

<原子力学会賞受賞記念寄稿>

東芝臨界実験装置 (NCA)

(株) 東芝 熊埜御堂 宏徳

1. はじめに

東芝臨界実験装置 (NCA ; Toshiba Nuclear Critical Assembly) は、低濃縮 UO_2 燃料を用いる軽水減速型臨界実験装置で、2013 年 12 月に初臨界から 50 周年を迎え、2014 年 3 月に原子力歴史構築賞を受賞しました。今回、炉物理部会報に記念稿を掲載する機会を頂きましたので、NCA を使用した研究開発などについて紹介します。

2. NCA 施設と研究開発について

2. 1 NCA 施設の概要

東芝臨界実験装置 (NCA) は、JPDR の建設や発電用軽水炉導入の機運が高まる中、日本原子力事業株式会社 (1989 年に東芝に吸収合併) が 1962 年 7 月に原子炉設置許可を受け、装置設計や製作、燃料製作などは東芝が行い、1963 年 12 月に初臨界を達成した。

NCA 建屋の外観及び装置の構成を図-1 及び図-2 に示す。NCA は、いわゆるタンク型と呼ばれる臨界実験装置で炉心タンク内に燃料棒を配置し、ダンプタンクにある軽水を炉心タンク内に給水して臨界を達成させる。炉停止に用いる安全板 (停止用の制御棒に相当) のほか臨界近くで微少な反応度調整を行う微調整板も装備されている。NCA の許可上の最高出力は 200W であるが、臨界水位のみの測定では 0.1W 以下、出力分布測定を行う実験では 20~30W 程度の出力で運転している¹⁾。



図-1 NCA 建屋の外観

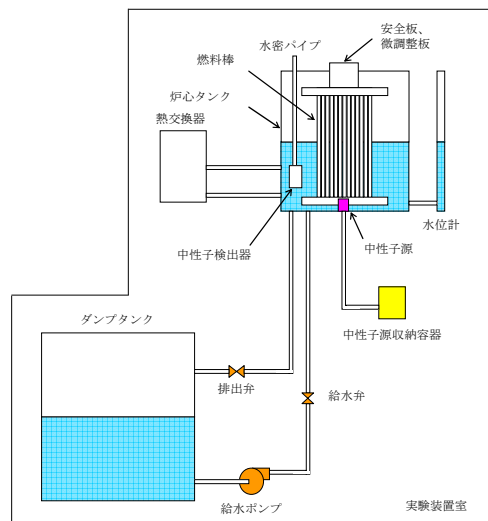


図-2 NCA 装置の構成

NCA の主要な仕様を表-1 に示す。NCA の燃料は、 UO_2 ペレット (直径 10mm、高さ方向有効長 1500mm) をアルミ合金製の被覆管に封入した燃料棒である。燃料は、濃縮度 1.0~4.9wt% の低濃縮度のもので、軽水炉燃料の濃縮度範囲をカバーしている。通常の UO_2

燃料棒以外にガドリニア (Gd_2O_3) を含有した燃料棒 (Gd_2O_3 濃度 : 0.1~15wt%) も所有している。

NCA では、炉心タンク内に設置した炉心支持枠に格子板を取り付け、格子板の穴に燃料棒を挿入して炉心を構成する。多種類の格子板を有しており、いろいろな炉心体系での臨界実験が可能である。実験上必要な場合には、設工認を行って新規に格子板を製作することも可能である。燃料棒配置などの炉心構成に自由度が大きく、また出力が低いので燃料棒の取扱いや炉心へのアクセスも容易な構造で、実験のしやすい装置である。

表-1 NCA の主要な仕様

(1) 最大出力	200W
(2) 燃料要素	形状 : 棒状アルミニウム合金被覆 ペレット : 焼結二酸化ウラン (直径 10mm、濃縮度 1.0~4.9wt%) 燃料有効長 1500mm
(3) 炉心	水対燃料体積比 0.2~3.0 配列 (1) 正方格子、(2) BWR 格子、(3) 稠密格子
(4) 減速材	軽水 (80°C 以下)
(5) 反応度制御	水位 微調整板 (1 枚)
(6) 停止機能	安全板 (5 枚) 板状ステンレスシース 吸収材 カドミウム 急速排水 (ダンプ弁等)

2. 2 NCA における実験の概要

メーカ所有の臨界実験装置として、NCA では従来から BWR 燃料や制御棒などの設計改良に関連する臨界実験を行い、開発や許認可などのバックアップとなるデータを取得してきた^{2)~4)}。近年では PWR の燃料や制御棒等に関する実験にも注力している。そのほか、使用済燃料ラックの改良や新たな炉内検出器の実用化のための実験も行ってきた。また、炉心構成のフレキシビリティを生かして、次世代炉や将来炉に関する実験も行っている。

未臨界度測定分野では、中性子源増倍法や炉雑音法、指数実験法⁵⁾などの実験に取り組んでおり、福島でのデブリ取出し時の臨界性監視技術についても貢献をしたいと考えている。

以下に、これまでに行ってきた実験のいくつかの事例を紹介する。

(1) BWR 炉心燃料に関する実験

BWR の燃料は高燃焼度化等による経済性の向上を目的に、平均濃縮度の増加、8×8 燃料や 9×9 燃料など燃料集合体の改良、ガドリニア入り燃料棒の本数や Gd₂O₃ 濃度の増加、部分長燃料棒の採用 (9×9A 型燃料) など種々の設計改良が行われてきた。NCA では、BWR 燃料集合体で燃料棒毎の濃縮度分布やガドリニア入り燃料棒の配置、Gd₂O₃ 濃度などを模擬するために、濃縮度の高い燃料棒(3.9%、4.9%など)やガドリニア入り燃料棒 (Gd₂O₃ 濃度 0.1～15wt%) を追加製作し、これらの改良燃料の臨界実験を、それぞれの開発・設計段階で行ってきた。実験では、主に臨界量 (燃料装荷量、臨界水位) や出力分布等の測定を行い、核計算手法の改良と精度検証に利用できるデータを提供した。

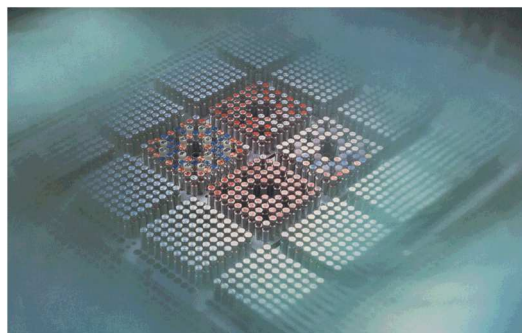


図-3 9×9 燃料模擬炉心

図-3に NCA 実験での 9×9 燃料模擬炉心の外観を示す。図-4は、複数のガドリニア入り燃料棒を集合体内で集中して配置させた実験の炉心配置の一例である⁶⁾。通常の集合体設計では、相互干渉によって中性子吸収効果が低下しないようにガドリニア入り燃料棒を分散して配置するが、ここではガドリニアの中性子吸収効果がより長期間継続するように集中配置した集合体の模擬実験を行った。臨界量の測定や燃料棒ごとの径方向出力分布の測定を行い、ガドリニア入り燃料棒が集中配置した場合の反応度 (固有値バイアス) や径方向出力分布の計算精度などの確認を行った。

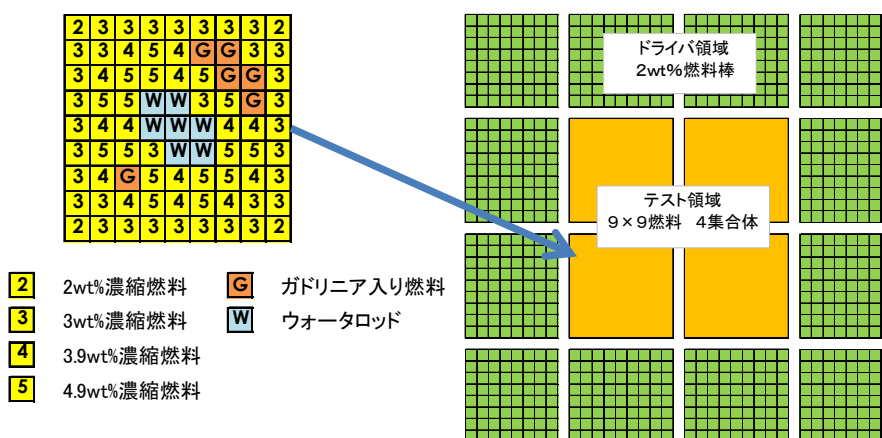


図-4 ガドリニア入り燃料棒を集中配置させた実験炉心配置例

(2)BWR 制御棒に関する実験

BWR の制御棒については、吸収材の種類や制御棒の構造等に関して多くの臨界実験を行ってきた⁷⁾。特に、BWR では出力運転中に挿入する制御棒を少数本に固定化した運転方

法と炉内集合体配置 (コントロールセル炉心) が採用されたことに関連して、1980 年代に長寿命制御棒の開発が要望され、Hf を吸収材とする制御棒が開発・実用化された。この開発では NCA での実験が大きな貢献をした。

BWR の制御棒は、十字型断面の SUS 製シース内に B_4C 粉末を封入した吸収棒を配列した構造である。NCA では、長寿命制御棒の開発初期段階から同形のシース内に棒状や板状の Hf を配置した制御棒の臨界実験を行ってきた^{8),9)}。ただ、Hf 制御棒は B_4C より重量が増加するため、制御棒の重量抑制と反応度価値の確保の両面を達成するという設計上の課題があった。東芝では、図-5 に示すように 2 枚の Hf 板を対向させ、Hf 板間に水を導入する構造で軽量化と反応度価値を両立するフラックストラップ型制御棒を考案した。NCA では、Hf 制御棒に関する臨界実験を行って、図-6 に示す Hf 板間のギャップ (間隔) による制御棒価値の変化を測定するなど、その効果の実証及び核設計コードの精度検証のためのデータを取得した^{10),11)}。

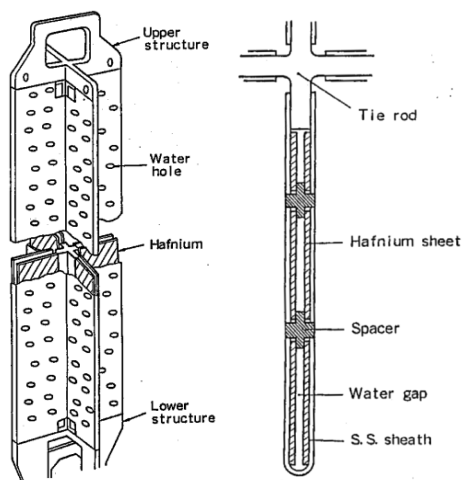


図-5 フラックストラップ型 Hf 制御棒

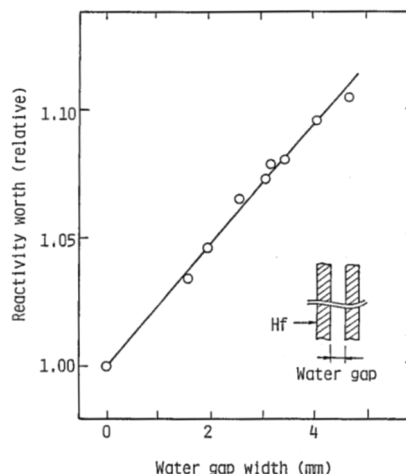


図-6 Hf 板間隔による制御棒価値の変化

(3)PWR 燃料・制御棒等に関する実験

NCA では、近年 PWR の燃料や制御棒等に関する臨界実験にも取り組んでいる¹²⁾。例として、AP1000TM で採用されたタングステン製制御棒の反応度価値測定¹³⁾があり、その測定と解析の結果は米国 NRC のライセンスにも利用された。

タングステン製の制御棒は、運転中の反応度の微調整や負荷追従の反応度調整に使用するので、通常の制御棒より反応度価値が小さく、いわゆるグレイロッドと呼ばれる種類のもので

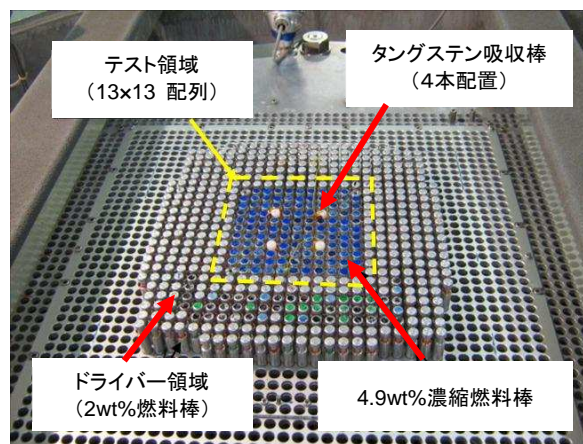


図-7 タングステン吸収棒の実験炉心

ある。図-7はタングステン吸収棒に関する NCA 実験の炉心体系である。実験炉心の中央のテスト領域に 4 本のタングステン吸収棒を挿入して、臨界水位差法によりタングステン吸収棒の反応度値を評価した。

3. NCA における人材育成活動について

原子力の人材育成の必要性が高まる中、研究炉等の減少のため学生等が原子炉物理を体感できる施設が不足した背景から、NCA では学生等を対象に炉物理実験への参加と関連する理論講義を併せて行う実習を 2007 年度から実施している¹⁴⁾。2014 年度までに大学生、大学院生、高専の学生など約 350 名が実習に参加した。図-8に実習風景を示す。

NCA での実習は、対象が高専生から大学院生までと範囲が広く、必ずしも炉物理に関する知識が十分でない場合もあるため、臨界近接やペリオド測定を基本とした原子炉の運転を体感するレベルから金箔放射化測定を行って中性子束分布を測定するレベルなど、対象



図-8 NCA での実習風景

に応じた内容の工夫を行っている。また、アラーム・スクラムやインターロック等の機能の確認も行い、安全に配慮した装置の設計についても理解されるよう努めている。

実習の内容と成果は、平成 23 年度日本原子力学会関東・甲越支部表彰や文部科学省の国際原子力人材育成イニシアティブ事業の事後評価で S 評価となるなど、原子力の人材育成として良い評価を受けている。

4. おわりに

NCA は運転開始以来、炉物理分野の研究・開発を長きにわたって続けることができ、近年では教育・人材育成の面でも活動を行ってきました。建設当初から、東芝社内のみならず関係する各方面、特に原子力学会、炉物理部会の方々から多くの助力ならびに有益な助言を頂いてきたことに、この場を借りて感謝申し上げます。今後も原子力利用に役立つため、できる限りの寄与をしていきたいと思えます。

参考文献等

- 1) 森川辰雄, 橋本弘, 「NAIG 軽水形臨界実験装置(NCA)」, 東芝レビュー18巻11号, p1229, (1963)
- 2) F.Kurosawa, Y.Sekiguchi, T.Yokoyama, “Critical Experiments in a BWR Lattice Using

- NAIG Critical Assembly “, TOSHIBA REVIEW, May. 1972, p.14.
- 3) 菊池司, 吉岡研一, 三橋偉司, 山本宗也, 「BWR 用改良型 9x9 燃料の開発(1)－臨界実験－」, 日本原子力学会 2002 年春の年会予稿集, F15, (2002)
 - 4) A. Fuji, K. Kato, A. Toba, T. Ishida, T. Iwai, H. Nozaki, S. Izutsu, T. Seino, T. Tanzawa, K. Sakurada, “Benchmark Experiments on Poisoned Fuel Rods with High Concentration Gadolinia in BWR-Type Assembly”, Proceedings of Topical Meeting on Advances in Fuel Management, p.431, (March, 1986)
 - 5) 郡司智, 吉岡研一, 熊埜御堂宏徳, 「位置敏感型検出器を用いた軸方向非均質体系での未臨界度測定」, 日本原子力学会 2012 年秋の大会予稿集, Q28, (2012)
 - 6) K. Yoshioka, T. Umano, M. Yamaoka, Y. Karino, J. Casal, M. Ouisloumen, “Critical Experiments for BWR Fuel Assemblies with Cluster of Gadolinia Rods”, Proceedings of PHYSOR 2014, Kyoto, Japan, September 28-October 3, Paper 1104329, (2014)
 - 7) M. Ueda, T. Kikuchi, M. Yamamoto, I. Mitsuhashi, R. Yoshioka, “Critical Experiment on high-worth control blades for BWRs”, Proceedings of International Conference on the Physics of Reactors (Physor96), E-104, (Sep., 1996)
 - 8) 丹沢富雄, 植田精, 黒沢文夫, 吉岡律夫, P.J. Savoia, P. van Dieman, 「BWR 長寿命制御棒に関する臨界実験」, 日本原子力学会昭和 57 年年会予稿集, C19, (1982)
 - 9) P.J. Savoia, P. van Dieman, T. Tanzawa, K. Sakurada, R. Yoshioka, “Critical Experiments on Advanced BWR Control Blade Materials”. Trans. Am. Nucl. Soc. , 41, p.583, (June, 1982)
 - 10) 植田精, 丹沢富雄, 吉岡律夫, 豊吉勇, 「フラックストラップ型 BWR 用 Hf 制御棒の臨界実験」, 日本原子力学会昭和 62 年秋の大会予稿集, D46, (1987)
 - 11) M. Ueda, T. Tanzawa, R. Yoshioka, “Critical Experiments on a Flux-Trap-Type Hafnium Control Blade for BWR”, Trans. Am. Nucl. Soc., 55, p.616, (Nov, 1987)
 - 12) T. Umano, T. Kikuchi, K. Yoshioka, I. Mitsuhashi, H. Kumanomido, S. Gunji, S. Sugahara, K. Hiraiwa, M. Ouisloumen, “Critical Experiments Simulating The Operating Conditions of PWRs in The Toshiba NCA Facility”, Proceedings of 9th International Congress on the Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'09), Paper9521, (2009)
 - 13) 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)
 - 14) 菊池司, 吉岡研一, 熊埜御堂宏徳, 馬野琢也, 秋山昌秀, 増山忠治, 平岩宏司, 荒川秋雄, 桜田光一, 松宮浩志, 「高専・大学と企業連携による原子力人材育成 (平成 22 年度－平成 24 年度): (1)臨界実験装置による炉物理実習/(2)原子力の危機管理に関する教育」, 日本原子力学会 2013 年春の年会予稿集, E25-E26, (2013)