

開会の挨拶及び趣旨説明（以下、敬称略）

山本部長（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、研究開発、それらの活動に横串を通ず観点から活動を継続しており、特に学術の立場から原子力安全の確保とは何かを問い続けることをテーマとし、安全全般に関わる長期的、短期的テーマを対象として種々の議論・検討を行っている。
 - 本日のキーワードの一つである新技術の導入に関し、燃料の改良は効果的な安全性向上対策であり、事業者は継続的に改良を行っているものの、新型燃料は30年近く日本に導入されていない。日本にとっての新型燃料である10x10燃料は海外では既に実用化されていることから、海外知見を活用して短期間で導入できれば原子力発電の安全性向上が見込まれるものの、国内外のハザードの違い等を考慮しなければならない。
 - 本日のセミナーの目的は、原子力安全に関わる新技術である「新型燃料導入」をキーワードとし、ハードウェア及びソフトウェアの両方に関して3名の方からご講演を頂き、後半に総合討論を行い議論を深めることにある。総合討論で想定している論点の候補は以下となる。
 - ハードウェアに関し、例えば規制のギャップがどうであるとか、新技術を導入する際の枠組みをどう考えたらよいか。
 - ソフトウェアに関し、ハードウェアとソフトウェアが一体で刷新される、あるいはソフトウェアの継続的改善をどう考えたらよいか。
 - 新技術を導入するにあたり、産官学がある程度ベクトルを揃えて進む必要があるが、そのための取組みをどうするか。
-

第一部 講演

10x10燃料を導入する際の課題とその解消に向けた道筋

鶴田義昭（東電HD）

<講演概要>

「10x10燃料を導入する際の課題とその解消に向けた道筋」として、BWRプラントへの10x10燃料の導入に係る背景、国内外の状況、新型燃料導入時の課題、論点等について説明がなされた。

- 欧米では、長期運転サイクルや熱出力向上による設備利用率向上を駆動力として燃料開発が進められており、結果として経済性・信頼性も向上している。現在の主力燃料は10x10燃料だが、11x11燃料の開発・導入も進められている。一方、国内では9x9燃料を

高燃焼度化しながら使い続けている。

- 10x10 燃料は、燃料棒 1 本あたりの熱的負荷の緩和、改良スペーサによる限界出力特性の向上、改良被覆管材等による機械的健全性の向上、異物による燃料破損低減に向けた改良（異物フィルタ）等による安全性・信頼性向上、取出燃焼度及びウラン装荷量の増加による燃料取替体数の低減（9x9 燃料から約 1 割低減見込み）、運転サイクル期間長期化等の多くのメリットを有する。日本のガラパゴス化を防ぐ意味でも 10x10 燃料を導入して海外に追いつく必要がある。
- 止める（制御棒挿入性の維持）、冷やす（冷却材流路の維持）、閉じ込める（被覆管の閉じ込め機能の維持）といった基本的な安全機能が、通常運転時のみならず、過渡時・事故時・地震時等にも適切に確保される必要があり、多岐にわたる項目を 10x10 燃料導入前に確認する必要がある。例えば「被覆管に貫通性損傷が生じないこと」を示すためには、機械的負荷・熱的負荷・化学的負荷等に対する健全性を示す必要があり、多くの労力が必要となる。また、燃料に関する規制（法令、内規、指針、解釈等）への適合性を確認する必要がある。
- 従来の方法では、個別プラントの設置許可申請時に燃料の機械設計の妥当性等を確認するが、確認すべき項目が多岐にわたるため、安全性・信頼性の高い 10x10 燃料導入に時間がかかってしまう。審査時間を合理的に低減すべく、10x10 燃料の許認可では、個別プラント審査に先行して、燃料の型式証明制度（複数プラントに共通する項目が対象）、及び、解析コードに係るトピカルレポート制度（TRAC コード及び合理的な保守性を得る統計的安全評価手法の妥当性確認）を活用し、その後、個別プラントの設置許可に入りたいと考えている。
- 10x10 燃料導入にあたっては、燃料体の機械設計等の基本設計は概ね完了しているものの、(1)地震時燃料棒閉じ込め機能評価、(2)沸騰遷移相関式、(3)使用中の燃料棒内圧が外圧を超える可能性の検討、(4)最適評価コード及び統計的安全評価手法のプラント過渡事象への導入等が論点になると考えている。広範な論点が対象となるので、型式認証制度とトピカルレポート制度を活用して 10x10 燃料導入の効率化を図りたい。
- 過渡的な 3 次元出力分布変化を解析可能な TRAC 系コードは、燃料棒径が細く（＝燃料から冷却材への伝熱速度が速い）、制御棒挿入時の軸方向出力分布変化が熱的制限値に大きく影響する可能性がある 10x10 燃料の過渡特性評価には TRAC 系コードの適用が必須となると考える。さらに、TRAC 系コードの入力は多岐にわたり、各々の入力パラメータに保守的な値を設定する事が難しいため、TRAC 系コード導入と併せて統計的安全評価手法の導入が必要となる。
- TRAC 系コードは全ての運転状態の包絡的な評価を行うものではないため、取替炉心の安全性を確認するタイミングで、当該炉心の主要な過渡事象を解析する必要が生じる。そのため、関連する規格類（JEAC4211 など）の整備も併せて必要となる。

<質疑応答>

Q：私の経験では、TRAC系コードは、3次元の細かい計算というよりは、1次元コードを3次元的に使うものと認識している。TRAC系コードの特徴は、核熱結合や中性子動特性モデルを導入している点にあると考えている。つまるところ、炉心の3次元的な中性子動特性を熱水力の変化と共に解析できる点が特徴という認識で良いか。

A：TRACコードは炉心の中性子の振舞いを3次元で解いており、AETNAコード（炉心解析コード）と同レベルの評価が可能である。また、圧力容器内は3次元の円筒体系で評価し、その中にご指摘の1次元体系（燃料集合体等）が配置されている。即ち、3次元モデルと1次元モデルを組み合わせる原子炉の過渡・事故特性を評価している。（標準委員会：工藤）

Q：型式認定・トピカルレポートと個別申請との切り分けは今後議論がなされるのか、もしくは相場感が出来ているのか、補足を頂きたい。

A：プラント毎の固有のパラメータ、燃料の核設計を反映する必要がある部分は、個別の設置許可で対応する。例えば、中性子動特性や熱水力特性はプラントの状況や安全設計によるところがあり、また、核設計も運転サイクル長等、個別のプラント条件によるため、型式証明が困難であり、個別の設置許可で対応していく。耐震性等は、包絡的な地震の揺れを設定できれば、全てのプラントに適用できるため、型式証明で対応できる部分がある。現状は、プラント間で統一的に確認できる燃料の機械設計等が型式証明のスコープになると想定している。

Q：10x10燃料を入れることで安全性が総合的に向上する点に違和感はないが、一方で燃焼度が向上すること等による負の影響を含めた全体像を掴みきれているか気になっている。どの程度の余裕があるか等の見通しがあれば伺いたい。

A：10x10燃料導入のメリットはご説明させて頂いた通りである。デメリットは、スクラム時の伝熱の速さによる側面等があると考えている。また、過酷事故（SA）時に伝熱の速さによる燃料、炉心、プラント側への熱移行が早期化するという点もあり得るかもしれない。

Q：10x10燃料を入れると同時に出力向上も検討するという選択肢はないものか。

A：その点は総合討論で扱わせて頂きたい。（山本部長）

炉心燃料分野の評価コードの高度化と学会標準の整備状況

工藤義朗（標準委員会）

<講演概要>

本講演では、炉心燃料分野での評価コードの高度化、統計的安全評価及び学会標準の整備状況の概要が紹介された。

- 安全評価コードの高度化は、評価結果の信頼性の向上及び設計の自由度・信頼性の向上を目的に進められ、安全性の向上、安全評価自体の説明性・信頼性の向上、使用済み燃料の削減、経済性の向上、最新知見の適時反映等の効果が期待される。
- 安全評価コードを複数コード群（従来）から単一コード（TRAC 系）に置き換えることで、継ぎ目のない一貫した事象解析を実現でき、最新かつ標準化された適格性評価（V&V[Verification, Validation]）を適用できるようになる。
- 日本では 50 年近く保守的な炉心 1 点近似コードや 1 次元コードが使われてきたが、10x10 燃料導入を契機に TRAC 系コード（BE[Best Estimate]コード）への移行を進めようとしている。
- 従来は、保守的な解析条件を用いて解析することで解析結果の保守性を確保してきた。プラントデータの蓄積が進んで現象の再現性が高いコード（BE コード）が開発され、かつ、計算機の能力が高まったことで、多数の解析を実施して統計的なばらつきの上限を評価する統計的安全評価（BEPU[BE Plus Uncertainty]）が開発された。現在、米国を始め海外の複数国にて適用が進められている。
- 統計的安全評価とは、現実的な入力値に基づき、BE コードを使用して、合理的な安全評価値、又は合理的な保守性をもつ安全評価値を算出する手法であり、「運転時の異常な過渡変化」及び「設計基準事故」を適用対象として学会標準を策定している。統計的安全評価の導入メリットは、不確かさを定量化でき、安全評価値の保守性（安全評価上の判断基準と安全評価値との差）を明確化できることである。加えて、安全評価結果の妥当性に係る説明及び確認、並びに高いレベルの作業品質の確保が容易となる。
- 統計的安全評価の手順（14 のステップ）を、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故を対象に、学会標準（2008 年に初版、2022 年に改定版）として発行した。具体的には、a. BE コードの適用性評価（PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) 作成を含む）、b. PIRT で重要と判定されたパラメータの不確かさの定量化、c. プラント感度解析及び不確かさ評価（BWR の場合、MCPR（最小限界出力比）や PCT（燃料被覆管最高温度）等を 95%累積確率/95%信頼水準（95/95 値）で評価）の流れとなる。
- 統計的安全評価では、4 種類の不確かさ（解析コード・モデルの不確かさ、解析コード

適用性に係る不確かさ、試験と実機のスケールの違いに係る不確かさ、入力データの不確かさ)を考慮する。不確かさごとの具体的な対応法(学会標準に明記)を用いて、モデルや入力データの「真値との差異の大きさ」を頻度分布(正規分布や対数正規分布等)として評価できる。

- 多数の頻度分布の中から、PIRTにて抽出された重要なモデル・入力データについて、その頻度分布に対応する不確かさを乱数を用いて評価し、複数回のBEコード解析を行う。得られた安全評価パラメータ(PCT等)の頻度分布から統計的安全評価値(95/95値)を算出する。一般的に安全評価パラメータの頻度分布は正規分布等の理想的な分布とはならないので、95/95値は順序統計法(保守的な評価方法)にて算出する(124回のBEコード計算を行い厳しい方から3番目を取る等)。
- 統計的安全評価では、安全評価値を95/95値として評価する。従来(保守的評価)と比べていずれが厳しくなるかはケースバイケースだが、統計的安全評価の方が根拠のある結果が得られる利点がある。
- 統計的安全評価の保守性の設定方法は、3種類ある。方法I(一般的な方法):モデルや入力データの頻度分布の幅(不確かさ)を大きめに設定する、方法II:推定誤差(バイアス)を大きめに設定する(分布幅ではなく分布の中心を厳しめに設定する)、方法III:統計的安全評価結果に後付けでバイアスを追加する(分布幅や中心位置を変えずに95/95値にバイアス(ペナルティ)を上乗せする)。

<質疑応答>

Q: BEPUを使う大きなメリットの1つは、マージンがどこにあるのかの理解を助けてくれる事にある(保守的評価(EM: Evaluation Model)では分からなかった)。保守的評価では、どのパラメータ・どの手法に大きなマージンがあるのかが結果に埋没してしまうが、BEコードを用いる事で理解が進む。ご説明頂いた方法I~IIIで、それぞれのモデルや入力データに不確かさを大きくとる方法(方法I)は非常に分かりやすいが、最後にペナルティを足す方法(方法III)は、一種の方便としては分かりやすいが、BEPUの良さを消してしまうように感じる。BEPUを導入する際の訴え方として、是非、個々のモデルや入力データのマージンに対する理解を深められる点を強調して頂きたい。

A: 統計的安全評価は、感度解析を含めてご指摘の点に活用できる手順・手法として確立しており、ご指摘の通りと考える。

Q: PIRTは、どうしても属人的なイメージを持たれるものと感じている。統計的安全評価ではPIRTを実施されていると思うが、専門家毎にPIRTのランキング(High/Medium/Low)がばらつくケースと、一定の理解の人であれば誰でも同じようなランキングになるケースがあると思う。実施した限りでPIRTでのバラツキがどうだったのかを伺いたい。

A: ある専門家がPIRTを作るとしても、その後に同等の専門家または一部には全然別の関係者を交えて全体を俯瞰してみる等、様々な方々を交えて、ランキング等に十分な説明性

があるのかを含めて見直すプロセスを実施している。実際、ご指摘の通り、一定のバラツキがありランキングが変化することがある。例えば、表の最初の方にある現象は後の現象よりも厳しめに評価してしまうこと等が起こりえる。そのため、表の最後から最初に向かってランキングを見直す等、出来るだけ公平な評価となるように努力している。

Q：付加的なバイアスの設定（方法 III）が気になっている。不確かさ評価時には不確かさの分布が与えられている訳だが、分布の妥当性に悩んだり、そもそも不確かさが分からないものもあると思う。そのような種々の因子を「付加的なバイアス」に押し込むと、結局、保守的評価手法と変わらないのではないかと常々感じている。この辺り、どのように考え方を整理すればよいとお考えか。

A：付加的なバイアスは極力設けない、設ける前に本当に設ける必要があるのか等をしっかり議論し、説明性を持たせる必要がある。但し、新しい知見が出てきた時にそれをどう反映させるかという際の緊急的な施策としてペナルティを与える方法は実際問題としてあり得ると思う。例えば、米国でも、ピーチボトム原子力発電所の過渡試験結果が従来とずれてきた際に、付加的なバイアスを与えることがなされた。このような状況を鑑みて付加的なバイアスを与える想定（方法 III）を含めている。

Q：そうであれば、「付加的なバイアス」を用いた場合は、バイアス追加に至った原因を解明するための研究や実験を実施しなければならず、規制側と産業界側で「今後の実施テーマ」としての共通認識を持っていくための一つの指標として使えるという理解でよいか。

A：そのような積極的な意義もあろうかと思う。

新型燃料に関する規制対応上の技術的課題

永瀬文久（規制庁）

<講演概要>

本講演では、新型燃料に関する規制対応上の技術的課題について概要が紹介された。

- 演題の内容に入る前に、新技術等の導入に際した関係者間のコミュニケーションの重要性について述べられた。当初、BEPU に関する規制側の準備（安全研究）は順調ではなかったが、庁内関係者のねばり強い努力により、10x10 燃料、統計的安全評価手法に対する規制判断に役立つような知見が提供できるようになった。順調ではなかった理由としては、専門家は学会や標準委員会を介して統計的安全評価（BEPU）研究の必要性を認識できるが、外部からはその動きが見えないため「その研究は必要か」「使われる見込みがあるか」と言う議論を避けられない点にある。そのような議論の場で研究の必要性を関係各位に説明するには、本フォローアップセミナーのような機会（関係者が集

まり、何がやりたいか、何を考えているかを頭出しして議論して相互理解を深める場が必要と思う。また、当事者だけでなく広い意味でコミュニケーションしていく事が重要と考えている。コミュニケーションは、表面上ではなく、真摯に実施（良い事だけでなく課題も机上に上げて議論）する必要がある。

- 新型燃料導入にあたっては、燃料を含む原子炉施設の安全設計の妥当性を確認する必要がある。10x10 燃料の申請に向けて整理が必要な事項として、燃料棒内圧基準への対応、沸騰遷移相関式の見直し、統計的安全評価手法の導入、反応度事故解析手法の高度化等が挙げられる。
- 従来評価（保守的評価手法）の課題として、(1)単純化・理想化されたモデルのため事故時の現実的な挙動を模擬できない、(2)保守的な想定を用いるため事故時の安全余裕を定量的に評価できない、(3)解析結果に含まれる種々の保守性に埋もれるため最新知見を導入しても解析結果への影響が小さい点が挙げられ、BEPU 導入の利点として、(1)事故時の現象を現実的に予測可能な BE コードを使用して、(2)事故時に現実的に取り得る入力パラメータの不確かさ（分布）を統計的に評価でき、(3)安全余裕を定量的に評価でき、安全性向上に係る改善点の検討に期待できる点が挙げられた。
- BEPU の実施基準として「日本原子力学会標準の統計的安全評価の実施基準」が定められている。統計的安全評価を行う際に確認すべき重要な技術的課題として、PIRT の妥当性、最適評価コード及びその適用性、評価マトリックスで選定された実験等、不確かさを考慮するモデル等の選定、モデル等の不確かさ（分布関数等）、スケール効果（スケール歪）、不確かさを考慮する入力データの選定、入力データの不確かさ（分布関数等）、安全評価パラメータの不確かさの統計評価方法（サンプリング法、統計処理手法等）、統計評価結果の妥当性が挙げられた。
- 規制庁では、BEPU 導入時に確認すべき重要な技術的課題を検討するため、関連研究を実施してきた。例えば、最適評価コードを用いた解析手法の整備（TRACE コード導入等）、実機事象への BEPU の適用（負荷遮断等への適用等）、OECD/NEA/CSNI/WAGMA の BEPU タスクの最新知見の収集（ベンチマーク評価の実施）等が挙げられる。
- PWR の大破断 LOCA（冷却材喪失事故）の BEPU 適用例が紹介された。統計評価手法として、(1)順序統計法、(2)正規分布仮定、(3)応答局面法の 3 つが試適用された。各々の方法による評価結果に差異があることから、今回の適用例の場合、解析結果分布の「正規分布との違い」が無視できない可能性が示唆された。
- 10x10 燃料に係る JAEA による安全研究の例（設計基準事故（DBA）条件での燃料挙動研究）が紹介された。燃料の挙動や限界は、9x9 燃料と 10x10 燃料で殆ど差が無い感触を得ている。

<質疑応答>

Q: PIRT の PI（現象同定）はある程度統一された見解が得られそうだが、RT（ランキングテ

ーブル) は、先程の工藤氏のご説明によれば判断が甘くなるという話もあった。「PIRT の妥当性評価」「入力パラメータの不確かさの評価」等、種々の評価ステップが上流から下流に流れるご説明であったが、両者はお互いにフィードバックしあっている事から、「入力パラメータの不確かさの評価」から「PIRT の妥当性評価」に戻る可能性があるのではないかと考えている。その辺りのご見解を伺いたい。

A : 物理現象の同定(PI)については文献調査が長年行われており、ある程度信頼できると考える(基本的にフィードバックは不要と考えている)。一方、RT(ランキングテーブル)は、感度解析プロセスにてランキングの妥当性をある程度見て取れると考えている。但し、試験や実験の結果次第で場合によって見直すことが必要になると考えている。技術的に一番難しいのは、PIを多く実施すると物理現象が細分化され、対応する試験データが欠けてきて、どのデータをどのように使って不確かさを定量化するかが難しくなる問題がある。最終的には粗視化プロセスが必要となることから、その適切性が議論になると考えている。(標準委員会：工藤)

Q : 今回ご紹介の資料では、順序統計法として、Wilks 式に基づき 181 回の試行の 5 番目を採用するとあるが、私のかつての経験では、Wilks 式を使えば 59 回の試行の 1 番目で良いと考えていた。今回の資料では、181 回の 5 番目、153 回の 4 番目、124 回の 3 番目、と記載があるが、これは、例えば規制上のレベルを測るために、回数の影響を見るために実施しているのか。

A : 規制上どう考えるかというよりは、あくまでもプラクティスの一部であり、回数の影響を確認する程度の位置づけである。

Q : 学会としては、回数/番目のセットをどのように考えているのか。

A : 完全なランダムサンプリングだと 95/95 値を収束させるには数千回の反復計算が必要となる。これに対し、ラテン超方格サンプリング(LHS)法でパラメータ間の独立性を考慮して試行を制御すると遥かに少ない回数で 95/95 値を収束させることができる。しかし、59 回では少なすぎる。さらに、93 回で 2 番目、124 回で・・・を実施していくと、95/95 値が収束していく。その収束した値を採用することを学会標準では推奨している。(標準委員会：工藤)

Q : 規制は「プロセスの妥当性」のチェックと「技術的な妥当性」のいずれが重要と考えているか。技術的な妥当性が重要であるならば、最後にチェックすると最初からやり直しという事になりかねないと危惧している。その辺り、どう考えればよいか。

A : 私見だが、BEPU プロセスは基本的には上流から下流に向かって検討を進めていく手順(フィードバック無し)ではあるものの、感度解析の結果次第では上流側の PIRT を見直して再評価する事はあり得ると思う。

Q : 規制庁の BEPU 研究が途絶えていたら、今どのような状況になっていたとお考えか。

A : 規制庁は「審査・検査部隊」「安全研究部隊(支援部隊)」に分かれている。仮に安全研究部隊の研究が途絶えていたとして、審査・検査部隊がしっかりとした技術調査の元で審査

を進める事になると思う。但し、知識の蓄積時間が必要となるため審査に時間を要するものと推測される。

A：BEPUは、規制委員会発足以前（福島第一原子力発電所事故以前）から導入の機運が高まっていた上に、国際的に遅れている状況への危惧があった。そのような状況下で福島第一原子力発電所事故が発生した。保守的評価を使い続ける事でどこにマージンがあるかを曖昧にし続け、しっかりとした現象の議論をして来なかった事が事故の一因と考える。規制委員会は「科学的・技術的知見に基づいて」と標榜している以上、いつまでも保守的評価に頼るのではなく、BEPU導入を目指す機運が高まった。そこで工藤氏にBEPUの種を蒔いて芽を出して頂き、それを塚本氏、金子氏が育ててきた。教訓としては、事業者側の新技術導入の機運が高まった事に規制側が一定の感度を持っていないと、山本部長の仰る不幸（BEPU研究が途絶えて審査が滞る）が起きると思う。また、事業者側も、新技術を導入したい旨、規制側に伝える必要があると思う。規制庁は常にリソース上の問題を抱えているものの、今回の事例は「運が良かった」のではなく「規制側が機運を掴んでいたから対応できた」ものとする。（規制庁：更田）

A：今、事業者と規制庁の意図の観点でのお話だったが、機運が高まっている背景には、学术界や産業界がその意図を理解できていたことがあると考える。統計的安全評価手法整備を標準委員会で実施していく事や、標準委員会で報告書をまとめて暗黙知になりがちな情報を形式知化する活動を丁寧に実施した事が非常に大きな前進だったと思う。報告書を読んだ方々がPIRTに参画するための「ベース」を学术界がUpdateしてきた。そのようなベースがあることが重要である。このような種々の活動が評価され拡大される仕組みも重要と考える。（東大：関村）

第二部 総合討論

村上健太（東大：モデレータ）、山内景介（東電HD）、工藤義朗、永瀬文久、山本部長

（東大：村上）：新技術導入に係る論点として、前回の企画セッションで挙げられたものを簡潔にまとめさせて頂いた。一つ目は、新たなハードウェアの開発・導入に関して、どう実装し、どう評価するか、また、そのための枠組みをどうするかという点。また、ソフトウェア側の論点として、ソフトウェアや解析コードの更新の必要性、更新が必要だとすれば継続的にUpdateする仕組みをどうするか、ソフトウェアや解析コードの適用範囲の明確化やPIRTの考え方の整理等が挙げられる。また、新技術導入の方向性をどのように共有していくのか、という論点で議論させて頂ければと考えている。今回、10x10燃料、新たな解析コード・評価法を例に取っているが、実質的にどこが変わったのか、或いはどう変わろうとしているのかについて、ポイントとお考えの点をパネリスト各位から

一言ずつ頂きたい。

(山本部長)：ソフトウェアの技術的な話としては、統計安全評価手法が一つのキーワードになると考える。一方、今の許認可ベースの話を考えて、例えば PWR の統計熱設計手法は、適用範囲の違い(通常・過渡・事故)はあれど、よく考えると大きなギャップはない。そのような点が今後の議論の一つのポイントと考える。

(東電 HD: 山内)：10x10 燃料は海外では導入されているものの国内には導入されていない。過去の事例では LUA (商用炉先行照射) から始める事になるが、今回は海外の事例を採用してバッチ規模(百数十体規模)から始めたいと考えている。いずれせよ、新技術を導入するので、しっかりとした評価を適切な体制下で実施しようと考えている。

(標準委員会: 工藤)：解析コード・統計的安全評価の点で意見を述べる。まず、解析コードは、(1)TRAC 系のコードは世界各地で長期間にわたって開発されてきた王道的な解析コードであり、(2)規制庁も TRAC 系コードの親戚筋の TRACE コードを所持していることから、大きな論点はなくスムーズに導入できると考えている。一方、統計的安全評価は、95/95 値に係る議論(5%を排除する根拠に係る議論、保守性に係る議論等)が課題として残ると考えている。

(規制庁: 永瀬)：解析手法等々は粛々とやっていけばよいと思うが、敢えて付け加えるなら、海外での長い使用経験(良いものも不具合も)を活かした上で、安全性が確認できればよいのではないかと考えている。

(東大: 村上)：概ね、この話はコンセンサスが取れていて、大きな障害はないようにも聞こえるが、実際に 10x10 燃料等の新技術導入を進めていく上で、どういう知見を更に得る必要があるか、得られた新知見に基づいて技術を Update した後でどうやってそれを検証して使える段階にもっていくか、その辺りに係るコメントをパネリストから頂きたい。

(標準委員会: 工藤)：今回の 10x10 燃料で言えば、10x10 燃料に適合する試験データが新たに必要になる側面がある。例えば統計的安全評価を行うためのモデルの不確かさを厳密に作り上げる必要があり、それがどこまで実現可能かという辺りが統計的安全評価を正しく実施していく上でのポイントとなる。10x10 燃料用のデータだと、例えばボイド率は、圧力損失・冷却材流量・核熱結合を介して炉心特性に影響する非常に重要なパラメータであり、最近、電中研で、最新の三次元 X 線 CT 装置を用いて燃料集合体内の三次元ボイド率分布データを世界で初めて取得している。そのような情報を是非活用していきたいと考える。

(山本部長)：二点述べる。一点目は統計的安全評価の不確かさ分布の「プラント個性」がある可能性を考慮すると、海外の知見(不確かさ)をそのまま国内に導入できるかを確認する必要があるのではないかとという点(確率論的リスク評価(PRA)に使用する故障率データが国内外で異なっている話と同様の話)。二点目は、95/95 値という概念の難しさに係る点。幅広い関係者間で 95/95 値の概念を正しく共有できるかどうかの一つのポ

イントだと思う。

(東大：村上)：「プラント個性」の話から少し掘り下げてみたい。一般的なプラントの考え方では、外的事象（プラント外）には強い個性があるが、内的事象（プラント内）には個性が殆ど無い印象がある。先程の工藤氏の資料では、内的事象にもプラントの個性があるというようなご説明だったかと感じたが、当該分野に係る「個性」の特徴について、少し掘り下げた説明を頂く事は可能か。

(標準委員会：工藤)：統計的安全評価では、実機で生じる現象や事象を詳細に分解していく。深い階層では、例えば、ボイド率を支配する現象として、燃料集合体の燃料棒周りの局所的な現象（燃料棒熱伝達等）に行きつく。このレベルでは個別効果試験を活用して現象の不確かさを決定でき、「個性」のレベルもプラントというよりは燃料集合体レベルの個性に留まる。BE コードでは、このレベルの現象の不確かさを重畳させて安全パラメータの不確かさを評価可能なため、基本的には熱伝達率等の基本的な不確かさの情報だけで問題ないと考えている。例えば、運転時の異常な過渡変化に係る実機の試験データ等が存在する場合は、実機試験データが、BE コードによる不確かさ解析の上下限（バンド）内に含まれていること、理想的には実機試験データがバンドの中心付近にあることが望ましいと考える。しかし、実機試験データがバンド内に含まれない場合等は、現象の不確かさ評価に立ち戻って不確かさ幅の要因等を見直したり、いずれかの入力を保守的な値に見直すことで、統計的安全評価の結果と実機データとが整合するようになっていく必要があるかもしれない。そのレベルまで考えると、例えばプラント毎の配管長の違い等に言及する必要がある可能性があるため、「プラントの個性」を考慮する必要があるかもしれない。

(東大：村上)：ということは、BE コードでは「プラントの個性」に係る情報をも考慮することが可能になるので、実機で採れたデータと BE コードの解析結果とを比較することで、「プラントの個性」を内包したような解析を整備できるというのが基本的な戦略であるという理解でよいか。

(標準委員会：工藤)：ご指摘の通り。

(東大：村上)：試験データが BE コードにどう活用されるかがクリアになってきたと感じる。「手法の Update によってどういう事が分かるようになってきたか」という点について、コメント・質問があれば頂きたい。

(糸井副部長)：私の専門の耐震分野でも、米国では 95/95 値と SSE (Safe Shutdown Earthquake, 日本の基準地震動に相当) とを比較して裕度の確認を行っている。95/95 値は汎用的な考え方だと思うが、耐震分野では併せて PRA を実施し、SSE を超えた場合の影響をしっかりと把握することを前提としていると理解している。そのような点は、統計

的安全評価ではどう扱われるのかが気になった。

(標準委員会：工藤)：統計的安全評価の学会標準(2022/4)に、解析結果や現象が急激に変化する事(クリフェッジ)の確認について記載している。具体的には、感度解析時に十分な幅を振っても現象が非線形現象を起こさない事を確認する事を推奨している。

(東大：村上)：その考え方は外的事象の取り扱いと比較的近いものと感じた。

(規制庁：更田)：10x10燃料は、福島第一原子力発電所事故前から準備されており、設計基準事故に対するデータ等も海外の燃料を使って試験等がなされており、準備が整っていたにも関わらず長く滞っていた。今のインフラ(試験設備)の状態であれば、10x10燃料が日本で最後の新型燃料になるのではという強い危機感を持っている。今後、10x10燃料に続く新燃料を導入しようにも、照射炉がどこにも存在しない。フランスが照射炉を建てようとしているものの2030年完成予定で稼働時期も分からない。日本の産業界・大学・研究機関は、米国の照射炉を使おうとしているが、米国の設備は米国優先となる。JMTR(Japan Material Test Reactor, JAEA)は廃炉となっている。新燃料の出力急昇試験を実施する場所がない。RIA(反応度事故)試験設備はNSRR(Nuclear Safety Research Reactor, JAEA)とCABRI(仏)が生き残っているが、試験計画数は限定的である。近年、ATF(事故耐性燃料)や新燃料の話をしているが、試験は殆どを海外に頼らねばならない状況にある。解析(ソフトウェア)は巻き返せるかもしれないが、インフラ(ハードウェア)は、「規制側」「事業者側」という問題ではなく強烈に危機的な状況にあると強く申し上げたい。

(規制庁：永瀬)：更田氏に同意する。核燃料に関しては、例えばATFは照射炉が拘束条件となっており日本の思い通りにいかない点がある。熱に関しては、世界的に幾つか残っている施設で活用していくことは、OECD/NEAを中心に実施されている印象を受ける。一方、燃料や材料については、JMTRが無くなり、Halden炉(世界共通の試験設備かつ研究者が集まる場所)が無くなってしまふ事が非常に大きく影響していると思う。データを採ることにに関して、燃料だけでなく、広い範囲で厳しい状況にあるのが現実だと思う。

(東大：村上)：今の話を整理すると、いくつかのフェーズがあると思う。(1)新しいデータが国内外いずれでも取れないというフェーズ、(2)海外知見は有るが国内知見は無いような状況でのコラボレーションで対応できるのかというフェーズ、(3)試験設備が失われるor減少する事による人材確保のフェーズ。コラボレーションで対応できるか(フェーズ2)について効率的に知見を使っていくためにどうしたらよいかという話から議論し、照射炉のようなもの(フェーズ1)は後の議論としたいと思う。まずはパネリストからご意見を伺いたい。

(東電HD：山内)：照射炉の問題は重要で、国内で建設すべきと言う意見はあるものの実際に建設できるかは大きな課題。学会のLUA標準等で、商用炉にて、燃料として照射でき

るのか、燃料を装荷せず被覆管だけであれば照射できるのか等を議論せざるを得ない。仮に商用炉で照射できたとしても、出力急昇試験を実施する場所がない点は課題として残っており、ここについては解決手段を考えていかなければならないと考えている。

(規制庁：更田)：試験機会が減るので、異なる各社の燃料毎に通りのマトリクスを試験する事が難しくなる。商業機密等も絡むので簡単ではないが、米国知見（先行照射）も適切に上手く活用する必要がある。上手く活用できるかは、規制側の判断の余裕というか、知識ベースに関わる場所ではあるものの、ここまで照射設備が世界的に少なくなると、代表的な新燃料に対して取られたデータを、各製品にどう反映できるかというやり方を編み出していく必要がある。それぐらいしか解決方法が無いと考える。

(山本部長)：本日の論点「知識基盤の産官学の共有の仕方」はドメスティックなイメージで記載したが、更田氏のご指摘はグローバルな視点を含めて考えるべきという事と思う。ポイントは2つと考える。(1)商業機密情報とそれ以外をどう分けて考えるか、(2)手持ちのデータをどこまで外挿できるかに係る学術的な考え方が材料分野でどこまで確立されているか。それらの論点についてお話し頂くのが良いと思う。

(東大：村上)：知識をどれくらい共有してどれくらいを先行者利益とするか、どれくらい一般化した知識として利用できるのか、という2点と解釈した。まず知見の代表性について議論したい。電中研の熱流動試験の話題を工藤氏から頂いたが、代表的な知見を得た後でそれをどうやって展開していくかは、寧ろ、解析側の外挿性に関連すると思うが、その辺り、意思決定とデータの代表性の関係をどう整理するかという言い方に出来ると思うが、まず、取得したデータをどう使っているかとしていこうとしているかを山内氏にお話し頂いたあとに、出されたデータをどう見ようとされているかの観点で永瀬氏からコメントを頂きたい。

(東電HD：山内)：全く同じ製法であれば同じデータが使えるとは思いますが、各社微妙に製造方法が違って、被覆管の破断の仕方等の特性が違っているということが実態としてある。現状は、種々の燃料を模擬するための個別照射試験がある程度は必要と感じる。今後、外挿性に係る研究が上手く進めば、先行試験結果を後段に繋げていく事が出来るものと考えている。具体的なアイデアはまだない。

(規制庁：永瀬)：私見だが、あるデータがあるとして、ラベル（・・・が・・・設備で採り・・・が評価したもの）だけで判断するのは科学的に合理的な判断ではないと思う。データや評価結果を吟味して技術的な判断をするのが科学的に合理的であり、我々や、学会の仕事と思う。科学的なデータや技術的な情報を基に「・・・だから使えない」を避けていかないと、技術の進歩はないし、新技術の導入も難しくなると印象を受ける。

(山本部長)：基本的に規制側の要求は「内挿」と理解しているが、今までの議論によれば、それは限界を迎えつつある。どこまで外挿できるかは種々の分野に現れる一般的な

問題である。例えば、取替炉心に関する標準を作る際にも、同じような議論を相当行った。一つの提案として、実験点からどこまで外挿が許されるのか、どういう方法があり得るのかについて、産官学含めた広いステークホルダ間である程度相場感を作っておくのが有効と思う。その辺りの感覚が少なくとも産業界と規制側で違っている気がしていて、その点を議論する場があればいいのかなと思う。

(規制庁：更田)：規制が「内挿」は必ずしもそうではない。例えば、内挿だけだと高経年化技術評価が成立しなくなる。「外挿」も認めない事には審査ができない部分もある。現象や対象によってどこまで外挿できるかは難しい議論だと思う。実際の規制の現場で、どこまで外挿出来るか、現在の知見で判断できるのか、最後は、どうしても目利きの人の存在に頼るのが現状である。例えば、PWR の 1 次系配管でき裂が見つかったときに、き裂で LBB (Leak Before Break) が成立するかどうかという判断等が該当する。BWR とは異なり、PWR はき裂進展速度の式がまだ出来てなかったもので、その状態の中で、もう 1 サイクル運転してよいものかどうか。このような場合の判断は、結果的には、その分野の技術的な訓練を経てきた人、学術的知識を蓄えてきた人たちの、複数の人たちの統一した見解のようなもの、で規制上の判断をしていく必要がある。議論を更に広げてしまいが、分野毎に目利きがいるかどうかで、規制上の判断に要する時間が変わってしまったり、新技術導入が出来なくなってしまうりする。普遍的には、日本の基礎体力が落ちているから、新技術導入がますます難しくなっている。設備の話だけではなくて、大学には学生を沢山採って頂いて、多くの若手を輩出して頂きたい。

(東大：村上)：寧ろ「外挿が含まれていると規制に認められない」のような形で、事業者サイドがやや縮こまっているような所がありはしないのかなという懸念を持ったため、確認のために敢えて伺った。話を戻すようで恐縮だが、出力急昇試験が出来ないので試験炉が無いと厳しいという風に聞こえたが、出力急昇試験は新燃料導入に本当に必要かを、メカニズムに照らしてもう一度考える必要があるのではと思った。

(規制庁：更田)：極端にいうと、RIA 試験や LOCA 試験を省略できても出力急昇試験は省略できないと思っている。RIA や LOCA はある種極端な条件を置いて、限界でもこの程度という判断が出来ているから、燃料設計が少し変わった程度で破損燃料本数が大きく変わる事は考えにくい。対して、出力急昇試験は、PCI (ペレット-被覆管相互作用) /SCC (応力腐食割れ) 等、分からない事が沢山ある難しい試験だが、それ故に出力急昇試験無しでの審査は大変難しいだろうと思う。即ち、JMTR や Halden 炉のような設備 (材料試験炉、材料照射炉、燃料照射炉) は、燃料だけでなく材料、これからの高経年化対応を含めて、どこかに求めざるを得ないと思う。海外でも数が限られているので、無いものねだりではあるものの、国内に存在しないのは大変に厳しい状況であると思う。

(東大：村上)：燃料自体の開発及びそれを支える基盤技術の話をしてきたが、ここまでで

コメント等あればお願いします。

(東大：関村)：ここまでの議論は、頼もしくもあり落胆する議論でもあった。ご講演の中にもあったが、原子力学会「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書」の中では、どういう事をどういう手段で確かめていくべきかに関して、きちんとした分類を作ってきた。また、報告書内で、運転経験と経験の奥にあるような様々な議論を知識化していく必要性を挙げている。出力急昇試験は更田氏のご指摘の通りと考える。加えて、照射試験の話も含めて、システムとして成立するかどうかという事をどのような形で確認していくかという論点が非常に重要と思っている。そのために、高燃焼度まで、或いは、出力急昇試験以外の所も含めて、LOCA 条件や事故条件、過渡条件も含めて、どういう風にやっていけるかを項目毎にリストアップし、総合化という観点もちゃんと出してきつつもりだったのだが、それが各位の基盤（ベース）となっていないと感じた。もちろん、報告書を見ずに「JMTR はお金がかかるから廃炉にする」と決断した方々が一番責められるべきではあるが、我々自身が、データではなく「試験を実施する意味」をちゃんと語っていけるかが非常に重要と考えている。つまり、データだけで語れない部分があり、どういう意図をもって、どういうバラツキ、不確実性、初めての物に対してどういう意味を与えていくかという考え方が整理されなければならない。本日の課題を大きく捉えるならば、新型燃料の第一歩である 10x10 燃料が失敗すると、続く ATF や新型炉、全く違ったコンセプトの燃料も、日本で成立しなくなると考えられる。だからこそ 10x10 燃料の話をこれだけ丁寧に我々はやろうとしているという所がポイントだと思う。しかるに、照射試験の話に限定され、現実的なデータや内挿性という話になるのが極めて不満である。課題を大きく捉え、安全部会としてきちんと取り上げて頂かないと、統計的安全評価のフレームワークが出来上がってきたという事に関しても、適用性が広がってこないと思う。10x10 燃料に拘らずにどのような燃料が必要か考え、安全部会の議論に繋げていくのか、纏めの中に入れて頂きたい。10x10 燃料が導入されなければ ATF の導入はあり得ないのは明らかであり、ATF の新たな概念の SiC も導入されるはずがなく、その道を自ら塞ごうとしていないか心配している。そうならないように繋いでいく必要がある。試験を行う事はデータを出す事ではなく、どのような概念が成立するかの検証であり、是非報告書を参照して頂きたい。

(東大：村上)：現象論として我々は何を正しく把握・理解しているか、何を外に出していくのか、という視点で全体の知識を見ていかないといけないと、改めてご指摘を頂いたと理解した。話を仕切り直させて頂く。海外で得られた知見をどう使うか、新技術の方向性をどう共有していくか、現状、あまり踏み込めていない。この点でアイディア・要望があればお願いしたい。

(東電 HD：山内)：10x10 燃料は、過去の実績、様々なジルカロイデータを取得した結果と

して、少数体装荷は不要と考えられる。原子力学会の技術基準に照らしても、必要なデータは揃っていると判断できる。ATF はデータを拡充する必要があると考えるが「どこでデータを取るか」という観点で良い手段がない事を非常に危惧している。海外燃料を導入する手段もあるが、耐震評価は若干海外は甘いと思っている。従って国内では不足している部分のデータ（例えば加振試験データ等）が必要になってくる。ATF の中でも導入が比較的早い Cr コーティング燃料も、母材の影響は分かるが、Cr コートの剥離前後の挙動等を調べる必要がある。また、PWR と BWR の違いも把握しながら検討を進める必要がある。必要なデータが揃わないと事業者は導入に踏み出せない。必要なデータを1つ1つ見ていく必要があり、それが学会標準で整理して、足りる・足りないを判断できればよいと考えている。

(東大：村上)：解析技術も含めた上で、工藤様からコメントを頂きたい。

(標準委員会：工藤)：解析では、信頼性を確認する上で V&V が必要で、そのためのデータが必要条件になる。統計的安全評価で考えている設計基準事故 (DBA) までは比較的データが揃っており、欧州では新たな試験も実施されている。一方、試験が無く外挿する場合も出てくるが、最近、取安コード (取替炉心の安全性の確認に用いる解析コード) 規程を作り、その中で解析コードを分類している。例えば、核特性等は、基本的に線形の世界なので、相場観があり、外挿性が一定程度確保できる。一方、熱水力は非線形が関わるので、2つの側面 (現象がどう変わるか、不確かさがどう変わるか) を見ながら外挿性を見ていくことになる。原子力学会の V&V 分科会では、取安コード規程による外挿の試みをシミュレーションに取り入れようとしているが、より一般性のある外挿の議論ができないかと分科会で議論しており、まだ結果は出ていないが、アンケートを取って整理する試みをしている。

(東大：村上)：相場観をどう構築した上で、相場観が適用できる範囲を広げる事ができるのか、という観点で作業されていると理解した。その作業に関わる人をどう広げていくかも重要で、今日は 規制庁から大勢参加頂けているので、永瀬氏からコメントを頂きたい。

(規制庁：永瀬)：かつての規制庁の研究職は、内に籠って自分のやりたいことをやっていたが、最近は外に出て色々な人と議論することを奨励している。人の話を聴く、意見を貰う、コミュニケーションを重ねることで相場観を持てる人材が育てば良いと思っている。

(山本部長)：試験とデータの話が出てきたが、データを取得できる場所が限られる問題がある。考えないといけないのは、産業界と規制は独立だが、本当に独立なデータを取り続けることが出来るのかという点であり、深刻な問題として、どこかで議論する必要があると思う。人材育成として、違うデータを見ながら同じ事を議論するのは難しいと思うが、同じデータを見ながら議論するのは意味のあることだと思う。そのような場を

安全部会や学術の場で提供できれば非常に良いと思う。

(規制庁：永瀬)：山本部会長ご指摘の「規制側と産業界側で別々のデータを取る」という話は、若干古い気がしている。今は必ずしもダブルチェックは必要ないと思っており、産業界のデータを確認できれば良いし、必要な研究をやれば良いと思っている。但し、まだチェックが甘くて、結果として二重にデータを取っている部分は存在する。NRC（米国原子力規制委員会）を見ていると、彼らは不確かさが大きい所は不確かさを確認するために自ら安全研究をすると定義している。現在の規制庁の安全研究の定義は「自分たちが必要と考えるデータを取る事」で、何でもやれる事になっており、今後、考え直したいと個人的に思っている。安全研究の範囲は整理していく必要がある。

(東大：関村)：規制と事業者で対比しているが、一方で事業者（申請者）は、どのようなステップを踏んで知見を深めていくのか、ここが重要な視点。例えば、10x10 燃料を 1 サイクル、どこでどのように燃やすのか、課題は何か、規制側と共に何を確認するか、という具体的なステップを事業者側から提案できるのか。ステップバイステップで進めていくことが地元への説明性に繋がると事業者がお考えであれば、具体的な提案があった方が良い。昔、更田氏や山中先生と一緒に J 合金（PWR 向け改良被覆管材）の開発をした際、試験の技術的な意義や論点を私からスペインの規制側に説明して納得して頂いたことで、スペインの炉で J 合金の燃焼試験を実施する事ができた。同様に、燃焼度依存性があるような話に関しては、事業者側からもう少し丁寧な提案ができるのではないかと感じた。

(東大：村上)：これまでの議論を受けて全体を纏めてみると、新しい技術を取り入れていく上での課題はあるが、システムの応答のようなものは、統計的安全性評価手法等の適用できちんと不確かさの分布を把握できるように進めてきた。一方で、核・熱水力に入りきらないような不確かさを持つ材料データ等は、必ずしも不確かさで扱い切れない部分もあるのでデータを取得してきた。データはステップバイステップで知見を増やすことで不確かさを減らしていく整理ができる。両輪で組み合わせていく事で、新しいことを更新できるのではないかと感じた。最後にパネリストから一言頂いてクロージングとしたい。

(規制庁：永瀬)：色々な人と色々な話をするのは大事だと思う。このような学会の場で様々な人と議論する事は貴重なので、今後ともこのような場を設けて頂きたいと思う。

(標準委員会：工藤)：訂正したいことが 1 点ある。相場観についてだが、基本的に現象メカニズムをしっかりと把握した上で、外挿性に対する工学的判断、一定の理解の裏付けが必要であり、技術的相場観ということである。今後 10x10 燃料導入にあたって、LUA 等の必要性については山内氏から説明された通りだが、実際に燃料を入れるとなると、経年的に変化するものが色々あるので、統計的安全性評価を適用し、そこに現実的な色々な入力データを取り入れていくと、本当にそれが保証されるのか、という課題が出てき

て、サイクルを通じて実際に確認するもの（スクラム特性等）が出てくると思う。

(東電 HD：山内)：今後、10x10 燃料を導入する流れになるが、照射後の PIE（照射後試験）やガンマスキャン等もしっかり見ていく必要があると改めて認識した。このような意見交換の場は有用だと思うので、引き続きお願いしたい。

(山本部会長)：個人的には、止まっていた時計が動き出した感じがして非常に良かった。始まる前は特定なトピックスに入ってマニアックな議論にならないか心配したが、幅広い議論ができて有意義だった。

閉会挨拶

中村副部長（JAEA）

- 本日の議論の中心的な課題は統計的安全評価手法であり、安全評価は、発電所及び種々のコンポーネントの安全性の確認に避けては通れないものである。
- 今回は 10x10 燃料を題材としたが、現場での実現に際して、安全評価は保守的評価の役割を果たすと考えている。往々にして、安全評価の計算結果を見て、それが現実であるかのようなイメージを持つことがあるが、解析結果と実現象の間には必ず異なる部分がある。その中で、統計的安全評価は、計算結果の中に発電所の現実を組み込んでできる限り精緻に再現して安全性を判断する方法だと思っている。これまで長い間安全研究を行ってきた者として、長年の悲願に等しいような評価技術だと思っている。今回のような議論ができる事を嬉しく思うが、依然として幾つかの山が残されていると思うので、引き続き、若い人の力をもって、課題克服に向けた努力がコミュニケーションを含めて続けられる事を切に期待している。
- 安全部会では、今後も、継続的な安全の確保と向上に関わる課題に関する議論を通じて、原子力発電所の現実に寄り添った活動を、関与される様々な分野の方と続けていく予定である。来年春の年会の企画セッションでは、最近の規制の対応に関わるお話を更田氏から頂く事を計画している。
- 各位には、今後も安全部会の活動に関心を向けて頂き、共に原子力発電所の現実における継続的な安全向上の活動に加わって頂きたいと考えている。