

論文の内容の要旨

論文題目 Study on the Transient Fuel Behavior of the Mixed Oxide Fast Reactor Fuel
(高速炉 MOX 燃料の過渡時燃料挙動に係る研究)

氏名 深野 義隆

1. 序論

安全性と経済性を両立する高速炉燃料の実用化に向けては、合理的な燃料破損限界評価手法の整備が必要となる。このためには、燃料の高燃焼度化、燃料設計条件の多様化等に対応し、燃料燃焼度や燃料スミア密度等の燃料条件に依存した破損メカニズム及び破損限界を適切に把握し、評価に反映することが重要である。

既往研究では、高スミア密度燃料を中心とした過渡試験データが存在するものの、データ数も僅少であり、燃料条件、過渡条件の多様化に対応した燃料破損限界を把握できない。また、破損限界評価手法も高スミア密度燃料の過渡試験データに基づいており、多様な設計条件に対応できていない。

一方、燃料製造時の品質のばらつきや照射条件の幅を踏まえると、過出力条件下において代表的な破損限界よりも大幅に低いエンタルピー条件で燃料溶融を伴って少数ピンが偶発的に破損する状況を考慮する必要がある。「常陽」、「もんじゅ」等の既存の高速炉では設計基準事象の範疇で燃料溶融は生じないため、これに対応した既往研究はない。

このため本研究では、国際共同 CABRI 炉内試験計画において過渡試験を実施し、燃料スミア密度や出力上昇速度等が燃料破損限界に与える影響を把握すること、また、既存の炉内過出力試験データを広範に調査し、統一的に分析することにより、燃料条件に依存した燃料破損メカニズムを明らかにすること、さらに、これらの知見を過渡時燃料挙動評価コードに反映させることを目的とした。また、設計条件の多様化に対応し、燃料溶融を伴った偶発的破損を想定した場合にも破損伝播が防止される可能性を実験及びその詳細な評価により確認することとした。

2. CABRI 炉内過出力試験の実施と結果分析

2.1 ランプ型過出力試験

CABRI-FAST 炉内試験計画では、制御棒誤引き抜き事故に相当するような緩慢な炉内過渡試験（ランプ型過出力試験）を4試験実施した。高スミア密度燃料（～90%TD:TD は理論密度）を用いた試験では定格出力の2倍程度で破損する結果となった。この試験では、同種燃料を用いて先に実施された試験（～1%Po/s：初期出力の1%毎秒の出力上昇）に比べ約3倍の出力上昇速度（～3%Po/s）を適用したが、同様の熱条件での破損となり、この範囲においては燃料破損限界に対する出力上昇速度の影響が小さいことを明らかにした（表1）。一方、低スミア密度燃料（～80%TD）を用いた3試験は、全て非破損の結果となり、定格出力の3倍以上の高い破損限界を有することを確認した（表2）

表1 高スミア密度燃料を用いた試験の結果概要

	BCF1	E12
定常時		
最大線出力(kW/m)	47.2	47.4
フィッサイル下端での冷却材温度(°C)	389	386
フィッサイル部の温度上昇(°C)	219	216
過渡時		
平均出力上昇速度(%Po/s)	2.8	0.9
破損時の最大線出力(kW/m)	84.0	81.0
入口流量変化(m ³ /h)	-3.5	-2.5
出口流量変化(m ³ /h)	+2.7	+2.7
入口圧力変化(MPa)	4.8	4.7
出口圧力変化(MPa)	4.9	2.4
破損位置での被覆管温度評価値(°C)	719	719

表2 低スミア度燃料を用いた試験の結果概要

	PFX	PF1	MF2
定常時			
最大線出力(kW/m)	403	414	396
フィッサイル下端での冷却材温度(°C)	380	378	382
フィッサイル部の温度上昇(°C)	174	175	175
過渡時			
平均出力上昇速度(%Po/s)	1.32	1.26	1.20
最大線出力(kW/m)	791	883	1247

2. 2 パルス型過出力試験

一方、短時間により多くのエネルギーが投入されるパルス型過出力試験の結果の分析からも同様に、低スミア密度燃料は高スミア密度燃料に比べて高い燃料破損限界を有していることを確認した。CABRI-FAST 炉内試験計画で実施した高スミア密度燃料を用いた PF2、LT2 試験について、先に実施された高スミア密度燃料の E4、E6 試験と結果を比較した(表3)。同程度の投入エネルギーでも、高スミアの E6 試験が破損の結果であったのに対し、LT2 試験は非破損である。また、共に非破損の E4、PF2 試験では低スミアの PF2 試験の方が投入エネルギーが高いにもかかわらず、被覆管歪みが小さい結果となっている(図1)。

表3 パルス型過出力試験の結果概要

	E6	LT2	E4	PF2
燃料ペレット形状	中実 ●	中空 ○	中実 ●	中空 ○
燃料スミア密度*	高	低	高	低
投入エネルギー(kJ/g)	1.24	1.26	0.51	0.90
破損/非破損	破損	非破損	非破損	非破損
被覆管歪み	大	中	大	小

※1 高: ~90%TD、低: ~80%TD

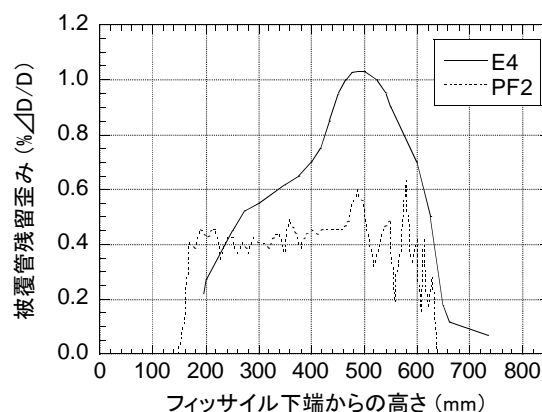


図1 E4試験とPF2試験後の被覆管残留歪みの比較

3. 燃料破損メカニズムの考察

CABRI-FAST 炉内試験結果に加え、過去に実施された CABRI 炉内試験、米国 TREAT 炉内試験等、既存の炉内ランプ型過出力試験データを統一的に分析することにより、燃料スミア密度が燃料破損限界に対する支配因子であることを明らかにした。表4に既存の炉内ランプ型過出力試験の試験条件及び結果の概要を示す。TREAT 試験は TREAT 試験炉の駆動炉心が空気冷却であるため、短時間の過渡となり、制御棒誤引き抜きに相当する出力上昇速度よりも数倍速い条件となっている。このため、燃料の温度上昇に対して冷却材の除熱が遅れ、CABRI 試験と比較して冷却材温度は相対的に低くなる。従って、燃料の破損限界をより適切に表すため、燃料の線出力ではなく、燃料の断面溶融割合の評価値を用いた(図2)。図2に示すように、高スミア密度燃料は20~30%程度の比較的低い断面溶融割合で破損しており、これは、燃料熱膨張や燃料スウェリングによる燃料被覆管機械的相互作用(FCMI)が主体となる破損であり、燃料溶融領域圧力も若干寄与している。これに対して、中~低スミア密度燃料(80~85%TD)は70~80%程度の高い断面溶融割合に至るまで破損していない。これは、中~低スミア密度燃料では、FCMIを緩和するメカニズムが存在し、高スミア密度燃料に比べて高い破損限界を有していると言える。なお、12at.%程度までの現状試験データの範囲では、燃料燃焼度の増加によって大幅に破損限界が低下するような状況にはないこともわかった。

また、このような高い破損限界を有する中~低スミア密度燃料の破損条件はプレナムガス圧程度の負荷での被覆管高温化による強度低下型の破損となることを確認した。図3は中~低スミア密度燃料について、プレナムガス圧相当の被覆管のフープ応力と被覆管温度の評価値をプロットし、被覆材の破断応力と比較したものである。900°C以上のデータはなく、直接の比較は困難であるが、低温側のデータから類推すると、中、低スミア密度燃料の破損データは概略破断応力に近接し、被覆管の高温化に伴う強度低下によってプレナムガス圧相当の圧力で破損していると言える。

表 4 既存炉内ランプ型過出力試験の試験条件及び結果概要

	CABRI			TREAT			
	E12/ BCF1	E9/ E9bis	PFX/ PF1/ MF2	TS-1/ TS-2	CDT-1	CDT-3	CO4/ CO5/ LO3
ペレット形状	中実	中空	中空	中実	中実	中空	中空
燃料スミア密度 ^{※1}	高	低	低	中	中	低	低
被覆材	15-15Ti	316SS ^{※2}	15-15Ti	316SS ^{※2}	HT9	HT9	316SS ^{※2}
燃料ピン外径(mm)	6.55	8.65	8.5	5.84	6.86	6.86	5.84
燃料燃焼度(a/o)	12.6	5.0	6.4	0.2/5.8	12.5	6.3	4.0/9.0/4.0
出力上昇速度(%Po/s)	1/~3	~1	~1	~10	~10	~10	~10
定常線出力(W/cm)	~470	~600	~410	408/ 353	353	385	~420
最大線出力(W/cm)	810/ 840	1347/ 1087	798/ 885/ 1248	1270/ 1200	1609	1732	1230/ 1310/ 1280
破損/非破損	破損	非破損	非破損	破損	非破損	非破損	破損

※1 高：~90%TD、中：~85%TD、低：~80%TD ※2 物性は若干異なる

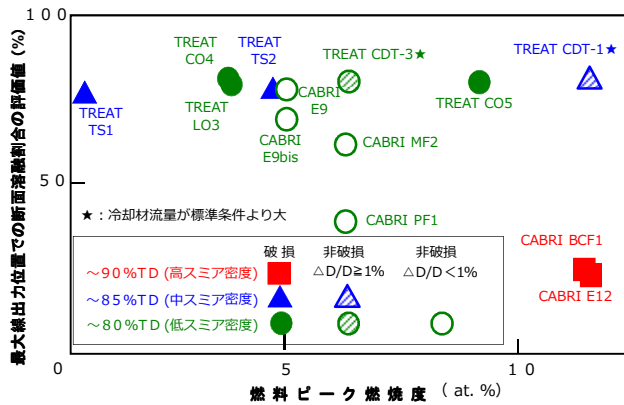


図2 各種スミア密度燃料の最大出力位置での燃料断面溶融割合の評価値

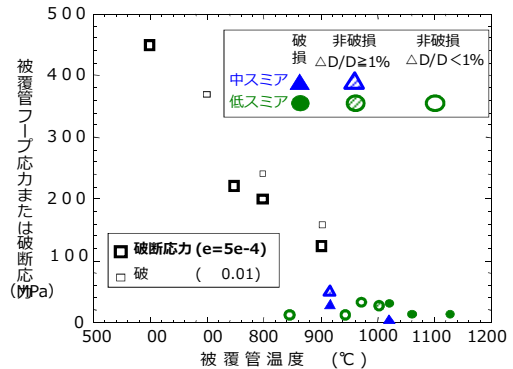


図3 中、低スミア密度燃料の被覆管フープ応力と破断応力

4. 解析モデルへの反映と評価

過渡前の断面金相写真の分析等から、これらの中～低スミア密度燃料の高い破損限界を支えるメカニズムとして、①燃料内の気相空間による燃料熱膨張及び燃料スウェリングの吸収、②自由空間への早期ガス放出による燃料スウェリングの抑制によるFCMIの低減が有力であるとの結論を得た(図4)。そこで、上記メカニズムを過渡時燃料挙動評価コードに経験式の形で反映した。本改良モデル適用前は、低スミア密度燃料を用いたランプ型過出力試験において最大数%程度の被覆管残留歪を計算していたのに対して、改良モデルを適用した結果、実験結果と同様、被覆管残留歪が全く生じない結果が得られた。また、低スミア密度燃料を用いたパルス型過出力試験の結果に対して、改良モデル適用前は被覆管残留歪を過大評価していた(図5)のに対して、改良モデル適用後は全般的に整合性のある評価結果が得られ、スミア密度に依存した過渡時の被覆管変形挙動評価が可能となった(図6)。

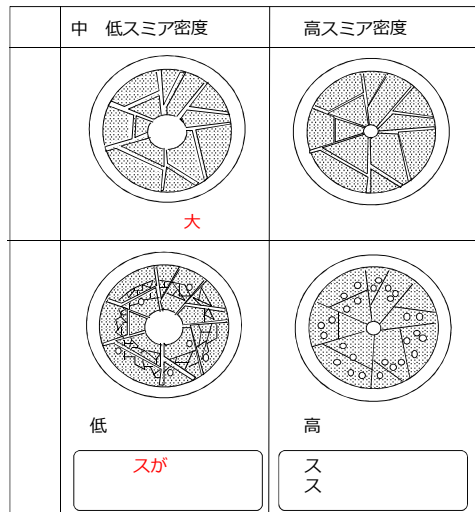


図4 FCMI低減効果の模式図

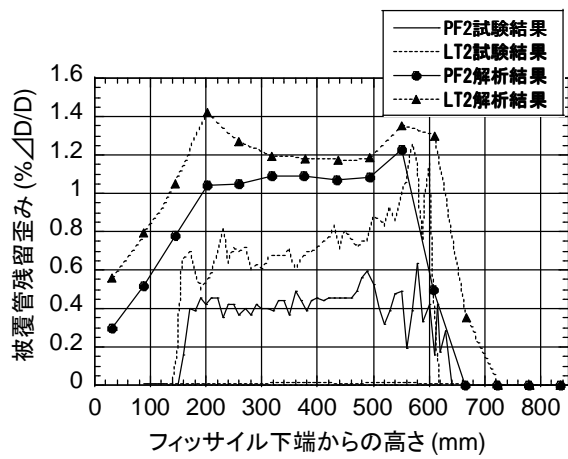


図5 改良モデル適用前の解析結果

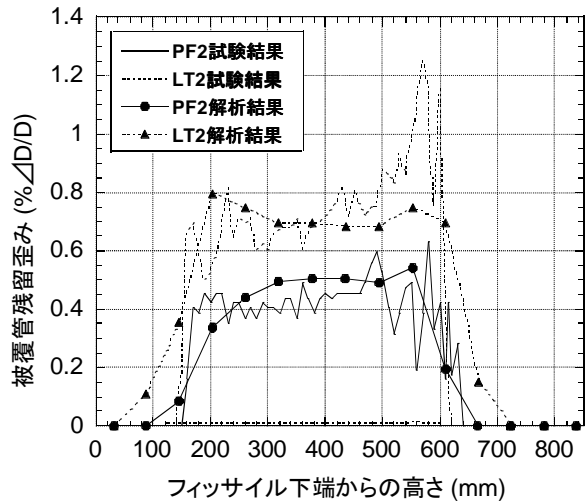


図6 改良モデル適用後の解析結果

5. 偶発的破損条件下での破損伝播の防止

CABRI-RAFT 炉内試験計画では、偶発的破損想定における熔融燃料の放出挙動と放出後の冷却性に関わる基本特性を把握するために RB1 及び RB2 試験を実施した。これらの試験では、図7に示すように、低スミア密度の照射済燃料の被覆管にスリット状の人工欠陥を設け、これを融点が 625°Cの合金で塞ぎ、各々図8に示す過渡条件で核加熱して燃料熔融を生じさせ、その上で冷却材流量減少によって欠陥部分の合金を熔融させて開口型の破損を実現した。

RB1 試験では、図9に示すように、20%程度の断面熔融割合（全燃料の 10%程度の熔融）での開口破損を実現するとともに、有意な燃料放出がないことを確認した。また、スクラム前の有意な燃料放出、ガス放出はなかったことから、10%程度の燃料熔融に対しては、燃料外周部の安定な固相燃料組織が熔融燃料やピン内 FP ガスに対して放出抑制機能を有することを明らかにした。また、開口破損によって冷却材流中へと遅発中性子先行核が移行し、炉心から流れ出した冷却材からの遅発中性子の測定によって異常を検知できる可能性があることを明らかにした。

RB2 試験では、より高い過出力を加えて燃料熔融量を増大させ、全燃料の 20%程度の熔融燃料の放出を生じさせることに成功した。RB2 試験では、熔融燃料の放出直後のごく短時間に破損口近傍で冷却材飽和温度を超えるものの、その後 1~2 秒間は冷却材飽和温度を越えない範囲で推移していることを確認した。このことから、熔融燃料放出量が極端に大きくない場合、周辺に単相冷却材流が存在する実機のピン束条件では、放出された熔融燃料が液相ナトリウムあるいはナトリウム蒸気によって冷却される可能性が高いことが示された。また、RB2 試験は単ピン試験であることから、米国 TREAT で実施された 7 本ピン束試験の結果についても分析し、RB2 試験と同程度の 50~60g 程度の熔融燃料の放出では、冷却材流量はほぼ回復し、ピン束条件でも破損伝播は限定的となる可能性が高いことを確認した。

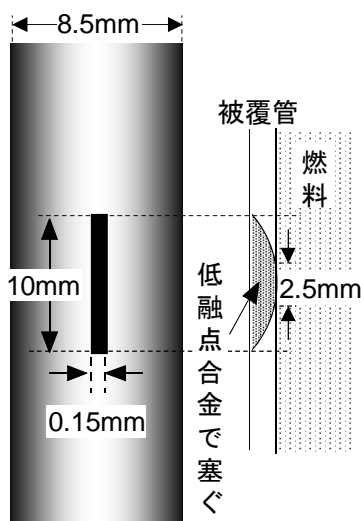


図7 RB1, 2試験の人工欠陥模式図

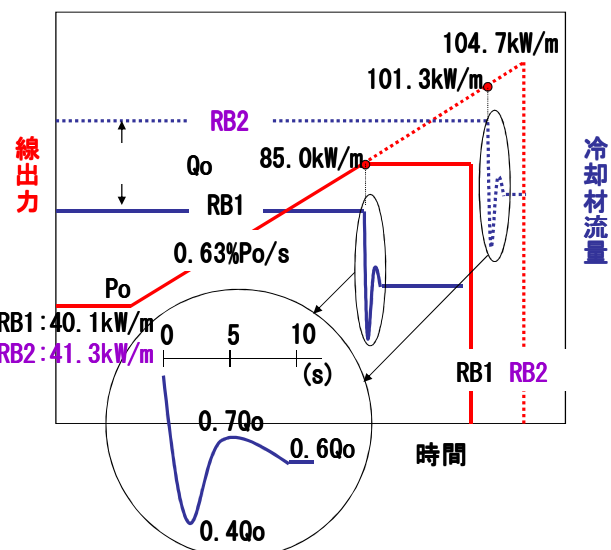


図8 RB1, 2試験の過出力及び流量減少履歴

Niコーティング

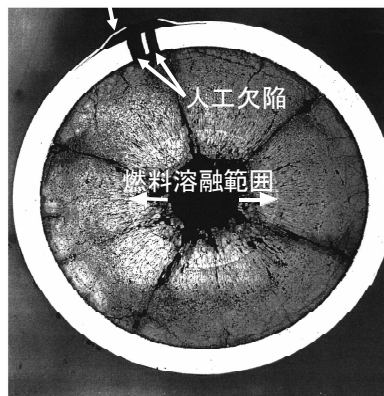


図9 RB1試験後の軸方向中心位置での断面金相写真

6. 結論

国際共同 CABRI 炉内試験計画において過渡試験を実施し、燃料スミア密度や出力上昇速度が燃料破損限界に与える影響を把握するとともに、既存の過出力試験を統一的に整理、解釈し、燃料スミア密度に依存した破損メカニズム、破損限界を明らかにした。また、燃料スミア密度に依存した破損メカニズムを PAPAS-2S コードに反映したことにより、合理的な被覆管変形挙動解析が可能となった。さらに、燃料溶融を伴った偶発的ピン破損を想定した場合にも、25g 程度の燃料溶融に対しては冷却材中への溶融燃料放出が抑制されること、有意な燃料放出がなくとも遅発中性子の観測によって異常状態を検知できる可能性があること、及び 50 g 程度の燃料放出があっても冷却材によって冷却され、破損伝播が防止される可能性が高いことを確認した。