

「福島第一原子力発電所3号機の水素爆発に寄与した漏えい 経路と爆発メカニズムの推定」にかかる補足資料

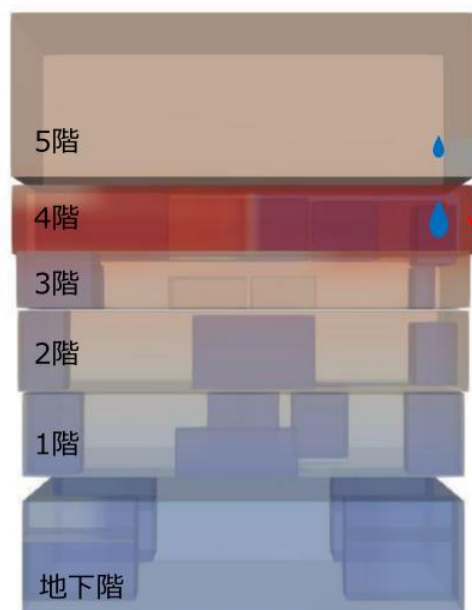
2023年6月22日



東京電力ホールディングス株式会社

前報告の概要 (第34回事故分析検討会：2022年12月20日) TEPCO

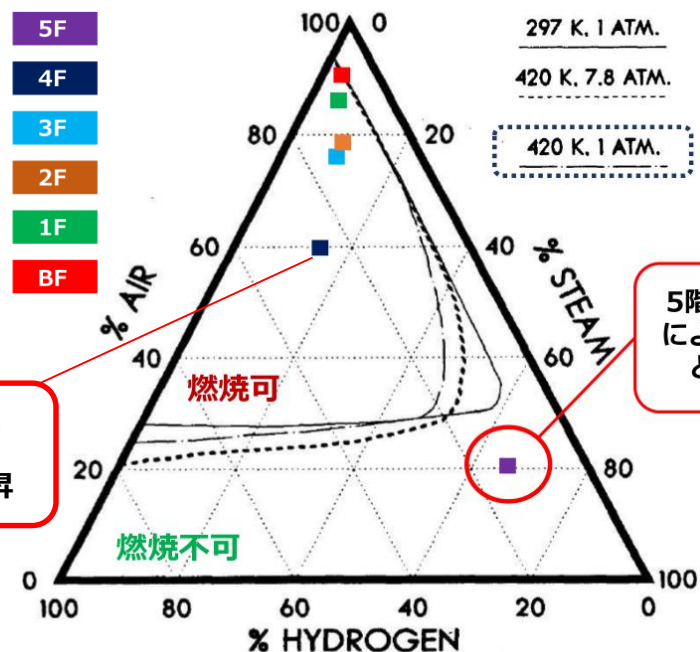
- 3号機の水素爆発事象に影響を与えたメカニズムを推定するため、確認している格納容器からの漏えい経路（シールドプラグ、MSIV室）をふまえ、GOTHICコードによる原子炉建屋内の水素濃度分布の解析を実施した。
- 解析の結果、シールドプラグ経由の漏えいを想定したケースの方が、爆発時の映像等から推定される状況（最初の爆発が4階で生じたこと、複数の爆発の後も5階に可燃性ガスが残存していたこと）と整合する結果を得た。



水素体積%

(a) 水素濃度分布

4階は5階と比較して、水蒸気の凝縮が進むことで水素濃度が上昇



5階は酸素欠乏により燃焼不可となる結果

(b) 燃焼可否の判定図

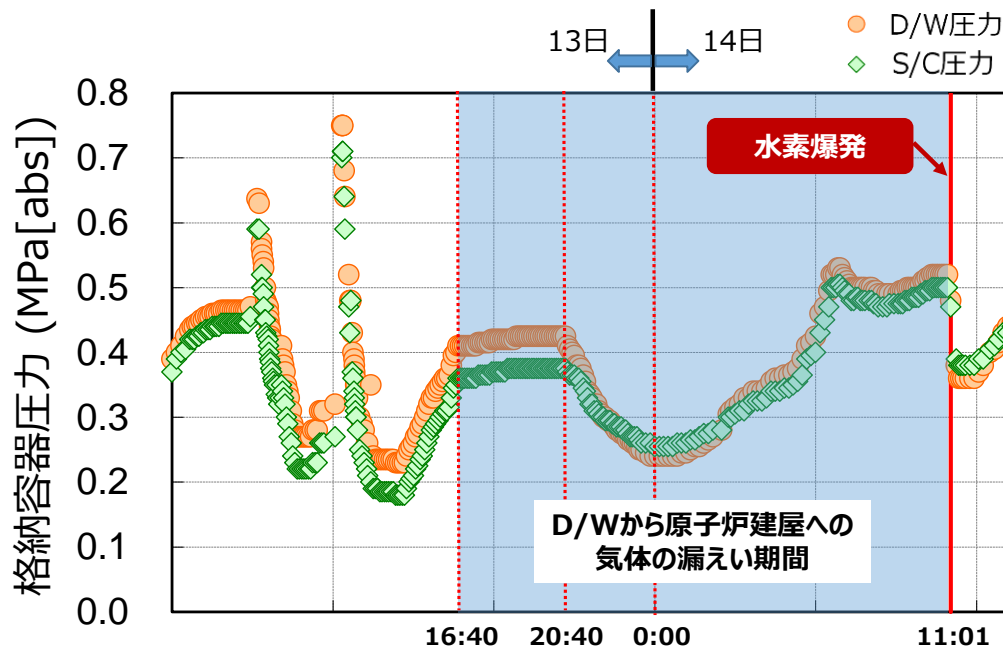
シールドプラグ経由の漏えいを仮定したケースにおける爆発時の状態の解析結果

「福島第一原子力発電所3号機の水素爆発に寄与した漏えい経路と爆発メカニズムの推定」に関して、爆発時の状況と整合する解析ケースを特定するまでのプロセスや、解析の妥当性に関する理解に役立てるため、以下の内容を補足する。

- 爆発時までの原子炉建屋各階における燃焼判定図上の時間変化
- 解析の妥当性に関する確認事項
 - 水蒸気の凝縮の取り扱い
 - 漏えいガスの浮力の取り扱い

解析条件（シールドプラグ経由）および感度解析について

- D/W圧力の実測値を再現する事故シナリオを推定し、水素・水蒸気の発生量と格納容器からの漏えい量を評価。
- 3号機の原子炉建屋内の水素濃度分布解析では、上記評価をベースに、13日16:40から水素爆発までのD/Wからの気相漏えい量について、映像による爆発の特徴に合う結果が得られるよう条件を探索。結果して3ケースを評価。
- このうちケース3が、水素爆発時の映像から得られる特徴と最も整合する解析結果となった（2022年12月に提示したのはケース3の結果）。



(a) 格納容器圧力の変化と、事故進展の推定

(b) D/W（シールドプラグ）から漏えいする気体に関する解析条件

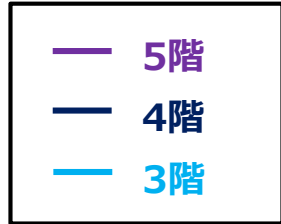
解析ケース	水蒸気 総漏えい量	水素 総漏えい量
ケース1	約150トン	約1300kg
ケース2	約110トン	約975kg
ケース3	約75トン	約650kg

2022年12月の検討会で提示した解析の条件

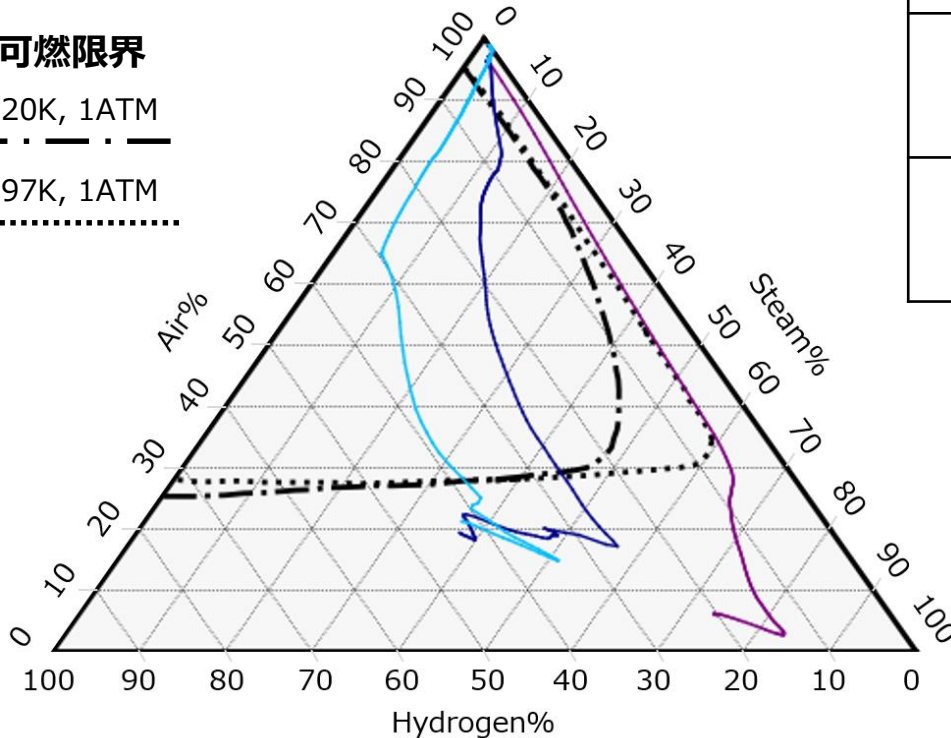
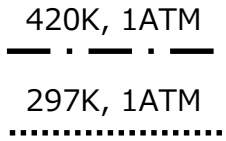
爆発時までの原子炉建屋各階における燃焼判定図上の時間変化

ケース1（水蒸気総漏えい量約150トン、水素総漏えい量約1300kg）

- 漏えい開始想定時刻：13日16:40
- 各フロアが可燃領域内にあった期間



可燃限界



	420K, 1ATM	297K, 1ATM
5階	なし	なし
4階	13日19:15頃 ~14日5:20頃	13日19:00頃 ~14日5:25頃
3階	13日20:25頃 ~14日8:00頃	13日20:10頃 ~14日8:00頃

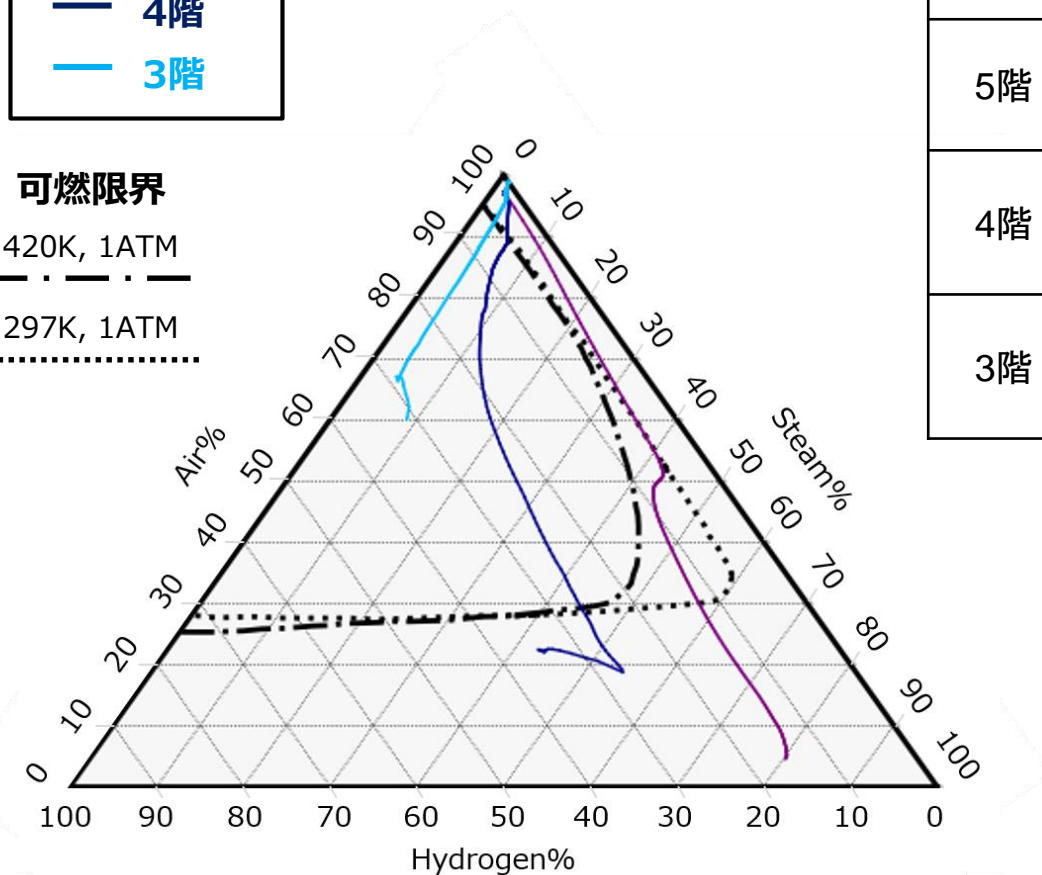
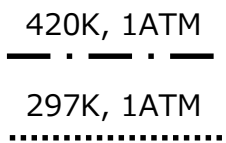
爆発時までの原子炉建屋各階における燃焼判定図上の時間変化

ケース2（水蒸気総漏えい量約110トン、水素総漏えい量約975kg）

- 漏えい開始想定時刻：13日16:40
- 各フロアが可燃領域内にあった期間



可燃限界



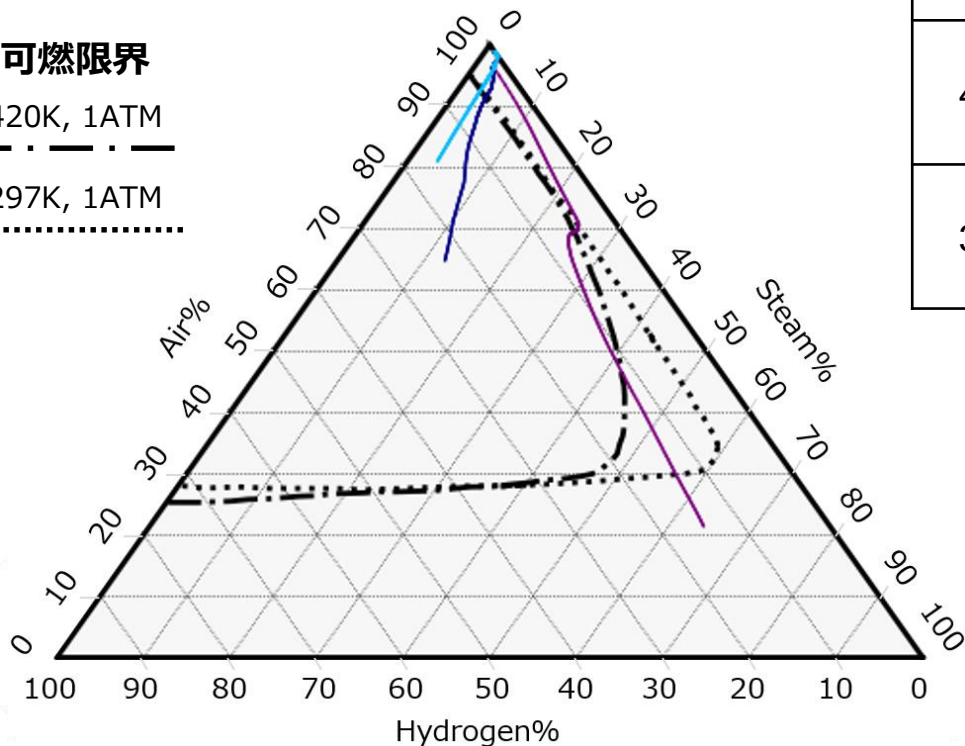
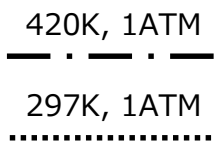
	420K, 1ATM	297K, 1ATM
5階	なし	13日20:00頃 ~14日4:30頃
4階	13日20:15頃 ~14日8:40頃	13日20:05頃 ~14日8:45頃
3階	13日23:25頃~	13日22:55頃~

ケース3（水蒸気総漏えい量約75トン、水素総漏えい量約650kg）

- 漏えい開始想定時刻：13日16:40
- 各フロアが可燃領域内にあった期間



可燃限界



	420K, 1ATM	297K, 1ATM
5階	13日22:45頃 ~14日6:35頃	13日21:15頃 ~14日9:05頃
4階	13日22:40頃~	13日22:10頃~
3階	14日1:55頃~	14日1:25頃~

3号機爆発時までの原子炉建屋内の水素濃度分布の解析では、特に次の2つの現象を適切に取り扱うことが重要と考えられる。

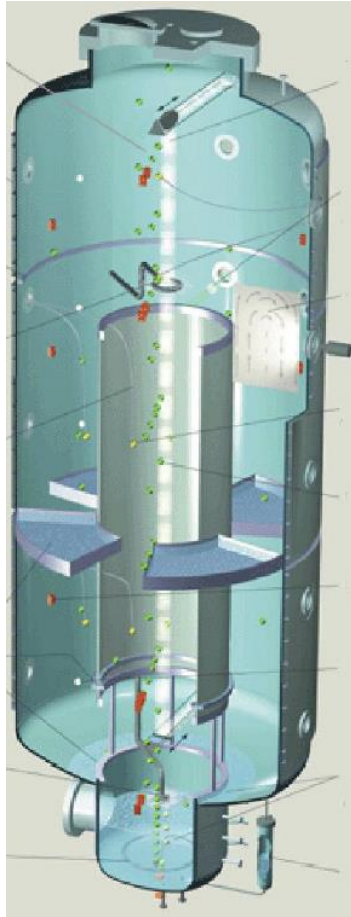
- 水蒸気の凝縮
原子炉建屋に漏えいさせたガス（水蒸気と水素を想定）のうち、水蒸気が建屋壁面などの構造物の表面で凝縮することで水素濃度が上昇し、建屋内の水素濃度の分布に影響するため。
- 漏えいガスの浮力
原子炉建屋に水素を含む密度の小さいガスが漏えいすることで、空気との密度差による浮力が働き、水素濃度の分布に影響するため。

上記2つの現象に関する解析上の取り扱いについて確認した事項を示す。

- 3号機爆発時までの原子炉建屋内の状態は大気圧近傍であり、非凝縮性ガスが混在する条件下で、～110℃程度の雰囲気温度（解析結果から推定）において水蒸気の凝縮が生じていたと考えられる。
- 水蒸気の凝縮を取り扱うモデルには、GOTHICコードにおける推奨モデルであるDLM-FMモデルを用いた。同モデルは幅広い実験データ等による妥当性確認が行われており、今回の評価で想定される条件は概ねモデルの妥当性が確認された範囲内であるため、同モデルを使用した。

	圧力の範囲	温度の範囲	非凝縮性ガス
CVTR Test3[1]	約1～2.2気圧	約25～115℃	有り
Dehbi[2]	約1.5～4.5気圧	約75～140℃	有り
Wisconsin大学 平板試験[3]	大気圧近傍	約70～100℃	有り
Wisconsin大学 大気圧試験[4]	大気圧近傍	約60～90℃[5]	有り
3号機	大気圧近傍	～110℃	有り

- [1] R.C.Schmitt, G.E.Bingham, J.A.Norberg, "Simulated Design Basis Accident Tests of the Carolinas Virginia Tube Reactor Containment – Final Report", 1970, IDAHO nuclear corporation.
- [2] A.A.Dehti, "The Effects of Noncondensable Gases on Steam Condensation Under Turbulent Natural Convection Conditions", 1991, Massachusetts Institute of Technology.
- [3] I.Huhtiniemi, M.L.Corradini, "Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas", 1993, University of Wisconsin.
- [4] M.H.Anderson, "Steam Condensation on Cold Walls of Advanced PWR Containments", 1998, University of Wisconsin.
- [5] D.S.Yoon, H.Jo, M.L.Corradini, "Assessment of MELCOR condensation models with the presence of noncondensable gas in natural convection flow regime", 2017, University of Wisconsin.



THAI-HM2試験装置[6]

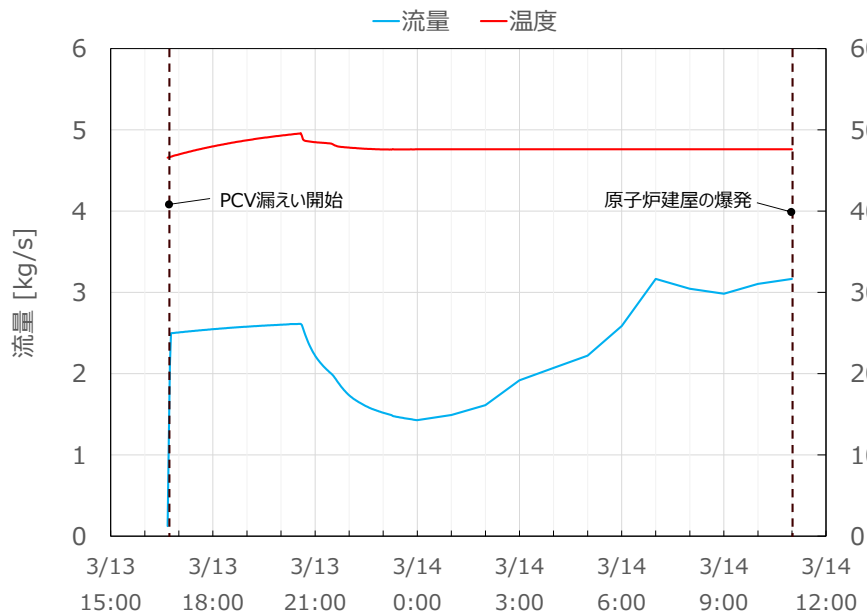
- THAI-HM2試験[6][7]では、試験装置中に水蒸気と水素の混合ガスを流入させた場合の水素濃度分布が測定されている。今回の評価と類似の条件であるため、同試験を模擬した解析を、GOTHICコードを用いて実施した。
- 左図の試験体系について3次元のメッシュ分割を行い、各方向に対してメッシュ幅の感度解析を実施した結果、次の傾向を確認した。
 - 垂直方向のメッシュ幅を小さくすると、試験における水素濃度分布の再現性が向上する。
 - 横方向のメッシュ幅は、試験における水素濃度分布の再現性に大きく影響しない。
- この結果を踏まえ、3号機原子炉建屋の体系において、垂直方向のメッシュ幅を変化させた感度解析を実施し、それ以上細分化しても水素濃度分布の解析結果が大きく変化しない程度のメッシュ幅を設定した。これにより、漏えいガスの浮力を適切に取り扱えたと判断した。

[6] https://www.ktg.org/ktg-wAssets/docs/2011_09_os_rheinmain_thai-facility.pdf

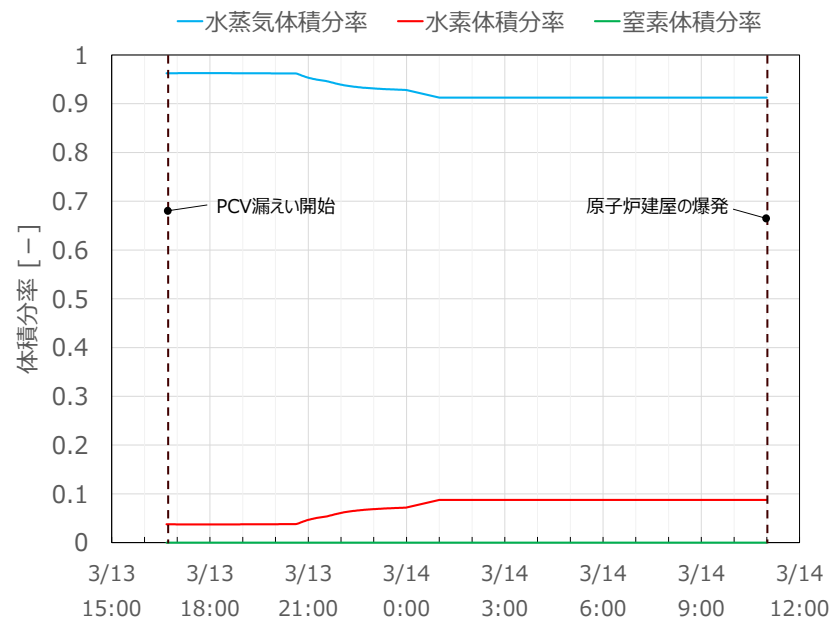
[7] D.C.Visser, et al., "Validation of a FLUENT CFD model for hydrogen distribution in a containment", 2012, Nuclear Engineering and Design, Vol.245, Page161-171.

参考：ケース1におけるD/Wからの気相漏えいの設定 (流量、温度、ガス組成)

項目	3/14 0:00まで	3/14 0:00以降
流量 (ケース1)	既往の再現解析 [8]における解析 結果を適用 (3/14 0:00 までの水素漏えい 量は約300kg)	3/14 0:00時点の漏えい流量に対し、D/W圧力に比例した漏えい流量を仮定
温度		3/14 0:00時点の温度を仮定
ガス組成		3/14 0:00から水素爆発までの水素漏えい量が約1000kgとなるよう一定の水素割合を仮定し、残りは水蒸気と仮定



漏えいガスの流量 (ケース1) 及び温度



漏えいガスの組成

[8] 東京電力HD, “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3-12 3.2.(1)”, 2022年11月10日

階	南北方向	東西方向	垂直方向
5階 (オペフロ)	4.2m	3.84m	1.01m
4階 (西側の広い空間)	3.83m	2.37m	0.68m
3階	5.02m	4.77m	0.71m
2階	4.98m	4.74m	0.80m
1階	4.89m	4.93m	0.83m

参考:

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（第34回）
資料2

福島第一原子力発電所3号機の水素爆発に寄与 した漏えい経路と爆発メカニズムの推定

2022年12月20日

FDR2022（2022年10月14日～16日, 福島県楢葉町J-village）

チャイプンファイ^a, 野崎 謙一郎^a, 末廣 祥一^a,
本多 剛^b, 溝上 暢人^b, 大和田 賢治^b, 溝上 伸也^b

^a 株式会社テプコシステムズ
^b 東京電力ホールディングス株式会社

※この資料は、FDR2022での発表内容を日本語訳したものです。

内容

- 背景と目的
- 解析条件
- 解析結果に基づく考察
 - 漏えい箇所別の建屋内ガス組成分布
 - 爆発メカニズムに関する仮説
- まとめ

背景と目的

最近の調査結果

爆発時の映像の超解像処理 [1]

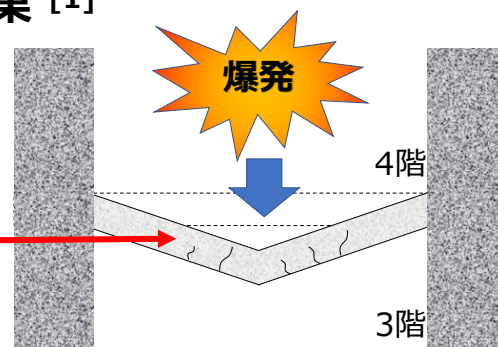


画像処理前



画像処理後

3号機原子炉建屋内部の現地調査結果 [1]



最近の調査結果から推定される状況^[1] :

- 3号機では、4階で第一段階の爆発が発生した。
- 4階の爆発に伴う建屋の変形により南東部の屋根に裂け目が生じ、火炎が発生。同時に原子炉建屋南壁が崩落した。
- 5階で第二段階の爆発が起こり、建屋天井の中央部から噴煙が吹き上げられた。
- 残存した可燃性ガスが燃え続け、原子炉建屋の屋根と思われる巨大な物体が垂直に約200m吹き上げられた。

疑問点

- なぜ最初の爆発が4階で生じたのか？
- なぜ複数の爆発の後も可燃性ガスが残存していたのか？

[1] 原子力規制委員会, “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～”, 2021年3月

背景と目的

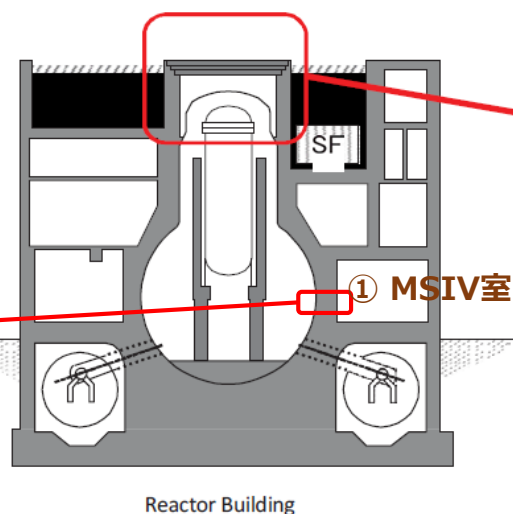
格納容器からの漏えいに関する観測事実

- ① 主蒸気隔離弁（MSIV）室の主蒸気配管D伸縮継手付近で漏えいを確認^[2]



Leak location

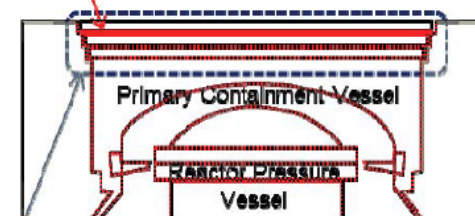
② D/Wトップヘッド



Reactor Building

Source region with high level contamination

- ② 除染後もシールドプラグ周辺では高い線量率を検出^[3]
- 爆発直後の衛星写真にて、シールドプラグ付近からの湯気の噴出を確認^[1]



Shield plug

(Trilaminar structure made of concrete with 60 cm thickness. Each layer has 11.3~11.8 m diameter and is division into three parts.)



3月14日11:04に撮影された衛星写真^[1]

17

この検討の目的

- 水素爆発に寄与した格納容器の主要な漏えい位置の推定
- 格納容器の漏えいが水素爆発事象に影響を与えたメカニズムの推定

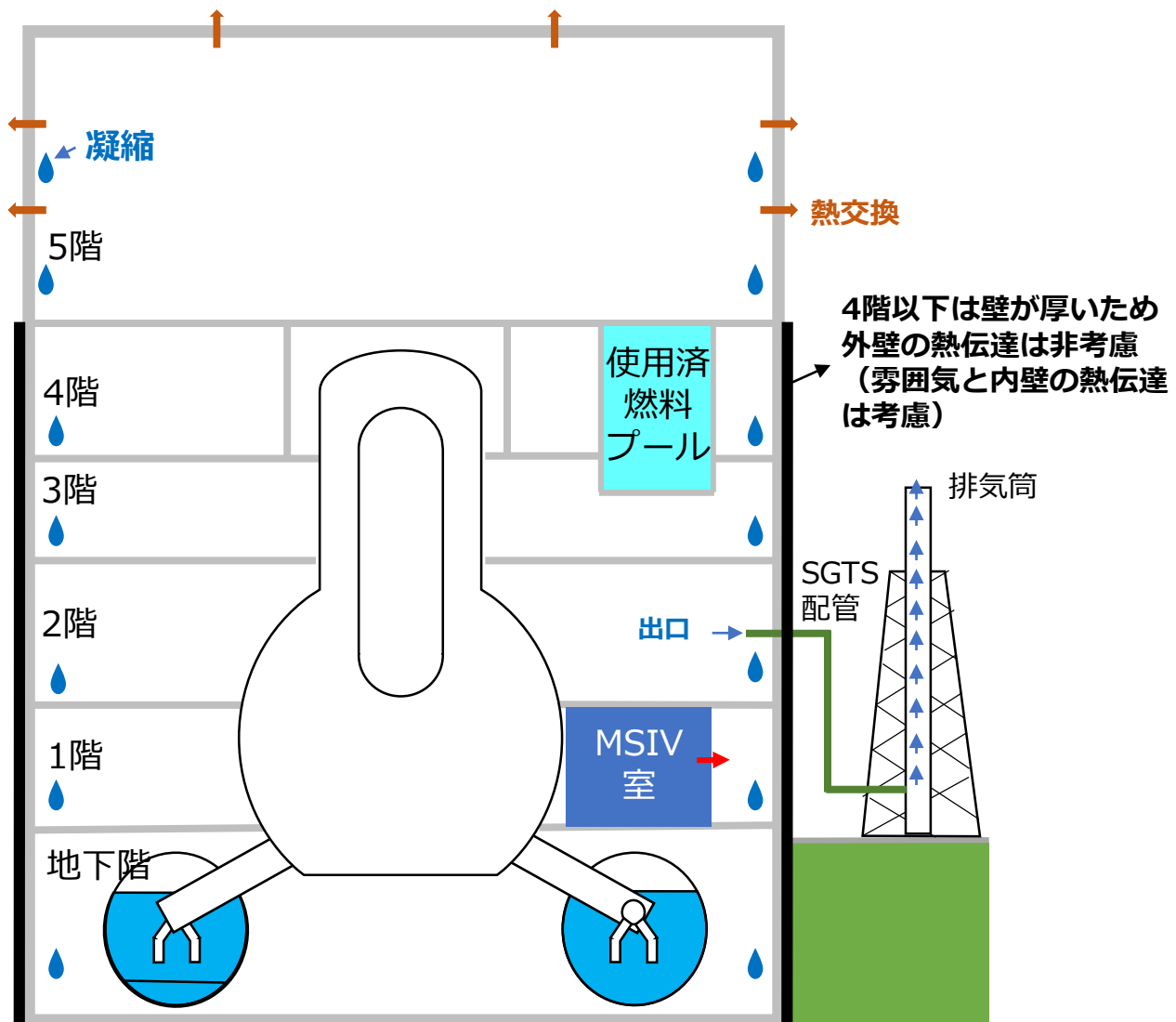
[1] 原子力規制委員会, “東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ～2019年9月から2021年3月までの検討～”, 2021年3月

[2] 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所3号機主蒸気隔離弁（MSIV）室内調査結果”, 2014年5月

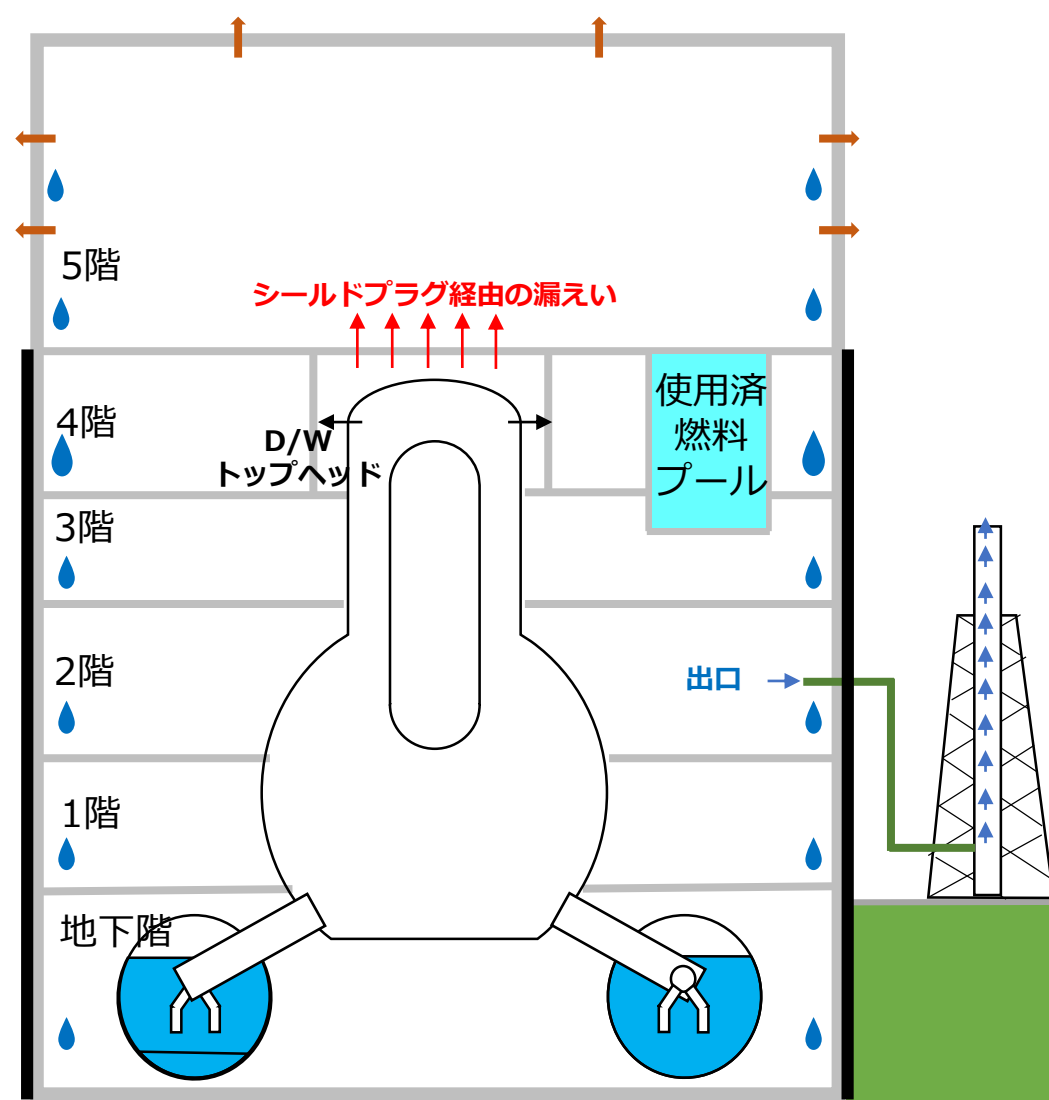
[3] Hiratama, H., Investigation of Main Radiation Source above Shield Plug of Unit 3 at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, ICRS-13 & RPSD-2016, 2017

解析条件（解析はGOTHICコードを使用）

① MSIV室経由の漏えい

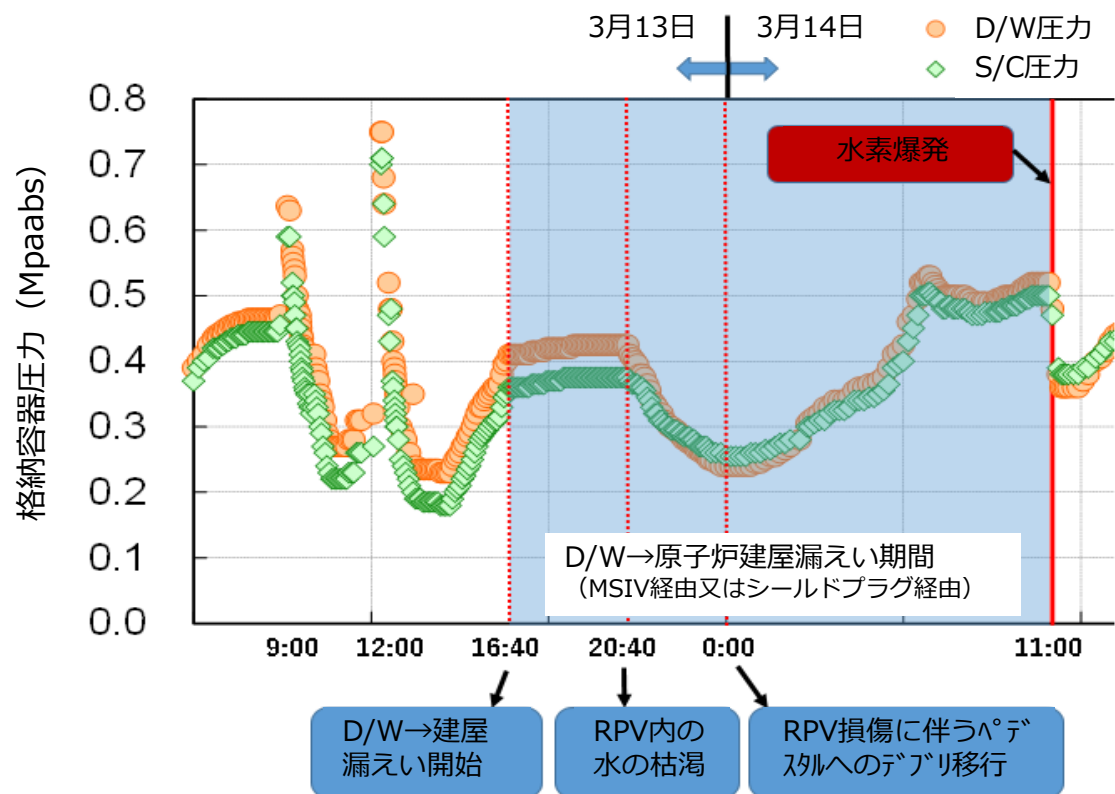


② シールドプラグ経由の漏えい

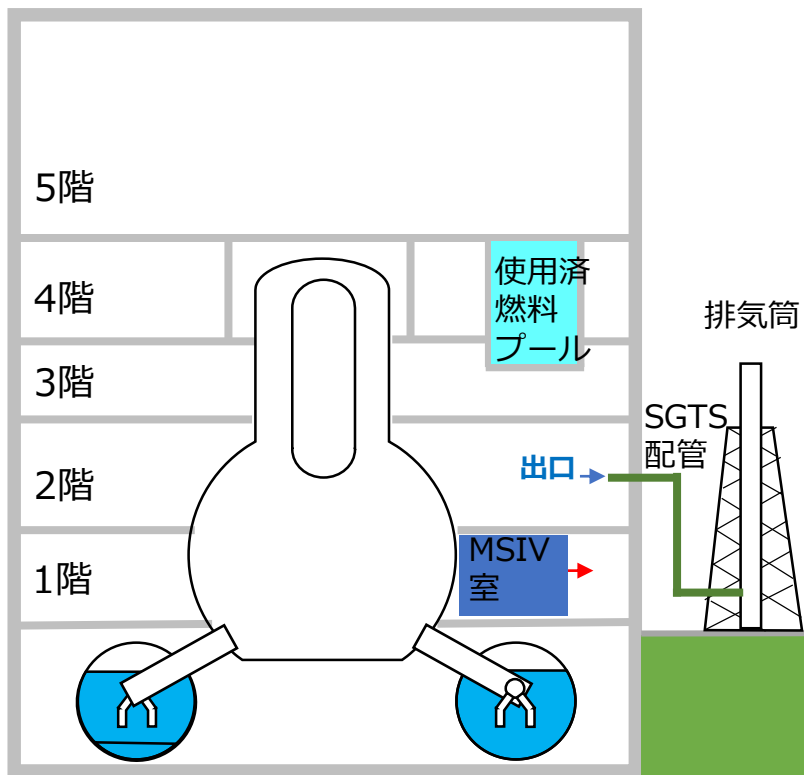


解析条件 (シナリオの想定と漏えい条件)

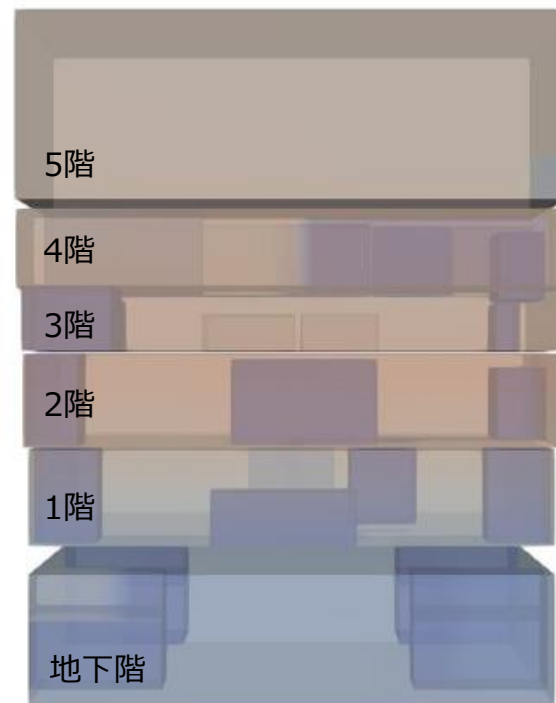
- 格納容器圧力の挙動から、D/Wから原子炉建屋への直接漏えいは3月13日16:40 から開始したと想定。
- 漏えい流量はD/W圧力に比例して変化すると仮定。単位圧力当たりの漏えい流量は、得られた解析結果が爆発時の映像や原子炉建屋調査結果による観察結果と整合するように調整。
 - 上記の調整の結果、漏えい期間中の水蒸気と水素の総漏えい量はそれぞれ75トン、650kgとした。
 - その他の有機可燃性ガスの分布挙動は水素と同等と仮定し、この解析では水素のみを考慮した。



解析結果に基づく考察 (①MSIV室経由の漏えい)

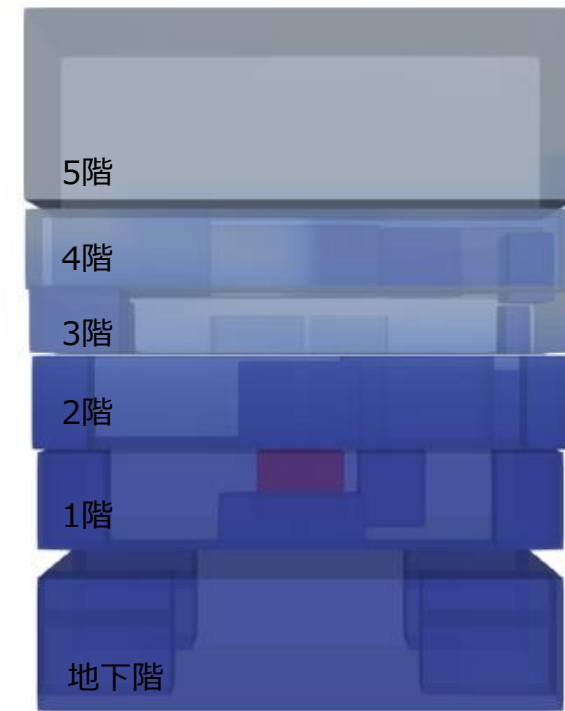


漏えい箇所のイメージ



水素体積%

爆発発生時（3月14日11時1分）のガス組成分布の解析結果



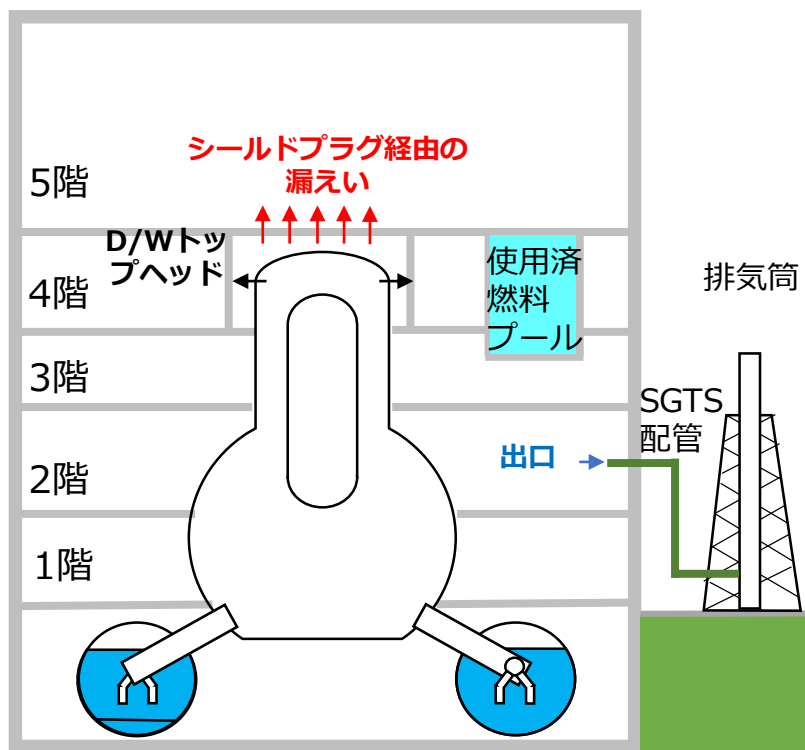
水蒸気体積%

- R/B 全体の流れにより、ガスの種類による成層化が防止されている。
- 漏えいガスの移行により3階以上の上層階は下層階に比べ温度が高くなり、水蒸気圧が高くなる。

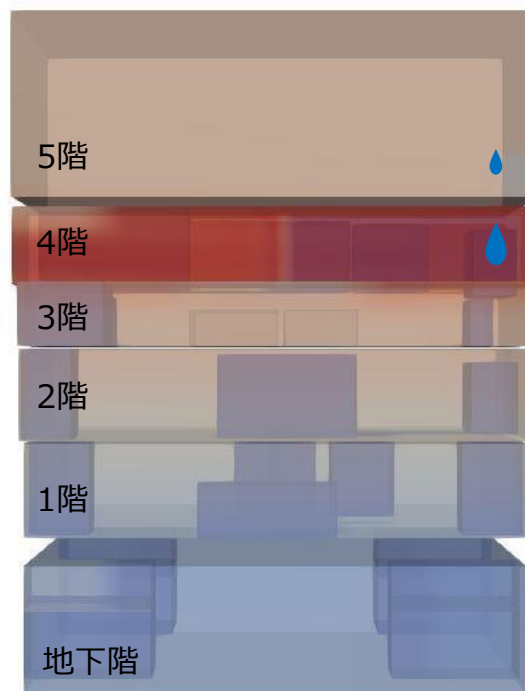


- MSIV室経由で漏えいが発生した場合、水素の分布は原子炉建屋内で比較的均一となる。
- 3階以上の上層階は、下層階に比べて高い水蒸気割合となる。

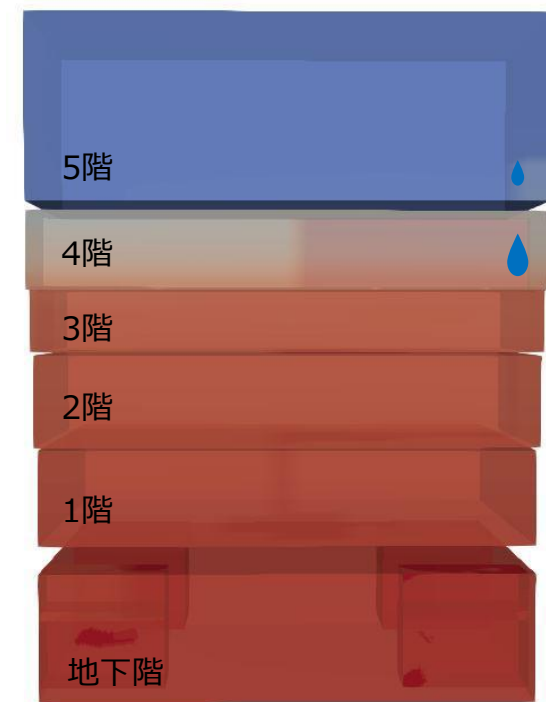
解析結果に基づく考察 (②シールドプラグ経由の漏えい)



漏えい箇所のイメージ



水素体積%



空気体積%

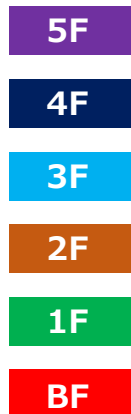
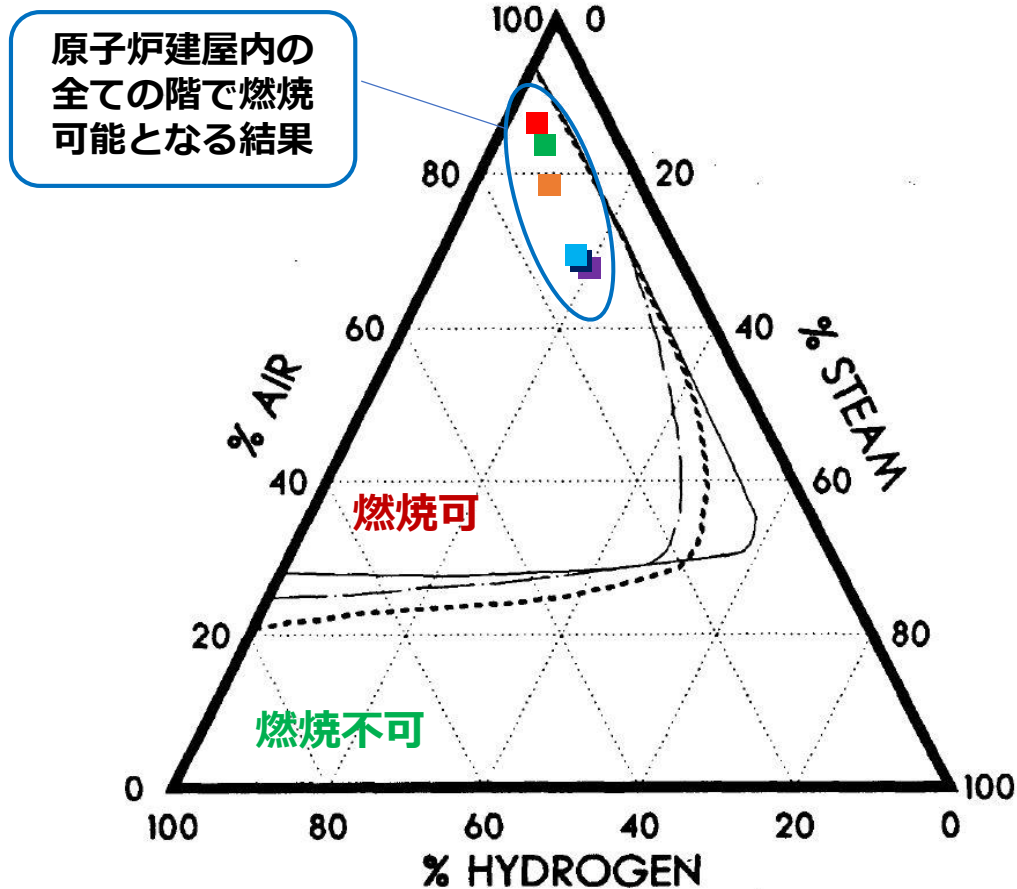
爆発発生時（3月14日11時1分）のガス組成分布の解析結果

- 連続的な漏えいにより5階が高温となり、凝縮が抑えられ、水蒸気圧が高くなった。それにより、空気が徐々に4階に押し下げられている。
- 4階は5階よりも温度が低いため、凝縮が進み、水蒸気圧は抑えられている。

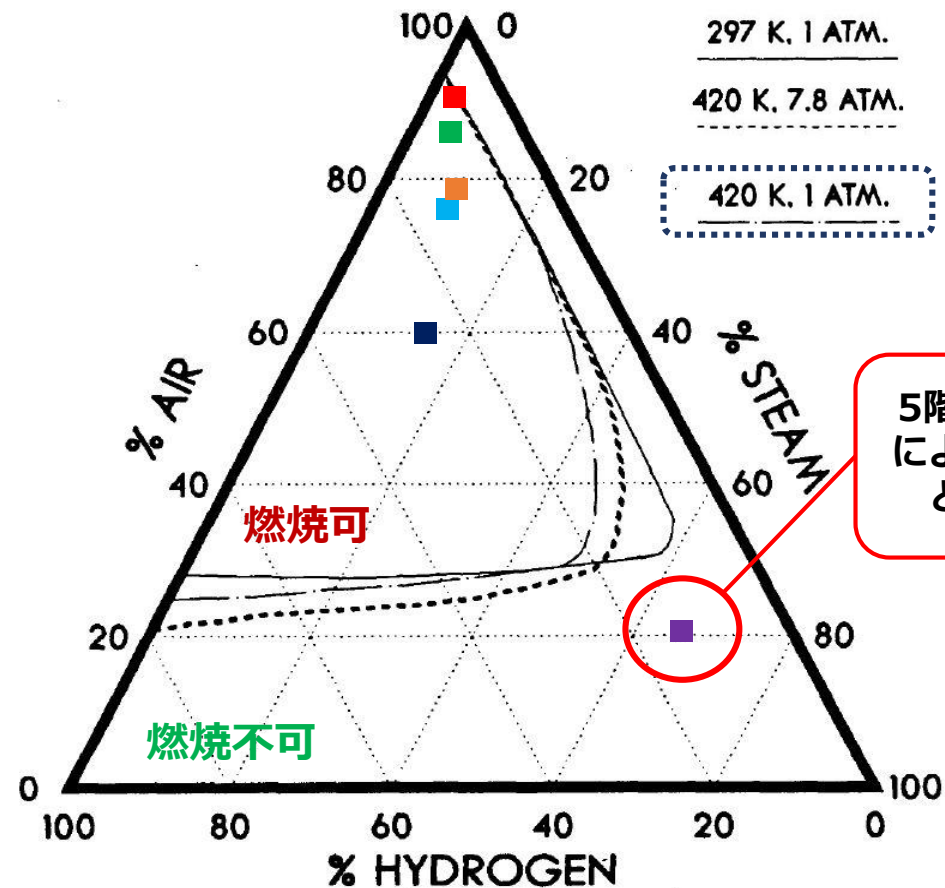
- シールドプラグ経由の漏えいの場合、5階の空気の濃度が低下する。
- 4階の水素濃度が他の階に比べて高くなる。

解析結果に基づく考察

① MSIV室経由の漏えい



② シールドプラグ経由の漏えい



爆発時（3月14日11時1分）の各階の燃焼可否の判定

解析結果に基づく考察

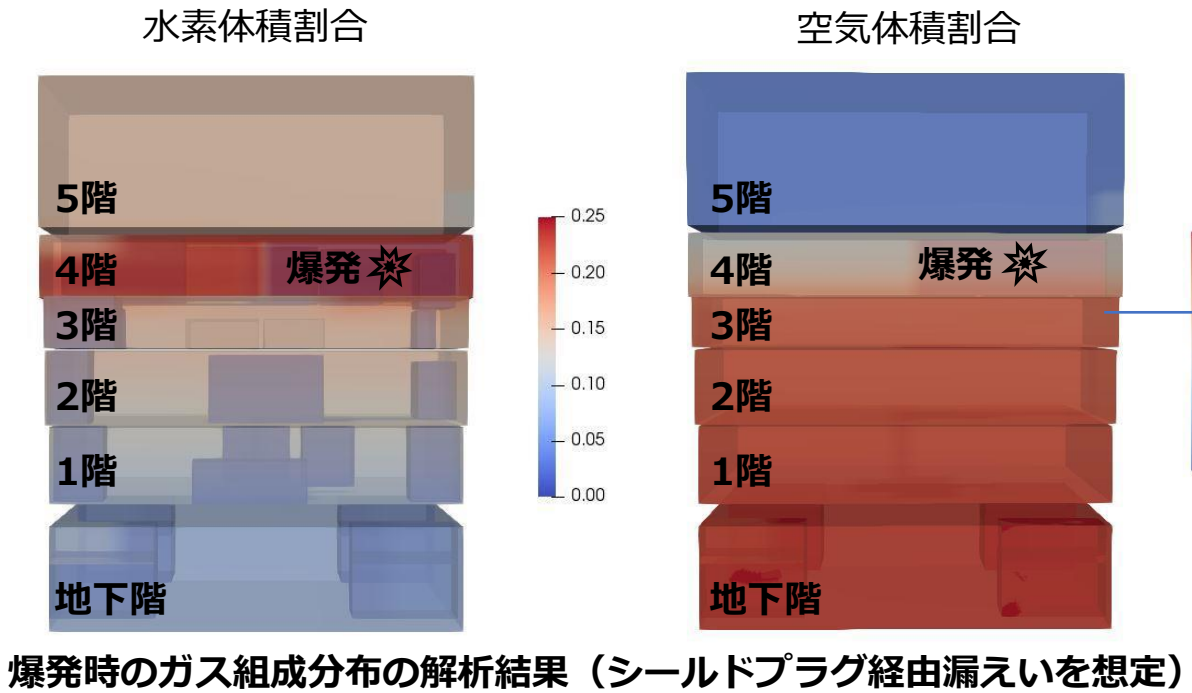
計算結果 観測事実 からの推定	① MSIV室経由の漏えい	② シールドプラグ経由の漏えい
4階で最初の爆発が発生	原子炉建屋内の全ての階で燃焼可能 ○ ・ 4階で爆発が起きたとしても矛盾はない	5階は酸素欠乏により燃焼不可 ○ ・ 4階は水素や空気の濃度が比較的高く、5階は酸素欠乏により燃焼不可となっている
多段階の爆発後も可燃性ガスが残存	× ・ 十分な酸素があれば、爆発によってほとんどの可燃性ガスは消費されるはず	○ ・ 酸素不足によって爆発後も可燃性ガスが消費しきれずに残っていた

解析結果に基づく考察 爆発メカニズムに関する仮説（1）



超解像処理された爆発映像 [1]

緑：超解像処理映像や現地調査による結論[1]
 赤：解析結果に基づく仮説



4階での爆発の衝撃で3階の天井の一部が崩落[1]

- 第一段階の爆発は4階で発生。
- この爆発は、4階に比較的高い濃度の水素と空気が存在したために生じた。

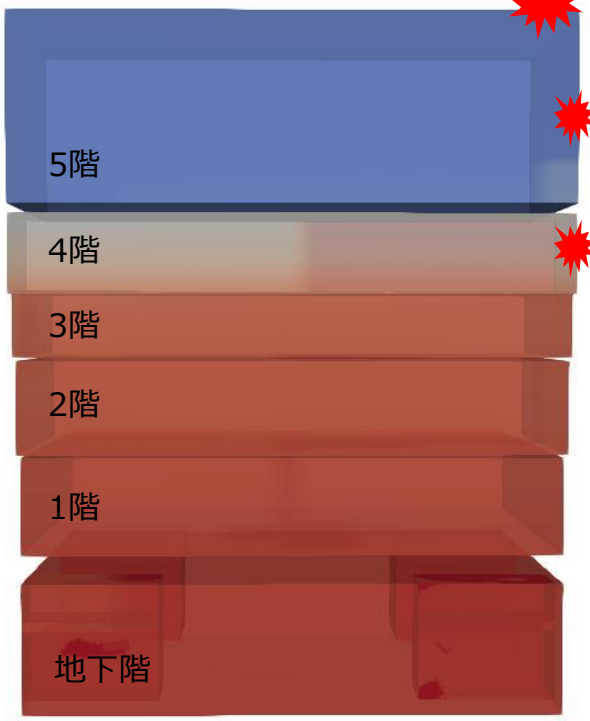
[1] 原子力規制委員会，“東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ～2019年9月から2021年3月までの検討～”，2021年3月
 FDR2022（2022年10月14日～16日，福島県楡葉町J-village）

解析結果に基づく考察 爆発メカニズムに関する仮説（2）



超解像処理された爆発映像 [1]

南側壁の崩落



爆発時の空気体積割合の解析結果
(シールドプラグ経由漏えいを想定)

- 南東の屋根に裂け目が発生。
- 裂け目から流れ出た5階のガスの酸素の割合が増加して燃焼。

- 南側の壁が崩落。
- 崩落した隙間から5階に空気が供給され、5階は徐々に燃焼可能な状態に移行。

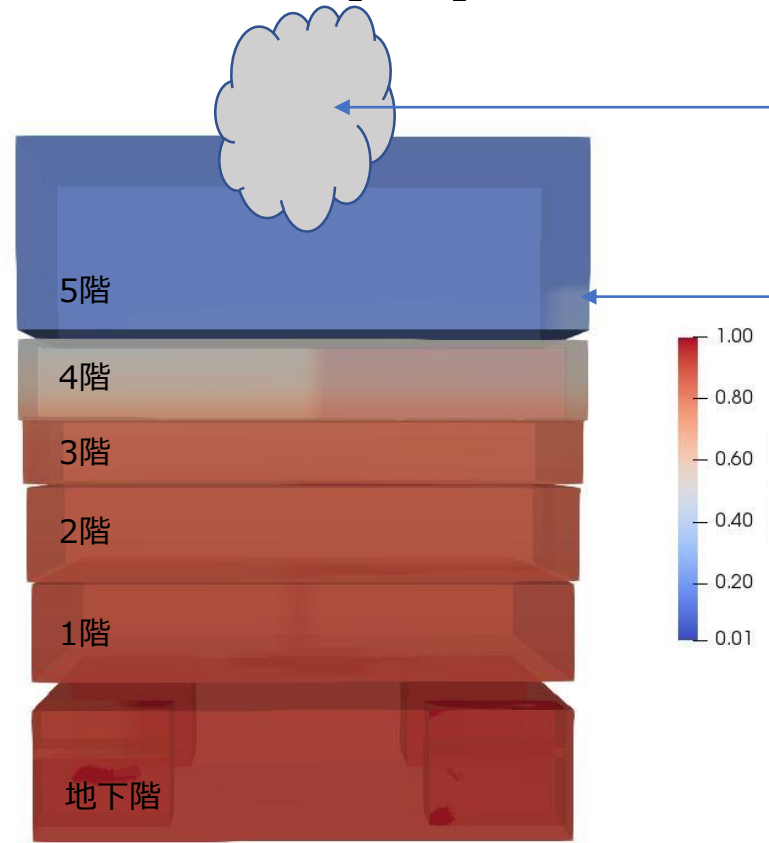
緑：超解像処理映像や現地調査による結論[1]
 赤：解析結果に基づく仮説

[1] 原子力規制委員会, “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～”, 2021年3月
 FDR2022 (2022年10月14日～16日, 福島県楡葉町J-village)

解析結果に基づく考察 爆発メカニズムに関する仮説（3）



超解像処理された爆発映像 [1]



爆発時の空気体積割合の解析結果
(シールドプラグ経由漏えいを想定)

- 残存した可燃性ガスが燃え続け、原子炉建屋の屋根と思われる巨大な物体が垂直に約200m吹き上げられた。

- 5階では酸素欠乏状態であったために、複数回の爆発後も可燃性ガスが残っていた。

緑：超解像処理映像や現地調査による結論[1]
赤：解析結果に基づく仮説

[1] 原子力規制委員会, “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～”, 2021年3月
FDR2022 (2022年10月14日～16日, 福島県楡葉町J-village)

まとめ

- 3号機原子炉建屋爆発時の漏えいガス分布を、事故後の調査結果等に基づいて2つの漏えい箇所を想定してシミュレーションした。
- MSIV室経由の漏えいを想定したケースでは、原子炉建屋全体が燃烧可能となった。シールドプラグ経由の漏えいを仮定したケースでは、5階が酸素欠乏により燃烧不可となった一方で、4階以下は燃烧可能となり、特に4階は水素濃度が高くなった。
- 超高解像度処理された爆発時の映像等とシミュレーション結果の比較から、シールドプラグ経由の漏えいを想定したケースの方が、複数回の爆発や噴煙の上昇をより良く説明できることが分かった。
- 上記の検討に基づき、爆発の進展メカニズムに関する仮説を提案した。