

# 東京電力福島第一原子力発電所4号機 における水素爆発の感度解析

---

**21<sup>st</sup> Mar. 2019**

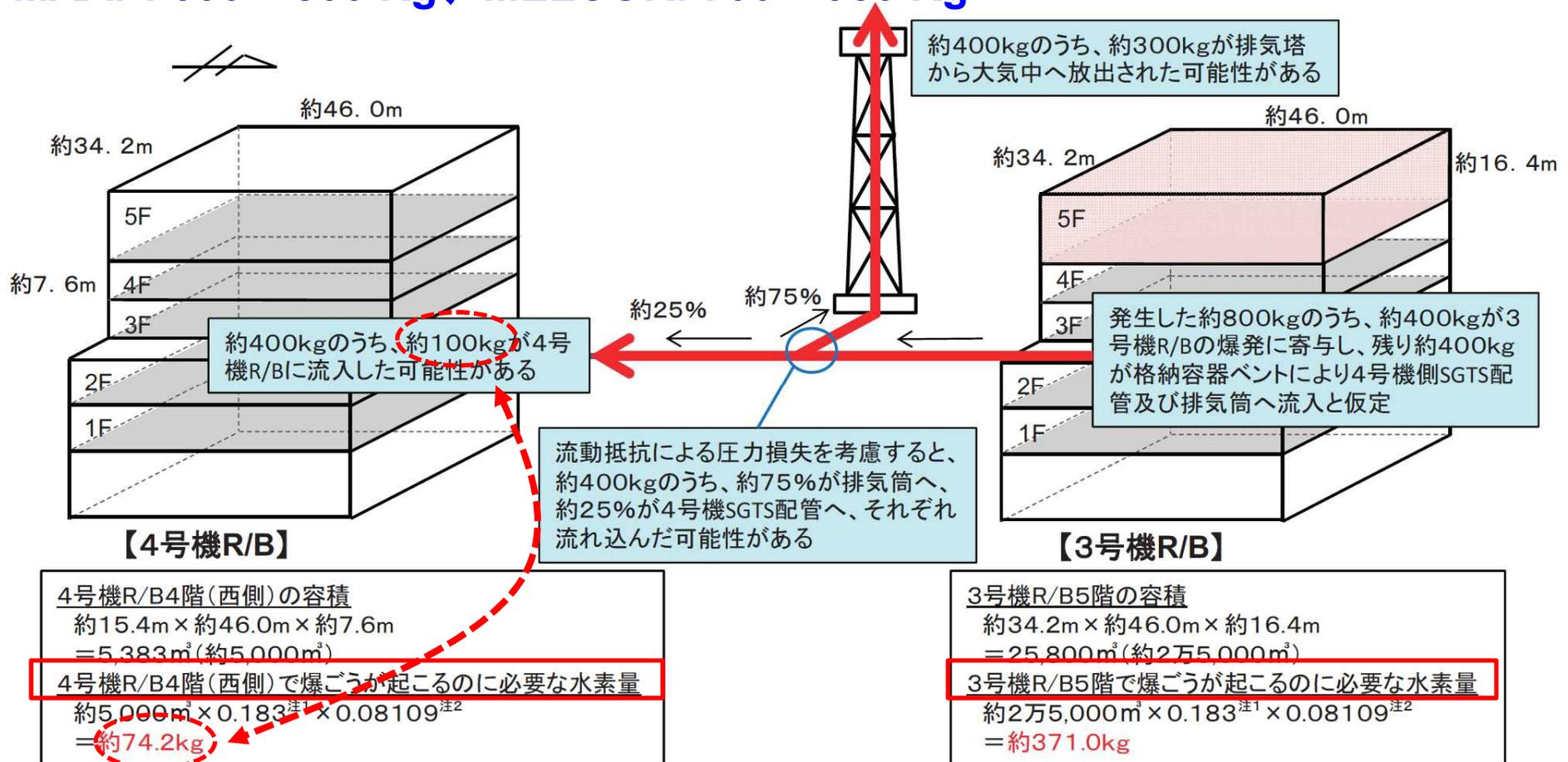
○西村 健、堀田 亮年

原子力規制庁  
長官官房技術基盤グループ

# 政府事故調査報告書における3号炉及び4号炉における水素発生量の評価

## 水素の発生量 (3号炉)

MAAP: 600 – 800 Kg、MELCOR: 700 – 950 Kg



注1 0.183 = 爆轟が起こり得るドライ条件での最小爆轟濃度 (機械工学便覧)

注2 0.08109 = 30°C、大気圧の条件の水素の密度

出展: 政府事故調 東京電力福島原子力発電所における 事故調査・検証委員会 報告書 (平成24年7月) より 抜粋し、一部加筆

# AICCに基づく燃焼前後のエネルギー保存から推定した水素量

AICC: Adiabatic Isochoric Complete Combustion

## 水素爆轟(4階、5階)を仮定した場合

- 原子炉建屋4階、5階にほぼ均質に水素が蓄積したと仮定し、水素爆轟が起こるには水素濃度(ドライ)18.3%となる水素量(約483kg)が必要となる。

## 水素燃焼(5階) + 水素爆轟(4階)を仮定した場合

- 水素燃焼による圧力の上昇を考慮すると、原子炉建屋5階は水素濃度11.9%となる水素量(約298kg)の燃焼により、外壁の破壊が考えられる。
- 一方、原子炉建屋4階は水素燃焼では外壁の破壊には至らず、外壁の破壊には水素爆轟が起こる水素濃度18.3%(水素量約114kg)が必要となる。
- 合計水素量約412kg以上が必要。

保守的に見積もって、**少なくとも約400kg**の水素蓄積が必要と考えられる。

- 容積の仮定 =  $26,000(5階) + 6,000(4階西側) = 32,000m^3$

出展:原子力規制庁 4号機における水素爆発(水素蓄積量等)について 事故分析検討会(第5回)資料2  
(平成25年11月)より抜粋し、一部加筆

## 4号機原子炉建屋における水素爆発に関する現地調査結果

OSGTS配管等の放射線量率測定結果及び現地調査による原子炉建屋の損傷状況から以下の点について整理される。

1) SGTS配管については、フィルタが設置されたSGTストレインの放射線量率の測定結果から、出口側(排気筒側)から入口側(原子炉建屋側)に放射能を含む気体が逆流したことが確認された。

2) SGTS配管が接続されている排気ダクトは、2階東側で原子炉建屋内に引き込まれ、1階方向と3階方向へ排気ダクトが敷設されているが、1階方向の排気ダクトは損傷が軽微である一方、3階方向の排気ダクトの損傷は激しく、排気ダクトを介して水素は上階に広がったと考えられる。

3) 原子炉建屋の床・天井・壁の損傷状況から、4階南西部の天井と床に大きな損傷があり、さらに3階北西部の床に比較的大きな損傷が確認されることから、少なくともこの2箇所付近で強い爆発があったものと考えられる。

また、5階についても東西及び南側の壁面並びに屋根が滅失していること、床の下方への変形が確認されることから、爆発の可能性が考えられる。

# 目 的

## <本発表での着目点>

爆轟の発生を前提としない条件において

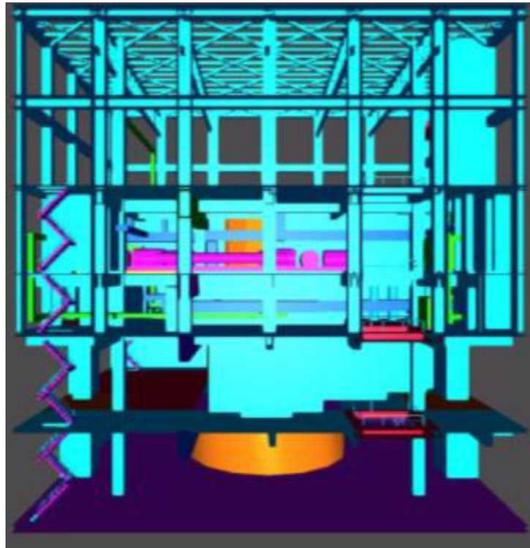
- 4号機の原子炉建屋に流入した水素は「どこに」、「どれだけ」拡散するか？
- 原子炉建屋に拡散した水素混合気によってどのように原子炉建屋の破壊に至るか？

## <目指すところ>

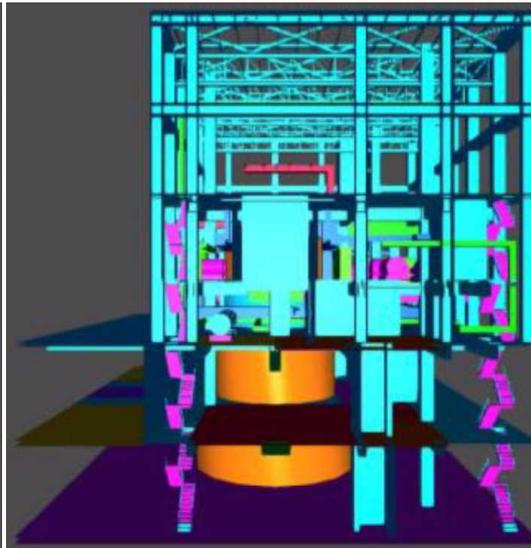
解析コードを利用した数値実験から下記等の推定

- 4号機の原子炉建屋について
  - 爆発に寄与した水素量
  - 建屋の破壊に至る可能性がある着火位置
- 3号機から4号機へ越流した水素量
- 3号機で発生した水素量

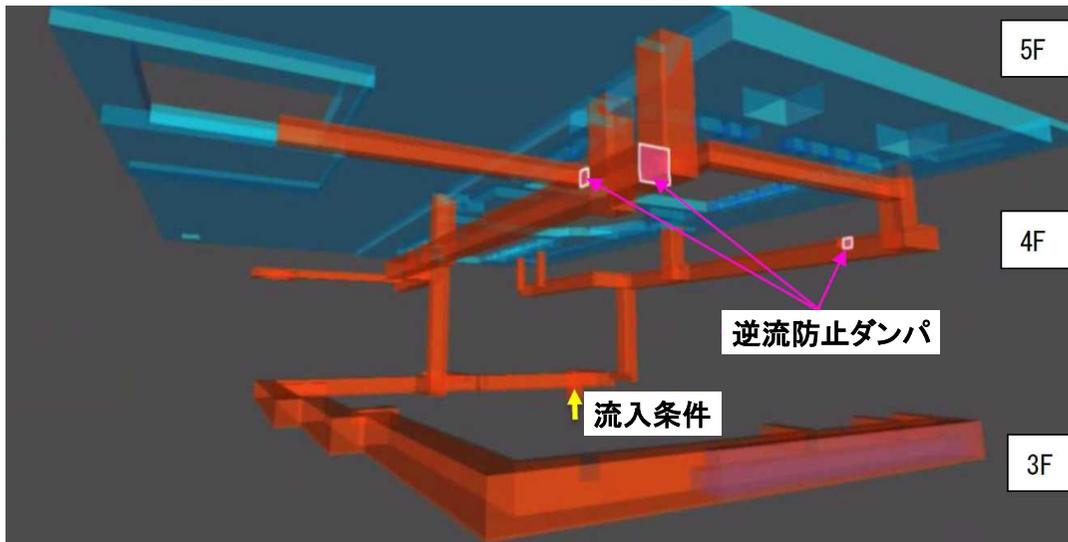
# 解析モデル



西側から見た図



北側から見た図



排気ダクトモデル

＜解析コードと計算体系＞

解析コード：**GEXCON FLACS**

メッシュサイズ：**0.5m固定**

要素数：**約150万要素**

＜主要な解析条件の設定＞

排気ダクト内：**流動・燃焼を考慮**

内部構造物：**剛体(変形無視)**

外壁・天井：**耐圧パネル**

(耐圧&質量の設定により疑似的に構造の破壊を模擬可能)

耐圧パネルの設定値[barg]

3階：**12.09～68.96**

4階：**5.90～16.69**

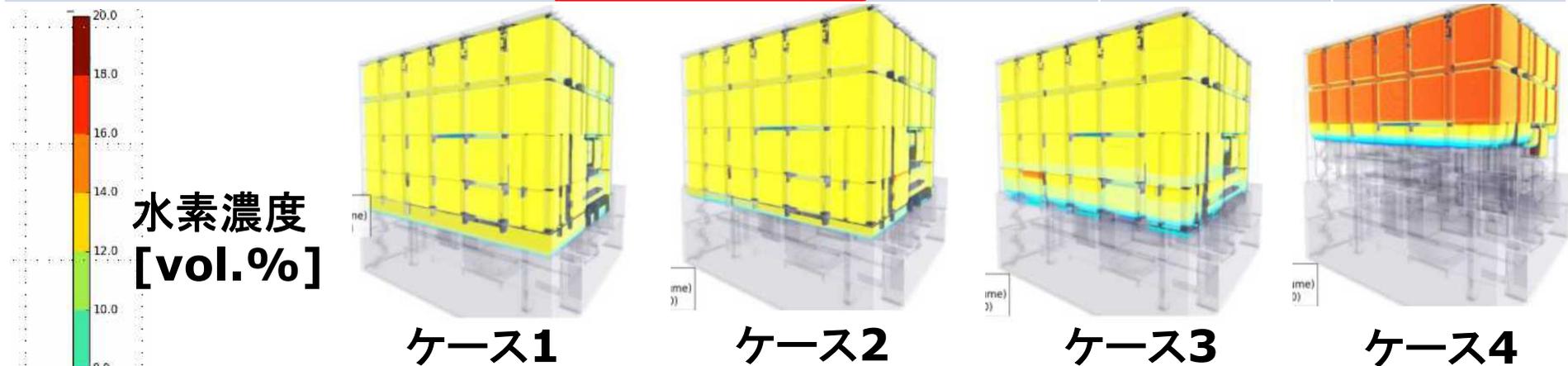
5階：**1.92～4.61**

天井：**0.5(天井板詳細不明のため仮定)**

建屋からの漏洩：**5階側壁に昇圧0.5bargを超えない程度に調整した開口部を仮定**

# 予備解析～水素拡散解析条件～

	ケース1 (ベースケース)	ケース2 (感度解析)	ケース3 (感度解析)	ケース4 (感度解析)
混合気の水素濃度 (vol.%)	50	70	50	70
流入する水素量 (kg)	500※	←	←	←
流入時間 (秒)	500	500	1,500	1,500
混合気の質量流量 (kg/s)	15.31	7.13	5.10	2.38
流入後静定期間 (秒)	あり(500秒)	←	←	←

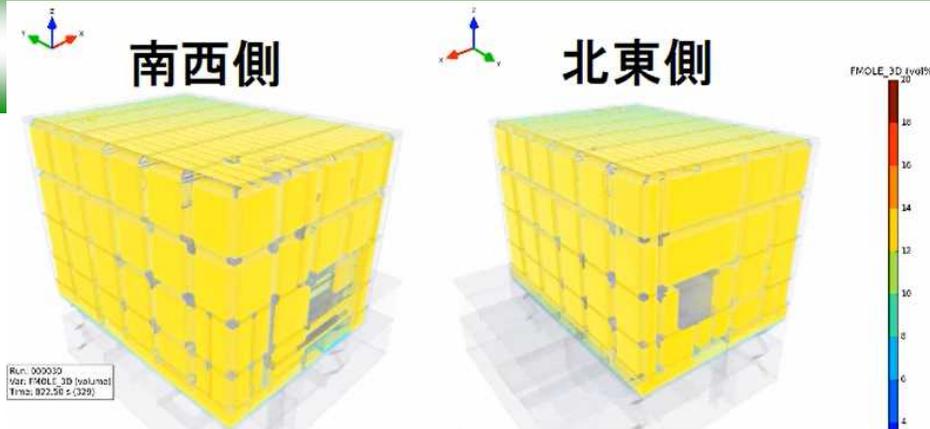


静定期間終了後の水素濃度分布

ケース4の水素濃度分布は1号機及び3号機で推定されるシナリオに近い

※「野崎ら、1E13、2017秋の大会」の流入水素量の推定値を参考に多めの500kgを仮定  
 今後、水素量を減らした条件(平均水素濃度が10%を下回らない範囲)での検討を継続する (6)

# 水素濃度(vol.%)拡散

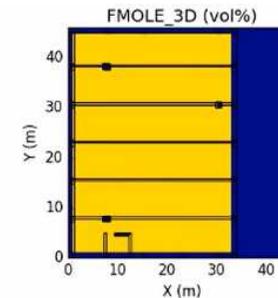
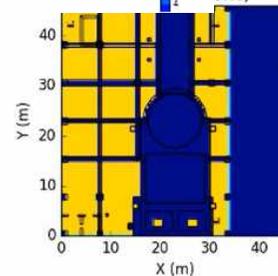
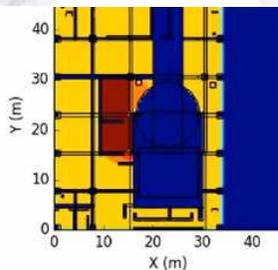


＜ベースケースの解析結果＞  
 流入中、主に3階に高い濃度が分布  
 流入後静定期間(500秒)でほぼ混合

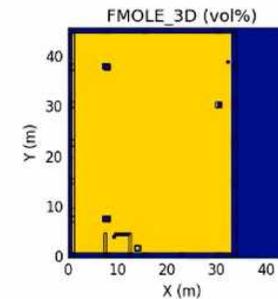
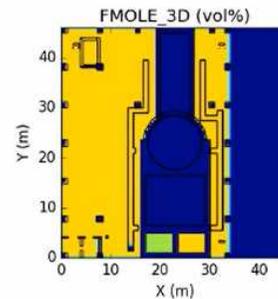
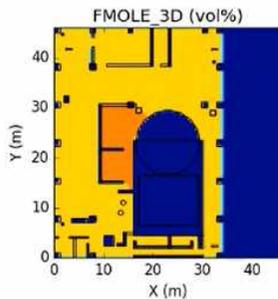
Run: 000030  
 Var: FMOLE\_3D (vol.%)  
 Time: 822.58 s (329)

注このページでは動画により解析結果が示されました。

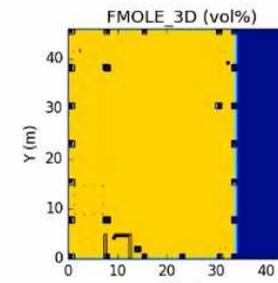
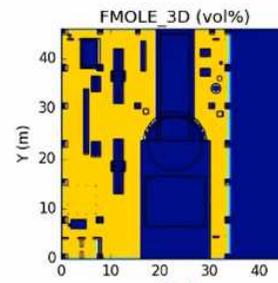
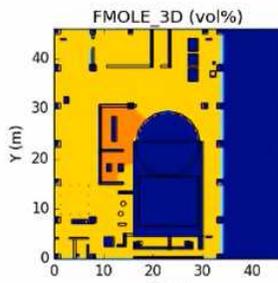
天井  
付近



中央  
付近



床  
付近

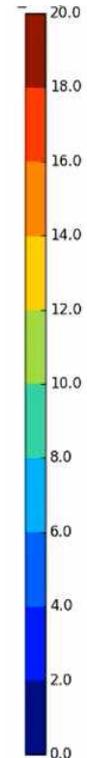


3階

4階

5階

水素濃度  
[vol.%]

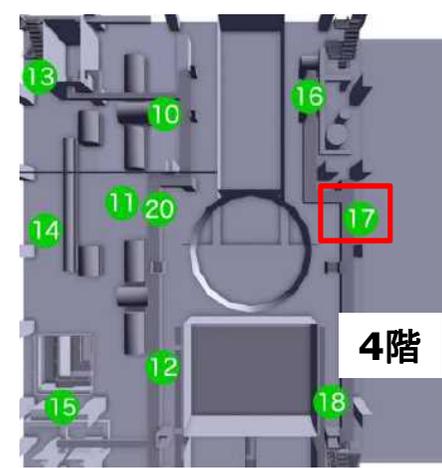
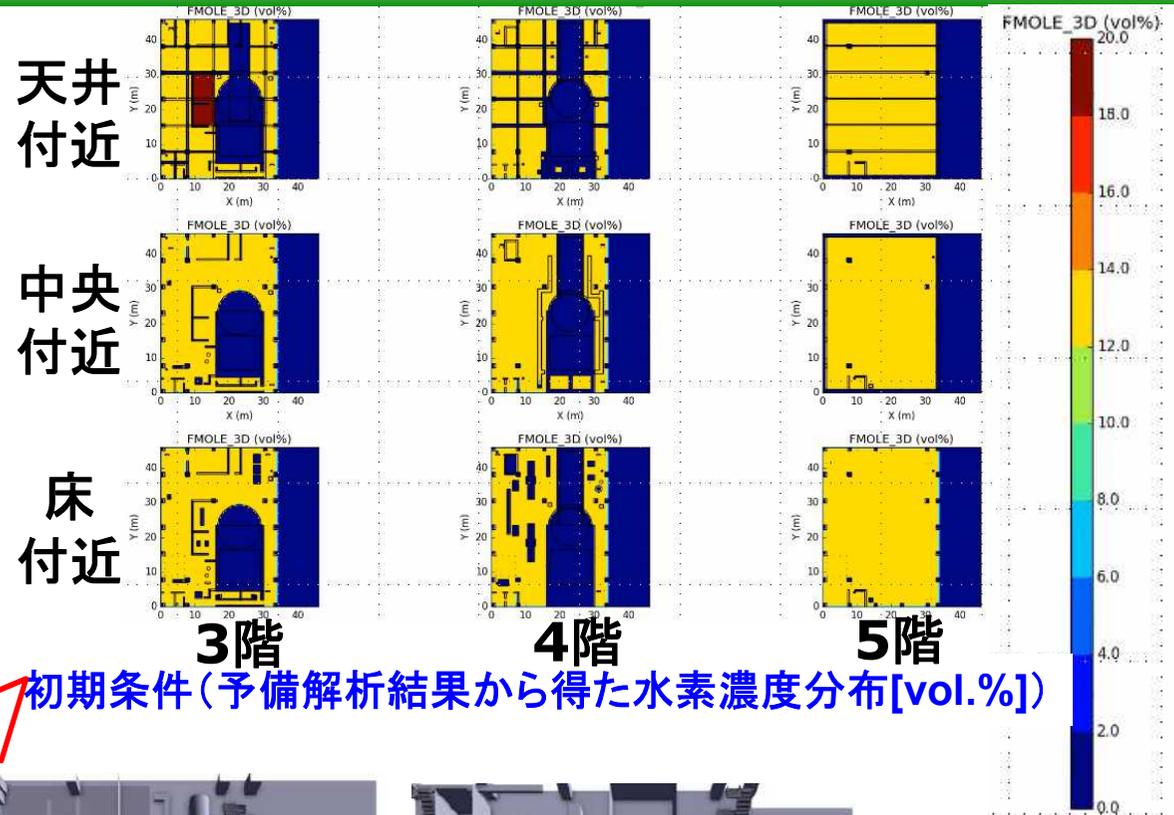




# 爆発解析～解析ケースと着火位置～

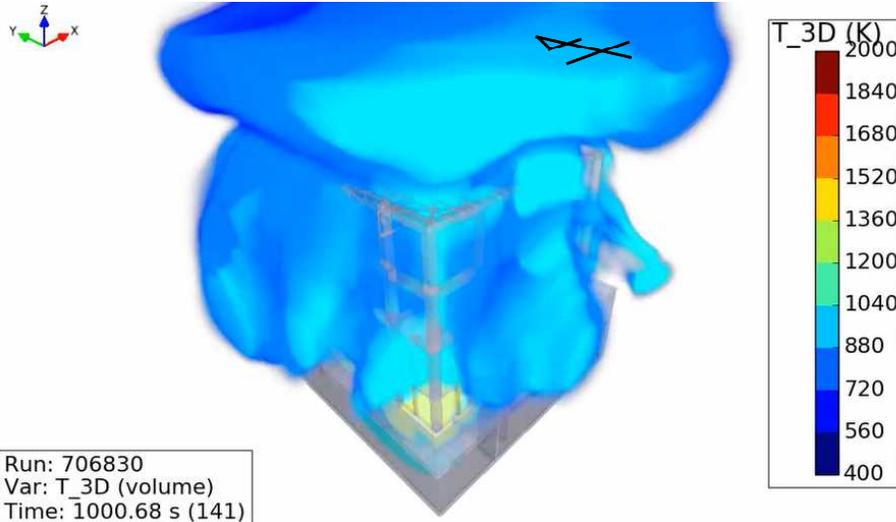
## 着火位置のリスト

#	フロア	方角	鉛直位置
1	3階	南西方向	天井付近
2		北東方向	床付近
3		北西方向	中央付近
4		南東方向	中央付近
5		北側区画	天井付近
6		中央付近	床付近
7		西側区画	床付近
8		南側区画	床付近
9		東側区画	床付近
10	4階	北側区画	床付近
11		中央付近	床付近
12		南側区画	中央付近
13		北西方向	床付近
14		西側区画	床付近
15		南西方向	床付近
16		北東方向	中央付近
17		東側区画	天井付近
18		南西方向	床付近
19	3階	ダクト内	ダクト中央
20	4階	ダクト内	ダクト中央

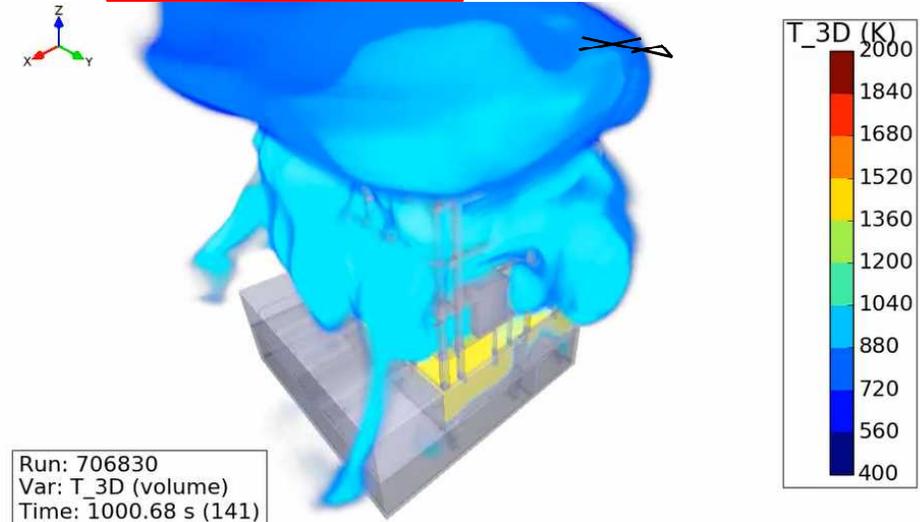


# 爆発解析結果（最大圧力、温度）、ケース#17

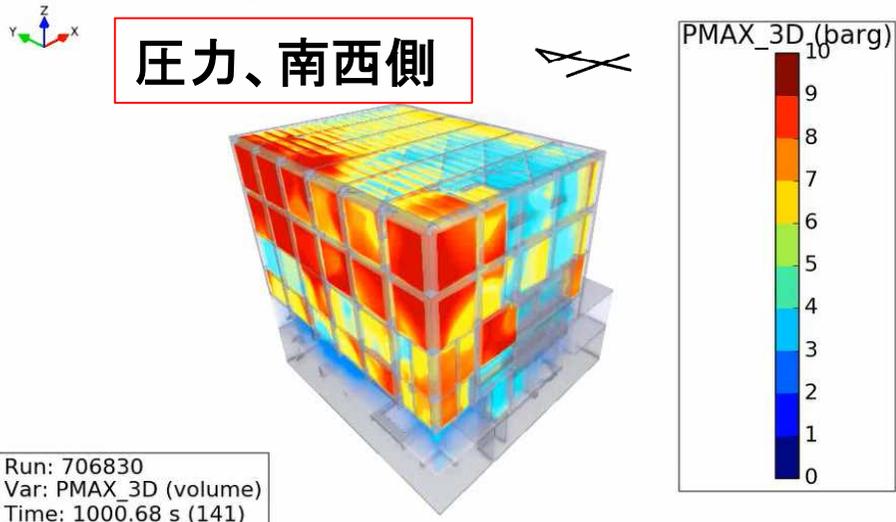
温度、南西側



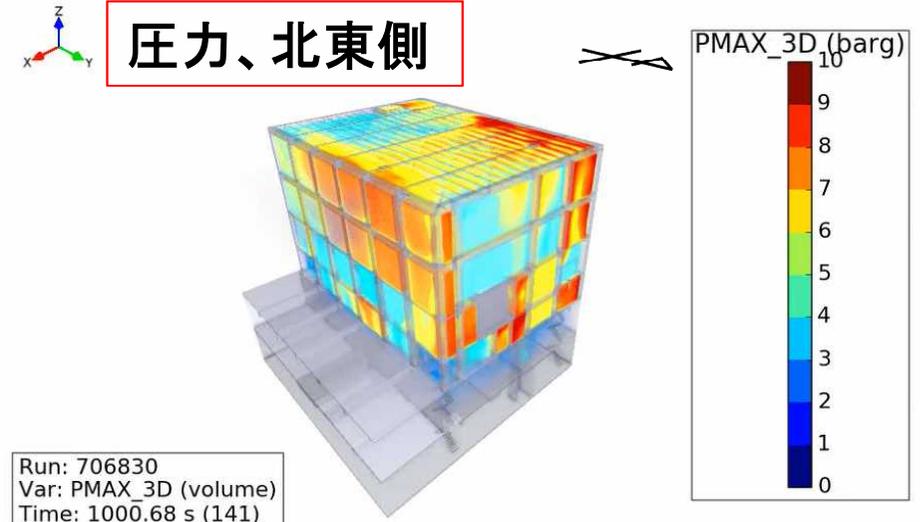
温度、北東側



圧力、南西側



圧力、北東側

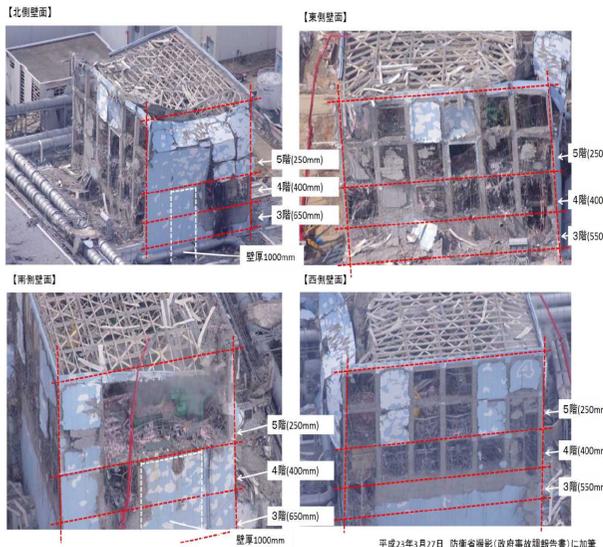


注)このページでは動画により解析結果が示されました。

# ①着火位置の違いによる耐圧パネルの開放結果

**黄色**: 全ての壁が破損  
**緑**: 半分以上の壁が破損

**5階壁がほぼ全面破壊  
実態と異なる  
(ex.北側壁は崩落していない、部分的に残る壁がある)**



出展: 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分析 中間報告書(平成26年10月)より抜粋

階と方角別の耐圧パネル開放結果

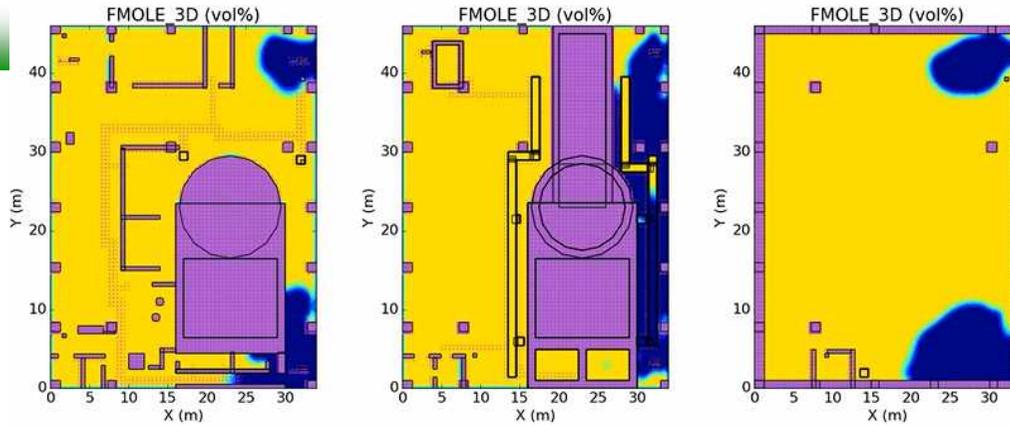
階数	着火位置	3階				4階				5階				天板
		南	北	西	東	南	北	西	東	南	北	西	東	
総数		3	5	6	6	3	5	6	6	10	10	12	15	30
Case1	3F①	0	0	1	2	2	3	4	5	10	10	12	15	30
Case2	3F②	0	0	1	0	3	1	4	5	10	10	12	15	30
Case3	3F③	0	0	0	2	2	0	2	5	10	10	12	15	30
Case4	3F④	0	0	2	0	2	4	4	4	9	10	12	15	30
Case5	3F⑤	0	0	0	1	2	1	3	5	10	10	12	15	30
Case6	3F⑥	0	0	1	1	2	3	3	4	10	10	12	15	30
Case7	3F⑦	0	0	0	5	2	3	3	5	10	10	12	15	30
Case8	3F⑧	0	0	0	1	2	4	4	4	10	10	12	15	30
Case9	3F⑨	0	0	1	0	2	1	3	5	10	10	12	15	30
Case10	4F⑩	0	0	1	5	2	2	5	6	10	10	12	15	30
Case11	4F⑪	0	0	0	5	2	2	3	5	10	10	12	15	30
Case12	4F⑫	0	0	0	5	1	3	4	5	10	10	12	15	30
Case13	4F⑬	0	0	0	2	2	0	2	5	10	10	12	15	30
Case14	4F⑭	0	0	0	5	2	3	2	5	10	10	12	15	30
Case15	4F⑮	0	0	1	4	0	3	3	6	10	10	12	15	30
Case16	4F⑯	0	0	1	1	3	2	4	4	10	10	12	15	30
Case17	4F⑰	0	0	2	1	2	0	6	5	10	10	12	15	30
Case18	4F⑱	0	0	3	0	2	4	4	4	10	10	12	15	30
Case19	4F⑲	0	0	1	0	3	1	3	5	10	9	12	15	30
Case20	4F⑳	0	0	3	3	1	3	2	5	10	8	12	15	30

着火位置のリスト

#	フロア	方角	鉛直位置
1	3階	南西方向	天井付近
2		北東方向	床付近
3		北西方向	中央付近
4		南東方向	中央付近
5		北側区画	天井付近
6		中央付近	床付近
7		西側区画	床付近
8		南側区画	床付近
9		東側区画	床付近
10	4階	北側区画	床付近
11		中央付近	床付近
12		南側区画	中央付近
13		北西方向	床付近
14		西側区画	床付近
15		南西方向	床付近
16		北東方向	中央付近
17		東側区画	天井付近
18		南西方向	床付近
19	3階	ダクト内	ダクト中央
20	4階	ダクト内	ダクト中央

全て破損した4階壁の方角は着火位置と反対方向に生じる傾向が見られる(黄色vs赤枠)

目次  
注)このページでは動画により解析結果が示されました。



感度ケース(初期乱れなし)

Run: 614031  
Var: FMOLE\_3D  
Time: 1450.23 ms (231)  
Plane: XY, Z=19.75m

Run: 614031  
Var: FMOLE\_3D  
Time: 1450.23 ms (231)  
Plane: XY, Z=26.25m

Run: 614031  
Var: FMOLE\_3D  
Time: 1450.23 ms (231)  
Plane: XY, Z=37.75m

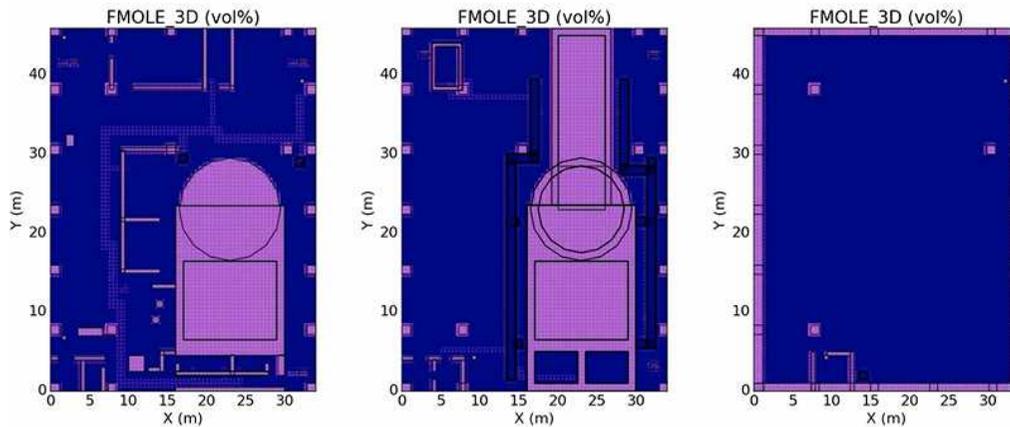
水素濃度  
[vol.%]



## ②初期乱れの影響

燃焼モデルに影響を与える乱れの有無に着目した感度解析を実施

13%一定の水素濃度、  
乱れゼロを初期条件に  
設定



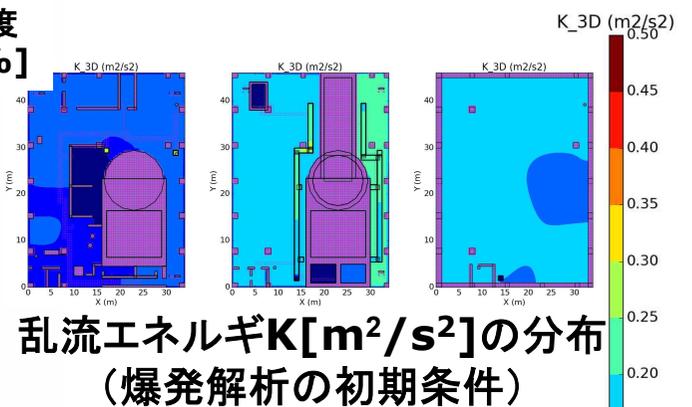
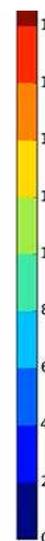
ケース#17(初期乱れあり)

Run: 706830  
Var: FMOLE\_3D  
Time: 1000693.69 ms (143)  
Plane: XY, Z=19.75m

Run: 706830  
Var: FMOLE\_3D  
Time: 1000693.69 ms (143)  
Plane: XY, Z=26.25m

Run: 706830  
Var: FMOLE\_3D  
Time: 1000693.69 ms (143)  
Plane: XY, Z=37.75m

水素濃度  
[vol.%]



乱流エネルギーK[m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]の分布  
(爆発解析の初期条件)

予備解析のベース  
ケース結果を初期条  
件に設定

# まとめ

## ＜水素拡散解析＞

- 流量が少ない場合には、主に5階に水素濃度が分布する傾向が得られた。
- 流量が多い場合には、3階から5階におよそ13%程度の水素濃度が平均的に分布する結果となった。
- 流入する混合気の空気濃度が増えると、体積・質量ともに増加するため、建屋への混合気流入によって建屋内圧が昇圧する結果となった。

## ＜爆発解析＞

- 5階壁の破壊は着火位置によらずほぼ全損する傾向があった。
- 4階壁は着火位置によって破壊される壁の位置がばらつき、着火位置と反対の方角の壁が全損する傾向があった。
- 3階壁の破壊される程度は他階と比べて小さくなる傾向があり、3階で着火した場合に比べ4階で着火したケースの方が3階壁の破壊が多くなる傾向があった。
- 建屋内の初期乱れの有無によって、火炎伝播速度に有意な違いがあった。このために、火炎の伝播と爆発の挙動に差異が生じ、初期乱れなしでは壁の破壊には至らないが、初期乱れありでは壁の破壊に至る結果となった。

## 解析における今後の課題

- 3階壁の破損は、爆発によるものなのか、それとも上階の壁の破壊に伴う二次的な破損なのか？
- 原子炉建屋の気密性は事故発生時点の実力値（開口部の有無含め）としてどの程度だったか？
- 建屋の内部構造は一般的な図面と事故時点の設備等の配置にどの程度の差異があったか？
- 天井の作りはどのようになっていたか？
- 3号機から越流した水素が4号機建屋へ流入する過程で、どの程度空気と希釈されたか、これをどう評価することが妥当か？
- SGTS系統の配管等の現実的な圧力損失を考慮した場合に、越流した水素が排気ダクトを逆流する際の質量流量はどの水準とするのが妥当か？
- 5階壁が部分的に破損した実態をどのように説明できるか？

**ご清聴ありがとうございました**