

タンデム型変調熱プラズマの下段コイル電流変調に対する  
原料供給位相変更時のナノ粒子生成への影響の数値解析的検討  
**Numerical study on influence of feedstock injection timing against lower coil  
current modulation on nanoparticle synthesis in tandem-type modulated  
induction thermal plasma**

古川颯大<sup>\*1</sup>, 長瀬有理奈<sup>1</sup>, 不破知哉<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>, 渡邊周<sup>2</sup>, 中村圭太郎<sup>2</sup>

Ryudai Furukawa<sup>\*1</sup>, Yurina Nagase<sup>1</sup>, Tomoya Fuwa<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>

<sup>1</sup>金沢大学, <sup>2</sup>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

タンデム型変調誘導熱プラズマ(Tandem MITP)は, 原料投入などによる外部からの擾乱に対する高い安定性を有し, 数千Kから1万Kまでの範囲の温度場を大きく変調制御可能という特徴を持つ. 筆者らはTandem MITPを用いたナノ粒子 (NP) 大量生成法の開発を目的とし, Tandem MITPによるナノ粒子生成に対する数値解析モデルを構築してきた[1, 2]. 本モデルでは, Tandem MITP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および粒子成長を計算した. 本稿では, Tandem MITPの下段コイル電流変調に対する原料供給位相を変更時の原料蒸発およびナノ粒子生成への影響を検討した.

## 2. 解析条件

トーチ上部からシースガスArを90 slpmで導入し, 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/radで供給した. 上下段の時間平均投入電力はともに10 kWにした. コイル電流は上段を無変調, 下段を0% SCLで変調した. On-time/ Off-timeはともに10 msとした. 周期定常状態において,  $t = 0-10$  msをOff-time,  $t = 10-20$  msをOn-timeとした. コイル電流の変調波形のオン遷移に対する原料供給の位相遅れ時間として,  $t_d = 0$  ms, 5 ms, 10 ms, 15 msと設定し, 結果を比較した.

## 3. 数値解析結果

Fig. 1に $t=20$  msにおける2次元温度分布を示す. 同図(a)は $t_d = 0$  ms, すなわちコイル電流変調と原料供給を同期した条件, 同図(b)は $t_d=10$  msで電流変調と原料供給を逆位相とした条件である. トーチ中心軸における温度低下は原料投入タイミングに依存しており, 熱プラズマから原料への入熱が変化する. その結果, コイル電流変調に対し逆位相で原料供給すると, 原料蒸発効率が向上した. 逆位相で原料を導入すると, 投入された原料粒子が変調温度領域に多く存在し, 続くOn-time時の高温熱プラズマによる原料蒸発が促されたため

ある. Fig.2に蒸発効率と生成粒子の平均粒径を示す. 前述のように逆位相で供給することで蒸発効率が向上し, さらにナノ粒子の粒子径が小さくなった. これは, 蒸発効率が向上したことでより高密度の蒸発蒸気が発生し, 過飽和が生じやすくなり, 均一核生成が促進された結果, 生成したナノ粒子の成長が抑制されたためである.

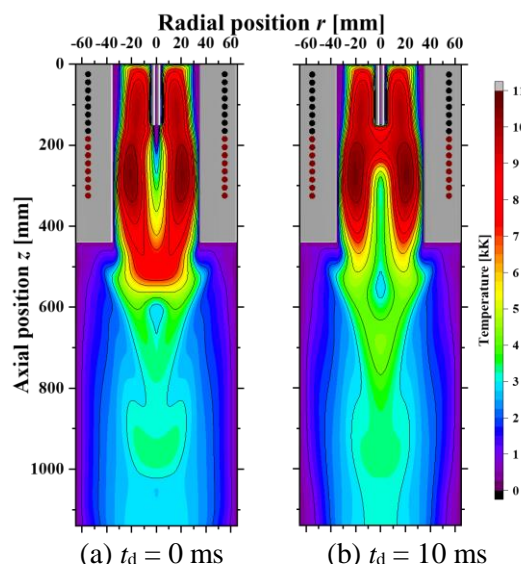


Fig.1 Gas temperature distribution at  $t = 20$  ms.

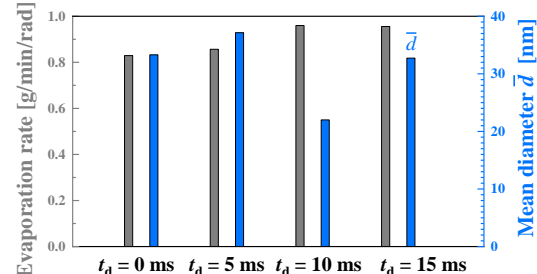


Fig.2 Evaporation rate and mean diameter

## 4. Reference

[1] R. Furukawa, et al., *Powder Technology*, 389, 460-470, 2021

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