

2022 年春の年会 企画セッション

「シビアアクシデント対策などの評価の考え方と課題」

- ・ 日時 2022 年 3 月 16 日(水)13:00 ~ 14:30
- ・ 場所 オンライン会議:

司会: 山本章夫(安全部会部会長、名大)

講演者: 天野直樹(原子力規制庁)、村上幸三(中国電力)、松田弘毅(九州電力)(敬称略)

1. 開会の挨拶及び趣旨説明

(山本部会長)

時間になったので、企画セッション「シビアアクシデント対策などの評価の考え方と課題」を始め

る。
原子力安全部会は、原子力安全という多様な学術分野に横串を通すための取り組みを進めており、原子力学会の春と秋の大会で開催する企画セッションでは様々なテーマを取り上げて議論を行っている。企画セッションだけでは時間が限られるので、フォローアップセミナーで議論を深めている。今日の内容についても、後日フォローアップセミナーを予定している。今日は、3名の講演の後、会場からの質疑も含めて総合討論を行う。

本テーマの背景になる問題意識として、原子力に関係する事故には不確かさを有する様々な事象が関与しており、その不確かさは事象が稀で解明が進んでいないもの、定量評価が難しいものなど、様々な種類がある。DBA(設計基準事故)に対しては、不確かさを包絡して保守的に設計するアプローチが取られている。SA(シビアアクシデント)対策は、事象が進むにつれて事象の不確かさが大きくなり、不確かさを減らすのは難しいことから、設備設計や有効性評価の考え方は、DBA と違いが出てきて当然である。一方で、事故の深刻さに応じて考え方をシフトすることによる影響や、どのように全体の安全をマネジメントするかは議論の余地がある。

今日の論点は、①審査基準は SA と DBA でどう違うのか、②常設設備と可搬設備のプライオリティの考え方、③SA 設備と自主的な設備の設備間の干渉、アクシデントマネジメントで注意を有した点、④常設 SA 設備に DBA 設備より高い耐性を求めること等の考え方の妥当性、設備が増えることで実質的に安全性が低下しないか、⑤設備オリエンテッドな考え方で安全を確保しているが、全体としての防護を考えるのが適切なのか、と考えている。

2. SA 設備の審査について 天野直樹(原子力規制庁)

基準の法体系、SA 設備と DB 設備の審査の違いについて紹介があった。

- ・ 委員会規則、審査基準は法律上の要求事項。審査ガイドは要求事項ではなく、審査官の審査の手引きという位置付け。規則の解釈等は委員会規則への適合性を判断するための具体的要求事項を規定しているが、解釈等に規定されたとおりの方針でなくても、規則に照らして

十分な保安水準の確保が達成できる技術的根拠があれば規則に適合すると判断されることがある。

- DB 設備は想定される全ての環境条件において、その機能を発揮することができるものでなければならないと規定されている。
- DB 設備の安全設計の妥当性を確認するために安全評価を行う必要があり、この評価として、原子炉施設の寿命期間中に予想される機器の単一の故障や運転員の単一の誤操作など、これらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって生ずる異常な状態に至る事象（運転時の異常な過渡変化）と、運転時の異常な過渡変化を超える異常な状態であって、発生する頻度はまれであるが、発生した場合には、原子炉施設からの放射性物質の放出の可能性があり、原子炉施設の安全性を評価する観点から想定する必要がある事象（設計基準事故）に対して安全評価を行う。安全評価においては、DB 設備の設計の妥当性を確認する見地から代表的な事象を選定した上で、評価においては保守的な評価手法が用いられている。
- SA についてはハードだけでなくソフトの基準も整備されている。SA 設備の環境条件は、DB 設備同様、想定している事故が発生した場合において、その機能が期待されているのであれば、その環境でも機能するようにという要求がされている。
- SA 設備の前提とする事象は、炉心損傷防止対策において想定する事象として、SBO など解釈に記載されている事故シーケンスグループを必ず想定することが求められている。また、個別プラント PRA を実施し、解釈に記載のない事故シーケンスグループが抽出された場合には対象に加える。
- 有効性評価では、格納容器破損防止対策において想定する事象として、過圧・過温破損など、解釈に記載されている格納容器破損モードを必ず想定すること等が求められる。審査ガイドにおいて、有効性評価にあたっては最適評価手法を適用するとしている。この点が DB 設備と異なるところと考える。不確かさが大きいモデルを使用するなどの場合には感度解析結果を基にその影響を適切に考慮する。
- SA の審査ガイドにおいては、故障を想定した設備を除き、設備の機能を期待することの妥当性が示された場合にはその機能を期待できると規定している。

3. BWR の SA 対策の概要 村上幸三(中国電力)

BWR を対象に、SA 対策の概要、SA 対策の整備プロセス、AM 上注意を要した事項、の 3 点が紹介された。

- SA 対策の概要
具体例として、緊急時対応拠点、格納容器除熱設備（残留熱代替除去系、フィルタベント）、電源多様化（ガスタービン発電機建屋、直流電源設備、高圧発電機車）、冷却機能確保（大型送水車等）等が紹介された。
- SA 対策の整備プロセス
SA 対策整備前の PRA（裸の PRA）実施、重要事故シーケンス選定、そして有効性評価と、3

ステップの評価フローが紹介された。

- AM 上注意を要した事項(3 例の紹介)
 - (1) TBP(全交流動力電源喪失+直流電源喪失+主蒸気逃がし安全弁(SRV)1 弁開固着)時、原子炉隔離時冷却系(RCIC)が機能停止後、速やかに大量送水車による原子炉注水を実施(2.4 時間後)できる体制を整備した。なお、大量送水車の準備時間の不確かさを考慮して、炉心損傷(3.2 時間)防止に対し十分な余裕時間を確保している。
 - (2) 下部ドライウェルに落下した溶融炉心がドレンラインを介してドレンサンプに流入する現象を抑制し、原子炉格納容器バウンダリへの溶融炉心の接触を防止するために、下部ドライウェル床面にコリウムシールドを設置。設計上の工夫として、コリウムシールドにスリットを設置し、スリットに流入した溶融炉心が凝固することでドレンサンプを防護している。
 - (3) コリウムシールド+下部ドライウェル初期水張りは MCCI 抑制に有効で、かつ水蒸気爆発の可能性は低い。しかし、審査の過程において、可能性は低くても、水蒸気爆発による格納容器バウンダリへの影響を評価する必要が生じた。そこで、MCCI 緩和の観点から十分であり、水蒸気爆発の影響も限定的とできる初期水張り水位を設定した。なお、格納容器下部が満水で水蒸気爆発が起きても格納容器バウンダリの健全性が維持できることを別途確認している。
- 全体のまとめとして、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、が紹介された。

4. PWR の SA 対策の概要 松田弘毅(九州電力)

「PWR の SA 対策の概要」として、重大事故等への対処に係る措置の有効性評価の流れと、具体的な評価内容の例が説明された。

- 「設置許可基準規則の解釈」を踏まえ、PRA の知見を活用し、炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価のための評価事故シーケンスを選定している。具体的な例として、川内の格納容器破損防止対策の有効性評価における評価事故シーケンスについて説明。
- 有効性評価では、現実的な条件を基本としつつ、事象進展の不確かさを考慮して、評価パラメータに対し余裕が小さくなるような条件を設定した感度解析を行い、SA 対策の有効性を確認している。
- 具体的な評価内容として、川内の「水素燃焼」について説明。保守的な条件設定(75%Zr-水反応)や感度解析(溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)の不確かさ、水素発生量の不確かさ)を実施して、SA 対策の有効性を確認している。
- SA 対策として静的触媒式水素再結合装置(PAR)及びイグナイタを設置しているが、ベース

ケース評価では PAR のみで判断基準を満足。イグナイタは、格納容器内での水素の成層化を考慮してドーム部にも追加で設置したが、PAR とあわせて判断基準を満足することを感度解析で確認。

- SA 事象は、物理現象や解析手法の不確かさが大きいいため、現状ではそれらを踏まえた条件設定や感度解析が必要な状況。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が可能となり、設備面・運用面の負担等の軽減、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できる。

5. 総合討論

(山本部会長)それでは、チャットの意見もフォローしながら総合討論を進めていきたい。これからの討論におけるご発言は、所属組織とは独立に一人の専門家としての発言であることとしたい。

(山本部会長)SA 設備の審査について天野様に伺いたい。最適評価の結果というのは、結果と不確かさが出てくるので、不確かさを包絡するような評価になると思う。宮田様から SA 審査特有の難しさはありますか？という質問を頂いているが、その点についてコメントはいかがか？

(天野氏:規制庁)新規基準が施行され、前例もなく、全てが新しく難しかったが、特に、DB と違ってハード対策だけでなく、ソフト対策も含まれる中でどう審査を進めるのか、事業者側もどのように説明するのか、審査する側だけでなく双方ともに難しかったと思うが、個別の審査を通じて相互の共通理解を深め、今の対策に繋がっていると考えている。

(山本部会長)SA では、概ね満足する、適切に考慮というのがキーワードとして出てくるが、色々な議論があったと思うし、規制側としてもどう考えるのか難しかったのではないかと思う。そこに戸惑いを感じることはなかったか？

(天野氏:規制庁)DB 設備は代表的・保守的との考え方のもとで、前例もあって確認しやすい状況であった。一方で、DB を超える現象をどう理解し、確認するのか、どのように規制側と事業者側で共通理解としていくのか DB と比べて難しさがあった。基準への適合性についても、十分な根拠をもった説明性があれば議論はできるが、これまでの結果として、十分な根拠が事前に準備された部分と、事前に余り準備がされていなかった部分があったと思う。

(山本部会長)次の論点として、松田さん、村上さんにご意見を頂きたい。SA 対策や自主的に採用する対策に関して、不確かさの感度解析をして、ソフト的な対策やハード対策、色々な事象を考慮して最適化する等、全体的に不確かさを包絡するような解析をしている印象がある。この点について、事業者として不確かさを見込まないと説明性が上がらないと感じたのか、そうではないのか等のご意見を伺いたい。

(村上氏:中国電)SA の解析は、DB と違ってノミナル、ベストエスティメイトで実施する。これは、審査の中で更田委員長が言われていた、SA の時は DB と違って運転員操作が介在するので、解析自体に保守性を見込むとずれが生じてくるのではないかとの話があった。そのため、SA ではノミナルの解析に対して不確かさを考慮するのが合理的ではないかと思う。また、SA は事象が進展すると分からない事があるので、そこは不確かさ解析や設備対策でカバーする必要があり、今後、

研究が進めば明確になるかもしれないが、現時点ではこのような対応となる。

(松田氏:九電)SA 事象は、事象進展がかなり進んだ後のことであり、どのような状況にあるか定かではない面があるので、SA 対策はある程度の不確かさを考慮した対策が必要であると思う。不確かさがどの程度あるかを技術的に判断するのは難しいので、水素対策の例でいえば、保守的に全てのジルコニウムが反応したとしても判断基準を満足する対策を取った。今後、研究が進んで定量感を精緻化できれば、過剰な対策を減らしていけると思う。

(山本部会長)BWR では、時間的余裕・ハード追加・複数事象での最適化、PWR では、Zr 水反応 100%感度解析・溶融燃料の極端な局所堆積で、SA 解析の不確かさを包絡しているように見えた。不確かさをある程度見込んで解析しないと説明性が上がらないという印象を受けたが、事業者の方がどう感じているかをお伺いしたい。

(村上氏:中国電)審査会合で「過酷事故解析では運転員操作が入るため、保守性を見込み過ぎると運転員対応が変わってしまう」との指摘があった。故に、SA 解析は、不確かさは大きいものの、ノミナル条件で実施し、不確かさを別途評価するものと考えている。不確かさ解析でカバーできない領域は、設備対策でカバーする。

(松田氏:九電)過酷事故は事象進展が進むと不確かさが大きくなり、適切な不確かさを考慮する必要がある。しかし、閾値の定量化が難しい場合は、100%Zr 水反応等の極限条件で設備設計を行うケースもある。今後、SA 研究が進めば、対策を合理化できる可能性があると考えます。

(山本部会長)会場(宮田様)から2つ質問が入っている。まず1つ目。BWRの格納容器除熱対策が2種類(残留熱代替除去系、フィルタベント)用意されているが、何らかの不確かさをカバーするために2種類用意しているのか。

(村上氏:中国電)当初規制上はフィルタベントのみが求められていたが、残留熱代替除去系は、東電のKサイトの知見として追加されたもの。現行BWRの裸のPRA(SA対策設備無し)の結果では、炉心損傷頻度の大部分はTWシーケンス(格納容器除熱失敗)による。そのため、格納容器除熱対策の多重化(残留熱代替除去系、フィルタベント)は重要と考える。なお、残留熱代替除去系は、可搬設備も備えている。

(山本部会長)不確かさというよりは、Unknown-Unknownsへの対応の一つとして、格納容器除熱に多様性を持たせているものと理解した。次に2つ目の質問に移る。PWRで、水Zr反応量を全Zr量の75%まで増加させた評価を行っているが、この補正は過剰ではないか。

(松田氏:九電)どの程度反応するかは理解が十分ではないため、過剰かどうかは測りかねる状況である。

(山本部会長)1番目(SA設備のDB設備の審査基準の差)と2番目(現行規制基準に対応するSA設備と他設備との干渉、AM上の注意事項)の論点についてご意見はあるか。会場(福井県庁の山本様)より質問あり。これは2つ目の論点(設備間の干渉)に関連する話である。SA設備を追加したために、SA設備が故障するとLCO逸脱となってしまうが、このような状況は適切か。

(松田氏:九電)LCO設定は、全SA設備及びDB設備は一部のMSに適用している。ご指摘の通り、現状は、全SA設備にLCOを設定しているが故に、DB設備が健全でもSA設備がLCO逸脱

となれば報告対象となり、過剰な面があると考えている。現在、SA 設備に対する LCO の考え方を整理している段階である。

(村上氏:中国電): 当社は、SA 設備に係る保安規定の整備の議論はこれからではあるが、SA 設備に加えて、特重も含めた LCO の考え方の整理が必要と考える。

(山本部会長)規制側(天野様)のお考えはいかがか。

(天野氏:規制庁)以下、私見として述べる。設備の整備段階では、深層防護の考え方に沿って、恒設設備・可搬設備を各々の層に適切に配することになるが、整備した機器の LCO 設定の考え方については、事業者から積極的な提案や工夫があってもよいのではないか。実際に整備されたものを事業者側でどう運用するのが最適かということは、事業者が検討した上で、規制の場で議論するのが合理的と考える。

(山本部会長)SA は DB に比べ外縁がぼんやりしているが、その中で物事を判断する難しさについて、山形先生はどうお考えか。

(山形先生:長岡技大)SA において、DB の範囲を超えてどこまで進展するか分からないなら、ある種の物理的限界を取る考え方がある。深層防護の後段の層ほど不確かさが大きくなるので、できるだけ幅広の対策を取らねばならない。例えば水素爆発の問題であれば、有効燃料長の範囲は Zr-水反応を起こしうるという幅広の考え方(物理的限界)など。

(山本部会長):これに関連する村上先生からのチャットでのご意見は重要な論点と思うが如何か。

(村上先生:東大)ももとのルール作りの段階では「ノミナル」が指向されていたのに、実施段階では「不確かさも考慮して感度解析を」となっている。最初から保守的評価を求めるより面倒な要求になっているようにも見えてしまう。今後さらなる安全性向上を求めることがありうるのだとすると、このような仕事の仕方は機動性を欠く。ルール作りから実装までの一連を経験し、規制側、事業者側とも何らかの改善点は考えられないか。

(天野氏:規制庁)積む必要のない不確かさを積んでいるという認識ではなく、DB を超えて不確かさが多く、実験的知見も少ない領域で、最終的に規制としての判断を行う上で必要な問いを投げかけ、それに対して事業者からの回答があり、そのような議論を積み重ねた結果として共通理解を得ていると考えている。今後の改善点としての議論は、まさに学会のような場での議論が有意義ではないか。

(村上氏:中国電): 審査での説明性の点で、そのようにせざるを得ない面がある。今回の説明の中で、ペDESTALへの初期水張り水位を下げた話をしたが、その水位が低い場合について自主的に水蒸気爆発の評価を行い、ペDESTALの耐性を評価している。ただしこれは、すべての不確かさを組み合わせたものではなく、現実的な評価において水蒸気爆発が起きても大丈夫であることを示すというリーズナブルなもの。

(松田氏:九電) 審査ガイドには最適評価手法を適用することをベースとするが保守的な仮定及び条件を否定するものではないとされていることから、保守的な条件を設定の方が審査における説明性という点では納得が得られやすいと考え、保守的な条件を設定し、評価を実施している。ノミナル評価に対し不確かさをどれだけ積むかというアプローチは、不確かさがどれだけかが技術

的に分かっていないと、そういう対応も難しい。

(山本部会長)不確かさの取扱いについていろいろ議論してるところではあるが、不確かさを積み重ねるとことは非常に頻度の低い領域で入り込むことになる。そうなるとプライオリティであるとか耐性をどこまで求めるかとか、という話にも繋がっていく。今日の企画セッションのもう一つのポイントである。この点についてご意見を伺いたい。

(松田氏:九電)PWR の SA 対策の中で水素燃焼対策としてイグナイタを追加設置した。本件について設備のマネジメント、多少メンテナンスは増えるが、ネックとなるような設備の増加ではない。また、不確かさを踏まえて自主的に追加した対策としては、PCCV の原子炉下部キャビティ部のライナープレートに溶融炉心が接触しないように防護壁を設置した例もあるが、原子炉下部キャビティ部であるため他の設備と干渉するとかメンテナンスが増大するというようなものではなく、SA 対策全体を振り返ってみてもネックになるようなものはない。

(村上氏:中国電)今後の話になるが、DBに加えてSA設備が増えてくると今後保守が大変になってくる可能性はある。人員の増員などの対応が考えられるが事業者でできることの限界はある。

(山本部会長)天野さんにお伺いしたい。後段に行くほど不確かさが大きくなって、それをカバーしようとする高い耐性を求めるという発想にもなる。これは、DB、SA と二重の設計基準となり、最初のコンセプトから少し外れてしまうのではないか。

(天野氏:規制庁)設計基準というのは深層防護の第三層の確認をするものであり、一方で、今回の新規基準は、当初設計で SA を想定していない既設炉に対して、SA 事象に対処する設備やソフトの対策を求めるバックフィットとだと理解している。高い耐性のイメージが沸かないが、ハザードとの関係性で高い耐性を求めるものは、別途特重等で議論している。説明を省略したが、SA を規制対象とすること、新規基準を既設の原子炉にさかのぼって適用することは、法律事項として原子炉等規制法に規定された。どのような SA を想定して、その想定に対する対策が妥当かというのは、基準への適合性として審査で確認している点である。基準の法体系の話をしたが、審査の場では当然議論の余地がある。二重の設計基準というのは違うと考えている。

(山本部会長)よく理解できた。残念ながら今日は最後の論点についてはカバーできなかったが、フォローアップセミナーでの議論できればと思う。今日は一時間半という短い時間ではあったが、不確かなところについてはかなり有意義な意見交換できたのではないかと感じている。今日出てきた論点などを加味し、フォローアップセミナーを企画したいと思う。

(村上先生:東大)R&D のことを考えたときに、今回のやり方グッドプラクティスと必ずしも言えないところがあると感じたこと、一方である意味合理性を持って進んできたということの両方理解でき非常に良かったと思う。次の R&D をどうするかということにもつながる問題であり是非フォローアップセミナーで議論させて頂きたい。

(山本部会長)時間になりましたのでこの企画セッションを終了させていただく。長時間に亘り様々なご議論いただきましてありがとうございました。

以上