

福島第一原子力発電所事故 事故進展分析に関する ワークショップ(第三回)

日本原子力学会
原子力安全部会 オンラインワークショップ
2021年12月8日



本ワークショップの趣旨

- 原子力安全部会では、福島第一原子力発電所事故の分析とその教訓の反映が原子力安全の向上に必須であるとの認識のもと、様々な議論を深めてきた
 - 2012年に一連のセミナーを通じて事故の分析と検討を行い、またそのセミナーの内容を報告書としてとりまとめ
 - 2018年秋の大会の原子力安全部会企画セッションにおいては、「福島第一原子力発電所事故の解明の進展から学ぶ」として、事故分析の進捗とそれから得られる教訓について検討
- 原子力学会においても、事故の未確認・未解明事項の検討を実施
 - 2014年出版の学会事故調報告書において1F事故進展に関する未解明点の整理を実施
 - 福島第一原子力発電所廃炉検討委員会では、2018年1月にこれらの未解明点に関する調査状況に関する報告書を公表



本ワークショップの趣旨

- 規制委員会/規制庁にて、「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」が開かれ、事故進展にかかわる技術的分析が継続的になされている。
- それらの分析結果については、2014年10月8日に中間報告書が公表され、その後の調査・分析についても2021年3月5日に中間取りまとめが公表されている。
- 本ワークショップでは、事故分析検討会における技術的分析を入力情報として、原子力安全に資する幅広い議論を行いたい。



本ワークショップの進め方

- 三回に分けて技術分析の内容を詳細に議論する
 - 第一回(9/21):放射性物質の放出・漏えい経路(原子力規制庁 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 第一章)
 - 第二回(10/22):原子炉建屋における水素爆発(同 第二章)
 - 第三回(12/8):原子炉冷却のために機能すべき機器の動作(同 第三章)
- 二部構成とし、第一部での事故進展の個別の技術的論点に関する議論に加えて、第二部では原子力安全に関する幅広い視点からの意見交換を行う(以下は第二部の論点)
 - 分析結果から得られる原子力安全向上への教訓は何か
 - 事故進展分析をどのように進めれば良いか。得られた測定結果を事故進展解析の再現精度向上に使用するのか、あるいは、予測精度向上に使用するのか。それぞれの用途を想定した場合、取得が望まれるデータはあるか。
 - 従来の事故進展分析と異なる見解は得られたか、異なる見解が得られた場合、その理由は何か
 - 運転手順・保安規定・規制基準・検査制度などへの反映事項はあるか
 - 廃炉作業の安全性、現場保存、収集すべきデータの観点から留意事項は何か
 - 安全研究や設備開発に対する教訓は何か
 - 得られた測定結果から想定される新たな研究テーマは何か



プログラム(第三回)

13:30～13:40 開会

開会挨拶、趣旨説明及び第二回の振り返り:山本章夫(部会長、名大)、規制庁

13:40～15:10 第一部

東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る

中間取りまとめ報告

第一回、第二回の補足情報:木原昌二(規制庁)

原子炉冷却のために機能すべき機器の動作:星陽崇(規制庁)

質疑応答

15:20～16:30 第二部

事故の調査・分析から得られる教訓とその反映

全三回の議論を通じた今後の取り組み

意見交換:星陽崇、木原昌二、安井正也(規制庁)、山本章夫、参加者

16:30 閉会挨拶、糸井達哉(副部会長、東大)



ご協力をお願い

- 参加者の方は、マイクをミュートにしてください。
- お名前の表示が「名前_所属」となるように変更をお願いいたします。
- 質問やコメントについては、随時チャットもしくはgoogle formで入力してください。Google formは匿名で質問/コメント可能です。
 - <https://forms.gle/QjoXP1fK4m2uVwQa7>
- 直接発言される場合は、zoomの**挙手機能**でお知らせください。
司会から指名させていただきますので、
お名前・ご所属とともにご発言をお願いします。
- 時間及び取り扱う論点の関係で、全てのご質問・コメントに対応出来ない場合があります。あらかじめご了承ください。なお、いただいたコメントは安全部会における今後の検討に活用いたします。



第二回の振り返り



第二回(第一部)の振り返り

- 2号機シールドプラグに係る追加調査結果(最新情報)
 - 全体として中心部の線量率が高く、端に近づくに従い低くなる
 - 中心部においても、南北方向の線量率が高めの傾向にあり、東西方向の端は南北方向の端より線量率が低い
 - 3層のシールドプラグの継ぎ目部(2本の直線部)の線量率が高く、周囲部の線量率は低い(継ぎ目部が主なCsの移動ルートと推定)
 - 第一回で議論したように、水蒸気が大きな寄与をしていると推定
- シミュレーションの分類と活用方法
 - 以下の4つに分類して議論するのが良いのでは
 - ①初期条件+適切なモデル→将来予測、②初期条件+調査結果→モデル高度化、③調査結果+適切なモデル→初期条件推定、④調査結果+適切な初期条件(想定される初期条件)→モデル(メカニズム)推定
NRA調査チームとしては、③、④いずれかのパターンで活用を想定



第二回(第一部)の振り返り

■ 3号機建屋水素爆発

- オペフロの水蒸気濃度、3号機の天井が200m程度吹き上げられたこと、画像解析、爆発時の地震動の結果などから、これまで議論されてきたように高濃度水素の爆轟ではなく、水素や可燃ガスの爆燃や燃焼による「多段階の爆発」であったのではないかと推定
- ケーブル被覆材など、有機材料の分解からの可燃性ガスの発生についてNRAで検討を行っている。
- 1号機と3号機の爆発時のエネルギー(1号機の爆発の方が地面に伝わったエネルギーが大きい)、画像解析の精度や限界(補間処理の信頼性など)、建屋の大きな破片が200m程度吹き上げられるメカニズム(水素+可燃性ガス?)、水素の濃度分布などに起因する水素燃焼の不確かさ、1号機と3号機の建屋構造の違いと水素爆発時の噴煙の見え方の違い(オペフロ部分の壁厚の差異?)などについて議論あり



第二回(第二部)の振り返り

- 水素爆発による復旧活動への影響は甚大であり、これを考えると「水素爆発は起こさせない」ことが安全設計の目的になるのでは。
- 水素が発生してから爆発までに時間差がある。この知見を安全設計に生かせる可能性あり。可燃性ガスが煤を出すなら、煤が拡散しPARなどへ影響することも考えられる。
- 原子炉建屋に水素が漏洩すると、いろいろな区画に水素が滞留する可能性があり、対策がより困難になる。格納容器から水素の漏洩を防ぐマネジメントが重要。例えば、フィルタードベントの利用など。
- 水素爆発する可能性のある場所において、どの程度の人的対応が出来るのかはよく検討しておく必要がある。
- 閉じ込め機能を優先するか、水素対策を優先するか、過酷事故の進展フェーズによって優先する項目が動的に変わっていくのではないかと。深層防護のレベル毎に、対応のプライオリティが変わっていくのではないかと。



第三回(本日)の論点例



第一部論点

- 得られた測定結果と事故進展解析が整合していない点は何か
- さらに分析を進めるために必要なデータは何か
- 分析結果に関する論点
 - 過酷事故条件における安全系機器の動作状況の変化
 - 3月11日16時から24時頃の3号機RPV圧力変動挙動から、逃し弁機能の制御機構について考察できる事項
 - 3月13日4:30頃から9時頃までの3号機RPV圧力挙動の変化から、安全弁機能の動作圧力の変化/安全弁のリークについて考察できる事項
 - 格納容器温度と安全弁動作圧力変化の安全上の影響
 - 意図しない条件における工学的安全設備の動作(例:3号機ADS)の安全上の影響
 - 大量の水蒸気が存在する条件での過温破損のメカニズム
 - 3号機水素爆発がPCV閉じ込め性能に与えた影響



第二部の論点

1. 分析結果から得られる原子力安全向上への教訓は何か
2. 事故進展分析をどのように進めれば良いか。得られた測定結果を事故進展解析の再現精度向上に使用するのか、あるいは、予測精度向上に使用するのか。それぞれの用途を想定した場合、取得が望まれるデータはあるか。
3. 従来 of 事故進展分析と異なる見解は得られたか、異なる見解が得られた場合、その理由は何か
4. 運転手順・保安規定・規制基準・検査制度などへの反映事項はあるか
5. 廃炉作業の安全性、現場保存、収集すべきデータの観点から留意事項は何か
6. 安全研究や設備開発に対する教訓は何か
7. 得られた測定結果から想定される新たな研究テーマは何か



全三回の議論と今後の取り組み



第一回(第一部)の振り返り

- 耐圧強化ベント/SGTS/SGTSフィルターの調査
 - 2号機はラプチャーディスク破れずベント失敗
 - 1/2号機のベントライン/SGTSの線量は3/4号機より二桁程度高いが、メカニズムはまだ不明
 - 1/2号はスタックの底やベントライン配管の底の線量が高い。メカニズムはさらに要検討
- シールドプラグの調査
 - 1～3号機のCsの全インベントリが560PBq(崩壊考慮)、2/3号のシールドプラグに各30PBq程度付着。環境放出は15～20PBq程度とされている
 - 1号機のシールドプラグへのCs付着は少ないと見込まれるが、再度測定による確認が必要。
 - シールドプラグの中心付近の線量が高く測定されている
 - 三層あるシールドプラグの中間面にCsが沈着している模様
 - 原子炉ウエル内部は比較的低線量
- 上記の結果を原子力安全の向上や議論に役立てていただきたい



第一回(第二部)の振り返り

- 分析結果から得られる原子力安全向上への教訓は何か
 - 水蒸気の存在がCsの移行挙動に大きく影響している可能性
- 事故進展分析をどのように進めれば良いか
 - 事故進展解析と現場での調査結果を突き合わせる形で評価
 - シールドプラグ狭隘部における水蒸気の挙動と凝縮の評価
 - ベント配管内の水蒸気流動と凝縮水の挙動の評価
 - 事故の履歴が積分的に残るものと最終状態のみが残るものを区別して扱う必要性
- 従来 of 事故進展分析と異なる見解は得られたか、異なる見解が得られた場合、その理由は何か
 - SGTSのグラビティダンパーからSGTS経由で建屋への逆流がある程度存在。1号機については、SGTS経由の逆流は建屋の水素爆発の主たる要因ではない？
 - シールドプラグへの多量のCs付着とそのメカニズムは？
 - 原子炉ウエルが比較的低線量。格納容器上部のCs付着量は予想より少ない？そのメカニズムは？



第一回(第二部)の振り返り

- 運転手順・保安規定・規制基準・検査制度などへの反映事項は何か
 - 知見をどのように反映するかはケースバイケースであり、個別の議論が必要
- 廃炉作業の安全性、現場保存、収集すべきデータの観点から留意事項は何か
 - 原子炉・格納容器周辺のコンクリートコアのサンプル収集(熱履歴とコンクリート強度)
 - 廃止措置時のシールドプラグの取り扱い
- 安全研究や設備開発に対する教訓は何か
 - シールドプラグへのCs吸着メカニズムに着目したFPのトラップ・放出抑制機構の開発など

第二回(第一部)の振り返り

再掲

- 2号機シールドプラグに係る追加調査結果(最新情報)
 - 全体として中心部の線量率が高く、端に近づくに従い低くなる
 - 中心部においても、南北方向の線量率が高めの傾向にあり、東西方向の端は南北方向の端より線量率が低い
 - 3層のシールドプラグの継ぎ目部(2本の直線部)の線量率が高く、周囲部の線量率は低い(継ぎ目部が主なCsの移動ルートと推定)
 - 第一回で議論したように、水蒸気が大きな寄与をしていると推定
- シミュレーションの分類と活用方法
 - 以下の4つに分類して議論するのが良いのでは
 - ①初期条件+適切なモデル→将来予測、②初期条件+調査結果→モデル高度化、③調査結果+適切なモデル→初期条件推定、④調査結果+適切な初期条件(想定される初期条件)→モデル(メカニズム)推定
 - NRA調査チームとしては、③、④いずれかのパターンで活用を想定

第二回(第一部)の振り返り

再掲

■ 3号機建屋水素爆発

- オペフロの水蒸気濃度、3号機の天井が200m程度吹き上げられたこと、画像解析、爆発時の地震動の結果などから、これまで議論されてきたように高濃度水素の爆轟ではなく、水素や可燃ガスの爆燃や燃焼による「多段階の爆発」であったのではないかと推定
- ケーブル被覆材など、有機材料の分解からの可燃性ガスの発生についてNRAで検討を行っている。
- 1号機と3号機の爆発時のエネルギー(1号機の爆発の方が地面に伝わったエネルギーが大きい)、画像解析の精度や限界(補間処理の信頼性など)、建屋の大きな破片が200m程度吹き上げられるメカニズム(水素+可燃性ガス?)、水素の濃度分布などに起因する水素燃焼の不確かさ、1号機と3号機の建屋構造の違いと水素爆発時の噴煙の見え方の違い(オペフロ部分の壁厚の差異?)などについて議論あり

第二回(第二部)の振り返り

再掲

- 水素爆発による復旧活動への影響は甚大であり、これを考えると「水素爆発は起こさせない」ことが安全設計の目的になるのでは。
- 水素が発生してから爆発までに時間差がある。この知見を安全設計に生かせる可能性あり。可燃性ガスが煤を出すなら、煤が拡散しPARなどへ影響することも考えられる。
- 原子炉建屋に水素が漏洩すると、いろいろな区画に水素が滞留する可能性があり、対策がより困難になる。格納容器から水素の漏洩を防ぐマネジメントが重要。例えば、フィルタードベントの利用など。
- 水素爆発する可能性のある場所において、どの程度の人的対応が出来るのかはよく検討しておく必要がある。
- 閉じ込め機能を優先するか、水素対策を優先するか、過酷事故の進展フェーズによって優先する項目が動的に変わっていくのではないかと。深層防護のレベル毎に、対応のプライオリティが変わっていくのではないかと。



今後の取り組みや検討例

- 2号機ラプチャーディスクの現物確認
- 1/2号機と3/4号機ベントとSGTSの線量の差異の原因
- SGTSグラビティダンパーの効果
- シールドプラグへのCs吸着と水蒸気挙動の関係
- PCV内外のCs分布(原子炉ウエル線量低)
- 過酷事故時の水素以外の可燃性ガス発生
- 1, 3号機の水素爆発の様相の違い(爆発エネルギー量、破片の吹き上げメカニズム)
- 過酷事故時の可燃性ガスマネジメント
- 放射性物質閉じ込めと水素ガス対策のマネジメント

原子力学会「未解明事項フォロー」との関係

- 2014年3月に出版した原子力学会事故調報告書に「事故進展に関し今後より詳細な調査と検討を要する事項」を記載
- 2018年1月に原子力学会廃炉検討委員会にて、上記の未解明事項+追加的な事項を調査・評価

福島第一原子力発電所事故：
未解明事項の調査と評価

2018年1月



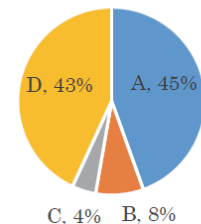
一般社団法人 日本原子力学会
福島第一原子力発電所廃炉検討委員会

A: 合理的な説明がなされていると判断されるもの
B: 既存発電所の安全対策高度化や廃炉作業の進捗の観点から重要でないと考えられるもの
C: 重要度は高いが、現時点では、これ以上の調査が困難であると考えられるもの
D: 重要であり、今後も継続した検討が望まれるもの
なお、項目によっては、A/B、A/C、A/Dのように複数の評価結果が与えられているものがあるが、これは、当該の未解明事項が複数の内容を含んでおり、これら複数の内容に対する評価が異なることを示している。

73項目の課題に対する評価結果の割合は、以下のようにまとめられる。

A: 45%
B: 8%
C: 4%
D: 43%

(複数の評価結果を含む項目については、それぞれの評価結果に対して等分の割合とした。)



未解明事項フォローで取り扱われている事項との関係

- 6. 炉心損傷後のSRVの動作
 - 格納容器内温度とSRC動作圧力の関係の説明(A)
- 16. 格納容器からの気相(水素・蒸気含む)の漏えいメカニズムおよび漏えい経路。また、漏えい量の時間的变化。
- 18. 気相として格納容器から原子炉建屋、さらに環境中に放出された放射性物質の量と時間変化、化学形態
 - シールドプラグへのCs吸着によりPCV上部からの漏洩の重要性が明らかに(D)
 - シールドプラグへのCs吸着が環境への放出を低減していた可能性(D)
- 23. 圧力容器内で発生した水素が、格納容器から建屋内に放出される主な経路、格納容器内および建屋内の水素濃度の時間変化および爆発の進行過程の詳細
 - 特に3号機水素爆発の形態について新たな解釈(D)
- 26. RPV,DW,S/C圧力と温度の計測値の信頼性
 - 本日の議論
- 41. 1号機水素爆発、同日14時頃に行われたベントとの因果関係
 - SGTSへの逆流がなかったという従来の見解とは異なる結果(A)
- 45. 1号機SGTS配管の高線量汚染
 - 汚染状況がかなり明確になったが、メカニズムについてはさらに検討が必要(D)
- 60. 2号機ラプチャーディスクの作動状況
 - ベントラインの線量測定はRDが動作していないことを支持。現物の確認が望まれる。(D)
- 65. 3号機原子炉圧力の挙動
 - 圧力変動については、熔融燃料が下部ヘッドに移行し、大量の蒸気を発生させたことと推定(B)



新たな未解明事項

- 過酷事故時の水素以外の可燃性ガス発生
- シールドプラグへのCs吸着と水蒸気挙動の関係
- PCV内外のCs分布(原子炉ウエル線量低)