

圧力抑制室保有水の温度成層化による 原子炉格納容器圧力等への影響等の検討

INES

平成24年2月1日

独立行政法人 原子力安全基盤機構

原子カシステム安全部





1. 目的

2. 圧力抑制室保有水の温度成層化の想定 3. トーラス室に流入した海水による除熱の想定 4. 1~3号機のプラント挙動への影響 5. 環境への放射性物質の放出量の推定 6. まとめ

– 🏷 JNES

1. 目的

- ・これまでの事故初期(約100時間)のMELCOR解析結果では、格納容器圧力について実測値と解析値に差異が見られた。
 - -2号機の逃し安全弁開放後
 - -3号機のRCIC作動中、HPCI起動後
- •そのため、3号機のRCIC作動中のPCV圧力上昇の要因として圧力抑制室保有水の 温度成層化を想定した場合について、MELCOR解析のモデルを改良してプラント挙 動への影響を確認。
- ・さらに2号機でPCV圧力の上昇が緩やかであった要因としてトーラス室に流入した海水による除熱を想定した場合について、MELCOR解析のモデルを改良してプラント 挙動への影響を確認。
- •そのうえで、上述の2点の想定について各号機間の整合性を検討。
- •今回の想定でのシナリオにおける環境への放射性物質の推定放出量を試算。



3. トーラス室に流入した海水による除熱の想定

•早期PCV漏えいを仮定した解析ではRCIC動作時のD/W圧力がよく一致するが、S/R弁を開放した後の圧力挙動は実測値と整合しない。



2号機では、3月12日1時頃にRCIC室に長靴程度の水、同日2時頃に水たまりの量の増加が確認されており*、以下の仮定に基づき解析を実施

・早期PCV漏えいは想定しない
 ・RCICによる排気熱量が系外へ除熱されたと仮定
 トーラス室に流入した海水により除熱された可能性を想定

(RCICによる排気熱量の約60%分がS/Cから除 熱されたと仮定し、S/Cのエンタルピーを計算)



*東京電力「福島第一原子力発電所事故の初動対応について」平成23年12月22日

4

— 🏇 JNES 解析体系(MELCORモデル)





4.1 3号機のプラント挙動への影響

解析条件

•RCIC・HPCIの注水量はテストライン(CSTへの戻りライン)を模擬し、注水量は感度解析を踏まえて設定

•S/Cは温度成層化を模擬。上下に2分割。

- ・ プール上部はRCIC駆動蒸気によって温度上昇(感度解析からOP1200mmと設定)
- HPCI起動時はHPCI蒸気配管出口近傍の水温が低いと仮定

•原子炉圧力容器下部ヘッド破損(42.4 h)を仮定 この時間以降のRPV圧力とD/W圧力がほぼ等しい値で推移していることから推定

•S/Cスプレイ、D/Wスプレイの流量は事業者からの情報に基づき 50 m³/hに設定

•現状モデルではMCCIを過大評価すると考えられるためMCCI反応は考慮せず

•トーラス室に流入した海水による除熱の想定は、3号機ではHPCI停止後の13日3時頃にも RCIC室に入室している*ことから、考慮していない

4.1.1 HPCIの運転状態に関する検討

HPCI起動後の原子炉圧力低下の挙動について、 原子炉への注水流量をパラメータとして感度解 析を実施

🐎 JNES

6000 (O)実測値 (△)実測値 150 t/h 8.0 0 Ð 4000 Δ Δ 0 100 t/h 炉圧 コラプスト水位 (mm) 6.0 2000 50 t/h 炉压 (MPa) 20 t/h 20 t/h o 50 t/h 4.0 0 ダウンカマ水位 100 t/h 150 t/h -2000 2.0 - BAF -4000 0.0 20 21 22 23 24 25 20 21 22 23 24 25 経過時間(h) 経過時間(h)

HPCI停止以降S/R弁が開くまでの原子炉圧力 上昇の挙動について、HPCI停止時の水位をパ ラメータとして感度解析を実施



テストライン等の制御により50~100 t/h程 度に調整されていたと推定される HPCI停止時の水位はTAF程度であったと推定される →水位が計測されなかった時間帯は十分な注水量で なかった可能性も考えられる 4.1.2 原子炉圧力・水位・D/W圧力の解析結果

>JNES



4.1.3 S/Cスプレイの効果

🏷 INES



(注)S/Cスプレイの効果のみを確認するため、HPCIからの蒸気排出を考慮していない 9

4.1.4 環境への放射性物質放出

🔅 JNES



🦫 JNES 🛛

4.1.5 1F3プラント挙動のまとめ

•RCIC動作時のD/W圧力挙動

- RCICの排出蒸気はS/Cの一カ所に継続して放出されるため温度成層化が生じると 考えられる
- S/Cの温度成層化を模擬した解析ではD/W圧力挙動は実測値と整合

•HPCI起動時のD/W圧力挙動

S/Cの温度成層化を考慮するとHPCI起動直前からS/Cスプレイが行われることで、 D/W圧力が低下

•ただし、以下の点は今後の課題として引き続き検討していく

- ・ 数値流体力学(CFD)によるS/C温度成層化の解析
- PCV漏えいの発生タイミングについて各種情報を踏まえて精査
- PCV漏えい挙動に加え、ベントラインが実際に開いていた時間が大きく影響するため、操作実績について精査し、環境への放射性物質放出量を評価



4.2 2号機のプラント挙動への影響

解析条件

・早期PCV漏えいは想定しない

- -プラント実測値のD/W圧力がやや低下する時間(約70時間)に微少漏えいを仮定
- -プラント実測値のD/W圧力が大きく低下する時間(約90時間)に漏えいの拡大を仮定
- -漏えい箇所を、D/W気相部とS/C気相部で比較
- •RCICによる排気熱量が系外へ除熱されたと仮定
 -トーラス室に流入した海水により除熱された可能性を想定
 -S/C外面での海水冷却は、実際の水位の増減等が不明であるため、エンタルピーの計算により除熱(RCICによる排気熱量の約60%分がS/Cから除熱されたと仮定)
- •東電の想定を踏まえ、直流電源喪失時のRCICによる注水量は不確定であることから、水位がTAFを切る時間をプラント実測値と整合するように調整

•S/Cは温度成層化を模擬。(1F3と同モデル)

•現状モデルではMCCIを過大評価すると考えられるためMCCI反応は考慮せず



4.2.1 2号機の解析結果(S/C気相部漏えい仮定)



4.2.2 環境への放射性物質放出(S/C気相部漏えい仮定)

PCV漏えい箇所:S/C気相部

🏷 JNES



約90時間で仮定したPCVの漏えい面積によって放出 量は変化する





ヨウ素、セシウムの放出量は、初期インベントリの0.1%未満

— 🏷 JNES -

4.2.3 2号機の解析結果(D/W気相部漏えい仮定)



4.2.4 環境への放射性物質放出(D/W気相部漏えい仮定)

PCV漏えい箇所:D/W気相部

🐎 JNES







D/W気相部の漏えいを仮定した場合の希ガスの放出挙動の方がモニタリングと類似している

17

4.2.6 1F2プラント挙動のまとめ

🔅 JNES

- S/Cの温度成層化を考慮し、約90時間まではPCVバウンダリに大きな漏えいが無く、RCICからの排気熱量の一部が除熱されていると仮定すると、D/W圧力は概ね実測値と整合した。
- その結果、想定されるPCVの漏えい面積が小さくなり、約90時間 までの環境への放出量は少なくなった。
- 環境への放射性物質放出タイミングは、D/Wでの漏えいを想定した結果の方が、よりモニタリング結果と整合した。
- PCVの漏えい箇所の仮定によって放出量は変化するため、今後 も精査していく。



- 1号機は2,3号機に比べ事象進展が早いこと、また、RCICと類似機構の HPCIは作動しなかったことから、S/C水の温度成層化が生じた可能性は 低い
 - ただし、RPV圧力が高い期間に設定圧の最も低い特定のS/R弁が連続して開いていたと考えられるため、S/R弁の連続開による局所的な水温上昇の効果については検討が必要
- 海水によるS/C外面冷却は無かったと推定される

🔅 JNES

- S/Cベント弁小弁の手動開操作のためにトーラス室へ入っているが、 蒸気や湿度を確認したとの情報はない*



*東京電力、「福島第一原子力発電所事故の初動対応について」、平成23年12月22日



5. 環境への放射性物質の放出量の推定

環境への放射性物質の放出量は、原子炉停止時に炉心に存在していた放射性物質の量 に、事象進展解析で求まる放出割合をかけて推定する。

・原子炉停止時に炉心に存在していた放射性物質の量は、地震で停止するまでの直近の連続運転時間を踏まえて一般的な炉心での放射性物質の生成等をORIGEN2にて解析した結果を使用

・MELCORでの初期インベントリに対する放出割合の計算では減衰を考慮しないため、 主要な10核種について下記のように減衰を考慮して放出量を算出

ある放射性核種Zが、時間tからt+ Δ tの間に放出される放出量 Q_t は

 $Q_t = A_t \times R_t$

A_t: 核種Zの時刻tにおける放射能

 R_t : 核種Zが属する元素群が時刻tからt+ Δ tの間に放出される割合 として算出。

総放出量は時刻t=0から解析時間の範囲でQ_tを積分して算出。

5.1 環境への放射性物質の放出量の推定(1号機)

D/W気相部漏えいロ 約35 cm²

元素群	初期インベントリに対す る放出割合(-)		
希ガス	9.5×10 ^{−1}		
CsI	6.6×10 ^{−3}		
Cs	2.9×10 ^{−3}		
Те	1.1×10 ^{−2}		
Ва	4.0×10 ^{−5}		
Ru	9.0×10 ⁻¹⁰		
Се	1.4×10 ^{−7}		
La	1.2×10 ^{−7}		

>JNES

放出量 (Bq)		
3.4 × 10 ¹⁸		
1.2 × 10 ¹⁶		
7.1 × 10 ¹⁴		
5.9 × 10 ¹⁴		
8.2 × 10 ¹³		
1.3 × 10 ¹⁴		
2.5 × 10 ¹⁶		
2.5 × 10 ⁰⁹		
3.5 × 10 ¹⁰		
1.1 × 10 ¹⁰		

出典:原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書、JNES-RE-2011-0002記載の1号機に関する感度解析2の結果

5.2 環境への放射性物質の放出量の推定(2号機)

初期インベントリに対する環境への放出割合

— 🏷 JNES

環境への放出量(Bq)

元素群	早期PCV漏 えいを仮定	S/P温度成層化を仮定した場 合の放出割合			早期PCV漏えい を仮定した場合*	^{えい} S/P温度成層化を仮定した ^{拾*} 場合	
	した場合の 放出割合*			1久↑里 	PCV上部 (約50 cm ²)**	S/C (約32 cm²) **	PCV上部 (約32 cm ²)**
	PCV上部 (約50 cm ^{2)**}	S/C (約32 cm ²) **	PCV上部 (約32 cm ²)**	Xe-133	3.5 × 10 ¹⁸	1.3 × 10 ¹⁸	3.0 × 10 ¹⁸
		(小JOZ CIII)		I-131	1.4 × 10 ¹⁷	1.8 × 10 ¹⁵	1.0 × 10 ¹⁷
希ガス	9.6×10 ⁻¹	3.9×10 ⁻¹	8.6×10 ⁻¹	Cs-134	1.6 × 10 ¹⁶	6.8 × 10 ¹³	4.5 × 10 ¹⁵
CsI	6.7×10 ⁻²	9.1×10 ⁻⁴	5.4×10 ⁻²	Cs-137	1.4 × 10 ¹⁶	6.0 × 10 ¹³	4.0 × 10 ¹⁵
0.	5 0, 10-2	2 4 × 10-4	1.7~10-2	Sr-89	$6.8 imes 10^{14}$	1.9 × 10 ¹³	1.7 × 10 ¹⁵
Us	5.8×10 -	2.4×10	1.7×10 ²	Ba-140	1.1 × 10 ¹⁵	3.1 × 10 ¹³	2.7 × 10 ¹⁵
Te	3.0×10 ⁻²	3.8×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻²	Te-132	5.7 × 10 ¹⁶	6.6 × 10 ¹⁴	3.4 × 10 ¹⁶
Ba	2.6×10 ⁻⁴	7.4×10 ⁻⁶	6.8×10 ⁻⁴	Ru-103	1.8 × 10 ⁰⁹	4.0 × 10 ⁰⁷	6.4 × 10 ⁰⁹
			Pu-241	1.2 × 10 ¹²	3.7 × 10 ⁰⁵	3.2 × 10 ⁰⁷	
Ru	5.4×10 ⁻¹⁰	1.2×10 ⁻¹¹	2.0×10 ⁻⁹	Cm-242	7.7 × 10 ¹⁰	9.0 × 10 ⁰⁷	1.6 × 10 ¹⁰
Ce	4.0×10 ⁻⁶	1.3×10 ⁻¹²	1.1×10 ⁻¹⁰	L	<u> </u>	<u> </u>	
La	8.4×10 ^{−7}	9.7×10 ⁻¹⁰	1.87×10⁻ ⁷	 *原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書、 JNES-RE-2011-0002記載の2号機に関する事業者解析2の結果 **主たる漏えいロ 			^{告書、} 果 22

5.3 環境への放射性物質の放出量の推定(3号機)

初期インベントリに対する放出割合(-)

🔅 JNES

環境への放出量(Bq)

元素群	PCV漏えいがな い場合*	PCV漏えいを仮 定した場合 (今回の解析結 果)		
希ガス	9.9×10 ⁻¹	8.8×10 ⁻¹		
CsI	3.0×10⁻³	1.6×10 ⁻²		
Cs	2.7×10⁻³	1.4×10 ⁻²		
Те	2.4×10⁻³	1.5×10 ^{−2}		
Ba	4.3×10 ⁻⁴	1.8×10 ⁻⁴		
Ru	8.6×10 ⁻¹⁰	9.1×10 ⁻⁹		
Ce	5.0×10 ⁻⁸	9.2×10 ⁻¹⁰		
La	1.3×10 ⁻⁷	6.6×10 ⁻⁷		

核種	PCV漏えいが ない場合*	PCV漏えいを仮定 した場合 (今回の解析結果)
Xe-133	4.4 × 10 ¹⁸	3.5 × 10 ¹⁸
I-131	7.0 × 10 ¹⁵	3.8 × 10 ¹⁶
Cs-134	8.2 × 10 ¹⁴	4.3 × 10 ¹⁵
Cs-137	7.1 × 10 ¹⁴	3.7 × 10 ¹⁵
Sr-89	1.2 × 10 ¹⁵	5.0 × 10 ¹⁴
Ba-140	1.9 × 10 ¹⁵	8.0 × 10 ¹⁴
Te-132	6.4 × 10 ¹⁵	3.9 × 10 ¹⁶
Ru-103	3.2 × 10 ⁰⁹	3.3 × 10 ¹⁰
Pu-241	1.6 × 10 ¹⁰	2.9 × 10 ⁰⁸
Cm-242	1.4 × 10 ¹⁰	7.0 × 10 ¹⁰

*原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書、JNES-RE-2011-0002記載の3号機に関する感度解析2の結果

6. まとめ

🔊 INES

 3号機及び2号機はRCICからの排出蒸気によってサプレッションプール水に温度 成層化が生じたと仮定すると、D/W圧力の解析値は実測値と概ね整合した。1号 機は事象の進展が早く、RCICと類似機構のHPCIも起動されていないことから同 様の事象が生じた可能性は低いと考えられる。

-2号機ではRCICからの排熱の一部が除熱される必要有り -温度成層化の詳細な解析は別途数値流体力学(CFD)を用いた計算が必要

- 1,3号機は、トーラス室に海水が流入したことを示唆する情報がなく、S/C外部冷却を考慮しない解析で概ね実測値と整合する。一方、2号機はトーラス室に海水が流入した情報があり、S/C外部冷却を考慮した解析の方が、D/W圧力挙動が実測値と整合した。
- IAEA6月報告書では2号機のD/W漏えい面積が1,3号機に比べて大きい仮定を 用いていたことから、環境への放射性物質放出量が最も大きくなっていた。D/W漏 えいを仮定した3号機の解析ではヨウ素・セシウムが約2%放出されている。
- ・放出量の評価はPCV漏えいの仮定(発生時間、漏えい箇所、面積)やベントの状況が大きく影響するため、各種情報を踏まえて精査していくことが必要。







	1F1	1F2		1F3		
解析実施時期	昨年6月	昨年6月	本報告	昨年6月	本報告	
S/P温度成層化	×	×	0	×	0	
S/C外部冷却	×	×	0	×	×	
PCV漏えい箇所	D/W気相部	D/W気相部 S/C気相部	D/W気相部 又は S/C気相部	漏えい無し	D/W気相部	
PCV漏えい面積 (cm ²)	7→35	D/W: 50 S/C: 300	0.6→32	0	20	
MCCI反応	0	0	×	0	×	