

## ペレット-被覆管機械的相互作用(PCMI)破損しきい値未満で破損した OS-1 燃料の破損原因について (案)

令和 3 年 9 月 9 日  
長官官房技術基盤グループ  
システム安全研究部門

### 1. 背景

設置許可基準規則の解釈第 15 条(炉心等)3 では、反応度投入事象の具体的な評価は、「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象に関する評価指針」(昭和 59 年 1 月 19 日原子力安全委員会決定)等によるとしている。同評価指針の後に発行された「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて」(平成 10 年 4 月 13 日原子力安全委員会了承)においては、反応度投入事象時に燃料がペレット-被覆管機械的相互作用(以下「PCMI」という。)により破損する目安値として、燃料エンタルピを用いて PCMI 破損しきい値を定め、運転時の異常な過渡変化にあつては、燃料破損が生じないように、燃料エンタルピがこの PCMI 破損しきい値を超えないこと、事故にあつてはこのしきい値を超えて PCMI 破損を生じ、これに起因する機械的エネルギーやペレットの微細化が発生しても、原子炉の停止能力及び冷却性並びに原子炉圧力容器の健全性を損なわないことを確認するよう求めている。

燃料安全研究として、海外ではすでに実用化されており、国内でも将来の導入が見込まれる改良型燃料に対して、PCMI 破損しきい値が適用可能であることを確認するために、原子炉安全性研究炉(以下「NSRR」という。)を用いた反応度事故(以下「RIA」という。)模擬実験を委託研究<sup>(1)</sup>で実施してきた。この委託研究の中で、現在まだ国内では使用されていないアルミナとクロミアが微量添加された二酸化ウランペレット(以下「添加型ペレット」<sup>(2)</sup>という。)が装荷され、スウェーデン BWR<sup>(3)</sup>で高燃焼度(64GWd/tU)まで照射された 10×10 型燃料の RIA 模擬実験(以下「OS-1 実験」という。)を実施した。その結果、同燃料(以下「OS-1 燃料」という。)は、燃焼度 40GWd/t~65GWd/tU の PCMI 破損しきい値である 50cal/g より低い 38cal/g で破損した。なお、燃料エンタルピの増分最大値は 69cal/g であった。OS-1 燃料の破損については、第 34

(1) 原子力施設等防災対策等委託費(燃料等安全高度化対策)事業及び原子力施設等防災対策等委託費(燃料設計審査分野の規制研究)事業

(2) 本添加型ペレットは、ウエスチングハウス社により開発され、ADOPT™と呼ばれている。核分裂ガス放出低減効果等が期待され、欧州では実用化されている。

<https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/operating%20plant%20services/fuel/ADOPT-Flysheet.pdf>

(3) オスカーシャム 3 号機

回技術情報検討会(平成 30 年 11 月 21 日)で報告し、破損原因について調査を進めることとされた。

その後、OS-1 実験との比較のために、国内でも使用されている従来型の二酸化ウランペレット(以下「従来型ペレット」という。)が装荷され、OS-1 燃料と同じ 10×10 型燃料集合体内で照射された燃料の RIA 模擬実験(以下「OS-2 実験」という。)を実施した。また、OS-1 燃料の実験後観察等を進め、OS-1 燃料の破損に関する知見が得られ、破損原因を推定したので、その結果を報告する。

## 2. 得られた知見

### 2. 1 OS-2 実験結果

国内でも使用されている従来型ペレットが用いられ、OS-1 燃料と同じ 10×10 型燃料集合体内で燃焼度 63GWd/tU まで照射された燃料(以下「OS-2 燃料」という。)の RIA 模擬実験を実施した。その結果、燃料エンタルピー増分最大値は 62cal/g に達したが、燃料は非破損であった。このことから、OS-1 燃料の破損は、添加型ペレットの特性が関係していると推察できる。

### 2. 2 OS-1 燃料の実験後観察結果等

OS-1 燃料の被覆管断面金相を図 1<sup>(4)</sup>に示す。水素化物を観察するためのエッチングが施されており、黒い筋が水素化物である。被覆管半径方向に析出した水素化物(写真内の矢印)も観察できる。また、水素化物は脆いため、半径方向水素化物に沿って進展したと考えられる貫通亀裂が観察できる。

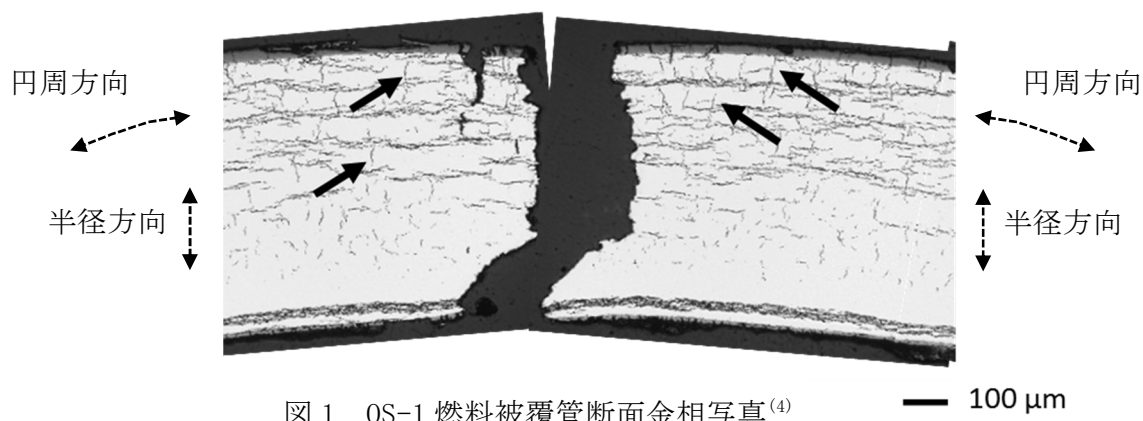


図 1 OS-1 燃料被覆管断面金相写真<sup>(4)</sup>

水素化物は作用する引張応力に対して垂直に析出することが知られている。通常では、図 1 のような多数の半径方向水素化物が生成することはなく、また、BWR での照射(以下「ベース照射」という。)後の OS-1 燃料の直径増加が

<sup>(4)</sup> 平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(燃料破損に関する規制高度化研究)事業

RIA 模擬実験に供した他の BWR 燃料<sup>(5)</sup>に比べて大きかったことから、ベース照射中に被覆管に作用した円周方向引張応力が通常よりも高いことが推察された。そこで、燃料棒挙動解析コードにより、ベース照射中の被覆管応力を解析した。従来型ペレットに比べて添加型ペレットの焼きしまりが小さいこと<sup>(6)</sup>を考慮するとともに、スウェリングが大きいと仮定することによって、OS-1 燃料の直径増加が再現され、ベース照射中に被覆管に作用する円周方向引張応力は、RIA 模擬実験に供した他の BWR 燃料よりも高くなった。この解析結果から、OS-1 燃料ではベース照射中の被覆管円周方向引張応力が通常よりも高かったため、半径方向水素化物が生成したと考えられる。

実験用に切り出した OS-1 燃料及び OS-2 燃料のそれぞれに隣接する位置(以下「リファレンス試料」という。)のペレット-被覆管界面金相写真を図 2<sup>(4)(7)</sup>に示す。図 2 は、ベース照射後の状態を表すものである。OS-1 リファレンス試料からは、ペレットと被覆管が癒着し、ボンディング層が生成していることがわかる。これは、ベース照射中に添加型ペレットと被覆管が強く接触していたことを示唆するものであり、被覆管円周方向引張応力が高かったとする解析結果とも整合する。一方、OS-2 リファレンス試料ではペレット-被覆管界面においてボンディング層は観察できず、ペレット-被覆管ギャップ(空隙)が残存しており、OS-1 燃料ほどの強い接触はなかったものと推測できる。

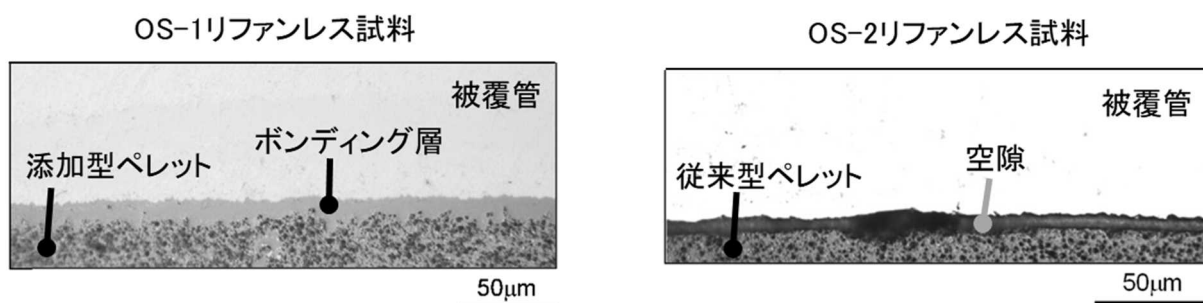


図 2 ペレット-被覆管界面金相写真<sup>(4)(7)</sup>

### 2. 3 OS-1 燃料破損原因の推定

現在までに得られた知見からは、従来型ペレットに比べて、添加型ペレットの焼きしまりが小さく、スウェリングが大きいいため、OS-1 燃料では、ベース照射中に添加型ペレットと被覆管が強く接触し、それによって生じる被覆管円周方向引張応力より半径方向水素化物が生成したと推察できる。

RIA 模擬試験では、急激に熱膨張したペレットが被覆管に接触し、被覆管に円周方向応力を負荷する。ペレット熱膨張量は燃料エンタルピー増分に比例す

<sup>(5)</sup> FK 実験で使用した東京電力福島第二原子力発電所で照射された燃料及び LS 実験で使用したスイス・ライプシュタット原子力発電所で照射された燃料。

<sup>(6)</sup> J. ARBORELIUS, et al., “Advanced Doped UO<sub>2</sub> Pellets in LWR Applications”, J. Nucl. Sci. Tech., Vol. 43, Iss. 9 (2006) 967-976

<sup>(7)</sup> 平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(燃料等安全高度化対策)事業

るが、OS-1 燃料では、被覆管に半径方向水素化物が生成していたため、少ないペレット熱膨張量、つまり、低い燃料エンタルピー増分でも半径方向水素化物に割れが生じ、破損に至ったと考えられる。

## 2. 4 今後の研究計画

OS-1 燃料の破損は、添加型ペレットの特性に依存するところが大きいと考えられるが、メカニズムそのものは、従来型ペレット燃料にも生じうる。また、上記の検討では、添加型ペレットのスウェリングが大きく、被覆管半径方向水素化物は OS-1 燃料のみに生成して、OS-2 燃料では生成していないとの仮定が含まれているが、今後実施するペレット密度測定及び OS-2 燃料の金相観察でそれらを確認できる。そのため、令和 5 年度まで計画している研究の中でさらにデータを取得して、それに基づき、OS-1 燃料の破損原因に関して結論を示すとともに、OS-1 燃料と同程度の燃焼度をもつ従来型ペレット燃料において PCMI 破損しきい値未満での破損が生じる可能性についても検討する予定である。

## 3. 今後の対応

「発電用軽水型原子炉施設の反応度投入事象における燃焼の進んだ燃料の取扱いについて」では、策定当時までに得られた NSRR での RIA 模擬実験結果に加えて、米国及びフランスでの実験結果も考慮して、PCMI 破損しきい値が決められたが、特異な例については検討対象から除外している。

現在までに得られた知見からは、OS-1 燃料は、国内で現在まだ使用されていない添加型ペレットの特性により PCMI 破損しきい値未満で破損したと推定されるため、現状では、PCMI 破損しきい値の改定は必要ないと考えられる。今後の研究において蓄積される知見をもって、改めて、PCMI 破損しきい値の改定の要否について検討する。