

プラズマの乱流加熱実験

河合, 良信
九州大学応用力学研究所 : 助教授

村岡, 克紀
九州大学応用力学研究所 : 助教授

<https://doi.org/10.15017/4743540>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 43, pp.19-27, 1975-08. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



プラズマの乱流加熱実験

河 合 良 信*
村 岡 克 紀*

概 要

プラズマの乱流加熱実験において、従来の結果を外部パラメーター、プラズマのパラメーター、および計測法について整理し、問題点を i) 加熱の再現性, ii) 電子加熱, iii) イオン加熱, iv) 表皮効果, v) 逃走電子, の点から指摘した。その考察に基づき、加熱機構の解明を通じて、加熱効率の向上を目指した、新しい実験装置を提案した。

1. ま え が き

核融合研究は、大別して、プラズマの「閉じ込め」と「加熱」の二研究分野に分けられる。中でも閉じ込めの研究は、プラズマを一定時間磁場で保持することが核融合にとって緊急の課題であるとの立場から、大きな比重を占めてきた。その結果、磁場中プラズマの拡散と不安定性に関する基礎的研究、およびそれに基づく閉じ込め方式の改善に於て着実な発展が見られ、トカマク装置のスケールアップによって、ある程度の密度と温度のプラズマを得る見通しがひらけてきた¹⁾。しかし、図1から明らかなように、ジュール加熱によるプラズマの温度には上限があり、それは目標に比し一桁程度低く、核融合実現のためには、適当な方法によって、より高温状態に加熱することが必要である。このような追加加熱を有効に行なわせるためには、閉じ込めを乱さない程度の短い時間内に加熱が終了していなければならないが、その実現にあたっては、技術的困難が多々予想されている。すでにいくつかの試みがなされているにもかかわらず、加熱研究は模索的な試行の段階にとどまっており、閉じ込め研究にくらべていちじるしく立ち遅れている。

現在のところ、加熱方式には、プラズマを急速に圧縮する（圧縮加熱）²⁾、プラズマに大電流を流す（乱流加熱）^{3)~11)}、中性^{12), 13)}もしくは荷電粒子¹⁴⁾のビームを打込む（粒子入射加熱）、また高周波をかける（高周波加熱）¹⁵⁾、などがある。しかし従来の実験研究では、注入する外部エネルギーの増加により、イオン温度の上昇を期待しているにすぎず、一部には約 $3keV$ のイオン温度が得られたとの報告はあるものの¹⁶⁾、加熱のメカニズム自体については推測の域を出ず、いまだに加熱効率をあげるための指導原理は得られていない。

ところで、プラズマ中に大電流を流すことにより乱れを誘起し、乱れとプラズマ粒子の相互作用を通

*九州大学助教授、応用力学研究所

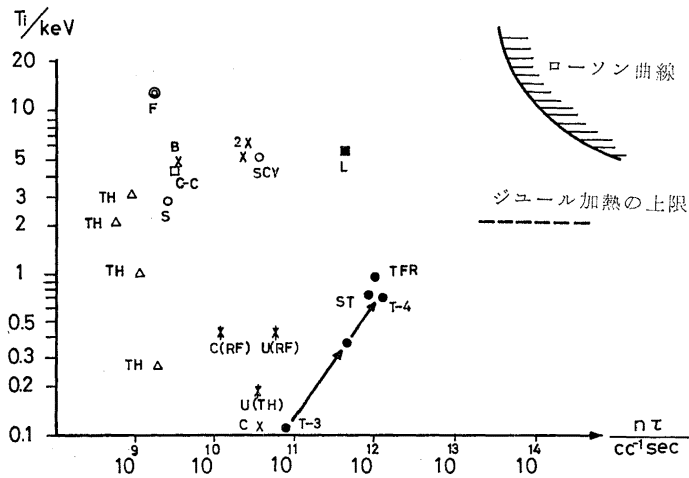


図 1 ローソン図。ここで n , T_i , τ はそれぞれプラズマ密度, イオン温度, 閉じ込め時間を示す。
 F: プラズマフォーカス, TH: 乱流加熱, 2X: 多重段階圧縮, B: バーンアウトV, S: 無衝突衝撃波, SCV: シラック, C-C: プラズマ衝突と圧縮, L: 巨大レーザープラズマ, T-4: ソ連トカマク, ST: プリンストンSTトカマク, U: ウラガンステラレーター(ソ連), TFR: フランストカマク。

じてプラズマ加熱を行なう乱流加熱法は, 加熱効率が高く, 短時間に加熱を行なうので, プラズマの閉じ込めに悪影響を及ぼさないと考えられており, 極めて有望な加熱法である。さらに他の追加加熱法, たとえば高周波加熱¹⁰⁾においては, プラズマ表面に数 $100kV/m$ の電界をかけなければならないこと, 中性粒子入射法¹²⁾においては, 管径方向に電界が生ずること, によりプラズマ中に乱れが誘起されることが予想されるので, 加熱機構に乱流現象が支配的である可能性が強い。従って, 乱流加熱機構の解明は, 有効な追加加熱法の確立にとって基本的な意味をもつと言わなければならない。

いっぽう, プラズマが高温化するにつれ, その温度や密度を測定することは技術的な困難さを増す。そのうえ, プラズマの性質は, 温度や密度だけでなく, 温度分布やプラズマ内に生ずる乱れによって左右される。したがって, 乱れを含めたこれら諸量の計測法の開発は, 高温プラズマの研究にとって不可欠のものとなっている。

2章で, これまでの乱流加熱実験の結果を表示し, そこでの問題点を3章で論ずる。その考察に基づく乱流加熱機構の解明, 加熱効率の向上を目的とした装置を4章に提案する。

2. 従来の乱流加熱実験結果

乱流加熱実験は, 直線状およびトーラス状プラズマに大電流を流すことにより行なわれてきた。その大電流によりプラズマ中に乱れを励起し, それによる異常加熱が観測されている。表1に代表的な乱流加熱実験の諸量を直線状^{9)~11)}, およびトーラス状装置^{9)~11)}, に分けて示す。ここで, Iはプラズマの寸法・加熱電源の大きさ等の外部パラメーターを, IIは加熱前後のプラズマの諸量・加熱効率, および観

表 1 代表的な乱流加熱実験結果

ω_{pi} , ω_{pe} はイオンと電子のプラズマ振動数, ω_B は Buneman 振動数, ω_{ci} , ω_{ce} はイオンと電子のサイクロトロン振動数である.

直線状装置

	名大プラズマ研究所 ³⁾	東大宇宙航空研究所 ⁴⁾	コーネル大学 ⁵⁾	ユトハーガス研究所 ⁶⁾	クルチャトフ研究所 ⁷⁾
I					
プラズマ長 (mm)	1,350	100	1,800	650	2,000
プラズマ直径 (mm)	40	60	80	10	60~80
磁場強度 (Wb/m ²)	1.4	0.12	0.3	0.2	0.33
ミラー比	1.8	—	2	2	1~3
プラズマ源	チタン銃	プラズマ銃	円錐ピンチ銃	直流アーク	チタン銃
動作圧力 (torr)	—	7.6×10^{-4}	—	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	—
加熱電圧 (kV)	36	18	200	36	150
加熱電流 (kA)	20	15/rod	13	20	10
コンデンサバンク容量 (μF)	2.2	2.5	0.18	1.8	0.025~0.2
立ち上り時間 (μs)	2	2	1.5	1~2	0.5~1
II					
イオンの種類	H ⁺	H ⁺ , He ⁺ , Ar ⁺	H ⁺	H ⁺	H ⁺
プラズマ密度 (m ⁻³)	5×10^{18}	$10^{18} \sim 10^{20}$	(2~8) $\times 10^{19}$	$10^{19} \sim 2 \times 10^{20}$	(1~2) $\times 10^{19}$
初期電子温度 (eV)	10	5~10	20	2~10	5
初期イオン温度 (eV)	—	5~10	—	≤ 3	—
加熱後電子温度 (keV)	8	10	2	1.4	1.3
加熱後イオン温度 (keV)	1.4	10	2	1	—
加熱効率 (%)	—	10	6.5	—	10
乱れ振動数領域	ω_{pi}	ω_{pi} , ω_{ci} , ω_{pe} , $2\omega_{pe}$	$\leq \omega_{pi}$, ω_B , ω_{ce} , ω_{pe} , $2\omega_{pe}$	ω_{pe} , $2\omega_{pe}$, ω_B , ω_{pi}	—
III					
プラズマ密度	マイクロ波干渉 レーザー干渉	プローブ	マイクロ波干渉	マイクロ波干渉	マイクロ波干渉
電子温度	X線 レーザー散乱	X線	X線	X線	X線, 分光 プローブ
イオン温度	分光 中性粒子検出	127°アナライザー	中性粒子検出	中性粒子検出	ファラデーカップ
乱れスペクトル	プローブ	プローブ	マイクロ波 輻射 マイクロ波 散乱	マイクロ波 輻射	—
プラズマ抵抗	電圧/電流	電圧/電流	電気伝導度 プローブ	電圧/電流	電圧/電流

トーラス状装置

	カラム研 ⁸⁾ 究所	テキサス ⁹⁾ 大学	サスカチ ュアン大 学	クルチャ ¹¹⁾ トフ研究 所
I				
主 半 径 (mm)	325	600	190	300
小 半 径 (mm)	50	95	25	30
磁 場 強 度 (Wb/m^2)	0.2~0.3	1.2	0.2	0.3
磁 場 配 位	ステラレータ ー	トカマク	ベータトロン	バンピートーラ ス
動 作 圧 力 ($torr$)	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	$2 \times 10^{-4} \sim 10^{-3}$	3×10^{-4}	10^{-5}
加 熱 電 圧 (kV)	40	40	5	30
加 熱 電 流 (kA)	6	30	1	1
コンデンサバンク容量 (μF)	0.25		5	
立 ち 上 り 時 間 (μs)	0.1	1	1	0.1
II				
イ オ ン の 種 類	H^+, Ar^+	H^+	Ar^+	H^+
プ ラ ズ マ 密 度 (m^{-3})	$10^{17} \sim 10^{19}$	$10^{18} \sim 3 \times 10^{19}$	$10^{18} \sim 10^{19}$	$5 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{19}$
初 期 電 子 温 度 (eV)	2~5	5	10	10
初 期 イ オ ン 温 度 (eV)				
加 熱 後 電 子 温 度 (keV)	2~3	10	3	1
加 熱 後 イ オ ン 温 度 (keV)	1	2	0.4	
加 熱 効 率 (%)				
乱 れ 振 動 数 領 域	$\leq \omega_{pi}, \omega_B,$ $\leq \omega_{pe}$		$< \omega_{pi},$ $\omega_{pi} < \omega < \omega_{pe}$	$\omega_{pe}, 2\omega_{pe}$
III				
プ ラ ズ マ 密 度	マイクロ波干渉	マイクロ波干渉	マイクロ波干渉	マイクロ波干渉
電 子 温 度	X線	X線	Charge selective orbit analyzer	X線
イ オ ン 温 度	中性粒子検出	中性粒子検出	分光	
乱 れ ス ペ ク ト ル	プローブ	マイクロ波輻射	プローブ	マイクロ波輻射
プ ラ ズ マ 抵 抗	電圧/電流		電圧/電流	電圧/電流

測された乱れの振動数を, IIIは諸量の測定に用いた計測法を示す.

3. 問 題 点

従来の乱流加熱実験における問題点を列挙する.

- i) 再現性. 初期プラズマの生成に問題があり, 加熱過程の再現性が悪い.
- ii) 電子加熱. 表 1 からわかるように, 電子は数 $keV \sim 10keV$ に加熱されており, 電子加熱は乱れによ

る異常抵抗で説明できると考えられている。しかし、乱れに関しては振動数の測定が行なわれている程度で、乱れスペクトルおよび乱れの絶対強度等、電子加熱を定量的に説明するに必要なデータは皆無である。

iii) イオン加熱、イオンは数 $keV \sim 10keV$ までに加熱されていると報告されているが、イオン温度測定に用いられている中性粒子検出法および分光法は、結果の解釈に問題点が多く、未だ確立されたものになっていない。

イオン加熱は、イオン波不安定性の励起と相関があることが実験的に示唆されている¹⁰⁾。しかし、乱れエネルギーを用いてイオン加熱を定量的に説明した報告はない。従って、イオン加熱の相似則および加熱加率の向上のための指導原理は得られていない。

iv) 表皮効果、大電流を瞬間的に流すので、表皮効果が予想される。しかし、諸量の空間分布の測定は初期的な段階であり^{5),9)}、表皮効果の議論を行なえるほどの実験事実はない。

v) 逃走電子、加熱のために電子の衝突時間内に高電圧を印加するので、かなりの数の逃走電子が作られると予想される。しかし、その存在の計測、加熱への影響等が論じられた例は皆無である。さらに電流方向の電子のエネルギー分布関数が測定された例はない。一般にはドリフトマックスウェル分布と仮定されているが、その保証はないので実測が必要である。

以上を要するに、高温高密度プラズマの乱流加熱において、乱れを駆動する不安定の性質、乱れの成長、および乱れとプラズマ粒子の相互作用によるプラズマ加熱に関する、一貫したモデルが確立していない。

4. 応用力学研究所におけるプラズマ乱流加熱実験装置の提案

以上の現状、問題点を踏まえて、プラズマ乱流加熱の加熱効率の向上、加熱の相似則の確立を目指して、以下の性能・寸法をもった直線状プラズマ乱流加熱実験装置を提案する。

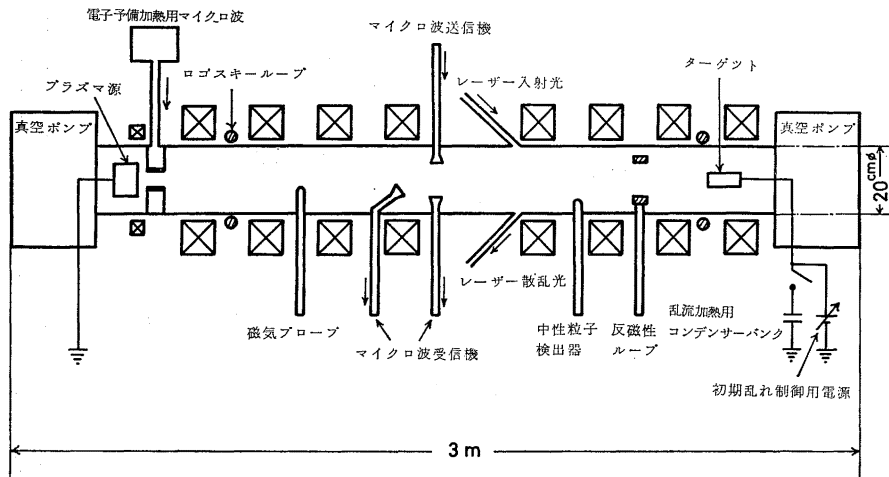


図 2 プラズマ乱流加熱実験装置概念図

I. 装置性能 (図 2)

・ プラズマ加熱容器

直径 $200\text{mm}\phi$ 長さ 3m 到達真空度 10^{-8} torr ・ 磁場強度 $\leq 3\text{Wb/m}^2$

・ 加熱電源

電圧 100kV 電流 $\geq 20\text{kA}$ 入力パワー $\geq 2\text{GW}$ 加熱時間 $\sim 1\mu\text{s}$

II. プラズマのパラメーター

プラズマ直径 $\geq 50\text{mm}\phi$ プラズマ密度 $10^{18} \leq n_e \leq 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 加熱後の温度 $\simeq 1\text{keV}$

III. 高温プラズマ計測装置性能 (図 3 に配置図を示す)

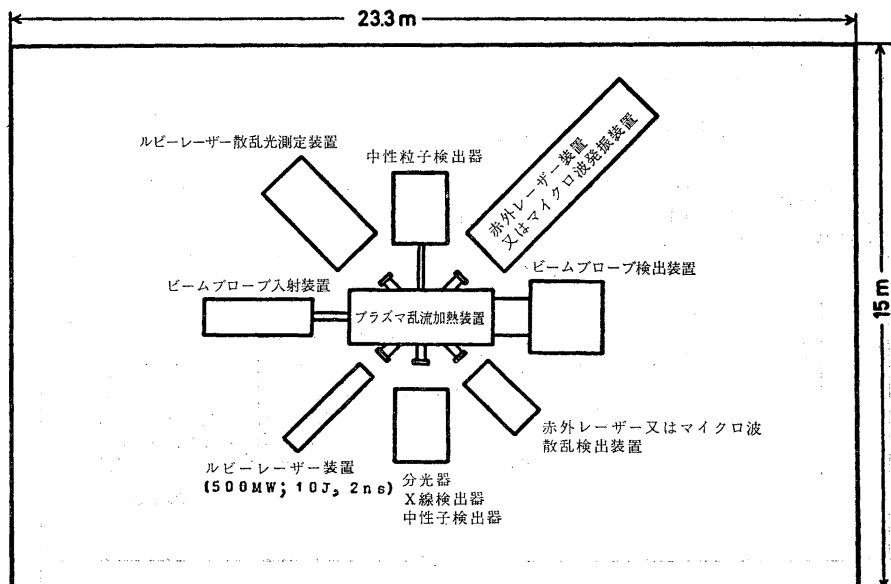
・ 高温プラズマの乱れスペクトル $S(\vec{k}, \omega)$ の測定マイクロ波散乱装置 (波長 4mm , 出力 $\geq 1\text{W}$)フック化メチルレーザー散乱装置 (波長 $496\mu\text{m}$, 出力 $\geq 10\text{MW}$)

図 3 プラズマ乱流加熱実験における計測装置の配置図

炭酸ガスレーザー散乱装置 (波長 $10.6\mu m$, 出力 $\geq 200MW$)

ビームプローブ (イオンビームエネルギー $\geq 100keV$)

エッシェル分光器 (可視域; 分解能 $0.1\text{\AA}$)

- 電子のエネルギー分布, ドリフト速度の測定

ルビーレーザー散乱装置 (波長 $6943\text{\AA}$, 出力 $500MW$)

真空紫外分光器 (波長域 $50\sim 5\text{\AA}$, 分解能 $0.1\text{\AA}$)

- イオンのエネルギー分布の測定

エッシェル分光器

可視域分光器 (分解能 $8\text{\AA}$, 明るさ $F8.6$)

中性粒子検出器 (エネルギー範囲 $200eV\sim 10keV$, 分解能 $100eV$)

以下に本装置提案の理由を述べる.

- 形状. プラズマの加熱効率の向上, 加熱の相似則の確立のためには, 加熱機構の解明が必要である. そのためには, 磁場構造が単純なこと, および諸量の時間的, 空間的分布の測定の容易さの点から, 直線状装置を選んだ. (ii) に示すように, 加熱時間内でのプラズマの閉じ込めは十分である.
- 閉じ込め. 直線状磁場内のプラズマ粒子の損失は, 磁場に平行方向の損失と, 磁場を横切る拡散に分けられる. 前者の損失時間は (プラズマの長さ) / (イオンの熱速度) できまるので, その下限は加熱後のイオン温度数 keV に対する熱速度, $5\times 10^6 m/sec$ できまる. 従ってプラズマ長を $1m$ 以上にすれば, 加熱時間 $1\mu s$ 以内のこの損失は無視できる.

後者は, 単一粒子モデルによれば, イオンのラーマー直径 ($2\rho_i$) がプラズマ半径に比して十分小ならば無視できる. 水素プラズマに対するラーマー半径は,

$$\rho_i (m) = 1.45 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{T_i (eV)}}{B (Wb/m^2)}$$

で与えられる. 磁場強度を $3Wb/m^2$ とすれば, この上限は加熱後のイオン温度, 数 keV に対する $2mm$ となり, プラズマの半径 $25mm$ に比して十分小さい. 一方, 密度こう配による加熱時間内の古典拡散¹⁷⁾は, 本実験のプラズマのパラメーターに対しては十分小さい. しかしながら, プラズマ中に乱れが存在すると異常拡散¹⁸⁾をひき起こすことがよく知られている. 乱流加熱時間が十分短いので一般的には, この効果が閉じ込めに重大な影響を与えることはないであろうと考えられているが, これに関する詳しい実験はない. 本計画では, (iii)の乱れ計測に関連してこの点を詳しく調べる予定である.

- 加熱. 本論文で提案する実験の目的は, プラズマの乱流加熱機構の解明を通じて, 加熱効率の向上, 加熱の相似則の確立を目指すことである. このためには, 強電場内での電子のエネルギー分布関数, 乱れスペクトル, および強度の時間的・空間的成長の測定を行ない, それと粒子の加熱の, 時間的・空間的進行との関連を明らかにする必要がある. すなわち, 高温高密度プラズマ内での, (外部エネルギー) → (電子の運動エネルギー) → (乱れのエネルギー) → (粒子加熱) の機構における, 波と粒子の相互

作用を明らかにする。強く乱れた状態を作るためには、電子ドリフト速度 V_d を電子熱速度 V_{th} より大きくしなければならない¹⁹⁾。初期プラズマに対する $V_{th}=1.3\times 10^6 m/sec$ 、電子密度 $n_e=5\times 10^{19} m^{-3}$ 、プラズマ径 $50mm\phi$ を用いれば、電流 $I\geq 20kA$ が必要である。つぎにプラズマの比抵抗を二体衝突による値を用い¹⁷⁾、プラズマ長を $2m$ とすれば、プラズマの抵抗 $R=1.68\times 10^{-3}\Omega$ になるので、上記電流を流すためには $V\approx 300V$ を加えなければならない。プラズマ乱れによって抵抗値は二桁以上大きくなると予想されるので、加熱用電源電圧は $100kV$ 程度は必要である。

ところで、高温・高密度領域におけるプラズマ計測は極めて不完全で、新しい計測法の開発が緊要である。ここでは、特に、イオン温度の計測（中性粒子検出法、分光法の確立）、プラズマ乱れの広範囲にわたるスペクトル分布の測定（マイクロ波、遠赤外レーザー、赤外レーザー、可視レーザー散乱計測法の開発）を通じて、上記の課題の解明を目指す。

改めて本装置の特徴を列挙すれば、

- I. 再現性のよい初期プラズマを作り、その制御を行なう。密度 $n_{e1}\approx 10^{18}\sim 10^{20} m^{-3}$ 、電子温度 $T_{e1}=1eV\sim 100eV$ (可変)、イオン温度 $T_{i1}=$ 数 eV 。
- II. 初期乱れおよび乱流の成長の制御を行ない、加熱効率の向上を目指す。
- III. 電子ドリフト速度 V_d を電子熱速度 V_{th} より大きくして成長率の大きい不安定性を励起し、強く乱れた状態を作る。
(乱れエネルギー) $\leq$ (粒子のエネルギー)
乱流の基本量の計測を通じて、加熱機構を明らかにする。そのために新しい計測法（ビームプローブ法、赤外レーザー散乱法等）を開発する。
- IV. さらに、加熱エネルギーを上げ、核融合プラズマ（イオン温度 $\approx 10keV$ ）に近い高温状態を実現する。

5. あ と が き

前章に示した実験装置・方法により、イオン加熱機構が明らかになれば、加熱効率の向上に関する指導原理が得られる。さらに、本方法により高温高密度プラズマの乱れを制御できれば、新しい追加加熱法、たとえば乱れたプラズマに高周波をかけることにより、一層加熱効率を向上させることが期待できる。

本報をまとめるに当たり、種々討論、助言をいただいた矢島信男教授、および絶えざる激励をいただいた北島一徳教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Artsimovich, L. A., Nuclear Fusion Vol. 12, 1972, p.215.
- 2) Bol, K., Cecchi, J. L., Daughney, C. C., Ellis, R. A., Eubank, H. P., Furth, H. P., Goldston, R. J., Hsuan, H., Jacobsen, R. A., Mazzucato, E., Smith, R. R., and Stix, T. H., Phys. Rev. Lett., Vol. 32, 1974, p.661.

- 3) Nakagawa, Y., Tanikawa, M., Watanabe, K., Adati, K., Iguchi, H., Ishii, K., Ito, Y., Jacquinet, J., Kawabe, T., Kawamura, T., Muraoka, K., Oda, T., and Sugihara, R., in *Proceedings of the 5th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Tokyo, Japan, 11-15 November 1974 (to be published), Paper No. IAEA-CN-33/C3-3.
- 4) Ohyabu, N., Okamura, S., and Kawashima, N., *Phys. Fluids*, Vol. 17, 1974, p.2009.
- 5) Wharton, C. B., Korn, P., and Robertson, S., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 27, 1971, p. 499.
- 6) De Kluiver, H., Piekaar, H. W., Rutgers, W. R., Schrijver, H., and De Groot, B., in *Proceedings of the 4th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Madison, Paper No. IAEA-CN-28/E-5, 1971.
- 7) Babykin, M. V., Gavrin, P. P., Zavoiskii, E. K., Nedoseev, S. L., Rudakov, L. I., and Skoryupin, V. A., *Sov. Phys.-JETP*, Vol. 25, 1967, p. 421.
- 8) Hamberger, S.M., and Jancarik, J., *Phys. Fluids*, Vol. 15, 1972, p.825.
- 9) Bengtson, R.D., Gentle, K.W., Jancarik, J., Medley, S. S., Nielsen, P., and Phillips, P., University of Texas FRCR No. 79, 1974.
- 10) Amagishi, Y., Hirose, A., Shubaly, M. R., Skarsgard, H. M., and White, B. F., in *Proceedings of the 5th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Tokyo, Japan, 11-15 November 1974 (to be published), Paper No. IAEA-CN-33/C3-4.
- 11) Fanchenko, S. D., Demidov, B. A., Elagin, N. I., and Ryutov, D. D., *Sov. Phys.-JETP*, Vol. 19, 1964, p. 337.
- 12) Berry, L. A., Bush, C. E., Dunlap, J. L., Edmonds, P. H., Jernigan, T. C., Lyon, J. F., Murakami, M., and Wing, W., in *Proceedings of the 5th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Tokyo, Japan, 11-15 November 1974 (to be published), Paper No. IAEA-CN-33/A5-2.
- 13) Bol, K., Cecchi, J. L., Daughney, C. C., Ellis, R. A., Eubank, H., Furth, H. P., Goldston, R., Hsuan, H., Jacobsen, R. A., Mazzucato, E., Smith, R.R., and Stix, T., in *Proceedings of the 5th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Tokyo, Japan, 11-15 November 1974 (to be published), Paper No. IAEA-CN-33/A4-1.
- 14) Mohri, A., Masuzaki, M., Tsuzuki, T., and Ikuta, K., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 34, 1975, p. 574.
- 15) Canobbio, E., in *Proceedings of the 5th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Tokyo, Japan, 11-15 November 1974 (to be published), Paper No. IAEA-CN-33/C4-3.
- 16) Kishimoto, H., Goto, S., and Ito, H., *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 31, 1973, p.1120.
- 17) Spitzer, L. Jr., *Physics of Fully Ionized Gases*, Interscience, New York, 1961.
- 18) Bohm, D., *The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields*, edited by Guthrie, A. and Wakerling, R.K., McGraw-Hill, New York, 1949.
- 19) Buneman, O., *Phys. Rev.*, Vol. 115, 1959, p. 503.