



JAEA-Technology

2007-016



JP0750067

国際核融合材料照射施設(IFMIF)の 高中性子束テストモジュールの検討

Investigation of High Flux Test Module for the International Fusion Materials
Irradiation Facilities (IFMIF)

宮下 誠 湯谷 順明* 杉本 昌義

Makoto MIYASHITA, Toshiaki YUTANI* and Masayoshi SUGIMOTO

核融合研究開発部門

IFMIF開発グループ

IFMIF Development Group
Fusion Research and Development Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAES-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の高中性子束テストモジュールの検討

日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門核融合エネルギー工学研究開発ユニット

宮下 誠^{*}、湯谷 順明*、杉本 昌義

(2007年1月18日受理)

本報告は、核融合炉材料開発において必要不可欠な国際核融合材料照射施設 (IFMIF) のテストセル系の高中性子束テストモジュール (HFTM) の構造検討について取り纏めたものである。

HFTM は IFMIF の照射場であるテストセルの高中性子束領域において、試料の中性子照射を行うことを目的としている。リグ内の試験片と熱電対配置、制御信号の取り合いおよび支持構造を含めた全体の構造を検討した。また、高中性子束領域の制約から矩形断面をしたモジュール胴(圧力容器)の内圧とたわみ量の関係を明らかにし、さらに高精度を要求される照射材料温度制御の温度センサーである熱電対の照射に対する影響を検討した。これらの検討結果を基に、構造図面を作成した。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

*技術開発協力員

*（株）東芝

Investigation of High Flux Test Module for the International Fusion Materials
Irradiation Facilities (IFMIF)

Makoto MIYASHITA[※]、Toshiaki YUTANI*and Masayoshi SUGIMOTO

Division of Fusion Energy Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received January 18, 2007)

This report describes investigation on structure of a high neutron flux test module (HFTM) for the International Fusion Materials Irradiation Facilities (IFMIF). The HFTM is aimed for neutron irradiation of a specimen in a high neutron flux domain of the test cell for irradiation ground of IFMIF.

We investigated the overall structure of the HFTM that was able to include specimens in a rig and thermocouple arrangement, an interface of control signal and support structure. Moreover, pressure and the amount of the bend in the module vessel (a rectangular section pressure vessel) were calculated. The module vessel did a rectangular section from limitation of a high neutron flux domain. Also, we investigated damage of thermocouples under neutron irradiation, which was a temperature sensor of irradiation materials temperature control demanded high precision. Based on these results, drawings on the HTFM structure.

Keywords : IFMIF, High Flux Test Module , Neutron Irradiation,
Test Cell, Structure Design

※Cooperative Staff

*Toshiba Corp.

目 次

1.はじめに	1
2.高中性子束テストモジュール設計の課題	2
2.1 照射体積	2
2.2 温度制御	2
2.3 容器の形状	2
2.4 照射試料	2
2.5 関連法規・規格	2
2.6 材料と設計値	3
3.構造概要	4
4.各部の構造	4
4.1 リグ	4
4.2 容器	6
4.3 容器に組み込む部品	7
4.4 位置調整機構	9
5.熱電対の検討	10
5.1 热電対の特徴	10
5.2 照射による影響	10
5.3 温度による影響	11
5.4 热電対の予想寿命	11
6.接合法の検討	12
7.まとめ	13
謝 辞	13
参考文献	13
付録	
横断面の空間を仕切板により3分割する胴に生じる応力とたわみ量の解析	55

Contents

1. Introduction	1
2. Task of High Flux Test Module Design	2
2.1 Volume to Take Irradiation	2
2.2 Temperature Control	2
2.3 Shape of Container	2
2.4 Specimen	2
2.5 Related Law and Standard	2
2.6 Materials and Design Specifications	3
3. Structure	4
4. Structure of Each Parts	4
4.1 Rig	4
4.2 Vessel	6
4.3 Parts to Put in Vessel	7
4.4 Position Adjuster	9
5. Investigation of Thermocouple	10
5.1 Characteristic of Thermocouple	10
5.2 Influence by Irradiation	10
5.3 Influence by Temperature	11
5.4 Expected Life of Thermocouple	11
6. Investigation of Welding	12
7. Conclusion	13
Acknowledgments	13
Reference	13
Appendix	
Analysis of Stress and Amount of Bend for Container divided into three in Divider Plate	55

List of Tables

Table2-5-1	The Rule that is applied to Container Holding Gas	14
Table4-2-1	Parts which constitutes Test Module Vessel	14
Table4-2-2	The Formula of Stress based on JIS B8280-2003(for Divider Plate)	15
Table4-2-3	The Formula of Stress based on JIS B8280-2003(for Stick)	16
Table4-2-4	The Formula of the Amount of Bending (for Divider Plate)	17
Table4-2-5	Stress of Noncircular Container with Divider Plate	18
Table4-2-6	Stress of Noncircular Container with Stick	19
Table4-2-7	Stress and Amount of Bend of Module Vessel (Noncircular Container divided into three in Divider Plate)	20
Table5-1-1	Type of Thermocouple	21
Table5-2-1	Nuclear Reaction Cross-section Area in 14 MeV of a main constitution nuclide of K and N Type Thermocouple)	21
Table5-2-2	Nuclear Reaction Cross-section Area in 14 MeV of a main constitution nuclide of C Type Thermocouple	21
Table5-2-3	C Type Thermocouple Composition in Neutron Exposure Dose 3×10^{21} n/cm ² (14 MeV)	22
Table5-2-4	Use Conditions of Thermo-couple in IFMIF	22
Table6-1	Feature and Application Example of Electron Beam Welding Process	22

List of Figures

図 題	CAD ファイル名 (注)	ページ
Fig.1-1 IFMIF Test Cell (Cross Section)	—	23
Fig.2-4-1 Specimen	Specimens.dwg	24
Fig.3-1 Test Module	Test_Module_r2.dwg	25
Fig.4-1-1 Rig	Rig_r2.dwg	26
Fig.4-1-2 Specimen Holder	Holder_r2.dwg	27
Fig.4-1-3 Assembling Drawing of Specimen Holder	Cross_Section.dwg	27
Fig.4-1-4 Assembly Method of Thermocouple	TC_FixPlate_r2.dwg	28
Fig.4-1-5 Accumulation Method of Holder	Stacking_r2.dwg	29
Fig.4-1-6 Holder Fixture (for Side)	Holder_Fixture.dwg	30
Fig.4-1-7 Lower Reflector	Lower_Rreflector_r2.dwg	31
Fig.4-1-8 Rig Upper Part Fixation Plate	Upper_Fixture_r2.dwg	32
Fig.4-1-9 Upper Reflector	Upper_Reflector_r2.dwg	33
Fig.4-1-10 Joint Tube	Joint_Tube_r2.dwg	34
Fig.4-2-1 Vessel of Test Module	Vessel.dwg	35
Fig.4-2-2 Bend Quantity between B - M of Module Vessel	—	36
Fig.4-2-3 Upper Stream Vessel	Upper_Stream_Vessel.dwg	37
Fig.4-2-4 Module Vessel	Module_Vessel.dwg	38
Fig.4-2-5 Lower Stream Vessel	Lower_Stream_Vessel.dwg	39
Fig.4-2-6 Support Vessel (for Output Terminal)	Support_Vessel_r2.dwg	40
Fig.4-2-7 Terminal Board Cover	Cover_Vessel_r2.dwg	41
Fig.4-3-1 Vessel which incorporated Contents	Vessel_with_Content_r2.dwg	42
Fig.4-3-2 The Board to do Flow Straghtner	Flow_Straightner.dwg	43
Fig.4-3-3 Lower Support	Lower_Supporter.dwg	44
Fig.4-3-4 Production Method Plan for Lower Support	Lower_Suppoter_Assemble.dwg	44
Fig.4-3-5 Side Reflector	Side_Reflector1.dwg	45
Fig.4-3-6 Side Reflector (Lower Side)	Side_Reflector2.dwg	45
Fig.4-3-7 Terminal Board	Terminal_Board_r2.dwg	46
Fig.4-3-8 Parts of Terminal	Terminal_Part.dwg	47

Fig.4-3-9 The State that Installed Parts on The Terminal Board (1)	Arrangement1.dwg	48
Fig.4-3-10 The State that Installed Parts on The Terminal Board (2)	Arrangement2.dwg	49
Fig.4-3-11 Electric Penetration Assembly (Pressure Boundary)	—	50
Fig.4-3-12 Parts of Pressure Boundary	Pressure_Boundary.dwg	50
Fig.4-3-13 The State that Installed Electric Penetration Department in Vessel	Vessel_with_Cable.dwg	51
Fig.4-3-14 The State that Installed Rig to Vessel	Vessel_with_Rig_r2.dwg	52
Fig.4-4-1 Guide Pin and Position Adjuster	—	53
Fig.4-4-2 Detail of Position Adjuster	Adjuster_r2.dwg	53
Fig.4-4-3 Example of Electromotive Drive BallScrew System	—	54
Fig.6-1 Friction Stir Welding	—	54

(注) : Auto CAD LT 2000 で作成

This is a blank page.

1. はじめに

国際核融合材料照射施設 (International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF) は核融合材料開発のため、核融合模擬中性子束の照射環境を得るために、最大エネルギー40MeV、最大電流 250mA 重陽子(D)ビームを高速液体リチウム流(Li)に入射し、D-Li ストリッピングを利用した材料試験施設である。

図 1-1 に IFMIF テストセルの全体図を示す。IFMIF の照射場は、その中性子照射量により、高中性子領域、中間中性子領域、低中性子領域に分けられる。照射試料を装着するテストモジュールは、それぞれの領域に設けられ、その構造は、上部には中性子の漏洩を防止するために、階段状のシールドプラグ（遮蔽体）と下部にはテストモジュールから構成されている。本報告の対象となる高中性子領域用テストモジュールは核融合炉のブランケット・第一壁構造材料等の照射に当たられる最も重要なテストモジュールである[1]。

日欧での検討の結果、高中性子領域のテストモジュールは、(a) 欧州案：F Z K型一縦置きリグ・NaK ボンディングと(b) 日本案：九大型一横置きリグ・He ボンディングの二つの方式が提案されている。

F Z K型の特徴は冷却 He ガス流路に沿った縦置きのリグ内に試料と熱伝導率の高い液体金属 (NaK) を入れ、リグ壁と試料間の接触熱抵抗を低減する方法で、試料温度の均一性は得られるという利点があるが、NaK の使用可能温度から試験温度が 600°C以下に制限されること、NaK と試料との共存性、また試験後の NaK の処理などの課題がある。

一方、九大型の特徴は冷却 He ガス流路に対し横置きしたリグを上下方向に 3段、奥行き方向に 3列の合計 9 本を、高中性子領域に合わせて置くことにより、中性子分布および温度分布の一様性が良いこと、構造が簡単であること、1,100°Cまでの高温領域までの試験が可能であることなどの利点がある。その構造から、リグが収容される容器（モジュール胴部分）に補強板に当たる仕切り板を設けることが出来ず、圧力容器として検討する必要がある[2]。

本報告書は九大案の横置きリグ・He ボンディング方式の高中性子束テストモジュールの実現を図るため、これまで検討した結果をまとめたものである。2章では前提となるテストモジュール設計の課題を整理した。3章ではテストモジュールの全体支持構造を含めた全体基本構造を検討した。4章ではモジュールを構成する各部の詳細について検討した。この中で、4.1 章では課題で示した試料等を 500cc の容積に收めるためにリグ内の試験片と温度センサー(熱電対)配置、制御信号の取り合いを検討した。4.2 章では、矩形断面の圧力容器であるモジュール胴の応力・たわみ量を計算した。5章では試料温度制御の重要要素である熱電対の照射による影響について検討した。6章ではテストモジュールの製造時に必要となる接合方法の検討を行った。さらに、テストモジュールのモックアップ製造時に必要となる構造、配置示す図および各部品の CAD 図を作成した。

2. 高中性子束テストモジュール設計の課題

2.1 照射体積

損傷速度 20dpa/年以上が得られる高中性子領域の照射体積は 500 cm³ (縦 5 cm × 横 5 cm × 長さ 20 cm) と極めて小さなものであり、この限られた中に、多数の微小試験片、温度制御用の電気ヒータと温度センサー(熱電対)類およびそれぞれのリード線、さらに冷却用の He ガス流路の確保が必要である。

2.2 温度制御

現在想定されている核融合構造材料は、照射特性における温度依存性が高いため、照射中は材料設定温度 300~1,100°C に対し、設定絶対温度の ± 1 % という高い精度の温度制御が要求されている。また、設定温度までの昇温時間は低温時の熱履歴の影響を小さくするため、さらにビームオフ時等の照射材料の冷却時間についても焼きなましによる照射欠陥の熱回復を防ぐために 10 分以内と要求されている。

高精度の温度制御には温度センサーの信頼性が極めて重要になる。温度センサーには熱電対の使用を考えられているが、これまで、IFMIF のような照射雰囲気での使用実績はなく、照射による影響を検討する必要がある。

2.3 容器の形状

高中性子照射が得られる領域は、磁石でほぼ矩形にされた重陽子ビームが Li ターゲットに当たるため、全体として矩形形状を示している。この形状に合わせて照射試験片を装着したリグ (Rig) を置くため、テストモジュールは矩形断面になる。この内部を冷却用の He ガスが 3~5 気圧で流れ、圧力容器としての機能が必要となる。通常の圧力容器が採用する円形断面ではなく、矩形断面では強度、変形に対しては不利な点も多く、事前に検討する必要がある。

2.4 照射試料

想定した照射試料を図 2-4-1 に示す。試料は、破壊靭性試験片 (2 種類)、引張試験片、シャルピー衝撃試験片および温度計測用試験片の 5 種類である。このうち、破壊靭性試験片 (2 種類)、引張試験片およびシャルピー衝撃試験片の 4 種類は現計画を参考にしているが、最終案ではない。

温度計測用試験片 (monitor specimen) は温度の計測・制御に用いるもので、熱電対を挿入するための直径 1mm の穴が設けられている。

2.5 関連法規・規格

テストモジュールでは、核発熱と電気ヒータによって試料の温度を目的の温度に制御し、発生した熱を大気圧を超える (数気圧程度) He ガスによって除去する。大気圧を超える気体を取り扱う場合、気体を保有する容器は労働安全衛生法の圧力容器関連の法律が適用される (ただし、容積が小さいと適用されない)。また、圧力がゲージ圧で 1 MPa を超えると高圧ガス保安法が適用される。圧力が 0.2MPa 以上 (0.2MPa 未満のときも容積により適用される) のときのこの 2

法による規制を簡単にまとめたものを表 2-5-1 に示す。

テストモジュールの He ガスの圧力は、今後の流動解析等に決定される予定であるが、高くても数気圧程度で、配管を除く部分の容積も 0.04m^3 未満になると予想されるので、上記の 2 つの法律は適用されないと考えられる。なお、この 2 つの法律以外に電気事業法(通産告示第 501 号)でも容器等について規制しているが、原子炉を対象としたものであるので、テストモジュールには適用されないと考えられる。しかし、テストモジュールは、容積は小さくても大気圧を超える He ガスを保有し、しかも強力な中性子照射場で使用されるので、自由に設計をして良いということにはならないであろう。たとえ許認可の対象にならなくても、法で規制されている圧力容器に準じて設計すべきであると考えられる。また、現状では、IFMIF に関する設計基準が設定されていないが、圧力容器に準じて設計しておけば、将来大幅な設計の見直しをする必要はないと考えられる。

法で規制している圧力容器の技術基準は日本工業規格に統一されてきている。テストモジュールのように円形でない断面構造を有する圧力容器に関する規格は、日本工業規格に JIS B 8280 「非円形鋼の圧力容器」である。これはアメリカ機械学会ボイラ圧力容器規格のうちの ASME Sec. VIII. Div. 13 の Appendix 13 "Vessels of Noncircular Cross Section" の日本版で、応力の計算方法や許容応力について規定している。今回の検討はこの規格に準じて行うこととした。

2.6 材料と設計値

テストモジュールの使用環境、および現時点での使用実績、材料規格のから、候補材としては ITER の真空容器に使用予定の SUS316LN 鋼のほうが妥当であると考えられる。しかし、「JIS B8265 付表 2.1.1 鉄鋼材料の許容引張応力」には、SUS316LN 鋼の値が記載されていないので、ここでは SUS316 鋼を使用することにした。なお、SUS316LN 鋼は SUS316 鋼よりも引張強さが 5%ほど高いので、SUS316LN 鋼を使用することになっても SUS316 鋼で評価しておけば安全側である。

試料が装荷される箇所の胴の温度は九大の評価で 100°C 前後と見積もられているので、設計温度は高めの 150°C とした。その他の部分の胴の温度は、これよりも低くても良いと考えられるが、今回は同じく 150°C とした。また、使用圧力は $0.3\sim0.5 \text{ MPa}$ 程度と考えられないので、設計圧力は少し高めの 0.6 MPa とした(なお、本検討の途上で、後述の上流側胴のみ整流機構で大きな圧力損失が生じると考えて設計圧力を一時 0.7 MPa としたが、九大の検討で圧力損失が少ないことが分かったので、全て 0.6 MPa とした)。いずれも設計の進捗に従って見直す必要がある。以上と許容引張応力値をまとめると次のようになる。

胴の材料 : SUS316 鋼

設計温度 : 150°C

設計圧力 : 0.6 MPa

許容引張応力値 : 107 MPa (JIS B8265 付表 2.1.1 鉄鋼材料の許容引張応力から)

3. 構造概要

テストモジュールを図 3-1 に示す。テストモジュールは、試料を収納するリグ（3 個、図では 1 個のみ記載）、リグを収納する容器、垂直型テストアセンブリーの遮蔽体にテストモジュールを接続して支持するとともにテストモジュールのビーム方向の位置調節を行う位置調節機構、計測・制御用の配線（熱電対や電気ヒーターなど）の端子、リグを支持する下部支持部、整流機構、反射体および He 配管等から構成される。なお、図面には記載していないが、圧力境界（信号線貫通部）から取り出された配線（無機絶縁（MI）ケーブル）は遮蔽体に設けられた端子に接続される。MI ケーブルは、銅導体を酸化マグネシウムと銅シースで被う構成で、構成材料が無機物のみなので、放射線の影響を受けにくい特徴を持つ。

4. 各部の構造

4.1 リグ

リグは、試料ホルダー、側面固定具、リグ下部反射体、リグ上部押さえプレート、リグ上部反射体、連結管、熱電対、電気ヒータ、および六角穴付ボルト等で構成される。リグを図 4-1-1 に示す。

(1) 試料ホルダー

照射試料は試料ホルダー内に装荷する。試料ホルダーを図 4-1-2 に示す。試料ホルダーは、試料ホルダー A と試料ホルダー B からなり、内部は試料が装荷できるようくり抜かれているが、装荷する試料の形状および数量によって内部形状が異なる。また、製造方法および材質とも未定である。プレート状の電気ヒーターが試料ホルダー A と試料ホルダー B にそれぞれ 5 個および 3 個取り付けられるが、取り付け方法が未定であるので、図示していない。電気ヒーターのリード線は、内径 0.8 mm、外径 1.2 mm の 1 つ穴のセラミックス製保護管内に入れて使用することとする。試料ホルダーがリグに組み込まれた状態（断面図）を図 4-1-3 に示す。

(2) 热電対の固定

熱電対の固定方法を図 4-1-4 に示す。試料を再照射する場合、遠隔操作でホルダー当たり熱電対（直径 1 mm のシース型の N 型熱電対）を 3 個取り付ける必要があるが、熱電対を 1 個ずつホルダー内の温度計測試料まで差し込むのは困難と考えられる。そこで、3 個同時に仕めるように、予め熱電対を厚さ 0.3 mm 程度の 2 枚の金属板（上部固定板と下部固定板）でサンドイッチ状に挟んでおくことにした。なお、2 枚の金属板間の熱電対がないところには、断熱材（厚さ約 1.2 mm）を入れ、また、断熱材の所々に穴を開け、そこに小さな金属板を挿入し、この金属板を介してスポット溶接にて 2 枚の金属板を固定して、熱電対を動かないようにする。

また、下段のホルダー用下部固定板は、下側からの冷却材の侵入を防止するために、16.4 mm × 230 mm の長方形とする。

(3) ホルダーの積み重ね

ホルダーの積み重ね方法を図 4-1-5 に示す。上面図は外観、正面図はほぼ断面であり、熱電対と電気ヒーターの取り出し方を主な目的として描いている。また、図が煩雑になるのを避けるため、試料は記載していない。固定板に固定した熱電対をホルダーに装着後、下側のホルダーから積み重ねていく。この時、下側のホルダーの電気ヒーターのリード線と熱電対が外側に、中央のホルダーのそれらは中間に、上側のホルダーそれらが内側になるように予め折り曲げておく必要がある。また、遠隔操作でこれらの作業には専用の治工具が必要と考えられ、今後、確認する必要がある。

(4) 側面固定具

側面固定具は、試料ホルダーを 3 段に積み重ねて、試料ホルダー A と試料ホルダー B が分離しないように両側面で固定するものである。側面固定具を図 4-1-6 に示す。また、直径 4 mm の穴に M4 のボルトを通して側面固定具を下部反射体と上部プレートに固定する。なお、ビーム側と最もビームから遠いところは、高さ 0.5mm の突起を取り付けて流路幅 1mm を確保する必要がある。

(5) リグ下部反射体

リグ下部反射体は、中性子反射体であるとともに、リグを下部支持部に装着する役割と試料ホルダーを固定する役割を有する。リグ下部反射体を図 4-1-7 に示す。反射体本体にネジ止めされる下側の直径 6 mm の棒が下部支持部に挿入される箇所である。また、上部の M4 の雌ネジは、試料ホルダーを固定するボルトを止めるところである。反射体の下側は厚さ 8 mm と上部より薄くすることによって、冷却材が流入しやすくなっている。

(6) リグ上部押さえプレート

リグ上部押さえプレートの主な役割は、試料ホルダーを固定することである。リグ上部押さえプレートを図 4-1-8 に示す。熱電対と電気ヒーターのリード線を容易に通すために、A と B の 2 つの部分からなっており、この 2 つを側面で六角穴付ボルトで固定する。上部押さえプレート A の両端の直径 4 mm の穴は、試料ホルダーを固定するためのボルトを通す穴である。A と B のそれぞれの上面に 2 個づつある M4 の雌ネジにリグ上部反射体をボルトで固定する。なお、リグ上部押さえプレートは中性子反射体でもある。

(7) リグ上部反射体

リグ上部反射体は中性子反射体である。リグ上部反射体を図 4-1-9 に示す。下側はリグ上部押さえプレート、上側は連結棺に接続される。4 個の直径 4 mm の穴にボルトを通してリグ上部押さえプレートに接続し、また M8 の雌ネジに連結管をボルト止めする。上面図で両端のコの字状に切り抜かれた箇所は、熱電対と電気ヒーターのリード線を通すところである。

(8) 連結管

連結管は、リグ上部反射体に固定してリグをテストモジュールから脱着するために用いる。10×10 mm の管の上下端に端栓を溶接にて取り付ける。連結管を図 4-1-10 に示す。上部端栓はマニピュレーターで掴むための把手で、直径 10 mm の棒に直径 15 mm のつばを設けた構造で、マニピュレーターで掴みやすくしてある。下部端栓の直径 8 mm の穴にボルトを通してリグ上部反射体に接続する。

上面図で両側のコの字状の部分は、厚さ 0.5 mm の板を折り曲げたもので 10×10 mm の管に溶接等で固定し、その内部に熱電対と電気ヒータのリード線を通す。また、この部分を正面図で、5箇所に凹みを設けてあるのは、電対と電気ヒータのリード線を通したときに、もしさらがはみ出しそうになった場合針金等で固定するための針金等の落下防止である。

4.2 容器

容器は圧力を受ける部分で、He 冷却ガスの流路から見て上流側から上流側胴、モジュール胴、下流側胴、端子盤支胴および端子盤カバーの 5 つの胴からなる。テストモジュールの容器全体を図 4-2-1 に示す。テストモジュールのこの 5 つの胴の仕切板などの形状を表 4-2-1 に示す。

胴の応力計算式を表 4-2-2 および表 4-2-3 に示す。また、たわみ量の計算式を表 4-2-4 に示す。応力計算式は JIS B 8280 「非円形鋼の圧力容器」に基づくものであり、たわみ量計算式は導出したものである。モジュール胴すなわち 3 分割胴の応力とたわみ量の計算式の導出を添付資料に示す。各胴の各部の応力計算結果を表 4-2-5～4-2-7 に示す（モジュール胴のみたわみ量を含む）。いずれの胴も大きな応力が発生すると考えられる B～C 間の胴板の厚さ t_2 のみをパラメータとして計算したもので、A～B 間の胴板の厚さ t_1 と仕切板の厚さ t_3 は B～C 間の胴板の厚さ t_2 と同じ寸法とした。したがって、 t_1 と t_2 については見直すことにより、表の値よりも小さい寸法にすることが可能である。

図 4-2-2 にモジュール胴の B～M 間のたわみ量を示す。図では仕切板の厚さを 0 として描いている。たわみは M₁～M 間では M 点で最大になる。たわみ量は 0.16 mm (0.3 MPa) から 0.32 mm (0.6 MPa) で、冷却材流路幅 1 mm に比べて無視できる値ではなく、たとえば 0.6 MPa の圧力を加えることによって冷却材流量が約 19% 増加（幅 1 mm、長さ 246 mm の冷却材流路が占める面積：246 mm²、たわんだ部分が占める面積：45.7 mm²）することになる。この冷却材流路増加の影響については今後の検討が必要であろう。また、B～M₁ 間ではたわみ量がマイナスの値（内側にたわむ）になっている。今回の解析では胴板を連続梁として評価しているが、両端支持梁として解析すれば内側にたわむことはない。連続梁か両端支持梁かは仕切板の厚さと取り付け方に依存すると考えられ、今後詳細に検討する必要がある。

(1) 上流側胴

上流側胴は、厚さ 14 mm の板材を溶接して製作し、内部に直径 24 mm の棒状ステーを 2 個有する。上流側胴を図 4-2-3 に示す。ただし、棒状ステーの取り付け方は今後の課題である。上部にモジュール胴を溶接によって接続する際に、真直度を保てるよう内側がモジュール胴に差し込めるようになっている。また、上部に下部支持部を設置する。その下に整流機構を設置する溝

を 3 カ所所有する。整流機構は溝に差し込んで設置するが、He の漏洩流防止のために整流機構の周辺を溶接する必要があると考えられるが、施工方法が課題である。左側面の下側に He 冷却ガスの取り入れ口で、市販の外径 48.6 mm の配管用ステンレス管を溶接によって接続する。

(2) モジュール胴

モジュール胴を図 4-2-4 に示す。モジュール胴は、中性子束が高いところで使用するので、母材と溶接部の組織等の相違に起因する照射による不具合が発生するのを防止するために、一体物としてブロックからの切り出し加工を原則とする。中央にリグ、左右の 2 カ所に側面反射体を設置する。

(3) 下流側胴

下流側胴を図 4-2-5 に示す。下流側胴は、厚さ 11 mm の板材を溶接して製作し、内部に直径 24 mm の棒状ステーを 2 個有する。上側胴と同様に棒状ステーの取り付け方が課題である。また、左側面が He 冷却ガスの出口で、市販の外径 48.6 mm の配管用ステンレス管を溶接によって接続する。

(4) 端子盤支胴

端子盤支胴を図 4-2-6 に示す。端子盤支胴は、厚さ 12 mm の板材と圧肉の板材を加工して製作する。両側面に、熱電対と電気ヒーターの配線を通すための、直径 4 mm の穴が 9 mm (中心間) 間隔でそれぞれに 100 個 (合計 200 個) ずつ設けてある。また、端子盤は M4 のねじ穴にボルト止めする。

(5) 端子盤カバー

端子盤カバーを図 4-2-7 に示す。端子盤カバーは、厚さ 10 mm の板材を溶接して製作する。端子盤カバーは端子盤支胴に溶接によって取り付けるが、この溶接は遠隔操作によって実施せねばならない (他の胴同士の溶接は非遠隔作業)。また、端子盤カバーは強度の余裕が少ない。

4.3 容器に組み込む部品

容器を組み立てていく際に、整流機構、下部支持部、側面反射体および端子盤を組み込む。また、端子盤支胴に圧力境界 (信号線貫通部) を取り付ける。図 4-3-1 に、整流機構、下部支持部、側面反射体および端子盤を容器に取り付けた状態を示す。

(1) 整流機構

整流機構を図 4-3-2 に示す。整流機構は、モジュール胴とリグおよびリグとリグとの間の冷却材流路内に水平方向に渡って冷却材が均一な条件で流れるように調節するもので、多孔質のセラミックスからなり、上流側胴に設けられた 3 箇所の溝に取り付ける。

また、多孔質セラミックスは衝撃などで損傷する恐れがあるので、流れの入口側と出口側がパンチングメタルからなるケース内に入る。

(2) 下部支持部

下部支持部を図 4-3-3 に示す。また、図 4-3-4 にその製作法を示す。下部支持部はリグと側面反射体を保持するもので、上流側に取り付ける。6 個の直径 6 mm の穴がリグの下端を差し込む所である。また、4 個の M6 の雌ネジに反射体をボルト止めする。

なお、熱流動試験によって、モジュール胴とリグおよびリグとリグとの間の冷却材流路間に、冷却材流量の差違が認められた場合は、下部支持部の上流側の構造を見直す必要があると考えられる。

(3) 側面反射体

側面反射体を図 4-3-5 および図 4-3-6 に示す。側面反射体は中性子反射体で、4 個ずつ一括して下部支持部にボルト止めする。上面図で中段の直径 6 mm の 2 個の穴にボルトを通す。また、上段と下段の計 6 個の直径 6 mm 穴は、熱流動解析の結果にしだいでは穴経を見直す必要がある。

(4) 端子盤

3 個のリグに装着される熱電対と電気ヒーターの合計数は、それぞれ 27 対および 72 個で、芯線数ではそれぞれ、54 本および 144 本となる。合計 198 本（これに中性子モニター用のリード線を加えれば 200 本を超えるかも知れない）の芯線をテストモジュールの外側に取り出さねばならない。芯線を取り出す箇所は圧力境界となるので、取り出す箇所を遠隔操作で製作するのは極めて困難であるので、そこを予め製作しておく、そこからの線とリグからの熱電対および電気ヒーターのリード線を遠隔操作で接続するほうが現実的である。

接続方法として、1) 電気コンセントのように単純に差し込むのと、2) 1 本ずつ接続する方法がある。1)の方法は、電気コンセントでも分かるように大きなスペースが必要である。テストモジュールはスペースの余裕がないので、作業は困難であるが、2)の方法を採用し、端子で接続することにした。

端子盤を図 4-3-7 に示す。端子盤は後述の端子部品を取り付けるための盤で、端子盤支腫にボルト止めする。図 4-3-6 で、200 個の直径 3 mm の穴に端子のボルトを通し、220 個の M3 の雌ネジに圧着端子の回転してお互いに接触するのを防止するセラミックス製ボルトを止めし、また、36 個の M4 の雌ネジに接触防止板をボルト止めして端子のボルトとリード線が接触するのを防止する接触防止板をボルト止めする。

(5) 端子部品

端子部品を図 4-3-8 に示す。端子部品は、(a)金属ボルト、(b)圧着端子、(c)セラミックス製ブッシュ、(d)ワッシャ、(e)ナット、(g)セラミックス製ボルトおよび(h)接触防止板から構成される。(f)は(a)～(e)を組み立てた図である。また、(e)セラミックス製ボルトは圧着端子を取り付けたときにお互い接触するのを防止するのに用いる。図 4-3-9 に、図 4-3-8 の(a)～(e)を端子盤に取り付けた状態を示す。また図 4-3-10 に、さらに(g)と(f)を取り付けた状態を示す（ただし、正面図と側面図の最上段のみに取り付けた状態）。

(6) 圧力境界 (信号線貫通部)

端子盤支胴の両側面から熱電対等の信号線を容器の外に取り出す。容器の内外に圧力差があるので、この箇所は圧力境界になる。この箇所で圧力の漏洩が生じないようにするために、信号線貫通部にはMIケーブルを使用して端子盤支胴の側面に設けた穴を通し、穴との隙間を密封する必要がある。しかし、MIケーブルと端子盤支胴を溶接などによって密封することは、熱容量の差が大きすぎるので困難である。そこで、従来からある図4-3-11に示す方法（電気ペネトレーション）を採用することにした。

予め、MIケーブルはそろばん玉のような形をした圧力境界コマに通し、圧力境界コマに溶接する。次に圧力境界コマと端子盤支胴（容器壁）とを溶接し、圧力境界が完成する。図4-3-12に圧力境界コマを示す。MIケーブルの端末として、1芯用MIケーブル端末が提案されているが[3]、照射下で使用可能な小型の2芯用の端末の開発により、圧力境界部の数は半減する。

図4-3-13に容器に信号線貫通部を取り付けた状態を、また、図4-3-14にさらにリグを装荷した状態を示す。

4.4 位置調整機構

高照射テストモジュールの照射位置の設定は、中性子束勾配が急であり、ターゲットとの距離を高精度で設定する必要がある。また、遮蔽プラグを含めて重量物（約5トンを想定）であるテストモジュール全体を精度良く設置するには位置調整機構が必要である。

基本的な高照射テストモジュール全体の位置調整は図4-4-1に示すように、ガイドピン方式により、テストセルカバー側に設けられたガイドピン受け穴部の基本位置に固定される。

位置調節機構は、以下の役割を有する。

- 1) テストモジュールの保持（遮蔽プラグへの接続）
- 2) He冷却材配管の接続
- 3) テストモジュールのビーム方向の位置調節

この役割を満足させるために、溶接ベローズとスライド機構を採用した。この構造により、過大な応力発生させることなしに、テストモジュールのビーム方向の位置調節が可能となる。溶接ベローズと配管との接続にはフランジ（図ではネジは省略してある）を用いる。位置調整機構の構造を図4-4-2に示す。

(1) 溶接ベローズについて

金属製ベローズの種類には製作方法から、以下の3種に分類される。

- ・ロール成形ベローズ
- ・液圧成形ベローズ
- ・溶接ベローズ

溶接ベローズは、金属薄板を盤状にプレスで抜いて、ドーナツ状の円盤の谷と山を溶接して円筒状にベローズを製作していく方法で、他と比較して加工工数のかかる製造法であるが、以下に示す高中性子照射テストモジュール用の位置調整機構に適した特徴を持つ。

- ・素材の多様性（溶接可能なあらゆる金属で製作可能）。
- ・繰り返しの使用の耐久性に優れる。
- ・耐食性に優れ、低温から高温まで広範囲な環境に適用可能。
- ・完全密着状態まで圧縮でき、大きな伸縮量が取れる。

IFMIF の使用環境に適し、かつ、実績のあるベローズ素材として、SUS316L、ニッケルクロム合金 (inconel-625) が考えられる。特に、inconel-625 は高温でクリープ強度に優れ、また、耐食性にも優れているため原子炉部品、核融合炉設備に使用されている。

(2) スライド機構

スライド駆動機構の起動方式は大きくわけて、油圧方式と電動方式があるが、使用雰囲気および使用温度等を考慮すると、油圧は不利な要素が多く、適用には不向きと考えられる。第一候補として、サーボプレス装置のスライド機構を始め、軽水炉の制御棒駆動機構にも採用されている電動駆動ボールスクリュー方式が適していると考えられる。図 4-4-3 にサーボプレス装置のスライド機構に用いられた例を示す。この例は、サーボモータからベルトを介して直接ボールスクリューを駆動する方式である[4]。

5. 热電対の検討

5.1 热電対の特徴

IFMIF 条件における热電対の热電特性の変化 (decalibration: variations in thermo-electric characteristics of thermocouple) や寿命については、EVEDAにおいて、詳細に検討する予定であるが、現状では以下のことが分かっている。

核分裂炉における照射試験で、現在使用されている热電対は、K 热電対と高温用（燃料中心温度測定用など）の C 热電対である。また、1980 年頃から N 热電対が照射試験に使用されるようになった。表 5-1-1 の各热電対の特徴を示す。N 热電対は、K 型热電対を改良したもので、以下の特徴を持つ。

- ・ Cr 量を増加して、+脚 (Nicrosil) の aging を減少させた。
- ・ Si を含ませて、酸化しにくくした。
- ・ 高温で長時間使用時のドリフト率を低下させた。
- ・ 核環境での安定性を向上させた。

5.2 照射による影響

照射による影響は、次の 3 つに分類される。

- ・ Transmutation
- ・ Structural damage (displacement)
- ・ RIEMIF (照射誘起起電力)

このうち、Structural damage および RIEMIF の影響は、ITER 条件（中性子束： $3 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ($>0.1 \text{ MeV}$)、照射量： $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ ）ではそれぞれ、2%以下および 0.5%以下と評価されている。[5]

Transmutation の影響（組成変化による起電力変化）は、核分裂炉と核融合炉条件では異なる。核分裂炉では、熱中性子の(n, γ)反応の断面積が高速中性子のそれに比べてはるかに大きいので、熱中性子の(n, γ)反応に起因する組成変化が主体となる。一方、熱中性子が少ない核融合炉条件では、数 MeV のところにしきいエネルギーがある(n, p)および($n, 2n$)のような核反応による組成変化が主体となる。

K 熱電対は、 $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 程度までの熱中性子照射量における熱起電力の変化は 1%以内と言われている。K 熱電対の decalibration が小さい理由として、主要成分であるニッケルの同位体が放射線崩壊しにくい（安定または半減期が長い）ことがあげられている。また、N 熱電対は、 $6.6 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ までの高速中性子照射量で、ドリフトは観測されていない。一方、核融合炉条件では、K および N 熱電対は、(n, p)および($n, 2n$)のような核反応の断面積が小さいので、組成変化も僅かで decalibration は小さいと予想されている。表 5-2-1 に K 熱電対と N 熱電対の結果を示す。

C 熱電対は、熱中性子を捕獲して W が Re に Re が Os に変わり ($9.1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ の熱中性子照射量における十脚と一脚の Os 含有量は、それぞれ 0.2 および 1%程度)、decalibration は $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の熱中性子照射量で 3.5～15 パーセントである。表 5-2-2 に C 熱電対の結果を示す。一方、核融合炉条件では、核反応により組成が変化する。ITER 条件では、 $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の中性子照射量で最終的に表 5-2-3 に示す組成になり、組成変化は控えめで大きな decalibration はない評価されている。しかし、IFMIF 条件では、テストモジュールを 1 年ごとに交換（したがって、熱電対も 1 年ごとに交換）するにしても、最大照射量は表 5-2-4 に示すように約 $1.5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ と、ITER 条件の 5 倍に達し、Os 量も $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ の熱中性子照射量時の半分程度になるので、decalibration も無視できなくなると考えられる[6] [7]。

5.3 溫度による影響

各熱電対の最高使用温度は、環境、素線の寸法、シース材料に依存し、また、寿命も同様である。メーカーのカタログによると、シース外径 1.0 および 1.6 mm の K および N 热電対（シース材料：インコネルおよび SUS316）の最高使用温度は、650 °C 程度（大気中）である。また、Ar 中の炉外試験で、以下の結果が得られている。[8]

- 仕様：K 热電対、シース外径 1.6 mm
- 雰囲気：Ar（酸素濃度 60～115 ppm）
- 温度：605、670、750 °C
- 時間：約 7,000 h
- 結果：2,000 h 付近から起電力低下、6,700 h で 605/670 °C 用約 1.5°C、750 °C 用約 4°C
- 原因：素線の酸化

5.4 热電対の予想寿命

IFMIF のテストモジュールで使用する熱電対のシース外径は決まっていないが、1～1.6 mm 程度と予想される。フェライト鋼およびバナジウム合金の照射温度範囲は、それぞれ 250～650 °C および 350～650 °C であるので、これらの材料の照射に K および N 热電対のどちらを使用しても、Transmutation と温度の点では寿命上の問題は生じないと考えられる。

これに対して、SiC/SiC複合材料の照射温度は、600～1100 °Cであり、K熱電対はともかく耐熱性の高いN熱電対であっても7000hを超える時間使用できないかも知れない。一方、C熱電対は温度上の問題は無いが、照射によるdecalibrationによって寿命が左右される可能性が考えられる。

6. 接合法の検討

テストモジュールの製造にあたり、その構造および形状から接合による組立が不可欠である。各種の接合方法の中で、テストモジュール構造に最適な接合法を検討した。

テストモジュールは矩形断面の圧力容器である。一般に圧力容器の接合は、要求されるシールド特性から溶接法による接合が取られるが、今回のような矩形断面では、通常の圧力容器の円形断面と異なり、溶接時の熱変形が課題となる事が予想される。

圧力容器の接合に適した熱変形を低減する低入熱接合法として、レーザ溶接法(CO₂、YAGなど)、電子ビーム法があげられる。さらに、近年、接合時の材料の変形や反りを最小限に抑制することが可能な接合法(固相接合法)として、摩擦攪拌接合法(Friction Stir Welding : FSW)が注目されている。この方法は、接合する部分に回転する円柱状工具を強い力で押し付ける事で、接合部の材料そのものを攪拌し、これによって摩擦熱を発生させて母材を柔らかくし、工具の回転力によって接合部周辺を塑性流動させて練り混ぜる事で複数の部材を一体化させる接合方法である。摩擦攪拌接合法の概要を図6-1に示す。本方法では、接合できる材料は、工具より軟らかく、延性の強い材料に限られ、現在のところ、実用化されているのは主にアルミニウム合金(鉄道、船舶などの構造物、部品)や少數例ではあるが銅合金に限られ、厚板の鉄系材料で実用化された例はなく、原子炉構造物の経年化対策の補修技術として適用化試験などが進められているのが現状である。しかし、この摩擦攪拌接合法は母材を溶かすことが無く、変形が少なく、強度も優れているなどの大きな特徴があり、中性子照射を受ける部材の接合には、今後期待される接合法と考えられる[9]。

現在、実用化されている接合技術では、低歪溶接ができることが大きな特徴電子ビーム溶接法が最適と考えられる。表6-1に電子ビーム溶接法の特徴を示す。

軽水炉原子力プラントにおける電子ビーム溶接の適用は、燃料被覆管や炉内構造物の精密高精度溶接に初期から使用されていたが、最近では大型構造物の溶接に適用されており、オーステナイト系ステンレス鋼製容器(炉心槽、補機タンク類)、炭素鋼製容器(蓄圧タンク)、低合金鋼製容器(蒸気発生器)等に実用化され、実績のある溶接法として確立している。

7.まとめ

IFMIF の照射場であるテストセルの高中性子束領域において試料の照射を行うテストモジュールの実現を図るために、必要とする機能から全体の構造を明らかにし、構造および配置を示す図面を作成した。

試料を収めたリグが装着されるモジュール胴の内圧とたわみ量の関係を明らかにした。また、温度制御の重要コンポーネントである熱電対についても検討を加え、照射温度 650°C以下では K および N 热電対は使用可能であろうとの結論を得た。さらに、テストモジュールの製造にあたり、現状の最適な接合法として電子ビーム溶接法を選択した

今後これらの検討結果をベースにして、試作および確認試験を通じて構造のさらなる具体化を進める必要がある。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、多大のご指導、助言をいただいた九州大学清水昭比古教授に対し、深く感謝いたします。また、ご指導頂きました高津英幸核融合エネルギー工学研究開発ユニット長、西谷健夫研究主席に感謝いたします。

参考文献

- [1] IFMIF International Team: IFMIF Comprehensive Design Report, (IEA on-line publication) available from
 <http://www.iea.org/Texbase/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_partA.pdf> and
 <http://www.iea.org/Texbase/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_partB.pdf>
- [2] A.Shimizu,A.Kimura,R.Kasada et al., "Present Design and R&D Status of International Fusion Irradiation Facility(IFMIF)",Journal of Plasma and Fusion Research Vol.82,No.1(2006),pp.7~15
- [3] T. Shikama et al., J. Nucl. Mater. 271&272 (1999) 560
- [4] Technical Documentation, Komatsu IndustriesCorp. :
http://www.komatsusanki.co.jp/tanatsu/pdfgijut/andou_Servo_kakoujirei.pdf
- [5] R.Van Nieuwehove et al., Rev.Sci.Instrum.75.75(2004)
- [6] C.Y.Ho et al., Thermal Conductivity 17, Plenum Press, New York, pp. 195-205 (1983)
- [7] C. VITANZA and T.E. STIEN , Journal of Nuclear Materials 139 (1986) 11-18
- [8] Technical Documentation, Chino Corp. : <http://www.chino.co.jp/products/sensors/sc.html>
- [9] TWI (The Welding Institute) : http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/fswintro.html

Table2-5-1 The Rule that is applied to Container Holding Gas

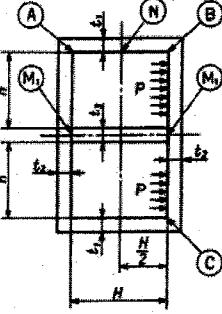
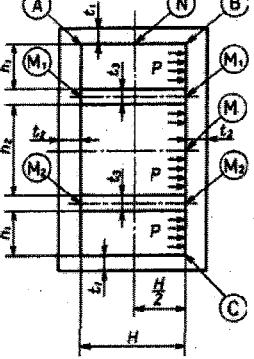
P、圧力 (MPa)	V、容積 (m ³)	適応される法律	備 考
0.2≤P<1	V<0.04	適用外	
	V≥0.04	労働安全衛生法	第二種圧力容器
P≥1	—	高压ガス保安法	

Table4-2-1 Parts which constitutes Test Module Vessel

No.	胴の名称	形式	仕切板又はステー	
			形状	数
1	上流側胴	2分割胴	丸棒	1*
2	モジュール胴	3分割胴	仕切板	2
3	下流側胴	3分割胴	丸棒	2
4	端子盤支胴	3分割胴	仕切板	2
5	端子盤カバー	2分割胴	仕切板	1

* 流れに垂直な方向の数

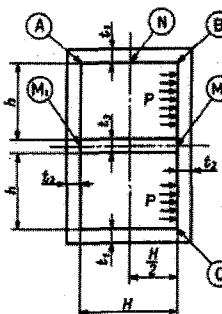
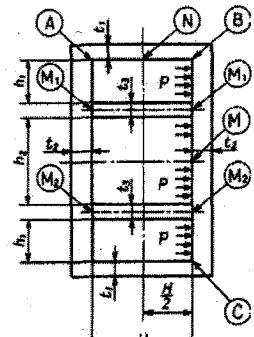
Table4-2-2 The Formula of Stress based on JIS B8280-2003(for Divider Plate)

部 位	応 力	2 等分割洞	3 分割洞
			
A~B 間	膜応力	$\sigma_m = \frac{Ph}{4t_1\eta} \left[\frac{K(\alpha^2 + 3) + 2}{2K + 1} \right]$	$\sigma_m = \frac{PHC_1}{t_1\eta}$
	曲げ応力	$(\sigma_b)_N = \pm \frac{Ph^2 c}{2t_1^3 \eta} \left[\frac{2 - \alpha^2(2K + 3)}{2K + 1} \right]$	$(\sigma_b)_N = \pm \frac{12PH^2 c}{t_1^3 \eta} C_2$
		$(\sigma_b)_A = \pm \frac{Ph^2 c}{t_1^3 \eta} \left[\frac{2\alpha^2 K + 1}{2K + 1} \right]$	$(\sigma_b)_B = \pm \frac{12PH^2 c}{t_1^3 \eta} \left(C_2 - \frac{1}{8} \right)$
B~C 間	膜応力	$\sigma_m = \frac{PH}{2t_2\eta}$	$\sigma_m = \frac{PH}{2t_2\eta}$
	曲げ応力	$(\sigma_b)_B = \pm \frac{Ph^2 c}{t_2^3 \eta} \left[\frac{2\alpha^2 K + 1}{2K + 1} \right]$	$(\sigma_b)_B = \pm \frac{12PH^2 c}{t_2^3 \eta} \left(C_2 - \frac{1}{8} \right)$
		$(\sigma_b)_{M1} = \pm \frac{Ph^2 c}{t_2^3 \eta} \left[\frac{K(3 - \alpha^2) + 1}{2K + 1} \right]$	$(\sigma_b)_{M1} = \pm \frac{12PH^2 c}{t_2^3 \eta} \left(C_2 - \frac{1}{8} + C_1\alpha_4 - \frac{1}{2}\alpha_4^2 \right)$
			$(\sigma_b)_M = \pm \frac{12PH^2 c}{t_2^3 \eta} \left[C_2 + \frac{1}{2}C_1(2\alpha_4 + \alpha_5) + \frac{1}{2}C_3\alpha_5 - \frac{1}{8}[1 + (2\alpha_4 + \alpha_5)^2] \right]$
M _x ~M _x 間	膜応力	$\sigma_m = \frac{Ph}{2t_3\eta} \left[\frac{K(5 - \alpha^2) + 2}{2K + 1} \right]$	$\sigma_m = \frac{PH}{t_3\eta} C_3$
係 数		$\alpha = H/h, K = \alpha(t_2/t_1)^3$ $C_1 = \frac{-3C_2(\alpha_4 + \alpha_5) + \frac{1}{8}(6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 - 2\alpha_5^3 + 3(\alpha_4 + \alpha_5))}{2\alpha_4^2 + 3\alpha_4\alpha_5}$ $C_2 = \frac{3\alpha_4^2 + 6\alpha_4\alpha_5 - 2\alpha_4^4 - 6\alpha_4^3\alpha_5 + 2\alpha_4\alpha_5^3 + \alpha_2(2\alpha_4 + 3\alpha_5)}{24(\alpha_4^2 + 2\alpha_4\alpha_5 + \alpha_2(2\alpha_4 + 3\alpha_5))}$ $C_3 = \frac{1}{2}(2\alpha_4 + \alpha_5) - C_1$ $\alpha_2 = (t_2/t_1)^3, \alpha_4 = h_1/H, \alpha_5 = h_2/H$	

c: 部材断面の中立面から表面までの長さ、 η : 溶接継手効率又はリガメント効率

単位: 応力 N/mm²、圧力 MPa、寸法 mm

Table4-2-3 The Formula of Stress based on JIS B8280-2003(for Stick)

部位	応力	2等分割胴	3分割胴
			
A~B間	膜応力	$\sigma_m = \frac{Ph}{t_1\eta}$	$\sigma_m = \frac{PHC_1}{t_1\eta}$
	曲げ応力	$(\sigma_b)_N = \pm \frac{Ph^2 c}{2t_1^3 \eta} \left[\frac{2 - \alpha^2(2K+3)}{2K+1} \right]$	$(\sigma_b)_N = \pm \frac{12PH^2 c}{t_1^3 \eta} C_2$
		$(\sigma_b)_A = \pm \frac{Ph^2 c}{t_1^3 \eta} \left[\frac{2\alpha^2 K + 1}{2K+1} \right]$	$(\sigma_b)_B = \pm \frac{12PH^2 c}{t_1^3 \eta} \left(C_2 - \frac{1}{8} \right)$
B~C間	膜応力	$\sigma_m = \frac{PH}{2t_2\eta}$	$\sigma_m = \frac{PH}{2t_2\eta}$
	曲げ応力	$(\sigma_b)_B = \pm \frac{Ph^2 c}{t_2^3 \eta} \left[\frac{2\alpha^2 K + 1}{2K+1} \right]$	$(\sigma_b)_B = \pm \frac{12PH^2 c}{t_2^3 \eta} \left(C_2 - \frac{1}{8} \right)$
		$(\sigma_b)_{M1} = \pm \frac{Ph^2 c}{t_2^3 \eta} \left[\frac{K(3 - \alpha^2) + 1}{2K+1} \right]$	$(\sigma_b)_{M1} = \pm \frac{12PH^2 c}{t_2^3 \eta} \left(C_2 - \frac{1}{8} + C_1\alpha_4 - \frac{1}{2}\alpha_4^2 \right)$
棒状ステー	膜応力	$\sigma_m = \frac{2PhP_c}{\pi d^2 \eta} \left[\frac{K(5 - \alpha^2) + 2}{2K+1} \right]$	$\sigma_m = \frac{4PHP_c}{\pi d^2 \eta} C_3$
	係数	$\alpha = H/h, K = \alpha(t_2/t_1)^3$	$C_1 = \frac{-3C_2(\alpha_4 + \alpha_5) + \frac{1}{8}\{6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 - 2\alpha_5^3 + 3(\alpha_4 + \alpha_5)\}}{2\alpha_4^2 + 3\alpha_4\alpha_5}$
			$C_2 = \frac{3\alpha_4^2 + 6\alpha_4\alpha_5 - 2\alpha_4^4 - 6\alpha_4^3\alpha_5 + 2\alpha_4\alpha_5^3 + \alpha_2(2\alpha_4 + 3\alpha_5)}{24\{\alpha_4^2 + 2\alpha_4\alpha_5 + \alpha_2(2\alpha_4 + 3\alpha_5)\}}$
丸棒ステーの最大ピッチ		$C_3 = \frac{1}{2}(2\alpha_4 + \alpha_5) - C_1$	
		$\alpha_2 = (t_2/t_1)^3, \alpha_4 = h_1/H, \alpha_5 = h_2/H$	
チ		$P_c = t_2 \sqrt{\frac{\sigma_a C}{P}}$	$C=2.1 \dots \text{厚さ } 11\text{mm} \text{以下の板に溶接したステー}$ $C=2.2 \dots \text{厚さ } 11\text{mm} \text{を超える板に溶接したステー}$

d : 丸棒ステーの直径、c : 部材断面の中立面から表面までの長さ、η : 溶接継手効率又はリガメント効率

Table4-2-4 The Formula of the Amount of Bending (for Divider Plate)

部 位		3 分割胴
A~B 間		$y = \frac{P}{Et_1^3} \left[-6H^2 C_2 x^2 + \frac{1}{2} x^4 + \frac{3}{2} H^4 C_2 - \frac{1}{32} H^4 \right]$ <p>最大たわみ量は、</p> $y_N = \frac{PH^4}{Et_1^3} \left[\frac{3}{2} C_2 - \frac{1}{32} \right]$
B~C 間	B~M ₁ 間	$y = \frac{P}{Et_2^3} \left[6H^2 \left(-C_2 + \frac{1}{8} \right) x^2 - 2HC_1 x^3 + \frac{1}{2} x^4 + 6\alpha_2 H^3 \left(-C_2 + \frac{1}{24} \right) x \right]$ <p>最大たわみ量は、 $dx/dy = 0$ となる x 位置で発生</p>
	M ₁ ~M 間	$y = \frac{P}{4Et_2^3} \left[3(-8C_2 + 1 + 8C_3\alpha_4)H^2 x^2 - 8(C_1 + C_3)Hx^3 + 2x^4 + (2\alpha_4 + \alpha_5) \{ 6(2\alpha_4 + \alpha_5)C_1 + 24C_2 + 6(-2\alpha_4 + \alpha_5)C_3 - 3 - 4\alpha_4^2 - 4\alpha_4\alpha_5 - \alpha_5^2 \} H^3 x + \alpha_4 \{ 2(8\alpha_4^2 + 12\alpha_4\alpha_5 + 3\alpha_5^2)C_1 - 24(\alpha_4 + \alpha_5)C_2 + 2(4\alpha_4^2 - 3\alpha_5^2)C_3 + (3\alpha_4 + 3\alpha_5 + 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 + 6\alpha_4\alpha_5^2 + \alpha_5^3)H^4 \} \right]$ <p>最大たわみ量は、</p> $y_{h_1+h_2/2} = \frac{PH^4}{4Et_2^3} \left[(6\alpha_4\alpha_5^2 + 2\alpha_5^3)C_1 + 6\alpha_5^2 C_2 + 2\alpha_5^3 C_3 - \left(3\alpha_4^2\alpha_5^2 + 2\alpha_4\alpha_5^3 + \frac{3}{4}\alpha_5^2 + \frac{3}{8}\alpha_5^4 \right) \right]$
係 数		$C_1 = \frac{-3C_2(\alpha_4 + \alpha_5) + \frac{1}{8} \{ 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 - 2\alpha_5^3 + 3(\alpha_4 + \alpha_5) \}}{2\alpha_4^2 + 3\alpha_4\alpha_5}$ $C_2 = \frac{3\alpha_4^2 + 6\alpha_4\alpha_5 - 2\alpha_4^4 - 6\alpha_4^3\alpha_5 + 2\alpha_4\alpha_5^3 + \alpha_2(2\alpha_4 + 3\alpha_5)}{24 \{ \alpha_4^2 + 2\alpha_4\alpha_5 + \alpha_2(2\alpha_4 + 3\alpha_5) \}}$ $C_3 = \frac{1}{2}(2\alpha_4 + \alpha_5) - C_1$ $\alpha_2 = (t_2/t_1)^3, \quad \alpha_4 = h_1/H, \quad \alpha_5 = h_2/H$

E : ヤング率

Table4-2-5 Stress of Noncircular Container with Divider Plate

項目	2分割 端子盤力バー	3分割 端子盤支胴	基準値
胴の名称			
胴の形状			
設計圧力:P (MPa)	0.6	0.6	
非円形胴の一片の長さ:h又はh ₁ (mm)	198	66	
非円形胴の一片の長さ:h ₂ (mm)		246	
非円形胴の一片の長さ:H(mm)	109	105	
胴板の厚さ:t ₁ (mm)	10	12	
胴板の厚さ:t ₂ (mm)	10	12	
仕切板の厚さ:t ₃ (mm)	10	12	
溶接継手効率又はリガメント効率: η	0.9	0.9	
部材断面の中立面から表面までの長さ:c(mm)	t ₁ 又はt ₂ の1/2	t ₁ 又はt ₂ の1/2	
材料の許容引張応力: σ_s (N/mm ²)	107	107	
条件	膜応力(N/mm ²) (中央N点)	6.00	-1.69
	曲げ応力(N/mm ²) (隅角部A、B点)	23.55	33.66
	合成応力(N/mm ²) (中央N点)	29.54	35.35
応力	合成応力(N/mm ²) (隅角部A、B点)	88.95	6.31
	膜応力(N/mm ²) (仕切板M ₁ 点)	3.63	2.92
	曲げ応力(N/mm ²) (隅角部B、C点)	154.54	-4.62
B～C間	合成応力(N/mm ²) (仕切板M ₁ 点)	158.18	7.54
	膜応力(N/mm ²) (隅角部B、C点)	86.59	123.69
	曲げ応力(N/mm ²) (仕切板M ₁ 、M ₂ 点)		160.5
仕切板	膜応力(N/mm ²) (中央M点)	14.41	92.27
	曲げ応力(N/mm ²) (中央M点)	0	160.5
			107
			107

Table4-2-6 Stress of Noncircular Container with Stick

項目	2分割 上流側胴	3分割 下流側胴	基準値
胴の名称			
胴の形状			
設計圧力:P (MPa)	0.6	0.6	
非円形胴の一片の長さ:h又はh1 (mm)	最小肉厚部	189	54
非円形胴の一片の長さ:h2 (mm)			248
非円形胴の一片の長さ:H (mm)	最小肉厚部	53.2	55.2
胴板の厚さ:t1 (mm)	最小肉厚部	12	11
胴板の厚さ:t2 (mm)	最小肉厚部	12	11
溶接継手効率又はリガメント効率: η		0.9	0.9
丸棒ステーの直径:d (mm)		24	24
ステー取付方法による効率:C		2.2	2.1
部材断面の中立面から表面までの長さ:c (mm)	t1又はt2の1/2	t1又はt2の1/2	
材料の許容引張応力: α_a (N/mm ²)		107	107
丸棒ステーの最大ピッチ:P _c		237.7	212.9
A～B間	膜応力 (N/mm ²)	10.50	3.27
	(中央N点)	45.44	(中央N点)
	(隅角部A、B点)	55.26	(隅角部A、B点)
	(中央N点)	55.94	(中央N点)
B～C間	合成応力 (N/mm ²)	65.76	23.19
	膜応力 (N/mm ²)	1.48	1.67
	(中央M ₁ 点)	96.40	(隅角部B点)
	(隅角部B、C点)	55.26	(ステー取付部M ₁ 、M ₂ 点)
丸棒ステー	曲げ応力 (N/mm ²)		-150.74
	(中央M ₁ 点)	97.88	(中央M点)
	(隅角部B、C点)	56.74	(ステー取付部M ₁ 、M ₂ 点)
			(中央M点)
膜応力 (N/mm ²)*	71.69		90.12
曲げ応力 (N/mm ²)*	0		0

Table4-2-7 Stress and Amount of Bend of Module Vessel
(Noncircular Container divided into three in Divider Plate)

大項目	小項目	値	基準値
条件	設計圧力:P (MPa)	0.6	
	非円形胴の一片の長さ:h ₁ (mm)	66	
	非円形胴の一片の長さ:h ₂ (mm)	246	
	非円形胴の一片の長さ:H (mm)	53.2	
	胴板の厚さ:t ₁ (mm)	12	
	胴板の厚さ:t ₂ (mm)	12	
	仕切板の厚さ:t ₃ (mm)	12	
	溶接継手効率又はリガメント効率: η	0.9	
	部材断面の中立面から表面までの長さ:c (mm)	t ₁ 又はt ₂ の1/2	
	材料の許容引張応力: (N/mm ²)	107	
応力とたわみ	ヤング率(MPa)*	1.8600E+05	
	A～B間	膜応力 (N/mm ²)	-2.40
		(中央N点)	27.11
		(隅角部A、B点)	17.28
	B～C間	合成応力 (N/mm ²)	29.51
		(中央N点)	160.5
		(隅角部A、B点)	19.68
		最大たわみ量(mm)	0.0073
	仕切板	膜応力 (N/mm ²)	1.48
		(隅角部B点)	17.28
		曲げ応力 (N/mm ²)	-122.43
		(中央M点)	87.69

* SUS316 鋼のヤング率: 150°Cで 186000MPa、JISB8265 の付表 4.1 から。

** 参考のために示すもので、最大ではない。

Table5-1-1 Type of Thermocouple

種類	材 料	組 成	最高使用温度
K	Chromel-Alumel	90% Ni 10%Cr- 95%Ni 3 %Mn 2%Al	1150 °C
N	Nicrosil-Nisil	84.6%Ni 14.2%Cr 1.4%Si- 95.5%Ni 4.4%Si 1%Mg	1300 °C
C	Tungsten-Rhenium	W 5%Re- W 26%Re	2200 °C

Table5-2-1 Nuclear Reaction Cross-section Area
in 14 MeV of a main constitution nuclide of K and N Type Thermocouple

核種	存在比	反応	断面積	生成元素	半減期	最終元素
Cr-52	83.8 %	(n, 2n)	0.26 b	Cr	27 d	V
Mn-55	100 %	(n, 2n)	0.72 b	Mn	312 d	Cr
Ni-58	68.1 %	(n, np)	0.6 b	Co	270 d	Fe
		(n, p)	0.37 b	Co	70 d	Fe
		(n, α)	0.11 b	Fe	2.7 y	Mn
Ni-60	20.2 %	(n, p)	0.147 b	Co	5.3 y	Ni

Table5-2-2 Nuclear Reaction Cross-section Area
in 14 MeV of a main constitution nuclide of C Type Thermocouple

核種	存在比	反応	断面積	生成核種	半減期	最終元素
W-182	26.3 %	(n, 2n)	2 b	W-181	121 d	Ta
W-183	14.3 %	(n, 2n)	2 b	W-182	安定	W
W-184	30.7 %	(n, 2n)	2 b	W-183	安定	W
W-186	28.6 %	(n, 2n)	2 b	W-185	75 d	Re
Re-185	37.4 %	(n, 2n)	2.2 b	Re-184	38 d/169 d	W
Re-187	62.6 %	(n, 2n)	2.2 b	Re-186	89 d	Os

Table5-2-3 C Type Thermocouple Composition
in Neutron Exposure Dose $3 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ (14 MeV)

脚	初期組成 (%)		最終組成 (%)			
	W	Re	W	Re	Os	Ta
+	95	5	94.699	5.130	0.021	0.150
-	74	26	73.820	25.955	0.107	0.117

Table5-2-4 Use Conditions of Thermo-couple in IFMIF

最大高速中性子束	最大照射量	時間	温度
約 $7 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	約 $1.5 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$	6132 h	250 ~ 1100 °C

1年ごとに交換すると仮定（稼働率：70 %）

Table6-1 Feature and Application Example of Electron Beam Welding Process

	特徴	適用例
1	深溶けこみ溶接、細い溶接ビード、低歪溶接が可能	アルミ、銅などの熱伝導率の高い金属
2	極細溶接ビード、低歪溶接が可能	センサー、ダイヤフラム部品
3	高速溶接、深溶けこみ、低歪溶接が可能	ギヤなどの自動車部品
4	高精度、低歪溶接、組立て溶接が可能	航空、宇宙部品
5	気密性の高い溶接、深溶けこみ溶接が可能	真空チャンバー、圧力タンク等の大型構造物
6	気密性の高い溶接、重ね溶接が可能	水冷ジャケットなどの冷却部品
7	溶接時の酸化が懸念されるもの	ニオブ、チタンなどの活性金属
8	他の溶接法では困難なもの	タンゲステン、タンタルなどの高融点材料 銅+ステンレス、鉄+ステンレスなどの異種金属溶接

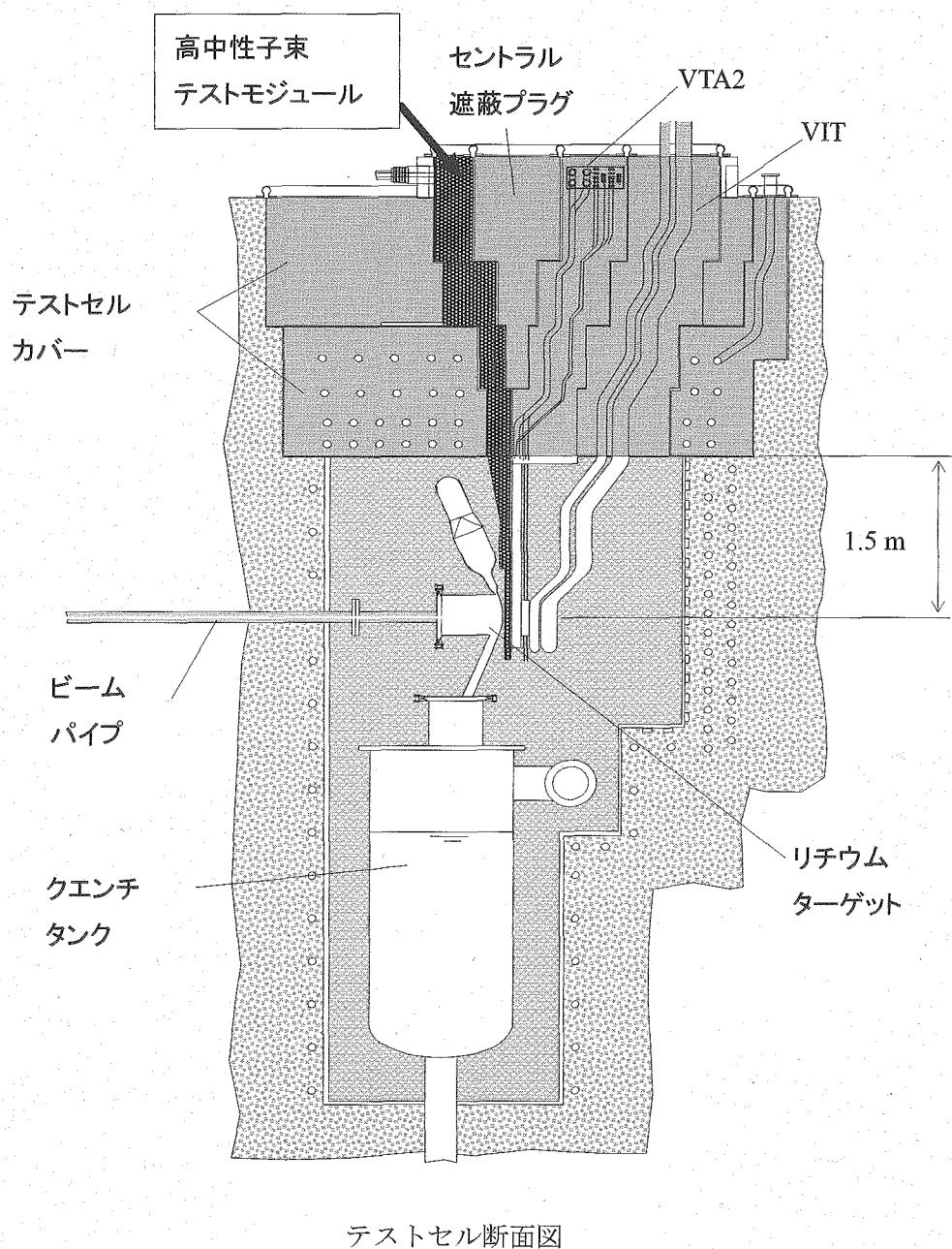
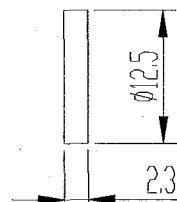
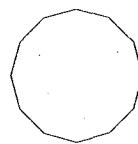
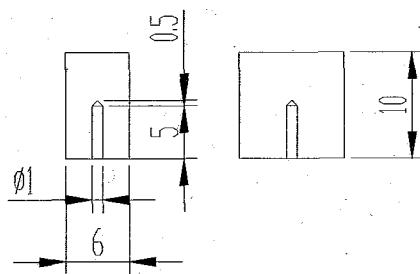


Fig.1-1 IFMIF Test Cell (Cross Section)

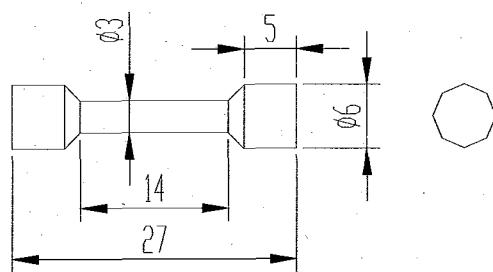
Fracture Toughness



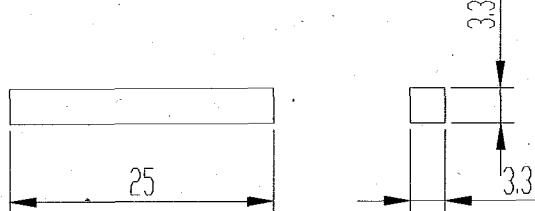
Monitor Specimen



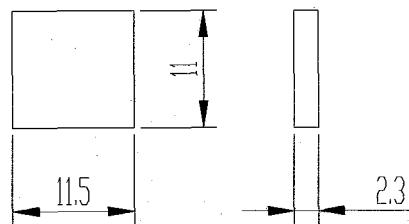
Tensile Properties



Charpy Impact

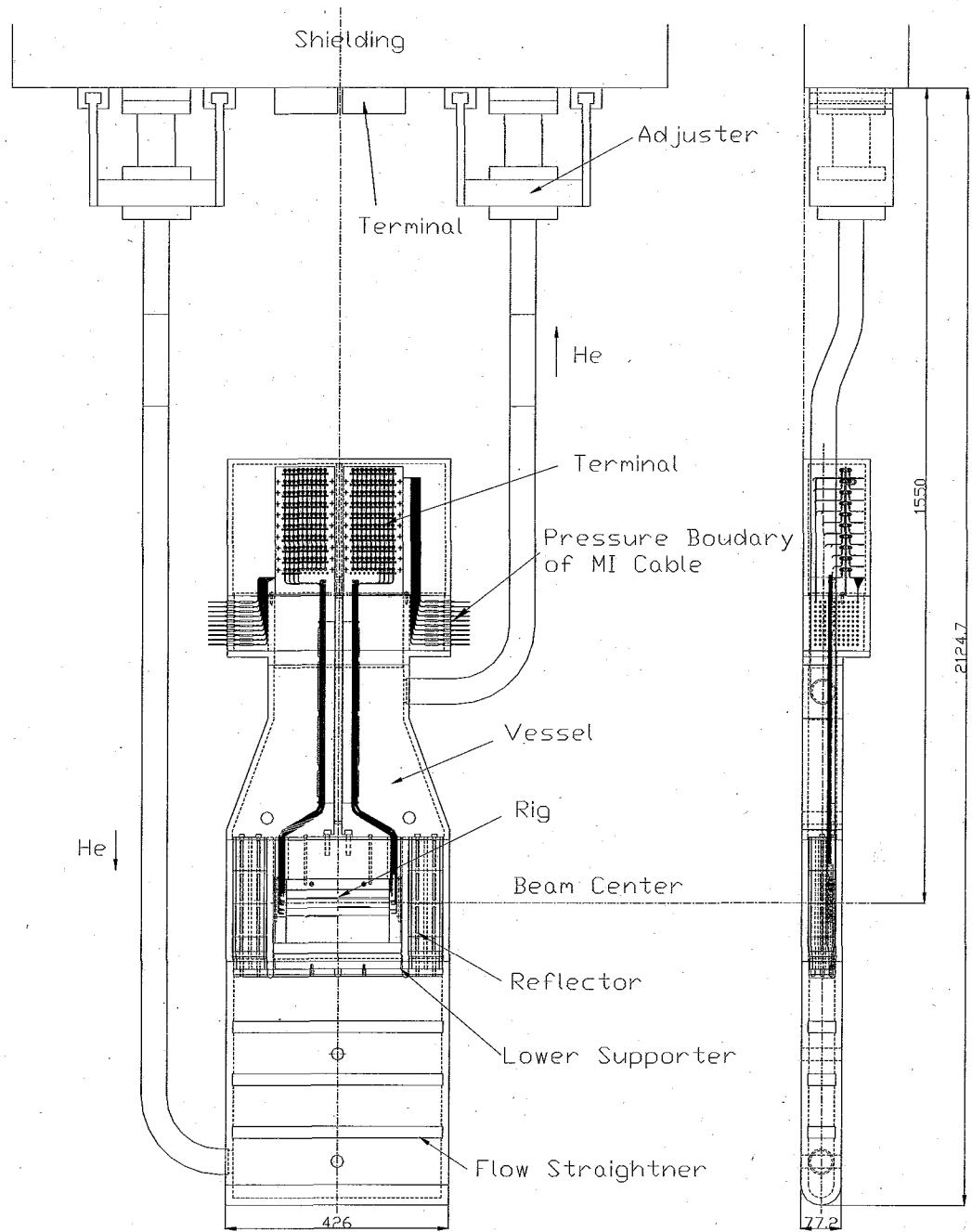


Fracture Toughness



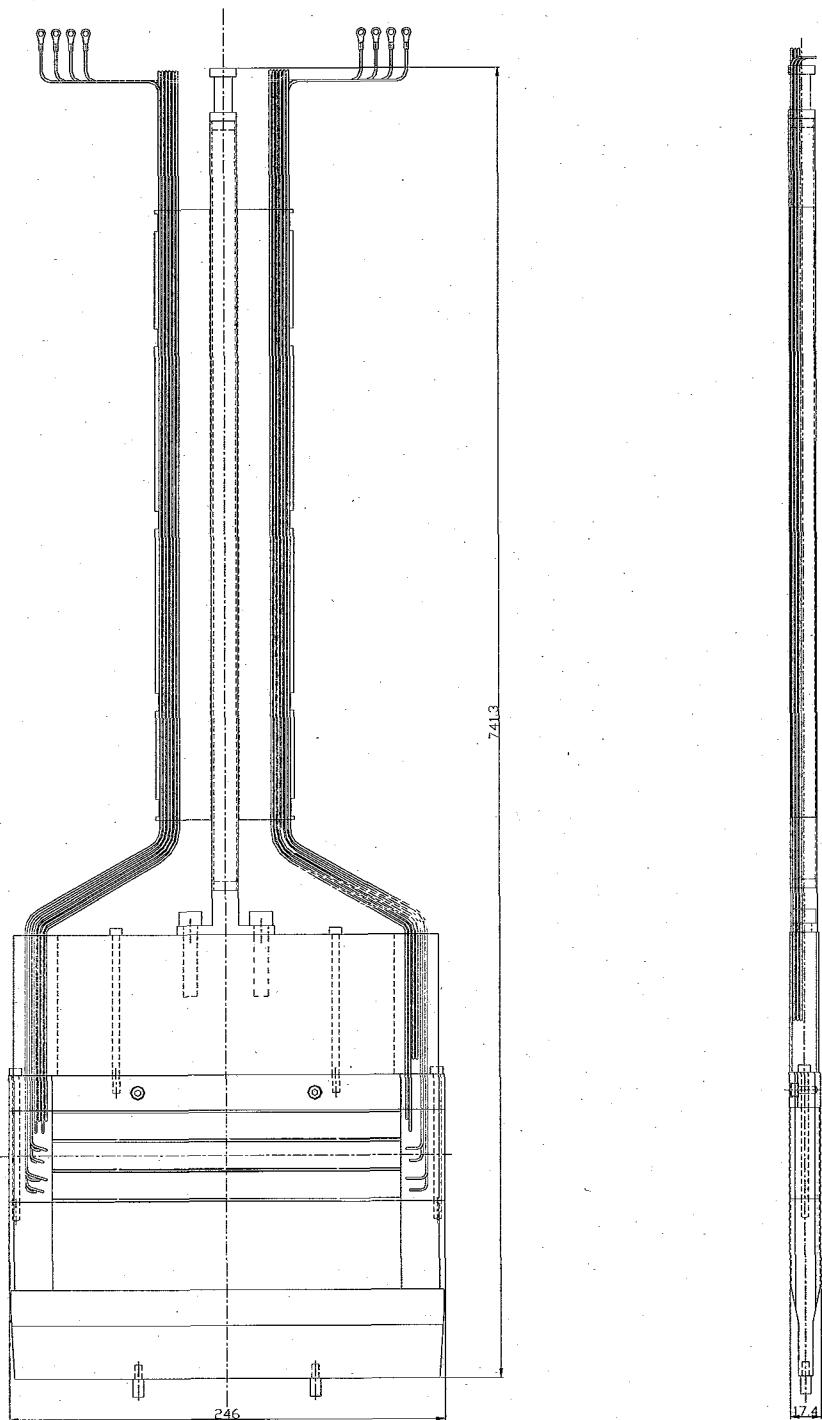
Specimen

Fig.2-4-1 Specimen



Test Module

Fig.3-1 Test Module



Rig

Fig.4-1-1 Rig

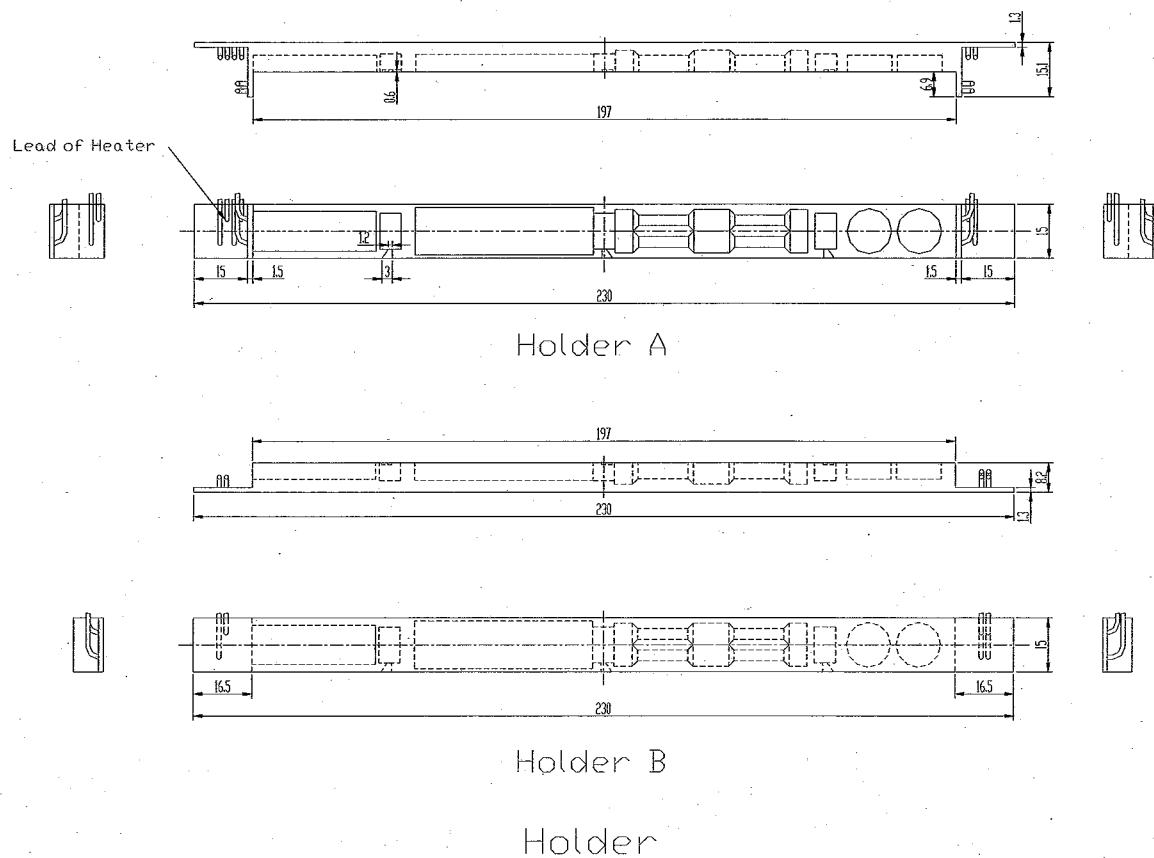


Fig.4-1-2 Specimen Holder

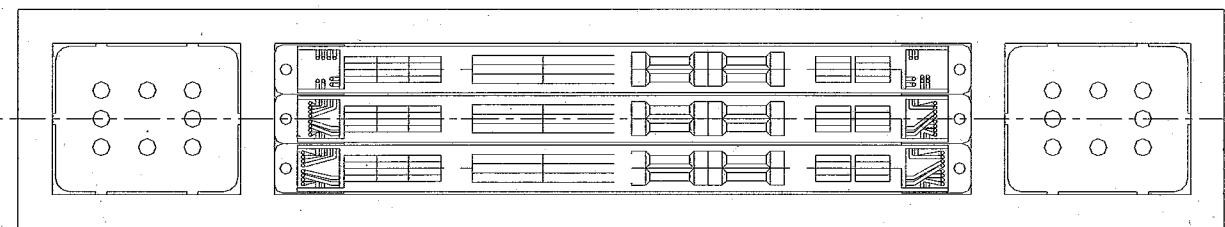
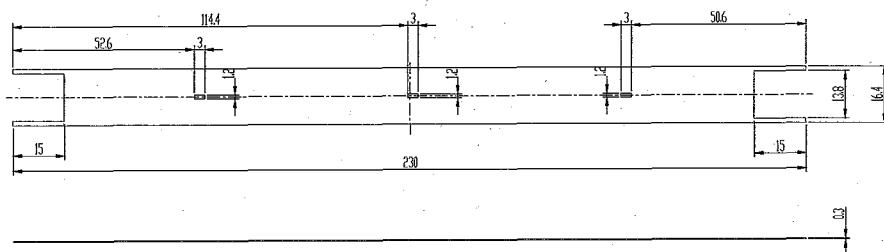
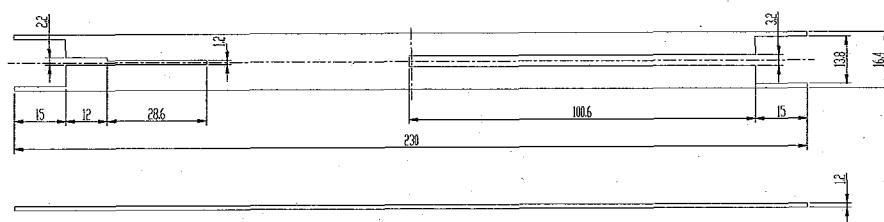


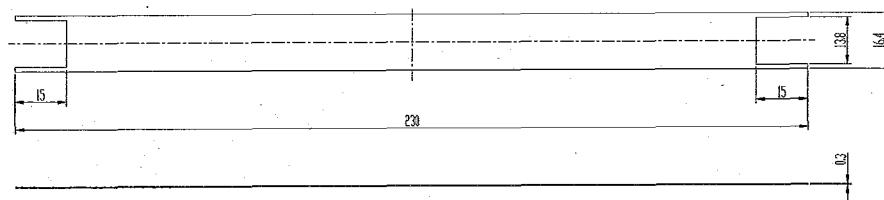
Fig.4-1-3 Assembling Drawing of Specimen Holder



Upper Plate



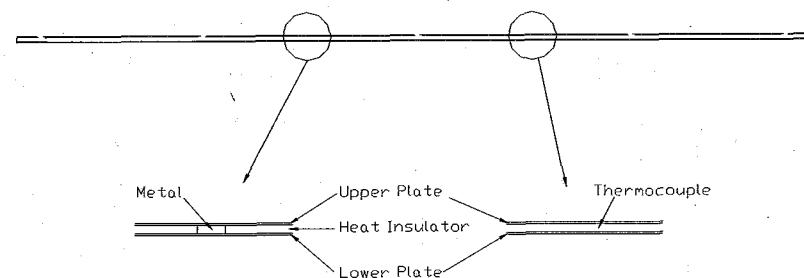
Heat Insulator



Lower Plate

TC Fixing Plate

Top View without Upper Plate



Assembling of Thermocouple

Fig.4-1-4 Assembly Method of Thermocouple

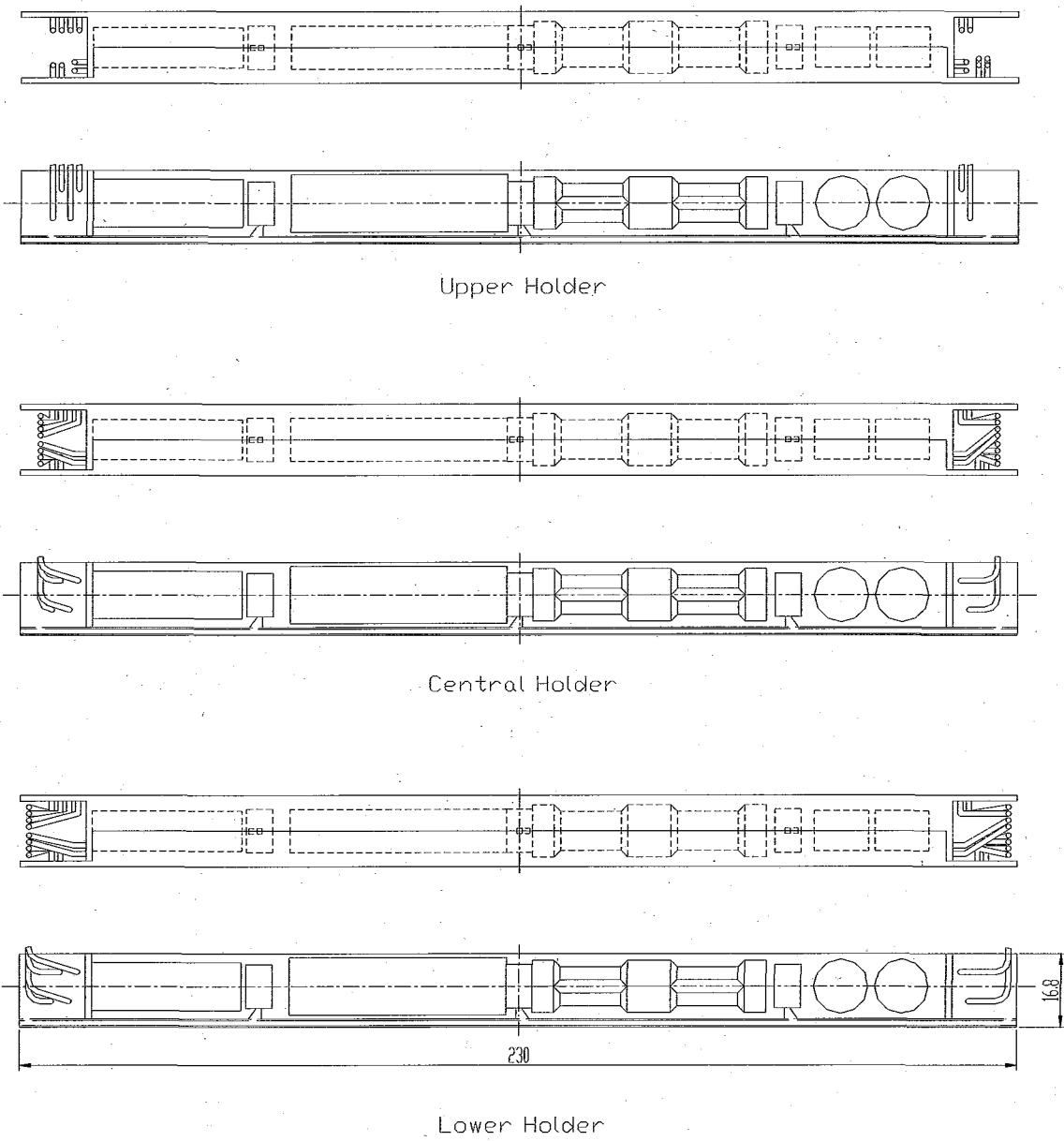
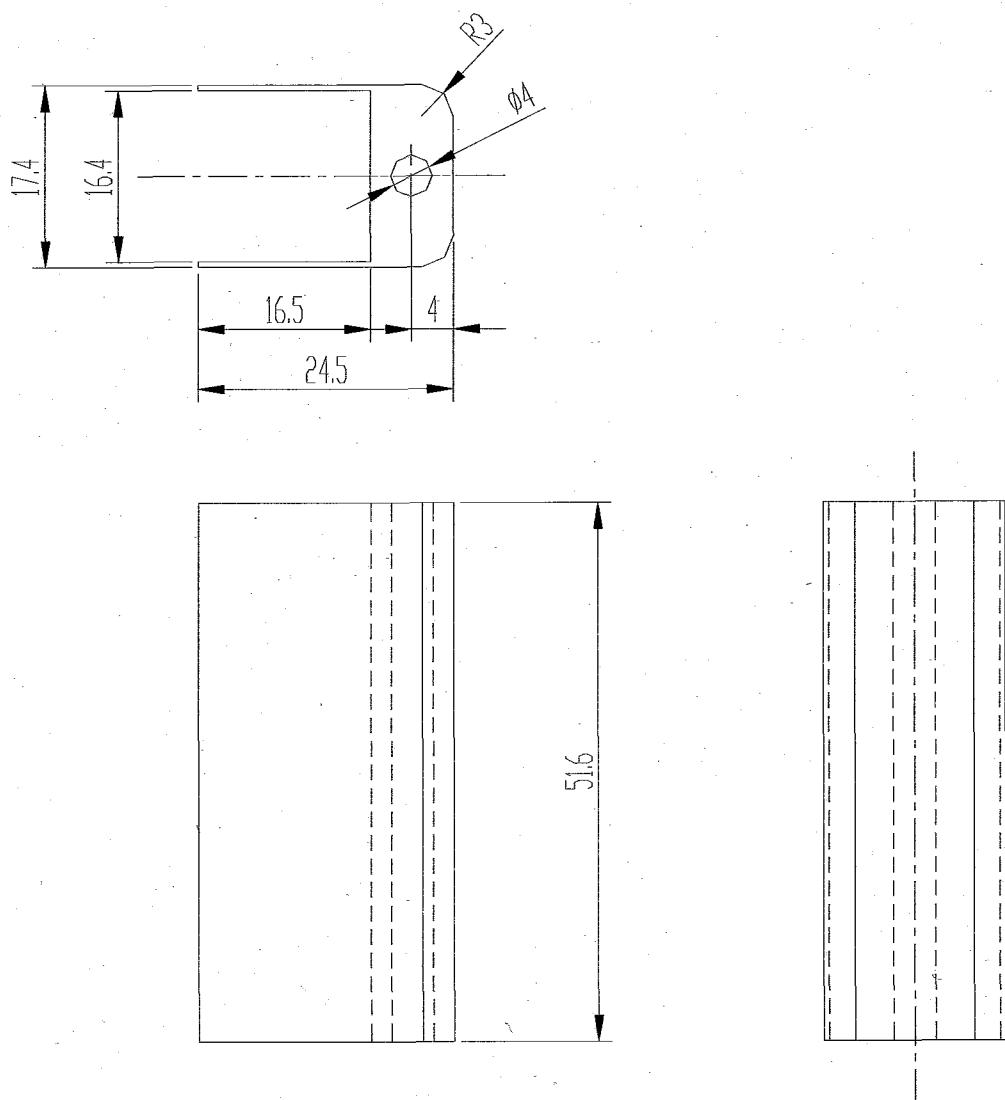
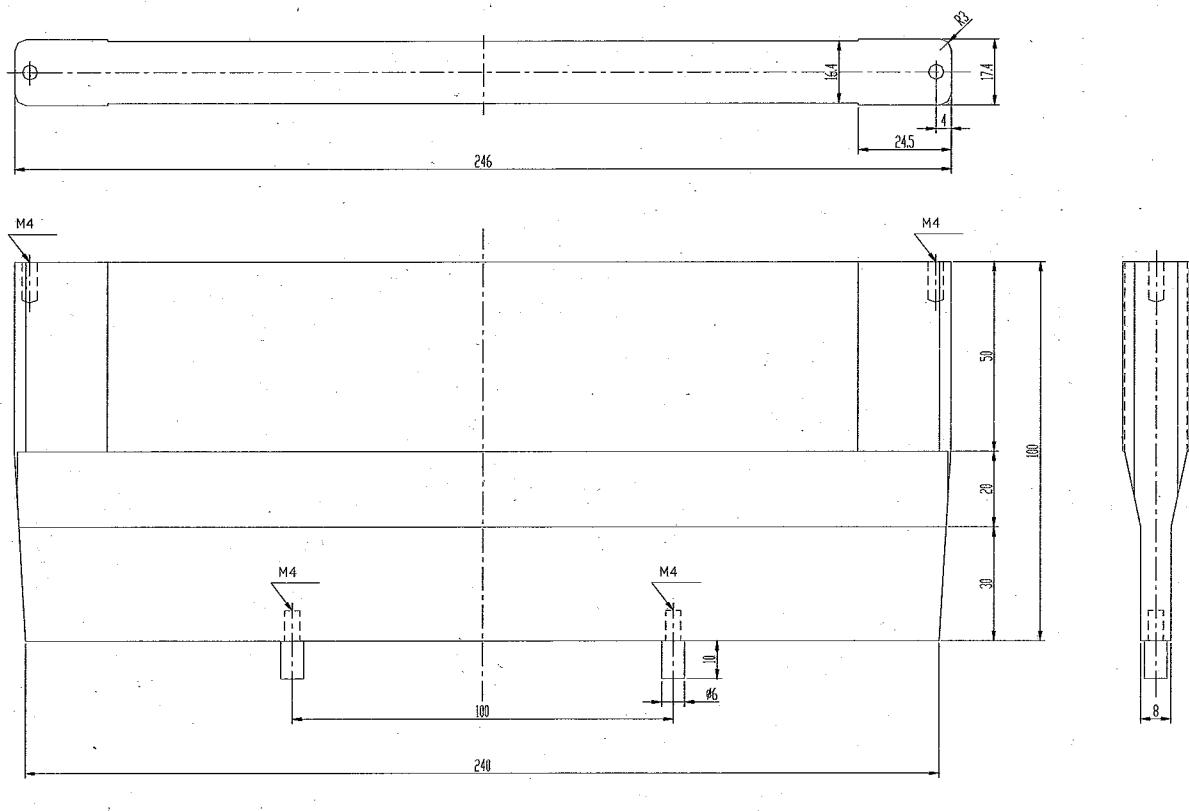


Fig.4-1-5 Accumulation Method of Holder



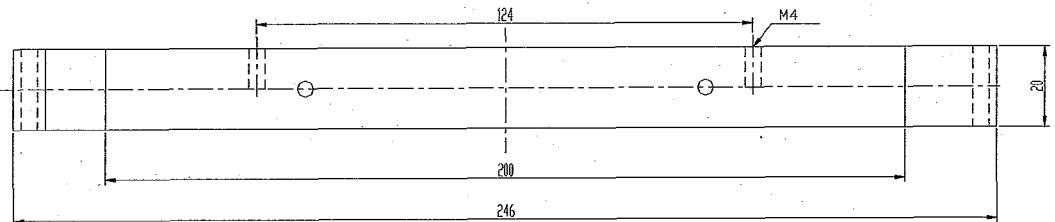
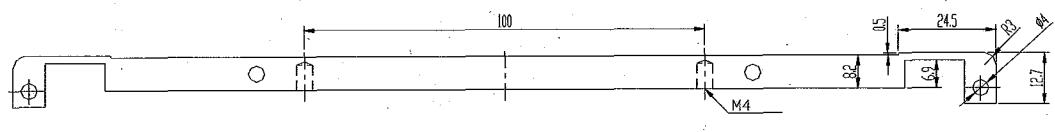
Holder Fixture

Fig.4-1-6 Holder Fixture (for Side)

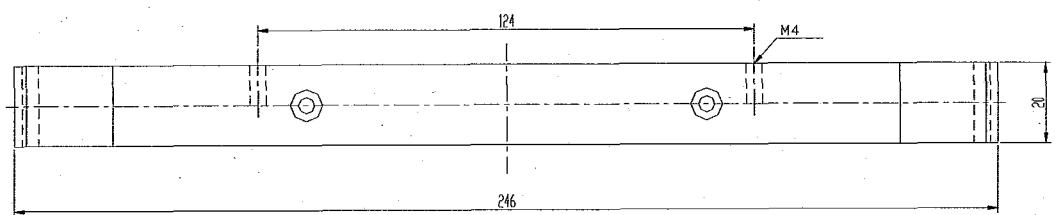
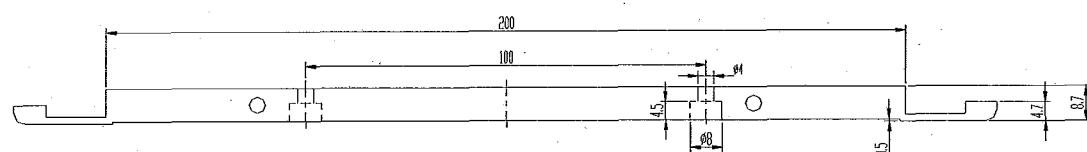


Lower Reflector

Fig.4-1-7 Lower Reflector



Upper Fixture A



Upper Fixture B

Upper Fixture

Fig.4-1-8 Rig Upper Part Fixation Plate

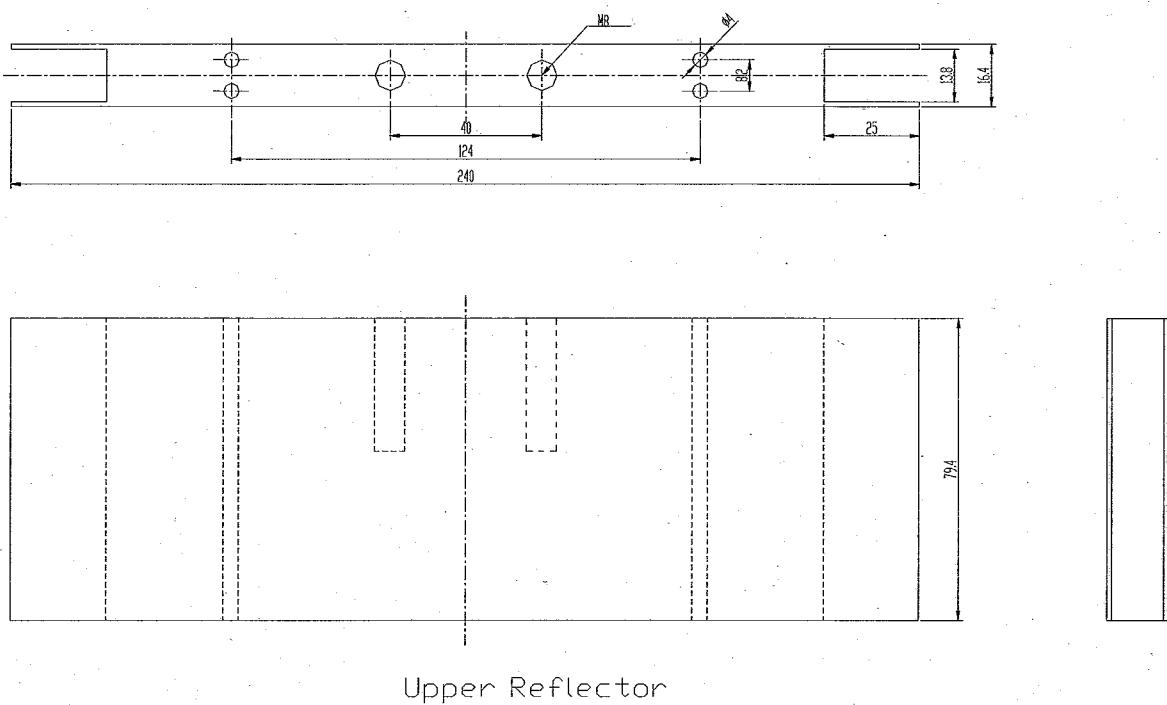
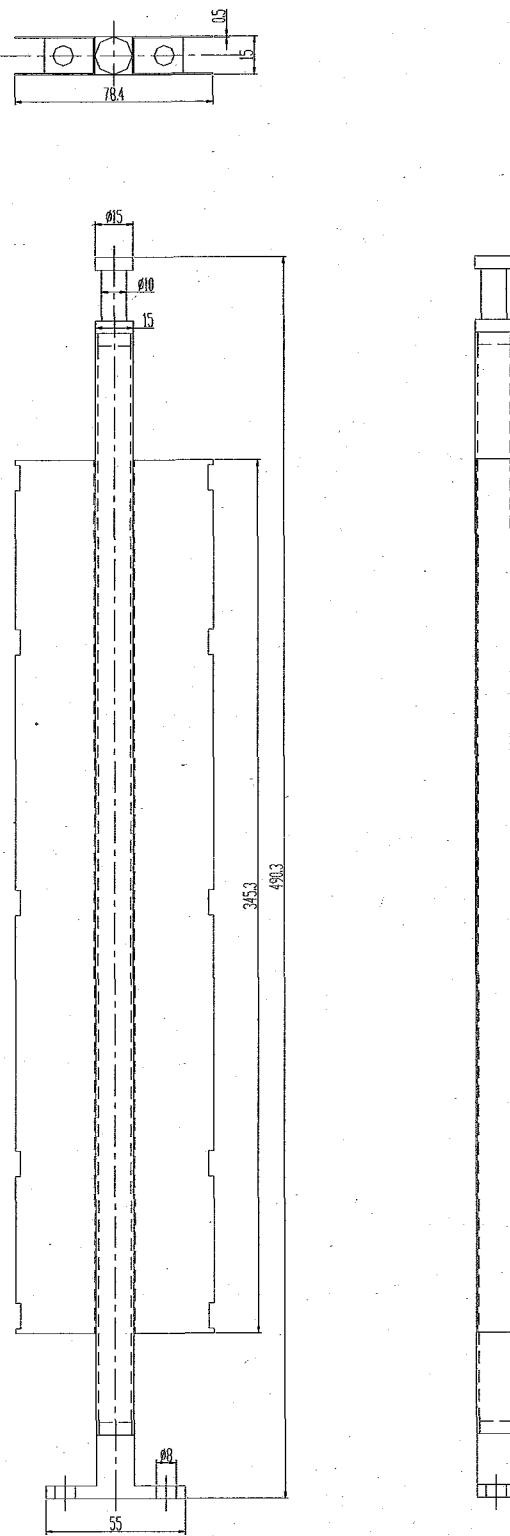
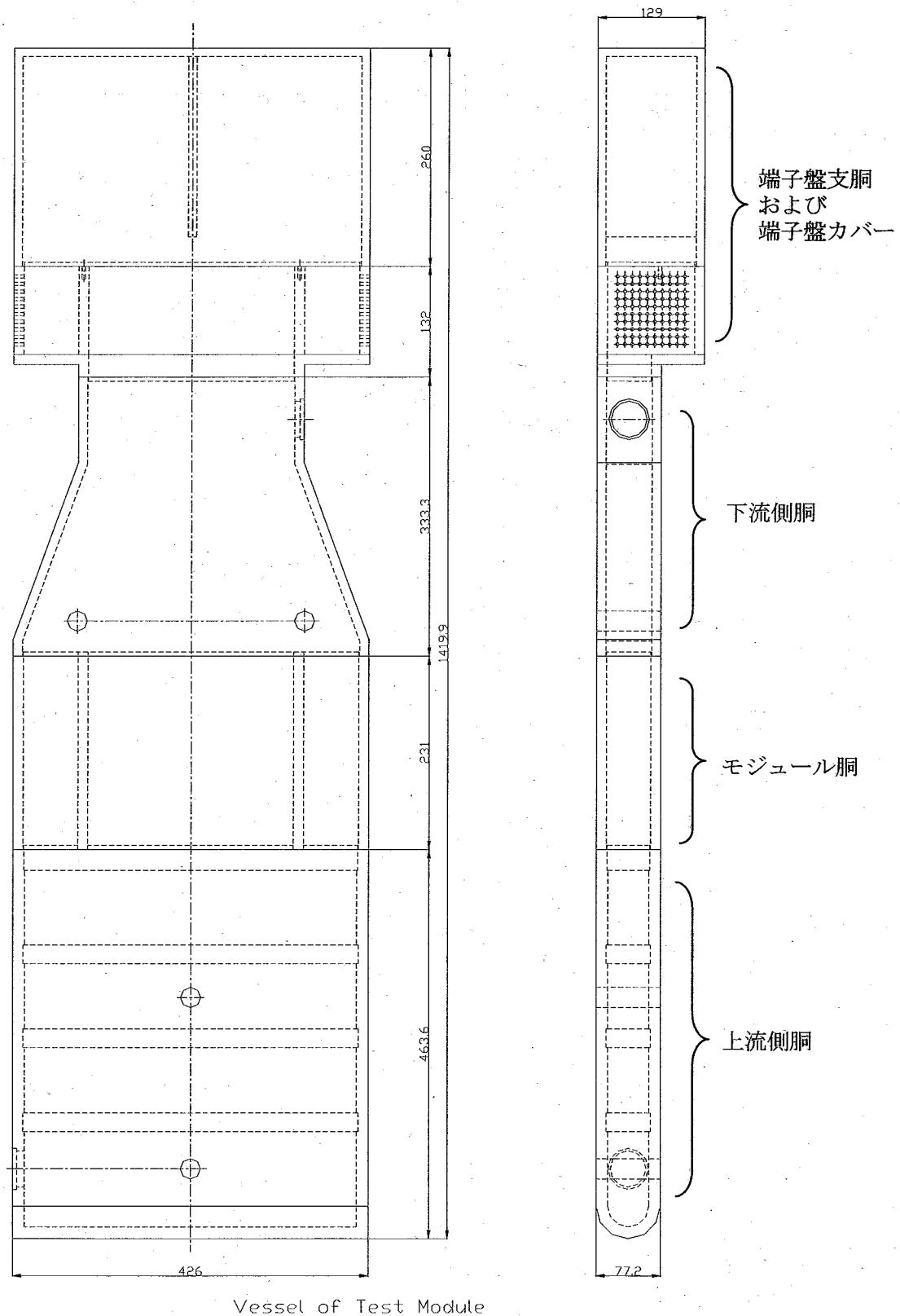


Fig.4-1-9 Upper Reflector



Joint Tube

Fig.4-1-10 Joint Tube



Vessel of Test Module

Fig.4-2-1 Vessel of Test Module

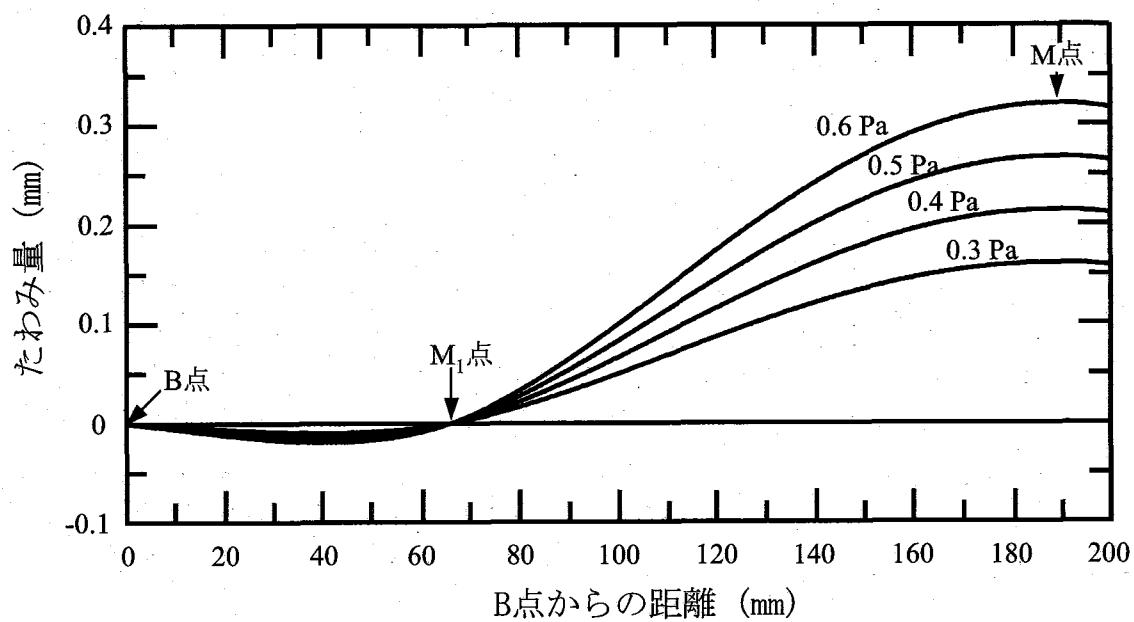


Fig.4-2-2 Bend Quantity between B - M of Module Vessel

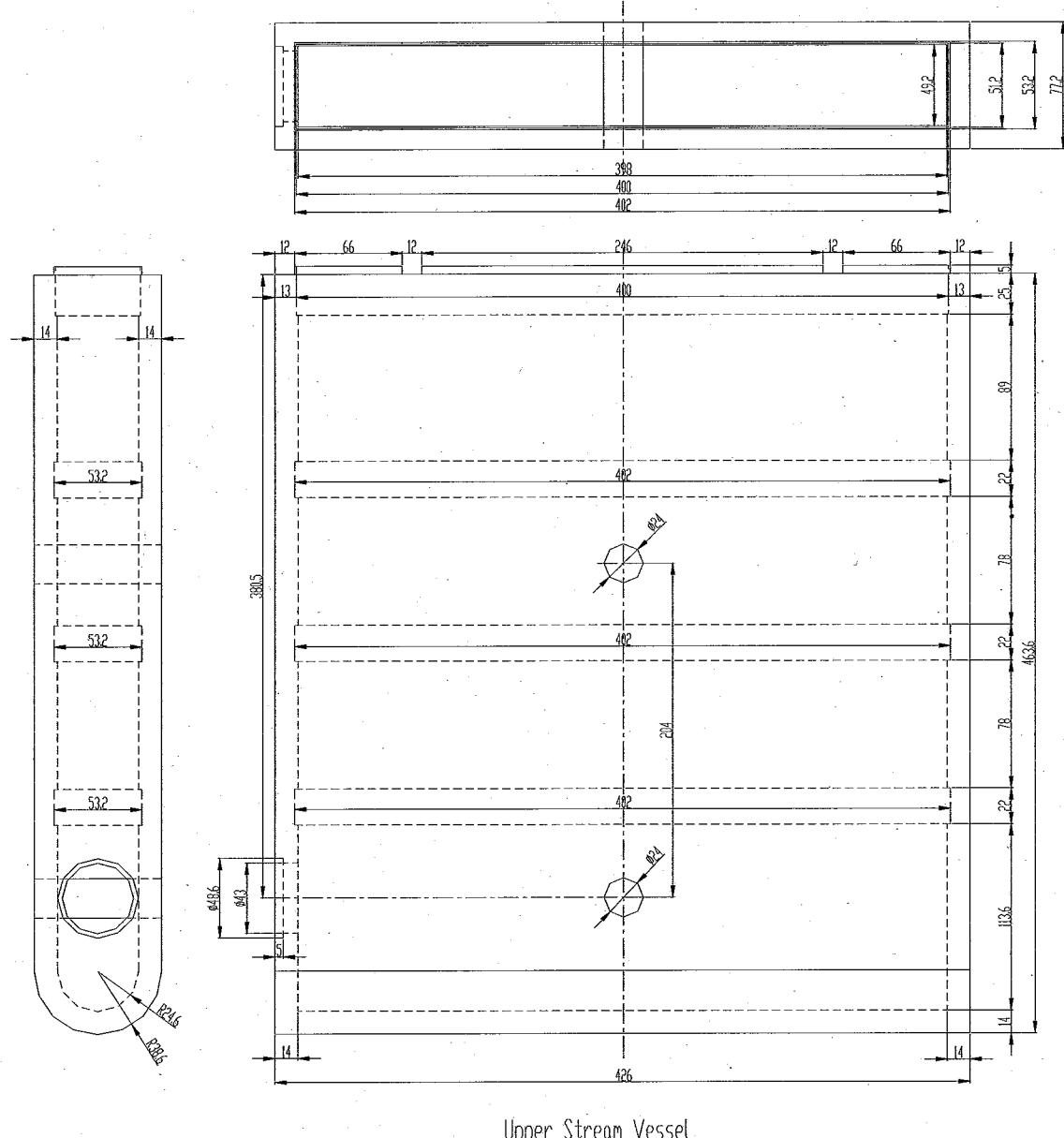
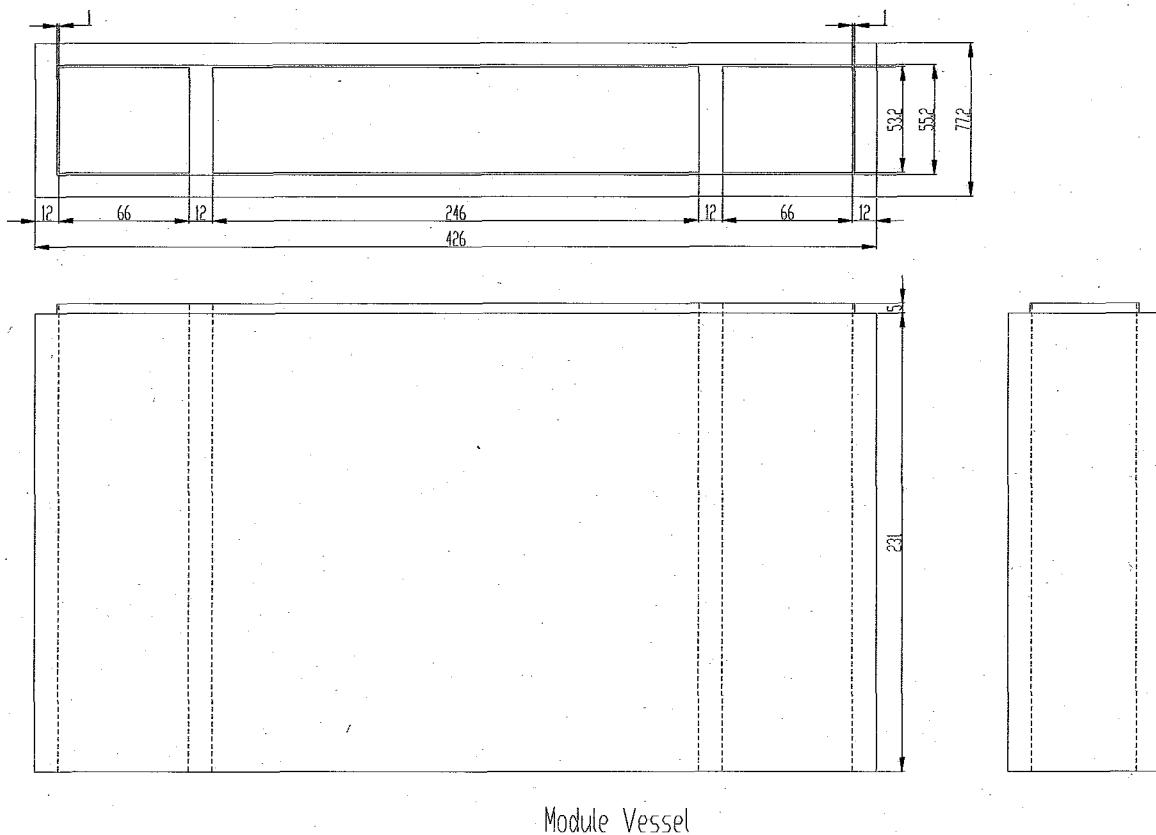
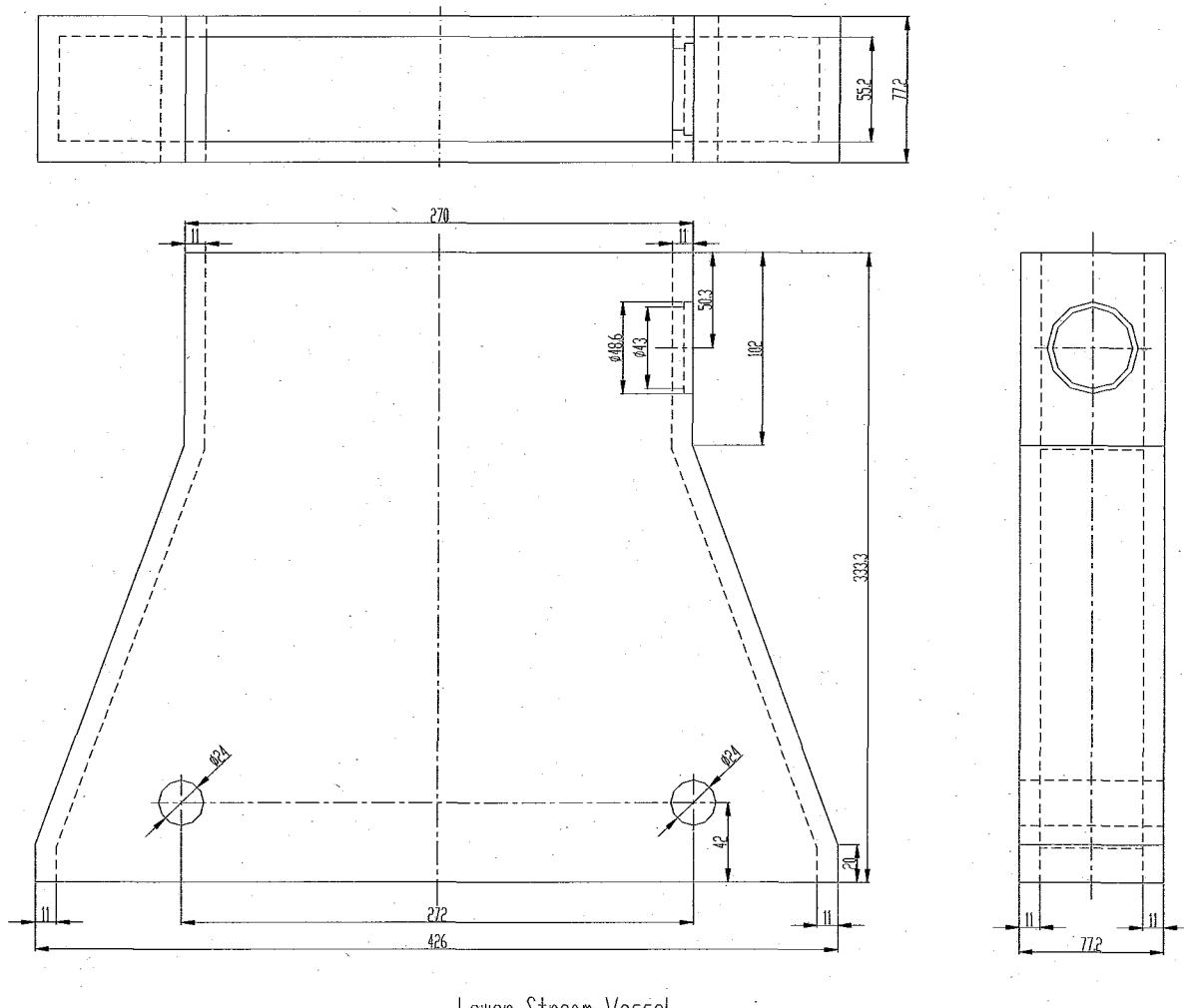


Fig.4-2-3 Upper Stream Vessel



Module Vessel

Fig.4-2-4 Module Vessel



Lower Stream Vessel

Fig.4-2-5 Lower Stream Vessel

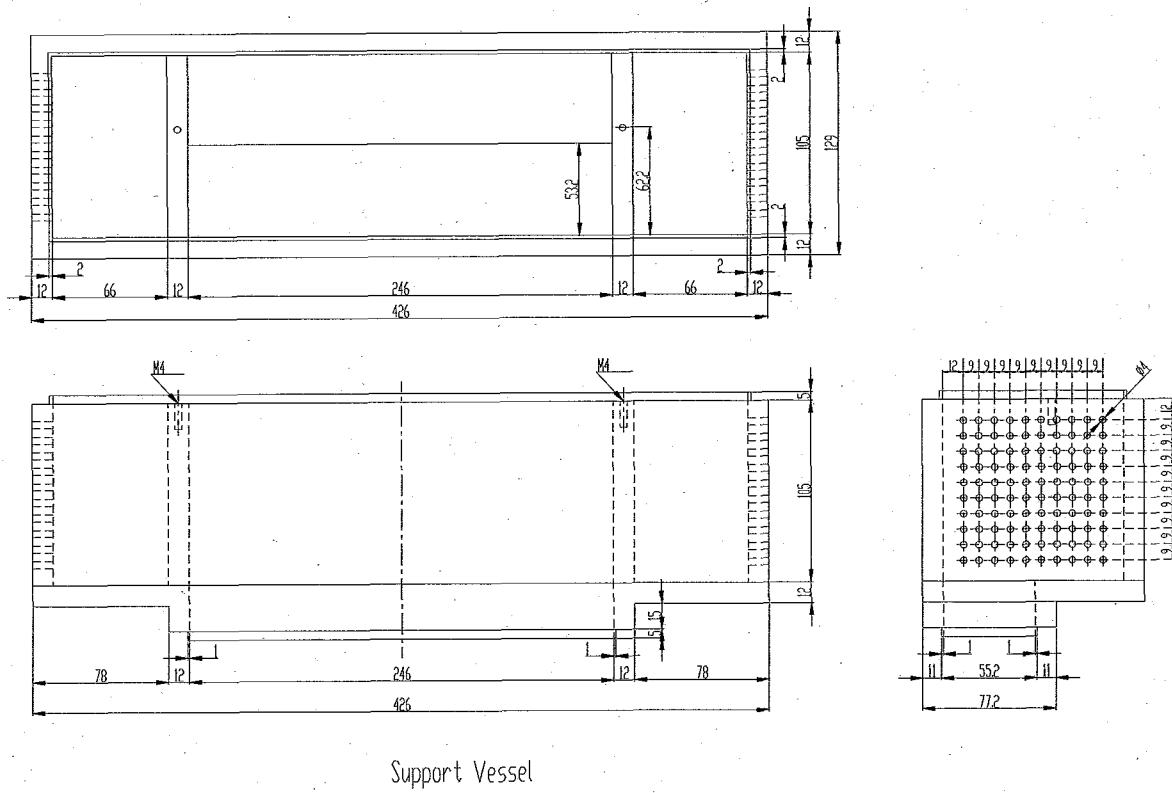


Fig.4-2-6 Support Vessel (for Output Terminal)

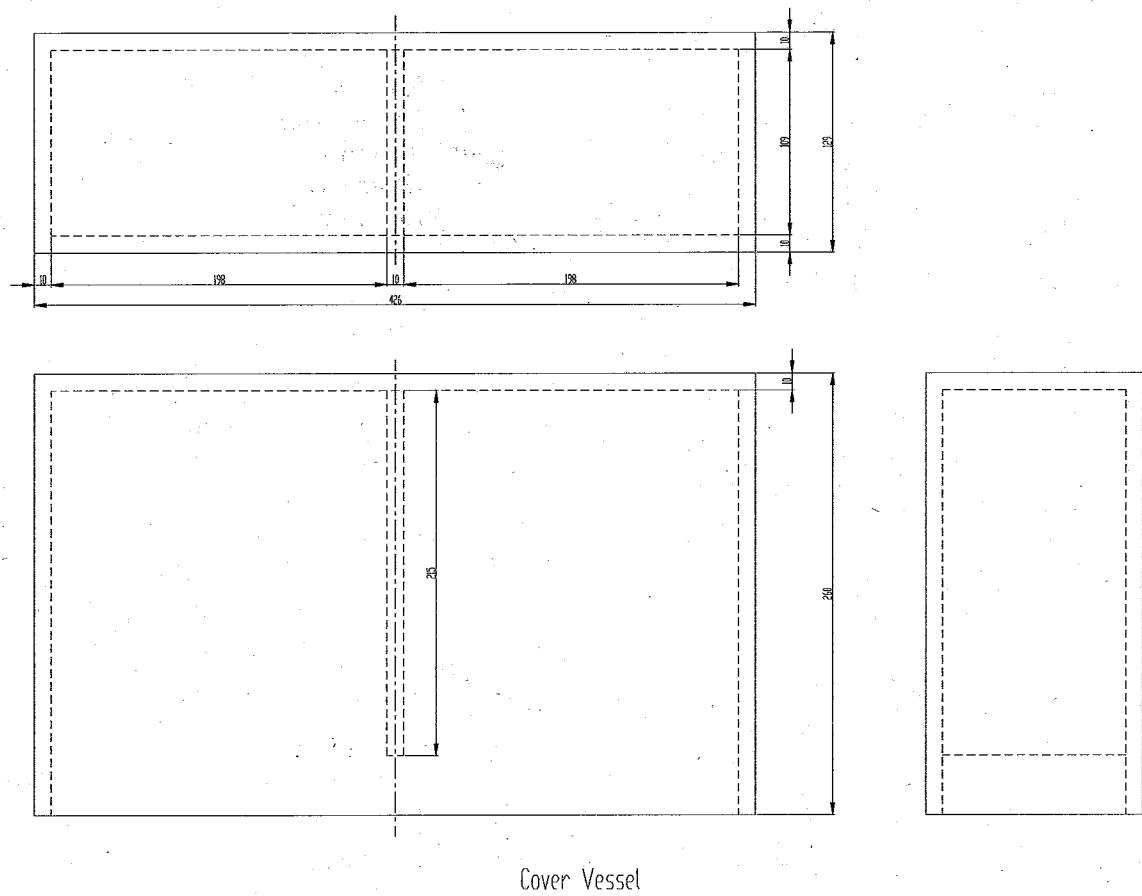


Fig.4-2-7 Terminal Board Cover

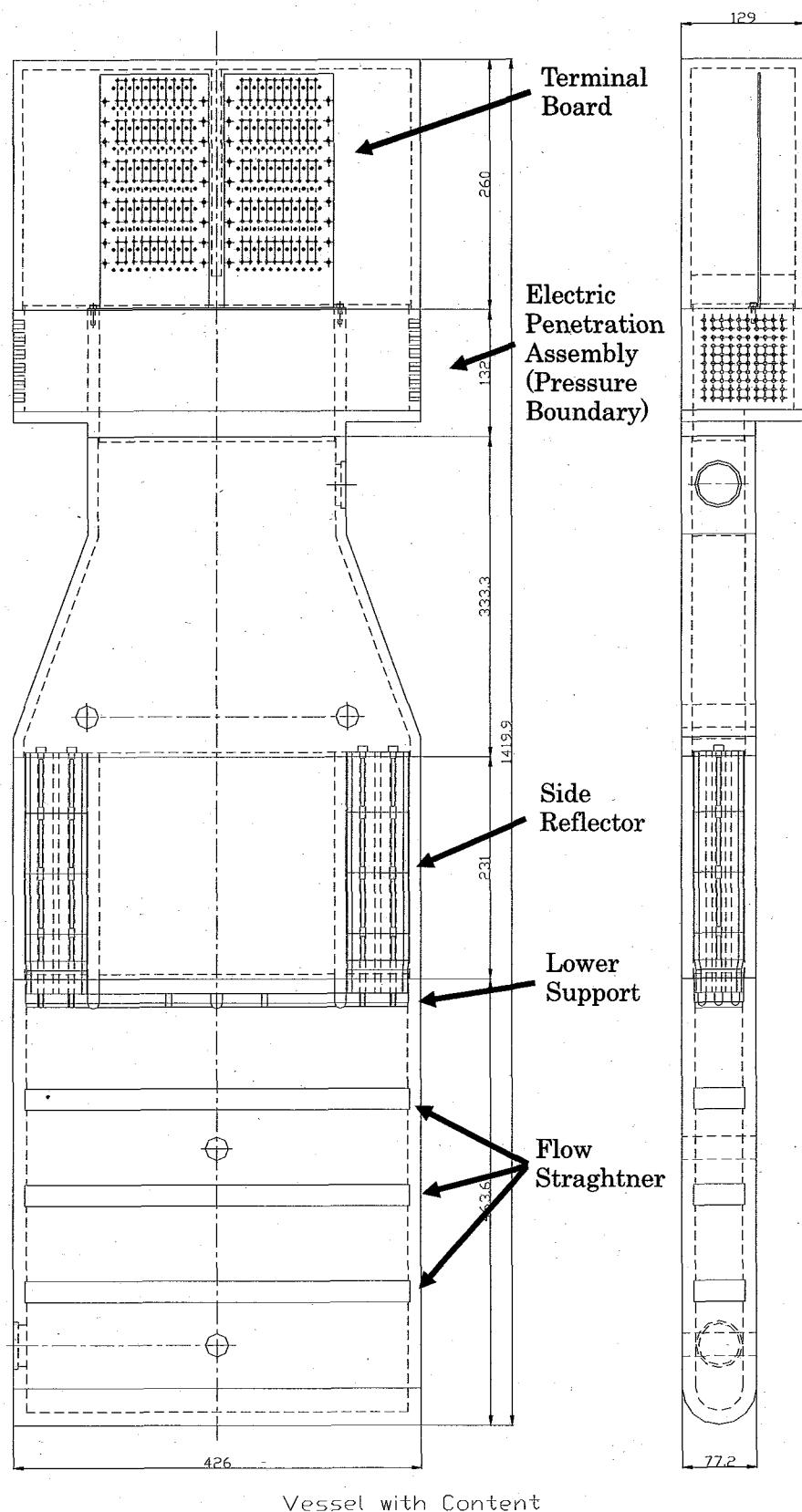


Fig.4-3-1 Vessel which incorporated Contents

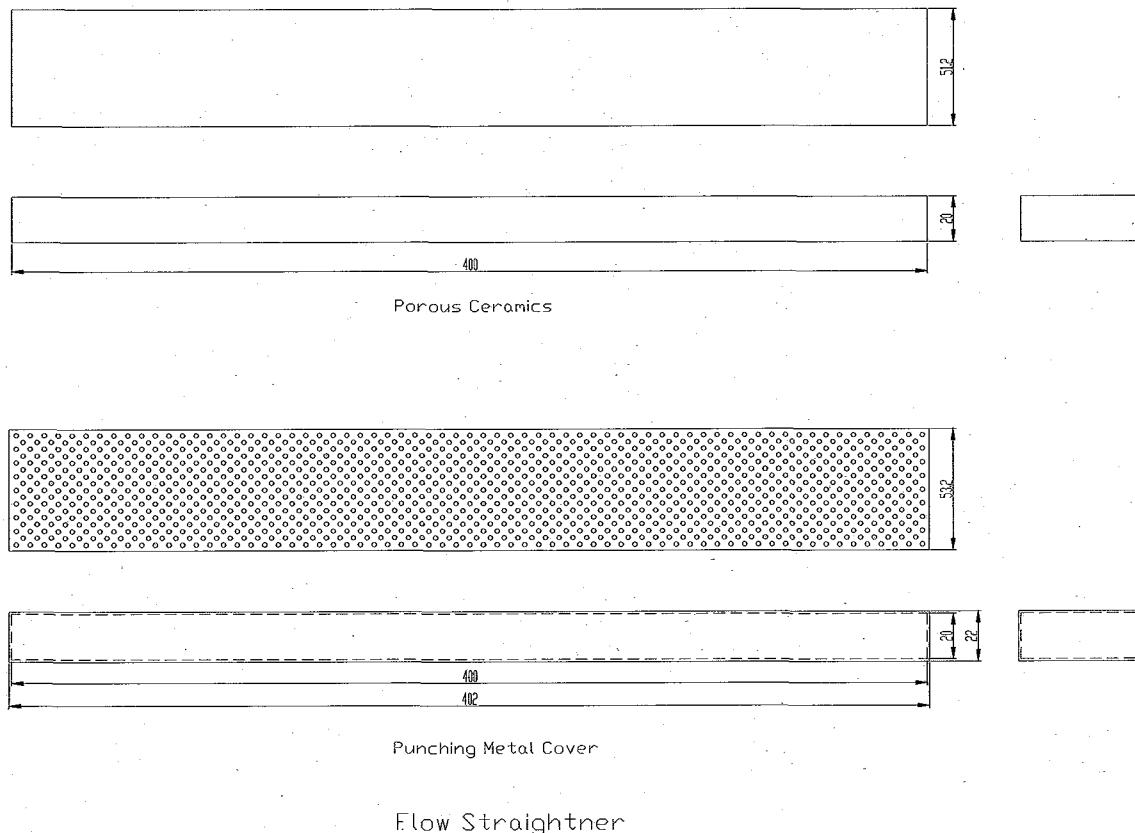


Fig.4-3-2 The Board to do Flow Straightner

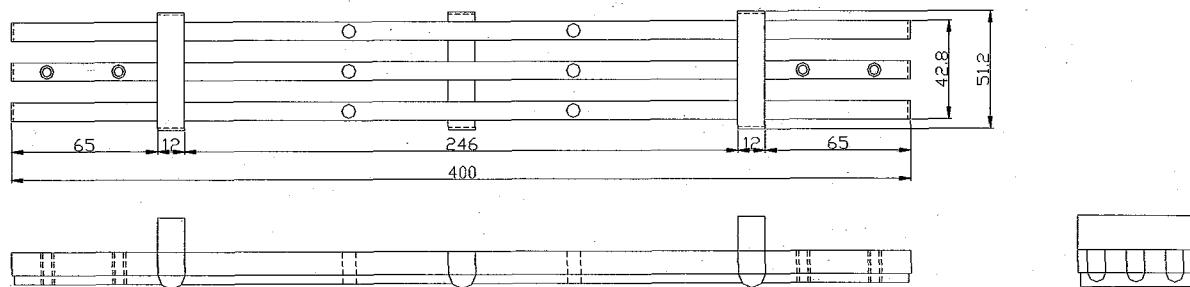
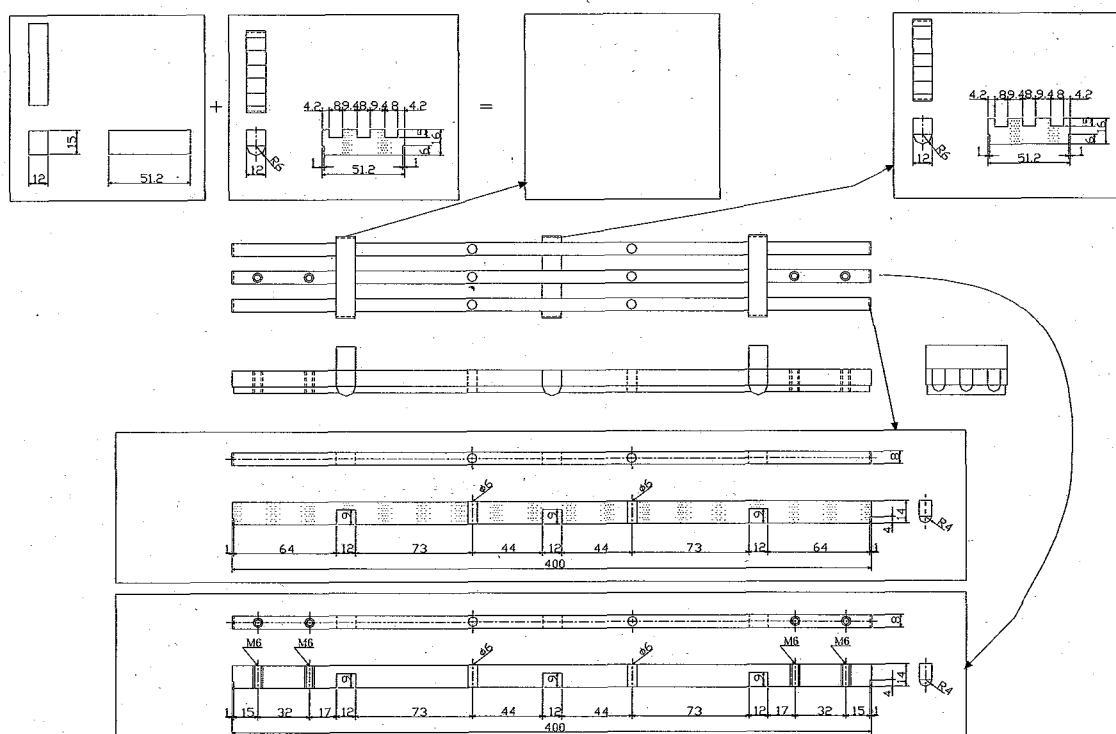
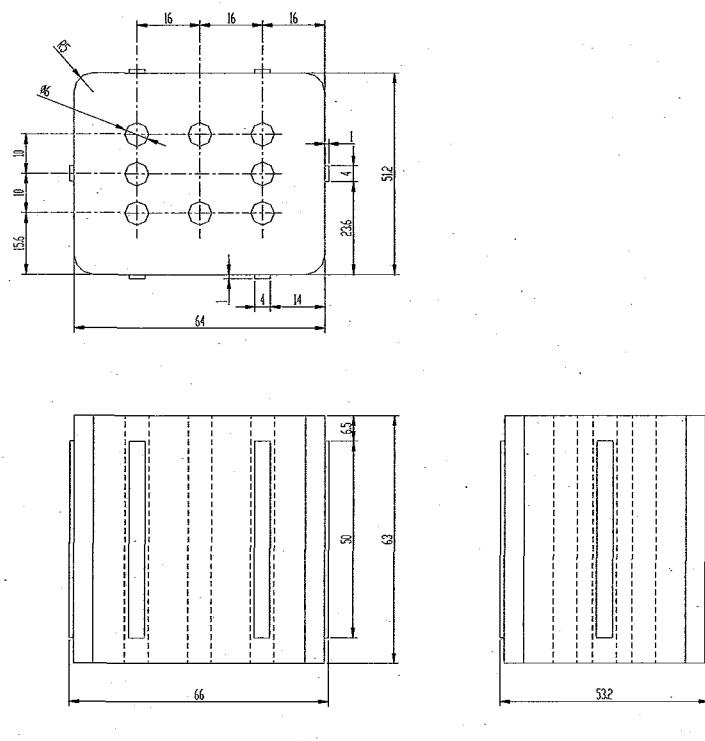


Fig.4-3-3 Lower Support



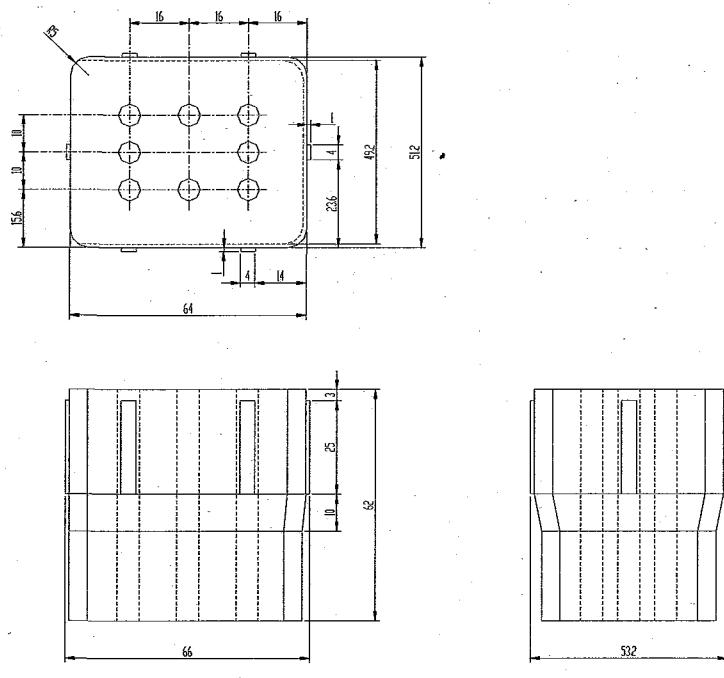
Assembling of lower supporter

Fig.4-3-4 Production Method Plan for Lower Support



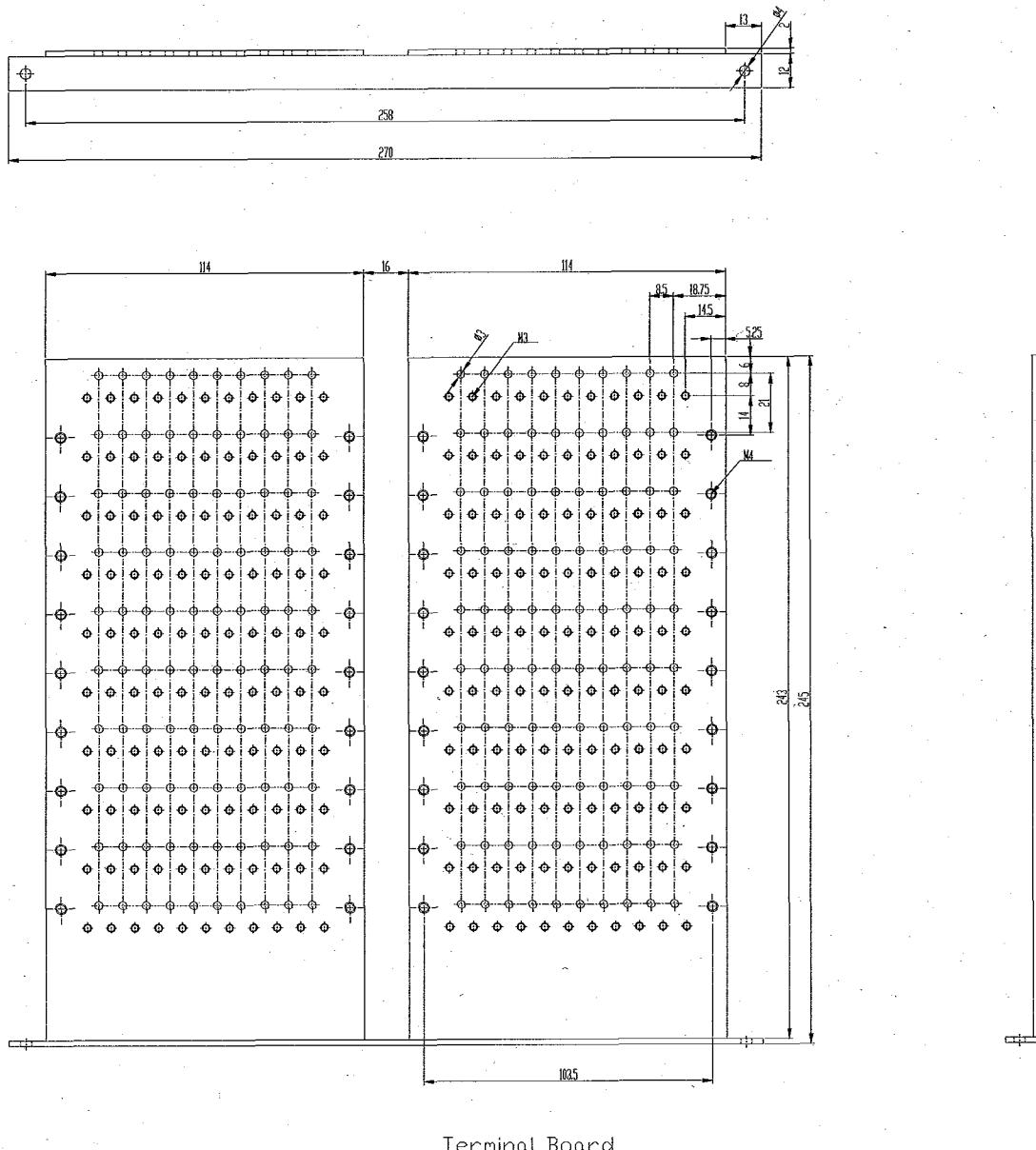
Side Reflector 1

Fig.4-3-5 Side Reflector



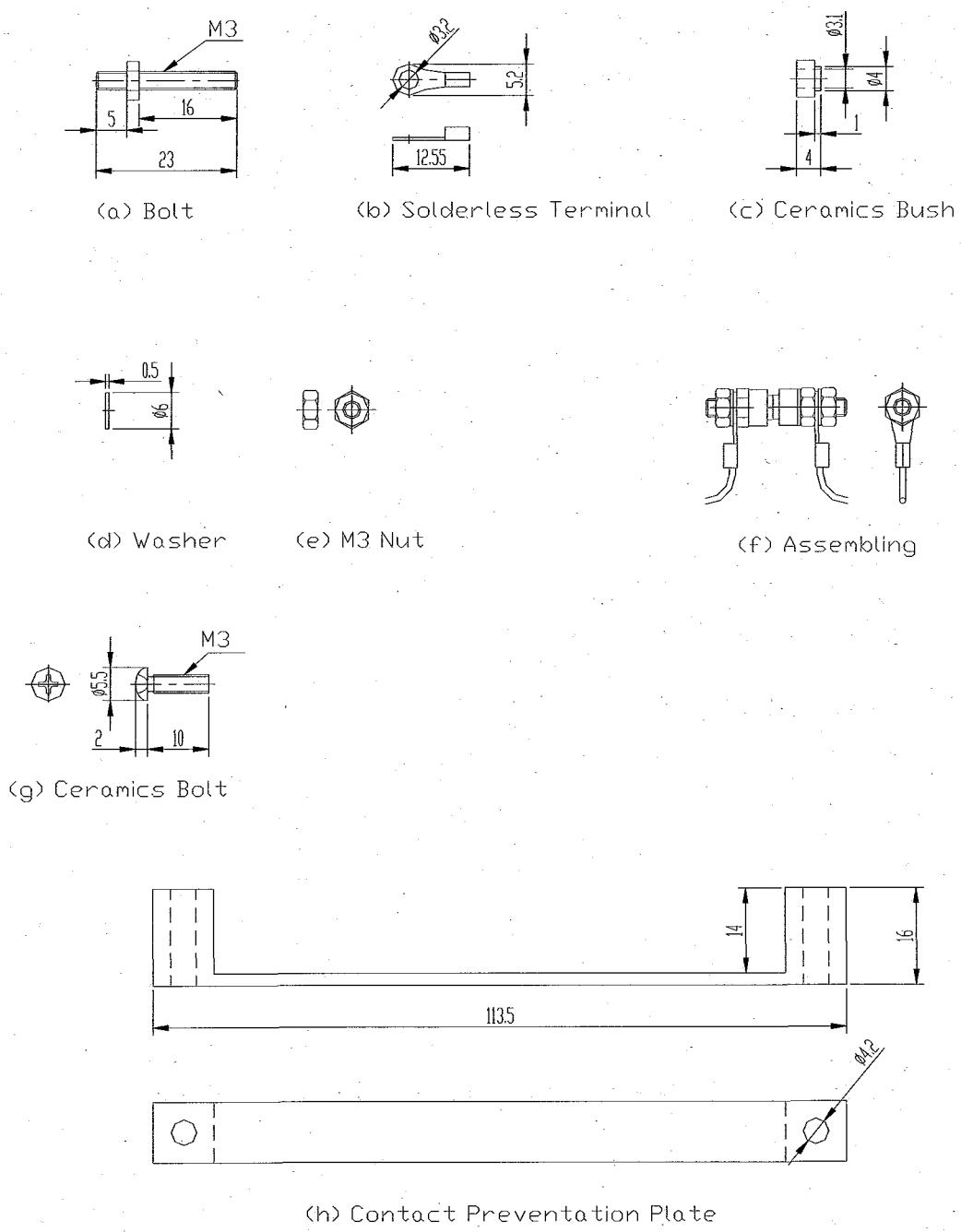
Side Reflector 2

Fig.4-3-6 Side Reflector (Lower Side)



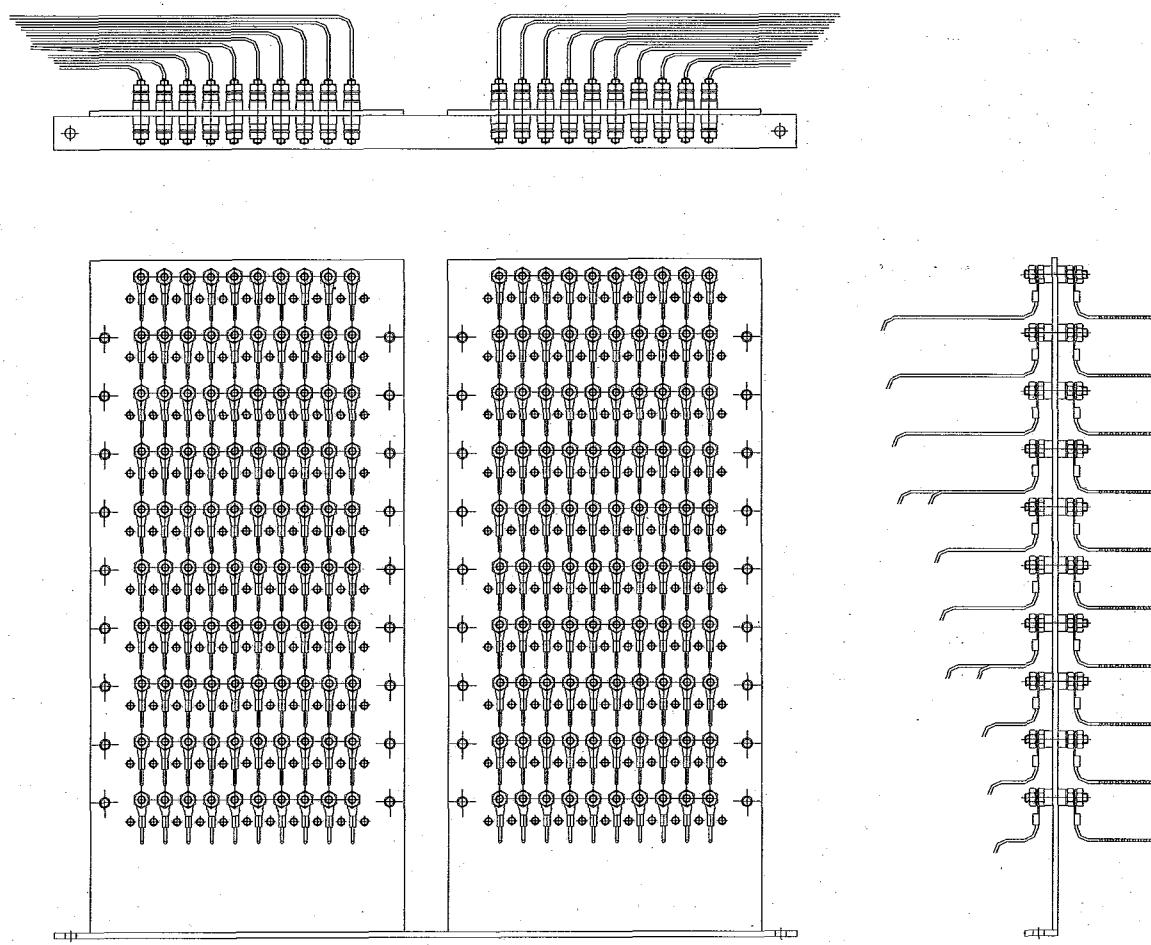
Terminal Board

Fig.4-3-7 Terminal Board



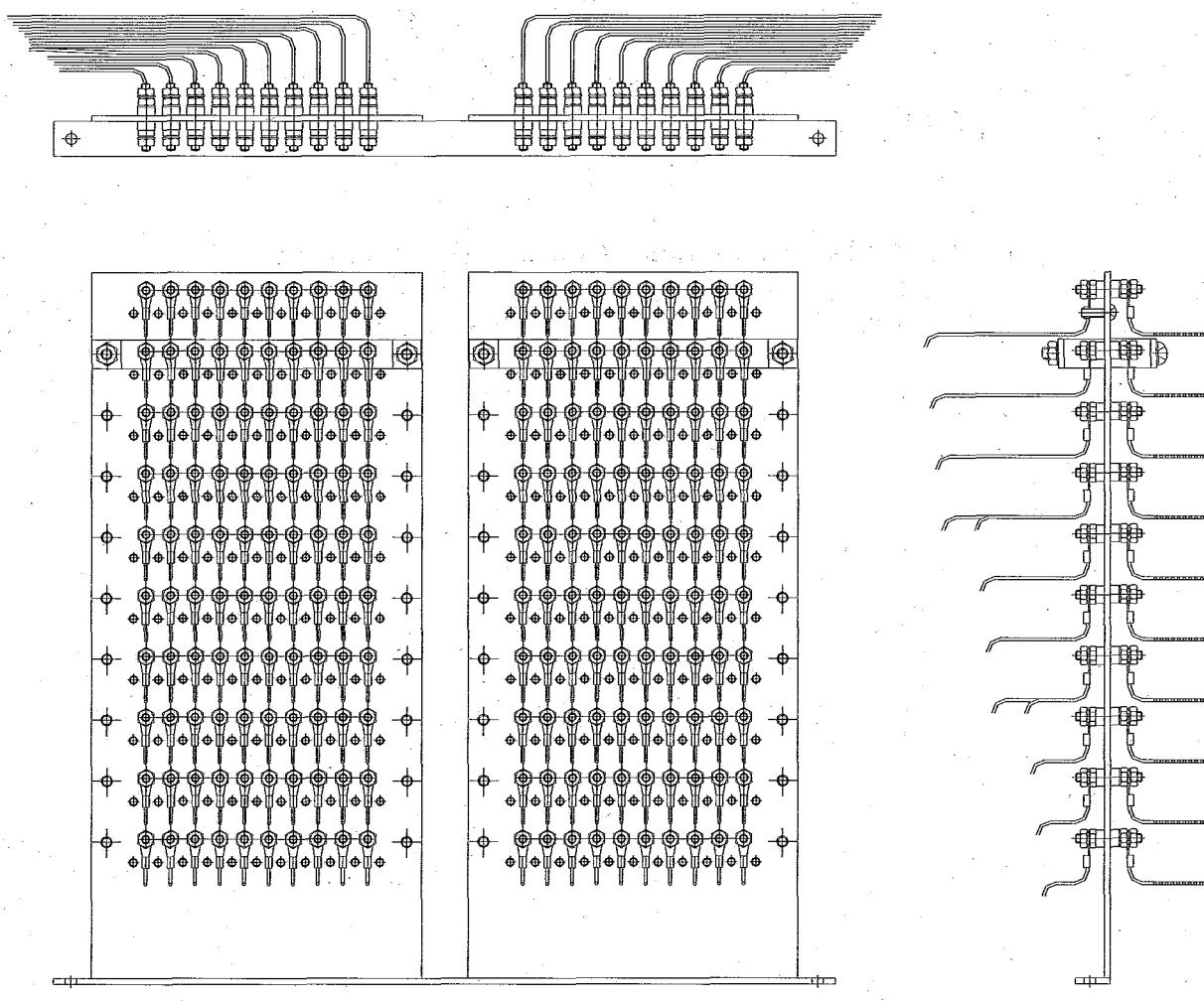
Part of Terminal

Fig.4-3-8 Parts of Terminal



Terminal Arrangement 1

Fig.4-3-9 The State that Installed Parts on The Terminal Board (1)



Terminal Arrangement 2

Fig.4-3-10 The State that Installed Parts on The Terminal Board (2)

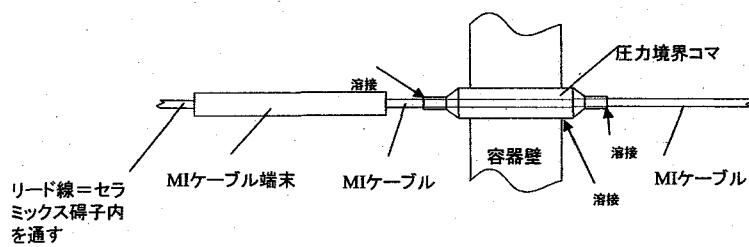
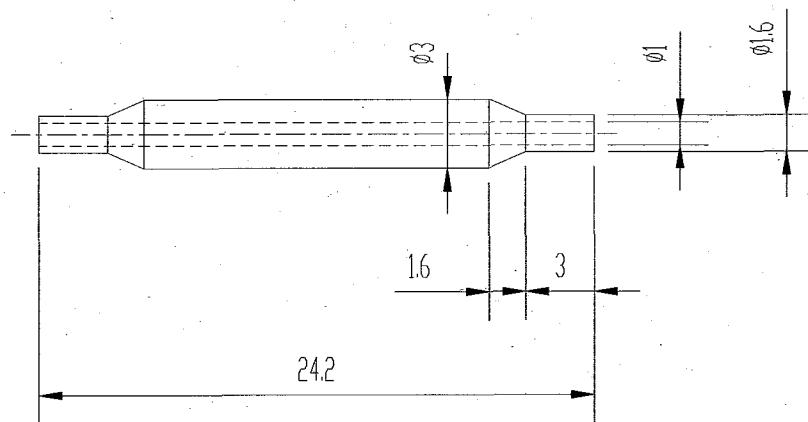


Fig.4-3-11 Electric Penetration Assembly (Pressure Boundary)



Pressure Boundary

Fig.4-3-12 Parts of Pressure Boundary

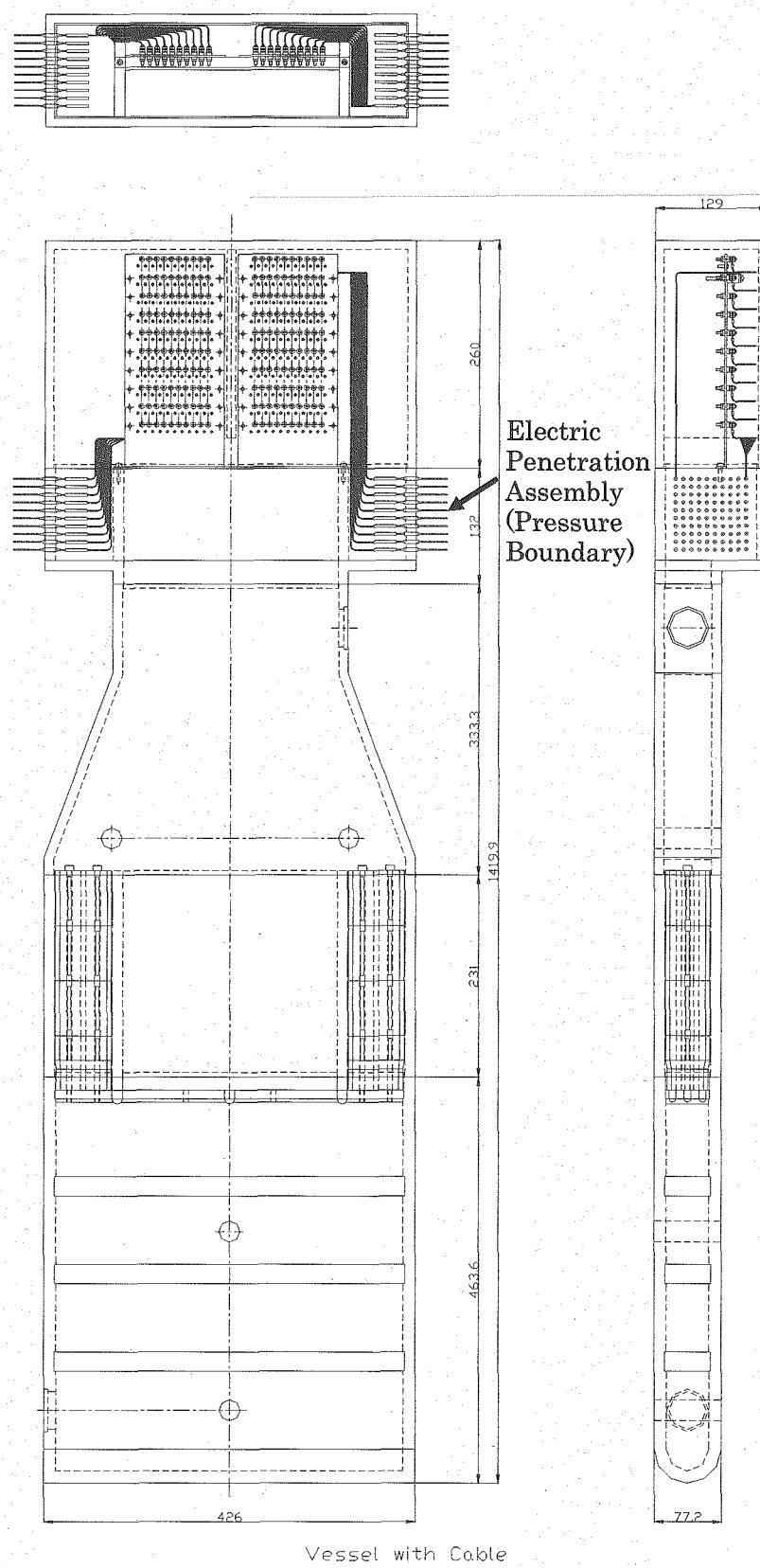
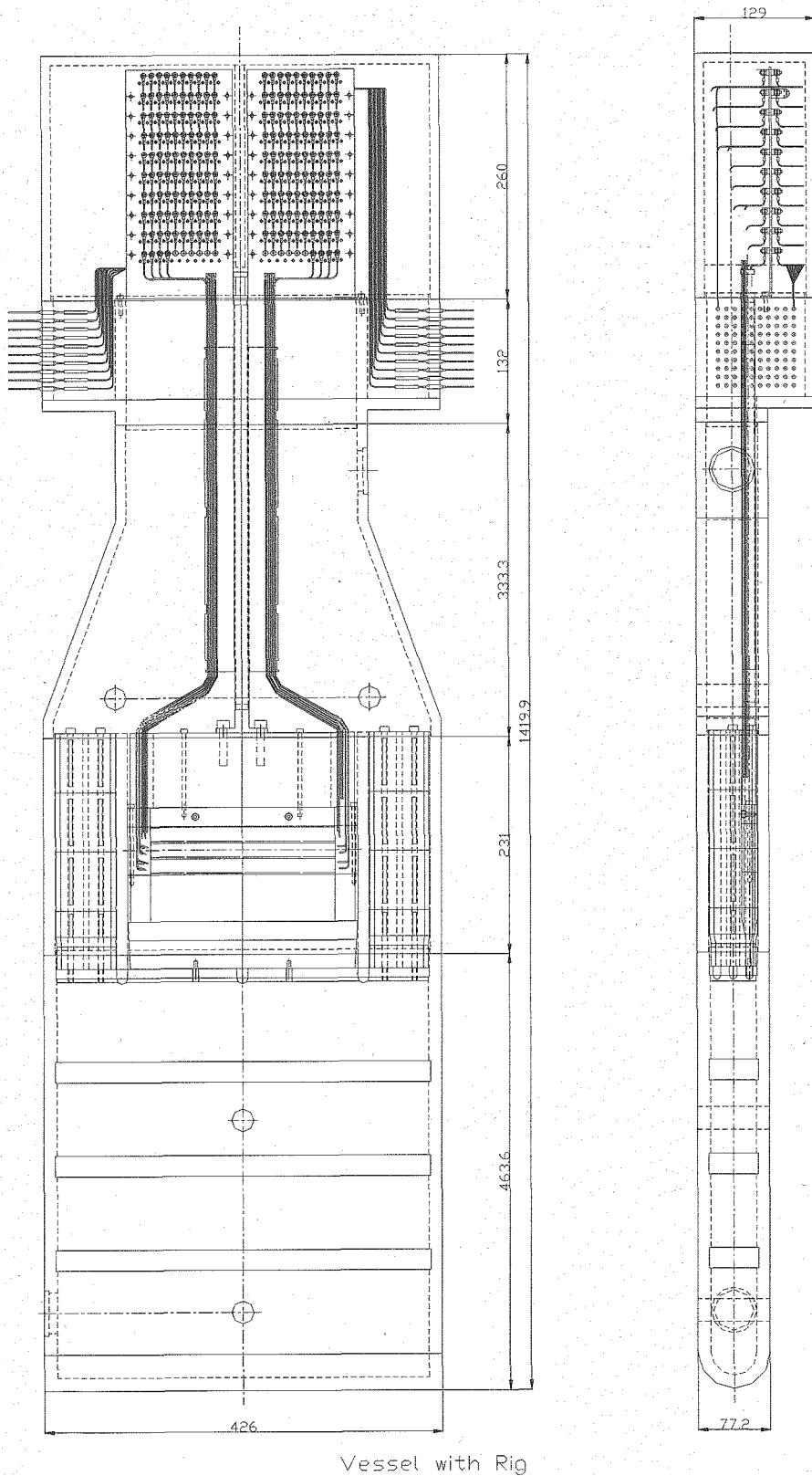


Fig.4-3-13 The State that Installed Electric Penetration Department in Vessel



Vessel with Rig

Fig.4-3-14 The State that Installed Rig to Vessel

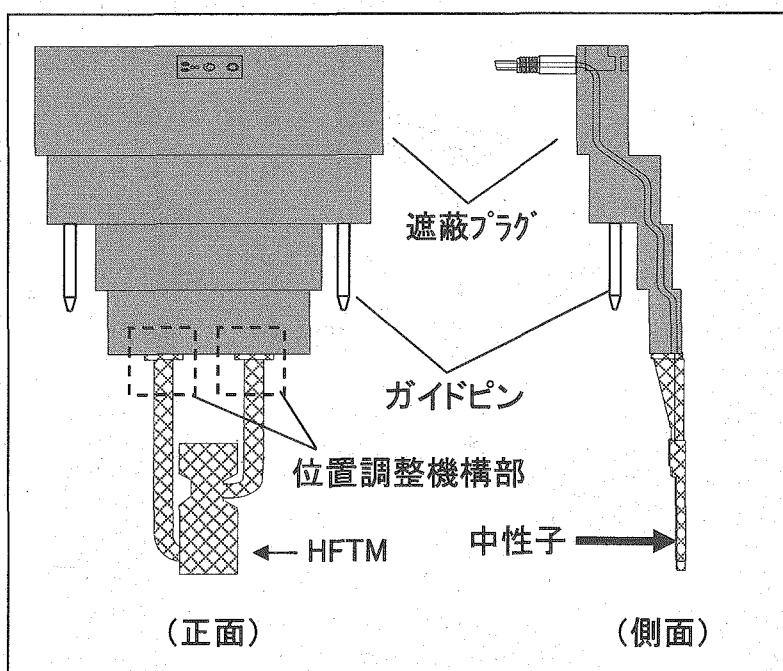
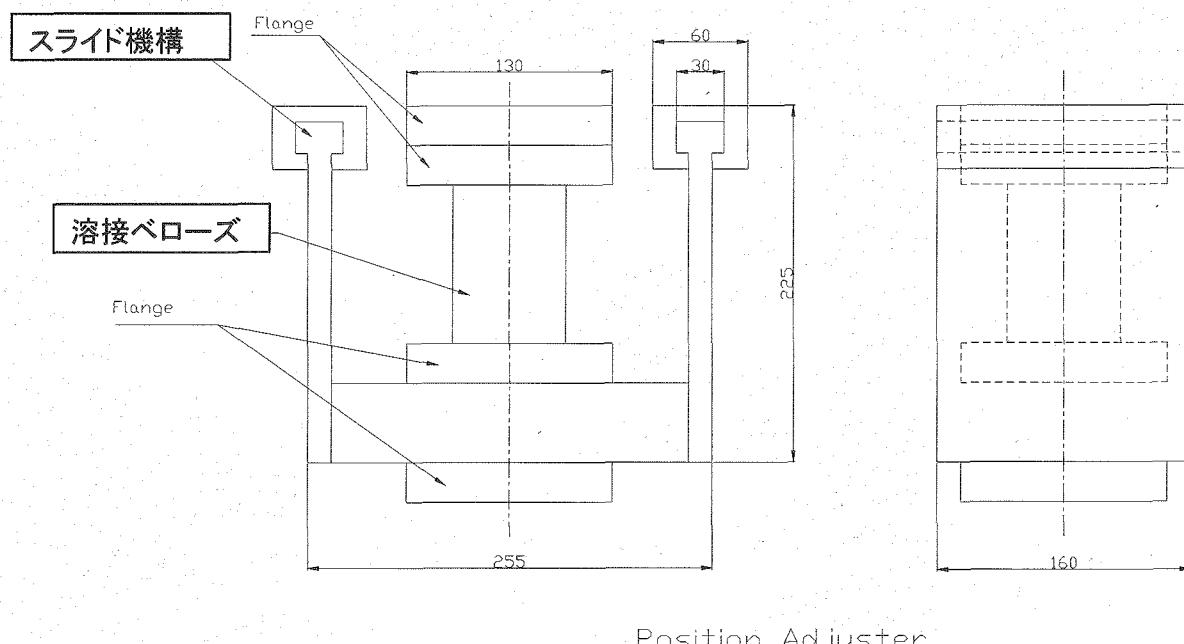


Fig.4-4-1 Guide Pin and Position Adjuster



Position Adjuster

Fig.4-4-2 Detail of Position Adjuster

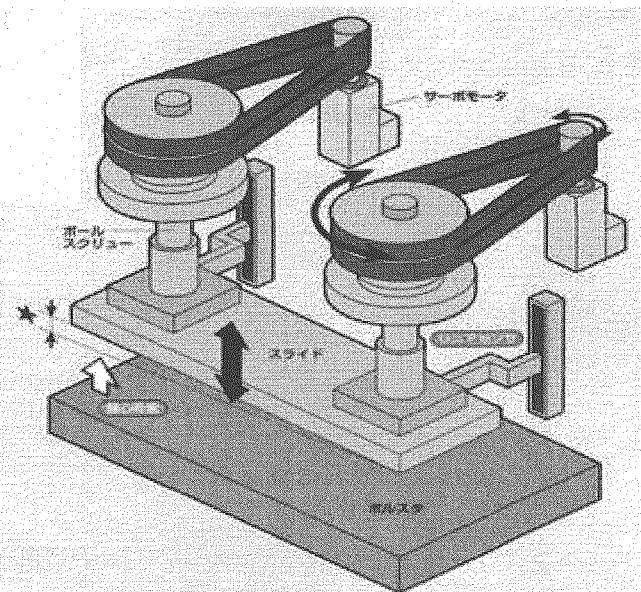


Fig.4-4-3 Example of Electromotive Drive Ball Screw System

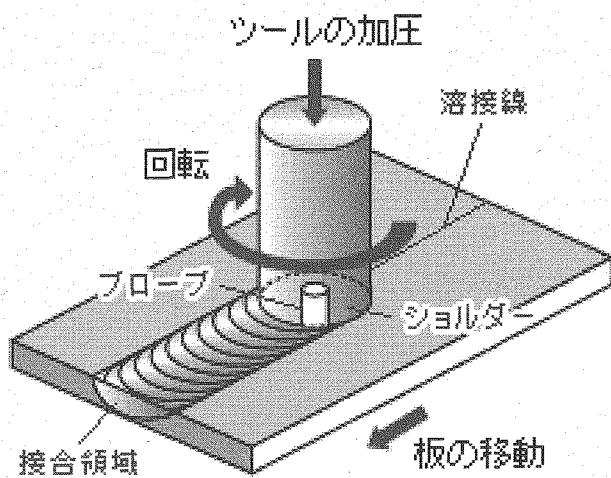
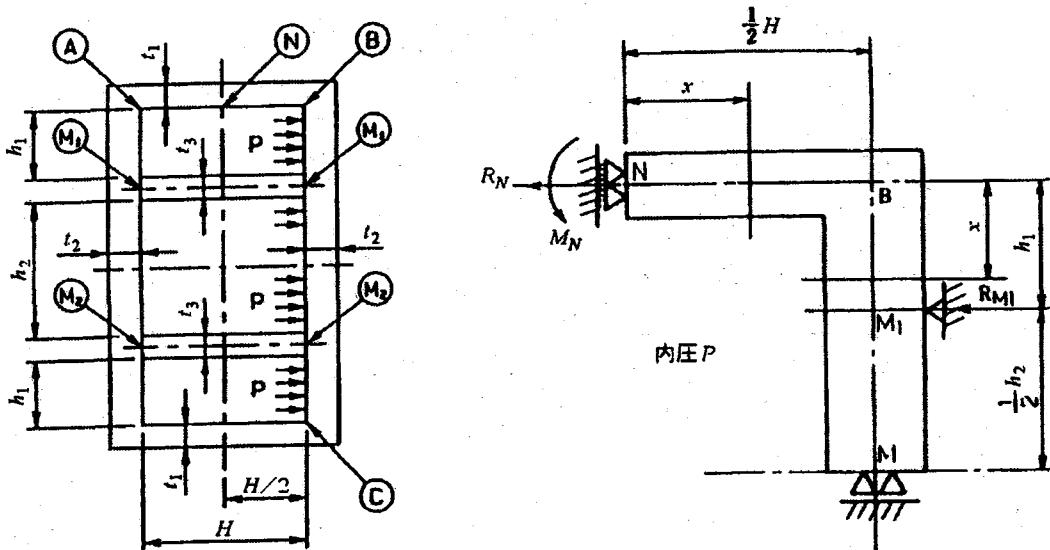


Fig.6-1 Friction Stir Welding

付録

横断面の空間を仕切板により3分割する胴に生じる応力とたわみ量の解析*

下図に示すように、対称性を考慮して 1/4 断面についてモデル化して解析する。ただし、仕切板の曲げ剛性および膜応力による板の伸びは無視する。



I. 応力

部材 A~B 間の任意の位置 x における曲げモーメント

境界条件

* I. 応力は JIS B 8280 を転載したものであり、II. たわみ量は本検討で導出したものである

B点のたわみ角

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=\frac{H}{2}} = \frac{1}{EI_1} \cdot \frac{1}{2} \left(-M_N H + \frac{1}{24} P H^3 \right) \quad \dots \quad (5)$$

部材 B~M₁ 間の任意の位置 x における曲げモーメント

$$M_x = EI_2 \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_N + \frac{1}{8} PH^2 - R_N x + \frac{1}{2} P x^2 \quad \dots \quad (6)$$

$$EI_2 y = \frac{1}{2} \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) x^2 - \frac{1}{6} R_N x^3 + \frac{1}{24} P x^4 + C_3 x + C_4 \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (8)$$

境界条件

$$x = h_1 \quad \text{で} \quad y = 0$$

$$\therefore \frac{1}{2} \left(-M_N + \frac{1}{8} P H^2 \right) h_1^2 - \frac{1}{6} R_N h_1^3 + \frac{1}{24} P h_1^4 + C_3 h_1 = 0 \quad \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \quad (10)$$

B点のたわみ角

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=0} = \frac{1}{EI_2} C_3 \quad \dots \quad (11)$$

M₁点のたわみ角

$$\left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=h_1} = \frac{1}{EI_2} \left\{ \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) h_1 - \frac{1}{2} R_N h_1^2 + \frac{1}{6} P h_1^3 + C_3 \right\} \quad \dots \quad (12)$$

部材 $M_1 \sim M$ 間の任意の位置 x における曲げモーメント

$$M_x = EI_2 \frac{d^2y}{dx^2} = \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) - R_N x - R_{M1}(x-h_1) + \frac{1}{2} Px^2 \quad \dots \dots \dots \dots \quad (13)$$

$$EI_2 \frac{dy}{dx} = \left(-M_N + \frac{1}{8}PH^2 \right)x - \frac{1}{2}R_N x^2 - \frac{1}{2}R_{M1} x^2 + R_{M1} h_1 x + \frac{1}{6}Px^3 + C_5 \quad \dots \quad (14)$$

$$EI_2 y = \frac{1}{2} \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) x^2 - \frac{1}{6} R_N x^3 - \frac{1}{6} R_{M1} x^3 + \frac{1}{2} R_{M1} h_1 x^2 + \frac{1}{24} Px^4 + C_5 x + C_6 \quad \cdot \quad (15)$$

境界条件

$$\therefore \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) - \frac{1}{2} R_N \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^2 - \frac{1}{2} R_{M1} \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) + R_{M1} h_1 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^2 + \frac{1}{6} P \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^3 + C_5 = 0 \quad \cdot \cdot \cdot \quad (17)$$

M₁点のたわみ角

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=h_1} = \frac{1}{EI_2} \left\{ \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) h_1 - \frac{1}{2} R_N h_1^2 - \frac{1}{2} R_{M1} h_1^2 + R_{M1} h_1^2 + \frac{1}{6} Ph_1^3 + C_5 \right\} \dots \quad (18)$$

B点およびM₁点において、たわみ角が等しい。

式(5)、(11)から

$$\frac{1}{EI_1} \cdot \frac{1}{2} \left(-M_N H + \frac{1}{24} P H^3 \right) = \frac{1}{EI_2} C_3 \quad \dots \quad (19)$$

式(12)、(18)から

$$\begin{aligned} & \frac{1}{EI_2} \left\{ \left(-M_N + \frac{1}{8} PH'^2 \right) h_1 - \frac{1}{2} R_N h_1^2 + \frac{1}{6} Ph_1^3 + C_3 \right\} \\ &= \frac{1}{EI_2} \left\{ \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) h_1 - \frac{1}{2} R_N h_1^2 - \frac{1}{2} R_{M1} h_1^2 + R_{M1} h_1^2 + \frac{1}{6} Ph_1^3 + C_5 \right\} \end{aligned} \quad \dots \quad (20)$$

式(10)、(17)、(19)、(21)及び R_N 、 R_{M1} と P との釣り合い条件から、 M_N 、 R_N 及び R_{M1} について解くと

$$M_N = \frac{\frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{16} h_1^2 H^2 + \frac{1}{8} h_1 h_2 H^2 - \frac{1}{24} h_1^4 - \frac{1}{8} h_1^3 h_2 + \frac{1}{24} h_1 h_2^3 + \frac{I_2}{24 I_1} H^3 \left(h_1 + \frac{3}{2} h_2 \right) \right\}}{\frac{1}{4} h_1^2 + \frac{1}{2} h_1 h_2 + \frac{I_2}{2 I_1} H \left(h_1 + \frac{3}{2} h_2 \right)} P . \quad (22)$$

$$R_N = \frac{-M_N \left(\frac{1}{2}h_1 + \frac{1}{2}h_2 \right) + \left(\frac{1}{8}h_1^3 + \frac{1}{4}h_1^2h_2 - \frac{1}{24}h_2^3 + \frac{1}{16}h_1H^2 + \frac{1}{16}h_2H^2 \right)P}{\frac{1}{3}h_1^2 + \frac{1}{2}h_1h_2} \quad \dots \dots \quad (23)$$

式(22)、(23)及び式(24)において $\alpha_2 = I_2/I_1$ 、 $\alpha_4 = h_4/H$ 、 $\alpha_5 = h_5/H$ とおいて整理すると

۲۷۸

$$G_1 = \frac{-3G_2(\alpha_4 + \alpha_5) + \frac{1}{8}\{6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 - 2\alpha_5^3 + 3(\alpha_4 + \alpha_5)\}}{2\alpha_4^2 + 3\alpha_4\alpha_5} \quad \dots \quad (28)$$

$$G_2 = \frac{3\alpha_4^2 + 6\alpha_4\alpha_5 - 2\alpha_4^4 - 6\alpha_4^3\alpha_5 + 2\alpha_4\alpha_5^3 + \alpha(2\alpha_4 + 3\alpha_5)}{24\{\alpha_4^2 + 2\alpha_4\alpha_5 + \alpha, (2\alpha_4 + 3\alpha_5)\}} \quad \dots \quad (29)$$

部材 A～B 間の応力

膜応力

曲げ応力¹ 式(1)から、

中央 N 点

隅角部 A、B 点

部材 B~C 間の応力

膜応力

B～C 間の膜力 $R_M = \frac{1}{2}PH$ であるから

曲げ応力

隅角部 B、C 点

式(6)で $x = 0$ として

$$M_B = -M_N + \frac{1}{8}PH^2$$

仕切板 M_1 、 M_2 点

式(13)で $x = h_1$ として

$$(\sigma_b)_{M1} = \frac{M_{M1}c}{I_2\eta} = \frac{12PH^2c}{t_2^3\eta} \left(G_2 - \frac{1}{8} + G_1\alpha_4 - \frac{1}{2}\alpha_4^2 \right) \quad \dots \quad (37)$$

$$^1 \quad \sigma_x = \frac{Mc}{I_z} \quad (c \text{ は部材断面の中立面から表面までの長さ}) , \quad I_z = \frac{bt^3}{12} \quad (\text{ここで } b=1)$$

中央 M 点

式(13)で $x = h_1 + \frac{h_2}{2}$ として上記と同様に式を整理して

$$(\sigma_b)_M = \frac{12PH^2c}{t_2^3\eta} \left[G_2 + \frac{1}{2}G_1(2\alpha_4 + \alpha_5) + \frac{1}{2}G_3\alpha_5 - \frac{1}{8}[1 + (2\alpha_4 + \alpha_5)^2] \right] \quad \dots \quad (38)$$

部材 $M_1 \sim M_1$ 、 $M_2 \sim M_2$ 間の応力

膜応力

$$\alpha_m = \frac{R_{M1}}{t_3\eta} = \frac{PH}{t_3\eta} G_3 \quad \dots \quad (39)$$

II. たわみ量

部材 A～B 間

境界条件

$$\text{式(3)において } x = \frac{1}{2}H \quad \text{で} \quad y = 0 \quad \therefore C_2 = \frac{1}{8}M_N H^2 - \frac{1}{384}P H^4 \quad \cdots \cdots \cdots \quad (40)$$

式(3)、(41)から、たわみ量は

$$y = \frac{1}{EI_1} \left[-\frac{1}{2} M_N x^2 + \frac{1}{24} P x^4 + \frac{1}{8} M_N H^2 - \frac{1}{384} P H^4 \right] \\ = \frac{1}{EI_1} \left[-\frac{1}{2} P H^2 G_2 x^2 + \frac{1}{24} P x^4 + \frac{1}{8} P H^2 G_2 \cdot H^2 - \frac{1}{384} P H^4 \right] \\ = \frac{P}{Et_1^3} \left[-6 H^2 G_2 x^2 + \frac{1}{2} x^4 + \frac{3}{2} H^4 G_2 - \frac{1}{32} H^4 \right] \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \quad (41)$$

N点 ($x=0$) でたわみ量が最大になる。式(41)から最大たわみ量は

部材 B～M₁ 間

式(8)、(9)、(19)から、たわみ量は

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{1}{EI_2} \left[\frac{1}{2} \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) x^2 - \frac{1}{6} R_N x^3 + \frac{1}{24} Px^4 + \frac{I_2}{2I_1} \left(-M_N H + \frac{1}{24} PH^3 \right) x \right] \\
 &= \frac{P}{EI_2} \left[\frac{1}{2} \left(-PH^2 G_2 + \frac{1}{8} PH^2 \right) x^2 - \frac{1}{6} PHG_1 x^3 + \frac{1}{24} Px^4 + \frac{I_2}{2I_1} \left(-PH^3 G_2 + \frac{1}{24} PH^3 \right) x \right] \\
 &= \frac{P}{EI_2^3} \left[6H^2 \left(-G_2 + \frac{1}{8} \right) x^2 - 2HG_1 x^3 + \frac{1}{2} x^4 + 6\alpha_2 H^3 \left(-G_2 + \frac{1}{24} \right) x \right] \quad \dots \quad (43)
 \end{aligned}$$

たわみ量が最大になるのは $dy/dx = 0$ となる x 位置であり、この x の値は解析的に求めることができるが、少々やっかいである。参考のため、 $x = h_1/2$ のところのたわみ量を

求める。 $x=h_1/2$ でのたわみ量は、式(43)から

$$\begin{aligned}
 y_{h1/2} &= \frac{P}{Et_2^3} \left[6H^2 \left(-G_2 + \frac{1}{8} \left(\frac{h_1}{2} \right)^2 \right) - 2HG_1 \left(\frac{h_1}{2} \right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_1}{2} \right)^4 + 6\alpha_2 H^3 \left(-G_2 + \frac{1}{24} \left(\frac{h_1}{2} \right) \right) \right] \\
 &= \frac{P}{Et_2^3} \left[-\frac{1}{4} H h_1^3 G_1 - \left(\frac{3}{2} H^2 h_1^2 + 3\alpha_2 H^3 h_1 \right) G_2 + \frac{3}{16} H^2 h_1^2 + \frac{1}{32} h_1^4 + \frac{1}{8} \alpha_2 H^3 h_1 \right] \\
 &= \frac{PH^4}{32Et_2^3} \left[-8\alpha_4^3 G_1 - (48\alpha_4^2 + 96\alpha_2\alpha_4) G_2 + 6\alpha_4^2 + \alpha_4^4 + 4\alpha_2\alpha_4 \right] \cdots \cdots \cdots \quad (44)
 \end{aligned}$$

部材 M₁～M 間

式(17)から

$$\begin{aligned}
 C_5 &= - \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) + \frac{1}{2} R_N \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} R_{M1} \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^2 \\
 &\quad - R_{M1} h_1 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) - \frac{1}{6} P \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^3 \\
 &= - \left(-PH^2 G_2 + \frac{1}{8} PH^2 \right) H \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) + \frac{1}{2} PHG_1 H^2 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} PHG_3 H^2 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 \\
 &\quad - PHG_3 \alpha_4 H^2 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) - \frac{1}{6} PH^3 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^3 \\
 &= PH^3 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) \left[- \left(-G_2 + \frac{1}{8} \right) + \frac{1}{2} G_1 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) + \frac{1}{2} G_3 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) - G_3 \alpha_4 - \frac{1}{6} \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 \right] \\
 &= PH^3 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) G_1 + G_2 - \frac{1}{2} \left(\alpha_4 - \frac{\alpha_5}{2} \right) G_3 - \frac{1}{8} - \frac{1}{6} \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 \right] \cdots \quad (45)
 \end{aligned}$$

(または

$$= \frac{PH^3}{48} (2\alpha_4 + \alpha_5) [6(2\alpha_4 + \alpha_5)G_1 + 24G_2 + 6(-2\alpha_4 + \alpha_5)G_3 - 3 - 4\alpha_4^2 - 4\alpha_4\alpha_5 - \alpha_5^2]$$

境界条件

$x=h_1$ で $y=0$ 式(15)から

$$\begin{aligned}
 C_6 &= -\frac{1}{2} \left(-M_N + \frac{1}{8} PH^2 \right) h_1^2 + \frac{1}{6} R_N h_1^3 + \frac{1}{6} R_{M1} h_1^3 - \frac{1}{2} R_{M1} h_1^3 - \frac{1}{24} Ph_1^4 - C_5 h_1 \\
 &= -\frac{1}{2} \left(-PH^2 G_2 + \frac{1}{8} PH^2 \right) H^2 \alpha_4^2 + \frac{1}{6} PHG_1 H^3 \alpha_4^3 - \frac{1}{3} PHG_3 H^3 \alpha_4^3 - \frac{1}{24} PH^4 \alpha_4^4 \\
 &\quad - \alpha_4 PH^4 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) \left[\frac{1}{2} \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) G_1 + G_2 - \frac{1}{2} \left(\alpha_4 - \frac{\alpha_5}{2} \right) G_3 - \frac{1}{8} - \frac{1}{6} \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 \right]
 \end{aligned}$$

$$= \frac{PH^4\alpha_4}{48} \left[-2(8\alpha_4^2 + 12\alpha_4\alpha_5 + 3\alpha_5^2)G_1 - 24(\alpha_4 + \alpha_5)G_2 + 2(4\alpha_4^2 - 3\alpha_5^2)G_3 \right. \\ \left. + (3\alpha_4 + 3\alpha_5 + 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 + 6\alpha_4\alpha_5^2 + \alpha_5^3) \right] \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \cdot \dots \quad (46)$$

式(15)、(45)、(46)から、たわみ量は

$$\begin{aligned}
y &= \frac{1}{EI_2} \left[\frac{1}{2} \left(-M_n + \frac{1}{8} PH^2 + R_{M1} h_1 \right) x^2 - \frac{1}{6} (R_N + R_{M1}) x^3 + \frac{1}{24} Px^4 + C_5 x + C_6 \right] \\
&= \frac{12}{Et_2^3} \left[\frac{1}{2} \left(-PH^2 G_2 + \frac{1}{8} PH^2 + PH^2 G_3 \alpha_4 \right) x^2 - \frac{1}{6} PH(G_1 + G_3) x^3 + \frac{1}{24} Px^4 \right. \\
&\quad + \frac{PH^3}{48} (2\alpha_4 + \alpha_5) \{ 6(2\alpha_4 + \alpha_5)G_1 + 24G_2 + 6(-2\alpha_4 + \alpha_5)G_3 - 3 - 4\alpha_4^2 - 4\alpha_4\alpha_5 - \alpha_5^2 \} x \\
&\quad + \frac{PH^4\alpha_4}{48} \{ -2(8\alpha_4^2 + 12\alpha_4\alpha_5 + 3\alpha_5^2)G_1 - 24(\alpha_4 + \alpha_5)G_2 + 2(4\alpha_4^2 - 3\alpha_5^2)G_3 \\
&\quad \left. + (3\alpha_4 + 3\alpha_5 + 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 + 6\alpha_4\alpha_5^2 + \alpha_5^3) \right] \\
&= \frac{P}{4Et_2^3} [3(-8G_2 + 1 + 8G_3\alpha_4)H^2 x^2 - 8(G_1 + G_3)Hx^3 + 2x^4 \\
&\quad + (2\alpha_4 + \alpha_5) \{ 6(2\alpha_4 + \alpha_5)G_1 + 24G_2 + 6(-2\alpha_4 + \alpha_5)G_3 - 3 - 4\alpha_4^2 - 4\alpha_4\alpha_5 - \alpha_5^2 \} H^3 x \\
&\quad + \alpha_4 \{ -2(8\alpha_4^2 + 12\alpha_4\alpha_5 + 3\alpha_5^2)G_1 - 24(\alpha_4 + \alpha_5)G_2 + 2(4\alpha_4^2 - 3\alpha_5^2)G_3 \\
&\quad \left. + (3\alpha_4 + 3\alpha_5 + 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 + 6\alpha_4\alpha_5^2 + \alpha_5^3) \right] H^4]
\end{aligned}$$

$x = h_1 + h_2 / 2$ でたわみ量が最大になる。式(47)から最大たわみ量は

$$y_{h1+h2/2} = \frac{P}{4Et_2^3} \left[3(-8G_2 + 1 + 8G_3\alpha_4)H^2 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^2 - 8(G_1 + G_3)H \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^3 + 2 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)^4 \right. \\ \left. + (2\alpha_4 + \alpha_5) \left\{ 6(2\alpha_4 + \alpha_5)G_1 + 24G_2 + 6(-2\alpha_4 + \alpha_5)G_3 - 3 - 4\alpha_4^2 - 4\alpha_4\alpha_5 - \alpha_5^2 \right\} H^3 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right) \right. \\ \left. + \alpha_4 \left\{ -2(8\alpha_4^2 + 12\alpha_4\alpha_5 + 3\alpha_5^2)G_1 - 24(\alpha_4 + \alpha_5)G_2 + 2(4\alpha_4^2 - 3\alpha_5^2)G_3 \right. \right. \\ \left. \left. + (3\alpha_4 + 3\alpha_5 + 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 + 6\alpha_4\alpha_5^2 + \alpha_5^3) \right\} H^4 \right] \\ = \frac{PH^4}{4Et_2^3} \left[3(-8G_2 + 1 + 8G_3\alpha_4) \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 - 8(G_1 + G_3) \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^3 + 2 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^4 \right. \\ \left. + (2\alpha_4 + \alpha_5) \left\{ 6(2\alpha_4 + \alpha_5)G_1 + 24G_2 + 6(-2\alpha_4 + \alpha_5)G_3 - 3 - 4\alpha_4^2 - 4\alpha_4\alpha_5 - \alpha_5^2 \right\} \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) \right. \\ \left. + \alpha_4 \left\{ -2(8\alpha_4^2 + 12\alpha_4\alpha_5 + 3\alpha_5^2)G_1 - 24(\alpha_4 + \alpha_5)G_2 + 2(4\alpha_4^2 - 3\alpha_5^2)G_3 \right. \right. \\ \left. \left. + (3\alpha_4 + 3\alpha_5 + 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 + 6\alpha_4\alpha_5^2 + \alpha_5^3) \right\} \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{PH^4}{4Et_2^3} \left[\left\{ -8 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^3 + 6(2\alpha_4 + \alpha_5)^2 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) - 2\alpha_4 (8\alpha_4^2 + 12\alpha_4\alpha_5 + 3\alpha_5^2) \right\} G_1 \right. \\
&\quad + \left. \left\{ -24 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 + 24(2\alpha_4 + \alpha_5) \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) - 24\alpha_4 (\alpha_4 + \alpha_5) \right\} G_2 \right. \\
&\quad + \left. \left\{ 24\alpha_4 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 - 8 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^3 + 12(-2\alpha_4 + \alpha_5) \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 + 2\alpha_4 (4\alpha_4^2 - 3\alpha_5^2) \right\} G_3 \right. \\
&\quad + \left. 3 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^2 + 2 \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right)^4 + (2\alpha_4 + \alpha_5)(-3 - 4\alpha_4^2 - 4\alpha_4\alpha_5 - \alpha_5^2) \left(\alpha_4 + \frac{\alpha_5}{2} \right) \right. \\
&\quad \left. + \alpha_4 (3\alpha_4 + 3\alpha_5 + 6\alpha_4^3 + 12\alpha_4^2\alpha_5 + 6\alpha_4\alpha_5^2 + \alpha_5^3) \right] \\
&= \frac{PH^4}{4Et_2^3} \left[(6\alpha_4\alpha_5^2 + 2\alpha_5^3)G_1 + 6\alpha_5^2G_2 + 2\alpha_5^3G_3 - \left(3\alpha_4^2\alpha_5^2 + 2\alpha_4\alpha_5^3 + \frac{3}{4}\alpha_5^2 + \frac{3}{8}\alpha_5^4 \right) \right] \\
&\quad \cdots \cdots \cdots \quad (48)
\end{aligned}$$

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
立体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎メートル	m^{-1}
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m^{-1} \cdot s^{-1}$ ^(b)	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2}$	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}	s^{-1}
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$N \cdot m$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率、放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷、電気量	クーロン	C	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	フアラード	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	シemens	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束密度	ウェーバー	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^\circ C$	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
光度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
(放射性核種)放射能	ベクレル	Bq	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
吸収線量、質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 $m^\circ C$ のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)、質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	Gy	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) rad$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) rad$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L=1 dm^3=10^{-3} m^3$
トン	t	$1t=10^3 kg$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) ln10(Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バール	bar	$1 bar=0.1 MPa=100 hPa=10^5 Pa$
オンストローム	Å	$1 Å=0.1 nm=10^{-10} m$
ペニン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボルト	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 cm^2/s=10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッード	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホタル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1 cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トルル	Torr	$1 Torr=(101.325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101.325 Pa$
カラリ	cal	$1 cal=1 J=10^4 erg$
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \mu m=10^{-6} m$