

材料部会セッション

照射炉利用関連研究開発の現状と国内照射炉の必要性（１）

Current Status of Research and Development Relating to Irradiation Tests and Necessity of Domestic Materials Testing Reactor ~Part I~

（４）軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設の役割

(4) The Role of Materials Testing Reactors and Post Irradiation Examination Facilities in the Development of Light Water Reactor Fuels

*坂本 寛¹¹NFD**1. はじめに**

軽水炉燃料には高い信頼性が要求されるため、その開発には幅広い知識が必要となるだけでなく、安全性を含めてその性能を事前に実証することが必要となる。我が国で使用されている商業用軽水炉燃料も 1970 年代から信頼性向上を主な目的とした本格的な開発が始まり、1980 年代以降は経済性向上、高性能化を実現するための開発が精力的に行われてきた。近年では、2011 年の福島第一原子力発電所事故の教訓から事故に対してより耐性を高めた事故耐性燃料 (Accident tolerant fuel: ATF もしくは Enhanced accident tolerant fuel: EATF) の開発も取り組まれている。

軽水炉燃料は当然のことながら高温高压の水/水蒸気、高照射環境において年オーダーの長期にわたり燃料として使用される。そのため、その性能の実証には熱機械解析に代表される使用環境における燃料ふるまい予測と先行使用燃料 (Lead use assembly: LUA) の照射後試験に代表される試験的実証を組み合わせてきた。この燃料ふるまい予測と試験的実証において、高照射環境を模擬するための照射試験炉と照射により放射化した燃料・材料を調べる照射後試験施設が重要な役割を果たしてきた。

以降では、これまでの軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設が果たしてきた役割の例を紹介するとともに、例として現在実施されている ATF 開発において今後必要となる役割について述べる。

2. 軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設の役割**2-1. 軽水炉燃料開発における照射試験炉と照射後試験施設が連携した例**

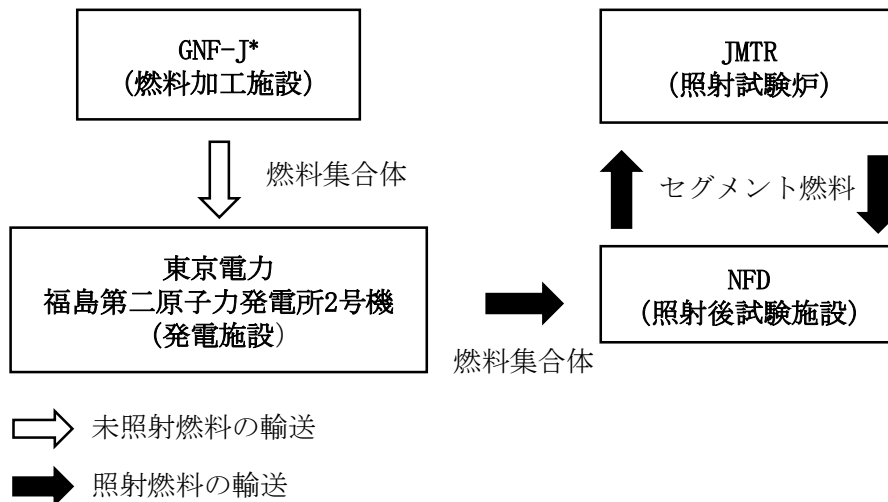
これまでの軽水炉燃料開発の概要については参考文献 1 等にまとめられているが、本稿では国内照射試験炉と国内照射後試験施設が連携して軽水炉燃料開発の役割を果たした例を紹介する。具体的には昭和 61 年度から開始し平成 13 年度に終了した「高燃焼度等燃料安全性試験」において実施された、(1)沸騰水型原子炉 (Boiling water reactor: BWR) 高燃焼度燃料の LUA 照射試験及び照射後試験と(2)LUA に組み込まれたセグメント燃料を用いた出力急昇試験と照射後試験を紹介する。出力急昇試験は燃料の破損限界を試験的に評価する試験であり、軽水炉燃料の信頼性向上、経済性向上、高性能化のいずれに対しても重要な実証データが得られる貴重な試験である。詳細は参考文献 2 にまとめられている。

事業全体のフロー図を図 1 に示している⁽²⁾。「高燃焼度等燃料安全性試験」では、燃料加工施設で製造された 8 体のステップ II 燃料集合体を福島第二原子力発電所 2 号機で 1-5 サイクル炉内燃焼させ、サイクル毎に NFD に輸送して照射後試験を実施して照射後試験データを取得した。また、3 サイクル以上炉内燃焼した集合体については、NFD において燃料集合体から採取したセグメント燃料を材料試験炉 (Japan materials testing reactor: JMTR) において出力急昇試験を実施して出力急昇試験データを取得し、出力急昇試験後のセグメント燃料を NFD にて照射後試験を実施して照射後試験データを取得した。本稿では、セグメント燃料を NFD から JMTR に輸送した以降のフローのみを取り上げる。

図 1 に示したように NFD と JMTR の間でセグメント燃料の輸送を行っている。出力急昇試験におけるセグメント燃料のふるまいを詳細に調べるために、出力急昇試験前後において出力急昇試験中に起こる変化 (塑

性変形、ガス放出、外観変化等)を評価するための数多くの試験を実施した。また、出力急昇試験では出力急昇試験中の試験条件及び破損による冷却材放射能上昇をその場計測した。

試験データや試験結果については参考文献 2 に譲るが、出力急昇試験では照射後試験施設、照射試験炉の両施設が高い精度、信頼性をもった試験データを採取することで初めて試験結果が得られる。「高燃焼度等燃料安全性試験」では、被覆管外面からの破損という新たな破損形態が観察され、その後その機構解明を目的とした研究が実施されたが⁽³⁾、出力急昇試験前後の試験データと出力急昇試験中の計測データの全てが高い精度、信頼性を持っていたことがその機構解明に大いに寄与した。また、数多くの出力急昇試験を実施することができたが、これは照射試験炉(JMTR)と照射後試験施設(NFD)が隣接していたために輸送が比較的容易であったという物理的な面の寄与も実施を可能とした要因の一つであった。



※:株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン
 (当時は設計が株式会社日立製作所、製造が日本ニュークリア・フュエル株式会社)

図1 高燃焼度等燃料安全性試験の事業全体のフロー図⁽²⁾

2-2. ATF 開発における照射試験炉と照射後試験施設の役割

前節では国内の照射後試験施設と国内照射試験炉が連携した好例を示したが、現在進められている ATF 開発においても照射後試験施設と照射試験炉が必要である。ATF として国内外で開発されている候補材はこれまでのジルカロイ-UO₂系燃料だけではなく、SiC/SiC や FeCrAl-ODS 等の全く新しい被覆管材や UN 等の新しい燃料材を使用するものも含まれており⁽⁴⁾、基礎的な物性データの取得から必要な場合も多く、当然のことながら照射による物性変化も必要な物性データであり、これまで以上に照射後試験施設と照射試験炉を利用する必要がある。

国内の ATF (被覆管材) の開発状況であるが、概ね照射試験炉、照射後試験施設の両者が必要な段階であり⁽⁵⁾、至近の課題として材料照射試験、模擬燃料棒照射試験及びその照射後試験が必要であることが明確である。しかし、JMTR の廃炉が決定した現状では少なくとも国内だけでの実施は困難となっており、海外照射試験炉の利用を前提とせざるを得ない。

3. 国内照射試験炉と国内照射後試験施設への期待

前章で示した様に、ATF 開発においては至近の問題として材料照射試験、模擬燃料棒照射試験及びその照射後試験が必要であり、そのためには照射試験炉、照射後試験施設の両者が必要であるが、少なくとも照射試験炉としては海外施設を利用せざるを得ない。この状況における短期的、長期的課題を以下に考察する。

(1) 短期的課題

種々の課題があると思われるが、主な課題は照射試験の実施機会が減少することであり、その影響は照射

した燃料・材料の輸送を伴う場合にはより顕著である。特に照射した燃料の輸送を伴う場合には、輸送の費用負担が大きく実施機会も限られるため、結果として実施機会が大幅に減少してしまうことを意味する。なお、材料照射試験の場合、未照射材料を海外照射試験炉に送付し、海外照射試験炉で照射された試験材を国内照射試験後施設に返送して照射後試験を実施することも可能である。しかしながら、照射試験材の国境を跨いだ輸送が必要なため予定通りに実施できない懸念があり、海外照射後試験施設において試験データを採取せざるを得ない場合もある。一方、種々の条件を整えば、海外照射試験炉、海外照射後試験施設を利用することで、より効率的に試験データを採取できるが、これら海外施設の利用のみが選択肢では照射方法や時期についての自由度が低下してしまう。

(2) 長期的課題

短期的課題において述べたが、国内照射試験炉が利用できない状況が続くと照射試験の機会が減少してしまうことに加えて、国内照射後試験施設を利用する機会も減少することになる。この状況が続くと、長期的には国内照射後試験施設における継続的な照射後試験が困難となり、最終的には国内照射後試験施設の維持も困難となる。すなわち、国内照射試験炉の問題は国内照射後試験施設の存続にも密接に繋がっており、国内の照射試験技術・知見が散逸するだけでなく、照射後試験を通じて得られてきた照射後試験技術・知見も散逸してしまうことを意味する。このような状況では、照射燃料・材料に精通した人材を育成することを期待することは困難であり、長く続けられてきた国内軽水炉燃料開発への影響が懸念される。

これら短期的・長期的課題から、高品質の試験データの採取及び試験データ採取を通じた人材育成が可能な国内照射試験炉と国内照射後試験施設の連携を確保することが期待される。その実現（再生）には、国内照射試験後施設が存続している状況を逃すことなく、至近の問題として燃料・材料の照射試験が可能な国内照射試験炉を検討し、長年培ってきた高度な照射試験技術・知見を礎とした新たな国内照射試験炉の復活が望まれる。

4. 参考文献

- (1) 財団法人 原子力安全研究協会、「軽水炉燃料のふるまい」（改訂第5版）、平成25年3月
- (2) 財団法人 原子力発電技術機構、「平成13年度高燃焼度等燃料安全試験に関する報告書」（BWR高燃焼度燃料 総合評価編）、平成14年3月
- (3) 独立行政法人 原子力安全基盤機構、「平成22年度 高燃焼度燃料破損限界試験成果報告書」、平成24年12月
- (4) OECD/NEA, State-of-the-art report on light water reactor accident-tolerant fuels, NEA No. 7317 (2018)
- (5) S. Yamashita, I. Ioka, Y. Nemoto, T. Kawanishi, M. Kurata, Y. Kaji, T. Fukahori, T. Nozawa, D. Sato, N. Murakami, H. Sato, T. Kondo, K. Sakamoto, K. Kusagaya, S. Ukai, A. Kimura, A. Yamaji, "Overview of accident-tolerant fuel R&D program in Japan", Proceedngs of TopFuel2019, Seattle, WA, Setember 22-27, 2019, 206-216

*Kan Sakamoto¹

¹NFD