

デジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因 故障対策の自律的対応について

今後のATENAによる対応

2023年10月26日
原子力エネルギー協議会

1. はじめに
 2. 柏崎刈羽7号機の要件整合確認（詳細設計）の追加確認結果
 - (1) TRAC系コードの適用性に関する確認
 - (2) ドライウェル圧力指示計の設計変更内容の確認
 3. ATENAによる今後の対応について
 - (1) 課題抽出
 - (2) 第三者機関の活用（工事・検査完了確認業務委託）
 - (3) 工事開始に関する事業者の担保について
 - (4) PDCA
 4. PWRプラントの対応状況
 5. ABWRプラントの対応状況
 6. BWR 5 プラントの対応状況
-
- (参考1) BWR5プラントの有効性評価結果（暫定）
 - (参考2) デジタルCCF対策に係る安全対策の基本フロー
 - (添付1) 柏崎刈羽7号機 要件整合報告書（詳細設計）
 - (添付2) 柏崎刈羽7号機 要件整合確認書（詳細設計）

- (1) デジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因故障緩和対策（以下、「デジタルCCF対策」という。）の自律的対応について、第8回（2023年7月25日）公開会合（発電用原子炉施設におけるデジタル安全保護系の共通要因故障対策等に関する検討チーム）において、最早プラントの川内1号機で行った対応とその振り返り、及び川内2号機と柏崎刈羽7号機の対応状況について説明を行った。
- (2) 今回、第8回公開会合で議論された柏崎刈羽7号機の有効性評価に用いたTRAC系コードの適用性、ドライウエル圧力指示計の波及的影響防止に係る設計（アイソレータの設置位置）について説明を行う。
- (3) また、今後の対応として、以下の説明を行う。
 - ◆ 許認可実績のない解析コード等の扱い、技術基準規則・民間規格への適合性の確認など、ATENAによる今後の対応について
 - ◆ PWR、ABWR、BWR5各プラントの対応状況について

(1) TRAC系コードの適用性に関する確認

- ATENAは、2023年7月25日に開催された第8回公開会合におけるTRAC系コードの適用性に関する議論を踏まえ、説明性向上の観点から、事業者に対して、TRAC系コードの適用性に関する追加資料を添付し、要件整合報告書（詳細設計）の改訂版を提出するよう要求した。
- 事業者は、TRAC系コードを適用するために必要な妥当性確認及び検証の適切性について確認又は判断したことを説明する追加資料（TRAC系コードの適格性評価）を添付し、要件整合報告書（詳細設計）の改訂版をATENAへ提出した。

（2023年9月27日）

- ATENAは、要件整合報告書（詳細設計）の改訂版に添付された追加資料の確認を行い、確認結果を公開した。

（2023年10月6日）

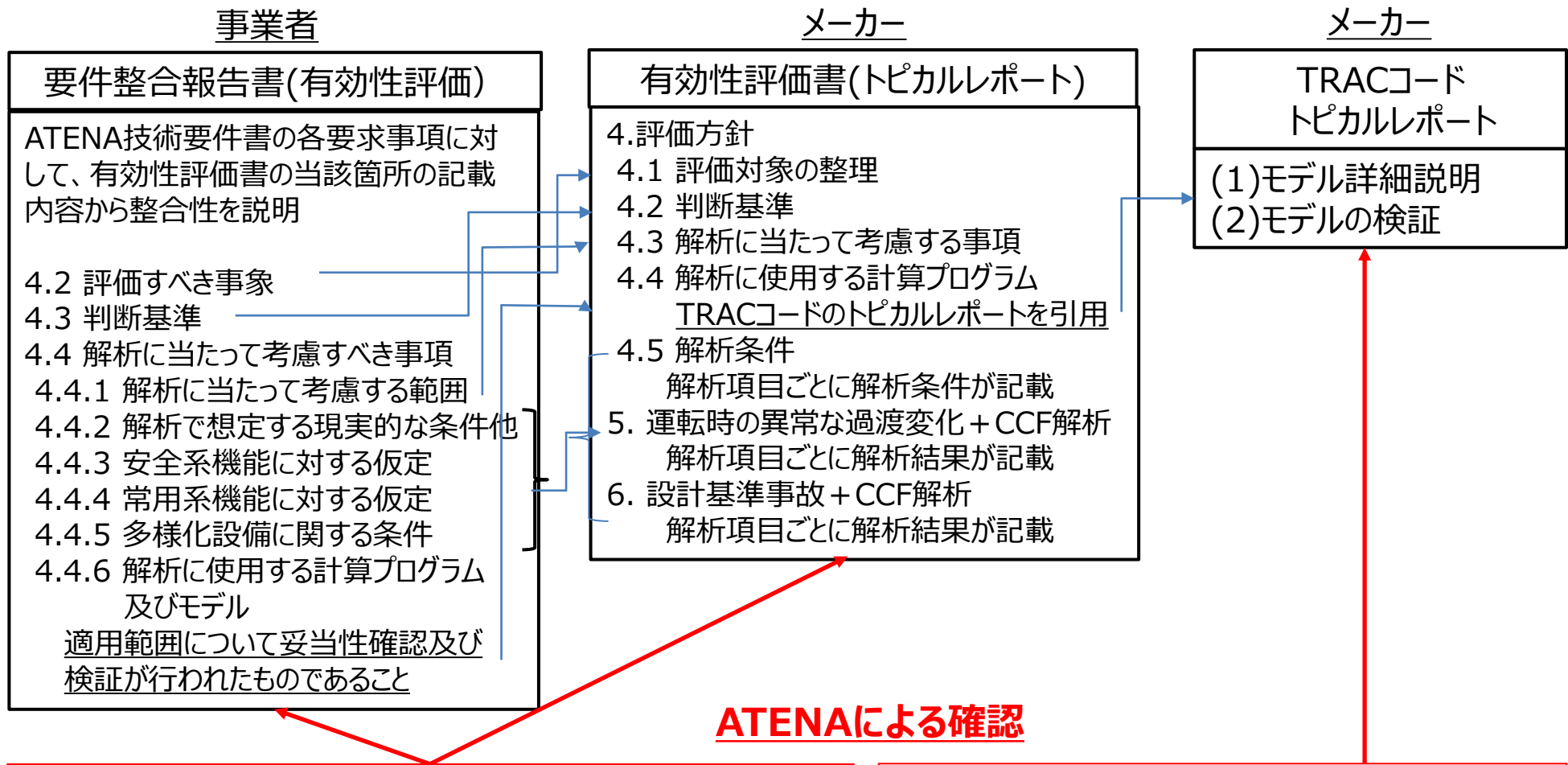
【事業者の課題認識】

- 事業者は、ABWRのソフトウェアCCF事象の有効性評価に、国内で許認可実績のないTRAC系コードを適用した。
- 米国においては、ABWRはTRAC系コードの認証実績がなく、また、制御棒誤引き事象についてはTRAC系コードの適用実績がない状況である。
- 有効性評価においてはCCFの重畳（スクラム制御棒が挿入されない場合又はARI制御棒の挿入が遅くなる）を考慮するため、従来の過渡事象や設計基準事故事象と異なる厳しい事象進展となる。
- 事業者は、上記を考慮し、以下の論点を抽出した。
 - (1) 米国のTRAC系コードの認証実績に含まれないABWRへの適用性
 - (2) 米国でTRAC系コードが適用されない制御棒系過渡への適用性
 - (3) ソフトウェアCCF重畳事象に固有な事象進展に関わる現象のモデル化及びその妥当性

【ATENAの確認結果】

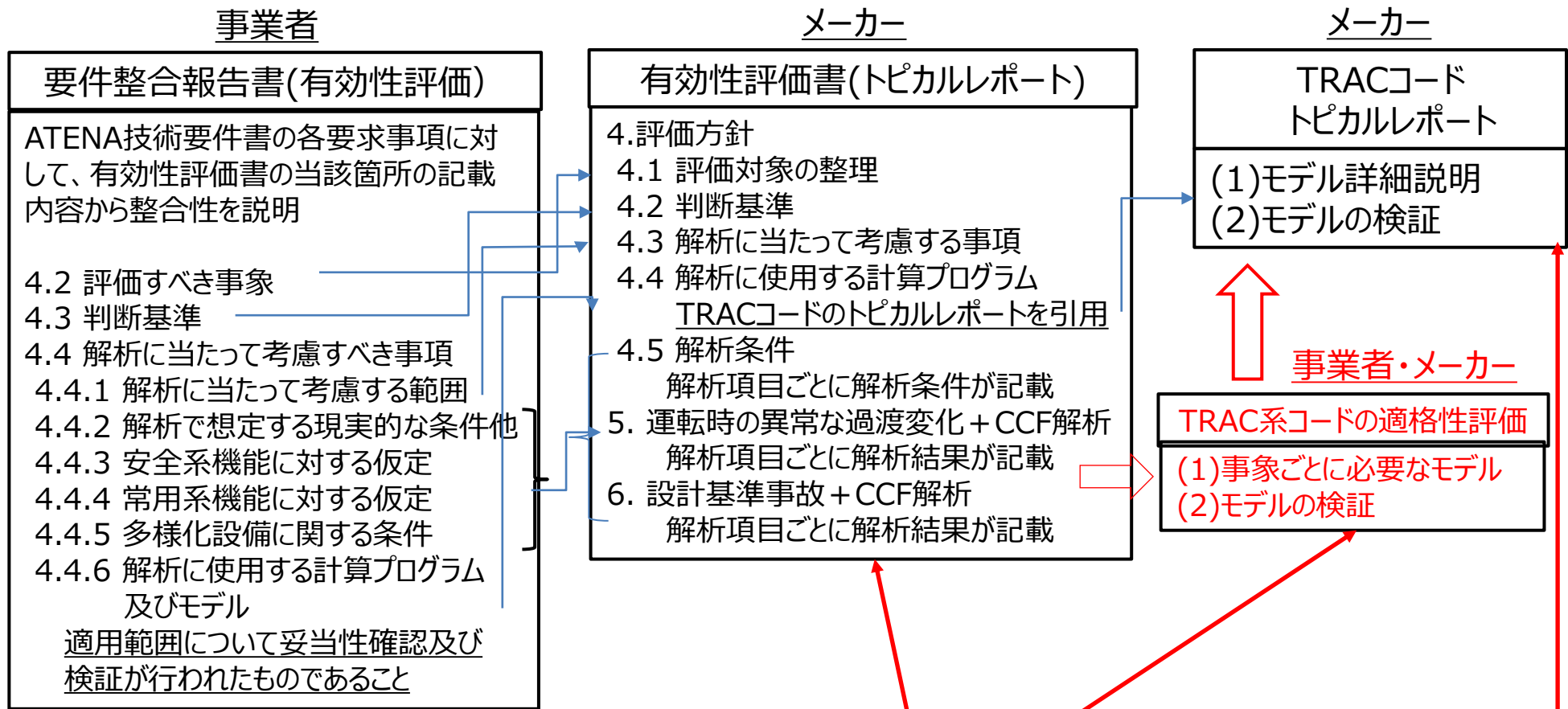
ATENAは、事業者が抽出した論点に対して、追加資料に以下の内容が記載されていることを確認したことから、有効性評価にTRAC系コードを適用することは妥当と判断した。

- (1) 米国のTRAC系コードの認証実績に含まれないABWRへの適用性
 - ABWRへの適用性についてはABWR固有の設備（インターナルポンプ等）がTRAC系コードにて適切にモデル化され、実機試験データにて妥当性が確認されている。
- (2) 米国でTRAC系コードが適用されない制御棒系過渡への適用性
 - 制御棒系過渡への適用性については、評価に必要とされるモデルが実機試験データ等により妥当性確認されている。
 - 起動時の制御棒誤引き抜きや制御棒落下におけるボイド反応度フィードバック効果について、合理的な設定がなされていることが確認されている。
- (3) ソフトウェアCCF重畳事象に固有な事象進展に関わる現象のモデル化及びその妥当性
 - ソフトウェアCCF重畳事象に固有な事象進展に関わる現象が同定され、それらの計算モデルに対して、適切な検証及び妥当性確認がなされている。例えば、制御棒の誤引き抜きを除く過渡事象又は原子炉冷却材流量の喪失事象とソフトウェアCCFが重畳させた事象では、燃料棒被覆管表面温度が上昇し、その後リウエットするが、それらの現象を模擬するために適用されているモデルが根拠を持って選定され、その裏付けが示されている。



①技術要件書の要求内容が漏れなく抽出されていること
②要件整合報告書の内容が有効性評価書に記載されていること。

①各モデルの説明が記載されていること。
②各モデルの妥当性確認と検証が試験等のデータに基づき実施されていること。



ATENAによる追加確認

CCF事象特有の現象を評価できるモデルが整備され検証されていること

(2) ドライベル圧力指示計の設計変更内容の確認

- 事業者は、新規追加した柏崎刈羽7号機のドライベル圧力指示計について、安全保護回路への波及的影響防止に係るJEAC4620-2020への適合性をより明確化するために設備設計の変更（アイソレータを安全保護系に設置）を行うこととし、要件整合報告書（詳細設計）を改訂してATENAに提出した。（2023年9月27日）
- ATENAは、要件整合報告書（詳細設計）の改訂版の確認を行い、当該設計変更の内容がATENA技術要件書に整合しており、かつ設備設計変更の理由であるJEAC4620-2020に適合していることを確認した。（2023年10月6日）
- ATENAによる要件整合確認（詳細設計）の完了を受けて、事業者は、柏崎刈羽7号機のドライベル圧力指示計の改造工事に着手した。（2023年10月10日）

【ATENA技術要件書への整合性】

ATENA技術要件書 要求内容		事業者確認内容	ATENA確認
3.5.8安全保護回路への波及的影響防止	多様化設備である共通要因故障対策設備は、共通要因故障対策設備の故障影響により安全保護系の安全機能が喪失しない設計とする。	アイソレータ及び抵抗による電气的分離により、安全保護系の安全機能が喪失しない設計となっていることを確認した。	ATENA技術要件書に整合していることを確認した。

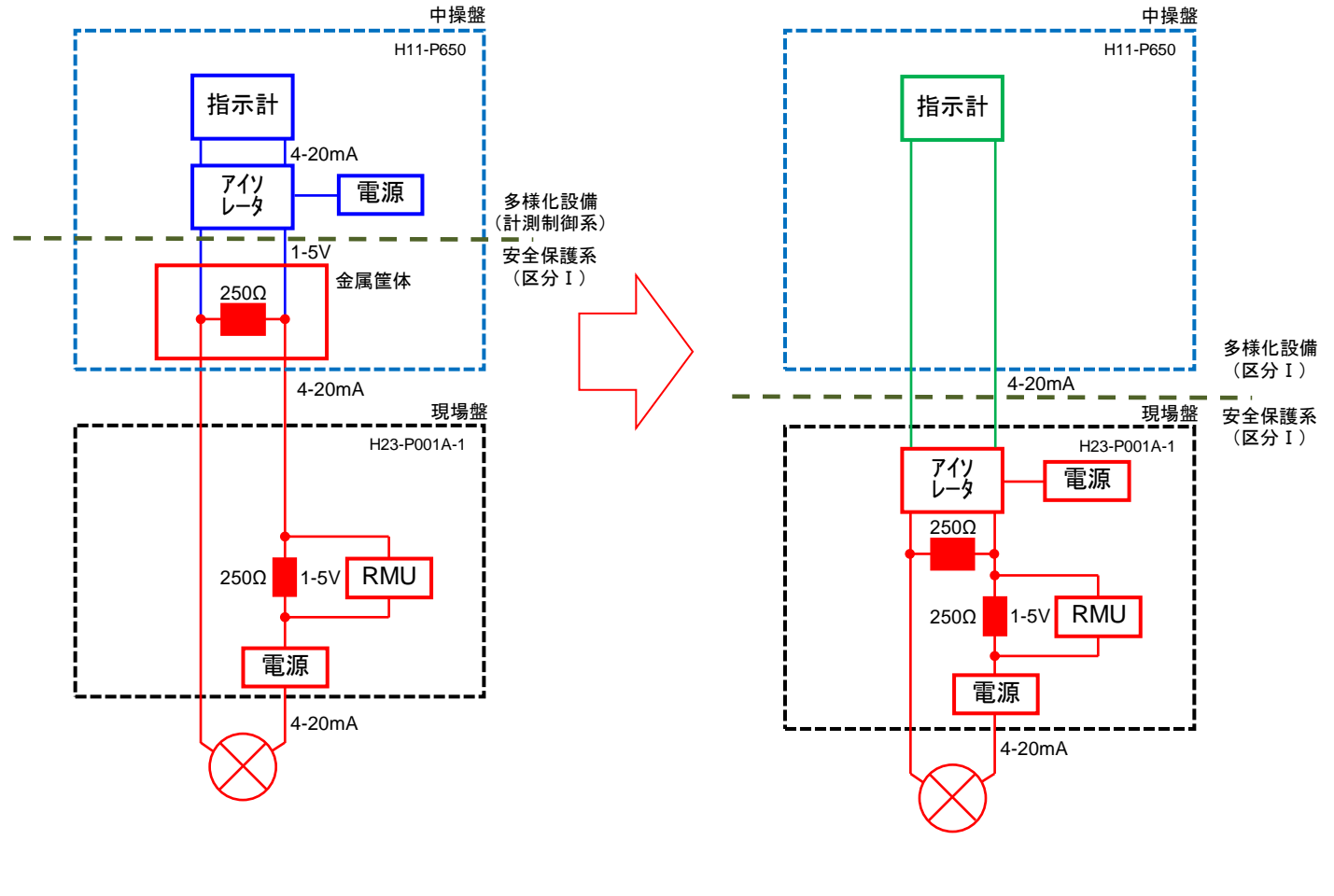
【技術基準・JEAC4620-2020への適合性】

	記載内容	事業者確認内容	ATENA確認
技術基準規則	計測制御系の一部を安全保護装置と共用する場合には、その安全保護機能を失わないよう、計測制御系から機能的に分離されたものであること。	アイソレータ及び抵抗を現場盤へ移設し安全保護系に設置することで、技術基準規則、JEAC本文及び解説に適合していることを確認した。	技術基準規則及びJEAC4620-2020へ適合していることを確認した。
JEAC本文	計測制御系で故障が生じてもデジタル安全保護系に影響のないよう、デジタル安全保護系と計測制御系を電气的に分離する設計とすること。		
JEAC解説	安全保護系と計測制御系との信号取り合いは、光/電気変換などのアイソレーションデバイスを用いる。 この場合アイソレーションデバイスは安全保護系に属する。		

【回路構成比較】

(設計変更前)

(設計変更後)



柏崎刈羽7号機の対応状況

	事業者の完了時期	ATENAの確認
要件整合報告（詳細設計）	2023年1月提出 2023年6月改訂版提出 2023年9月改訂版提出※1	2023年5月改訂指示 2023年6月確認・公開 2023年10月確認・公開
要件整合報告（手順書）	2023年7月提出	2023年7月確認・公開
工事・検査完了報告	2022年7月工事開始※2 2023年10月ドライウエル圧力 指示計の改造工事開始・完了 2023年10月提出予定	2023年10月確認・公開予定

※1：TRACコードの適格性評価の追加及びドライウエル圧力指示計の設計変更に伴う改訂

※2：ATENAによる要件整合報告書（詳細設計）の確認完了前に工事を開始していたため、工事完了及び検査開始はATENAによる確認完了の通知受領後とした。

(1) 課題抽出

○事業者及びメーカーは、許認可実績のない手法、工法や設備を使用する等、新たな課題を幅広く抽出し、それぞれ各プラントに対し、その技術的論点を明確にした上で要件整合報告書提出の前までに、ATENAに文書で連絡する。

- 【課題の例】
- ・許認可実績のない解析手法・コードを適用する場合
 - ・技術基準規則・民間規格への適合性に課題がある場合
 - ・技術基準規則・民間規格の解説に記載された例と相違する場合
 - ・エンドースが予定されている民間規格に相違する場合
 - ・許認可実績のない設備設計や判断基準を適用する場合

○抽出された課題に対し、ATENAは必要に応じてATENA-WGの専門家に意見照会を行い、対応方針を取り纏め事業者に連絡する。また、ATENAは、必要に応じてNRAとコミュニケーションを図る。

○事業者は、ATENAが取り纏めた『課題に対する対応方針』を受領後、対応方針に沿って必要に応じて妥当性を示す資料を添付し、要件整合報告書（詳細設計）をATENAに提出する。

- 【資料例】
- ・有効性評価において許認可実績のない解析コードを適用する場合は、当該コードの妥当性確認及び検証の適切性について説明する資料。
 - ・多様化設備から安全保護系への波及的影響防止については、技術基準規則や民間規格(JEAC4620-2020)への適合性について説明する資料。

(2) 第3者機関の活用（工事・検査完了確認業務委託）

- 現在、ATENA在籍の要員が行っている工事・検査完了確認で、今までの経験も踏まえ定型化されている部分については、第3者機関（発電技検）を活用し、原子力発電所における工事・検査完了確認の透明性向上を図る。
- 発電技検にATENAがOJTなどで力量を確認・付与した委託員2名が担当者として現場同席確認等を行う。なお、委託員はATENAの責任者のもとで確認等を行う。
- 委託は、大飯4号機の工事・検査完了確認から開始する。（10月13日）

(3) 工事開始に関する事業者の担保について

事業者は、今後、ATENAの要件整合確認(詳細設計)の完了通知を受けてから工事を開始することを、オーソライズ文書等に定める方針であり、ATENAはその確認を行う。

(4) PDCA

○ ATENA確認要領の改訂

(1)～(3)に示した対応について、ATENA確認要領書に反映するとともに、同要領書を公開する。

○ 技術要件書の改定

多様化設備のデジタル化要件の明確化などについて技術要件書の改定を検討する。

3. ATENAによる今後の対応について (3/3)

○対応スケジュール

追加対応項目	2023年度	2024年度	未定
(1)課題抽出	<p>10月12日 から開始予定</p> <ul style="list-style-type: none"> ▽柏崎刈羽7号機 ▽大飯3,4号機 ▽高浜3,4号機 ▽美浜3号機 ▽玄海3,4号機 ▽高浜1,2号機 ▽伊方3号機 ▽柏崎刈羽6号機 ▽島根2号機 ▽女川2号機 		<ul style="list-style-type: none"> 泊3号機 敦賀2号機 志賀2号機 島根3号機 大間 東海第二 東通1号機 浜岡3,4号機
(2)第3者機関の活用 (工事・検査完了 確認業務委託)	<p>10月13日 から開始予定</p> <ul style="list-style-type: none"> ▽大飯4号機 ▽高浜3号機 ▽美浜3号機 ▽玄海3号機 ▽高浜4号機 	<ul style="list-style-type: none"> ▽玄海4号機 ▽伊方3号機 ▽高浜1号機 ▽高浜2号機 ▽高浜4号機 ▽大飯3号機 	

4. PWRプラントの対応状況（1/2）

○PWRプラントは、主な対策は川内1号機と同じであり、事業者及びATENAは、川内1号機と同様の対応を行っている。

【2023年9月末時点】

プラント	要件整合報告 (詳細設計)	要件整合確認 (詳細設計)	工事開始	検査開始
川内1号機	2023年1月提出済 2023年3月改訂版 提出済	2023年3月確認済	2023年2月※	2023年3月 2023年4月工事・検査完了
川内2号機	2023年1月提出済 2023年3月改訂版 提出済	2023年3月確認済	2023年5月	2023年6月 2023年7月工事・検査完了
大飯4号機	2023年1月提出済 2023年4月改訂版 提出済 2023年8月改訂版 提出済	2023年8月確認済	2023年9月	2023年9月 2023年10月工事・検査完了
高浜3号機	2023年4月提出済 2023年8月改訂版 提出済	2023年9月確認済	2023年9月	2023年11月

※：ATENAによる要件整合報告書（詳細設計）の確認完了前に工事を開始しているが、確認完了後に工事を完了し、検査を開始した。

4. PWRプラントの対応状況 (2/2)

【2023年9月末時点】

プラント	要件整合報告 (詳細設計)	要件整合確認 (詳細設計)	工事開始	検査開始
美浜 3号機	2023年8月提出済	2023年10月確認済	2023年11月	2023年12月
玄海 3号機	2023年10月提出予定	2023年10月確認予定	2023年11月	2023年12月
高浜 4号機	2023年4月提出済 2023年8月改訂版提出済	2023年9月確認済	2023年12月	2024年3月
大飯 3号機	2023年1月提出済 2023年4月改訂版提出済 2023年8月改訂版提出済	2023年8月確認済	2024年2月	2024年3月
玄海 4号機	2023年10月提出予定	2023年10月確認予定	2024年3月	2024年5月
伊方 3号機	2024年4月提出予定	2024年度	2024年度	2024年度
高浜 1号機	2024年2月提出予定	2024年度	2024年度	2024年度
高浜 2号機	2024年2月提出予定	2024年度	2024年度	2024年度
泊 3号機	設置変更許可後に実施計画を策定し報告	未定	未定	未定
敦賀2号機	設置変更許可後に実施計画を策定し報告	未定	未定	未定

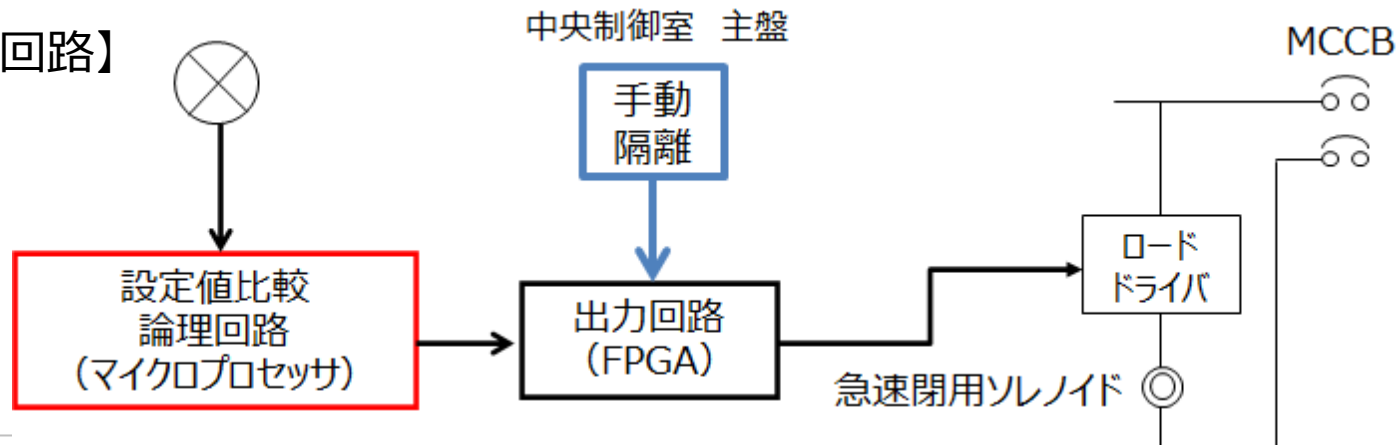
- ABWRプラントは、主な対策は柏崎刈羽 7 号機と同じであり、事業者及びATENAは、柏崎刈羽 7 号機と同様の対応を行う。
- 柏崎刈羽 7 号機は、手動操作（MSIV閉回路）の出力回路にFPGA※が使用されているため、保守的に当該FPGAをソフトウェアCCF対象とし、手順書では、MSIV閉操作として、当該FPGA回路を使用しているMSIV手動隔離スイッチではなく、MSIVのMCCB操作がエントリーされている。

※：内部の論理回路の構造を再構築できる半導体チップの一種で、現場で書き換え可能な論理回路（Field Programmable Gate Array）

なお、柏崎刈羽6号機では当該回路はハード回路で構成されており、FPGAの使用はない。当該FPGAと同様な回路は、志賀 2 号機と島根 3 号機にあるものと認識している。

- 柏崎刈羽7号機は、MSIV閉回路の出力回路にFPGAが使用されているため、以下の対応を行っている。
 - FPGAはマイクロプロセッサに対して多様性を有しており、CCFの想定を除外できるものであると考えられるが、柏崎刈羽7号機では保守的に当該FPGAをソフトウェアCCF対象とした。
 - 柏崎刈羽7号機の手順書では、MSIV閉操作として、当該FPGA回路を使用しているMSIV手動隔離スイッチではなく、MSIVのMCCBがエントリーされている。
- 将来、多様化設備にソフトウェア技術(例FPGA)を適用する場合を考慮し、安全保護回路(マイクロプロセッサ)と多様性が確保できCCFの想定を除外できる要件を明確化し技術要件書へ反映する予定である。

【MSIV閉回路】



【2023年9月末時点】

プラント	要件整合報告 (詳細設計)	要件整合確認 (詳細設計)	工事開始	検査開始
柏崎刈羽7号機	2023年1月提出済 2023年6月改訂版提出済 2023年9月改訂版提出済 ^{※2}	2023年6月確認済 2023年10月確認済 ^{※2}	2022年7月 ^{※1} 2023年10月 ^{※3}	2023年7月 2023年10月 ^{※3}
柏崎刈羽6号機	2024年3月提出予定	未定	未定	未定
志賀2号機	設置変更許可後に実施計画 を策定し報告	未定	未定	未定
島根3号機	設置変更許可後に実施計画 を策定し報告	未定	未定	未定
大間	設置変更許可後に実施計画 を策定し報告	未定	未定	未定

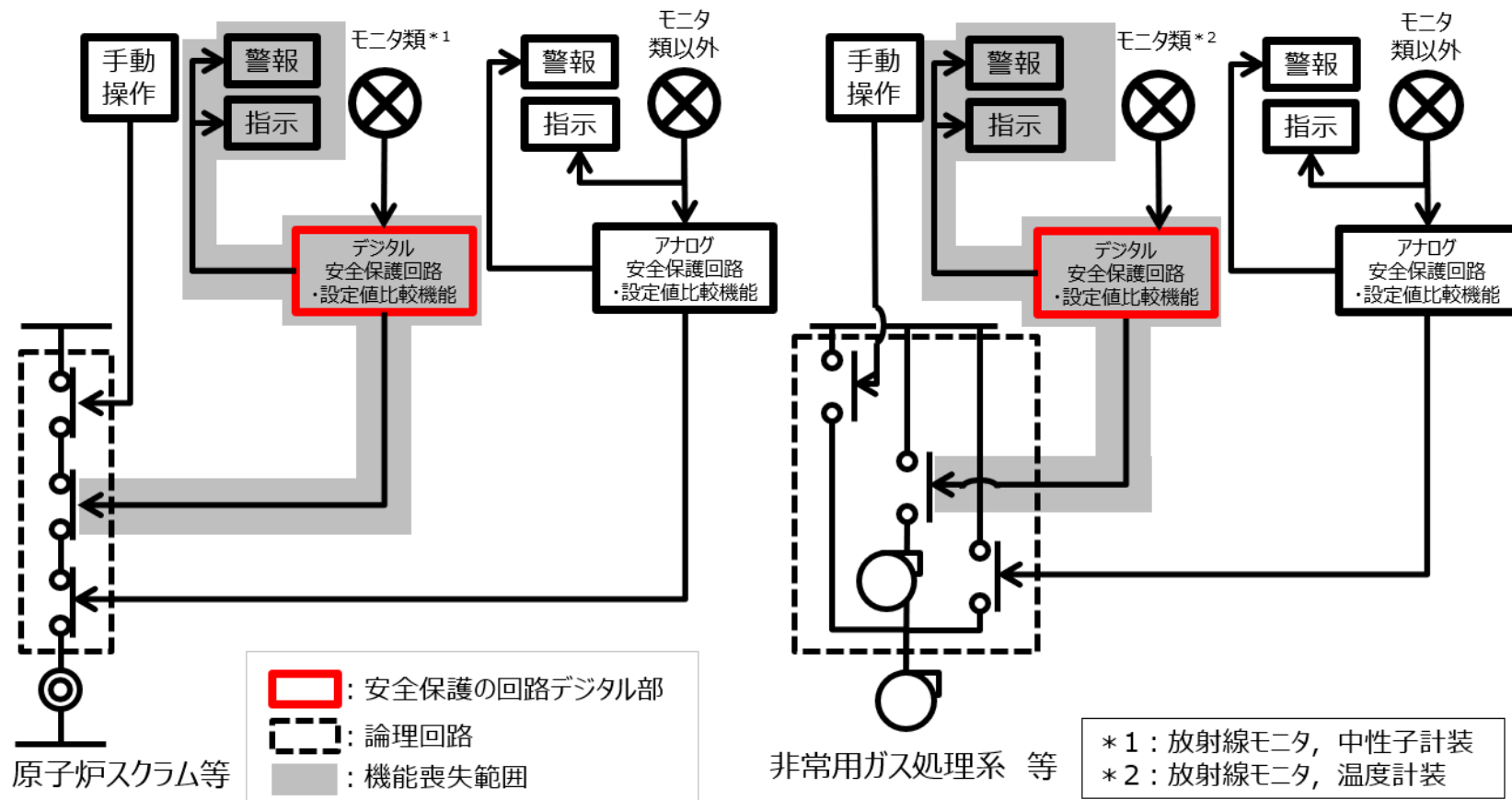
※1：ATENAによる要件整合報告書（詳細設計）の確認完了前に工事を開始しているが、確認完了後に工事を完了し、検査を開始した。

※2：TRACコードの適格性評価の追加及びドライウエル圧力指示計の設計変更に伴う改訂

※3：ドライウエル圧力指示計の改造工事、自主検査

○BWR5プラントの安全保護回路は、放射線モニタ、核計装、温度計装にソフトウェアが使用され、その他はアナログ機器で構成されている。

【BWR5プラントの安全保護回路のデジタル部】



- 技術要件書では、デジタル化された範囲に対してソフトウェアCCFの影響を受ける事象に対して有効性評価を行い、設計基準事故の判断基準を概ね満足することが確認できる場合には、多様化設備を設けなくてもよいこととしている。
- 事業者は、今後、有効性評価により多様化設備の設置が不要であることを、要件整合報告書（詳細設計）に取りまとめ、ATENAに提出する。ATENAは、受領した報告書の確認完了後に確認結果を公開するとともにNRAへ報告を行う
- なお、事業者は、有効性評価書のABWRの解析結果から、BWR5において多様化設備が不要であることを示すとしている。

(参考1)
- また、多様化設備の設置が不要であっても、手順書の整備、教育・訓練の実施が必要となる場合、事業者は、運用に係る事業者自主検査を実施する。

(参考2)

【2023年9月末時点】

プラント	要件整合報告 (詳細設計)	要件整合確認 (詳細設計)	工事開始	検査開始
女川2号機	2024年2月提出予定	2024年2月確認予定	—	2024年2月
島根2号機	2024年4月提出予定	2024年5月確認予定	—	未定
東海第二	新規制基準適合性に 係る工事完了までに 実施	未定	—	未定
東通1号機	設置変更許可後に実 施計画を策定し報告	未定	—	未定
浜岡3号機	設置変更許可後に実 施計画を策定し報告	未定	—	未定
浜岡4号機	設置変更許可後に実 施計画を策定し報告	未定	—	未定

新規制基準適合性審査が未申請のプラント（女川3号、柏崎刈羽1～5号、浜岡5号、志賀1号）は、設置変更許可申請後に実施計画を策定し報告することとしている。

デジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因 BWR5プラントの有効性評価結果 (暫定)

2023年10月26日
東北電力株式会社
中国電力株式会社

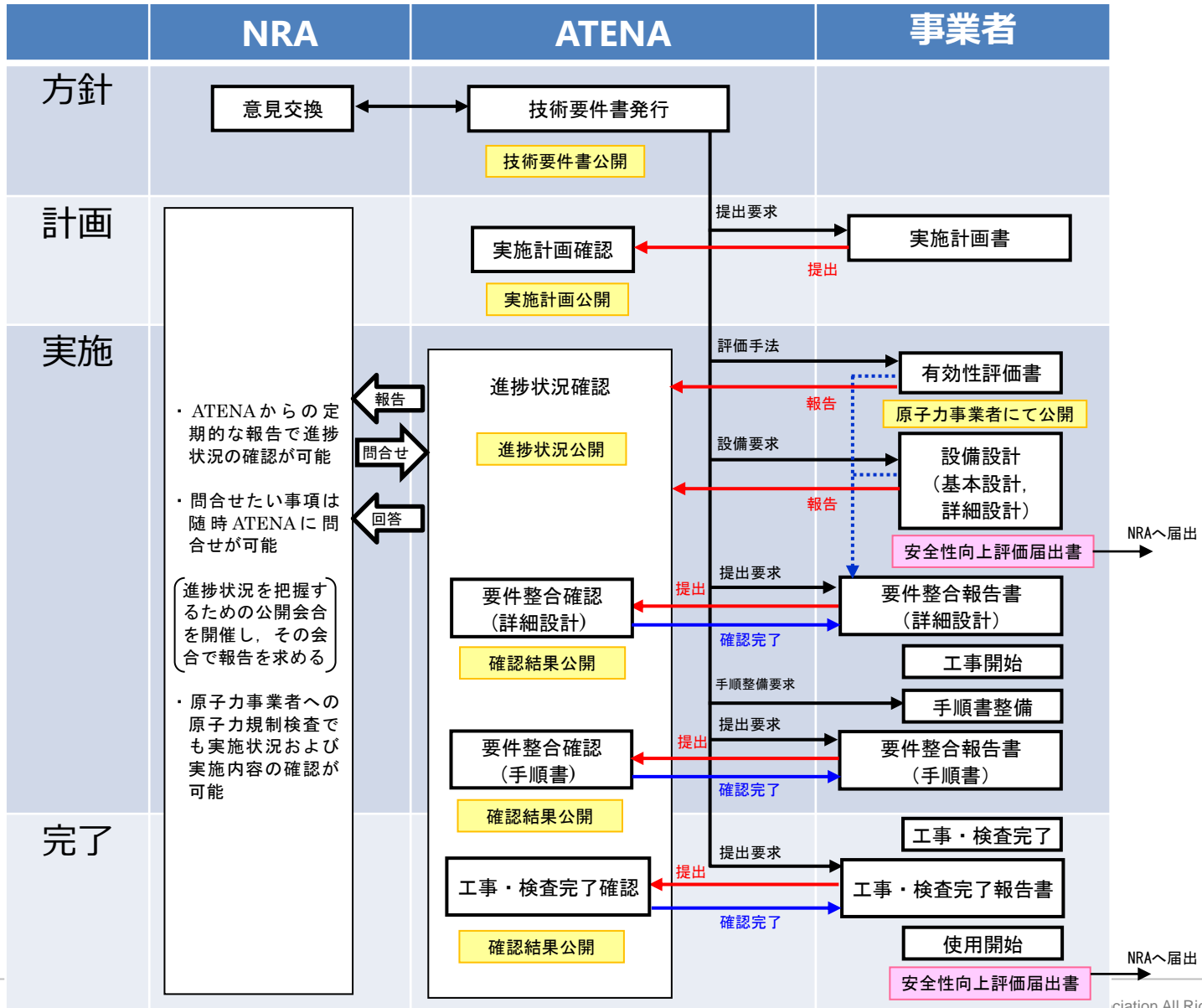
○有効性評価結果

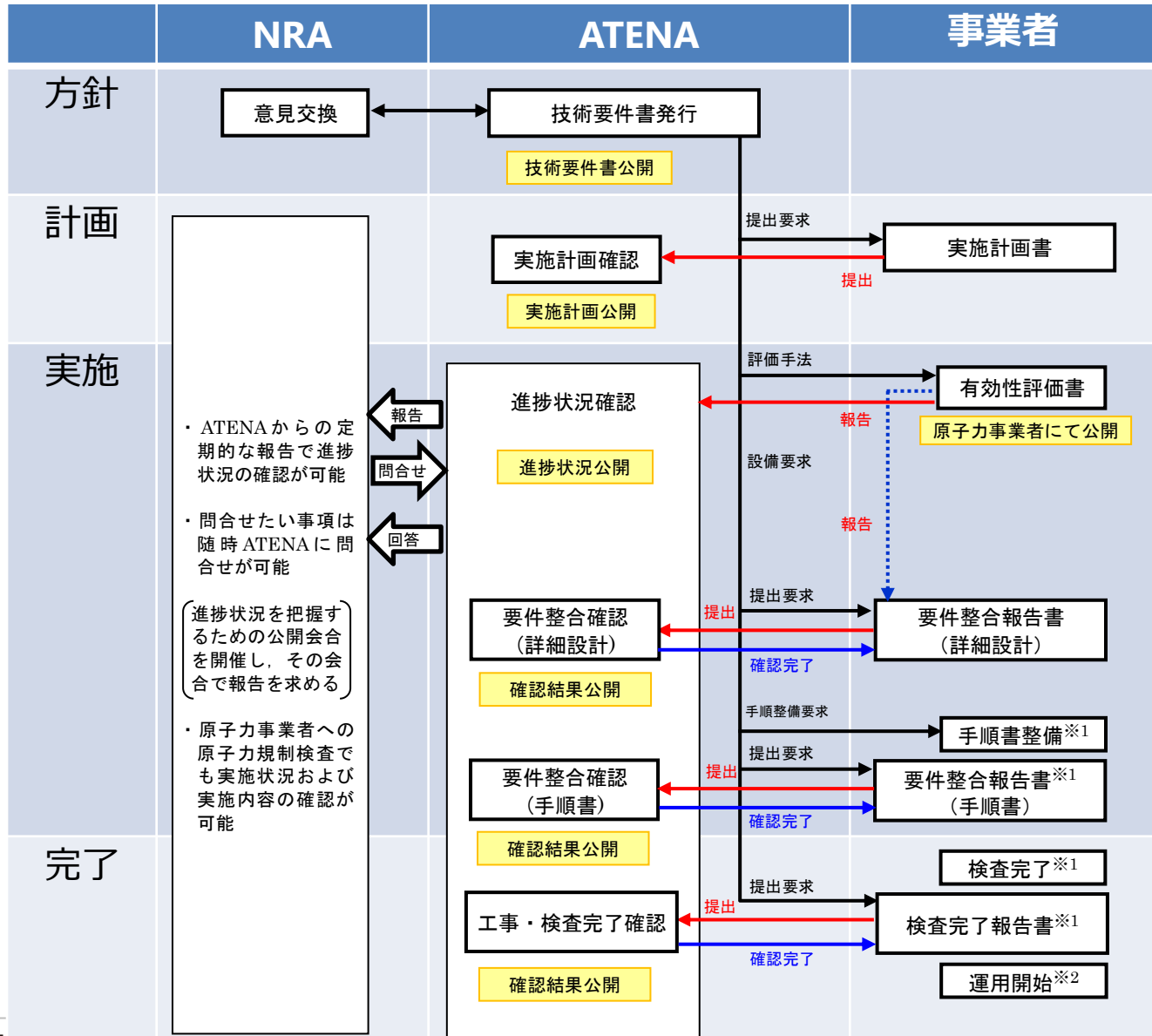
BWR5プラントではソフトウェアCCFの影響を受ける以下の事象(①～⑦)について、有効性評価図書の代表ABWRプラント解析結果から、多様化設備に期待しない場合においても、設計基準事故で使用される判断基準を満足することを確認した。

評価事象	理由
運転時の異常な過渡変化	①原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き 制御棒引抜速度よりも制御棒落下速度の方が速いため、⑤制御棒落下の解析結果に包絡される。
	②出力運転中の制御棒の異常な引き抜き 局所出力が上昇する事象であり、炉型に依存しないため、代表ABWRプラントの解析結果(有効性評価書5.1.2)を参照する。代表ABWRプラントでは同時引抜本数が多いため、原子炉出力はBWR5プラントと比較して高くなるが、代表ABWRプラントの解析結果でも燃料被覆管温度は1200℃以下で整定する。 一方、BWR5プラントでは同時引抜本数が1本であり、誤引抜制御棒周辺の燃料集合体出力の上昇は同程度となるため、代表ABWRプラントと同様に判断基準を満足する。 なお、通常の運転管理として定格出力近傍での制御棒引抜操作は1ノッチずつに限定されることから、連続誤引抜は発生しない。
	③給水加熱喪失 炉心入口サブクーリング増加により中性子束が上昇するが、MSIV閉条件に至らず、ARI及びRPTが作動せずに整定する事象である。本事象のスクラム遅れの影響は、スクラム失敗時の圧力上昇によるボイド反応度フィードバックが最も厳しい主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。有効性評価書「5.3.2主蒸気隔離弁の誤閉止」に示すように代表ABWRプラントは十分余裕をもって判断基準を満足する。同様の事象進展となるBWR5プラントにおいても同様に判断基準を満足する。

○有効性評価結果 (つづき)

評価事象		理由
運転時の異常な過渡変化	④原子炉冷却材流量制御系の誤動作	誤動作による炉心流量増加により中性子束が上昇するが、MSIV 閉条件に至らず、ARI及びRPTが作動せずに整定する事象である。本事象のスクラム遅れの影響は、スクラム失敗時の圧力上昇によるボイド反応度フィードバックが最も厳しい主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。③と同様にBWR5プラントにおいても代表ABWRプラントと同様に判断基準を満足する。
設計基準事故	⑤制御棒落下	有効性評価書「6.2反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化」に示すように、代表ABWRプラント解析においてBWR5プラントを包絡する条件としてBWR5プラントの制御棒落下速度を設定している。代表ABWRプラントでは、反応度フィードバックによる固有の安全性により燃料エンタルピの増加が緩和され、判断基準を満足する結果となっており、BWR5プラントにおいても同様に判断基準を満足する。
	⑥制御棒落下 (被ばく評価)	有効性評価書の添付2「代表プラント以外への適用性」に示すように、有効性評価書「6.3 環境への放射性物質の異常な放出」の評価に代表されるため、BWR5プラントにおいても代表ABWRプラントと同様に判断基準を満足する。
	⑦燃料集合体の落下 (被ばく評価)	





BWR5プラントは有効性評価結果から設備対応が不要な場合、設備設計(基本設計、詳細設計)及び工事開始のプロセスは対象外となる。

※1: 手順書の整備、教育・訓練の実施が必要となる場合、手順書整備、要件整合報告(手順書)、運用に係る検査、検査完了報告のプロセスが必要となる。

※2: 手順書の運用開始

**柏崎刈羽原子力発電所 7 号機
デジタル安全保護回路の
ソフトウェア共通要因故障緩和対策
に関する要件整合報告書 (詳細設計)**

別冊資料参照

柏崎刈羽原子力発電所7号機
デジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因故障緩和対策
に関する要件整合確認書 (詳細設計)

別冊資料参照