

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37回会合

議事次第

1. 日 時 令和5年4月24日（月）14：00～18：00

2. 場 所 原子力規制委員会 13階BCD会議室

3. 議 題

(1) 1号機原子炉格納容器内部調査の進捗状況について

〔 ・1号機 ROV-A2 によるペDESTAL内部等の詳細目視 〕

(2) ケーブル加熱試験等の状況について

〔 ・日本原子力研究開発機構におけるケーブル加熱試験 〕

〔 ・東京電力ホールディングス株式会社におけるケーブル加熱試験 〕

(3) 水素燃焼試験の状況について

〔 ・水素及び可燃性有機ガスの燃焼試験 〕

(4) 1号機原子炉補機冷却系熱交換器の高汚染について

〔 ・1号機原子炉補機冷却系統の現地調査の状況 〕

(5) その他

〔 ・日本原子力研究開発機構における凝縮による水素局所化に関する解析 〕

〔 ・4号機及び5号機原子炉建屋内調査 〕

4. 配布資料

資料1：1号機原子炉格納容器内部調査の状況について〔技術研究組合国際廃炉研究開発機構 東京電力ホールディングス株式会社〕

資料2-1：BWR 格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析結果〔国立研究開発法人日本原子力研究開発機構〕

資料2-2：ケーブルなどから発生する可燃性ガス発生量評価及び可燃性有機ガス燃焼試験進捗状況〔東京電力ホールディングス株式会社〕

資料3：東京電力福島第一原子力発電所事故時の水素爆発における可燃性有機ガスの影響に関する調査 [国立大学法人長岡技術科学大学]

資料4：1号機原子炉補機冷却系統の現地調査の状況 [原子力規制庁]

資料5-1：CIGMA装置体系での凝縮による水素局所化に関するCFD解析 [国立研究開発法人日本原子力研究開発機構]

資料5-2：現地調査の実施状況（5号機原子炉建屋、4号機原子炉建屋） [原子力規制庁]

1号機 原子炉格納容器内部調査の状況について

2023年4月24日

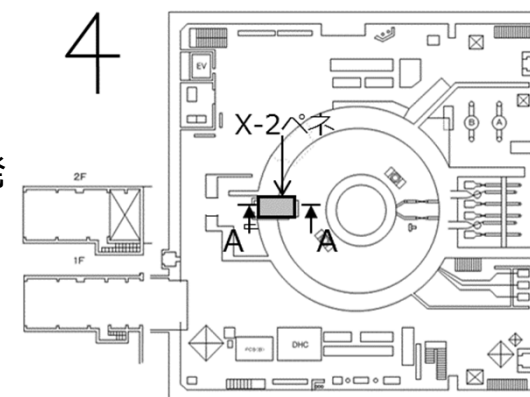
IRID **TEPCO**

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構
東京電力ホールディングス株式会社

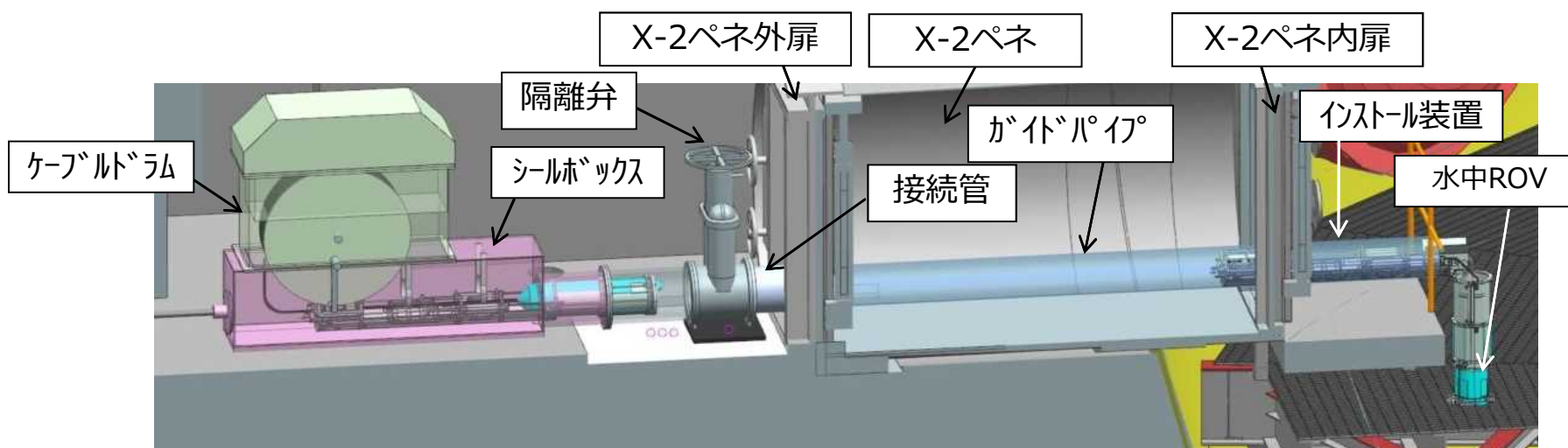
1. 1号機PCV内部調査の概要

- 1号機原子炉格納容器（以下，PCV）内部調査は，X-2ペネトレーション（以下，X-2ペネ）から実施
- PCV内部調査に用いる調査装置（以下，水中ROV）はPCV内の水中を遊泳する際の事前対策用と調査用の全6種類の装置を開発
- 水中ROV調査ステップ

- | | | |
|---------------|----------|-------------------|
| 前半調査
(調査済) | ① ROV-A | 事前対策となるガイドリング取付 |
| | ② ROV-A2 | ペDESTAL外の詳細目視 |
| | ③ ROV-C | 堆積物厚さ測定 |
| 後半調査
(調査済) | ④ ROV-D | 堆積物デブリ検知・評価 |
| | ⑤ ROV-E | 堆積物サンプリング |
| | ⑥ ROV-B | 堆積物3Dマッピング |
| | ⑦ ROV-A2 | ペDESTAL内部、壁部の詳細目視 |



1号機原子炉建屋1階におけるX-2ペネの位置



内部調査時のイメージ図 (A-A矢視)

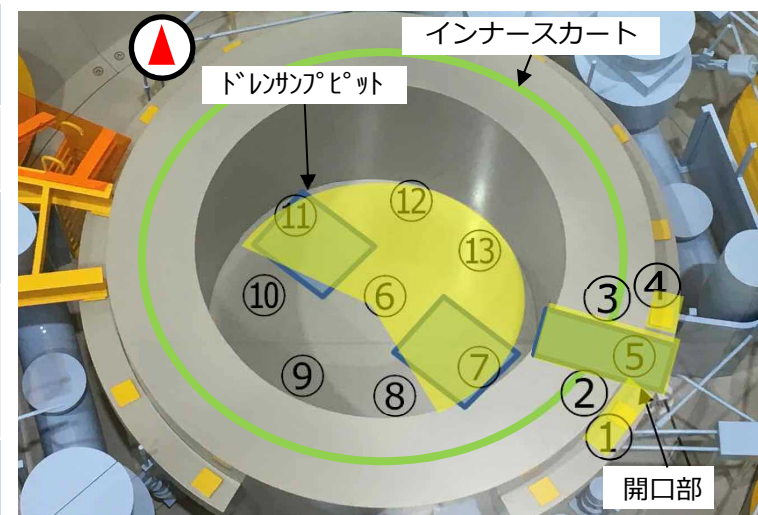
2.ROV-A2調査(後半)の実施状況について

- ROV-A2調査(後半)では、主にペDESTAL開口部やペDESTAL内部を撮影し、ペDESTAL基礎部、ペDESTAL内構造物、堆積物等を確認
- ROVの遊泳範囲として、開口部外側からペDESTAL内部の北側（右下図：黄色エリア）まで到達することができたが、南側は寄り付きでの調査はできていない
- 南側の映像については、ペDESTAL開口部(⑤)の位置や遊泳時の撮影映像から状況を確認

【ROV-A2調査順序】

実施日	場所	調査箇所
3/28	①⇒②⇒③⇒④⇒⑤	ペDESTAL外部
3/29	⑪⇒⑫⇒⑬⇒⑦	ペDESTAL内部
3/30	⑬⇒⑥～⑦の間	ペDESTAL内部
3/31	⑤	ペDESTAL外部 ※⑤開口部まで進入 (ケーブル余長の関係のため)
未実施	⑧⑨⑩	ペDESTAL内部 ※⑤からの遠距離撮影映像なら びに遊泳時の撮影映像あり

【1号機ペDESTAL内部】



ROV到達エリア：

3-1.ペDESTAL基礎部の状態について①

- ペDESTAL内側下部のコンクリートが一部消失している箇所（床面より1m程度）には配筋を確認
 - 配筋には、垂直方向の引っ張り荷重を支持する縦筋と、周方向の引っ張り荷重を支持する横筋が存在するが、縦筋は大きな変形がなく当初の形状を維持 <写真1>
 - 配筋は、製造時に施工されている格子状の凹凸が確認され、製造・据え付け時の寸法が維持されていると推定 <写真1,2>
- 配筋露出箇所の上部には、棚状堆積物が存在し、それより上部にはコンクリートが残存 <写真3>



写真1. ポイント⑪ペDESTAL基礎部



写真2. ポイント⑫ペDESTAL基礎部

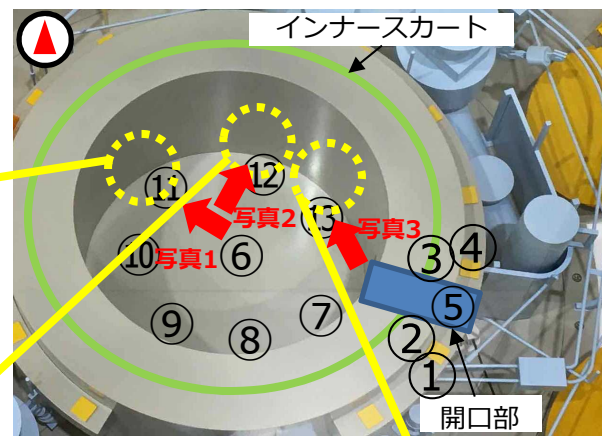
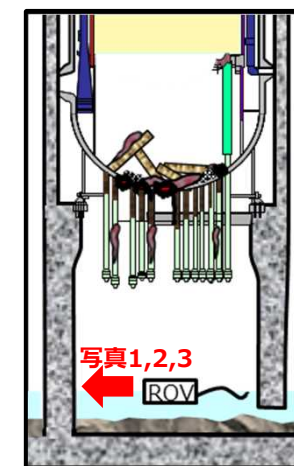


写真3. ペDESTAL内の棚状堆積物と壁面部

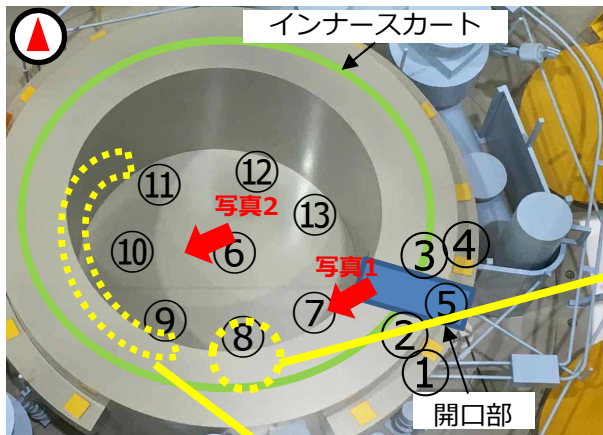
ペDESTAL縦断面(推定)



(※CRD：制御棒駆動機構)

3-2.ペDESTAL基礎部の状態について②

- 調査箇所⑧、⑨、⑩については、ROVが到達できなかったものの、調査箇所⑤にて撮影した映像や、ROVが遊泳中に撮影した映像からペDESTAL基礎部の状態を確認 <写真1,2>
- 確認した基礎部の状態は他の調査箇所と似ている状態であり、ペDESTAL内側下部のコンクリートが一部消失している箇所には配筋を確認 <写真1,2>
- 配筋より奥については、一部（調査箇所⑦）においてインナースカートに至るまでのコンクリートの消失を確認 <P28_写真5参照>



ペDESTAL縦断面(推定)

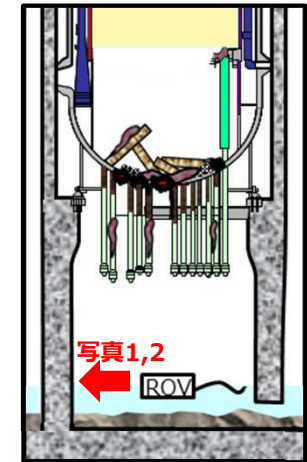


写真1. ポイント⑧ペDESTAL基礎部

画像処理：東京電力ホールディングス(株)



写真2. ポイント⑨、⑩ペDESTAL基礎部

画像処理：東京電力ホールディングス(株)

4.ペデスタル内部の状態(底部)

- ペデスタル内底部には、CRDハウジング以上に大きな構造物は確認されず、CRD交換機については本体は確認されず、CRD交換機レール・車輪を部分的に確認 <写真1,2>
- ペデスタル内底部には、床面全域にわたり高さ1 m未満の堆積物があり、CRDハウジング等の上部の構造物が部分的に落下しているのを確認 <写真2,3>

ペデスタル縦断面(推定)

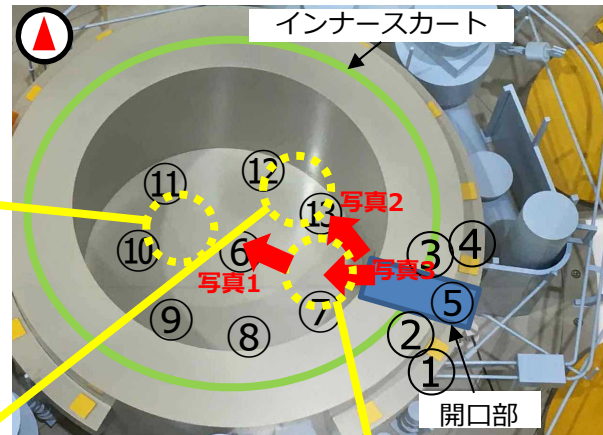
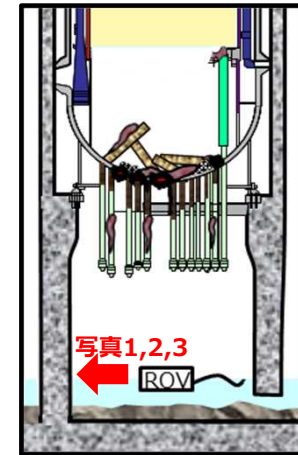


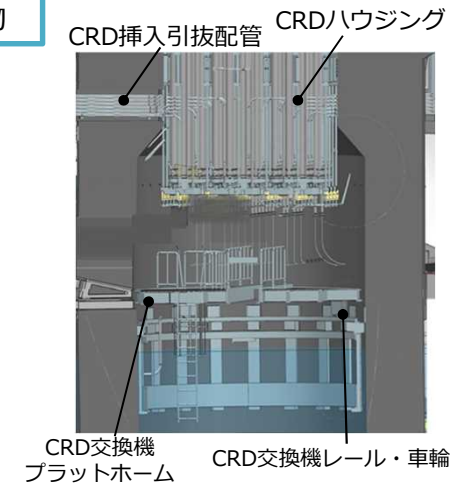
写真1.CRD交換機レールの車輪と思われる構造物



写真2. CRDハウジングと思われる構造物



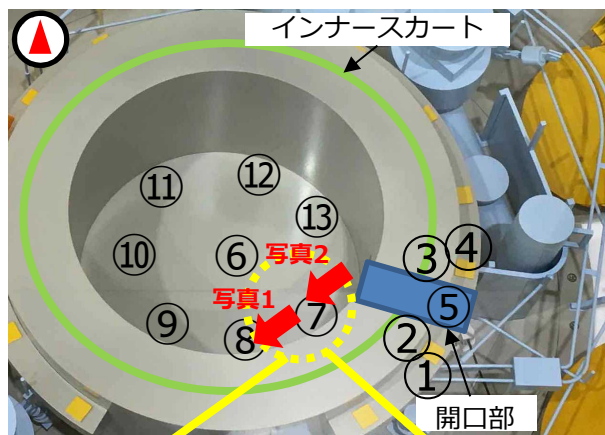
写真3. ペデスタル内開口付近堆積物



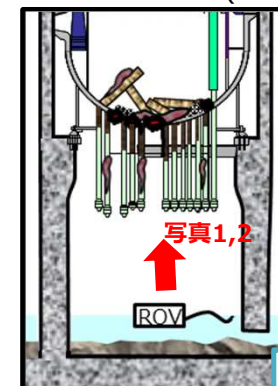
ペデスタル断面におけるCRD交換機イメージ図

5-1.ペDESTAL内部の状態(上部)①

- ペDESTAL上部にはCRDハウジング、CRDハウジングサポートを確認。一部は正規位置より下方に位置していることを確認(ペDESTAL底部に落下しているものもあり) <写真1,2>
- 下方に位置しているCRDハウジングは原形を留めており、溶融物が固化したと思われる塊が付着している箇所がある <写真2>
- 今回映像データを取得した、調査ポイント⑦の周辺においては、本来は映るはずの場所にCRDハウジングと思われる構造物からの反射がなく、一部が黒い空間のように見える箇所がある。この領域はCRDハウジングが脱落し、その上部にあるRPV底部に穴が開いている可能性が示唆される。 <写真2>



ペDESTAL縦断面(推定)



CRD挿入引抜配管と推定



写真1. CRDハウジングサポートと思われる構造物



写真2. CRD関連と思われる構造物

参考.震災前のペDESTAL内構造物

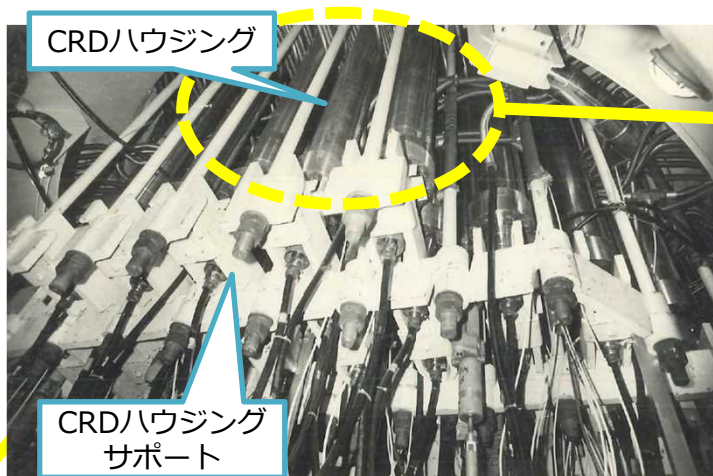
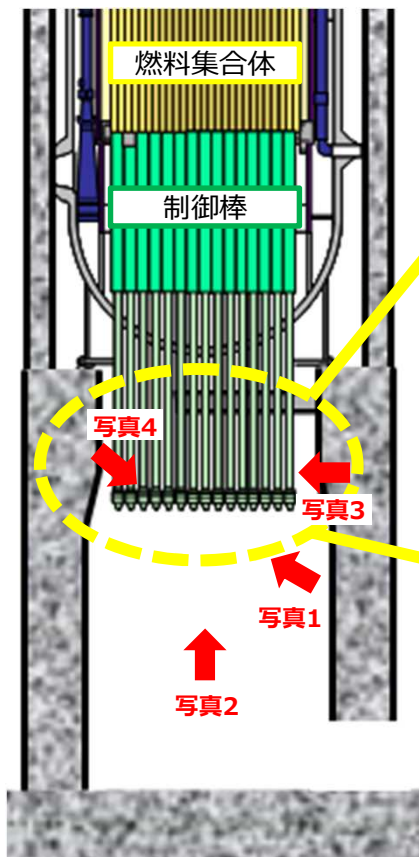


写真1. CRDハウジングサポートとCRDハウジング(建設当時)

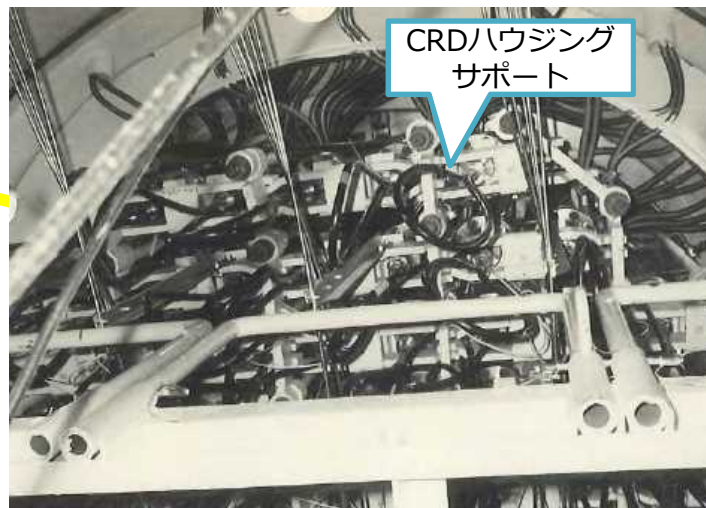


写真2. ペDESTAL上部方向を見上げた写真(建設当時)

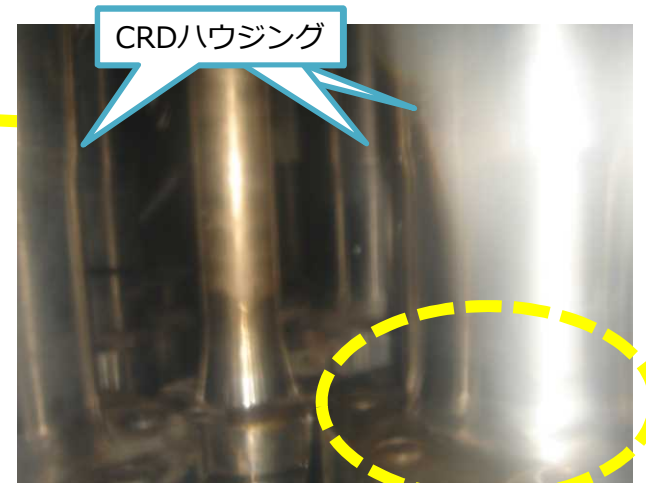


写真3. CRDハウジング(震災前)

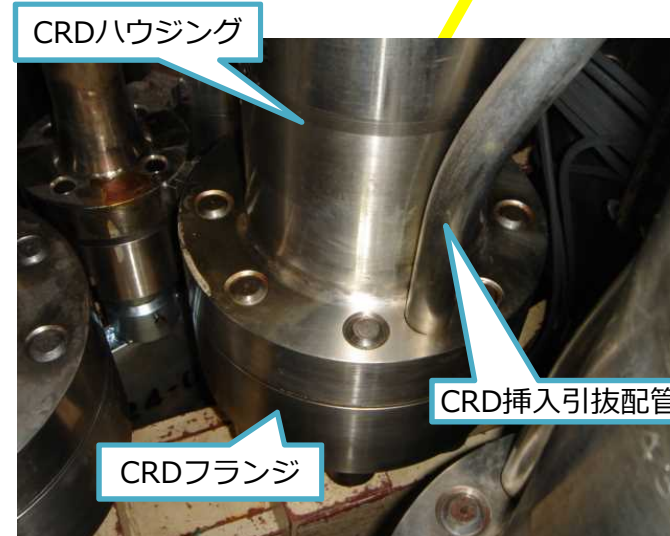


写真4. CRD関連機器 (震災前)

5-2.ペDESTAL内部の状態(上部)②

- ペDESTAL中央部にて原子炉注水による集中的な水の滴下を確認。このことから、RPV底部の中心部付近には開口部が存在し、そこから滴下していると推定。 <写真1,2>
- CRD交換用開口部に、上方より落下したCRDハウジングが存在していることを確認。今後、調査や廃炉作業において、当該開口部を活用する場合は、それを前提とした計画立案を検討することが必要 <写真3>



写真1. 炉注水停止前の水面の状況

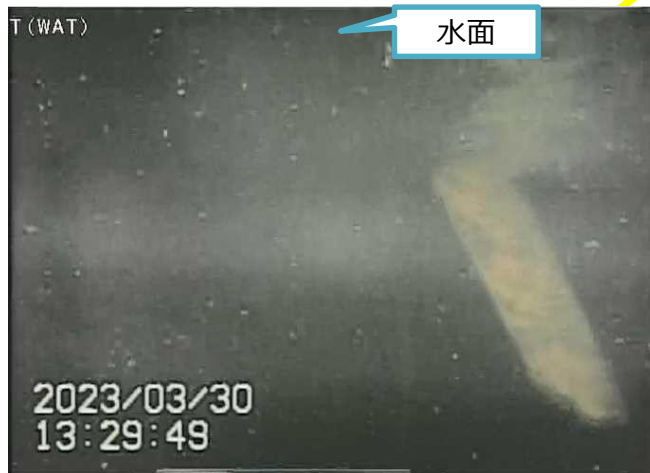
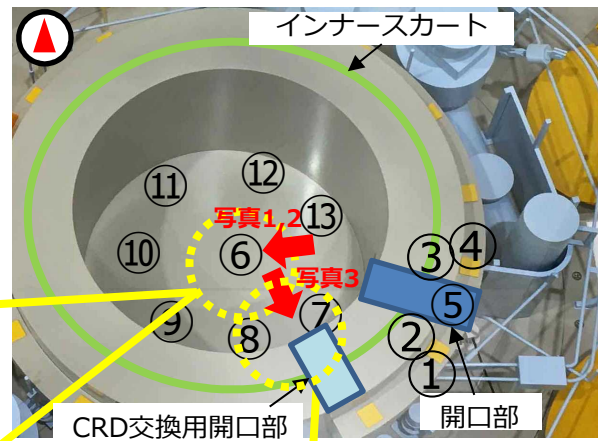
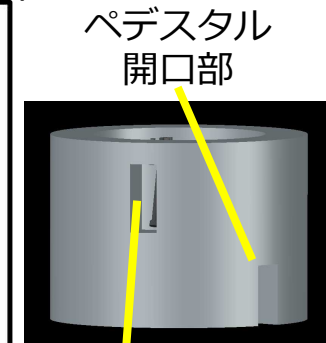
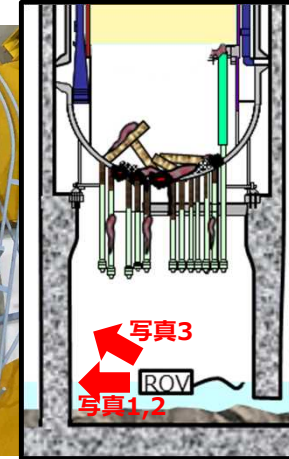


写真2. 炉注水停止後の水面の状況



ペDESTAL縦断面(推定)



CRD交換用 開口部

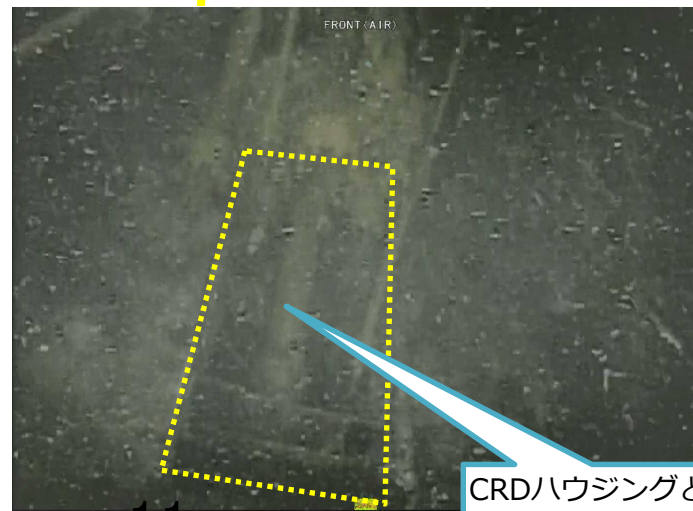
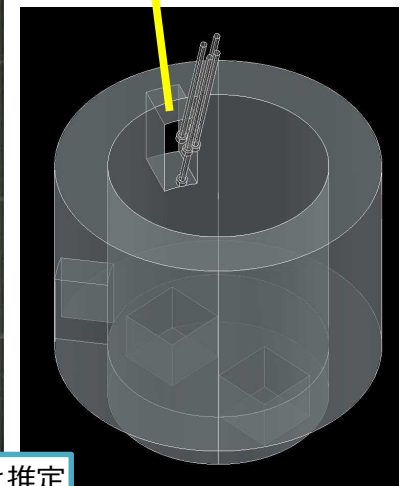


写真3. ペDESTAL内壁側のCRD交換用開口部の状態



6.ペDESTAL開口部付近の堆積物断面の状態

- ROV-A2の前半調査でも確認された、開口部付近の厚さ数cmの平板になっている棚状の堆積物の断面を接写したところ、層になっており、気泡のような空隙が表面に見えている多孔質である事を確認

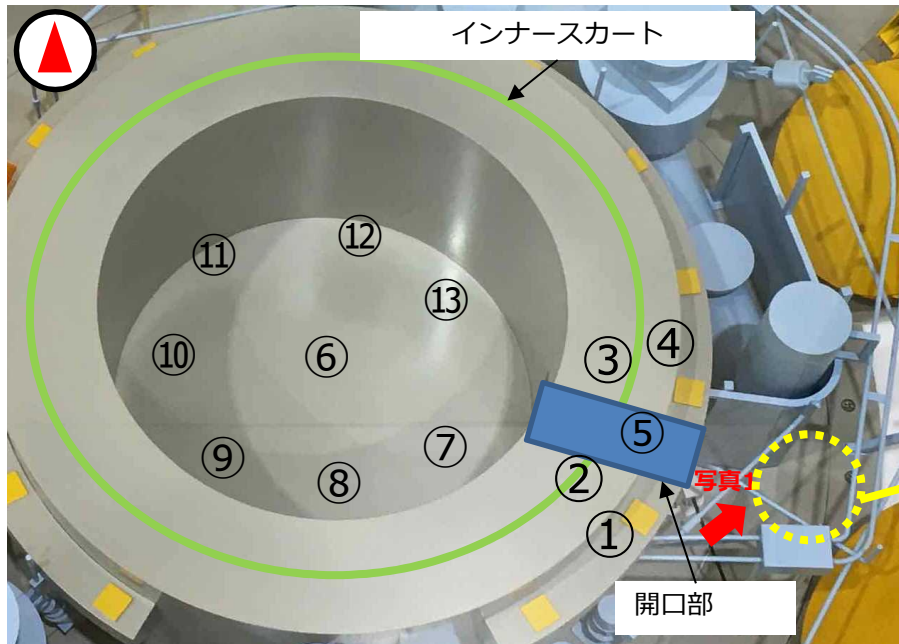
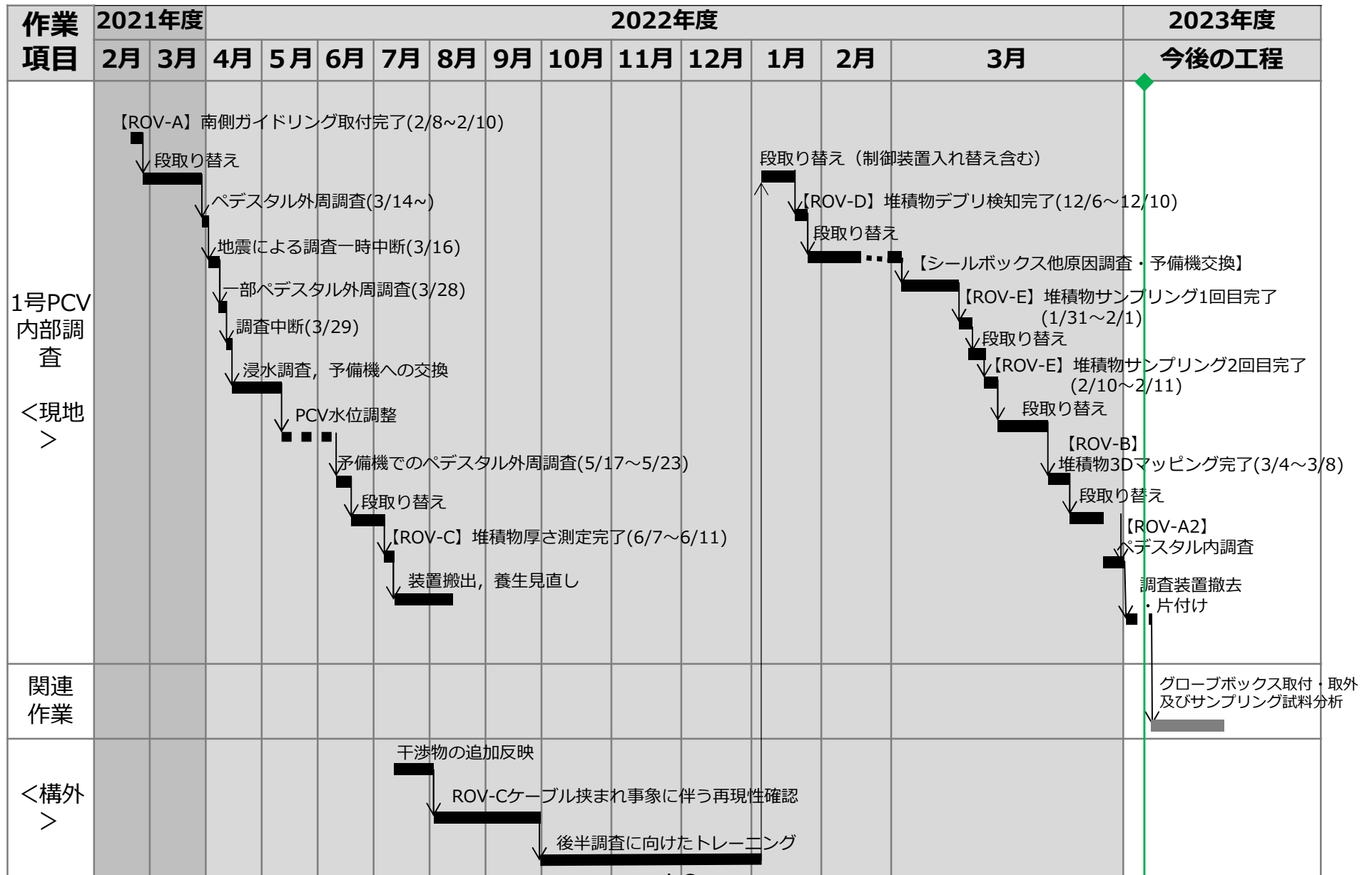


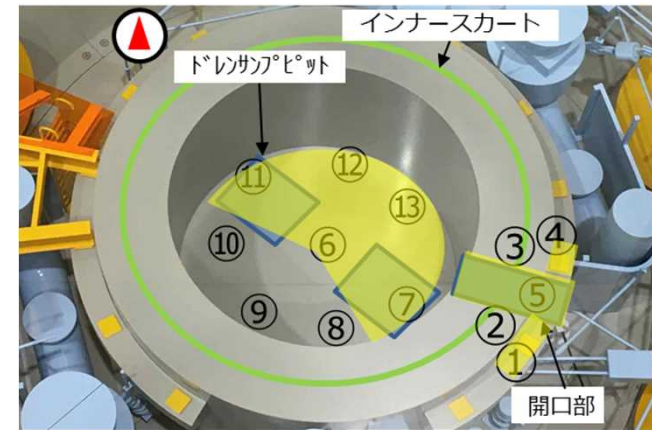
写真1. ペDESTAL外棚状堆積物断面

9. 1号機PCV内部調査全体工程



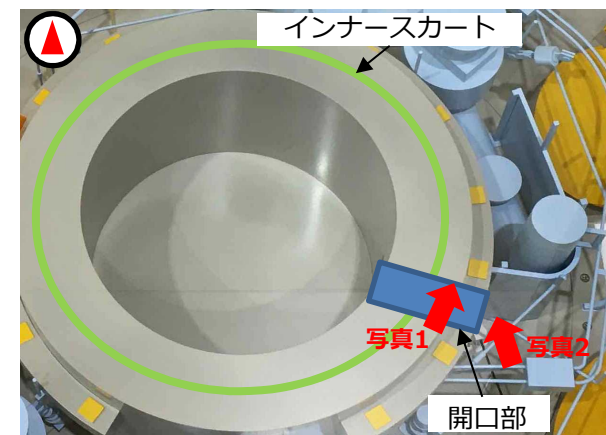
(注) 各作業の実施時期については計画であり、現場作業の進捗状況によって時期は変更の可能性あり。

【参考】ペDESTAL開口部から撮影した映像のパノラマ画像



【参考】ペDESTAL開口部右側のコンクリート残存（1/2）

- ペDESTAL外部から見えているコンクリート残存の可能性の高い部分（事故前に設置されたボルトの締結状態が確認できる。）について、2023/3の調査にて、ペDESTAL壁内部でも対応する部分を確認した
- ペDESTALの外壁開口部右側におけるコンクリートの消失は限定的と考えられる
- 確認された外側の鉄筋は、開口部右7本、左11本。耐震評価においては、開口部とあわせ、角度にして64°に相当するとして設定



ROVフレームの映り込み



写真1. ペDESTAL開口部内から見えているコンクリート残存部

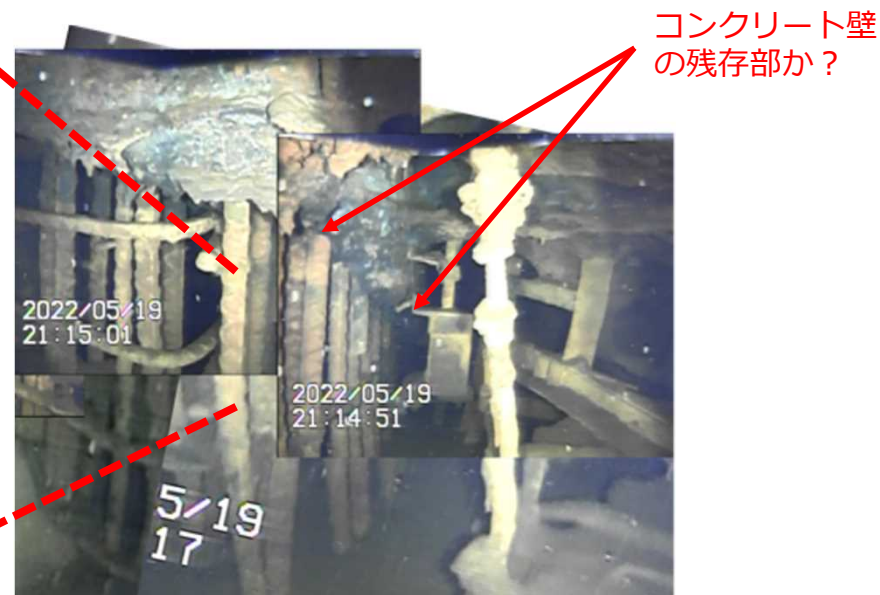


写真2. ペDESTAL外部から見えているコンクリート残存部

参考. ROV-A2(後半)調査実績① : ペDESTAL開口部外側の状況(3/28)



写真1.ペDESTAL開口部左上側壁面部



写真3.ペDESTAL開口部右上側壁面部



写真2.ペDESTAL開口部左下側壁面部

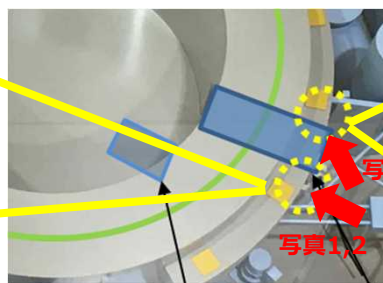


写真4.ペDESTAL開口部右下側壁面部

(参考)
 ①ケーブル中継箱(A)
 ②ケーブル中継箱(B)

ペDESTAL壁面部

開口部



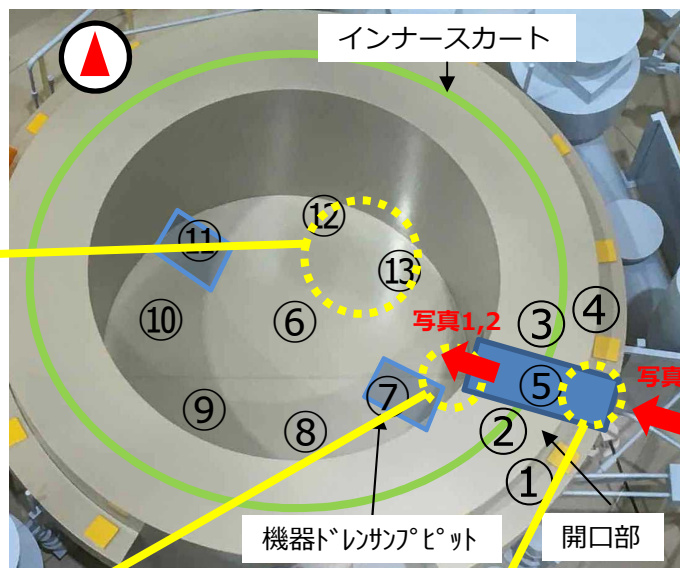
棚状の堆積物

配筋

参考.ROV-A2(後半)調査実績② : ペDESTAL開口部付近の状況(3/28)



写真1. CRDハウジングと思われる構造物



ペDESTAL縦断面(推定)

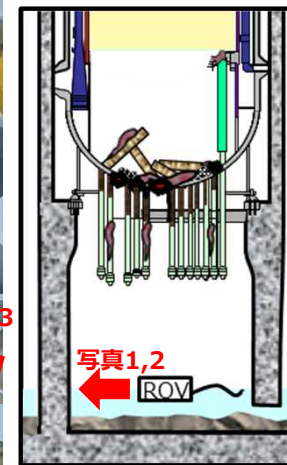


写真2.ペDESTAL内開口付近堆積物

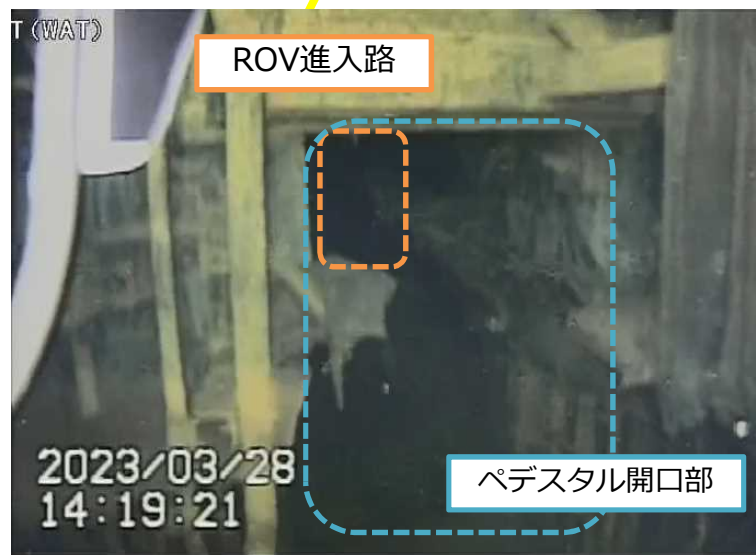


写真3.ペDESTAL開口部

参考.ROV-A2(後半)調査実績③ : ペDESTAL開口部付近の状況(3/28)



写真1.ペDESTAL内壁面部配筋

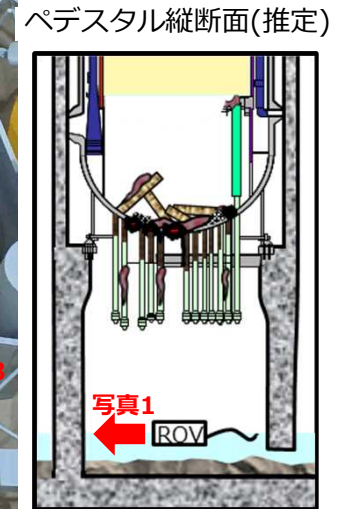
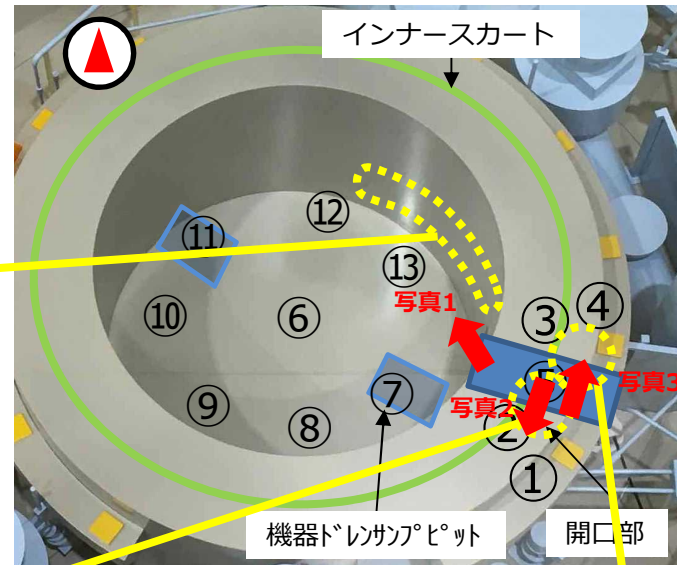


写真2.ペDESTAL開口左側配筋

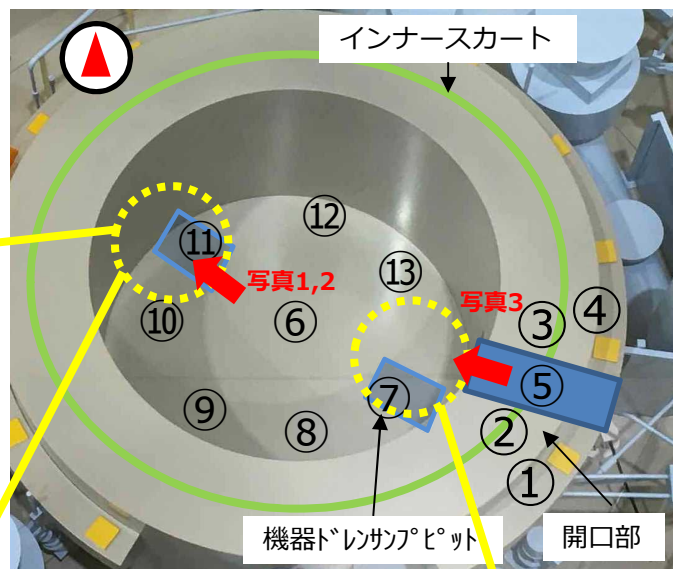


写真3.ペDESTAL開口右側配筋

参考.ROV-A2(後半)調査実績④ : ペDESTAL内の状況(3/29)



写真1. CRDハウジングと思われる構造物 (上部監視カメラで気中を撮影)



ペDESTAL縦断面(推定)

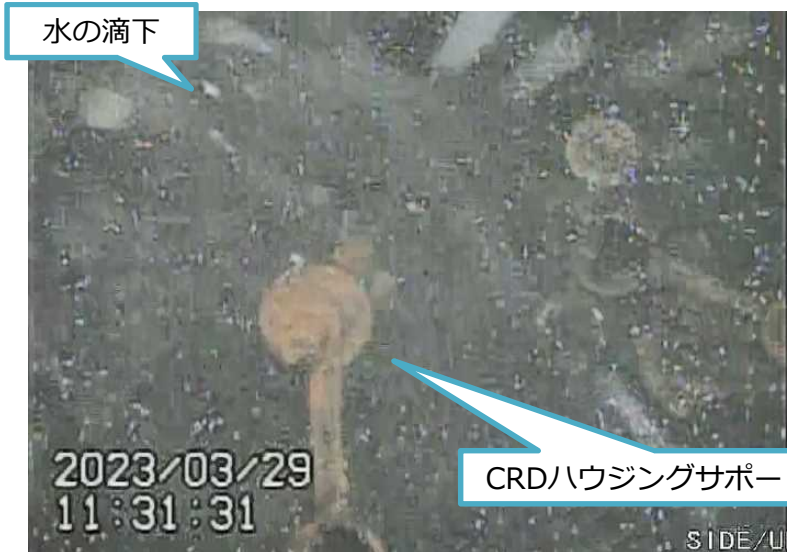
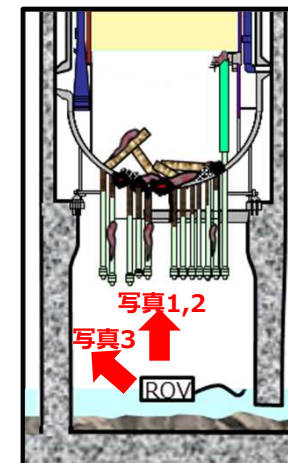


写真2. CRDハウジングサポートと思われる構造物 (上部監視カメラで気中を撮影)



写真3. 核計装関連機器と思われる構造物 (気中監視カメラで気中を撮影)

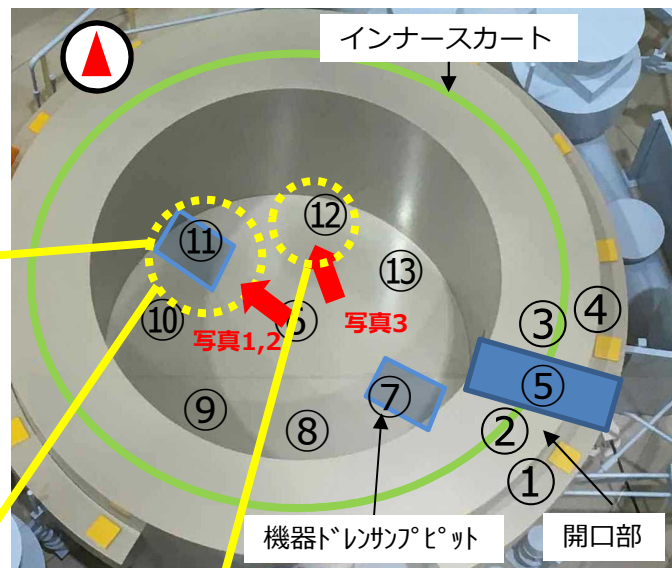
参考.ROV-A2(後半)調査実績⑤ : ペDESTAL内の状況(3/29)



写真1.ペDESTAL内壁面部(上部)



写真2.ペDESTAL内壁面部(下部)



ペDESTAL縦断面(推定)



写真3.棒状の構造物(ペDESTAL底部)

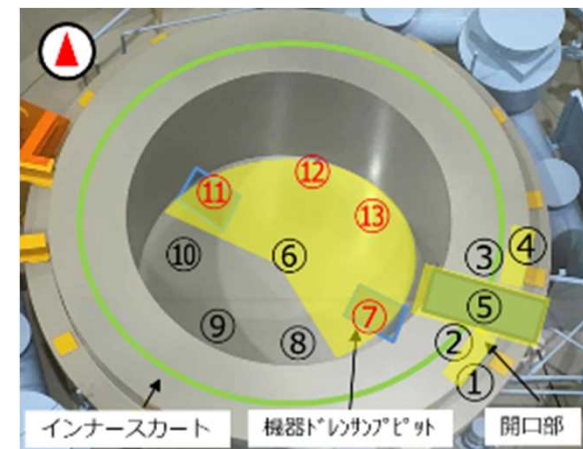
参考.ROV-A2(後半)調査実績⑥ : ペDESTAL内の状況(3/29)



写真1. ポイント⑪上部



写真3. ポイント⑫



調査済エリア :



写真2. ポイント⑪下部



写真4. ポイント⑬



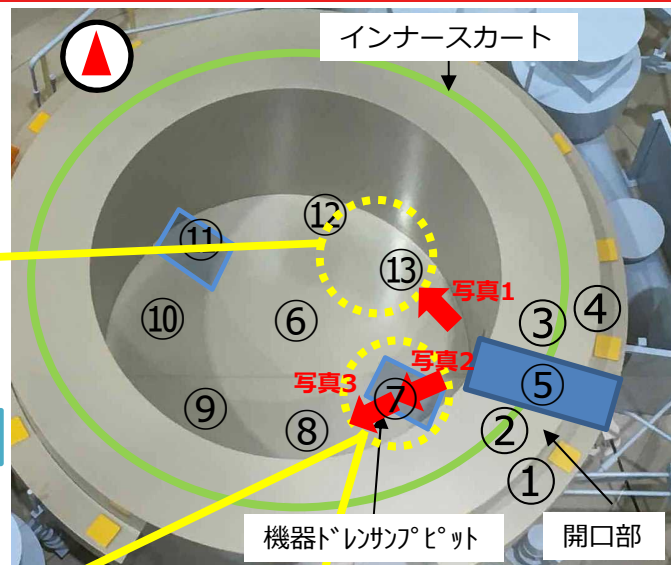
写真5. ポイント⑦

インナースカートリブ

参考.ROV-A2(後半)調査実績⑦：ペDESTAL内の状況(3/30)



写真1. CRDハウジングと思われる構造物
(水中監視カメラで前方を撮影)



ペDESTAL縦断面(推定)

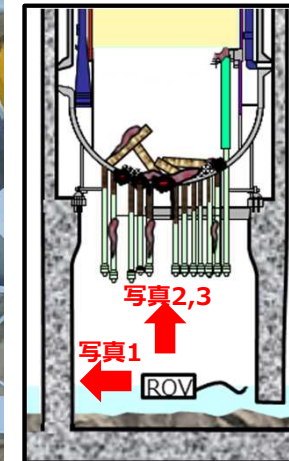


写真2. CRDハウジングサポートと思われる構造物
(上部監視カメラで気中を撮影)



写真3. CRD関連と思われる構造物
(上部監視カメラで気中を撮影)

参考.ROV-A2(後半)調査実績⑧ : ペDESTAL内外の状況(3/30)

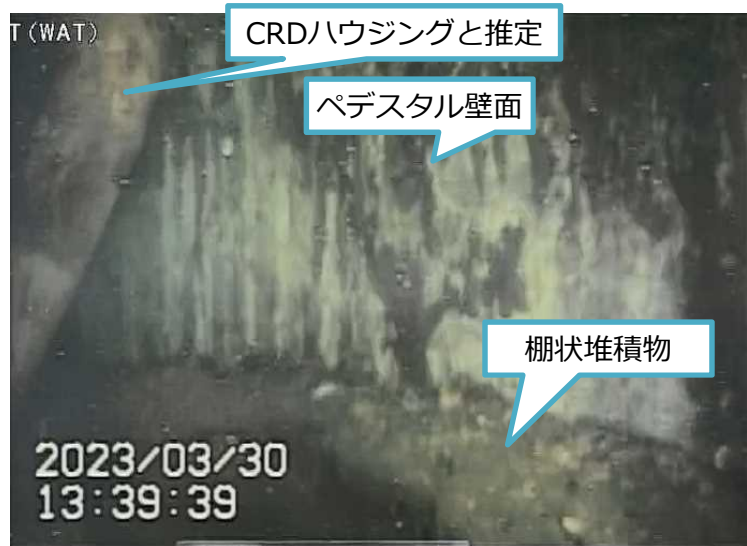
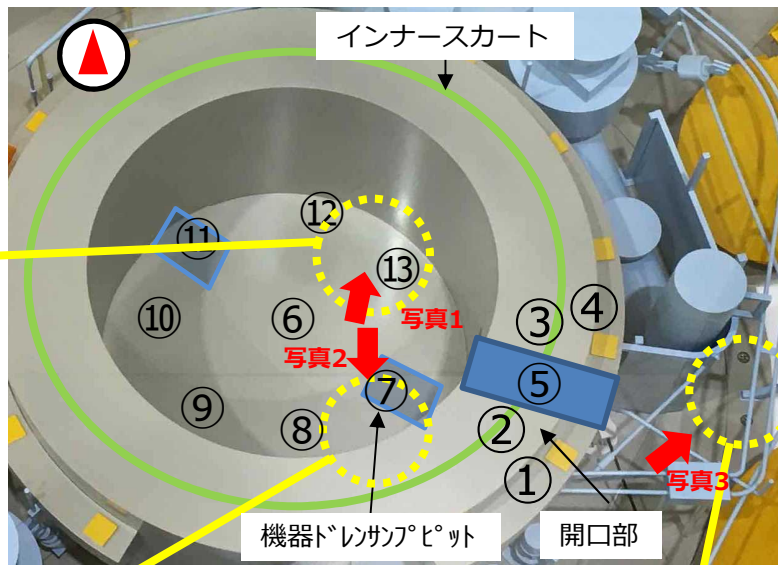


写真1. ペDESTAL内の棚状堆積物と壁面部



ペDESTAL縦断面(推定)

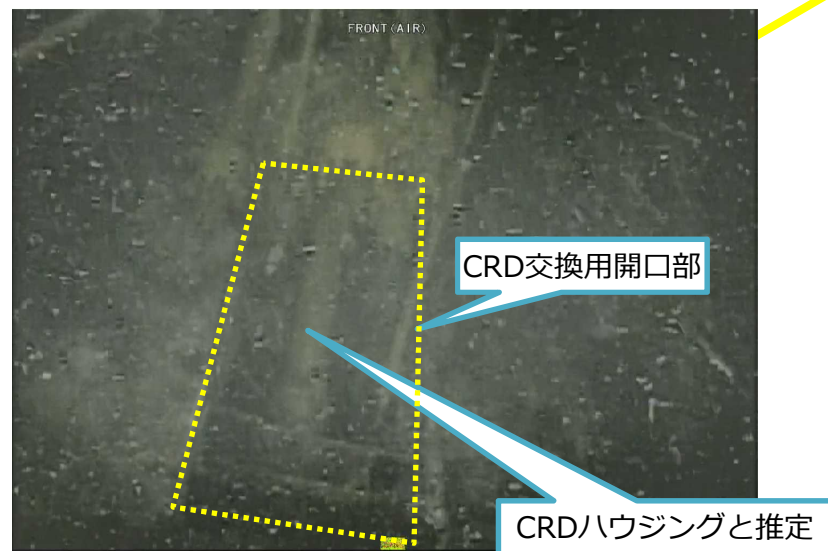
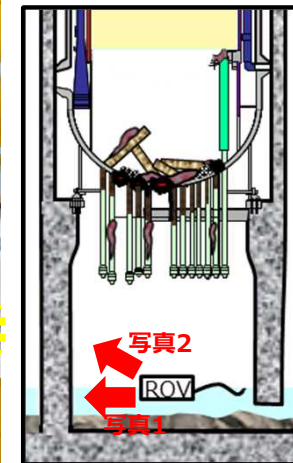


写真2. ペDESTAL内壁側のCRD交換用開口部の状態 (気中監視カメラで気中を撮影)

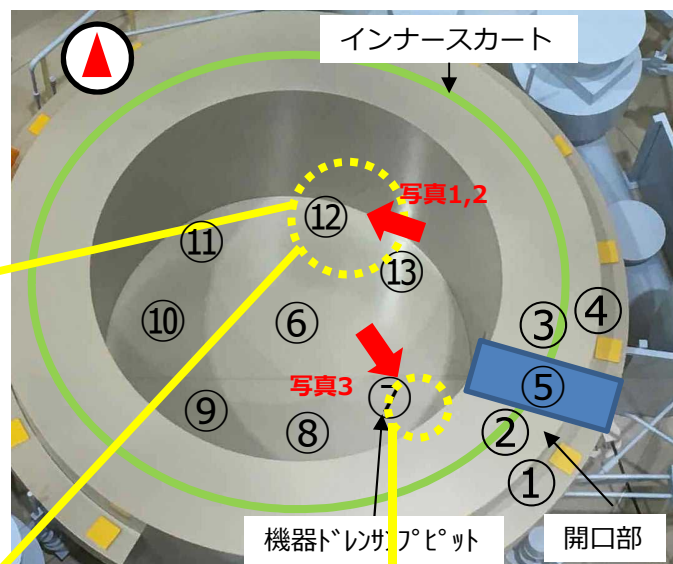


写真3. ペDESTAL外棚状堆積物断面

ペDESTラル内棚状堆積物



写真1 棚状堆積物の縁の状態 (その1)



ペDESTラル縦断面(推定)

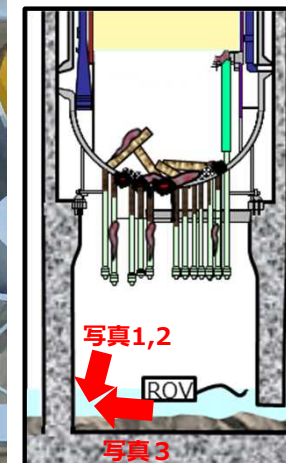


写真2 棚状堆積物の縁の状態 (その2)

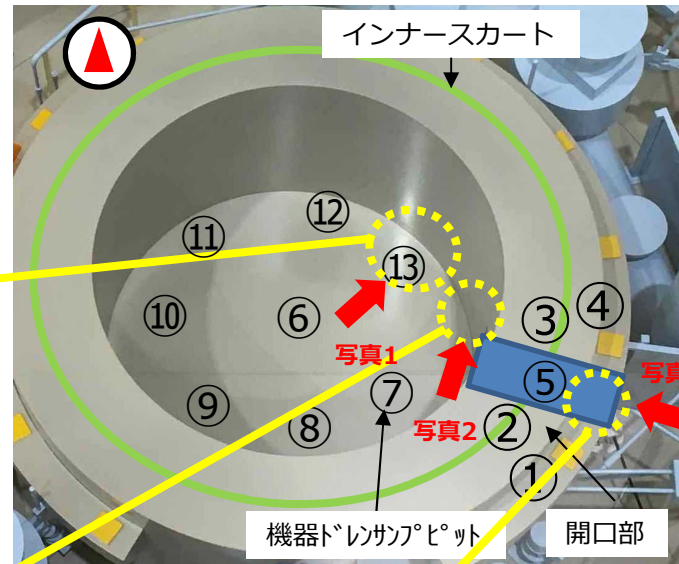


— 24 — 写真3 比較的に大きい棚状堆積物

棚状堆積物のない場所の状況



写真1 棚状堆積物のない壁面の状況



ペDESTアル縦断面(推定)

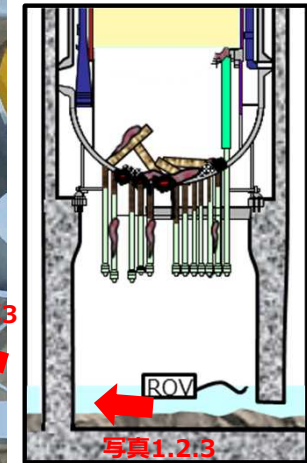


写真2 (パノラマ) 開口部右側の棚状堆積物

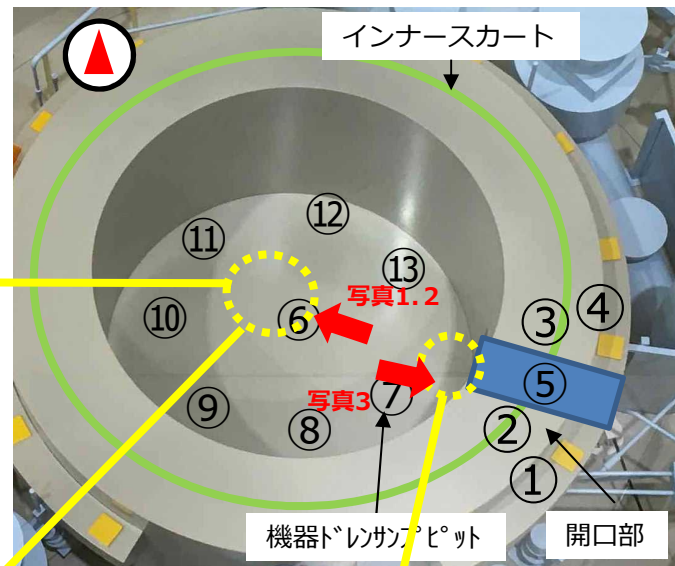


写真3 開口部内部の左側の壁の状態

CRDハウジングの状態



写真1 ペDESTAL内中心部で確認されたCRDハウジング (水中)



ペDESTAL縦断面(推定)

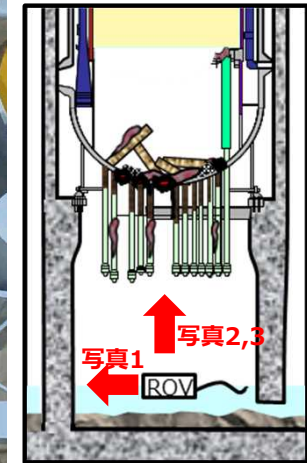
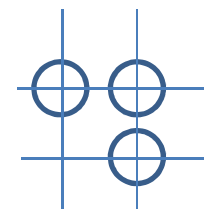


写真2 CRDハウジング断面

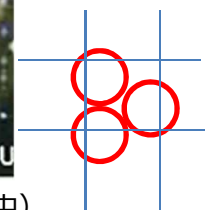


写真3 ペDESTAL壁周辺のCRDハウジングの状態 (気中)

元のCRD配列



観測された配列



【参考】各号機の事故進展に関する比較（ペデスタル内上部の状況）

- 事故分析の観点から、1号機は「冷やす」ことができない期間が最も長期にわたったため、原子炉の破損の状況は、2号機と3号機と比較して厳しいと推定していた。
- 1号機の内部調査の完了により、それぞれの号機の比較が可能となった

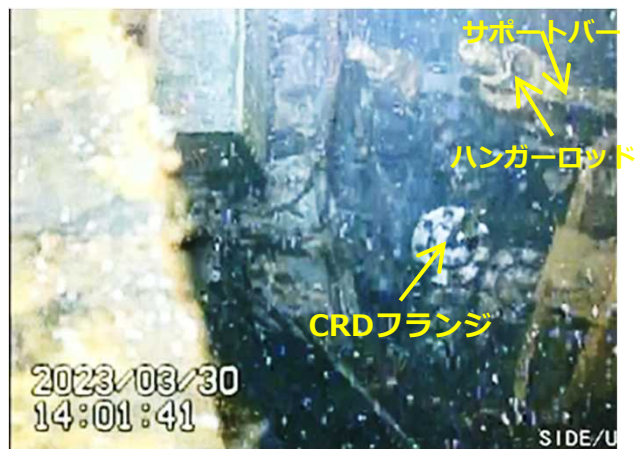
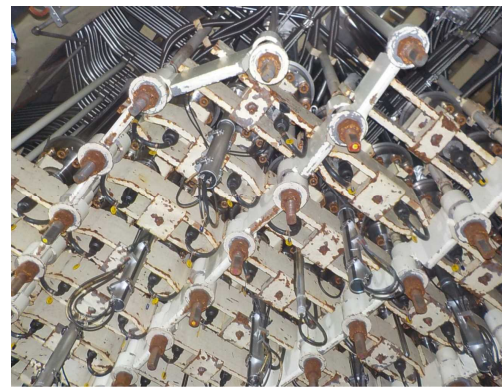


写真1. 1号機で確認されたCRD

写真2. 2号機で確認されたCRD

写真3. 3号機で確認されたCRD

【参考】各号機の事故進展に関する比較（ペデスタル内下部の状況）

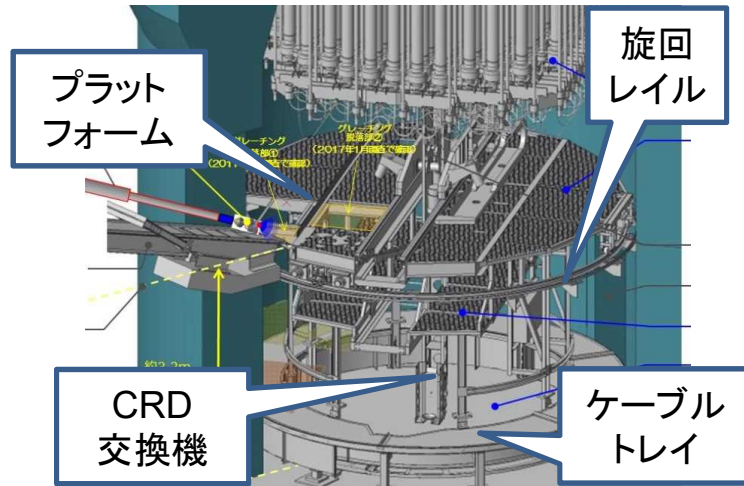


図1. Mark-I格納容器のペデスタル内の機器配置(例)

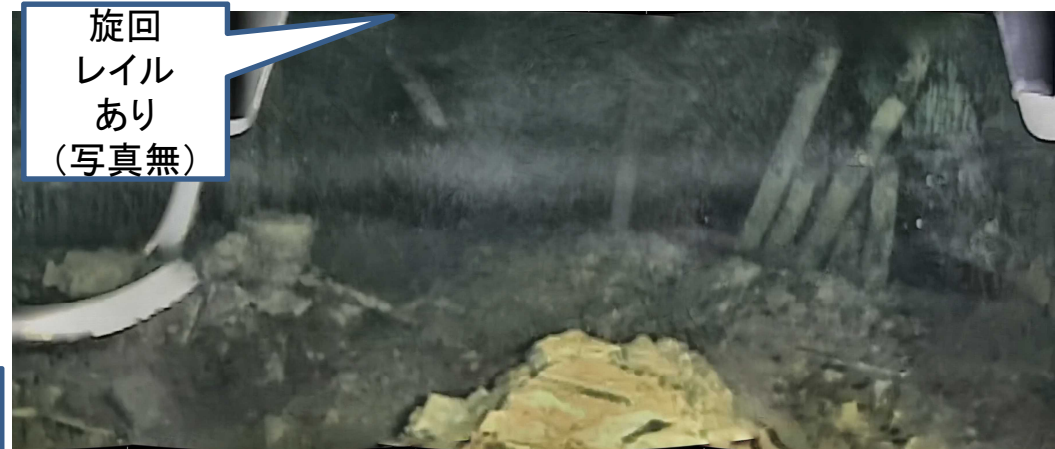


写真1. 1号機のペデスタル内の状況

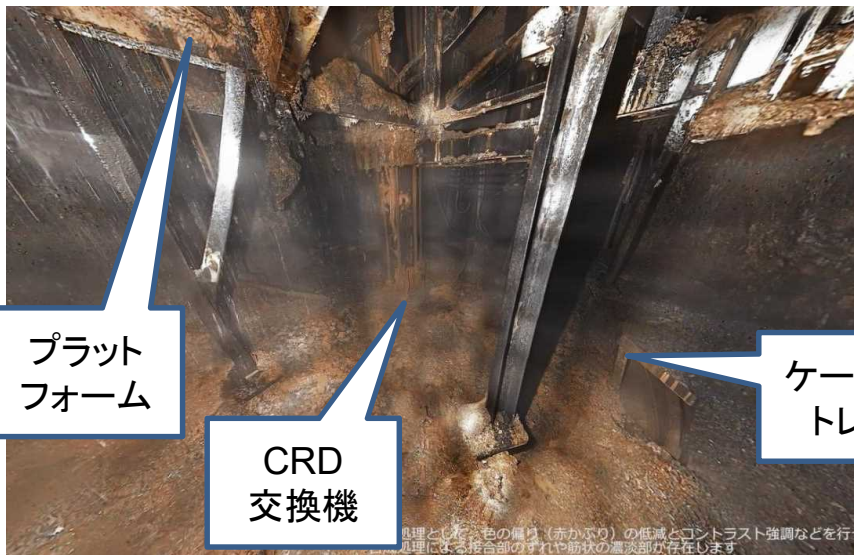


写真2. 2号機のペデスタル内の状況

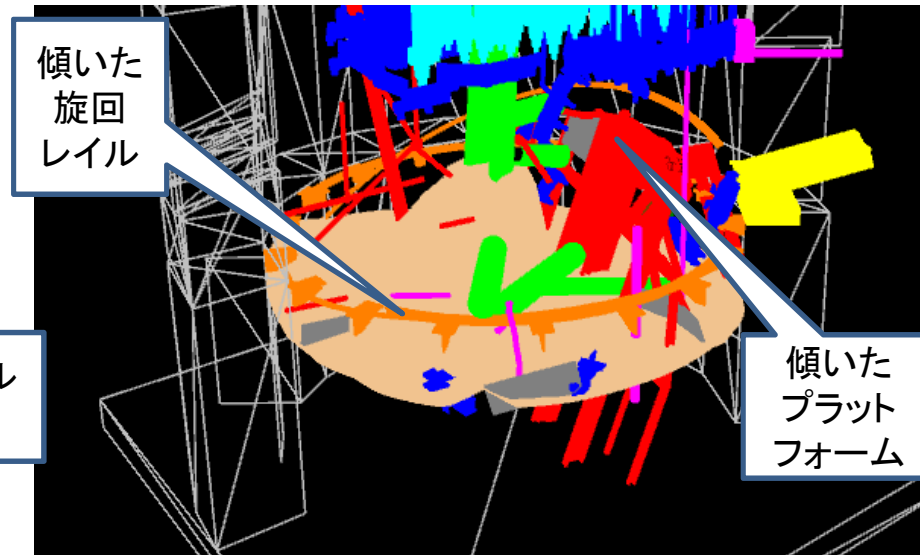


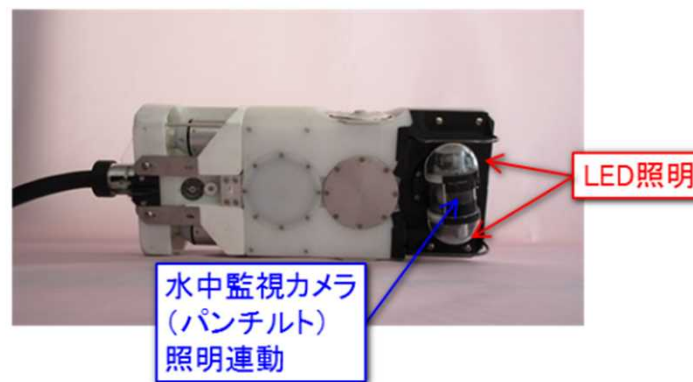
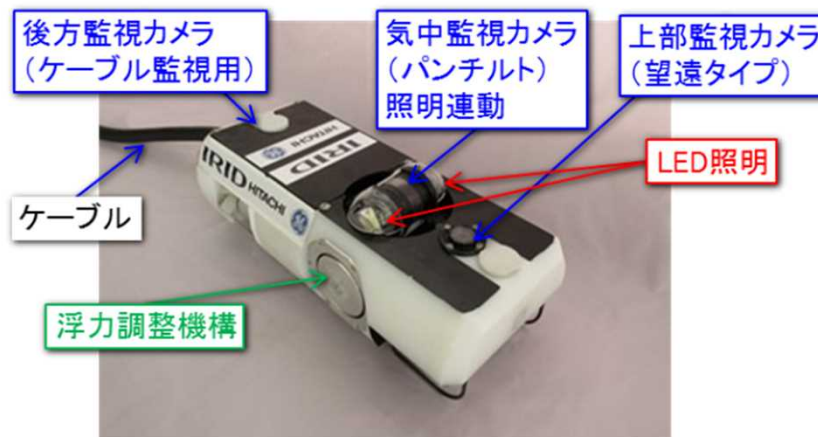
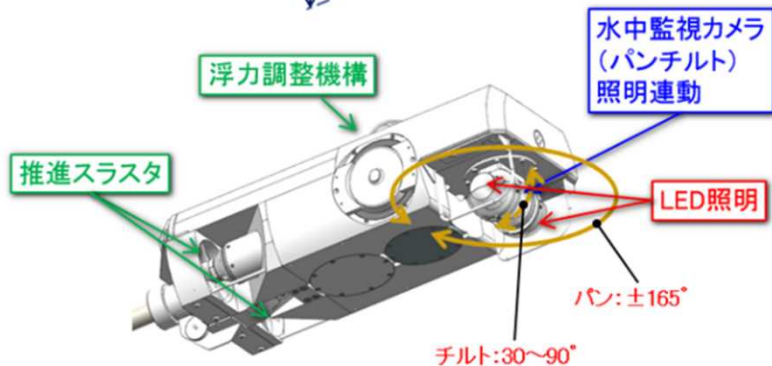
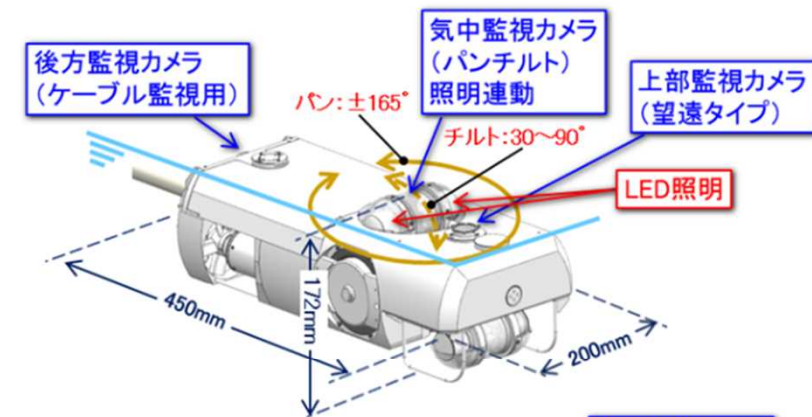
図2. 3号機のペデスタル内の状況

➡ 各号機の調査結果から、従来推定の通り2号機と3号機と比較し、1号機の破損状況が厳しい状態であることが確認できた

【参考】調査装置詳細：ROV-A2（詳細目視調査用）

調査装置	計測器	実施内容
ROV-A2 詳細目視	ROV保護用（光ファイバー型γ線量計※，改良型小型B10検出器） ※：ペDESTAL外調査用と同じ	地下階の広範囲とペDESTAL内（※）のCRDハウジングの脱落状況などカメラによる目視調査を行う（※アセスできた場合）
	員数：2台 航続可能時間：約80時間/台	調査のために細かく動くため，柔らかいポリ塩化ビニル製のケーブル(φ23mm)を採用

推力：約50N 寸法：直径φ20cm×長さ約45cm



BWR格納容器内有機材料 熱分解生成気体の分析結果

2023年4月24日

日本原子力研究開発機構
安全研究センター
大野卓也、飯田芳久、阿部仁

- 30 -

ねらい

- R3年度は、窒素雰囲気にて熱分解生成ガスの定性分析を実施した。
(熱重量(TG)-MS分析、ガスクロマトグラム(GC)-MS分析)
- 今回(R4年度)は、窒素雰囲気に加え、より酸化性の高い雰囲気(酸素／窒素混合)での無機及び有機ガス成分の定量分析を進めた。
(TG-MS分析、管状炉-GC分析)
 - ◆ GC分析では無機成分、低分子量有機成分(炭素数1～4)に応じた分離カラムと検出器を使用

➤ 分析試料

試料番号	材質	用途
1	難燃性エチレンプロピレンゴム	原子炉容器下部制御・計装PNケーブルの絶縁材
2	特殊クロロプレンゴム	原子炉容器下部制御・計装PNケーブルのシース
3	難燃性特殊耐熱ビニル	高圧動力用CVケーブルのシース
4	ウレタン	保温材

分析手法

OTG-MS分析

- 目的: 顕著な熱分解が生じる温度範囲の把握、 H_2O の定量分析
- 雰囲気: 酸素(4%)/窒素混合雰囲気<窒素雰囲気は昨年度>
- 温度: 昇温速度 $10^{\circ}C/分$ 、最高温度 $1,200^{\circ}C$

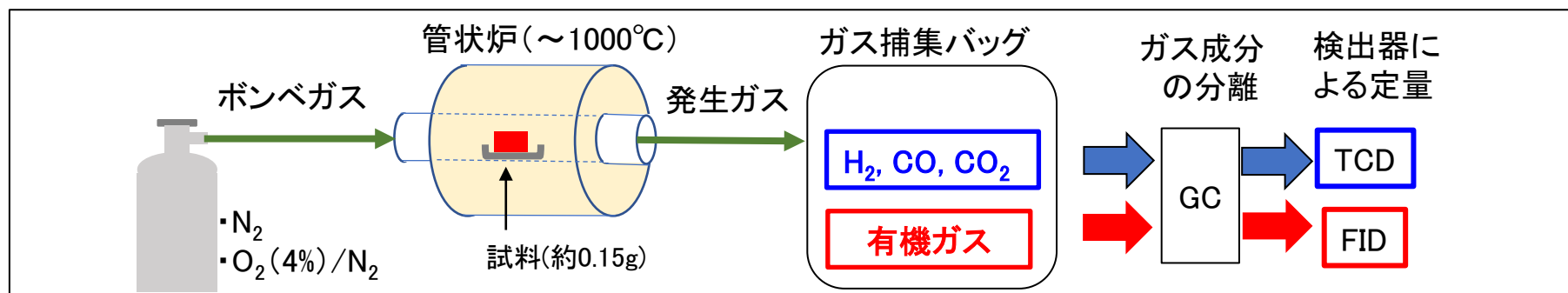
シュウ酸カルシウムを用いた検量線
 $CaC_2O_4 \cdot H_2O$
 $\rightarrow CaC_2O_4 + H_2O \uparrow$

○管状炉-GC分析

- 目的: H_2 , CO , CO_2 , 低分子量有機ガスの定量分析
- 雰囲気: 窒素雰囲気、酸素(4%)/窒素混合雰囲気
- 温度: 昇温速度 $10^{\circ}C/分$ 、最高温度 $1,000^{\circ}C$

ウレタンの分析においては、結果を東京電力と比較するため以下の条件を揃える。

(酸素濃度(4%)、昇温速度($10^{\circ}C/分$)、単位試料量当たりのガス滞留時間*)

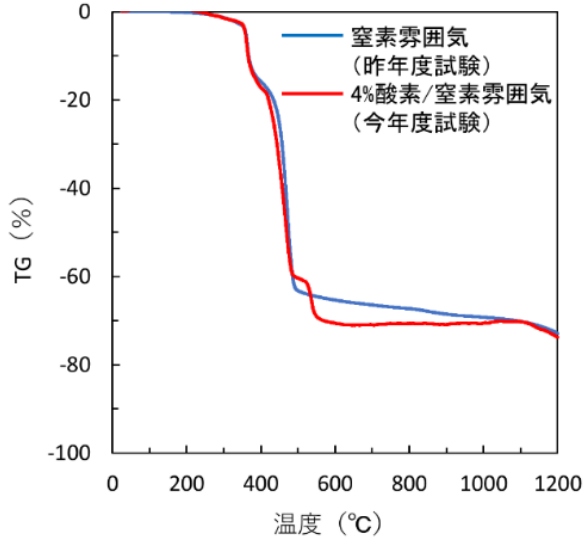


検出物質	分析方法
H_2O	TG-MS
H_2 , CO , CO_2	管状炉-GC-熱伝導度検出器(TCD)
低分子量有機ガス	管状炉-GC-水素炎イオン化検出器(FID)

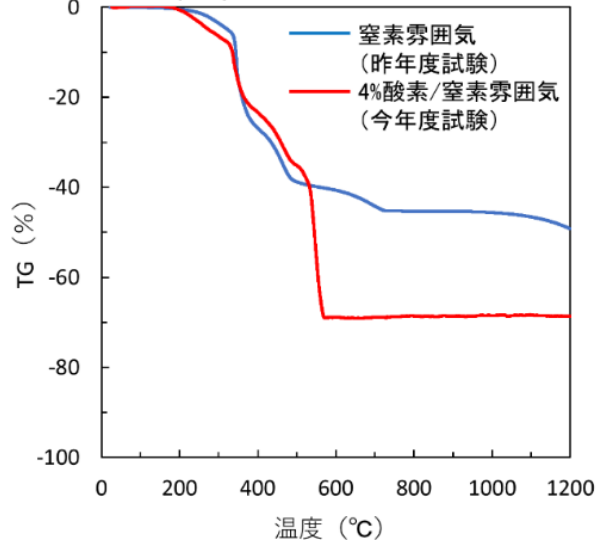
* : 単位試料量当たりのガス滞留時間(分/g) = 試料室容積(ml) ÷ ガス流量(ml/分) ÷ 試料量(g)

試料重量変化

難燃性エチレンプロピレングム



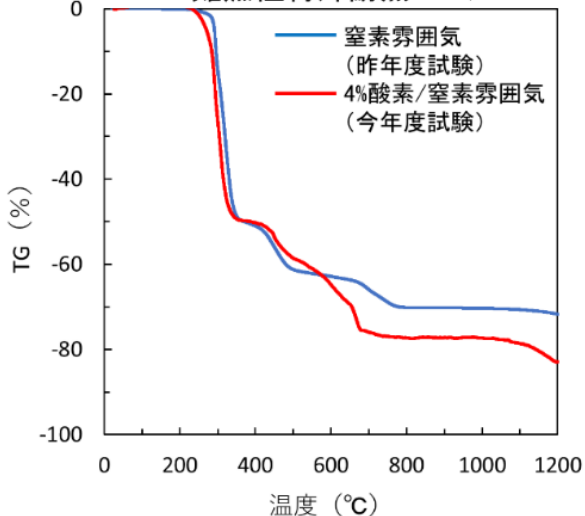
特殊クロロプレングム



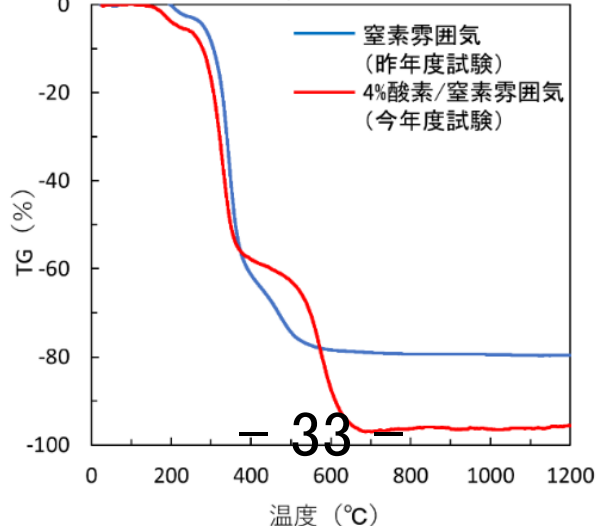
4%酸素/窒素雰囲気では窒素雰囲気と比較して、

- ・試験後の残重量が小さくなる。
- ・重量減少が顕著な温度帯は大きく変わらない。

難燃性特殊耐熱ビニル



ウレタン



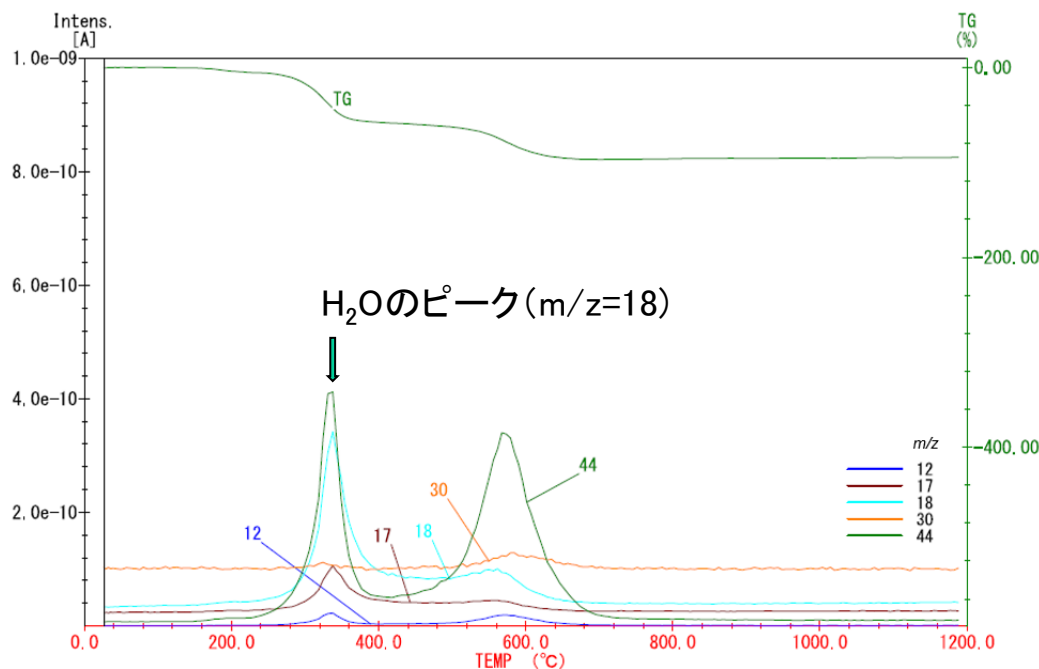
重量変化のまとめ

試料	窒素雰囲気			重量減少割合 (%)	酸素／窒素混合雰囲気			重量減少割合 (%)
	重量減少が生じた温度範囲(°C)				重量減少が生じた温度範囲(°C)			
難燃性エチレン プロピレンゴム	210～ 321	321～ 395	395～ 500	72	210～ 320	320～ 406	406～ 601	74
特殊クロロ prenゴム	230～ 307	307～ 404	404～ 527	53	230～ 309	309～ 398	398～ 620	69
難燃性特殊 耐熱ビニル	200～ 376	376～ 560	560～ 800	75	200～ 370	370～ 512	512～ 750	77
ウレタン	160～ 246	246～ 421	421～ 580	82	160～ 230	230～ 440	440～ 682	97

赤字: 重量減少が顕著

H₂O発生量のまとめ

MSデータの例
(ウレタン)

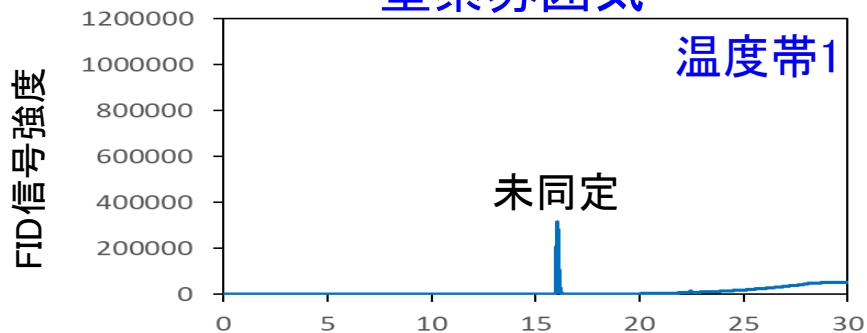


試料	H ₂ O発生量 (wt%)*					
	窒素雰囲気			酸素／窒素混合雰囲気		
	温度帯1	温度帯2	温度帯3	温度帯1	温度帯2	温度帯3
難燃性エチレン プロピレンゴム	0.5	1.2	2.9	1.6	4.0	29
特殊クロロプレンゴム	0.8	2.6	2	1.3	3.9	12
難燃性特殊耐熱ビニル	7.6	2.5	1.4	11	6.8	2.4
ウレタン	0.7	4.6	2.2	1	24	14

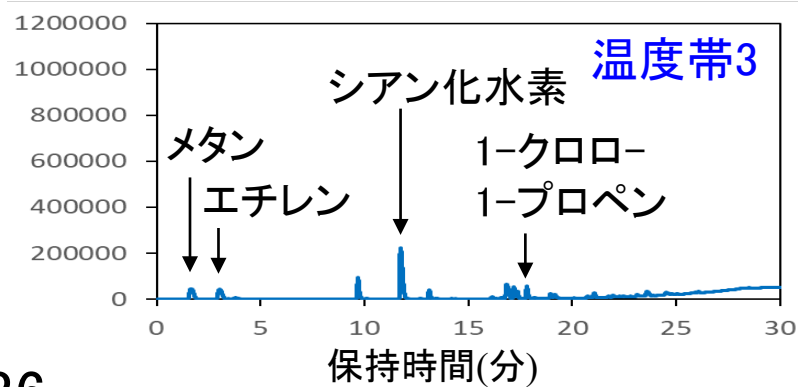
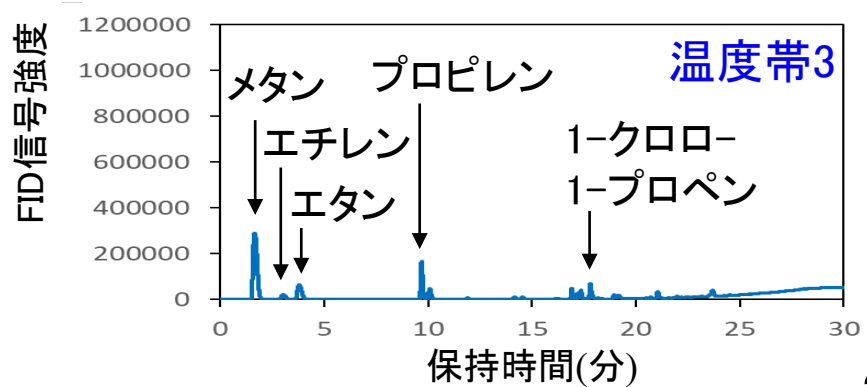
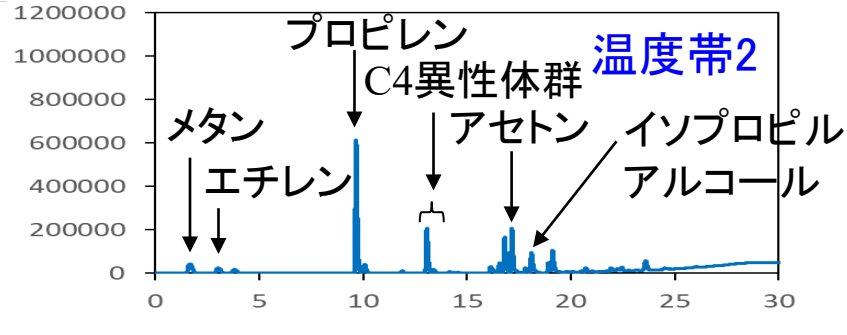
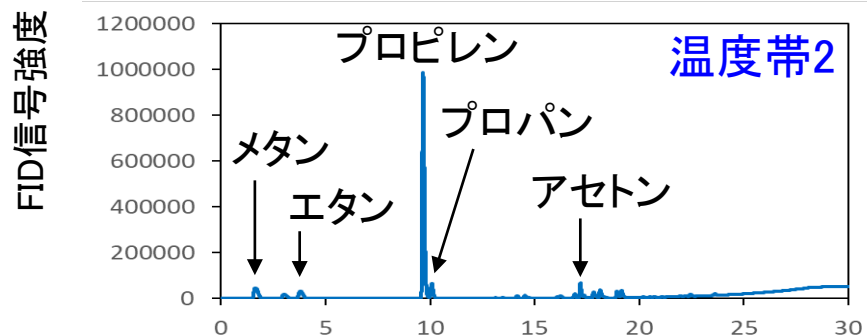
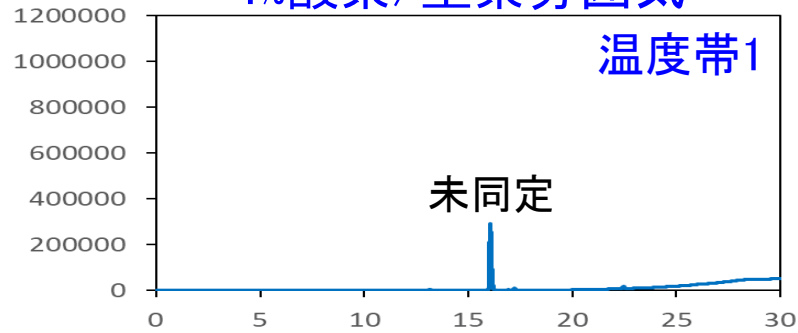
* : H₂O発生量 (wt%) = H₂O定量値 (mg) / 試料重量 (1 mg) × 100

ガス成分の推定(ウレタン)

窒素雰囲気



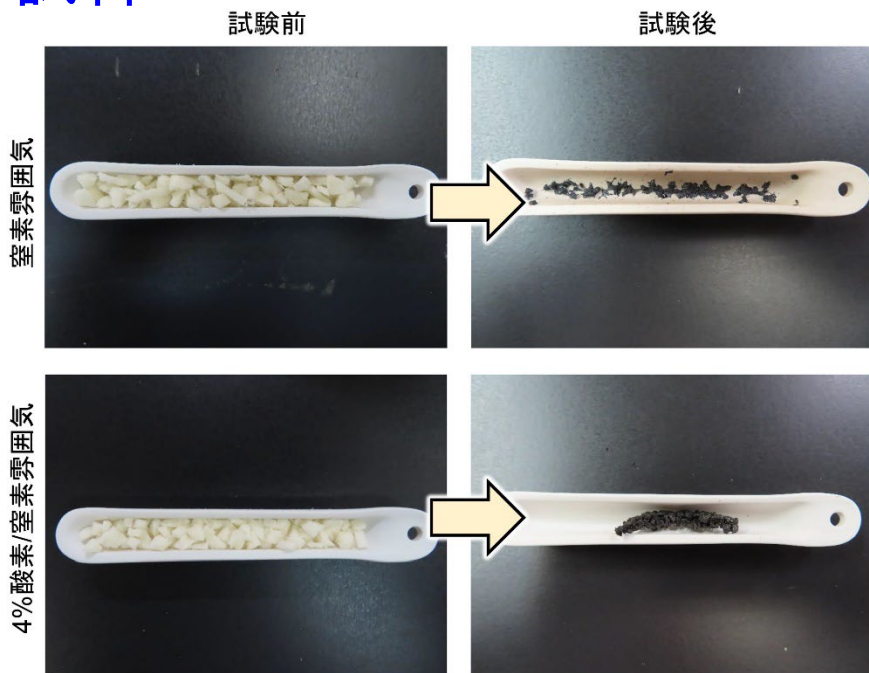
4%酸素/窒素雰囲気



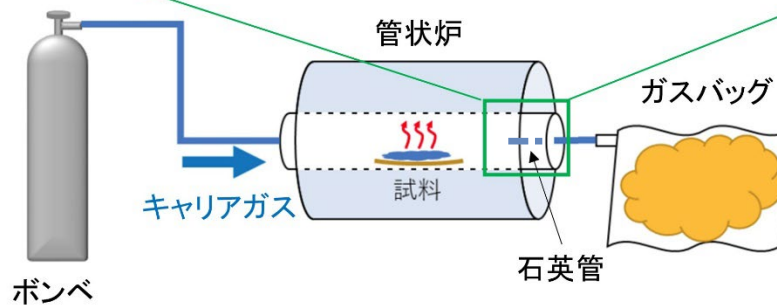
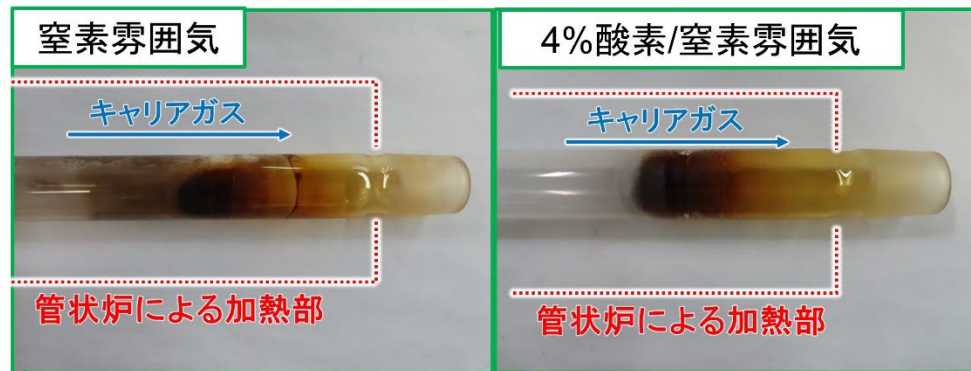
- 36 -

・1試料あたり10~15個のピークに相当する化合物を推定した後、定量した。

試料



石英管



- ・炭化した試料と見られる物質が試料台に残存。
- ・管状炉とガスバッグをつなぐ配管(石英管)内にタール状の物質が付着。
→熱分解ガス中の高沸点成分が、キャリアガス温度の低下にともなって凝縮したものと推定。

定量分析結果のまとめ(ウレタン)

	(wt%)	窒素雰囲気				4%酸素/窒素雰囲気			
		室温～ 250℃	250～ 420℃	420～ 580℃	合計	室温～ 250℃	250～ 420℃	420～ 680℃	合計
試験後の重量減少	ΔTG	5.3	63	10	78.3	5.5	54	38	97.5
	管状炉	—			74.4	—			86.5
成分ガスの発生量*	H ₂ O	0.7	4.6	2.2	7.5	1	24	14	39
	CO	< 1	< 1	< 1	0	< 1	0.2	28	28.2
	CO ₂	< 1	10	< 1	10	< 1	14	44	58
	H ₂ (参考値)	< 0.001	< 0.001	0.034	—	< 0.001	0.001	0.025	—
	C1有機物	< 0.1	< 0.1	0.4	0.4	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1
	C2有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1
	C3有機物	< 0.1	0.7	0.1	0.8	< 0.1	0.6	< 0.1	0.6
	C4有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0
	C5有機物	—	—	—	0	—	—	—	0
	C6有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0
	C7有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0
	合計				18.7				126.0
H ₂ O、CO、CO ₂ 中の酸素を雰囲気由来とし、これらの生成量から酸素量を除いた場合の合計									33.0

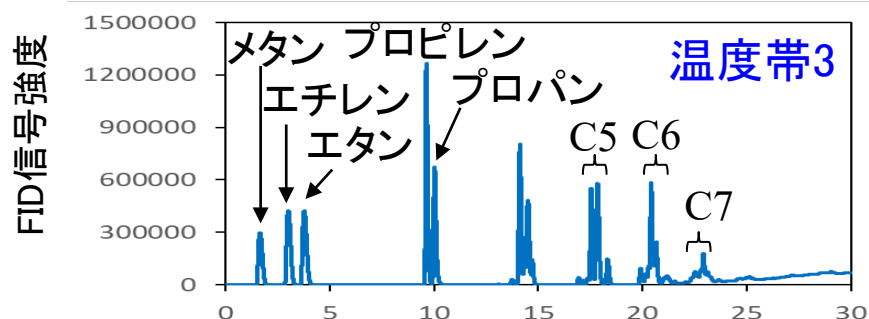
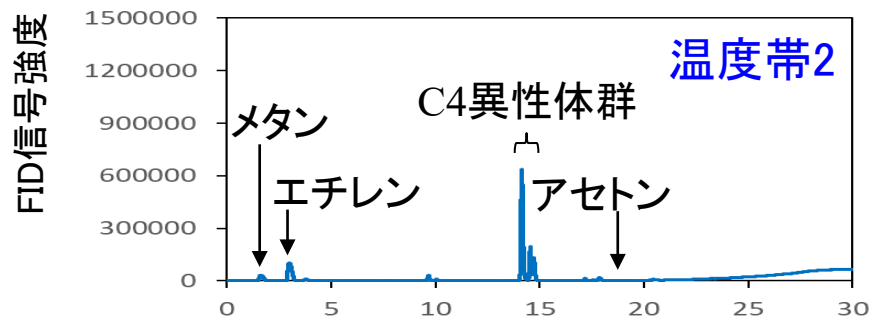
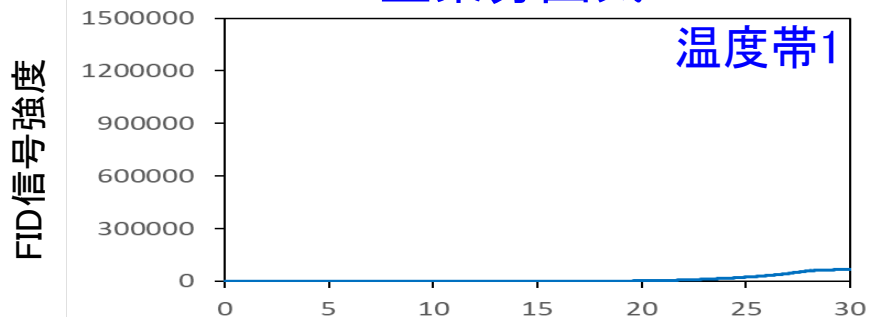
$$* \text{成分ガスの発生量 (wt\%)} = \frac{\text{ガスバッグ中の濃度 (g/L)} \times (\text{供給ガス流量 (L/min)} \times \text{ガス捕集時間 (min)})}{\text{試料の初期重量 (g)}} \times 100$$

- ・無機成分 (H₂O、CO、CO₂) の量が多く、低分子有機成分は微量。
- ・重量減少に比べてガス生成量が少ないのは、タール状物質の生成によるものと推定。

参考資料

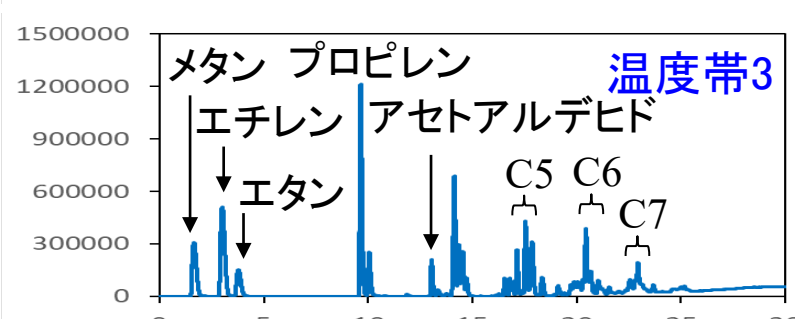
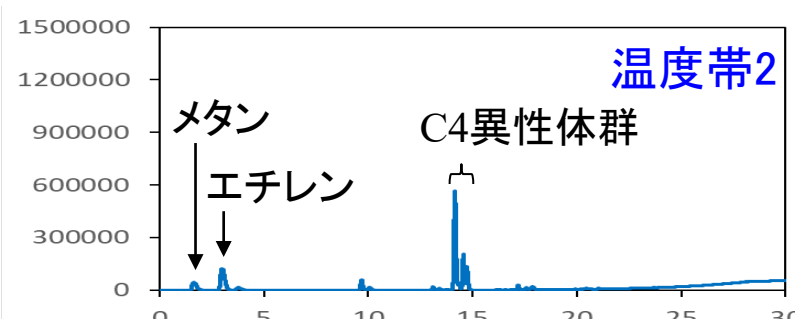
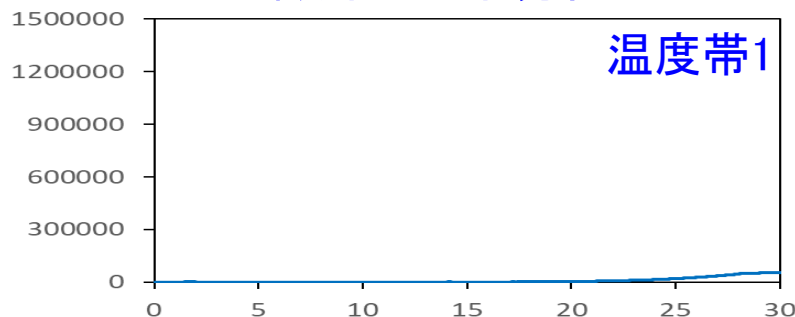
ガス成分の推定(難燃性エチレンプロピレンゴム)

窒素雰囲気



保持時間(分)

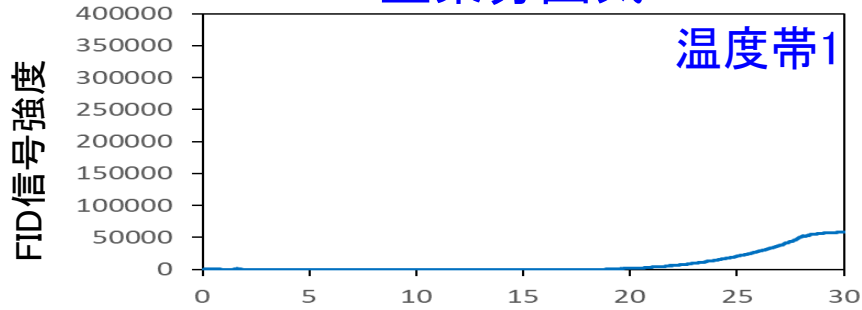
4%酸素/窒素雰囲気



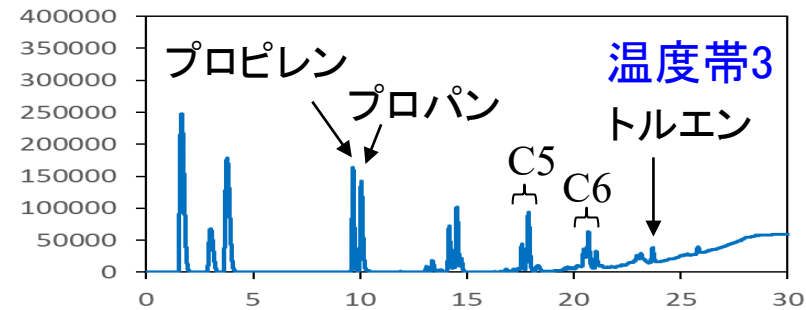
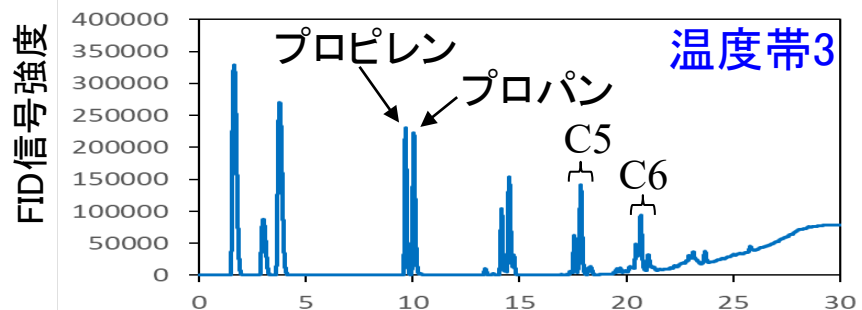
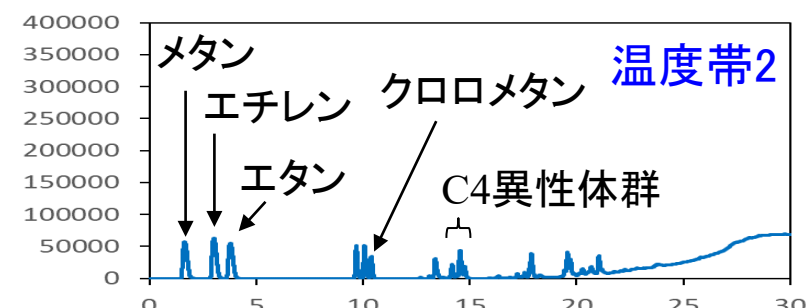
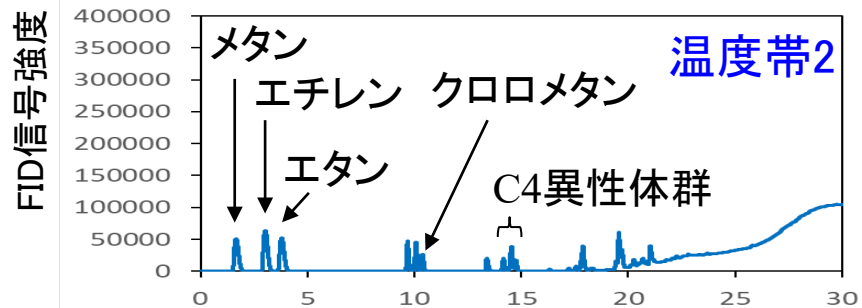
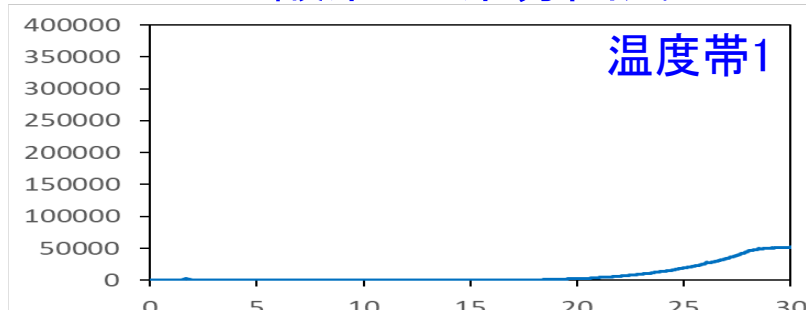
保持時間(分)

ガス成分の推定(特殊クロロプレンゴム)

窒素雰囲気



4%酸素/窒素雰囲気

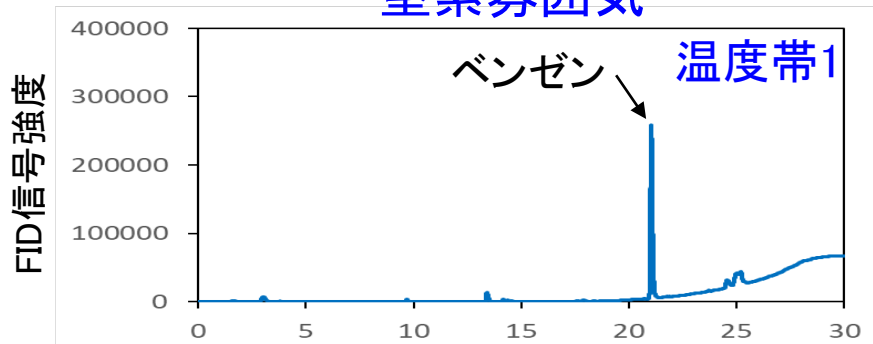


保持時間(分)

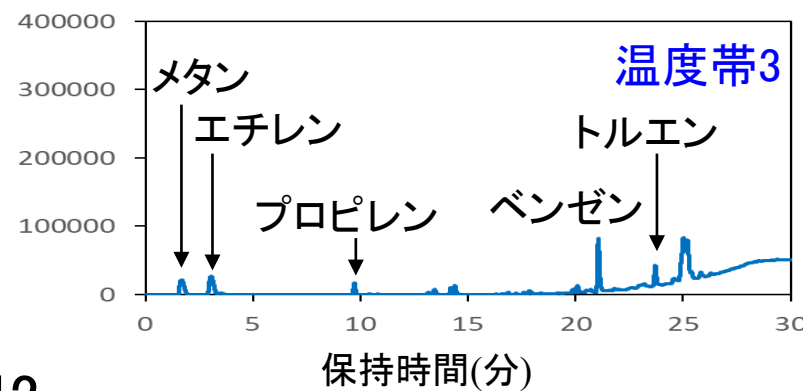
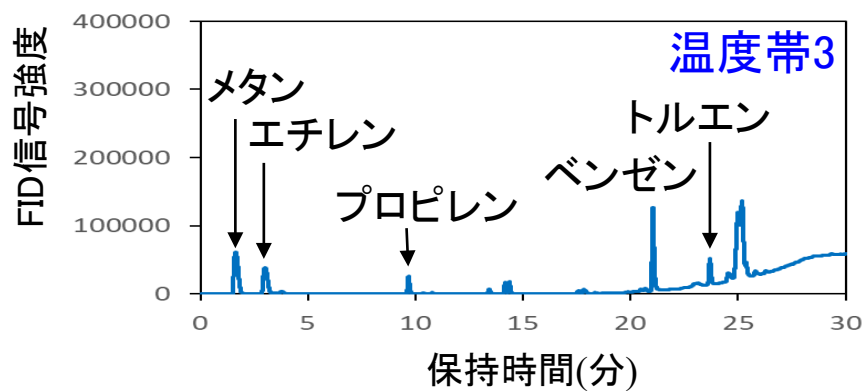
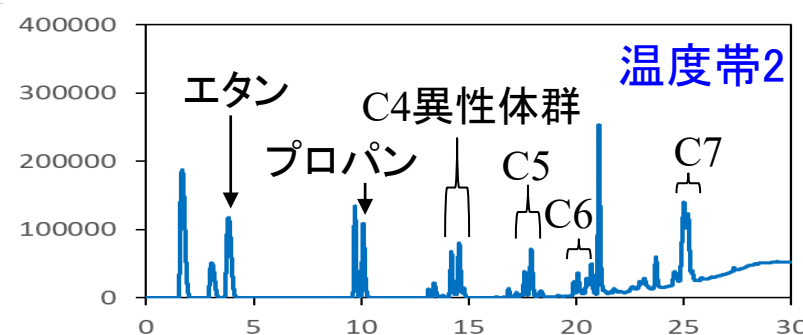
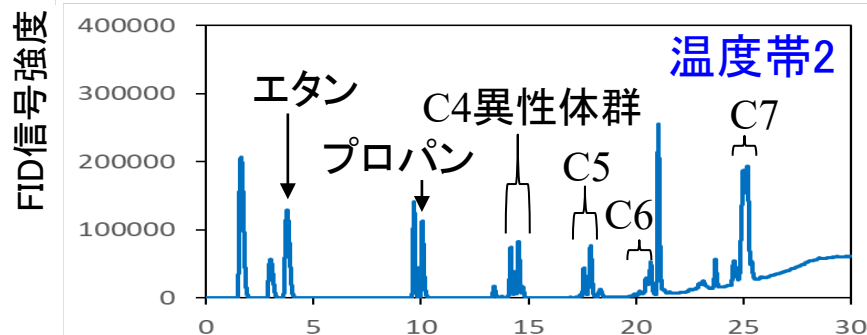
保持時間(分)

ガス成分の推定(難燃性特殊耐熱ビニル)

窒素雰囲気

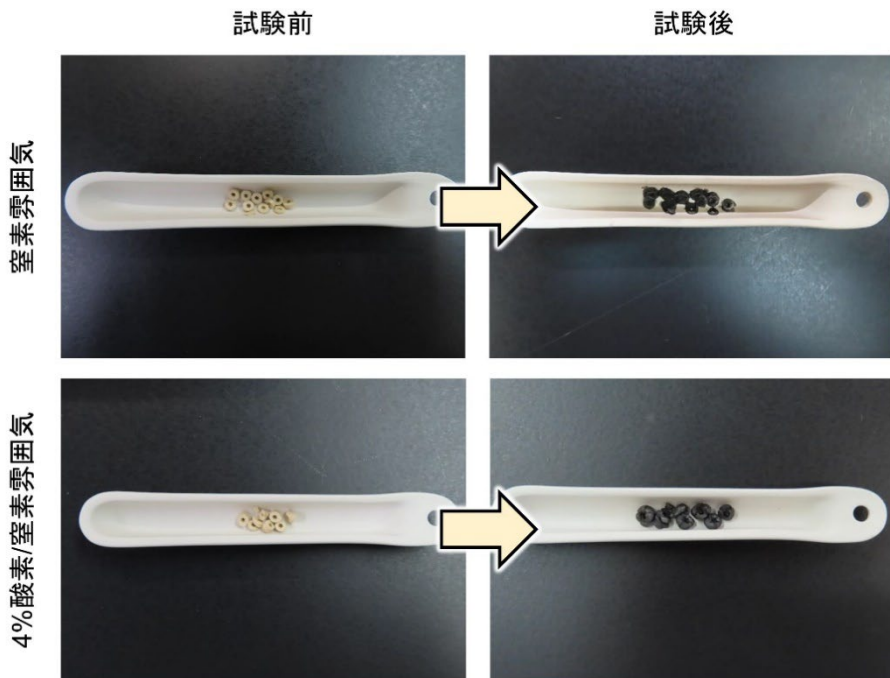


4%酸素/窒素雰囲気

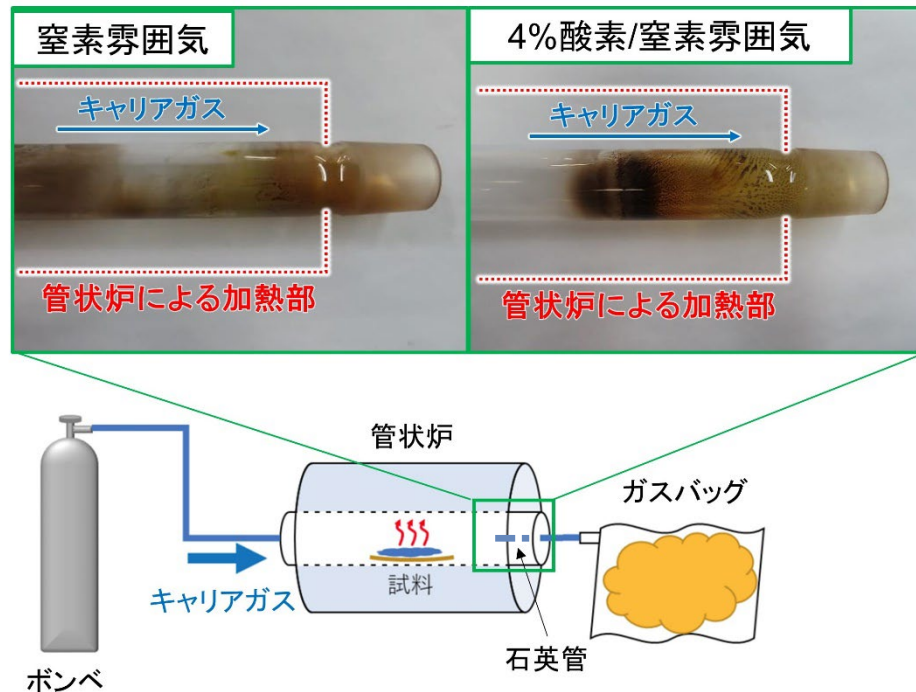


試験後の試料及びガス配管の様子(難燃性エチレンプロピレンゴム)

試料



ガス配管

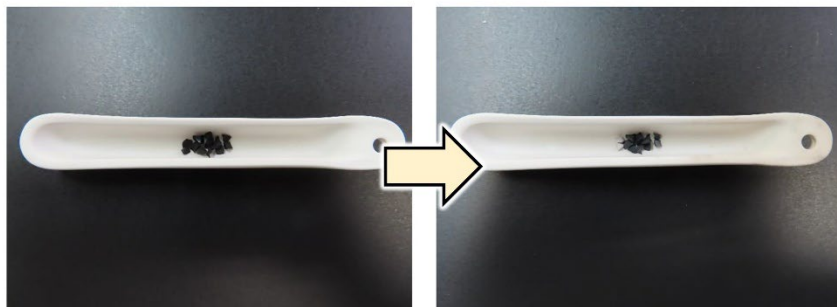


試料

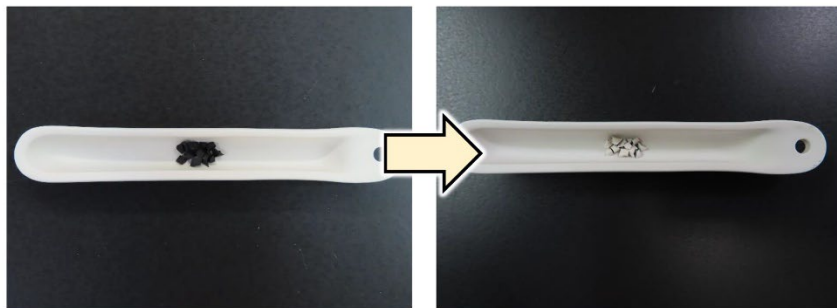
試験前

試験後

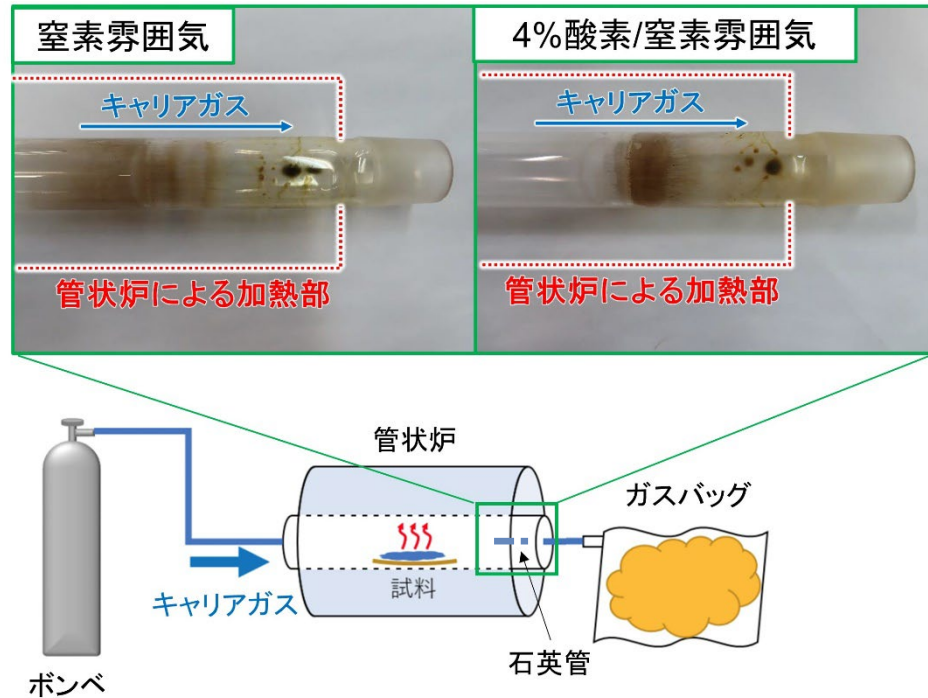
窒素雰囲気



4%酸素/窒素雰囲気

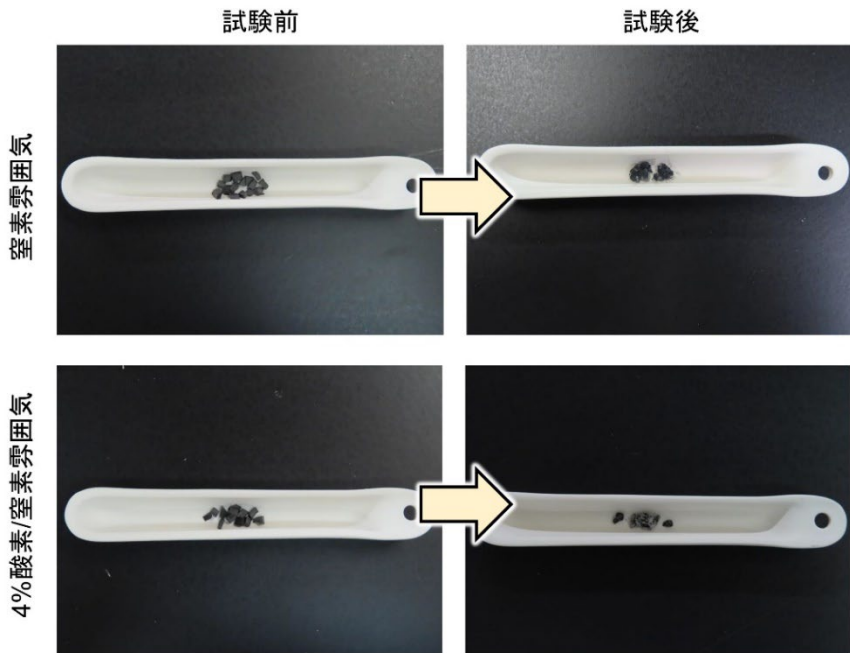


ガス配管

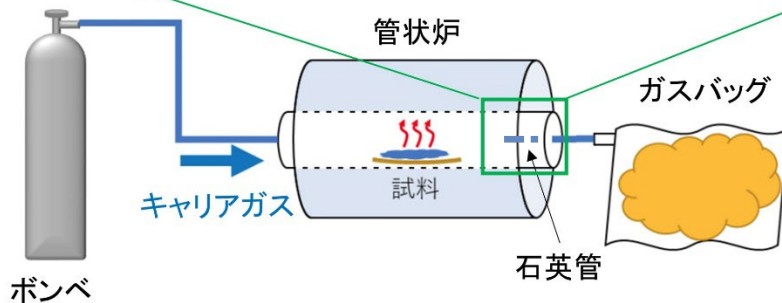
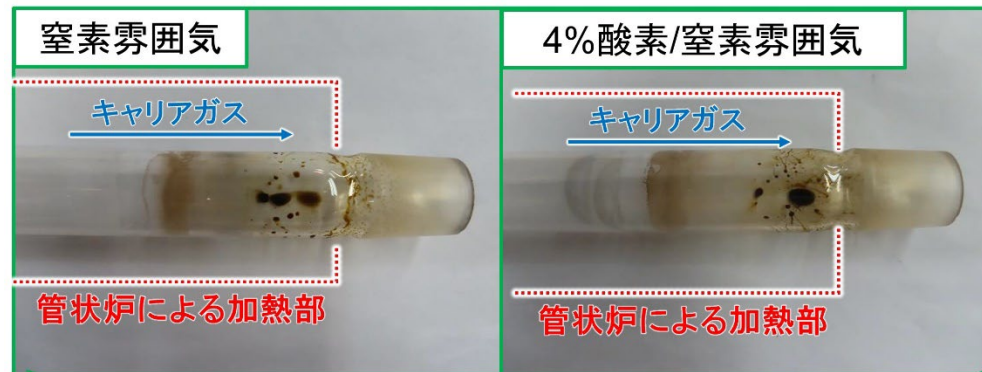


試験後の試料及びガス配管の様子(難燃性特殊耐熱ビニル)

試料



ガス配管



定量分析結果のまとめ(難燃性エチレンプロピレンゴム)

	(wt%)	窒素雰囲気			合計	4%酸素/窒素雰囲気			合計
		室温～	320～	400～		室温～	320～	400～	
		320℃	400℃	500℃		320℃	400℃	680℃	
試験後の重量減少	ΔTG	2.9	14	55	71.9	1.9	16	56	73.9
	管状炉	—			66.2	—			71.2
生成物量*	H ₂ O	0.5	1.2	2.9	4.6	1.6	4	29	34.6
	CO	< 1	< 1	< 1	0	< 1	< 1	4	4
	CO ₂	< 1	< 1	< 1	0	< 1	< 1	15	15
	C1有機物	< 0.1	< 0.1	0.3	0.3	< 0.1	< 0.1	0.5	0.5
	C2有機物	< 0.1	< 0.1	0.6	0.6	< 0.1	< 0.1	1.4	1.4
	C3有機物	< 0.1	< 0.1	0.8	0.8	< 0.1	< 0.1	1.2	1.2
	C4有機物	< 0.1	0.3	0.8	1.1	< 0.1	0.3	1.1	1.4
	C5有機物	< 0.1	< 0.1	0.6	0.6	< 0.1	< 0.1	0.8	0.8
	C6有機物	< 0.1	< 0.1	0.4	0.4	< 0.1	< 0.1	0.5	0.5
	C7有機物	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	0.3	0.3
	合計				8.50				59.7
H ₂ O、CO、CO ₂ 中の酸素を雰囲気由来とし、これらの生成量から酸素量を除いた場合の合計									15.8

定量分析結果のまとめ(特殊クロロプレンゴム)

	(wt%)	窒素雰囲気			合計	4%酸素/窒素雰囲気			合計
		室温～	310～	400～		室温～	310～	400～	
		310℃	400℃	530℃		310℃	400℃	600℃	
試験後の重量減少	ΔTG	6.7	20	22	48.7	7	16	46	69
	管状炉	—			40	—			54.7
生成物量*	H ₂ O	0.8	2.6	2	5.4	1.3	3.9	12	17.2
	CO	< 1	< 1	< 1	0	< 1	< 1	2	2
	CO ₂	< 1	< 1	< 1	0	< 1	< 1	17	17
	C1有機物	< 0.1	< 0.1	0.4	0.4	< 0.1	< 0.1	0.4	0.4
	C2有機物	< 0.1	< 0.1	0.3	0.3	< 0.1	< 0.1	0.4	0.4
	C3有機物	< 0.1	< 0.1	0.2	0.2	< 0.1	< 0.1	0.2	0.2
	C4有機物	< 0.1	< 0.1	0.2	0.2	< 0.1	< 0.1	0.2	0.2
	C5有機物	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	0.1
	C6有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0
	C7有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0
	合計				6.60				37.5
	H ₂ O、CO、CO ₂ 中の酸素を雰囲気由来とし、これらの生成量から酸素量を除いた場合の合計								8.70

定量分析結果のまとめ(難燃性特殊耐熱ビニル)

	(wt%)	窒素雰囲気			合計	4%酸素/窒素雰囲気			合計
		室温～	380～	560～		室温～	380～	560～	
		380℃	560℃	800℃		380℃	560℃	800℃	
試験後の重量減少	ΔTG	51	11	13	75	50	10	23	83
	管状炉	—			52.9	—			57.5
生成物量*	H ₂ O	7.6	2.5	1.4	11.5	11	6.8	2.4	20.2
	CO	< 1	< 1	3	3	< 1	< 1	< 1	0
	CO ₂	4	2	7	13	5	11	25	41
	C1有機物	< 0.1	0.3	0.1	0.4	< 0.1	0.3	< 0.1	0.3
	C2有機物	< 0.1	0.2	< 0.1	0.2	< 0.1	0.2	< 0.1	0.2
	C3有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0
	C4有機物	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1
	C5有機物	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	0.1
	C6有機物	0.3	0.2	0.1	0.6	0.4	0.2	< 0.1	0.6
	C7有機物	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0
	合計				28.9				62.5
	H ₂ O、CO、CO ₂ 中の酸素を雰囲気由来とし、これらの生成量から酸素量を除いた場合の合計								14.7

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37回）
資料2 - 2

ケーブルなどから発生する可燃性ガス発生量評価 及び 可燃性有機ガス燃焼試験進捗状況

1. 概要	p1
2. 可燃性ガス分析試験内容	p2-9
3. 可燃性ガス分析結果	p10-39
4. 可燃性ガス評価まとめ	p40
5. 可燃性有機ガス燃焼試験	p41-49
6. 可燃性有機ガス試験結果と事象考察	p50

東京電力ホールディングス株式会社

2023年4月24日

1. 概要

<概要>

- 「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」にて、1F3号機の水素爆発時の火炎及び噴煙の状態から、**水素爆発時に水素以外に可燃性有機ガスの寄与が報告**された
- 分析のため、次のステップで評価を進めている状況
- ① **可燃性有機ガス発生量評価（可燃性有機ガスの発生量を把握）**
 - 2021年度：一部実施済み
 - 2022年度：評価対象追加、JAEA殿と条件調整の上実施予定 → **今回報告**
- ② **燃焼試験（火炎、黒煙の発生条件を把握）**
 - 2022年度：可燃性有機ガス発生量を参考に実施予定 → **今回報告**

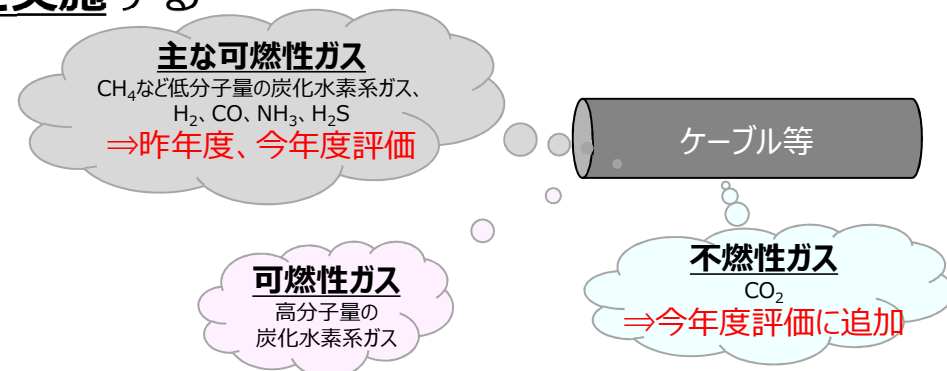
<2021年度成果>

- ① **可燃性有機ガス発生量評価**
 - 格納容器内での使用量が多く、可燃性有機ガスの発生が考えられるケーブル、塗料、保温材について、水素ガス、水蒸気環境下での1000℃昇温時、200℃24時間保持時に発生する可燃性有機ガスの同定及び定量分析を実施
 - 水素環境下よりも**水蒸気環境下の方が可燃性ガスが多く発生する傾向**を確認
 - 200℃24時間環境下では、可燃性ガスはほぼ発生しない**ことを確認

2-1. 可燃性有機ガス分析試験計画 (方針)

<2022年度ガス分析方針>

- 水素環境より水蒸気環境の方がガス発生量が多い傾向が確認されたことから、**水蒸気環境を優先**する
- 200℃24h試験はガス発生量がほぼないことが確認されたことから、**1000℃昇温試験を優先**する
- 酸素ガス影響を考慮して、**4%酸素環境試験を実施**する
 - 酸素以外の雰囲気条件（窒素又は水蒸気）は、代表試料（ウレタン保温材）について2パターン評価し、他試料の雰囲気条件を決定
 - 水蒸気100%環境試験と類似の結果が得られると想定されることから、**代表試料の試験を実施**
- 2022年度評価試料は、試験体の種類毎に1機種以上確保し、以下の通りとする**
 - 無機ジンクリッチ塗料、KGBケーブル、潤滑油**（初めての評価対象）
 - PNケーブル**（格納容器下部ドライウエルの物量が多くガス発生量多い）
 - ウレタン保温材**（物量が多くガス発生量多い）
- 可燃性ガス以外としてCO₂の発生量が多いと想定されるため、**CO₂分析のため代表試料の水蒸気環境での再試験を実施**する
- 高分子量揮発成分を把握するため、**タール分の重量測定を実施**する
- 2022年度に初めてガス分析を実施する試料は、予備試験も実施する



2-2. 可燃性有機ガス分析試験計画（概要）

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31回）
資料4-2 資料引用・青字追加

今回報告範囲

No.	種類	評価対象	用途	本試験 水蒸気97%+ 窒素3%	本試験 水素100%	本試験 酸素4%+窒素 or水蒸気96%
1	ケーブル	CVケーブル 絶縁体：架橋ポリエチレン シース：難燃性特殊耐熱ビニル	・ 高圧動力用ケーブルに使用	完了 (1000℃/200℃)	完了 (1000℃)	※2
2	ケーブル	PNケーブル 絶縁体：難燃性エチレンプロピレンゴム シース：特殊クロロプレンゴム	・ 制御・計装ケーブルに使用 ・ RPV下部に設置	完了 (1000℃/200℃) 2022年度再試験 (1000℃)	完了 (1000℃)	2022年度試験 (1000℃) ※2
3	ケーブル	同軸ケーブル 絶縁体：ETFE/架橋ポリエチレン シース：難燃性架橋ポリエチレン	・ SRNM/LPRMケーブルに使用 ・ RPV下部に設置	完了 (1000℃/200℃)	完了 (1000℃)	※2
4	塗料	エポキシ系塗料	・ D/W上塗り	完了 (1000℃/200℃)	完了 (1000℃)	※2
5	塗料	無機ジンクリッチ塗料	・ D/W 下塗り	2022年度試験 (1000℃)	—	2022年度試験 (1000℃) ※2
6	保温材	ウレタン保温材	・ 配管保温	完了 (1000℃/200℃) 2022年度再試験 (1000℃)	完了 (1000℃)	2022年度試験 (1000℃) ※2
7	保温材	ポリイミド保温材	・ 配管保温	完了 (1000℃)	完了 (1000℃/200℃)	※2
8	ケーブル	KGBケーブル 絶縁体：シリコンゴム+ガラス編組 シース：シリコンゴム	・ PIPケーブルに使用 ・ RPV下部に設置	2022年度試験 (1000℃) ※1	—	2022年度試験 (1000℃) ※2
9	潤滑油	電動機用潤滑油	・ PLR電動機	2022年度試験 (1000℃/200℃) ※1	—	2022年度試験 (1000℃) ※2

・ 有機ジンクリッチ塗料は使用範囲が限定的であるため、優先度を下げ試験対象外とした

1000℃：1000℃昇温試験、200℃：200℃24h試験

※1：予備試験も実施

※2：代表機種にて試験実施

2-3. ケーブル試料について

重量割合はケーブル全体に対する割合

試料		仕様	写真	断面写真
CVケーブル	絶縁体	架橋ポリエチレン (重量割合：14%)		
	シース	難燃性特殊耐熱ビニル (重量割合：18%)		
PNケーブル	絶縁体	難燃性エチレンプロピレンゴム (重量割合：18%)		
	シース	特殊クロロプレンゴム (重量割合：54%)		
同軸ケーブル	第一絶縁体	ETFE (重量割合：3%)		
	第二絶縁体	架橋ポリエチレン (重量割合：14%)		
	シース	難燃性架橋ポリエチレン (重量割合：27%)		
KGBケーブル	絶縁体	シリコンゴム+ガラス編組 (重量割合：16%)		
	シース	シリコンゴム (重量割合：8%)		

2-4. 可燃性有機ガス分析試験計画 (概要)

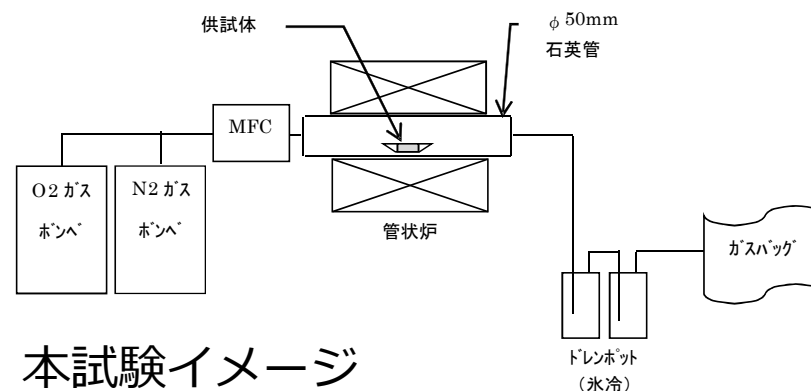
<予備試験>

- ガス発生温度域及び有機系化合物が1000℃昇温で揮発するか確認するため、窒素環境下での昇温中の重量変化測定 (TG*1)
- 昇温試験前後の材質評価 (FT-IR*2、SEM-EDX*3)

*1:熱重量測定
*2:フーリエ変換赤外分光法
*3:走査型電子顕微鏡-
エネルギー分散型X線分光分析

<本試験>

- 水蒸気環境下、酸素4%+窒素又は水蒸気環境下での昇温試験
- **ウレタン保温材の酸素ガス環境下試験条件をJAEA殿条件と整合**
- 発生ガス中の可燃性ガスの同定及び定量分析(ガスクロマトグラフィーなど)
 - 200℃~1000℃間 (ガス発生温度域からガスサンプリング条件を決定)
 - 1000℃ (試験装置の限界温度。RPV下部での溶融炉心との接触を想定)
- 昇温試験前後の材質評価 (FT-IR*2、SEM-EDX*3) ※潤滑油は液体のため、SEM-EDX測定実施せず



本試験イメージ

2-4. ウレタン保温材の可燃性有機ガス分析試験計画

- 酸素ガス濃度、試験中の発生ガス条件（試料単位重量当たりのガス接触時間）を整合

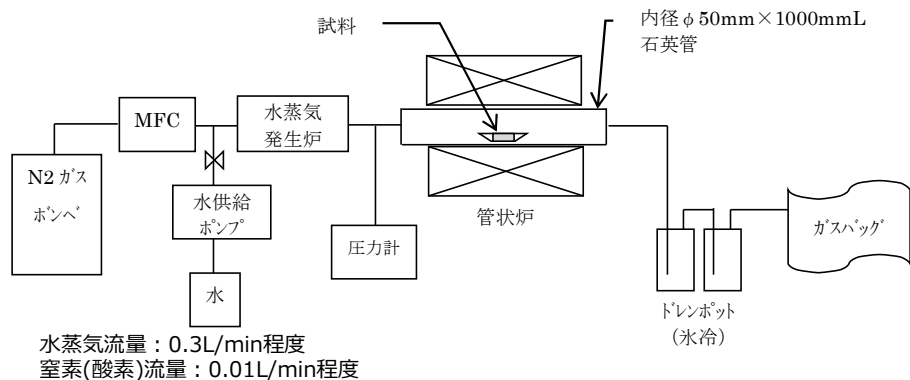
No.	試験設定項目	JAEA（現状案）	東京電力HD	備考
昇温試験条件				
1	雰囲気ガス濃度（酸素）	4.0%	4.0%	1F保安規定より
2	雰囲気ガス濃度（酸素以外）	窒素96%	①窒素96% ②水蒸気96%	可燃性ガス発生量の多い条件を他試料へ適用予定
3	昇温速度	10℃/min	10℃/min	2021年度と同条件
試料単位重量当たりのガス接触時間(約9min/g*に一致)※				
<small>*:[試験系体積(mL)]÷[ガス流量(mL/min)] ÷ [試料重量(g)]</small>				
4	試験系実効体積	約140mL	約1570mL	2021年度と同条件
5	雰囲気ガス流量	100mL/min	300mL/min	2021年度と同条件
6	試料重量（ウレタン保温材）	約0.15g	約0.6g	試験中の発生ガス条件を合わせるため調整
ガス分析方法				
7	対象：水素、一酸化炭素、二酸化炭素	ガスクロマトグラフ法（熱伝導度検出器(TCD)）	ガスクロマトグラフ法（熱伝導度検出器(TCD)）	2021年度と同条件 二酸化炭素の検出を追加
8	対象：炭化水素	ガスクロマトグラフ法（水素炎イオン化検出器(FID)）	ガスクロマトグラフ法（水素炎イオン化検出器(FID)）	2021年度と同条件
9	対象：アンモニア	分析予定なし	ガス検知管法	2021年度と同条件
10	対象：硫化水素	分析予定なし	ガスクロマトグラフ法（炎光光度検出器(FPD)）	2021年度と同条件

※：No.5/6条件が変更となる場合は、試料単位重量当たりのガス接触時間を整合させる

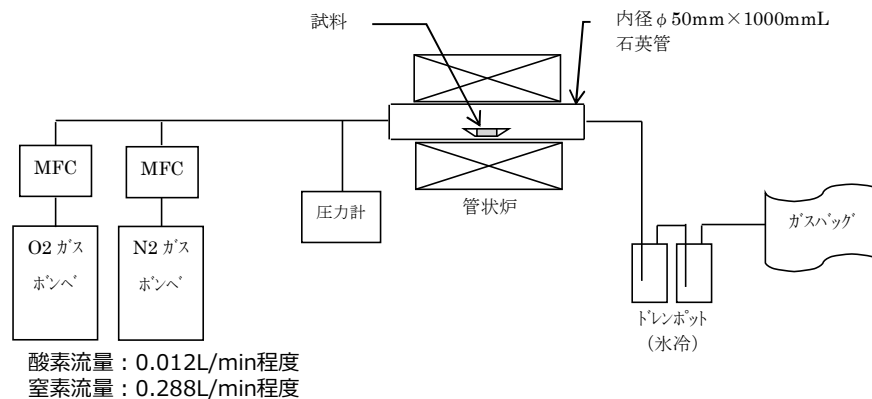
2-5. 可燃性有機ガス分析試験計画（本試験）

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31回）
資料4-2 資料引用・一部修正

■ 水蒸気 + 窒素（酸素）環境下



■ 酸素 + 窒素環境下



管状炉



マスフローコントローラ

石英管



ガスバッグ

2-5. 可燃性有機ガス分析方法

■ ガス種に対する分析方法

対象ガス	分析方法	検出器	定量下限値
水素 一酸化炭素 二酸化炭素	ガスクロマトグラフ法	熱伝導度検出器(TCD)	0.1vol%
炭化水素	ガスクロマトグラフ法	水素炎イオン化検出器(FID)	1volppm
アンモニア	ガス検知管法		0.5volppm
硫化水素	ガスクロマトグラフ法	炎光光度検出器(FPD)	0.1volppm

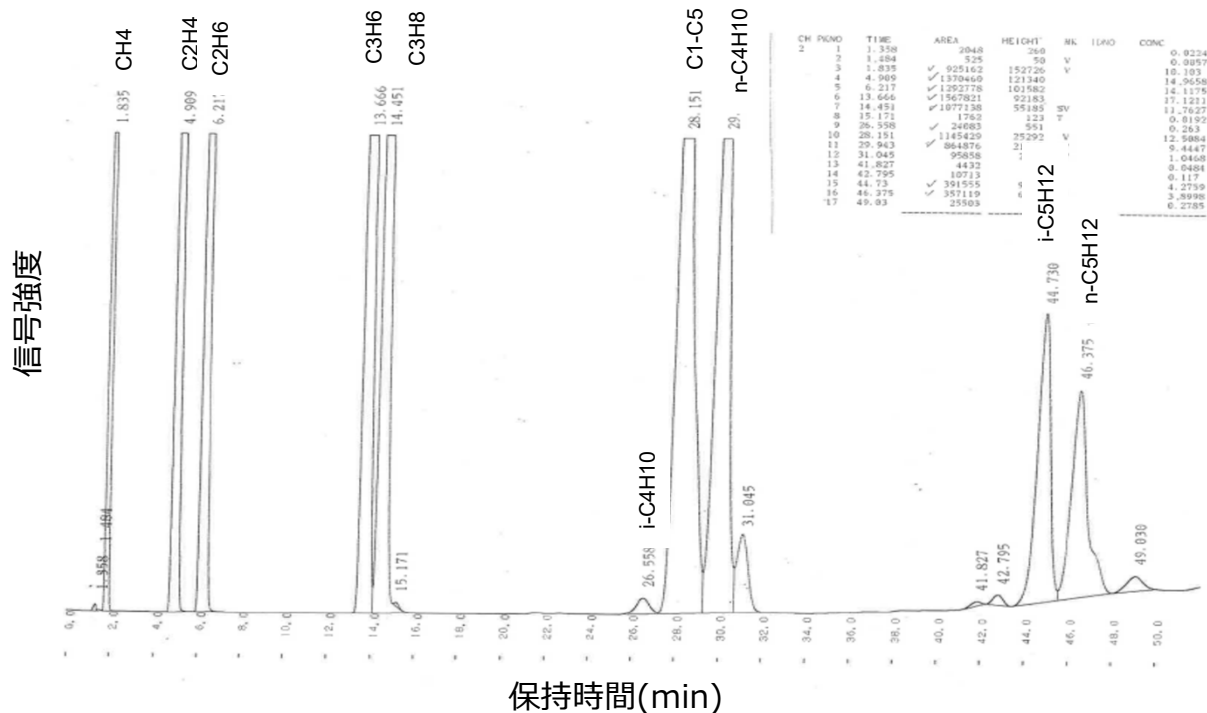
■ そのほかの分析方法

対象物	分析方法
ガス発生量	排ガス全量をガスバッグに採取し、積算流量計で計測した値から供給ガス量を差し引いて算出（水蒸気環境下の場合、水はドレンポットに回収され、排ガスには含まれない）
タール発生量	石英管やドレンポットに付着・回収されたタールを秤量
水蒸気発生量	ドレンポットに回収した水蒸気の量から供給した水蒸気の量を差し引いて算出

2-5. 可燃性有機ガス分析方法

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29回)
資料1-2 資料引用

■ CVケーブル水蒸気環境下350-500°Cガスクロマトグラム(C1-C5)



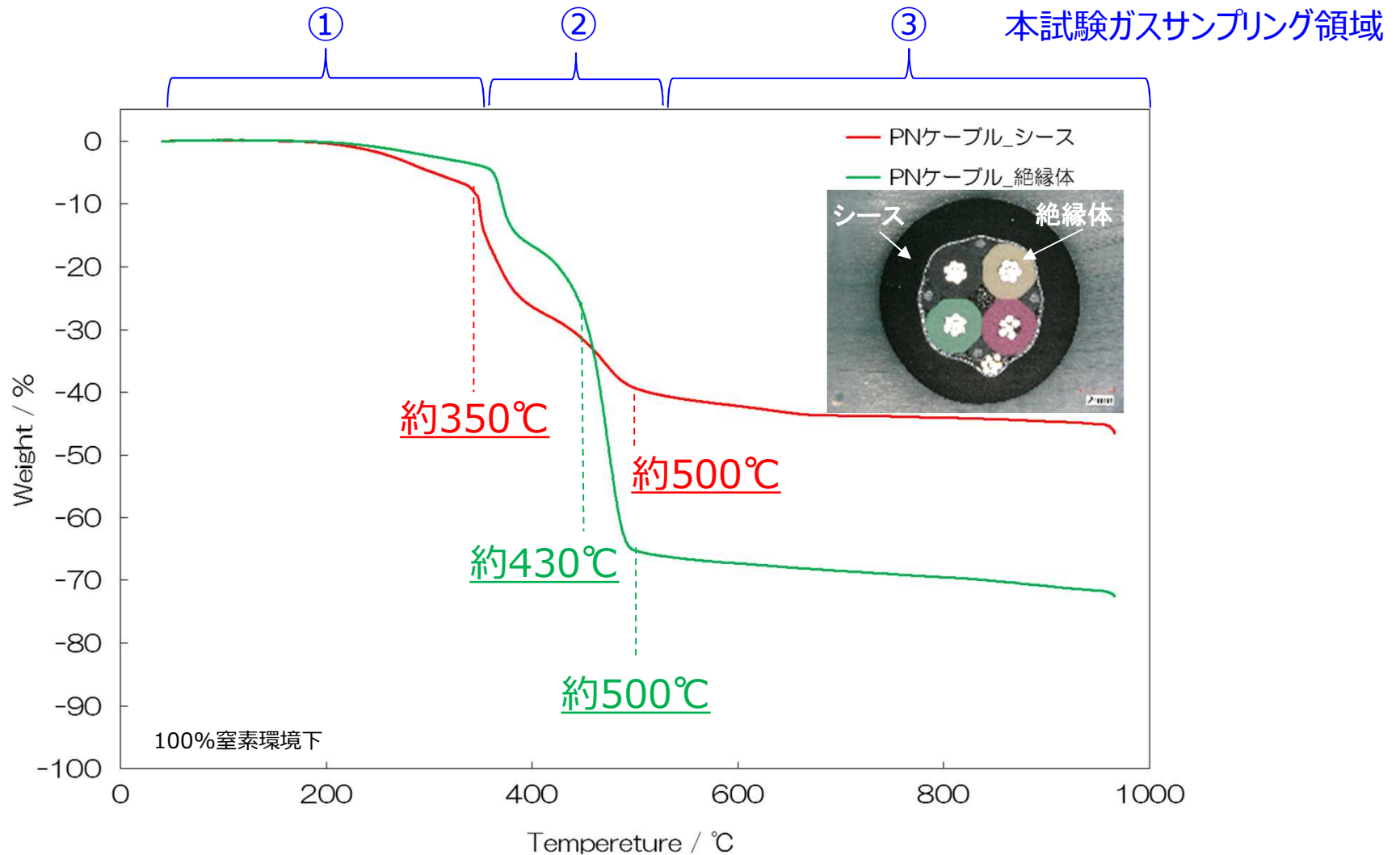
標準ガスを基準とし、各ピークの同定と面積からガス濃度を算出

	CH4	volppm	2000
	C2H4	volppm	1500
	C2H6	volppm	1400
炭 化	C3H6	volppm	1300
	C3H8	volppm	850
水 素	i-C4H10	volppm	14
	n-C4H10	volppm	540
	i-C5H12	volppm	190
	n-C5H12	volppm	180

3-1. PNケーブル予備試験結果

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29回)
資料1-2 資料引用

■PNケーブルのTG曲線



3-1. PNケーブル本試験結果

■ PNケーブル昇温前後の状態



試験前



試験後

(1000℃水蒸気97%+3%窒素環境下)

試料	PNケーブル						
	環境	水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%		
温度	℃	RT~400	400~500	500~1000	RT~400	400~500	500~1000
ガス発生量	L	2.3	0.4	13.2	2.2	0.4	9.3
	(合計)	15.9			11.9		
ケーブル長さ	mm	80.0			80.0		
試験前試料重量	g	17.13			17.37		
試験後試料重量	g	7.85			8.32		
増減	g	-9.28			-9.05		
	%	-54.2			-52.1		
タール発生量	g	5.16			4.17		
供給水蒸気量	g	68.45			70.31		
回収水蒸気量	g	62.26			67.77		
水蒸気発生量	g	-6.19			-2.54		



試験後

(1000℃酸素4%+水蒸気96%環境下)

3-1. PNケーブル本試験結果

■ PNケーブル1000℃昇温時に発生したガス分析結果 (ケーブル単位重量当たりのガス発生重量分率)

試料		PNケーブル						
環境		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%			
温度(℃)		RT~400	400~500	500~1000	RT~400	400~500	500~1000	
H2	wt%	-	2.87E-03	3.22E+00	-	2.06E-03	2.06E+00	
CO	wt%	-	1.46E-02	2.22E+01	-	2.88E-02	1.78E+01	
CO2	wt%	-	1.03E-01	1.47E+01	-	1.07E-01	1.90E+01	
炭化水素	CH4	wt%	4.32E-03	1.61E-02	1.74E+00	2.35E-04	1.99E-02	1.40E+00
	C2H4	wt%	2.96E-04	2.66E-02	9.57E-01	3.17E-05	2.81E-02	7.92E-01
	C2H6	wt%	9.15E-04	1.09E-02	4.43E-01	-	1.35E-02	5.34E-01
	C3H6	wt%	-	5.47E-03	5.22E-01	-	8.10E-03	6.17E-01
	C3H8	wt%	1.03E-04	4.87E-03	1.88E-01	-	6.22E-03	2.36E-01
	i-C4H10	wt%	-	2.34E-04	9.68E-03	-	2.46E-04	1.31E-02
	n-C4H10	wt%	-	2.72E-03	1.37E-01	-	2.46E-03	1.59E-01
	i-C5H12	wt%	-	1.97E-04	6.99E-02	-	1.76E-04	8.35E-02
	n-C5H12	wt%	-	2.44E-04	1.37E-01	-	1.48E-04	1.45E-01
	上記以外のC1~C5(CH4換算値)	wt%	2.25E-04	8.55E-03	4.35E-01	-	7.20E-03	4.98E-01
NH3	wt%	-	-	-	-	-	-	
H2S	wt%	4.78E-05	1.95E-02	1.20E-02	1.92E-04	2.53E-02	1.83E-02	

3-1. PNケーブル本試験結果

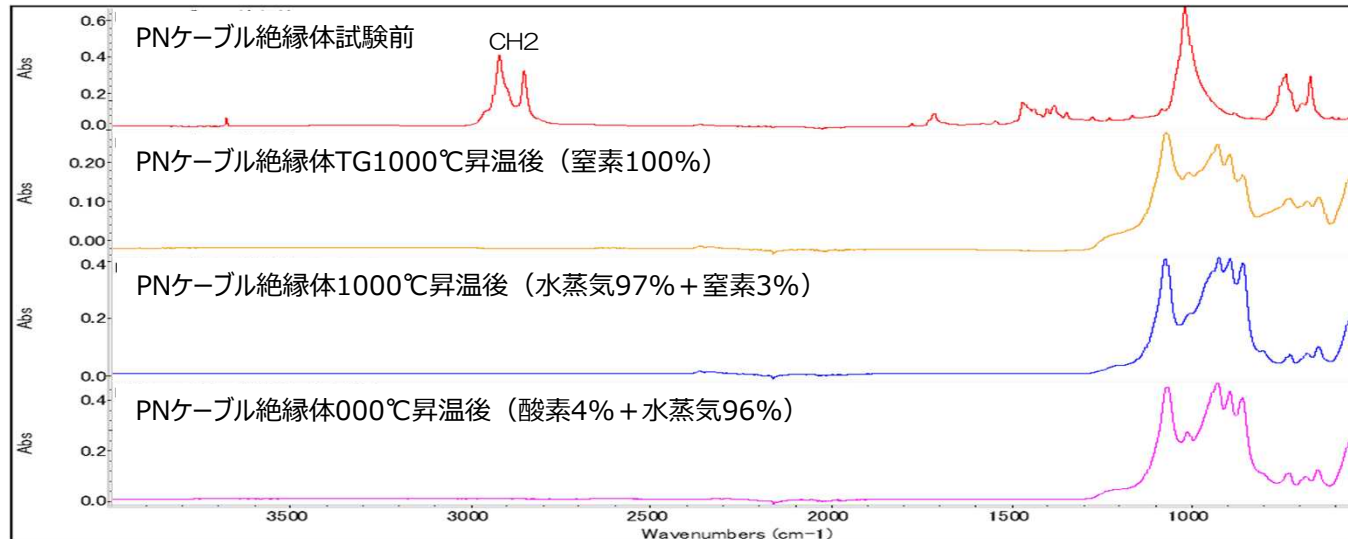
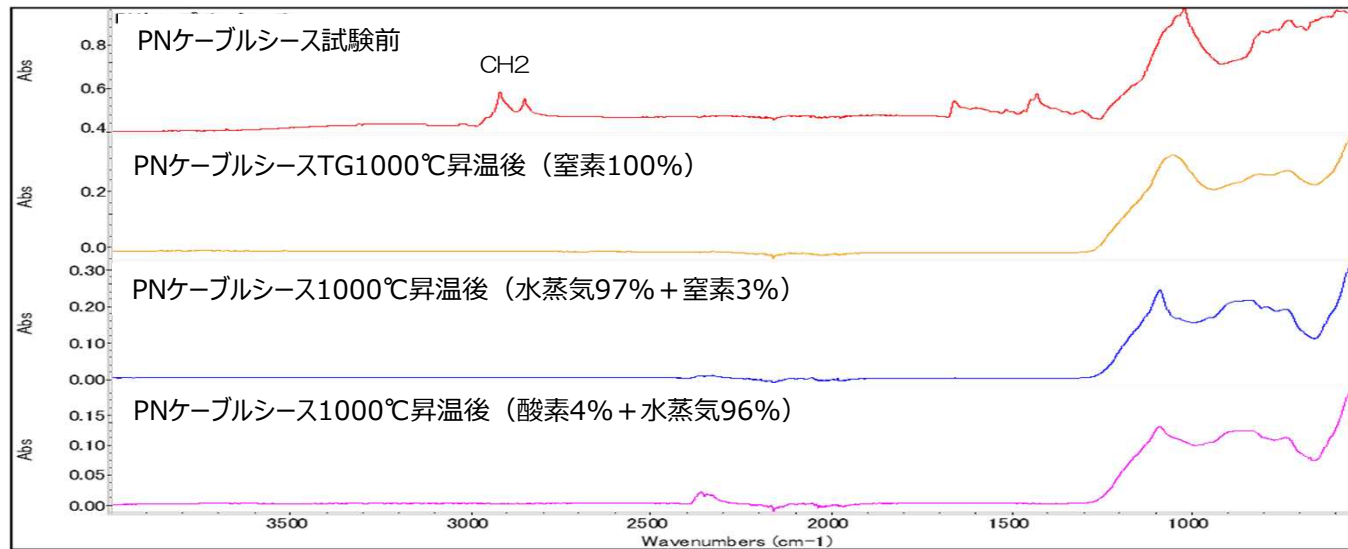
■ PNケーブル1000℃昇温時に発生したガス分析結果

(ケーブル中のシースと絶縁体単位重量当たりのガス発生重量分率)

試料		PNケーブル						
環境		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%			
温度(°C)		RT~400	400~500	500~1000	RT~400	400~500	500~1000	
H2	wt%	-	3.94E-03	4.43E+00	-	2.83E-03	2.84E+00	
CO	wt%	-	2.01E-02	3.05E+01	-	3.96E-02	2.45E+01	
CO2	wt%	-	1.42E-01	2.02E+01	-	1.48E-01	2.62E+01	
炭化水素	CH4	wt%	5.94E-03	2.21E-02	2.39E+00	3.24E-04	2.74E-02	1.93E+00
	C2H4	wt%	4.07E-04	3.66E-02	1.32E+00	4.36E-05	3.86E-02	1.09E+00
	C2H6	wt%	1.26E-03	1.51E-02	6.09E-01	-	1.86E-02	7.35E-01
	C3H6	wt%	-	7.53E-03	7.18E-01	-	1.11E-02	8.49E-01
	C3H8	wt%	1.42E-04	6.70E-03	2.59E-01	-	8.56E-03	3.25E-01
	i-C4H10	wt%	-	3.22E-04	1.33E-02	-	3.38E-04	1.80E-02
	n-C4H10	wt%	-	3.74E-03	1.89E-01	-	3.38E-03	2.19E-01
	i-C5H12	wt%	-	2.71E-04	9.61E-02	-	2.42E-04	1.15E-01
	n-C5H12	wt%	-	3.36E-04	1.88E-01	-	2.04E-04	1.99E-01
	上記以外のC1~C5(CH4換算値)	wt%	3.10E-04	1.18E-02	5.98E-01	-	9.90E-03	6.84E-01
NH3	wt%	-	-	-	-	-	-	
H2S	wt%	6.58E-05	2.68E-02	1.65E-02	2.64E-04	3.49E-02	2.51E-02	

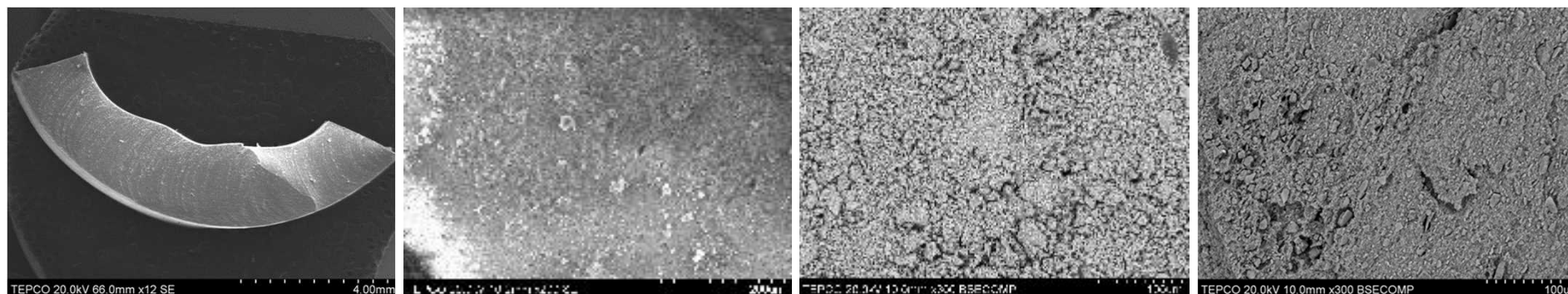
3-1. PNケーブル本試験結果

■ PNケーブル1000℃昇温前後でのFT-IRスペクトル



3 - 1. PNケーブルルシース本試験結果

■ PNケーブルルシース1000℃昇温前後でのSEM-EDX分析結果



試験前

TG1000℃昇温後
窒素100%

1000℃昇温後
水蒸気97% + 窒素3%

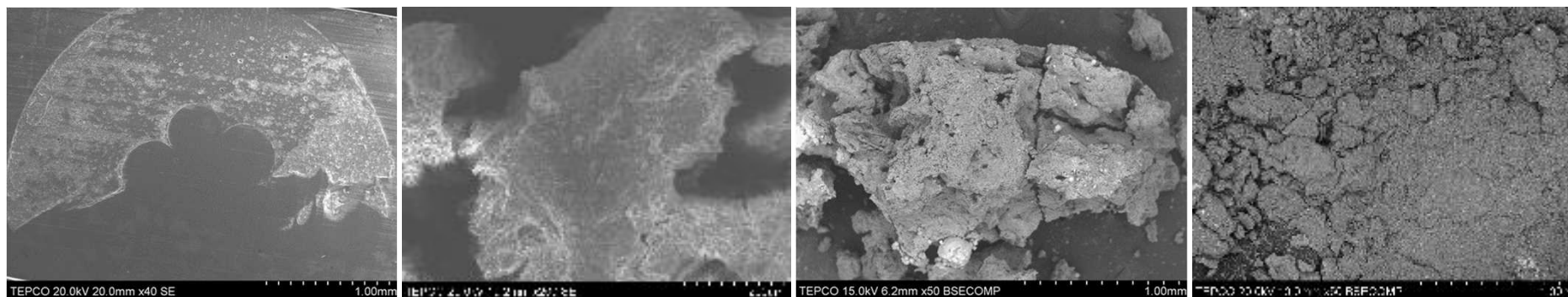
1000℃昇温後
酸素4% + 水蒸気96%

単位：wt%

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Ni	Cu	Zn	Sb	Pb	合計
試験前	62.48	14.86	0.03	0.05	3.37	3.08	0.84	8.71	0.06	0.00	0.15	0.05	0.03	0.01	0.01	0.87	5.41	100
TG1000℃ 窒素100%	10.64	41.07	0.06	0.14	15.78	15.17	-	0.01	0.30	0.03	1.11	0.60	0.14	0.14	-	0.11	14.71	100
1000℃ 水蒸気97% + 窒素3%	11.68	46.91	0.12	0.23	15.60	14.22	0.15	0.04	0.24	0.01	0.78	0.29	0.18	0.11	0.13	0.24	9.08	100
1000℃ 酸素4% + 水蒸気96%	13.02	44.04	0.18	0.23	14.74	13.18	0.21	0.05	0.22	0.00	0.77	0.25	0.18	0.10	0.62	0.36	11.86	100

3-1. PNケーブル絶縁体本試験結果

■ PNケーブル絶縁体1000℃昇温前後でのSEM-EDX分析結果



試験前

TG1000℃昇温後
窒素100%

1000℃昇温後
水蒸気97%+窒素3%

1000℃昇温後
酸素4%+水蒸気96%

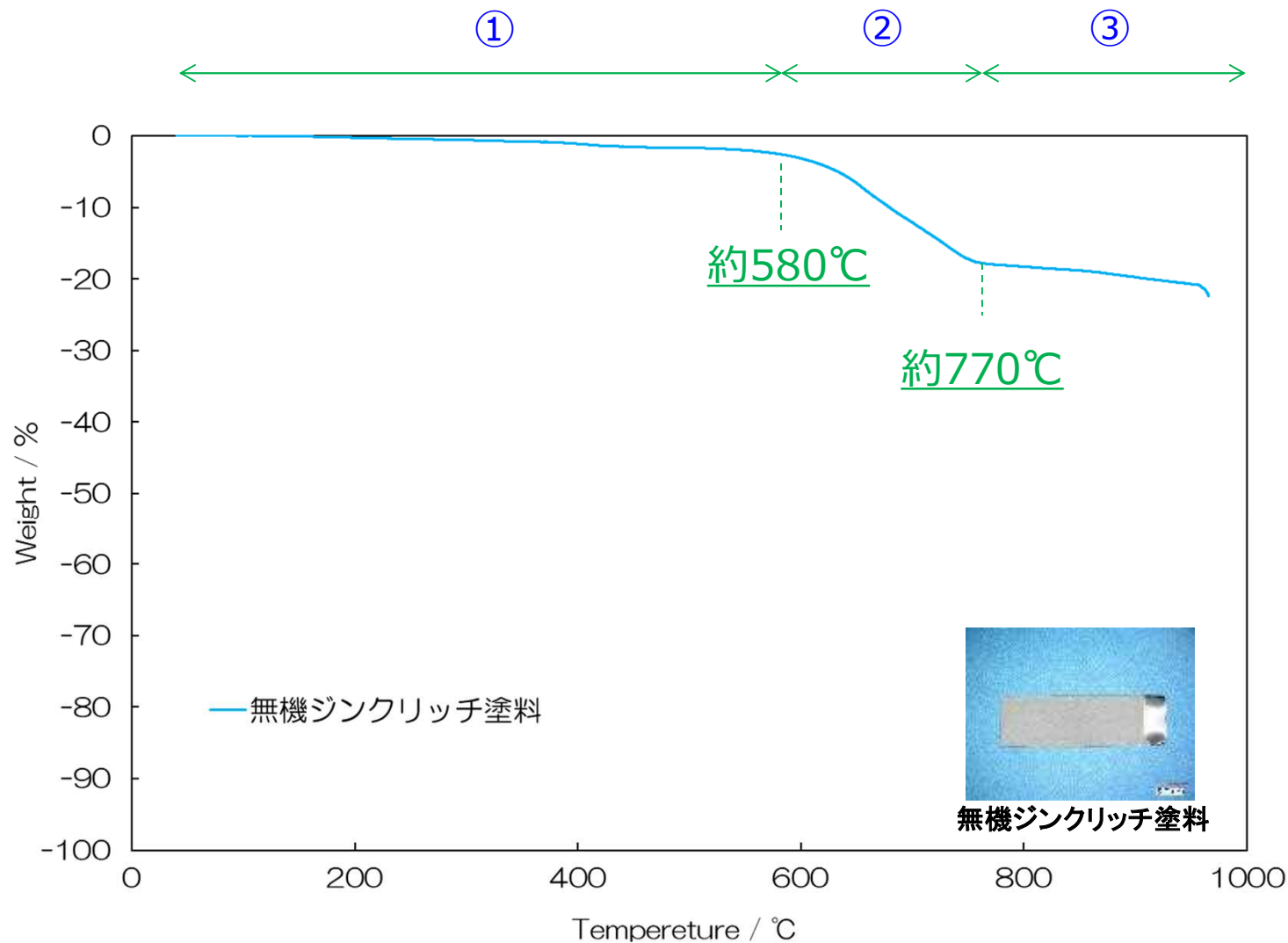
単位：wt%

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Cu	Zn	Br	Sb	Pb	合計
試験前	70.36	11.24	0.13	2.15	0.96	3.35	0.93	0.17	0.09	0.02	1.54	4.24	4.73	0.08	100
TG1000℃ 窒素100%	10.97	32.29	0.73	8.87	0.15	13.97	0.03	0.17	0.49	0.30	7.17	0.18	24.26	0.41	100
1000℃ 水蒸気97% +窒素3%	12.62	46.71	0.10	12.22	0.85	17.02	0.15	2.81	0.55	1.11	0.44	0.00	1.84	3.57	100
1000℃ 酸素4%+ 水蒸気96%	9.74	47.22	0.23	13.93	0.55	20.46	0.06	0.18	0.56	0.66	1.78	0.00	1.86	2.76	100

3-2. 無機ジンクリッチ塗料予備試験結果

■ 無機ジンクリッチ塗料のTG曲線

本試験ガスサンプリング領域



3-1. 無機ジンクリッチ塗料本試験結果

無機ジンクリッチ塗料昇温前後の状態



試験前



試験後

(1000℃水蒸気97%+3%窒素環境下)

試料		無機ジンクリッチ塗料					
		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%		
環境	℃	RT~580	580~770	770~1000	RT~580	580~770	770~1000
ガス発生量	L	2.7	0.5	2.4	2.9	<0.1	<0.1
	(合計)	5.6			2.9		
試験前試料重量	g	3.40			3.56		
試験後試料重量	g	4.31			4.53		
増減	g	0.91			0.97		
	%	26.8			27.2		
タール発生量	g	0.01			0.08		
供給水蒸気量	g	73.37			71.62		
回収水蒸気量	g	69.97			71.85		
水蒸気発生量	g	-3.40			0.23		



試験後

(1000℃酸素4%+水蒸気96%環境下)

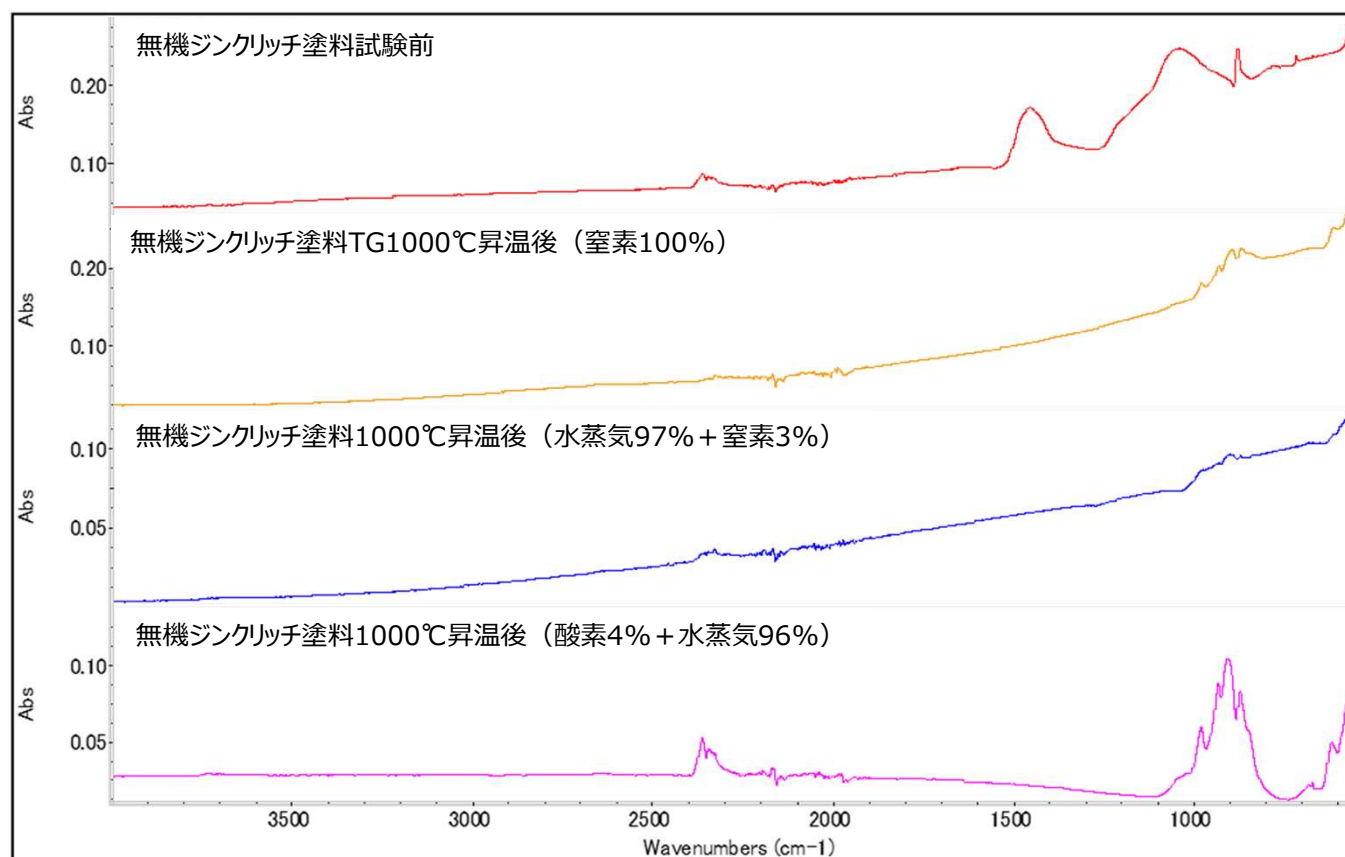
3-2. 無機ジンクリッチ塗料本試験結果

■ 無機ジンクリッチ塗料1000℃昇温時に発生したガス分析結果 (塗料単位重量当たりのガス発生重量分率)

試料		無機ジンクリッチ塗料						
環境		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%			
温度(℃)		RT~580	580~770	770~1000	RT~580	580~770	770~1000	
H2	wt%	-	1.16E-01	3.64E+00	-	-	6.50E-02	
CO	wt%	-	-	5.65E-01	-	8.01E-03	3.03E-01	
CO2	wt%	-	1.99E-01	3.11E+00	-	3.77E-02	3.62E+00	
炭化水素	CH4	wt%	4.05E-03	2.90E-02	3.95E+00	3.80E-03	4.30E-04	3.81E-02
	C2H4	wt%	5.59E-04	3.81E-03	8.89E-02	3.23E-03	3.76E-04	2.55E-02
	C2H6	wt%	1.60E-03	1.60E-03	8.02E-03	4.32E-04	3.43E-05	1.11E-03
	C3H6	wt%	5.59E-04	3.42E-03	1.08E-02	9.08E-04	3.72E-04	7.64E-03
	C3H8	wt%	2.93E-04	6.38E-04	1.33E-03	-	2.52E-05	3.81E-04
	i-C4H10	wt%	-	-	-	-	6.63E-05	1.03E-02
	n-C4H10	wt%	-	-	-	-	-	-
	i-C5H12	wt%	-	-	-	-	-	-
	n-C5H12	wt%	-	-	-	-	-	-
	上記以外のC1~C5(CH4換算値)	wt%	1.38E-02	6.38E-03	1.05E-01	-	9.61E-05	3.16E-03
NH3	wt%	-	-	-	-	-	-	
H2S	wt%	2.26E-05	1.54E-05	3.09E-04	7.35E-05	7.78E-06	7.37E-05	

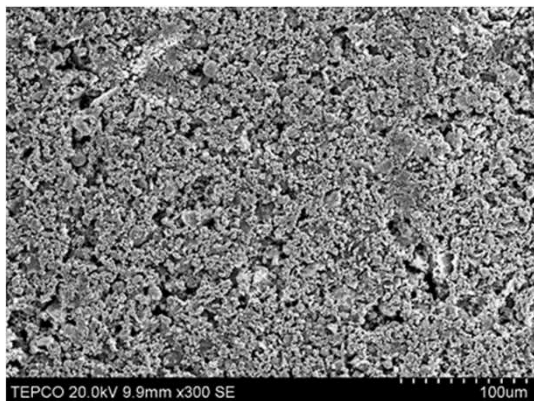
3-2. 無機ジンクリッチ塗料本試験結果

■ 無機ジンクリッチ塗料1000℃昇温前後でのFT-IRスペクトル

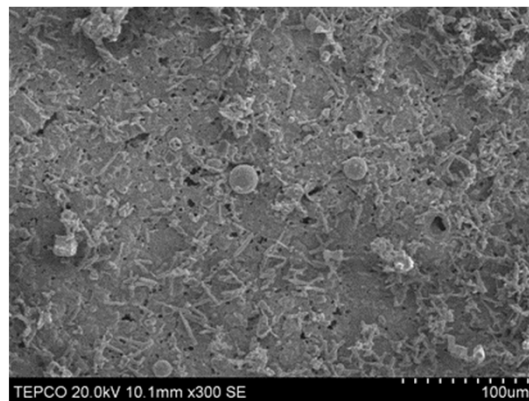


3-2. 無機ジンクリッチ塗料本試験結果

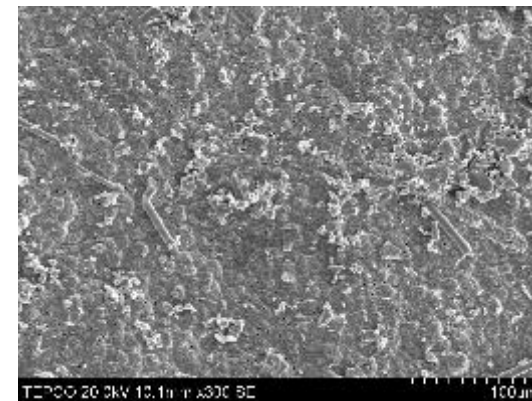
■ 無機ジンクリッチ塗料1000℃昇温前後でのSEM-EDX分析



試験前



1000℃昇温後
水蒸気97%+窒素3%



1000℃昇温後
酸素4%+水蒸気96%

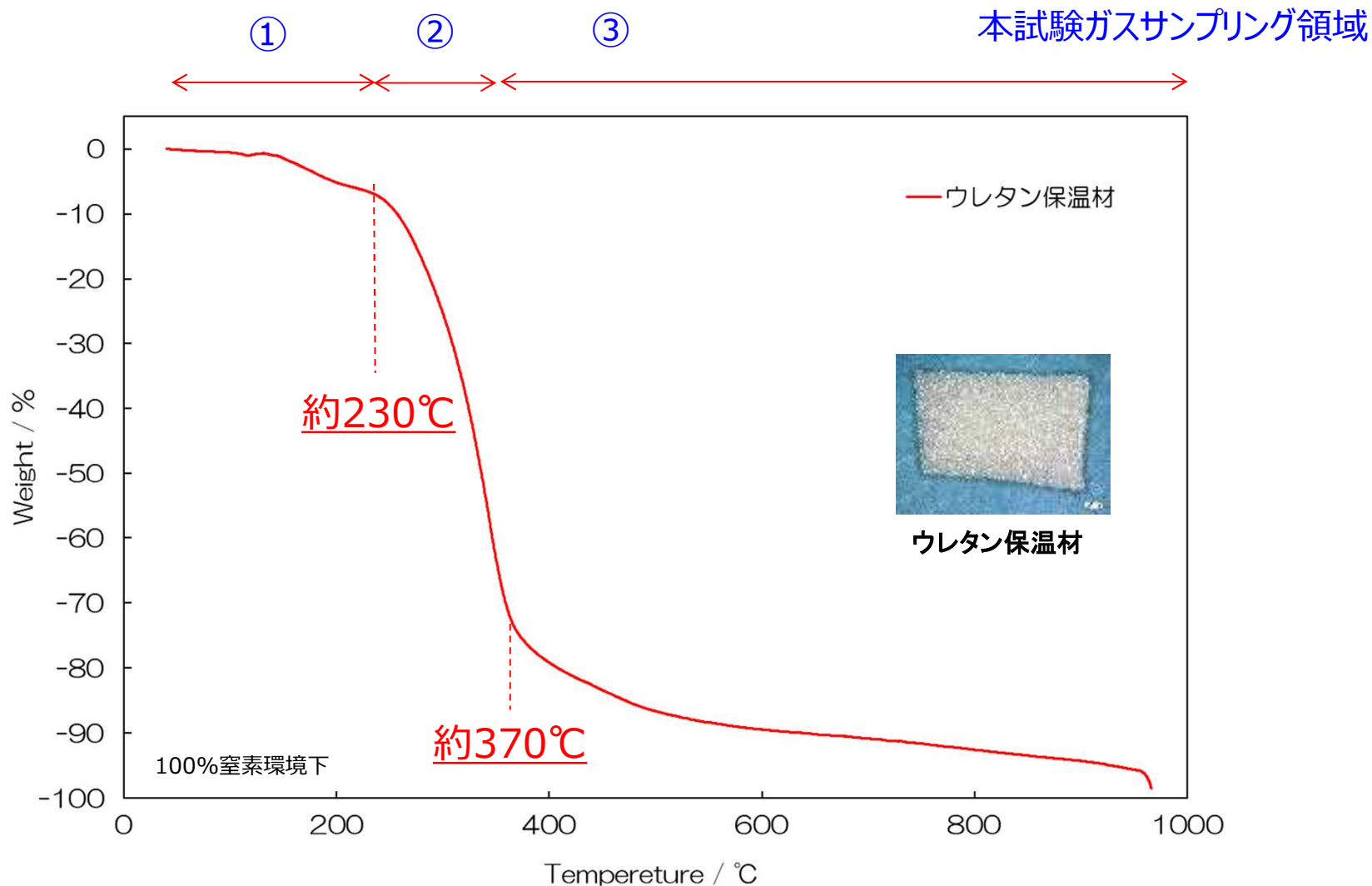
単位：wt%

	C	O	Na	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Zn	合計
試験前	16.90	18.12	0.00	0.95	5.65	0.24	2.87	0.01	0.01	0.08	55.17	100
TG1000℃ 窒素100%	8.27	12.19	7.42	0.03	0.13	0.01	0.15	-	-	0.30	71.50	100
1000℃ 水蒸気97% +窒素3%	8.21	20.41	1.17	0.31	2.73	0.03	0.72	0.01	0.04	0.12	66.26	100
1000℃ 酸素4%+ 水蒸気96%	10.46	22.19	0.70	0.28	0.49	0.01	0.34	0.29	0.10	0.19	64.94	100

3-3. ウレタン保温材予備試験結果

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29回)
資料1-2 資料引用・一部修正

■ウレタン保温材のTG曲線



3-3. ウレタン保温材本試験結果

■ウレタン保温材昇温前後の状態



試験前

試験後
(1000℃水蒸気97%
+
3%窒素環境下)

試験後
(1000℃酸素4%
+
窒素96%環境下)

試験後
(1000℃酸素4%
+
水蒸気96%環境下)

試料		ウレタン保温材								
		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%			酸素4%+窒素96%		
環境	°C	RT~230	230~370	370~1000	RT~230	230~370	370~1000	RT~230	230~370	370~1000
ガス発生量	L	1.9	0.1	0.8	1.5	0.2	0.2	1.0	0.1	1.5
(合計)	L	2.8			2.6			1.9		
試験前試料重量	g	0.60			0.60			0.60		
試験後試料重量	g	0.00			0.00			0.00		
増減	g	-0.60			-0.60			-0.60		
	%	-100.0			-100.0			-100.0		
タール発生量	g	0.31			0.33			0.20		
供給水蒸気量	g	70.80			69.76			-		
回収水蒸気量	g	69.40			69.18			0.06		

3-3. ウレタン保温材本試験結果 (JAEA殿との比較)



■ウレタン保温材1000℃昇温時に発生したガス分析結果 (保温材単位重量当たりのガス発生重量分率)

青字：定量下限値未満も含む生値

試料		TEPCO					JAEA殿					
環境		酸素4%+窒素96%					酸素4%+窒素96%					
温度	℃	RT~230	230~370	370~1000	合計	分析法	RT~250	250~420	420~680	合計	分析法	
重量減少	wt%	1.00E+02			1.00E+02		8.65E+01			8.65E+01		
水	wt%	1.00E+01			1.00E+01	回収後の重量	1.00E+00	2.40E+01	1.40E+01	3.90E+01	TG-DTA-MS	
H2	wt%	-	-	-	-	GC-TCD	1.00E-03	1.00E-03	2.50E-02	2.70E-02	GC-TCD	
CO	wt%	-	-	1.01E+01	1.01E+01		<1	2.00E-01	2.80E+01	2.82E+01		
CO2	wt%	7.77E-02	3.83E+00	1.45E+02	1.48E+02		<1	1.40E+01	4.40E+01	5.80E+01		
炭化水素	CH4	wt%	8.21E-04	4.64E-03	6.24E-01	6.30E-01	GC-FID	<0.1	<0.1	1.00E-01	1.00E-01	GC-FID
	C2H4	wt%	-	1.63E-03	3.68E-01	3.70E-01		<0.1	<0.1	1.00E-01	1.00E-01	
	C2H6	wt%	-	8.71E-04	1.73E-01	1.73E-01		<0.1	6.00E-01	<0.1	6.00E-01	
	C3H6	wt%	-	5.00E-02	1.14E+00	1.19E+00		<0.1	<0.1	<0.1	0.00E+00	
	C3H8	wt%	-	1.28E-03	1.81E-01	1.82E-01		<0.1	<0.1	<0.1	0.00E+00	
	i-C4H10	wt%	-	-	-	-		<0.1	<0.1	<0.1	0.00E+00	
	n-C4H10	wt%	-	-	-	-		-	-	-	0.00E+00	
	i-C5H12	wt%	-	-	-	-		-	-	-	0.00E+00	
	n-C5H12	wt%	-	-	-	-		-	-	-	0.00E+00	
	上記以外のC1~C5(CH4換算値)	wt%	6.65E-02	3.67E-01	2.83E-01	7.16E-01		-	-	-	-	
C6系化合物	wt%					<0.1	<0.1	<0.1	0.00E+00	GC-MS		
C7系化合物	wt%					<0.1	<0.1	<0.1	0.00E+00			
NH3	wt%	-	-	2.09E-03	2.09E-03	検知管						
H2S	wt%	-	-	-	-	GC-FPD						
①上記の合計	wt%				1.72E+02					1.26E+02		
②雰囲気中酸素とした場合の合計	wt%				4.69E+01					3.30E+01		
生成タール	wt%	3.33E+01			3.33E+01							
③生成タール分も入れた合計	wt%				8.02E+01							

成分ガス発生量(g) = ガスバッグ中の濃度(vol%) × キャリアガス流量(L)

試料単位質量あたりのガス発生重量分率 (wt%) = 成分ガス発生量(g) / 初期試料重量(g) × 100

①：水や検出したガス類の合計値

②：①のうち、水、CO、CO2中の酸素の全量について、雰囲気中の酸素由来と仮定した場合の合計値

③：②にタールの重量も入れた場合の合計値

3-3. ウレタン保温材本試験結果

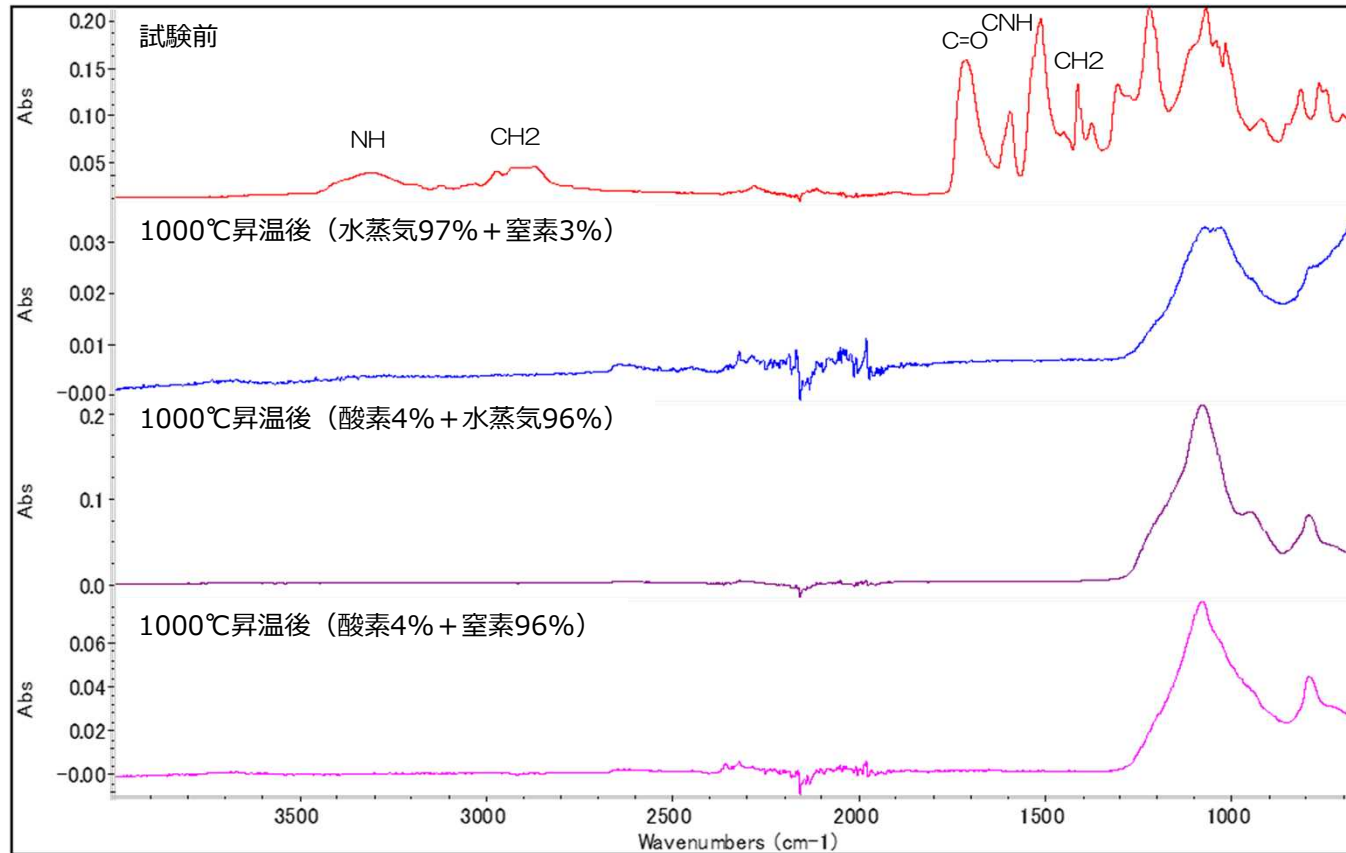
■ウレタン保温材1000℃昇温時に発生したガス分析結果 (保温材単位重量当たりのガス発生重量分率)

試料		ウレタン保温材									
環境		水蒸気97%+窒素3%			水蒸気96%+酸素4%			窒素96%+酸素4%			
温度(°C)		RT~230	230~370	370~1000	RT~230	230~370	370~1000	RT~230	230~370	370~1000	
H2	wt%	-	-	2.62E+00	-	-	-	-	-	-	
CO	wt%	-	-	1.48E+01	-	-	4.47E+00	-	-	1.04E+01	
CO2	wt%	-	1.44E-01	3.19E+01	-	2.25E-01	8.20E+01	8.89E-02	3.93E+00	1.49E+02	
炭化水素	CH4	wt%	9.40E-04	2.88E-04	3.44E+00	2.84E-03	5.32E-04	2.21E-01	9.40E-04	4.76E-03	6.41E-01
	C2H4	wt%	-	-	9.86E-01	-	-	1.44E-01	-	1.67E-03	3.78E-01
	C2H6	wt%	-	-	2.23E-01	-	-	9.58E-02	-	8.93E-04	1.77E-01
	C3H6	wt%	-	-	1.23E+00	-	-	7.08E-01	-	5.13E-02	1.17E+00
	C3H8	wt%	-	-	1.03E-01	-	-	5.15E-02	-	1.31E-03	1.86E-01
	i-C4H10	wt%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	n-C4H10	wt%	-	-	-	-	-	5.14E-03	-	-	-
	i-C5H12	wt%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	n-C5H12	wt%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)		wt%	4.14E-02	1.41E-02	2.47E-01	5.67E-02	2.13E-02	1.31E-01	7.62E-02	3.76E-01	2.90E-01
NH3	wt%	-	-	-	-	-	-	0.00E+00	0.00E+00	7.89E-02	
H2S	wt%	5.70E-03	1.50E-03	2.73E-02	6.03E-04	1.48E-04	1.03E-03	-	-	-	

成分ガス発生量(g) = ガスバッグ中の濃度(vol%) × (キャリアガス流量 + 試料から発生したガス発生量) (L)
 試料単位質量当たりのガス発生重量分率 (wt%) = 成分ガス発生量(g) / 初期試料重量(g) * 100

3-3. ウレタン保温材本試験結果

■ウレタン保温材1000℃昇温前後でのFT-IRスペクトル

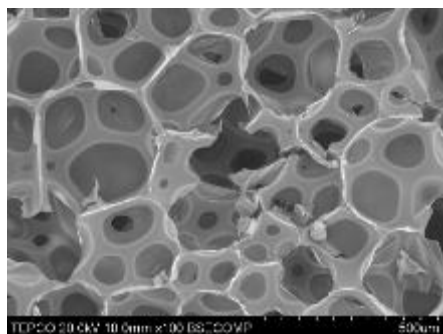


TG昇温後試料揮発のため、データなし

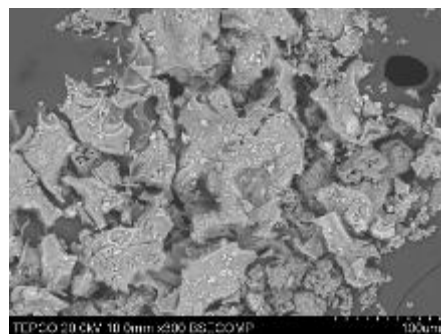
3-3. ウレタン保温材本試験結果

■ウレタン保温材1000℃昇温前後でのSEM-EDX分析結果

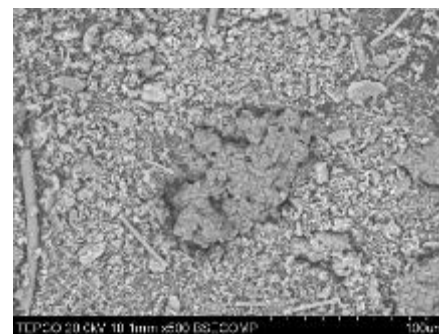
TG1000℃昇温後は試料揮発のため、測定なし



試験前



1000℃昇温後
水蒸気97% + 窒素3%



1000℃昇温後
酸素4% + 水蒸気96%



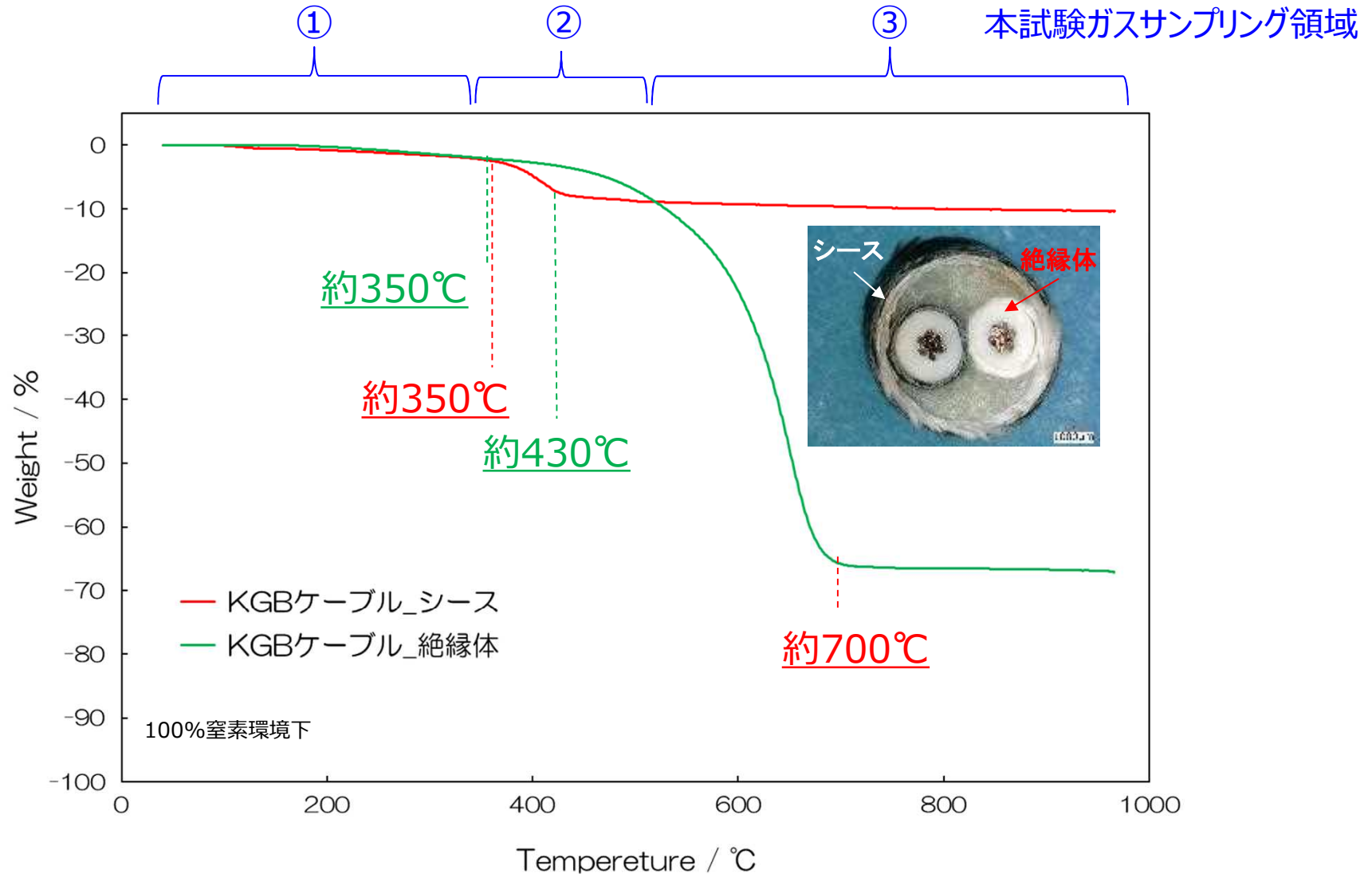
1000℃昇温後
酸素4% + 窒素96%

単位：wt%

	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	合計
試験前	67.12	9.66	21.64	0.01	0.00	0.02	0.06	0.24	1.16	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	100
1000℃ 水蒸気97% + 窒素3%	24.33	1.79	47.42	0.39	0.14	6.59	13.38	1.36	0.01	0.13	2.17	1.26	0.06	0.03	0.48	0.05	0.20	0.21	100
1000℃ 酸素4%+ 窒素96%	17.76	2.17	53.42	0.05	0.05	0.93	22.33	0.49	0.02	0.01	0.39	1.47	0.02	0.01	0.57	0.03	0.26	0.04	100
1000℃ 酸素4%+ 水蒸気96%	42.00	1.32	39.35	0.23	0.10	4.91	8.65	0.75	0.00	0.07	1.18	0.79	0.03	0.01	0.29	0.04	0.13	0.15	100

3-4. KGBケーブル予備試験結果

■ KGBケーブルのTG曲線



3-4. KGBケーブル本試験結果

■ KGBケーブル昇温前後の状態



試験前



試験後

(1000°C水蒸気97%+3%窒素環境下)

試料		KGBケーブル					
		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%		
環境	°C	RT~450	450~700	700~1000	RT~450	450~700	700~1000
ガス発生量	L	2.2	0.2	0.9	2.2	0.2	0.4
(合計)	L	3.3			2.8		
ケーブル長さ	mm	80.0			80.0		
試験前試料重量	g	12.24			12.34		
試験後試料重量	g	10.47			10.69		
増減	g	-1.77			-1.65		
	%	-14.5			-13.4		
タール発生量	g	0.38			1.04		
供給水蒸気量	g	71.50			71.34		
回収水蒸気量	g	71.36			70.89		
水蒸気発生量	g	-0.14			-0.45		



試験後

(1000°C酸素4%+水蒸気96%環境下)

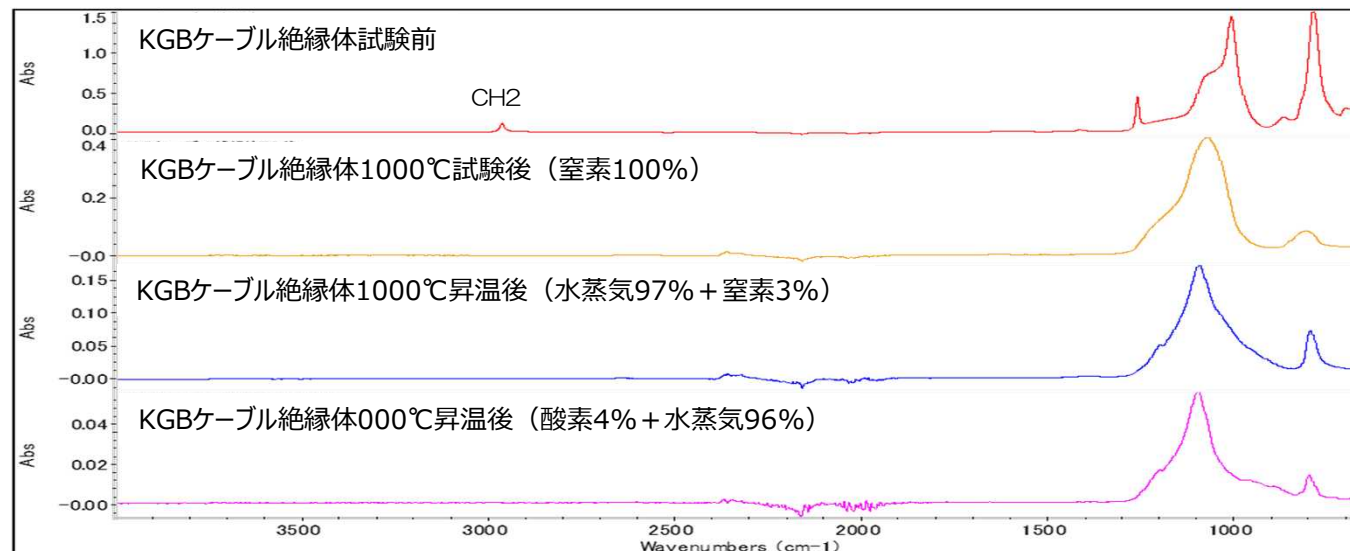
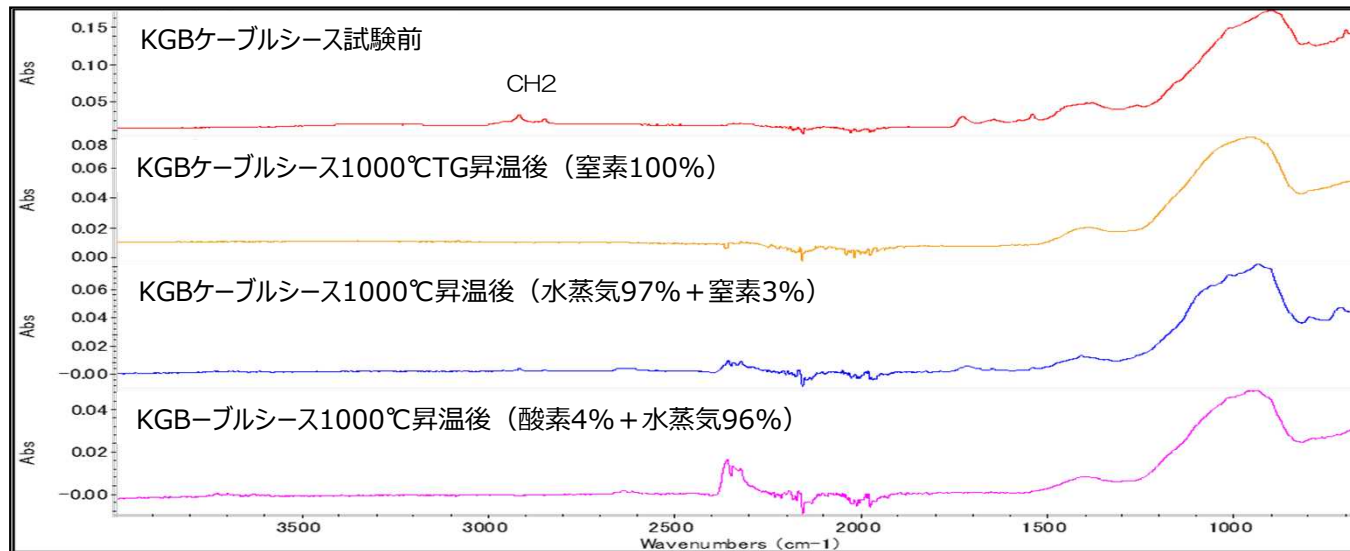
3-4. KGBケーブル本試験結果

■ KGBケーブル1000℃昇温時に発生したガス分析結果 (ケーブル単位重量当たりのガス発生重量分率)

試料		KGBケーブル											
		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%								
環境		RT~450			450~700			700~1000					
温度(℃)		RT~450		450~700		700~1000		RT~450		450~700		700~1000	
H2	wt%	-	-	-	-	-	-	7.06E-04	3.02E-02	-	-	-	-
CO	wt%	-	-	1.47E-01	-	-	-	8.90E-02	1.38E+00	-	-	-	-
CO2	wt%	-	2.12E-02	6.55E-01	-	-	-	5.44E-02	2.10E+00	-	-	-	-
炭化水素	CH4	wt%	1.04E-04	2.57E-03	3.36E-01	1.42E-04	9.04E-03	1.66E-01	-	-	-	-	-
	C2H4	wt%	4.10E-04	8.09E-03	1.05E-01	3.48E-04	8.90E-03	7.80E-02	-	-	-	-	-
	C2H6	wt%	9.76E-05	3.03E-04	4.99E-03	5.33E-05	1.01E-03	1.43E-02	-	-	-	-	-
	C3H6	wt%	6.83E-05	3.17E-04	9.56E-03	-	6.97E-04	1.10E-02	-	-	-	-	-
	C3H8	wt%	-	2.82E-05	8.09E-04	-	7.77E-05	1.51E-03	-	-	-	-	-
	i-C4H10	wt%	9.43E-05	1.02E-04	3.71E-03	1.24E-03	4.30E-04	3.19E-03	-	-	-	-	-
	n-C4H10	wt%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	i-C5H12	wt%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	n-C5H12	wt%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)		wt%	3.12E-04	1.46E-04	6.86E-03	2.27E-04	1.16E-04	3.44E-03	-	-	-	-	-
NH3	wt%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H2S	wt%	5.53E-06	1.64E-06	2.98E-05	2.42E-05	3.60E-06	1.08E-05	-	-	-	-	-	-

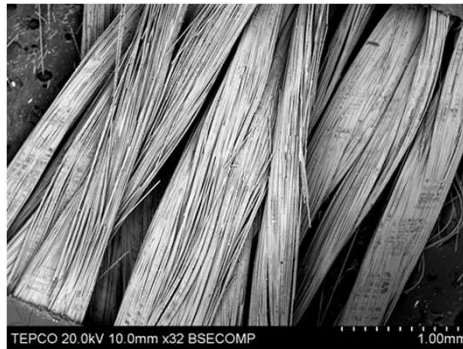
3-4. KGBケーブル本試験結果

■ KGBケーブル1000℃昇温前後でのFT-IRスペクトル

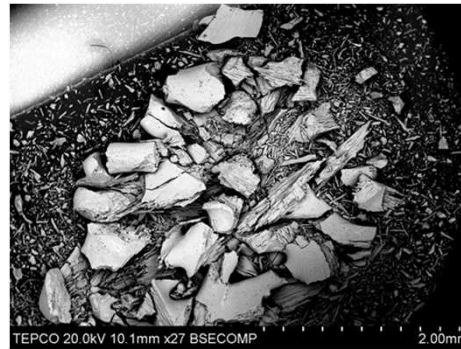


3-4. KGBケーブルシース本試験結果

■ KGBケーブルシース1000℃昇温前後でのSEM-EDX分析結果



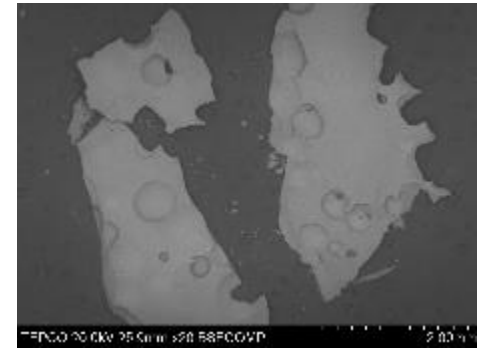
試験前



1000℃TG試験後
窒素100%



1000℃昇温後
水蒸気97%+窒素3%



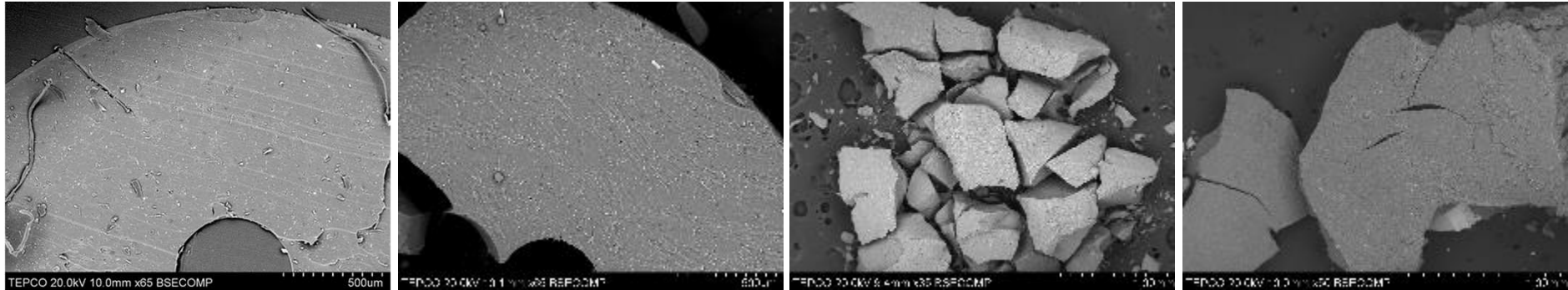
1000℃昇温後
酸素4%+水蒸気96%

単位：wt%

	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn	合計
試験前	36.61	35.28	0.11	0.09	4.00	13.38	0.09	0.10	9.84	0.09	0.04	0.24	0.02	0.07	0.04	100
TG1000℃ 窒素100%	10.80	49.86	0.18	0.19	6.52	19.68	0.01	0.13	12.19	0.11	0.01	0.18	0.00	0.10	0.03	100
1000℃ 水蒸気97% +窒素3%	9.88	49.71	0.25	0.11	5.21	21.52	0.01	0.07	12.85	0.07	0.00	0.11	0.00	0.03	0.17	100
1000℃ 酸素4%+ 水蒸気96%	9.74	46.42	0.20	0.19	6.62	21.38	0.00	0.17	14.80	0.19	0.02	0.20	0.02	0.04	0.01	100

3-4. KGBケーブル絶縁体本試験結果

■ KGBケーブル絶縁体1000℃昇温前後でのSEM-EDX分析結果



試験前

1000℃TG試験後
窒素100%

1000℃昇温後
水蒸気97%+窒素3%

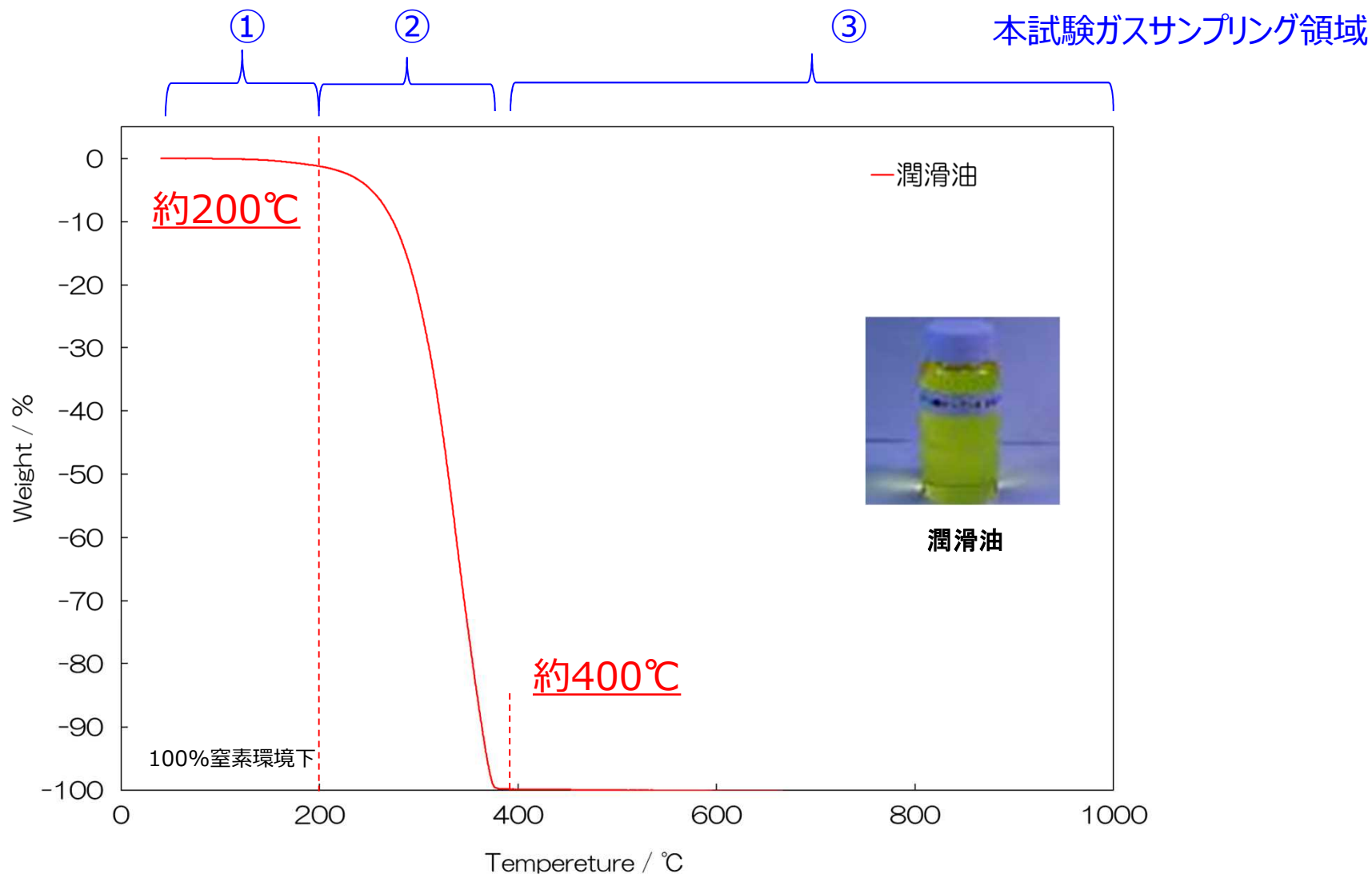
1000℃昇温後
酸素4%+水蒸気96%

単位：wt%

	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Zn	合計
試験前	40.90	28.84	0.04	0.01	0.11	29.71	0.12	0.03	0.06	0.10	0.06	0.01	0.01	100
TG昇温後 窒素100%	13.01	51.61	0.08	0.06	0.14	34.60	0.01	0.02	0.03	0.27	0.06	0.11	0.00	100
1000℃ 水蒸気97% + 窒素3%	15.28	53.81	0.07	0.01	0.15	30.24	0.01	0.01	0.02	0.25	0.05	0.10	0.01	100
1000℃ 酸素4%+ 水蒸気96%	13.11	50.64	0.07	1.27	0.23	33.14	0.01	0.01	0.11	0.28	0.17	0.96	0.01	100

3 - 5. 潤滑油予備試験結果

■ 潤滑油のTG曲線



3-5. 潤滑油本試験結果

■ 潤滑油昇温前後の状態



試験前



試験後

(1000°C水蒸気97%+窒素3%環境下) (1000°C酸素4%+水蒸気96%環境下)



試験後

試料		潤滑油						
		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%			水蒸気97%+窒素3%
環境	°C	RT~200	200~400	400~1000	RT~200	200~400	400~1000	200(24h)
ガス発生量	L	2.1	0.1	8.5	2.2	0.1	7.3	1.5
(合計)	L	10.7			9.6			
試験前試料重量	g	10.02			10.04			10.01
試験後試料重量	g	0.06			0.00			9.27
増減	g	-9.96			-10.04			-0.74
	%	-99.4			-100.0			-7.4
タール発生量	g	4.01			2.28			0.62
供給水蒸気量	g	70.27			71.15			301.36
回収水蒸気量	g	68.05			71.20			299.71



試験後

(200°C水蒸気97%+窒素3%環境下)

3 - 5. 潤滑油本試験結果

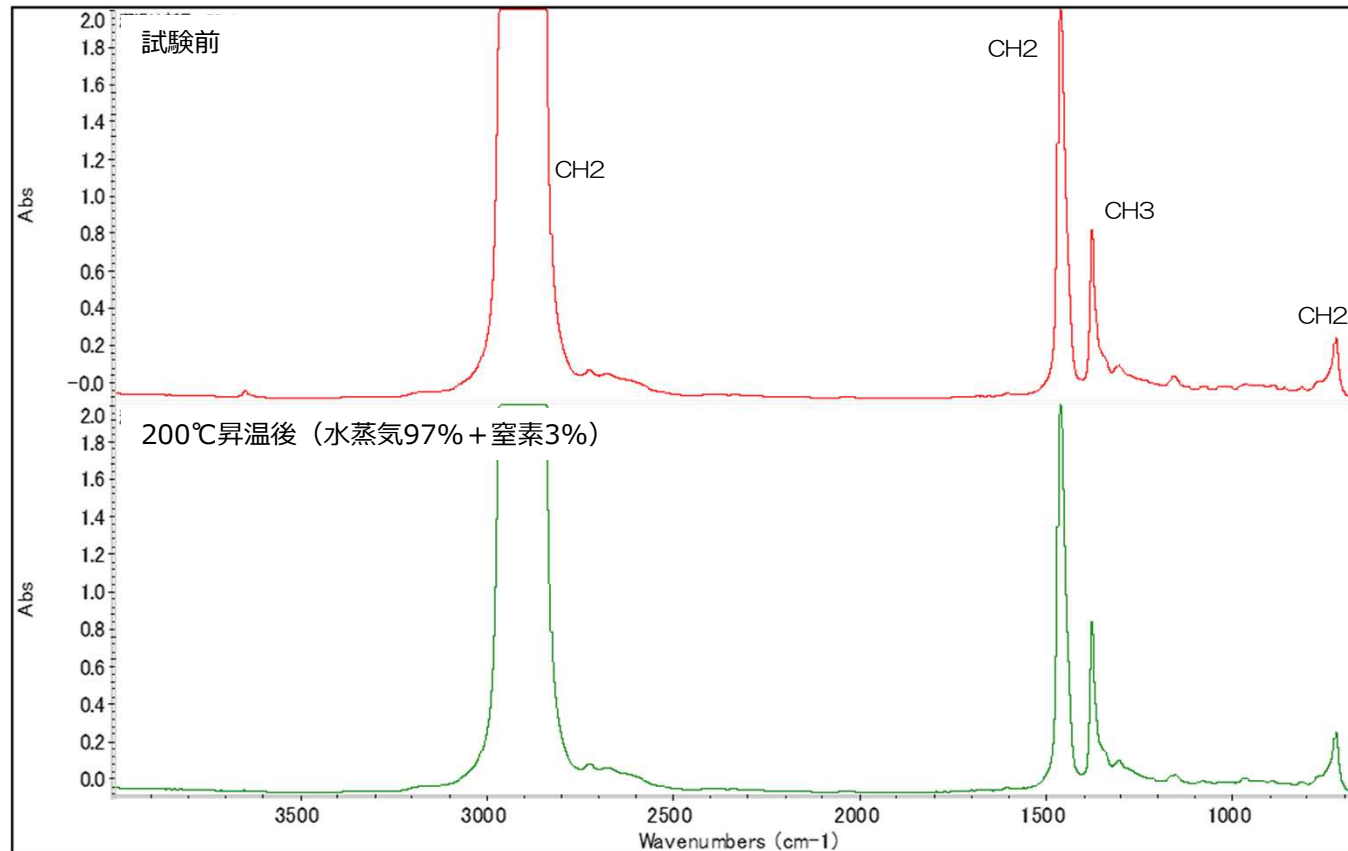
■ 潤滑油1000℃、200℃昇温時に発生したガス分析結果 (潤滑油単位重量当たりのガス発生重量分率)

試料		潤滑油							
環境		水蒸気97%+窒素3%			酸素4%+水蒸気96%			水蒸気97%+窒素3%	
温度(℃)		RT~200	200~400	400~1000	RT~200	200~400	400~1000	200(24h)	
H2	wt%	-	-	2.71E+00	-	-	2.25E+00	-	
CO	wt%	-	-	7.45E+00	-	-	1.68E+01	-	
CO2	wt%	-	-	9.68E+00	-	-	1.85E+01	-	
炭化水素	CH4	wt%	5.75E-05	1.63E-05	1.10E+01	4.24E-04	3.75E-05	1.01E+01	4.54E-04
	C2H4	wt%	-	4.74E-06	7.83E+00	4.00E-04	1.87E-05	6.81E+00	1.99E-04
	C2H6	wt%	-	-	8.11E-01	1.22E-04	1.00E-05	8.94E-01	-
	C3H6	wt%	-	-	2.12E+00	3.43E-04	3.51E-05	2.47E+00	-
	C3H8	wt%	-	-	1.90E-01	8.98E-05	1.47E-05	2.22E-01	-
	i-C4H10	wt%	-	-	9.31E-03	-	1.94E-05	1.05E-02	-
	n-C4H10	wt%	-	-	2.05E-01	-	-	2.29E-01	-
	i-C5H12	wt%	-	-	-	-	-	3.93E-01	-
	n-C5H12	wt%	-	-	3.96E-01	-	-	4.53E-01	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)		wt%	4.31E-03	2.49E-04	1.83E+00	6.85E-03	3.48E-04	1.75E+00	1.82E-03
NH3	wt%	-	-	-	-	-	-	-	
H2S	wt%	1.22E-05	5.76E-06	1.45E-02	1.39E-05	5.68E-06	4.14E-04	1.45E-04	

3-5. 潤滑油本試験結果

■ 潤滑油200℃昇温前後でのFT-IRスペクトル

1000℃昇温後は試料なし



3-6. 1F3号機発生ガス総量

■ケーブル4種、塗料2種、保温材2種、潤滑油1種から発生するガス濃度 (1F3D/W、水蒸気97%+窒素3%環境下)

1F3の格納容器内ケーブル、塗料、保温材、潤滑油の想定物量総量と
ドライウェル空間容積より発生ガス総量 (vol%) を算出

*：一部未測定

試料		発生ガス総量 (vol%)		ガス物性
環境		水蒸気+窒素		燃焼(爆発)範囲 (vol%)
温度(°C)	°C	RT~1000		
H2		vol%	2.46E+01	4~75.6
CO		vol%	4.73E+00	12.5~74
CO2		vol%	2.12E+00*	-
炭化 水素	CH4	vol%	4.85E+00	5.0~15
	C2H4	vol%	2.05E+00	2.7~36
	C2H6	vol%	3.16E-01	3.0~12.5
	C3H6	vol%	4.45E-01	2.0~11
	C3H8	vol%	7.09E-02	2.1~9.5
	i-C4H10	vol%	1.47E-03	1.8~8.4
	n-C4H10	vol%	4.15E-02	1.6~8.5
	i-C5H12	vol%	2.76E-02	1.3~7.6
	n-C5H12	vol%	3.29E-02	1.5~12.5
	上記以外のC1~C5(CH4換算値)		vol%	8.39E-01
NH3		vol%	7.03E-06	15.0~28
H2S		vol%	1.92E-02	4.0~44

3-6. 1F3号機物量根拠

D/W空間体積	線種／材質	総量	根拠
3,770m ³	CVケーブル	約3t	・1F3物量不明のため、他プラントの使用実績を適用
	PNケーブル	約0.1t	・ペDESTAL部に施工されているケーブル総量
	同軸ケーブル	約0.32t	
	KGBケーブル	約0.73t	
	エポキシ塗料	約0.442t	・格納容器（D/W側）内壁表面積約1600m ² 、上塗り／中塗り膜厚それぞれ100μmで試算
	無機ジンクリッチ塗料	約0.432t	・格納容器（D/W側）内壁表面積約1600m ² 、下塗り膜厚100μmで試算
	ウレタン保温材	約0.28t	・1F3使用量約8m ³ より試算
	ポリイミド保温材	約0.006t	・1F3使用量約1m ³ より試算
	潤滑油	約0.34t	・PLRポンプモータ潤滑油使用量

4. 可燃性有機ガス分析試験まとめ

水素爆発時の可燃性有機ガスによる影響を調査するため、2021-2022年度に、格納容器内に存在する有機物質からの可燃性ガス発生量の評価を実施（計画した試験・評価を全て完了）。

その結果、昇温時のガス発生量は水や水素、一酸化炭素、二酸化炭素、タール成分が大半を占め、可燃性有機ガスは少ないことを確認。

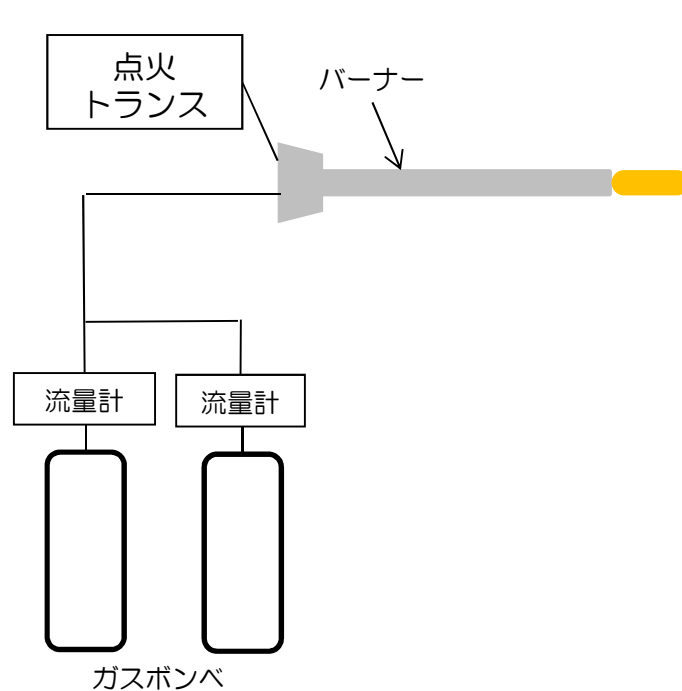
詳細は下記の通り。

- 格納容器内での使用量が多く、可燃性有機ガスの発生が考えられるケーブル、塗料、保温材、潤滑油について、水素、酸素、水蒸気環境下での1000℃昇温時、200℃24時間保持時に発生する可燃性ガスの同定及び定量分析を実施
- 室温～1000℃まで上げると、**高温域で最もガスが発生**
- 200℃24時間環境下では、可燃性ガスの発生量は少ないことを確認
- 水素、酸素環境下よりも**水蒸気環境下の方が可燃性ガスが多く発生する傾向**を確認
 - ✓ 水蒸気97% + 窒素3% > 水素100% > 酸素4% + 窒素96% > 酸素4% + 水蒸気96%
- 単位重量当たりの可燃性ガスは以下の順に発生量が多い傾向にあることを確認
 - ✓ ポリイミド保温材 > ウレタン保温材 = PNケーブル > 潤滑油 > 無機ジンクリッチ塗料 > エポキシ塗料 > CVケーブル = 同軸ケーブル > > KGBケーブル

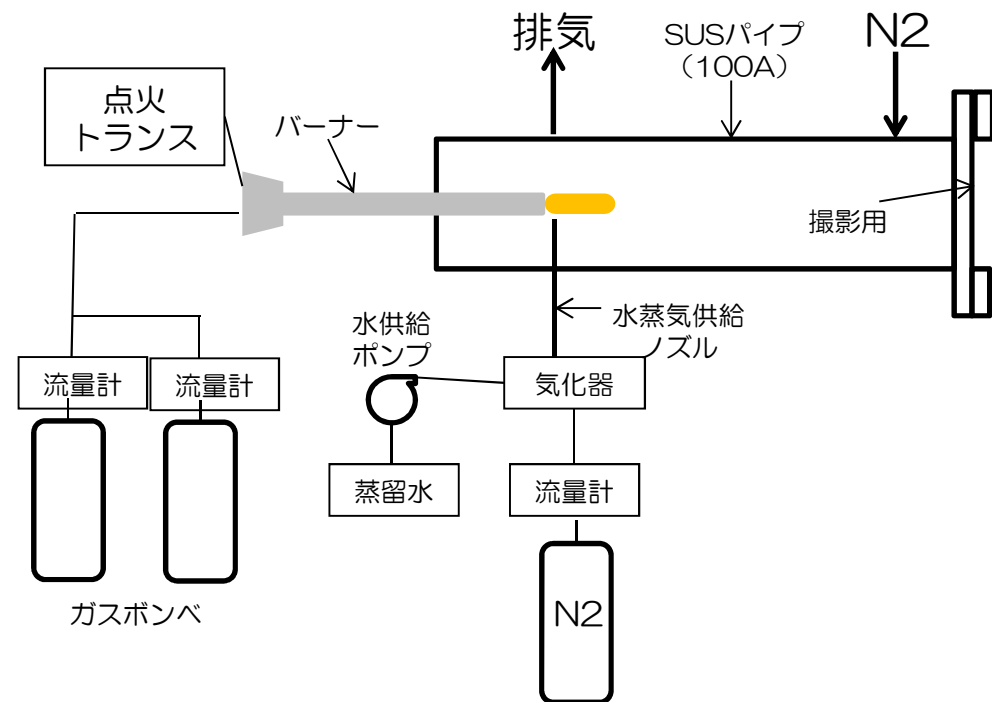
5-1. 可燃性有機ガス燃焼試験概要

<試験概要>

- 所定流量の酸素（空気）、プロパン（可燃性有機ガス）をバーナーに供給、着火
- コンクリート片、珪砂、乾燥土などの粉末を追加
 - ✓ コンクリート片はモルタルと砂利と水を混ぜたものを各粒形サイズに粉砕したもの
- 窒素、空気、水蒸気パージしたSUS管内に設置
- 炎と煙の色を観察（ビデオ撮影、写真撮影）

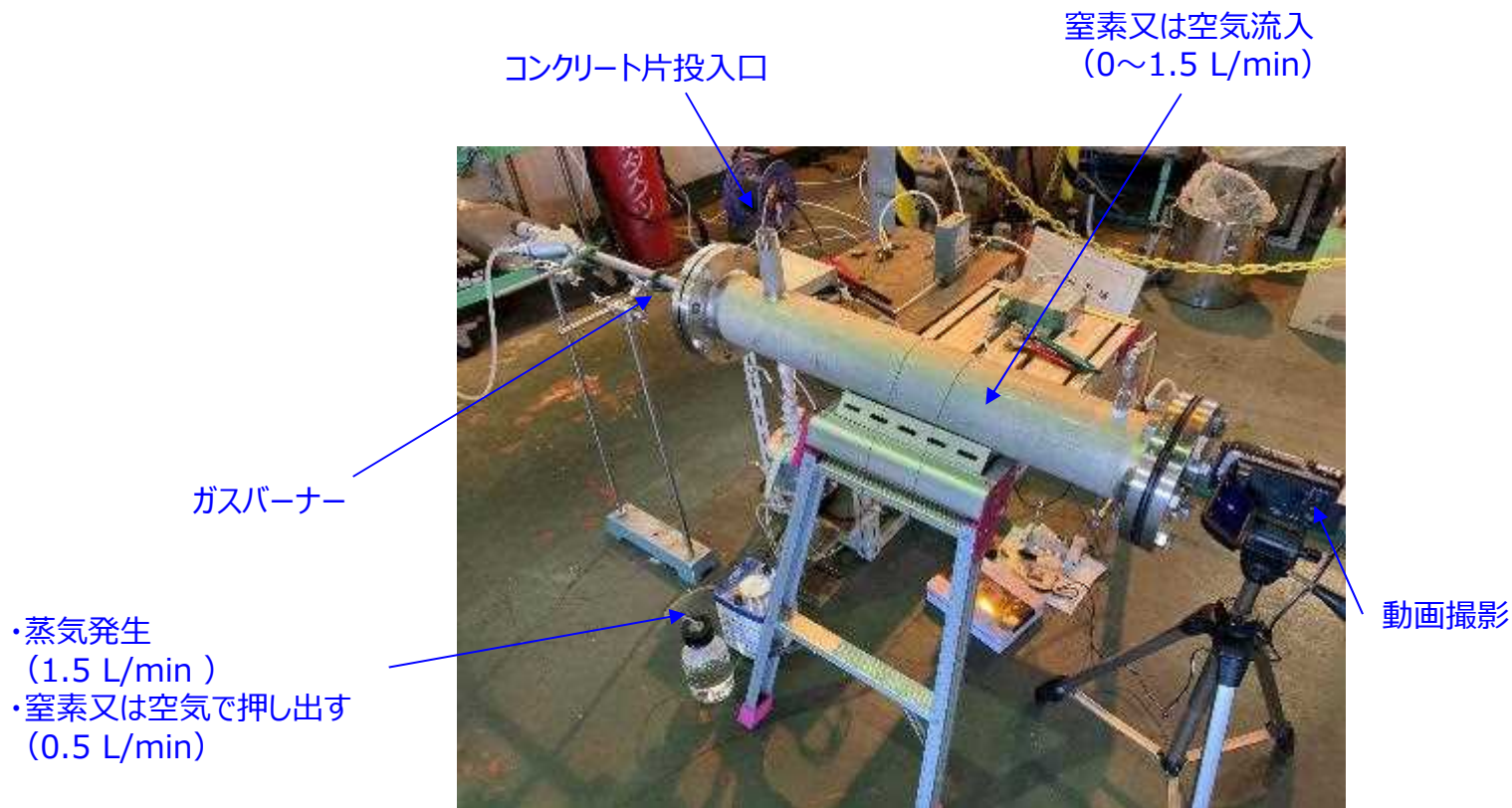


ガスバーナー試験



SUS管内試験

5 - 1. 可燃性有機ガス燃焼試験計画



SUS管内試験

5-2. ガスバーナー試験結果

蒸気、コンクリート片、潤滑油による影響

ベース



蒸気



コンクリート片 425~500 μ m + 水分 (霧吹き4回)



<ガスバーナー条件>
 ・プロパン：1 L/min
 ・空気：15 L/min

・炎なし

コンクリート片 106~180 μ m



・オレンジ色の発光あり
 ・コンクリート片：106~500 μ mで有意な差なし

コンクリート片 180~300 μ m



コンクリート片 300~425 μ m



コンクリート片 425~500 μ m



コンクリート片炙り ・炎なし



潤滑油炙り



・炙り続けるとオレンジの炎、白い煙
 ・バーナー撤去後もしばらく炎と煙あり

潤滑油 + コンクリート片炙り



・オレンジの炎、白や黒い煙
 ・バーナー撤去後もしばらく炎と煙あり

5 - 3. SUS管内試験結果

<ガスバーナー条件>
 ・プロパン : 1 L/min
 ・空気 : 15 L/min※

※ガスバーナー条件の空気を
 15 L/min → 10 L/minの場合、
 全ての条件で炎が消える

<SUS管内雰囲気条件> 窒素又は空気 : 水蒸気

		1 : 0 (1.5 L/min : 0 L/min)	1 : 1 (1.5 L/min : 1.5 L/min)	1 : 1.5 (1 L/min : 1.5 L/min)	1 : 3 (0.5 L/min : 1.5 L/min)
窒素	ベース	・青い炎 	・青い炎 ・一時オレンジの炎 	・青い炎 ・一時オレンジの炎 	・青い炎 ・一時オレンジの炎
	コンクリート片 (106 μm)	・オレンジの炎 	・オレンジの炎 	・オレンジの炎 	・オレンジの炎
空気	ベース	・青い炎 	・青い炎 	・青い炎 	・青い炎
	コンクリート片 (106 μm)	・オレンジの炎 ・振りかけ後も一時炎残る 	・オレンジの炎 ・振りかけ後も一時炎残る 	・オレンジの炎 ・振りかけ後も一時炎残る 	・オレンジの炎 ・振りかけ後も一時炎残る

5-3. SUS管内試験結果

<ガスバーナー条件>
・プロパン：1 L/min
・空気：15 L/min

<SUS管内雰囲気> 粉末を追加、水蒸気雰囲気

ブランク



コンクリート片
(425~500μm)



乾燥土
(試験場付近で採取)



珪砂
(106μmより細かい)



水蒸気雰囲気
(1.5L/min)



コンクリート片
(425~500μm)



乾燥土
(試験場付近で採取)



珪砂
(106μmより細かい)



- ・粉であれば何でもよい
- ・蒸気による影響はあまり確認されず

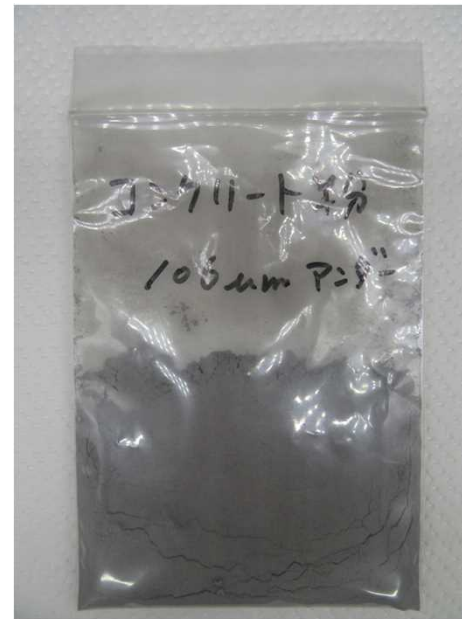
5-4. コンクリート片試料分析

◆ 試料

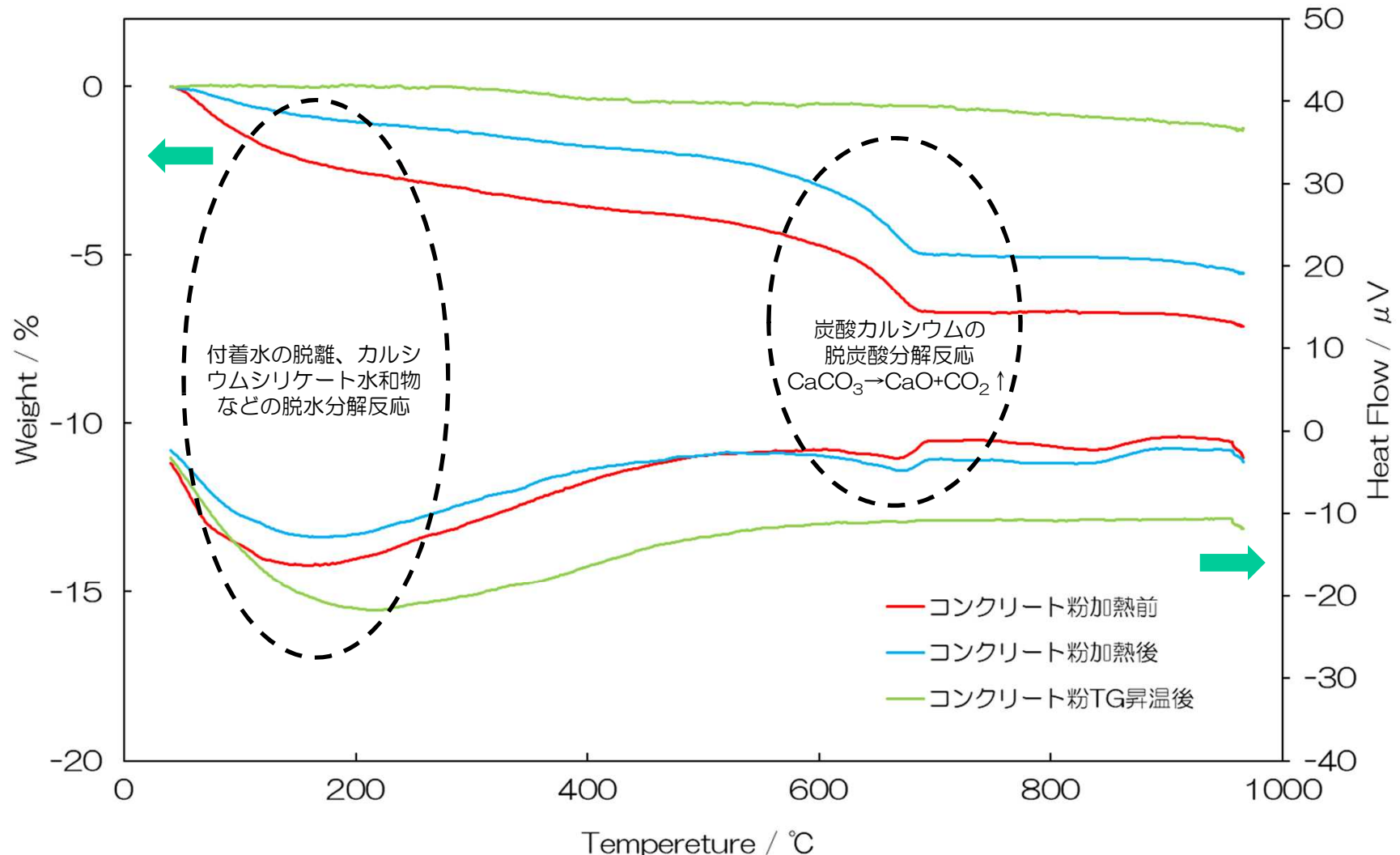
- ✓ コンクリート粉106 μ m以下加熱前
- ✓ コンクリート粉106 μ m以下加熱後
- ✓ コンクリート粉106 μ m以下TG昇温後
コンクリート粉加熱前をTG装置にて1000 $^{\circ}$ Cまで昇温

◆ 測定内容

- ✓ TG-DTA測定
熱分析によるガス燃焼試験時の
化学反応確認
- ✓ SEM-EDX分析
元素分析

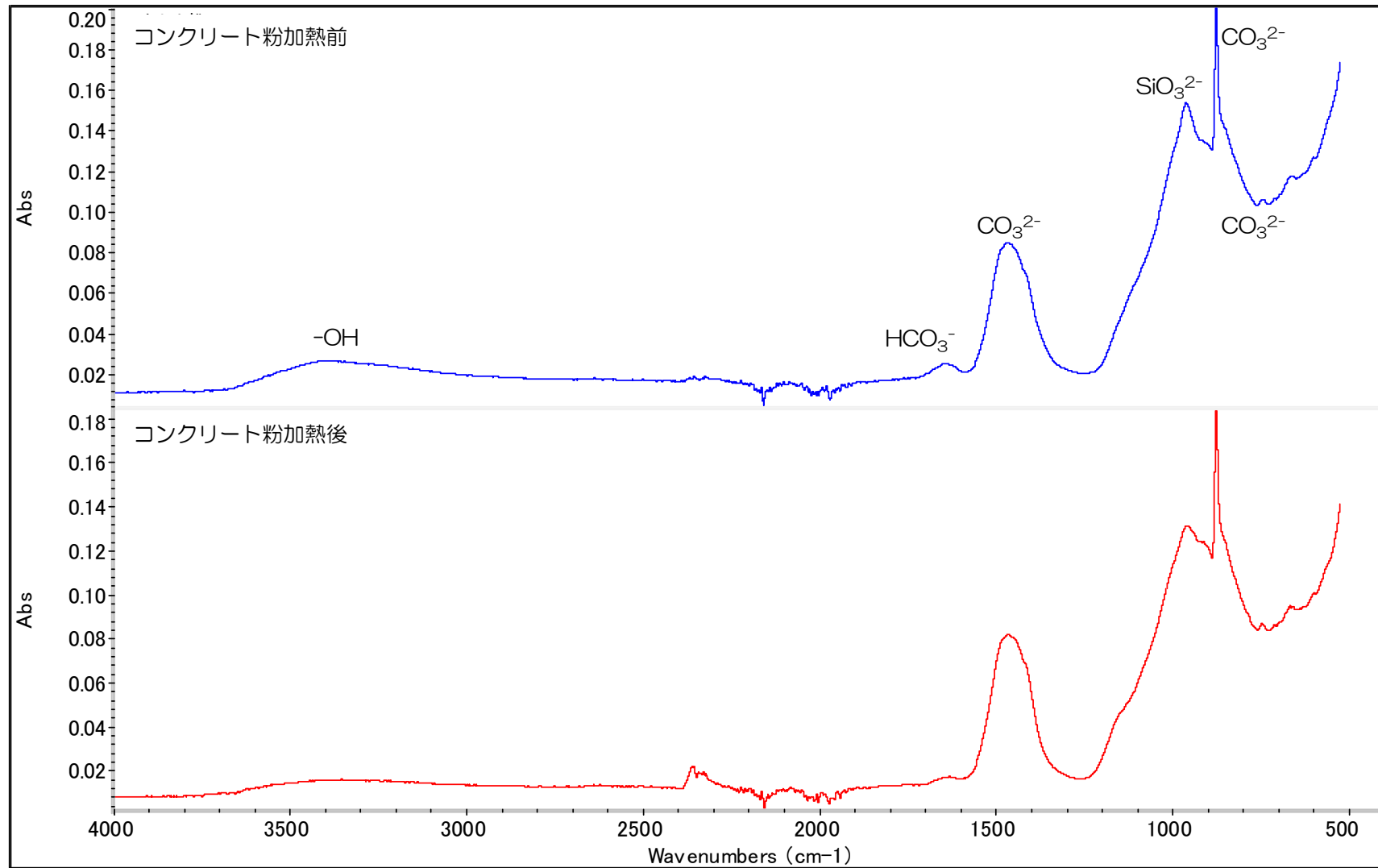


5-4. コンクリート片試料分析 (TG-DTA曲線)



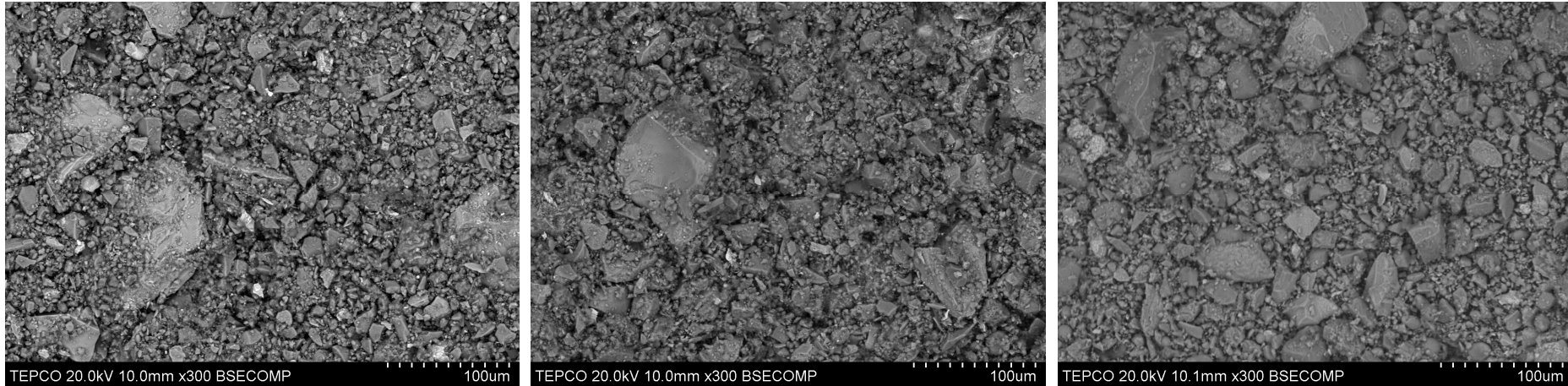
- コンクリートを加熱しても加熱前とほぼ変化なし。つまり、加熱による化学反応はなし
- コンクリートをTGで1000 $^{\circ}\text{C}$ まで昇温すると炭酸カルシウムの脱炭酸反応がなくなった。つまり、TGで1000 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱することにより炭酸カルシウムは消費
 ⇒ コンクリート加熱後は加熱されていない

5-4. コンクリート片試料分析 (FT-IRスペクトル)



- コンクリートを加熱しても加熱前とほぼ変化なし
⇒ 加熱による化学反応はなし

5-4. コンクリート片試料分析 (SEM-EDX)



加熱前

加熱後

TG昇温後

	C	O	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Mn	Fe	合計
加熱前	9.66	46.00	2.27	3.68	9.20	0.21	0.91	21.31	0.37	0.79	5.59	100
加熱後	9.87	42.72	2.28	3.80	9.55	0.23	0.94	23.07	0.42	0.88	6.23	100
TG昇温後	11.44	45.83	2.42	3.30	8.74	0.20	0.37	19.63	0.37	0.91	6.79	100

- 酸素、カルシウム、ケイ素、鉄、アルミニウム、マグネシウムなどが検出された。
⇒ 炭酸カルシウム、アルミナシリケートなど
- 加熱前後で顕著な変化はなし

6. 可燃性有機ガス燃焼試験結果

水素爆発時の状態を調べるため、有機ガスの存在による炎や煙の状況を確認する試験を実施（計画した試験を全て完了）。その結果、コンクリート片などの粉末をプロパンガスを含む炎に振りかけると、オレンジ色の発光を確認。

詳細は下記の通り。

- **コンクリート片（粒子径100 μ m～500 μ m程度）、珪砂、乾燥土をプロパンガスを含むガスバーナーの炎に振りかけると、オレンジ色の発光を確認**
 - （推定）コンクリート片等が舞っている条件下では、体積当たりの表面積が大きくなるため、ガスバーナーから発光に必要なエネルギーを短時間で受け取ることができ、発光に至ったものと推定
- ガスバーナーの炎に振りかける前後のコンクリート片成分はほぼ変化しないことを確認
 - （推定）発光は化学反応によるものではなく、高温になることによる熱放射が支配的と推定
- トレイに接触させた状態では発光せず
 - （推定）コンクリート片等をトレイに接触させた状態でガスバーナーで炙っても発光しないため、温度が外部に逃げる条件下では、発光に必要なエネルギーに至らないものと推定
- 乾燥したコンクリート片等であれば、蒸気環境下においてもオレンジ色の発光を確認
 - （推定）コンクリート片等に水分が浸透していない状態であれば、コンクリート片等から直接熱を奪うことは無いため、発光に至ったものと推定（一方で、コンクリート片等を霧吹きにより湿らせた状態では発光しない）
- 潤滑油などの有機物は爆発のような一瞬の条件では燃え切らないため、最終的にススとなって火炎から放出
- SUS管内試験にて、雰囲気条件（窒素又は空気：水蒸気）を変更させても有意な変化は見られず



令和5年4月24日

令和4年度原子力規制庁委託成果報告

東京電力福島第一原子力発電所事故時の水素爆発 における可燃性有機ガスの影響に関する調査

国立大学法人 長岡技術科学大学
技学研究院 システム安全系

門脇⁰ 敏

事業目的

東京電力福島第一原子力発電所(以下「1F」という。)事故等を踏まえた重大事故時の対策や安全評価手法並びに安全対策の高度化に関連する技術的知見を取得する。

本事業では、1F1号機及び3号機の原子炉建屋において発生した水素爆発に関して、デフラグレーション(deflagration、爆燃)を考慮した水素濃度等の条件による水素燃焼時の挙動及び可燃性有機ガスによる水素燃焼への影響を把握することを目的に、水素及び可燃性有機ガスの燃焼試験等を実施した。

事業概要

本事業では、水素及び可燃性有機ガスの燃焼(予混合燃焼)による水素燃焼時の挙動を把握するため、水素及び可燃性有機ガスの濃度条件等による燃焼挙動について、下記に示す項目を実施した。

- (1) 水素等燃焼試験(予混合燃焼試験)
- (2) 燃焼試験結果の取りまとめ及び評価
並びに1Fの水素爆発に対する考察

実施内容

水素等燃焼試験(予混合燃焼)

水素、可燃性有機ガス及び空気の混合気体による燃焼試験(予混合燃焼)を行った。ここで、水素等燃焼試験として、次の2種類の燃焼試験(①水素燃焼試験、②混合気体(水素、可燃性有機ガス及び空気)燃焼試験)とする。水素等燃焼試験においては、水素燃焼時の挙動を把握するため、口径30 cmの観察窓を有し、燃焼時の系内全体の挙動を観察・記録できる試験装置を用いて試験を行った。

燃焼試験

①水素燃焼試験

デフラグレーション (deflagration、爆燃) を考慮した燃焼時の挙動を把握するため、水素濃度による燃焼時の圧力変化及び高速度カメラによる燃焼挙動等を測定した。また、試験パラメータは水素濃度とし、3ケース実施した。

試験条件及び測定項目を以下に示す。

・試験条件

試験装置: 密閉型であり、口径30cmの観察窓を有する。

燃焼状態: 予混合燃焼

着火位置: 中央部

水素濃度: 10 vol%、15 vol%、20 vol%

・測定項目

水素ガスの濃度及び温度、燃焼時の系内の圧力変化、高速度カメラによる燃焼挙動

燃焼試験

②混合気体(水素、可燃性有機ガス及び空気)燃焼試験

①の水素燃焼試験の結果を踏まえ、水素燃焼時の可燃性有機ガス(メタン)の影響を把握するため、水素濃度、可燃性有機ガス濃度及び空気の混合気体による燃焼時の圧力変化並びに高速度カメラによる燃焼挙動等を測定した。また、試験パラメータは、水素濃度及び可燃性有機ガス濃度として、6ケース実施した。ここで、混合気体の当量比は1以下とする。試験条件及び測定項目を以下に示す。

・試験条件

試験装置、燃焼状態、着火位置: ①と同様

水素濃度: 10 vol%、15 vol%、20 vol%

可燃性有機ガス(メタン)濃度: 1 vol%、2 vol%

・測定項目

水素ガス及び可燃性有機ガスの濃度及び温度、燃焼時の系内の圧力変化、高速度カメラによる燃焼挙動

試験装置

密閉型燃焼容器

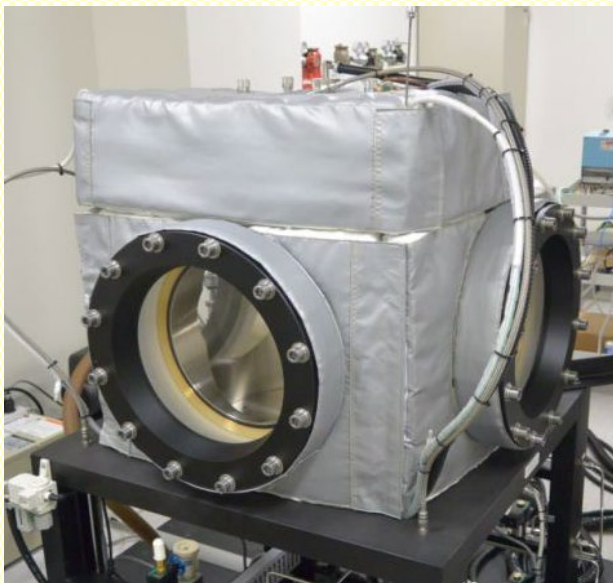


図1 密閉型燃焼容器

表1 密閉型燃焼容器の基本仕様

容器	容積	73 L
	材質	SUS
観察窓	直径	300 mm
	厚み	140 mm
	数	4

試験装置

燃烧試験システム

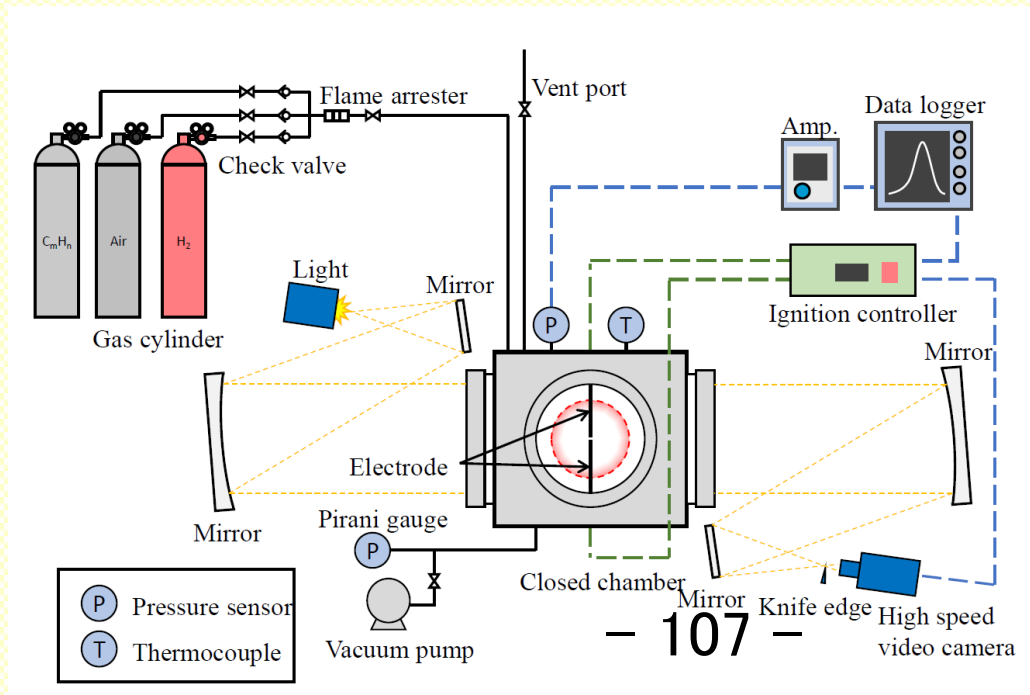


図2 燃烧試験システム

試験方法

燃焼容器には、ガス供給ライン、排気ライン、真空引きラインを設け、ガス供給ラインと排気ラインのすべての弁は、遠隔から電氣的に操作できるように設定している。真空引きやガス供給時の容器内部圧力の測定用としてピエゾ抵抗センサ (Keller PAA-23Y)、容器内部の混合気温度の測定用にシース熱電対 (T-type) を設置している。燃焼時の容器内の急激な圧力変化を取得するため、圧電センサ (Kistler 6045A) を燃焼器上部に設けたポートに直接取り付け、圧電センサ用チャージアンプ (Kistler 5918A) より出力された電圧をデータロガー (キーエンス NR-600) によってサンプリング周波数 10 kHz で記録した。また、火炎形状および動的な伝播挙動を広範囲に取得するため、直径 350 mm の凹面鏡を有するシュリーレン法測定装置 (溝尻光学工業所 SL-350) により観察した。シュリーレン画像は、高速度ビデオカメラ (Photron FASTCAM SA-X) を用いて、撮影速度 10000 fps、シャッター速度 20 μ s、および解像度 1024 \times 1024 pixels で撮影した。

試験結果

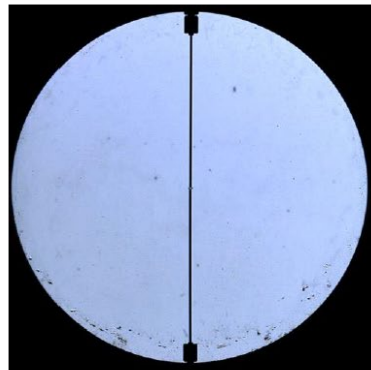
①水素燃焼試験

球状のデフラグレーションの伝播の様子を示したのが図3(上部)である。ここで、初期温度は25°C、初期圧力は1気圧、水素濃度は10 vol%であり、メタン濃度は0 vol%である。点火後0.1 ms のシュリーレン画像、及び火炎半径 $r_b = 2\text{ cm}$ 、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm のときの画像が示されている。**火炎半径の増加と共に火炎面にセルが形成**され、それが発達して複雑な形状になる様子が観察されている。このセルの形成は予混合火炎の固有不安定性に起因するものである[2]。また、球状の火炎が全体として上方へ移動することが確認される。これは浮力によるものであり、燃焼速度が小さい予混合火炎で顕著に現れる挙動である。本試験では、口径30 cmの観察窓を有する燃焼容器を用いていることから、この条件下での浮力の影響を示すことが出来ている。燃焼現象を把握するには、十分広い観察窓を有する燃焼容器を用いる必要がある。

容器内の圧力変化を示したのが図3(下部)である。燃焼反応が進行すると共に、容器内圧力は急激に上昇する。燃焼反応が完了した後、圧力は下降する。これは、燃焼容器から周囲への熱損失により既燃ガス温度が低くなるからである。

水素濃度が15 vol% と20 vol% のときのシュリーレン画像を示したのが、図4と図5の上部である。**水素濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大**している。これは予混合火炎の燃焼速度が大きくなるからである[3]。また、容器内の**最大圧力は上昇**する(図4と図5の下部参照)。これは断熱火炎温度が高くなるからである[4]。なお、水素濃度20 vol% における燃焼後の圧力変化が大きいのは、火炎温度が高いために周囲への熱損失が大きくなるからである。

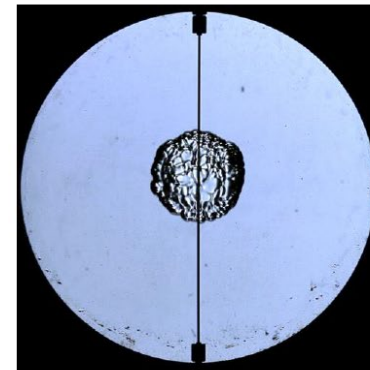
試験結果



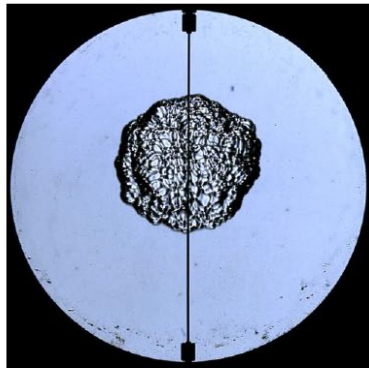
t=0.1ms , rb=0.25cm



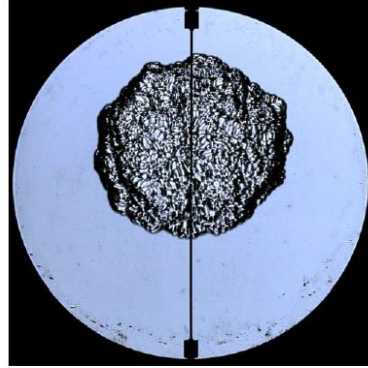
t=29.8ms , rb=2cm



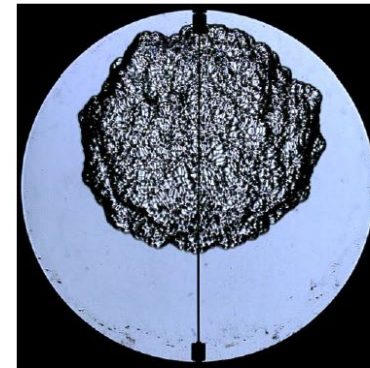
t=71.4ms , rb=4cm



t=102.5ms , rb=6cm



t=126.8ms , rb=8cm



t=146.7ms , rb=10cm

- 110 -

図3上部 シュリーレン画像 (水素濃度10 vol%、メタン濃度0 vol%)

試験結果

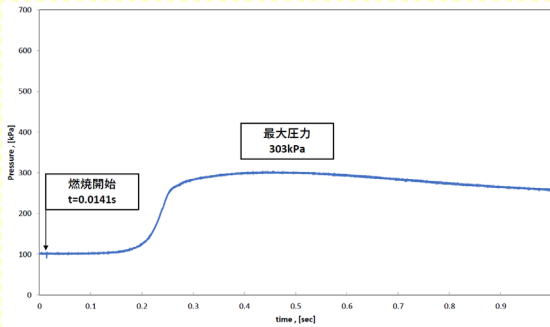
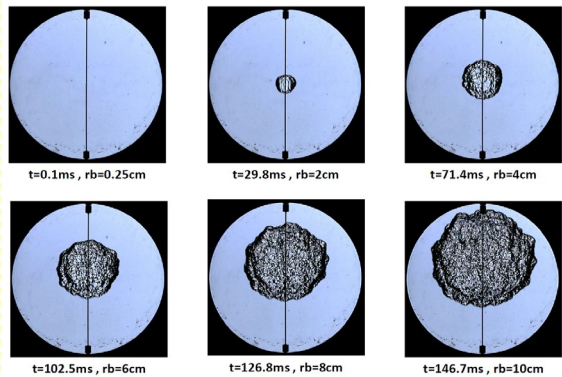


図3 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度10 vol%、メタン濃度0 vol%)

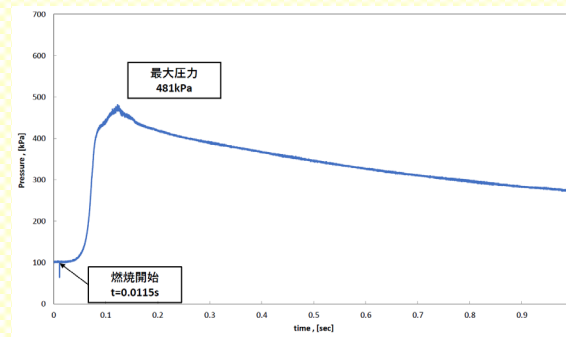
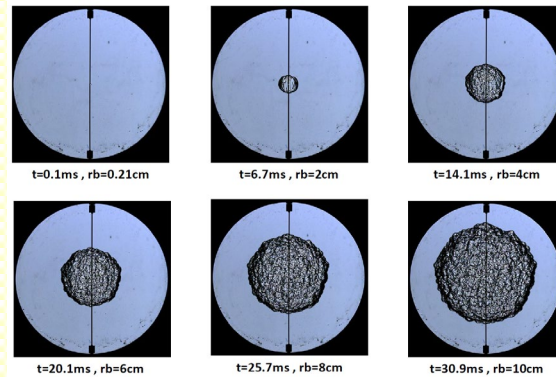


図4 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度15 vol%、メタン濃度0 vol%)

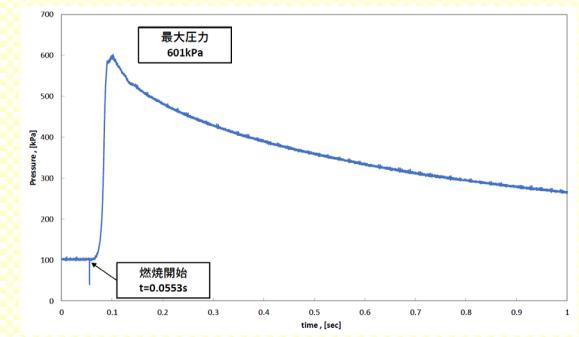
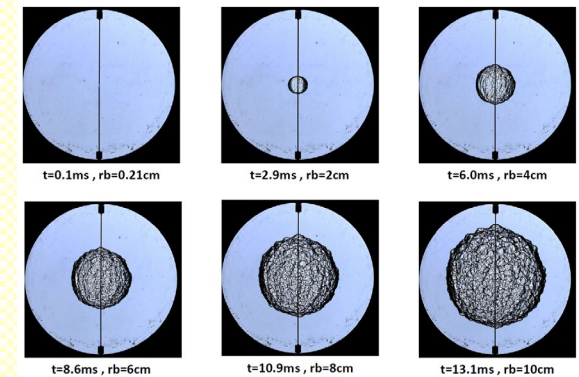


図5 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度20 vol%、メタン濃度0 vol%)

試験結果

②混合気体燃焼試験

水素濃度10 vol%、メタン濃度1 vol%、2 vol% におけるデフラグレーションのシュリーレン画像と容器内圧力変化を示したのが図6(メタン濃度1 vol%)と図7(メタン濃度2 vol%)である。ここで、混合気体の当量比は、メタン濃度0 vol%、1 vol%、2 vol% において、それぞれ、0.265、0.375、0.487である。**メタン濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大し、容器内の最大圧力は上昇する。**前者は予混合火炎の燃焼速度が大きくなることによるもので、後者は断熱火炎温度が高くなることによるものと思われる。

水素濃度が15 vol% のときの試験結果を示したのが図8(メタン濃度1 vol%)と図9(メタン濃度2 vol%)である。ここで、混合気体の当量比は、メタン濃度0 vol%、1 vol%、2 vol% において、それぞれ、0.420、0.539、0.660である。また、水素濃度が20 vol% の試験結果を示したのが図10(メタン濃度1 vol%)と図11(メタン濃度2 vol%)である。ここで、混合気体の当量比は、それぞれ、0.595、0.723、0.855である。メタン濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大するが、火炎面のセルの凹凸は僅かではあるが滑らかになっている。この要因としては、メタン添加による固有不安定性への影響が考えられるが、そのメカニズムについては精査する必要がある。さらに、メタン添加が火炎伝播の加速に影響を与えるものと考えられる。この加速現象に関しても、詳細な検討が必要である。なお、メタン添加による火炎面の凹凸の僅かな違いは、口径30 cmの観察窓を用いていることから明らかになったものであり、小さい観察窓では明確に違いをキャッチすることは困難である。

試験結果

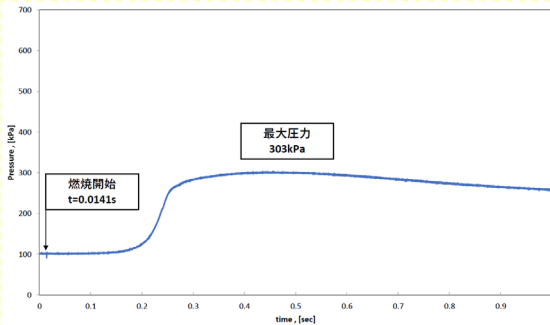
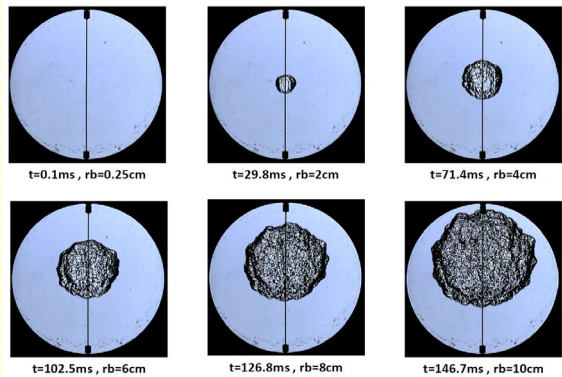


図3 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度10 vol%、メタン濃度0 vol%)

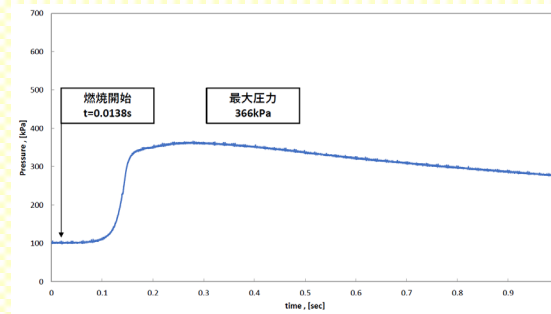
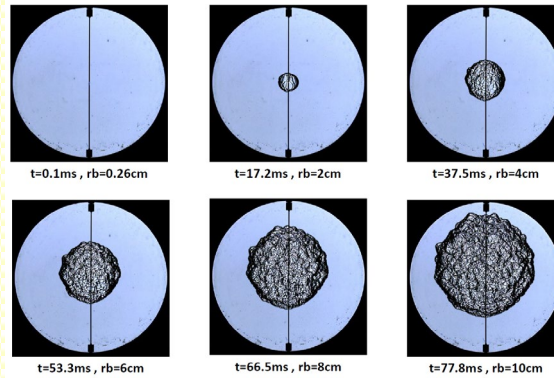


図6 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度10 vol%、メタン濃度1 vol%)

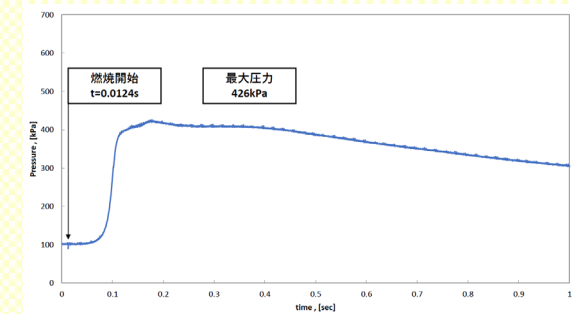
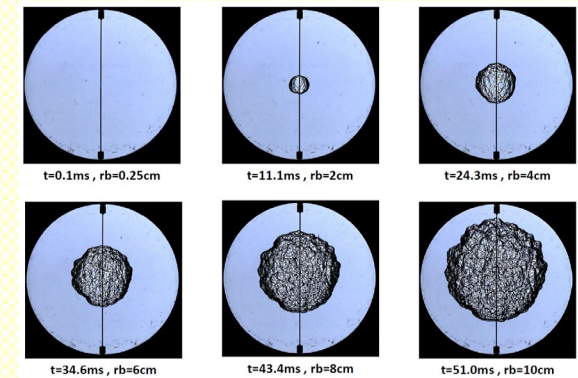


図7 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度10 vol%、メタン濃度2 vol%)

試験結果

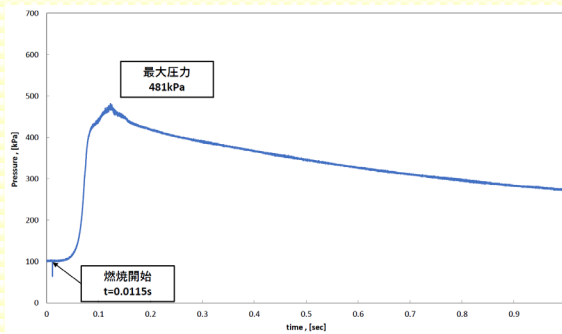
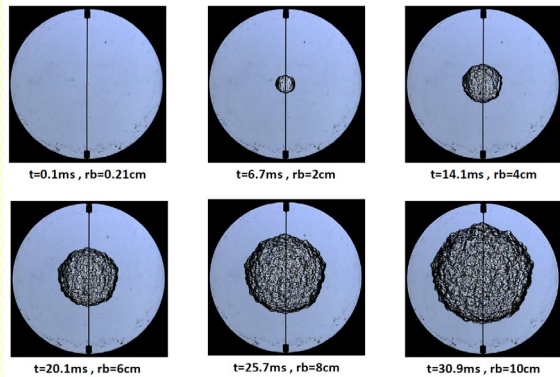


図4 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度15 vol%、メタン濃度0 vol%)

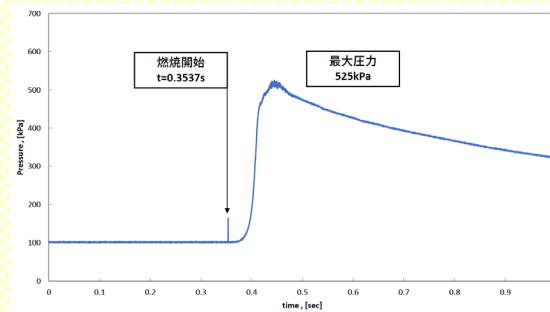
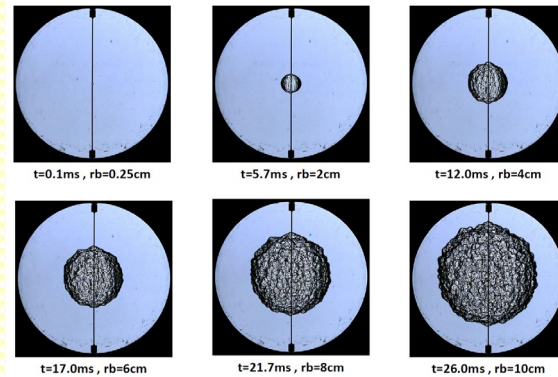


図8 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度15 vol%、メタン濃度1 vol%)

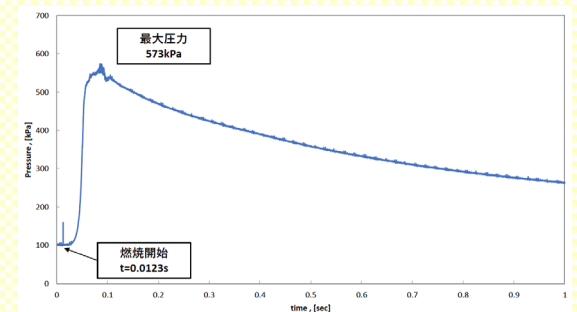
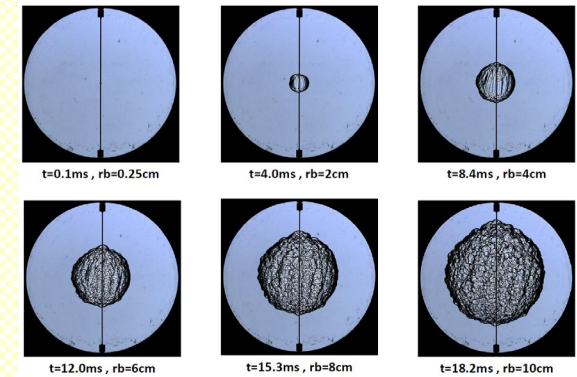


図9 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度15 vol%、メタン濃度2 vol%)

試験結果

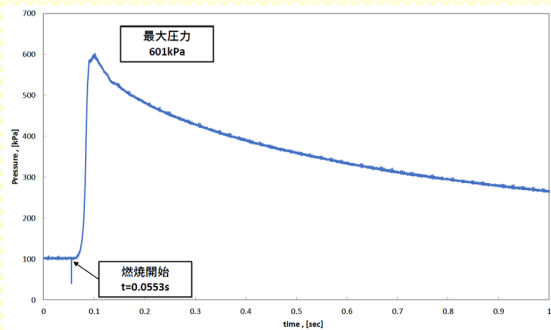
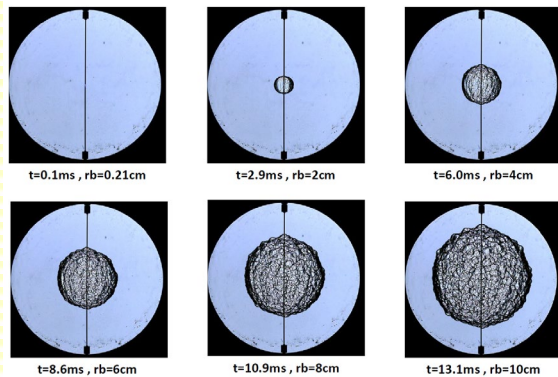


図5 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度20 vol%、メタン濃度0 vol%)

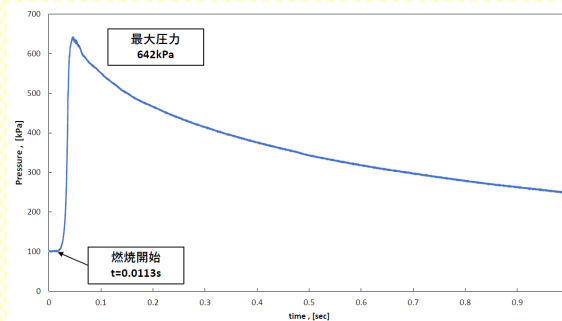
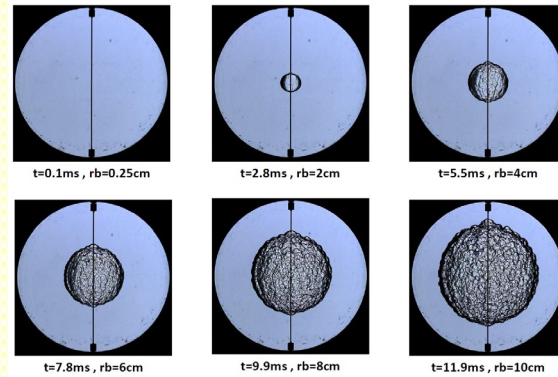


図10 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度20 vol%、メタン濃度1 vol%)

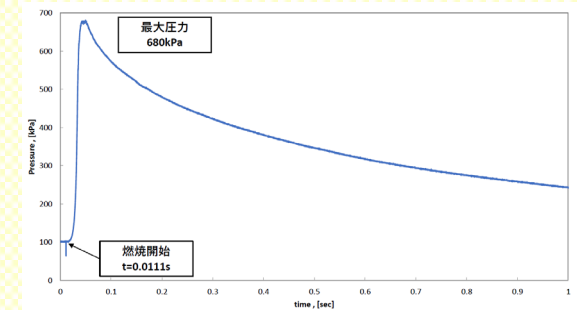
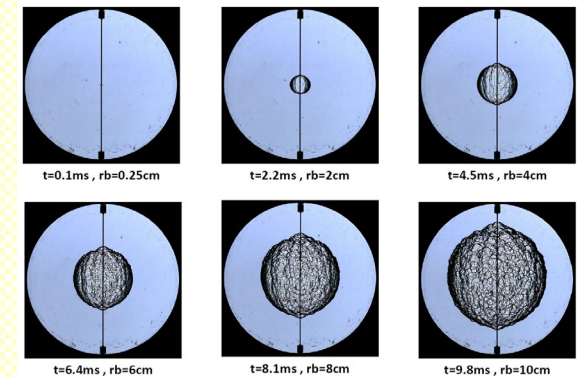


図11 シュリーレン画像と容器内圧力変化
(水素濃度20 vol%、メタン濃度2 vol%)

試験結果

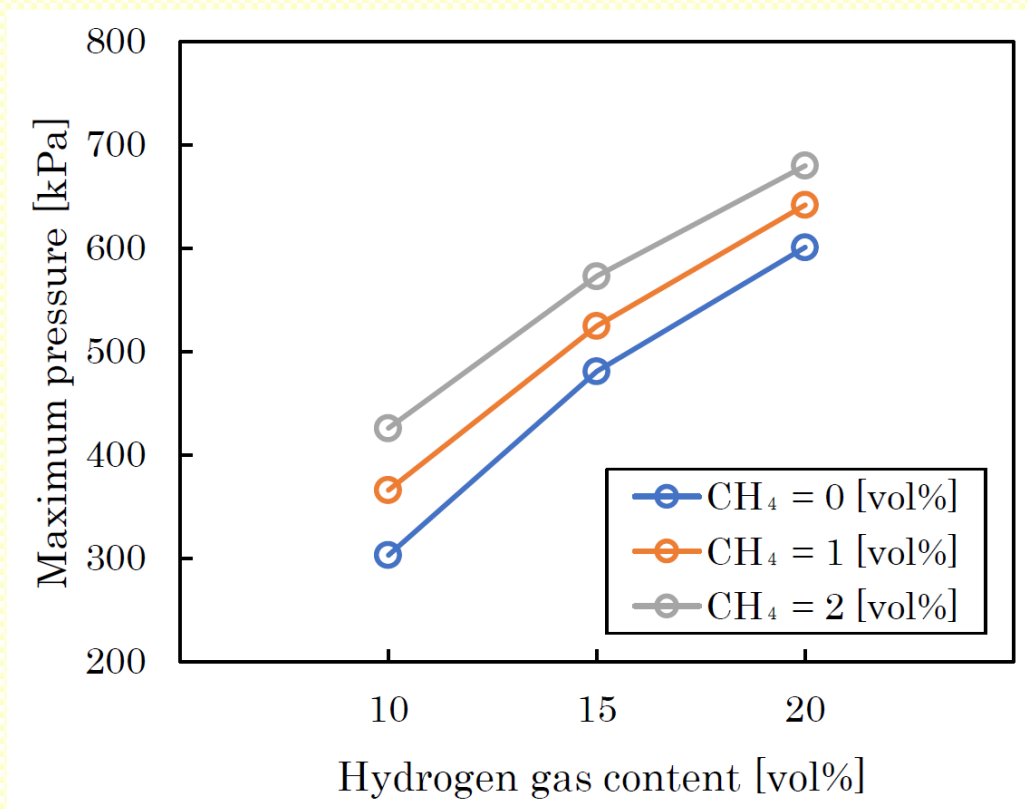


図12 容器内の最大圧力

まとめ

本事業では、水素、メタン及び空気の予混合気による燃焼試験を実施し、水素球状伝播火炎の動的挙動を観察し、水素濃度とメタン濃度が火炎挙動に与える影響を精査した。そして、以下の結果と知見を得た。

- ・火炎半径の増加と共に火炎面にセルが形成され、それが発達して複雑な形状になる。このセルの形成は従来の燃焼実験[5-6]でも観察され、JAEAの研究グループの数値計算[7]においても確認されている。
- ・水素濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大している。これは予混合火炎の燃焼速度が大きくなるからである。また、容器内の最大圧力は上昇する。これは断熱火炎温度が高くなるからである。
- ・メタン濃度が高くなると共に、火炎の伝播速度は増大し、容器内の最大圧力は上昇する。前者は予混合火炎の燃焼速度が大きくなることによるもので、後者は断熱火炎温度が高くなることによるものと思われる。
- ・容器内の最大圧力は、水素濃度及びメタン濃度が高くなると共に、単調に上昇する。最大圧力の上昇は、水素爆発による破壊力の強化に結び付くことから、1Fの水素爆発における可燃性有機ガスの影響を精査することは非常に重要である。

まとめ

各試験の条件下での試験回数を増やすことにより、再現性を確認すると共に、**データの精度を高める**必要がある。また、**初期温度を上昇させて試験を実施**し、その効果を定量的に明らかにすることも必要である。さらに、**可燃性有機ガスの添加による最大圧力の上昇への影響を精査**し、1Fの水素爆発に対する考察を深化させることは有用である。

海外の関連する組織との交流が必要である。**フランスの関連組織ICARE/CNRS**は、本事業にも関係するガス爆発の分野において、水蒸気を含めたガスを扱える密閉型容器を用いて実験を遂行しており、世界でもガス爆発特性に関する知見を有する数少ない研究機関の一つである。この研究機関と水素爆発に係わる情報を交換すると共に、**共同での水素爆発試験の実施**等を検討することが有用である。

本事業では、実験室レベルでの水素爆発の基本的な現象を観察している。実機等における爆発現象を把握することは、次のステップとなる。その際、**スケールの効果を考慮**することが肝要である。

ここでは、水素及び可燃性有機ガスの予混合燃焼を取り扱っているが、拡散燃焼を取り扱い、**火炎色等の確認試験を実施**することが必要である。得られる試験結果は、火炎の挙動や温度分布等を明らかにすることに繋がり、1Fの水素爆発を理解する上で有用である。

参考文献

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, 令和3年3月5日, <https://www.nra.go.jp/data/000345595.pdf>
2. Williams, F. A., Combustion Theory, Second Edition (1985), p. 349, Addison-Wesley, Reading, CA.
3. Lewis, B. and Elbe, G., Combustion, Flames and Explosions of Gases, Third Edition (1987), p. 396, Academic Press, Orlando, FL.
4. Law, C. K., Combustion Physics (2006), p. 41, Cambridge University Press, New York.
5. Lamoureux, N., Chaumeix, N., Paillard, C. E., Laminar flame velocity determination for H₂-air-He-CO₂ mixtures using the spherical bomb method, Experimental Thermal and Fluid Science (2003), Vol. 27, pp. 385-393.
6. Katsumi, T., Kobayashi, H., Aida, T., Aiba, K., Kadowaki, S., Outward propagation velocity and acceleration characteristics in hydrogen-air deflagration, International Journal of Hydrogen Energy (2017), Vol. 42, pp. 7360-7365.
7. Thwe Thwe Aung, Terada, A., Hino R., Nagaishi, R., and Kadowaki, S., Simulation of the self-propagating hydrogen-air premixed flame in a closed-vessel by an open-source CFD code, Journal of Nuclear Science and Technology (2022), Vol. 59, No. 5, pp. 573-579.



令和5年4月24日

令和4年度原子力規制庁委託成果報告

東京電力福島第一原子力発電所事故時の水素爆発 における可燃性有機ガスの影響に関する調査

《 ご清聴ありがとうございます 》

- 120 -



1号機原子炉補機冷却系統の現地調査の状況

2023年4月24日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

1号機原子炉補機冷却系統の現地調査

(1) 目的

1号機原子炉補機冷却系統(RCW系統)の熱交換器付近での水素滞留事象に関して、RCW系統の各設備位置・汚染状況を確認する。

(2) 場所 1号機原子炉建屋

(3) 調査日 2023年3月23日、4月13日

(4) 調査実施者

2023年3月23日 原子力規制庁職員 4名

2023年4月13日 原子力規制庁職員 6名

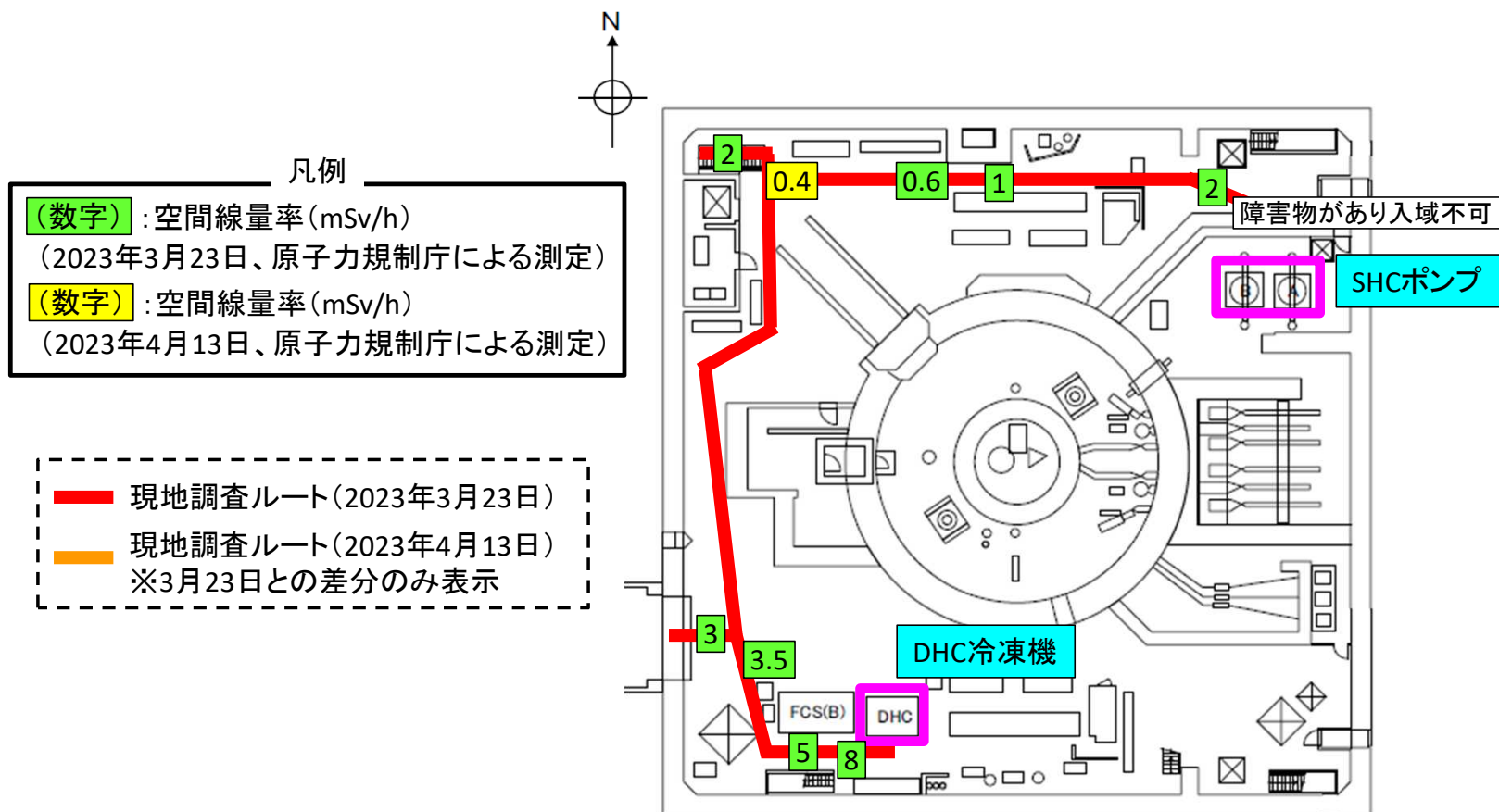
(5) 被ばく線量

2023年3月23日 最大: 2.61mSv、最小: 2.20mSv

2023年4月13日 最大: 2.51mSv、最小: 1.30mSv

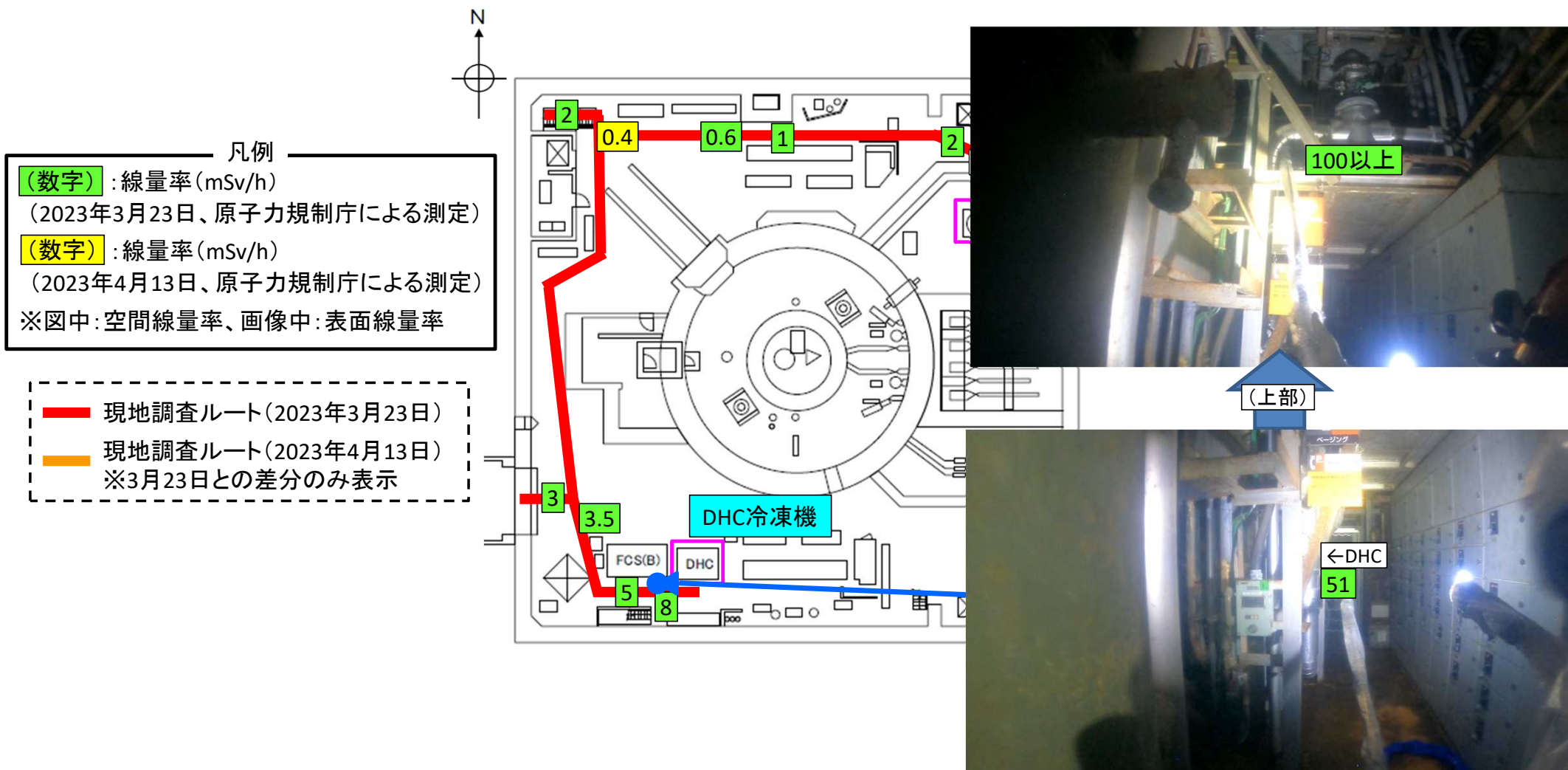
※被ばく線量[mSv]の最大、最小は、調査実施者のうち、最も被ばく線量の高い人の値と低い人の値を1日の合計値として示した。

調査箇所及びルート(1号機原子炉建屋1階)



図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

調査状況(1号機原子炉建屋1階:DHC付近)



図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

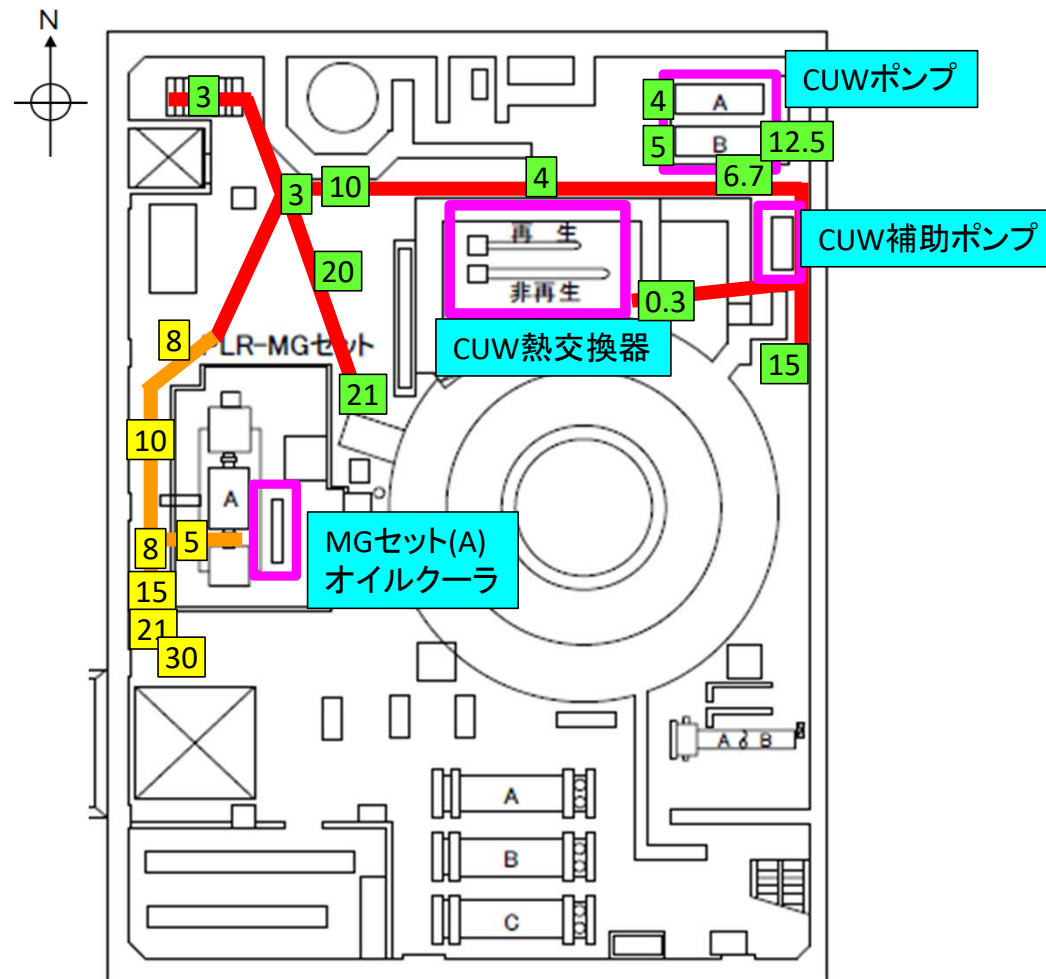
写真は、いずれも2023年3月23日原子力規制庁撮影

調査箇所及びルート(1号機原子炉建屋2階)

凡例

- (数字) : 空間線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)
- (数字) : 空間線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

- 現地調査ルート(2023年3月23日)
- 現地調査ルート(2023年4月13日)
※3月23日との差分のみ表示



調査状況(1号機原子炉建屋2階:CUWポンプ等)

凡例

(数字):線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

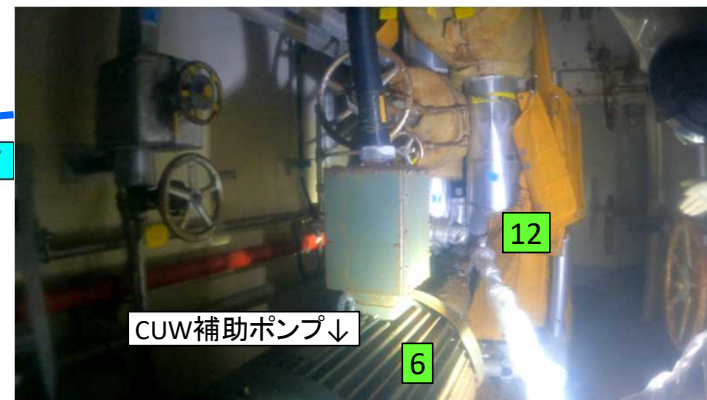
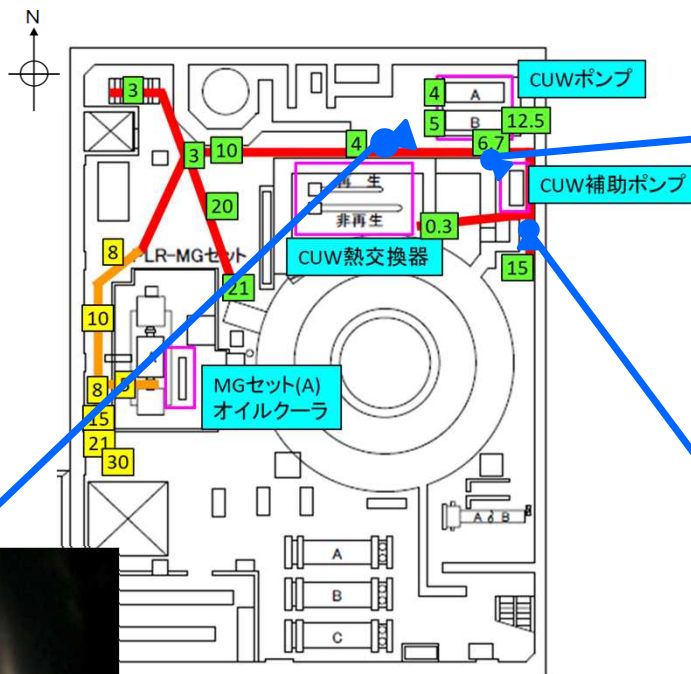
(数字):線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)

※3月23日との差分のみ表示



CUW補助ポンプ↓

12



↑CUWポンプ(B)



ここからは配管類が多数
あるため、SHC-Hx方向への
通り抜け不可

調査状況(1号機原子炉建屋2階:CUW熱交換器)

凡例

(数字):線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

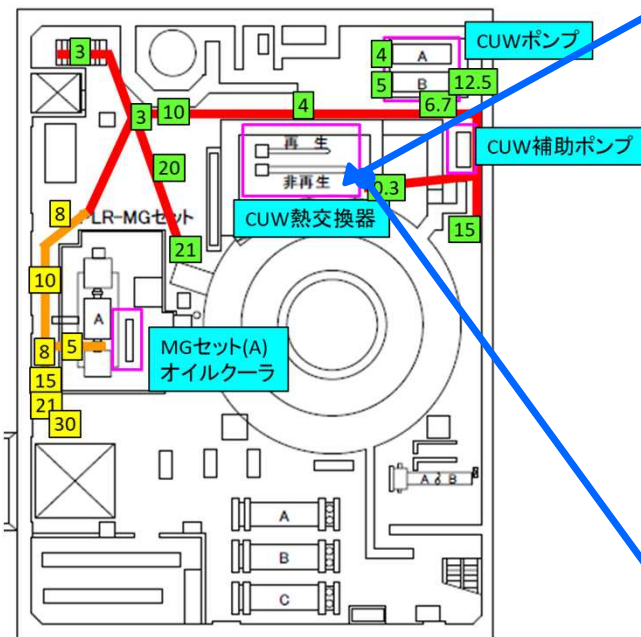
(数字):線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)

※3月23日との差分のみ表示



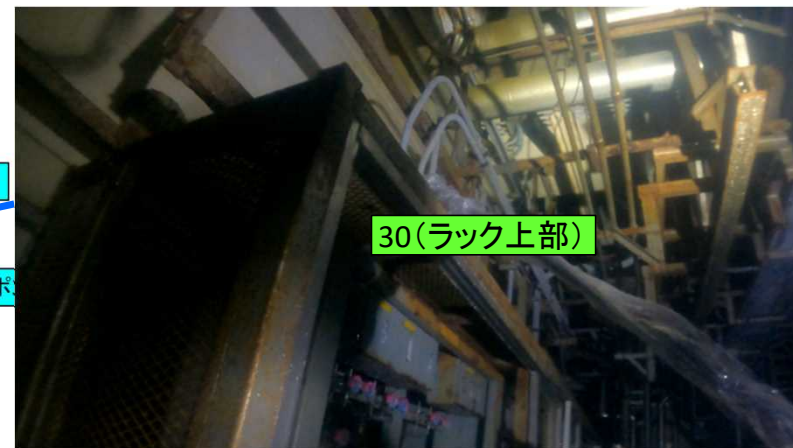
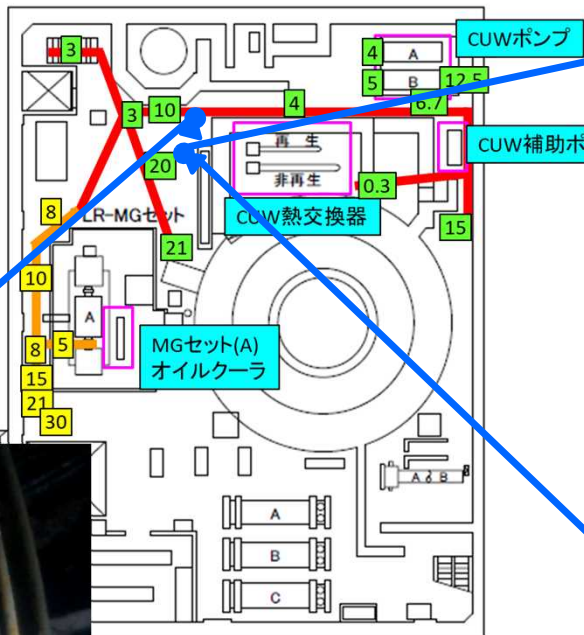
調査状況(1号機原子炉建屋2階:北西側フロア)

凡例

(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率



図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

写真は、いずれも2023年3月23日原子力規制庁撮影

調査状況(1号機原子炉建屋2階:MGセット付近)

凡例

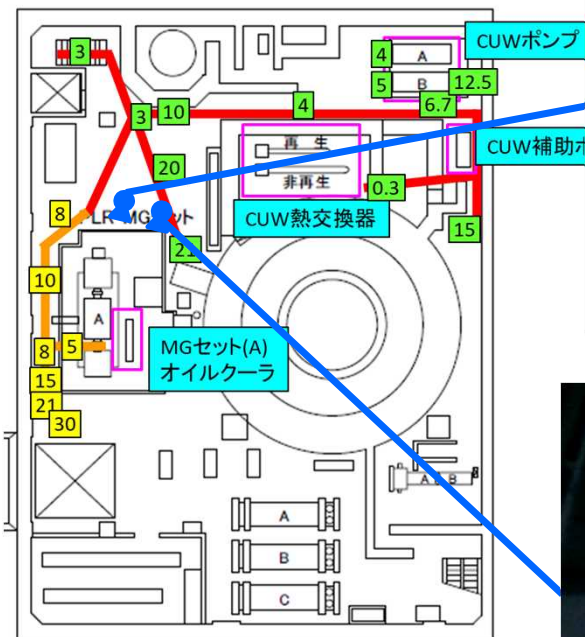
(数字) : 線量率 (mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

(数字) : 線量率 (mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)
※3月23日との差分のみ表示



調査状況(1号機原子炉建屋2階:MGセット(A)オイルクーラ)

凡例

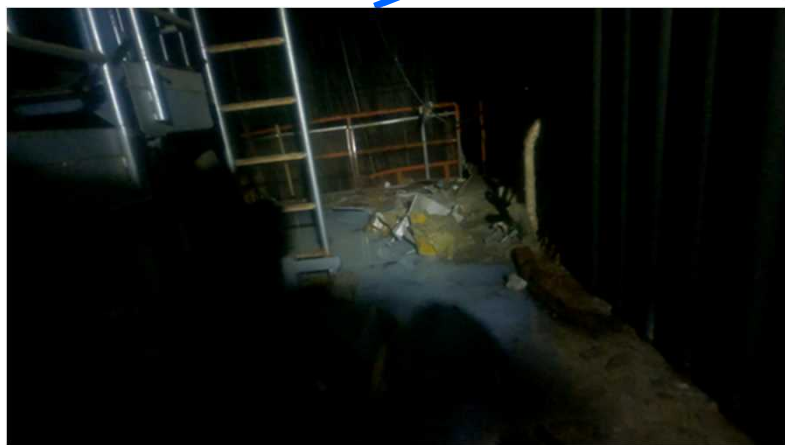
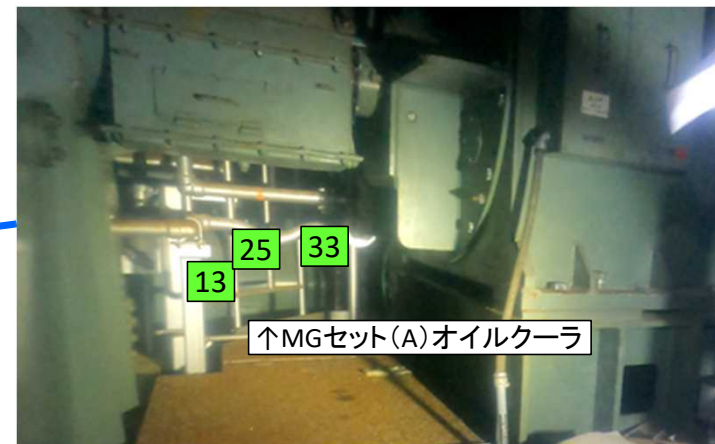
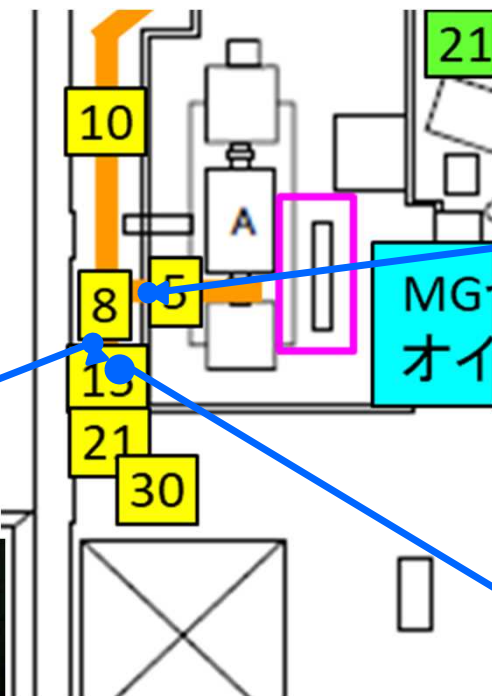
(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)
※3月23日との差分のみ表示

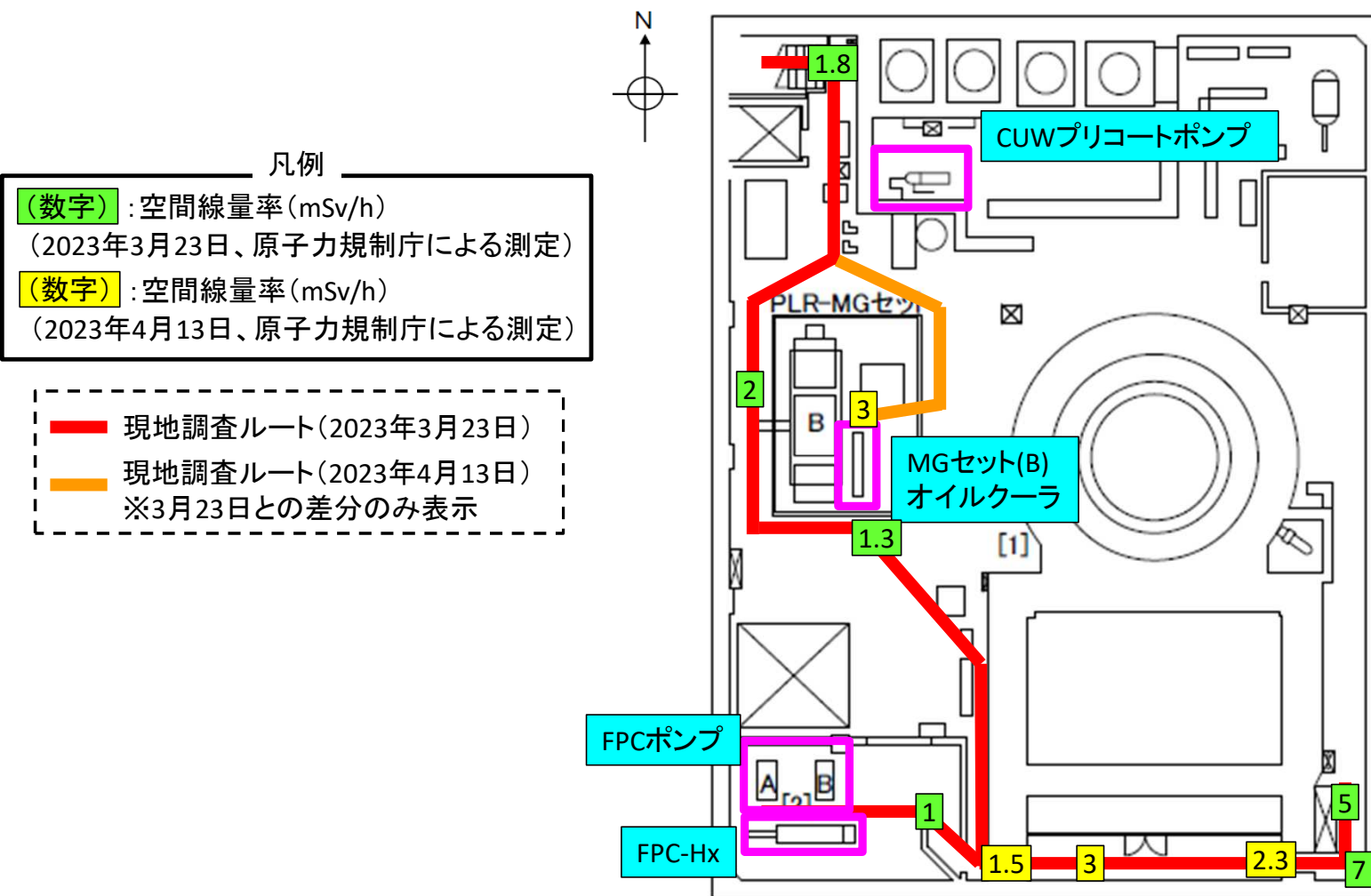


コリメータ付き線量計による測定

東向き
3(mSv/h)

南向き
15(mSv/h)

調査箇所及びルート(1号機原子炉建屋3階)



図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

調査状況(1号機原子炉建屋3階:FPC-Hx付近)

凡例

(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

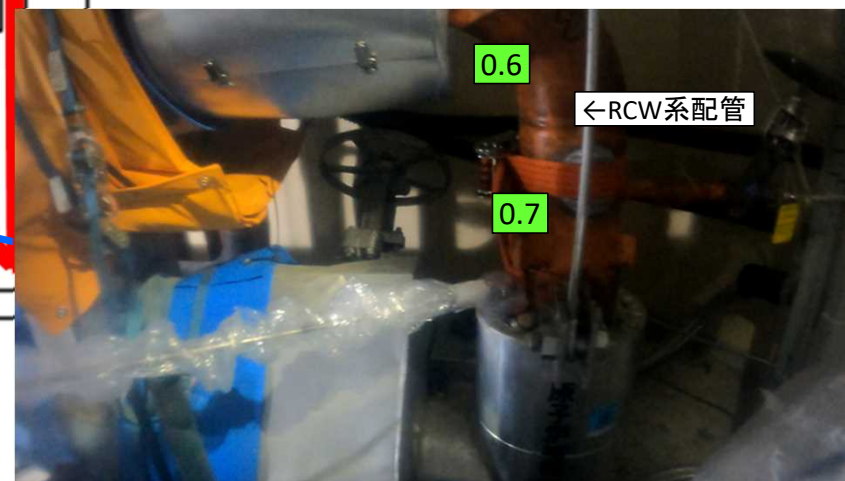
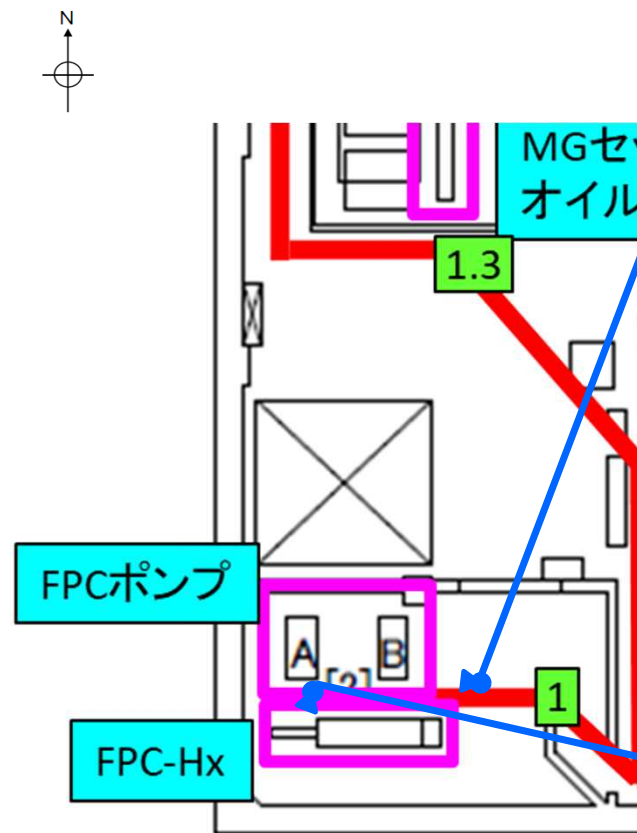
(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)

※3月23日との差分のみ表示



調査状況(1号機原子炉建屋3階:MGセット(B)オイルクーラ等)

凡例

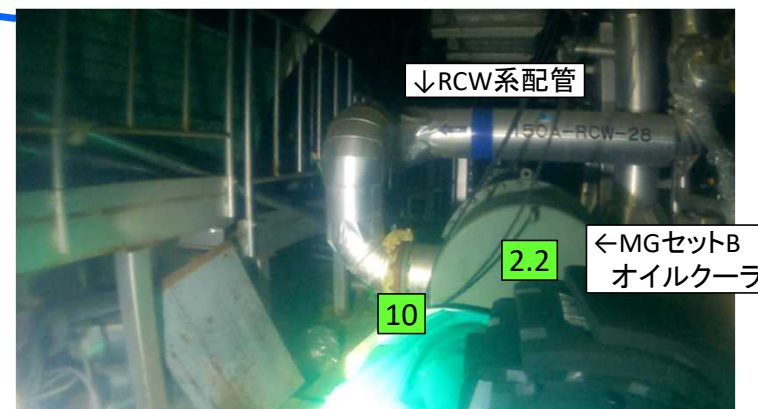
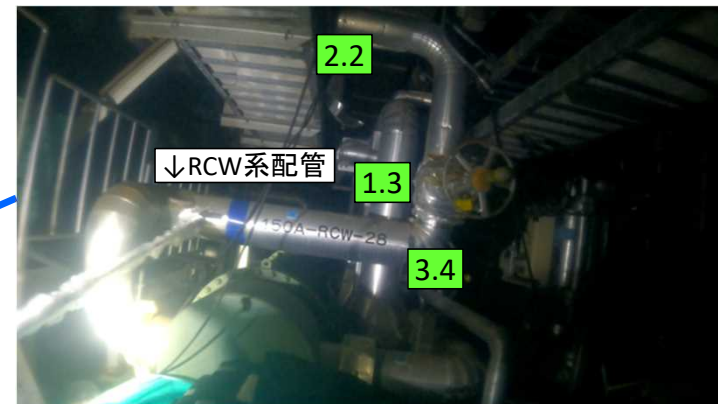
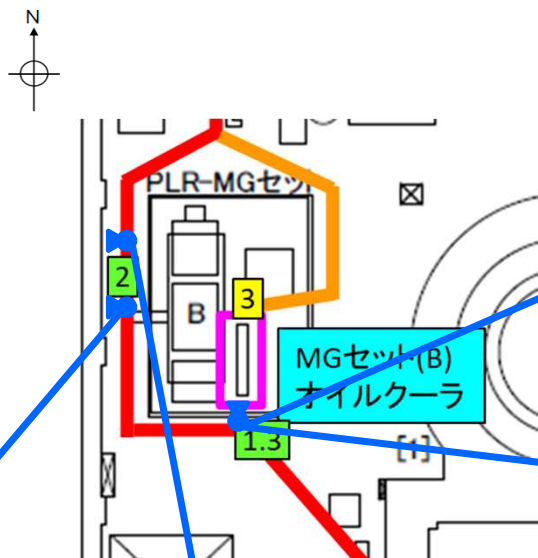
(数字): 線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

(数字): 線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中: 空間線量率、画像中: 表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)
※3月23日との差分のみ表示



図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

写真は、いずれも2023年3月23日原子力規制庁撮影

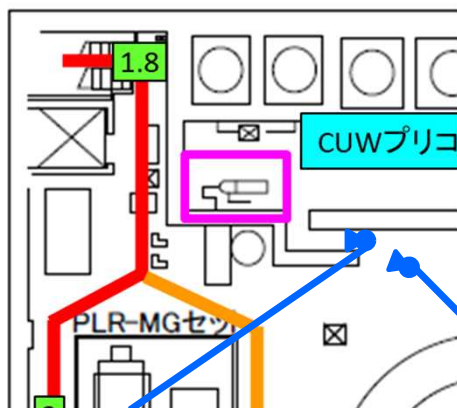
調査状況(1号機原子炉建屋3階:CUWプリコートポンプ室付近)

凡例

(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

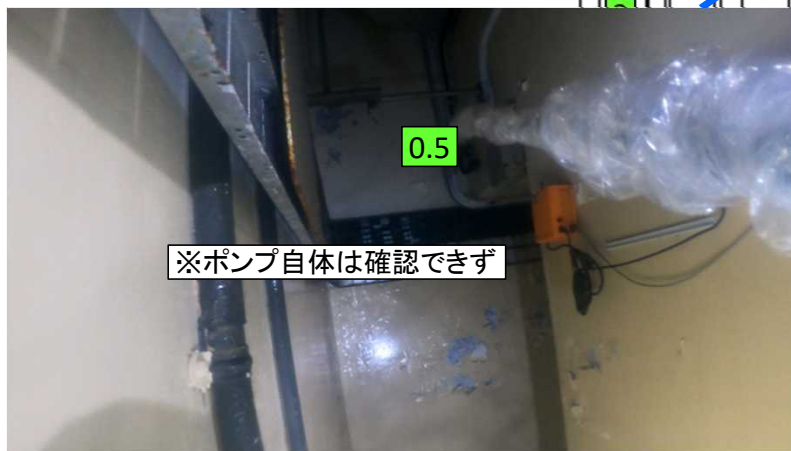
(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率



— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)
※3月23日との差分のみ表示



調査箇所及びルート(1号機原子炉建屋4階)

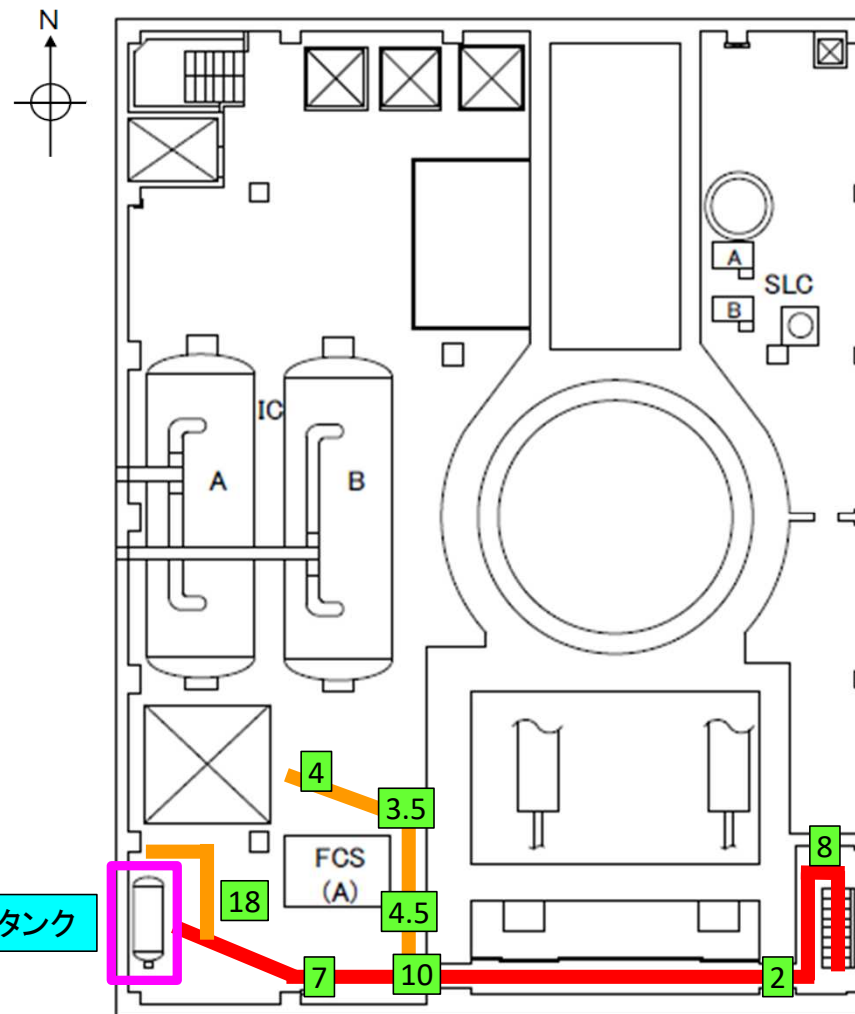
凡例

(数字) : 空間線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

(数字) : 空間線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

— 現地調査ルート(2023年3月23日)
— 現地調査ルート(2023年4月13日)
※3月23日との差分のみ表示

RCWサージタンク



図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

調査状況(1号機原子炉建屋4階:RCWサージタンク付近)

凡例

(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

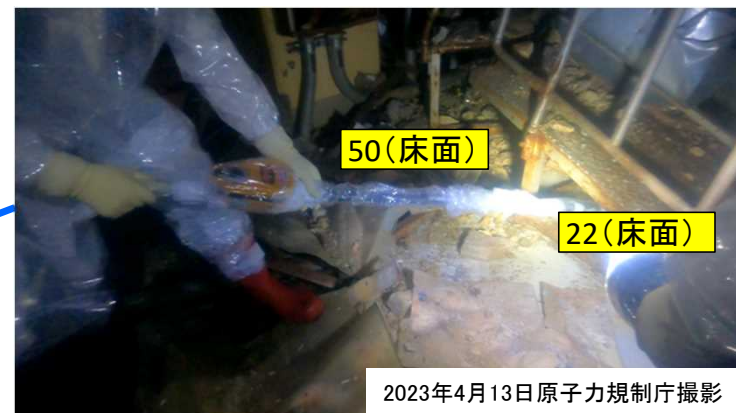
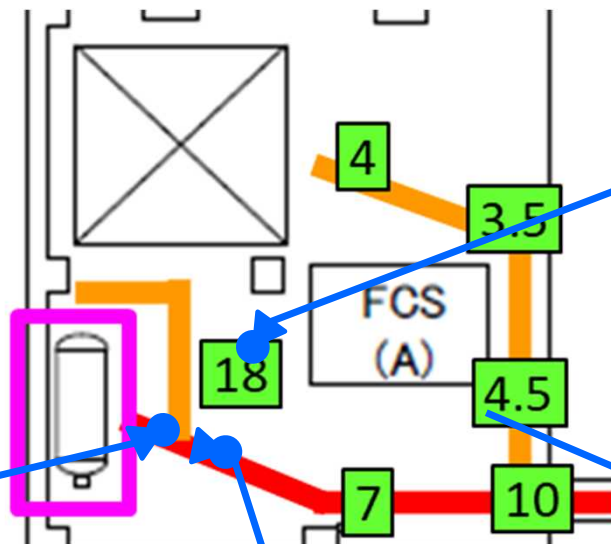
(数字) : 線量率(mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中:空間線量率、画像中:表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)

※3月23日との差分のみ表示



コリメータ付き線量計による測定

北向き
1.8(mSv/h)

西向き
3(mSv/h)

図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

調査状況(1号機原子炉建屋4階:RCWサージタンク)

凡例

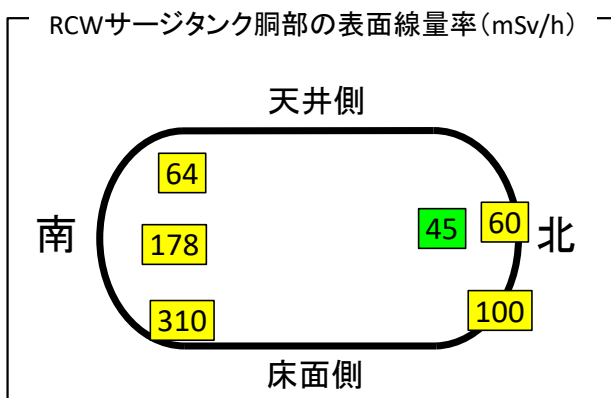
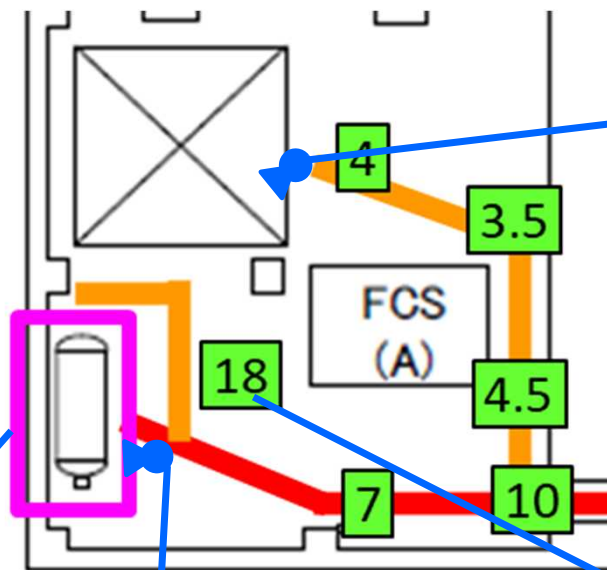
(数字) : 線量率 (mSv/h)
(2023年3月23日、原子力規制庁による測定)

(数字) : 線量率 (mSv/h)
(2023年4月13日、原子力規制庁による測定)

※図中: 空間線量率、画像中: 表面線量率

— 現地調査ルート(2023年3月23日)

— 現地調査ルート(2023年4月13日)
※3月23日との差分のみ表示



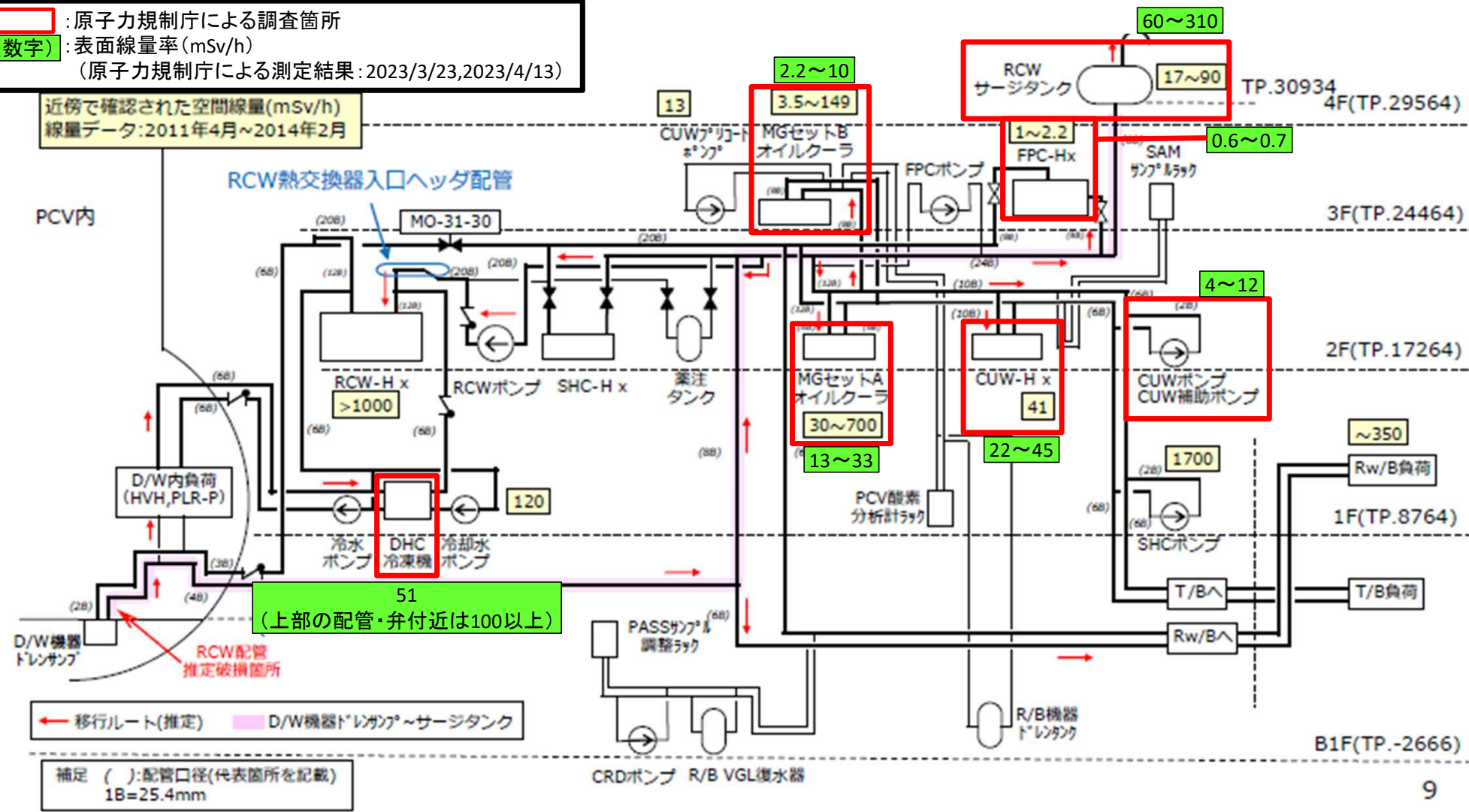
図面は、東京電力資料より抜粋、一部加工

写真は、いずれも2023年4月13日原子力規制庁撮影

調査箇所及び線量率測定結果

: 原子力規制庁による調査箇所
(数字) : 表面線量率 (mSv/h)
 (原子力規制庁による測定結果: 2023/3/23, 2023/4/13)

近傍で確認された空間線量(mSv/h)
 線量データ: 2011年4月~2014年2月



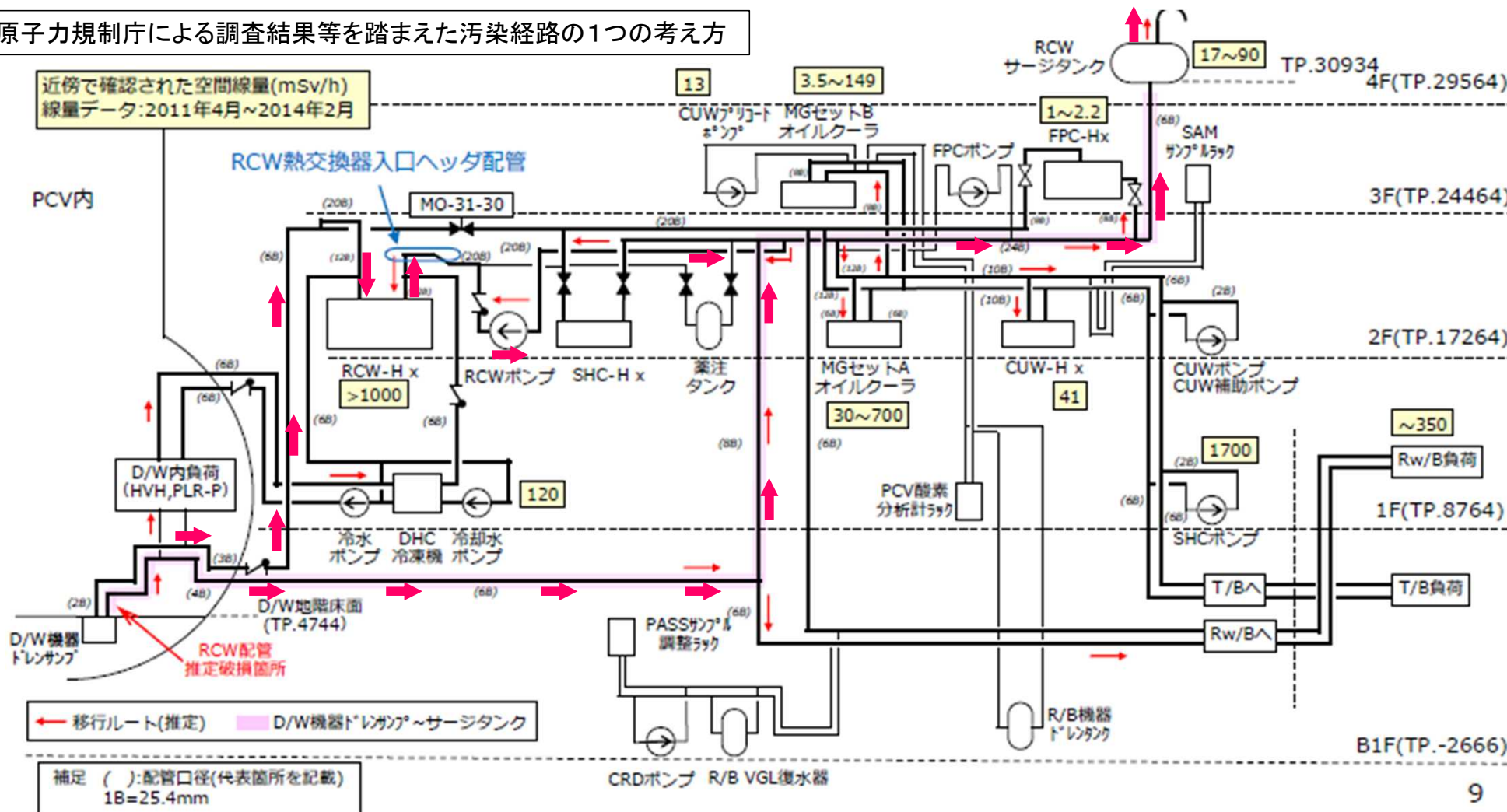
← 移行ルート(推定) D/W機器ドレンタンク~サージタンク

補足 (): 配管口径(代表箇所を記載)
 1B=25.4mm

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36回)資料2-1から抜粋、一部追記

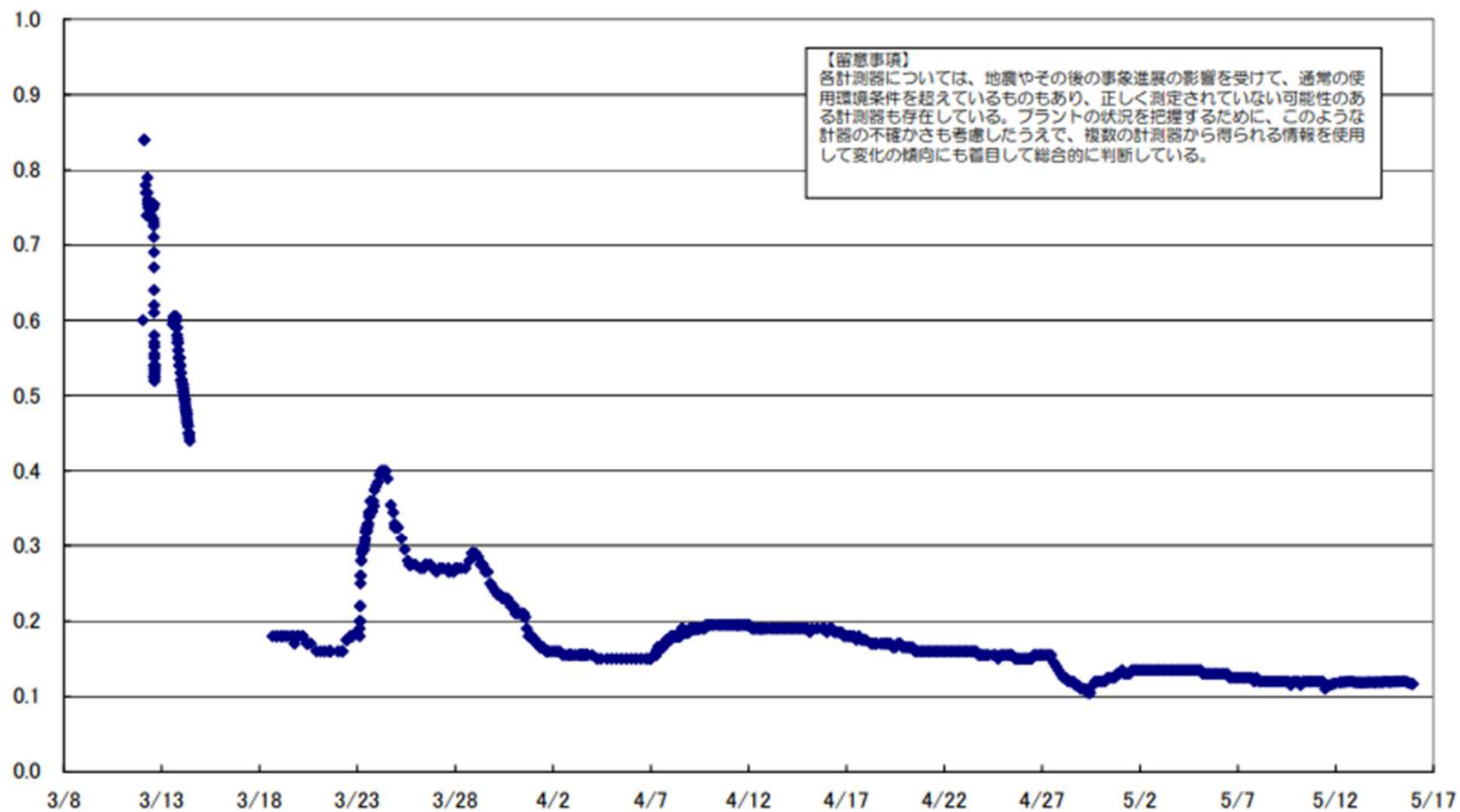
RCWシステムの汚染経路(1つの考え方)

➡: 原子力規制庁による調査結果等を踏まえた汚染経路の1つの考え方



(参考) 1号機D/W圧力の推移

1F1 D/W圧力(MPa abs)



CIGMA装置体系での 凝縮による水素局所化に関する CFD解析

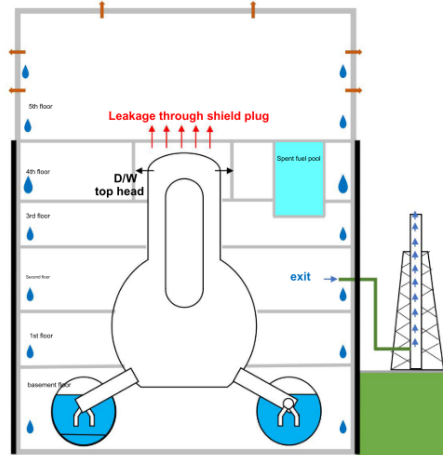
2023年4月24日

日本原子力研究開発機構
安全研究センター熱水力安全研究グループ

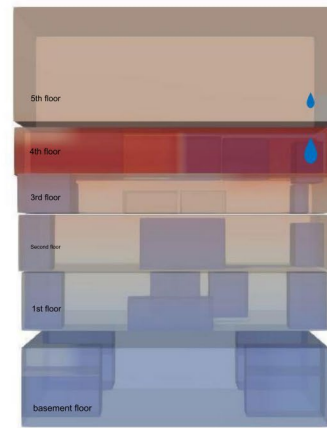
Ari Hamdani, 柴本泰照

- 検討会では、3号機において、4階及び5階の損傷の様子や福島中央テレビの映像から総合的に判断して「2段階爆発」可能性が指摘されている。
- 4階で第一段回目の爆発が発生した理由として、GOTHICを用いた解析により、シールドプラグ経由での水素漏洩に対し以下の可能性が指摘されている*。
 - ✓ 5階では酸素欠乏となり燃焼が不可となった。
 - ✓ 4階では水蒸気凝縮効果により水素濃度が高く、燃焼可能となった。

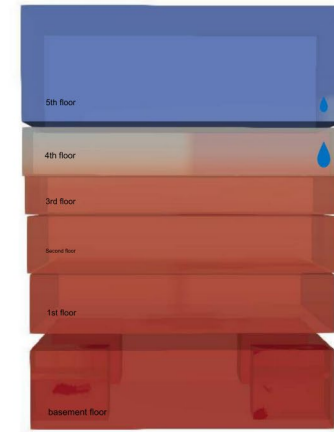
シールドプラグからの漏洩



GOTHICによる解析結果



水素濃度分布(%)



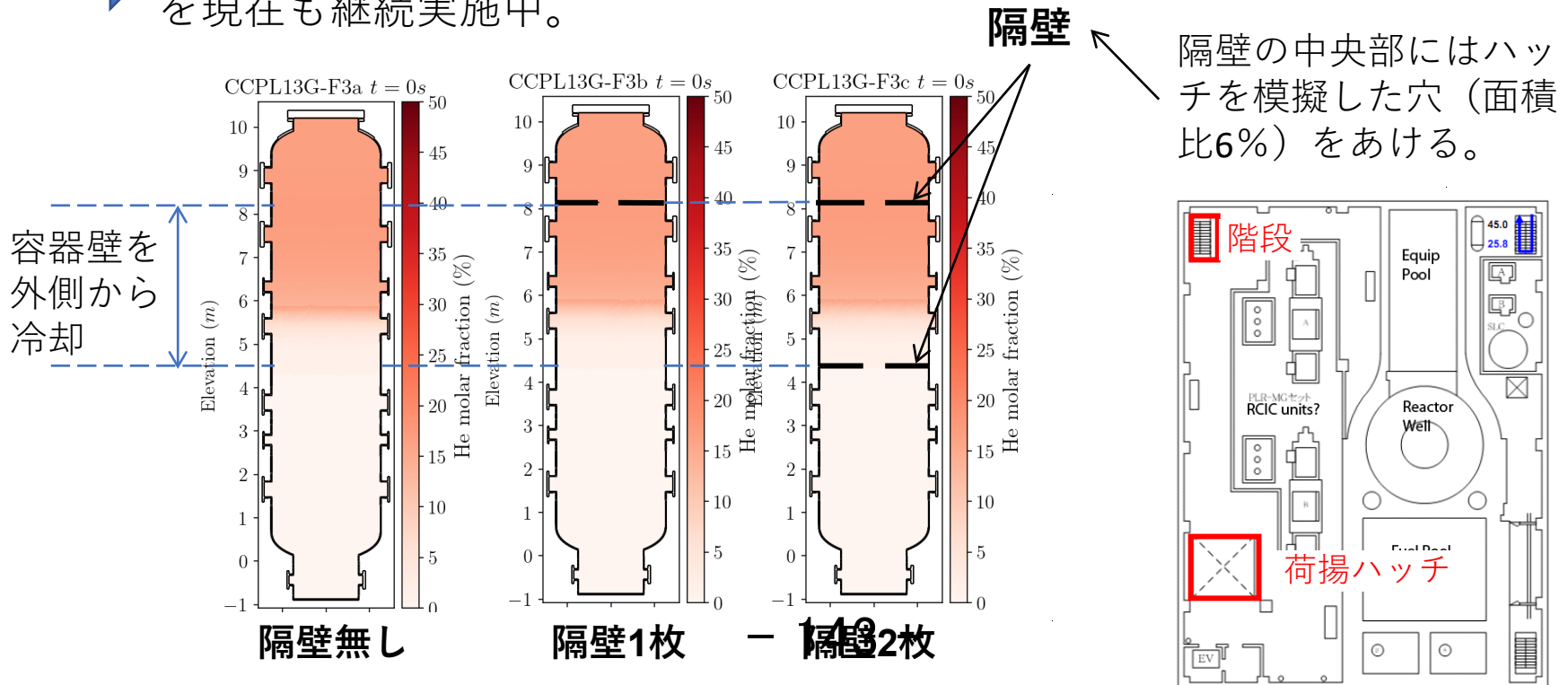
空気濃度分布 (%)

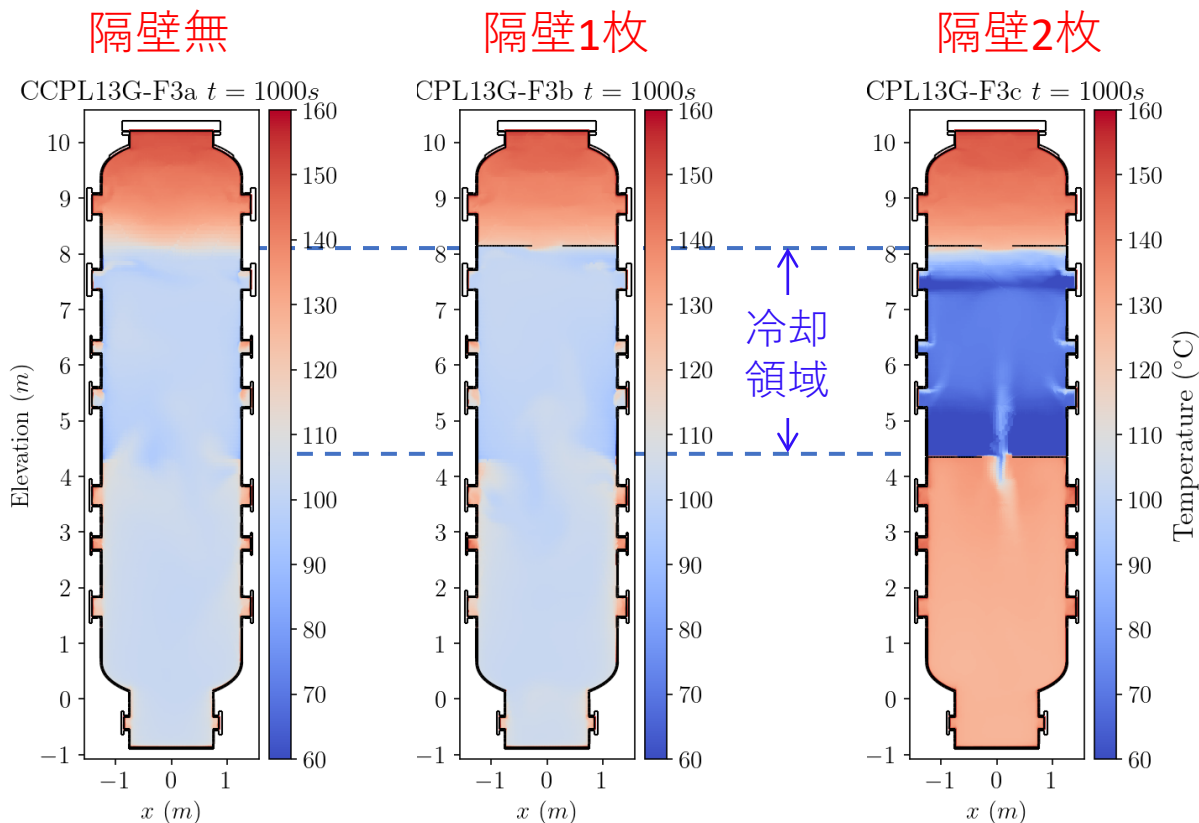
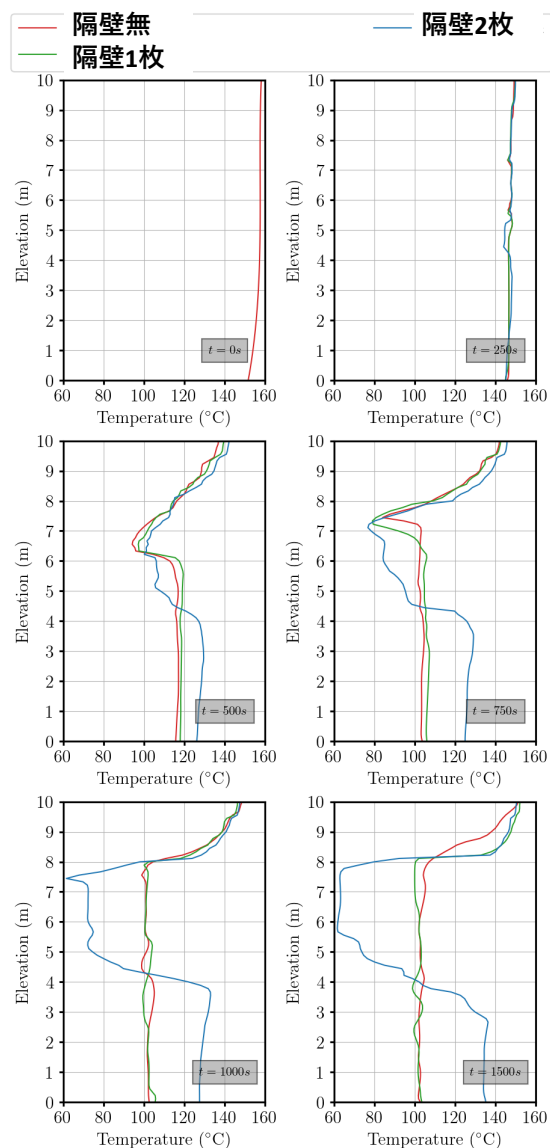
閉じられた容器の中間層で水素の濃縮が生じるかを、CIGMA実験装置の体系を用いたCFD解析を試みた。

= 142 =

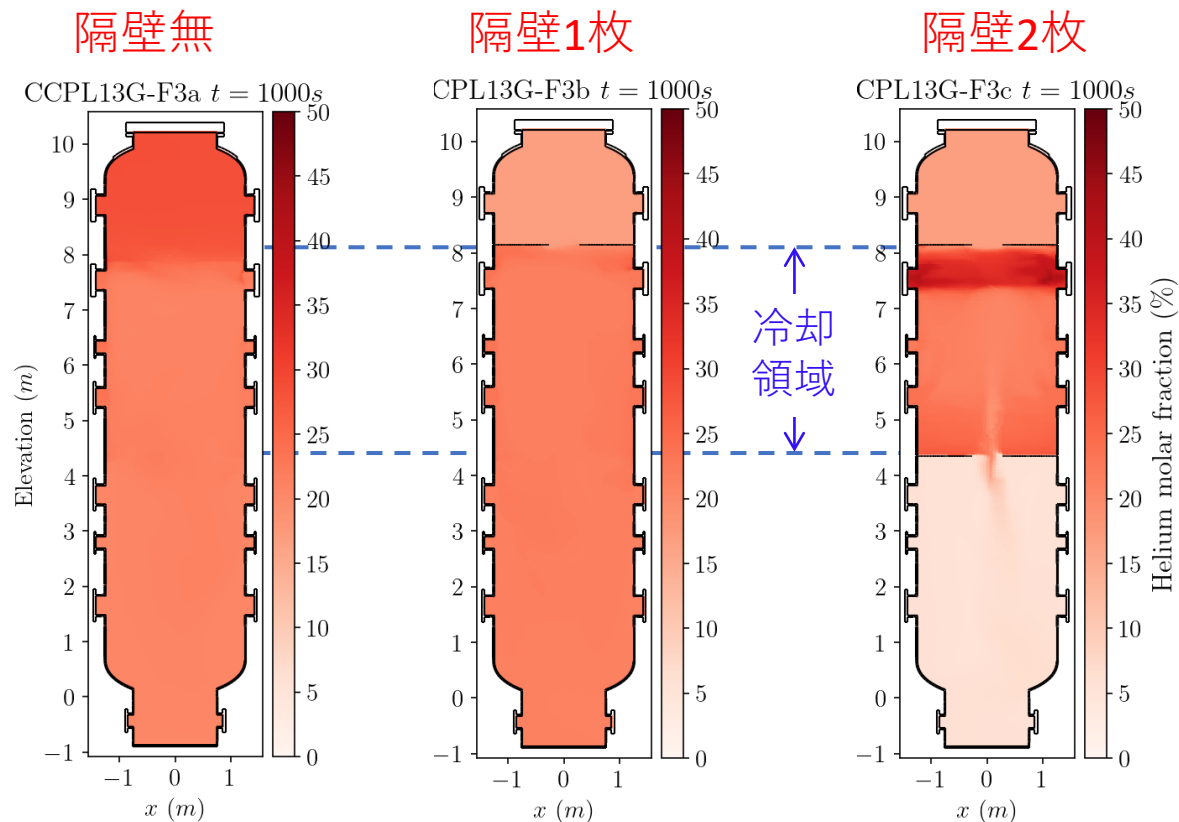
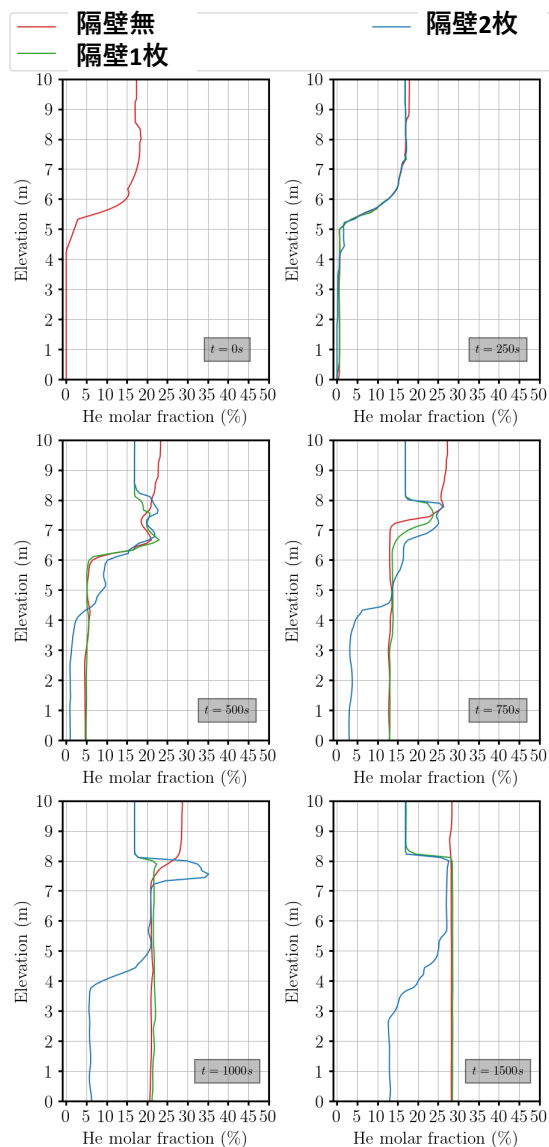
- 初期条件：空気・水蒸気・ヘリウムの混合気体で加圧し，容器の上部にヘリウムの密度成層を形成。
- 境界条件：容器の中間部分の壁を冷却（中間部での凝縮を模擬）
- 階層を模擬するための隔壁を挿入（0枚，1枚，2枚）。隔壁には気体が行き来できる開口部を設ける。

➡ 本計算は実機で想定される条件とは異なる。実事故に近い条件での計算を現在も継続実施中。



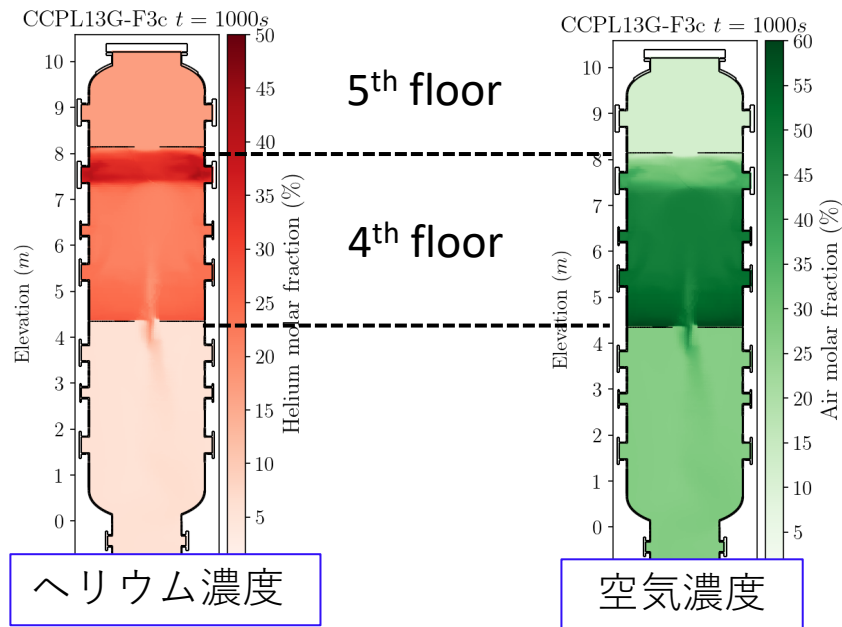


- 隔壁の影響が顕著に現れる。
- いずれも容器上部の気体温度は高温を維持。
- 隔壁2枚条件では、隔壁で挟まれた領域で温度が低下し、混合が進まない状況が観察された。

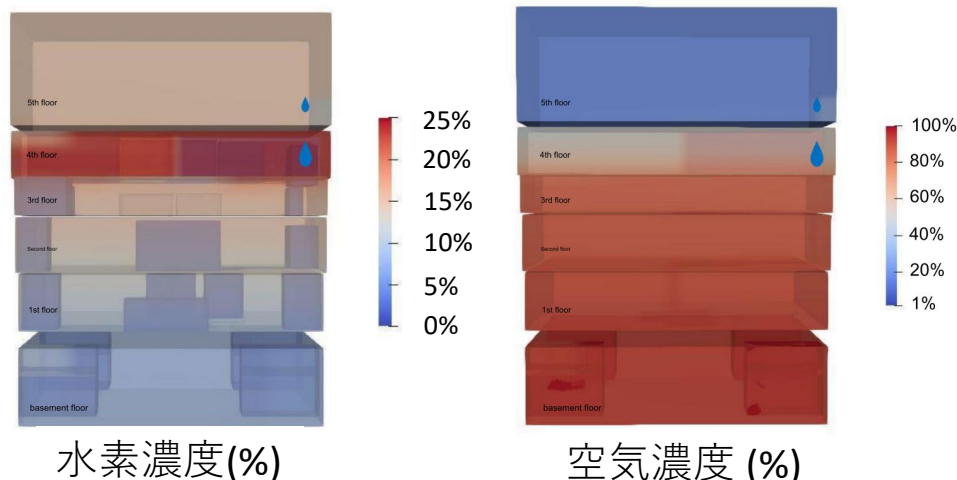


- 隔壁に挟まれた冷却領域では、蒸気濃度が減少し、ヘリウムの蓄積が生じる。
- ヘリウムの最高濃度は隔壁2枚条件での天井壁の直下で生じる。
- TEPSYSのG45+HC解析と類似の結果。

- 隔壁2枚条件では、水蒸気の凝縮による対流駆動と隔壁による循環抑制が働き、中間階で顕著なヘリウム蓄積が観察された。
- より事故条状況に近い条件で解析を継続中。
- CIGMA装置により事故状況を定性的に再現できる実験が可能であり、検討に着手。検討可能なパラメータは以下。
 - ✓ 蒸気及びヘリウムの供給流量（比）や時間
 - ✓ 中間層の凝縮量（冷却水温度や水位で制御）



解析1000秒後の気体濃度分布



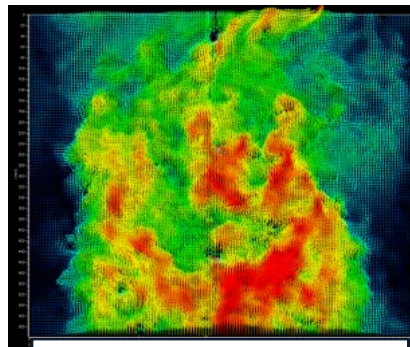
参考資料



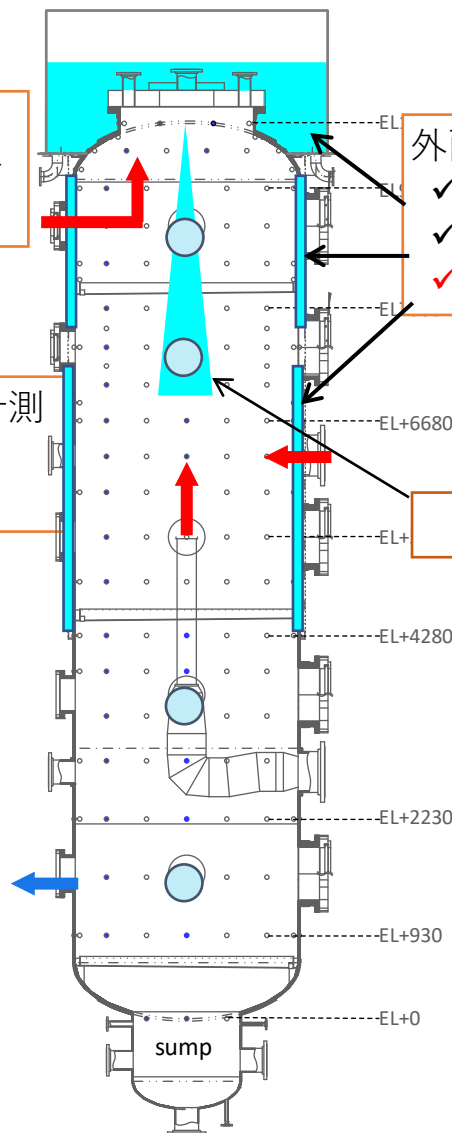
様々な箇所から蒸気-空気-ヘリウム混合の高温気体 (~700 °C) を注入

高密度名温度とガス組成の計測
 Concentration (QMS): 100
 Temperature (TC): 650

流体の可視化
 (large size window)



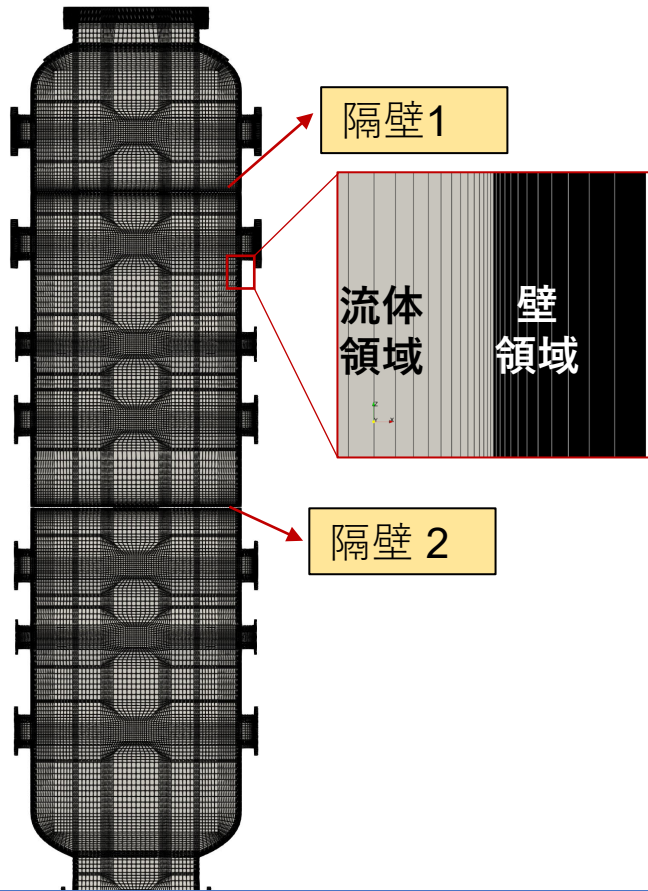
PIV measurement



外面冷却機能
 ✓ upper pool
 ✓ middle jacket
 ✓ lower jacket

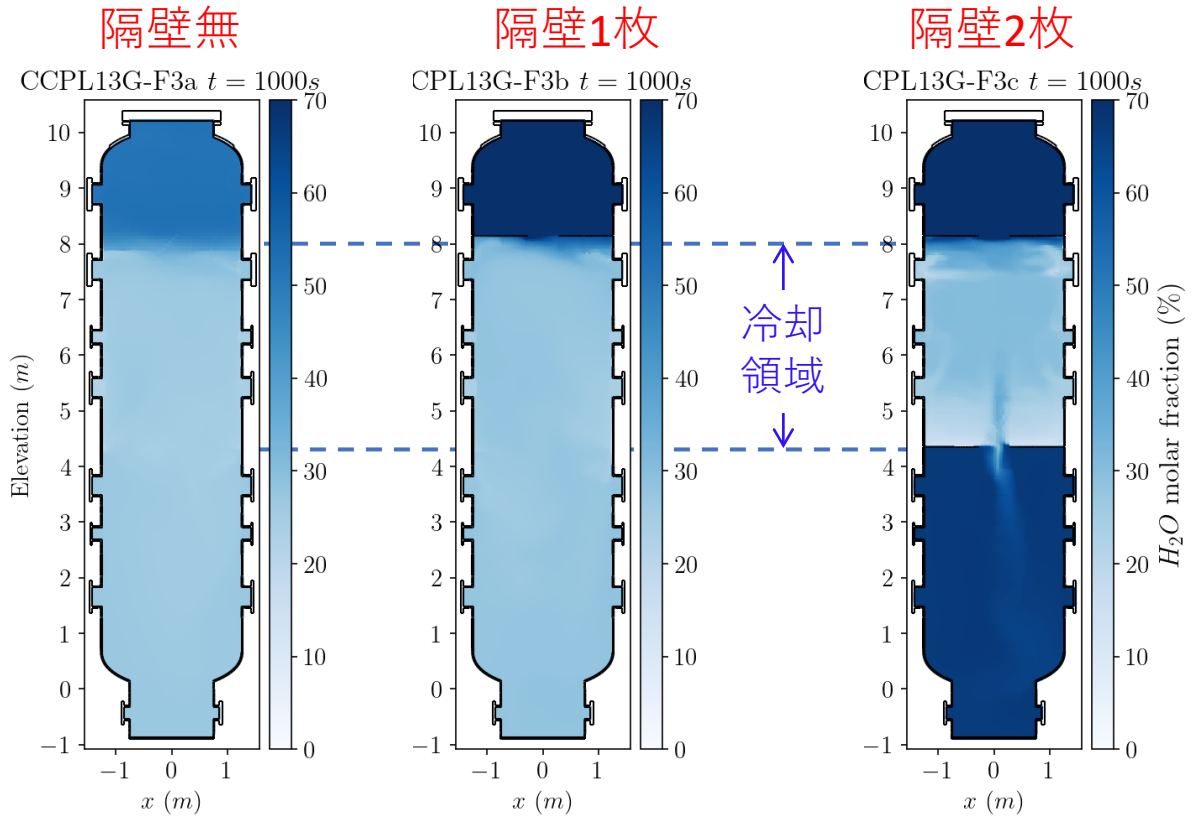
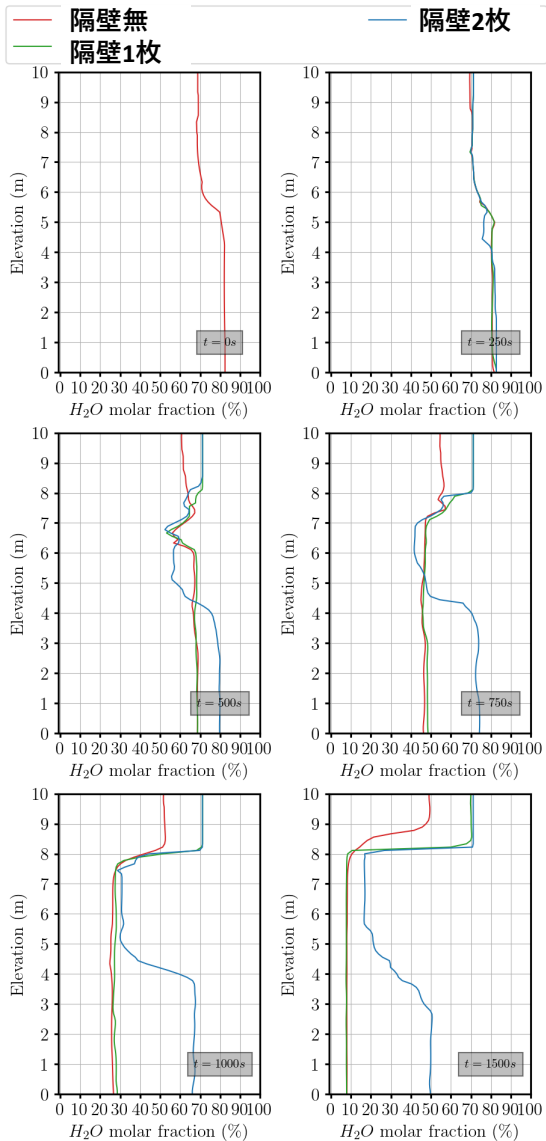
スプレー噴射

圧力(MPa)	0.5(high temp.), 1.5(max.)
温度(C)	300(ave), 700(max.)
サイズ	11mH x 2.5mD
体積	~ 51m ³

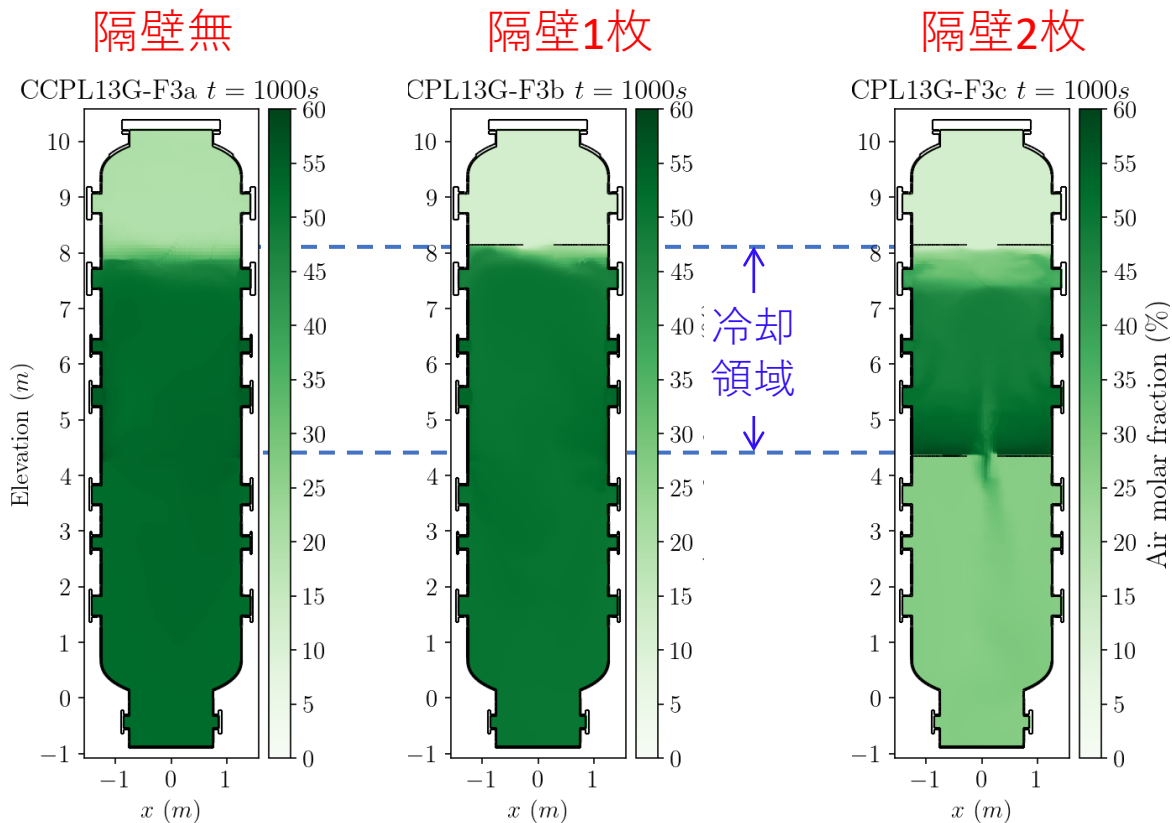
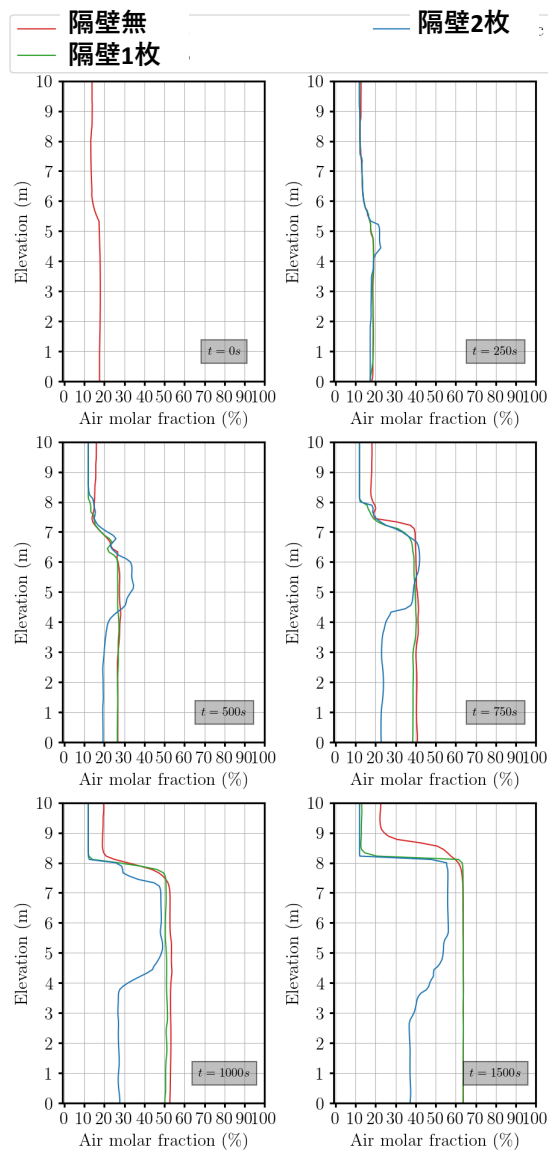


Solid region: 1,212,580 hexahedra cells
 Fluid region: 2,878,760 hexahedra cells
 Wall-adjacent cell $y^+ < 1$

CFD code	OpenFOAM 9
OpenFOAM solver	ContainmentFoam
Governing Equations	unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (URANS) model
Turbulent Transport	k- ω based Shear Stress Transport (SST) model, including production and dissipation terms for buoyancy turbulence based on SGDh
Wall Condensation	single phase 'diffusion-layer' approach
Multi-Species Transport	effective binary diffusion model (Fuller model)

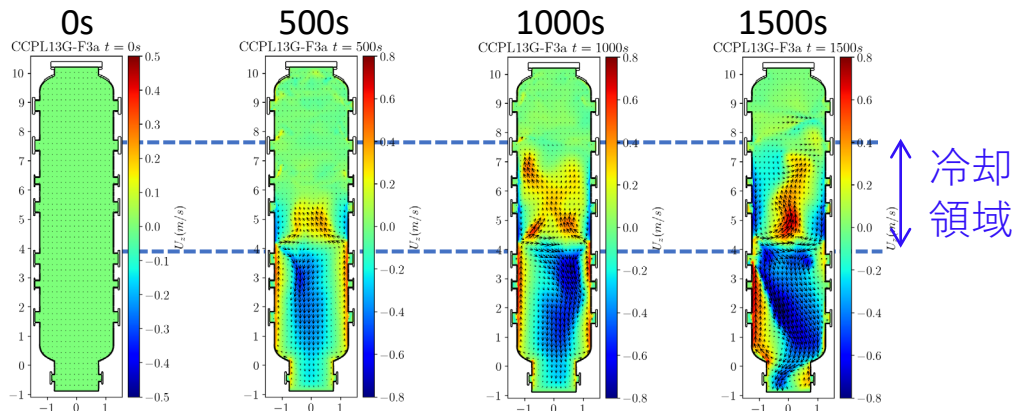


- 隔壁2枚条件では、隔壁に挟まれた冷却領域のみ蒸気濃度が低下した。
- 蒸気凝縮が非凝縮性ガス（ヘリウムと空気）の濃度勾配を生み、移行の駆動力となるが、隔壁により循環が阻害される。

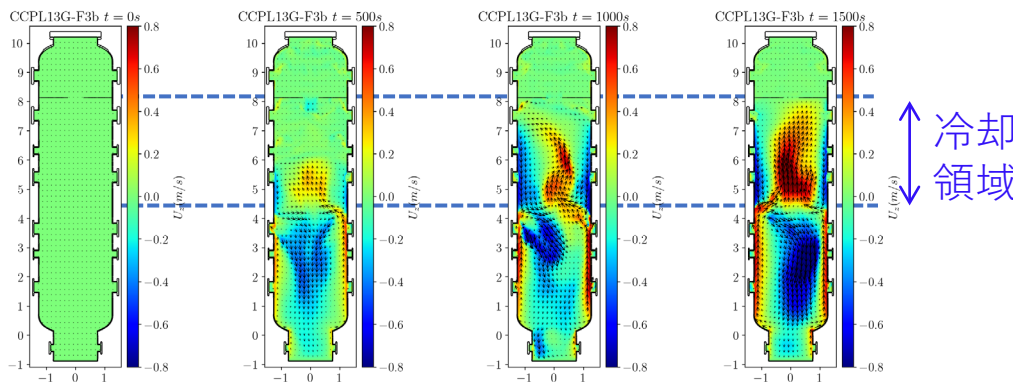


- 空気濃度の挙動はヘリウム濃度の挙動と類似。

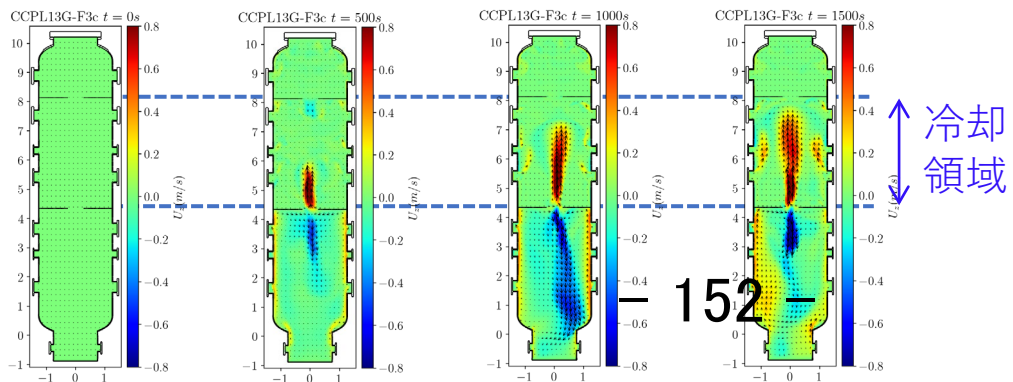
隔壁無



隔壁1枚



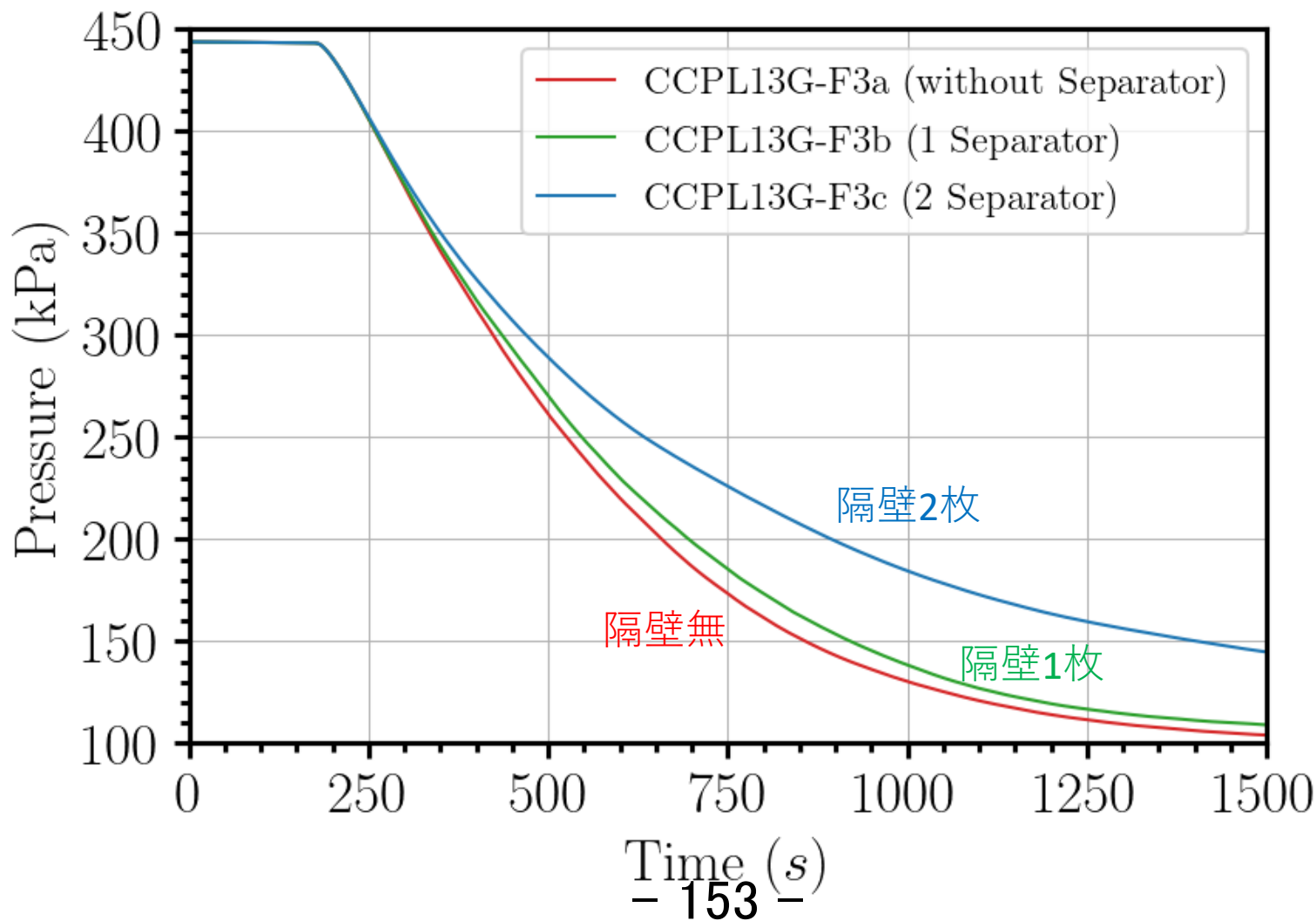
隔壁2枚



カラーコンター
赤：鉛直上昇
青：鉛直下降

- 冷却領域とその下部で自然循環が生じ、対向する双子渦が形成される。

- 中央部での凝縮により隔壁の穴を通じて上下から気体が供給される。
- 下部からの供給量が多い。



現地調査の実施状況

- ・ 5号機原子炉建屋
- ・ 4号機原子炉建屋

2023年4月24日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

(1) 5号機原子炉建屋 (2023年4月12日)

(1) 5号機原子炉建屋

(1) 目的

現在、東京電力にて調査中&事故分析検討会で議論中の1号機PCV内部調査にて確認されつつあるペデスタル内部の状況等に関して、1号機で調査等がされている箇所を(実機で確認可能な)5号機にて確認する。

(2) 場所 5号機原子炉建屋

(3) 調査日 2023年4月12日

(4) 調査実施者

外部有識者 3名(大阪大学 村田教授、佐藤教授、牟田教授)

原子力規制庁職員 3名

(5) 被ばく線量

最大: 0.06 mSv、最小: 0.04mSv

※被ばく線量[mSv]の最大、最小は、調査実施者のうち、最も被ばく線量の高い人の値と低い人の値を1日の合計値として示した。

5号機ペDESTALの確認状況

(CRD関連機器)



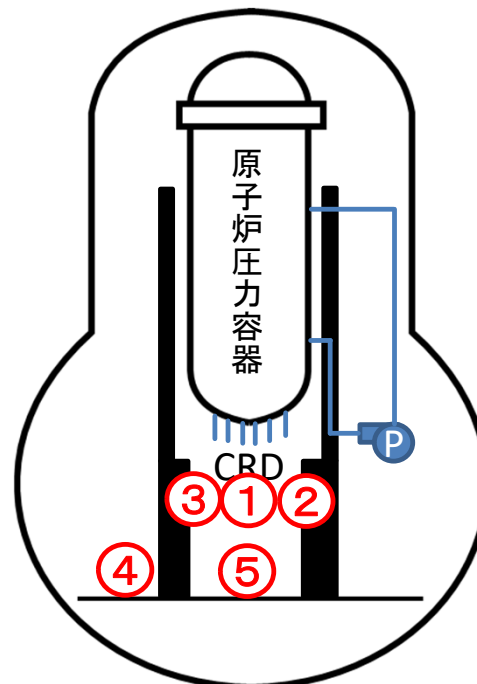
(RPV下部から見上げた様子)



(RPV下部から見上げた様子)



福島第一5号機



原子炉格納容器

写真は、いずれも2023年4月12日原子力規制庁撮影

(ペDESTAL入口付近)



(ペDESTAL内)



(2) 4号機原子炉建屋 (2023年4月12日)

(2) 4号機原子炉建屋

(1) 目的

東京電力福島第一原子力発電所事故における水素爆発による原子炉建屋への影響の理解に資するために、4号機原子炉建屋内の調査を行う。

(2) 場所

4号機原子炉建屋

(3) 調査日

2023年4月12日

(4) 調査実施者

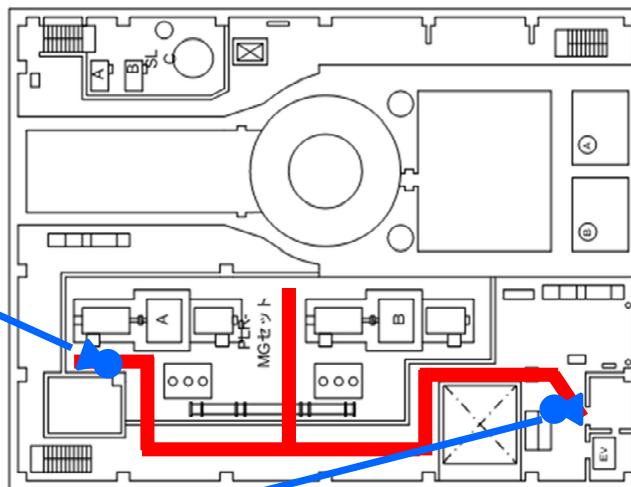
外部有識者 3名(大阪大学 村田教授、佐藤教授、牟田教授)
原子力規制庁職員 3名

(5) 被ばく線量

最大: 0.06 mSv、最小: 0.04mSv

※被ばく線量[mSv]の最大、最小は、調査実施者のうち、最も被ばく線量の高い人の値と低い人の値を1日の合計値として示した。

4号機原子炉建屋4階の確認状況

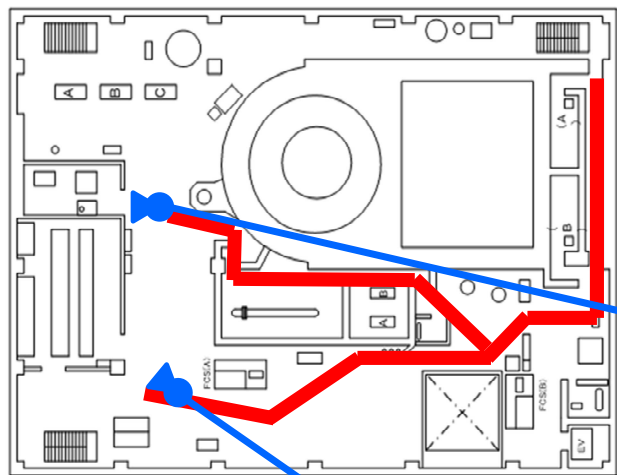


現地調査ルート
(令和5年4月12日)

写真は、いずれも2023年4月12日原子力規制庁撮影



4号機原子炉建屋3階の確認状況



現地調査ルート
(令和5年4月12日)



写真は、いずれも2023年4月12日原子力規制庁撮影

図は、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10回会合資料3より抜粋、一部加工