

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 (2024年版)

2024年6月11日

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

2024年9月2日 原子力学会安全部会夏期セミナー

検討対象

東京電力福島第一原子力発電所事故に関して、これまでに十分に知見が得られていない事項を網羅的に検討。



- これまでの中間取りまとめに盛り込んだ内容の一部に対して、さらなる検討を加えた。
- 現場アクセスの可能性や廃炉作業の進展等により追加的に実施できる調査・分析の内容を基に、事故時の事象進展や状況の詳細な検討が可能な範囲を検討に加えた。

検討体制及び実施方法

- 現地調査
- 東京電力からの情報提供
- メーカー等の関係者からの情報提供
- 大学・研究機関等による技術支援

「事故分析検討会」で議論

「福島第一原子力発電所廃炉・事故調査に係る連絡・調整会議」による廃炉作業との調整

- 廃炉作業との干渉・重複等による支障や非効率性を避けるため、作業の内容、手順、スケジュール等に係る情報共有及び調整を実施
- 資源エネルギー庁、原子力損害賠償・廃炉等支援機構、東京電力、原子力規制庁が参加

中間取りまとめ構成

第一章 放射性物質の格納容器外漏えい関連の知見

- 第一節 1号機原子炉補機冷却系統(RCW)で確認された高線量率からの知見
- 第二節 事故初期における原子炉建屋内での高線量率
- 第三節 事故初期における原子炉建屋外での高線量率
- 第四節 2号機原子炉キャビティ差圧調整ラインのバルブ状態

第二章 1号機原子炉格納容器ペDESTALで確認されたコンクリート損傷

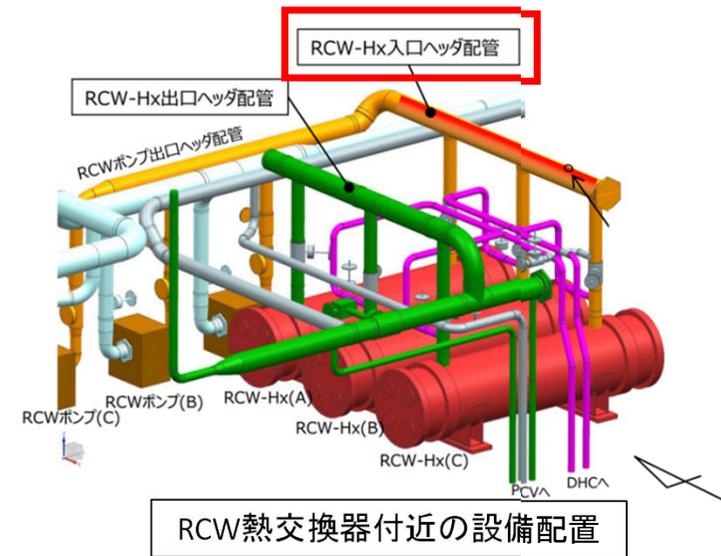
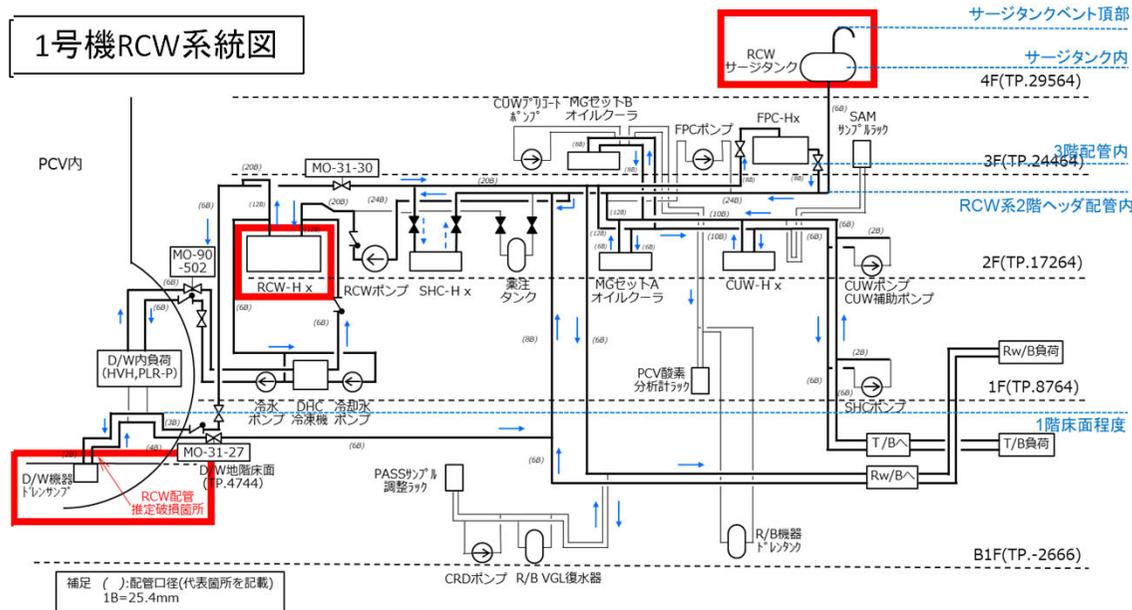
第三章 水素爆発事象の解明

第四章 その他の調査項目

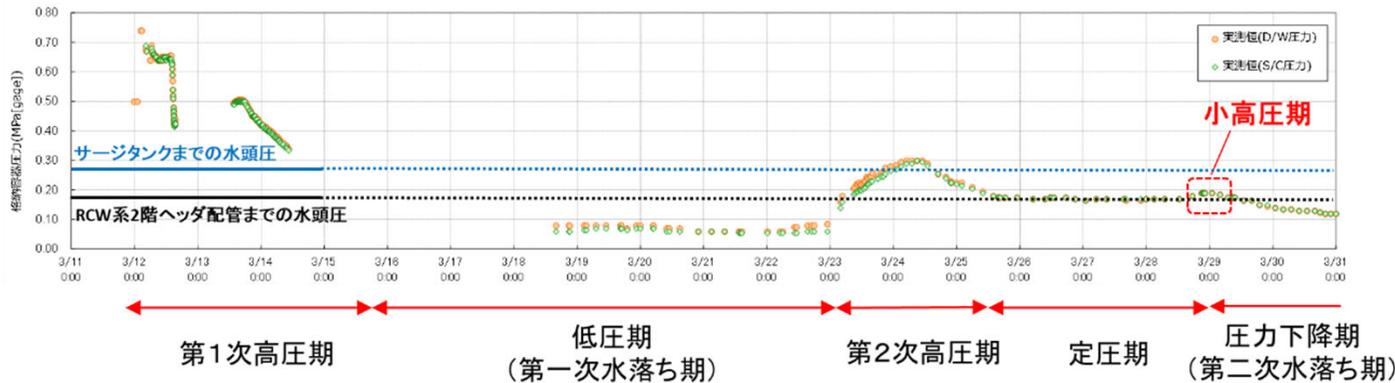
- 第一節 2号機X-6ペネで確認された堆積物
- 第二節 1/2号機SGTS配管の切断による配管内の汚染分布の測定
- 第三節 その他の活動状況

第一章第一節 1号機原子炉補機冷却系統で確認された高線量率からの知見(1)

- ✓ 1号機原子炉補機冷却系(RCW)の設備(特にRCW熱交換器、RCWサージタンク)が高放射線量率となっている要因として、当初は、**格納容器に落下した溶融炉心によりRCW配管が損傷し、その開口部から高濃度の放射性物質がRCW配管→RCWサージタンク→RCW熱交換器に移動した**と考えられていた。
- ✓ その後、RCW熱交換器内の水の組成、RCW熱交換器入口ヘッダ配管内の気相の組成、RCW各設備の最新の汚染状況、格納容器内圧力推移等により、**当初、考えられていた放射性物質の移動ルートでは説明が困難**になったため、RCWの高放射線量率の発生メカニズムを検討した。



1号機原子炉格納容器圧力の推移

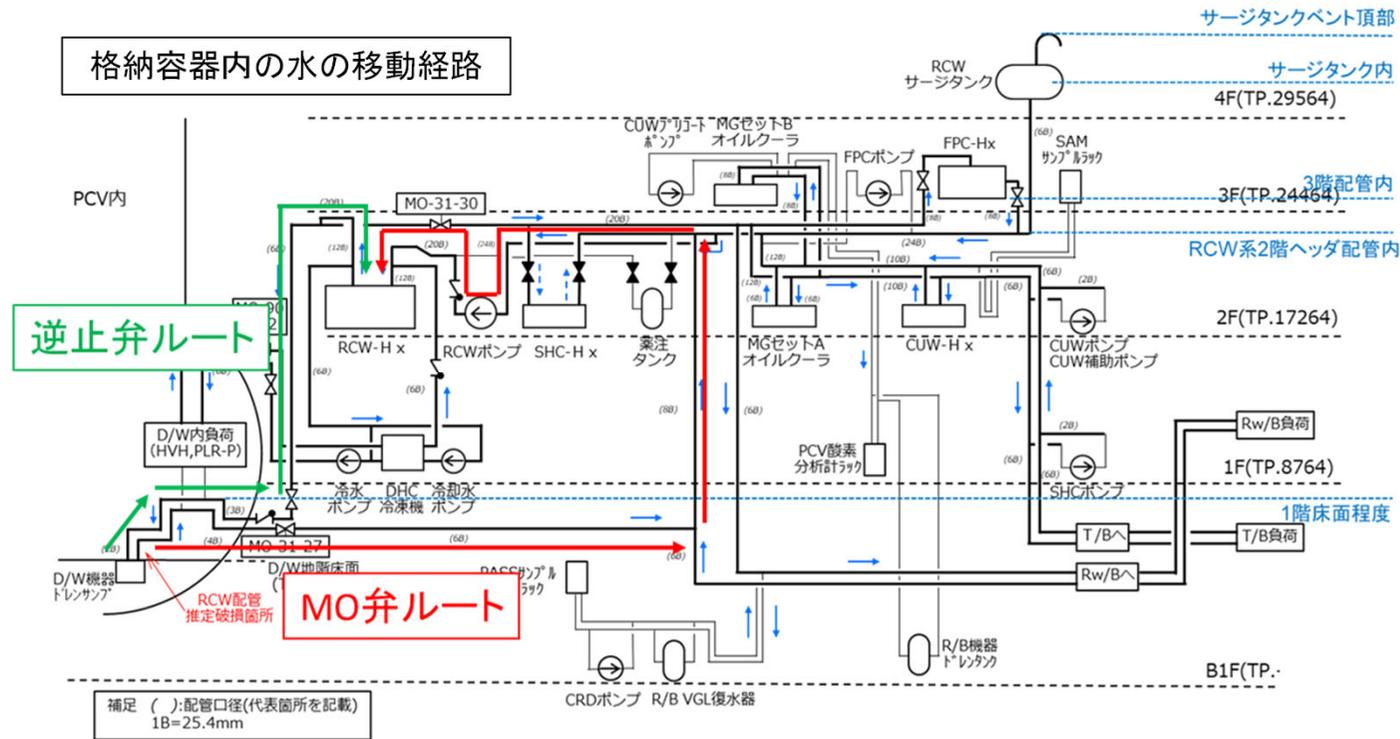


第一章第一節 1号機原子炉補機冷却系統で確認された高線量率からの知見(2)

- RCWサージタンクの汚染は、格納容器内の放射性物質を含む**気体がRCW配管を経由してRCWサージタンクに入り込んだ**と考えられる。
- RCW熱交換器入口ヘッダ配管内の気相は、「水落ち※」に伴い、**RCWサージタンク経由でRCW熱交換器付近の配管内に大気が引き込まれて形成**され、RCW熱交換器内の**水の放射線分解による水素と酸素で希釈されたものが**、主な組成となっている。

※水落ち: 格納容器圧力が下がることによりRCW配管内の水が格納容器に引き戻される現象

- RCW熱交換器内の水に高放射線量率をもたらしたルートとして、**MO弁経由ルートと逆止弁経由ルートのどちらか一方のルートに特定することは困難である。また、両ルートが時間経過の中で生じた可能性も考えられる。**



- RCW配管が格納容器外への放射性物質等の放出経路となり得る
- 逆止弁経由での水落ち現象がRCW熱交換器の高線量率の発生に重要な役割を果たしている
- RCW配管の損傷箇所はペDESTAL内側だけでなくペDESTAL外側にも存在する可能性が高い



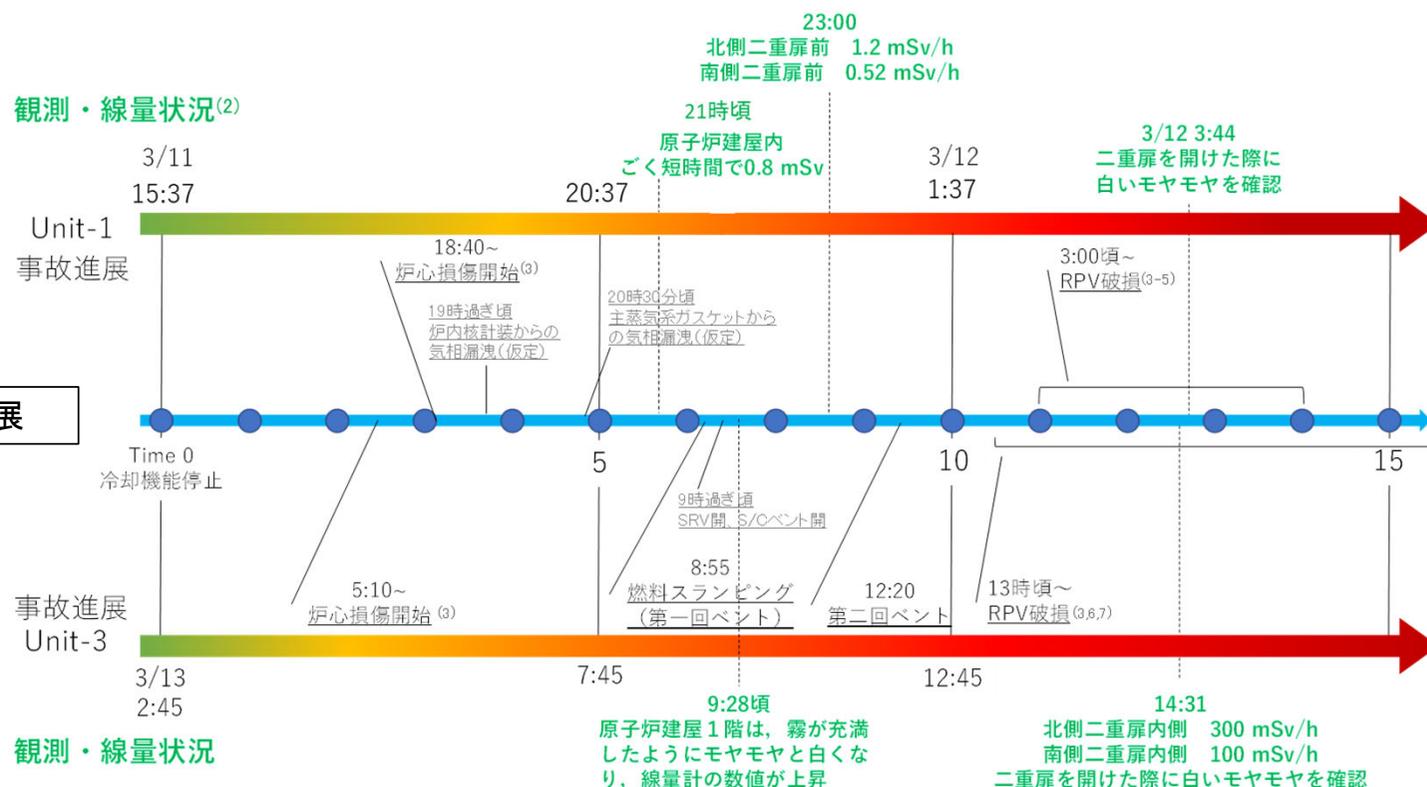
原子力規制委員会へのフィードバック

- シビアアクシデント時の格納容器隔離機能に関する問題であるとの認識の下、隔離弁の規制上の取り扱い等について検討が進められている

第一章第二節 事故初期における原子炉建屋内での高線量率

- 事故初期における原子炉建屋内の放射線量率のデータがある1号機及び3号機について、**冷却機能の喪失、炉心損傷、原子炉建屋内での高線量率の確認のタイミングに類似性がある**ことを提示。
- 原因を問わず**設計漏えい率程度の漏えいが生じた場合、炉心損傷後数時間で原子炉建屋内は1号機及び3号機で観測された放射線量率(300 mSv/h程度)に十分到達しうるとの解析結果を確認。**
- 原子炉建屋の空調システム(SGTS)が失われている場合、**炉心損傷後2時間程度で原子炉建屋内は作業員などが侵入することが非常に困難な放射線レベル(300 mSv/h程度)に至る**ことを確認。

福島第一原子力発電所1号機及び3号機の事象進展



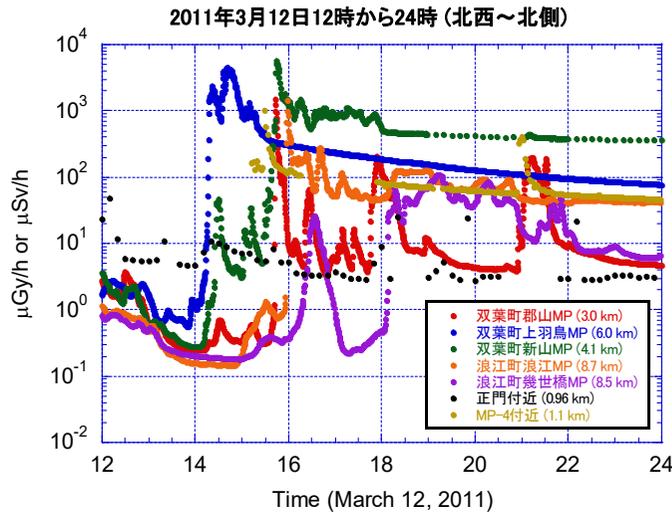
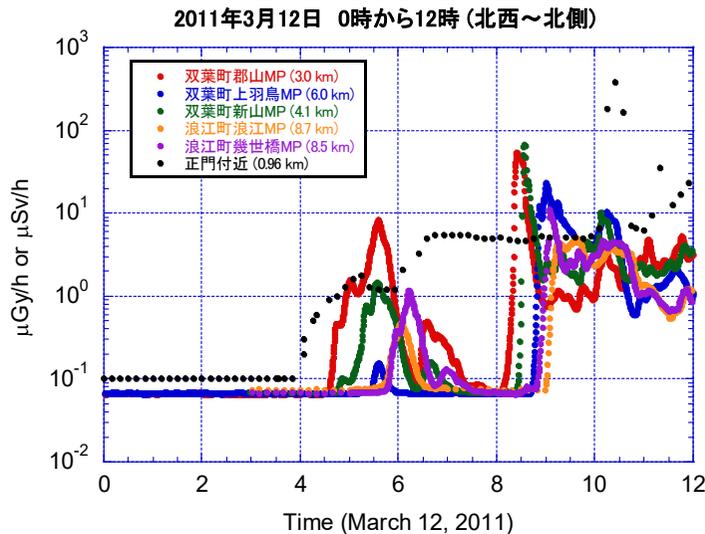
シビアアクシデント発生時に向けての教訓

- シビアアクシデント時の措置の指揮者等は、設計基準を超えた状況に原子炉が陥った際に、どのような時間的尺度で事態が推移するかを承知しておくことが重要。
- 運転員・作業員の安全と原子炉施設の重大事故回避とのバランスをどうすべきか、平時から十分な議論をしておくことが必要。
- 炉心損傷後の原子炉建屋の高線量率にヨウ素が大きく寄与するのであれば、ヨウ素による被ばく対策を平時から準備しておくことが必要。
- 炉心損傷が生じた場合、2時間程度で原子炉建屋への侵入は非常に困難になるとの知見の下に行動を計画することが必要。
- 炉心損傷後のSA対策は、原子炉建屋への侵入を極力要しないように準備することが必要。

第一章第三節 事故初期における原子炉建屋外での高線量率

- 1F事故時の1F敷地内外のモニタリングポスト(MP)等のデータを可能な限り収集し、これらを基に2011年3月12日のMP等の記録の分析を実施。
- ↓
- 3月12日5:00頃及び10:00頃に1F敷地外の一部のMPにピークが検出されており、これらの時間帯に原子炉建屋から外部への放射性物質の漏えいが一時的に生じた、または、増大したことによるものと考えられる。
 - 1号機ベントによると思われるピークにはプルーム通過後の放射線量率上昇が確認され、1号機ベントによる汚染は1Fの北から北西の方向に広がった。
 - 水素爆発時までの1F敷地内の放射線量率測定結果をもたらしていた放射性物質の多くは、1F敷地内に残った。ヨウ素などは、1号機水素爆発時点までに原子炉建屋内側に定着し、爆発後もその大半が1F敷地内に降下または残存したと推測される。
 - 1号機ベントによって放出されたセシウムやヨウ素の放射性物質の量は、3号機ベントによって放出された放射性物質の量よりもオーダーベースで多かったと考えられる。この結果、「福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気への放出量の推定について」(平成24年5月、東京電力)の1号機ベントに関連する放出量は過少評価である可能性が高いと考えられる。

2011年3月12日に1F敷地内外のMP等で観測された線量率



これらのMP等の分析を通じて、以下の事項が再確認された。

SA時の対応のために、発電所内のMPについては、

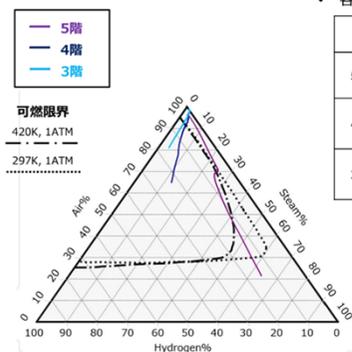
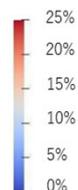
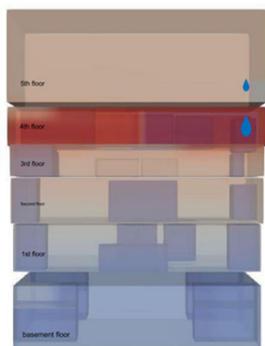
- プルームは短時間で通過するため、そのプルームの動きを捉えることができる記録間隔の情報が有用であること。
- FPの放出タイミング、場所、核種の情報而建屋等の近傍で得ることで、発電所内でのSA時の作業計画や線量管理等をより実効的に実施可能であること。
- 今後の展開として、ベント位置から比較的近いMPに飛来するプルームの挙動を把握するために、**詳細な大気拡散解析**を実施を検討中

第三章 水素爆発事象の解明

- ✓ 中間取りまとめ(2021年版)で、3号機の水素爆発について超解像処理された映像を用いた検討の結果、多段階事象説を提案した。
- ✓ その後、追加的な調査・検討を実施してきた。

原子炉建屋内の水素挙動

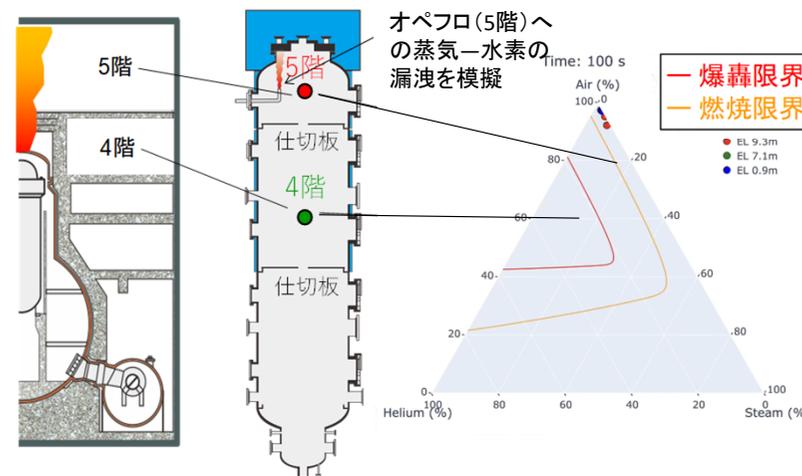
- ✓ 東京電力等によるシミュレーションにより、原子炉建屋オペフロに水蒸気とともに放出された水素が原子炉建屋4階で爆燃条件に到達するのに対し、オペフロでは水蒸気の存在により爆発条件に至らない状態が続くことが十分にあり得ることが確認された。
- ✓ JAEAのCIGMA装置を用いた実験によって、水素と同時に水蒸気が格納容器から原子炉建屋に放出される際には、放出された空間そのものよりも水蒸気凝縮が生じやすい隣接空間で先に水素爆発が発生しうる可能性が高くなることを確認することができた。



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

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

TEPSYSによるGOTHIC 解析結果



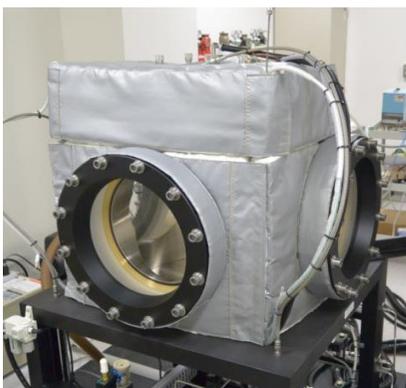
原子炉建屋の階層構造を CIGMA装置で模擬 気体組成の時間変化: 緑で示す4階の濃度履歴は可燃領域(黄色)に長時間滞在

JAEA CIGMA実験

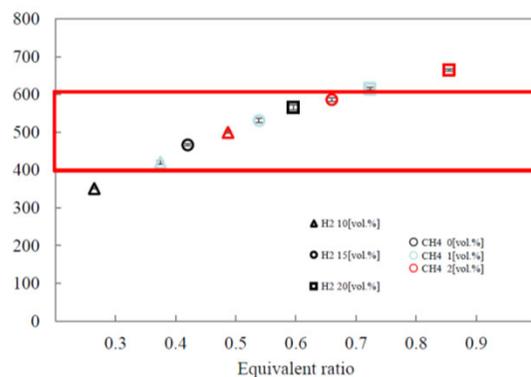
第三章 水素爆発事象の解明

水素爆発時に生じる圧力

- 中間取りまとめ(2021年版)では、簡易計算によって、原子炉建屋4階空間における爆燃現象によって、3階天井部の梁折損が生じる可能性とその際の圧力条件を提示した。
- 今回、この計算結果を実験的に確認することに取り組み、水素濃度が10%程度以上になれば、爆燃現象で梁折損に必要な圧力とその継続時間が実際に生じることが確認された。



実験装置(燃焼容器)



実験結果(燃焼容器内の最大圧力)

可燃性有機ガスを生じさせる可能性のある物質

- 3号機の水素爆発時に見られた黄橙色の火炎色の原因について検討。
- 原子炉建屋天井部に敷設されているアスファルト防水材が可燃性有機物の供給源として有望であると考えられる。



- ①火炎(黄橙色)、建屋南壁の崩落、東南角への噴出に大きな変化なし
- ②建屋屋根中央部の上方への膨張開始が明確ではないが火炎も合わせ確認

第二章 1号機原子炉格納容器ペDESTALで確認されたコンクリート損傷

1号機ペDESTAL下部の状況

- ✓ 2023年3月以降の東京電力による調査により、ペDESTAL内側の壁の下部のコンクリートが全周にわたって破損している状況等が確認された。



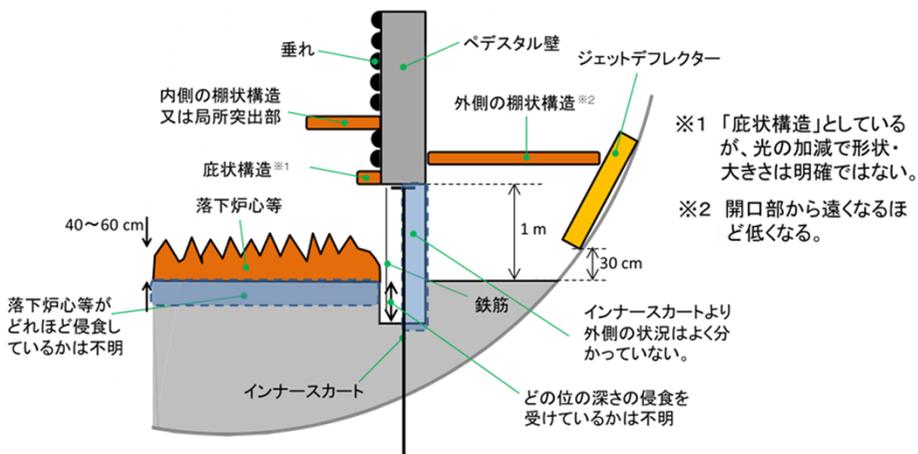
出典: 第39回事故分析検討会資料1

ペDESTALの安全性との関係

- ✓ ペDESTAL内側下部のコンクリートが全周にわたって損傷していることが確認されているが、ペDESTAL外側の破損範囲を現時点で知ることはできず、残存しているコンクリートが元来の強度を有している確証はない。
- ✓ これらのことなどから、原子力規制委員会は東京電力に対して「ペDESTALの機能が喪失した場合における格納容器等の構造上の影響」等について検討するよう求めた。
- ✓ 原子力規制委員会は、東京電力による仮定に基づく評価の妥当性を判断することは困難と判断した一方、ペDESTALの損傷により圧力容器等が一体となって転倒し原子炉建屋へ衝突するという極端な仮定のもとでも、原子炉建屋全体として構造健全性は十分に維持されることを確認した。

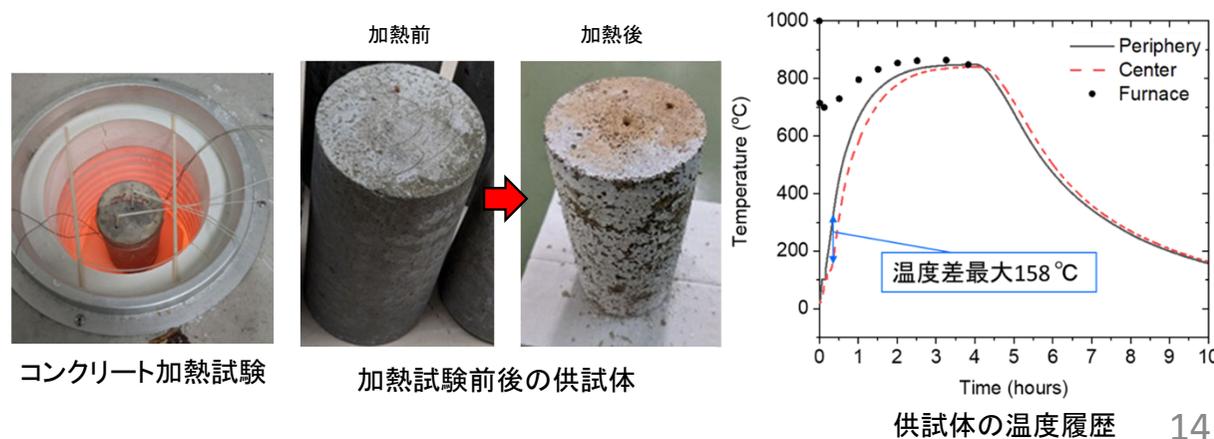
コンクリート損傷要因(推定)

- ✓ コンクリート損傷の要因として、コンクリート破損部がインナースカート高さ(床面から高さ1m)に一致していることなどから、インナースカートが寄与している可能性を示した。



コンクリート加熱試験の実施状況

- ✓ コンクリート損傷の要因の解明のために引き続き情報を収集するとともに、福島高専及び大阪大学の協力の下に実施した「模擬コンクリート供試体」を用いたコンクリート加熱試験結果も踏まえて、事象解明に係る検討を継続する。

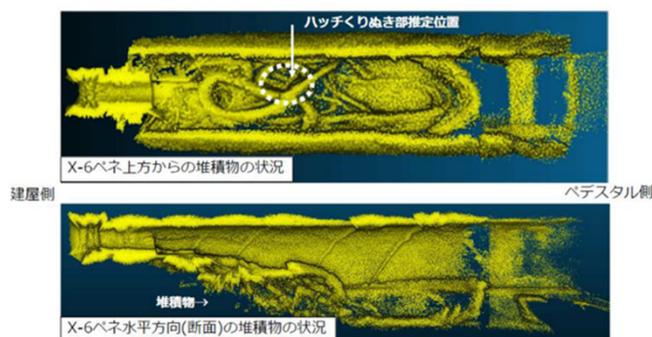


供試体の温度履歴 14

第四章 その他の調査項目

2号機X-6ペネで確認された堆積物

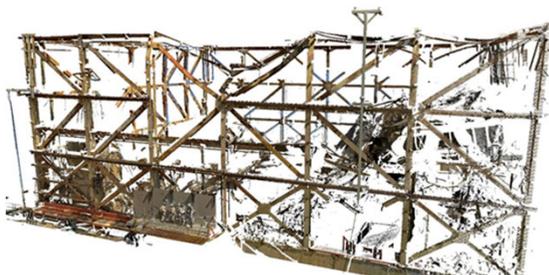
- ✓ 東京電力が行った調査により、2号機X-6ペネ内部が堆積物により完全に閉塞していることが判明。
- ✓ X-6ペネ堆積物の生成過程等を解明するために、これまでに得られたスミヤ試料等の分析結果に関する情報を再整理。



2号機X-6ペネ内の堆積物

その他(3Dレーザースキャナによる測定)

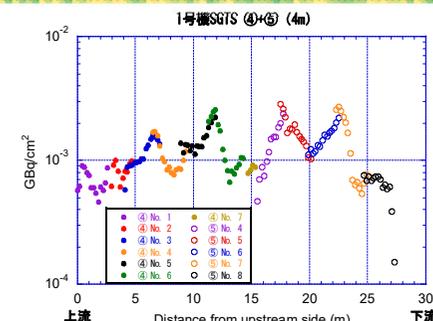
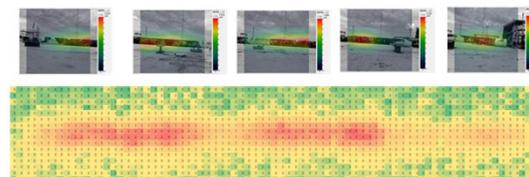
- ✓ 原子炉建屋等の構造物の形状、損傷状況等を把握するため、3Dレーザースキャナによる測定を実施。
- ✓ これまでのところ、4号機原子炉建屋2階～4階及び3号機原子炉建屋3階天井(損傷している梁)の変形は進んでいないことを確認。



測定結果(1号機原子炉建屋オペフロ)

切断後の1/2号機SGTS配管に対する内面汚染分布の測定

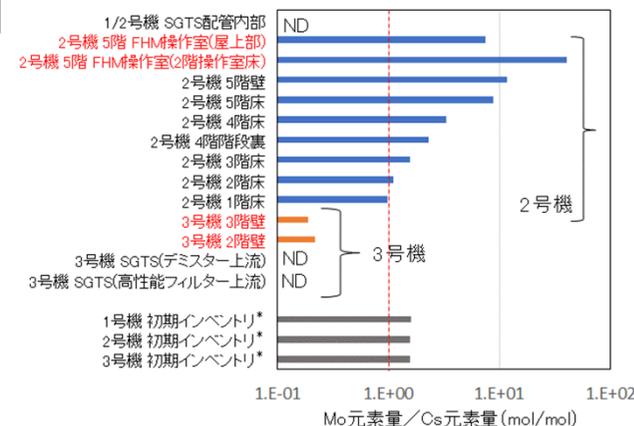
- ✓ 設置箇所から切断された1/2号機SGTS配管のうちの一部の1号機SGTS配管に対して、ガンマカメラによる汚染密度等の測定を実施。
- ✓ 測定の結果、配管内の汚染分布を把握。
- ✓ 他のSGTS配管に対する汚染状況に関する調査・分析を引き続き実施。



測定結果(配管内(軸方向)の汚染密度分布)

その他(スミヤ試料分析)

- ✓ 事故時の原子炉挙動の推定等を目的として、1～3号機原子炉建屋内等で採取したスミヤ試料の分析を実施。
- ✓ 2号機におけるMo等の元素とCsの割合から、炉心損傷進展時の雰囲気条件等を推定。



分析結果(Csに対するMoの存在比)

- 想定されていなかったRCW配管による放射性物質等の漏洩
- BWR原子炉建屋における事故初期での高放射線量率の発生
- モニタリングポスト(MP)で得られる情報の有用性
- 3号機水素爆発事象の解明: 建屋内ガス分布と爆発時圧力
- 1号機ペデスタル下部のコンクリート損傷事象の解明

東京電力福島第一原子力発電所事故に係る調査・分析には、未だ取り組むべき課題が山積みしている。

- 放射線量の低減等の環境改善により、現地での調査が可能となった箇所については、可能な限り、現地調査等を実施
 - ⇔ 事故分析検討会での議論
 - ⇔ 各研究プロジェクトへの反映

今般の調査・分析作業や事故分析検討会における議論を進めるに当たり、作業に係る準備、検討の基礎となる基本的知識の共有から、仮説・解釈の構築、検討内容の検証などの様々な場面において、以下を含む数多くの方々から積極的かつ貴重なご協力をいただいた。

- 各分野の専門的知見の共有と科学的・技術的な助言等をいただいた外部の専門家の皆様
- コンクリート加熱試験等に使用する「模擬コンクリート供試体」の作製、コンクリート加熱試験の実施に全面的な協力をいただいた福島工業高等専門学校の緑川教授他、及び大阪大学の牟田教授、大石准教授を含む東京電力福島第一原子力発電所事故調査チーム「1F-2050」の皆様
- 3号機水素爆発事象の解明に資するための水素等燃焼試験及び火炎色等確認試験を実施いただいた長岡技術科学大学の門脇教授
- 3号機水素爆発事象の解明に資するための原子炉建屋内の水素挙動に係る、実験的検証を実施いただいたJAEA 安全研究センターの柴本ディビジョン長他の皆様
- 調査チームが取得した1～3号機原子炉建屋内で取得したスミヤ試料に対する分析等を実施いただいたJAEA 規制・国際情報分析室の飯田室長代理、島田研究主幹他の皆様
- 技術的な背景の理解に資する情報及び質疑への対応をいただいた設備メーカーや各種団体の皆様
- 現地調査において放射線管理を中心に現場作業の安全かつ円滑な実施にご尽力いただいた東京電力の皆様
- 現地調査の段取りや事前調整などにより円滑な現場作業の実現にご貢献いただいた原子力規制庁福島第一原子力規制事務所の皆様
- 原子力安全に係る知見と工学的見解の共有、科学的・技術的議論への参画等により検討を支援いただいた原子力規制庁の職員の皆様、特にMPデータ検討に関して技術的専門的知見の提供にご尽力いただいた原子力規制庁の平山技術参与