

開会の挨拶及び趣旨説明（以下、敬称略）

山本部会長（名大）

- 原子力安全部会は、総合工学である原子力工学において、細分化しがちな学術分野間に安全の観点で横串を通す事を重視して活動している。
 - 本フォローアップセミナーでは、2022年3月の春の年会の企画セッションで得られた論点を対象として皆様と議論を深めたい。前半（1時間強）は3つの講演、後半は総合討論を行う。パネリストはご講演者と山路先生（早稲田大）をお願いしている。
 - まず、背景となる問題意識を共有させて頂く。原子力発電所の事故は様々な種類の不確実さを有する。設計基準事故（DBA）は不確実さを包絡する評価手法が採られる。対して、過酷事故（SA）は、事象の不確実さが大きいため、設計基準（DB）とは設備設計や対策の有効性評価の考え方にある程度の違いが生じる。両者の評価の考え方を、一貫性を持たせつつ事故の深刻さに応じてどのようにシフトさせるか、どのように安全をマネジメントするか、検討の余地があると認識している。本日は以下の4点を中心に議論させて頂きたい。
 - SA設備とDB設備の審査基準の相違。
 - SA対策や自主的対策が、安全性向上の観点から他の設備と相互干渉を生じる点や、アクシデントマネジメント（AM）上注意を要する事項。
 - 常設SA設備にDB設備より高いハザード耐性を求める必要性。
 - 常設SA設備やDB設備について、設備オリエンテッドな考え方から発電所全体（システム）としての防護への移行を考えることの妥当性。
-

第一部 講演

SA設備の審査について

天野直樹（規制庁）

<講演概要>

本講演では、SA設備の審査（前提とする事象、想定する環境、機能喪失の判断基準等）がどのようにDB設備の審査と異なるかについての概要が紹介された。

- 新規制基準策定の経緯としては、平成24年6月に東京電力の福島第一原子力発電所事故（1F事故）の教訓を踏まえた原子炉等規制法の改正が行われ、平成25年7月8日に新規制基準が施行された。

- DB 設備及び SA 設備に対する要求事項は、設置許可基準規則の「第二章 設計基準対象施設（第三条～第三十六条）」及び「第三章 重大事故等対処施設（第三十七条～第六十二条）」に規定されている。
- DB で前提とする事象としては、安全設計評価において「評価すべき範囲」として、「運転時の異常な過渡変化」及び「事故」が挙げられる。DB に対する安全評価指針では、これらの状態を、ある限られた数の事象の解析で適切に包絡するために評価すべき事象を適切に選定することや、単一故障を仮定した解析を行うこと等が規定されている。
- SA で前提とする事象としては、「重大事故に至るおそれがある事故（炉心の著しい損傷の防止）」及び「重大事故（原子炉格納容器の破損の防止）」が挙げられる。SA に対する有効性評価の審査ガイドでは、最適評価手法を適用し、不確かさが大きいモデルを使用する場合には感度解析等を基にその影響を適切に考慮することが規定されている。

<質疑応答>

特になし。

BWR の SA 対策の概要（考え方、設備）

村上幸三（中国電力）

<講演概要>

本講演では、BWR の SA 対策の概要、有効性評価の流れ、及び AM 上注意を要した項目が紹介された。

- BWR の SA 対策として以下が紹介された。
 - 常設及び可搬の代替注水設備を整備。可搬設備は常設設備のバックアップとして運用。
 - 最終ヒートシンクへ熱を輸送するための代替熱交換設備の整備。
 - 格納容器過圧破損を防止するための残留熱代替除去系及び格納容器フィルタベント系（スクラバ及び銀ゼオライト）の設置。
 - ガスタービン発電機（常設の交流電源設備）、蓄電池の補強（常設の直流電源設備）、及び高圧発電機車（可搬型の交流電源設備）の設置。
- SA 対策前の設備構成の PRA（裸の PRA）の実施、重要事故シーケンスの選定、炉心損傷防止に寄与する対策検討、有効性評価による効果の検証を行うことで、SA 対策設備の整備を行っている。
- また、AM 上注意を要した 3 つの事項の紹介があった。
 - 「全交流動力電源喪失+逃がし安全弁 1 個開固着（TBP）」の炉心損傷頻度（CDF）は

8.2E-12(1/yr)と低い、原子炉隔離時冷却系 (RCIC) ポンプが早期に停止する。そこで、可搬型の大量送水車による原子炉注水を速やかに実施できる体制を整備した。可搬型設備の準備時間は、炉心損傷防止に対して十分な余裕を確保している。

- ・ 溶融炉心が原子炉圧力容器 (RPV) から下部ドライウェル床面に落下すると、溶融炉心がドレンラインを伝ってドライウェルサンプに流出し、溶融炉心-コンクリート相互作用 (MCCI) により格納容器バウンダリの健全性が損なわれる恐れがある。これを防止するため、下部ドライウェル床面にスリット付きのコリウムシールドを設置し、スリット内で溶融炉心が凝固してドライウェルサンプに流出しない設計とした。
- ・ 上記対策に加えて、RPV 破損前に下部ドライウェルに初期水張りを行うことが MCCI の影響緩和に有効である。溶融炉心-冷却材相互作用による水蒸気爆発の可能性は低いものの、審査の過程で、水蒸気爆発による格納容器バウンダリへの影響評価を行う必要が生じた。そこで、MCCI 緩和の観点から十分かつ水蒸気爆発発生時の格納容器バウンダリへの影響が限定的となるような初期水張り水位を設定した。
- ・ まとめは以下。(1) PRA 等のリスク情報を有効に活用し、頻度及び影響の観点から真に必要な SA 対策を整備することが肝要、(2) 設計基準対象施設の重要機能に悪影響を及ぼさないように SA 対策を検討する事が重要、(3) 講じた SA 対策の効果や影響度合いを精査し、総合的に安全を確保できる対策とすることが必要。また、今後の取り組みとして、SA 対策整備後もリスク情報を利用し、自プラントの強み弱みを認識することで自主的に効果的な安全性を向上させていく事が示された。

<質疑応答>

Q: フィルタベントシステムは、スクラバ4並列、ヨウ素フィルタ1つで構成されるとのことだが、そのような構成を採用した理由は何か。

A: 元々は4つのフィルタベント (スクラバ) を並列設置する設計であったが、審査の過程でヨウ素フィルタを設置することになった事から、各スクラバの出口配管を合流させてヨウ素フィルタに接続している。

Q: CDF が非常に低い TBP シーケンスの対策を整備するのはなぜか。

A: 当初、長期 TB シーケンス (全交流動力電源喪失) のみを対象に有効性評価を進めていたが、審査の過程で TBP 等の別シーケンスも対策を講じることとなったため。特定の外的事象を想定して TBP を選定したものではない。

Q: 代替注水系は専用ラインか共用ラインか。共用の場合は弁のマネジメントはどうするか。

A: 格納容器に入るまでは専用ラインだが、RPV 等に新たな貫通部を増やしたくないことからそれ以降 (格納容器~RPV) は共用ラインとなる。代替注水系は SA 用電源だけで弁を開けて注水可能となるように設計している。

Q: 格納容器ベントの弁操作は手動でも可能とのことだが、作業環境はどのように考えているか。

A：被ばくが低減できるような作業環境及び作業手順としている。

Q：重大事故等対処設備と SA 環境条件に適合するように改良した DB 設備（設計基準拡張設備）を両方整備しているのか。両方整備しているのであれば冗長すぎるのではないか。

A：両方とも整備している。有効性評価の事故シーケンス解析では DB 設備の機能喪失を仮定するので両方整備するのは仕方のないことである。

Q：原子炉へ代替注水を行う場合、注水量をどのようにコントロールするのか。

A：水位計を見ながら制御する。

PWR の SA 対策の概要（考え方、設備）

松田弘毅（九州電力）

<講演概要>

本講演では、PWR の有効性評価の流れ、及び AM 上注意を要した項目が紹介された。

- 重大事故等への対処に係る措置の有効性評価の流れとして、①評価事故シーケンスの選定、②当該シーケンスにおける有効性評価の実施となり、その概要が説明された。
- ①は、裸の PRA の知見を利用して、炉心損傷防止対策の有効性評価を行うための重要事故シーケンスの選定、及び格納容器破損防止対策の有効性評価を行うための評価事故シーケンスを選定する。
- 格納容器破損防止対策でのシーケンス選定の概要としては、内的事象レベル 1.5PRA 及び外的事象に係る定性的な検討を行い、「設置許可基準規則の解釈」を踏まえた上で、格納容器破損防止対策の有効性評価を行う格納容器破損モードを選定する。
- 具体的には設置許可基準規則の解釈第 37 条に示されており、重大事故が発生した場合に想定する格納容器破損モードは、必ず想定する 6 つのモードと、個別プラント評価により抽出した格納容器破損モードがあれば追加考慮することになっている。選定された格納容器破損モード毎に格納容器破損モード発生観点で厳しいプラント損傷状態（PDS）を選定し、その中から厳しい事故シーケンスを格納容器破損防止対策の有効性評価の評価シーケンスとして選定している。
- ②としては、選定された評価事故シーケンスについて、重大事故等に対処するための設備、手順及び体制を整備した上で、解析コードによる解析等を踏まえて、対応する設備の有効性を評価する。解析条件は、設計値等の現実的な条件を基本としつつ、有効性を確認するための評価項目となるパラメータに対し余裕が小さくなるような条件を設定する。解析コードの重要現象に対する不確かさや解析条件の不確かさが有効性評価の評価項目パラメータの余裕が小さくなる方向の場合には感度解析等を行い、その影響

を確認している。

- 次に、各破損モードでの有効性評価の具体的な評価内容の例として「水素燃焼」について、以下の内容が紹介された。
- 関連する設置規制許可基準の水素爆発に対する対策の要求や基準に従って評価する。
- 水素燃焼の観点から厳しくなる事故シーケンス(大LOCA+低圧注入失敗)を選定する。
- 選定された事故シーケンスの有効性評価の評価条件として、解析コード、評価パラメータ、解析で想定するSA対策設備(PAR等)、MCCIで発生する水素条件の考え方等が示され、有効性評価結果が基準(ドライ条件に換算した水素濃度 $\leq 13\text{vol}\%$)を満足することが示された。
- 不確かさを踏まえた感度解析として、熔融炉心の広がり不確かさ(MCCIの不確かさ)及び水素発生量の不確かさ(Zr-水反応量の不確かさ)を考慮した感度解析結果が基準を満足することが示された。また、水素混合の不確かさの影響を低減するための設備として、PARに加えてイグナイターをSA設備として追加設置した事が説明された。
- SA事象は物理現象や解析手法の不確かさが大きいため、今後これらが精緻化されると設備の合理化や対策要員の見直し等が可能となり、設備面・運用面での発電所員の負担等の軽減につながり、それらを更なる安全性向上のためのリソースとして使用することが期待される。

<質疑応答>

Q：Zr-水反応等で発生する水素発生量は、標準状態で格納容器体積の何倍か。

A：定量的なデータを持ち合わせていないが、格納容器の自由空間体積は川内で約 $67,000\text{m}^3$ であり、それより大きくなることはないと考えます。

Q：水素濃度分布の不確かさとして、局所的な濃度分布について規制側と議論があったか。

A：実験結果や詳細解析結果から、蒸気流など各種流れによる混合で水素も概ね混合されると審査で説明したものの、不確かさに備えるためイグナイターを設置した。

Q：水素濃度は可燃限界を超えているが、燃焼の効果は考慮しているか。

A：水素が燃焼しても格納容器バウンダリが破損しない事を解析で確認している。

第二部 総合討論

山本部長、天野直樹、村上幸三、松田弘毅、山路哲史(早稲田大)

(山本部長)：ご講演者と山路先生をパネリストとして話を進める。まずはご講演に関する質問から入りたい。まず1点目は、Zr-水反応発生時や炉心露出時は、燃料は崩壊熱だけで膜沸騰状態が維持される可能性がある。その場合、Zrと反応するのは水ではなく蒸

気であり、反応は長期にわたってゆっくり続くのではないか。高温の Zr と反応するのは水か蒸気か、現象論的にはどう考えればよいかというご質問。山路先生、いかがか。

(早稲田大：山路)：私は Zr-水（蒸気）反応の専門家ではないが、本反応は閾値（1000℃等）を超えないと殆ど進まないことを考えると、そのような温度領域で Zr と接するのは蒸気ということになるはずである。

(山本部会長)：2 つ目は守屋様からのご質問。天野様から規制基準の条文に則した SA 設備の要求事項を説明して頂いたが、事業者の対策説明において、審査の中で変更が必要となった事例があったとのこと。事業者は規制基準に適合するように申請をしたと思うが、変更があったのであれば、規制と事業者で条文の解釈に違いがあったものと考えられる。そのような認識のギャップについても議論する必要があるのではないか。

(原子力規制庁：天野)：本日の私の説明に事実誤認がある場合は参加者の皆様からご指摘を頂きたい。当時、新規規制基準が施行された日に各社から申請を頂いた。以下、私見だが、当時、規制側も事業者側もドタバタしており、例えば、PWR の有効性評価において 2 ループプラントの有効性評価を 3 ループプラントの結果で説明されること等の状況があった。申請された内容と最終的に適合性が判断された内容とのギャップは、審査を進めた結果であるが、それについては、本日のような場で議論頂きたい。

(山本部会長)：個別質問に移る。東北大の平岡先生より、天野様へ 3 つ質問が来ている。

① SA 設備の審査にあたり、事業者の個別プラント PRA の妥当性をどのように審査しているのか。規制庁自身も PRA モデルを整備し評価・確認するといった取り組みは行われているのか、② 過去には審査の一環として JNES によるクロスチェック解析が行われていたが、新規規制基準の適合性審査においてクロスチェック解析は行われているか、③ SA に係る安全研究の成果はどのように審査に反映されているのか。不確かさの大きい事象を効果的に審査するには規制当局の知見を高めることも必要と考える。

(原子力規制庁：天野)：1 つずつお答えする。①旧 JNES の PRA 専門家と連携し、旧 JNES の基盤グループが整備した PRA モデルの知見等も活用して審査を進めた、②旧組織ではクロスチェック解析が行われていた。現在は、従来の意味でのクロスチェック解析は行われていないが、申請者が実施した解析結果と、基盤グループの解析コードによる解析結果との間に多くの齟齬がないか、という形で審査を進めていったと認識している、③ご指摘の通りと考えている。安全研究に携わっている方に、知見の共有や審査支援をお願いし、不確かさの大きい事象も含めて審査や規制に反映するという取り組みを行っている。

(山本部会長)：梶本様からチャットを頂いている。水蒸気爆発は、福島第一原子力発電所の 1～3 号機で発生しなかった。これは、現行の原子炉では、水蒸気爆発が発生するよう

な条件が達成される可能性が小さいことを示している。このような発生頻度が小さい SA 現象の対策は、発生防止、拡大防止、影響緩和のうち、発生防止に集中すべきであり、万一発生したらという拡大防止や影響緩和の視点から大きな保守性を見込んだ評価をすべきではない。今回の議論では、物理化学現象の不確かさが話題になっているが、発生頻度の不確かさとセットで考えるべき。こちらのコメントは後の総合討論の論点に入っている、そちらで議論させて頂きたい。

(山本部会長)：論点に従って議論を進めたい。最初の論点「常設 SA 設備に DB 設備より高いハザード耐性等、より大きな保守性を持たせるべき」には賛否両論ある。その辺りを最初に議論したい。切り口は色々あるが「種々の設備 (DB 設備、SA 設備、特重) の位置づけ」「深層防護との関係」「現行規制基準の条文との関係」について、まずはパネリストからご意見を頂きたい。

(九州電力：松田)：DB 設備よりも SA 設備の耐性を高くする必要があるというよりは、常設 SA 設備に対して、DB 設備に対する多様性、独立性、位置的分散等の措置を可能な限り適切に講じることで、DB 設備と SA 設備が共倒れしないようにして、プラント全体としての耐性が高くなるようにするのが一番良いと考えている。

(山本部会長)：今のお話しは、耐性というよりも、独立性、多様性、位置的分散等が大事ということと理解した。

(中国電力：村上)：例えば地震ハザードに対して、DB 設備よりも常設 SA 設備の耐震強度を上げたとしても、深層防護を実現できないのではないかと思う。例えば、地震で圧力容器や格納容器が壊れてしまうと、SA 設備だけ耐性を強化しても仕方がない事になる。そういった観点から、SA 設備だけ耐性を上げるやり方は、深層防護という観点にはそぐわないと考える。

(原子力規制庁：天野)：深層防護の各段階の設備に対してどの程度のハザード耐性を求めるかの議論の前提として、1F 事故の反省を踏まえると、まずは DB 設備に対して十分なハザード耐性を求める必要があると認識している。例えば、地震を例にとると、地震発生様式を考慮して、「震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を策定する必要があり、活断層やプレート間地震等について、不確かさの考慮等も行った上で、最新の科学的・技術的知見に基づくハザードレベルを設定する必要があるのではないかと考えている。深層防護との関係としては、今の基準は、深層防護の第 3 層と第 4 層に個別の基準を設定しているので、層を切り分けて考える必要があるのではないかと考えている。現行基準でも、第 2 章が DB、第 3 章が SA と、明確に区分しているのが現状と理解している。

(早稲田大：山路)：最初に挙げて頂いた、多様性、独立性、位置的分散には容易に思い至った。その他、SA 設備は原子炉の状況が不明な状態で使用する設備なので、使い方に柔軟性を持たせた、本来の意図と違う用途にも使える設備とするのが望ましいのではない

かという感想を持った。

(山本部会長)：天野様から、DB のハザード設定が非常に包絡的になっている上に、更に高いハザードを設定するのが合理的なのかという話があった。深層防護から考えると、独立性、多様性、位置的分散等の方がむしろ重要であり、むやみにハザード耐性を上げるという話ではないという話があったかと思う。また、山路先生から、SA 設備の使い方に柔軟性が必要というご意見もあった。事業者のご意見を伺いたい。

(中国電力：村上)：SA 設備の使い方の柔軟性については、用途が決まっている常設 SA 設備を柔軟に使うのは難しいと考える。一方、可搬設備は、原子炉に注水したり、格納容器に注水したり、場合によっては使用済燃料プールに注水したりできる。そういう意味で可搬設備 (FLEX 等) には柔軟性があると考えている。

(九州電力：松田)：使い方の柔軟性という観点では、常設 SA 設備の注水系は、炉注水も格納容器スプレイもできるように設計している。また、可搬 SA 設備は、電源式とディーゼル式のポンプを用意し、かつ、注水先も、炉心や SG の 2 次側等、柔軟な運用が出来るように、SA 対策を整備している。

(山本部会長)：電源式とディーゼル式のポンプは、用途の多様性に加え、駆動方式の多様性で共倒れを防止している。ここまで、パネリストからは、常設 SA 設備に他よりも高いハザード耐性を求めるのはあまり合理的ではないという話だったと考えるが、参加者の方のご意見はいかがか。深層防護の後段設備ほど高いハザード耐性を持たせるべき等、ご意見があれば頂きたい。

(宮田副部会長)：SA 設備は何のためにあるのかと思い始めた。BWR の TBP シーケンス (内的事象) の CDF が $\sim 1E-12(\text{yr})$ という話と併せて SA 設備充実の説明がなされた。しかしながら、逆に、外的事象のような、不確かさがそれなりにあつて対処すべき領域があり、SA 設備の充実がそういう領域に意味があるとすれば、SA 設備の設計はどうあるべきか、という事を考えていた。DB 設備のように数字的な耐力を上げるやり方は、あまり合理的とは言えないと感じる。どちらかと言えば、SA 設備は、種々の外的事象に対して多様な設備であるべきではないかと思う。例えば、配置を色々に変更できる、免震建屋に設置可能等。そういう場面で SA 設備を活用していくのが良いのではないかと考えている。

(山本部会長)：今のご意見は、最初に頂いた「多様性」「独立性」「位置的分散」と通じるところがあると思うが、重要な問題として「SA 設備は何のための設備か」が提起された。SA 設備の位置づけを外的事象対策と考えるならば、先程の「耐性を上げる」という意味が、一般的な意味 (地震加速度に対する耐性を上げる等) ではなく、別の意味 (「多様性」「独立性」「位置的分散」等) とも考えられ、全体としてプラント安全性のロバスト性を向上する方向となる、というコメントと理解した。

(安全部会：梶本)：外的事象や内的事象の話が出てきたが、これらの点は新規規制基準を作る際にかなり気を遣った。ある特定の機器の故障の組み合わせが決まれば炉心損傷に至るシーケンスが決まるが、故障機器の組み合わせは機器の故障理由に依存しない。即ち、内的事象でも外的事象でも変わらない。以上より、内的事象と外的事象を区別するのではなくて、安全系を構成する機器の役割から分類すべきであって、外的事象、内的事象というような特定の理由を付ける必要はないと考える。

(安全部会：梶本)：もう一点述べさせて頂く。SA 対策は、SA 現象 (DBA よりも遥かに大きな負荷がかかる現象) を対象とするので、愚直に対策すると膨大な設備になる。発生頻度とセットで考えないと、対策が拡大するばかりで、合理的ではないと考える。発生頻度が小さいが影響が大きい現象に対してどのような対策をどのような思想で考えるべきか、という点が非常に重要となる。深層防護レベルは種々あるが、ここで考えるべきは、発生防止、拡大防止、影響緩和の 3 つである。SA 事象は、発生防止 (物理的に切り離す等) を真剣に考えるべきである。発生しないような頻度の事象を考える場合、「万一発生したら」を考えると膨大な設備が必要になることは必然である。SA 設備を考える際には、発生防止に重点をおいて考えるべきであって、影響緩和等に重点をおいた、保守性を見込んだ膨大な設備を作るのはアプローチが違うと考える。

(山本部会長)：適切な問題提起に感謝する。重要なポイントを頂いたと思う。今のご指摘事項は多くの方がモヤモヤしている点と考える。天野様、ご意見を頂きたい。

(原子力規制庁：天野)：先ほどの発言が誤解を与えてしまったと思うが、DB 設備のハザードが保守的なため、後段の常設 SA 設備のハザード耐性を更に高める必要は無いと申し上げたつもりはない。梶本様のご指摘とイメージは近く、まずは設計基準の層で自然ハザードに対しても十分な対策を講じて発生防止を図るべきではないかという主旨だった。

(山本部会長)：恐らく、先程の梶本様のコメントのポイントは、発生頻度と絡めた議論をすべきという点だと思う。その辺りはいかがか。

(原子力規制庁：天野)：個別プラント毎に発生頻度を見ながら対策を行うも、それでも想定外に起こり得る状態に対しては、FLEX 等の可搬 SA 設備にて柔軟性をもって対応すべきと考える。

(安全部会：守屋)：梶本様から非常に良いご指摘を頂いたので、本件を深掘して議論できれば一つの良い成果になると思い、敢えて発言させて頂く。先ほど、「内的事象と外的事象を区別するのではなくて」とご発言があったが、私は、内的事象と外的事象は、やはり異なるものと考えている。1F 事故では、外的事象が共通原因故障 (CCF) を引き起こしてしまった。このような、CCF によって炉心損傷に至ってしまう事象は、独立故障を前提とする内的事象とは異なるものだと思う。内的事象の場合、多重故障を想定したシーケンスが作られるが、故障を認識した運転員によるリカバリ (代替手段等) が期待できるので、現実的には、かなりの割合で炉心損傷を防止できると思う。但し、人的過誤

(HE) がむしろ炉心損傷を引き起こすリスクも逆に存在する。以上のように、内的事象は、多重故障が前提なのでリカバリに期待できるが、外的事象は、発生頻度は非常に低いものの、万一起きてしまうと、CCFに起因する炉心損傷を引き起こしてしまうかもしれない点が、大きな違いと考える。従って、内的事象と外的事象とでは、設備対策やSA対策が、違ってくるのではないかと考える。

(山本部会長)：他の方のご意見も伺いたく。梶本様のお話の要点は、発生頻度は非常に低いものの不確かさが大きいSA現象は、可能な限り発生防止に重点を置くべきではないか、というご発言だったと思う。

(中村副部長)：外的事象の発生頻度は、評価が難しいが、まずは、発生頻度がある程度大きいと仮定した上で、緩和系の効果はどの程度かという議論につながると考えている。例えば、NRCのSOARCAでは、典型的な事故を対象に、この程度の放射性物質の 대기放出しか起こらない、というような評価を行っている。1F事故とTMI事故とを比較すると、TMIは、炉心はかなり溶融したものの、溶融炉心は圧力容器の外に流出せず、 대기放出された放射性物質は殆どなかった。TMI事故は、電源は生きているものの運転員が操作を誤ったものだが、1F事故は、自然現象によって電源が喪失しており、それにより運転員がプラントの状態を十分に把握できていなかった。即ち、両者は全く異なる状況と言える。今回の議論で「事故とはいったい何か」ということを思考実験として実施しているが、その前提条件として、どこまでを想定しておくべきかを決めておかないと、議論が同じ場所を回るばかりで収束しないと感じている。例えば、SA規制では「必ず想定する事故シーケンス」が決められているが、それはどのような前提に基づいて決められているのか。まず、今議論されている規制に、まだ十分でない箇所があるならば、そこをきちんと議論するべきではないかと考える。

(山本部会長)：議論の前提条件によって様々な結論を導き得るとのご意見と理解した。これはかなり難しい課題と感じる。先程、発生頻度について、中村副部長から「不確かだ」というお話があった。事故の発生頻度が非常に低いと思われるものに対して、発生防止側で出来るだけ止める方が良いのか、もしくは事象緩和側で頑張るべきか、そのあたりの感触を、事業者の方から伺いたい。

(中国電力：村上)：どちらかと言えば緩和ではなく発生を防止すべきと考えるが、発生頻度や影響の大きさを考慮に入れた上で、何らかの対策を講じるべきと考える。水蒸気爆発のお話があったが、規制要求上は「発生頻度が低く評価する必要はない」と書かれていたと思うが、一方で、海外では、未だに水蒸気爆発の研究が続いていることから、審査の場で「水蒸気爆発発生の可能性をどう考えているか」と問われ、弊社は、下部ドライウェルの水張り水位を下げると説明した。このように、発生頻度が低いものとはいえ、発生時に影響が大きくなるものについては、発生頻度や影響の大きさを考慮に入れ

た上で、やはり何らかの対策を講じるべきと考える。至近では、今進めているデジタル CCF も、殆ど起こりえない事象とは思いますが、対策を打っておかないと、発生した時に甚大な被害につながる可能性があると考えている。

(安全部会：梶本)：意見を述べさせて頂きたい。水蒸気爆発の発生頻度は $1E-12$ (/yr) と小さいものの、不確実さ伝播解析を行うと、 $1E-8 \sim 1E-12$ (/yr) 程度の幅を持つ。このような事象の条件付き確率=1 (発生すると仮定) とすると、膨大な影響緩和設備が必要になることは自明である。発生頻度が非常に低い事象が「発生した」と仮定して影響を緩和する種々の手段を用意しておくのは効率が悪く合理的ではない。極端な話としては、発生防止のために水を抜く等の措置の方が望ましいと考える。今回、水蒸気爆発対策として、下部ドライウエルの事前水張り水位を調整しているが、これを発生防止策と考えるか、影響緩和策と考えるかが重要である。もし、これを影響緩和策と考えるならば、膨大な対策が必要となってしまう。そうではなく、ある種の哲学を持って、発生防止の視点でこのような問題にアプローチすべきと考える。本件、解決策がある訳ではないが、しっかりと考えていくべき課題である。

(安全部会：梶本)：もう一つ、不確実さについて付け加えさせて頂きたい。不確実さには、SA 現象の不確実さに加えて、発生頻度の不確実さも存在する。リスクは頻度と影響の積のため、頻度=1 と仮定して SA 現象の不確実さだけを考えるのではなく、頻度と SA 現象の両方をセットで考える必要がある。非常に発生頻度が小さくかつ影響が大きいものは、リスク (積) の視点で考えないと、解決策が見つからないと考える。

(山本部会長)：ご指摘頂いた点は、最初に挙げた論点の二つ目 (不確かさの話) に相当する。SA 進展解析をご専門とされる山路先生のご意見をお伺いしたい。

(早稲田大：山路)：今朝、山本先生にお送りした資料をご説明させて頂きたい。対象が福島第一原子力発電所 3 号機 (1F-3) のため、議論が発散するかもしれないが、SA 解析において、どのような不確かさに悩んでいるかの事例紹介をさせて頂く。(スライド①) こちらは 1F-3 の事故進展 (ドライウエル圧力の時刻歴) のグラフである。グラフの上には圧力容器の中の様子のポンチ絵を記載した。青い線のタイミングで圧力容器が減圧している。圧力容器減圧に伴い、炉内の水が減圧沸騰で失われるが、この時、炉心部は相当な高温状態のため、水蒸気による炉心冷却と、Zr-水反応による水素発生が同時に進行する。その後、事故が更に進展して、グラフの右端あたりで炉心領域に残存していた燃料デブリのかなりの量が下に落ちたと推測している。このような解析を幾つか実施すると、条件次第で様々な結果が得られる。例えば、とある解析では、圧力容器減圧時、減圧沸騰で発生する水蒸気によって炉心が冷やされる結果となっている。その後、炉心部から水が枯渇すると炉心は崩壊熱によって加熱され、熔融炉心が下部プレナム水中に落下した際に水蒸気が再度発生するものの、炉内には酸化反応を起こす金属が残っておらず、酸化反応熱は殆ど出ない。対して、別のケースとして、減圧沸騰時に金属 Zr が炉内

にかなり残っている解析では、減圧沸騰で発生する水蒸気によって Zr-水反応が促進され、炉心がヒートアップする解析となっている。その後も、かなりの量の金属が炉内に残存しており、水素が出続けるケースとなっている。本日の議論からは少し外れるかもしれないが、例えば、このような解析の不確かさにより、水素の発生量や発生タイミングが大きく異なる事があるというのが本スライドで言いたい事である。

(早稲田大：山路)：(スライド②) 先ほどのスライドは In-Vessel だったが、こちらは Ex-Vessel (圧力容器破損後のドライウェル圧力変化) を解析したグラフとなっている。圧力容器破損後 75 分の間にドライウェル圧力が大きく増加する。昨年度まで実施した解析では、圧力容器下部～下部ドライウェル床の間の構造物 (中間架台のプラットフォーム等) 表面で溶融燃料 (燃料デブリ) が凝固・支持されるシナリオを検討した。このような不確かさにより、下部ドライウェル床に水が溜まっていた場合の格納容器圧力挙動が異なってくる。これら 2 枚のスライドで申し上げたいことは、AM で炉注水することで事象進展が非常に複雑になり、自信を持って何が起きるかを断定できないという悩みである。また、SA 解析では、しばしば事故進展がフェーズ A からフェーズ B に急に切り替わるが (圧力容器破損による溶融炉心落下等)、実際は、物質の移動にも不確かさがあり (中間架台へのデブリ凝固等)、そのような点も解析上の悩みとなっている。結論がある訳ではないが、注水や物質移動等の不確かさによって事故進展が複雑に枝分かれするために、内部の状況を把握するのが非常に難しい点に悩んでいる。

(山本部会長)：先ほど頂いたコメントとの関連事項が 2 点ある。1 つ目が Zr-水反応の不確かさ (水と反応するか蒸気と反応するか等)、2 つ目が高温状態の炉心に注水する際の不確かさ (Zr-水反応により炉心温度が上昇する恐れがあるので炉心への直接注水は避けるべきとのご意見あり)。1F 事故の事故進展の未説明事項が残っているので、Zr-水反応の話を含めて更なる検討が必要というコメントも頂いている。山路先生から頂いたご意見は 2 つ目の論点の最後の部分 (事故進展の不確かさを減らす観点での事故対応手順のあり方) に関連する。山路先生、問い方が難しいが、事故進展を複雑にしないために、敢えて行わない方が良い事故対応があるということか。

(早稲田大：山路)：敢えて炉心に注水しないというのは極端すぎると思うが、例えばフランスの事故対策では、ドライキャビティ方式 (圧力容器が壊れることが予測できた場合、注水を停止し、ドライな条件で圧力容器から燃料デブリを格納容器に落下させ、それからゆっくり冷やす) を採用しているはず。これは、事故進展の不確かさを低減する方向のマネジメントと解釈している。

(山本部会長)：不確かさの低減というと、解析の精度向上や設備側に安全余裕を見込むという方法に進みがちだが、事故対応手順を工夫することで事故進展の不確かさを減らすという考え方もあるのではないというご意見と受け取った。

- (安全部会：守屋)：2点申し上げたい。まず1点目。炉注水は、少量ずつ入れると中途半端な状態となるので、大量の水を一度に入れてクールダウンすれば、不確実さは基本的になくなるものとする。注水マネジメントにおいては注水タイミングの他に注水設備容量を見定めるべきということかと思われる。
- (早稲田大：山路)：勿論一気に冷やすのがベストだが、1F事故ではそれが出来なかったと考えている。DBであればどのくらいの容量を準備しておけばそれが確実に機能するかを予測できると思うが、プラントも人員も異常な状態となっているSA時は、想定した量の水が望むタイミングで入ることに期待するのは難しいのではと思う。
- (安全部会：守屋)：1F事故以前は、SA対策は今ほどではなく、出来ることをやっていればよかったと思っていた時代であった。結果として、外的事象で殆どの水源や注水設備が全滅した状態から、何とか炉注水が始まり、不確かな状況に陥った。しかし、今後、代替注水系をサイジングするのであれば、不確かさがなくなるように、必要量を見定めて注水することが原則となる。
- (山本部会長)：設備設計としてはご指摘の通りと考える。山路先生のご指摘は、それでも予測できないことが多々あり、マネジメントでカバーできる所もあるのではということかと思う。
- (安全部会：守屋)：同意する。不幸な事態が多く重なって1F事故のようになった時に備えて、注水のタイミング等をバックアップとして持っておくことが必要と思う。
- (山本部会長)：中村副部長より、チャットで「日本ではドライキャビティ方式は難しいのでは」とコメントを頂いている。守屋様、もう一点のご意見を願います。
- (安全部会：守屋)：梶本様の水蒸気爆発に関するご意見に100%同意する。本当に低頻度なものに対して、不確実さがあるというだけで設備対策を実施するのは合理的ではない。但し、注意が必要な点として、リスク＝頻度×影響なので、頻度が低くとも影響が非常に大きい現象に対しては、継続的な検討(クリフエッジ対応等)が必要となる。非合理的にならない範囲で緩和手段を考えておくことは現場の実学として必要と思う。
- (山本部会長)：事業者のご意見を伺いたい。
- (九州電力：松田)：高影響のものに緩和設備をつけると膨大な投資が必要となる。そこに至る前に、発生防止の観点で対処した方が、費用対効果が高いと思う。
- (山本部会長)：Google formのコメントを紹介する。発生頻度が非常に低い場合でも対策を講じる必要があるとなると、原子炉建屋の倒壊にも対策するのか、どこかで線引きが必要では、とのコメント。
- (原子力規制庁：天野)：大規模損壊(故意による大型航空機衝突や大規模な自然災害)は、可搬型設備を用いて、状況を見定めて対応していくこととしており、その範疇のことと考える。

(山本部会長)：先ほどの守屋様のご意見と相通じるものと理解した。頻度が非常に低くても非常に重大な影響を及ぼすものについては、何らかの打てる手は打っておくのが現実的なプラクティスということと考える。

(山本部会長)：それでは次に、「設備オリエンテッドな考え方から発電所全体としての防護への移行を考えることの妥当性」について議論したい。ここで言っているのは、個々の設備をひたすら強固にしてゆくという考え方よりも、先ほど多様性の話があったが、SA設備や特重などの様々な設備がある中で、それらをうまく活用して全体として防護性能をあげられないかという考え方。深層防護との関係からどうなのか等、議論できればと考える。

(原子力規制庁：天野)：考え方として、議論されることは理解する。既設炉では、DBの中でDB設備の設計条件を定めて、その中で対策を講じている。対してSAは既設炉に対する追加的な対策として実施している。そのような状況下で、発電所全体をどうシステムとして捉えて、どう位置づけるのかというと、私自身、理解が追い付いていない状況である。

(山本部会長)：本件は色々な議論の余地があるというお考えと理解した。

(中国電力：村上)：考え方を理解していないかもしれないが、「発電所全体としての防護」は、常設設備では難しく、可搬設備を柔軟に使って対応することが回答になると思う。可搬設備であれば台数を確保できるので1台故障しても予備を使用することができるし、離れた場所に置いておくことができる。従って、本件に対する回答は「可搬設備の活用」と考えている。

(九州電力：松田)：川内では特重設備の運用を開始している。特重設備は航空機衝突やテロ対応の設備として設置しており、設置目的は異なるが、SA時に有効活用できないかと考えている。特重設備も常設設備だが、常設SA設備よりも準備にかかる時間や要員を削減できる可能性もあり、SA設備を特重設備に置き換えることにより、早期の事故終息、安全性の向上、事故対応要員の削減にメリットがあるのではと考えている。そのような観点で、現状の設備をトータルで最適運用すべく検討を進めている。

(山本部会長)：特重設備はどちらかということ CV防護機能を有しており、常設SA設備(CV防護)と特重設備とは、ある意味で冗長になっている。この点は、合理化の余地ありと考えておられるか、それとも、冗長性があるから信頼性が高いと思われているか。

(九州電力：松田)：特重はCVスプレイや炉注水が出来るように設計している。早くin-serviceできるものから使うという方針で検討している。

(山本部会長)：基本的には冗長性があることで信頼性が上がっていると考えておられると理解した。

(早稲田大：山路)：機器の機能喪失は1か0かのOn-Offで話が枝分かれしているイメージがあるが、SA時は、機器が機能喪失しても、その後の復旧や制御を失った状態での運

転継続など、様々な事が起こりえると推測される。システム全体でマネジメントしようと考えたとき、機器として本来のパフォーマンスは期待できないが、複数機器を組み合わせることで事故緩和が期待できるのではないかという感想を持った。

(山本部会長)：実際の対応上の重要なポイントと思う。まさに「全体としての防護」に繋がる論点と思う。これはどちらかと言えば設計というより訓練の話に近いと思うが、松田様、どのようにお感じになられたか。

(九州電力：松田)：実際の訓練での対応でも、二の矢、三の矢を並行した形で準備をしつつ、復旧も考慮に入れている。一旦故障したからもう使用しないというような対応は基本的にしていない。

(山本部会長)：「復旧してまた使う」というシナリオの訓練も実施されているのか。

(九州電力：松田)：その通り。壊れたら復旧にどれぐらいかかるかを共有する訓練等を実施している。

(中国電力：村上)：弊社も同様の状況である。解析では機器が最初から全て壊れる事を想定するが、訓練では機器が途中で壊れることや復旧を想定している。壊れる場所によってはケーブルを持ってくることで復旧する可能性があることや、その場合の想定時間など、実際の事故に近いシナリオで防災訓練を実施している。

(山本部会長)：非常に良い論点が出てきていると思う。我々が議論していた時は、設備設計の観点で議論していたが、「全体としての防護」を考える際には、それだけでは不足で、運用とセットで考えることが重要とのご指摘と思う。

(安全部会：村上)：今は、常設 SA 設備は耐震重要度の高いクラスで設計することになっている。SA 設備の耐性を DB 設備より高くしなければならないとの考え方が妥当かどうかの観点で先ほど議論があったが、逆の発想は取りえないか。可搬と常設という分け方しかしていないが、敢えて、例えば耐震に関し（あるいは他のハザードでも良いが）、重要度が低いとしても用意しやすいものを色々入れておくことで、確実に多様性を確保する考え方があり得るのかもしれない。そうすると「重要度の高いクラスで色々なものを作らなければならない」との基本的ルールの見直しもあり得るかもしれない。

(山本部会長)：多様性拡張設備のようなものの重要度分類に関するお話しと理解した。

(原子力規制庁：天野)：可搬設備で柔軟に対応することについてはご指摘の通りと考える。常設設備と可搬設備を組み合わせ、組合せとしての信頼性向上を図っているということであり、議論として理解できる。

(山本部会長)：宮田副部長から「基本的には「全体としての防護」は大規模損壊と類似、ただ、評価手法に改善の余地あり」とのコメントがあった。評価手法とは有効性評価のことか、補足を頂きたい。

(宮田副部長)：まだ頭を整理できていないが、例えば地震ハザードが大きくなった時、ある程度「こういうものは残る、こういうものは使えなくなる」といったことを考えながら、勿論、設計基準をはるかに超えたところの話だが、ハザード毎の評価を精緻に行うことができれば、発電所全体としての取組を充実させることができると思う。

(山本部長)：大規模損壊した所からスタートしているが、ハザード毎にきちんとやってみれば有益ということか。(宮田副部長：Yes)

(山本部長)：中村副部長から「特重施設の現実的利用について、どのように組み合わせるかについて検討の余地あり」とのコメント。ここは事業者が色々と検討されていると思う。特重施設は公開できない点も多く、我々が全て知ることは難しい。

(山本部長)：守屋様から「DBとSAで切り分けるのでは」とのコメントあり。

(安全部会：守屋)：DB設備までは、包絡的で保守的な設計条件の下で、QA(品質保証)やQC(品質管理)を含めて設備をがっちり設計するので、その範囲で不具合が発生するとメーカーのミスとなる。その範囲で守り切れないが深層防護の第3層、第4層の世界となる。そこでは想定された設計条件が作れないので、そのような領域では、設備での対応は非合理的であり、AMオリエントで世界を考えるべきである。その際、素手では何もできないから、何らかの手段・設備を用意しておいた方がAMを実行しやすいという逆の発想で考えるべき。耐性でなく、柔軟性や多様性がむしろ重要になると思う。1F事故のような複雑な状況下では、汎用の手段・設備を持っておく方が、原子力仕様の特別なものよりも、修復可能性を鑑みると、むしろ有用であった(例：車のバッテリーで直流電源を補うなど)。DB設備のような原子力仕様のものを更に積み上げても、1F事故のような事態では足を引っ張るだけの設備になってしまう。深層防護という思想を我々は持っているのだから、その思想を実際のものに展開して行くためには、そういう発想の転換が必要だと思う。

(山本部長)：上手くまとめて頂いた。本日の議論を振り返っておきたい。「SAとDBのハザード耐性」の件は、より高いハザード耐性ではなく、多様性・独立性・位置的分散でカバーすべきとのご意見があった。また、内的事象と外的事象で、共通要因故障の可能性を踏まえておくべきとのご意見もあった。関連して、事故解析における不確かさの考慮について、発生頻度との関係で議論が白熱したが、影響が大きいもの(水蒸気爆発等)は発生防止に注力することが適切という点は概ね合意が得られたと思う。緩和についても、何もしない訳ではなく、クリフエッジ対応等、出来る事はやるという話があった。「設備オリエントドの考え方から発電所全体としての防護への移行」の件は、DBありき+SA追加という経緯はあるものの、考え方としてはあり得るということだったと思う。最後に守屋様がまとめて下さったが、DBは設備オリエントドで行けるが、SA

は必ずしもそうではなく、システム全体としての防護がなじみやすい。但し、ここは設備だけでは閉じず、訓練等との組み合わせが重要であり、有効性評価をどう考えるかという課題は残されている。関連して、「事故進展の不確かさ」は、設備のマージンを取る、解析の精緻度を上げるというアプローチもあるが、対応手順を工夫することで、不確かさを減らす考え方もあるとのご意見を頂いた。別途、大本さまから「SAにおいては想定した通りにシナリオが進展しない可能性があるため、柔軟な対応が必要。そういったことから訓練による継続的な改善活動を事業者としては進めていると考えています」とのコメントを頂いた。時間となったので本日の議論はここまでとしたい。

閉会挨拶

糸井副部長（東大）

- 多くの方のご参加及び活発なご議論に感謝申し上げます。
- 本日の議論に関連して、半年前に、外的事象に関する、設計/設計外の考え方の議論を行っている。本日は、外的事象の観点ではなく、SA対策という別の観点から同様の問題を議論できたと考えている。
- 一連の議論を通じて、この10年積み上げてきたものをベースとして、新しい事を進めていくにはどういう論点があるのかというのが、関係者の意見の違いも含めて、非常に明快になってきたものと思っている。
- 安全部会は、今後も、このような 세미나を積み重ねて、より議論が進むような活動をしていきたいと考えている。引き続きご支援を頂きたい。
- 秋の大会では、燃料の観点から安全について議論したいと考えている。そちらにもご参加を頂ければ有難い。