特集 核融合新技術

U.D.C. 621.039.672.026: [621.318.3:538.945]

強磁場超電導トカマク型核融合装置 "TRIAM-1M"の開発

Development of High Field Superconducting Tokamak ``TRIAM-1M''

九州大学応用力学研究所で建設中のトカマク型核融合装置"TRIAM-1M"は、ト ロイダル磁場コイルを我が国で初めて超電導化し、装置の小型強磁場化を図るなど、 他のトカマク計画に比べて幾つかの特徴をもっている。日立製作所は、このTRIAM-1M装置を昭和57年4月に受注し、現在まで設計製作を進めてきた。

本論文では,装置全体構成について述べるとともに,工場で製作中のプラズマ真 空容器,超電導トロイダル磁場コイルなどの設計製作につき紹介する。また,プラ ズマ断面位置フィードバック制御及び中央制御システムの概要について述べる。

伊藤智之*	Satoshi Itô				
鈴木登夫**	'Takao Suzuki				
鈴木昌平**	Shôhei Suzuki				
西 政嗣***	Masatsugu Nishi				
川崎剛秀**	Takahide Kawasaki				

11 緒 言

昭和52年から九州大学により実験研究が進められている TRIAM計画は¹⁾,トロイダル磁場強度の高いトカマク装置を 用いた,いわゆる強磁場トカマク路線に沿った研究開発計画 で,その研究目的は他のトカマク計画に比べて次に述べるよ うな特徴をもつ新機軸を盛り込んである。 ル磁場コイルをトカマク装置に組み込み,各要素(ポロイダ ル磁場コイル,プラズマ電流など)の超電導線材への影響を調 べ,Nb3Sn超電導コイルの実用化を図る。

TRIAM計画は昭和52年から、小型強磁場トカマク装置

(1) プラズマ密度n, 閉じ込め時間 τ_E , プラズマ半径a, ト ロイダル磁場強度Bt及びトーラス半径Rの間には下記のスケ ーリング則が成り立つ。

 $n \propto Bt/R$ (2)

以上から強磁場トカマクでは、Rの小さい小型装置でローソン条件 $n\tau_E \ge 10^{14}$ (個·s/cm³)を満足する炉心プラズマを生成できる可能性がある。TRIAM計画ではプラズマ密度に関する比例法則を中心として、強磁場トカマクプラズマの閉じ込めとその比例法則の確立を目指す。

(2) 第2段加熱法としては,現在,高エネルギーNBI(中性粒 子入射法)やRF加熱(高周波加熱法)が主流として研究されて いるが,これらの方法は,大規模なイオン源や発振管の開発 が必要であるなど,炉心プラズマ発生装置に適用する上で困 難な問題が多い。TRIAM計画では加熱方式として単純で効 率が良く,しかも経済的である乱流加熱方式の開発と,その 大型装置への適用性の研究を行なう。

(3) トカマク型炉心プラズマ発生装置の最大の欠点といわれ ているパルス運転を改善する方法の一つとして,電流駆動法 が考えられるが,これまでの電流駆動法の実験では数秒程度 の電流維持であり,パルス運転を克服しているとは言いにく い。そこで昭和57年に建設に着手したTRIAM-1Mでは,トロ イダル磁場コイルを超電導化して,プラズマ電流を直流的 (10秒以上)に流し,低域混成波電流駆動法を採用して,電流 駆動のメカニズム,電流分布のコントロール,不純物の影響 などについて研究を行なう。

"TRIAM-1"により実験研究を開始し,現在までに高密度化の実現や乱流加熱法の有効性を実証し,その主な研究目的を 達成した。昭和57年からは前記研究目的の(1)~(4)を目指して, トロイダル磁場強度がTRIAM-1の約2倍となる超電導強トロ イダル磁場実験装置"TRIAM-1M"の建設に着手し,現在工 場で製作中である。この装置は、本格的に超電導トロイダル 磁場コイルを採用したトカマク装置としては世界に類を見ない強磁場を目指したものであり、その成果が注目されている。

この九州大学のTRIAM計画に対し、日立製作所は実験装置のメーカーとして約10年前から技術開発と装置の設計製作を通じて全面的に協力してきた。すなわち、先にTRIAM-1 本体の製作を担当し完成するとともに、引き続きTRIAM-1Mの本体、電源、制御、冷却系などを含むほとんど全プラントの設計、製作及び据付を担当している。本論文では、TRIAM-1Mの技術的概要と、トロイダル磁場コイル、真空容器、各種制御など核融合装置の技術分野で画期的な進歩をもたらした新技術の内容について述べる。

2 TRIAM-1Mの概要

TRIAM-1Mのプラント構成を図1に,主要パラメータを表 1に示す。装置本体部は、プラズマ閉じ込め空間を形成する 真空容器、閉じ込め磁場を生成するトロイダル磁場コイル、 プラズマ断面形状を制御する各種ポロイダル磁場コイル、プ ラズマ加熱用空心変流器コイル及び乱流加熱コイル、トロイダ ル磁場コイルを液体へリウム温度に保持するため、本体全体を 外部から断熱する断熱真空容器、並びにベースなどの支持構 造物外により構成される。その外観を図2に示す。本体の周

41

(4) 磁場閉じ込め方式による核融合炉を目指す場合, 超電導	辺には真空排気設備、ヘリウム液化冷凍設備、冷却水設備な
コイルの採用は不可欠である。特に10T以上の強磁場を超電	どが配置されている。電源は前述の超電導トロイダル磁場コ
導コイルで発生するためには、超電導線材としてNb3Snを使	イルを励磁するための精密直流電源,各種ポロイダル磁場コ
用する必要がある。TRIAM-1MではNb3Sn超電導強トロイダ	イル用の電源などから構成される。これらの全プラント機器

* 九州大学応用力学研究所 工学博士 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士

672 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)



図 | TRIAM-IMのプラント構成 TRIAM-IMは超電導トロイダルコイルを備えているため、冷却系として水のほかに液体窒素及び液体ヘリウム関係の設 備を必要とする。

表 | TRIAM-IM主要諸元 プラズマ並びに主要 部品の寸法及び電気的諸元を示す。

No.	項目			目			諸	元
Ì	プ	-	ブ	7	主半径		0.8m	
		/	~		電	流	500kA	
2	真	ספי	空 容	B .0	主半径		0.84m	
		Ŧ		奋	断	面	0.26m×0.38m	
			主半径		0.85m			
3			断	面	0.44m×0.67m			
	トロイダル磁場コイル	イル	磁	場	8 T(目標)			
			個	数	16			
				線	材	Nb ₃ Sn		
4	ポロイダル磁場コイル			空心変流器				
					SN			
		7-5-	-	SP				
		112	種	別	BH-FB			
				BH				
				ТН				

注:略語説明 SN(Shaping Negative) SP(Shaping Positive) BH-FB(B-Horizontal Feed-Back) BH(B-Horizontal) TH[Turbulent Heating(乱流加熱)]



図2 TRIAM-IM外観 TRIAM-IMは、超電導トロイダルコイルを大気から断熱するため に全体が断熱真空容器の中に収められている。

は大幅に自動化された制御装置により、円滑かつ安全に運転 される。

電導トロイダル磁場コイルと、この真空容器との間に3種類 のポロイダル磁場コイル(SP, SN, BH-FB:表1下略語説 明参照)及び乱流加熱コイルが設けられるが、これらは常温領 域の水冷コイルであるため、 プラズマ真空容器から支持され ている5)。 前述のように、本体全体は断熱真空容器内に収納されるの で、 プラズマ真空容器には、内部を真空に排気したときの外 圧だけでなく、内部が大気圧である状態で外部を真空に排気

8 プラズマ真空容器

42

TRIAM-1Mのプラズマ真空容器は周方向に2分割絶縁され たD型断面のトーラスである⁷⁾。真空容器の一部はボックス構 造で各種ポート,固定リミタ及びビューイングダンプなど が取り付けられる。また、液体ヘリウム温度に冷却された超

強磁場超電導トカマク型核融合装置"TRIAM-1M"の開発 673



図3 真空容器外観 外周に水冷却配管とポロイダル磁場コイル及び乱 流加熱コイルのサポートを備えている。ポートにはリークテストのため、ふた をしている。

したときの内圧が加わる場合もあることを考慮しなければな らない。更に、通常の運転状態では外部が真空雰囲気である ため冷却が悪くなるので、真空容器外周に冷却配管を設け水 冷却する構造とした。本真空容器は33本のポートを備えてい るが、垂直方向のポートはプラズマ真空容器の支持脚も兼ね



図4 トロイダルコイル外観 つり上げ中の完成したトロイダルコイル を示す。右側がトーラス中心側で、テーパ状に厚さが薄くなっている。

た構造とした。外観を図3に示す。

プラズマ真空容器に加わる力としては内圧・外圧・熱応力 及びポロイダル磁場コイル・乱流加熱コイルの電磁力と、パ ルス運転時・プラズマディスラプション時の渦電流電磁力が ある。これらの力の組み合わせを考慮してプラズマ真空容器 の応力解析を行ない、SUS304L材でASME(American Society of Mechanical Engineers), SECIIIに準拠した許容応 力値内であることを確認した。

4 トロイダル磁場コイル

トロイダル磁場コイルは、トロイダル中心磁場 $B_0 = 8 \, \mathrm{Te}$ 達成するために超電導化されている⁴⁾。

トロイダル磁場コイルは最大経験磁場Bmが11Tに達するこ と、トカマク運転により外部磁場のパルス的外乱を受けるこ とを考慮して、線材すべてを臨界温度 T_c の高いNb₃Sn線材で 構成した。すなわち、コイル内の磁束密度分布を考慮して、 導体を3グレードに分割しているが、最外層(B = 5 T以下) の部分にもNb3Sn超電導線材を用いた。本トロイダル磁場コ イルは装置全体の小型化・強磁場化の要請から、完全安定化 超電導コイルとしては従来の約2倍の高電流密度となってい る。高電流密度の条件で完全安定化条件を満たすため、本コ イルの超電導導体は安定化材に従来の銅に加えて、一部に高 純度アルミニウム(残留抵抗比≥3,000)を用いた複合安定化 超電導線とするなどの新技術を盛り込んでいる。更に本導体 は、液体ヘリウムに接する冷却面に高性能伝熱面加工(サーモ エクセルC:日立製作所商品名)を施し、必要な熱流束を確 保している。コイル全体はダブルパンケーキ巻線・液体ヘリ ウム浸せき冷却とした。 超電導トロイダル磁場コイルを安定に保持するためには, 上述の安定化設計に加えて,超電導導体の交流損失に対する 応答を正しく評価する必要がある。すなわち、トカマク運転 により外部変動磁場が超電導導体に加わると、 渦電流による ジュール熱(交流損失)が発生し,超電導導体の常電導転移を引 き起こす可能性がある。そこで、実機超電導トロイダル磁場

コイルにパルス磁場を印加し、このときの交流損失を測定し、 十分精度の高い計算方式を確立した。

この交流損失計算方式をもとに,予定されているすべての トカマク運転に対して,超電導トロイダル磁場コイルの安定 性をシミュレートしたところ,超電導状態を安定に保持でき ることが確認された。

完成したトロイダルコイルの外観を図4に示す。

5 プラズマ断面・位置フィードバック制御

プラズマ位置のフィードバック制御系の設計では、従来プ ラズマを線状電流環で近似するモデルが用いられていた。こ のモデルは、プラズマの断面形状制御には適用できない。米 国のダブレット-IIIトカマクでは、非円形プラズマの平衡解を 数値解析で求めておき、外部磁場の分布がその解が示す磁場 分布に一致するように制御している。この方式では、実験条 件を変えるたびに平衡解を求める必要がある。この欠点を解 決するため、断面形状を考慮した平衡方程式の解析解を新た に導出した²⁾。この解析解はTRIAM-1Mで計画されているす べてのプラズマ形状を取り扱えるように八重極変形、すなわ ち四角形の変形まで考慮している。

フィードバック制御系のシミュレーションプログラムは, 回路方程式³⁾を基本としている。すなわち,プラズマ及びポ ロイダル磁場コイル系と,真空容器などの構造物の電磁的結 合状態を,回路方程式で記述している。

プラズマ位置のフィードバック制御のシミュレーション結果の一例を図5に示す。この例は非円形度1.1のプラズマを 乱流加熱し、ポロイダルβ値を1msの間に0.5から1.0まで上 昇させたときの水平方向位置制御を示している。プラズマは ポロイダルβ値の上昇に伴い、外側($\Delta R > 0$)に移動する。 これに伴い、プラズマ断面形状の三角度と四角度が変化して いる。これはプラズマが移動したとき、真空容器に押し付け られ、断面形状がゆがんだことを示している。

43

674 日立評論 VOL. 66 No. 9(1984-9)



図 5 プラズマ位置制御シミュレーションの結果 ポロイダルβ値 の上昇に伴い、プラズマはいったん外側に移動する。このとき、断面形状の三 角度、四角度も変化する。

TRIAM-1M全設備の統括と安全運転,及びプラズマ放電制 御の実行を目的として,図6に示す機能と構成をもつ制御シ ステムの開発を進めている。



6.1 中央制御設備

全体制御

6

本設備は、TRIAM-1M全設備の運転の統括を行なうもので あり、各ブロック設備制御盤と信号の授受を行ない、設備全 体の制御・保護インタロックを処理するとともに、放電制御 時のタイミング信号を各設備機器に与えるものである。

主制御盤はデスク型とし、運転員がオペレーションパネル 及び表示灯類によって操作・監視が可能な構成としている。 運転時間設定盤は、主制御盤からの運転指令を受信し、各設 備の運転状態と照合して、各電源制御装置などに制御シーケ ンスに必要なタイミング指令を与えるもので、乱流加熱運転 などの速いパルスに対応するため、高精度のタイミングユニ ットを備え、制御精度が高いのが特長である。また、放電実 行時の安全性維持のための保護インタロック処理も、本制御 盤で行なっている。運転表示盤はTRIAM-1M全設備の運転状 態を監視するための設備で、できる限りグラフィック化を図 り、運転員が把握しやすいようにしている。

6.2 計算機システム

プラズマ制御用計算機は、電磁気計測検出器からの信号に よりプラズマの位置・形状を演算し、これと目標値との偏差 に対し制御演算を行なってコイル電流指令値を算出し、下位 の電源制御装置へ出力することによってフィードバック制御 を行なう。本システムでは、プラズマ制御コイル系の簡素化 を図るため、ハイブリッドコイルを用いた多変数制御方式に よるフィードバック制御を計画している。また、プラズマ放 電中に発生する大量の実験データを収集、処理するために、 高速、大容量のデータ処理用計算機を設置して、実験の高効



注: (データ) (インタロック信号) ---- (タイミング信号)

図 6 TRIAM-IM制御システムの機能と構成 TRIAM-IM全設備の 統括監視,制御,保護及びデータ収集を行なう。全系制御設備,プラズマ制御 用計算機,データ処理用計算機から成る制御システムの機能と構成を示す。

装置技術の進歩に寄与するところが大きいと確信している。 特に,日立製作所はこのプラントを構成するほとんどの機器 の建設を設計から据え付け,試運転に至るまで,九州大学の 指導のもとに一貫して担当し,システムとしての統一性,整 合性を追求し合理性と信頼性の確保に努めている。これらの 技術的経験を,今後建設される超電導核融合装置に生かして ゆきたいと念願している。

参考文献

- 1) 伊藤, 外: TRIAM-1M計画, 物理学会講演予稿集(1982)
- 2) 染谷,外:TRIAM-1Mプラズマ位置断面形状制御,物理学会 講演予稿集(1982)
- 3) 阿部,外:TRIAM-1Mプラズマ位置断面形状制御II,物理学 会講演予稿集(1982)
- 4) 鈴木(昌), 外: TRIAM-1M超電導(Nb₃Sn)超電導強トロイダ ル磁場コイルの設計, 物理学会講演予稿集(1982)
- 5) 鈴木(登), 外:TRIAM-1M構造解析, 物理学会講演予稿集 (1982)
- 6) 中村(幸),外:TRIAM-1M超電導トロイダルコイルの実証試験,物理学会講演予稿集(1983)

率化を図っている。

7 結 言

我が国で初めて本格的に超電導トロイダル磁場コイルを採 用した強磁場核融合装置"TRIAM-1M"は、間もなく工場組 立、現地据付けを経て稼動を開始する。本機は技術的にも画 期的な新しい試みが多く採り入れられた装置であり、核融合

- 7) 鈴木(昌),外:TRIAM-1Mプラズマ真空容器の設計,プラズマ・核融合学会講演予稿集(1984)
- 8) 中村(幸),外:TRIAM-1M超電導トロイダルコイルの交流損失,プラズマ・核融合学会講演予稿集(1984)
- 9) S.Shimamoto, et al.: Japanese Design of a Test Coil for the Large Coil Task, Proc. 8 th, Symp. on Eng. Prob. of Fusion Res. p. 1174(1979)

44