

<概要>

高速増殖炉の炉心燃料は軽水炉に比べ稠密で発熱密度の高い状態で使用される特徴がある。このため、過出力状態や燃料集合体の一部に異物による流路閉塞が形成されることなどにより局所の除熱が低下する状況を想定し、このような異常が拡大せず、異常が検知されて安全に事象が終息することを示す研究がなされている。これまでに、過出力によって燃料を溶融させるような実験を多数実施するとともに、解析コードによる評価研究を進め、適切な設計と異常の検知によってこのような事故の影響が局所にとどまり、全炉心への波及を防止できることを確認している。

<更新年月>

2007年10月

<本文>

1. 高速増殖炉燃料の特徴と安全確保の重点

高速増殖炉の炉心燃料はその特徴である高速中性子を効率良く利用するために図1に示すような稠密構造にて使用される。また、伝熱性能の高いナトリウムを冷却材に使用することから、軽水炉に比べて炉心燃料の発熱密度がより高い条件で使用される。このため、何らかの原因で過出力状態に至った場合、あるいは定格出力運転中に燃料集合体内に流路閉塞を形成して局所的な除熱が低下する場合を想定し、このような状況を確実に検知して異常の拡大を防止できる設計とすることが重要である。流路閉塞は、炉心燃料の一部において被覆管が破損し、破損燃料の変形などによって冷却材流路が閉塞する場合と、炉心外部などから異物が侵入して燃料集合体内に閉塞を形成する場合の2つが考えられる。何れの場合にも閉塞範囲が拡大して多数の燃料ピンの被覆管が破損したり、燃料が溶融したりする状況を確実に防止することが重要である。

2. 過出力事象における異常拡大の防止

過出力状態における異常拡大防止のためには、燃料ピンの被覆管が破損を生じる出力と過出力状態が検知される出力の関係を調べ、過出力の検知時点での状態が被覆管破損に対して十分な裕度を有していることを確認することが有効である。そこで、実験用の原子炉内に1本から数本の燃料ピンを設置し、実機において誤って制御棒が引き抜かれる事象を模擬した試験（以下スローTOP（Transient OverPower）試験と呼ぶ）を仏国のCABRI炉（参考文献1）、米国のTREAT炉（参考文献2）やEBR-II炉（参考文献3）を用いて実施した。

表1に代表的なスローTOP炉内試験の例を示す。CABRI炉およびTREAT炉では、定格出力の3倍程度に相当する高い過出力条件を実現できる特長があり、多くの破損データが得られている。一方、EBR-II炉では定格出力の2倍程度までの過出力が実現できるが、多くの照射済燃料ピンは非破損の結果となっており、高スミア密度燃料の一部においてのみ破損が生じている。図2はこれらの試験結果のうち、燃料条件に応じた破損限界把握の観点から重要なデータについて、燃料燃焼度と概略燃料溶融割合の関係に着目して整理したものである。理論密度比85%程度以下の中低スミア密度燃料の破損限界は極めて高く、70%を越える高い燃料断面溶融割合まで非破損の結果となっている。一方、理論密度比90%程度の高スミア密度燃料の代表的な破損限界は20～30%の断面溶融割合となっている。

一方、高速増殖原型炉「もんじゅ」の場合、燃料溶融が生じる前に中性子束検出器などによって過出力状態が検知され、原子炉の自動停止に至ることが確認されている。このことから、高速炉燃料の破損限界は高く、適切な設計によって燃料は十分な健全性裕度を保つことができ、異常拡大が防止できる。

3. 流路閉塞事象における異常拡大の防止

3.1 燃料ピン破損からの流路閉塞

原子炉内の多数の燃料ピン個々の特性のばらつきを考慮すると、定格出力運転条件下において少数ピンが破損する状況を考慮する必要がある。このような燃料ピン破損を起因とした燃料応答を調べるために、人工欠陥を設けるなど意図的に被覆管破損を生じさせ、継続運転条件下での挙動を調べるRBCB（Run Beyond Cladding Breach）試験が米国のEBR-II炉（参考文献4）やベルギーのMOL炉（参考文献5）を用いて実施された。これらの試験から破損燃料ピンから隣接ピンへの破損伝播が生じ難いこと、異常の拡大には数日以上時間を要し、異常拡大の早期段階で燃料から冷却材流中に移行する物質が発する中性子（**遅発中性子**）を炉心外でモニターすることで異常拡大の兆候を検知し、安全に炉停止することが可能であることが示された。

3.2 燃料集合体内への異物の侵入による流路閉塞

従来、流路閉塞の研究は結果の厳しさの観点から平板状の閉塞物を想定し、そのような極端な場合においても短時間の異常拡大に至らないことを示す研究が行われ、異常の検知と炉停止によって影響が炉心全体に及ばないことが確認された。

一方、フランスや日本などで行なわれた閉塞形成試験から、ワイヤースペーサ型燃料集合体体系においては、平板閉塞のような状況は極めて起こり難く、ポーラス状の閉塞がより代表性の高い想定であることが明らかにされた。このポーラス状閉塞は、製作時の切り粉などの混入物、あるいはポンプで粉砕されたルースパーツや離脱したワイヤースペーサなどによって生じると想定される。異物を大量に混入させた閉塞形成試験では、まずワイヤースペーサに沿って異物が蓄積し（従って集合体水平断面内では連続して流路が閉塞されるのではなく千鳥格子状となる）、その部分を中心に異物が流れ方向に厚みを持って集積することが観測された。

このようなワイヤースペーサ型燃料集合体におけるポーラス状閉塞を対象として、閉塞物内外の熱流動特性を明らかにするため、閉塞物を構成する粒子スケールの試験から燃料ピンバンドル体系の試験までスケールを変えた実験研究（CCTL-LF）がなされた。また、各種実験から得られた知見をもとにポーラス状閉塞モデルなどを作成し、燃料集合体熱流動解析コードASFREに組み込むことにより解析手法を構築した。これらの実験ならびに解析で得られた知見に基づくと、ポーラス状閉塞では短時間にピン破損に至るような厳しい温度上昇となる可能性は低く、多数の燃料ピンが同時に破損することはない。また、長期的には燃料ピン破損が生じ得るが、その場合は上記3. のRBCBに代表される緩慢な事象推移となり、異常の検知によって安全に炉停止に至る。

<関連タイトル>

[高速増殖炉のプラント構成 \(03-01-02-02\)](#)

[高速増殖炉の炉心設計 \(03-01-02-04\)](#)

[高速増殖炉の燃料設計 \(03-01-02-06\)](#)

[ナトリウムの特性 \(03-01-02-08\)](#)

[高速増殖炉の安全対策 \(03-01-03-06\)](#)

[高速増殖炉想定事故の安全評価 \(03-01-03-07\)](#)

[高速増殖炉におけるシビアアクシデントの研究 \(06-01-02-08\)](#)

<参考文献>

(1) 佐藤一憲：CABRI試験計画からの主要な知見、原子力学会誌

(2) WRIGHT, A., et al. : Proc. Int. Fast Reactor Safety Meeting, Snowbird, Vol.II, 233 (1990)

(3) TSAI, H., et al. : J. Nucl. Mater. Vol.204, 217 (1993)

(4) LAMBERT, J.D.B., et. Al. : Failed Fuel Monitoring and Surveillance Technique for Liquid Metal Cooled Fast Reactors, Proc. BNES Conference – Fuel Management and Fuel Handling, Edinburgh, UK March 20–22, 1995

(5) WEIMAR, P., ERNST, W. : MOL-7B – An 18-Pin Bundle Operating 200Days Beyond Breach, Nucl. Technol. Vol.57, p.81–89 (1982)

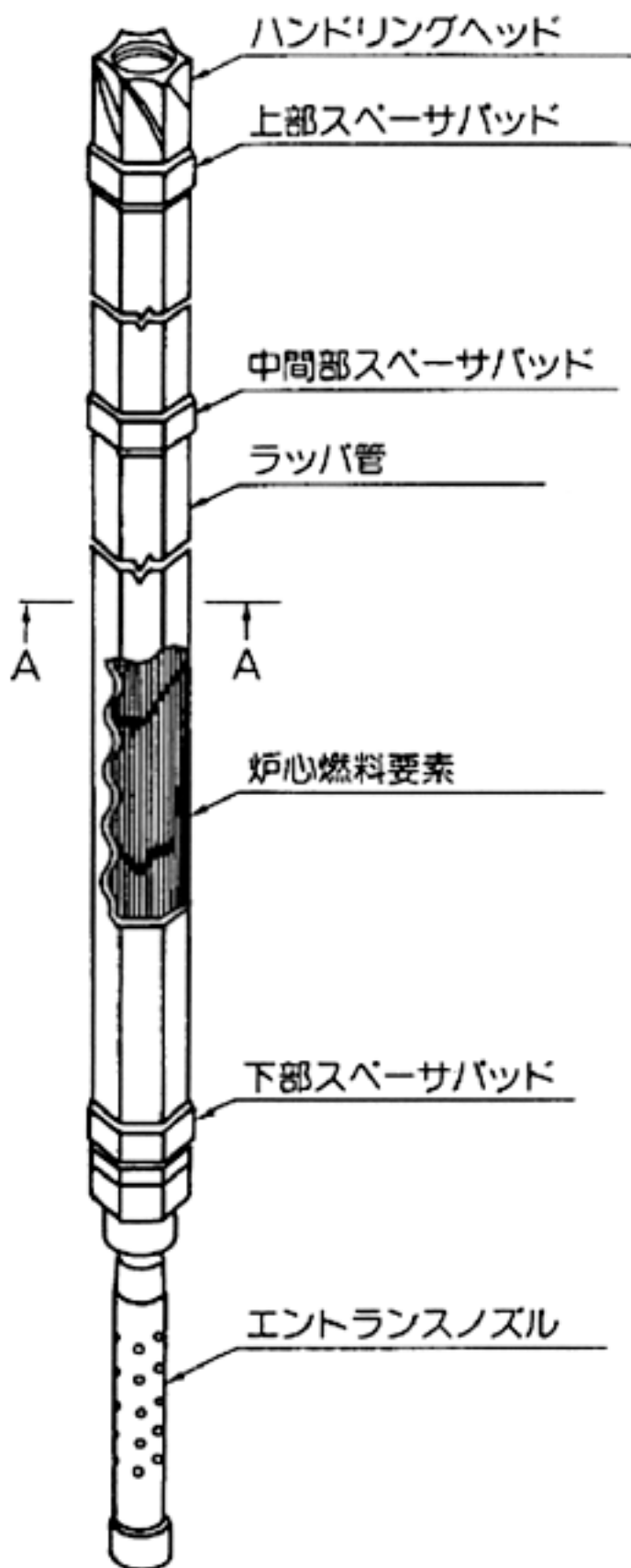
(6) ナトリウム教育委員会：ナトリウム技術読本、核燃料サイクル開発機構レポート、JNC TN9410 2005-011 (2005)

(7) (独) 日本原子力研究開発機構：次世代原子力システム研究開発部門 資料集

表 1 スローTOP条件での代表的な炉内試験の例

	CABRI-2 CABRI-FAST	EBR-II TOP	PFR/TREAT	FFTF/TREAT
試験名	E9, E9bis, E12 BCF-1, PFX, PF1, MF2	TOPI-1A, B, C, D, E	C04, C05, L03	RFT-L2, L3 EBT-3 TS-1, 2 CDT-1, 3
試験ピン仕様	ピン数 : 7本 ピン径 : 8.65mm (中空) 8.5 mm (中空) 6.55mm (中実) 被覆管材 : 316Ti/15-15Ti	ピン数 : 95本 ピン径 : 5.84mm (中実) 7.0 mm (中実) 7.5mm (中実/中空) 被覆管材 : CW316SS, D9, PNC316, PNC1520 PNC-FMS	ピン数 : 9本 ピン径 : 5.84mm (中空) 被覆管材 : CWM316	ピン数 : 11本 ピン径 : 5.84mm (中実) 6.86 mm (中空) 被覆管材 : CW316SS, HT9
燃 焼 度	5, 6.4, 12 atom%	0 ~ 16 atom%	4, 9 atom%	0.2 ~ 12.5 atom%
過出力速度	1, 3 %Po/sec	0.1, 10 %Po/sec	10 %Po/sec	5, 10 %Po/sec
燃料破損ピン数 (過出力レベル)	2本 (E12, BCF-1) (~1.6Po, ~1.8Po) 810, 840W/cm	・ 2本 (1C) (~1.75Po) 490, 550W/cm ・ 2本 (1E) (~1.75Po) 760, 780W/cm	9本 (C04, C05, L03) (~3Po) 1250 ~ 1350W/cm	2本 (TS1, TS2) (3.1, 3.4Po) 1200, 1270W/cm

炉心燃料集合体



炉心燃料要素

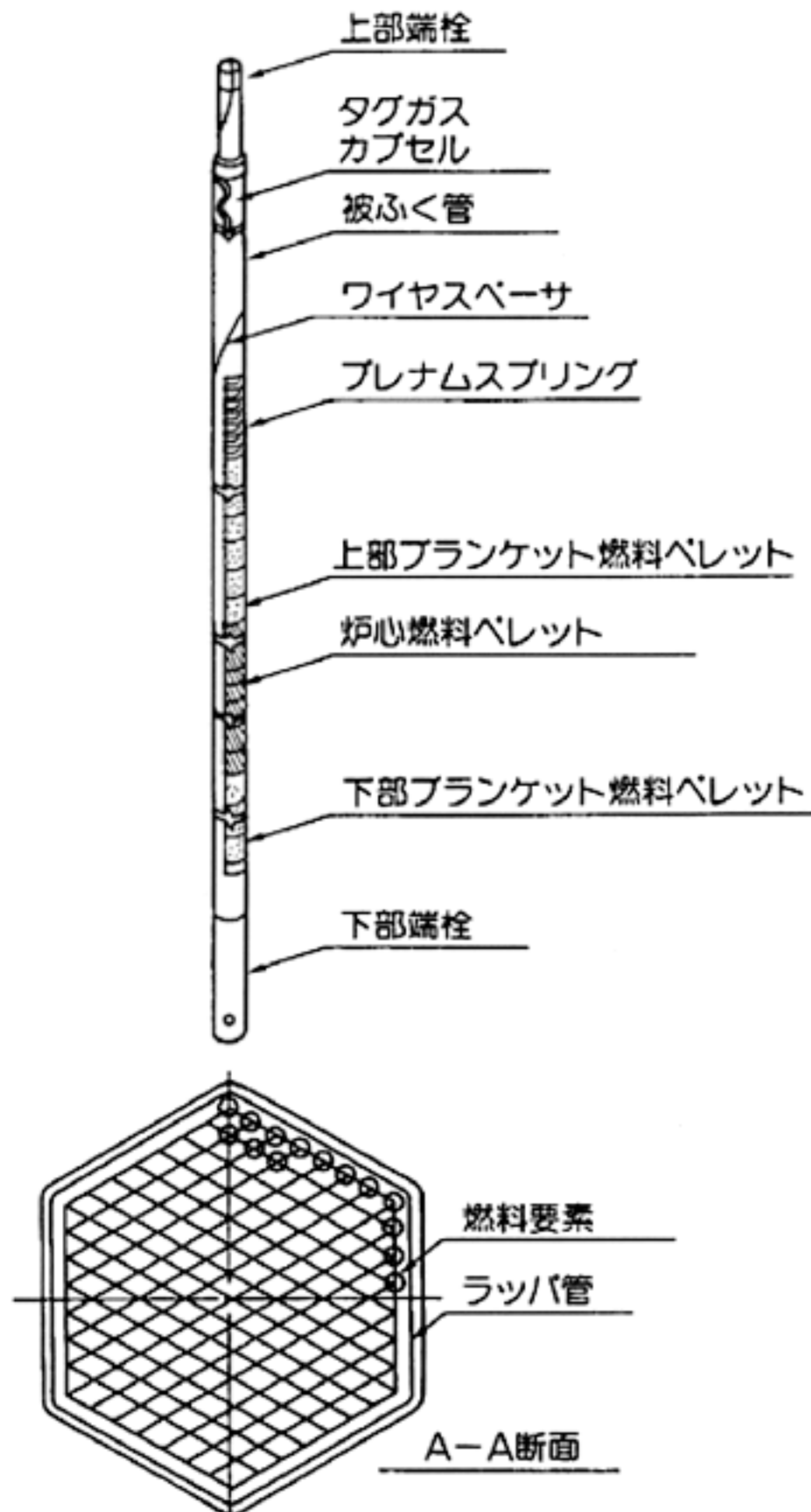


図1 高速炉用燃料集合体の構造

★：冷却材流量が標準条件より大
 #：最大出力位置での概略評価値
 ※：高温強度が相対的に低い被覆材料
 *：中実の低スミア密度燃料

被覆管外径変化率	破損	非破損 ($\Delta D/D \geq 1\%$)	非破損 ($\Delta D/D < 1\%$)
～90%TD (中実燃料)	■	▨	□
～85%TD (中実燃料)	▲	▴	
～80%TD (*は中実 他は中空燃料)	●	⊙	○

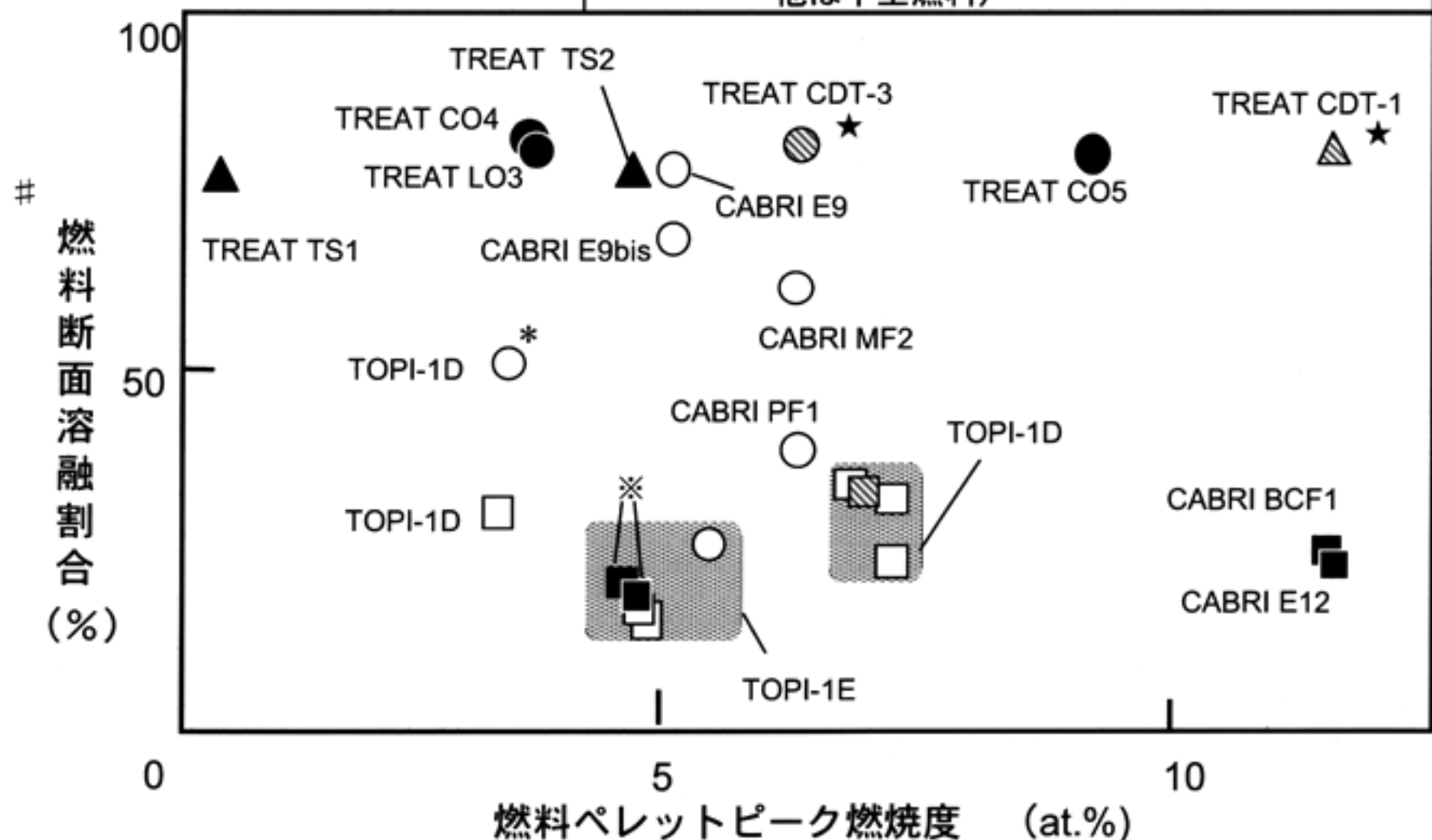


図2 スローTOP試験の結果概要