

使用済み核燃料再処理溶液のマイクロ波均一加熱を目的とした
各相状態における電力吸収特性解析中島 裕貴¹ 今井 卓¹ 田口 健治¹ 柏 達也¹ 北澤 敏秀²
鈴木 政浩³ 瀬川 智臣³ 藤井 寛一³¹北見工大 〒090-8507 北海道北見市²立命館大 〒525-8577 滋賀県草津市³日本原子力研究開発機構 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村E-mail: now_i@mail.kitami-it.ac.jp

あらまし 核燃料サイクルの一環として、使用済み核燃料から生成される再処理溶液を原料とした固形の MOX 燃料が製造されている。日本では再処理溶液を粉末化するための脱硝工程において、マイクロ波加熱が利用されている。マイクロ波加熱を用いた脱硝法では、MOX 燃料原料粉末の大量生産を実現するため加熱むらの低減等、更なる加熱特性の改善が求められている。再処理溶液は加熱による液相→液固混相→固相への相状態遷移に伴い、電気定数が大きく変化する。そのため、各相状態における再処理溶液の吸収電力分布等を把握することが重要である。本研究では、再処理溶液のマイクロ波均一加熱を目的とした各相状態における媒質の電力吸収特性解析を行った。尚、電磁界解析手法としては FDTD 法を用いた。

キーワード 使用済み核燃料, 再処理溶液, マイクロ波加熱, 相状態, 吸収電力

Analysis of Power Absorption Characteristics for Uniform Microwave Heating
of Pu/U Mixed Nitrate Solution in Each Phase StateYuki NAKAJIMA¹ Suguru IMAI¹ Kenji TAGUCHI¹ Tatsuya KASHIWA¹
Toshihide KITAZAWA² Masahiro SUZUKI³ Tomoomi SEGAWA³ and Kan-ichi FUJII³¹Kitami Institute of Technology, Kitami, Hokkaido, 090-8507 Japan²Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan³Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1194 JapanE-mail: now_i@mail.kitami-it.ac.jp

Abstract The mixed oxide (MOX) fuels are produced from the Pu/U mixed nitrate solution obtained from the spent nuclear fuel as a part of the nuclear fuel cycle. In Japan, the water evaporation and the de-nitration of the Pu/U mixed nitrate solution have been carried out by using the microwave heating. In this process, however, further improvements of heating uniformity and efficiency are eagerly required for the mass production. The electric constants of the Pu/U mixed nitrate solution change along with the phase transition caused by heating. Therefore, in microwave heating, it is very important to know the power absorption characteristics of the Pu/U mixed nitrate solution in each phase state. In this study, the electric power absorption of the medium in each phase state is investigated by using the FDTD method.

Keyword Spent nuclear fuel, Pu/U mixed nitrate solution, Microwave heating, Phase state, Absorbed power

1. はじめに

核燃料サイクルの一環として、使用済み核燃料から MOX 燃料(UO₂+PuO₂)が製造されている。この製造過程において、使用済み核燃料からウラン及びプルトニウムを含む再処理溶液が生成される。その後、再処理溶液を加熱し水分及び硝酸分を取り除くことにより

MOX 燃料の原料粉末が生成される。日本では、脱硝工程においてマイクロ波加熱の利用が進められている [1], [2]。マイクロ波加熱を用いた脱硝法では、MOX 燃料原料粉末の大量生産を実現するため加熱むらの低減等、更なる加熱特性の改善が求められている。

従来、マイクロ波加熱における食品の加熱むら低減

に関する報告が行われている[3]-[6]。しかしながら、再処理溶液は加熱による液相→液固混相→固相への相状態遷移に伴い電気定数が大きく変化するため、食品等とは異なる加熱特性を有すると考えられる[7]。そのため、脱硝工程全体を通して効率的な加熱を実現するには、再処理溶液の各相状態における電気定数及び熱伝導率等の物性値に応じた加熱特性を把握する必要がある[8]-[11]。

従来、我々は液相状態における再処理溶液の定性的な電力吸収特性を明らかにした[12]。その結果、液相状態の再処理溶液は水及び金属の中間的な特性を有することが示された。更に、導波管取付け位置及び各入力偏波を考慮した電力吸収特性の解析により、キャビティ上面からの円偏波入力を用いることで媒質表面における加熱むらが低減されることを明らかにした[13]、[14]。

本報告では、再処理溶液のマイクロ波均一加熱を目的とした各相状態における媒質の電力吸収特性解析を行った。

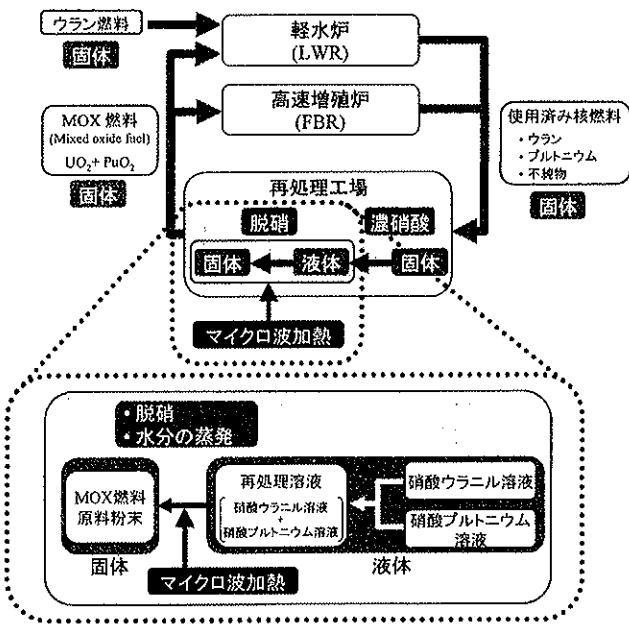


図1 核燃料サイクル図

2. 核燃料サイクル

図1に核燃料サイクルの概略図を示す[15]。現在、原子力発電所では主にウラン燃料を用いた軽水炉による発電が行われている。また、燃料となるウラン資源を有効利用するため、高速増殖炉の開発が進められて

いる。これらの原子炉から排出される使用済み核燃料には燃え残ったウラン以外に核反応により生じたプルトニウム及び不純物が含まれる。これらの内、ウラン及びプルトニウムは核燃料として再利用(Recycle)が可能である。

再処理工場では、固体の使用済み核燃料が濃硝酸により溶解され、硝酸ウラニル溶液及び硝酸プルトニウム溶液、不純物に分離される。その後、硝酸ウラニル溶液及び硝酸プルトニウム溶液を混合した再処理溶液が生成される。この再処理溶液の水分蒸発及び脱硝を行なうことでMOX燃料原料粉末が製造される。

3. マイクロ波オープンモデル

図2に本研究で用いたマイクロ波オープンモデルを示す。本研究では直径350mm、高さ350mmの円筒形オープンの上面に、直径90mm、高さ200mmの円形導波管を接続した。再処理溶液は直径250mm、厚さ30mmの円盤形とし、オープン底より50mmの高さの中央に配置した。

再処理溶液の電力吸収特性解析を行なうためには、媒質の各相状態における複素比誘電率($\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$)が必要となる[16]。本研究では、液相状態($\epsilon_r = 80 - j390$)、液固混相状態($\epsilon_r = 42.5 - j16$)、固相状態($\epsilon_r = 5 - j9$)を想定した。入力波は周波数が2.45GHz、電力が1000Wの右旋円偏波とした。円偏波入力位相差90°の直交する2つの直線偏波を用いて実現している。また、導波管終端部における吸収境界条件としてMurの1次境界条件を用いた。

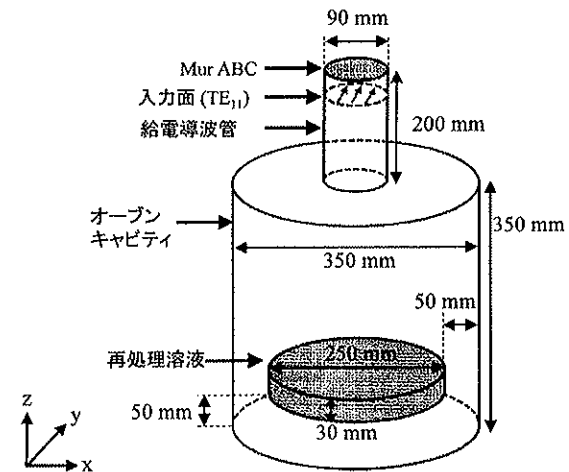


図2 マイクロ波オープン

4. 各相状態における電力吸収特性

4.1. 電界分布

図3に各相状態におけるオープン内電界分布を示す。観測面はキャビティ中心を通るzx平面及びyz平面とした。

液相、液固混相、固相の順に導波管及びオープン内の定在波が小さくなっているが、電界分布に大きな変化は見られなかった。円偏波入力を用いていることから、相状態によらずzx平面及びyz平面のどちらも同じ分布を示している。

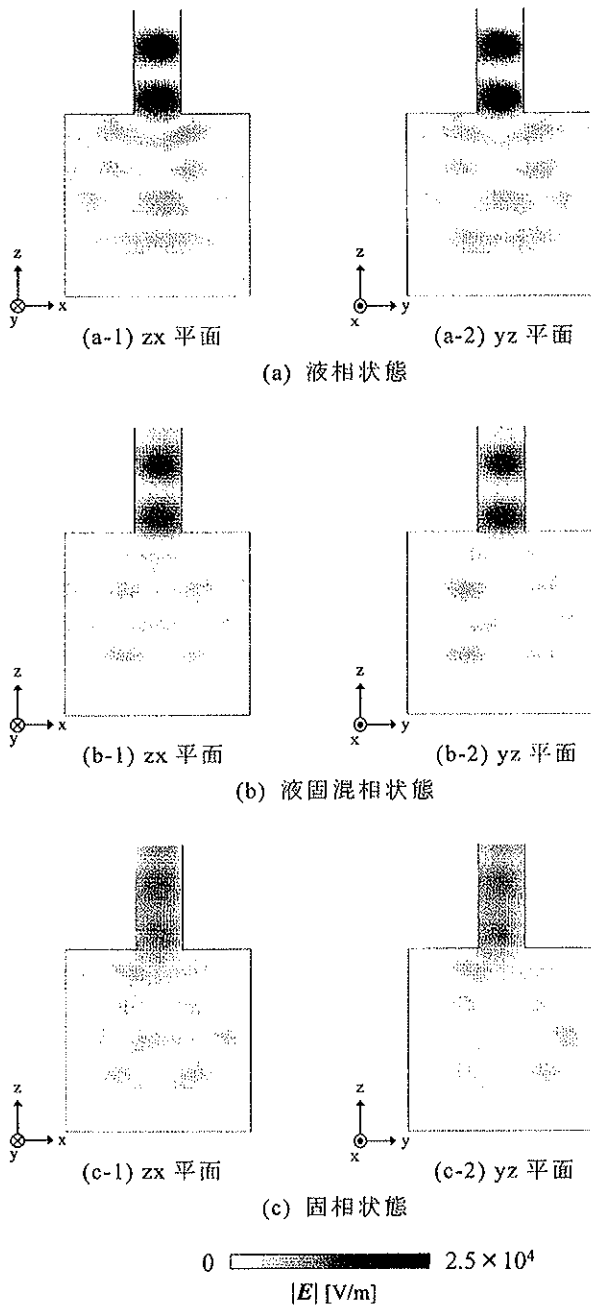


図3 各相状態におけるオープン内電界分布

4.2. 吸収電力分布

図4及び図5に各相状態における再処理溶液の吸収電力分布を示す。観測面は媒質の上側表面及び中心断面である水平面(xy平面)、媒質中心を通る垂直面(zx平面及びyz平面)とした。尚、吸収電力分布 P [W/m³]は $1/2 \cdot \sigma E^2$ より求めた。

図4及び図5より、吸収電力は媒質の上側表面及び外周部に集中することが明らかとなった。また、液相、液固混相、固相の順に媒質内部へ電波が浸透していることが示された。

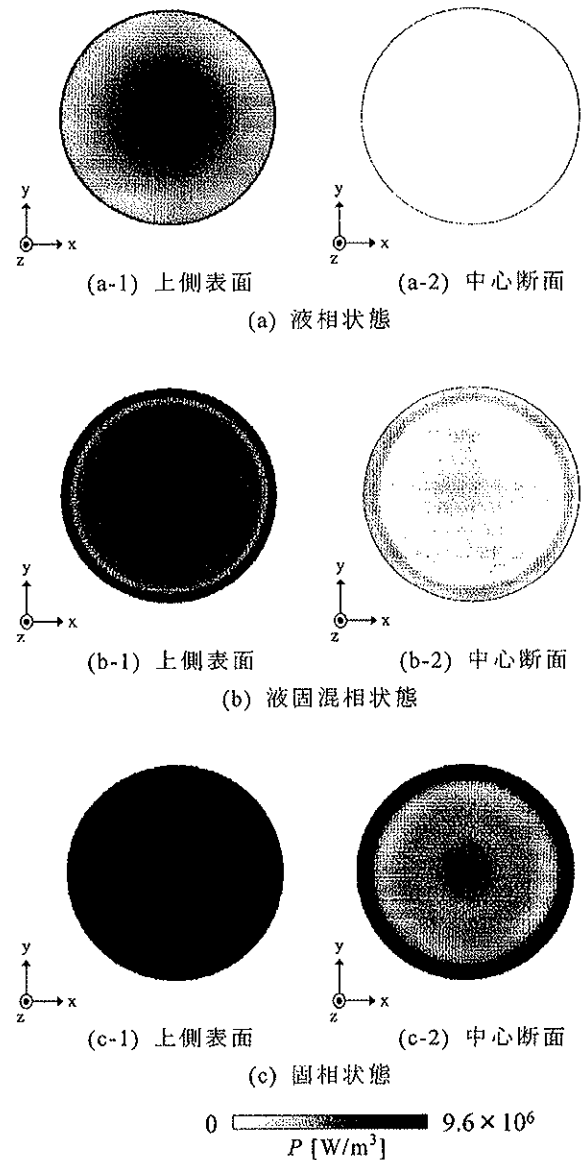


図4 各相状態における再処理溶液の吸収電力分布 (水平面)

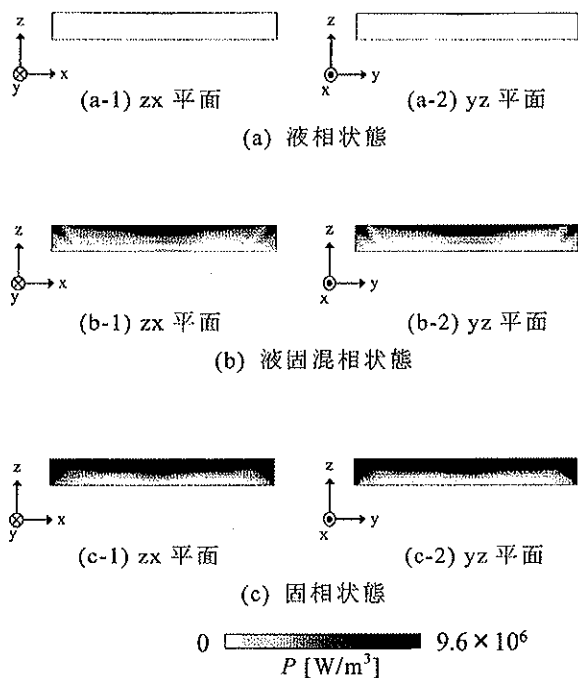


図5 各相状態における再処理溶液の吸収電力分布 (垂直面)

5. むすび

本研究では、使用済み核燃料再処理溶液のマイクロ波均一加熱を目的とした各相状態における電力吸収特性解析を行った。その結果、液相では媒質上側表面のみに吸収電力が集中するのに対し、液固混相、固相では媒質内部へ電波が浸透することが明らかになった。一方、各相状態における電界分布は、定在波の強さが変化するものの、分布の大きな変化は見られなかった。

今後は、各相状態における熱拡散及び対流等を考慮した熱解析を行う予定である。最終的には、脱硝工程全体を通じた経時的な相状態変化に応じた電磁界及び熱問題の連成解析を行う事を目標としている。

文 献

[1] M. Suzuki, T. Yamamoto, K. Ishii, Y. Kihara, K. Fujii, S. Horii, A. Kaneko, and Y. Abe, "Discussion on artificial geyser affecting vessel design for innovative de-nitration," Proc. of Global 2009, Paper 9175, Paris, France, Sept. 2009.

[2] M. Suzuki, K. Ishii, Y. Kihara, T. Kurita, Y. Kato, K. Yoshimoto, T. Okita, M. Kato, and K. Fujii, "Development of innovative system and technology on MOX fuel production for FBR," Proc. of FR09, pp. 1-11, Kyoto, Japan, Dec. 2009.

[3] K. Iwabuchi, T. Kubota, and T. Kashiwa, "Analysis of electromagnetic fields in a mass-produced microwave oven using the finite-difference

time-domain method," J. Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol. 31, no. 3, pp. 188-196, Oct. 1996.

[4] 打矢匡, 柏達也, 岩淵康司, "複数の偏波を用いて給電された電子レンジの加熱特性解析," 信学論(C), vol. J83-C, no. 11, pp. 1044-1045, Nov. 2000.

[5] 須賀良介, 橋本修, 渡邊恵理子, 伊集院太一, 高富哲也, "工業用電子レンジ庫内に配置された食品の円偏波による加熱ムラ低減," 信学技報, MW2007-97, pp. 89-92, Sept. 2007.

[6] S. Watanabe, M. Karakawa, and O. Hashimoto, "Computer simulation of temperature distribution of frozen material heated in a microwave oven," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 58, no. 5, pp. 1196-1204, May 2010.

[7] Y. Kato, T. Kurita, and T. Abe, "Dielectric properties of uranium and plutonium nitrate solution and the oxide compounds formed in the de-nitration process by the microwave heating method," J. of Nuclear Science and Technology, vol. 41, no. 8, pp. 857-862, Aug. 2004.

[8] L. Ma, D.L. Paul, N. Potheary, C. Railton, J. Bows, L. Barratt, J. Mullin, and D. Simons, "Experimental validation of a combined electromagnetic and thermal FDTD model of a microwave heating process," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 43, no. 11, pp. 2565-2572, Nov. 1995.

[9] K. Iwabuchi, I. Fukai, T. Kashiwa, Consumer Applications of Microwaves, T. K. Ishii ed., pp. 249-275, Handbook of Microwave Technology, Academic Press, 1995.

[10] F. Torres, and B. Jecko, "Complete FDTD analysis of microwave heating processes in frequency-dependent and temperature-dependent media," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 45, no. 1, pp. 108-117, Jan. 1997.

[11] 渡邊慎也, 斉藤耕太, 飯野一哉, 橋本修, "対流及び熱放射を考慮した抵抗皮膜を用いたλ/4型電波吸収体の温度解析," 信学論(C), vol. J88-C, no. 12, pp. 1130-1141, Dec. 2005.

[12] Y. Nakajima, S. Imai, K. Taguchi, T. Kashiwa, T. Kitazawa, M. Suzuki, and K. Fujii, "Analysis of Microwave Heating for Nuclear Nitrate Solution," 2010信学ソ大, C-1-29, Sept. 2010.

[13] 中島裕貴, 今井卓, 田口健治, 柏達也, 北澤敏秀, 鈴木政浩, 藤井寛一, "高導電率溶液のマイクロ波均一加熱を目的とした電力吸収特性解析," 信学技報, MW2010-138, pp. 19-22, Jan. 2011.

[14] 中島裕貴, 今井卓, 田口健治, 柏達也, 北澤敏秀, 鈴木政浩, 藤井寛一, "入力偏波の影響を考慮した高導電率溶液のマイクロ波加熱特性解析," 2011信学総大, C-1-22, Mar. 2011.

[15] 原子力・エネルギー図面集 2010年版, 電気事業連合会, 2010.

[16] N. Nakao, Y. Morishita, K. Wakino, T. Kitazawa, S. Imai, K. Taguchi, T. Kashiwa, M. Suzuki, and K. Fujii, "An adaptive evaluation method of material with complex permittivity in a cylindrical cavity," ISAP2010, Macao, China, Nov. 2010.