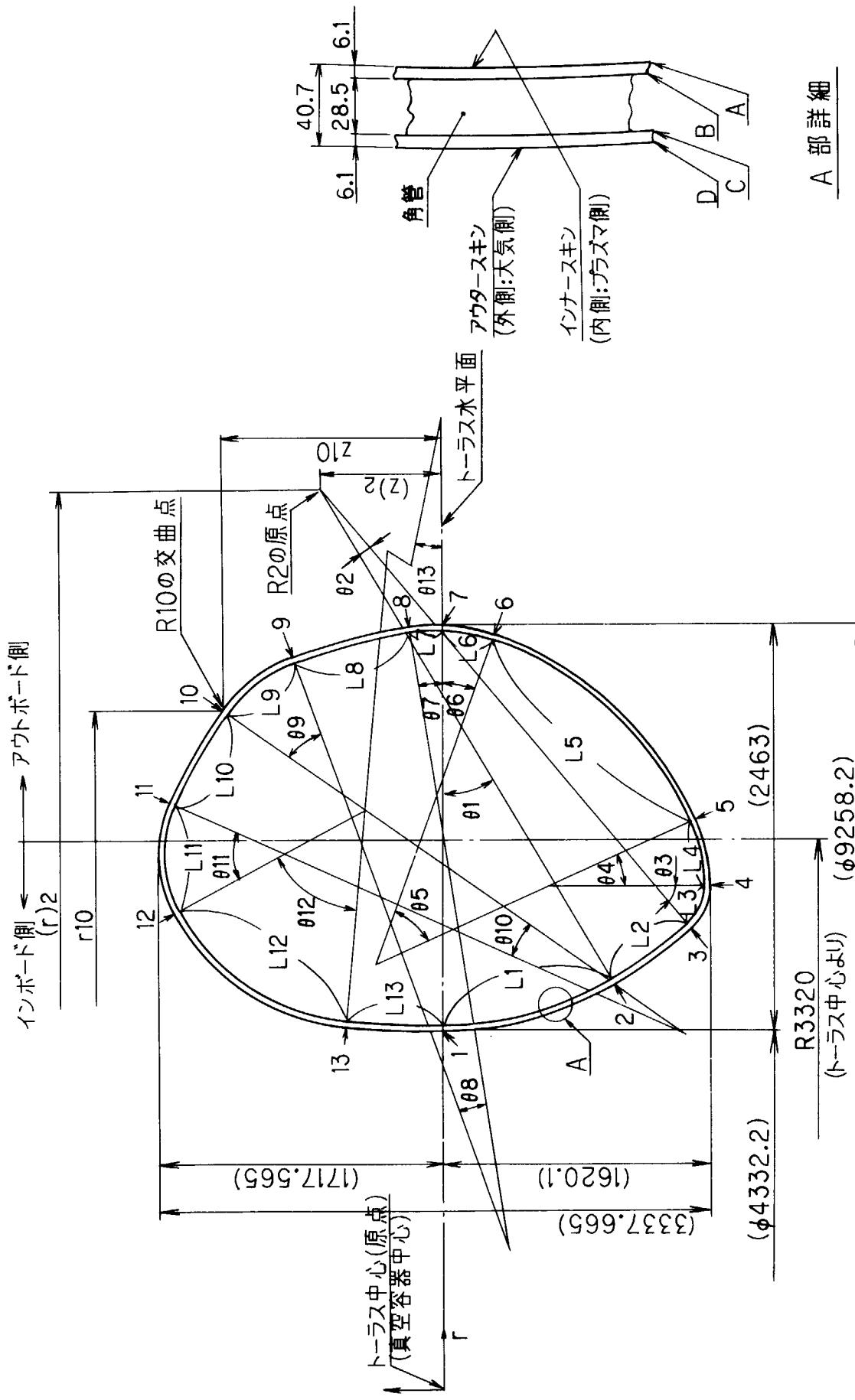
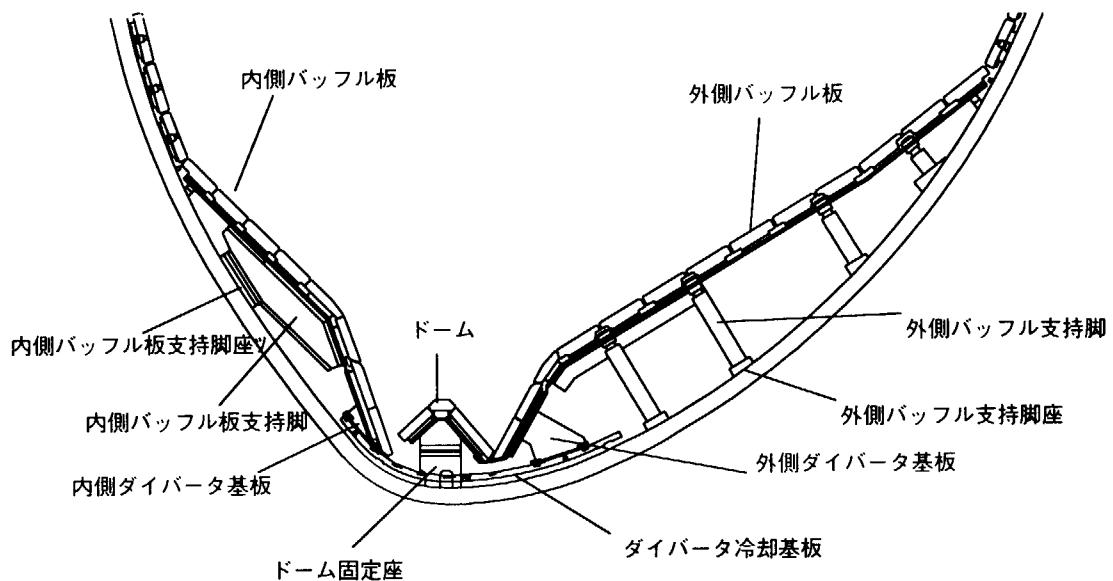
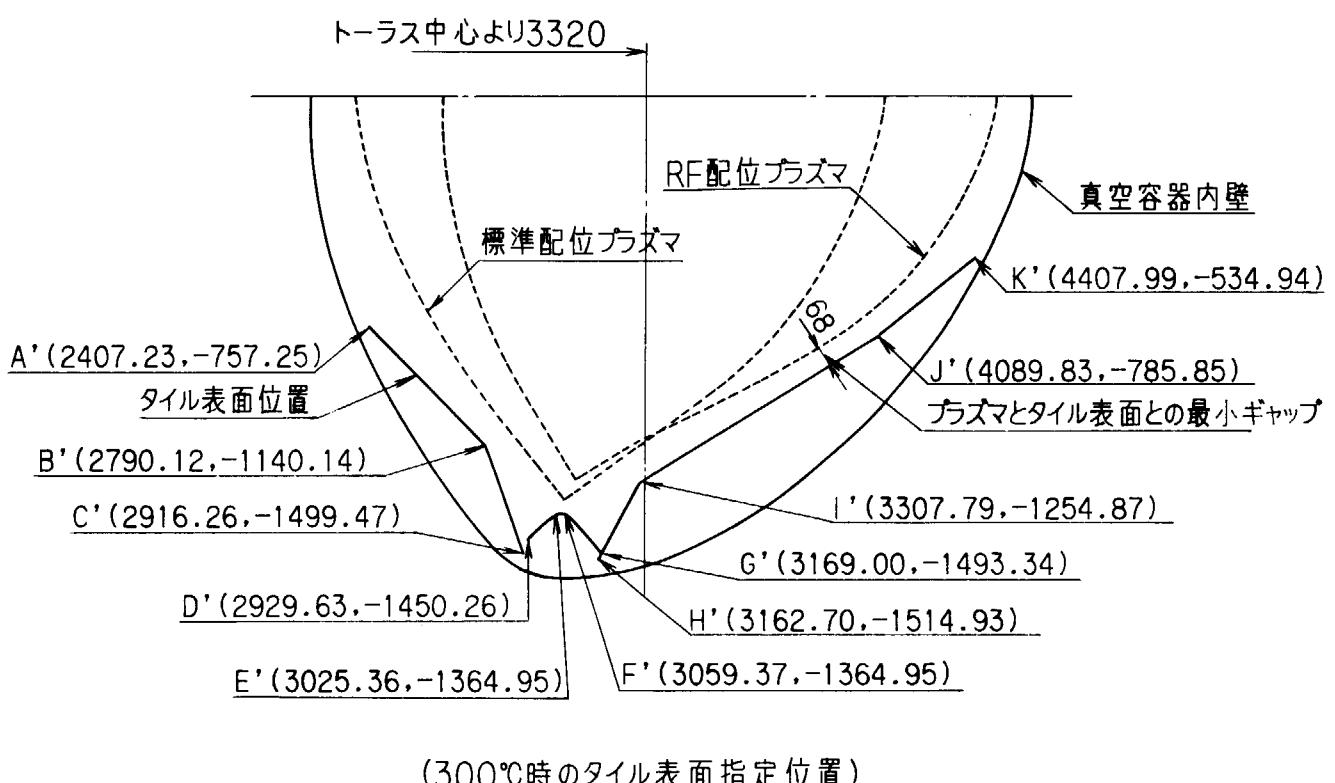
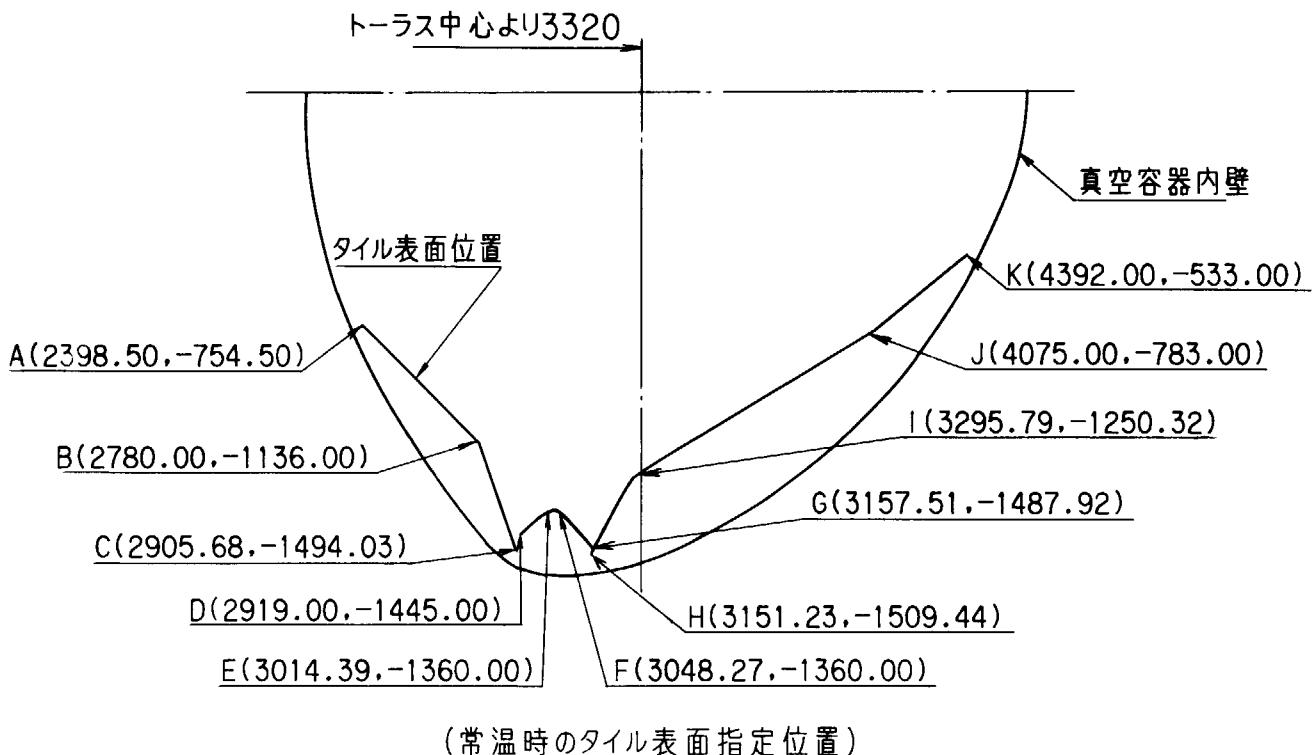


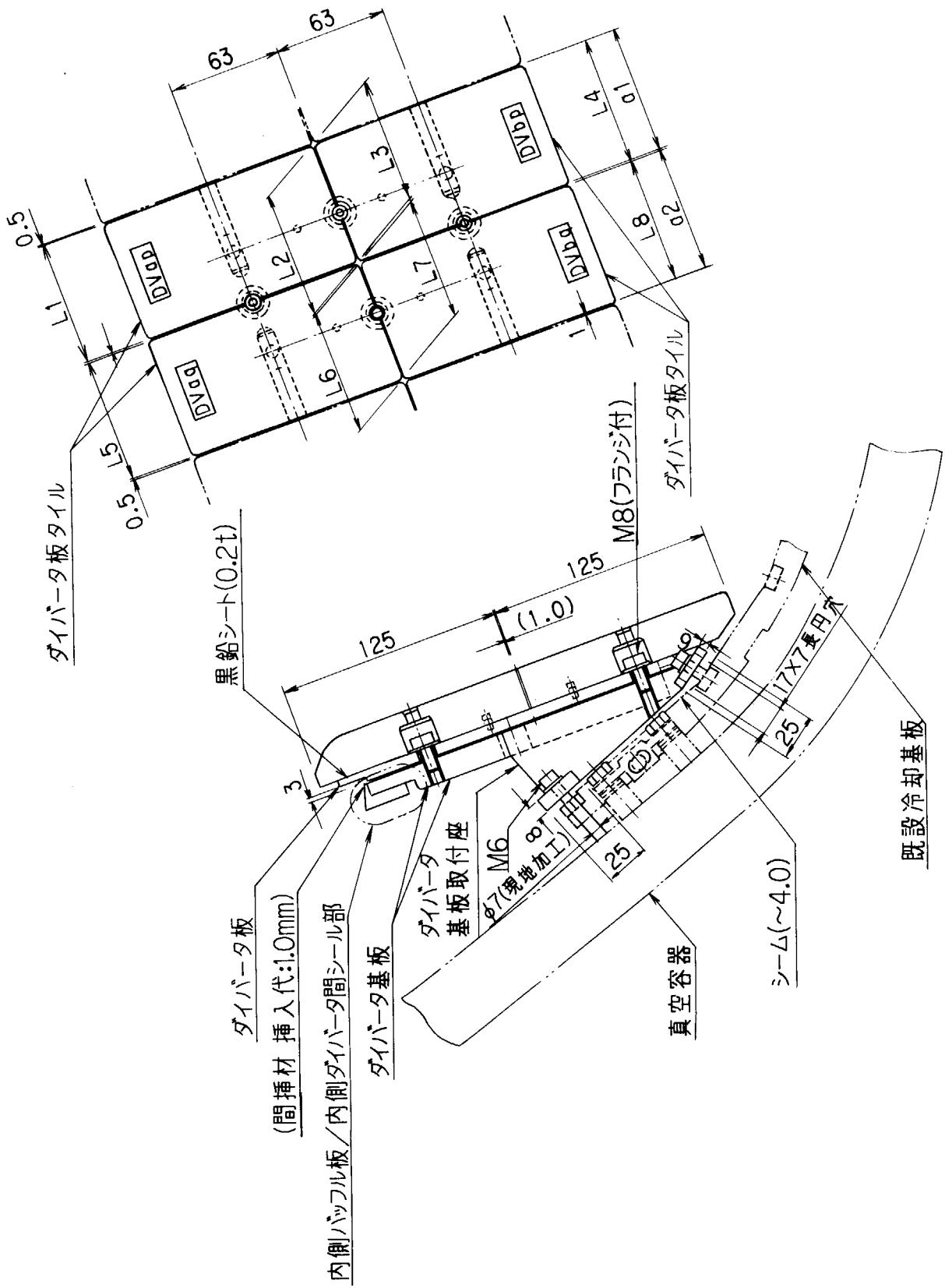
図 2.1 真空容器のポロイダル断面



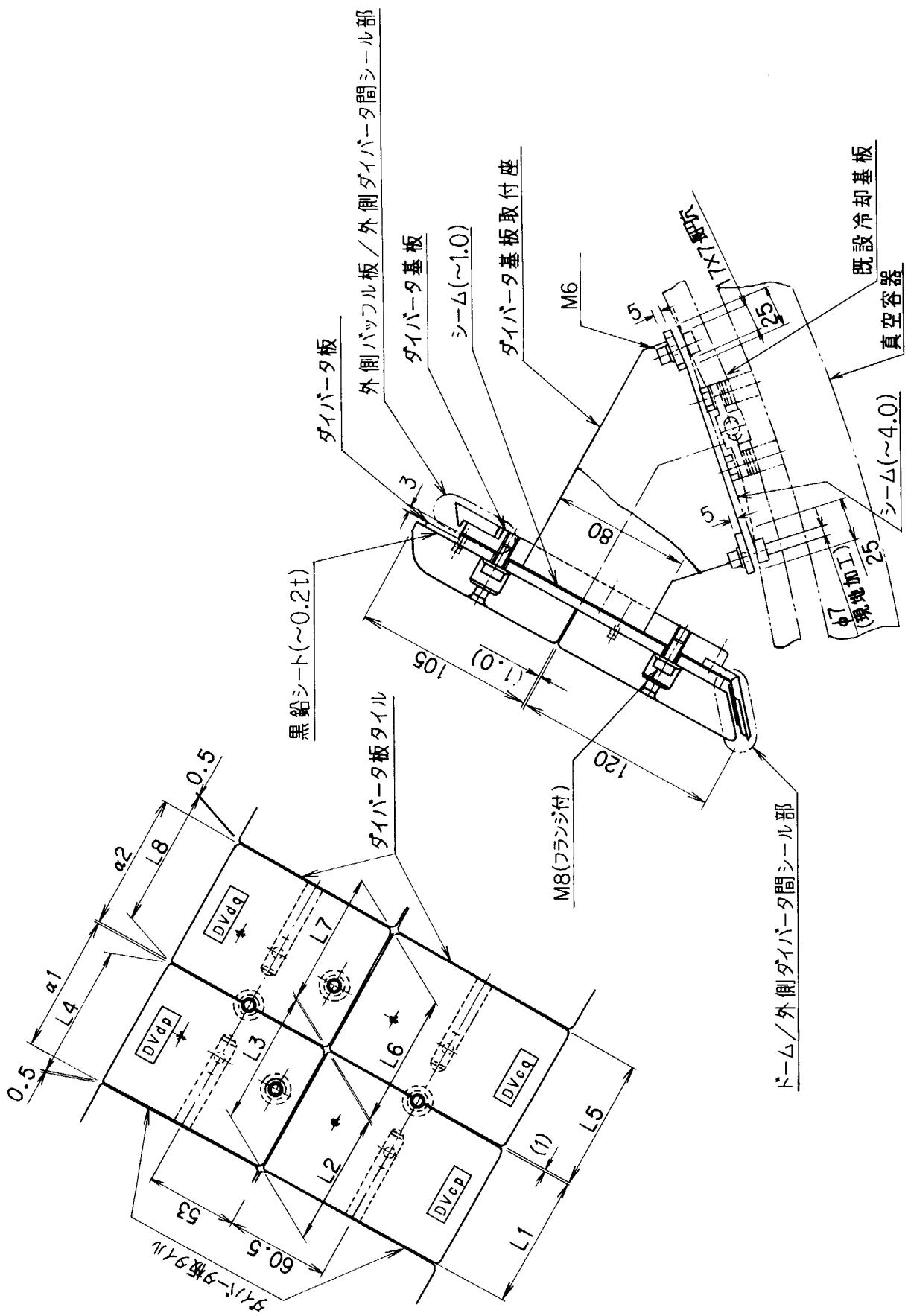
第 2.2 図 W型ダイバータの構造及び各部の名称



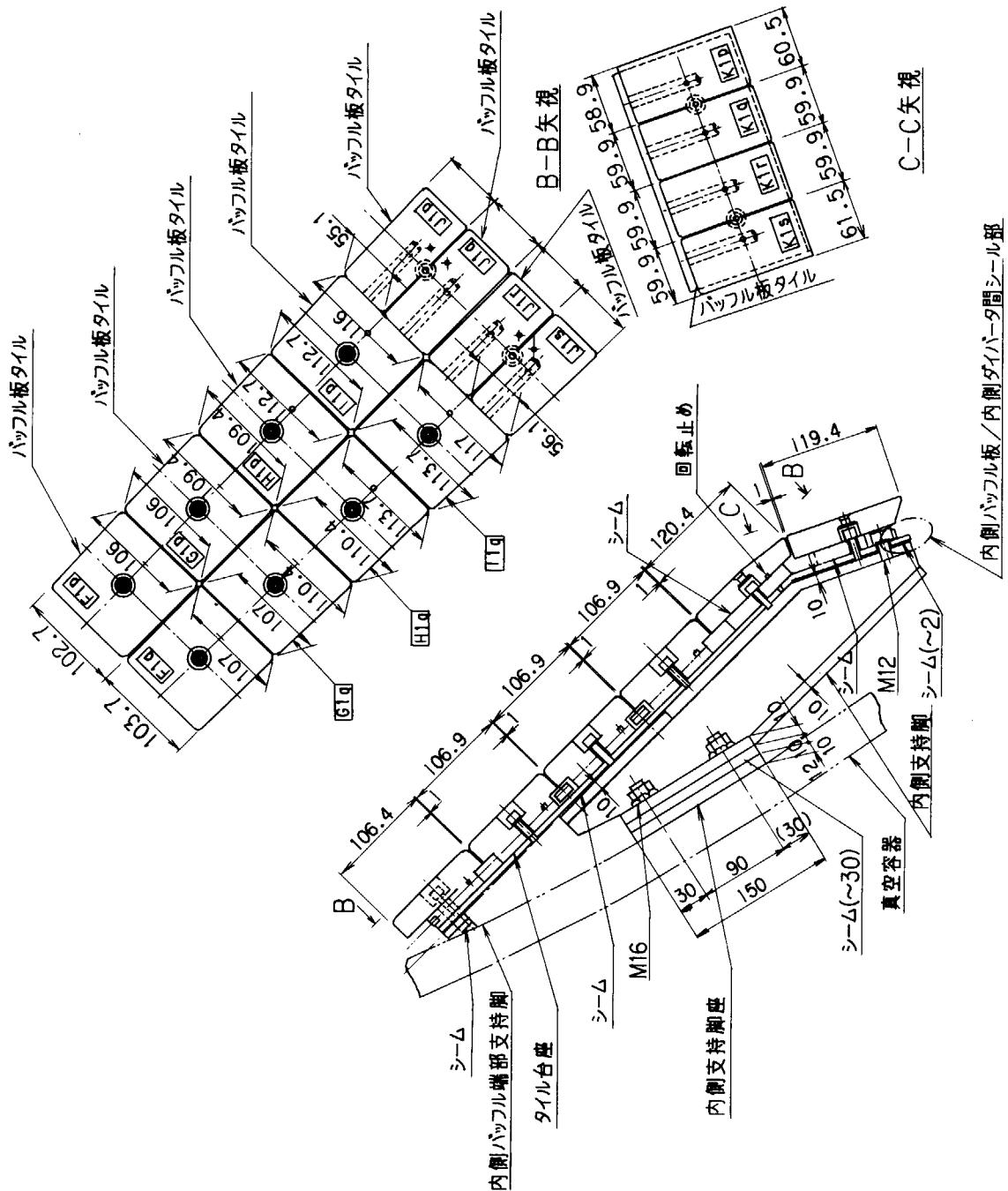
第 2.3 図 W型ダイバータの基本座標



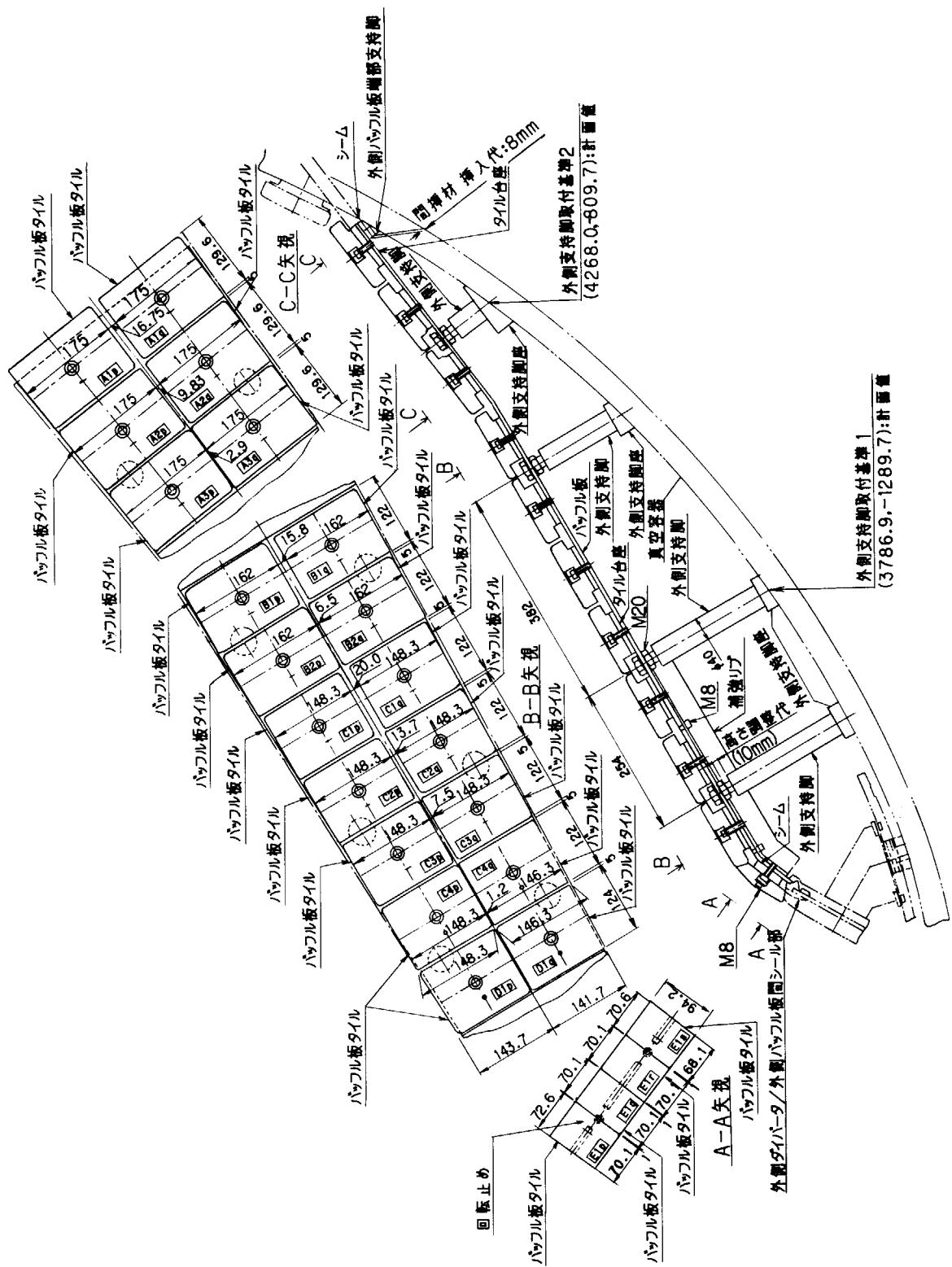
第 2.4 図 内側ダイバータの構造



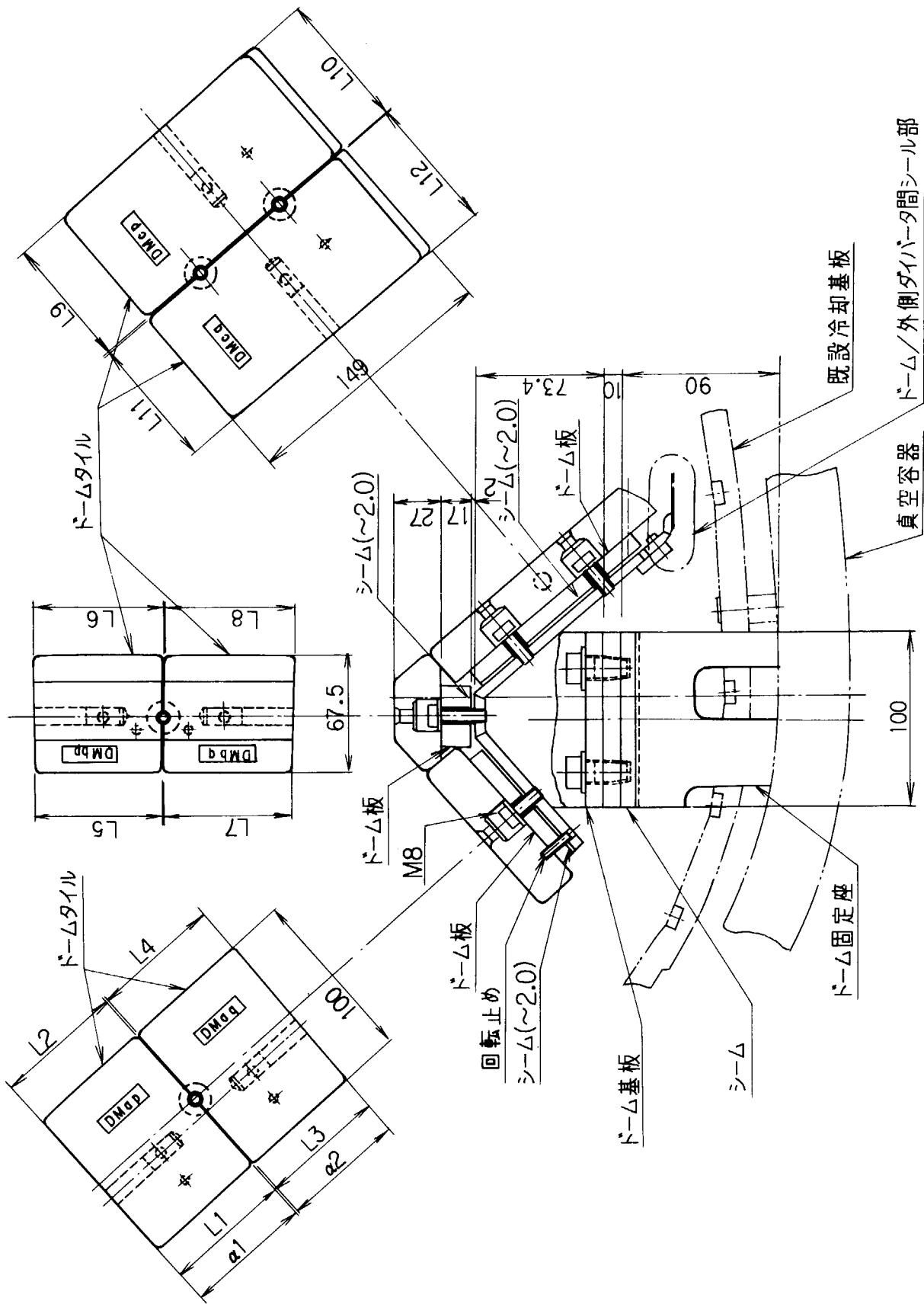
第2.5図 外側ダイバータの構造



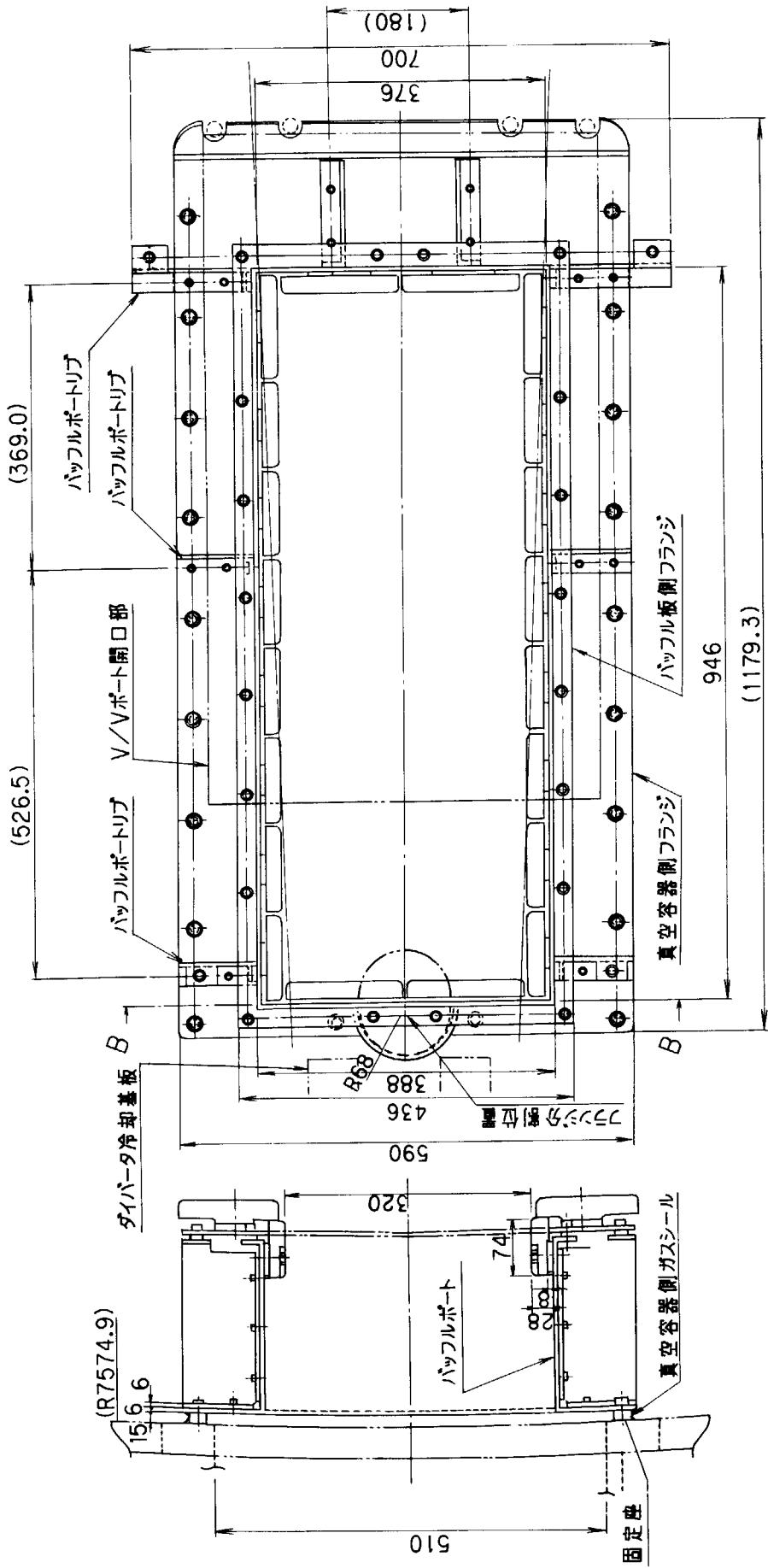
第 2.6 図 内側パッフル板



第 2.7 図 外側バッフル板

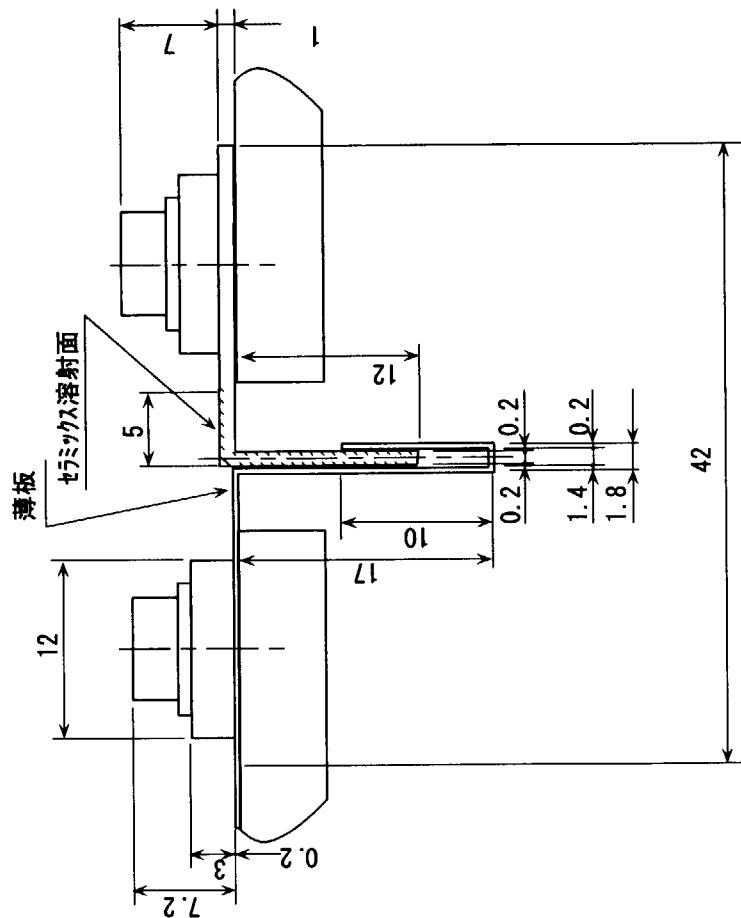
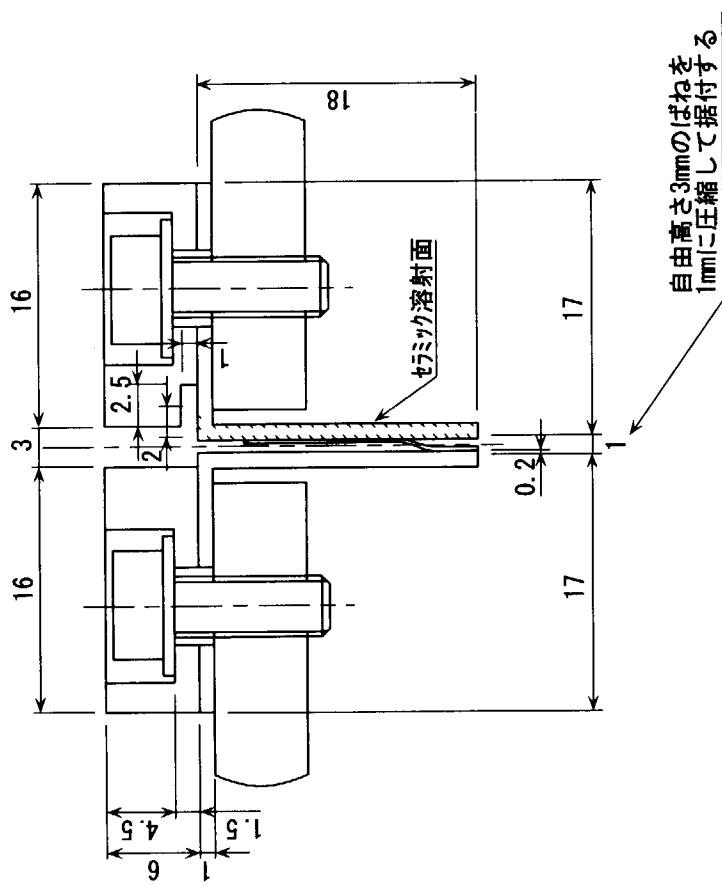


第2.8回 ドーム

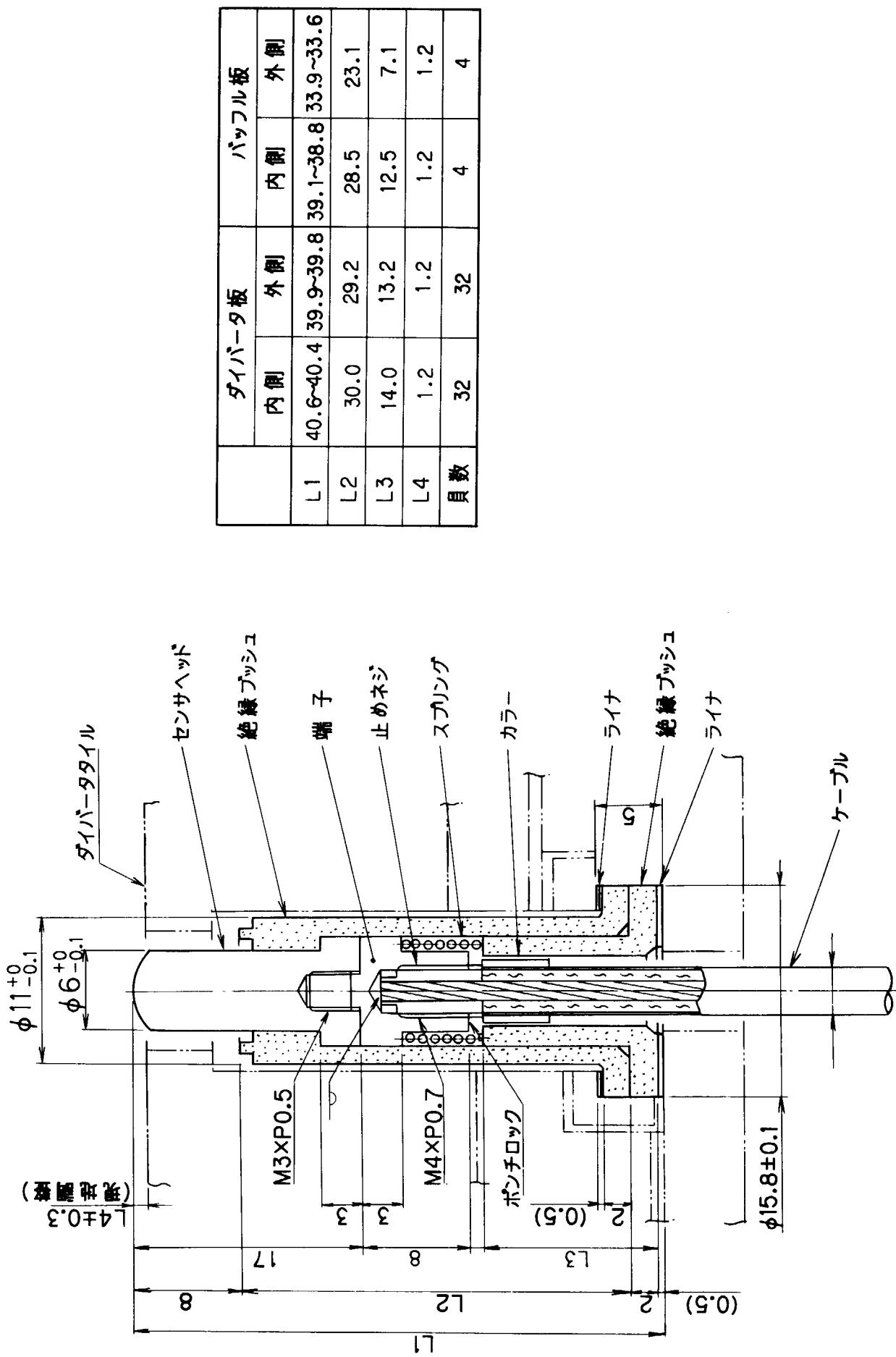


第 2.9 図 P-2ノバッフルポートの構造

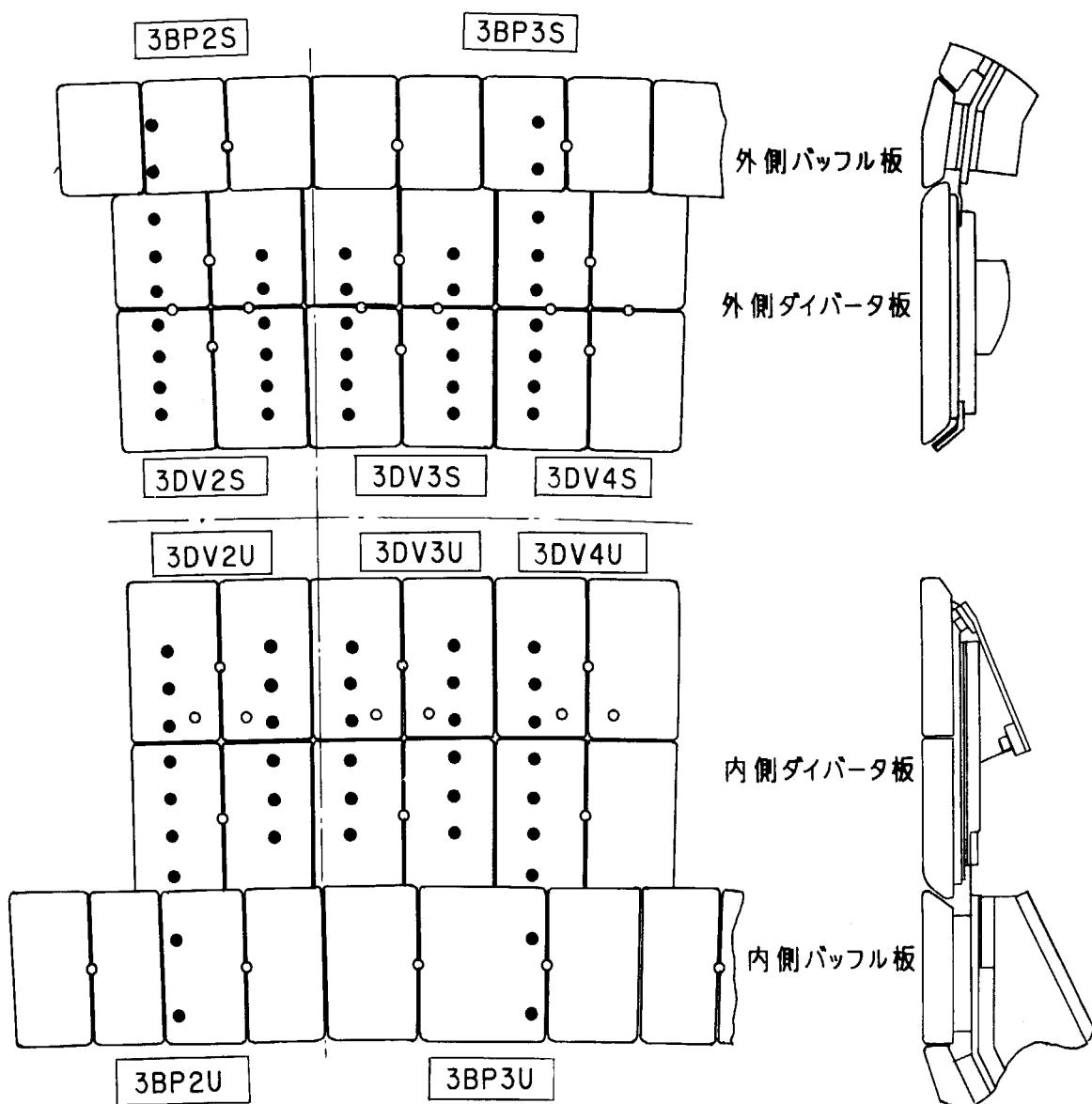
B-B矢視

b. 差込タイプa. 接触タイプ

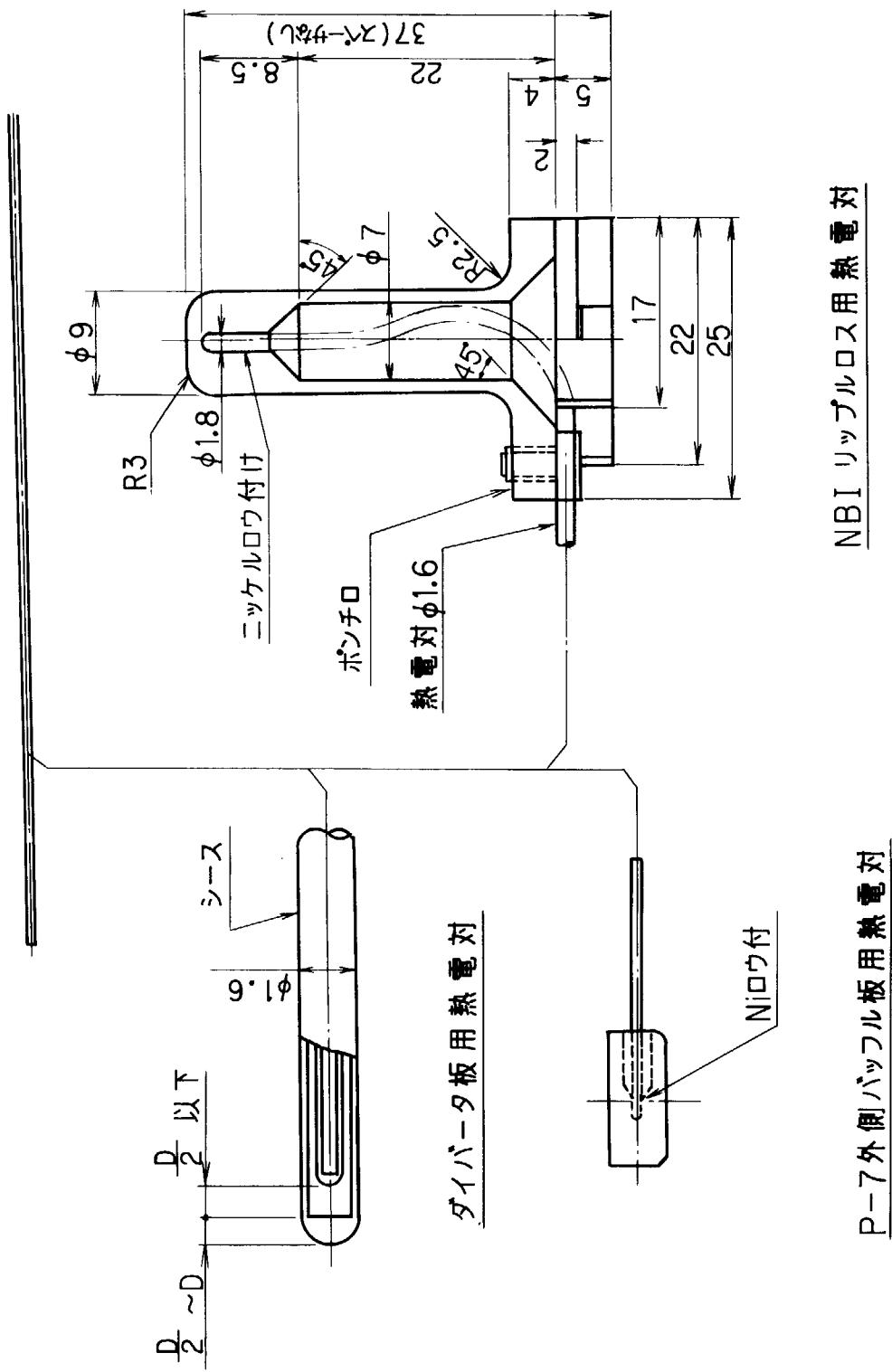
第 2.10 図 シール構造



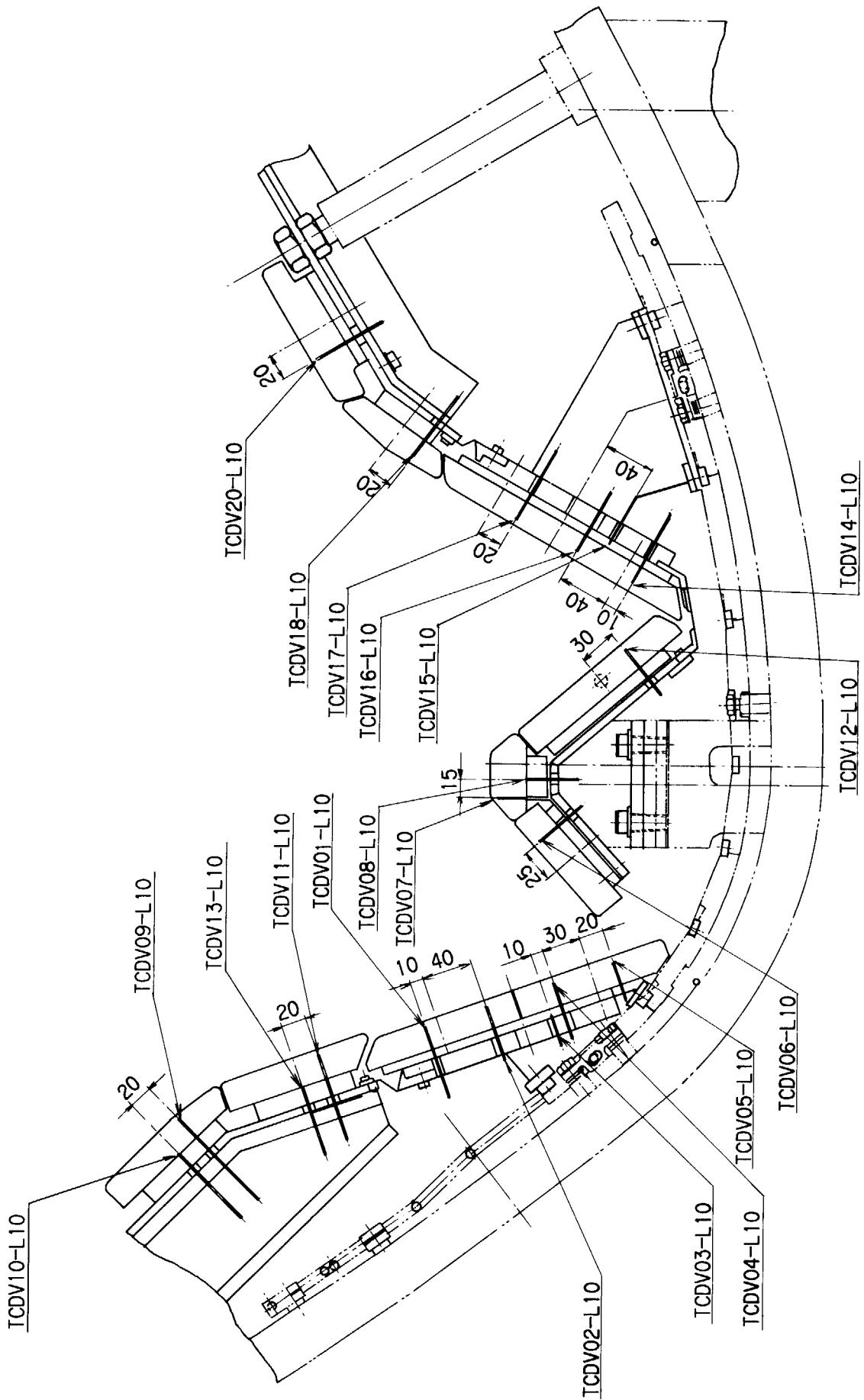
第 2.11 図 静電プローブ（ラングミューラ探針）の構造



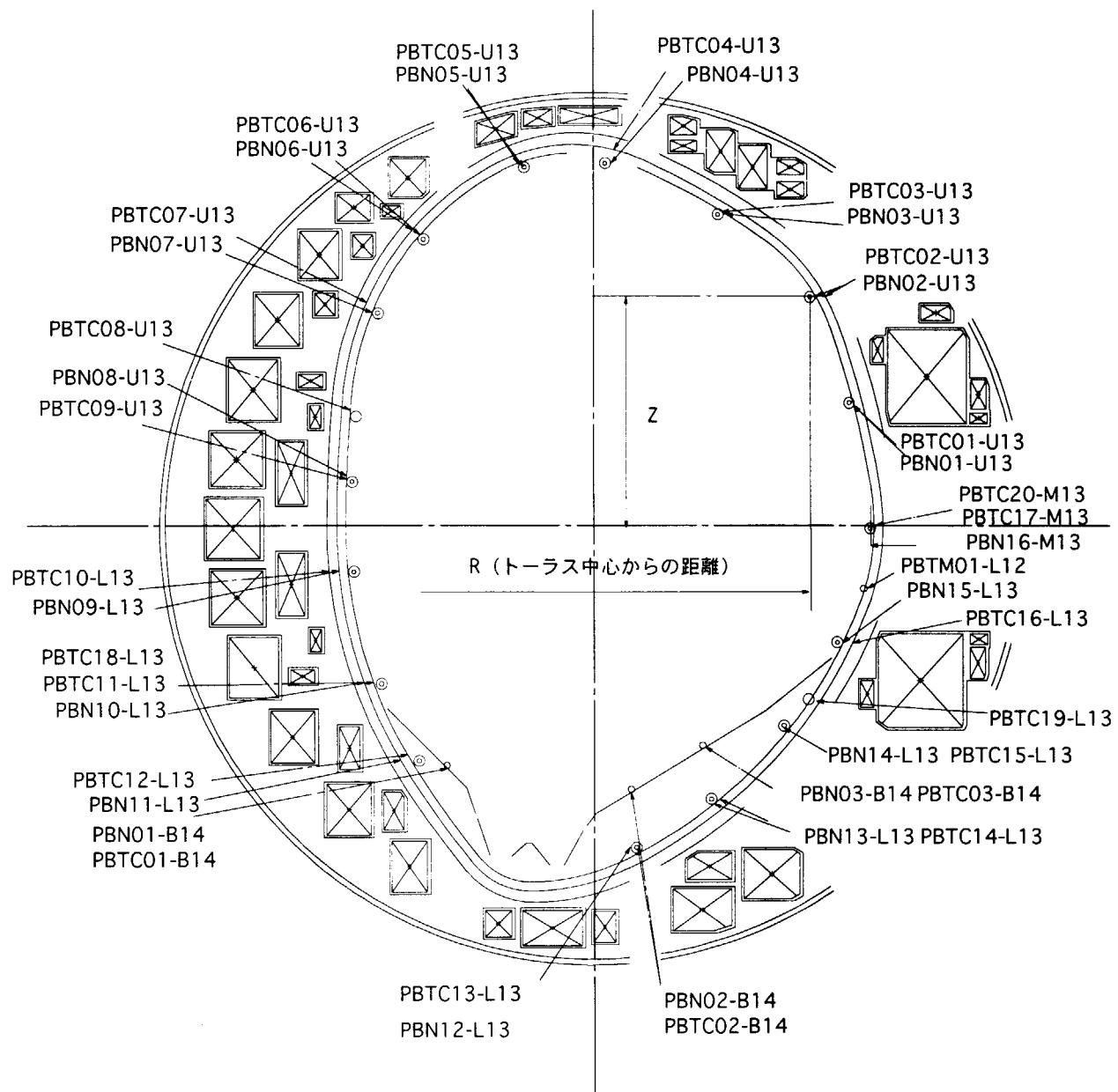
第 2.12 図 静電プローブの配置図



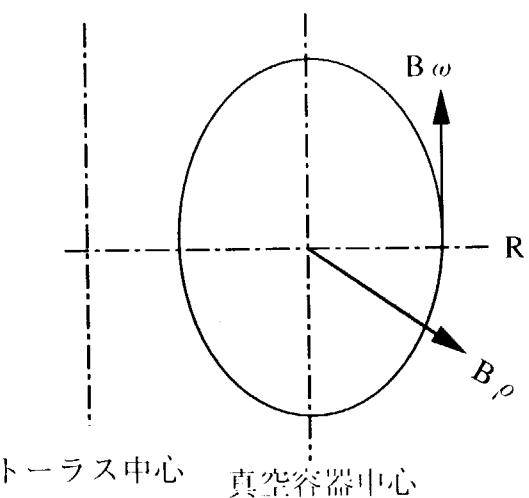
第 2.13 図 热電対の構造



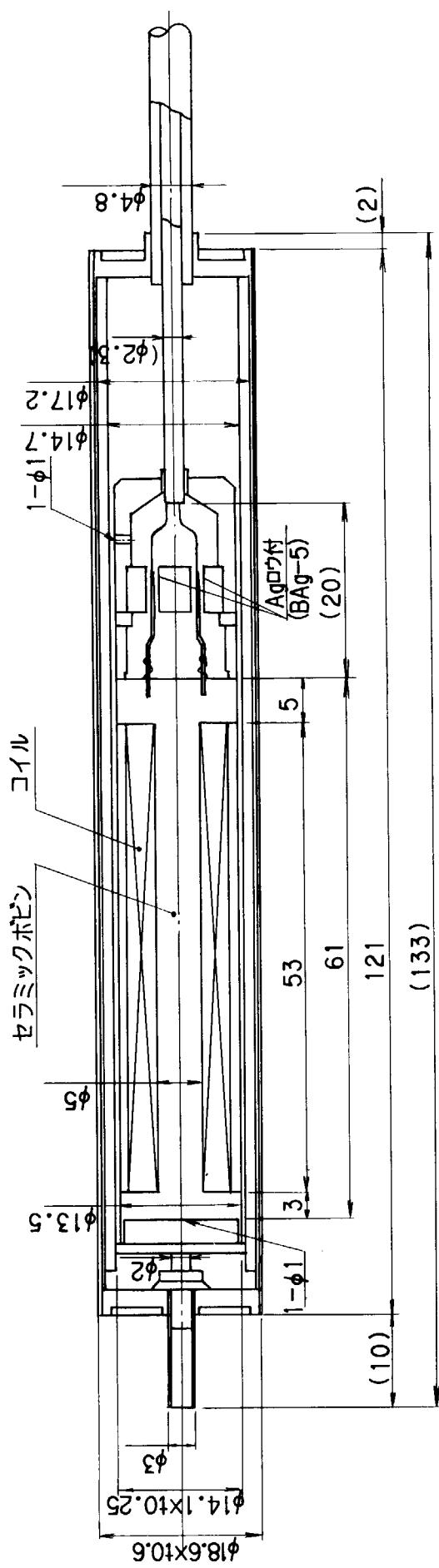
第 2.14 図 ダイバータ板用熱電対の配置



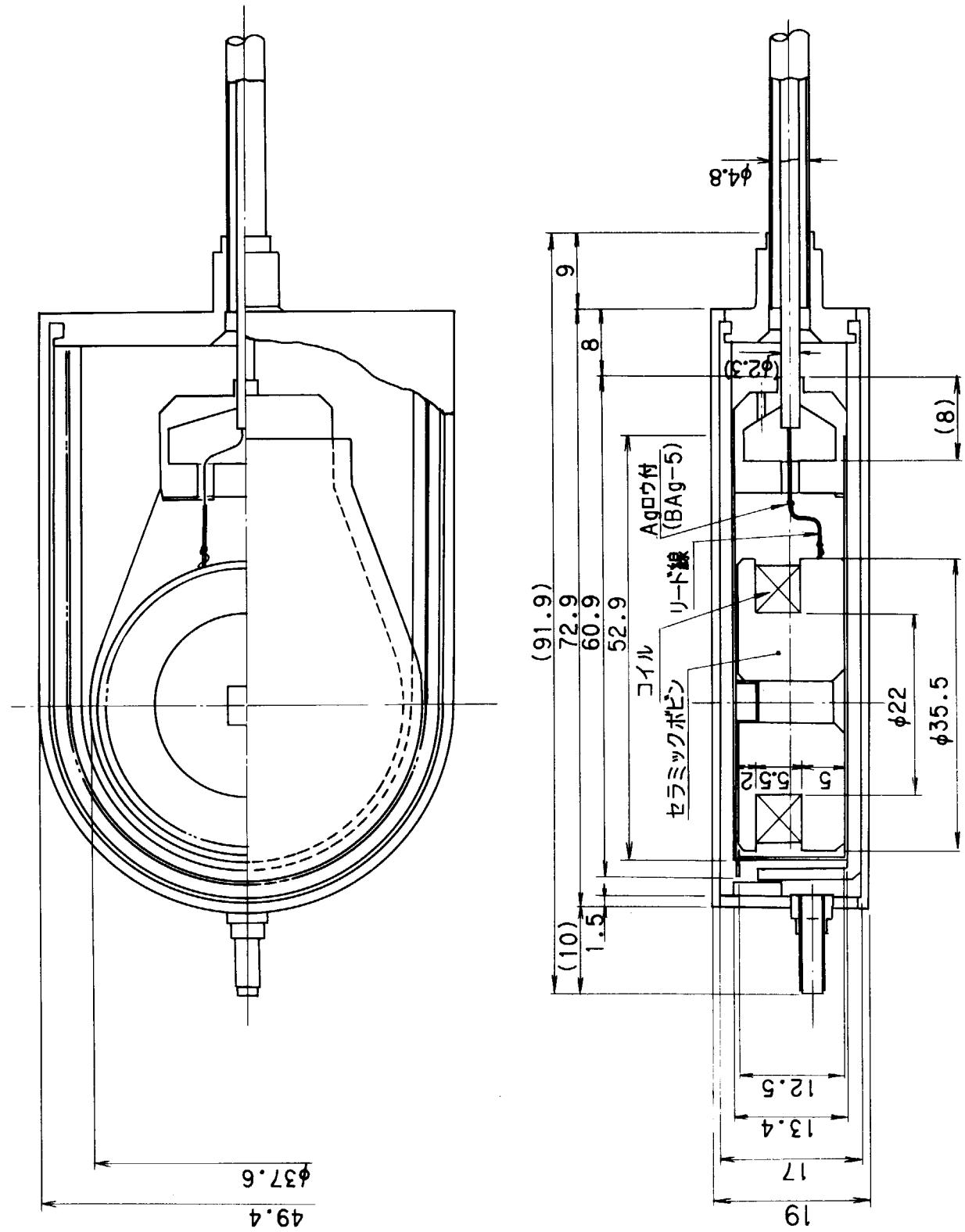
第 2.15 図 制御用プローブ (P-13~14間) の配置図



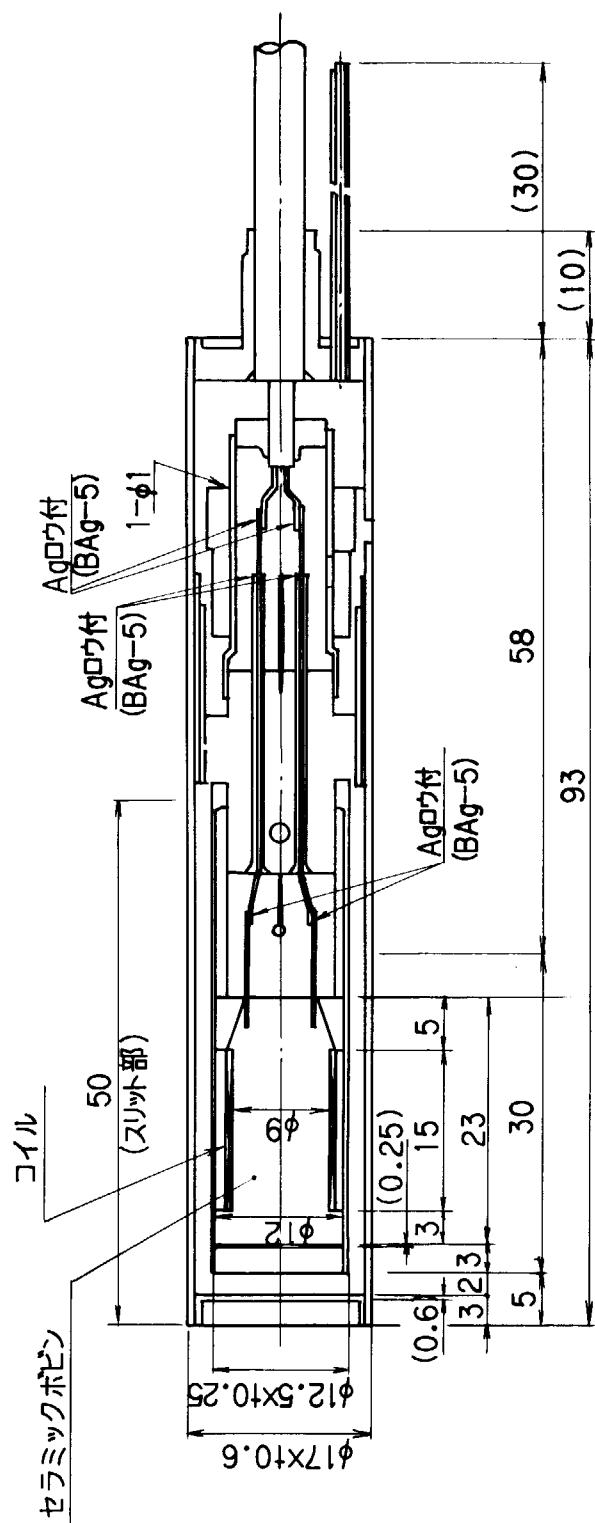
第 2.16 図 ポロイダル断面における磁場成分



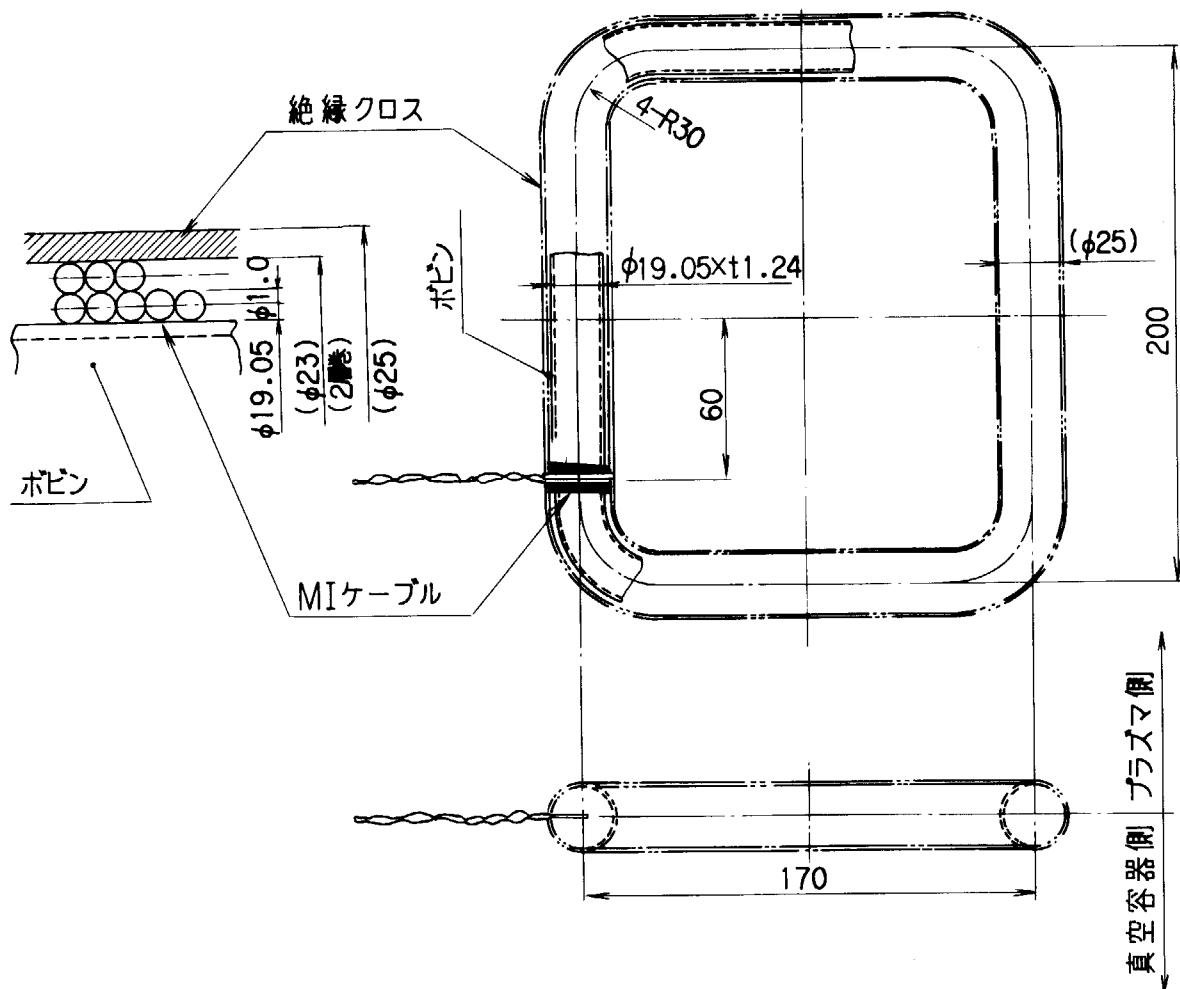
第 2.17 図 TC プローブの構造



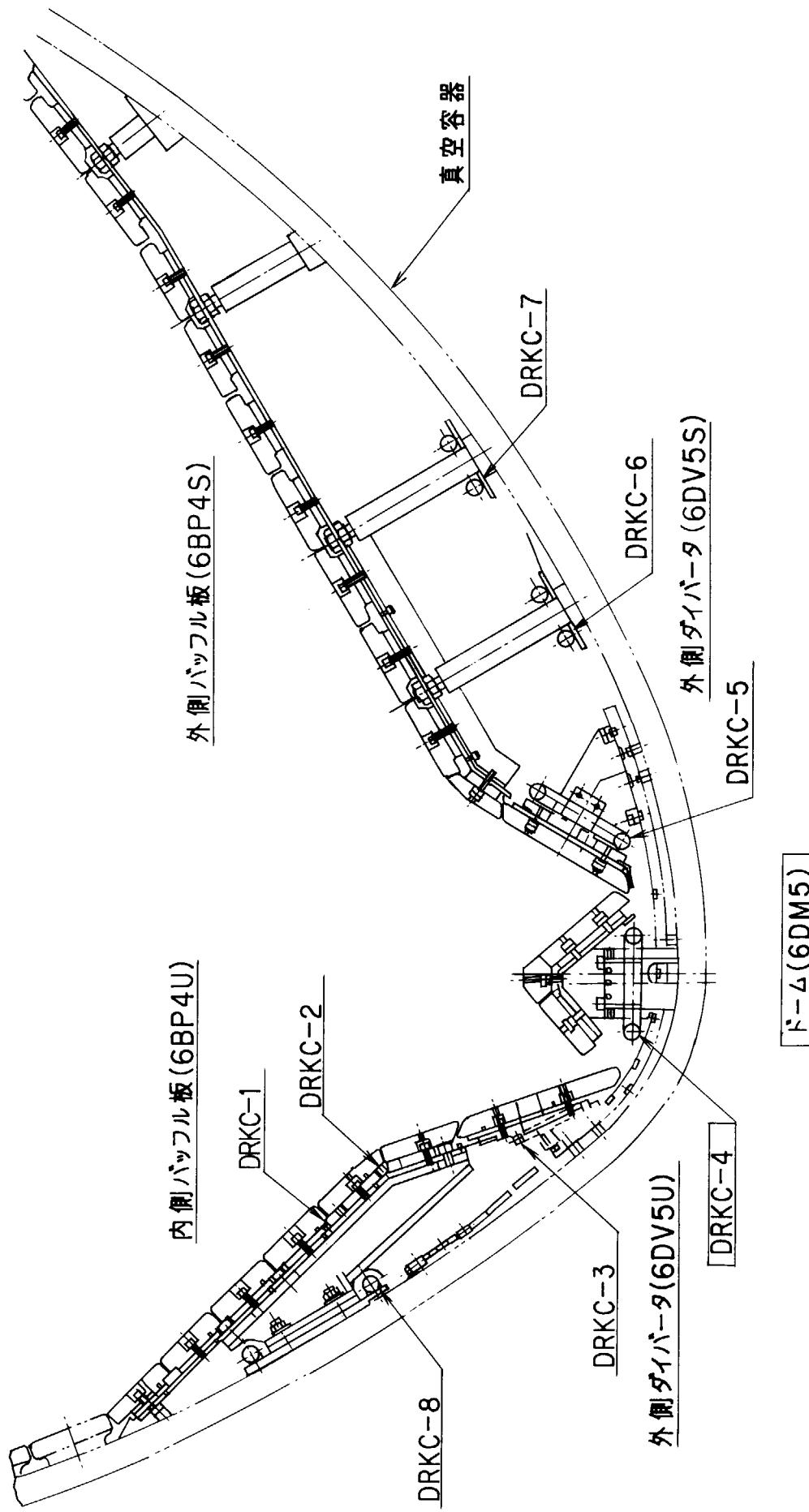
第2.18 図 Nプロープの構造



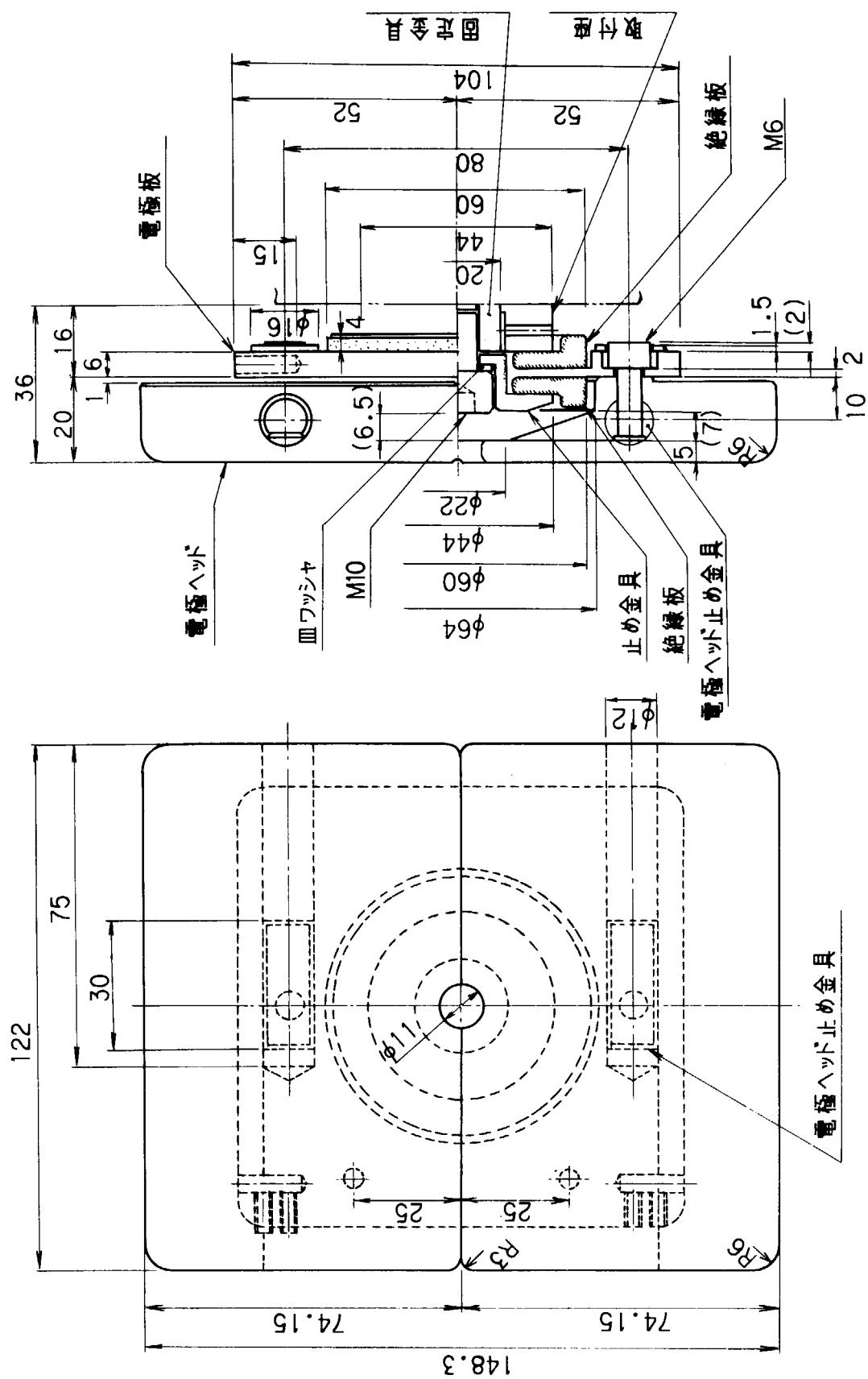
第 2.19 図 TM プローブの構造



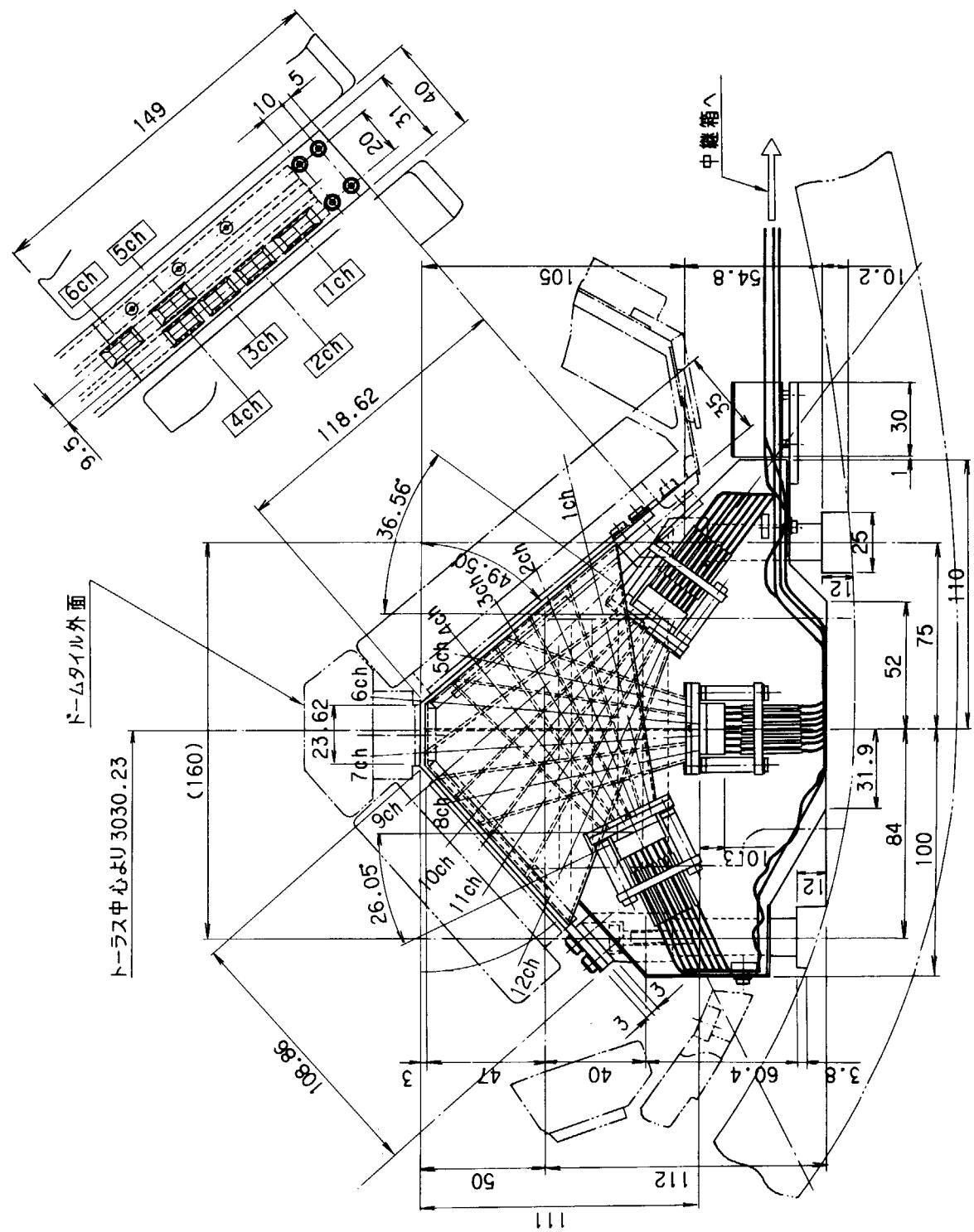
第 2.20 図 ハロー電流プローブ（タイプA）の構造



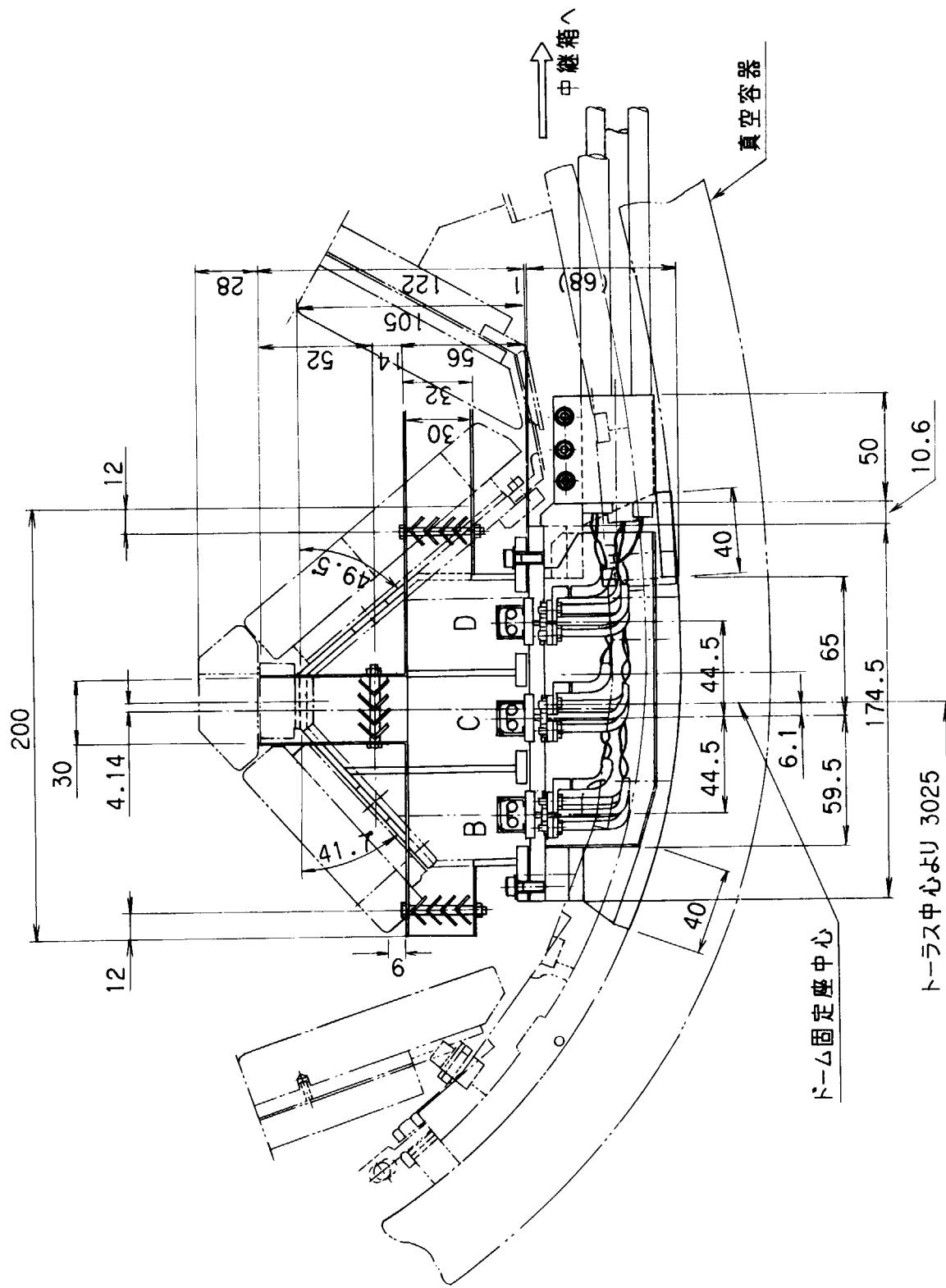
第 2.21 図 ハローー電流プロープの配置図



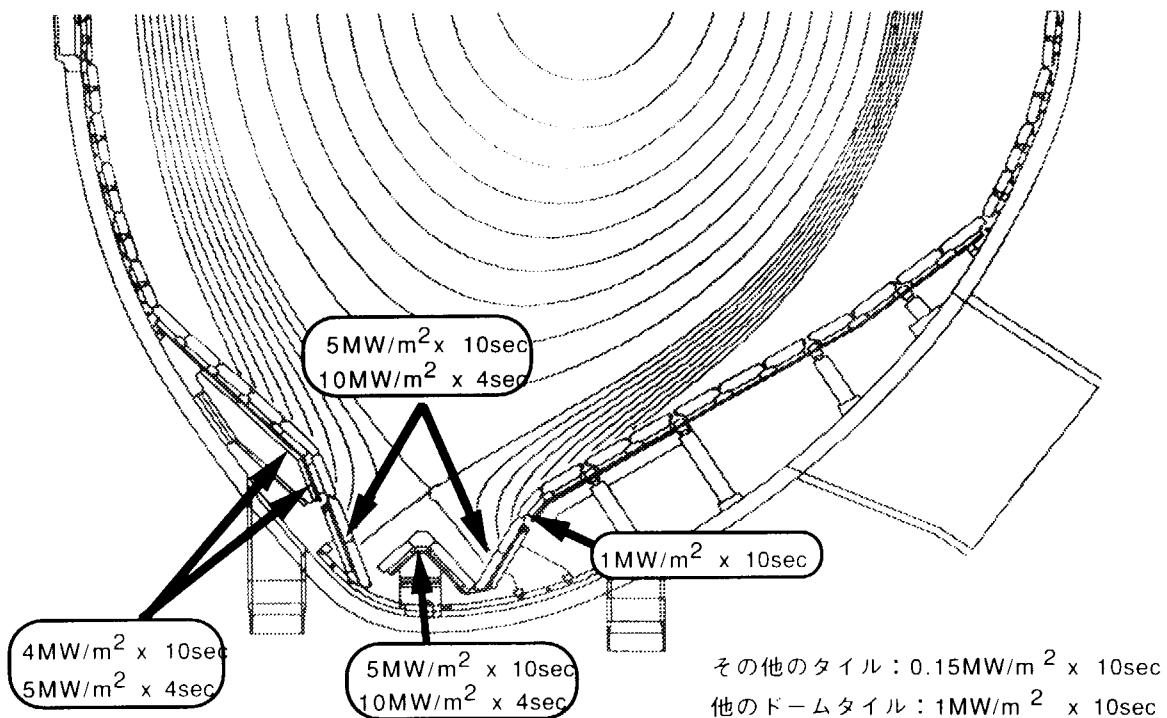
第 2.22 図 第一壁グローブ電極



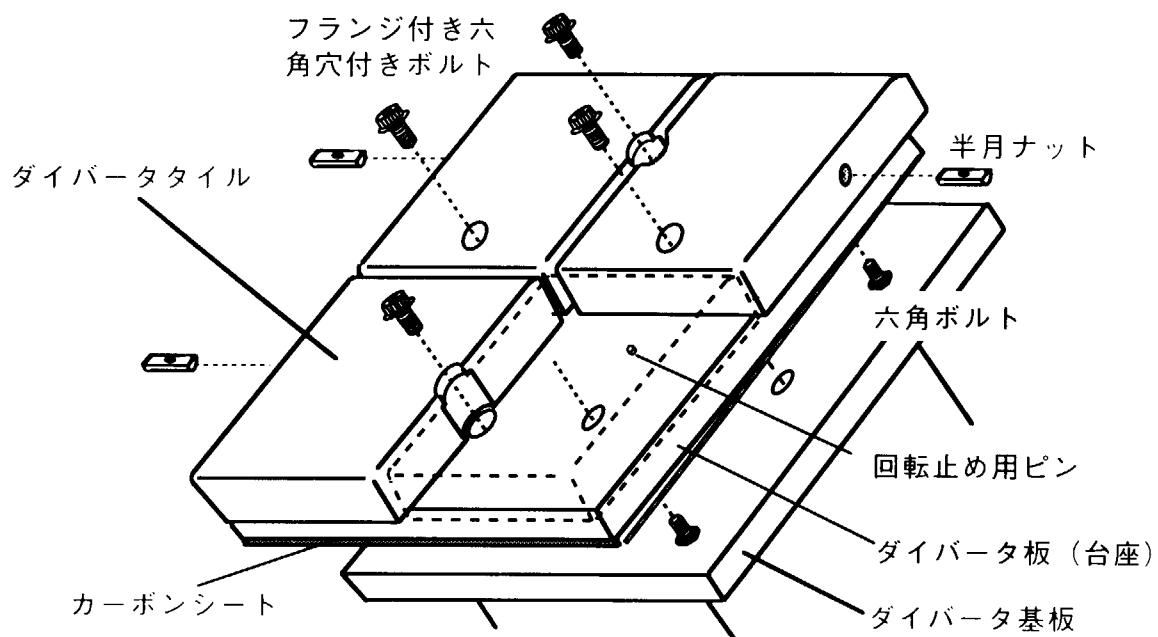
第 2.23 図 ボロメータの配置図



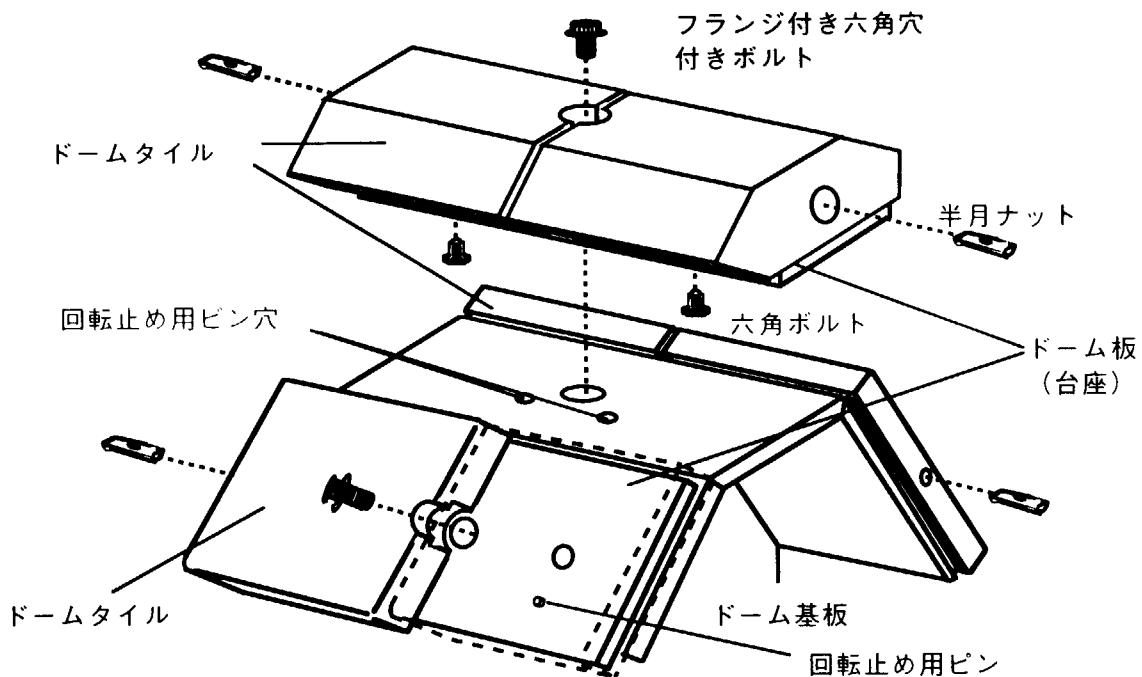
第 2.24 図 イオンゲージ（ドーム下部）



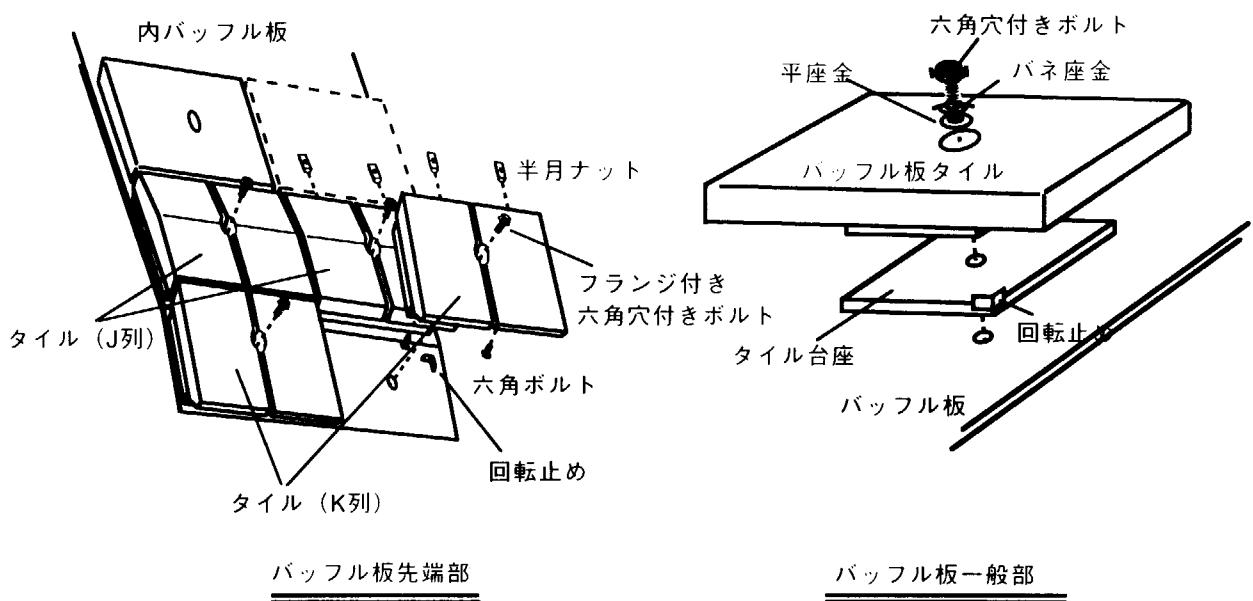
第 3.1 図 W型ダイバータの熱負荷条件



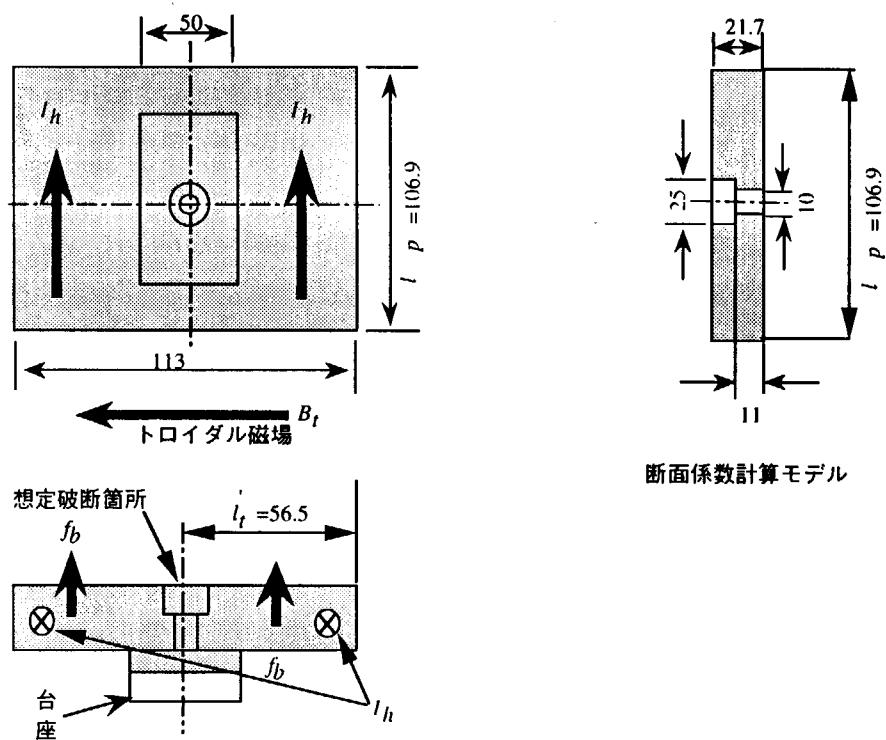
第 3.2 図 ダイバータタイルの取付け構造



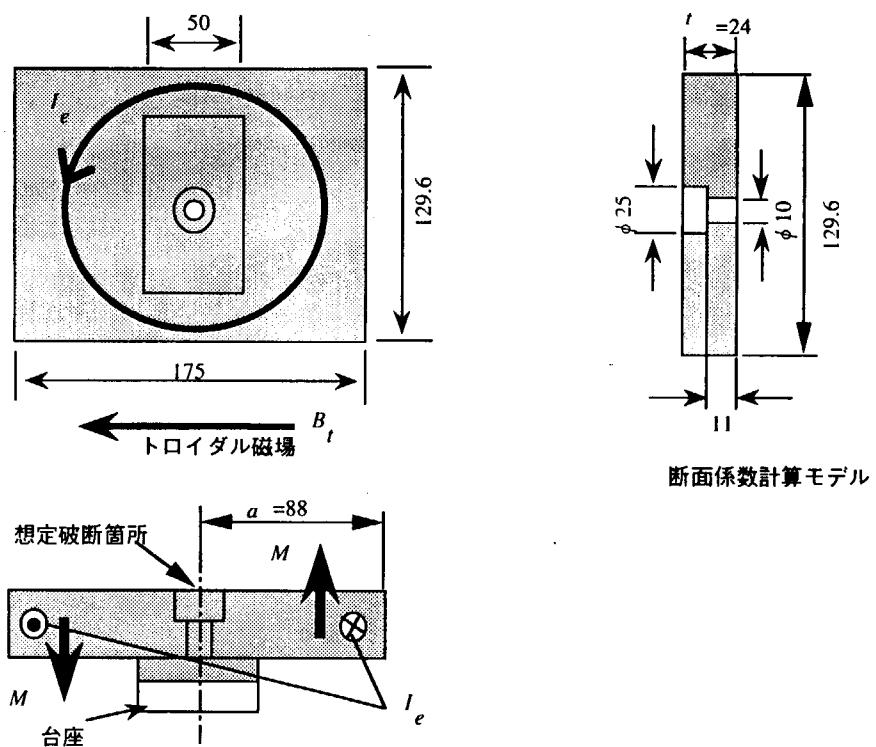
第 3.3 図 ドームタイルの取付け構造



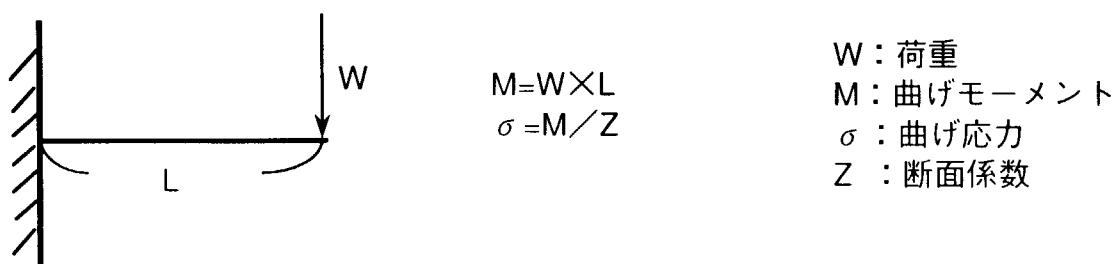
第 3.4 図 バッフル板タイルの取付け構造



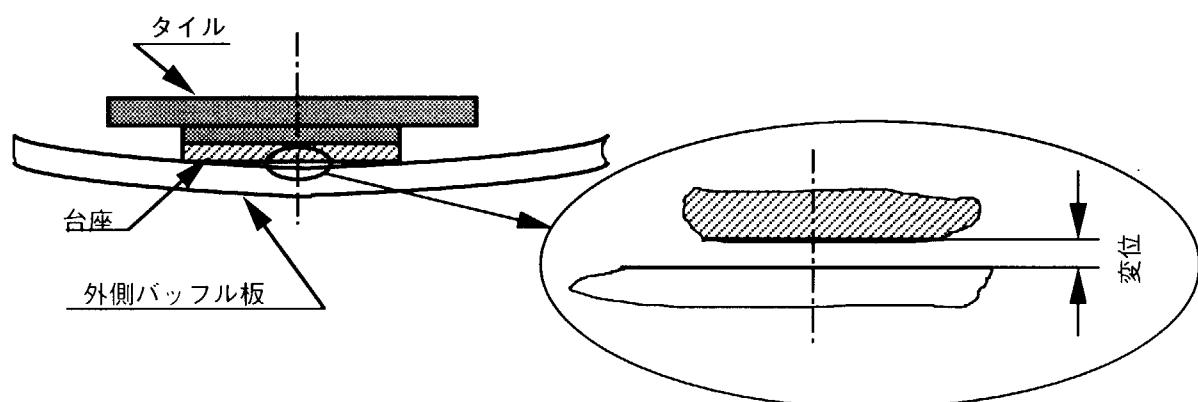
第 3.5 図 タイルのハロー電流に対する構造強度評価モデル



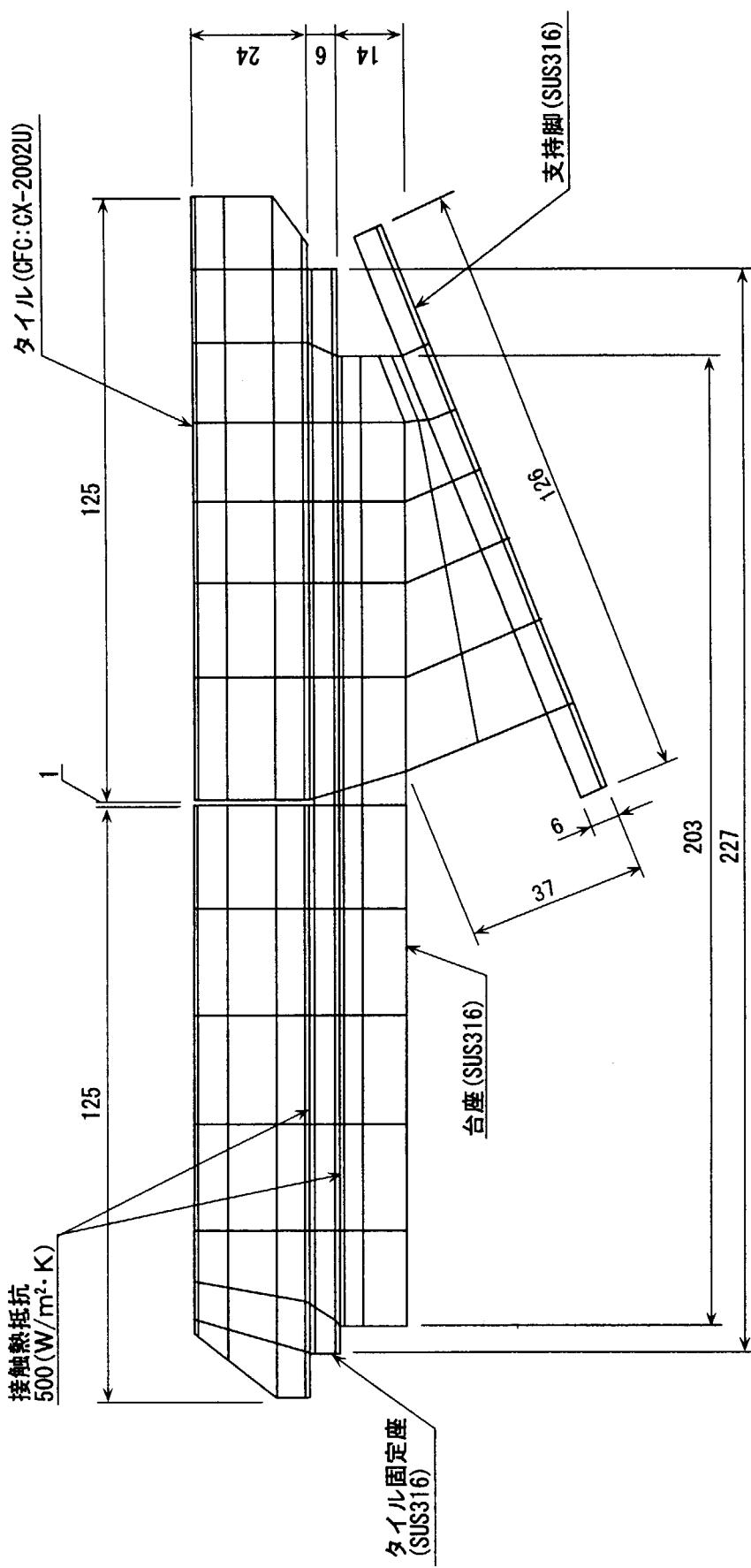
第 3.6 図 タイルの渦電流に対する構造評価モデル



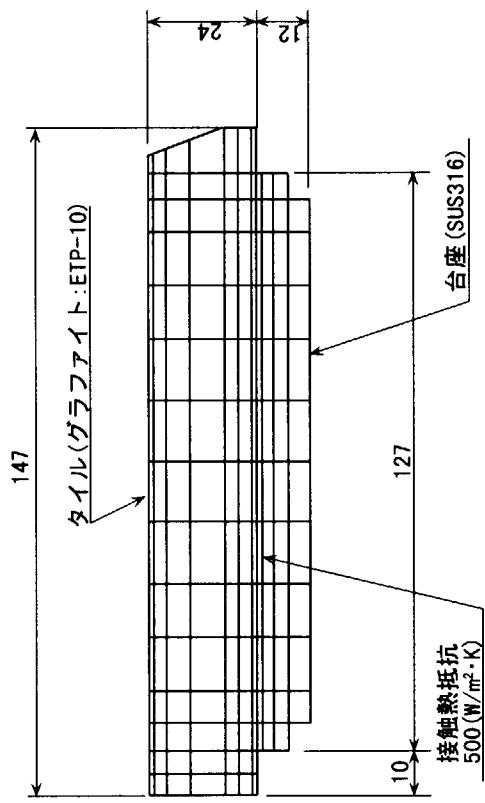
第 3.7 図 加速度に対する強度評価モデル



第 3.8 図 タイルの変形に対するボルト部の強度評価

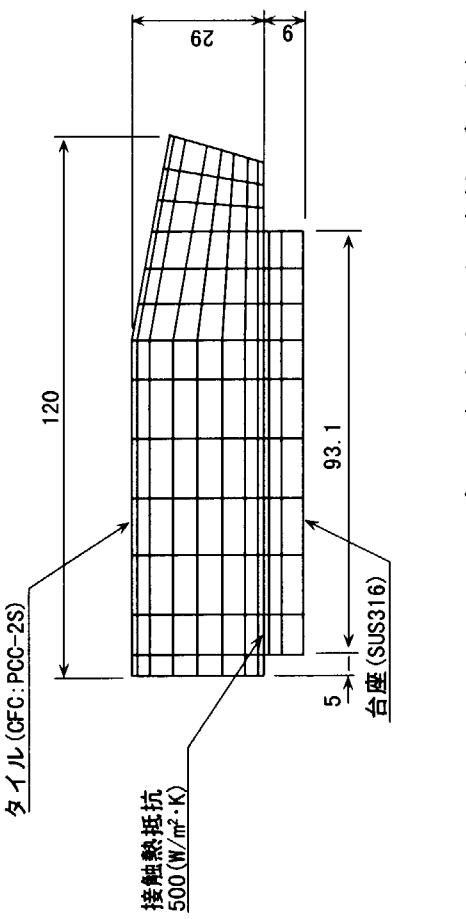


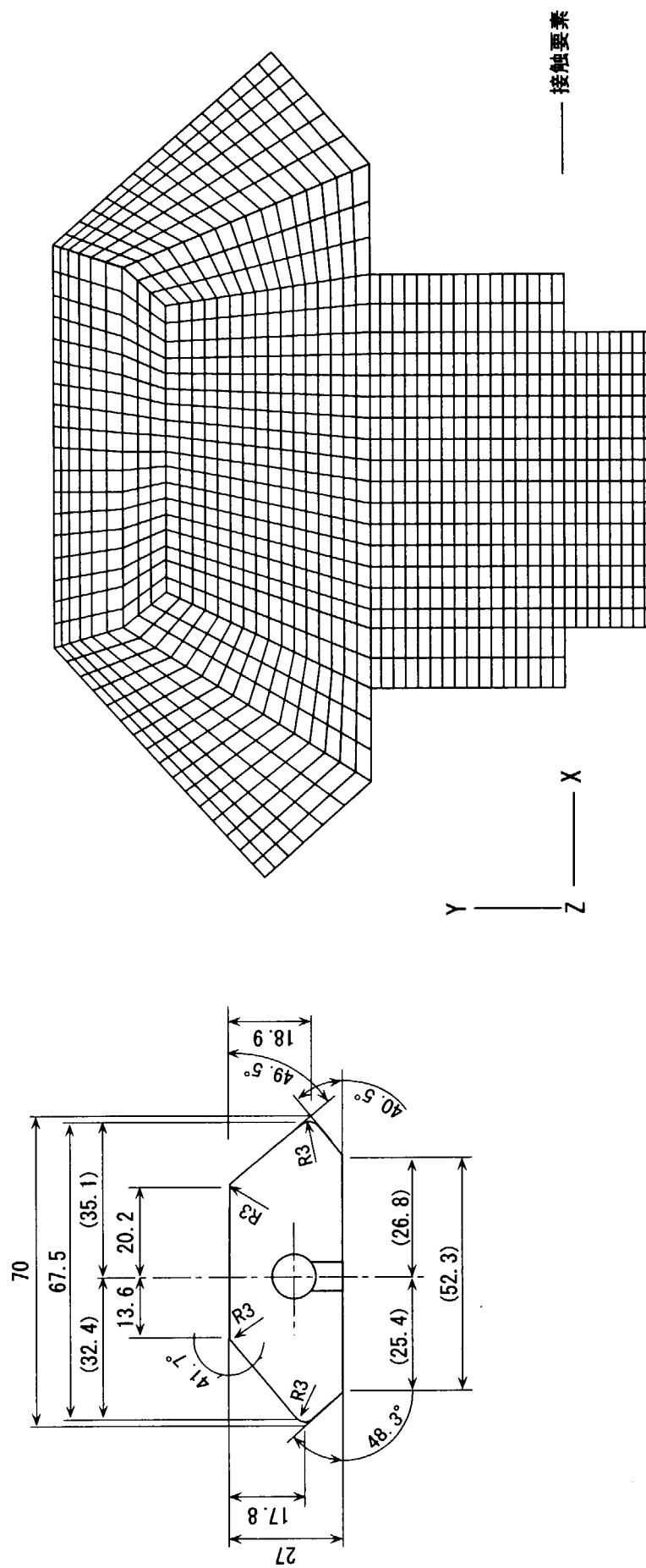
第 3.9 図 内側ダイヤパータ板 (DVa, DVb) の熱解析モデル



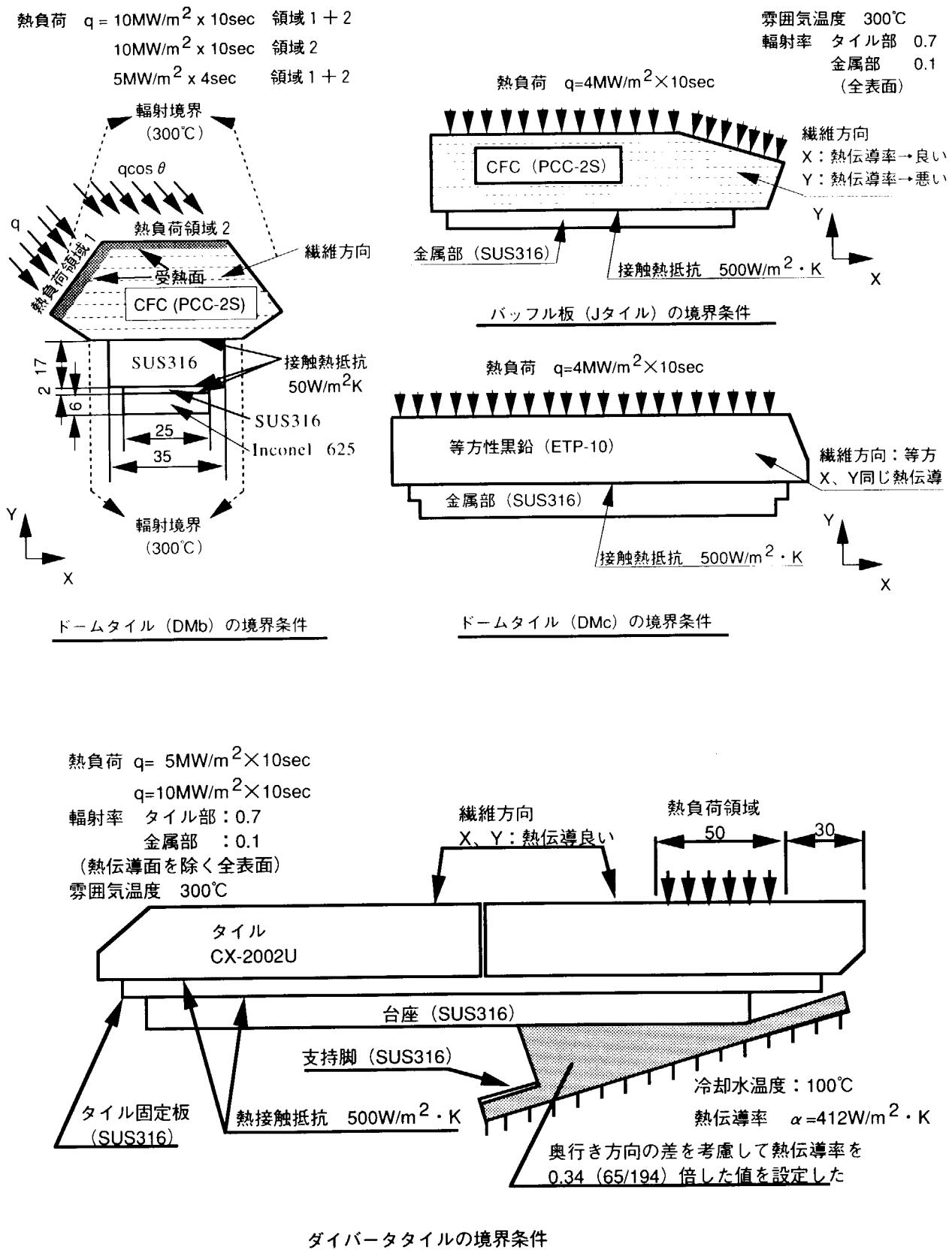
ドームタイル (DMc) の解析モデル寸法

第 3.10 図 パッフル板 (J) 及びドームタイル (DMc) の熱解析モデル

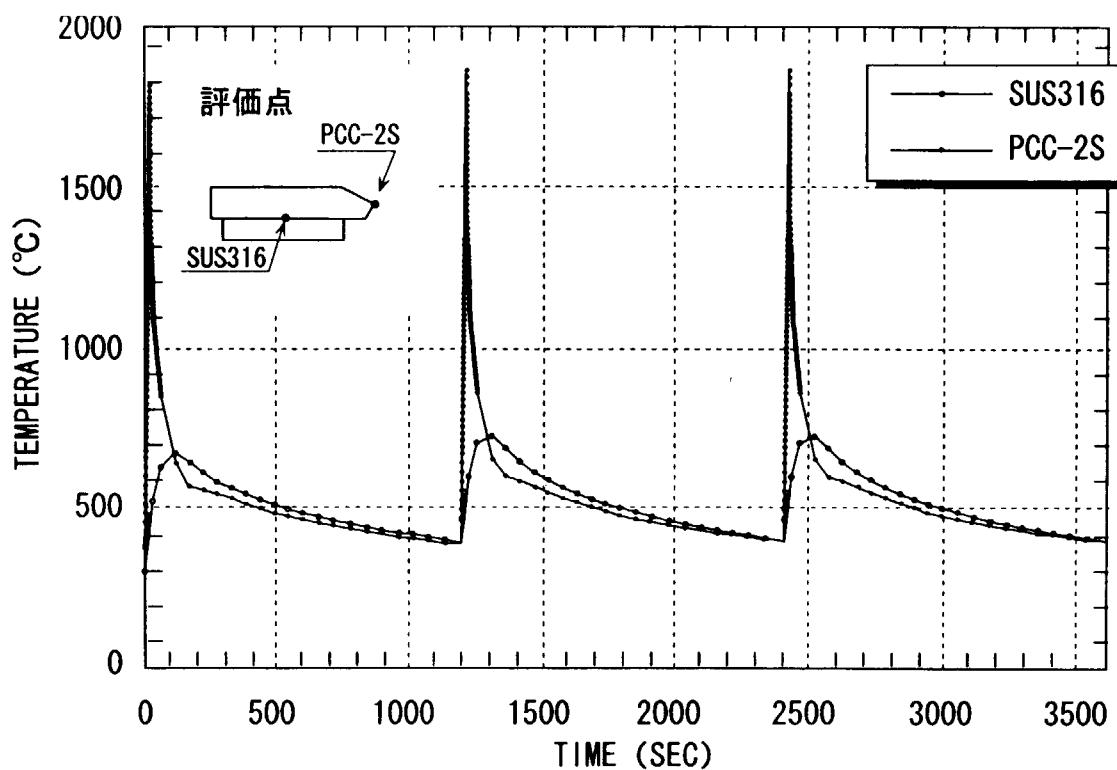
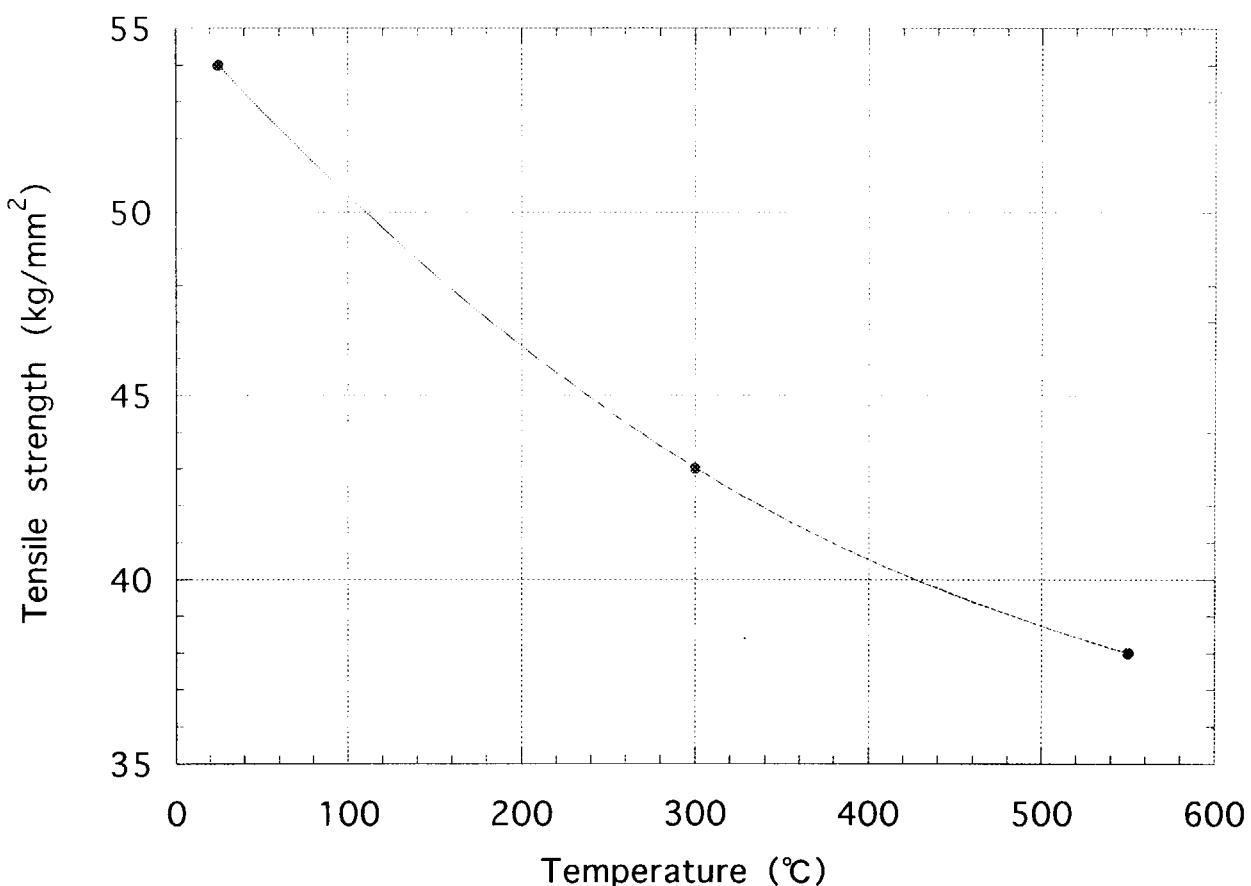




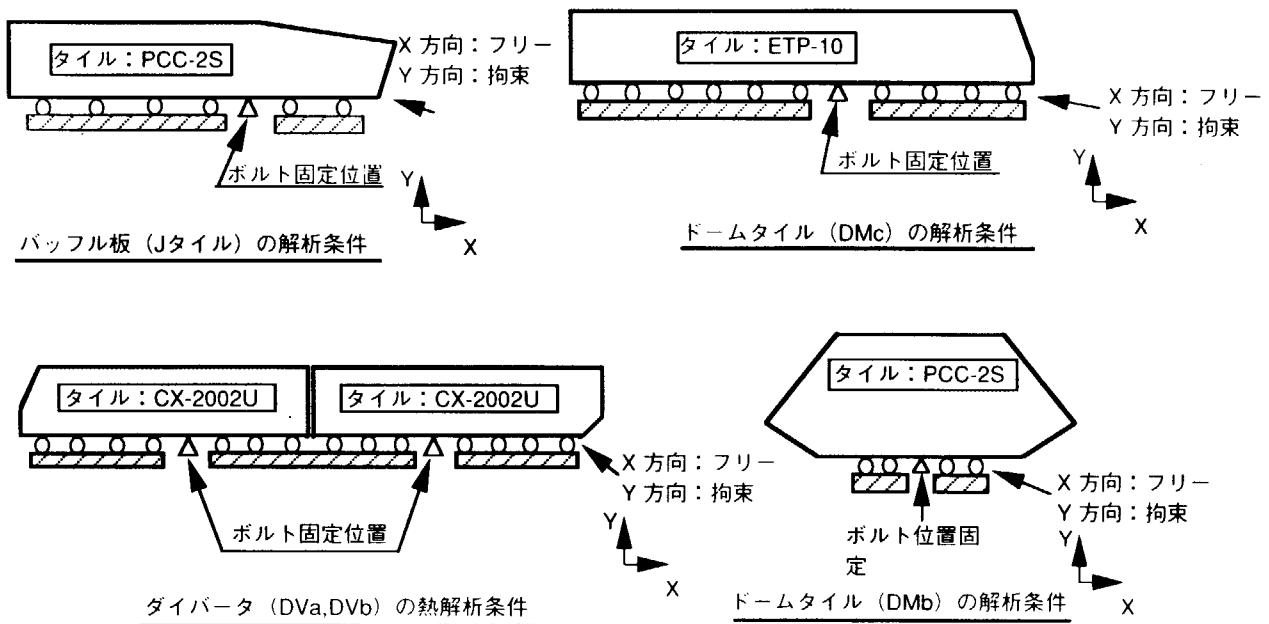
第 3.11 図 頂部ドームタイル (DMb) の熱解析モデル



第 3.12 図 各タイルの熱応力境界条件

第 3.13 図 バッフル板 (J) 温度時刻歴図 (4MW/m²×10sec、3サイクル)

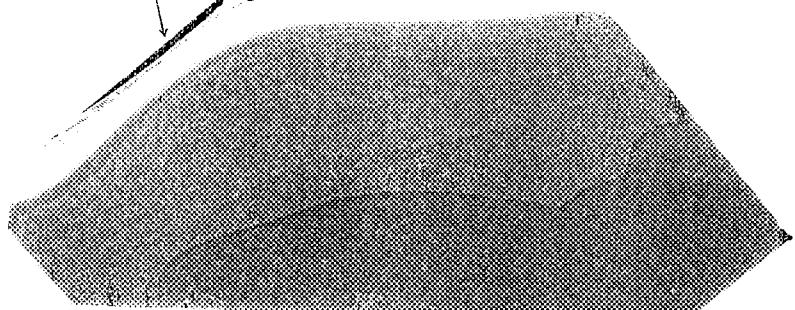
第 3.14 図 SUS316の引張り応力の温度特性



第 3.15 図 各タイルの熱応力拘束条件

最大値 28.96 MPa

節点番号 24

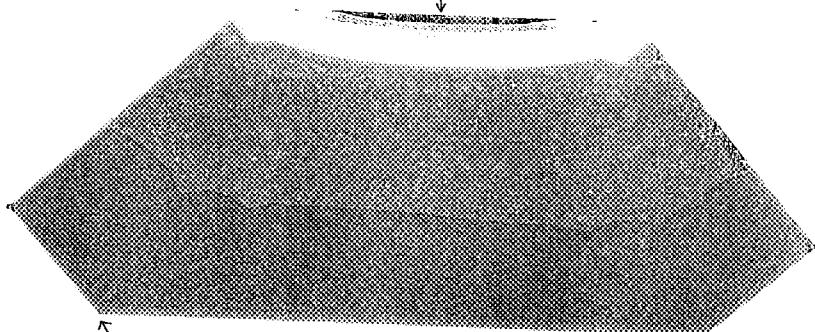
熱負荷 $10\text{MW}/\text{m}^2 \times 4\text{sec}$ 領域 $1+2$

最小値 7.036 MPa

節点番号 236

最大値 27.48 MPa

節点番号 116

熱負荷 $10\text{MW}/\text{m}^2 \times 4\text{sec}$ 領域 2

最小値 7.557 MPa

節点番号 109

最大値 28.04 MPa

節点番号 5

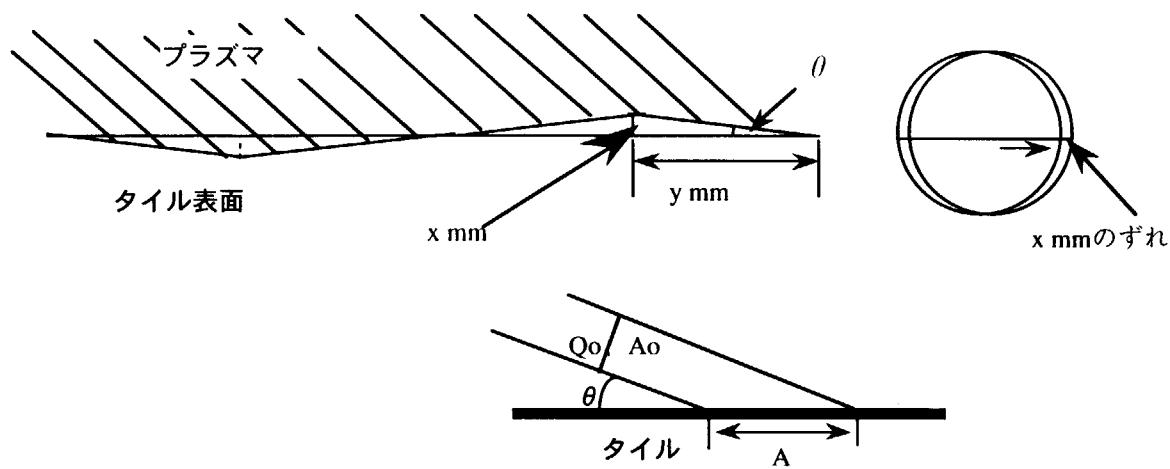
熱負荷 $5\text{MW}/\text{m}^2 \times 10\text{sec}$ 領域 $1+2$

最小値 8.508 MPa

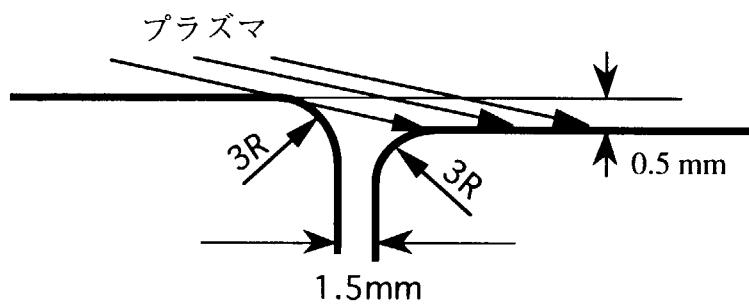
節点番号 236

第 3.16 図 ドームタイル (DMb) トレスカ応力分布図

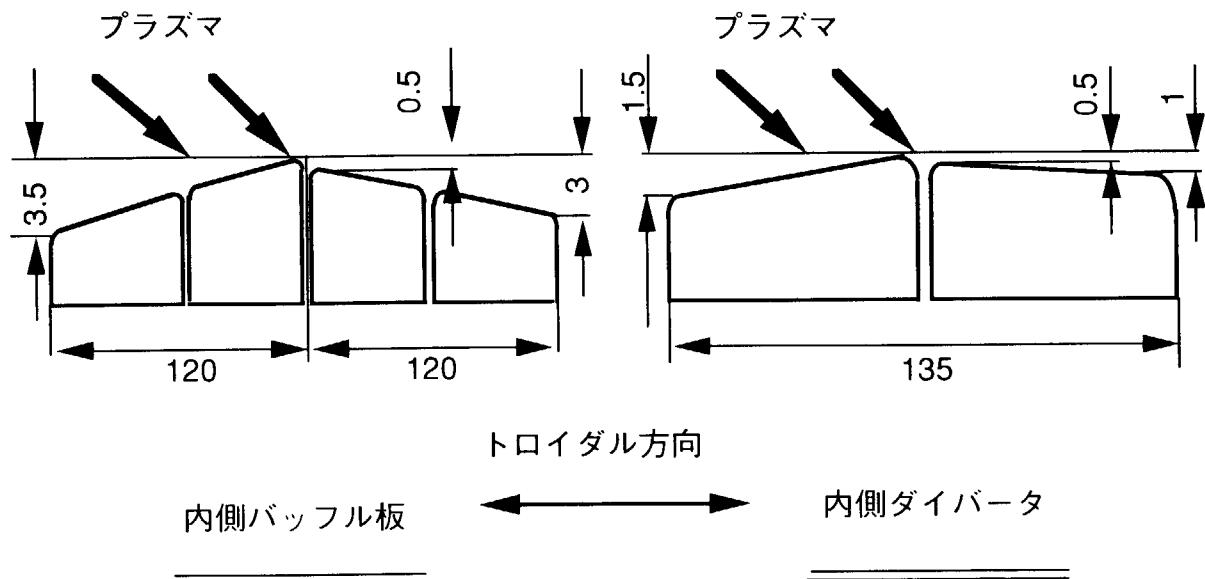
This is a blank page.



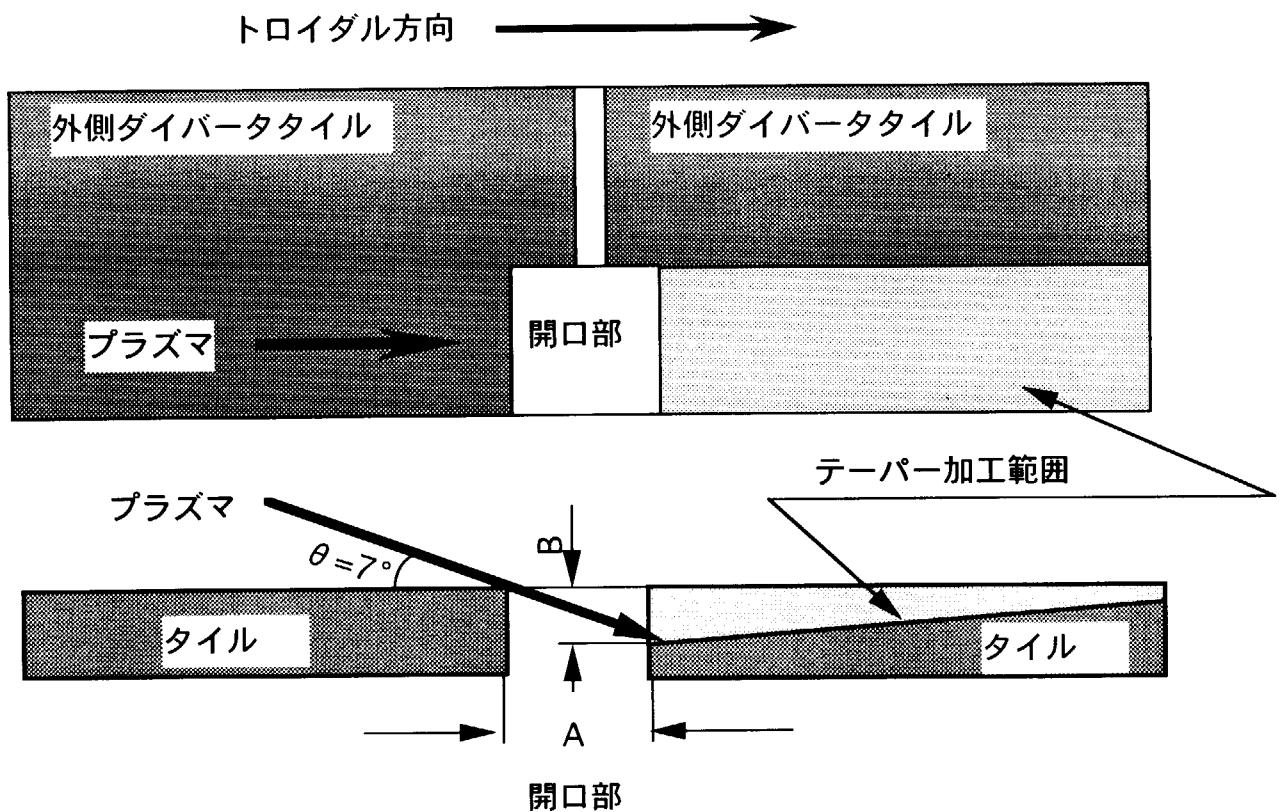
第 3.17 図 プラズマに対する芯ずれの模式図



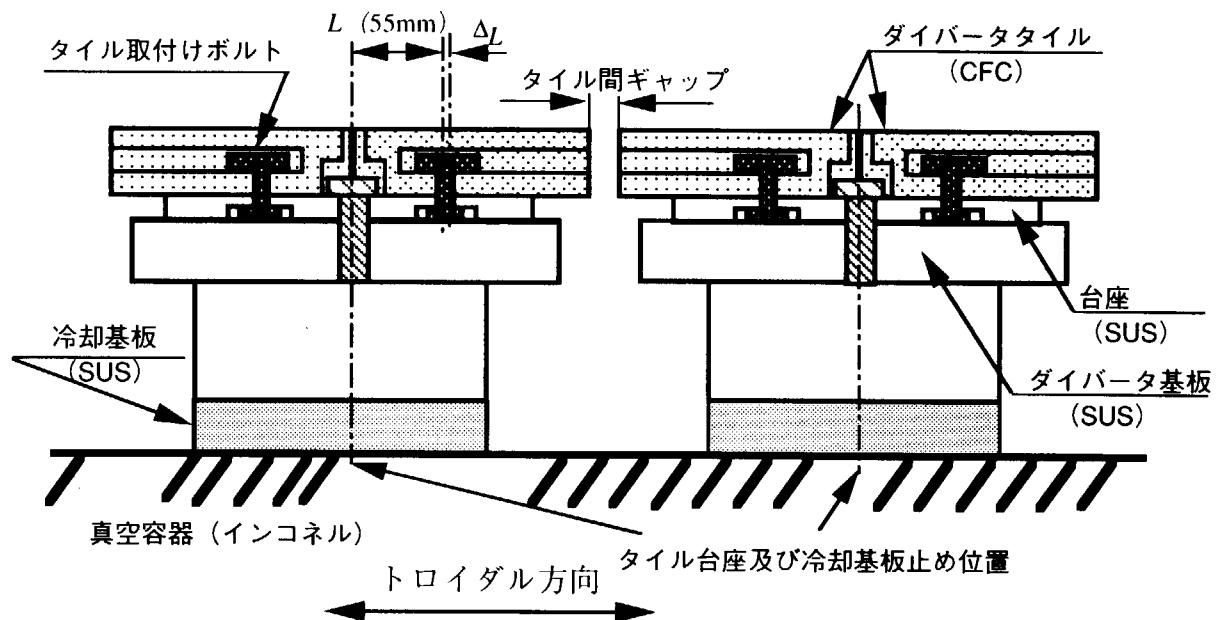
第 3.18 図 ダイバータタイルの端部段差



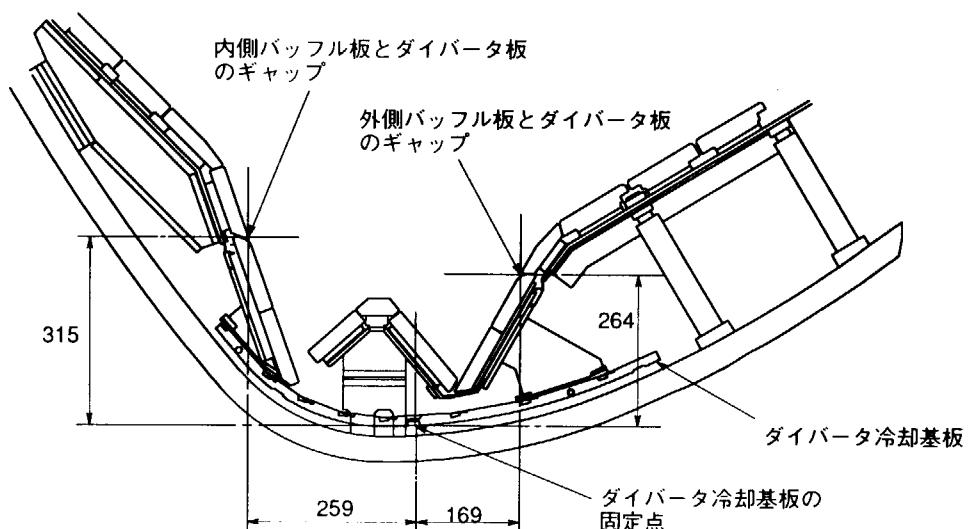
第 3.19 図 タイル端部加工



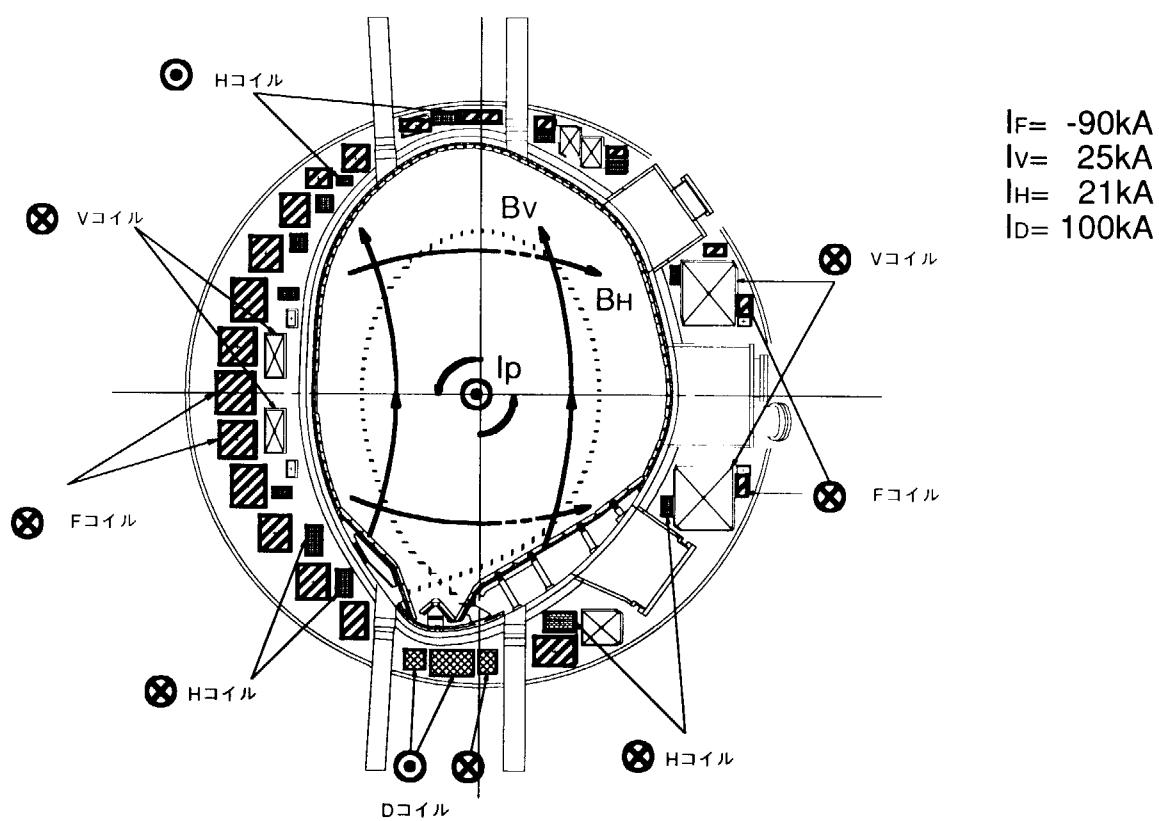
第 3.20 図 開口部を有するタイルのテーパー加工



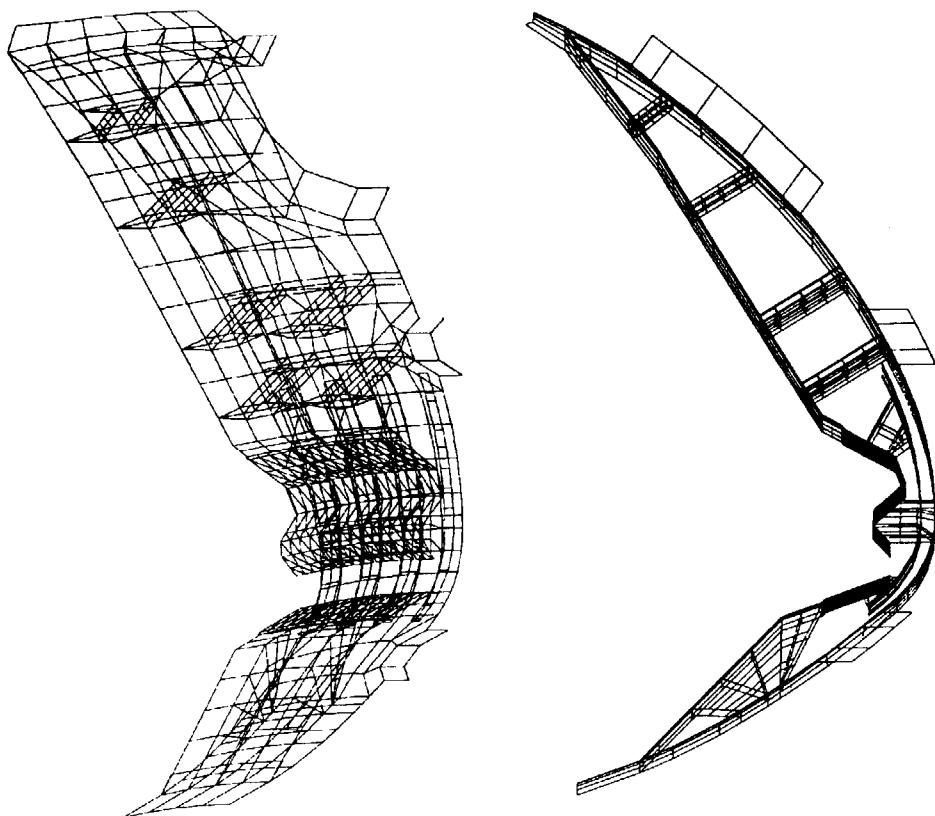
第 3.21 図 タイル間ギャップとタイル固定の相互関係



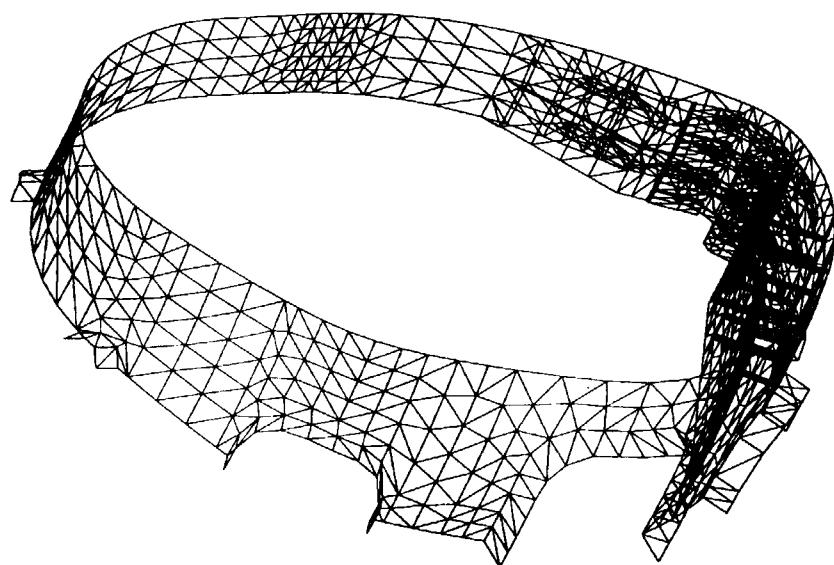
第 3.22 図 ダイバータ板とバッフル板の相互関係

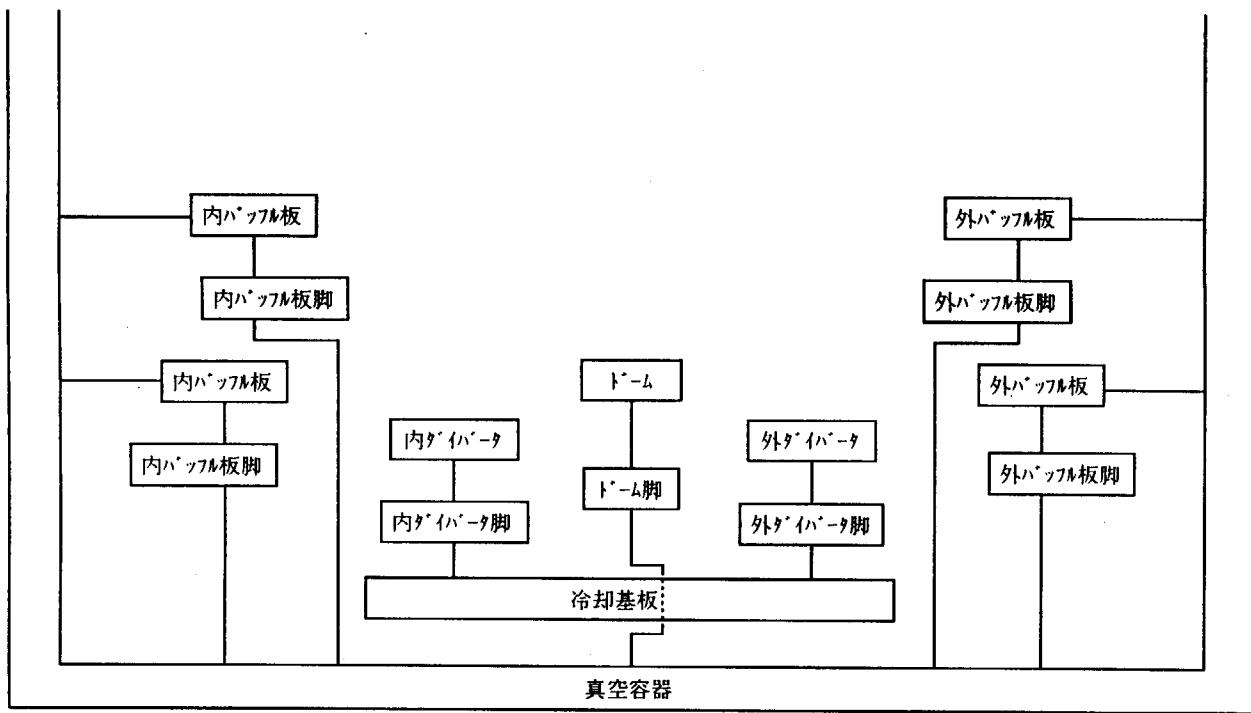


第 3.23 図 電磁力解析における各コイルの電流路

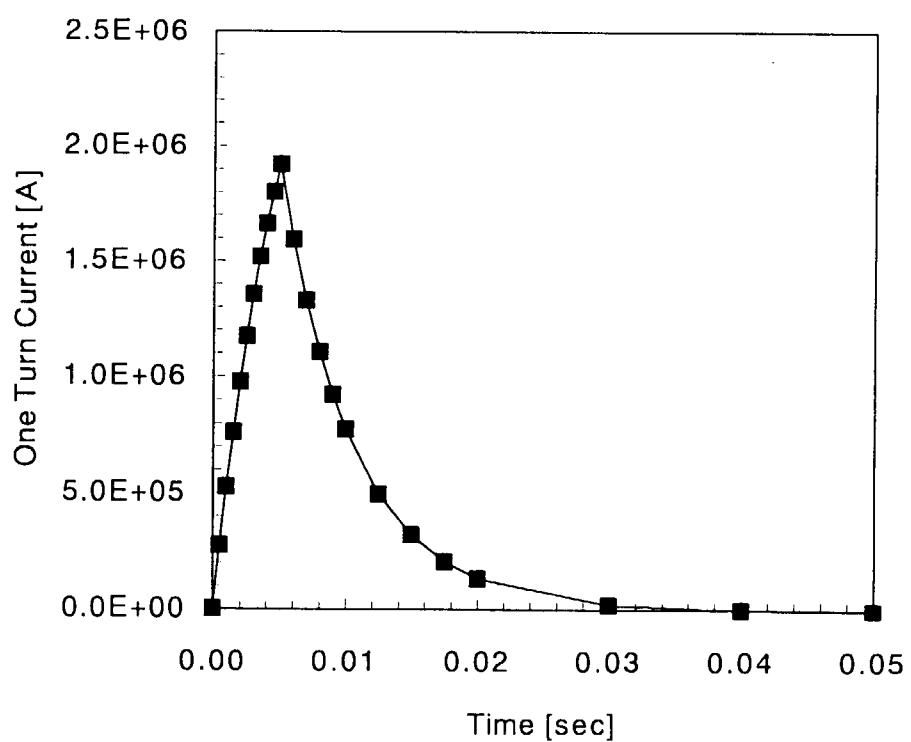


第 3.24 図 電磁力解析用 10° セクター モデル

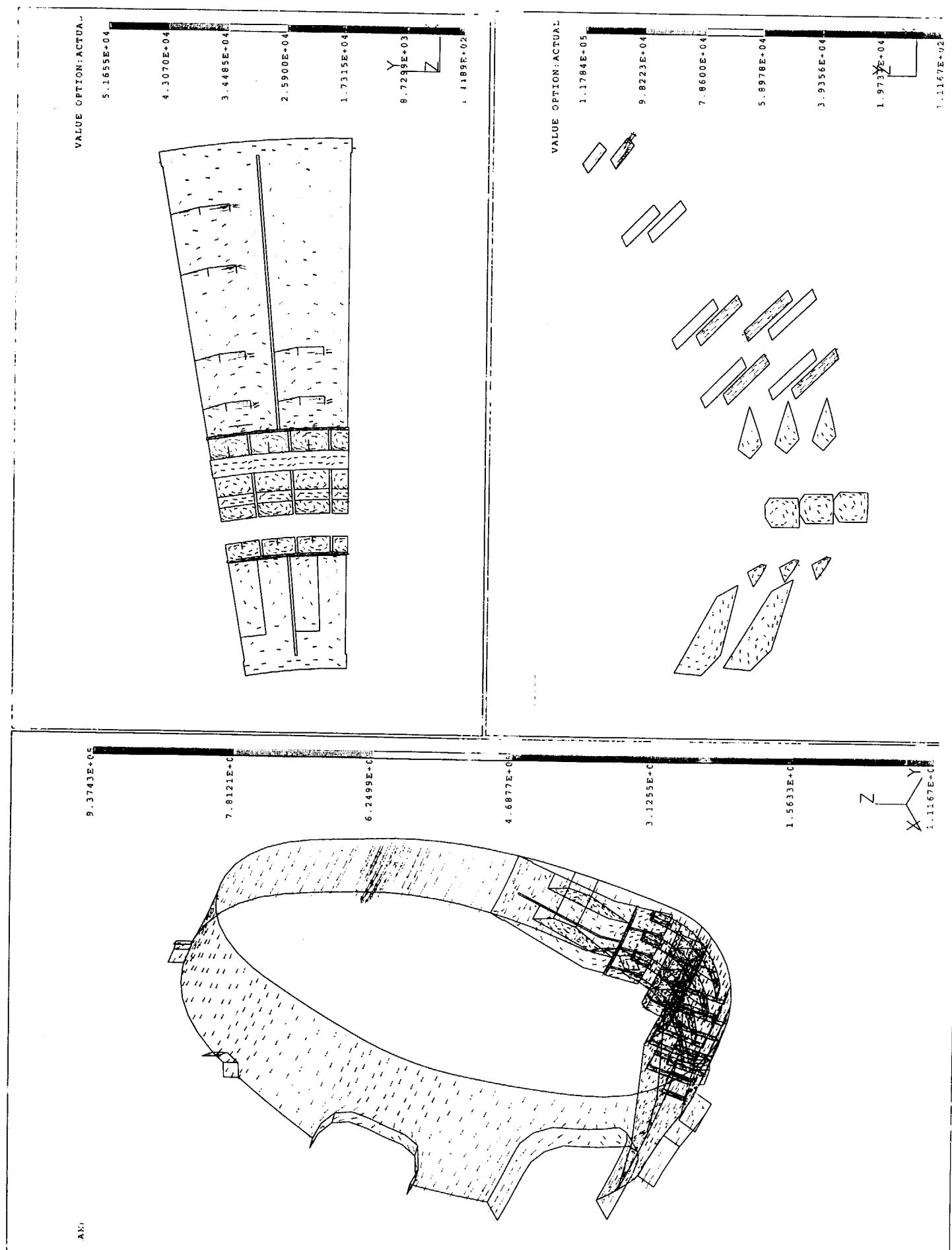




第 3.25 図 電磁力解析モデル用導通条件

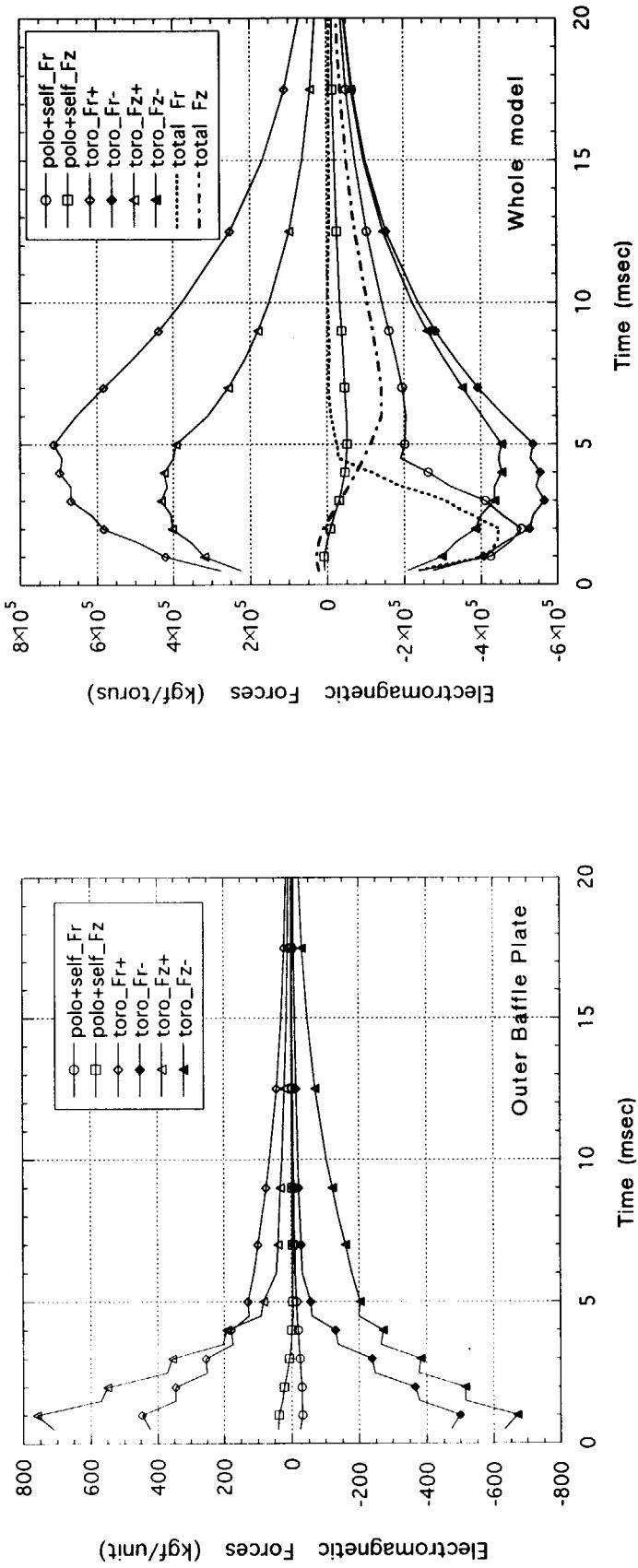


第 3.26 図 デストラプション時に真空容器に発生するトロイダル電流（ケース1）

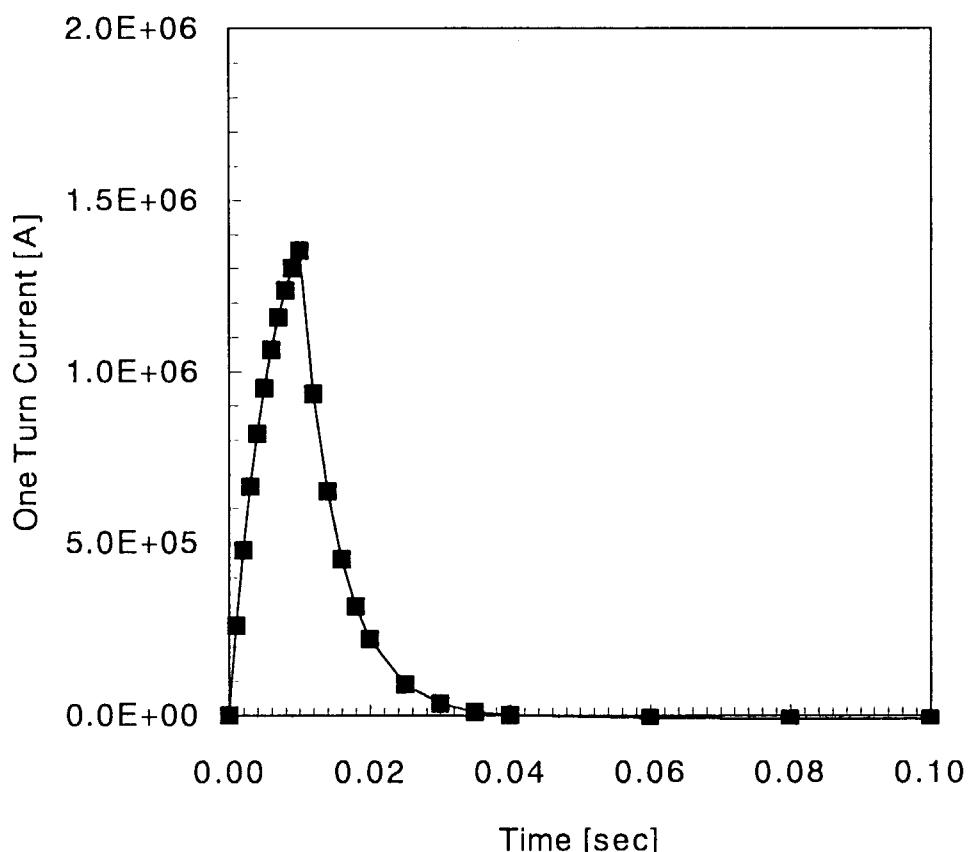


第 3.27 図 デスラプション発生5msec後の電流分布（ケース1）

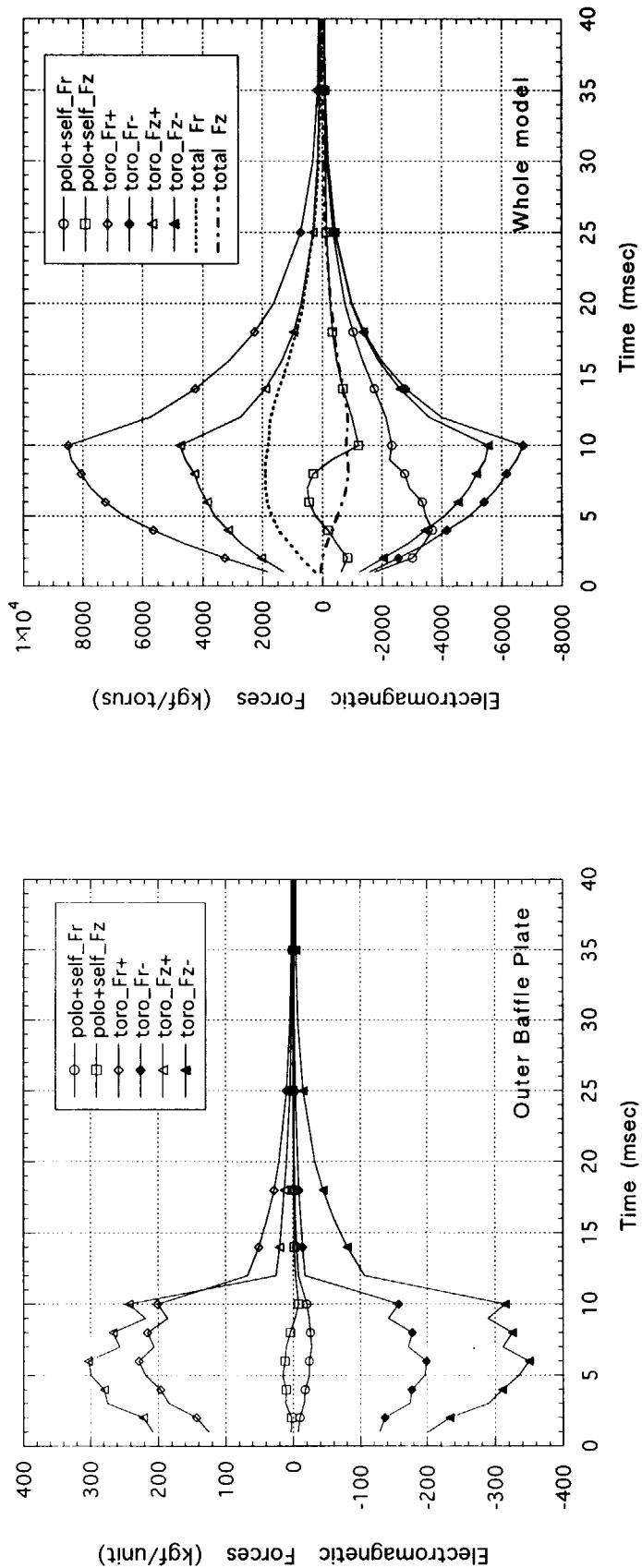
This is a blank page.



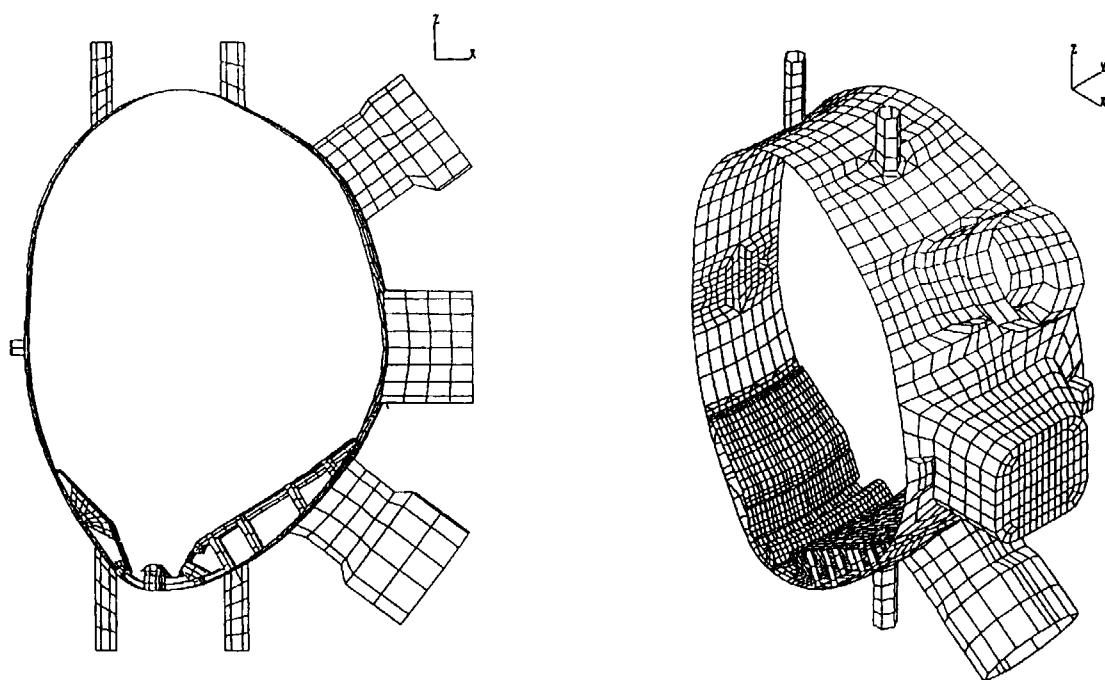
第 3.28 図 外側バッフル板及びモデル全体に生じる電磁力の積算和の例（ケース1）



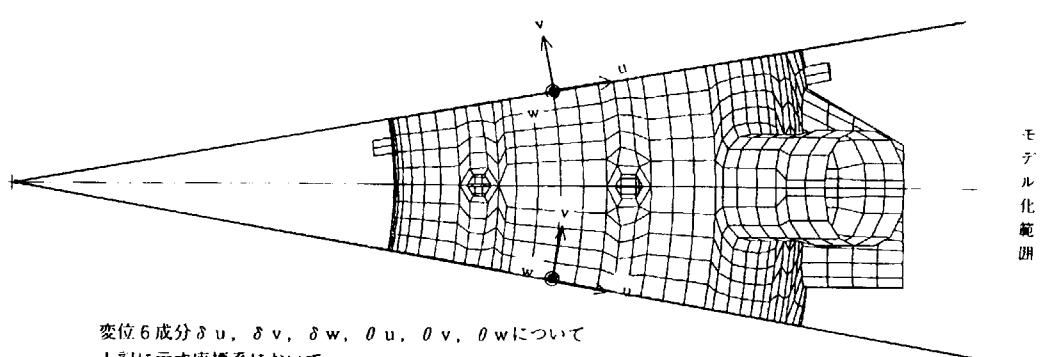
第 3.29 図 デスマッシュ時に真空容器に発生するトロイダル電流（ケース2）



第 3.30 図 外側バッフル板及びモデル全体に生じる電磁力の積算和の例（ケース2）



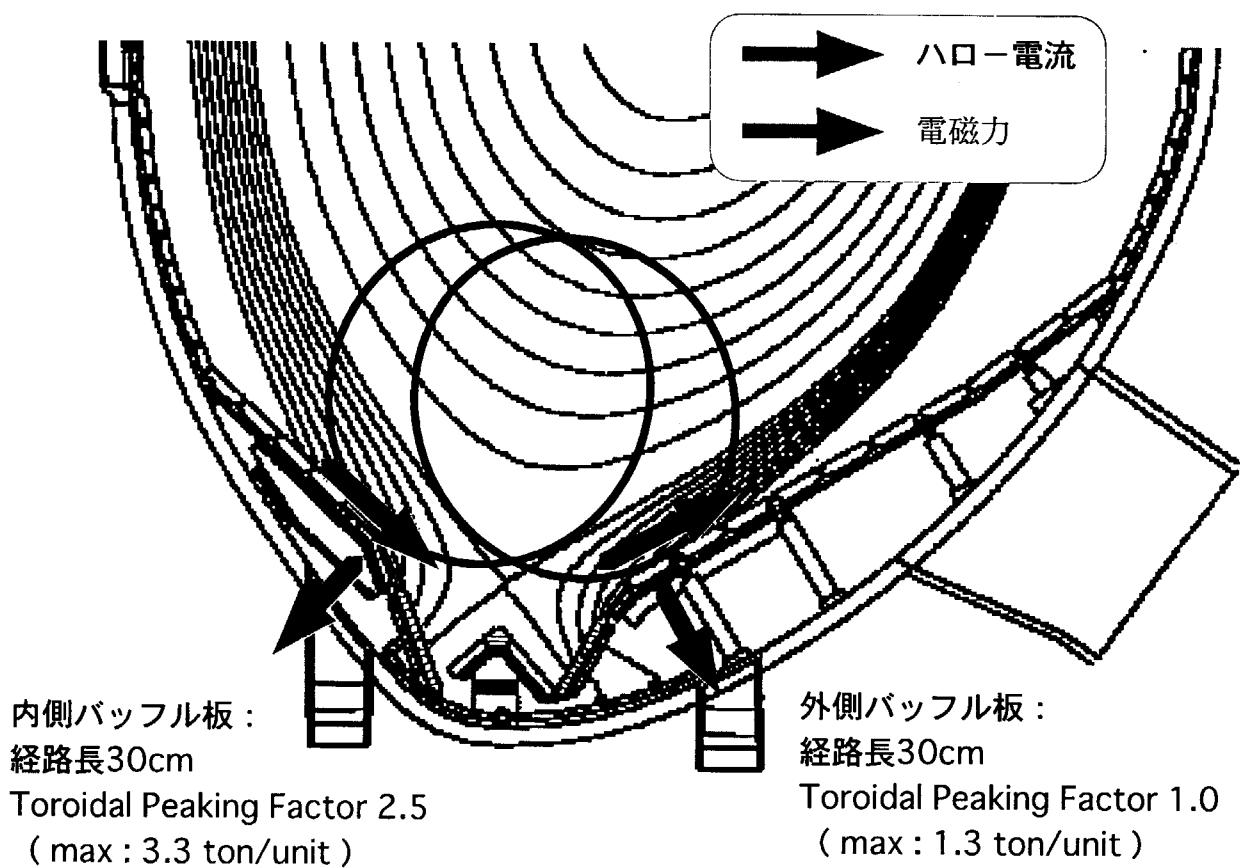
第 3.31 図 構造強度解析モデル



変位 6 成分 δu , δv , δw , θu , θv , θw について
上記に示す座標系において

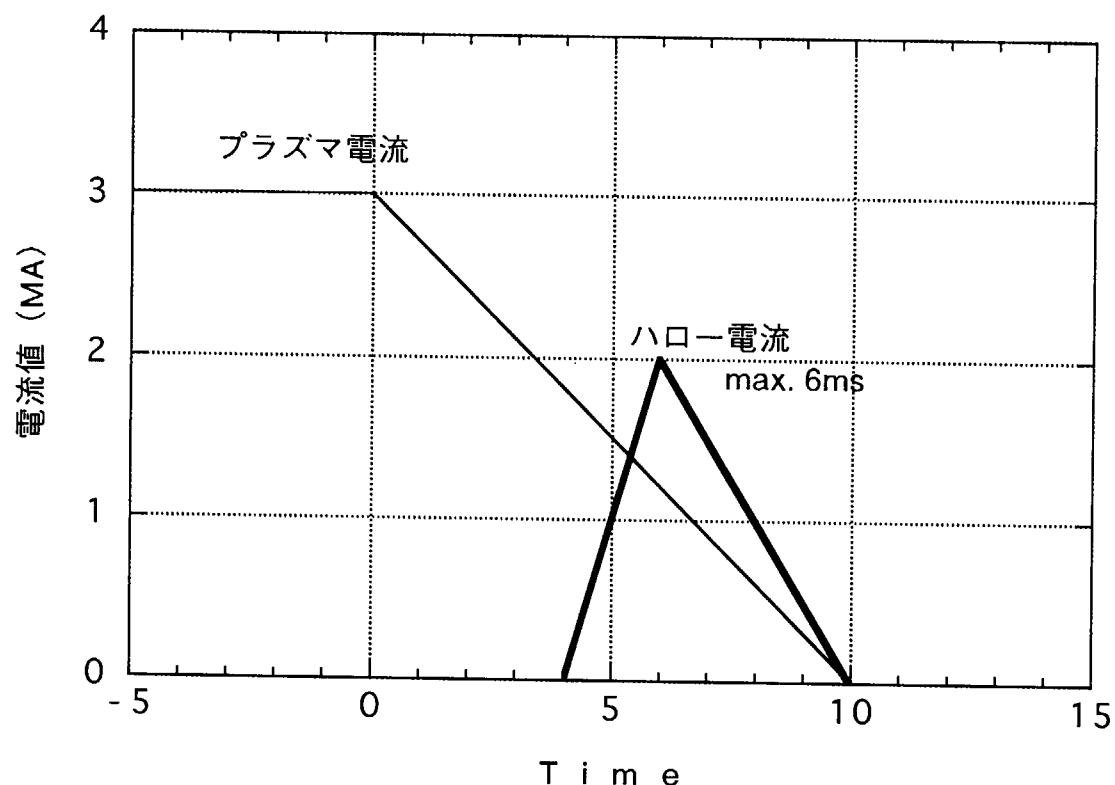
$$\begin{aligned}\delta u &= \delta u' \\ \delta v &= \delta v' \\ \delta w &= \delta w' \\ \theta u &= \theta u' \\ \theta v &= \theta v' \\ \theta w &= \theta w'\end{aligned}$$

第 3.32 図 構造強度解析におけるセクタ間の境界条件



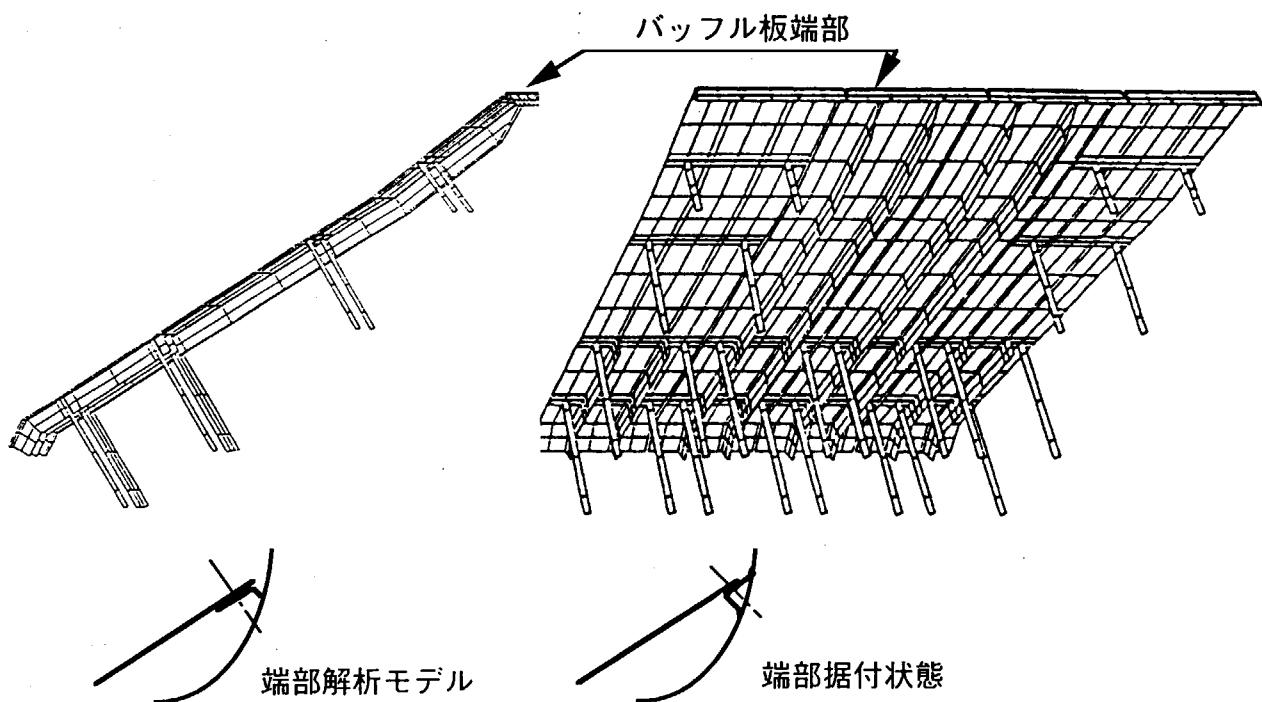
第 3.33 図 ハロー電流模式図

This is a blank page.

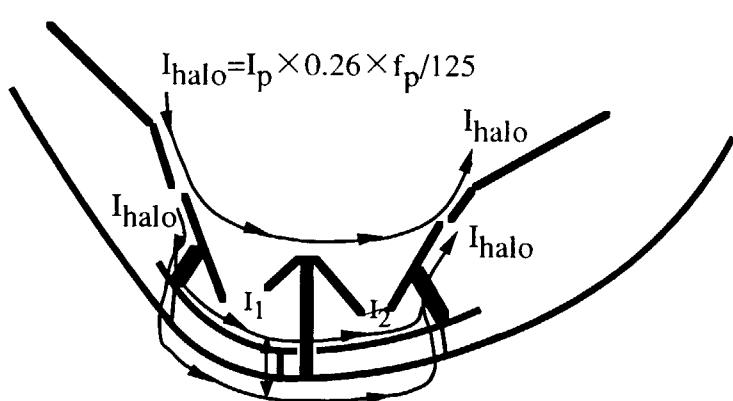


第 3.34 図 ハロ一電流時刻歴変化

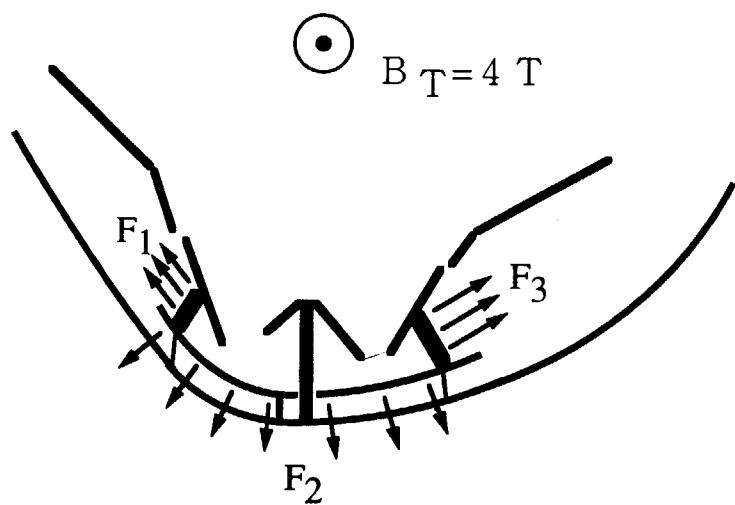
This is a blank page.



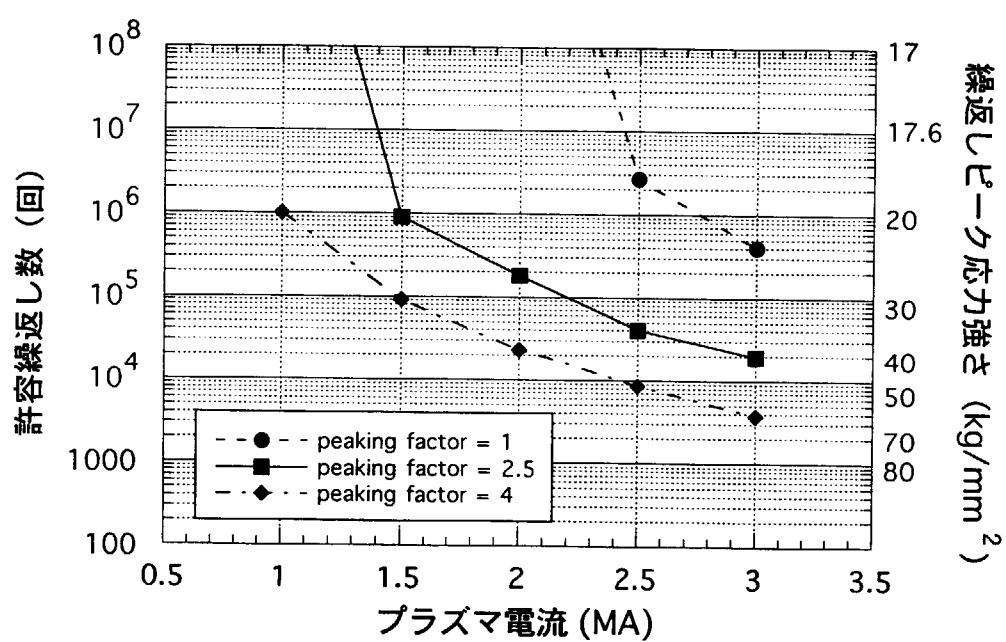
第 3.35 図 外側バッフル板端部の解析モデルと据付形状



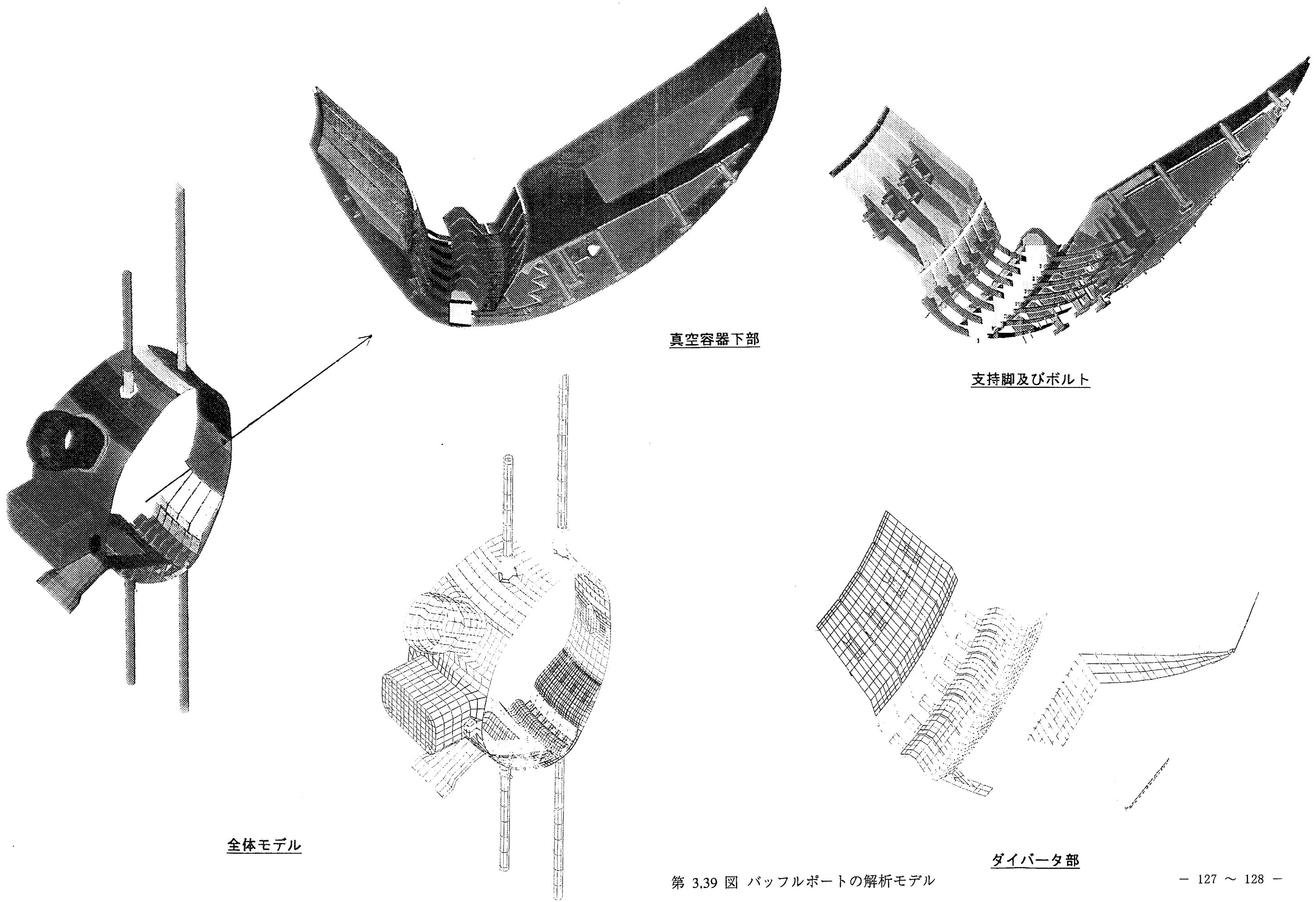
第 3.36 図 ダイバータ冷却基板に係るハロー電流経路



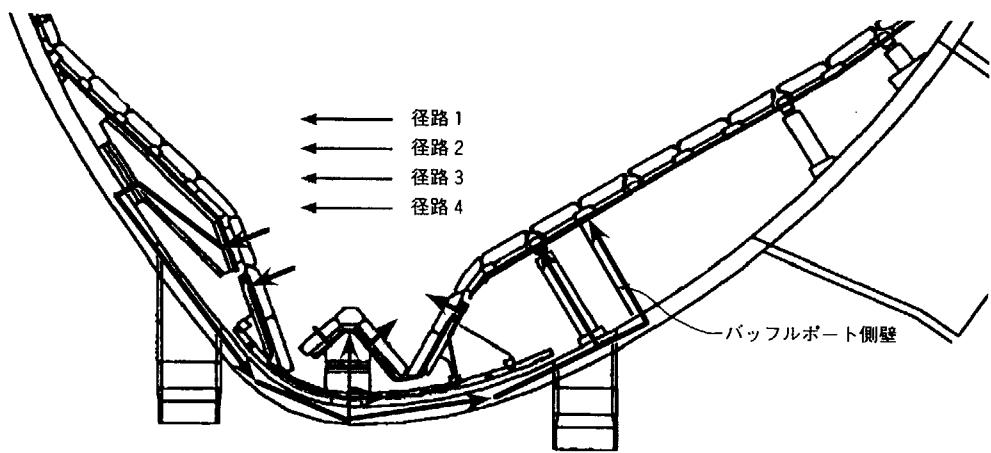
第 3.37 図 ハロー電流による電磁力の方向（冷却基板評価用）



第 3.38 図 冷却基板スライド支持ピンの許容繰返し数

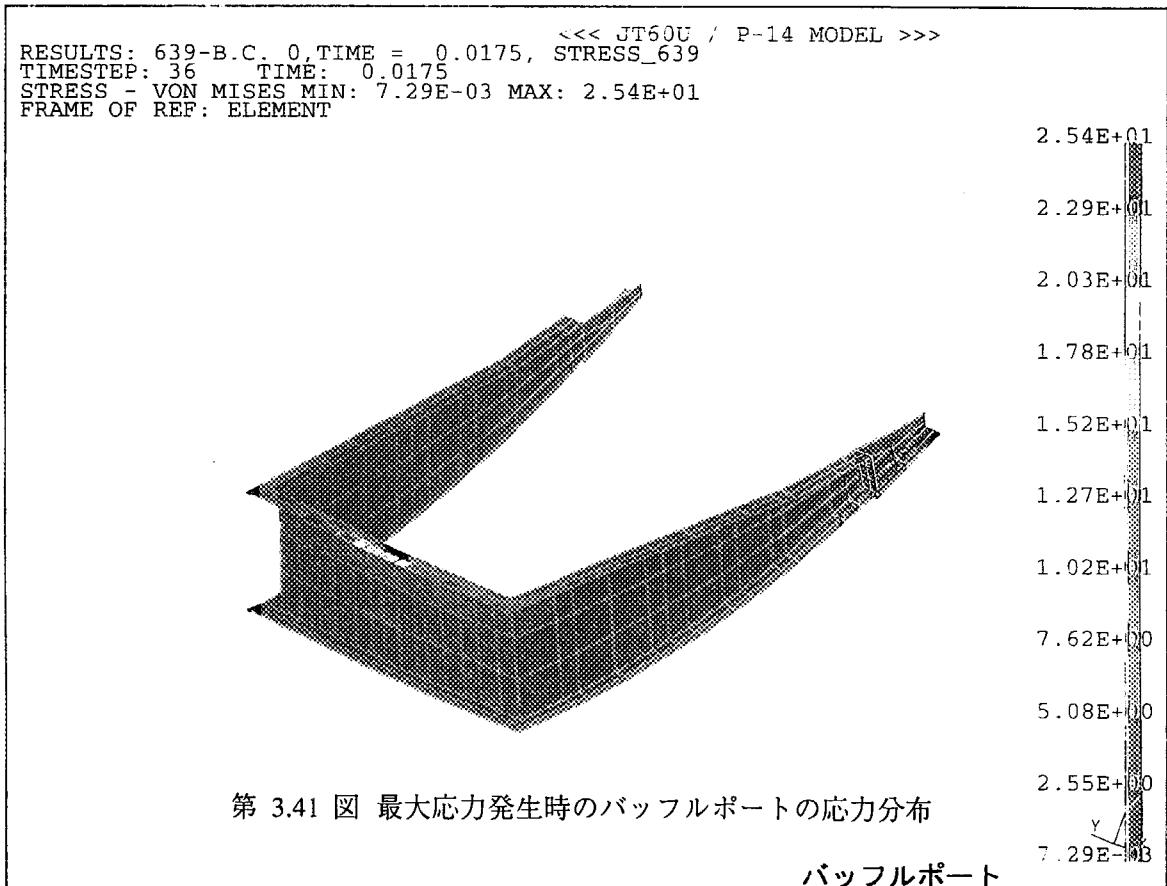
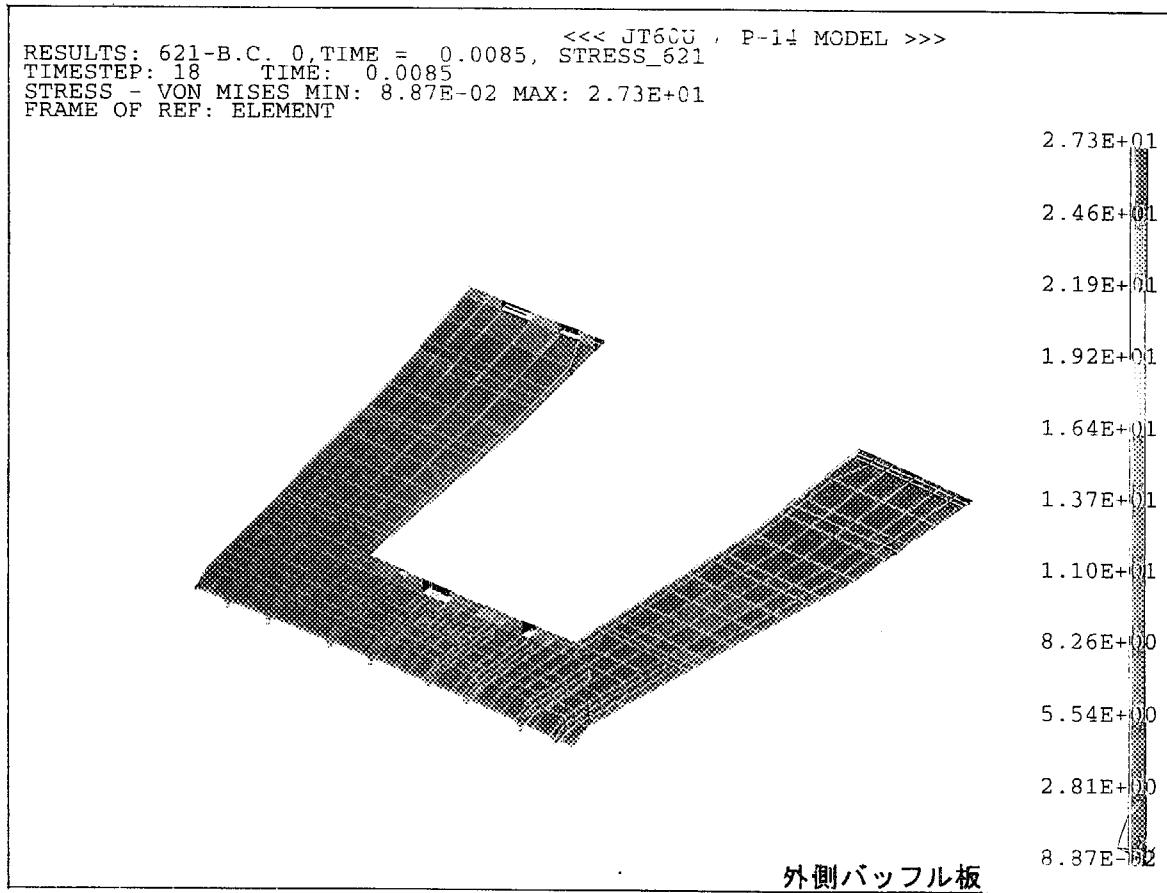


第 3.39 図 バッフルポートの解析モデル

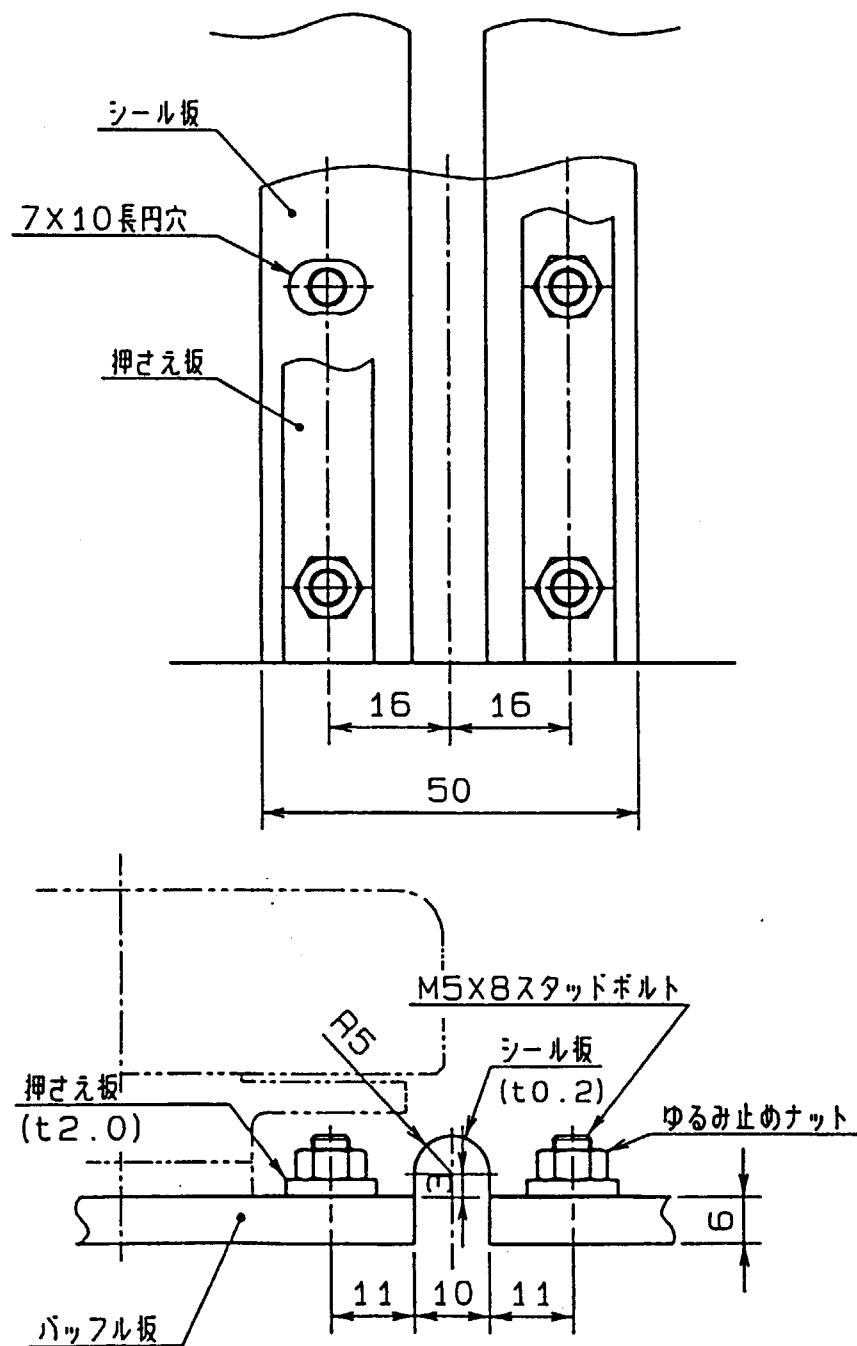


第 3.40 図 バッフルポートに係るハロー電流経路

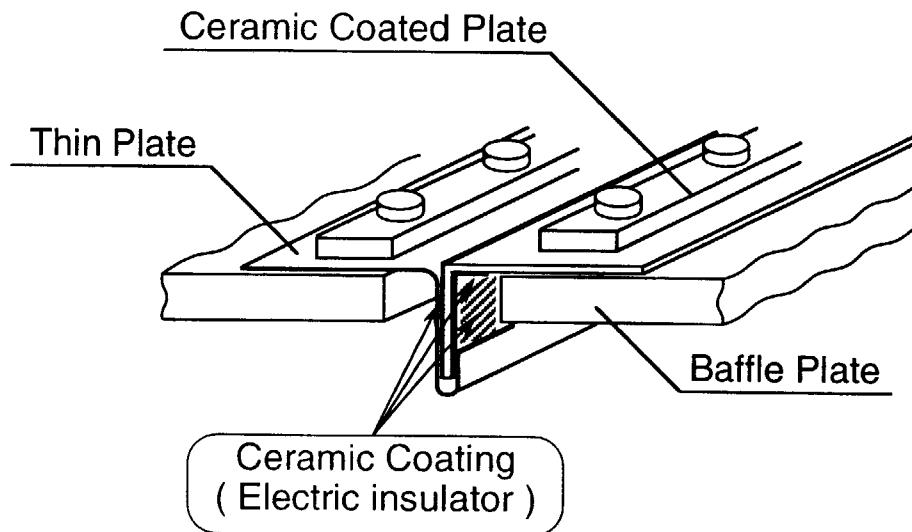
This is a blank page.



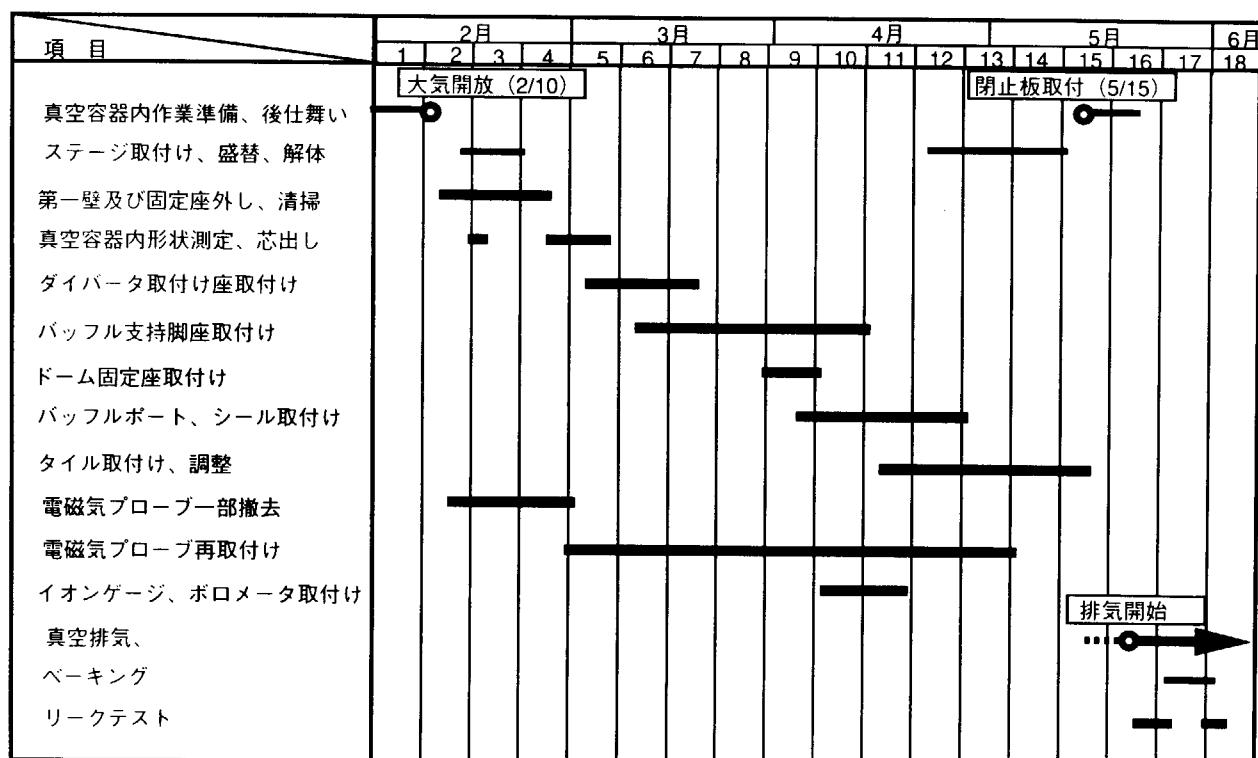
This is a blank page.



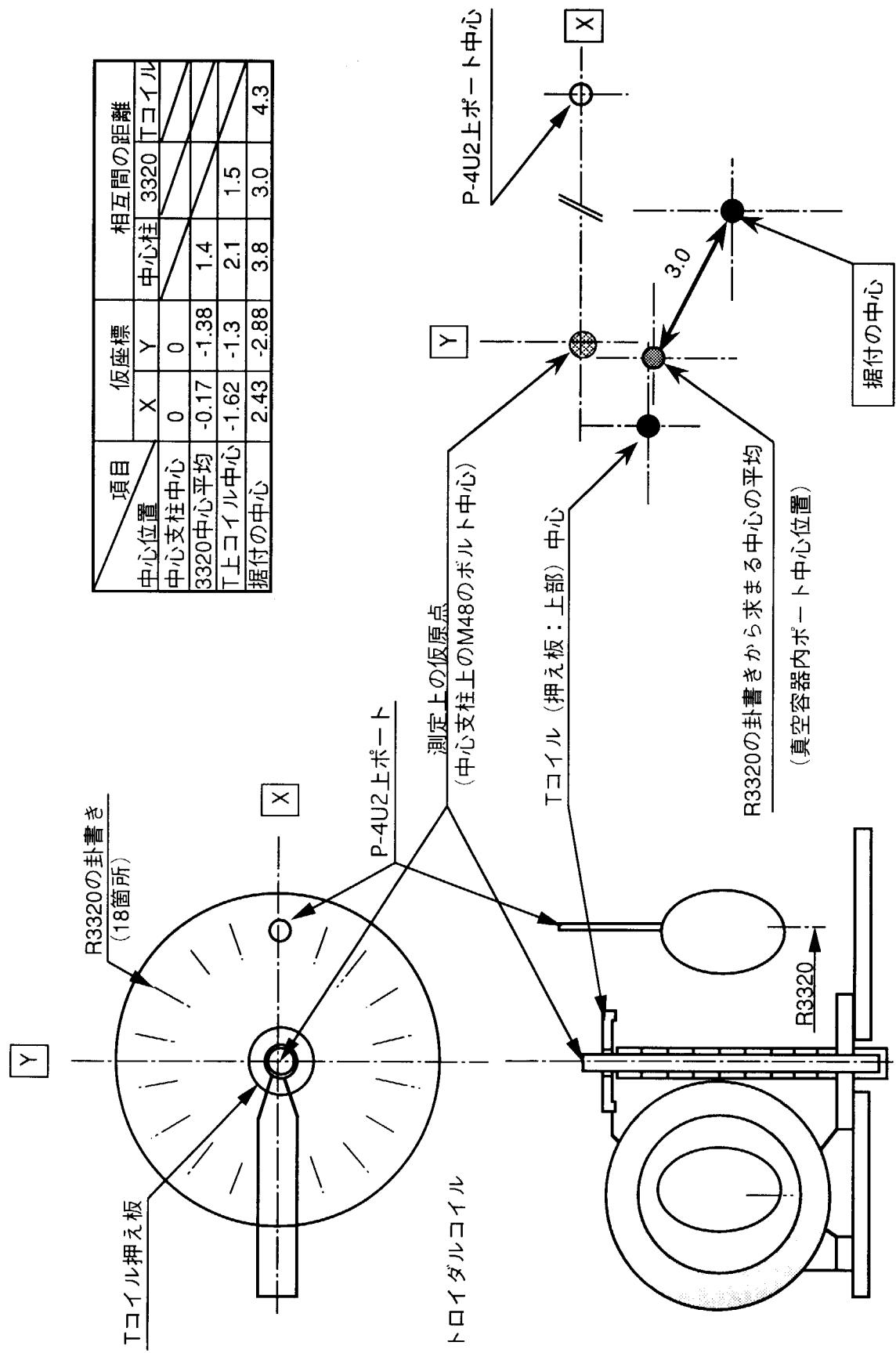
第 3.42 図 検討したシール構造の一例



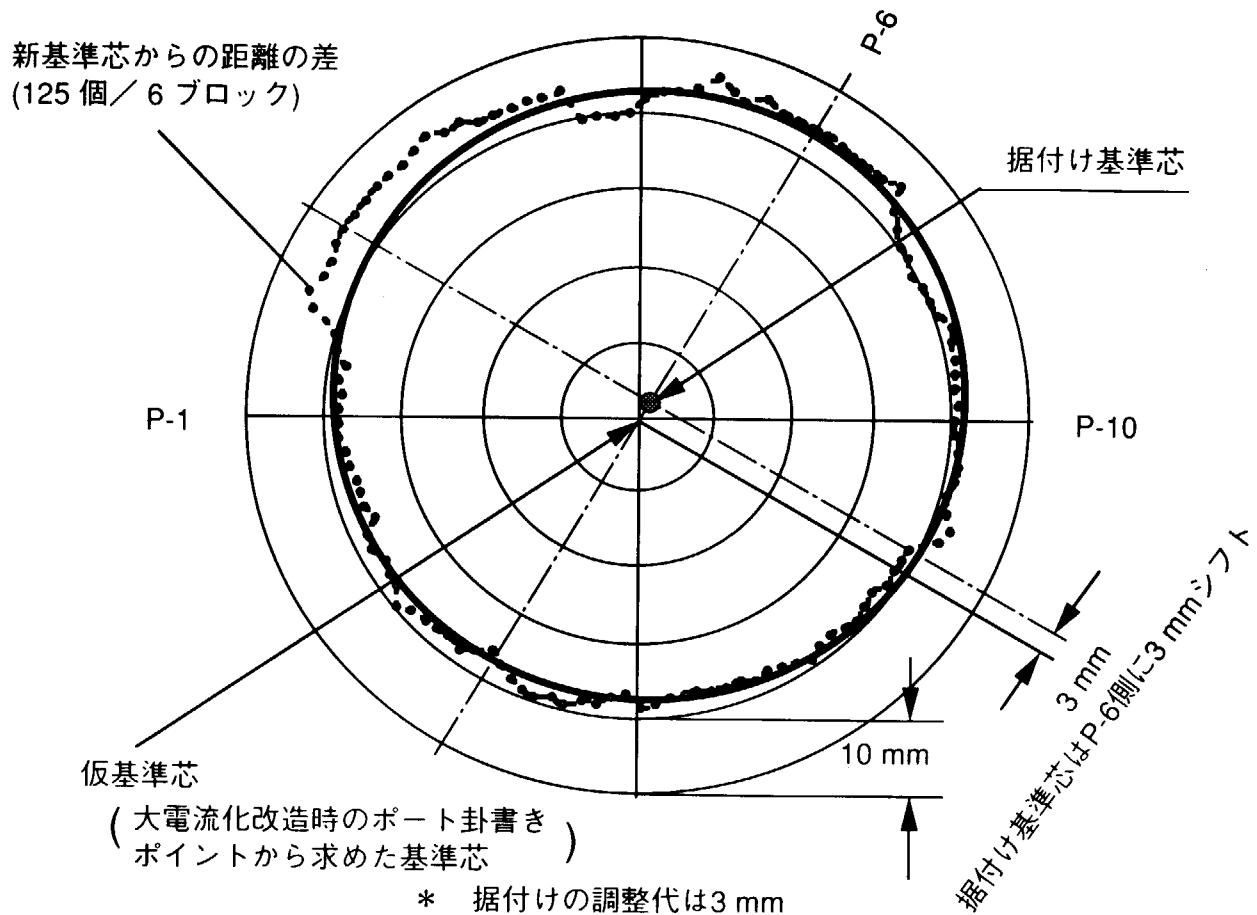
第 3.43 図 スライド式絶縁型シール構造の一例



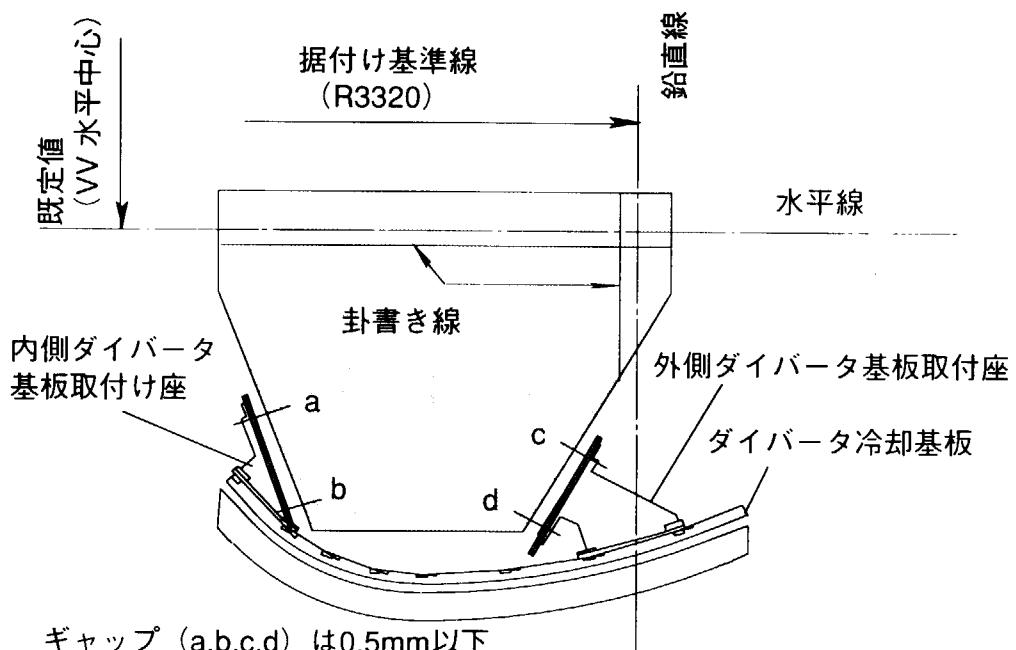
第 4.1 図 W型ダイバータの現地据付け工程



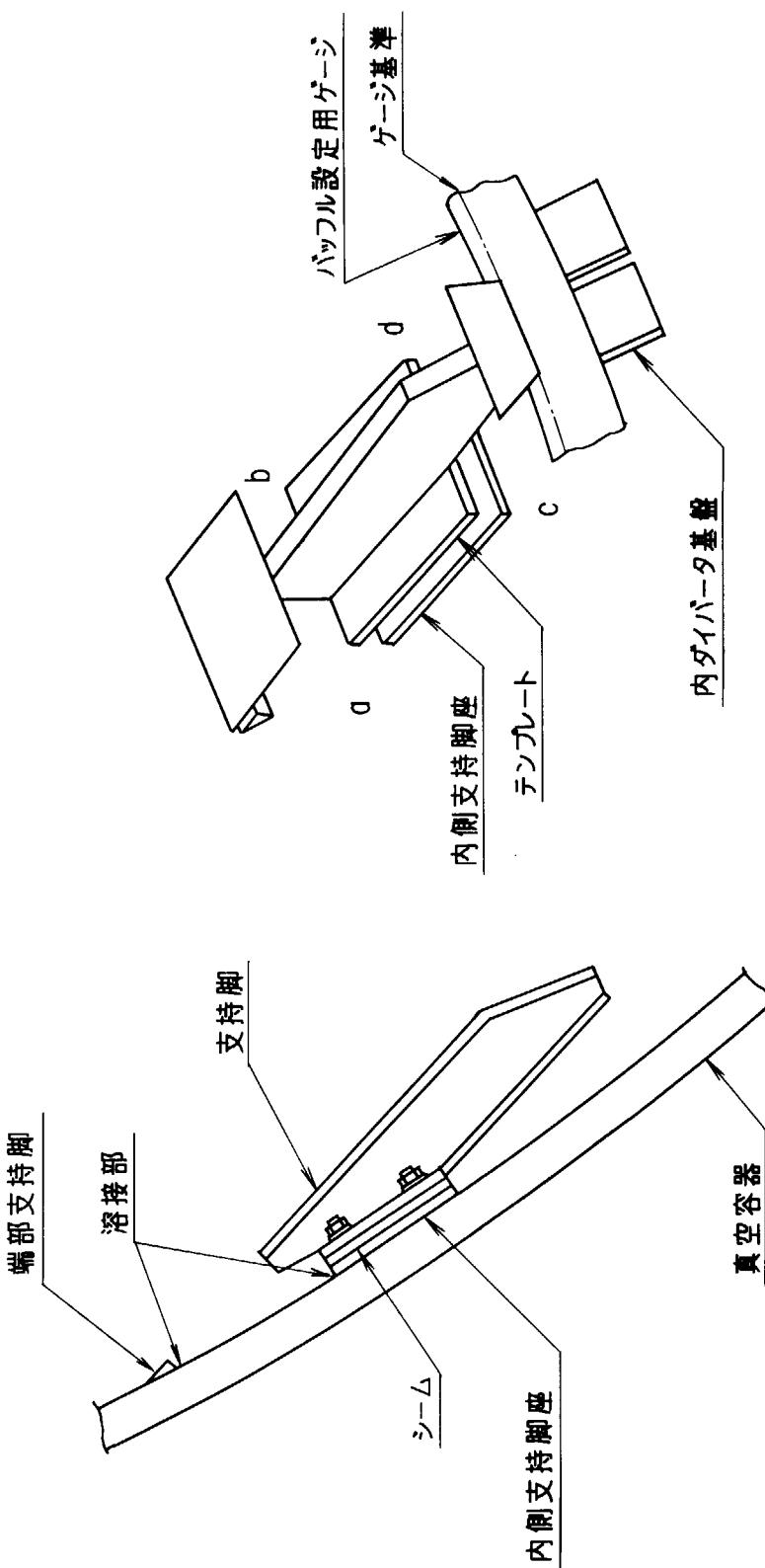
第 4.2 図 据付け基準の調査結果



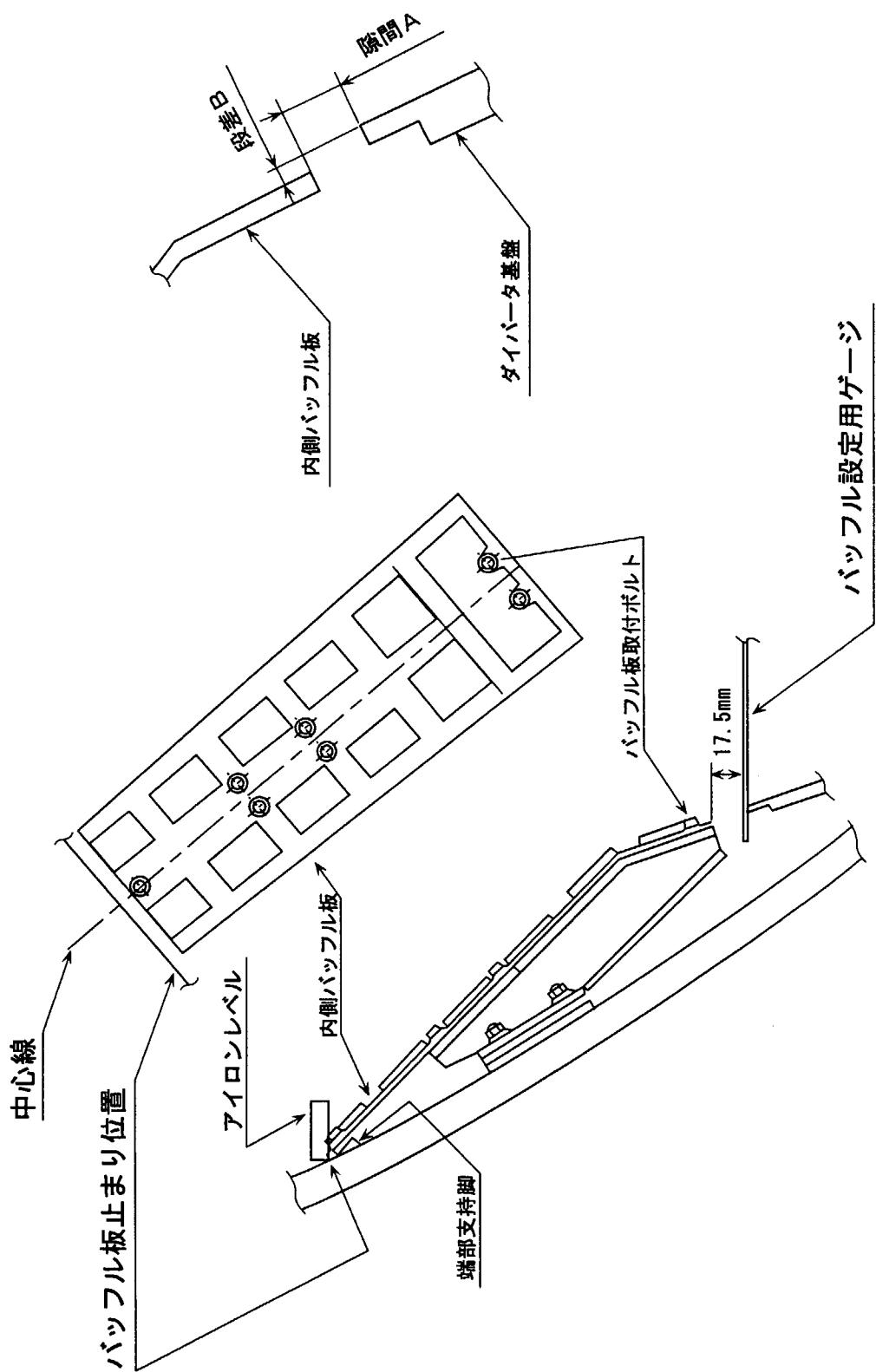
第 4.3 図 ダイバータ冷却基板の調査結果



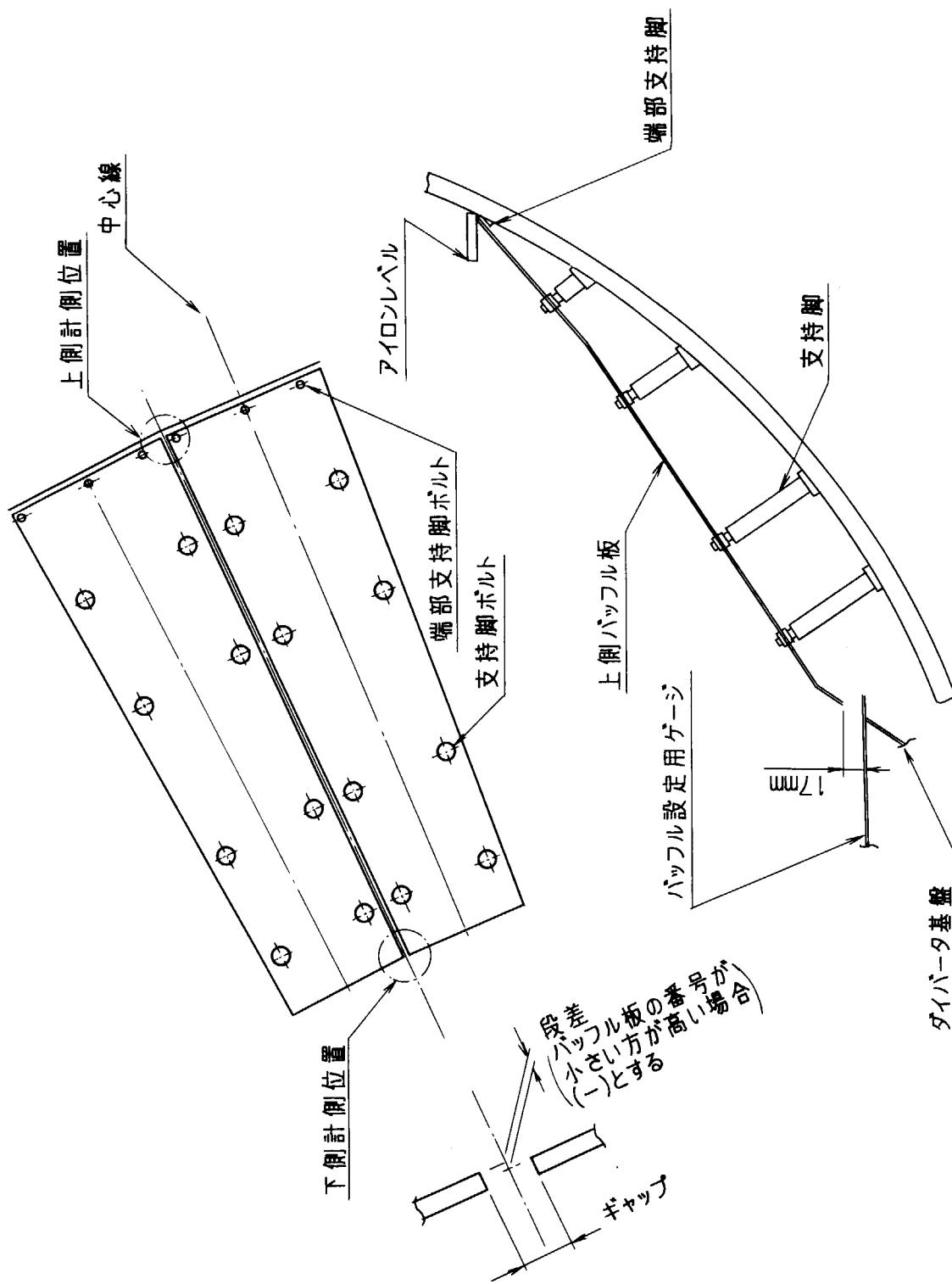
第 4.4 図 ダイバータ基板取付け座の据付け



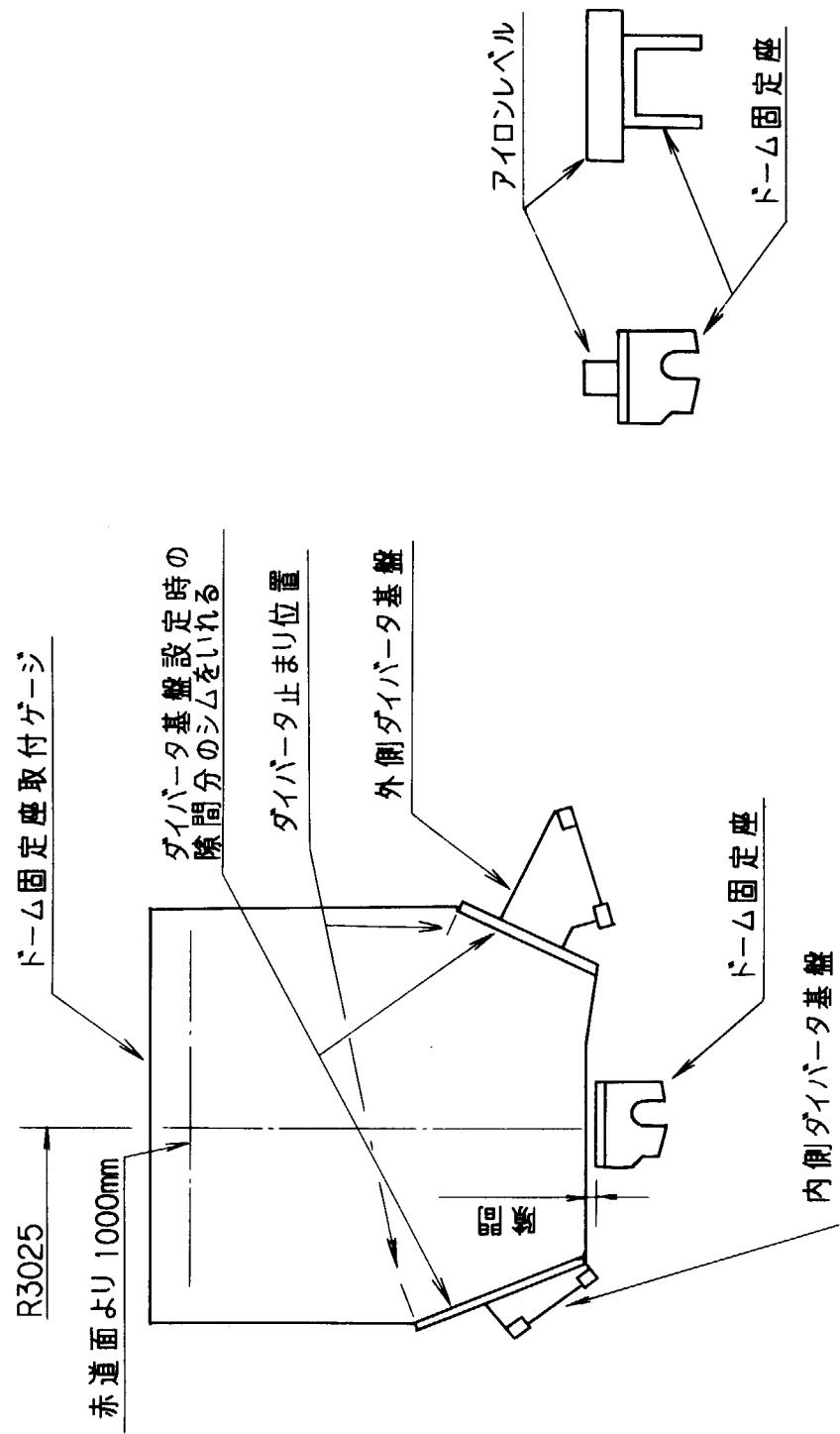
第 4.5 図 内側バッフル支持脚の据付け



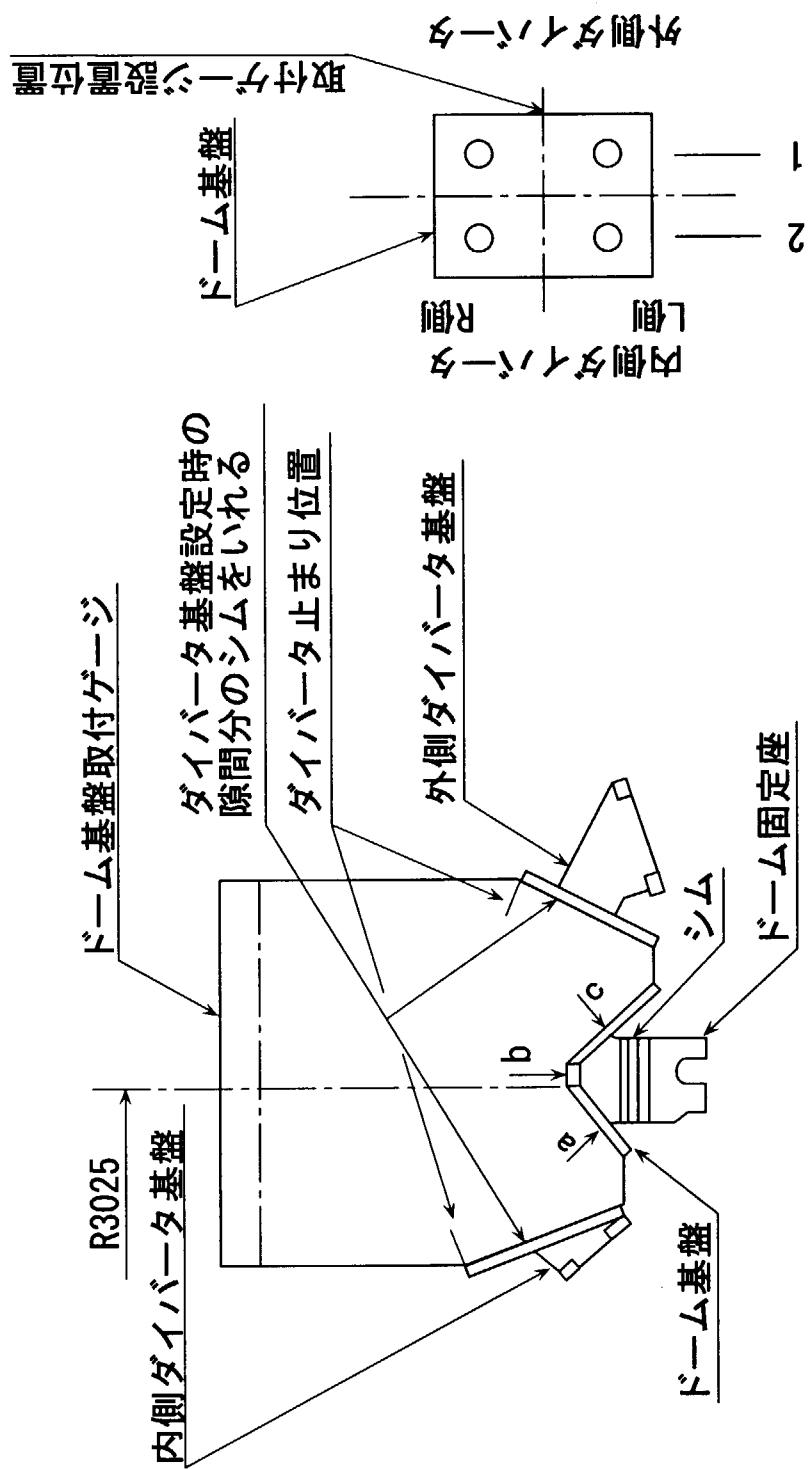
第 4.6 図 内側バッフル板の据付け



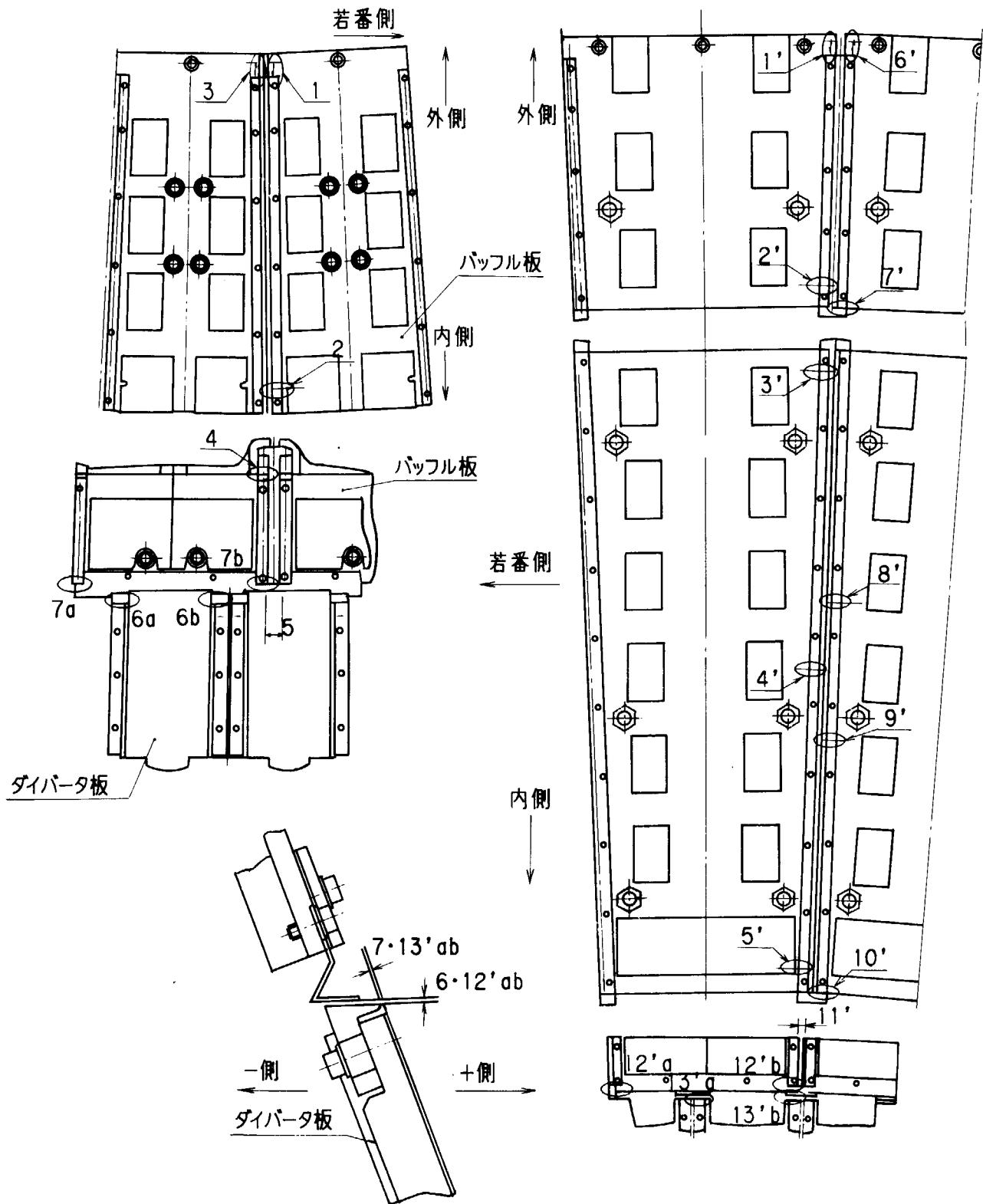
第 4.7 図 外側ダイバータの据付け



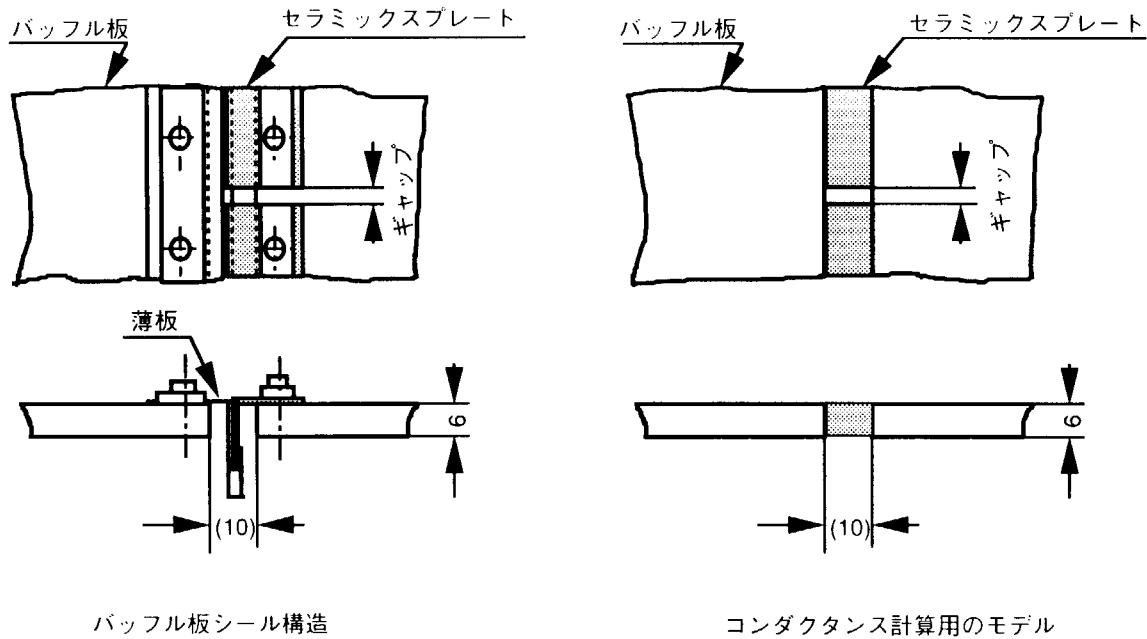
第 4.8 図 ドーム固定座の据付け



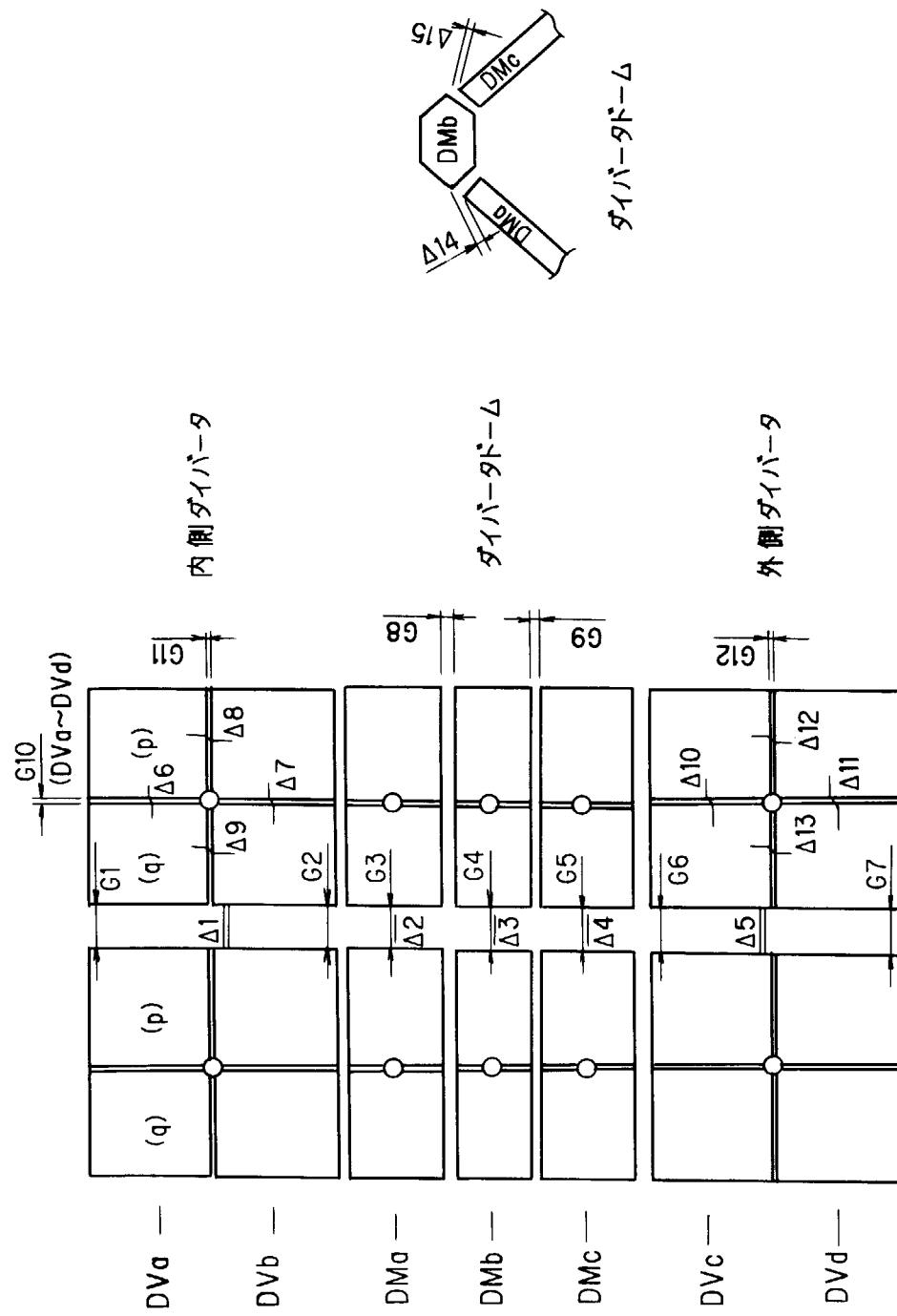
第 4.9 図 ドーム基板の据付け



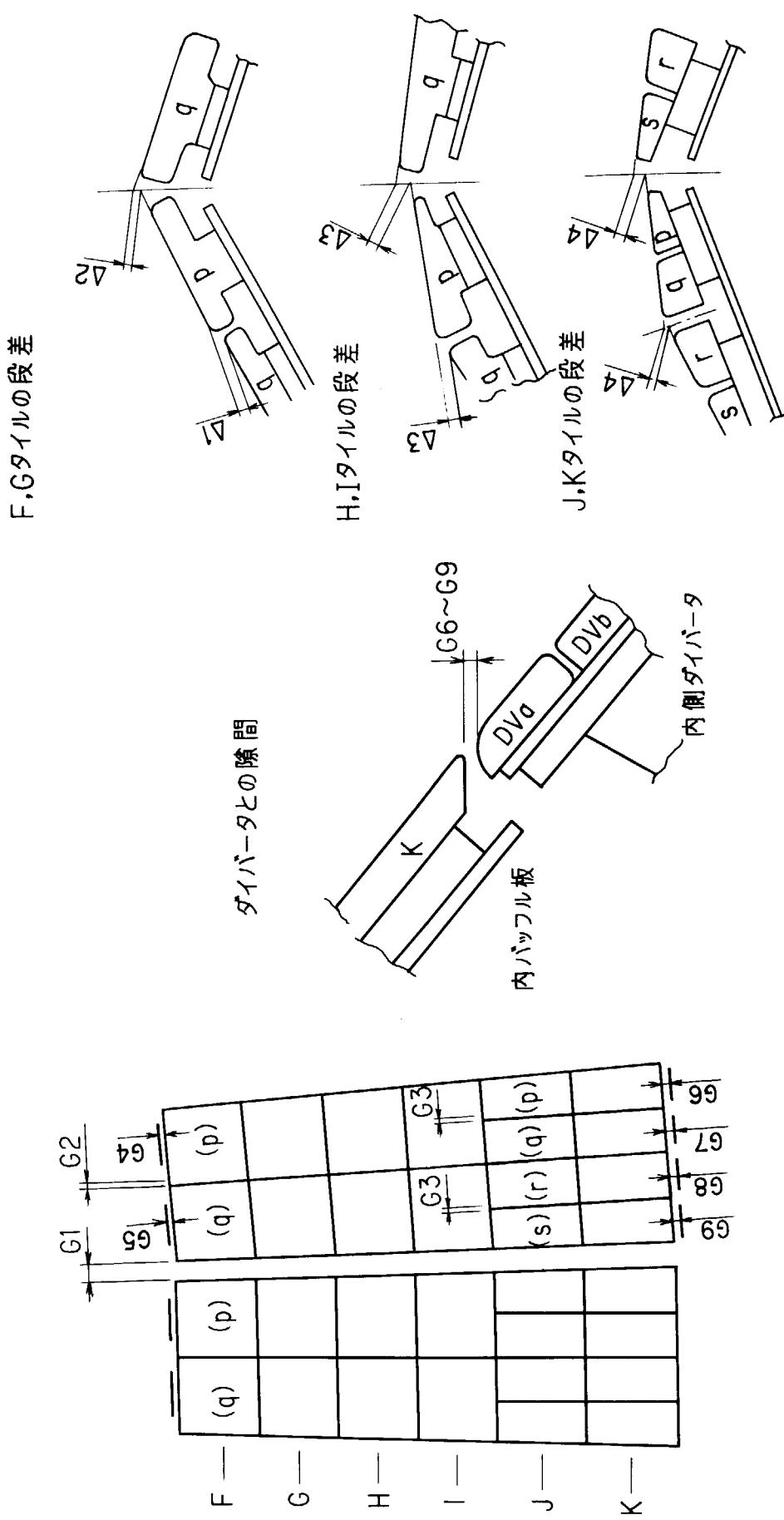
第 4.10 図 シール部の隙間



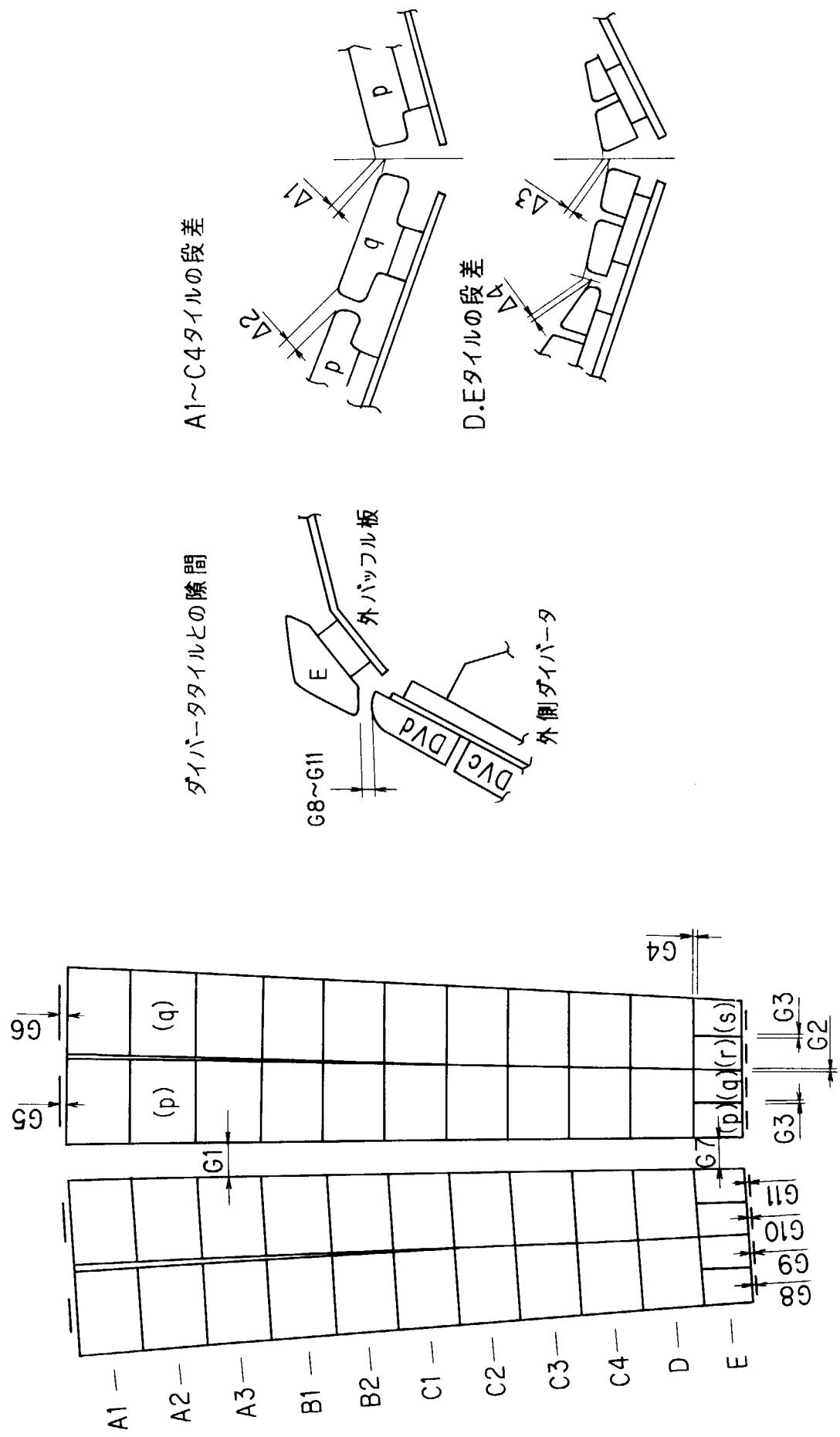
第 4.11 図 シール部のコンダクタンスの計算モデル



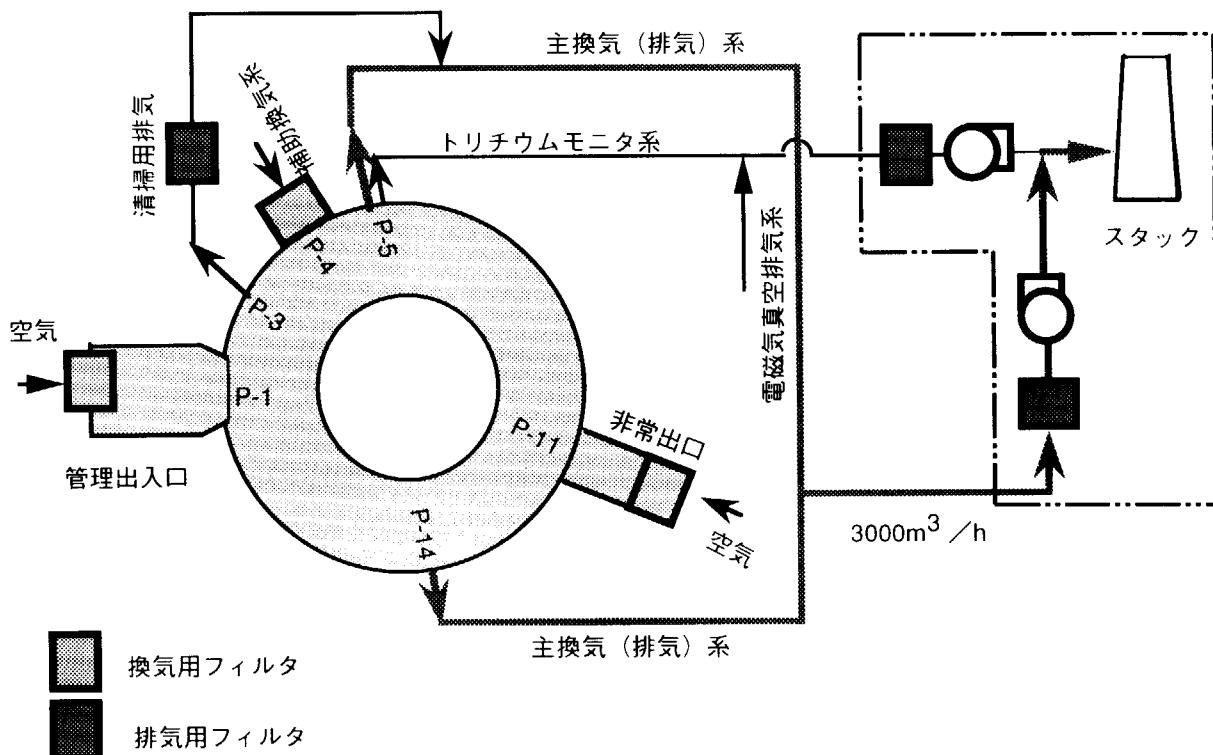
第 4.12 図 ダイバータ及びドームタイルの据付け



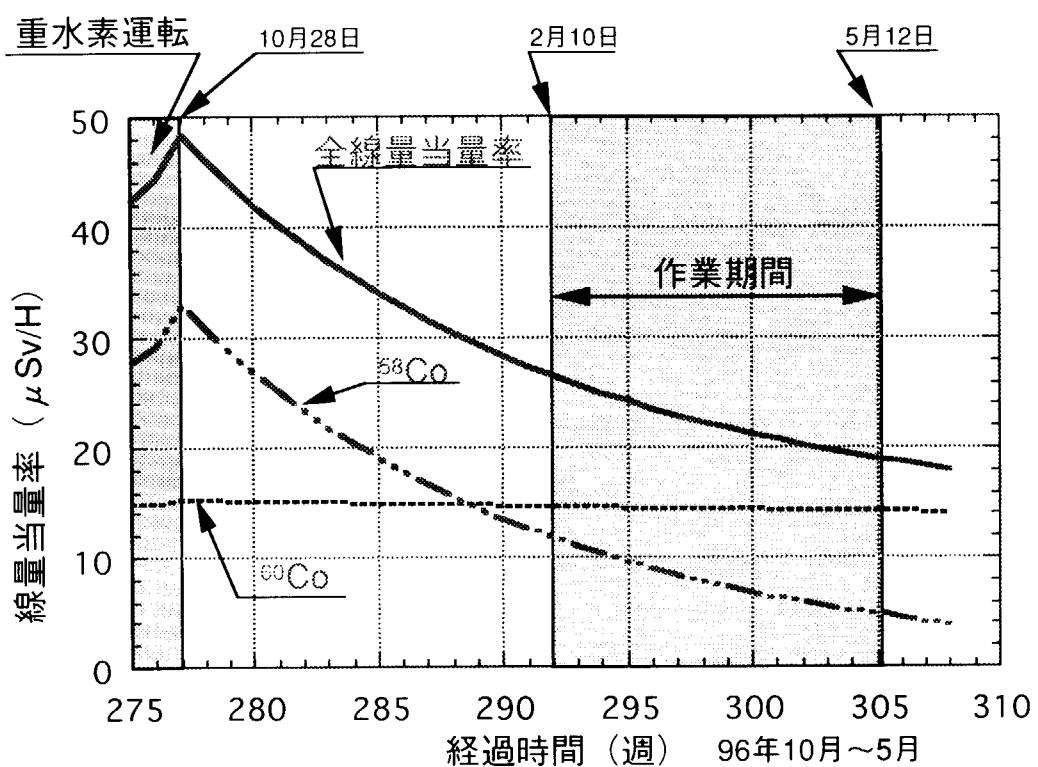
第 4.13 図 内側バッフル板の据付け



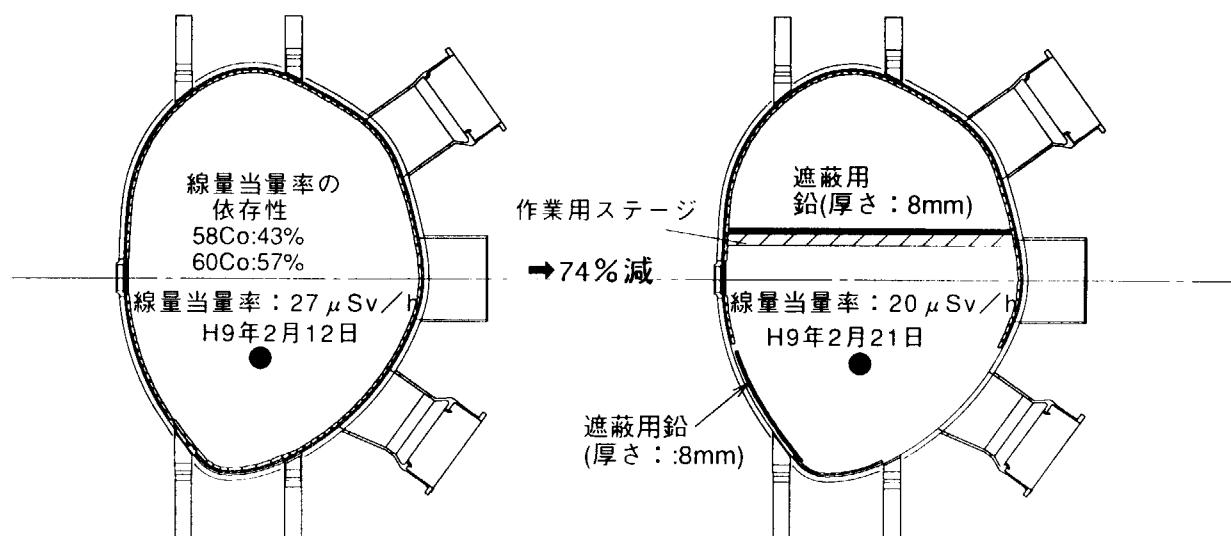
第 4.14 図 外側パッフル板の据付け



第 5.1 図 真空容器の換気系統図



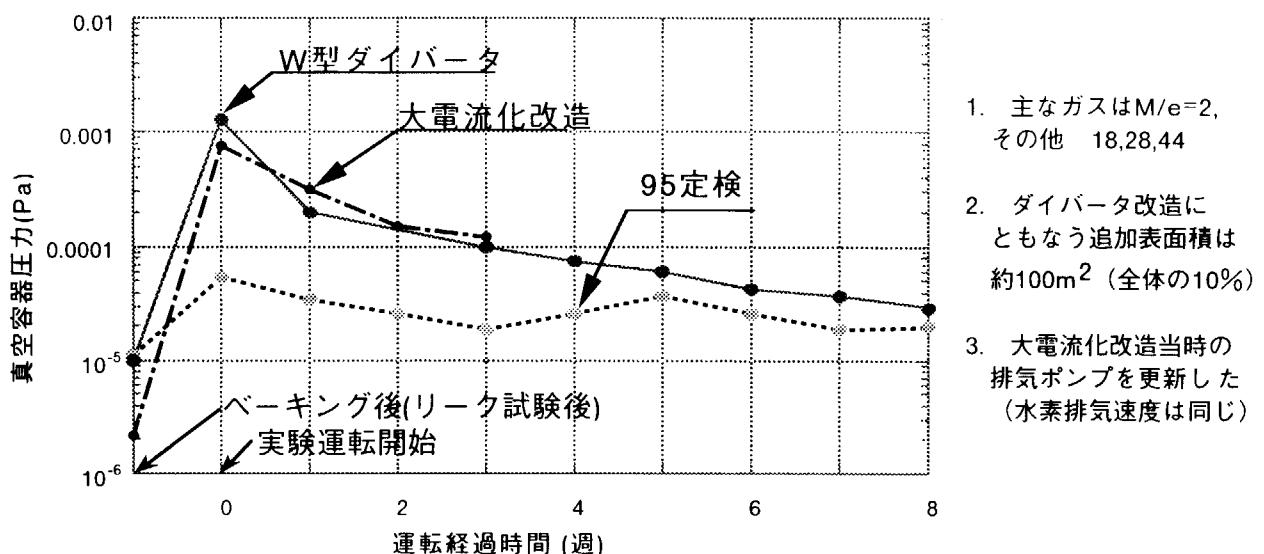
第 5.2 図 真空容器内の線量当量率の変化



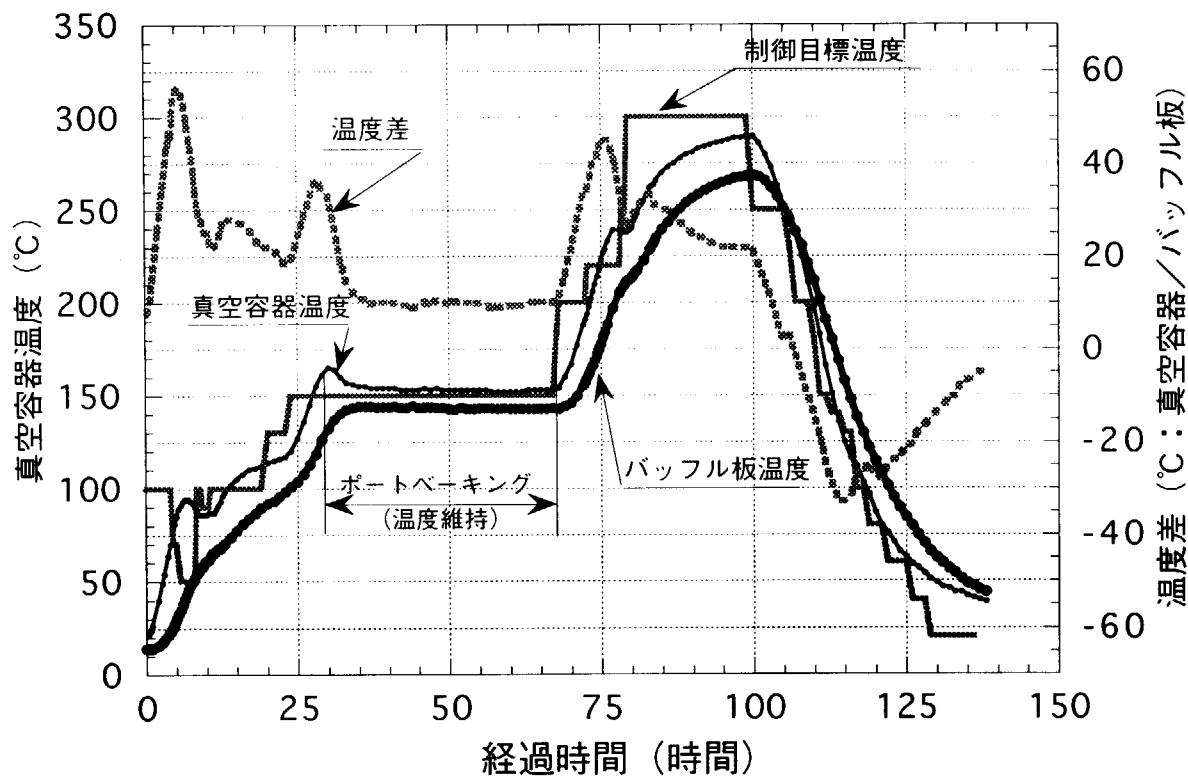
真空容器内の線量当量率は58Coと60Coに依存する。

1. 9日の減衰による線量当量率の変化は 4 %である。
2. 下部第一壁の撤去による線量当量率の減衰は 7 %である。
3. 鉛遮蔽による減衰は15 %である。

第 5.3 図 真空容器内の放射線遮蔽



第 6.1 図 真空容器の圧力経過



第 6.2 図 ダイバータ改造後の最初のベーキング

This is a blank page.



第 6.3 図 平成9年度の定検時における不具合箇所と修復後

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
		1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889				
	9.80665		1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵		1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858		1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586		2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255		3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰		4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

