【解説】

プラズマの熱物性

神沢 淳

東京工業大学化学工学科

〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

プラズマの熱物性は、プラズマ中に存在するイオンや電子に大きく依存する。従って通常のガスの熱物性の延長上にはない。ここでは、プラズマの組成、熱力学的定数、輸送係数などについて算出方法と結果例を記述する。

1 はじめに

物質にエネルギーを加え加熱していくと、固体から液体に、液体から気体に相変化していく。この気体にさらにエネルギーを加えると、中性粒子から電子が飛び出してイオンになり、イオンと電子の混在した状態になる。この状態をプラズマといい、巨視的に見て電氣的に中性な電離気体と定義される。

プラズマは、多くの場合アーク放電、グロー放電、マイクロ波放電などの電気放電によってつくられる。この他、急激圧縮の衝撃波、化学エネルギーの燃焼、レーザーなどの高エネルギービームによってもつくることができる。このようにしてつくったプラズマは、化学的高活性を利用したプラズマ化学、高熱源を利用したプラズマ加工、超高温エネルギーを利用した核融合炉、導電性を利用したMHD発電やプラズマロケット、電磁波放出を利用した照明やレーザーなど多くの分野に使用されている。特にプラズマ化学の分野においては、半導体製造や金属精錬など実用面でその特長が活かされている。

これらの分野でプラズマの利用効率を上げ、さらに利用範囲を広げていくためには、プラズマの状態を知り、利用プロセスの機構を解明していくことが必要である。プラズマ物性はそれをおこなう上で重要な基礎的データの一つであり、その知見を集積していくことはきわめて大切である。プラズマ物性はこれまでアルゴン、窒素、水素、ヘリウム、酸素など主なガスについて計算や実験により求められている。ここでは、プラズマ物性のうち熱に関するものとして、組成、熱力学的定数、輸送係数などについて、その算出方法と結果例を述べることにする [1, 2]。

2 プラズマ熱物性一般

2.1 特徴

プラズマ中にはイオンや電子などの荷電粒子が存在しているので、それらの振舞いによって熱物性が大きく左右される。その特徴的要因を以下に示す。

(1) 粒子間にクーロン力が働くこと

荷電粒子相互の間にはクーロン力という静電気が働く。この力は広範囲に及ぶので、実質的な衝突断面積が非常に大きくなる。このことは粒子の移動を妨げることにになり、粘性係数などは電離とともに大きく減少する。なお、荷電粒子と中性粒子との衝突でも中性粒子に分極をおこし、粒子間のポテンシャルがそれによって影響される。

(2) 電子の質量が非常に小さいこと

電子は質量がイオンや中性粒子（併せて重い粒子という）に比べて非常に小さいので、移動し易く単位時間あたり多くのエネルギーを輸送することができる。これは熱伝導率の増加につながる。

(3) 電磁場の影響を受けること

プラズマ中に電界があると、イオンや電子はそれから静電気を受けて移動する。また、磁場があると荷電粒子は磁場を横切って動きにくくなるので、磁場に垂直方向の輸送係数は減少し非等方性物性になる。

(4) 電離反応があること

中性粒子がイオンと電子になる電離反応とこの逆の再結合反応がプラズマ中でおこっている。従って、高温部で電離反応し低温部で再結合反応すれば電離エネルギーが輸送され、見掛けの熱伝導率が増加する。またこの反応がおこる温度領域で、

エンタルピーは急上昇し比熱は極大値を示す。

- (5) 新たな放射があること
原子内の束縛電子遷移による放射（輝線スペクトル）に加えて、再結合放射や荷電粒子の速度変化に伴う制動ふく射（ともに連続スペクトル）が放出される。
- (6) 高温であること
プラズマは1万度を超える高温で、対象温度も広範囲である。熱物性は温度に対し大きく変わり、しかも単調に変化しない。従って一定として扱えない。

2.2 平衡と非平衡

2.2.1 平衡状態と非平衡状態 プラズマ物性を求める場合、プラズマの状態が平衡か非平衡かに分けて考えることが多い。完全平衡状態というのは、

- (1) 粒子のエネルギーがマクスウエル・ボルツマン分布をしていること（この平均がプラズマ温度）
- (2) 各粒子の温度が等しくプラズマ温度であること
- (3) 励起状態がボルツマン分布であること
- (4) 粒子密度が反応平衡組成になっていること
- (5) 電磁波が黒体ふく射であること

の条件が成り立っている状態をいう。このうち (5) のふく射平衡は実現がむづかしいが、(1) ～ (4) は大気圧のアーーク放電などで比較的实现し易い。(1) ～ (4) の条件が成立している状態を局所熱平衡状態 (Local Thermodynamic Equilibrium、略してLTE) と呼んでいる。

圧力が低い場合、電界が強い場合、プラズマと固体またはガスが接している近傍、3体再結合のある場などは、上の条件が成立せず非平衡状態になる。

2.2.2 平衡物性と非平衡物性 プラズマが局所熱平衡状態である場合は物性が温度と圧力だけの関数となり、これを平衡物性と呼んでいる。平衡物性は結果として与え易く、これまで求められている熱物性の多くは平衡物性である。

プラズマが非平衡状態の場合は組成が平衡組成になく、電子温度がイオンや中性粒子に比べて高いことが多い。非平衡物性は一般に組成にも依存するから、一義的に求めることがむづかしい。従って、物性はプラズマ場の状態に応じて逐一求めていく必要がある。非平衡物性としては、電子と重い粒子の温度が異なっている2温度状態に対して多く検討されている。

3 プラズマの組成

3.1 平衡組成の算出方法

プラズマ中のイオン、電子、中性粒子はどのような割合になっているのか、その割合は温度や圧力でどう変わるのか、を知ることは物性を求める上で大切であ

る。ここでは、平衡状態での組成について述べる。

i 価の荷電粒子 A_i が $i+1$ 価の荷電粒子 A_{i+1} と電子 e になる電離反応およびその逆の再結合反応を考える。その場合の反応式は

である。 E_i は i 価から $i+1$ 価になる電離エネルギーである。このときの平衡定数 K_{i+1} は A を単原子分子とすると

$$\begin{aligned} K_{i+1} &= \frac{N_{i+1}N_e}{N_i} = \frac{Z_{i+1}Z_e}{Z_i} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \\ &= V \left(\frac{2\pi m_e kT}{h}\right)^{3/2} = \frac{2Z_{i+1}Z_e}{Z_i N_i} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad (2) \end{aligned}$$

で与えられる。この式はサハ (Saha) の式といわれている。ここで、 N は粒子数、 Z は分配関数、 k はボルツマン定数、 V は体積、 T は絶対温度、 h はプランクの定数、 m は粒子の質量、 Z_{in} 内部分配関数であり（分配関数については次節参照）、添字の e は電子、 i は i 価 ($i=0$ は中性粒子)、 $i+1$ は $i+1$ 価である。

プラズマは電氣的に中性であるので、それを式にすると

$$N_e = \sum i N_i \quad (3)$$

となる。状態方程式は

$$PV = (\sum N_i + N_e) kT \quad (4)$$

である。ここで P は圧力である。Eqs. 2～4 を用いると、熱平衡状態にある原子・イオン・電子の各組成を温度・圧力の関数として計算することができる。

3.2 結果例

1 気圧におけるアルゴンの平衡組成を Fig.1 に示す [2]。この図でわかるように、15,000 K 付近でほぼ半分が電離し、20,000 K 以上で2価のイオンが現われてくる。Fig.2 に窒素の1気圧の平衡組成を示す [2]。窒素は2原子分子であるから、まず分子が原子になる解離反応が5,000K以上で起こる。できた窒素原子の電離はアルゴンとほぼ同じ温度レベルでおこる。

3.3 2温度

電子と重い粒子の温度が異なる2温度非平衡状態の組成は、次のようにして求める。Eq.2にある温度を電子温度 T_e とし、分配関数を電子温度と重い粒子温度 T_n の両方の関数とする。またEq.4の状態方程式は

$$PV = N_e kT_e + \sum N_i kT_n \quad (5)$$

Fig.1 Equilibrium Composition of Argon Plasma (1atm)

Fig.2 Equilibrium Composition of Nitrogen Plasma (1atm)

になる。計算結果の一例をFig.3 に示す[2]。これはアルゴンと水素をモル比 1 : 3 で混合した場合のもので、同図(a) は平衡状態のもの、同図(b) は電子温度と重い粒子温度との比が 3 のものである。両者を比較すると、(b) において水素原子や水素原子イオンが少なく水素分子イオンが多いことがわかる。これは、重い粒子温度が低いために水素分子の解離が進まないの原子密度が少なくなること、解離しないうちに分子に高温の電子が衝突してイオン化することなどに困っている。

Fig.3(a) Equilibrium Composition of Argon-Hydrogen Plasma (1atm)

Fig.3(b) Equilibrium Composition of Argon-Hydrogen Plasma (1atm)

4 プラズマの熱力学的定数

4.1 算出方法

4.1.1 分配関数 熱力学定数には、比熱、エンタルピー、エントロピー、音速などがあるが、プラズマの熱力学的定数も通常の場合と同様に分配関数から計算で求めることができる。

プラズマの分配関数 Z は、電離や荷電粒子を考慮に入れて次式で与えられる。

$$Z = \sum g_i \exp(-\varepsilon_i/kT) \\ = Z_{\text{trans}} Z_{\text{rot}} Z_{\text{vib}} Z_{\text{in}} \exp(-E_i/kT) \quad (6)$$

この式で、 g は統計的重み、 ε はエネルギーレベル、 Z_{trans} は並進運動エネルギーによる分配関数、 Z_{rot} は回転運動エネルギーによる分配関数、 Z_{vib} は振動運動エネルギーによる分配関数、 Z_{in} は内部分配関数である。単原子分子のときは、 Z_{rot} と Z_{vib} は考えなくてよい。

体積 V 中に N 個の粒子があるとき、全体の分配関数 Z_t は次式で与えられる。

$$Z_t = Z^N / N! = (eZ/N)^N \quad (7)$$

4.1.2 熱力学的定数の算出式 Eq.7の全体の分配関数 Z_t を用いて、体積 V の熱力学的諸量は j 成分のそれの和として次式によって求められる。

$$\text{圧力} \quad P = \sum P_j = \sum N_j kT / V \quad (8)$$

$$\text{密度} \quad \rho = \sum \rho_j = \sum m_j N_j / V \quad (9)$$

$$\text{内部エネルギー} \quad U = \sum U_j \\ = \sum kT^2 (\partial \ln Z_{t,j} / \partial T)_V \quad (10)$$

$$\text{エンタルピー} \quad H = \sum H_j = \sum (U_j + P_j V) \quad (11)$$

$$\text{エントロピー} \quad S = \sum S_j \\ = \sum (k \ln Z_{t,j} + U_j / T) \quad (12)$$

$$\text{自由エネルギー} \\ \text{ギブス} \quad G = \sum G_j = \sum (H_j - TS_j) \quad (13)$$

$$\text{ヘルムホルツ} \quad F = \sum F_j = \sum (U_j - TS_j) \quad (14)$$

$$\text{定積比熱} \quad C_v = (\partial U / \partial T)_V \quad (15)$$

$$\text{定圧比熱} \quad C_p = (\partial H / \partial T)_P \quad (16)$$

$$\text{音速 (平衡)} \quad a_e^2 = (\partial P / \partial \rho)_{s, g} \quad (17)$$

$$\text{音速 (凍結)} \quad a_f^2 = (\partial P / \partial \rho)_{s, N_j} \quad (18)$$

ここで音速が二つあるのは、プラズマが反応性ガスであるためである。音は媒体の等エントロピー膨張・圧縮によって伝播し、温度がそれに依拠して変化する。周波数が小さいときは、この温度変化に組成が平衡状態で追従でき、平衡音速になる。周波数が大きいときは、組成が追従できなくて組成変化がおこらず、凍結音速となる。

4.2 結果例

4.2.1 平衡エンタルピー Fig.4 に各種ガスのエンタルピーを示す[2]。解離反応（2原子分子の場合のみ）や電離反応がおこっている温度領域で、エンタルピーが急上昇していることがわかる。これは反応エネルギーが加わるためである。Fig.5 はアルゴンプラズマを例にとり、エンタルピーが圧力によってどう変わるかを示したものである。圧力が低いほどより低温度

で電離するので、この図で示されるようにエンタルピーの急上昇もより低温度ではじまる。

Fig.4 Equilibrium Enthalpy of Plasma (latm)

Fig.5 Equilibrium Enthalpy of Argon Plasma (latm)

4.2.2 平衡定圧比熱 Fig.6 に各種ガスの定圧比熱を示す[2]。定圧比熱はエンタルピーを温度で微分したものであるから、Fig.4 から推測されるように解離反応や電離反応がおこっているエンタルピー急上昇のところで極大を示す。

4.2.3 2温度でのエンタルピー Fig.7 に水素のエンタルピーを示す[2]。この図の θ は電子温度と重い粒子温度との比で、 T_e/T_n である。 $\theta = 1$ が平衡状態である。エンタルピーが急上昇しているところ（解離反応がおこっているところ）は、 $\theta = 1$ で 3,000 ~

Fig. 6 Specific Heat of Plasma (1atm)

Fig. 7 Enthalpy of Hydrogen Plasma (1atm)

4,500 K, $\theta = 2$ で 6,000~9,000 K、 $\theta = 3$ で 9,000 ~ 13,500 K である。これはちょうど θ の倍数になっていて、重い粒子の温度が 3,000 ~ 4,500 K のときに解離反応がおこることを示している。ただし、 θ が 4 以上になるとどの θ でも電子温度が 12,000~14,000 K のときにエンタルピーが上がっている。これは θ が大きくなると重い粒子による解離がおこる前に電子温度が 12,000 ~ 14,000 K 以上になり、この電子のエネルギーで水素分子が電離するためである。

5 プラズマの輸送係数

5.1 算出方法

熱プラズマの輸送係数は、計算または実験によって求められている。計算に使う理論には simple kinetic theory (以下シンプル法という) と rigorous kinetic theory (以下リゴラス法という) とがある。これにつ

いては後で述べる。

実験で求める場合は、熱プラズマ流の温度・流速・濃度・電位分布を測定し、これが輸送係数に依存することから、流体力学の保存式や電流の保存式を用いて求めることができる。プラズマジェットの温度と流速を測定しその変化から熱伝導率や粘性係数を求めたものの [3]、アーク放電中の温度分布を測定し発生したジュール熱と熱の逃げのエネルギーバランスから熱伝導率を求めたものなどがある。

5.1.1 シンプル法 シンプル法は、一つの粒子が他の粒子と衝突して移動する過程を追ったもので、その着目粒子が運ぶ運動量、エネルギー、電気量、数を、粘性係数、熱伝導率、電気伝導度、拡散係数に結びつけるものである。これは、いわゆる気体分子運動論といわれるもので、一般のガスに古くから適用されている。このシンプル法では、粒子間の衝突断面積と平均自由行程が主要なパラメータとなる。プラズマではクーロン衝突による衝突断面積が重要なものとして新たに加わり、これには次の式

$$Q = \left(\frac{e^2}{kT} \right)^2 \ln \left(\frac{kT}{e^2 n_i^{1/3}} \right) \quad (19)$$

が用いられている [4]。ここで、 Q は荷電粒子間の衝突断面積、 e は 1 価の電荷、 n_i は荷電粒子の数密度である。シンプル法は精度的には粗いが、これを用いると比較的に簡単に輸送係数を計算することができる。

5.1.2 リゴラス法 粒子 i の運動の状態は、分布関数 $f_i = f_i(r, v_i, t)$ の保存式であるボルツマン方程式 $\frac{\partial f_i}{\partial t} + (v_i \frac{\partial f_i}{\partial r}) + \left(\frac{\lambda_i}{m_i} \frac{\partial f_i}{\partial v_i} \right) = \sum_j J(f_i, f_j)$ (20) によって規定される。右辺は衝突項である。定常で一樣な場では上式の左辺が 0 となり、分布関数は平衡状態のマクスウエル・ボルツマン分布 (f_r^0) となる。リゴラス法はこの方程式に摂動法を適用し、分布関数がどう変化するかを調べて求めるものである。つまり分布関数を

$$f_r = f_r^0 (1 + \phi_r) \quad (21)$$

とおき、摂動関数 ϕ_r を多項式 (Sonine 多項式) で展開して、これを Eq. 20 のボルツマン方程式に代入し、分布関数がボルツマン分布に近づく速度から各輸送係数を算出するものである。その精度は Sonine 多項式の次数により決まるが、次数をあまり大きくすると非常に多くの計算を要することになる。次数としてはこれまで、輸送係数の種類や要求精度に応じて 1 ~ 4 が用いられている。またいくつかの工夫もされている。例えば、水素、アルゴン、ヘリウム、クリプトンなどの熱伝導率は次数を 4 として求めるとよいとされている

が、計算を簡単にするために重い粒子を次数2で、電子を次数3で別々に求め、これらの結果を加えてトータルの熱伝導率を算出しているものがある。この方が計算は楽で精度もアルゴンで0.1%以下、窒素で0.9%以下である[5]。

Sonine多項式の中には、粒子間ポテンシャルに基づいた衝突積分というのが現われる。リゴラス法ではこれが主要なパラメータとなる。衝突積分はアルゴン、窒素、酸素、水素などでは求められているが、プラズマ化学によくでてくる炭素と水素間など複雑なものは求めるのがむづかしい。リゴラス法は一般的に精度は高いが、複雑な計算を要するのが難点である。ただし平衡物性の場合には、すでに求められている輸送係数を多項式近似して用いればよい。

5.1.3 修正シンプル法 シンプル法における精度の粗さは、プラズマのような高温場における衝突断面積の不確かさに因っている。しかし、非平衡状態の場合は組成依存の非平衡物性を逐一計算で求める必要があり、計算量の多いリゴラス法を適用することが不可能である。そこでリゴラス法の結果を用いて衝突断面積を予め修正し、それをシンプル法の式に入れて輸送係数を計算する方法がある。これを修正シンプル法という[6]。これを用いれば、計算は簡単で精度はリゴラス法に近いものが得られ、非平衡状態での輸送係数も計算可能である。アルゴンプラズマの場合の修正した衝突断面積をFig.8に示す。

Fig.8 Collisional Cross Sections used for Corrected (suffix C) and (suffix S) Kinetic theory (1: argon atm, 2: argon ion, 3: electron, CE: charge exchange)

5.2 平衡物性の結果例

5.2.1 粘性係数 各種ガス（アルゴン、ヘリウム、窒素、水素）の粘性係数をFig.9に示す[2]。また、

Fig.9 Viscosity of Plasma (atm)

アルゴンプラズマを例にとり粘性係数が圧力によってどう変わるかをFig.10に示す[6]。これらの図からわ

Fig.10 Viscosity of Argon Plasma (Effect of Pressure)

かるように、電離がおこると粘性係数が大きく減少する。粘性係数は運動量の移動であり、電離すると質量の大きいイオンが運動量を運ぶ担い手となる。しかしイオン同士の衝突はクーロン衝突であり、その衝突断面積は大きくイオンが動きにくくなる。そのため粘性係数が減少する。

ガスの粘性係数は温度の0.5~1乗で大きくなることが知られている。従って、温度だけ大きく電離度がまだ小さい領域では、粘性係数が大きくなり室温でのその数~10倍まで上る。プラズマプロセッシングに用いられているプラズマはこのような状態のものが多く、粘性係数が一般に大きい。依って、このようなプラズマ中に固体粒子が入れたり、ガスと混合させたりすることはむづかしいので、工夫を要する。

Fig.9 とFig.10はリゴラス法で計算したものであるが、シンプル法とリゴラス法を比較するために、両者から算出したアルゴンプラズマの粘性係数をFig.11に示す[6]。図中に縦棒で実験値も示されている。リゴラスの計算結果とよく一致していることがわかる。

5.2.2 熱伝導率 アルゴンの熱伝導率をFig.12に、窒素のそれをFig.13にそれぞれ示す[2]。これらの図において κ は熱伝導率、添字の totalはトータル、eは電子、reactは反応、int は内部エネルギー、肩添字の tr は並進を表わす。電離反応や解離反応がおこると熱伝導率が急激に増加するのがわかる。通常のガスの熱伝導率は並進運動エネルギーによる κ_{tr} だけを考えればよいが、電離や解離反応があるとそのエネルギーが拡散によって運ばれ、これが見掛けの熱伝導率を大きくする。これが κ_{react} である。電離の場合はさらに電子が寄与している。電子は質量が小さいので移動し易く、結果として多くのエネルギーを運ぶことになるからである。熱プラズマにおいては局所熱平衡状態を仮定できるから熱伝導率として κ_{total} を用いればよい。

Fig.11 Viscosity of Argon
(Comparison of Estimation Method)

Fig.12 Thermal Conductivity
of Argon Plasma (latm)

Fig.13 Thermal Conductivity
of Nitrogen Plasma (latm)

Fig.14にアルゴンの熱伝導率の圧力による変化を、Fig.15にシンプル法とリゴラス法と修正シンプル法の比較をそれぞれ示す。図中の縦棒は実験値で、この場合はシンプル法でも合う。[6]

Fig.14 Thermal Conductivity
of Argon Plasma
(Effect of Pressure)

Fig.15 Thermal Conductivity of Argon
(Comparison of Estimation Method)

5.2.3 電気伝導度 各種ガス（アルゴン、窒素、ヘリウム、水素）の電気伝導度をFig.16に示す[2]。ま

Fig.16 Electrical Conductivity of Plasma(1atm)

た、圧力による影響をFig.17に示す。図からわかるように、電離がおこりはじめると電子が電流を運ぶことになるので、電気伝導度が急激に上昇する。この値は電離が完了するとほぼ一定になるが、2価の電離がはじまるとまた急上昇する。電界による荷電粒子の移動速度は、衝突支配の場では電界に比例するとして与えられるが、この比例係数は移動度と呼ばれている。電気伝導度は、この移動度に電子密度と電荷を乗じた形として与えられる。

Fig.17 Electrical Conductivity of Argon Plasma,
(Effect of Pressure)

5.2.4 拡散係数 プラズマにおいては、中性粒子、イオン、電子の3つの拡散係数がある。しかし、イオンと電子はクーロン力で引き合うので、プラズマ状態（電気的中性）を保ちつつ拡散することが多い。この場合、イオン-電子のペアと、中性粒子の2成分拡散となり、このときの拡散係数は両極性拡散係数といわれている。電子温度とイオン温度が等しく電離度の小さいときは、両極性拡散係数がイオン拡散係数の2倍になる。アルゴンプラズマの両極性拡散係数をFig.18に示す[6]。

Fig. 18 Ambipolar Diffusion Coefficient of Argon Plasma

5.3 非平衡物性

非平衡物性もボルツマン方程式から求めることができる。この場合、電子と重い粒子に対して別々に算出して加える方法が計算し易い。また衝突積分は、非平衡の場合も平衡のものをを用いてよい。

一例として2温度の場合のアルゴンプラズマの粘性係数をFig. 19に、アルゴン-水素プラズマの熱伝導率をFig. 20にそれぞれ示す。ここで θ は電子温度と重い粒子温度との比で、 $\theta = 1, 2, 3, 4, 6, 10$ のものが示してある[2]。

Fig. 19 Non-equilibrium Viscosity of Argon Plasma (1 atm)

Fig. 20 Non-equilibrium Thermal Conductivity of Argon-Hydrogen Plasma (1 atm)

6 おわりに

以上示したように、プラズマの熱物性は通常のガスに比べて特異的な変化を示す。その主な要因は荷電粒子の存在に因るものである。これまでに多くの熱物性が計算されているが、プラズマプロセスで現われる多くの化学種に対してはそれら相互の間の粒子間ポテンシャルがほとんど知られていない。これらの基礎的データの知見がさらに集積され、プラズマの定量的取扱いや各プロセスの機構解明に活かされることを望んでいる。

<参考文献>

- [1] C. Bonet, M. Boulos, P. Fauchais, W. H. Gauvin, O. Matsumoto, E. Pfender, S. A. Panfilov, F. Talandier, B. Waldie; Pure & Appl. Chem., 54 (1982) 1222/1238
- [2] E. Pfender, "Thermal Plasma", Lecture Note of ISSPC-87, pl. (IUPAC Subcommittee, 1987)
- [3] A. Kanzawa, I. Kimura; AIAA J., 5 (1967) 1315/1319
- [4] H. Maecker, T. Peters, H. Schenk; Z. Physik, 140 (1955) 119/138
- [5] R. S. Devoto; Phys. Fluid, 10 (1967) 2105/2112
- [6] 本多卓也、神沢淳; 化工論, 2 (1976) 182/187

Thermal Properties of a Plasma

Atsushi KANZAWA
Dept. of Chem. Eng., Tokyo Inst. of Tech.
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo

The thermal properties of a plasma is strongly dependent on ions and electrons which are included in a plasma. So the properties cannot be estimated from those of an ordinary gas. In this paper, the composition, the thermodynamic properties and the transport properties of a plasma are described.

(Received on Feb. 5, 1990)