

<原子力学会賞受賞記念寄稿>

核解析手法の精度検証のための臨界実験技術の開発

(株) 東芝 吉岡 研一

1. はじめに

近年、研究炉や臨界実験装置が減少し、炉物理実験の担い手が少なくなっている。臨界実験は炉心設計の精度検証に重要な役割を果たすとともに、炉物理の基礎習得にも有効である。今回、我々が実施してきた臨界実験技術開発の成果に対し原子力学会賞技術賞を受賞し、部会報への寄稿の機会をいただいたので、本研究の内容とともに、私が炉物理を始めたきっかけや経緯を紹介する。

私は学生時代から原子力専攻であり、放射線計測や断面積測定などを研究していたが、炉物理は講義程度で、本格的に炉物理と関わったのは入社以降である。当初は、教科書での独習や、上司からの指導の下、業務を行っていたが、共鳴吸収やバックリングなどの概念は、理解し難かった。その後、臨界実験や実験解析を通し、徐々に理解が深まっていった。また、実験計画から、治具の設計・製作、解析コードの改良、許認可手続きまで一通りの業務を経験することで、新たな実験提案もできるようになり、私自身、臨界実験の教育的有効性を体感してきた。

本受賞の対象となったのは、H17年から若手対象のMEXT公募研究としてスタートした、マイクロ炉物理[1]に関する東芝、阪大、原子力機構の共同研究であり、私が研究代表者を務めた。本研究のターゲットの一つが、燃料棒内の中性子束分布を精度よく測定するというものであったが、その方法については、研究開始当初はまだはっきり目処が立っていなかった。予算は限られており、締切も迫ってくるなか、チームメンバーと検討の末、次章以降に示す箔放射化法の改良により、良好な実験結果が得られた。その成果を論文としたものが本受賞の中心となっている。研究代表者としてのペーパーワークも多く、苦労も多かったが、本研究の中で培った技術が、その後、新たにスタートしたPWR燃料集合体模擬実験にもつながり[2]-[3]、本受賞にまでつながったことは、大変良い経験であった。

次章以降に研究の概要を示す。

2. 研究概要

マイクロ炉物理は燃料内の中性子のふるまいをこれまでより詳細に考慮する手法である[1]。マイクロ炉物理に基づく解析手法を検証するためには、燃料棒内の詳細な中性子束分布測定法が必要となる。本研究では、低コストで取り扱いの容易な手法として、箔放射化法に注目し、その測定精度向上法を開発した。箔放射法の測定精度は、主に、箔の加工誤差、設置時の位置決め誤差、放射線計数時の統計誤差で決定される。特に、1cm程度の直径の燃料ペレット内部をさらに詳細に分割するためには、円環状の金属箔を高精度に加工する必要があり、加工誤差と位置決め誤差が測定精度に大きな影響を与える。

本研究では、加工誤差と位置決め誤差を低減するために、化学エッチングで加工を行う

方法 (エッチング法) を開発した。

開発した方法を、東芝臨界実験装置 (NCA) での低減速軽水炉模擬臨界実験に適用した。低減速軽水炉 [4]–[8] の燃料集合体設計の一例を図 1 に示す。図は改良型沸騰水型軽水炉 (ABWR) をベースとした燃料集合体とストリーミングチャンネルの一例を示している。ストリーミングチャンネルはボイド領域 (Void region)、構造材 (Structural material)、水ギャップ (Water gap) から構成される。ストリーミングチャンネルは燃料集合体に隣接して配置される。ボイド領域は通常 60% 程度のボイド状態での運転時には中空 (空気) 領域である。出力が上昇し、水ギャップのボイド率が上昇すると、ボイド領域を通して、より炉心からの中性子漏えいが大きくなる。その結果、ボイド反応度係数が負の方向にシフトするため、ボイド反応度係数の改善ができるという特徴がある。

図 2 はエッチング法で加工された箔を示す。円環状の箔が精度よく加工できていることがわかる。切断線の幅は 0.1 mm 以下である。図に示される一部切断されていない連結部分は、箔を燃料棒にセットする際の位置ずれを防ぐための工夫である。パンチング法のように、照射後の加工ができないため、エッチング法では、照射前に加工を行うが、円環状に全て切断してしまうと、燃料棒にセットする際に位置ずれが起きてしまう。これを防ぐため、容易に切断可能な程度にわずかに連結部分を残し、照射後にその部分のみをカッターで切断する。

本試験では、加工時に使用できる溶液の制約のため、金はエッチング法が使用できなかった。そのため機械的パンチングにより打ち抜きで加工した。銅箔、マンガン (ステンレス中のマンガンを利用) 箔、タングステン箔にエッチング法を使用した。

位置ずれ誤差や統計誤差を含め、測定誤差は金箔で 2%、他の箔で 1% と評価した。

臨界実験は東芝臨界実験装置 (NCA) [9] で行った。燃料棒径方向中性子束分布測定のために、図 3 に示すように 3 実験炉心を構築した。炉心は中央部にロッドピッチ 13.5 mm の三角格子による稠密格子部分と、その周囲にロッドピッチ 15.2 mm の正方格子によるドライバ領域から構成される。中央の稠密格子部分には 3.9wt% と 4.9wt% の UO_2 燃料棒を用いた。ドライバ領域は 2wt% の UO_2 燃料棒を用いた。

低減速軽水炉の運転時の高ボイド率を模擬するために、ポリスチレンを使用した減速材模擬技術を開発した。ポリスチレンには 2 種類のものを使用している。一つはポリスチレン樹脂を固めたプラスチック状のものであり、もう一つはさらに高ボイド率を模擬するために、発泡スチロール状にしたものである。プラスチック状のものは、原材料で密度が決まるが、発泡スチロールの方は、発泡の度合いで密度が変化するため、特に高い製造技術が必要となる。ここでは、運転時 60% ボイド率の水素密度と等価になるように発泡度を調節した。

図 3 に示したケース 1 は冷温 (Cold) 状態の模擬であり、ケース 2 およびケース 3 は運

転時 60%ボイド模擬であり、上述のポリスチレンブロックを炉心内に挿入し、ボイド模擬状態を構築している。ケース 1 の水対燃料体積比は 0.59、ケース 2 および 3 の水対燃料体積比は 0.18 である。ケース 3 では、炉心中央にウォーターホールを設けている。このウォーターホールは中性子スペクトルを複雑にし、非均質性を高める目的で設定した。

測定結果および臨界実験解析について述べる。連続エネルギーモンテカルロコード *MVP*[10]と *JENDL-3.3*[11]核データライブラリを用いて、実験解析を行った。

図 4 は解析値と測定値の比較の一例としてケース 3 の棒 No. 2 の結果を示している。銅、マンガン (ステンレス)、タングステンについては解析値と測定値は 1~2%程度の差でよい一致を示している。一方、金については、他の箔に比べて測定値のばらつきが大きくなっているが、この差は、加工法の差によるものと考えられる。各測定点の解析値の統計誤差は放射化箔の吸収断面積のエネルギー分布に依存するが、金で 2%、他の箔で 1%程度である。

これらの結果から、本開発手法は、これまで容易に測定が困難であった燃料内部の径方向中性子束分布の測定に有効な手法であるといえる。

3. まとめ

これまで測定が容易ではなかった燃料棒内の中性子束分布を高精度に測定する技術を開発した。エッチング技術により高精度に加工された放射化箔を用い、燃料棒内の中性子束分布を 2%の精度で測定することに成功した。モンテカルロ法コード *MVP*による解析を実施し、1~2%程度の精度で解析値と測定値は一致し、測定手法の妥当性を示した[12]。

4. 謝辞

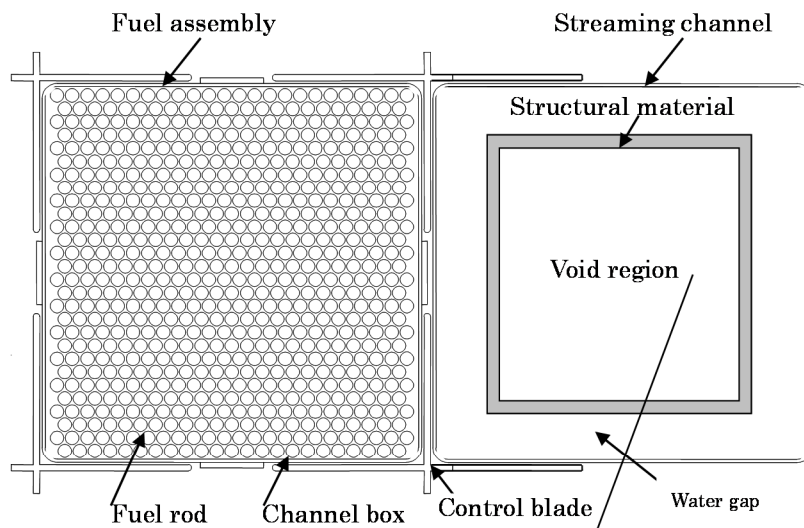
本技術開発は東芝、大阪大学、原子力機構の共同研究により、H17-H19 年に MEXT 公募原子力システム研究開発事業として行われた「マイクロ炉物理に基づく反応度係数の高精度測定手法と解析手法の開発」の成果を利用している。

受賞につながった本研究を支えていただいた、東芝、大阪大学、原子力機構の多くの関係者の方々に改めて、深く感謝いたします。

本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

(参考文献)

- [1] T. Takeda, et al., 3-D Transport Theory Method Based on MOC for Analyzing Integral Data of Transmutation, *Global2003*, New Orleans, LA (2003).
- [2] T. Kikuchi, K. Yoshioka, S. Gunji, H. Matsumiya, S. Sugahara, M. Ouisloumen, “Gray Rod Cluster Assembly for AP1000™: (2)GRCA Critical Experiments/(3)Critical Experiments Analysis”, 日本原子力学会 2012 年春の年会予稿集, E45-E46, (2012).
- [3] M. Ouisloumen, H. Huria, K. Yoshioka, T. Umano, T. Kikuchi, S. Gunji, H. Matsumiya and S. Sugahara, “ANALYSIS OF TUNGSTEN GRAY RODS CRITICAL EXPERIMENTS USING PARAGON WITH ULTRA-FINE ENERGY MESH METHODOLOGY”, Proceedings of PHYSOR 2014, Kyoto, Japan, September 28 - October 3, Paper 1101855 (2014).
- [4] 師岡他 低減速炉の技術開発の進捗および課題 日本原子力学会誌 Vol. 48 p484 2006.
- [5] T. Yokoyama, et al., Study on Breeding Characteristics of Fast Spectrum BWR, *International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology*, Islandia Marriott Long Island, NY, October 5-8, 1998 (1998), pp. 1679-1684.
- [6] Y. Sakashita, et al., Core Characteristics of Breeding BWR for BARS (BWR with Advanced Recycle System), *7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7)*, Tokyo, April 19-23, 1999 (1999).
- [7] K. Hiraiwa, et al., BARS: BWR WITH ADVANCED RECYCLE SYSTEM, *Proc. of the Workshop on Advanced Water Reactors with Innovative Fuels (ARWIF-2001)*, Chester, Oct., 2000 (2000).
- [8] M. Yamaoka, et al., Study on Fast Spectrum BWR Core for Actinide Recycle, *9th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-9)*, Nice, April 8-12, 2001 (2001).
- [9] 東芝臨界実験装置 HP
(<http://www3.toshiba.co.jp/power/pic/nuclearlaboratory/201210.nca.no2.pdf>) .
- [10] Y. Nagaya, et al., *MVP/GMVP II : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods*, JAERI 1348, Japan Atomic Energy Agency, (2005).
- [11] K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, et al., Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version3 Revision-3: JENDL-3.3, *J. Nucl. Sci. Technol.* 39 (2002), pp. 1125-1136.
- [12] K. Yoshioka, et al., Intra-pellet neutron flux distribution measurements in LWR critical lattices, *J. Nucl. Sci. Technol.* 50 (2013), pp. 606-614.



The streaming channel consists of void region, structural material and water gap. As power increases, the void ratio in the water gap increases. The increase of neutron leakage improves the negative void coefficient of reactivity for the reduced-moderation LWR.

図 1 低減速軽水炉の燃料集合体とストリーミングチャンネルの例

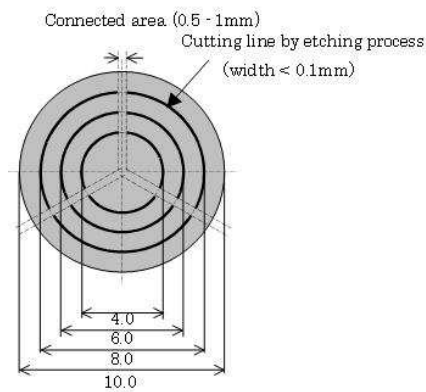
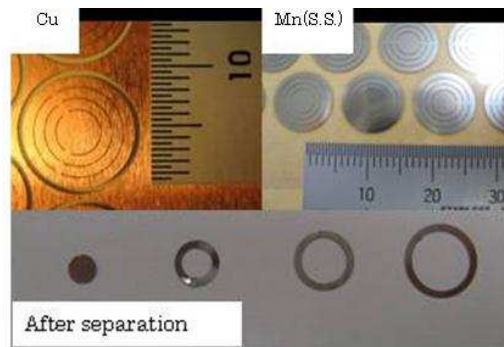


図 2 エッチング法による箔の加工

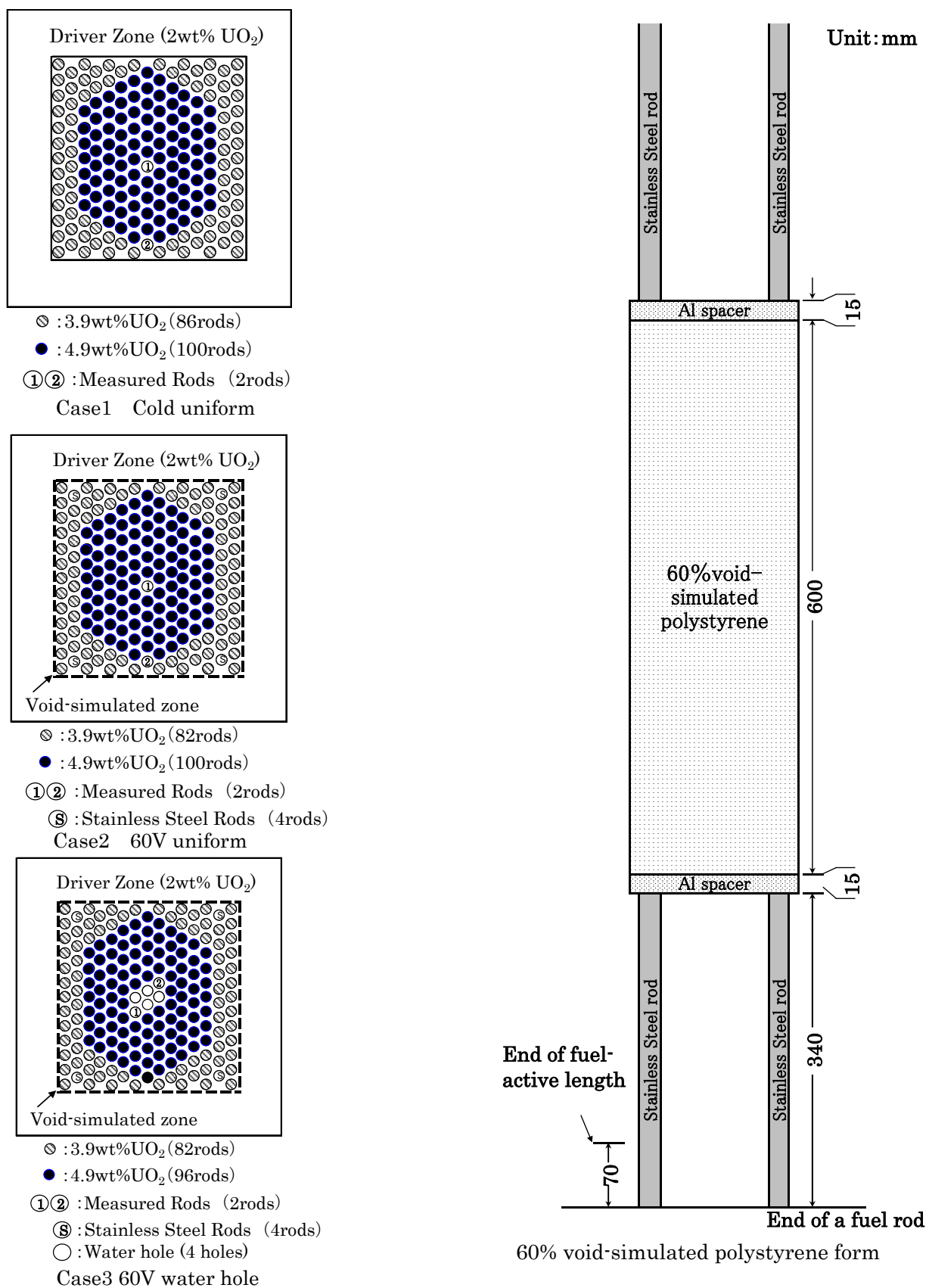


図 3 燃料棒径方向中性子束分布測定炉心

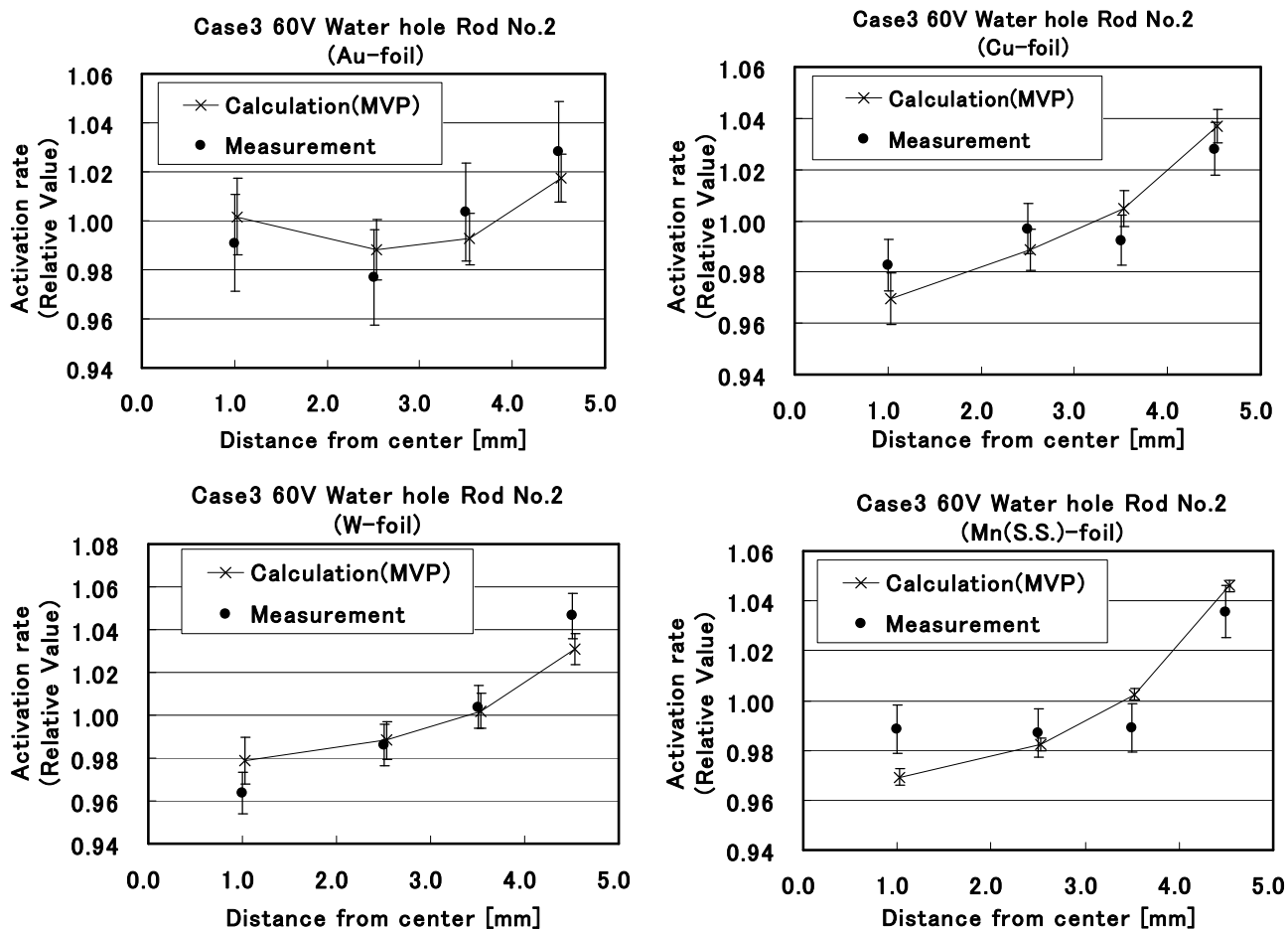


図 4 測定値と MVP による解析値の比較 (ケース 3 60%ポイド模擬中央部ウォーターホール (60V Water hole) 棒 No.2)