

強磁場トカマク型核融合装置“TRIAM-1”の完成

Construction of High Magnetic Field Tokamak "TRIAM-1" for Nuclear Fusion Research

このたび九州大学応用力学研究所では、強磁場トカマク型核融合装置“TRIAM-1”を完成した。

本装置は小型トカマクにもかかわらず、強トロイダル磁場をもっているため、高放電電流密度、高温・高密度のプラズマを得ることができる国内唯一の強磁場トカマクである。大型装置に匹敵するこれらの高性能を実現するため、真空容器の高耐電圧セラミックブレード方式、高耐電圧コイル、バット接合方式の変流器鉄心の開発など、各種の新技术・新設計を採用した。他方、実験装置としての取扱い、分解組立、保守点検などが容易である小型化の特長を十分生かした設計製作を行なった。

本論文では、装置の概要とこれらの技術的課題について述べる。

伊藤智之* Satoshi Itoh
 橋本 宏** Hiroshi Hashimoto
 加沢義彰** Yoshiaki Kazawa
 井村泰也** Yasuya Imura

1 緒言

核融合エネルギーの利用に不可欠な複雑なプラズマの挙動を研究するため、各種の基礎実験が現在各大学、研究所で多様に実施されており、核融合開発の貢献に大きく寄与している。九州大学応用力学研究所で完成した強磁場トカマク型核融合装置“TRIAM-1”は、比較的小さいプラズマ半径で炉心プラズマを得ることの可能性、すなわち核融合炉の小型化の可能性を研究するための小型実験装置である。

本装置の大きな技術的特長は、大学、研究所で気軽に実験できる小型装置であるにもかかわらず4.0Wb/m²の強トロイダル磁場をもっていること、第2段加熱として乱流加熱ができるよう強トロイダル電場に耐えられる放電管、各ポロイダル磁場コイル、架台、ベースなどの高耐電圧絶縁構造の採用などが挙げられる。

以下、装置の概要とこれらの特長、技術的課題などについて述べる。

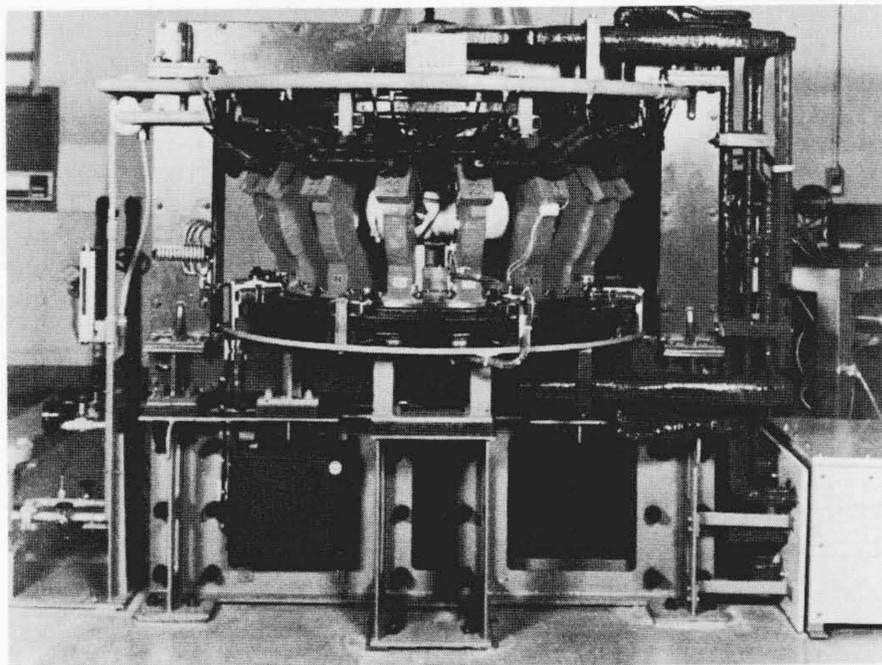


図1 強磁場トカマク型核融合装置“TRIAM-1”の外観 “TRIAM-1”本体の全景を示す。

2 装置の概要

“TRIAM-1”本体の外観を図1に、主要諸元を表1に示す。本装置は、(1) プラズマ閉込め空間である真空容器、(2) 真空容器の中心に4.0Wb/m²のトロイダル磁場を発生するトロイダル磁場コイル、(3) プラズマ電流を流すための変流器(鉄心、一次コイル)、(4) プラズマ電流を平衡させ保持するための垂直磁場コイルと水平磁場コイル、(5) 本装置を支持するためのベース、架台から構成される。

3 真空容器

プラズマの閉じ込め空間を形成するトーラス状の真空容器は、トロイダル方向にセラミック絶縁フランジを介して2分割されている。セラミック絶縁フランジの耐電圧は、乱流加熱の際の電圧を考慮して、15kVのインパルス試験電圧に耐えられる構造にしている。真空容器には、プラズマ観測用のポート及び真空排気用ポートを14個設けてある。図2に真空容器の外観を、表2に設計要目を示す。材質は非磁性ステンレス鋼を用い、内面仕上げ及び洗浄は超高真空に適する処理を実施している。真空容器内部を超高真空にするため、真空容器のセラミック絶縁部を電氣的に一時的に短絡し、変流器の

表1 “TRIAM-1”の主要諸元 小型ながら強磁場が特徴である。

項目	数値
トロイダル半径	$R = 25.4\text{cm}$
リミッタ半径	$a_L = 4.0\text{cm}$
トロイダル磁場	$B_t = 4\text{Wb/m}^2$
垂直磁場	$B_V = 0.1\text{Wb/m}^2$
水平磁場	$B_H = 0.005\text{Wb/m}^2$
鉄心磁束	$\Phi = 0.037\text{V}\cdot\text{s}$
乱流加熱電場	$E_{TH} = 10\text{kV}$
到達真空度	$P_B = 5.5 \times 10^{-10}\text{Torr}$

* 九州大学工学部 工学博士 ** 日立製作所日立工場

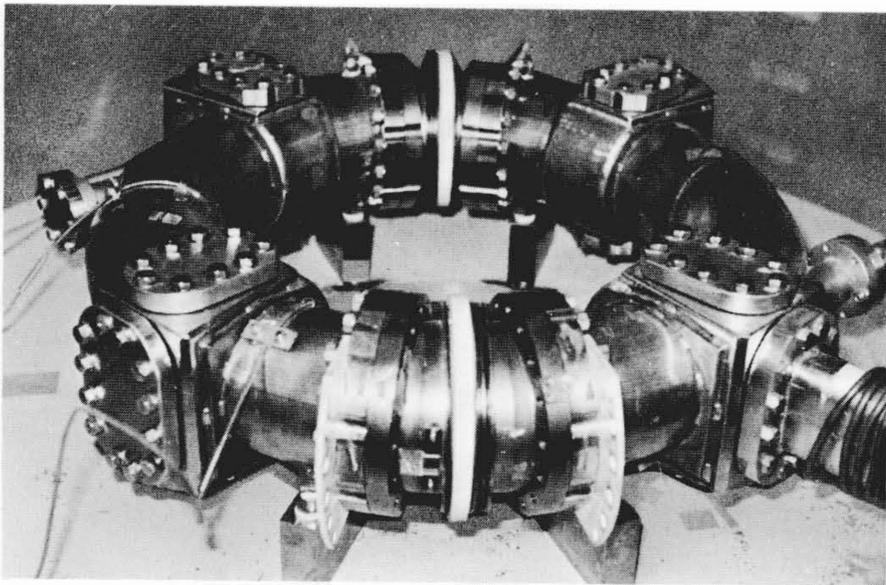


図2 真空容器の外観 真空容器を単独でトラス状に組み立てた状態を示す。トロイダル方向にセラミック絶縁フランジを介して電氣的に絶縁されている。

表2 真空容器設計要目 15kVのインパルス試験電圧に耐えるセラミック絶縁方式を採用している。

項目	仕様・性能
トロイダル半径	254mm±3
断面内直径	105.3mm±2.5
肉厚	5.35mm
材質	SUS-304
ベーキング温度	最大250°C
全リーク量	10 ⁻⁹ Torr l/s以下
1ターン試験電圧	15kV インパルス
分割	トロイダル方向にセラミック絶縁フランジを介して2分割
付属品	4個……長円形(50×90mm)ポート 8個……長円形(30×73mm)ポート 2個……丸形(直径35mm)接続ポート

一次コイルに商用周波数の電圧を加えることにより、真空容器に二次電流を通し、そのジュール熱でベーキング加熱を行なう。ベーキング温度は250°Cとし、観測ポート及び分割部は、すべてメタルパッキン封止構造とした。真空容器の外表面には、ベーキング時の断熱と温度の均一性を目的として保温を設けている。工場ではベーキング時の真空封止の信頼性と品質保障を考慮して、250°C～常温のヒートサイクル試験を5回実施して、リークのないことを確認している。真空容器はベースに固定されるが、対ベース間には7.5kVの試験電圧に耐える絶縁構造をもつ固定法を採用した。

4 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは16個から構成され、1個のトロイダル磁場コイルの外観を図3に示す。トロイダル磁場コイルの導体は直接水冷方式を採用し、中空導体を用いた。トロイダル磁場4 Wb/m²を発生するため、コイルには強大な電磁力が発生する。すなわち、トラスの求心方向には全コイルで236tf 1個当たり15tfの電磁力、またコイルの半径方向には全コイルで917tf、1個当たり57tfの電磁力が作用する。また、垂直磁場と鎖交するため、トロイダル磁場コイルには転倒力が作用する。この電磁力は全コイルで16.5tf、1個当りで1tfである。これらの強大な電磁力を支持するため、コイルの外側に非磁性ステンレス鋼製のサポートを設けた。これらの電

磁力が作用した際のコイル及びサポート各部に生ずる応力と変位分布を有限要素法により求めた。それらの結果をそれぞれ図4、5に示す。トロイダル磁場コイルにはコンデンサ電源から通電を行なうため、電流波形が急峻であり、サポートが一体構造の場合サポートに流れる誘起電流が比較的大きく、これがトロイダル磁場を打ち消す方向に作用する。この影響をなくすため、サポートをコイルの周方向に1箇所分割し絶縁を施した。コイルへの冷却水供給は、上部ベースに固定された給水管から絶縁ホースを介して通水している。16個のトロイダル磁場コイル間の接続によるトラス方向の電流成分は、不整磁場としてプラズマの平衡に悪影響を及ぼすため、巻戻し線を設け不整磁場を打ち消すよう考慮した。トロイダル磁場コイルの設計要目を表3に示す。

5 変流器

コンデンサに蓄積された電氣的エネルギーは、変流器一次巻線を含む負荷回路に放電され、鉄心を介して二次巻線に相当するプラズマに供給され、プラズマの放電、ジュール加熱とポロイダル磁場の発生に寄与する。鉄心は方向性ケイ素鋼板を積層したもので、鉄心の解体、組立の容易さを考慮してバット接合となっている。ケイ素鋼板の積層は、絶縁と固定を兼ねて接着構造とした。鉄心の外観を図6に示す。

変流器一次コイルは、鉄心の脚鉄の上部及び下部に2個配置し、それぞれ電氣的に直列に接続される。本コイルは90kVのインパルス試験電圧に耐える絶縁構造をもっている。変流器の設計要目を表4に示す。



図3 トロイダル磁場コイルの外観 完成したトロイダル磁場コイル1個の外観を示す。電磁力を支持するための非磁性ステンレス鋼製のサポートを設けている。

表3 トロイダル磁場コイルの設計要目 トロイダル磁場4 Wb/m²を発生するためのコイル設計要目を示す。

項目	仕様・性能
トロイダル半径	275mm
内径	220mm
外径	約350mm
材質 (導体) (巻粋)	電気銅 ステンレス鋼
起磁力	2.55×10 ⁶ AT
通電時間	0.03秒 5分周期
印加電圧	5kV
試験電圧	15kV インパルス
冷却方法	直接水冷

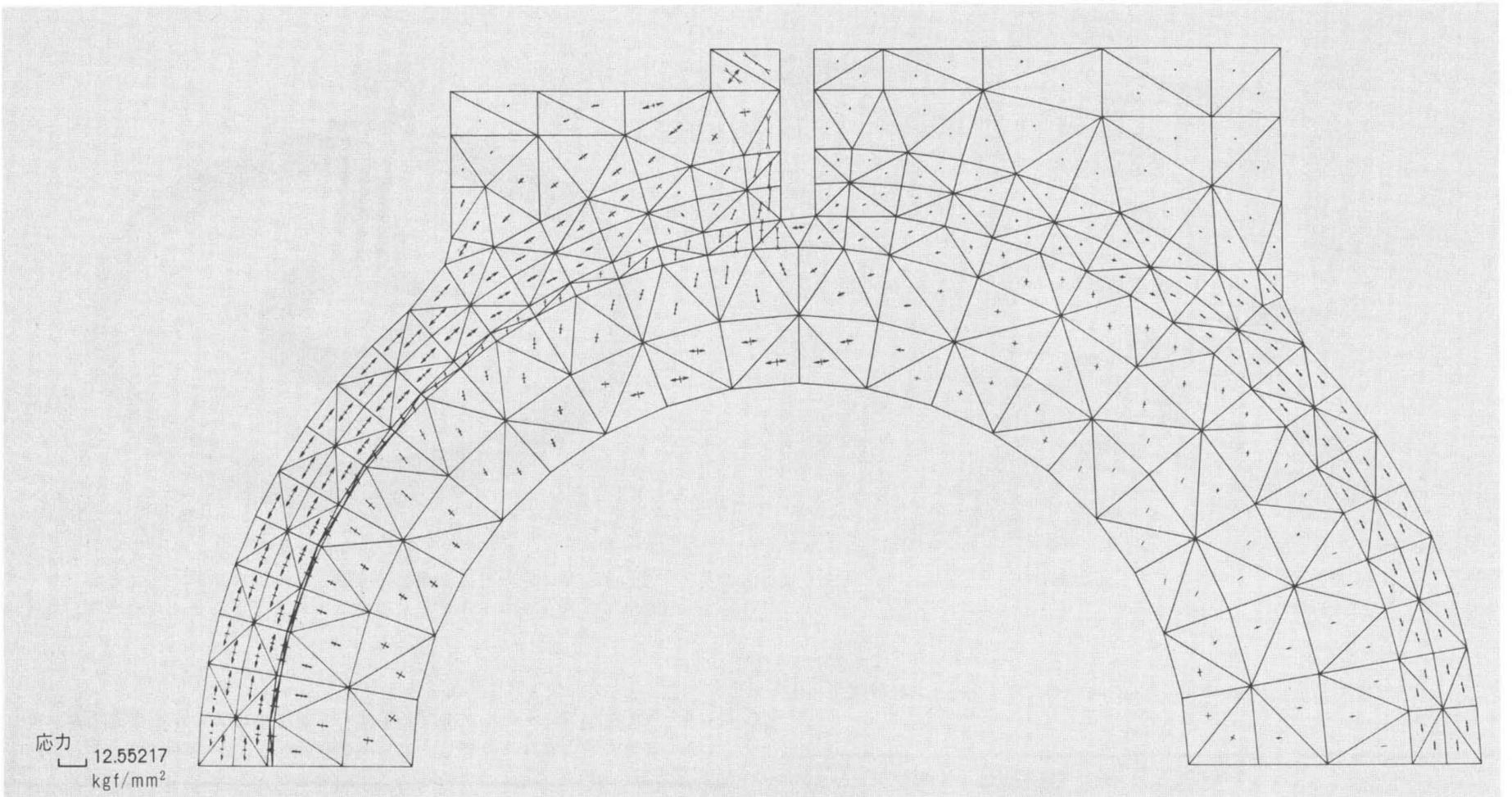


図4 トロイダル磁場コイルの応力分布 有限要素法で計算した応力分布を示す。

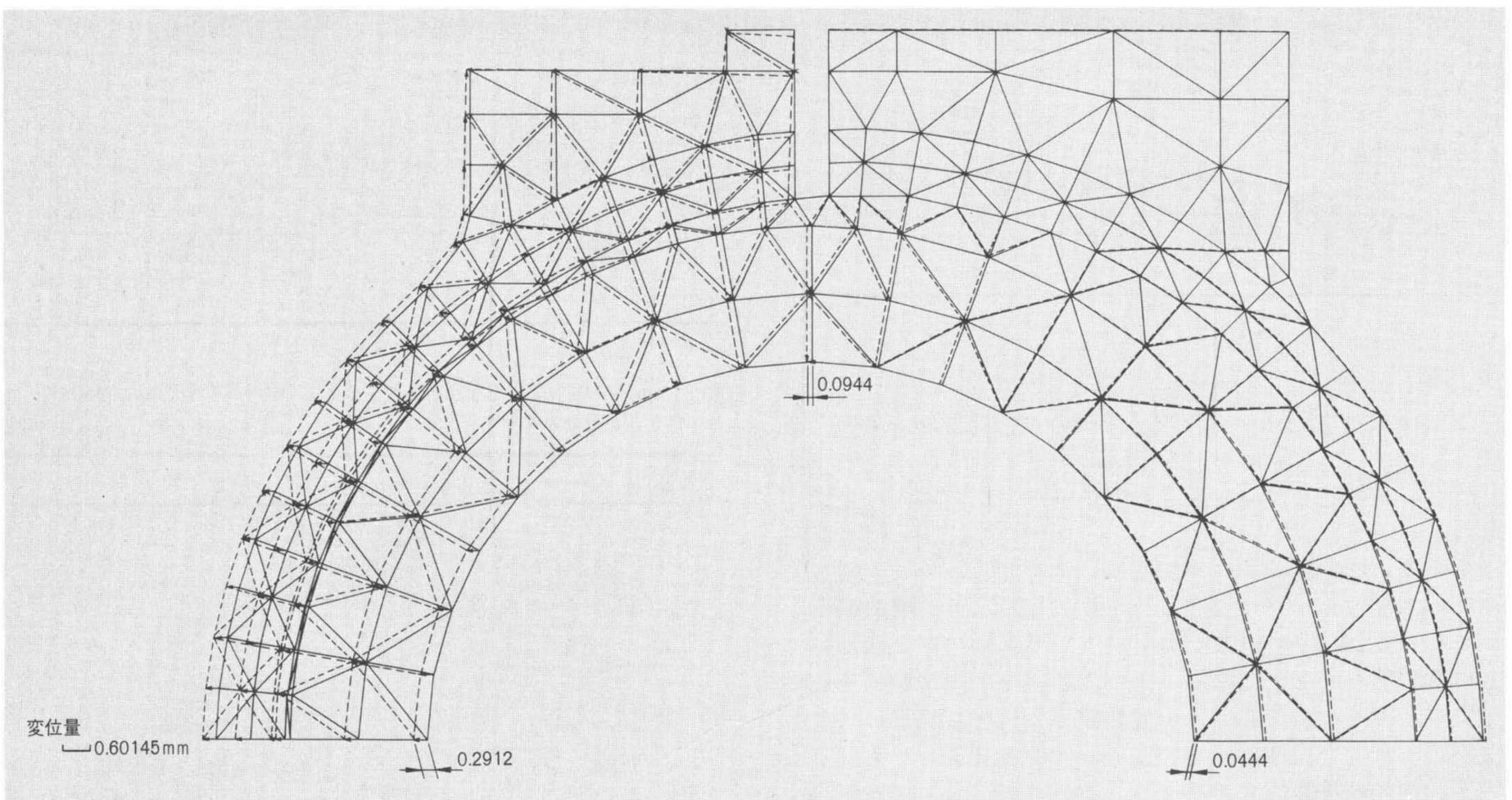


図5 トロイダル磁場コイルの変位分布 有限要素法で計算した変位分布を示す。

6 垂直磁場コイル

本コイルは、プラズマの平衡を得るため、プラズマの閉込め領域に約 0.1Wb/m^2 の垂直方向の磁場を与えるコイルである。本コイルの各ターンには、プラズマ電流の変動及び乱流加熱運転時の高電圧誘起を考慮して、1ターン当たり 10kV に耐える絶縁を施している。また、変流器との磁束の鎖交を打ち消すため巻戻しコイルを設け、直列に接続されている。垂直磁場コイルの外観を図7に、設計要目を表5に示す。

7 水平磁場コイル

トロイダル磁場コイルの微小な設置誤差や機内配線からの影響で、プラズマ領域の水平方向に不整磁場が発生する。本コイルはこの水平方向の不整磁場を打ち消すため設けられたもので、プラズマの領域で水平方向に約 60G を発生できるものである。コイルの絶縁は、垂直磁場コイルと同様1ターン 10kV に耐えるよう設計されている。本コイルの設計要目を表6に示す。

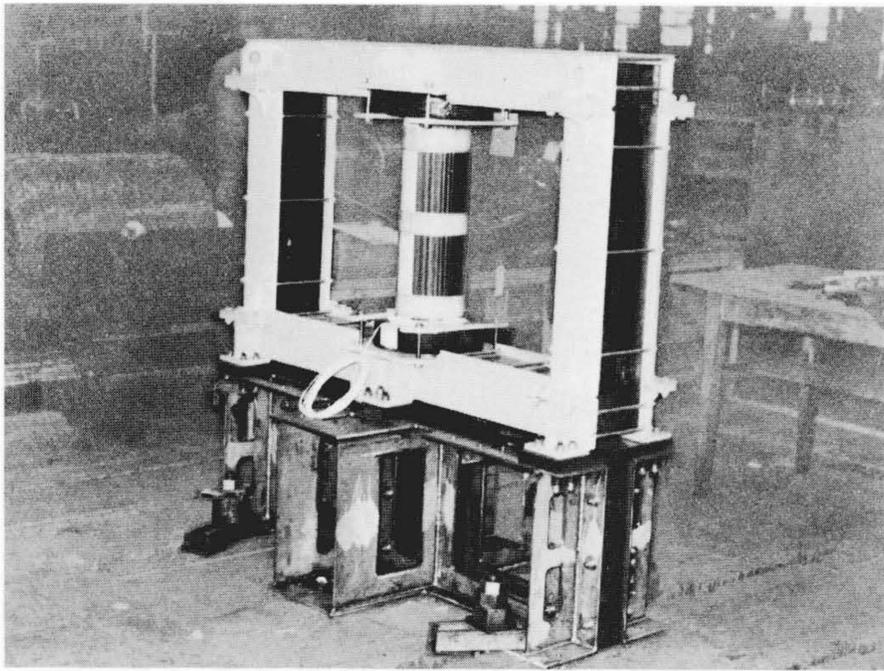


図6 変流器の外観 一次コイルを変流器鉄心に組み込んで、単独で架台に設置した状態を示す。

表4 変流器の設計要目 一次コイルは90kVのインパルス試験電圧に耐える絶縁構造をもっている。

項目		仕様・性能	
鉄材	鉄板	新日本製鐵株式会社 Z-9H相当品ケイ素鋼板	
	締金具	普通鋼	
心	脚鉄の占積率	87%以上	
	接合方法	衝頭(バット接合)	
	接合部のギャップ	0.3mm以下	
一次コイル	総巻数	6回(上下各3回)	
	最大印加エネルギー	15kJ	
	材質(導体)	電気銅	
	通電周期	5分	
	試験電圧	90kV インパルス	

8 結 言

“TRIAM-1”は小型ではあるが多くの技術的課題をもち、設計、製作には困難を極めたが、コンポーネント試作、モデル試験などを実施して検討を重ね、予定どおり期限内に完成することができた。

本装置はその後順調に運転を続けており、プラズマ電流密度950A/cm²、電子密度2×10¹⁴/cm³以上、電子温度640eV、イオン温度280eVの成果が得られており、更に第2段加熱として乱流加熱を加えることにより、イオン温度580eVを達成している^{1)~4)}。本成果は、小型装置でも核融合反応に必要なプラズマ密度、温度に近づける可能性があることを実証しており、今後の実験成果が期待される。

終わりに、本装置の設計、製作に当たり貴重な御助言と御指導をいただいた関係各位に対し深謝する次第である。

参考文献

- 1) 例えば、K. Toi, S. Itoh et al.: Confinement of Ohmic and Turbulent-Heated Plasmas in Small High-Field Tokamak TRIAM-1, (1979-11/13 日ソ セミナー, 名大プラズマ研)
- 2) N. Hiraki, S. Itoh et al.: Confinement of Ohmically Heated Plasmas and Turbulent Heating in High-magnetic Field Tokamak TRIAM-1 (Reports of Research Institute for Applied Mechanics Vol. XXVII No.85, 1979)

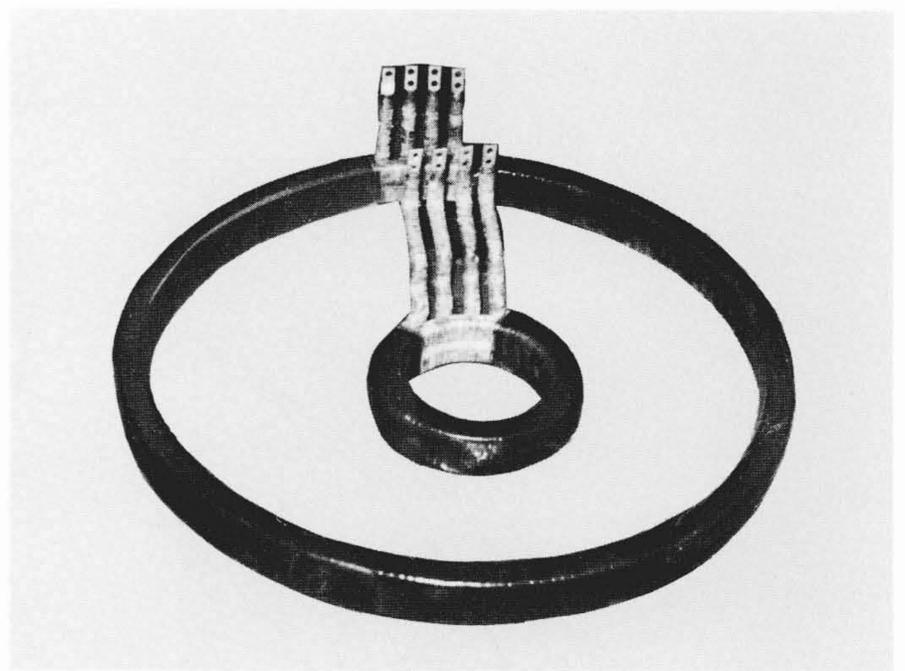


図7 垂直磁場コイルの外観 完成した垂直磁場コイル, 巻戻しコイルの外観を示す。大きいコイルが垂直磁場コイル, 小さいコイルが巻戻しコイルである。

表5 垂直磁場コイルの設計要目 垂直磁場コイルと垂直磁場巻戻しコイルを電氣的に直列に接続し, 0.1Wb/m²の垂直磁場を発生するものである。

項目		仕様・性能	
コイル		垂直磁場コイル	垂直磁場巻戻しコイル
数	量	2個(上下各1個)	2個(上下各1個)
中心半径		450mm	120mm
上下間中心距離		500mm	300mm
起磁力		12×10 ⁴ AT	—
材質(導体)		電気銅	電気銅
総巻数		20回(上下各10回)	20回(上下各10回)
通電時間		0.05秒 5分周期	0.05秒 5分周期
試験電圧		75kV インパルス	75kV インパルス

表6 水平磁場コイル設計要目 0.005Wb/m²の水平磁場を発生するためのコイル設計要目を示す。

項目		仕様・性能
数	量	2個(上下各1個)
中心半径		505mm
上下間中心距離		500mm
起電力		15×10 ³ AT
材質		電気銅
総巻数		10回(上下各5回)
通電時間		0.05秒通電 5分周期
試験電圧		75kV インパルス

- 3) K. Toi, S. Itoh et al.: Ion Temperature Measurement by Neutral Energy Analyzer in High-Field Tokamak TRIAM-1 (Reports of Research Institute for Applied Mechanics Vol. XXVII, No.86, 1980)
- 4) Y. Kawai, S. Itoh et al.: Efficient Ion Heating of Tokamak Plasma by Application of Positive and Negative Current Pulse in TRIAM-1 (Reports of Research Institute for Applied Mechanics Vol. XXVII, No.86, 1980)