## 原料粉体間歇導入を伴う変調誘導熱プラズマのナノ粒子生成法に関する 統括数値解析モデルの構築

Development of a Numerical Model for Nanoparticle Synthesis in Pulse-Modulated Induction Thermal Plasmas with Intermittent Feedstock Feeding 金沢大理工<sup>1</sup>, 日清製粉 Gr 本社<sup>2</sup> <sup>O</sup>田中 康規<sup>1</sup>, 隠田 一輝<sup>1</sup>, 明石 恵太<sup>1</sup> 古川 颯大<sup>1</sup>, 中野裕介<sup>1</sup>, 石島 達夫<sup>1</sup>, 末安志織<sup>2</sup>, 渡邊 周<sup>2</sup>, 中村圭太郎<sup>2</sup>

Kanazawa Univ.<sup>1</sup>, Nisshin Seifun Group Inc.<sup>2</sup>, °Y. Tanaka<sup>1</sup>, K. Onda<sup>1</sup>, K. Akashi<sup>1</sup>, R. Furukawa<sup>1</sup>, T.

Ishijima<sup>1</sup>, S. Sueyasu<sup>2</sup>, S. Watanabe<sup>2</sup>, K. Nakamura<sup>2</sup>

E-mail: tanaka@ec.t.kanazawa-u.ac.jp

筆者らはこれまでに,誘導熱プラズマ(ICTP) 法によるナノ粒子生成の生成レートを大幅に向 上させる手法として,PMITP+TCFF 法を開発し ている[1]。PMITP とは「パルス変調誘導熱プラ ズマ」で,ICTP を維持するコイル電流に振幅変 調を加え,熱プラズマの状態を周期的に高温・低 温変化させる。さらにこの PMITP に対して原料 を PMITP の高温状態の時刻にのみ間歇的に制御 導入するのが「原料時間制御導入法:TCFF 法」の 一例である。これにより原料粉体の効率的蒸発に よる高密度原子の生成と,生じた高密度原子の急 冷による粒子核の大量生成とをミリ秒オーダで 交互に生じさせる。本法により例えば酸化物ナノ 粒子を 20 kW の入力電力で生成レート数百 g/min での生成が可能であることを見出している[1]。

PMITP+TCFF 法にてさらなる効率的・高レートなナノ粒子生成を実現するためには、PMITP+ TCFF 法での原料間歇導入による原料原子のさらなる高密度生成と、生成原子・前駆体分子の輸送 現象および核生成などを詳細に把握し、制御する 必要がある。筆者らはこれまでに2次元分光器を 用い、原料原子の生成と前駆体分子の輸送を、実 験的に検討してきた[2]。さらに詳細に現象把握 するためには、数値解析的なアプローチも強力な ツールとなる。TCFF 法においては、原料を時間 周期的に導入するため、これらの過渡的な現象を 解析できるモデルの構築が必要となる。

今回 PMITP+TCFF 法の総括的な数値解析モデ ルを開発した。本モデルでは PMITP での変動熱 プラズマ温度場・流体場を解くとともに,これに 間歇導入した原料粒子の軌跡,加熱と蒸発過程を 解く。蒸発により生じた原料蒸気からの PMITP 場への影響は熱力学輸送特性の修正と生成項と して考慮する。さらに生成した原料蒸気からの均 一核生成,不均一凝縮を考慮したモーメント法に より,エアロゾルー般動力学方程式を解いた。

Fig.1(a)および(b)は, PMITP+TCFF 法において 20 kW-Ar PMITP に, Si 原料粉体を導入した場合

の Si 蒸気質量密度分布および生成ナノ粒子の数 密度分布の例を示している。PMITP の変調条件 は on-time/ off-time を 10 ms/10 ms とし, 原料もそ の周期に合わせて導入している。同図は, on-time 遷移後の時刻 t=2.5 ms のものである。同図(a)か ら Si 蒸気質量分率はトーチ軸上において高くな っている。これは軸上で多数の投入粒子が蒸発す るためである。軸上 z=600-700 mm で質量分率が 低下している。これは原料間歇導入に伴い, Si 原料が導入されない時刻の存在による。z>320 mm のチャンバ壁近くでは Si 蒸気質量分率が非 常に小さくなっている。この位置では温度が低く 蒸気から核生成が高頻度で生じるためである。同 図(b)から z=320 mm 付近でナノ粒子密度が高い。 これは変調に伴い,ガス流が径方向内向きに生じ, 温度が低いガスがチャンバ内側に導入されるた めである。この動作により PMITP+TCFF 法では ナノ粒子が大量にできることが予想される。 参考文献

Y. Tanaka, et al., J.Phys.Conf.Ser., **406**, 012001 (2012).
N. Kodama, et al., Plasma Sources Sci & Technol.,**26**, 075008 (2017)



Fig.1 Calculation results for 20 kW-Ar PMITP with Si feedstock feeding