



令和4年度
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門
合同研究成果報告会

冷却材喪失事故条件下における 燃料細片化メカニズム及びそのしきい値に関する研究

令和4年11月22日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 安全研究センター
燃料安全研究グループ

三原 武

本研究は平成30年度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、平成31年度同委託費(燃料破損に関する規制高度化研究)事業、及び令和2年度同委託費(燃料破損に関する規制高度化研究)事業の成果である。

背景

冷却材喪失事故

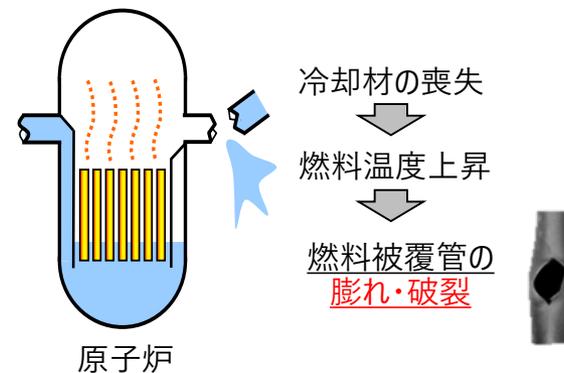
(loss of coolant accident: LOCA)

- 配管の破断等によって炉心から冷却材が流出し、燃料棒が露出する事故

LOCA時の燃料挙動の安全性評価

- 要求事項：LOCA時に炉心の冷却が可能な形状を維持

*要求事項を満たすため、非常用炉心冷却系（ECCS）の性能評価指針が定められ、これに沿って軽水炉の設計が行われている。

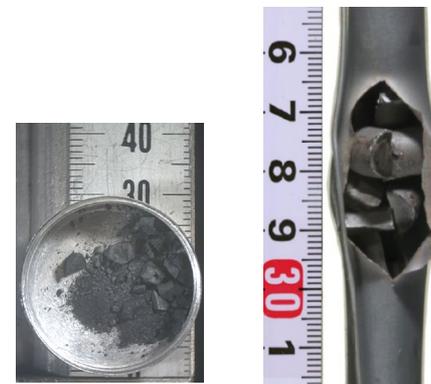


冷却可能形状維持についての懸念が示されている、高燃焼度燃料で着目されている現象

- LOCAを模擬した試験において、燃料被覆管の破裂時に燃料ペレットの細片化・再配置及び放出（fuel fragmentation, relocation, and dispersal: FFRD）が観察された¹⁾。

FFRDに関連した安全課題

- 膨れ部で細片化燃料の集積による局所出力の上昇
 - 被覆管の温度や酸化が局所的に上昇
- 開口部から放出し、原子炉底部において堆積した燃料の冷却性



燃料ペレットの細片化¹⁾と被覆管破裂開口部への集積²⁾

1) RIL 2021-13.
2) Raynaud P., NUREG-2121 (2012).

背景及び目的

FFRD現象についての先行研究

- FFRD現象はLOCAを模擬した試験により燃焼度に依存することが報告されている。燃焼に伴う現象に起因していると考えられているが、FFRD現象後の結果に基づく分析のため多くの因子が予想され、個別の現象についてさえメカニズムは明らかになっていない。
- 燃料細片化挙動に着目すると、被覆管付きの燃料を使用した試験であり、被覆の有無が燃料細片化挙動に影響を及ぼしたかは不明である。また、燃焼に伴う組織変化（FPガス蓄積）が細片化に影響を及ぼした可能性が考えられるが、微細組織の状態と細片化の関連について明らかになっていない。

目的

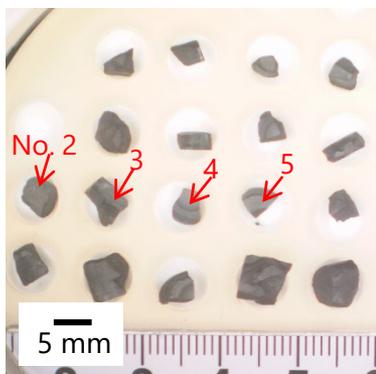
- LOCA中の細片化について被覆の有無の影響を調べる。細片化の温度しきい値や細片化状態と微細組織の関係から細片化メカニズムを明らかにする。

方法

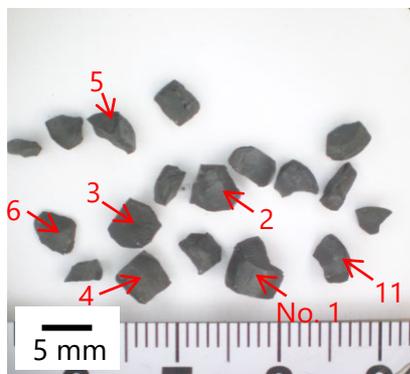
- JAEAの燃料試験施設にて、商業炉で高い燃焼度まで照射された燃料から被覆管を取り除いた裸の燃料ペレット片を対象とした炉外昇温試験を実施し、試験中におけるFPガス放出や試験後の細片化有無を確認する。試験前後にペレットの外観や微細組織を観察する。

対象燃料試料

燃料タイプ	被覆管	照射炉	セグメント 平均燃焼度
PWR 17×17 UO ₂	M-MDA (SR：応力除去焼鈍)	Vandellos-2	73 GWd/tU 81 GWd/tU

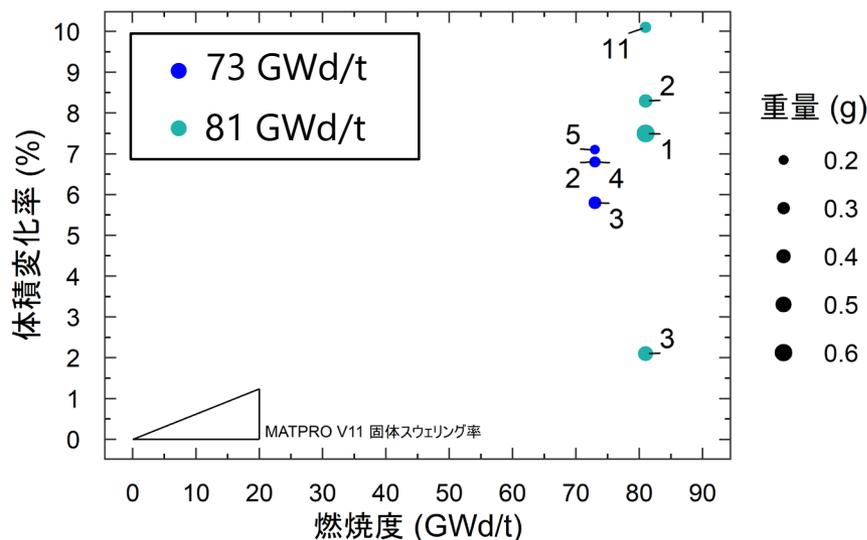


(1) バンデロス燃料
(73 GWd/tU)



(2) バンデロス燃料
(81 GWd/tU)³⁾

採取した燃料ペレット片の外観



燃料ペレット片の体積変化率の燃焼度依存性

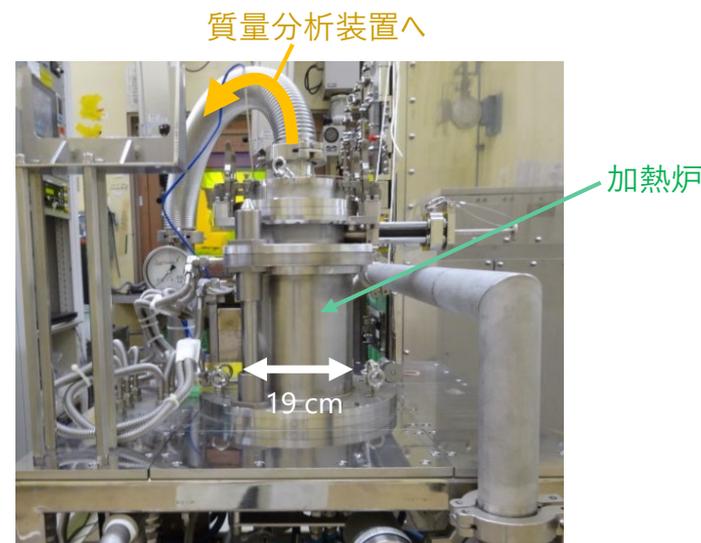
(体積変化率(%)) = (製造時密度 - 照射後密度) / 照射後密度 × 100

炉外加熱試験の概要

- 加熱条件及び分析方法
 - 973 Kから1473 Kまでの範囲の到達温度での昇温(5K/s, 15K/s)及び降温のサイクルを1回あるいは数回実施し、それぞれの試験中におけるFPガス放出や試験後に細片化の有無を確認する。
- 加熱試験装置：アウトガス分析装置（OGA）
 - 燃料ペレット（製造時のペレット約1個分）をLOCA時の燃料温度履歴を模擬した条件にて加熱可能
 - 四重極質量分析装置を備えており、試験時のFPガス放出のタイミングをリアルタイムで計測可能

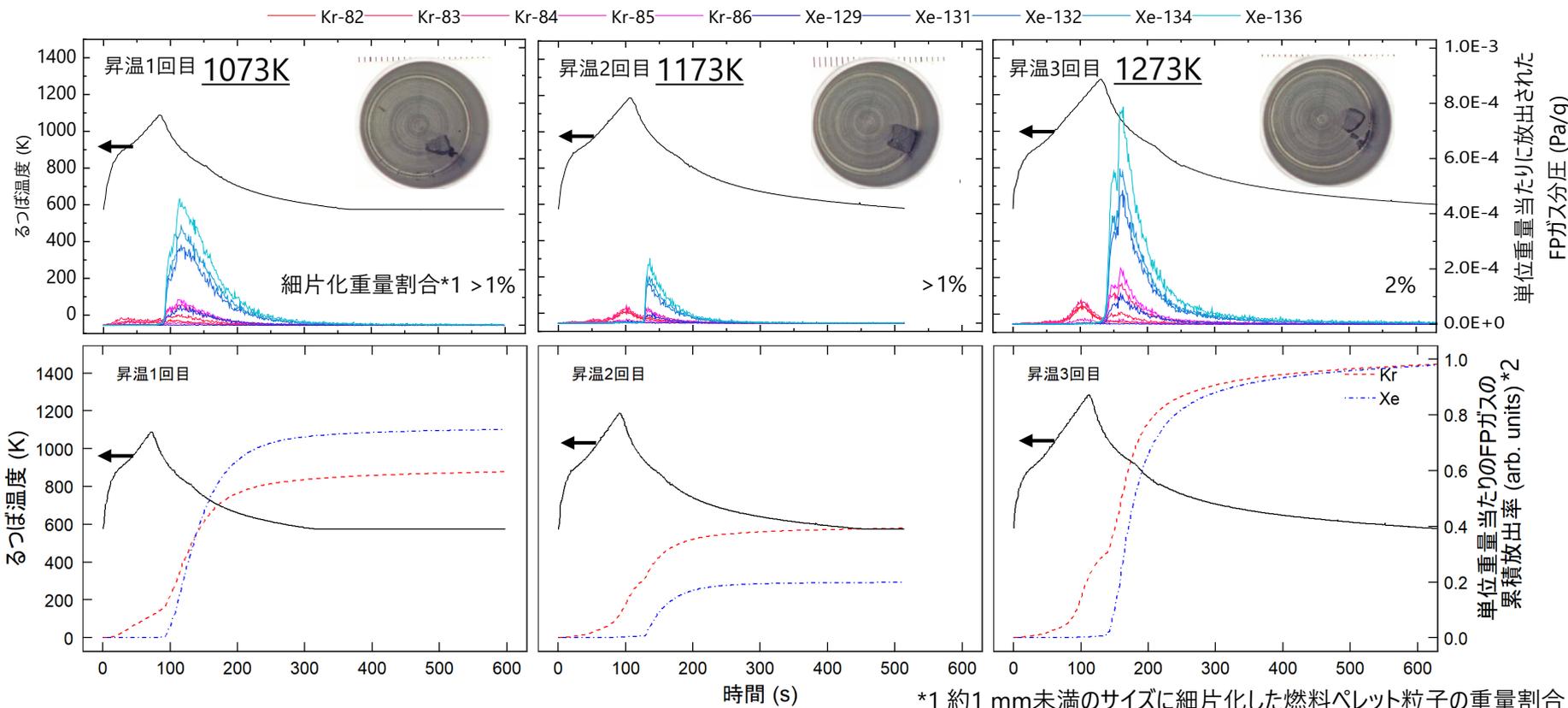
OGAの主な仕様

加熱方法	高周波誘導加熱方式 (間接加熱)
加熱雰囲気	真空
るつぼ材質	タングステン
るつぼ温度計測	放射温度計
質量分析法	四重極質量分析



OGAの外観

るつぼ温度及びFPガス放出の時刻歴 (バンデロス燃料 (81 GWd/tU) No. 4)



●FPガス放出量及び試験後に細片化した割合は、到達温度1073及び1273Kの試験時に多く、FPガス放出と細片化が同じ到達温度条件で確認された。

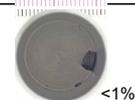
→細片化に伴いFPガスが放出したと考えられる。

●1073Kでは1273Kに比べ、XeのKrに対する割合が大きかった。

→Xe/Kr比は外周部で高いことを考慮すると、外周部から細片化したことを示唆

加熱試験後のバンデロス燃料 (81 GWd/tU) の外観

(表内数値は約1 mm未満のサイズに細片化した燃料ペレット粒子の重量割合)

Specimen ID	Terminal temperature (K)				
	973	1073	1173	1273	1473
No. 1			 3%		
No. 2				 3%	
No. 3		 0%	 0%	 0%	
No. 4		 <1%	 <1%	 2%	
No. 5					
No. 6					
No. 11		 <1%	 1%	 4%	

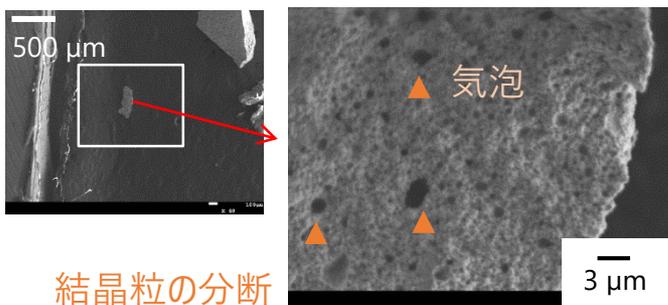
商業炉での燃焼に伴う
体積変化率が極端に
小さかった

重量割合評価
未実施

- 到達温度973-1073 Kで多くが重量割合にして約1%程度の細片化を生じた。
- 到達温度1173-1273 Kを超えると約3%程度の細片化を生じた。
- 73 GWd/tでは顕著な細片化が確認されなかった。

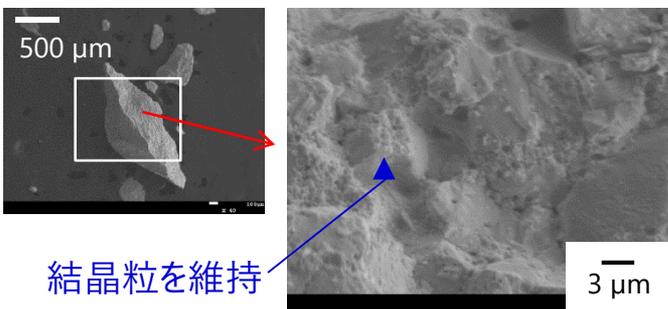
→ 細片化を生じるしきい燃焼度は73-81 GWd/tの間にある。先行研究の被覆有の試験で得られた値 (約55 GWd/t) *よりも高いことから、今回の被覆無の試験では燃料被覆管の膨れ破裂に伴う被覆管拘束力の急激な解放や燃料棒内の急激な圧力減少などが無いことが影響した可能性がある。*RIL 2021-13

試験後微細組織と細片化の関係 (バンデロス燃料 (81 GWd/tU) No. 1の微細組織)



結晶粒の分断

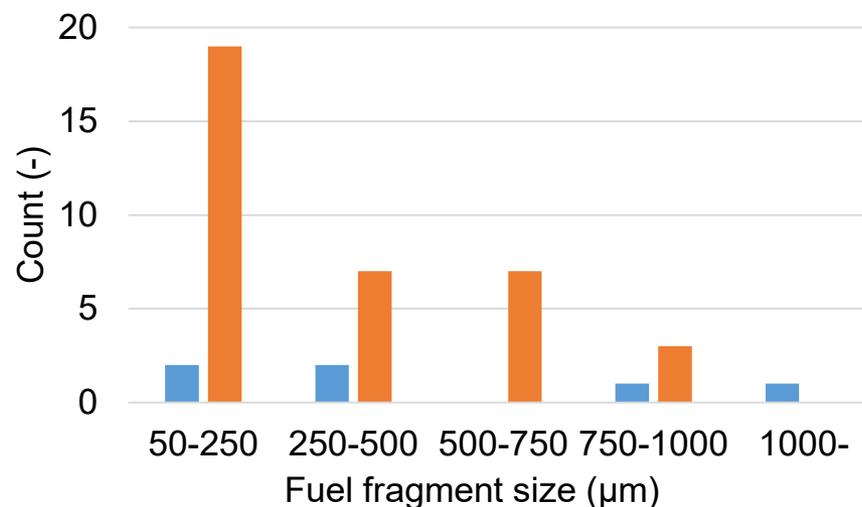
(1) 粒子サイズ < 500 μm



結晶粒を維持

(2) 粒子サイズ ≥ 500 μm

- 製造時結晶粒を維持した組織
- 多数の気泡や分断した結晶粒を含む組織



製造時結晶粒を維持した組織と
分断した組織のヒストグラム

細片化した燃料ペレットのSEM画像

細片化した多くの燃料ペレット粒子において、ダークゾーンないし高燃焼度組織の特徴である多数の気泡や分断した結晶粒からなる組織が特徴的に観察された。

→ 結晶粒を分断するような顕著な細片化は、主としてダークゾーンないし高燃焼度組織に高密度に集積したFPガス気泡によるペレットマトリクスの破壊に起因すると考えられる。

まとめ

商業炉で高い燃焼度まで照射された燃料から被覆管を取り除いた裸の燃料ペレット片を準備し、これを対象とした炉外昇温試験及びその後の外観観察・微細組織観察により、ペレット細片化の温度しきい値やそのメカニズムを検討し、以下の通りの結果を得た。

● 細片化しきい温度

- 微量の細片化：973-1073 K
- より多量の細片化：1173-1273 K

● 細片化しきい燃焼度

- 重量割合にして1%を超える顕著な細片化を生じるしきい燃焼度は73–81 GWd/t（セグメント平均燃焼度）の間にあり、被覆有の試験で得られた値（約55 GWd/t）*よりも高かった。

● 微細組織と細片化挙動との関係

- 顕著な細片化は主としてダークゾーンないし高燃焼度組織に高密度に集積したFPガス気泡による燃料ペレットマトリクスの破壊に起因すると考えられる。

成果の反映

- FFRDに関連した安全性の評価に向けて、ペレットからのFPガス放出や細片化に関して想定されたメカニズムに基づき、シミュレーションモデルを構築する。