管内熱プラズマ流による粒子の加熱[†]

朴 東化・本多卓也・神沢 淳

東京工業大学工学部 化学工学科^{††}

熱プラズマから粒子への伝熱機構を調べるための基礎的な研究として、ここでは水冷管内を流れる熱プラズマ流中に直径 2 mm の β -SiC 粒子を一個ずつ送入して加熱し、加熱された粒子の温度をカロリメトリックな方法で測定する実験を行った。また既存の静止系伝熱の式を用いた計算も行い、実験値と比較した。なお、この計算に必要な熱プラズマ流の温度と流速は計算から求めた。その結果、測定された粒子の温度は計算で解いた粒子の温度と実験誤差内で一致する結果が得られ、ここで行った計算によって熱プラズマで加熱された β -SiC のような高密度粒子の温度を推定することができることがわかった。

緒 言

最近高温熱源として、1～2 万度の熱プラズマを工業的に利用する研究が盛んに行われている。この熱プラズマの特徴である高温や高活性を用いて物質を処理することをプラズマプロセッシングといい、その応用例としては、プラズマ溶射、超微粒子の製造、高融点物質の精製、高温化学反応などが挙げられる。これらには粒子（あるいは粉粒体）を加熱して、物質を処理するプロセスが含まれることが多い。この場合、熱プラズマから粒子へ目的に応じた熱を伝えることが重要であり、例えばプラズマ溶射の場合は、粒子が蒸発されないで、完全に溶けた状態になることが要求される。そこで熱プラズマから粒子へどのくらい熱が移動するかを知るために、その伝熱機構を調べる必要がある。本研究では、その基礎的研究として粒子間の干渉のない一つの粒子への伝熱を実験と計算によって調べた。

熱プラズマを用いて粒子を加熱する場合は、プラズマに温度分布があるので粒子がプラズマ流の中心部分（高温部分）を通るようにすることが望ましい。プラズマ流として多く用いられるフリージェットプラズマの場合は温度分布が半径方向に広がり、粒子の加熱の効率が概して低い。一方、管内プラズマ流においては管壁材料の問題や管内でのプラズマおよび粒子の温度推定がむずかしいということがある。いままでのプラズマプロセッシングにはフリージェットプラズマが多く用いられ、報文例もフリージェットプラズマに関するものがほとんどである。例えば Fauchais^ら⁸⁾ は数十 μm のアルミナ粒子を用い、

フリージェットプラズマの温度と速度場およびそこに送入された粒子の温度と速度を実験的および解析的に調べている。しかし管内プラズマ流に関する研究は少なく、Boulos¹⁾ が I.C.P. (Inductively Coupled Plasma) を用いて管内プラズマでの粒子の軌跡と温度を解析的に解いたものなどがあるだけである。いずれにしても、これまでの報告は理論解析的な研究が多く、実測データによって確認することが要望されている。

ここでは水冷管内を流れるアルゴン熱プラズマ流に β -SiC の球形粒子を入れ、加熱された粒子の管出口での温度と速度を測定した。また簡単な数値計算を行い、プラズマの温度および流速、粒子の温度および速度を求めて実験結果と比較・検討した。

1. 実験装置

本実験に用いた実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験装置はプラズマ発生部、粒子加熱部、および加熱された粒子の温度と速度を測定する測定系よりなっている。

Fig. 2 はプラズマの発生部に用いられたプラズマジェットの詳細図である。本実験に用いた熱プラズマ発生には、内径 8 mm のノズル状銅製陽極と直径 6 mm のタンゲステン棒陰極との間でのアーク放電を用いた。放電気体にはアルゴンガスを使い、ロータメータを用いて所定の流量のガスを放電部へ流入させた。なお、両電極は共に水冷されている。

Fig. 3 に粒子加熱部として用いた水冷管の詳細図を示す。内側の銅管は内径 8 mm で長さが 100 mm と 200 mm の 2 種類を用いた（以後これらを 10 cm 管、20 cm 管と呼ぶ）。外側の管は内径 20 mm のアクリル管であり、冷却水用ジャケットを構成している。粒子の供給は 1 個ずつ重力による自然落下を利用して行った。粒子の供給される

[†] 1987年1月5日受理；化学工学協会第50年会（横浜，1985年3月）にて一部発表

^{††} 〒152 目黒区大岡山 2-12-1

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

位置は陽極の先端から 18 mm の所である。

2. 管出口でのプラズマ流の温度と流速の測定

粒子の温度を計算で求める場合に必要管内プラズマ流の温度と流速は、後述するように計算によって求めたが、この計算値を確認するためにまず管出口でのプラズマ流の温度と流速を測定した。

管出口でのプラズマ流の温度の測定には非定常法⁴⁾を用いた (Fig. 4)。Cu-Co. 熱電対 (線径; 0.2 mm) を接続した直径 0.8 mm の銅球 (以下プローブと呼ぶ) を管出口でプラズマの流れに対して垂直方向に掃引させ (掃引速度は 8 cm/s), その時のプローブの温度上昇を Cu-Co. 熱電対によって測定した。このような操作でプローブに流入した熱流量を測定断面の各半径方向位置に対して求め、温度分布を求めた。プラズマ流の温度を求める具体的な方法は以下のとおりである。プラズマ流とプローブとの熱収支式は次の式で与えられる。

$$\rho_{cu} \frac{\pi}{6} D_{cu}^3 C_{p_{cu}} \frac{dT_{cu}}{dt} = h_p (T - T_{cu}) \pi D_{cu}^2 - Q_{loss} \quad (1)$$

$$Nu_p = Nu_{pf} \left(\frac{\rho_{\infty} \mu_{\infty}}{\rho_w \mu_w} \right)^{0.6} \left(\frac{C_{p_{\infty}}}{C_{p_w}} \right)^{0.38} \quad (2)$$

$$Nu_{pf} = 2 + 0.6 Re_{pf}^{1/2} Pr_f^{1/3} \quad (2-a)$$

任意の半径位置でプローブを掃引させ得られた T_{cu} と t の関係曲線より微係数 dT_{cu}/dt を求めて Eq. (1) に代入することによってプラズマ温度 T を求めることができる。ただし、この場合は以下の 4 つのことを考慮する必要がある。

Fig. 2 Sectional drawing of the plasma generator

Fig. 3 Detail drawing of the particle heating section

ある。

1) プローブ内の温度は一樣であると仮定する。

プローブは熱伝導率がよい銅を用いているのでプローブ内の温度差はないと考えられるが、確認のため Bi 数を考えてみる。プラズマ流の中心軸上でプラズマガス流量が $2.77 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ の場合の Bi 数を計算してみると、10 cm 管を用いた場合は 1.62×10^{-4} , 20 cm 管の場合は 1.0×10^{-4} 程度であった。この値は一樣性の目安である 0.02 ²⁾ より

Fig. 4 Measurement method of the plasma temperature at the tube exit

十分小さいのでプローブ内の温度は一樣という仮定を満たすことがわかる。

2) h_p を計算する際の物性値

Eq. (1) での h_p は Eq. (2) の Nu_p 数から求めた⁶⁾。Eq. (2-a) の Nu_p を求める時の物性値は測定する任意の半径位置でのプラズマの温度 T とプローブの温度 T_{cu} の平均温度、すなわち境界温度に相当する値を用いた。この Eq. (2-a) は静止球における伝熱に使われる式であるが、本実験においてはプローブの掃引速度が約 8 cm/s に対して、プラズマの流速は約 34 ~ 56 m/s (Fig. 5 参照) であるので、プローブは静止球として考えて良い。したがって、 Nu_p を求める時に必要な Re_p の代表速度は測定した任意の半径位置でのプラズマ流速を用いた。ただしプラズマ流の場合、粒子（ここではプローブ）との温度差が大きいので、温度による流体の物性値の変化を考慮すべきであり、Eq. (2) のように Nu_p に物性の変化による補正項を入れて求めた。 h_p を求めるのに、物性の変化の補正を行った Eq. (2) を用いた場合と行わなかった Eq. (2-a) を用いた場合、得られたプラズマ流の温度の違いは 6 ~ 7 % であった。なお、ここで用いたアルゴンの物性は Appendix に示す。

3) 熱損失 Q_{loss} の値

Eq. (1) での Q_{loss} としては、リード線への熱の逃げ (Q_{cond}) とプローブ表面からの熱放射による逃げ (Q_{rad}) が考えられる。本実験でプローブの温度が一番高い場合は 415 K であり、この場合について考えてみる。 Q_{rad} の値はプローブの放射率 ϵ が 1 としても約 2.45×10^{-3} W であり、 Q_{conv} の値 3.14 W と比べて 0.08 % になり無視できる。一方、 Q_{cond} は $kA\Delta T/L$ の L の値が 1 cm の場合約 1.48×10^{-2} W であり、 Q_{conv} の値の約 0.5 % である。また、プローブの形状から L は 1 cm 以上であると考えられるので、 Q_{cond} も無視できることがわかる。したがって、プラズマの温度 T を求める際、 Q_{loss} の項は無視した。

4) プラズマ流速との関係

h_p を求めるために使われる Eq. (2) は Re_p 数を含んでいるのでプラズマの温度 T を求めるためにはプラズマ局所流速が必要である。ここでは、水冷ピトー管を用いた動

Fig. 5 Radial distribution of measured plasma temperature and velocity at the tube exit

圧を測定して次式

$$U = \left(2g_c \frac{1}{\rho_{Ar}} (P_t - P_a) \right)^{1/2} \quad (3)$$

からプラズマの流速を求めた。Eq. (3) では ρ_{Ar} が含まれているので、プラズマの流速 U はプラズマの温度 T の関数である。前述のとおり Eq. (2) は流速の関数であるのでこれらは陰関数的に求められることになる。

管出口でのプラズマの温度および流速分布を Fig. 5 に示す。プラズマガス流量 $\dot{m}$ が 2.77×10^{-4} kg/s の場合、10 cm 管および 20 cm 管出口の中心軸上での温度は約 3200 K および 1700 K、流速はおおよそ 44 m/s および 27 m/s であり、 $\dot{m}$ が小さくなるにつれ、また管の長さが長くなるにつれて温度、流速共に小さくなっている。なお、半径方向に対する温度分布および流速分布は共に放物線分布形に近いことがわかる。

3. 管出口での粒子の温度と速度の測定

熱プラズマ流によって加熱された管出口での粒子の温

Fig. 6 Variation of measured particle temperature with distance from tube exit to particle reflecting plate

度の測定にはカロリメトリックな方法を用いた。すなわち Fig. 1 に示したように、水が入っている容器に粒子が入るように反射板をセットし、粒子が水に入った時の水の温度上昇を Cu-Co 熱電対を用いて測ることによって粒子の温度を算出した。

粒子の温度を求める時は次式を用いた。

$$M_{wa} C_{pwa} \Delta T = M_p C_{pp} (T_p - T_r) \quad (4)$$

ここで粒子の質量 M_p は測定した値 (15.28 ± 0.08 mg) を用い、 C_{pp} は $800 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ を用いた。

粒子の速度測定には光学的方法を用いた。すなわち 2 個のフォトトランジスターを用い管出口を通る粒子へ光をあてて反射光を測定した。このようにするとシンクロスコープに 2 つのピークが現れ、この 2 つのピークの時間差から粒子の速度を求めた。

本実験の管出口での粒子温度の測定は上述のようにカロリメトリックな方法で行ったが、管出口から水に入るまでに粒子の温度が変化し管出口での粒子温度と異なる温度を測定しているおそれがある。そこで反射板の位置を変えて粒子温度に及ぼす影響を調べた。その測定結果を Fig. 6 に示す。この図から粒子温度は反射板の位置を変化させてもほとんど変わらないことがわかる。これについては後節の計算結果からわかるようにプラズマ流に入った粒子は粒子入口付近で急に温度が上がり、管出口の部分ではほとんど上がらないことや、さらに管出口から出たプラズマの温度は管内での温度よりかなり低くなることから説明できる。したがって、ここで示した粒子の温度は管出口での粒子の温度とほとんど差がないとみても良いと考えられる。

プラズマガス流量 $\dot{m}$ とプラズマの放電電力を変化させた場合の粒子の温度の測定結果を Fig. 7 に示す。まず、

Fig. 7 Variation of measured particle temperature with plasma gas flow rate and plasma power

Fig. 8 Variation of measured particle velocity with plasma gas flow rate and tube length

$\dot{m}$ の変化による粒子の温度の変化はほとんど見られないことがわかる。これは $\dot{m}$ が大きくなると、プラズマの温度が高くなり (Fig. 5 参照)、粒子との温度差 ΔT が大きくなって粒子の温度を上げる効果をもつが、代わりにプラズマ流速が速くなるので粒子の滞留時間が短くなり、粒子の温度を下げる効果ももつ。これらの 2 つの効果により粒子の温度はほとんど差がない結果が得られたと考えられる。また、20 cm 管を用いた結果が 10 cm 管の場合より粒子の温度が高い結果が得られた。これも 20 cm 管の場合は粒子の管内での滞留時間が長くなることから説明できる。また、放電電力を変化させた場合、粒子の温度は放電電力が大きくなると全体的に数度ぐらい高くなっているともいえるが、ほとんど差がないことがわかる。

Fig. 8 は管出口での粒子の速度の測定結果である。 $\dot{m}$

が大きくなるにつれ粒子の速度は速くなっている。管の長さに対しては10cm管と20cm管で粒子の速度はあまり変わっていない結果が得られた。これは管を長くしてもプラズマ流の温度が下がり、プラズマの流速が小さくなるので粒子の速度が上がらないものと考えられる。

4. 数 値 計 算

粒子の温度を計算するためにはプラズマ流の温度と流速が必要であるので、本計算では、まずプラズマの流れ場を解き、そこに粒子を入れた場合の粒子の温度上昇を計算した。

4.1 プラズマの流れ場

本研究は加熱された粒子の温度を求めることであるので、プラズマの流れ場の温度と流速に対しては、小林ら⁵⁾の管内熱プラズマ流の数値解析の結果に基づき、簡単なモデルを設定して解いた。すなわちプラズマの流れは温度・流速とも半径方向には放物線分布を仮定した。この仮定は数値解析によって求めた管内プラズマ流の温度分布が放物線分布に近い形をしている⁵⁾ことや、測定した半径方向に対する温度および流速分布 (Fig. 5参照) が放物線分布形に似ていることから許される仮定であると考えられる。また管壁温度は一定とし、浮力の影響はないものとする⁵⁾。座標は流れ方向に x 、半径方向に r とする。以上の仮定から、半径 r に対する温度 T と速度 U は

$$T = (T_c - T_w)(1 - r^2/R^2) + T_w \quad (5)$$

$$U = U_c(1 - r^2/R^2) \quad (6)$$

バルク温度 T_b とバルク速度 U_b は

$$\begin{aligned} T_b &= \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R [(T_c - T_w)(1 - r^2/R^2) + T_w] 2\pi r dr \\ &= \frac{T_c - T_w}{2} + T_w = \frac{T_c + T_w}{2} \quad (7) \end{aligned}$$

$$U_b = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R U_c(1 - r^2/R^2) 2\pi r dr = \frac{1}{2} U_c \quad (8)$$

になり、管内流のエネルギー保存式は

$$\dot{m} C_p \frac{dT_b}{dx} = -\pi D h (T_b - T_w) \quad (9)$$

で与えられる。ここで h を求める際、プラズマのような再結合反応が存在する高温反応性流体では物性値が急に変化するため、従来のKaysの $Nu=3.65$ では整理できないので、小林⁵⁾らの管内熱プラズマの数値解析より得られた $Nu=5$ を用いて h を算出した。この計算において用いた物性値は、温度の半径分布を放物線分布としたので、管中心温度と壁温度の平均温度 $(T_c + T_w)/2$ に相当する値を用いた。これは一般に用いられているバルク温度に相当する。Eq. (9)からプラズマのバルク温度 T_b を解き、Eq. (7)から T_c を求め、Eq. (5)により T を求めた。Eq. (9)を解くために必要な初期条件 (陽極の先端を $x=0$ とす

Fig. 9 Calculated results for axial distribution of the plasma temperature and velocity in the tube

る)を以下に示す。

$$\dot{m} = 2.22 \times 10^{-4} \text{ kg/s} : x=0; T_{i,c} = 11600 \text{ K}$$

$$\dot{m} = 2.77 \times 10^{-4} \text{ kg/s} : x=0; T_{i,c} = 12000 \text{ K}$$

$$\dot{m} = 3.32 \times 10^{-4} \text{ kg/s} : x=0; T_{i,c} = 12200 \text{ K}$$

この値は、同じ構造のジェットを用いたフリージェットプラズマの測定値⁹⁾($x=5, 10, 20, 30 \text{ mm}$ での測定値)から $x=0$ のところへ外挿して求めた値である。

また、境界条件としては

$$r=r_w : T=T_w, U=0$$

を用いた。なお、 T_w としては水温から推定した値300Kを用いた。

流速 U は次式の連続の式から求めた。

$$\dot{m} = \int_0^R \rho U 2\pi r dr \quad (10)$$

このようにして、管出口($x=124 \text{ mm}$ と 224 mm)までのプラズマの温度 T と流速 U を求めた。流れ方向に対する管中心温度および流速の変化をFig. 9に示す。計算は実験と対応させるために実験で用いた3種類の $\dot{m}$ について行った。また図中のキーは各々の $\dot{m}$ に対する管出口での測定値である。管中心温度は最初の部分で大きく減少し、管出口の部分では減少量が少なくなっている。管中

心流速に対しても温度と同様な結果が見られる。なお、管出口での計算値と測定値は温度に対しても流速に対してもほぼ一致していることがわかる。この結果より、管内熱プラズマ流の数値解析の結果に基づき、半径方向には放物線分布を用いることと発達したプラズマ流には $Nu = 5$ を用いる⁵⁾ことで、管内でのプラズマの温度と流速を近似的に推定することができることがわかる。

4.2 粒子の温度および速度

粒子温度の計算には次の4つの仮定をおいた。1) 粒子は直径2mmの球形、2) 粒子内の温度分布はなく一様、3) 粒子の比熱は一定、4) 粒子からの熱放射による熱の逃げは無視。

ここでこれらの仮定について考えてみる。まず、1)と3)については、本研究に用いた粒子が実際球形に近いことと400~500Kの温度での比熱はほとんど変わらないことを確認したことで、この2つの仮定を満たすことがわかる。次に2)の粒子内の温度分布はなく一様という仮定については、前節のプラズマの温度測定の場合と同様に Bi 数を計算してみる。 $\dot{m}$ が $2.77 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ において、10cm管を用いた場合の Bi 数は 7.4×10^{-4} であり20cm管の場合の Bi 数は 4.6×10^{-4} 程度であるので、粒子内の温度分布がないと仮定しても良いと考えられる。また4)の粒子からの熱放射による熱の逃げを無視したことについては、プラズマから粒子に対流によって入る熱流束と粒子からの熱放射による熱流束を比較してみる。代表的な熱流束値として、粒子の入口での熱流束値と管出口での熱流束値との平均熱流束値を考える。粒子の温度 T_p が最も高い場合(約460K)について放射率 ϵ を1にして計算しても熱放射による熱流束値は $1.5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ に対し、対流による熱流束値は $9.7 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ となり、前者は後者の約0.15%程度である。したがって、この仮定を満たすことがわかる。

以上の仮定のもとに計算を行う。まず粒子における熱収支は

$$M_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h_p (T - T_p) \pi D_p^2 \quad (11)$$

ここで h_p はプラズマ温度測定に用いた Eq. (2) を用いて求めた。なお、本計算に用いた β -SiC 粒子の物性値は密度が 3100 kg/m^3 、比熱が $800 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ 、熱伝導度が $83.6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ である。

管出口での粒子の温度を求めるには、まず粒子の軌跡を調べる必要がある。4.1で管内プラズマ流の温度と流速分布が求められているので、粒子についての半径方向および流れ方向の運動方程式を解くと二次元の軌跡が求められる。運動方程式は流れ方向(x)に対しては

$$\frac{dV_x}{dt} = -\frac{3}{4} C_D \frac{\rho}{\rho_p D_p} V \cdot (V_x - U) - g \quad (12)$$

半径方向(r)に対しては

$$\frac{dV_r}{dt} = -\frac{3}{4} C_D \frac{\rho}{\rho_p D_p} V \cdot V_r \quad (13)$$

ここで V は相対速度

$$V = \sqrt{(V_x - U)^2 + V_r^2} \quad (14)$$

である。また初期条件としては $V_x = 0$, $V_r = 1 \text{ m/s}$ を用いた。なお、 C_D に対しては次の式を用いた⁷⁾。

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) + \frac{0.42}{1 + 4.25 \times 10^{-4} / Re_p^{1.16}} \quad (15)$$

また粒子と管壁との衝突は完全弾性衝突とした。このようにして Eq. (15) の C_D を用い、Eqs. (12), (13) から x 方向と r 方向の位置が時間に対して求められる。

粒子の軌跡が求まると、Eq. (11) から粒子の温度 T_p が時間に対して求められる。この場合、Eq. (11) の h_p は Eq. (2) を用いて求めるが、その時 Eq. (2-a) の Re_p 数の代表速度としては Eq. (14) で与えられる相対速度を用いた。ただし、この場合の相対速度は β -SiC 粒子の速度が遅いのでプラズマ流の速度に近く、近似的に静止球とみなしうる。

Fig. 10 は粒子の入口から管出口まで x 方向に対する粒子の温度上昇と速度変化を計算した図である。図中のキーは3種類の $\dot{m}$ に対して10cm管出口と20cm管出口での測定値を表している。このようにして求めた粒子の温度に対する計算値は実験の測定値の範囲内にはば入っていることがわかる。3種類の $\dot{m}$ のどの場合も粒子の温度は粒子が送入された直後急に上がり、管出口付近では温度がゆっくり上がっていくことがわかる。これは最初の部分でプラズマと粒子との温度差が非常に大きいこと、粒子の滞留時間が長いことによるものと考えられる。一方、粒子の速度に対しては測定値が計算値より少し低い値を示している。これは、実際の粒子の軌跡が計算で仮定したような二次元的ではなく、速度の低い領域を通過する場合もあるためと考えられる。したがって、加速される量は減少することになり、実験値が少し低く得られたと考えられる。なお、温度については温度分布が低い領域を通過することにより粒子の温度が上がらない効果と、これによって滞留時間が長くなり粒子の温度が上がる効果とによって、粒子の温度には大きく影響を及ぼさないことである。

結 言

水冷管内に流れる熱プラズマ流に β -SiC 粒子 (β -SiC 粒子は高密度で重いので静止系伝熱の式を適用できるも

Fig. 10 Variation of calculated particle temperature and velocity with axial distance of the tube

のと考えられる)を入れて加熱する実験および計算を行い、次のような結果が得られた。

1) 簡単なモデルの数値計算でプラズマ流の温度および粒子の温度を求め、測定値と計算値がほぼ一致する結果が得られた。したがって、本研究で行った計算を用いて熱プラズマによって加熱される粒子の温度を推定することができることがわかった。

2) プラズマガス流量とプラズマ放電電力を変えても粒子の温度に大きく影響を及ぼさないが、管を長くした場合は粒子の管内での滞留時間が長くなることによって、粒子の温度を上げることができた。

Appendix

本研究では、アルゴン熱プラズマを用いているのでアルゴンの物性値(密度、定圧比熱、熱伝導度、粘性係数)を推算する必要がある。これらは、圧力、温度、組成の関数であり、本計算においては本多ら³⁾によるCorrected Simple Kinetic Theoryを用いた。ここで組成は熱平衡であれば、温度、圧力の関数であり、Sahaの式、状態方程式より求まる。Fig. Aに1気圧の熱平衡における物性値を温度に対して示す。定圧比熱は電離エネルギーによるエンタルピー変化を考慮したeffectiveな値、熱伝導度は拡散による効果を考慮したeffectiveな値も示した。

Fig. A Physical properties of argon

Nomenclature

A	= cross sectional area	[m ²]
Bi	= Biot number ($= h_p \cdot D_{cu} / 2 \cdot k_{cu}$ or $h_p \cdot D_p / 2 \cdot k_p$)	[-]
C_D	= drag coefficient	[-]
C_p	= specific heat	[J/kg·K]
D	= diameter	[m]
g	= gravitational acceleration	[m/s ²]
h	= heat transfer coefficient between plasma and tube wall	[W/m ² ·K]
h_p	= heat transfer coefficient between plasma and particle (or probe)	[W/m ² ·K]
k	= thermal conductivity of plasma	[W/m·K]
k_{cu}	= thermal conductivity of probe	[W/m·K]
k_p	= thermal conductivity of particle	[W/m·K]
M	= mass	[kg]
$\dot{m}$	= mass flow rate of plasma gas	[kg/s]
Nu	= Nusselt number for plasma flow ($= h \cdot D / k$)	[-]
Nu_p	= Nusselt number for particle (or probe) ($= h_p \cdot D_p / k$ or $h_p \cdot D_{cu} / k$)	[-]
P	= pressure	[Pa]
Pr	= Prandtl number ($= \mu \cdot C_p / k$)	[-]
Q	= heat transfer rate	[W]
R	= radius	[m]

Re_p = Reynolds number for particle (or probe)

$(= \rho \cdot V \cdot D_p / \mu \text{ or } \rho \cdot U \cdot D_{cu} / \mu)$ [-]

r = radial distance [m]

T = plasma temperature [K]

T_p = particle temperature [K]

ΔT = temperature rise [K]

t = time [s]

U = plasma velocity [m/s]

V = relative velocity between plasma and particle [m/s]

V_x = particle velocity for x -direction [m/s]

V_r = particle velocity for r -direction [m/s]

x = axial distance [m]

ε = emissivity [-]

ρ = density [kg/m³]

μ = viscosity [kg/m·s]

<Subscripts>

Ar = argon

a = atmospheric (static)

b = bulk

c = center

cond = conduction

conv = convection

cu = copper (probe)

i = initial

p = particle

r = room, r -direction

rad = radiation

t = total

w = tube wall, particle (or probe) surface

wa = water

x = x -direction

∞ = free stream

<Superscript>

f = film

Literature cited

- 1) Boulos, M.I.: *IEEE Transaction on Plasma Science*, **PS-6**, 93 (1978)
- 2) Bourdin, E., P.Fauchais and M.I.Boulos: *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26**, 567 (1983)
- 3) Honda, T. and A.Kanzawa: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 182 (1976)
- 4) Kanzawa, A.: *Kagaku Kōgaku*, **36**, 1004 (1972)
- 5) Kobayashi, M., T.Honda and A.Kanzawa: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **9**, 622 (1983)
- 6) Lee, Y.C., K.S.Hsu and E.Pfender: 5th International Symposium on Plasma Chemistry, **2**, 795 (1981)
- 7) Marchildon, E.K. and W.H.Gauvin: *AIChE J.*, **25**, 938 (1979)
- 8) Vardelle, M., A.Vardelle, P.Fauchais and M.I.Boulos: *ibid.*, **29**, 236 (1983)
- 9) Watanabe, T.: Master Thesis, Dept. of Chem. Eng., Tokyo Inst. of Tech. (1986)

Particle Heating by a Thermal Argon Plasma Flow in a Tube

Dong-Wha Park, Takuya Honda and Atsushi Kanzawa

Dept. of Chem. Eng., Tokyo Inst. of Tech., Tokyo 152

Key Words: Heat Transfer, Thermal Plasma, Particle, Temperature, Velocity, Water Cooled Tube

To investigate the heat transfer from a thermal plasma to a particle, the temperature of a β -SiC particle (2-mm dia.) heated in an argon plasma tube flow was calorimetrically measured and numerically calculated using the energy equations. The plasma temperature and velocity in the tube which are required to calculate the heat transfer rate from the plasma to the particle were also determined by the calculations. The calculated results of the particle temperature are in good agreement with the experimental results. Therefore, it is shown that the simple calculation method presented is enough to estimate the temperature of a high-density particle like β -SiC which is heated in thermal plasma tube flow.