

JAERI-M
85-136

コイル通電試験において得られたJT-60
本体の熱・構造特性

1985年9月

高津 英幸・山本 正弘・大久保 実
川崎 幸三・安東 俊郎・清水 正亜
清水 徹*・中尾 敬三*・原 泰博**
芹沢 保典***・太田 充

JAERI Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

コイル通電試験において得られたJT-60本体の熱・構造特性

日本原子力研究所那珂研究所JT-60試験部

高津 英幸・山本 正弘・大久保 実・川崎 幸三
安東 俊郎・清水 正亜・清水 徹*・中尾 敬三*
原 泰博**・芥沢 保典***・太田 充

(1985年8月7日受理)

JT-60本体の完成に引き続き、1984年12月10日から1985年2月20日まで本体コイル通電試験を実施した。本試験の目的は、プラズマ生成に先立ち全コイルに最大定格まで電流を流し、本体、電源、制御などの全システムの健全性を確認することにある。試験は多くのデータを慎重に検討しながら、単一コイル通電から複合通電へ、低電流値から定格電流値へと進められ、所期の性能をほぼ100%達成し成功裡に終了した。

本報告は上記通電試験の結果について、本体の熱・構造的な観点からまとめたものである。主な結論は以下の通りである。

- (1) 全コイルを同時に最大定格まで通電することに成功し、本体の熱・構造的な性能を含めて全システムの健全性を確認した。
- (2) 測定された歪および変位は設計値と比較的よく一致し、電磁力の支持が設計通りなされており、かつ力の流れが滑らかであることを示している。
- (3) 電磁力による真空容器の振動が顕著であり、最大加速度は 50 m/s^2 にまで達するため、真空容器に直接取り付けられるコンポーネントの設計・製作にはこの加振力を考慮すべきである。
- (4) 熱・構造的な観点から本体の運転に対する制限項目（垂直磁場コイルの立ち上げ速度、弱電流放電洗浄運転の連続運転可能時間）を明らかにした。
- (5) 既設の計測器だけでは不十分と考えられる測定項目（水平ポート先端のゲート弁の振動、磁気リミタコイルのフィードの変位）があり、計測器の追加が必要であることを明らかにした。

* 現在、石川島播磨重工業（株）
** // 日本真空技術（株）
*** // （株）IBS データ・センター

Mechanical and Thermal Characteristics of
JT-60 Tokamak Machine Demonstrated in its Power Tests

Hideyuki TAKATSU, Masahiro YAMAMOTO, Minoru OHKUBO, Kozo KAWASAKI,
Toshiro ANDO, Masatsugu SHIMIZU, Tohru SHIMIZU*, Keizoh NAKAO*,
Yasuhiro HARA**, Yasunori SERIZAWA*** and Mitsuru OHTA

Department of JT-60 Facility
Naka Fusion Research Establishment, JAERI

(Received August 7, 1985)

JT-60 power tests were carried out from Dec. 10, 1984 to Feb. 20, 1985 to demonstrate, in advance of actual plasma operation, satisfactory performance of tokamak machine, power suppliers and control system in combination. The tests began with low power test of individual coil systems and progressed to full power tests.

Power tests were successfully concluded with the following conclusions.

- (1) All of the coil systems were raised up to full power operation in combination and system performance was verified including thermal and structural integrity of tokamak machine.
- (2) Measured strain and deflection showed good agreements with those predicted in the design, which was an evidence that electromagnetic loads were supported adequately as expected in the design.
- (3) Vibration of lateral port was found to be large up to 50 m/s^2 and caused excessive vibration of gate-valves.
- (4) A few limitations to machine operation were made clear quantitatively.
- (5) It was found that the existing detectors were insufficient to monitor the machine integrity and a few kinds of detectors were necessary to be installed.

Keywords : JT-60 Tokamak Machine, Power Test, Toroidal Field Coil, Poloidal Field Coil, Vacuum Vessel, Mechanical Support Structure, Electromagnetic Force, Strain, Displacement, Vibration, Temperature Rise

* Present Address: Ishikawajima-Harima Heavy Ind. Co., Ltd.

** Present Address: ULVAC Co.

*** Present Address: IBS Data Center

目 次

1. 序 言	1
1.1 J T -60本体コイル通電試験の概要	1
1.2 通電試験における本体計装	2
1.3 J T -60本体の構造概要	2
2. トロイダル磁場 (T F) コイル単独通電	12
2.1 T F コイル補強枠の歪の T F コイル電流依存性	12
2.2 T F コイル補強枠の歪の T F コイル冷却水入口温度依存性	13
2.3 T F コイルの変位の T F コイル電流依存性	14
2.4 中心ブロックの歪の T F コイル電流依存性	14
2.5 中心支柱の歪	15
2.6 P F コイルサポートの歪	16
3. ポロイダル磁場 (P F) コイル単独通電	22
3.1 P F コイル単独通電時の本体の熱・構造応答	22
3.2 弱電流放電洗浄 (T D C) 運転時のベローズへの熱入力	22
3.3 T D C 運転時のベローズの温度上昇と連続運転可能時間	23
4. T F コイルと P F コイルとの複合通電	29
4.1 複合通電時のコイル通電波形と代表的な歪応答	29
4.2 T F コイル転倒力の支持	29
4.3 上架台変位異常検出用リミット・スイッチ部の変位	30
4.4 水平ポート先端のゲート弁の振動	31
4.5 真空容器支持系の振動	33
4.6 その他の振動データの評価	34
4.7 真空容器の振動に対する垂直磁場コイル立ち上げ速度の影響	35
4.8 磁気リミタコイルのフィーダーの変位	36
5. 結 論	51
謝 辞	52
参考文献	53
付録 I J T -60本体コイル通電試験要領	54
付録 II J T -60本体コイル通電試験における本体計装一覧	97
付録 III T F コイル導体と補強枠との間のギャップを考慮した応力解析	101

Contents

1. Introduction	1
1.1 Outline of JT-60 power tests	1
1.2 Instrumentation for JT-60 tokamak machine in power tests	2
1.3 Structural outline of JT-60 tokamak machine	2
2. Toroidal field (TF) coil excitation	12
2.1 Dependence of TF coil casing strain on TF coil current	12
2.2 Dependence of TF coil casing strain on TF coil coolant temperature	13
2.3 Dependence of TF coil casing deflection on TF coil current	14
2.4 Dependence of central block strain on TF coil current	14
2.5 Strain of central column	15
2.6 Strain of PF coil support	16
3. Poloidal field (PF) coil excitation	22
3.1 Thermal and mechanical response of PF coil system	22
3.2 Heat input to vacuum vessel bellows during Taylor discharge cleaning (TDC) operation	22
3.3 Temperature rise of vacuum vessel bellows during TDC operation	23
4. TF and PF coils combined excitation	29
4.1 Typical time behavior of coil currents and strains	29
4.2 Support of TF coil overturning moment	29
4.3 Limit switch for abnormal displacement of upper support structure	30
4.4 Vibration of lateral port gate-valve	31
4.5 Vibration of vacuum vessel support system	33
4.6 Other vibration data	34
4.7 Influence of rising time constant of vertical field coil to vibration of vacuum vessel	35
4.8 Displacement of magnetic limiter coil feeder	36
5. Conclusions	51
Acknowledgement	52
References	53
Appendix I Procedure of JT-60 power tests	54
Appendix II List of main instrumentation	97
Appendix III Stress analysis of TF coil considering gap between conductor and casing	101

1. 序 言

1.1 JT-60 本体コイル通電試験の概要

現在、世界各国の核融合研究の重点は、大型トカマク装置による臨界プラズマ条件の達成に向けられつつある。米国では、1982年12月にプリンストン大学においてTFTRにファースト・プラズマが着火され⁽¹⁾、それから半年後には英国カラム研究所においてヨーロッパ連合の大型トカマク装置JETの実験が開始された⁽²⁾。原研で建設を進めてきた臨界プラズマ試験装置(JT-60)は、JETの完成より1年3ヶ月程遅れて1984年9月に本体の組み立てを完了した。本体の据付け作業には約20ヶ月もの期間を要したが、大きなトラブルもなくおおむねスケジュール通りに進められた⁽³⁾。また、本体の据付完了前後から、各設備の単体機能試験が並行して進められた。以後、本体コイル通電試験、総合機能試験を順調に終え、1985年4月8日にファースト・プラズマの着火に成功した⁽⁴⁾。

JT-60は、臨界プラズマの達成はもとより、より炉の条件に近いプラズマを閉じ込めてその物理的・工学的問題点を究明しようとする試験装置であり⁽⁵⁾、同様の目標を掲げるTFTRやJETなどと競い合って目標の早期達成を目指して実験を進めている。JT-60本体の鳥瞰図をFig. 1に、またその主要パラメータをTable 1にまとめる。JT-60の特徴としては、DT反応は行なわないが、長パルス運転が可能であり、また多くの不純物対策が施されているなど他の大型トカマク装置にない特異性を有しており、その実験結果に多くの期待が持たれている。

コイル通電試験は、プラズマ生成に先立って本体コイルに最大定格までの電流を流し、本体、電源、制御の各設備の健全性を確認することが目的であり、さらに、実験や運転に際しての問題点や留意事項などを洗い出すことを目的としている。コイル通電試験は各設備ブロックにまたがる実負荷の組み合わせ試験(ブロック組み合わせ試験Fと呼ばれる)であるが、前述の通りこの試験に先行して各設備単体の調整試験は完了しており、また各設備ブロック間にまたがる制御系だけの健全性を確認する無負荷ブロック組み合わせ試験も終了している。試験は1984年12月10日から1985年2月20日まで2ヶ月強の期間を要し、所期の性能をほぼ100%確認でき成功裡に終了した⁽⁶⁾。

コイル通電試験はTable 2にまとめるように26の試験項目に分けられているが、大きく分類してイロイダル磁場(TF)コイル単体通電試験(F-1~5)、ポロイダル磁場(PF)コイル単体通電試験(F-6~12, 14)、TFコイルとPFコイルとの複合通電試験(F-13, 15~19)に分けられる。これら各試験の目的、要領、測定項目の詳細を付録Iに添付する。いずれの試験においても、通電々流は低い値から始められ、ショット毎に得られた各種試験データを慎重に検討し、徐々に定格にまで上げられていった。また、F-21~23においては、真空容器を250℃以上にベーキングし高温状態で各コイルに通電を行ういわゆる高温通電運転の健全性の確認も行われた。

本報告は、JT-60 コイル通電試験の結果について本体の強度および熱に関する観点からまとめたものである。この中では、特に核融合装置の設計を左右する重要な因子の1つである巨大な電磁力の支持がどのようになされているかをみて、設計と実測値との比較を行うことにより設計の妥当性を検証する。さらに、これらの電磁力が各コンポーネントにどのような影響を与えているかについて検討を行なう。これらの熱・構造データは、装置本体の設計のレビューを行い、実態としての機器耐力を把握する上でも重要であり、ひいては次期装置や核融合炉の熱・構造設計に資するデータを提供するものと期待される。また、本報告では、通電試験の中で明らかにされた項目として、実験や運転に対する2～3の制限事項や新たに必要と思われる計装項目についても言及する。以下に、1.2節でコイル通電試験時の本体計装について述べ、1.3節では以下の章での記述内容の理解を容易にするため、JT-60本体の構造概要を記す。さらに、試験項目別に第2章でTFコイル単独通電、第3章でPFコイル単独通電、第4章でTFコイルとPFコイルの複合通電時に得られたデータのまとめと結果の考察について述べる。これらの中には一部考察不十分と考えられる事項もあるが、速報性に価値をおきあえて収録した。そして第5章にて全体のまとめを行う。

1.2 通電試験における本体計装

本試験においては、JT-60本体に関して強度的（歪、変位、振動）、熱的（温度、冷却水流量、圧力など）、電氣的（コイル電流、電圧、コイルや真空容器への誘起電流、電圧、磁場など）および真空（真空度、マス・パターンなど）に関するデータをショット毎に取得し、かつ本体室に多くの試験員を配置して外観目視点検を継続して行った。特に強度データと外観目視点検の結果は、装置に損傷を与えることなく各コイルの電流値を定格にまで上げられるか否かの判断基準として慎重に吟味された。

本体の強度データを取得するための計装項目をTable 3にまとめる。200点の実装歪ゲージのうち64点はCAMACを経由して時間分解能が5 msec と非常に早い放電管理系データとして記録され、76点は同じくCAMACを経由して時間分解能が1 sec と応答の比較的ゆるやかな運転管理系データとして処理される。残りの60点は直接記録計に入力され、その時間分解能は50 msec 程度である。変位測定に際しては、Table 3にまとめる以外にも絶縁スケールを多数貼付して様々な個所の変位をモニターした。また、変位計や振動計のピック・アップは比較的移動が容易であるので、試験の目的に対応して計測位置を変更して使用した。さらに、Table 3に示した以外にも、真空容器の内・外表面に設置された熱電対1307点や、真空容器や各コイルの冷却材の状態を示す多数の流量計、圧力計、熱電対から得られる熱水力データも補助的に強度データの検討に用いられた。参考として付録Ⅱに本体計装項目の一覧を示す。

1.3 JT-60本体の構造概要

JT-60本体を構成する主要なコンポーネントは、TFコイル、PFコイル、真空容器および架台であ

る。

(7)

以下に、各コンポーネントの構造概要を記すが詳細は別報告書を参照されたい。

① TF コイル

TF コイルはトラス中心側をテーパ状に加工された円形パンケーキ型コイルであり、真空容器を取り囲んでトロイダル方向に等間隔に18個設置される。その断面は、非磁性鋼からなる補強棒とコイル導体である銅および絶縁材のFRPから構成されている。

隣接コイル間は、コイル上下でスペーサにより連結されており、コイル全体としては、下架台上に設置されるとともに、スペーサを介して上架台とも連結される。トラス中心軸には中心ブロックが存在するが、TFコイルはこれとも接触している。

② PF コイル

PF コイルは真空容器に添ってトロイダル方向に一周するコイル群であり、真空容器外に設置される空心変流器コイル、垂直磁場コイル、水平磁場コイル、四重極磁場コイルと、真空容器内に設置される磁気リミタコイルに分けられる。

真空容器外の各PF コイルは、トロイダル方向に等間隔に設置された18個の支持体によって支持されている。支持体は真空容器のまわりをポロイダル方向に一周し、下スペーサ上に設置されるとともにPF コイル支持柱により下架台から支持されている。PFコイルおよびその支持体、支持柱のいずれも、TFコイルとは構造的には接触しないが真空容器とは自重サポートを介して接している。

③ 真空容器

真空容器は板厚65mmの厚肉リングと板厚2.7mm、山高さ70mm、ピッチ20mmのベローズが各8個、交互に配置されてドーナツ形状を構成している。さらに厚肉リングは40°セクタ6個と60°セクタ2個に分けられる。ベローズは成形による平行ベローズであり、接線方向の剛性に比べ軸方向の剛性が極端に小さい特殊構造物である。真空容器内部には、ライナ、固定リミタ、磁気リミタ板などの第1壁が、外部には、ポート、温度制御層等が設置される。

各厚肉リングセクタは支持柱から取り出した2本の真空容器支持アームにより支持されるとともにPFコイル支持柱にも支持される。

④ 架 台

架台は、JT-60本体を構成する各要素の自重を支持する他、それらに作用する真空力、電磁力、地震力などを支持する構造物であり、上架台、下架台、中心支柱、真空容器支持アーム、真空容器支持柱および星形トラスに大別される。

上架台は、装置全体を支持する架台のうち装置上部を支持するベースであり、主にTFコイルの転倒力を下架台、星形トラスとともに支持する役割を果たす。上架台はトロイダル方向に8分割(40°セグメント6ケ、60°セグメント2ケ)され、各セグメントは絶縁板を介してボルト結合されて一体構造を構成する。40°セグメント2ケと60°セグメント2ケには突出しアームが設けられ、上架台はこの部分で星形トラスと連結されるとともに真空容器支持柱に支持される。TFコイルの転倒力による上架台の面内回転を許容するため、星形トラスとの連結部はピン結合であり、真空容器支持柱の支持部も回転継手を採用

している。

下架台は、装置全体を支持する架台のうち装置下部を支持するベースであり、真空容器支持柱が支持する荷重以外の全ての荷重を支持する。上架台と同様に、下架台もトロイダル方向に8分割（ 40° セグメント6ケ、 60° セグメント2ケ）され、各セグメントは絶縁板を介してボルト結合されて一体構造を構成する。

下架台下部には、各種計測装置を設置する空間を確保するために基礎架台が設置される。基礎架台はトロイダル方向に4分割（ 90° セグメント4ケ）され、各々が絶縁板を介してボルト結合され円筒構造を構成している。

基礎架台中央部には、中央部の荷重を支える目的で中心架台が設置される。下架台は、外周部全周を基礎架台で支持される他、内周部4ケ所（ 40° セグメント2ケ、 60° セグメント2ケ）が中心架台にて支持される。

中心支柱は、主に中実円柱である中心支柱と18角形に加工された厚肉リングである中心ブロックから構成され、前者が上架台の支持重量の一部を支えるだけなのに対し、後者はTFコイルの巨大な向心力を支持する役割を果たす。

中心支柱は、その上部を中心支柱支援板に、下部を中心受台にボルト結合され、さらにそれらを介して上下架台にボルト結合される。中心支柱は中心ブロックとの間に2mmのギャップを有し接触しない設計となっている。

中心ブロックは11ケのブロックが単に積み上げられただけの構造であり、全体がTFコイル内周側端面の下部にある突起に支持されている。11ケのブロックは各々長さが異なり、ブロック毎に剛性を変化させている。これは向心力による支持面の変位を上下方向の位置によって変えることにより、TFコイルに発生する応力を調整することが目的である。

真空容器支持アームは、真空容器に作用する真空力、電磁力、地震力等を支持する部材であり、支持アーム、連結アーム、連結アーム・スタンドから構成される。真空容器はトラス外周部から片持梁方式で支持される。

支持アームは、各厚肉リングに2個所ある支持ラグ部を介して直接真空容器を支持するコンポーネントである。ラグ部との取り合い部分は、上下一対のピン結合部と中間のはめ合い部から構成され、ピン結合部で曲げモーメントを、はめ合い部で剪断力を支持する。各厚肉リングはその両端において2本の支持アームで支持され、支持アームはさらに連結アームに支持される。

連結アームは、支持アームを支持するとともに、連結アーム・スタンド間を連結するコンポーネントであり、連結アーム・スタンドは、真空容器支持柱と真空容器支持アームを連結するコンポーネントである。これらは、いずれも高マンガン非磁性鋼製の箱形構造を有している。真空容器支持柱は10ケの独立した柱であるが、連結アームにより互いに連結されてトロイダル一周全体としてリング構造を構成しており、真空容器に作用するプラズマ異常消滅時の電磁力や地震時の加振力に対する十分な支持剛性を確保している。

真空容器支持柱は絶縁板を介して支持柱架台および基礎架台にボルト結合にて支持される。真空容器支持柱上には連結アーム・スタンドが、さらにその上に上架台を支える回転継手がボルト結合される。

星形トラスは、TFコイルの転倒力による上下架台間の振れを上架台から建家の壁に連結して上架台を支持する構造物であり、上架台の4ヶ所の突出しアームと建家3階のキャット・ウォーク4ヶ所とを結びトラス要素4組8本から成っている。トラスの両端は、上架台の面内回転をある程度逃がせる様ピン結合となっている。また、トラスの中間において、建家側壁との絶縁をとるために絶縁板を介したボルト結合部を有している。

星形トラスの建家3階基礎部4ヶ所にはダンパが設置され、地震時の建家側壁への過度な荷重を避けるとともに、本体自身の振動を軽減する役割を果たしている。

真空容器，PFコイル，TFコイルの部分図，下架台，真空容器支持アームの部分図をFig. 2に示し，上架台，星形トラスの部分図をFig. 3に示す。

Table 1 Major specifications of JT-60 tokamak machine

Parameter	Design value
Major radius	3.03 m
Minor radius	0.95 m
Plasma current	2.7 MA
Toroidal field at plasma axis	4.5 T
Plasma current duration	10 sec
Repetition time	10 min
Additional heating power	
Neutral beam injection	20 MW
Radio frequency heating	10 MW
Total number of full power operation	5×10^4
Total turns and current of poloidal field coils	
Ohmic heating coil	60/91.7 kA
Vertical field coil	64/57.5 kA
Horizontal field coil	12/20.0 kA
Quadrupole field coil	36/25.0 kA
Magnetic limiter coil	16/94.0 kA
Time constant of plasma disruption	1 msec
Earthquake proof	2 m/sec ²

Table 2 Summary of power test (F-series) titles

Test No.	Test Title
F-1	TF coils continuous excitation I (by utility network)
F-2	TF coils continuous excitation II (by M-G)
F-3	TF coils pulsed excitation I (by utility network)
F-4	TF coils pulsed excitation II (by M-G)
F-5	TF coils pulsed excitation III (by utility network & M-G)
F-6	PF (F) coils excitation I (low current pulse disch. cleaning-TDC)
F-7	TF (F) coils excitation II (short pulse disch. cleaning-SPDC)
F-8	PF (V) coils excitation
F-9	PF (H) coils excitation
F-10	PF (Q) coils excitation
F-11	PF (M) coils excitation I
F-12	PF (M) coils excitation II
F-13	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H, Q & M) coils
F-14	PF (F) coils pulsed excitation III (VCB one-stage break)
F-15	Simultaneous excitation of TF & PF (F) coils
F-16	Simultaneous excitation of TF & PF (F & V) coils
F-17	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V & H) coils
F-18	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H & Q) coils
F-19	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H, Q & M) coils
F-20	Fast movable limiter driving test I
F-21	High temperature operation test I
F-22	High temperature operation test II
F-23	High temperature operation test III
F-24	Fast movable limiter driving test II
F-25	Surface conditioning monitor driving system I
F-26	Surface conditioning monitor driving system II

Table 3 List of instrumentation for mechanical data
of JT-60 tokamak machine

Item	Sensor	Number	Installation	Comments
Strain	Strain gage	200	Permanent	36 for TF coil casing
		(+102 in redundancy)		54 for spacer 54 for PF coil support 40 for vacuum vessel support column 16 for vacuum vessel support arm
Deflection	Optical deflection meter	4	Temporary	
	Transit	10	Temporary	
Vibration	Piezoelectric-type acceleration meter	10	Temporary	

臨界プラズマ試験装置 (JT-60)

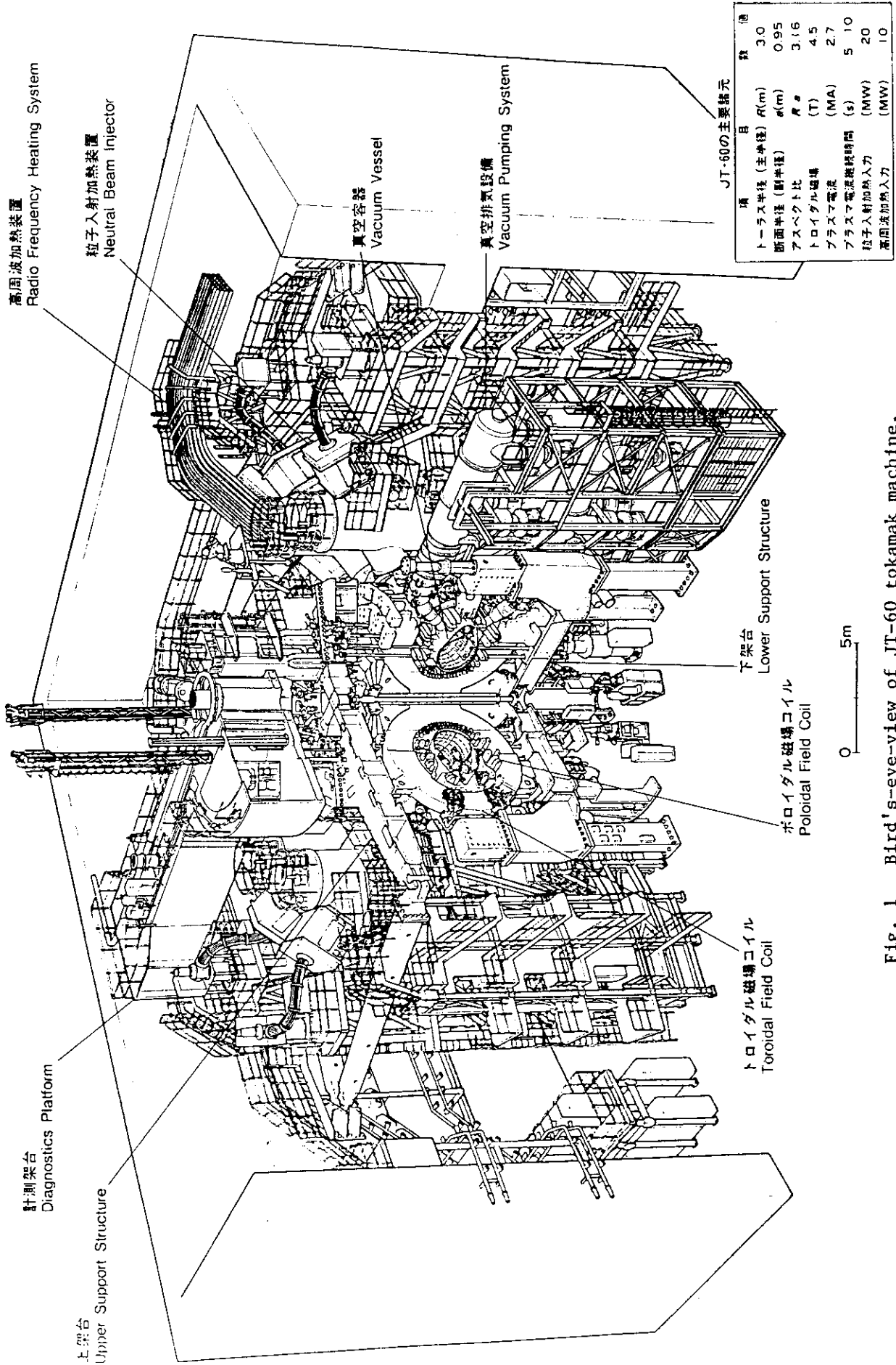
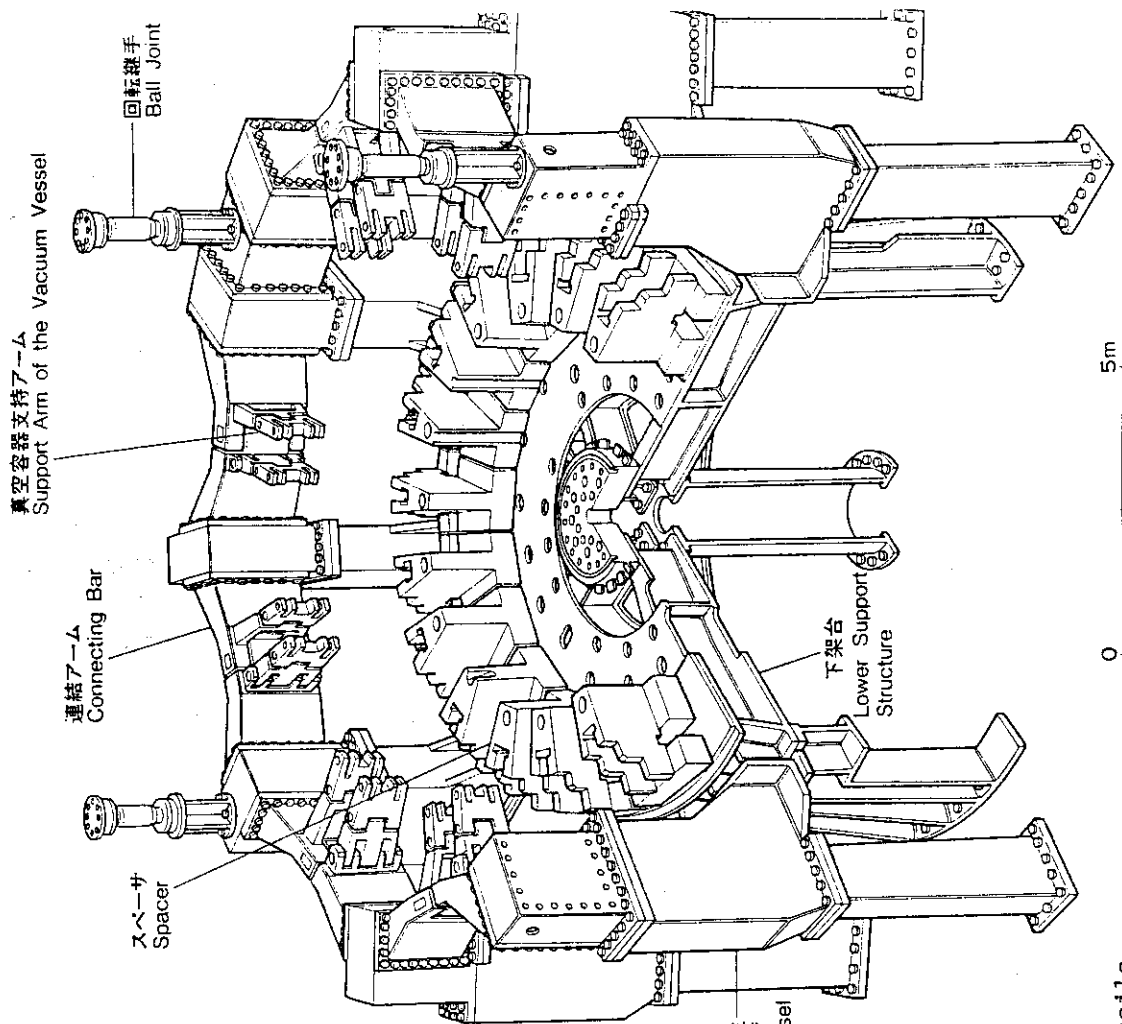


Fig. 1 Bird's-eye-view of JT-60 tokamak machine.

下 架 台
Lower Support Structure



真空容器 + ポロイダル磁場コイル +
Vacuum Vessel Poroidal Field Coil
トロイダル磁場コイル
Toroidal Field Coil

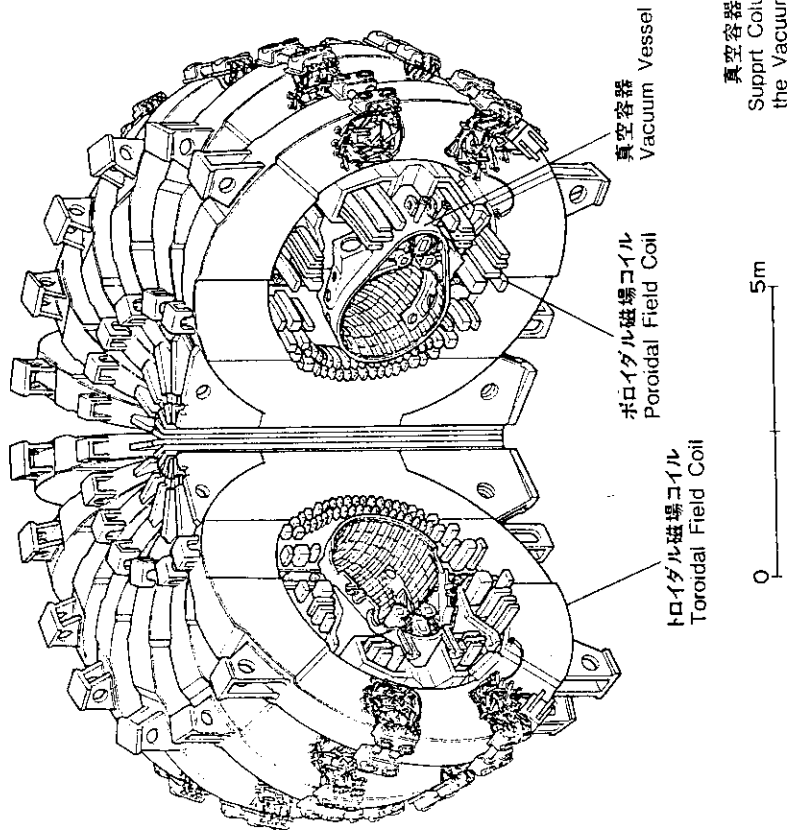


Fig. 2 Lower support structure, vacuum vessel and coils.

上架台
Upper Support Structure

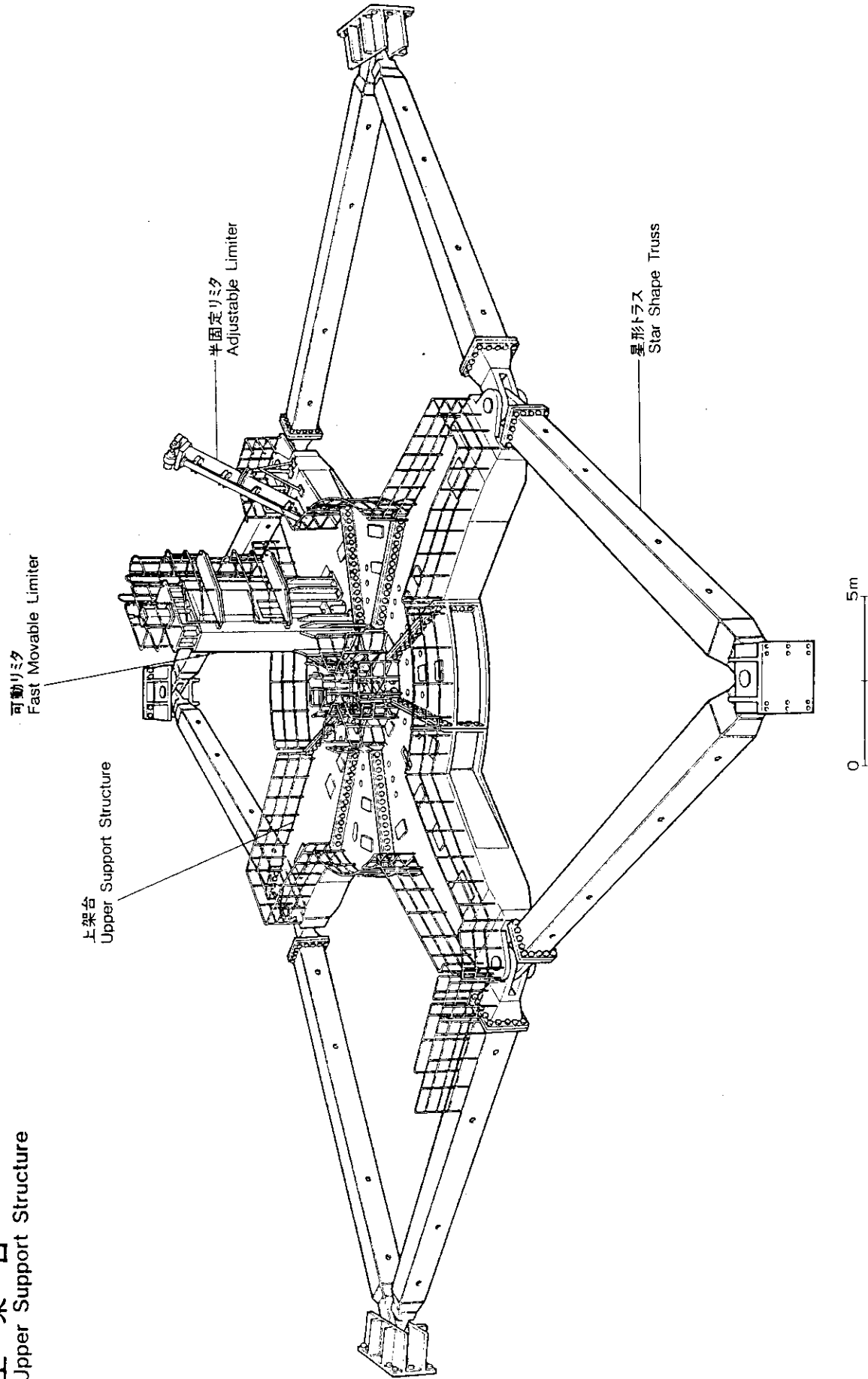


Fig. 3 Upper support structure and star-shaped trusses.

2. トロイダル磁場 (TF) コイル単独通電

2.1 TF コイル補強枠の歪のTF コイル電流依存性

TF コイル単独通電時には、TF コイル補強枠には電磁力（フープ力）による応力と熱応力が作用する。この合成応力はトーラス最内周側で最大値をとる⁽⁸⁾。しかし、歪ゲージは空間的な制約から当該位置に設置できないため Fig. 4 に示す上下約 4.5° ずれた位置に設置されている。したがって、測定される歪値はTF コイル補強枠に生じている最大歪ではなく、また強度的により厳しいコイル導体そのものに発生する歪も測定していないので注意を要する。ただし、Fig. 4 の中の挿入図に示す測定点からTF コイル全体の挙動の概要を知ることが可能であると考えられる。

Fig. 4 では、図中矢印で示す位置にて測定したTF コイル補強枠のトロイダル方向（面内周方向）歪のTF コイル電流依存性を示す。歪値はTF コイル電流の2乗に比例するので、横軸はTF コイル電流の2乗で整理してあり、縦軸は歪値である。図中の実線は自己電磁力による歪とフラット・トップ終点温度による熱歪の設計値を表わし、○印とエラー・バーは同一ショットにおける放電管理系データ9点の平均値と標準偏差を示している。なお、通電は立ち上げ時間20秒、フラット・トップ時間5秒であり、測定歪はこの間の最大値を読みとっている。

Fig. 4 からわかるように、同一ショットにおける放電管理系データ9点のばらつきは非常に小さく、標準偏差は高々 30μ であった。また、他の運転管理系データ18点、記録計データ9点を含めても、18ヶの各コイル間の測定データのばらつきは小さく、各コイルの製作、据付上の個有差や荷重の不均等は無視し得る程度であると考えられる。

Fig. 4 に示す測定値はTF コイル電流の2乗に対しておおむね直線性を有しているが、全体として設計値の約50%と小さい値を示している。また、同一TF コイル電流値においてもショットが異なれば歪値が 80μ 程度も異なる場合がある。これは以下の通り解釈される。TF コイルは、導体および絶縁部の応力を軽減するために、導体、絶縁層と補強枠との間にギャップがなく導体に作用する荷重が補強枠に伝達される設計となっている。一方、製作時の寸法誤差、絶縁つめ物の枯れなどにより、実際には導体、絶縁層と補強枠との間にいくらかギャップが生じており、変形の初期においては導体に作用する荷重が補強枠へ十分に伝えられない。そのため補強枠に生じる歪が設計値より小さくなっているものと思われる。

Fig. 4 中において、同一TF コイル電流値で大きく歪値が異なる場合があるのは、通電時のTF コイル冷却水入口温度が異なることによるものである。たとえば、TF コイル電流が 2200 (kA)^2 における3つのショットにおける冷却水入口温度は、歪値が小さいものから順に $17, 21, 24^\circ\text{C}$ であり、同様に 2300 (kA)^2 における3つの測定データは $23, 28, 30^\circ\text{C}$ であり、補強枠の歪の冷却水入口温度依存性が明らかである。これは以下の通り解釈される。冷却水入口温度の上昇により導体は熱膨張するのに対し、補強枠は雰囲気温度に主に支配されるためほとんど熱膨張しない。そのため、冷却水入口温度の上昇により導体、絶縁層と補

強棒との間の初期ギャップが吸収される傾向にある。したがって導体、絶縁層と補強棒の構造一体性が向上し、補強棒の歪が増大する。この補強棒の歪の冷却水入口温度依存性に関しては2.2において定量的に検討を行なう。

なお、補強棒の歪が設計値より小さいということは補強棒の荷重分担率が設計値より小さいということであり、結果的に導体の歪値が設計値を上回っていることが予想される。しかし、導体、絶縁層と補強棒の間にギャップを考慮した構造モデルに対する応力解析を行なった結果ではギャップがない場合に比べて応力強さの増加分は最大応力が発生する最外周ターンの最狭部において高々1 MPa程度、ロー付部においても6 MPa程度である（付録Ⅲ 参照）。このことから、導体の寿命に与える影響はほとんど無視し得るものと判断される。

2.2 TF コイル補強棒の歪のTF コイル冷却水入口温度依存性

Fig. 4で明らかなように、TF コイル補強棒の歪はTF コイル冷却水入口温度に依存している。これは冷却水入口温度の上昇による導体の熱膨張が導体、絶縁層と補強棒との構造一体性を向上し、導体に作用する荷重が補強棒によく伝えられることによるものであり、結果的に補強棒の歪が増加して設計値に近づいている。導体、絶縁層と補強棒との間のギャップがなく構造一体性を有することはTF コイル全体としては定性的に好ましいことであり、このギャップを小さくする具体的な運転方法としては、

① 2次冷却水流量を制限するなどしてTF コイル冷却水の入口温度を上昇させ、導体を熱膨張させる。

② 本体室の空調操作を行ってTF コイルの雰囲気温度を下げ、補強棒を熱収縮させる。などが考えられる。

Fig. 5には下記2通りの対策を施して得られた補強棒の歪値を示す。図中横軸は冷却水入口温度であり、また○は補強棒の温度が約21℃、△は約23℃の場合の実測歪を表わす。破線は○および△のデータに対して最小2乗法より求められた最適直線である。この図からも補強棒の歪の冷却水入口温度依存性が明らかであり、補強棒の温度が21、23℃のいずれの場合でも、補強棒の歪は冷却水入口温度に対して5～6 $\mu/\text{℃}$ の直線依存性を示す。また、補強棒の温度が2℃下がることによりその歪値は30～40 μ 高くなることも明らかとなった。これより、導体、絶縁層から補強棒への力の伝達がギャップを介しており、ギャップを小さくするような運転を行うことにより構造一体性が向上することが定量的に示された。

なお、冷却水入口温度上昇のために2次冷却系ポンプ1台停止、1次冷却系の熱交換系の部分停止などの対策をとり、本体室の温度低下のために空調操作を行ったが、冷却水入口温度は高々28℃までしか上昇せず、本体室の温度低下も2℃程度であり、補強棒の歪の増加は高々70 μ 程度であり効果は少なかった。冷却水入口温度をさらに上げたり本体室の温度をさらに下げることが技術的には可能であると思われるが、運転の繁雑さや自由度の低下、導体の応力強さの増加量の少なさを考えあわせると特別な対策は不要と考えられる。ただし、連続運転を行っていけば冷却水の入口温度は徐々に上昇し（上限42℃）、導体と補強棒との構造一体化の効果はある程度期待されるものと思われる。

2.3 TFコイルの変位のTFコイル電流依存性

TFコイルの変位は、光変位計およびトランシットによりトラス外周部より測定された。これらのうちの代表的な測定点のTFコイル電流依存性をFig. 6および7に示す。Fig. 6はTFコイルの鉛直方向変位であり、TFコイル上部A点とスペーサ部B点の2ヶ所で測定を行っており、上向きの変位が正である。同じく、Fig. 7はTFコイルの主半径方向変位であり、図中に示すようにTFコイル外周部で測定を行っており、外側への変位を正としている。いずれもパルス運転と連続運転に分けて整理されている。また、図中の実線は、自己電磁力とフラット・トップ終点温度から算出された設計値である。ここで、Fig. 6に示すスペーサ部はTFコイルとの間の滑りが十分であれば固定点となるが、滑らないものとして設計値を算出している。

実測値はおおむねTFコイル電流の2乗に比例しているが、設計値より小さ目であり、かつ主半径方向変位に関しては設計値と逆符号である。これらについては、TFコイル導体と補強枠との間のギャップが原因しているものと考えられる。特にトラス最外周部における導体と補強枠のギャップが最内周側より大きいものと予想され、そのため自己電磁力によるトラス内周向きの力は導体から補強枠へよく伝えられるのに対し、トラス外周向きの熱膨張は導体から補強枠へ十分伝えられていないものと思われる。

2.4 中心ブロックの歪のTFコイル電流依存性

TFコイル通電時には、定格電流値において約1GNもの求心力が作用し、この電磁力は全て中心ブロックで受けられるため、設計では中心ブロックには最大280MPaまでの一次圧縮膜応力が作用するものと予想されている。通電試験においてこの圧縮歪を測定するためFig. 8に示すように中心ブロック最上端の対称位置2ヶ所（図中P-1およびP-10で示す）に歪ゲージが設置されている。

Fig. 8には測定された中心ブロックの圧縮歪のTFコイル電流依存性を示す。横軸はTFコイル電流値の2乗であり、縦軸が中心ブロックの歪を表わす。実線は設計値であり、○印はP-1側、△はP-10側の歪ゲージによる測定値である。実測歪は設計値よりはるかに小さい値を示しており、かつTFコイル電流値が小さい領域では引張歪が観測される場合もある。これらの原因については下記のように解釈される。

中心ブロックは11ヶのブロックが積み重ねられた構造であり、各々のブロックの長さが異なる。すなわち、赤道面（プラズマ中心を含む水平面）に近いほどブロックの長さを短くし、逆に上下端のブロックほどその長さを長くしている。これはTFコイルの求心力が赤道面に近いほど大きいのに対し、その荷重を支持する中心ブロックのばね定数も赤道面に近いブロックほど小さく上下端ほど高くすることにより中心ブロックの反力を調節し、赤道面近傍のTFコイル導体に発生する応力が過大にならないよう配慮しているためである。また、設計ではTFコイル端面と中心ブロックとは均一に面接触することを仮定しているが、

- ① 中心ブロックの平均圧縮量が最大定格運転で0.18mmであるのに対し、11ヶの中心

ブロックの外径寸法のばらつきが製作実績で $\begin{matrix} +0.07 \\ -0.06 \end{matrix}$ mm であり、ほぼ変位量に相当する大きさである。

② 前述の通り、11ヶのブロックは各々圧縮方向のばね定数が異り、赤道面に近いブロックほどばね定数が低く圧縮変位量大きい。

③ 中心ブロックに接するTFコイル端面の平坦度も製作時において最大0.2 mmのばらつきがあり、かつ通電中のTFコイル端面の不均一な熱変形も考えられる。

などの理由により、TFコイル端面と中心ブロックとの接触は均一ではなく、特に歪ゲージが設置されている最上端ブロックにおいてはTFコイル電流が小さい領域では片当たりもしくは接触面圧が不十分であり、設計で期待される圧縮歪が観測されないものと考えられる。

TFコイル電流値が小さい領域では引張歪が測定されることがあり、特にP-10側の歪ゲージにおいて顕著である。しかしその値は高々10 μ でありノイズ・レベルを考えあわせると有意な値とは云い難い。また、P-1側では700 (kA)²、P-10側では2200 (kA)²を越えたTFコイル電流の大きな領域では圧縮歪の増加が徐々に顕著となってくる。これは中心ブロックの変形が進み、最上端のブロックでもTFコイル端面と比較的均一な接触が得られるようになったことによるものと思われる。

2.5 中心支柱の歪

中心支柱は上架台を支持するコンポーネントであり、中心ブロックを貫いて上下架台をボルトにて連結している。中心支柱と中心ブロックとは互いに接しておらず、中心支柱の全長7.5 mに渡って2 mmのギャップが確保されている。従って、中心支柱には上架台の自重および上架台が支持する自重の一部しか作用しない設計となっているため、TFコイル通電時においてもそれ以外の荷重が作用しないはずである。しかし、本試験では引張歪が観測された。

Fig. 9, 10に中心支柱の引張歪の代表的な実測例を示す。Fig. 9は比較的通電時間の短いショット（通電番号F-1-6）における中心支柱の歪（図中の実線L1）、中心ブロックの歪（同L2）、TFコイル端子電圧（同L3）、TFコイル冷却水最高温度（同L4）の時間変化を示したものであり、各々の実線に対する目盛りと単位が左右、上の欄外に示されている。横軸は日、時、分で表示された時間であり、2時間分のデータが示されている。これから明らかなように、TFコイル通電とともに中心支柱の歪は立ち上がっているが、TFコイル電流が0となっても歪は急激には立ち下がらず、TFコイル冷却水温度と同じ傾向でゆるやかに減衰している。一方、Fig. 10には1時間以上に渡る連続通電（通電番号F-1-7）時における中心支柱の歪（図中実線L1）の時間変化が示されている。ここでも中心支柱の歪はTFコイル電流（同L4）とともに立ち上がっているが、立ち下がり時はTFコイル電流よりはTFコイル冷却水最高温度（同L3）に依存している。しかし、通電中は、TFコイル冷却水の温度が上昇し続けているにもかかわらず、中心支柱の歪は上昇せず、かえって減少傾向がみられている。また、応答速度の早い記録計データによれば、パルス通電時においても、中心支柱の引張歪の最大値はTFコイル電流が最大値に至る前にあらわれており、それ以後は減少

傾向がみられた。

中心支柱の引張歪のTF電流依存性をFig. 11に示す。横軸はTFコイル電流の2乗であり、縦軸は歪値を示す。また、対称位置に2ヶ所設置されている歪ゲージのうちP-1側の実測値を△印（パルス通電）、▲印（連続通電）で示し、P-10側の実測値を○印（パルス通電）、●印（連続通電）で示している。電流値が ~ 1000 (kA)²以下においては中心支柱の引張歪はTFコイル電流依存性を示すが、それ以上では $100 \sim 150 \mu$ で電流依存性を示さない。

以上より、中心支柱の引張歪はTFコイルの鉛直方向変位が原因しているものと考えられる。すなわち、パルス通電時には主にフープ力により、連続通電時には主に熱膨張によりTFコイルは鉛直方向上向きに変位する。この際、TFコイルとスペーサ間は絶縁コッタ部で変位を吸収する構造となっている。しかし、滑りが十分でないとTFコイルは上架台を押し上げて、結果的に中心支柱には引張歪が生じるものと判断される。またTFコイルの変位がある程度大きくなるとTFコイルとスペーサ間で滑りが生じるため歪の緩和が生じるものと思われる。

中心支柱が引張力を受けるため、中心支柱と建家基礎とを連結している中心架台にも引張歪が生じている。この場合、部材断面が中心支柱の約5倍あるため歪値は $1/5$ となっている。なお、中心支柱の引張歪による伸び、応力値は、高々1 mm, 30 MPaであり強度的には問題とならない。

2.6 PFコイルサポートの歪

TFコイル単独通電時にはPFコイルサポートに歪が生じない設計であるにもかかわらず、TFコイルのパルス通電時、連続通電時のいずれにおいても歪が観測された。Fig. 12には、PFコイルサポートに生じた歪の代表例を示す。図中、実線L1, L2, L3がPFコイルサポートの圧縮歪を示し、L4がTFコイル冷却水最高温度を示す。同図は、Fig. 10と同じ連続通電（通電番号F-1-7）時のものであり、中心支柱の引張歪と同様にPFコイルサポートの圧縮歪はTFコイル冷却水温度依存性を示している。PFコイルに生じる圧縮歪は高々 40μ であり、強度的には全く問題とならない。

この歪の原因は現在不明であるが、一つの可能性として中心支柱に生じる引張歪と同様にTFコイルの鉛直方向上向きの変位によるものと考えられる。すなわち、フープ力や熱膨張によるTFコイルの鉛直方向上向きの変位により中心支柱は引張力を受ける。同時に下架台にも引張力が作用するため下架台にて支持されるTFコイルサポートに圧縮力が作用する可能性があると考えられる。この点に関しては今後の検討が必要である。

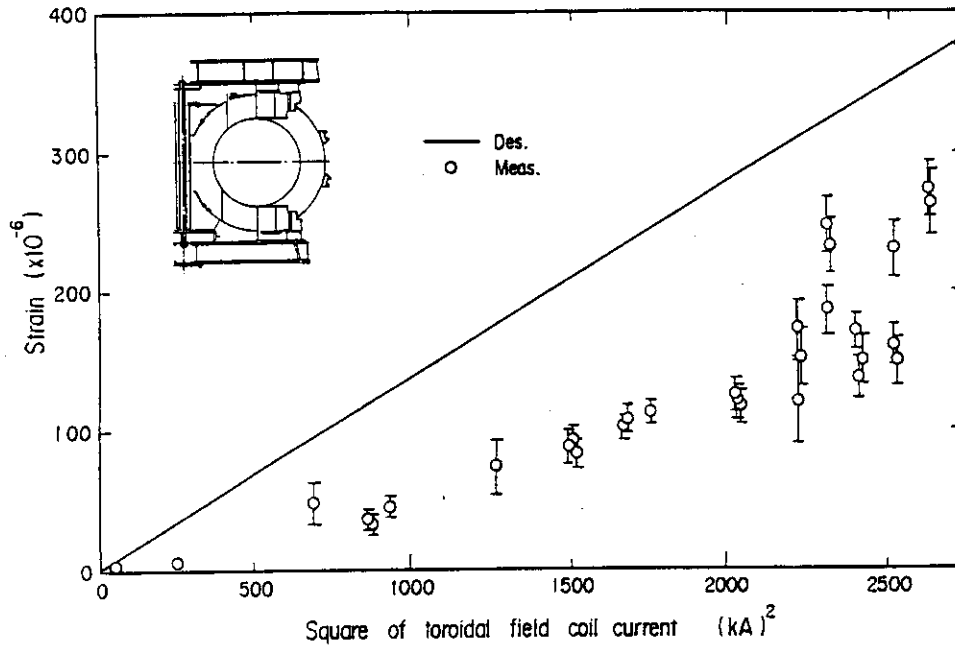


Fig. 4 Comparison between measured strain of toroidal field coil casing with designed one. Location and direction of measured strain are indicated in the figure.

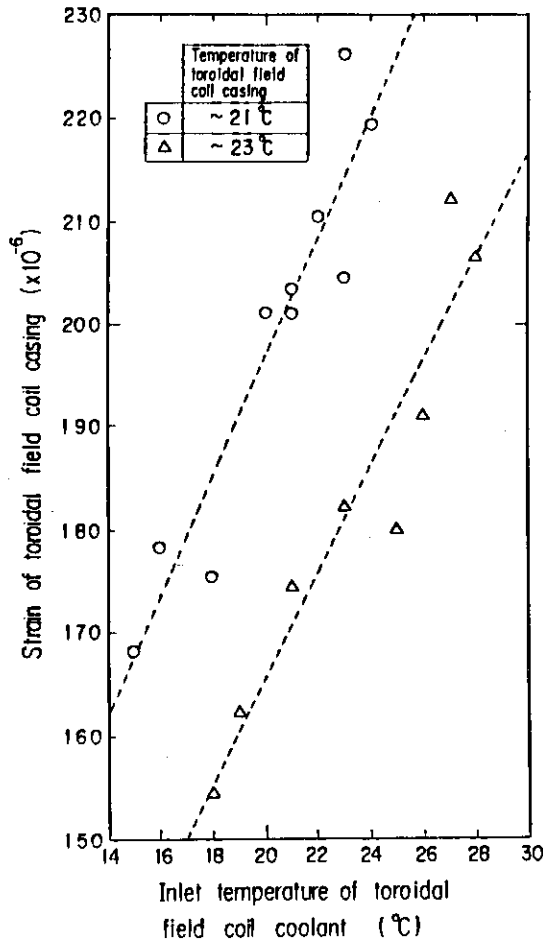


Fig. 5 Dependence of strain of toroidal field coil casing on inlet temperature of toroidal field coil coolant with parameter of toroidal field coil casing temperature. Broken lines indicate best-fit-curves.

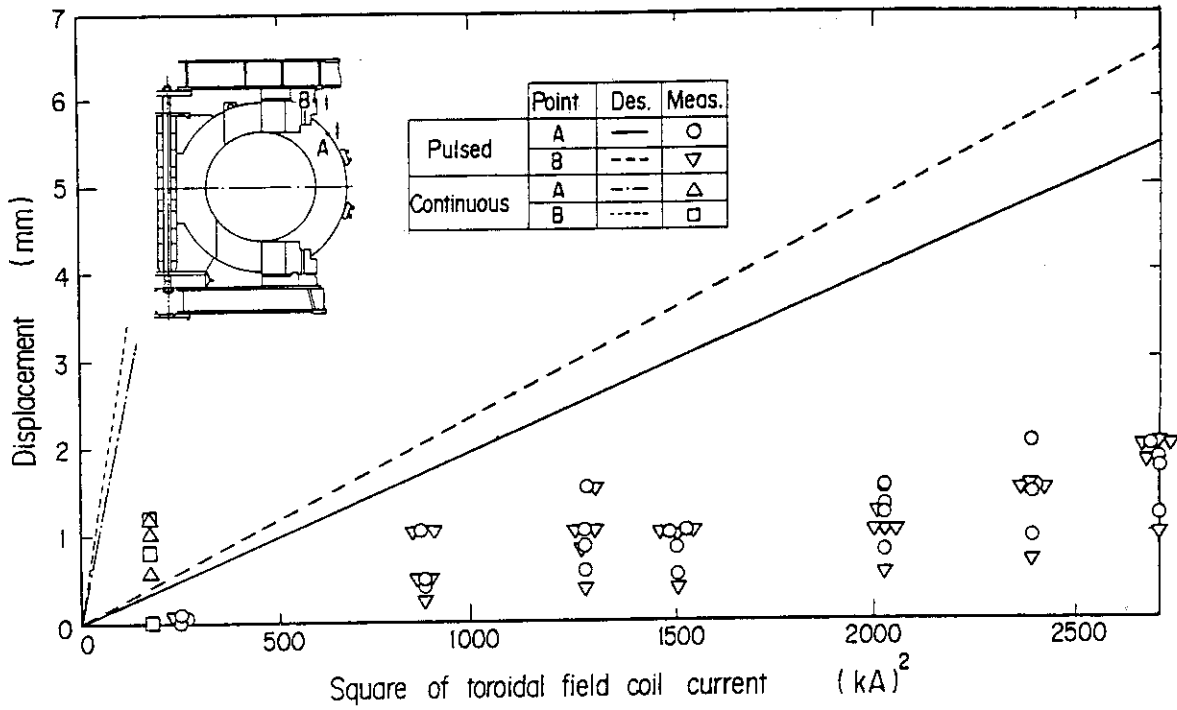


Fig. 6 Comparison between measured vertical displacement of toroidal field coil with designed one. Location and direction of measured displacement are indicated in the figure.

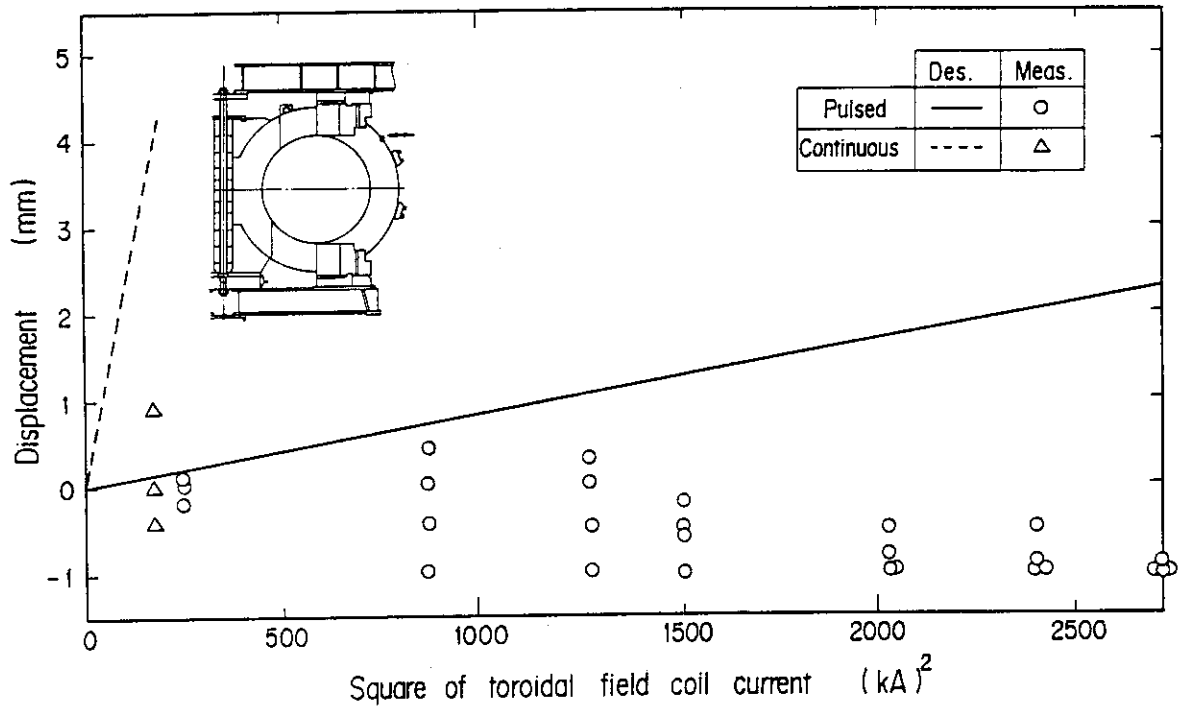


Fig. 7 Comparison between measured radial displacement of toroidal field coil with designed one.

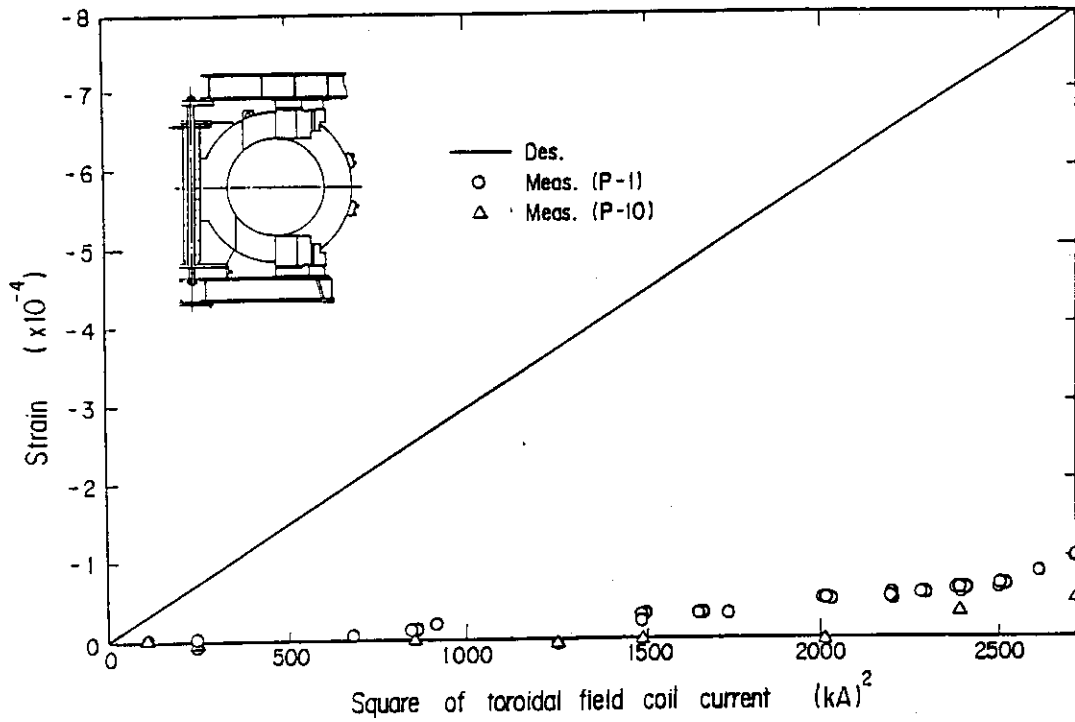


Fig. 8 Dependence of measured strain of central block on toroidal field coil current showing considerable discrepancies with designed ones.

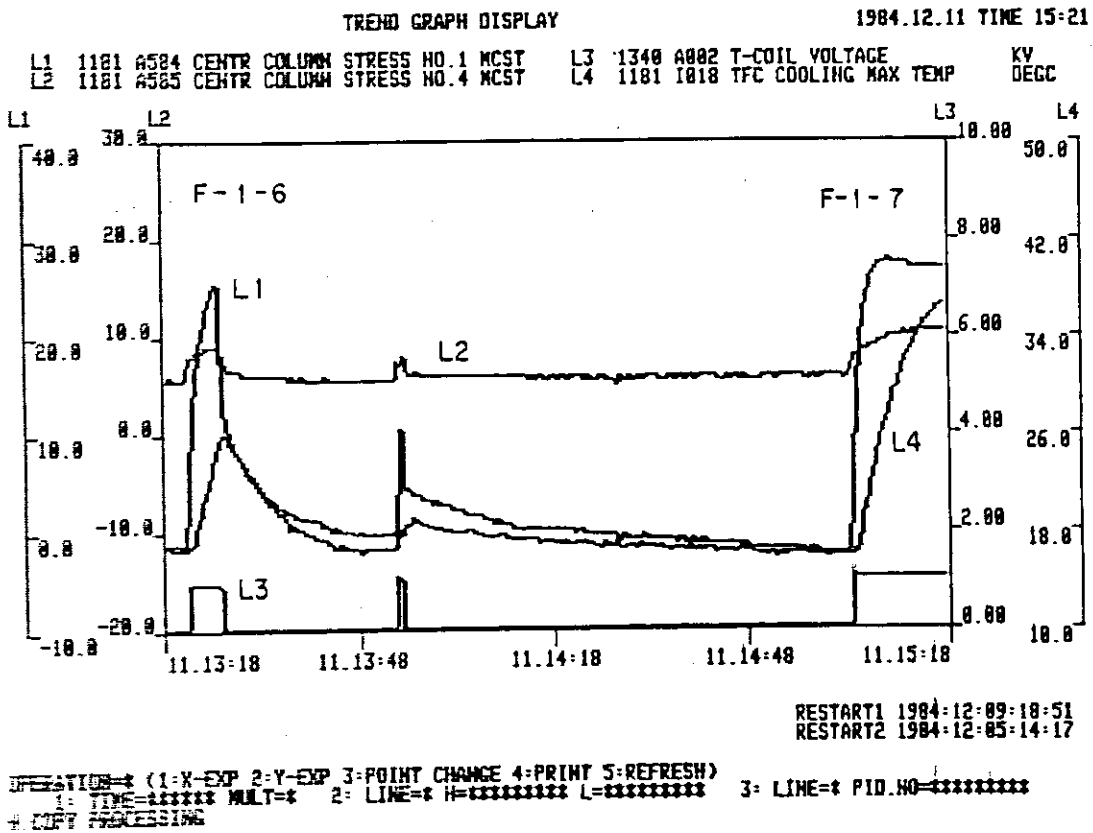


Fig. 9 Time behavior of central column strain showing its dependence on toroidal field coil coolant temperature.

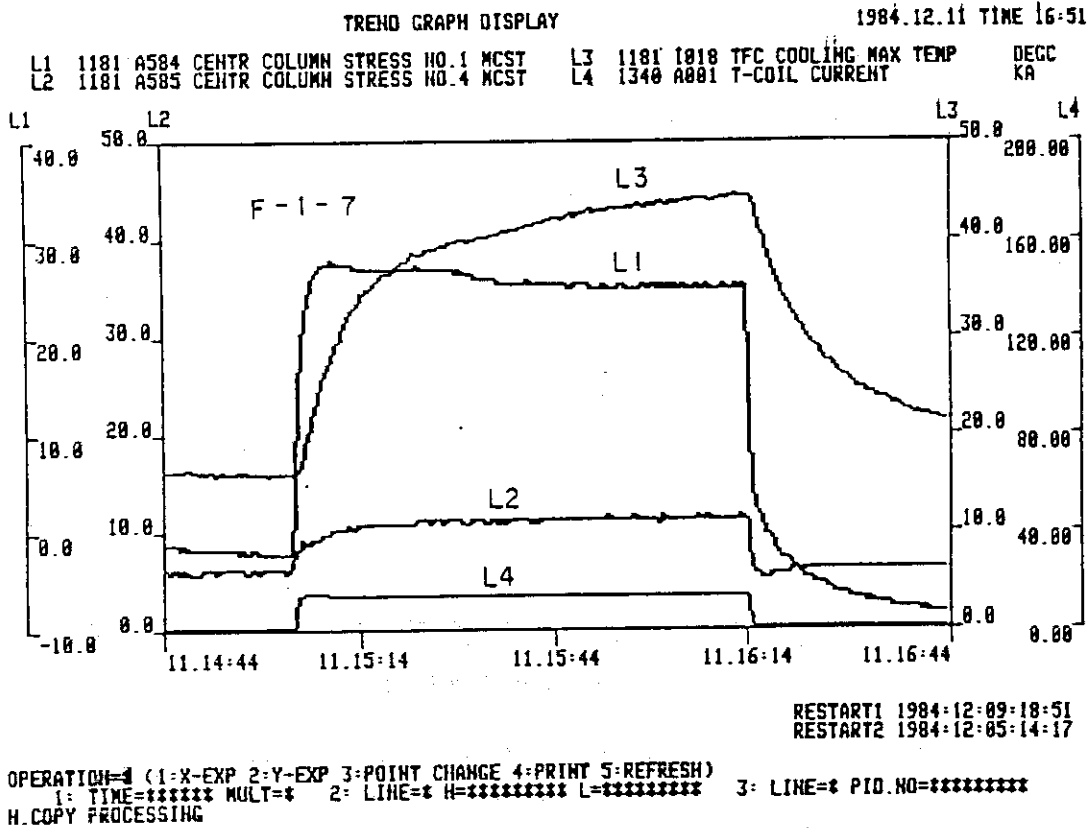


Fig. 10 Time behavior of central column strain during continuous toroidal field coil excitation.

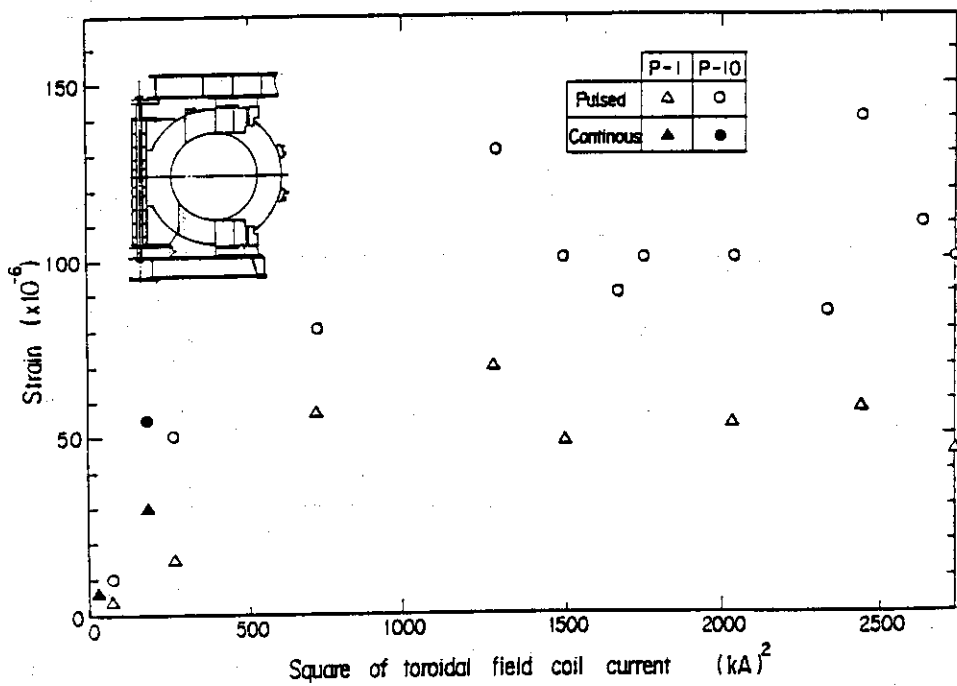
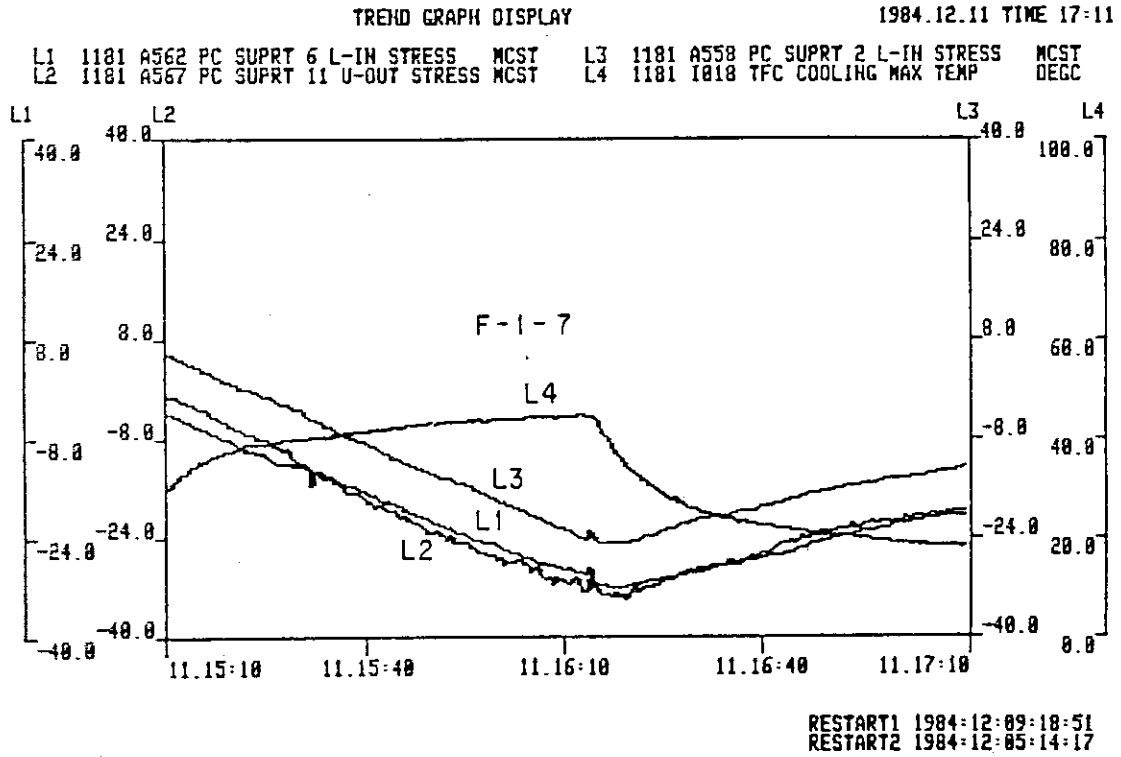


Fig. 11 Relation between central column strain and toroidal field coil current.



OPERATION=1 (1:X-EXP 2:Y-EXP 3:POINT CHANGE 4:PRINT 5:REFRESH)
 1: TIME=***** MULT=* 2: LINE=* H=***** L=***** 3: LINE=* PID.NO=*****
 H. COPY PROCESSING

Fig. 12 Time behavior of strains of poloidal field coil casing showing their dependence on toroidal field coil coolant temperature.

3. ポロイダル磁場 (P F) コイル単独通電

3.1 P F コイル単独通電時の本体の熱・構造応答

5種類のP F コイルを各々単独に運転した場合の本体の健全性を確認する試験がF - 6 からF - 14において行なわれた。ただし、F - 12は磁気リミタコイル(M)を構成する1本の主磁気リミタコイルと2本の副磁気リミタコイルのうち主磁気リミタコイルのみに通電を行うM 1単独運転(いわゆる高ベータモード)であり、F - 13は各P F コイルを同時に放電洗浄モードで運転する試験項目である。

F - 6 からF - 13における代表的な試験データを設計値と比較してTable 4 にまとめる。ここで、TDC, SPDC, PD は各々、弱電流放電洗浄運転モード、短パルス放電洗浄運転モード、プラズマ放電運転モードを示している。コイル導体そのものの歪および変位データは測定されず、空心変流器コイル(A), 垂直磁場コイル(V), 水平磁場コイル(H), 四重極磁場コイル(Q)の単独運転時の歪および変位はP F コイルサポートにおける値を示し、MおよびM 1単独運転時のそれは真空容器支持アームの値を示している。

Table 4 によれば各コイル冷却水の温度上昇は設計値に近いかそれ以下であり、また、コイル連続通電時における各P F コイル冷却パス毎に測定された冷却水温度上昇も設計値とほぼ等しく各P F コイルの熱的健全性が確認された。強度的には、プラズマ通電運転モードにおける空心変流器コイルと垂直磁場コイルの電磁力が主であり、放電洗浄運転モードにおける電磁力や他のP F コイルからの寄与は無視し得ることが示された。また、空心変流器コイルと垂直磁場コイルのプラズマ放電運転モードにおいてP F コイルサポートに生じる歪と変位の実測値はほぼ設計値に近く、各P F コイルの単独運転時における強度的健全性が示された。なお、空心変流器コイルの歪実測値が設計値を上回っているのは計算モデルの粗さに起因するもので、モデルをより詳細にすることにより設計値は上がるものと考えられる。ただし歪値のレベルから考えてその必要はないものと判断される。

3.2 弱電流放電洗浄 (T D C) 運転時のベローズへの熱入力

トカマク装置の運転では、トカマク放電運転以外に、真空容器の内面を清浄にする目的で放電洗浄運転を行なう。放電洗浄運転は、短い繰り返し周期で低温プラズマを生成し、そのプラズマが真空容器内面をたたくことにより吸着している不純物ガスを追い出す運転であり、通常プラズマ放電運転に先立って行なわれる⁽⁹⁾。

J T - 60では、放電洗浄運転モードとして弱電流放電洗浄 (T D C) と短パルス放電洗浄 (SPDC) を考えており、各々、本試験における典型的な空心変流器コイル印加 (充電) 電圧と繰り返し周期は2.0 kV, 300 msec (TDC), 2.5 kV, 4 sec (SPDC) である。

放電洗浄運転時には、空心変流器コイルに電流が流されると同時に真空容器にも一周電流が

誘起され、真空容器ベローズ部においてジュール発熱する。放電洗浄運転は繰り返し周期が短く、かつ通常長時間に渡って行われるため、ベローズ部の温度は徐々に上昇するのに対し、厚肉リング部は電気抵抗が小さくほとんど温度上昇がないため、厚肉リング部とベローズ部との温度差が大きくなり熱応力も大きくなる。JT-60では、ベローズ部の熱応力の制限から厚肉リング部とベローズ部の許容温度差を150℃以下に抑えているため、これが放電洗浄の連続運転時間に制限を与えている。そこで、本試験において放電洗浄運転時に真空容器に誘起される一周電流を測定し、ベローズ部の温度上昇との関連を調べた。

Fig.13には(a)TDC運転時、(b)SPDC運転時に真空容器に誘起される一周電流 I_{u0} の時間変化を示す。 I_{u0} は、真空容器の内・外壁に設置された電磁気計測器(ログスキー・コイル)の出力より求められる。また時間依存の誘起電流を繰り返し周期でならした平均誘起電流 $|\bar{I}_{u0}|$ は次式により算出した。

$$|\bar{I}_{u0}|^2 = \int_0^{\tau} I_{u0}^2 dt / \tau \quad (1)$$

ここで τ は放電洗浄運転繰り返し周期である。TDC運転の場合、ピーク電流は約30kAであり、平均誘起電流は9.5kAである。一方、SPDC運転では、ピーク電流は80kAと高いが繰り返し周期がTDCより長いいため平均誘起電流は2.0kAと小さい。

真空容器ベローズでのジュール発熱量は、ベローズの全抵抗を R (実測値で1.53m Ω)とすると $I_{u0}^2 R$ で求められ、TDC運転で137kW、SPDC運転で6kWを得る。これより、ベローズの温度上昇という観点からはTDC運転の方がSPDC運転よりはるかに厳しいことがわかる。なお、TDC運転時のベローズの熱的検討は3.3節にて行う。

本試験における放電洗浄運転ではプラズマは生成されていないが、実際にプラズマを着火させた場合には同一の運転条件でも真空容器への誘起電流は小さくなるものと予想される。したがって、3.3節の熱的検討もプラズマ不着火の場合であり、プラズマ着火の場合と直接対応づけるには着火の場合の誘起電流を実測すべきである。

3.3 TDC運転時のベローズの温度上昇と連続運転可能時間

TDC運転時における真空容器ベローズの温度変化をFig.14に示す。横軸は時間であり太線で示した時間だけTDC運転(空変流器コイル印加電圧2.0kV、繰り返し周期300msec)を行ったことを示す。縦軸は温度であり、○印は図中に記した真空容器断面図中のA~D点に設置されている熱電対による測定値を示す。また、実線は単に測定値を結んだだけであり、厳密な時間変化を示しているわけではない。

真空容器は8ヶのベローズから構成され、Fig.14では#1ベローズの測定結果を示している。他の測定データによれば8ヶのベローズの温度履歴は非常によく一致しており、8ヶの中に特異性はない。また、Fig.14からわかるように、温度上昇はトロイダル断面においてトラス内周側のA点で最も高い。トロイダル方向には当然のことながら温度上昇はベローズ

部に集中し、ベローズ部と厚肉リングとをつなぐ接合リング部で 10°C 以下の温度上昇がみられるが、厚肉リング部では全く温度上昇がみられなかった。また、Fig.14からTDC運転時のベローズの温度上昇率とTDC運転を行っていない場合の温度降下率からベローズの発熱量を概算すると 105kW であり、誘導電流から算出した発熱量と約 30% の誤差で一致する。

また、Fig. 15には連続TDC運転を行った場合の真空容器内最大温度差の時間変化を、空心変流器コイルの印加電圧をパラメータにして示してある。いずれの場合も繰り返し周期 300msec で連続運転を行うとともに 10 分毎に温度モニタリングを行い、温度差が 150°C に到達すると本体保護動作が働いて自動的に運転が停止される。印加電圧が高くなるにしたがって温度上昇率も高くなるのがわかる。なお、TDC運転開始時における初期温度差が3つの条件で異なるのはそれまでの運転履歴によるもので本質的な意味はない。

Fig. 15をもとに、空心変流器コイル印加電圧と連続TDC運転可能時間の関係をまとめた結果をFig. 16に示す。横軸は空心変流器コイルの印加電圧を、縦軸はTDC連続運転可能時間を示している。横軸には、空心変流器コイルの印加電圧と対応している真空容器への平均誘起電流、ベローズへの平均熱入力もあわせて示されている。Fig. 15に示されている場合ではTDC運転開始時にすでにいくらかの初期温度差がついているが、Fig.16では初期温度差がないものと仮定した。空心変流器コイルの印加電圧が3つのケースしかデータがなく詳細な議論は難しいが、おおむね真空容器への平均誘起電流が 4.5kA 以下、ベローズでの平均熱入力が 30kW 以下であれば 10 時間程度の連続通電が可能である。

なお、TDCとの比較のためにSPDC運転時における真空容器ベローズ(#1ベローズ)の温度変化をFig. 17に示す。Fig. 14と同様、横軸は時間であり太線で示した時間だけSPDC運転(空心変流器コイル充電電圧 25kV 、繰り返し周期 4sec)を行ったことを示す。縦軸は温度であり、図中に記したA~D点に設置されている熱電対による測定点を○印で示し実線はそれらを結んだものである。トロイダル方向およびポロイダル方向の温度分布の傾向はTDC運転の場合とよく一致している。また、温度上昇率はTDC運転より小さく、現実的な範囲で連続運転を行っても問題ないと考えられる。

真空容器ベローズと同様、磁気リミタキャンのベローズにも放電洗浄運転時に誘導電流による発熱がある。キャンのベローズの温度上昇率は真空容器ベローズの平均温度上昇率と同程度であり、真空容器ベローズの温度差が許容値以下であれば問題ないと思われる。

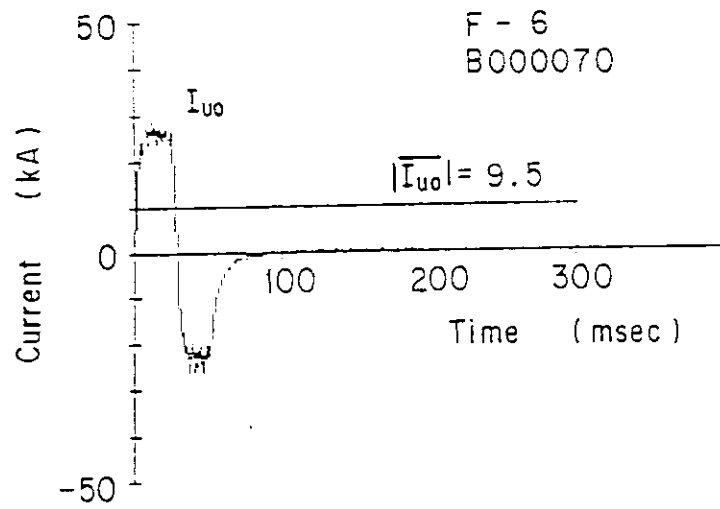
Table 4 Summary of mechanical and thermal data obtained in poloidal field coil excitation tests. Strain and deflection were measured at poloidal field coil support structure for F, V, H, Q and at vacuum vessel support arm for M, MI.

Coil	Operation mode	Test No.	Current (kA)	Coolant temperature rise (°C)		Strain (μ)		Displacement (mm)	
				Meas.	Des.	Meas.	Des.	Meas.	Des.
F	TDC	F-6	8.0	1	1	0	0	0	0
	SPDC	F-7	10.4	1	1	0	0	0	0
V	PD	F-14	91.7	5	9	95	50	0.8	1.0
	TDC•SPDC	F-13	5.8	20	31	0	0	0	0
H	PD	F-8	57.5	25	38	32	50	-1.0	-2.0
	TDC•SPDC	F-13	2.0	8	17	0	0	0	0
Q	PD	F-9	20.0	10	26	0	0	0	0
	TDC•SPDC	F-13	2.5	8	19	0	0	0	0
M	PD	F-10	25.0	12	33	0	0	0	0
	TDC•SPDC	F-13	9.4	24	25	0	0	0	0
MI	PD	F-11	94.4	22	32	0	0	0	0
	PD	F-12	60.0	8	13	0	0	0	0

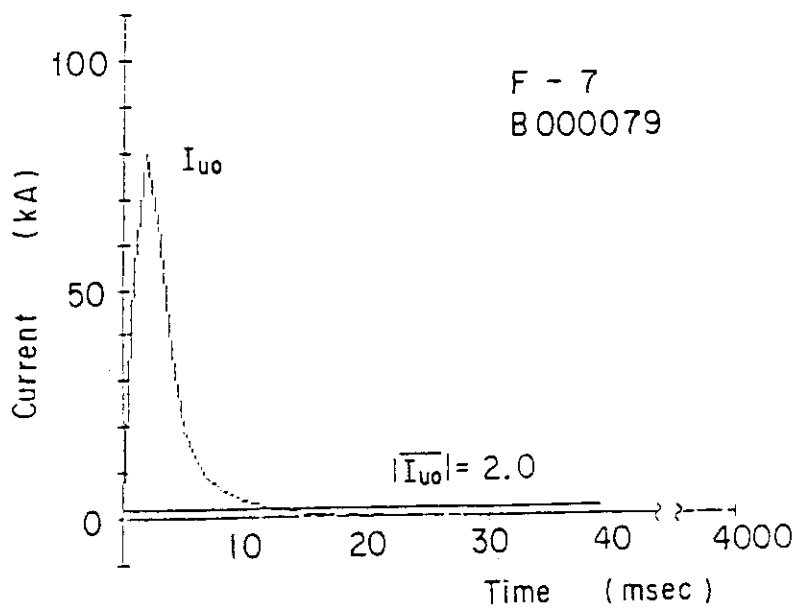
TDC : Taylor Discharge Cleaning operation mode

SPDC: Short Pulse Discharge Cleaning operation mode

PD : Plasma Discharge operation mode



(a) TDC



(b) SPDC

Fig. 13 Time behavior of loop current induced in vacuum vessel during (a) TDC (ohmic heating coil terminal voltage $V_F = 2.0$ kV and repetition time $\tau = 300$ msec) and (b) SPDC ($V_F = 25$ kV and $\tau = 4$ sec) operations.

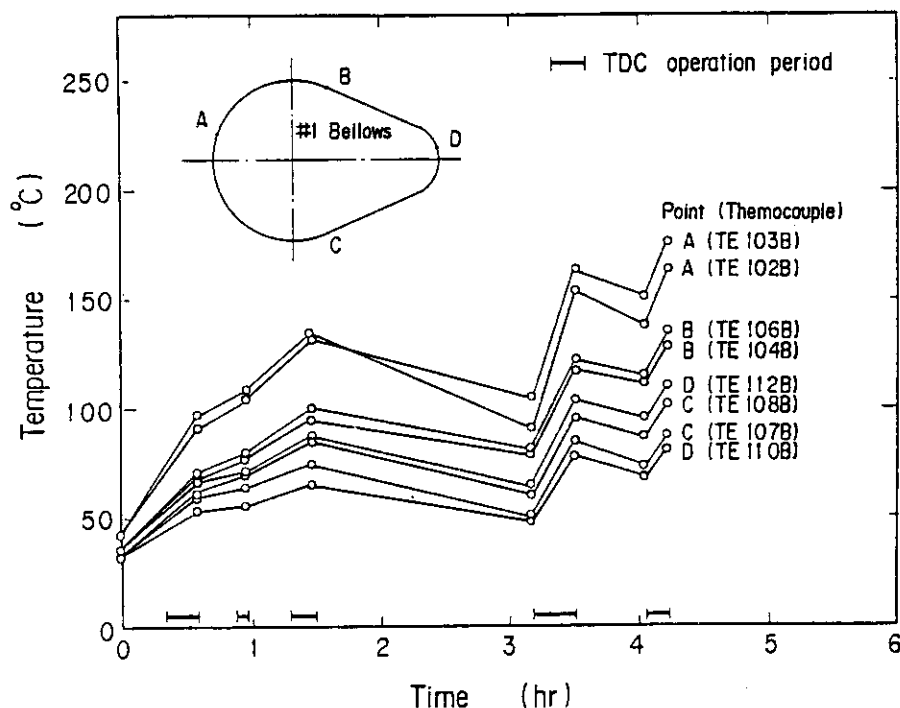


Fig. 14 Time history of typical vacuum vessel bellows temperature during intermittent TDC operation. Location of thermocouples is indicated in the figure.

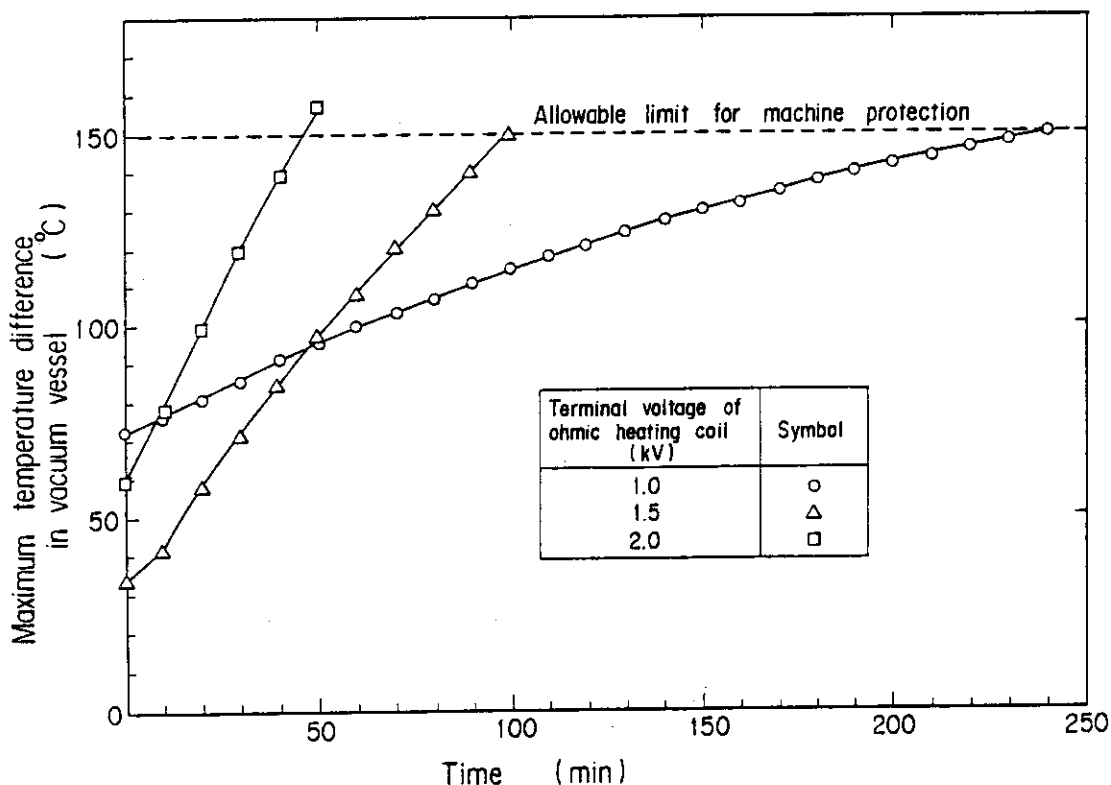


Fig. 15 Time history of maximum temperature difference in vacuum vessel during continuous TDC operation with parameter of ohmic heating coil terminal voltage. Temperature difference is limited less than 150°C to avoid excessive thermal stress in vacuum vessel bellows.

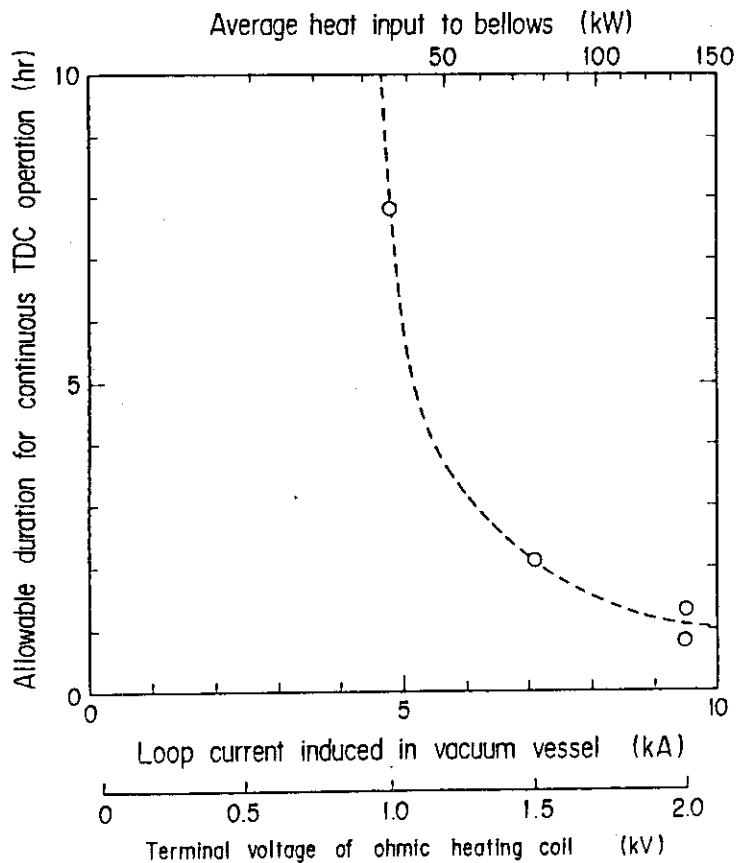


Fig. 16 Relation between ohmic heating coil terminal voltage and allowable duration for continuous TDC operation. Abscissa also represents average loop current induced in vacuum vessel and average heat input to vacuum vessel bellows. Blank circles indicate measured values shown in Figs. 6 and 7 and broken line is their best-fit-curve.

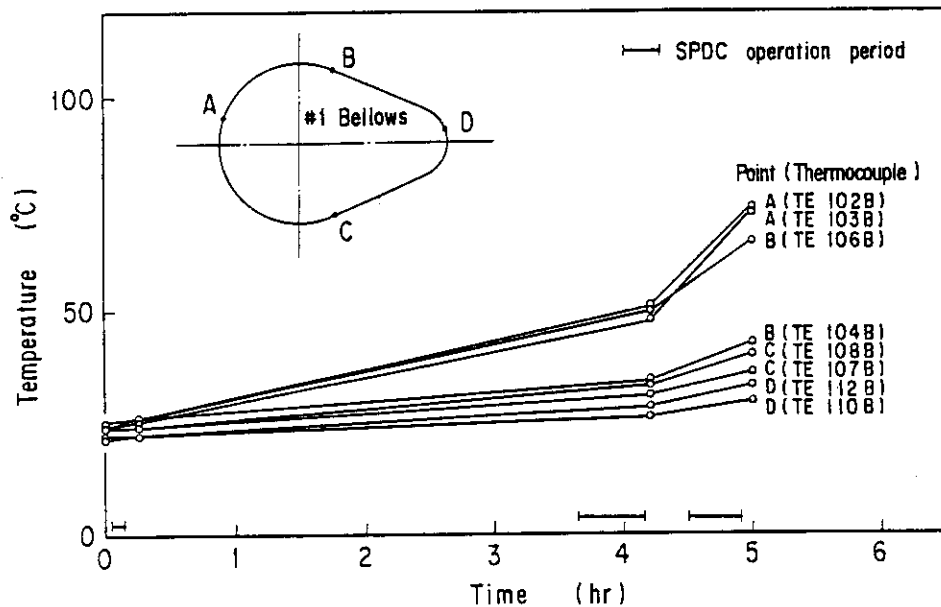


Fig. 17 Time history of typical vacuum vessel bellows temperature during intermittent SPDC operation. Locations of thermocouples are listed in the figure

4. TFコイルとPFコイルとの複合通電

4.1 複合通電時のコイル通電波形と代表的な歪応答

複合通電時には、真空容器中にガスを導入しないだけで、その他の条件はプラズマ放電運転と同一である。TFコイルおよび全てのPFコイルを最大定格で運転したショットの放電管理系データの一例をFig. 18に示す。同図左は代表的なコイルの通電波形（上よりTFコイル、空心変流器コイル、垂直磁場コイル）であり、右側は代表的な部位の歪データの時間変化を示している。横軸はいずれもsec単位の時間であり、各グラフ毎にその時間目盛が書き込まれている。時間は、空心変流器コイルの遮断開始時を基準（ $t = 0$ sec）としている。また、縦軸はコイル電流（単位A）もしくは歪（ $\times 10^{-6}$ ）であり、各グラフ毎にその目盛りの最大値と最小値がグラフの左側に書き込まれている。各グラフには2種類のデータが書き込まれており、実線（グラフ中(1)と表示）と破線（同(2)と表示）で区別するとともに、どういう物理量を表示しているかが各グラフの下段に記入されている。ここでTM STRESS (5)と(6)はTFコイル補強枠、同(1), (2)はTFコイルスペーサ、同(43), (44)はPFコイルサポート、同(47), (48)は上、下架台の歪を表わしている。

TFコイル電流は $t = -30$ secから立ち上がり、 $t = 0$ から5 sec間フラット・トップ52.1 kAを保った後、コイルの時定数にしたがって減衰する。空心変流器コイル電流は、 $t = -2$ secで立ち上がり、 $t = 0$ で最大値92.0 kAに達すると遮断を開始する。遮断後コイル電流が0に達すると、さらに-46.4 kAまで逆向きに電流を流し磁束変化をかせいでいる。垂直磁場コイル電流は $t = -2$ secから $t = 0$ まで-8.7 kAまで逆側に流しておいた後 $t = 0$ から1 sec間で57.5 kAまで立ち上げる。この2種のPFコイルについてもフラット・トップは5 sec間であり、磁場の極性は電流の符号が逆の時に同一である。

このように $t = 0 \sim 1$ secを境に空心変流器コイルによる磁場の極性が反転するうえに、垂直磁場コイルの磁場が重畳されるため、構造物の挙動もこのタイミングで反転する。Fig. 18からもわかるように、各コンポーネントの歪も $t = 0 \sim 1$ secで符号が反転している。ただし、TFコイル電流は $t = -30$ secから立ち上げられているため、TFコイル補強枠の歪には $t = -2$ secにおいてすでに120 μ 程度の大きな熱歪が作用しており以後の歪値もこの分が重畳されている。

4.2 TFコイル転倒力の支持

TFコイルとPFコイルの複合通電時における最大の電磁力はTFコイルの転倒力であり、全コイルの最大定格運転（プラズマ不着火）時においてその値は140 MN・mである。JT-60本体では、このモーメントを上架台、星形トラスを介して建家側壁で支持する構造をとっている。Fig. 3に示すように上架台、星形トラス、建家側壁の各連結部はピン結合であり上架

台の回転変位を許容する構造である。したがって、この上架台の回転変位に着目してTFコイルの転倒モーメントの支持状態を検討した。

Fig. 19に複合同電時の上架台の面内回転変位の測定結果を示す。ここで、横軸 f は様々なコイル通電条件における電磁力の大きさの目安を表わすパラメータである。すなわち、上架台の回転変位は垂直磁束とTFコイル電流の積に比例する。また、垂直磁束に寄与するのは主に垂直磁場コイルと空心変流器コイルが作る磁束であり、その比は定格電流においておおむね3:1である。また、水平磁場コイル、四重極磁場コイル、磁気リミタコイルの寄与ははるかに小さいため無視し得る。そこで、垂直磁場コイル、空心変流器コイルおよびTFコイルの通電電流値の定格に対する割合を、各々 V 、 F および T とすると、次式で表示されるパラメータ f

$$f \equiv T \times \frac{F + 3V}{4} \quad (2)$$

はある通電電流条件における電磁力の大きさを定格に対する比率で表わす。

Fig. 19に示す○印はトランシットによる実測値であり、実線は設計値を表わす。これからわかるように、実測値と設計値とは非常によい一致を示しており、それらの差はおおむね±0.5 mm以下である。

一方、Fig. 20には上記転倒モーメントを支持している星形トラスに発生する歪の実測値を示している。Fig. 19と同様に、横軸は様々な通電条件における電磁力の大きさを表わすパラメータ f であり、縦軸は星形トラスの歪を示す。また、○印はFig. 20中の平面図に示す2ヶ所に設置した歪ゲージによる実測値であり、実線は設計値を示す。Fig. 20においても設計値と実測値とはよい一致を示している。また、Fig. 21には、上架台回転変位時に上架台アーム付け根部に生じる曲げ歪の電磁力パラメータ f に対する依存性を示す。実測値は設計値を下回り、そのずれ量は最大約40%と比較的大きい（原因は歪ゲージの貼付位置の寸法効果などが考えられるが定量的には不明である）が f に対しては良好な線形性を有している。以上Fig. 19, 20, 21より、TFコイルの転倒力の支持はおおむね設計通りなされており、かつ力の流れも滑らかであるものと判断される。

4.3 上架台変位異常検出用リミット・スイッチ部の変位

リミット・スイッチは、P-1およびP-10セクションの上架台アーム部のほぼ中央に位置して設置されており、上架台の回転変位が異常に大きくなった場合に本体保護インター・ロックを作動して、本体コイルへの通電を中止する働きを有している。上架台の回転変位測定と同様にして、上架台変位異常検出用リミット・スイッチ部の変位を調べた結果をFig. 22にまとめる。

Fig. 22では、図中に示すリミット・スイッチ部の変位をFig. 19同様に電磁力パラメータ f で整理している。この場合も実測値と設計値とはよい一致を示し、その差は±0.5 mm以下である。

なお、本体保護インター・ロック項目としての「本体架台変位異常」の警報は3.3 mmと仮設定してあったが、通電試験時には定格運転条件（全コイル定格運転， $f = 1$ ，設計変位値は2.4 mm）において警報が発生している。これは以下の原因による。

変位異常検出用リミット・スイッチの接点は連結アーム・スタンドからビームにより約1.2 m上部に張り出した位置に設けられている。一方、真空容器に作用する鞍形電磁力（真空容器表面を鞍形状に流れる渦電流とトロイダル磁束との相互作用による電磁力）により連結アーム・スタンドをはさむ両側の真空容器支持アームは通電時に上下逆相に変位し、連結アーム・スタンド上面で傾きが生じる。この傾きは微小であるにもかかわらず、レバー比の効果によりリミット・スイッチ部では最大約1 mmの変位となる。そのため上架台アーム部そのものの変位にこの変位が重畳される結果としてリミット・スイッチが接点をたたく場合が生じるものと考えられる。連結アーム・スタンドの傾きを避けることは難しく、かつリミット・スイッチを支持する適当な固定系も他にないため、「本体架台変位異常」の保護設定値を変更し、3.9 mmとすることで対処するものとする。

4.4 水平ポート先端のゲート弁の振動

プラズマ計測，第2段加熱，真空排気などの目的で真空容器には計182本ものポートが設置されている。それらの大多数は真空容器との間にベローズを有し，真空容器の振動を吸収する構造をとっている。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾一方，計20本の小口径水平ポートはベローズを介さず直接真空容器に設置されており，かつそれらの先端には真空封じ切りのための全金属製ゲート弁が取り付けられている。複合通電時において，真空容器の振動に起因するこれらの水平ポートの振動が顕著であったため，それらのゲート弁に振動計ピック・アップを取り付けて振動測定を行った。

P14S1Uポートのゲート弁が通電時に受ける鉛直方向振動の最大加速度と最大変位をFig. 23にまとめる。本ポートの設置状態は同図中の真空容器断面図に示されている。真空容器の鉛直方向振動は主に鞍形電磁力に起因する。その大きさは前記4.2節と同様に垂直磁束の大きさとTFコイル電流の大きさの積に比例するため，様々な通電条件における電磁力の大きさを(2)式の f で整理している。縦軸は加速度および変位であり，○印および●印がそれらの実測値を表わす。

Fig. 23に示されるように，加速度，変位のいずれも f に比例して増加しており，定格運転（ $f = 1$ ）付近において最大値 48m/sec^2 ， 0.46mm が測定された。加速度 a ，変位 δ より，その系の固有振動数 f_{nat} は

$$f_{\text{nat}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{a / \delta} \quad (3)$$

で概算され，上記数値を用いるとP14S1Uのゲート弁の固有振動数51 Hzを得る。また，ピックアップからの振動データのチャート記録から直接読み取られた固有振動数は約43 Hzであり，読み取り誤差を考えると上記数値とよい一致を示す。

この水平ポートの振動の原因は以下の通り考えられる。P14S1Uポートは外径120 mm，

板厚 5 mm , 長さ 325 mm のインコネル 625 製円管であり、その固有振動数は約 200 Hz で十分剛であるから、ポート自身が励振をうけているとは考えられない。他方、真空容器 60°セクタモデルの固有値解析の結果によれば、鞍形電磁力に最もよく対応する真空容器の固有モードは固有振動数が 46 Hz (第 20 次モード) である。⁽¹²⁾ Fig. 24 にはこの固有モードのモード図を示す。この図からも明らかなように、46 Hz 近傍の周波数領域においては厚肉リングのポロイダル断面直線部の膜振動(つぶれ)が顕著である。実測された固有振動数がこの周波数領域に非常に近いことから、P14S1U ポートの振動はポート付け根の厚肉リングのポロイダル断面直線部の膜振動に起因しているものと考えられる。

(12)

本通電試験の定格運転時における真空容器の動的応答解析の結果を Fig. 25 に示す。横軸は空心変流器コイル遮断後の時間であり、縦軸は上から X, Y, Z 方向の変位 q_x , q_y , q_z を示している。解析は Fig. 24 に示すモデルを用いており、座標軸は Fig. 24 中に示されている。Fig. 25 図中の番号はモデルの節点番号を示しており、厚肉リング端部(ベローズとの境界)に相当する。ここで、鉛直方向変位成分の時刻歴 q_z をみると、全体的な挙動としては 10 Hz 程度のゆるやかな振動を示している(これはおおむね荷重の時間変化に一致しており準静的な振動である)が、微小の高周波成分が重畳されていることがわかる。この高周波成分は Fig. 24 に示された 46 Hz の固有モードであり、変位振幅は約 0.1 mm である。この変位は厚肉リングのポロイダル断面直線部におけるものであるが、P14S1U ポートのゲート弁はこの点から約 1.4 m 離れたポートの先端に取り付けられている。厚肉リングのポロイダル断面直線部の長さが約 1.2 m であるから、厚肉リングのポロイダル断面直線部中央での 0.1 mm の変位は P14S1U ポート先端においてレバー比の効果により $1.4 / 1.2 / 2 \approx 2.3$ 倍増幅されるものと考えられる。したがって、Fig. 25 の動的応答解析結果をもとに P14S1U ポート先端に生じる加速度を概算すると、 $0.1 \times 10^{-3} \times 2.3 \times (2\pi \times 46)^2 \approx 20 \text{ m/sec}^2$ である。この値は実測された最大加速度の約 1/2 である。この両者の差は固有振動数の計算誤差、直線部のつぶれ量の評価誤差、レバー比評価誤差などによるものと思われる。

Fig. 26 は同様にして P13S3U ポートに取り付けられているゲート弁の受ける加速度と変位を示している。加速度、変位とも電磁力パラメータ f に比例しており、それらの最大値は定格運転 ($f = 1$) においてそれぞれ $\sim 20 \text{ m/sec}^2$, $\sim 0.2 \text{ mm}$ である。これらの数値を、(3) 式に代入すると固有振動数はやはり 50 Hz 近傍である。P13S3U ポートは厚肉リング直線部よりやや内周側に付けられており、直線部の膜振動の影響が小さいため変位も比較的小さく、加速度も P14S1U ポートに比べて小さいものと考えられる。また、厚肉リング直線部よりやや内周側に付けられている P-13S4U ポートの受ける最大加速度は $\sim 15 \text{ m/sec}^2$ と P14S1U ポートより小さく、これらの数値からもサイドポート先端のゲート弁の振動に与える厚肉リングの膜振動の効果が明らかである。

なお、設計においては、厚肉リングに生じる最大加速度は 10 m/sec^2 (プラズマ立ち上げ時), 100 m/sec^2 (プラズマ異常消滅時、消滅時定数 1 msec) と評価されていたが、真空容器に直接取り付けられるゲート弁にはポートのレバー比の効果で増幅された加速度が作用することが明らかとなった。10⁴ サイクル程度の繰り返し疲労を考えれば、ゲート弁が所定の真空性能を保持できる加速度は高々 $20 \sim 30 \text{ m/sec}^2$ であり、⁽¹³⁾ 現実に本通電試験で 20

本の水平ポート用ゲート弁のうち8ヶに真空漏れが生じている（幸い、これらの漏れはボルトの増し締めで修復されたが）ことを考えると、ゲート弁の支持方法を変更するか、もしくはゲート弁自身の構造を変更することが必要であると思われる。また、プラズマ実験が開始されても当該部の振動をモニタしていくことも必要であろう。

4.5 真空容器支持系の振動

J T - 6 0 真空容器はその内部のトラス外周側に磁気リミタコイルを設けている。高温運転時における真空容器本体と磁気リミタコイルとの相対変位を可能な限り小さくするために、真空容器は Fig. 2 に示すようにトラス外周側より片持はり方式で支持されている。したがって、このままでは真空容器は鉛直方向に固定度の低い構造となるため、P F コイルサポートの一部に座を設け厚肉リングの各セクタ毎に1~2ヶ所の鉛直方向の支持（自重で接するのみ）をとり過度な振動を防止する構造をとっている。真空容器にはプラズマ立ち上げ時やプラズマ消滅時に大きな電磁力がパルスの作用し、真空容器やその支持系に振動を発生する原因となる。設計によれば、例えばプラズマ1 msec 消滅時にはループ電磁力（一周電流とポロイダル磁束との相互作用による電磁力）による求心力が真空容器全体で約8 MN、鞍形電磁力による厚肉リングの転倒力が60°セクタ1ヶ当たり約3 MN⁽¹⁴⁾である。特に鞍形電磁力は真空容器およびその支持系に与える影響が大きいいため、真空容器の最大応力もこの荷重条件で発生している⁽¹⁵⁾。

真空容器の振動は既に述べた通りであるが、ここでは真空容器支持系の振動データをまとめる。まず、Fig. 27は真空容器支持アームの鉛直方向加速度を電磁力パラメータ f で整理したものである。図中○印は厚肉リング60°セクタ用支持アーム（P-11セクション）、△印は同じく40°セクタ用支持アーム（P-12セクション）が各ショットにおいて受ける最大加速度を示している。いずれも外力 f に対して良好な線形性を示し、60°セクタで最大加速度が 17 m/sec^2 、40°セクタで最大加速度が 8 m/sec^2 である。また、Fig. 28には、厚肉リング#6セクタの固定端側支持アーム（P-12）と自由端側支持アーム（P-13）に設置したピック・アップからの信号を示す。(a)はショット番号F-18-10（TFコイル、空心変流器コイル、垂直磁場コイル、水平磁場コイル、四重極磁場コイルが各々76%、75%、75%、75%、50%）における鉛直方向変位の時間変化であり、(b)はショット番号F-18-45（同80%、80%、80%、80%、100%）における鉛直方向加速度の時間変化を示している。これからわかるように、 $t = 0 \text{ sec}$ （空心変流器コイル遮断、垂直磁場コイル立ち上げのタイミング）直後の振動は、変位、加速度ともP-12とP-13の支持アームで逆相となっており、このことから真空容器支持系の振動は鞍形電磁力により主に支配されていることがわかる。

振動記録チャートから読みとると、真空容器支持アームの鉛直方向振動に対する固有振動数は40°セクタ、60°セクタのいずれも約2.4 Hzであり、また同一条件（ショット番号F-18-10と11、通電条件は前述の通り）で測定した40°セクタ支持アームの鉛直方向変位0.19 mm、鉛直方向加速度 5.5 m/sec^2 より(3)式を用いて算出される固有振動数は2.7 Hz

である。一方、真空容器支持系の動的解析によれば、真空容器支持アームが鞍形モード的に逆相に振動するのは第8次モード(22Hz)、第14次モード(33Hz)⁽¹⁶⁾であり、測定値とほぼよい対応をみせている。

次に、真空容器支持柱の受ける加速度をFig. 29から31にまとめる。いずれもTC-12と呼ばれる支持柱上の連結アーム・スタンド(図中の挿入図に位置が示されている)の受ける最大加速度を電磁力パラメータ f で整理してあり、Fig. 29はトラス主半径方向、Fig. 30はトロイダル方向、Fig. 31は鉛直方向加速度を示している。これらより3方向とも最大約 3 m/sec^2 程度の加速度が生じていることがわかる。いずれも電磁力パラメータ f に対して線形性を有するが、鉛直成分を除いて実測値は設計値よりはるかに小さい。これは、設計においては各コンポーネントが剛結合であるとして動的解析を行っているのに対し、実際にははめ合い部、ピン結合部、ボルト結合部などがありエネルギーの散逸があることによるものと考えられる。

なお、プラズマ1 msec消滅時には本試験条件であるプラズマ不着火時を約1桁上回る加速度が作用するものと予想され、真空容器支持柱に直接取り付けられるコンポーネントはこの衝撃加振力を考慮に入れておくべきである。

4.6 その他の振動データの評価

コイル通電試験で得られた代表的な振動データをFig. 32に示す。これらはショット番号F-16-37(TFコイル、空心変流器コイル、垂直磁場コイル各100%通電)における加速度および変位の時刻歴データである。横軸は時間であり、空心変流器コイル遮断および垂直磁場コイル立ち上げのタイミングを $t=0$ としている。いずれも(a)はP14S1Uゲート弁の鉛直方向成分、(b)は同ゲート弁シリンダ部の鉛直方向成分、(c)は厚肉リング40°セクタ支持アーム(P-12)の鉛直方向成分、(d)は同トロイダル方向成分、(e)は厚肉リング60°セクタ支持アーム(P-11)の鉛直方向成分、(f)は同トロイダル方向成分、(g)はホール素子による磁場データである。JT-60そのものが急激に変化する大電力を使用する上に、定常的に微小振動の発生源となるコンポーネント(排気系のターボ分子ポンプなど)が周囲に存在するため、測定データは高周波成分のまわり込みが多く雑音レベルも高い。特に加速度データの(f)は雑音レベルが高く有意なデータとなっていない。また、(g)の磁場データはタイミング信号として用いている。

各コンポーネントは $t=0$ において衝撃的な電磁力に対応した振動を呈する。この振動は各コンポーネントの固有振動数に対応しているものと考えられる。一方、振動の減衰は比較的大きく、チャートから読み取られる減衰定数は3~10%程度であり通常の鋼構造物で期待される値1~2%⁽¹⁷⁾よりはるかに大きい。これはJT-60本体においてはボルト結合部が多いこと⁽¹⁸⁾以外に磁気減衰効果が効いているものと考えられる。

ところで、変位時刻歴をみると $t=0.5\text{ sec}$ 付近に約2 Hz程度のゆるやかな振動がみられる。これは各コンポーネントの振動データに共通であり、

- ① 固有振動数が2 Hzと低いコンポーネントは本体では考えられない。一方、コンクリー

ト系構造物の固有振動数はこの領域にあることが多い。

- ② チャートから読みとられる減衰定数は1.4～1.6%と非常に大きく、鋼構造物では考えられない数値である。
- ③ 実験棟建家の耐震解析において得られている建家の鉛直方向固有振動数は3.5 Hz と近い値を示している。⁽¹⁹⁾
- ④ ピック・アップその他の振動計測系に対する磁場の影響はないことが、原研所有の磁場較正装置にて確認されている。

などの理由から、建家床の振動とも考えられるが、2 Hz がピック・アップやアンプの積分器の使用可能周波数領域の下限（ピック・アップは1～8000 Hz，積分器は3～400 Hz）にあり信頼性に欠けるため、今後より低周波数領域に適用可能な振動計測系を用いて測定を行う必要があると考えられる。

真空容器支持系以外としては、転倒力により面内回転変位をおこす上架台、および上架台上に設置されている可動リミタ、半固定リミタの振動が注目された。Fig. 33には上架台の最外周部において、その面内回転変位時に生じる加速度を電磁力パラメータ f で整理して示している。上架台の加速度も f に対して線形性を示し、定格にて約 2 m/sec^2 の最大値をとる。上架台の面内回転振動の固有振動数は、チャートからの読み取りでは1.6～1.7 Hz であり、設計時の評価値1.8.7～2.1.9 Hz（TF コイル重量の寄与に不確定性があるため、前者ではその1/2を、後者では1/4を上架台が分担すると仮定している）とも良い一致を示している。また、プラズマ放電が開始されてから得られたスペーサの歪データ（通電番号E 000419、スペーサ歪TM STRESS (23))をFig. 34に示すが、これにおいてもプラズマ消滅後の $t = 1.5 \text{ sec}$ 付近から上架台の振動に起因するとみられる歪のゆらぎがみられるが、この振動の固有振動数が約2.2 Hz であり、前記の数値ともよい一致を示す。

可動リミタと半固定リミタは上架台上に設置される長尺の構造物であり、上架台の面内回転振動によりこれらがトロイダル方向に加振されるため過度な共振が懸念された。Fig. 35には半固定リミタが受けるトロイダル方向および鉛直方向の加速度を示す。いずれも電磁力パラメータ f に対する良好な線形性を有し、 $f = 1$ において最大値 4 m/sec^2 （鉛直方向）、 5 m/sec^2 （トロイダル方向）をとる。トロイダル方向には、上架台の加振力が2.5倍に増幅されているが構造的には妥当なものと考えられる。また、可動リミタは半固定リミタより長尺であり、片持梁構造に固有な逆位相振動（加振点の上架台と加振を受ける可動リミタが逆位相で振動する）が見られる。可動リミタの受ける最大加速度は上架台上面より約3mの位置にて 6.7 m/sec^2 と半固定リミタより大きく、減衰もやや遅いが過度な共振はみられなかった。

4.7 真空容器の振動に対する垂直磁場コイル立ち上げ速度の影響

プラズマ立ち上げ時において、垂直磁場コイル立ち上げ速度は0.1～1.0secの範囲で設定され、Fig. 18に示す波形で立ち上げられる。垂直磁場コイルの作る磁束は構造物を貫く全垂直磁束の主成分であり、その時間変化が早い程構造物の振動は顕著となる。Fig. 36には

真空容器の40°セクタを支持しているアーム（図中のP-12と示されているヶ所）の鉛直方向加速度に対する垂直磁場コイルの立ち上げ速度の影響が示されている。図中○印は実測値、破線は最小2乗法による実測値の最適直線である。なお、各々の実測点は各コイルの通電々流値が異なるため(2)式に示すf値にて規格化し、各コイルが定格電流値の場合に焼き直して整理している。

測定点にはばらつきが大きい、おおむね垂直磁場コイルの立ち上げ速度が短くなるに従って加速度は大きくなる。0.2sec立ち上げ時には1.0sec立ち上げ時の約2倍の加速度も測定されており、真空容器の振動が顕著になっていることがわかる。また、0.2sec立ち上げ時には前述の通り水平ポート用ゲート弁の多くから真空漏れが発生しており、ゲート弁のボルト締結部の増し締め対策を必要とした。さらに、致命的な真空もれには至らずとも、通電の瞬間に真空漏れの発生らしき真空度の低下がみられる場合もあり、本体保護や真空性能保持の観点からは1.0secより早い時間で垂直磁場コイルを立ち上げる運転は避けることが望ましいと考えられる。

4.8 磁気リミタコイルのフィーダの変位

P F コイルの各ブロックを連結するフィーダ（渡り線）は強大なトロイダル磁場を横切るため、T F コイルとP F コイルの複合通電時には当該部位に最大0.8 MN/mもの大きな電磁力が作用する。この場合、電流の向きが逆である巻き戻し線を設け、渡り線と一体化して固定することにより、逆方向に作用する両者の電磁力を可能な限り相殺し、内力として作用させる構造をとっている。しかし、

- ① コーナー部では、巻き戻し線と渡り線の電流パス長が異なる。
- ② 外部磁場に分布がある（トロイダル磁場の主半径方向勾配、トロイダル磁場のリップル、分布するポロイダル磁場）。

ことにより両者の電磁力にアンバランス成分が生じ、これが磁気リミタのフィーダの変位の原因となっている。

磁気リミタコイルのフィーダ部では、空間的な制約から支持点間隔が長いことや真空容器との相対変位を許す支持構造としているため、このアンバランス力による変位が大きくなり、コイル通電試験の途中段階においても8mm（T F コイルと磁気リミタコイルの電流値の定格に対する割合が0.76および0.6であり、他のP F コイルは全て0.75。後に示す磁気リミタコイルフィーダ部の電磁力パラメータ f_M が0.46という定格の約半分の条件）という設計の予想を上回る変位値を示したため、通電試験中に補強を追加した。

補強追加後の磁気リミタコイルフィーダの変位をFig. 37～39に示す。ここで、横軸 f_M は磁気リミタコイルフィーダ部に作用する電磁力の大きさの目安を与えるパラメータであり、T F コイルおよび磁気リミタコイルの通電電流値の定格に対する比率をT、Mとすると

$$f_M \equiv T \times M \quad (4)$$

で示される。ここでは、分布する外部磁場の中で主成分であるトロイダル磁場のみを考慮に入れ、寄与の小さいポロイダル磁場の効果は無視している。

Fig. 37は上側副磁気リミタコイル(MA), Fig. 38は主磁気リミタコイル(MB), Fig. 39は下側副磁気リミタコイル(MC)のフィーダの変位を示している。測定には多数のトランジットおよび絶縁スケールを用い、多くの個所の3成分変位(トロイダル方向, 主半径方向, 鉛直方向)を測定したが, Fig. 37~39はいずれも主半径~5.8 mの位置におけるトロイダル方向(図中○印)と主半径方向(図中△印)の変位を示している。また, 直線と破線は最少2乗法による各々の最適直線である。

トロイダル方向成分と主半径方向成分で最適曲線の形が異なる(前者は $y = ax + b$, 後者は $y = ax$ の形)のは以下の理由による。磁気リミタコイルのフィーダの支持方法は, トロイダル方向および鉛直方向にはギャップ(設計値2 mm, 設定誤差 ± 0.5 mm)を介して拘束条件であるが, 主半径方向には自由である(厳密には, 主半径方向にも耐電磁力用のストッパがあり, フィーダとのギャップは~2 mmであるが, 通電試験におけるフィーダの変位値から判断して自由支持としてほぼ問題ないと考えられる)。したがって, 主半径方向変位は電磁力パラメータ f_M に比例すると考えられる。一方, トロイダル方向には, ギャップがなくなるまではコイル自身の剛性で変位し, コイルが支持に接触してからはコイルと支持とを合わせた剛性で変位するものと考えられる。したがって, 荷重-変位直線の傾きは荷重の小さい領域と大きい領域とで異なり, 最適直線の縦軸切片は0とならない。補強を追加した後では f_M 値の小さい領域での試験が行なわれず, それらのデータがないため正確な変曲点は不明である。

Fig. 37~39からわかるように, MBのトロイダル成分にややばらつきが大きい点を除けばいずれのデータもおおむね f_M に対して線形性を有していることがわかる。変位はトロイダル成分が最も大きく, MAおよびMBで最大4.5 mmが観測された。トロイダル方向成分に比して主半径方向成分は小さく, またFig. 37~39には示されていないが鉛直方向成分も比較的小さい。

以上みたように, コイル通電試験の途中において磁気リミタコイルフィーダ部の変位が過大であることが判明し, 急拠補強を追加した。そのため, 変位は最大4.5 mmまで抑えることができたが, 限られた試験スケジュールや空間的な制約の厳しさから十分といえる補強は行えず, この部位の変位はプラズマ実験時においても継続して測定していくとともに, 補強の追加や変位モニタの設置を考慮する必要があると思われる。

JT-60 GD4 E000062

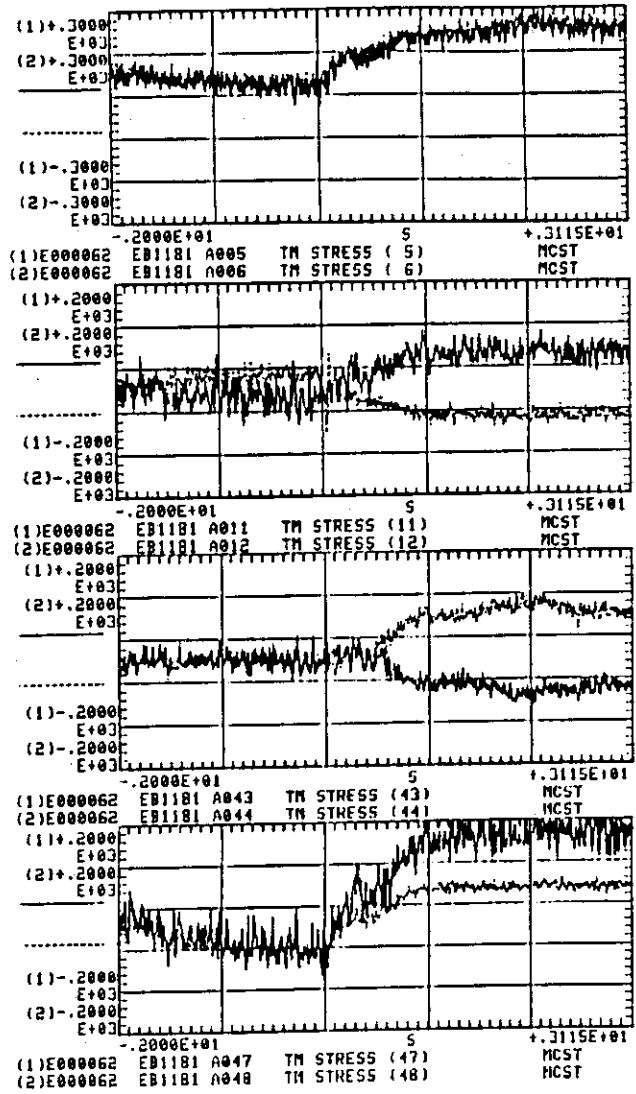
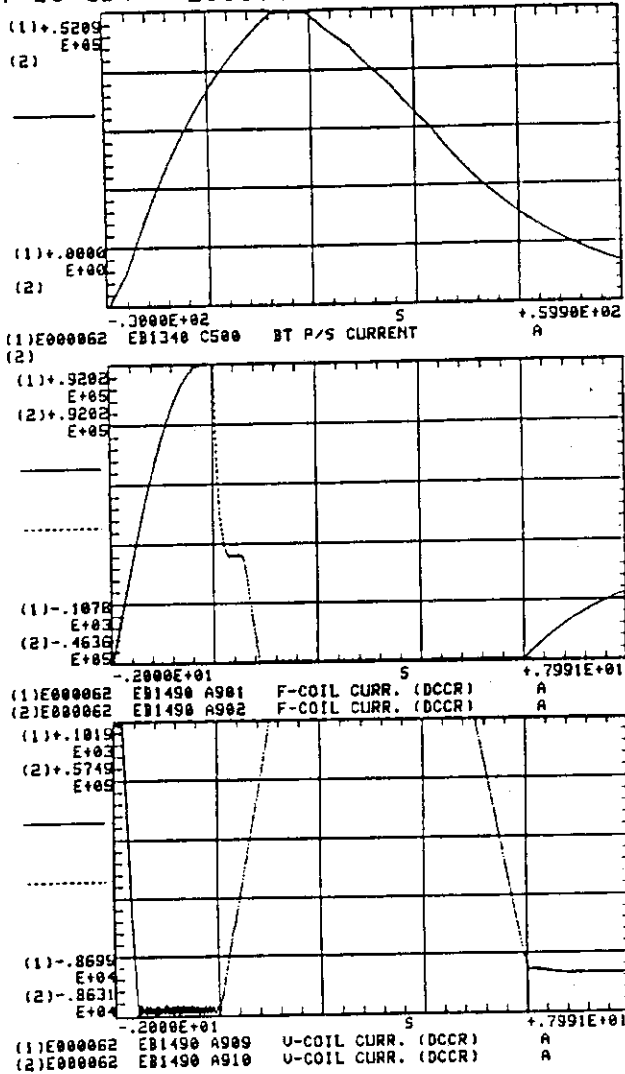


Fig. 18 Typical time behavior of coil currents (top left-toroidal field coil, middle left-ohmic heating coil, bottom left-vertical field coil) and strains (top right-toroidal field coil casing, second right-spacer, third right-poloidal field coil support, bottom right-upper and lower support structures) during full operation.

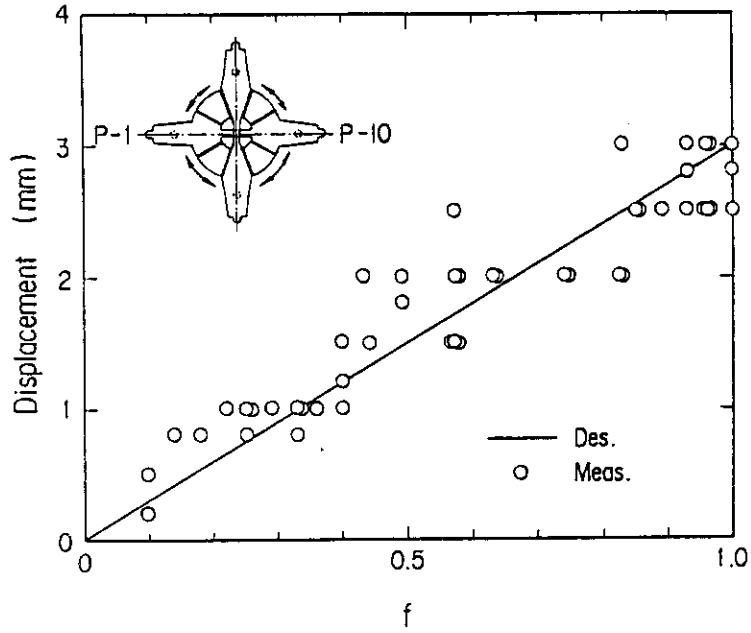


Fig. 19 Comparison between designed deflection of upper support structure and that measured by transit. Abscissa represents electromagnetic force parameter f defined by Eq. (2).

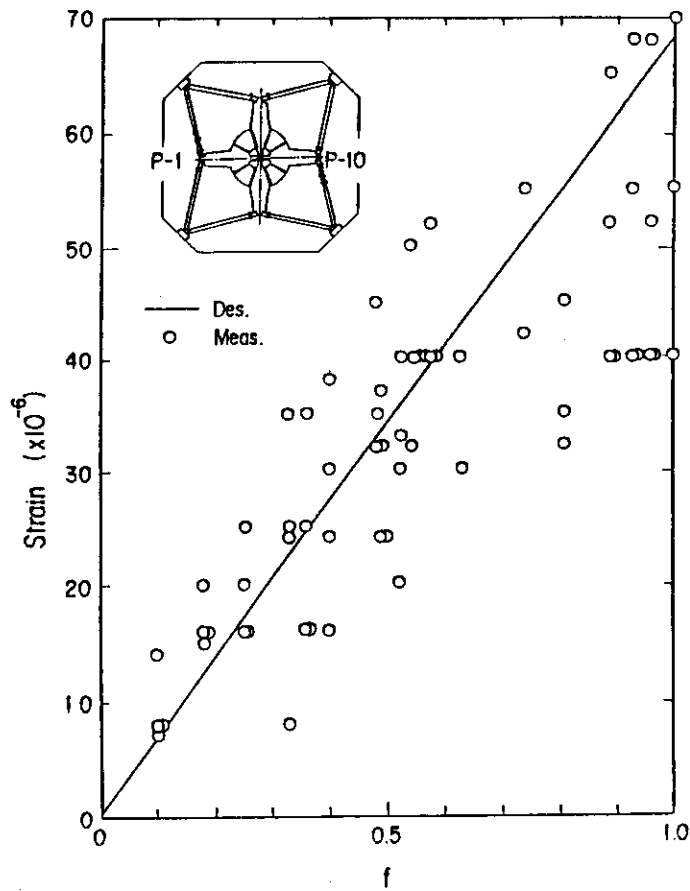


Fig. 20 Comparison between designed strain of star-shaped truss and measured one.

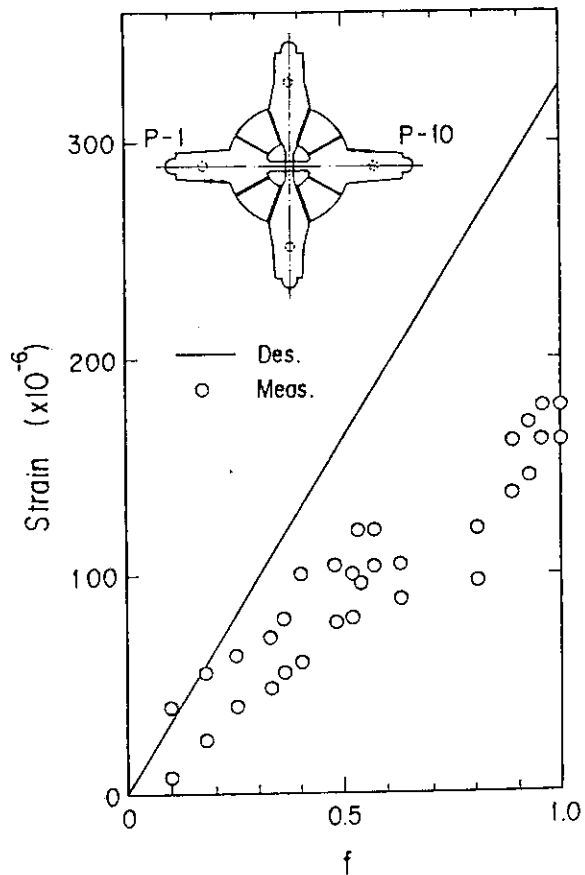


Fig. 21 Comparison between designed strain of upper support structure and measured one.

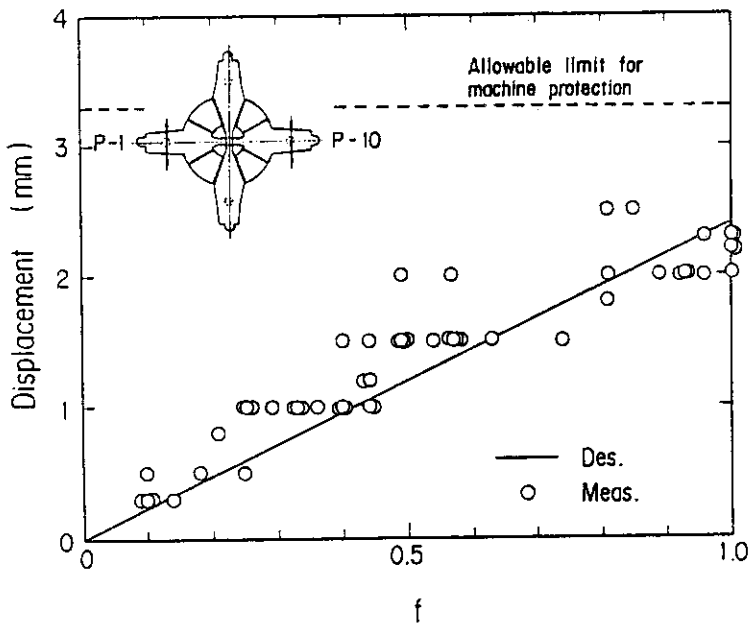


Fig. 22 Comparison between designed deflection of upper support structure and measured one at limit switch location shown in the figure.

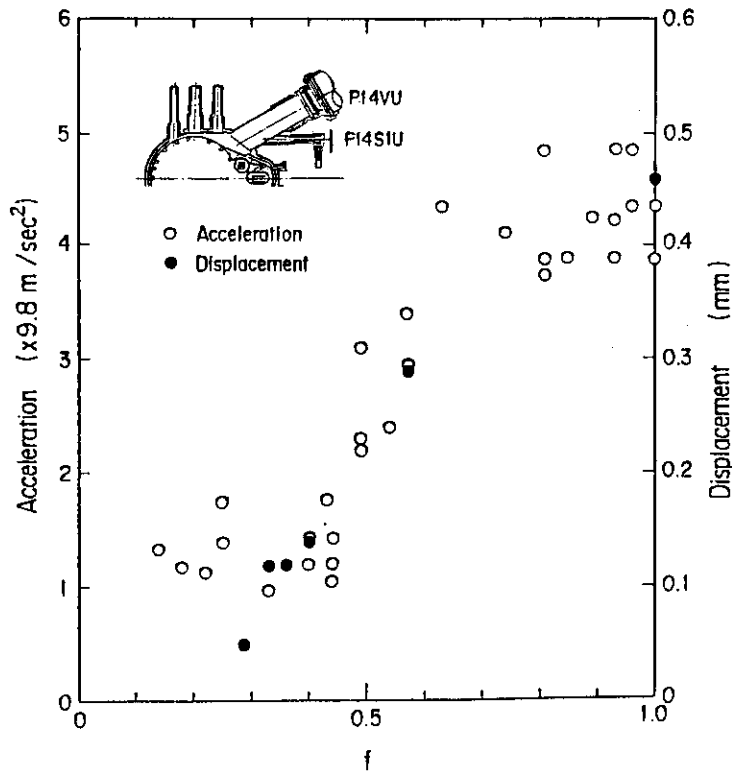


Fig. 23 Relation between acceleration and displacement of lateral port gate-valve named P14SIU and electromagnetic force parameter f .

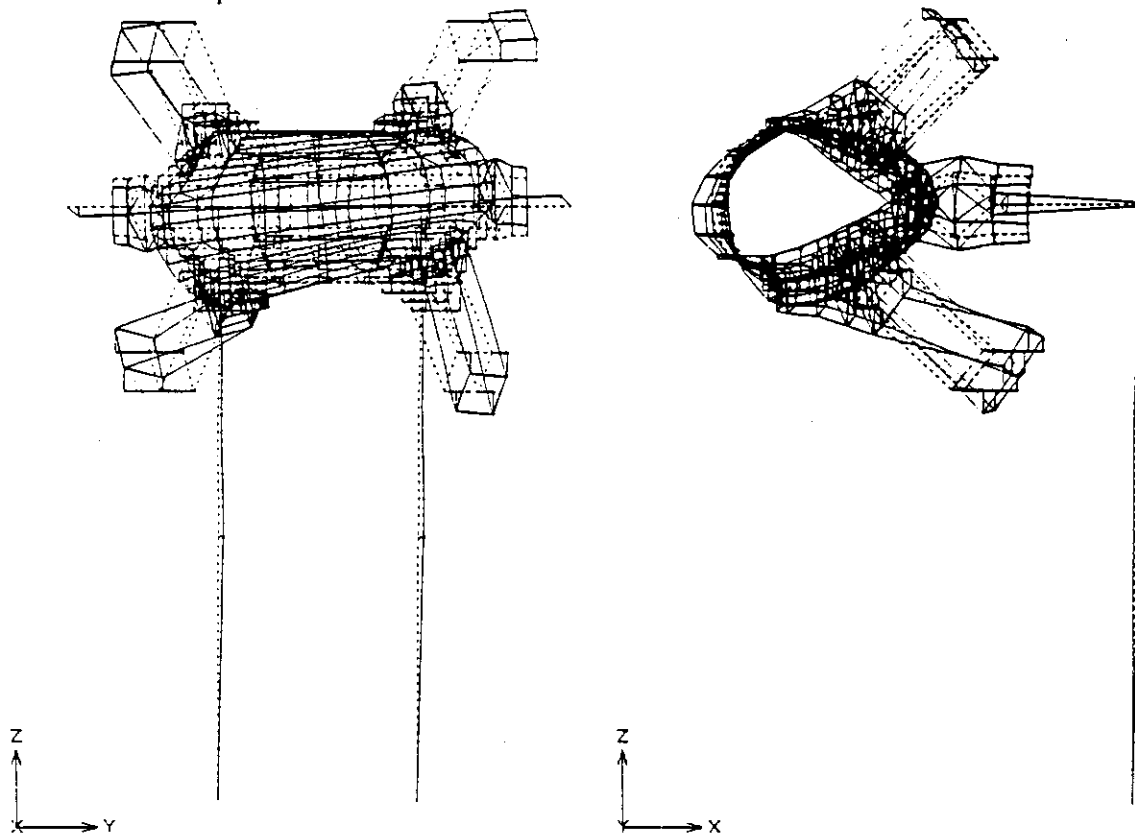


Fig. 24 20th eigenmode of 60°-sectorial rigid ring with natural frequency of 46.3 Hz, which was obtained in eigenvalue analysis of vacuum vessel and typically corresponds to motion of rigid ring under saddle-like electromagnetic force.

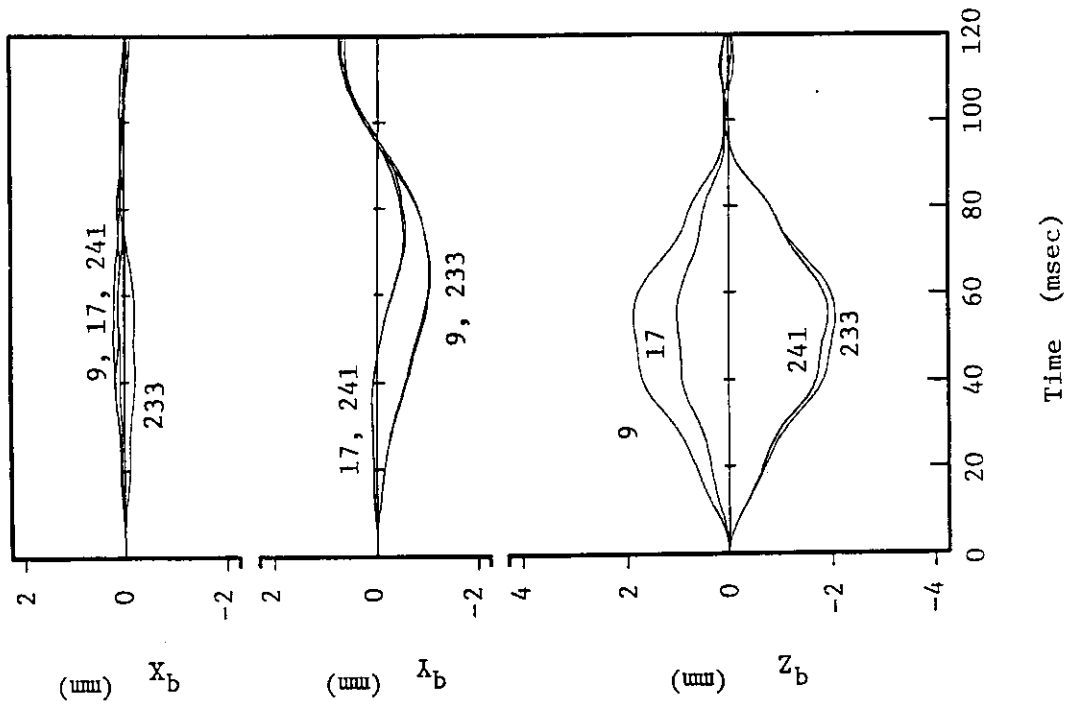


Fig. 25 Displacement revolutions of edge of rigid ring q_x, q_y, q_z under saddle-like electromagnetic force during start-up phase. Co-ordinates are shown in Fig. 13 and numbers 9, 17, 241 and 233 in this figure are those of nodal points.

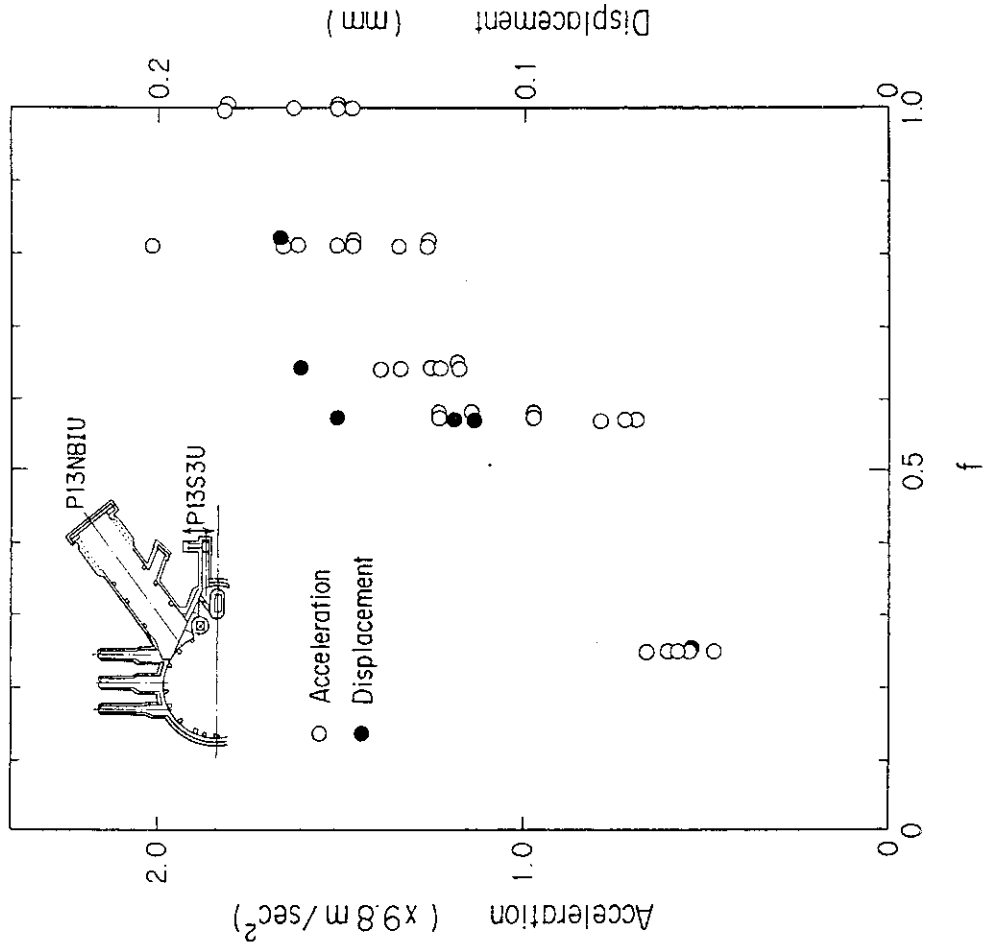


Fig. 26 Relation between acceleration and displacement of lateral port gate-valve named P13S3U and electromagnetic force parameter f .

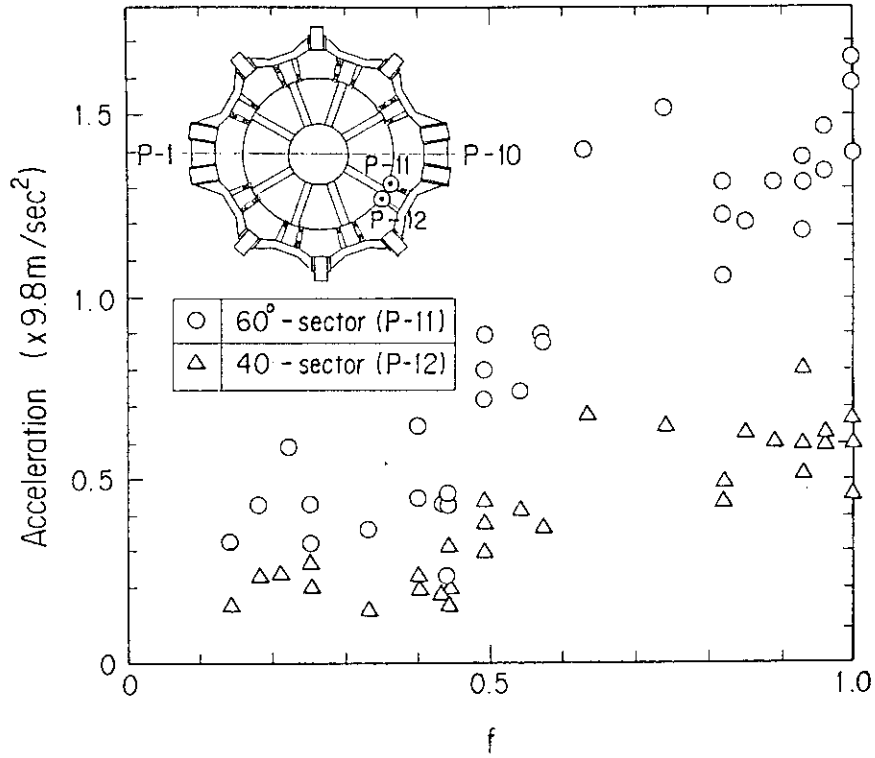
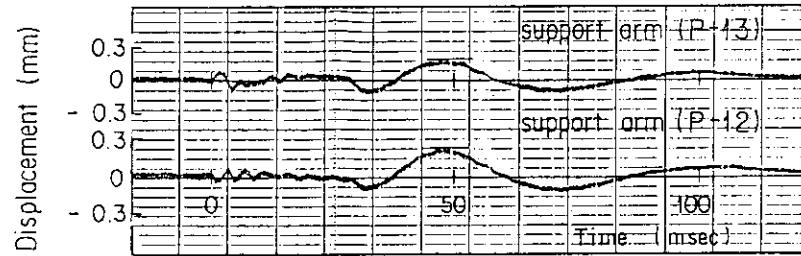
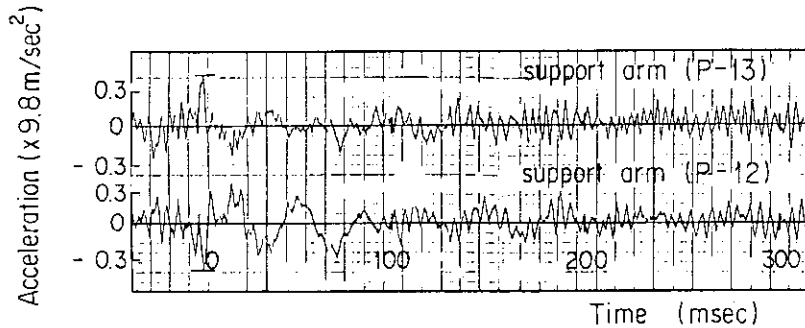


Fig. 27 Relation between acceleration of vacuum vessel support arms and electromagnetic force parameter f .



(a) Displacement revolution (F-18-10)



(b) Acceleration revolution (F-18-45)

Fig. 28 Time behavior of acceleration and displacement of vacuum vessel support arm.

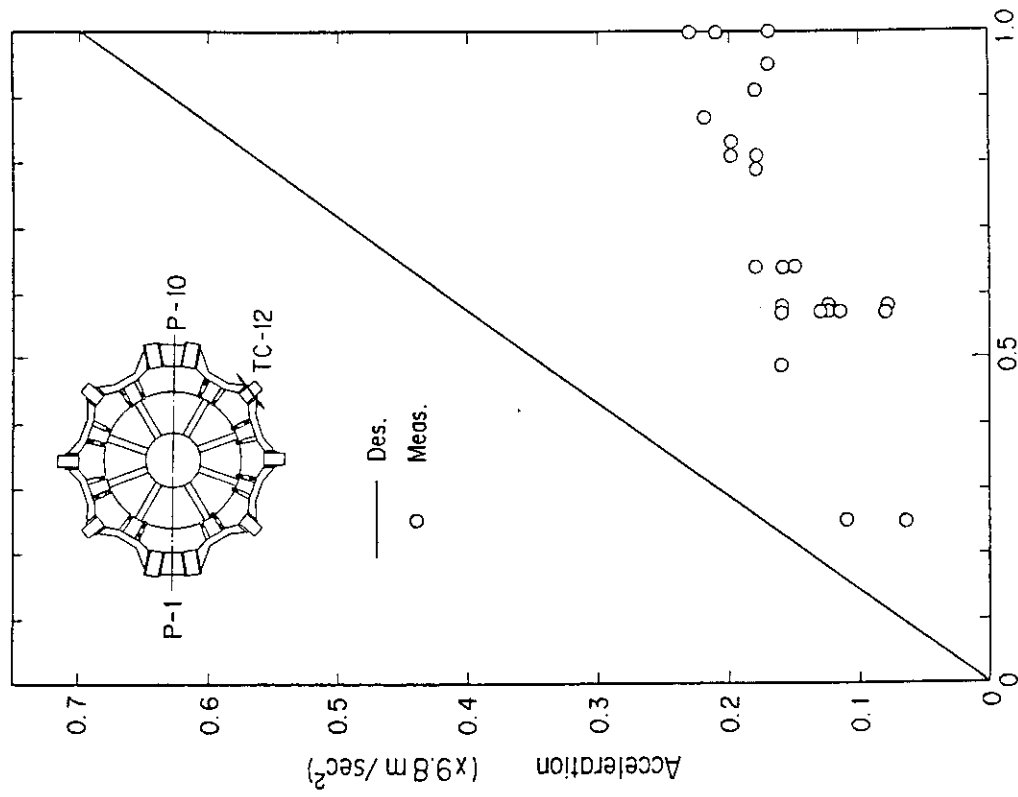


Fig. 29 Comparison between measured radial acceleration of vacuum vessel support column and designed one.

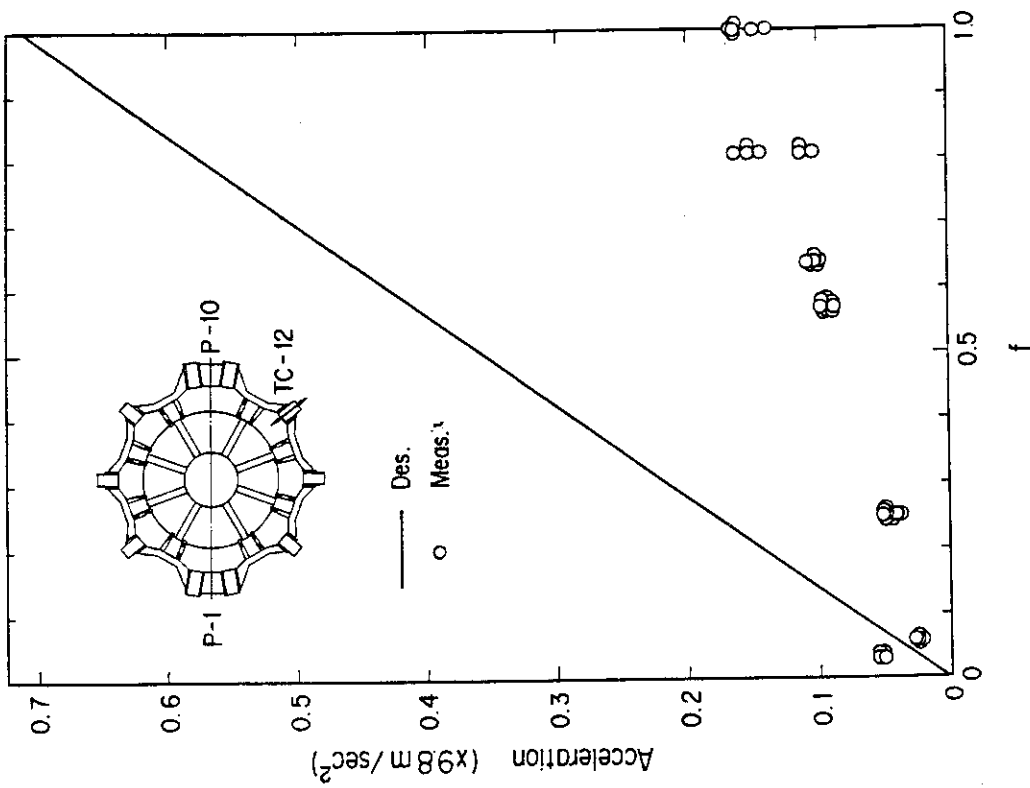


Fig. 30 Comparison between measured toroidal acceleration of vacuum vessel support column and designed one.

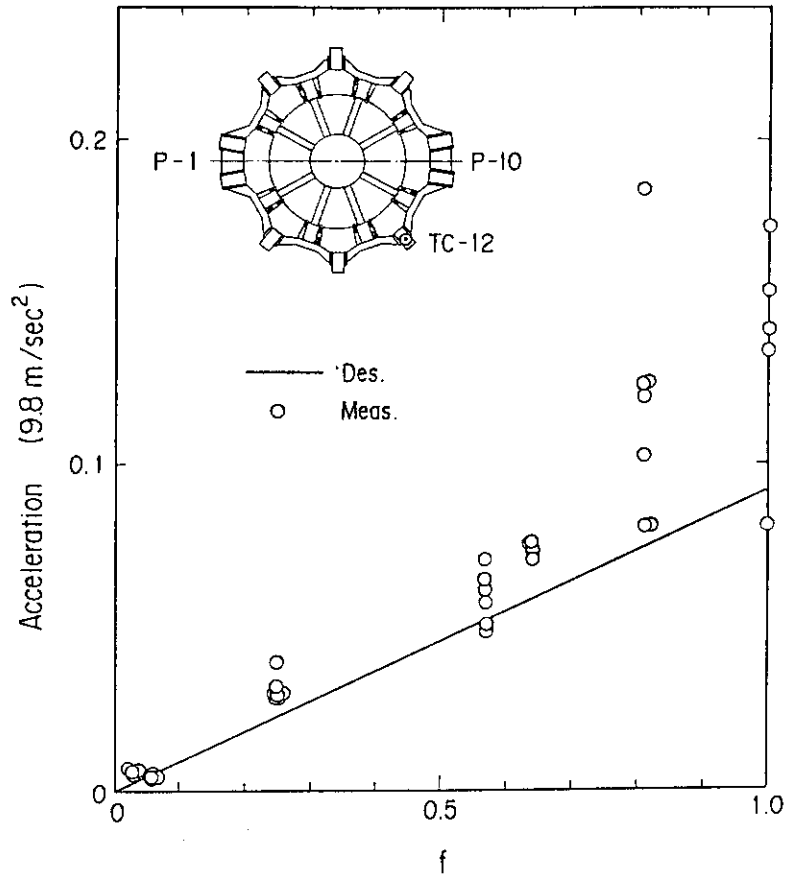


Fig. 31 Comparison between measured vertical acceleration of vacuum vessel support column and designed one.

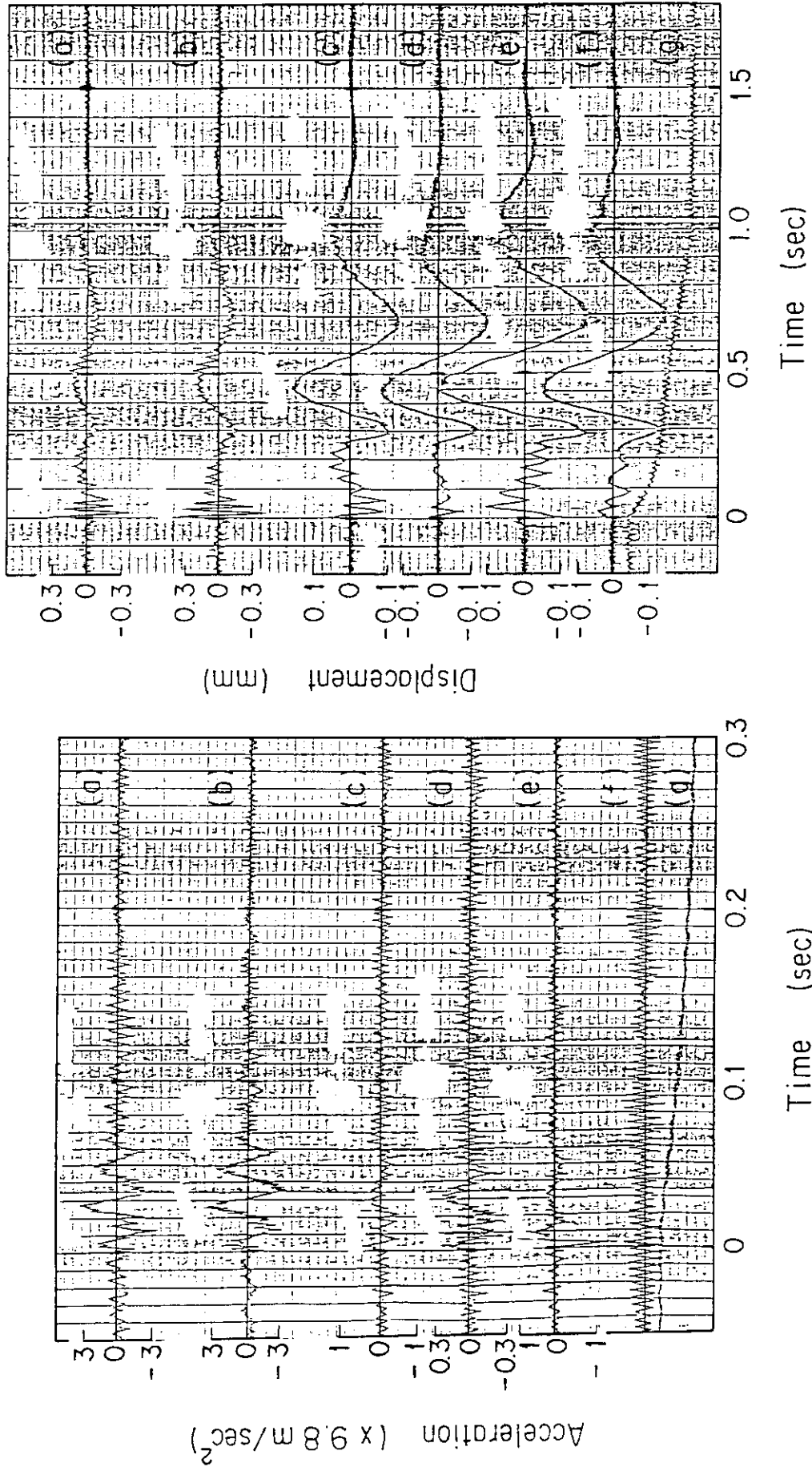


Fig. 32 Typical time behavior of acceleration and displacement of lateral port gate-valve and vacuum vessel support arms.

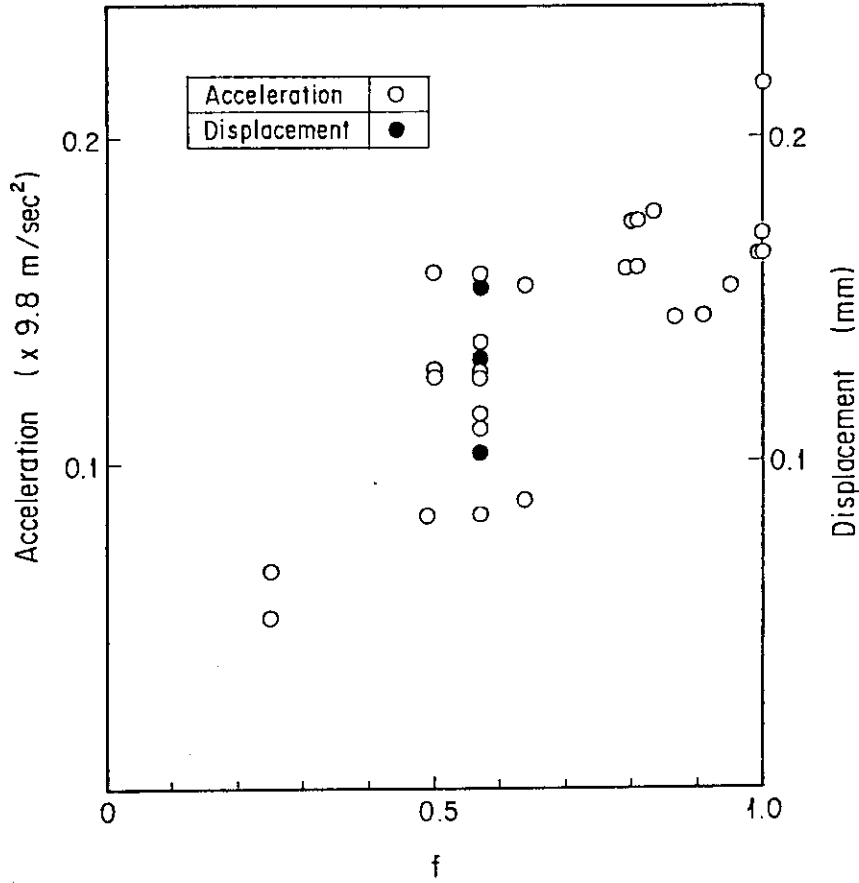


Fig. 33 Relation between toroidal acceleration of upper support structure and electromagnetic force parameter f.

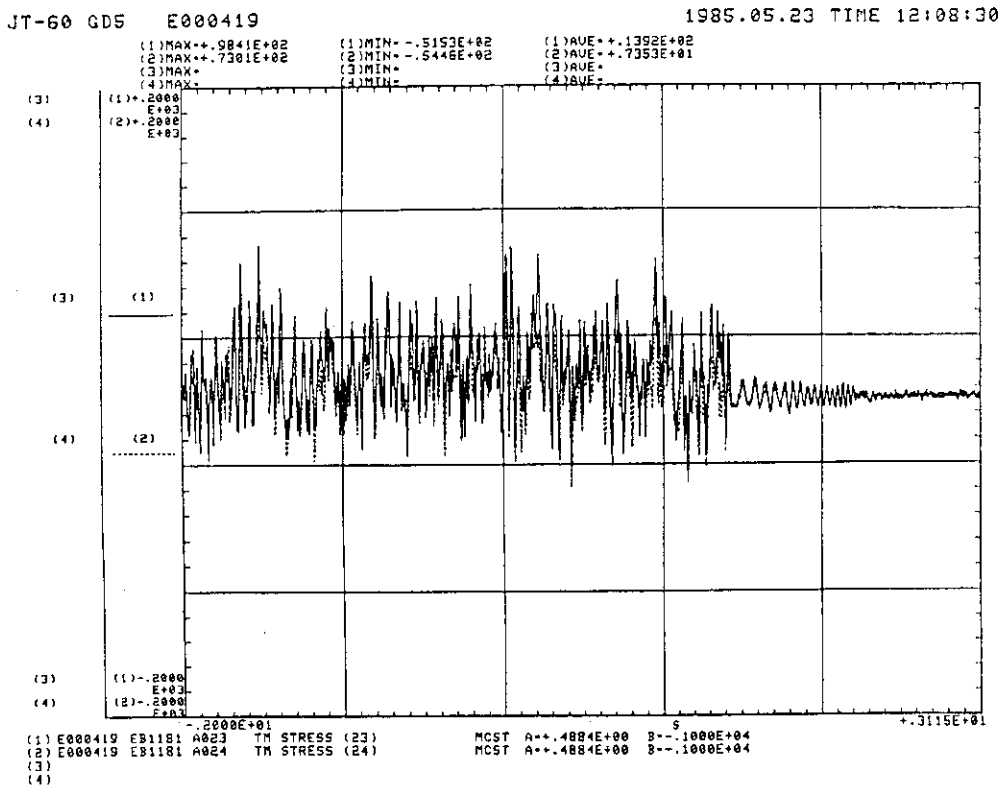


Fig. 34 Time behavior of strain of spacer during plasma discharge.

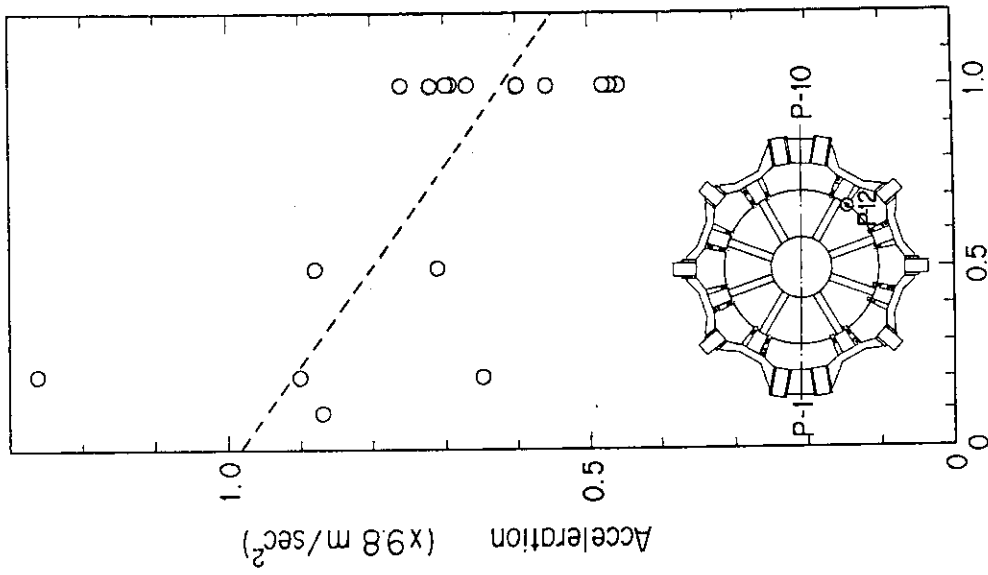


Fig. 36 Relation between acceleration of vacuum vessel support arm named P-12 and rising time constant of vertical field coil.

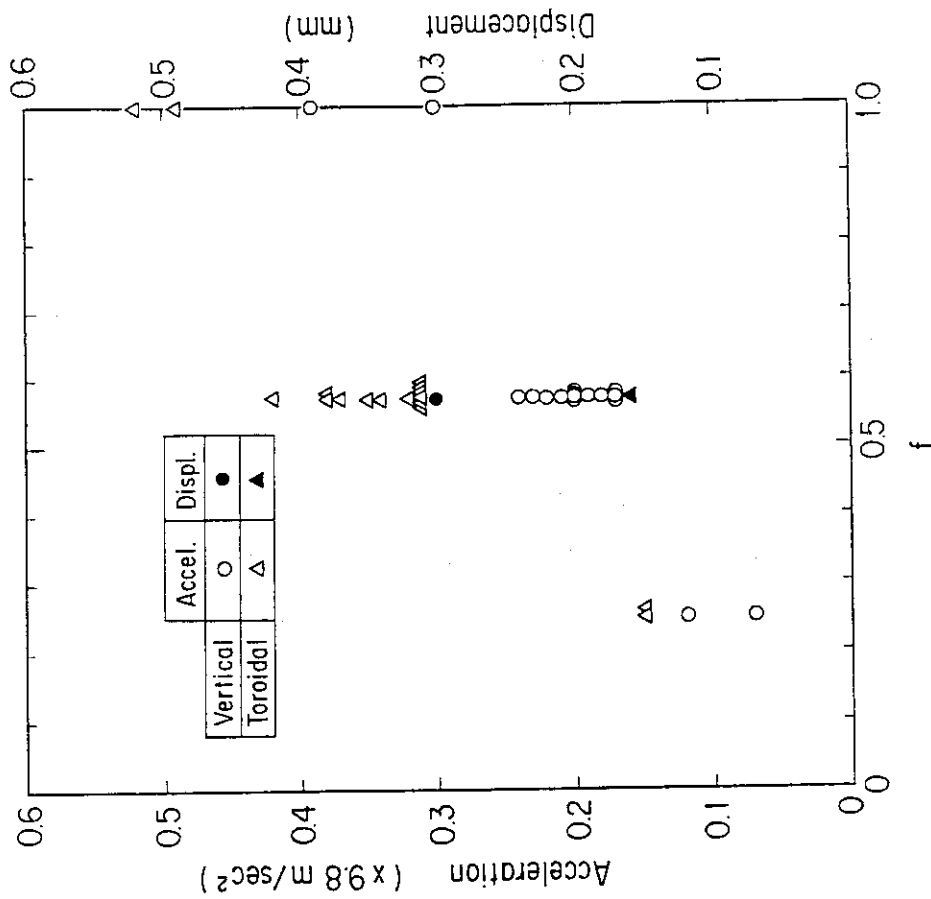


Fig. 35 Relation between acceleration and displacement of adjustable movable limiter and electromagnetic force parameter f.

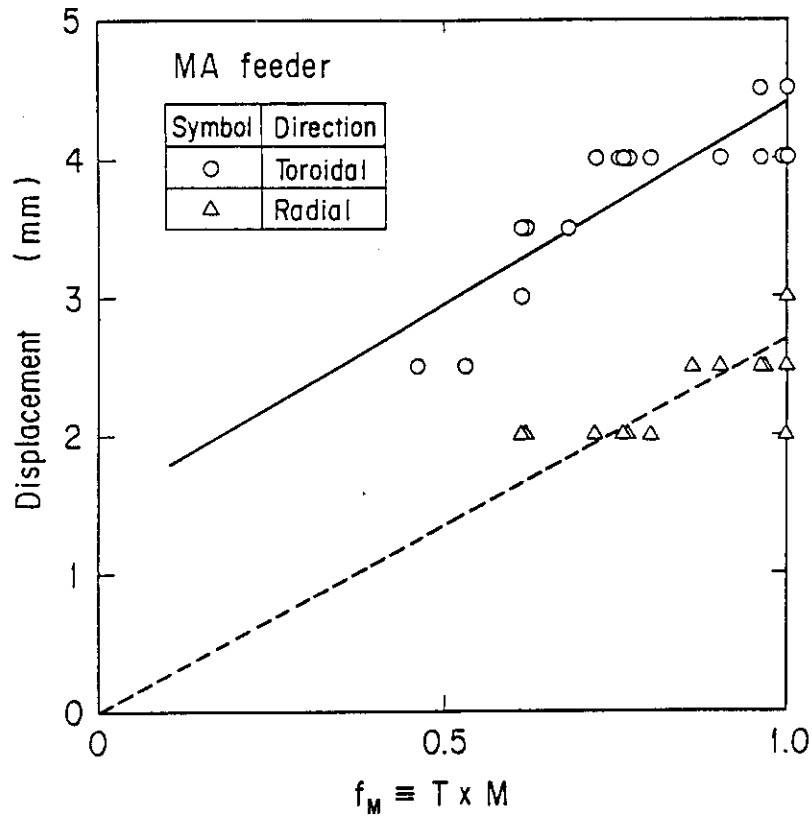


Fig. 37 Relation between displacement of upper sub-magnetic limiter coil (MA) feeder and electromagnetic force parameter f_M .

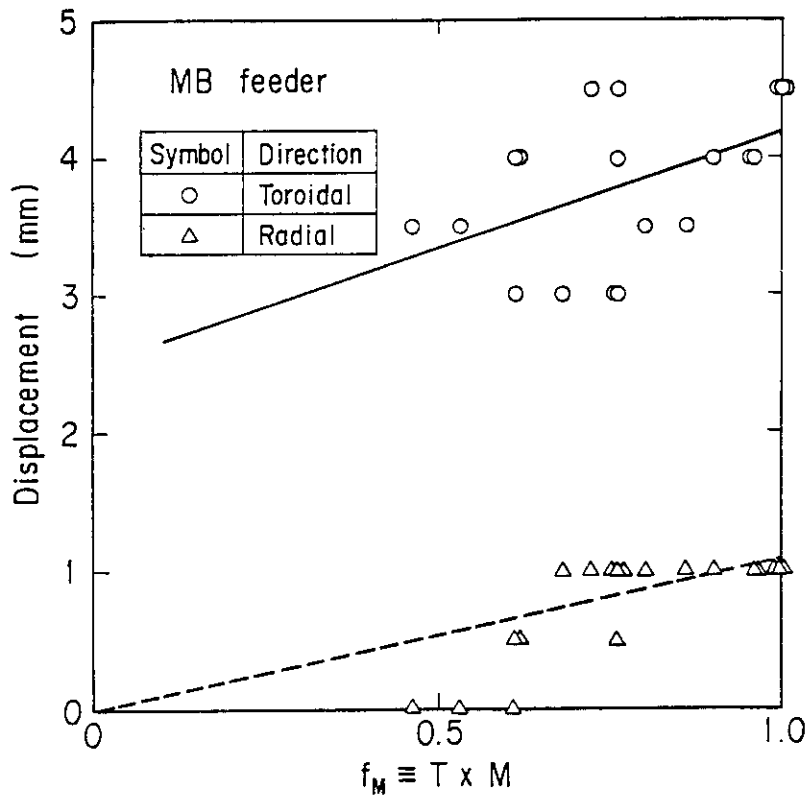


Fig. 38 Relation between displacement of main-magnetic limiter coil (MB) feeder and electromagnetic force parameter f_M .

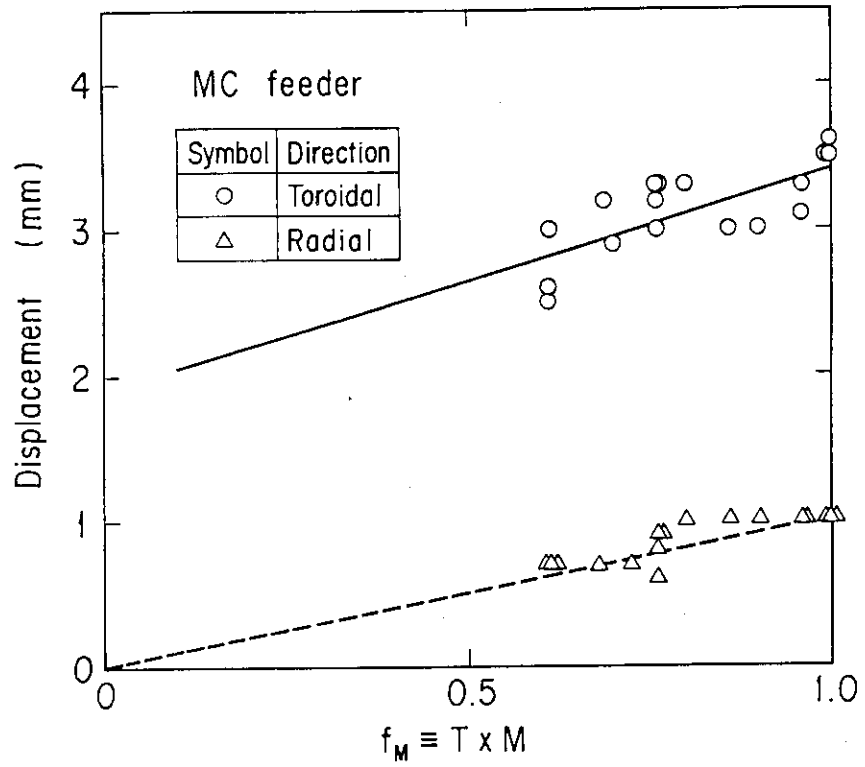


Fig. 39 Relation between displacement of lower sub-magnetic limiter coil (MC) feeder and electromagnetic force parameter f_M .

5. 結 論

日本原子力研究所で建設を進めてきた臨界プラズマ試験装置 (J T -60) は、その装置本体の組み立てを完了し、去る 1984 年 12 月 10 日から 2 ヶ月強の期間をかけて本体コイル通電試験が実施された。本試験は、プラズマ生成に先立って本体コイルに最大定格まで電流を流し、本体、電源、制御の各設備の健全性を確認し、さらに、実験や運転に際しての問題点や留意事項などを洗い出すことを目的とした。

本試験においては、装置本体の健全性を確認するため、外観目視点検はもとより強度、熱、電気および真空に関する様々なデータがショット毎に取得された。特に熱および強度データは、装置に損傷を与えることなく各コイルの電流値を定格にまで上げられるか否かの判断基準として慎重に吟味された。さらに、これらのデータは、本体の熱・構造設計のレビューを行い、実態としての機器耐力を把握する上でも重要であり、また、ひいては次期装置や核融合炉の熱・構造設計に資するものと期待される。

試験は、各設備において所期の性能がほぼ 100% 確認でき成功裡に終了した。本論文は、J T -60 本体コイル通電試験の結果について、本体の強度および熱的な観点からまとめたものであり、得られた主要な結論は以下の通りまとめられる。

- (1) 測定された歪および変位はおおむね設計値に近く、設計で意図された電磁力の支持方法がその機能を果たし、かつ力の流れが滑らかであることを示している。また、TF コイルと隣接スペーサとの滑りが十分でなく一部のコンポーネントに設計で考慮されなかった歪が発生しているが、その歪レベルは低く強度的には全く問題とならない。
- (2) TF コイルのように、熱膨張率が異なる複数のコンポーネントから構成される大型の複合構造物では、わずかな温度差によりコンポーネント間にギャップが生じ構造物としての一体性を損ねることがある。J T -60 の場合、その影響は無視し得る程度であったが同様の装置の設計や運転には注意を要する。
- (3) 電磁力による真空容器の振動が顕著であり、プラズマ立ち上げ不着火時において最大加速度は 50 m/sec^2 にも達する。真空容器に直接取り付けられる機器はその加振を受けるため、何らかの耐振構造を施すべきである。また、プラズマ放電中に生ずる可能性のある異常消滅 (ディスラプション) を考慮すると、可能な限り真空容器と他の機器との間に振動を吸収するコンポーネントを配置する構造を採用すべきであると思われる。
- (4) 強度的な面から、本体の運転に対する制限項目が 2 点 (弱電流放電洗浄運転の連続運転可能時間、垂直磁場コイルの立ち上げ速度) 明らかになった。弱電流放電洗浄運転を連続して行う場合、真空容器本体ベローズのジュール発熱による温度上昇が原因となって発生するベローズの熱応力が制限となって連続運転が可能な時間にも上限がある。本試験の結果によればベローズでの平均発熱量が 30 kW 以下であればおおむね 10 hr 程度の連続運転が可能であることが明らかとなった。また、垂直磁場コイルの立ち上げ速度は実験目的にあわせて $0.1 \sim 1.0 \text{ sec}$ の範囲で設定可能であるが、立ち上げ速度が早いほど真空容

器の振動が顕著となる傾向にある。本体保護の観点からは1.0 secより早い垂直磁場コイルの立ち上げ運転は避けることが望ましい。なお、これら2項目は実験目的などとあわせて検討を行う必要があると思われる。

- (5) 既設の計測器だけでは本体の健全性モニターとしては不十分と考えられる測定ヶ所、項目（水平ポートのゲート弁の振動、磁気リミタコイルのフィーダの変位）が明らかとなった。真空容器の水平ポートに取り付けられているゲート弁の受ける振動が非常に大きく、プラズマ実験を開始しても常時その振動を計測していく必要があると思われる。また、磁気リミタコイルのフィーダの変形が比較的大きく、この部位の変位も継続してモニターしていく必要があるものと思われる。
- (6) 予め設定された本体保護設定値の中で、「本体架台変異常」は実情と合わず再設定する必要がある。
- (7) 各コイル冷却水の温度上昇はほぼ設計値と等しいことから、各コイルの熱的健全性が確認された。
- (8) 高温通電時における本体の熱・構造的特性は常温運転時のそれとほぼ同一であり、高温運転に対する健全性が確認された。

以上みたように、他の大型トカマク装置と異なりJT-60ではプラズマ実験に先立って装置の最大定格が確認され、また運転に際しての留意点なども明らかにされているため装置としての完成度が非常に高く、今後のプラズマ実験の成果が大いに期待される場所である。

謝 辞

本試験を遂行するにあたり日本原子力研究所森茂理事、磯康彦東海研究所副所長、苫米地顕那珂研究所々長、吉川允二臨界プラズマ研究部々長、飯島勉JT-60試験部々長からは終始激励を戴いた。試験ワーキング・グループ（主査相川裕史JT-60第1試験室運転計画グループグループ・リーダー）のメンバーの方々には試験方案の立案および審議において多大な御協力を戴いた。JT-60の総合機能試験本部（本部長田村早苗臨界プラズマ研究部次長）のメンバーの方々には試験の実施に際して昼夜をおしまぬ精力的な御協力を戴いた。さらに、JT-60試験部、臨界プラズマ研究部、製作受注メーカー各社（（株）日立製作所、（株）東芝、三菱電機（株）、住友重機械工業（株）および開発電気（株）の関係者各位には試験方案の検討から試験の実施までの全ての段階で御協力戴いた。特に、本体強度データの取得、検討に際してはJT-60第2試験室および日立製作所の試験担当者の御尽力に負うところが大きい。第3章で述べた放電洗浄運転時の真空容器への誘起電流の評価はJT-60第1試験室本村豊秋、高橋実両氏に依った。以上の方々には深く感謝致します。

器の振動が顕著となる傾向にある。本体保護の観点からは1.0 secより早い垂直磁場コイルの立ち上げ運転は避けることが望ましい。なお、これら2項目は実験目的などとあわせて検討を行う必要があると思われる。

- (5) 既設の計測器だけでは本体の健全性モニターとしては不十分と考えられる測定ヶ所、項目（水平ポートのゲート弁の振動、磁気リミタコイルのフィーダの変位）が明らかとなった。真空容器の水平ポートに取り付けられているゲート弁の受ける振動が非常に大きく、プラズマ実験を開始しても常時その振動を計測していく必要があると思われる。また、磁気リミタコイルのフィーダの変形が比較的大きく、この部位の変位も継続してモニターしていく必要があるものと思われる。
- (6) 予め設定された本体保護設定値の中で、「本体架台変異常」は実情と合わず再設定する必要がある。
- (7) 各コイル冷却水の温度上昇はほぼ設計値と等しいことから、各コイルの熱的健全性が確認された。
- (8) 高温通電時における本体の熱・構造的特性は常温運転時のそれとほぼ同一であり、高温運転に対する健全性が確認された。

以上みたように、他の大型トカマク装置と異なりJT-60ではプラズマ実験に先立って装置の最大定格が確認され、また運転に際しての留意点なども明らかにされているため装置としての完成度が非常に高く、今後のプラズマ実験の成果が大いに期待される場所である。

謝 辞

本試験を遂行するにあたり日本原子力研究所森茂理事、磯康彦東海研究所副所長、苫米地顕那珂研究所々長、吉川允二臨界プラズマ研究部々長、飯島勉JT-60試験部々長からは終始激励を戴いた。試験ワーキング・グループ（主査相川裕史JT-60第1試験室運転計画グループグループ・リーダー）のメンバーの方々には試験方案の立案および審議において多大な御協力を戴いた。JT-60の総合機能試験本部（本部長田村早苗臨界プラズマ研究部次長）のメンバーの方々には試験の実施に際して昼夜をおしまぬ精力的な御協力を戴いた。さらに、JT-60試験部、臨界プラズマ研究部、製作受注メーカー各社（（株）日立製作所、（株）東芝、三菱電機（株）、住友重機械工業（株）および開発電気（株）の関係者各位には試験方案の検討から試験の実施までの全ての段階で御協力戴いた。特に、本体強度データの取得、検討に際してはJT-60第2試験室および日立製作所の試験担当者の御尽力に負うところが大きい。第3章で述べた放電洗浄運転時の真空容器への誘起電流の評価はJT-60第1試験室本村豊秋、高橋実両氏に依った。以上の方々には深く感謝致します。

参考文献

- (1) SINNIS, J. : Proc. 10th Symp. on Fusion Engineering, Philadelphia, Dec. 5~9 (1983) 2096.
- (2) HUGUET, M. : *ibid*, 834.
- (3) OHKUBO, M., YAMAMOTO, M., KOIKE, T., TAKATSU, H., ISAKA, M., ANDO, T., NAKAMURA, H., ARAI, T., AKINO, N., SHIMIZU, M., OHTA, M. : To be published in Proc. 11th Symp. on Fusion Engineering, Austin, Nov. 18~22 (1985).
- (4) 森 茂: 原子力誌, 27 [5], 386 (1985).
- (5) 磯 康彦, 吉川 允二: 原子力誌, 24 [4], 247 (1982).
- (6) JT-60 Team (presented by AIKAWA, H.) : To be published in Proc. 11th Symp. on Fusion Engineering Austin, Nov. 18~22 (1985).
- (7) 大型トカマク開発部: 非公開資料 (1984).
- (8) OHKUBO, M., NISHIO, S., OHTA, M., ITOU, Y., TAKIZAWA, T., FURUYAMA, M., SAITO, R., MATSUNOBE, K., TANAKA, F. : Proc. 11th Symp. on Fusion Technology, Oxford, Sep. 15~19 (1980) 409.
- (9) 例えば, 坂本 雄一: 核融合研究, 53 [1], 7 (1985).
- (10) 高津 英幸, 山本 正弘, 清水 正亜, 鈴木 和夫, 園部 正, 林 雄三, 水野 源一郎: JAERI-M 82-205 (1982)
- (11) 高津 英幸, 山本 正弘, 清水 正亜, 君島 富夫, 梶浦 宗次, 大和田 公郎: JAERI-M 83-077 (1983)
- (12) TAKATSU, H., SHIMIZU, M., OHTA, M., IMAI, K., ONO, S., MINAMI, M. : Nucl. Engrg. Des. 71, 161 (1982).
- (13) 小原 建治郎: 非公開資料 (1983).
- (14) NINOMIYA, H., NAKAMURA, Y., OZEKI, T., SUZUKI, Y., KAMEARI, A., TSUZUKI, N., SOMETANI, T. : Proc. 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Fransisco, Nov. 13~16 (1979) 1863.
- (15) 高津 英幸, 清水 正亜, 山本 正弘, 太田 充: JAERI-M 8017 (1978).
- (16) TAKATSU, H., SHIMIZU, M., OHTA, M., IMAI, K., ONO, S., MINAMI, M. : JAERI-M 9242 (1980).
- (17) 例えば, 原子力発電所耐震設計技術研究データ, I S U 編 (1978).
- (18) BIALEC, J.M., WEISSENBURGER, D.W. : PPPL-2187 (1985).
- (19) 高津 英幸, 清水 正亜: 非公開資料 (1981)

付録I JT-60 本体コイル通電試験要領

PROCEDURES OF POWER TEST

No.	F-1	TEST TITLE	TF coils continuous excitation I (by utility network)
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during TF coils continuous excitation by utility network	
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of mechanical supports (4) DC feeder circumferential temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field	
TEST PROCEDURE		CONTENTS	
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coolant conditions] B --> C["TF coils continuous excitation (~5, 10 & 25 % rated)"] C --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF coils coolant (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) } (7) visual confirmation of machine integrity	
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum	

No.	F-2	TEST TITLE	TF coils continuous excitation II (by M-G)	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during TF coils continuous excitation by M-G.		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of mechanical supports (4) DC feeder circumferential temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coolant conditions] B --> C[TF coils continuous excitation (~5, 10 & 25 % rated)] C --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF coils coolant (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) } (7) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum		

No.	F-3	TEST TITLE	TF coils pulsed excitation I (by utility network)
PURPOSE	to verify integrity of tokamak machine & power supplies during TF coils pulsed excitation by utility network		
TEST ITEMS	(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of mechanical supports (4) DC feeder circumferential temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field (7) equivalent excitation period		
TEST PROCEDURE	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coolant conditions] B --> C[TF coils pulsed excitation (network 1 bank)] C --> D[TF coils pulsed excitation (network 2 bank)] D --> E[TF coils pulsed excitation (network 3 bank)] E --> F[TF coils pulsed excitation (network 4 bank)] F --> End(()) </pre> </div> <div style="width: 50%;"> <p>(b)</p> <p>(1) pressure, flow rate & temperature of TF coils coolant</p> <p>(c) ~ (f)</p> <p>(1) } listed in "TEST ITEMS" (7) }</p> <p>(8) visual confirmation of machine integrity</p> </div> </div>		
COMMENTS	(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 1		

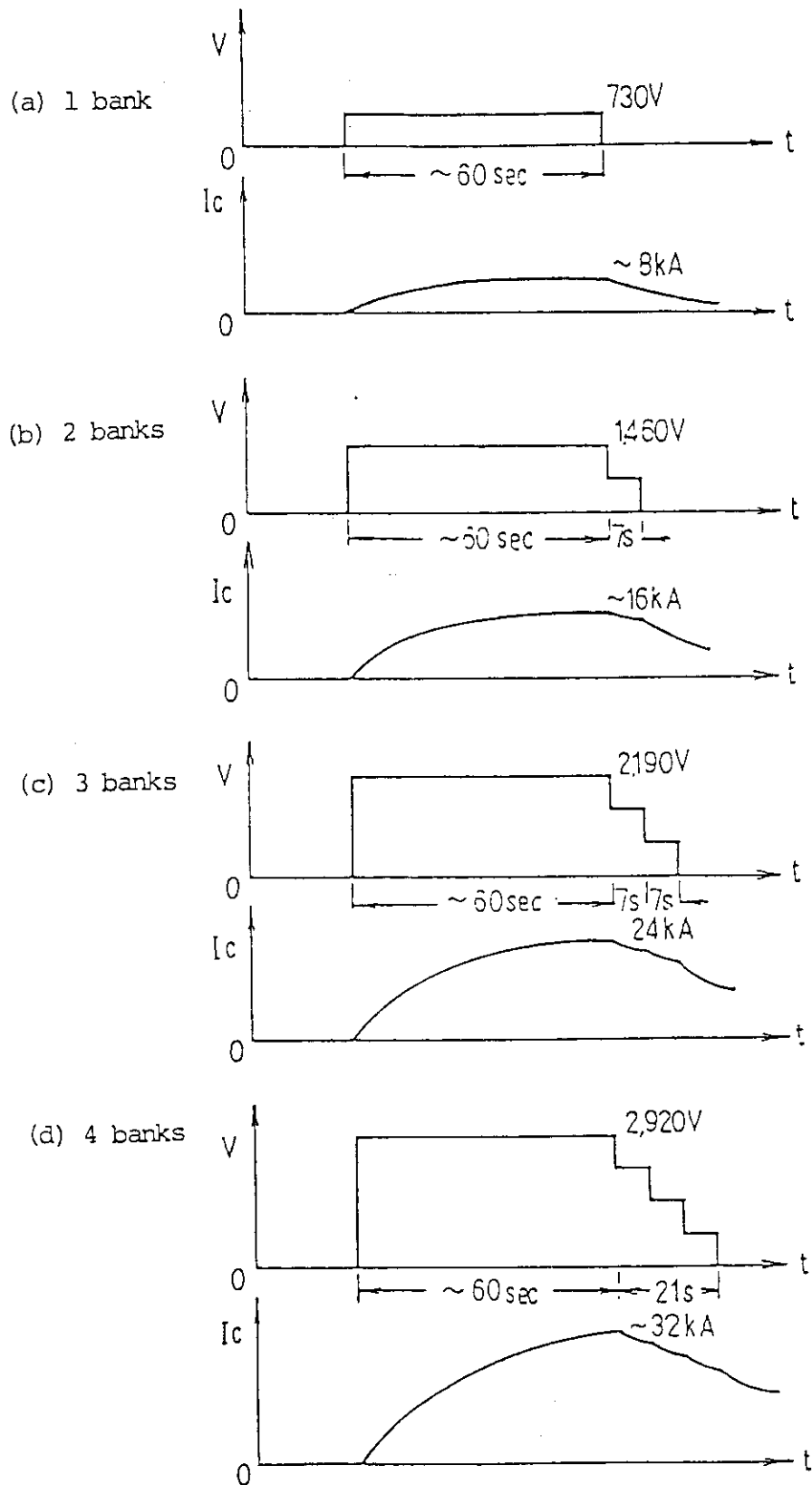
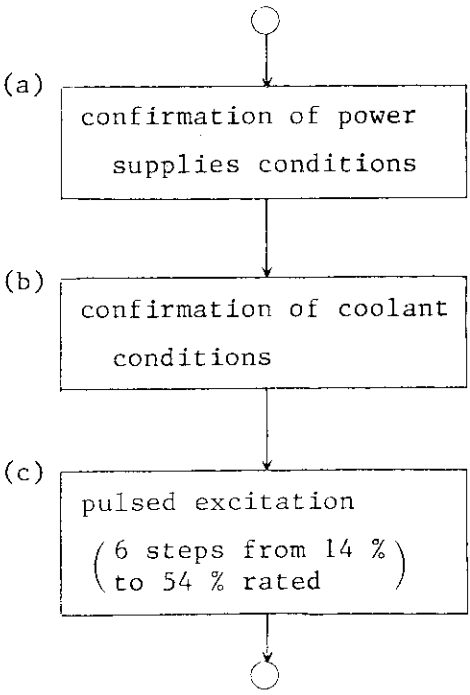


Fig. A-1

No.	F-4	TEST TITLE	TF coils pulsed excitation II (by M-G)	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during TF coils pulsed excitation by M-G		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of mechanical supports (4) DC feeder circumferential temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field (7) equivalent excitation period		
TEST PROCEDURE  <pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coolant conditions] B --> C["pulsed excitation (6 steps from 14 % to 54 % rated)"] C --> End(()) </pre>		CONTENTS (b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF coils coolant (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (7) } (8) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 2		

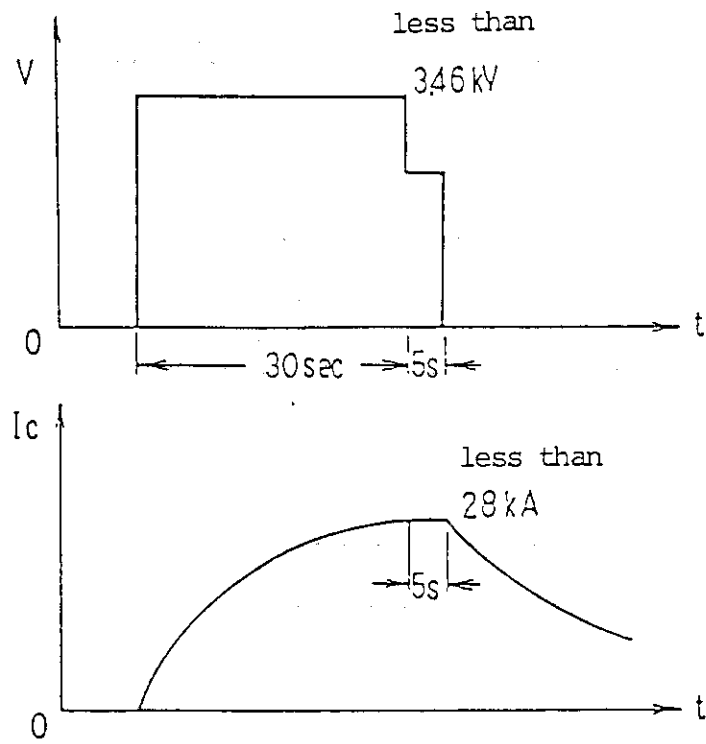


Fig. A-2

No.	F-5	TEST TITLE	TF coils pulsed excitation III (by utility network & M-G)
PURPOSE	to verify integrity of tokamak machine & power supplies during TF coils pulsed excitation by utility network and M-G		
TEST ITEMS	(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of mechanical supports (4) DC feeder circumferential temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field (7) equivalent excitation period		
TEST PROCEDURE	CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coolant conditions] B --> C["pulsed excitation (network 1 bank & M-G 30 % rated)"] C --> D["pulsed excitation (network 2 banks & M-G 60 % rated)"] D --> E["pulsed excitation (network 3 banks & M-G 66 ~ 78 % rated)"] E --> F["pulsed excitation (network 4 banks & M-G 80 ~ 100 % rated)"] F --> End(()) </pre>	(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF coils coolant (c)~(f) (1) } listed in "TEST ITEMS" (7) } (8) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS	(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 3		

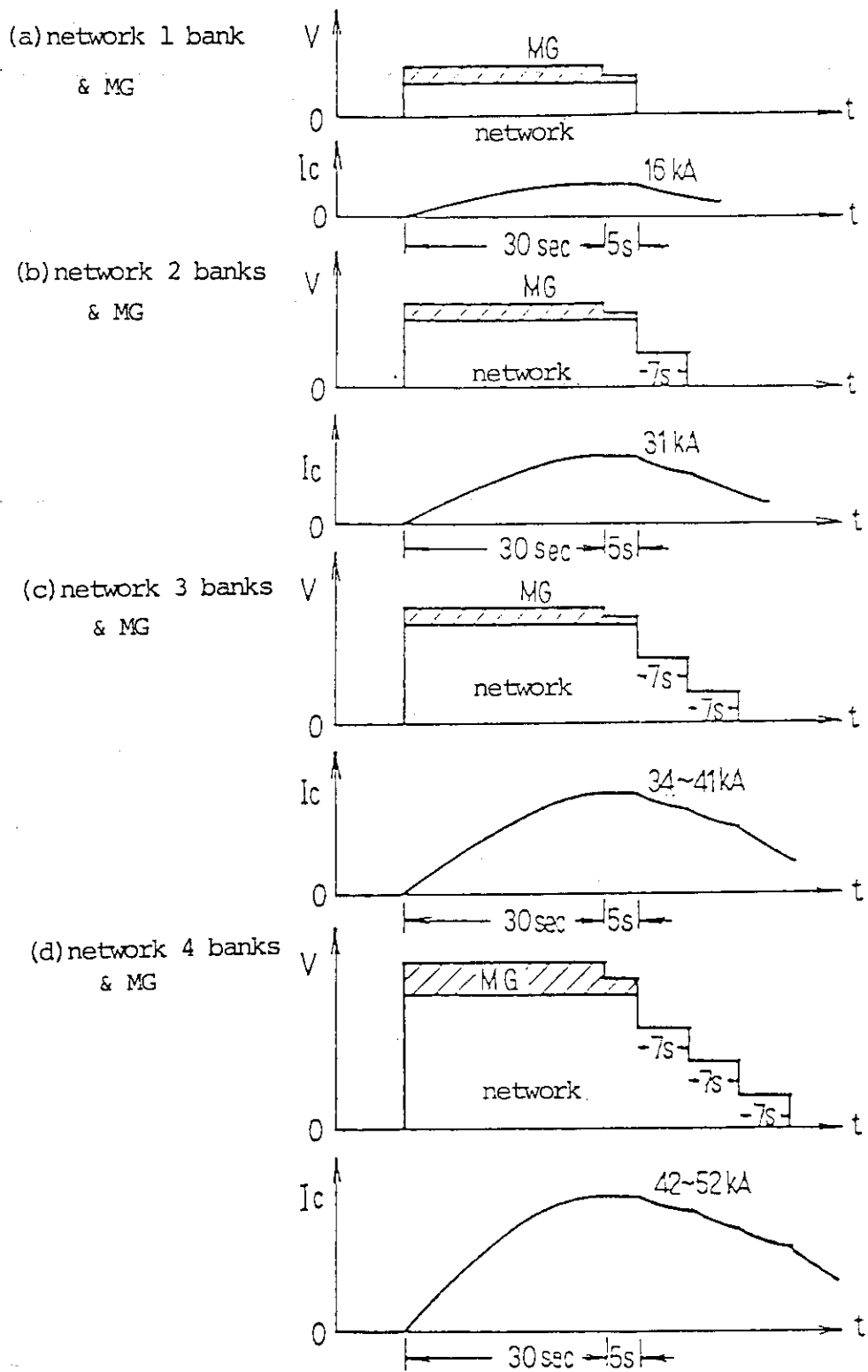


Fig. A-3

No.	F-6	TEST TITLE	PF (F) coils pulsed excitation I (low current pulse discharge cleaning)
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during PF (F) coils pulsed excitation	
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) temperature rise of vacuum vessel bellows (4) one-turn current & voltage of vacuum vessel (5) stress & deflection of vacuum vessel supports (6) induced current & voltage of T,V,H,Q & M coils (7) signals of electromagnetic sensors (8) magnetic field	
TEST PROCEDURE		CONTENTS	
<pre> graph TD Start(()) --> A[a confirmation of power supplies conditions] A --> B[b confirmation of F coils coolant conditions] B --> C[c confirmation of vacuum vessel coolant conditions] C --> D[d pulsed excitation] D --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of F coils coolant (c) (1) confirm no coolant in vacuum vessel cooling channel (d) (1) } listed in "TEST ITEMS" (8) } (9) visual confirmation of machine integrity	
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 4	

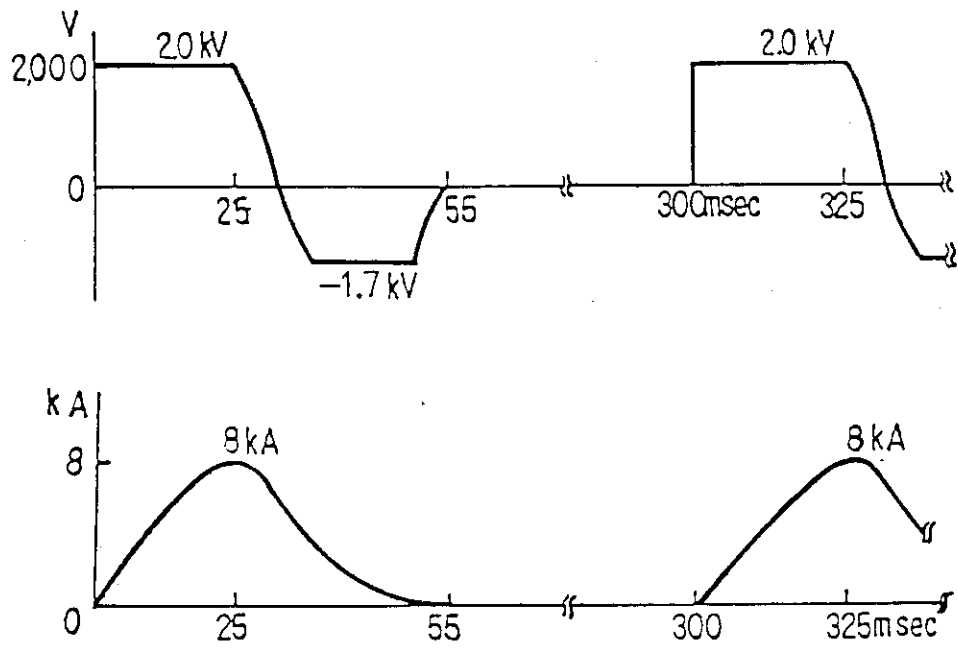


Fig. A-4

No.	F-7	TEST TITLE	PF (F) coils pulsed excitation II (short pulse discharge cleaning)
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies	
		during PF (F) coils pulsed excitation	
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) temperature rise of vacuum vessel bellows (4) one-turn current & voltage of vacuum vessel (5) stress & deflection of vacuum vessel & coil supports (6) induced current & voltage of T, V, H, Q & M coils (7) signals of electromagnetic sensors (8) magnetic field (9) vacuum vessel temperature distribution	
TEST PROCEDURE		CONTENTS	
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of F coils coolant conditions] B --> C[confirmation of vacuum vessel coolant conditions] C --> D["pulsed excitation (6 steps from 5 % to 30 % rated)"] D --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of F coils coolant (c) (1) confirm no coolant in vacuum vessel cooling channel (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (9) } (10) visual confirmation of machine integrity	
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 5	

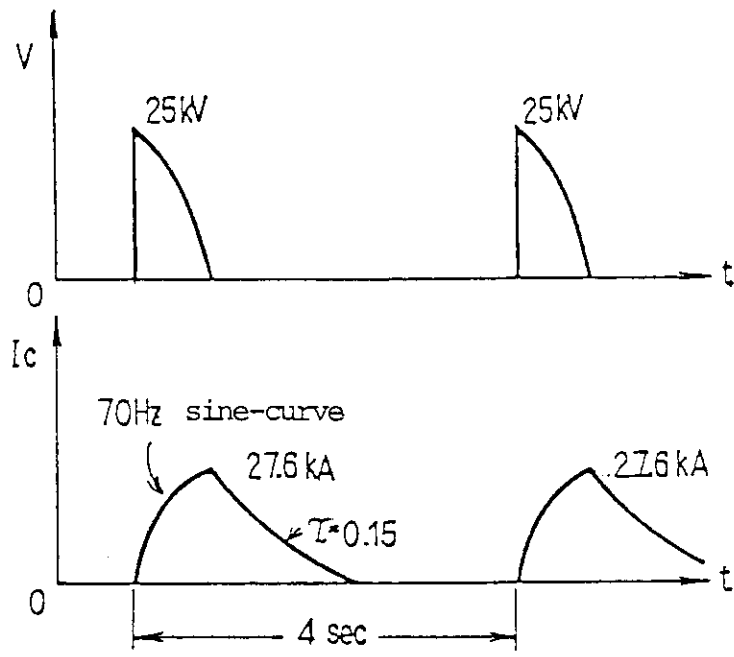


Fig. A-5

No.	F-8	TEST TITLE	PF (V) coils excitation	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during PF (V) coils excitation		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil & vacuum vessel mechanical supports (4) magnetic field. (5) induced current & voltage of T, F, H, Q & M coils (6) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of V coils coolant conditions] B --> C["V coils excitation (7 steps from 10 % to 70 % rated)"] C --> D["V coils excitation (6 steps from 70 % to 100 % rated)"] D --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of V coils coolant (c)~(d) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) } (7) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 6		

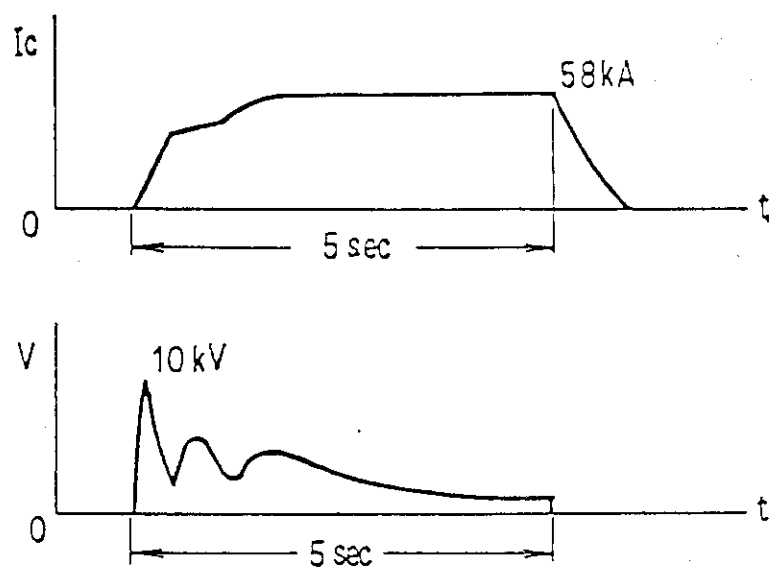
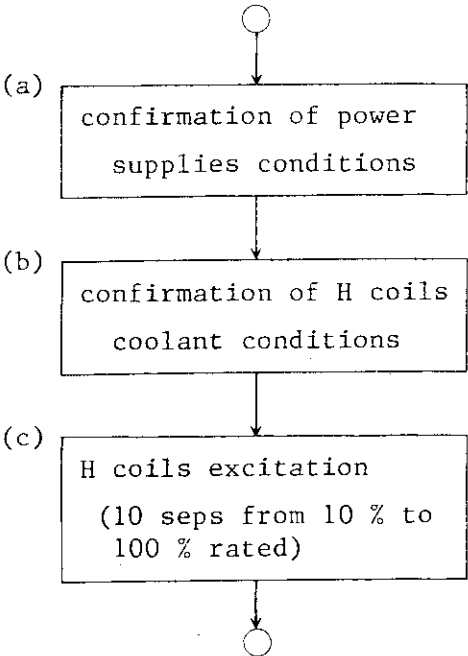


Fig. A-6

No.	F-9	TEST TITLE	PF (H) coils excitation	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during PF (H) coils excitation		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil & vacuum vessel mechanical supports (4) magnetic field (5) induced current & voltage of T, F, V, Q & M coils (6) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE  <pre> graph TD Start(()) --> A["(a) confirmation of power supplies conditions"] A --> B["(b) confirmation of H coils coolant conditions"] B --> C["(c) H coils excitation (10 seps from 10 % to 100 % rated)"] C --> End(()) </pre>		CONTENTS (b) (1) pressure, flow rate & temperature of H coils coolant (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) } (7) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 7		

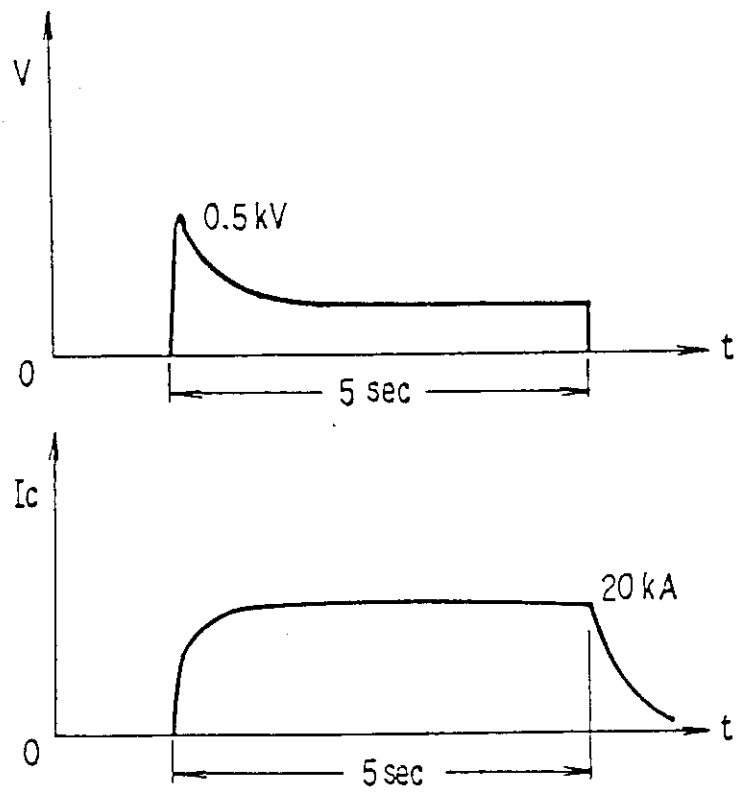


Fig. A-7

No.	F-10	TEST TITLE	PF (Q) coils excitation
PURPOSE	to verify integrity of tokamak machine & power supplies during PF (Q) coils excitation		
TEST ITEMS	(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil & vacuum vessel mechanical supports (4) magnetic field (5) induced current & voltage of T, F, V, H & M coils (6) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE	CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of Q coils coolant conditions] B --> C["Q coils excitation (8 steps from 10 % to 80 % rated)"] C --> D["Q coils excitation (4 steps from 80 % to 100 T rated)"] D --> End(()) </pre>	(b) (1) pressure, flow rate & temperature of Q coils coolant (c) ~ (d) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) } (7) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS	(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 8		

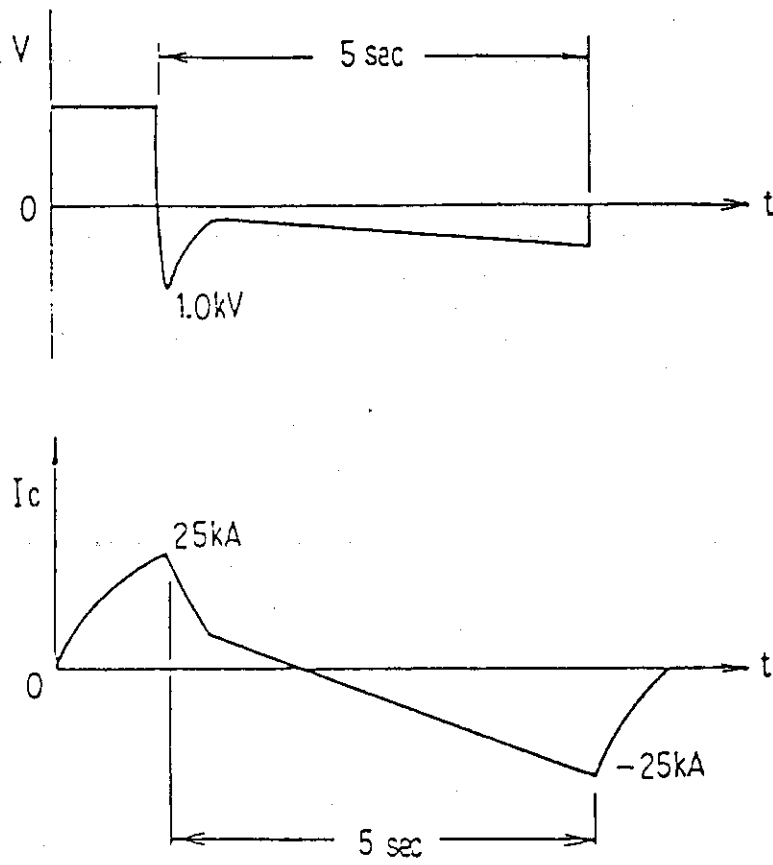


Fig. A-8

No.	F-11	TEST TITLE	PF (M) coils excitation I	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during PF (M) coils excitation		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil & vacuum vessel mechanical supports (4) magnetic field (5) induced current & voltage of T, F, V, H & Q coils (6) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of M coils coolant conditions] B --> C["M coils excitation (10 steps from 10 % to 100 % rated)"] C --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of M coils coolant (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) } (7) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 9		

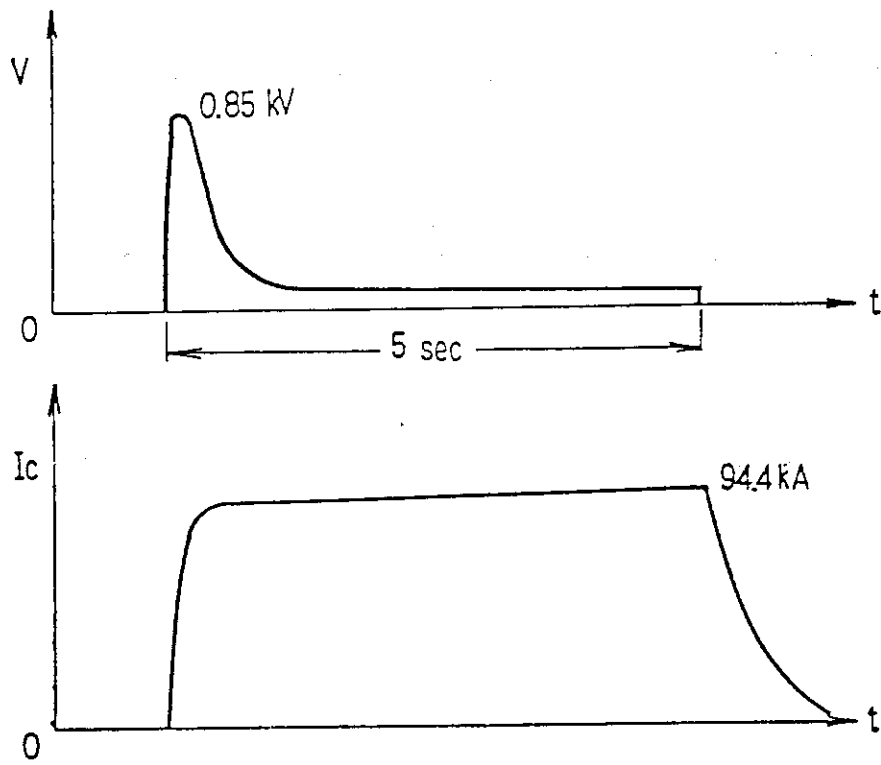
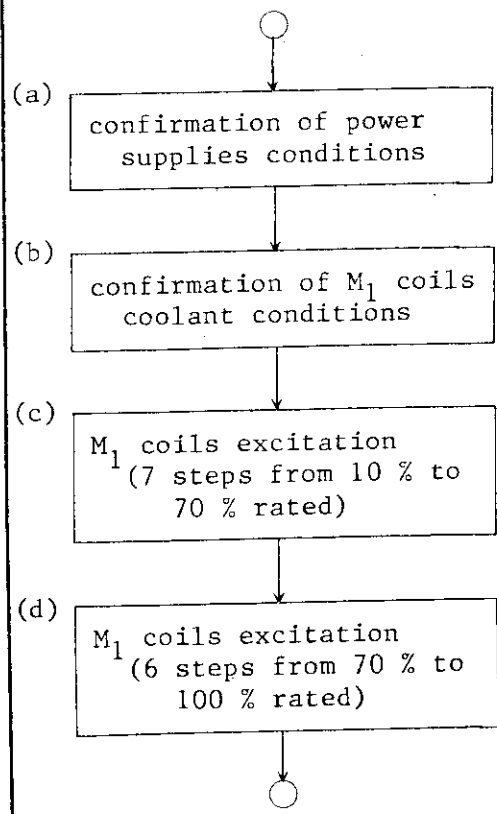


Fig. A-9

No.	F-12	TEST TITLE	PF (M) coils excitation II	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during PF (M_1^*) coils excitation * M_1 denotes main magnetic limiter coil.		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil & vacuum vessel mechanical supports (4) magnetic field (5) induced current & voltage of T, F, V, H & Q coils (6) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
 <pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of M1 coils coolant conditions] B --> C["M1 coils excitation (7 steps from 10 % to 70 % rated)"] C --> D["M1 coils excitation (6 steps from 70 % to 100 % rated)"] D --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of M_1 coils coolant (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) } (7) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 9		

No.	F-13	TEST TITLE	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H, Q & M) coils
PURPOSE	to verify integrity of tokamak machine & power supplies during simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H, Q & M) coils		
TEST ITEMS	(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil mechanical supports (4) stress & deflection of vacuum vessel supports (5) magnetic field (6) one-turn current & voltage of vacuum vessel (7) DC feeder circumferential temperature (8) vacuum vessel coolant outlet temperature (9) vacuum vessel temperature distribution		
TEST PROCEDURE	<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF coils & vacuum vessel coolants] B --> C["continuous excitation (TF 25 % rated, V 10 % rated)"] C --> D["continuous excitation (TF 25 % rated, V,H 10 % rated)"] D --> E["continuous excitation (TF 25 % rated, V,H,Q 10 % rated)"] E --> F["continuous excitation (TF 25 % rated, V,H,Q,M 10 % rated)"] F --> G["continuous excitation (TF 25 % rated, V,H,Q,M 10 % rated) & F coils pulsed excitation"] G --> End(()) </pre>		
COMMENTS	(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation period of 0.5 ~ 1.0 hr for (c) ~ (g) (3) F coils excitation pattern shown in Fig. 4		
CONTENTS	(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF & PF coils & vacuum vessel coolant (c) ~ (g) (1) } listed in "TEST ITEMS" (9) } (10) visual confirmation of machine integrity		

No.	F-14	TEST TITLE	PF (F) coils pulsed excitation III (VCB one-stage break)
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during PF (F) coils pulsed excitation (VCB one-stage break)	
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) temperature distribution of vacuum (4) one-turn current & voltage of vacuum vessel (5) stress & deflection of vacuum vessel & coil supports (6) induced current & voltage of T, V, H, Q & M coils (7) signals of electromagnetic sensors (8) magnetic field	
TEST PROCEDURE		CONTENTS	
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of F coils (and vacuum vessel) coolant] B --> C[excitation (6 steps from 20 % to 70 % rated)] C --> D[excitation (6 steps from 70 % to 100 % rated)] D --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of F coils & vacuum vessel coolants (c) ~ (d) (1) } listed in "TEST ITEMS" (8) } (9) visual confirmation of machine integrity	
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 10	

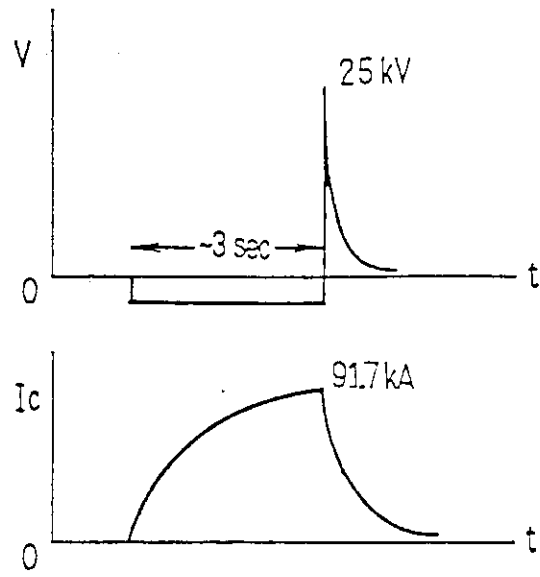


Fig. A-10

No.	F-15	TEST TITLE	Simultaneous excitation of TF & PF (F) coils	
PURPOSE	to verify integrity of tokamak machine & power supplies during simultaneous excitation of TF & PF (F) coils			
TEST ITEMS	<ul style="list-style-type: none"> (1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil mechanical supports (4) stress & deflection of vacuum vessel supports (5) magnetic field (6) one-turn current & voltage of vacuum vessel (7) signals of electromagnetic sensors (8) induced current & voltage of V, H, Q & M coils 			
TEST PROCEDURE	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F) coils coolants] B --> C["excitation (TF 26 % rated, F 10~50 % rated)"] C --> D["excitation (TF 50 % rated, F 30~70 % rated)"] D --> E["excitation (TF 76 % rated, F 50~100 % rated)"] E --> F["excitation (TF 100 % rated, F 75~100 % rated)"] F --> End(()) </pre> </div> <div style="width: 50%;"> <p>CONTENTS</p> <ul style="list-style-type: none"> (b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF & F coils coolants (c)~(f) (1) } listed in "TEST ITEMS" (8) } (9) visual confirmation of machine integrity </div> </div>			
COMMENTS	<ul style="list-style-type: none"> (1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 11 			

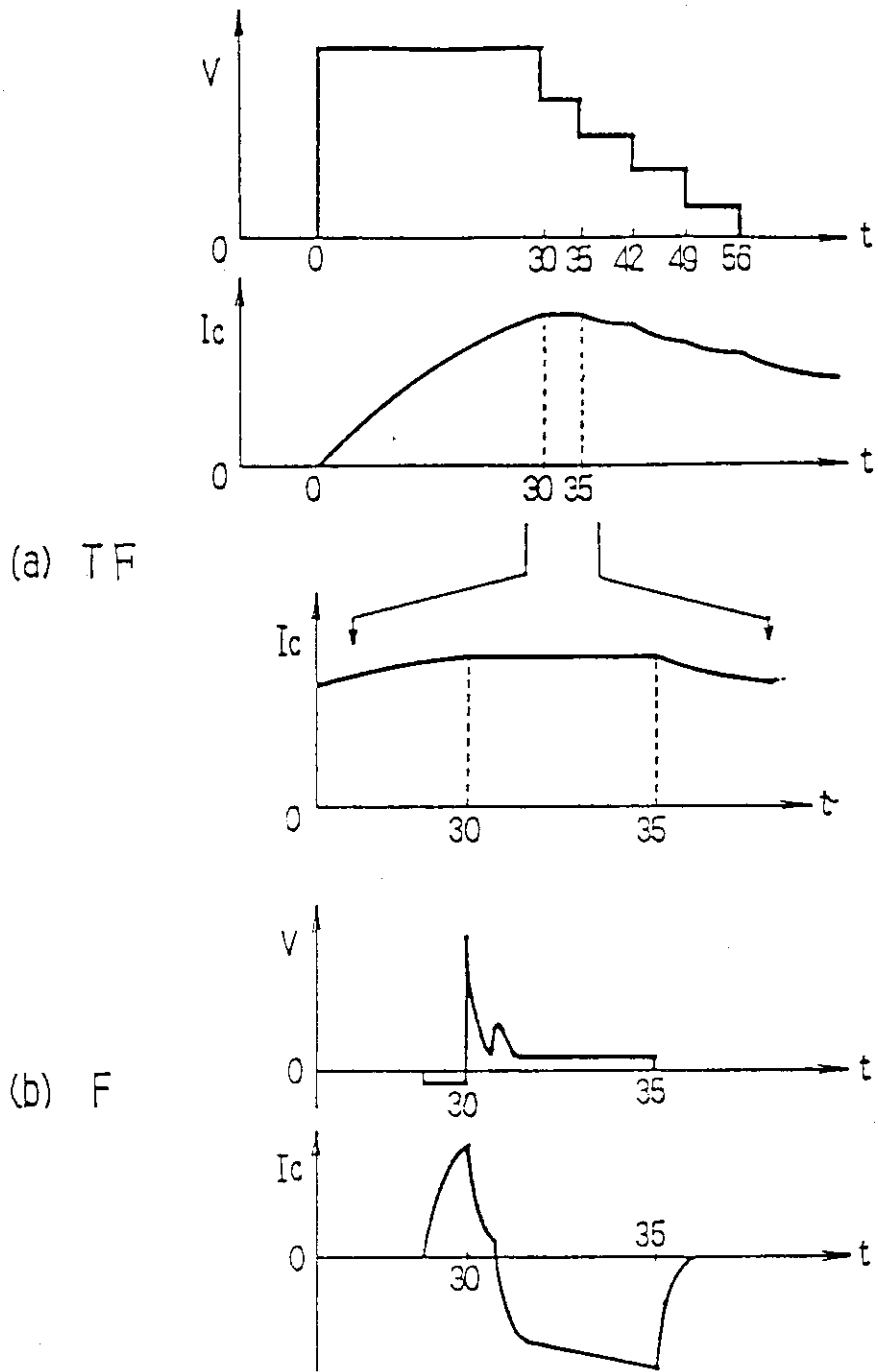


Fig. A-11

No.	F-16	TEST TITLE	Simultaneous excitation of TF & PF (F & V) coils	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during simultaneous excitation of TF & PF (F & V) coils		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil mechanical supports (4) stress & deflection of vacuum vessel supports (5) magnetic field (6) one-turn current & voltage of vacuum vessel (7) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F&V) coils coolants] B --> C["excitation (TF 50 % rated FA* 50 % rated V 10~100 % rated)"] C --> D["excitation (TF 76 % rated FA 75 % rated V 50~75 % rated)"] D --> E["excitation (TF 100 % rated FB 100 % rated VB 75~100 % rated)"] E --> End(()) </pre> <p>* Suffixes A & B correspond to excitation patterns in Fig. 12</p>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF, F & V coils coolant (c)~(e) (1) } listed in "TEST ITEMS" (7) } (8) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 12		

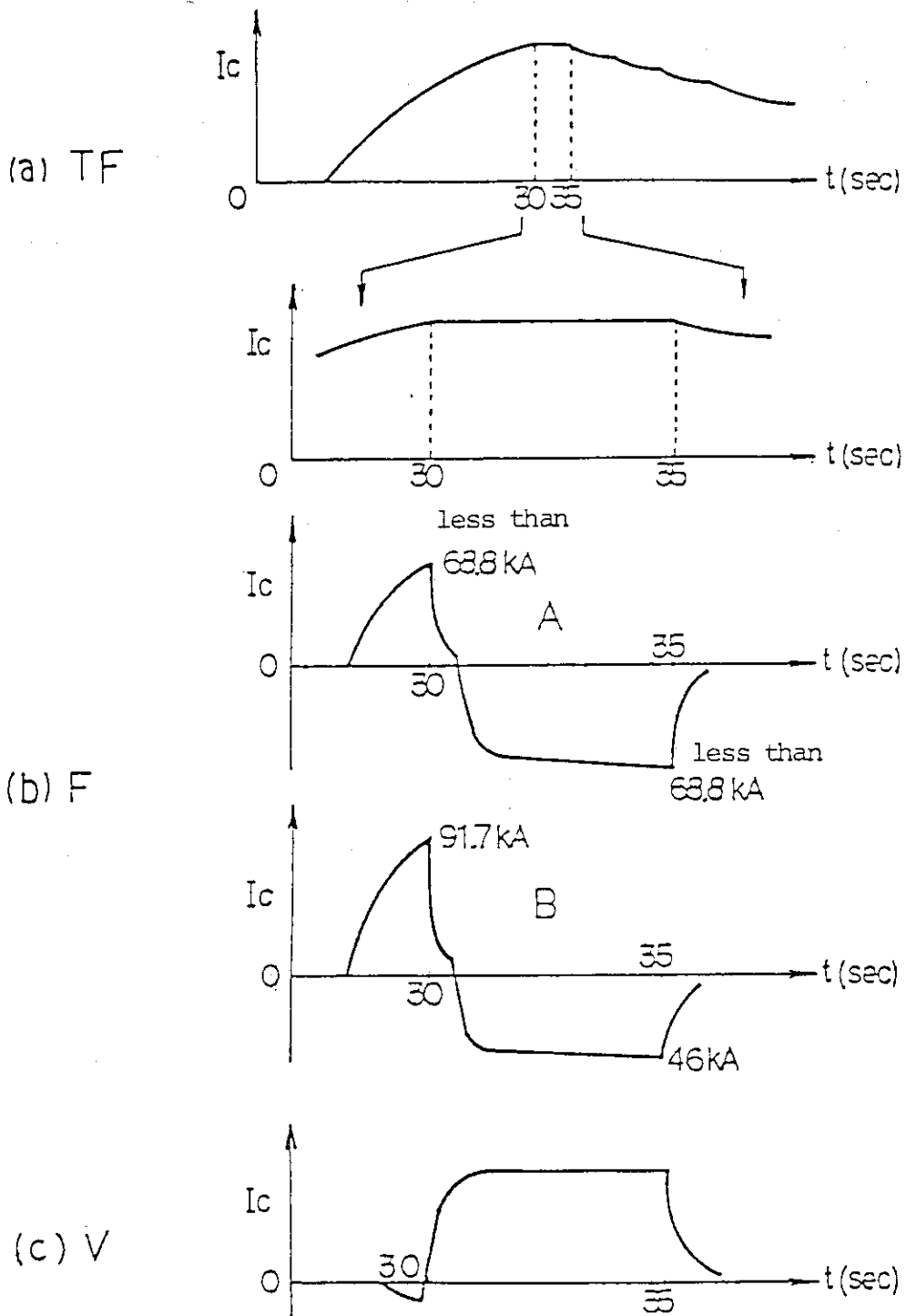


Fig. A-12

No.	F-17	TEST TITLE	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V & H) coils	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during simultaneous excitation of TF & PF (F, V & H) coils		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil mechanical supports (4) stress & deflection of vacuum vessel supports (5) magnetic field . (6) one-turn current & voltage of vacuum vessel (7) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F,V&H) coil coolants] B --> C["excitation (TF 76 % rated FA,V 75 % rated H(+) 10~100 % rated)"] C --> D["excitation (TF,FB,V 100 % rated H(+) 75~100 % \")"] D --> E["excitation (TF,FB,V 100 % rated H(-) 75~100 % \")"] E --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF, F, V & H coils coolants (c)~(e) (1) } listed in "TEST ITEMS" (7) } (8) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 13		

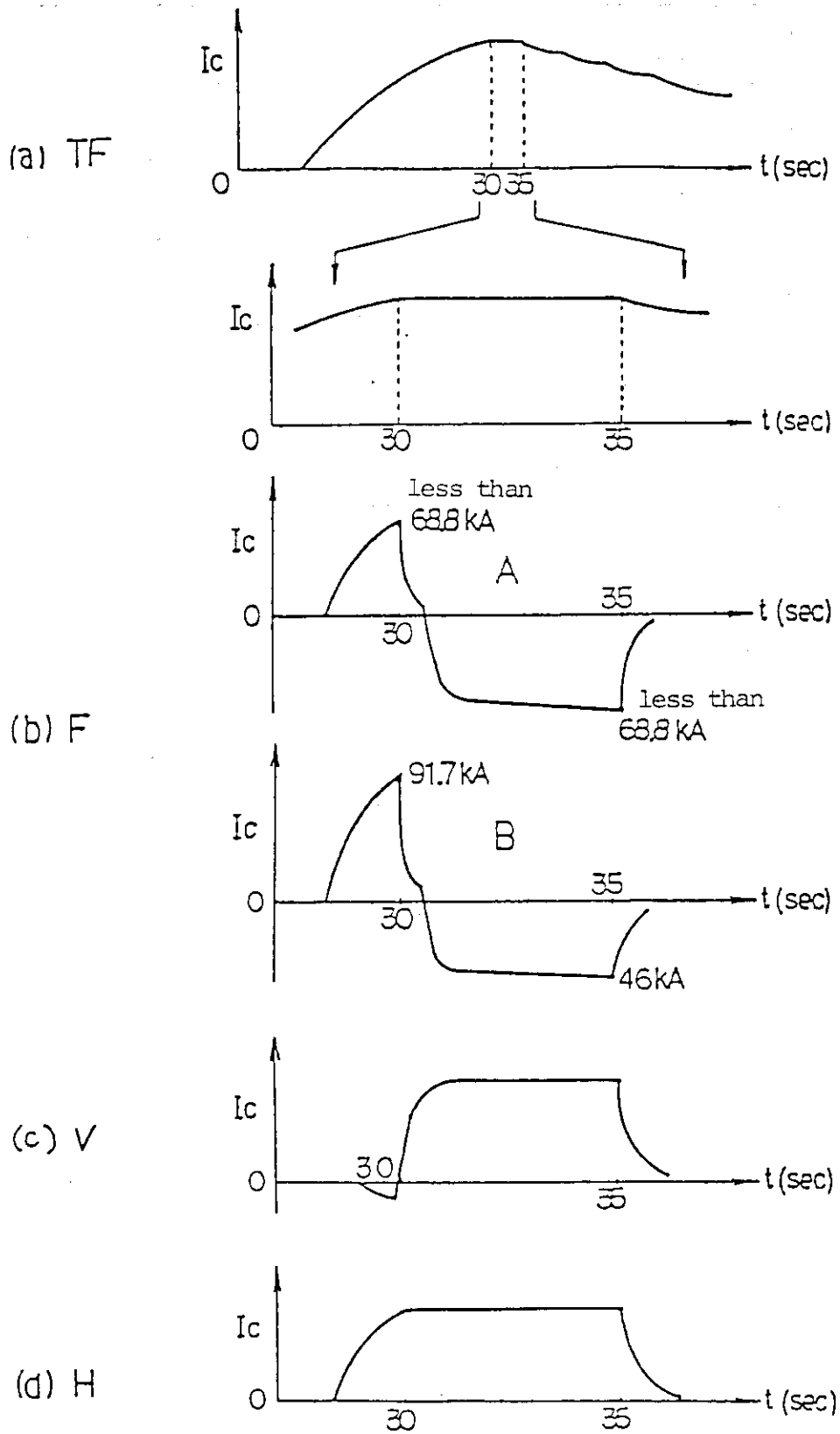


Fig. A-13

No.	F-18	TEST TITLE	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H & Q) coils	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H & Q) coils		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil mechanical supports (4) stress & deflection of vacuum vessel supports (5) magnetic field (6) one-turn current & voltage of vacuum vessel (7) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F,V,H&Q) coils coolant] B --> C["excitation (TF 76% rated, FA,V,H 75% rated, QA 10~100% rated)"] C --> D["excitation (TF,FB,V,H 100% rated, QA 75~100% \"")"] D --> E["excitation (TF 75% rated, FC,V,H,QA 100% \"")"] E --> F["excitation (TF,FB,V,H 100% rated, QB 70~100% \"")"] F --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF, F, V, H & Q coils coolants (c)~(f) (1) } listed in "TEST ITEMS" (7) } (8) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 14		

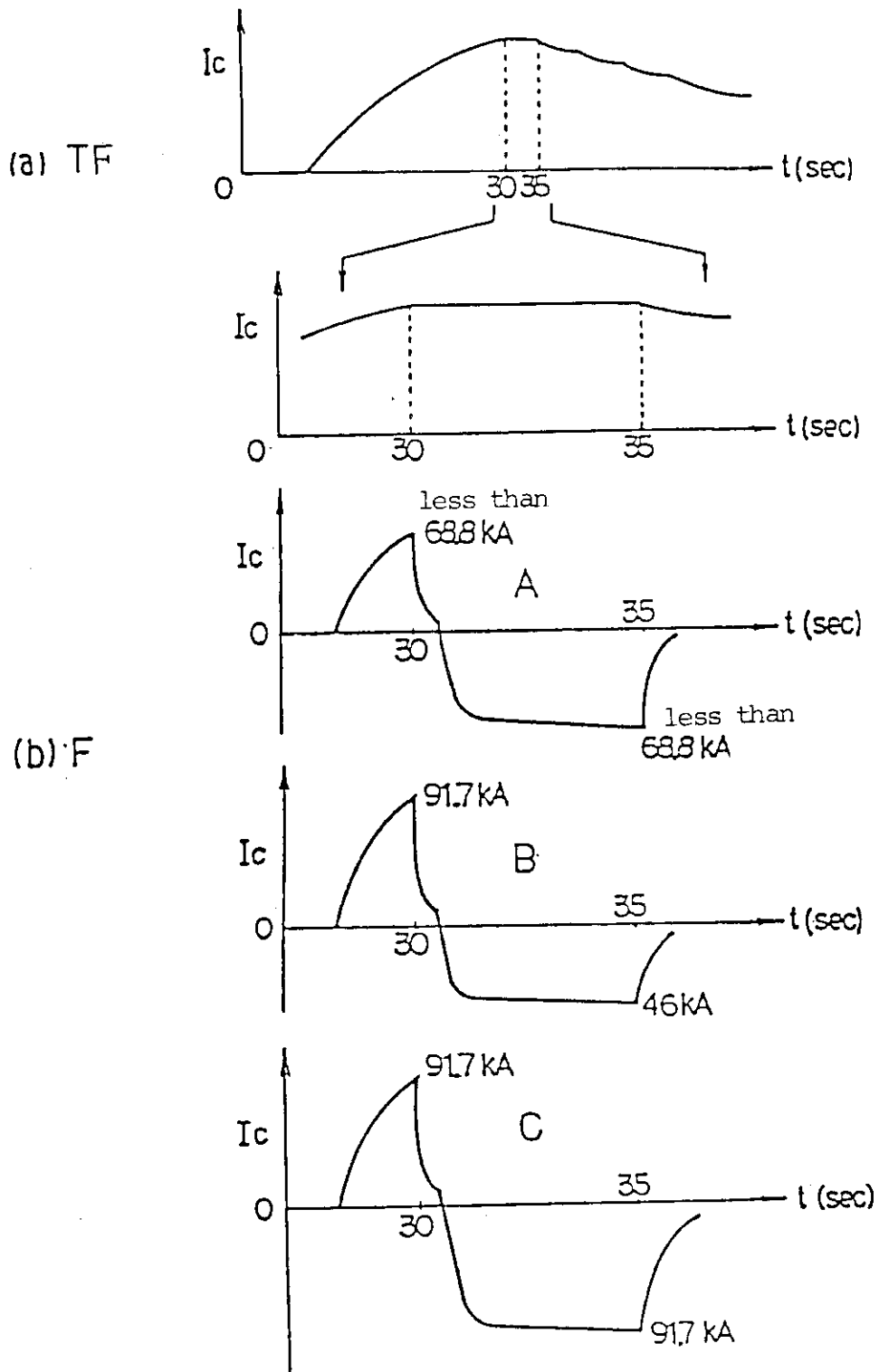


Fig. A-14

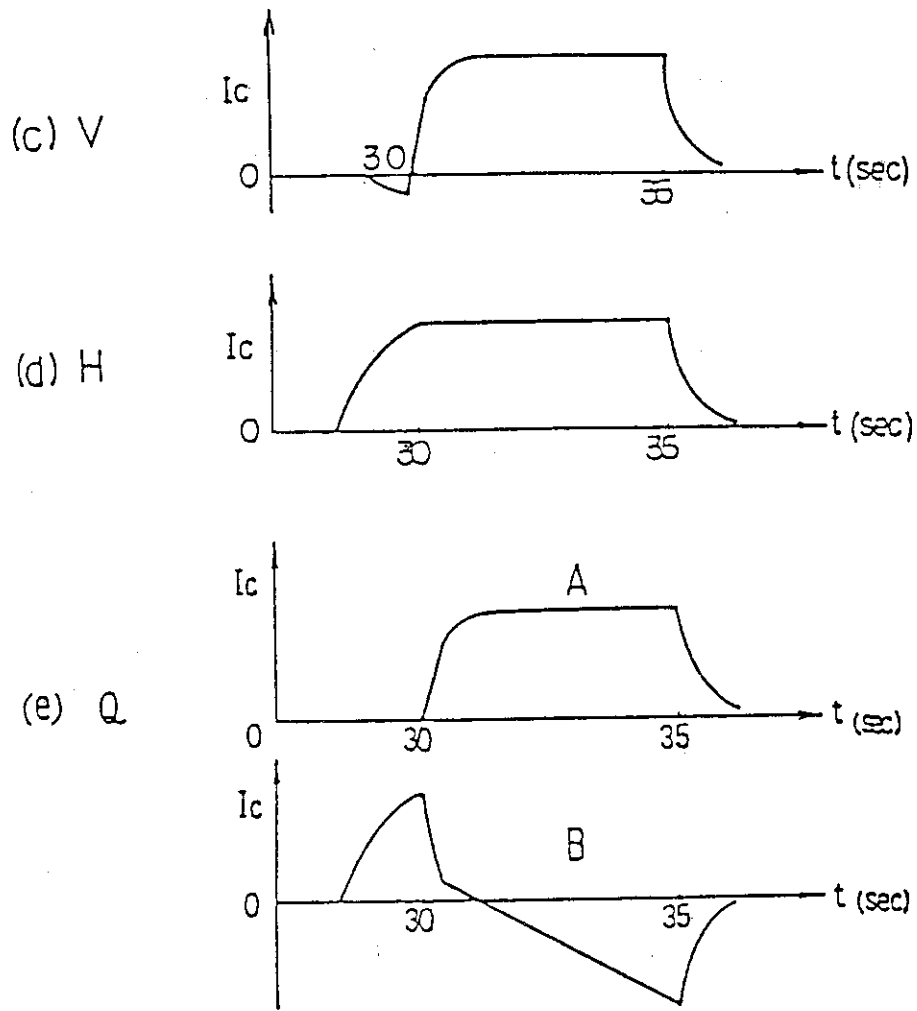


Fig. A-14 (Contd.)

No.	F-19	TEST TITLE	Simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H, Q & M) coils	
PURPOSE		to verify integrity of tokamak machine & power supplies during simultaneous excitation of TF & PF (F, V, H, Q & M) coils		
TEST ITEMS		(1) coil current & voltage (2) coil coolant outlet temperature (3) stress & deflection of coil mechanical supports (4) stress & deflection of vacuum vessel supports (5) magnetic field (6) one-turn current & voltage of vacuum vessel (7) signals of electromagnetic sensors		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F,V,H,Q&M) coils coolant] B --> C["excitation (TF 76 % rated FA,V,H,QA 75 % \" MA 10~100% \")"] C --> D["excitation (TF,FB,H,Q 100% rated V 78% \" MA 75~100% \")"] D --> E["excitation (TF,FB,H,QA 100 % rated V 78 % \" MB 70~100% \")"] E --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF, F, V, H, Q & M coils coolant (c) (1) } listed in "TEST ITEMS" (7) } (8) visual confirmation of machine integrity		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at R.T. & in vacuum (2) excitation pattern shown in Fig. 15		

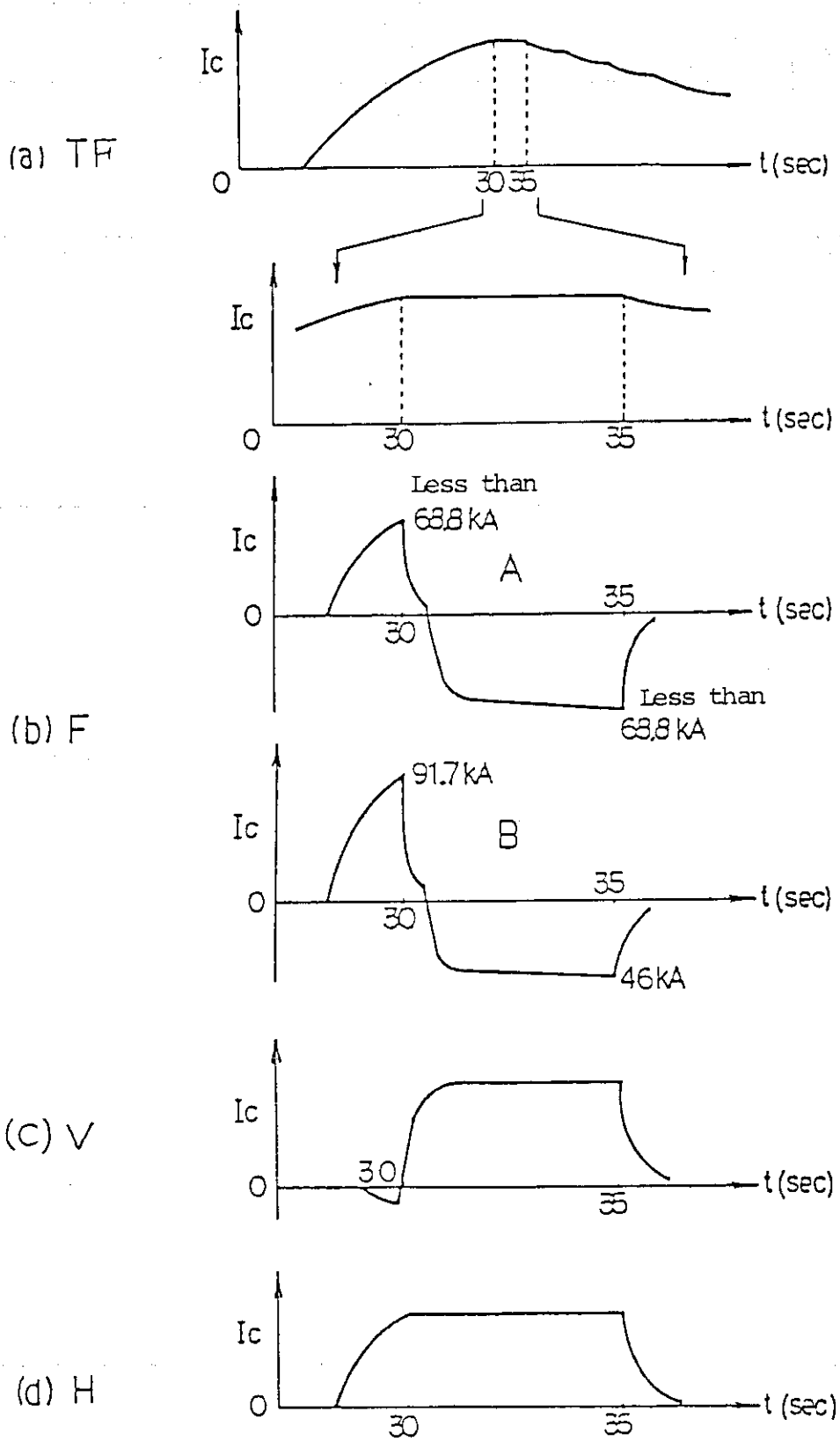


Fig. A-15

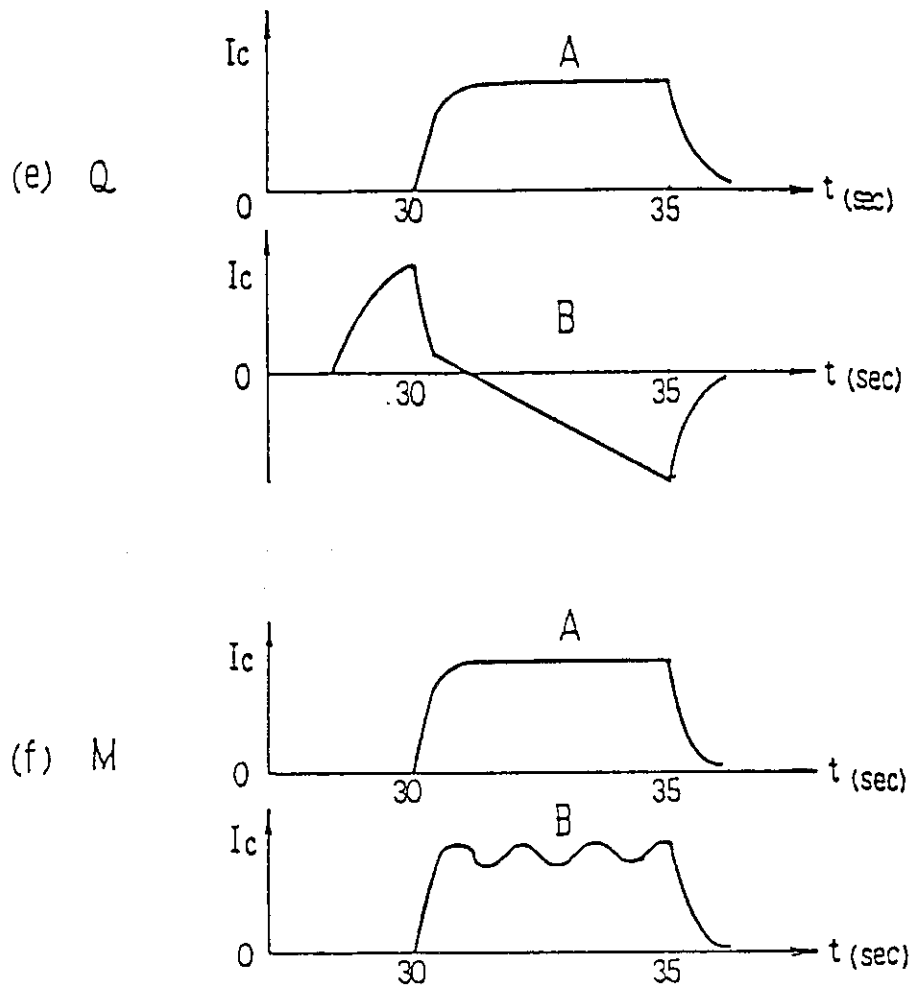


Fig. A-15 (Contd.)

No.	F-20	TEST TITLE	Fast movable limiter driving test I
PURPOSE	to verify driving characteristics of fast movable limiter under the influence of magnetic field at room temperature operation mode		
TEST ITEMS	(1) driving characteristics of fast movable limiter (2) vacuum properties of vacuum vessel (3) vibration characteristics of vacuum vessel & mechanical support structures		
TEST PROCEDURE	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coil coolant] B --> C[confirmation of oil pressure system conditions] C --> D[driving of fast movable limiter under TF, F, V, H & Q 50% rated] D --> E[driving of fast movable limiter under TF, F, V, H & Q 75% rated] E --> F[driving of fast movable limiter under TF, F, V, H & Q 100% rated] F --> End(()) </pre> </div> <div style="width: 50%;"> <p>CONTENTS</p> <p>(b) (1) pressure, flow rate & temperature of coil coolant</p> <p>(c)~(f) (1) (3) } listed in "TEST ITEMS"</p> </div> </div>		
COMMENTS	(1) vacuum vessel in vacuum & at R.T. (2) coil excitation pattern shown in Fig. 14		

No.	F-21	TEST TITLE	High temperature operation test I	
PURPOSE		to confirm integrity of tokamak machine & power supplies during TF & PF (F) coils excitation at high temperature operation mode		
TEST ITEMS		(1) stress & deflection of vacuum vessel supports (2) temperature distribution of vacuum vessel (3) vacuum vessel coolant outlet temperature (4) coils coolants outlet temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field		
TEST PROCEDURE		CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F) coils coolants] B --> C[confirmation of vacuum vessel coolants] C --> D["coil excitation (TF 25% rated continuous) (F Fig. 4)"] D --> End(()) </pre>		(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF & PF (F) coils coolants (c) (1) N ₂ gas inlet & outlet pressures (2) inlet flow rates of vacuum vessel & magnetic limiter cooling systems (3) outlet temperature of N ₂ gas (d) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6) }		
COMMENTS		(1) vacuum vessel at high temperature & in vacuum (2) F coil excitation pattern shown in Fig. 4		

No.	F-22	TEST TITLE	High temperature operation test II
PURPOSE	to confirm integrity of tokamak machine & power supplies during TF & PF (F,V,H & Q) coils excitation at high temperature operation mode		
TEST ITEMS	(1) stress & deflection of vacuum vessel supports (2) temperature distribution of vacuum vessel (3) vacuum vessel coolant outlet temperature (4) coils coolants outlet temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field		
TEST PROCEDURE	CONTENTS		
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F,V,H&Q) coils coolants] B --> C[confirmation of vacuum vessel coolants] C --> D["coil excitation (TF 26 % rated, F,V,H,Q 10~50 % rated)"] D --> E["coil excitation (TF 50 % rated, F,V,H,Q 30~70 % rated)"] E --> F["coil excitation (TF 76 % rated, F,V,H,Q 70~100 % rated)"] F --> G["coil excitation (TF,F,V,H,Q 100 % rated)"] G --> End(()) </pre>	(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF & PF (F, V, H & Q) coils coolants (c) (1) N ₂ gas inlet & outlet pressures (2) inlet flow rates of vacuum vessel & magnetic limiter cooling systems (3) outlet temperature of N ₂ gas (d) ~ (g) (1) } listed in "TEST ITEMS" (6)		
COMMENTS	(1) vacuum vessel at high temperature & in vacuum (2) coil excitation pattern shown in Fig. 14		

No.	F-23	TEST TITLE	High temperature operation test III
PURPOSE	to confirm integrity of tokamak machine & power supplies during TF & PF (F, V, H, Q & M) coils excitation at high temperature operation mode		
TEST ITEMS	(1) stress & deflection of vacuum vessel supports (2) temperature distribution of vacuum vessel (3) vacuum vessel coolant outlet temperature (4) coils coolants outlet temperature (5) signals of electromagnetic sensors (6) magnetic field		
TEST PROCEDURE	<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of TF & PF (F,V,H,Q & M) coils coolant] B --> C[confirmation of vacuum vessel coolants] C --> D["coil excitation (TF,F,V,H,Q 50 % rated, M 10~70 %)"] D --> E["coil excitation (TF 76 % rated, F,V,H,Q 75 %, M 50~100%)"] E --> F["coil excitation (TF,F,H,Q 100 % rated, V 78 %, M 100 %)"] F --> End(()) </pre>		
COMMENTS	(1) vacuum vessel at high temperature & in vacuum (3) coil excitation pattern shown in Fig. 15		
CONTENTS	(b) (1) pressure, flow rate & temperature of TF & PF (F, V, H, Q & M) coils coolants (c) (1) N ₂ gas inlet & outlet pressures (2) inlet flow rates of vacuum vessel & magnetic limiter cooling systems (3) outlet temperature of N ₂ gas (d) ~ (f) (1) } listed in "TEST ITEMS" (2) }		

No.	F-24	TEST TITLE	Fast movable limiter driving test II
PURPOSE		to verify driving characteristics of fast movable limiter under the influence of magnetic field at high temperature operation mode	
TEST ITEMS		(1) driving characteristics of fast movable limiter (2) vacuum properties of vacuum vessel (3) vibration characteristics of vacuum vessel & mechanical support structures	
TEST PROCEDURE		CONTENTS	
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coils & vacuum vessel coolants] B --> C[confirmation of oil pressure system conditions] C --> D[driving of fast movable limiter under TF, F, V, H & Q 50% rated] D --> E[driving of fast movable limiter under TF, F, V, H & Q 75% rated] E --> F[driving of fast movable limiter under TF, F, V, H & Q 100% rated] F --> End(()) </pre>		<p>(b)</p> <p>(1) pressure, flow rate & temperature of coils & vacuum vessel coolants</p> <p>(c)</p> <p>(1) pressure & temperature of oil pressure system of fast movable limiter</p> <p>(d) ~ (f)</p> <p>(1) (3) } listed in "TEST ITEMS"</p>	
COMMENTS		(1) vacuum vessel in vacuum & at high temperature (2) coil excitation pattern shown in Fig. 14	

No.	F-25	TEST TITLE	Surface conditioning monitor driving test I		
PURPOSE	to verify driving characteristics of surface conditioning monitor under the influence of magnetic field at room temperature operation mode				
TEST ITEMS	(1) driving characteristics of fast movable limiter (2) vacuum properties of vacuum vessel				
TEST PROCEDURE	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coils coolants] B --> C[confirmation of vacuum pumping systems of surface conditioning monitor] C --> E[driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 50 % rated] E --> F[driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 75 % rated] F --> G[driving of surface conditioning monitor under TF & F 100 % rated] G --> End(()) </pre> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> <p>CONTENTS</p> <p>(b)</p> <p>(1) pressure, flow rate & temperature of coils coolants</p> <p>(c)</p> <p>(1) operation of vacuum pumping system of surface conditioning monitor</p> <p>(d) ~ (f)</p> <p>(1) { (2) } listed in "TEST ITEMS"</p> </td> </tr> </table>			<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coils coolants] B --> C[confirmation of vacuum pumping systems of surface conditioning monitor] C --> E[driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 50 % rated] E --> F[driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 75 % rated] F --> G[driving of surface conditioning monitor under TF & F 100 % rated] G --> End(()) </pre>	<p>CONTENTS</p> <p>(b)</p> <p>(1) pressure, flow rate & temperature of coils coolants</p> <p>(c)</p> <p>(1) operation of vacuum pumping system of surface conditioning monitor</p> <p>(d) ~ (f)</p> <p>(1) { (2) } listed in "TEST ITEMS"</p>
<pre> graph TD Start(()) --> A[confirmation of power supplies conditions] A --> B[confirmation of coils coolants] B --> C[confirmation of vacuum pumping systems of surface conditioning monitor] C --> E[driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 50 % rated] E --> F[driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 75 % rated] F --> G[driving of surface conditioning monitor under TF & F 100 % rated] G --> End(()) </pre>	<p>CONTENTS</p> <p>(b)</p> <p>(1) pressure, flow rate & temperature of coils coolants</p> <p>(c)</p> <p>(1) operation of vacuum pumping system of surface conditioning monitor</p> <p>(d) ~ (f)</p> <p>(1) { (2) } listed in "TEST ITEMS"</p>				
COMMENTS	(1) vacuum vessel in vacuum & at R.T. (2) coil excitation pattern shown in Fig. 12				

No.	F-26	TEST TITLE	Surface conditioning monitor driving test II
PURPOSE		to verify driving characteristics of surface conditioning monitor under the influence of magnetic field at high temperature operation mode	
TEST ITEMS		(1) driving characteristics fast movable limiter (2) vacuum properties of vacuum vessel	
TEST PROCEDURE		CONTENTS	
<pre> graph TD Start(()) --> A[a confirmation of power supplies conditions] A --> B[b confirmation of coils & vacuum vessel coolants] B --> C[c confirmation of vacuum pumping systems of surface conditioning monitor] C --> D[d driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 50 % rated] D --> E[e driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 75 % rated] E --> F[f driving of surface conditioning monitor under TF, F & V 100 % rated] F --> End(()) </pre>		<p>(b)</p> <p>(1) pressure, flow rate & temperature of coils & vacuum vessel coolants</p> <p>(c)</p> <p>(1) operation of vacuum pumping system of surface conditioning monitor</p> <p>(d)~(f)</p> <p>(1) (2) } listed in "TEST ITEMS"</p>	
COMMENTS		(1) vacuum vessel in vacuum & at R.T. (2) coil excitation pattern shown in Fig. 14	

付録Ⅱ JT-60 本体コイル通電試験における本体計装一覧

LIST OF MAIN INSTRUMENTATION
INSTRUMENTATION

COMP.	TEST ITEM	SENSOR	NUMBER	INSTALL.	COMMENTS
TF coil	Coolant outlet temperature	Thermocouple	256	Permanent	14 for each coil 14 × 18 2 for manifold 2 for overall inlet/outlet
	Coolant flow rate	Orifice flow meter	19	"	1 for each coil 1 for overall inlet
	Strain	Strain gauge	90	"	36 for coil casing 36 for spacer
	Deflection	Transit	Many	Temporary	
	Magnetic field	Electromagnetic sensor	57	Permanent	23 N probes 24 P probes
	DC feeder circumferential temperature	Thermocouple	3	"	
	Coolant inlet pressure	Thermo-paint	Many	Temporary	
		Diaphragm pressure gauge	1	Permanent	

INSTRUMENTATION

COMP.	TEST ITEM	SENSOR	NUMBER	INSTALL.	COMMENTS
PF coil	Temperature (insulation surface)	Thermocouple	44	Permanent	12 for magnetic limiter coil insulation surface 32 for external PF coils insulation surface
				Temporary	
	Coolant outlet temperature	Thermocouple	31	Permanent	
	Coolant flow rate	Orifice flow meter	6	"	5 for each coil (F, V, H, Q & M) 1 for overall inlet
	Coolant inlet pressure	Diaphragm pressure gauge	1	"	overall manifold
	Strain	Strain gauge	54	"	
	Magnetic field	Electromagnetic sensor		"	

INSTRUMENTATION

COMP.	TEST ITEM	SENSOR	NUMBER	INSTALL.	COMMENTS
Vacuum Vessel	Temperature	Thermocouple	1307	Permanent	510 for rigid ring inner surface 49 outer " 369 heater 92 132 for bellows bellows 116 heater 16 608 for port port 302 heater 126 gate valve 180 57 for the others outer surface of insulator 13 magnetic limiter coils 12 external PF coils 32
	Strain	Strain gauge	16	"	for vacuum vessel supports
	Deflection	Transit & Optical deflection meter	Many	Temporary	Transit for quasi-static deflection (ex. thermal expansion) Optical sensor for dynamic deflection (ex. electromagnetic vibration)
	Vibration	Optical deflection meter & quartz vibration meter	10	Temporary	

INSTRUMENTATION

COMP.	TEST ITEM	SENSOR	NUMBER	INSTALL.	COMMENTS
Vacuum vessel (Cont'd)	Coolant outlet temperature	Thermocouple	16	Permanent	8 for vacuum vessel cooling system 8 for magnetic limiter cooling system
	Coolant flow rate	Karman flow meter	16	"	8 for vacuum vessel cooling system
	Coolant inlet pressure	Diaphragm pressure gauge	3	"	2 for vacuum vessel cooling system 1 for water line 1 for N ₂ gas line 1 for magnetic limiter cooling system
	One-turn current & voltage	Electromagnetic sensors	10	"	2 inside one-turn coils 5 outside one-turn coils 2 Rogowski coils 1 plasma current detection coil
Support structure	Strain	Strain gauge	40	Permanent	
	Deflection	Optical deflection meter & Transit	Many	Temporary	
	Vibration	Optical deflection meter & quartz vibration meter	10	"	

付録Ⅲ TF コイル導体と補強枠との間のギャップを考慮した応力解析

TF コイル導体と補強枠との間に温度差がある場合、両者の間にギャップが生じ、導体に作用する荷重が十分に補強枠に伝えられないため、補強枠に発生する歪が設計値を下回ることが2.1節で示された。この場合、結果的に導体自身の荷重分担率が設計の予想より高くなり、導体の歪値が設計値を上回っていることが予想される。ここでは、TF コイル補強枠の温度と導体部を冷却する冷却水の入口温度との差により両者の間にギャップが生じる場合を想定して応力解析を行った。

解析モデルの模式図をFig. A-16に示す。両者の間に生じるギャップ δ は、冷却水入口温度 $T_{coolant}$ と補強枠温度 T_{casing} との差 $\Delta T \equiv T_{coolant} - T_{casing}$ により発生する。解析に用いたモデルは、導体36ターン、層間絶縁、対地絶縁、補強枠を考慮したFEMモデルであり、詳細は設計報告書を参照された⁽⁷⁾。本解析では、室温にほぼ等しいと考えられる補強枠温度を一定として、冷却水入口温度をパラメータにして、 $\Delta T = \pm 20^{\circ}\text{C}$ の範囲について比較を行った。また、温度差による初期ギャップの効果については、

- ① 導体の変形が進み初期ギャップ δ が0になるまでは、荷重はコイル導体と絶縁層のみで支持されるものとする。この場合の荷重は電磁力のみとする。
- ② 導体の変形が進み初期ギャップ δ が0となれば、それ以上の荷重（電磁力と温度上昇による熱応力）は導体と補強枠の両方で支持されるものとする。

例えば、温度差が $\Delta T = -5, -10, -20^{\circ}\text{C}$ である場合、初期ギャップは各々、 $\delta = 0.24, 0.48, 0.95\text{ mm}$ であり、これらの場合に初期ギャップが0となるのは定格電磁力の7, 14, 28%が導体に作用した状態であり、残りの電磁力と熱応力は導体と補強枠の両方で支持されるとする。

解析結果の代表例をFig. A-17に示す。右側はターン数1番（最内周ターン）、左側はターン数36番（最外周ターン）の導体に発生する応力強さを表わしている。いずれも横軸は温度差 ΔT であり、○印は最狭部、△印はロー付部の計算値を示している。現実的な最大温度差として -10°C を考えても、最も高い応力値を示す最外周ターンの応力増加分は1MPa以下（最狭部）、6MPa（ロー付部）と小さく、導体の寿命に与える影響は無視し得る程度と考えられる。

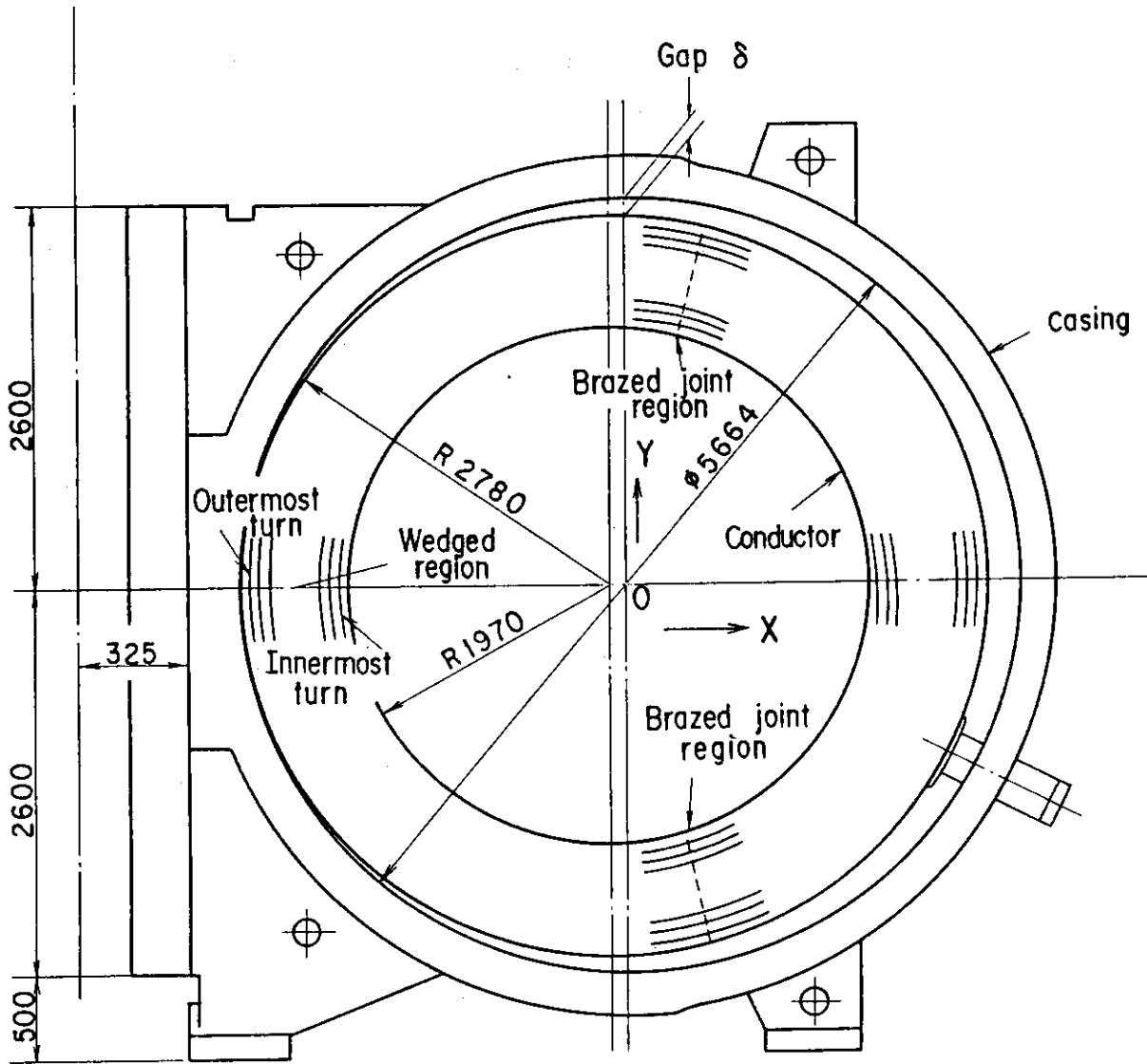


Fig. A-16 Model for stress analysis of toroidal field coil considering gap between conductor and casing.

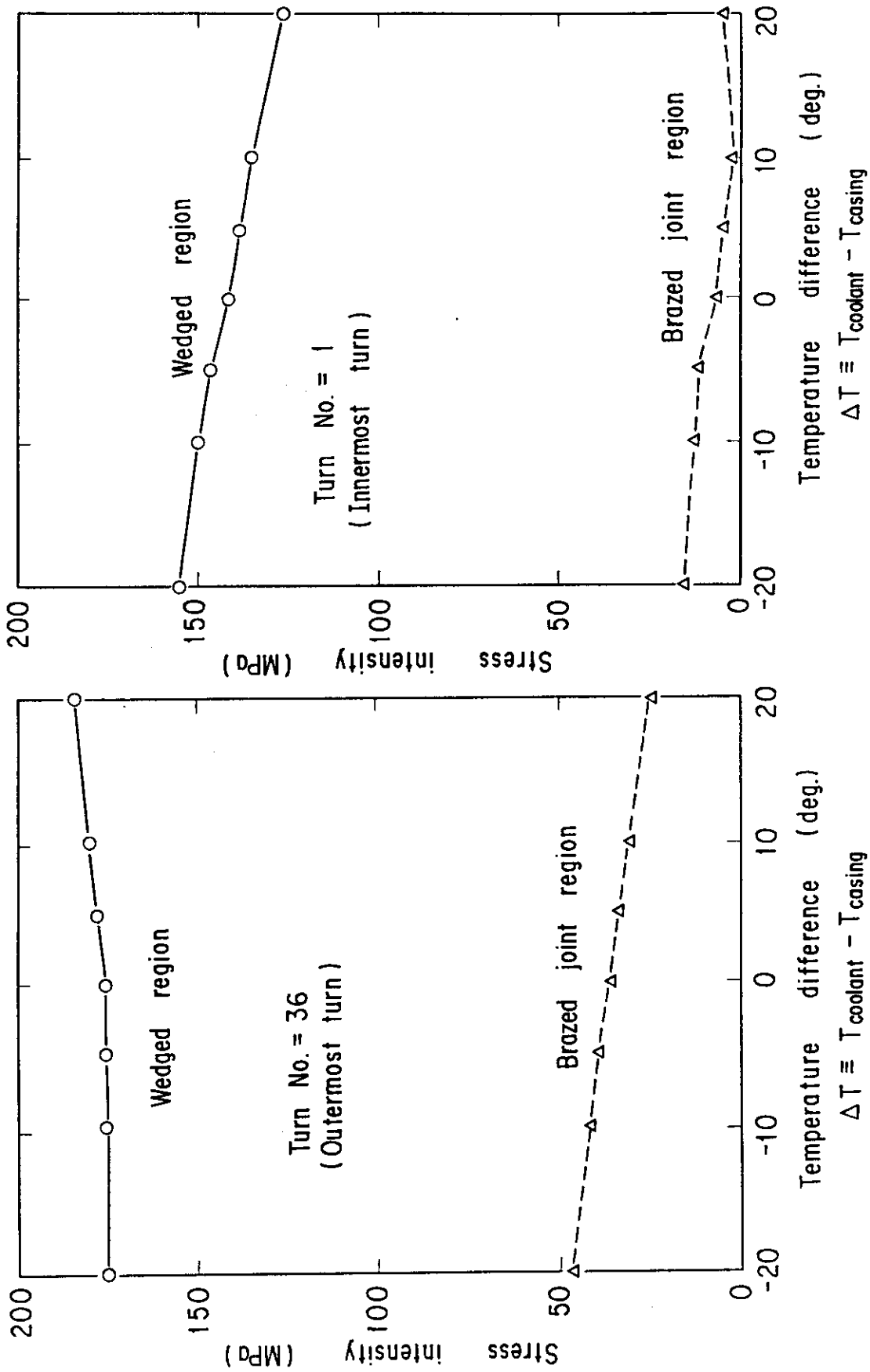


Fig. A-17 Dependence of stress intensity of toroidal field coil conductor on temperature difference between coolant and casing.