

宇宙開発事業団φ13 mスペースチャンバの開発

Development of φ13 m Space Chamber for NASDA

宇宙開発事業団では、筑波宇宙センター内にスペースチャンバ、振動、音響などの大型試験設備をそろえた総合環境試験棟を建設した。日立製作所は、代表的試験設備であるスペースチャンバの建設と、総合環境試験棟全体のインテグレーション支援を担当した。

このスペースチャンバは、高真空、極低温の宇宙環境を模擬し、人工衛星などの熱制御データの取得および評価、品質確認を行う設備であり、直径14 mの巨大な真空容器、高真空を実現する真空排気系、冷暗黒空間を作る極低温系、模擬太陽光を照射するソーラーシミュレータなどで構成されている。その優れた性能および運用性は、大型人工衛星をはじめとする宇宙関連機器の開発に大いに役立つことが期待される。

中村安雄*	Yasuo Nakamura
末広満**	Mitsuru Suehiro
石井興一**	Kôichi Ishii
綾部重光**	Shigemitsu Ayabe
奥野澄生***	Sumio Okuno
長谷川一彦****	Kazuhiko Hasegawa

1 緒言

人工衛星を利用した情報・通信の発達した現在、宇宙開発はわれわれの日常生活から切り離せないものとなっている。特に通信衛星「さくら」、放送衛星「ゆり」、気象衛星「ひまわり」などは日常生活に深くなじまれている。しかし、人工衛星をはじめとする宇宙用機器は、軌道上でいったん故障した場合には修理が困難であり、現在の高度化した情報化社会に多大な影響を与えるため高い信頼性を要求される。スペースチャンバは、これらの宇宙用機器の設計評価および機能と性能を地上で確認する試験装置で、円筒または球形の容器内に高真空、極低温の冷暗黒空間および太陽光線の宇宙環境を作り出すものである¹⁾。

宇宙開発事業団では、これまで1975年筑波宇宙センターに建設した有効内径8 mの垂直円筒型のスペースチャンバ²⁾により、さまざまな人工衛星の試験を行ってきた。しかし、開発中のHⅡロケット³⁾は静止軌道に2 t級衛星の打上げが可能であり、また今後の宇宙用機器の大型化に伴いより大きなスペースチャンバおよび一連の試験装置が必要となった。このため、1986年にスペースチャンバ、振動試験設備、音響試験設備などを含む総合環境試験棟(図1)の建設に着手した。既設の設備では、各設備が個別の建屋に設置されているため、試験ごとに供試体の建屋間移動が必要であったが、この試験棟ではすべての設備を同一建屋内に収納することにより、試験作業の効率向上を図っている。スペースチャンバは1989年9月に設備が完成し、1993年打上げ予定の技術試験衛星6型(ETS-

VI)の開発試験からこの設備が使用されている。

2 スペースチャンバのシステム概要

スペースチャンバのシステム構成と設備仕様を図2に示す。

(1) 真空容器系

真空容器は主チャンバ(直径14 m)と副チャンバ(直径10 m)がT型に結合され、さらに副チャンバには斜め下方から擬似太陽光の光路となる円錐(すい)状のスパウト(図2参照)が結合されている。スパウトの先端には、大気中から真空中に擬似太陽光を導入するための窓レンズが取り付けられている。主チャンバには人工衛星などの供試体を搬入する直径14 mの全面開口(図3)が設けられており、搬入扉は開口面に対し平行に移動する。供試体搬入口の前面が組立準備室になっており、ここで組み立てられた供試体は、供試体支持機構に載せられてターンテーブルによって方向転換、14 m開口部から主チャンバ内に搬入・固定される。

真空容器の真空にさらされる部分はSUS304ステンレス鋼を使用し、内面はバフ研磨を行ってアウトガス量および熱入力を軽減している。

(2) 真空排気系⁴⁾

真空排気系は粗引き排気系と高真空排気系で構成され、真空容器の内容積は約5,030 m³である。粗引き排気系は大気圧から1.33 Pa {1 × 10⁻² Torr} まで6時間で排気するもので、油回転ポンプ4基、1段メカニカルブースタ2基、2段メカ

* 宇宙開発事業団 筑波宇宙センター試験部 ** 日立製作所 笠戸工場 *** 日立製作所 機械研究所 **** 日立製作所 機電事業本部

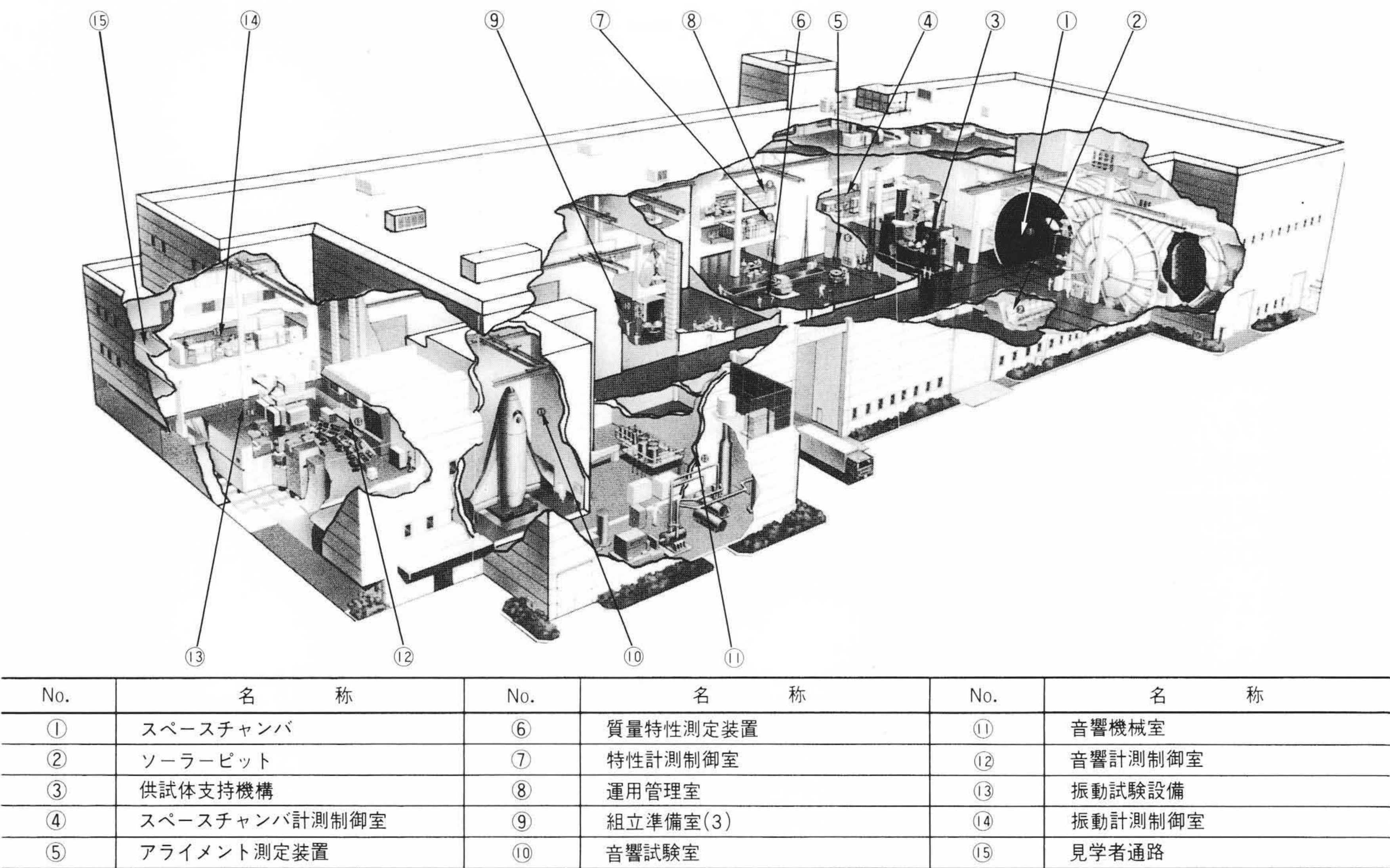


図1 総合環境試験棟鳥観図 スペースチャンバ、振動、音響などの大型試験設備が一つの建屋にまとまり、試験効率の向上を目指している。

ニカルブースタ2基の2系列で構成、1系列が異常停止しても半量運転を可能にしている。

高真空排気系は粗引き排気後に引き続き運転され、1.33 Pa { 1×10^{-2} Torr } から 1.33×10^{-5} Pa { 1×10^{-7} Torr } 以下の到達圧力まで排気するものであり、ターボ分子ポンプ3基、副クライオソーブションポンプ4基、主クライオポンプ2基で構成されている。主クライオポンプは、スペースチャンバの主排気ポンプで真空容器内に組み込まれたクライオパネルを低温ヘリウムガスで20 Kに冷却、極低温面を作り容器内の残留ガス(窒素など)を吸着・排気する設備であり、He冷凍機とともに2系列で構成されている。

(3) 極低温系⁵⁾

極低温系は真空容器内面を覆っているシュラウド(アルミフィンチューブで構成)の温度制御を行う液化窒素・ガス窒素系と、クライオパネルに低温ヘリウムガスを供給するヘリウム系で構成されている。

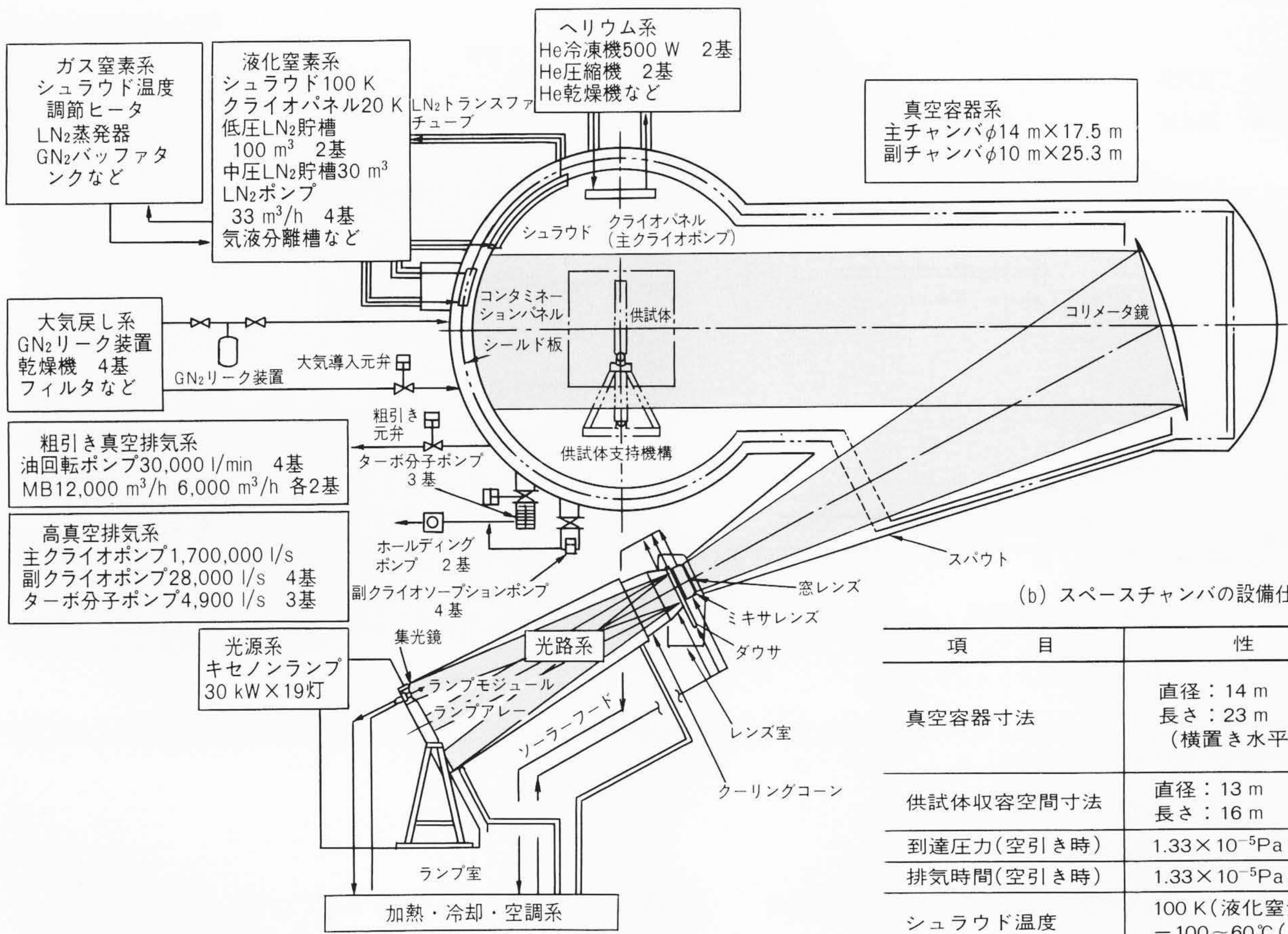
シュラウドの表面には、太陽光吸収率および赤外放射率の大きな黒色塗料が塗られており、アルミフィンチューブ内に液化窒素を流すことによって100 K以下に冷却、宇宙空間の冷暗黒を作り出す。シュラウドは39系統に分割され、液化窒素で冷却されるだけでなく、ガス窒素によって-100℃から+60℃までの任意の温度に設定でき、各系統単独に温度制御さ

れる。
(4) ソーラーシミュレータ系⁶⁾

ソーラーシミュレータ系は、キセノンランプを含む光源系、ミキサレンズ、コリメータ鏡を含む光路系、ランプ、光学部品

の熱制御を行う加熱・冷却・空調系で構成されている。
宇宙空間での太陽光は均一かつ平行光線であり、人工衛星から反射した光は二度ともとの位置に帰ってこない。この太陽光を模擬するのがソーラーシミュレータである。擬似太陽光源として30 kWキセノンランプ19灯を使用し、有効光束径6 m、最大照射強度1.82 kW/m²、均一度±5%以内、平行度⁷⁾±1.5度以内の模擬太陽光を供試体に照射することができる。光源からの光は山型の強度分布を持つため、途中のミキサレンズで分割・合成することによって均一な強度分布に変換し、真空容器スパウト先端の窓レンズから容器内に導入される。導入光は副チャンバ内のコリメータ鏡によって平行光線にされ、主チャンバ内の供試体を照射する。擬似太陽光の照射面は高温、影となる面はシュラウドからの輻(ふく)射熱によって極低温に冷却され、宇宙の厳しい環境を再現する。

本稿では、複雑な形状で構成されながら、コリメータ鏡や窓レンズ取付部のように光学的に厳しい形状精度を要求される真空容器の構造解析と、直径14 mという超大型でありながら真空シールのための加工精度を要求されるフランジの製作、



注：略語説明 MB（メカニカルブースタ）

(a) スペースチャンバのシステム構成

(b) スペースチャンバの設備仕様

項 目	性 能
真空容器寸法	直径：14 m 長さ：23 m (横置き水平ハンマ型)
供試体収容空間寸法	直径：13 m 長さ：16 m
到達圧力(空引き時)	$1.33 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ $\{1 \times 10^{-7} \text{ Torr}\}$
排気時間(空引き時)	$1.33 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ まで16時間
シュラウド温度	100 K(液化窒素冷却) -100~60℃(ガス窒素制御)
ソーラーシミュレータ	●有効光束径 6 m ●最大照射強度 1.82 kW/m^2 ●平行度 $\pm 1.5^\circ$ 以内 ●均一度 $\pm 5\%$ 以内
データ計測チャンネル数	1,150チャンネル

図2 スペースチャンバシステム構成図 真空容器系，真空排気系，極低温系，ソーラーシミュレータ系および制御監視系で構成している。

およびシール方法について述べる。

3 真空容器の構造

真空容器の構造上の課題として、

- (1) 外圧による座屈強度と変位
- (2) 地震による耐震強度と応答加速度
- (3) 大口径フランジ部の真空シール

があげられる。これらの問題解決のため、以下に述べるモデル試験および構造解析のケーススタディを繰り返し、真空容器の最終構造を決定した。

3.1 1/10縮尺モデルによる座屈試験

真空容器は大口径の円筒殻が軸非対称構造になっており、外圧が作用した場合、大口径分岐結合部が強度上最も問題となる。この分岐部の直径が大きすぎ、また形状が複雑なためJIS⁸⁾やASME⁹⁾(American Society of Mechanical Engineers)で規定している外圧を受ける軸対称円筒の設計コード、および開口部の補強方法を単純に適用することができない。

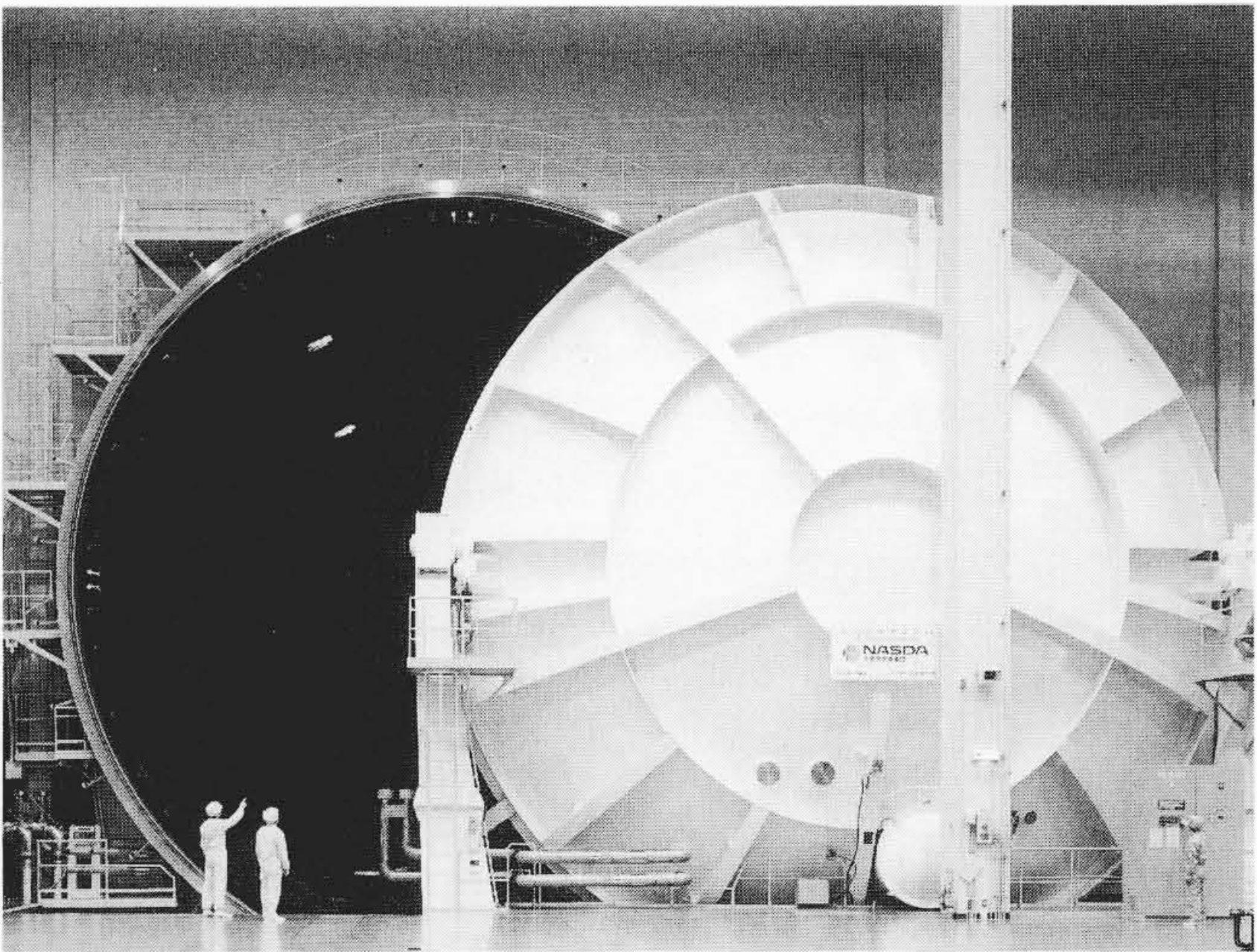
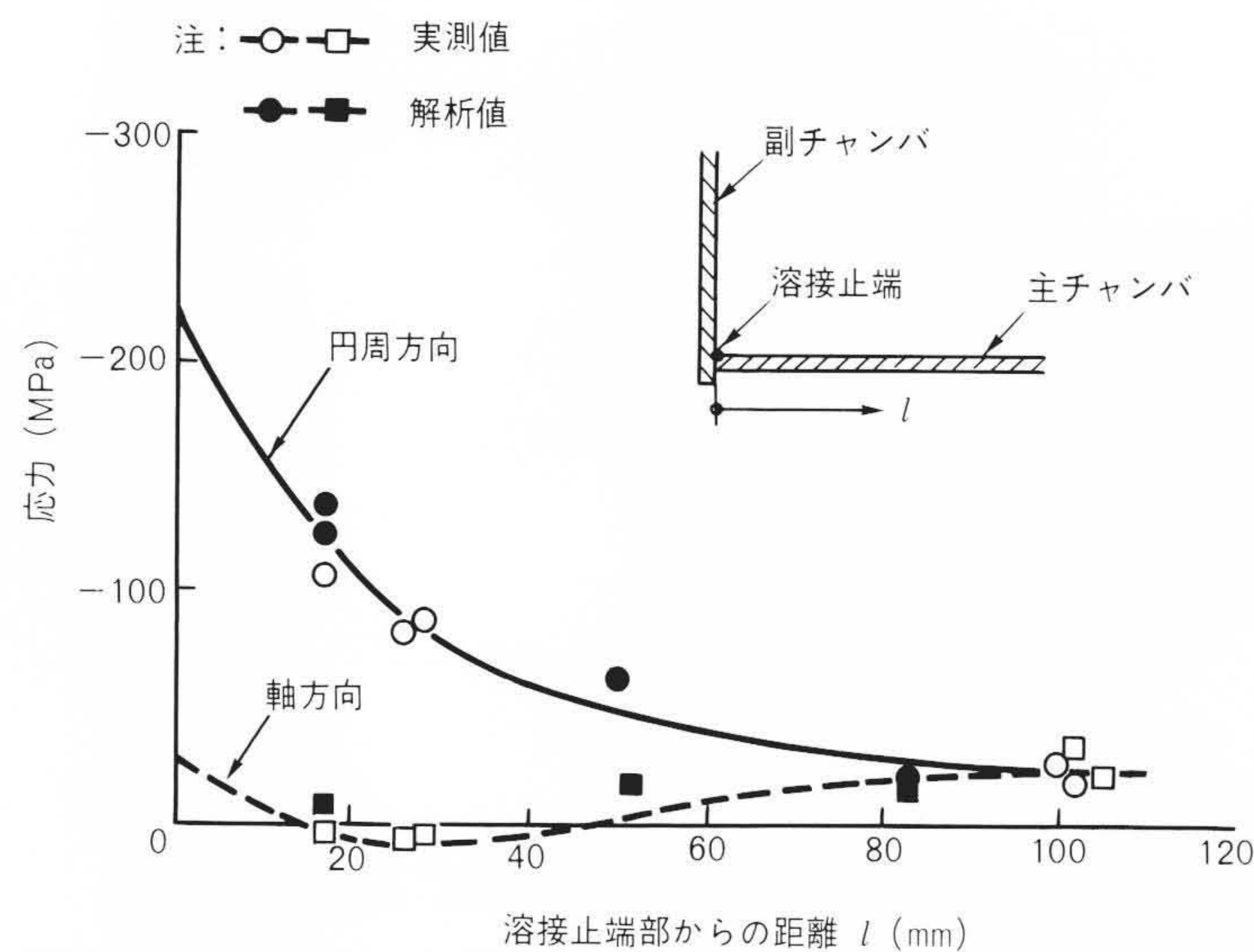


図3 搬入扉と主チャンバ内部 容器内の黒色パネルがシュラウドで、上部には照明装置が付いて作業効率が向上した。右下は搬入扉の操作盤で遠隔操作により搬入扉が開閉する。



(a) 分岐部(主チャンバ側)の応力

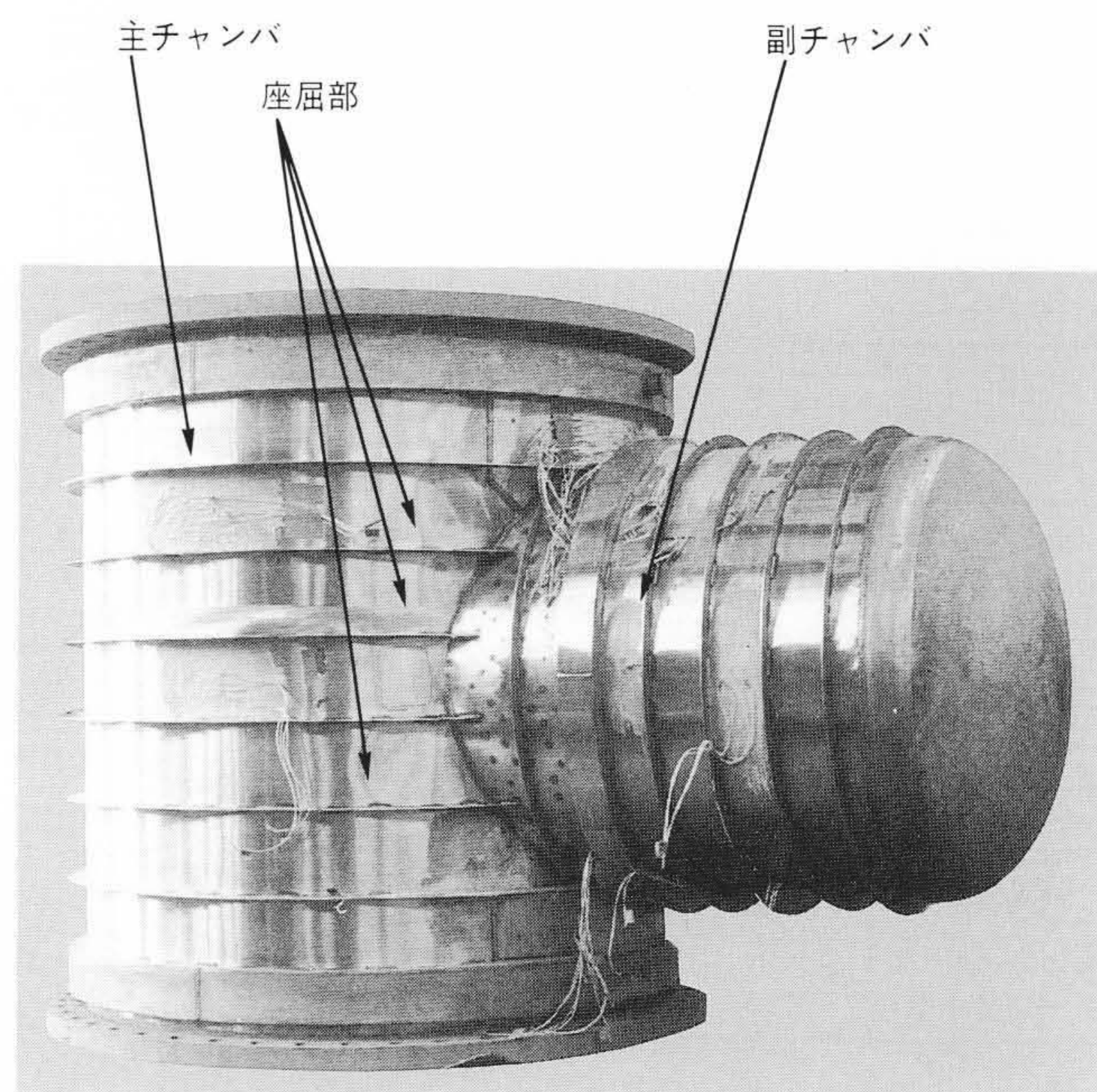
(b) 座屈試験後の $\frac{1}{10}$ 縮尺モデル

図4 $\frac{1}{10}$ 縮尺モデルと発生応力 分岐部、主チャンバ側の応力測定値と解析結果を示すもので、応力の高い部分ごく狭い範囲に限られる。(b)は試験後のモデル外観で、主チャンバ側で座屈した。

初期計画段階で大口径分岐部の変形および応力は、有限要素法による弾性解析によって把握することとしたが、構造上、当該部の座屈強度を評価することが最重要課題となる。しかし、座屈強度の場合、真円度に代表される真空容器の初期変形量¹⁰⁾にも大きく左右され、非線形の挙動を示すため一義的に評価できない難しさがある。したがって、構造解析による基本構造の検討および適正な補強構造を明確にしたうえで、実機の $\frac{1}{10}$ 縮尺モデルを製作し実験的に座屈強度を評価した。

分岐結合部の溶接止端部近傍での膜応力値について測定値と解析結果との比較、および座屈試験後の $\frac{1}{10}$ 縮尺モデルの外観を図4に示す。計算値は、かなり粗い要素分割で求めた値でも実測値とよく対応している。主・副チャンバとも溶接止端部で円周方向に大きな膜応力が発生しているが、高応力の発生するのは結合部のごく狭い範囲に限られている。

$\frac{1}{10}$ 縮尺モデル試験の結果、

- (1) 分岐結合部の座屈強度は周辺での降伏域の広がりに影響される。そのときの限界圧力は0.2 MPaであった。
- (2) 分岐結合部以外の強度は弾性座屈強度で決まり、軸対称円筒殻として評価できる。

ことが明らかになった。これらの結果をもとに、実機の設計外圧に対する安全率をJISおよびASMEに準じて3以上とした。

3.2 実機の構造設計

縮尺モデル試験の結果をベースに、真空容器の構造解析を行い最適な補強構造を決定した。基本となる解析モデルを図5に示す。解析モデルは、副チャンバ中心に対し左右対称として $\frac{1}{2}$ を対象に要素分割した。鏡および胴部を三次元殻要素、

強め輪を三次元梁(はり)要素でモデル化している。

(1) 主チャンバと副チャンバ結合部の補強構造

縮尺モデルによる評価基準に従い、大口径結合部の補強構造に対する座屈強度の検討を行った結果、主チャンバと副チャンバ結合部の補強構造を、次のように決定した。

- (a) 主チャンバ側は開口部全面当板補強とし、副チャンバ側も全周当板補強とする。
- (b) 結合部の変形を小さくするため、副チャンバ側を剛性の大きい箱型強め輪で補強する。
- (c) 主チャンバ側と副チャンバ側の強め輪の構造的連続性を満たすため、広幅強め輪で補強する。

(2) 副チャンバとスパウト結合部の補強構造

副チャンバとスパウトは結合面が長円形となるため、予想以上に変形量が大きく、次の4ケースについてケーススタディを行い、結合部や窓レンズ取付部の変位、および製作の容易さを考慮して、ケース④を最適補強構造として採用した。

- ケース①：副チャンバ側開口部を全面当板補強
- ケース②：副チャンバ側開口部に横梁補強追加
- ケース③：全面当板補強と横梁補強の組み合わせ
- ケース④：発生応力の高い結合部だけ部分当板補強し、開口面に横梁補強を追加

真空容器の全体構造を図6に示す。モデル試験、解析結果により、初期計画時から補強方法に大幅な改良を加えており、コリメータ鏡取付部の傾きは約41秒(要求値60秒)、窓レンズ取付部の面外変位は約0.08 mm(要求値0.15 mm)であり、機能を十分満足できた。

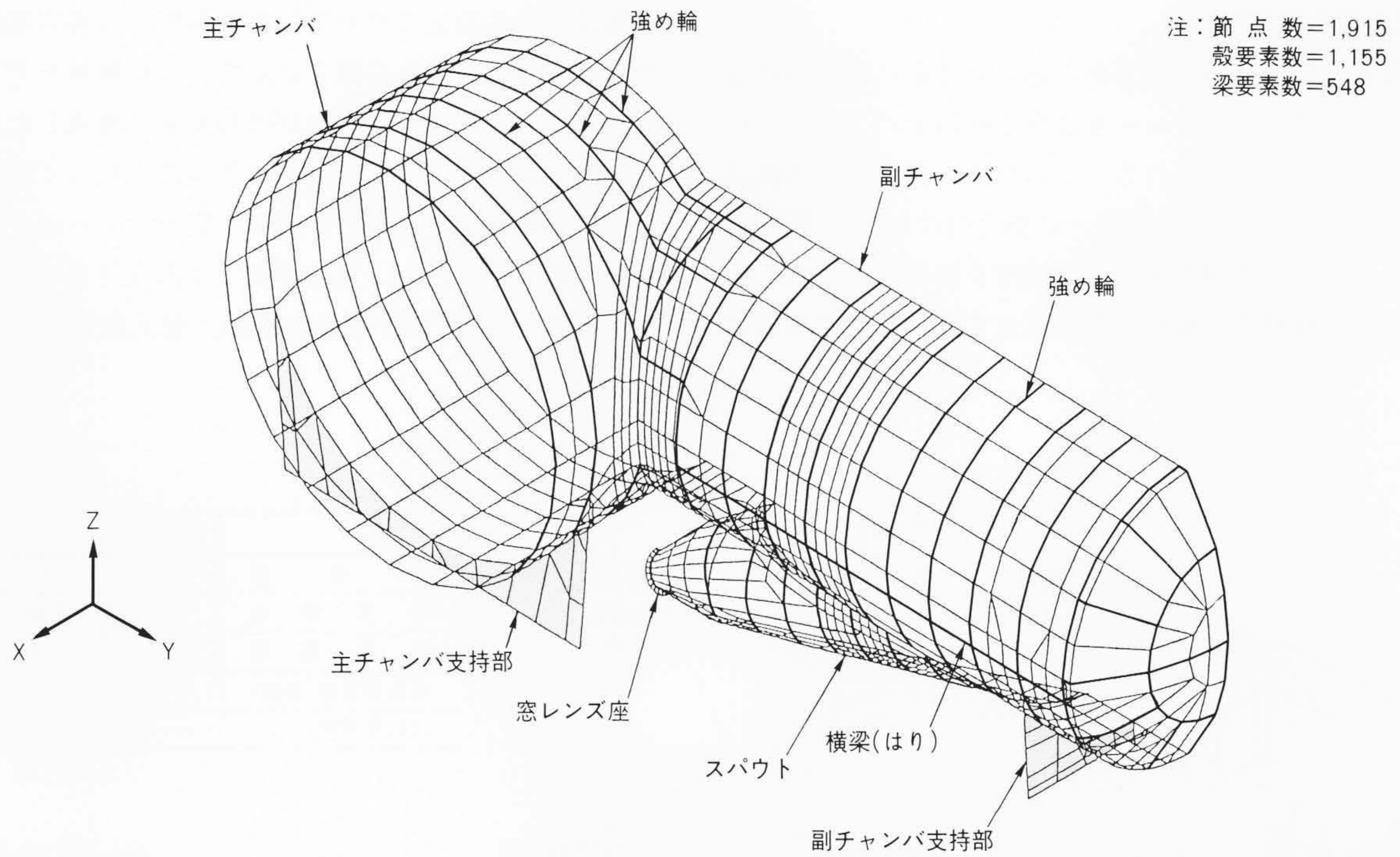


図5 構造解析モデル要素分割図 殻と梁(はり)要素によって容器の $\frac{1}{2}$ をモデル化した。広幅強め輪は、梁要素の断面定数を変えている。

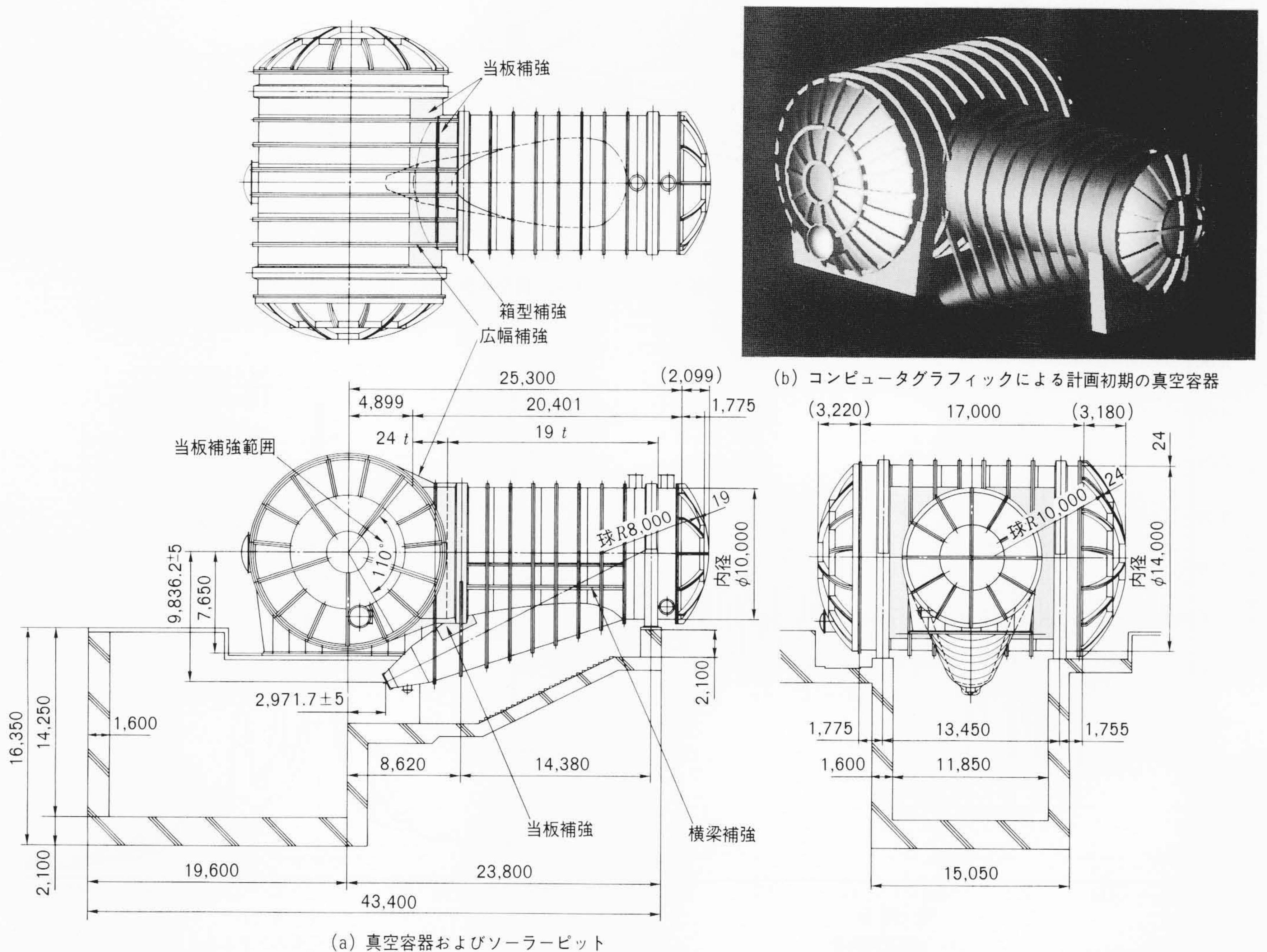


図6 真空容器の構造 真空容器はソーラーピット(箱型基礎)上に据え付けられている。搬入扉の補強など、計画初期に比較して補強方法が改良されている。

3.3 真空容器の耐震設計

擬似太陽光は真空容器の下方から窓レンズ部に投射されるため、キセノンランプモジュールは深さ約14 mのソーラーピット(箱型基礎)内に設置される。このため、真空容器本体は厚さ1.6 mのソーラーピット側壁上に据え付けられる(図6)。窓レンズ、コリメータ鏡などの光学精度を維持するため、取付部は厳しい形状精度と剛性が要求されており、光学機器の

耐震設計条件設定のために固有値解析、地震応答解析を行った。振動解析モデルを図7に示す。振動解析モデルは三次元殻要素、三次元梁要素およびばね要素で構成した。計算のつごう上、要素分割は強度解析モデルに比較して粗くなっている。解析条件はできるだけ筑波宇宙センター近くのデータを使用することとし、入力地震波には国立防災センター構内での測定波(1985年10月取手市震源、最大加速度 1 m/S²)を地

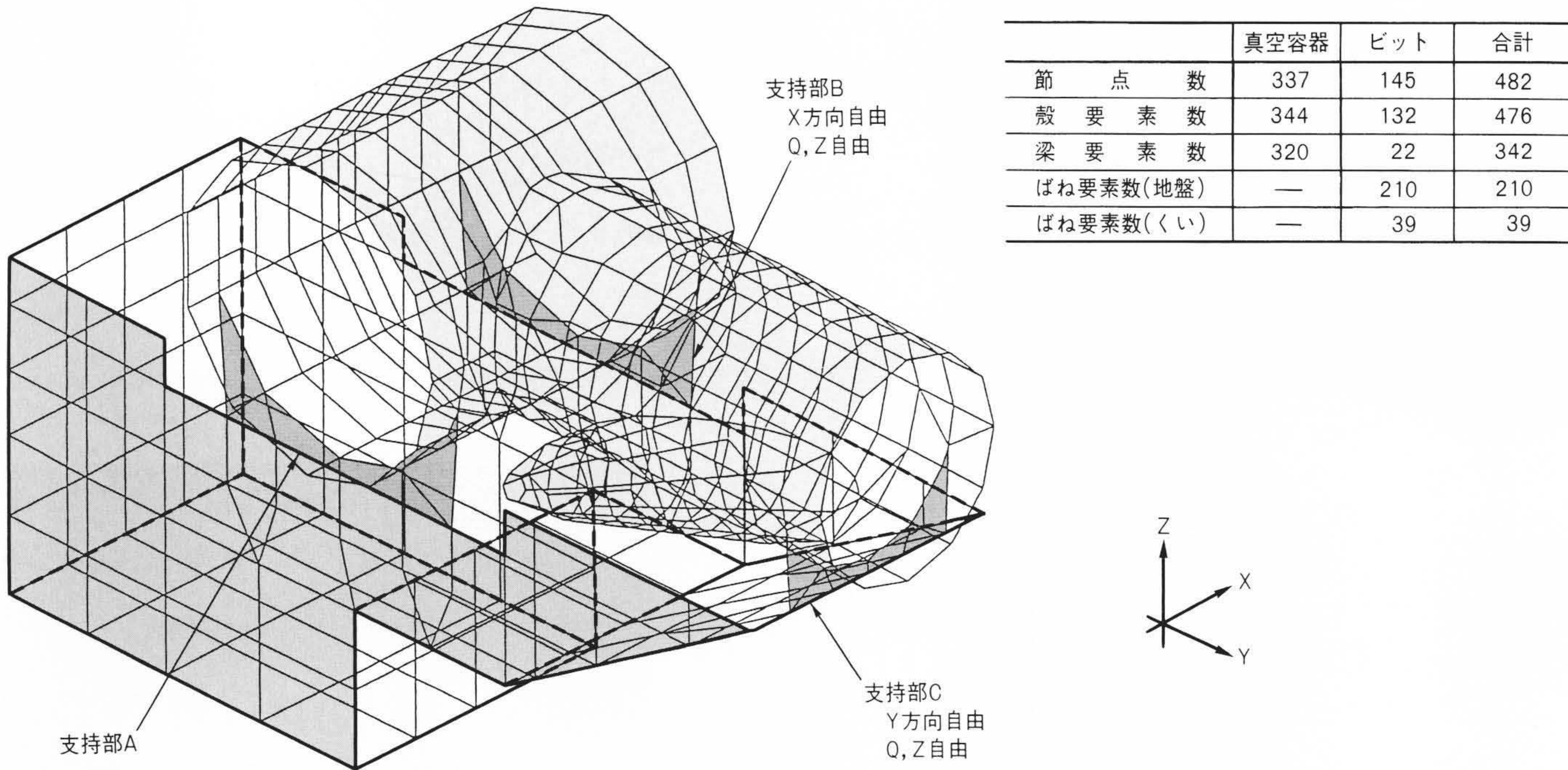


図7 振動解析モデル要素分割図 殻、梁およびばね要素の組み合わせにより、真空容器と箱型基礎を一体でモデル化している。

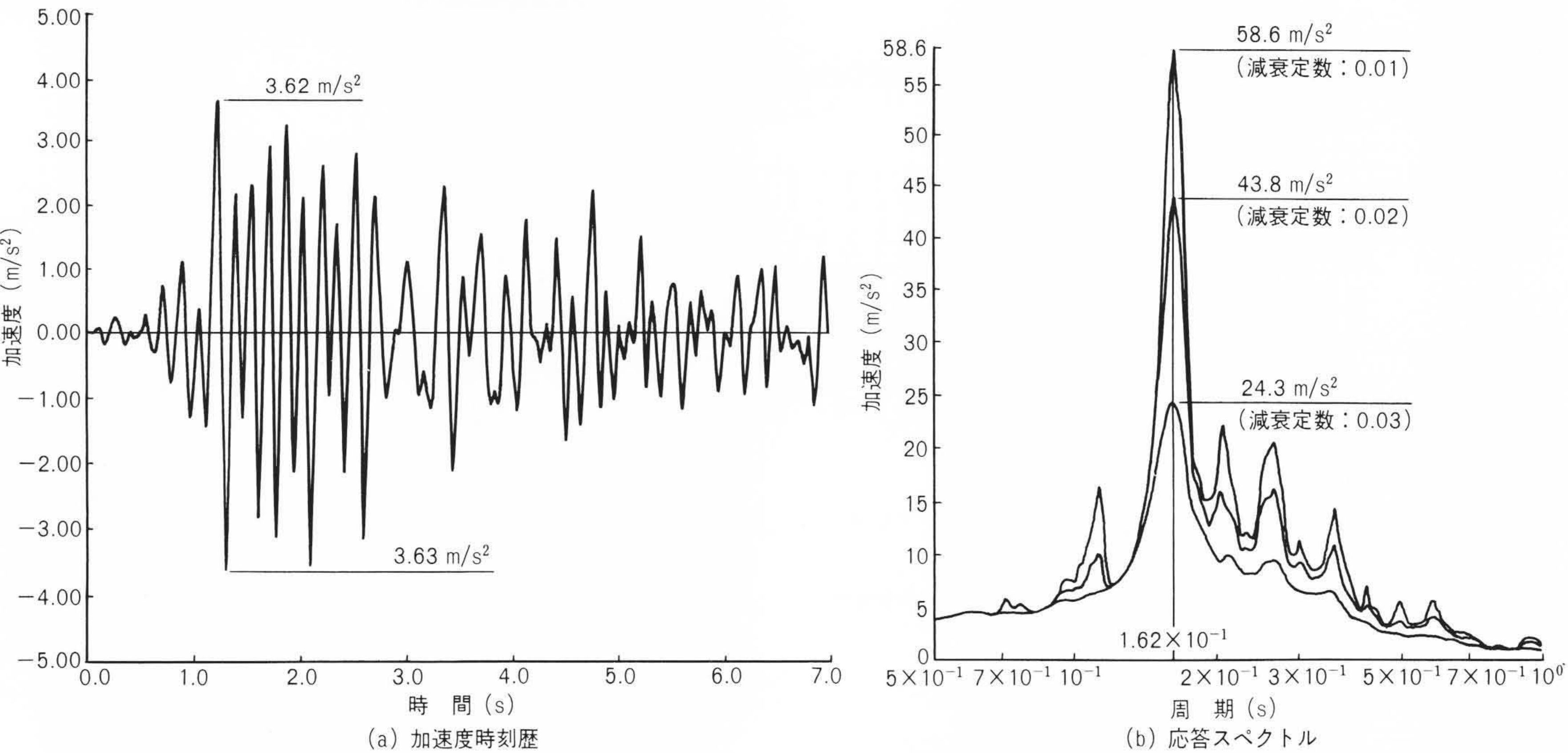


図8 コリメータ鏡取付部の加速度時刻歴と応答スペクトル 最大加速度 3 m/s²の入力波に対し、コリメータ鏡取付部の応答加速度は3.63 m/s²である。

表で 3 m/S^2 (水平) となるよう増幅し、地盤定数については筑波地区のボーリングデータを使用した¹¹⁾。コリメータ鏡取付部(下部)の加速度時刻歴と応答スペクトル例を図8に示す。これらの結果をもとに、コリメータ鏡や窓レンズの構造のチェックを行い、機能的に満足できることを確認した。

4 大口径フランジの加工とシール方法

真空容器の製作にあたっては、容器が大型であるため輸送上の制限から多数のブロックに分割し、筑波宇宙センター内で溶接組立を行った。ただし、全面開口部の14 mフランジについては真空シール面の加工精度を確保し、かつ輸送上の問題を解決するため、現地に工作機械を据え付けて一体加工した。

フランジ構造と現地加工状況を図9に示す。フランジのシール方法として容器側フランジにOリングを二重に配列し、Oリング間を真空排気するガードバキューム方式としている。フランジは垂直でありOリングの脱落を防止するため、Oリング溝はあり溝構造とし、溝寸法は要素試験によってつぶししろ30%を確保できる形状としている。

フランジは大型のため4分割して輸送し、現地機械加工に先立ち、バイトの選定、切削条件、ラッピング条件などは事前確認を行って決定している。現地では特製の旋回アームとターンテーブルを据え付け、研磨途中で異物の混入を防ぐため簡易ハウスの中で作業した。しかし、簡易ハウス内でのアーム上・下面の温度差によって、旋回アームが変形し加工精度が得られないため、仕上げ加工は気温が安定する夜間に温度変化の管理を行いながら加工した。大型ゆえの予期しない出来事であった。フランジの平面度は1.5 mmを目標値とし、

加工状態では0.2 mmと良好であった。

図3の搬入扉は、フランジ面に対し20 mmのすきまを持って横方向に移動し、かつ真空シールのための締付も行う必要がある。しかし、単純なボルト締付では機能性が不十分なため、押付装置と締付装置の遠隔操作によって締め付けることとした。締付装置および押付装置の外観を図10に示す。締付装置はフランジの周囲に32本のエアシリンダが均等に配置され、押付装置は扉開閉装置のフレームに取り付けた3か所の電動シリンダで駆動される。これらの機構と特殊シール構造によってフランジがさらに大型になった場合でも、容易に真空シールを可能とするシステムを開発できた。今後この種の大規模装置への適用が期待される。

5 性能確認試験

機能確認のため、シュラウド組込前に真空容器系単独で性能確認試験を実施した。試験に先立ち、主チャンバ、副チャンバの真円度の測定を行い、真空容器の形状精度を確認後、真空排気を開始した。確認項目は窓レンズおよびコリメータ鏡取付部の変位量、大口径結合部の応力、フランジ部からの漏れ量で、各項目とも関連システムに影響しない範囲であることを確認できた。スペースチャンバ完成後の総合試験では、図2(b)に示す到達圧力および排気時間の要求値に対し、図11に示す排気曲線の結果を得た。

6 結 言

完成したスペースチャンバは世界最大級の設備であり、技術的に難しい点も多かった。しかし、全開口搬入扉や自動運転化という設備性能は、今後大型化するわが国の宇宙関連機

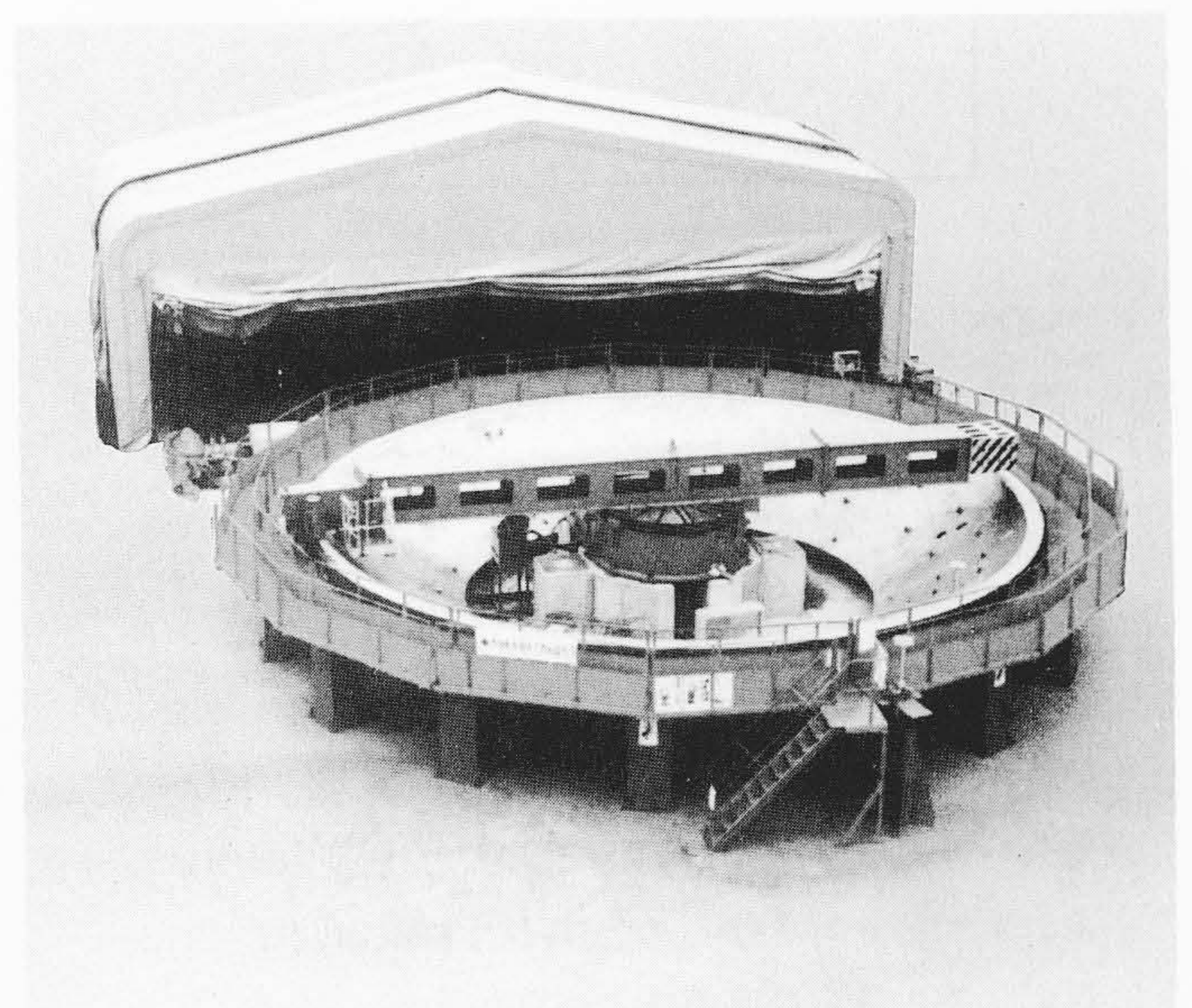
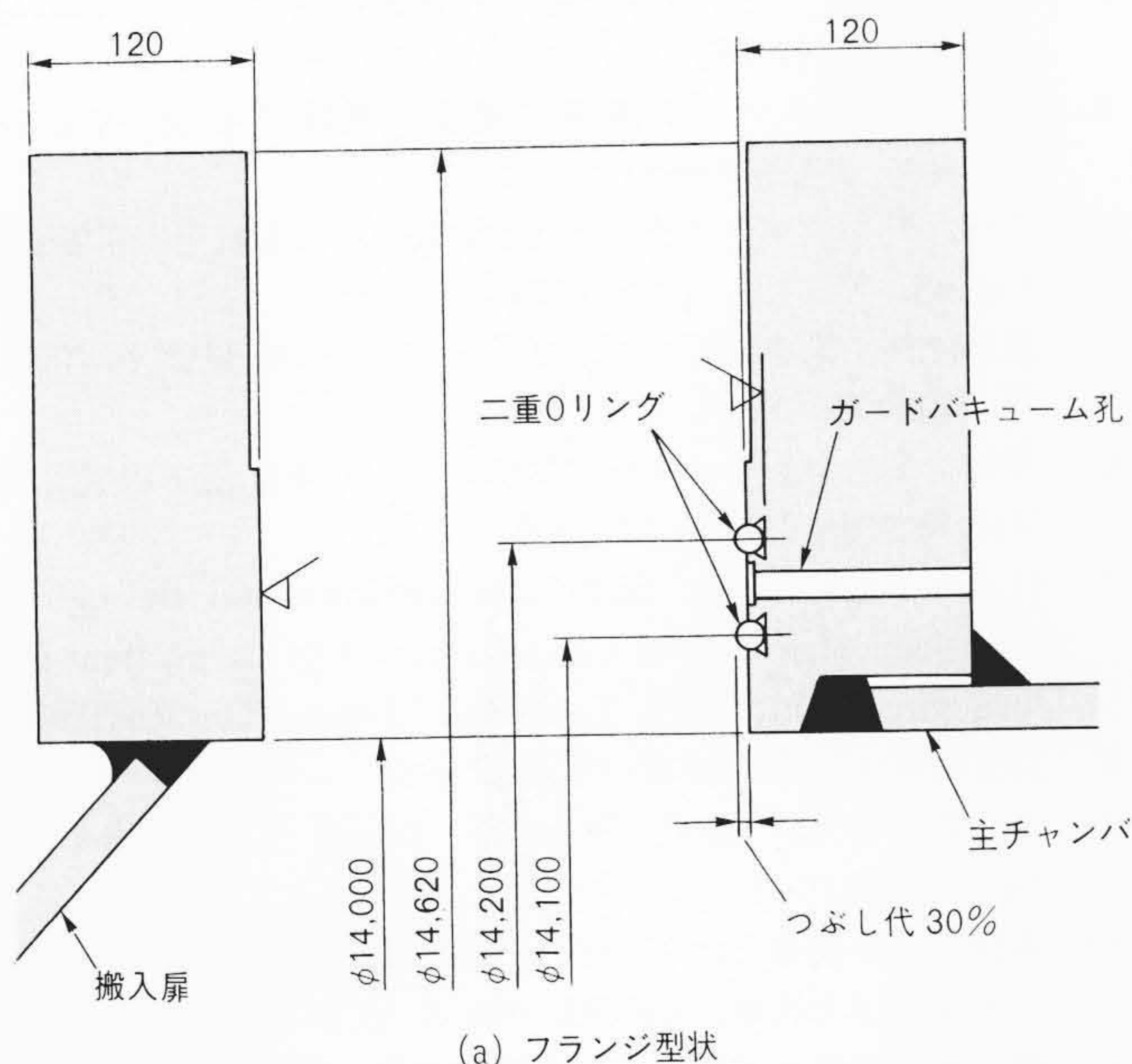
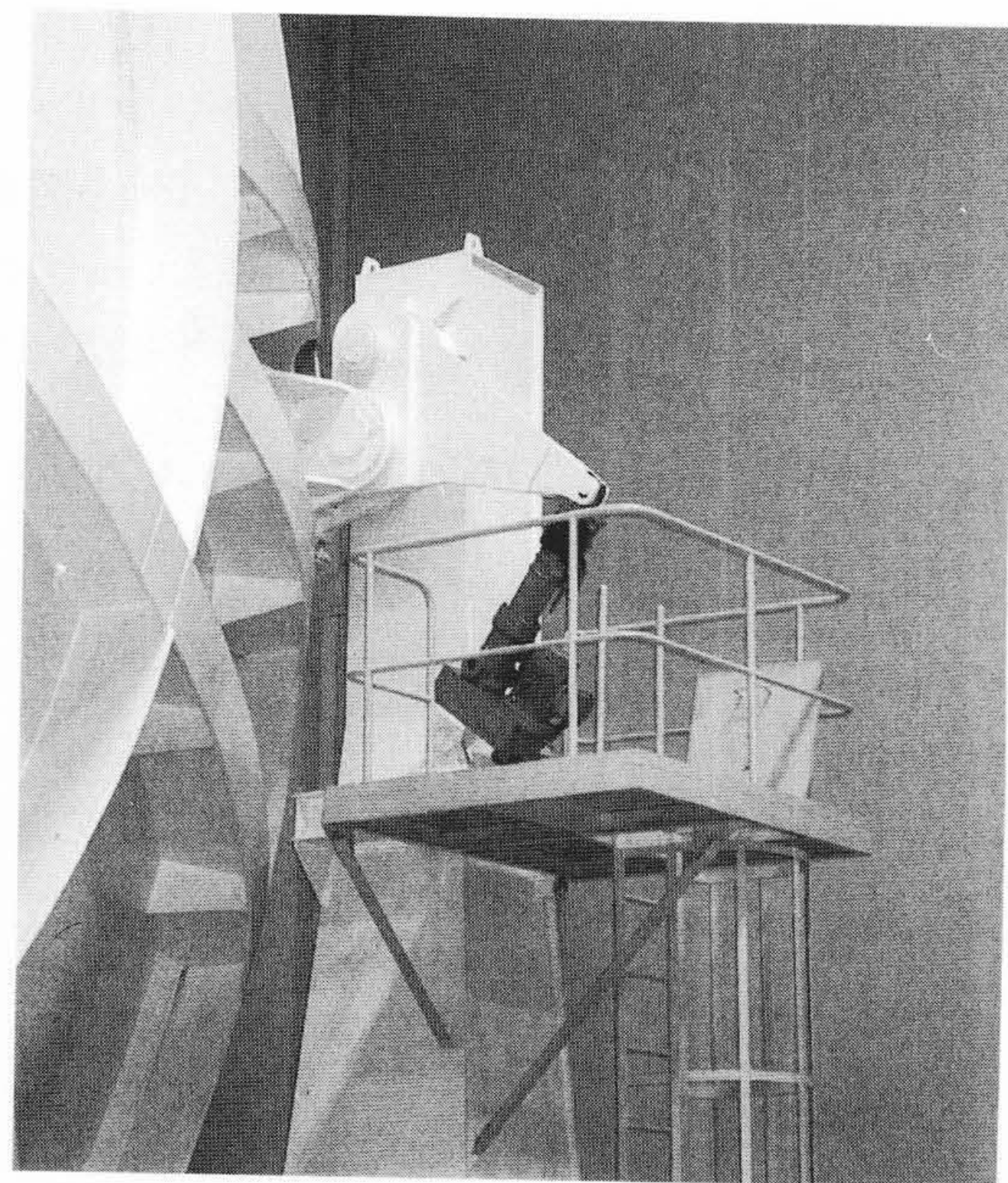


図9 超大型フランジの加工 Oリングは二重あり溝、ガードバキューム方式を採用し、加工は現地に建設した簡易ハウス内で行った。

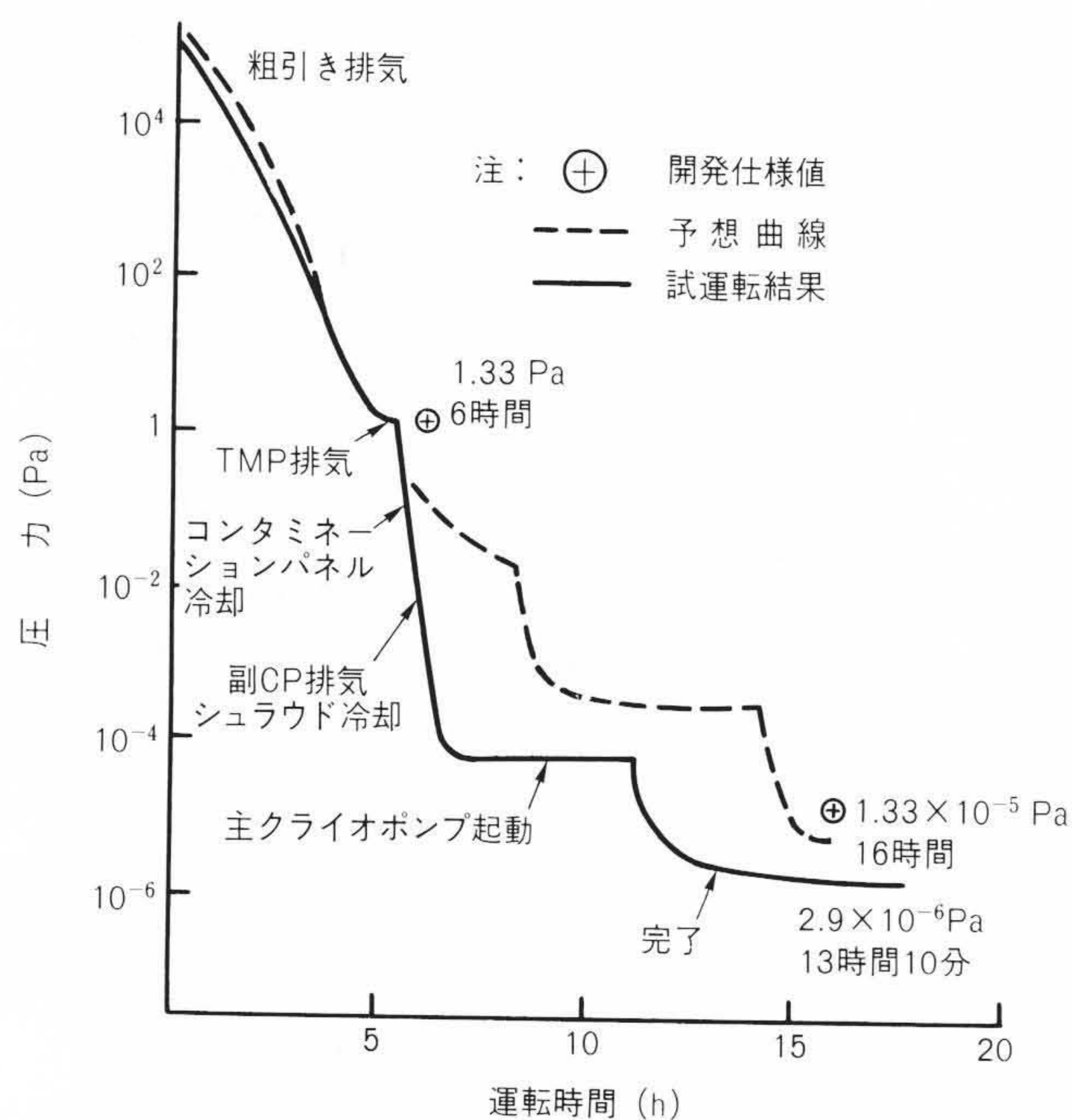
図10 搬入扉の締付装置および押付装置外観 締付装置はフランジ周囲に32本等分配置し、押付装置は扉開閉装置のフレームに取り付けて、この原理を利用している。



(a) 締付装置



(b) 押付装置



注：略語説明 TMP (ターボ分子ポンプ), CP (クライオパネル)

図11 真空排気曲線 排気時間、到達真空度ともに開発仕様値をクリアしている。

器の開発に対し、運用面でも優れた機能を発揮できるものとして期待するものである。

大型スペースチャンバの建設で培った技術を基本に、今後の宇宙ステーションをはじめとする大型宇宙開発プロジェクトに対応して、さらに高機能で信頼性の高い設備の開発に取り組んでいく考えである。

総合環境試験棟を無事完成することができたのは、関係各

位のご指導のたまものであり、心からお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 中山：宇宙と真空，真空，Vol.13，No.9，p.1(1970)
- 2) 遠藤：大型スペースチャンバの開発，高圧ガス，Vol.15，No.1，p.25(1978)
- 3) 五代：大型ロケット開発の動向，機械学会誌，Vol.88，No.803，p.1127(1985)
- 4) 中川，外：スペースチャンバと排気系，日本航空宇宙学会誌，Vol.18，No.198，p.17(1970)
- 5) 遠藤，外：筑波大型スペースチャンバの極低温系，低温工学，Vol.11，No.4，p.16(1976)
- 6) 中村：ソーラシミュレータについて，日本航空宇宙学会誌，Vol.18，No.198，p.27(1970)
- 7) H.N. Riise：Solar Simulator Optimization through De-focusing：A Result of Computerized Optical System Ray-Tracing Study，JPL Technical Memo. 33～384(1968)
- 8) JIS：B8243「压力容器の構造」(1981)
- 9) ASME：Boiler and Pressure Vessel Code. Sec.VIII，Div.1(1986)
- 10) 本間，外：初期たわみを有する円筒殻の座屈強度に対する理論と実験，圧力技術，Vol.13，No.3，p.2(1975)
- 11) 建設省筑波研究学園都市営繕建設本部：筑波研究学園都市地盤図