

JAERI-M

4 9 2 3

J F T - 2 実 験 計 画

追試実験を中心として

1 9 7 2 年 8 月

核融合研究室 J F T - 2 グループ

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JFT-2 実験計画

追試実験を中心として

日本原子力研究所東海研究所核融合研究室 JFT-2 グループ

(1972年7月20日受理)

これはトカマク型プラズマ発生装置 JFT-2 の追試実験を中心とした実験計画書である。ソ連、米国の実験精度の高いトカマク装置の実験結果を参考にして、JFT-2 における実験の遂行にあたり注意すべき実験項目が個条書形式で記述されている。また JFT-2 における計測手段の準備状況を考慮して作成された実験計画フローチャートおよび実験結果を他のトカマク装置の結果と比較するためのグラフも示されている。

編集者 伊藤智之，的場 徹，東井和夫

担当者 竹田辰興，藤沢 登，前野勝樹

船橋昭昌，田島輝彦，鈴木紀男

Plans for the Experiments in the JFT-2 Tokamak

With Emphasis on Confirmation of the Available Data

JFT-2 group, Nuclear Fusion Lab., Tokai, JAERI

(Received July 20, 1972)

The program for the preliminary experiments in JFT-2 is described. The experimental data obtained from tokamaks in U.S.S.R. and U.S.A. are referred to, and cautions to be taken and problems encountered in application of the data to JFT-2 are given. The course of preliminary experiments in JFT-2 is illustrated, in which preparation of the diagnostic instruments is taken into consideration. The graphs showing the overseas data of tokamaks are so plotted that the results in JFT-2 will be added later for comparison purposes.

Editors

Satoshi ITOH, Tohru MATOBA and Kazuo TOI

Authors

Tatsuoki TAKEDA, Noboru FUJISAWA, Masaki MAENO,

Akimasa FUNAHASHI, Teruhiko TAZIMA

and Norio SUZUKI.

iii

記 号 表

a	プラズマ半径	$q(a)$	プラズマ表面での安定係数
a_{lim}	リミター半径	$q(0)$	プラズマ中心での安定係数
B_a	プラズマ表面でのポロイダル磁場	R	プラズマの主半径
B_p	ポロイダル磁場	R_p	プラズマの電気抵抗
$\dot{B}_p$	ポロイダル磁場の振動成分	r_s	シェルの管半径
$\tilde{B}_p$	ポロイダル磁場の摂動の大きさ	T_e	電子温度
B_{pmean}	ライナー面上での平均ポロイダル磁場	$\bar{T}_e$	プラズマ断面で平均された電子温度
B_R	漏洩磁束密度または垂直磁場コイルによる磁場のトロイダル半径方向の成分	$T_{e(0)}$	プラズマ中心での電子温度
B_t	トロイダル磁場	T_i	イオン温度
ΔB_t	非軸対称性に起因するトロイダル磁場の強さのずれ	$\bar{T}_i$	プラズマ断面で平均されたイオン温度
B_{vd}	直流垂直磁場	$T_{i(0)}$	プラズマ中心でのイオン温度
B_{vp}	パルス垂直磁場	U_-	トーラスの外側と内側の一对の磁気プローブ出力の差
B_z	漏洩磁束密度または垂直磁場コイルによる磁場の垂直方向成分	V_c	プラズマ電流用コンデンサ充電電圧
E_t	単位長さあたりのプラズマの総エネルギー	V_{pr}	一次電圧
f_{Bp}	ポロイダル磁場の摂動の周波数	V_{loop}	プラズマのワンターン電圧
I_p	プラズマ電流	v_{de}	電子ドリフト速度
I_{pmax}	プラズマ電流の最大値	v_{is}	イオンの音速
I_{pr}	一次電流	Z_{eff}	プラズマの実効的な電荷数
I_L	ライナー電流	$\bar{Z}_{eff}$	プラズマ断面で平均されたプラズマの実効的な電荷数
L_p	プラズマのインダクタンス	β	全磁気圧に対するプラズマ圧力の比
ℓ_i	正規化されたプラズマの内部インダクタンス	β_p	ポロイダル磁場圧に対するプラズマ圧力の比
m	ポロイダル磁場の摂動のポロイダル方向のモード数	Δ	プラズマ中心のシェル中心に対する変位
n	ポロイダル磁場の摂動のトロイダル方向のモード数	Δ_B	垂直磁場によるプラズマ柱の変位
n_e	電子密度	θ	磁力線のシアパラメータ
$\bar{n}_e$	プラズマ断面で平均された電子密度	ν_{eff}	実効的なプラズマ衝突周波数
$n_{e(0)}$	プラズマ中心での電子密度	σ	プラズマの電気伝導度 (電子温度から求めた古典的な値)
n_o	中性粒子密度	$\bar{\sigma}$	プラズマ断面で平均されたプラズマの電気伝導度
P_o	初期ガス圧	σ_{exp}	プラズマの電気伝導度の実測値
q	安定係数	$\bar{\sigma}_{exp}$	プラズマ断面で平均されたプラズマの電気伝導度の実測値

τ_E	エネルギーの閉じ込め時間	τ_n	荷電粒子の閉じ込め時間
τ_H	プラズマの熱伝導に関係した閉じ込め時間	τ_{ph}	予備加熱時間
τ_j	プラズマ電流維持時間	τ_r	プラズマからの放射および荷電交換に関係した閉じ込め時間

第1章 ま え が き

この実験計画は本年4月に核融合研究室に設置されたトカマク型超高温プラズマ発生装置 J F T-2 の実験を円滑に進めるために作成されたものである。現在までに J F T-2 の実験計画を遂行するうえで過去約10年間にわたるソ連でのトカマク実験に関する文献を問題点別に分類しまとめたもの¹⁾およびそれ以後のトカマクに関する報告をウィスコンシン会議での発表を中心にしてまとめたもの²⁾がつくられている。これらの総合報告のほかにトカマクで問題となっている事項や今後の課題が J F T-2 のプラズマパラメータを用いて検討されている。³⁾本計画書ではこれらの報告を参考にして J F T-2 の具体的な実験計画を記述する。

現在 J F T-2 の各種の測定装置の調整、準備がすすめられ、磁場精度の測定も実施されている。これらにつづいて、できるだけすみやかにしかも能率よく過去のトカマクのデータを検証するため追試実験がなされなければならない。またこの追試実験を通じて不明な部分、今後問題となると考えられる重要な事項に対し独自の新しい研究方針を確立することが必要である。

本計画書の第2章では最も基礎的なプラズマパラメータのあらい評価について述べる。第3章では J F T-2 のプラズマパラメータの可変領域の決定について述べる。第4章では追試実験の具体的内容について記述する。そこでは実験精度の高い T M-3, T-3, T-4, T-6 (以上、ソ連クルチャトフ研究所), S T (米国プリンストン大学)の実験結果を参考にして次の6項目を検討する。

- (1) 電子温度, イオン温度, 各種の閉じ込め時間
- (2) 捕捉粒子
- (3) 電気伝導度
- (4) 安定係数 q と安定領域
- (5) 安定係数 q とポロイダル磁場の摂動の周波数およびモード数との関係
- (6) 異常変位, スパイク振動

これらの各項目に対して現在考えられる最も正確な測定法, 最も妥当と思われる検証法, 評価法を述べ過去にソ連や米国のトカマクで使われてきた方法を記述する。このときとくに追試実験で注意しなければならない過去の実験結果をまとめグラフをつくる。このグラフは J F T-2 の実験データをプロットする際に利用するものとし, 本文中の図表番号にアンダーラインを付してある。最後に実験遂行のためのフローチャートを示す。

なお, 本計画書にしたがって実験をすすめる際必要となる物理量等のグラフは文献4)を参照するものとする。

第2章 基礎的プラズマパラメータの評価

まず最初に電子温度，イオン温度，電子密度および閉じ込め時間のあらひ評価をおこない，その結果が設計目標値とどの程度の差があるかを調べる。また，シエル中心に対するプラズマ中心の変位 Δ の測定もおこなっておく必要がある。ここで，これらの測定法や評価法としてはJFT-2での計測装置の準備状況から判断してきめる必要があるが現在のところ次のとおりである（第1表）。

電子温度はプラズマの電気伝導度および反磁性測定によって求める。イオン温度は荷電交換によりプラズマから放出される高速の中性粒子のエネルギー分析から求める。電子密度はマイクロ波の干渉法によって測定する。閉じ込め時間としてはエネルギーの閉じ込め時間を考え，現在一応測定可能な量でのみ表わされる簡単な式，

$$\tau_E = \frac{E_t}{Q_J - \frac{dE_t}{dt}} \quad (2.1)$$

で評価する。ただし， E_t はプラズマの単位長さあたりの総プラズマエネルギーでありプラズマの反磁性測定により求められる。 Q_J はジュール加熱によりプラズマの単位長さあたりに単位時間に注入されるエネルギーであり，プラズマの電流電圧特性から求められる。シエル中心に対するプラズマ中心の変位 Δ はプラズマリングの内側と外側に設置された磁気プローブ対で求める。 Δ の測定は垂直磁場の精度とその効果のあらひ評価をおこなうことを主たる目的としている。

なお，第4章において上述の測定法や評価法についてその妥当性を検討する。

第1表 JFT-2の計測手段の整備状況

昭和47年7月1日現在

計測器	測定量	S.47							S.48				S.49
		7	8	9	10	11	12	1	2	3	4~6	7~9	10~12
プラズマ監視装置													
デバイダー	一次電圧 (V_{pr})	●											
シャント	一次電流 (I_{pr})	●											
ワンターンコイル	ループ電圧 (V_{loop})	●											
ロコスキークコイル	プラズマ電流+ライナー電流	●											
Bt ロコスキークコイル (長磁性コイル)	プラズマエネルギー (平均)	●											
2ターンコイル	プラズマエネルギー (平均)	●											
磁気プローブ	Δ	●											
	m, n 数	●											
2mm マイクロ波	$n(r)$	●											
VUV モノクロメータ	不純物同定				●								
	不純物空間分布						●						
中性粒子計測	$\overline{T_e}(r)$	●											
可視モノクロメータ	不純物	●											
レーザ光散乱	$T_e(r)$							●					
	$n_e(r)$							●					
VUV ホリクロメータ	不純物											●	
硬 X 線	逃走電子など	●											
軟 X 線	T_e				●								
ボロメータ	プラズマエネルギー損失						●						
パルス重量法	$O(r)$ 分布						●						

第3章 JFT-2のプラズマパラメータの可変領域

つぎに行なわなければならない重要なことはJFT-2の外部パラメータの可変領域およびプラズマ自体のパラメータ（以後内部パラメータと呼ぶことにする）の可変領域をあらかじめ調べておくことである。ここで外部パラメータとは直流垂直磁場 B_{vd} ，パルス垂直磁場 B_{vp} ，トロイダル磁場 B_t ，プラズマ電流用コンデンサ充電電圧 V_c ，初期ガス圧 P_0 ，予備電離についての条件などである。一方，内部パラメータとは電子密度 n_e ，電子温度 T_e ，イオン温度 T_i ，中性粒子密度 n_0 ，プラズマ電流 I_p ，プラズマ半径 a ，プラズマ変位 Δ などである。これらのパラメータについて第2表のような表をつくり必要なグラフは適宜作製する。（ 頁）

第4章 追試実験の主な対象項目

ここでは第1章であげた6項目について、各項目ごとにそれらの測定法、評価法を詳しく述べる。まず現在最も正確と考えられる測定法あるいは最も妥当と考えられる評価法を述べ、次に追試実験で特に注意しなければならないソ連や米国におけるトカマク実験の結果をまとめる。各項目の最後にJFT-2での進め方について計測装置の準備状況に応じて記述する。なお、計測装置の準備状況は第1表に示してある。

4.1 電子温度，イオン温度，各種の閉じ込め時間

4.1.1 電子温度

電子温度の最も正確な測定法としてはレーザー散乱法が考えられる。この方法は電子温度の空間分布を正確に決定できる唯一の方法である。トカマクではこのほかに反磁性測定、軟X線のエネルギー分析、分光学的方法、プラズマの電気伝導度から求める方法などが使用されている。反磁性測定でえられる量はプラズマ断面で平均されたものである。プラズマ半径、電子密度とその分布に関する情報がえられておれば温度分布を適当に仮定することにより電子温度とイオン温度の和がえられる。この方法はプラズマの総エネルギーを求めるのに便利である。軟X線法では電子温度がレーザー散乱法でえられる値に比べて高めに評価され、電気伝導度から求めれば低めに評価される。また分光学的方法は極めて限られた条件でのみ使用されている。

次に電子温度に関して注意しなければならない実験項目、実験結果を列記する。

1. プラズマ電流波形に対する電子温度分布 $T_e(r)$ (および $T_e(0)$: プラズマ中心での値) の時間変化 (第1図)。
2. トロイダル磁場を固定したときの $T_e(0)$ の電子密度 $n_e(0)$ およびプラズマ電流 I_p に対する依存性 (第2, 3図)。ただしプラズマ電流波形は同一に保つこと、および電子温度、電子密度の分布が著しく異ならないことを確認しておく必要がある。
3. $n_e(0) \cdot T_e(0)$ の I_{pmax} 依存性 (第4図)。このときも2.で述べたことに注意する必要がある。

JFT-2では現在のところ分光学的方法による電子温度測定は困難であり、レーザー散乱法は昭和48年2月頃、軟X線法は早くても48年1月頃になると考えられるので、当初は電気伝導度および反磁性測定による方法を用いて行なう。したがって当初は上記1.についてはプラズマ半径について平均した値を用いる。2.および3.についても同様に平均値で議論をすすめることとする。また反磁性測定によってえられる温度はイオン温度も含んでいるが当初はイオン温度が低いと考えられるので(中性粒子のエネルギー分析法により確認できる)温度の半径方向分布を仮定することによって電子温度のあらひ評価ができる。なおレーザー散乱法が整備できた時点で再度データをとることとする。

4.1.2 イオン温度

イオン温度の測定法としてはある限られた条件内であるがスペクトル線のドブラー幅から求

める方法が正確である。この方法によれば観測領域で平均された値がえられる。またアーベル変換を使うか、STにおけるように注目しているスペクトル線がある場所に局在しているときには空間分布 $T_i(r)$ が決定できる。このほかに荷電交換により放出される高速の中性粒子のエネルギー分析法や中性子放射強度から求める方法があるが、両者ともプラズマの中心部のイオン温度を与えるのでスペクトル線のドブラー幅からえられるイオン温度よりも一般には高い。

以下にイオン温度に関して注意すべき過去の実験項目、実験結果を列記する。

1. イオン温度 T_i の時間変化とイオン温度の空間分布 $T_i(r)$ (第5図, 第6図)。
2. イオン温度の電子密度依存性 (第7図)。
3. イオン温度の最大プラズマ電流 I_{pmax} 依存性 (第8図)。
4. イオン温度のスケーリング法則。イオンは電子から古典的なクーロン衝突によりエネルギーをえて、新古典的な熱伝導によってエネルギーを失うとすると、

$$\bar{T}_i \propto (I_p B_t \bar{n}_e R^2)^{\frac{1}{3}} A^{-\frac{1}{3}}$$

というスケーリング法則をうる。第9図はTM-3, T-3A, T-4の実験結果である。

5. 4.1.1で述べた電子温度に関する実験結果をあわせて、プラズマの単位長さあたりの全エネルギー(イオンと電子との和)の I_{pmax} 依存性 (第10図)。

JFT-2では中性粒子のエネルギー分析法のみで測定可能である。しかしながら、実験開始当初はイオン温度がそれほど高いとは考えられないので、最初はイオン温度をモニターする程度にとどめ、追試実験の後半に上記の5項目について詳細に調べるのが得策である。なお、5.については反磁性測定法でも可能であるので、比較のために初期段階で調べておくことは意味がある。

4.1.3 閉じ込め時間

プラズマからの主なエネルギー損失としては磁場を横切つての荷電粒子の拡散、熱伝導、放射および荷電交換が考えられる。各エネルギー損失が互いに独立であれば、

$$1/\tau_E = 1/\tau_n + 1/\tau_H + 1/\tau_r \quad (4.1)$$

という関係式が成立すると考えられる。ここで、 τ_E はエネルギーの閉じ込め時間、 τ_n は荷電粒子の磁場を横切つての拡散に関係したエネルギー損失をあらわす特徴的な時間、 τ_H は磁場に垂直な方向の熱伝導に関係したエネルギー損失を特徴づける時間、 τ_r は放射および荷電交換によるエネルギー損失を特徴づける時間である。ただし、(4.2)式において dQ_r/dt を考慮するときは(4.1)式の第3項 $1/\tau_r$ を除いた式を用いるものとする。

エネルギーの閉じ込め時間を次式で評価すれば一応信頼できる結果と考えられる。

$$\tau_E = \frac{N[r(T_e + T_i) + eV_i]}{R_p I_p^2 - \frac{d}{dt} \left[\frac{3}{2} N(T_e + T_i) \right] + eV_i \left(\frac{dN}{dt} \right)_{pl} - \frac{dQ_r}{dt}} \quad (4.2)$$

ここに、 N : プラズマの全電子数、 eV_i : 水素原子の電離エネルギー、 $\left(\frac{dN}{dt} \right)_{pl}$: プラズマ中

の全電子の減少速度, Q_r : 放射および荷電交換によるエネルギー損失であり分光学的方法, 中性粒子分析器あるいはボロメータで評価できると考えられる。また τ は温度に対する平均運動エネルギーの比である。しかし, いままでは (4.2) 式よりさらに簡単化された (2.1) 式がよく用いられてきた。なお (2.1) 式の各量の求め方については第2章ですでに述べたが単位時間にプラズマの単位長さあたりに注入されるエネルギー Q_J の評価が問題である。すなわち, ループ電圧からプラズマインダクタンスに関係する電圧をいかに差し引くかが問題であり, この前にインダクタンスを求めておく必要がある。

荷電粒子の閉じ込め時間 τ_n としては,

$$\tau_n = \frac{N}{I - \frac{dN}{dt}} \quad (4.3)$$

で定義するのが最も妥当と考えられる。Nはプラズマの全電子数であり, 中性粒子の電離による単位時間あたりの荷電粒子の生成数を I とする。ここで I は中性粒子の電離確率に比例している。この電離確率に関してはクルチャトフ研究所のグループの用いている値とプリンストン大学のグループの用いている値とに差異があり, 現在問題となっている点であり, 5) 当グループでも早急に検討する必要がある。なお, I を評価するときには分光学的方法が用いられている。

τ_H について記述する。 τ_E, τ_n が上記に述べたような評価法で求められ, τ_r が分光学的方法, 中性粒子分析器あるいはボロメータによって決定することができれば, 各エネルギー損失が互いに独立かどうか問題ではあるが, 一応 (4.1) 式から間接的に熱伝導によるエネルギー損失 τ_H を評価できるであろう。

以下に閉じ込め時間について注意しなければならない実験項目, 実験結果をまとめる。

1. 閉じ込め時間のプラズマ電流波形に対する依存性。 τ_E のプラズマ電流波形に対する依存性は T-3 などにおいて調べられている (第11図)。
2. τ_E のスケーリング法則。(a) $\tau_E \propto a^2 B_p$ と電子密度依存性を考慮したスケーリング則 $\tau_E \propto n_e^{\frac{1}{2}} a^2 B_p$, および (b) $\tau_E \propto n_e a^2 (T_e + T_i)^{\frac{3}{2}}$ が成立する電子密度 n_e , 安定係数 q , プラズマ電流値 I_p , トロイダル磁場 B_t , 電子温度 T_e , イオン温度 T_i などの領域を調べる (第12図)。(a)(b)二種類のスケーリング則はいずれもプラズマ半径に依存しており, JFT-2 ではリミター径をかえることによりプラズマ半径依存性が調べられると考えられる。
3. τ_H の電子密度依存性。第13図は TM-3 でえられた結果である。JFT-2 では当初は τ_n, τ_E の大雑把な測定にとどめ, ボロメータの準備およびプラズマ温度の上昇をまって追試実験の後半に τ_H などの正確な測定を行なう方が得策である。

4.2 捕捉粒子

ここでは捕捉粒子の存在の実験的な検証について述べる。T-3, TM-3 において荷電交換によりプラズマから放出される高速中性粒子束の大きさがトーラス面の上下方向に非対称となることがわかり, この原因は捕捉粒子が存在するためであると説明されている (第14図)。しかし以上の検証法では定性的な評価がなされたにすぎない。JFT-2 でも 4.1.2 で述べた

イオン温度の測定の際にこの検証を並行しておこなうことができる。以下に注意すべき事項を述べる。

1. この実験と同時に中性粒子の空間分布を測定しておくこと。
2. イオン-イオンの衝突周波数をかえて、注目しているエネルギーを有する粒子束の上下方向の非対称性がどのように変化するかに着目すること。またバナナ領域だけでなく MHD 領域でも実験がおこなえるかどうか検討する。
3. 定量的評価を検討すること。たとえば、非捕捉粒子数に対する捕捉粒子数の割合のプラズマアスペクト比に対する依存性。
4. 第 14 図のような結果がえられる原因として捕捉粒子以外にも考えられないかどうか十分検討すること。

4.3 電気伝導度

トカマクでは当初プラズマの電子温度を電気伝導度から求めていた。しかし、反磁性測定、レーザ散乱法からえられる電子温度よりかなり低いことがわかり、プラズマの異常抵抗という問題がおこった。現在、その主な原因として次の 4 点が考えられている。

1. 不純物イオンの存在 (第 3 表: ST での結果)。
2. 捕捉粒子の存在 (第 4 表: ST での結果)。
3. イオン音波不安定性 (第 15 図)。
4. その他の不安定性や異常効果。

T-3, ST での異常抵抗係数 $\sigma/\sigma_{\text{exp}}$ は小さく、1.0 以下である。ここで σ は電子温度から Spitzer の式を使って求めた電気伝導度であり、 σ_{exp} はプラズマの電流電圧特性から求めたものである。これに対し TM-3 では $\sigma/\sigma_{\text{exp}}$ がかなり大きく 6.0 程度に達する場合もみられる。ST では不純物イオンを分光学的測定法を使って精密に測定することによって異常抵抗は不純物イオンの存在で説明できるとしている。さらに捕捉粒子の存在による電気伝導度の減少に関する実験を行っており、理論と矛盾しない結果をえている。一方、T-3, TM-3 では異常抵抗の原因をイオン音波不安定性によるものかどうかを調べるため第 15 図のような $\sigma/\sigma_{\text{exp}}$ の v_{de}/v_{is} 依存性を求めている。

JFT-2 では次の項目に注意して追試実験を行なうこととする。

1. σ_{exp} としてはプラズマ断面での平均値 $\bar{\sigma}_{\text{exp}}$ を用いるものとする。ただし、プラズマインダクタンスに関係する電圧を求めるとき、インダクタンスとしてシェルのプラズマとの同軸近似で求めた $L_p = \mu_0 R [\ln(r_s/a) + \ell_i/2]$ を使うものとし、正規化された内部インダクタンス ℓ_i は適当な電流密度分布を仮定して求めることとする。⁶⁾ なお μ_0 は真空の透磁率であり r_s, R, a はそれぞれシェルの半径、プラズマの主半径、プラズマ半径である。一方、 σ としては電子温度 T_e から Spitzer の式を使って求め、プラズマ断面で平均した値 $\bar{\sigma}$ を用いるものとする。
2. $\bar{\sigma}/\bar{\sigma}_{\text{exp}}$ の v_{de}/v_{is} 依存性を調べる。
3. 分光学的方法により不純物イオンの種類と密度を調べ、プラズマの実効的な電荷数 Z_{eff} を求める。この値のプラズマ断面での平均値 $\bar{Z}_{\text{eff}}$ を求め、 $\bar{\sigma}/(\bar{Z}_{\text{eff}} \cdot \bar{\sigma}_{\text{exp}})$ の値を吟

味する。

4.4 安定係数 q と安定領域

トカマクにおいてプラズマのMHD安定性はかなり以前から研究されているが1969年以降に特に詳しい実験がおこなわれるようになった。現在までにおこなわれた主な実験項目は次のとおりである。

1. Shafranov - Kruskal 限界。
2. 安定係数 q とMHD不安定性のモード数との関係 (4.5で述べる)。
3. MHD安定性のプラズマ電流波形に対する依存性。
4. 導体壁の効果。
5. スパイク振動 (4.6で述べる)。

以上については文献(1)(2)(3)などに詳しく述べられている。しかし、MHD安定性に関して系統的に実験がなされているとはいえない。したがって、JFT-2では追試実験というよりも以下にのべるように新たに系統的な進め方をとるほうが望ましい。すなわち、

1. 不安定性の発生する外部パラメータの領域を明白にする。
2. 不安定性が観測される場合と観測されない場合とにおける内部パラメータの相違を明白にする。
3. えられた実験結果をもとに理論と比較する。

以上のことをさらに詳細に示すと第16図のようになる。

JFT-2でのMHD安定性の実験をおこなうときに特に注意すべき事項は以下のとおりである。

1. プラズマ表面での安定係数 $q(a)$ を求めるときプラズマ半径の評価が問題となる。プラズマの外部インダクタンスの測定、電子温度分布、電子密度分布などから求める方法があるが、どの方法が妥当であるか検討を要する。
2. Shafranov-Kruskal 限界の検証
3. ポロイダル磁場の摂動の測定から安定係数 $q(a)$ に対する安定領域を求める (第17図)。このとき $q(a)$ と同時に安定領域を規定すると考えられるパラメータである r_s/a (r_s : シェルの管半径), 電流密度分布, 電子密度などに注目する。
4. $q(a)$ の時間微分に対するポロイダル磁場の摂動の大きさ $\tilde{B}_p$ の依存性もあわせて調べ, 安定領域を拡大する方法をさぐる。第18図にT-3Aでえられたプラズマ電流波形に対するポロイダル磁場の摂動の大きさ $\tilde{B}_p$ の振舞を示しておく。

4.5 安定係数 q とポロイダル磁場の摂動の周波数およびモードとの関係

4.4の内容と不可分なものであるが、ここであらためてまとめる。

T-3においてポロイダル磁場の摂動 $\tilde{B}_p$ の周波数が測定され10kHz程度であることが示された。クルチャトフ研究所のグループはこの原因が単に電場と磁場とによるプラズマ回転であると考えている。STではさらに詳しく実験をおこない、この回転の周波数が電子反磁性ドリフト周波数 ω_{pe}^* と非常によく一致するという結果をえている。しかし ω_{pe}^* の評価にはまだ問

題がある。

一方、ポロイダル磁場の摂動のモード数は安定係数 $q(a)$ とほぼ一致するという結果がえられている。そしてトロイダル磁場は時間的に一定であるがプラズマ電流が増加すること、あるいはプラズマ半径が減少することによって $q(a)$ は時間的に減少する。それ故、摂動のモード数も放電初期では大きく次第に減少していくはずであり、実験的にもほぼ確かめられている。

JFT-2でもT-3, STなどと同様にトラス周囲に設置された多数の磁気プローブによって摂動の周波数とモード数を求める。その結果を次の点に注意して整理することが必要である。

1. モード数の時間的変化と安定係数 $q(a)$ との共鳴性を調べる。
2. 摂動 $\tilde{B}_p$ の周波数 $2\pi f_{Bp}$ と電子反磁性ドリフト周波数 ω_{pe}^* との比較を行なう。ここで

$$\frac{\omega_{pe}^*}{m} \propto \frac{1}{B_t n_e r} \cdot \frac{d(n_e T_e)}{dr} \propto \frac{T_e}{B_t r_m^2}$$

のような関係があり、 r_m はモード数 m と q とが一致する有理面の半径であり、他の文字は通常の意味で用いられている。 $2\pi f_{Bp}/m$ の時間変化（後ほど示す第19図参照）、およびトロイダル磁場、電子温度依存性を調べる。また電流密度分布を推定して r_m を求めその依存性についても検討する。

3. プラズマの回転が電子の圧力勾配と磁場とによって駆動されているとして矛盾はないか検討する。

4.6 異常変位, スパイク振動

Shafranov の平衡理論によればプラズマ中心のシェル中心に対する変位 Δ は垂直磁場による変位 Δ_B と直線関係にある。しかしTM-3で初期圧を高くしたとき Δ と Δ_B とが直線関係になく、しかも垂直磁場の効果が理論的に予想されるよりわるくなるということが観測された。この原因はいくつか考えられているがT-3, STなどでは全くこのような現象は観測されおらずTM-3固有の異常現象とも考えられる。したがってJFT-2では Δ と Δ_B との関係を求め異常現象が観測されたときにその原因を調べるような手順をとった方がよい。

次にスパイク振動については、T-3, STなどほとんどすべてのトカマクで観測されている。この振動の特徴としてはワンターン電圧波形に鋭い負のスパイクが現われることである（第19図）。この振動については文献(1)(2)(3)にくわしく述べられている。この振動についての結論はえられていないが、その発生原因として次のようなものが考えられている。

1. トロイダル磁場を下げたり、プラズマ電流値を増加させたりして安定係数を下げたときなどでプラズマ中心での安定係数 $q(a)$ が1以下になると予想されるとき。
2. 中性ガスを加えたり真空条件が悪いとき（プラズマ表面が外界との相互作用をするためと考えられている）。
3. 電子密度がある臨界値をこえるとき。
4. 垂直磁場が不適当でプラズマがある値より大きく外側へ変位したとき。

この他にもいくつかの原因があげられているがここでは省略する。次に電圧スパイクの発生と

同期して現われる諸現象を以下に記述する。

1. 不純物のスペクトル線のインパルスの増加
2. 中性粒子圧のインパルスの増加
3. 硬 X 線放射の停止
4. 電子密度の急増
5. 電子温度の低下
6. トーラスの内側へ向ってのプラズマ柱の急激な変位
7. プラズマ半径の急増
8. リミターへ流入する電流の急増

その他いくつかの特徴が観測されているがあまり重要でないので省略する。以上スパイク振動に関する諸現象について述べたが、現在考えられるいくつかの理論的解釈について述べる。

1. 捕捉粒子ピンチ効果 (Ware の理論)。
2. リミターとの相互作用などに起因するプラズマ半径の減少による MHD 安定性の悪化。
3. 過熱不安定性によるプラズマ半径の減少。
4. プラズマの主半径の振動に同期したプラズマ半径の減少。

ここで注意すべきことは上述のどの理論的考察もプラズマ半径の減少に着目しているということである。

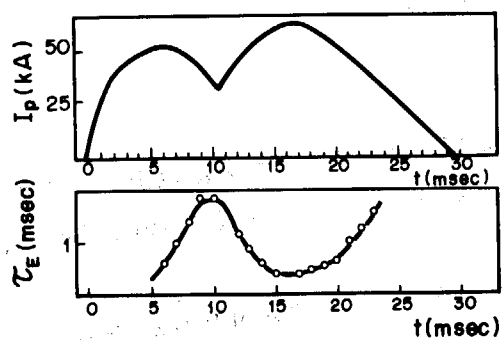
JFT-2 においてスパイク振動が観測された場合には次のように進める。

1. 安定係数 $q(a)$, 電流密度分布を特徴づけるパラメータ (たとえば正規化された内部インダクタンスや電気伝導度の空間分布 $\sigma(r)$) および電子密度あるいは初期圧などによってスパイク振動の発生領域を求める。
 2. スパイク振動の原因が捕捉粒子ピンチ効果によるとすれば安定係数 $q(a)$ を固定し, 電子密度または電子温度をかえてバナナ領域での実験をおこなうこと。また MHD 領域での実験が可能かどうか検討する。ただし $q(a)$ は MHD 的に安定であると考えられる値をえらぶこと。
 3. プラズマ半径, 電子温度分布 (電流密度分布の推定のため) およびプラズマ中心の変位 Δ の時間的变化をできるだけ正確に調べる。
 4. リミター付近の様子。たとえば不純物のスペクトル線強度, 硬 X 線放射強度などの時間的变化も調べる。なお硬 X 線放射強度の測定により逃走電子の検証もあわせておこなう。
- 以上のような方法によりスパイク振動の原因を明白にし, スパイク振動の防止法を考えることが必要である。

T-3

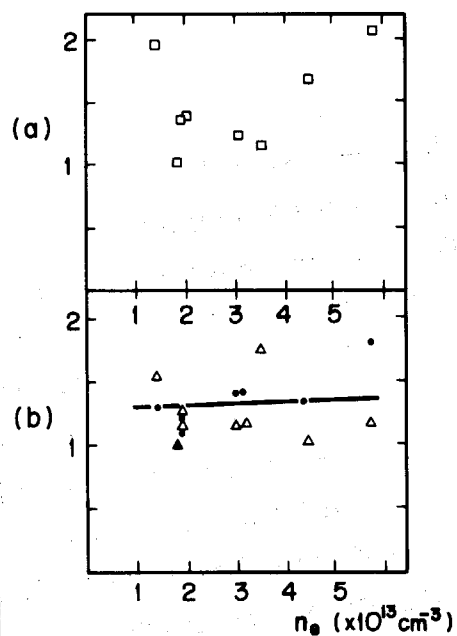
$$B_t = 25 \text{ kG}$$

$$\bar{n}_e = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$



第 11 図

T-3



$$(a) n_e a^2 (T_e + T_i)^{3/2} / \tau_E$$

$$(b) \bullet - n_e^{1/2} a^2 B_p / \tau_E$$

$$\Delta - a^2 B_p / \tau_E$$

第 12 図

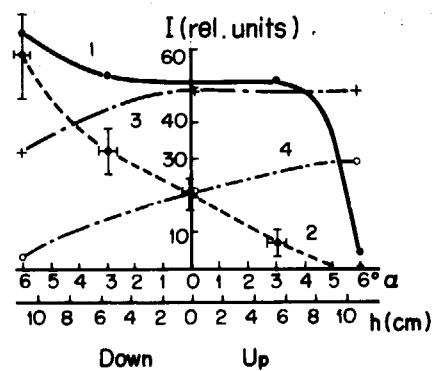
T-3

$$B_t = 25 \text{ kG}$$

$$I_p = 55 \text{ kA}$$

$$\bar{n}_e = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

1. $E = 200 \text{ eV}$; $B_t \uparrow \uparrow I_p$
2. $E = 780 \text{ eV}$; $B_t \uparrow \uparrow I_p$
3. $E = 200 \text{ eV}$; $B_t \downarrow \downarrow I_p$
4. $E = 780 \text{ eV}$; $B_t \downarrow \downarrow I_p$



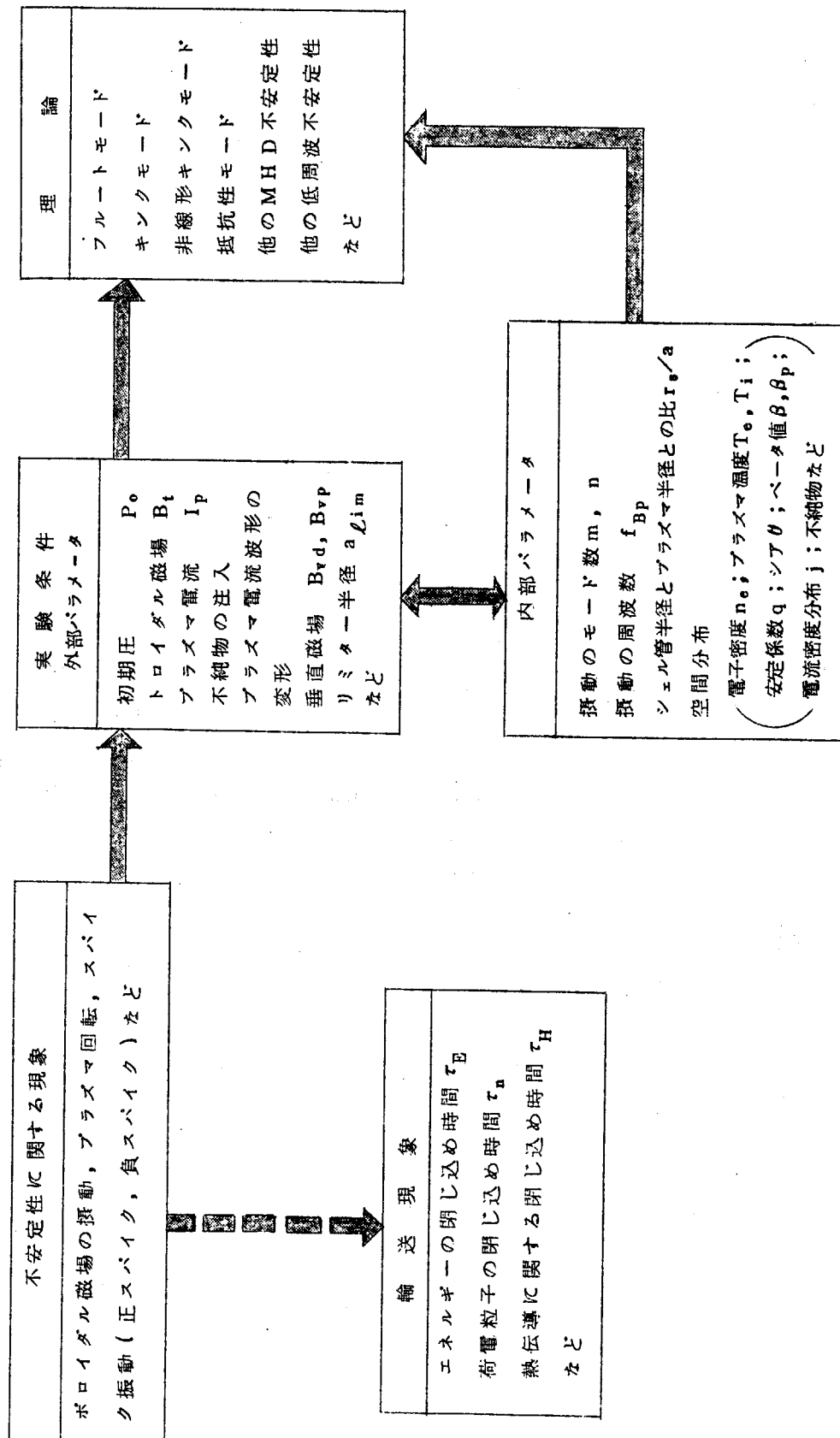
第 14 図

第 3 表

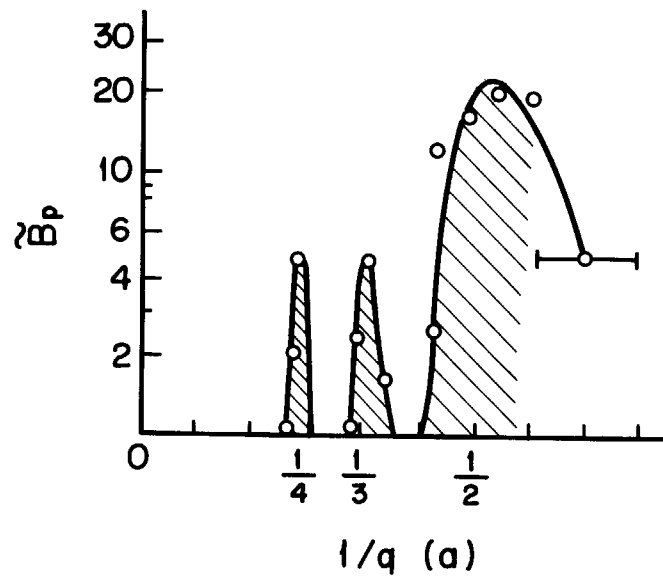
Gas	P_0 (mTorr)	$\bar{T}_e$ (eV)	$\bar{\sigma}/\bar{\sigma}_{exp}$			v_{de}/v_{is}
			$\bar{Z}_{eff}=1$	$\bar{Z}_{eff}=2$	$\bar{Z}_{eff}=4$	
He	0.28	493	4.5	2.6	1.6	0.39
He	0.12	468	4.4	2.6	1.5	0.79
He	0.11	372	4.3	2.5	1.5	1.1
He	0.20	297	3.3	1.9	1.1	0.48
H ₂	0.20	470	4.1	2.4	1.4	1.1
H ₂	0.34	247	1.9	1.1	0.67	0.79
H ₂	0.32	430	5.8	3.3	1.9	1.3
He	0.12	447	3.7	2.2	1.3	2.0
He	0.12	190	2.6	1.5	0.92	2.1
He	0.12	289	4.3	2.4	1.4	2.3
He	0.12	107	6.5	4.7	2.1	2.2

第 4 表

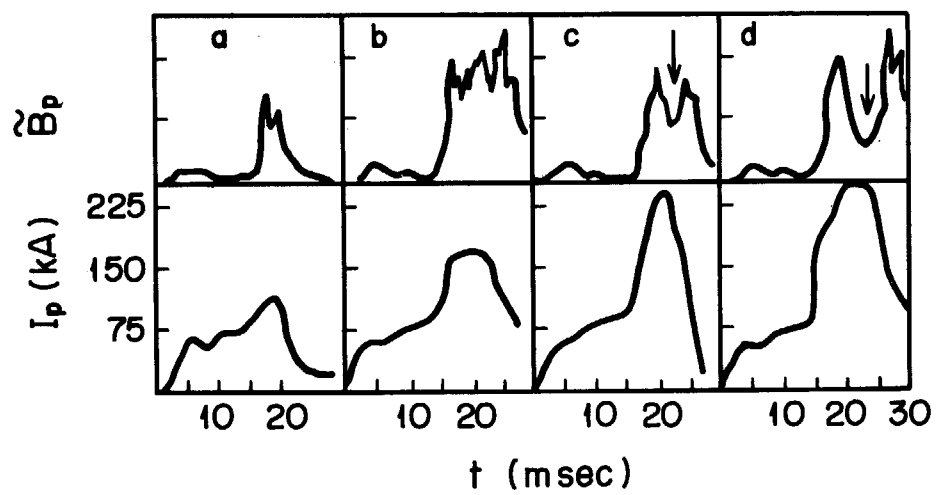
	水 素			重 水 素	
	1.0×10^{-4} Torr			1.4×10^{-4} Torr	
$\Delta B_t/B_t$ (%)	1.5	11.0	30.0	1.5	2.8
$\bar{n}_e$ (10^{18}cm^{-3})	0.65	0.68	0.71	1.53	1.52
$\bar{T}_e$ (eV)	368	444	312	500	550
$\bar{\sigma}/\bar{\sigma}_{exp}$	3.8	5.8	3.8	4.0	8.5



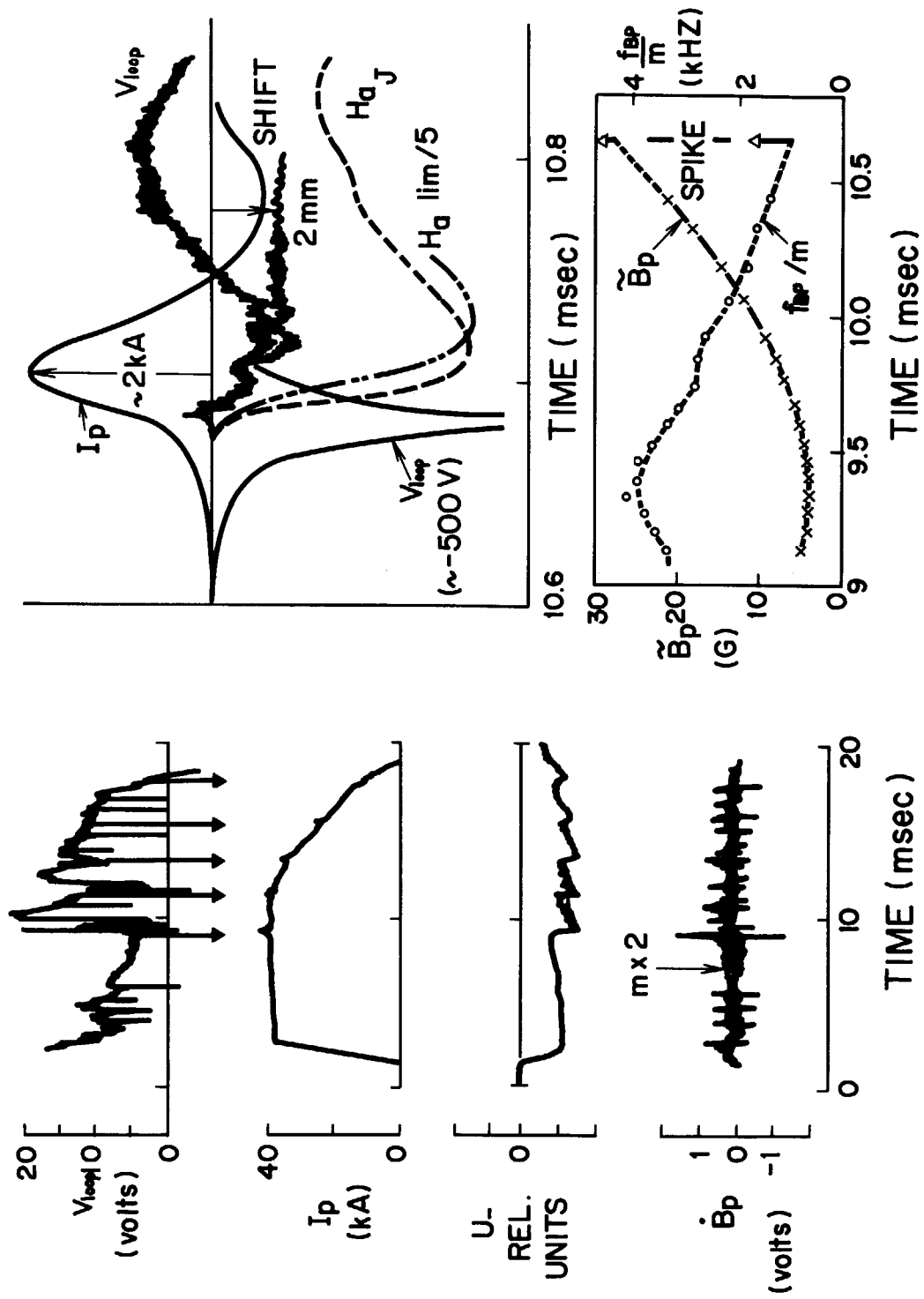
第 16 図



第 17 図



第 18 図



第 19 図

第 5 章 む す び

JFT-2における追試実験をおこなうにあたりトカマクでの注目すべき実験結果や測定法および理論的考察などについて述べてきた。これらの実験を通じてJFT-2における特徴ある実験計画がまとめられていくことが期待される。

なお、追試実験の範疇にははいらないがJFT-2の最大の特長の一つであるダイナミックリミターを使用しての一連の実験を追試実験の期間におこなうものとする。

以上のべてきた実験計画をまとめて第5表にフローチャートとして示しておく。ただし、このフローチャートの開始時点は電子温度が約100eVをこえた時点とし、最も基礎的なプラズマパラメータの評価(第2章)およびJFT-2のプラズマパラメータの可変領域を調べること(第3章)は、1月目におこなうものとする。

最後にこの実験計画書の作成にあたり種々の有益な助言をいただいた森茂核融合研究室長に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 東井, 伊藤 ; JAERI-memo 4286 (1971).
- 2) 伊藤, 藤沢 ; JAERI-memo 4618 (1971).
- 3) 田中他 ; JAERI-memo 4366 (1971).
- 4) N.Suzuki et al., JAERI-M 4726 (1972).
- 5) 河西他 ; JAERI-memo 4596 (1971).
- 6) N.Suzuki et al., Ref 4. Fig 23 (P.64).

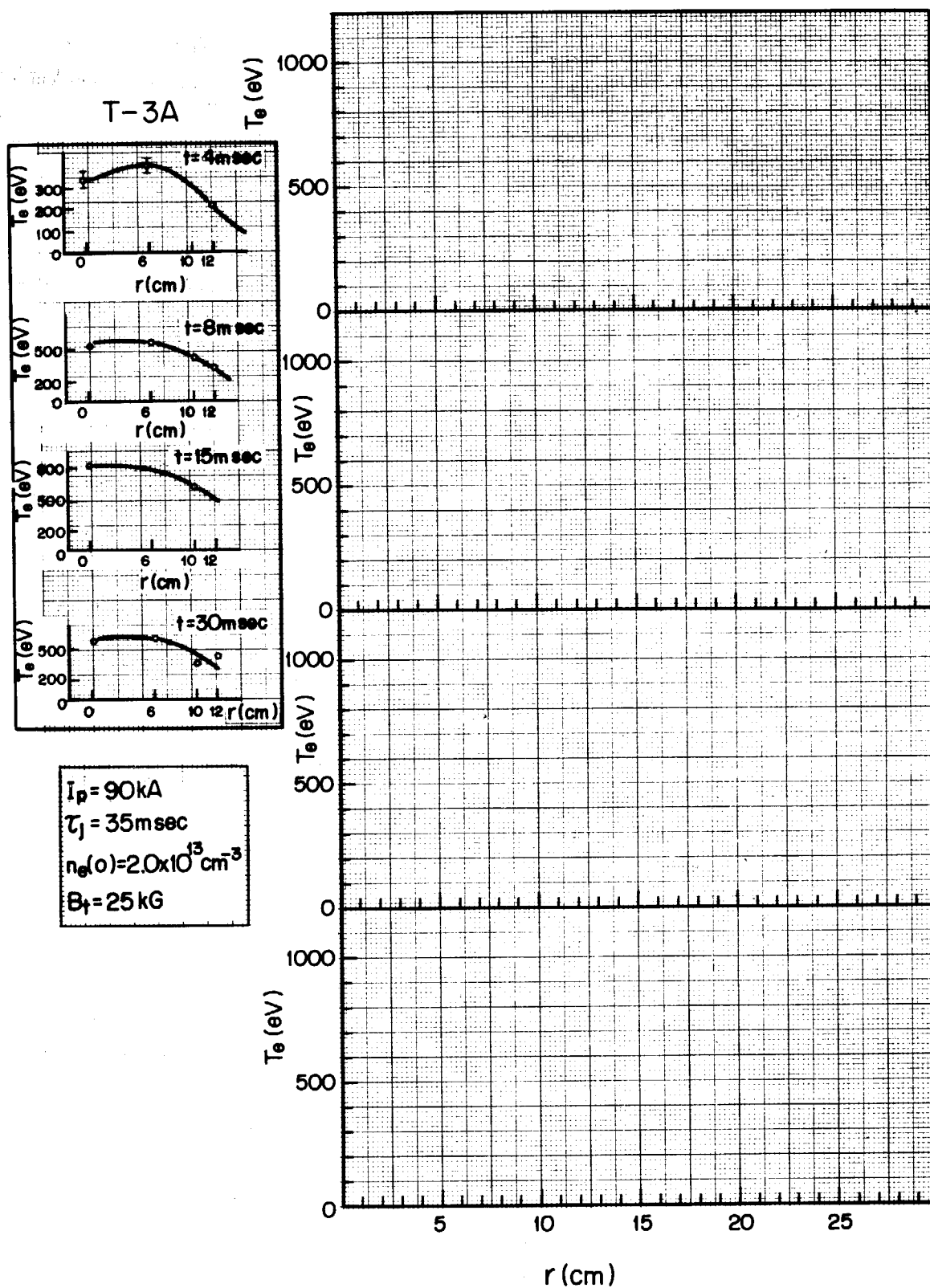
第5表 JFT-2 実験計画フローチャート

昭和47年7月1日現在

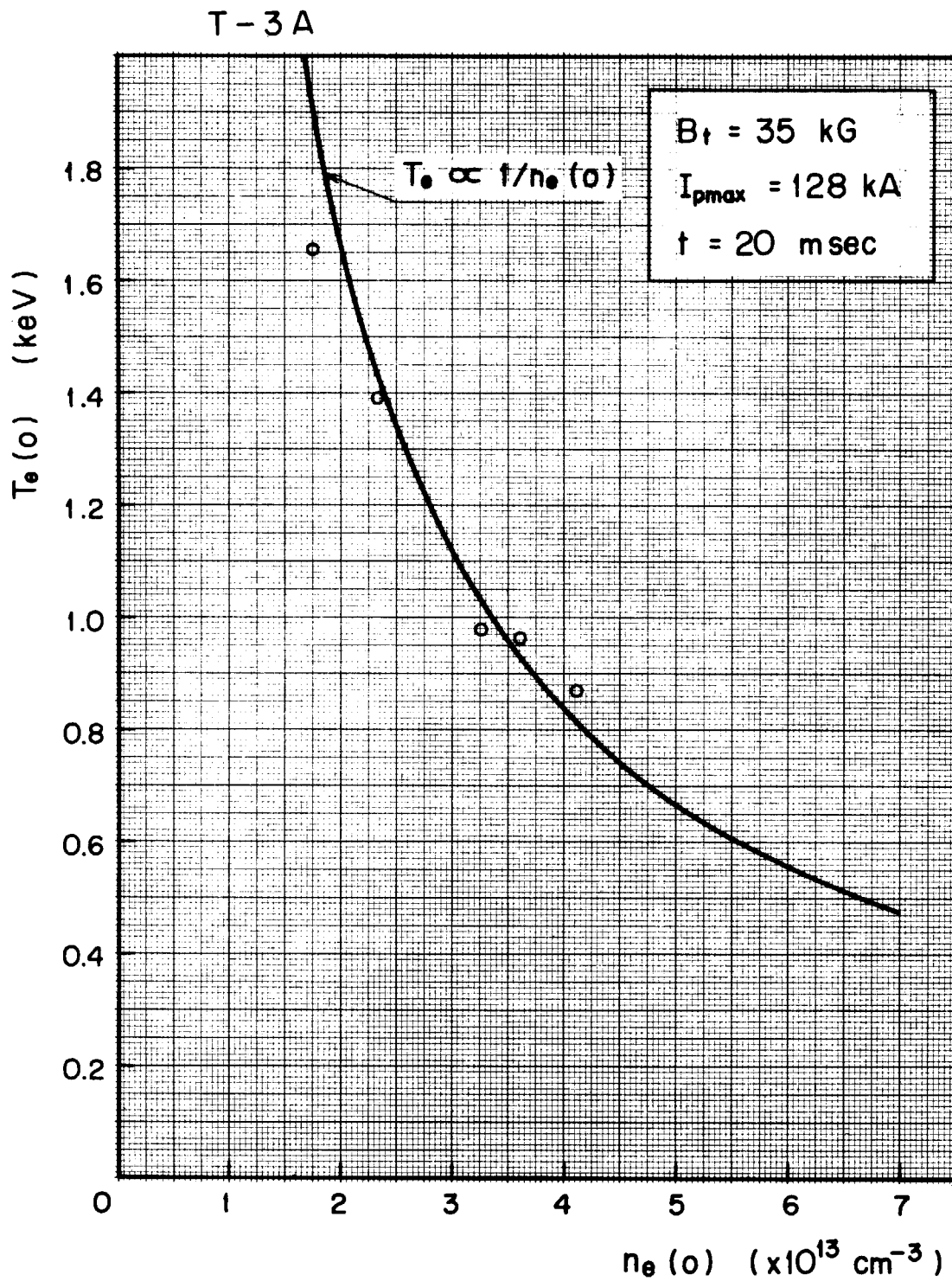
項目	実験内容	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-12	13-15	16-18	19-21
(1) 電子温度・イオン温度・各種の閉じ込め時間	プラズマ電流波形に対する電子温度およびそのプラズマ半径方向分布の時間的変化	T_{e0}	$T_e(\text{diomag})$					$T_e(r, T_{e0})(r-\gamma)$						
	トロイダル磁場をパラメータとしたときの電子温度の電子密度依存性、電子温度のプラズマ電流値依存性	$T_e(\text{diomag}) - \bar{n}_e(\mu\text{sec})$						$T_e(o) - \bar{n}_e(o)(r-\gamma)$						
	[(電子温度)X(電子密度)]のプラズマ電流値(最大値)依存性	$T_e - I_p(t_0)$						$T_e(o) - I_p(t_0)$						
	イオン温度の時間的変化およびイオン温度のプラズマ半径方向分布	$T_i(\text{中性粒子})$	T_i					$T_i(r)$						
	イオン温度の電子密度依存性	$T_i - \bar{n}_e(\mu\text{sec})$						$T_i(o) - \bar{n}_e(o)(\mu\text{sec})$						
	イオン温度のプラズマ電流値(最大値)依存性	$T_i - I_{pmax}$						$T_i(o) - I_{pmax}$						
	イオン温度のスケリング則: $T_i \propto (I_p B_0 \bar{n}_e R^2)^{1/2}$						バナナ領域での実験							
	プラズマの単位長さあたりの全エネルギーのプラズマ電流値(最大値)依存性	$E_t(\text{diomag}) - I_{pmax}$						$(r-\gamma) + (\text{中性粒子})$						
	T_e, T_i のプラズマ電流波形依存性	$T_e = N / (1 - \frac{dN}{dt})$						$T_e = E_t / (Q_f - \frac{dE_t}{dt})$						
	T_H の電子密度依存性							$T_H - \bar{n}_e, \bar{n}_e(o) T_H - \bar{n}_e, \bar{n}_e(o)$						
	T_e のスケリング則: (a) $T_e \propto Q^2 B_0$ (b) $T_e \propto Q^2 \bar{n}_e (T_e + T_i)^{3/2}$	(a) Q より少し半径方向						$T_e(r) \propto Q$ $(r-\gamma)$						
(2) 捕獲粒子	イオン-イオンの衝突周波数を考えたときの特定のエネルギー値を有する中性粒子束のトラップ効率						MHD 領域での実験	バナナ領域での実験						
	捕獲粒子に関する定量的評価: たとえば n_e^0/n_e^1 の R/a 依存性など													
(3) 電圧伝導度	電圧伝導度の異常係数 (σ/σ_{exp}) の V_{d0}/V_{is} 依存性							$\sigma/\sigma_{exp} - V_{d0}/V_{is}$						
	プラズマの有効的電荷数の評価および $\sigma/(Z_{eff} \sigma_{exp})$ の値													
(4) 安定領域	安定係数、導体壁半径および電流密度分布に対する安定領域の決定	$Q(a), a/r_0$						$Q(a), a/r_0$						
	トロイダル磁場の擾動の大きさ、成長率の安定係数の時間微分値に対する依存性							$Q(a), a/r_0, T_e^{3/2}(r)$						
(5) 数値的・物理的・理論的・実験的・比較	トロイダル磁場の擾動のモード数の時間的変化および安定係数の共鳴性							$\sigma(r), a$						
	トロイダル磁場の擾動の周波数と電子反磁性ドリフト周波数との比較							$\sigma(r), a$						
(6) スパイク振動と異常電位	安定係数、電子密度および電流密度分布に対するスパイク振動発生領域の決定							$Q(a), n_e$						
	安定係数を固定して電子密度、電子温度を考えたバナナおよび MHD 領域での実験						MHD 領域での実験	バナナ領域での実験						
(7) リミット効果	プラズマ半径、電子温度分布およびその時間的変化、プラズマの水平方向変位							$T_e(r)$						
	$r = r_0$ 近傍での様子 (不純物、硬 X 線など)	$\Delta B_{yd}, B_{yp}$						不純物 (可視分光)						
	外部垂直磁場成分による変位に対するプラズマの水平方向変位の関係	$\Delta B_{yd}, B_{yp}$												
(7) リミット効果	ダイナミックリミットを境としての一連の実験													

第 2 表

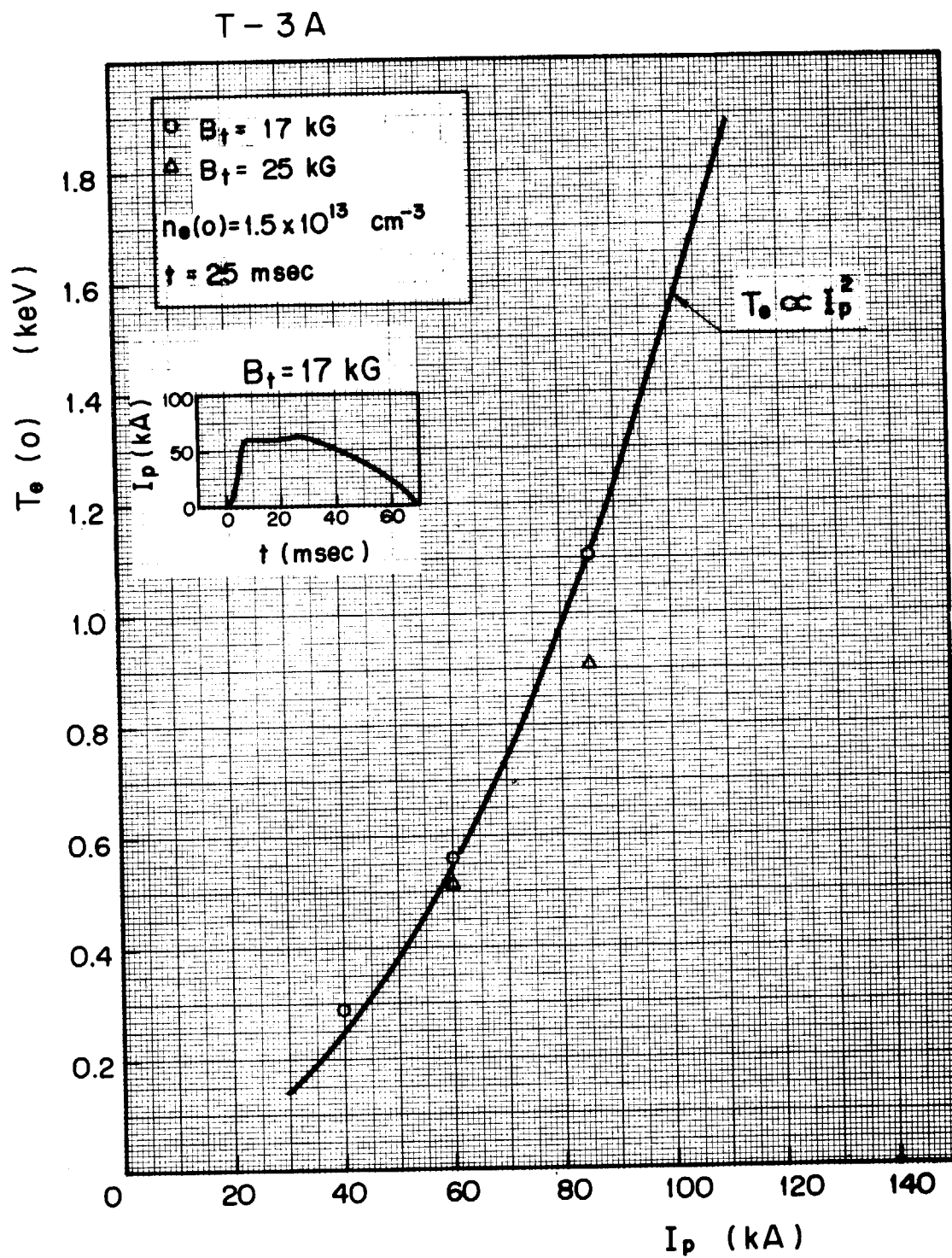
	初期圧 P_0 ($\times 10^8$ Torr)	プラズマ電流 用コンデンサ 充電電圧 V_0 (kV)	トロイダル 磁場 B_t (kG)	直流垂直磁場 B_{vd} (G)	パルス垂直 磁場 B_{vp} (G)	プラズマ電流 I_p (kA)	温 度 ($T_e + T_i$) (eV)	電子密度 n_e ($\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								



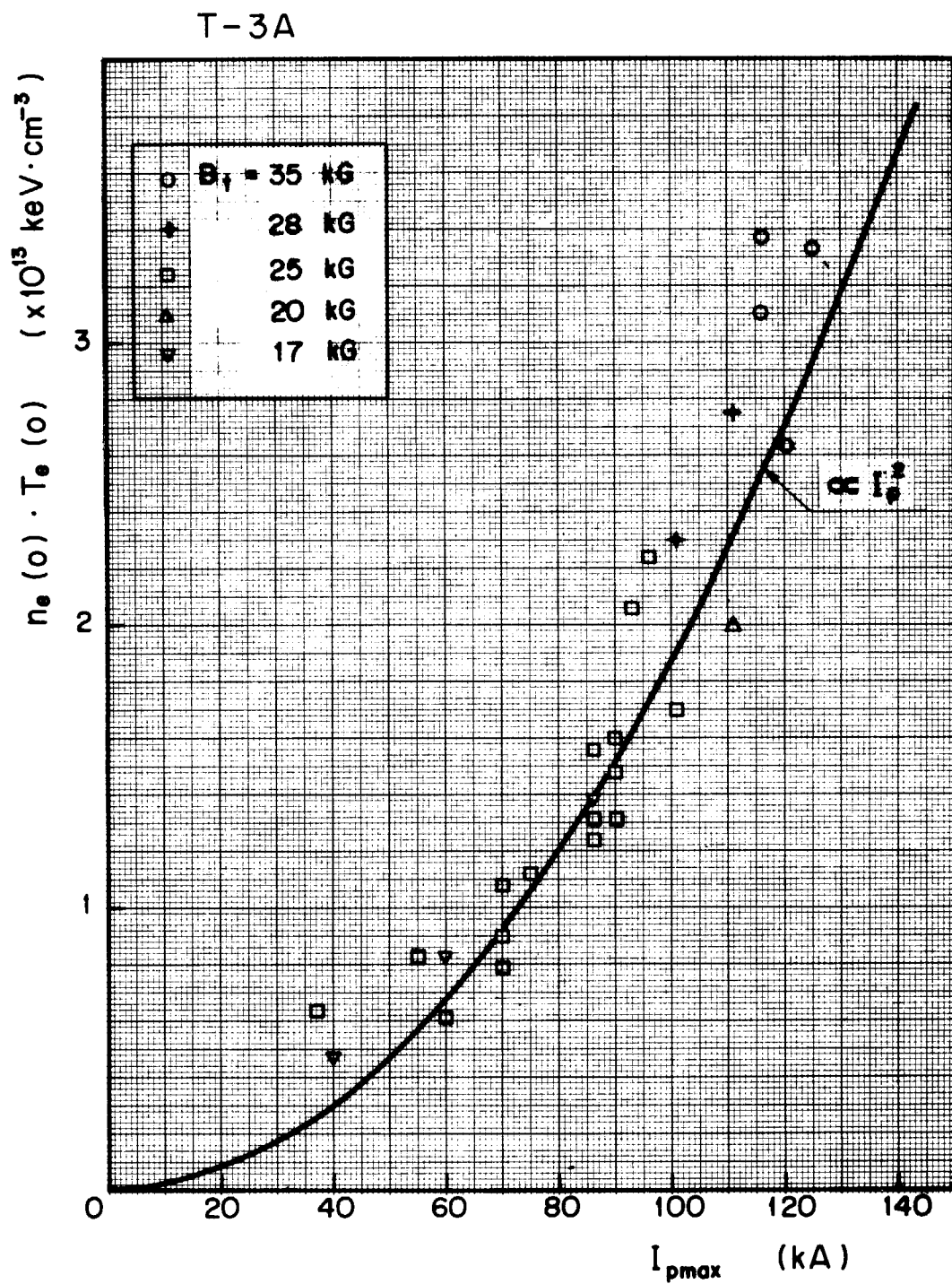
第 1 図



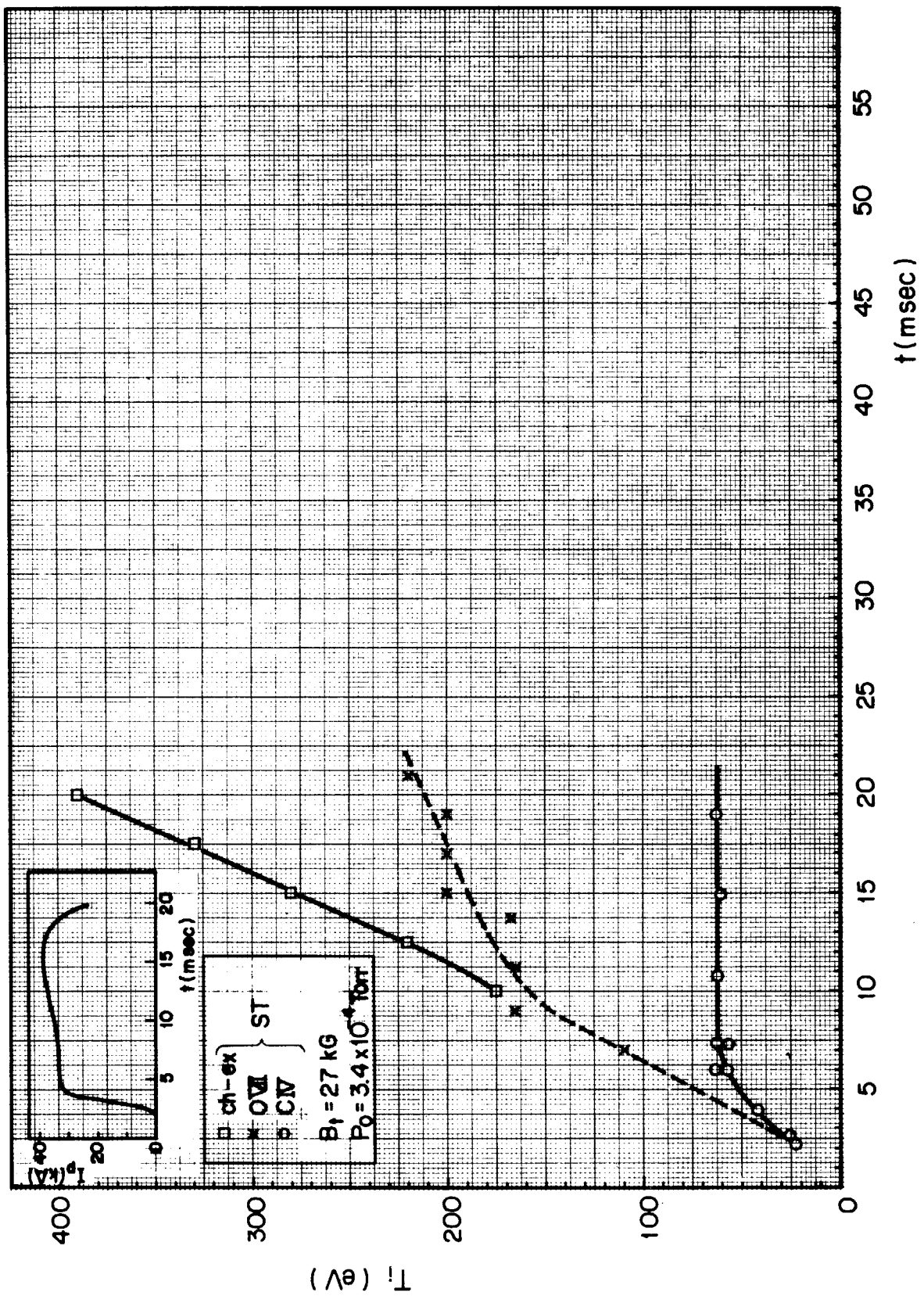
第 2 図



第3図

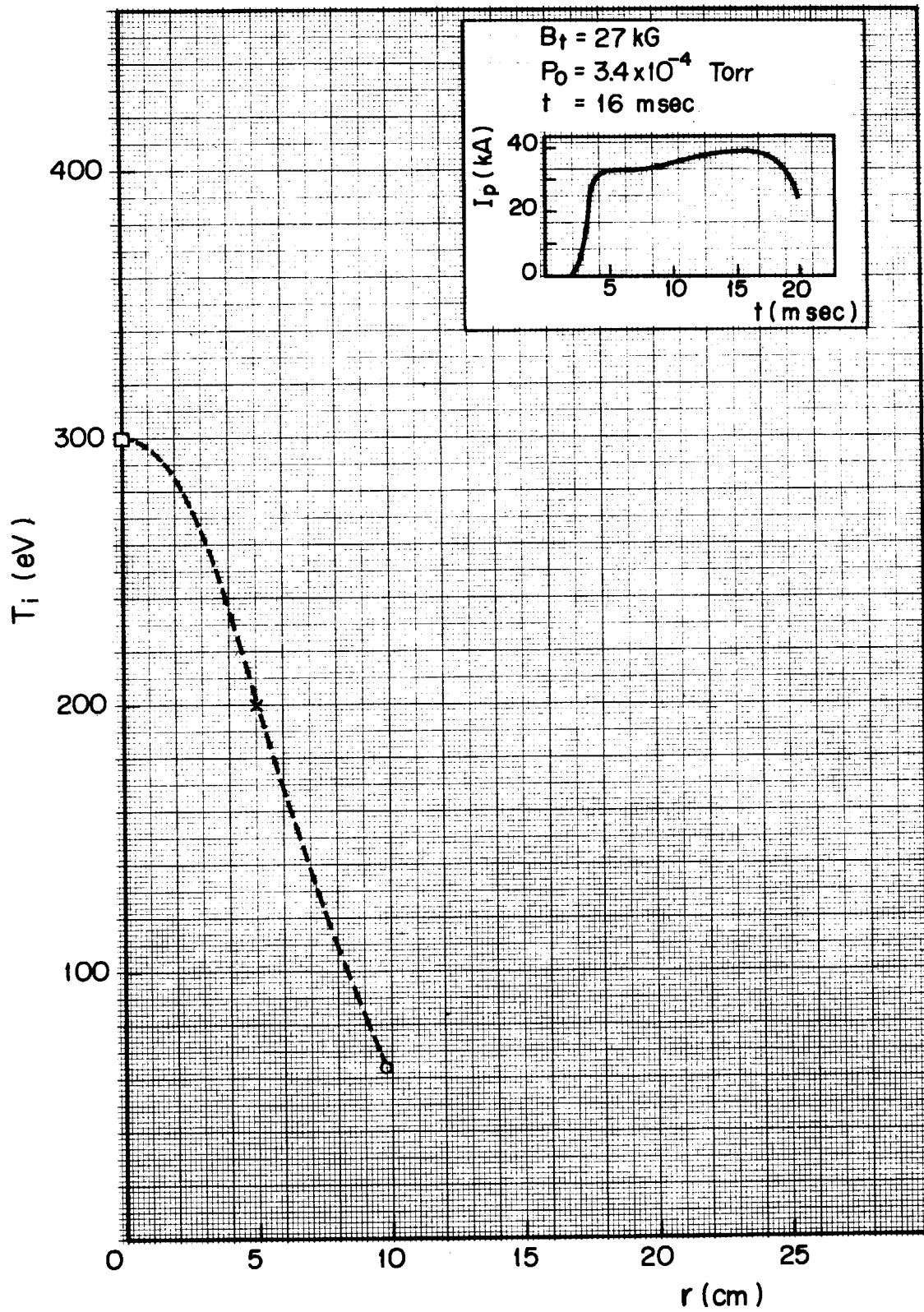


第 4 図

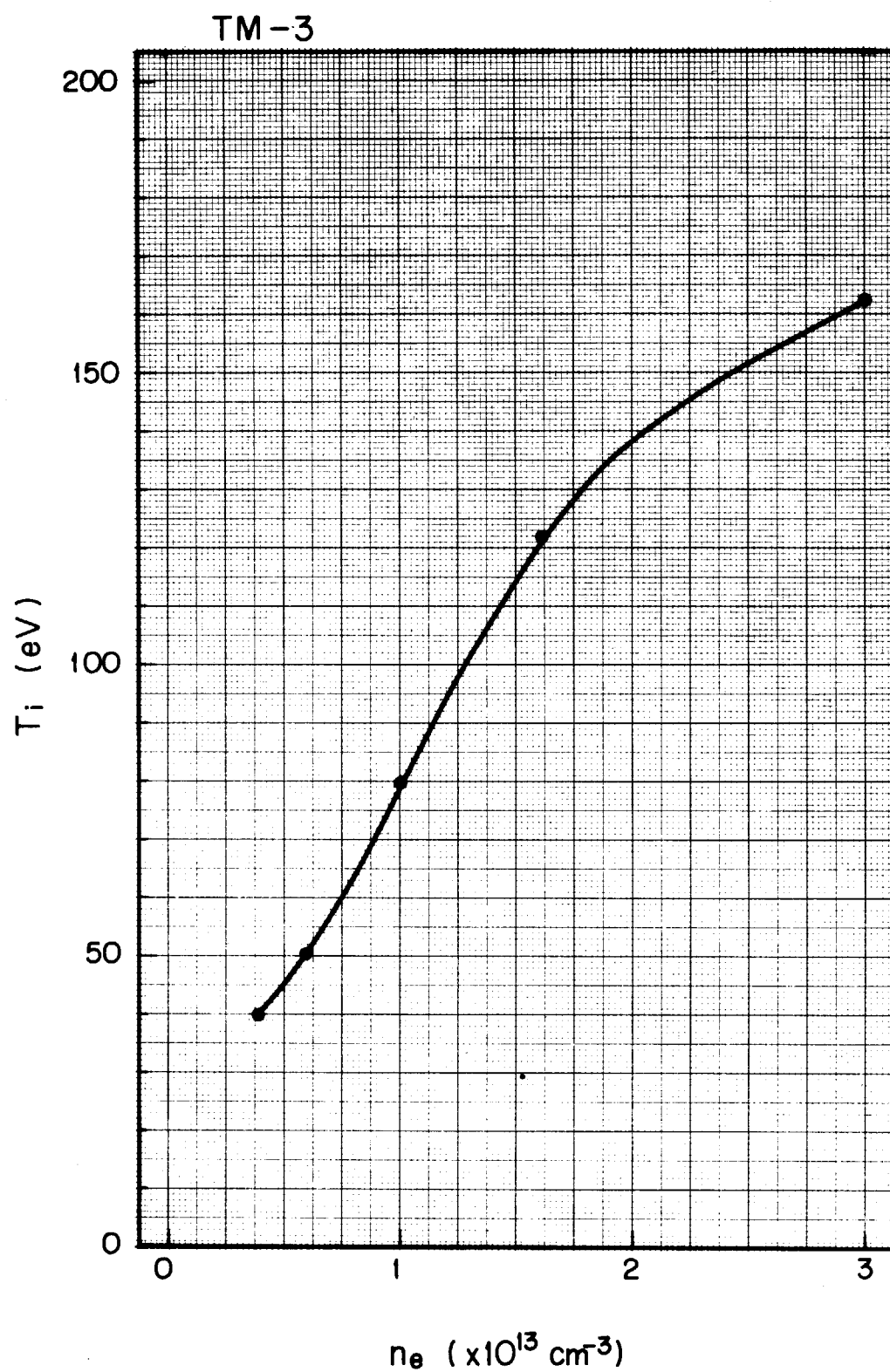


第 5 図

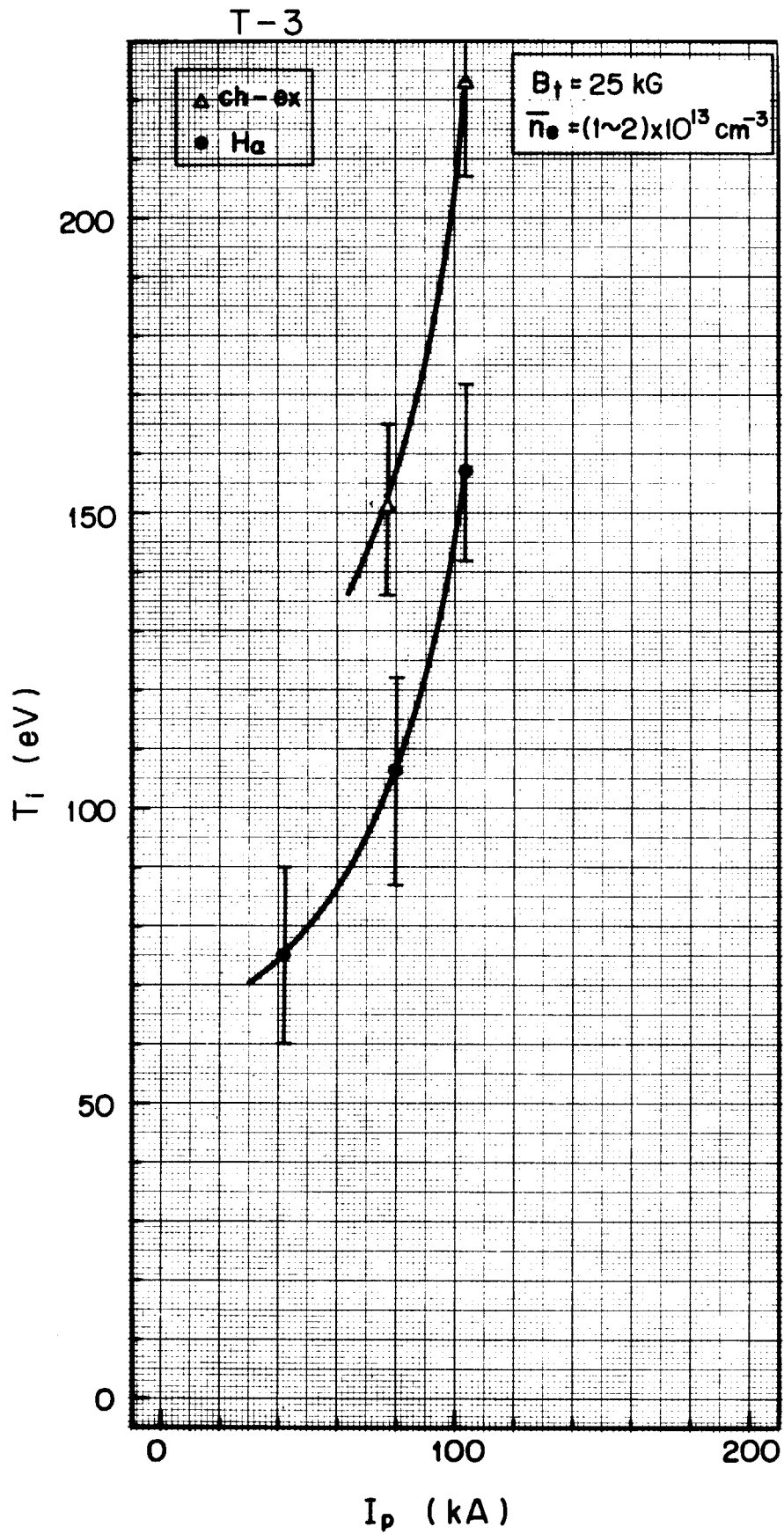
ST



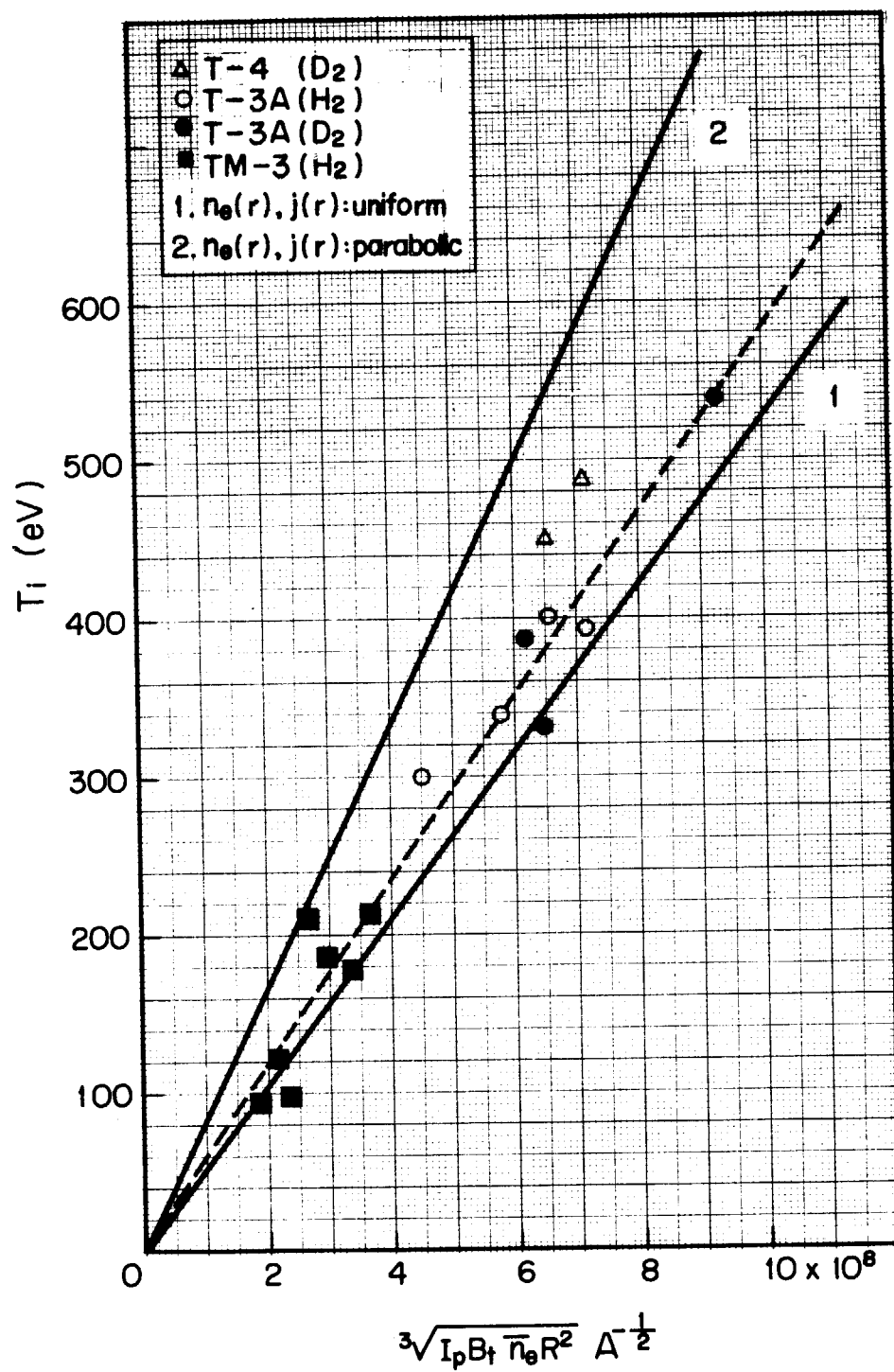
第 6 図



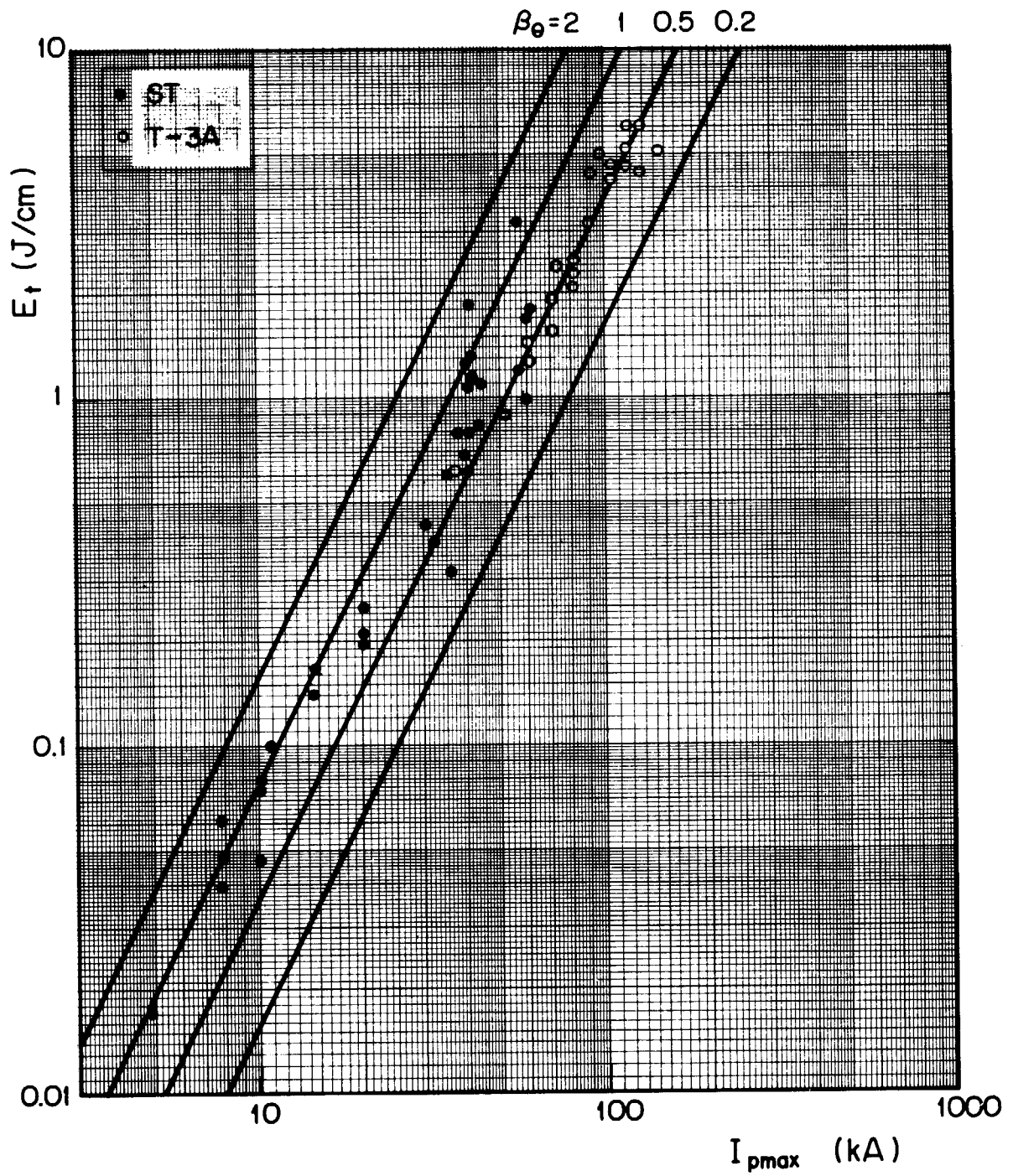
第 7 図



第 8 図

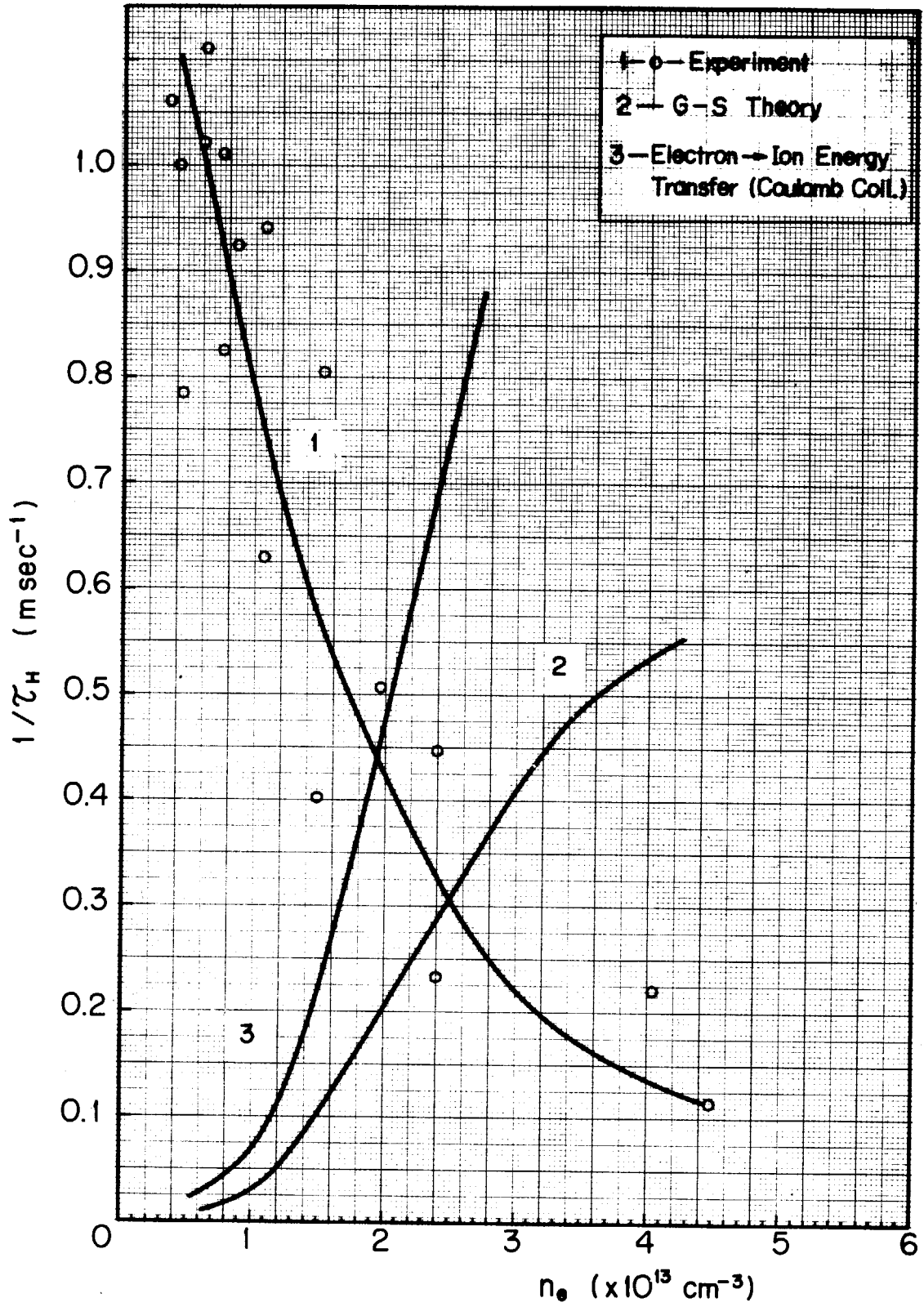


第 9 図

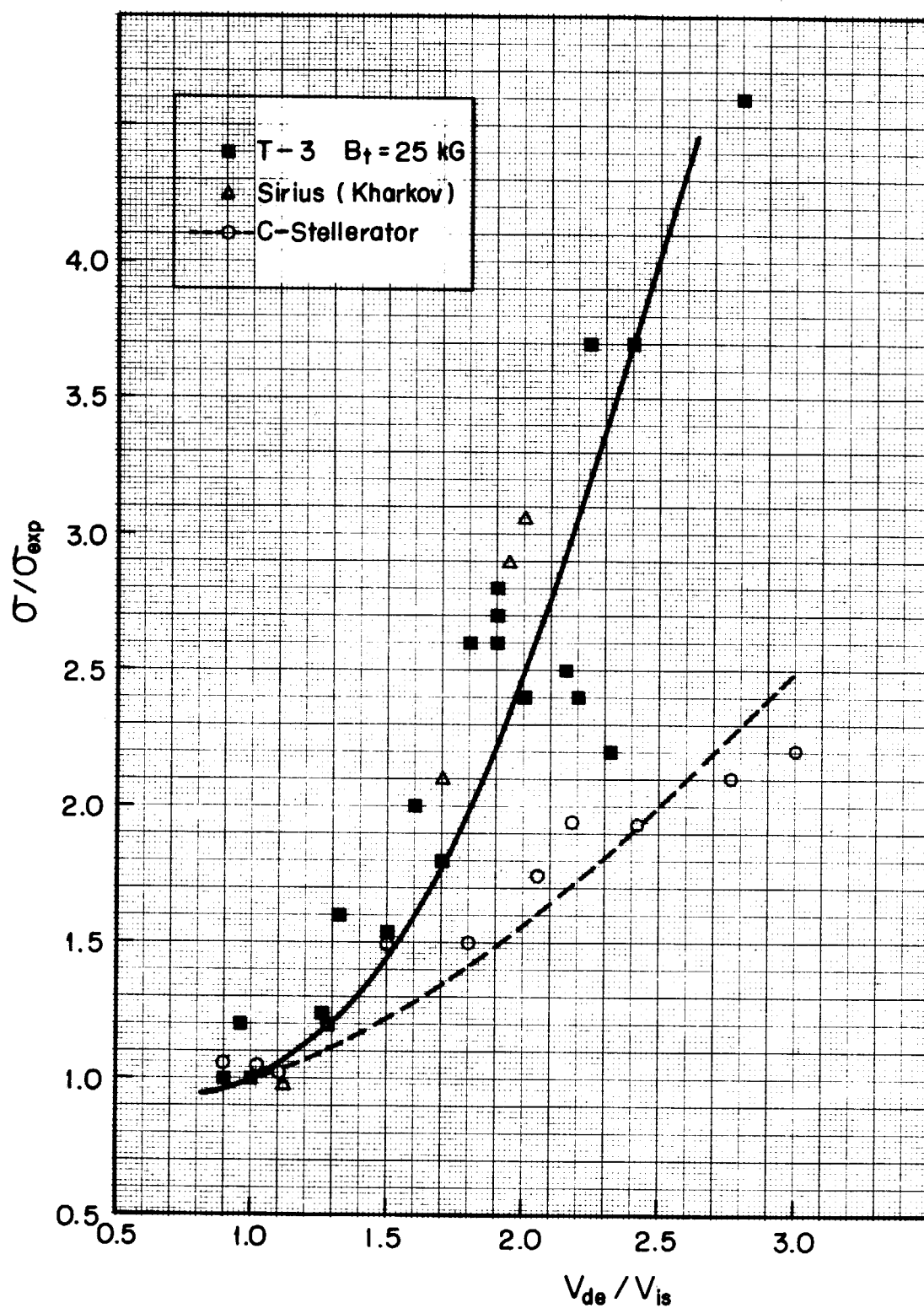


第 10 図

TM-3



第 13 図



第 15 図