

炉心損傷後のBWR原子炉建屋内の 放射線量率について

(議論の材料)

本資料は、当日の質疑・検討によって記述の修正などが行われる可能性があることに注意。

2023年12月25日
東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

これまでの検討との関係

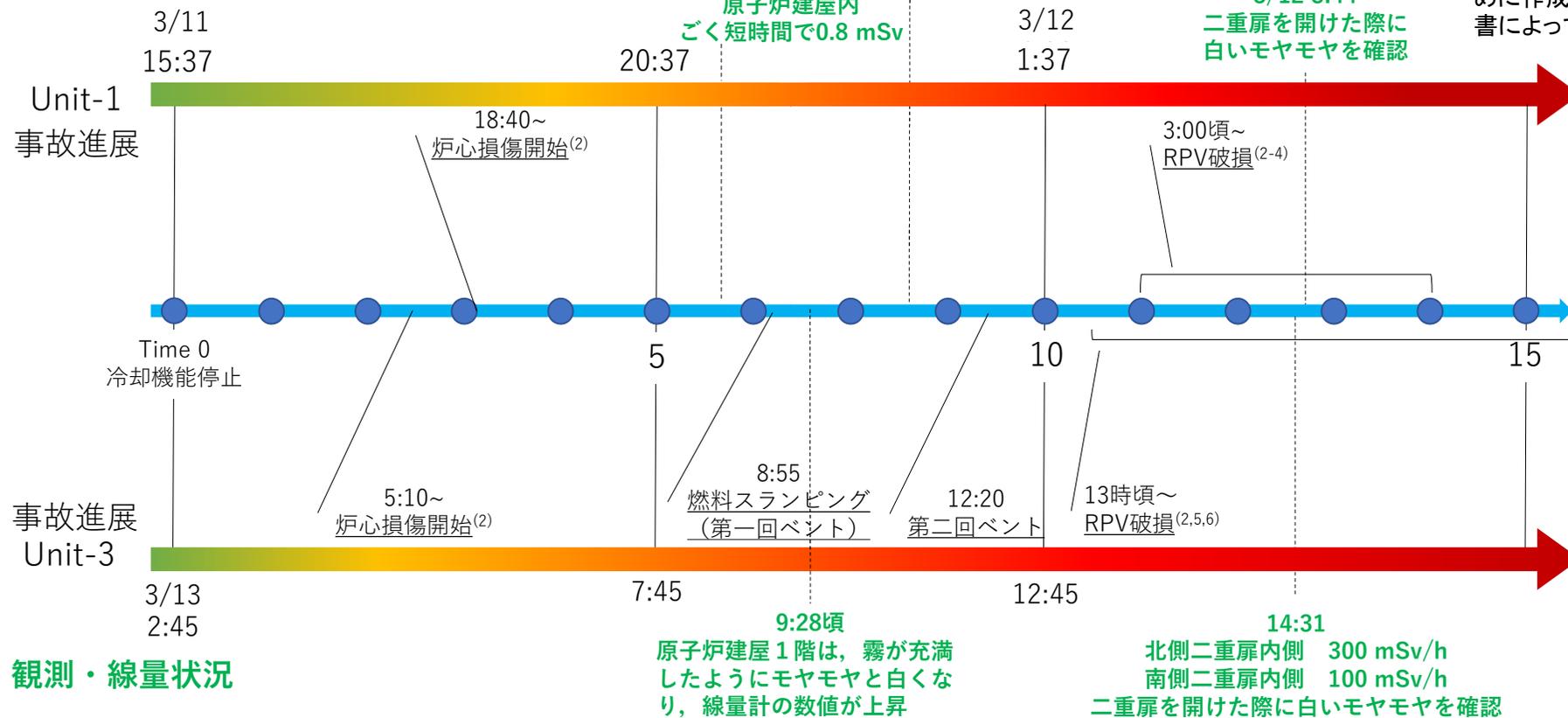
○第39回会合にて「福島第一原子力発電所1号機及び3号機の事故初期高線量率の原因推定に向けて」により、以下の3点の問題を提起。

- ①1号機と3号機の事故初期の原子炉建屋内の高線量率は、類似の過程の結果と考える方が自然かもしれない。
- ②事故初期の高線量率は、格納容器からオペレーションフロア付近に放出されたものが原因ではなく、原子炉建屋1階付近から放出されたものではないか？
- ③事故初期の高線量率の原因となる具体的な漏えい箇所はどこか。

第39回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会資料3 P. 5を一部修正

観測・線量状況⁽¹⁾

注)本図は、時間スケールを把握するために作成したもの。時刻は、各種報告書によって記載が異なる場合がある。



(1) 東京電力ホールディングス株式会社, “福島原子力事故調査報告書、別紙2” 2012年6月20日
 (2) 東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所1~3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告、添付資料3”2021年11月10日
 (3) Tuomo Sevón, “A MELCOR model of Fukushima Daiichi Unit 1 accident”, Annals of Nuclear Energy 85 (2015), 1-11
 (4) Gauntt et al. “MELCOR Simulations of the Severe Accident at the Fukushima Daiichi Unit 1 Reactor”, Nuclear Technology 186:2, 161-178
 (5) 東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会, “東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ~2019年9月から2021年3月までの検討” 別添1 8-2”, 2021年3月5日
 (6) Tuomo Sevón, “A MELCOR model of Fukushima Daiichi Unit 3 accident”, Nuclear Engineering and Design 284 (2015), 80-90

第39回及び第40回検討会での検討結果

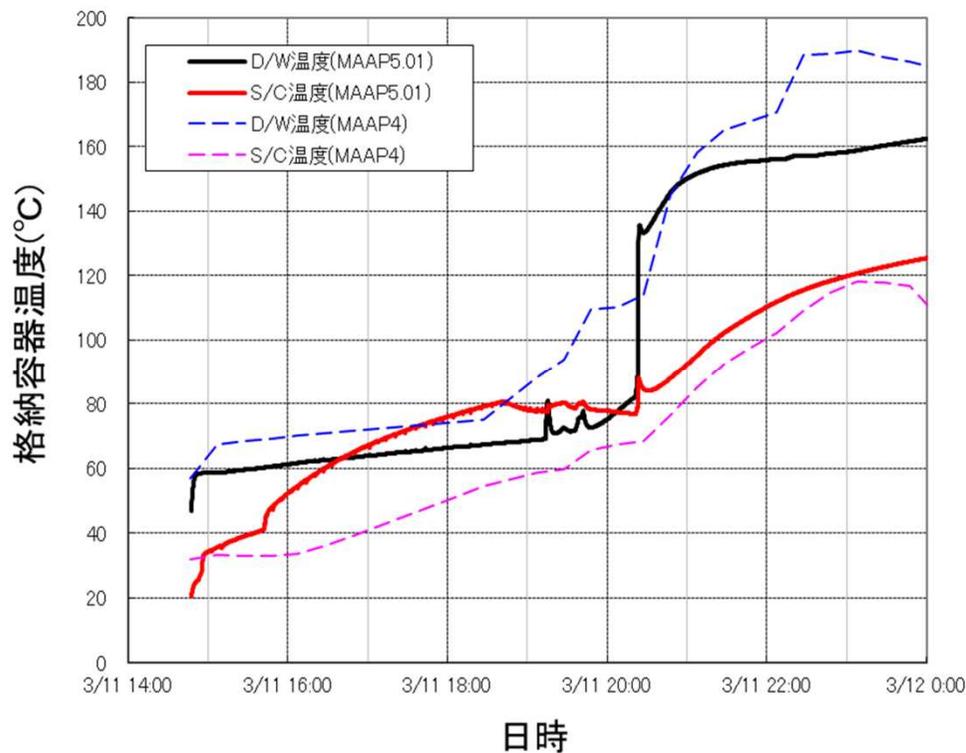
- 3月12日朝4時から観測された、福島第一原子力発電所内のモニタリングポストにおける線量率上昇は、オペフロに溜まった放射性ガス等からの直接線／スカイシャイン線によるもの。希ガスよりも、ヨウ素132等の寄与が大きい・・・②関連
- 1号機の事故初期における特段の破損・漏えい箇所を特定することはできていない。・・・③関連
- 特段の破損が生じなくても、「通常の漏えい」だけで観測された線量率が説明できる可能性について指摘あり。(この場合、炉型共通問題の可能性あり)・・・①関連

3月11日午後の1号機原子炉建屋の放射線量率急上昇は 午後8時から9時の間に起こった可能性が高い（観測ベース）

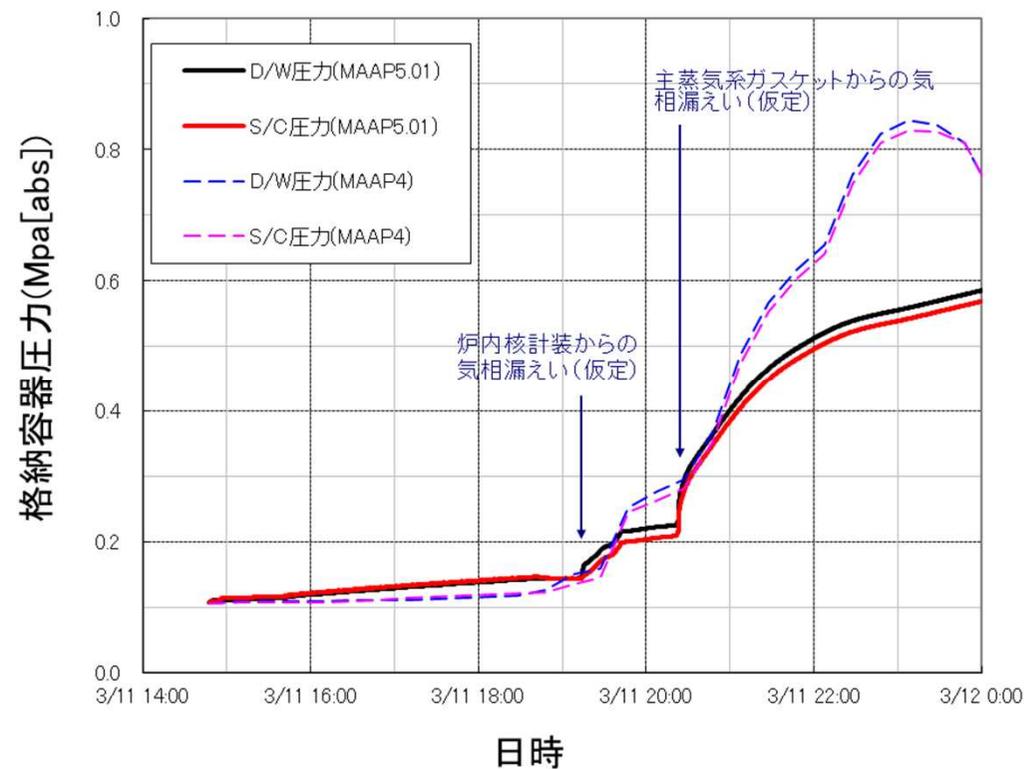
- 17:19 運転員が原子炉建屋外側二重扉を開けて入ったところ、通常測定値の約3倍の値を計測した。
- 20:07 原子炉建屋内にある原子炉圧力計を確認しに行っているが、この時点で線量率上昇があったか定かではない。
- 21時頃 運転員が原子炉建屋に入域したところ、APD（警報付きポケット線量計）の数値がごく短時間で0.8mSvを示した。（大まかに言えば300mSv/h弱に相当）
- 23時の時点で、原子炉建屋二重扉前は高い線量率（北側二重扉前1.2mSv/h、南側二重扉前0.52mSv/h）

注)福島原子力事故調査報告書(平成24年6月20日、東京電力株式会社)の記載内容を基に作成

MAAP4及びMAAP5.01による解析結果(1号機)



格納容器温度変化



格納容器圧力変化

注) 東京電力ホールディングス株式会社によるMAAPの解析結果を基に作成

1号機格納容器圧力及び雰囲気温度が設計圧力/温度を 超過した時間帯は、限定されている(解析ベース)

- 東電はMAAP4及びMAAP5.01による解析結果を公表済み。
- 格納容器圧力及び温度共に3月11日20:20頃までは、格納容器設計圧力(0.384MPa-g(=0.485MPa-a))及び設計温度(138 °C)をかなり下回る。
- 20:20頃からの格納容器圧力及び温度急上昇の原因は、その頃に主蒸気管フランジからの漏えいを仮定したことによるが、その後、その設計温度を超過している。一方、21時までには設計圧力を超過した時間はない。
- なお、「20:20頃」は、「圧力容器内のガス温度が450°Cに到達」する時刻として設定されている(注1)もの。

注1)福島原子力事故調査報告書(平成24年6月20日、東京電力株式会社) P.136 脚注

注2)本資料中でMPa後の「-g」はゲージ圧、「-a」は絶対圧を表している(以下、同じ)

1号機原子炉建屋の高放射線量率と格納容器温度/圧力の推移との関連性について

- 東電の解析では、20:20頃に原子炉圧力バウンダリからの漏えい開始を仮定。その後、即座に格納容器からの漏えいが急増したと考えることは妥当であろうか？
- あるいは、格納容器圧力/温度の推移から、上記よりも遅れて短い期間に急増したと考えるべきか？（格納容器への直接漏えいが始まった時点で原子炉建屋内の線量率が上昇することは間違いないが、これが支配的と言えるかどうか。）
- 格納容器への直接漏えいが遅ければ、今回観測されたような原子炉建屋内の高線量率は生じなかったと言えるか？

3月12日には、1号機原子炉建屋内の放射線量率は 300mSv/hを大幅に超えたと思われる

○1号機の格納容器内部は東電のシミュレーションによれば、

- ・圧力： 3月11日午後9時以降も上昇を続け、12日1:00頃からベント実施までの約13時間に渡って
ほぼ0.8MPa-a(0.7MPa-g)弱を推移。(実測値も同様)
- ・温度： 比較的穏当な結果を示すMAAP5.01でも、午後9時以降緩やかに上昇後、12日6:00前後
から再度急上昇し、その後約24時間に渡って300°Cを超える状態が継続。

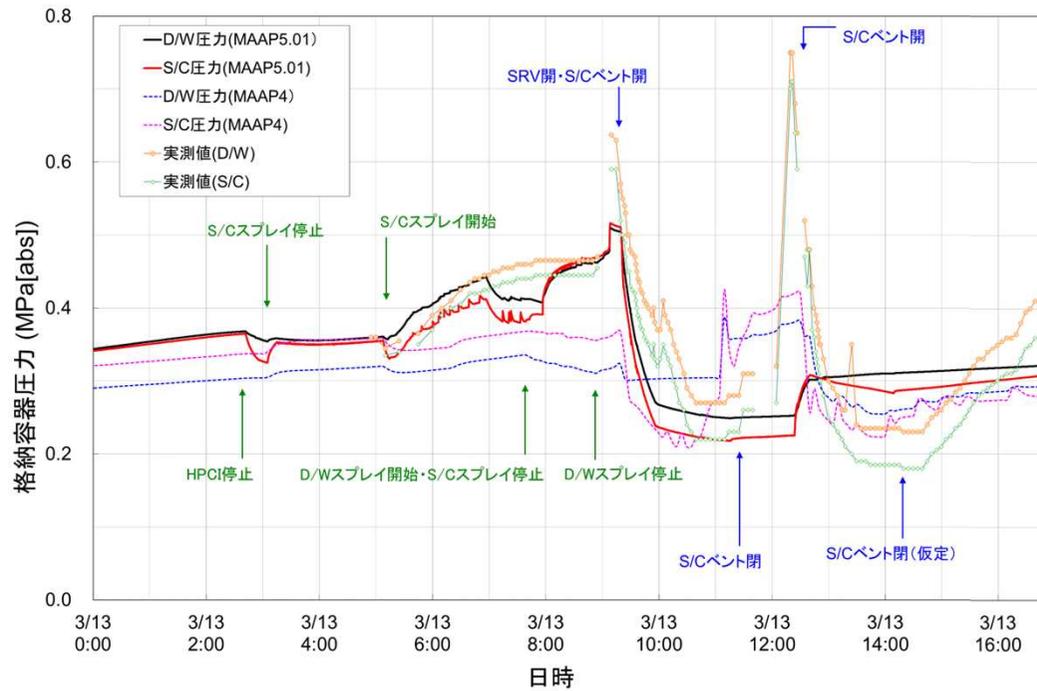
注) 格納容器の最高使用圧力(0.427MPa-g)及び設計温度(138°C)を大きく超過。

○このため、格納容器からの漏えいは11日21:00以降、さらに拡大した可能性が高い。

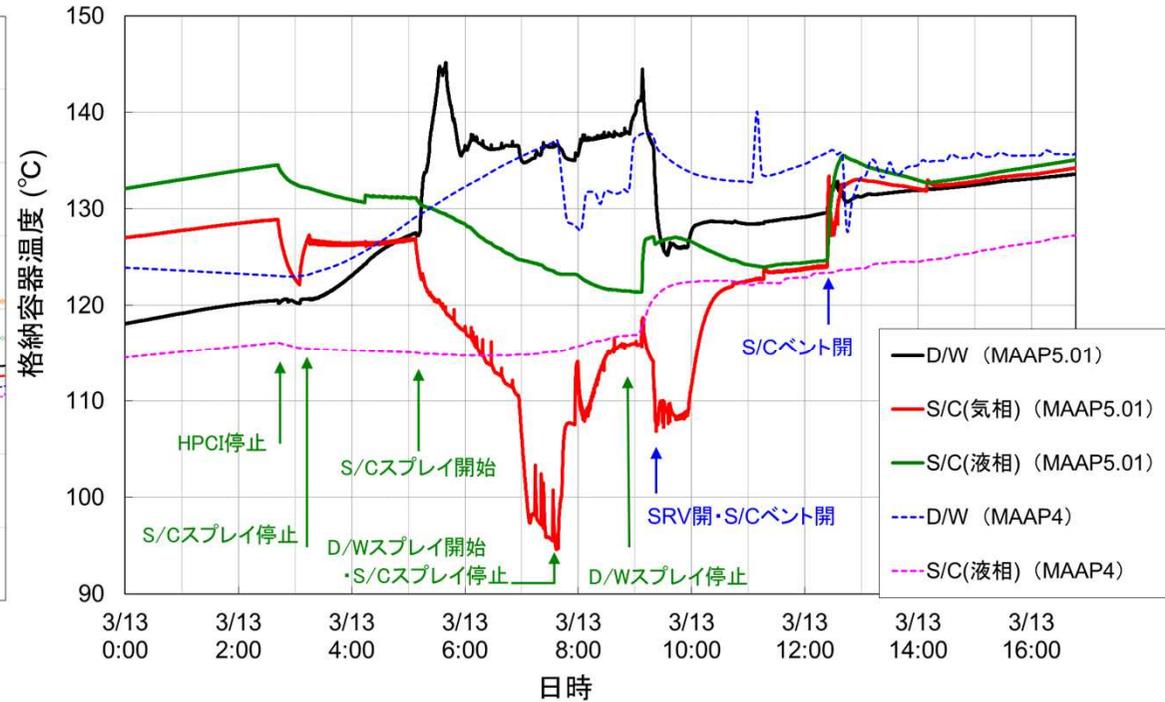
○なお、トップヘッドフランジの破損が推定される3月12日午前7時頃のオペフロの放射線量率は、
数十Sv/hに達していたと評価されている。

注) 圧力及び温度は、「東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・
格納容器の状態の推定と未説明問題に関する検討 第6回進捗報告、添付資料3-11～3-12」から引用

MAAP4及びMAAP5.01による解析結果(3号機)



格納容器圧力変化



格納容器温度変化

注) 東京電力ホールディングス株式会社によるMAAPの解析結果及び実測データを基に作成

3号機の格納容器圧力は、原子炉圧力の減圧時に設計圧力をかなり超過した時間帯がある(実測ベース)

- 格納容器圧力は、原子炉圧力容器減圧時に生じたピークを除けば、設計圧力(0.384 MPa-g)を上回る時間帯は殆ど無かった。
- 一方、原子炉圧力減圧時のピークは2度あり、圧力の最高値は0.75 MPa-a程度、設計圧力を上回る継続時間はそれぞれ30分間程であった。(実測)(注)
- 格納容器温度は、設計温度(138 °C)とほぼ同等か、若干下回る程度で推移した時間が大分部と考えられる。(解析結果)

注) 0.384 MPa-g \doteq 0.48 MPa-aとして記述

格納容器漏えい率試験の条件と結果等

		福島第一		柏崎刈羽	
		1号機	3号機	6号機	7号機
格納容器の 設計条件	格納容器設計圧力(※1)	0.427 MPa-g	0.384 MPa-g	0.279 MPa-g	
	D/W設計温度	138 °C		171 °C	
	許可申請書上の設計圧力における漏えい率	0.5 %/day以下		0.4 %/day以下	
格納容器漏 えい率試験 条件	試験圧力	0.255 MPa-g	0.384 MPa-g	0.279 MPa-g	
	判定基準(※2)	0.348 %/day	0.45 %/day	0.36 %/day	
試験結果(注1)		0.15 %/day	0.036 %/day	0.082 %/day	0.097 %/day

(※1)

1F1は設計圧力=最高使用圧力=0.427 MPa[gage]

1F2～は設計圧力=最高使用圧力×0.9

1F3で最高使用圧力0.427 MPa[gage]、設計圧力0.384 MPa[gage]

K67で最高使用圧力0.310 MPa[gage]、設計圧力0.279 MPa[gage]

(※2)

試験圧力、判定基準の設定の考え方が異なる（いずれも当時のJEACで認められた方法）

1F1：試験圧力をピーク圧力とし、判定基準は $0.5 \text{ %/day} \times \sqrt{0.255/0.427} \times (1-0.1) = 0.348 \text{ %/day}$

1F3, K6/7：試験圧力を設計圧力とし、判定基準は設計漏洩率×(1-0.1)（運転期間中の劣化影響を考慮した係数を0.1とした場合）

注1) 次ページの各試験結果の平均値

注2) 東京電力から提供された情報をもとに作成

格納容器漏えい試験実績データは 号機間・試験間でかなり違う

直近3回の定期検査(定検)時の格納容器漏えい率試験の結果

福島第一		柏崎刈羽	
1号機	3号機	6号機	7号機
第24回定検(H18.9) :0.101 %/day	第22回定検(H19.11) :0.0348 %/day	第8回定検(H21.5) :0.086 %/day	第8回定検(H20.12) :0.091 %/day
第25回定検(H20.2) :0.176 %/day	第23回定検(H20.7) :0.0344 %/day	第9回定検(H23.1) :0.084 %/day	第9回定検(H22.6) :0.083 %/day
第26回定検(H21.7) :0.166 %/day	第24回定検(H22.9) :0.039 %/day	第10回定検(H24.10) :0.076 %/day	第10回定検(H23.11) :0.116 %/day

注) 東京電力から提供された情報をもとに作成

1F1/3号機及びKK6・7号機に関する実測値、SA時評価、などの整理(案)

	福島第一1号機	福島第一3号機	柏崎刈羽67(TQUV 評価)
スクラムから冷却喪失まで	約1時間	約36時間	0時間
冷却喪失から炉心損傷まで	約3時間	約2.5時間	1時間
炉心損傷後の圧力バウンダリ	気相漏えい？	気相漏えいなし※(自動減圧)	気相漏えいなし(強制減圧)
実測高線量率	300mSv/h(後刻さらに上昇か?)	300mSv/h	---
解析線量率	3-500 mSv/h?(希ガスのみ)	3-500 mSv/h?(希ガスのみ)	1200 mSv/h(FP込み)
炉心損傷～観測の経過時間	2時間強	9時間強	2時間強
気相漏えい～観測の経過時間	Max40分	---	---
スクラビングの有無	なし	あり	あり
解析での設定漏洩率	0.5%/day	0.5%/day	(圧力の関数)
漏えい率試験結果	0.15 %/day	0.036 %/day	6号機:0.082 %/day 7号機:0.097 %/day

※圧力容器の損傷がない場合(小規模漏洩は含まない)

注)東京電力から提供された情報をもとに作成

これまでの情報から以下のようなことが言えるか？ (要検討)

- 炉心損傷が開始すると、2-3時間で原子炉建屋内の放射線量率が数百mSv/hに到達しうることは、福島第一の経験と各種解析の双方から確認できた。また、その後、さらに放射線量率が上昇する可能性が十分にある。
- 原子炉圧力の減圧を、S/C経由で行い、スクラビング効果などが期待できる場合であっても、上記の理解に変更は生じない。
- 原子炉停止から数日経過した後でも、原子炉建屋内の放射線量率は数百mSv/hになりうる。
- 炉心損傷後の原子炉建屋内の線量率にはヨウ素など希ガス以外のFPが大きく寄与する。
- 以上は、特段の格納容器バウンダリの損傷が生じなくても発生するものであり、BWR共通の挙動だと考えられる。(2号機には明確な情報はないが……)

事故時対策等へのフィードバック事項①(要検討)

- BWRにおいては、炉心損傷開始後、特に格納容器圧力の急上昇開始後は、短時間(1-2時間)で人が原子炉建屋内に侵入することは困難になる可能性が高い。S/Cでのスクラビングがあっても、同様との評価もある。
- 炉心損傷後における原子炉建屋内の放射線量率の推定や評価には、ヨウ素等の寄与を含めることが不可欠。
- 事象進展が速いシーケンスでは、原子炉冷却能力を完全喪失すると、炉心損傷までに3時間程度しかなく、目視等による原子炉建屋内の状況把握は、装備装着時間などを考えると、非常に限定された時間枠しかない。(福島第一原子力発電所1号機では、現場確認のための「認識合わせ」だけで「20分や30分では終わらなかった。」とのこと。(福島原子力事故調査報告書(平成24年6月20日、東京電力株式会社) 別紙2 P.37)

事故時対策等へのフィードバック事項②(要検討)

- 格納容器圧力及び温度の急上昇を回避する手段の重要性。
(例えば、「漏えい率 $\propto\sqrt{(P/P_d)}$ 」は評価上安全サイドだが、これに従って対応を考えてよいか?)
- 建屋換気能力の回復の重要性。(既に措置を講じてきたが、事故時措置として優先度が高い。)
- 今回の議論程度の漏えいであれば、大規模な水素爆発の危険性は殆ど無いと言えるか?
 - ・20000 m³を超えるオペフロ空間の水素濃度を10%にするためには、0.5 %/dayの漏えい率と水素総発生量1t程度の条件では、非常に簡略化した計算下で35日程度が必要になる。(オーダーとして1日～2日ではない。)

(参考) MAAP4と5.01による解析結果(1号機)

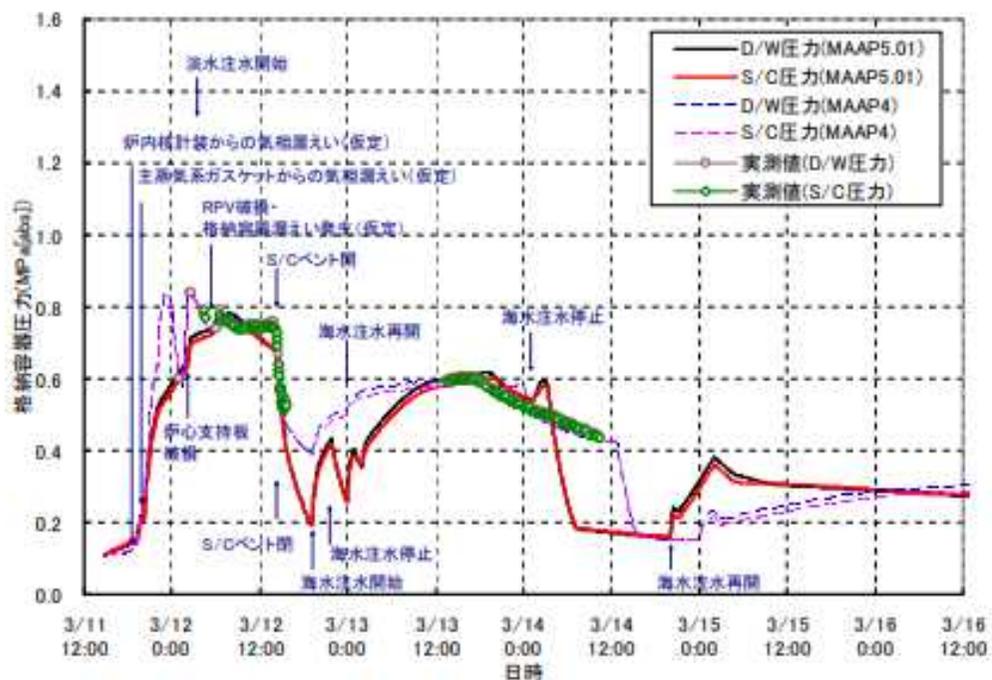


図 1-3 1号機 格納容器圧力変化

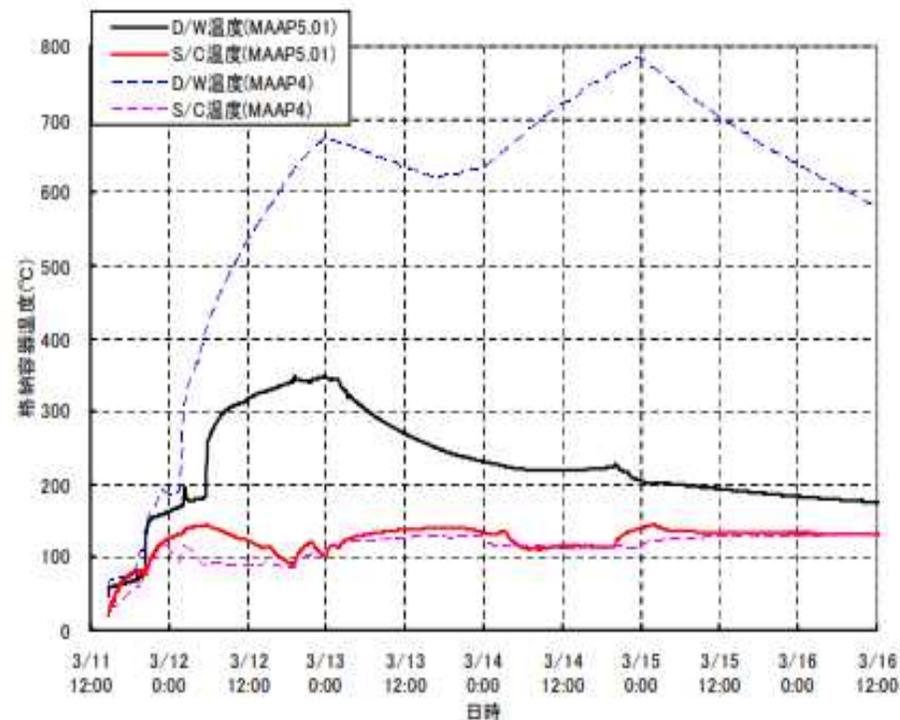


図 1-6 1号機 格納容器温度変化

注)「東京電力ホールディングス株式会社, “福島第一原子力発電所1~3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告”、添付資料3-11~3-12」から引用

(参考)MAAP4と5.01による解析結果(3号機)

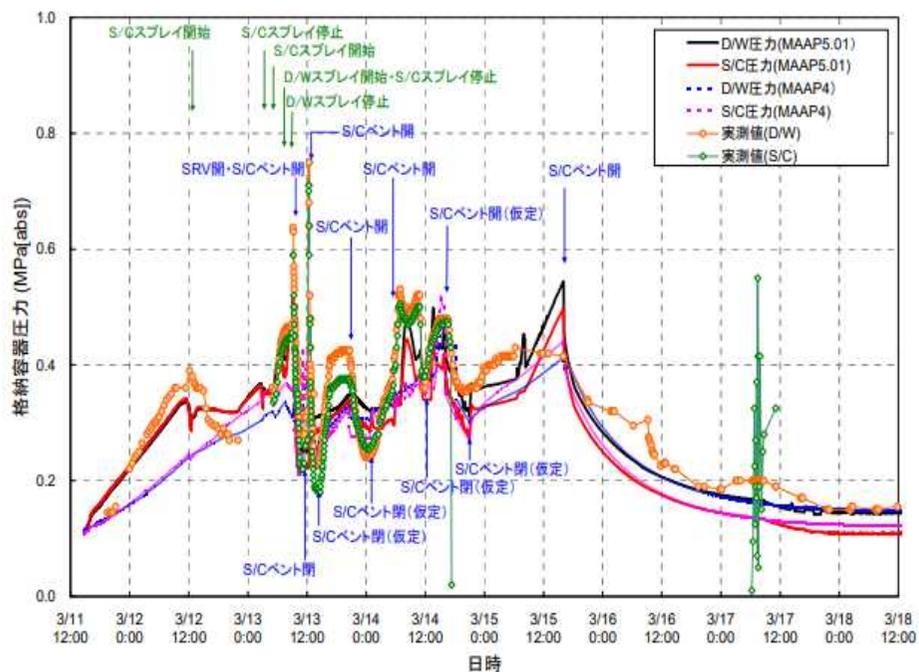


図 3-3 3号機 格納容器圧力変化

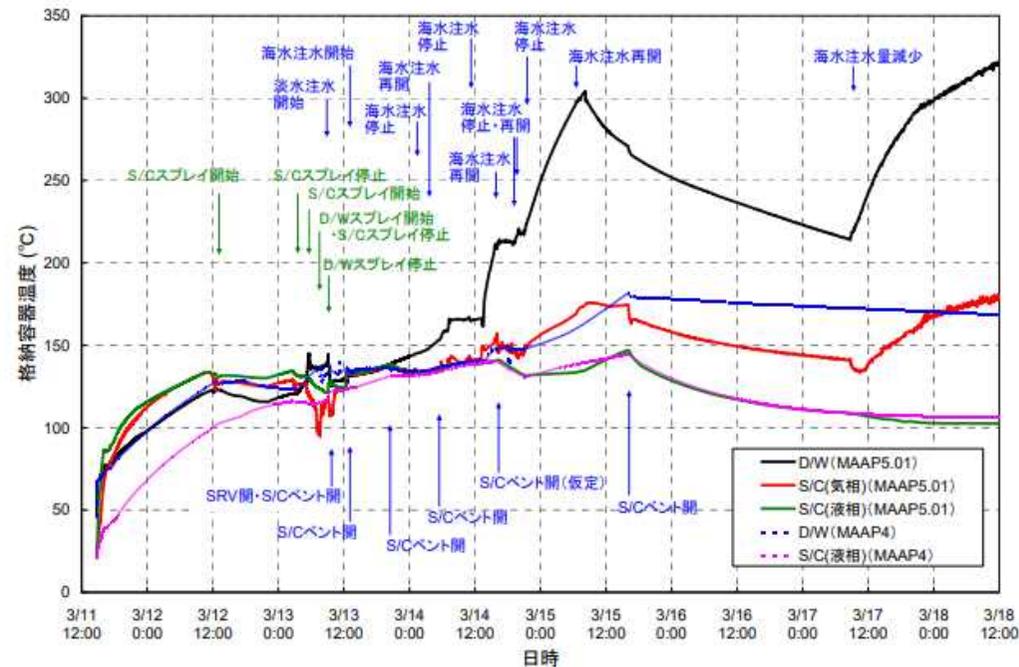


図 3-5 3号機 格納容器温度変化

注)「東京電力ホールディングス株式会社,“福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未説明問題に関する検討 第6回進捗報告”、添付資料3-41～3-42」から引用