

日本原子力学会安全部会「福島第一原子力発電所事故に関するセミナー第4回」  
議事メモ

本議事メモは発言者の承認を得ておりませんので、講演者及び事務局以外の参加者から頂いた発言については個人名を記載せずに「参加者」と致します。

1. 日時:平成 24 年 8 月 10 日(金) 13:30 ~ 18:00
2. 場所:東京大学 本郷キャンパス 工学部 11 号館 講堂
3. 座長・発表者・参加者  
座長: 関村直人(副部会長, 東大)  
発表者: 阿部清治(部会長, JNES)、宮田浩一(東京電力)、守屋公三明(日立GEニュークリア・エナジー)、  
その他の参加者: 90名(計94名)  
合計: 名
4. 議事項目
  - (1) 開会挨拶とセミナーの趣旨説明: 関村直人(副部会長, 東京大学)
  - (2) 第3回セミナー概要報告(松井幹事, 中部電力)
  - (3) 福島第一原子力発電所事故について(4号使用済み燃料プールを中心に): 宮田浩一(東京電力)
  - (4) 討論
    - 使用済み燃料プール(SFP)で起きた事象と今後の検討課題: 阿部清治(部会長, JNES)
  - (5) 福島第一事故の教訓を反映した今後の安全確保の考え方
    - 中間とりまとめ趣旨説明: 阿部清治(部会長, JNES)
    - 福島第一事故の教訓を反映した安全確保の考え方: 守屋公三明(日立GEニュークリア・エナジー)
    - 討論
  - (6) 次回以降のセミナー案内及び閉会挨拶
5. 配布資料
  - 資料1 頭紙、セミナー趣旨、本日のプログラム
  - 資料2 第3回セミナーの概要
  - 資料3 福島第一原子力発電所事故について(4号使用済み燃料プールを中心に)
  - 資料4 使用済み燃料プール(SFP)で起きた事象と今後の検討課題(4号機の事象を中心に)
  - 資料5 福島第一事故の教訓を反映した今後の安全確保の考え方
  - 資料6 第5回以降のセミナーの開催予定とテーマ

## 6. 議事概要

### 6.1. 開会挨拶と趣旨説明

関村副部会長より以下のとおり趣旨説明があった。

原子力安全部会は、安全に対する当事者であり、福島第一事故に関して安全を専門とする立場から、何が問題であったのか、これから何をなすべきかを議論するためにこのようなセミナーを企画した。

第1回では全体として何が問題であるかを、防災の面も含めて討論した。第2回は1号機の事象を中心にして論点の整理、更にこれからの教訓を如何に導き出すべきかを議論を重ね、更に前回は、2号機及び3号機について同様の議論を深く行った。

本日は、4号機における使用済み燃料プールの課題を前半で取り上げ、これにて、実際に事故が起こった1号機から4号機の各号機について一通りの議論を進めることができると考える。

後半は、安全部会としてどのような形でセミナーでの議論を取りまとめて報告書の形にしてゆけるか、中間的な取り纏めの骨子について、1号機から4号機での事象を踏まえて提案させていただき、これについても議論を深めさせていただきたい。事故がどのようなところから起きるかを考えると、安全部会が設立された主旨である様々な検討課題を全体として見渡して、どの点に抜けがあったか、どのような点を今後深めて行けばよいか原子力安全を高めて行くための教訓をここでしっかり議論させていただきたい。また、種々の事故調査報告書や報道の中には、実際に起こったことと異なる情報もあるため、これを更に安全部会として専門家の立場で確認し、こうした情報を正すことも我々の役目と考えている。

第5回以降では、防災、コミュニケーション、情報伝達の考え方の議論も行う予定であり、安全部会として取りまとめてゆく上で重要な課題となると考えているが、今回はまずは1号機から4号機までの、設備、安全設計を中核としながら中間的な取り纏めとしてゆきたい。

## 6.2. 第3回セミナー概要報告

松井幹事より第3回セミナーの概要について以下の説明があった。

第3回セミナーでは、東電宮田氏からの福島第一2号機、3号機についての事故の解説、及び東芝磯田氏からの計装系の課題について解説をいただき、その後阿部部会長の方から論点整理をいただきながら討論を進めた。それぞれについて簡単に説明する。

### (1)福島第一原子力発電所事故について(2、3号機)(東京電力 宮田浩一氏)

#### ○ 2号機の事故経緯

津波により全電源が喪失し、プラント状態の把握も不可能となった。RCICにより約3日間注水がなされたが、RCIC停止後、逃がし安全弁(SR弁)を開いて減圧し、消防車による注水を行ったが、減圧等に手間取り、炉心損傷に至った。

2号機で大きな音がして格納容器破損が疑われたが、地震計の記録から、現在では、4号機の水素爆発と考えられる。また、後日の現場調査の結果では、2号機の格納容器が大きく損傷した形跡はない。

2号機では、オペフロのシールドプラグ付近の線量レベルが高く、格納容器ヘッドフランジのシール部から気体が漏洩した可能性が高い。

放射性物質放出量は、15日の放出が全放出量に最大の寄与をしているが、この時間帯は2号機の格納容器圧力が低下した時間帯と一致しているので、2号機から放出されたと考えられる。

#### ○ 3号機の事故経緯

津波により全交流電源喪失が起こり、RCIC、HPCIで約2日間注水。HPCI停止後の消防車による注水では、SR弁による減圧に数回失敗し、炉心損傷に至った。

### (2) 計装系に係る課題(磯田氏)

計装系の課題に関しては、主要な計装系の仕組み、事故時の挙動、得られる教訓について解説があり、主なものは、次のとおり。

- ・ 原子炉水位は、計測配管内の保有水が蒸発し、実際と異なり、見かけ上、上昇したり一定の値を表示。
- ・ 原子炉圧力は、震災当初、電源喪失で電気信号断となったが、バッテリー接続で復帰。
- ・ S/C圧力は、トラス室が浸水し、伝送器の水没により故障と推定。
- ・ CAMS(格納容器内雰囲気モニタ)では、放射線計測はバッテリー接続後復帰した。CAMSデータを炉心損傷の推定へ応用する動きもある。水素、酸素濃度はバッテリー接続後も復帰せず。
- ・ SPDS(安全パラメータ表示システム)は、プロセス計算機の電源喪失で信号が送られずSPDSで情報収集できず。
- ・ 今後の課題・教訓：①計測器の電源確保、②水位計の多様化、③(機能維持できたものを含め)環境悪化に対する耐性強化。

### (3) 総合討論(司会: 関村副部会長)

主な議論は、以下のとおりであるが、議事メモからの抜粋であり安全部会の見解というわけではないことをお断りしておきたい。

- ・ 2号機からの大きい放出につき、原子炉圧力低下の一方で、水位が下がって炉心損傷が生じていることを把握しながら、対応ができなかった理由につき質疑：3号機爆発によるライン損傷、線量増加によるアクセス困難、消防車燃料切れ、SR弁の意図せぬ閉止等が重なり、減圧注水が遅れたこととの説明。
- ・ SA時の設備利用可能性に関する質疑：RCICの手順書充実化などの改善進行中との説明、アクセス性の考慮が重要との意見。
- ・ CVの役割、原子炉建屋の役割に関する議論：ベントラインの設計の考え方に関する説明。参加者より、格納容器の設計につき、PWRの格納容器の余裕は比較的大きいとの意見。

(計装系に関する議論)

- ・ 入手した情報がどんな意味を持つのかを共有することが大事であるが困難であった。データがどのようなものか、どのような原理で不確かさがどの程度か、といった情報がデータと併せて判るようにすべきとの意見。
- ・ 前記事項につき、専門家の寄与などについて安全部会としても検討すべきとの意見。

(その他の議論)

- ・ 事象の早い進展について対応ができず事故に至ったとの印象を受ける。早い事象に対応することを安全として考えてゆく必要がある。今回は、人が不足しているとの印象を受けたので、ヒューマンファクターという要因についても考える必要があるとの意見。
- ・ PSA では確率の数値が重要視されがちだが、シナリオが重要。今回、水素が漏洩して爆発したが、一つの重要な事故シナリオ。今後、事故シーケンスの不確かさについて検討を深めてゆくことが重要との意見。

### 6.3. 福島第一原子力発電所事故について(資料3)

東京電力の宮田浩一様より、以下の説明がなされた。

(4号機の燃料プールについて)

- ・ 福島第一原子力発電所の建屋・設備配置、使用済燃料貯蔵量について説明。全号機の中で、定検中の4号機燃料プールが、シュラウド交換作業のため、全炉心燃料がプールに取出されていたことから、1,535体の燃料集合体が貯蔵され、熱的に最も厳しい状況であった。
- ・ 4号の状態は、資料中のフェーズAでは、津波襲来後、交流電源が喪失、水位が低下して燃料頂部(TAF)が露出するのは3月下旬頃と見て、他号機の冷却を優先しつつ、4号機の冷却の検討を行っていた。14日に運転員が確認したところ、プール水温は84℃と高い状態だったが、予想した範囲だった。
- ・ フェーズBでは、3/15衝撃音と振動を伴う爆発が発生し、当初は、2号機のサブプレッションチャンバーでの爆発と考えられていたが、後に4号機の爆発と判明した。4号機では、爆発の原因(課題1)、爆発によるプールの健全性、燃料の健全性(課題2)、水位の確保(課題3)が不明の中で、冷却手段を探していた。  
ただし、建屋周辺の線量はアクセスできる程度の線量だったことから、水による遮蔽が効いていると考えればおそらく水はあると思われたが、確信は無かった。
- ・ フェーズCでは、3/16に上空からプール水面が確認でき、3/20より放水車・ポンプ車による注水が可能になり、安定的な冷却ができるようになり、各号機の優先順位を考えながら対応した。3、4号機のプールについて3号機プールへの注水を優先したのは、4号機で水位面が確認できた一方で、3号機の水面は瓦礫で確認できなかったため。

(課題1 爆発の原因)

- ・ 建屋外観は、各方位の壁や天井に相当の損傷があるが、屋根トラスや柱がある程度形状を維持していた。原因は、後ほど解説するが、3号機からの水素が、SGTSダクト内で爆発したものだ。
- ・ 爆発の原因として、使用済燃料過熱に伴う水素、油の気化、持ち込み可燃物(アセチレンガス)、水の放射線分解による水素の可能性が検討されたが、いずれも、プール水位が維持されていることや、現場確認や爆発規模との整合により否定された。
- ・ 設計情報を検討している中で、3号からSGTS配管を逆流して、4号機建屋に水素が流入した可能性がでてきた。また、4号機のSGTSラインの弁類は、電源喪失時には全て開となる設計だった。1～3号機は、閉じるものがあった。
- ・ 確証を得るために、SGTSフィルタトレインの線量測定をしたところ、フィルタの3号機側に高い線量が確認された。また、5階面の床は上に持ち上がっており、下から力が加わっていた。一方、4階面の床は凹んでいた。また、4階のSGTSダクトが喪失し、破片が床一面に散らばっていることから、4階の換気空調ダクト内で水素爆発が起こり、建屋を損傷させたと推定している。

(課題2-1 プールの健全性)

- ・ 使用済燃料貯蔵プールは、プールの下階に水の漏えいが認められないこと、プールを支える壁(シェル)に異常が無いことから、プール躯体は健全であると判断している。また、建屋自体が傾いてないかという指摘に対して、5階の床面とプール水面の距離が、複数のポイントで差異がないこと、建屋壁の垂直度を光学的に調べたところ、建築基準法の基準内で、問題ないことを確認している。
- ・ また、原子炉建屋が壊れた状態で、今回の地震が起きても、十分な耐震性があることを解析により確認している。ただし、安心のために、プールの下階にコンクリートを打せつし、プール底部を支えるように補強し、耐震余裕度を20%程度向上させた。

#### (課題2-2 燃料の健全性)

- ・ プール内の撮影ではこれまで異常は認められておらず、現在燃料を共用プールに移す作業をしているが、異常は認められていない。また、プール水の核種測定では、1～3号機に比べて2桁低いレベルでセシウムとよう素が検出された。しかし、よう素は半減期が8日と短く、核分裂停止後は急速に減っていくため、プール水から検出された放射性物質は、停止中の4号機起因ではなく、運転中だった1～3号機からの放出による影響と考えられる。これらのことから、4号機の使用済燃料には、大規模な損傷は無かったものと推定している。

#### (課題3 プール水位)

- ・ プール水位は、津波襲来後、低下したが、水位低下により、プールゲートのシール性能が低下し、原子炉ウェル、ドライヤーセパレータピットの水がプールに流入し、プール全体の水量が増えたものと推定し、その結果、水位低下が緩慢になり、かつ、水位が維持されたと、実測も踏まえ評価している。

#### (その他号機の燃料プール、共通設備について)

- ・ 1号機は、崩壊熱量が非常に小さく、時間に余裕があると見込まれていたことから、水位の復旧作業は5月末とかなり後だった。
- ・ 2号機の水位は、ギザギザしているが上にあがった時に水位を実測できている。温度計の実測がギザギザしているのは、温度計がプール水面近傍にあり、水位が上がっているときは冷却できていない高い水温を、水位が下がっているときは空気の温度を測定しているため。5/30以降は冷却により温度低下している。
- ・ 3号機でも、同様に評価しており、水位は維持されている。
- ・ 5, 6号機、共用プールについては、一旦70℃付近まで実測で上がっているが、冷却が復旧した後は温度が低下し、安定した冷却を継続している。
- ・ 各号機のプール水の核種測定結果は、多少状態の差はあるが、よう素が時間の経過とともに検出されなくなる傾向は同じで、原子炉から発生したセシウムが検出されている状態。
- ・ 乾式貯蔵キャスクは、津波により、大量の泥、海水、砂、瓦礫が建屋に流入し、床面浸水、ルーバや扉が損傷したが、空気の流れに支障はなく冷却上の問題はなく、放射能レベルもバックグラウンド程度なので、密封性は維持出来ていると推定している。今後リーク試験をする予定。
- ・ 現在、使用済燃料貯蔵プールでは、通常の冷却系が使用できないため、仮設による一次冷却設備及び空冷による二次冷却設備を設けている。信頼性確保のため冷却設備及び補給水系を冗長化しており、また、水源も多様化している。仮に、冷却系に問題があっても、65℃からTAF+2mまでの時間的余裕は、2号機では40日程度と長く、対応には余裕がある。また、海水を注水したことから、塩素濃度を下げる努力をしている。プール水中の塩素濃度は、100ppm以下の目標に対して11ppm程度と低い状態になっている。

#### 質疑応答(事実確認)

(関村副部長) ウェルのゲートが空いてプールに水が流れ込んだ時期は、事実として確認しているわけではなくて、シミュレーション結果と併せて、推定しているという理解でよいか。

(説明者) そのとおり。はっきりはしないが、ヘリから水位を確認できた頃(資料 p13 の 3/16 頃)より少し前にゲートが開いたのではと想定している。なお、グラフのギザギザは、実測と注水状況に歩留まりを考慮して推定したもの。

(参加者) 4号機ダクト内の水素燃焼の火種はどのような候補があるのか

(説明者) 政府報告書も強く指摘しているが、静電気でも水素は爆発するので、火種はわからない。この状況で現場の詳細な調査はできないし、今現場を見ても痕跡はわからないだろう。

(参加者) p13 の絵で燃料のトップの位置はゲートの位置よりもっと下ではないか。ウェルのゲートは、燃料プールから炉心側に押しつけているだけか。

(説明者) そのとおり。ポンチ絵は、位置関係まで厳密に描いていない。

#### 6.4. 討論

(関村副部長) まずは阿部部長から、SFPの今後の検討課題について論点をまとめていただく。

(阿部部長)

- ・ SFPの安全問題としては、水位が燃料頂部近くまで低下すればアクセスが困難になること、更に低下して燃料有効長の中ほどまで露出すれば燃料は溶融することから、事故時には何をしても水位の維持と確認が重要である。ただ、燃料プールの事象進展は炉心に比べればはるかに遅いため、時間余裕を考えた適切な

対応が必要である。

・ 4号機で起きた事象の確認:

- SFPでの燃料溶融の懸念自体ははじめから、水がなくなれば炉心と同様に燃料溶融の可能性が考えられたが、燃料露出までの時間ははるかに長い。
- 3月15日6時14分、原子炉建屋上部で爆発したときは、最初は誰も3号機からの水素とは思わず、「燃料が露出して水素発生」と推定した。実際は事故期間中燃料露出はなかった模様。
- 4号機での爆発は、2号機のS/C付近での爆発音と誤認された。
- プール水のサンプリングで低濃度の放射能が検出され、一部では「燃料が損傷した証拠だ」との話もあったが、組成は炉心のものと類似していることから他号機の炉心からきたと推定される。
- 万一SFPで燃料溶融すれば小規模では済まず、組成、量からもSFPでは燃料溶融がなかった証拠と言える。

- ・ 福島事故で、実際にはSFPで重大な事故は起きなかったが、当時の心配を思い返すことは大事。米国では同時多発航空機テロ以降、SFPに懸念を示している。SFPの安全確保策(設計基準やAM)について、再検討するのは有益である。
- ・ 設備共用の問題については、SGTSを通じての水素の流入は考えていなかったことがある。設備の共用は、プラント間での影響伝播の観点からの一般的問題として再考して見る必要がある。
- ・ 隣接炉の影響、多数機サイトの問題については、SFPへの注水も、どの号機を優先するかの問題があった。1~3号機での議論同様、隣接炉・多数機の問題を考える必要がある。
- ・ 事故後の施設の耐震性については、損傷施設の耐震性確認は当然であるが、評価結果に基づく合理的な対策がなされるべきである。
- ・ 事故後、現在に至ってもSFPは燃料が露出したと思っている人が多い。事故中には誤情報は仕方がないが、誤りとわかったものについては機会をとらえて訂正していくことが必要。

(関村副部長)安部部長から論点を整理していただいたが、安全面での課題について会場の皆さんと議論したい。

(参加者)1~4号機のバルブ設計についてもう一度確認したい。

(宮田氏)ほとんどのバルブは電源喪失で開く。1号機はフィルタレインを出たところに流量調整ダンパが付いていて電源喪失で閉まる。2号機と3号機はフィルタレイン出口にグラビティダンパがついており、重力がかかると閉まる。4号機は全部開いた状態になっているので、逆流が生じ得る。

(参加者)設計になぜそのような差があるのか。

(宮田氏)古いプラントについてはどのような思想による設計かはわからない。一般的には、A系B系とある場合、逆流防止の機能はつくものである。4号機については、電源喪失時にそのような機能がなくなる。当時は電源喪失は考えていなかったため、電源に対する期待の仕方が違ったのではないかと考えている。

(参加者)SFPの構造の件だが、今回プールによるリスクへの寄与が大きいということで色々調べたところ米国で1990年くらいまでにプールを起因事象とするレベル2PSAがなされていると知って驚いた。そこでは、起因事象にプールのシール部の欠落により水が一気になくなってしまいう事象があったが、先ほどの宮田さんのご説明では水が抜けるような構造になっていないとのことであったが、1990年より前のものと比べると設計がアップデートされているということでしょうか。

(宮田氏)設計は変わっておらず当初からプールはコンクリートの内側にライニングしている。溶接部に漏えいのポテンシャルがあるため、裏側に溝をほって仮に漏れても溝から流れて、下から出てくるようになっており、そこで律速されるので、大量には漏れることがない設計になっている。そのため補給することが容易で、いきなり水が無くならないといった設計思想になっている。

(阿部部長)この問題は幹事会でも議論したが、耐震性と水密性とは同じであるかということをお聞きした。全く同じではないが、耐震性が十分であれば急激におかしなことにはならないということだと理解している。

(参加者)3号機の爆発が起こってから4号機の爆発まで11時間くらいたっている。3号機からの水素は11時間前から供給が途絶えているということではないか。

(宮田氏)3号機の爆発は、格納容器から漏えいして原子炉建屋にたまった水素による。一方、4号機に流れた水素は格納容器をベントしたときに格納容器内からきたものである。3号機の建屋が爆発したとしてもそれ以降ベント操作をしているのでその時にも水素が4号機側に流入する可能性がある。3号機爆発後に追加の水素供給がなかったとは言えない。

(阿部部長)水素爆発が起こるためには総量としてかなりの水素が必要だが、爆発を起こすのに十分な量かどうか

か評価されているか。

(宮田氏)3号機の水素発生量は、MAAP解析上は約800kg、格納容器内に水素が放出されている。これは炉心の燃料のメタルウォーター反応に起因する。このうちの一部は建屋に漏れいして爆発し、格納容器に残った水素がベントされて一部は排気塔から流出して、残りが4号機に流れた。水素量からして両方の爆発を起こしうると考えられる。他にもSAで追加的に水素が発生する事象はあるので、それらがさらに寄与している可能性もある。

#### 6.5. 福島第一事故の教訓を反映した今後の安全確保の考え方

(関村副部長)後半は、これまでのセミナーを通して得た教訓を今後どう活かしたらよいかという観点から議論したい。最初に日立GEの守屋さんにとりまとめをしていただき、その後、幹事会からお呼びしたお二人のコメントータにお話しいただく。お一人はJAEの渡邊憲夫さんで、国の事故の分析で第一人者としてご尽力されている。もうお一人は原子力学会理事をお務めで、エネルギー総合工学研究所の田中隆則さんで、学会で今後立ち上げようとしている事故調査委員会の予定および安全部会への期待をお話しいただく。

##### (1) 福島第一事故の教訓を反映した今後の安全確保の考え方(日立GE 守屋氏)

(福島事故の教訓)

- ・原子力発電プラントは、「深層防護」を基本思想として、多重、多様な手段で安全性を確保する設計を行ってきた。
- ・安全設備の設計には「設計条件」を設定する必要がある、代表的もしくは包絡的な事象シナリオを想定し、適切な裕度を確保した設計条件とすることで確実に機能する設備を設計する。
- ・設計で想定した事象シナリオに包含されない事象についても検討され、有意なリスクについてはリスク低減のためのAMとして安全設備以外の系統から注水機能の強化などを実施している。
- ・福島第一サイトはBWRであるが、直接サイクルであるため炉心に直接注水することが用意であるため、多種多様な注水手段を備えておくことが安全上の基本戦略である。

(福島第一 1号機の安全注水系)

- ・1号機の安全注水系としては、IC(非常用復水器)、HPCI(高圧注水系)、CS(炉心スプレイ系)、ADS(原子炉自動減圧系)がある。
- ・ICは、原子炉隔離時に発生する崩壊熱によって発生する余剰の蒸気が系統の圧力を上げるのを、蒸気凝縮によって防ぐ設備である。崩壊熱を100%除熱できる凝縮器が2基設置されている。2基設置されているのは圧力抑制に冗長性を持たせるためである。100%といっても炉毎にばらつきがあるため、崩壊熱にはマージンを持たせており、かなりオーバーキャパシティとなっている。したがって、実際は1系統のみの運転とし、なおかつバルブの開度調整により圧力を調整する。オーバーキャパシティなのは、間違っても能力不足で圧力が上がらないように、十分な余裕を持たせるという設計思想による。
- ・ICが機能喪失した場合でも、炉内水位が下がってくれば、タービン駆動のHPCIによって、水を補給することができる。
- ・高圧系統が機能喪失もしくは足りない場合、炉心スプレイ系として非常用電源で駆動する系統が2系統あり、炉内に注水する(CS)。
- ・この系統は圧力が低い揚程となっているため、SRVによって系統圧力を下げる。1号機は4弁あり、DC電源とアキュムレータで作動する(ADS)。

(福島第一 2, 3号機の安全注水系)

- ・2, 3号機は、ICがRCIC(原子炉隔離時冷却系)に代わっている。HPCIと同様にタービン駆動となっており、100%が1系統である。
- ・HPCI、CSは1号機と同様で、ADSは出力が高いため8弁となっている。
- ・注水系を強化するため、LPCI(低圧炉心注水系)が追加されている。非常用電源駆動で1系統あり、炉内に注水する。

(AM設備)

- ・さらに多重故障の場合を想定したSAマネジメント対策として、注水系のろ過水タンクや復水貯蔵タンクを水源として注水できるように強化したり、バウンダリ保護のための格納容器ベントの系統整備を追加している。

(事象進展と得られた教訓)

- ・1号機の事故後の事象進展にしたがって、教訓の整理を行った。前々回のセミナーで6つの教訓を提案したが、会場との議論を踏まえて、ICの機能喪失は隔離弁の構成のあり方の問題であると考え、一つ教訓を追加して

いる。

- ・1号機の、地震スクラムから建屋爆発までの事象進展においてAM策の有効性を分析してみると、これまでの6つの教訓と、新たに追加した「隔離弁の構成のあり方」の計7つの教訓で説明できる。また、2, 3号機についても基本的には7つの教訓で包含される。教訓1-7についてそれぞれ説明する。

(教訓1: 電源設備などの重要設備の配置改善と重要設備の可搬と緊急時のアクセス手段)

- ・津波に対しては可能な限り高い位置に重要機器を配置することと水密化は重要だが、給排気口や扉、貫通口などから浸水する可能性があり、過大な水撃も考えられ完全防御は困難である。
- ・想定の高さを超えた津波やその他の外部リスクに対しては、可搬もしくは仮設の復旧対策が必要である。さらに、電源車、電源盤などの高台への常備や、アクセスのための緊急取付け口確保とアクセスルート作成のための重機の常備が必要である。

(教訓2: 隔離弁構成のあり方)

- ・IC、RCICが原子炉隔離時の冷却設備として設置されており、これらが機能喪失した場合もECCSでバックアップするように設計している。
- ・ICは破断検知回路があり、万が一破断した場合は内側、外側の隔離弁を閉めるが、DC電源が喪失すると検知不能となり、フェールセーフとして隔離を指示して検知系がダウンする。現在の推定では、AC電源がしばらく維持されたために隔離弁が動作してシステムを隔離して、ICが機能喪失した可能性が高い。
- ・隔離弁の動作に関しては、過酷事故(SA)まで考えて隔離よりも機能優先の考え方もあるかもしれないが、設計基準事故時のバウンダリ機能確保やSA時にも隔離が必要な事態も想定すると、隔離弁のあり方は改善が必要である。一案としては、隔離優先を基本としつつ、必要な場合は隔離弁を手動もしくは遠隔で開ができる手段(隔離弁の格納容器外側設置、予備の直流電源の常備)を追加することが挙げられる。
- ・RCICも隔離弁があるが、ECCSと同様に隔離より注入優先という考え方があり、破断検知回路は検知不能でフェールアズイズにしてあり、隔離弁は開いた状態となる。ICは蒸気を凝縮させているだけのシステムなので隔離優先となっている。

(教訓3: 重要機器の予備直流電源の常備)

- ・DC電源の喪失あるいは枯渇によって、計装の機能喪失により状態の把握が困難、SRVによる減圧が遅延、RCIC、HPCIなどの注水系の起動信号の喪失、という問題が生じる。
- ・これらを防ぐために、可搬のDC電源もしくは予備DC電源を準備し、最低限必要な重要なシステムについては信号を出せるようにすることが重要である。

(教訓4: 計装の信頼性/信憑性と対応操作)

- ・原子炉水位、圧力、温度などのAM実施上必要な計装の信頼性/信憑性が重要である。今回、出てきた信号が本当に信じてよいか、ドリフトしていないか、まったく誤った信号かが判断できなかった。この反省から、計測器の適用レンジの拡大と環境条件の見直しが必要である。この時、SA時は精度よりも水があるのか無いかといった情報でも重要な場合があるので、設計条件での精度との違いを適切に考える必要がある。
- ・信憑性を確認する別の手段を確保することは重要である。一つの計測器では判断が難しいので、嘘をついている計測器を見抜くために、バックアップの手段を持つておくことが必要。
- ・信憑性が無いと判断した場合のAM手順と訓練が重要である。兆候ベースの手順は備えてはいるが、計測不能な状態でも、適切な判断ができるように改善する必要がある。

(教訓5: 注水系/冷却系の多様化)

- ・水密強化やプラント配置の対策は重要だが、設備設計の条件を超えた「想定外」での機能喪失も考慮し、プラント外からの救援/支援も含めた多様化する必要がある。
- ・水源まで含めた機能維持の達成も考慮する必要がある。
- ・常設の設備も設計想定を超えると機能喪失する可能性を考慮し、仮設の設備も含めた多様化が必要である。
- ・想定外の事態でも対応することも考慮し、多様なシナリオに対応できるようなAM設備と手順が必要。特に想定外の場合でも炉心注水、格納容器注水を実行できるような柔軟性が求められる。

(教訓6: AM設備のアクセス性、操作性、実行性)

- ・ベント操作も、実際は開けられないような環境状況であったりする。現場の状況を考慮してアクセスし操作できるように考える必要がある。例としては、遮蔽壁を通して遠隔で操作できるようにするなど、本当に実行できるような設備にすることが重要である。

(教訓7: 格納容器バウンダリ防護の多様化)

- ・福島第一サイトのW/Wベントの状況としては、代替注水遅れ及びPCVベント遅れにより、ベント前にPCV過温リークが発生し、放射性物質放出抑制を効果的に実施できなかった可能性が高い。

- ・対策としては、注水機能の強化により過温シーケンスを回避し、過圧シーケンスは、WW ベントによりバウンダリ防護するということが挙げられる。

(福島事故の教訓のまとめ)

- ・設計を超える過酷事故のリスクを認識してAMを整備していたが、福島ではその想定を超えた事態を経験、想定を超える事態、つまり想定外に対する安全確保の考え方が重要。また事態に応じた的確な判断と指示、実行をする体制と教育、訓練が重要である。
- ・特に、福島事故のようなサイト全体に被害が及ぶような事態には、プラントの設備対策とAMでは限界で、オンサイト、オフサイトを含めた多重、多段の安全確保の考え方が必要である。「誰が何時までに何をするのか」を平時より明確にして「備え」を怠らないことが重要。
- ・AM設備も想定外の事態において不十分な働きとなるため、様々な場面に対して実行性、操作性のあるAM設備にする必要がある。また、初動を的確に実行するためには、計測の信憑性が重要である。

(アクシデント・マネージメントの改善)

- ・設計基準事故を越えた事故に対しては、これまでのAMを実行性のあるものに改善することが重要である。
- ・加えて、自然災害などの外的リスクに対してはプラント外からの救援を迅速に行う手順、体制が重要である。

(中長期でのAMの改善(案))

- ・戦うための拠点をサイトの中に備えておくことが必要。例として、必要な水を確保しておく、空冷 DG、電源盤などをシェルタの中に常備しておくことで、いざというときに救援の拠点にできるのではないかな。

(想定外も含めた安全確保の体制(案))

- ・事故のレベルに応じた多重、多様な安全確保体制
  - －事故の発生防止～炉心損傷防止までは、個々の事業者による安全確保の範疇
  - －炉心損傷に至った場合、個々の事業者だけで事態を収束できなくなる可能性が高くなるため、事業者だけでなく行政も含めた多面的(機材、情報共有体制、連携活動訓練など)な安全確保体制
- ・緊急事態に備えた規制の整備
  - －AMIに適した設備を速やかに導入できる規制体系、想定外の事態に対しても柔軟な運用を前提とした規制、迅速な導入ができる審査プロセス
- ・緊急時と平時の適切な基準の使い分け  
従業員への被曝限度、管理区域からの雨水の放出

(安全確保のための戦略的展開の考え方(案))

- ・レベル1～5 までの IAEA がわけたカテゴリーを基にすれば、対策についてはそれぞれにレベルで、プラント内の AM から、オンサイト AM、オフサイト AM というように多段の体制が必要となる。設備、実施責任、対応主体についても多段の体制が必要である。

(海外の教訓との比較)

- ・米国では福島事故の教訓として、プラント設備だけでなく、オンサイト、オフサイトからのマネジメントの必要性が重要との同じような結論に至っている。
- ・NISAの公開資料によると、多様なマネジメントとして、産業界より可搬設備の準備、多様な配置や防護手段を提案しており、結果として同じことを目指していることがわかる。

(まとめ)

- ・設備の設計には想定が必要であるため、「想定外」を無くすためにはプラント設計の強化の繰り返しではなく、プラント外からの支援を前提とした AM 対策が必要である。

(2) コメンテーターからの意見①(JAEA 渡邊氏)

- ・プラント設計、設備構成については、炉心冷却は多様な設備構成となっているが、原子炉の減圧が前提で高圧にシナリオに強くない。
- ・冷却系は PWR と BWR では構成が異なる。PWR では加圧器逃がし弁、二次系冷却によって多重性と多様性を兼ね備えている。一方、BWR は逃がし安全弁だけなので、多重性だけである。
- ・BWR の逃し安全弁は、電源と圧縮空気の両方が必要である。どちらかで動かせるメカニズムがあればリスク軽減できる。海外では ERV(Electronic Relief Valve)といったものも使われているようだが。
- ・崩壊熱除去については、最終ヒートシンクの利用が前提である。PWR は二次系冷却と残留熱除去系、BWR は PCS と残留熱除去系によるが、いずれも原子炉減圧が必要で、減圧できるかどうか大きなポイントとなる。
- ・設計の考え方については、まず Fail Safe の適用として Fail open/close、Fail as is の何を優先するかという問



題がある。非常用復水器の弁、SGTS の弁への適用は正しかったかという疑問がある。

- ・格納容器ベントラインの弁アラインメントの問題として、通常時閉止弁 2 個+ラプチャディスク というアラインメントがどうしてこのようになったのか。またラプチャディスクの開設計圧は米国より高い圧力だが、どんな事態で使うことを想定したのか。高い圧力に設定されていれば弁は一つでいいのではと思うし、考え方の整理で別のアラインメントもあるのではないか。

- ・サポート系(機器冷却系、電源系等)の系統構成および配置については、多重性と独立性が必要である。

- ・多様性の手段として、例えば空冷/水冷、固定式/可搬式を備えるといったことは既設プラントでも可能な対応である。一方、海水系、EDG、バッテリー等の離れた区画への配置ということについては、新設では考慮できるが既設では無理である。

- ・外的事象への設計対応の考え方としては、「起こらないから大丈夫」、「起こっても大丈夫」ということがあるが、起こらないと言いきれるか、またどこまで想定して起こっても大丈夫というかが問題で、頻度の概念が不可欠である。

- ・地震については、「揺れないから大丈夫」ということについては、制震・免震で対応する。「揺れても大丈夫」については、耐震設計や別建屋配置などの分散配置(別建屋配置)で構造多様性を導入できる。

- ・浸水については、「水が入ってこないから大丈夫」については防潮堤、水密化という対応ができる。「水が入っても大丈夫」については、分散配置、つまり別建屋配置や対角配置などの配置多様性の強化が挙げられる。

- ・テロを含む航空機落下については、「落ちないから大丈夫」については、飛行禁止空域の設定あるいは迎撃ミサイルの配備などがある。「落ちて大丈夫」については、防護壁、二重化、分散配置によるこれも配置多様性の強化がある。

### (3) コメンテーターからの意見②(エネルギー総合工学研究所 田中氏)

- ・原子力学会としての事故調査委員会を 8/21 から開始する。これまでも事故対応は分科会を設けてやってきたが、むしろ要請されてのその場対応であった。原子力プラントがこのようになって、やむにやまれぬ自主的な活動として事故調を立ち上げることになった。安全部会が、専門家を集めてこのような活動を先立って実施されていることに敬意を表したい。

- ・事故調では、情報を有効に扱い、横断的に、専門家集団としてまとめることを目指す。レポートは来年の暮れになるが、ピアレビューも受け、国際的にも使ってもらえるものにしたいと考えている。レポートの作成は、安全部会のセミナーで作成予定のレポートも柱になる。

- ・防災は大きな議論が必要になる。原子力には専門化がない。また通信も新たな問題である。

- ・人命だけでなく、社会生活、経済に与える影響も考慮した、安全向上の論理が必要である。

- ・途上国では原子力を進めていくことが予想されるが、今後予想しないこともありうる。安全向上のためのサポート、または緊急援助隊など日本にできることは何か。世界に向けて日本が何を発信できるのか議論したい。

- ・原子力の組織の問題についても指摘されている。今後、安全を高めるための組織のあり方も議論が必要である。

### (4) セミナー参加者による総合討論

(関村副部会長) 討論に入る前に、ご講演を受けて阿部部会長に改めて論点を整理いただく。

(阿部部会長)

- ・守屋さんのお話では何度も「多様性」という言葉がでてきた。多様性については第1回のセミナーで紹介したが、これまであまりよく考えてこなかったのではないかと考えさせられた。多様性の定義として、従来は異なるメカニズムだけを考えていたが、他にも配置の多様性という問題がある。また今回、守屋さんからご指摘があったのは、一つの機能を果たすものとして、プラント、オンサイト、オフサイトで用意すると、違った意味の多様性もあるということ。さらに静的機器、バルブの開閉の問題など、多様性という概念が広がってきて、今後きちんと議論していく必要がある。

- ・また、「独立性」と「多様性」も大きな問題である。建物の中は区分けして独立になっているが、津波の水が入ってくるところが同じであることも考えれば、「独立性」と「多様性」は違う。この問題にも焦点をあてた議論が必要である。

- ・オンサイト、オフサイトまで含めたコミュニケーションの問題がある。今回もきちんと情報が伝わらなかった問題があるが、コミュニケーションについては輸送も含めた包括的な対策が必要である。

- ・「実効性のある AM」、「最善を尽くす」、というお話もあった。しかし何をもって実効性があるとするかが難しい。

従来の規制はコンプライアンスが重要で厳格であったが、それでは想定範囲を超えたものについては適正なことできない。どこまでを最低限守らなければいけないか、どこから柔軟で最高のものを目指すか。規制を考えるときには難しく、何をもちょう最高とするかも難しい問題である。

・渡邊さんのお話は、ハザードが十分小さいか、ある程度以上あっても準備が取れているかということが重要ということで、セミナーでこれまで漠然と話してきたことをきれいに整理いただいた。バルブの開閉の考え方についても議論が止まっているので分析を進めたい。

・田中会長からは、学会の事故調のことをお話いただいた。安全部会の本セミナーは当事者事故調のようなものと思っている。

・原子力にムラがあるのはある意味では当然と考えており、ムラの当事者として分析をしていくことが必要と考えて本セミナーを進めている。要点は3つあると考える。一つめは当事者としての責任を果たすということ。反省して分析して資料に残すことである。二つめは当事者でなければわからないことがあるということ。最善の知識を持ってきちんと分析をする必要がある。三つめはムラの住民としての言い分もあるということ。当事者としてもきちんと発信すべきである。学会の事故調にも反映していただければ幸いである。

(関村副部長)パネリストの方々にはコメントを受けた観点から、あるいはアップデートの観点から一言いただきたい。

(守屋氏)減圧に関しては、BWRのSRVの系統は、DC電源ありさえすればよい。多様ではないが、数があるので一つでも開けばよい。爆破弁タイプも米国にはあるがスタックオープンなどのデメリットもあり信頼性の観点から得策でない。今回の事故も機械的な問題はなかったの、ボトルネックはやはりDC電源である。したがって予備をもっていき、万が一の時は操作に行けるようにしておくというのが最も確な対策ではないかと思う。また設備設計におけるクリフエッジの問題。頻度は小さくても崖が高くて万が一一起こると奈落の底というのは問題である。崖の高さを低くする、つまりmitigateの考えが必要と考える。

(渡邊氏)逃し弁については、共通原因故障ということを見ると脆弱性が残る。やはり多様な考え方をもちたいといけいではないか。

ところで疑問に思っている点の一つある。ICは1号機が100%2系統、3号機が100%1系統しかないがどういう考えのもとにそうなったのか。もともと2系統いらなかったのではないか。システムの設計を変えるとき基本的な考え方が伝わらないといざという時の運用がうまくいかない。設備変更の記録を残していくということが必要。

(関村副部長)設計変更については守屋さんに解説いただきたい。

(守屋氏)1号機は古くGEの設計で、よくわからないところはある。ICは凝縮型熱交換器で溜めている水は4時間分くらい、8時間くらいはもたせるということがあったのではないか。最初1系統、プラント収束しない場合にもう1系統使うというようなことを考えていたのではないか。一方、RCICはタービン駆動なので水源さえあれば回り続ける。設計上DCも8時間もつので1系統で十分ということであったのではないかと考えている。

(関村副部長)田中さんからコミュニケーションの問題も含めて学会としてどう考えるかお願いしたい。

(田中氏)お話をお聞きし、学会の事故調も現時点の問題だけでなく、なぜそういう設計になったかまで検証しなくてはならないと思った。まさにこのような専門家が集まった場でできる議論ではないかと思うのでぜひお願いしたい。全てを知っているという点では、チーフエンジニアという制度はプラントに必要なのではないか。原子炉主任技術者はそのような発想で進められたが日本ではなかなかそうはなっていない。プラントのことを知り尽くした、設計の経緯や特に非常時にこうするべきということがわかっている人が必要ではないか。こうした管理の面も含めて議論していただきたい。

(関村副部長)それでは会場からご質問、ご意見をいただきたい。

(参加者)これまで4回参加しているが、技術論が深まってきたと思う。原子力ムラについては真剣に考える必要がある。外部の支援を受けるという話がでてきたが重要なポイントと考える。防災をやっている人が原子力のことをほとんど知らないが、これを直さないとサポートにまわれい。一方、原子力をやっている人が防災のことを知らないというギャップがあり、ここがムラ化している部分ではないか。パラボラアンテナを持ち込むというような話は今回ほとんどなかった。重機と鉄板をどうやって運び込むか、多面的に多分野の仕組みを知らないといけい。また、現場では計器は壊れなくて簡単でプリミティブなものがよい。逆に政府や、県にどの程度サポートできたか。相互のコネクションを考えないと、外部の支援もうまくいかない。

(関村副部長)次回、第5回にセミナーは防災をテーマに開催する。ご意見を取り入れて準備を進めたい。

(参加者)セミナーの報告書はいつ出すのか？

(関村副部長)今年度中に出す予定である。

(参加者)世の中の事故調ではいろいろ問題が指摘されているが、一般の方の不安を増すだけではないか。今、一

般の方にとって必要なのは、ここまでやれば安全というメッセージではないか。それができるのは、専門化である原子力学会、また安全部会ではないか。お話を聞いているといろいろな教訓が指摘されているが、全部やらないといけないということになると運転できなくなる。ここまでやれば福島対応はできる、それ以上はやったほうが良い対策ということで、少なくとも2段階メリハリをつけて提示していただくのがよい。

(阿部部会長)ご指摘のとおりと考えている。実際やるべき仕事はあるが全部終わらないと運転できないという話ではない。できるだけ明確にしたい。

(参加者)守屋さんの提案について異論ないが一つ質問したい。安全の観点から、セシウムという長い半減期のものをばらまかないということが目標とすると、スリーマイルはキセノンなど半減期の短いものしか出していないが今回は出てしまったという問題がある。BWR では制御棒の貫通部や核計装配管から下部に漏れやすいという問題があり、スクラビング、ベントフィルタの必要があるのではないか。

(守屋氏)誤解されている点があるのでご指摘したい。核計装配管で起こったことは減圧に対しては影響あったが、FPは格納容器に出るだけなので放出に対しては影響ない。下部に貫通部がなくてもあっても、炉心が压力容器下部に落ちてしまえば抜けてしまう時間はほとんど変わらない。またスクラビングベントは格納容器ベントをしたときにサブプレッションプールで適用されており、粒子状FPがスクラビングされた結果は先般の宮田さんの報告で土壌汚染の程度からも判断できる。今回の問題は水が入られなかったことにあり、輻射も含めて格納容器の温度が上がり、非金属部分からバイパスして漏れた。水がデブリにかけられて蒸気を圧力に変えられていれば、水を使ったスクラビングベントが機能してセシウムを除去することができたはず。したがってフィルタベントをつけなくてもご指摘のことはできるようになっている。ただし、さらに放出量を下げのためにフィルタをつけるという考えは自主的な対策としてありうる。

(参加者)JNESさんの解析で、1号機のICがうまく機能すれば、炉心溶融しなかったという結果がある。ICをAM設備として使うのは、長時間続く場合に時間的余裕を得るのには有効ではないか。水素対策については、格納容器のどの部分からどの程度出たかを検証する必要があるのではないか。その上でダイレクトに水素を結合させて処理するのが有効ではないか。

(守屋氏)設備で対応する場合はシーケンスがしっかり把握できていないといけない。シナリオがはっきりしている部分については設備で対応し、そうでない部分はマネジメントで対応というのがよい。事業者さんと一緒に使いやすい設備を考えていく必要がある。水素については、BWRの格納容器は窒素置換していて酸素が無いので再結合は起こらない。出てきた水素は換気して濃度を溜めないというのが基本である。どこか局所に溜まるようなところがあれば、再結合を配置するというのはありうる。

(渡邊氏)教育訓練について回答したい。どういう思想で設計されているのかがうまく伝わっていないのではと心配する。化学プラントは既に経験して学んでいるはずなので、知見を取り入れて必要があるのではないか。

(参加者)運転員だけで事故対応がとれるのがが問題。今回の経験を踏まえ、いろんなことがありえるということで、設計者も運転員も一緒に対応していくことが大切と思う。

(参加者)福島大で復興を学んでいる。皆さんがご尽力されていることがわかり、福島でもしっかり伝えていきたい。

(関村副部会長)ぜひお願いしたい。いろんな分野の人で議論することが必要である。現地に行って我々の言葉で伝えることも必要と考えている。

(参加者)多様性は重要だとわかったが、ほんとうに必要なになってくる状況で生き残る設備は限られてくるのではないかと考える。今回では最終的には消火系と消防車だった。また本当に多様性が必要になったときに、使える設備は取り合いになって数が足らなくなるという懸念がある。設計を超えたいろんな事象で対策をならべて、取り合いにならないかという分析を精緻にする必要があると思うが、どのように考えられるか。

(守屋氏)良いご指摘をいただいた。設備は数が多ければいいというものではなく、いざというときの取り扱いやメンテナンスの問題もある。事象進展に沿って何が必要かと言うことを分析した上で多重性、多様性を考えなくてはならない。適切な設備を用意して適切に次々と対策をとっていけるような戦略をもつことが必要である。

(渡邊氏)多重性と多様性の根本的な違いは、共通要因故障どれだけ排除できるかということ。本来多様性で排除するのが基本だと考える。多重性においては、数が多ければよいというものではなく最適化が必要であるが、PSAという考え方が一つあるだろう。リスクがこれ以上下がらないという最低限必要な数をおさえて、さらに実行できる体制を整えるということで対応できると考える。

(阿部部会長)PSAは大事だが、単なる道具にすぎないので、クリフエッジがないように見ていくということもあわせてやらなくてはならない。

(守屋氏)多様性については、駆動方式が違って場所が同じなら一緒にだめになるので、配置の問題が重要ということを今回改めて感じた。

(参加者)原子力学会SNWのシンポジウムで、単純化した説明を期待したいという意見がでた。今回の事故は圧力

を上手に抜いて冷やすということなのではないか。それをうまく説明していただくとわかりやすい。想定外の対処については伝承の問題を取り上げられたが、設計を経験してみないと伝わらないということがある。プラント超寿命化によってむしろ技術が伝承しにくくなるのではないか。化学プラントなどは20年くらいでリニューアルするという話もあるが。

(守屋氏)技術の伝承についての問題は認識している。基本的な原理はどのプラントも同じなので、基本を理解していれば応用で対応できる。最近ではプラントトラブルを起こさなくなっているのだから、トラブルを起こったときに何が起こるかを体験する機会も無い。

(関村副部長)プラントの経年化対策、技術の伝承など、何が安全にとって必要なかを全体的に考えていく必要がある。今後も安全部会として掘り下げていきたい。伝承だけでなく、原理をどのように考えるか、リテラシーの問題などいくつかの課題を含んでいる。大学教育もどうレベルアップするかという課題を抱えており、今後皆さんの意見をいただきたいと考えている。それでは、最後に田中理事長からコメントいただきたい。

(田中氏)今回は大変貴重な機会をいただいた。これから学会の事故調が始まるが、節目節目でオープンにしてご意見に対応できるようにしたいので、ぜひ関心をもっていただきたいと思う。

(関村副部長)さらにご意見いただける場合は、メールでお願いしたい。また本日の資料はHPにアップするので参考にしていただきたい。

#### 6.6. 次回以降のセミナー案内及び閉会挨拶

新田副部長より、以下の案内・挨拶があった。

- ・ 本日は、説明者、コメンテーター、会場の皆さまに長時間議論いただき感謝する。回を重ねるに従い、議論も深まってきたと思う。
- ・ 次回第5回は、8月20日(月)13:30からこの会場で、福島事故時の防災対策をテーマに実施する。
- ・ 第5回以降は、資料6にあるように、秋の学会で、9/19 12:00～13:00 安全部会総会、標準委員会のセッションの後、14:30～16:00 安全部会のセッションで第2回から5回セミナーの報告を予定している。
- ・ 第6回以降は、10月以降を予定しており、福島第二、女川、東海2号で起きた事象の紹介と、何が事故の結果を分けたかを議論する予定。
- ・ その後、本年末頃までに、部会幹事がドラフトの報告書を作成し、セミナー最終回(日時未定)で、ドラフト報告書の要点を議論し、春の年回で、最終報告会を開催予定。
- ・ セミナーの進め方について、当日の報告の質問はできるだけ当日にお願いするとともに、セミナーの進め方に対する意見はメールで送っていただきたい。本日はありがとうございました。