

安全部会セッション
2018年9月6日@岡山大学

福島第一原子力発電所事故の 解明の進展から学ぶ

(2) 解明／未解明事項の整理と原子力安全研究への教訓

名古屋大学 山本章夫



本発表の概要

- 背景
- 福島第一原子力発電所事故の未解明事項の調査と評価の概要
- 原子力安全研究への教訓
- まとめ



背景

- 福島第一原子力発電所事故から7年半が経過し、事故進展に関して、多くの知見が得られてきた。
- 日本原子力学会の福島第一原子力発電所廃炉検討委員会において、「事故進展に関する未解明事項フォローWG」(未解明WG)が設置された。
 - これまでに得られた知見と、残された未解明事項の整理
 - その成果は、2018年1月に廃炉委のHPで報告書として公開
- この未解明事項の調査と評価において整理された知見や、残された未解明事項に基づき、原子力安全研究において今後取り組むべき課題を議論する。



未解明事項の調査と 評価の概要



未解明事項の調査方法の概要

- 学会事故調報告書(2014年3月)の第6章付録に示された「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」に加え、69編の国内外の報告書を精査
- 事故進展解明に関する新たな知見や、残された未解明事項を調査
- 抽出された73項目の課題について、これまでに得られた知見と、未解明WGとしての評価を「対象号機」「日時」「分類」「対象物」「未解明事項」「内容」「調査資料」「調査結果」「評価結果」からなる整理表として取りまとめ



調査対象とした報告書

- 52編の国内の報告書類（事故調報告書第6章付録に記載している14編の参考文献を含む）
- 17編の国外の報告書
 - 各種事故調報告書
 - 原子力規制庁事故分析
 - 経産省技術ワークショップ
 - NDF/IRID廃炉関係報告書
 - 東電未解明問題検討進捗レポート
 - 安全部会セミナーレポート
 - 新潟県技術委員会資料
 - その他

未解明事項整理表

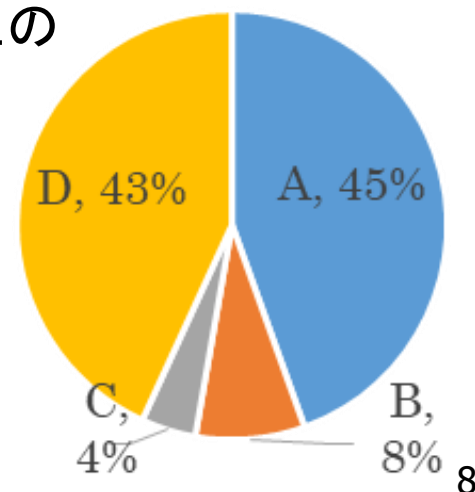
福島第一原子力発電所事故未解明事項およびその検討状況に係る整理表

※1 各報告書は『事故進展に関する未解明事項フォローWG』において調査した報告書一覧』に記載。

番号	対象号機	日時	分類	対象物	未解明事項	内容	調査資料 ^{※1}	調査結果 / 評価結果
1	共通 対象号機	津波襲来時 日時	津波	原子炉建屋、コントロール建屋、タービン建屋、タービン建屋	津波の進入経路と、原子炉建屋、コントロール建屋、タービン建屋の各部屋(区画)の浸水開始時刻、最大浸水深、浸水深の時間変化 1号機 DG の機能喪失要因	30.学会事故調最終報告書(表6章付録) たとえば、2号機の RCIC 室については、3月12日午前2時頃までに原子炉建屋内への水の侵入があったことが報告されている。一方、「政府事故調最終報告書」では、4号機原子炉建屋の浸水状況から2号機原子炉建屋の浸水の推認をすることは困難があるとしている。また、「国会事故調報告書」では、津波襲来前に非常用 DG が停止した可能性が指摘されている。浸水経路とその時間変化に関する情報は、原子炉建屋の低い位置に設置されている各種機器・電源の機能喪失を時系列で詳細に確認する際に必要である。	9(8) 35 20 37 38	【調査結果】 9(8). 規制庁検討書: 13 ページ～ 1号機 DG(A)が津波により機能喪失したこと及びその原因を、現地調査、過渡現象記録装置の計測データ、東電による津波到達時間評価結果等から分析。 35. 日本学術会議総合工学会原子力事故対応委員分科会の報告書 (p. 16) 1号機への津波到着時刻は15時36分47秒前後と推定されている。 20. 東電 52 項目: 添付資料 地震津波-1 連続写真の分析等により、津波が発電所に到達した際の挙動を、時系列に整理。津波の敷地への到達時刻、海水ポンプ等の機能喪失時刻を分析。敷地への津波到達時間は15時36分台であること、DGの運転記録および非常用電源盤の電圧の分析結果から津波が原因でDGが機能喪失したと示している。 20. 東電 52 項目: 添付資料 1-3 1号機 DG(A)が津波により機能喪失したことを、過渡現象記録装置の計測データから分析。 20. 東電 52 項目: 添付資料 2-2 2号機格納容器圧力の上昇が、解析で想定されるより小さい原因を分析している。一つの仮説として、トラス室へ流入した海水がヒートシンクとなった可能性を検討。このシナリオにより、格納容器圧力上昇の抑制が説明できることを示した。 37. 新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会 平成28年度第2回委員会資料3 (委員等の意見) 全電源喪失の原因について国の検討会や東京電力が検証している。原因は浸水と考えられるが、浸水原因の検証は不十分であり、全電源喪失に至った詳細なプロセスは不明である。1号機以外における全電源喪失のプロセスについても確認する必要がある。 38. 福島事故検証課題別ディスカッション【地震動による重要機器の影響】第8回資料2 非常用電源設備への津波侵入の経路長が長いほど機能喪失時刻が遅い傾向が確認できており、非常用交流電源は津波により機能喪失したと推定される。 【評価結果】 A 廃炉確認 ・種々の評価結果及びDGの機能喪失時に余震が重なったことと合わせて考えると、DGの機能喪失に至った要因は、浸水であると考えることが最も合理的であると見られる。 ・各建屋への浸水のプロセスは、津波侵入の経路長と機能喪失時刻との相関を確認されているなど、概略については把握できていると考えられる。ただし、津波侵入プロセスについては、高精度津波シミュレーションや廃炉作業において新たに得られる知見を活かして、より詳細な全体像を検討する余地がある。
2	共通	津波襲来時	冷却	注水ポンプ (HPCI, CS, CCS, MWC, CRD, SLC, R HRS)	被水・没水による注水ポンプ (HPCI, CS, CCS, MWC, CRD, SLC, R HRS) の機能喪失状況	30.学会事故調最終報告書(表6章付録) 電源喪失もしくはサポート系の喪失で機能喪失したものと、本体の被水・没水で機能喪失したものの分類が必要と考えられる。「技術的知見」の表 IV-2-1 に状況がまとめられているが、「政府事故調中間報告書」によると、たとえば、1号機の地下1階は水没していたとされており、電源が失われなかった場合に、地下階に設置されていた機器などが使用できたかどうかは確認できない。交流電源が失われていなければ使用できたものと、交流電源が失われていなくても使用できなかったものの分類が事故対応に関する検討をさらに進めるうえで必要と考えられる。	35	【調査結果】 35. 日本学術会議総合工学会原子力事故対応委員分科会の報告書 (p. 2, 3, 8) 3号機の HPCI に関して、津波襲来後12日11時36分に RCIC が停止、その後12時35分に HPCI 起動に成功。ただし、HPCI による冷却は原子炉圧力が低下した12日17時30分頃以降は有効に働いていなかったと考えられる。13日2時42分頃、手動で停止される。 【評価結果】 C ・廃炉作業において現場確認は可能であると考えられるが、現場確認の結果から事故当時の機能喪失状況を検討することは困難であると考えられる。

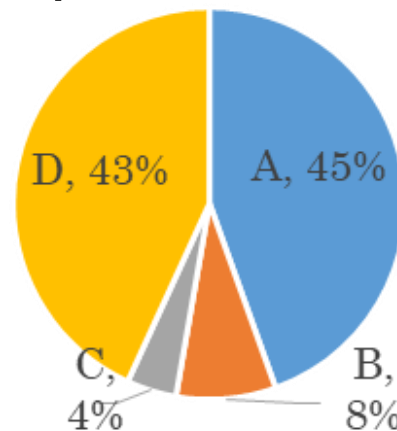
調査結果の概要

- 文献調査の結果、抽出された73項目の課題について、これまでに得られた知見と評価結果を整理表の形に取りまとめた
- 各課題について、以下の様に分類されている
 - 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



調査結果の概要

- Aの「合理的な説明がなされている」と判断される課題が相当数に上る
- Dの「継続して検討が必要な課題」は、現時点においても項目数は多い
 - 特に、調査が限定的である格納容器内部、あるいは調査が行われていない原子炉容器内部の現状、あるいは溶融燃料挙動に関連するものが多くを占める
 - 現場・現物の確認が重要であり、今後の廃止措置に伴う調査での解明が期待される(A/D8件, C/D1件含む)





原子力安全研究への教訓



評価結果から示唆される 安全研究の課題

■ 津波シミュレーション

- 建屋に対する津波侵入プロセスについては、高精度津波シミュレーションや廃炉作業において新たに得られる知見を活かして、より詳細な全体像を検討する余地がある。
- 建屋や設備の被害状況の再現の観点から、継続して津波シミュレーション手法の高度化に取り組むことが重要である。

■ 海水冷却時の除熱効果

- 塩分を含む海水を代替注水したときの冷却効果(熱伝達)については、必ずしも知見が十分ではなく、継続して検討する余地がある。

評価結果から示唆される 安全研究の課題

- 過酷事故時の γ ヒーティングの効果
 - 炉心に冷却材がない状態では、 γ ヒーティングによる発熱分布は、冠水状態に比べて変化すると考えられるが、定量的な評価はなされていない。
 - この効果を定量化することにより、燃料の温度上昇など、事故進展への影響を評価することができると考えられる。
- 酸化ジルコニウムの高温特性
 - 酸化ジルコニウムの機械的特性の基礎的なデータは存在するが、高温時の特性も含め、必ずしも最新のデータではないことから、より信頼性の高いデータの取得が望まれる。

評価結果から示唆される 安全研究の課題

- DCH、シェルアタック、水蒸気爆発
 - 廃炉作業に伴い、原子炉容器及び格納容器の破損形態、破損メカニズム、原子炉容器内・格納容器内の状況が明らかになると想定される。DCH、大規模なシェルアタックや水蒸気爆発が発生しなかったメカニズムを継続して検討することは過酷事故進展の理解の上で重要であると考えられる。
- 溶融燃料の性状と移行経路
 - 原子炉容器内の状態は、ミュオンによる調査以外の情報は得られていない。また、燃料デブリの性状については、不確かな点が多く、今後継続して検討が必要である。また、得られる知見をシビアアクシデント解析の高度化につなげることが重要である。



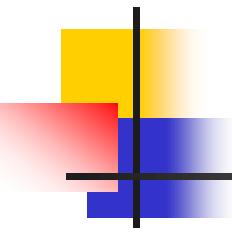
評価結果から示唆される 安全研究の課題

- 原子炉容器・格納容器の損傷、MCCIの状況
 - 原子炉容器、格納容器の損傷状態、MCCIの状況については、詳細は明らかになっておらず、廃炉作業の進展に伴って得られる情報を取り入れつつ、事故進展再現の観点から継続した検討を行うことが必要である。
- 水素爆発シミュレーション
 - 廃炉作業に伴って得られる現場の情報を加味しつつ、水素爆発シミュレーションの高度化を行うことは、より精緻に現象を理解するために重要である。



評価結果から示唆される 安全研究の課題

- 過酷事故時の計測機器の信頼性
 - 廃炉作業における現場確認の知見などを活用して、計測機器の信頼性について検討を進めることが望まれる。
- RCICの駆動メカニズムと停止メカニズム
 - 2号機におけるRCICの動作については、二相流によるRCICタービン駆動により、合理的に説明できるが、今後、試験などを行うことにより、二相流によるRCICのタービン駆動状況について確認をすることが可能になると考えられる。また、RCIC停止のメカニズムが推定されているが、廃炉作業時にRCICの状態を確認することにより、その妥当性を確認することができる。



評価結果から示唆される 安全研究の課題

- 非凝縮性ガスがS/Cの健全性に及ぼす影響
 - 非圧縮性ガスがS/Cの健全性に与える影響については、継続して検討が必要と考えられる。
- PLRポンプメカニカルシールの健全性
 - 交流電源喪失時におけるPLRポンプメカニカルシールからの冷却材漏えい挙動を把握することは、特に事故対応が長期にわたる場合、重要になる可能性があり、継続して検討が望まれる。

評価結果から示唆される 安全研究の課題

- 環境中に放出された放射性物質の量や化学形態など
 - 環境中に放出された放射性物質の量については、不確かさが大きい状況である。廃炉作業時の知見などを取り入れることにより、不確かさを低減する検討が可能になる。また、シビアアクシデント時の放射性物質の移行については、放射性物質の化学形態が重要になるが、知見が十分でない場合があり、今後継続して検討していく必要がある。
- モニタリングされた放射線のピークと放出量
 - 廃炉作業時に得られる格納容器損傷状態の情報、解析の高度化などを含めて継続して検討することが望まれる。



安全研究に対する教訓

- まとめた課題を概観すると以下に大別される
 - ①シミュレーション手法の高度化
 - ②過酷事故時の現象の理解の深化
 - ③ ①・②を支える基礎データの取得
- シミュレーション手法の高度化は、過酷事故解析、津波シミュレーション、水素爆発シミュレーション、大気拡散シミュレーションなどがあり、事故時の原子力発電所の振る舞いを正確に予測し、安全対策に活かすという観点から重要である。



安全研究に対する教訓

- 過酷事故時には多種多様の複雑な物理現象が発生する。これまで実機における詳細な観測例が存在しないMCCIやBWRに特有の原子炉容器下部の制御棒駆動機構の破損メカニズム、ウエットベントの性能など、さらに理解を深化させる必要がある課題が存在する。
- また、シミュレーション手法の高度化や、現象の理解を深化させるためには、これらを支える基礎的なデータの拡充も必要である。福島第一の事故前は、このような基盤的な安全研究が十分に行われていたとはいえず、福島第一事故後に精力的に取り組まれているとはいえ、さらなる取り組みが必要である。



まとめ



まとめ

- 本稿では、福島第一原子力発電所事故の事故進展に関し、残された未解明事項を元にして、取り組むべき安全研究の課題を概観
- 今後、福島第一の廃炉作業が進展するにつれ、特に原子炉建屋内、格納容器内、原子炉容器内の状況が明らかになり、残された未解明点に関する知見が新たに得られていくものと考えられる。
- 取り組むべき安全研究の課題は、新たに得られる知見を反映しつつ、今後も検討していく必要がある。