

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

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 藤井 寛一³

¹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: ¹lx@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て固形（粉末）の MOX 燃料が製造されている。わが国では、再処理溶液の固形化（粉末化）のための水分蒸発及び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が、加熱むらの低減や高効率化等の更なる加熱特性の改善が必要とされている。そのためには、再処理溶液における吸収電力分布等の諸特性を把握することが不可欠である。本研究では、高導電率性を有する再処理溶液のマイクロ波加熱における電力吸収特性解析を行った。具体的には導波管取付け位置及び各入力偏波に対する特性の比較を行った。尚、電磁界解析手法として FDTD 法を用いた。

キーワード マイクロ波加熱, 再処理溶液, 高導電率, 吸収電力, FDTD 法

Power Absorption Characteristics for Uniform Microwave Heating of Medium with High Conductivities

Yuki NAKAJIMA¹ Suguru IMAI¹ Kenji TAGUCHI¹ Tatsuya KASHIWA¹
Toshihide KITAZAWA² Masahiro SUZUKI³ and Kan-ichi FUJII³

¹Kitami Institute of Technology, Kitami, Hokkaido, 090-8507 Japan

²Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

³Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1194 Japan

E-mail: ¹lx@mail.kitami-it.ac.jp

Abstract As a part of the nuclear fuel cycle, the MOX fuels for FBR are produced from Pu/U mixed nitrate solution obtained from spent fuel. In Japan, evaporation and de-nitration of Pu/U mixed nitrate solution have been carried out by using microwave heating. In this process, however, further improvements of heating uniformity and efficiency are eagerly required. Therefore, in microwave heating, it is very important to know power absorption characteristics of Pu/U mixed nitrate solution. In this study, power absorption characteristics of medium with high conductivities like Pu/U mixed nitrate solution were investigated taking the influence of the polarization of input waves and feeding positions of waveguide into account employing the FDTD method.

Keyword microwave heating, Pu/U mixed nitrate solution, high conductivities, absorbed power, FDTD method

1. はじめに

近年、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。核燃料サイクルでは使用済み核燃料からウラン及びプルトニウムを含んだ再処理溶液を生成し、それを MOX 燃料の原料として再利用する。この際、再処理溶液の固形化のための水分蒸発及び脱硝工程において、マイクロ波加熱を用いた脱硝法の有効性が報告されている[1], [2]。本手法においては加熱むらの低減等、更なる

加熱特性の改善が期待されている。

再処理溶液の相状態は加熱により液相→液固混相→固相へと遷移する。これに伴い、その電気定数も大きく変化する[3]。そのため、脱硝工程全体を通してより効率的な加熱を実現するためには、再処理溶液の電気定数及び熱伝導率等の物性値変化に応じた加熱特性を把握する必要がある[4]-[9]。

本研究では第 1 段階として液相状態の再処理溶液における電磁界解析を行い、溶液中の電力吸収特性を明

らかにすることを目的としている。液相状態の再処理溶液は高導電率性を有することが知られている[3]。従来、我々は2次元FDTD解析を行い再処理溶液における定性的な電力吸収特性を明らかにした[10]。その結果、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。

本報告では、再処理溶液のマイクロ波加熱における定量的な電力吸収特性を明らかにするために3次元FDTD解析を行った。具体的には導波管取付け位置及び各入力偏波に対する電力吸収特性の比較を行った。

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[11]。現在、原子力発電所ではウラン燃料を用いた軽水炉による発電が行われているが、ウラン資源の有効利用の観点から、高速増殖炉の開発が進められている。発電所から排出される使用済み核燃料には、ウラン以外に核反応によって生じたプルトニウム及び不純物が含まれている。

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る。その後、不純物等が取り除かれ、硝酸プルトニウム溶液及び硝酸ウラニル溶液の混合溶液である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燃料の原料粉末が製造される。

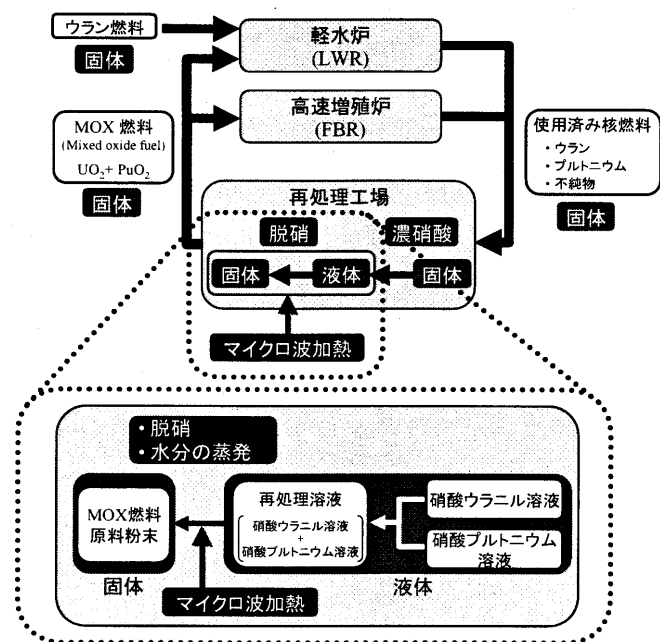


図1 核燃料サイクル図

3. 解析モデル

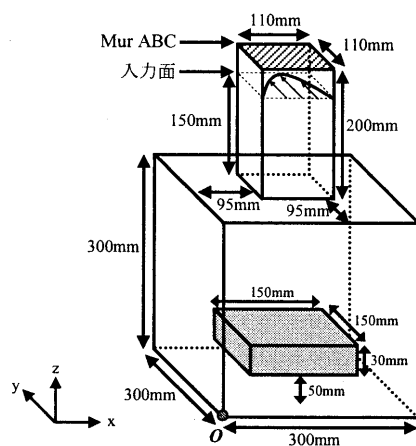
3.1. マイクロ波オープン

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。本研究ではキャビティ上面及び側面から給電を行うモデルをそれぞれ縦給電及び横給電モデルとした。導波管は110mm×110mmの断面を有する正方形導波管、キャビティは1辺が300mmの立方体とした。再処

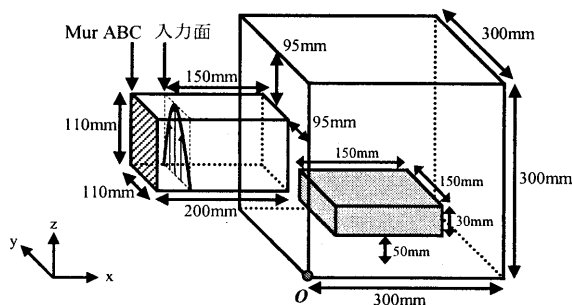
理溶液はオープン底より50mmの高さ、オープン側面よりそれぞれ75mm離れた位置に配置した。

表1に縦給電及び横給電モデルにおける入力偏波を示す。尚、円偏波入力には位相差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、入力波の周波数は2.45GHz、入力電力は1000Wとした。

FDTD法における空气中及び再処理溶液中の空間離散間隔はそれぞれ1.0mm及び0.25mmとし、媒質表面から空气中に向かって徐々に変化させている。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。



(a) 縦給電モデル



(b) 横給電モデル

図2 マイクロ波オープン

表1 縦給電及び横給電モデルにおける入力偏波

給電位置	入力偏波	
	縦給電	直線偏波
	円偏波	右旋
横給電	直線偏波	偏波方向:z軸
	円偏波	右旋

3.2. 再処理溶液の複素比誘電率

再処理溶液の電力吸収特性解析を行なうためには、媒質の複素比誘電率($\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$)が必要となる[12]。再処理溶液の ϵ''_r は水に比べ非常に高く、高導電率性を有することが知られている。一方、 ϵ'_r の詳細な値は報告されていない。本研究では、 ϵ'_r の実部として硝酸の $\epsilon'_r=80$ 、虚部として50°Cにおける再処理溶液の $\epsilon''_r=390$ を用いた[3]。

4. 縦給電における偏波の影響

4.1. 電界分布

図3に縦給電モデル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及びyz平面とした。

入力偏波による違いを比較すると、直線偏波ではzx及びyz平面において異なる電界分布を示す事が分かる。一方、円偏波ではどちらの平面でも同様の電界分布が示されている。また、入力偏波によらず媒質内部に電界が浸透しない様子が確認された。

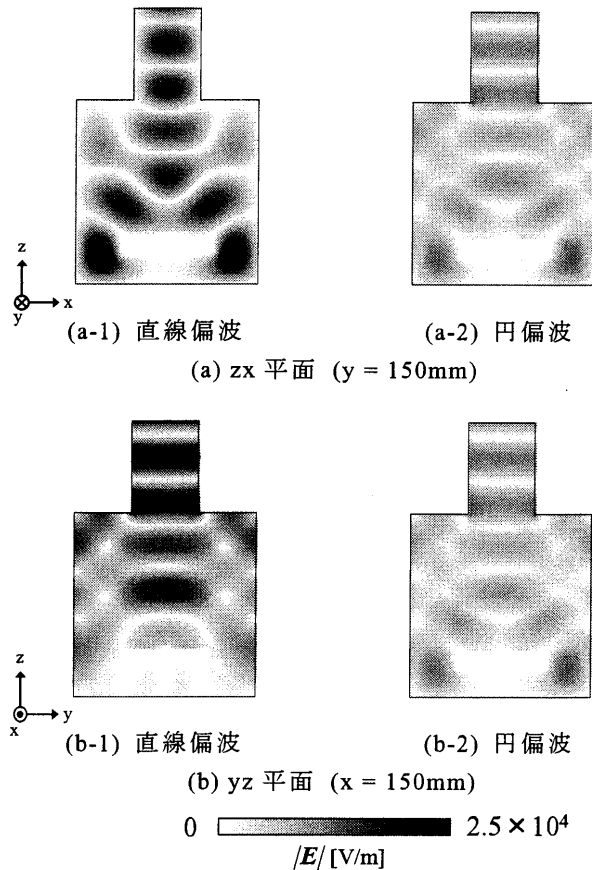


図3 縦給電モデルにおけるオープン内電界分布

4.2. 吸収電力分布

図4に縦給電モデル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であるxy平面、媒質中心を通るzx及びyz平面とした。尚、吸収電力分布 $P [W/m^3]$ は $1/2 \cdot \sigma E^2$ より求めた。

図4(a)より、直線偏波に比べ円偏波の方が媒質の上側表面における吸収電力分布のむらを低減出来る事が明らかとなった。また、図4(b)及び(c)より、媒質表面のみに吸収電力が集中する事が示された。

5. 横給電における偏波の影響

5.1. 電界分布

図5に横給電モデルにおけるオープン内電界分布を示す。観測面は縦給電モデルと同様にキャビティ中心

を通るzx及びyz平面とした。

図5より、zx及びyz平面のそれぞれにおいて、入力偏波によらず媒質近傍で同傾向の電界分布を示す事が分かる。また、縦給電の場合と同様に媒質内部に電界が浸透しない様子が示された。

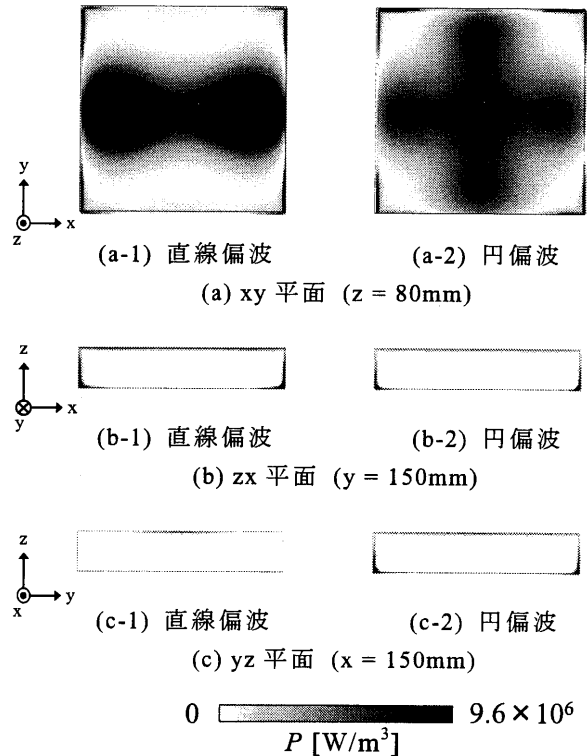


図4 縦給電モデルにおける再処理溶液の吸収電力分布

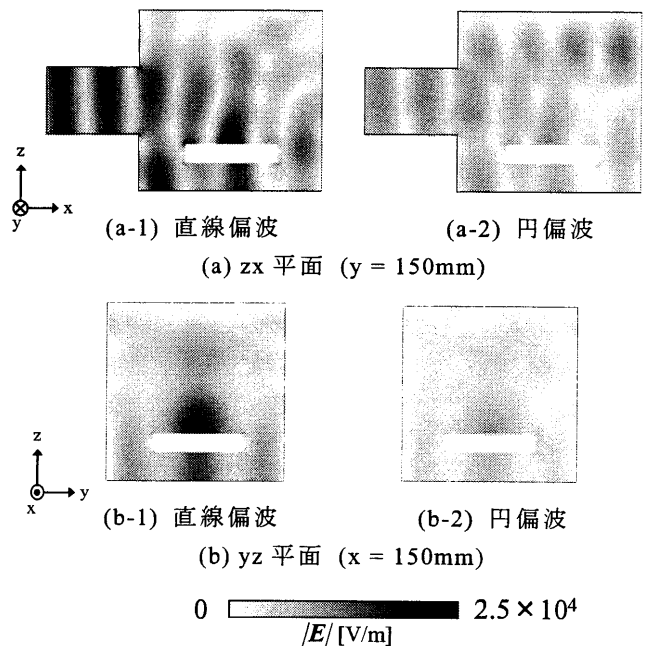


図5 横給電モデルにおけるオープン内電界分布

5.2. 吸収電力分布

図6に横給電モデル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であるxy平面、媒質中心を通るzx及びyz平面とした。

図6(a)より、媒質の上側表面では入力偏波によらず同傾向の吸収電力分布を示す事が分かる。また、図6(b)及び(c)より、縦給電の場合と同様に媒質表面のみに吸収電力が集中する事が示された。

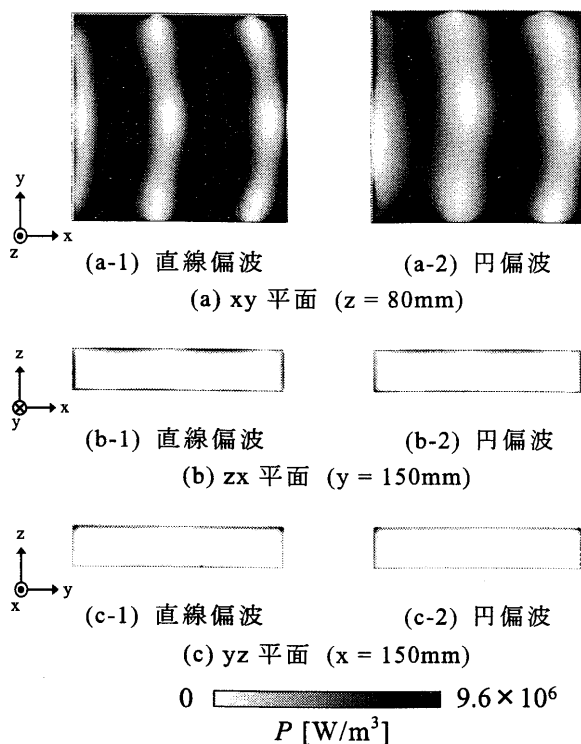


図6 横給電モデルにおける再処理溶液の吸収電力分布

6. むすび

本研究では、高導電率溶液のマイクロ波加熱における電力吸収特性解析を行った。具体的には導波管取付け位置及び各入力偏波に対する特性の比較を行った。その結果、縦給電モデルにおいては円偏波を用いることにより、媒質表面における吸収電力分布のむらが低減される事を明らかにした。一方、本研究における横給電モデルにおいては円偏波及び直線偏波による吸収電力分布に大きな変化が無いことが示された。

現在、液固混相及び固相における電力吸収特性解析を行っている。今後は、各相状態における熱拡散及び対流を考慮した熱解析を行う予定である。最終的には、脱硝工程全体を通して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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 渡邊慎也, 齊藤耕太, 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 $\lambda/4$ 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 原子力・エネルギー図面集 2010年版, 電気事業連合会, 2010.
- [12] 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.