

マイクロ波加熱による突沸発生機構

Mechanism of Flashing induced by Microwave Heating

*藤田峻也¹, 阿部豊¹, 金子暁子¹, 湯浅朋久¹,
瀬川智臣², 加藤良幸², 川口浩一², 石井克典²

¹筑波大学, ²日本原子力研究開発機構

マイクロ波加熱時に生じる溶液の突沸現象の機構解明を目的として、突沸現象の噴き上げ現象を詳細可視化観測した。突沸の噴き上げメカニズムの一つとして考えられる、気泡の瞬時生成と成長のメカニズムの考察を行った。

キーワード: 突沸, マイクロ波加熱, 不均質核生成, 気泡膨張

1. 緒言

核燃料サイクルの再処理工程にて、マイクロ波加熱脱硝法が開発されている。マイクロ波加熱時には沸騰現象を伴い、先行研究において再処理溶液を模擬した硝酸ウラン溶液にマイクロ波を照射した際、突沸による噴きこぼれの発生を確認した。本研究ではマイクロ波加熱による突沸発生機構の解明を目的として突沸のモデルを想定した。そして、突沸時の可視化結果から気泡生成頻度・気泡体積を計算し、モデルの妥当性を考えた。

2. 実験

マイクロ波加熱装置は、オープン上部からマイクロ波を照射する構造である。マイクロ波周波数は 2.45 GHz。試験流体には蒸留水を用いた。

3. 結果と考察

図 1 に突沸挙動の可視化結果を示す。

図 2 に突沸現象の想定図を示す。突沸現象は、過熱液相から単一気泡が生成し、成長し崩壊をきっかけに無数の気泡が生成され、成長することで起こると考えられる。

図 3 に各接触角 θ における不均質核生成頻度と液温の関係を示す。この理論値を求める際、西尾ら^[1]の核生成頻度 J_{HE} を用いた。

$$J_{HE} = N^{2/3} \psi_a[\vartheta] \left(\frac{2\sigma}{\pi m B \psi_b[\vartheta]} \right)^{1/2} \exp \left\{ - \frac{16\pi\sigma^3 \psi_b[\vartheta]}{3kT(P_v - P_l)^2} \right\} \quad (1)$$

$$\psi_a[\vartheta] = (1 + \cos\vartheta)/2 \quad (2)$$

$$\psi_b[\vartheta] = (2 + 3\cos\vartheta - \cos^3\vartheta)/4 \quad (3)$$

ここで、 N は液相分子数密度 $[\text{m}^{-3}]$, m は液相分子 1 個の質量 $[\text{kg}]$, k はボルツマン定数 $[\text{J/K}]$, N_A はアボガドロ数 $[\text{1/mol}]$, M は分子量 $(\text{H}_2\text{O}:18)[\text{g/mol}]$, σ は表面張力 $[\text{N/m}]$, P_v は気泡内圧力(各温度時の飽和蒸気圧) $[\text{Pa}]$, P_l は液相圧力(大気圧) $[\text{Pa}]$, T は液相温度 $[\text{K}]$, ρ_l は水密度 $[\text{kg/m}^3]$ である。既存研究において、固液界面ナノバブルの存在が確認されており、ナノバブルはマクロスケールの気泡と比べはるかに大きな接触角を持つ特性があり、マイクロ波照射による熱的效果・非熱的效果によって、このナノバブルが再現性高く生成されることが報告されている^[2,3]。これより、突沸時の噴き上げ現象の気泡生成メカニズムは、不均質核生成によるものと考えられる。

図 4 に、接触角 177° の不均質核生成頻度 J_{HE} と Mikic の式^[4]で求めた気泡体積を用いて、単位体積 $[\text{mm}^3]$ あたりの気泡群総体積の時間変化を算出した。これから考えられる噴き上げ現象のメカニズムとして一つ目に気泡群の総体積が成長したことで溶液内の水を追い出しと二つ目に気泡群が崩壊したことで、気泡内圧の放出が支配的なものと考えられる。

以上より、マイクロ波加熱時の突沸現象のメカニズムについて、過熱液相内で、不均質核生成によって固液界面ナノバブルが瞬時に大量に生成され、その気泡群が急激に成長し、気泡群が崩壊して、気泡内圧の放出によって激しく噴き上がる現象が生じると考えられる。

参考文献

- [1] S.Nishio, A Review of Elementary Processes of Evaporation and Boiling Phenomena in Uniform Temperature Field, Thermal Science & Engineering Vol.8 No.4, pp.1-11 (2000)
 - [2] 高橋 厚史, “固液界面ナノバブルの実験について”, Journal of the Heat Transfer Society of Japan, Vol.57, No.239, 2018
 - [3] Lei Wang, “Microwave – Induced Interfacial Nanobubbles”, 2016
 - [4] B. B. Mikic, W. M. Rohsenow and P. Griffith, “ON BUBBLE GROWTH RATES”, Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 13, pp. 657-666, 1970
- *Shunya Fujita¹, Yutaka Abe¹, Akiko Kaneko¹, Tomohisa Yuasa¹,
Tomoomi Segawa², Yoshikazu Yamada², Yoshiyuki Kato², Katsunori Ishii².
¹University of Tsukuba, ²Japan Atomic Energy Agency.

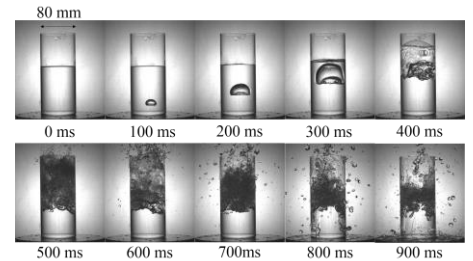


図 1 突沸挙動の可視化結果

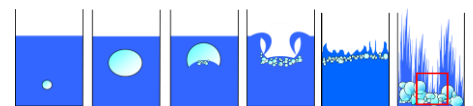


図 2 突沸現象の想定図

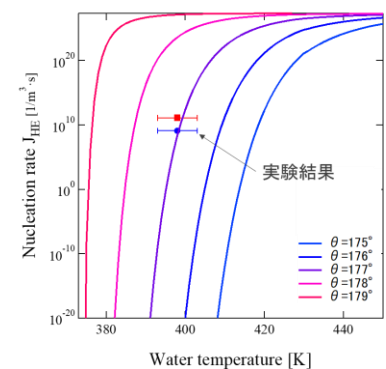


図 3 不均質核生成頻度と実験値

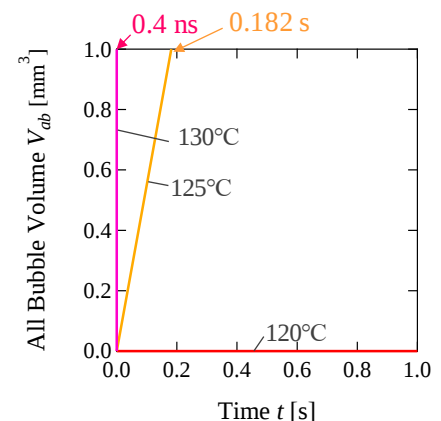


図 4 気泡群総体積の時間変化