

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (1/9)

原子力規制委員会による東京電力福島第一原子力発電所事故の調査分析

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る背景

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故の後、原子力規制委員会だけでなく、国際原子力機関(IAEA)、米国原子力発電運転協会(INPO)、世界原子力発電事業者協会(WANO)、米国原子力規制委員会(USNRC)、フランス放射線防護・原子力安全研究所(IRSN)など海外の機関も含めて様々な調査が実施されてきた。

近年、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉作業が進捗し、原子炉建屋内部等へのアクセス性が向上したことから、施設の状態確認や試料採取などのさらなる調査が可能になった。

こうした状況を踏まえ、原子力規制委員会は2019年に追加的な調査・分析を開始した。

事故の経緯

2011年3月11日に発生した東京電力福島第一原子力発電所における事故は、日本政府の事故調査・検証委員会の最終報告書等でも記載されているとおり、以下のとおり進展した。

2011年3月11日14:46	地震発生
2011年3月11日15:37	津波襲来
2011年3月12日午後	1号機ベント
2011年3月12日15:36頃	1号機原子炉建屋水素爆発
2011年3月13日午前	3号機ベント
2011年3月14日11:01頃	3号機原子炉建屋水素爆発
2011年3月15日6:12頃	4号機原子炉建屋水素爆発

1～4号機原子炉建屋の損傷状況



- 1号機、3号機、4号機は水素爆発により原子炉建屋が損傷し、最上階が崩落。
- 1号機、2号機、3号機は炉心及び原子炉圧力容器が損傷し、原子炉格納容器からの漏えいが生じた。

事故分析の調査項目

原子力規制委員会の調査チームが実施した現地調査から得られた知見等について、以下のテーマごとに説明する。

セクションA: Cs-137による汚染の状況	Cs-137による高汚染が確認されたシールドプラグや格納容器(PCV)ベント配管等の調査・分析から、PCVからの放射性物質の漏えい、汚染経路を検討
セクションB: 原子炉建屋における水素爆発	水素爆発時の映像や建屋等の損傷状況から、爆燃(deflagration)による建屋損傷やPCV内での可燃性有機ガスの発生、水素挙動等を検討
セクションC: 1号機PCVペダスタルの損傷	PCVペダスタル周辺における配管やコンクリートの損傷状況や燃料デブリ等の堆積物の状況から、炉心溶融後の事象進展を検討

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (2/9)

セクションA: Cs-137による汚染の状況

調査の概要

調査チームは、セシウム-137 (Cs-137) の汚染状況を把握し、事故時の放射性物質の移行挙動を推定するため、シールドプラグ※1やSGTS※2配管の線量測定等の現地調査及び解析を実施した。

- ※1 格納容器の上部に遮蔽のために設置される3層のコンクリート板
- ※2 Standby Gas Treatment Systemの略で、原子炉建屋の空気を処理するための空調系統で、格納容器ベント配管が接続されている。

その結果、以下の点に関する知見が得られた。

- A-1: シールドプラグの隙間の汚染状況
- A-2: Cs-137の漏えい経路
- A-3: Cs-137の移行モデル

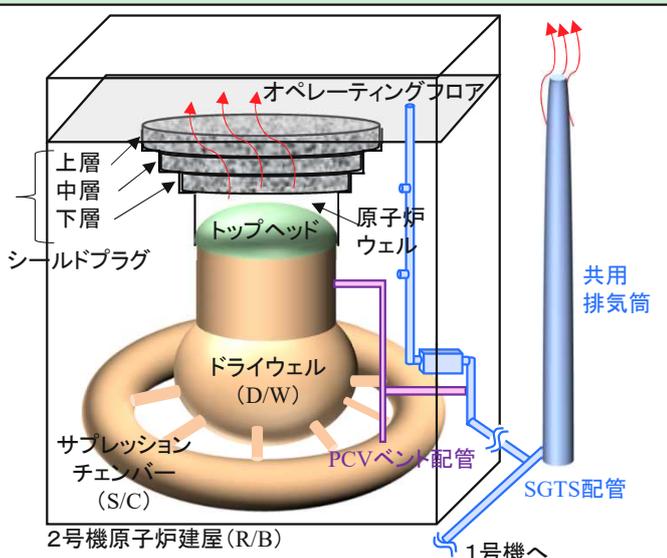
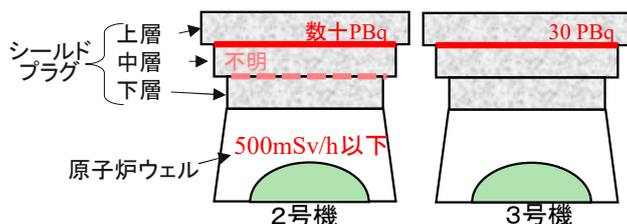


図 放射性物質の放出経路に関連する部位の名称

得られた知見

A-1: シールドプラグの隙間の汚染状況

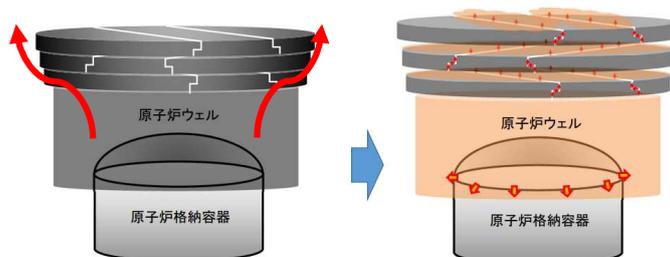
オペレーティングフロアや原子炉ウエルの線量率測定等の結果から、シールドプラグの隙間に線源が存在すると考えられた。東京電力の測定結果に基づいて調査チームが評価したところ、上層シールドプラグと中層シールドプラグの間に2号機では数十PBq、3号機では30PBq程度のCs-137が存在すると推定された。



図① 2号機及び3号機のシールドプラグ間の汚染状況の推定

A-2: Cs-137の漏えい経路

2号機シールドプラグ上面の線量率測定の結果、3分割されるシールドプラグの継ぎ目及び継ぎ目が交差する点において高線量が確認されたことから、従来考えられていたようなシールドプラグ外縁部ではなく、シールドプラグの継ぎ目がCs-137の主な漏えい経路となっている可能性が高いと考えられる。



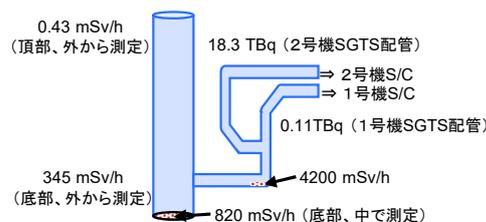
図② Cs-137の漏えい経路

A-3: Cs-137の移行モデル

SGTS配管の線量測定の結果、以下の状況が明らかになった。

- 共用排気筒底部の汚染の程度が高い
- ベントに成功した1号機SGTS配管よりも2号機の方が汚染の程度が高い

RELAPコードを用いた蒸気流動の再現解析においても、Cs-137の蒸気の流動に伴って移行し、蒸気が凝縮する際に汚染が蓄積されることが示唆された。



図③ 1、2号共用排気筒及びSGTSの汚染状況

考察及び今後の調査の方向性

シールドプラグやSGTS配管の汚染状況から、Cs-137が蒸気とともに移行し、凝縮によりCs-137が蓄積されたことが示唆される。発電所から放出された後のオフサイト側での線量上昇を調べるため、敷地外に設置されているモニタリングポスト等のデータ分析を実施しており、今後バックグラウンド線量の低い3月12日頃のデータやそれ以降のピーク時のデータを基に放射性核種の放出挙動分析を行う。

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (3/9)

セクションA: Cs-137による汚染の状況 (A-1: シールドプラグの隙間の汚染状況)

1号機シールドプラグの汚染状況の調査(その1)

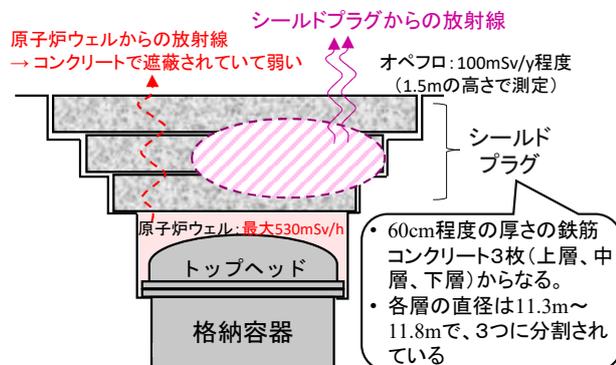
① シールドプラグ上の空間線量率に寄与する線源の特定

- ・オペレーティングフロアの除染作業後も、シールドプラグ上の空間線量率が低下せず、周囲の床面上よりも高いままであったこと(100mSv/h程度)(*1)
- ・原子炉ウエル内の空間線量率は最大でも530mSv/hであったこと(*2)
- ・シールドプラグ上の表面汚染密度は、周囲の床と同程度であったこと



以上から、シールドプラグの隙間に非常に強い線量があると推定される。

- *1 「2号機シールドプラグ高濃度汚染への対応状況について」(<https://www.nra.go.jp/data/000358693.pdf>)、2021年7月8日、東京電力
- *2 「2号機原子炉建屋オペフロ内残置物移動・片付後調査の結果について」(<https://www.nra.go.jp/data/000270450.pdf>) P.3、2019年5月20日、東京電力



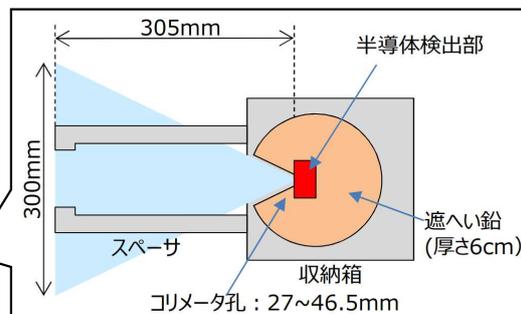
② シールドプラグの隙間の汚染量の推定

- ・2018年11月に東京電力が床から高さ1.5mの空間線量率を測定した結果、シールドプラグ上で、79～148mSv/hであった(*2)。その値をもとに、ガンマ線の計算コード(*3)を用いて評価した結果、上層シールドプラグと中層シールドプラグの隙間に約70PBqのCs-137が存在すると推定された。
- ・さらに東京電力が床から高さ30.5cmで鉛コリメータ付き検出器(右図)で測定した結果に基づいて評価した結果でも、20～40PBq以上と推定された。



以上から、上層シールドプラグと中層シールドプラグの間に数十PBqのCs-137が存在していると考えられる。

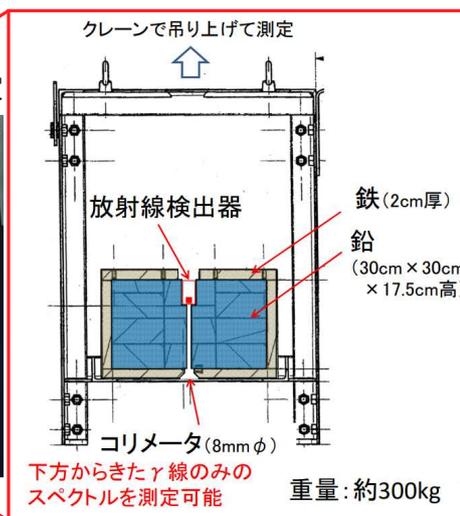
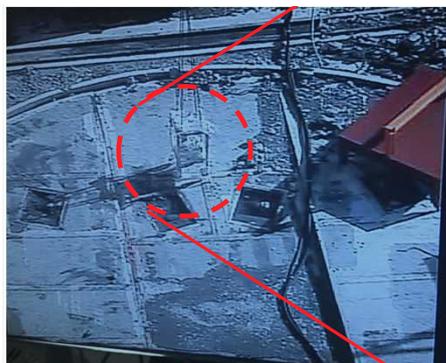
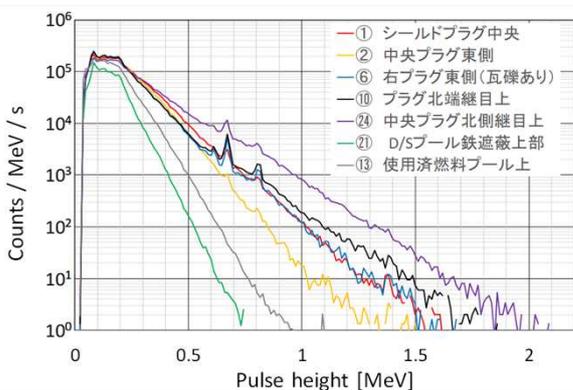
- *3 電磁カスケードモンテカルロコードegs5



3号機シールドプラグの汚染状況の調査

測定手法

クレーンでつるしたコリメータ付きスペクトル測定器により3号機シールドプラグ上を測定



結果

3号機シールドプラグは表面を厚さ5mm程度を削り取っており、表面汚染はほぼ考えられないため、十分なコリメータを設けた本測定で見られる全吸収ピークは、シールドプラグ下部からの透過線と考えざるを得ない。これに基づいてシールドプラグ下面のCs-137の汚染密度を推定すると、平均 2.7×10^{10} Bq/cm²が得られた。これは全面にCs-137が一様に分布していると仮定すると31 PBqに相当する。

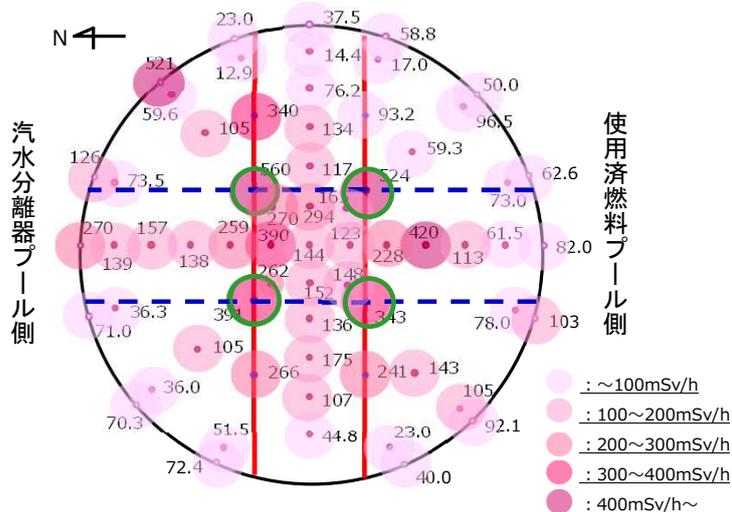
東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (4/9)

セクションA: Cs-137による汚染の状況 (A-2: Cs-137の漏えい経路)

2号機シールドプラグの汚染状況の調査(その2)

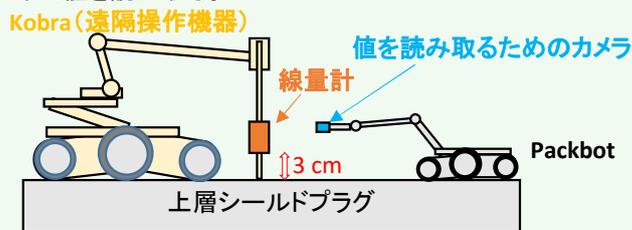
2021年10月に東京電力及び規制委員会は2号機シールドプラグ上の線量率を測定し、下左図の結果が得られた。

シールドプラグ上の64測定点の空間線量率(mSv/h)



測定手法

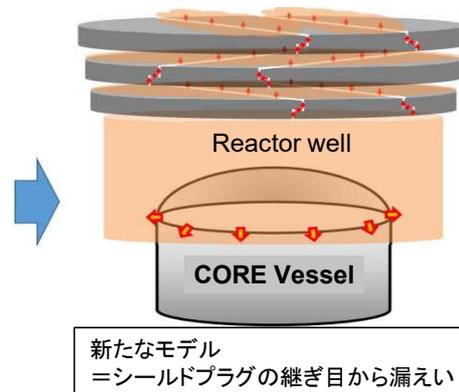
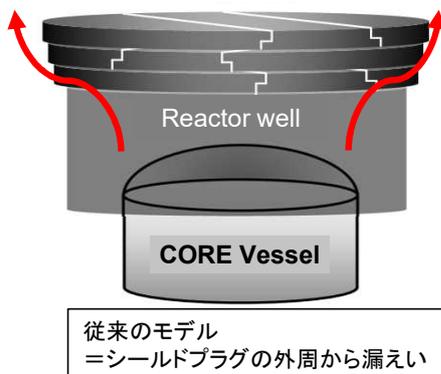
遠隔操作機器を用いて、シールドプラグの上面3cmの高さの線量計をカメラで値を読み取る。



左図の出典: 第23回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会資料5-1「2号機オベフロ内シールドプラグ穿孔部調査について」P.3、東京電力、<https://www.nra.go.jp/data/000367850.pdf>
 ※規制委員会が図中に測定値、分割線及び交点を追記

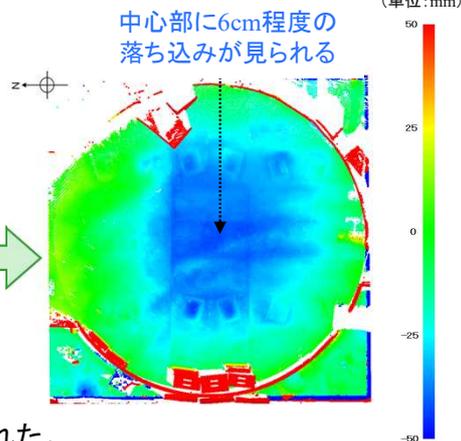
赤実線: 上層シールドプラグの分割線
 青点線: 中層シールドプラグの分割線
 緑丸: シールドプラグの継ぎ目の交わる箇所

➤ シールドプラグの分割線(赤線)上及び分割線の交わる箇所(緑丸)の線量率が円周部に比べて高いことから、従来想定されていたシールドプラグ外周ではなく、シールドプラグの継ぎ目がCs-137の漏えい経路となっていることが示唆される。



2号機シールドプラグの形状に関する調査

2021年12月、規制委員会はシールドプラグにおける漏えい経路の調査のため、3Dレーザースキャナ(FARO社製)を用いてシールドプラグの形状を測定した結果、シールドプラグの中央に最大6cm程度の落ち込みがあることが判明した。



➤ この変形によりシールドプラグの分割線がCsの漏えい経路となりうることが示された。

左写真及び右測定結果の出典: 第28回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会資料2-1-3「2号機シールドプラグの変形」P.4、7、原子力規制委員会、<https://www.nra.go.jp/data/000382268.pdf>

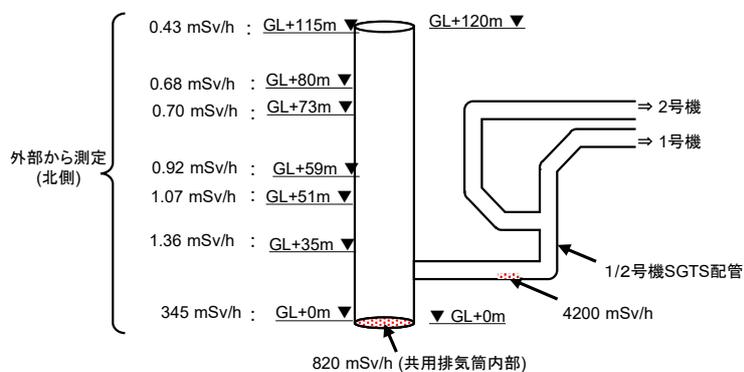
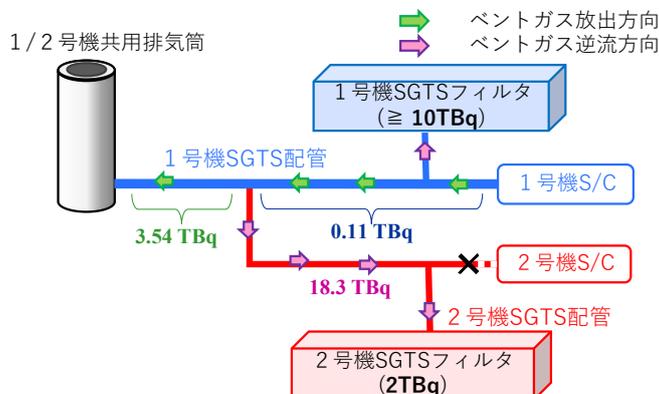
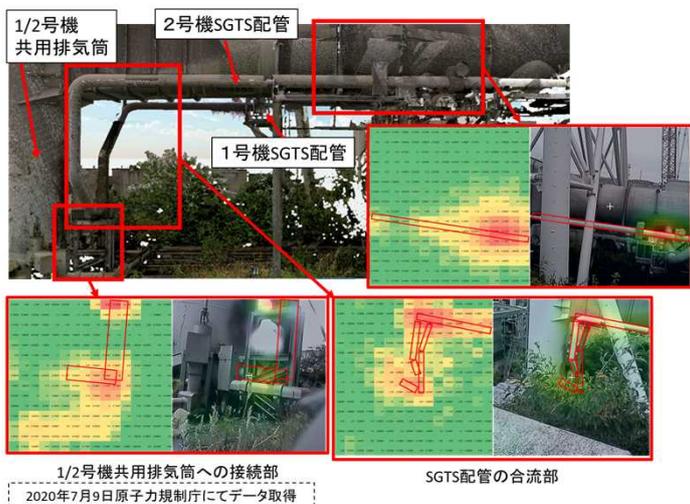
東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (5/9)

セクションA: Cs-137による汚染の状況 (A-3: Cs-137の移行モデル)

1, 2号機SGTS配管の汚染状況調査

調査チームは、PCVベントに使われた1～4号機SGTS配管の線量測定及びガンマカメラ測定を行い、汚染状況を整理した。

- ① PCVベントに成功していない2号機SGTS配管の方が、PCVベントに成功した1号機SGTS配管よりも汚染程度が高い。
- ② 1号機SGTSフィルタトレインは、2号機SGTSフィルタトレインよりも汚染の程度が高い。
- ③ 1/2号機共用排気筒の汚染状況については、当該排気筒の底部の汚染の程度が高い。

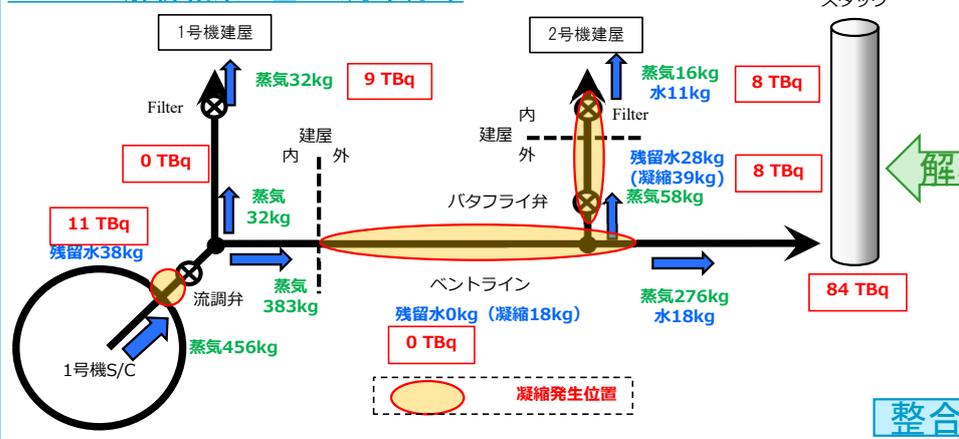


左写真の出典: 第13回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会資料3
 「現地調査の実施状況について」P.40、原子力規制委員会、<https://www.nra.go.jp/data/000325407.pdf>

1, 2号機SGTS配管内汚染の分析

PCVベントを行った1号機よりもPCVベントを行っていない2号機の方が高汚染となった原因について、熱流動システム解析コードRELAP5による再現解析を行い、SGTS配管の汚染の分析を行った。

RELAP5解析結果に基づく汚染分布



評価上の仮定

- S/Cから流出する蒸気のトータル質量456 kgを130 TBqと仮定する
- 1,2号機建屋の出口境界に到達した分はフィルタに残留と仮定する

現地調査で得られた実際の高汚染箇所



- 1号機及び2号機SGTS配管系のグラビティダンパで逆流が発生し、2号機原子炉建屋へ1号機PCVベントガスが逆流した。
- 配管内で生じた蒸気凝縮が汚染の支配的因子と示唆された。
- 凝縮水の残留位置と、現地調査で得られた実際の高汚染箇所はおおむね一致した。

図の出典: 第32回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会資料3
 「1,2号機SGTS配管内汚染の分布」P.13, 14を加工、原子力規制委員会、<https://www.nra.go.jp/data/000408673.pdf>

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (6/9)

セクションB: 原子炉建屋における水素爆発

調査の概要

原子炉建屋における水素爆発事象の挙動及び可燃性ガスの関与に係る知見を得るため、以下の調査等を実施した。

- B-1: 映像解析による爆発事象の調査
- B-2: 建屋内の損傷状況調査
- B-3: 可燃性有機化合物に関するケーブル加熱試験

調査B-1 映像解析による爆発事象の調査

原子炉建屋における水素爆発の挙動を検討するため、福島中央テレビ、日本テレビ放送の協力のもと映像解析を実施した。

1号機及び3号機の水素爆発の映像の比較(①)



3号機原子炉建屋の水素爆発の映像のコマ送り(②)



- ①から、3号機は1号機と異なり、噴煙と破片が同時に上方まで一緒に吹き上げられている様子が観察される。また、②から、3号機は比較的長時間燃焼が継続していることが観察される。したがって3号機は、建屋の破片が初期の爆発エネルギーだけで吹き上げられたとは考えづらい。
- ②の写真から、発生している火炎は黄橙色であり、燃焼の後半は大量のすすを伴った噴煙となることから、燃焼ガス中に有機化合物が含まれている可能性が高いと考えられる。



3号機原子炉建屋の黒煙等の上昇は、爆発の衝撃ではなく、**可燃性ガスの燃焼に伴う上昇気流**の可能性が示唆される。

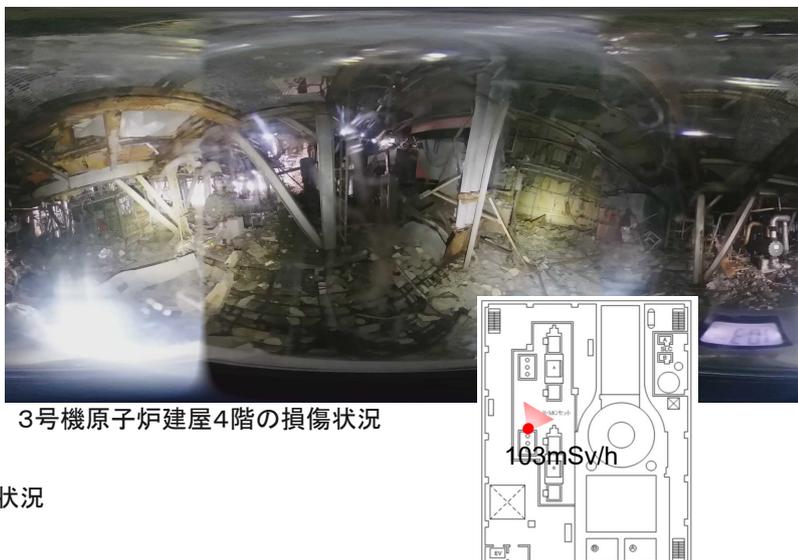
※本ポスター写真は、福島中央テレビにより撮影された映像から作成されたものである。写真の出典:「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ～2019年9月から2021年3月までの検討～」P.198, 212, 213、原子力規制委員会、<https://www.nra.go.jp/data/000345595.pdf>

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (7/9)

セクションB: 原子炉建屋における水素爆発

調査B-2 建屋内の損傷状況調査

2020年9月18日、規制委員会は、3号機原子炉建屋3階、4階の損傷状況に関する調査を実施した。



左図: 第14回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会資料3「現地調査の実施状況について」JP.23、<https://www.nra.go.jp/data/000331513.pdf>
 右図: 【映像資料】東京電力福島第一原子力発電所における3号機原子炉建屋内調査映像(2020年9月18日撮影) 6:15付近、<https://www.youtube.com/watch?v=2ogtUCOnQDg>

- 事故時の爆発は必ずしも爆轟現象とは言えず、爆燃現象でも、原子炉建屋を破損させる十分なエネルギーを有していたと考えられる。
- 3号機原子炉建屋3階の天井梁のうちいくつかは損傷していることを確認した。このことから、爆発事象はオペレーティングフロア(原子炉建屋5階)のみならず、4階でも生じていると考えられる。

規制対応

規制委員会は、原子炉格納容器ベントの目的として原子炉建屋の水素防護を追加した。
 (2022年9月14日第38回原子力規制委員会)

調査B-3 可燃性有機化合物に関するケーブル加熱試験

可燃性ガス(水素及び有機ガス)による爆燃(deflagration)の検討のため、JAEAにおいて、格納容器内で使用されているケーブルや保温材等(右表)の加熱試験を実施した。

分析装置: (1)熱重量測定(TG)-質量分析(MS)
 (2)熱分解ガスクロマト(GC)-質量分析(MS)
 環境条件: 窒素雰囲気
 測定範囲: 室温～1200℃
 昇温速度: 10℃/min

高温条件における有機材料の熱分解生成ガスの発生を確認した。

- H₂O及びCO₂を検出
- 400℃～500℃の温度でケーブル等の添加剤となるトルエンなどを確認

- 高温により、格納容器内のケーブル等の有機材料が熱分解生成ガスとして発生し、爆発の際に一定量存在していたと考えられる。今後、加熱試験の環境条件として、酸素及び水蒸気の影響を検討する予定。

試料	仕様等	写真	断面図	用途
PNケーブル(絶縁体)	難燃性エチレンプロピレンゴム			RPV下部制御・計装ケーブル(140m)
PNケーブル(シース)	特殊クロロプレンゴム			高圧動力用ケーブル
CVケーブル(絶縁体)	架橋ポリエチレン			高圧動力用ケーブル
CVケーブル(シース)	難燃性特殊耐熱ビニル			高圧動力用ケーブル
保温材	ウレタン			CCW系統保温材(8m ³ , 320kg)

今後の調査の方向性

水素爆発は、その後のアクシデントマネジメント策を困難にするなど事故進展に大きな影響を与えるが、爆燃(deflagration)の発生やそのエネルギー、原子炉建屋内への水素の漏えいと滞留、可燃性有機ガスの影響など、水素挙動については不明点が多い。これらの解明は原子力施設の安全性向上に繋がるものであり、水素燃焼試験等の水素挙動に係る試験、解析をとおして、知見拡充を進める。

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (8/9)

セクションC: 1号機PCVペDESTALの損傷

調査の概要

東京電力は、2022年2月以降、1号機PCVの内部調査を実施している。調査では、1号機PCVの西側のX-2ペネトレーションから水中ROVを投入して反時計回りに遊泳させ、180°周回した地点のペDESTAL開口部付近等の映像を撮影した*。

*実際に調査で得られた映像は、東京電力HPに掲載されている。

2月調査分: https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=k593g02e

3月調査分: https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=s19dq021

5月調査分: https://www.tepco.co.jp/library/movie/detail-j.html?catid=107299&video_uuid=og07od6u

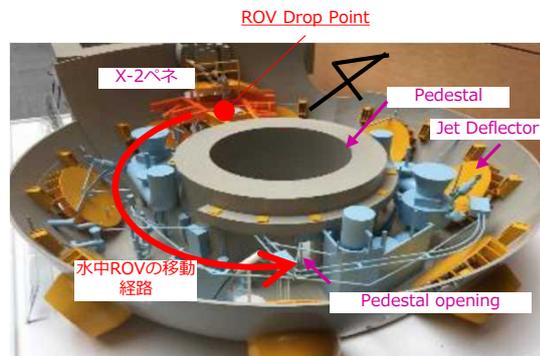
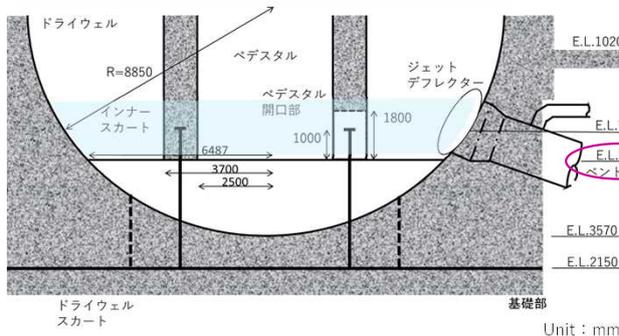
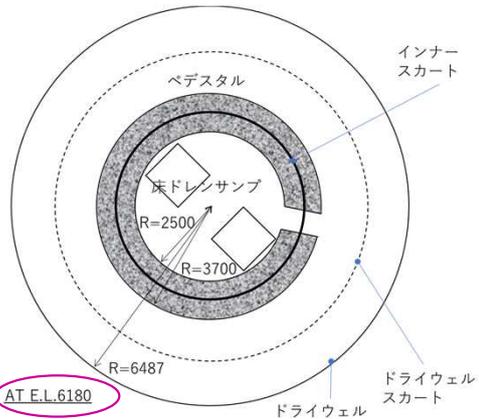
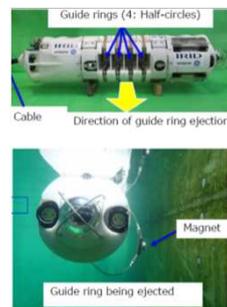
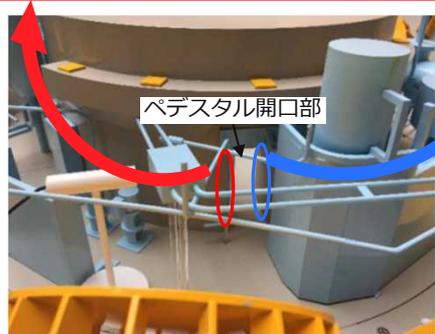


図1 PCVペDESTALの模型
 Provision of reference: IRID & Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.



ペDESTALのコンクリート損傷部

- ① ペDESTAL開口部の両側ではコンクリート部が消失している。鉄筋は損傷を受けていないように見える。
- ② ペDESTALのコンクリート部はテーブル状堆積物より下側で消失している。
- ③ ペDESTAL周辺の種々の配管は大きな損傷を受けていない。
- ④ シート状の鉛遮蔽へいは一定の高さで溶融している。



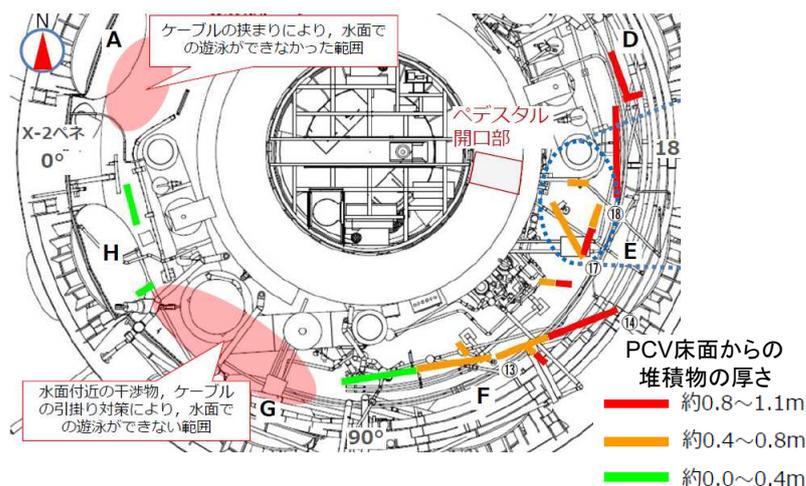
写真の出典: 第30回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会補足説明資料1「1号機PCV内部調査の状況について」IRID/東京電力、<https://www.nra.go.jp/data/000395885.pdf>

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析 (9/9)

セクションC: 1号機PCVペDESTALの損傷

MCCIクラスト

- ⑤ テーブル状の堆積物(クラスト)はペDESTAL開口部から反対側に向けて分布している。
- ⑥ テーブル状の堆積物はペDESTAL開口部付近が高く(約1.2m)、反対側が低く(約0.3m)なっている。
- ⑦ テーブル状の堆積物の下側(表面)は滑らかに見える。
- ⑧ テーブル状の堆積物は小さい泡を含んでおり、3cmの厚さと推定されている。



左図: 第31回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会資料1-1
「1号機PCV内部調査の状況について」P.5、IRID/東京電力、<https://www.nra.go.jp/data/000403164.pdf>
写真の出典: 第30回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会補足説明資料1
「1号機PCV内部調査の状況について」IRID/東京電力、<https://www.nra.go.jp/data/000395885.pdf>

PCV内及び外周部付近の状況

- ⑨ ペDESTAL開口部付近に燃料デブリの小山状の堆積物が確認される。(ただし明瞭なものではない。)
- ⑩ テーブル状のものがまくれあがったような形状の堆積物がペDESTAL開口部の天井より下に存在する。(厚さは不明)
- ⑪ 膨らみのある形状のものがPCV床面のデブリ又は堆積物の表面に確認される。
- ⑫ PCVの外壁に損傷は確認されていない。
- ⑬ PCV床面の正確な状況は不明である。

写真の出典: 第30回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会補足説明資料1
「1号機PCV内部調査の状況について」IRID/東京電力、<https://www.nra.go.jp/data/000395885.pdf>



主な検討課題

1. なぜ原子炉圧力容器(RPV)から落下した燃料デブリが拡がっていないのか。
2. どのようにしてペDESTAL壁面に沿ってコンクリート部が損傷したのか。
3. 1号機PCV内ではいくつかの形状の堆積物(クラスト)が確認されているが、これらの堆積物はどのように形成されたのか。

今後の調査の方向性

本調査の知見は、溶融した炉心の温度、性状等の推定に資する情報である。今後東京電力が実施する追加の調査結果等も踏まえ、ペDESTALの損傷メカニズム、溶融炉心の挙動、従来の炉心溶融事象進展モデルとの整合性等について調査・分析を進める予定。