

2号機X-6ペネで確認された堆積物に関する考察

令和8年10月22日
東京電力福島第一原子力発電所事故対策室
石川 大裕

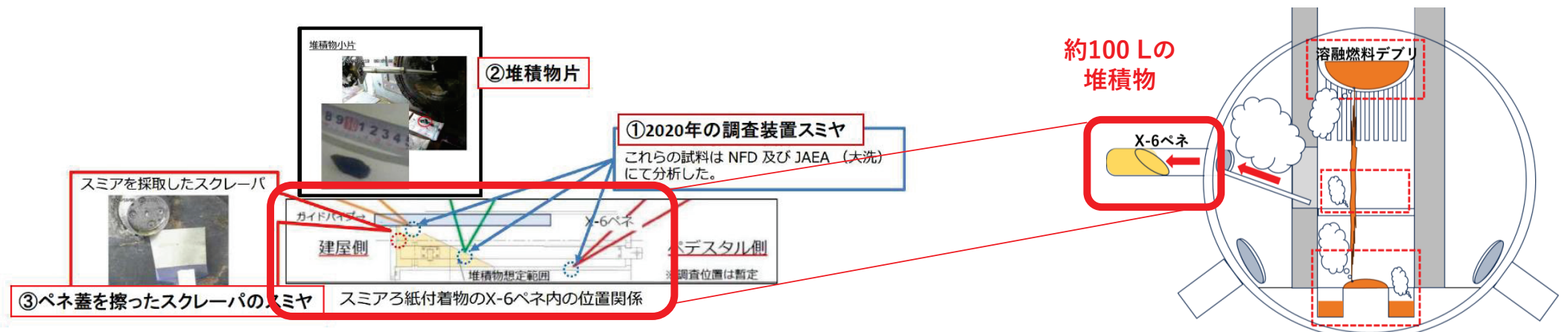
経緯



(経緯)

令和2年10月に2号機燃料デブリの試験的取出に先立って、X-6ペネの内部調査を行ったところ、フランジ近傍(ペDESTAL内壁面から約10 m離れた位置)に約100 L程度の堆積物(主成分:鉄酸化物、一部:酸化ウラン)が確認された。原子力規制庁では、当該堆積物が事故進展初期における情報を保有している可能性を踏まえ、事故進展の理解に資するものとして、調査を開始した(第51回事故分析検討会(令和7年6月27日))。この方針を踏まえ、プラントパラメータ及び分光分析結果に対して熱力学的な考察を加えた(第53回事故分析検討会(令和8年1月15日))。

一方で、移送メカニズムについては、一切触れて来なかった。今回はこれを扱いたく、現時点までに加えた考察を紹介したい。



X-6 ペネの拡大図 (推定) [1]

2号機原子炉格納容器の模式図 (推定)

(下線は、考察に着手した箇所)

仮説1: 炉内で生成した熔融燃料が原子炉圧力容器下部や格納容器へ落下する過程で、熔融燃料のうちの一部の鉄、酸化鉄又は水酸化鉄が蒸発後、X-6ペネに移動する過程で凝縮し、酸化鉄微粒子になった。そして、X-6ペネ内で凝集し、100 μ m以上の大きさの集合粒子を形成した。

仮説2: 大量の酸化鉄の粒子は、ペDESTAL下部において、鉄等の融点を大きく超える温度かつ酸化雰囲気下で生成されたのではないかと考えられる。鉄等の温度が融点を大きく超えていたとすると、そのような状況になるのは、熔融した鉄等を含む熔融燃料がペDESTAL底面のコンクリートと接触して急冷される前であると考えられる。

仮説3: X-6ペネで確認されたウラン粒子は、ウランの蒸発・凝縮によって生じたものではなく、熔融燃料が、ペDESTAL下部へ落下した際の衝撃又はコンクリートと接触した際の反応(コンクリートに含まれる水分の蒸発等)による飛沫が凝固し生成したものである。

仮説4: 圧力容器直下、X-6ペネにつながる開口部と同じ高さの箇所に鉄板やグレーティング、制御棒駆動機構交換機等があり、そこに熔融燃料が落下したときの衝撃によりウランの飛沫の生成及び鉄等の蒸発が起きた。その後、ペDESTAL内の昇圧により、酸化鉄粒子及びウラン粒子がペDESTAL開口部から外部へ押し出された

仮説5: X-6ペネの堆積物は、熔融燃料が高温である短い期間に堆積したのではないかと考えられる。

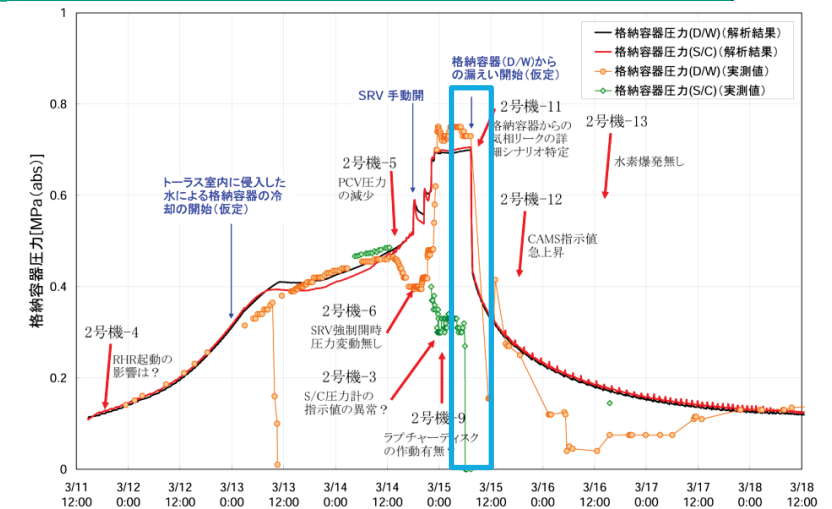
[1]第51回事故分析検討会(令和7年6月27日)資料



X-6ペネ堆積物の移送に係る考察①(D/W圧力変化)

2号機の事故進展で特徴的なものとして、

- ・D/W圧が**730 kPaから155 kPa急減**(3/15 7:20から11:25、**右図青枠**)。
- ・同時期にブローアウトパネルから蒸気放出確認。
- ・2号機から数km程度離れた正門付近のモニタリングカーにおける線量が大幅に上昇。



2号機原子炉格納容器のパラメータ[2]

○D/W圧力が減圧された際に、例えばPCVの上部蓋のシール部のような密閉性が弱い箇所を経由して、放射性物質が漏えいした可能性が高い。この際に、**PCV全体において気流が形成されたものと考えられる**。これを蒸気圧と絡めて考えれば、D/W圧力が十分に高いため、Feなどの気相の分圧は基本的に飽和蒸気圧となることが見込まれる。

○この結果、PCV外への漏洩に合わせて、凝縮相に存在していたFeなどが**飽和蒸気圧を保ちながら蒸気化をしたと予想する**。

■ 明らかになったこと

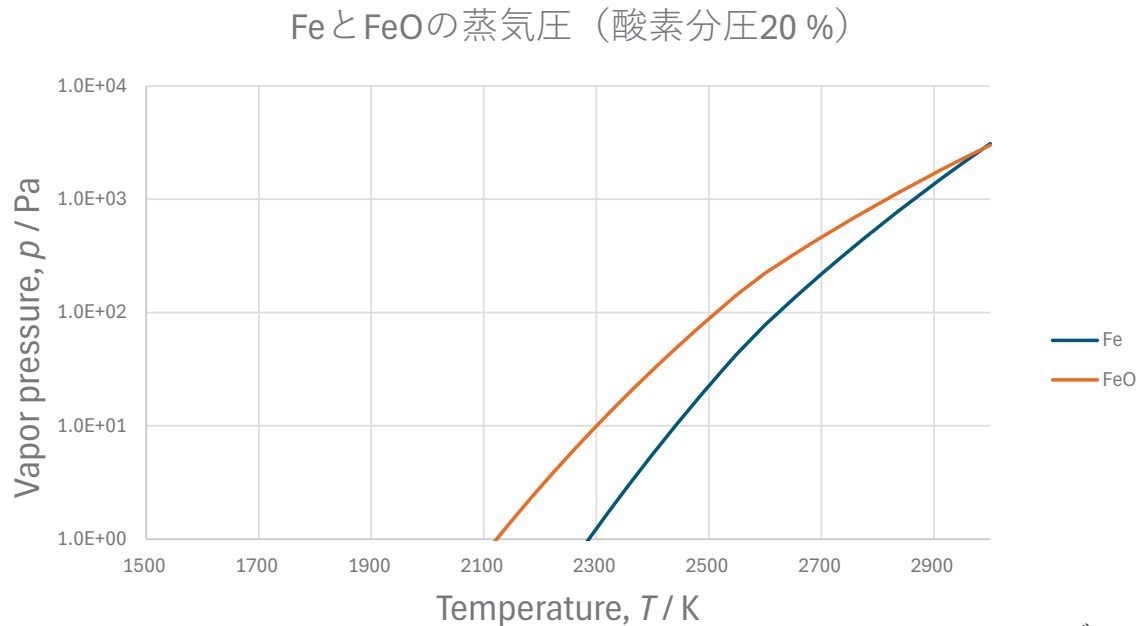
■ 考察事項

[2]東京電力HD、福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告(令和4年11月20日)



X-6ペネ堆積物の移送に係る考察①(蒸気圧)

蒸気圧についてより詳細に調べてみると、堆積物の中心元素であるFeとその代表的な化学形である酸化鉄(FeO)の蒸気圧は以下のとおりとなる。(本計算は、大阪大学・大石教授にご協力を頂いた。)



データベースはFACT53、計算はFactSageを使用

2号機は事故炉の中では比較的酸化的な雰囲気であり、酸化雰囲気における傾向としては約2000K以上においてFe及びFeOのいずれも有意な蒸気圧を示すようになる。Feが酸化するタイミングは分からないものの、蒸気化が起こる領域においては一定程度の温度を有していたと考えられる。一方でPCV内部調査の結果として、ペDESTALにおけるケーブルトレイ(炭素鋼:融点約1500℃)が損傷していない^[2]ことを踏まえると、高温領域は局所的であった可能性が示唆される。

[2]東京電力HD、福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告(令和4年11月20日)



X-6ペネ堆積物の移送に係る考察②

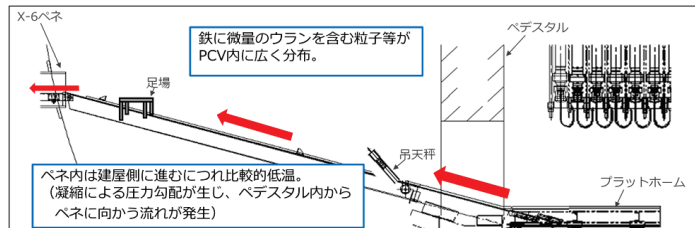
フランジ解放時に水滴が流れ出ることが確認されている。[3][4]

- 受け皿に水が溜まる状況は見られないものの、ウエスの濡れ具合は増加(目視確認結果)
- 設置2日目のウエス表面線量は、 γ 線:10mSv/h、 $\beta+\gamma$:7Sv/h、 α 線:検出限界未満



11/4の作業終了後、フランジ下部、にじみのある場所にウエスを入れた受け皿を設置。
11/6作業開始前に受け皿内を目視確認。表面線量測定実施。
11/6.7も作業終了後ウエスと受け皿を設置。
11/8作業開始前に受け皿内を再度目視確認

【滴下物の推察】
原子炉格納容器内の蒸気がX-6ペネフランジ表面で冷やされて凝縮。ペネ内の凝縮水が滴下しているものと推察。



X-6ペネ堆積物に係る水蒸気凝縮の可能性 [3][4]

熱輻射による温度勾配による力「熱泳動」の表式は以下のとおり。

$$F_{thermal} = k\Delta T$$

より具体的にはWaldmannとSchmitt [5]によれば、
小さな粒子（粒子径 $D < \text{平均自由行程} \lambda$ ）の場合は

$$F_{thermal} = p\lambda D^2 \frac{\Delta T}{T} \propto pD^2 \frac{\Delta T}{T}$$

となり（ p ：雰囲気気体の圧力）、大きな粒子（粒子径 $D > \text{平均自由行程} \lambda$ ）の場合は

$$F_{thermal} = H \frac{9\pi D\eta^2}{2\rho_g} \times \frac{\Delta T}{T}$$

となる（ η ：粘性係数、 H ：係数）。特に大きな粒子の場合は、粒子内で温度勾配を生じてしまうため、複雑な現象となる。

熱泳動に係る表式例

○東京電力において、PCV内外の温度差に起因する、ペネフランジ近傍の水蒸気凝縮により形成された圧力勾配によって、ペデスタル内からX-6ペネに向かう水蒸気の流れが生じることなどが提案されており、長期間にわたる緩やかな気流が存在していたことは確認された事実と照らし合わせても、概ね同意するところ。

○この際に、第53回事故分析検討会（令和8年1月15日）に会場からあった「熱泳動」による移送も寄与したものと考えられる。

○併せて、燃料デブリの試験的取出の結果で、試料断面に空隙を持つものが複数見出されていることを踏まえると、蒸気圧が高いものが蒸気化している痕跡があるため、Csをはじめとする高い蒸気圧を持つ物質の蒸気圧による流路形成もあり得たのではないかと予想する。

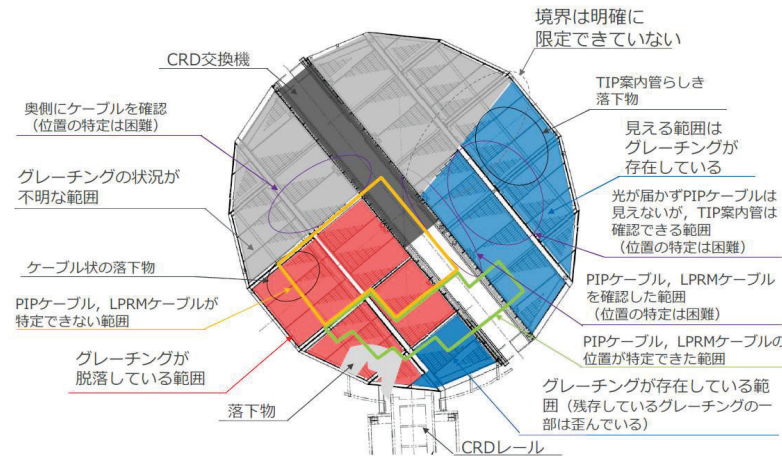
[3]第41回事故分析検討会（令和5年12月25日）資料3-2 [4]第50回事故分析検討会（令和7年3月28日）資料6-3

[5]L. Waldmann and K. H. Schmitt, "Thermophoresis and Diffusiophoresis of Aerosol," Academic Press(1966)



X-6ペネ堆積物の移送に係る考察③(溶融落下物による影響)

PCV内部調査の結果として、以下のとおりグレーチングが脱落したことが確認されている。

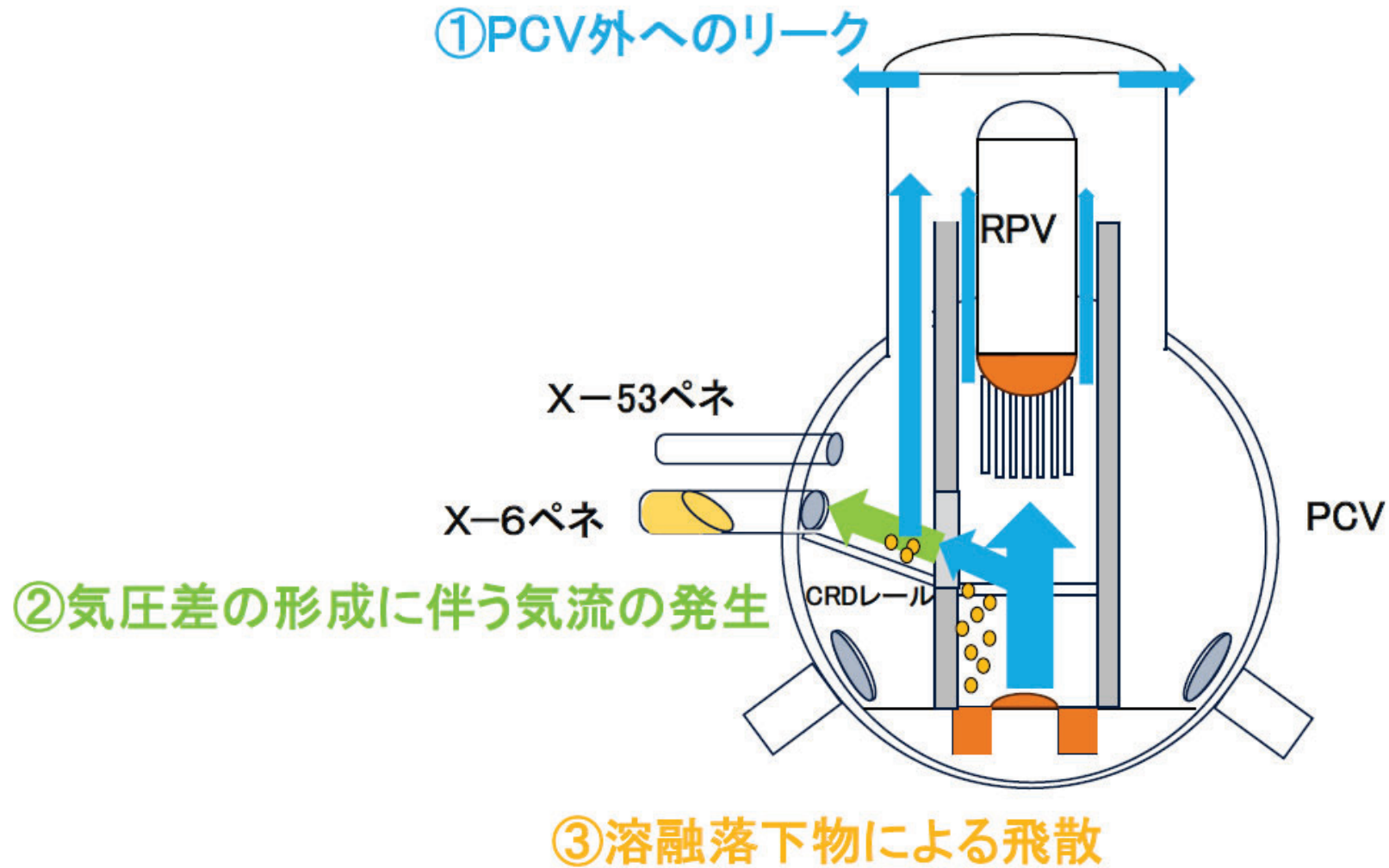


PCV内部調査を踏まえた2号機グレーチング模式図 [2]

○ウランのような鉄よりも蒸気圧が低く、密度も高い物質から成る粒子も確認されていることを考えると、前述の蒸気圧や気流と同様の移送形式は、Fe中心のものとは比べて相対的に起きにくいと考えられ、異なる移送形式の可能性を考える必要がある。そこでグレーチングの損傷に注目すると、一部のグレーチングが欠損していることから、相当程度の重量を有する溶融落下物が、グレーチングを巻き込んで落下したものと推定される。その際に、ペデスタル底部に衝突した際に、粒子が飛散したものと考えられる。

○これを踏まえ、**気流による移送の比較的困難な粒子については、飛散によりCRDレールに載ったうえで、ペネフランジ近傍に生じた圧力勾配によってレールを介したX-6ペネへ移送された可能性を挙げたい。**

なおPCV内部調査の結果として、グレーチングの脱落部がCRDレールに必ずしも近いわけではないので、飛散を考えた場合は、粒子径の大きいものは、小さいものに比べて相対的に少ないと考えられる。





X-53ペネに関連するPCV内部調査結果①

併せて、X-6ペネと同様の組成を持つと分析されたX-6ペネ近傍のX-53ペネ堆積物の移送についても紹介したい。

2号機X-53ペネ内については、すでに「少量の堆積物を確認(残置物の回収痕が形成される程度)」ということで報告されている^[3]。なお、分析の結果としてX-6ペネ堆積物及びX-53ペネ堆積物の主成分はいずれも酸化鉄が主成分。

※写真奥側がPCV方向



X-53ペネ内

[3]第41回事故分析検討会(令和5年12月25日)資料3-2



X-53ペネに関連するPCV内部調査結果②

X-53ペネを図面調査したところ、「予備ペネ」としての位置づけであり、X-6ペネのように「レール」が敷設されておらず、完全にPCV内に孤立して存在している。このため、X-53ペネには、堆積物が空間を介してのみ入り込むと言え、機器配置について調査を進めた。そこで2号機と同様にBWR-4でMark-I型のPCVを持ち、アクセスが比較的容易な5号機に注目して現地調査を行った。



X-6ペネ(PCV外側)



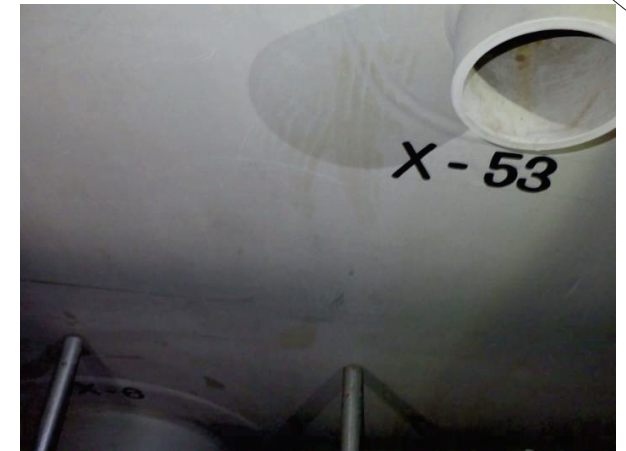
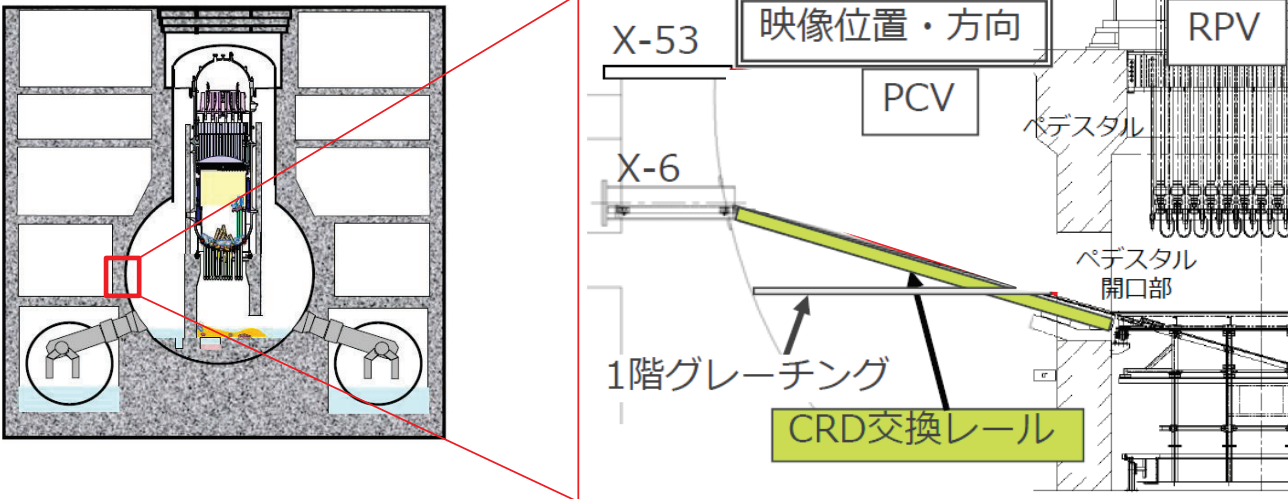
X-6ペネ(PCV内側)



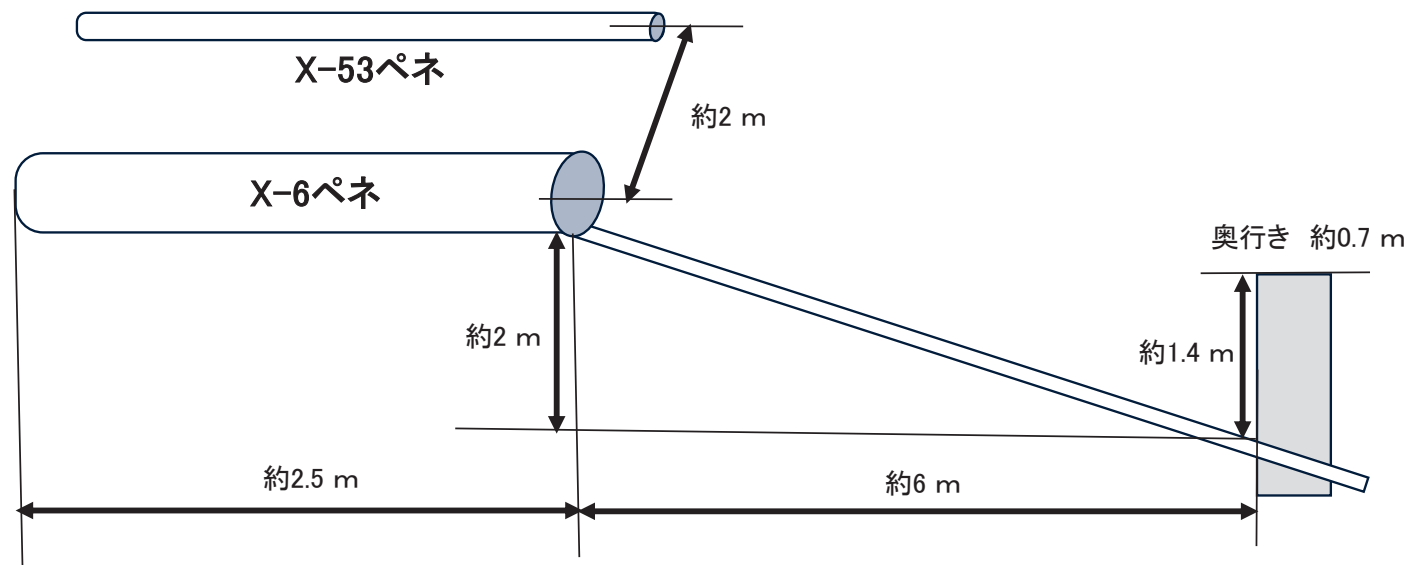
X-53ペネ



5号機PCV内における現地調査



X-6ペネとX-53ペネの配置関係





X-53ペネへの堆積物移送に係る考察

現地調査の結果として、X-53ペネへのアクセスは、垂直梯子を上る必要があり、**ペデスタル開口部から高さがあったこと**。X-53ペネ周囲は構造物が存在するため、ペデスタル開口部を**X-53ペネから全く確認することができなかった**ことが分かった。

OPCV内部調査の結果として、堆積物はX-6ペネで大量に確認されており、X-53ペネで少量確認されている。一方で、5号機現地調査の結果として、構造物が存在するため、X-53ペネへの堆積物の移送は当該構造物を回り込む様式でないと起きないと考えられる。

○このため、一つの可能性の候補として考えてきたRPVの落下物による飛散の可能性は、X-53ペネに対しては低く、X-6ペネ及びX-53ペネに共通する移送メカニズムとしては、**ペネのフランジ方向へ気流が形成される形で堆積物が移送されたもの**と考えられる。

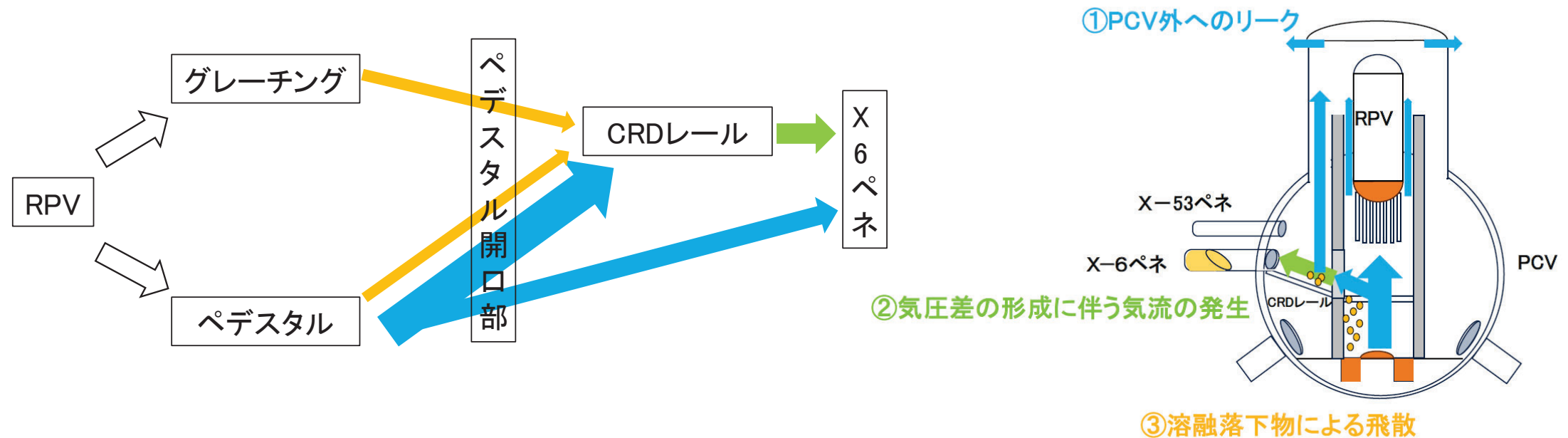
○一方で、3号機については、X-6ペネ及びX-53ペネに共通して、マイクロドローンの調査結果により、堆積物が見出されなかったことを踏まえると、**2号機と3号機の差異としてPCVリークの規模の大きさは、移送を考えるうえで要素の一つとしてあったもの**と考えられる。





まとめ

今回、現状までに明らかになっているデータを踏まえ、堆積物のペネへの移送について考察を加えた。



(下線は、考察に着手した箇所、赤字は今回の対象)

仮説1: 炉内で生成した溶融燃料が原子炉圧力容器下部や格納容器へ落下する過程で、溶融燃料のうちの一部の鉄、酸化鉄又は水酸化鉄が蒸発後、X-6ペネに移動する過程で凝縮し、酸化鉄微粒子になった。そして、X-6ペネ内で凝集し、100 μm 以上の大きさの集合粒子を形成した。

仮説2: 大量の酸化鉄の粒子は、ペDESTAL下部において、鉄等の融点を大きく超える温度かつ酸化雰囲気下で生成されたのではないかと考えられる。鉄等の温度が融点を大きく超えていたとすると、そのような状況になるのは、溶融した鉄等を含む溶融燃料がペDESTAL底面のコンクリートと接触して急冷される前であると考えられる。

仮説3: X-6ペネで確認されたウラン粒子は、ウランの蒸発・凝縮によって生じたものではなく、溶融燃料が、ペDESTAL下部へ落下した際の衝撃又はコンクリートと接触した際の反応(コンクリートに含まれる水分の蒸発等)による飛沫が凝固し生成したものである。

仮説4: 圧力容器直下、X-6ペネにつながる開口部と同じ高さの箇所に鉄板やグレーチング、制御棒駆動機構交換機等があり、そこに溶融燃料が落下したときの衝撃によりウランの飛沫の生成及び鉄等の蒸発が起きた。その後、ペDESTAL内の昇圧により、酸化鉄粒子及びウラン粒子がペDESTAL開口部から外部へ押し出された

仮説5: X-6ペネの堆積物は、溶融燃料が高温である短い期間に堆積したのではないかと。

2号機X-6ペネで確認された堆積物に関する考察

令和8年1月15日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

石川 大裕



経緯・目的

(経緯)

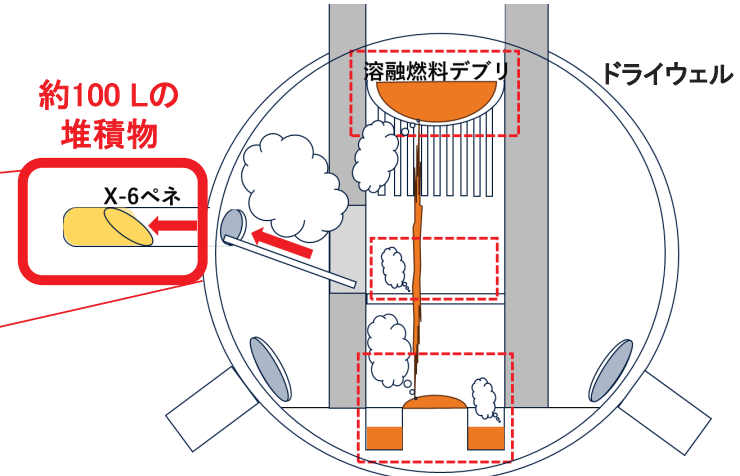
令和2年10月に2号機燃料デブリの試験的取出に先立ち、X-6ペネの内部調査を行ったところ、フランジ近傍(ペDESTAL内壁面から約10 m離れた位置)に約100 L程度の堆積物(主成分:鉄酸化物)が確認された。原子力規制庁では、当該堆積物が事故進展初期における情報を保有している可能性を踏まえ、事故進展の理解に資するものとして注目し、5つの仮説(下部に掲載)を提示し、調査を開始した(第51回事故分析検討会(令和7年6月27日))。今回、現状までに明らかになっているデータを踏まえれば、5つの仮説の要素となる(Ⅰ)物理的性質(粒径・形状)、(Ⅱ)化学的性質(化学形、共存元素比の違いによる影響)、(Ⅲ)熱力学的性質(鉄成分の蒸発の程度、熱力学的物性値)という3つの柱でアプローチしていくことが適切と考え、これらの観点を手がかりに考察する。

(目的)

発見された堆積物の性質を調べることで、当該堆積物が生成した炉内環境を把握する。



X-6ペネの拡大図(推定)^[1]



2号機原子炉格納容器の模式図(推定)

(仮説は「中間取りまとめ^[2]」からの引用)

仮説1: 炉内で生成した溶融燃料が原子炉圧力容器下部や格納容器へ落下する過程で、溶融燃料のうちの一部の鉄、酸化鉄又は水酸化鉄が蒸発後、X-6ペネに移動する過程で凝縮し、酸化鉄微粒子になった。そして、X-6ペネ内で凝集し、100 μ m以上の大きさの集合粒子を形成した。(ⅠとⅡとⅢ)

仮説2: 大量の酸化鉄の粒子は、ペDESTAL下部において、鉄等の融点を大きく超える温度かつ酸化雰囲気下で生成されたのではないかと考えられる。鉄等の温度が融点を大きく超えていたとすると、そのような状況になるのは、溶融した鉄等を含む溶融燃料がペDESTAL底面のコンクリートと接触して急冷される前であると考えられる。(Ⅲ)

仮説3: X-6ペネで確認されたウラン粒子は、ウランの蒸発・凝縮によって生じたものではなく、溶融燃料が、ペDESTAL下部へ落下した際の衝撃又はコンクリートと接触した際の反応(コンクリートに含まれる水分の蒸発等)による飛沫が凝固し生成したものである。(Ⅲ)

仮説4: 圧力容器直下、X-6ペネにつながる開口部と同じ高さの箇所に鉄板やグレーティング、制御棒駆動機構交換機等があり、そこに溶融燃料が落下したときの衝撃によりウランの飛沫の生成及び鉄等の蒸発が起きた。その後、ペDESTAL内の昇圧により、酸化鉄粒子及びウラン粒子がペDESTAL開口部から外部へ押し出された。(Ⅲ)

仮説5: X-6ペネの堆積物は、溶融燃料が高温である短い期間に堆積したのではないかと考えられる。(Ⅲ)

[1]第51回事故分析検討会(令和7年6月27日)資料1 [2]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7年9月4日)



現状までの調査^{[3][4][5]}により明らかになったこと

(堆積物の特徴)^{[4][5]}

- 酸化鉄を主成分とした粒子
- 酸化鉄の化学形は α -FeO、 α -Fe₃O₄、正スピネル構造の α -FeCr₂O₄も一部存在
- 粒子径は μ mオーダー
- 酸化鉄以外の確認された元素 (SEM-WDX/γ線/ICP-MS)
U・Gd・Np・Pu・Am・Zr・Sn・Cr・Ni・Mn・Mo・Ca・Si・Al・Cu・Pb・Zn・Ti・S・Co・Sr・Y・Tc・Cs・Pr・Nd・Sm・Sb・Rh・Ce・Eu・V・Ag・Bi・As・Cd・Pd・Mg・Cl

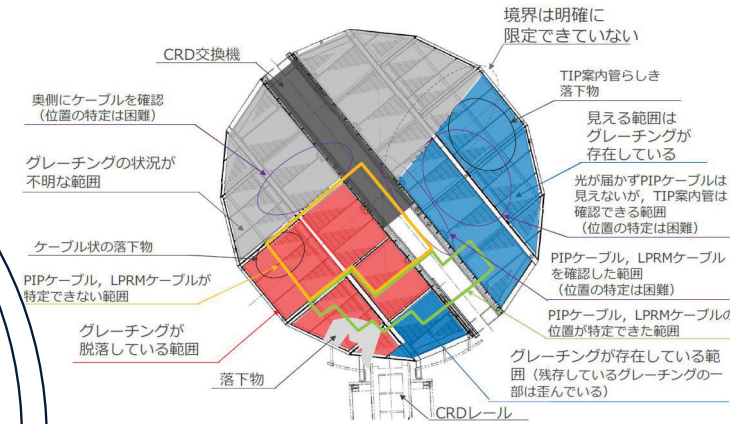


約100 Lの
堆積物

- X-6ペネ内のケーブル被覆材が炭化
- X-6ペネのフランジ部から溶融物が垂れ下がる

- 燃料集合体上部タイプレートの一部がCRDレール近傍のペDESTAL内壁面付近で確認
- ペDESTAL壁にあるケーブルトレイ及びRCW配管の損傷なし

- 制御棒駆動機構配管の外周部の存在を確認
- ペDESTAL床一面に水滴が落下している
- RPV底部のケーブルが特定できない範囲とグレーチングの脱落している範囲が重複



CRDレール近傍のグレーチングが一部崩落

- 滞留水の水位が約60 cm
- ペDESTAL内の蒸気の立ち上がり方に偏りが確認
- ペDESTALに物体が堆積高さに分布を持って存在し、ペDESTAL周辺部にも堆積偏りが確認

[3]東京電力HD、福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告(令和4年11月20日)

[4]池内ほか、令和3年度福島第一原子力発電所の炉内付着物サンプル等の分析(令和5年12月) JAEA-Data/Code 2023-005

[5]第50回事故分析検討会(令和7年3月28日)資料6-3

内部調査により明らかになったこと ³



2号機のプラント挙動の時系列①^{[3][6]}

3/11

通常運転中

プラント停止

全交流電源喪失(淡水冷却)

- ▲ 14:46 地震発生
- 14:47 原子炉スクラム
- 14:48 外部電源喪失・非常用D/G起動
- 14:50 RCIC手動起動・操作

- ▲ 15:27 津波襲来(第1波)
- 15:35 津波襲来(第2波)
- 15:39 RCIC手動起動
- 15:41 非常用D/G停止、全交流電源喪失

- ▲ 21:50 原子炉水位確認

3/12

全交流電源喪失(淡水冷却)

- ▲ 2:55 RCICの運転確認

- ▲ 15:30ごろ P/Cへのケーブルつなぎ込み、
高圧電源車への接続、電源車電源車
起動・調整が完了
- 15:36 1号機R/B爆発の影響により受電不可

3/14

全交流電源喪失(淡水冷却)

[3]東京電力HD、福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告(令和4年11月20日)

[6]東京電力、福島原子力事故調査報告書(平成24年6月20日)



2号機のプラント挙動の時系列② [3][6]

3/14

全交流電源喪失(淡水冷却)

▲11:01 (3号機原子炉R/B爆発)
11時ごろ 原子炉水位低下開始

▲13:25
RCIC機能
喪失判断

▲17:17
原子炉水位が
TAF到達

▲18:02
主蒸気逃し弁によりRPV減圧開始
(約1 MPa程度まで減圧)

▽19:20 炉心損傷開始(※解析): 炉心最高温度が1200℃に到達

炉心損傷

全交流電源喪失(海水冷却)

▲19:54
消防車によるRPVへの注水
21時過ぎ ラプチャーディスクを除く
ベントライン構成完了

3/15

全交流電源喪失(海水冷却)

▲22:50
D/W圧力:540 kPa,
RPV圧力:1.8 MPa(gage)
23:00
D/W圧力:580 kPa,
RPV圧力:2.07 MPa(gage)
23:25
D/W圧力:700 kPa,
RPV圧力:3.15 MPa(gage)

▲23:30
D/W圧力:700 kPa,
RPV圧力:1.913 MPa(gage)
23:40
D/W圧力:740 kPa,
RPV圧力:1.170 MPa(gage)
23:46
D/W圧力:750 kPa

▲0時過ぎ
D/Wベント操作
0:05
D/W圧力:740 kPa,
RPV圧力:0.653 MPa(gage)
0:22
D/W圧力:735 kPa,
RPV圧力:1.170 MPa(gage)
0:45
RPV圧力:1.823 MPa(gage)

▲06:14
大きな衝撃音
と振動が発生
S/C圧力:ダウンスケール

▲07:20
D/W圧力:730 kPa
08:25
R/B5階
BOPから
蒸気放出を
確認
11:25
D/W圧力:155 kPa
(D/W圧力の
低下を確認)
15:25
CAMS(D/W):
135 Sv/hに
急上昇
(以後、単調減少)

正門付近のモニタリングカー
線量が大幅上昇

[3]東京電力HD、福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告(令和4年11月20日)

[6]東京電力、福島原子力事故調査報告書(平成24年6月20日)

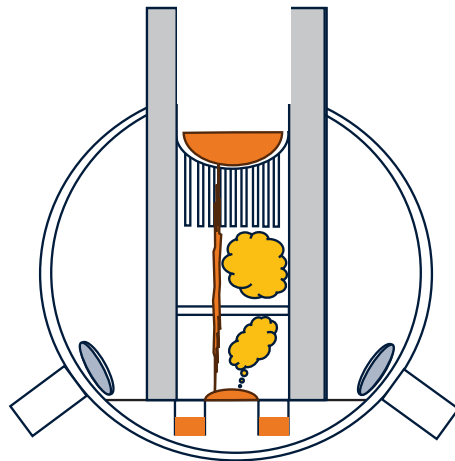


考察①(プラント挙動)

2号機では、3/14の11:00ごろからCAMS(D/W)の線量の上昇が止まった3/15の15:25までの間に、大きく環境変化が起きたと推測される。特にX-6ペネフランジ近傍への物質移送との関係では、**D/W圧力が大きく降下した3/15の7:20から11:25の間に注目したい。**

D/W圧力に注目すれば、3/15の未明にかけて、約700 kPaの圧力上昇を経て、730 kPa(3/15 7:20)から155 kPa(3/15 11:25)と約4時間程度の短時間で、急な圧力降下を経た。この間に、5階ブローアウトパネルからの放射性物質を含むと推測される白い蒸気発生も確認(3/15 8:25)されていることに加え、正門付近のモニタリングカーにおける線量上昇も確認された。

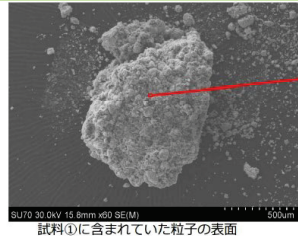
これより、D/W圧力降下を起因として、D/Wから原子炉建屋内を経由してブローアウトパネルへの物質移送があったと推測される。確認された白い蒸気については、D/Wから放出された放射性物質が外気による冷却、又は、D/W内外の圧力差に起因する断熱冷却を受けたことにより、凝結したものと推測される。さらにD/W内部に注目すれば、漏えいした放射性物質は、**D/W内で気相状態にあったもの**、又は、D/Wが減圧された結果、**蒸気圧による蒸気化が起こったもの**であったことが想定される。別の観点で見れば、**蒸気圧を駆動源とする物質の移送の可能性**があったのではないかと考えている。



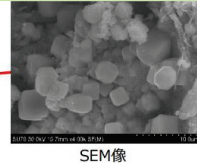


考察②(物理化学的性質～粒子の形状・含有元素/同位体～)

令和5年10月にX-6ペネハッチ開放時に、フランジ部から落下した堆積片(下図①)について、詳細な分析を行い報告がなされたところであるが^[5]、SEM-EDSによる形状観察に注目すると、大部分は丸みを帯びている。



堆積物のSEM像^[5]

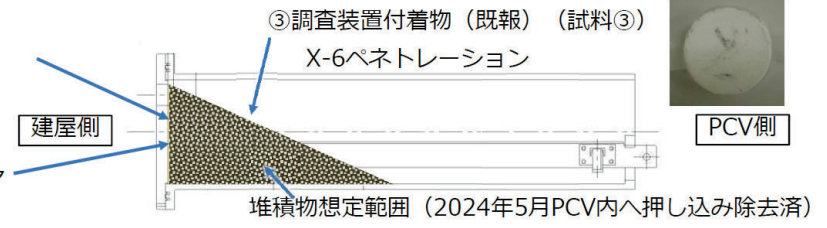


SEM像



①堆積物片

②ハッチスミア



X-6ペネの拡大図(推定)^[5]

丸みが帯びている理由としては、熔融物が表面張力を受けつつ蒸気化・凝集したことに起因しているのではないかと考えられる。言い換えれば、X-6ペネ近傍の堆積物は、熔融したうえで**蒸気化の過程**を経ている可能性を示唆しているのではないかと考えられる。

(X-6ペネの堆積物のみで確認された元素)

Cu・Pb・Ti・S・Y・Tc・Pr・Nd・Sm・Rh・Ce・Eu・V・Ag・Bi・As・Cd・Pd・Mg・Cl

(燃料デブリの試験的取出^[7]のみで確認された元素)

Cm・Nb・Na・B

(X-6ペネの堆積物及び燃料デブリの試験的取出の両方で確認された元素)

Fe・O・U・Gd・Np・Pu・Am・Zr・Sn・Cr・Ni・Mn・Mo・Ca・Si・Al・Zn・Co・Sr・

Cs・Sb・Eu・Mg

(X-6ペネ堆積物及び燃料デブリの試験的取出のU同位体)

試料 [単位は%]	U-234/全U	U-235/全U	U-236/全U
粉末(燃料デブリ)	0.027±0.001	1.943±0.002	0.342±0.001
塊(燃料デブリ)	0.026±0.002	1.9±0.1	0.33±0.002
粉末(燃料デブリ)	0.027±0.002	1.93±0.01	0.35±0.01
X-6ペネ堆積物	0.03±0.03	1.91±0.03	0.34±0.03



元素に注目すれば、X-6ペネ堆積物は、燃料デブリの試験的取出よりも多くの元素を有しており、物質移行が起こる条件に関する情報を反映しているものと考えている。またU同位体比に注目すれば、X-6ペネ堆積物及び燃料デブリのいずれもほぼ同じ値を示している。解析に基づく2号機の平均のU-235の同位体は、約2 %^[3]ではあるものの、炉心全体として同位体程度の分布があり、差異が見出されても不思議ではないが、現状としてサンプル数が少なく、U同位体について議論することは難しく、しばらくは化学形に注目していくこととしたい。



考察②(物理化学的性質～融点～)

(堆積物の特徴)

- 酸化鉄を主成分とした粒子
- 酸化鉄の化学形は α -FeO、 α -Fe₃O₄
(正スピネル構造の α -FeCr₂O₄も一部存在)
- 粒子径は μ mオーダー

(材料の融点)

ケーブル被覆材: 約300℃

約100 Lの
堆積物

(材料の融点)

燃料: UO₂ (2850℃)
制御材: B₄C (2430℃)
燃料被覆材: ジルカロイ (1760℃)
炉内構造物: ステンレス (1450℃)
圧力容器: 炭素鋼 (1540℃)

(材料の融点)

グレーチング構造物: ステンレス (1450℃)

CRDレール近傍のグレーチングが一部崩落

(材料の融点)

構造物: 鉄筋コンクリート (1200℃)

- ペDESTALに物体が堆積高さに分布を持って存在し、
ペDESTAL周辺部にも堆積偏りが確認

(材料の融点)

ケーブルトレイ: ステンレス (約1450℃)
RCW配管: 炭素鋼 (約1500℃)

- ペDESTAL壁にあるケーブルトレイ及びRCW配
管の損傷なし

既存の知見

内部調査により明らかになったこと

考察事項

グレーチングを突き破り、ペDESTALへ落下した溶融物は、ペDESTAL内部に広がって分布した。なおペDESTALへの落下物の温度は、ステンレス製(融点: 約1450℃)のケーブルトレイを熱的に損傷させるほどの温度ではなかったと推定される。

またX-6ペネ堆積物の温度はケーブル被覆材等を溶融させるほどの温度(約300℃)ではなかったと推定される。

融点は、[1]第51回事故分析検討会(令和7年6月27日)資料1 [3]東京電力HD、福島第一原子力発電所1～3号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第6回進捗報告(令和4年8月11月20日)[7]第52回事故分析検討会(令和7年9月4日)資料2



考察②(物理化学的性質～化学形～)

X-6ペネ堆積物の主成分である酸化鉄の化学形は($c\text{-FeO}$ (ウスタイト)、 $c\text{-Fe}_3\text{O}_4$ (マグネタイト)、 $c\text{-FeCr}_2\text{O}_4$)であった。これより単純な系として、 Fe-O 二成分系の状態図(図1)から考える。状態図によれば、冷却過程を見ていくと、 $c\text{-Fe}_3\text{O}_4$ は1600°C付近から生成し始め、 $c\text{-FeO}$ は1450°C付近から生成し始めることになる。一方で、仮に準静的過程を経ると考えれば、 $\alpha\text{-Fe}$ や $c\text{-Fe}_3\text{O}_4$ (マグネタイト)が生成されると期待されるが、実際には $c\text{-FeO}$ (ウスタイト)が観測されていることから、高温状態における化学形を保存した状態で急冷を受けたものと推測される。なお熱力学計算によれば、 $c\text{-FeCr}_2\text{O}_4$ は1700°C付近で生成し始めるとの結果が得られており、 $c\text{-Fe}_3\text{O}_4$ の一部のFe原子がCr原子に置換を経たものの、基本的には $c\text{-Fe}_3\text{O}_4$ 同様に考えられ、同じく急冷を受けたと推測される。

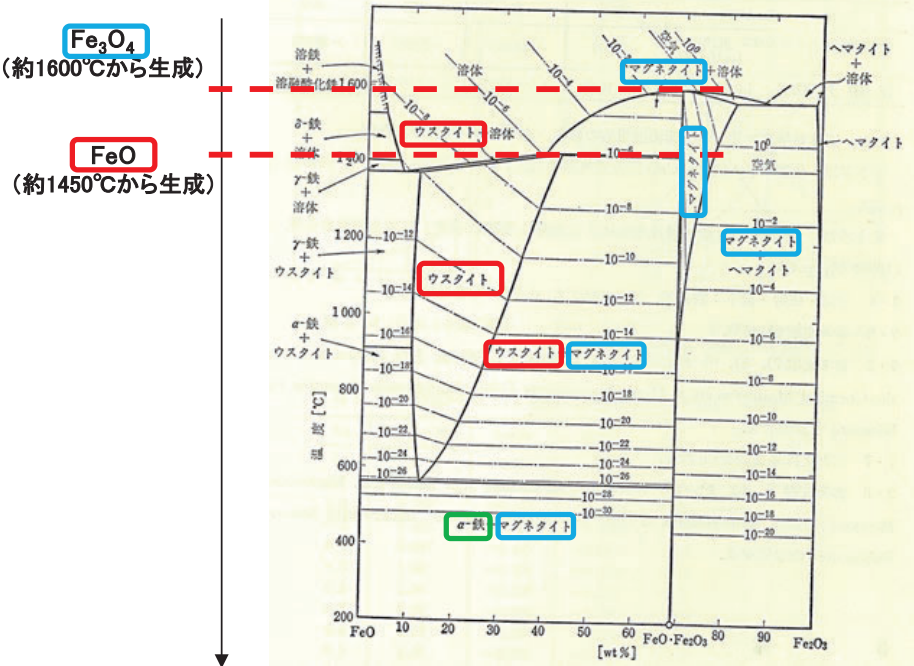


図1 Fe-O二成分系の状態図^[8]

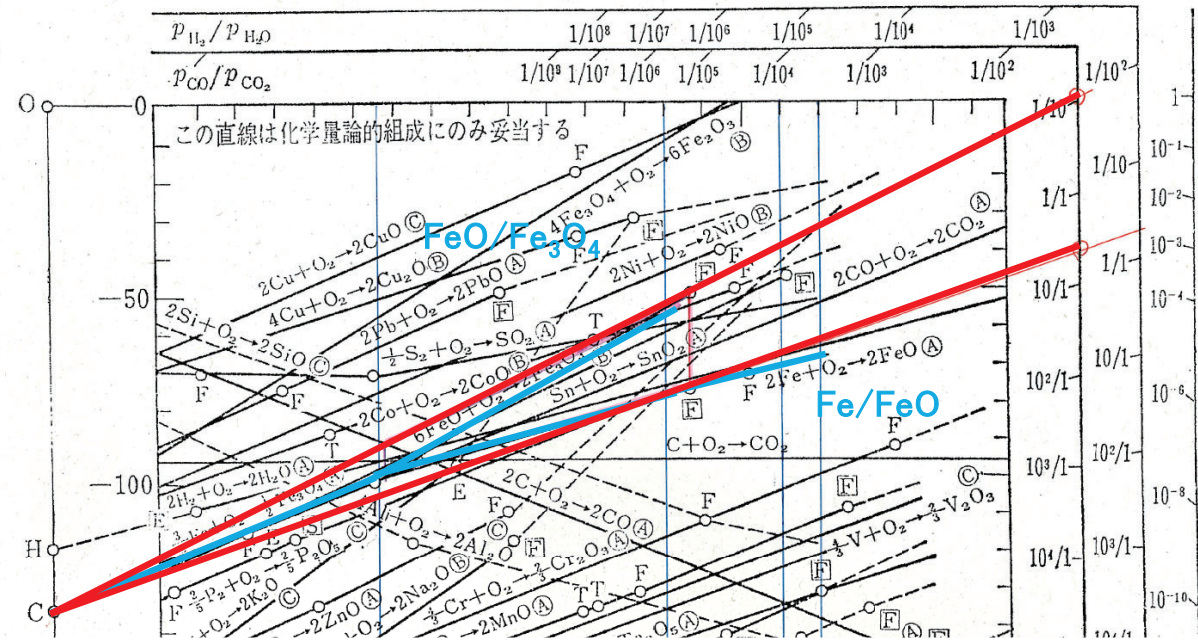


図2 酸化物の標準生成自由エネルギー(Ellingham図)^[9]

冶金工学において用いられるGibbsの自由エネルギーと温度の相関を表すEllingham図^[10]にRichardsonら^[11]が修正を加えた図(図2)を用いて考える。酸化鉄の化学形を踏まえ、還元ガスである H_2 や CO の分圧比を求めると、 $p(\text{H}_2)/p(\text{H}_2\text{O}) \cong 0.05 \sim 2$ 、 $p(\text{CO})/p(\text{CO}_2) \cong 0.1 \sim 7$ となる。これらより、酸化鉄が生成した条件は、酸化的な雰囲気を満たし得たと推測される。

^[8]松下ほか、冶金物理化学、丸善(1970) ^[9]大谷、鉄冶金熱力学、日刊工業新聞社(1971) ^[10] H. T. J. Ellingham, J. Soc. Chem. Ind. Trans., 63, 125(1944). ^[11] F. D. Richardson et al., J. Iron Steel Inst., 160, 261(1948).



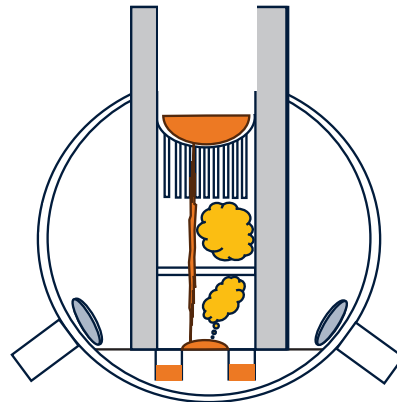
考察②(物理化学的性質)

今回検討した範囲内(7～9ページ)のうち、特に注目したいと考えるのは以下のとおり。

- X-6ペネ堆積物の元素に注目すれば、燃料・マイナーアクチノイド・燃料被覆材・構造材・ケーブル・塗料・FP・海水といった様々な材料・物質由来の元素が存在することが示唆された。堆積物の元素では、一部にUが見出されていることから、上記で示した材料・物質のうち、**融点が高い燃料を溶融させるような温度を経た可能性がある。**
- X-6ペネ堆積物の主成分である酸化鉄に着目すれば、あまりに高い温度にあると溶融してしまい、 α -FeO(ウスタイト)のような化学形を取ることができないため、当該化学形を取りうる**約1600℃～1700℃以下の温度領域で酸化鉄が生成して、急冷を受けたと推測される。**
- 原子炉圧力容器の一部が損傷して、落下した溶融物がグレーチングの一部を巻き込み、ペDESTALへ落下して、冷却を受けたと考えられる。なお、落下物は**ペDESTALに存在するケーブルトレイ等の構造物を損傷させるほどの温度を有していなかったと推測される。**

ここで、酸化鉄が急冷を受けている可能性があるが、これは落下物とペDESTALとの接触によるものと推測している。これより、**酸化鉄は原子炉圧力容器内で、酸化鉄が生成したものと推測される。**これを踏まえれば、原子炉圧力容器内の環境として、燃料の一部を溶融させるほどの高い温度を持つ領域が原子炉圧力容器にあったものの、そのような高い領域は局所的な場所に留まっていたこと、酸化鉄が生成したと考えられる原子炉圧力容器内の環境として、酸化的な雰囲気にあったと推測される。

- このほか、X-6ペネ堆積物の形状から、**ペDESTALへの落下後に蒸気化を経た可能性がある。**





今回のまとめ・今後の方針

(今回のまとめ)

現状までに明らかになっているデータを踏まえ、6月に提示した5つの仮説(以下に再掲)を(Ⅰ)物理的性質(Ⅱ)化学的性質(Ⅲ)熱力学的性質という3つの柱でアプローチしていくことが適切と考え、これらの観点を手がかりに考察を行い、以下のような可能性が示唆された。

- 原子炉压力容器内で生成した酸化鉄をはじめとする物質は、ペDESTALへの落下による急冷を経た後に、蒸気化の過程を経たこと
- 蒸気化を含めた物質移送を起こしうるような特定の期間があったこと

(今後の方針)

調査開始に当たって提示した5つの仮説に立ち返れば、仮説の一部要素を検証できたもののもあれば、未着手のものもある。未着手のものうち、今回提示した考察から示唆されるペDESTAL下部から蒸気化の因子となる蒸気圧の考察が十分に行えていないことが課題としてある。なお、大阪大学・大石教授のご協力により、溶融物が蒸気化する可能性について、Fe及びFeOに関する熱力学計算を開始したところであり、雰囲気酸素分圧と物質の蒸気圧には相関があることは、手始めに見出されている。

具体的な調査事項として、

- 蒸気化が重要な要素であるため、観測されている化学形について雰囲気や温度条件を変化させたときに、蒸気圧がどのような挙動を示すのか
- ウランについての化学形に注目して、状態図からどのようなことが考えられるのか
- 燃料デブリ分析が平行して進んでいることから、その結果との比較

(下線は、考察に着手した箇所)

仮説1: 炉内で生成した溶融燃料が原子炉压力容器下部や格納容器へ落下する過程で、溶融燃料のうち一部の鉄、酸化鉄又は水酸化鉄が蒸発後、X-6ペネに移動する過程で凝縮し、酸化鉄微粒子になった。そして、X-6ペネ内で凝集し、100 μm 以上の大きさの集合粒子を形成した。(ⅠとⅡとⅢ)

仮説2: 大量の酸化鉄の粒子は、ペDESTAL下部において、鉄等の融点を大きく超える温度かつ酸化雰囲気下で生成されたのではないかと。鉄等の温度が融点を大きく超えていたとすると、そのような状況になるのは、溶融した鉄等を含む溶融燃料がペDESTAL底面のコンクリートと接触して急冷される前であると考えられる。(Ⅲ)

仮説3: X-6ペネで確認されたウラン粒子は、ウランの蒸発・凝縮によって生じたものではなく、溶融燃料が、ペDESTAL下部へ落下した際の衝撃又はコンクリートと接触した際の反応(コンクリートに含まれる水分の蒸発等)による飛沫が凝固し生成したものである。(Ⅲ)

仮説4: 压力容器直下、X-6ペネにつながる開口部と同じ高さの箇所に鉄板やグレーティング、制御棒駆動機構交換機等があり、そこに溶融燃料が落下したときの衝撃によりウランの飛沫の生成及び鉄等の蒸発が起きた。その後、ペDESTAL内の昇圧により、酸化鉄粒子及びウラン粒子がペDESTAL開口部から外部へ押し出された。(Ⅲ)

仮説5: X-6ペネの堆積物は、溶融燃料が高温である短い期間に堆積したのではないかと。(Ⅲ)