

第427回核燃料施設等の新規制基準適合性に係る審査会合（令和4年1月18日）における  
指摘事項への回答及び対応方針について

表 「常陽」のULOF解析に係る物理現象の一覧と回答及び対応方針

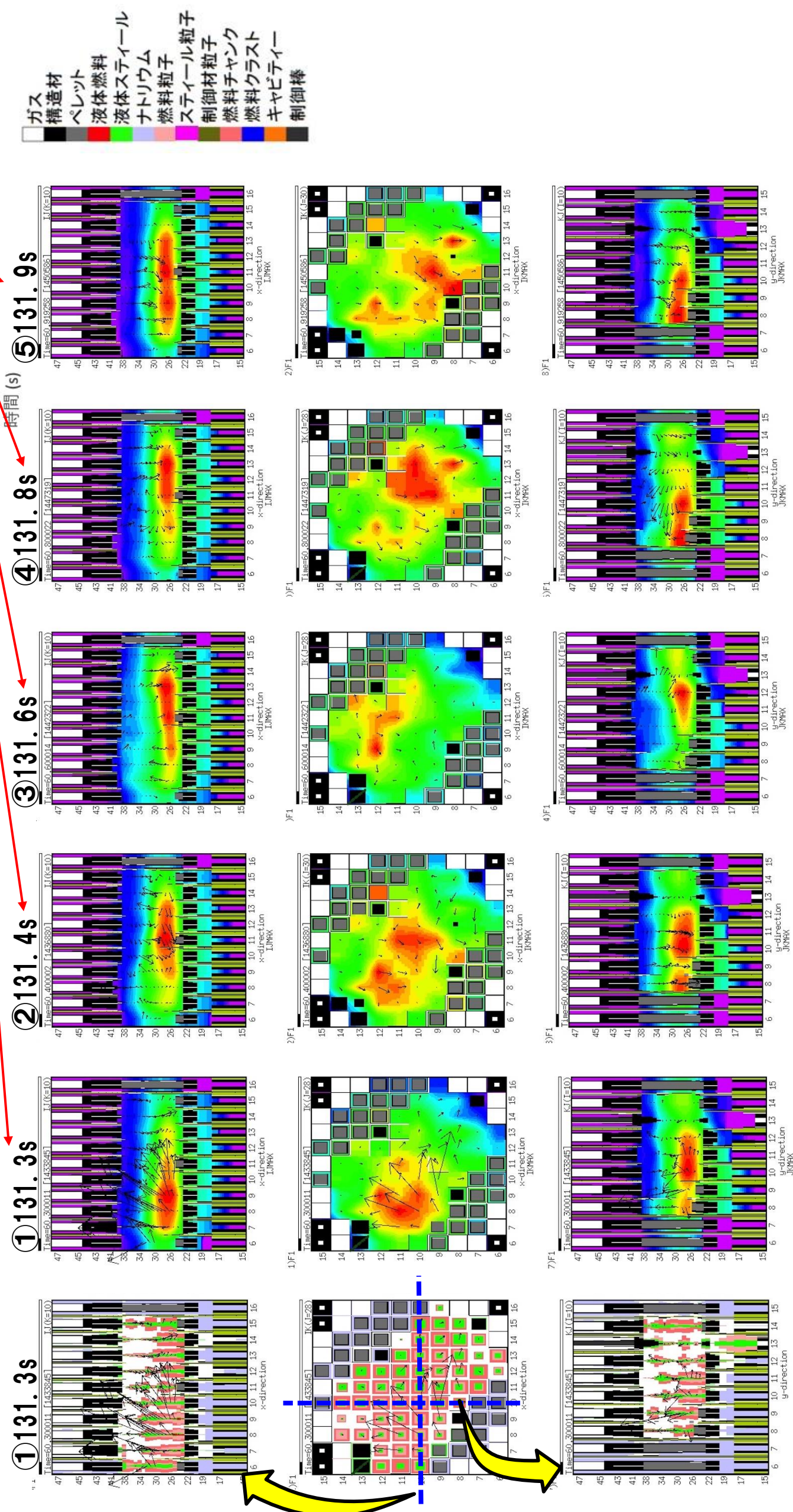
ULOF フェーズ	物理現象	回答、対応方針
遷移過程	(1) 燃料落下速度（自由落下想定か、上部ガスプレナム圧駆動による加速された落下を想定か）	【回答】 被覆管溶融によって破損した直後の燃料は、破損時の周囲の構造の有無にも影響を受けるが、その位置の周囲の流体の流速、圧力勾配及び重力に従って運動を始める。沸騰領域拡大後に燃料要素が緩慢に崩壊する「常陽」では、沸騰拡大後の燃料崩壊前にプレナムガスが放出されてしまうため、プレナムガス圧駆動による加速は生じない。
	(2) 燃料の堆積位置（炉心底部か、途中で引っかかる想定をしているか）	【回答】 炉心下部に未破損の燃料要素が残存している場合は、そのピン束の上まで落下できる。ただし、損傷領域の拡大の過程では燃料集合体ごとの時間遅れを伴って多次的に進展する。
	(3) 燃料落下時の反応度投入率	【回答】 SIMMERでは、空間依存動特性モデルによって炉心全体の物質と温度の空間分布から反応度変化を求めている。個々の燃料の挙動による反応度を分離して評価することは難しい。「常陽」の遷移過程の初期の数10秒間は被覆管の溶融によって破損した燃料要素の燃料ペレットが炉心下部へ凝集する一方で、他所では局所的なFCIやFPガス圧の発生で多次的な流動が生起されている。この過程でのこれらの燃料の動きを反映した空間依存動特性モデルによって計算された反応度挿入率は以下に示すようにXX\$/s程度である（評価結果は別途提示）。
	(4) 燃料ペレットサイズ未満に破損する要因	【回答】 「常陽」の遷移過程解析では出力過渡による固体クラッキングを想定し、被覆管溶融による燃料要素破損時に燃料要素が直径2mmに割れるとの想定を用いている。
	(5) 溶融燃料プールの燃料粒子の大きさの分布	【回答】 ほぼ2mmに近い値
	(6) 燃料ペレットサイズ未満の燃料粒子の割合	【回答】 ほぼ100%
	(7) 燃料粒子の粒径分布の放出エネルギーへの影響（大きい場合と小さい場合）	【回答】 放出エネルギーは炉心物質全体のスロッシングによる燃料集中に支配される。SIMMERによる「常陽」遷移過程解析では、燃料粒子と溶融スチールからなる炉心物質の粘性を粒径分布や粒子の体積率にかかわらず零として、スロッシングによる燃料集中を保守的に解析しているため、粒径分布が炉心物質の流動性すなわちスロッシングによる放出エネルギーに与える影響はない。
	(8) 被覆管溶融後に崩落した燃料ペレットの質量の時間変化（不確かさケース1及び2）	炉心内の燃料粒子、燃料チャンク、溶融燃料質量の時間変化グラフを提示。
	(9) 最終的にスロッシングに寄与している燃料ペレットの割合	下記の「(13)スロッシング時の凝集速度」の処理において、重心に向かう速度が正の燃料質量のみを積算し、炉心燃料インベントリに対する割合を求める。
	(10) 溶融炉心プールの炉心内分布の状態	別紙1参照
	(11) 溶融炉心プールの液面形状	

ULOF フェーズ	物理現象		回答、対応方針
遷移過程	(12)	熔融炉心プールを凝集させる駆動力	基本ケースは局所的な FCI と重力によるプールの揺動。不確かさ影響評価ケース（S I M M E R - IIIによる 2 次元解析ケース）は炉心中心でのスチール蒸気圧で炉心外周部へ分散→外周を下降して炉心中心へ集中、となっている。これを補強する解析結果を分析したグラフ及び説明図を提示。
	(13)	スロッシング時の凝集速度	Coagulation の評価プログラムにおいて、各セルから重心に向かう単位ベクトルと各セル中心の燃料流速ベクトルの内積で重心に向かう速度を求め、各セルの燃料質量で重み付き平均を求める。
	(14)	スロッシング時の反応度投入率	反応度、反応度挿入率、振幅のデジタル値を EXCEL 形式で提示。
	(15)	全炉心スチール量の分布の時間変化	炉心内、上下ピン束、径方向反射体領域のスチール質量の時間変化グラフを提示。
	(16)	スチールが炉心外へ移行する過程及びその要因	遷移過程のほとんどの時間範囲では、上下ピン束領域への流出が主であることから、これを確認できる物質分布図を提示。
機械的 応答過程	(17)	機械的応答過程開始時における炉心領域及び炉心上部構造の ・ 熔融燃料・ 熔融スチールの質量 ・ 燃料とスチールの質量分布、温度分布 ・ 全圧と各成分の分圧 (基本ケースと不確かさケース 2 について)	炉心、炉心上部構造、上部プレナム、の 3 つの領域に対して、左記の物理量のグラフを提示。
	(18)	炉上部プレナム内の C D A 気泡各成分の質量、圧力、液滴径・粒子径	上部プレナム底部で、ナトリウムの体積率が 25% (PV カーブ作成で CDA 気泡の界面と見なす値) 以下のセルについて、各物質成分 (熔融燃料、燃料粒子、熔融スチール、スチール粒子) の質量の積算、液滴径・粒子径の質量重み付き平均、セル圧力の平均を提示。
	(19)	炉上部プレナム内の C D A 気泡内の各成分の体積率 (又は質量) 分布	CDA 気泡 (上部プレナム底部) に着目した物質分布図を提示。
	(20)	炉心及び炉心上部構造に残存する熔融物質質量及び炉上部プレナム中へ移行する熔融物質質量の割合	前述の質量分布グラフで対応。
	(21)	炉上部プレナム中の非凝縮性ガスの割合	上部プレナム底部領域の FP ガスナトリウム蒸気の質量総和のグラフを提示。
	(22)	機械的エネルギーを構成するナトリウムスラグの運動エネルギー (軸方向成分のみ対象としたものか、あるいは水平方向も併せて考慮しているか)	全方向を考慮している。ただし、全物質成分の運動エネルギー、カバーガスの圧縮エネルギー、位置エネルギー、全機械的エネルギーに分けたグラフを提示。
	(23)	回転プラグ底面に係る圧力分布	代表的な時間点における圧力分布図と、各地点における圧力の時間変化のグラフと説明図を提示。
	(24)	PLUG 解析において、偏心している小回転プラグを円筒体系で模擬することの妥当性	不確かさ影響評価ケースにおいても小回転プラグ締付ボルトの歪みは最大でも約 0.7% であり、破断歪み約 15% に比べて十分に小さく、プラグの傾きを考慮してもその健全性に影響はない。また、小回転プラグの大回転プラグに対する相対変位は最大でも 10mm 以下で小回転プラグの直径約 1,110mm に比べて約 1/100 以下である。プラグ間隙へのナトリウム流入量も間隙容量に対して約 1/10 以下であることから、プラグの傾きを考慮しても格納容器 (床上) へ漏えいすることはない。PLUG の傾きによる固着については、固着後プラグが一体となって運動することの影響を評価する。
	(25)	回転プラグ・ボルトの詳細図面	適切な図面を提示。
	(26)	ナトリウム噴出経路の詳細図面	
	(27)	ボルトの締め付け圧の減衰の可能性	最初の締め付け後の締め付け力の緩みが生じている可能性と理解。可能性の検討、影響の評価について検討を実施中。
	(28)	ナトリウム噴出経路の圧力損失	PLUG の入力根拠書等に基づいて説明資料を作成。



# 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 —

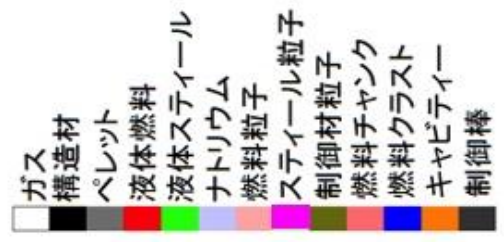
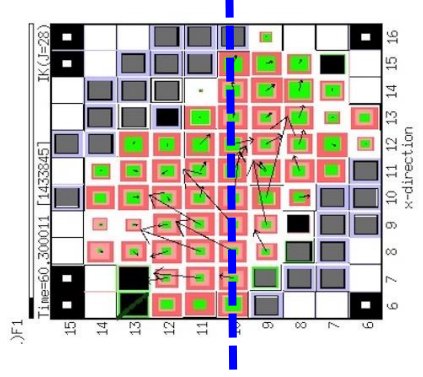
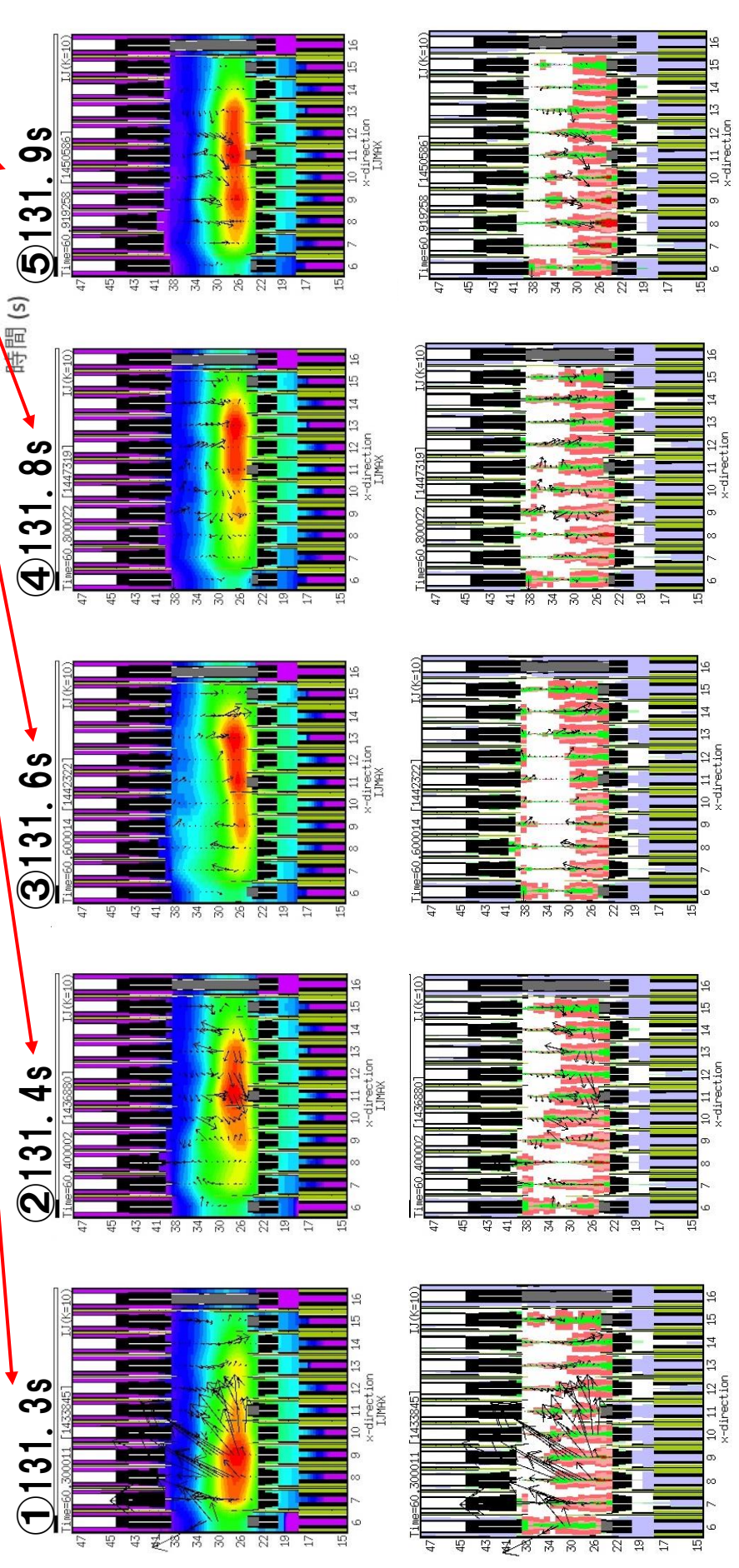
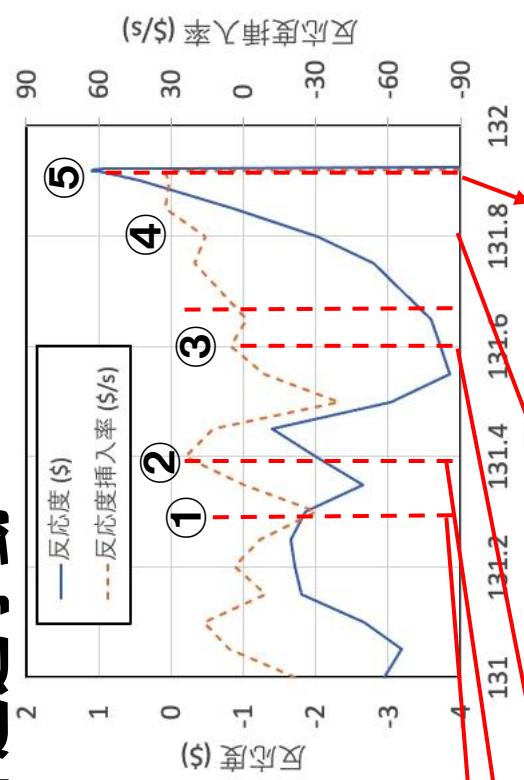
- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻して再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。





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

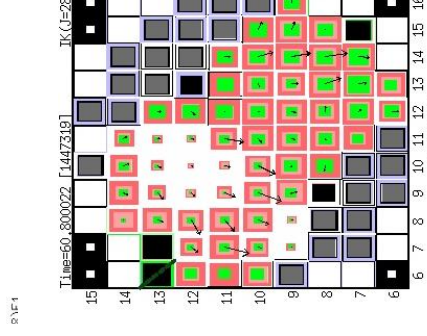
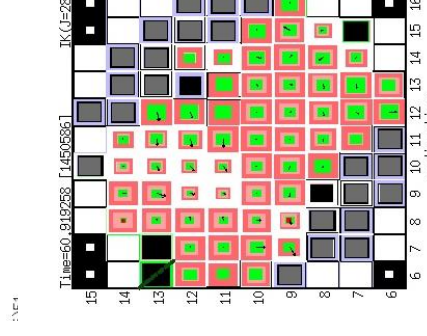
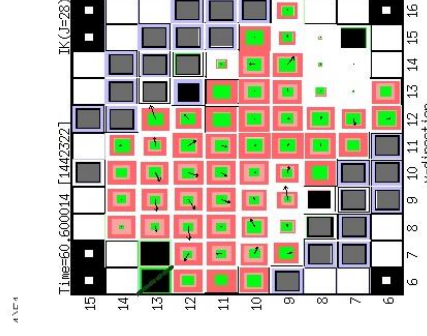
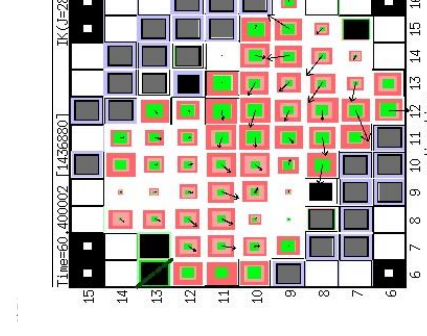
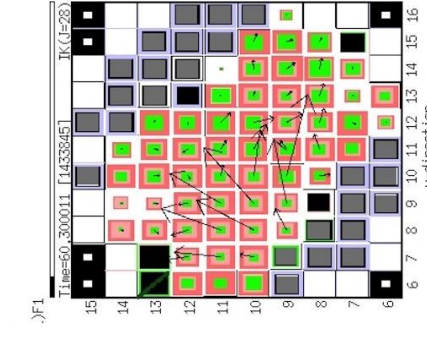
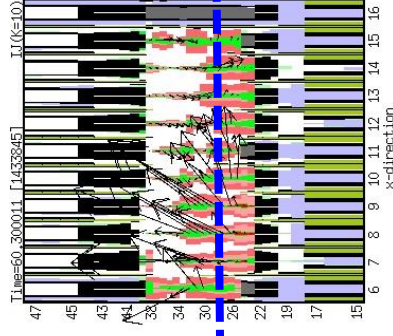
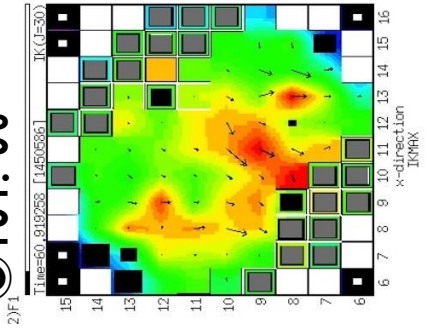
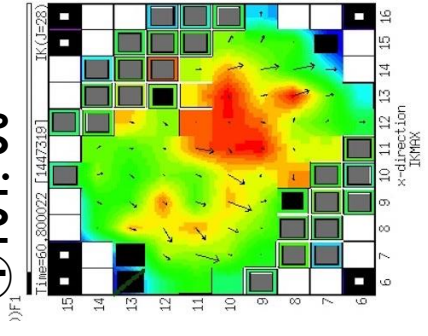
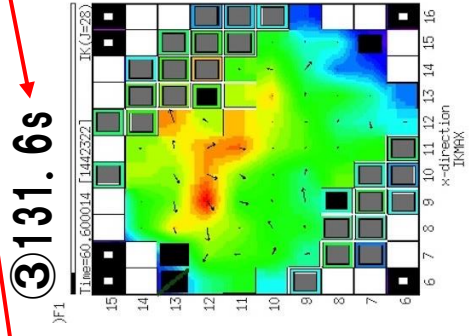
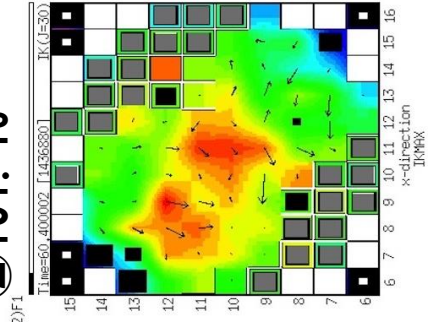
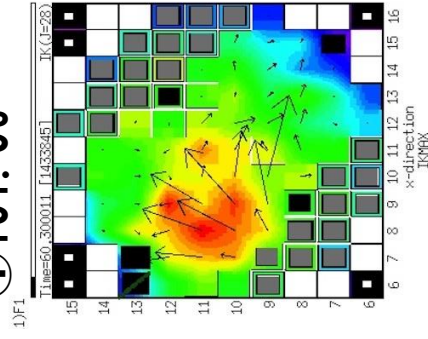
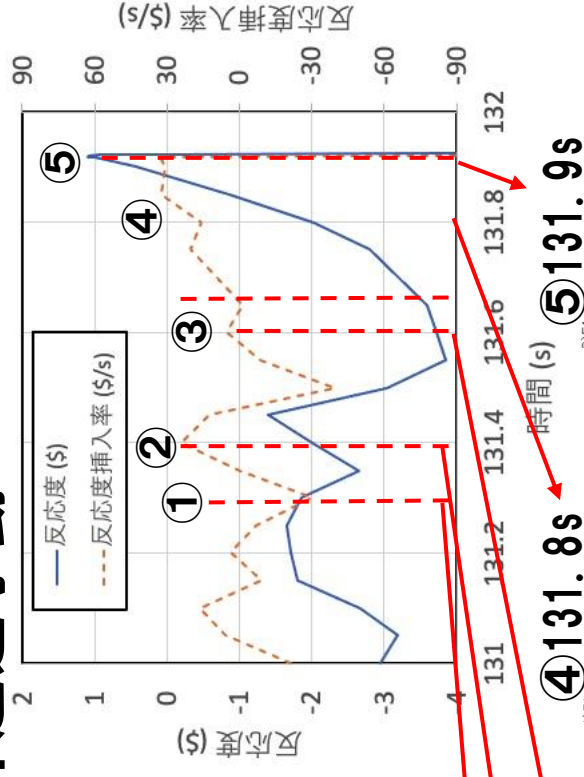
- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻して再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。





# 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 —

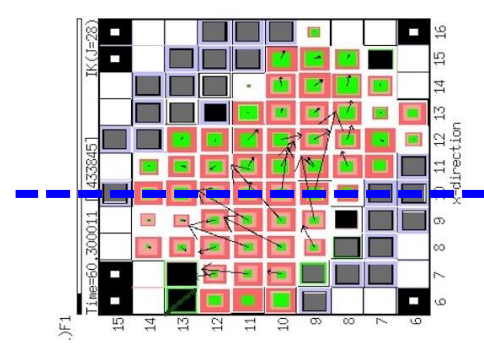
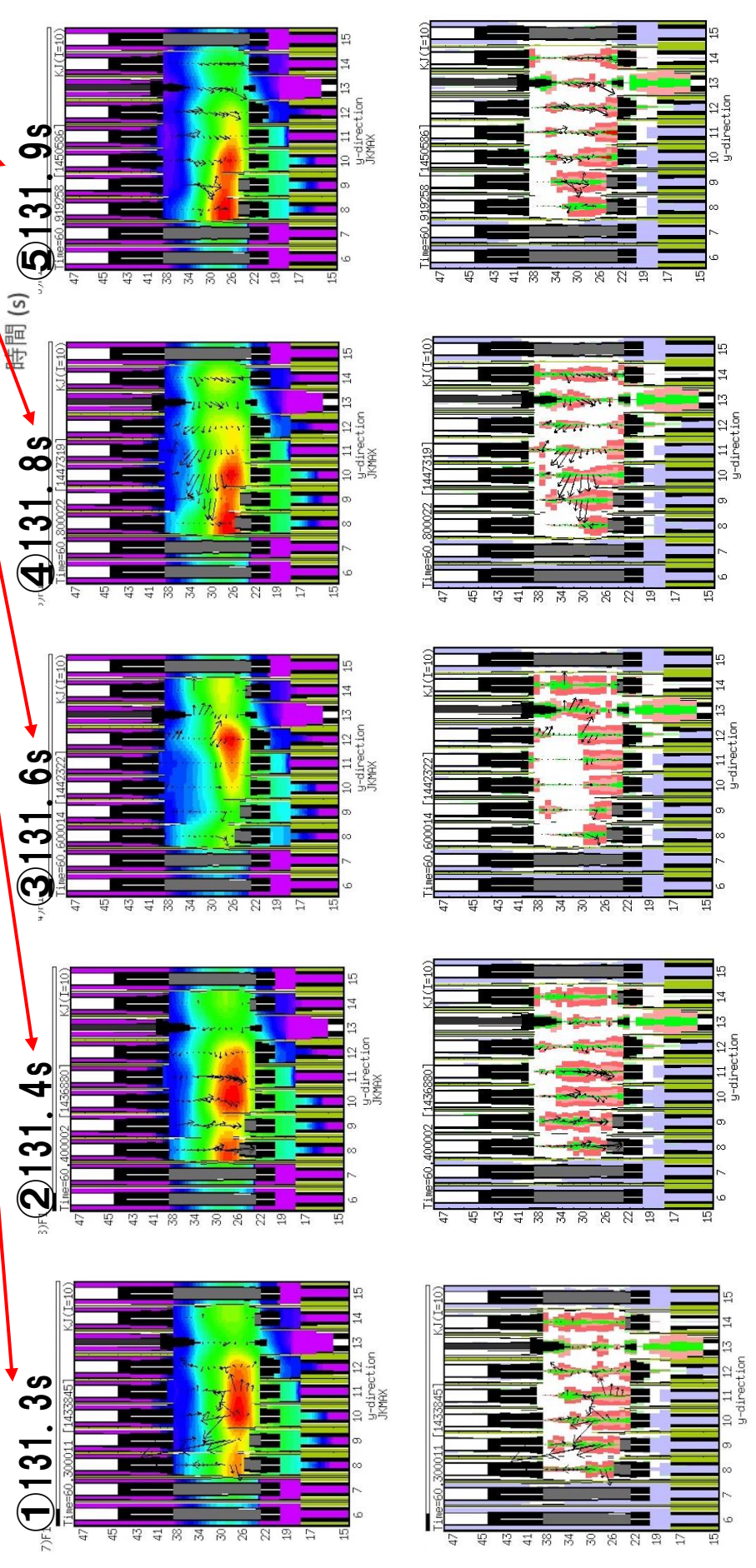
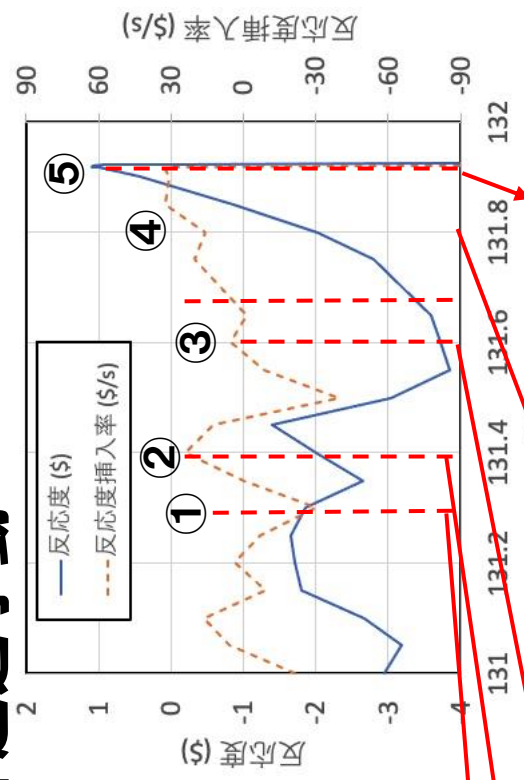
- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻して再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。





# 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 —

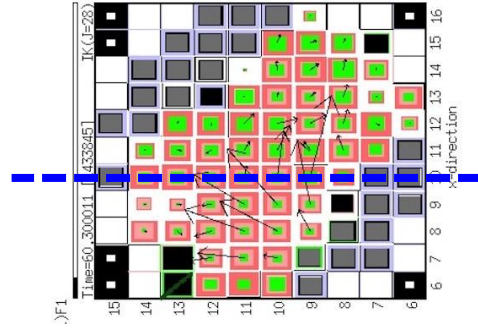
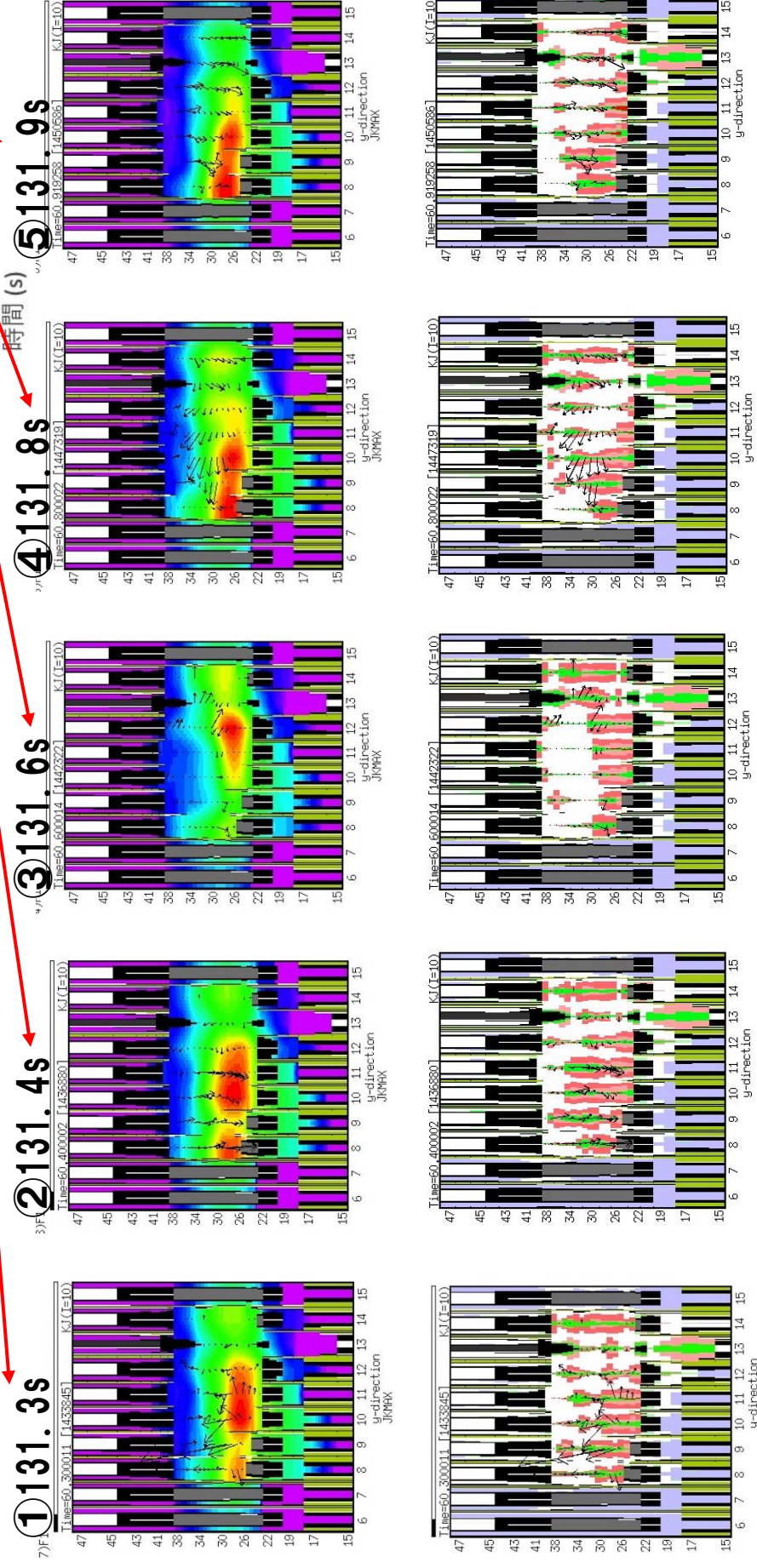
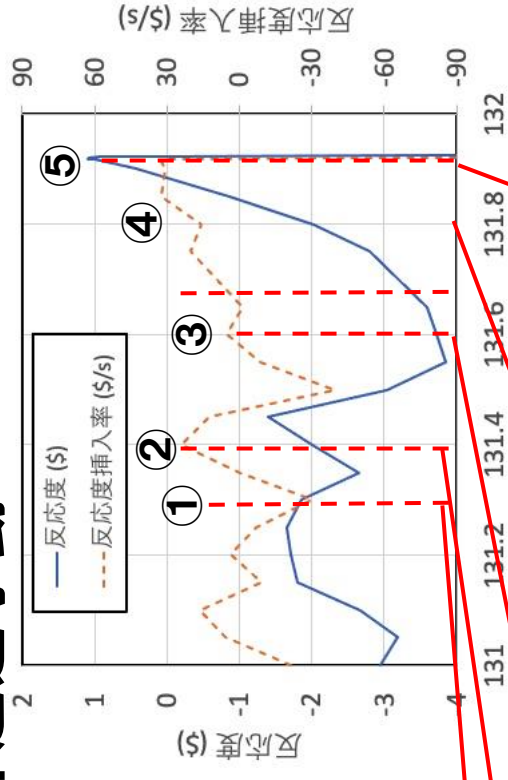
- 即発臨界超過直前（131.9s）までの燃料の発熱密度の空間分布の時間変化を示す。
- 燃料が全体として水平断面左下から右上へ移動し、揺れ戻して再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。



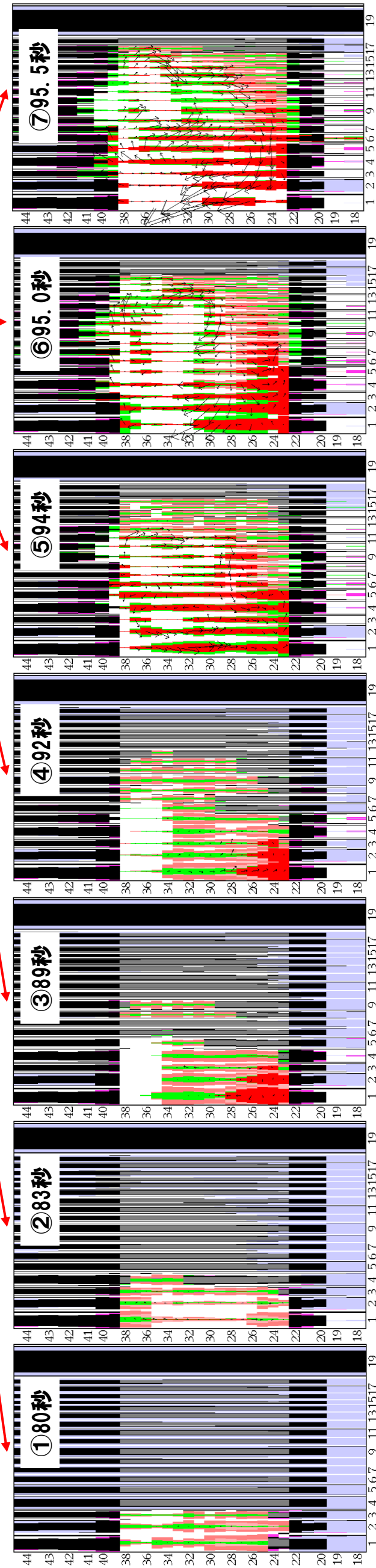
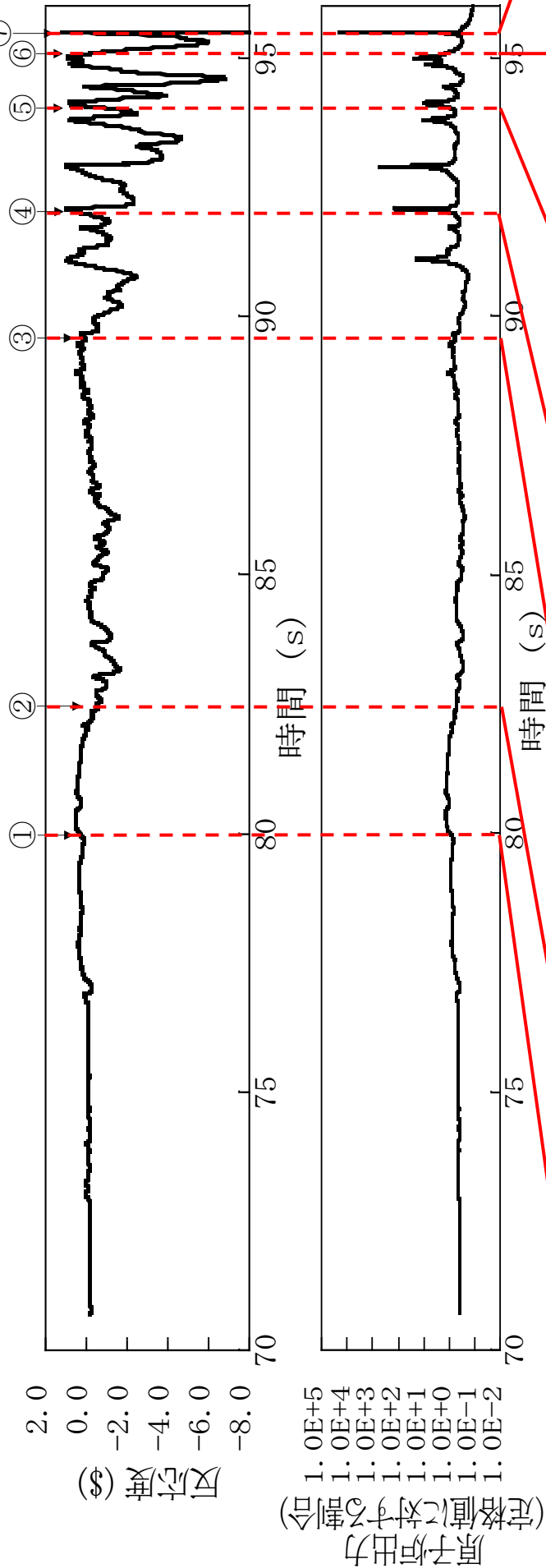


# ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 — 基本ケースにおける即発臨界超過挙動 —

- 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、揺れ戻して再度左下に集中した時点で即発臨界を超過する。



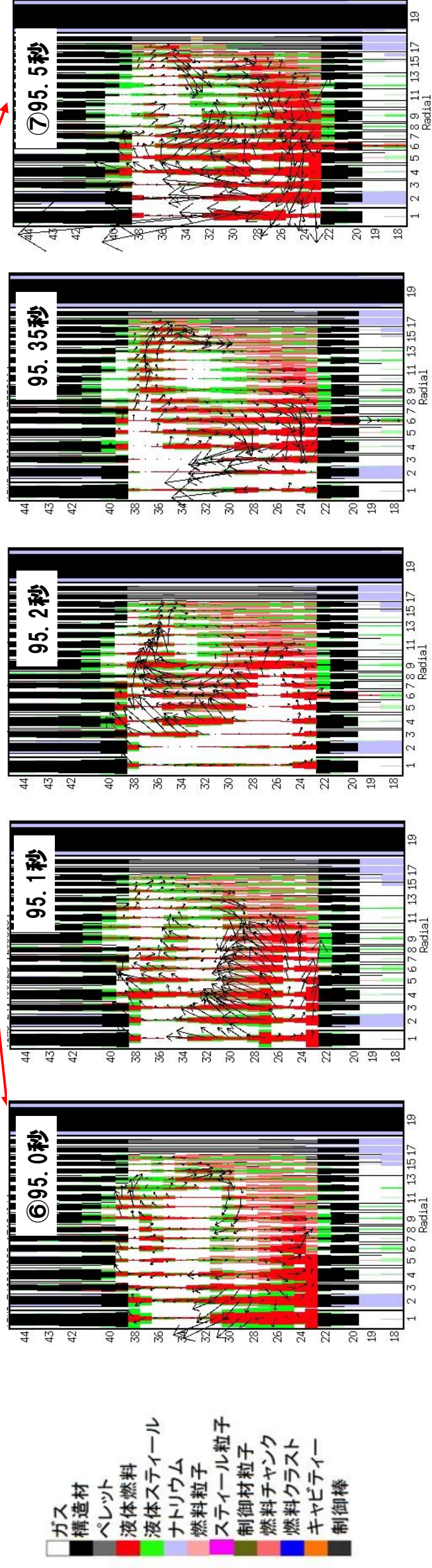
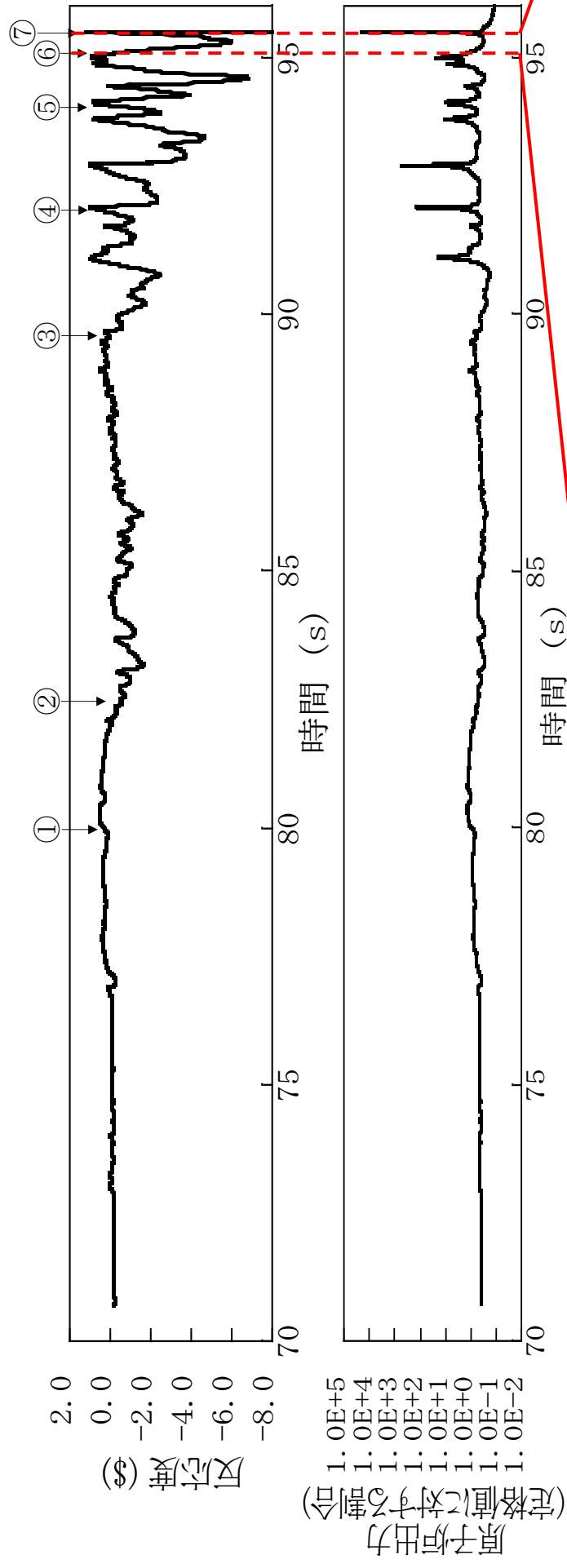
# ULOFの格納容器破損防止措置の有効性評価 — 遷移過程の不確かさの影響評価の事象推移 —



- 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、ステイ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 ステイ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 —



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テイール蒸気圧が発生

ステイール蒸気圧によって炉心物質が炉心外部へ分散

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、激しい即発臨界と大きなエネルギー発生