JIPP T-II トーラス装置の ECR 放電洗浄*

坂本雄一**・石部行雄**・石井成行**・岡崎清比古**
 大山 等**・矢野勝喜**・野田信明***・川端一男***
 川澄義明***・棚橋秀伍**

(昭和57年1月30日 受理)

ECR Discharge Cleaning in the JIPP T-II Torus Device

Yuichi SAKAMOTO**, Yukio ISHIBE**, Shigeyuki ISHII**,
 Kiyohiko OKAZAKI**, Hitoshi OYAMA**,
 Katsuki YANO**, Nobuaki NODA***, Kazuo KAWAHATA***,
 Yoshiaki KAWASUMI*** and Shugo TANAHASHI***

(**The Institute of Physical and Chemical Research, Wako-shi, Saitama 351)

(***Insitute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya 464)

(Received January 30, 1982)

By the use of the JIPP T-II torus device (IPP Nagoya), an experiment on ECR discharge cleaning was carried out. The aim was focused to finding the effect of the cleaning on tokamak discharges. To characterize the tokamak discharge property, mean plasma resistivity, intensity of an oxygen ion spectral line and mean electron density without gas puffing were measured. The first cleaning operation for 5 hours drastically improved the purity of the tokamak discharge plasma. The succeeding 75 hours' cleaning gave the wall surface condition corresponding to $Z_{eff}=1.0$.

The cleaning plasma had the electron temperature of 5 eV and the density of about $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ with a hydrogen pressure of $2.9 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ and a microwave power of 800 W.

1. 序

トカマク等の核融合装置では、高エネルギー放電に立って、低電子温度の水素プラズマによる放電洗浄が行われる。放電洗浄により炭素や酸素の様な軽元素不純物を除去する。その方式は、プラズマの生成の方法により、テーラー型¹⁾、グロー放電型²⁾、交流(或いは高周波)放電型³⁾等に分類されるが、これらの基本原理は同一である。その原理とは、「水素プラズマを発生させて、洗浄しようとする壁に向けて H^+ と H を供給し、壁表面の C と O を夫々 C_nH_m 及び H_2O の形に変えて気相に出し排気する。この際電子温度 T_e は $T_e \leq 10 \text{ eV}$ にと

るのが望ましい。」という事である。電子温度を低くとらなければならない意味は、2つ考えられる。第1には生成された C_nH_m や H_2O が排気孔に達する迄にプラズマ中で解離されないためであり、第2にはプラズマと壁の間に発生するシースの電位差****を低く保ち、このシー스로加速されたイオンが壁をたたいてもそれによるスパッタリングが無視できる程度とするためである。(スパッタリングが盛になると壁表面は常に活性化されている事となり、生成ガス分子は壁面に再吸着して洗浄効率を下げる。)

著者等の一部は上記の原理をふまえ、ECR (電子サイ

**** シース電位差 V_s は次式で与えられる¹²⁾

$$V_s = (kT_e/e) \ln \{ (1-\Gamma) / \sqrt{2\pi m_e/M_i} \}$$

ここで k : ボルツマン定数, e : 電子の電荷, Γ : 壁表面の2次電子放射率, m_e : 電子質量, M_i : イオン質量。式からわかるようにシース電位差は電子温度を電子ボルトで表わした値にほぼ等しい。

* 昭和56年11月5日 第22回真空に関する連合講演会で講演

** 理化学研究所(埼玉県和光市広沢)

*** 名古屋大学プラズマ研究所(名古屋市中種区不老町)

クロトロン共鳴)型放電洗浄法を開発し⁴⁾,これを原研のJFT-2装置に適用して,プラズマへの入力力が等しい条件では,テーラー型放電洗浄と略々等しい洗浄効果がある事を示した^{5,6)}.JFT-2の実験においては,その洗浄効果は,4重極質量分析器による生成ガス(CH_4 , H_2O , CO)分圧の測定とオージェ電子分光による表面観察によって評価されたが,トカマク主放電(以下主放電と略記する.)に及ぼす効果は調べられていなかった.

本実験⁷⁾に当っては,ECR放電洗浄によって主放電の不純物が如何に減少するかを調べる事に焦点を合わせた.主放電の不純物量を評価するために,平均プラズマ比抵抗(ループ電圧とプラズマ電流より求める.)酸素イオンのスペクトル線強度(OII , $\lambda=4414.9\text{\AA}$, $2p^23s-2p^23p$)及び平均電子密度(4mm波干渉計による.)を求めた.すなわちプラズマ比抵抗は電子温度と実効イオン電荷 Z_{eff} の関数で(附録参照),不純物の減少と共に低下する.また OII のスペクトル線強度は,プラズマ周辺へ入る酸素の原子束に比例するから,壁の清浄化とともに減少する.更に放電開始後10ms以降の,電子密度は,壁面が清浄でない場合には,不純物の電離によって決定されるが,壁が清浄になり,不純物の混入が低下すると,水素リサイクリングで決まるレベル迄低下し,プラズマは通常逃走電子モードへと移行する.従って以上3つの物理量は,放電洗浄が進むにつれて減少する傾向にあり,洗浄効果を直接反映する.

2. 実験装置

Fig. 1 に実験装置を模式的に示す.

2.1 JIPP T-II

よく知られている様に JIPP T-II はトーラス装置であって,トカマク或いはステラレータートして運転できる.放電洗浄実験に関連する主要な装置パラメーターは次の通りである.

第1壁材料	ステンレス鋼
主半径 R_0	91 cm
小半径	
壁 r_w	20 cm
リミター a_L	17 cm
壁面積	$7.2 \times 10^4 \text{ cm}^2$
実効排気速度	水素に対し 760 l/s
壁の許容温度	350°C

後述するように使用しているマイクロ波の周波数は2.45 GHz であり,これに対する電子サイクロトロン共鳴磁界は0.875 kG である.共鳴領域は主軸を軸とする円筒面となり,トロイダルコイルに流す電流を変える事によって,その半径 R_{res} を動かす事が出来る. Fig. 2 はト

ロイダルコイル電流と R_{res} の関係を示している.

2.2 マイクロ波系

マイクロ波電力は発振周波数 2.45 GHz 最大出力 2.5 kW のマグネトロンから供給され,長時間運転の電力は800W連続である***.伝送線路の大部分は矩形導波管W RJ-2 より成り,トーラス近くで同軸管39D(外導体の内径38.8 mm,内導体の外径16.9 mm)に変換し,内導体の先端にヘリカル・ランチャーを設け,トーラスのポートに接続された内径 83.1 mm のステンレス鋼の円形配管内にマイクロ波を放射している.真空封止は同軸管部に継付されたアルミナ窓で行っている.アルミナはマイクロ波に対して低損失の誘電体ではあるが,連続波運転の場合損失熱の蓄積により温度が上昇し,それと共に $\tan \delta$ (損失角の正接)が増し,更に損失熱が増し,破壊に到る恐れがある.これを防ぐため同軸内導体中に冷却水を流し,アルミナ窓の冷却効率を上げている.

3. 実験及び実験結果

実験の手順をFig. 3 に示す.放電洗浄とトカマク放電

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement.

ML: movable probe, MG: microwave generator, HL: helical launcher, G: gas inlet, QMA: quadrupole mass analyser.

*** 本実験では,ポートの取り合いに相当無理があり,モード変換損失が非常に大きく,安全のため1kW以下で運転したが,始めから合理的な設計を行えば,全電力の投入は困難ではない.

プラズマの純度との関係を明らかにするため、トカマク放電も3回に分けて行った。トカマク放電(1)は放電洗浄前、同じく(2)は短時間(5時間)放電洗浄を行った後、(3)は長時間(75時間)放電洗浄の後に夫々実行された。短時間洗浄の場合はトラス容器壁温は室温であり、長時間洗浄の場合は60 Hz の誘導電界によって容器に交流電流を流してオーム加熱し壁温を150~200℃に上げた。一言加えれば、60 Hz の誘導加熱を行う場合、容器壁の抵抗は有限値を持つから、誘導電界は容器内部にも発生し、ECR プラズマを種として120 Hz のプラズマが発生する。このプラズマによる洗浄作用については別に報告する。

さて ECR プラズマの姿を眺める事は興味のあることである。トラスの接線方向からテレビカメラが捉えた ECR プラズマの写真を Fig. 4 に示す。プラズマは共鳴

面の近傍で発光強度が大きいので、光っている円筒面を眺めている事になる。

3.1 QMA (四重極質量分析器) による測定

前出の Fig. 3 に従う手順で作業を進める過程で QMA を使って、 H_2 、 CH_4 (及び O)、 H_2O 及び CO (及び C_2H_4) を観測した。その結果を Fig. 5 に示す。横軸に時間を取り、種々の操作がどの時点で行われたかを記入してある。縦軸は QMA 信号の大きさをその電流値で与えてあり、この値に 670 を乗ずれば、大略 Pa で測った分圧の値を与える。排気速度がガスの種類によらないと仮定して、ベーキング前、ベーキング後及び放電洗浄(5+75時間)後で、各ガスの放出率を計算した結果を Table 1 に示す。Fig. 5 において、点線で書かれている

Fig. 2 Radial position of the resonance surface (measured from the major axis) as a function of toroidal coil current.

Fig. 4 Photograph of ECR plasma taken by a TV camera viewing in the tangential direction.

Fig. 3 Flow chart of ECR-DC experiment.

部分は、主放電と放電洗浄を実施した時間であり、主な処理過程のみを書き込んである。我々の最も関心のある H_2O 信号のその期間の詳細な変化を Fig. 6 に示す。Fig. 6 も Fig. 5 と同様に、横軸に時間を縦軸に信号電流値をとっている。放電洗浄と主放電の期間と H_2O 信号の変化の対応を見易くするため、図面中段に夫々の期間を示してある。特に主放電は黒い帯でその期間を示している。 H_2O 信号の測定値を示す△のうち黒く塗られた▲は水素を圧力 $2 \times 10^{-3} Pa$ で導入し、主放電を行う直前の値を示し、直接比較できるものである。水素を導入した場合に H_2O 信号が増大するのは、QMA の電離装置内での H_2O の生成によるものであろう。(電離装置のフィラメント上で $H_2 \rightarrow 2H$ の熱解離が起り、化学活性の大きいHはフィラメント及びこれを包む器壁に存在するOと反応して H_2O を生成すると考えられる。)

3.2 プローブ測定

水素プラズマによる放電洗浄に有効なのは、プラズマから壁表面に供給されるH及び H^+ であり、これらの粒子束を評価するため、ラングミュア・プローブを用いてプラズマ・パラメーターを測定した。測定はQMAの H_2O 信号が最大となる水素圧力 $3 \times 10^{-2} Pa$ の下で行った。イオン密度は共鳴面近傍で最大値をとる。主半径方向に測定すると、共鳴面より内側の方向(主軸に向かう方向)には密度の低下は鋭く、外側の方向にはゆるやか

である。これはトーラス効果による荷電分離で発生するプラズマ中の静電界 E_s とトロイダル磁界 B_t によって生ずる所謂 $E_s \times B_t / B_t^2$ ドリフトで、プラズマが外向きに運動するためである。使用したプローブ移動機構は、そのベローズの伸縮限界のため、 $101 < R < 111 cm$ の間の測定しかできない。ここでRは主軸からプローブ迄の距離である。密度のおよその分布の形を求めるために次の便法を用いた。

1) プローブを最も内側 $R = 101 cm$ に設定し、トロイダルコイル電流を変えて共鳴面を移動させて、共鳴面附近の密度の分布を求めた。密度の最大値は $1.2 \times 10^{10} cm^{-3}$ であった。

2) 共鳴面を $R = 91 cm$ に設定し、プローブを可動範囲一杯に動かして、リミター径附近の分布を求めた。今の場合の $R_{res} = 91 cm$ は放電洗浄時の共鳴の位置であ

Table 1 Effective gas desorption rates of CH_4 , H_2O and CO (and C_2H_4) without introduction of H_2 gas.

	Effective gas desorption rates in $Pa \cdot l/sec \cdot cm^2$		
	before baking	after baking	after DC
CH_4 and O	7×10^{-9}	1×10^{-9}	4×10^{-10}
H_2O	9×10^{-8}	1×10^{-8}	3×10^{-9}
CO and C_2H_4	3×10^{-8}	7×10^{-9}	3×10^{-9}

Fig. 5 Temporal variation of QMA signals.

Fig. 6 H_2O signal in QMA observation of the process of tokamak discharge and ECR-DC.

る。これらのデータを総合して書いた密度分布の形が Fig. 7 に示されている。また電子温度はプラズマ中で殆ど一定で約 5 eV であった。

3.3 トカマク主放電

主放電時に、ループ電圧、プラズマ電流、平均電子密度及び酸素イオンのスペクトル線 ($O II$) 強度を測定した。トロイダル磁界 $B_t = 0.9$ T の場合の 1 例を Fig. 8 に示す。放電電流最大の時にはインダクタンスの影響が消えて、 V_L/I_p からプラズマ抵抗が求まり、これから平均プラズマ比抵抗が求められる (附録 参照)。放電電流最大時の平均プラズマ比抵抗、 $O II$ 線強度及び平均電子密度を一括して Fig. 9 に示す。図中の、 TD_1 、 TD_2 及び TD_3 は夫々 Fig. 3 の流れ図におけるトカマク放電(1)、(2)及び(3)を意味する。白い棒は $B_t = 0.9$ T を黒い棒は $B_t = 1.9$ T の場合を示している。主放電プラズマの密度は後者の方が高い事は言うまでもない。図から明らかなように 3 つの物理量は、放電洗浄の進展とともに、期待通り着実に低下している。特に初めの 5 時間の洗浄による不純物の低下は、壁温が室温であるにもかかわらず著しい。それに次ぐ壁温 150 ~ 200 °C で 75 時間の洗浄時にも、その低下の速さは鈍化するにしても着実である。ただしこの際には真空容器壁加熱用の交流誘導電界による 120 Hz (60 Hz $\times$ 2) のプラズマが発生し、この洗浄効果はここでは分離されていない。以上の総計 80 時間の放電洗浄を行った後、プラズマ比抵抗の測定から評価された Z_{eff}^* は $Z_{eff} = 1.0$ すなわち $Z_{eff} - 1 < 0.05$

Fig. 7 Density profile of ECR plasma.

であった (附録参照)。JIPP-T II では主放電を反復する事によっても $Z_{eff} = 1$ のプラズマを得る事ができるが、そのための必要放電回数は経験上約 3,500 回に及ぶ。理想化した運転条件として「3 分に 1 回の割合で主放電を行い、1 日 8 時間の運転を採用すれば、その実現に約 22 日を要する (通常の運転条件では経験的に約 2 ケ月を要していた。今回の実験によれば、これが 3 日強で実行できるので、清浄化時間は大幅に短縮される事になる。

* $Z_{eff} = \sum_K Z_K^2 n_{K,Z} / n_e$ で定義される。ここで $n_{K,Z}$ は K 種の Z 価のイオンの密度、 n_e は電子密度。純粋の水素プラズマでは $Z_{eff} = 1$ で、不純物の増加とともに大きくなる。

Fig. 8 Typical data of tokamak discharge on loop voltage, plasma current, mean electron density and OII line (4419.9Å) intensity; broken line: before discharge cleaning, dotted line: after 5 hrs' ECR-DC with room temperature wall, solid line: after 75 hrs' cleaning with wall temperature ranging 150°–200°C.

4. 考 察

水素放電洗浄で本質的な役割を演ずるH及びH⁺の壁に流入する粒子束を評価し、洗浄時間を概算してみよう。Fig. 7 から判るように、プラズマはR=91 cmの共鳴面とR=108 cmのリミター面の間に存在し、密度は夫々の半径位置で $1.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 及び $0.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ でこの間直線的に変化していると仮定しても無理はないだろう。簡単な計算からプラズマ体積 V_p と平均電子密度 $\bar{n}_e$ は、 $V_p = 2.8 \times 10^5 \text{ cm}^3$ 、 $\bar{n}_e = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ となる。プラズマ電子は水素分子と非弾性衝突してこれを励起・解離し、いわゆるフランク・コンドン中性原子を発生させる。壁に流入する平均の中性原子束 ϕ_0 は

$$\phi_0 = 2n_e n_0 \langle \sigma v_e \rangle_{\text{dis}} V_p / A_w \quad (1)$$

で計算できる。ここで n_0 と $\langle \sigma v_e \rangle_{\text{dis}}$ は、それぞれ分子密

Fig. 9 Change of plasma resistivity, OII line (4414.9Å) intensity and mean electron density: TD₁ before ECR-DC, TD₂ after 5 hrs' ECR-DC with room temperature wall, TD₃ after 75 hrs' ECR-DC with wall temperature ranging 150°C–200°C.

度及び $H_2 + e \rightarrow 2H + e$ の反応の速度係数である。今の場合 $n_e = 1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $n_0 = 7.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (圧力 $2.9 \times 10^{-2} \text{ Pa}$), $\langle \sigma v_e \rangle_{\text{dis}} = 4.3 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,⁸⁾ (電子温度 5 eV) であるから $\phi_0 = 2.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる。他方プラズマ粒子はトラス外向に $E_s \times B_t / B_t^2$ のドリフトで逃げる。 E_s を $E_s \sim T_e / (eR_0)$ で評価すると**, $5.5 \times 10^{-2} \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ となり, $B_t = B_{\text{res}} = 8.8 \times 10^{-2} \text{ T}$ を仮定するとドリフト速度は, $V_d = 6.3 \times 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ となり, これを使ってトラスの外側の壁に向うイオン束は, $\phi_i = n_i \cdot v_d = 6.3 \times 10^{13} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ となる。これらの評価から洗浄を支配しているのは中性原子束であることがわかる。中性原子束はプラズマから等方的に飛散し, 磁力線を横切って壁に当たるから, 洗浄にとって好都合である。

さて洗浄に要する時間を概算してみよう。今処理すべき不純物を酸素で代表させ, 大気に曝した後のトラス壁の表面には 10^2 原子層の酸化層が形成されていて, 酸化層の1原子層には $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ の面密度で酸素原子が存在すると仮定する。水素原子2コが壁に附着して酸素原子1コと反応して水分子1コを作り, これが気相に出た場合反応確率を1と約束すると, 基礎実験のデータから⁴⁾ 今の場合の反応確率を鉄の場合に略々等しいとして 10^{-2} と仮定すると, 処理に要する時間は約6時間となる。Fig. 9 で見られるように, 始めの5時間で不純物は急減する。上の計算から5時間の間に表面近くの数10原子層が処理できていると考えるのは合理的であろう。従って主放電で不純物放出に重要な役割を演じているのは表面に近い部分であると考えるのは自然である。

最後に水素分子の収支に関して一言する。前出の水素原子束の総量を換算すると $3.6 \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{l/s}$ となり, 一方ガス供給量は $2.3 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{l/s}$ であるのでこれは前者より1桁小さい。それに関らず定常であるのは, 反応確率が 10^{-2} 程度と小さいから $2H \rightarrow H_2$ なる再結合が壁で起り, 水素の大部分がプラズマと壁との間でリサイクルしているからである。壁温を 300°C 近く上げると反応確率は約1桁上がり¹⁰⁾ 同じプラズマパラメーターの定常状態は保てなくなりガス供給量を増さねばならないであろう。

** この評価は粒子の磁力線の曲りによるドリフト速度 V_R と B_t の勾配によるドリフト速度 V_{VB} の和が V_d にほぼ等しいと仮定することと等価である。 $(V_R \times V_{VB})$ はトラスの上下方向に荷電分離を起こし静電界 E_s を作る。この際結果として生ずる静電力 eE_s は原因であるトラス・ドリフトを起こす力 $eB_t[V_R + V_{VB}]$ を超えることはないだろうと考える。事実荷電粒子の磁力線に平行及び垂直な速度成分をそれぞれ $v_{//}$ 及び $v_{\perp}$ とすると⁹⁾ $|V_{VB} + V_R| = m_e / e \cdot [R_0 \times B_t / R_0 \cdot B_t^2] (v_{//}^2 + \frac{1}{2} v_{\perp}^2) \sim T_e / e \cdot R_0^{-1} \cdot B_t^{-1} (= E_s / B_t)$ ただしわれわれはここでは電子のみを考え, イオンはエネルギーが非常に小さいとして無視する

5. 結 言

JIPP T-II装置を用い, ECR型の放電洗浄実験を実施した。実験の目標を放電洗浄とトカマクの本放電プラズマの純度との関係を明らかにする事に置き, 電子温度 5 eV , 密度約 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の水素プラズマで洗浄を行った。プラズマ比抵抗, イオンのスペクトル線 ($4414.9 \text{ \AA}$) 及び平均電子密度を測定して本放電プラズマの純度を評価した。壁温が室温でも5時間の洗浄で不純物の著しい低下が認められた。その後 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ の壁温で75時間洗浄した。最終の Z_{eff} は1.0であり洗浄の有効性を実証した。

謝辞 著者等は JIPP T-II装置の運転に関し, 広倉 覚, 石黒宏幸, 錦見淳治, 谷口能之の諸氏に感謝する。また名大プラズマ研究所の藤田順治教授及び理化学研究所の森 一夫主任研究員に, 研究の支持に関して謝意を表する。

〔文 献〕

- 1) L. Oren and R. J. Taylor: Nuclear Fusion **17** (1977) 1143.
- 2) J. Winter, J. Waelbroeck, B. Brandt, K. J. Dietz, I. Ali-khan and P. Wienhold: J. Nuclear Mater. **93 & 94** (1980) 812.
- 3) Y. Gomay, R. E. Clausing, R. J. Colchin, L. C. Emerson, L. Heatherly, W. Namkung and J. E. Simpkins: J. Vac. Sci. Technol. **16** (1979) 918.
- 4) Y. Sakamoto and Y. Ishibe: Japan. J. Appl. Phys. **19** (1980) 839.
- 5) Y. Sakamoto, Y. Ishibe, K. Yano, H. Oyama, Y. Tanaka, N. Fujisawa, Y. Matsuzaki, N. Suzuki, K. Maeno, T. Yamamoto and K. Yokokura: J. Nuclear Mater. **93 & 94** (1980) 333.
- 6) 石部行雄, 坂本雄一, 石井成行, 矢野勝喜, 岡崎清比古, 大山 等, 大塚英雄, 松崎 諒, 横倉賢治, 鈴木紀男, 谷 孝志, 田中裕二: 真空 **24** (1981) 223.
- 7) Y. Sakamoto, Y. Ishibe, S. Ishii, K. Okazaki, H. Oyama, K. Yano, N. Noda, K. Kawahata, Y. Kawasumi and S. Tanahashi: IPPJ-539 (IPP Nagoya, Sept. 1981).
- 8) E. M. Jones: CLM-R175 (Culham Laboratory, 1977)
- 9) F. Chen: Introduction to Plasma Physics (Plenum Press, New York & London, 1974) p. 26.
- 10) H. F. Dylla: J. Nuclear Mater. **93 & 94** (1980) 61; data is cited from K. J. Dietz et al, IUPAC Conf. Zürich 1979.
- 11) D. F. Duchs, D. E. Post and P. H. Rutherford:

附 録

比抵抗は次式で与えられる¹¹⁾. 以下 MKS 単位, T_e は eV.

$$\eta = \eta_L \cdot \gamma \cdot (f_{TR})^{-1} \quad A1)$$

ここで η_L , γ 及び f_{TR} は, それぞれ ローレンツ・ガスの比抵抗, 電子・電子衝突に関する補正係数及び トーラス効果に関する補正係数で次式で示される.

$$\eta_L = m_e v_e / (n_e e^2),$$

ここで

$$v_e = 4\sqrt{2\pi} \cdot e^4 \cdot n_e \cdot \ln A_e / [3\sqrt{m_e} (e T_e)^{3/2} (4\pi e_0)^2]$$

$$A_e = 1.09 \times 10^{14} T_e / [\sqrt{n_e} \cdot Z_{eff}] \text{ 但し } T_e > 50 \text{ eV,}$$

$$\gamma = Z_{eff} \{0.29 + 0.457 / (1.077 + Z_{eff})\},$$

$$f_{TR} = 1 - [1.9(r/R_0)^{1/2} - r/R_0] / (1 + v_e^*),$$

ここで

$$v_e^* = v_e (1 + Z_{eff}) R_0^{3/2} B_t / [2\sqrt{r} \cdot B_\theta \cdot (e T_e / m_e)^{1/2}],$$

ここで B_θ はポロイダル磁界. r はプラズマ中心からの距離.

これらの式からわかるように η_e は T_e と Z_{eff} の関数である.

さてプラズマ断面にわたっての平均の比抵抗は

$$\langle \eta \rangle = \frac{2}{a_L^2} \int_0^{a_L} \eta(r) r dr \quad A2)$$

で与えられる. 電子温度の半径方向の分布としてもっともらしいと考えられる 4 乗分布をとる. すなわち

$$T_e(r) = T_{e0} (1 - r^2/a_L^2)^2 \quad A3)$$

ここで T_{e0} は中心電子温度.

Z_{eff} が r によらないとすれば, A1), A3) を入れ, T_{e0} , Z_{eff} を与えれば A2) の計算ができる.

一方実験的には平均比抵抗は

$$\langle \eta \rangle_{ex} = V_t \cdot a_L^2 / I_p \cdot 2R \quad A4)$$

から求められる. レーザー光のトムソン散乱によって T_{e0} を求めれば, A2), A4) の値が一致するような Z_{eff} を決定することができる. ちなみに実験では $T_{e0} = 680$ eV であった.