



JY-114-1

**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
計算コード及び有効性評価等に対するコメントへの回答**

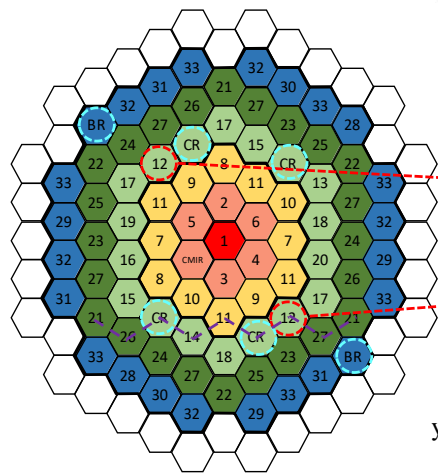
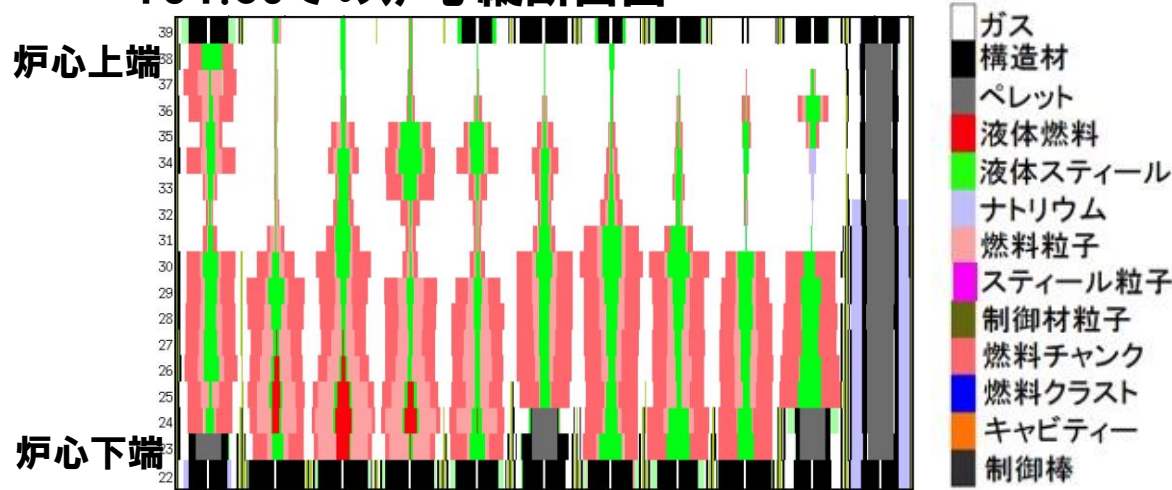
2022年2月8日

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部**

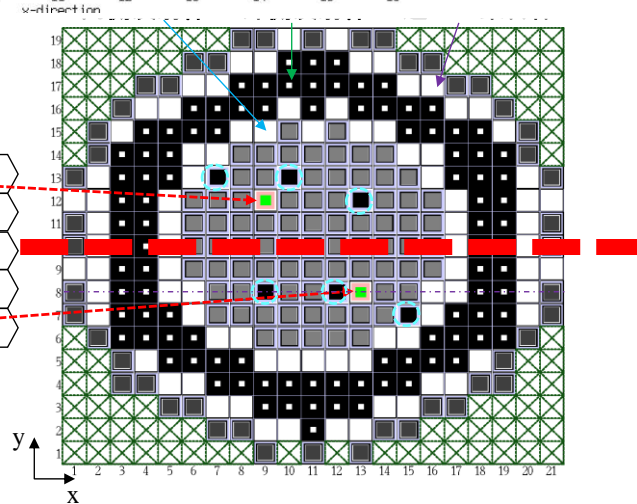
No.257 炉心物質の粘性を考慮した場合の SIMMER による事象推移の解析結果を説明すること。



131.6sでの炉心縦断面図

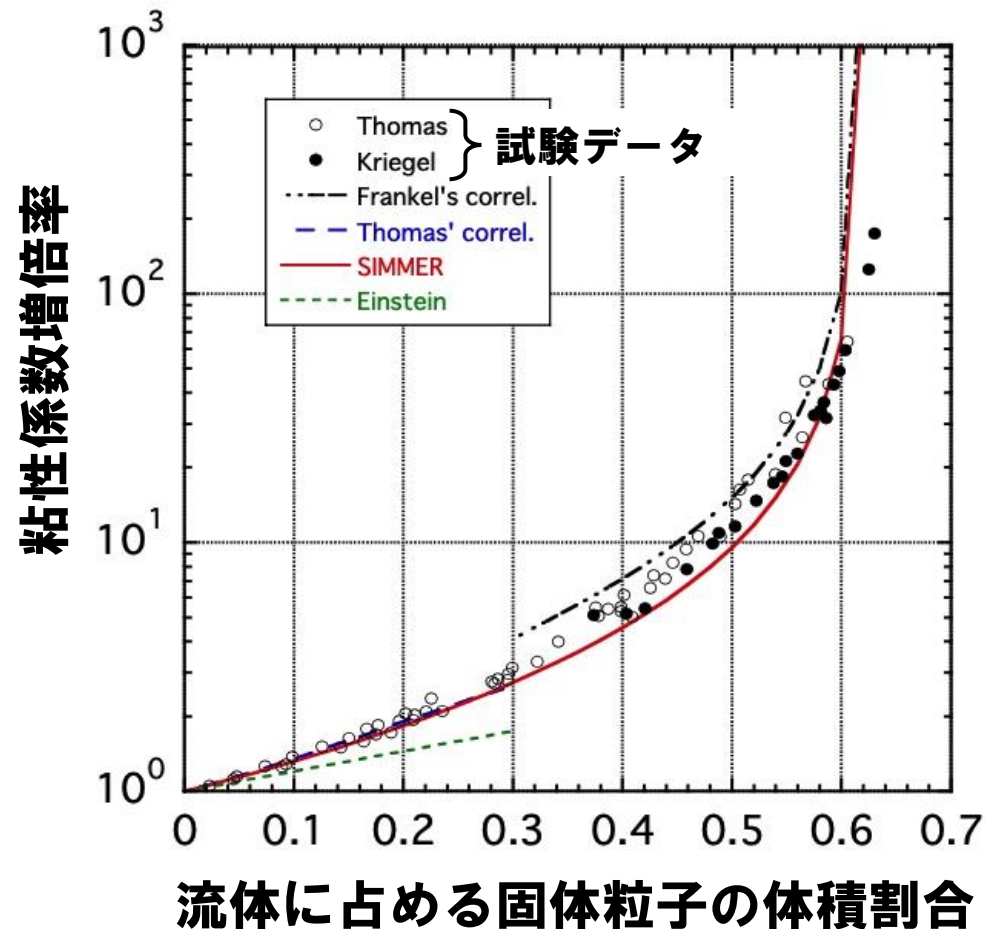


「常陽」炉心構成

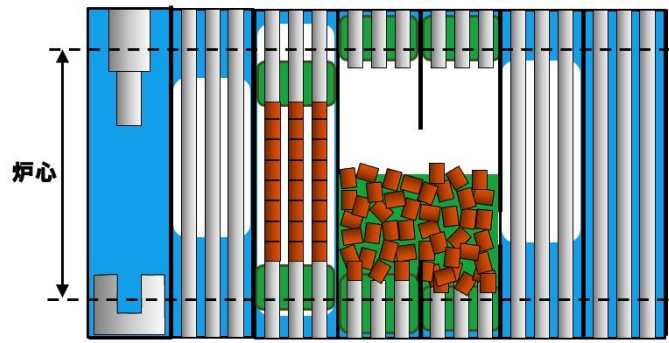


SIMMER-IV計算体系：炉心水平断面図

- 「常陽」は、ほぼ全炉心でボイド反応度が負であるため、損傷領域の拡大の過程で原子炉出力が増加せず、炉心の損傷進展が緩慢となる。
- 全炉心規模に損傷が拡大する遷移過程においても、最後の即発臨界超過による出力逸走の直前まで炉心は固体の燃料粒子のデブリベッドの間隙を溶融したスティールが占め、固体粒子の体積割合は約0.8前後である。
- この様な炉心物質の実効的な粘性は、極めて大きく（下図）、現実には炉心物質はほとんど流動できない。



流体に占める固体粒子の体積割合



■ 「常陽」は、ほぼ全炉心でボイド反応度が負であるため、損傷領域の拡大の過程では冷却材が沸騰しても原子炉出力が増加せず、炉心の損傷進展が緩慢となる。

燃料ペレット	被覆管・構造材	ナトリウム
熔融燃料	熔融スチール	気相
固化燃料	固化スチール	

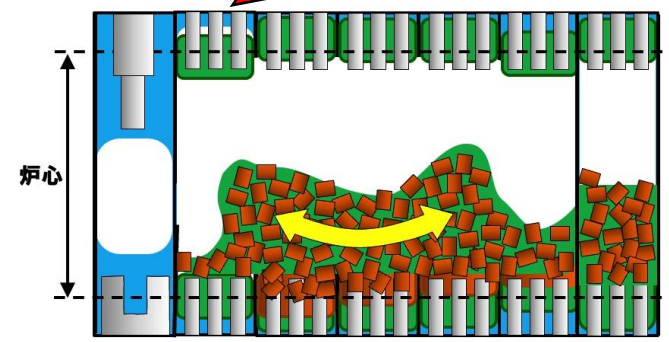
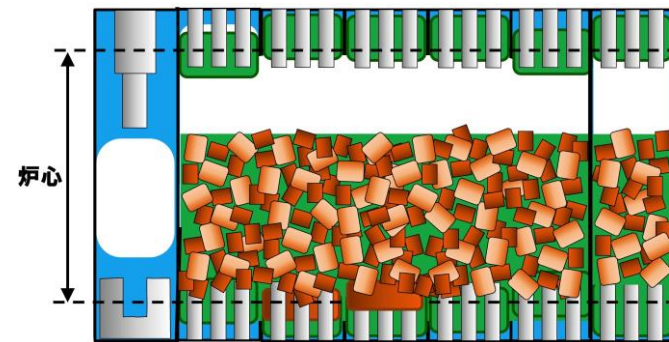
現実的な事象推移

保守的想定 (1)

燃料はスエリングせず、焼結密度で堆積する。

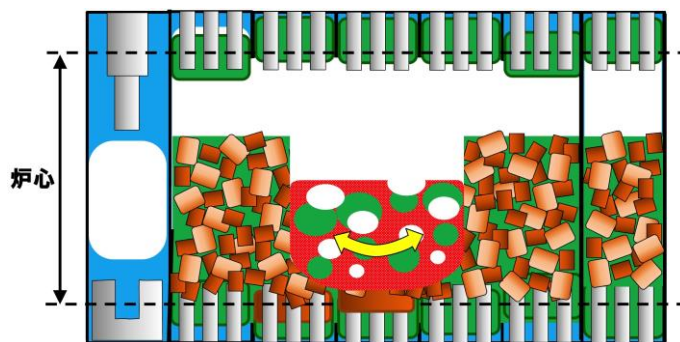
保守的想定 (2)

炉心物質の流動解析における粘性率をゼロとする。



- 燃料はスエリング（固体状態でのFPガスによる膨張）し、炉心高さの約70%程度を占め、流動及びスロッシングが制限される。
- 炉心物質の実効的な粘性は極めて大きく、炉心物質はほとんど流動できない。

- 本来流動性が極めて低い未熔融の固体燃料粒子と熔融スチールが混在した炉心物質も粘性率ゼロでスロッシングするとの想定を用いて解析を実施した。



- 核発熱によって炉心の中心から熔融する。スロッシングは熔融している限られた範囲で発生し、その結果発生する即発臨界超過による発生エネルギーは限定されたものになる。



「常陽」解析における炉心スロッシングによるエネルギー発生

No.259 燃料凝集率と反応度挿入率の評価に関して、燃料物質の分布等を踏まえた定量的な評価について説明すること。

■ 燃料凝集量 (Coagulation)

$$C = \frac{R_{C0}}{R_c} \quad R_c = \int_{core} \bar{\rho}_f |\vec{r}_G| dV / \int_{core} \bar{\rho}_f dV$$

C はcoagulation、 $\bar{\rho}_f$ は燃料の巨視的密度、 \vec{r}_G は重心からの位置ベクトル、 R_c は重心からの距離の燃料密度による重み付き平均、 R_{C0} は遷移過程解析開始時点での R_c

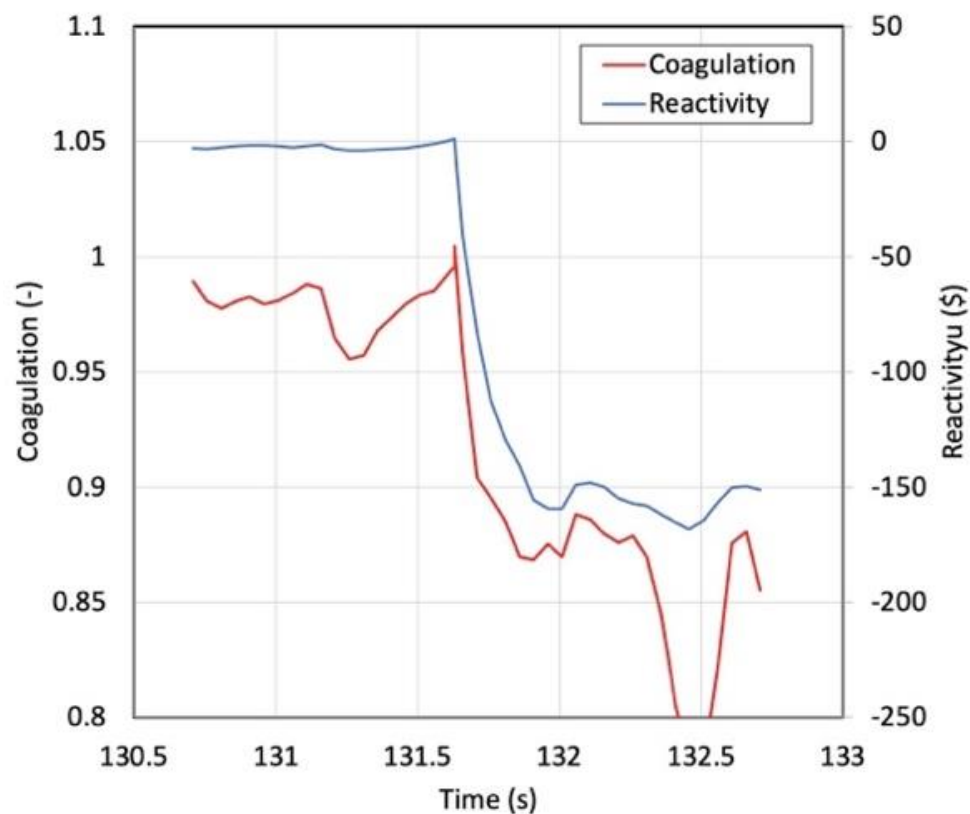
■ 燃料凝集率

$$V_c = - \int_{core} \bar{\rho}_f \vec{e}_G \cdot \vec{v}_f dV / \int_{core} \bar{\rho}_f dV$$

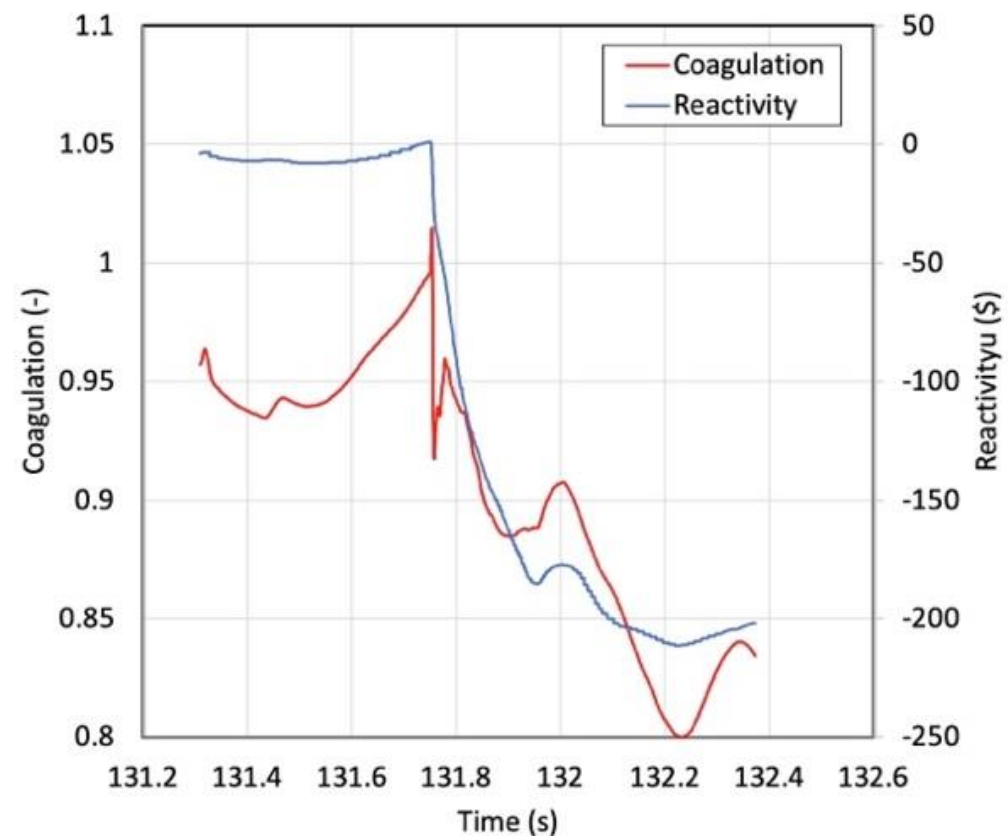
V_c は燃料凝集率、 $\bar{\rho}_f$ は燃料の巨視的密度、 \vec{e}_G は中性子束中心に向かう単位ベクトル、 \vec{v}_f は燃料の流速ベクトル

■ 燃料凝集に寄与する燃料質量の割合

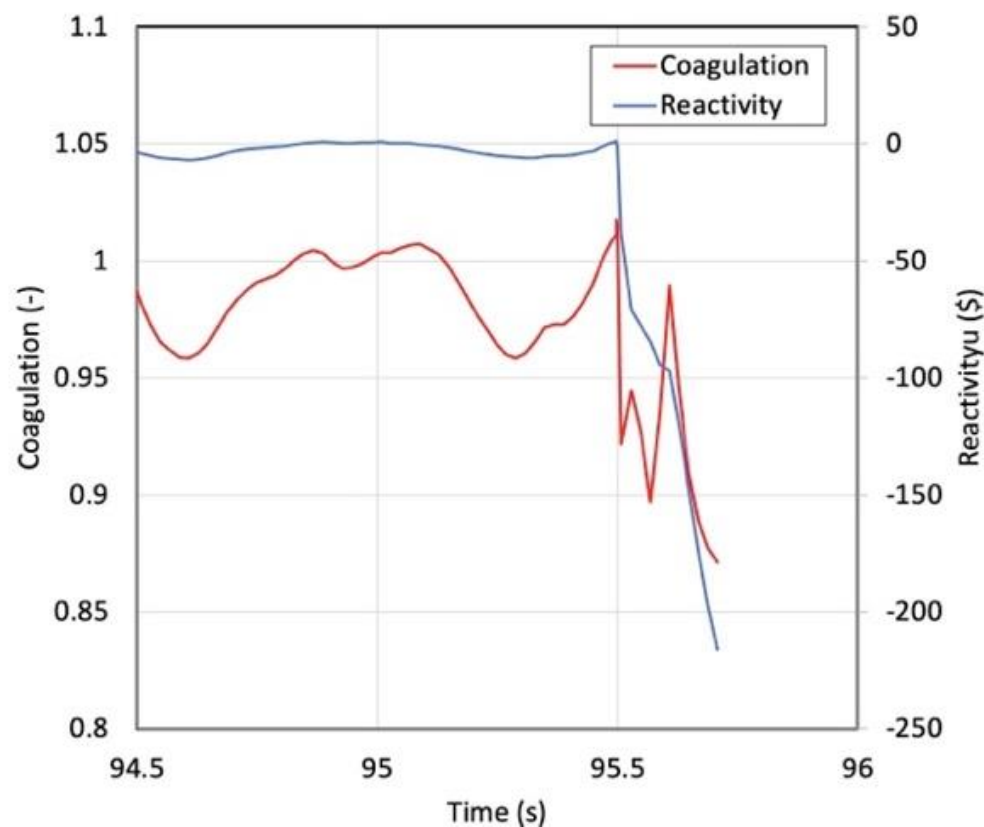
燃料凝集率を求める際に、各地点で中性子束中心に向かう流速が正である燃料質量を全炉心について積算した値の炉心インベントリに対する割合を、燃料凝集に寄与する燃料質量の割合とする。



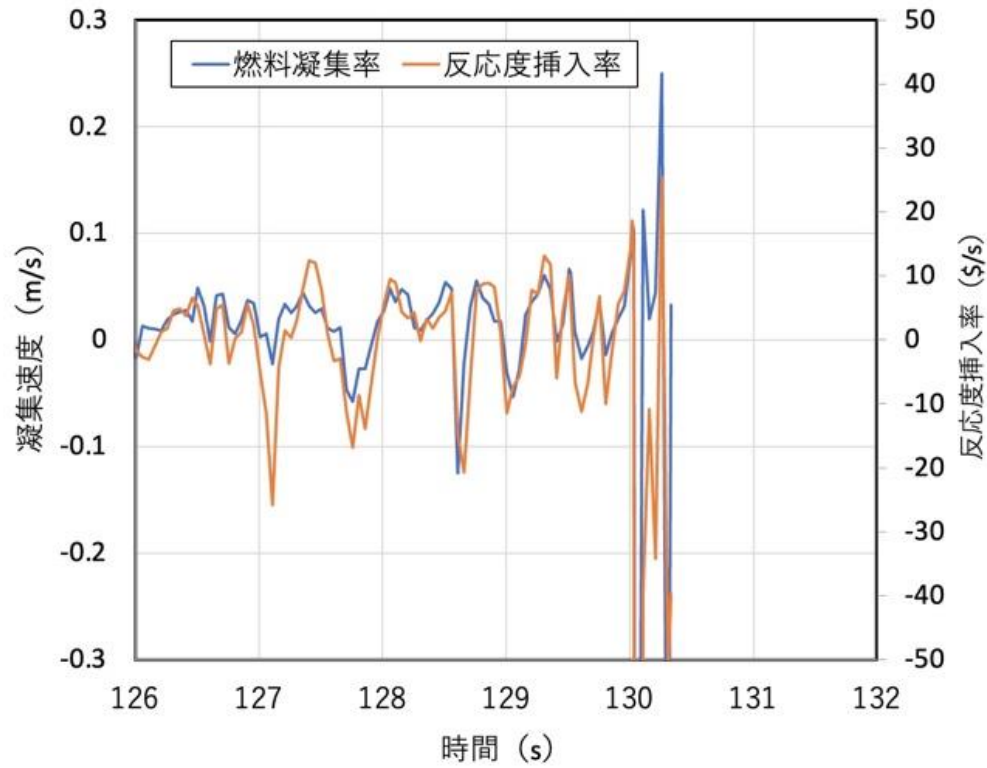
基本ケース



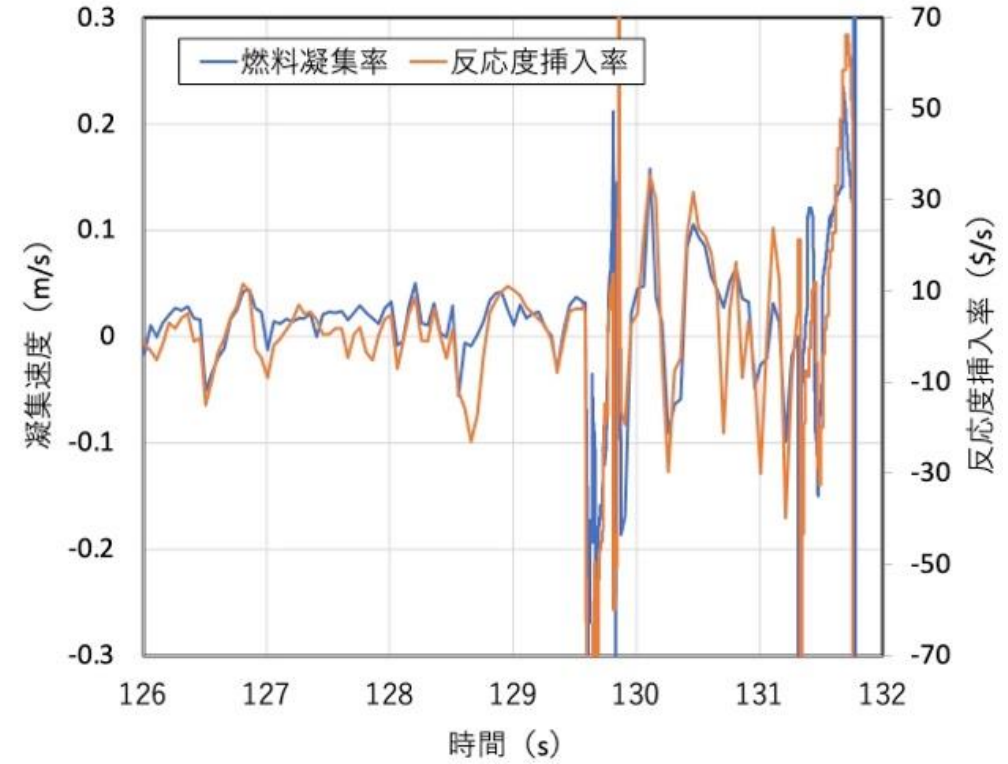
不確かさの影響評価ケース1 (FCI)



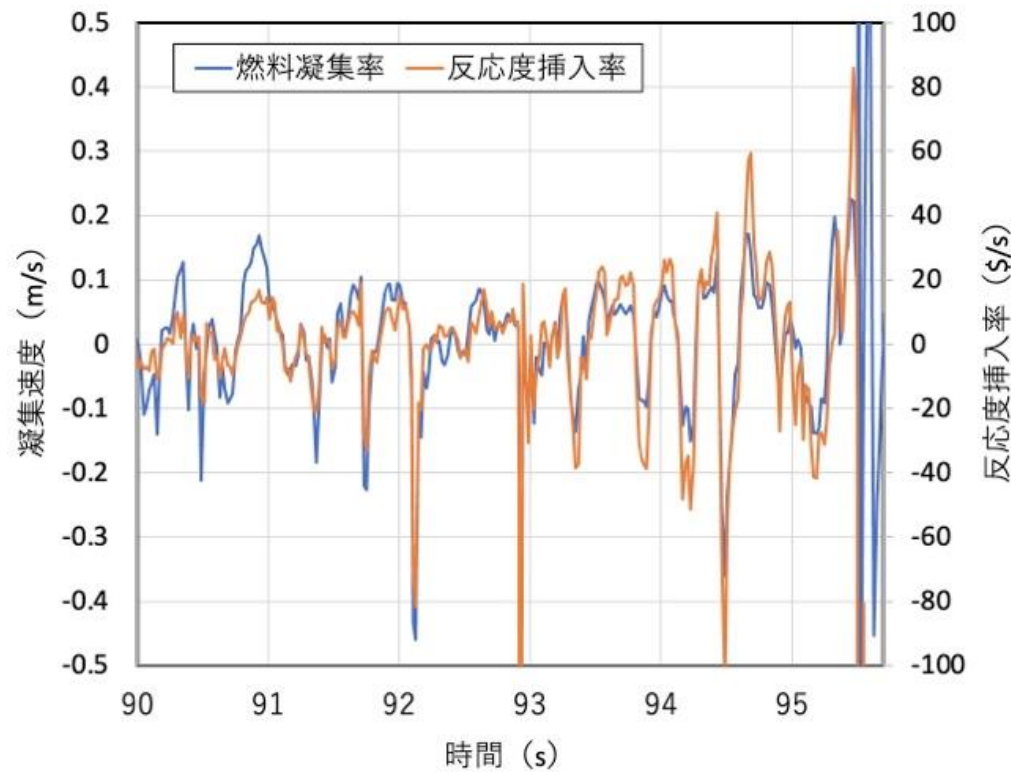
不確かさの影響評価ケース2 (燃料スロッシング)



基本ケース



不確かさの影響評価ケース1 (FCI)



不確かさの影響評価ケース2 (燃料スロッシング)

ケース	燃料凝集量の時間変化率	燃料凝集率	凝集に寄与する燃料質量の割合	反応度挿入率	炉心平均燃料温度の最高値
基本	約0.15 (1/s)	約0.084 (m/s)	約32%	約30\$/s	約3,700°C
不確かさの影響評価ケース1 (FCIの不確かさ)	約0.27 (1/s)	約0.136 (m/s)	約43%	約50\$/s	約4,070°C
不確かさの影響評価ケース2 (燃料スロッシング挙動)	約0.30 (1/s)	約0.162 (m/s)	約55%	約80\$/s	約5,110°C

- 燃料の重心からの距離を燃料の巨視的密度分布で重み付き平均した値の初期値からの変化割合の逆数として燃料の凝集量 (Coagulation) の時間変化率、燃料凝集率及び凝集に寄与する燃料質量の割合を評価し、SIMMERによるULOF (i) 遷移過程解析の基本ケースと不確かさの影響評価ケース1及び2を対象として即発臨界を超過する際の反応度挿入率と比較した。
- これらの物理量と反応度挿入率の増減の傾向は定性的に整合することから、即発臨界を超過する状態での反応度の挿入は、主に燃料の凝集によるものであることが確認された。

No. 261 機械的応答過程におけるプラグ応答の評価（プラグ間隙へのナトリウム流入量の評価）に関し、FCI拳動の不確かさがプラグ応答の評価に与える影響について、今後の有効性評価において説明すること。

ULOF (i) とULOF (iii) の不確かさの影響評価ケース（遷移過程における発生エネルギーの不確かさの影響）において、初期の燃料、スチール温度及び炉心平均圧力に差はほとんどなく、同程度の初期条件である。発生する機械的エネルギーも同程度である。

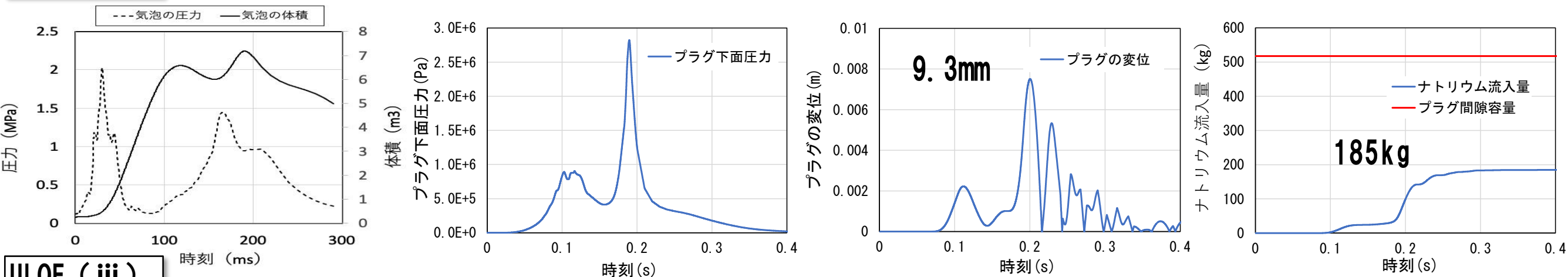
	ULOF (i)	ULOF (iii)
炉心平均燃料温度 (初期値) (°C)	5, 110	5, 130
炉心平均スチール温度 (初期値) (°C)	2, 400	2, 310
炉心平均圧力 (初期値) (MPa)	13. 1	12. 4
機械的エネルギー (MJ)	3. 6	3. 4

ナトリウム噴出量の解析の主要な結果から、プラグの最大変位及びプラグ間隙部へのナトリウム流入量はULOF (i) の方が大きい。いずれの評価事故シーケンスにおいても間隙の容量には十分に余裕があり、回転プラグ間隙を通じた原子炉容器内からのナトリウムの噴出は生じない。

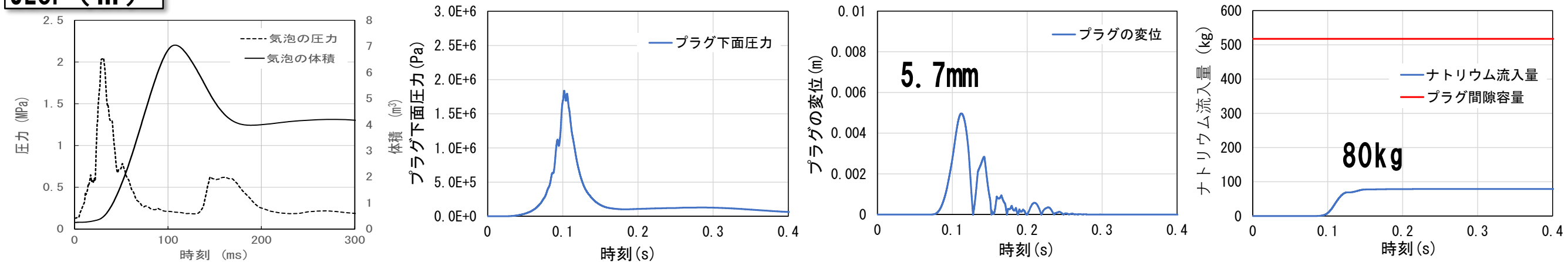
	ULOF (i)	ULOF (iii)
回転プラグの最大変位 (mm)	9. 3	5. 7
プラグ間隙部へのナトリウム流入量 (kg)		
大回転プラグ (間隙容量517kg)	185	80
小回転プラグ (間隙容量315kg)	29	5
炉心上部機構 (間隙容量111kg)	31	6

- CDA気泡と体積の圧力履歴：最初の圧力ピークの数値とその幅は、おおむね同じであるが、2回目の圧力ピーク値とその幅はULOF (i)の方が大きく、気泡体積が再度増加する。
- プラグ下面に作用する圧力
 ULOF (i) では2回目の圧力ピークに由来する、0.19秒時点のピークが最大
 ULOF (iii) では最初の圧力ピークに由来する、0.1秒時点のピークが最大
- プラグ下面に作用する圧力レベルの相違→大回転プラグ変位の大きさの相違
 ULOF (i) : 9.3 (mm) / ULOF (iii) : 5.7 (mm)
- 大回転プラグの浮上に要する圧力は 2.75×10^5 (Pa) (絶対圧) である。ULOF (iii) に比べてULOF (i)の方がこのレベル以上の圧力が維持される時間が長い。

ULOF (i)



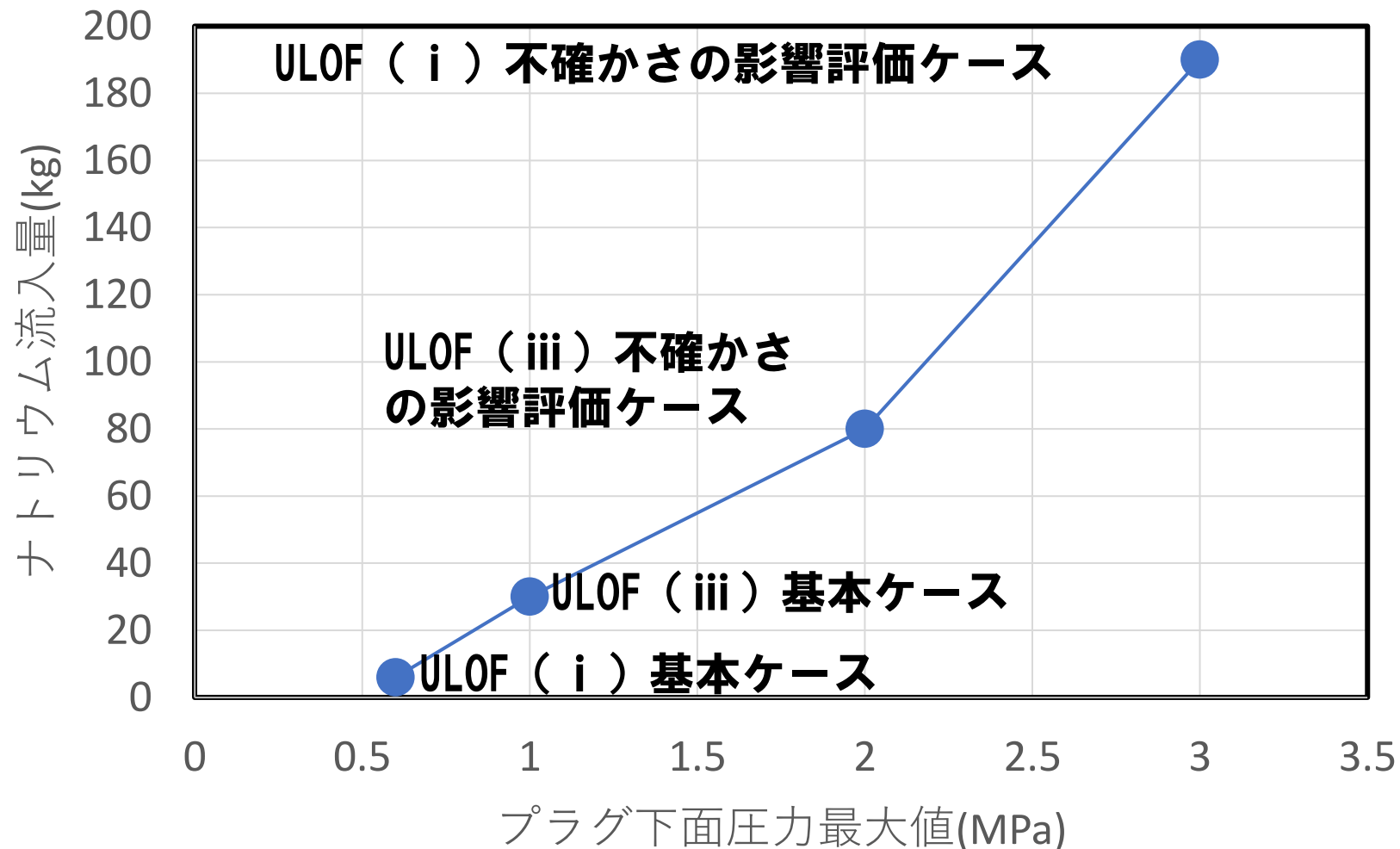
ULOF (iii)

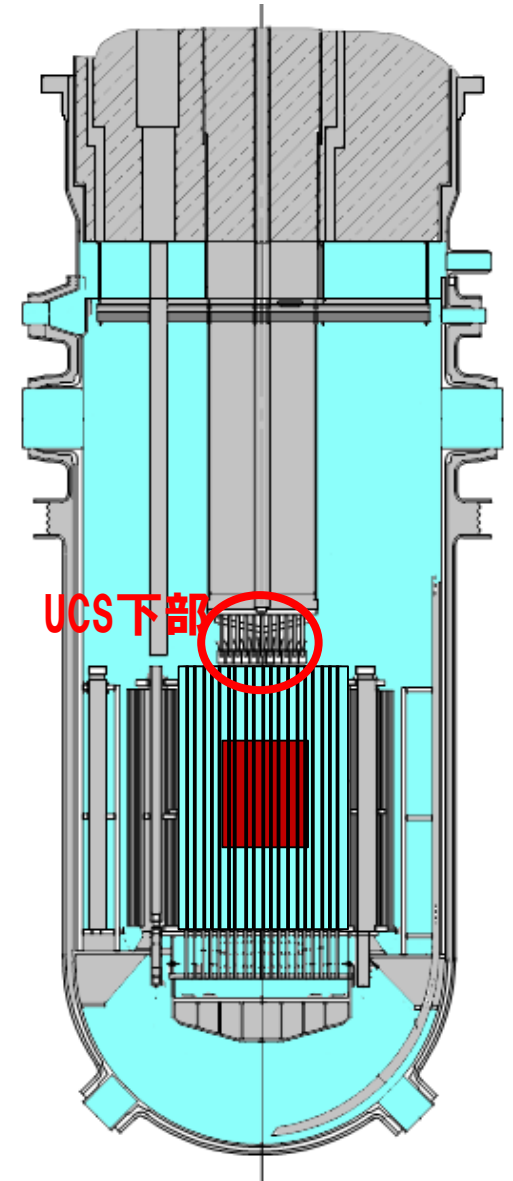
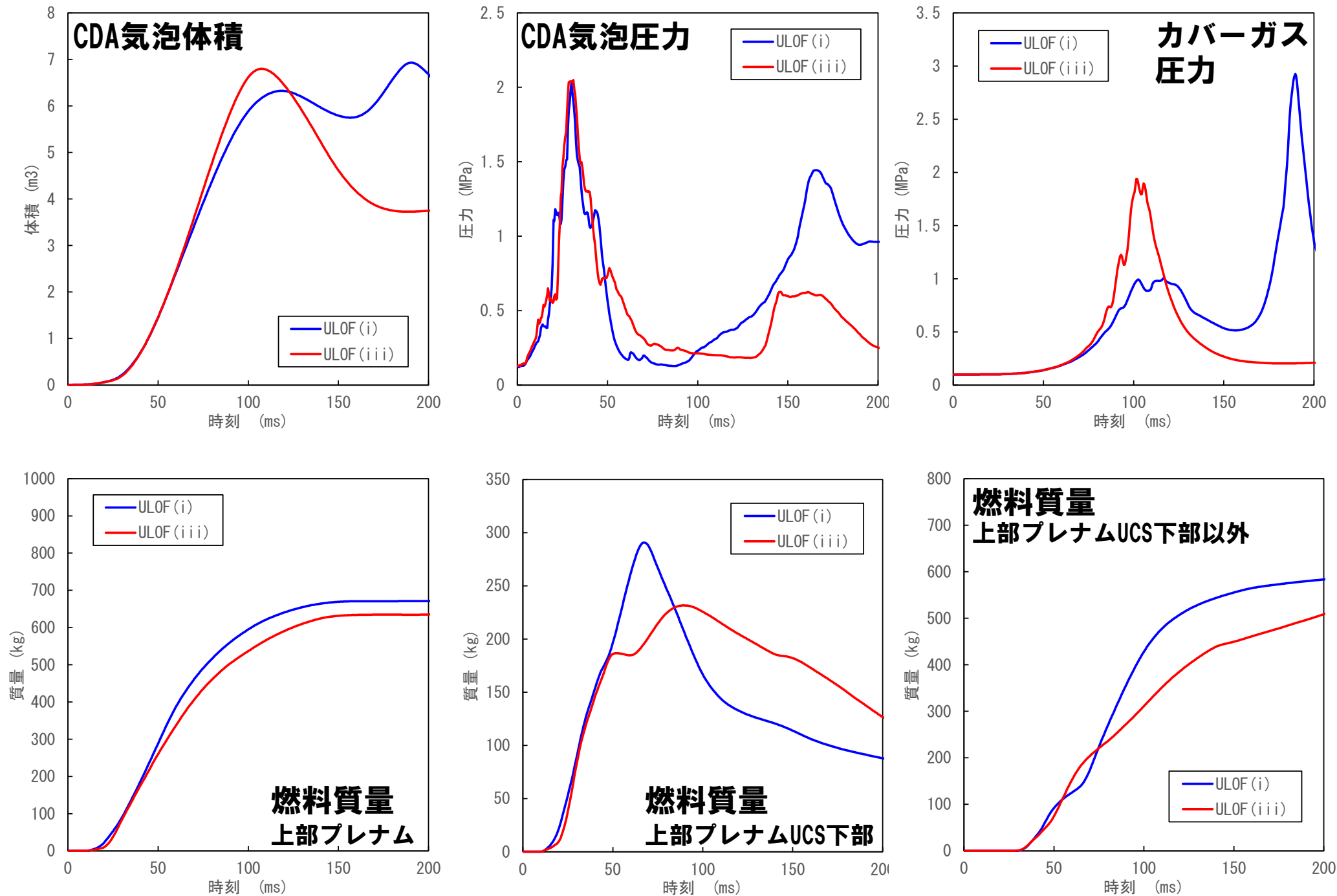


以下の理由によりULOF (i)の方がナトリウム流入量が顕著となったと言える。

- ① プラグ下面に作用するピーク圧力及びプラグ変位がULOF (i)の方が大きい。
- ② プラグの浮上している時間がULOF (i)の方が長い。

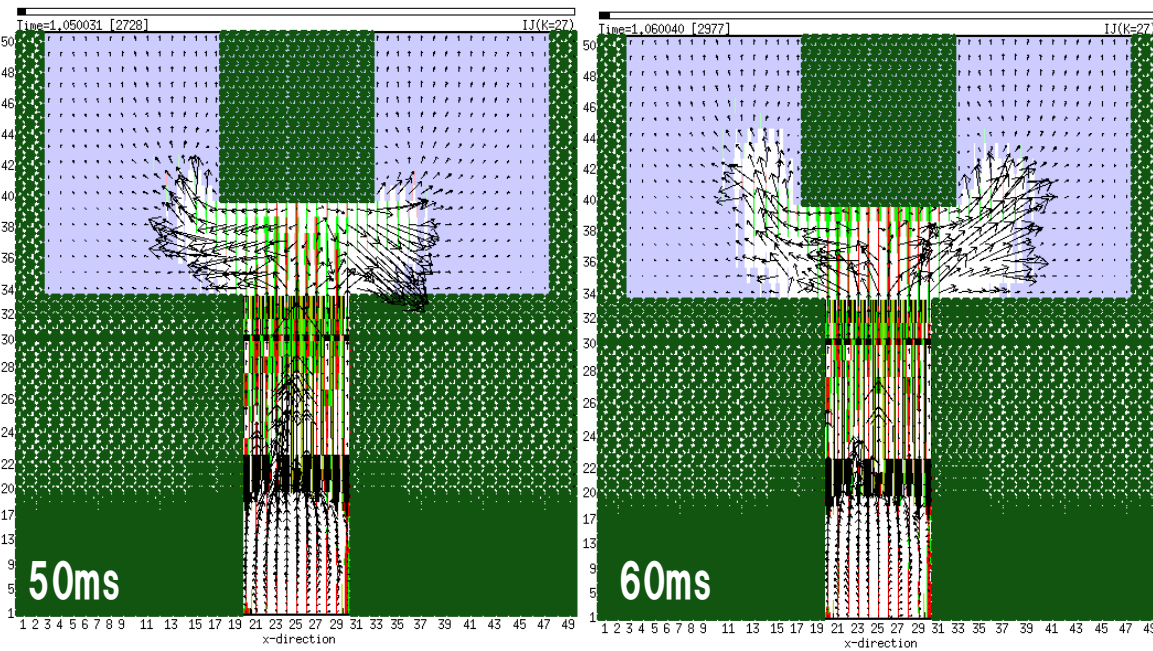
- ULOF (i) と ULOF (iii) のプラグ下面の最大圧力の違いは、上部プレナム下部での FCI 挙動の違いによる。
- プラグ間隙へのナトリウム流入量はプラグ下面の最大圧力が増加するに従って増加する。
- プラグ下面の最大圧力に影響する上部プレナム下部での FCI 挙動に関する不確かさ影響の評価が必要と考えられる。
- THINA 試験の検証解析によって、上部プレナム下面における FCI に S I M M E R を適用することの妥当性を確認しているが、原子炉容器規模への外挿性に関して不確かさ影響を確認する解析が必要と考えられる。



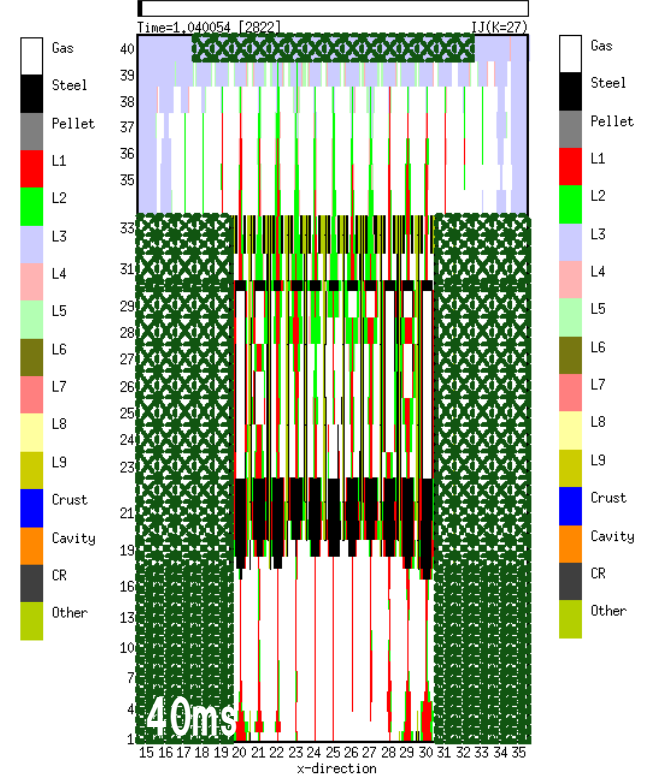
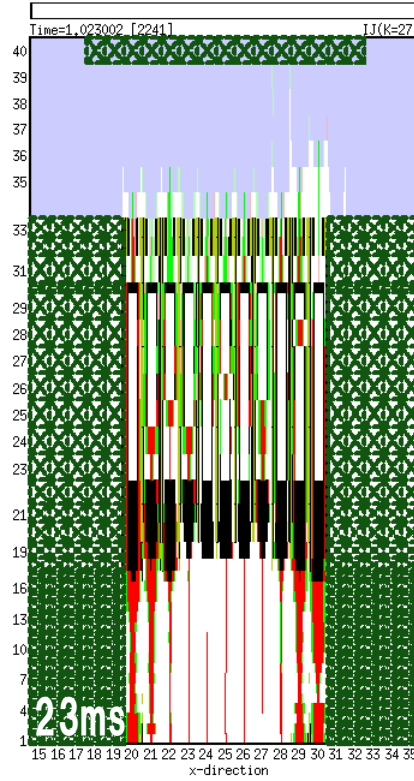
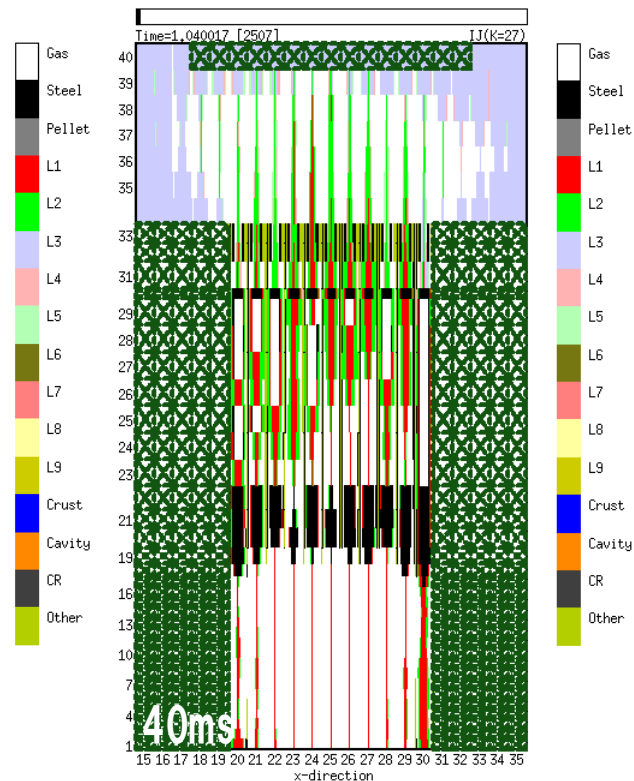
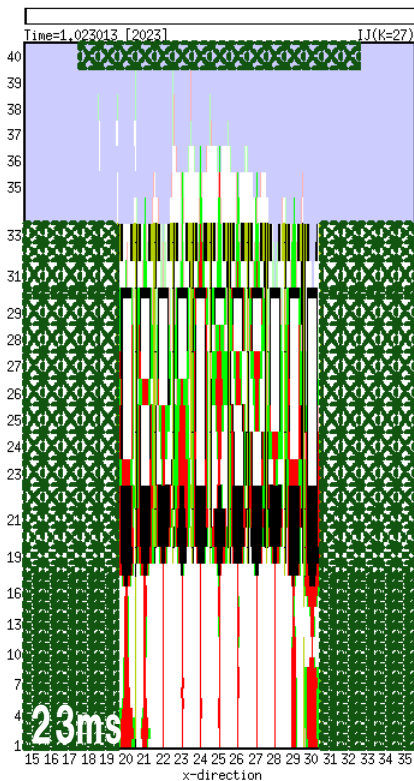
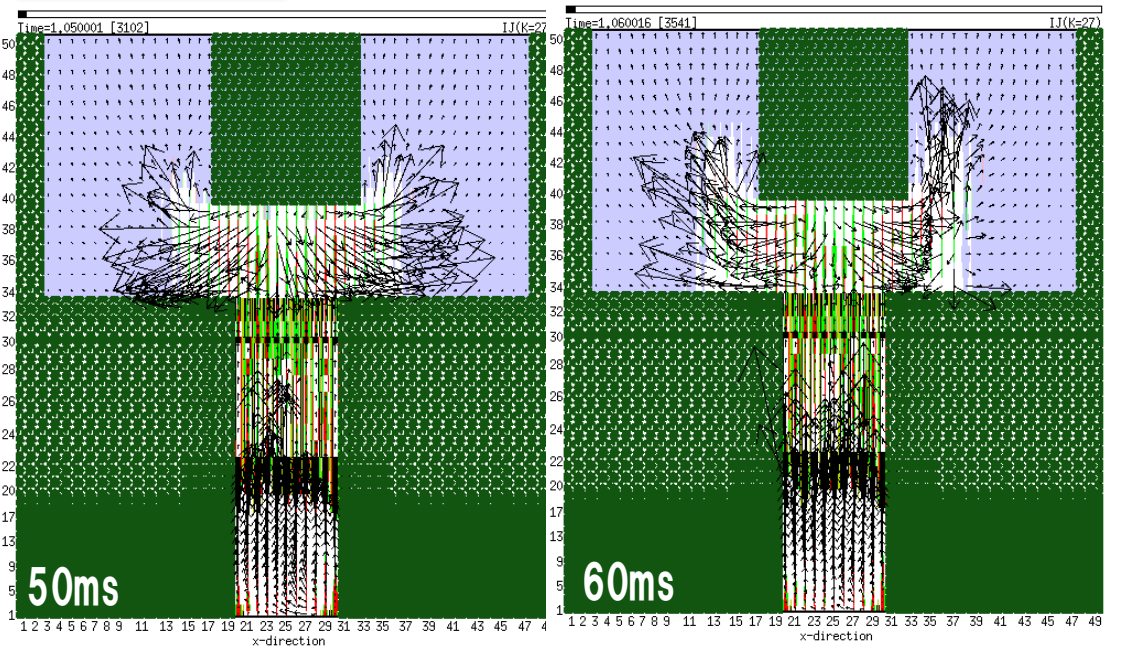


- 150ms以後のULOF (i) とULOF (iii) のカバーガス圧力の違いは、CDA気泡の圧力と体積の違いによる。
- この違いは、ULOF (i) ではULOF (iii) に比べて、上部プレナムに放出された燃料が原子炉容器壁側、すなわちUCSの下部よりも外側に放出されたため、100msで一旦収縮を始めたCDA気泡内で再度FCIが発生したことによると考えられる。

ULOF (i)

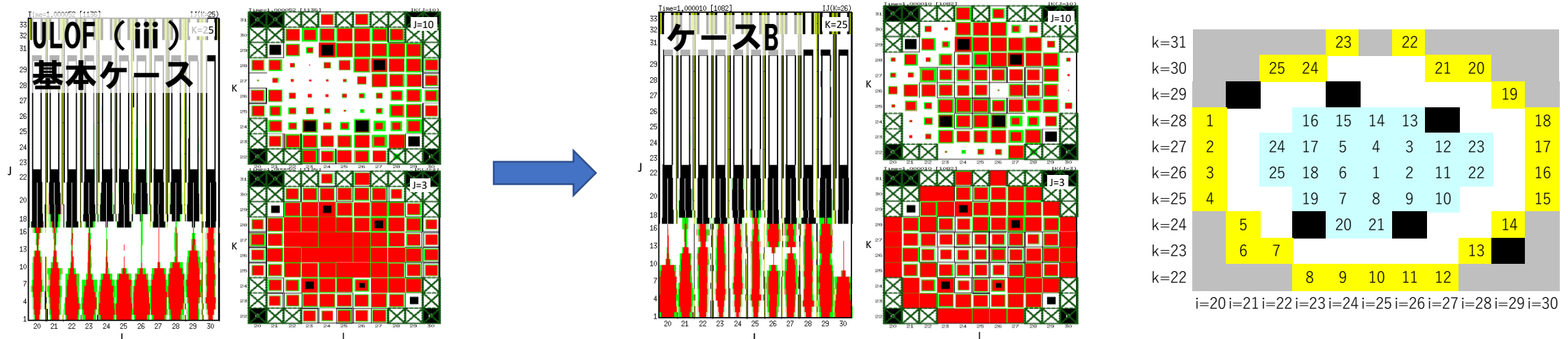


ULOF (iii)

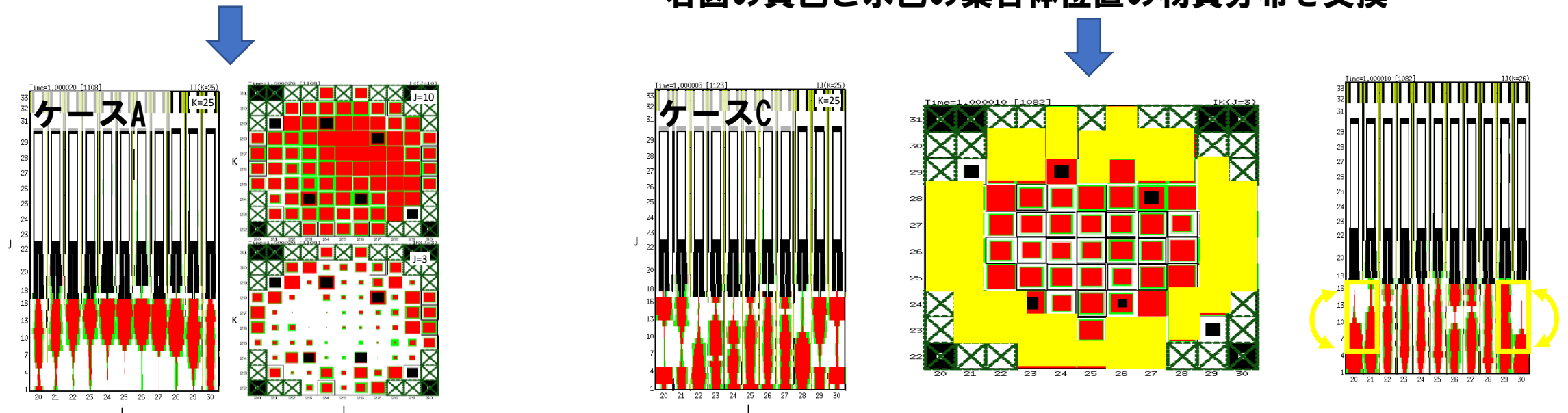


- ULOF (i) では、50ms～60msの間、UCS下部近傍の気相の速度ベクトルは主として上方及び径方向外側を向いているが、ULOF (iii) ではULOF (i) に対して下向き成分が強い。
- ULOF (i) では径方向中心部からCDA気泡が拡大し、UCS下面の中心部から先行してナトリウムが消失しているのに対して、ULOF (iii) ではUCS下面のナトリウムが径方向におおむね一様に減少しており、UCS下面中央部にナトリウムが取り残されFCIが大きくなった。

- ULOF (i) と ULOF (iii) の不確かさの影響評価ケース (遷移過程における発生エネルギーの不確かさの影響) プラグ下面の最大圧力の違いは、上部プレナム下部でのFCI挙動の違いによる。
- FCI挙動の基本ケースに対するFCI挙動の不確かさの影響の評価として、上部プレナム下部への炉心物質の放出パターンに影響を与えることを目的として、即発臨界超過直後の炉心内の物質配位を組み替えたパラメータ解析を実施した。
- パラメータ解析の対象は炉心平均燃料温度の高い ULOF (iii) とした。



右図の黄色と水色の集合体位置の物質分布を交換

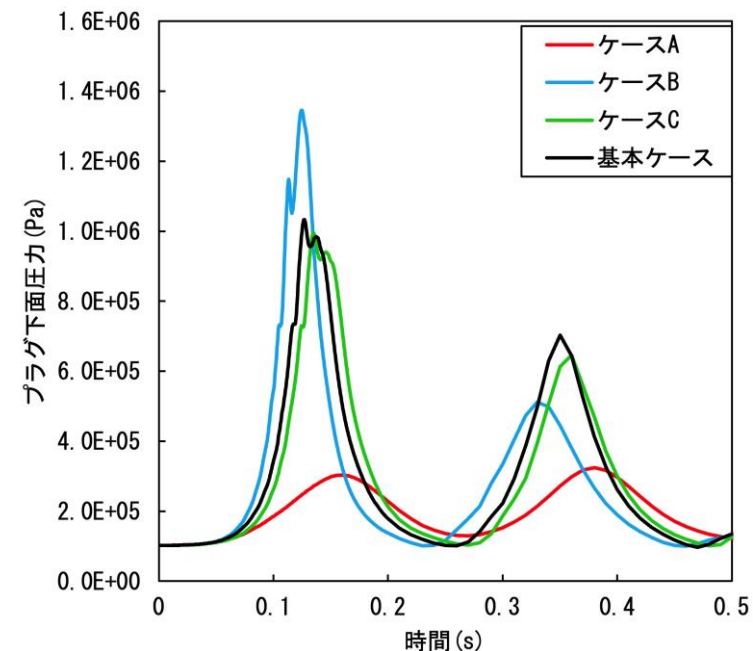
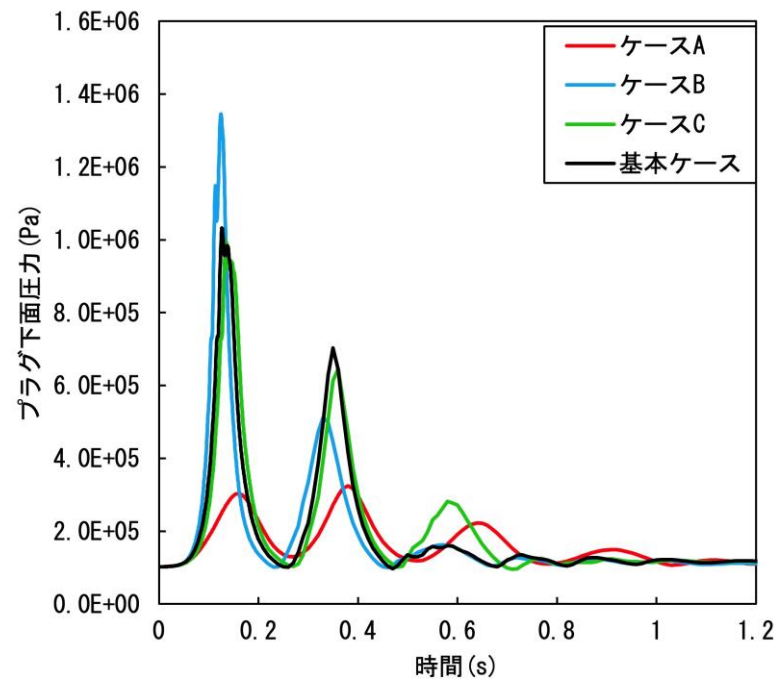


基本ケースの物質分布の上下を反転

ケースBに対して黄色の領域の物質分布を上下反転

- **最も大きな機械的エネルギーとプラグ下面圧力の最大値を与えたケースはケースBである。**
- **ケースBでは、基本ケースに対して炉心の外側と内側の集合体を入れ替えたことにより、より高圧な炉心外側の溶融炉心物質が相対的に先行して上部プレナムへと排出され、その結果集合体出口における溶融炉心物質と液体ナトリウムとの混合が顕著となってためと考えられる。**

	基本ケース	ケースA	ケースB	ケースC
炉心平均燃料温度 (°C)	4, 200			
プラグ下面圧力の最大値 (Pa)	1. 03E+6	3. 24E+5	1. 35E+6	9. 95E+5
プラグ下面圧力のピーク時刻 (s)	0. 127	0. 380	0. 125	0. 135
機械的エネルギーの最大値 (MJ)	2. 565	0. 91	2. 858	2. 43
機械的エネルギーのピーク時刻 (s)	0. 340	0. 380	0. 115	0. 145
圧力源の最大膨張体積 (m3)	6. 35	4. 36	6. 79	6. 50
圧力源の最大膨張時刻 (s)	0. 35	0. 38	0. 128	0. 149



- ULOF (i) と ULOF (iii) の基本ケースのうち、炉心平均燃料温度の高い ULOF (iii) に対して、FCI 挙動の不確かさが機械的エネルギー発生に与える影響の評価を行うことを目的として、機械的エネルギー解析の初期状態における炉心内の物質配位を組み替えたパラメータ解析を実施した。
- その結果、上部プレナム下部における FCI の挙動が大きく影響される結果となった。ただし、基本ケースの機械的エネルギー約 2.6MJ、プラグ下面圧力の最大値約 1.03MPa に対して、パラメータ解析ケースの中で最大となった値は、それぞれ約 2.9MJ、約 1.35MPa であり、遷移過程におけるエネルギー発生の不確かさの影響評価ケースの約 3.4MJ、約 1.8MPa を超えない。

No.262 UTOP における FCI の不確かさの影響評価について、保守的な評価として、最も影響が大きいものを評価していることを説明すること。また、ULOF と同様に、制御棒下部案内管 2 カ所で FCI を同時に発生させた場合には、燃料の凝集を阻害することのことであるが、当該評価の結果 についても説明すること。

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. 計算コード SIMMER-IV

2. 基本ケース解析体系の概要

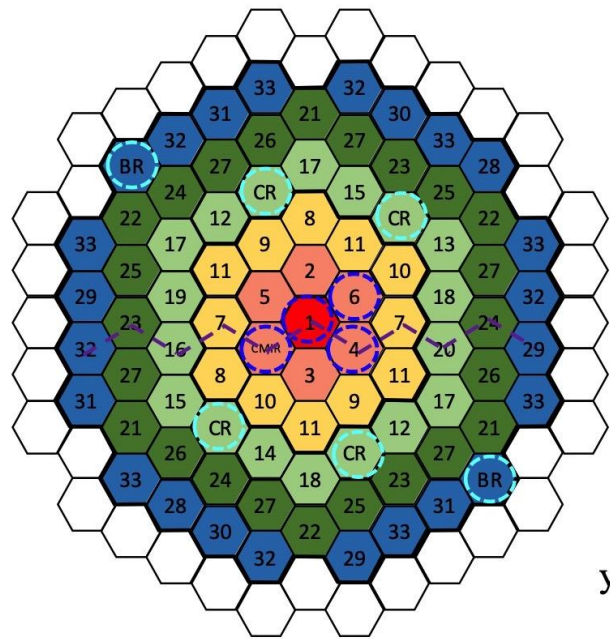
3次元直交座標（流体力学メッシュ：21×19×67）
で全炉心の崩壊挙動を解析する。

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。

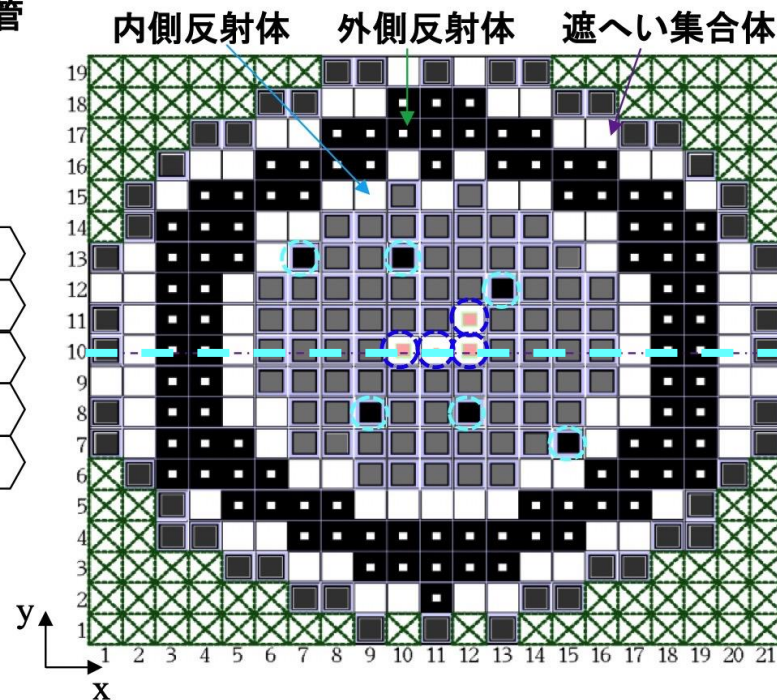
j																											
66, 67	カバーガス						[黒色領域]									カバーガス											
54, 55	[茶色領域]						ハンドリングヘッド									[茶色領域]											
39~53	ガスプレナム			ガスプレナム			ガスプレナム			[灰色領域]			ガスプレナム			[灰色領域]			ガスプレナム								
23~38	遮へい集合体			外側反射体			内側反射体			外側炉心			内側炉心			外側炉心			内側反射体			外側反射体			遮へい集合体		
14~22	下部反射体																										
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	i	

○: 制御棒下部案内管及び
後備炉停止制御棒下部案内管

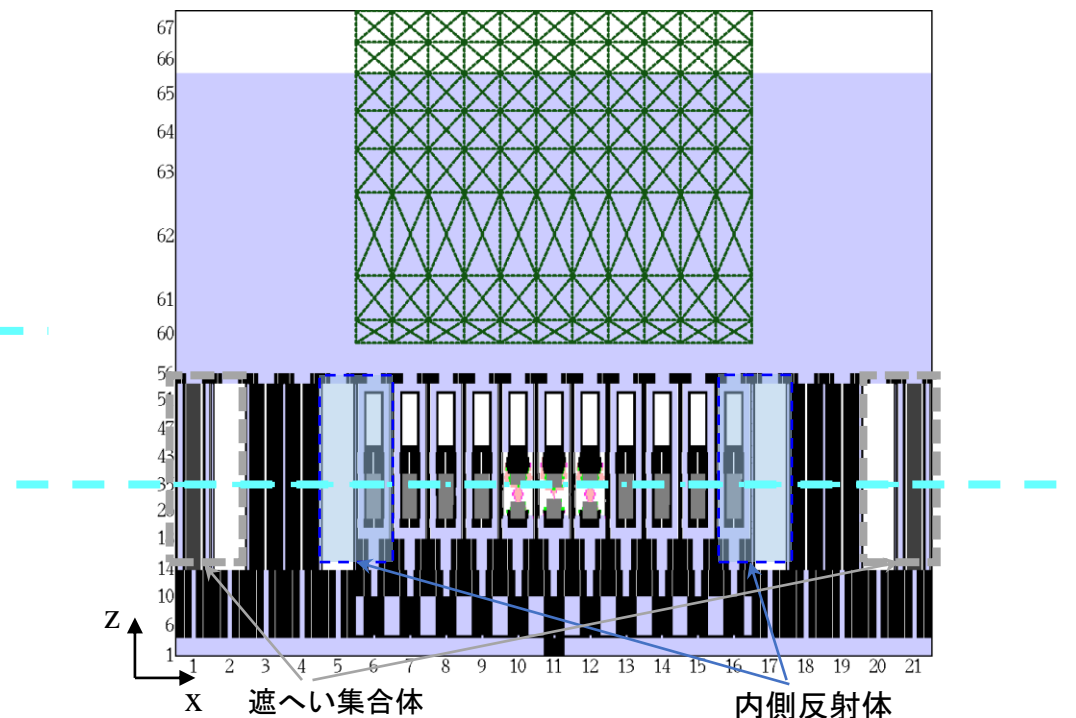
⊗: 計算除外セル



「常陽」炉心構成

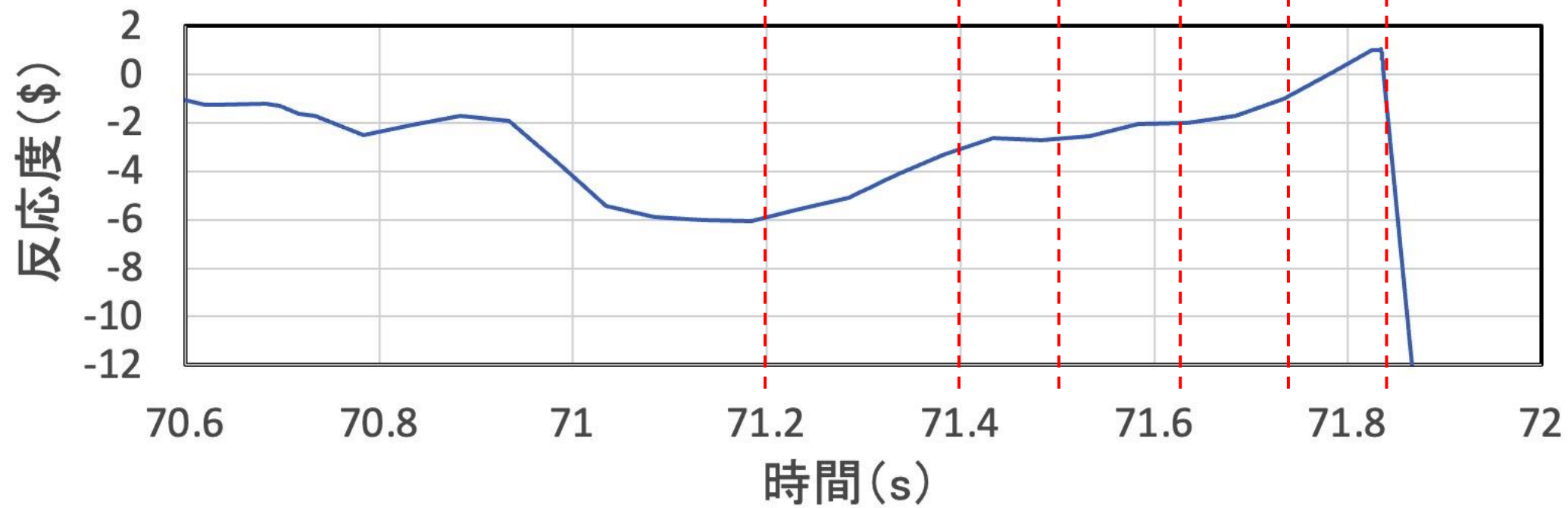


SIMMER-IV計算体系：炉心水平断面図

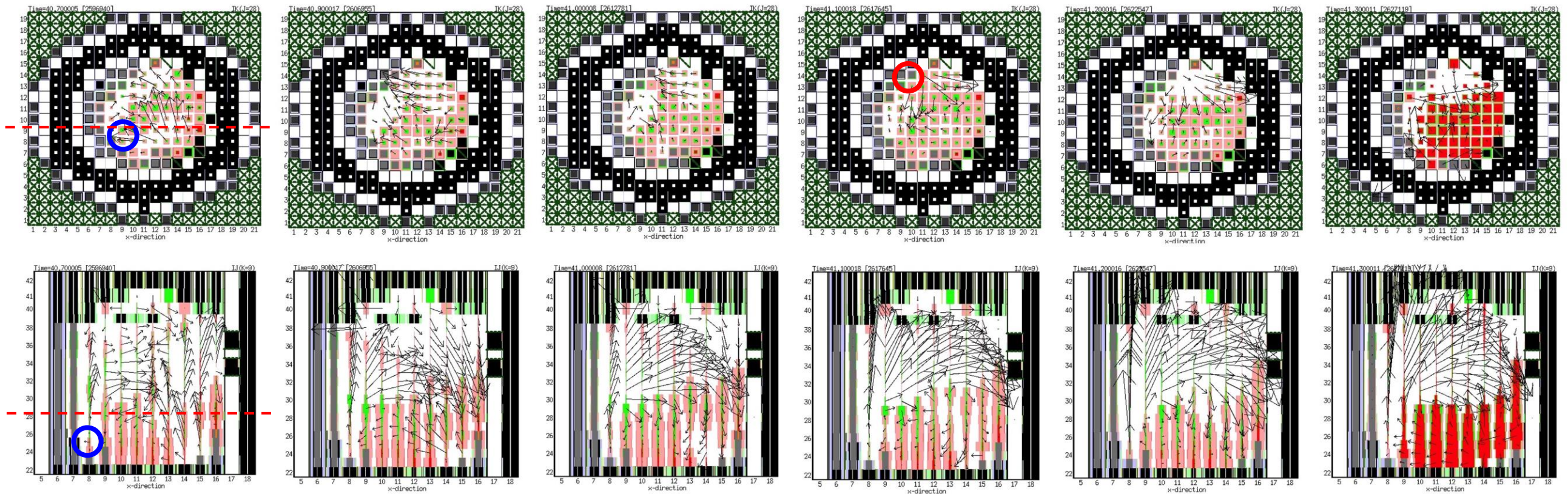


SIMMER-IV計算体系：炉心鉛直断面図

UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 FCIの不確かさの影響評価 (1/2)

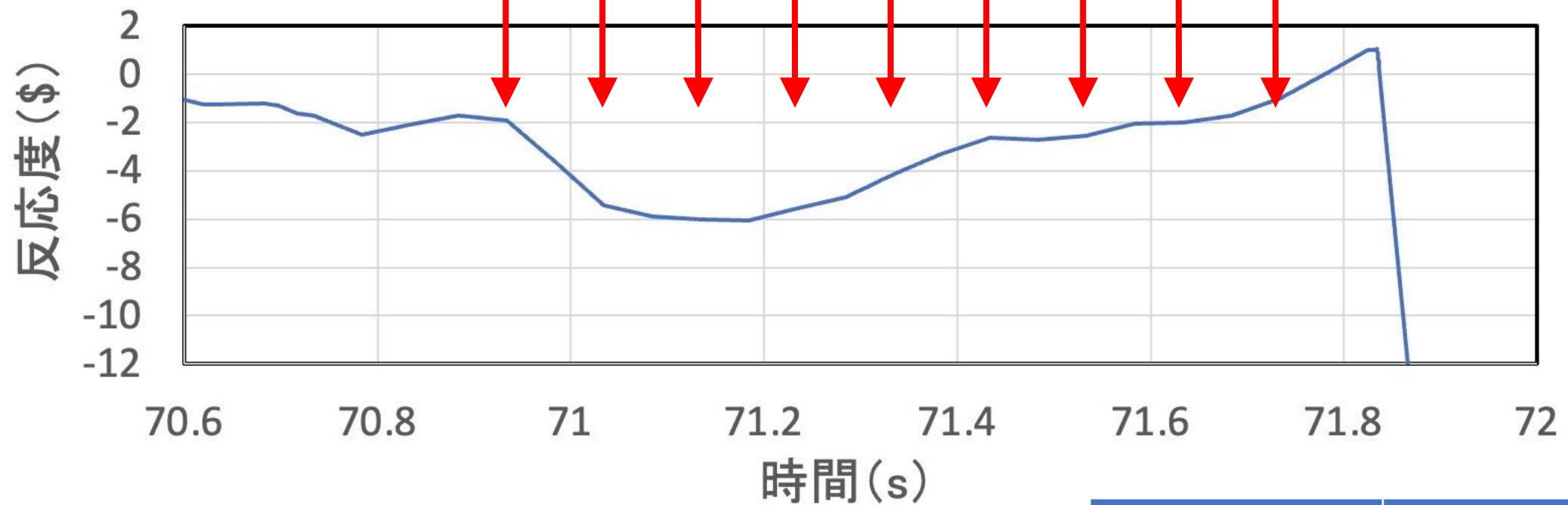


- ガス
- 構造材
- ペレット
- 液体燃料
- 液体スチール
- ナトリウム
- 燃料粒子
- スチール粒子
- 制御材粒子
- 燃料チャンク
- 燃料クラスト
- キャビティー
- 制御棒

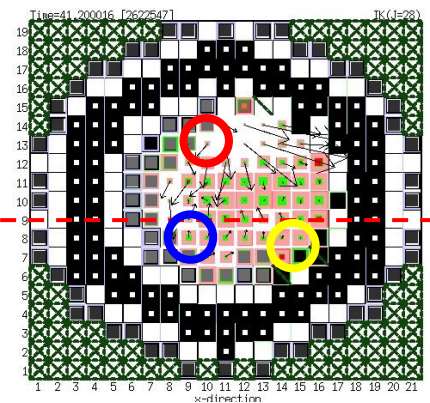


- 基本ケースでは約71.2sの水平断面図左下（青丸）炉心下部のFCIで吹き上げられた炉心物質が約71.6sの水平断面図上部の炉心下部で発生したFCIによって水平断面図右下の炉心下部に集中することで、即発臨界を超過した。

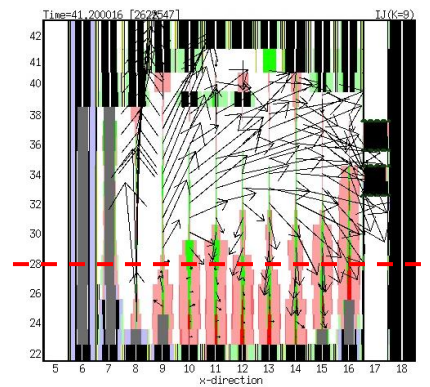
UTOPの格納容器破損防止措置の有効性評価 FCIの不確かさの影響評価 (2/2)



71.73秒



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



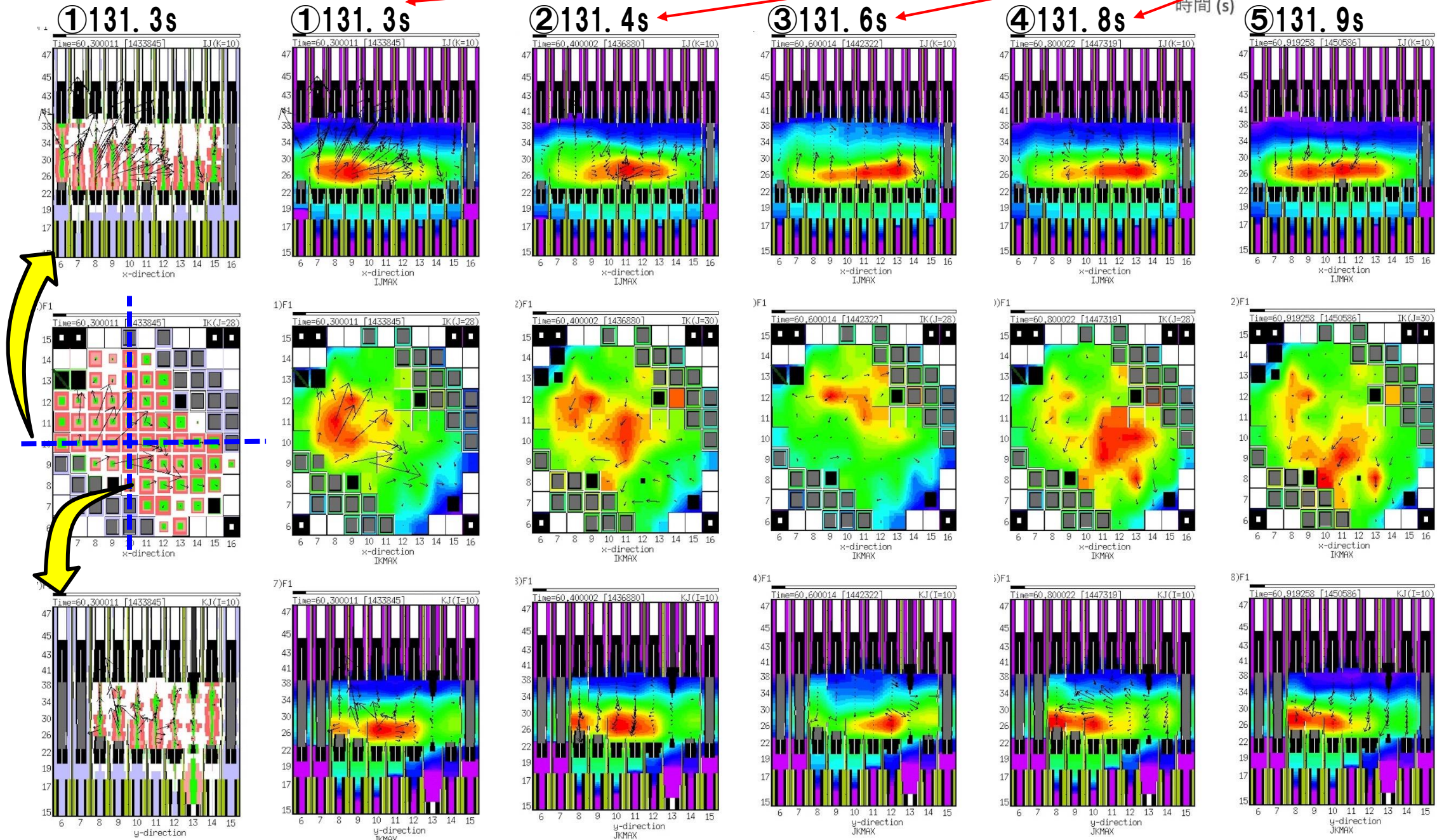
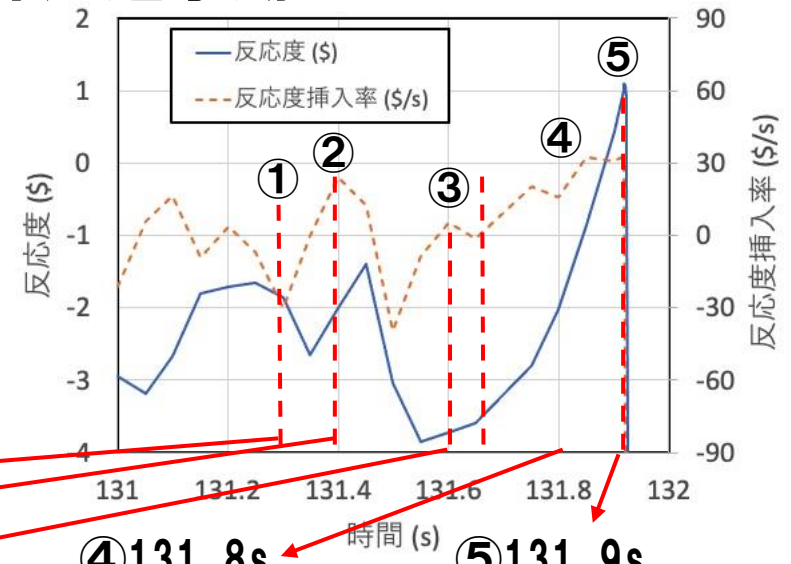
- 基本ケースでは約71.2sの水平断面図左下（青丸）炉心下部のFCIで吹き上げられた炉心物質が約71.6sの水平断面図上部のFCIによって水平断面図右下の炉心下部に集中することで、即発臨界を超過。
- この燃料集中を加速する水平断面図左上（赤丸）の炉心下部で約80atm程度のFCIを強制的に発生させる。時間は上図の矢印で示す70.93～71.73sまで0.1s間隔とする。
- 水平断面図の左上（赤○）に右下（黄○）も加えてFCIの同時2カ所発生を仮定して炉心中心領域に燃料を集中させるケースも実施した。

FCI時刻 (s)	1カ所FCI	2カ所FCI
基本ケース	約2,820	
70.93	約2,750	約3,300
71.03	約2,950	—
71.13	約3,600	約3,415
71.23	約2,840	約3,028
71.33	約3,410	—
71.43	約2,830	約3,030
71.53	約3,060	約3,090
71.63	約3,190	—
71.73	約2,750	約3,030
不確かさの影響評価ケース（燃料スロッシング）	約4,300	

No.284 最終的な即発臨界超過後の核的事象収束に至るまでの挙動に関して、燃料物質の発熱密度等で説明されてきたが、液面の変化や燃料物質の凝集等を物理的、視覚的に図示して説明すること。

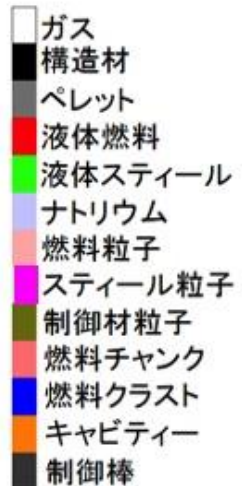
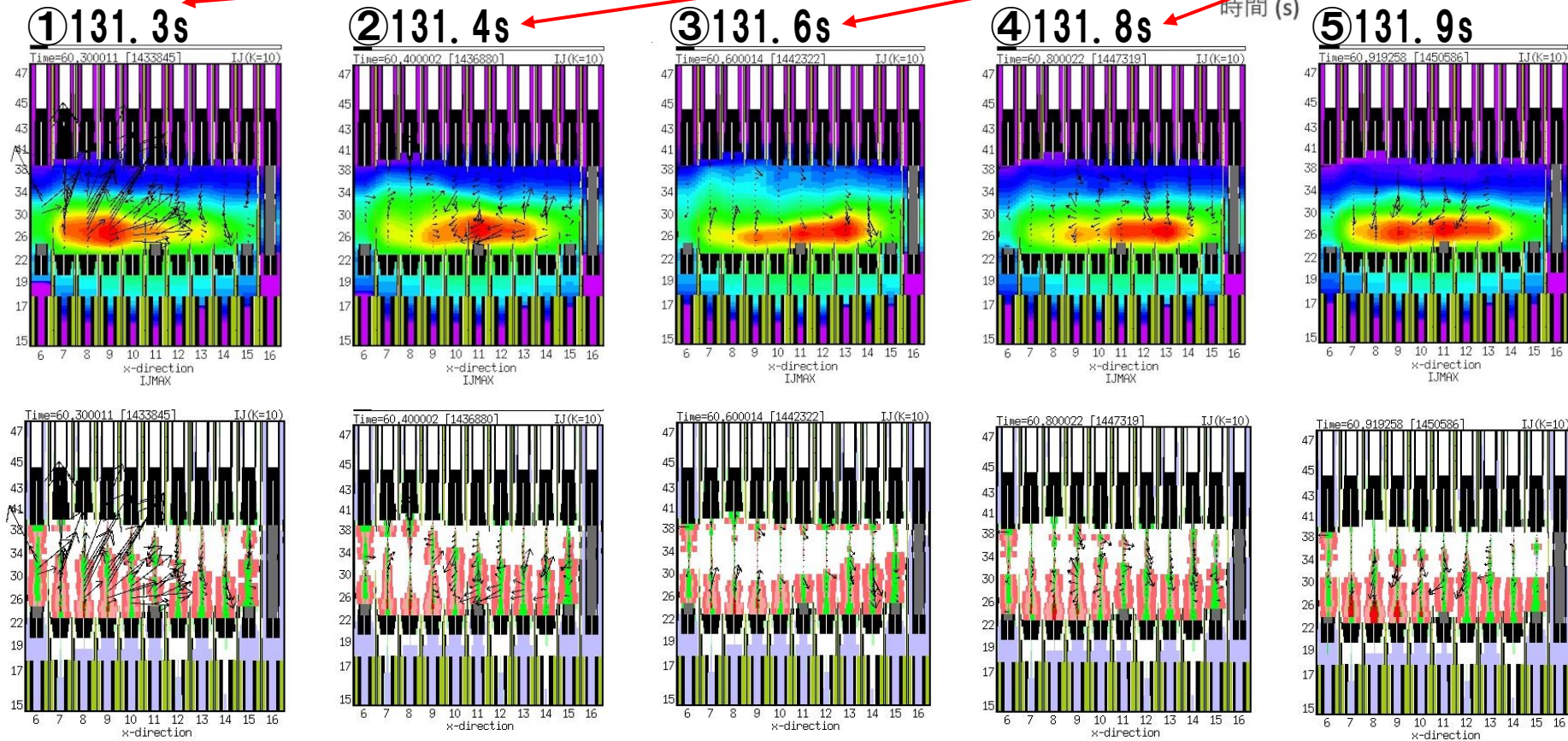
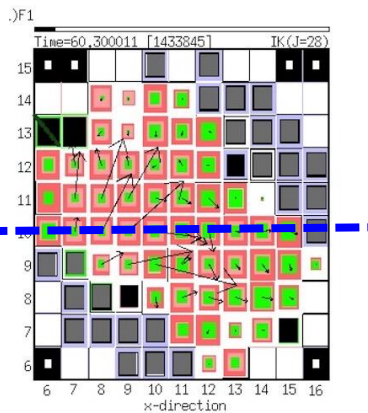
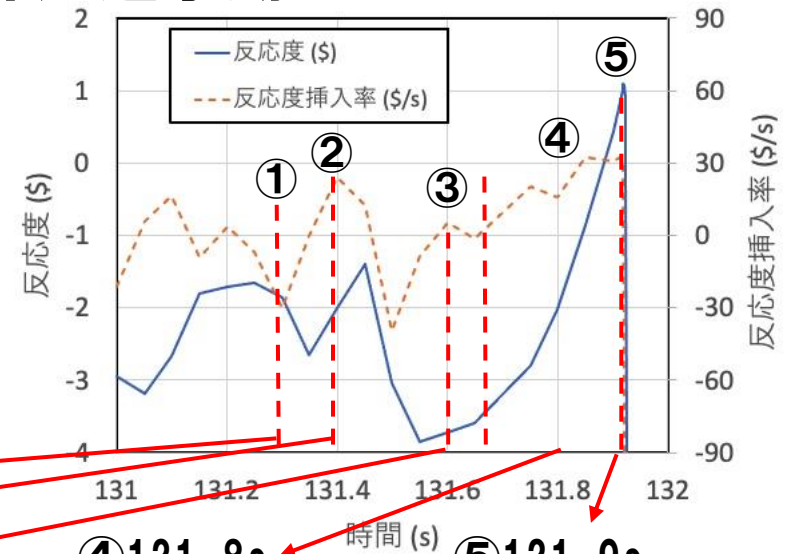
ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 —基本ケースにおける即発臨界超過挙動—

- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻って再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。



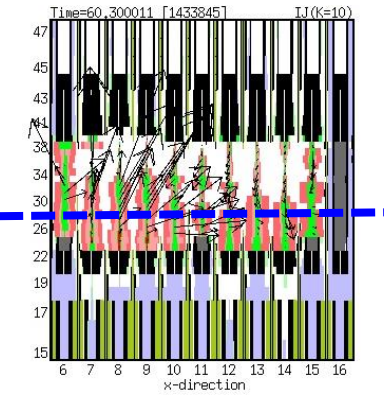
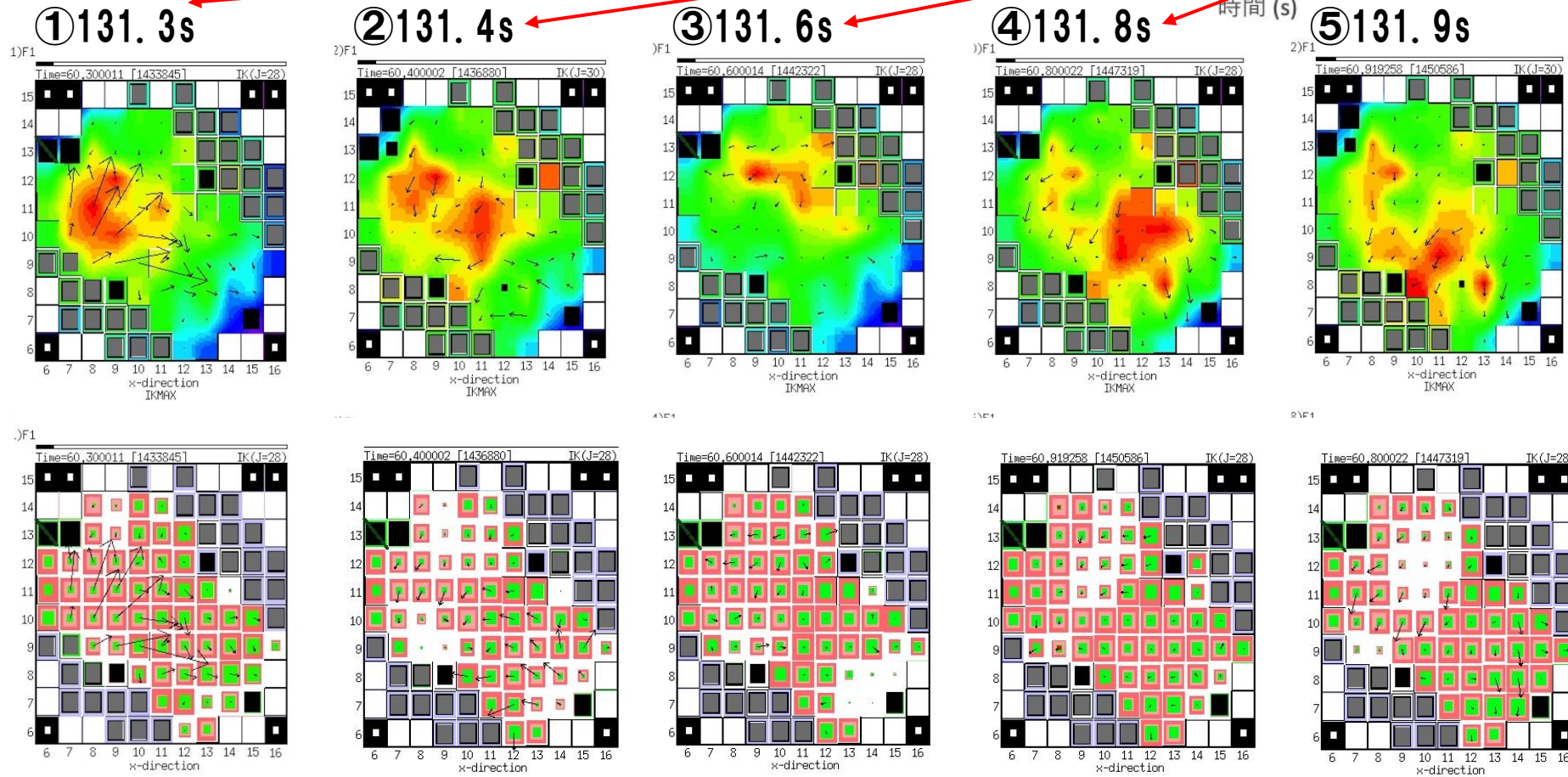
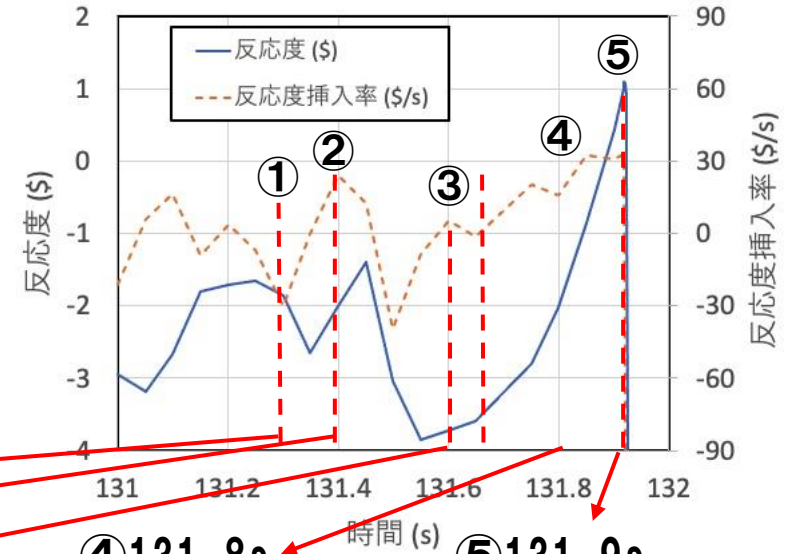
ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 —基本ケースにおける即発臨界超過挙動—

- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻って再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。



ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 —基本ケースにおける即発臨界超過挙動—

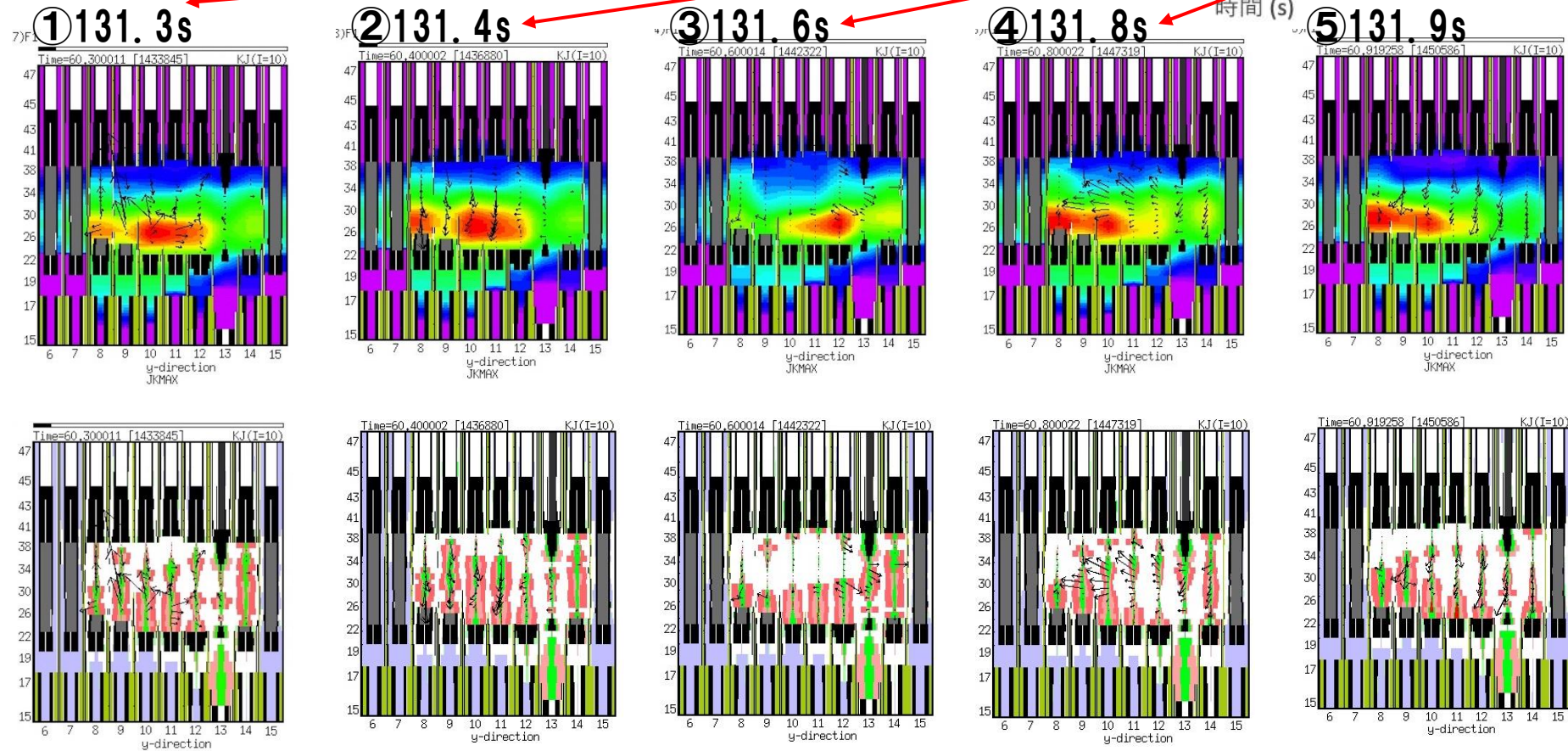
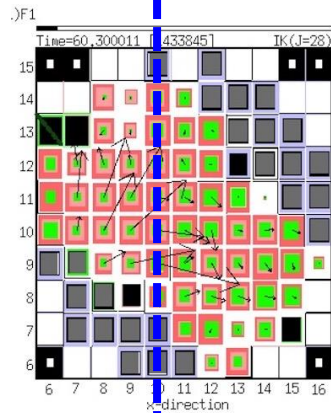
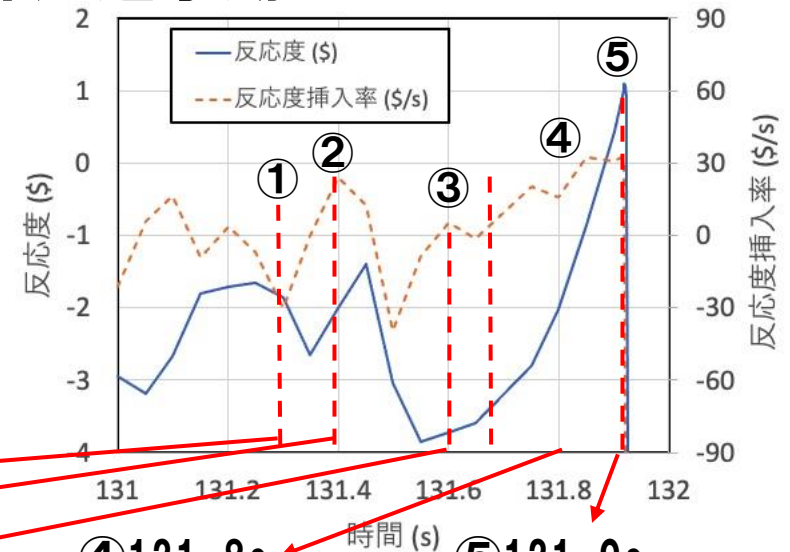
- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻って再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。



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

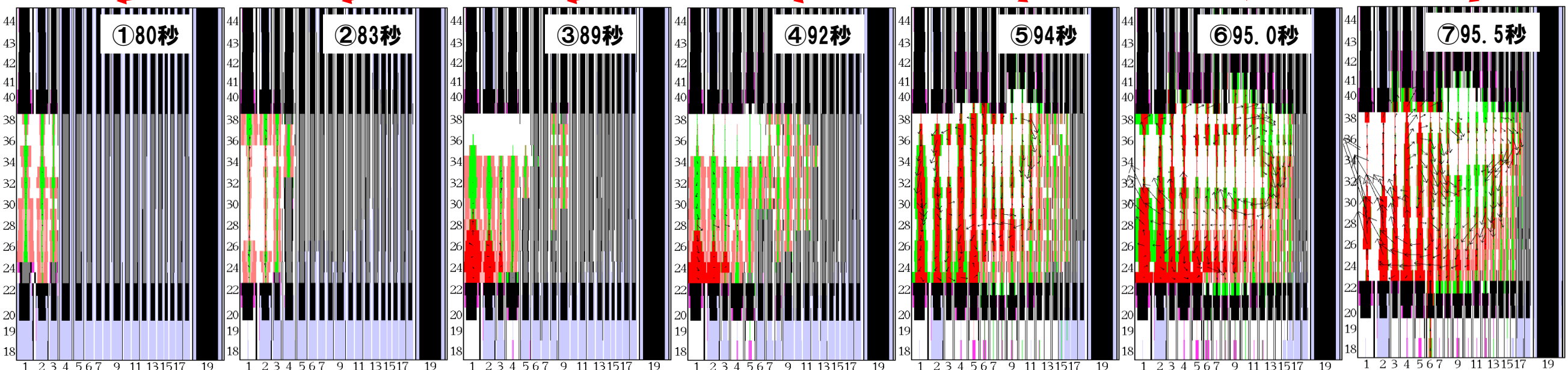
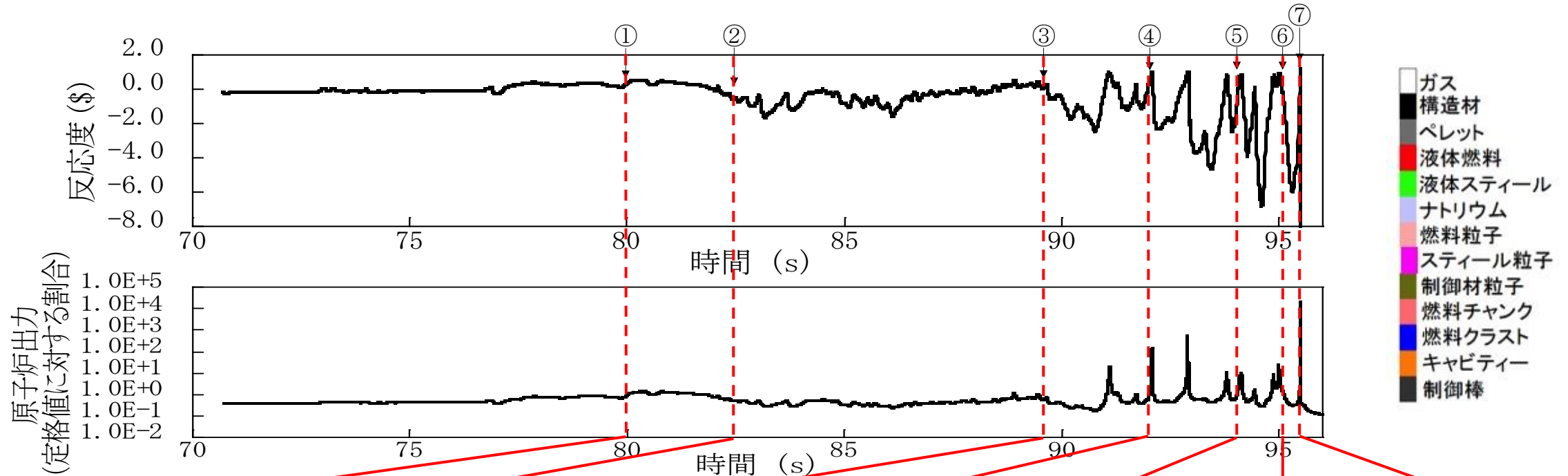
ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 —基本ケースにおける即発臨界超過挙動—

- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻って再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。



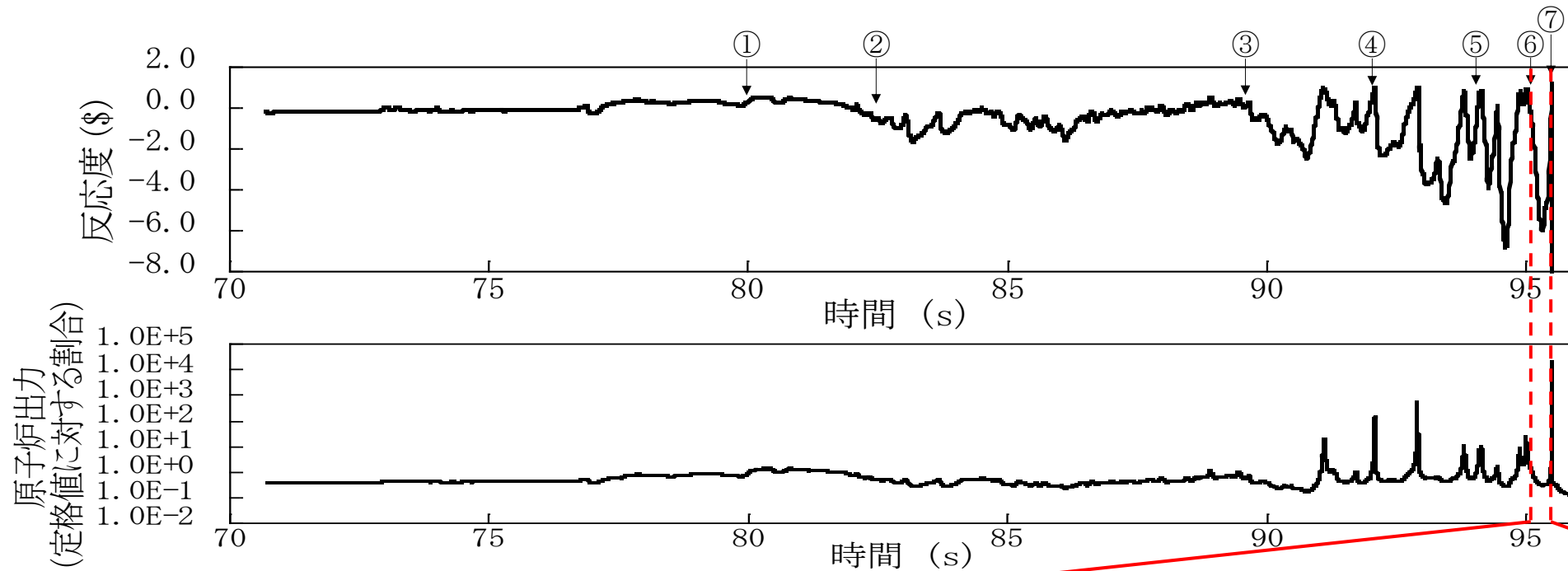
- ガス
- 構造物
- ペレット
- 液体燃料
- 液体スチール
- ナトリウム
- 燃料粒子
- スチール粒子
- 制御材粒子
- 燃料チャンク
- 燃料クラスト
- キャビティー
- 制御棒

ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 — 遷移過程の不確かさの影響評価の事象推移 —

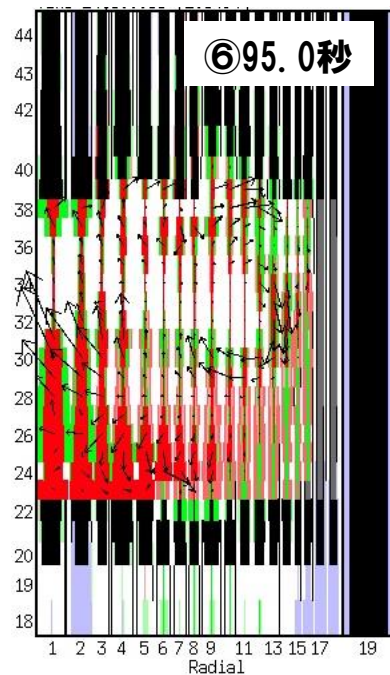


- ① 破損伝播と伝播先の集合体における燃料沈降により反応度上昇
- ② 燃料分散と外側燃料集合体での沸騰により反応度低下
- ③ 沸騰した集合体で燃料破損が進行、スチールとナトリウム蒸気圧による燃料分散により反応度低下
- ④ 外側炉心まで燃料損傷が広がる。燃料沈降によって初めて即発臨界を超過
- ⑤ スチール蒸気と燃料溶融時に放出されるFPガスにより炉心物質が径方向に移動
- ⑥ 炉心中心領域の燃料の大半が溶融し、内側炉心から外側炉心に至る炉心物質の流動が発生
- ⑦ ⑥で駆動された炉心中心軸に向かう燃料集中により、厳しい即発臨界と大きなエネルギー発生

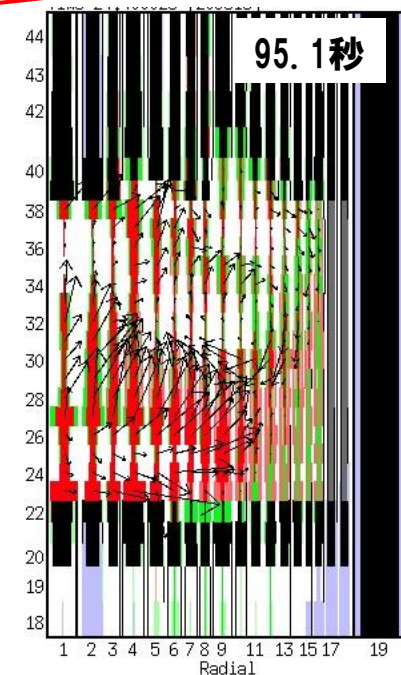
ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 — 遷移過程の不確かさの影響評価の事象推移 —



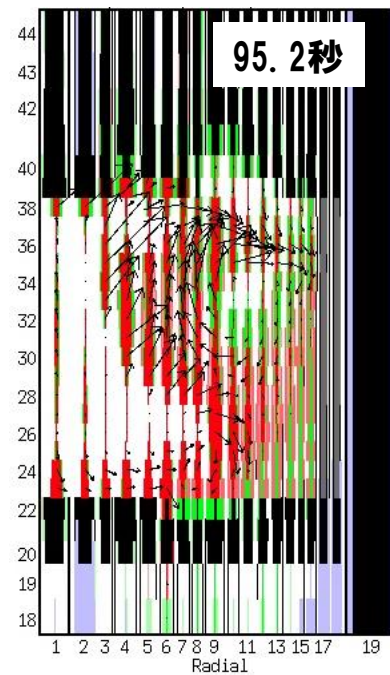
- ガス
- 構造材
- ペレット
- 液体燃料
- 液体スチール
- ナトリウム
- 燃料粒子
- スチール粒子
- 制御材粒子
- 燃料チャンク
- 燃料クラスト
- キャビティー
- 制御棒



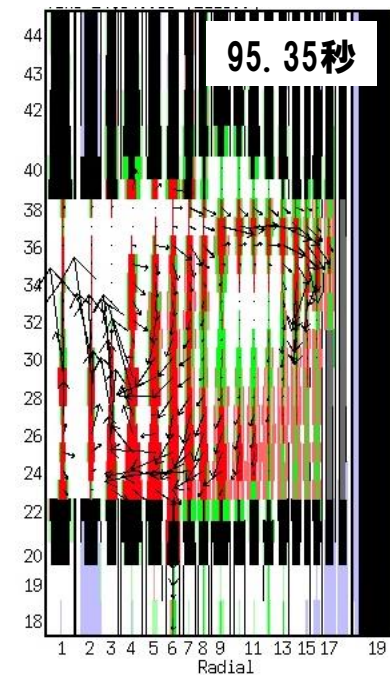
⑥ 炉心中心領域の燃料の大半が溶融し、内側炉心から外側炉心に至る炉心物質の流動が発生



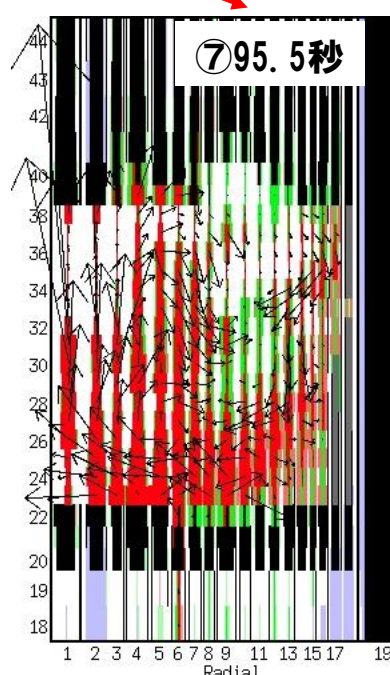
⑥ の出力ピークによって炉心中心部にスチール蒸気圧が発生



スチール蒸気圧によって炉心物質が炉心外周部へ分散



炉心外周部へ分散した炉心物質が慣性と重力によって炉心中心部へ再度集中



⑦ ⑥で駆動された炉心中心軸に向かう燃料集中により、厳しい即発臨界と大きなエネルギー発生