JAERI-M
92-094

核融合実験炉(ＩＴＥＲ)クライオスタット及び貫通部構造設計

１９９２年７月

沢　　正史・金森　直和・清水　克祐・野村由紀夫
大川　慶直・柴沼　　清・多田　栄介

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

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

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行　日本原子力研究所
印　　刷　日立高速印刷株式会社

JAERI－M 92－094

核融合実験炉（ITER）クライオスタット及び貫通部構造設計

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部
沢　正史[+]・金森　直和・清水　克祐[+]・野村由紀夫[+]
大川　慶直[+]・柴沼　清・多田　栄介

（1992年6月2日受理）

国際熱核融合実験炉（ITER）は，日本，米国，EC及びロシアの4極協力で進められている計画であり，既に3年間にわたる概念設計活動を通して炉概念が構築され，主要な構成機器の基本構造評価が成されている。本件は，炉の中心を構成する主要機器の一つであるクライオスタットについて，日本提案のコンクリート製クライオスタットを基本として，遠隔による分解組立性と遮蔽機能を両立する各部構造の検討結果を取り纏めたものである。本件では，クライオスタット上部蓋，各種ポート貫通部（ベローズ，大型ゲート弁を含む）及び上部ポート冷却配管配置を主な検討対象とした。

上部蓋については，ポロイダル磁場コイルの交換を考慮し，遠隔操作で全体的に着脱可能な構造を採用すると共にブランケットの分解組立の際にクライオスタット上部へのアクセスを可能するために生体遮蔽の機能を兼ね備える構造とした。上部ポートについては，ブランケットの遠隔操作による分解組立性，冷却配管配置，中性子ストリーミング効果を考慮した開口部構造とし，クライオスタット貫通部の真空シールには熱膨張吸収のためベローズを配置した。また，その他のポート（水平ポート，NBIポート，及び排気ポート等）についても，トロイダル磁場コイル及び生体に対する遮蔽体の構造・配置を工夫することによって，ポート自身の遠隔操作による分解組立性を確保すると共に貫通部にベローズを配置することによって，熱膨張の吸収が可能な構造とした。

これらのポート貫通部に配置するベローズは，いづれも直線部を有する非円形断面形状となり，内外圧力荷重に対する座屈防止のための補強を施す構造とした。またポート貫通部は，プラズマ真空と分離するためのゲート弁を配置する構造となるが，要素開発の一環としてゲート弁のシール機構を試作し，繰り返し試験によりそのシール性能を確認した。更に，上部ポートについては，ダイバータ及びブランケットの分解組立シナリオと整合し，プラズマ計測機器の設置を加味した冷却配管配置を設定し，熱応力解析により構造健全性に

那珂研究所：〒311－01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801－1
＋　ITER開発室

対する見通しを得た。

以上の様に，クライオスタット及びその貫通部に対して遠隔保守性及び遮蔽性能を両立する構造概念を明かとしたが，今後は詳細解析並びに要素開発を並行させ，各部詳細構造を決定する予定である。

Structural Design of Cryostat and Port Penetration of International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER)

Masafumi SAWA[+], Naokazu KANAMORI, Katsuhiro SHIMIZU[+]
Yukio NOMURA[+], Yoshinao OHKAWA[+], Kiyoshi SHIBANUMA
and Eisuke TADA

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 2, 1992)

Preliminary structural design of the ITER cryostat and port penetration based on concrete cryostat was conducted and the structural concept compatible with remote handling and nuclear shielding is proposed. The ITER cryostat was mainly composed of side wall, upper cover, upper port, horizontal port, vacuum port, cooling pipe penetration. The upper cover is designed to be fully detachable structure by remote handling for assembling/disassembling the poloidal field coils. In addition, the upper cover provides the biological shield for personal access for the blanket maintenance operation. The upper port is designed to meet the requirements of cooling pipe penetration, blanket maintenance and biological shield. The layout of the cooling pipe is defined by simple thermal stress analysis.

There are 16 horizontal ports arranged around the cryostat to provide the access of heating & current drive system, fuel injection, blanket test modules, vacuum pump and remote handling manipulators. Each port should have the biological shield and bellows to prevent an excessive thermal stress due to thermal expansion. These bellows are

---

+ Department of ITER Project

non-circular cross-section and the reinforced structure to prevent buckling is proposed.

A partial model of the seal mechanism applicable to large gate valves connected to the horizontal ports was fabricated and the basic performance under cyclic loading has been investigated.

As a whole, the design concept of the cryostat and port penetration has been successfully developed and more detailed analysis and critical technology development will be conducted in the Engineering Design Phase.

Keywords: Fusion, International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER)
Cryostat, Port Penetration, Non-circular Bellows, Gate Valve

目　　次

1. はじめに …… 1
2. 設計条件 …… 1
3. 構造設計の特徴 …… 1
4. 各部構造検討 …… 5
4.1 クライオスタット側壁 …… 5
4.2 クライオスタット上部蓋構造 …… 7
4.3 上部ポート構造 …… 16
4.4 水平ポート構造 …… 22
4.5 下部ポート構造 …… 38
4.6 冷却配管配置 …… 45
4.7 大口径ベローズ …… 81
5. 大型ゲート弁試作開発 …… 86
6. 今後の課題 …… 98
6.1 各部構造設計 …… 98
6.2 大型ゲート弁 …… 99
7. まとめ …… 101
謝　辞 …… 101
参考文献 …… 102

Contents

1. Introduction 1
2. Design Conditions 1
3. Structural Design Features 1
4. Structural Design 5
4.1 Cryostat Side Wall 5
4.2 Cryostat Upper Cover 7
4.3 Upper Port 16
4.4 Horizontal Port 22
4.5 Vacuum port 38
4.6 Cooling Piping Arrangement 45
4.7 Non-circular Bellows 81
5. Large Gate Valve Development & Test 86
6. Critical Issues 98
6.1 Cryostat and Penetrations 98
6.2 Large Gate Valve 99
7. Conclusion 101
Acknowledgement 101
References 102

1. はじめに

クライオスタットは，図1.1に示す様にトロイダル及びポロイダル磁場コイル，ダイバータ及びブランケット等の炉内構造物，真空容器を収納する円筒容器であり，超電導コイルの断熱真空の確保，生体遮蔽境界，更にトリチウム格納の第2次障壁を形成するためのものである。超電導コイルの断熱真空の観点から，クライオスタット内側の通常圧力は10^{-5}mbar程度に保たれ，4Kという極低温で動作する超電導コイル及びその支持構造物に対する過大な熱侵入を抑えることによって，ヘリウム冷凍機に対する要求を合理的な水準に維持することが出来る。

国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計では，金属製クライオスタットが主案として，検討されたが，ポート貫通部の遮蔽が複雑になることから，コンクリート製クライオスタットが副案として提案された。コンクリート製の場合，真空保持のために表面にライニングを施す構造となるが，生体遮蔽と建家強度壁を兼用することが可能であり，ポート貫通部の遮蔽構造を簡易にすると同時に建家の小型化が図れる特徴を有している。

本件では，コンクリート製クライオスタットを基本として，遠隔操作による分解組立性を考慮した上部蓋及び各種ポート（上部，水平及び排気ポート）構造の設計検討結果について報告する。また，各ポートに取り付けられるベローズ及びゲート弁等の周辺機器についても構造検討を実施し，ゲート弁については要素開発の一環として実施したシール機構の特性試験結果を取り纏めた。

2. 設計条件

ITER概念設計（CDA）で定めたクライオスタットの設計条件を表2.1に示す。（ITER DOCUMENTATION SERIES, NO28より）

3. 構造設計の特徴

今回の検討では，クライオスタット円筒胴部を鉄筋コンクリート製とし，真空境界を確保するために円筒胴部の内側に厚さ15mm程度のステンレス製ライニング設置することとした。また，クライオスタット天井（上部蓋）は，ポロイダル磁場コイルの分解組立の観点から着脱可能であることが要求される。このため，上部蓋を円周方向に分割可能な鋼製のリブと水タンクから成る構造とし，ステンレス鋼と水の組み合わせで生体遮蔽を満足すると共に水タンクを独立に撤去することによって上部蓋の分解組立の簡易化を図るものとした。

クライオスタット貫通部の主たるものは，上部ポート，加熱，計測水平ポート及び排気ポートである。上部ポートは，ブランケット及びダイバータ等の炉内構造物からの冷却配管の貫通，

1. はじめに

クライオスタットは，図1.1に示す様にトロイダル及びポロイダル磁場コイル，ダイバータ及びブランケット等の炉内構造物，真空容器を収納する円筒容器であり，超電導コイルの断熱真空の確保，生体遮蔽境界，更にトリチウム格納の第2次障壁を形成するためのものである。超電導コイルの断熱真空の観点から，クライオスタット内側の通常圧力は10^{-5}mbar程度に保たれ，4Kという極低温で動作する超電導コイル及びその支持構造物に対する過大な熱侵入を抑えることによって，ヘリウム冷凍機に対する要求を合理的な水準に維持することが出来る。

国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計では，金属製クライオスタットが主案として，検討されたが，ポート貫通部の遮蔽が複雑になることから，コンクリート製クライオスタットが副案として提案された。コンクリート製の場合，真空保持のために表面にライニングを施す構造となるが，生体遮蔽と建家強度壁を兼用することが可能であり，ポート貫通部の遮蔽構造を簡易にすると同時に建家の小型化が図れる特徴を有している。

本件では，コンクリート製クライオスタットを基本として，遠隔操作による分解組立性を考慮した上部蓋及び各種ポート（上部，水平及び排気ポート）構造の設計検討結果について報告する。また，各ポートに取り付けられるベローズ及びゲート弁等の周辺機器についても構造検討を実施し，ゲート弁については要素開発の一環として実施したシール機構の特性試験結果を取り纏めた。

2. 設計条件

ITER概念設計（CDA）で定めたクライオスタットの設計条件を表2.1に示す。(ITER DOCUMENTATION SERIES, NO28より)

3. 構造設計の特徴

今回の検討では，クライオスタット円筒胴部を鉄筋コンクリート製とし，真空境界を確保するために円筒胴部の内側に厚さ15mm程度のステンレス製ライニング設置することとした。また，クライオスタット天井（上部蓋）は，ポロイダル磁場コイルの分解組立の観点から着脱可能であることが要求される。このため，上部蓋を円周方向に分割可能な鋼製のリブと水タンクから成る構造とし，ステンレス鋼と水の組み合わせで生体遮蔽を満足すると共に水タンクを独立に撤去することによって上部蓋の分解組立の簡易化を図るものとした。

クライオスタット貫通部の主たるものは，上部ポート，加熱，計測水平ポート及び排気ポートである。上部ポートは，ブランケット及びダイバータ等の炉内構造物からの冷却配管の貫通，

1. はじめに

クライオスタットは，図1.1に示す様にトロイダル及びポロイダル磁場コイル，ダイバータ及びブランケット等の炉内構造物，真空容器を収納する円筒容器であり，超電導コイルの断熱真空の確保，生体遮蔽境界，更にトリチウム格納の第2次障壁を形成するためのものである。超電導コイルの断熱真空の観点から，クライオスタット内側の通常圧力は10^{-5}mbar程度に保たれ，4Kという極低温で動作する超電導コイル及びその支持構造物に対する過大な熱侵入を抑えることによって，ヘリウム冷凍機に対する要求を合理的な水準に維持することが出来る。

国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計では，金属製クライオスタットが主案として，検討されたが，ポート貫通部の遮蔽が複雑になることから，コンクリート製クライオスタットが副案として提案された。コンクリート製の場合，真空保持のために表面にライニングを施す構造となるが，生体遮蔽と建家強度壁を兼用することが可能であり，ポート貫通部の遮蔽構造を簡易にすると同時に建家の小型化が図れる特徴を有している。

本件では，コンクリート製クライオスタットを基本として，遠隔操作による分解組立性を考慮した上部蓋及び各種ポート（上部，水平及び排気ポート）構造の設計検討結果について報告する。また，各ポートに取り付けられるベローズ及びゲート弁等の周辺機器についても構造検討を実施し，ゲート弁については要素開発の一環として実施したシール機構の特性試験結果を取り纏めた。

2. 設計条件

ITER概念設計（CDA）で定めたクライオスタットの設計条件を表2.1に示す。（ITER DOCUMENTATION SERIES, NO28より）

3. 構造設計の特徴

今回の検討では，クライオスタット円筒胴部を鉄筋コンクリート製とし，真空境界を確保するために円筒胴部の内側に厚さ15mm程度のステンレス製ライニング設置することとした。また，クライオスタット天井（上部蓋）は，ポロイダル磁場コイルの分解組立の観点から着脱可能であることが要求される。このため，上部蓋を円周方向に分割可能な鋼製のリブと水タンクから成る構造とし，ステンレス鋼と水の組み合わせで生体遮蔽を満足すると共に水タンクを独立に撤去することによって上部蓋の分解組立の簡易化を図るものとした。

クライオスタット貫通部の主たるものは，上部ポート，加熱，計測水平ポート及び排気ポートである。上部ポートは，ブランケット及びダイバータ等の炉内構造物からの冷却配管の貫通，

及び炉内構造物の分解組立のために用いられる。また，水平ポートは，加熱装置，計測装置，ブランケット試験モジュール，炉内遠隔保守機器などのアクセスに用いられ，排気ポートは，真空排気系と接続される。上部ポートについては，ブランケットの分解組立時に極力作業員のアクセスを可能とし，配管の切断溶接作業を行える様に大口径の開口部構造とした。これにより，クライオスタット上部蓋を取り外すことなく，真空容器内部からブランケットの引き抜き，装填が可能となり，遠隔操作による保守性を高めた。水平ポート及び排気ポートについては，コンクリート製円筒胴との整合性を確保すると共に熱膨張吸収機能の確保及び遠隔操作による分解組立が可能な構造・配置とした。

表 2.1 CRYOSTAT VESSEL REQUIREMENTS

Inner radius	13m
Outer radius	13.7m max
Inside total height	27.3m
Operating pressure inside	10^{-5}mbar
outside	1 bar abs
Accidental pressure inside	2.0 bar abs (1 bar design p.)
outside	1.3 bar abs (1.3 bar design P.)
Operating temperature	20-35°C
Maximum temperature	TBD
Maximum leak rate	10^{-5}mbar.l.s^{-1}
Toroidal electrical resistance of cylindrical section	equivalent of 10 mm of SS
Minimum electrical resistance for all ties to VV	100 micro Ohm/sector
Port requirements*:	
1) Ports interfacing to vacuum vessel:	
16 Midplane-horizontal	3.3m(W)x5.8m(H)
16 upper side-horizontal	3.1m Dia
16 lower side-pumping	3.3m Dia
16 top head-vertical	1 m dia permanent and a large trapezoidal cover for blanket segments replacement
16 boottom head-vertical	1 m Dia
20 Other Ports/penetration:	
1 top head-centre	6.3m Dia
1 boottom head-centre	14m Dia
TBD piping penetrations	TBD
TBD coil elect. leads	TBD

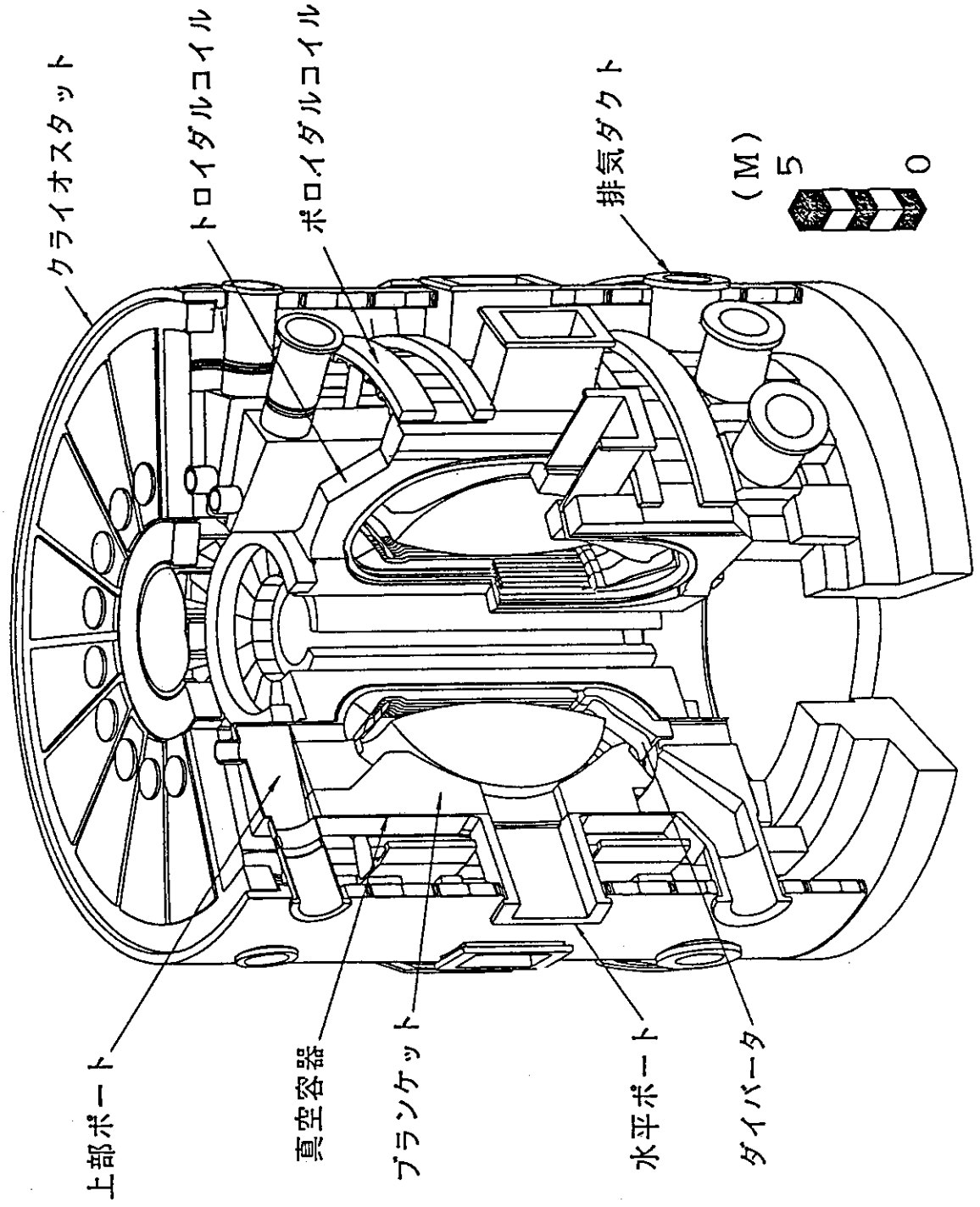


図1.1　核融合実験炉外観

4. 各部構造検討

4.1 クライオスタット側壁

クラスオスタットに作用する圧力は以下の通りである。

- 運転圧力　内圧　10^{-5}mbar
  　　外圧　1 bar abs
- 事故時圧力　内圧　2 bar abs（設計圧力 1bar）
  　　外圧　1･3 bar abs（設計圧力 1・3bar）

従ってクライオスタット側壁は運転時外圧1bar，事故外圧1・3barで設計する必要がある。（事故時内圧は，上蓋自身の遮蔽体／構造材重量と相殺する。）クライオスタット側壁は，軽水炉のコンクリート格納容器と同一の概念であり，当該部のコンクリート及びライナの設計は，軽水炉の設計基準である，“原子力用コンクリート格納容器設計指針”を準用出来る可能性がある。

ライナは一定のピッチで設置したライナアンカによりコンクリート壁に固定される。ライナの仕様は，格納容器設計指針に基ずき設定する事が可能であり，ライナの材質をSUS316，ライナアンカに囲まれるライナの寸法を1m×2mと仮定した概略検討では，ライナの必要厚さは15mm程度であり，軽水炉のライナ板厚である10mmと大差ない値である。クライオスタット側壁の概念を図4.1.1に示す。
(ITER DOCUMENTATION SERIES NO28より)

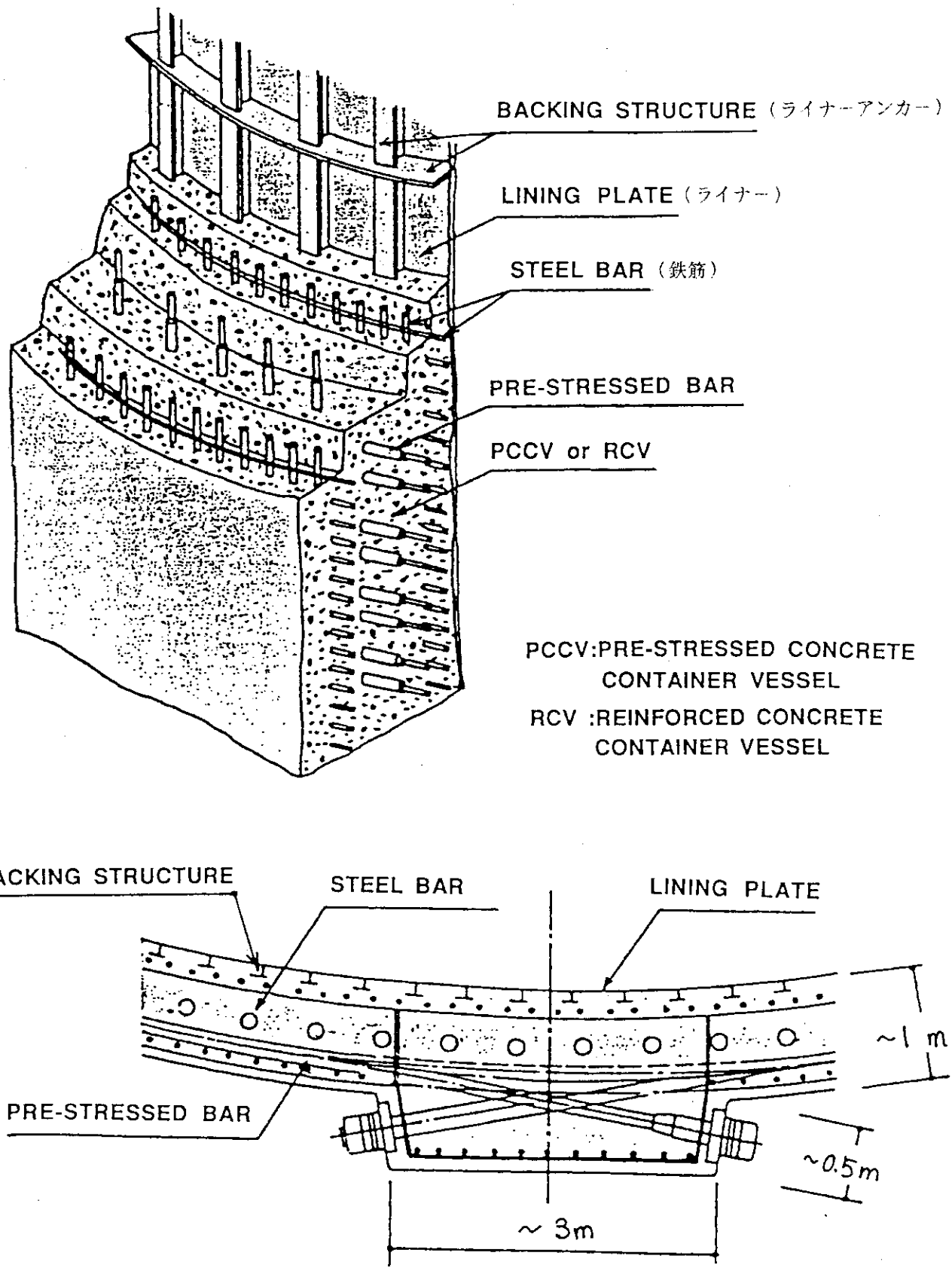


図 4.1.1　コンクリートクライオスタット円筒胴概念図

4.2 クライオスタット上部蓋構造

(1) 前提条件

クライオスタット上部蓋構造の検討に於いては，以下を前提条件とした。

a) クライオスタット上部蓋全体は，ポロイダル磁場コイルの分解組立のために，着脱が容易な構造とする。

b) ブランケットの分解組立時の上部ポートへのアクセスを確保するためにクライオスタット上部蓋に遮蔽構造を組み込む事とする。ステンレス鋼リブと水タンクから成る遮蔽構造とし，SUS20％，水80％の構成比で厚さ1500mmとする。また，上部ポート開口部周囲には，SUS80％，水20％，厚さ750mmの遮蔽構造を設置する。

c) クライオスタット上部蓋中心部は，中心ソレノイド・コイルの分解組立のために，独立に着脱可能な構造とする。

d) クライオスタットの着脱は，すべて遠隔機器にて行う。

(2) 荷重条件

クライオスタット上部蓋に作用する荷重条件は以下の通りである。

a) 外圧荷重　3185トン

b) 遮蔽体／構造材重量　3400トン

c) ブランケットメンテナンスキャスク（ブランケット込み）　300トン

(3) 基本構造

今回検討したクライオスタットの基本構造を図4.2.1～図4.2.7に示す。クライオスタット上部蓋の構造は，ITER概念設計と同様な考え方を適用し，クライオスタットの高さを削減するために，上部蓋は平板構造とした。上部蓋平板のうち，上部ポート用開口部以外の部分は遮蔽上の要求から，厚さ1500mmの水タンクとし，タンク天井板及び底板の板厚は150mmとした。クライオスタット上部蓋中心部は，ボルトにて周辺の上部蓋に締結し，中心ソレノイド・コイルの分解組立のため，単独で着脱可能とした。クライオスタット上部蓋を着脱する際に使用する天井クレーンは，容量800トンであり，クライオスタット上部蓋全体を一度に取り外す事は出来ない。また一度に取り外すと置き場所の問題もあり，分割型とすることとした。クライオスタット上部蓋中心部以外の周辺部は，円周方向に16セグメントに分割し，各々ボルトにてクライオスタット円筒胴部に締結する構造とした。上部ポートの外側の遮蔽体は，単独で着脱可能であり，各セグメントを着脱する際の，クライオスタット円筒胴との締結ボルトへのアクセス空間を確保する。各セグメントの主たる強度部材は，セクターの両わきに設置する放射状のリブである。放射状リブの付け根は中立軸を境にして，引張応力と圧縮応力が逆転する。従ってクライオスタット上部蓋セグメント取り付け用として，2種類のボルトを上下左右に配置するものとした。中立軸より上のボルトが引張が作用するボルトであり，中立軸より下のボルトが圧縮が作用するボルトである。中立軸より下のボルトは，クライオスタット側受板とクライオ

スタット上部蓋セグメント間のギャップを調整する機能も考慮した。

(4) 強度検討

クライオスタット天井の強度検討に於いては，軽水炉の設計基準である“原子力設備の技術基準”を参照した。本技術基準によれば，クライオスタットは第2種容器または第3種容器に該当すると考えられる。しかしながらクライオスタットの上部蓋の構造は通常の第2種容器または第3種容器の構造規格を満足しない。そこで，本件では応力解析により設計する第1種容器の考え方に準拠し1次応力の評価を実施した。

応力評価においては主たる強度部材である放射状リブに着目し，放射状リブを32本の片持梁に置き換えて，1本の梁に外圧，遮蔽体／構造材重量の32分の1及びブランケットメンテナンスキャスクの重量300トンを負荷した場合について検討を実施した。評価結果は以下の通りである。

$$PL + Pb = 4.7Kg/mm^2 < 1.5Sm = 21Kg/mm^2$$

よってクライオスタット上部蓋は，現状の構造で充分な強度を有しており，遮蔽機能及び分解組立性も両立可能であることが明らかとなった。

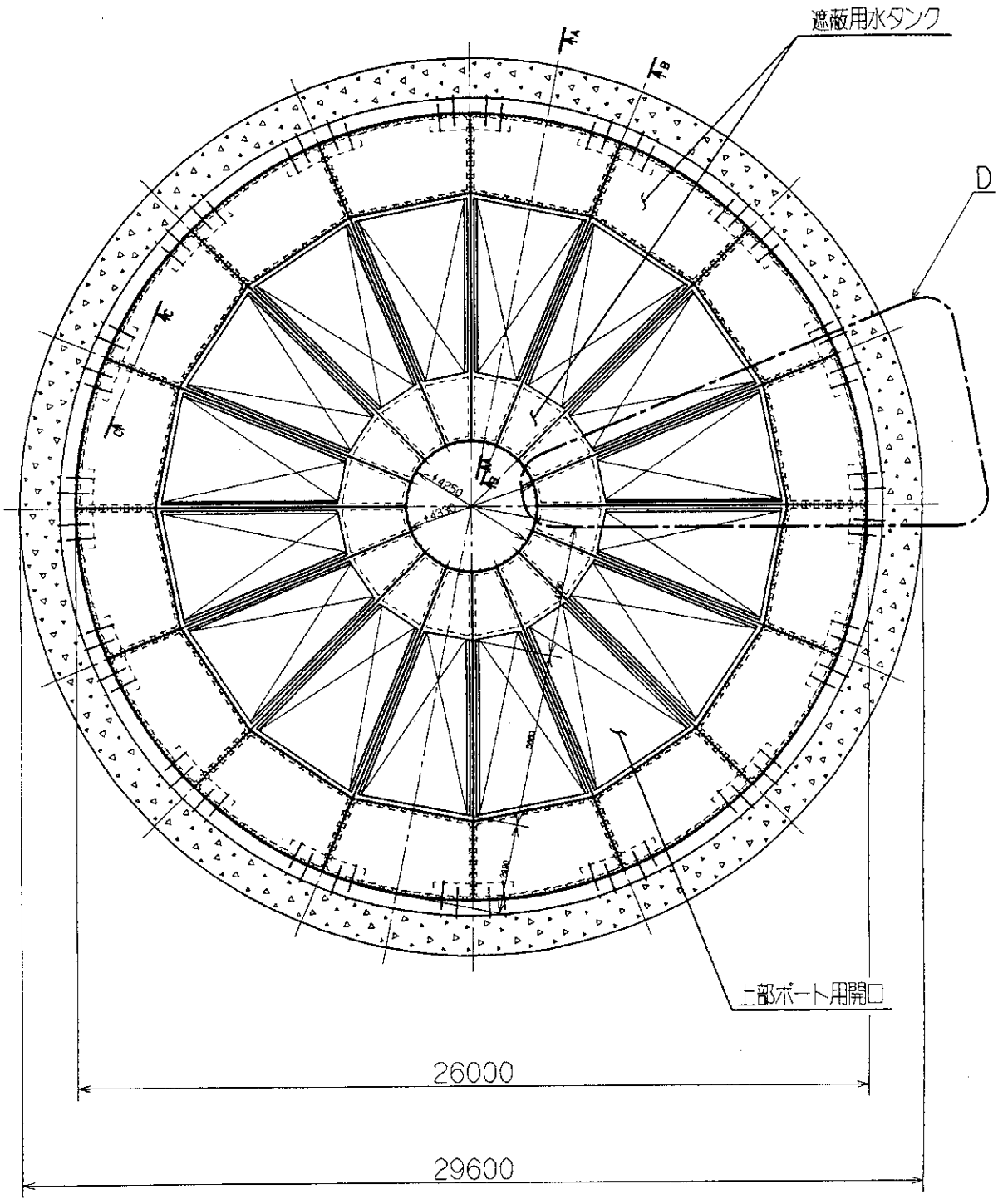


図 4.2.1　クライオスタット上部蓋平面図

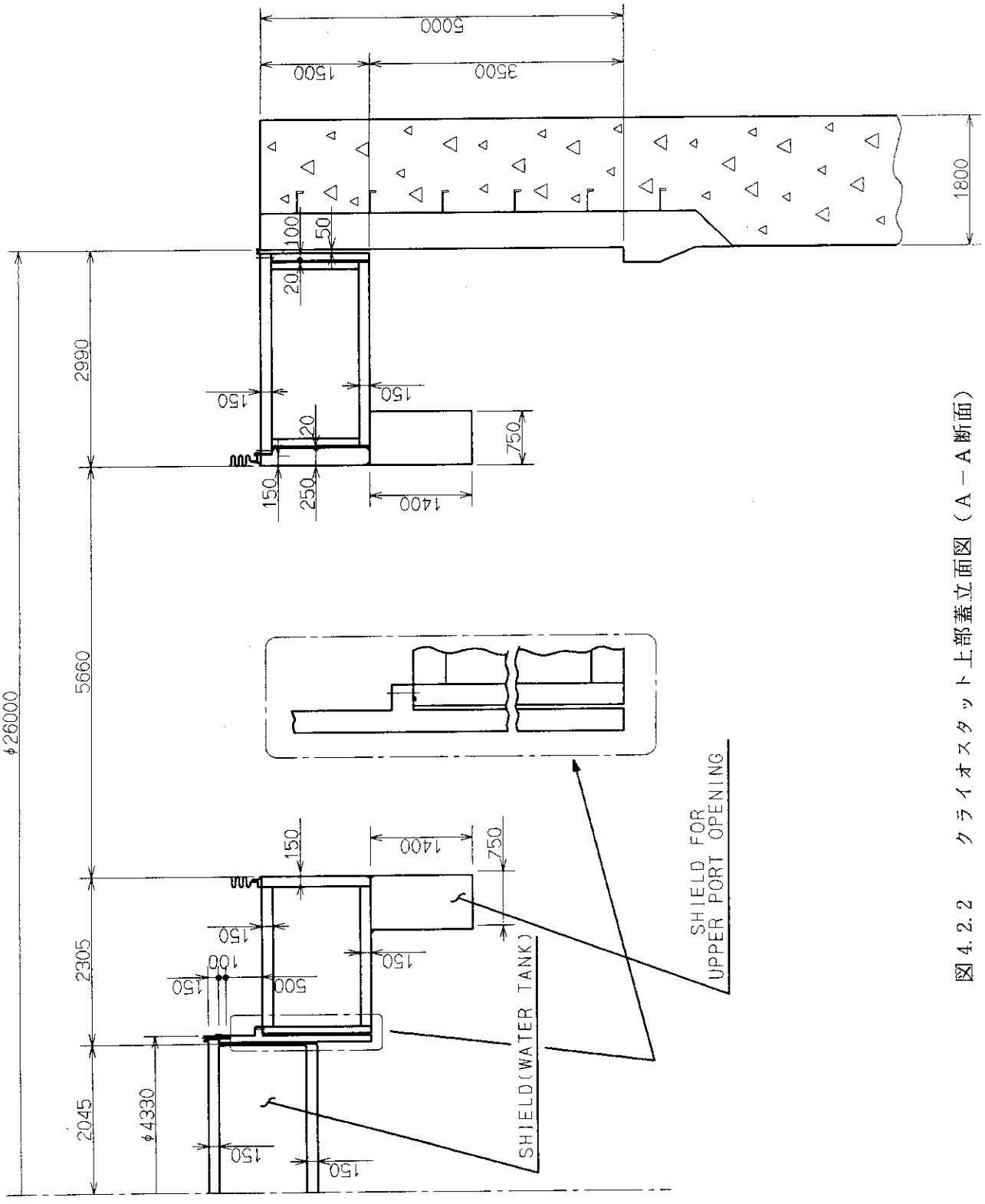


図4.2.2　クライオスタット上部蓋立面図（A－A断面）

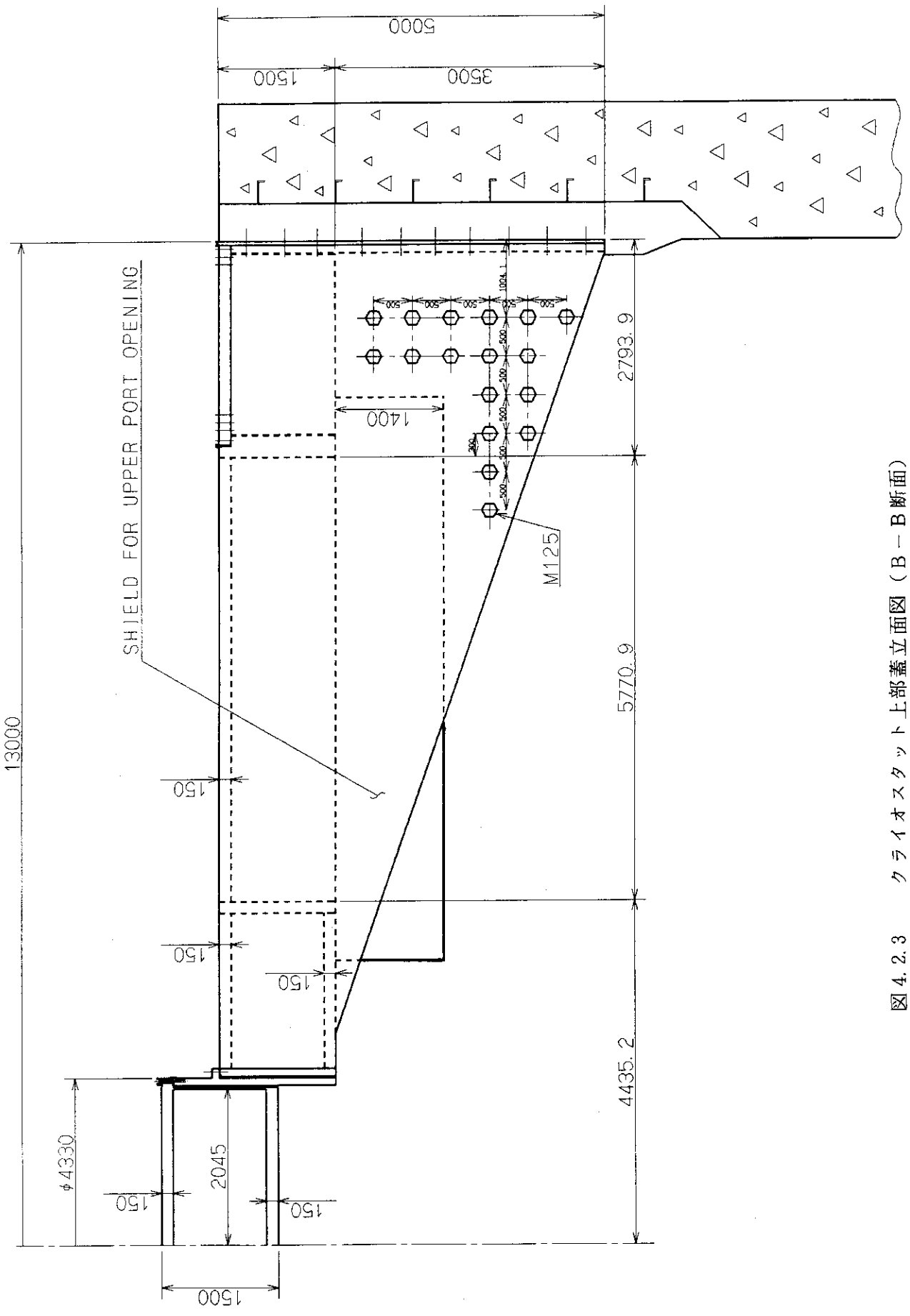


図 4.2.3　クライオスタット上部蓋立面図（B－B断面）

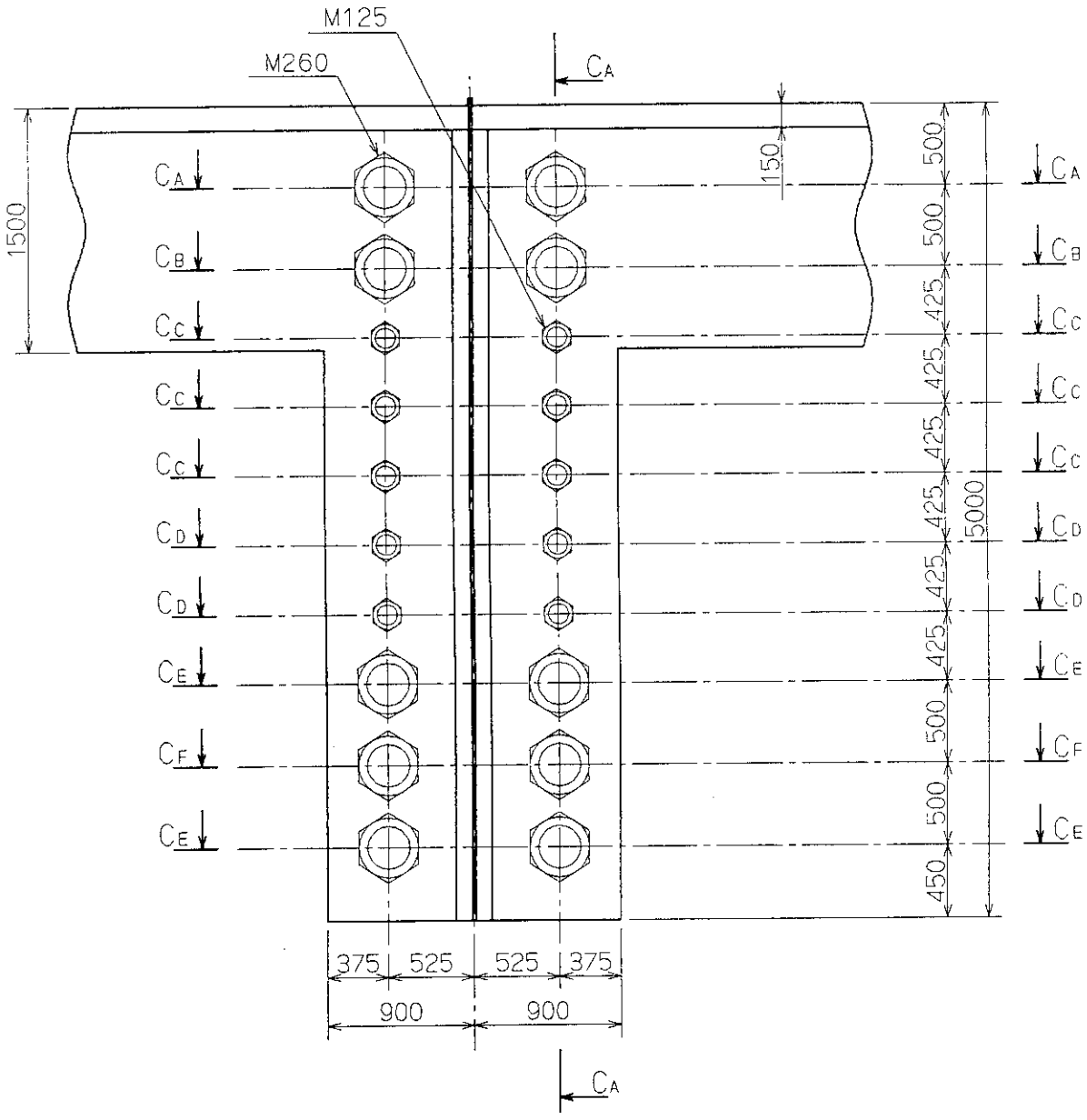


図 4.2.4　　クライオスタット上部蓋取付用ボルト配置図（C－C矢視）

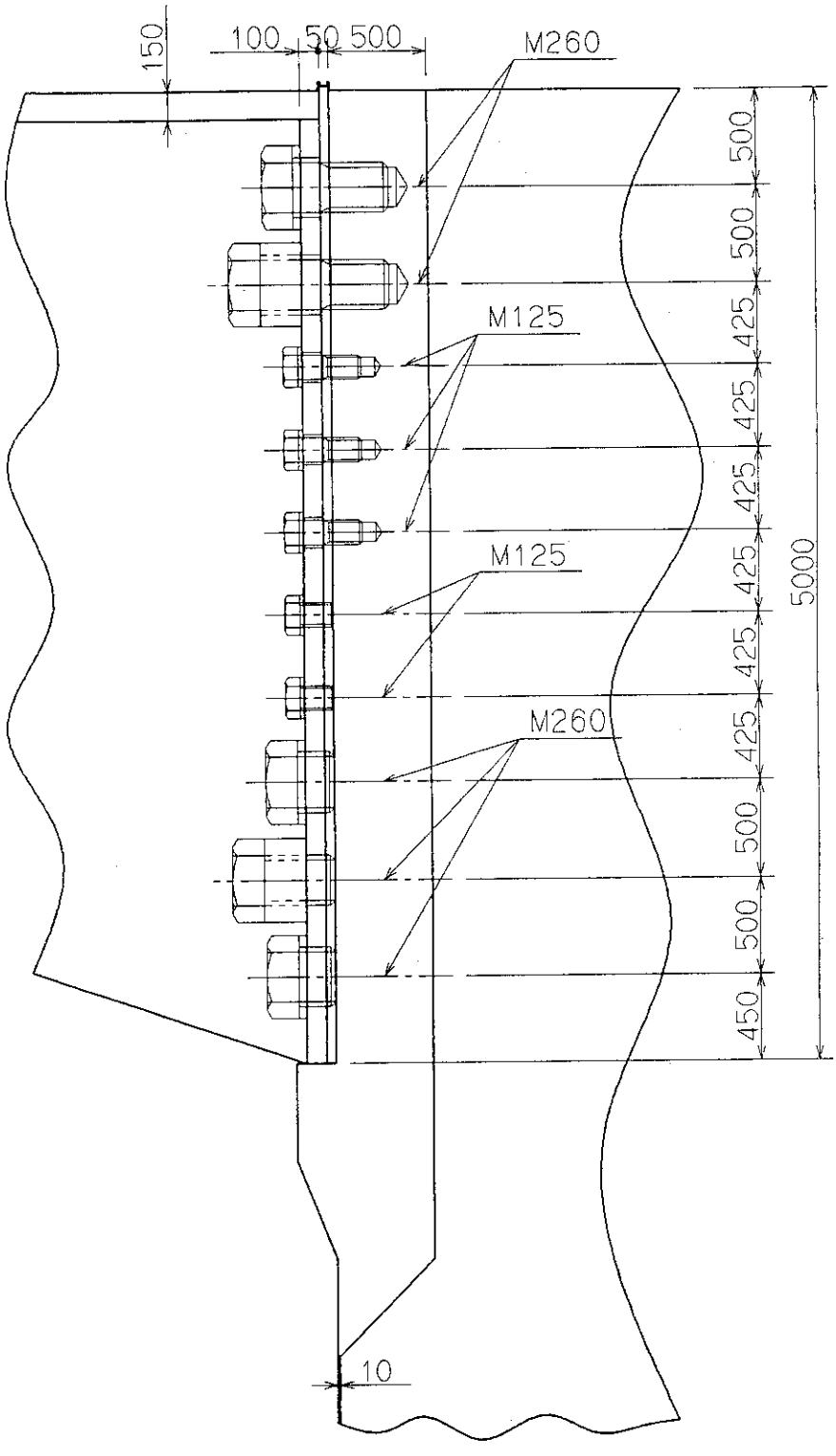


図 4.2.5　クライオスタット上部蓋取付用ボルト配置図（ＣＡ－ＣＡ矢視）

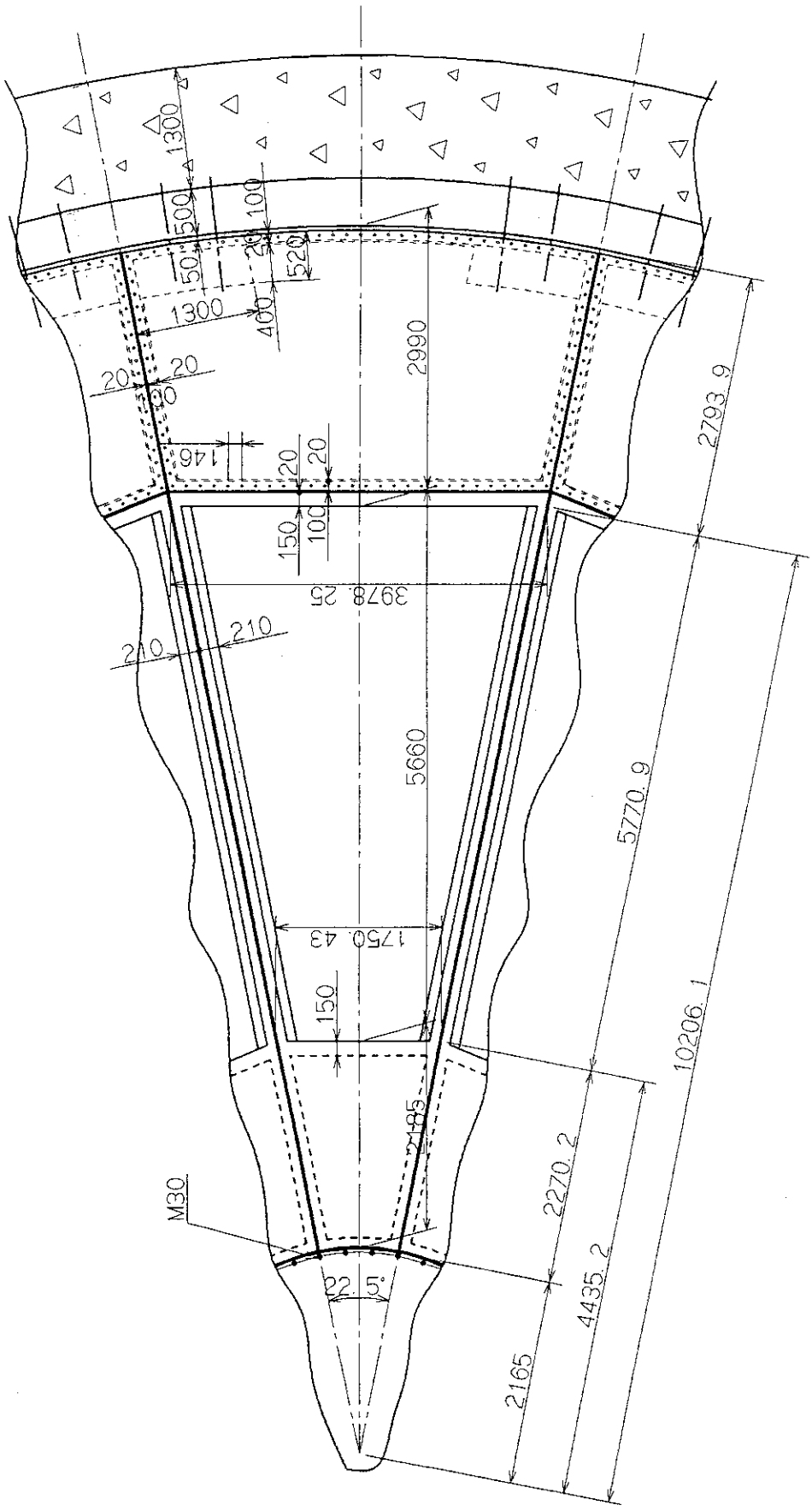


図 4.2.6　クライオスタット上部蓋平面詳細図（D部詳細）

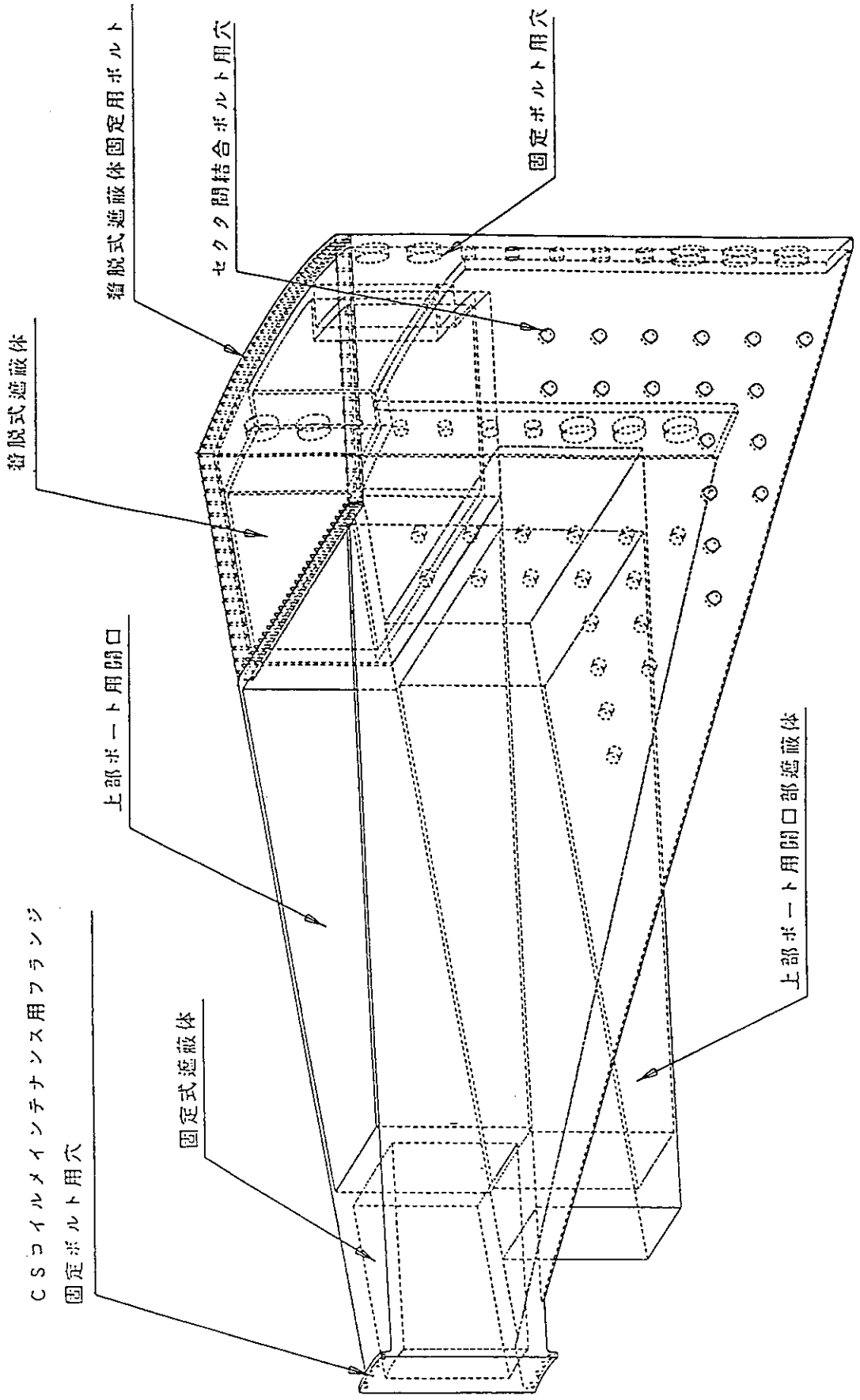


図4.2.7　クライオスタット上部蓋鳥瞰図（１セクター分）

4.3 上部ポート構造

上部ポートは主として，真空容器内に装着されているブランケット，及び炉内コイル等の分解組立，及び計測等の遠隔保守用開口部として利用される。本件ではこれらの作業性を考慮して，大開口部を確保するポート構造の製作性，他機器との整合性に着目して構造の検討を行った。

(1) 設計条件

a)	使用温度：	Max.	180	℃
b)	使用圧力：	Max.	1.5	MPa
c)	荷重条件：			
	・事故時内圧		0.2	MPa
	・ディスラプション時の電磁力	TBD		
	・地震	TBD		
		(垂直：0.2G，水平：0.3G)		

(2) 基本構造

上部ポートの基本構造を図4.3.1～5に示す。上部ポートは真空容器に設けられたポート台座に溶接接続され，クライオスタットとは熱伸縮吸収用台形形状の大型ベローズを介して取付けられる。上部ポート部の収納物は主として遮蔽体上部プラグ類，ブランケット上部構造体部が収納されており，これらとの間隙，及びそれぞれの部品の隙間は，設計上20mmを保って設定される構造である。また，ポート部は真空容器内の真空雰囲気とクライオスタット建屋内雰囲気を隔離する部分であり，同真空雰囲気とは二重真空シール構造となるよう二重の閉止板を配置した。閉止板はそれぞれ外圧，荷重等に耐えるボルト締結で取付けられ，真空境界はその内側でリップ溶接による溶接シールで確保するものとした。

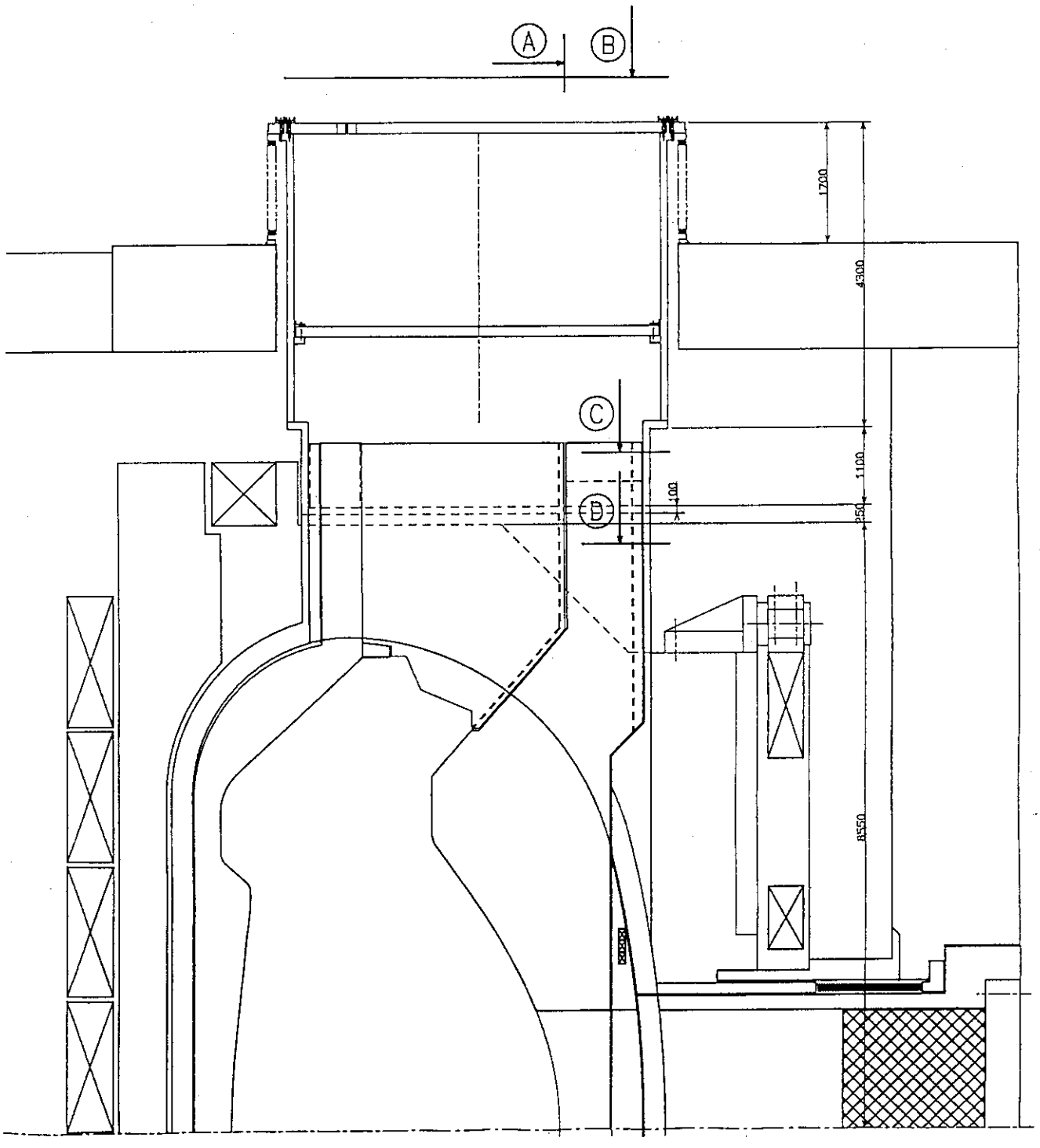


図 4.3.1　　上ポート構造図（ポロイダル断面）

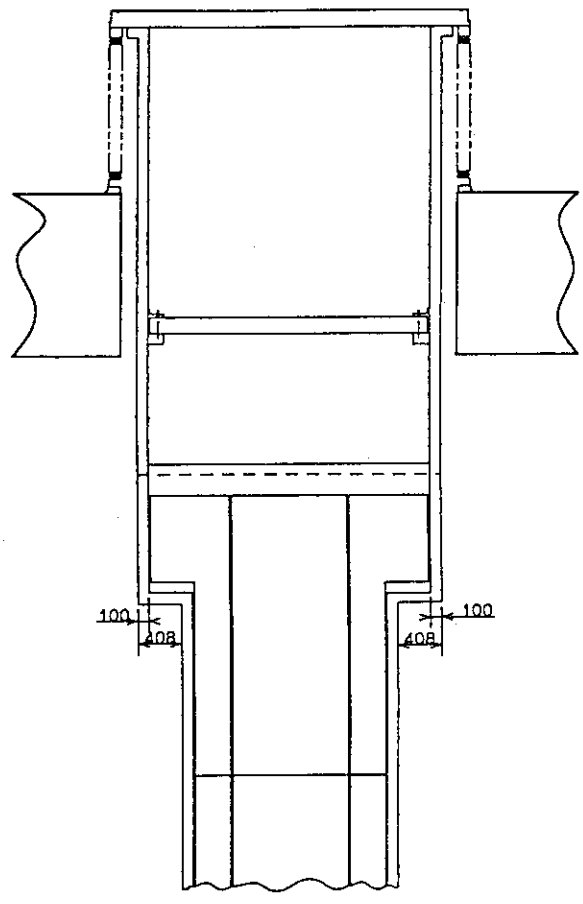


図 4.3.2　　上ポート構造図（トロイダル断面，Ⓐ部）

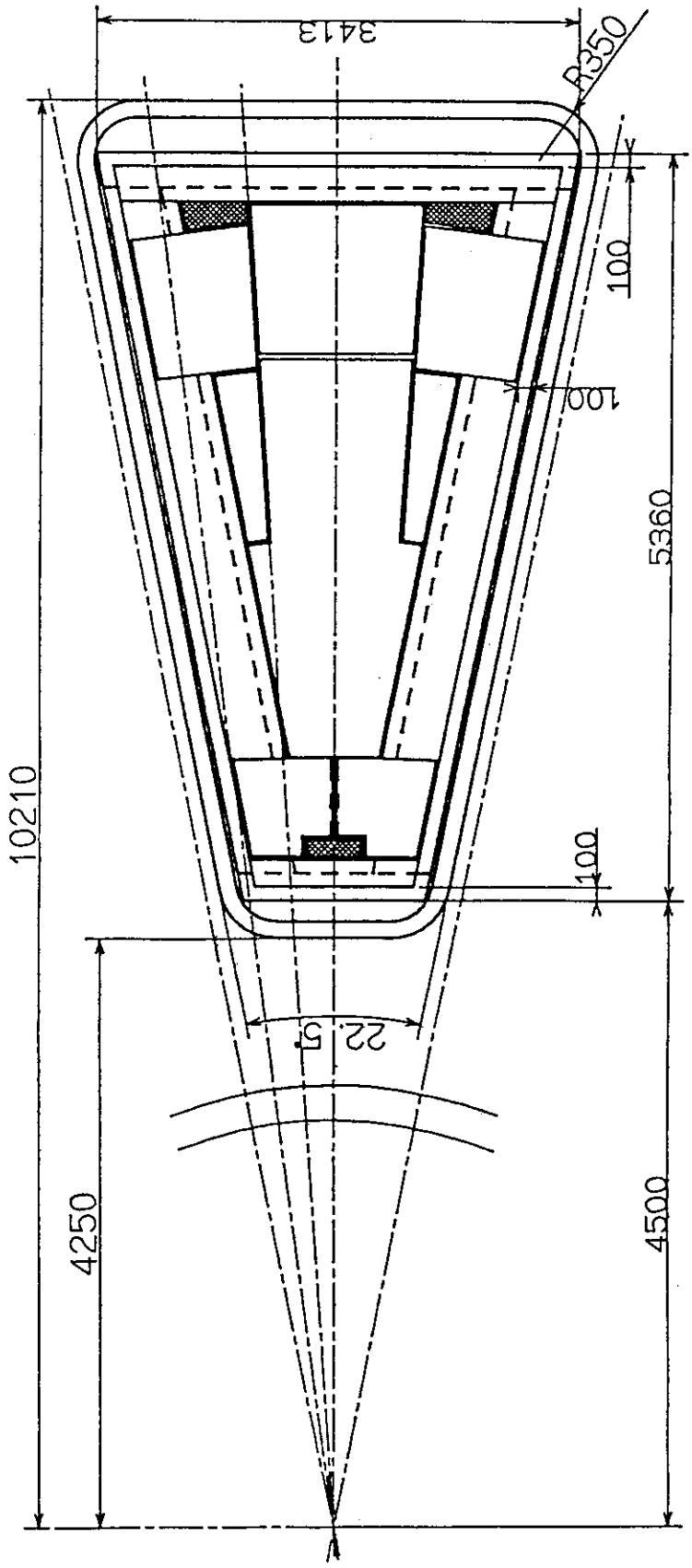


図 4.3.3　上ポートト構造図（トロイダル断面，Ⓑ部）

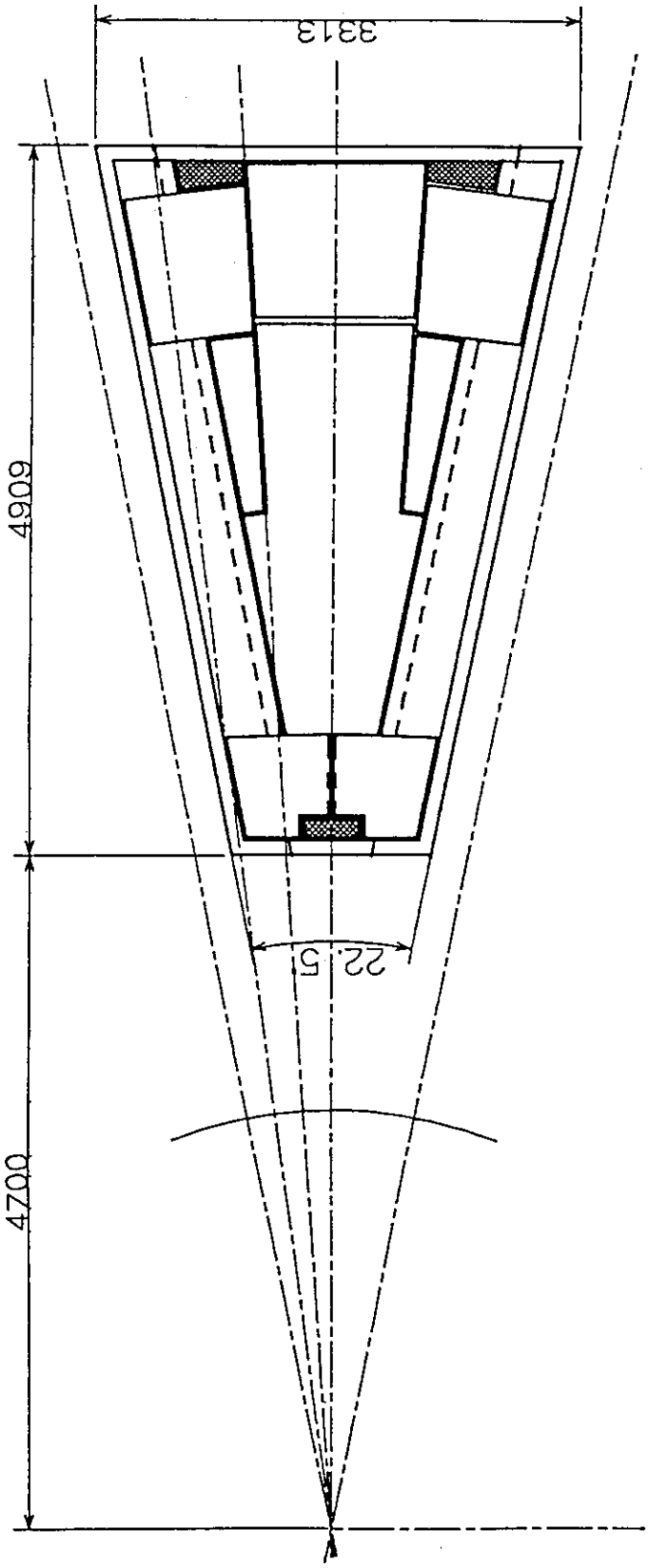


図 4.3.4　上ポート構造図（水平断面，◎部）

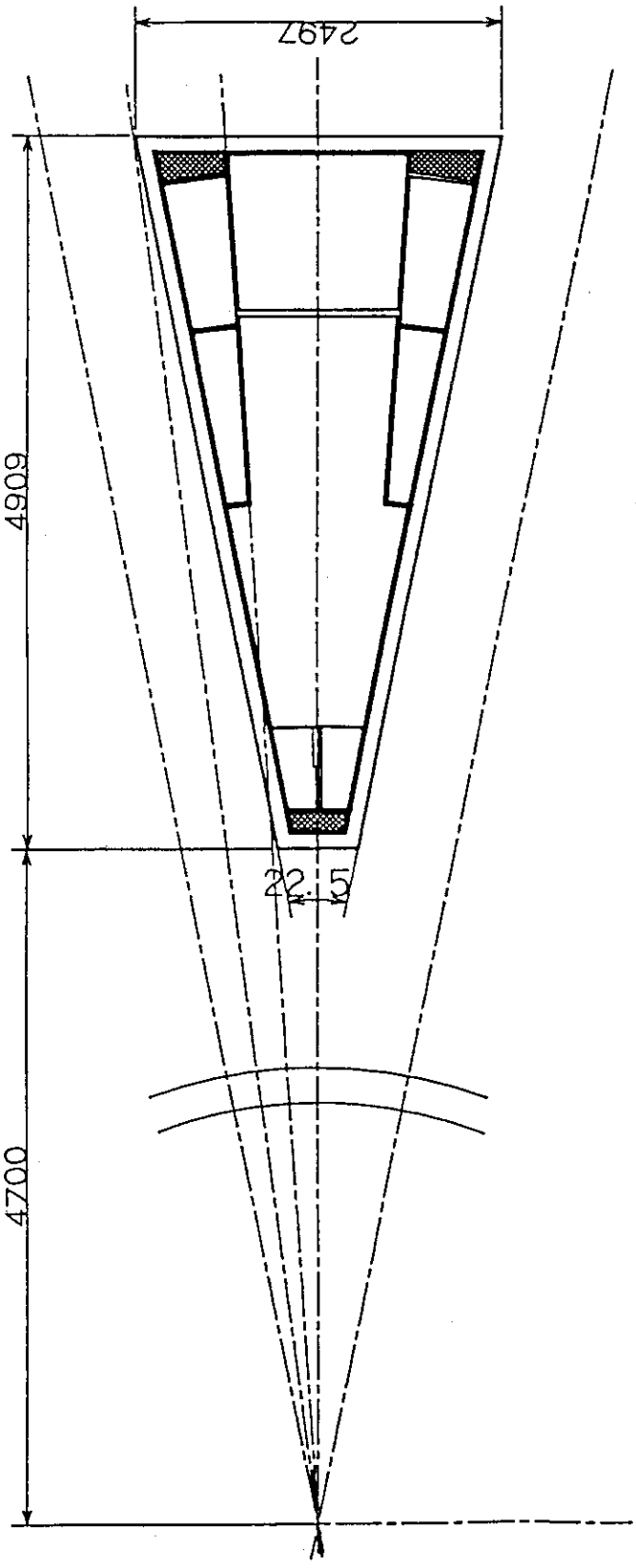


図 4.3.5　上ポート構造図（水平断面，ⓓ部）

4.4 水平ポート構造

水平ポートは加熱，計測，燃料供給及び遠隔保守等の機器のプラズマへのアクセスに利用される。ITER概念設計（CDA）でのポート計画（案）を図4.4.1に示す[5]。

これらのポートの内，一般ポート，メンテナンスポート及びNBIポートに着目し，遠隔機器による分解組立性，遮蔽の確保との整合性の観点から構造検討を実施した。

構造検討を行う上で，①構造の簡素化（コイル遮蔽を含む），②真空容器との取合いの統一化（但し，NBIポートを除く）を基本方針とした。

(1) 前提条件

a)開口部基本寸法

- 一般水平ポート　　:^{W}1.2m x^{H}3.4m
- メンテナンス用ポート:^{W}1.3m x^{H}3.4m
- NBIポート　　:^{W}0.8m x^{H}3.4m（入射方向に対する垂直断面内）

b)コイル及び溶接部に対する遮蔽厚さ（SUS：H_2O = 0.8：0.2の場合）

- トロイダルコイル　：35cm
- ポロイダルコイル　：50cm
- 溶接部　　：20cm（He生成濃度：0.1ppm）

(2) 設計条件

a) 使用温度　：max. 180℃

b) 使用圧力　：max. 1.5 MPa

c) 荷重条件　：

- 事故時内外圧　　：0.2MPa
- ディスラプション時の電磁力　：TBD
- 地震力　　：TBD（垂直0.2G，水平0.3G）
- 自重　　：25ton

(3) 基本構造

前提条件a)，b）より検討した基本構造を図4.4.2～3に示す。；

- 図4.4.2(a)　一般水平ポート平面図
- 図4.4.2(b)　メンテナンススポート平面図
- 図4.4.2(c)　一般／メンテナンスポート断面図
- 図4.4.3(a)　NBIポート平面図
- 図4.4.3(b)　NBIポート断面図

ポート構造は，真空容器とは予め真空容器側に取り付けられたポート台座と取合い，クライオスタットとは熱伸び吸収用のベローズを介してクライオスタット側に取り付けられる短管と取り合うことを基本とした。また，コイルに対する遮蔽を確保するためクライオスタット側よりポート内側及び外側に遮蔽構造体を配置することとした。（前者を内置き遮蔽体，後者を外置き遮蔽体と呼ぶ。）このように遮蔽構造を分離することにより，真空容器側への負荷荷重の軽減，

遠隔機器への負荷の軽減及び接続部構造の簡素化等が図られる。しかしながら，遠隔機器よる組立性，クライオスタット外側の作業空間，内置き及び外置き遮蔽体の冷却配管の引き回し等は，今後の検討課題である。

水平ポートの内部構造概念を図4.4.4に示す。二重壁構造を採用し，内外壁の板厚を20mm，壁間隔を150mmとし，面外荷重に対する剛性確保のため壁間には格子状にリブを配置する構造とした。コイルに対する遮蔽を確保するため内外壁間に遮蔽構造体を詰めるものとする。核発熱の除熱及びベーキングはリブ間に加圧水を流すことにより行う。

(4) 強度評価

a) 解析モデル

一般水平ポートについて構造及び荷重の対称性を考慮し，1／4または1／2を解析対象とした。解析モデルを図4.4.5に示す。

b) 解析条件

・構造条件	： 内外壁間	150	mm
	リブピッチ	200	mm
・板厚条件	： 内外壁	20	mm
	リブ	20	mm
	ベロース取付部	60	mm
・材料物性	： ヤング率	19000	kgf／m m²
	ポアソン比	0.29	
・荷重条件	： 外圧	0.02	kgf／m m²
	壁間静水圧	0.15	kgf／m m²
・境界条件	： 対称面に対して垂直方向の変位拘束		
	対称面内軸回りの回転拘束		
・拘束条件	： 真空容器側接続部を完全拘束		

c) 解析結果

① 図4.4.6に外圧荷重における変形図及び応力コンター図を示す。最大変位量は約3mm，最大応力はトレスカ応力で5.3kg／m m²となる。

② 図4.4.7に壁間静圧荷重における変形図及び応力コンター図を示す。最大変位量は約0.05mm，最大応力はトレスカ応力で1.7kg／m m²となる。

上記結果より，一様面圧荷重に対しては十分に構造強度が確保されていることが，確認され

た。今後は，電磁力荷重及び地震力に対する構造強度評価を実施し，構造の健全性を確認するとともに構造の最適化を図る。

(5) 組立／分解手順

図4.4.8に組立／分解手順（真空容器分解時を想定）を示す。

① クライオスタット側に取り付けられた遮蔽プラグを撤去。
- シール溶接部の切断
- 冷却配管の撤去及び端末処理。
- 重量は約80ton

② 内置き遮蔽体の撤去。
- 冷却配管の撤去及び端末処理。
- 重量は約105ton

③ ベローズ部の撤去。
- フランジとライナー間の溶接接続部を切断。
- ポート短管との溶接接続部の切断。

④ ポート短管の撤去。
- ポート台座との溶接接続部の切断。
- 重量は約25ton

[①～④はクライオスタット開口部より外部に取り出す。]

⑤ 外置き遮蔽体の撤去。
- クライオスタット上部より外部に取り出す。

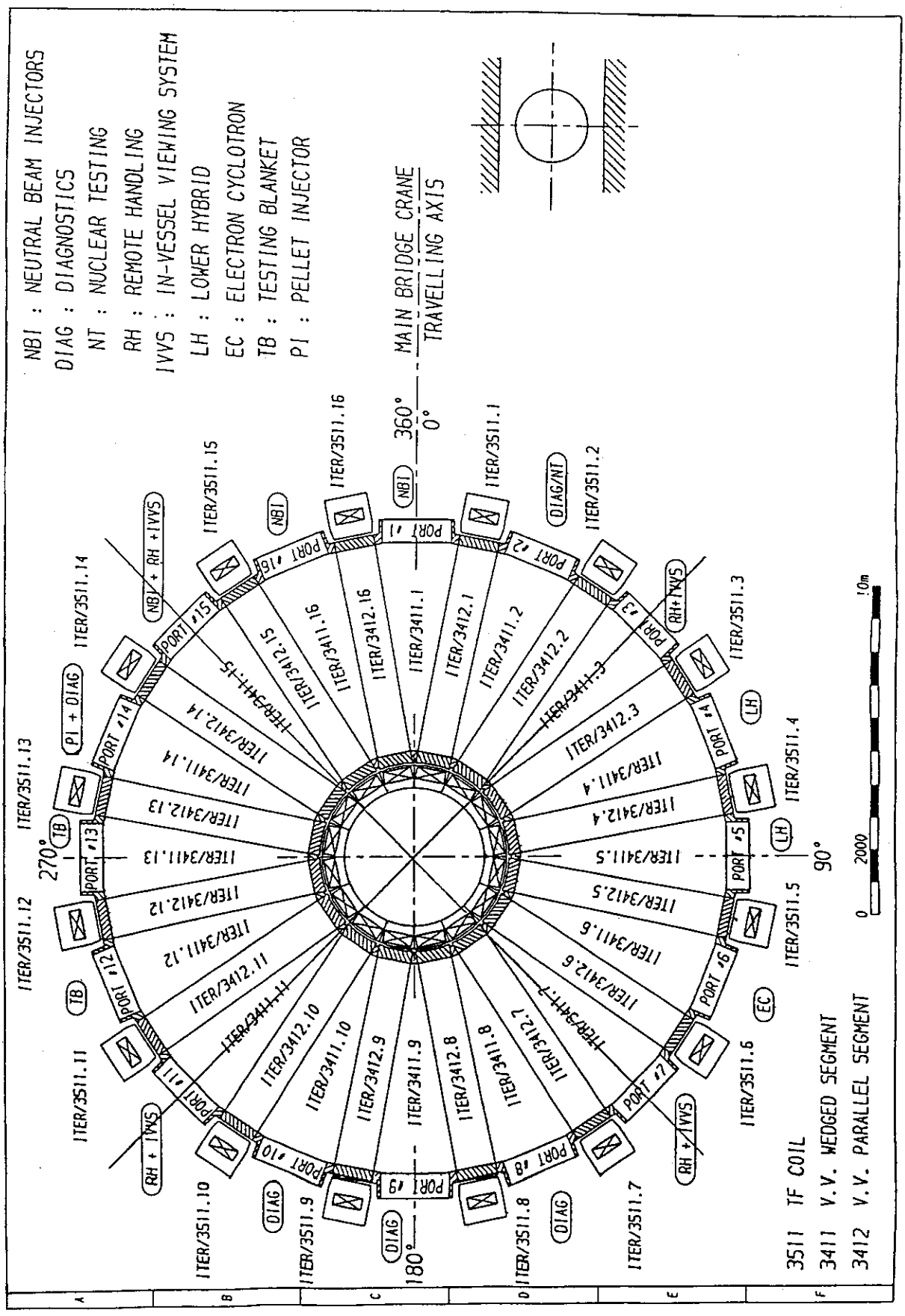


図 4.4.1　水平ポート計画（案）

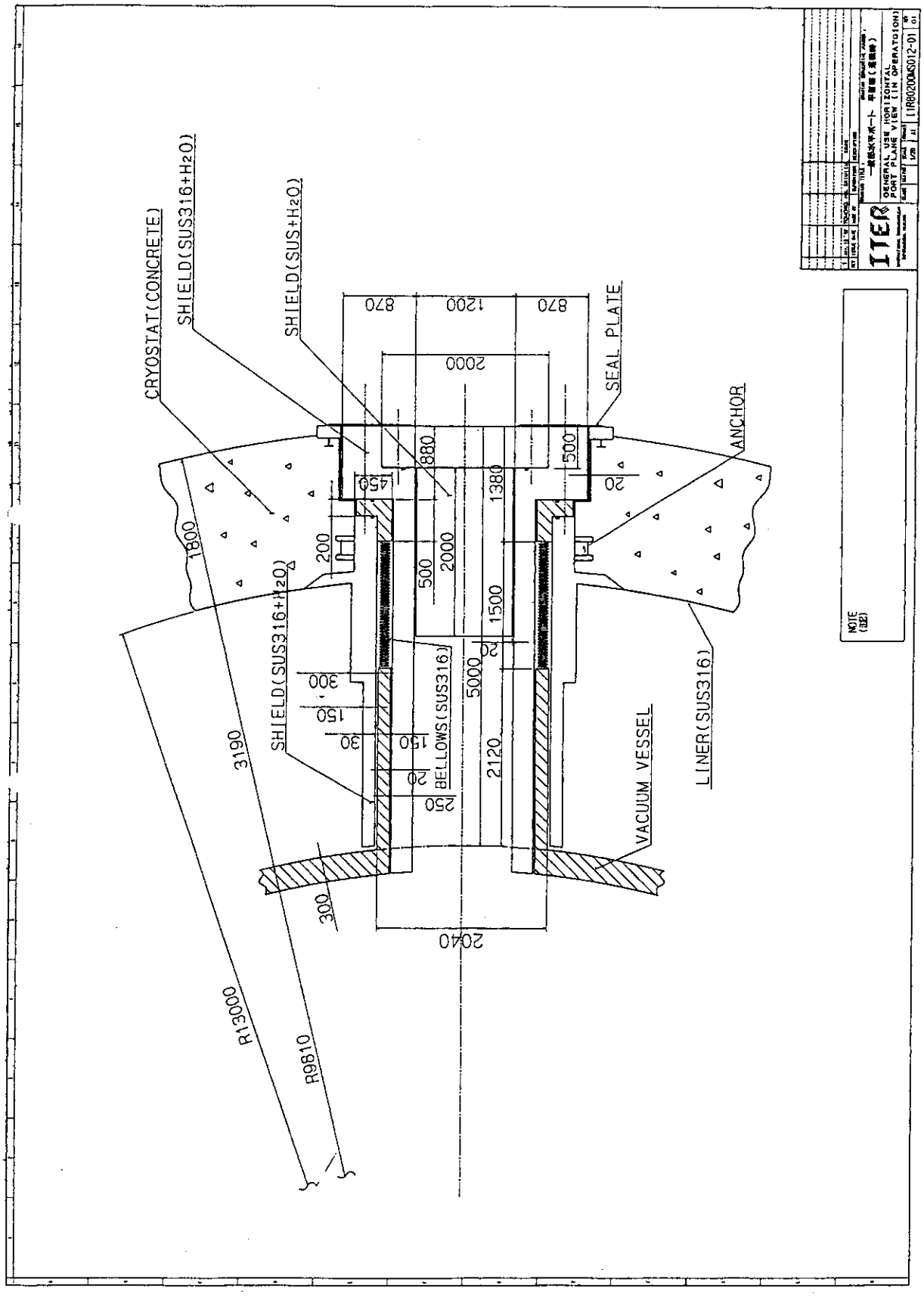


図4.4.2(a) 一般水平ポート平面図

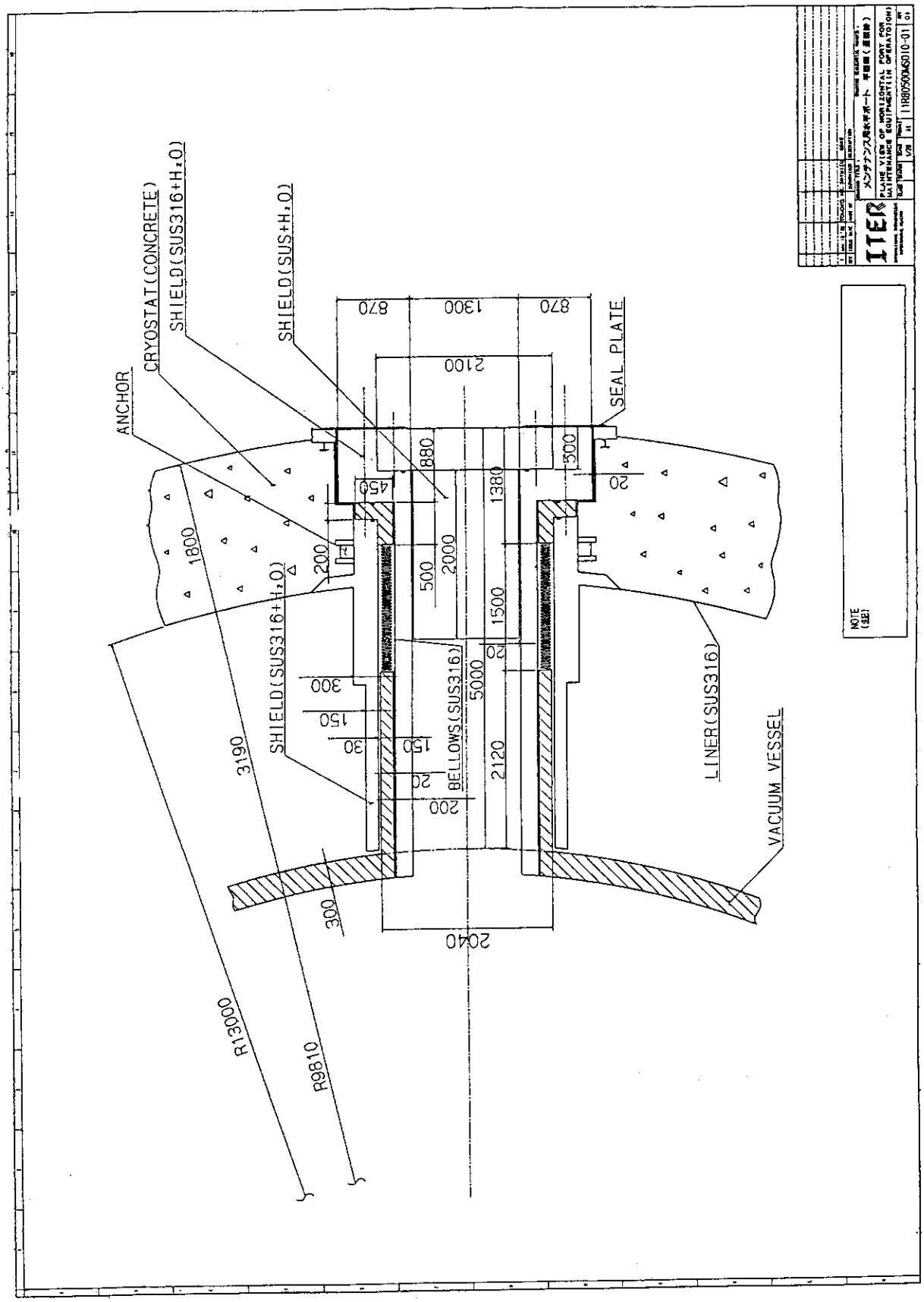


図 4.4.2(b)　メンテナンスポート平面図

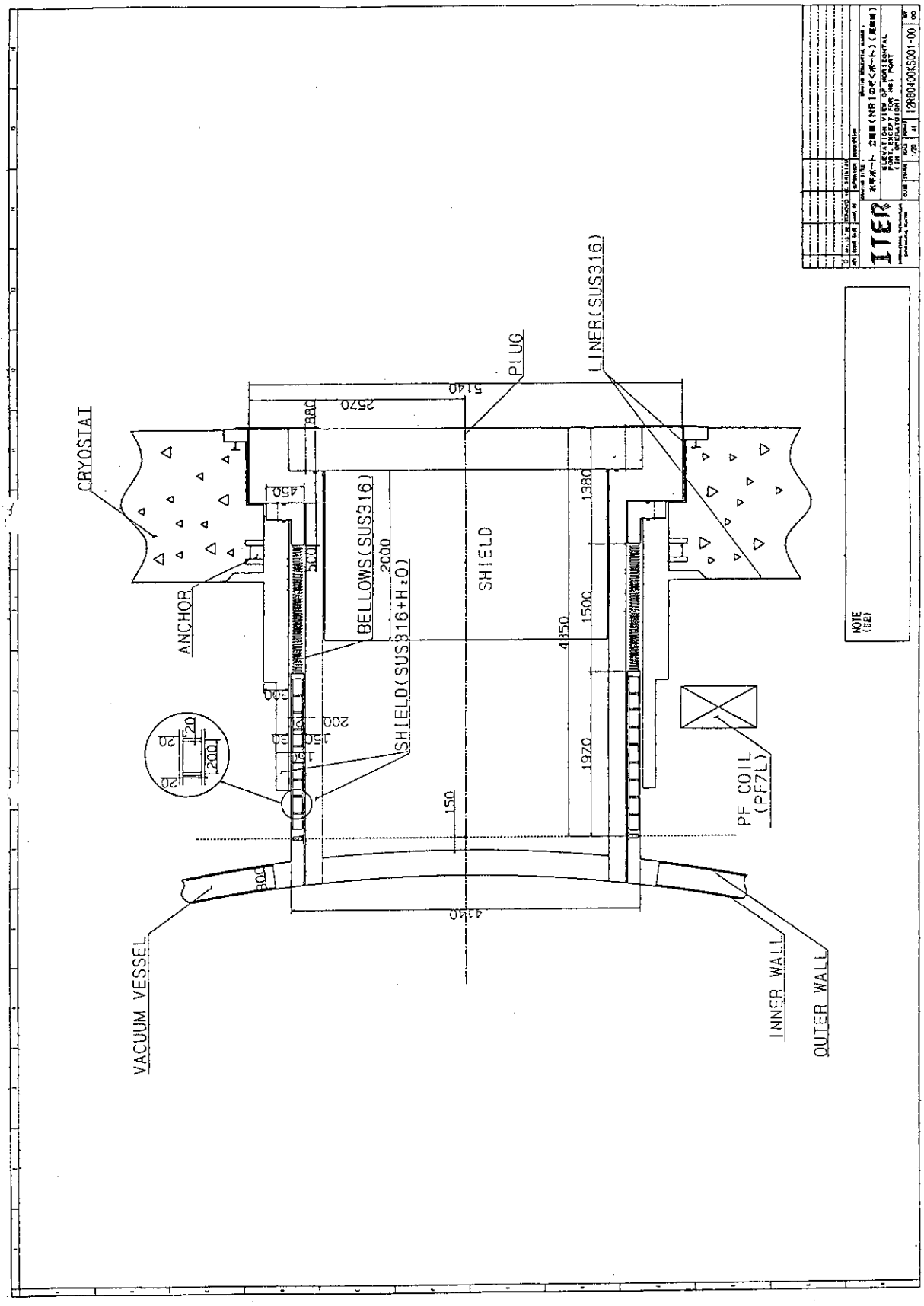


図 4.4.2(c) 一般／メンテナンスポート断面図

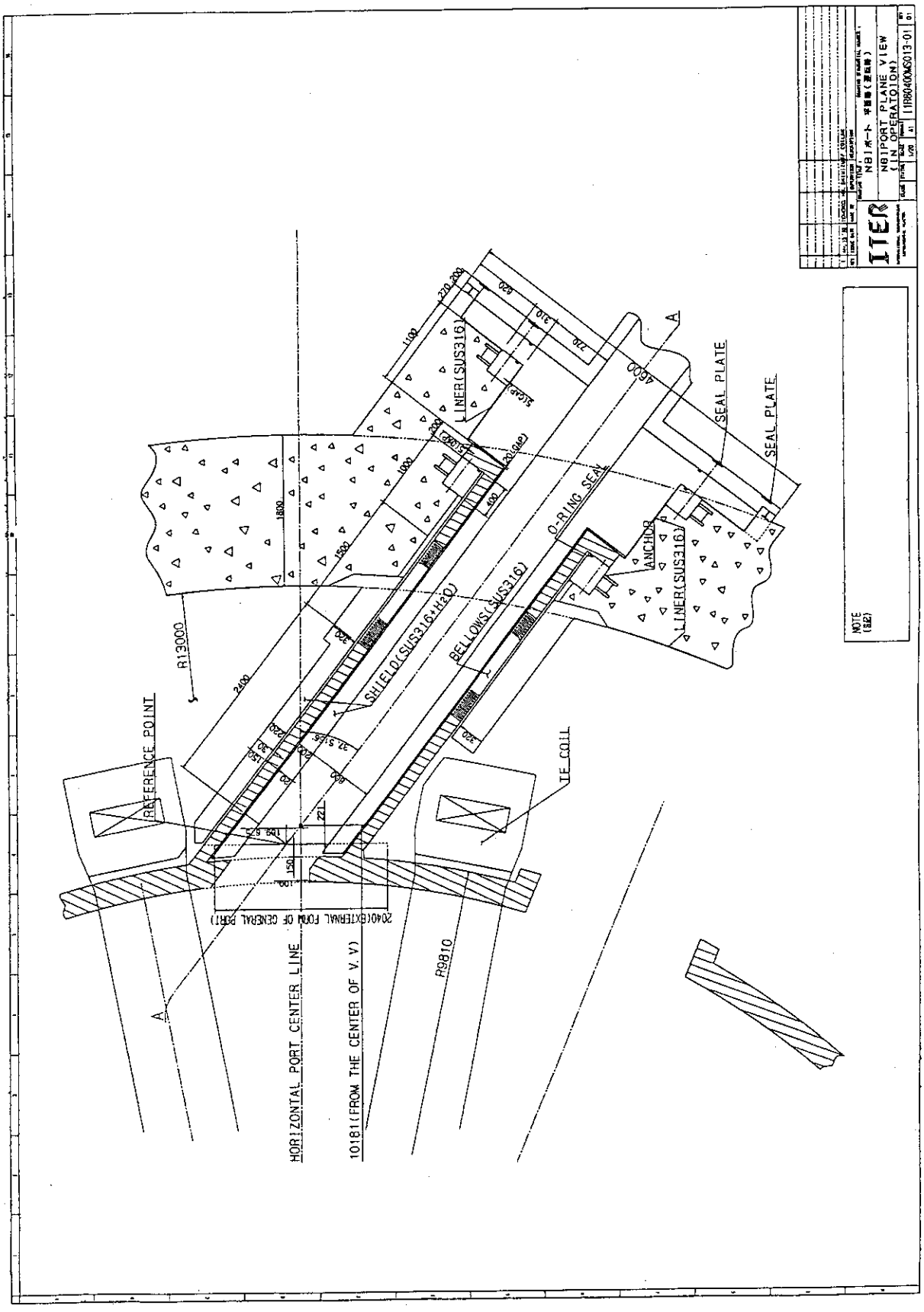


図 4.4.3(a)　N B I ポ ー ト 平 面 図

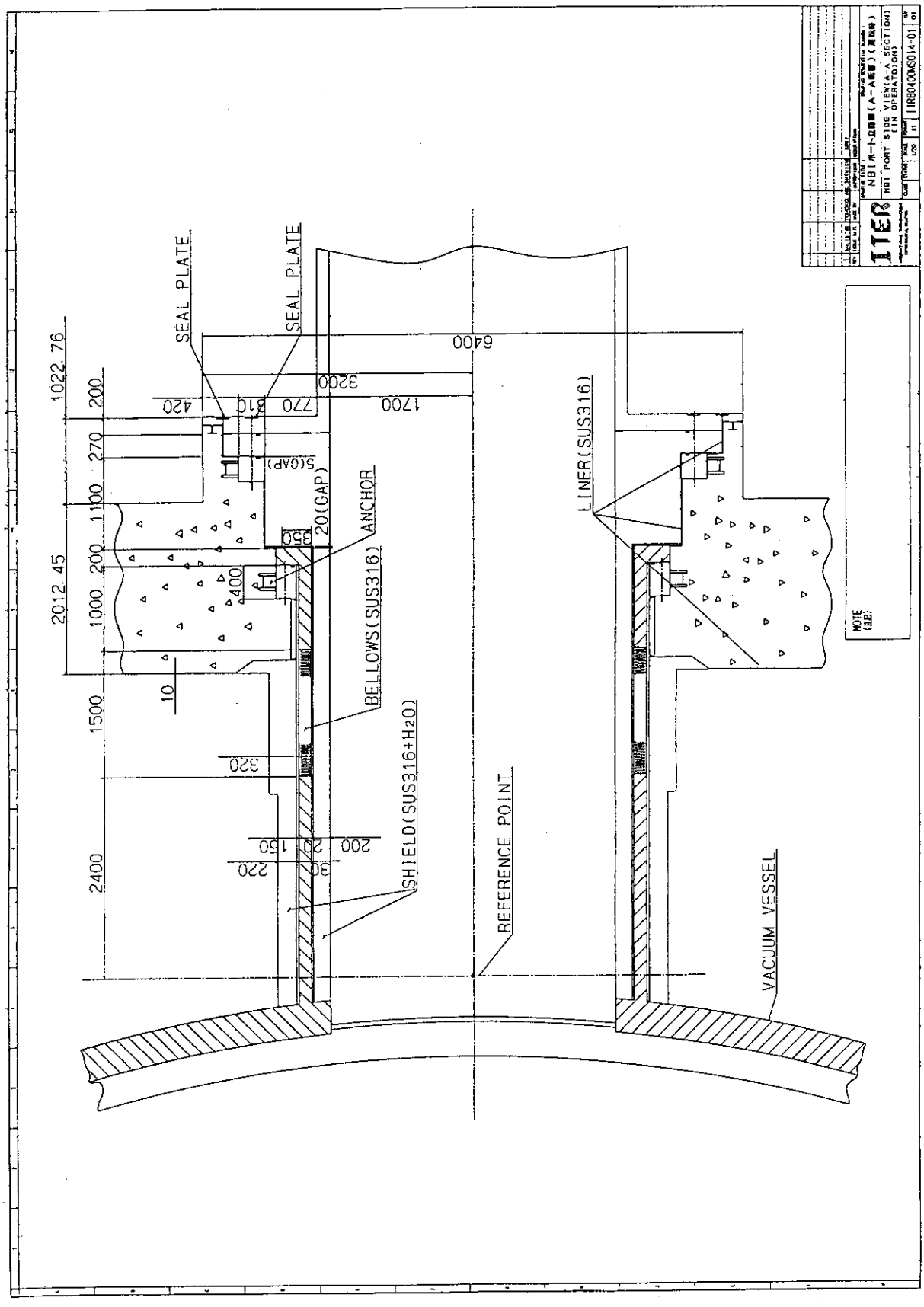


図 4.4.3(b) NBI ポート断面図

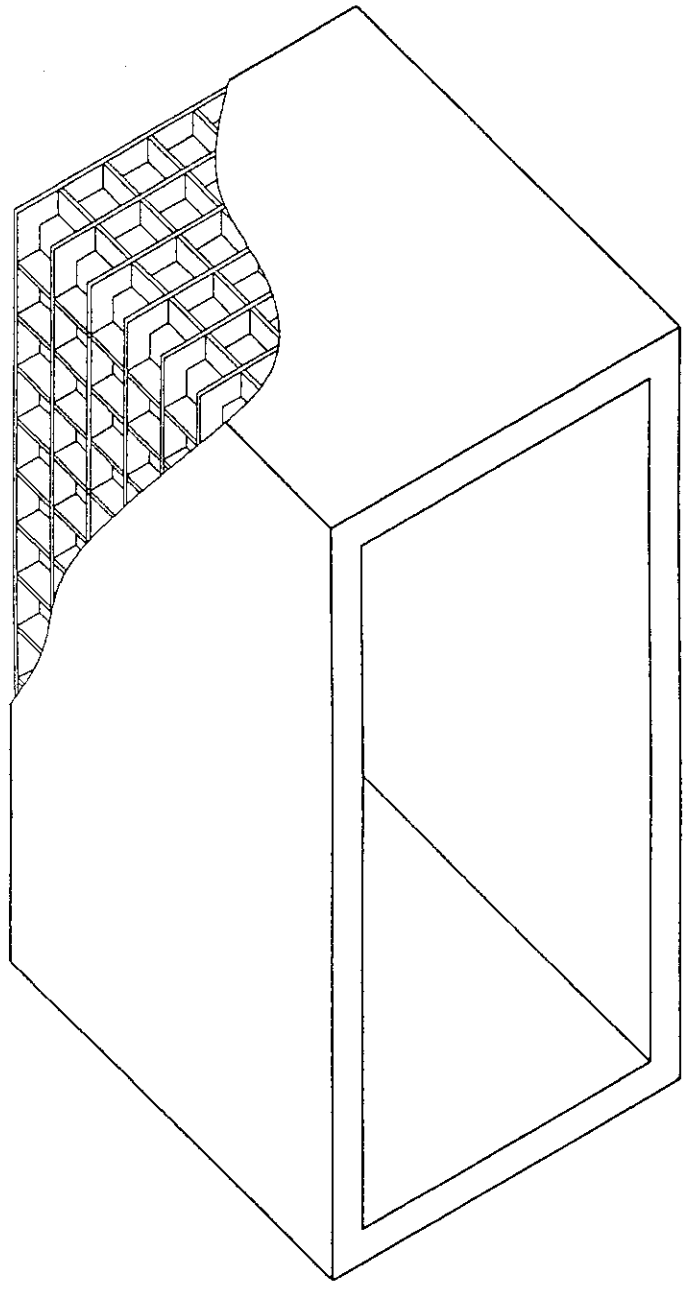


図4.4.4　水平ポート内部構造概念

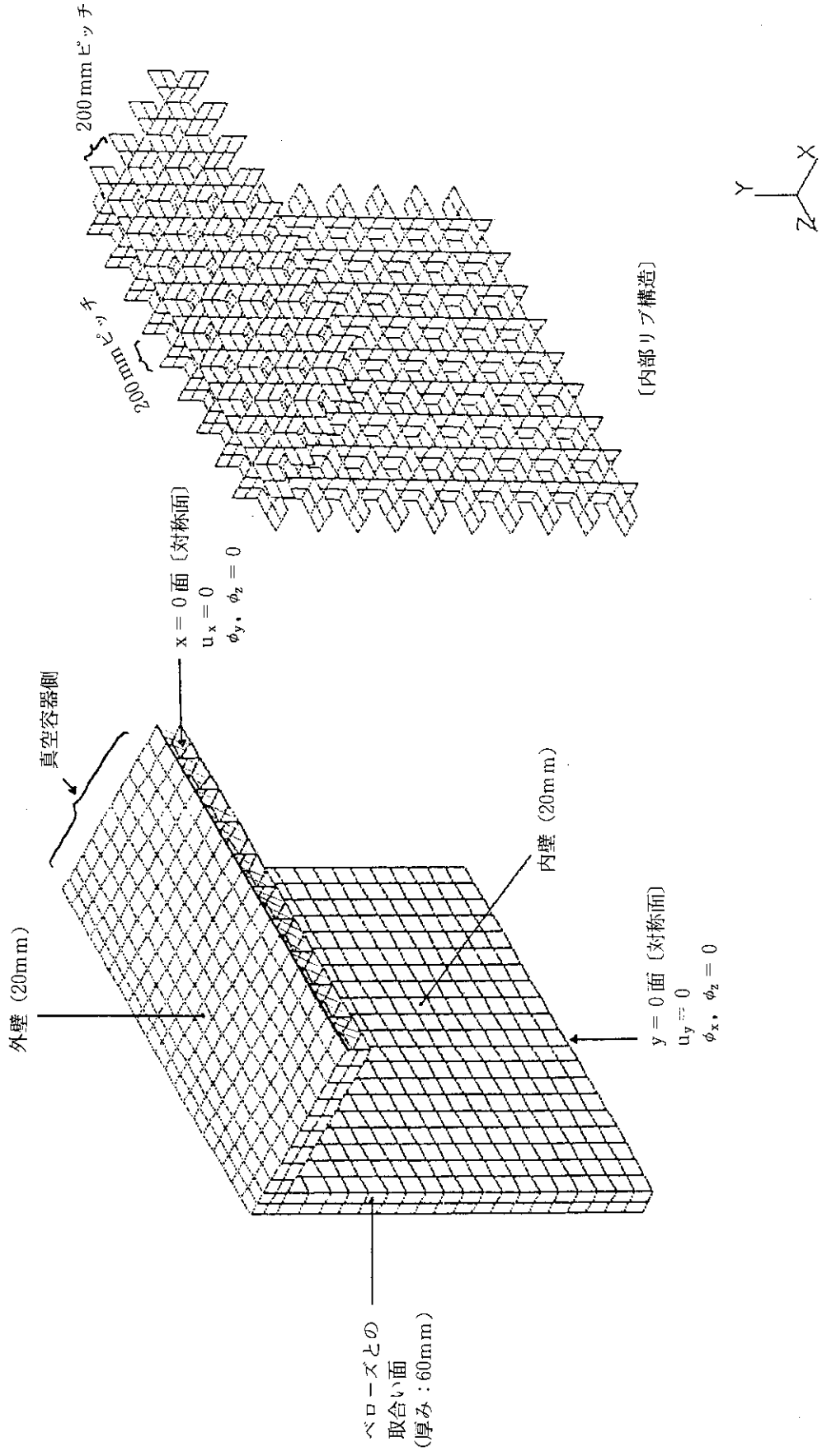


図 4.4.5　1／4 解析モデル
（＊　1／2 解析モデルは，y＝0 面のみ対称面とした上半分モデル）

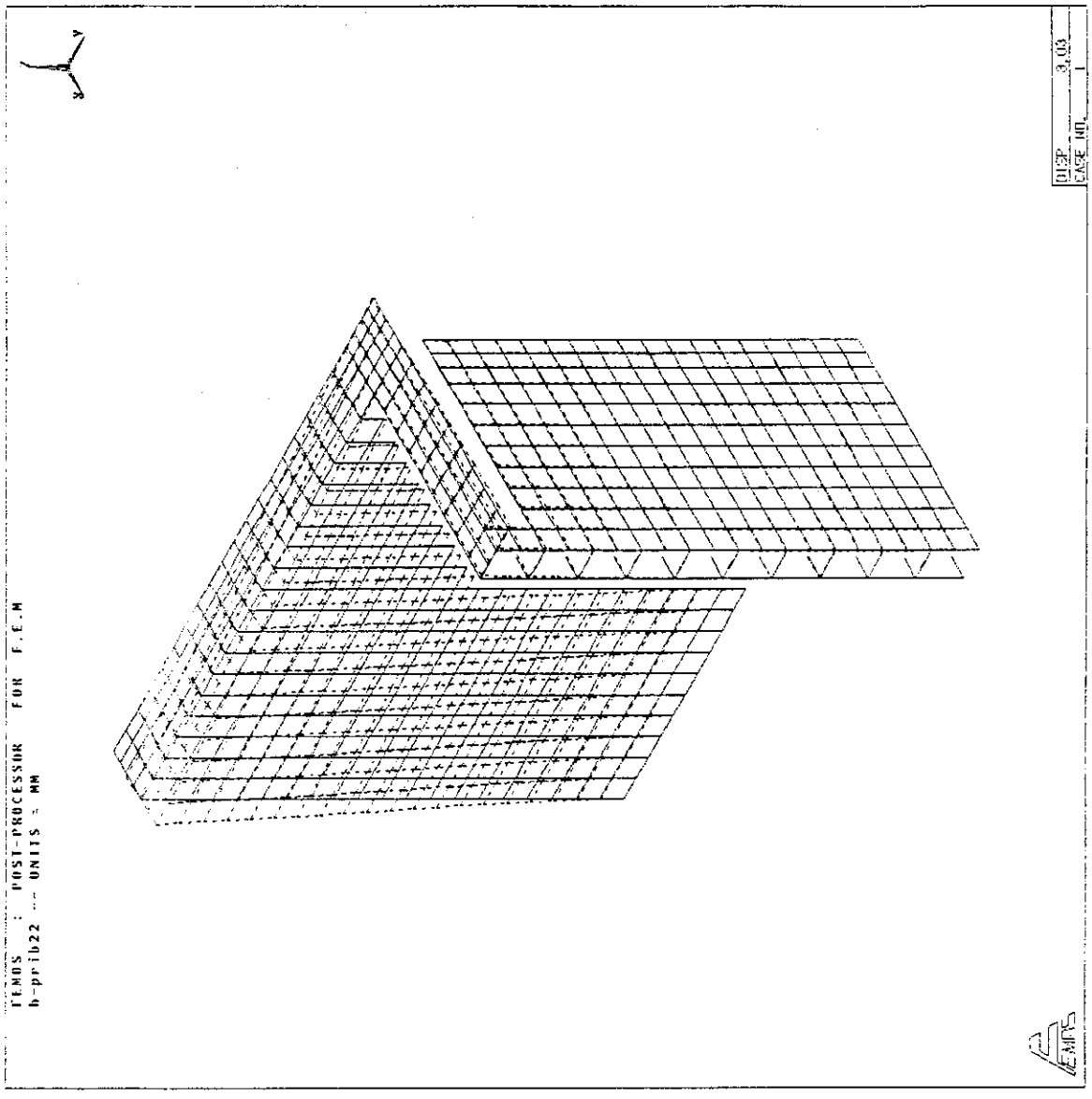


図 4.4.6(a)　外圧荷重（0.02kg／mm²）における変形図

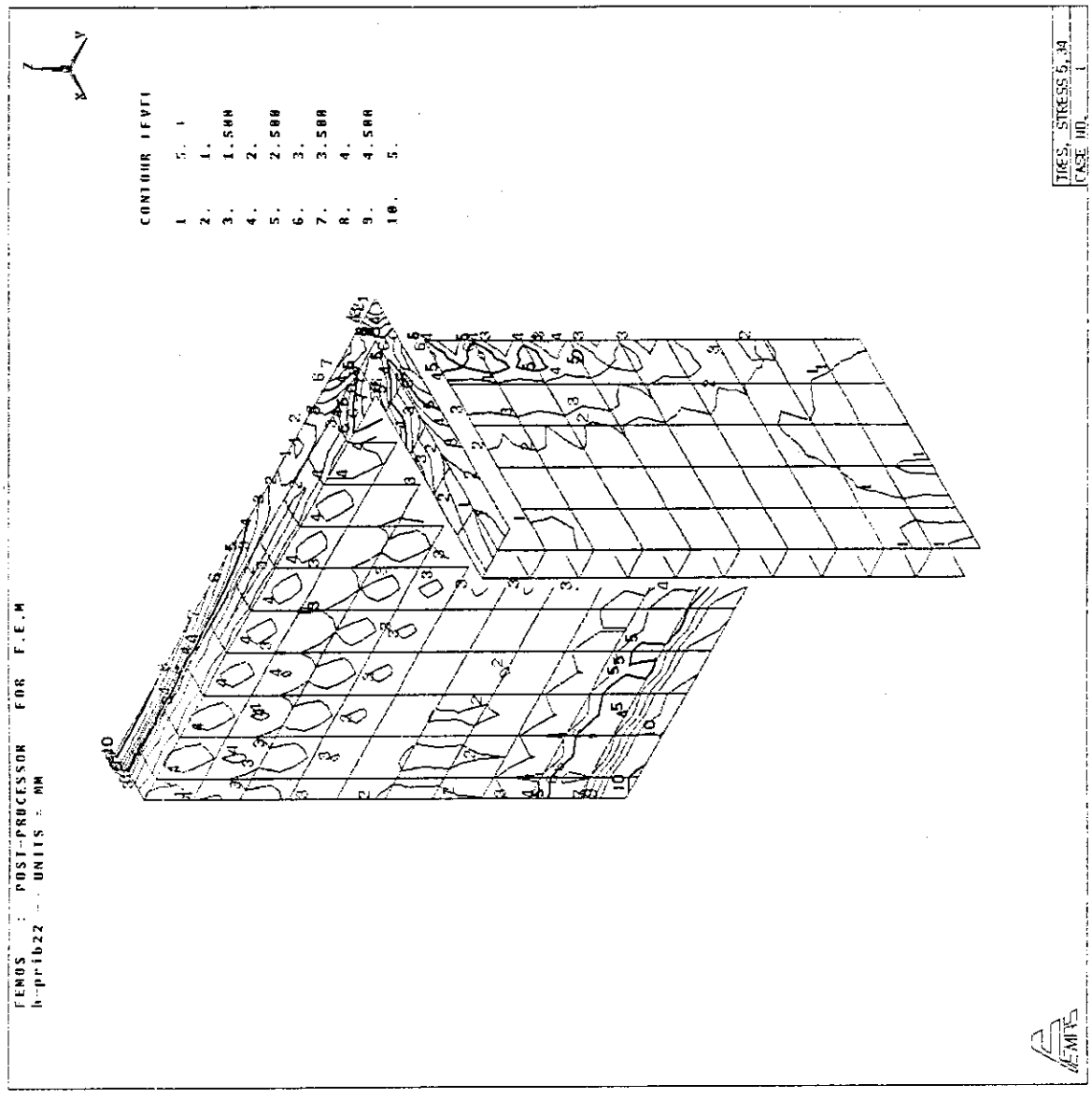


図4.4.6(b)　外圧荷重（1.02kg／mm^2）における応力コンター図

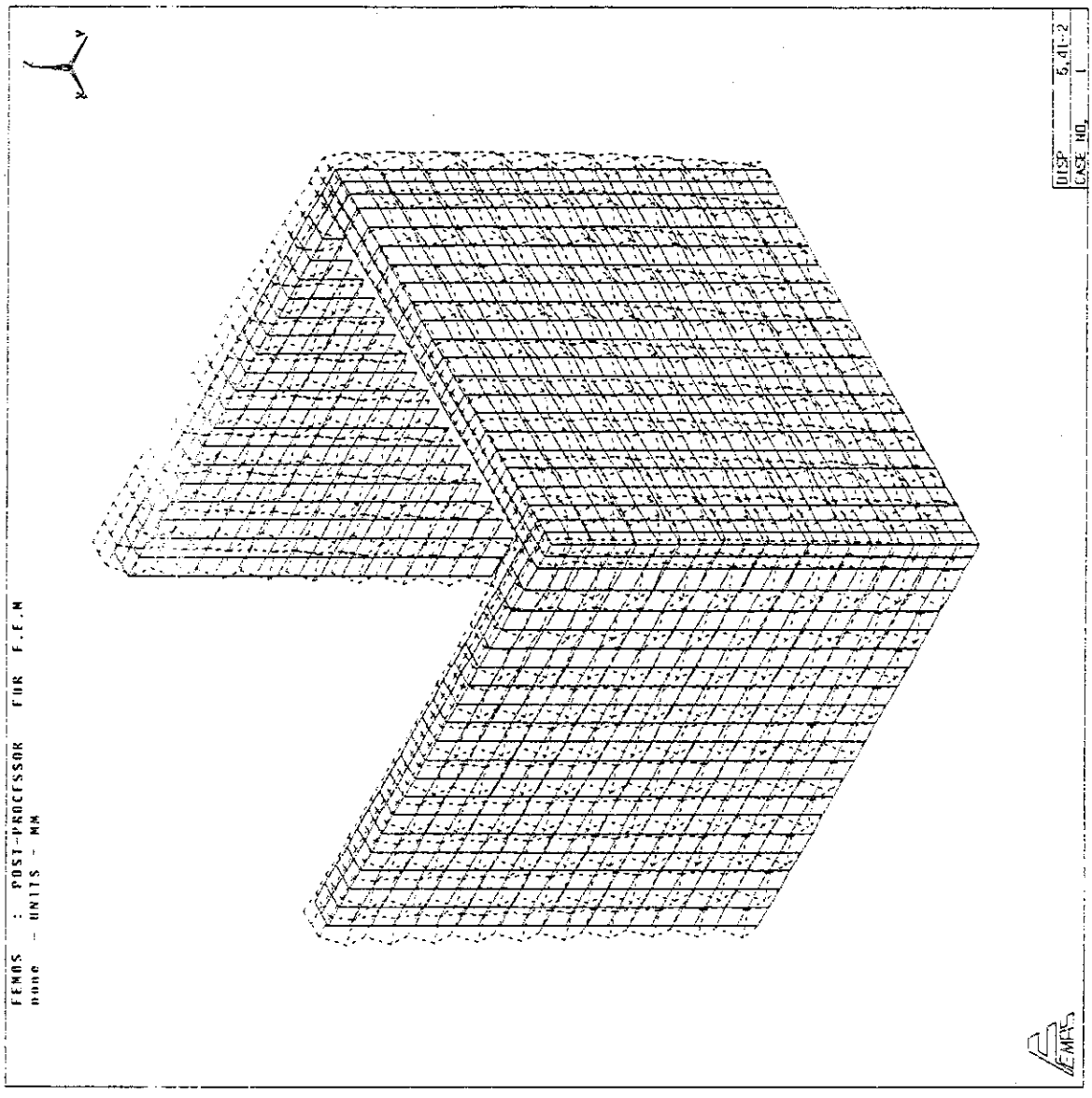


図 4.4.7(a)　壁間内圧（0.15kg／mm^2）における変形図

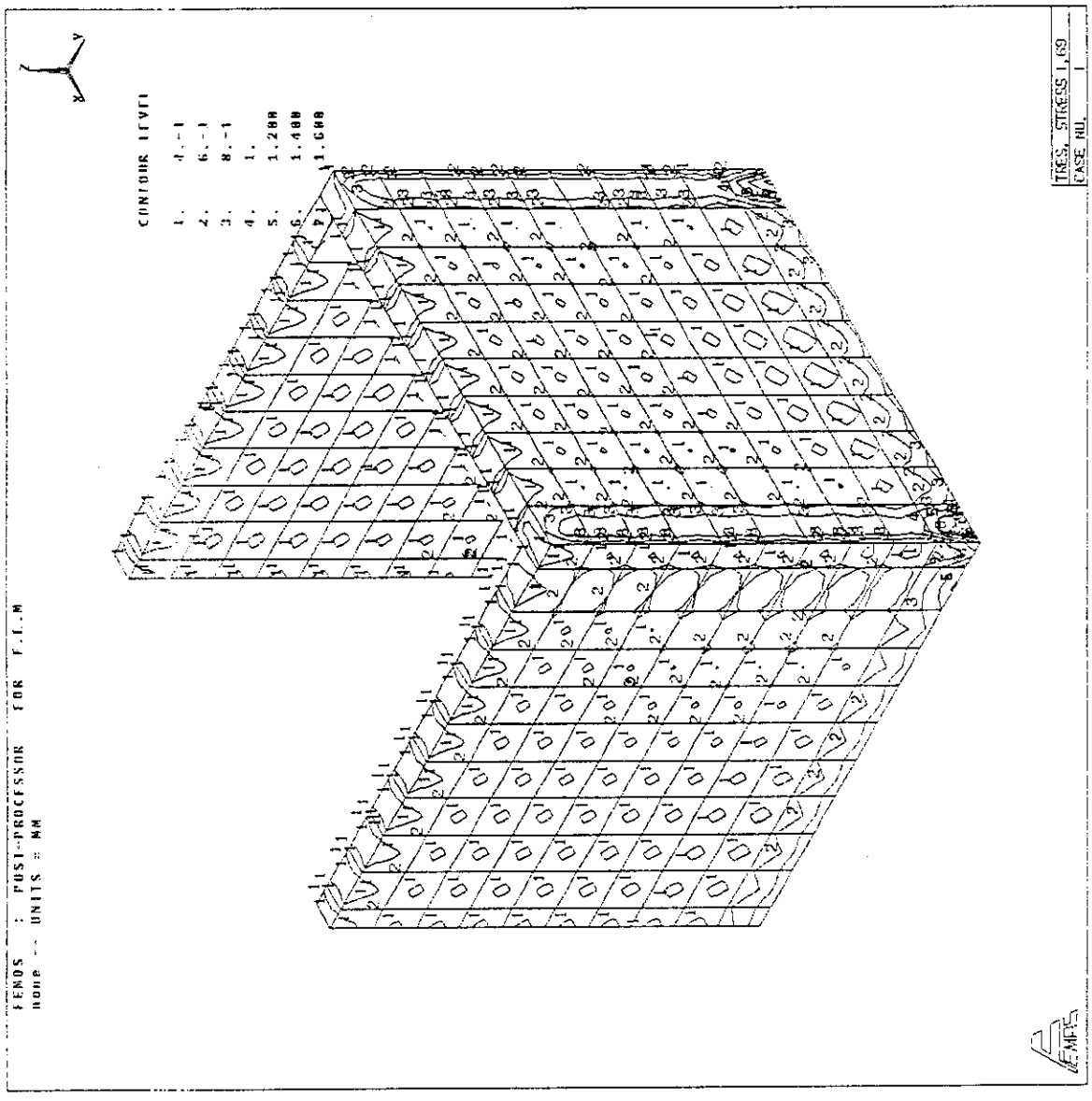


図 4.4.7(b)　壁間内圧（0.15kg／mm²）における応力コンター図

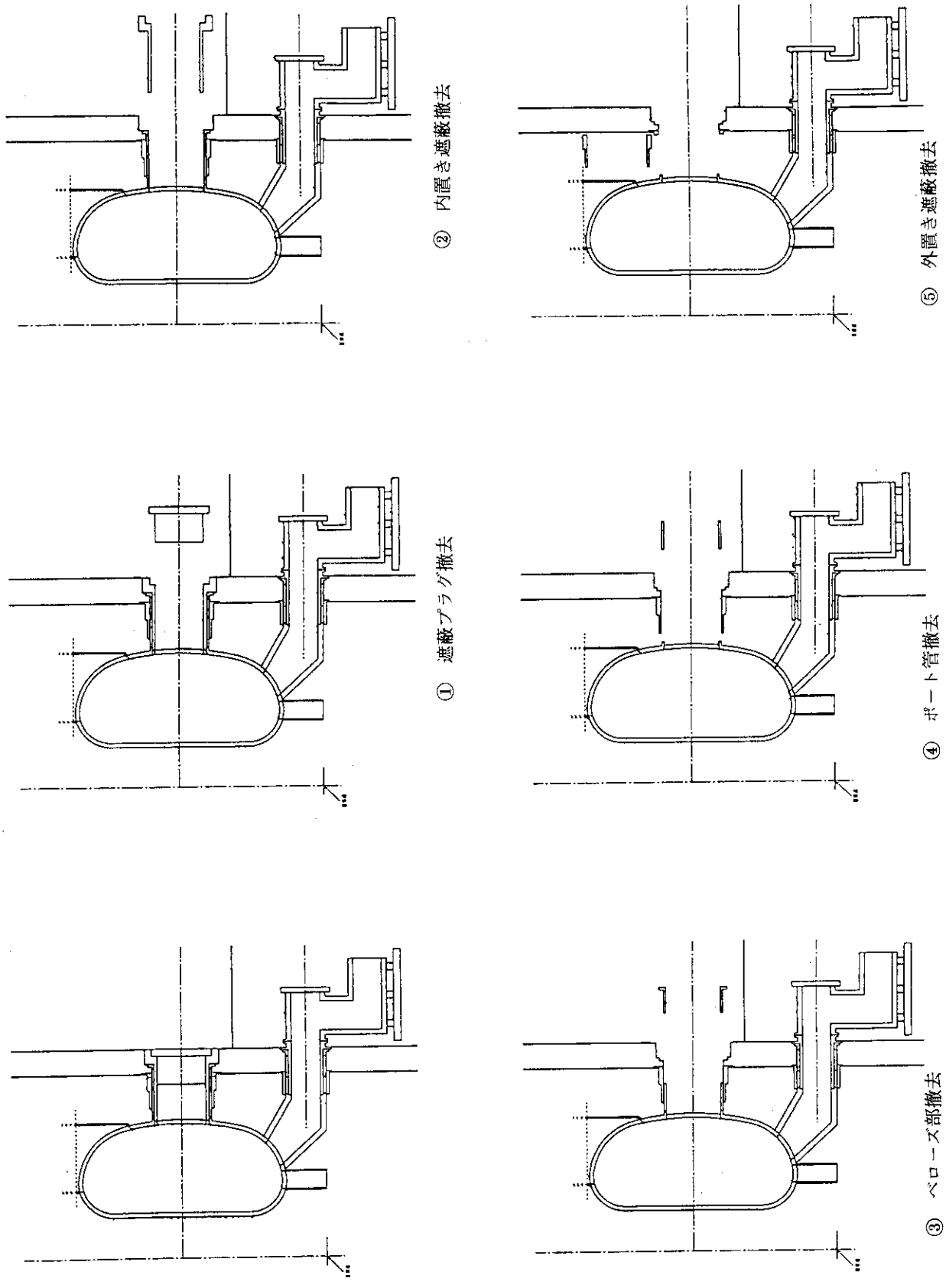


図 4.4.8 水平ポート分解／組立手順

4.5 下部ポート構造

下部ポートは真空排気，下部ダイバータの冷却配管の引き出し，下部ブランケットの冷却配管の引き出しに使用されると共に，真空容器の重力支持脚と取り合う構造となる。したがって，下部ポートには本来の機能のほかに重量構造物（真空容器及び炉内構造物）支持に対する構造強度が要求される。更に，水平ポートと同様にコイル系に対する遮蔽機能も要求される。本件では，これらの条件を満足し，かつ遠隔操作による分解組立性と整合する構造検討を実施した。

(1) 前提条件

a) 真空容器（排気開口部形状）及び真空排気系との取合い条件はITER概念設計（CDA）と同様とする。

b) コイル系に対する遮蔽厚みは，中性子のエネルギー減衰を考慮し，40cmとする。溶接部に関しては水平ポートと同様に20cmとする。
[SUS : H_2O = 0.8 : 0.2の場合]

(2) 設計条件

a) 使用温度 : max. 180℃

b) 使用圧力 : max. 1.5MPa

c) 荷重条件

- 事故時内外圧 : 0.2MPa
- ディスラプション時の電磁力 : TBD
- 地震力 : TBD（垂直0.2，水平0.3G）
- 自重 : 123ton
- 負荷重量 : 580ton（炉内構造物を含む）

(3) 基本構造

図4.5.1に基本構造を示す。CDAでは，排気ダクトとダイバータ冷却配管引き出し用ポートが一体となった構造であったが，ここでは，その製作性を鑑みて分離した構造とした。真空容器との取合いは，水平ポートと同様に真空容器に取り付けられたポート台座と取合う。クライオスタットとはポート短管，ベローズ部を介して取合う。

排気ダクトとそのポート短管との取合い位置は組立／分解時に必要と考えられる作業空間により決定されると考えられる。したがって，今後，遠隔機器及び治工具等に関する検討を詰める必要があろう。

排気ダクトに取り付けられるポート短管部のコイルに対する遮蔽は，クライオスタット側に取り付けた内置き遮蔽体及び外置き遮蔽体により確保するものとした。（図4.5.1参照。）ダイバータ冷却配管引き出し用ポートでは，遮蔽はダイバータ構造体により確保するものとした。

排気ダクト，排気ダクトのポート短管部及び冷却配管引き出し用ポートも水平ポートと同様に二重壁構造を採用した。特に，排気ダクトについては遮蔽厚みとして40cm必要となることか

ら製作性及び接続部の構造等を考慮すると厚板構造は難しいと考えられる。排気ダクトの内外壁の板厚は各々50mmとし，その他のポートは20mmとしている。構造概念を図4.5.2に示す。

(4) 強度評価

水平ポートと同様に排気ポートをモデル化し，外圧荷重に対する応力解析を実施した。この結果，外圧荷重（0.1MPa）に対して下部ポート部の最大変位は0.6mm程度あり，0.2MPaの荷重に対しては構造強度は確保されていると考えられる。図4.5.3に0.1MPa負荷時の変形図及び応力コンター図を示す。電磁力荷重及び自重等に対する構造解析は今後の課題である。

(5) 組立／分解手順

図4.5.4に分解手順を示す。基本的には，水平ポート構造で記述した手順と同様である。

問題点は，先ず第一に，真空排気ポンプ室の作業空間と遠隔機器類の設置空間との取合いが挙げられる。また，真空容器の組立／分解手順に大きく関連する問題としては，重力支持脚と排気ダクトとの間の空間への遠隔機器のアクセスが挙げられる。これらについては，遠隔保守機器の設計と併せて，全体設計により今後見直しを図ることが必要である。

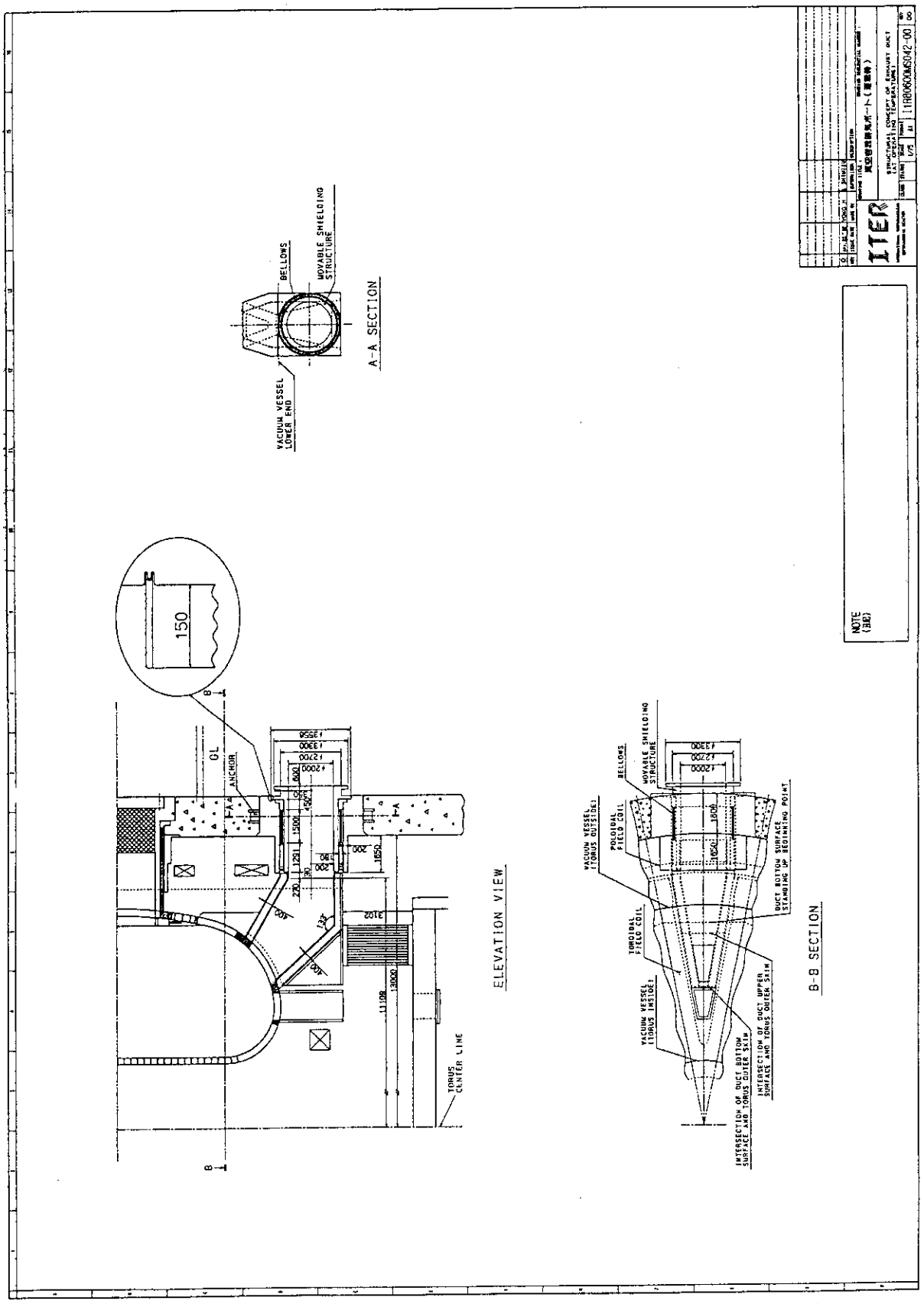


図4.5.1 下部ポート基本構造（案）

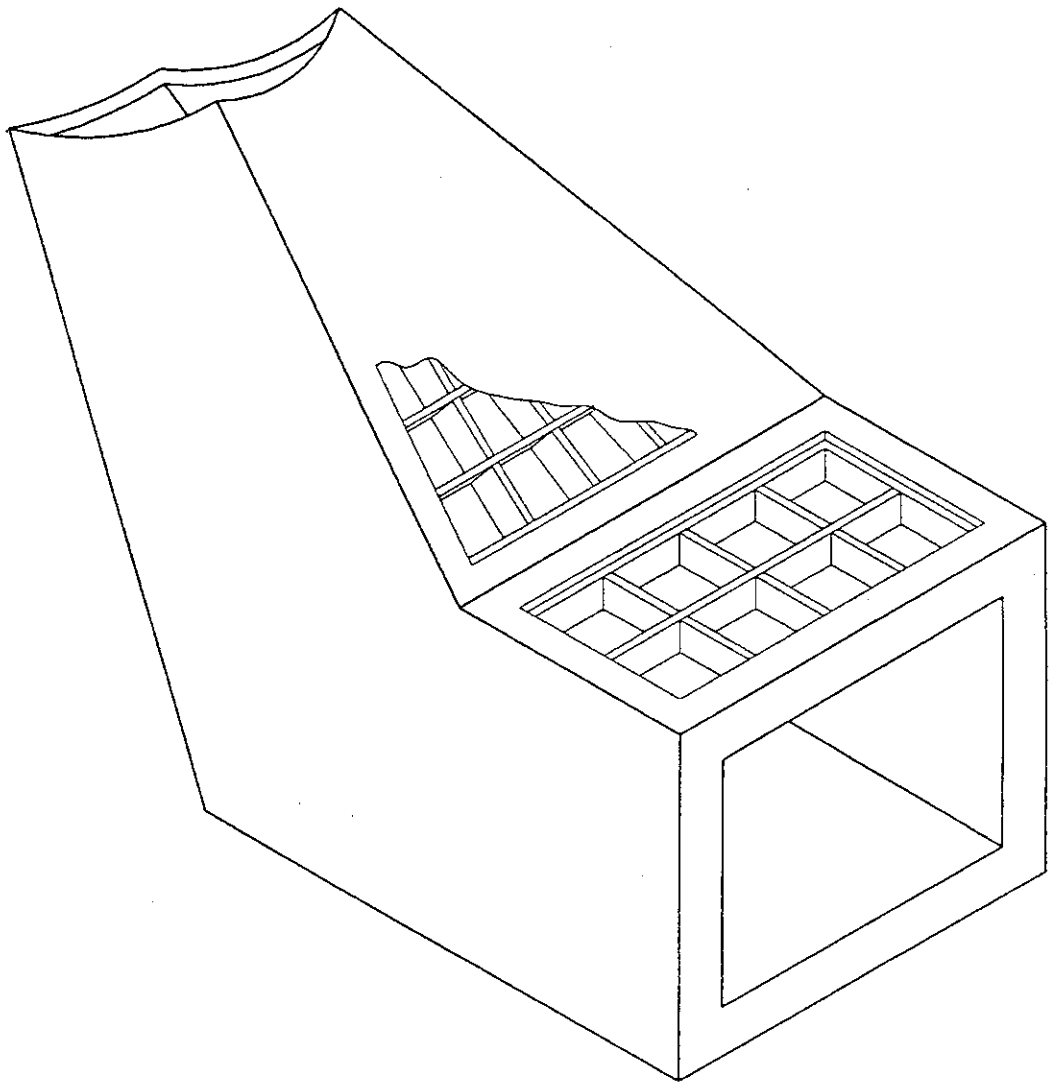


図4.5.2　排気ダクト内部構造概念

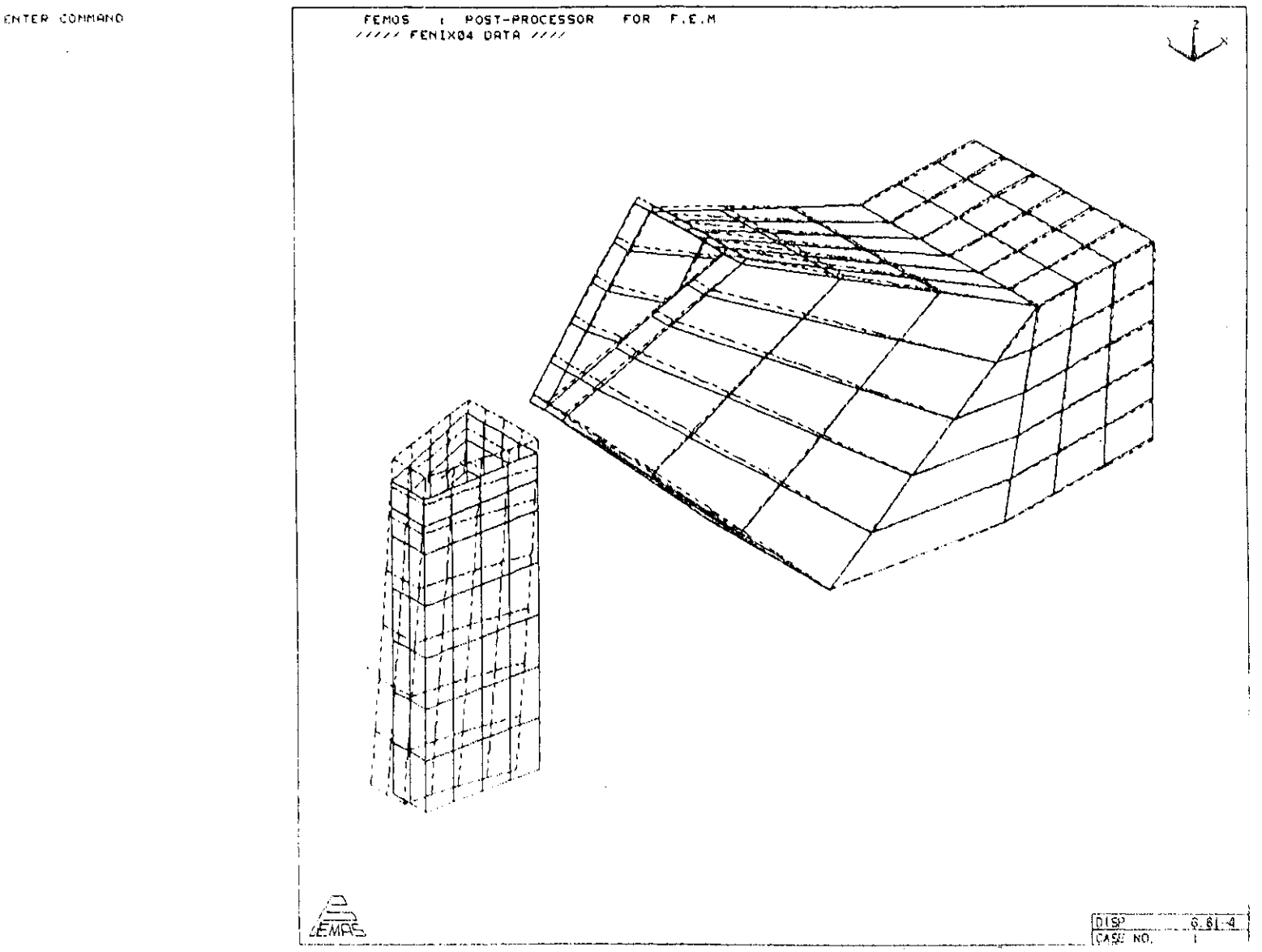


図4.5.3(a)　外圧荷重（0.1MPa）における変形図

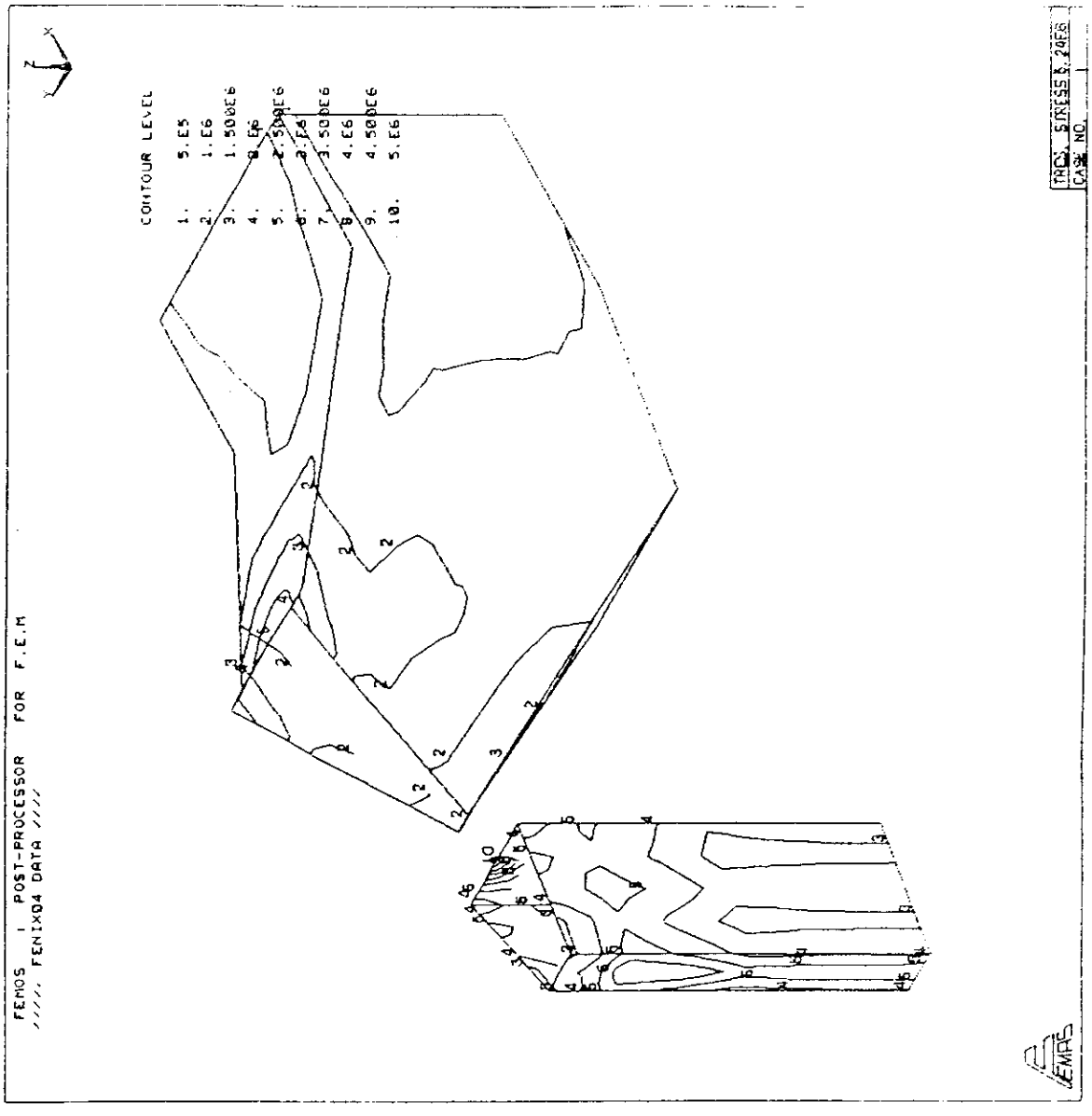


図4.5.3(b) 外圧荷重（0.1MPa）における応力コンター図

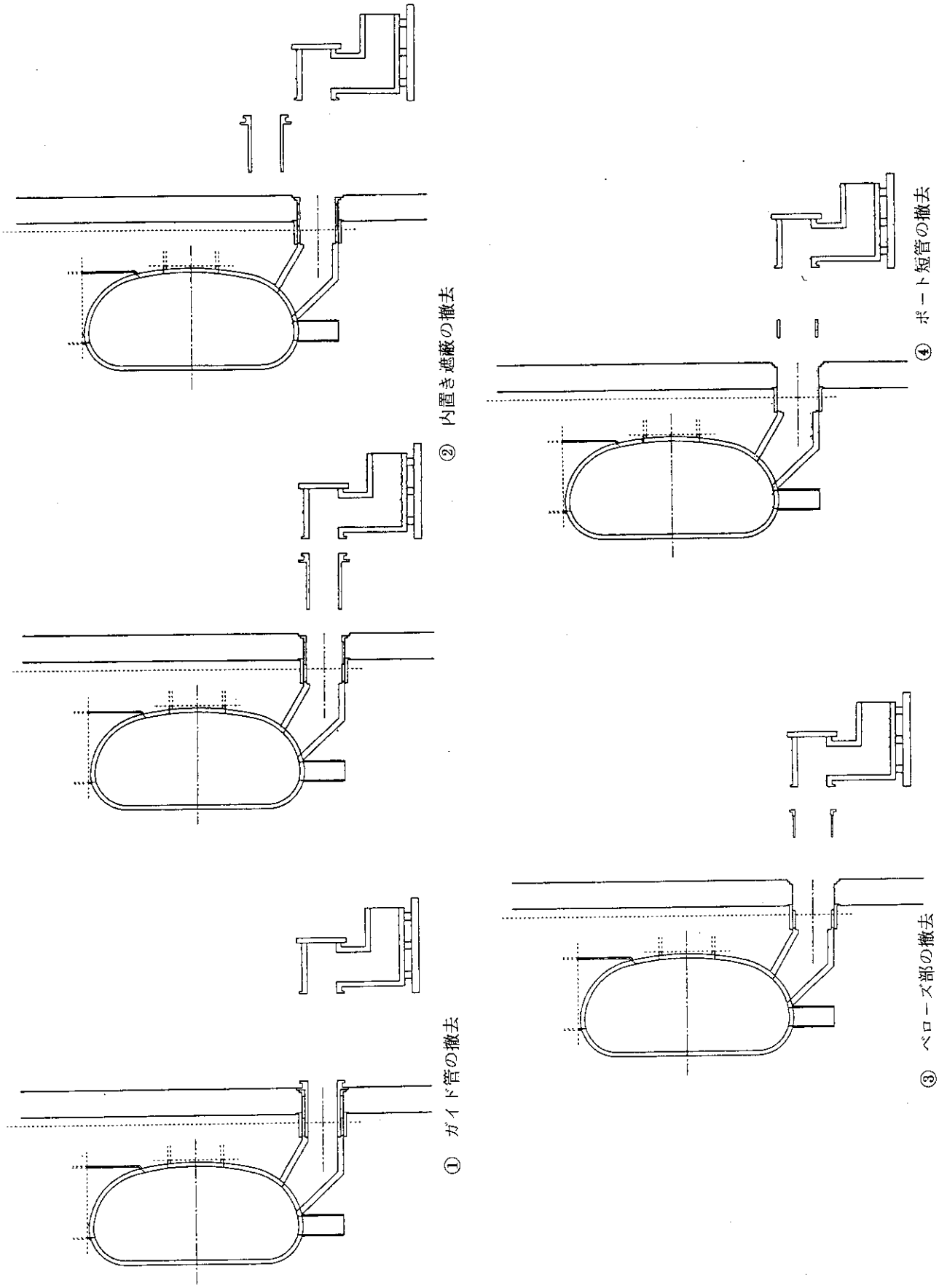


図4.5.4 排気ダクト分解／組立手順

4.6 冷却配管配置

上部ポート近傍の，真空容器及びクライオスタットと，1次冷却系配管との取合調整を目的として，真空容器内機器の冷却系配管の配置検討を実施した。
検討範囲は，真空容器内機器配管取り合いノズルと1次冷却系配管室の間とした。(真空容器冷却系配管配置検討は，今回の検討には含まれていない。)

(1) 前提条件

配管配置検討においては，以下の前提条件を設定した。

a) 1次冷却系配管室の位置は，ITER概念設計と同様とする。
b) 冷却材バウンダリの配管ベローズは設置しない。
c) 冷却系配管は，クライオスタット上部蓋を垂直に貫通する。
d) 冷却系統は，ダイバータ冷却系，第1壁冷却系，ブランケット冷却系，遮蔽冷却系の4系統に分ける。
e) 各系統は，トリチウムの集中を防止するために4分割とする。
f) 各系統毎の流量配分はオリフィスにより調整する。
g) 真空容器内機器の配管取り合いノズル直上は，管内アクセスの切断，溶接機器の設置空間を確保するため，原則として配管を設置しない事にする。
h) 真空容器内機器のベーキング時に，加熱媒体の流路として冷却系配管を使用する可能性があり，各冷却系配管は以下の温度に対応可能な配置とする。
   - ダイバータ冷却系配管　：350℃
   - 第1壁冷却系配管　：350℃
   - ブランケット冷却系配管　：180℃
   - 遮蔽冷却系配管　：180℃
i) 計測系機器の設置空間を確保するため，遮蔽プラグ直上には配管を配置しない事とする。

(2) 検討条件

a) 検討のベースとなる冷却系の仕様を表4.6.1に示す。
   (JAERI－M91－080，TABLE 17－1より引用)
b) 冷却系配管の仕様を表4.6.2に示す。
c) 真空容器内機器の配管取合ノズル配置を図4.6.1に示す。
d) 冷却系系統図を図4.6.2に示す。

(3) 配管配置

上記(1)，(2)により設定した冷却系入り口配管及び出口配管の立面図を図4.6.3，図4.6.4に示す。1次冷却系配管室には4系統の出入口リングヘッダを配置した。リングヘッダを含む各系統の配管の全体平面図を図4.6.5から図4.6.12に示す。各系統の配管の平面図，鳥かん図を図4.6.13から図4.6.28に示す。

(4) 熱膨張解析

a) 概要

配管配置の成立性を確認するため，配管熱膨張解析を実施した。解析対象は，各系統の中で配管長さが最も長く，熱膨張応力が最も大きくなると考えられる遮蔽冷却系出口配管とした。熱膨張解析はNASTRANにより実施した。

解析結果を用いて，“原子力設備の技術基準”により，現実的と考えられる第3種管としての評価を行った。

b) 解析条件

- 解析モデル　：図4.6.29に示す。
- 配管材質　　：SUS316LTP
- 運転温度　　：100℃（室温：20℃）
- 境界条件　　：各端点は完全固定とする。
- 強制変位　　：上部ポート側端点（8点）に，半径方向外側に30mm，上方に30mmの強制変位付与。

c) 解析ケース

以下の2ケースについて解析した。

- 配管継手としてエルボを用いたケース
- 配管継手としてティーを用いたケース
  （管内アクセスの切断，溶接機器の接近性を確保するためにティーを用いる。）

d) 解析結果

遮蔽冷却系出口配管熱膨張変位を図4.6.30に示す。

e) 応力評価

解析により求まった配管系各部のモーメントを用いて，応力評価を行った。応力評価は，通常運転時（100℃）及びベーキング時（350℃）について実施した。遮蔽冷却系のベーキング時温度は180℃であるが，ベーキング時350℃になる系統の成立性に対する見通しを得るために，350℃で応力評価を実施した。ベーキング時のモーメントは，通常運転時の解析結果をもとに，比例計算により求めた。応力評価結果を表4.6.3に示す。

f) 結論

配管取り合いノズル直上の配管継手として，エルボを用いたケース及びティーを用いたケースについて，“原子力設備の技術基準”の第3種管としての評価を行った。いずれのケースも表4.6.3に示す通り上記評価基準を満足する結果が得られ，本配管配置の成立性に対する見通しが得られた。但し冷却系配管の評価基準の確定は今後の検討課題である。

表4.6.1 冷却系仕様

冷却系統 / 仕様	第 1 壁	ダイバータ	ブランケット／遮蔽	真空容器
HEAT LOAD (MW)	414	220	1040	25
ループ数	4	4	4	1
回路数	3	3	3	2
圧力 (MPa)	1.7	3.5	1.5	1.0
入口温度 (℃)	60	50	60	50
出口温度 (℃)	100	65	100	70

表4.6.2　上部ポート設置配管仕様（1／2）

		第1壁冷却系					上部ダイバータ冷却系		ブランケット冷却系				
		インボードセグメント		アウトボードセグメント					インボードセグメント		アウトボードセグメント		
		右側	左側	サイド		上部センタ	右側	左側	右側	左側	サイド		上部センタ
				右側	左側						右側	左側	
HEAT LOAD(MW)/モジュール		2・9	2・9	6・9	6・9	2・1	3・4	3・4	5・7	5・7	14・6	14・6	4・7
入口温度（°C）		60	60	60	60	60	50	50	60	60	60	60	60
出口温度（°C）		100	100	100	100	100	65	65	100	100	100	100	100
圧力（Kg／cm^{2}a）		17・4	17・4	17・4	17・4	17・4	35・7	35・7	15・3	15・3	15・3	15・3	15・3
流量（Kg／s）		17・1	17・1	41・1	41・1	12・3	54・9	54・9	34・0	34・0	86・8	86・8	28・0
管仕様	外径　(mm)	76・3	76・3	114・3	114・3	76・3	139・8	139・8	101・6	101・6	165・2	165・2	101・6
	内径　(mm)	69・3	69・3	106・3	106・3	69・3	129・8	129・8	93・6	93・6	155・2	155・2	93・6
	肉厚　(mm)	3・5	3・5	4・0	4・0	3・5	5・0	5・0	4・0	4・0	5・0	5・0	4・0
	管内流速(m/s)	4・7	4・7	4・8	4・8	3・4	4・3	4・3	5・1	5・1	4・8	4・8	4・2
	管材質	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316

表 4.6.2　上部ポート設置配管仕様（２／２）

		遮蔽冷却系								パージガス系				
		インボードセグメント		上部遮蔽プラグ			アウトボードセグメント			インボードセグメント		アウトボードセグメント		
		右側	左側	右側	中央	左側	サイド		上部センタ	右側	左側	サイド		上部センタ
							右側	左側				右側	左側	
HEAT LOAD(MW)/モジュール		TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	0・4	0・4	0・2	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
入口温度（° C）		60	60	60	60	60	60	60	60	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
出口温度（° C）		100	100	100	100	100	100	100	100	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
圧力（Kg／cm^2a）		15・3	15・3	15・3	15・3	15・3	15・3	15・3	15・3	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
流量（Kg／s）		TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	2・4	2・4	1・1	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
管仕様	外径　(mm)	89・1	89・1	60・5	114・3	60・5	60・5	60・5	60・5	34・0	34・0	34・0	34・0	34・0
	内径　(mm)	81・1	81・1	53・5	53・5	53・5	53・5	53・5	53・5	28・0	28・0	28・0	28・0	28・0
	肉厚　(mm)	4・0	4・0	3・5	4・0	3・5	3・5	3・5	3・5	3・0	3・0	3・0	3・0	3・0
	管内流速(m/s)	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	1・1	1・1	0・6	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
	管材質	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316	SUS316

表4.6.3　遮蔽冷却系出口配管応力評価結果

評価ケース	評価基準	評価対象	通常運転時（１００°）			ベーキング時（３５０° C）		
			発生応力*6	許容値*7	判定	発生応力*6	許容値*7	判定
配管取合ノズル直上の配管継手としてエルボを用いたケース	告示５０１号 第３種管	エルボ *2	７・０	３１・２	○	１９・３	２８・６	○
		レデューサ *3	３・５	３１・２	○	６・０	２８・６	○
配管取合ノズル直上の配管継手としてティーを用いたケース *1	告示５０１号 第３種管	ティー *4	６・３	３１・２	○	１６・４	２８・６	○
		レデューサ *5	３・８	３１・２	○	７・３	２８・６	○

注　*1　管内アクセスの切断、溶接機器の接近性を考慮したケース
*2　ブランケットノズル頂部のエルボ
*3　最もリングヘッダ寄りのレデューサ
*4　ブランケットノズル頂部のティー
*5　最もリングヘッダ寄りのレデューサ
*6　Sn（但し機械荷重による応力を２Kg／mm_2と仮定）を求めた。
*7　許容値はSaとした。

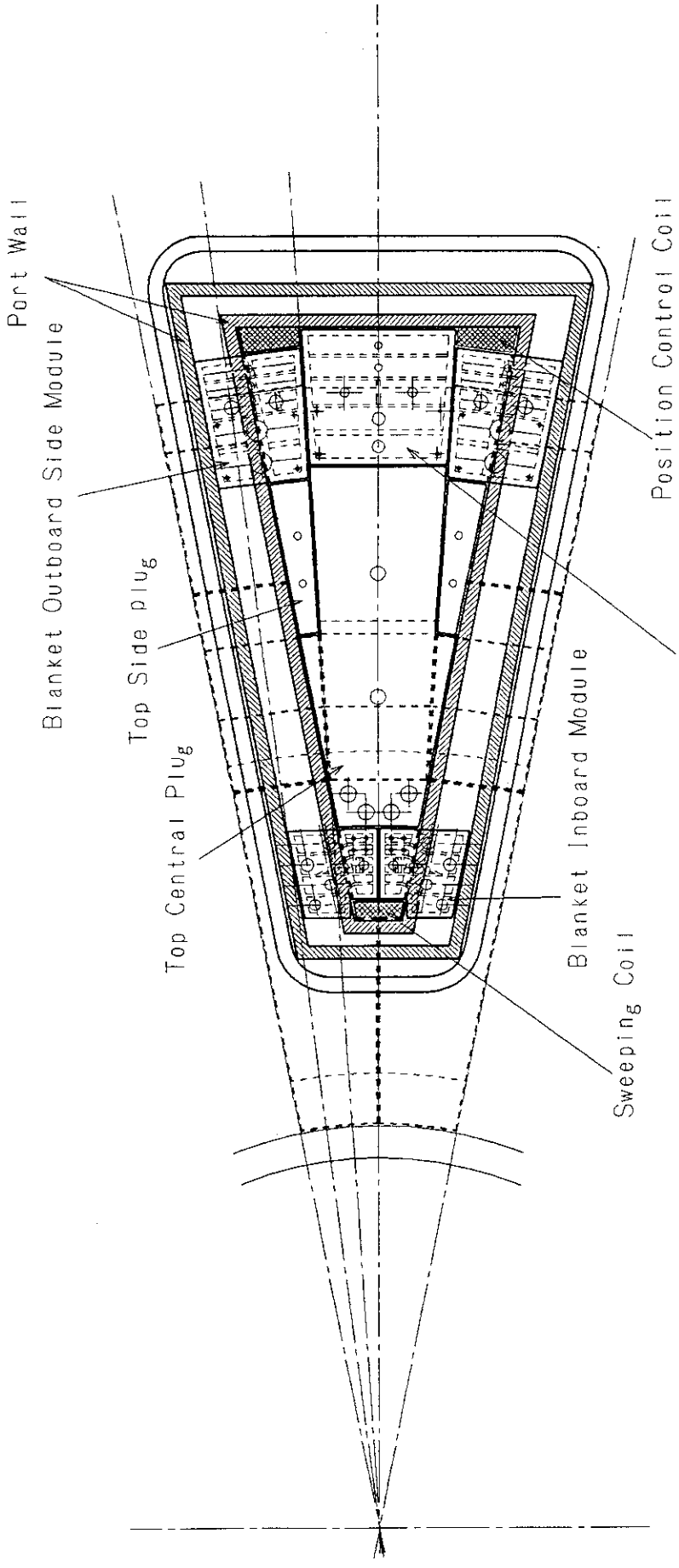
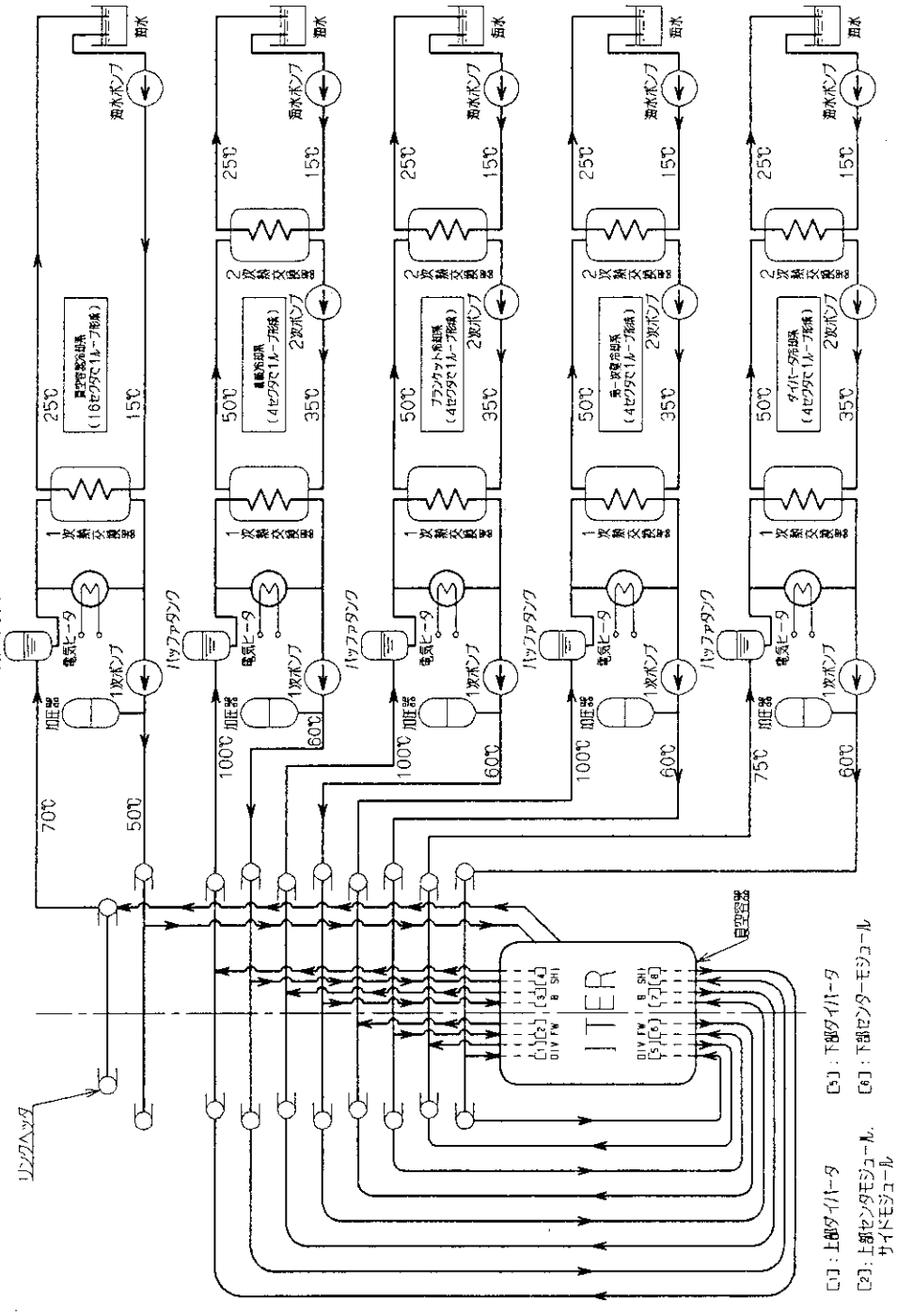


図4.6.1　上部ポート配管取合ノズル配置



[1]：上部ダイバータ　[5]：下部ダイバータ

[2]：上部センタモジュール，サイドモジュール，インボードモジュール　[6]：下部センタモジュール

[3]：上部センタモジュール，サイドモジュール，インボードモジュール　[7]：下部センタモジュール

[4]：上部センタモジュール，サイドモジュール，上部センタ遮蔽プラグ，上部サイド遮蔽プラグ，インボードモジュール　[8]：下部センタモジュール，下部遮蔽プラグ

図 4.6.2　冷却系統図

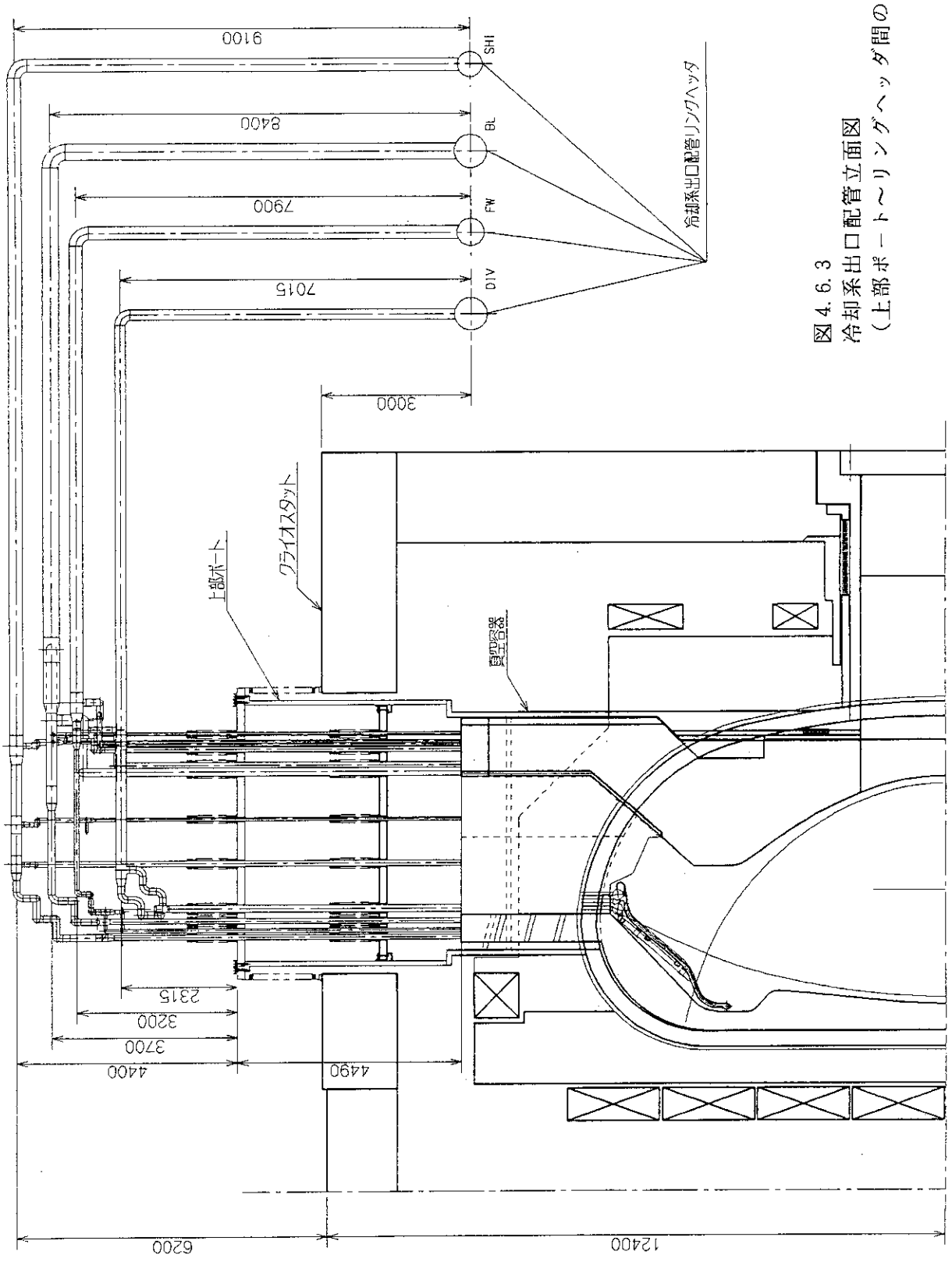


図4.6.3
冷却系出口配管立面図
（上部ポート～リングヘッダ間のみ）

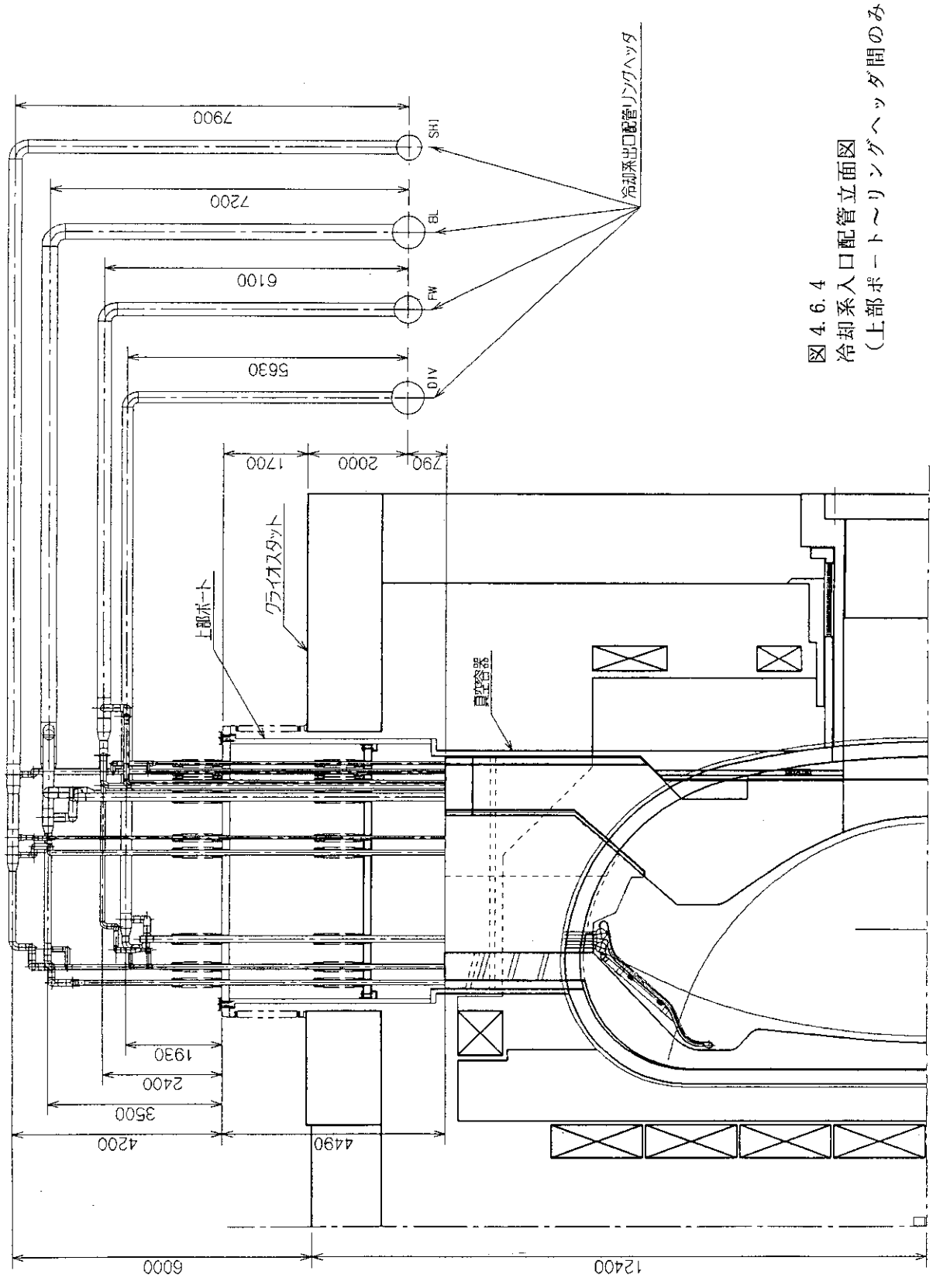


図 4.6.4
冷却系入口配管立面図
（上部ポート～リングヘッダ間のみ）

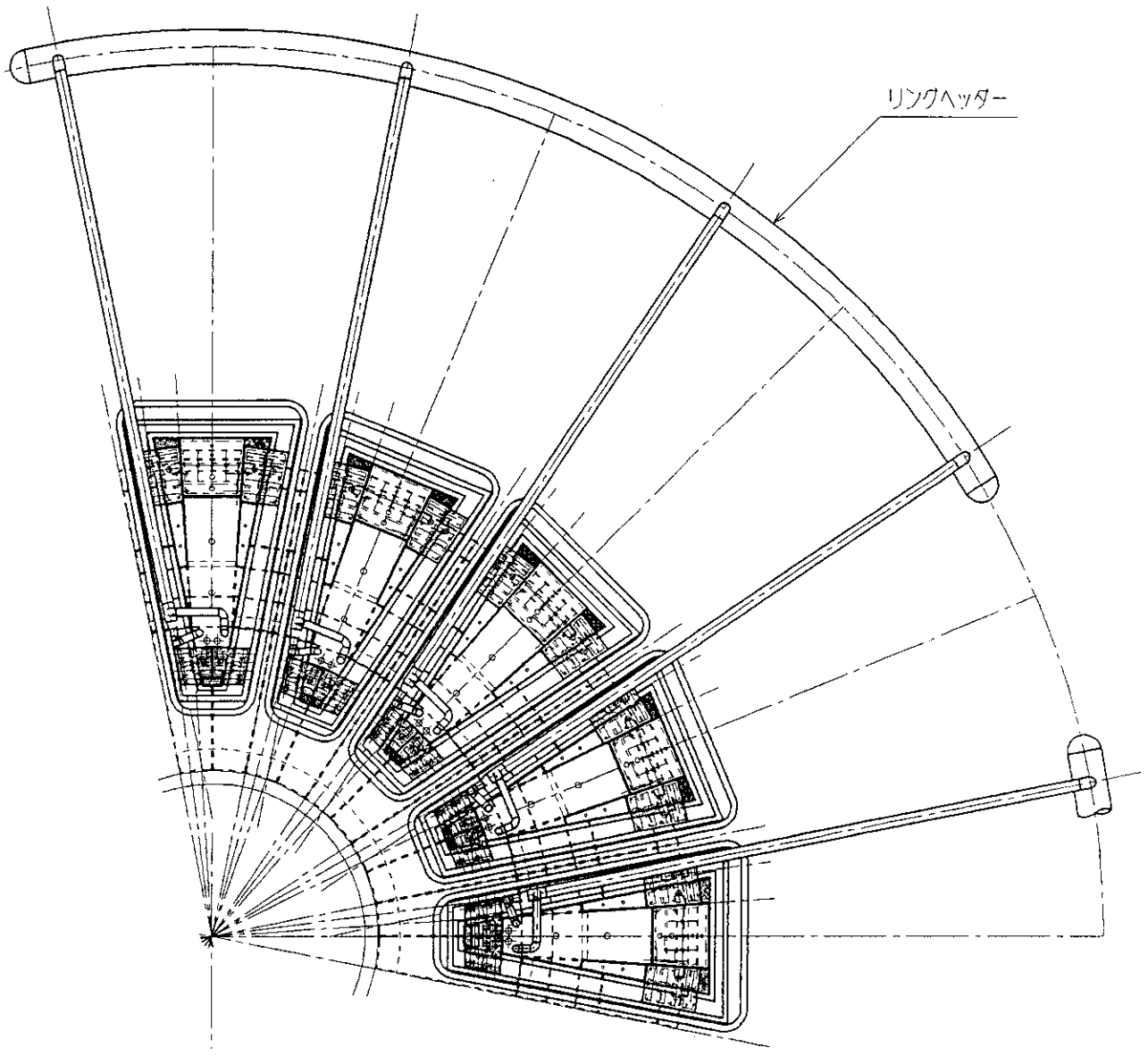


図 4.6.5　ダイバータ冷却系入口配管

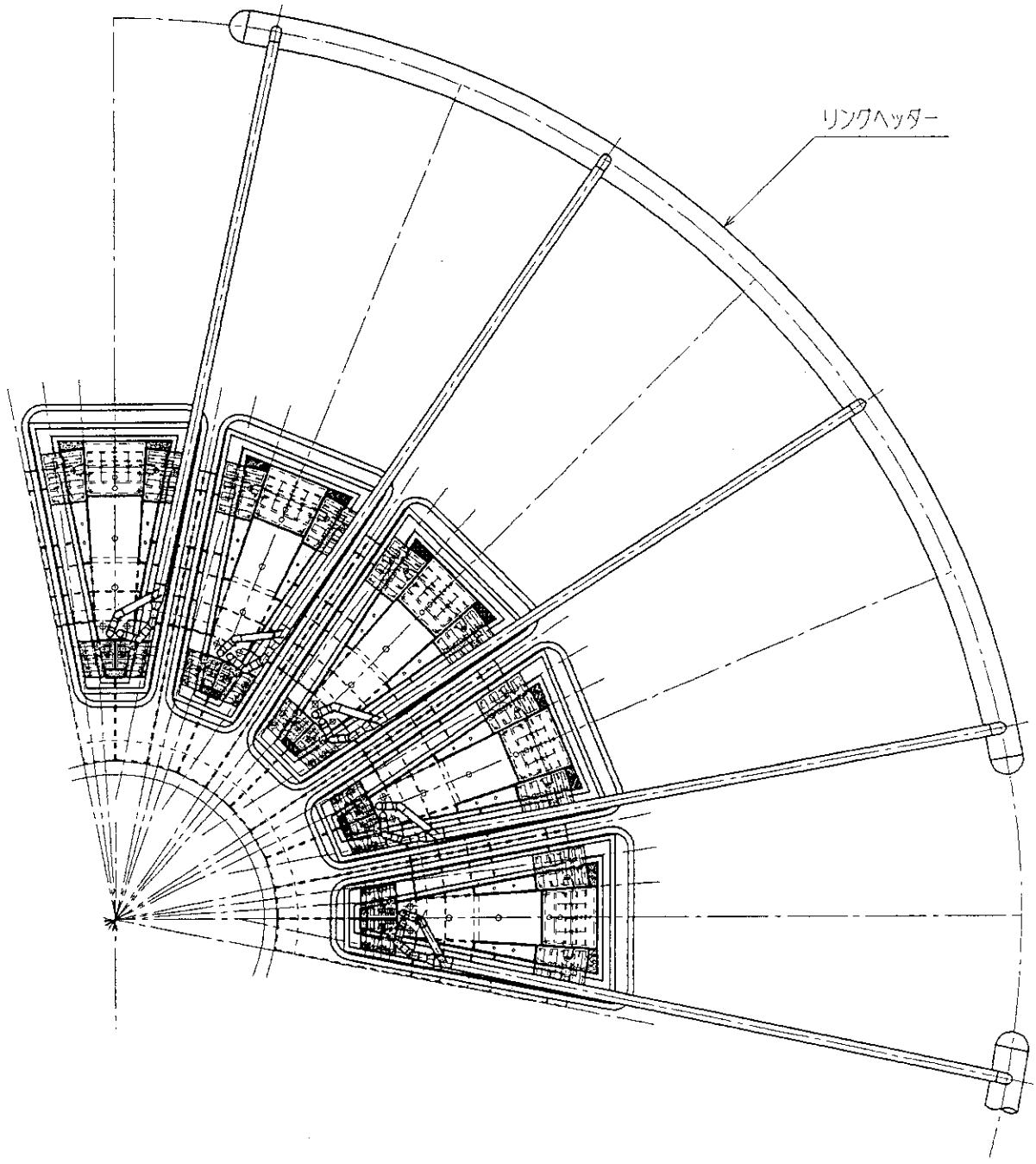


図4.6.6　ダイバータ冷却系出口配管

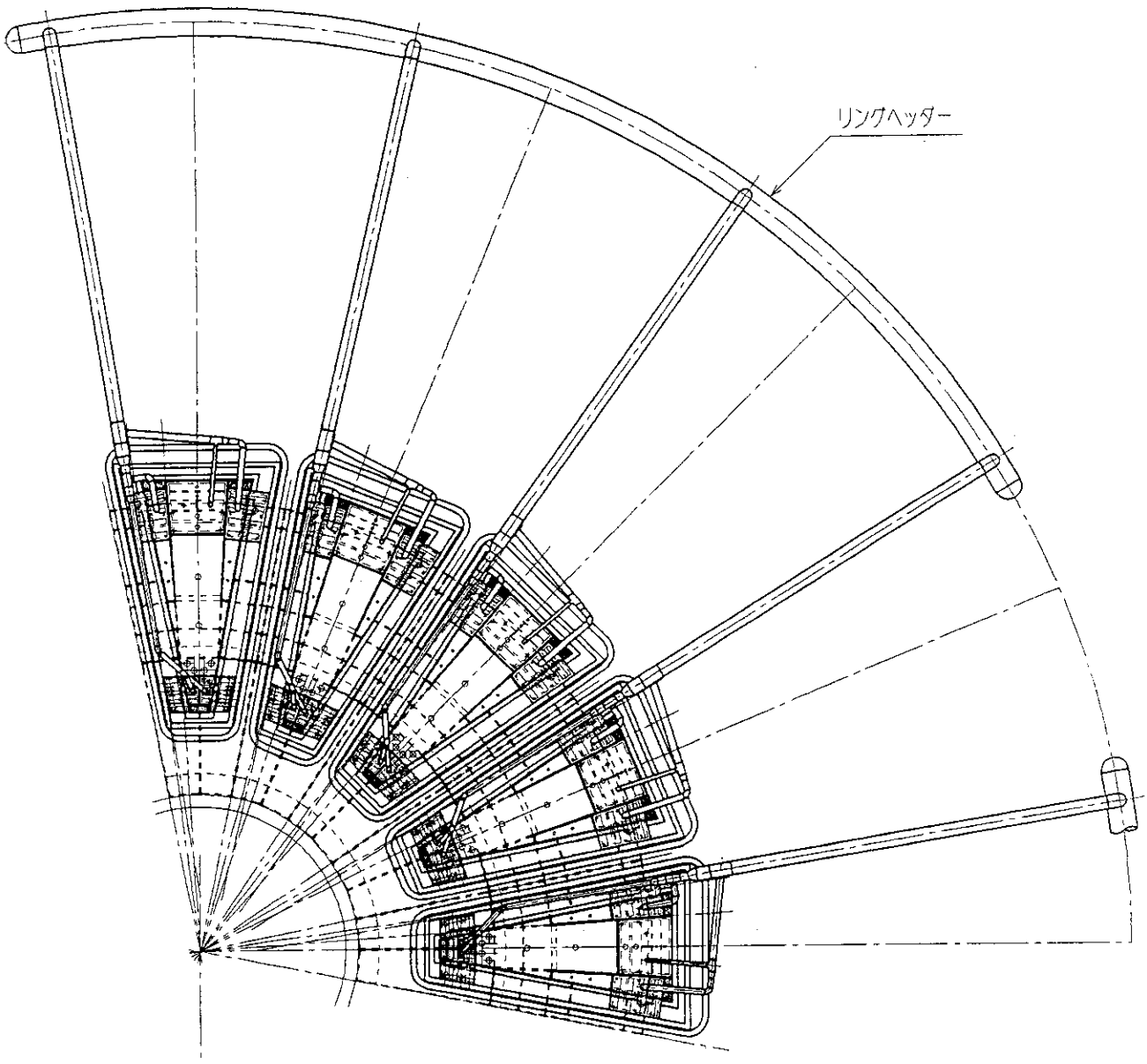


図4.6.7　第一次壁冷却系入口配管

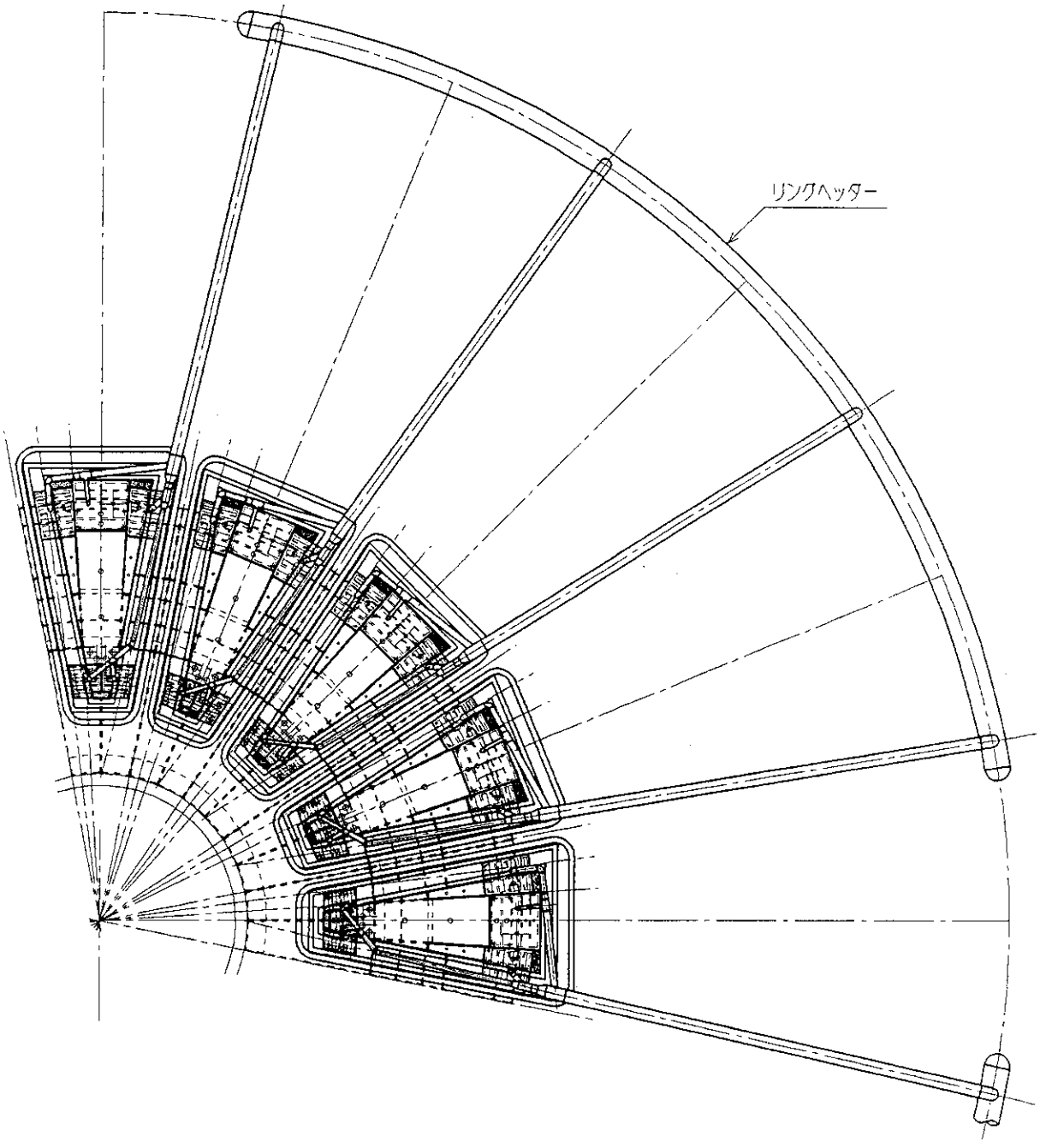


図 4.6.8　第一次壁冷却系出口配管

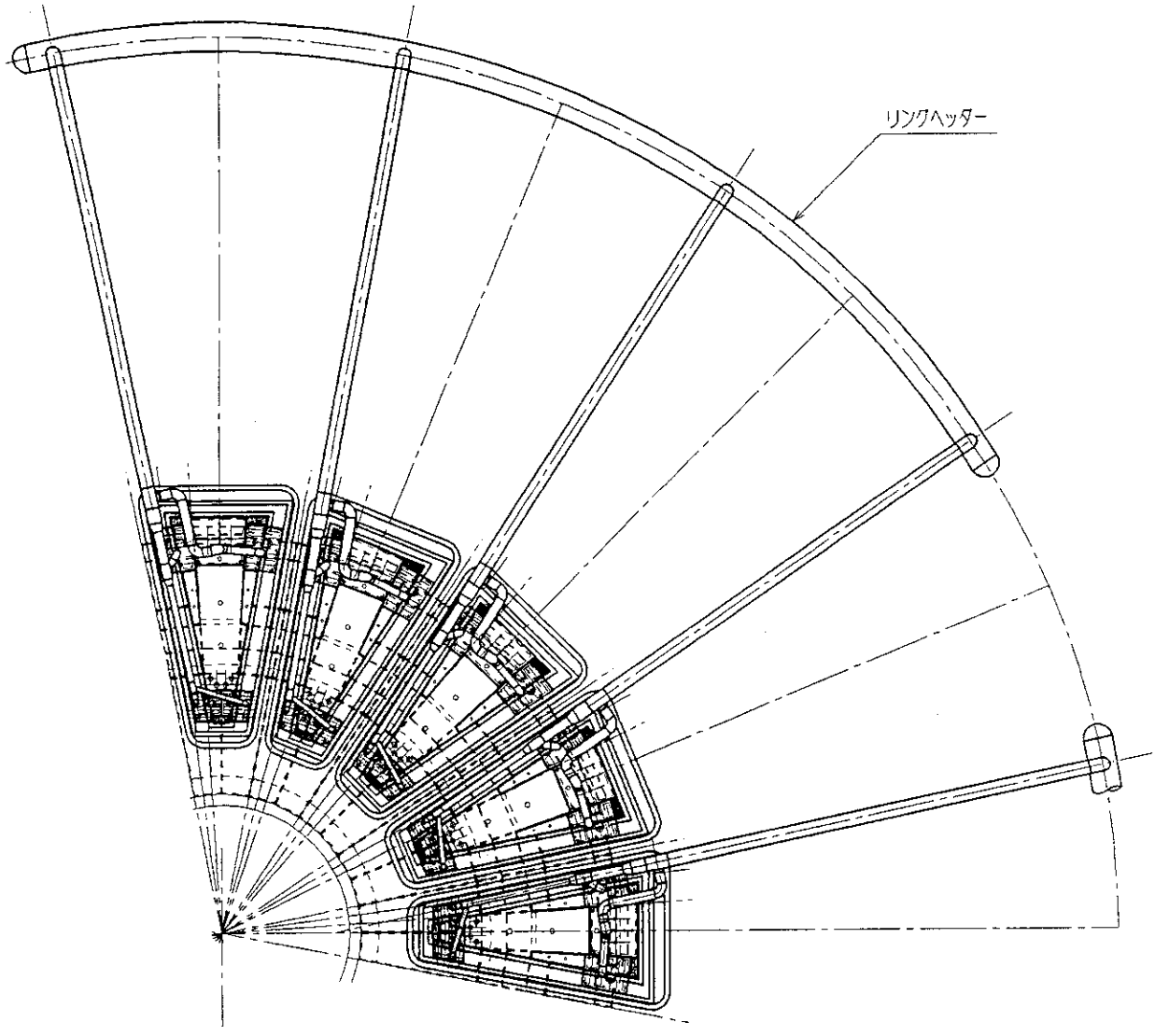


図4.6.9　ブランケット冷却系入口配管

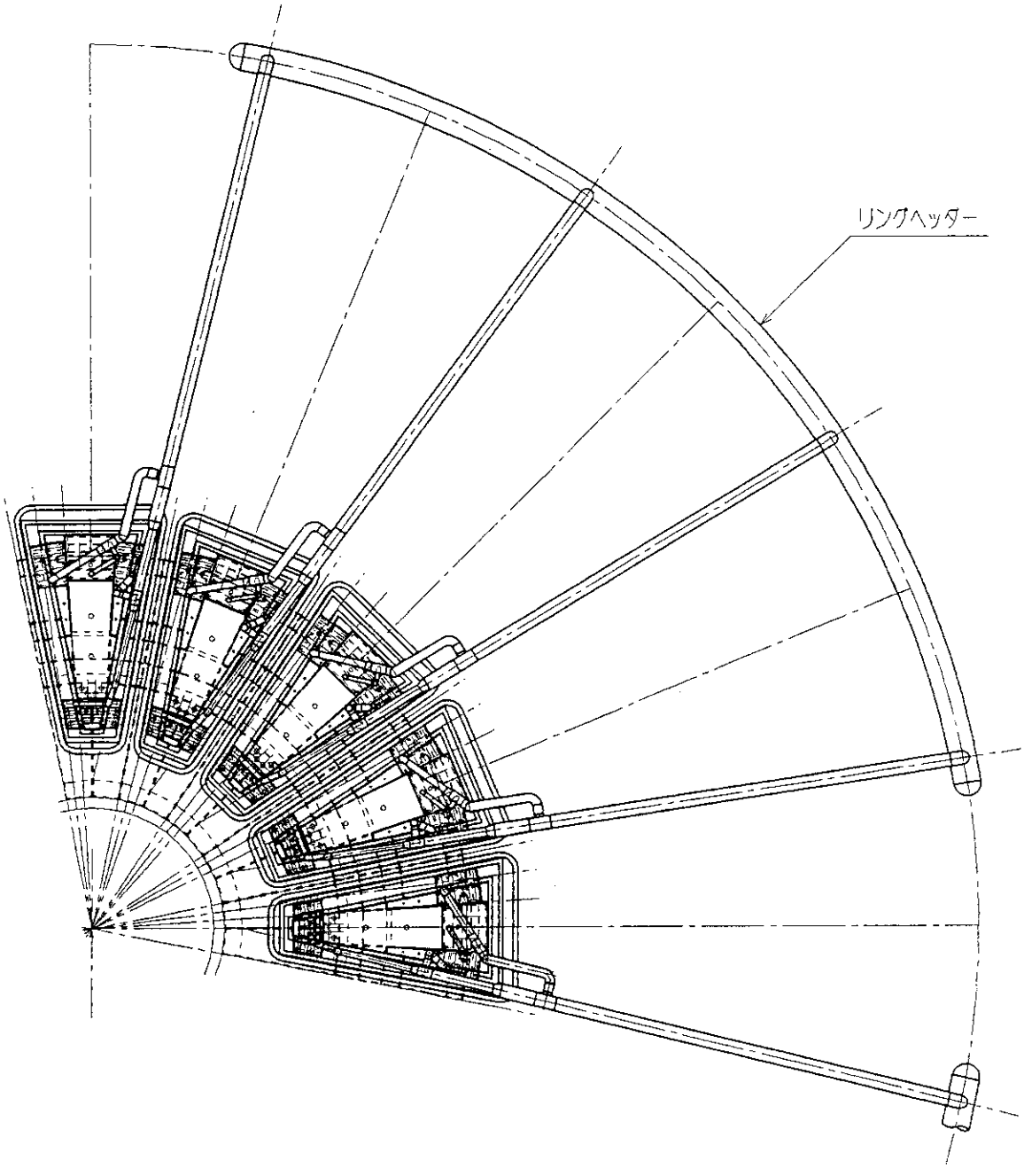


図4.6.10　ブランケット冷却系出口配管

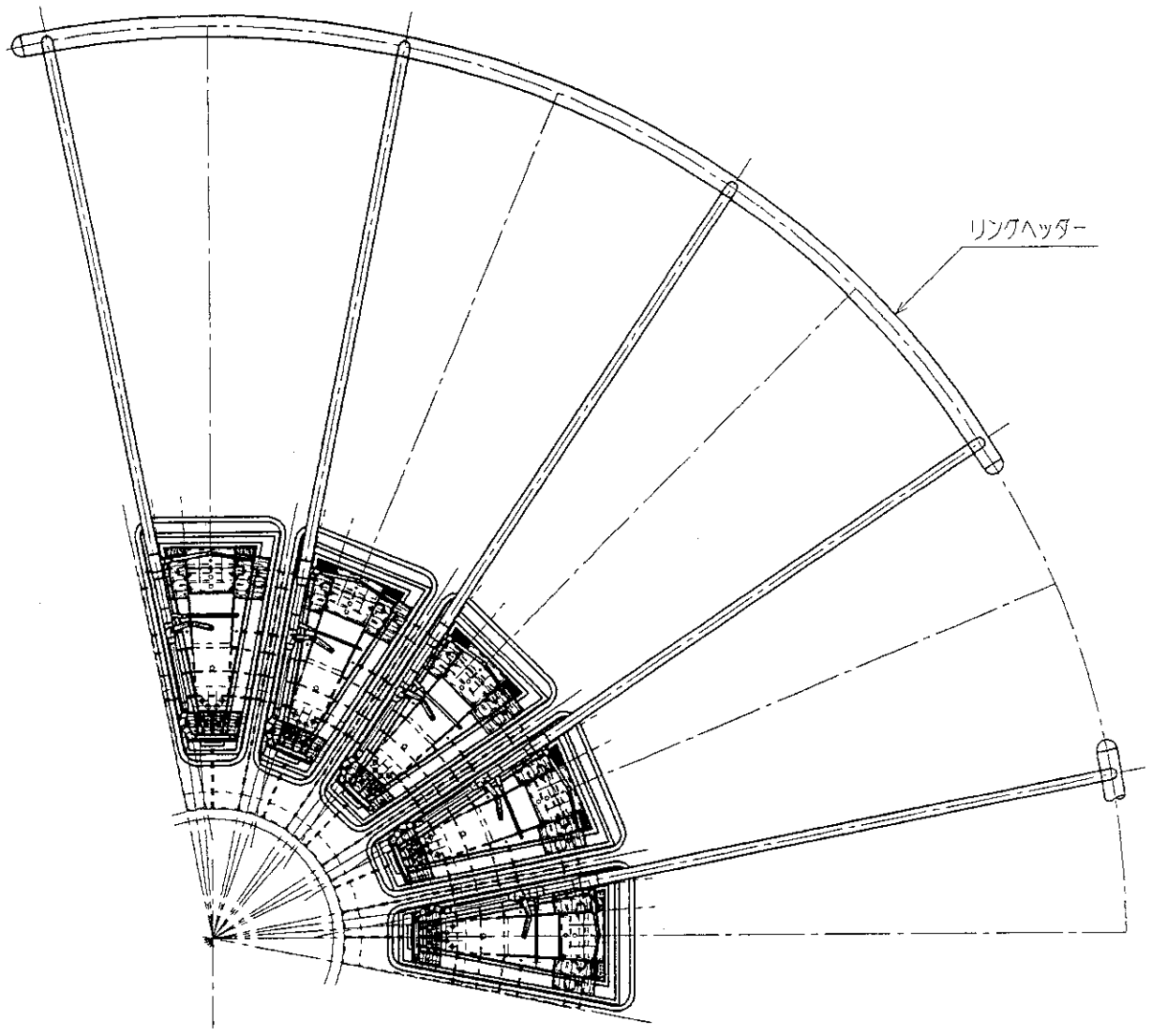


図 4. 6.11　遮 蔽 冷 却 系 入 口 配 管

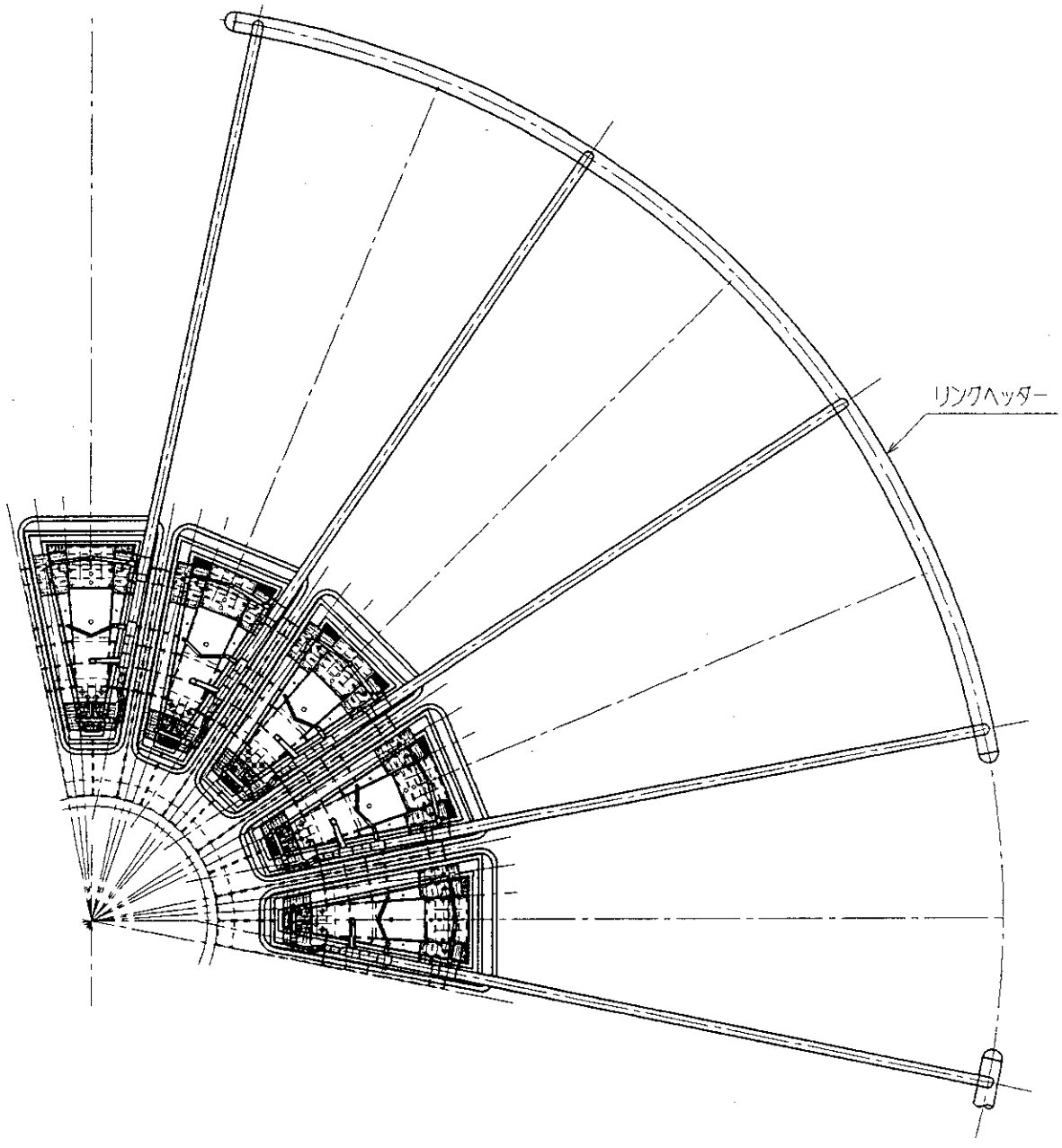


図 4.6.12　遮蔽冷却系出口配管

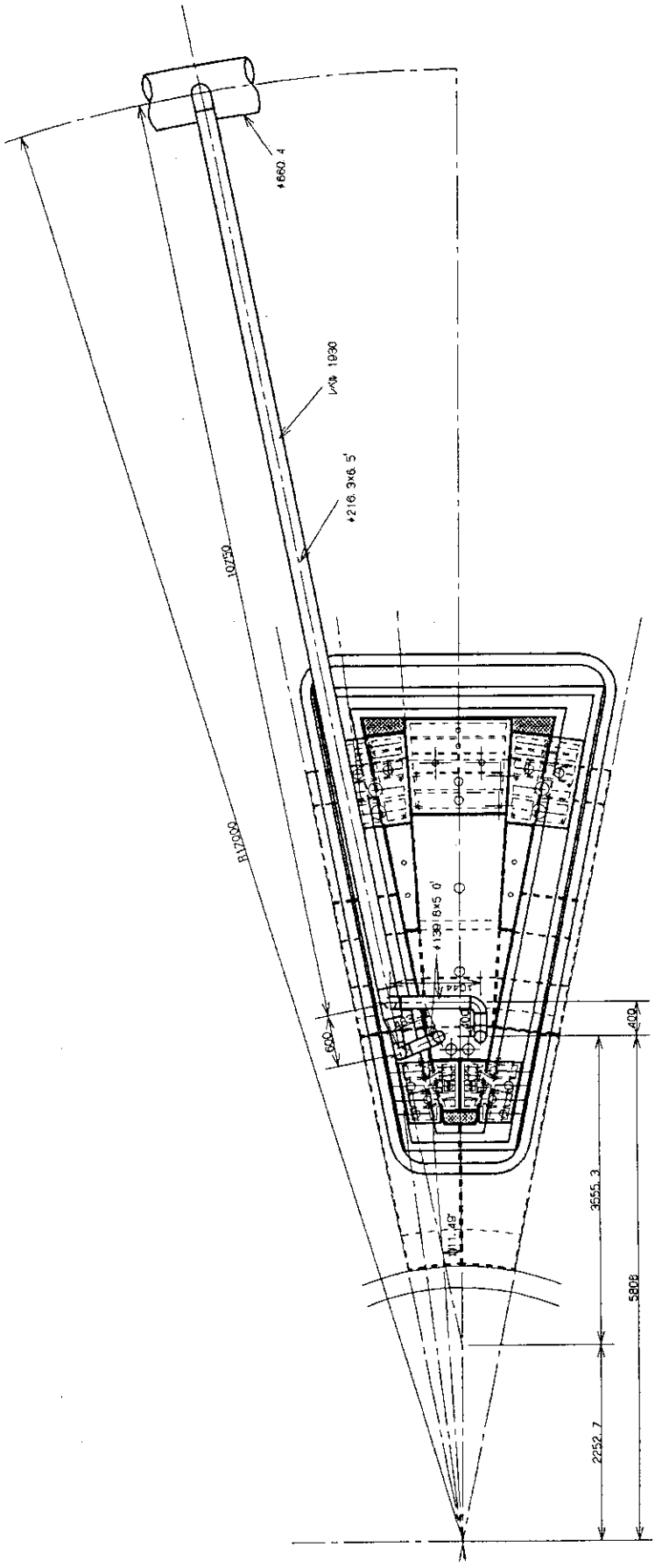


図 4.6.13　ダイバータ冷却系入口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

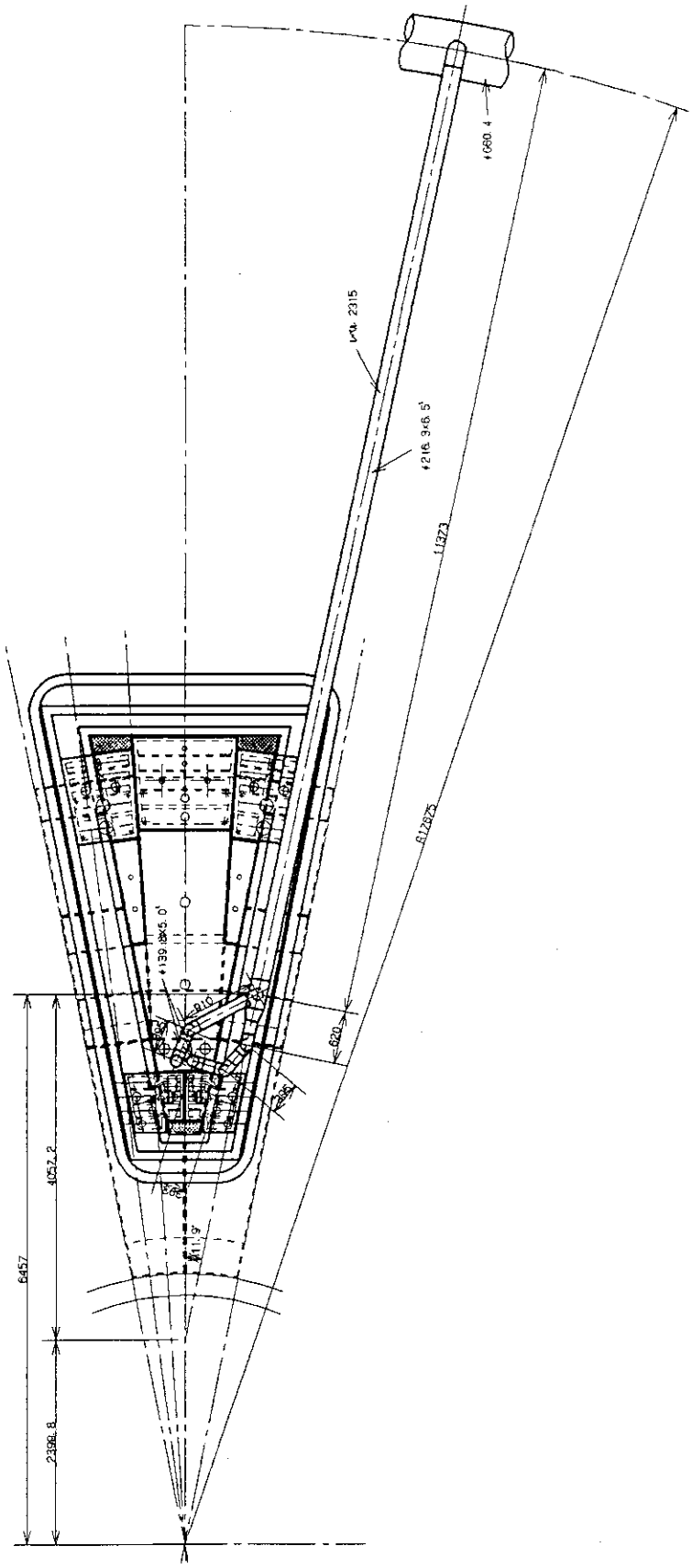


図4.6.14　ダイバータ冷却系出口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

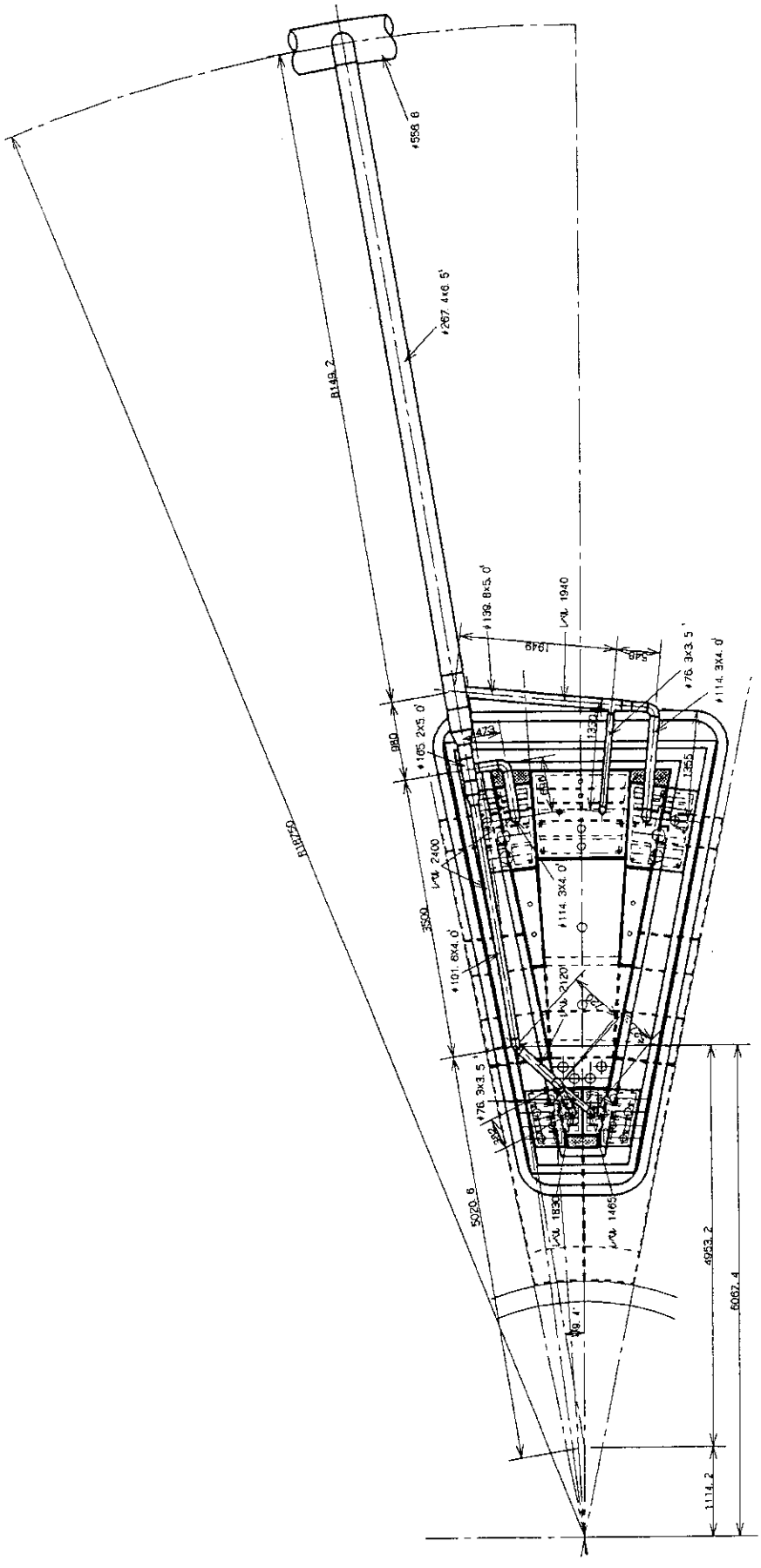


図 4.6.15　第一次壁冷却系入口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

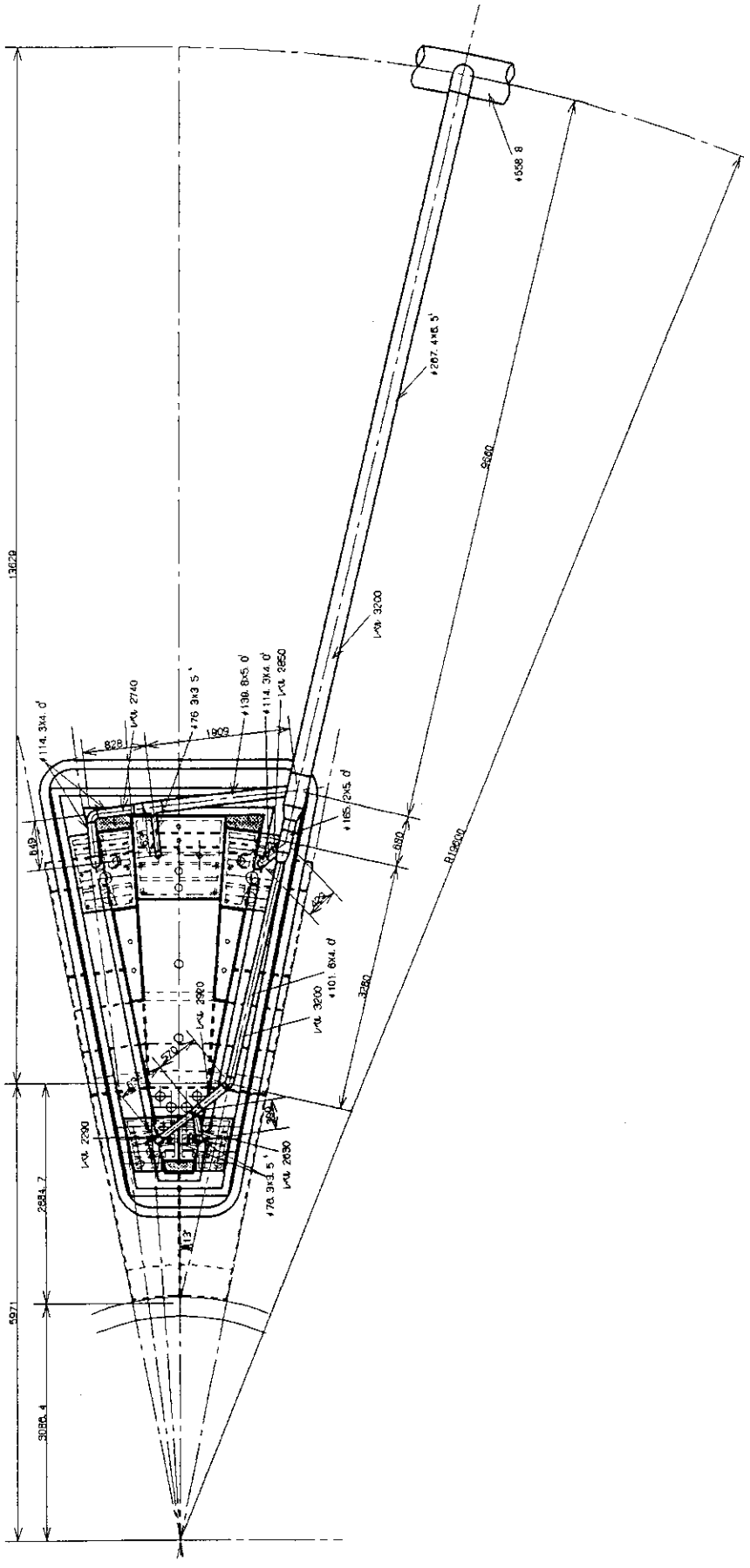


図 4.6.16　第一次壁冷却系出口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

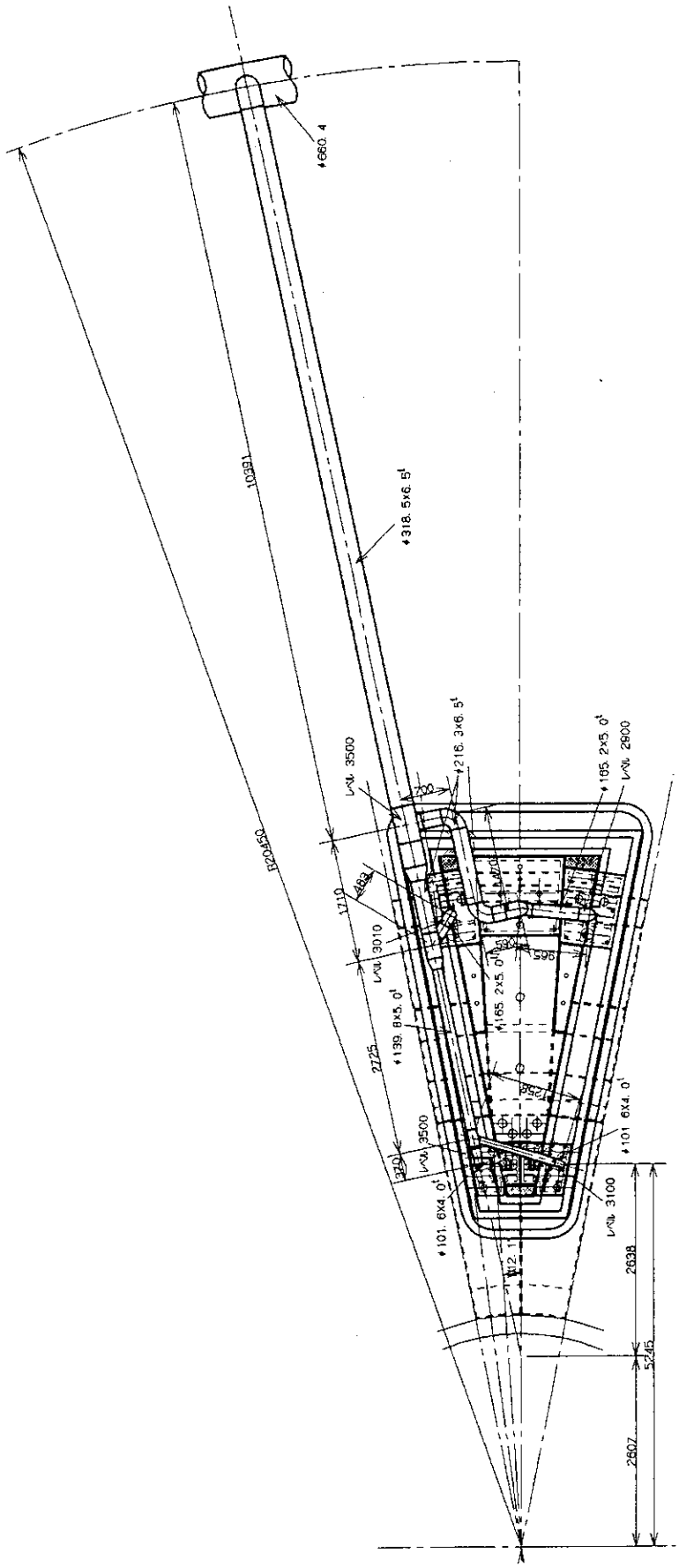


図 4.6.17　ブランケット冷却系入口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

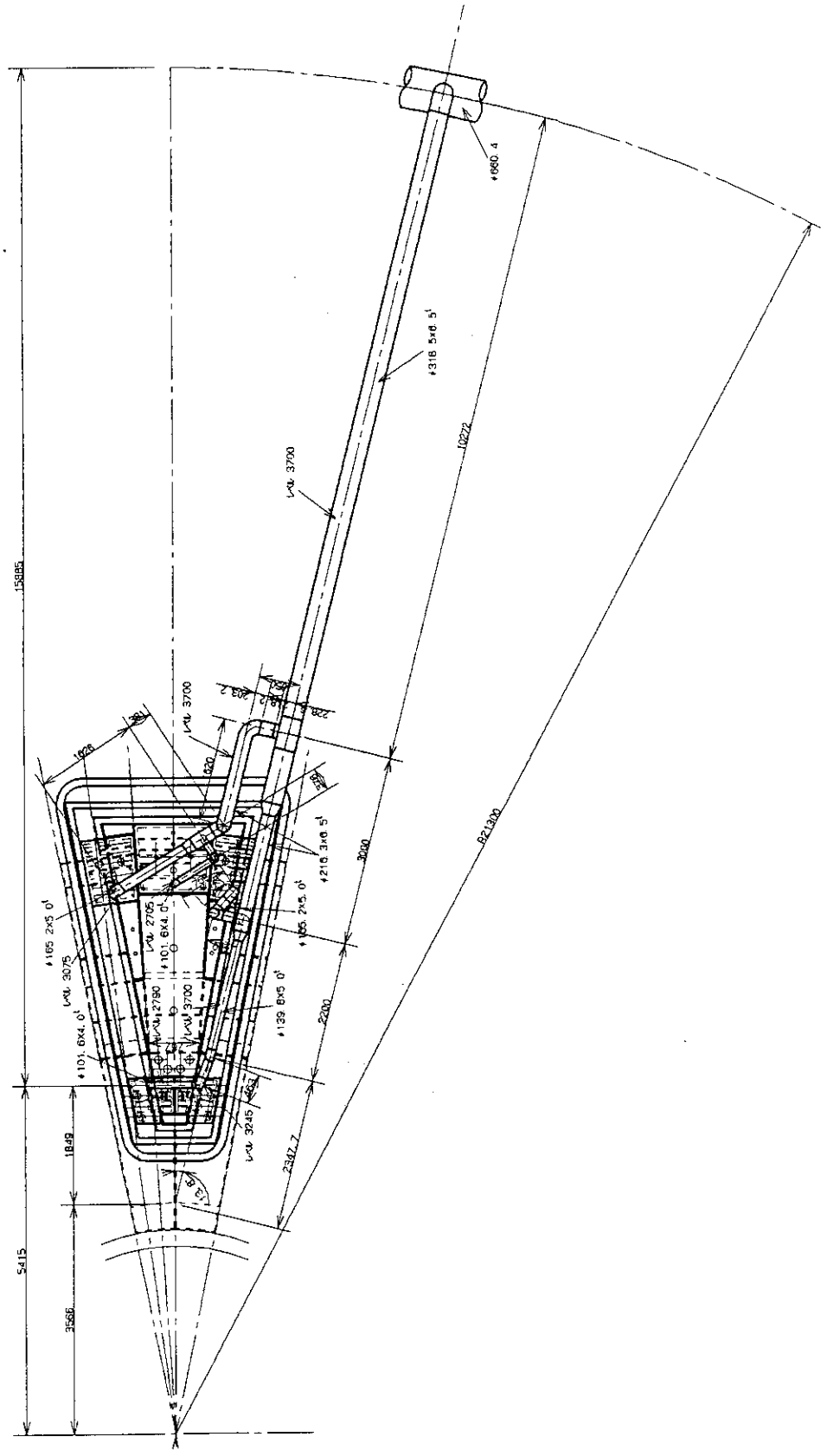


図4.6.18　プラントケット冷却系出口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

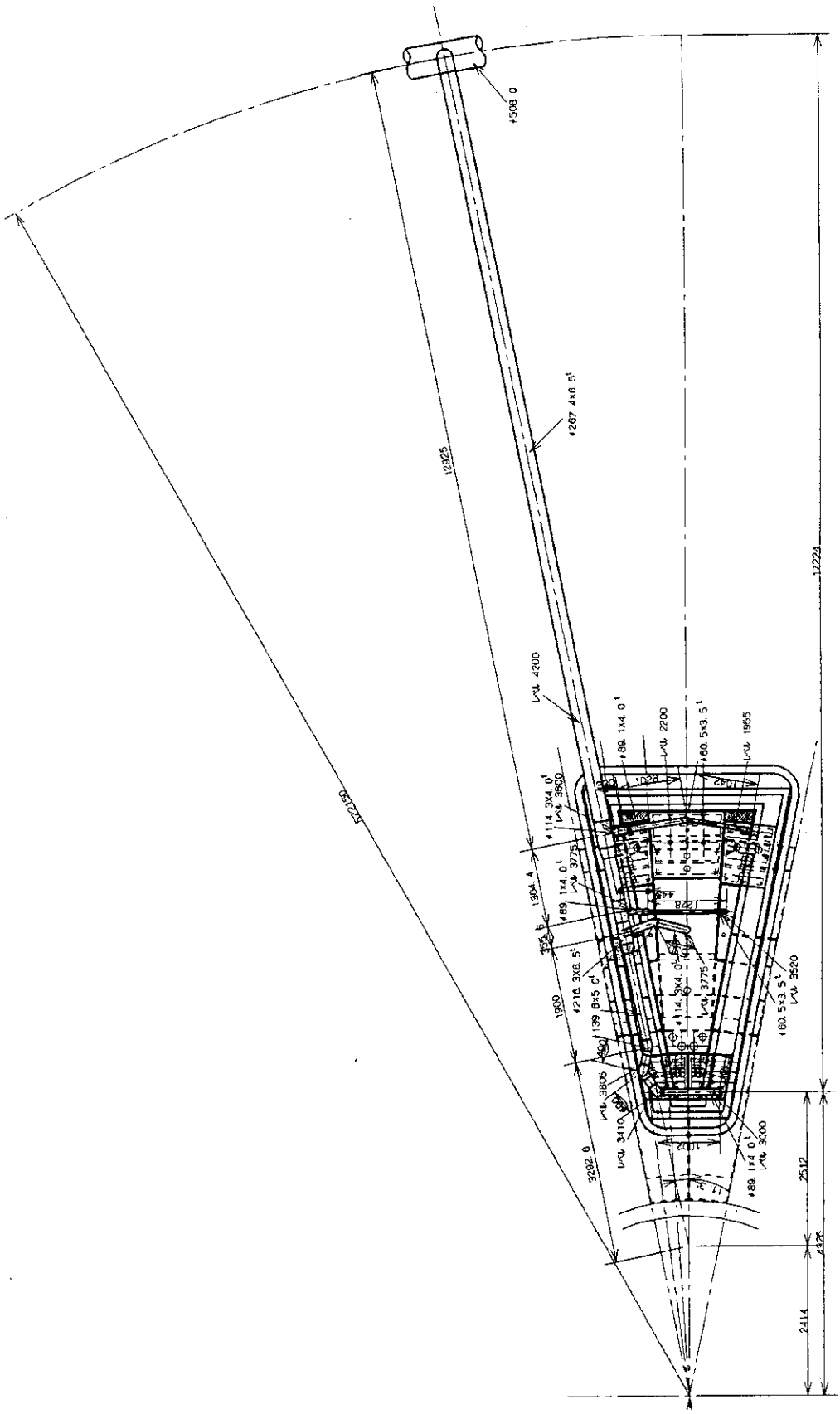


図 4.6.19　遮蔽冷却系入口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

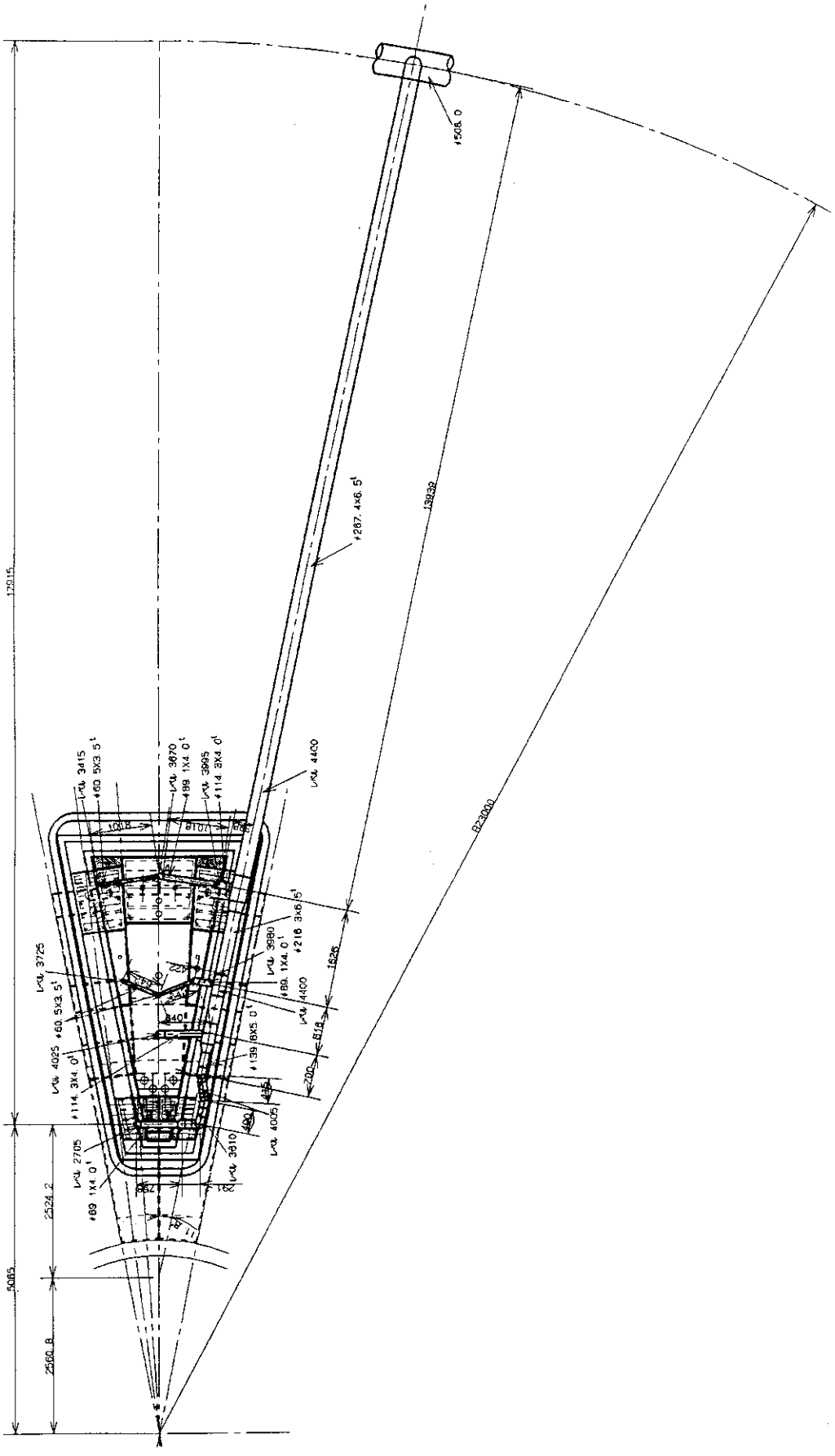


図 4.6.20　遮蔽冷却系出口配管
（図中のレベルは上部ポート上端からのレベルを示す。）

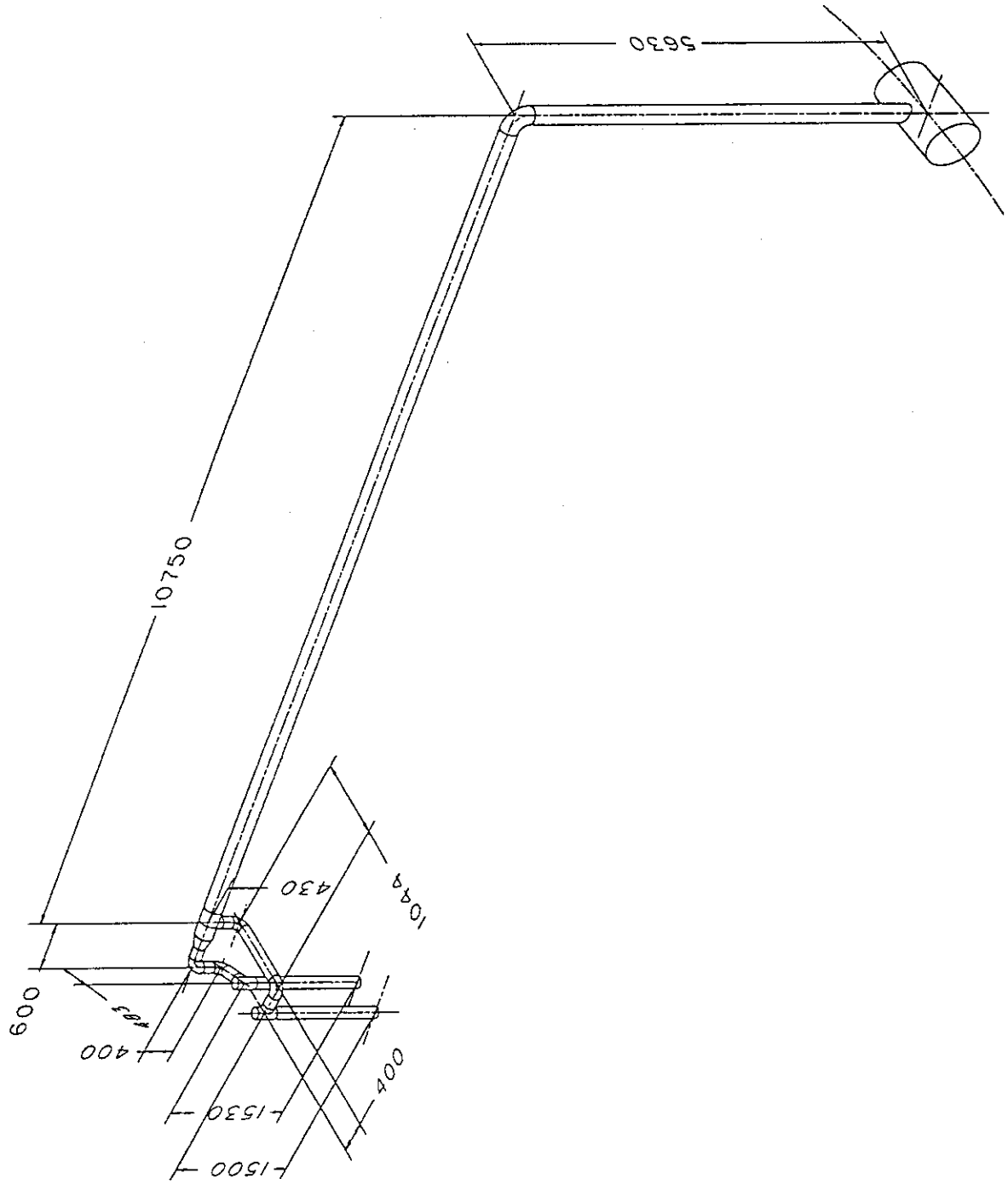


図4.6.21　ダイバータ冷却系入口配管

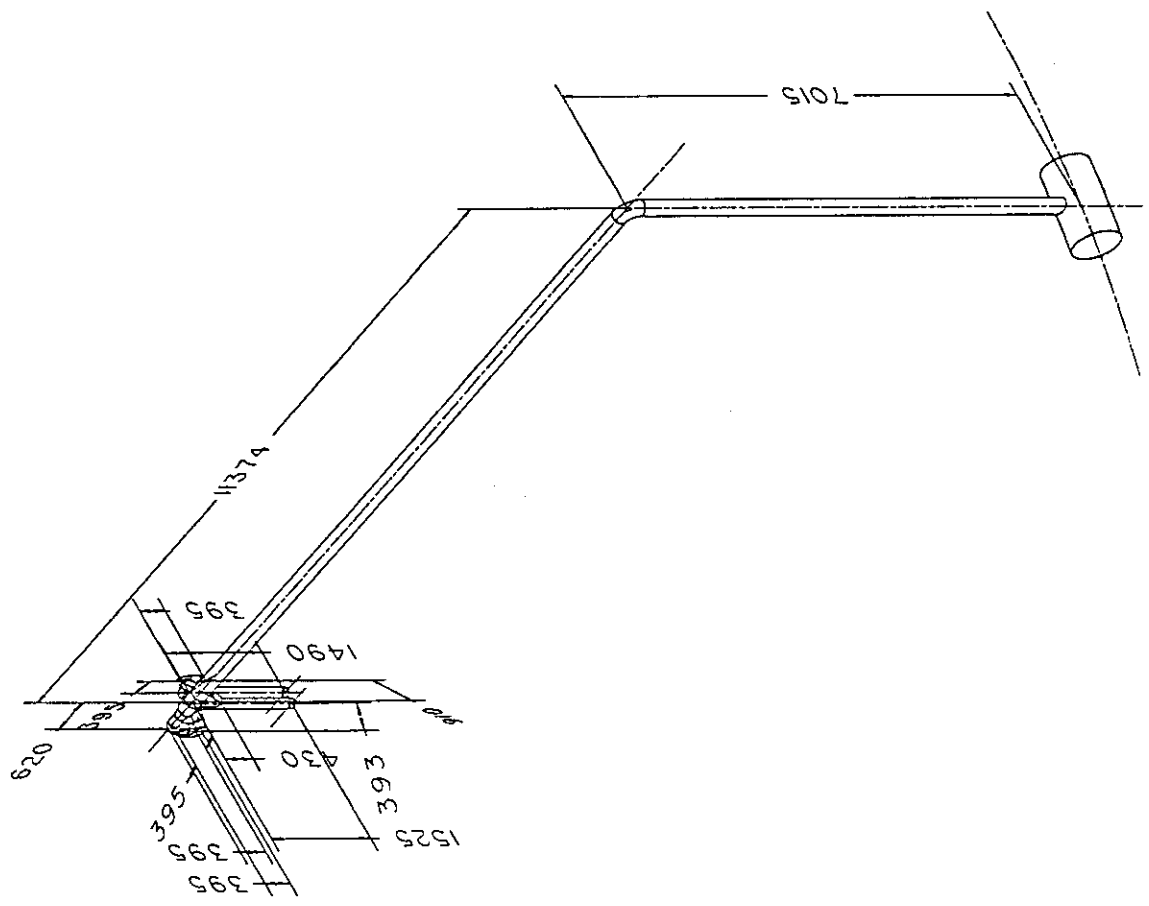


図 4.6.22　ダイバータ冷却系出口配管

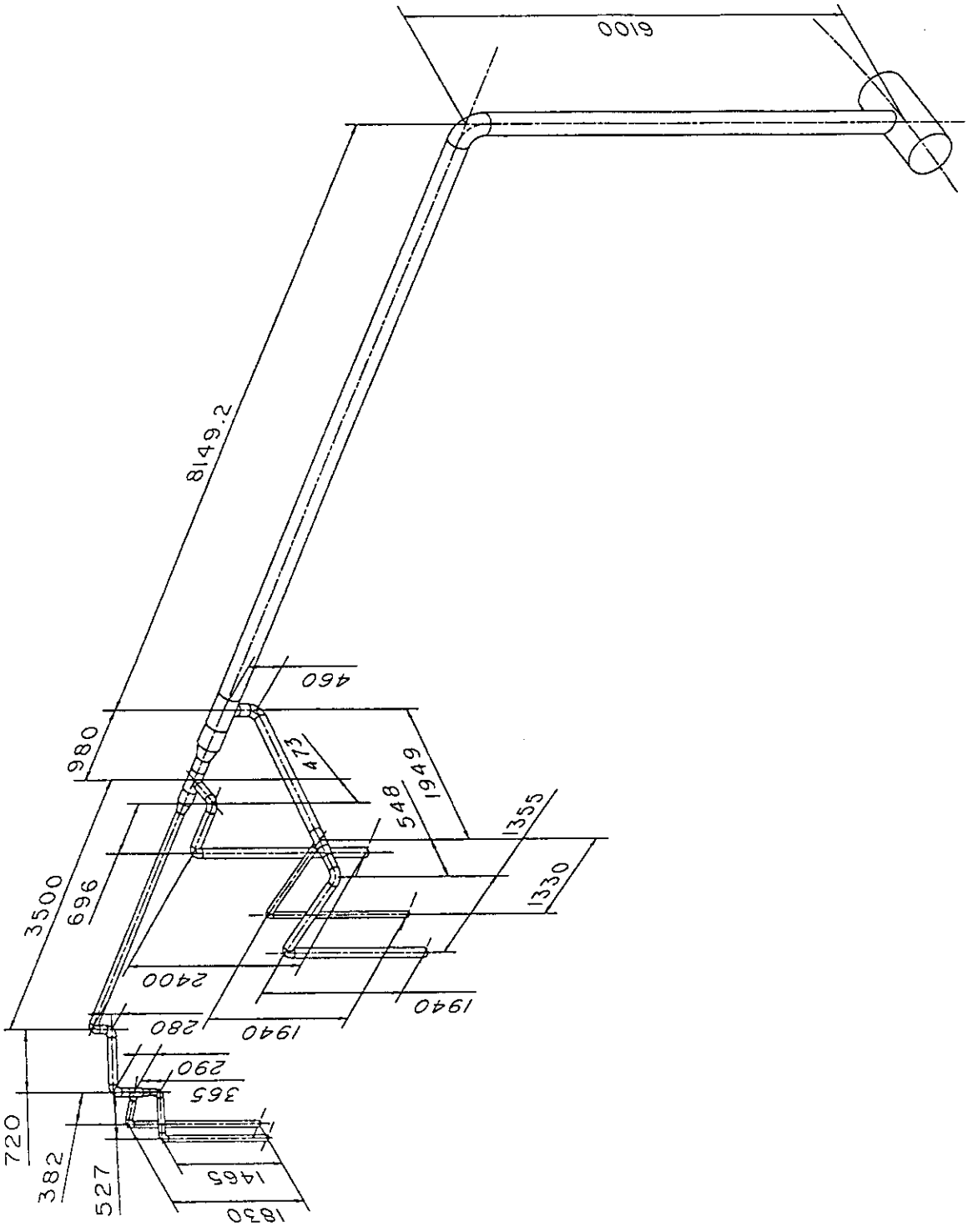


図 4.6.23　第 1 壁冷却系入口配管

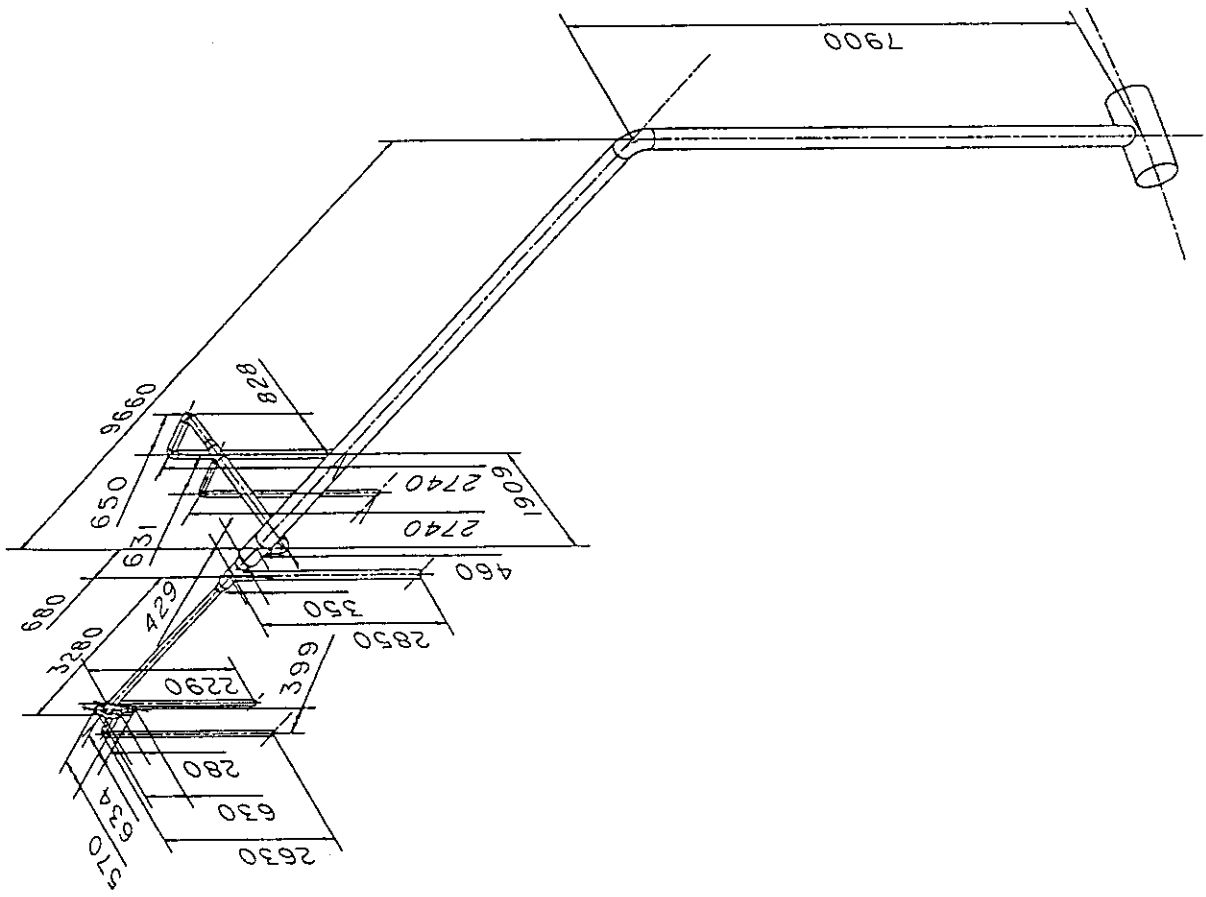


図4.6.24　第1壁冷却系出口配管

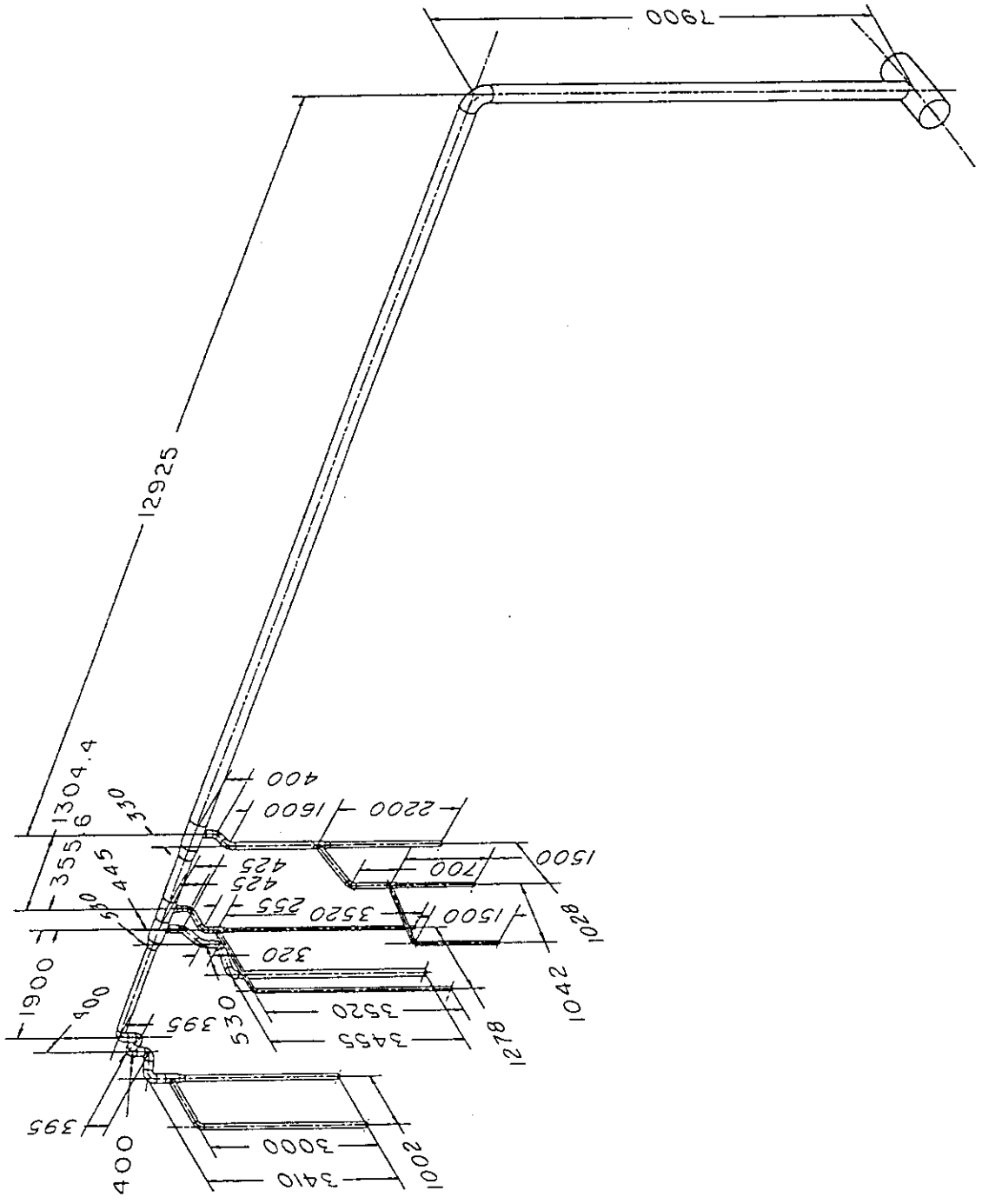


図4.6.25　しゃへい冷却系入口配管

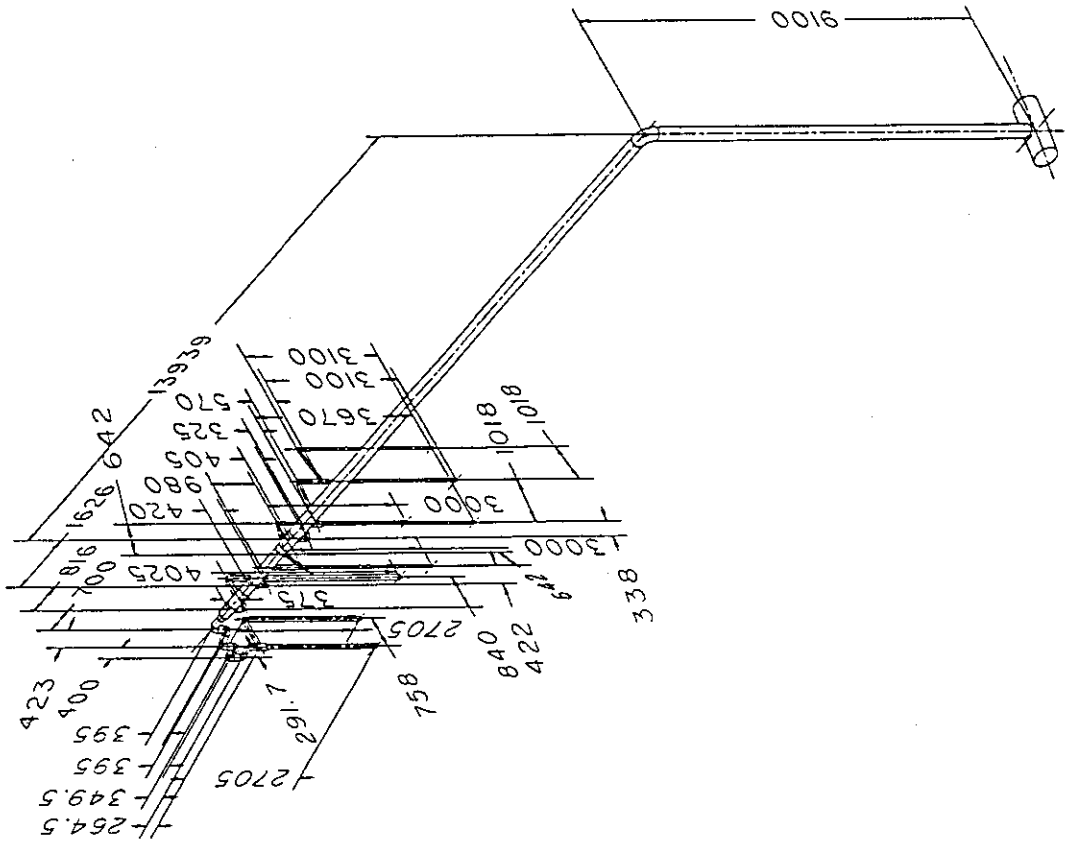


図 4.6.26　しゃへい冷却系出口配管

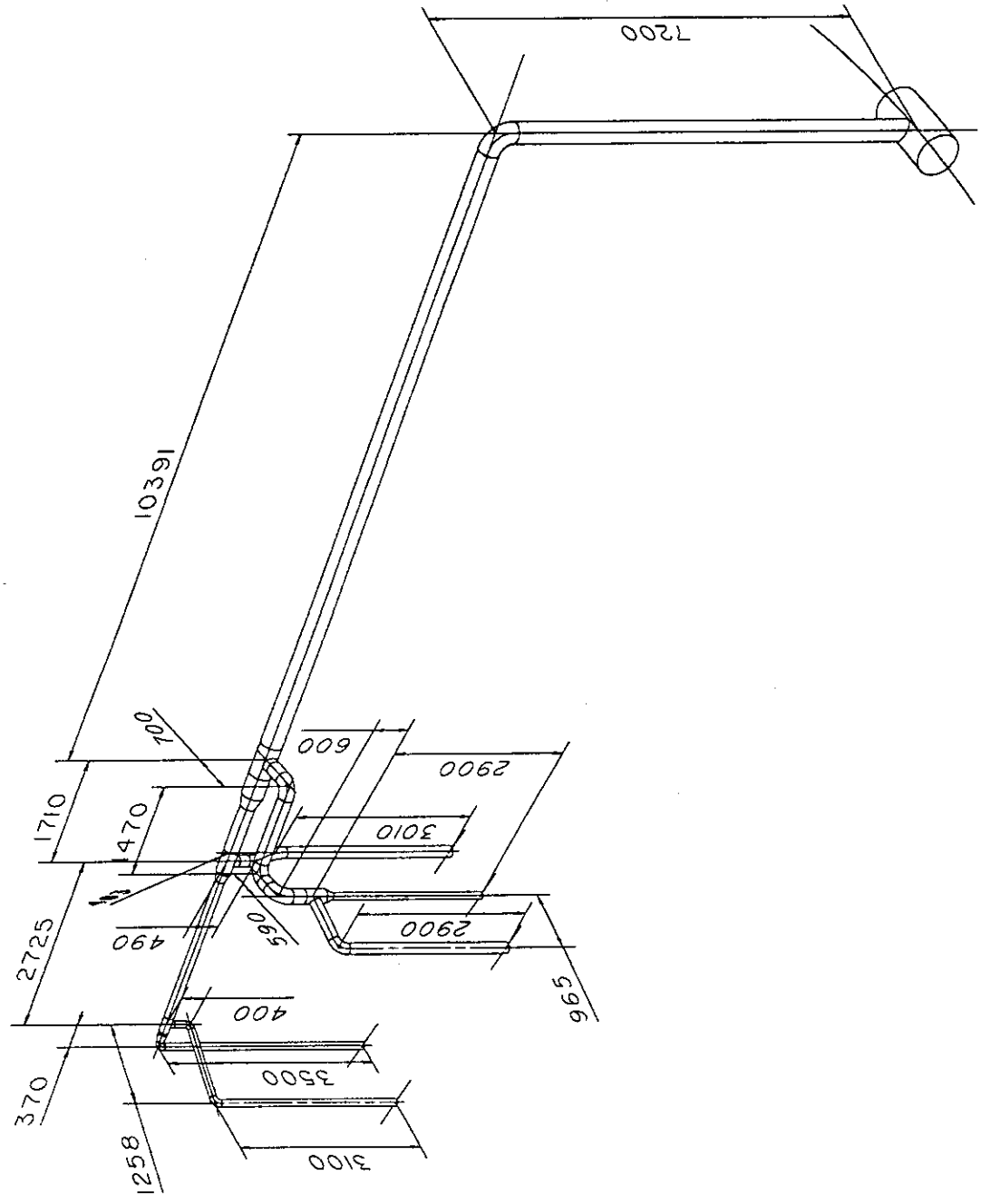


図 4.6.27　ブランケット冷却系入口配管

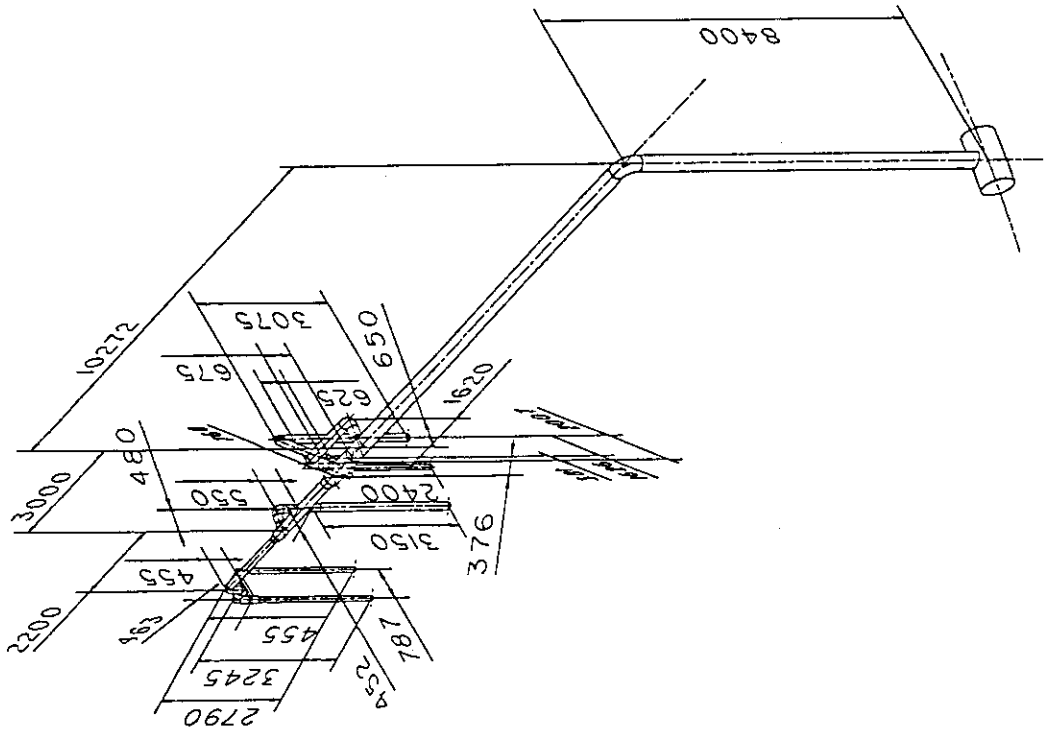


図 4.6.28　ブランケット冷却系出口配管

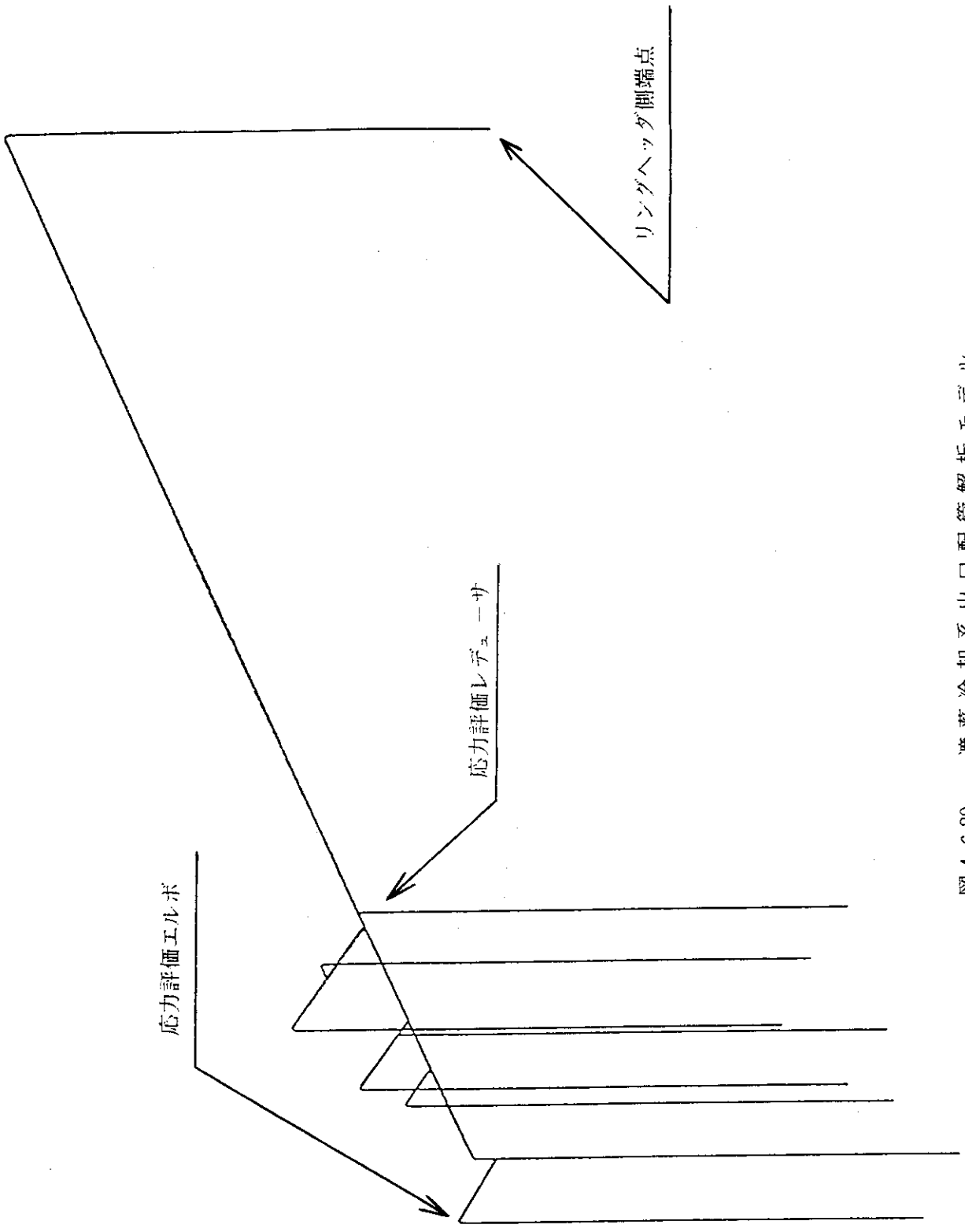


図 4.6.29　遮蔽冷却系出口配管解析モデル

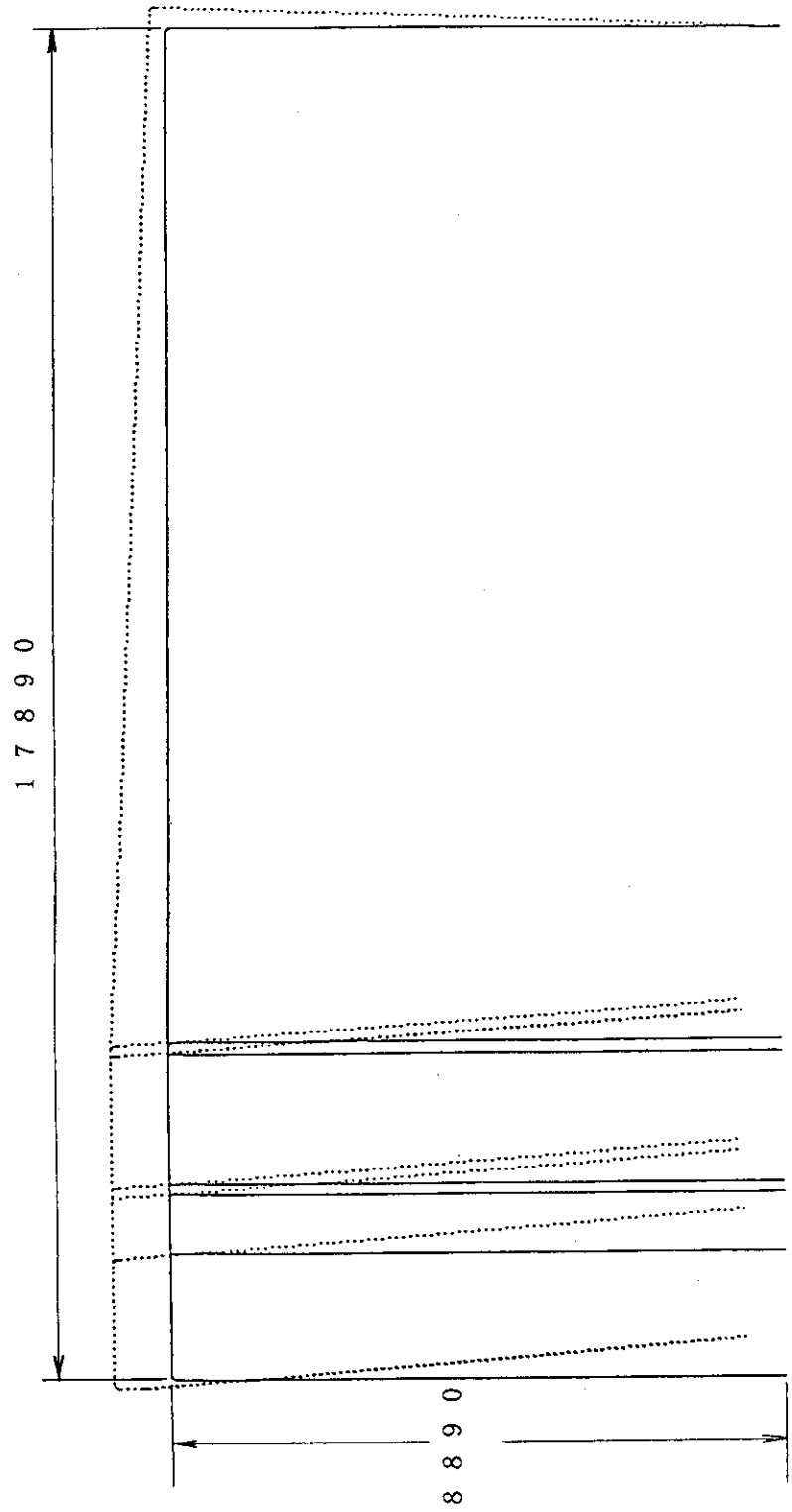


図 4.6.30　遮蔽冷却系出口配管熱膨張変位

4.7 大口径ベローズ

1) はじめに

プラズマを保持する真空容器は，外気並びに真空容器を収納するクライオスタット雰囲気とは気密隔離して設置される。しかし，真空容器には容器内へアクセスする各種ポート類があり，これらの大部分はクライオスタットを貫通して室内雰囲気である外気に開口している。もちろん開口部は通常，計測等の外部機器が装着されているか，あるいは真空を保持するため閉止板にて密閉されている。本真空容器はプラズマ性能向上のため，ベーキングを行ったり，あるいは運転中の加熱等で真空容器の温度が変化するが，クライオスタットはほぼ，常温であるため，真空容器とクライオスタットの寸法関係は真空容器の熱伸縮のため，変化する。ポート部も熱影響が加わり，熱伸縮の影響を受ける。このため，これ等の間の寸法関係を補償する部品としてベローズ装着が要求される。ポートの口径の最大のものは幅約3m，長さ約6mもあり，最大級の大口径ベローズ（以下のベローズと記す）が必要である。

2) ベローズの仕様

ベローズに関する主な仕様を表4.7.1，及び2に示す。ITERの設計は現在，進行中であり，特に真空容器に関連する機器や，ベローズの仕様，あるいは，デューティは未だ定まっていないが，これらの条件に基づいて基本構造の検討を行った。

3) 構造

ベローズの形状，構造はポート開口部の寸法，形状によるところ大であるが，ベローズの形式や，使用板厚によっても構造が異なる。ベローズの形式として，一般に断面形状が蛇行形となる成形加工を行って製作する成形ベローズと円盤状の薄板の内周，外周をそれぞれに溶接してベローズ形状とする溶接ベローズがあるが，これ等のベローズ形式として表4.7.2に示す通りそれぞれ特色があり，ITER真空容器として溶接を可能な限り少なくすること，及び耐圧力の立場から比較的板厚の厚くできる成形ベローズを採用することとした。

真空容器に取付られるベローズ類を図4.7.1示す。ベローズの代表例として台形状，及び矩形状のベローズ構造を図4.7.2，及び3に示す。図に示すように台形や，矩形矩形の形をしたベーロズは直線部を有する構造となるので，耐圧力については極めて弱い構造である。このため，直線部に内外圧サポートを設けて補強を行う必要がある。

表 4.7.1　ベローズに関する主な仕様

外部条件	外圧力　正常時	1×10^{-7} Pa（ｸﾗｲｵｽﾀｯﾄの大気バウンダリーより内）
	異常時	1.5×10^{5} Pa（同上）
		（注、クライオスタットの外部は常に大気圧）
	内圧力　正常時	1×10^{-7} Pa
	異常時	2×10^{5} Pa（外圧時とは無関係）
	温度　運転停止時	常温
	通常運転時	100 ℃
	ベーキング時	180 ℃
ベローズ材質		SUS 316
許容漏洩量		1×10^{-8} Pa・L／Sec.
外部磁場		3000 Gauss
トリチウム環境		真空容器内トリチウム有
中性子フラックス		10^{10} n／cm²・Sec.
中性子フルエンス		10^{17} n／cm²

伸縮量　変位等（mm）

条件	回数（回）	上部ポート	水平ポート	下部ポート
通常運転 1)初期（大気圧）	—	ベロー変位は製作者側製作時の初期変位値とする。		
2)常温（真空）	10^{3}	X= 1, Y= 1, Z= 1	X= 2, Y= 2, Z= 1	X= 0, Y= 0, Z= 1
3)100℃ 運転（真空）	10^{4}	X=15, Y= 0, Z=35	X=25, Y= 0, Z=15	X=25, Y= 0, Z=10
4)180℃ 運転（真空）	10^{3}	X=30, Y= 0, Z=65	X=50, Y= 0, Z=30	X=50, Y= 0, Z=20
5)ディスラプション（100℃）		※(X=30, Y=10, Z=30)	※(X=30, Y=10, Z=30)	※(X=30, Y=10, Z=30)
（下段は3)を重畳した値）	10^{3}	X=45, Y=10, Z=65	X=55, Y=10, Z=45	X=55, Y=10, Z=40
6)地震（180℃）		※(X=30, Y=30, Z=10)	※(X=30, Y=30, Z=10)	※(X=30, Y=30, Z=10)
（下段は4)を重畳した値）	10	X=60, Y=30, Z=75	X=80, Y=30, Z=40	X=80, Y=30, Z=30

注記　(1) X=主半径方向，Y=トーラス接線方向，Z=上下方向。(X, Y, Z, はトーラス系)
(2) 上表内に示す※( )内数字は事象のみの値を示す。設計は重畳した値を用いること。
(3) 上表数値はベローズ可動の全振幅を示す。
(4) 上表内 5),6)についてITERは未算出のため、FER のものを引用した。
(5) 上表は、局部的伸縮量についての記載を略し、平均化して表示した。

表 4.7.2　ベローズ製作比較

	成形ベローズ	溶接ベローズ
特色	1)薄板を最小限の溶接継ぎ足しで必要大きさにし、ベローズを塑性加工による成形で製作するため、欠陥の出来やすい溶接個所極めて少なくすることができる。 2)成形治工具の大きさに限りがあるため、ベローズの大きさが限定される。 3)ベローズの板厚成形について、3 mm程度までの加工は可能。	1)円板状薄板を個々に溶接してベローズにするため、溶接個所が極めて多く、強度、信頼性確保が困難である。 2)円板状薄板溶接は多層可能なため、比較的大伸縮ベローズの製作が可能である。 3)ベローズ板厚は溶接施工上、1 mm程度までに限られる。

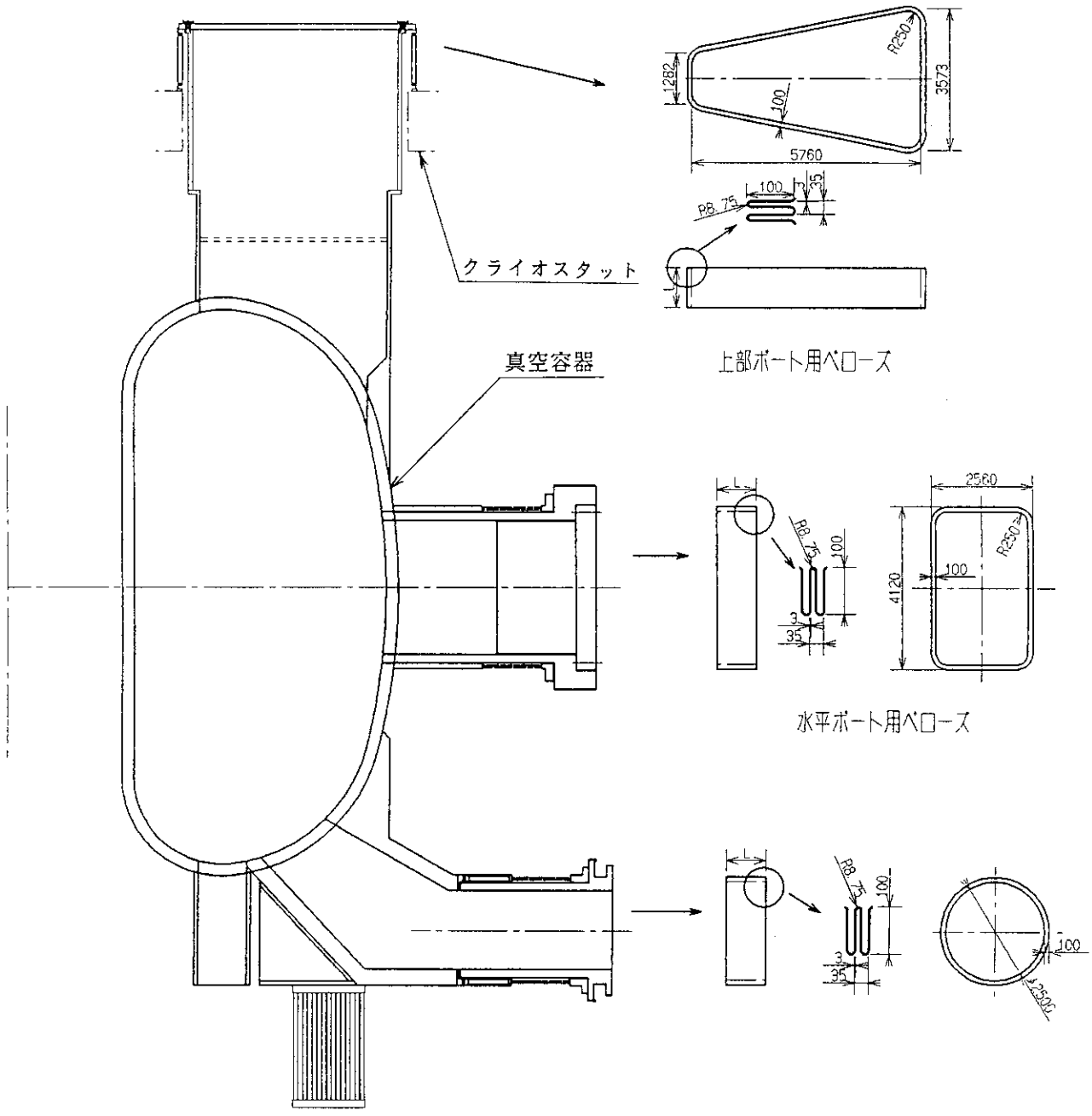
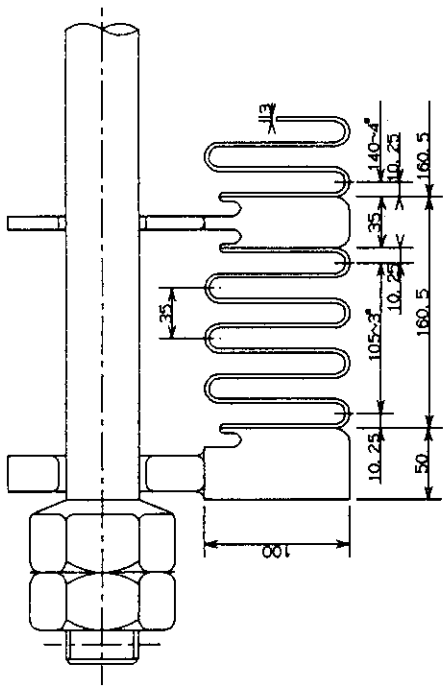
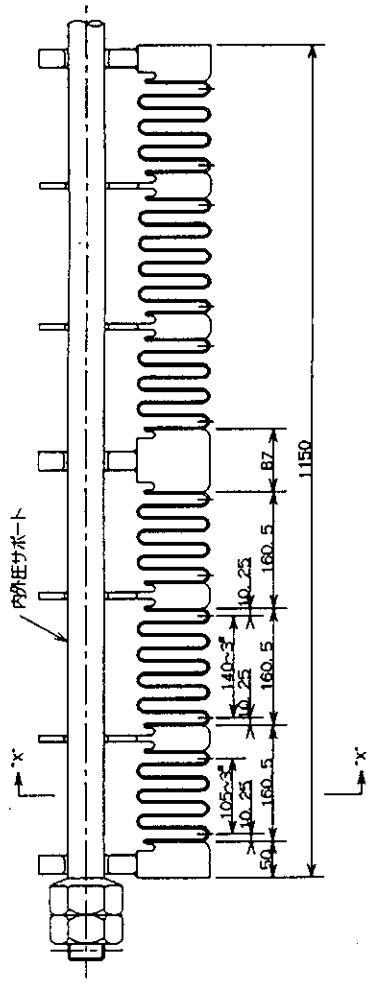


図4.7.1　真空容器のベローズ





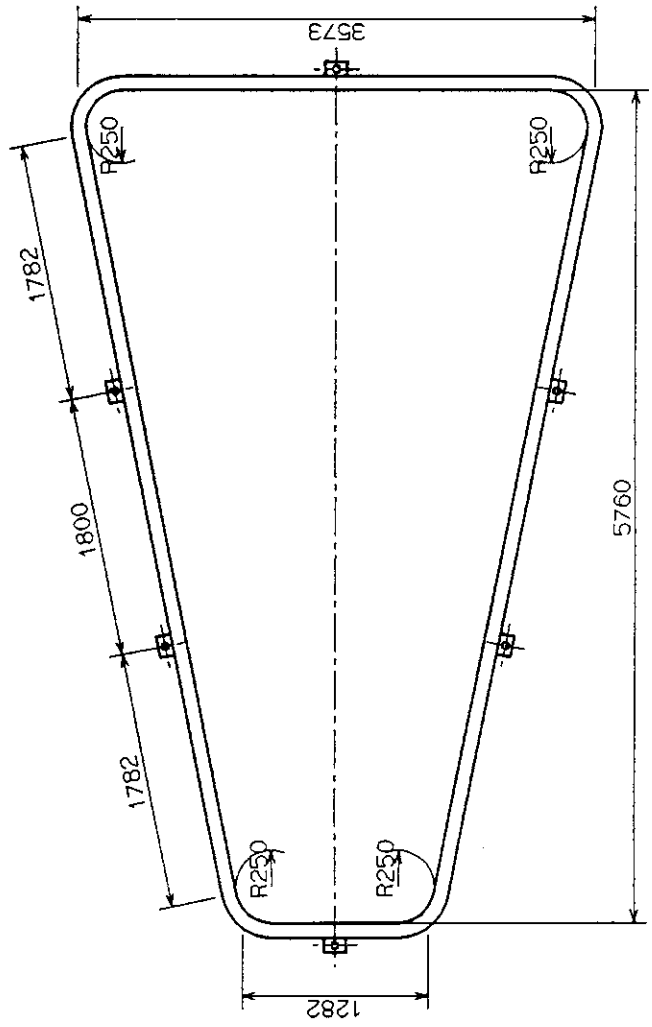


図4.7.2　台形状ベローズ

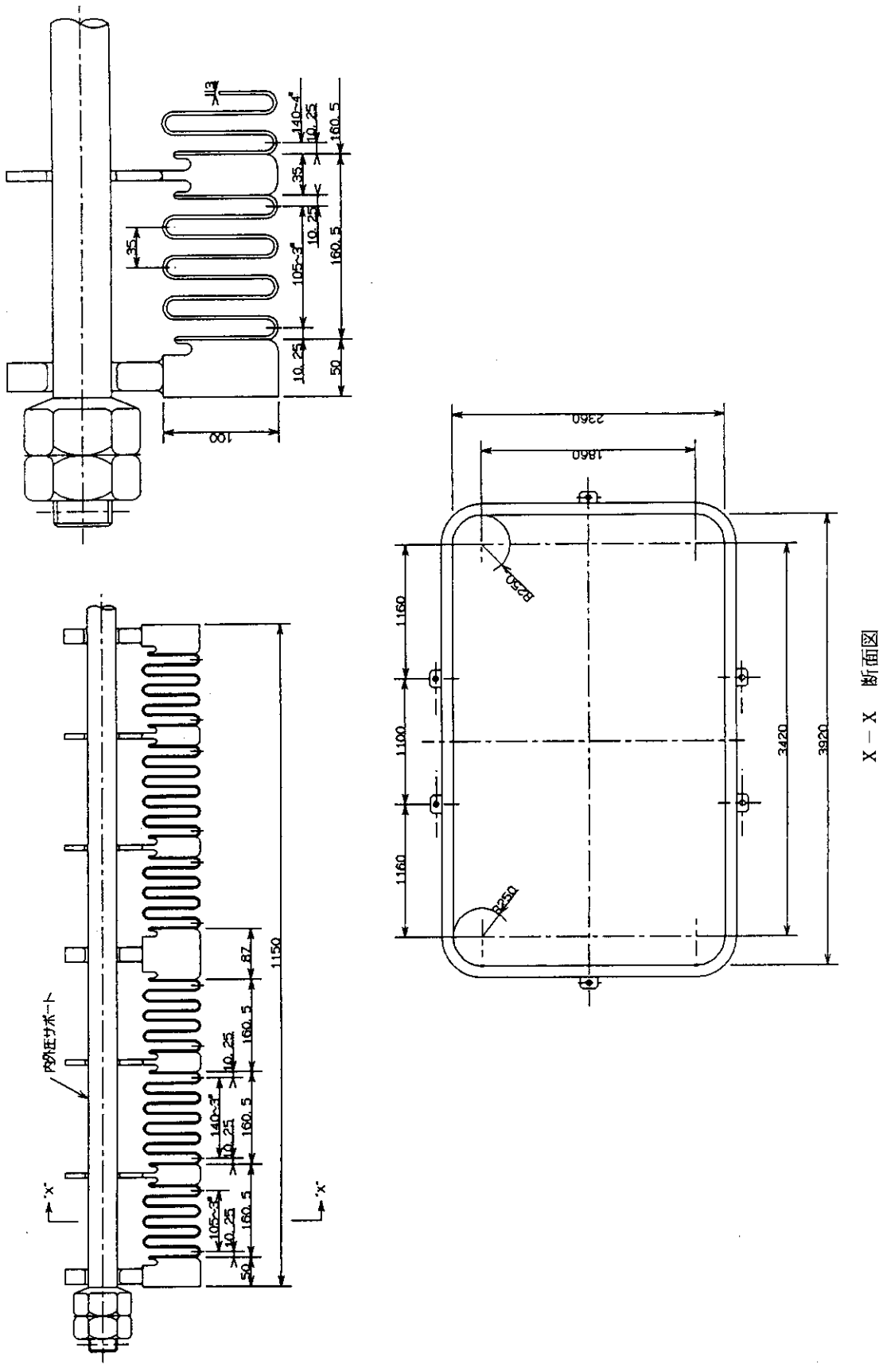


図4.7.3 矩形状ベローズ

5. 大型ゲート弁試作開発

1) はじめに

核融合実験炉の真空容器は主として，内部にプラズマを保持する容器であるが，他にもブランケット，ダイバータ等炉内構造物が収納されている。これら炉内構造物のメンテナンスを行う目的のためや，真空容器内への計測装置の導入，エネルギー注入等のため，多数のポートが真空容器に設けられている。これらのポートは真空容器と各種装置類と真空系で接続されているため，これらの容器，あるいは装置側に不具合が生じたり，メンテナンス等の必要が生じた場合は，真空の健全性を保つ上から，接続部にはゲート弁を設ける構造としている。ポート開口部の大きさは設置場所にもよって異なるが，最大のものでは，幅約3m，長さ約5mの大型であり，超高真空シール，重復開閉作動が可能なゲート弁として今後開発する必要があり，そのR＆Dの一つとして重復開閉作動のシール性について検討，及び試作試験を行った。

2) 大型ゲート弁の仕様

大型ゲート弁の仕様は装着される真空容器ポートの使用目的にもよるが，代表的な項目について表5.1に示す。

3) 大型ゲート弁の設計

図5.1及び表5.2に大型ゲート弁の構造例と主要部品名称を示す。本構造例はポート開口部寸法に比し，ゲート弁を小さくするため，厚みも可能な限り薄くするとともに，弁開閉駆動機構もパンタグラフ式として機構部の簡易化を図っている。また，弁の開閉は真空容器の運転にも係わるが，高放射線雰囲気の厳しい環境下，かなり回数行われることを想定し，本体部材質は主としてステンレス鋼とし，超高真空シール部には金属製シールパッキングを採用している。

4) 開発方針

大型ゲート弁はサイズ，使用目的において従来実績を上廻る性能が要求されており，強力に開発を進めなくてはならない多くの課題があるが，ここでは大型ゲート弁の開発にとって最も重要と考えられる弁シール機構の試作開発について記す。

a) 弁シール方式の選択

使用される環境は厳しい条件であるため，採用するシール方式は限定される。耐用性，耐放射線性下の観点からメタルシール方式を採用した。メタルシール方式としては図5.2に示す幾つかの種類が考えられるが，使用上重要となる表5.3に示す視点から，最も有望性の高いメタルパッキングとして，中心部にコイルバネを有し，外被をC形に金属薄板を配した図5.2に示すg)タイプを対象とした。

b) パッキング構造

メタルパッキングを図5.3に示す。これを用いた予備的なシール試験を図5.4に示し，その結

果の一例を図5.5に示す。今後，開発推進に向けて，本格的な調査，研究を必要とするが，予備的なシール試験結果では，開閉を繰り返すための繰り返しシール性について良好な結果が得られたと考えられる。

表5.1　大型ゲート弁概略仕様

許容弁座リーク	1×10^{-6}	PaL／Sec
許容外部リーク	1×10^{-8}	PaL／Sec
許容放出ガス量	1×10^{-8}	PaL／Sec
使用圧力	1×10^{-7}	Pa　（弁箱）
	1×10^{-7}	Pa　（弁）
放射線環境	6×10^{5}	R／h
パッキング耐久性	1×10^{4}	回以上
駆動部耐久性	2×10^{4}	回以上
ベーキング温度	180	℃
使用温度	100	℃
外部磁場	3000	Gauss

表5.3　メタルシール選定に当っての定性的評価

図－2の種別記号	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
非円形対応	○	○	×	○	○	○	○	○	×	×
復元（繰返し）性	×	×	○	×	△	×	○	×	×	×
繰返し実績	－	－	○	－	－	－	○	－	－	－
総合評価	△	△	△	△	△	△	○	△	×	×

表 5.2　部　品　名　称

項番	名　　称	項番	名　　称
101	バルブボデイ（1）	301	ピン
102	バルブボデイ（2）	306	ピン
103	バルブボデイ（3）	310	車輪
104	バルブボデイ（4）	311	レール
105	カバー	312	リンク
106	サポートブロック	402	ビーム
107	メタル中空Oリング	404	プレーンメタル
108	メタル中空Oリング	407	ホルダー
109	シールプレート	408	ライナー
110	リテーナ	409	アクチエータ
111	バネ入りCリング	410	リテーナ
112	カウンタープレート	412	リンク
113	ラグ	413	プランジャー
114	ピン	419	ステーボルト
115	リテーナ	420	コイルバネ
117	ストロークボールベアリング	421	ベローズ
201	スタンド		
202	ネジステム		
203	スピンドル		
204	クレビス		
210	アクチエータ		
211	ベローズ		

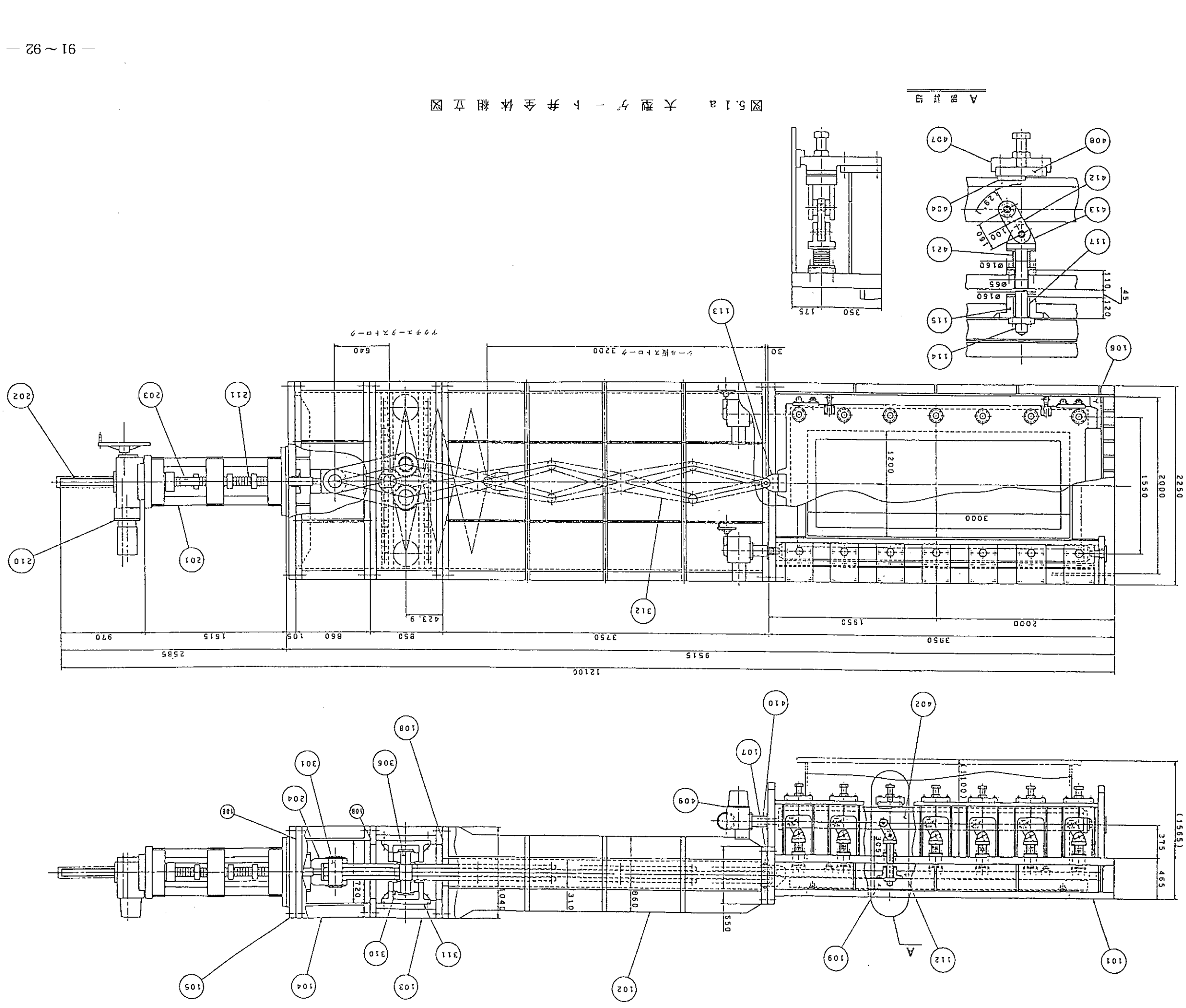
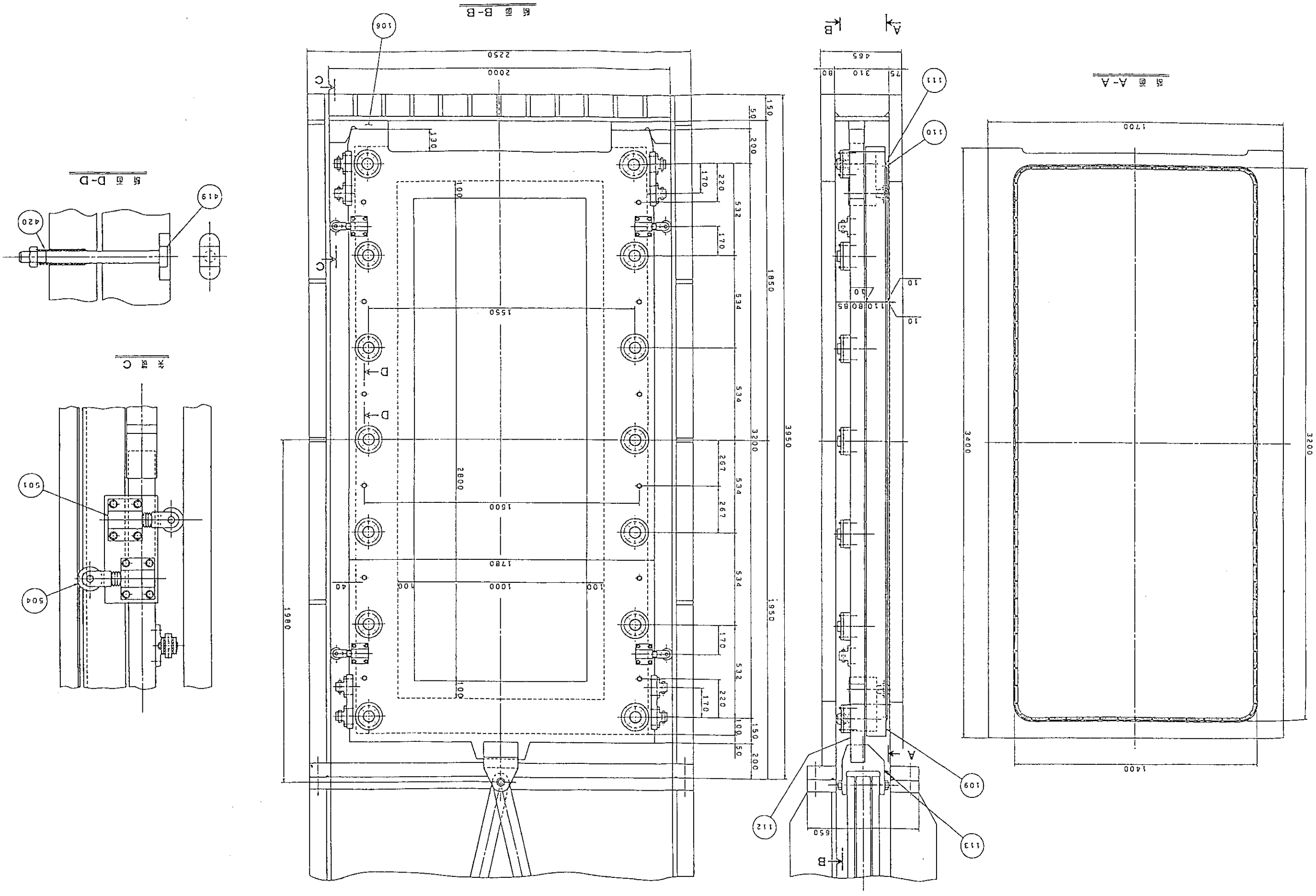


図5.1a　大型グリーナ全体組立図

図5.1b　大型ケース・ト井井部組立図



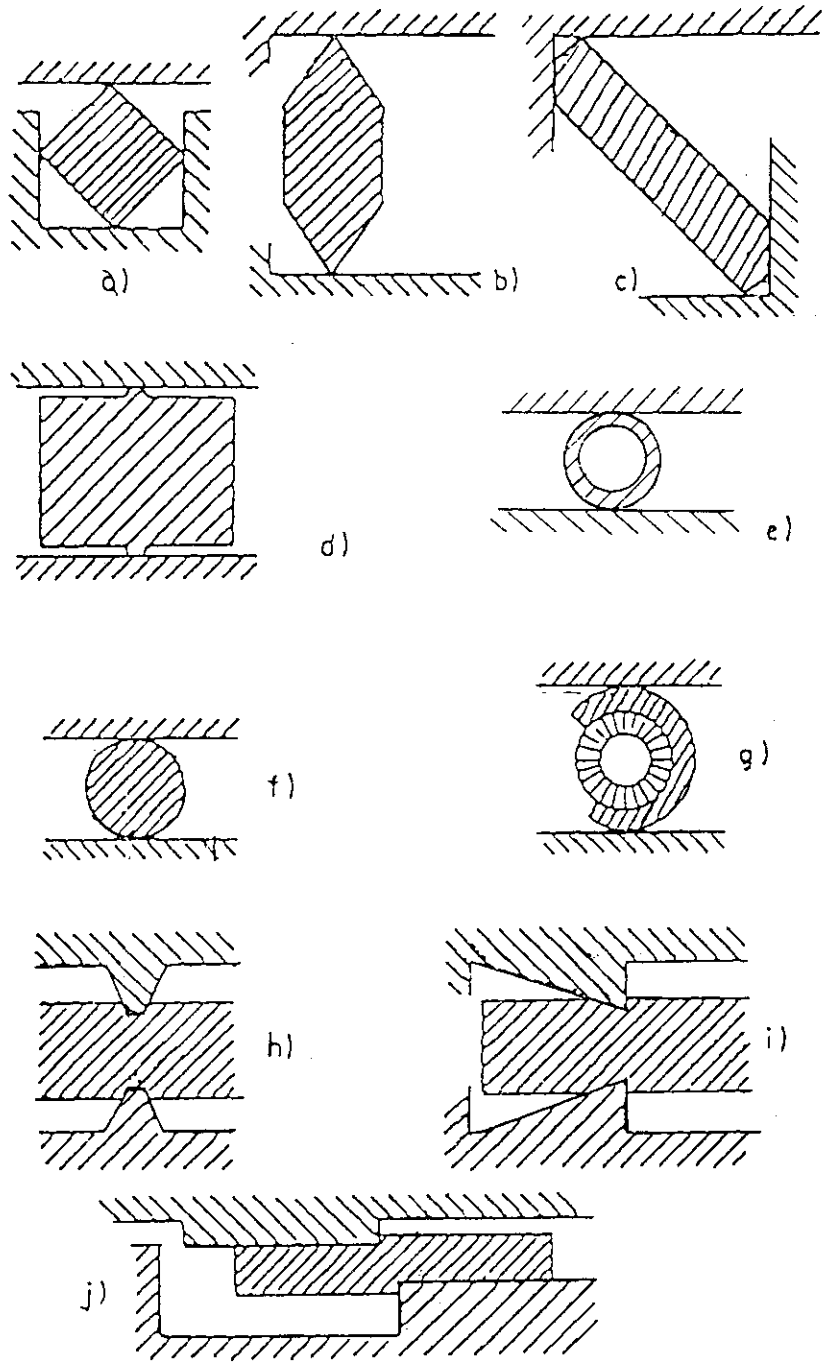


図5.2　メタルシール機構の種類

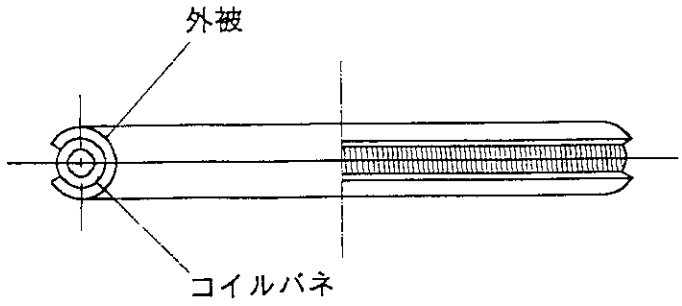


図 5.3　　メタルパッキング

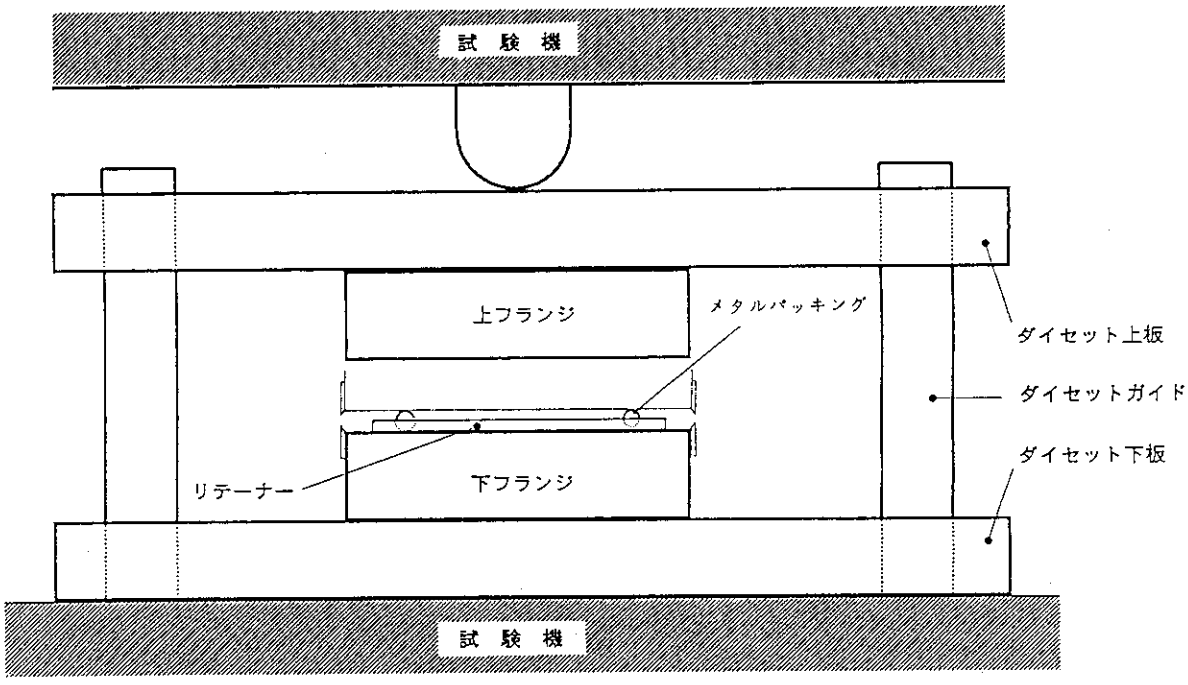


図 5.4　　試 験 装 置 の 構 成

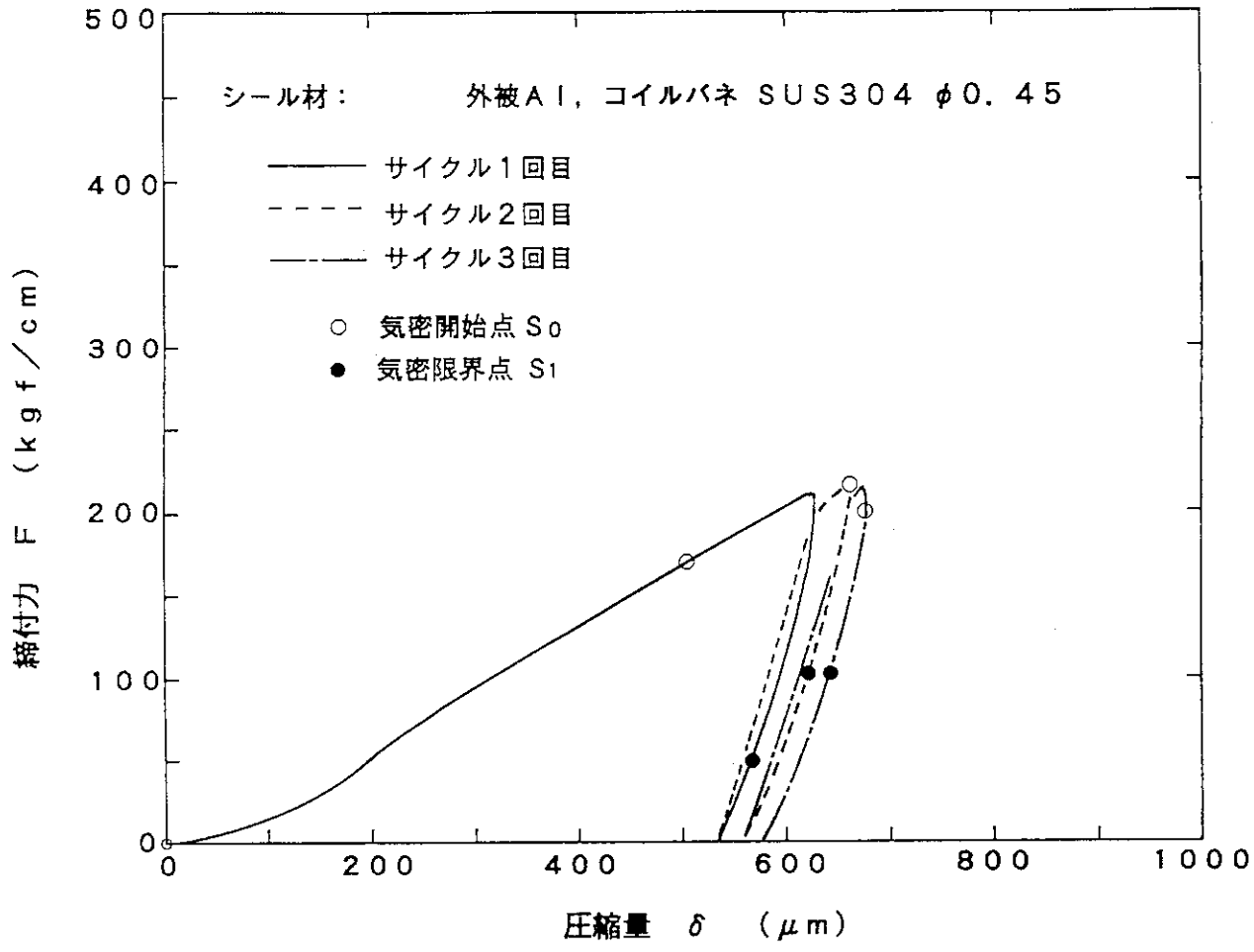


図 5.5　繰り返しシール性の試験例

6. 今後の課題

6.1 各部構造設計

(1) クライオスタット側壁

クライオスタット側壁は，建屋構造の一部を兼ね，真空境界形成のためのライナの仕様は，建屋の建設工法に依存する場合がある。従ってクライオスタット側壁の検討は，建屋全体の検討と併せて見直す必要がある。特に貫通部は，機器との整合性を含めて，設計の詳細化及び構造健全性に関する要素開発が必要である。また生体遮蔽壁としての機能を要求されるため，詳細遮蔽解析との整合を図ることが必要である。

(2) クライオスタット上部蓋

クライオスタット上部蓋については，今後詳細応力解析，遮蔽解析を実施し，構造の合理化，重量削減など最適化を図る必要がある。また，真空境界形成のための，シール構造及び遠隔保守機器との適合性の検討が必要である。

(3) 上部ポート構造

真空容器は，通常運転時（100℃），ベーキング時（150℃），及びメンテナンス時（ほぼ室温）と異なる温度条件にさらされるため，構造設計上，これらの温度条件に対する熱伸縮を十分考慮することが必要である。特にポート貫通部は室温状態にあるクライオスタットと接続され，熱的，寸法構造的な境界をなす部位であるため，熱，構造の視点からの評価が今後の課題である。

(4) 水平ポート構造

遠隔操作のために必要な作業空間の割り出し，冷却配管の引き回し（ポート短管部を除く），据付／撤去に必要な設置空間との整合を図ることが今後の課題である。

(5) 下部ポート構造

今後以下の検討課題がある。

- ブランケット配管との取り合い及び引き出し部の空間取り合いに関する検討。
- ダクトと支持脚との固定及び解除時に必要となる遠隔機器及びそのアクセス空間の検討。
- ポート台座（厚板構造体）の製作性の検討。

(6) 大口径ベローズ

ベローズは今までに製作された例がないほどの大型構造，並びに精度と高性能な仕様を備える必要があり，今後これ等を満足するべき製品とするには表6.1のような課題について検討を加

えて行くことが必要である。

(7) 冷却系配管配置

今後以下の課題がある。

- 上部ポート貫通部の細部構造検討を実施し，配管高さの削減検討など最適化を図る。
- 配管系について，耐震解析を含めた詳細応力解析の実施。配管支持架構，ハンガ，スナバ，レストレイント等の，配管支持装置の検討。
- リングヘッダ以降，1次冷却系機器室までの配管配置の計画。
- 下部ポートからの配管配置の検討。

6.2 大型ゲート弁

a) ゲート弁開閉機構

大きさ最大幅約3m，長さ約5m，重さ数トンになる弁の開閉機構は，その大ストローク量からも強力，かつ，精密な機構装置を必要とする。これらのメカニクス，作動検知方法等合わせを行う必要がある。

b) シール機構

繰り返しシール機構を想定して，シール機構の方法について一応策定したが，実規模への展開，あるいはシール面の状況，繰り返し下における。最適パッキング締付け荷重量，シール機構部等の解明を行う必要がある。

c) パッキング

大型ゲート弁のシール材としてのパッキングの選択は重要な事項である。パッキングの内部にコイルバネを有し，外皮を金属の薄膜で覆ったメタルパッキングが有望であることが明らかとなったが，実現模サイズのパッキングとしてこれら最適化された構成，あるいは材質的検討等について今後詳細検討が必要である。

d) 大型ゲート弁の構造

ゲート弁のサイズも既述の寸法を有し，その全重量も数十トンに及ぶため，自重による変形もシール機構に与える影響が大きい。このため，軽量化，強剛性弁体を有するゲート弁の開発も重要である。

表6.1　大型ベローズの今後の課題

No.	項　　目	内　　容
1	ベローズ支持構造	台形、または矩形ベローズのストレート部は耐圧力に弱く、ストレート部を内外より支持、補強する構造が必要である。そのため、その設置スペースを必要とする。このため、ポート開口面積が少なくなり、ベローズの設置により他機器への空間的、寸法的影響が大。
2	コーナー部(R250) ベローズの構造	コーナーR250 mmの実績は、板厚1.5 mm、山数2と本ＩＴＥＲ用ベローズに対しては非常に低いレベルである。コーナー部のモデルを製作し、製作精度、仕上り形状等を確認する必要がある。
3	軸方向溶接	上記コーナー部とストレート部とを軸方向に溶接する場合の溶接後の寸法精度、形状変形、溶接部強度の確認が必要。 変形が大きい場合、上記NO.1のベローズ支持構造の機構に大きなインパクトを与える恐れが有る。また、軸方向溶接で精度が悪い場合、周方向溶接の検討が必要となる。
4	疲労強度	ベローズは従来に無く極めて大型であり、従来実績による、強度やバネ定数の推定ができにくく、実機大スケールモデルにより強度等の確認が必要。

7. ま　と　め

鉄筋コンクリート製クライオスタット及び貫通部の構造概念の検討及び要素の試作開発を実施し，以下の成果を得た。

(1) 生体遮蔽の機能を有するクライオスタット上部蓋について，遠隔操作で全体的に着脱可能な構造として，周方向に16分割された水タンク方式の概念を設定し，簡易強度評価によりその妥当性を確認した。

(2) トロイダルコイルに対する遮蔽及び生体遮蔽に対する要求条件を満足し鉄筋コンクリート製クライオスタット円筒胴とも整合する，水平ポート，NBIポート，排気ポート構造概念を構築し，分解組立手順を明らかにした。またポート設置の大口径非円形ベローズの強度評価を実施し，その妥当性を確認した。

(3) 配管貫通，ブランケット引き抜き及び生体遮蔽に対する条件を満足する上部ポート構造概念を定めた。

(4) ブランケットの分解組立シナリオと整合する配管配置を定め，熱膨張解析により，配置成立に対する見通しを得た。

(5) 大口径ベローズについては，実機適用を考慮した構造設計を実施し，強度解析により基本的な構造健全性を明らかにした。今後，試作及び試験を行い，実機適用についてさらに検討を加える必要がある。

(6) 大型ゲート弁についてはシール部の要素試作，試験を行い，シール機構の耐久性についてのデータを取得した。今後は総合的な機能の実証のため，熱・構造設計並びに部分モデルの試作・試験を実施する計画である。

謝　　辞

本設計検討を実施するにあたり，ITER開発室，炉構造研究室，核融合炉システム研究室の方々から，多くの有意義な助言を頂きました。

CAD解析グループの方々には，構造設計・解析で多大な協力を頂きました。

大型ゲート弁については，試作開発の労を惜しまれなかった（株）日本製鋼所の担当者の方々に謝意を表します。

また本研究を進めるにあたり，多くのご支援を頂いた松田慎三郎ITER開発室計画管理グループリーダーに感謝致します。

7. ま　と　め

鉄筋コンクリート製クライオスタット及び貫通部の構造概念の検討及び要素の試作開発を実施し，以下の成果を得た。

(1) 生体遮蔽の機能を有するクライオスタット上部蓋について，遠隔操作で全体的に着脱可能な構造として，周方向に16分割された水タンク方式の概念を設定し，簡易強度評価によりその妥当性を確認した。

(2) トロイダルコイルに対する遮蔽及び生体遮蔽に対する要求条件を満足し鉄筋コンクリート製クライオスタット円筒胴とも整合する，水平ポート，NBIポート，排気ポート構造概念を構築し，分解組立手順を明らかにした。またポート設置の大口径非円形ベローズの強度評価を実施し，その妥当性を確認した。

(3) 配管貫通，ブランケット引き抜き及び生体遮蔽に対する条件を満足する上部ポート構造概念を定めた。

(4) ブランケットの分解組立シナリオと整合する配管配置を定め，熱膨張解析により，配置成立に対する見通しを得た。

(5) 大口径ベローズについては，実機適用を考慮した構造設計を実施し，強度解析により基本的な構造健全性を明らかにした。今後，試作及び試験を行い，実機適用についてさらに検討を加える必要がある。

(6) 大型ゲート弁についてはシール部の要素試作，試験を行い，シール機構の耐久性についてのデータを取得した。今後は総合的な機能の実証のため，熱・構造設計並びに部分モデルの試作・試験を実施する計画である。

謝　　辞

本設計検討を実施するにあたり，ITER開発室，炉構造研究室，核融合炉システム研究室の方々から，多くの有意義な助言を頂きました。

CAD解析グループの方々には，構造設計・解析で多大な協力を頂きました。

大型ゲート弁については，試作開発の労を惜しまれなかった（株）日本製鋼所の担当者の方々に謝意を表します。

また本研究を進めるにあたり，多くのご支援を頂いた松田慎三郎ITER開発室計画管理グループリーダーに感謝致します。

参 考 文 献

1) E. tada, et al.,"ITER CONTAINMENT STRUCTURE", ITER Documentation Series, No. 28 IAEA,(1991)
2) H. Hosobuchi, et al., "ITER PLANT SYSTEMS", ITER Documentation Series, No. 35, IAEA, (1990)
3) K. Shibanuma, et al., "Japanese Contributions to Containment Structure, Assembly & Maintenance and Reactor Building for ITER", JAERI－M91－080 (June 1991)
4) S. Nishio, et al., "Conceptual Design and Technology Development of Containment Structure in Fusion Experimental Reactor (FER)", JAERI－M91－089 (May 1991)
5) J. Doggett, et al., "ITER TOKKAMAK DEVICE", ITER Documentation Series, No. 25, IAEA (1991). P28.