これまでをふりかえり、今後を展望する(核燃料部会)

商用軽水炉燃料開発のこれまでとこれから

Past and Future of Commercial LWR fuel development

草ヶ谷 和幸

Kazuyuki Kusagaya

KEYWORDS: Nuclear fuel, Commercial Light Water Reactors

はじめに

60年の歴史を振り返ることは、20年ほどの職歴しかない私には書物¹⁾などに頼らざるを得ないが、約50年前に海外技術を導入して始まったわが国の商用軽水炉燃料について、その開発の大まかな変遷と福島第一原子力発電所事故による変化、および今後の展望について、筆者が身をおく産業界における状況を中心に述べる。

前世紀の軽水炉燃料開発

わが国最初の商用軽水炉は、沸騰水型原子炉(BWR)は敦賀1号炉(1969年臨界)、加圧水型原子炉(PWR)は美浜1号炉(1970年臨界)である。BWR、PWRともに1950、60年代にその原型を開発した米国の技術が、原子炉本体と同様、それに用いられる燃料についても導入された。当時の電力需要の年ごとの増大や石油への高い依存度といったエネルギー事情に対処すべく原子力を国産技術として確立・推進する国策にのって、燃料の基礎研究や製造技術開発も速やかに進められ、1970年代には国産燃料が国内の炉に供給されるに至った。

1980年ごろまでは、軽水炉燃料という新技術の未成熟ゆえに顕在化した諸課題を克服して、燃料の信頼性の著しい向上が図られた時期であった。当時、海外炉等において燃料のさまざまな破損事例(例えば、製造時に燃料ペレットに付着した水分が運転時に被覆管の水素脆化を起こした事象)が発生したが、製造技術や設計の改良によって順次克服された。

1980年代以降は、達成した信頼性の向上を背景に、原子炉利用の経済性向上を目指す技術開発にフェーズが移った。燃料集合体からその寿命中に取り出すエネルギー量の増加、つまり高燃焼度化のための開発が産業界主導で段階的に推進され、開発された新型燃料の商用炉での実証試験が官民協力して実施された。燃料の信頼性を保ちつつ高燃焼度化を図るには、燃料の設計や材料の改良が必要であった。PWR燃料では、例えば、炉内使用環境下での被覆管の腐食を抑制するために従来のジルコニウム合金よりも耐食性を高めた新合金が開発され

た。BWR燃料では、集合体内の燃料棒本数を増やして各燃料棒の負担を抑えるとともに、ペレット-被覆管相互作用による応力腐食割れの対策としてジルコニウムライナ被覆管が開発されるなどした。

2000年頃には、世界的に最も低い破損率を維持しつつ、これらの高燃焼度化の計画を達成した。直面した課題を次々に解決した諸先輩の努力・能力に敬服すると同時に、着実な開発の背景には原子力の興隆期の時代の熱気の後押しがあったことも強く感じられる。

福島第一原子力発電所事故前の開発動向

21世紀に入っても燃料のさらなる開発に向けた検討が続けられた。その概要は、日本原子力学会の「軽水炉燃料の高度化に必要な技術検討」特別専門委員会において検討し作成された「燃料高度化技術戦略マップ2007」と、その後、核燃料部会の「燃料高度化ロードマップ」実行委員会に引き継がれて更新された「燃料高度化技術戦略マップ2008-2009」²⁾に集約された。その戦略マップにおける「燃料高度化」とは、さらなる高燃焼度化による使用済燃料発生量の低減、海外で先行しつつあったプラントの高度利用(炉出力向上、柔軟な運転サイクル対応)によるCO₂排出量の削減、プルサーマル推進によるウラン資源の有効利用、といった公益性向上を図るに際して増大する燃料への負荷に燃料を対応させる、ということであった。その具体策としては、産業界が主体となったさらなる改良被覆管や改良燃料の開発などが挙げられ、それらの実用化に向けたロードマップが学会活動として産官学の共同作業で作成された。燃料高度化に必要な基盤としての試験施設や規格基準などについても議論がなされた。

福島第一原子力発電所事故後の開発動向

東日本大震災とそれに伴う福島第一原子力発電所事故の発生により、その後の安全規制の再構築と強化も相まって、国内の商用炉は一時すべて停止する事態となった。現時点においても再稼働した炉は数えるほどであり、そうした状況下、上述の燃料高度化の計画は白紙と

なった。

他方、福島第一原子力発電所事故では、冷却水を失った炉心においてジルコニウム合金の燃料被覆管が高温水蒸気と反応し、その反応熱により炉心溶融が促進されたとともに、反応により生じた大量の水素が水素爆発の発生につながった。その反省に立ち、これらの事象の抑制を意図した事故耐性燃料の研究開発が世界的に勃興した。欧米が先行するものの、国内においても事故耐性燃料に関する国の研究事業が立ち上げられるなどして、産官学による研究開発が進捗している。高温水蒸気との反応性がジルコニウム合金に比べ桁違いに低い材料(炭化ケイ素複合材、改良ステンレス鋼)を被覆管に適用した燃料の原理的・技術的実証を目指して過酷事故時のみならず通常運転時における材料特性や設計成立性が実験や解析等により調べられ、その成果は近年の当学会の秋の大会等で報告されている。

毎年開かれている軽水炉燃料関連の国際会議 Topfuel/WRFPM においても、昨今は事故耐性燃料に関する報告が多く、海外では上述の材料の他に、金属やセラミクスをコーティングしたジルコニウム合金被覆管や被覆管だけでなく燃料ペレットの革新も着目されている。事故耐性燃料以外では、従前からの研究分野(通常運転時、異常過渡時、設計基準事故時の炉心内での燃料挙動)の他に、使用済燃料が累積する状況を反映し、その貯蔵時の燃料挙動に関する研究が目立ってきている。

今後の展望

総合資源エネルギー調査会原子力小委員会傘下の自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループの要請を受けた日本原子力学会は、安全対策高度化技術検討特別専門委員会において「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」を検討し、平成 27 年 5 月に最終報告した。核燃料部会は、これを受け、核燃料関係の安全性向上に係る課題を掘り下げて検討すべく、部会内に「軽水炉燃料等の安全高度化ロードマップ検討ワーキンググループ」を設置し、活動を進めた³⁾。以前の「燃料高度化技術戦略マップ」とは異なり、安全性向上の観点に特化し、燃料分野での安全性向上をどのように進めていくのかを議論した。燃料の信頼性向上、解析評価技術の高度化、事故耐性燃料の開発といったカテゴリに分けて整理し、現状分析に基づく重点課題の明確化から、課題解決に向けた具体的取り組みの長期計画までを検討した。短・中期的には、開発済の技術(改良材料など)の早期実用化による安全裕度の向上、長期的には事故耐性燃料の実用化による飛躍的な安全性の向上を目指している。このワーキンググループの成果は、今後の燃料開発の貴重な道標となるだろう。

しかし、ロードマップに描いた道筋に立ちはだかる困難は大きい。一つには、国内の原子力発電自体の将来の

見通しの不確かさがある。他電源との競合や電力自由化により従前以上の経済性が原子力発電に求められつつある。また、開発における産業界側のより大きな分担を求める原子力委員会の表明のように国策としての後押しの減退が実感される。これらの状況は、廃炉による国内の燃料市場の規模縮小と相まって、今後の開発投資の困難さを増すものと考えられる。

二つ目には、燃料の技術面でのイノベーションが必要なことである。これまで依拠してきた技術(例えば、ジルコニウム合金被覆管)が事故耐性あるいは高燃焼度化の観点で限界が見えてきており、そこからの脱却が求められている。新しい燃料技術の確立は、材料開発、原子炉での照射試験、商用炉での実証試験を経て実用化までに場合により数十年の長期戦である。しかし、国内外の試験炉の廃炉が決まるなど、開発の基盤となる施設の確保は年々難しくなりつつある。人材の確保についても同様である。

上記の困難を乗り越えるためには、私見では、前世紀後半の興隆期のような開発の強力な原動力あるいは社会の後押しが必要であり、それを得るためには、福島第一原子力発電所事故を経た現在においては、過酷事故を起こさない従来と一線を画した燃料の実現を目指す夢のある開発が切望される。長期的には、固有安全性を持った次世代原子炉をベースとした全く新しい燃料の設計開発を目指す方向の一つだろう。

これまでの利便性を優先してきた社会から、今後は自然災害などに対する強靱性がより重視される社会になっていくと思われるが、原子力発電は災害時に“お荷物”ではなく、むしろ頼りにされるくらいの存在にならなければ、少なくともエネルギー産業としての原子力は社会から必要とされないのではないかと想像したりもする。原子力のいまの緩やかなフェーズアウトの状況の間にイノベーションを発信できるかが問われていると思う。

参考文献

- 1) 「軽水炉燃料のふるまい」改訂第 5 版, (公財)原子力安全研究協会, 平成 25 年 3 月。
- 2) 燃料高度化技術戦略マップの概要について
www.aesj.or.jp/sc/committees/gijiroku/etc/2009-2-2.pdf
- 3) 核燃料部会 軽水炉燃料等の安全高度化ロードマップ検討ワーキンググループ 活動実績
<http://www.aesj.or.jp/~fuel/Events/WG.html>

著者紹介

草ヶ谷和幸 (くさがや・かずゆき)

株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン

(専門分野/関心分野) 燃料挙動解析, 事故耐性燃料