

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13回会合

議事次第

1. 日 時 令和2年9月3日(木) 14:30 ~ 18:00
2. 場 所 原子力規制委員会 13階会議室A
3. 議 題
  - (1) 福島第一原子力発電所3号機の水素爆発について
  - (2) その他
4. 配布資料
  - 資料1: 議事次第
  - 資料2: 福島第一原子力発電所3号機の水素爆発
  - 資料3: 現地調査の実施状況について
  - 資料4: 参考資料等
    - ・原子炉建屋の構造等
  - 資料5: これまでの事故分析検討会における論点の整理
  - 資料6-1: 福島第2原子力発電所1号機の格納容器圧力挙動について[東京電力ホールディングス株式会社]
  - 資料6-2: 福島第一原子力発電所3号機のRCIC運転中の原子炉圧力挙動について[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3号機の水素爆発

～ 複数段階事象の可能性について～

2020年9月3日

説明者 原子力規制特別国際交渉官

安井 正也

## 1. 1号機と3号機の水素爆発

- 2つの爆発は、爆発の規模及びその様相が大きく異なる。
- 様相の違いは、原子炉建屋の構造の相違によるとの見解が多い。

## 2. 政府事故調関連部分の要約

(本文編P67付近)

- 5階頭部付近で着火
- 4階以下にも爆風が広がった
- 同北西部付近で爆轟に至る
- 垂直方向に黒色爆煙を吹き上げらせるとともに、水平方向に壁を吹き飛ばす

(本文編P47)

- 建屋構造の相違によって、1号機と3号機の爆発状況に相違が生じた可能性



○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(政府事故調)最終報告書(2012.07.23)より抜粋  
(p.68-69)

(5) 3号機R/Bの爆発

a 3号機R/B爆発の原因は、可燃性ガスによるものと考えられること

(a) 本件爆発及び損傷の状況

中略

中略

3号機R/Bの損傷状況を見ると、3号機R/B5階東側はコンクリート柱が残存し、床も原形をとどめているのに対し、R/B5階西側はコンクリート柱も全て滅失し、R/B4階北西側は垂直方向のコンクリート柱、天井や水平方向に走るコンクリート製支柱が滅失し、同フロア内にあった設備の一部が建屋外側方向へ露出するなど、3号機R/B北西側の5階及び4階が特に激しく損傷している。そうすると、例えば3号機R/B5階に水素が蓄積されていたところ、5階南東部付近で着火し、同空間に蓄積していた水素に燃焼波が伝ばする中で、音速を超え、北西部付近で爆ごうに至り、5階床が抜けるなどして、4階以下にも爆風が広がっていった可能性がある<sup>144</sup>。

いずれにせよ、3号機R/B内で爆発が生じた際、5階壁面まで鉄筋コンクリート造りであった3号機R/Bは、水平方向にかかる負荷への耐性が1号機R/Bよりも強いため、1号機R/B爆発のときよりも大きな圧力をR/B内に蓄積し、その後建屋が負荷に耐えられず、構造物を生成するコンクリート等もろとも垂直方向に黒色爆煙を吹き上げらせるとともに、水平方向に壁を吹き飛ばして、天井及び周囲の5階部分及び4階部分の一部の壁を消失させ、その際、水平方向への爆発によるエネルギーの発散は、南方向よりも北方向の方が強かったと考えられる。

中略

<sup>144</sup> もっとも、R/B4階部分以下にも水素が蓄積し、同様の爆発を引き起こした可能性も否定できない。

○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(政府事故調)最終報告書(2012.07.23)より抜粋  
(p.47)

(3) 1号機R/Bの爆発

a 1号機R/B爆発の原因は、可燃性ガスによるものと考えられること

(a) 本件爆発及び損傷の状況

中略

中略

すなわち、1号機R/Bは、5階部分が、鉄製骨組みに鉄板をはめ込んだだけの壁となっており、3号機R/Bと比して、R/B周囲の壁が水平方向にかかる負荷に強くない構造となっている。したがって、このような建屋構造の相違によって、1号機と3号機の爆発状況に相違が生じた可能性がある。

そうすると、1号機R/Bについて、3号機R/Bとの構造上の相違から、R/B内で爆発が生じた際、5階部分の周囲の壁が水平方向に広がる圧力に耐えきれずに吹き飛ばされ、R/B内から圧力が大きく抜けたため、天井の一部が吹き飛ばされることなく、支柱が破損するなどして脱落した可能性がある<sup>108</sup>。

<sup>108</sup> もちろん、1号機R/Bの爆発の方が、3号機よりも、爆発そのものの規模が小さかった可能性も否定できない。

### 3. 本日の主要論点

3号機の水素爆発は、1号機のような単一の爆発事象ではなく、2段階以上の複数段階事象だったのではないか。

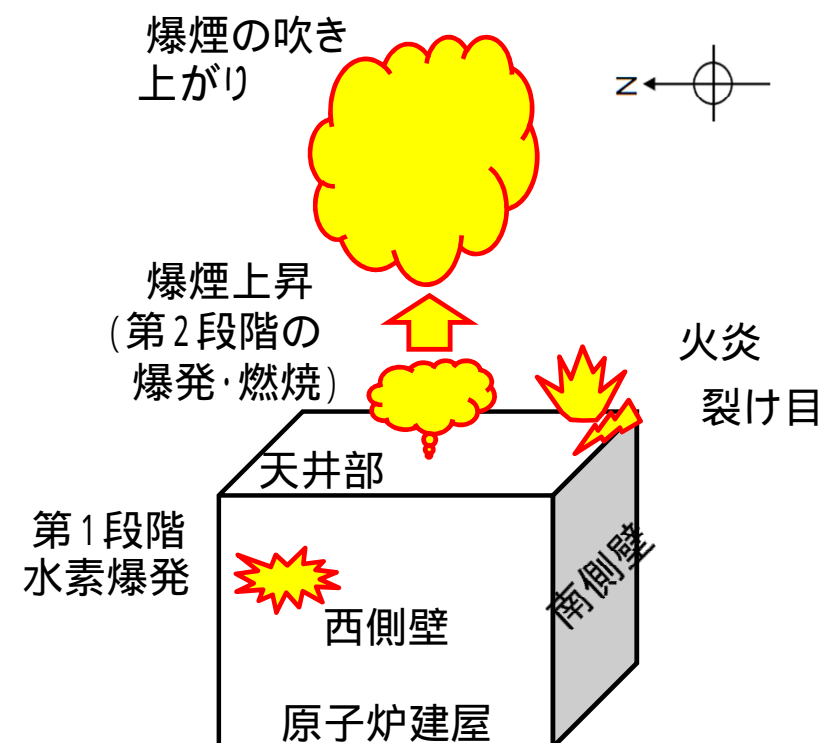
## 4. 複数段階事象仮説

RB内で北西部に大きな損傷を与える第1段階の水素爆発(RB4階の可能性もある。)

RB南東側天井部に裂け目が生じ、火炎発生

これとは別に、RB中央天井部から第2段階の爆発・燃焼による爆煙上昇

残存水素が燃焼しつつ爆煙を吹き上げる



## 5. 検証項目

- 5 - 1) 3号機水素爆発のビデオ画像
- 5 - 2) 3号機破損状況
- 5 - 3) 3号機3階天井部梁の折損
- 5 - 4) 凝縮波の有無
- 5 - 5) 地震計記録

## 5 - 1) 3号機水素爆発のビデオ画像(1 / 2)

< プロジェクト投影資料を参照 >

映像提供者との関係で画像についてはプロジェクト投影としている。

$t = -0.066 \text{ s}$  : 見える範囲では異常は見当たらない。

$t = -0.033 \text{ s}$  : 既に北西方向に少しRBが歪み、RBの高さも下がっているように見える。

$t = 0 \text{ s}$  : 明確に炎が出ている。この炎は、 $t = 0.429 \text{ s}$  (14コマ)まで映っている。

爆煙の上昇開始時点は、 $t = 0 \text{ s}$ を含めてそれ以降。

$t = 0.033 \text{ s}$  及び  $0.066 \text{ s}$  に、スタック左側にも小さく炎が映っている様にも見えるが確定的なことは言えない。

## 5 - 1) 3号機水素爆発のビデオ画像(2 / 2)

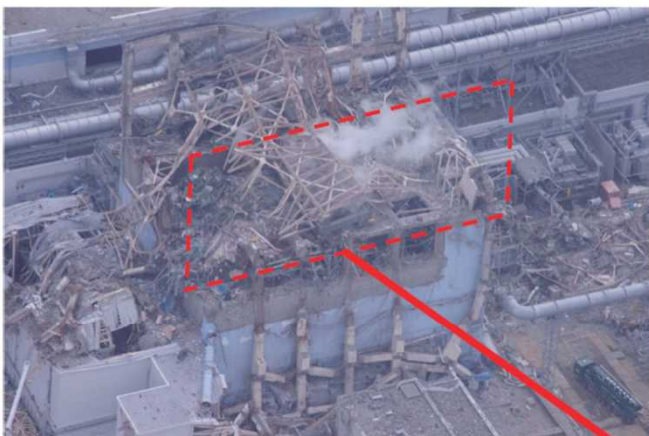
- 爆煙は、濃淡二色の灰色。上昇する爆炎は濃灰色。薄い方は低い位置にとどまっている。
- 色の薄い爆煙は、1号機の場合よりも更に低い位置を占め続けている。
- 色の濃い爆煙の上昇速度は約 75 m/s 程度。

## 5 - 2) 3号機破損状況

- 3号機の破損が北西部で激しい。
- 3号機5階東側の5階柱が上部で西側に折れ曲がっている。

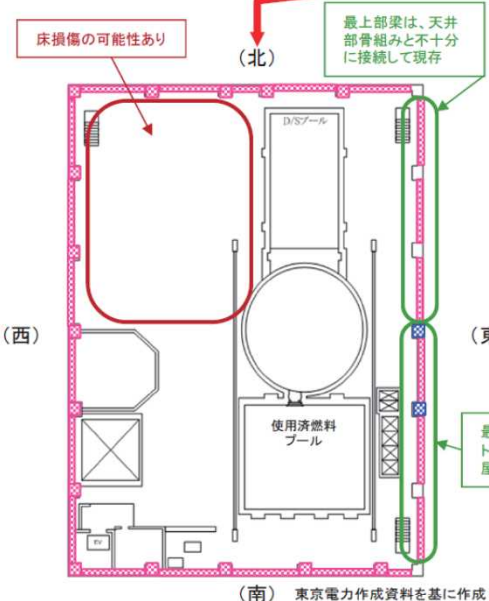


【西側壁面】

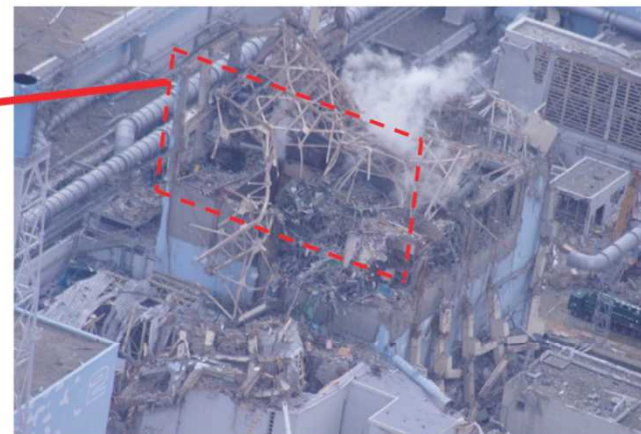


平成23年3月27日 防衛省撮影

【5階】



【北側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

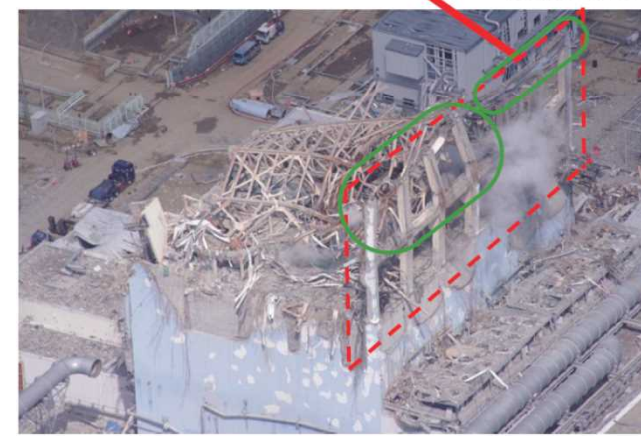
## 3号機RB の損傷状況

【南側壁面】



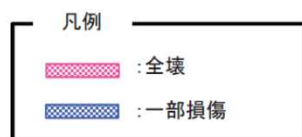
平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】

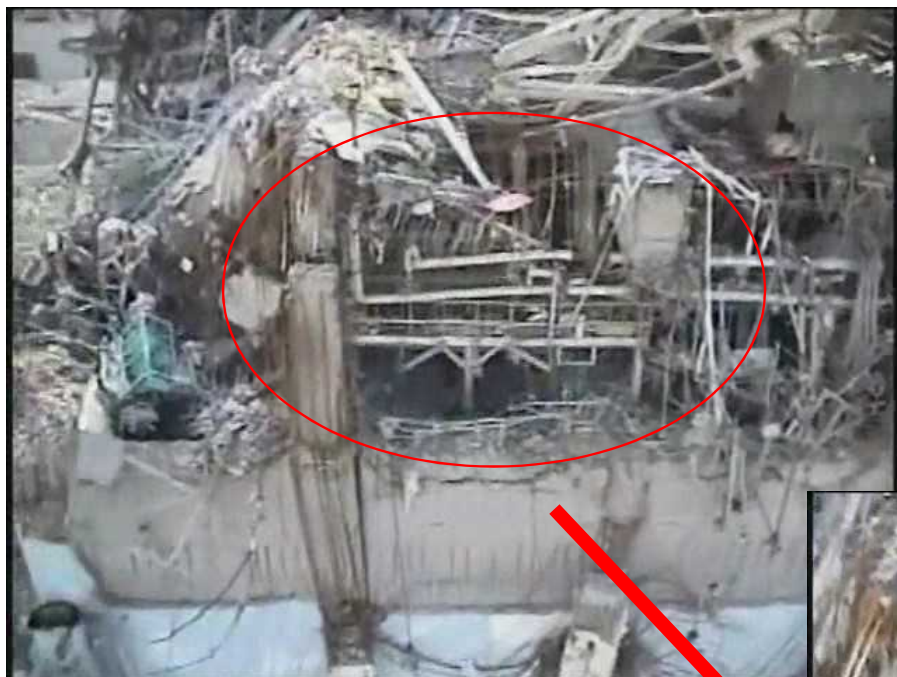


平成23年3月27日 防衛省撮影

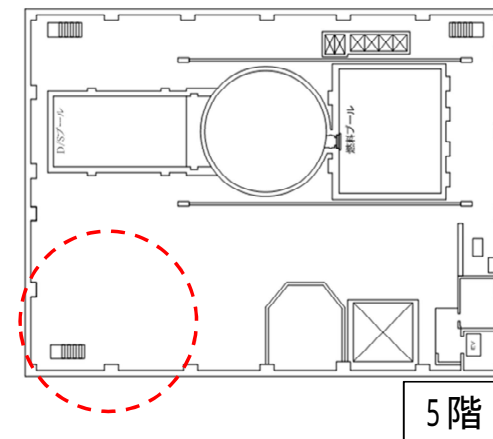
東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会（政府事故調）最終報告書（2012.07.23）より抜粋



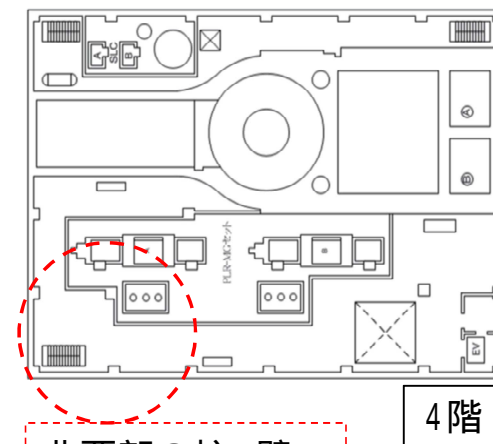
## ○3号機原子炉建屋 北西部(5階、4階)の損傷



柱、壁の全壊。



5階

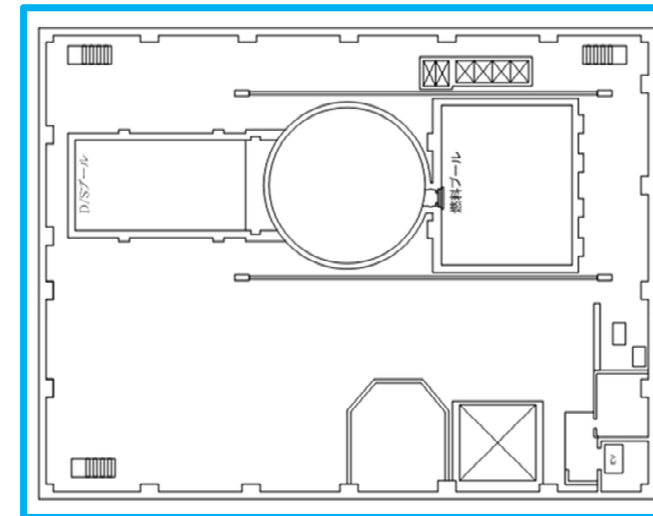
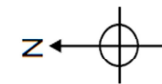


4階

北西部の柱、壁、  
床が全壊。

東京電力ホールディングス株式会社HP  
T-Hawkからの撮影映像(1号、3号、4号機)より抜粋  
<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110416-02j.html>





3号機原子炉建屋5階

2014/1/31 東電クレーンカメラ

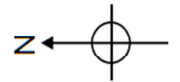


## 3号機原子炉建屋北西部の損傷状況

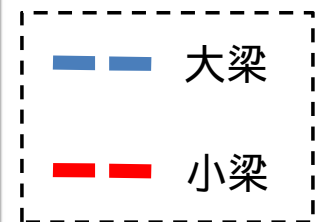
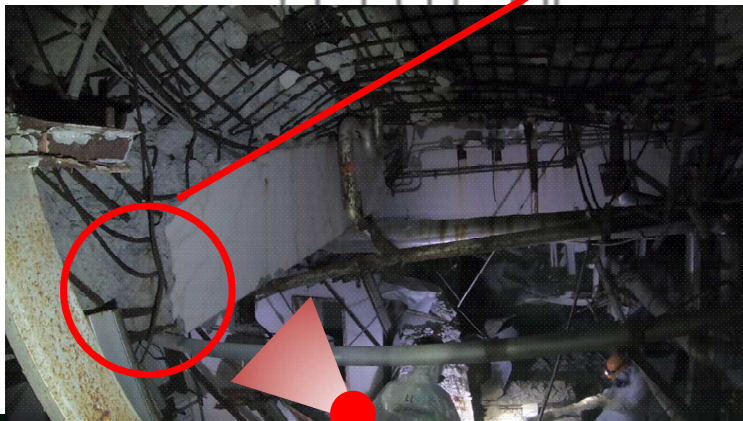


平成23年3月15日東京電力撮影を一部加工

## 5 - 3) 3号機3階天井部梁の折損



3号機原子炉  
建屋 3階  
[小梁]



12/26の検討会において撮影箇所を修正しました。

令和元年12月12日原子力規制庁撮影



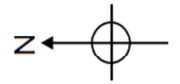
## 3号機原子炉建屋 3階 [小梁]



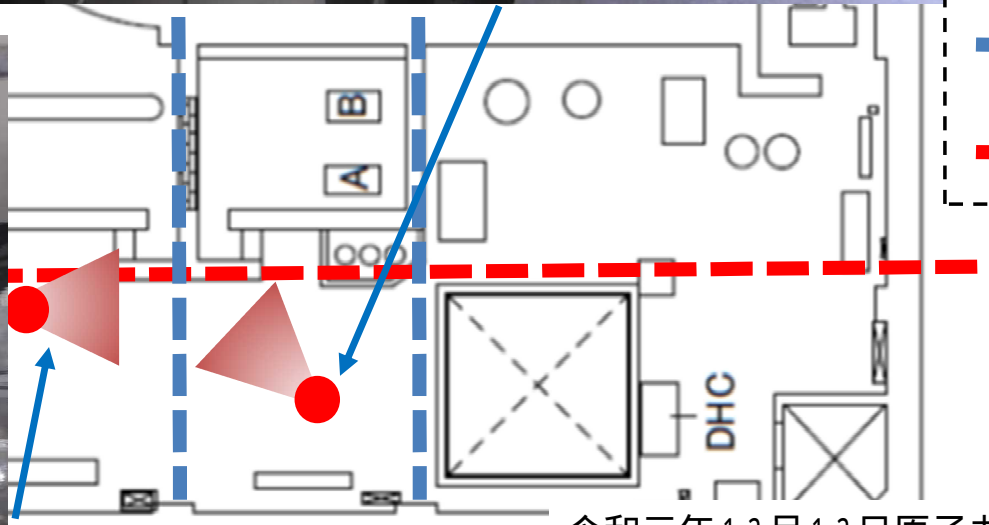
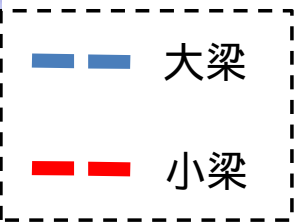
令和元年12月12日原子力規制庁撮影



令和元年12月12日原子力規制庁撮影



3号機原子炉  
建屋 3階  
[大梁]



令和元年12月12日原子力規制庁撮影



## 5 - 4) 凝縮波

○ 3号機では凝縮波は観測されていない。

< プロジェクト投影資料を参照 >

映像提供者との関係で画像についてはプロジェクト投影としている。

## 5 - 5) 地震計記録

○ 当時付近に設置されていた地震計の記録を見ると、地震計に伝わった振動は3号機の爆発時の方が1号機の際より大きいとは言えない。

< 資料2 参考を参照 >

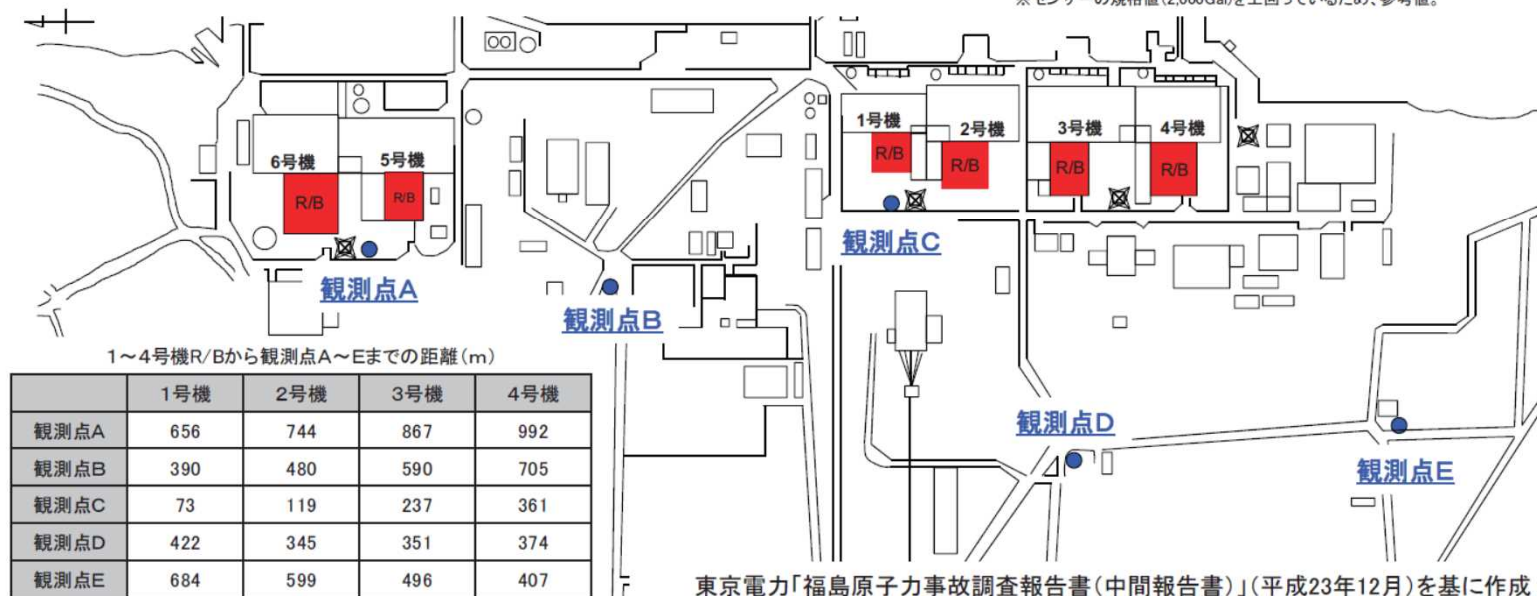
更なる詳細な分析の取り組みについては、資料2 参考 観測波による分析の概要を参照。

## 福島第一原子力発電所構内における地震観測記録計設置箇所

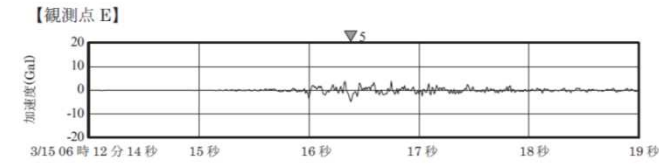
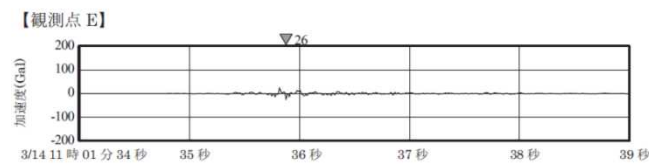
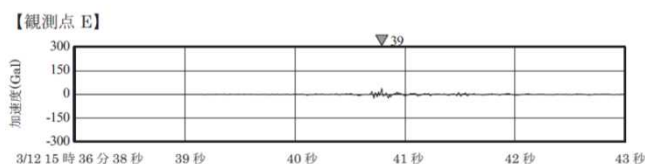
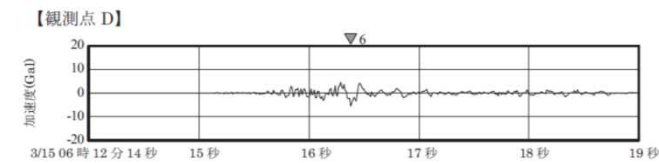
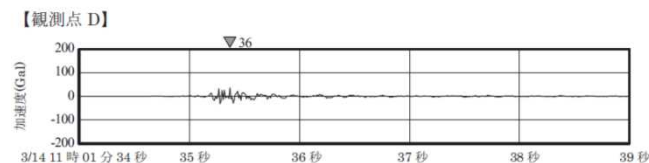
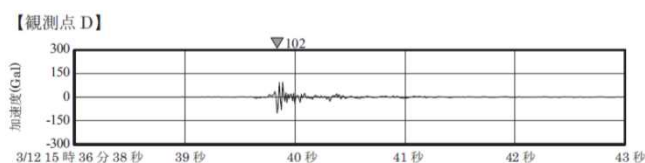
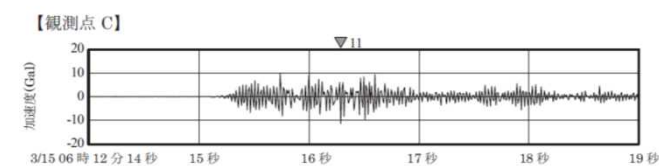
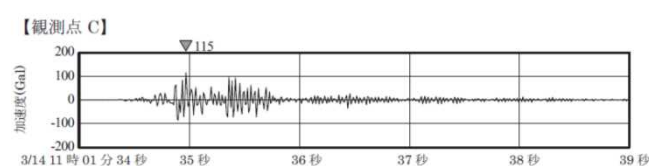
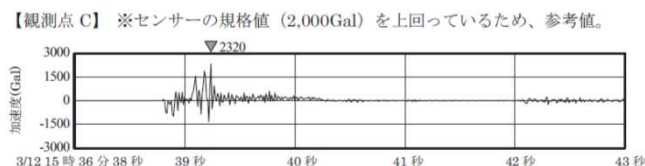
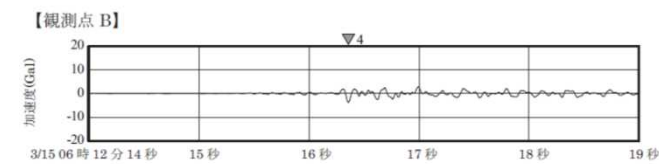
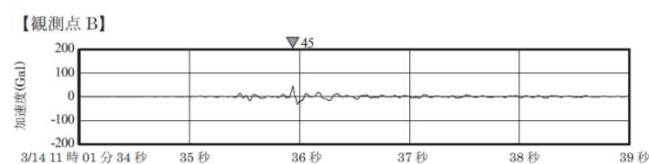
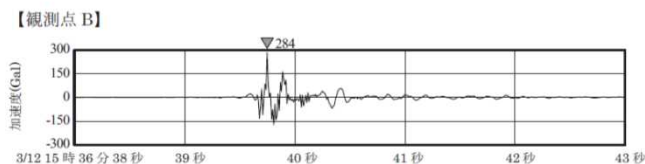
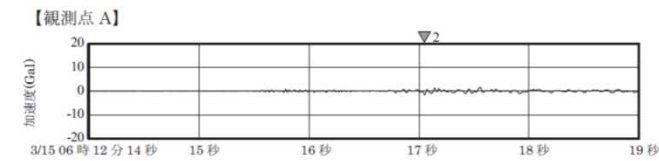
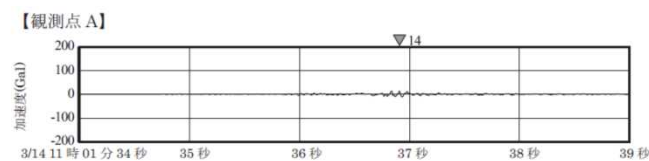
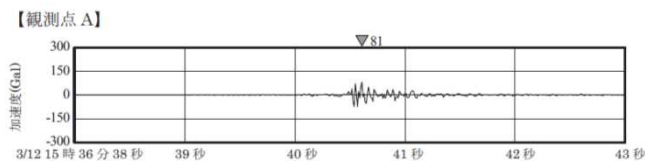
1号機、3号機及び4号機R/B爆発時に地震観測記録計が観測した最大加速度値(Gal)

	1号機爆発 (3月12日15時36分頃)			3号機爆発 (3月14日11時1分頃)			4号機爆発 (3月15日6時12分頃)		
	南北方向	東西方向	上下方向	南北方向	東西方向	上下方向	南北方向	東西方向	上下方向
観測点A	81	52	120	14	15	21	2	2	2
観測点B	284	129	138	45	18	28	4	3	3
観測点C	2,320※	2,392※	1,956	115	158	490	11	9	6
観測点D	102	91	231	36	51	173	6	7	11
観測点E	39	22	26	26	24	30	5	5	11

※センサーの規格値(2,000Gal)を上回っているため、参考値。



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(政府事故  
調)最終報告書(2012.07.23)より  
抜粋



1号機爆発時の加速度波形(南北方向)

3号機爆発時の加速度波形(南北方向)

4号機爆発と推定される時刻の加速度波形(南北方向)

## 6. 課題

水素の必要量と供給可能性についても、検討が必要。



本日の議論の範囲で、仮説にある程度の妥当性が認められれば、必要水素量やその供給の可能性についての議論を次回、3号機PCV挙動の議論を行う際にあわせて行うこととしたい。

## 7. 他論文等

ARNL2019 (U.S. Efforts in Support of Evaluations at Fukushima Daiichi – 2019 Evaluations) Chapter 6

[<https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/09/154944.pdf>]

- 昨年発表された上記のレポートにおいて、米国内の専門家のコンセンサスには至っていないとした上ではあるが、「multi-mode combustion」として、類似した考えが紹介されている。
- 詳細においては本日の仮説と異なる点もある。
- 正確には、原典を確認して頂きたい。

## ARNL2019 (U.S. Efforts in Support of Evaluations at Fukushima Daiichi – 2019 Evaluations)

### Chapter 6

#### 要約

- 第一モード:

5階で爆燃 → 4階で爆燃

この爆発は3号機のRBの破裂 (bursting) まで見えない。

- 第二モード:

RBの破裂により、RBの屋根がなくなり、RBの上部の大気中で燃焼開始。

火球 (fire ball) が形成され、大きな物体も火球と共に上方へ運ばれた。

- 4号機爆発を含めた一連の現象に必要な3号機での必要水素発生量は3250kg程度と試算している。

## 参考資料等（水素爆発関係）

- ・ 爆轟と爆燃（機械工学便覧等）
- ・ 発電所敷地内の配置図
- ・ 原子炉建屋等の外形寸法
- ・ 原子炉建屋の爆発時の気温（気象庁 過去の気象データ検索）
- ・ 航空写真（防衛省撮影）



## ○爆轟 (detonation) と爆燃 (deflagration) について

### □ 機械工学便覧 (1987年日本機械学会編)

#### 燃焼波とデトネーション波

可燃性混合気の爆発は衝撃波を伴った高速の波の伝ぱによって行われるが、この波をデトネーション波 (detonation wave)、あるいは爆ごう波と呼ぶ。通常の亜音速の燃焼波 (deflagration wave) では、熱伝導や拡散などの輸送現象によって化学反応が進行し、その伝ぱが維持される。これに対して超音速のデトネーション波では、衝撃波の圧縮による高温高圧によって反応が進行し、その発熱によって衝撃波が駆動され反応と衝撃波が一体となって伝ぱする。

## ○水素ガス爆発の特徴について

水素の燃焼範囲は、水素濃度約 4 %から約75 %の範囲 (丸善(株) 理科年表より)

**爆燃(ばくねん)** : 衝撃波を伴わない燃焼。周囲に対する破壊効果は少なく、推進効果  
が大きい。

開放空間での燃焼速度は、2 ~ 3 m/s

水素濃度約 4 % (燃焼下限界) 付近で発生

岩波書店「理化学辞典」参照

**爆ごう(ばくごう)** : 化学反応を伴う爆発で反応のおこる面(火炎面)が音速より大きい  
速度で移動するもの。衝撃波を伴う。<sup>1</sup>

**爆ごう波の速度**(火炎面の移動速度) は、1 ~ 3 km/s程度、波面圧力  
は最初の圧力の13 ~ 55倍になる<sup>1</sup>

水素濃度約 18 %<sup>2</sup>以上で発生

<sup>1</sup> 岩波書店「理化学辞典」参照

<sup>2</sup> 水素濃度約18% : 日本機械学会「機械工学便覧」(2001年)参照

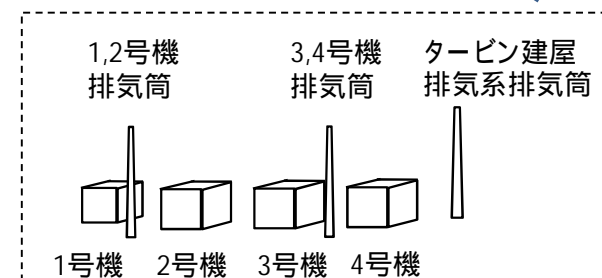
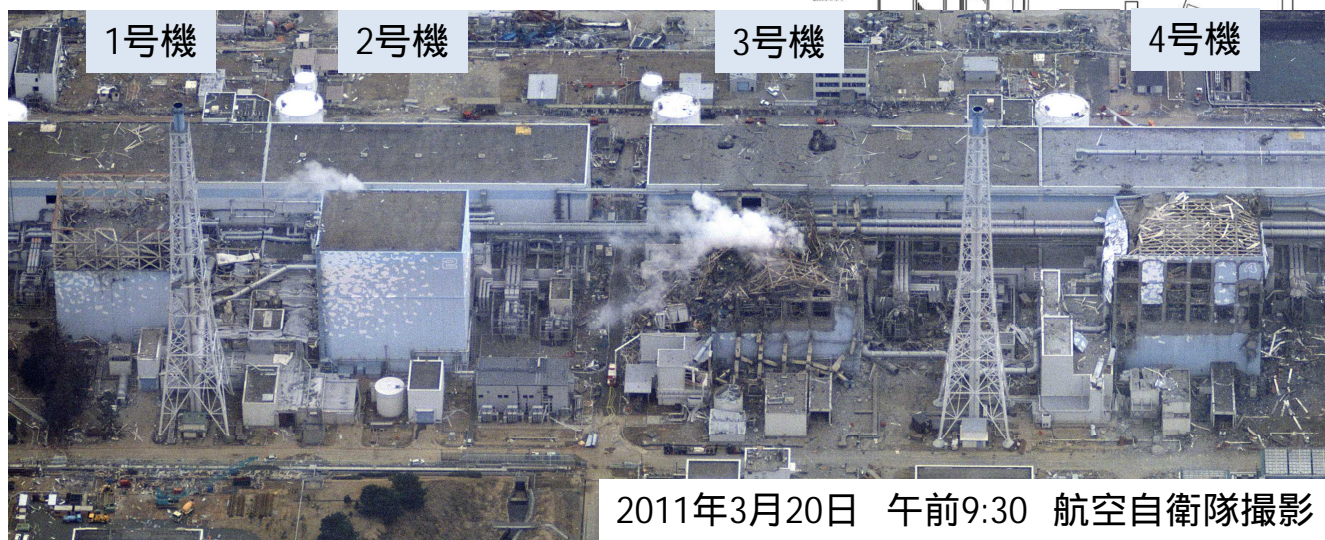
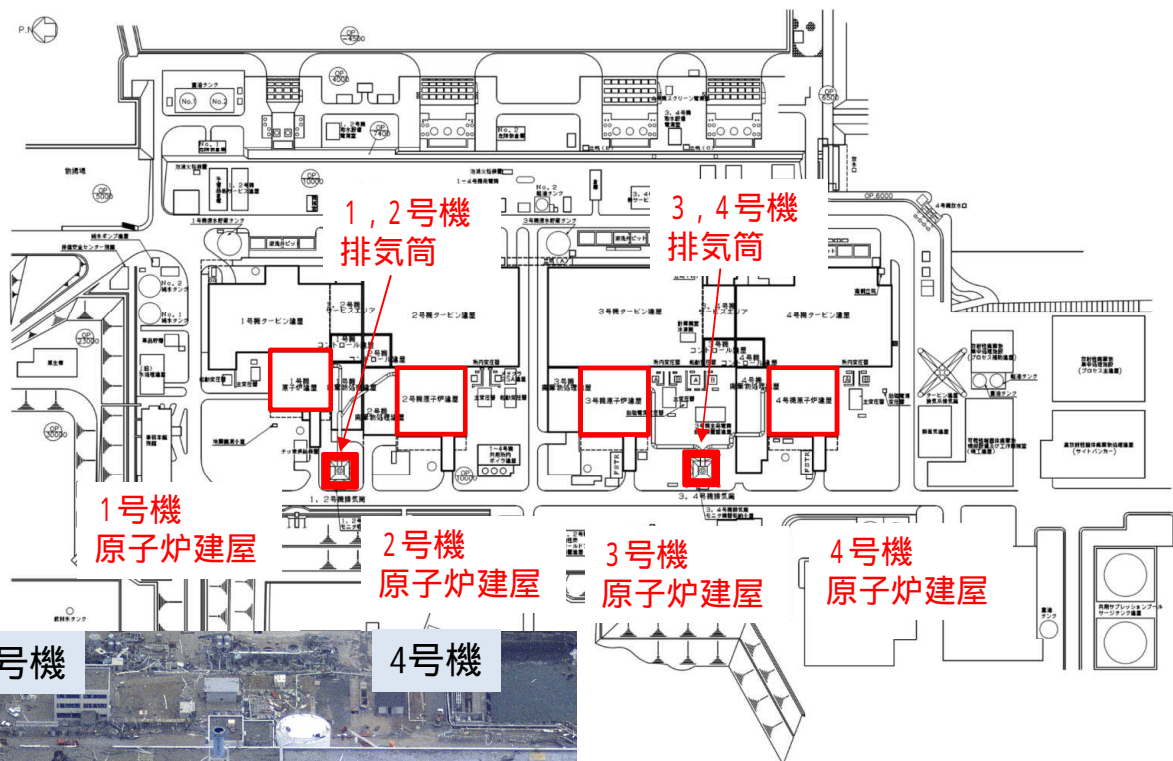
(ただし、爆ごうを引き起こす水素濃度の下限界には諸説あり)

水素2体積と酸素1体積とを混合した気体を**爆鳴気**と呼び、点火すると爆音を発し、  
化合して水となる。その際、多量の熱を発する。 $[2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}(\text{気}) + 484\text{kJ}]$   
(岩波書店 理化学辞典より)

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  
1回) 資料4より抜粋、  
一部加工

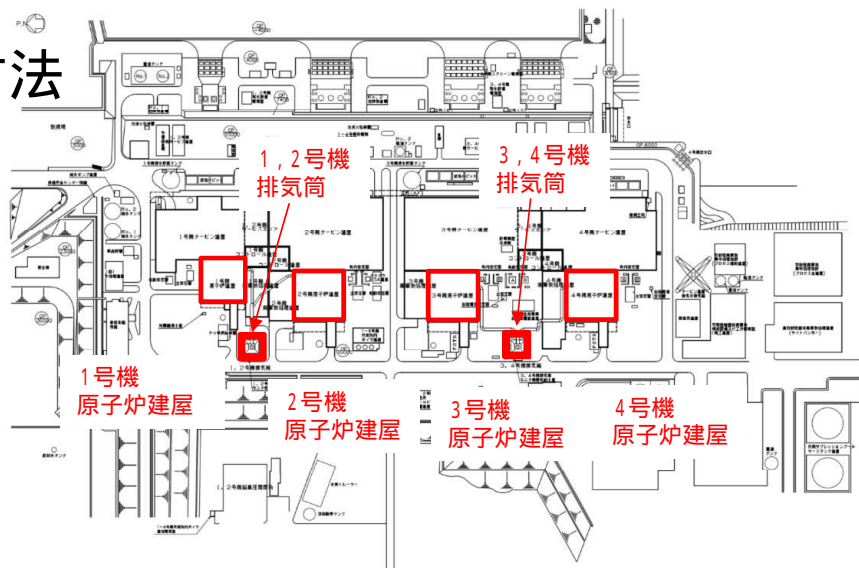
【参考】

# ○ 発電所敷地内の配置図



南西部からの視野図(概要)

# ○ 原子炉建屋等の外形寸法



1, 2号機排気筒

約120m

約30m

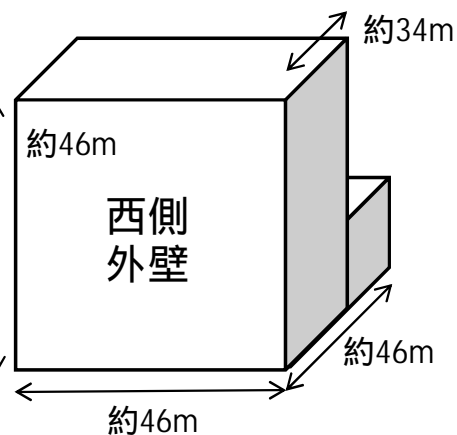
西側  
外壁

約45m

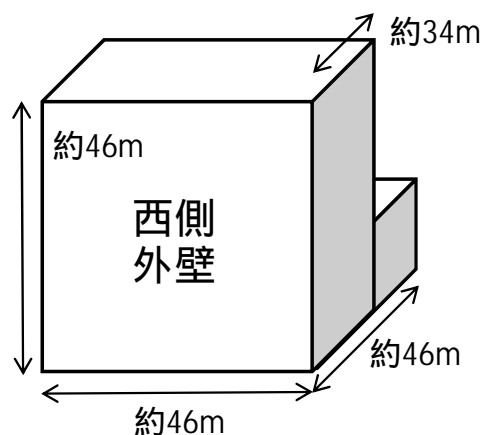
約41m

約41m

1号機原子炉建屋



2号機原子炉建屋



3号機原子炉建屋

3, 4号機排気筒

約120m

約34m

西側  
外壁

約46m

約46m

4号機原子炉建屋

OP 10m



# ○福島県 環境放射能監視テレメータシステム(温度、湿度、風向、風速)



測定装置		線量率計 (NaI)	線量率計 (電離箱)	中性子線量率計	連続ダストモニタ (6時間放置後測定)		リアルタイムダストモニタ (集じん中測定)		ヨウ素モニタ	気象観測装置				
測定項目	空間線量率	空間線量率	中性子線量率	α濃度	β濃度	α濃度	β濃度	ヨウ素濃度	風向・風速	感雨雪	降水量	温度・湿度	気圧	大気安定度
大熊町														
向畑	○	○					○	○			○			
熊川	○										○			
南台	○	○									○			
大野	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
未沢	○	○		○	○	○	○	○		○				

大野に設置されているモニタリングポストの気象観測装置の観測データ(温度、湿度、風向、風速)を整理

福島県 環境放射能監視テレメータシステム  
ホームページより抜粋、一部加工  
<http://www.atom-moc.pref.fukushima.jp/public/map/MapMs.html>

○ 1, 3, 4 号機 原子炉建屋の爆発時の気温等について

	大野(モニタリングポスト)		1号機	3号機	4号機
	温度、湿度	風向・風速			
3/12	15:30 9.3 47.1% 15:40 9.4 44.8%	15:30 E 4.2 m/s 15:40 ESE 3.7 m/s	14:30頃 ベント <b>15:36 原子炉建屋で爆発</b>		
3/13			1号機R/Bの爆発 水平(南北)方向に広がるよう に白色の爆発煙が上がる。 (政府事故調)	09:20頃 ベント 12:30頃 ベント	
3/14	11:00 18.9 14.1% 15:40 18.9 14.7%	11:00 W 7.0 m/s 11:10 WSW 5.9 m/s		<b>11:01 原子炉建屋で爆発</b>	
3/15	06:10 6.3 71.4% 06:20 6.3 73.1%	06:10 NNW 2.9 m/s 06:20 NNW 3.0 m/s	3号機R/Bの爆発 白煙を上げて水平方向に広がる爆発煙と、黒煙 を上げて垂直方向に広がる爆発煙が認められた。 (政府事故調) オレンジ色の閃光を放った次の瞬間、3号機R/B が爆発した(国会事故調) 爆発後、最上階から水蒸気の白煙が激しく立 ち上がるのが観察された(国会事故調)		<b>06:12 原子炉建屋で爆発</b>

ふくしま復興ステーション 事故直後にモニタリングポストで測定された空間線量率について

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/ps-jikogo-post.html>

福島県環境放射能監視テレメータシステムによる測定結果について(平成23年3月11日～3月16日分)

[https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec\\_file/monitoring/etc/tereme\\_press.pdf](https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec_file/monitoring/etc/tereme_press.pdf)

## ○気象庁 過去の気象データ検索



マーク	地点の種類	観測要素
●	気象台等	降水量、風、気温、日照時間、積雪、気圧、湿度、天気など
■	アメダス	降水量、風、気温、日照時間
■	アメダス	降水量、風、気温、日照時間、積雪
●	アメダス	降水量、風、気温(一部の観測所は気温を除く)
■	アメダス	降水量、風、気温、積雪
●	アメダス	降水量
■	アメダス	降水量、積雪
□	アメダス	積雪

福島第一原子力発電所

川内村: アメダス(降水量、風、気温、日照時間)

広野町: アメダス(降水量、風、気温、日照時間)

小名浜: 気象台等(降水量、風、気温、日照時間、  
積雪、気圧、湿度、天気など)

【参考】

○ 1, 3, 4号機 原子炉建屋の爆発時の気温について

	気温(気象庁)		1号機	3号機	4号機
	広野町	川内村			
3/12	15:00 8.7 15:30 8.5 16:00 8.2	15:00 7.2 15:30 6.4 16:00 6.4	14:30頃 ベント 14:50 D/W圧力 750kPa[abs]→580kPa[abs] <b>15:36 原子炉建屋で爆発</b>		
3/13	06:00 2.9 07:00 5.7 08:00 10.7	06:00 -0.6 07:00 0.0 08:00 5.2 09:00 8.0 10:00 11.1	<div>           1号機R/Bの爆発            水平(南北)方向に広がるよう            に白色の爆発煙が上がる。            (政府事故調)         </div>	9:20頃 ベント 9:24 D/W圧力 637kPa[abs]→540kPa[abs] 12:30頃 ベント 13:00 D/W圧力 480kPa[abs]→300kPa[abs]	
3/14	<div>           欠測または観測を            行っていない         </div>			<b>11:01 原子炉建屋で爆発</b>	
3/15				<div>           3号機R/Bの爆発            白煙を上げて水平方向に広がる爆発煙と、黒煙            を上げて垂直方向に広がる爆発煙が認められた。            (政府事故調)            オレンジ色の閃光を放った次の瞬間、3号機R/B            が爆発した(国会事故調)            爆発後、最上階から水蒸気の白煙が激しく立            ち上がるのが観察された(国会事故調)         </div>	<b>6:12 原子炉建屋で爆発</b> 9:38 3階北西付近で火災発生
3/16					5:45 3階北西付近で火災発生



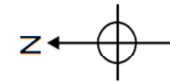
## ○気象庁 過去の気象データ検索における日ごとの値

### 小名浜 2011年3月12日(10分ごとの値)

時分	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 ( )	相対湿度 (%)	風向・風速(m/s)				日照 時間 (分)
	現地	海面				平均	風向	最大瞬間	風向	
15:30	1021.5	1022.2	×	8.8	59	5.4	南	7.9	南	10

### 小名浜 2011年3月14日(10分ごとの値)

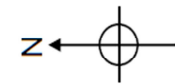
時分	気圧(hPa)		降水量 (mm)	気温 ( )	相対湿度 (%)	風向・風速(m/s)				日照 時間 (分)
	現地	海面				平均	風向	最大瞬間	風向	
11:00	1014.0	1014.6	×	11.7	71	3.9	南	6.4	南	10



【参考】







【参考】



令和2年9月3日

# デトネーション(爆轟)と デフラグレーション(爆燃)

長岡技術科学大学 システム安全専攻

門脇 敏

- 40 -

# 燃焼現象

- 予混合燃焼

燃料と酸化剤を予め混合して燃焼させる

可燃性ガス(水素)＋空気

粉塵(穀物粉, 金属粉)＋空気

- 拡散燃焼(非予混合燃焼)

燃料 → 【火炎】 ← 酸化剤

多くの場合, 爆発は ≪ 予混合燃焼 ≫

# デトネーションとデフラグレーション

- デトネーション(爆轟)
  - $M_1 > 1$ , 超音速燃焼
  - C-J Detonation
  - Strong Detonation
- デフラグレーション(爆燃)
  - $M_1 < 1$ , 亜音速燃焼
  - Weak Deflagration

下付添え字 1 :  
未燃ガス  
下付添え字 2 :  
既燃ガス

# デトネーションとデフラグレーション

	デトネーション	デフラグレーション
$u_1 / a_1$	5~10	0.0001~0.03
$u_2 / u_1$	0.4~0.7	4~16
$p_2 / p_1$	13~55	$\doteq 0.99$
$\rho_2 / \rho_1$	1.4~2.5	0.06~0.25

# デトネーション

- C-J (Chapman-Jouguet) デトネーションの特性

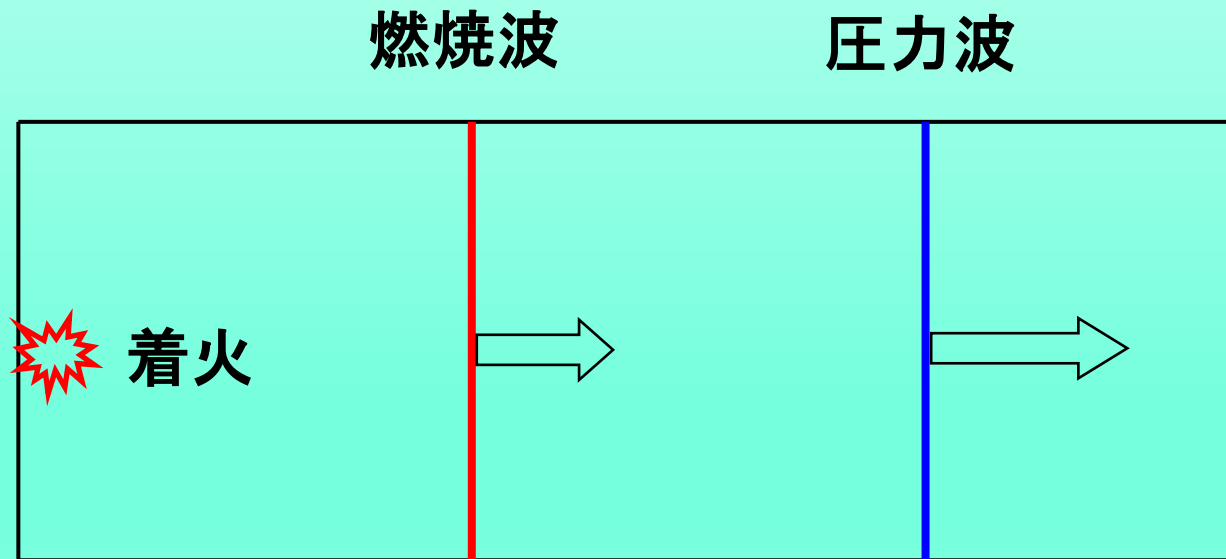
	$u_1$ (m/s)	$p_2$ (atm)	$T_2$ (K)
水素/空気	1967	15.6	2951
アセチレン/空気	1863	19.1	3111
メタン/空気	1801	17.2	2783
プロパン/空気	1795	18.2	2819

$$p_1 = 1 \text{ atm}, T_1 = 298 \text{ K}, \phi = 1.0$$



# デトネーション

- DDT (deflagration-to-detonation transition)  
デフラグレーション・デトネーション転移



# デトネーション

- DDTの経過

- 火炎の伝播速度が増大する。(←乱れ等)
- 火炎前方に圧力波が発生する.
- 圧力波が重なり, 衝撃波が発生する.
- 衝撃波背後の温度が上昇し, 自己着火温度に達する.
- 衝撃波が燃焼を伴って伝播する.
- デトネーション波が形成される.

この転移は, 火炎が加速しやすい管路やダクトにおいて, より容易に起こる.

# デフラグレーション

- デフラグレーションの特性

- $M_1 \ll 1$

- $p \doteq \text{const.}$

- 対流, 熱伝導, 拡散, 反応速度が現象を支配

- ルイス数

- $Le = \alpha / D \sim O(1)$

- $\alpha$ : 熱拡散率

- $D$ : 拡散係数

# デフラグレーション

- 可燃性ガス・空気混合気の最大燃焼速度

可燃性ガス	最大燃焼速度 (m/s)	当量比
水素 $\text{H}_2$	2.91	1.80
アセチレン $\text{C}_2\text{H}_2$	1.54	1.30
メタン $\text{CH}_4$	0.37	1.06
プロパン $\text{C}_3\text{H}_8$	0.43	1.14
一酸化炭素 $\text{CO}$	0.43	2.57

— 48  
 $p_1 = 1\text{atm}, T_1 = 298\text{K}$

# デフラグレーション

- 可燃性ガス・空気混合気の燃焼限界（当量比）

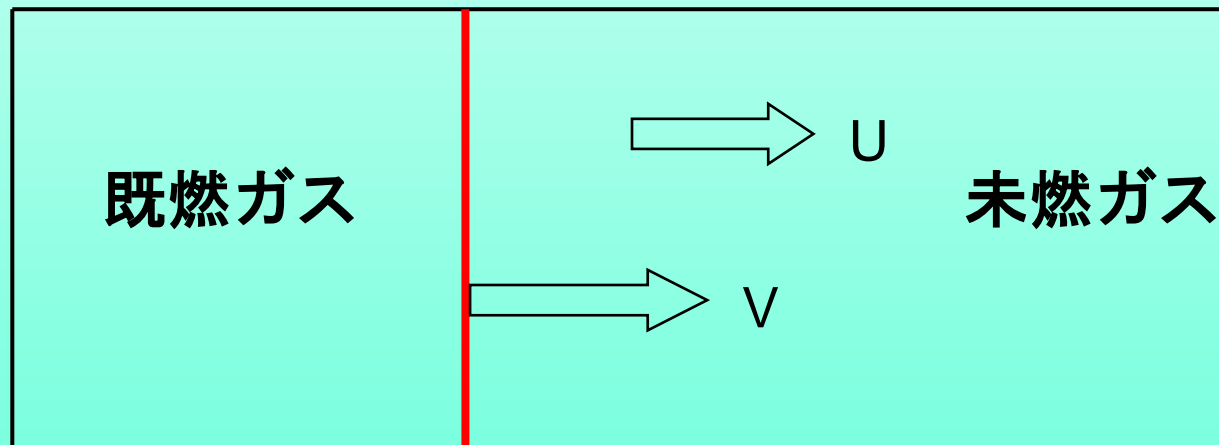
可燃性ガス	下限界	上限界
水素 $\text{H}_2$	0.10	7.17
アセチレン $\text{C}_2\text{H}_2$	0.31	$\infty$
メタン $\text{CH}_4$	0.50	1.69
プロパン $\text{C}_3\text{H}_8$	0.51	2.51
一酸化炭素 $\text{CO}$	0.34	6.80

— 49  
 $p_1 \equiv 1\text{atm}, T_1 = 298\text{K}$

# デフラグレーション

- デフラグレーションの伝播

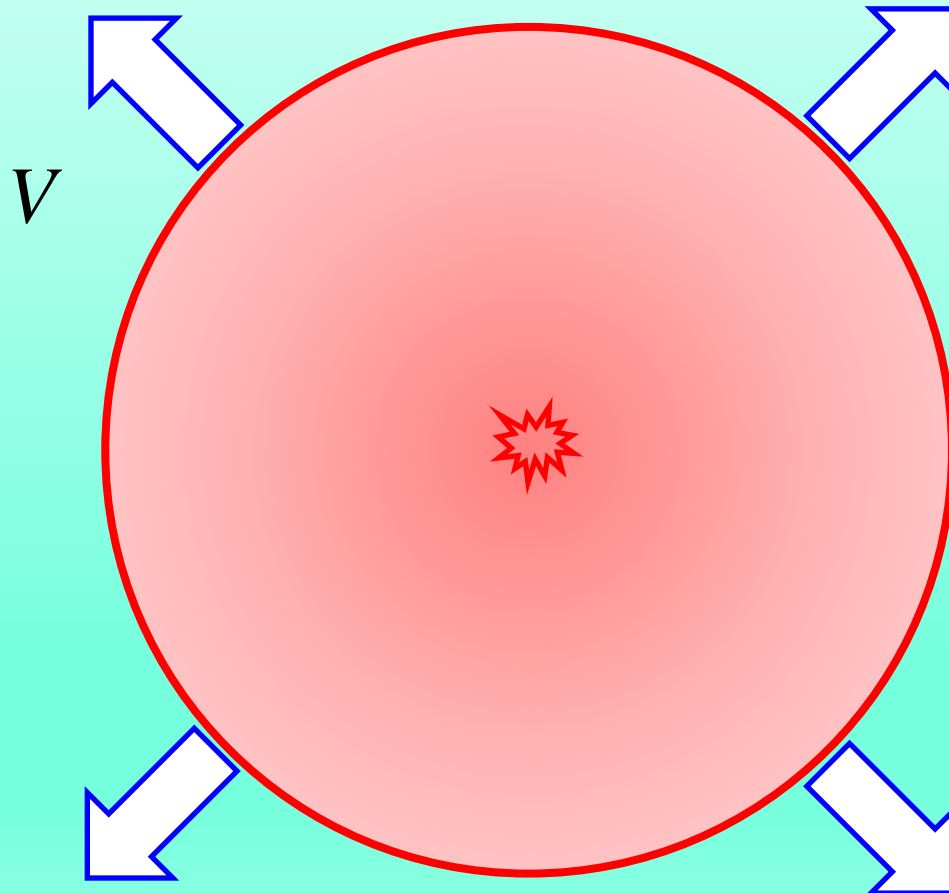
## デフラグレーション



$$U = u_1 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) = u_2 - u_1, \quad V = u_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} = u_2$$

- 50 -

# デフラグレーション



$$V = u_1 \frac{\rho_1}{\rho_2} = u_2$$

# 参考文献

- K. K. Kuo, Principles of Combustion, John Wiley & Sons, New York, (1986).
- 平野敏右, 燃烧学, 海文堂, (1986).
- 新岡嵩, 他, 燃烧現象の基礎, オーム社, (2001)
- 門脇敏, 日本原子力学会誌「アトモス」, 56巻, 7号, pp. 453-457, (2014) .



# デトネーション(爆轟)と デフラグレーション(爆燃)

ご清聴ありがとうございます

# 福島第一原子力発電所3号機の水素爆発

～ 観測波による分析の概要～

2020年9月3日

地震・津波研究部門

# ○ 水素爆発に伴う観測波の号機間の振幅比 (エネルギー比) ～ 2013年度の分析に基づく考察～

## ➤ 距離減衰特性に基づく分析

分析に用いた距離減衰特性評価式

$$A(r) = f(r, M, n, b, g)$$

$A(r)$  : 振源距離 $r$ の位置での最大加速度

$r$  : 振源から評価点までの距離

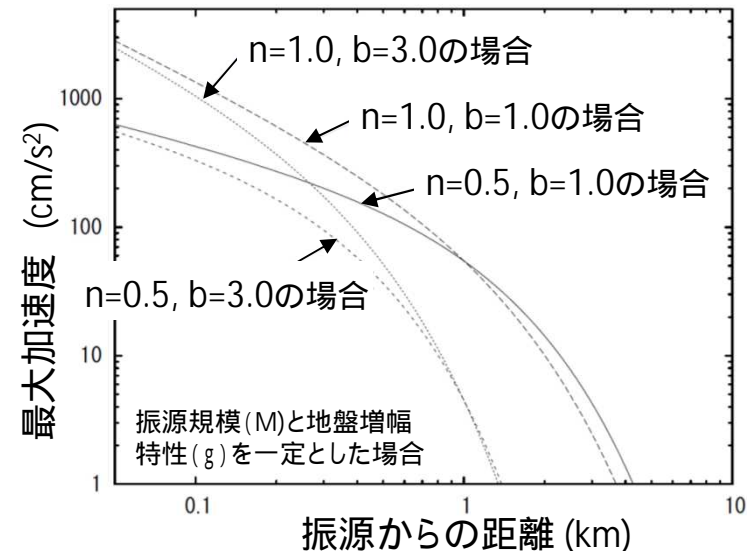
$M$  : 振源規模

$n$  : 波の広がりによる振幅減衰

$b$  : 地盤の媒質特性による振幅減衰

$g$  : 評価点の地盤による振幅増幅特性

距離減衰特性の例

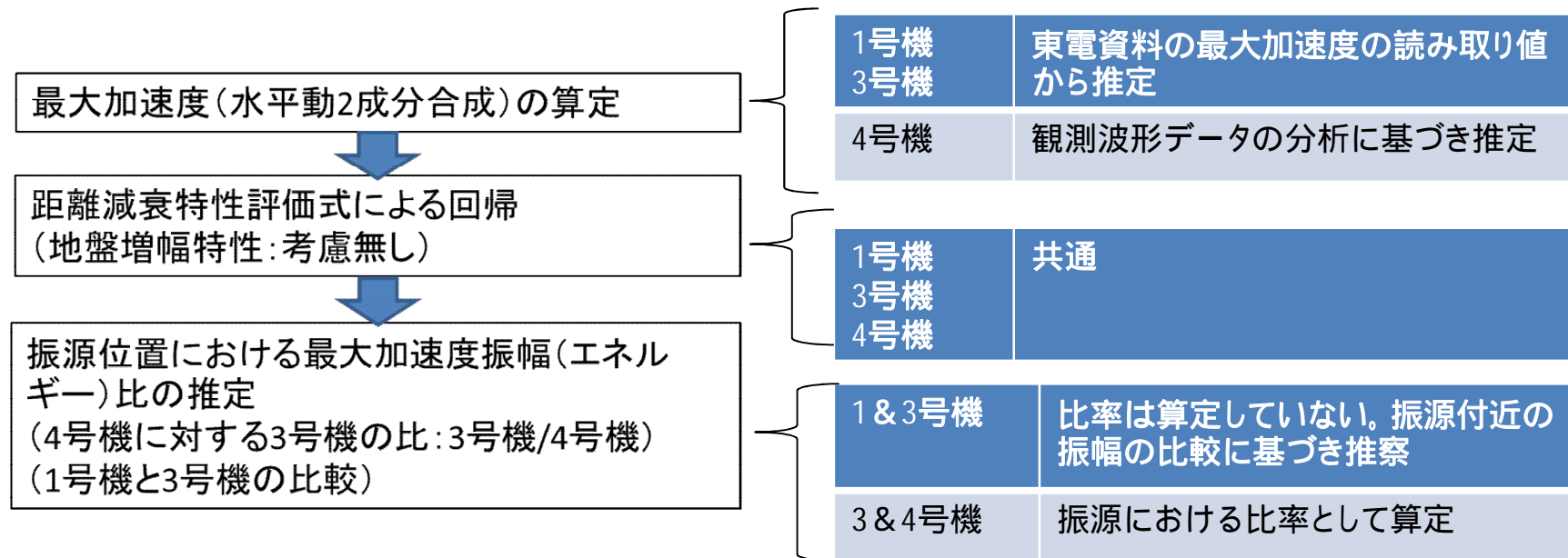


「振源から放射された観測波の最大加速度は距離減衰特性評価式に従い、振源からの距離の増加に伴い減衰する」と仮定して分析

観測波 (最大加速度) の減衰の要因

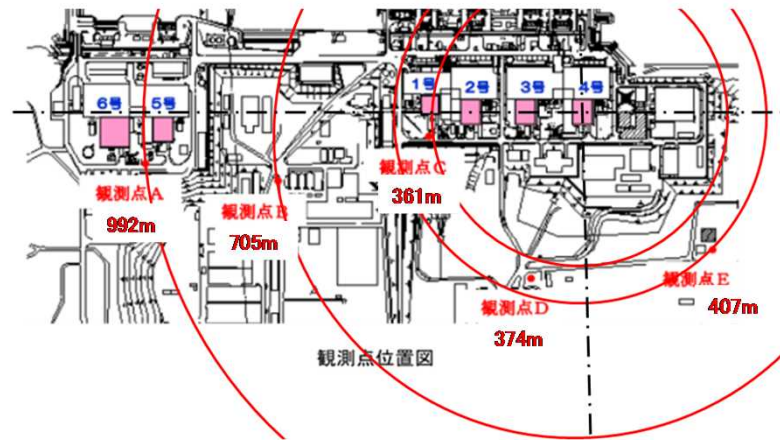
- ・ 波の広がり方 (波の種類に依存: パラメータ  $n$  で表現)
- ・ 波が伝播する地盤の媒質の特性 (非弾性減衰: パラメータ  $b$  で表現)

➤ 分析のフロー

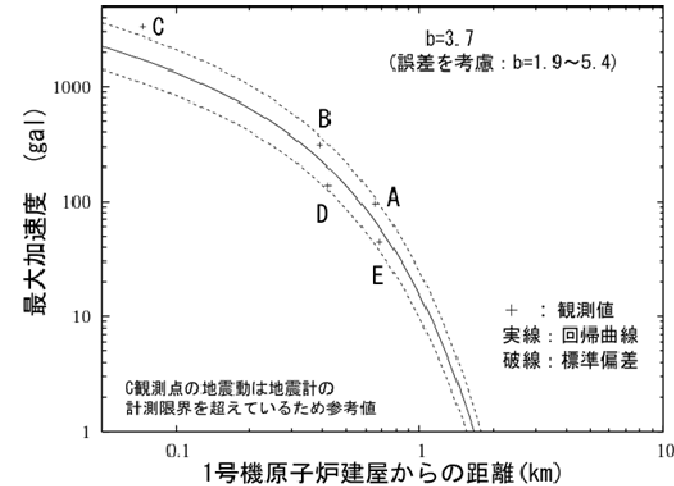


## ➤ 1, 3及び4号機の距離減衰特性

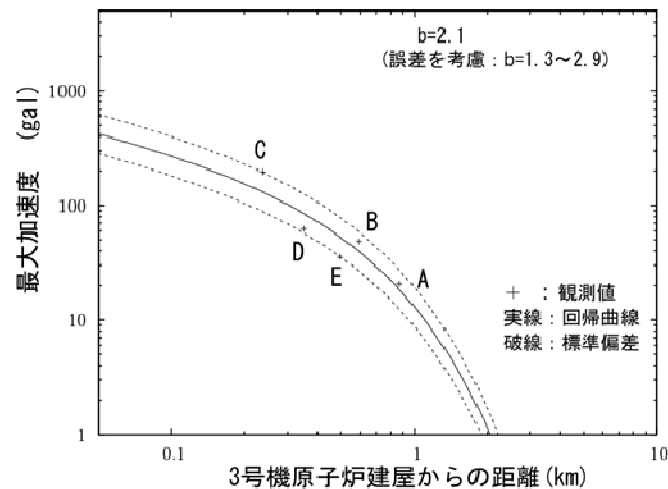
### ■ 原子炉建屋及び観測点の配置(平面図)



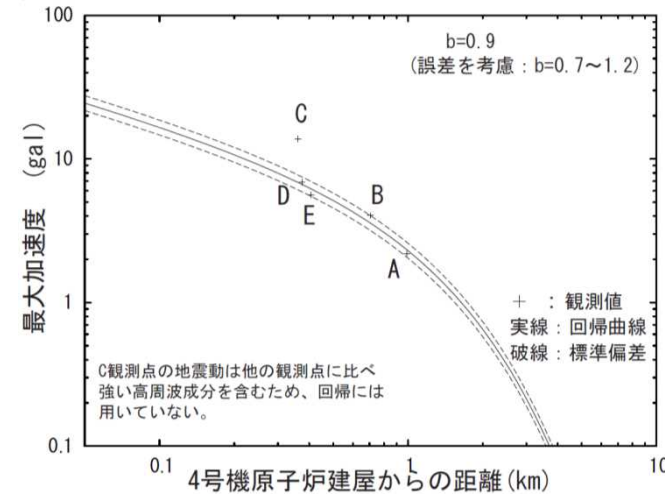
### a) 1号機爆発時の最大加速度の距離減衰



### b) 3号機爆発時の最大加速度の距離減衰



### c) 4号機爆発時の最大加速度の距離減衰

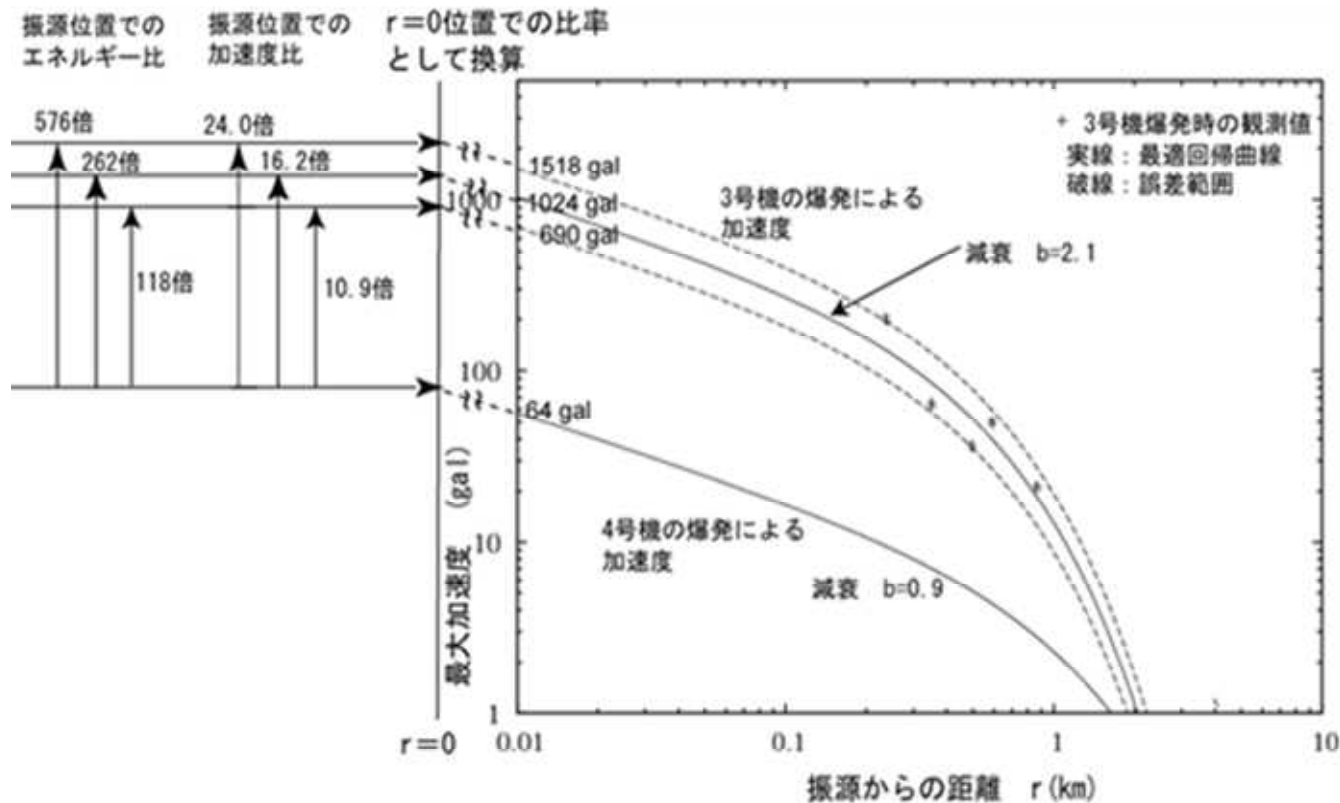


- 振源付近における各号機間の観測波振幅の比較から、1号機と3号機の比は3号機と4号機の比よりも小さい可能性がある。



➤ 1, 3及び4号機の爆発に伴う観測波の振幅比(エネルギー比)

距離減衰特性に基づく、3及び4号機爆発による観測波振幅比の推定

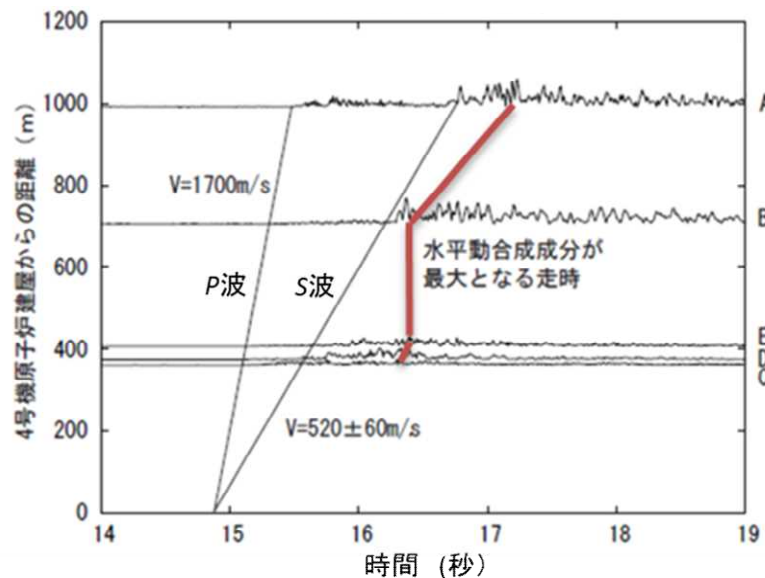


- ・ [3号機爆発に伴う振源付近での観測波振幅]/[4号機爆発に伴う振源付近での観測波振幅]は約16倍(エネルギー比で約260倍)である。
- ・ [1号機爆発に伴う振源付近での観測波振幅]/[3号機爆発に伴う振源付近での観測波振幅]は16倍よりも小さいと推察できる。

## ○2013年度の分析における課題

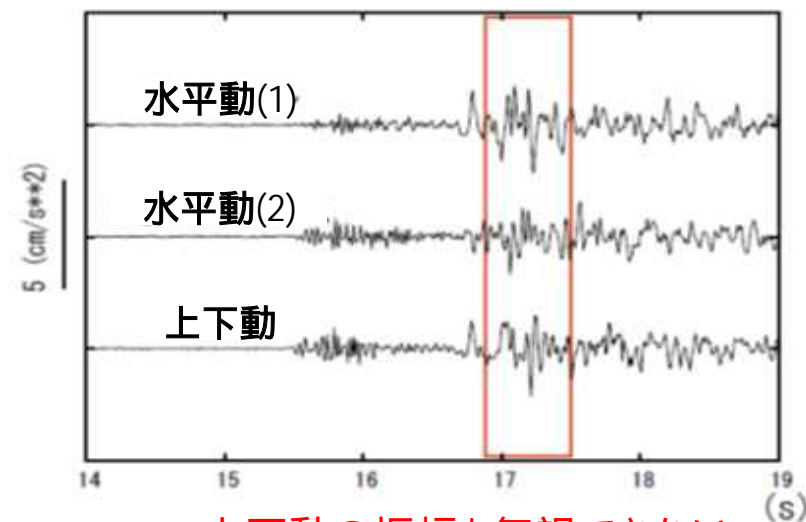
1. 分析に用いた最大加速度には爆発以外の事象による影響が含まれている可能性がある(下図左)。
2. 観測波の振幅の評価に上下動成分が考慮されていない(下図右)。
3. 観測点A～Eの地盤による振幅増幅特性の違いが考慮されていない。  
(波の伝播に伴う減衰特性(非弾性減衰)が3号機、4号機の爆発時で異なっている)。

水平動合成成分の波形記録  
(4号機爆発時の振源距離順)



最大加速度はP波、S波と一致せず、合成振幅には複数のピークが見られる。

4号機爆発に伴う観測点Aでの波形記録



上下動の振幅も無視できない。

地盤の媒質の特性による減衰 $b$ には各号機の爆発間で有意な相違が見られた。

(1号機:  $b=3.7$ , 3号機:  $b=2.1$ , 4号機:  $b=0.9$ )

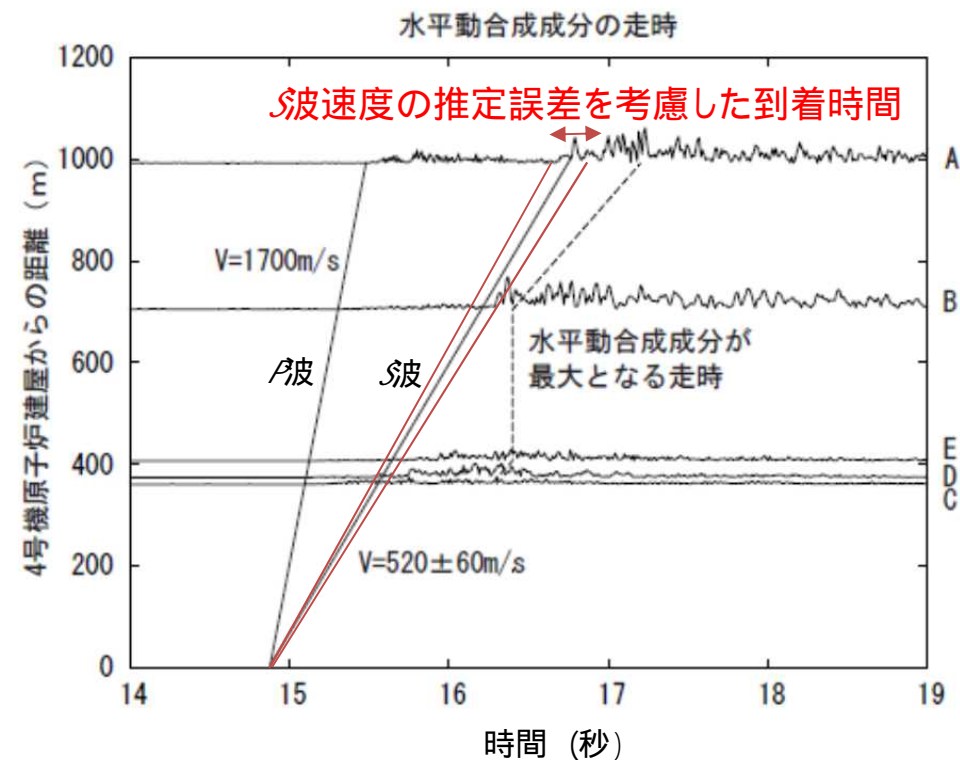
## ○ 今後の分析計画

号機間の爆発に伴う観測波の振幅比(エネルギー比)の推定

- 以下の条件を考慮した分析に基づき、1、3及び4号機の爆発に伴う観測波の振幅比(エネルギー比)について検討する。

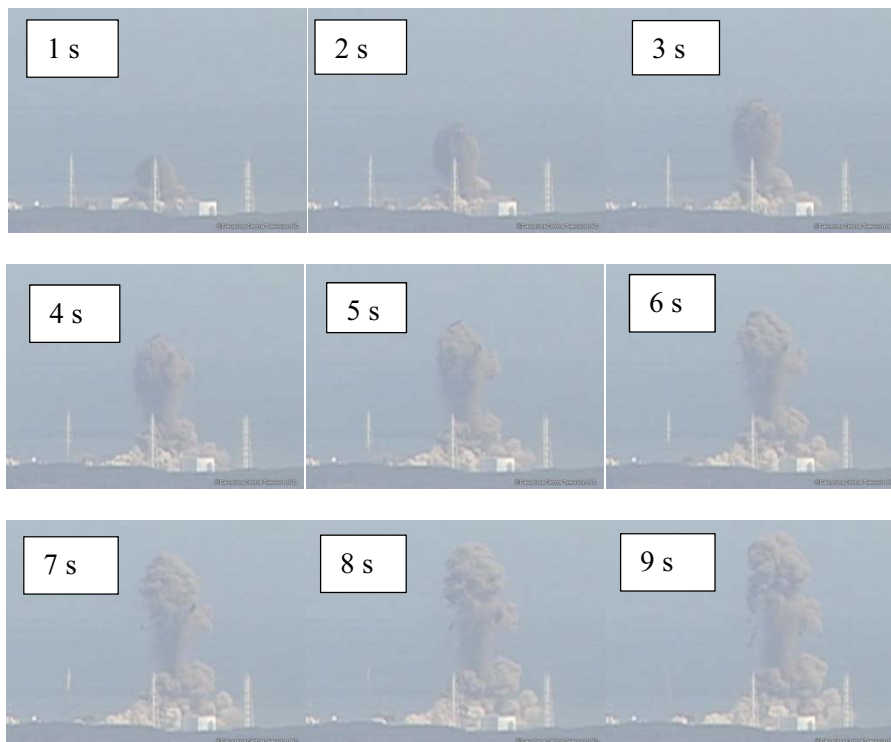
### ➤ 条件

- フェーズ( $P$ 波、 $S$ 波など)が特定できる観測波のみを分析に用いる。  
(例: 右図)
- 振幅の評価に上下動成分を考慮する。



## 6.2.5. Video Capturing Explosions

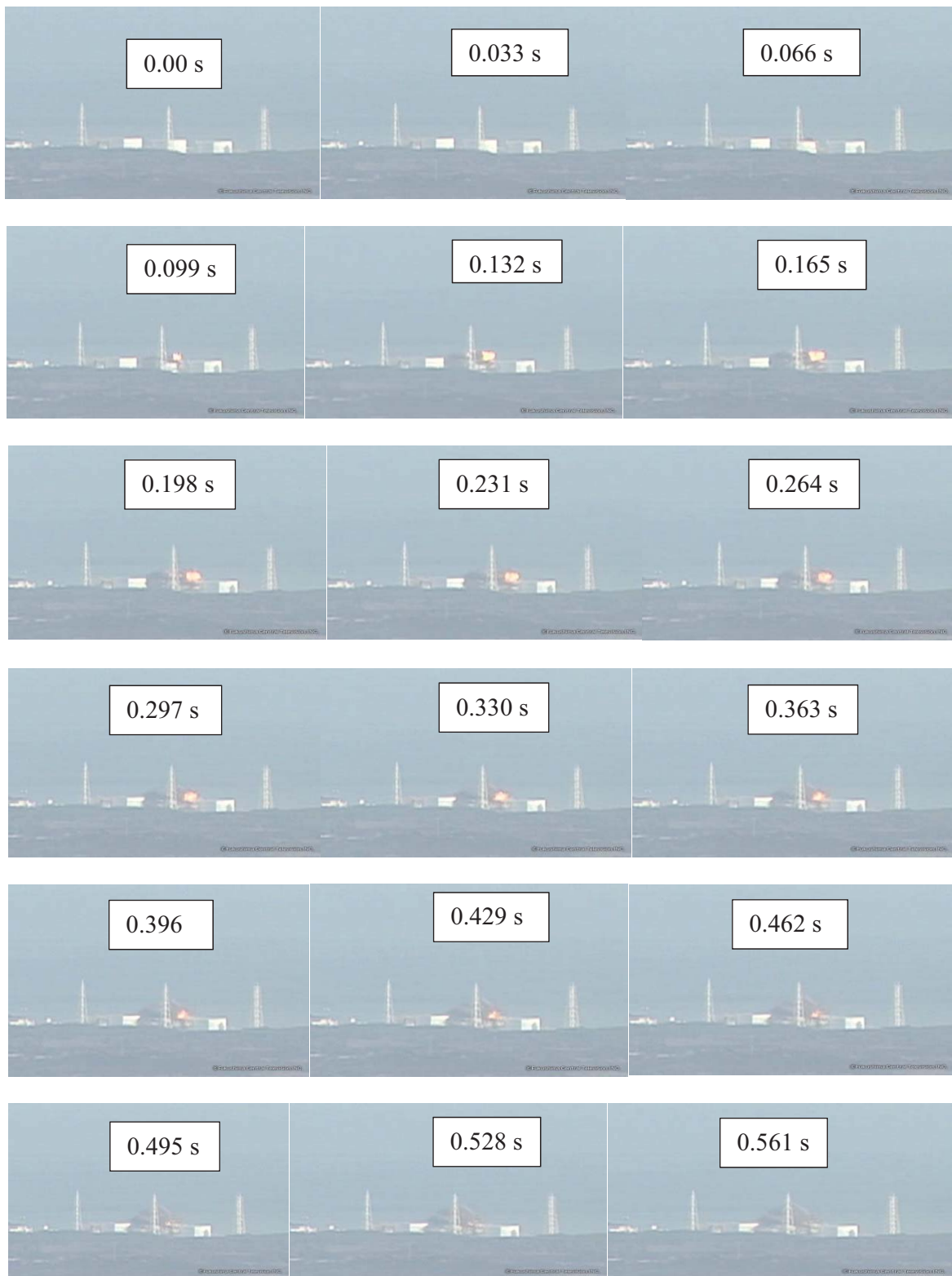
Figure 6-11 shows one-second interval snapshots from Fukushima Central Television Company, LTD (FCT) videos capturing the 1F3 explosion for the first 9 seconds (about the duration of the explosion).[214] Figure 6-12 shows millisecond-time scale snapshots of images before and after the appearance of a “flash fire” (an orange flame) which first appeared in the 0.099-s frame and disappeared in the 0.495-s frame.



**Figure 6-11.** Images of 1F3 explosions at 1-second intervals. (Courtesy of FCT [214])

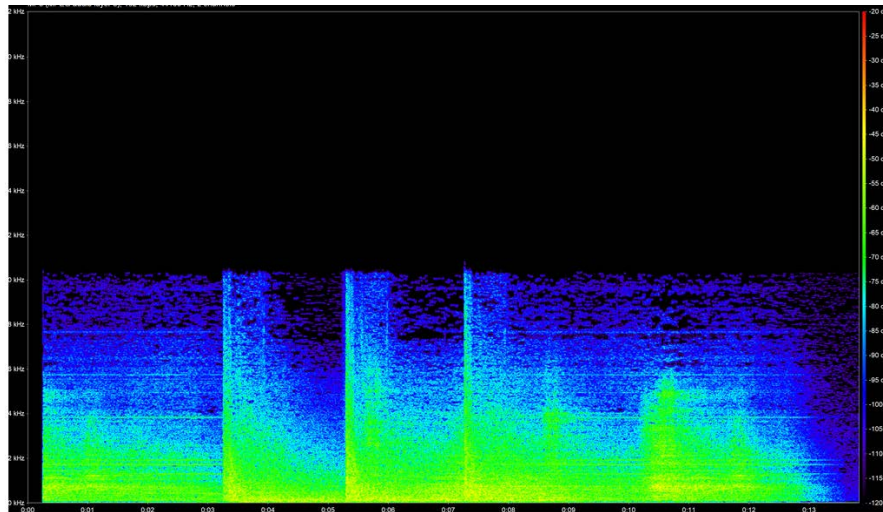
U.S. and Japanese expert evaluations of information related to hydrogen combustion, [22,215,216,217] as well as videos of the explosions, indicate that the hydrogen explosion at the 1F3 reactor building was very different from the explosion of 1F1. The combustion process of the explosion at 1F1 was a fast deflagration of hydrogen accumulated in the operating bay (5<sup>th</sup> floor) of the reactor building.[216] A video of the explosion indicates the presence of a condensation shock wave (for about a 0.5-second duration) propagating into an open air at about the speed of sound after the initial bursting of the 1F1 reactor building. The deflagration was not fast enough to transition to detonation. As shown in the left side of Figure 6-14, the explosion “smoke” at about one second after the initial bursting appeared light in color, suggesting it was primarily dust. The “smoke” was dispersed relatively close to the building in the vertical direction and was directed northward (toward the left in the picture) due to the prevailing wind at that time. The building roof and side panels were blown away by the explosion, but concrete pillars remained intact with little damage.

In an effort to further explore the 1F3 explosion, signal analysis software was used to examine the video sound frequency. As shown Figure 6-13, the resultant sound frequencies found on the audio appeared like an echo. Upon contacting the video owners, [218, 219] it was determined that the audio was not an echo but was added to the video after it was filmed.



**Figure 6-12.** Images of 1F3 explosions during an appearance of a flash fire. (Courtesy of FCT [214])





**Figure 6-13.** Sonic frequency analysis of 1F3 reactor building explosion video. Acoustic wave examination shows a large peak replicated three times at approximately 2 second intervals; discussions with FCT indicate that video had no sound detection capabilities (Courtesy of SNL, [218, 219])

U.S. evaluations indicate that the explosion at 1F3 was a multi-mode combustion, and thus was quite different in appearance and much more energetic (Figure 6-14). There appeared to be at least two modes of combustion involved in the explosion. The first was similar to the 1F1 explosion which was a deflagration of hydrogen (and possibly CO) accumulated in the operating bay (5<sup>th</sup> floor). The flame front apparently propagated to the 4<sup>th</sup> floor (based on damage seen in Figure 6-3) and resulted in the deflagration of flammable gaseous mixture accumulated in the 4<sup>th</sup> floor at that time. This first mode of combustion occurred inside the reactor building and could not be seen in the available video until the initial bursting of the 1F3 reactor building. Following the bursting of the 1F3 reactor building, the top floor of the reactor building became roof-less, and the second mode of combustion began in an open air on top of the reactor building. The second mode was combustion of a hydrogen (and possibly CO) gas cloud in an open air in the form of a rising and expanding spherical fireball over the reactor building (Figures 6-11 and 6-12). The second mode of combustion was directed vertically with an almost perfect spherical fireball appearing above the building and shooting up high into the sky (about three times the vent stack height). Large chunks of materials appeared to be carried upward with the fireball. Unlike the explosion at 1F1, available 1F3 images indicate that concrete pillars on the building top floor were highly damaged. The “smoke” resulted from fire ball appeared in darker color of dust and debris than that of the 1<sup>st</sup> mode of combustion, which appeared white (in the image) and remained at lower elevations close to the building (Figure 6-11).

The fact that the 1F3 explosion was much more powerful than the 1F1 explosion requires that the amount of combustible gases involved in the entire multi-mode explosion must also be much greater. A recent estimate indicates that a large amount of nearly 2000 kg of hydrogen or hydrogen equivalent is involved in the 1F3 explosion.[220] The result suggests the possibility that a large amount of unmixed hydrogen or hydrogen-equivalent gases had been accumulating at extremely rich concentrations in the reactor building including the 5<sup>th</sup> floor, the 4<sup>th</sup> floor, and possibly the 3<sup>rd</sup> floor prior to the explosion.[220] In the 1F3 explosion, a similar deflagration of initially existed combustible gas-air mixture is postulated since this mode of combustion could not be seen in the video until the initial bursting of the 1F3 reactor building. (The video was also taken from a much farther distance than the 1F1 explosion resulting in the



**Figure 6-14.** Images of 1F1 explosion compared with 1F3 explosion. (Courtesy of FCT [214])

loss of resolution for details.) It is then expected that most of the combustible gas mixture would be consumed in the first deflagration and the explosion would be over. However, this is not the case for the 1F3 explosion. Following the bursting of the reactor building due to deflagration, there was a huge fireball burning immediately over the reactor building. For this to happen, there must be an additional source of combustible gases (which did not exist in the 1F1 explosion) that fueled the fireball combustion. This point is further discussed in Section 6.2.6.

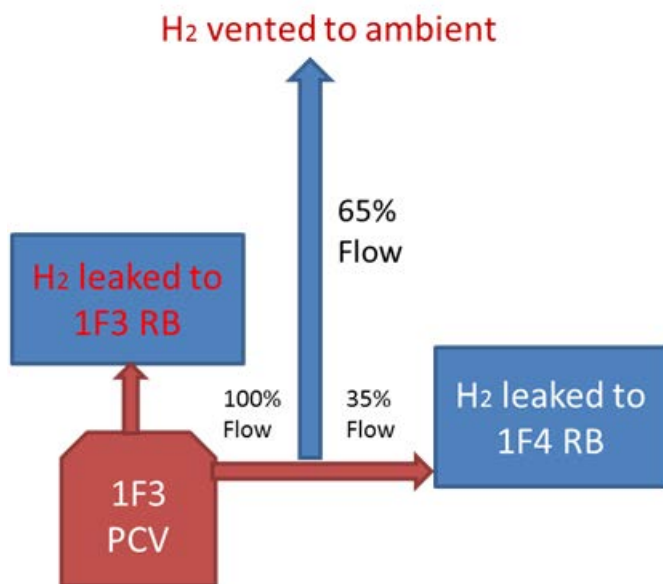
## 6.2.6. Plant Data

### 6.2.6.1. 1F3

The time of the 1F3 explosion, 11:01 am, March 14, 2011, was about the same time when the 1F3 PCV pressure dropped significantly from about 0.52 to about 0.39 MPa (Figure 6-15). From 10:55 to 11:02, about 6 minutes prior to the explosion, the drywell pressure dropped from 0.52 MPa to 0.48 MPa. The average depressurization rate for this 6 minute duration prior to the explosion was 95 Pa/second. Then, after the explosion from 11:02 to 11:15 am, the drywell pressure dropped further from 0.48 MPa to 0.39 MPa. The average depressurization rate for this 13-minute duration after the explosion was 115 Pa/second.

The significant drop in pressure is believed to correspond to drywell upper head seal failure. This PCV failure would release a hot hydrogen-rich gaseous mixture into the 5<sup>th</sup> floor of the reactor building around the drywell plug, which was lifted by a pressure buildup below it. It was possible that these hot vented gases (among other random ignition sources) could have ignited hydrogen gas, which leaked earlier and accumulated on the 5<sup>th</sup> floor (and 4<sup>th</sup> floor) of the reactor building. Ignition of this hydrogen resulted in the first combustion mode whose burning mechanism (i.e., deflagration) was postulated to have occurred in a similar way as the 1F1 explosion. Then, a gross failure of the 1F3 drywell upper head seal (whose symptom already appeared 6 minutes prior to the explosion as the PCV experienced a relatively significant

number is the required ex-vessel H<sub>2</sub> generation whose typical rate can be assumed based on code calculation results. From these values, the time required to produce the ex-vessel H<sub>2</sub> can be determined. This required time is then subtracted from the 1F3 explosion time of 68.3 hours.[116] The result is the latest time required for vessel failure. The time required for vessel failure for MAAP5 is shown in Table 6-4 and for MELCOR in Table 6-5. Because ex-vessel CO generation in terms of moles is not significant, it is ignored in this estimate.



**Figure 6-20.** Process used to obtain ballpark estimate of the latest vessel failure time. (Courtesy of FAI [225])

**Table 6-3.** Ballpark estimate of required hydrogen generation

Source of H <sub>2</sub>	Amount of H <sub>2</sub> (kg) based on assumed H <sub>2</sub> %	Assumed H <sub>2</sub> Concentrations% at time of Explosion
H <sub>2</sub> in 1F3 RB	1300	~70% H <sub>2</sub> in 5F, 50% H <sub>2</sub> in 4F
H <sub>2</sub> in 1F4 RB	370	~15% H <sub>2</sub> in 5F, 4F, 3F
H <sub>2</sub> in 1F3 PCV	890	5 bars, ~50% H <sub>2</sub> in drywell, ~50% H <sub>2</sub> in wetwell
H <sub>2</sub> vented through 1F3-1F4 common stack	$(65/35) \times \text{H}_2 \text{ leaked to 1F4 RB}$ $= (65/35) \times 370 = 690 \text{ kg}$	35% of vent flow from 1F3 leaked to 1F4 RB 65% of vent flow to environment [226]
Total H <sub>2</sub> leaked and vented	1300+370+690=2360 kg	
Total H <sub>2</sub> that must be generated in-vessel and ex-vessel	2360+890 = 3250kg	

## **U.S. Efforts in Support of Examinations at Fukushima Daiichi - 2019 Evaluations**

---

**Nuclear Engineering Division**

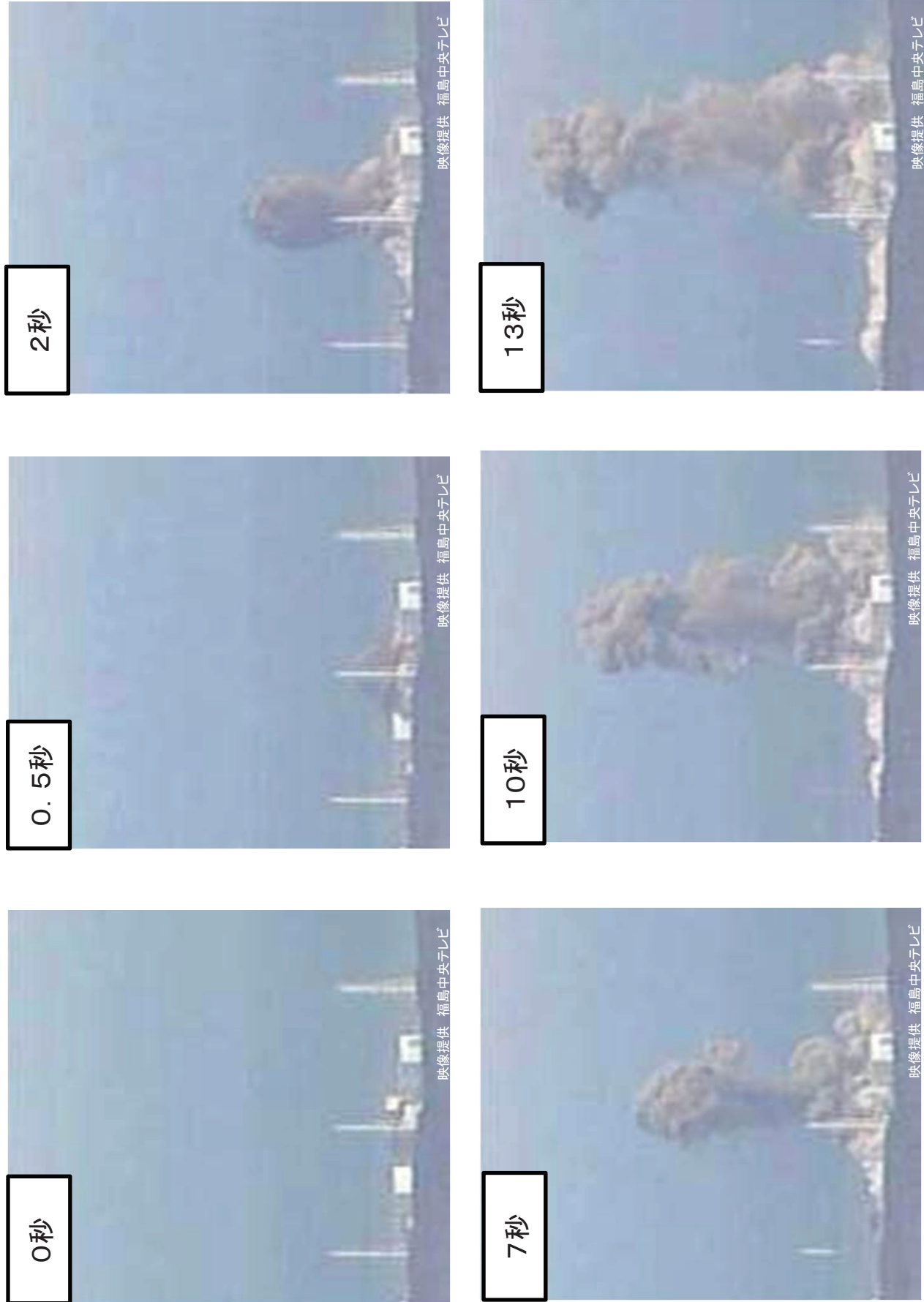


1号機及び3号機の水素ガス爆発映像

【1号機】



【3号機】



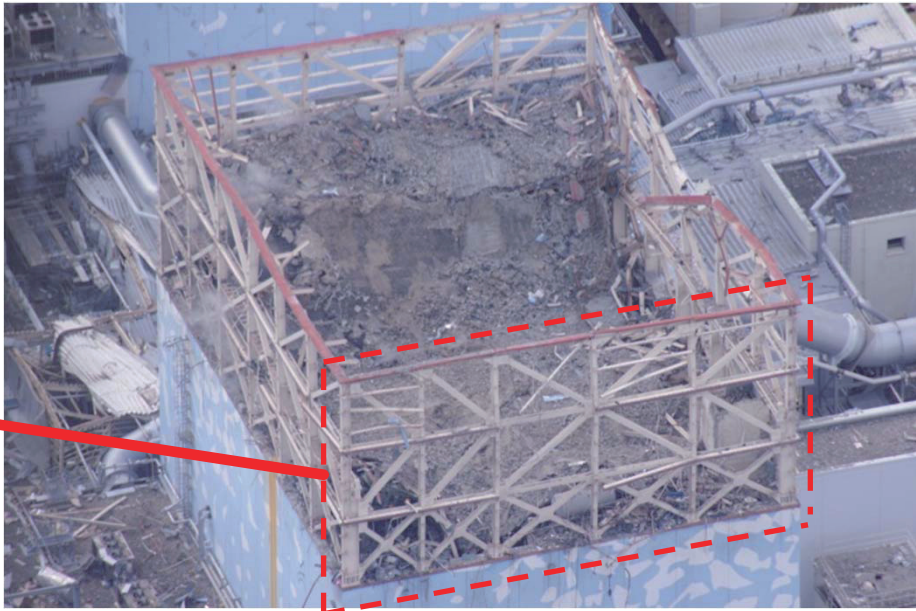
資料Ⅱ-2-1

映像提供 福島中央テレビ ※無断転載を禁ずる



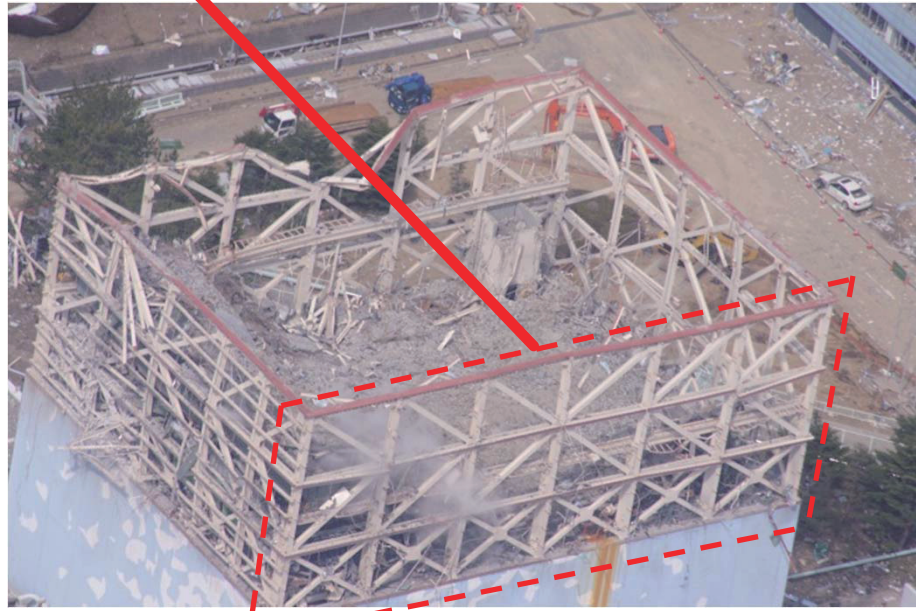
1号機R/B5階の損傷状況

【北側壁面】



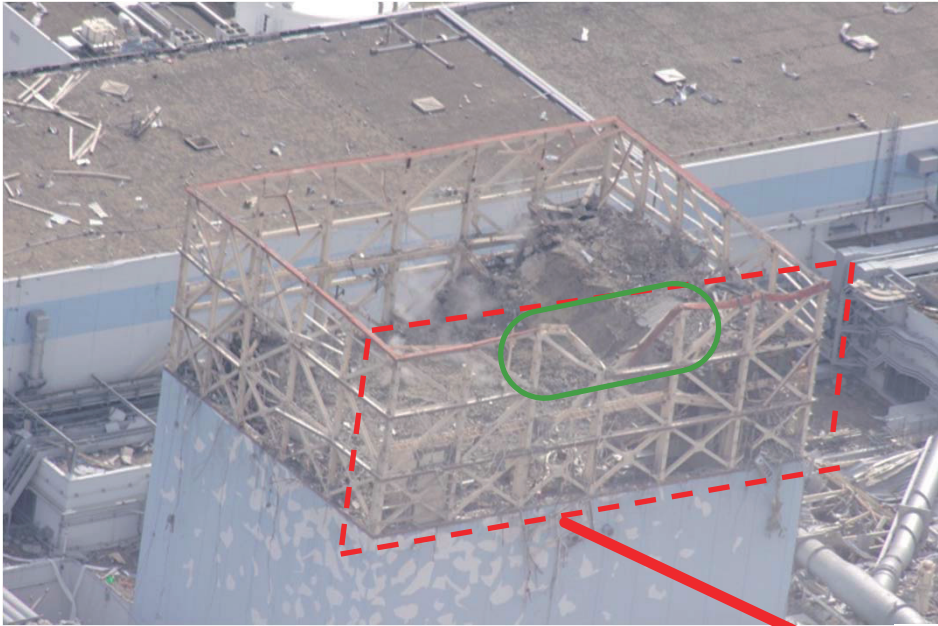
平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



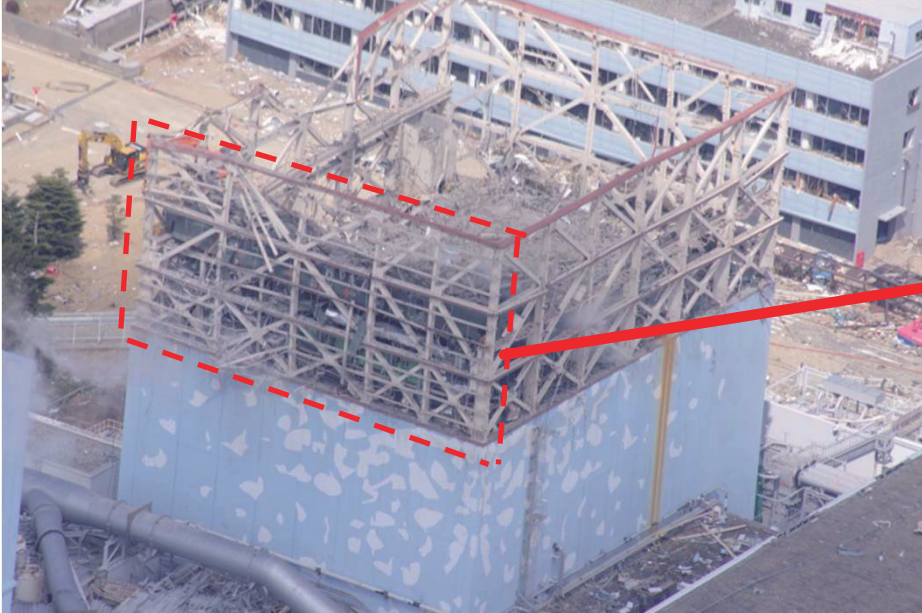
平成23年3月27日 防衛省撮影

【西側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

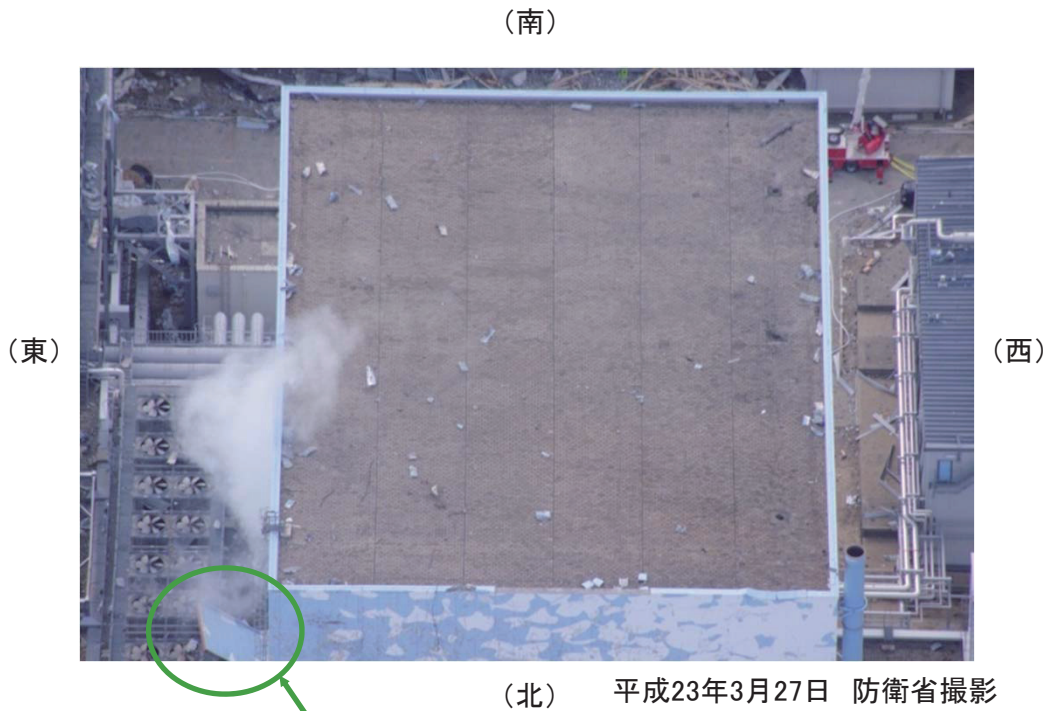




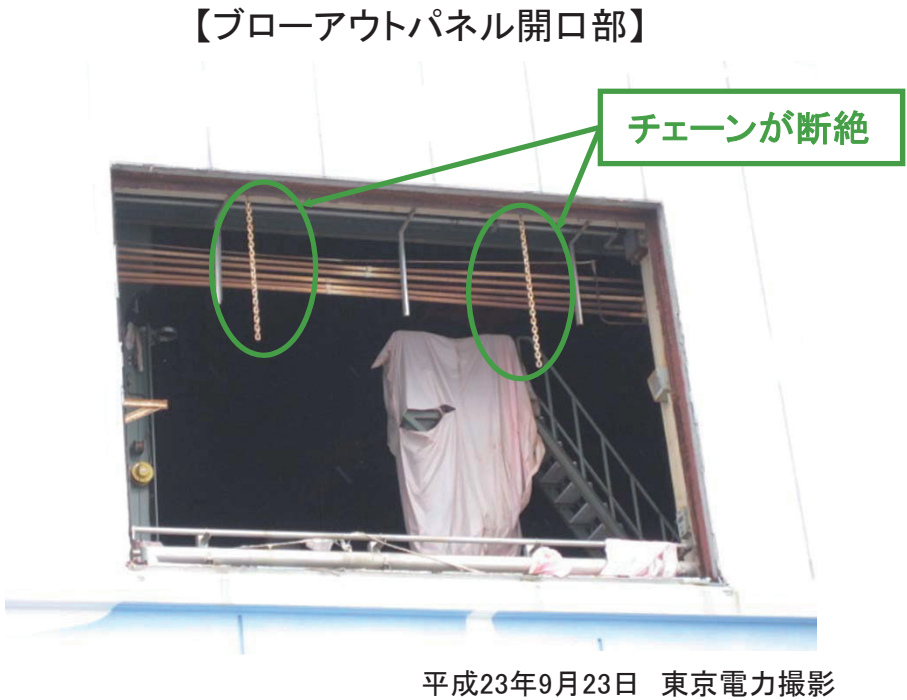
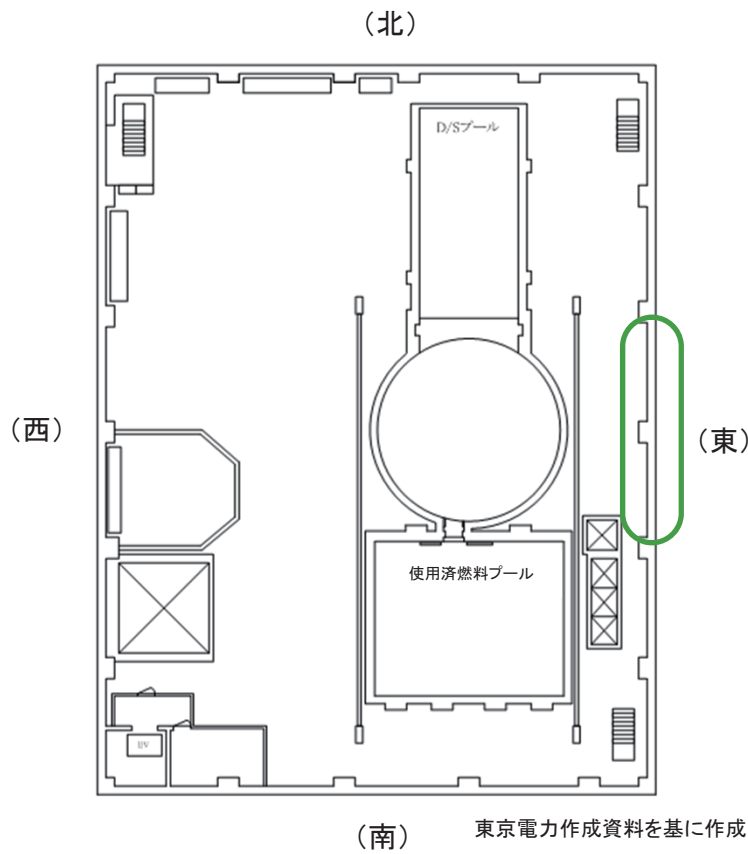
2号機R/B5階の損傷状況



平成23年3月16日 DigitalGlobe社撮影、東京電力提供



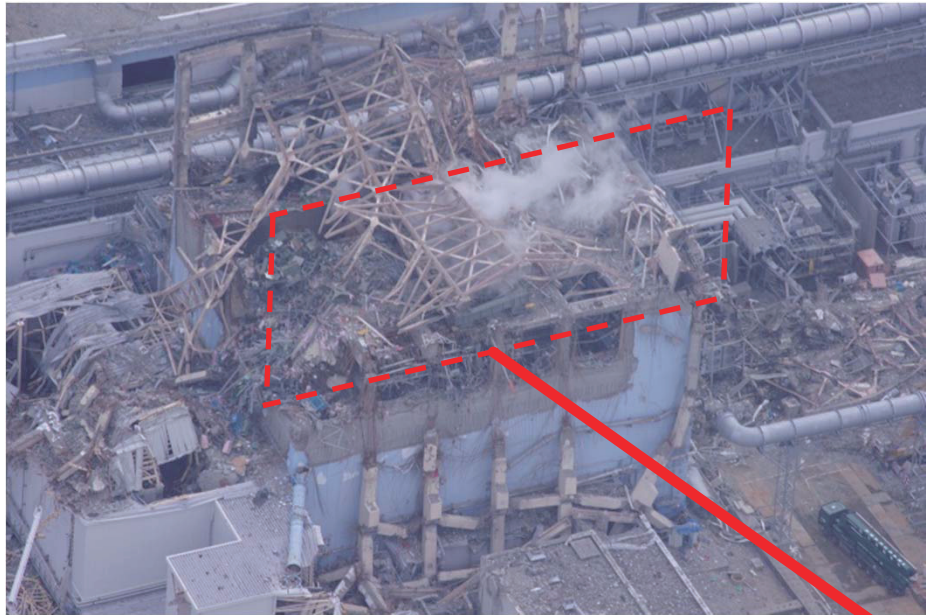
ブローアウトパネルが脱落





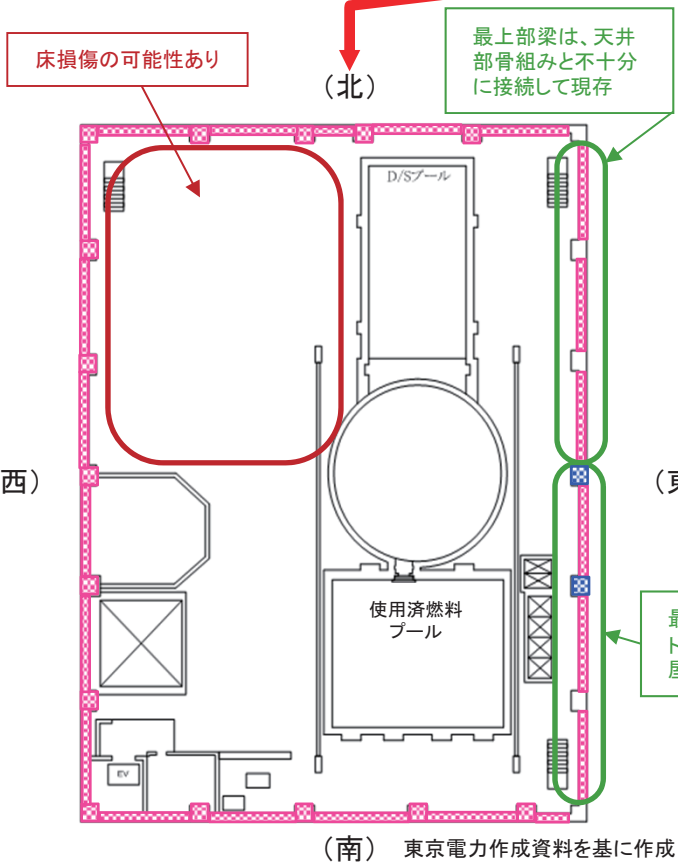
3号機R/Bの損傷状況

【西側壁面】

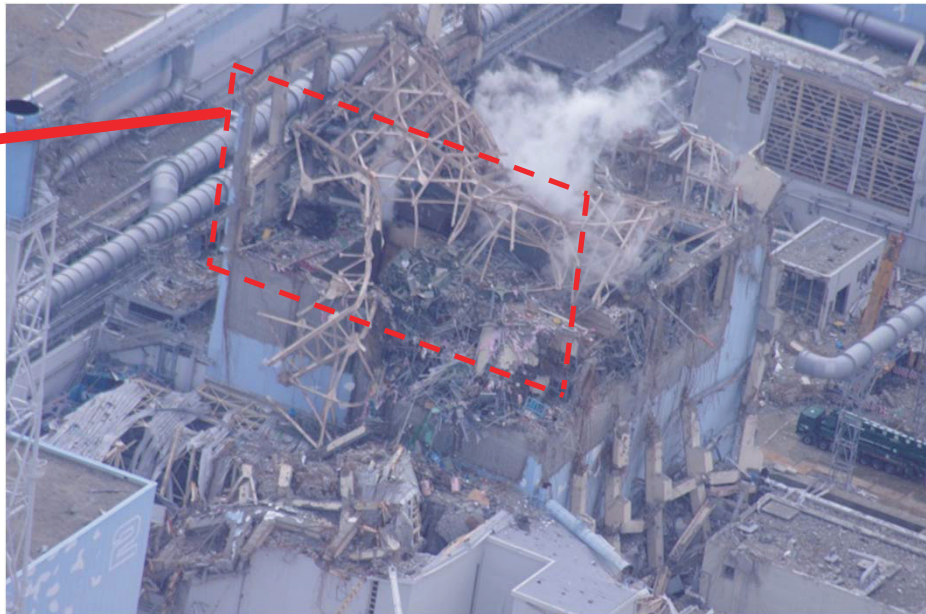


平成23年3月27日 防衛省撮影

【5階】

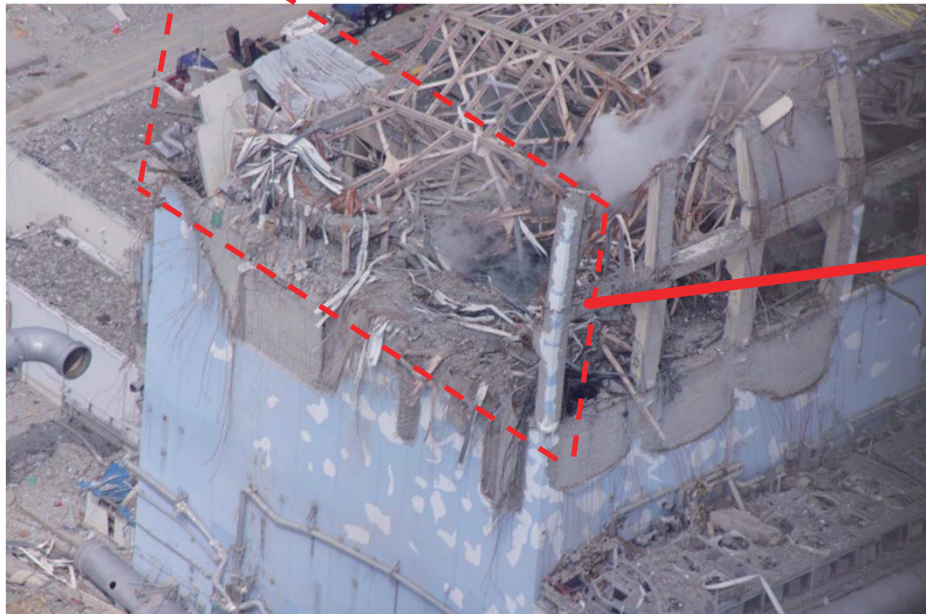


【北側壁面】



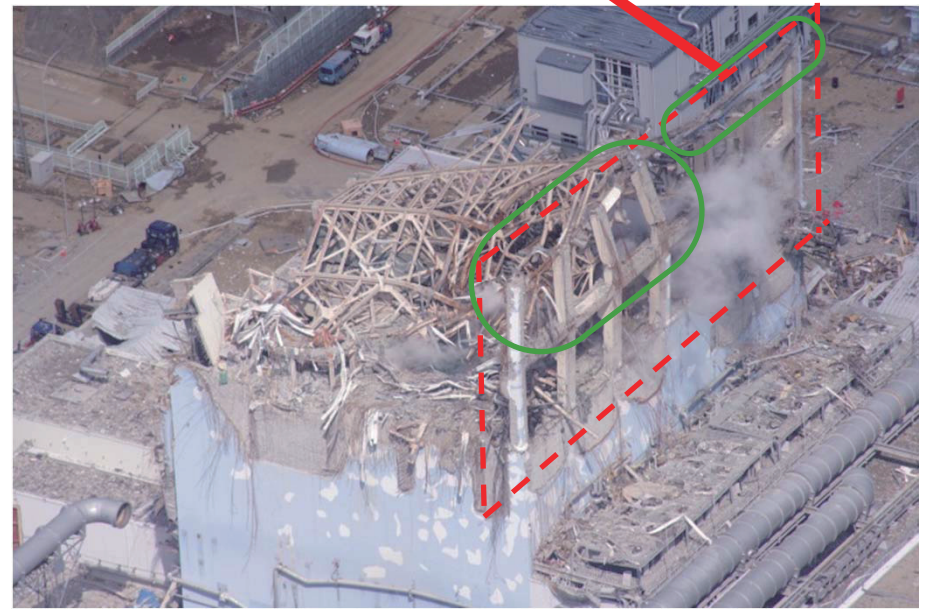
平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】

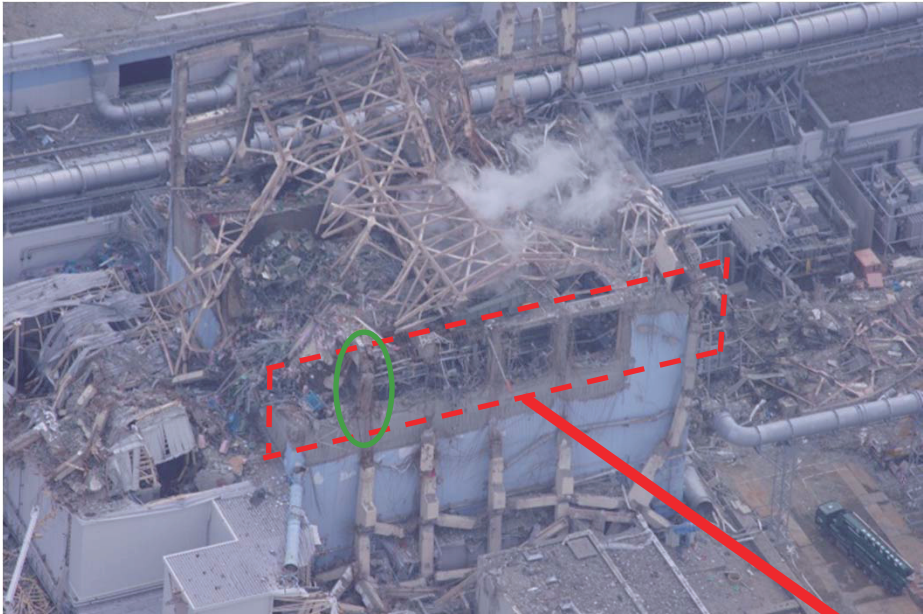


平成23年3月27日 防衛省撮影



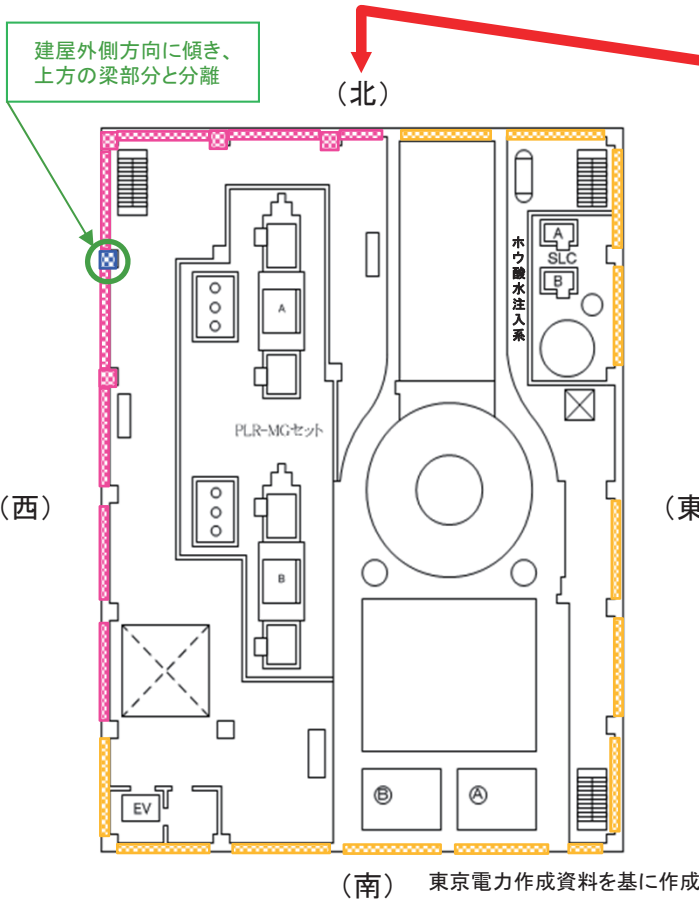
# 3号機R/Bの損傷状況

【西側壁面】

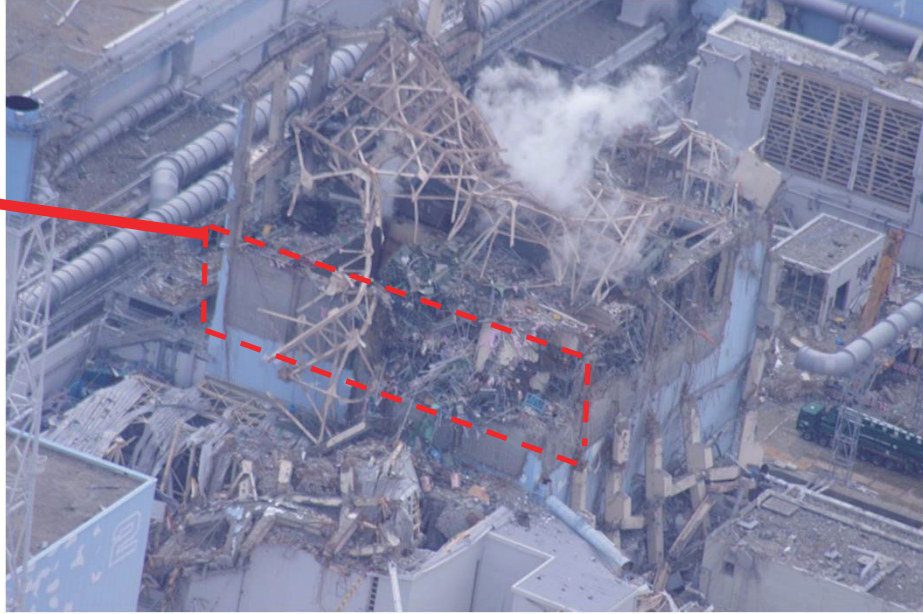


平成23年3月27日 防衛省撮影

【4階】

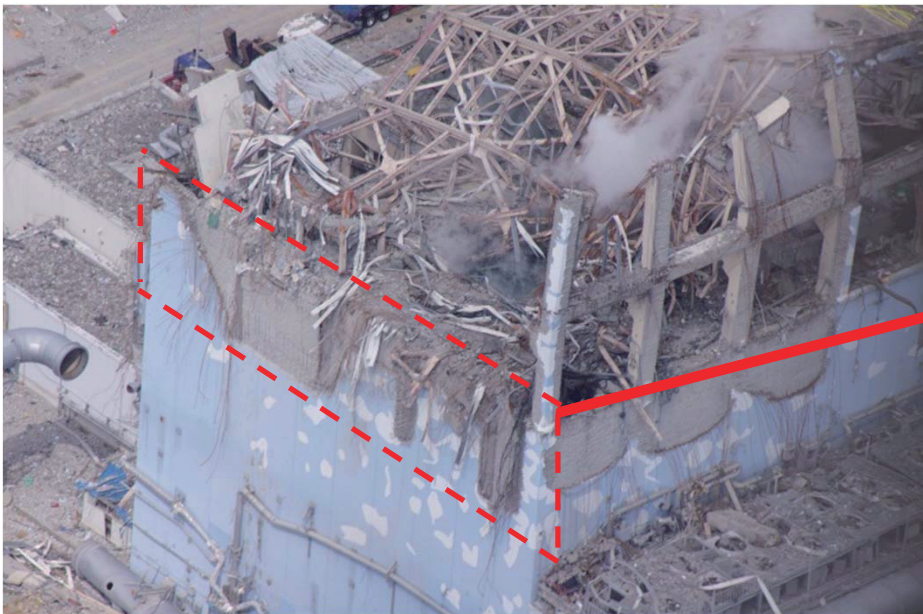


【北側壁面】



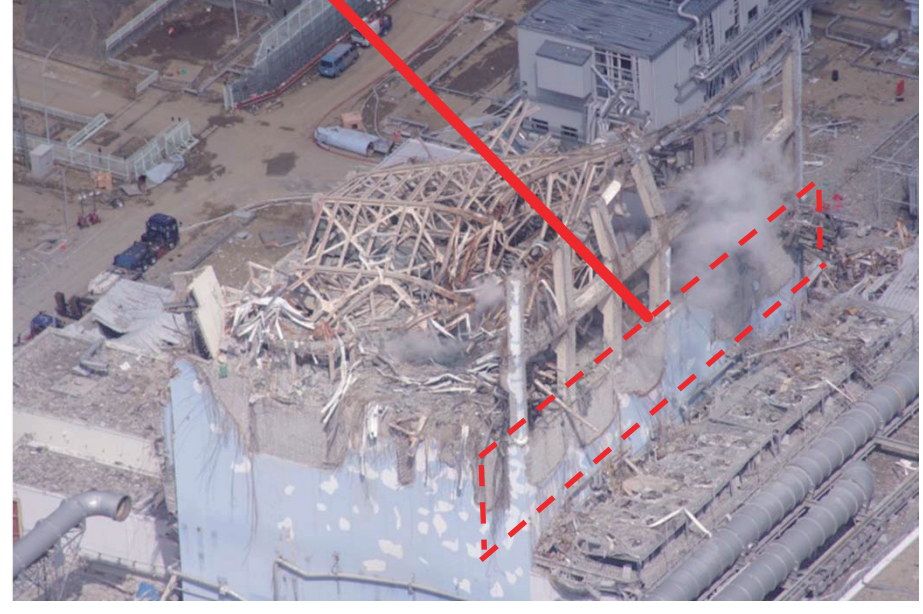
平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



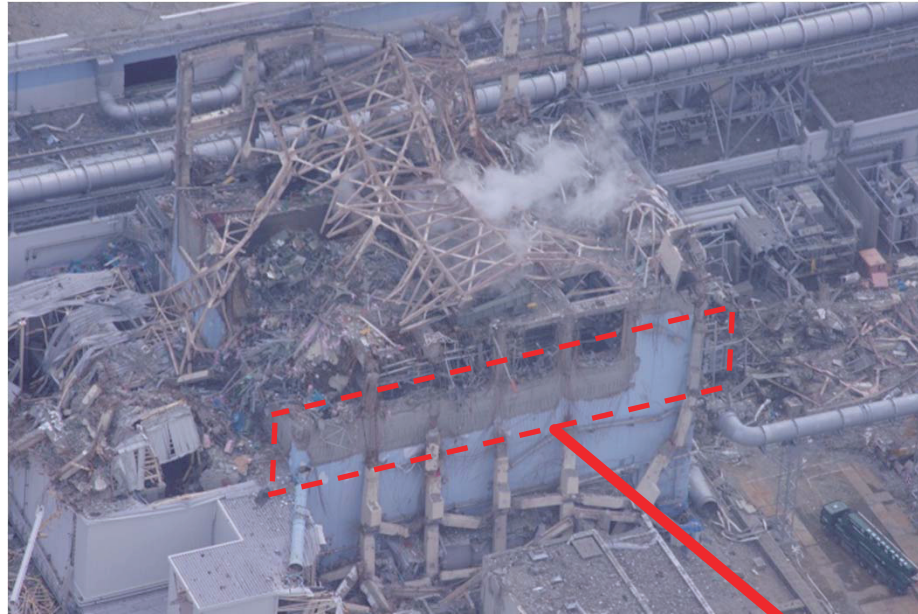
平成23年3月27日 防衛省撮影

凡例	
	:全壊
	:一部損傷
	:表面損傷



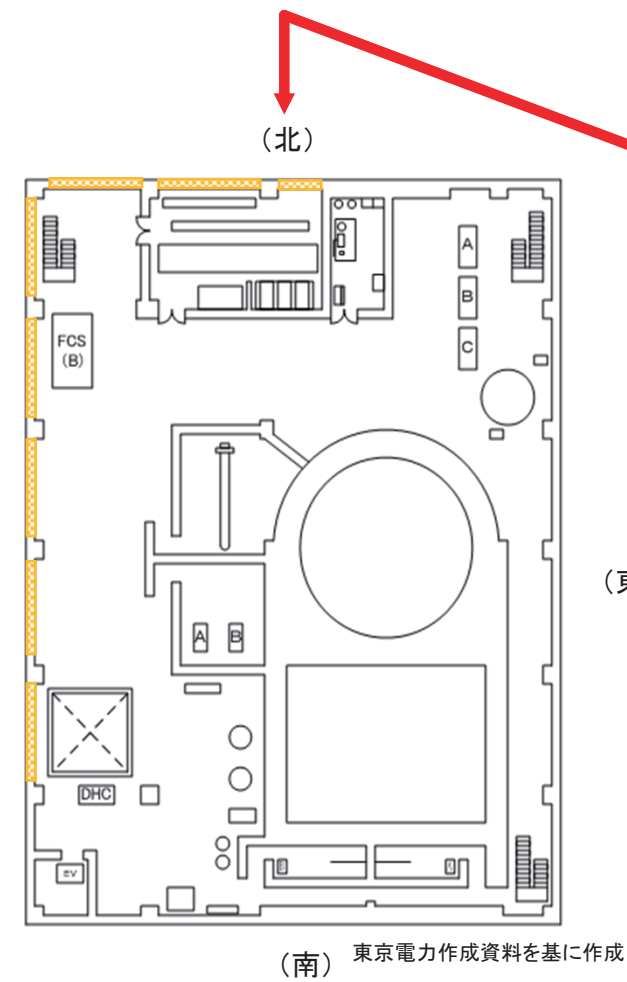
### 3号機R/Bの損傷状況

【西側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【3階】

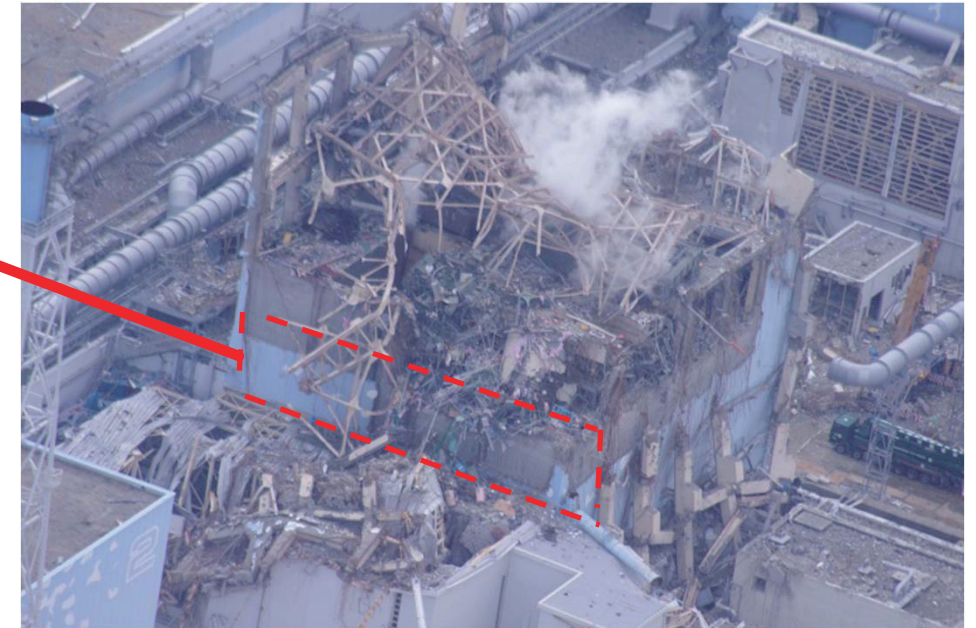


東京電力作成資料を基に作成

## 凡例

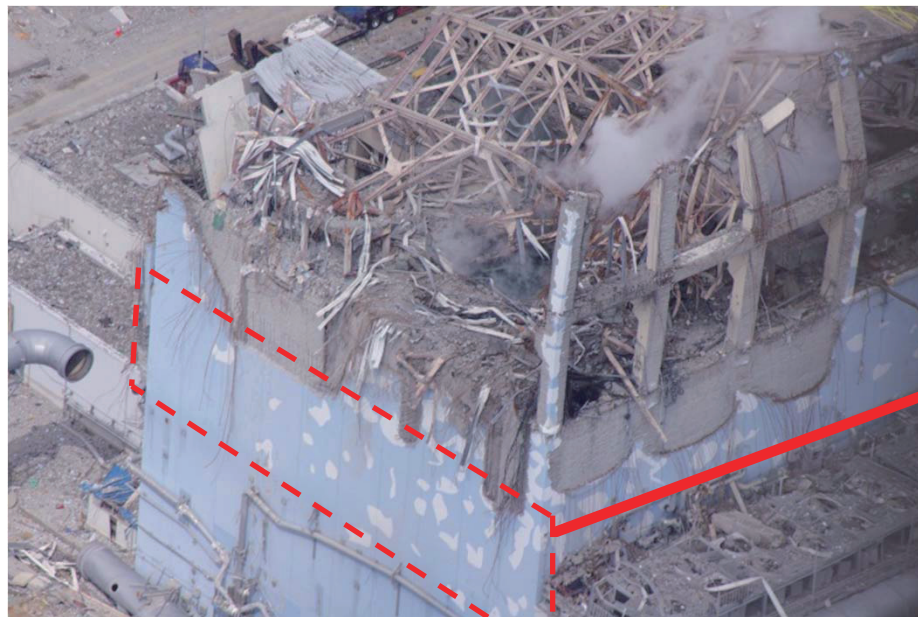
 : 表面損傷

【北側壁面】



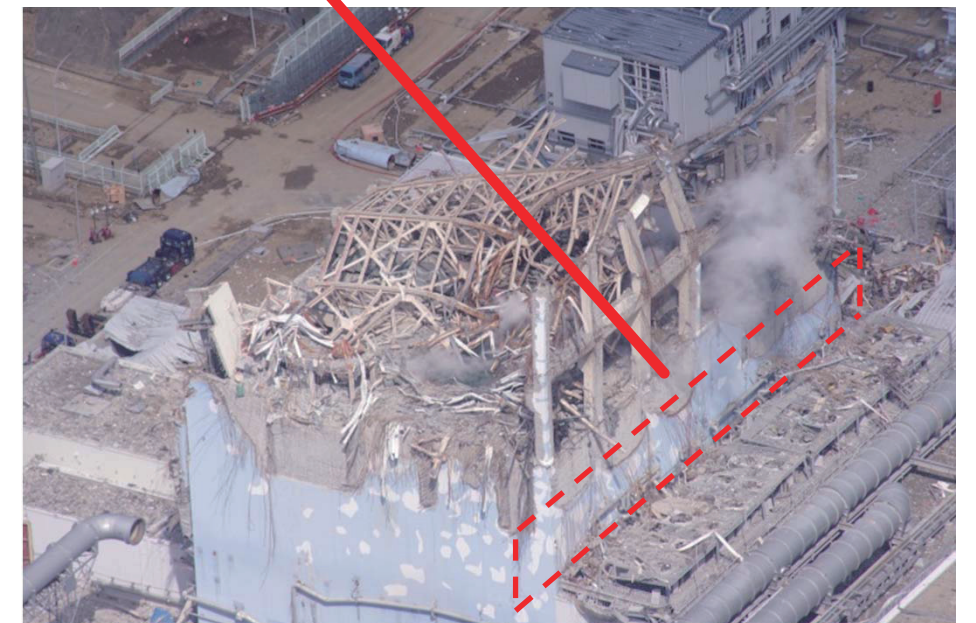
平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】

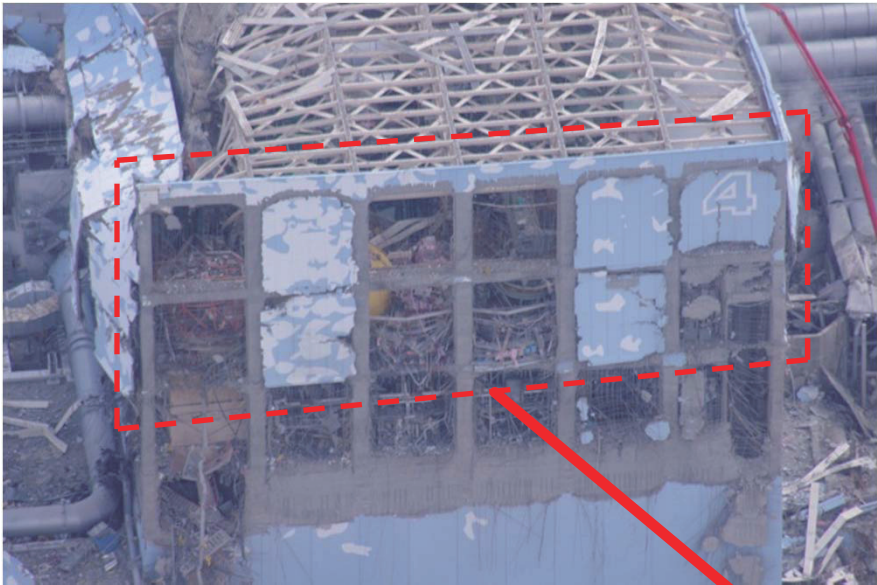


平成23年3月27日 防衛省撮影



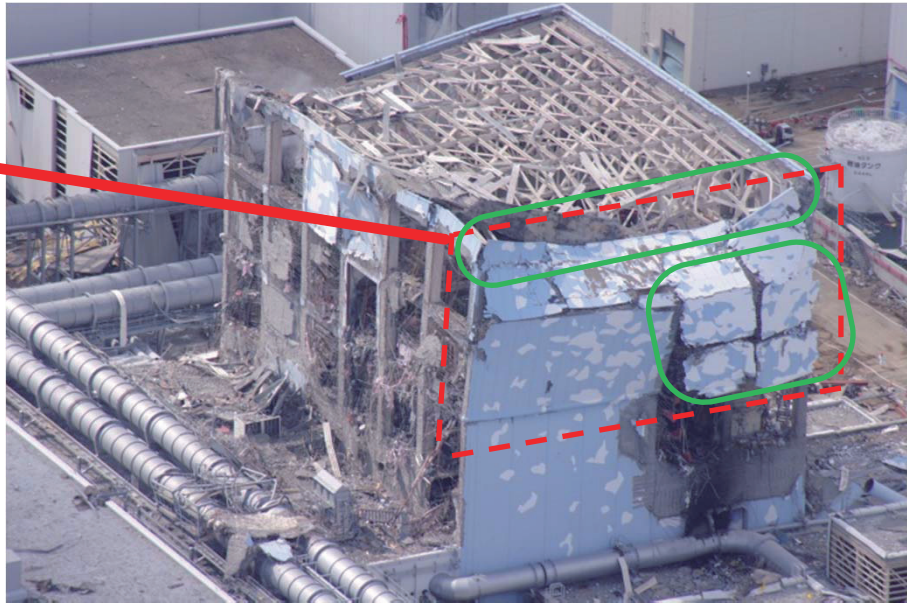
4号機R/Bの損傷状況

【西側壁面】



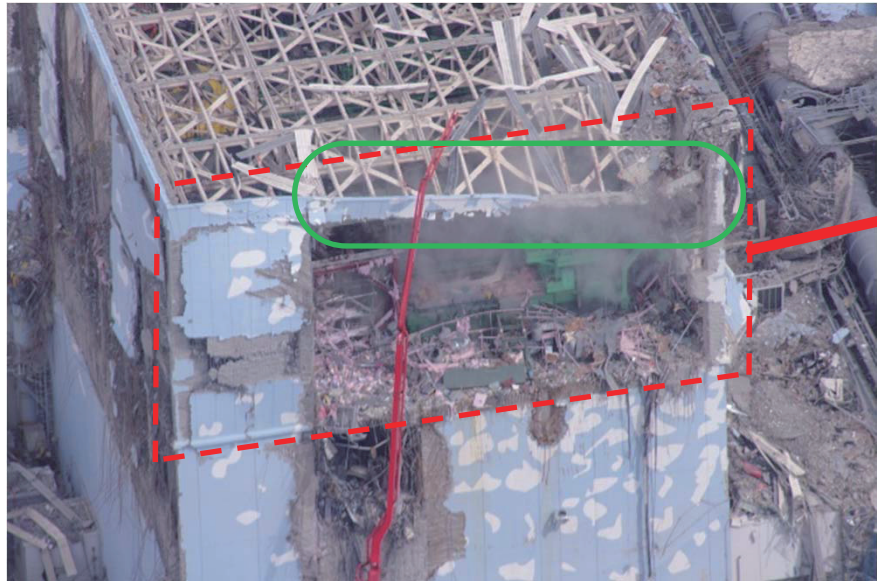
平成23年3月27日 防衛省撮影

【北側壁面】



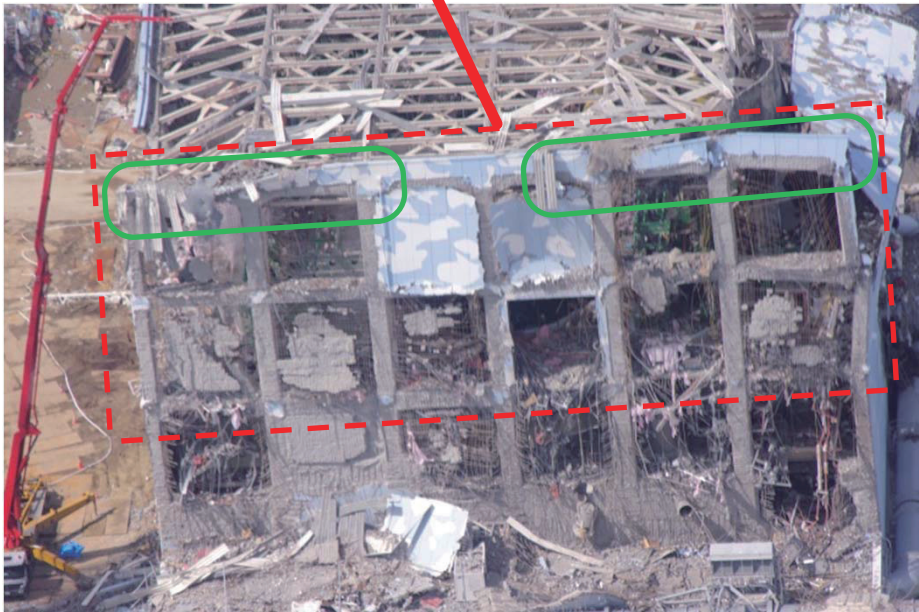
平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】

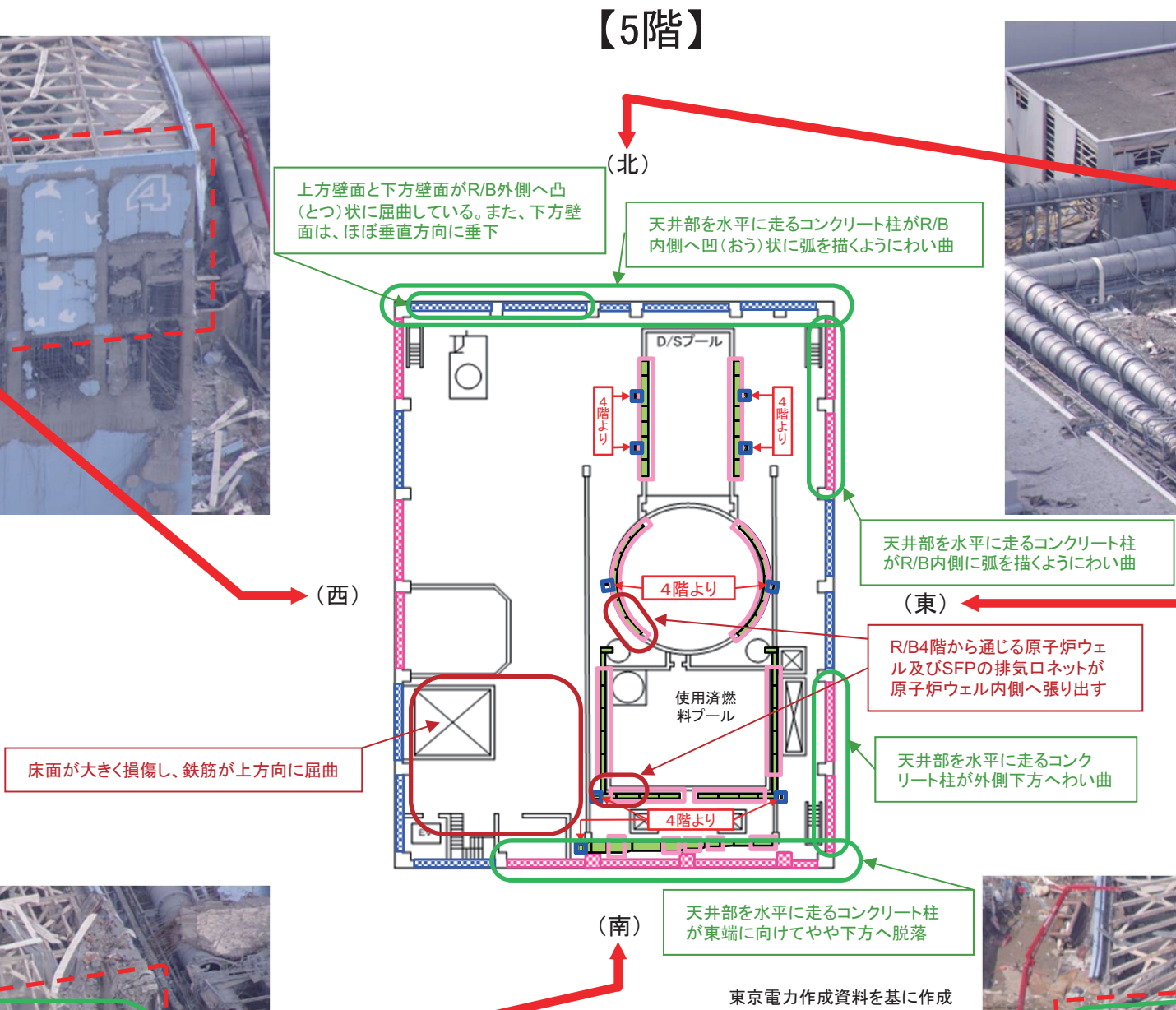


平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

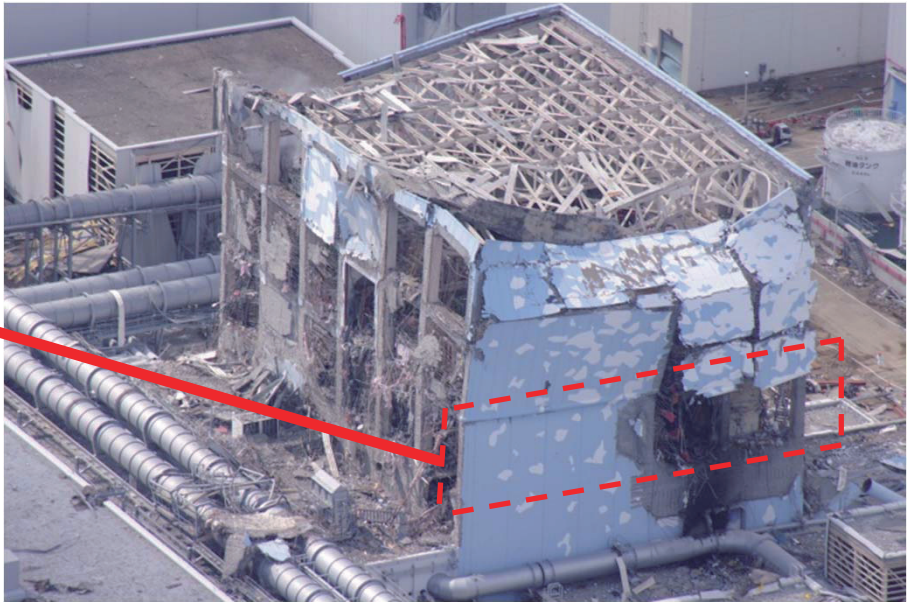


凡例	
	: 全壊
	: 一部損傷
	: 排気ダクト
	: 排気口
	: 下階との接続部



4号機R/Bの損傷状況

【北側壁面】



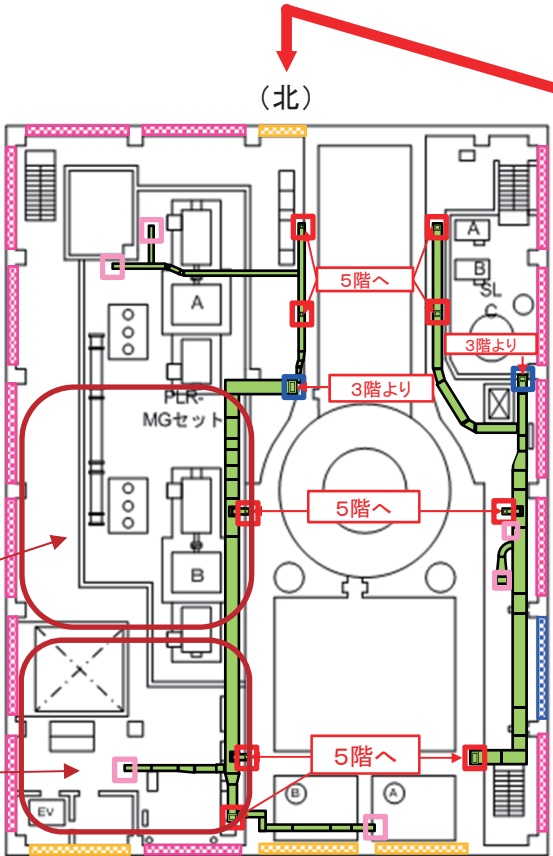
平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【4階】

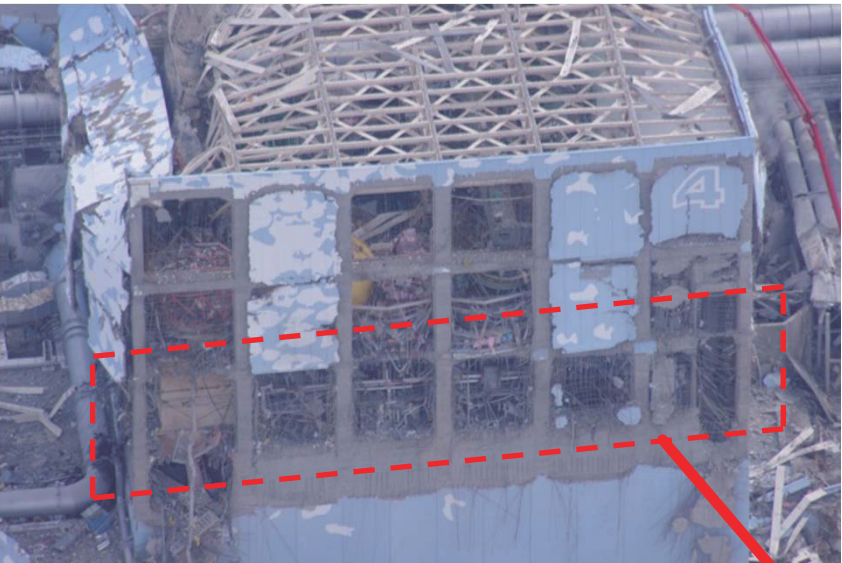


東京電力作成資料を基に作成

凡例

- : 全壊
- : 一部損傷
- : 表面損傷
- : 排気ダクト
- : 排気口
- : 下階との接続部
- : 上階との接続部

【西側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

5階フロア床の損傷が大きい箇所の直下付近の床面が下方に変形し、排気ダクトの残がいと推定されるがれきが多数存在

排気ダクトが粉碎されて原形をとどめておらず、4階床が爆発の影響で3階方向へ沈下

(西)

(北)

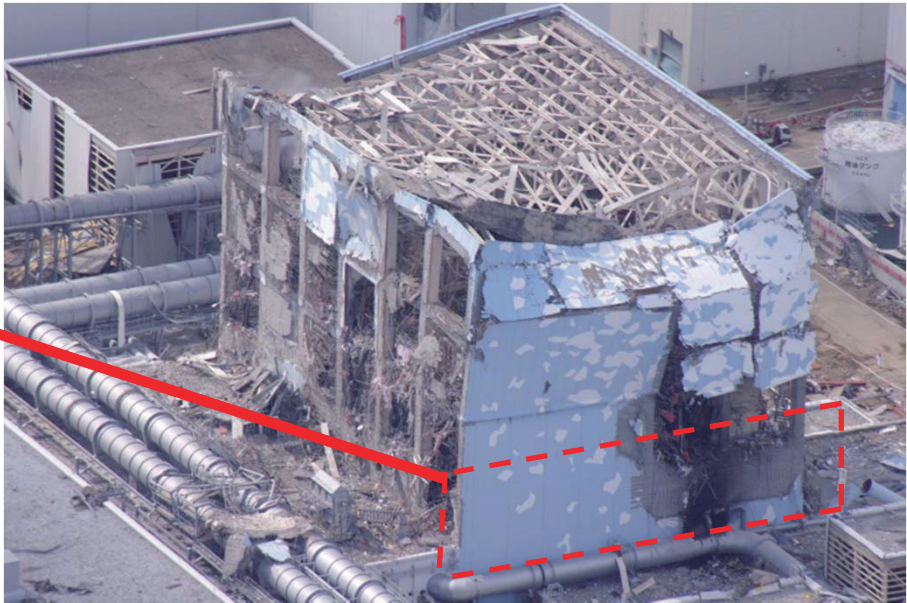
(東)

(南)



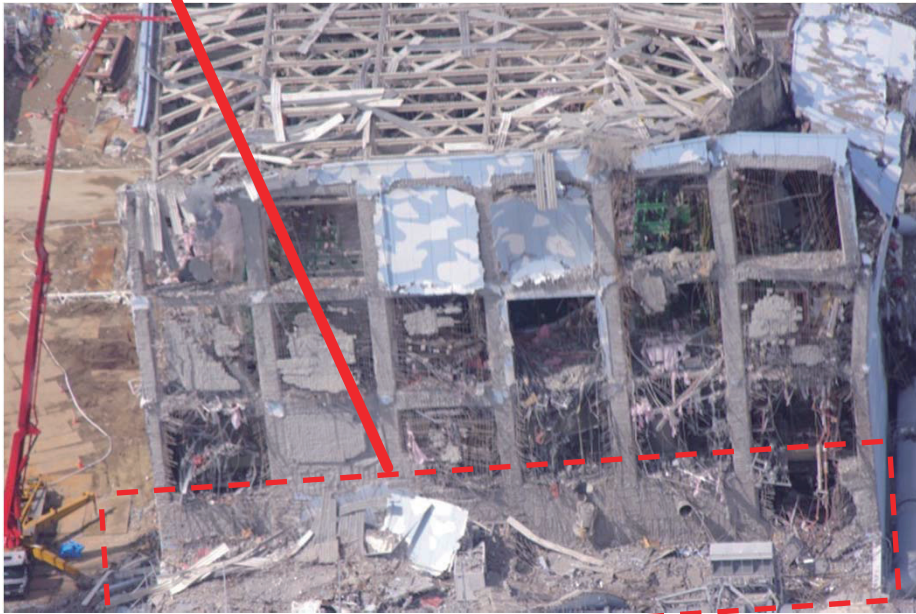
4号機R/Bの損傷状況

【北側壁面】



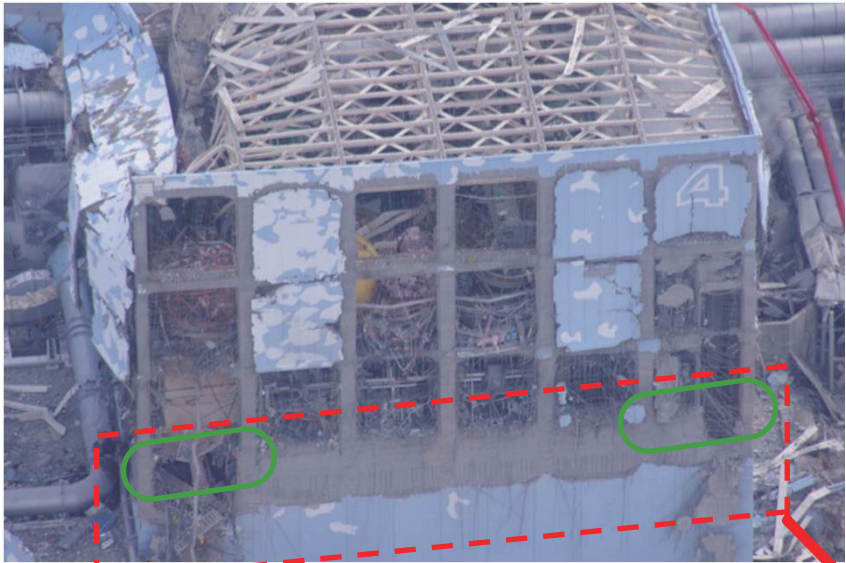
平成23年3月27日 防衛省撮影

【東側壁面】



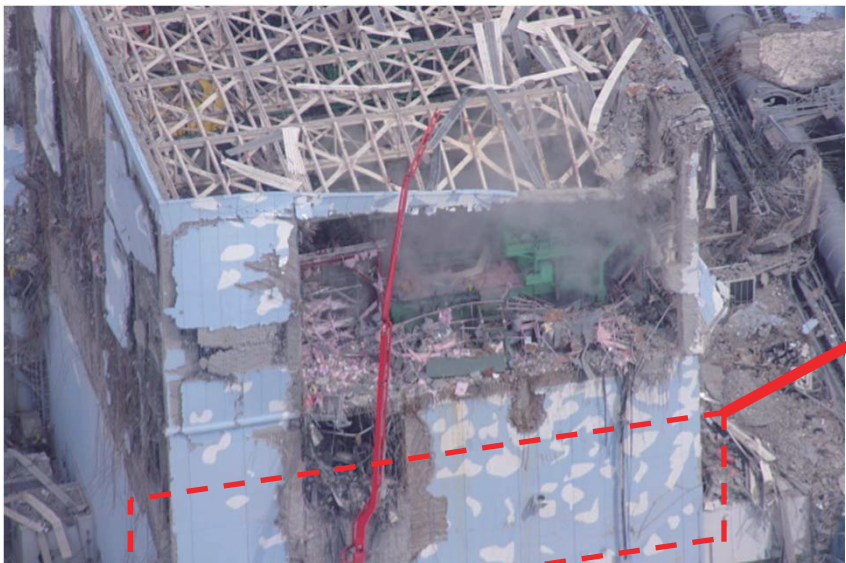
平成23年3月27日 防衛省撮影

【西側壁面】



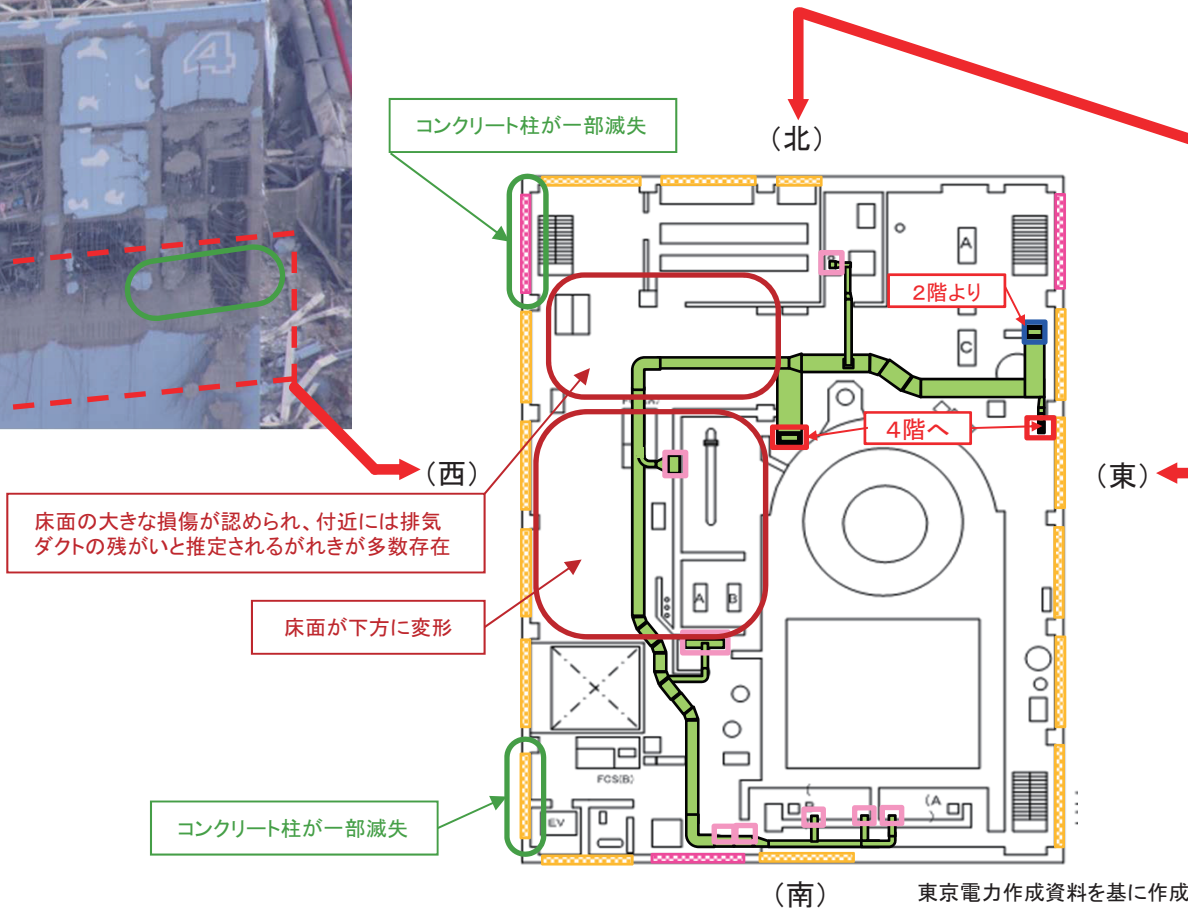
平成23年3月27日 防衛省撮影

【南側壁面】



平成23年3月27日 防衛省撮影

【3階】



凡例

- 全壊
- 表面損傷
- 排気ダクト
- 排気口
- 下階との接続部
- 上階との接続部

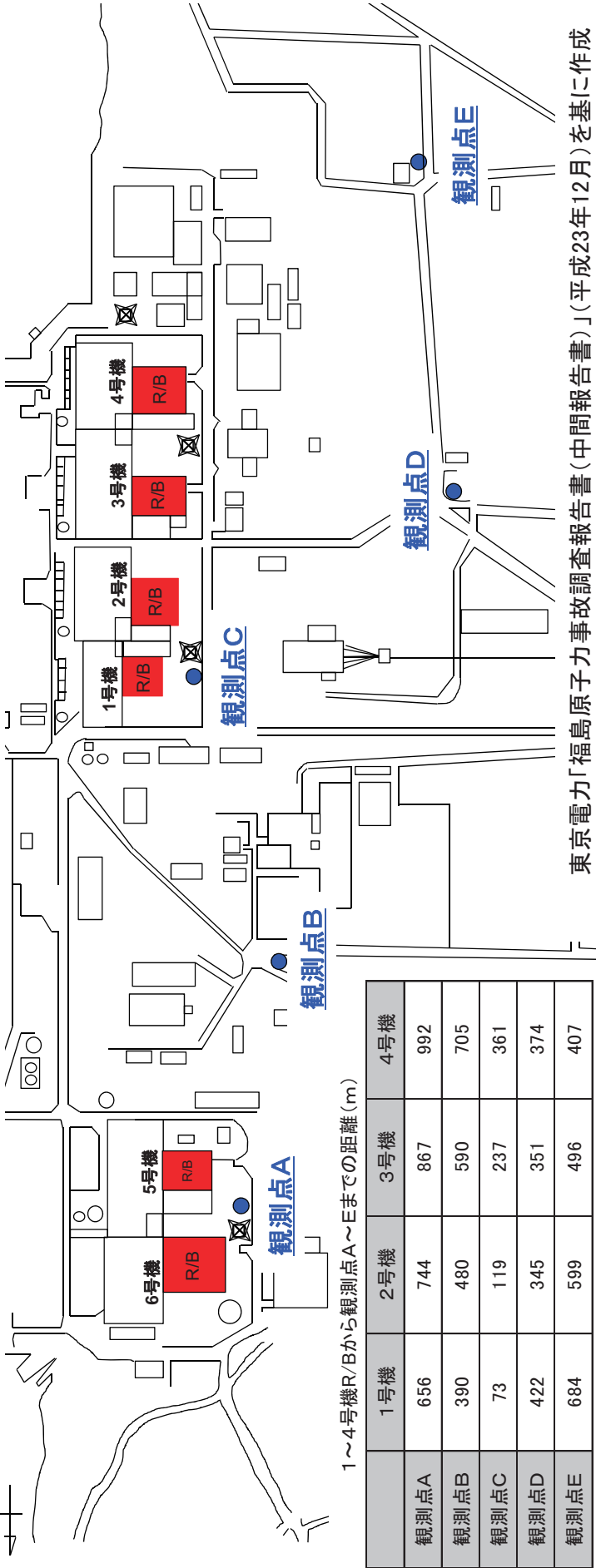


福島第一原子力発電所構内における地震観測記録計設置箇所

1号機、3号機及び4号機R/B爆発時に地震観測記録計が観測した最大加速度値 (Gal)

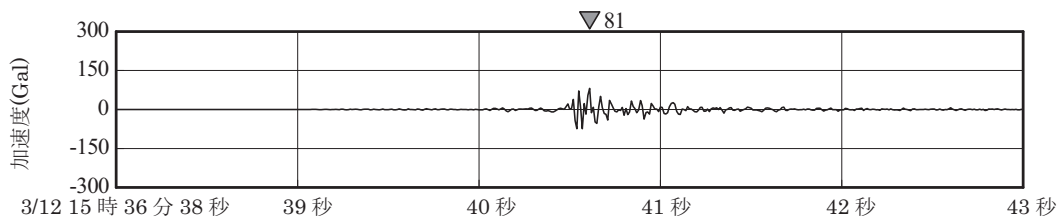
	1号機爆発 (3月12日15時36分頃)			3号機爆発 (3月14日11時1分頃)			4号機爆発 (3月15日6時12分頃)		
	南北方向	東西方向	上下方向	南北方向	東西方向	上下方向	南北方向	東西方向	上下方向
観測点A	81	52	120	14	15	21	2	2	2
観測点B	284	129	138	45	18	28	4	3	3
観測点C	2,320※	2,392※	1,956	115	158	490	11	9	6
観測点D	102	91	231	36	51	173	6	7	11
観測点E	39	22	26	26	24	30	5	5	11

※センサーの規格値(2,000Gal)を上回っているため、参考値。

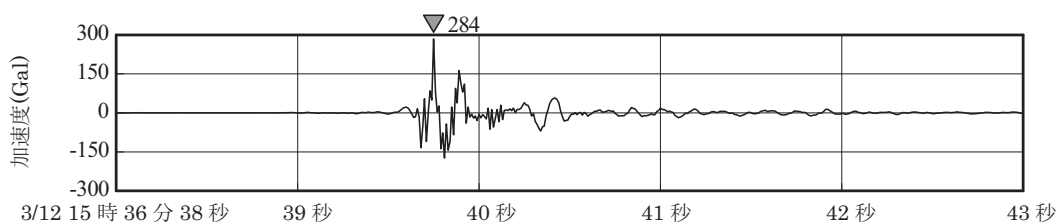


東京電力「福島原子力事故調査報告書(中間報告書)」(平成23年12月)を基に作成

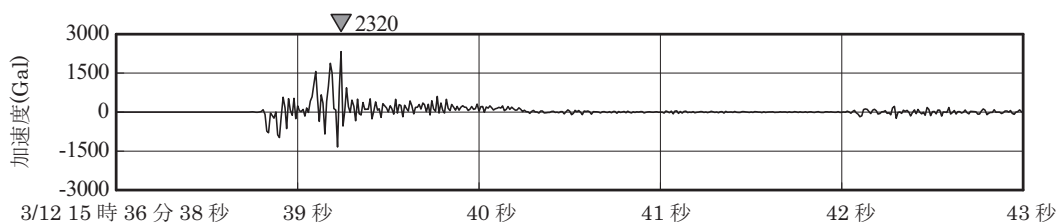
【観測点 A】



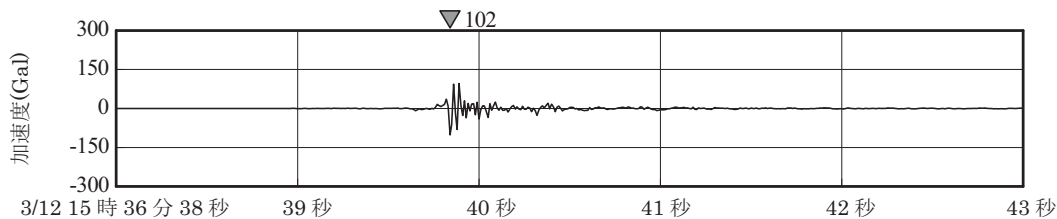
【観測点 B】



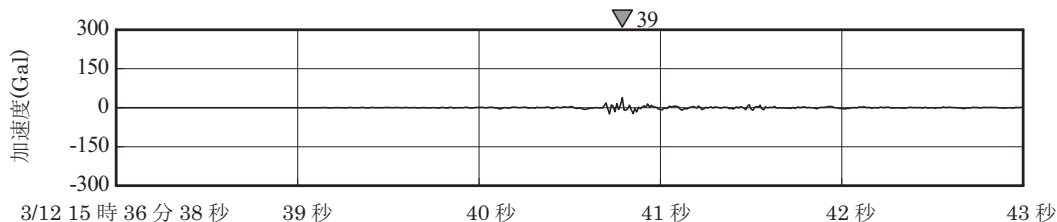
【観測点 C】 ※センサーの規格値（2,000Gal）を上回っているため、参考値。



【観測点 D】

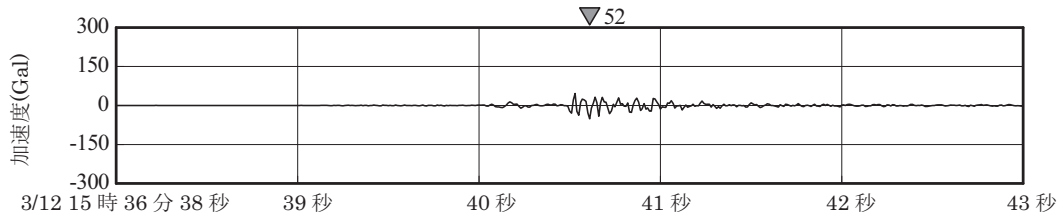


【観測点 E】

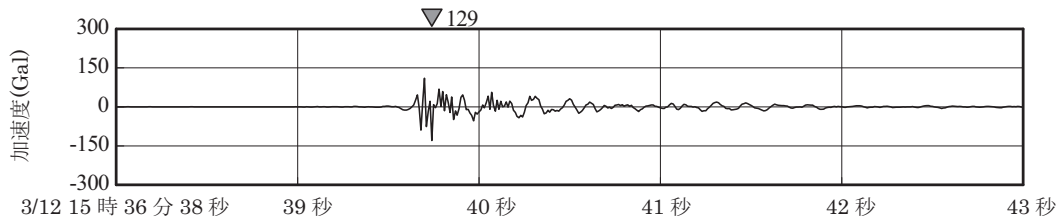


1号機爆発時の加速度波形(南北方向)

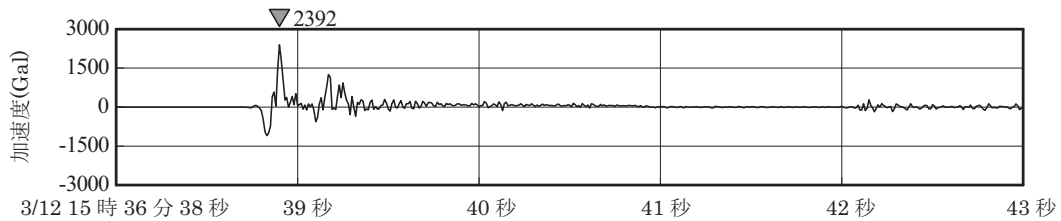
【観測点 A】



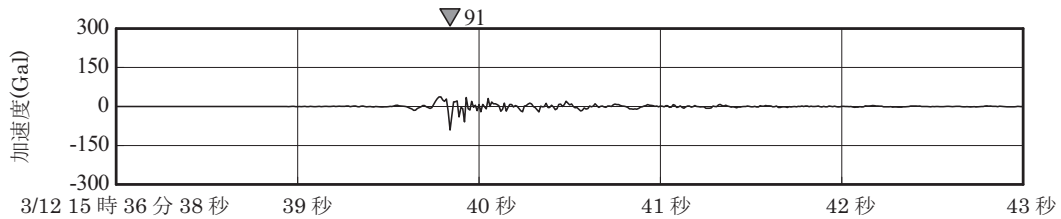
【観測点 B】



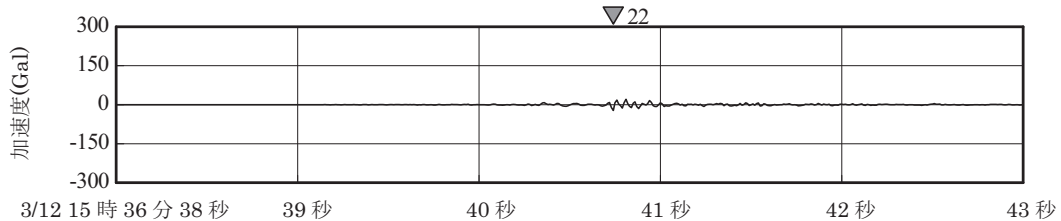
【観測点 C】 ※センサーの規格値（2,000Gal）を上回っているため、参考値。



【観測点 D】

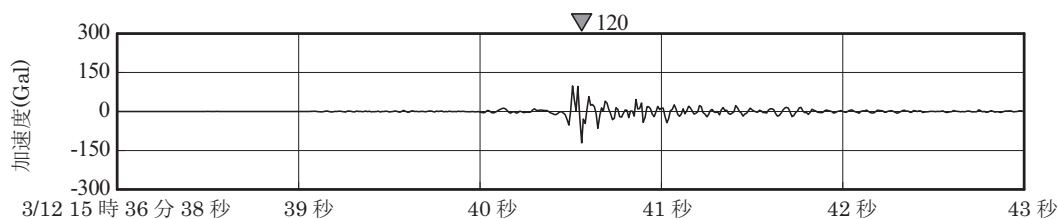


【観測点 E】

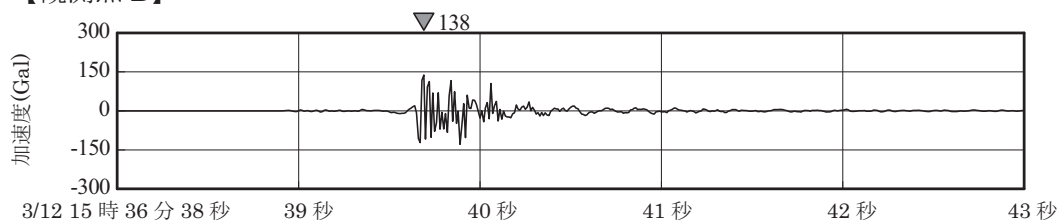


## 1号機爆発時の加速度波形（東西方向）

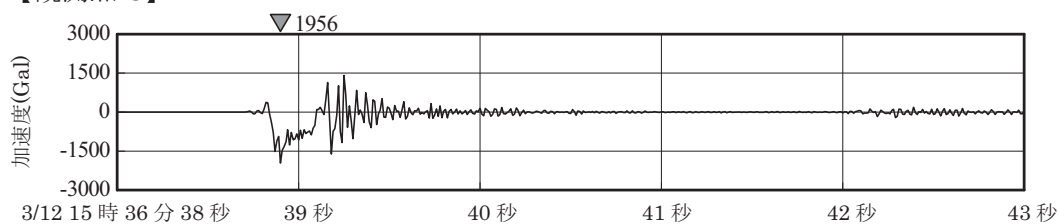
【観測点 A】



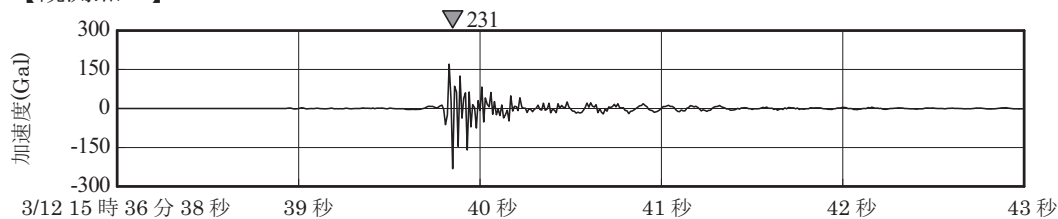
【観測点 B】



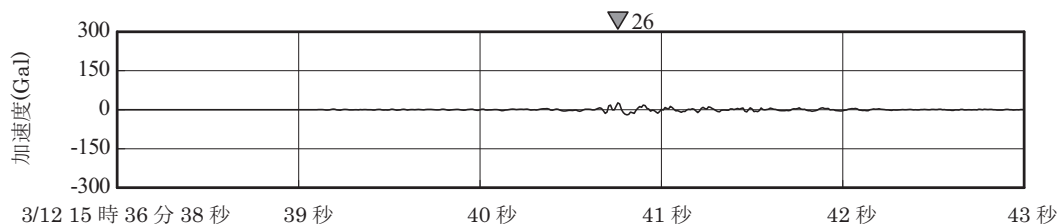
【観測点 C】



【観測点 D】

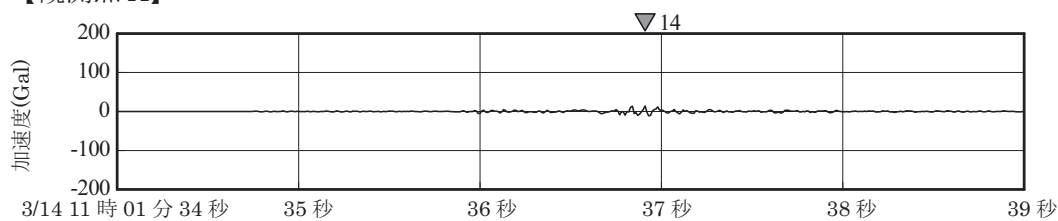


【観測点 E】

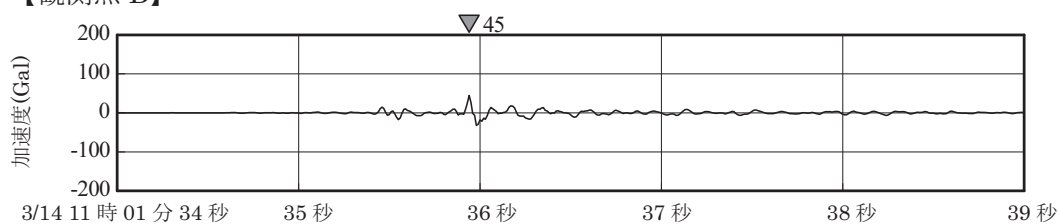


1号機爆発時の加速度波形(上下方向)

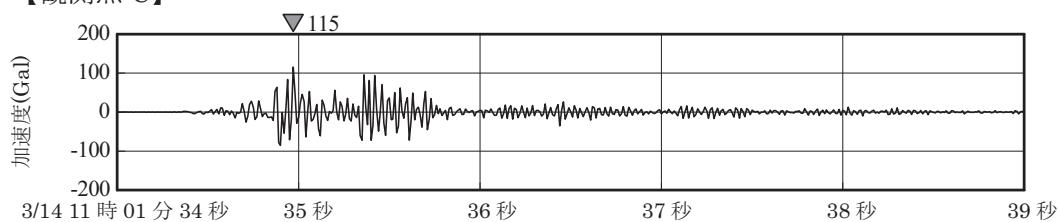
【観測点 A】



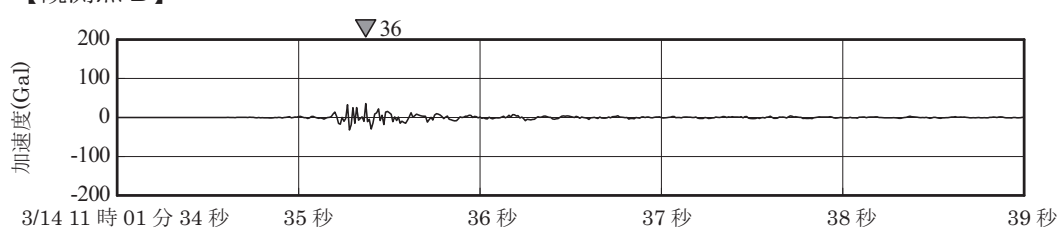
【観測点 B】



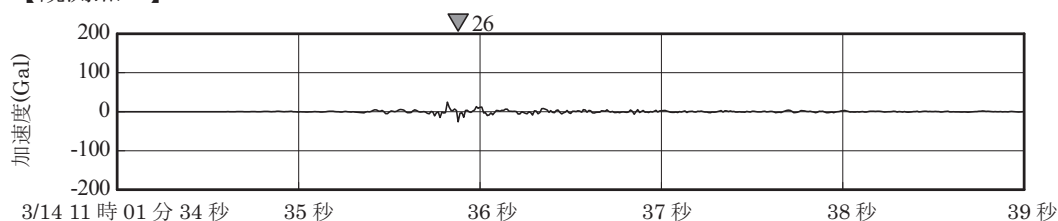
【観測点 C】



【観測点 D】



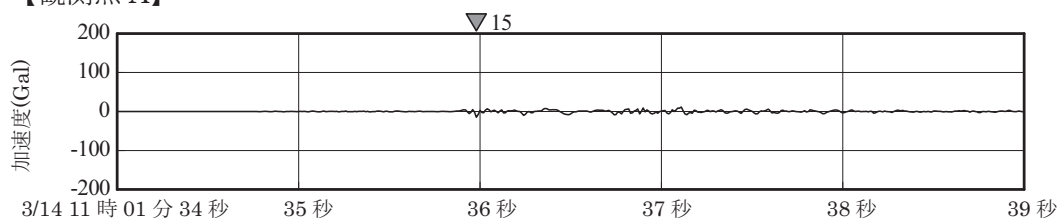
【観測点 E】



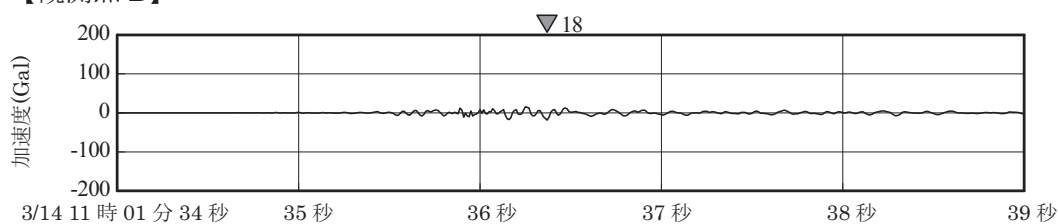
### 3号機爆発時の加速度波形(南北方向)



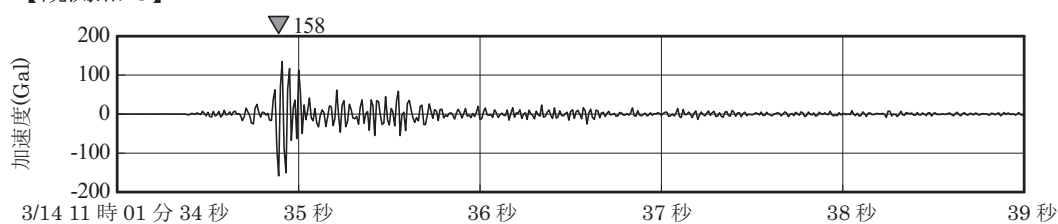
【観測点 A】



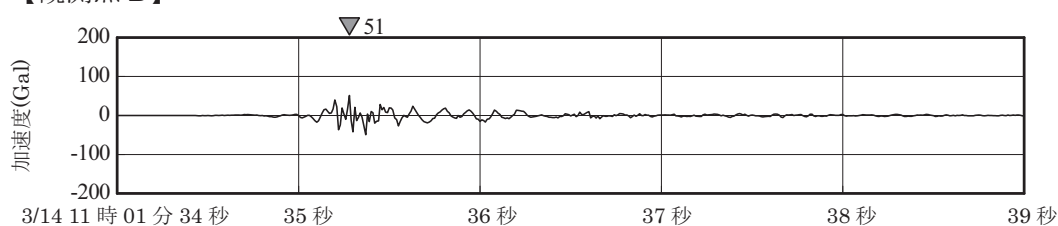
【観測点 B】



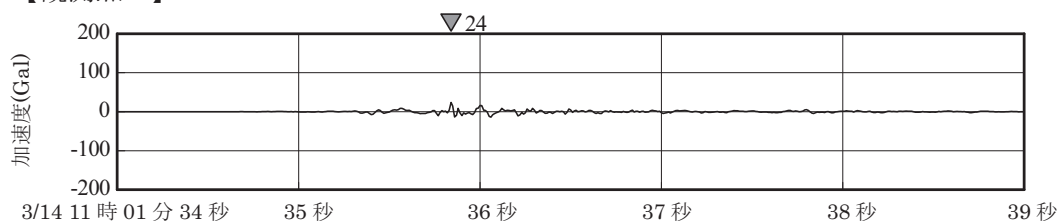
【観測点 C】



【観測点 D】



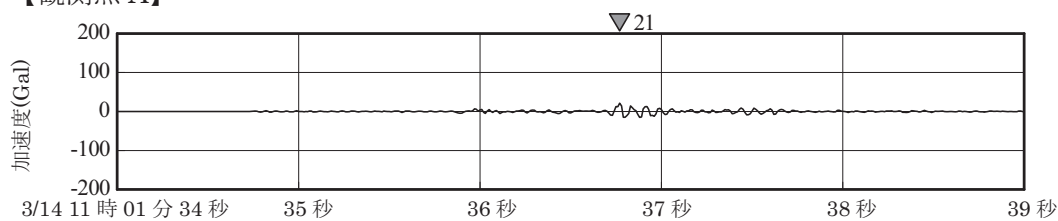
【観測点 E】



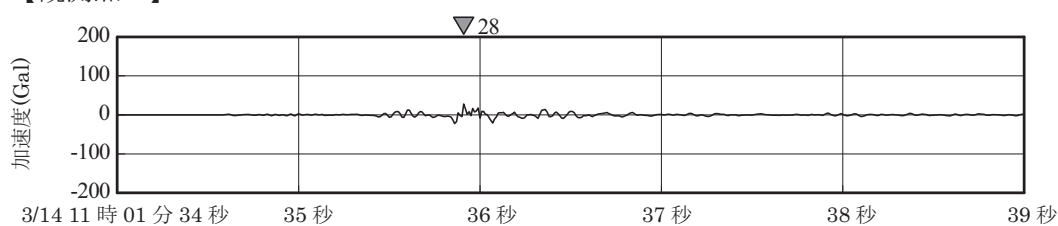
### 3号機爆発時の加速度波形(東西方向)

東京電力作成資料を基に作成

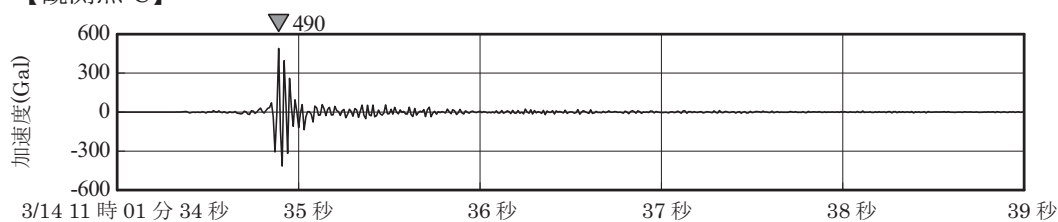
【観測点 A】



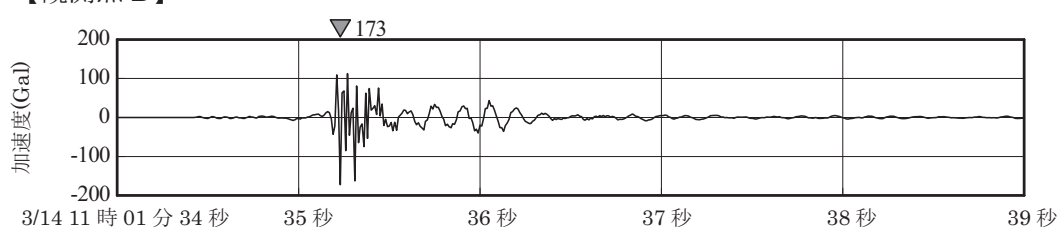
【観測点 B】



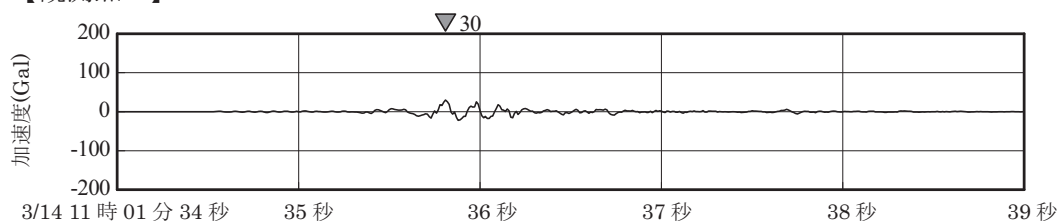
【観測点 C】



【観測点 D】

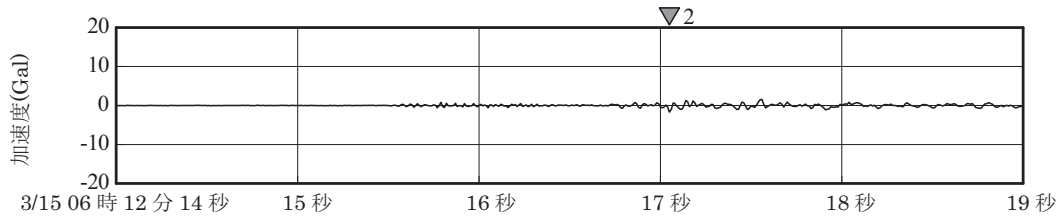


【観測点 E】

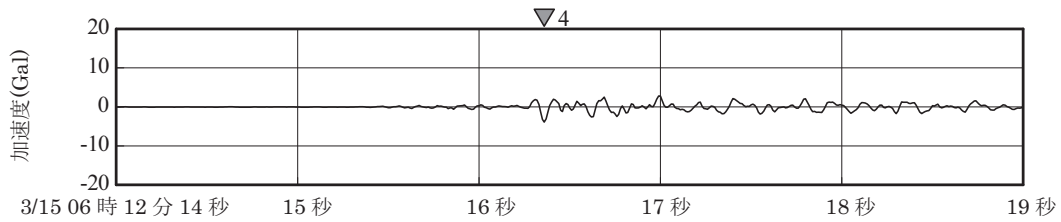


### 3号機爆発時の加速度波形(上下方向)

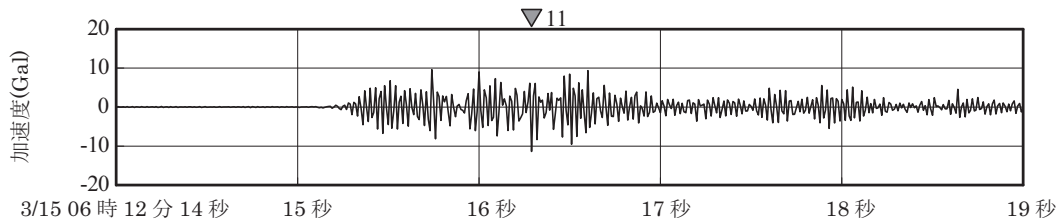
【観測点 A】



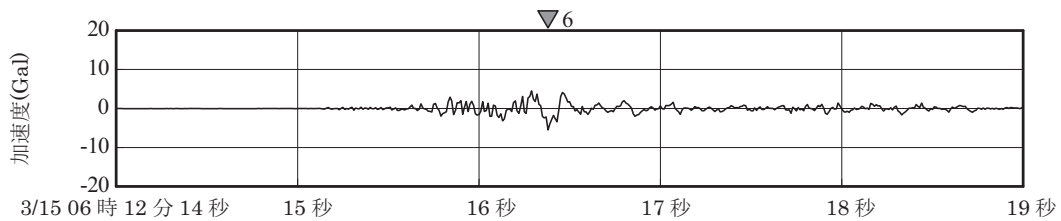
【観測点 B】



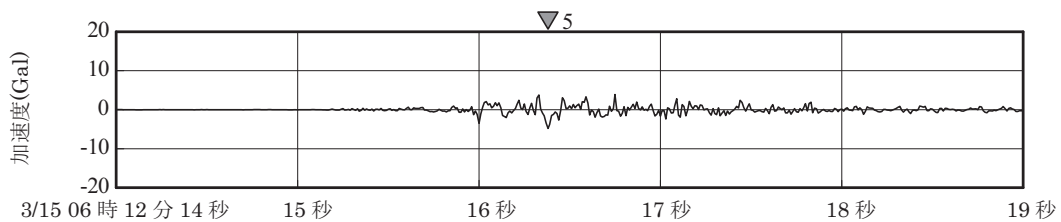
【観測点 C】



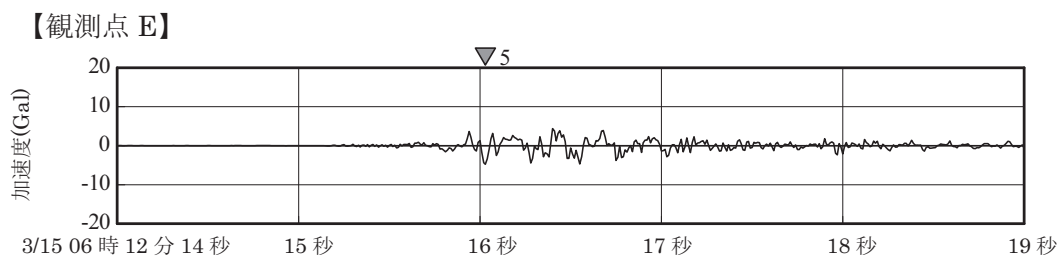
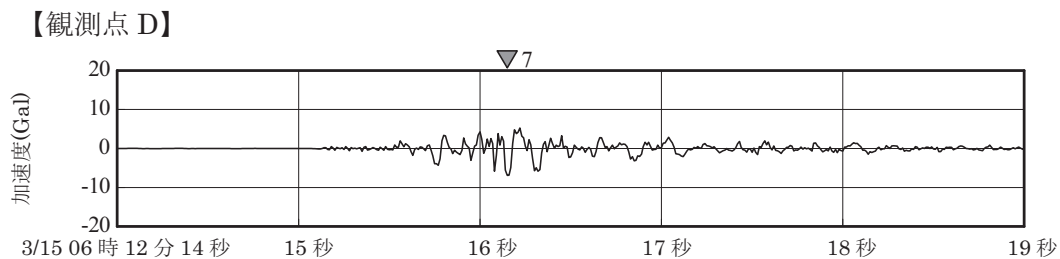
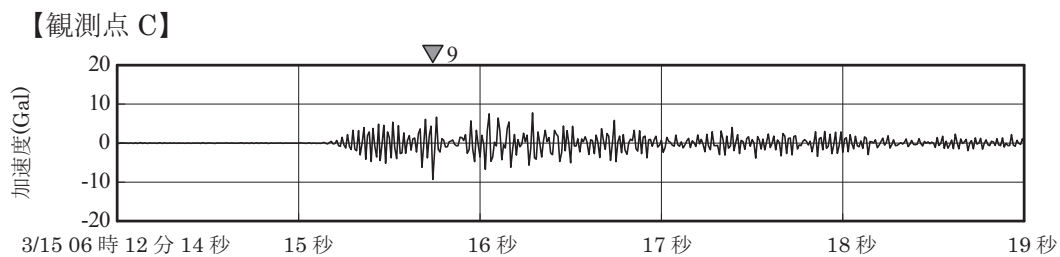
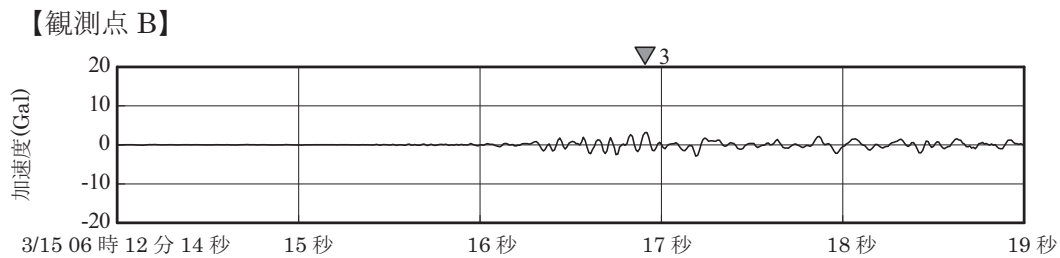
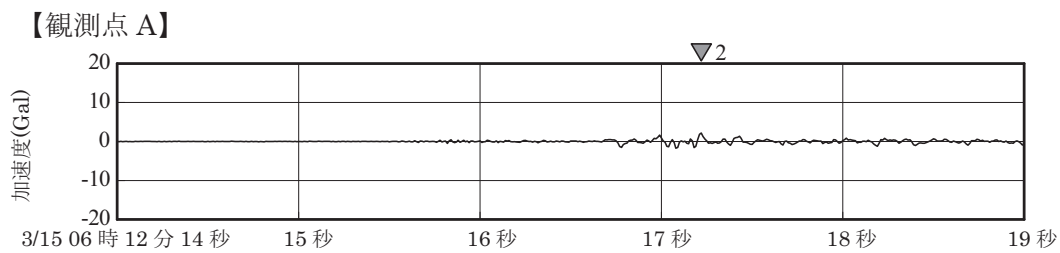
【観測点 D】



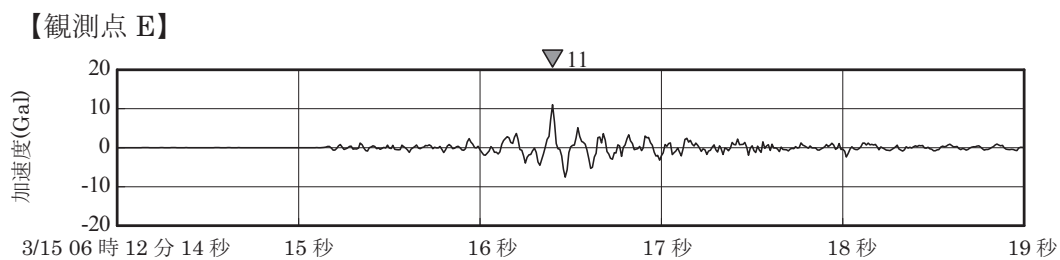
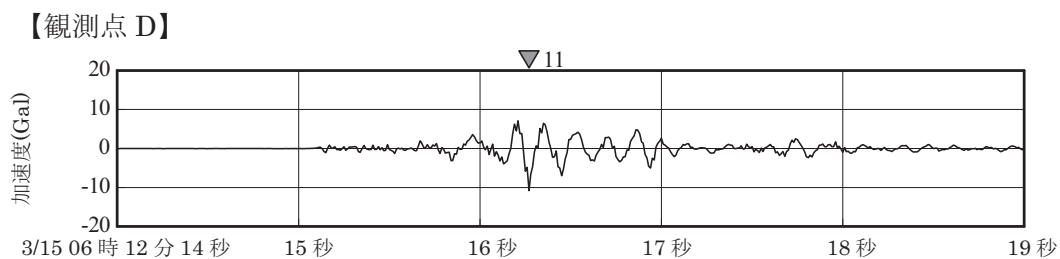
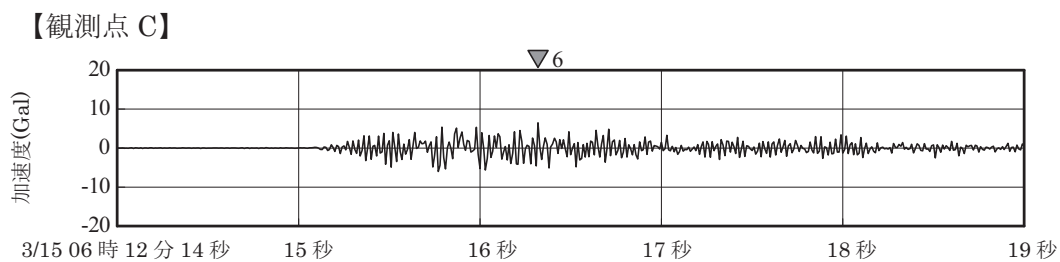
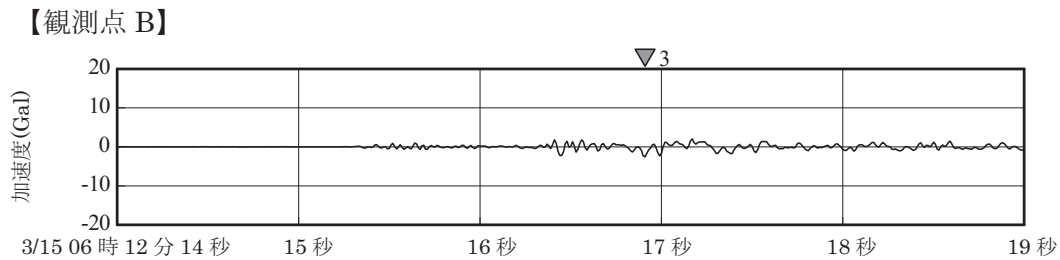
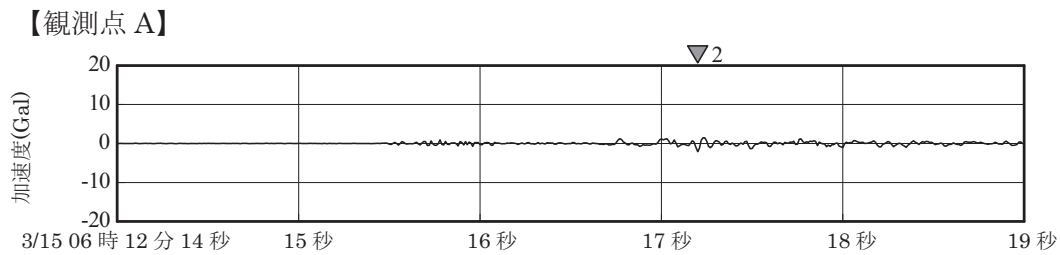
【観測点 E】



#### 4号機爆発と推定される時刻の加速度波形(南北方向)



#### 4号機爆発と推定される時刻の加速度波形(東西方向)



4号機爆発と推定される時刻の加速度波形(上下方向)