

標準委員会セッション3
(システム安全専門部会とリスク専門部会の合同セッション)
「原子カプラントの継続的な安全性向上対策採用の考え方」



**(2) 決定論的評価と確率論的評価
の統合の課題**

平成26年9月10日

山下正弘(電力中央研究所)



目次

1. 決定論的評価と確率論的評価の統合的な活用

- 1.1 安全性向上対策の採用に係る周辺動向
- 1.2 IAEA文書(INSAG-25)に見る統合のプロセス

2. 決定論的アプローチと確率論的アプローチ

- 2.1 安全確保における2つのアプローチの役割
- 2.2 不確実さへの対応における2つのアプローチの役割

3. 統合的な活用における論理や考え方に係る課題

- 3.1 2つのアプローチから得られる情報の異質性と相互補完
- 3.2 防護層の強化とALARPの枠組み
- 3.3 グレーディッドアプローチ、外部ハザードへの対応

4. 統合的な活用における確率論的評価に係る課題

1. 決定論的評価と確率論的評価の統合的な活用

1.1 安全性向上対策の採用に係る周辺動向

- 新規制基準では、重大事故対策で想定する事故シーケンスグループ及び格納容器破損モードを抽出する際に、内部事象及び外部事象のPRA(適用可能なもの)を実施して得られる情報を活用することが要求されている。
- 安全性向上評価では、内部事象及び外部事象のPRA(段階的に拡張)を実施して自主的な安全性向上措置の調査・分析を行い、その結果を踏まえて安全性向上に向けた取組方針を策定することが義務付けられた。
- 経済産業省の自主的安全性向上WGは、自主的・継続的安全性向上に向けた提言の中で、外的事象も含めたPRAを実践して得られる情報をリスクマネジメントに活用していくことの重要性に言及した。*
- 安全性向上対策は複数のキーエレメントを総合的に考慮した意思決定プロセスを経て決定される。中でも、決定論的評価と確率論的評価の知見を統合的に活用することが重要である。

※ 「原子力の自主的・継続的な安全性向上に向けた提言」(平成26年5月30日)原子力の自主的安全性向上に関するワーキンググループ

～ 「決定論的評価」と「確率論的評価」 ～

| | 決定論的安全評価 (DSA) | 確率論的リスク評価 (PRA) |
|---------------|--|--|
| キー エレメント | <ul style="list-style-type: none"> ■ 安全基準 (Safety Criteria) ■ 深層防護 (Defense in Depth) ■ 安全余裕 (Safety Margins) | <ul style="list-style-type: none"> ■ 確率論的ターゲット ■ PRAの品質とスコープ <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <ul style="list-style-type: none"> ■ 事故シナリオの包括的・統合的解析 ■ 潜在的故障、人的過誤の数を限定せずに取り扱い可能 </div> |
| アプローチ ■ 問い | <ul style="list-style-type: none"> ■ 安全系が設計上の意図に合致しているか ■ 合致していない場合の影響はどのようなか | <ul style="list-style-type: none"> ■ 何が起こり得るか (シナリオ) ■ 起こり易さはどのくらいか (頻度) ■ 影響はどのようなか (影響度) |
| ■ 答え | <ul style="list-style-type: none"> ■ 好ましくない影響のリスクが許容レベルであることを定性的に評価 <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> <p>DBAの安全解析による安全系の性能の確認/その他の決定論的要求への適合の確認 ⇒ 安全が確保(を確信)</p> </div> | <ul style="list-style-type: none"> ■ 広範なスペクトルの内部/外部ハザード、機器故障、人的過誤に起因するリスクを定量的に評価 |

(出典) INSAG-25 (IAEA, 2011) の Fig.1, 2 を参照

DSA: Deterministic Safety Assessment, PRA: Probabilistic Risk Assessment

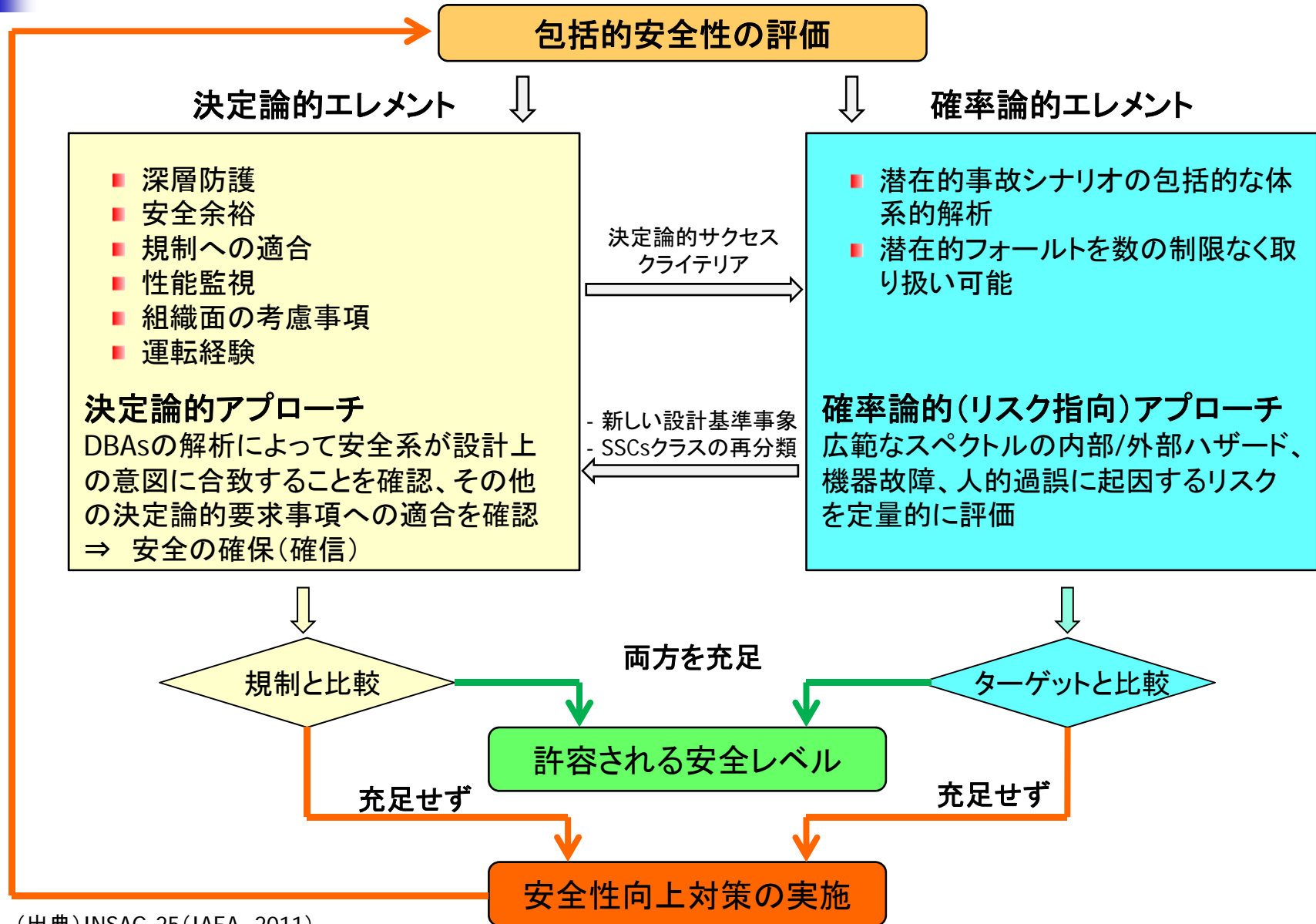
1.2 IAEA文書(INSAG-25)に見る統合のプロセス ～ 統合的意思決定プロセスのキーエレメント ～

- 標準とグッドプラクティス
- 運転経験のフィードバック
- **決定論的考慮事項**
 - 安全基準
 - 深層防護
 - 安全余裕
- **確率論的考慮事項**
 - 確率論的リスク評価(PRA)
 - 確率論的ターゲット
 - PRAの品質とスコープ
- 組織面の考慮事項
 - マネジメントシステム
 - 訓練及び手順
- セキュリティ面の考慮事項
- その他の考慮事項
 - 被ばく線量(公衆、従業員)
 - 経済的影響
 - 研究から得られる知見

懸案事項への対策(選択肢)について、キーエレメントを取り入れた統合的意思決定プロセス(IRIDM)を通じて、実施の要否を決定する。対策の実施後、プラントの性能監視を行い、必要に応じて、是正措置をとる。

(出典)INSAG-25(IAEA, 2011)

～ 決定論的エレメントと確率論的エレメントの統合 ～



2. 決定論的アプローチと確率論的アプローチ

2.1 安全確保における2つのアプローチの役割

- 決定論的アプローチでは深層防護の堅持及び安全余裕の確保を基本とする。
 - 多段的に防護層を設定して各防護層の信頼性や防護層間の独立性の確保を図る
 - 防護層を構成する系統・設備は十分な安全余裕をもってその機能を達成する、等
- 深層防護の第2層、第3層では包絡事象である設計基準事象(DBEs)を設定して、第4層では設計拡張状態(DECs)を設定して、安全解析の結果が基準に適合することで、防護層の適切性を確認する。
 - DBEsやDECsの設定には明示的／非明示的に頻度や影響度が考慮される。特に、DECsの設定には確率論的リスク評価(PRA)の知見がかなり強く活用される。
- 確率論的アプローチでは炉心損傷頻度、格納容器破損頻度、大規模放出頻度、健康影響リスク等をリスク指標として、これらの指標値を十分に低く抑制することを基本とする。
 - 確率論的リスク評価(PRA)からは、体系的・網羅的に事故シナリオが特定され、それらの頻度と影響、安全上重要な系統・設備、不確かさが結果に及ぼす影響等が評価される。

～ 決定論的アプローチと確率論的アプローチの緊張関係 ～

決定論的アプローチとリスクベーストアプローチの間に対立(Conflicts)が起こる



従来の「決定論的」アプローチ

- 定量化していない蓋然性
- 設計基準事故(DBAs)
- 深層防護(Defense in Depth)
- 過大な規制負荷を課す可能性
- 不完全

リスクインフォームド アプローチ

- 従来のアプローチとリスクベーストアプローチの組合せ

リスクベーストアプローチ

- 蓋然性(確率)の定量化
- シナリオベース
- リアリスティック
- 不完全
- 品質が懸案事項

2.2 不確実さへの対応における2つのアプローチの役割

偶然的な不確実さ Aleatory uncertainty

ランダムに発生する事象に
起因する不確実さ

PRAの確率論的モデルに取り
込む

認識論的な不確実さ Epistemic uncertainty

パラメータの不確実さ

故障率、極限強さ等、基本データに関連する不確実さ
通常、パラメータ値の確率分布によって表現

モデルの不確実さ

事象、現象に関する知識状態の不完全さに由来する

完全性の不確実さ

スコープからの除外、知識の欠如に由来する
知識の欠如のある部分 (Unknown unknowns) は、深層防護、
安全余裕によって対処する

Known unknowns

Unknown unknowns

確率論的モデル

確率分布、不確実さ解析、感度解析

深層防護、安全余裕、レジリエンス、性能の監視 等

3.統合的な活用における論理や考え方に係る課題

3.1 2つのアプローチから得られる情報の異質性と相互補完

- 決定論的アプローチと確率論的アプローチは相互に代替できるものではなく、両者からは相互補完的な知見が得られる。
 - 決定論的アプローチからは、各防護層の信頼性や頑健性、防護層間の独立性を持たせるべき、1つの防護層の中でも重大事故の発生防止対策と影響緩和対策は独立性を持たせるべき等が要請される。
 - 確率論的アプローチからは、例えば、確率論的リスク評価を通じて、リスク指標の値、安全上重要な系統・設備、不確実さが結果に及ぼす影響等が得られる。しかし、例えば、防護層間の独立性をどの程度にすべきかといった情報は出てこない。
- 2つのアプローチから得られる知見の統合はどうあるべきか。

決定論的アプローチからの要請を明確にする決定論的ターゲットとして、レファレンスレベルを定めることが有効ではないか。

レファレンスレベルの要素は、例えば、炉心損傷時の条件付き格納容器破損確率を一定値以下に抑制すべき、特定の防護層間や防護層内の特定の機能間では電源機能は独立性を持たせるべき等。

3.2 防護層の強化とALARPの枠組み

- 安全性向上対策は、各防護層の信頼性と防護層間の独立性の向上を図ることと捉えることができる。

レファレンスレベルでは、特に、以下の点を明確にすることが有効である。

- 決定論的アプローチからの要請(定性的な方向付け)を、確率論的アプローチが定量的かつ具体的にどのように補完すべきか。
- 1つの防護層に過度に依存すべきではない。第1層～第4層の信頼性(ディペンダビリティ)や頑健性、防護層間のバランスがどうあるべきか。
- 防護層間、特に第3層と第4層の間の独立性はどの程度確保されるべきか。

- 安全性向上評価制度では、新規制基準での許認可対象設備等に加えて、自主的に設置した設備等を有するプラントのPRAを実施して、安全性向上に向けた取組みを策定する。

新規制基準に適合していることを前提として、自主的安全性向上対策を効果的に摘出するためには、ALARPのBSOに相当する確率論的ターゲットを定めることが有効ではないか。

～ 安全目標及び性能目標に係る状況 ～

旧原子力安全委員会安全目標専門部会における検討結果※1

定性的安全目標案

原子力利用活動に伴って放射線の放射や放射性物質の放散により公衆の健康被害が発生する可能性は、公衆の日常生活に伴う健康リスクを有意には増加させない水準に抑制されるべきである。

定量的安全目標案

原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによる、施設の敷地境界付近の公衆の個人の平均急性死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである。

原子力施設の事故に起因する放射線被ばくによって生じ得るがんによる、施設からある範囲の距離にある公衆の個人の平均死亡リスクは、年あたり百万分の1程度を超えないように抑制されるべきである。

安全目標案に対応する性能目標(発電炉)

炉心損傷頻度:10-4/年程度、格納容器機能喪失頻度:10-5/年程度 を同時に満足すること。

原子力規制委員会における安全目標に関する議論 ※2

- 旧原子力安全委員会安全目標専門部会における検討結果は原子力規制委員会が安全目標を議論する上で十分に議論の基礎となる。
- 福島第一発電所事故を踏まえ、放射性物質による環境への汚染の視点も安全目標の中に取り込む。
 - 事故時のCs137の放出量が100TBqを超えるような事故の発生頻度は、100万炉年に1回程度を超えないように抑制されるべきである(テロ等によるものを除く)。

3.3 グレーディッドアプローチ、外部ハザードへの対応

- PRA技術の進展を踏まえると、プラントの相対的な脆弱点の抽出だけではなく、グレーディッドアプローチに活用できる情報を提供できる。

安全性向上を図る上では、リソースを効果的・効率的に配分することを考慮すべきであり、安全上の重要度に応じて強弱を付けたアプローチ(グレーディッドアプローチ)をとるべきである。

相対的な脆弱点の抽出とその対策にリソースを投入するプロセスは、過度に保守的な部分が残るなど、バランスの取れたアプローチとはならない可能性がある。

- 設計基準を超える外部ハザード(地震、津波等)に対して、安全余裕、多様性及び位置的分散の確保など、深層防護の多段的な構造が取り入れられている。

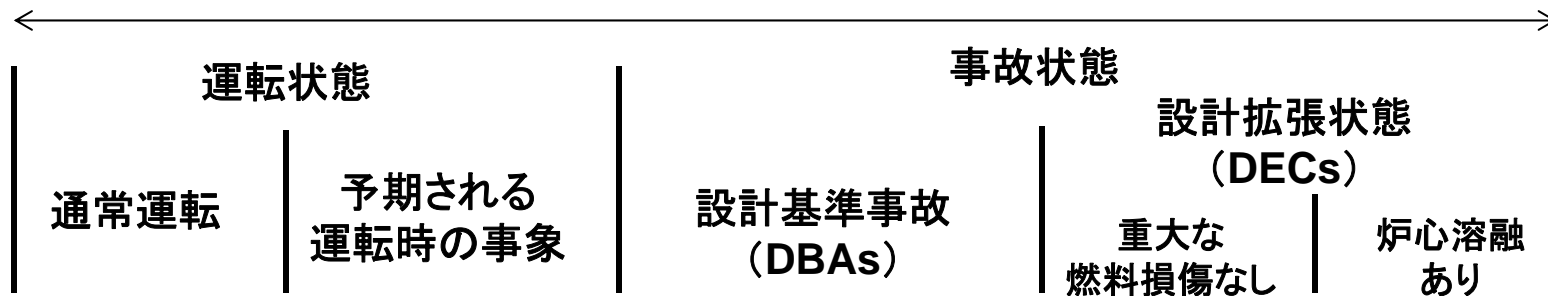
地震、津波等の外部ハザードに対して、深層防護の防護層を明確な形で多段的な構造としてはどうか。

設計拡張状態(DECs)の中に、設計拡張ハザード(DEHs)を取り入れて、PRAの結果も活用してそれを定めて防護策を検討する枠組みとしてはどうか。

～ 設計基準事象を超える事象の取り扱い ～

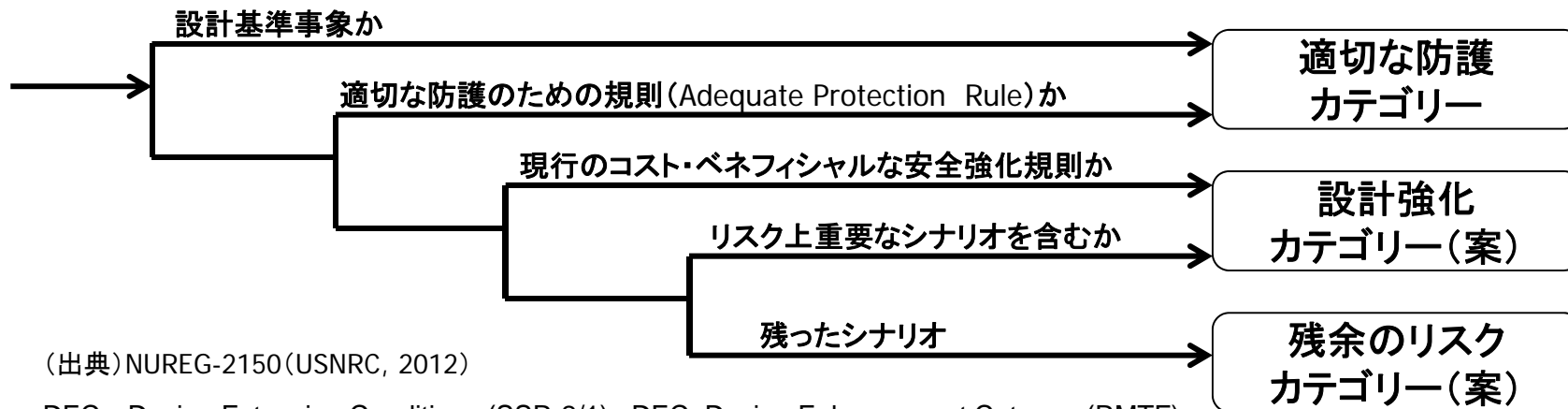
- IAEA SSR-2/1は、設計基準事故DBAsを超えるプラント状態である設計拡張状態(DECs)を設計で考慮することを要求

(設計で考慮する)プラント状態



(出典) SSR-2/1 (Rev.1) ドラフト (IAEA, 2014)

- NRCのリスクマネジメント・タスクフォースは、設計基準を超える事象(外部ハザードを含む。)を含む設計強化カテゴリ(DEC)を規制の枠組みに取り入れることを提言



(出典) NUREG-2150 (USNRC, 2012)

DECs: Design Extension Conditions (SSR-2/1), DEC: Design Enhancement Category(RMTF)

4. 統合的な活用における確率論的評価に係る課題

- 原子力学会標準委員会では地震PRAをはじめとする多数のPRA標準が策定されてきた。また、原子力安全推進協会におけるピアレビューマニュアルと試評価の経験を踏まえて、原子力学会のPRA品質確保標準が策定された。

PRAの品質の確保と対象事象・スコープの拡大に必要となるPRA標準の策定とそれらに最新の技術的知見を反映する継続的改善がなされることが期待される。

また、PRAから得られる知見の活用の仕方(例えば、PRAのスコープ外のハザードがある場合の活用の仕方など)の**ガイダンス**も有用である。

- 複合事象、複数ユニット、地震起因を含めた内部火災、溢水等の分野で、PRAの手法・データベースの開発が必要である。また、電力会社は個別炉PRAを行い、安全性向上対策の策定のための知見を導出する必要がある。これらには、多数の専門家を含む人的リソースが恒常的に必要となる。

PRAの対象事象・スコープの拡大に向けて、**PRA手法・データベースの開発**のための研究を計画的に推進していく必要がある。

PRA手法・データベースの開発、個別炉PRAの実施等について、学協会を含めて、国内の関係機関、電力会社、メーカーの**効果的・効率的な役割分担、組織構成**とすることが有用である。

～ 日本原子力学会におけるPRA標準の策定状況 ～

(出力運転時PRAの例)

| 対象事象 | PRAのスコープ | | | 備考 |
|---------------|----------------|--------------|--------------|------------|
| | レベル 1 | レベル 2 | レベル 3 | |
| 内部事象 | | | | |
| ■ 内的事象 | SC-P008:2008* | SC-P009:2009 | SC-P010:2008 | *改定版公衆審査終了 |
| ■ 内部火災 | SC-RK00X:201X* | — | — | *公衆審査終了 |
| ■ 内部溢水 | SC-RK-005:2012 | — | — | — |
| 外部事象 | | | | |
| ■ 地震 | SC-P006:2007* | — | — | *改定版公衆審査終了 |
| ■ 津波 | SC-RK004:2011 | — | — | — |
| ■ その他の外部事象 | — | — | — | — |
| 複合事象 | | | | |
| ■ 地震と津波の重畳 | — | — | — | — |
| ■ 地震起因内部溢水 | — | — | — | — |
| ■ 地震起因内部火災 | — | — | — | — |
| 複数ユニット | — | — | — | — |

■ : 複数標準の組合せで概ねカバーできる範囲

□ : 安全性向上評価(第1回)で想定される範囲

注. 停止時については、内的事象停止時PRA標準(SC-P001:2010)(スコープはレベル1)が策定済み



おわりに

- 安全性向上対策の決定に係る統合的な意思決定プロセスの中で、決定論的安全評価と確率論的リスク評価の知見を統合的に活用する際の論理や考え方、PRA技術等に係る課題を検討した。
- 統合的な意思決定プロセスに関して、十分に言及していない重要な課題の例として以下があり、これらについても今後検討していく。
 - 対策の候補による各キーエレメントの充足度合、統合的に意思決定する際の複数のキーエレメントの相対的重要度(重み付け)
 - 対象事象や評価の不確実さを考慮した意思決定の在り方(対策の在り方、例えば、性能の監視等)
 - 防護策の在り方として、信頼性(Dependability)や頑健性(Robustness)に加えて、レジリエンス(Resilience)を考慮すべきこと 等

ご清聴ありがとうございました。