



JY-86-3

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

コメント回答

2021年9月28日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所

高速実験炉部

審査会合におけるコメント

【令和3年9月6日第413回審査会合におけるコメントの回答予定】

No.※1	コメント	回答状況	資料
223	有効性評価における全ての評価項目と評価指標の対応について説明すること。また、評価項目の具体的な判断基準についても説明すること。	10月4日審査会合でご説明	・ JY-86-1
224	SAS4Aの妥当性確認で抽出された不確かさの影響評価の詳細について説明すること。	10月4日審査会合でご説明	・ JY-86-3
225	再配置・冷却過程に係る損傷炉心物質の炉心からの流出の不確かさ及び不確かさの影響評価について説明すること。	10月4日審査会合でご説明	・ JY-86-3
226	SIMMERにおける損傷炉心の核的挙動の計算について、試験解析等により妥当性を確認した結果として、最適評価を適用することを結論として明記すること。	10月4日審査会合でご説明	・ JY-86-2
227	FCI挙動はTHINA試験でSIMMERの妥当性を評価しているが、この他の実験的知見も含めて、「常陽」の炉心損傷過程における状態へのこれらの実験的知見の適用性を説明すること。また、FCIの最大圧力を約80atmとすることの妥当性を説明すること。	10月4日審査会合でご説明	・ JY-86-3
228	SIMMERの有効性評価への適用性に関して、不確かさの影響評価において、FCI、スロッシングの不確かさを包絡する保守的な設定となっていることを確認するため、不確かさの影響評価の検討過程における感度解析等について、定量的又は定性的に説明すること。例えば、FCIの発生時期や発生位置の影響をどのように把握し、不確かさの影響評価の条件を設定したのか、及び2次元円筒座標系での計算（スロッシング挙動、流動性の仮定を含む。）において十分な保守性を考慮していることの説明が必要である。	次回審査会合でご説明	
229	機械的エネルギー3.6MJの場合に格納容器（床上）にナトリウムが噴出しないことの評価について、機械的な応答の計算の詳細を説明すること。	10月4日審査会合でご説明	・ JY-86-3
230	SAS4AからSIMMER-IIIへのデータの引継ぎにおいて、初期条件として損傷燃料を炉心中心に設定していることの妥当性等、境界条件が適切に引き継がれていることを説明すること。	10月4日審査会合でご説明	・ JY-86-2

※1：「常陽」質問管理表の管理番号

No. 223 SAS4Aの妥当性確認で抽出された不確かさの影響評価の詳細について

起因過程の不確かさの影響評価について (ULOF及びUTOP)

■ 起因過程の不確かさ

計算コードのモデルに関する不確かさとしては、FPガス保持量の不確かさの影響を評価する。

解析条件に関する不確かさとしては、制御棒引抜き反応度、ナトリウムボイド反応度、ドブプラ反応度、燃料の軸伸び及び燃料破損条件の不確かさの影響を評価する。

起因過程解析の不確かさ (ULOF及びUTOP)

	項目	不確かさの幅	幅の設定方法
ULOF	FPガス保持量	100% (×約0.0)	FPガスの保持量を0% (解析上は微量) に減じる。
	ナトリウムボイド反応度	30% (負値×0.7、 正值×1.3)	炉心の核設計における不確かさ (解析精度 (約20%以下) 及び炉心構成の違い (約10%以下)) から設定 ナトリウムボイド反応度が負値の領域では反応度の値を×0.7とし、ナトリウムボイド反応度が正值の領域では反応度の値を×1.3とする。
	ドブプラ反応度	30% (×1.3)	ULOFでは燃料温度が低下して正值となるため、反応度の値を×1.3とする。
	燃料の軸伸び	30% (×1.3)	ULOFでは燃料温度が低下して正值となるため、反応度の値を×1.3とする。
UTOP	FPガス保持量	100% (×約0.0)	ULOFと同じ。
	制御棒引抜き反応度	約4.2¢/sで一定	制御棒位置や実効遅発中性子割合の不確かさ等を考慮して、反応度添加率を約4.2¢/sで一定とする。
	ナトリウムボイド反応度	30% (負値×0.7、 正值×1.3)	ULOFと同じ。
	ドブプラ反応度	30% (×0.7)	UTOPでは燃料温度が上昇して負値となるため、反応度の値を×0.7とする。
	燃料の軸伸び	30% (×0.7)	UTOPでは燃料温度が上昇して負値となるため、反応度の値を×0.7とする。
	燃料破損条件	溶融直後 及び 溶融割合50%	基本ケースにおいて溶融割合が20%となった時点で破損させていたものを、負の反応度効果を有する燃料分散の抑制という観点から、保守性を考慮して燃料溶融開始直後とする。それとは別に、負の反応度効果を有する燃料分散の開始を遅らせるという観点から、保守性を考慮して溶融割合が50%となった時点で破損させる。

起因過程の不確かさの影響評価について (ULOF及びUTOP)

■ 不確かさの影響評価 (ULOF)

反応度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臨界 (0.0\$) を超えることはなかった。

ナトリウムボイド反応度ケースでは損傷集合体の数が増加しているが、遷移過程の評価で重要な挙動である大規模な燃料移動挙動が表れる段階においては、遷移過程開始時の損傷集合体に係る状況の違いによる影響はほとんどなくなっていると考えられる。

以上の点から起因過程の不確かさは遷移過程の評価に影響しないと考えられる。

解析ケース	解析結果					
	沸騰開始 (秒)	燃料の 崩壊開始 (秒)	最大出力 (%)	最大 全反応度 (\$)	ラツパ管 溶融 (秒)	損傷 集合体数 (体)
基本ケース	45.5	70.3	< 100	< 0.0	71.7	2
ナトリウムボイド 反応度ケース	39.4	59.3	< 100	< 0.0	60.0	5
ドツプラ 反応度ケース	44.5	68.6	< 100	< 0.0	70.7	2
燃料の軸伸びケース	44.8	67.9	< 100	< 0.0	69.4	2
FPガス 保持量ケース	45.5	70.3	< 100	< 0.0	71.3	2

起因過程の不確かさの影響評価について (ULOF及びUTOP)

■ 不確かさの影響評価 (UTOP)

反応度は基本ケースの最大0.195\$に対して、反応度に最も大きな影響のあった制御棒引抜き反応度ケースでも最大0.244\$と大きな差はなく即発臨界(1.0\$)を超えることはなかった。

燃料破損条件ケース(溶融割合0%ケース)では損傷集合体の数が増加しているが、遷移過程の評価で重要な挙動である大規模な燃料移動挙動が表れる段階においては、遷移過程開始時の損傷集合体に係る状況の違いによる影響はほとんどなくなっていると考えられる。

以上の点から起因過程の不確かさは遷移過程の評価に影響しないと考えられる。

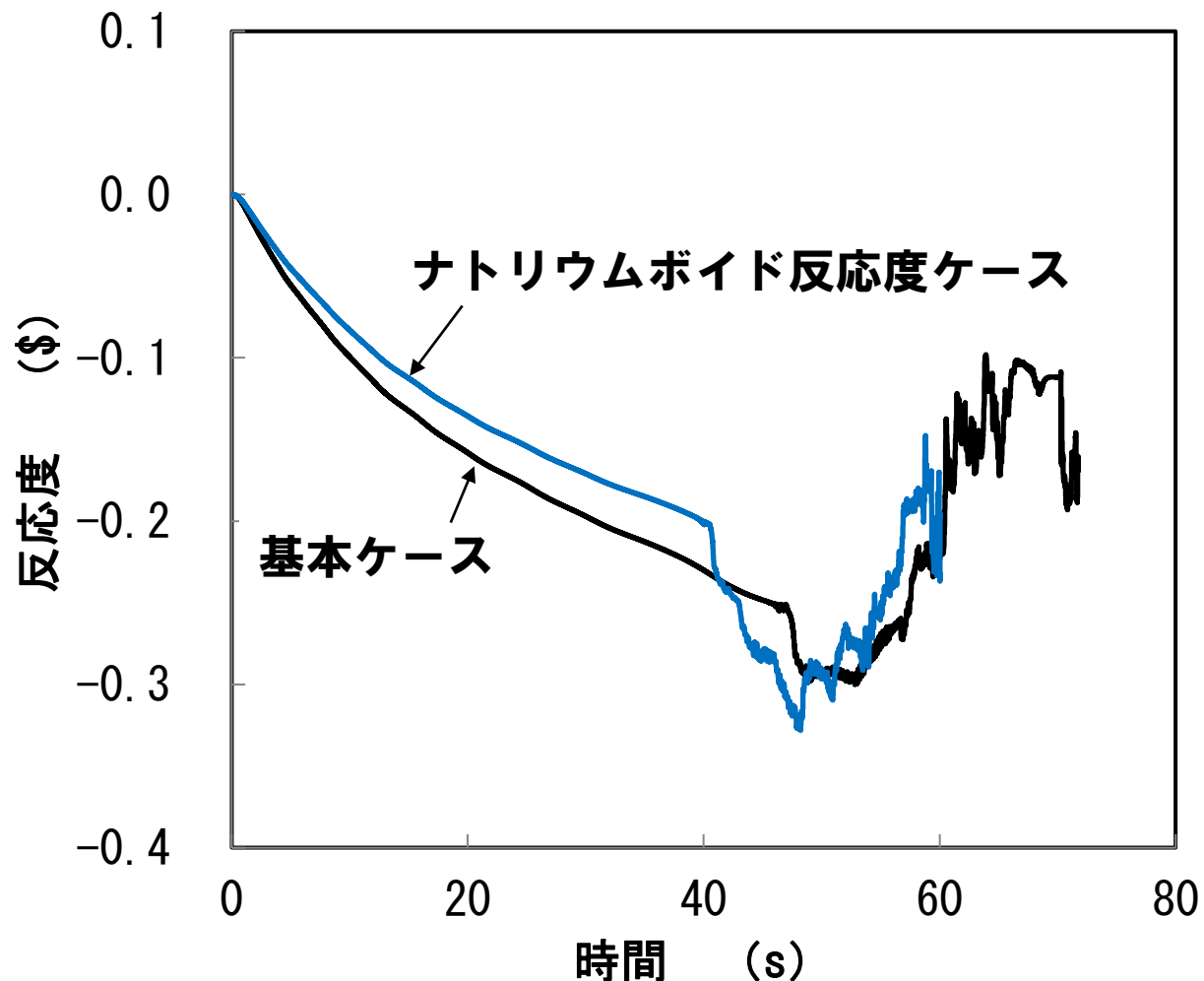
解析ケース	解析結果					
	沸騰開始 (秒)	燃料要素 破損開始 (秒)	最大出力 (%)	最大 全反応度 (\$)	ラッパ管 溶融 (秒)	損傷 集合体数 (体)
基本ケース	-	27.9	255	0.195	31.6	2
制御棒引抜き 反応度ケース	-	20.2	270	0.244	23.6	2
ナトリウムボイド 反応度ケース	-	26.3	257	0.203	30.2	2
ドップラ 反応度ケース	-	25.6	259	0.208	29.4	2
燃料の軸伸びケース	-	26.2	257	0.202	30.4	2
燃料破損条件ケース (溶融割合0%ケース)	-	21.1	206	0.183	26.8	10
燃料破損条件ケース (溶融割合50%ケース)	-	42.5	374	0.203	44.4	1
FPガス 保持量ケース	-	27.9	255	0.195	31.9	2

起因過程の不確かさの影響評価について (ULOF及びUTOP)

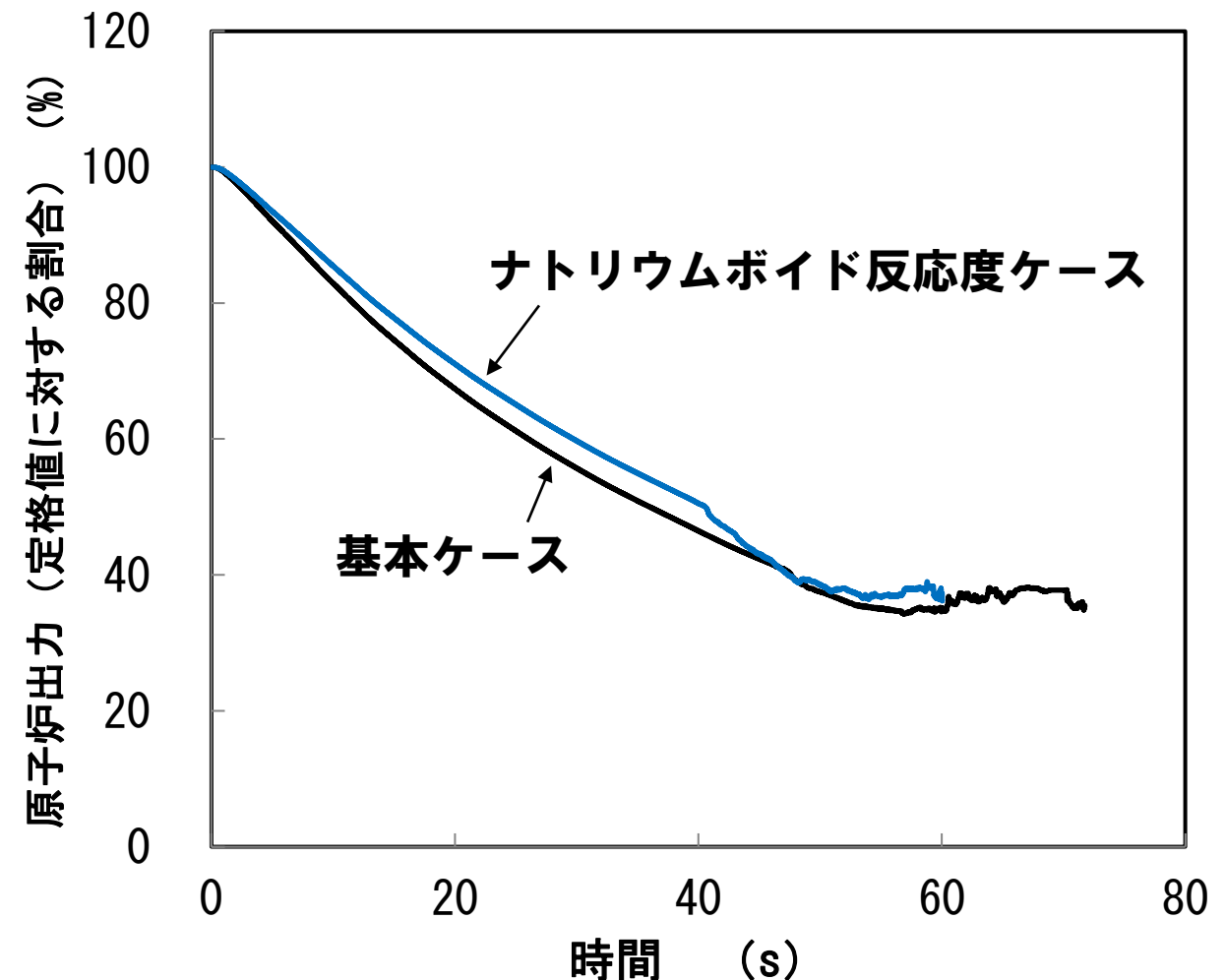
■ 不確かさの影響評価 (ULOF: ナトリウムボイド反応度ケース)

基本ケースに比べて過渡開始直後から反応度の減少が若干緩やかになり、沸騰開始時刻や燃料崩壊時刻が早くなっている。冷却材が沸騰するチャンネルの数が増加し、被覆管の溶融に至るチャンネルの数も増加するが、炉心全体では負の冷却材密度反応度及びナトリウムボイド反応度が卓越しているため、基本ケースと同様に未臨界の状態が維持される。

反応度推移に関しても大きな差はなく、基本ケースと同様、事象全体を通じて反応度は負の範囲にとどまり臨界(0.0\$)を超えることはなかった。また、損傷集合体数は基本ケースの2集合体に対して、ナトリウムボイド反応度ケースでは5集合体となっているが、その内の3集合体は被覆管が溶融に至っただけで燃料は流動化していない。炉心全体の燃料分布は基本ケースと大きく変わらず、遷移過程の事象推移に大きな影響を与えることはない。



反応度の時間履歴



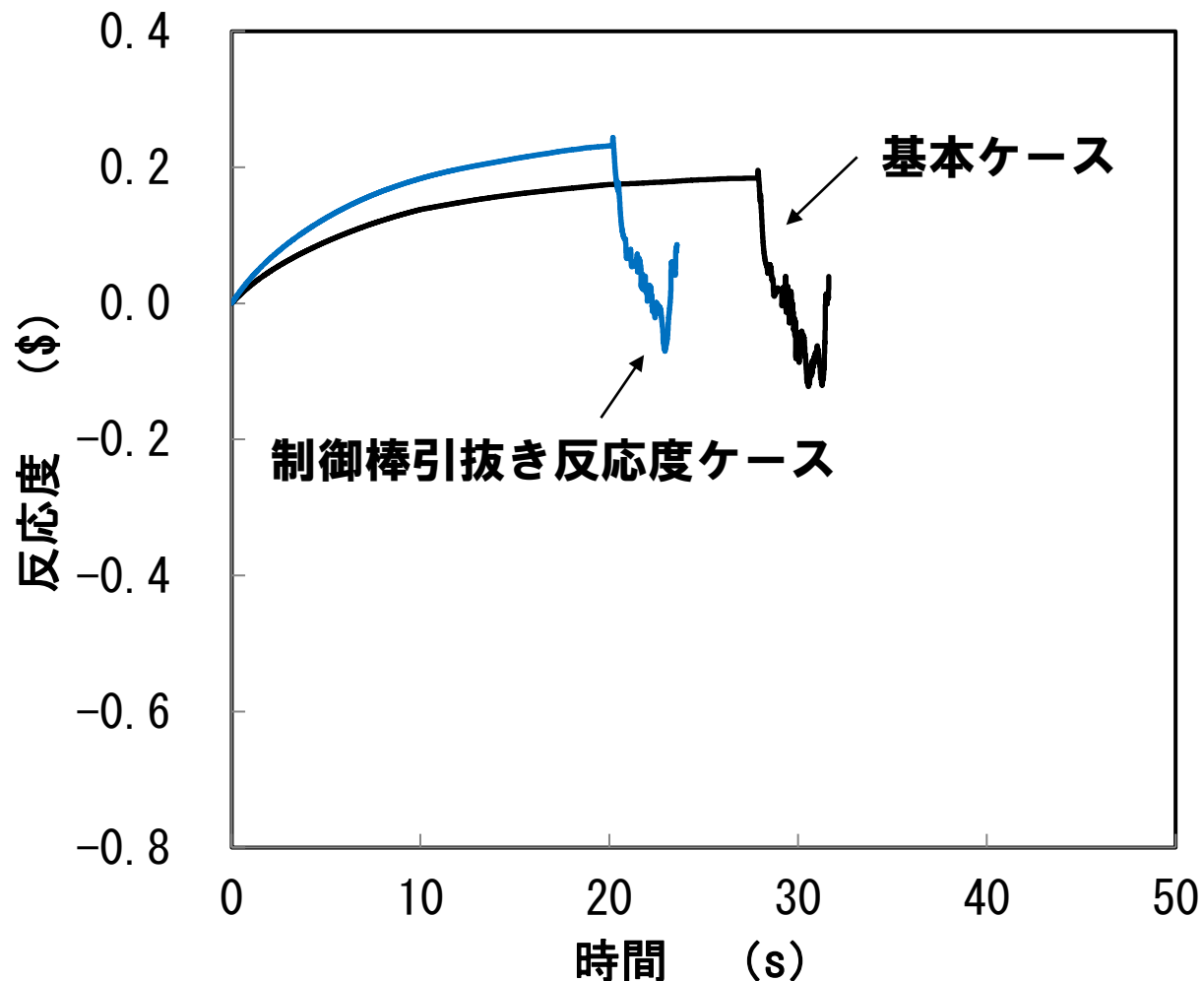
原子炉出力の時間履歴

(ULOF及びUTOP)

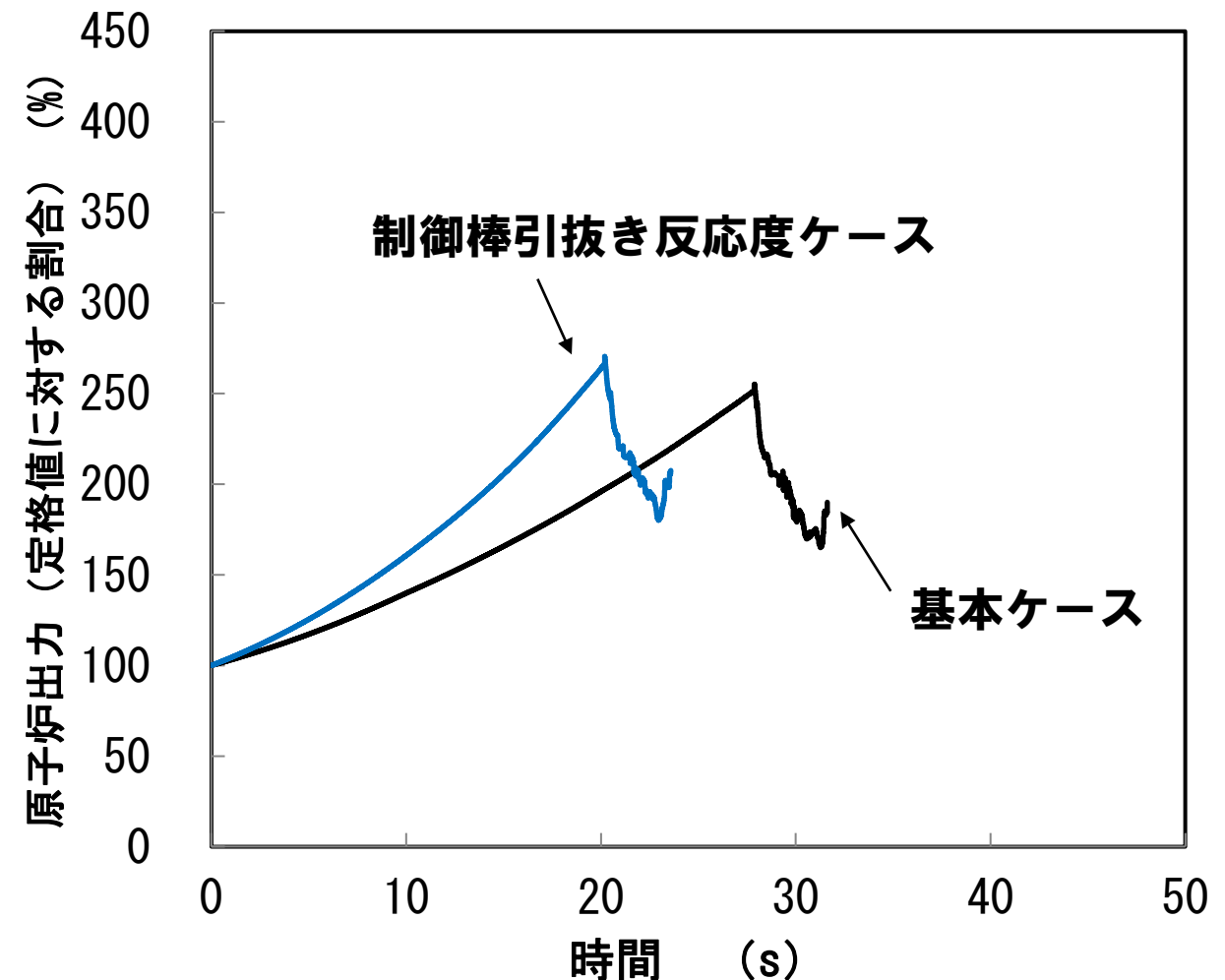
■ 不確かさの影響評価 (UTOP: 制御棒引抜き反応度ケース)

制御棒引抜き反応度ケースについては、過渡開始直後から反応度の増加率が上がり、燃料要素の破損時刻が早くなっている。しかしながら、損傷集合体数は基本ケースと同様に2集合体だけであり、破損後の推移も大きな違いはなかった。

事象進展が速くなり、最大反応度や最大出力が増加したが、最大出力は定格出力に対して約2.7倍程度、最大反応度は約0.244\$と基本ケース(最大出力は定格出力に対して約2.5倍程度、最大反応度は約0.195\$)と大きな差はなく、即発臨界(1.0\$)を超えることもなかった。また、損傷集合体数も基本ケースと同じ2集合体だけであった。後続の遷移過程の事象推移にも大きな影響を与えることはない。



反応度の時間履歴



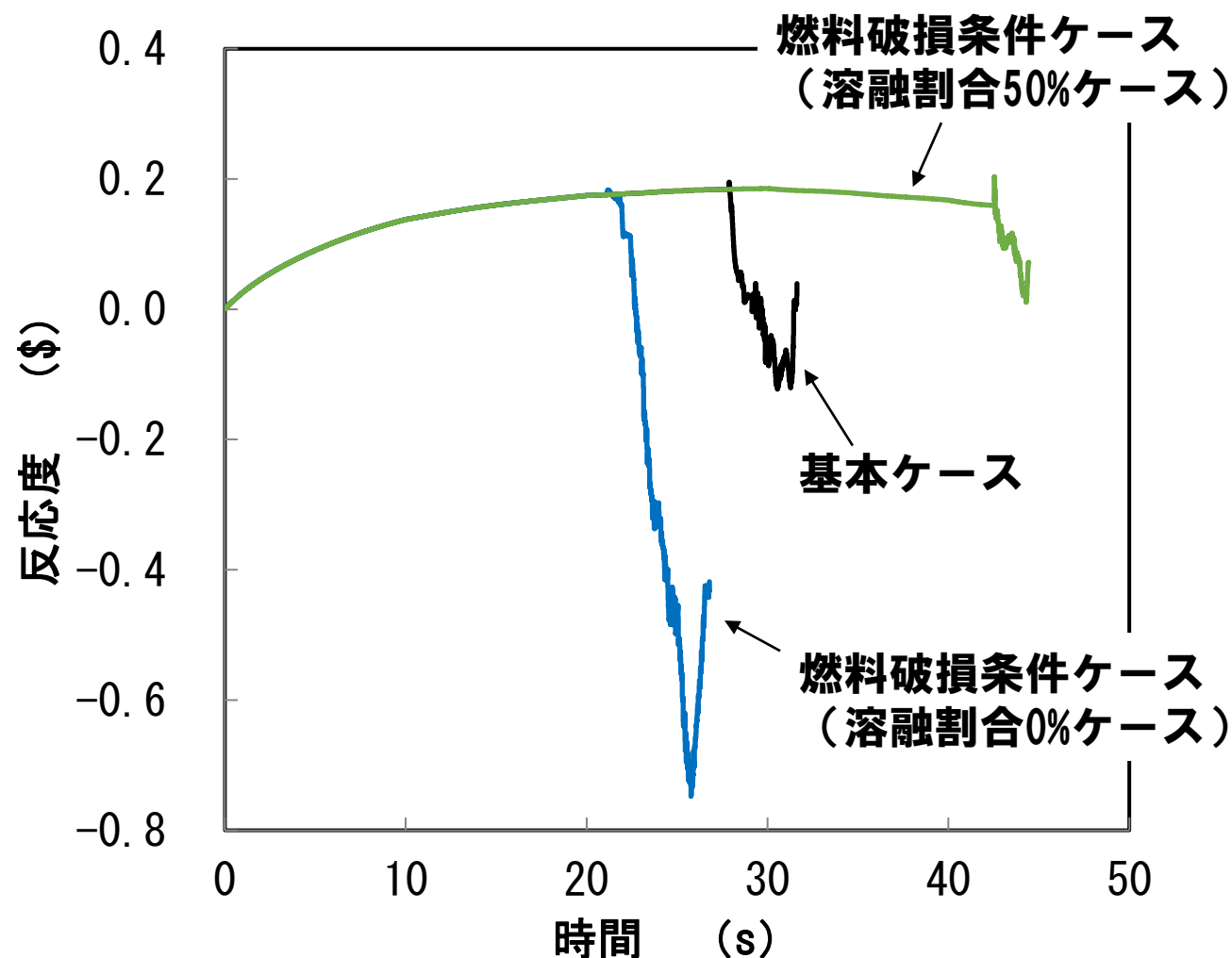
原子炉出力の時間履歴

起因過程の不確かさの影響評価について (ULOF及びUTOP)

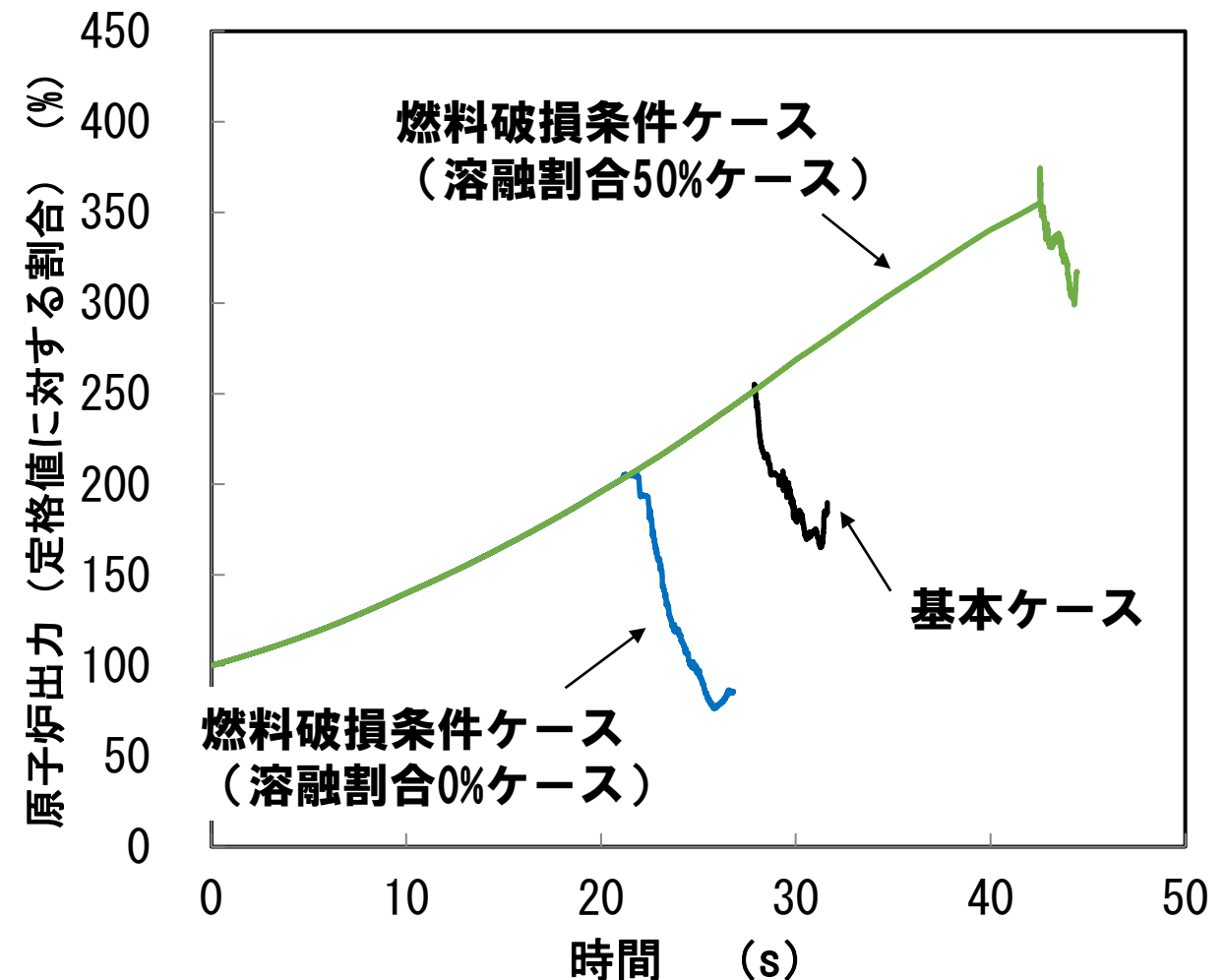
■ 不確かさの影響評価 (UTOP: 燃料破損条件ケース)

溶融割合0%ケースでは燃料の破損の同時性が高まり、基本ケースに比べて損傷集合体数は増加した(10集合体)。破損時の燃料溶融割合が減少したことで、破損直後の燃料移動反応度は基本ケースに比べて小さくなるが、損傷集合体数が増加したことによって結果的に燃料移動反応度は基本ケースよりも大きくなっている。破損時の燃料はほとんどが未溶融で流動性が低いため、炉心全体の燃料分布は基本ケースと大きく変わらず、遷移過程の事象推移に大きな影響を与えることはない。

溶融割合50%ケースでは破損時刻が大幅に遅れ、基本ケースに比べて最大出力が増加しているが、それでも定格出力に対して3.8倍程度であった。破損時の燃料溶融割合が大きいことから、破損時に燃料要素内の燃料集中による反応度の増加が見られるが、最大出力反応度は0.203\$と基本ケースと同程度であった。また、損傷集合体は1集合体だけであった。



反応度の時間履歴

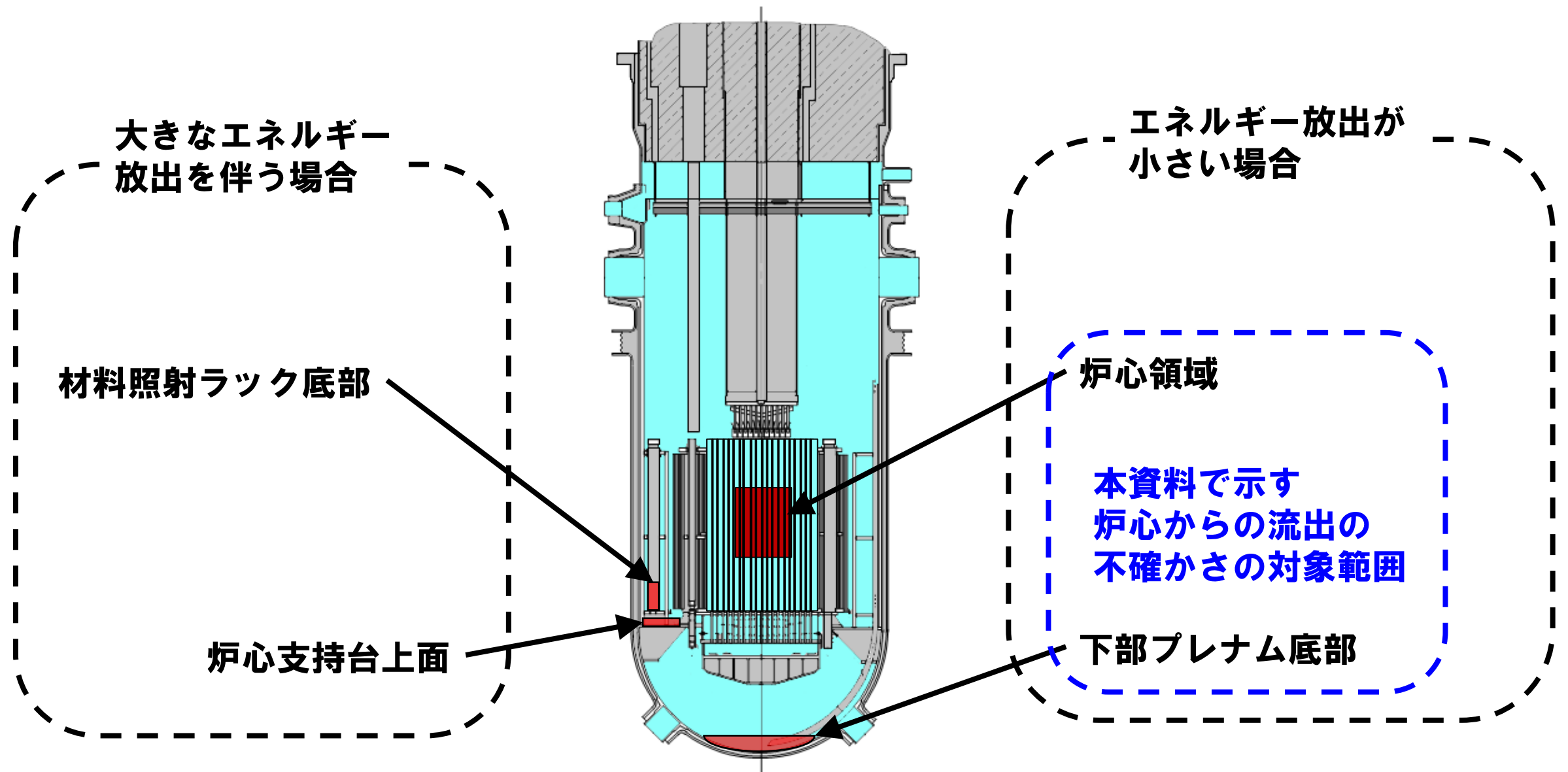


原子炉出力の時間履歴

**No. 224 再配置・冷却過程に係る損傷炉心物質の炉心からの流出の不確かさ
及び不確かさの影響評価について**

1. 再配置・冷却過程について

- 原子炉容器内での損傷炉心物質の再配置挙動には、崩壊熱による残留炉心物質の溶融と流出挙動に依存して大きな変動幅がある。
- 事象推移に関して基本となるシナリオを想定した上で、先行する遷移過程の基本ケースの結果を踏まえて、残留炉心物質の溶融と炉心からの流出挙動に応じた再配置挙動を検討する。



2. 損傷炉心物質の炉心からの流出の不確かさ

- 下部プレナムへの損傷炉心物質の流出量は流出タイミングに依存

□ 流出タイミング①：基本ケースとして想定したもの

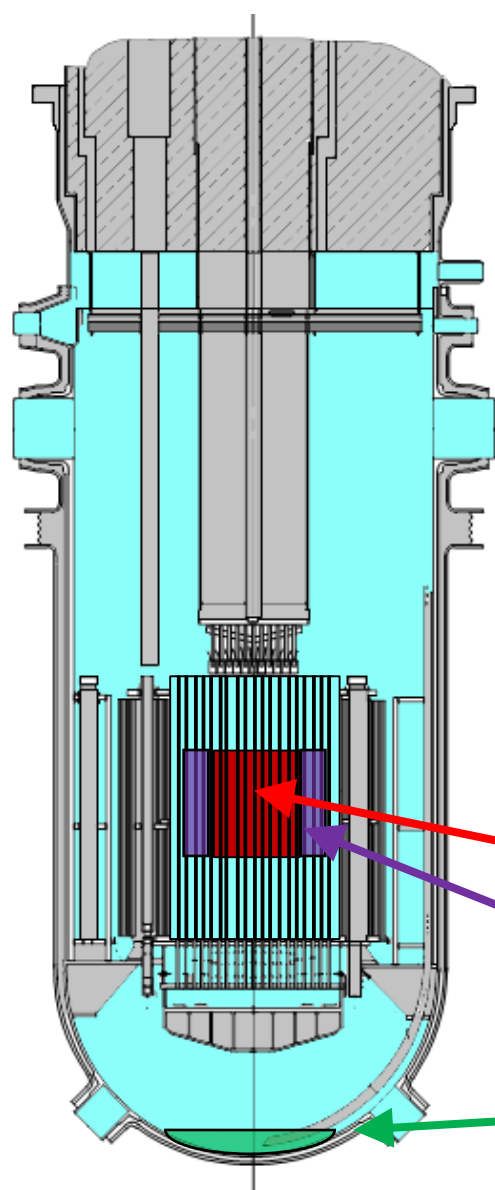
- ✓ 損傷炉心物質が崩壊熱によって徐々に溶融する状況で、溶融した損傷炉心物質が制御棒下部案内管を通じて順次下部プレナムへ流出する場合

- 溶融した残留炉心物質は制御棒下部案内管を通り下部プレナムへ流出するが、炉心に残留する燃料の量が初期燃料インベントリ（以下「インベントリ」という。）の約50%を下回ると、発熱と炉心周辺構造への熱損失がバランスして燃料はそれ以上溶融しなくなり、下部プレナムへの流出は停止
- この場合、下部プレナムに移行可能な溶融燃料はインベントリの約30%

□ 流出タイミング②：損傷炉心物質の炉心からの流出の不確かさを考え、下部プレナムへ流出し得る燃料量を最大限見積もる想定

- ✓ 損傷炉心物質が溶融開始後も炉心内にとどまり、溶融量が蓄積した後下部プレナムへ流出する場合

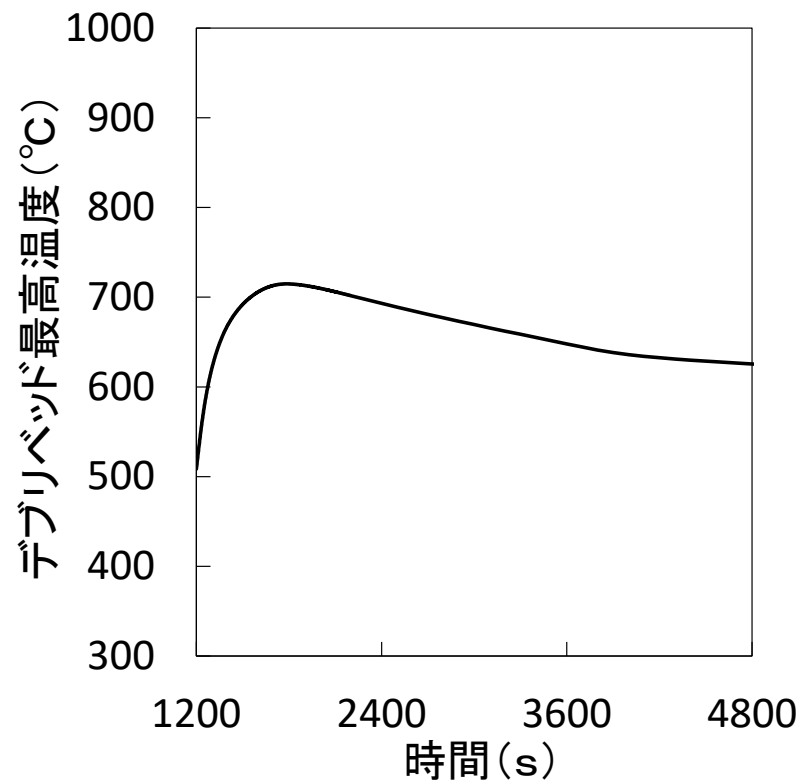
- 炉心物質の溶融量の増加と炉心物質の温度上昇の結果として炉心周囲への熱損失が増加し、崩壊熱の低下も重畳して、ある値以上は溶融量が増加しなくなる。
- 炉心物質の炉心における最大溶融量として得られたインベントリの約70%が損傷炉心物質の炉心からの流出量の不確かさの上限



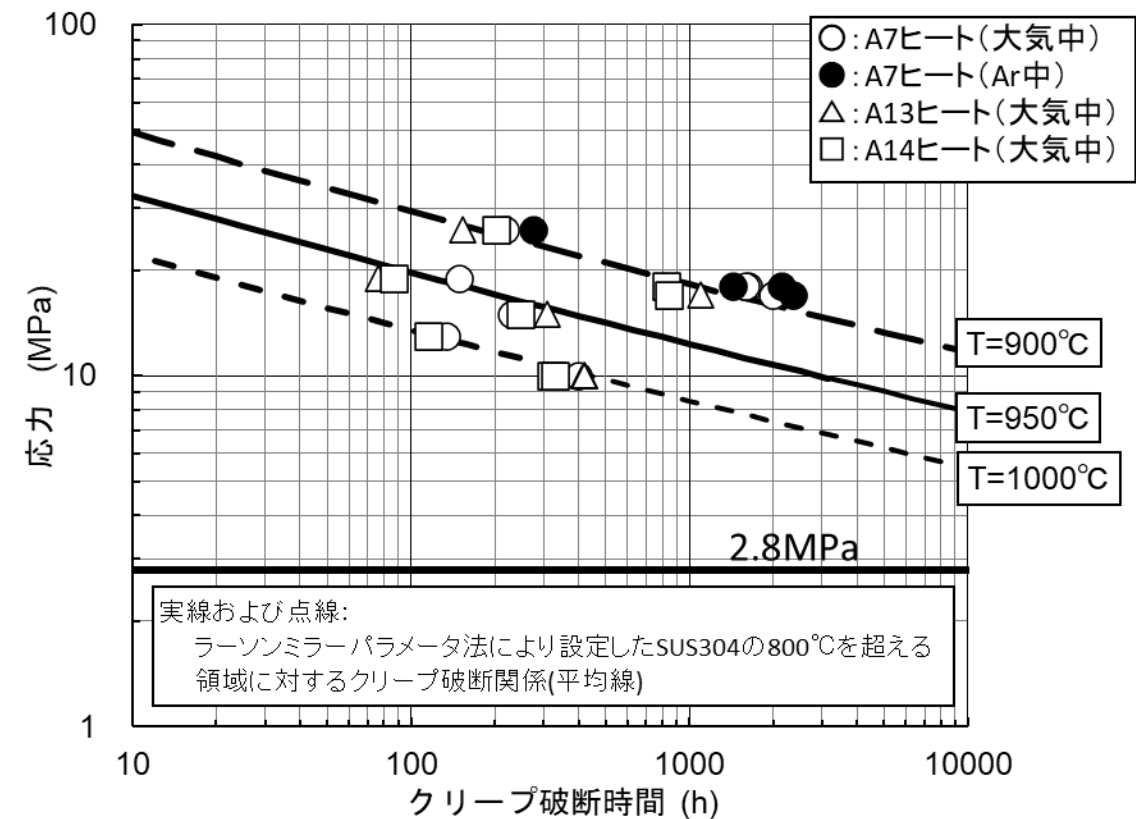
	基本ケース (流出タイミング①)	炉心からの流出の不確かさ (流出タイミング②)
炉心部	約50%	約10%
炉心部周辺	約20%	約20%
下部プレナム 底部	約30%	約70%

3. 損傷炉心物質の炉心からの流出の不確かさの影響評価

- デブリベッド最高温度は約1800秒後に約720℃まで上昇し、その後は崩壊熱の減衰と共に低下する。
- デブリベッドにより高温条件（最高温度約720℃）となる原子炉容器底部の鏡板では、原子炉容器自重、ナトリウム重量、及びデブリベッド重量により発生する応力は2.8MPa（1次応力）であり、SUS304について900℃を超える温度条件で得られているクリープ試験結果に対しても有意に小さくクリープ破断は発生しない。



デブリベッド最高温度の履歴



SUS304のクリープ破断時間と応力の関係

**No. 226 炉心損傷過程へのFCIの実験的知見の適用性
及びFCIの最大圧力を約80atmとすることの妥当性**

遷移過程における溶融燃料－冷却材相互作用（FCI）の想定について

UO₂-ナトリウム系におけるFCI試験

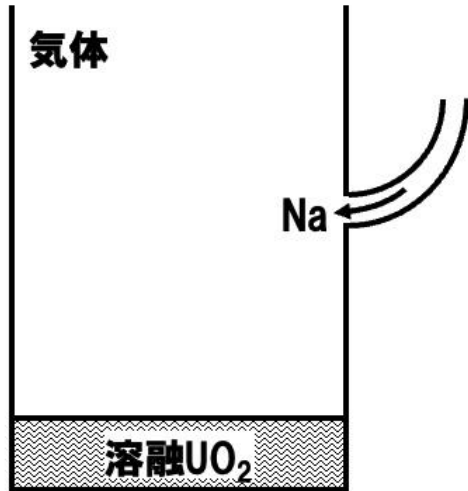
試験名	ケース	融体	質量 (kg)	加熱方法	高温融体温度 (°C)	FCI発生状況	ナトリウム温度 (°C)	投入速度 (m/s)	発生圧力ピーク (MPa)	
CORECT-II	12B	UO ₂	4.15	高周波加熱	—	溶融UO ₂ を皿状のるつぼに入れ、その周囲下方向からナトリウム液位を上昇させる。 I～IVの試験modeがあり、mode IIIとIVは閉じ込められた狭い空間内でのFCI、mode Iは融体プールにナトリウムを上から注ぐ試験である。炉心近傍のFCIとして参考になるのは開放された空間で実施したmode IIである。	I	600	—	<u>6.6</u>
	18	UO ₂	4.92	高周波加熱	—		III	685	—	<u>7</u>
	19	UO ₂	5.15	高周波加熱	—		IV	580	—	5
	21	UO ₂	4.86	高周波加熱	—		III	560	—	<u>12</u>
	22	UO ₂	5.13	高周波加熱	—		II	561	—	4.3
M-series	M1	UO ₂ -Mo	1.4	テルミット	—	約3～3.2kgのナトリウムプールへ融体を落下させる。		288	3.3	0.43
	M2	UO ₂ -Mo	6.8	テルミット	—			299	18	0.69
	M3	UO ₂ -Mo	3	テルミット	—			627	3.9	0.28
FARO-TERMOS	T1	UO ₂	110	通電加熱	3,000	直径30cm、深さ約2mのプールに約5m上から融体を落下させる。主に炉容器外でのFCIを想定した試験である。		400	10	未計測
	T2	UO ₂	140	通電加熱	3,000			400	10	<u>6</u>
CAMEL	C6	UO ₂ -Mo	約2	テルミット	3,200	クリンチリバー増殖炉の制御棒案内管を模した直径10.23cmの流路に2.54cm径のパイプから融体を噴出させる。背圧はC6が0.59MPa、C7が0.31MPaである。		503	—	4
	C7	UO ₂ -Mo	約2	テルミット	3,200			503	—	未計測
EAGLE	ID1	UO ₂ -SS	—	核加熱	3,000以上	核加熱で燃料ピン束を溶融して形成した炉心プールがナトリウムを内包するダクトを溶融破損してFCIが発生する。		400	—	約0.15

■ 既存の溶融UO₂とナトリウムのFCIを実現した実験的知見をまとめた。

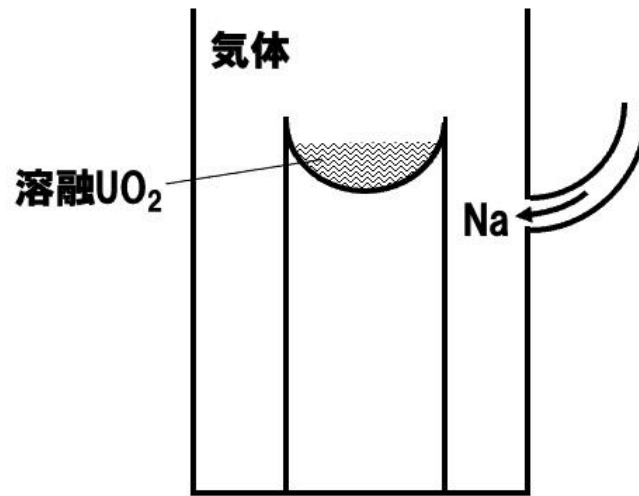
■ 様々なFCIの発生状況を想定した試験が行われている。大きな圧力ピークが測定されているのはCORECT-II試験のケース21の約12MPa、ケース18の約7MPa、ケース12Bの約6.6MPa、FARO-TERMOS試験のケースT2の約6MPaである。

CORECT-II試験

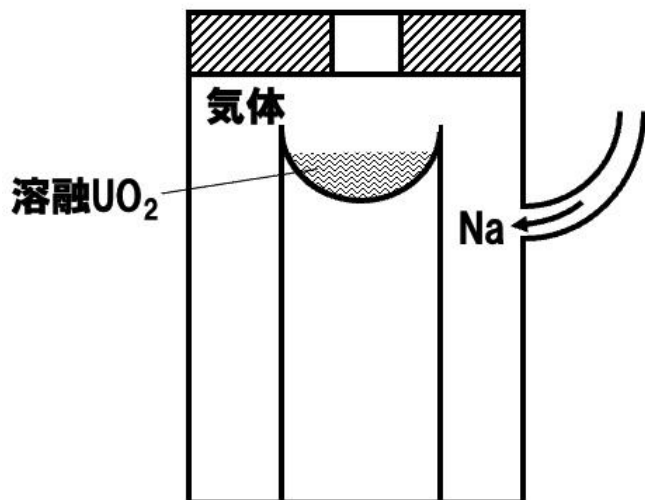
試験名	ケース	融体	質量 (kg)	加熱方法	高温融体温度 (°C)	FCI発生状況	ナトリウム温度 (°C)	投入速度 (m/s)	発生圧力ピーク (MPa)	
CORECT-II	12B	UO ₂	4.15	高周波加熱	—	溶融UO ₂ を皿状のるつぼに入れ、その周囲下方向からナトリウム液位を上昇させる。 I～IVの試験modeがあり、mode IIIとIVは閉じ込められた狭い空間内でのFCI、mode Iは融体プールにナトリウムを上から注ぐ試験である。炉心近傍のFCIとして参考になるのは開放された空間で実施したmode IIである。	I	600	—	6.6
	18	UO ₂	4.92	高周波加熱	—		III	685	—	7
	19	UO ₂	5.15	高周波加熱	—		IV	580	—	5
	21	UO ₂	4.86	高周波加熱	—		III	560	—	12
	22	UO ₂	5.13	高周波加熱	—		II	561	—	4.3



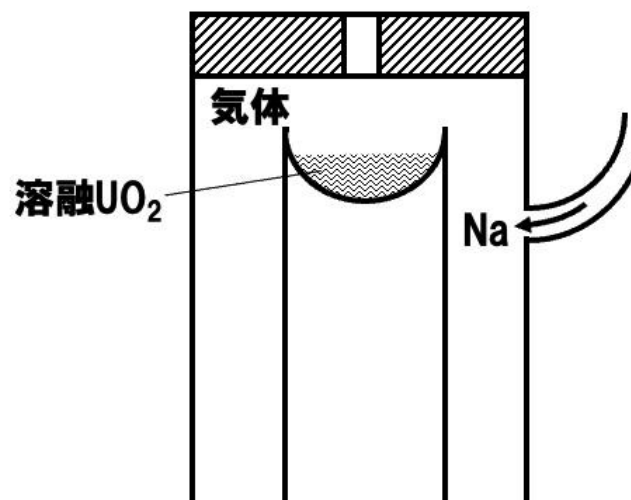
モード I (試験ケース 12B)



モード II (試験ケース 22)



モード III (試験ケース 18, 21)



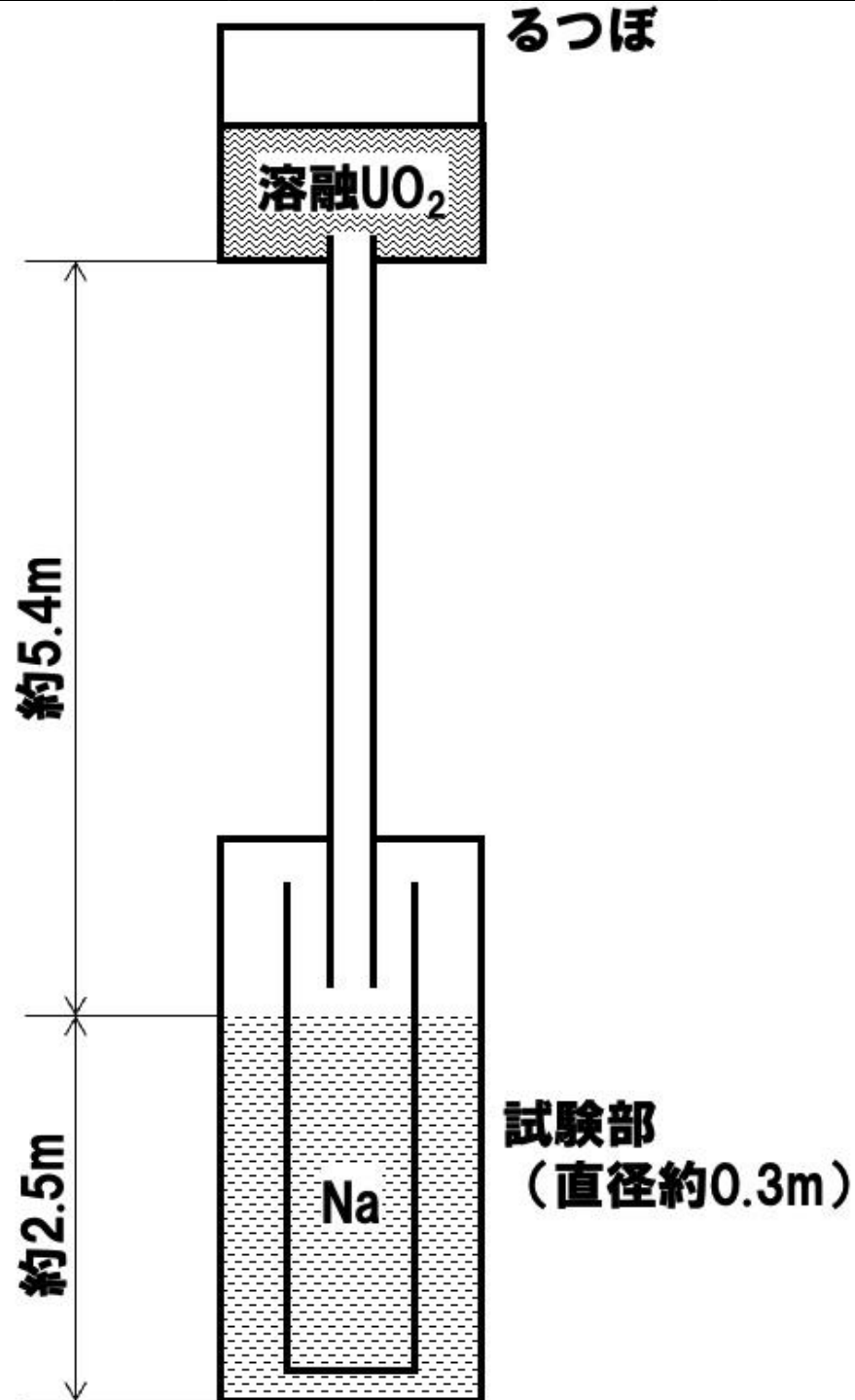
モード IV (試験ケース 19)

CORECT-II試験装置の概念図

- 大きな圧力ピークが測定されているのはCORECT-II試験のケース21の約12MPa、ケース18の約7MPa、ケース12Bの約6.6MPaである。**
- 前者2つの試験ケースは閉じ込められた狭い空間内に強制的にナトリウムを注入したモードIII、ケース12Bは高温融体上にナトリウムを注入する試験であり、いずれの試験も炉心周囲で発生するFCIの発生状況を模擬した試験には該当しない。**

FARO-TERMOS試験

試験名	ケース	融体	質量 (kg)	加熱方法	高温融体温度 (°C)	FCI発生状況	ナトリウム温度 (°C)	投入速度 (m/s)	発生圧力ピーク (MPa)
FARO-TERMOS	T1	UO ₂	110	通電加熱	3,000	直径30cm、深さ約2mのプールに約5m上から融体を落下させる。 主に炉容器外でのFCIを想定した試験である。	400	10	未計測
	T2	UO ₂	140	通電加熱	3,000		400	10	6



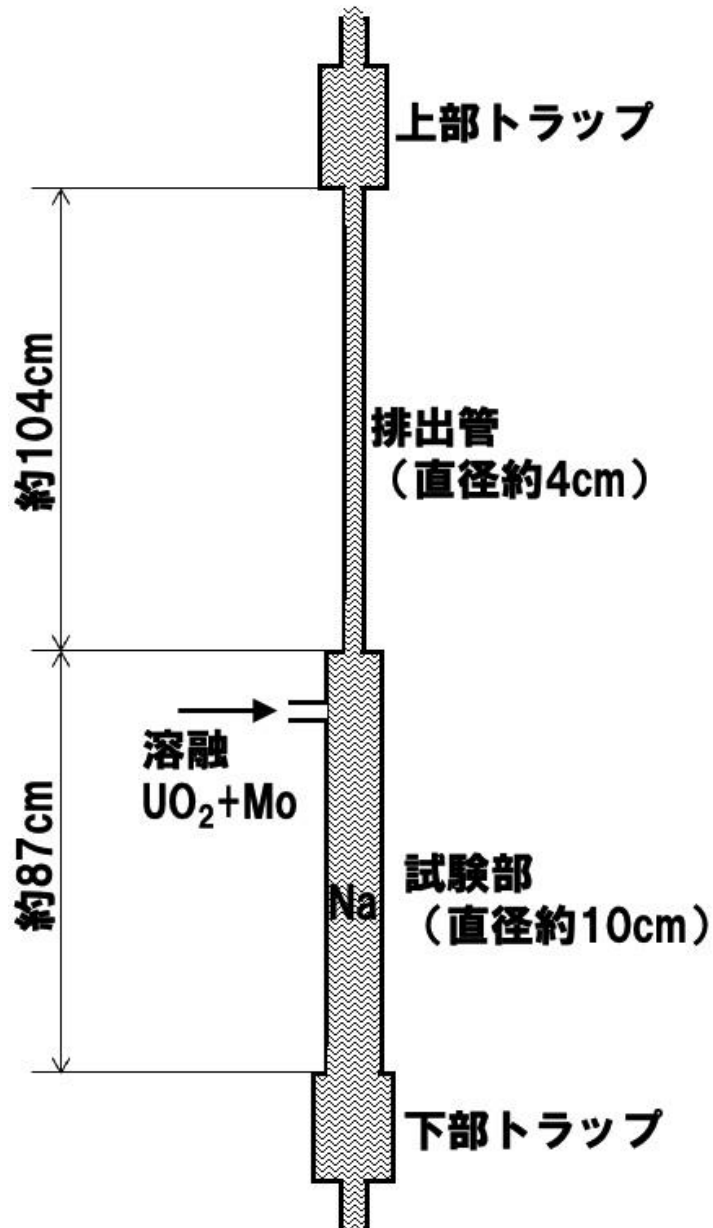
- FARO-TERMOS試験においても約6MPaの圧力ピークが測定されている。
- この試験は約140kgの溶融UO₂を5mの高さからナトリウムプール中へ落下させた試験であり、炉心内の局所的なFCIの知見として用いるには適切ではない。

FARO-TERMOS試験装置の概念図

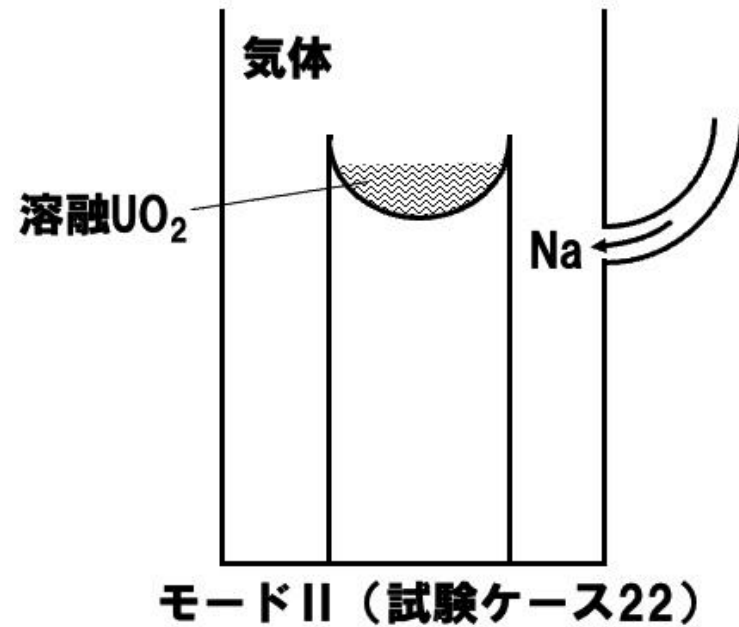
遷移過程における溶融燃料－冷却材相互作用（FCI）の想定について

炉心内FCIへの適用性の高い試験的知見

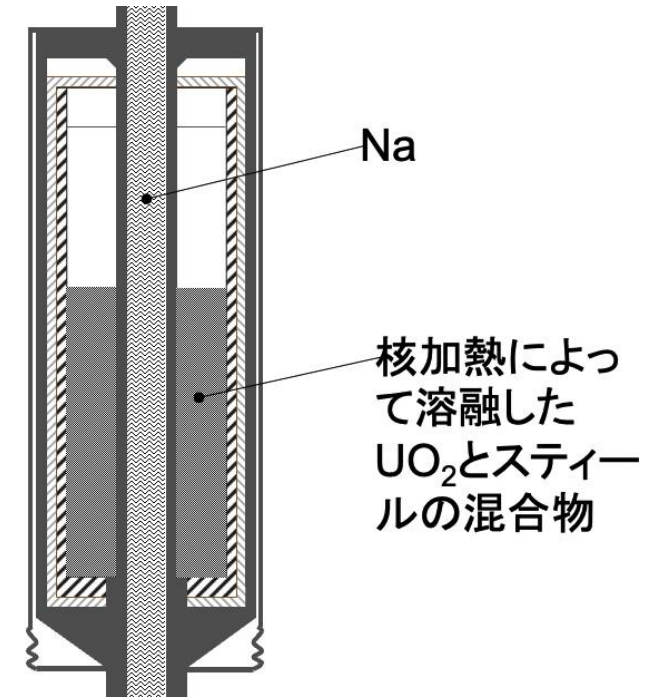
試験名	ケース	融体	質量 (kg)	加熱方法	高温融体温度 (°C)	FCI発生状況	ナトリウム温度 (°C)	投入速度 (m/s)	発生圧力ピーク (MPa)	
CAMEL	C6	UO ₂ -Mo	約2	テルミット	3,200	クリンチリバー増殖炉の制御棒案内管を模した直径10.23cmの流路に2.54cm径のパイプから融体を噴出させる。背圧はC6が0.59MPa、C7が0.31MPaである。	503	—	4	
	C7	UO ₂ -Mo	約2	テルミット	3,200		503	—	未計測	
EAGLE	ID1	UO ₂ -SS	—	核加熱	3,000以上	核加熱で燃料ピン束を溶融して形成した炉心プールがナトリウムを内包するダクトを溶融破損してFCIが発生する。	400	—	約0.15	
CORECT-II	22	UO ₂	5.13	高周波加熱	—	炉心近傍のFCIとして参考になるのは開放された空間で実施したmode IIである。	II	561	—	4.3



CAMEL試験装置の概念図



CORECT-II 試験装置の概念図



EAGLE 試験装置の概念図

- 炉心内でのFCIの発生状況に近い状況を模擬した試験としては、CORECT-IIケース22、CAMEL C6、EAGLE ID1試験がある。
- 発生圧力はCORECT-IIのケース22が約4.3MPa、CAMEL C6が約4MPa、EAGLE ID1は極めて緩慢で約0.15MPaである。

遷移過程解析におけるFCIの不確かさの扱い

- **S I M M E R**を用いた遷移過程の解析においては、炉心内の損傷領域の拡大と炉心物質の動きに従って解析されているが、「常陽」の遷移過程は低出力かつ低温（大半の燃料は固化状態）のまま推移するため、有意なFCI現象は発生していない。
- 大きな反応度効果を駆動する可能性のある炉心周辺部のFCI現象については、EAGLEの知見に基づけば数気圧程度の極めて限定された圧力発生にとどまることが示されており、また、CAMEL C6又はCORECT-IIケース22のように強制的に高温融体とナトリウムを接触させた試験においても約4MPa程度の発生圧力である。
- FCIの不確かさに係る感度解析では、基本ケースで燃料集中による即発臨界が発生する直前に、燃料集中を促進する位置にある外側炉心の制御棒下部案内管2カ所で同時に約8MPaの圧力が発生するという仮想的な条件の下での保守的な解析を行ってその影響を評価した。

**No. 228 格納容器（床上）にナトリウムが噴出しないことに関する
機械的応答過程の計算の詳細について**

機械的応答過程の概要

機械的応答過程の解析は下図に示す手順で実施した。

先行過程（遷移過程）の解析

（物質、温度、速度、圧力分布）

①機械的エネルギーの解析
（SIMMER-IV）

（膨張する圧力源の圧力-体積の関係（P-V曲線））

②原子炉容器の構造応答解析
（AUTODYN）

炉容器変形量

（プラグ下面の圧力履歴）

③ナトリウム噴出量の解析
（PLUG）

ナトリウム噴出量

機械的応答過程解析の手順

- 初期状態は遷移過程において即発臨界を超過して出力逸走が起こった直後の、炉心燃料温度が最高値に達した時点の炉心状態（炉心物質の質量、温度、速度及び圧力）である。
- 熱エネルギーの放出により高温となった炉心物質が蒸発・膨張しつつ炉心から上方に噴出され、ナトリウムを蒸発・膨張させながら機械的エネルギーに変換される。
- 機械的エネルギー発生解析で得られた炉心物質の膨張における圧力-体積変化を圧力源として原子炉容器の構造応答を解析する。
- ナトリウム噴出量の解析で使用する回転プラグ下面の圧力履歴は、原子炉容器の変形による圧力緩和効果を無視したものとする。

1. 解析の目的

- 機械的エネルギー発生時の原子炉容器内圧力上昇によって引き起こされる
 - ✓ 回転プラグの動的応答
 - ✓ 回転プラグの間隙から格納容器（床上）に噴出するナトリウム量の評価を目的とする。

2. 解析方法

- ナトリウム噴出量の解析は P L U G を用いて行う。
- P L U G は、回転プラグ下面に作用する圧力履歴による回転プラグの動的応答と、回転プラグ間隙を通じて格納容器（床上）へと噴出するナトリウム量を解析する計算コードである。
- P L U G の主要な入力は、回転プラグの重量及び受圧面積、回転プラグの固定ボルトの幾何形状及び材料特性並びに回転プラグ下面に作用する圧力の時間履歴である。
- これらを入力として回転プラグの動的応答を解析し、回転プラグの変位、固定ボルトのひずみ及び格納容器（床上）に噴出するナトリウム量を計算する。
- 回転プラグ間隙部の空間に流入するナトリウム量がこの空間体積よりも少ない場合、格納容器（床上）へのナトリウムの噴出は生じない。

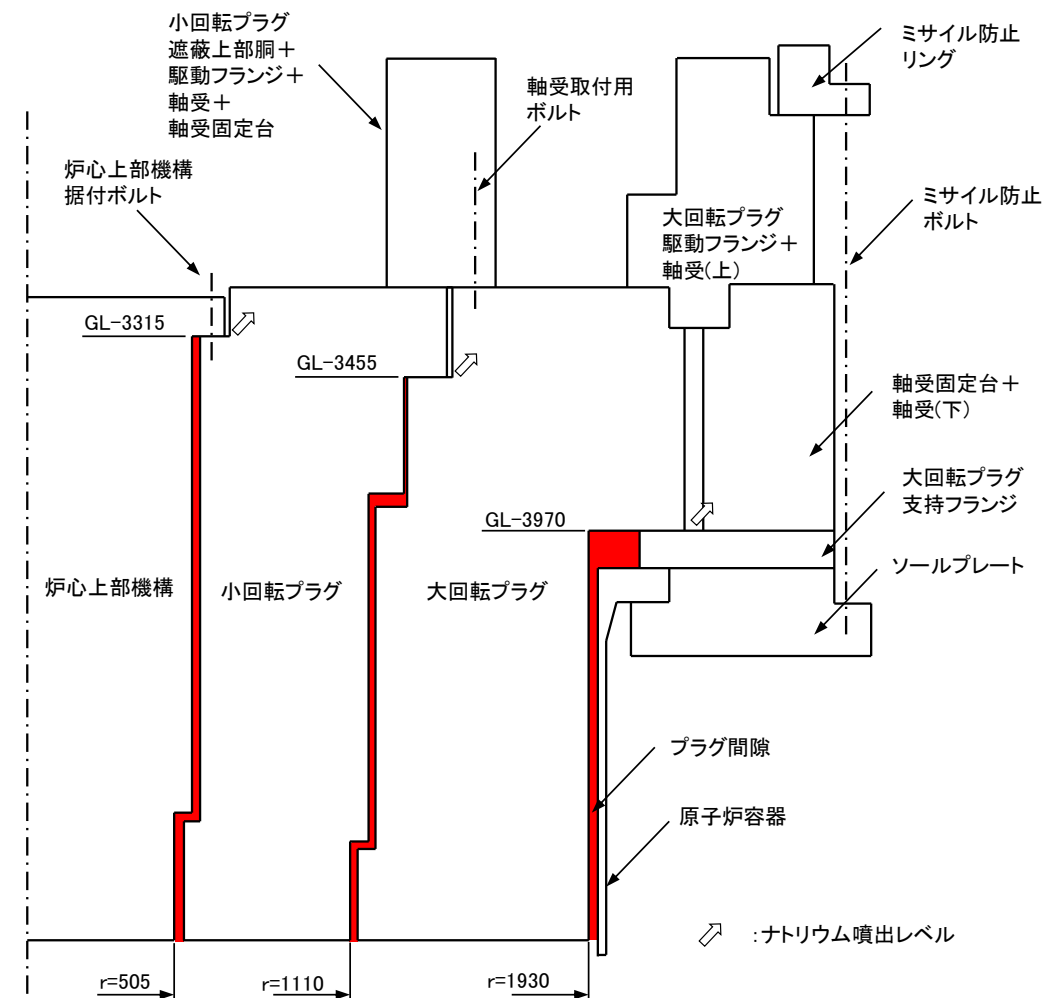
3. 解析ケース

- 機械的エネルギーの解析における基本ケース（機械的エネルギー1.8MJ）及び不確かさを考慮したケース（機械的エネルギー3.6MJ）の2ケースとする。

4. 解析条件

4.1 解析体系

- 回転プラグを構成する大回転プラグ、小回転プラグ及び炉心上部機構をモデル化する。
- 各プラグに作用する圧力に対する力の伝達経路を同定して、作用の及ぶ固定ボルトをモデル化する。
- カバーガスの存在は無視して、ナトリウムは最初から回転プラグ下面に接しているものとする。
- ナトリウムの噴出経路となる回転プラグ間隙部の垂直部分は環状流路として、水平部分は矩形流路としてモデル化する。



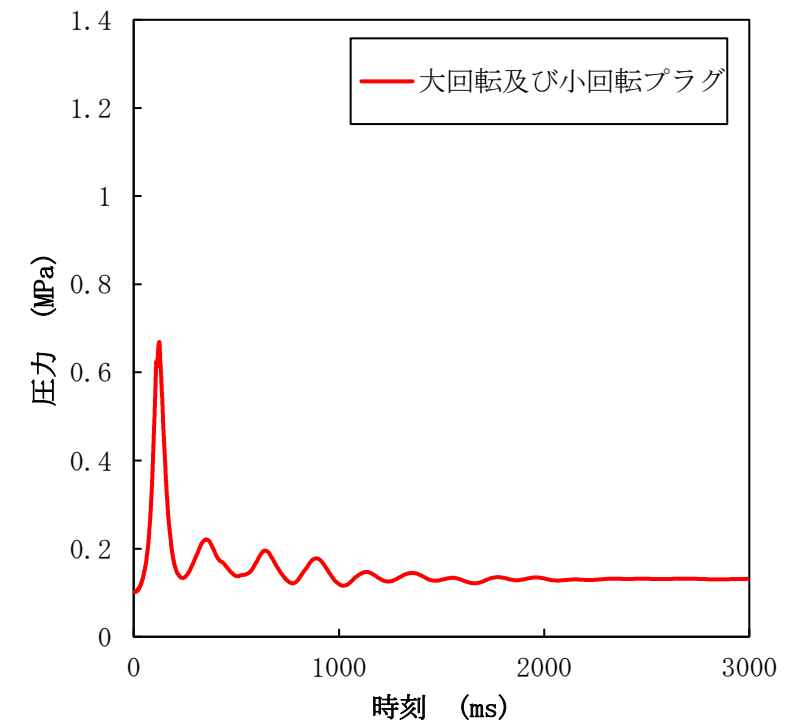
ナトリウム噴出量の解析（PLUGコード）の解析体系

4.2. 基本ケースの解析条件

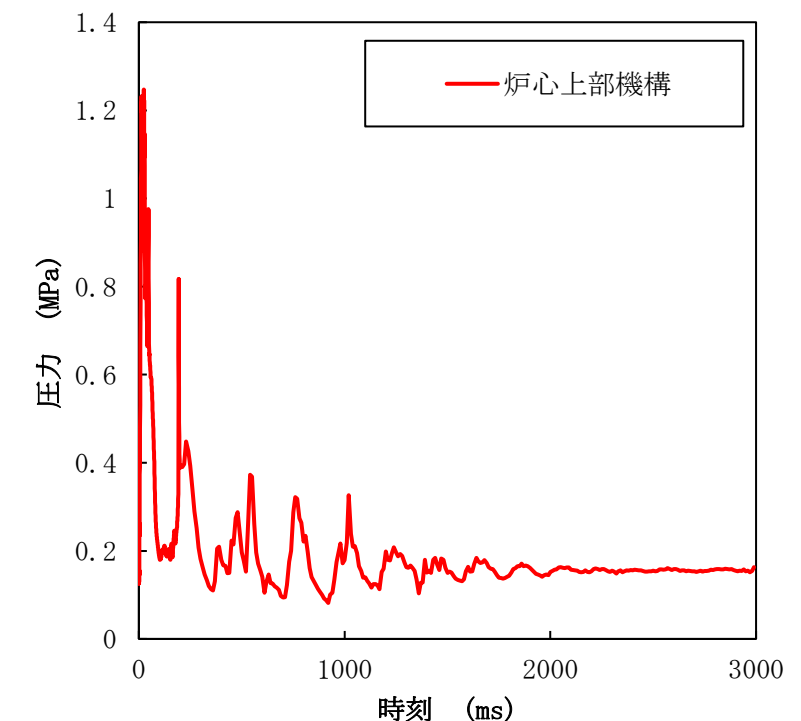
- 回転プラグ下面に作用する圧力の履歴は、機械的エネルギーの解析の結果得られる圧力履歴を用いる。
- 大回転プラグ及び小回転プラグの下面は同一高さに位置するため同じ圧力履歴を用いる。
- 炉心上部機構の下面はこれより3.6mほど下方であるため、該当する高さの圧力履歴を用いる。
- 回転プラグが衝突する際の反発は、反発係数を考慮した反発モデルを用いて計算する。
- ボルトが初期に締め付けられている場合はその初期締め付け力を考慮する。

4.3. 不確かさを考慮したケースの解析条件

- 不確かさを考慮したケースの解析は、基本ケースに対して、入力する圧力履歴のみを変更して行う。



回転プラグの下面に作用する圧力（基本ケース）

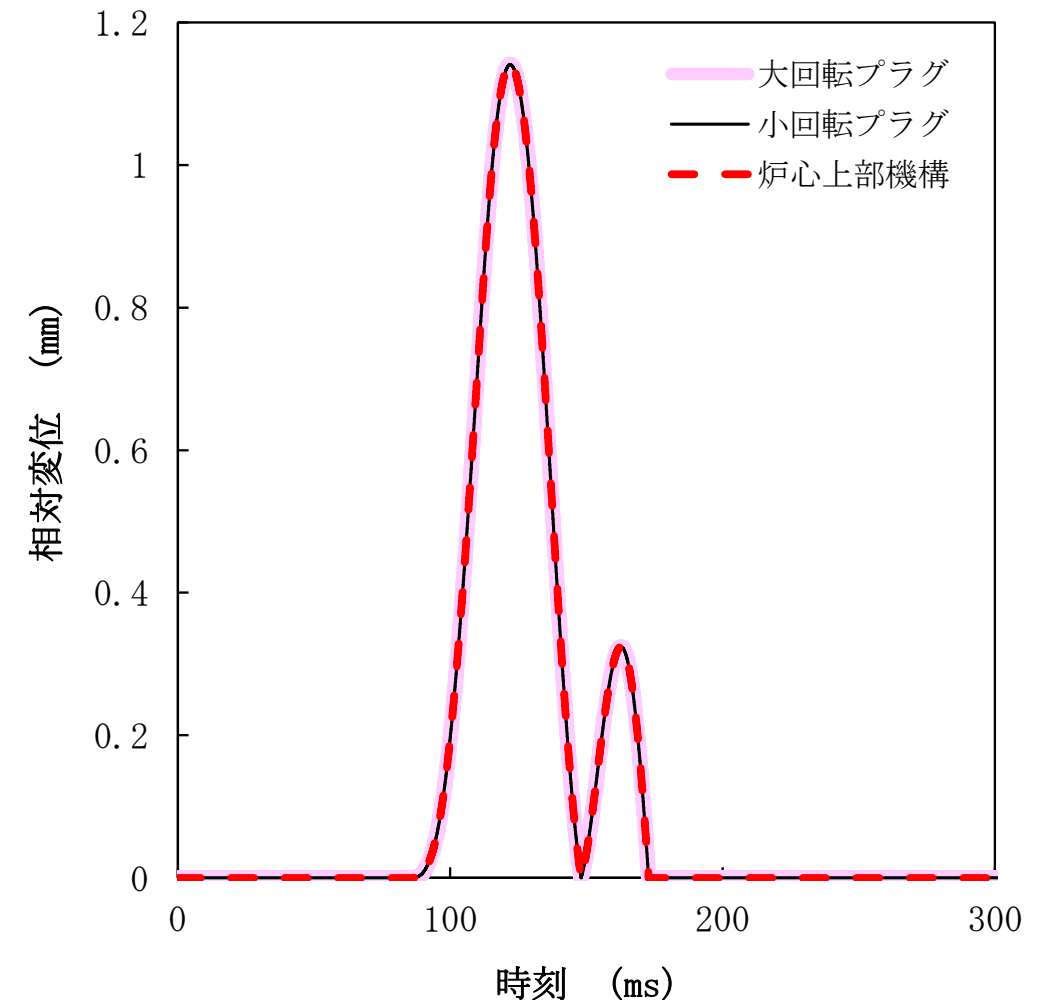


回転プラグの下面に作用する圧力
（不確かさを考慮したケース）

5. 解析結果

5.1. 基本ケースの解析結果

- 炉心上部機構及び小回転プラグは大回転プラグと一体となって変位し、大回転プラグとの相対変位は生じない。
- 大回転プラグは80ms程度の短時間だけ、最大約1.2mm上向きに浮き上がるが、原子炉容器内の圧力がプラグの浮き上がりに必要な圧力以下に低下すると、支持フランジ上に着座する。
- 各回転プラグの間隙内に流入するナトリウム量（積算値）は大回転プラグで6.6kgであり、小回転プラグ及び炉心上部機構ではナトリウムはプラグ間隙内に流入しない。
- 大回転プラグの間隙内に保持可能なナトリウム質量（回転プラグ間隙の容積に相当）は約520kgであり、間隙内への流入量がこれを十分下回ることから、基本ケースでは格納容器（床上）にナトリウムは噴出しない。

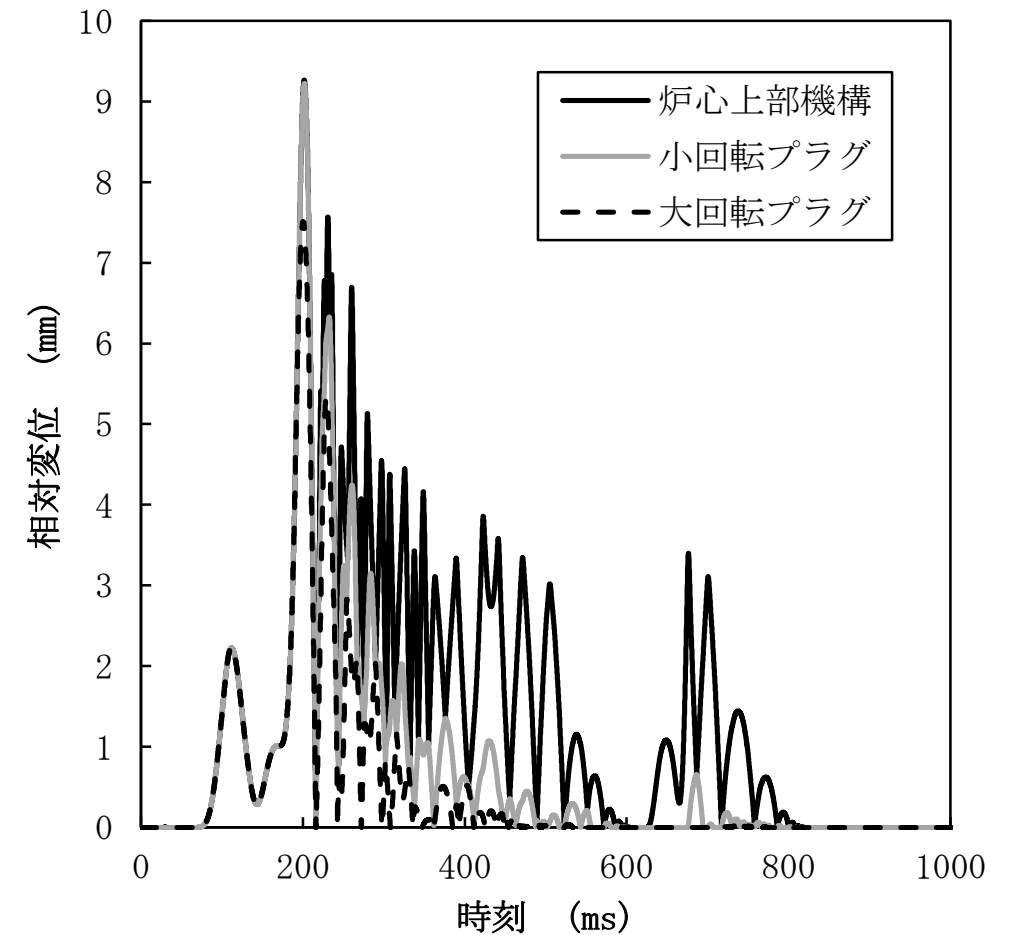


各回転プラグの動的応答（基本ケース）

- ボルトのひずみは最大0.07%。
- いずれのボルトも塑性変形に至っていない。

5.2. 不確かさを考慮したケースの解析結果 (1)

- 約200msまで各プラグは一体となって変位するが、200ms以降はボルト強度の相違及び衝突による運動エネルギーの受け渡しの影響を受けて、各プラグが独立に変位し相対変位が生じている。
- 約200msまで各プラグが一体となって変位する理由は、炉心上部機構が初期締め付け力約100MPaで小回転プラグに固定されていること及び小回転プラグが初期締め付け力約200MPaで大回転プラグに固定されていることによる。
- 800ms以降、原子炉容器内の圧力が回転プラグの浮上に要する圧力（約0.24MPa）を下回ると、各プラグは被搭載プラグあるいは大回転プラグ支持フランジ上に着座する。

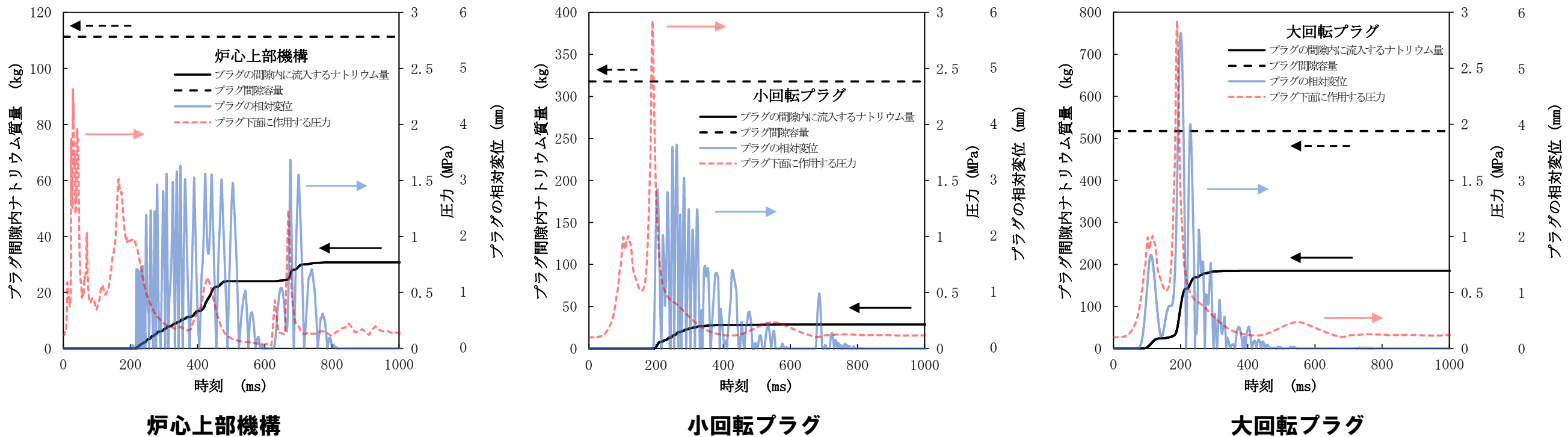


各回転プラグの動的応答（不確かさを考慮したケース）

- ボルトのひずみは最大1.6%。
- 常温の破断伸び15%と比べて十分小さく、破断には至らない。

5.2. 不確かさを考慮したケースの解析結果 (2)

- 炉心上部機構、小回転プラグ及び大回転プラグの間隙内にそれぞれ31kg、29kg及び185kgのナトリウムが流入した。
- 回転プラグ間隙内に流入するナトリウム量が、保持可能なナトリウム量（それぞれ約110kg、約320kg及び約520kg）以下であれば、ナトリウムの噴出は生じない。



各回転プラグの間隙内に流入するナトリウム量（積算値）（不確かさを考慮したケース）

- 結果として、回転プラグ間隙へのナトリウムの流入量は同間隙の保持可能なナトリウム量を下回り、格納容器（床上）に噴出しない結果となった。

6. 機械的応答過程におけるプラグ応答及びナトリウム噴出挙動解析まとめ

- **回転プラグの応答及びナトリウム噴出を解析した。基本ケースでは次のような結果となった。**
 - ✓ 各プラグを固定するボルトのひずみは最大で0.07%であり、破断伸びである15%より十分小さく、ボルトの健全性は維持される。
 - ✓ 回転プラグは短時間の間、垂直上方向へ変位するものの、プラグ間の間隙を通じてのナトリウムの格納容器（床上）への噴出は生じない。
- **不確かさの解析ケースでは次のような結果となった。**
 - ✓ 各プラグを固定するボルトのひずみは最大で1.6%であり、破断伸びである15%より十分小さく、ボルトの健全性は維持される。
 - ✓ 回転プラグは短時間の間、垂直上方向へ変位するものの、プラグ間の間隙を通じてのナトリウムの格納容器（床上）への噴出は生じない。
- **発生する機械的エネルギーの不確かさを考慮したとしても、格納容器（床上）へのナトリウムの噴出は生じないことが確認できた。**
- **これにより、評価項目の一つである「燃料の溶融に伴う即発臨界超過により放出されるエネルギーによって原子炉容器の上部からナトリウムが格納容器（床上）に噴出する可能性がある場合において、格納容器の破損を防止できること。」に対して、ナトリウムが格納容器（床上）に噴出しないことをもって評価項目を満足し得ることが確認できた。**