パルス変調誘導熱プラズマによるSiナノ粒子の生成・成長の 変調度依存性の数値解析

## Numerical Study about Influence of Modulation Degree on Si Nanoparticle Formation in Ar Pulse-Modulated Induction Thermal Plasmas

長瀬 有理奈\*1,明石 恵太<sup>1</sup>,古川 颯大<sup>1</sup>,田中 康規<sup>1</sup>,中野 裕介<sup>1</sup>,石島 達夫<sup>1</sup>, 末安 志織<sup>2</sup>,渡邉 周<sup>2</sup>,中村 圭太郎<sup>2</sup>

Yurina Nagase<sup>\*1</sup>, Keita Akashi<sup>1</sup>, Ryudai Furukawa<sup>1</sup>, Yasunori Tanaka<sup>1</sup>, Yusuke Nakano<sup>1</sup>,

Tatsuo Ishijima<sup>1</sup>, Shiori Sueyasu<sup>2</sup>, Shu Watanabe<sup>2</sup>, Keitaro Nakamura<sup>2</sup>

1金沢大,2日清製粉グループ本社

<sup>1</sup>Kanazawa University, <sup>2</sup>Nisshin Seifun Group Inc.

## 1. まえがき

誘導熱プラズマ(ICTP)は、高いガス温度、高い化学反応 性、無電極放電のため汚染物質混入が非常に少ないという 特長を有しており、ナノ粒子生成などの材料処理分野への 応用が活発である[1]. 筆者らはこれまでに、パルス変調 型誘導熱プラズマ(PMITP)および原料粉体の時間制御供 給(TCFF)法による Si ナノ粒子生成に対する数値解析モデ ルを構築してきた [2]. 本モデルは、PMITP に対する電磁 熱流体解析に加え、原料粉体の挙動とナノ粒子の核生成と 成長を計算する.本稿では、PMITP のコイル電流変調度 を変更した場合における生成ナノ粒子の粒径を検討した.

## 2. 数値解析モデリングと解析条件

本数値解析では熱プラズマを電磁熱流体とみなした.支 配方程式として質量,運動量およびエネルギーに対する保 存方程式およびコイル電流が生成するベクトルポテンシ ャルに対する Poisson 方程式をたて, SIMPLE 法を用いて 温度・流速場を解いた. 原料粒子に対して質量, 運動量お よびエネルギーに対する保存方程式をたて、4次 Runge-Kutta 法を用いて解いた. ナノ粒子形成と輸送につ いてはエアロゾル一般動力学方程式をモーメント法を用 いて解いた.計算条件として、トーチ上部からシースガス Ar を 90 slpm 導入した. トーチ中央部の水冷チューブから キャリアガス Ar 4 slpm とともに Si 原料を平均 1.0 g/min で間歇供給した.図1に、各条件でのコイル電流と原料供 給量の関係を示す. コイル電流は On-time/Off-time ともに 10ms とした. 20 周期後の時刻 t= 0-10 ms は Off-time, t= 10-20 ms を On-time と表示した. On-time の電流振幅に対 する Off-time における電流振幅の比 SCL を 100%, 80%, 70%の3条件に設定した. 平均入力電力を20kWとした.

## 3. 数值解析結果

図2に、100%SCL、80%SCL および70%SCL における ガス温度分布および生成ナノ粒子の数密度分布を示す.同 図は*t*=10 msの時点のものである。同図から、ナノ粒子は チャンバ壁付近でより多く生成されることがわかる.これ はチャンバ壁付近では、Si 蒸気の温度が低下し、核生成が 促進されるためと考えられる.電流変調を行うことで、チ ャンバ壁付近で生成されるナノ粒子の数密度が高くなる ことがわかる.また変調度が大きい方がチャンバ壁上流で の粒子数密度が高くナノ粒子が多く生成されている.これ は以下のように考えられる.コイル電流変調度が大きい 時,熱プラズマの温度変化も大きくなる.温度低下時には それによる質量密度の増加に伴い,周囲からの低温ガスの 巻き込みが生じる.この冷ガスがトーチからの原料蒸気を 急冷するため,核生成が促進されたと考えられる.



(a) 100% SCL (b) 80% SCL (c) 70% SCL

図2 コイル電流変調度毎のガス温度分布(左)および生

成ナノ粒子の数密度分布(右)(t=10 ms)

Fig. 2 Distribution of gas temperature (left) and total nanoparticle concentration  $M_0$  (right) for different modulation degrees of coil current at t=10 ms.  $\dot{\chi}$   $\vec{k}$ 

[2] Y. Tanaka, et al, The 73rd Annual Gaseous Electronics Conference, GT3.00006, 2020

<sup>[1]</sup> Y. Tanaka, et al., J. Phys. Conf. Ser., 406, 012001, 2012