



CABRI-FAST EFM1試験における 破損後燃料移動挙動

小野田雄一 佐藤 一憲

大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部*

資料番号：7-8

Post-Failure Fuel Relocation Behavior in the CABRI-FAST EFM1 Test

Yuichi ONODA Ikken SATO

Sodium and Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center

CABRI-FAST炉内試験計画（1992～1995年に過渡試験を実施）の中で実施されたEFM1試験（EFMは“Extended Fuel Motion”の意）は、本計画の主要課題の一つである「燃料破損後の継続した加熱条件下での燃料移動挙動の解明」を主要な目的としたものである。本研究では、このEFM1試験の中性子ホドスコープによる燃料移動データや、各部の温度計、出入口流量計等の過渡時データ、及び試験後の破壊・非破壊検査等のデータを詳細に分析し、本試験における燃料崩壊・分散・固化といった一連の物理現象の全体的推移を明確化した。その結果、燃料の軸方向移動を支配する燃料可動性は燃料エンタルピーに強く依存し、緩慢な加熱条件下では可動性が増大する過程でのローカルな移動が生じるものの、顕著な軸方向移動は十分な燃料エンタルピーの蓄積に伴って生じること、及び継続した加熱条件下においては、炉心燃料領域上部に一度形成した燃料閉塞の再溶融や構造材破損によって燃料移動が継続し得ることを確認した。さらに、このような詳細分析によって、今後実施予定の燃料分散・固化挙動にかかわる解析コードを用いた評価の重点課題を明確にすることができた。

The EFM1 (extended fuel motion) test was performed in the CABRI-FAST in-pile experimental program carried out between 1992 and 1995. The aim of the test was to study fuel relocation behavior under a continued fuel heating condition beyond fuel disruption, which is one of the main subjects of the program. In this study, various experimental data such as transient signals from the neutron hodoscope, thermo-couples, inlet/outlet flowmeters, as well as destructive and non-destructive post-test examination results were analyzed in detail. As a result of this study, the event sequence of fuel disruption, dispersal and freezing during the transient have been clarified. We confirmed that fuel mobility is highly dependent on fuel enthalpy. Although local fuel relocation can take place along a gradual increase of fuel mobility under a mild fuel heating condition, significant axial relocation can only take place after the fuel obtain a certain enthalpy level. Under a continued heating condition, pre-formed fuel blockage in the upper region can disappear resulting in further fuel relocation with possible fuel re-melting and structure failure. Another result of this study is that detailed data evaluation, key issues for future study using an analytical model for fuel dispersal and freezing have also been identified.

キーワード

高速炉安全性、ATWS、ULOF、炉内試験、燃料崩壊、燃料移動、燃料分散、燃料固化

FBR Safety, ATWS, ULOF, In-Pile Test, Fuel Disruption, Fuel Relocation, Fuel Dispersal, Fuel Freezing

1. はじめに

高速増殖炉の運転時の異常な過渡変化において、スクラム不作動という工学的には起こるとは考えられない事象（ATWS: Anticipated Transient Without Scram）を想定すると、冷却材沸騰に起

因する出力上昇を生じ、炉心の損傷に至る可能性がある。このような仮想的な事象想定時においても環境への影響が十分に抑制されることを確認しておくことは、高速増殖炉の安全研究として、深層防護の観点からも重要な位置付けを持つ。

サイクル機構では、このような高速増殖炉の安全研究を目的として、仏国安全防護研究所（IPSN）

*現在：大洗工学センター 要素技術開発部
Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

及び独国カールスルーエ研究所（FZK）との共同で、CABRI-FAST試験計画¹⁾を実施した。CABRI-FAST試験計画では1992年～1995年に八つの過渡試験を実施したが、これらの試験の主なねらいは、「中空燃料の破損挙動」及び「燃料破損後の継続した加熱条件下での燃料移動挙動」にあった。このうち、1994年5月に実施されたEFM1試験は後者の目的に焦点を当てた代表的な試験であり、燃料破損後の継続した加熱条件に特徴がある。このEFM1試験の成果を最大限に活用するためには、過渡中の燃料移動挙動の詳細の把握と、これに基づく解析モデルの検証が極めて重要である。

本報告では、このEFM1試験における燃料加熱条件下での燃料移動挙動を重点として、試験結果を詳細に分析評価した結果について述べる。本研究は、今後実施するSAS4Aコード^{2), 3)}を用いた解析評価に先立ち、実験データの詳細分析によって具体的な物理現象の推移を把握するとともに、これに基づいて解析評価で目指すべきポイントを明らかにすることを目的としたものである。

なお、サイクル機構では、IPSN及びFZKとの共同でCABRI-FAST試験の総合評価を行っており、本研究はその一環としてサイクル機構独自に実施したものである。

2. EFM1試験条件の概要

EFM1試験⁴⁾では、表1に概要を示す照射済燃料ピン1本をCABRI炉内のナトリウム・ループ中に設置し、定格運転状態を模擬した最大線出力487W/cmの条件から、流量半減時間約7秒で冷却材流量を減少させた（図1参照）。これにより、冷却材流量減少（LOF: Loss of Flow）開始後約22秒で冷却材の沸騰が開始した。その後、実機での冷却材沸騰が進展した領域を模擬すべく、冷却材沸騰開始後約8秒に、図2に示す3つの出力ピー

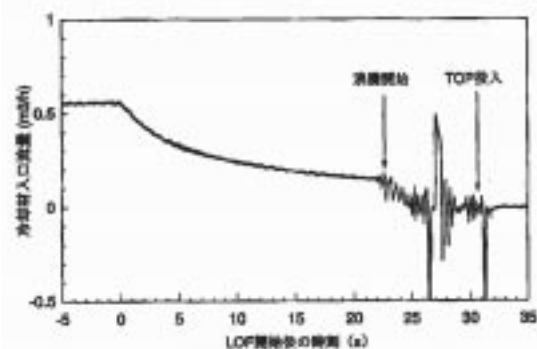


図1 LOF中の冷却材入口流量の推移

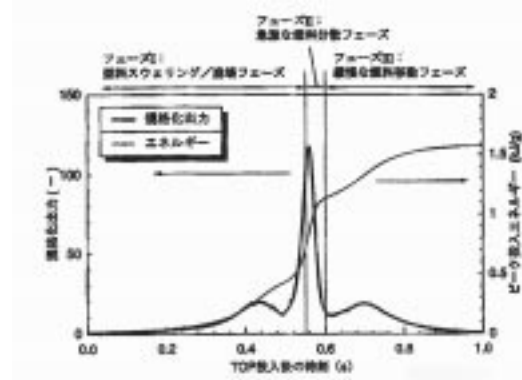


図2 TOP印加中の出力履歴とピーク位置での燃料ビンへの投入エネルギー

表1 EFM1試験に使用した照射済燃料ピンの概略仕様

名称		SCARABIX
フィッサイル長		0.75m
上部ブランケット長		0.03m
下部ブランケット長		0.02m
燃料ピン製造データ (中空燃料ペレット)	燃料ペレット外径	$7.13 \times 10^{-3} \text{m}$
	燃料ペレット内径	$2.03 \times 10^{-3} \text{m}$
	被覆管外径	$8.50 \times 10^{-3} \text{m}$
	被覆管内径	$7.37 \times 10^{-3} \text{m}$
被覆管材料		15-15Ti*
ピーク燃焼度		7.8a/o

* スウェリング低減を図ったフランス製改良オーステナイト鋼

クからなる過出力（TOP: Transient Over Power）を印加した。最大線出力位置である0.44mBFC（m above Bottom of Fissile Column）での投入エネルギーは、第1出力ピーク後で0.43kJ/g、第2出力ピーク後で1.15kJ/g、最終的には1.57kJ/gであった。この投入エネルギーは実機における燃料破損に必要なエネルギーよりも高く、破損後の燃料分散と流路上下方向への燃料侵入挙動を観測するために選定したものである。

図3は試験前後での¹⁴⁴Ceのγスキャン測定結果から燃料の軸方向分布を比較したものであるが、当初のフィッサイル領域（本報でのフィッサイルとはブランケット燃料（UO₂）に対する炉心燃料（MOX）を指す）は燃料の分散によってほとんどが空洞化しており、その上方及び下方に分散燃料が堆積している。

なお、本試験で用いた燃料ピンのフィッサイル長は0.75mであるが、その上下の軸方向ブランケ

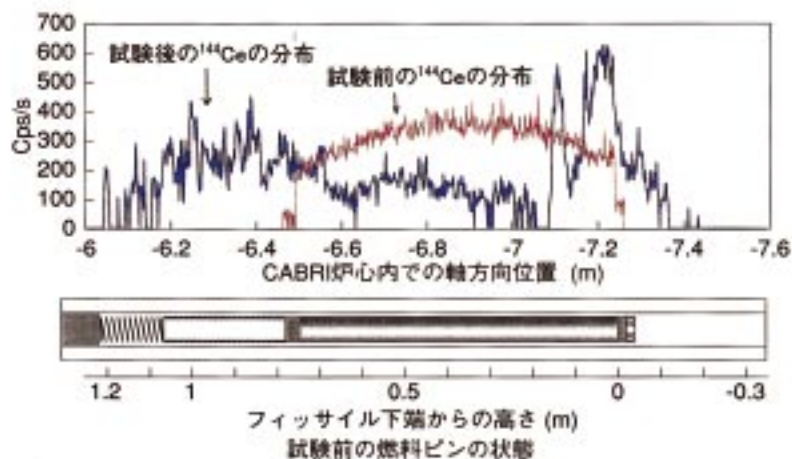


図3 試験前後の ^{144}Ce の γ スキャン測定結果

ット燃料は各々0.03m及び0.02mとなっており、FBRプラントで想定されているもの（通常0.3～0.4m⁵⁾）よりも短い。このようなブランケット燃料の長さは分散燃料の閉塞形成等に影響を与えるため、試験結果の解釈においては注意を要する。

3. 冷却材沸騰後のLOF中挙動とTOP印加時の状態

3.1 冷却材沸騰後のLOF中挙動

図4は本試験データの詳細分析によって得られた冷却材沸騰後の流路中のボイド拡大など、TOP印加までの事象進展の概要を示したものである。この詳細分析は、主に出入口冷却材流量計、圧力

計、温度計、ボイド計のデータに基づいている。

冷却材の沸騰から約3.7秒後には、被覆管の破損とそれに伴う燃料ピン内ガスの冷却材流路中への放出（ブローアウト）が生じている。このブローアウトによって、沸騰領域上下の液相冷却材スラグは各々上下に一度押し出され、その約1秒後に下部の液相スラグのみがフィッサイル領域に戻ってくる。一方、上部の液相冷却材スラグは、継続した燃料ピンからのガス放出によって上方へと押し出されたままとなっている。下部から液相冷却材スラグが再流入する際には、液相冷却材が高温化したフィッサイル領域に侵入して被覆管を一時的に冷却する“リウエッティング”が生じてい

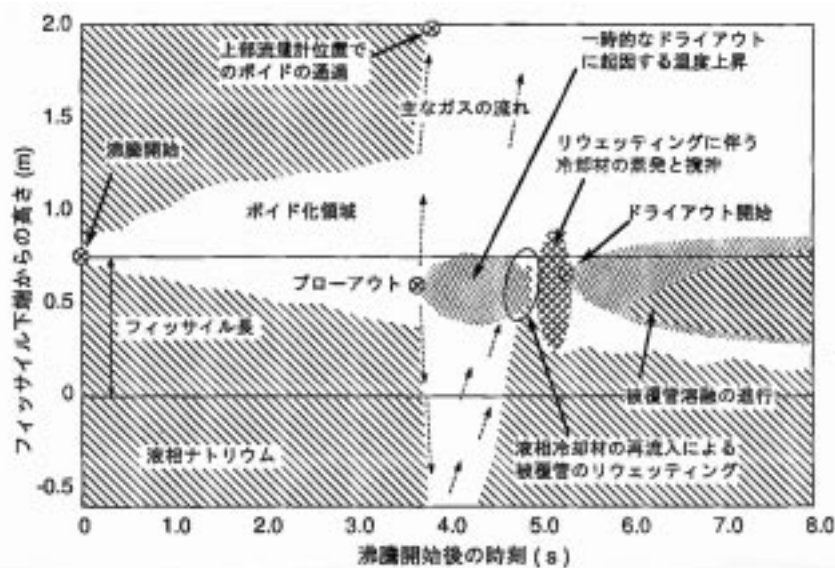


図4 冷却材沸騰開始後の事象進展の概要

る。リウエッティング後は再び被覆管のドライアウトを生じ、被覆管溶融領域がフィッサイル上部の広い範囲に拡大してゆく。

CABRI試験では試験燃料ピンから放出される高速中性子をコリメーターを介して多数の中性子検出器でとらえることにより、燃料の時間空間分布の情報を得る中性子ホドスコープ⁶⁾を使用している。ホドスコープ信号の増加は軸方向の燃料移動による燃料質量の増加と、燃料スウェリングなどによる燃料外径増加に起因する自己遮蔽効果の低減の二つの可能性がある。これに対し信号の減少については、燃料が径方向に縮小することは考え難いことから、ほとんどの場合、燃料の軸方向移動による燃料質量の減少に対応する。EFM1試験におけるこのホドスコープ信号は、LOF中のガス・ブローアウト以降、フィッサイルの軸方向ピーク出力位置（Peak Power Node、以下PPN）近傍で増加している。ここで対象としているホドスコープ信号増加については、他の軸方向位置での信号減少が見られないこと、及び燃料がペレット形状を保っていると考えられ軸方向移動は考え難いことから、燃料外径の増加によるものと推定される。

すなわち、ブローアウト後の被覆管温度上昇のために、被覆管による拘束力が失われた条件での顕著な燃料スウェリングによって燃料外径が増加しているものと考えられ、概略評価によるとTOP印加時の燃料外径増加は10%程度と推定される。

3.2 TOP印加時の状態

図5はTOP印加時の燃料ピンの状態を模式的に示したものである。出入口冷却材流量応答及びボイド計のデータから、0.15mBFCより上方の広い領域がナトリウム蒸気あるいは燃料ピンから放出されたFPガス（核分裂生成ガス）によってボイド化されていた。

流路に設置された熱電対（TC: Thermocouple）データによると、0.4mBFC～TFC（Top of Fissile Column=0.762mBFC）では被覆管融点に到達しており、この領域では被覆管が溶融していたことがうかがわれる。TCは0 mBFC～0.95mBFCの間に7カ所（0、0.15、0.3、0.45、0.6、0.75、0.95 mBFC）、各軸位置では燃料ピンを囲むように周方向等間隔に3本が設置されている。また、0.3～0.4mBFCではナトリウムの飽和温度を超えており、被覆管ドライアウトが生じていたものと考えられる。0.15～0.3mBFC、及びTFC～1.0mBFCではナトリウム飽和温度となっており、被覆管表

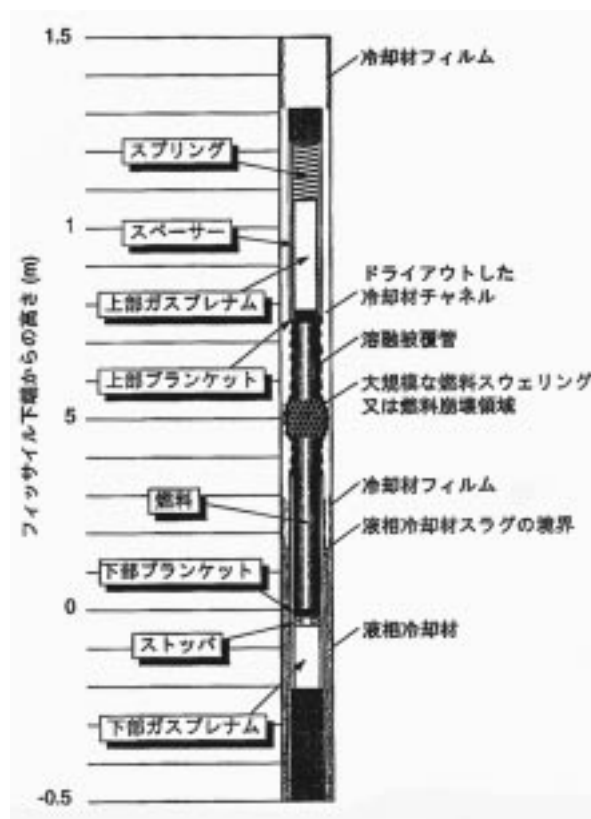


図5 TOP印加時の燃料ピンの状態

面には液相フィルムが存在していた可能性が高い。

一方、1.0mBFCより上方ではナトリウム飽和温度以下となっており、非凝縮ガスの存在を裏付けている。

4. TOP中燃料移動の全体的推移

図6にTOP投入後0.4～0.7秒の燃料移動挙動の評価結果を模式的に示す。この評価結果は、ホドスコープの信号データ、出入口冷却材流量データ、流路内各部に設置された温度計のデータ及び試験後の破壊・非破壊検査からの情報を詳細に分析するとともに、既存のCABRI試験からの知見^{7)～9)}を踏まえ、これらを相互に補完・統合して得たものである。

図7のホドスコープ信号は、LOF開始前の定常時の信号レベルを基に、過出力印加中の燃料信号を出力変化に対して規格化したものである。このホドスコープ信号データについて、燃料の動きをより明確に把握するため、初期条件を上回る信号を青色で、下回る信号をだいたい色で示し、また燃料の動きと思われる信号変化の主要なものに矢印をつけた（各矢印は図6のものに対応している）。

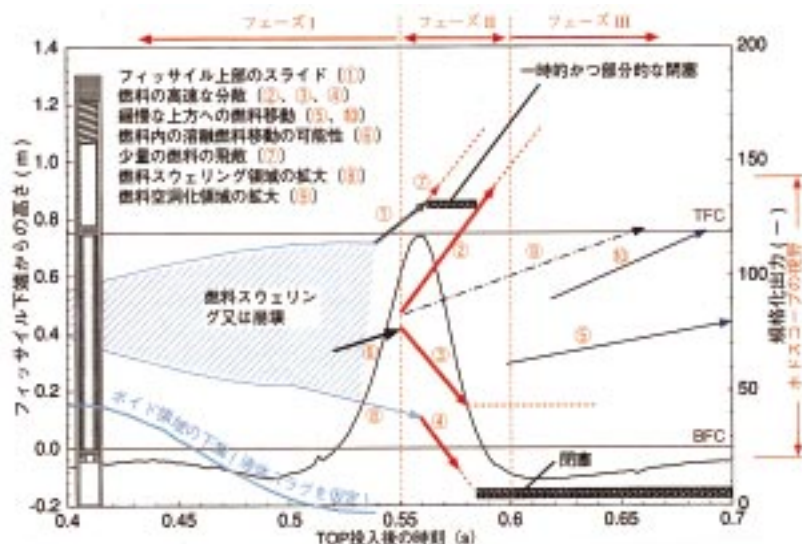


図6 TOP印加中の燃料移動シナリオ

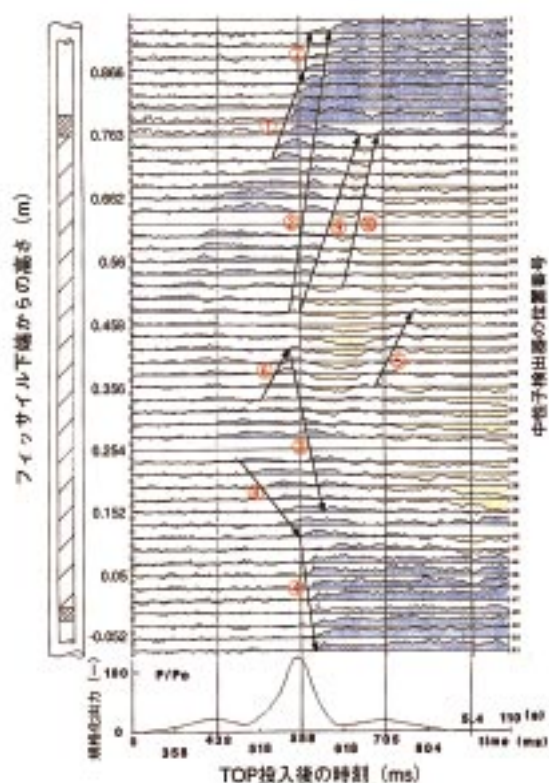


図7 TOP中の中性子ホドスコープ信号データ

以下に、燃料移動挙動の流れの概要をエネルギー投入の進展に沿って述べる。TOP印加中の燃料の移動挙動を見る上では燃料エンタルピーに依存した可動性が重要となるが、TOP後約0.55秒を境として可動性の大きな変化が見られる。すなわち、

0.55秒以前は燃料の顕著なスウェリングや細かな燃料片への崩壊等を生じるものの、燃料の可動性が十分でなく、大規模な軸方向移動は生じていない。一方、0.55秒以降は急激な加熱によって十分な可動性をもった燃料が、急速な軸方向移動を生じている。また、このような急速な燃料移動は第2出力ピークの終了と共に収まり、第3出力ピークによる継続した加熱条件下では緩慢な移動となっている。

そこで、以下においてはこれらを「燃料スウェリング／崩壊フェーズ (=フェーズI)」、「燃料分散フェーズ (=フェーズII)」、及び「継続加熱フェーズ (=フェーズIII)」と呼ぶこととし、各々のフェーズの挙動の概要を以下に示す。

(1) フェーズI：燃料スウェリング／崩壊フェーズ

このフェーズでは燃料の可動性が低く、主として燃料スウェリング又は燃料崩壊による径方向への燃料の変形・変位のみが生じている。ただし、本フェーズの後半にはPPN近傍の燃料エンタルピーの上昇により、緩慢な上下への燃料移動が見られており、本フェーズ末期においては燃料ピン上部の上方へのスライドも開始している。

(2) フェーズII：燃料分散フェーズ

フェーズIから開始していた燃料ピン上部の移動は約0.08mのスライドアップを生じて、本フェーズの早い段階で停止する(図7の①)。この停止したフィッサイルの頂部では、一時的かつ部分的な閉塞を形成する。一方、フィッサイル内部領域では大きなエネルギー投入によって大部分の燃料が溶融し、PPN付近を起点とした上下方向への

急速な燃料分散を生じている(図7の②、③、④)。このようにして上方に分散してきた高エンタルピーの燃料は、エネルギー投入によってエンタルピーの上昇しつつある前述の上部閉塞を取り込む形で、更に上方へと連続的に分散している(図7の②)。

下方への分散燃料の先端部(図7の④)では、溶融燃料が冷却材流路中をフィッサイル下端の下方まで侵入し、およそ0.12mBFCを先端として閉塞を形成している。この閉塞の形成以後、下方への燃料侵入は停止している。

(3) フェーズⅢ：継続加熱フェーズ

フェーズⅡの終わりには、下部において安定な閉塞が形成されているのに対して、上部には安定な閉塞がなく、本フェーズの継続した加熱条件下でのフィッサイル領域内圧力は上方へと解放され、燃料は総じて上方へと移動する(図7の⑤、⑩)。

5. TOP中挙動の詳細な解釈

フェーズⅠにおいては、燃料スウェリング領域の拡大と、このような領域内での部分的な燃料信号の変化が見られており、これらについて各々述べる。一方、フェーズⅡ～Ⅲでの燃料移動については多くの要素が各部で関連しながら進行しており、燃料ピン上部と下部の二つの領域に分けた上で、一連の流れを踏まえるべくフェーズⅠとのつながりを含めて詳細に述べる。

5.1 燃料スウェリング領域の拡大

LOF中のホドスコープ・データによると、顕著な燃料スウェリングによると見られる燃料外径の増加はLOF中から始まっており、TOP開始時には0.43～0.55mBFCの領域において燃料外径が10%程度増加していたものと推定される。

TOP中のホドスコープ信号を見ると、このような燃料スウェリング領域は第1出力ピークの緩慢な加熱の過程で上下に拡大してゆき、第2出力ピークに差し掛かるTOP後0.5～0.55秒には0.2mBFCから下方へとやや速度を増して拡大している(図7の⑧)。

0.3mBFCでのTCデータによると、周方向の一部ではTOP印加前から被覆管の融点近傍の高い温度になっており、この軸方向位置でのTOP中の被覆管による拘束力は小さいと考えられる。このことから、TOP前半の燃料スウェリング領域の上下への緩慢な拡大は、被覆管の拘束が軸方向の広い範囲で失われた状況での、TOPによる燃料高温化

領域の軸方向拡大に対応しているものと思われる。一方、0.2mBFC以下の領域ではTOP印加の時点で被覆管は液相冷却材に冷やされており、0.5秒から0.55秒にかけての信号増加領域のやや急速な下方への拡大は、TOP中の被覆管昇温領域の拡大に依存している可能性が高い。図8に0.15mBFCの位置でのTCデータを示すが、TOP後約0.5秒までの間には冷却材飽和温度になっており、その後昇温していることが分かる。なお、TOP中の流路内TCは燃料からの被覆管を介した加熱によって昇温され、被覆管温度はTCデータよりも高いと考えられる。一方、これまでのCABRI試験の評価からは、被覆管温度が約1,200℃を超えると被覆管強度は急激に失われて大規模な燃料スウェリングが可能になるとの知見が得られている⁹⁾。これらの情報を総合すると、0.2mBFC以下の領域ではTOP中に冷却材ボイド化領域が下方に拡大し、これを追う形で被覆管強度低下領域が拡大し、その範囲で顕著な燃料スウェリングを生じているとの解釈が成り立つ。

このような挙動の類似例として、CABRI-2計画E2試験⁷⁾のフィッサイル下部の状況が挙げられる。E2試験では定常出力の約10倍の台形状過出力を投入しており、PPNでのエネルギー投入速度は過渡全般を通じて1.6kJ/g/s程度であったが、この試験のホドスコープ・データにおいても、EFM1試験(図7の⑧)と同様の軸方向領域、時間スケールでの信号増加領域の下方への伝播が見られた。なお、EFM1試験での当該フェーズにおけるPPNでのエネルギー投入速度は2.2kJ/gであり、E2試験の条件に近い。E2試験では、その後のエネルギー投入が少なく、試験後の破壊検査からは図9に示すように0.2mBFC付近での冷却材流路を埋めるような顕著な燃料スウェリングとそれによって縮小した冷却材流路中への若干の溶融

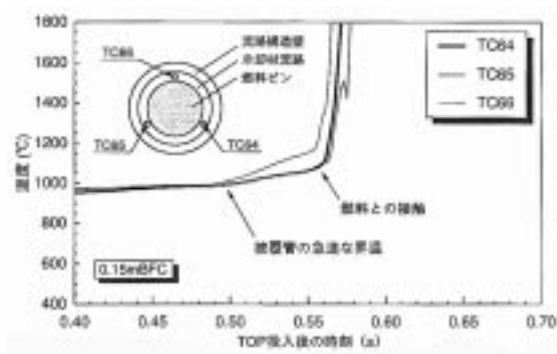


図8 0.15mBFCにおけるTC応答

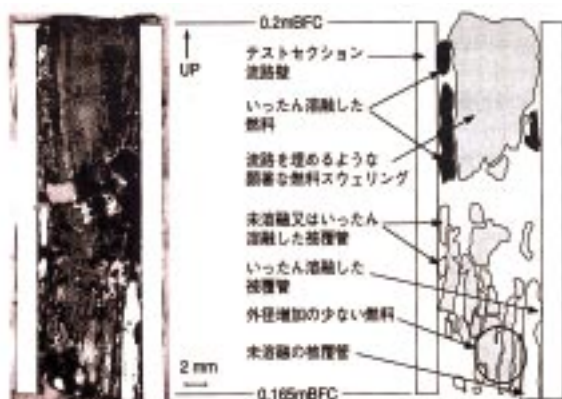


図9 E2試験における試験後のテストセクション断面金相写真 (0.165~0.2mBFC)

燃料の侵入、及び0.16mBFC付近での未溶融被覆管を一部に伴った外径増加の少ない燃料の存在が確認されている。このようなE2試験結果から、前述のEFM1試験結果の解釈が妥当なものと判断された。

5.2 燃料スウェリング／崩壊領域内部でのローカルな燃料移動

燃料スウェリング領域が軸方向に拡大する過程では、その中心部分でのホドスコープ信号が減少しており、高温化に伴って一部可動化した燃料は、緩慢な軸方向移動を開始しているものと見られる。一方、0.4mBFC近傍でのホドスコープ信号変化を見ると、このような軸方向移動によって一度減少した信号が、0.52~0.55秒には再び増加している。

この領域では、既に燃料スウェリング／崩壊を経て軸方向移動を開始しており、2度目の信号増加が燃料の径方向形状変化によるものとは考え難い。したがって、この部分での燃料質量が増加していると考えるべきであり、この下部の顕著な燃料スウェリング／崩壊を生じている領域で解放されたFPガスに駆動された燃料移動 (図7の⑥) であると推定される。

このような燃料移動の詳細メカニズムについては、今後解析コードを用いた評価により詳細に説明する。

5.3 上方への燃料移動

ここでは、フェーズIの終わりに始まったフィッサイル上部のスライドアップと、それに続く上方への燃料移動について述べる。

図10に一連の挙動を模式的に示すが、このシナ

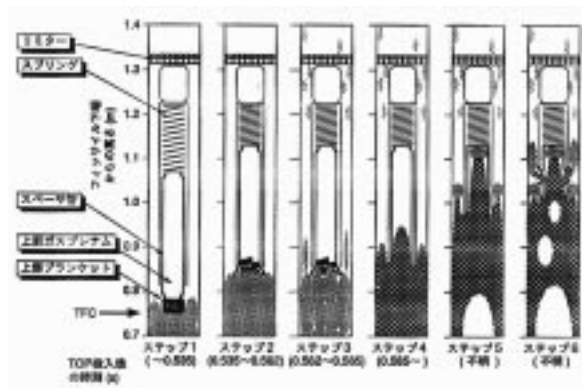


図10 上方への燃料移動の模式図

リオは過渡中のホドスコープデータ、TCデータ及び試験後の破壊・非破壊検査の情報を統合して推定したものである。図10のステップ1はフェーズI後半の状態を表しており、燃料スウェリング又は燃料崩壊によって燃料が冷却材流路一杯に拡がっている状況を示す。この時点で上部軸方向ブランケット近傍の被覆管は既に溶融しているか、高温で容易に変形する状態にあったと考えられる。

(1) フィッサイル上部のスライドアップと一時的な閉塞の形成

TOP後0.54~0.56秒 (ステップ2) にはやや急速な上方への燃料移動が見られており、これは上部軸方向ブランケットや燃料ピン内上部構造を含めたフィッサイル上端部分のスライドアップと考えられる。図10のステップ2はこのようなスライドアップ後の状態を示しているが、ホドスコープ・データによるとスライドアップによってフィッサイル頂部は約0.08m上方に移動している。一方、試験燃料ピンの頂部に設置された軸方向変位の測定装置の結果では、およそ0.54sの時点で燃料ピン上端がわずかに上方に変位しているがその移動幅は極めて小さく、この時点までに燃料ピン上端とリミター (燃料ピンの上方への移動を抑制するための機構) の隙間はほとんど閉じていたものと考えられる。また、試験後の非破壊検査 (γスキャン) からはスプリングが完全に圧縮される形で0.05m程度縮んでおり、0.08mのフィッサイル頂部の上方移動には上部軸方向ブランケット近傍の被覆管がつぶれることで0.03m程度のシフトが生じているものと考えられる。

このようなスライドアップの後、TFC付近の崩壊燃料は一時的な閉塞として作用しているものと考えられる。

(2) TFC付近の部分閉塞を通過した微少な燃料の飛散

ホドスコープ・データによると、このようなスライドアップが停止した後も、フィッサイル頂部(TFC)を通過して上方に移動する少量の燃料が見られる(図7の⑦)。図10のステップ3はこの状況に相当し、TFC付近での閉塞は部分的なものであったと思われる。試験後の非破壊検査(X線ラジオグラフィー)からは1.2mBFC付近に燃料堆積が見られているが、これはステップ3の時点で1.2mBFCより上方に飛散した多数の微少な燃料片が、最終的にこの位置のグリッド・スペーサ上に積もっていた可能性が高い。このことは、試験後にこの部分の断面金相撮影を試みた際に、当該部分の燃料が容易に失われてしまったことから、多数の微少な燃料片であったと推定されることと整合している。

なお、後述のようにフェーズIIの後半にフィッサイル上部へと侵入した高エンタルピー燃料の到達範囲は1.2mBFCには及んでいない可能性が高い。

(3) TFC付近の閉塞の消失と高エンタルピー燃料の侵入

図10のステップ4はフェーズII後半の状況に相当する。この時点までに第2出力ピークによる大きなエネルギー投入が完了し、TFC付近の閉塞を形成していた燃料エンタルピーが上昇し、大きな可動性を得ている。また、PPN付近からは高エンタルピーの燃料が移動してきており、この閉塞を取り込む形で更に上方へと連続的に移動している(図7の②)。ただし、図7の②は厳密には実際の燃料移動を示しているのではなく、燃料密度の高い部分のフロントの伝播を示している。すなわち、PPN付近からの駆動圧によってフィッサイル上半分の燃料が下から順次圧縮されてゆく状況に相当する。そして、その結果としてのフィッサイル領域の燃料空洞化範囲はそれよりもだいぶ遅れて拡大する(図7の⑨)。

このような高エンタルピー燃料の存在は、1.0~1.1mBFCで見られた燃料クラストによって裏付けられる。図11及び図12にこの領域での金相写真を示すが、これらによって、冷却材流路の表面(1.0mBFC)及び被覆管内面(1.1mBFC)に薄い燃料クラストが見られ、このことからこの部分を高エンタルピーの溶融燃料が高速で通過していたことが分かる。

また、0.95mBFCでのTCデータによると、この位置に高温かつ大量の燃料が到達するのは分散フェーズ後半の0.61秒程度以降であり、このタイミ



図11 試験後のテストセクション断面金相写真 (1.0mBFC付近)

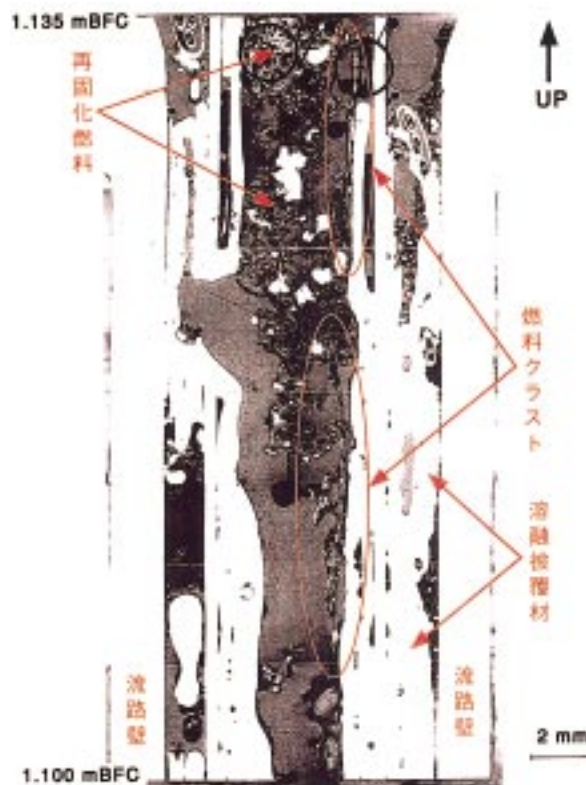


図12 試験後のテストセクション断面金相写真 (1.1mBFC付近)

ングはホドスコープで見られた上方への燃料分散（図7の②）の動きと整合している。

(4) 高エンタルピー燃料の上方侵入先での固化

図10のステップ5は被覆管の内側及び外側に侵入した溶融燃料が各々固化して閉塞を形成した状況を示す。被覆管内部の溶融燃料の侵入範囲は、約1.1mBFCのスプリング下端であることが、試験後の非破壊検査（X線ラジオグラフィ）により確認されている。一方、このフェーズでの冷却材流路側の溶融燃料の侵入範囲については、先のフェーズIでの少量の燃料侵入、及びその後の被覆管を破っての流出（図10のステップ6）が混在していると考えられることから、必ずしも明確ではない。しかし、X線ラジオグラフ及び部分的な断面金相データから、冷却材流路壁面の燃料クラスト形成は～1.0mBFC以下の領域に限られており、この直上で閉塞していた可能性が高い。

このような急速な溶融燃料の被覆管内外での上方への移動は、ホドスコープに見られた急速な上方への移動（図7の②）の延長上にあるものと考えられ、冷却材流路側での閉塞形成のタイミングとしては0.62秒前後と推定できる。一方、被覆管内の溶融燃料移動については、上部ブランケット燃料片が流出に対する抵抗として作用していた可能性があり、閉塞形成のタイミングは冷却材流路側と同程度か、あるいは若干遅れているものと考えられる。

なお、溶融燃料の侵入距離が被覆管内側の方が大きいのは、侵入部の等価直径が大きいことが影響している可能性が高い。いずれにせよ、上部ブランケット燃料片による流出抵抗は、あまり大きくはなかったものと推定される。

(5) 「継続加熱フェーズ」における緩慢な燃料移動

下部での燃料閉塞形成以降は、フェーズIIIの継続した燃料加熱条件下における上方へのゆっくりした燃料移動がホドスコープ・データに見られている。このように、被覆管内外で燃料固化を生じた後もガスの流出パスは確保されており、図10のステップ6に示すような被覆管の溶融貫通が短時間に生じている可能性が高い。

EFM1試験においては、フェーズIIまでのエネルギー投入は約70%であり、残りの30%はフェーズIIIの継続加熱で投入されている。したがって、フェーズIIIでは崩壊燃料からのFPガス放出が継続している可能性があり、このフェーズでの燃料移動の駆動力としてはFPガス圧と溶融被覆材より発生するスティール蒸気圧が主な候補となる。なお、前フェーズからの残留FPガスが、上方へ

と徐々に解放されている可能性もあり、燃料からのガス放出や構造材料への伝熱を含めた解析評価による解釈が重要になる。

5.4 下方への燃料移動

ここではフェーズII（燃料分散フェーズ）における下方への溶融燃料の侵入と閉塞の形成及びその後の挙動について述べる。図13に一連の燃料移動挙動を模式的に示すが、こちらも図10同様、過渡中のホドスコープデータ、TCデータ及び試験後の破壊・非破壊検査の情報を統合して推定したものである。ステップ1はフェーズII後半の燃料ピンの状態を示しており、燃料スウェリング/崩壊によって冷却材流路が減少し、さらには崩壊燃料が冷却材流路全体に拡がっている状況である。このような燃料崩壊領域は、燃料エネルギーの増加とともに下方へと進展しつつある。そして、PPN近傍では、エネルギーの上昇した燃料の緩慢な軸方向移動が開始している。また、後述のように崩壊燃料の一部は縮小した冷却材流路を抜けて下方へと移動しているものと考えられる。

(1) 溶融燃料のBFC下方への侵入

図13のステップ2はフェーズII前半の状況に当たり、まずPPN付近の燃料が急速に下方へ動き出し（図7の③）、若干遅れて0.1mBFC付近から下方への急速な燃料移動が生じている（図7の④）。この図7の④の燃料移動速度は約10m/秒であるが、試験後の破壊検査（断面金相撮影）からは侵入先での被覆管に沿って形成したと思われる燃料クラストが見られ、溶融燃料が冷却材流路中を移動したものと考えられる。

(2) 安定な下部閉塞の形成

図13のステップ3はBFCよりも下方へ侵入した燃料が閉塞を形成した状況であり、-0.12mBFC

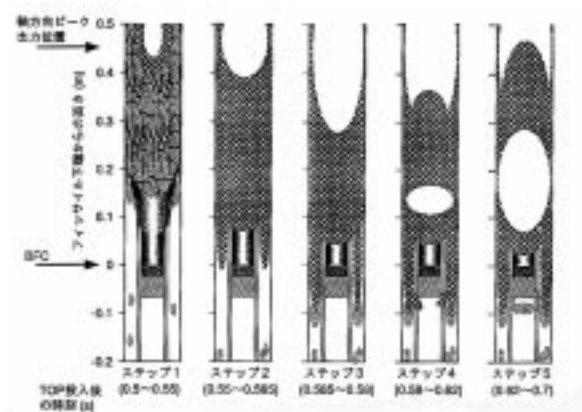


図13 下方への燃料移動の模式図

付近を先端として閉塞を形成していることが試験後の非破壊検査（ γ スキャン）によって確認されている。なお、下部ブランケットは0.02mと短く、その下方の被覆管内は空洞となっているが、被覆管温度が十分に低いことから、TOP中の被覆管の健全性は確保されている。

図14は閉塞部の先端付近の金相写真であり、燃料は燃料内に取り込んだ溶融被覆材や周辺構造への熱損失によって固化しているが、この領域での被覆管はほとんど損傷を受けていない。

(3) 閉塞の形成に伴う燃料移動の一時停止

ホドスコープの視野が $-0.07\text{mBFC} \sim -0.93\text{mBFC}$ であることから、ホドスコープ信号では閉塞の先端を見ることはできないが、下方への移動燃料の先端を外挿すると閉塞形成時間はおよそ0.58秒と見積もられる。このような下部閉塞の形成により、PPN付近から下方への燃料移動に伴う燃料空洞化領域の下方への拡大は $\sim 0.3\text{mBFC}$ でいったん停止し、その後は $0.1 \sim 0.3\text{mBFC}$ の領域の燃料が上方へとゆっくり動いている（図7の⑤）。

(4) 下部閉塞よりも下方に見られた燃料片についての解釈

このほか、上記の下部閉塞よりも更に下方の一

$0.16 \sim -0.195\text{mBFC}$ での断面金相データが得られており、これには細かな固体燃料片が見られる。このことは、燃料分散フェーズでの高エンタルピー燃料の侵入の前に、ガス流に駆動された少量の燃料片がこの位置に到達していることを示している。すなわち、フェーズIにおける崩壊領域からの放出ガスによって崩壊燃料の一部が運ばれていることになる。

5.5 ブランケットの長さを考慮した燃料分散挙動に関する考察

EFM1試験に使用した燃料では、上下ブランケット燃料が極端に短い条件となっており、より長い軸方向ブランケット条件での燃料移動との相違を踏まえる必要がある。EFM1試験の 0.02m の下部ブランケットの下方にはガスプレナムがあるが、この領域の被覆管はTOP印加の時点で低温に保たれており、被覆管の健全性は少なくとも下方への燃料移動の段階までは確保されている。このため、高速な溶融燃料の侵入に対するこの領域の被覆管強度は通常の長いブランケットの場合と基本的に等価である。一方、 0.03m の上部ブランケット上方の中空被覆管部分はLOFによって高温化しており、TOP中に高温燃料によって溶融侵食されるなどして大きな燃料流出経路を提供する結果となっている。この結果としての顕著な上方への燃料分散は、上部ブランケットを短くするなどの燃料設計に依存した効果的な燃料流出を直接的に示す重要なデータである。しかし、より長い上部ブランケットの条件では、ブランケット上部の中空被覆管部分の破損は相対的に起こり難く、EFM1試験の上方への燃料侵入データは直接的には適用できない。また、EFM1試験においては大きな流出経路を通じて燃料分散駆動力が低下しているとすると、その下方への燃料移動挙動への影響も問題となる。しかし、本分析の結果から、下方への燃料侵入と閉塞形成の時点では、燃料ピン上部のスライドアップが中空被覆管部分のつぶれによってわずかに増加していたと見られるものの、上部の境界条件は長いブランケットの場合に想定される条件と基本的に等価であると判断できる。したがって、下方への燃料侵入・固化挙動については、ブランケットの長さには影響されない普遍性の高いデータであるといえる。

6. 解析評価における重点課題

EFM1試験の主目的は燃料の軸方向分散挙動の定量化にあり、燃料の崩壊と移動及びフィッサイ

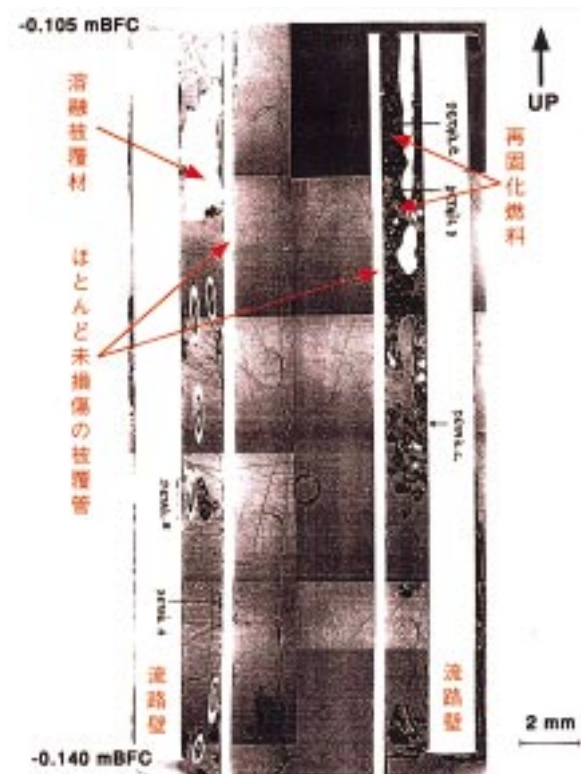


図14 試験後のテストセクション断面金相写真（ -0.12mBFC 付近）

ル領域外への燃料侵入・固化モデルの検証が、解析評価で目指すべき第1のポイントである。

EFM1試験では、燃料崩壊から軸方向移動へと推移するまでの過出力が緩慢であるために、これらの挙動の時間的な推移が詳細に観測されている。したがって、本試験の結果は燃料崩壊あるいは軸方向移動開始にかかわる解析モデルの妥当性の確認に適している。そして、第2の出力ピークによって十分に加熱された燃料の上下への分散挙動については、駆動圧の主体と見られるFPガスと溶融燃料のドラッグ力にかかわるモデル検証に有効である。また、このような急激な燃料分散はフィッサイル領域上下への燃料侵入を生じるが、侵入先での固化と閉塞形成は従来のCABRI試験においてもデータが不足している部分であり、燃料や溶融被覆材の固化モデルの改良・検証に活用できる。

EFM1試験のもう一つの特徴は、燃料の可動化に十分なエネルギー投入を行った後も、緩慢な過出力を継続している点にある。すなわち、約70%のエネルギー投入によって急速な燃料分散を生じた後、数百ミリ秒の時間スケールでの緩慢な過出力を維持し、この間に緩やかな上方への燃料移動を生じた。このような燃料移動の駆動力としては、残り約30%のエネルギー投入に伴う追加的なFPガスの放出と溶融被覆材からのスチール蒸気の発生が考えられるが、解析評価を通じて支配要因を分析することが可能であり、さらには燃料から構造材料への伝熱モデルの妥当性の確認にも役立てられる。このほかにも、LOF中に見られたガスブローアウト時の冷却材流量応答や流路温度変化などのデータは非凝縮ガス放出モデルの検証に役立て得る。

以上のように、EFM1試験の結果は、燃料崩壊、分散、固化といった燃料移動挙動の基本要素を効果的にカバーするものであり、解析モデルの改良・検証への有効な寄与が期待される。

7. おわりに

EFM1試験結果を詳細に分析し、これまでの多くのCABRI試験から得られている知見を踏まえて総合的に評価することにより、TOP中の燃料移動挙動の詳細な内容を把握することができた。以下に本研究から得られた主要な知見を列挙する。

- ① 被覆管の拘束力が失われた状況での緩慢な燃料加熱条件では、燃料は初めに大きな燃料スウェリングを生じ、エンタルピーの上昇とともに固体燃料粒子や一部溶融燃料からなる崩壊燃料

へと連続的に推移する。

- ② 上記崩壊燃料は若干の可動性を有するが、更にエンタルピーが上昇する過程で可動性は顕著に増加する。
- ③ 燃料スウェリング／崩壊領域の先端では、冷却材流路が縮小して燃料やガスの流出を抑制する。
- ④ 上記のような崩壊領域先端部分の燃料エンタルピーが上昇すると、この部分を越えた顕著な燃料分散を生じる。
- ⑤ フィッサイル領域外に侵入した高エンタルピー燃料は、低温のフィッサイル下部でもBFCから0.1m程度侵入する。
- ⑥ 高温となるフィッサイル上部では一般に下部に比べより大きな侵入長が見込まれるが、EFM1試験での約0.3mという侵入長はブランケットの長さ依存したものである。
- ⑦ 継続した燃料加熱条件下では燃料移動の駆動力が持続し、ガス流出経路が確保される場合にはフィッサイル領域からの燃料流出が持続する。

本研究により、今後行う解析モデルを用いた評価における重点課題を明確にすることができた。今後は、SAS4Aコードを用いた試験解析を行い、その成果をCABRI-FAST計画の総合評価に反映する予定である。

参考文献

- 1) 佐藤一憲：“CABRI-FAST試験における燃料破損及び溶融燃料移動挙動”，日本原子力学会「1995年春の年会」予稿集，B28 (1995.3)。
- 2) A.M. Tentner, et al.：“The SAS4A LMFBR Whole Core Accident Analysis Code”，Proc. Int. Mtg. on Fast Reactor Safety, Knoxville, Tennessee, Vol.2, p.989-998 (1985)。
- 3) U. Imke, D. Struwe, et al.：“The SAS4A-Code Development for Consequence Analysis of Core Disruptive Accidents”，Proc. Int. Topical Mtg. on Sodium Cooled Fast Reactor Safety, Obninsk, Russia, Vol.2, p.232-241 (1994)。
- 4) 小野田雄一，佐藤一憲：“CABRI-FAST EFM1試験における破損後燃料移動挙動”，日本原子力学会「1999年春の年会」予稿集，I26 (1998.3)。
- 5) Alan E. Walter, Albert B. Reynolds：“Fast Breeder Reactors”，Pergamon Press, p.254。
- 6) K. Baumung, et al.：“The CABRI Fast Neutron Hodoscope”，Nuclear Technology, Vol.71, p.353-365 (1985)。
- 7) 野中信之，佐藤一憲 他：“国際共同CABRI炉内試験計画の進展とその成果”，動燃技報，No.82, p.38-55, PNC TN1340 92-062 (1992)。
- 8) 佐藤一憲：“PNC-欧州共同炉内安全性試験CABRI-2計画の総合評価”，動燃技報，No.96, p.33-37, PNC TN1340 95-004 (1995)。
- 9) 佐藤一憲：“CABRI-2 炉内試験総合評価(4) ボイド化冷却材チャンネル中での燃料移動挙動”，日本原子力学会「1994年秋の大会」予稿集，B52 (1994.9)。