U.D.C. 621.039.62

日本原子力研究所納 トーラス形核融合実験装置"JFT-1"

Torus Device for Thermonuclear Fusion Equipment "JFT-1"

宏* 和世啓三* 加 沢 義 彰* 本 Yoshiaki Kazawa Hiroshi Hashimoto Keizô Wase

要 旨

ナショナルプロジェクトとして強力に推進されることになったわが国の核融合研究の分野で、その第一段階 の中心的役割をになうヘクサポール形トーラス装置"JFT-1"(JAERI Fusion Torus-1(JAERIは日本原子 力研究所の英文略称))を完成し、納入した。

この装置には各種の新技術が試みられているが、特に真空中の極限にまで制限されたスペースに配置され、 大電流密度でしかも強大な電磁力を受ける内部導体コイルの冷却,絶縁,支持構造および1ターン方向に分割 して簡単に着脱可能のトロイダルコイルの接続構造などは従来のコイルの構造とは異なる方式となっている。 本文はその概要と技術的な問題点について述べる。

1. 緒 言

最近, トーラス形装置でプラズマを安定に閉じ込める見通しが明 るくなったこともあり,核融合炉の実現を目ざす研究が世界中で活 発に進められるようになった。



わが国でも原子力委員会が核融合の研究を特定総合研究として取 り上げ、強力に推進することになったが、この装置はその研究の第 一段階で中心的役割をになうものとして建設されたヘクサポール磁 界を有する内部導体形トーラス装置である。

この装置の主要な技術的特長は、内部導体コイルとトロイダルコ イルにある。すなわち内部導体コイルは,超高真空(10⁻⁷ Torr)中 に配置され, 強大な電磁力を受けるにもかかわらず, プラズマ損失 が少ないよう高電流密度 (1,200 A/mm²), 高デューティサイクル で通電され、極限にまで制限された寸法の高精度コイルとなってい る。またトロイダルコイルはトーラス状の真空容器内に配置された 内部導体コイルの組立て,解体,交換などの必要から1ターン方向 に分割し、テーパ接触子構造により一体として簡単に着脱可能とし たコイルである。これらはいずれも国内外に例がなく、従来のコイ ルの概念を変える大胆にして画期的な構造となっている。

また、このようなきびしい要求にもかかわらず,新しい冷却方式, 冷却構造の採用により、当初計画の運転周期を大幅に短縮可能とし た。すなわち諸外国で建設された同種装置(内部導体系トーラス)は 1日100パルス程度の運転をして翌日まで冷却時間を要していた が、この装置では1分間隔での連続運転が可能となり研究の能率を 画期的に向上する結果となった。これにより諸外国に一歩遅れてス タートしたわが国の核融合研究を世界的水準にまで引き上げる一因 ともなり、その装置建設の技術面では世界のトップレベルに到達で きたといっても過言ではない。

以下装置の概要とこれらの特長,技術的問題点などについて述 べる。

2. 装置の概要

装置本体部の外観を図1に示す。中央に大気圧空間を有する二重

図1 装置の外観



図2 ヘクサポール磁界の概念図

定に閉じ込められるが、これにトロイダル磁界を重畳することによ り,いっそう安定に閉じ込めることが期待される。

トロイダルコイルをはずしたトーラス本体部外観は図3に、その 中心部構造は図4に示すとおりである。 内部導体コイルは内側の HC-1コイルと外側に配置された1対のHC-2コイルおよび磁界分 布を調整する1対の補助(AUX-C)コイルから構成される。内部導 体コイルは磁界の乱れと電磁力の影響を小さくするために特別に開

15

我也不许的少小的之母,它们的6个人们在上的之日的6一至	
円筒形真空容器と,真空中に配置され図2のようなヘクサポール磁	発された同軸構造の給電部を通じて約130KJ, 3kV のコンデンサ
界を発生する内部導体コイル(3個の環状主導体コイルおよび2個	電源により1分間隔でパルス状に繰り返し励磁される。これらのコ
の補助導体コイル)と中央の大気圧空間を通って真空容器に巻かれ	イルは同時に納入された冷却油装置と配管され冷却される。
たトロイダルコイルから構成される。トロイダルコイルを励磁しな	トロイダルコイルは長方形で,真空容器中央の大気圧空間に三重
いで内部導体コイルによるヘクサポール磁界のみでもプラズマは安	円筒形に組み立てて一体とした主コイルと半径方向および垂直方向
* 日立製作所日立工場	のリターンパスを形成する8個の分割コイルから構成される。主コ

334 日 立 評 論

VOL. 53 NO. 4 1971



(トロイダルコイルをはずした状態) 図3 JFT-1主要部外観

イルは狭い空間に配置され電流密度が高いので別置のブロワにより 強制空冷される。その構造は、各導体を断面台形のセグメントとし て,ちょうど直流機の整流子のように絶縁板を介して円周状に配列 された円筒形となっており,水冷方式には適さない。 コイルのおもな仕様は表1に示すとおりである。

3. 内部導体コイル



図4 装置の中心部構造

3.1 コイルの基本構造と冷却方式

16

提示された計画仕様に対し考えられる各種構造、冷却方式のコイ ルについて比較検討を行なった。表2はその結果を示したものであ る。内部導体コイルは多重巻で,真空容器内にあるため,コイル導 体やステンレス鋼製外被を通じての自然冷却速度はきわめて遅い。 一方,制限された断面寸法に配列する素線径は小さく,電流密度は 最大1,200 A/mm² にも達し発熱量も大きい。 外国の例のように自 然冷却のままでは運転周期が数時間となるので周期5分という仕様 が満足されない。

これらの検討結果からこのコイルでは導体をステンレス鋼製トー ラス状ケースの中に入れ、セラミックスペーサにより素線の絶縁お よび位置決めを行ない、300℃以上の耐熱性と良好な絶縁性を有する

		内 部	トロイダル		
		HC-1 (内側主導体)	HC-2 (外側主導体)	AUX-C (補助導体)	コイル
最大起磁力	(kAT)	183	95	70	400
最大励磁電流	(A)	5, 910	9, 500	7,000	1, 390
最大電流密度	(A/ mm ²)	1,200	336	248	20
最大励磁電圧	(V)	3,000	3,000	3,000	600
卷 数		31	10	10	288
主平均半径	(mm)	315	469	553	
卷線直径	(mm)	2.6	6.0	6.0	
冷却方式		油	直接冷	却	強制空冷
繰返運転周期		5分周期	月1パルス約 20	ms 通電	5分周期,1パ ルス10秒通電, ただしフラット

冷去	印 法	No.	充てん材冷却媒体	ケースの シール方式	スペーサ 材 質	耐 熱 温 度	長 所	短 所	比較
自然冷却コ		1	樹 脂 充 て ん	はんだ または 接着	耐 熱樹 脂	150 ≀ 180℃	i 絶縁性 良 ii 冷却装置不要	 i 長時間使用不 能 ii 真空シール困 難アウトガス大 iii 強度 小 	×
1	イ レ	2	セラミック 充 て ん	溶接または ろう付	セラミック	500℃	i 耐熱性 優 ii 冷却装置不要	i 絶縁性(耐電 圧)が問題	0
強	間接冷却	3	水 また は 空 気 冷 却	No.1と No.2の構 造と組合せ たシール法	セラミック	100 ∂ 200℃	i No.1より使用 時間延長できる	i 冷却装置必要	Δ
は 制 冷 道 却 接 っ 必	直	4	純水冷却	溶 接 または ろう付	セラミック	100 ∂ 200℃	i 冷却効果 良	i 純水装置必要 ii 絶縁性 空気, 油より劣る	
	接	5	空気または ガス冷却	溶接または ろ う 付	セラミック	100∼ 200℃	i 冷却系簡単	i 絶縁性 油よ り劣る	0
イル	却	6	油冷却	溶 接 または ろう付	セラミック	100 ∂ 200℃	 i 冷却効果 良 ii 絶縁性 優 iii 不燃性絶縁油 は耐熱性 良好 	i 冷却系は空気 より複雑	Ø

表2 内部導体コイルの各種冷却法と基本構造の比較

(◎……秀, ○……優, △……良, ×……不可)

335 日本原子力研究所納 トーラス形核融合実験装置 "JFT-1"

不燃性絶縁油により直接冷却を行なう画期的な方式を採用した⁽¹⁾。 内部導体コイルの外観は図5に示すとおりである。ケース内には電 流が各コイルの主平均半径の位置を中心とする円内に分布するよう に素線が配置されている。各素線の位置はコイル円周上数十個所に 配置したセラミック製スペーサの素線用穴で決められ、それぞれ所 定の位置から1mm以下の精度で保持される。ケースに収容する前 のHC-1, HC-2 コイルは図6, 図7に示すとおりである。

ケースを水平面で二つ割にして下半部にコイルを入れてから上半 部をかぶせてシール溶接する。溶接による熱変形は特殊治工具と, 新たに開発した精密特殊溶接法により±0.5mm以下に押えられた。 スペーサは位置決めのほか,強大な電磁力による素線の変形を押え, 素線間および素線とケース間の絶縁保持を兼ねる機能を持ってい る。また、ケースの溶接温度でも害されない耐熱性が要求される。 これらの点を検討し図8のようなセラミック製スペーサを使用し た。スペーサには素線用穴のほかに冷却油の通路となる穴が多数あ けられている。

内部導体コイルへの給電線は図4のように真空容器壁に設けられ た真空窓を利用して内部へ導入される。給電部は磁界の乱れ、電磁 力の影響,外径寸法を最小に押えるために同軸構造が要求される。 しかも絶縁,冷却,電磁力,熱膨張などきびしい条件に置かれる。 われわれは特殊絶縁スペーサを用いた新構造同軸給電部を開発して これに対処した。

3.2 技術的問題点

(2) 絶縁および冷却

コイルの外形寸法が大きいとプラズマの損失が増すので外形は 極限にまで制限される。したがってきわめて狭いスペースで3,000 Vの端子電圧に対する絶縁をしなければならない。

また大電流密度, 高デューティサイクルのためコイルの温度上 昇が高く、しかも真空中に配置されコイルケース表面からの放熱 はほとんど期待されないので冷却方式とその冷却効果の予測が重 大な課題となる。

われわれは設計製作に際して部品試作やモデル試験を含む事前 検討をじゅうぶんに行ない、これらの問題を一つ一つ解決した。 以下そのおもなものについて述べる。

3.3 電磁力の検討

各コイルに作用する電磁力は次式により求められる。

 $F = \int IBdl$ (N)(1)

ここに、I:コイルの電流(A)

B: 考えるコイル dl(m) 部の電流方向と直交する磁束 密度 (Wb/m²)

(1) 垂直方向の電磁力

HC-2に作用する垂直力 F_{v_2} はHC-1とHC-2の間の力 $F_{12}(N)$, HC-2上下ョイル間の力 $F_{22}(N)$ の合成力であるとして求められ る。図2の座標系で考えると(1)式から

 $F_{12}=2\pi r_2 N_2 I_2 B_r \left(Z=\frac{h}{2}, r=r_2\right)$

このコイルは前述のように各種の新しい技術を取り入れているの で解決を要する多くの技術的問題があった。すなわち

(1) 電 磁 力

各コイル相互間に強大な電磁力が作用するが,これを支持する サポートはプラズマの損失に直接影響するので極小の寸法と本数 にする必要がある。また各コイルの素線にはコイルによる力のほ かに同一コイルのほかの素線を流れる電流による力も作用するの で導線、スペーサとも慎重な強度上の検討が必要である。



内部導体の外観(HC-2 コイル) 図 5



ここに, r₁, r₂, h: 図2による (m) N₁, N₂: HC-1, HC-2の巻数 $K(k_2)$, $E(k_2)$: k_2 を母数とする第1種, 第2種の完全だ 円積分で



*I*₁, *I*₂は過渡電流となるので最大電磁力はそのピーク時に発生 する。最も典型的な運転モードではHC-1, HC-2 が直列に接続 され AUX-C は励磁されない。 この場合は $I_1 = I_2 \equiv I$ となり簡単 な回路方程式からそのピーク値は

 $I_{\max} = \frac{V}{\beta L} e^{-\alpha t_m} \sin \beta t_m \quad (A) \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (3)$ となる。





図7 HC-2 コイルの内部 HC-1 コイルの内部 図 6

図8 セラミック製スペーサ

17

336 日 JZ. 評 論

VOL. 53 NO. 4 1971

20



- 衝撃力に対する増幅係数 図 9
- V: 端 子 電 圧 ここに, (\mathbf{V})

e: 自然対数の底

$$\alpha = \frac{R}{2L}, Rはコイルの抵抗(\Omega), Lはインダクタンス (H)$$





$$t_m = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{\beta}{\alpha} \quad (s)$$

計算の結果 F12 は約1,300 kg に達する。同様にして F22 を求め 合わせると F_V は約2,400kgとなる。

補助コイルに働く垂直力はこれほど大きくない。

(2) 水平方向の電磁力

それぞれのコイルには次式で与えられる半径方向電磁力 FR が 作用する。

 $F_R = 2 \pi \times 10^{-7} (NI)^2 \left(\log_e \frac{16 r}{d} - 0.75 \right)$

 $+2\pi r(NI) \cdot B_V(Z,r) \quad (N) \dots (4)$

ここに, N, I, r, d: 考えるコイルの巻数, 電流(A), 主半径 (m), 断面直径 (m)

 $B_{V}(Z, r)$: 座標 (Z, r) に配置されたコイルの電流

に直交する垂直方向磁束密度 (Wb/m²)

第1項は自分自身の電流によって発生するフープ力, 第2項は ほかのコイルによる磁束とそのコイル電流とにより生ずる力で ある。

HC-1に作用するこの力がいちばん大きく, 定格条件では最大 22tに達する。

(3) コイルの各素線に作用する電磁力

18

前述の(1)(2)の力は各素線からスペーサを経由してすべてコ イルカバーに作用する力である。コイルの各素線およびスペーサ にはこれらの一のほかに各コイル内のほかの素線を流れる電流 による力が作用する。この力はほかの素線により考える素線の位 置に発生する磁界を計算機で計算すれば(1)式により求まる。こ の力は求心力として作用しHC-1では最大2.8tにも達する。



図11 内部導体コイルの温度

としても溶接組立構造とすることによりじゅうぶんであるが、素 線と垂直力をささえる4~6本の外径4mm

の各コイルサポー トはきわめてきびしい条件に置かれる。

コイル素線としては HC-1 が最も問題であるが、スペーサ間隔 を製作作業上ぎりぎりまで小さくすることにより、応力を約10 kg/mm², 衝撃増幅係数 A₀ を約 1.1 に 押えることが できる。 し かし、これは銅線の許容限界近くであるので、繰返し引張試験、 破断試験など慎重な予備試験で安全性を確認して使用した。また 銅線は完全な弾性体として扱えるか疑問であり弾性係数も明らか でない。したがってパルスごとの永久ひずみが累積して許容変位 を越え絶縁破壊の原因になる可能性も考えられる。 試験結果で は図10に示すように初めの1~2回の荷重で永久ひずみが生じて 加工硬化し、その後の繰返し応力に対する永久ひずみの増加は なかった。

垂直力をささえる HC-2 コイルのサポートは約40 kg/mm²の 応力に達するので、破断応力80kg/mm²以上の高張力合金棒(イ ンコネル)を使用し、モデルにより使用応力条件で107回以上の 振動試験を行ない安全を確認した。

3.4 絶 縁

コイルの絶縁はセラミック製スペーサと冷却を兼ねた不燃性絶縁 油によった。不燃性絶縁油は絶縁耐力は高いが一般の絶縁油と同様 に油中に含まれる水分や空気により著しく絶縁性が劣化する。

一般に絶縁油には数百パーツパーミリオン (ppm) の水分,数パ ーセントの空気を含んでいる。このため油中に含まれる水分や空気 を真空脱気により除く方式を採用した。 3.5 温度上昇 HC-1 コイルは1,200 A/mm²の最大電流密度で運転されるので最 もきびしい条件に置かれる。 このコイルの温度上昇は図11に示すように非定常伝熱の理論で

これら(1)~(3)に述べた電磁力はいずれもパルス状の衝撃力 として作用するので各部の応力や変位は静的な外力の場合と異な る。その値と静的外力のときの値との比を衝撃増幅係数 A。とし て定義すると A_0 は加振力の振動数f(+ f(- n n)),固有振動数 f_n (サイクル)および加振力の波形により図9で与えられる⁽²⁾。 これらの強大な電磁力に対し、 コイルカバーはステンレス鋼製

337 日本原子力研究所納 トーラス形核融合実験装置"JFT-1"



図12 トロイダルコイル概念図

扱う必要があるが、その時間tにおける到達温度 T_c は次式で概算 される。

ここに、 θ_f : 1パルスによるコイルの断熱温度上昇 (deg)

e: 自然対数の底

τT: コイルの熱時定数 (s)

T₀: 運転開始後じゅうぶん長い時間が経過して次のパ



図13 主 コ イ ル









ルス状通電が行なわれる直前 to におけるコイル の温度 (℃)

HC-1の例では $\theta_f \doteq 80 \deg$, $\tau_T \doteq 5 \circ \tau_0$ は自乗平均電流に 対し油温上昇,油と導線の温度差を計算して約40℃となるので導 線の温度はピーク値で120℃程度に押えられる。これらの値はモデ ルテストや完成後の試験で確認された。

4. トロイダルコイル

4.1 コイルの方式および構造

トロイダルコイルはトロイダル磁界の発生に寄与する主コイル と, 主コイル電流の分割回路を構成するための分割コイルから成っ ている。図12はトロイダルコイルの構造の概念を示したもので ある。

ヘクサポール磁界を発生するための内部導体(ヘクサポール)コ イルおよび真空容器が一体環状構造を形成している。トロイダルコ イルがこの内部導体コイルおよび真空容器と鎖交するため、または 内部導体コイルの交換などの必要からトロイダルコイルは主コイル と分割コイルを少なくとも上部2個所,下部1個所で機械的に分離 連結することが必要である。分離および連結の方法としては次の二 つの条件を満たす方式を採用した。

- (1) 機械的には分離,連結がなるべく簡単に行なえること。
- (2) 電気的には接触抵抗によるオーム損失が可能な限り小さい こと。

主コイルは真空容器の中心に設けられた上下方向の穴(250 mmø) を貫通するため、高電流密度は避けられないが、 セグメン トバーから成るコンダクタと,平行な絶縁板を交互に重ねて環状に 丸めた大きさの異なる3種類の主コイルを、3本同心に配置するこ とによってコンダクタの占有率を高め, 電流密度を極力小さくする

図14 テーパ接触部の構造の比較

表3 テーパ接続法の比較

		7	左 7	: 固 方	定式	スプリング 方 式	ネ シ 方 ゴ	ジョム 板大 方 式
接	触	抵 む	讫 催	i (C	×		
接	触抵抗	のばら	っつき	. 1	2	0	×	×
接	触抵	亢 の 再	現性		2	0	×	×
ĸ	- Ľ,	, チの	精度	: (C	0	×	×
耐		熱性		: (0 ×			
真		円	度		C	0	×	×
		電	Т	. ()	×	×	×
作業性	業 性	性 機		. ()	0	Δ	
		組	立	. 2	2	0		Δ

(○……優, △……良, ×……不可, 一……測定不能)

く分割することが好ましいが、プラズマ測定のための空間の必要か ら8分割とした。

4.2 技術的問題点

(1) 接 続 部

コイルの接続個所はコイル全体で1,152個所あり、そのうち864 個所はボルト共締め締結による接続であり、ほかの288 個所はテ ーパ接触による接続である。いずれの接続個所も全部直列に接続 されるため,その接触抵抗の大小がコイル全体の性能を大きく左 右する。そのため接触抵抗を小さくすることに細心の注意を払っ た。特にテーパ接触部は144個所のセグメントバーを同時に接触 させるため、問題も多く、図14に示す4種類の方式のスケール モデルを試作し特性比較を行なった。表3はその比較を示したも のである。比較表から明らかなように回定方式が最良の特性を示 し、製品にはこの固定方式を採用した。

19

ようにした。 主コイルの構造(1)は図13に示すとおりである。 主コイルの冷却には最も経済的な強制空冷方式を採用し, 主コイ ルの外側を風胴で囲い、その中を下から上に空気を送って冷却した。 分割コイルは, 主コイルの中心から円周上に方位角方向に等間隔 で配置される。その分割数はトロイダル磁界の精度の点からは数多 338 日 立 評 論

VOL. 53 NO. 4 1971



(2) 磁界分布

核融合装置では磁界の乱れがプラズマの閉じ込めに大きな影響 を及ぼすので、いかに精度の高い磁界分布を作るかが大きな問題 である。当然コイルの精度、対称性が重要視される。主コイル1 本の真円度、曲り、ねじれ、3本の主コイルを同心に配置した場 合の心のずれ、垂直度、分割コイルにおいては上下の対称性、方 位角方向の等間隔性、半径方向の寸法精度などすべてが磁界分布 の精度につながる大きな問題である。特にトロイダルコイルには 避けられない、トーラス方向に周回する渡り線の1巻による磁界 の乱れを最小限に押えるためにコイルの巻もどし方法なども考慮 せねばならない。 量にも大きく影響するので極力小さくすることに留意した。 面接触の接触抵抗は次式により求められる⁽³⁾。

R	=kP	-n ()	$\mu\Omega)\dots$			 	(6)
ZZK,	P:	接	触	力	(kg)		
	n:	常		数			
	k:	常		数			

フルスケールモデルで実験した結果について以下に述べる。計算上 の接触抵抗 $R=5 \mu \Omega$ を目標として(6)式より1個の接触面あたり の接触力 Pを求めると 35 kg となる。この接触力でテーパ接触部お よび共締め接触抵抗を測定した。その結果平均で約 $7 \mu \Omega$ であった。 テーパ接触部の接触抵抗は単に接触力だけでなく,各接触面の当た りぐあいによって大きな影響を受けることがわかった。そこで製品 化にあたっては接触部の締付方法,締付けによる変形防止,接触面 のメッキ方法などにじゅうぶんな注意を払った。

(3) 電 磁 力

トロイダルコイル自身の電磁力のほかに、ヘクサポール磁界に よってトロイダルコイルに生ずる電磁力をも考えてこれらの電磁 力に対するコイルの有効な支持構造に特別の考慮を払う必要が ある。

(4) 高電流密度

1回の通電時間は短時間であるが,主コイルの電流密度が高い ため、1回の通電による温度上昇によって主コイルに熱膨張が生 じ、これによってコイル自身に無理な応力が加わらないような構 造とした。定格電流による温度上昇は強制空冷でじゅうぶん冷却 された。

4.3 接 続

20

4.2 で述べたように接続個所が多く,それが全部コイルと直列に 接続されるので,1個所でも接触不良を起こすとコイルが断線した と同じになり重大な事故となる。したがって接続には100%の信頼 性が要求される。

接続の方法としては主コイルと分割コイルを接続するためのテー パ接触による接続方法と、分割コイル同士を接続するための共締め による接続方法の2種類を採用した。テーパ接続の接触子の構造は 図15に示すとおりである。

次に、トロイダルコイルの渡り線はトーラス方向に1巻のループを形成するので、これがトロイダル磁界を乱しプラズマの閉じ込めに重大な影響を及ぼす。従来の装置では単純に渡り線の電流と反対方向の電流を流し、ちょうど電流が打ち消されるように1巻きの巻もどし線を用いていた。しかしこれでは必ずしもじゅうぶんでなく磁界の乱れを完全に解消することはできない。
本装置では特別の巻もどし線を用いないで、図16に示すようにトロイダルコイルを最初時計方向に順次接続しながら巻回し、次に反時計方向に巻もどしながら巻回しすることにより磁界の乱れをほぼ完全に解消した⁽¹⁾。
4.4 接触抵抗

電流を変化することによって接触抵抗がどのように変化するかに ついて測定したが、特に接触抵抗の変化は見られなかった。また 1,000Aのパルス通電を60回繰り返し、その前後の接触抵抗を比較 した結果、接触抵抗には多少の変化は見られるが、性能を左右する ほどの変化はない。

4.5 電磁力の検討

(1) 主コイルに作用する電磁力

(a) 主コイル相互間の電磁力

主コイルは同軸構造になっており,電流は三層とも同方向である。二層計算モデル断面を示すと図17のようになり,その電磁力は次式により求められる。三層以上のときも同様にして計算できる。

.

(i) 内部導体に働く力

ピンチ効果によるもの(外圧)

$$F_{p} = \frac{\mu_{0} I_{1}^{2}}{\pi (a_{12}^{2} - a_{11}^{2})^{2}} \left(\frac{1}{3} (a_{12}^{3} - a_{11}^{3}) - a_{11}^{2} (a_{12} - a_{11}) \right)$$

$$(N/m) \qquad (7)$$

磁界の圧力によるもの (外圧)

ここに

$$r_1 = \frac{a_{12} + a_{11}}{2}$$
 (m)

(ii) 外部導体に働く電磁力 ピンチ効果によるもの(外圧)
(7)式と同様にして求めることができる。 磁界の圧力によるもの(外圧)
(8)式と同様にして求めることができる。 内部導体の磁界によるもの(外圧)

339 日本原子力研究所納 トーラス形核融合実験装置"JFT-1"



$$Fr = \frac{2 \times 10^{-7}}{r_2} I_1 I_2 \quad (N/m) \quad \dots \quad (9)$$

ここに

$$r_2 = \frac{a_{22} + a_{21}}{2}$$
 (m)

このようにして求めた電磁力の計算結果は次のとおりである。 外圧 $1.2 \,\mathrm{kg/cm^2}$ 第一層 主コイル



 $F_r = 740 \text{kg}$ $F_z = 570 \text{kg}$ $F_{\phi_1} = 40 \text{kg}$ $F_{\phi_2} = 50 \text{kg}$

図19 分割コイルの電磁力

縁物自身の圧縮応力でじゅうぶん耐えられる。ねじれに対しては 主コイルの外側に強力なバインドテープを巻き,固く締め付ける ことによって主コイル自身の強度で耐えられる構造とした。

第二層 主コイル 外圧 1.7 kg/cm² 2.4 kg/cm^2 第三層 外圧 主コイル (b) 分割コイルによる電磁力

分割コイルは主コイルを中心にして方位角方向および半径方向 とも完全に対称であれば、分割コイルによって主コイルの中心に 生ずる磁界のうち,電磁力として働く磁界の成分はゼロである(中 心の磁界は互いに打ち消すため)。 実際はコイルの製作誤差や, 主コイルが同心の環状になっているので多少の電磁力は残るが, その値は小さく,特に考慮する必要はない。

(c) ヘクサポールコイルによる電磁力

ヘクサポールコイルによる磁界は主コイルの各点で分布してい るので次式により求められる。

ここに、Br(Z): 半径方向の磁束密度 (Wb/m²) (ヘクサポールコイルによるもの)

I: 主コイルの電流 (A)

N: 巻 数

この力は主コイルをねじる方向に働く。Br(Z)を計算機より求 め区分求積で求めた電磁力は図18に示すとおりである。

(2) 分割コイルに働く電磁力

(i) 分割コイル相互間の電磁力

(ii) 主コイルによる電磁力

が生ずるが、(i)、(ii)ともビオサバールの法則から磁束密度 Br(Z)を求め(10)式より算出することができる。電磁力の方向は すべて分割コイルに対し外側方向である。

(iii) ヘクサポールコイルによる電磁力

(10)式を用いて計算することができる。この電磁力は分割コイ

(ii) 分割コイルの支持方法

外側に働く電磁力に対してはコイル自身の強度でじゅうぶんで あるが回転力に対しては、コイルのたわみが大きく、そのためコ イルの背面に非磁性のステンレス鋼材を当て、 ベースから固定す る方法でコイルの変位を最小限に押えることができた。

4.6 温度上昇

主コイルはスペースの関係でコンダクタ断面を大きくとれないた め、電流密度が高く(約20A/mm²)1パルスの温度上昇は断熱と 仮定して計算し約18 deg である。これが5分周期で繰り返されるの で自然冷却では不じゅうぶんであるので強制空冷方式を採用した。 定格の通電で温度上昇は最大70 deg で所期の性能を満足している。

5. 結 言

この装置は構造,材料,製作法など困難な技術的課題を有したが, 幾多の試作,モデル試験,基礎実験を含む慎重な検討結果を背景に大 胆にして斬新(ざんしん)な新技術を数多く取り入れ,運転周期を仕 様の1/5に短縮するなど予期以上の結果を得ることができた。また このような高度の技術を要する装置がきわめて短期間で建設され、 日本原子力研究所により順調に運転され、すぐれた成果を上げてい ることについては海外の核融合研究者の賞賛を得ており、われわれ としても顧客の期待にこたえ得た喜びを禁じ得ない。今後とも、こ の種装置の設計、製作を積極的に取り上げてナショナルプロジェク トとして展開されている核融合研究に協力していきたい。

終わりに本装置の設計、製作にあたり、貴重なご助言とご指導を いただいた日本原子力研究所森次長,田村研究員および日立製作所 日立工場西副工場長, 笠原副技師長に厚く謝意を表するとともに, 設計, 製作, 試験にご協力いただいた関係者各位に深謝する次第で ある。

- ル上下で働く方向が逆で、回転力に似た力として作用する。 計算結果は図19に示すとおりである。
- 電磁力に対する支持方法 (3)
- (i) 主コイルの支持方法
 - 主コイルの外圧方向の電磁力に対しては主コイル導体および絶

献 考 文 参 特許出願中 (1)James T. Gwinn: Machine Design 33 105 (Aug. 1961) (2)大森: 電学誌 87, 2462 (昭 42-12) (3)

21