

臨界プラズマ試験装置(JT-60)本体の試作開発

Research and Development of JT-60 Tokamak

未来のエネルギー装置として期待される、核融合装置の実用化を目指して、我が国の国家的プロジェクトとして、臨界プラズマ試験装置(JT-60)の計画が進められているが、装置の建設に先立ち、その設計と試作開発を行なった。特に、核融合装置の炉心に相当する本体は、高度の技術を必要とするため、各種の調査、試作及び試験を実施した。

その結果、電磁現象、熱、構造強度を主体とした、各種の解析手法が確立され、モデルによって立証されるとともに、電気用、構造用の各種材料に関する諸特性の把握と選定が行なわれた。このようにして製作に関する種々の技術が蓄積され、更に実機大コンポーネントの試作と試験によって、実機建設の可能性が実証された。

齋藤龍生*
佐藤 弘*
村田寿典**
伊藤吉保***

Saitô Ryusei
Satô Hiroshi
Murata Toshifumi
Itô Yoshiyasu

1 緒 言

核融合反応によるエネルギーを利用することを目的とした核融合装置の開発は、近時世界各国で計画が進められている。我が国では日本原子力研究所を中心に、臨界プラズマ試験装置(以下、JT-60という)が建設されようとしている。

この装置は米国のTFTR¹⁾、ヨーロッパのJET²⁾、ソ連のT-20³⁾とともに、当面建設が計画されている世界の四大装置の一つとなっており、1982年に完成が予定されている。

我が国でも既に幾つかの核融合装置が建設され、有意義な成果が得られてきたが、JT-60はこれらをはるかに越える規模の装置であり、実機の設計・製作に先立ち、あらかじめ解決しておかなければならない問題があった。

JT-60に関する設計と試作開発は、1975年から約一年半にわたって実施され、我々は実機建設を目標に鋭意これを遂行した。本体関係における成果を、日立製作所担当の分野に重点を置いて報告する。

2 JT-60の概要と特徴

JT-60はトカマク型に属する核融合装置で、臨界プラズマの発生を目標としている⁴⁾。装置の主要諸元は、表1に示すとおりである。

JT-60の特徴は、アスペクト比の小さいプラズマの形成、磁気リミタの装備及びポロイダル磁場コイルをトロイダル磁場コイルの内側に配備していること、並びに不純物対策として、モリブデン第一壁の使用と高温のベーキングを計画していることなどである。

図1は、日本原子力研究所から提供を得たJT-60装置の概念図を示すものである。

3 大型トロイダルコイルの開発

JT-60のトロイダル磁場コイルは、18個の単位コイルから構成されている。

このコイルの技術的着眼点は、次に述べる事項である。

- (1) 従来のコイルに比較して極めて大型で、かつ磁界も強く、蓄積エネルギーが非常に大きく、これに起因して、コイル導体、絶縁材及び支持構造物に高い応力が生ずること。
- (2) 比較的長いパルス励磁に伴い、過渡的な温度上昇と温度

表1 JT-60本体主要諸元 表の数値が示めすとおり、JT-60は非常に大型の装置である。基本諸元に記すイオン温度と閉じ込め時間は、臨界プラズマ条件に相当する。

区 分	項 目	仕 様 数 値
1. 基 本 諸 元	型 式	トカマク型磁気リミタ付
	プラズマ主半径	3 m
	プラズマ小半径	0.95 m
	中心磁束密度	4.5 T
	プラズマ電流	2.7 MA
	イオン温度	5 ~ 10 keV
	閉じ込め時間	0.2 ~ 1 s
2. トロイダル磁場コイル	総起磁力	67.5 MAT
	最大電流	52.1 kA
	構成単位コイル数	18個
	配列主半径	3.32 m
	内半径	1.94 m
3. ポロイダル磁場コイル	構 成	変流器コイル
		垂直磁場コイル
		水平磁場コイル
		四重極磁場コイル
		磁気リミタコイル
4. 真 空 容 器	構 成	真空容器本体
		ライナ
		固定リミタ
		磁気リミタ
	真空容器本体形状	非円形断面トーラス
	ベーキング温度	500°C
	到達真空度	< 1 × 10 ⁻⁸ Torr

- 分布が生ずること。
- (3) 超大型コイルの材料及び製作技術に、新しい手法を必要とすること。

3.1 解 析

磁界解析では、高精度の磁界計算と種々の原因によって発

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 理学博士 *** 日立製作所日立研究所

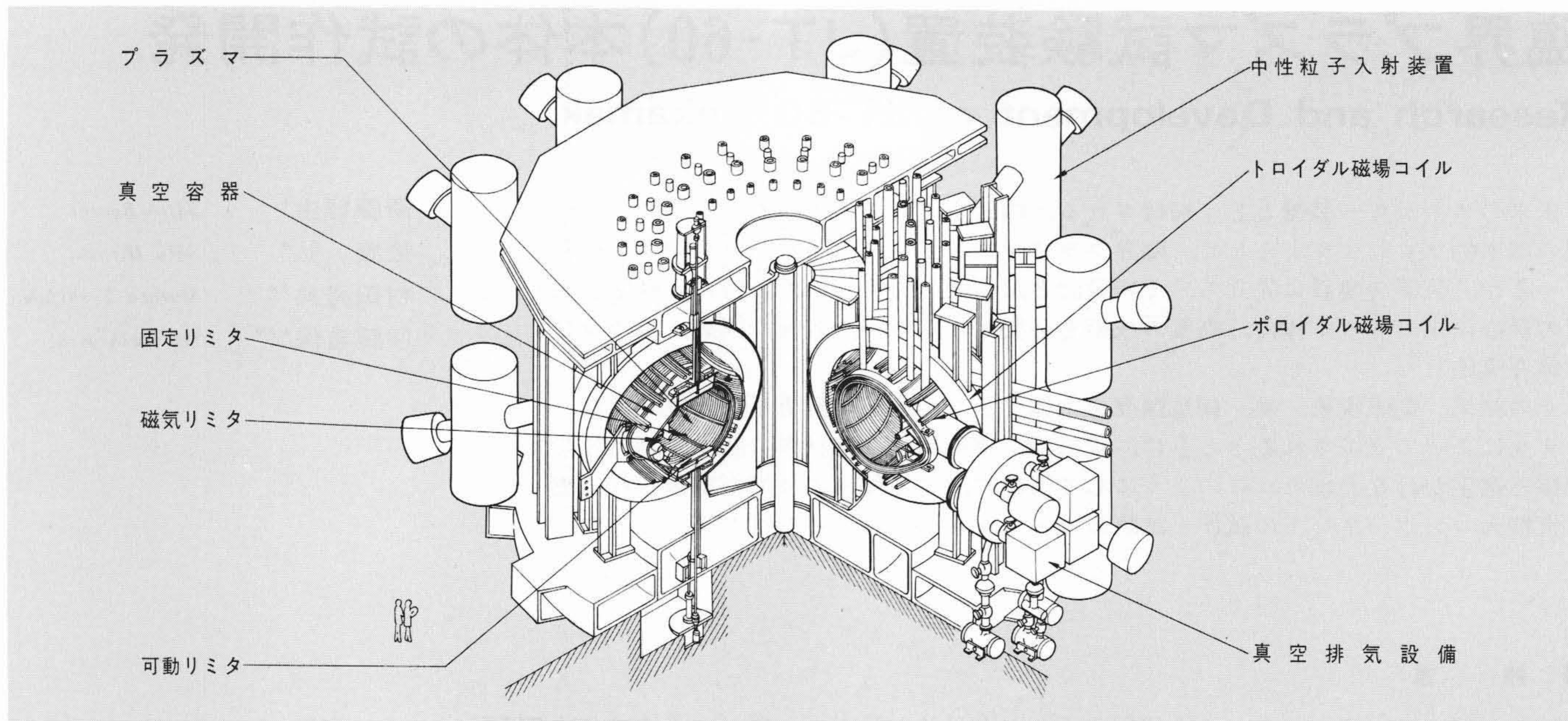


図1 JT-60概念図 JT-60は多数の部品で構成されている。磁気リミタの内蔵とこれに伴う真空容器の断面形状は、本装置の特徴の一つである(資料：日本原子力研究所提供)。

生すると予測される不整磁界の的確な把握、及び構造設計へのフィードバックを検討した。

熱解析の分野では、大断面の直接水冷コイルがパルス電流で励磁される場合の導体及び冷却水の各部温度の時間的変化の解析法を開発した。

作用力については、磁界解析に基づく力分布を求め、強度解析用プログラムに的確なインプットが可能となった。

強度解析の面では、構造物強度解析用プログラム“HISTRAN”(Hitachi Structure Analysis System)シリーズ⁵⁾を用いて各種計算を行ない、コイルに生ずる変位、応力の状況を把握した。

解析の代表例として、導体の温度分布を図2に示す。

3.2 材料の選定

このコイル導体に発生する応力の強さは、コイルの最狭部

では従来のコイルに比較して高い値となる。このため、一般に電気用として用いられる軟質銅材では強度が不足する。その対策を次のとおり実施した。

このコイルでは高度の耐力を要する部分の導体として、0.2%銀入り無酸素銅の40%加工材を、その他の部分用として無酸素銅の20%加工材を採用することとした。無酸素銅の選定は、導電率、ろう付特性、軟化特性などの面で優れていること、また、銀入りの採用は強度及び軟化特性の面で効果があることによる。

絶縁用材としては、層間絶縁用としてポリアミド紙とガラス不織布の複合プリプレグ材を、対地絶縁用としてはマイカ、及びガラステープのプリプレグ材を採用した。

選ばれた材料については、電氣的、熱的及び機械的な各種試験を行ない、基礎的なデータを採取した。

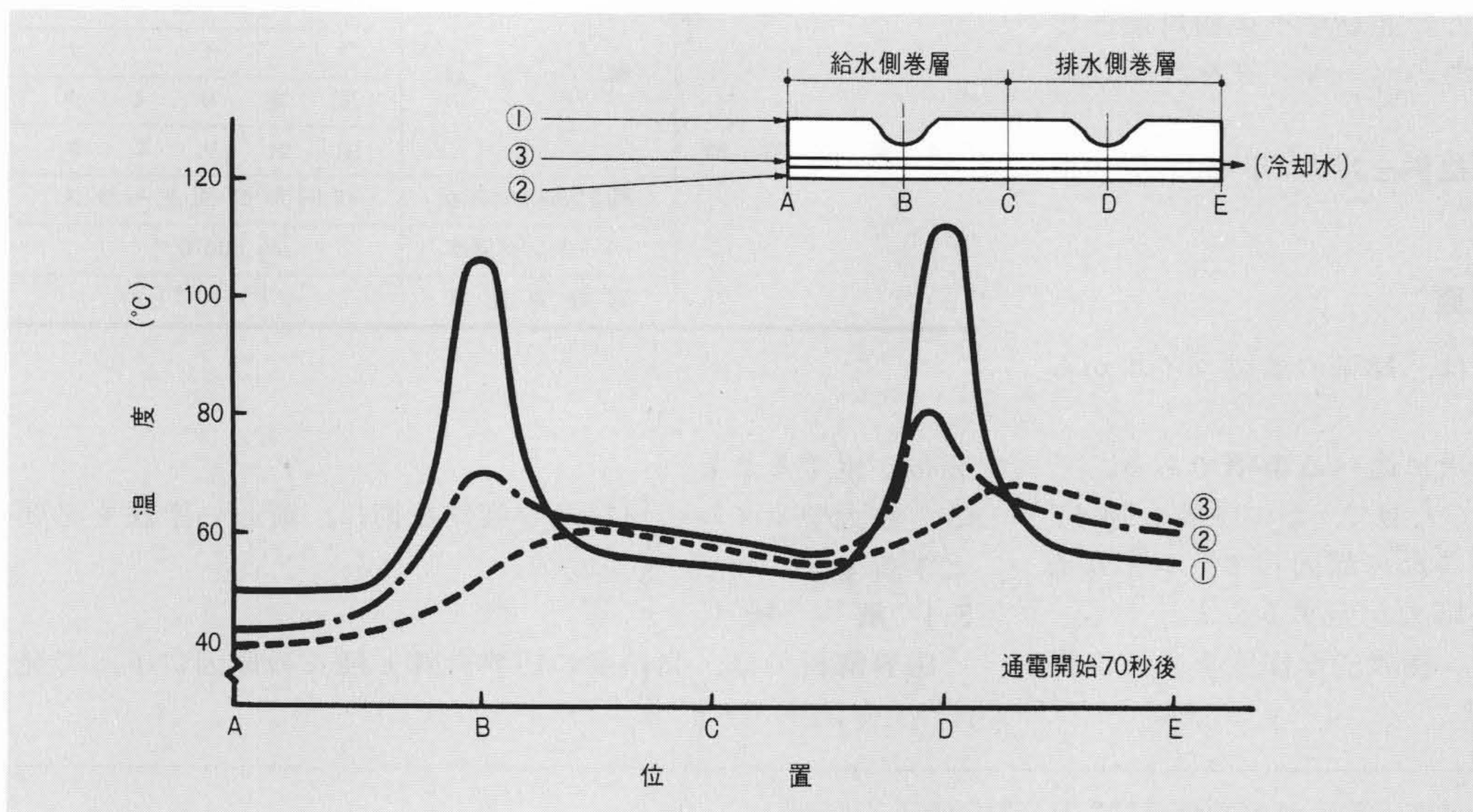


図2 導体長手方向の温度分布 冷却水は、コイルの二層を直列に冷却する。コイルの狭くなった部分に、局所温度上昇が生ずる様子が示されている。

3.3 縮小モデル

解析の結果を立証し、設計手法を確立するために、幾つかの縮小モデル試験を行なった。

熱解析の結果を実測で確かめるために、 $\frac{1}{2.5}$ の冷却モデルによる試験を行なった。モデルは電流、温度、時間及び寸法が所定の相似則に基づいて設定されており、実機の温度分布と変化をそのまま表示することができた。

強度解析の結果を確かめ、併せて応力変位及び疲労試験を行なうための $\frac{1}{10}$ サイズのコイルユニットモデルを製作した。このモデルには、コイルに発生する電磁力と同じ分布の荷重を機械的にかける装置が設けられている。

これら試験と解析の結果は良い一致を示し、設計、解析手法の妥当性が立証された。

3.4 製作技術の開発

このコイルの導体は断面積が 100cm^2 を超え、単位重量も 1t に達し、かつ加工材が必要なため、導体の製造自体も困難な問題があり、高品質の無酸素銅を得るための製造工程の開発を行なった。

巻線の製作は導体寸法、材質の特性を考慮して、ロール曲げと接続の組合せ方式を採用した。コイルは半円の巻層ごとに接続されるため、信頼性の高い接続法が必要である。このコイルでは温度管理が行なえ、かつ均一な接続が期待できる高周波ろう付け法を開発した。ろう材には、広い接続面に対しても流失を生じないように特殊処理をした複合ろう材を使用した。

前述した絶縁物の特性と使用の手法についても、入念な試験と試行を行なった。

3.5 実機大コイルの試作

ここまでの検討の成果をもとに、実機大コイルユニットの試作と試験を実施した。

製作に当たっては、将来の量産工程を想定した実際的な手

法を極力取り入れた。試験項目については一般の電氣的試験のほか、熱的試験及び $3,000\text{t}$ を超える荷重を用いての機械力試験を実施し、その性能を確かめた。

図3に、試作された実機大トロイダル磁場コイルを示す。

4 大型真空容器の開発

JT-60の真空容器は、(1)厚肉リング及びベローズから成るトーラス型の真空容器本体、(2)ライナ、固定リミタ及び磁気リミタから成る第一壁、並びに(3)各種観測用ポートから構成されている。また、容器内部には磁気リミタコイルが設けられ、外部には温度制御層が取り付けられている。

この真空容器の技術的着目点は、次に述べるとおりである。

- (1) 大型の非円形断面トーラス型状であること。
- (2) 超高真空対策の一環として高温(500°C)のベーキングが要求されていること。
- (3) 電磁力を含む各種の力が複雑に作用すること。

4.1 解 析

電磁氣的な問題としては、各種コイルの励磁及びプラズマの挙動によって真空容器に誘導される電圧、並びに電流の解析と外部磁界との相互作用によって生ずる電磁力などの把握が重要である。各種の解析を通じ、真空容器をトーラス方向に一周するループ電流や、厚肉リングに局部的に誘起される鞍型電流の存在などが明らかにされた。

作用力に対する真空容器の強度解析は、コイルと同様のプログラムを用いて、2次元及び3次元のモデルについてマクロ及びズームアップ手法を組み合わせて綿密に実施され、真空容器の形状、補強構造及び支持構造との関係を明らかにした。

高温に保持され、また、プラズマからの入熱を受ける真空容器の熱解析についても定常及び非定常の計算が行なわれ、温度の場所的、時間的關係を明らかにした。

4.2 材料の選定

真空容器の材料としては、高温での十分な耐力が必要なことから、ニッケルベースの超合金インコネル625及びハステロイXを候補材として選んだ。

第一壁用材としては、高温特性、プラズマに対する不純物の影響などの観点より、モリブデンが選ばれた。

選択した材料については、各種の機械的、熱的な試験及び加工に関する基礎的なデータの採取を行なった。

4.3 縮小モデル試験

解析結果を立証するために、厚肉リングとベローズの部分を出した $\frac{1}{10}$ サイズのモデル10種余りを製作し、応力 変位、座屈、振動などの試験を行なった。

疲労試験及び熱試験には、実断面サイズの部分モデルを用いて試験を行なった。

試験の結果は、解析結果あるいは材料特性と比較検討され、解析手法の確立と意味付けを行なった。

縮小モデルと解析の比較検討の一例として、真空容器の構成部品の一つであるベローズについて、外圧によるひずみの検討結果を図4に示す。

4.4 製作技術の開発

超合金の溶接は新しい開発テーマであり、溶接法の開発と溶接部の特性を知るための各種試験を行ない、高耐力、超高真空溶接の手法を確立した。

超高真空対策としての表面処理と放出ガス量の関係も重要なテーマであった。将来、実機に適用できる表面処理法に基づく放出ガス量の測定は、 $1,000$ 時間に及んで実施された。

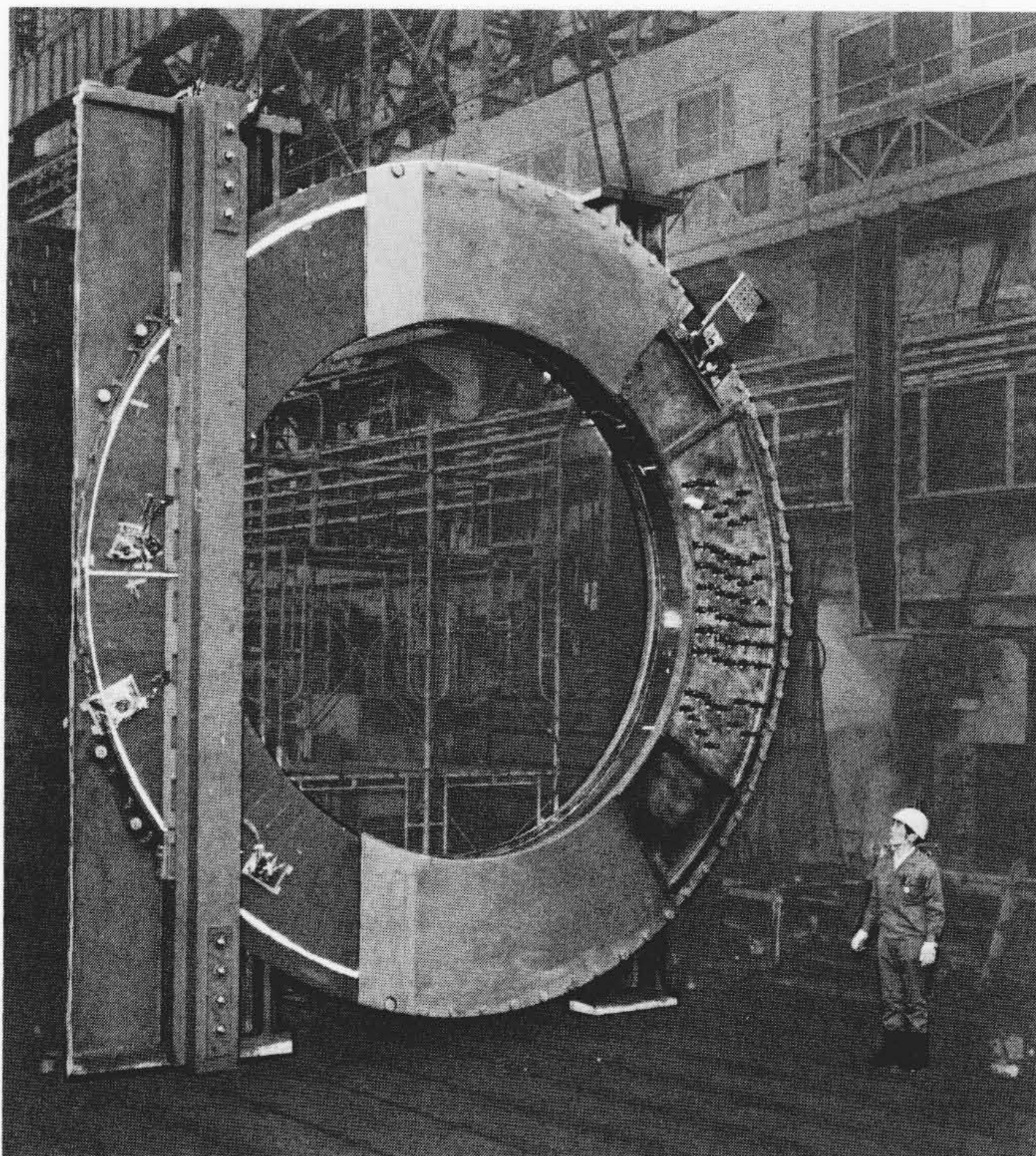


図3 実機大トロイダル磁場コイル 試作されたコイルユニットを示す(外径は約6m)。

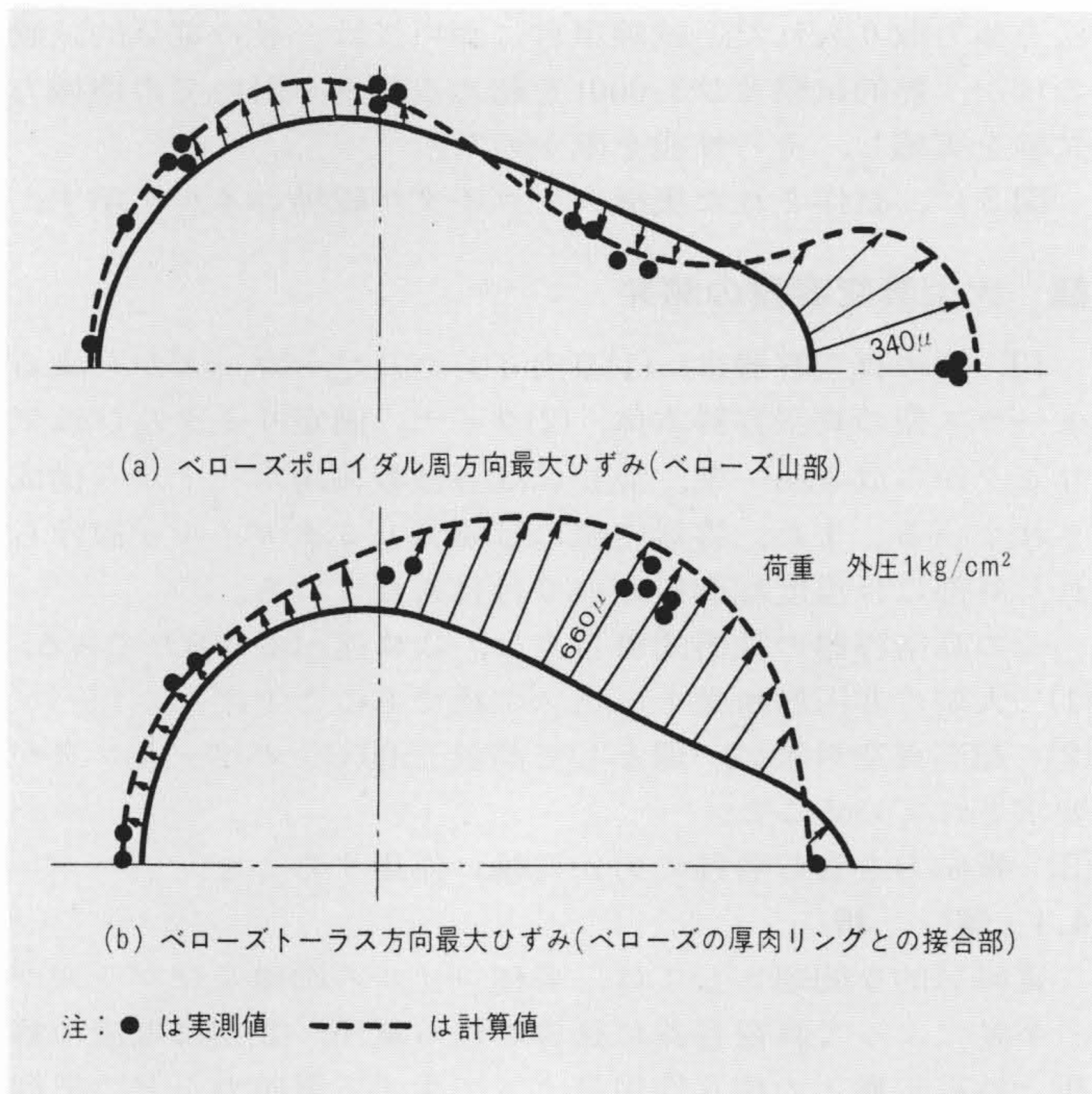


図4 ベロースのひずみ分布実測値と計算値の比較 解析の結果をモデルを用いた実測値と対比したものである。両者はよく一致し、解析手法の妥当性が立証された。

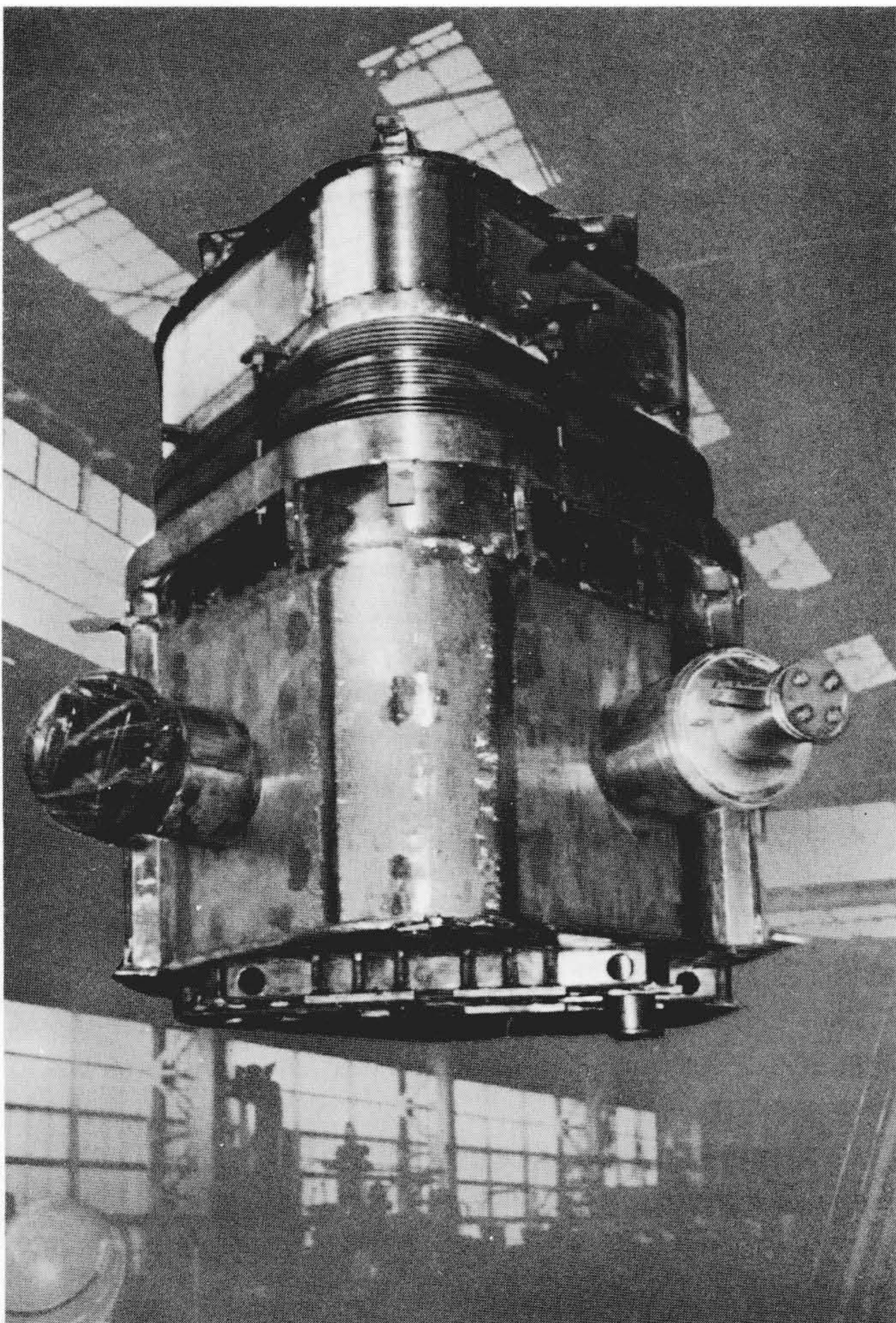


図5 総合性能試験用実機大真空容器 実機大真空容器で、材料はインコネル625及びハステロイXが使用されており、下部より厚肉リング、ベロース及び分解組立部で構成されている。軸長(上下方向)は約3mである。

実機大ベロースの製作は、超合金という材質的特殊性に加えて、非円形で山の高さに比べてピッチの小さい形状という困難さを克服して、成形方式のベロースの試作に成功した。

ベロースと厚肉リングの接合技術の開発を行ない、自動溶接法の開発も同時に行なった。

真空容器を二分する分解組立部の試作と作業性の確認、真空性能の立証などを実材料を用いた実機大モデルを用いて行なった。

ライナの製造、加工性についても、切削、成形など各種の試作、試験を行なった。

4.5 総合性能試験

試作試験の成果を確認するために、トーラス30度に相当する実材質、実物大のモデルが製作された。モデルは分解組立部を含む厚肉リング部、並びにベロース部及び排気ポートから成り、内部にはライナなどの一部、外部には温度制御層が取り付けられた。

試験は、ベーキングと真空排気を中心とした試験及び応力、変位、振動に関係した機械的試験が行なわれた。ベーキングは500℃まで行なわれ、 6×10^{-9} Torrの真空度を得ることに成功した。表面よりの放出ガスは、ベーキング後 10^{-13} Torr l/scm²のオーダに保たれ、表面処理の適合性も立証された。

図5に総合性能試験用真空容器を示す。

5 結 言

今回のJT-60本体の設計及びトロイダル磁場コイルと真空容器を対象とした試作開発を通じ、この装置に課せられている技術的な諸問題が明らかにされるとともに、各種解析手法の確立と製作技術が蓄積され、また、これらを実証する成果が得られた。すなわち、

- (1) 電磁現象、熱及び構造強度を主体とした各種解析法の確立とモデルによる実証
 - (2) 電気用及び構造用材料の選定と特性の把握
 - (3) 各種加工、処理技術の開発
 - (4) 実機大コンポーネントの試作と試験による実機製作の可能性の実証
- などである。

JT-60の建設はこれから本格的に進められるが、試作開発が局部的でかつ限定された時間の中で解を求めたものであるのに対し、実機はシステムとしての生きた機能とバランス、そして永い年月を耐え抜くだけの信頼性が要求される。

今後我々は、試作開発で得た技術蓄積の上に、更に信頼性に主眼をおいた設計といっそう詳細なデータの積上げとを行ない、この世界的装置の建設を成功裏に進めていきたいと考えている。

終わりに、この試作開発に当たり、種々の御指導、御協力をいただいた関係各位に対し、心から謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) PPL, E/G: Tokamak Fusion Test Reactor, Reference Design Report PPL-1312 PH-R-004(Nov. 1976)
- 2) P.H. Rebut: The JET Project (Design Proposal) EUR-JET-R 5 (1975)
- 3) Glukhikh, V.A., et al.: Development Status of T-20 Demonstration Thermonuclear Tokamak-Reactor B-0319, (1976)
- 4) 日本原子力研究所: 核融合研究開発の現状 1976年(昭51-10)
- 5) 佐川ほか: 応力解析汎用プログラム“HISTRAN”の概要と適用例, 日立評論, 57, 1051(昭50-12)