



JY-97-6

## **第53条（多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止）に係る説明書**

### **過出力時原子炉停止機能喪失（UTOP）の格納容器破損防止措置の有効性評価**

**2021年11月16日**

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所  
高速実験炉部**

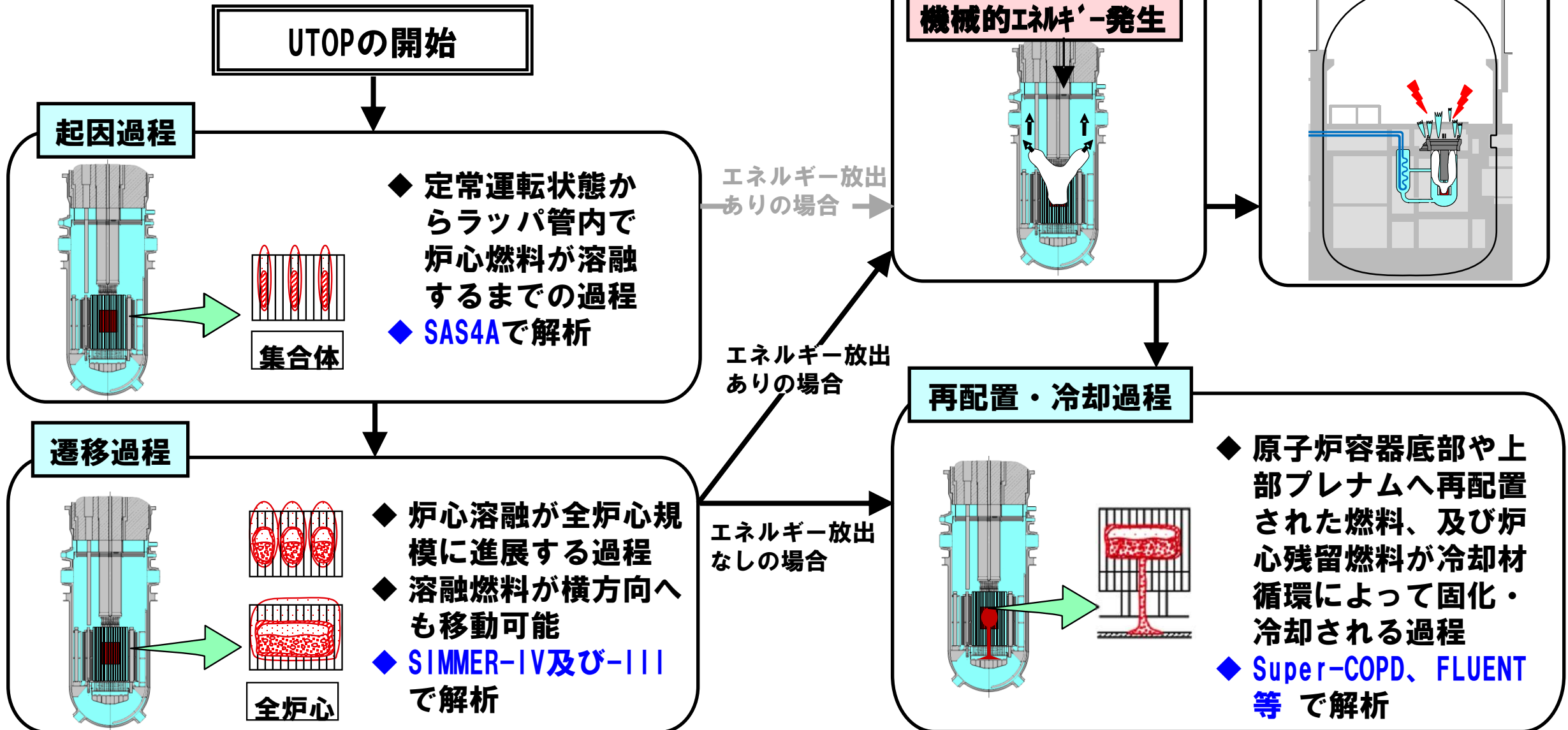
# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 解析評価の流れ

## 1. 対象事象

出力運転中の制御棒の異常な引抜き及び原子炉トリップ信号発信失敗の重畳事故

## 2. 主な格納容器破損防止措置

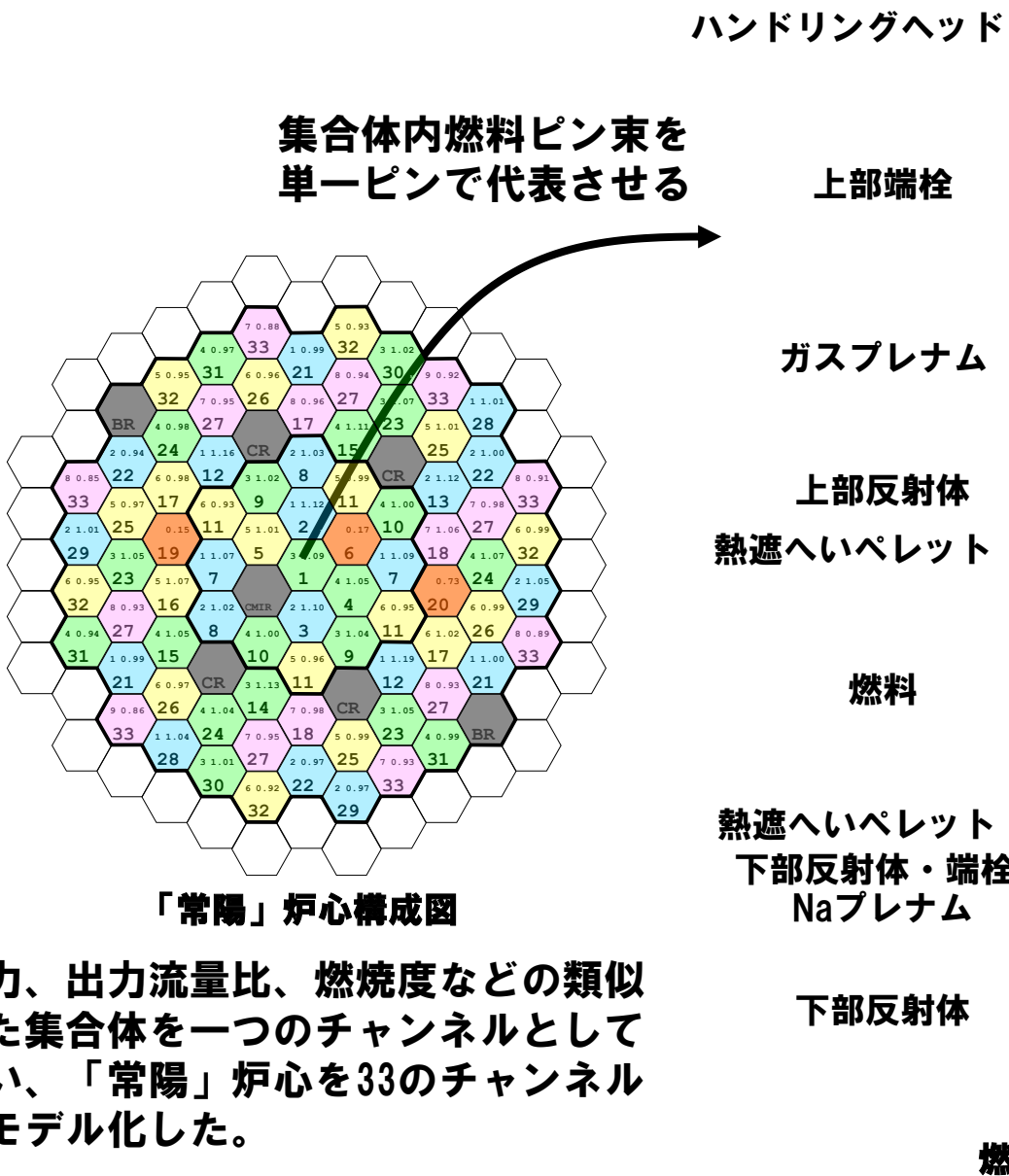
- ・ ポニーモータ運転等による原子炉容器内冷却
- ・ 負のボイド反応度等の炉心特性、原子炉容器構造（回転プラグを含む。）、大空間体積・耐圧・耐熱の格納容器構造



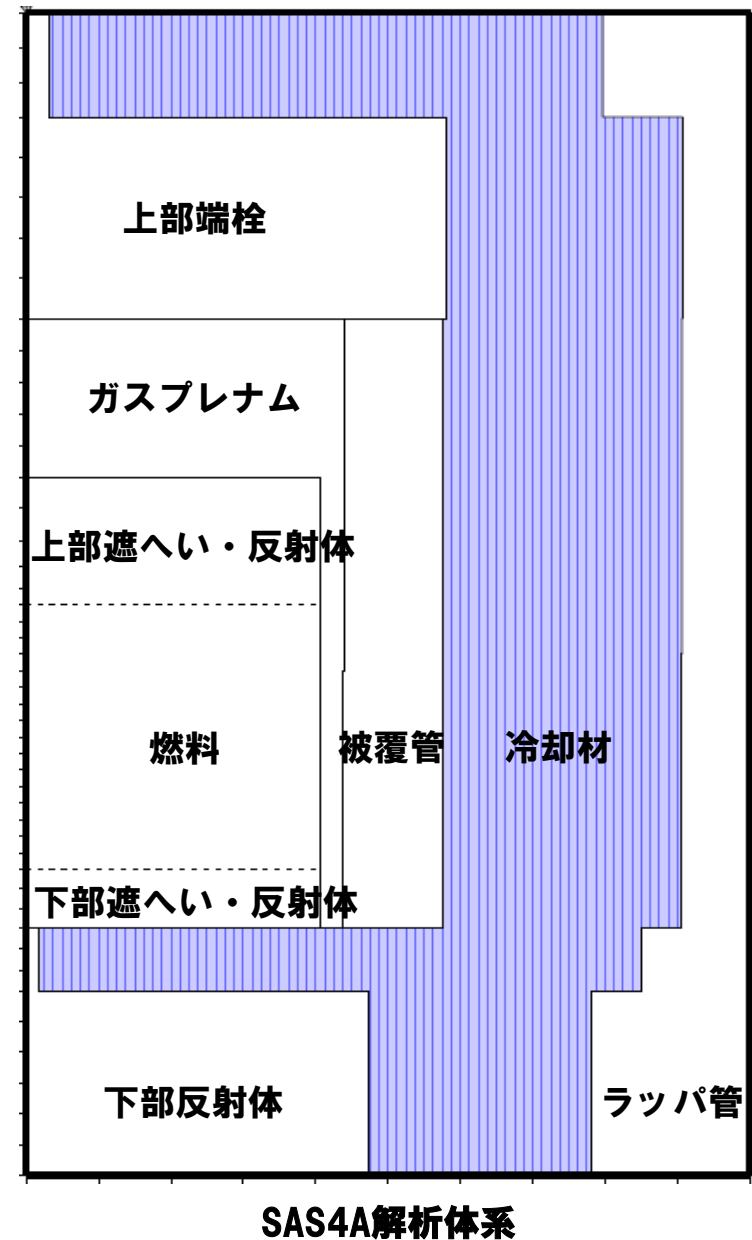
# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 起因過程の解析手法及び解析体系

## 1. 解析コード SAS4A

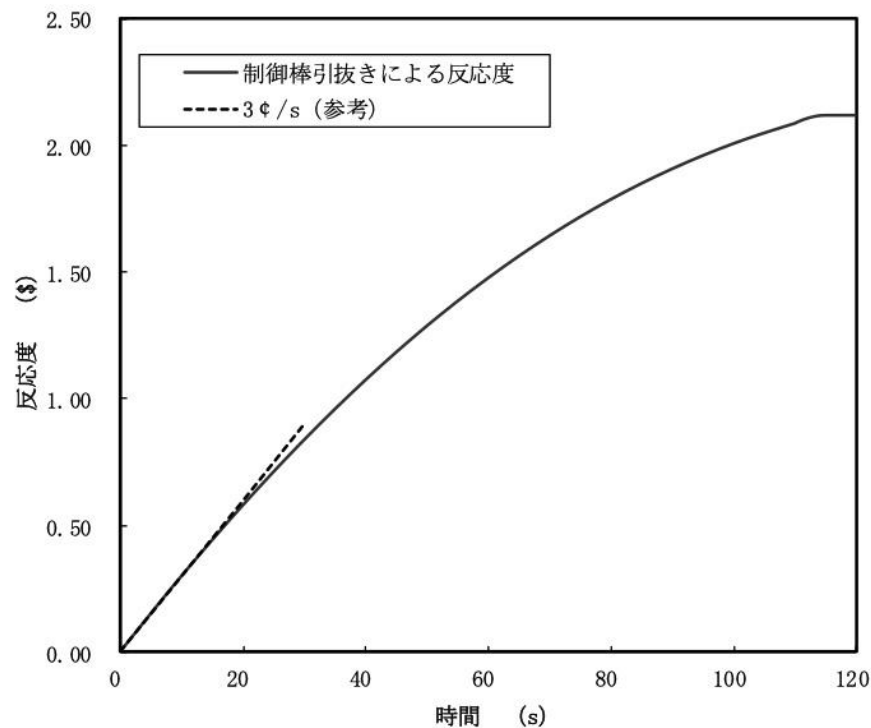
## 2. 解析体系の概要



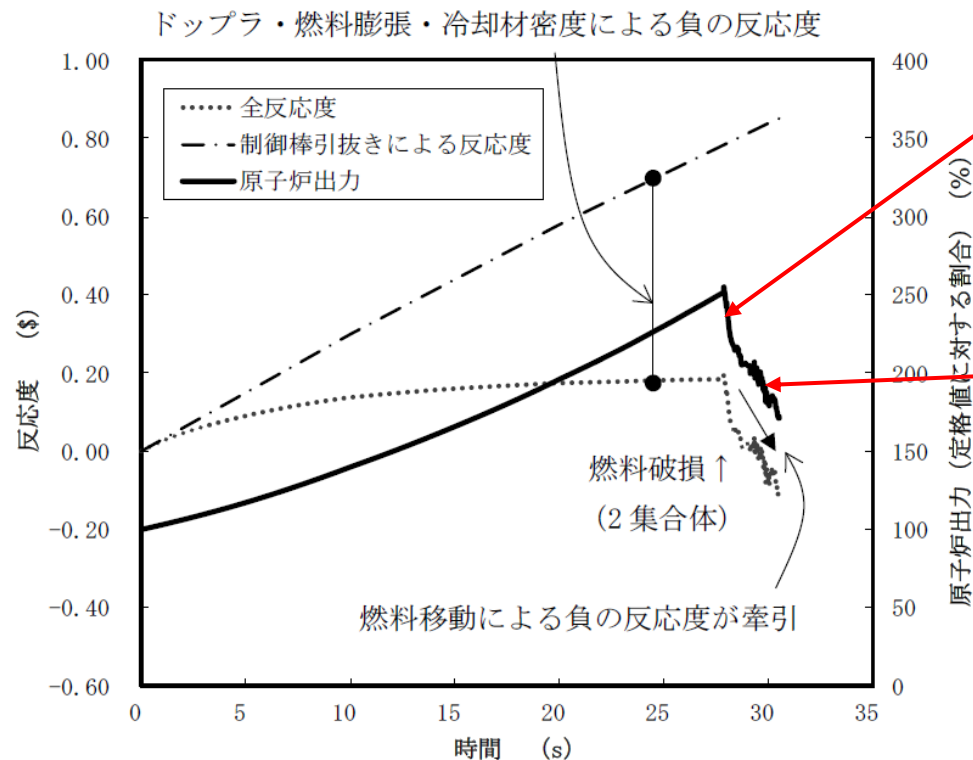
集合体毎に出力や冷却材流量を設定



# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 起因過程の解析条件及び解析結果



## 制御棒の引抜きにより投入される反応度



## 出力及び反応度の推移

### 3. 主な解析条件

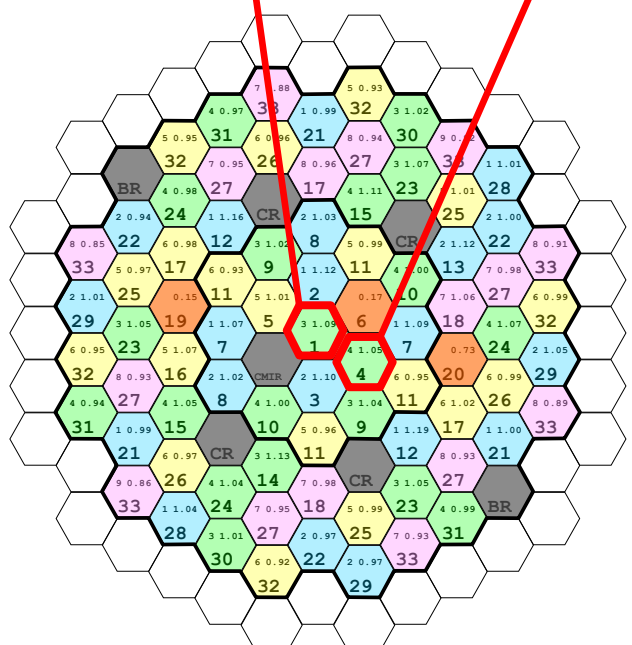
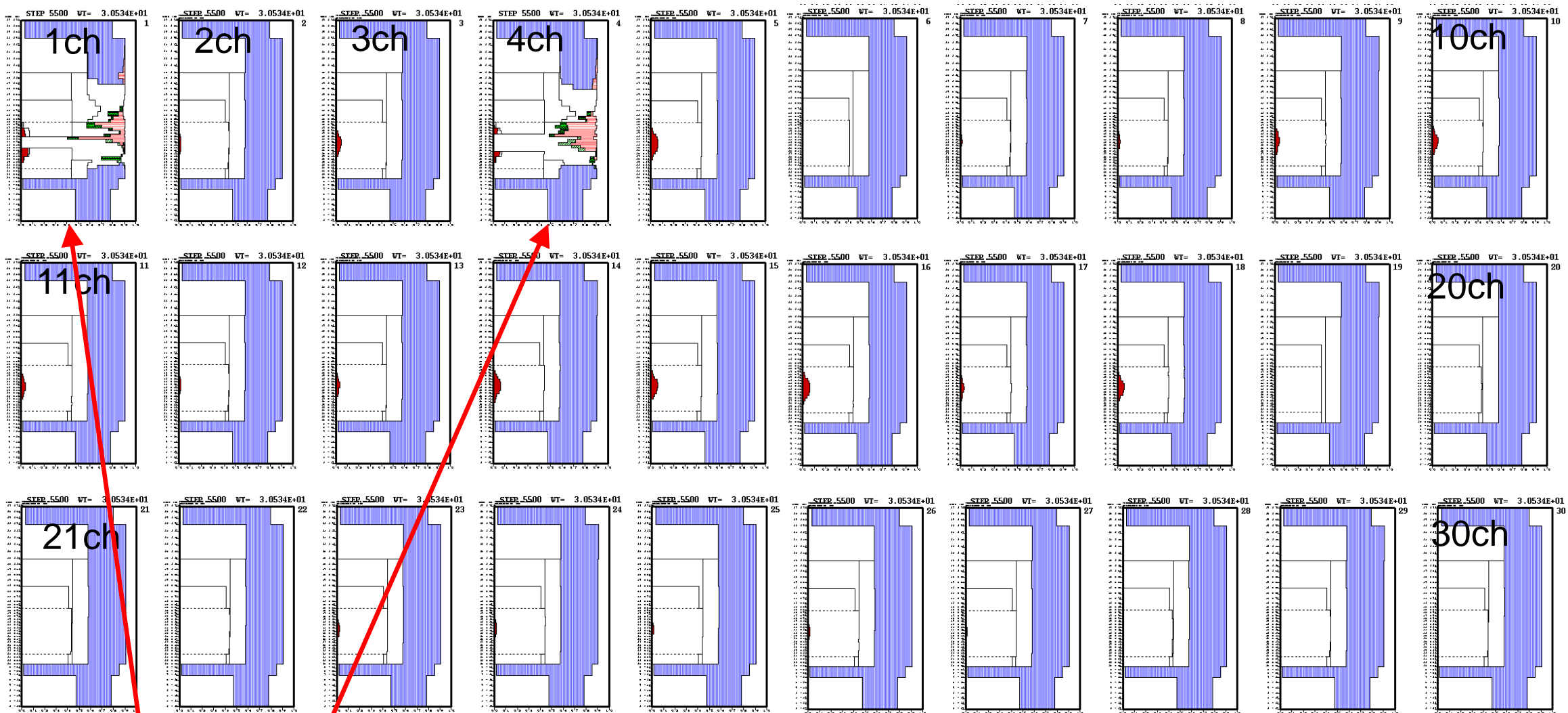
- 最大の反応度値を持つ制御棒1本が最大速度で引き抜かれるものとする。
- 解析対象は起因過程（事故の開始からラツパ管内で炉心燃料が溶融する過程）で、ラツパ管の溶融貫通までを解析する。

### 4. 主な解析結果

- 最大の反応度値を持つ制御棒1本が最大速度で引き抜かれるものとする。
- 燃料の中心部は溶融し、出力と燃焼度が共に高いチャンネルで冷却材は未沸騰のまま燃料が破損に至る。燃料の一部が冷却材流路に放出され、冷却材の流れに運ばれて上部へ分散し、原子炉出力が低下する。
- 被覆管の昇温に伴う強度低下によって燃料は崩壊し、多くの燃料が冷却材流路に放出されるが、この燃料の上下への分散に伴う負の反応度効果と被覆管の上下への分散に伴う正の反応度効果とでは、燃料の分散による効果の方が大きく、原子炉出力は低下する。

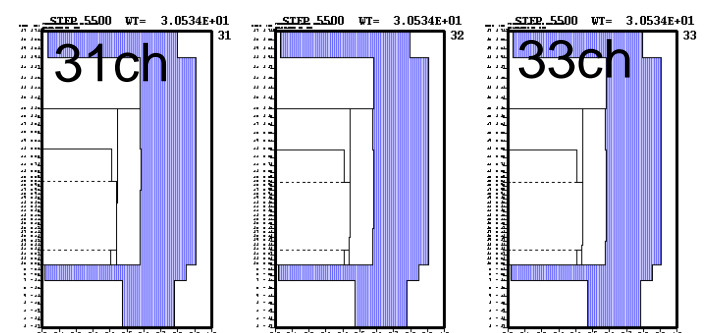
# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価

## 起因過程 (SAS4A) → 遷移過程 (SIMMER-III/IV) 接続時の炉心状態



「常陽」炉心構成図

- 燃料の破損した集合体から周囲へ破損が伝播する以前で、物質移動による反応度変化が静定した約30秒で接続。
- 燃料破損が発生するのは出力と燃焼度が共に高い炉心中心部の1chと4chのみで、その他の集合体は未沸騰。



# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 起因過程の不確かさ影響評価

## 5. 不確かさの影響評価

起因過程の事象推移に影響を与える以下の項目の不確かさの影響評価を行った。なお、これらの各項目の間に相関関係はなく互いに独立であるため、不確かさの重ね合わせは行わない。

項目	不確かさの設定
FPガス保持量	保持量を0%に減じる
制御棒引抜き反応度	反応度挿入曲線の傾きが最大（4.2\$/s）で一定
ナトリウムボイド反応度	炉心の核設計の不確かさ30%であることから、正值領域は×1.3、負値領域は×0.7
ドップラ反応度	UTOPでは燃料温度が上昇し、負値となるため×0.7
燃料の軸伸び	UTOPでは燃料温度が上昇して膨張し、負値となるため×0.7
燃料破損条件	破損燃料の移動を抑制するため、燃料溶融開始直後に破損 燃料分散による負の反応度投入を遅らせるため、50%断面溶融割合の条件で破損

不確かさの影響評価結果では、評価項目に関わる重要なパラメータである反応度に関しては、どの不確かさを考慮したとしても基本ケースと同様に即発臨界（1.0\$）を超えることはなかった。

すなわち、不確かさの影響を考慮したとしても、起因過程は反応度及び出力の上昇は緩慢であり、部分的な炉心損傷のまま後続の遷移過程に移行する。



# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 遷移過程の解析手法及び解析体系

## 1. 解析コード SIMMER-IV

## 2. 基本ケース解析体系の概要

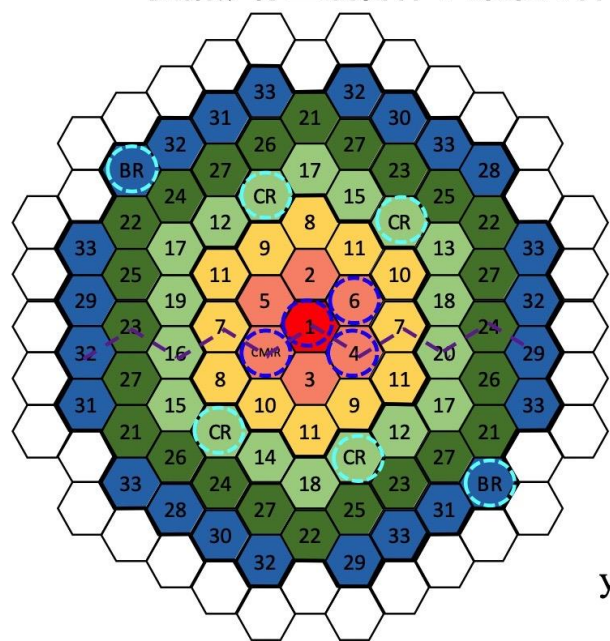
3次元直交座標（流体力学メッシュ：21×19×67）で  
全炉心の崩壊挙動を解析する。

鉛直方向は低圧プレナムからカバーガス領域までを、  
径方向は内側炉心から遮へい集合体までをモデル化する。

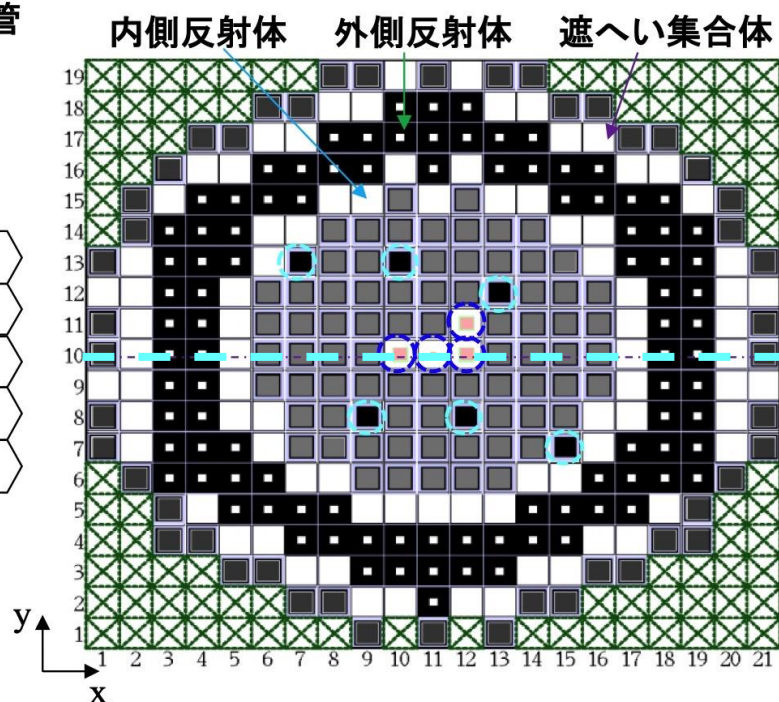
j																						i
66, 67	カバーガス					[黒色領域]											カバーガス					
54, 55	[茶色領域]					ハンドリングヘッド											[茶色領域]					
39~53	ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム		ガスプレナム			
23~38	遮へい集合体		外側反射体		内側反射体		外側炉心		内側炉心		外側炉心		内側反射体		外側反射体		遮へい集合体					
14~22	下部反射体																					
4~13	高圧プレナム																					
1~3	低圧プレナム																					
	1	2	3	4	5,6	7~15											16,17	18	19	20	21	

○: 制御棒下部案内管及び  
後備炉停止制御棒下部案内管

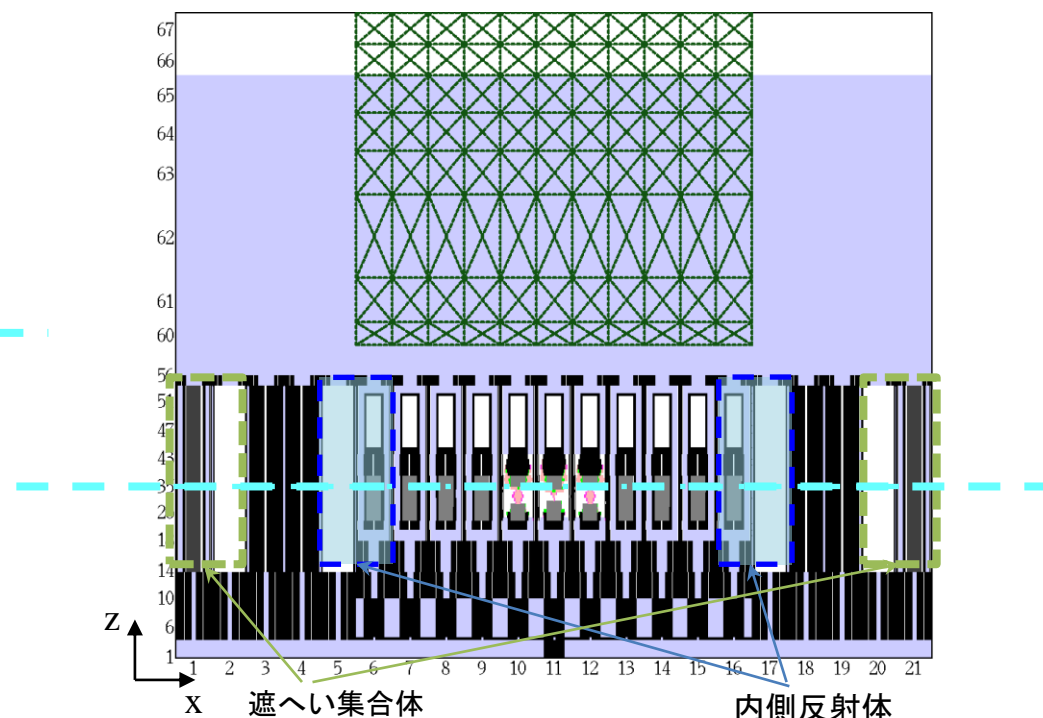
⊗: 計算除外セル



「常陽」炉心構成

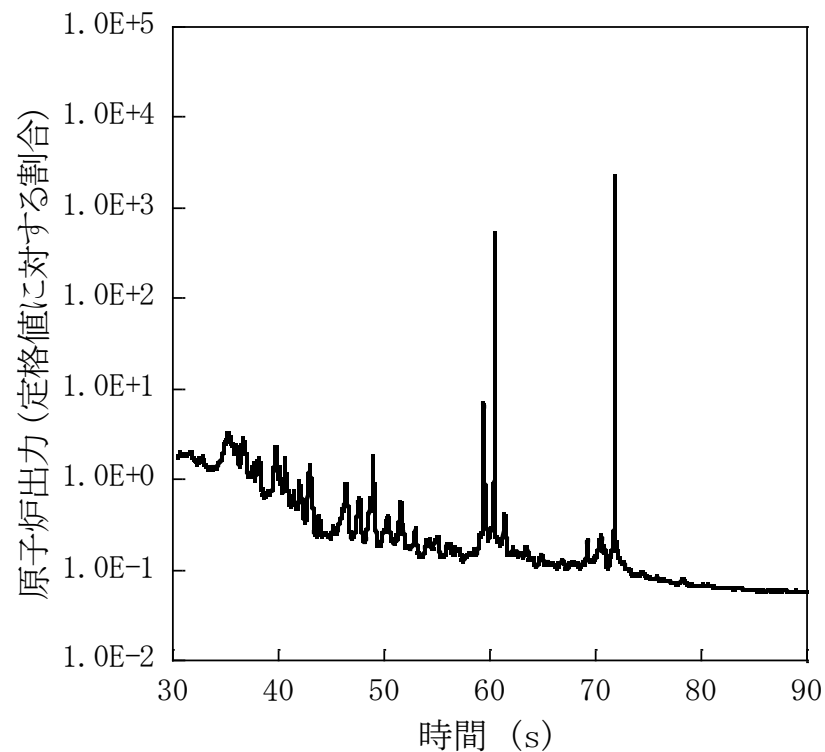


SIMMER-IV計算体系：炉心水平断面図

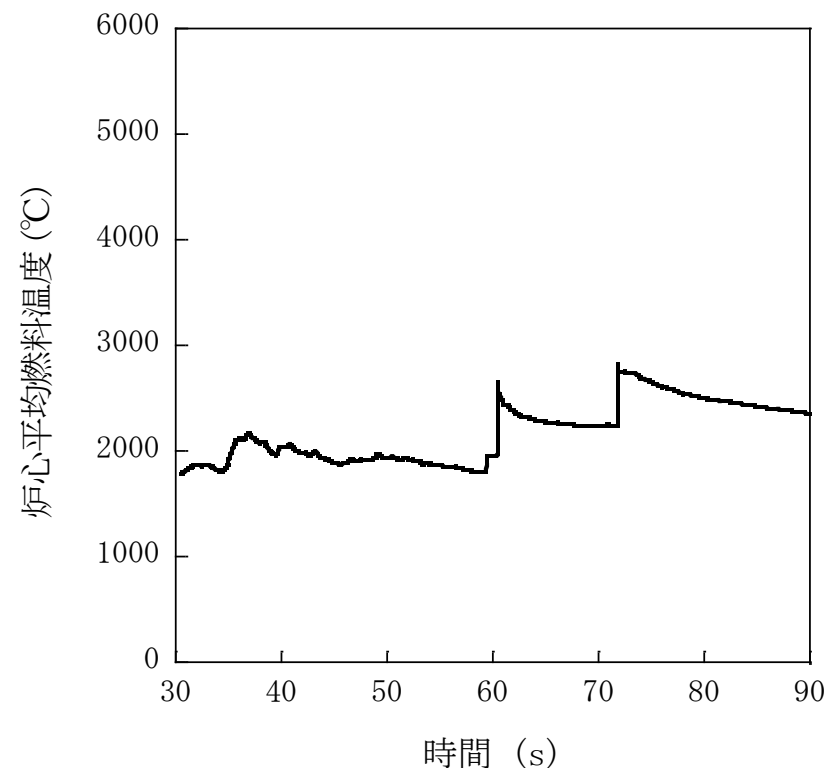


SIMMER-IV計算体系：炉心鉛直断面図

# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 遷移過程の解析条件及び解析結果



原子炉出力の推移



炉心平均燃料温度の推移

## 3. 主な解析条件

- 起因過程と同様に最大の反応度値を持つ制御棒1本が最大速度で引き抜かれるものとする。
- 健全状態で定格時冷却材流量を再現するように出入り口の圧力境界条件を設定する。その他の解析条件はULOFと同一の条件を用いる。

## 4. 基本ケースの主な解析結果

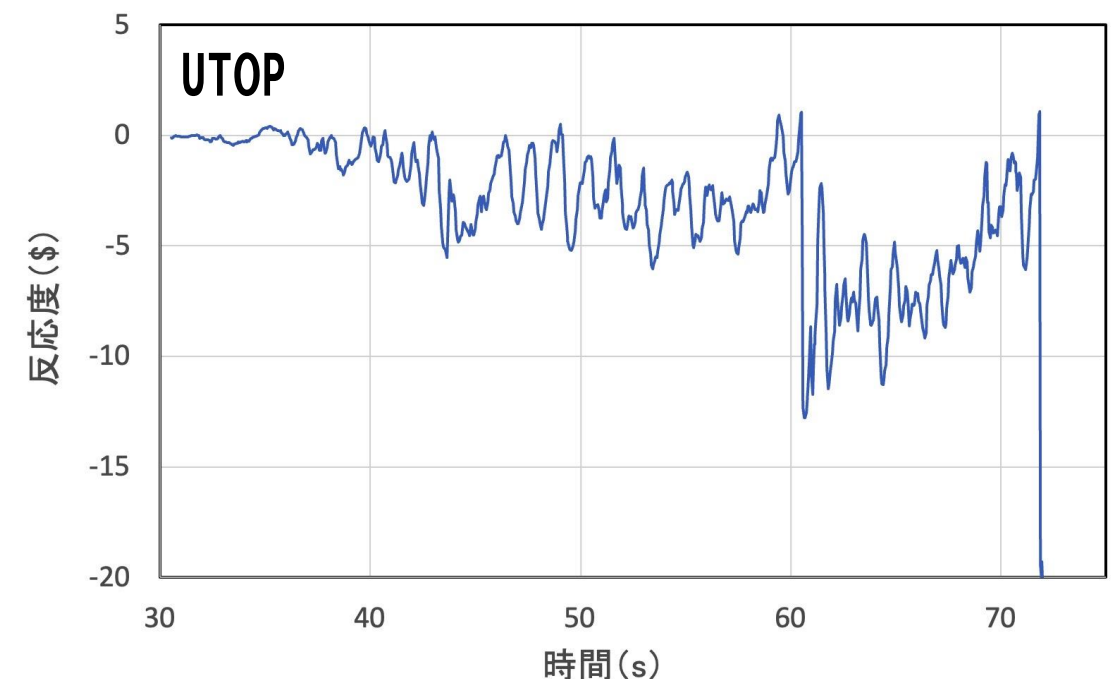
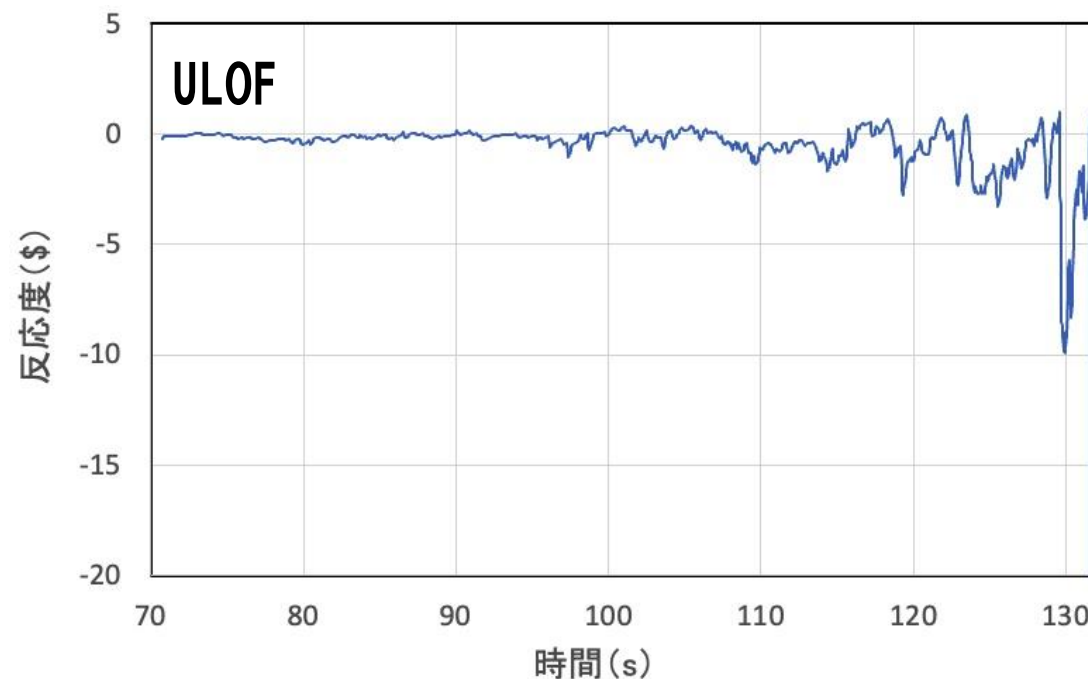
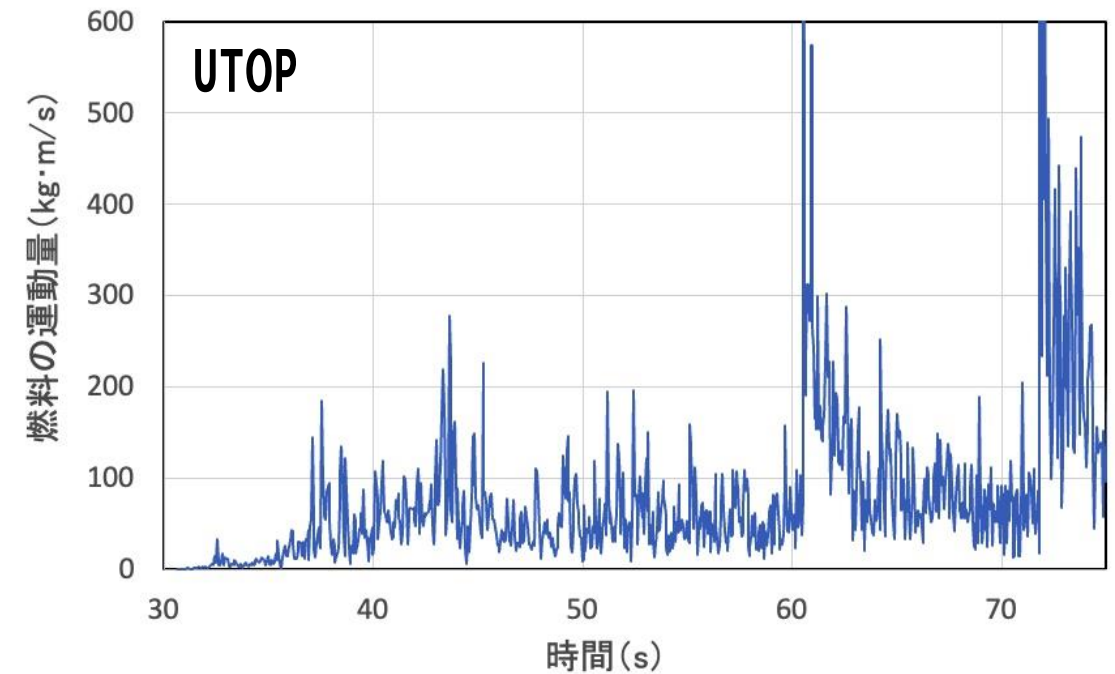
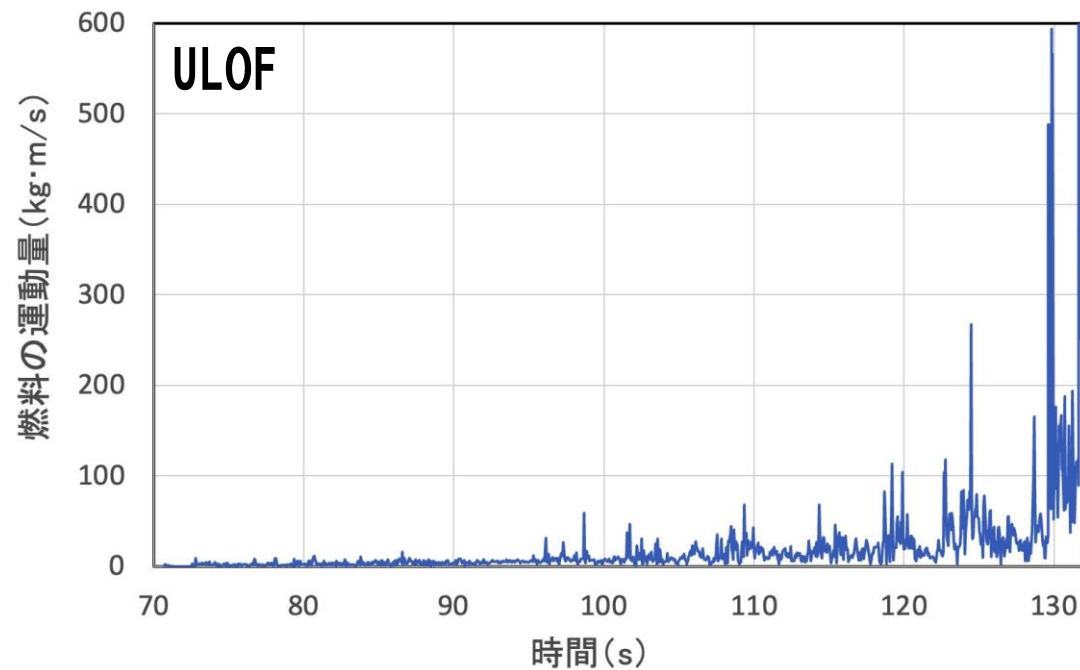
- UTOP開始から約50秒までに炉心燃料集合体の約40%が破損する。
- 1次主循環ポンプが運転を継続しているため、炉心下部の固化燃料とスチールによる閉塞が不完全な部分から流入するナトリウムとのFCIによって炉心物質が分散され、炉心下部への大規模な堆積を妨げる。このため、反応度と原子炉出力は増減を繰り返しつつも全体として低下する。
- 炉心下部への損傷燃料の堆積によって、事象開始後約60秒及び約72秒に反応度が即発臨界を超過するが、その場合でも大きなエネルギー放出に至ることはない。
- 約72秒での即発臨界超過後、ナトリウムとスチール蒸気圧によって炉心燃料の約30%が流出し、未臨界（ $\beta < -30$ 以下）となって核的な事象推移は終息する。このときの炉心平均燃料温度の最大値は約2,820°Cである。
- UTOP遷移過程の事象推移はULOFに比べて大きなエネルギー放出を伴うものではない。損傷した集合体の炉心下部で冷却材蒸気圧力が頻繁に発生することで炉心物質を分散させるため、炉心下部での損傷燃料の堆積を妨げられることにある。



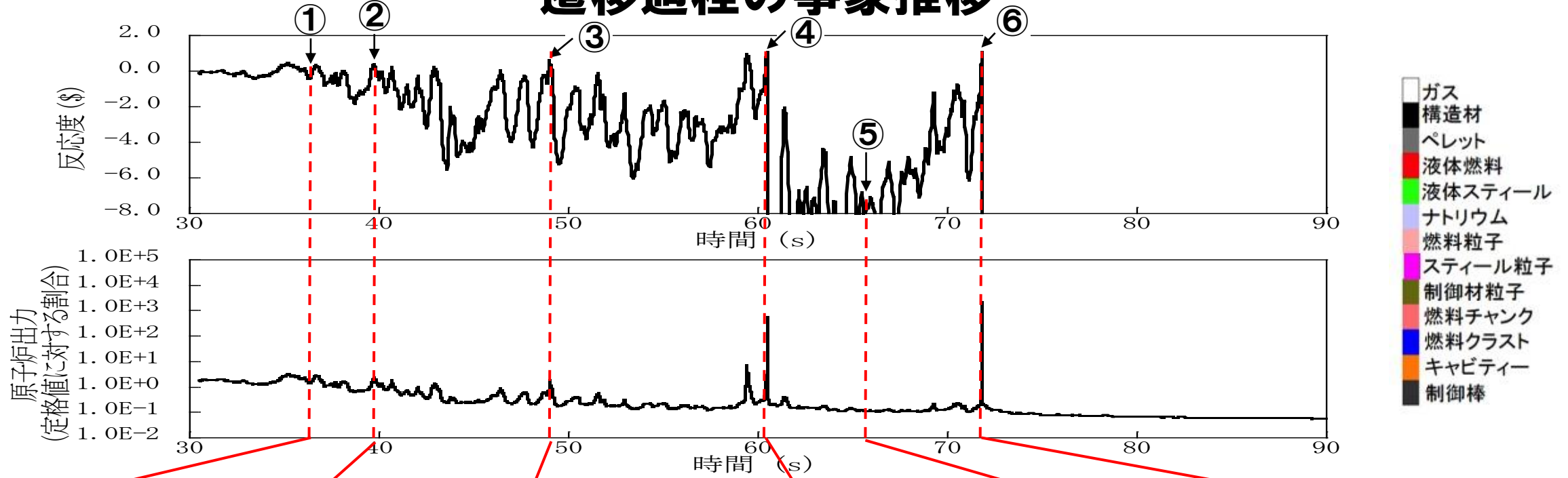
# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価

## 事象推移のULOFとの比較

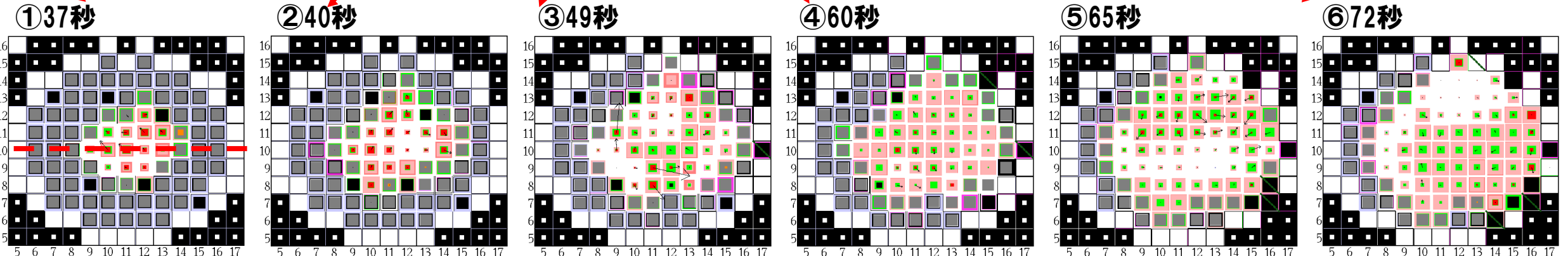
- 遷移過程解析開始からエネルギー発生までの燃料の運動量と反応度の時間変化を示す。
- UTOPでは炉心下部のFCIによる燃料分散が頻繁に発生し、炉心内の燃料の運動量、反応度ともに遷移過程の初期からULOFに比べて振幅が大きい。
- FCIが発生するのは炉心プールの下部であるため、燃料を分散させる方向に働き、燃料の堆積と燃料凝集が妨げられ、ULOFに比べて即発臨界超過によるエネルギー放出は抑制される。



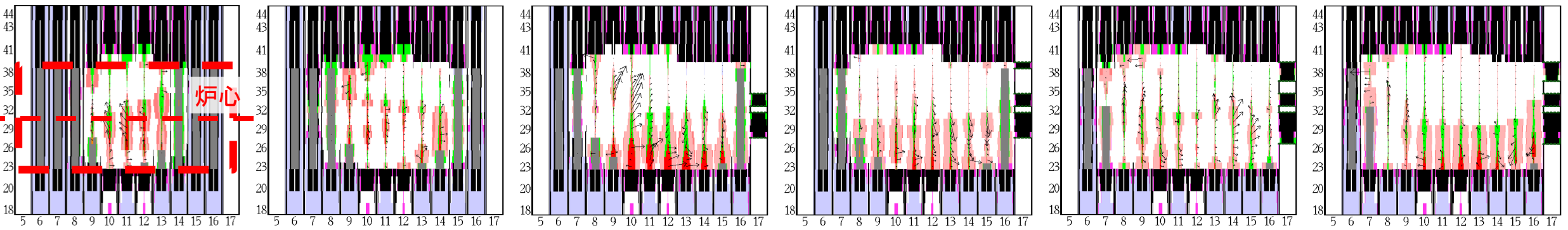
# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 遷移過程の事象推移



水平断面物質分布



縦断面物質分布



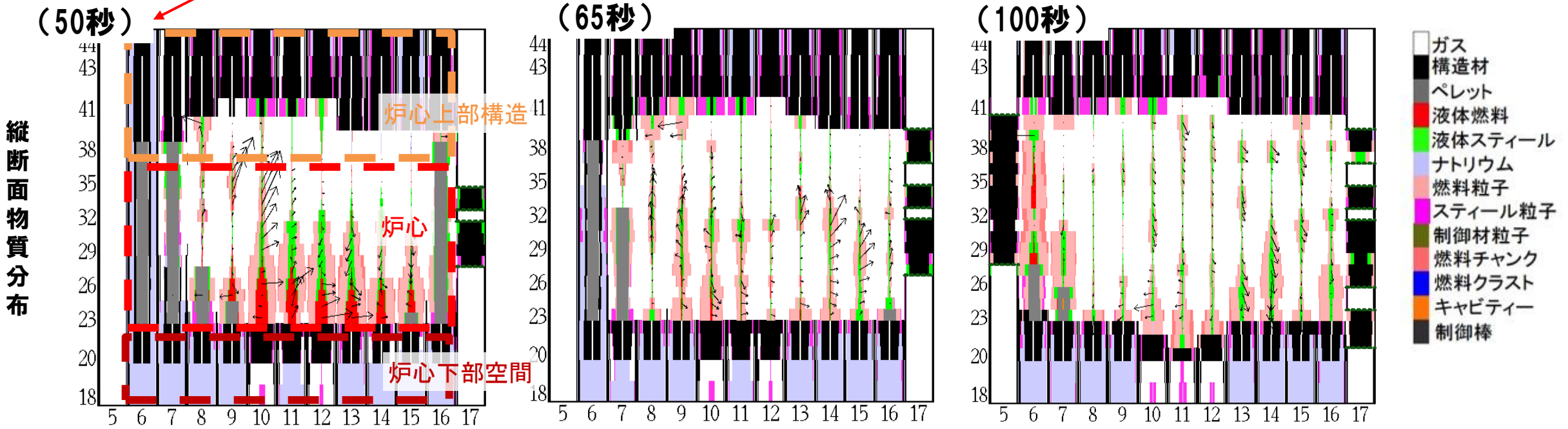
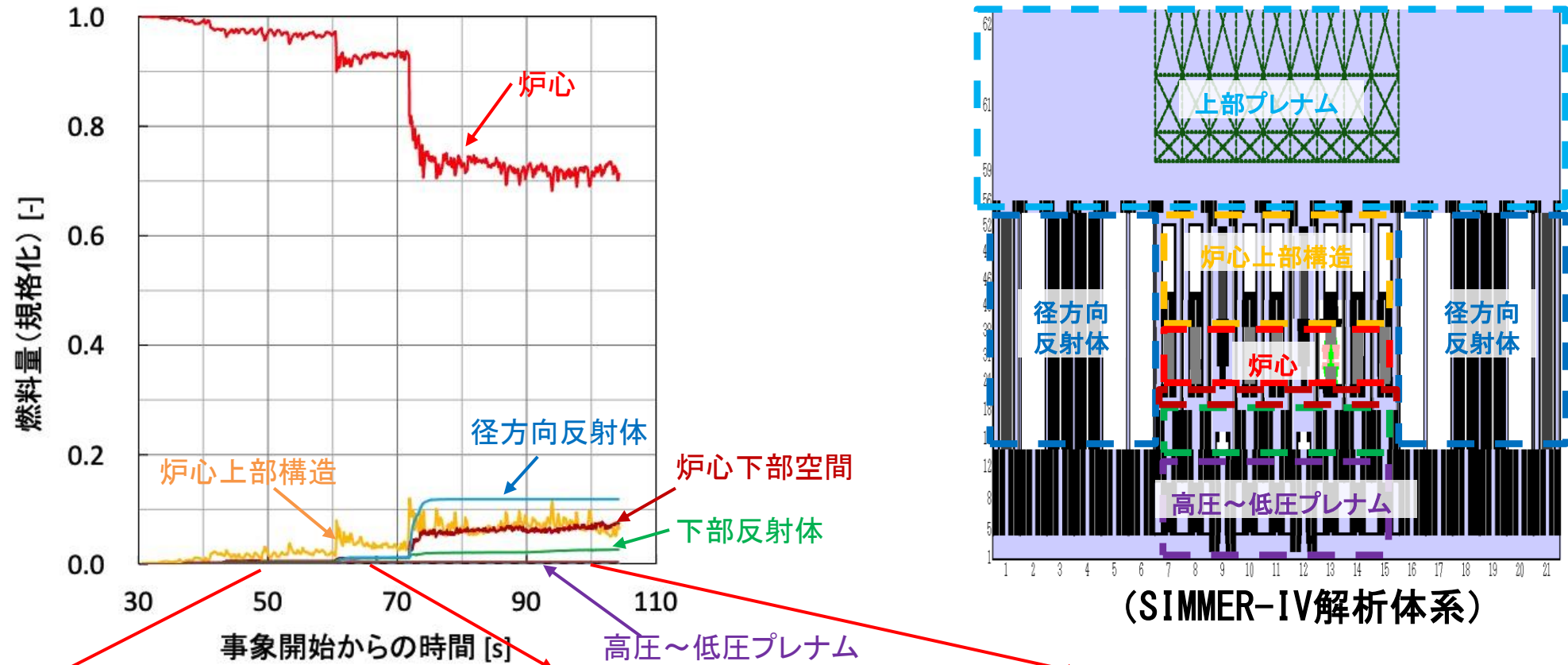
①～③ 損傷燃料は下部に堆積しようとするが、1次主循環ポンプの運転が継続しているため、炉心下部のFCIによって燃料が分散することで反応度は増減を繰り返す。約50秒までに炉心の約40%の燃料が損傷する。

④ 損傷して堆積する燃料の増加により初めて即発臨界を超過する。

⑤ 分散する燃料の増加によって反応度は-8\$程度まで低下する。

⑥ ⑤で分散していた燃料のほとんどが炉心下部に堆積し、FCI圧力で凝集することで即発臨界を超過。

# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 遷移過程及び遷移過程収束後の物質配位



- 約60秒の即発臨界超過によって炉心上部構造へ約10%の燃料が流出する。
- 約72秒の即発臨界超過後、径方向反射体の集合体間ギャップに約12%、炉心上部構造に約7%、炉心下部空間に約7% 流出する。反応度は約74秒で約-30\$以下となって事象推移は静定する。

# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価

## 燃料スロッシングの不確かさ影響評価の解析手法及び解析体系

### 5. 不確かさの影響評価

ULOFと同様に遷移過程の後期の段階で大規模な燃料移動に影響を及ぼす条件又は解析上の想定における不確かさを考慮することとする。

UTOPの遷移過程解析における不確かさ影響評価においても、FCIの発生条件に関する不確かさ影響評価と、炉心プールのスロッシングの不確かさを包絡する2次元円筒座標系を用いた解析によって炉心中心への溶融燃料の凝集移動を仮想的に発生させる不確かさ影響評価を実施した。

はじめに、SIMMER-IIIコードによるスロッシングの不確かさを包絡する解析ケースについて説明を行う。

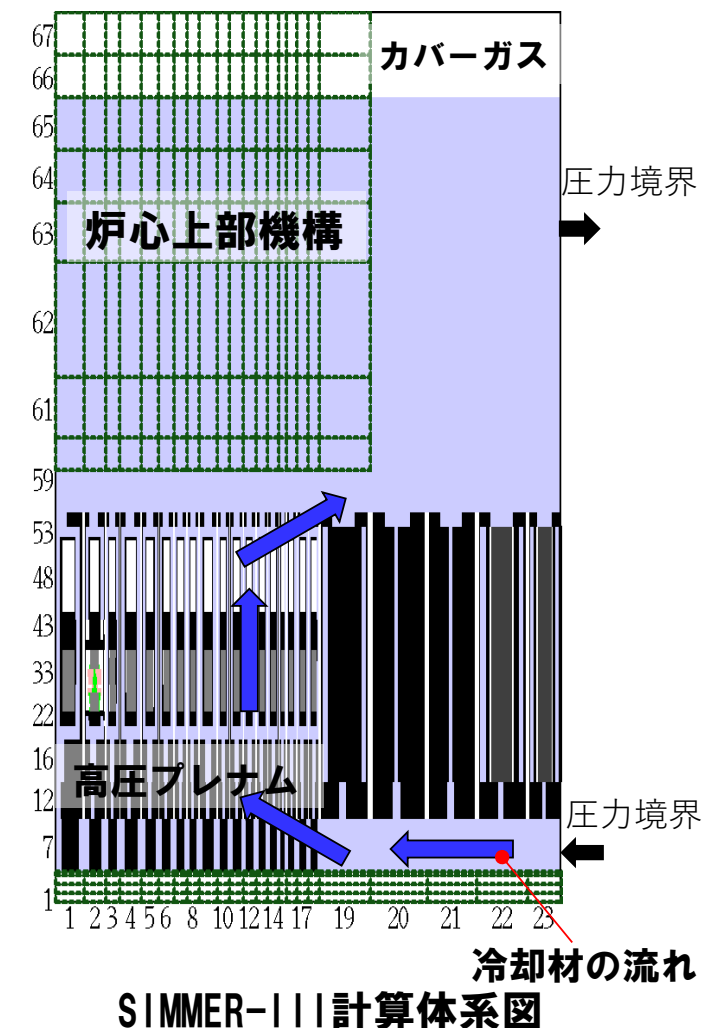
### 6. 解析コード

SIMMER-III

### 7. 解析体系の概要

燃料移動に影響を与える物理現象の不確かさの影響を包絡的に評価することを目的として、2次元円筒座標で炉心中心への軸対称な燃料集中を許容する解析を実施した。

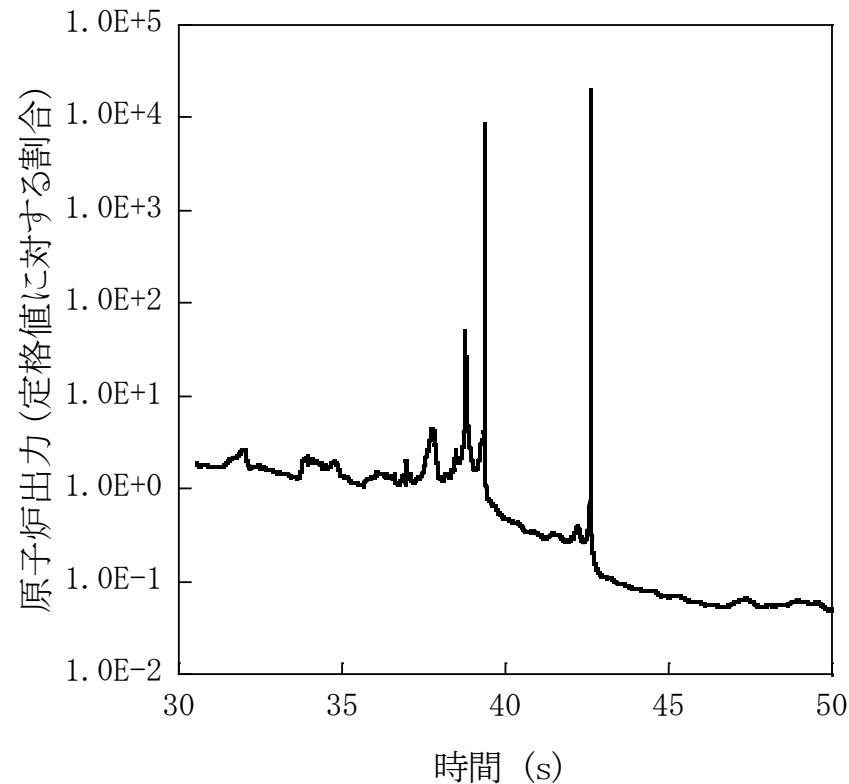
基本ケースにおけるB型・C型照射燃料集合体に加えて制御棒、後備炉停止制御棒も炉心燃料集合体に置き換える。



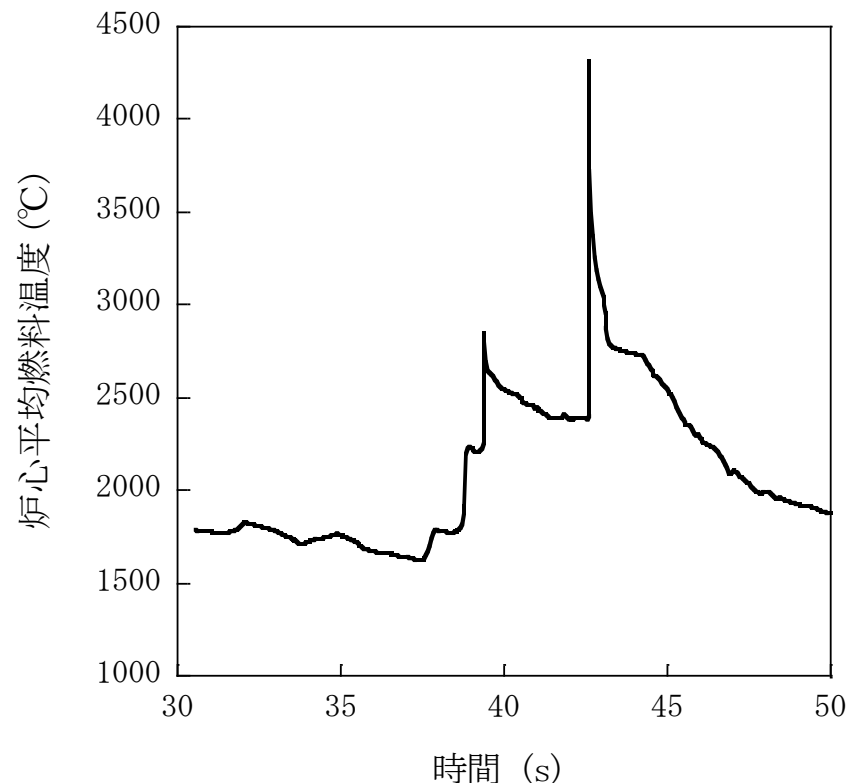


# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価

## 燃料スロッシングの不確かさ影響評価の解析条件及び解析結果



原子炉出力の推移



炉心平均燃料温度の推移

### 8. 主な解析条件

- 起因過程と同じく制御棒の誤引抜きによる反応度投入を想定する。
- 健全状態で定格時冷却材流量を再現するように出入り口の圧力境界条件を設定する。
- その他の解析条件はULOFと同一の条件を用いる。

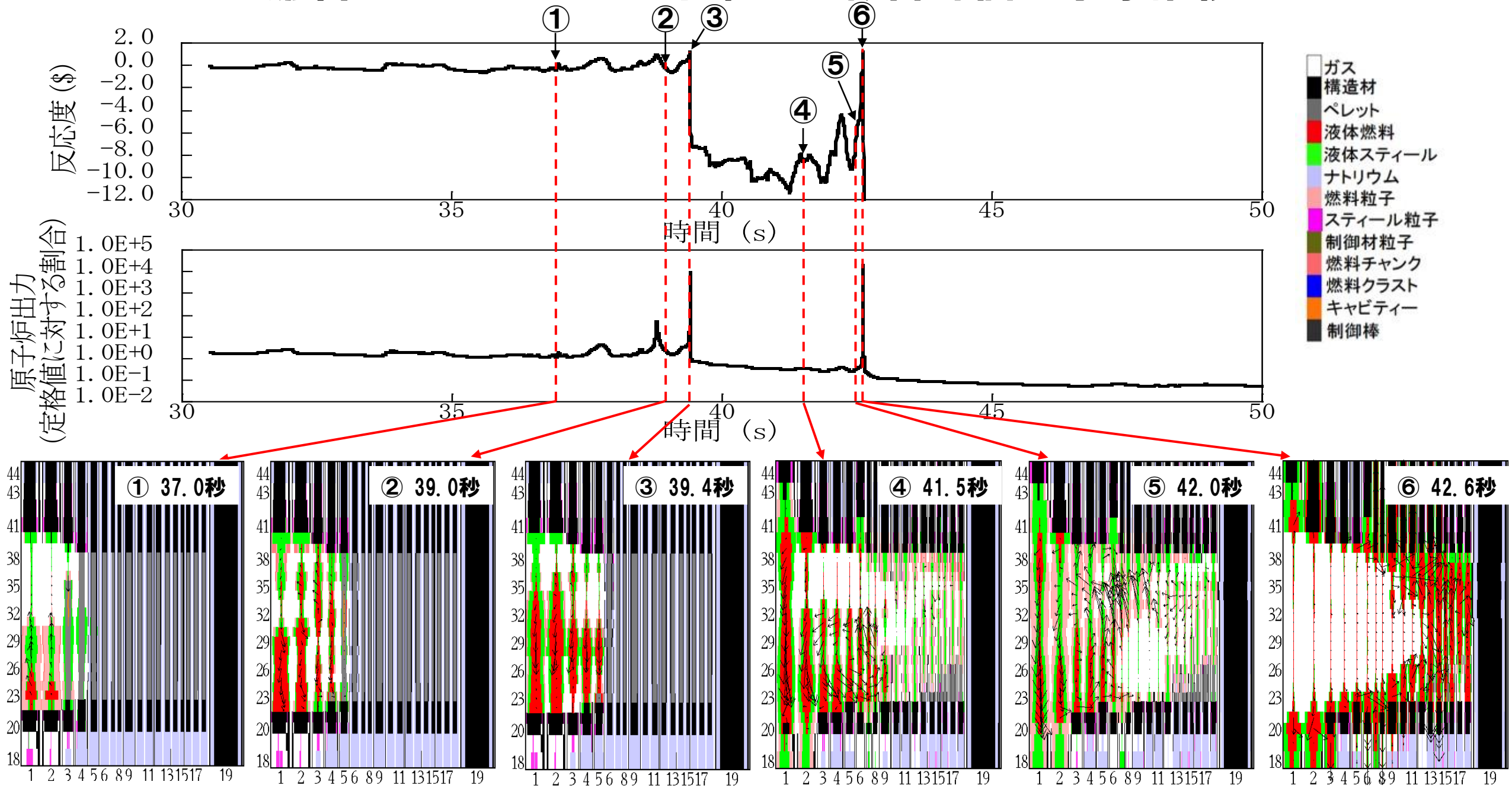
### 9. 主な解析結果

- 外側炉心下部で発生したFCIによって炉心中心に向かう燃料凝集が発生することによって反応度が即発臨界を超過するが、炉心平均燃料温度の最大値は約4,300°Cであった。
- 2次元円筒座標系で解析するため、FCIは必ず円周周囲で同時に発生するという、燃料集中の駆動力として極めて仮想的な保守的な想定になる。
- FCIは炉心下部で発生するために、燃料を炉心中心に集中させる一方で、上方に分散させる。



# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価

## 燃料スロッシングの不確かさ影響評価の事象推移



① 破損伝播と伝播先の集合体における燃料沈降により反応度上昇。

② 出力上昇によって損傷領域の拡大と燃料の溶融に至る。

③ 溶融領域に接する健全集合体のラツパ管破損に伴うFCIにより溶融燃料が炉心下部に凝集して最初の即発臨界超過が発生。

④ ③の即発臨界超過による燃料分散により反応度は-10\$程度まで低下する。

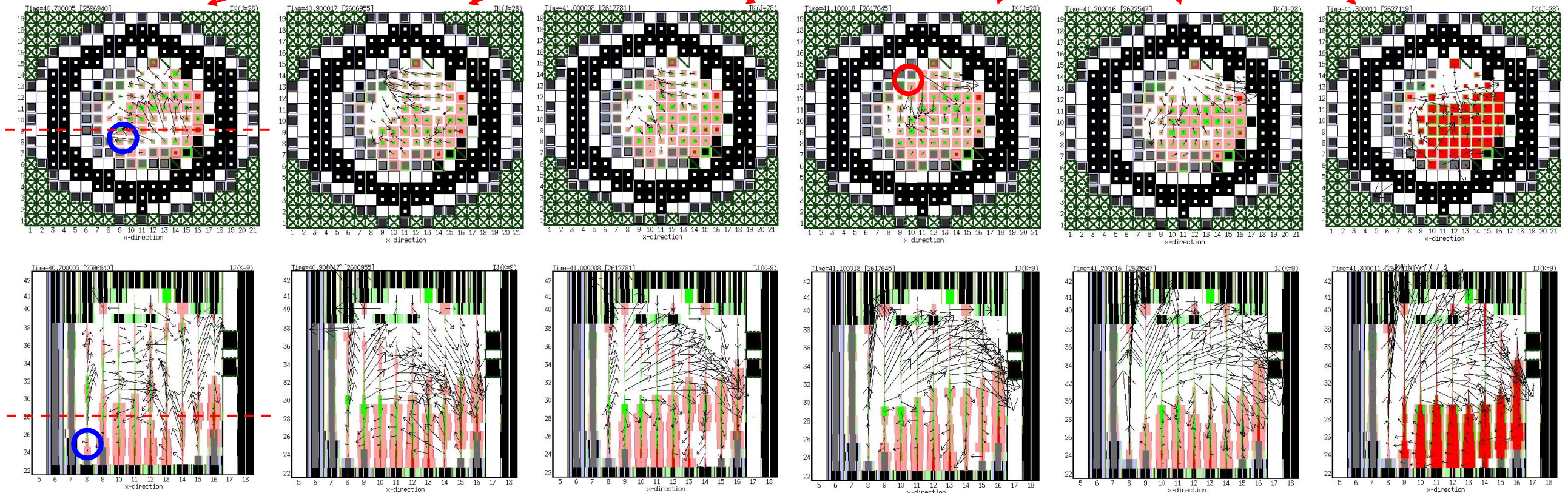
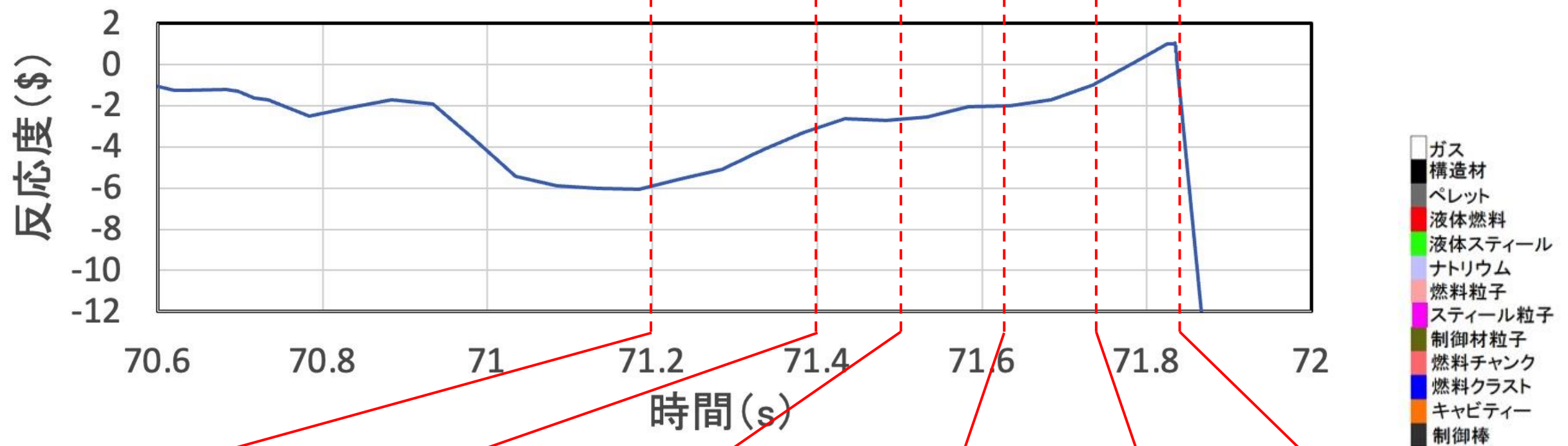
⑤ 炉心下部で発生したFCIによって炉心中心への燃料凝集が加速される。

⑥ ⑤の燃料凝集によって厳しい即発臨界超過となり、炉心上下への燃料流出によって反応度は-200\$以下に低下する。



# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価

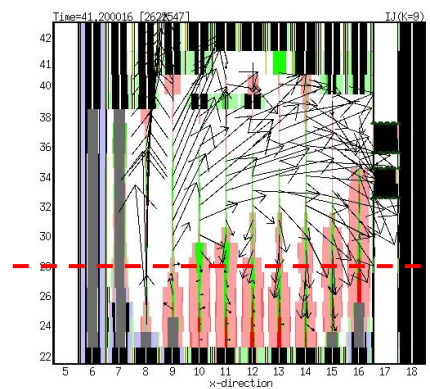
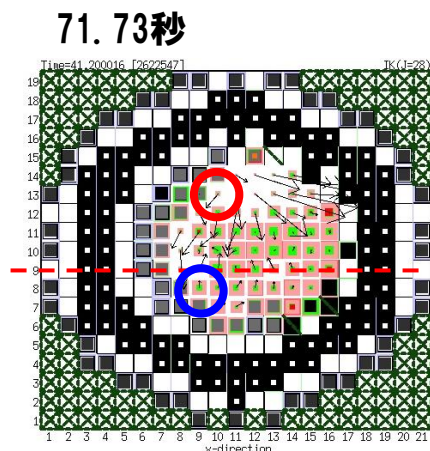
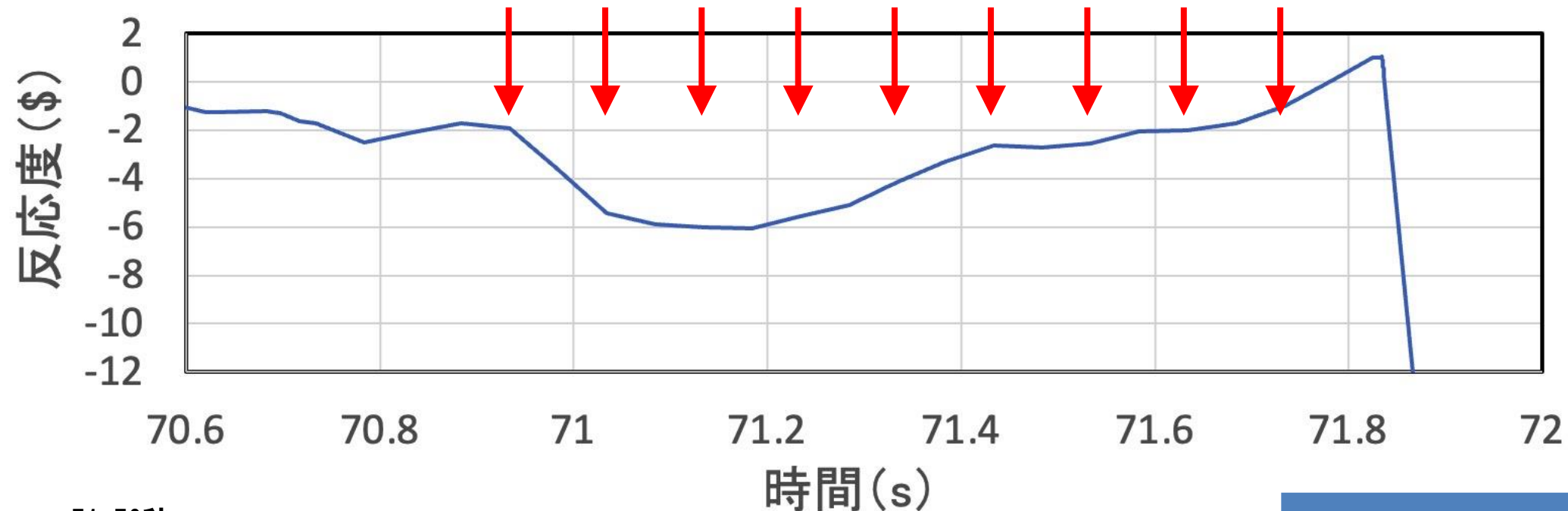
## FCIの不確かさ影響評価 (1/2)



- 基本ケースでは約71.2sの水平断面図左下（青丸）炉心下部のFCIで吹き上げられた炉心物質が約71.6sの水平断面図上部の炉心下部で発生したFCIによって水平断面図右下の炉心下部に集中することで、即発臨界を超過した。



# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 FCIの不確かさ影響評価 (2/2)



〇 ガス  
 〇 構造材  
 〇 ペレット  
 〇 液体燃料  
 〇 液体スチール  
 〇 ナトリウム  
 〇 燃料粒子  
 〇 スチール粒子  
 〇 制御材粒子  
 〇 燃料チャック  
 〇 燃料クラスト  
 〇 キャビティー  
 〇 制御棒

- 基本ケースでは約71.2sの水平断面図左下（青丸）炉心下部のFCIで吹き上げられた炉心物質が約71.6sの水平断面図上部のFCIによって水平断面図右下の炉心下部に集中することで、即発臨界を超過。
- この燃料集中を加速する水平断面図左上（赤丸）の炉心下部で約80atm程度のFCIを強制的に発生させる。時間は上図の矢印で示す70.93～71.73sまで0.1s間隔とする。

FCI時刻(s)	炉心平均燃料温度(°C)
基準ケース	約2,820
70.93	約2,750
71.03	約2,950
71.13	約3,600
71.23	約2,840
71.33	約3,410
71.43	約2,830
71.53	約3,060
71.63	約3,190
71.73	約2,750
スロッシング不確かさ影響評価ケース	約4,300

# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価

## 機械的応答過程解析の解析条件

### 2. 解析条件

- 本解析の基本ケースでは、遷移過程まで標準的な条件を用いて事象推移を解析し、炉心部での熱エネルギーの発生を解析したケースにおいて炉心平均燃料温度が最大となる時点の炉心の物質及び温度配位を用いる。
- これらの不確かさの影響評価の結果、機械的応答過程に最も大きな影響を持つ不確かさは遷移過程までの事象推移における不確かさ、すなわち解析初期条件としての放出熱エネルギーの大きさであると考えられる。
- 不確かさ影響評価解析ケースの機械的エネルギーは約2.3MJとなった。これはULOF (i) の不確かさ影響評価解析ケースの約3.6MJよりも小さく、UTOPの原子炉容器の構造応答、遮へいプラグの応答及びナトリウム噴出量はULOFの解析結果に包絡される。

	基本解析ケース	不確かさ影響評価解析ケース
炉心部の物質及び温度配置	遷移過程の基本ケースにおいて、炉心平均燃料温度が最大となる時点の物質及び温度配置	遷移過程の解析においてエネルギー発生に大きな影響を与える不確かさの影響を考慮したケースにおいて、炉心平均燃料温度が最大となる時点の物質及び温度配置
炉心平均燃料温度	接続時：2820℃	接続時：4300℃
炉心平均スチール温度	接続時：1455℃	接続時：2207℃
カバーガス圧力	0.1 MPa	0.1 MPa
機械的エネルギー	約1.9MJ	約2.3MJ

# UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 まとめ

- 「常陽」のUTOP事象における著しい炉心損傷後の事象推移解析を実施し、格納容器破損防止措置の有効性評価を行った。
- 起因過程及び遷移過程の評価から、即発臨界超過時のエネルギー放出は不確かさを考慮してもULOFよりもはるかに小さい（炉心平均燃料温度の最大値はFCIの不確かさ影響評価ケースで約3,600°C、燃料スロッシングの不確かさ影響評価ケースで約4,300°C）。このため発生する機械的エネルギー、原子炉容器の構造応答、遮へいプラグの応答及びナトリウム噴出量はULOFの解析結果に包絡される。
- 燃料スロッシングの不確かさ影響評価ケースで発生した機械的エネルギーは約2.3MJである。これはULOF(i)の約3.6MJよりも小さい。すなわち即発臨界超過によるエネルギー放出が発生した場合でも原子炉冷却材バウンダリの健全性は保たれ、ナトリウムの漏えいや格納容器（床上）への噴出は生じず、ナトリウム燃焼等に対して格納容器の健全性は維持される。
- UTOPではULOFよりも大きな1次冷却材流量が確保されることから、原子炉容器内で再配置した燃料及び炉心残留燃料の冷却もULOFに比べて容易である。したがって、本事象においても原子炉冷却材バウンダリの健全性に影響を及ぼすことはない。
- 以上より、出力運転中の制御棒の異常な引抜き及び原子炉トリップ信号発信失敗の重畳事故を想定しても格納容器の破損は防止され、施設からの多量の放射性物質等の放出は防止される。