

10×10燃料導入に向けた対応

2022年12月12日
原子力エネルギー協議会

1. BWR 10x10燃料の概要

✓ 事業者は、新型燃料であるBWR 10x10燃料の導入に取り組んで行く所存

10x10燃料（米国GNF社の最新燃料）の特徴など：

➤ 燃料の安全性・信頼性の向上

- 改良スパーサ（Flow Wing付き）導入などによる限界出力の大幅な増加
- 燃料棒本数を増やすことで1本当たりの熱的負荷を緩和
- 異物フィルタ採用などによる燃料信頼性向上

➤ 取替体数の低減（使用済燃料発生量の低減）

- 取出燃焼度の増加（平均45G→50G）
- 1体あたりのウラン重量の増加

➤ 米国での実績（豊富な照射実績）

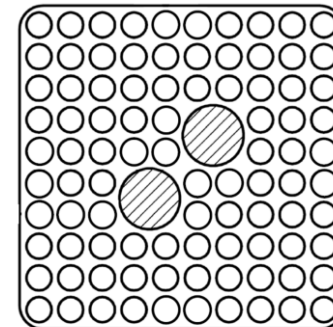
- 30年、4世代にわたる10x10燃料の装荷実績あり

✓ また、10x10燃料を導入するためには、許認可上の余裕※に係る保守性をより明確化するTRACコード及び統計的安全評価手法の同時導入が必須となる

（※：許認可上の余裕 = 判断基準値と安全評価値との差）



内部構造図



断面図

米国GNF社の10x10燃料の例（第3世代のもの）

2. 検討経緯

- ✓ 燃料の安全性・信頼性の向上及び使用済燃料発生量の低減の観点から、BWR 10x10燃料の導入に向けて、事業者・メーカーにて検討を進め個別プラント許認可、燃料型式証明などの申請を準備してきた。
- ✓ 4月19日のCNO意見交換会※において、事業者より、10x10燃料の導入に取り組んで行くこと、型式証明、トピカルレポート、設置許可の一連のプロセスを活用し、審査を効率的に進めたいことを表明した。
- ✓ これを受け、ATENAは、新たな検討テーマとして「燃料高度化の促進」を設定し、事業者、プラントメーカ、燃料メーカからなる「10x10燃料対応WG」を設置し、検討を開始した。また、NRAとATENAの間で実務レベルでの意見交換を開始した。
- ✓ 今回、以上の検討・意見交換を踏まえ、10x10燃料に係る申請に当たっての対応希望案及びスケジュール案を提示する。

※：主要原子力施設設置者（被規制者）の原子力部門の責任者との意見交換会

3. 対応希望案（1 / 4）

審査プロセス（型式証明，トピカルレポート，設置許可）：

- ✓ 従来，新型燃料導入は個別プラント設置許可にて審査された。
- ✓ 10×10燃料については，設置許可時の審査期間の短縮のため，複数プラント共通の内容を一括して審査する型式証明及びトピカルレポートを活用したい。
- ✓ 型式証明及びトピカルレポートは全BWRを申請対象とする予定。ただし，一部にABWRを対象とした記載が含まれる。

[各審査プロセスの想定(案)]

審査の 枠組み	審査対象	審査目的	至近の申請対象 (後段申請への活用可能範囲)
型式証明	・燃料機械設計	プラント共通条件又はプラントタイプに応じた共通条件に基づく設計の設置許可基準規則への適合性の確認	全BWR向け10×10燃料を対象。
トピカルレポート	・3次元核熱結合動特性解析コード（TRAC） ・適用報告書（統計的安全評価手法）	プラント共通又はプラントタイプで共通，かつ10×10燃料より新規に導入する安全評価手法の妥当性を確認	TRAC（モデル，適格性評価）は全BWRを対象。適用報告書も全BWRを対象とするが，運転時の異常な過渡変化の計算例はABWRを例示として示している。
個別プラント設置許可	・核設計，熱水力設計 ・動特性 ・過渡／事故解析 等	プラント固有条件に基づく設計・評価の設置許可基準規則への適合性の確認	

⇒型式証明及び設置許可は設置許可基準適合性に係る審査を想定。

以降の頁では，トピカルレポートの対象となるTRAC及び統計的安全評価手法についてポイントを説明する。

3. 対応希望案（2 / 4）

3次元核熱結合動特性解析コード（TRAC）及び統計的安全評価手法の導入：

- ✓ 10x10燃料は燃料棒径が細いため、スクラムなどによって出力分布が過渡的に変化すると冷却材中の蒸気発生量などへの影響が大きくなる。このとき、熱的制限値への影響を正しく評価するには3次元コードであり、熱的制限に関わる局所の状態も取り扱えるTRACを導入する必要がある。⇒ [11](#) [12](#) [13](#)参照
 - TRACを過渡及び事故から炉心損傷前までの有効性評価対象事象（BDBA）まで一貫して安全評価に適用（ごく一部、例外あり）
- ✓ さらに、TRACを用いる場合、炉心内の局所状態の変化から炉心全体の3次元挙動に至るまで多様な核・熱水力・燃料の相互作用を取り扱うことから、局所の熱的制限値を厳しく評価するための保守的解析条件を一律に設定するのが困難な事象がある。このため、モデル、入力データなどの不確かさの影響を定量的に評価することで合理的な保守性を得る統計的安全評価手法を導入しなければならない。⇒ [14](#) [15](#) [16](#) [17](#) 参照
- ✓ TRAC及び統計的安全評価手法は、米国等海外許認可で実績がある。また、統計的安全評価手法については、海外手法をベースとした原子力学会標準（「統計的安全評価の実施基準：2021」）が策定され、これに基づきトピカルレポートを作成し申請準備を進めている。

3. 対応希望案（2 / 4）

3次元核熱結合動特性解析コード（TRAC）及び統計的安全評価手法の導入

（続き）：

[ABWRプラントにおけるTRAC及び統計的安全評価手法の適用事象(案)]

TRACコード適用事象※ ¹ （トピカルレポートの対象）	統計的安全評価手法の適用有無
過渡（プラント系事象（加圧，減圧，流量増加，流量減少等））	適用（トピカルレポート※ ² の対象）
過渡（起動時の制御棒誤引き抜き）	適用せず※ ³ （従来の考え方に基づく保守的解析条件を使用）
事故（LOCA，制御棒落下事故等）	
動特性（プラント安定性）	

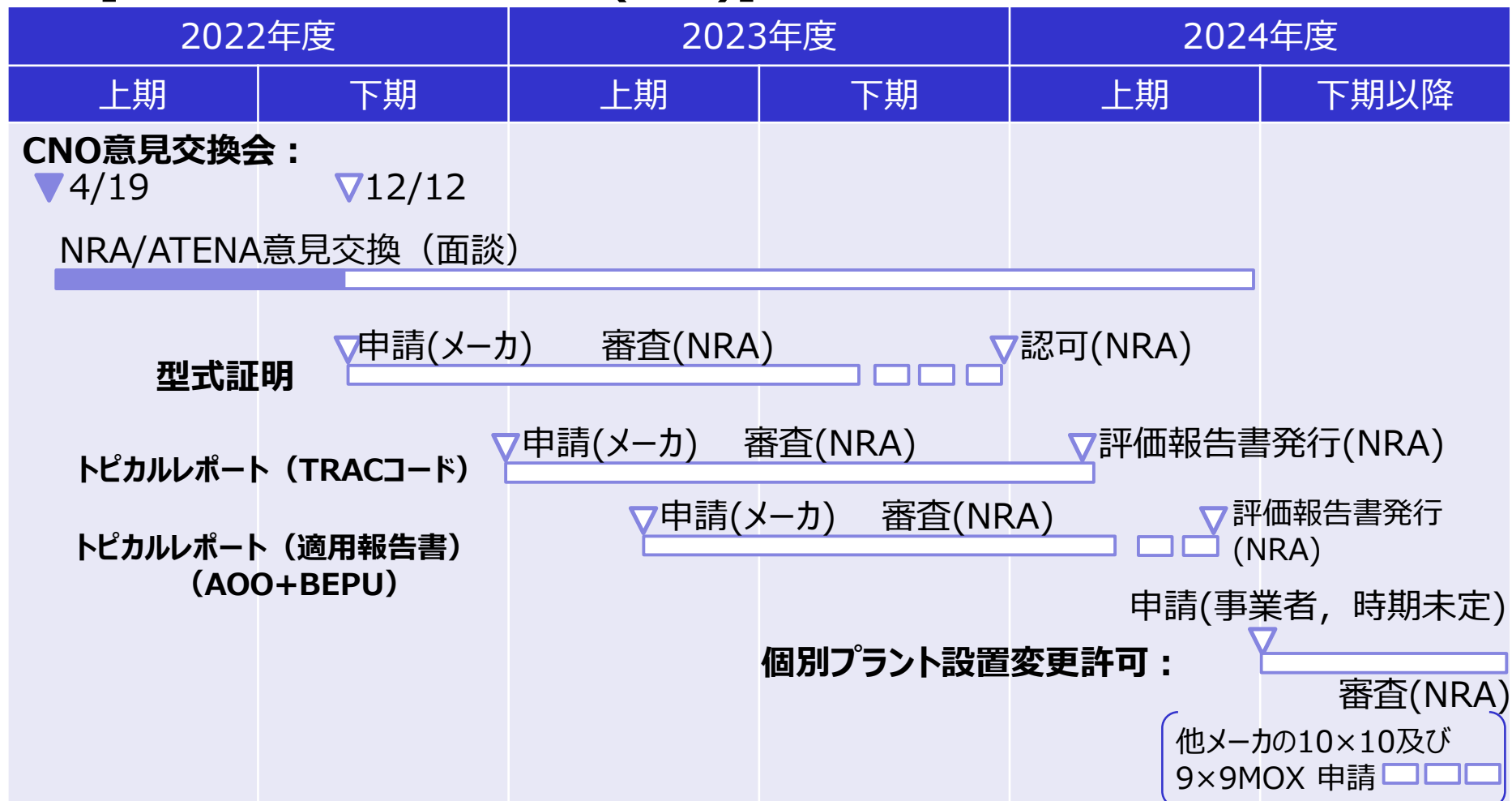
※1：TRACのトピカルレポートは全BWRを対象。過渡（出力運転時の制御棒誤引抜き）については，従来より3次元炉心定常解析コードを使用し保守性が確認されていることから，継続して用いることとし，TRACは適用しない。

※2：全BWRを対象とするが，運転時の異常な過渡変化に対する計算例はABWRを対象として実施したもの。

※3：これらの事象については，事象進展の特徴から系統的な保守的な設定が容易であることなどから保守的な安全評価を実施し，統計的安全評価手法を適用しない。必要に応じて統計的安全評価結果で裏付けることも考慮。

3. 対応希望案（4 / 4）

[10×10燃料のスケジュール(想定)]



- ✓ 2024年度上期以降の個別プラント設置許可申請を想定。それまでに型式証明及びトピカルレポートの審査を完了させていただきたい。
- ✓ 型式証明とトピカルレポートの審査は一部並行して行うと想定するが、相互のリソース配分や、審査結果の連携等、効率的に進めていただきたい。

4. 課題と対応希望案

- ✓ トピカルレポート制度については、旧原子力・安全保安院による審査実績※はあるが、NRAとしての実績はない。

⇒NRAにて、審査できる制度・体制を早急に整備いただきたい。

※評価要領「トピカルレポートの技術評価について（内規）」が作成され、これに基づき保安院/JNESが評価報告書を発行（例：燃料棒熱機械解析コード（PRIME03, CARO-NA））

- ✓ 統計的安全評価手法では、現実的な入力値を用いた最適評価と不確かさの統計的評価に基づき許認可上の余裕を評価する。[16](#) 一方、従来は保守的解析条件を設定しており、発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針にも「各判断基準ごとに、結果が最も厳しくなるように解析条件を定めなければならない」との記載がある。

⇒10×10燃料及びTRACの導入に必須となる統計的安全評価手法について、その使用の妥当性をトピカルレポート審査で確認の上判断いただきたい。

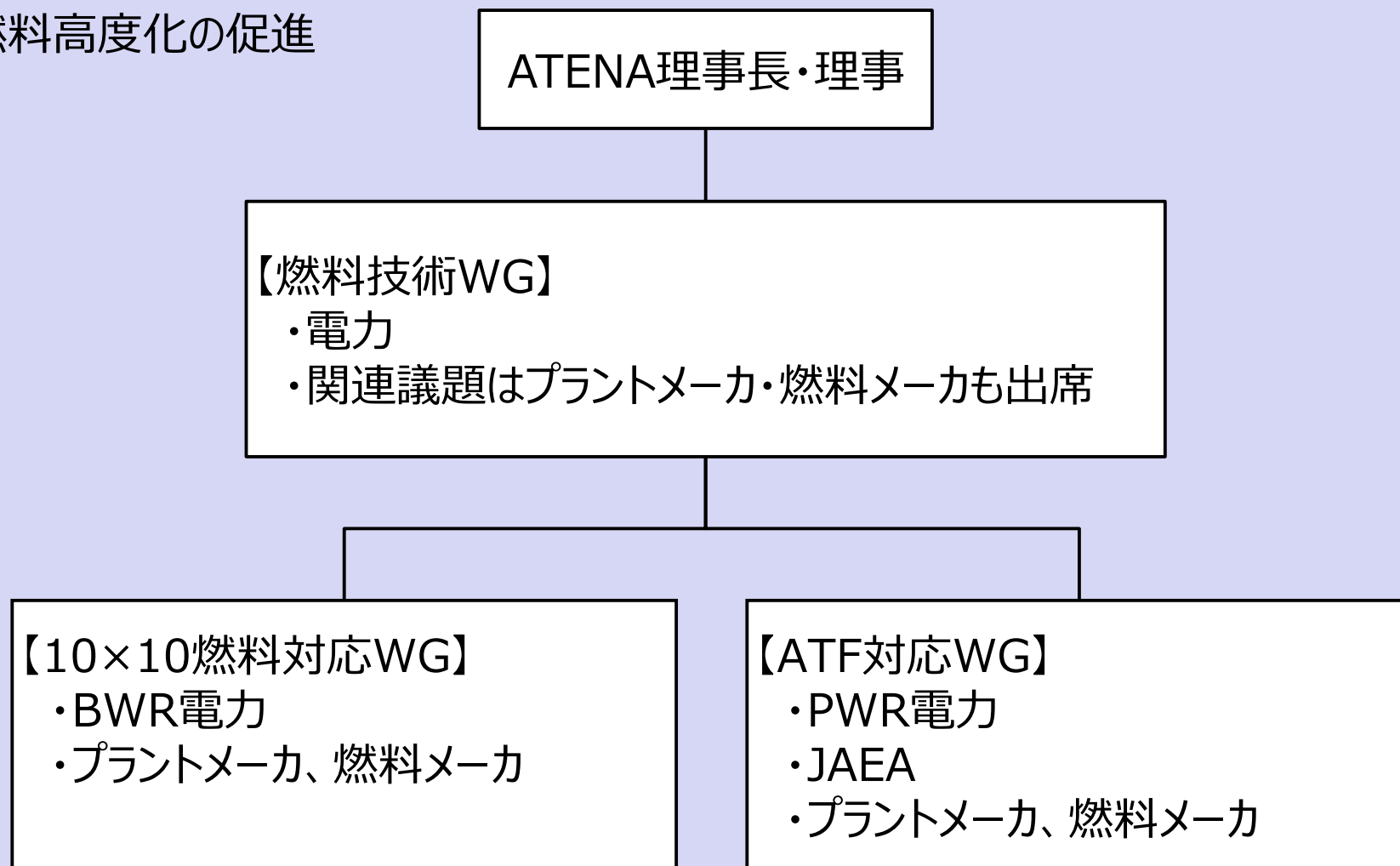
5. まとめ

- ✓ 事業者として、安全性・信頼性の向上と使用済燃料発生量低減に資する10×10燃料を早期に導入したいと考えている。それに伴って、重要な現象を直接に評価できるTRACコード、並びに不確かさ及び保守性を合理的に取り扱える統計的安全評価手法を導入したいと考えている。
- ✓ これらの導入に向け、設置許可プロセスに先立って、型式証明制度及びトピカルレポート制度を活用し、効率的に審査を進めていただきたい。
- ✓ プラントメーカ及び燃料メーカにおいて、型式証明及びトピカルレポート申請の準備を進めている。ATENAは、事業者、プラントメーカ、燃料メーカとともに検討を進めており、引き続きNRAと効率的な審査の進め方について意見交換させていただきたい。
- ✓ NRAにおいても、トピカルレポート審査に係る制度の整備、審査に係るリソースの確保等をお願いしたい。

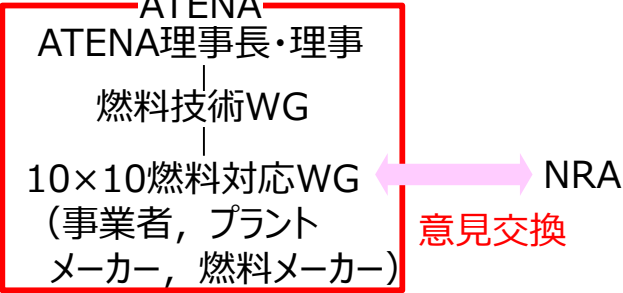
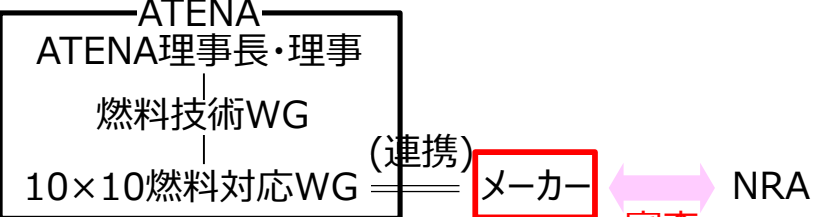
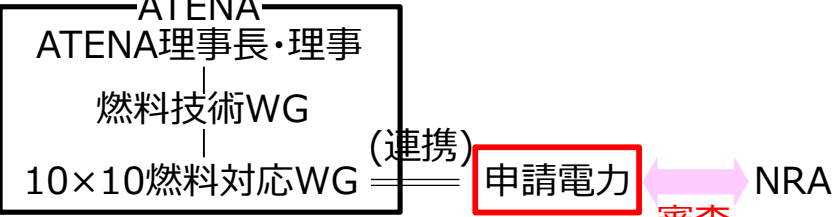
(参考)

【参考】 ATENAとしての燃料案件の取組体制

ATENAテーマ：
燃料高度化の促進



【参考】ATENAの体制

対応フェーズ	体制
審査の進め方に係わるNRA-産業界 意見交換 (審査開始前～審査中まで常時)	 <p>10×10燃料対応WGが主体的にNRAと意見交換</p>
型式証明審査 トピカルレポート審査	 <p>メーカーがNRAの審査を受け、審査状況を適宜WGに報告</p>
個別プラント設置許可	 <p>申請電力がNRAの審査を受け、審査状況を適宜WGに報告</p>

【参考】TRAC及び統計的安全評価手法の必要性

BWRにおけるTRACの導入の必要性：

- ✓ 従来のプラント挙動解析コードであるREDY-SCAT等は炉心を1点近似等する簡易モデルを使用。
- ✓ **10x10燃料の導入**に伴って 3次元出力分布等の過渡変化の熱的制限値に対する影響が顕在化するため※，これを直接に評価できる**TRACコード**の導入が必要となる。

※ スクラム時に制御棒の挿入とともに軸方向出力分布のピークが上方にひずむ（TVAPS：Time Varying Axial Power Shape）。燃料棒が細径化する10×10燃料では，ペレット内熱伝導に要する時間が減少し冷却材への伝熱が出力に追従しやすくなるために，蒸気発生 of ピーク位置が上方にひずむとともに蒸気量が一層増加する結果，**熱的制限値へのTVAPSの影響が顕在化する。**

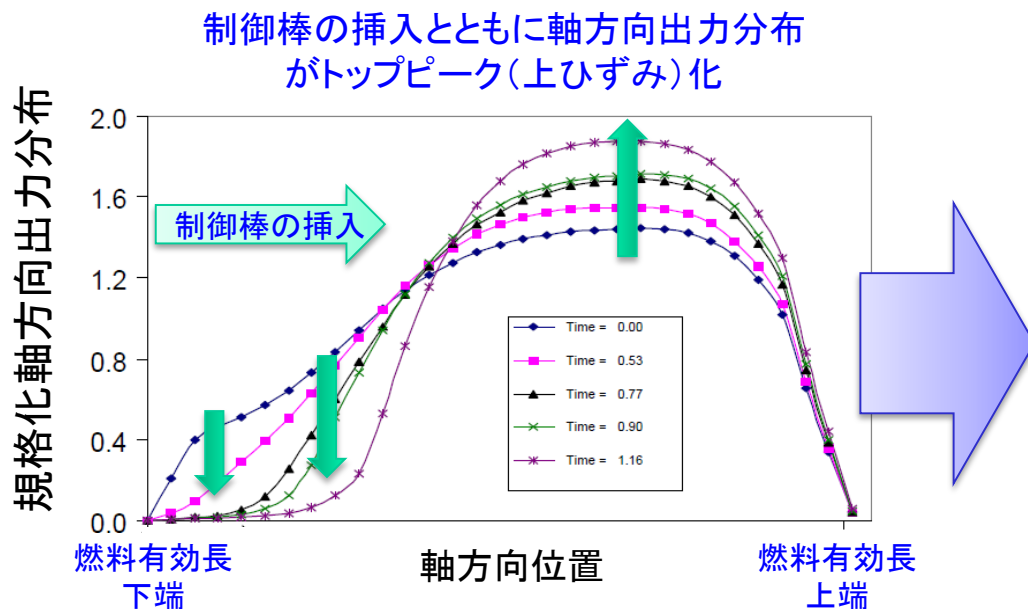
次ページ
参照

解析コード	特徴	安全評価上のポイント
従来コード	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心1点近似動特性 + 燃料集合体1次元熱水力 ・熱的制限値の計算に当たって，出力分布，ボイド率分布，燃料集合体入口流量などの重要な対象の過渡変化を扱えない ・不確かさデータがなく統計的安全評価不可 	<ul style="list-style-type: none"> ・1点で取り扱えない分布量，係数などの保守的設定は，あらかじめ別コードで評価又は確認した上で工学的判断に基いて決定 ・10x10からは別コードとしてTRACが必須 ・保守的な安全評価結果となることを期待
TRAC	<ul style="list-style-type: none"> ・運転時の異常な過渡変化からBDBAまで適用可 ・炉心などを3次元化 <ul style="list-style-type: none"> ・炉心を千から数万の小領域に分割 ・小領域の現象（核，熱水力，燃料）を正確に解いて積上げることで3次元の出力，ボイド率，流量などの分布の過渡変化を正しく評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・現実的な入力を用い，炉心の3次元挙動を正確に取り扱って局所の安全評価結果を得る。 ・事前に実施されたコードの適格性評価（V&V）結果に基いて統計的安全評価を容易に導入可

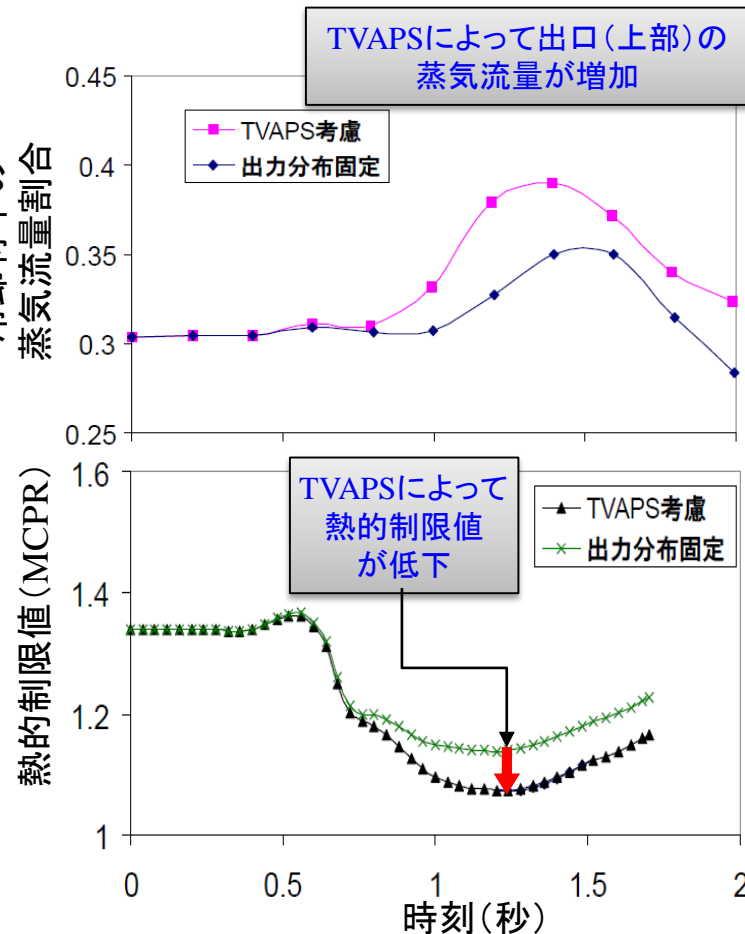
【参考】TRACの導入が必須となること

10x10燃料でTVAPSの影響が顕在化することの説明：

✓ TVAPSを考慮したときと考慮せずに軸方向出力分布を不変としたときの比較 (イメージ)



燃料集合体出口の冷却材中の蒸気流量割合



TVAPSによる熱的制限値の低下量

- 9×9燃料までは従来コードのスクラム速度の保守的設定によって相殺可能(⇒ 熱的制限値の保守的評価可能)
- 10×10燃料では細径のため上ひずみ化の影響が大きく、スクラム速度設定では相殺不可 ⇒ TVAPSの影響が顕在化 ⇒ TRAC導入が必須

【参考】TRACによる3次元解析の重要性

例えば、**BWRの運転時の異常な過渡変化における3次元核熱結合解析の重要性**：

- ✓ TVAPS効果：3次元的（既挿入制御棒の存在，制御棒ごとの挿入速度のばらつき）
- ✓ 炉心の3次元的挙動による熱的制限値（MCPRなど）への影響大（3次元的挙動の例）
 - ✓ 過渡変化前及び過渡変化中の炉心の**3次元出力分布**の影響大
 - ✓ 過渡時の**ボイド反応度フィードバック効果の3次元分布**の反映が重要。同効果の大きさは：
 - ✓ 燃料集合体の下部から上部にかけて大きく相違（軸方向の影響）
 - ✓ 燃料集合体の核設計，燃焼度に応じて有意に相違（径方向装荷パターンの影響）
 - ✓ 径方向制御棒パターン，制御棒挿入量などに応じて有意に相違
 - ✓ **高出力・低流量**の燃料集合体と**低出力・高流量**の燃料集合体との過渡的な熱水力挙動（**軸方向ボイド率分布**，沸騰開始高さなど）が有意に相違
 - ⇒ 炉心入口**冷却材流量配分**及び**集合体出力**（共に**2次元分布**）の変化に影響
 - ✓ 炉心入口**温度**の過渡変化時に影響大
 - ✓ 炉心入口**流量**の過渡変化時にも影響が有意

統計的安全評価手法の導入の必要性（従来コードに係る背景）：

- ✓ 従来コードでの不確かさの取扱い：
 - ✓ 従来の炉心1点近似のプラント挙動解析コードでは、炉心の3次元的な状態・ばらつき（＝不確かさ）、簡易モデル故に生じる不確かさなどの不確かさの影響を保守的に取り扱う必要があった。
また、簡易な解析コードであったため、このような不確かさの影響を反映できる入力パラメータが少数（スクラム速度、スクラムカーブ、ボイド反応度係数など）に限られていた。
さらに、熱的制限値の評価を最も厳しい側にするための入力パラメータの設定及び／又はその妥当性の確認を、定常状態を対象とした複数の別コードを用いた上で工学的に判断していた。
 - ✓ このような状況から、従来コードでは保守性について、個別パラメータごとに間接的に説明されてきた。
 - ✓ なお、従来コードでは2000年以降に整備された方法に従ってコード開発者／使用者による適格性評価（V&V）がなされていないため、不確かさを直接に取り扱って合理的な保守性を評価する統計的安全評価手法を適用できない。

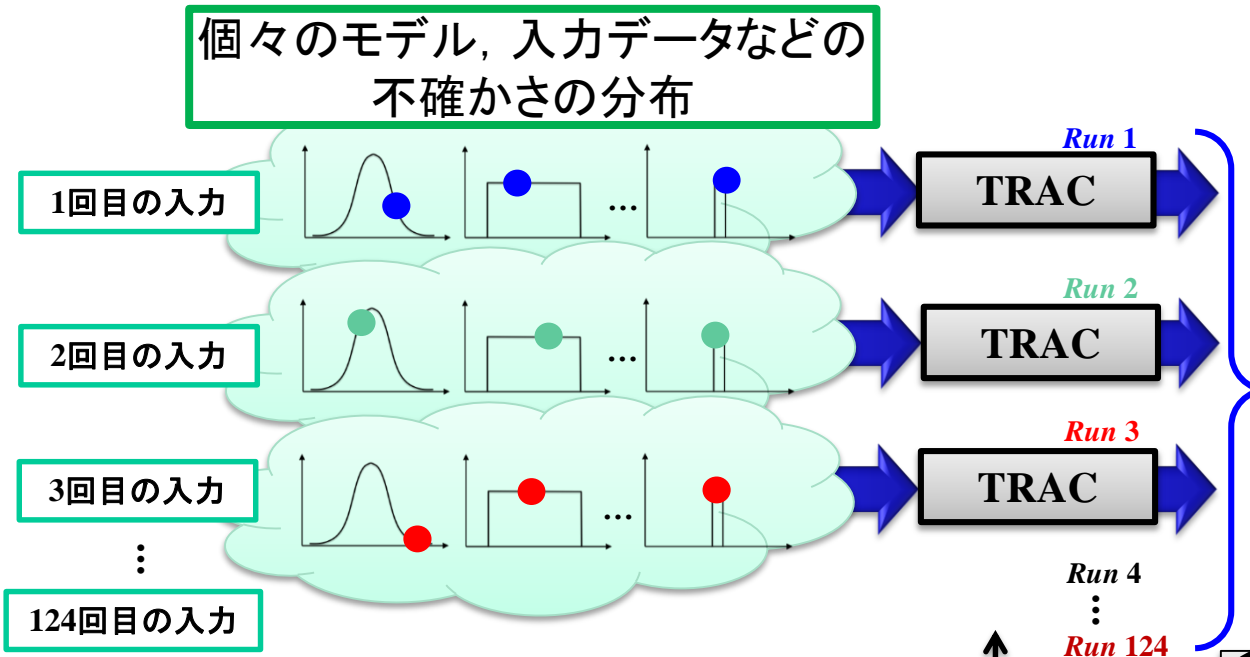
【参考】TRAC及び統計的安全評価手法の必要性

統計的安全評価手法の導入の必要性：

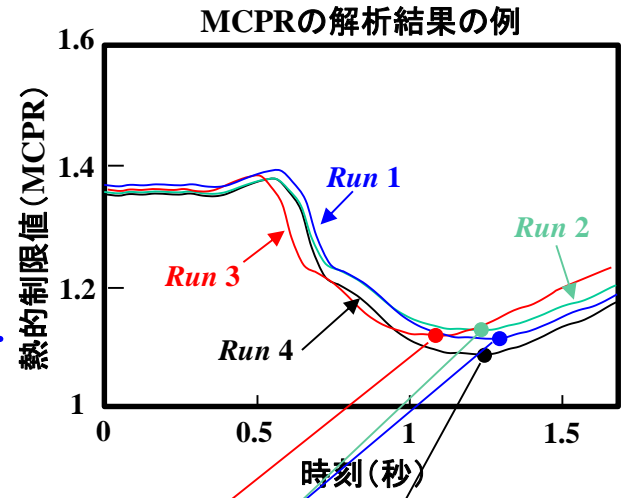
- ✓ **TRAC**は過渡時の熱的制限値の計算時の不確かさを評価できるコード（=最適評価コード）であり、保守性を合理的かつ直接に評価できるコードである。
 - ✓ 合理的な適格性評価（V&V）の方法に従って重要なモデルの**不確かさに係る情報が漏れなく用意**されている。
 - ✓ **運転時の異常な過渡変化**においては、局所のボイド反応度、スクラム、ボイド発生、冷却材流量・原子炉圧力などの変化が相互に強く影響し合うことで3次元挙動とともに局所の熱的制限値に影響することから、熱的制限値の解析結果を厳しくする保守的解析条件を一律に設定することが困難。
 - ✓ 仮に保守的設定を行う場合、運転点、過渡変化の条件などに応じて設定する入力及びその設定値を毎回決定する必要があるが、保守的因子を評価ケースごとに更新するのでは安全評価の妥当性の説明が困難となる。
 - ✓ 一方、**統計的安全評価手法**を用いれば、入力データ、モデルの不確かさを直接に取り扱い、例えば95%累積確率／95%信頼水準として**保守性を科学的かつ系統的に評価**できる。
 - ✓ **設計基準事故など**、運転時の異常な過渡変化以外においては、事象進展の特徴から系統的な保守的な設定が容易であることなどに加えて、許認可上の余裕の評価値又は運転制限値への不確かさの影響が小さいことから保守的な安全評価を実施する。
 - ✓ 必要に応じて統計的安全評価結果で裏付けることも考慮

【参考】統計的安全評価手法の計算の流れ (BWRの運転時の異常な過渡変化の例)

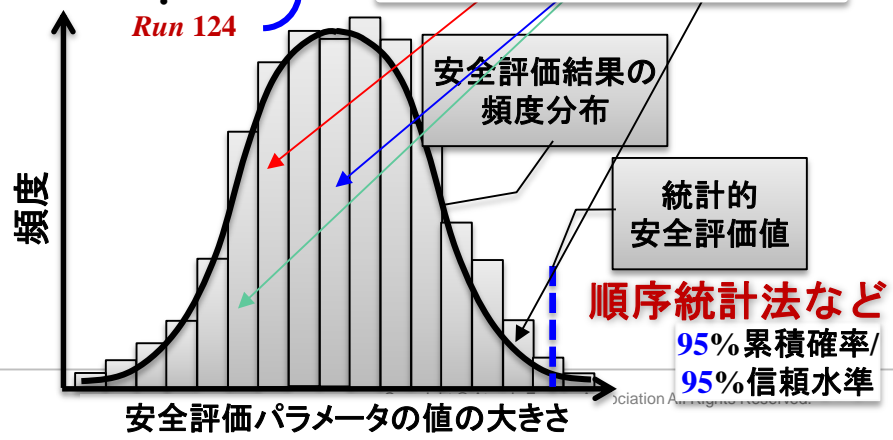
- 不確かさ分布をもつ様々な入力に基づいて、合理的で厳しい側の安全評価値を算出



公知の系統的ツール (PIRT) によって不確かさを反映する対象 (モデル, 入力データなど) を決定

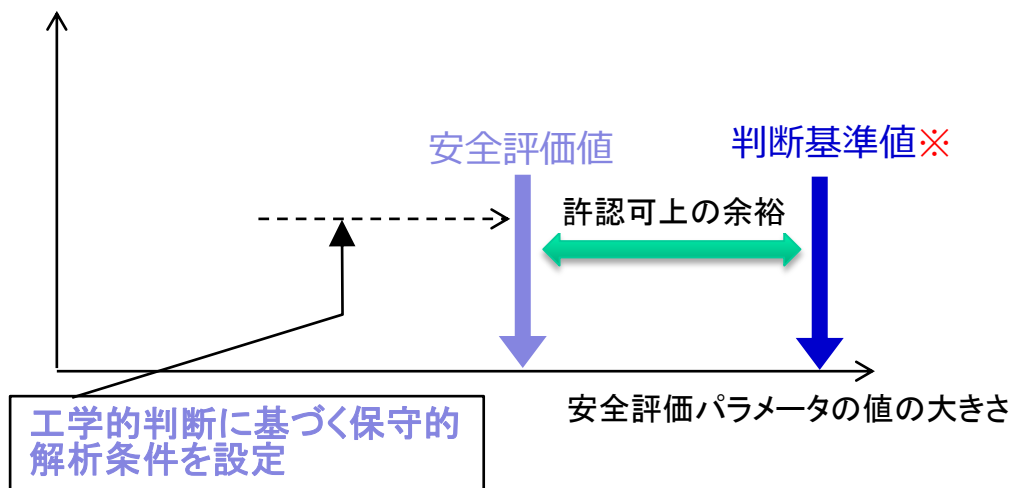


MCPRの最小値をサンプリング

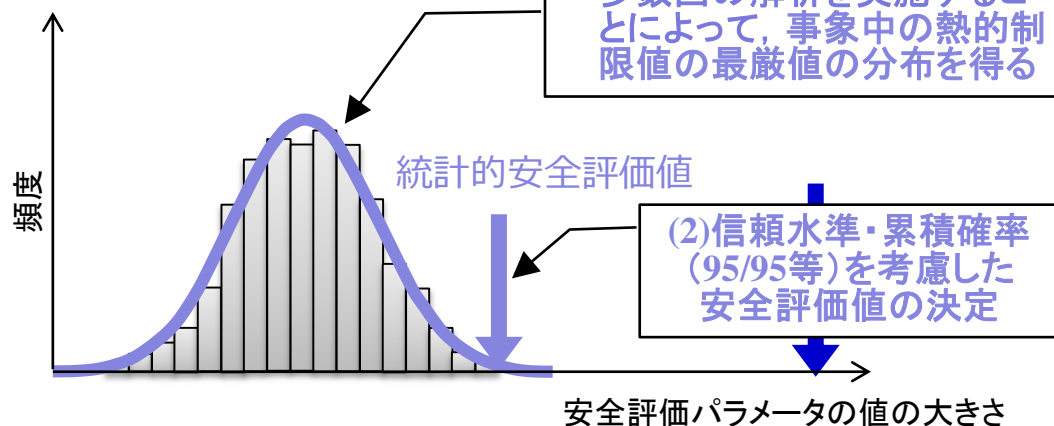


【参考】統計的安全評価手法における保守性の考え方（従来との比較）

従来の保守的解析条件設定



統計的安全評価手法



- ✓ 従来手法では, 工学的な判断に基づき少数の入力パラメータを保守的に設定し, さらに, 詳細解析コードによるバックアップ解析によって設定条件の保守性を確認している。
- ✓ 統計的安全評価手法では, TRAC等の最適評価コードを用い, 不確かさの影響を定量化することで合理的な保守的評価値が得られる。(左記の(1)及び(2))
- ✓ また, 統計的安全評価手法では, 感度の高い計算モデルの不確かさの幅を大きくすることなどによって更なる保守性を得ることができる。

※ LOCA事象においては冷却可能形状維持に係る基準に当たる (1200℃, 15% ECR)

運転時の異常な過渡変化でMCPRが安全評価パラメータとなる事象においては, 別途定まる許容限界MCPRに対し, 安全評価値に対応するMCPR変化量 (Δ MCPR) を足し込むことによって運転制限値が決定されるため, 許認可上の余裕は設けられていない。