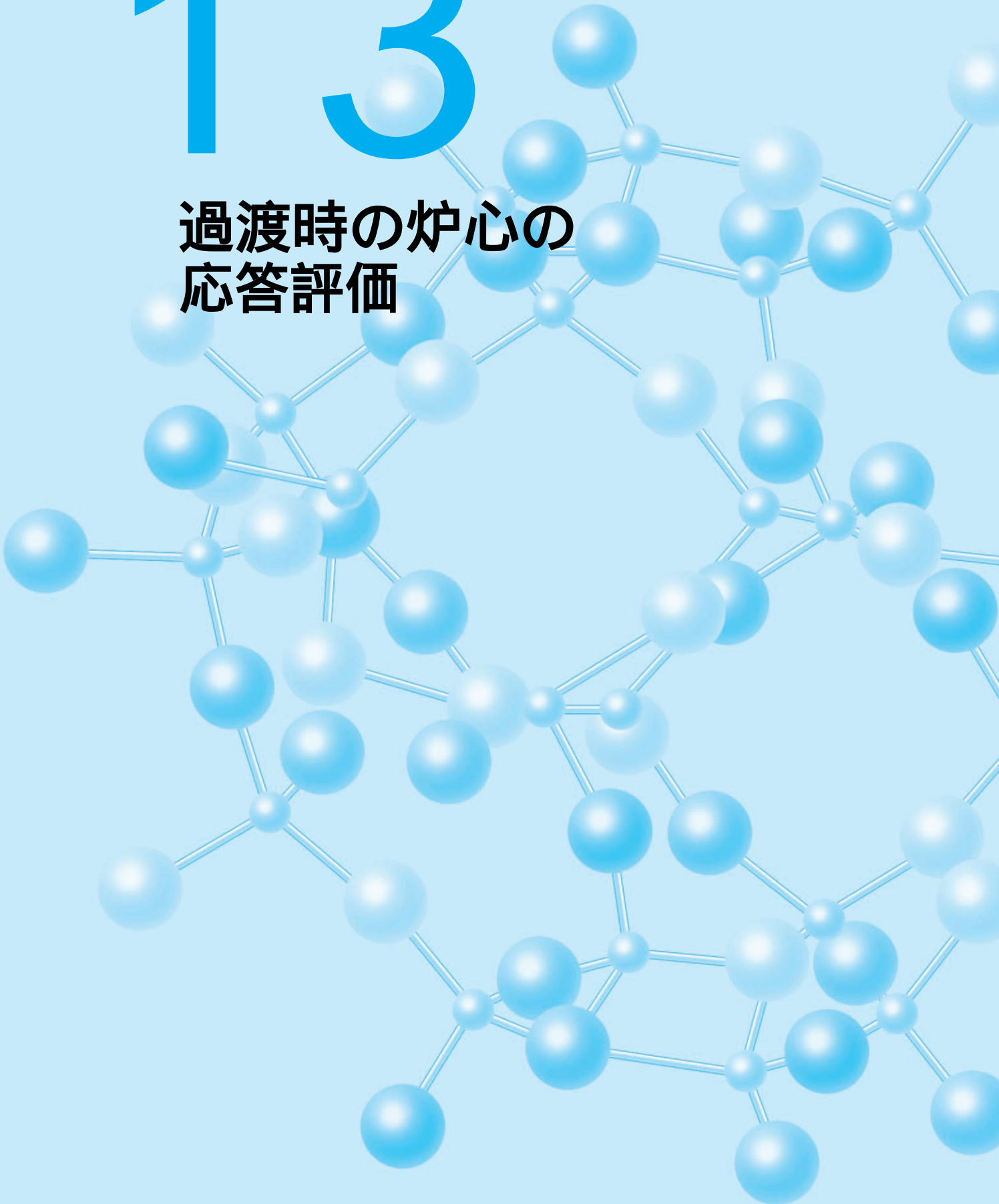


第

# 13

章

過渡時の炉心の  
応答評価



第13章 過渡期の炉心の応答評価 目次

原子力システム部 上席研究員 横尾 健  
原燃サイクル部 主任研究員 尾形 孝成

13 - 1 設計基準内事象時の応答評価 .....103  
13 - 2 設計基準外事象時の応答評価 .....104

---

横尾 健 86ページに掲載  
尾形 孝成 86ページに掲載

# 13 - 1 設計基準内事象時の応答評価

これまでに述べたように、金属燃料炉心の設計では、金属燃料の特長を活用するとともに、不利な点を補うための工夫が求められる。これらは従来からのFBR設計の考え方にほぼ沿ったものである。また、原子炉構造、原子炉保護系、1次冷却系に対しても、従来の酸化燃料FBRで開発されてきた概念を適用することに問題はない。したがって、金属燃料FBRの安全性の検討に対しても、従来からの考え方が適用できるであろう。これは、「設計基準事象<sup>\*1</sup>と呼ばれる設計の基準とする事象(表13-1-1)を頻度で分類し、各分類に対して燃料ピンの健全性に対する判断基準(表13-1-2)を設定したうえで、具体的な事象を評価することによって、これらの基準が満たされることを保証する」という考え方である。ただし、現状では金属燃料ピンの破損時および溶融時の挙動については未解明の部分が多い。今後、これらを解明して、燃料ピンの健全性に対する判断基準を具体化してゆく必要がある。

原子炉保護系などを従来と同様と想定するならば、代表的な設計基準事象も酸化燃料FBRのものと同様になると考えられる。金属燃料FBRに対する設計基準内事象の例を表13-1-3に示す。具体的な事象の評価の

表13-1-3 金属燃料FBRの設計基準内事象の例

事象分類	代 表 事 象		
	過出力(TOP)型事象	流量低下(LOF)型事象	集合体事故(局所異常)
事象	制御棒の異常な引抜き	外部電源喪失	統計的燃料要素破損
事象	制御棒の急速引抜き	1次系ポンプ軸固着	局所流路閉塞(非発熱)
事象	S2クラス地震	全電源喪失	局所燃料要素過熱

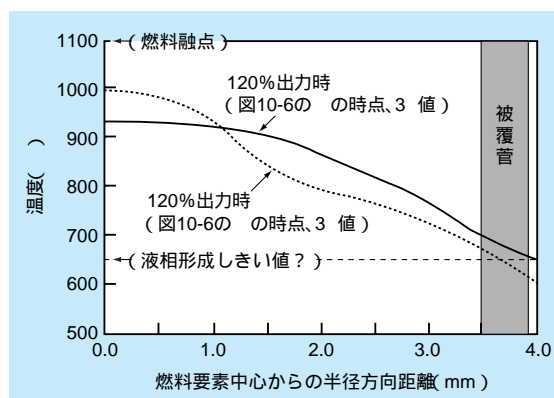


図13-1-1 1000MWe炉心の最大出力燃料要素の、120%過出力時における径方向温度分布

一例を図13-1-1に示す。これは、前出の1000MWe 2領域均質炉心において、制御棒の異常な引き抜きが生じた場合の最大線出力燃料ピンの温度を解析した結果である。制御棒が引き抜かれると、炉心に反応度が加わって炉心全体の出力が上昇し、過出力状態となる。この時の過出力値(定格時の出力を100%とした値)は、従来の酸化燃料炉心では一般的に115~117%とされるが、図13-1-1で示した解析では、それより大きめの120%とした。これは金属燃料炉心では反応度の出力係数が小さい(12-2節参照)ことを踏まえて設定したものである。図13-1-1から、燃料中心温度は融点以下、また、被覆管内面温度も700以下(対応する液相侵食量1μm以下)であり、破損までに十分に余裕があることがわかる。設計基準内、すなわち原子炉のスクラム<sup>\*2</sup>に成功する事象においては、燃料の違いに起因する炉心応答の差異は小さく、燃料健全性確保のうえで大きな問題は生じないと言える。

表13-1-1 金属燃料FBRの事象分類の考え方

分類	発生頻度(炉年 <sup>-1</sup> )	内 容	もんじゅの分類
事象	-	通常運転状態	通常運転
事象	~10 <sup>-2</sup>	単一故障・誤動作、単一誤動作(1回/プラント寿命)	異常な過渡変化
事象	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-4</sup>	多数基のプラントでは発生する可能性あり	事故
事象	10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-6</sup>	発生の可能性は極めて小さいが安全評価の観点から想定	

表13-1-2 金属燃料FBRの事象分類ごとの燃料判断基準の例

分類	TOP型事象	LOF型事象	許容燃料破損数
事象、~10 <sup>-4</sup> (炉年)	中心溶融なし	CDF 0.01/事象、0.1/寿命	(燃料健全性確保)
事象、10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-4</sup>	溶融許容値1 <sup>*</sup>	CDF 0.01	数本の破損
事象、10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-6</sup>	溶融許容値2 <sup>*</sup>	CDF 0.3	(冷却形状の維持)

<sup>\*1</sup>設計基準事象：原子力施設の安全特性や安全設備を設計するとき、事故時においても公衆の健康と安全が確保されることを示すために選ばれる、機器の破損や故障などの事象。

<sup>\*2</sup>スクラム：本編では、運転中の原子炉が異常な状態となった場合に、原子炉停止系などの安全装置によって自動的に原子炉の停止を行うことを指す。

## 13 - 2 設計基準外事象時の応答評価

金属燃料炉心の大きな特徴のひとつは、炉心損傷事故の起因過程として代表的な事象である「異常な過渡変化時にスクラムに失敗する事象(ATWS: Anticipated Transient without SCRAM)」に対する安全性向上の可能性が高いことである。ATWSに含まれる代表的な事象は、制御棒が誤って引き抜かれることによる過出力型事象(UTOP: Unprotected Transient Over Power)と、ポンプの停止などによる冷却材流量喪失型事象(ULOF: Unprotected Loss of Flow)である。UTOPに対する有効な方策は、前章で述べたように、制御棒に必要とされる反応度を低減することによって事象の重大性を緩和することである。一方、ULOFの際に反応度フィードバック<sup>\*3</sup>のみによる受動的な炉停止<sup>\*4</sup>を実現する上で、金属燃料炉心において有利な点は、運転時の燃料温度が冷却材の沸点よりかなり低いこと、反応度の出力係数(12-2節参照)が小さいため出力補償反応度<sup>\*5</sup>が少なく済むこと、である。以下、金属燃料炉心のULOF時の応答について述べる。

ULOF時には、冷却材温度の上昇によって正の反応度が加わるが、同時に炉心各部の熱膨張に対応して負の反応度フィードバックが生じる。後者が前者より大きい場合には、正味の反応度が負となって炉心の出力は低下する。しかし、出力の低下は流量の低下ほど速やかではないために、冷却材の温度は上昇を続けることになる。また、ULOF時の燃料温度の変化を、金属燃料炉心と酸化燃料炉心で比較して示したものが図13-2-1である。酸化燃料炉心では、出力の低下を反映して燃料温度が低下してゆく。一方、金属燃料炉心では、燃料スラグから

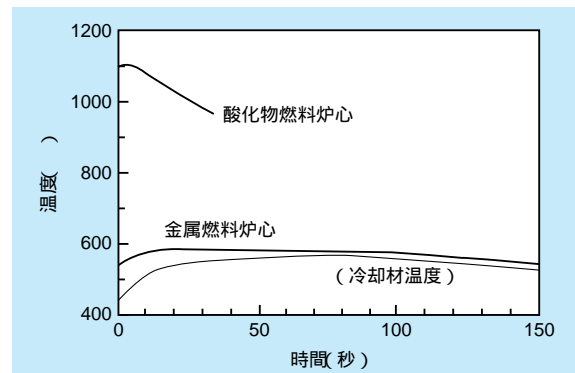


図13-2-1 ULOF時の燃料平均温度の推移(1000MWe炉心)

冷却材への熱の伝達が良好である(12-2節参照)ために、定格運転時の燃料温度が冷却材温度に近く、冷却材温度の上昇に追従して燃料温度が上昇する。結局、燃料温度が低下してゆく酸化燃料炉心では正のドブプラ反応度<sup>\*6</sup>が加わるために出力低下が遅れるのに対して、燃料温度が上昇する金属燃料炉心では負のドブプラ反応度が加わって出力の低下が促進される。

図13-2-2および図13-2-3には、それぞれ金属燃料および酸化燃料の1500MWe 2領域均質炉心のULOF時の応答解析結果を示す。ここでは、ポンプ停止後10秒で冷却材の流量が半減し、最終的には自然循環にいたることを想定した。また、負の反応度フィードバック要因として炉心の径方向膨張によるものを考慮した。その他の反応度フィードバック項目についても両炉心で同一とした。この結果によると、金属燃料炉心では上述の理由で正のドブプラ反応度<sup>\*6</sup>が入らないために正味の反応度が十分に負となって、冷却材が沸騰することなく事象が終息に向かっている。これに対して、酸化燃料炉心ではより大きな負の径方向膨張反応度が入るが、正のドブプラ反応度のために正味合計が小さくなるために、出力の低下速度が十分でなく、冷却材が沸騰する。

金属燃料炉心において、ULOF時に冷却材沸騰にいたることなく受動的に炉停止を達成できる可能性は、小型炉から大型炉まで炉心の出力規模によらず、ほぼ同様にあることもわかっている。

<sup>\*3</sup> 反応度フィードバック：ある出力状態の炉心に、冷却材温度の上昇などの変化が生じた場合、それに対応して炉心の反応度(第12章の<sup>\*1</sup>参照)が変化し、炉心の出力が変化する。このように、炉心内のある変動が、反応度を介して再び炉心の出力に影響することを反応度フィードバックと呼ぶ。負の反応度が炉心に加わる(第12章の<sup>\*1</sup>参照)場合には、負の反応度フィードバック、と呼ぶ。

<sup>\*4</sup> 受動的な炉停止：事故の際などに、制御棒などの工学的な装置にたよることなく、反応度フィードバック(<sup>\*3</sup>参照)など炉心が本来持っている性質によって、炉心の出力が安全性に問題が生じないレベルにまで下がること。

<sup>\*5</sup> 出力補償反応度：通常の炉心では、反応度の出力係数(第12章の<sup>\*5</sup>参照)が負であるため、停止状態から定格出力状態まで炉心の出力を上げた時、反応度が低下する。これを補うために制御棒によって反応度を加える必要がある。この反応度を出力補償反応度と言う。

<sup>\*6</sup> ドブプラ反応度：第12章の<sup>\*6</sup>参照

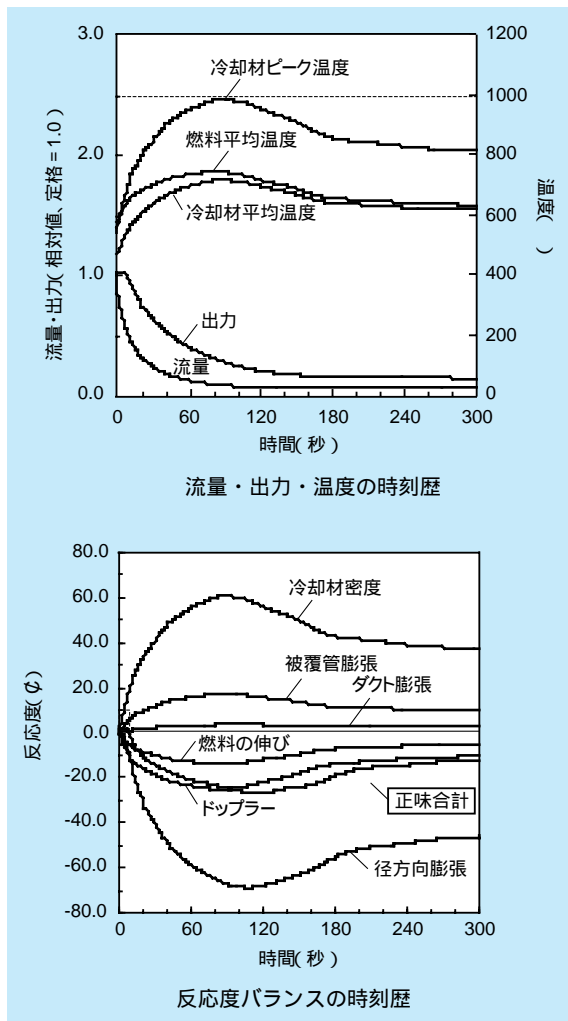


図13-2-2 1500MWe金属燃料炉心のULOF解析結果  
(平衡サイクル末期、流量半減時間=10秒)

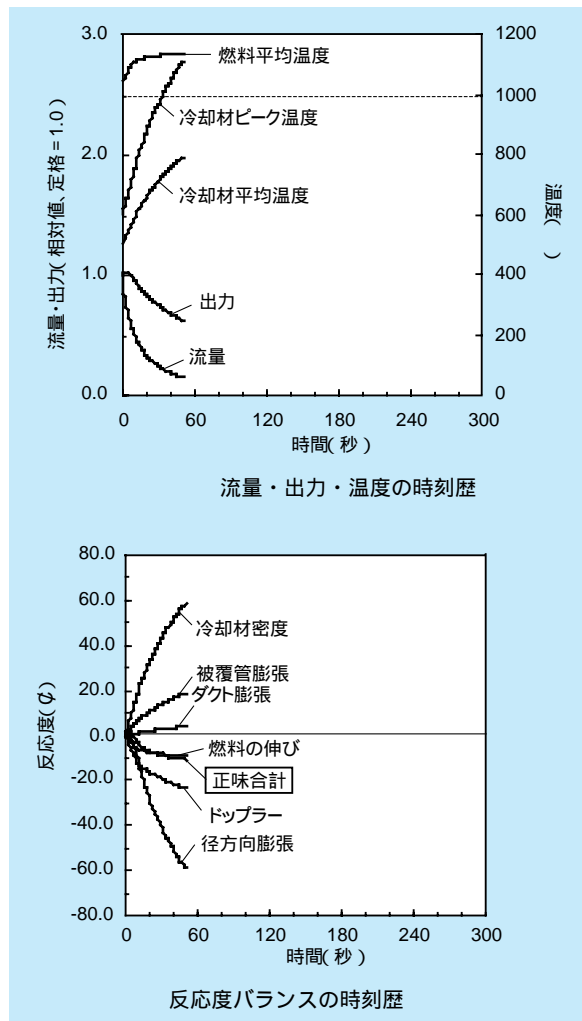


図13-2-3 1500MWe酸化物燃料炉心のULOF解析結果  
(平衡サイクル末期、流量半減時間=10秒)