

(添付5-1) 柏崎刈羽7号機 要件整合報告書 (詳細設計)

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)

2023年6月6日

東京電力ホールディングス株式会社

改訂来歴

| 改訂番号 | 改訂年月日 | 改定内容 | 備考 |
|------|------------|---|----|
| 初版 | 2023/01/31 | 新規作成 | - |
| 1 | 2023/6/6 | ・2023年5月15日「ATENA 運第14号」の気付き事項に対する反映 ・記載の適正化 | - |
| | -以下余白- | | |
| | | | |

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)
目次

| | 頁 |
|----------------|----|
| I. 本文 | 1 |
| II. 添付書類 | 45 |

I . 本文

柏崎刈羽原子力発電所 7 号機におけるデジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因故障(以下、「ソフトウェア CCF」という。)緩和対策について、「原子力発電所における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技術要件書(ATENA 20-ME05 Rev.1)」(以下、「技術要件書」という。)が定める「3. 多様化設備要件」及び「4. 有効性評価」の各要求内容に対する要件整合性の確認を行った。

なお、「5. 手順書の整備と教育及び訓練の実施」については、当社が ATENA へ提出した「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の実施計画及び実績(2023 年 4 月 7 日)」において「再稼働前に実施」としていることから、本報告書の対象外とする。

1. 確認方法

技術要件書に記載された要求内容に対して、各要件に対応する設計図書、有効性評価図書等の記載内容を確認し、要求内容ごとに要件整合性の判定及びその理由を記載する。

2. 確認結果

(1) 「3. 多様化設備要件」

多様化設備に対する要件整合性について、以下に示す技術要件書の各要求内容に対して、各設計図書の記載内容を確認した結果、全ての要求内容に対して整合していることを確認した。各要求内容に対する確認結果については表1に示す。

【技術要件書の各要求内容】

- 3.1 設置要求
- 3.2 機能要求
- 3.3 多様化設備の範囲
- 3.4 設計基本方針
- 3.5 多様化設備への要求事項

(2) 「4. 有効性評価」

有効性評価に対する要件整合性について、以下に示す技術要件書の各要求内容に対して、有効性評価図書(「沸騰水型原子力発電所 デジタル安全保護回路のソフトウェア共通要因故障影響緩和対策の有効性評価書^{*}」TLR-100, HLR-129, 東芝エネルギーシステムズ株式会社, 日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社, 令和 4 年)の記載内容を確認した結果、全ての要求内容に対して整合していることを確認した。各要求内容に対する確認結果については表 2 に示す。

※:本図書では代表 ABWR プラントの解析結果及びそれらを基にした BWR プラントの有効性評価の検討結果を記載しており、柏崎刈羽原子力発電所 7 号機の有効性評価は包含される。

【技術要件書の各要求内容】

4.2 評価すべき事象

4.3 判断基準

4.4 解析に当たって考慮すべき事項

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(1/9)

| ソフトウェア CCF 対策設備設計図書要件整合性 | | | | |
|---|---------------------------------|-------|--|-----------------------------------|
| ATENA 技術要件書 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | | 設計図書 |
| | | 判定 | 理由 | |
| 3.1 設置要求 | | | | |
| デジタル安全保護回路を設ける場合には、代替機能を有する多様化設備を設置しなければならない。 | デジタル安全保護回路の代替機能を有する、多様化設備を設置する。 | ○ | デジタル安全保護回路がソフトウェア CCF によってその機能をすべて喪失し、かつ運転時の異常な過渡変化、又は設計基準事故が発生した場合でも設計基準事故の判断基準を概ね満足することができ、 る設備を多様化設備として設けることを設計図書により確認した。 具体的な代替機能は3.2項にて、多様化設備の範囲は3.3項にて確認を行う。 | 【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 3.3章 |
| ただし、ソフトウェア CCF が発生するおそれがない場合、若しくは運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、かつ安全保護回路の一部がソフトウェアにより作動するものがある場合で、当該ソフトウェアが機能しない場合を想定しても、他の安全保護回路の安全機能が作動することにより設計基準事故の判断基準を概ね満足することが有効性評価により確認できる場合には、多様化設備を設けなくともよい。 | ー | ー | 多様化設備を設置する計画であるため、考慮しない。 | 同上 |

(判定記号) ○：整合有 ー：該当なし

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(2/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策設備設計図書 要件整合性 | | |
|---|--|---|---|---|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | | |
| | | 判定 | 理由 | |
| 3.2 機能要求 | <p>多様化設備は、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、かつソフトウェア CCF により安全機能が喪失した場合においても、設計基準事故の判断基準を概ね満足できるよう、原子炉停止系統、工学的安全施設等を自動、又は手動で作動させることができなければならない。</p> | <p>デジタル型安全保護回路がソフトウェア CCF によってその機能が全て喪失し、かつ運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生しても設計基準事故の判断基準を概ね満足することができるとして多様化設備を設ける。</p> <p>多様化設備は、デジタル安全保護回路とは異なる動作原理により自動または手動で原子炉緊急停止系及び工学的安全施設等を作動させる機能及び警報機能、指示機能を設ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> 自動(作動)機能 代替制御棒挿入 他 <p>(別表1「多様化設備が有する自動作動機能一覧表」参照)</p> <ul style="list-style-type: none"> 手動操作機能 高圧炉心注水系起動 他 <p>(別表2「多様化設備が有する手動操作機能一覧表」参照)</p> <ul style="list-style-type: none"> 警報機能 ARI 作動(ハード) 他 <p>(別表3「多様化設備が有する警報機能一覧表」参照)</p> <ul style="list-style-type: none"> 指示機能 原子炉水位 原子炉圧力 他 <p>(別表4「多様化設備が有する指示機能一覧表」参照)</p> | ○ | <p>多様化設備はデジタル安全保護回路とは異なる動作原理により、原子炉緊急停止系、工学的安全施設等を自動又は手動で作動させる設計であることを設計図書により確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> 【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 3.4 章,3.5 章 柏崎刈羽原子力発電所6,7号炉における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設備について 3.1 章 原子炉緊急停止系 インターロックブロック線図(Sh.34,35) 苛酷事故対策設備 インターロックブロック線図(Sh.14,16~20) 後備原子炉停止系 インターロックブロック線図(Sh.4~8) ソフトウェアCCF対策設備警報 インターロックブロック線図(Sh.3~5) |
| <p>さらに、原子炉停止系統、工学的安全施設等を手動により作動させる場合には、運転員が必要な時間内に操作を開始し、判断基準を概ね満足した状態で事を収束させることができるよう、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の発生時に安全保護機能動作の異常の発生を認知し、必要な操作の判断を行える機能を設ける。</p> | <p>原子炉緊急停止系、工学的安全施設等を手動により作動させる場合には、運転員が必要な時間内に操作を開始し、判断基準を概ね満足した状態で事を収束させることができるよう、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の発生時に安全保護機能動作の異常の発生を認知し、必要な操作の判断を行える機能を設ける。</p> | ○ | <p>異常な過渡変化または設計基準事故時にソフトウェア CCF が重畳した場合、デジタル安全保護回路は機能喪失し、原子炉緊急停止系及び工学的安全施設は作動せず、多様化設備の ARI が作動し、 ARI 作動警報が発報する。これにより運転員は事象発生を認知し、定められた手順書により事象を判断し、必要な操作を実施する。</p> <p>運転員が必要な時間内に手動操作を開始し、判断基準を概ね満足した状態で事を収束させることができることを確認は4項で行う。</p> | |

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(3/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策設備設計図書の要件整合性 | |
|---|---|---------------------------|--|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | |
| | | 判定 | 理由 |
| <p>3.3 多様化設備の範囲</p> <p>多様化設備の範囲は、3.2 機能要求を達成するために必要となる、検出器、操作スイッチ、論理回路、指示計・警報等の計測制御設備とする。 この計測制御設備の構成要素は、3.5 多様化設備への要求事項を満足する限り、デジタル安全保護回路のソフトウェア CCF 影響緩和対策として設けた設備以外の設備(安全保護回路の検出器及び操作スイッチ、重大事故等対処設備等)も多様化設備として用いることができる。 また、多様化設備の範囲は、安全保護回路のデジタル化の範囲等により異なるため、多様化設備としてどの設備を選定したか設計図書で明確にする。</p> | <p>多様化設備の範囲は以下の(1)~(5)である。</p> <p>(1)検出器 原子炉水位 原子炉圧力 D/W 圧力 復水貯蔵槽水位 HPCF(C)系統流量 (2)操作スイッチ 手動スケラム MSIV MCCB CUW 吸込ライン内側隔離弁操作スイッチ RCIC 蒸気ライン内側隔離弁操作スイッチ HPCF ポンプ(C)操作スイッチ HPCF S/P 側吸込隔離弁(C)操作スイッチ HPCF 注入隔離弁(C)操作スイッチ HPCF 最小流量バイパス弁(C)操作スイッチ (3)論理回路 代替制御棒挿入 代替冷却材再循環ポンプ・トリップ (4)指示計 原子炉水位 原子炉圧力 D/W 圧力 復水貯蔵槽水位 HPCF (C)系統流量 上記(2)の弁、ポンプの状態表示 (5)警報 L-2(ハード) 原子炉圧力高高(ハード) ARI 作動(ハード)</p> | ○ | <p>多様化設備の範囲が明確に示されていることを設計図書で確認した。</p> <p>・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 3.5 章 ・柏崎刈羽原子力発電所 6,7 号炉における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設備について 3.1 章 ・【技術検討書】デジタル安全保護回路のソフトウェアに起因する共通要因故障への対応方針について</p> |

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(4/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策設備設計図書の要件整合性 | | 設計図書 |
|-------------|--|---------------------------|---|------|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 判定 | 要件整合性 理由 | |
| 3.4 基本設計方針 | <p>デジタル安全保護回路は、十分に高い信頼度でソフトウェア設計がなされており、ソフトウェア CCF が発生する可能性は極めて小さく抑えられているため、多様化設備は、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、かつソフトウェア CCF により安全機能が喪失するという設計基準を超える事象に対応する設備であることから、多様化設備に対しては、設計上、単一故障を考慮しない。</p> <p>多様化設備は、設計上、火災・溢水あるいは外的影響(地震を除く)とソフトウェア CCF との重畳を考慮しない。</p> <p>多様化設備は、ソフトウェア CCF 発生時に安全保護回路の代替機能を有する設備であることから、耐環境性、耐震性、供給電源等は、安全保護回路と同等の条件で機能を発揮できる設計とする。</p> | — | <p>本項は基本設計方針に記載したものであるため、具体的な設計については「3.5 多様化設備への要求事項」で確認した。なお、多様化設備のうち既設の自主設備、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備を兼ねる設備については、機器仕様に変更がないため、既存設備状態を示す図書により確認した。</p> | — |

(判定記号) ○：整合有 ー：該当なし

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(5/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策設備設計図書の要件整合性 | | 設計図書 |
|--|--|---------------------------|--|--|
| 要求内容 | | 記載内容(概要) | 要件整合性 判定 | |
| 3.5 多様化設備への要求事項 | | | | |
| 3.5.1 多重性 | | | | |
| 多様化設備には、多重性は要求しない。 | 多様化設備は運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、かつソフトウェア CCF により安全機能が喪失するという設計基準を超える事象に対応する設備であることから、設計上、単一故障を考慮しない。 | ○ | 多様化設備は単一故障を想定しないことから、多重性を要求していないことを設計図書により確認した。 | ・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.1 章 |
| 3.5.2 多様性 | | | | |
| 多様化設備自体には、多様性は要求しない。 | 多様化設備自体には多様性を要求しない。 | ○ | 多様化設備自体には多様性を要求していないことを設計図書により確認した。 | ・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.2 章 |
| 多様化設備は、ソフトウェアを用いた安全保護回路に対して多様性を有した設備とすること。なお、多様性を有した設備とは、アナログ設備等、ソフトウェア CCF によってデジタル安全保護回路と同時にその機能を喪失するおそれがないものをいう。 | 多様化設備はソフトウェア CCF によってデジタル安全保護回路と同時にその機能を喪失するおそれがないようアナログ設備のみで構成する。 | ○ | 多様化設備はソフトウェアを用いた安全保護回路に対して多様性を有するハード回路を用いた設計としていることを設計図書により確認した。 | 同上 |
| また、多様化設備に用いられるソフトウェア及びデジタル安全保護回路に用いられるソフトウェアにおいて、それらのソフトウェアに不具合が共通して内在する可能性がなく、かつその他ソフトウェア CCF が発生するおそれがないことが明らかである場合には、多様化設備にもソフトウェアを用いることができる。 | ー | ー | ハード回路を用いた設計とする計画であるため、考慮しない。 | 同上 |
| 3.5.3 耐環境性 | | | | |
| 多様化設備は、4. 有効性評価で対象とする運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳する状態で想定される環境条件において、その機能を発揮できる設計とすること。 | 多様化設備は運転時の異常な過渡変化、又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳した状態で想定される温度、湿度、放射線等の環境条件においても所定の機能が発揮できる設計とする。 | ○ | 多様化設備はソフトウェア CCF に運転時の異常な過渡変化、又は設計基準事故が重畳した場合での環境下においても所定の安全機能が果たせることを設計図書により確認した。 | ・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.3 章 ・相崎刈羽原子力発電所 6.7 号炉における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設備について 3.2 章 |

(判定記号) ○：整合有 ー：該当なし

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(6/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウエア CCF 対策設備設計図書要件整合性 | | 設計図書 |
|-------------|---|---|--|--|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | 理由 | |
| 3.5.4 耐震性 | 多様化設備は、基準地震動 Ss による地震力に対し、機能維持する設計とすること。 | 多様化設備は基準地震動 Ss に対し機能維持する設計とする。 | 多様化設備の内、設計基準対象設備及び重大事故等対処設備と共用しておらず、個別の耐震評価が必要なものについては基準地震動 Ss に対して機能維持することを設計図書により確認した。 | <ul style="list-style-type: none"> ・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.4 章 ・格納容器補助盤の耐震性についての計算書 ・ATWS 緩和設備制御盤の耐震性についての計算書 ・高圧代替注水系制御盤の耐震性についての計算書 ・中央運転監視盤の耐震性についての計算書 ・運転監視補助盤の耐震性についての計算書 |
| 3.5.5 供給電源 | 多様化設備は、外部電源が利用できない場合においても、非常用電源系又は重大事故等対処設備電源のどちらか一方から給電できる設計とすること。 | 多様化設備は外部電源が利用できない場合において、非常用電源系又は重大事故等対処設備電源系から給電できる設計とする。 | 外部電源が利用できない場合においても、非常用電源系又は重大事故等対処設備電源系である非常用交流電源設備、直流電源設備から給電される設計としていることを設計図書により確認した。 | <ul style="list-style-type: none"> ・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.5 章 ・原子炉緊急停止系及び主蒸気隔離系 展開接続図 ・原子炉系計装 展開接続図 ・原子炉再循環流量制御系 展開接続図 ・原子炉冷却材浄化系 展開接続図 ・原子炉隔離時冷却系 展開接続図 ・高圧炉心注水系 展開接続図 ・高圧代替注水系 展開接続図 ・原子炉系故障表示回路 展開接続図 |
| 3.5.6 設備の共用 | 多様化設備は、二以上の発電用原子炉施設において共用しない設計とすること。また、相互に接続しない設計とすること。 | 多様化設備は二以上の発電用原子炉施設にて共用及び相互接続しない設計とする。 | 二以上の発電用原子炉施設にて共用及び相互接続しないものとして、いることを設計図書により確認した。 | <ul style="list-style-type: none"> ・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.6 章 |

(判定記号) ○：整合有 ー：該当なし

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(7/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウエア CCF 対策設備設計図書 要件整合性 | | 設計図書 |
|-----------------------|--|---|-------------|---|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 判定 | 要件整合性 理由 | |
| 3.5.7 試験可能性 | 多様化設備は、原子炉の運転中又は停止中に、試験又は検査ができる設計とすること。 | 多様化設備は原子炉の運転中又は停止中に、模擬信号又は実動作によって機能が確認できる設計とする。 | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.7 章 |
| 3.5.8 安全保護回路への波及的影響防止 | 多様化設備は、多様化設備の故障影響により安全保護回路の安全機能を喪失させない設計とすること。 | 多様化設備の故障等により安全保護回路の安全機能を喪失させない設計とする。多様化設備と安全保護回路が部分的に設備を共用する場合には、電気的・機能的に隔離又は分離した設計とする。 | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.8 章 原子炉系計装 展開接続図 原子炉再循環流量制御系 展開接続図 原子炉冷却材浄化系 展開接続図 原子炉隔離時冷却系 展開接続図 高圧炉心注水系 展開接続図 高圧代替注水系 展開接続図 原子炉系故障表示回路 展開接続図 |
| 3.5.9 火災防護及び溢水防護 | 多様化設備が、火災・溢水の影響を受けたとしても、安全保護回路の安全機能を喪失させない設計とすること。 | 多様化設備が火災、溢水の影響を受けたとしても、安全保護回路の安全機能を喪失させない設計とする。 | ○ | <ul style="list-style-type: none"> 【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.9 章 KK-7M ソフトウエア CCF 対策 電気工事計画書 |

(判定記号) ○：整合有 ー：該当なし

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(8/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウエア CCF 対策設備設計図書要件整合性 | |
|--|---|--------------------------|---|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | |
| | | 判定 | 理由 |
| 3.5.10 外的事象に対する防護 | 多様化設備は、想定される自然現象(地震を除く)、人為による事象、蒸気タービン、ポンプ、その他の機器又は配管の損壊に伴う飛散物等に対して、多様化設備がそれらの影響を受けない設計とすること又は多様化設備がそれらの影響を受けたとしても、安全保護回路の安全機能を喪失させない設計とすること。 | ○ | 発電所で考慮する自然現象及び外部人為事象等に対して、多様化設備の受ける影響評価を行った結果、これらの事象に対して多様化設備が影響を受けない、または別表5「多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表」により確認した。 |
| 3.5.11 操作性 | 多様化設備として手動操作設備が必要になる場合は、原子炉制御室に設置すること。 | ○ | <p>誤操作防止が図られたハード操作器及び表示を、3.3 項の操作スイッチ及び表示として中央制御室に設置することを設計図書により確認した。</p> <p>○</p> |
| また、原子炉制御室に設置する場合には、誤操作防止を考慮した設計とするとともに、操作結果が確実に確認できるよう配慮した設計とすること。 | また、中央制御室に設置する場合には、誤操作防止を考慮した設計とするとともに、操作結果が確実に確認できるよう配慮した設計とする。 | ○ | <p>誤操作防止が図られたハード操作器及び表示を、3.3 項の操作スイッチ及び表示として中央制御室に設置することを設計図書により確認した。</p> <p>○</p> |
| なお、有効性評価により、原子炉制御室以外での操作で対応可能であることが確認できた場合はこの限りではない。 | ー | ー | <p>ハード操作器は中央制御室に設置済みであるため考慮しない。</p> <p>同上</p> |
| | | | <p>・【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.11 章</p> <p>・柏崎刈羽原子力発電所 6,7 号炉における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設備について 3.3 章</p> <p>・原子炉緊急停止系及び主蒸気隔離系 展開接続図</p> <p>・原子炉冷却材浄化系 展開接続図</p> <p>・原子炉隔離時冷却系 展開接続図</p> <p>・高圧炉心注水系 展開接続図</p> <p>同上</p> |

(判定記号) ○：整合有 ー：該当なし

表1 「3. 多様化設備要件」に関する要件整合性確認表(9/9)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策設備設計図書要件整合性 | | 設計図書 |
|-------------|--|--------------------------|---|---|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 判定 | 要件整合性理由 | |
| 3.5.12 監視性 | <p>多様化設備には、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳した事象の発生を認知できる警報、事象の判定及び対応操作の判断に必要な監視設備を原子炉制御室に設置すること。</p> <p>また、多様化設備が自動で作動した場合には、その作動要因が原子炉制御室に表示される設計とすること。</p> | ○ | <p>運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳した事象の発生を認知できる警報、事象の判定及び対応操作の判断に必要な 3.3 項の指示計及び警報を中央制御室に設置することを設計図書により確認した。</p> | <p>【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について 4.12 章</p> <ul style="list-style-type: none"> ・柏崎刈羽原子力発電所 6,7 号炉における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設備について 3.1 章 ・原子炉緊急停止系及び主蒸気隔離系 展開接続図 ・原子炉系計装 展開接続図 ・原子炉再循環流量制御系 展開接続図 ・原子炉冷却材浄化系 展開接続図 ・原子炉隔離時冷却系 展開接続図 ・高圧炉心注水系 展開接続図 ・高圧代替注水系 展開接続図 ・原子炉系故障表示回路 展開接続図 |
| | <p>また、多様化設備が自動で作動した場合には、その作動要因が中央制御室に表示される設計とする。</p> | ○ | 同上 | 同上 |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(1/19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | 有効性評価図書 |
|--|---|------|---|
| | 記載内容(概要) | 判定理由 | |
| 4.2 評価すべき事象 運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の全事象を対象に評価。 | 多様化設備は安全保護回路の代替機能を有する設備であるため、「運転時の異常な過渡変化」及び「設計基準事故」の全事象を対象としている。 | ○ | 4.1 評価対象の整理 (P.4-1) 添付 1 評価対象事象について (添付表 1-1, 1-2, 1-3) |
| ソフトウェア CCF が同じ影響を与える事象はグループピングすることができる。なお、グループピングを行う場合は、代表シナリオの包絡性を確認し、その妥当性を示すこと。 | ソフトウェア CCF の影響を踏まえグループピングを行い、以下の事象を解析対象としている。 ○運転時の異常な過渡変化 ・原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き ・出力運転中の制御棒の異常な引き抜き ・主蒸気隔離弁の誤閉止 ・原子炉圧力制御系の故障 ・給水流量の全喪失 | ○ | 4.1 評価対象の整理 (P.4-1) 添付 1 評価対象事象について |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(2/19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | |
|---------------------|---|----|----|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 理由 |
| | <p>○設計基準事故</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子炉冷却材喪失(原子炉冷却材の喪失又は炉心冷却状態の著しい変化)(主蒸気管破断, 給水配管破断, RHR 出口配管破断) 原子炉冷却材流量の喪失 制御棒落下(反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化) <p>上記解析対象事象のうち, 以下の事象を代表シナリオとして設定している。</p> <ul style="list-style-type: none"> 主蒸気隔離弁の誤閉止 <p>主蒸気隔離弁の誤閉止は, ソフトウェア CCF が重畳した場合において, 負荷の喪失や外部電源喪失と比較して, 再循環ポンプトリップタイミングが遅く, 原子炉圧力上昇が最も高くなるため, 圧力上昇過渡に分類される事象の代表シナリオとして選定する。</p> | | |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(3/ 19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|---------------------|---|----|----|---------|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 理由 | |
| | <p>・原子炉冷却材流量の喪失(APTA) APTA は、ソフトウェア CCF が重畳した場合において、流量急減事象に分類される事象のうち原子炉冷却材喪失以外の事象の代表シナリオとして選定する。</p> <p>・原子炉冷却材喪失(原子炉冷却材の喪失又は炉心冷却状態の著しい変化)(主蒸気管破断、給水配管破断、RHR 出口配管破断)</p> <p>主蒸気管破断、給水配管破断、RHR 出口配管破断は、ソフトウェア CCF が重畳した場合において、より破断面積が小さい原子炉冷却材喪失事象(LPFL 配管破断、HPCF 配管破断、ドレン配管破断)を包絡するため、代表シナリオとして選定する。</p> | | | |
| 以下に該当する場合は解析を省略で | | | | |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(4/19)

| ATENA 技術要件書 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|--|--|----|---|---------|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 要件整合性 理由 | |
| 要求内容 | | | | |
| さる。 | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・判断基準に対して影響の程度が軽微である事象 | 以下の事象は判断基準に対して影響の程度が軽微であるため、解析を省略している。 <ul style="list-style-type: none"> ○運転時の異常な過渡変化 ・給水加熱喪失 ・原子炉冷却材流量制御系の誤動作 ・給水制御系の故障 ○設計基準事故 ・原子炉冷却材喪失(環境への放射性物質の異常な放出)(原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化) ・主蒸気管破断(環境への放射性物質の異常な放出) ・燃料集合体の落下 ・制御棒落下(環境への放射性物質の異常な放出) ・可燃性ガスの発生 | ○ | 対象事象は判断基準に対して影響が軽微であることを示している。 4.1 評価対象の整理(P.4-1) 添付 1 評価対象事象について(添付表 1-1, 添付表 1-3) | |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(5/19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|---------------------|---|----|----|---------|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 理由 | |
| | <p>・動荷重の発生 給水加熱喪失, 原子炉冷却材流量制御系の誤動作, 給水制御系の故障は いずれも, ソフトウェア CCF が重畳した 場合において, 主蒸気隔離弁閉に至 らず, 原子炉圧力上昇は緩やかなた め, 影響の程度は軽微として解析は省 略する。 原子炉冷却材喪失(環境への放射性 物質の異常な放出)(原子炉格納容器 内圧力, 雰囲気等の異常な変化)は, ソフトウェア CCF が重畳した場合にお いても, 事象進展, 緩和操作に対する 影響の程度は軽微として解析を省略 する。 主蒸気管破断(環境への放射性物質 の異常な放出)は, ソフトウェア CCF が 重畳した場合においても, 現実的な評</p> | | | |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(6/19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|---------------------|---|----|----|---------|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 理由 | |
| | <p>価条件を考慮することで判断基準を満足すると判断できることから、影響の程度は軽微として解析は省略する。</p> <p>燃料集合体の落下は、ソフトウェア CCF が重畳した場合においても、現実的な評価条件を考慮することで判断基準を満足すると判断できることから、影響の程度は軽微として解析は省略する。</p> <p>制御棒落下(環境への放射性物質の異常な放出)は、ソフトウェア CCF が重畳した場合においても、現実的な評価条件を考慮することで判断基準を満足すると判断できることから、影響の程度は軽微として解析は省略する。</p> <p>可燃性ガスの発生は、ソフトウェア CCF が重畳した場合においても、現実的な評価条件を考慮することで判断基準</p> | | | |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(7/19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|--|---|----|-----------------------------------|--|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 理由 | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・グループピングしたグループ内の代表事象に包絡される事象 | <p>準を満足すると判断できることから、影響の程度は軽微として解析は省略する。</p> <p>動荷重の発生は、ソフトウェア CCF が重畳した場合においても、事象進展、緩和操作に対する影響の程度は軽微として解析は省略する。</p> <p>以下の事象は代表事象に包絡されるため、解析を省略する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・外部電源喪失及び負荷の喪失 外部電源喪失及び負荷の喪失は、代表事象と比較して、再循環ポンプトリップタイミングが早く、原子炉圧力上昇が低い傾向になるため、代表事象である主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。 ・原子炉冷却材喪失(LPFL 配管破断, HPCF 配管破断, ドレン配管破断) | ○ | <p>対象事象が代表事象に包絡されていることを示している。</p> | <p>4.1 評価対象の整理 (P.4-1) 添付 1 評価対象事象について(添付表 1-1, 添付表 1-2)</p> |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(8/19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|---|--|----|-------------------------------------|--|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 理由 | |
| <ul style="list-style-type: none"> デジタル安全保護回路の動作を期待しない事象 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 記載内容(概要) 断) より破断面積が大きい原子炉冷却材喪失(主蒸気管破断, 給水配管破断, RHR 出口配管破断)に包絡される。 以下の事象はデジタル安全保護回路の動作を期待しないため, 解析を省略する。 ・原子炉冷却材流量の部分喪失 ・放射性気体廃棄物処理施設の破損 | ○ | 対象事象がデジタル安全保護回路の動作に期待していないことを示している。 | 4.1 評価対象の整理 (P.4-1) 添付 1 評価対象事象について(添付表 1-1, 添付表 1-3) |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(9/ 19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | 有効性評価図書 |
|---|--|------|--|
| | 記載内容(概要) | 判定理由 | |
| 4.3 判断基準 全事象に対して判断基準は設計基準事故において使用される判断基準を準用し、その判断基準を概ね満足することの確認を行う。 | 判断基準として「設置許可基準規則」第十三条第一項第二号を準用し、解析によりその判断基準を概ね満足することを確認している。 | ○ | 4.2 判断基準 (P.4-1, 4-2) 5. 運転時の異常な過渡変化 + ソフトウェア CCF の解析(各表, 各図) 6. 設計基準事故 + ソフトウェア CCF の解析(各表, 各図) 7. まとめ(P.7-1) |
| 設備の健全性が別途確認されている原子炉格納容器の限界圧力, 温度等の条件, 及び炉心の著しい損傷防止が達成できることを適切に確認できる他の判断基準を用いてもよい。 | ー | ー | 他の判断基準は使用していない。 |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(10/ 19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | 有効性評価図書 |
|--|--|---------------------------|---|
| | 記載内容(概要) | 要件整合性 判定理由 | |
| 4.4 解析に当たって考慮すべき事項 | | | |
| 最適評価コードにより、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故に対する評価を行うこと。 | 最適評価コードである TRAC 系コードを使用し評価を実施している。 | 最適評価コードによる評価を実施している。 ○ | 4.3 解析に当たって考慮する事項 (P.4-2) 4.4 解析に使用する計算プログラム (P.4-4～4-6) |
| 保守的評価によって解析した結果が余裕をもって判断基準を満足する場合には、保守的評価を採用してもよい。 | ー | ー | 従来より使用している保守的な評価コード(許認可解析コード)による評価は実施していない。 |
| 4.4.1 解析にあたって考慮する範囲 | | | |
| 有効性評価においては、事象発生前の状態として、通常運転範囲及び運転期間の全域を対象とすること。 | サイクル期間中の炉心燃焼変化、燃料交換等による長期的な変動及び運転中に予想される運転状態を考慮し、全ての運転範囲及び運転期間を対象に解析条件を設定した。 | ○ | 4.3.1 解析にあたって考慮する範囲 (P.4-2) 4.5 解析条件 (表 4-3～表 4-8) |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(11/19)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | |
|--|---|----------------------------|--|--|
| | | 記載内容(概要) | 要件整合性 | |
| 要求内容 | 判定 | | 理由 | |
| <p>解析は、想定した事象が、判断基準を概ね満足しながら、過渡状態が収束し、その後原子炉は支障なく安定状態へ移行できることが合理的に推定できる時点までを包含すること。</p> | <p>各事象の解析範囲は、事象発生から多様化設備の作動によって事象進展が収束しプラント状態が安定するまでを基本とし、安定状態へ支障なく移行できると合理的に推定できる時点までの解析結果(グラフ)を示している。</p> | ○ | <p>事象発生から、主要パラメータが判断基準を満足しながら、安定状態へ支障なく移行出来ると合理的に推定できる時点まで解析を実施している。</p> | <p>4.3.1 解析にあたって考慮する範囲(P.4-2)</p> <p>5. 運転時の異常な過渡変化+ソフトウェア CCF の解析(各表, 各図)</p> <p>6. 設計基準事故+ソフトウェア CCF の解析(各表, 各図)</p> |
| 4.4.2 解析で想定する現実的な条件等 | | | | |
| <p>最適評価で想定する現実的な条件の例を以下に示す。</p> <p>・事象発生前のプラント初期条件は、設計値等に基づく現実的な値を用いること。その場合には、安全設計の妥当性確認に用いる安全解析における解析条件との差異及び根拠を明確にすること。</p> | <p>解析条件として、解析のプラント初期条件と設定根拠及び安全設計の妥当性確認に用いる安全解析との差異を示している。</p> | ○ | <p>プラント初期条件及び設定根拠が示されている。</p> | <p>4.3.2 解析で想定する現実的な条件等(P.4-2)</p> <p>4.5 解析条件(表 4-3, 表 4-5～表 4-8)</p> |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(12/ 19)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | |
|---|---|----------------------------|---|---------|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | | 有効性評価図書 |
| | | 判定 | 理由 | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・事象発生によって生じる外乱の程度、炉心状態(出力分布、反応度係数等)、機器の容量等は、設計値等に基づく現実的な値を用いること。その場合には、安全設計の妥当性確認に用いる安全解析における解析条件との差異及び根拠を明確にすること。 ・作動設定点等については計装上の誤差は考慮しなくともよい。 ・誤操作が起回事象となる評価では、運転手順に基づく現実的な操作条件を用いること。 | <p>事象発生による外乱の程度、炉心状態、機器の容量などの解析条件と設定根拠及び安全設計の妥当性確認に用いる安全解析との差異を示している。</p> <p style="text-align: center;">○</p> | | <p>解析条件及び根拠が示されている。</p> <p>4.3.2 解析で想定する現実的な条件等(P.4-2)</p> <p>4.5 解析条件 (表 4-4～表 4-8)</p> | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・作動設定点等については計装上の誤差は考慮しなくともよい。 ・誤操作が起回事象となる評価では、運転手順に基づく現実的な操作条件を用いること。 | <p>自動作動を期待する設備の作動設定点として設計値を設定し、解析条件として示している。</p> <p style="text-align: center;">○</p> | | <p>自動作動を期待する設備の動作条件として、計装上の誤差を考慮しない、設計値を設定している。</p> <p>4.3.2 解析で想定する現実的な条件等(P.4-2)</p> <p>4.5 解析条件 (表 4-4～表 4-8)</p> | |
| <ul style="list-style-type: none"> ・誤操作が起回事象となる評価では、運転手順に基づく現実的な操作条件を用いること。 | <p>原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜きにおいては、保安規定に基づき作成された制御棒引抜操作手順を考慮し、現実的な操作条件を想定した投入反応度として示している。</p> <p style="text-align: center;">○</p> | | <p>運転操作手順に基づく現実的な投入反応度を考慮している。</p> <p>4.3.2 解析で想定する現実的な条件等(P.4-3)</p> <p>4.5 解析条件 (表 4-6)</p> <p>5.1.1 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き(P.5-1)</p> | |

(判定記号)○:整合有 -:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(13/19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|--|---|----|---------------------------------|---|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 要件整合性 理由 | |
| 4.4.3 安全系機能に対する仮定 ソフトウェア CCF 発生時のデジタル安全保護回路, 原子炉停止系統及び工学的安全施設を含む安全設備の作動状態については, 以下を仮定すること。 ・ソフトウェア CCF によりデジタル安全保護回路の機能が喪失し, 原子炉停止系統及び工学的安全施設が自動作動しない。 | 各事象においてデジタル安全保護回路の機能が喪失し原子炉停止系統及び工学的安全施設が動作しないことを解析条件として設定している。 | ○ | ソフトウェア CCF による機能喪失を解析条件に反映している。 | 4.3.3 安全系機能に対する仮定(P.4-3) 4.5 解析条件 (表 4-4~表 4-6, 表 4-8) 5. 運転時の異常な過渡変化+ソフトウェア CCF の解析(各クロノロジー表) 6. 設計基準事故+ソフトウェア CCF の解析(各クロノロジー表) |

(判定記号)○:整合有 -:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(14/ 19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|---|---|----|--|---|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 要件整合性 理由 | |
| <p>・デジタル安全保護回路を経由しない、自動起動信号又は運転員が事象の発生を認知した場合の自動起動信号により、原子炉停止系統及び工学的安全施設は作動可能とする。</p> | <p>各事象においてデジタル安全保護回路の機能が喪失し、動作しない原子炉停止系統及び工学的安全施設について、デジタル安全保護回路を経由しない、自動起動信号(代替制御棒挿入、代替再循環ポンプトリップ)及びソフトウェア CCF による機能喪失の対応操作として自動起動(高圧炉心注水系)を解析条件として反映している。</p> | ○ | <p>デジタル安全保護回路を経由しない、自動起動信号(代替制御棒挿入、代替再循環ポンプトリップ)及びソフトウェア CCF による機能喪失の対応操作として自動起動(高圧炉心注水系)を解析条件として反映している。</p> | <p>4.3.3 安全系機能に対する仮定(P.4-3) 4.5 解析条件 (表 4-4～表 4-5、表 4-7) 5. 運転時の異常な過渡変化+ソフトウェア CCF の解析(各クロノロジー表) 6. 設計基準事故+ソフトウェア CCF の解析(各クロノロジー表)</p> |
| <p>・自動起動信号又は運転員の手动操作による、最も確からしいプラント応答を評価するため、安全機能を有する機器の単一故障は想定しない。</p> | <p>各事象において、起因事象による影響を受けない、安全機能を有する機器の単一故障は想定していない。</p> | ○ | <p>起因事象の影響を受けない安全機能を有する機器の単一故障を解析条件としていない。</p> | <p>4.3.3 安全系機能に対する仮定(P.4-3) 4.5 解析条件 (表 4-5)</p> |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(15/19)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | |
|---|--|----------------------------|--|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | |
| | | 判定 | 理由 |
| <p>安全機能のサポート系(電源系, 冷却系, 空調系等)は, 起因事象との従属性がなく, かつソフトウェア CCF の影響を受けない場合は, 起因事象が発生する前の作動状態を維持する。</p> | <p>各事象において, 起因事象との従属性がなく, かつソフトウェア CCF の影響を受けない安全機能のサポート系(電源系, 冷却系, 空調系等)は, 起因事象が発生する前の作動状態を維持することを想定している。</p> | ○ | <p>必要な安全機能に対するサポート系について, 起因事象及びソフトウェア CCF の影響を受けないことを確認している。</p> |
| <p>4.4.4 常用系機能に対する仮定 常用系設備の機能については, 以下を仮定すること。 ・起因事象として外部電源の喪失を仮定する事象以外は, 外部電源は利用可能とする。 ・事象発生前から機能しており, かつ事象発生後も機能し続ける設備は, 故障の仮定から除外する。</p> | <p>起因事象が外部電源喪失以外の事象では外部電源喪失は仮定していない。 事象発生前から機能している常用系設備の機能喪失は仮定していない。</p> | ○ | <p>起因事象が外部電源喪失以外の事象では, 解析条件において, 外部電源喪失を仮定していない。 解析条件において, 起因事象に関係しない常用系設備の機能喪失は仮定していない。</p> |
| | | | <p>4.3.3 安全系機能に対する仮定(P.4-3) 添付 4 多様化設備が作動させる設備に対するサポート系の機能確保</p> |
| | | | <p>4.3.4 常用系機能に対する仮定(P.4-3) 4.5 解析条件(表 4-5) 4.3.4 常用系機能に対する仮定(P.4-3) 4.5 解析条件(表 4-4~表 4-5) 6.3 環境への放射性物質の異常な放出</p> |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(16/ 19)

| ATENA 技術要件書 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | |
|--|--|---|---|
| | 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 判定理由 |
| | | | (P.6-15~P.6-16) |
| <ul style="list-style-type: none"> • 常用系機能の喪失が起因となる事象が前提である場合は、当該事象を評価する際にはその機能を期待しない。 | <p>常用系機能の喪失が前提となる事象では、当該常用系の機能には期待していない。</p> | <p>常用系機能の喪失が前提となる事象では、事象発生以降、その機能には期待していない。</p> | <p>4.3.4 常用系機能に対する仮定(P.4-3)</p> |
| 4.4.5 多様化設備に関連する条件 | | | |
| 多様化設備に関連する条件を以下に示す。 | | | |
| (1) 機器条件 | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • 多様化設備がもつ緩和機能の有効性を確認する観点から、多重性を要求しない多様化設備の単一故障は想定しない。 | <p>多様化設備の単一故障は想定していない。</p> | <p>多重性が要求されない多様化設備の単一故障を想定していない。</p> | <p>4.3.5 多様化設備に関連する条件(P.4-3)</p> <p>4.5 解析条件(表 4-5)</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • 多様化設備がもつ緩和機能の有効性を確認する観点から、多様化設備が代替作動させる原子炉停止系統、工学的安全施設等の故障及び誤動作が起因となる事象は想定しない。 | <p>多様化設備が代替作動させる原子炉停止系統、工学的安全施設等は、そのサポート系が使用できない場合を除き、代替作動させる設備の故障及び誤動作は想定していない。</p> | <p>多様化設備が代替作動させる設備の故障及び誤動作が起因となる事象は想定していない。</p> | <p>4.3.5 多様化設備に関連する条件(P.4-3)</p> |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(17/ 19)

| ATENA 技術要件書 | | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | |
|--|--|----------------------------|---|---|
| 要求内容 | 記載内容(概要) | 要件整合性 | | 有効性評価図書 |
| | | 判定 | 理由 | |
| <p>・多様化設備が作動させる原子炉停止系統, 工学的安全施設等は, そのサポート系(電源系, 冷却系, 空調系等)が利用可能であることを確認し, 使用できない場合原子炉停止系統, 工学的安全施設等は利用できないものとする。</p> | <p>多様化設備が作動させる原子炉停止系統及び工学的安全施設等は, 起因事象及びソフトウェア CCF が発生した状態において, そのサポート系が使用可能であることを確認し, その利用を前提として期待していることを記載している。</p> | ○ | <p>サポート系が起因事象及びソフトウェア CCF の影響を受けず利用可能であるかを確認している。</p> | <p>4.3.5 多様化設備に関連する条件(P.4-3) 添付 4 多様化設備が作動させる設備に対するサポート系の機能確保</p> |
| <p>(2) 操作条件</p> <p>・運転員による手動操作をソフトウェア CCF 対策として期待することができるとは, 有効性評価において運転員による手動操作を期待する場合には, 原子炉制御室において運転員による事象の認知が可能であり, それに基づく操作手順書が整備され, 運転操作訓練が適切に行われることによつて, 手動操作が適切に実施されることが前提となる。</p> | <p>事象に及び, 運転員による手動操作を期待しているが, 多様化設備の警報等により事象の認知が可能であり, 予め定める手順書に基づき手動操作を行うことを記載している。また, 上記手動操作については, ハード対策完了までに整備される運転員操作手順書及び教育訓練計画に適切に反映することを記載している。</p> | ○ | <p>解析上期待している運転員の手動操作の成立性は, 有効性評価の知見が反映された運転員操作手順書及び教育訓練計画により裏付けられることを示している。</p> | <p>4.3.5 多様化設備に関連する条件(P.4-4) 添付 5 有効性評価で決定する運転員対応操作について</p> |

(判定記号)○:整合有 ー:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(18/ 19)

| ATENA 技術要件書 要求内容 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|--|--|----|--|---|
| | 記載内容(概要) | 判定 | 要件整合性 理由 | |
| <p>・原子炉制御室での運転操作開始時間を現実的な想定としてもよい。その場合においては、運転員による事象の認知から運転操作開始までの時間を適切に考慮し、その根拠を明確にすること。</p> | <p>事象に応じ、中央制御室での運転員による手動操作を期待しており、運転員による事象の認知から運転操作開始までの各所要時間を適切に設定している。</p> | ○ | <p>事象認知から移動や操作にかかる各操作の所要時間を計測し、根拠を明確にし、たうえで成立性を確認している。</p> | <p>4.3.5 多様化設備に関連する条件(P.4-4) 添付 5 有効性評価で仮定する運転員対応操作について</p> |
| <p>・原子炉制御室外における運転員による現場操作を考慮してもよい。その場合においては、原子炉制御室における運転員による事象の認知から現場操作場所までの移動時間、及び現場操作場所に到着してから操作開始までの時間は適切に考慮し、その根拠を明確にすること。</p> | ー | ー | <p>中央制御室以外での現場操作を想定していない。</p> | ー |

(判定記号)○:整合有 -:該当なし

表 2 「4. 有効性評価」に関する要件整合性確認表(19/19)

| ATENA 技術要件書 | ソフトウェア CCF 対策有効性評価図書の要件整合性 | | | 有効性評価図書 |
|--|--|-------|---|---|
| | 記載内容(概要) | 要件整合性 | 理由 | |
| 要求内容 | 判定 | | | |
| 4.4.6 解析に使用する計算プログラム及びモデル | | | | |
| 有効性評価を行う場合は、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の解析で用いる計算プログラム及びモデル、又は最適評価コード及び現実的な計算モデルを使用すること。 | 最適評価コード及び現実的な計算モデルを使用している。また、有効性評価に用いた計算プログラム及びモデルについて詳述した他の資料を引用する形で記載している。 | ○ | 最適評価コード及び現実的な計算モデルを使用しており、詳細は引用した他の資料から確認できる。 | 4.3 解析に当たって考慮する事項(P.4-2) 4.4 解析に使用する計算プログラム(P.4-4~4-6) 8. 参考文献(P.8-1) |
| 使用する計算プログラム及びモデルは、適用範囲について、妥当性確認及び検証が行われたものであること。なお、許認可での使用実績により、計算プログラム及びモデルの確認が行われている場合には、妥当性確認及び検証は不要である。 | 有効性評価に用いた計算プログラム及びモデルについて、妥当性確認及び検証を行っている。各コード、解析モデルの妥当性を詳述した他の資料を引用する形で示している。 | ○ | 解析で用いた計算プログラム、モデルの妥当性確認及び検証を行っており、詳細は引用した他の資料から確認できる。 | 4.4 解析に使用する計算プログラム(P.4-4) 8. 参考文献(P.8-1) |

別表1 多様化設備が有する自動作動機能一覧表

| 工学的安全施設等の起動信号の種類 | 検出器 | | 及び | | 作動条件 | | 備考 |
|------------------|-------------|----|------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------|
| | 検出器の種類 | 個数 | 取付箇所 | 原子炉に非常停止に要する信号の個数 | 設定値 | 工学的安全施設等の起動信号を発生させない条件 | |
| 代替制御棒挿入 | 原子炉圧力高 | 3 | 系統名 | — | 7.48MPa以下 | — | 各検出器は重大事故等対処設備と共用 |
| | | | 設置床 | 原子炉建屋 T.M.S.L. 4800mm | | | |
| | 原子炉水位低(L-2) | 4 | 系統名 | — | 1165cm (原子炉圧力容器 零レベル*3より) 以上 | — | |
| | | | 設置床 | 原子炉建屋 T.M.S.L. 4800mm | | | |

別表1 多様化設備が有する自動作動機能一覧表

| 工学的安全施設等の起動信号の種類 | 検出器 | | 及び | | 動作条件 | | 工学的安全施設等の起動信号を発生させない条件 | 備考 |
|------------------|-----------------|----|----------------|-------------------------|------|---|------------------------|-----------------------------|
| | 検出器の種類 | 個数 | 取付箇所 | 原子炉に非常停止に要する信号の個数 | 設定値 | | | |
| 代替冷却材再循環ポンプ・トリップ | 原子炉圧力高 | 3 | 原子炉圧力*1 検出器 | — | 2 | 7.48MPa 以下 | — | |
| | | | 設置床 | 原子炉建屋 T.M.S.L 4800mm | | | | |
| (1)*4 | 原子炉水位低 (L-3) | 3 | 原子炉水位 検出器 | — | 2 | 1285cm (原子炉圧力容 器 零レベル*3より) 以上 | — | 各検出器は設計基準対象施設, 重大事故等対処設備と共用 |
| | | | 設置床 | 原子炉建屋 T.M.S.L 4800mm | | | | |
| (2)*5 | 原子炉水位低 (L-2) | 4 | 原子炉水位*2 検出器 | — | 2 | 1165cm (原子炉圧力容 器 零レベル*3より) 以上 | — | |
| | | | 設置床 | 原子炉建屋 T.M.S.L 4800mm | | | | |

*1: 同一検出器

*2: 同一検出器

*3: 原子炉圧力容器零レベルは, 蒸気乾燥器スカート下端より 1224cm 下。

*4: 本信号により, 原子炉冷却材再循環ポンプ 4 台を自動停止させる。

*5: 本信号により, 原子炉冷却材再循環ポンプ 6 台を自動停止させる。

別表2 多様化設備が有する手動操作機能一覧表

| 操 の 種 | 作 器 類 | 個 数 | 取 付 箇 所 (設 置 床) | 備 考 |
|------------------------------|-------------|--------|---|---|
| 手動スクラム | | 2 | コントロール建屋 T.M.S.L 17300mm (中央制御室) | 各操作器は設計基準対象施設, 重大事故等対処設備と共用 |
| MSIV MCCB | | 8 | | |
| CUW 吸込ライン内側隔離弁 操作スイッチ | | 1 | | 各操作器は設計基準対象施設, 重大事故等対処設備とは異なる 設備として格納容器補助盤に設 置 |
| RCIC 蒸気ライン内側隔離弁 操作スイッチ | | 1 | | |
| HPCF ポンプ(C) 操作スイッチ | | 1 | | |
| HPCF S/P 側吸込隔離弁(C) 操作スイッチ | | 1 | | |
| HPCF 注入隔離弁(C) 操作スイッチ | | 1 | | |
| HPCF 最小流量バイパス弁(C) 操作スイッチ | | 1 | | |

別表3 多様化設備が有する警報機能一覧表

| 警 報 の 種 類 | 個数 | 取 付 箇 所 (設 置 床) | 備 考 |
|------------------|----|--|--|
| L-2 (ハード) | 1 | コントロール建屋 T.M.S.L 17300mm (中央制御室) | 設計基準対象施設，重大事故等対処設備とは異なる設備として，運転監視補助盤に設置する。 |
| 原子炉圧力高高 (ハード) | 1 | | |
| ARI 作動 (ハード) | 1 | | |

別表4 多様化設備が有する指示機能一覧表

| 名 | 称 | 検出器の種類 | 計測範囲 | 個数 | 取付箇所 | 備考 |
|-----------------|--------------|--------|-----------------------------|----|------|---|
| | | | | | | |
| 原子炉水位 | 差圧式水位 検出器 | 1 | -3200～+3500mm ^{*1} | 系 | 統 | 各検出器～指示計 は設計基準対象施 設, 重大事故等対 処設備と共用 |
| | | | | 設 | 置 | |
| 原子炉圧力 | 弾性圧力 検出器 | 1 | -8000～+3500mm ^{*1} | 系 | 統 | 検出器は設計基準 対象施設, 重大事 故等対処設備と共 用 |
| | | | | 設 | 置 | |
| D/W 圧力 | 弾性圧力 検出器 | 1 | 0～11MPa | 系 | 統 | 検出器は設計基準 対象施設, 重大事 故等対処設備と共 用 |
| | | | | 設 | 置 | |
| 復水貯蔵槽 水位 | 差圧式水位 検出器 | 1 | 0～+17m ^{*2} | 系 | 統 | 検出器～指示計は 設計基準対象施 設, 重大事故等対 処設備と共用 |
| | | | | 設 | 置 | |
| 高压炉心注水系 系統流量 | 差圧式流量 検出器 | 1 | 0～1000m ³ /h | 系 | 統 | 検出器は設計基準 対象施設, 重大事 故等対処設備と共 用 |
| | | | | 設 | 置 | |

*1: 基準点は蒸気乾燥器スカート下端“(原子炉圧力容器零レベルより 1224cm

*2: 基準点は復水貯蔵槽底部。

別表4 多様化設備が有する指示機能一覧表

| 名 称 | 検 出 器 類 | 計 測 範 囲 | 個 数 | 取 付 箇 所 | 考 考 |
|--------------------------------|----------|---------|-----|----------------|--|
| | | | | | |
| MSIV の状態 | リミットスイッチ | 開閉状態 | 8 | 系 統 名 設 置 床 | |
| CUW 吸込ライン 内側隔離弁の状態 | リミットスイッチ | 開閉状態 | 1 | 系 統 名 設 置 床 | |
| RCIC 蒸気ライン 内側隔離弁の状態 | リミットスイッチ | 開閉状態 | 1 | 系 統 名 設 置 床 | |
| HPCF ポンプ(C) の状態 | リミットスイッチ | 動作状態 | 1 | 系 統 名 設 置 床 | 検出器は設計基準 対象施設, 重大事 故等対処設備と共 用 |
| HPCF S/P 側吸 込隔離弁(C) の 状態 | リミットスイッチ | 開閉状態 | 1 | 系 統 名 設 置 床 | |
| HPCF 注入隔離 弁(C) の状態 | リミットスイッチ | 開閉状態 | 1 | 系 統 名 設 置 床 | |
| HPCF 最小流量 バイパス弁(C)の 状態 | リミットスイッチ | 開閉状態 | 1 | 系 統 名 設 置 床 | |

別表5 多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表

(判定記号) ○：影響なし ー：該当なし

| 設置(変更)許可において想定される自然事象等 | (参考)設置許可での想定/対策の概要 | 各事象に対する多様化設備への影響評価 | | |
|------------------------|--|--------------------|---|---|
| | | 結果 | 理由 | |
| 5 条(津波による損傷の防止) | 津波 浸水防止設備としては、タービン建屋海水熱交換器区域地 下の補機取水槽上部床面に取水槽閉止板を設置し、タービ ン建屋内の区画境界部及び他の建屋との境界部に水密扉、 止水ハッチ、浸水防止ダクト(7号炉)及び床ドレンライン浸水 防止治具の設置並びに貫通部止水処置を実施する。 | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に 設置している。 | |
| | | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に 設置している。 | |
| 6 条(外部からの衝撃による損傷の防止) | 森林火災 | ○ | 過去の気象条件を踏まえて、約 20m の防火帯幅を確保する こと等により安全施設が安全機能を損なうことのない設計とす る。 | |
| | 想定され る自然現 象(地震 除く) | 風(台風) | ○ | 設計基準風速(40.1m/s, 地上高 10m, 10 分間平均)の風荷 重に対し機械的強度を有することにより安全機能を損なわな い設計とする。 |
| | | 竜巻 | ○ | 設計竜巻の最大風速 92m/s の竜巻が発生した場合におい ても、竜巻及びその随伴事象によって安全機能を損なわない 設計とする。 |
| | | 低温(凍結) | ○ | 屋内設備について換気空調系により環境温度を維持し、屋 外設備については保温等の凍結防止対策を必要に応じて行 うことにより、安全機能を損なわない設計とする。 |

別表5 多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表

(判定記号) ○：影響なし ー：該当なし

| 設置(変更)許可において想定される自然事象等 | (参考)設置許可での想定/対策の概要 | 各事象に対する多様化設備への影響評価 | |
|------------------------|--------------------|--------------------|--|
| | | 結果 | 理由 |
| 6条(外部からの衝撃による損傷の防止) | 降水 | ○ | 設計基準降水量(101.3mm/h)の降水に対し、排水口による海域への排水等により安全機能を損なわない設計とする。 |
| | 積雪 | ○ | 設計基準積雪量(167cm)の積雪荷重に対し機械的強度を有すること、また、非常用換気空調系の給・排気口は、設計基準積雪量より高所に設置することにより安全機能を損なわない設計とする。 |
| | 想定される自然現象(地震を除く) | ○ | 原子炉建屋等への避雷針の設置、接地網の敷設による接地抵抗の低減等を行うとともに、安全保護系への雷サージ侵入の抑制を図る回路設計を行うことにより安全機能を損なわない設計とする。 |
| | 地滑り | ○ | 斜面からの離隔距離を確保し地滑りのおそれがない位置に設置することにより安全機能を損なわない設計とする。 |
| | 火山 | ○ | 設定した降下火砕物の設計基準堆積量等に対し、以下の影響について、安全機能を損なわない設計とする。 ・直接的影響(降下火砕物の堆積荷重、化学的影響(腐食)、降下火砕物による閉塞等) ・間接的影響(長期間の外部電源の喪失等) |

別表5 多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表

(判定記号) ○：影響なし ー：該当なし

| 設置(変更)許可において想定される自然事象等 | (参考)設置許可での想定/対策の概要 | | 各事象に対する多様化設備への影響評価 | |
|------------------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------------------------|
| | 想定される自然現象(地震除く) | 生物学的影響(クラゲ等) | 結果 | 理由 |
| 6条(外部からの衝撃による損傷の防止) | | | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |
| 6条(外部からの衝撃による損傷の防止) | 人為事象 | 爆発 | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |

別表5 多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表

(判定記号) ○：影響なし ー：該当なし

| 設置(変更)許可において想定される自然事象等 | (参考)設置許可での想定/対策の概要 | 各事象に対する多様化設備への影響評価 | | |
|------------------------|--------------------------------|--|----|-------------------------------|
| | | 結果 | 理由 | |
| 6条(外部からの衝撃による損傷の防止) | <p>近隣工場等の火災・爆発</p> <p>人為事象</p> | <p>(爆発)で示したとおり、発電所近隣の工場で爆発により影響があると考えられるものはないことから、敷地周辺の道路を運行中の燃料輸送車両の火災・爆発、発電所港湾内へ侵入してきた漂流船舶の火災・爆発、敷地内危険物タンクの火災による影響を評価した。</p> <p>燃料輸送車両及び漂流船舶ともに、火災で原子炉建屋外壁面が許容温度(200℃)以下となる危険距離、爆発で人体に影響がないとされる爆風圧(0.01MPa)以下となる危険限界距離のいずれに対しても、十分な離隔距離があることを確認した。</p> | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |
| | 航空機墜落による火災 | <p>航空機が発電用原子炉施設周辺で落下確率が10^{-7}回/年・年以上になる地点へ落下することを想定し、発電用原子炉施設に対する火災の影響を評価した結果、6号炉及び7号炉の外壁面温度が許容温度(200℃)を下回ることを確認した。</p> | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |

別表5 多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表

(判定記号) ○：影響なし ー：該当なし

| 設置(変更)許可において想定される自然事象等 | (参考)設置許可での想定/対策の概要 | | 各事象に対する多様化設備への影響評価 | |
|------------------------|--------------------|------|--------------------|-------------------------------|
| | 人為事象 | 有毒ガス | 結果 | 理由 |
| 6条(外部からの衝撃による損傷の防止) | 人為事象 | 有毒ガス | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |

別表5 多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表

(判定記号) ○：影響なし ー：該当なし

| 設置(変更)許可において想定される自然事象等 | (参考)設置許可での想定/対策の概要 | 各事象に対する多様化設備への影響評価 | |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
| | | 結果 | 理由 |
| 6条(外部からの衝撃による損傷の防止) | 船舶の衝突 | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |
| | 人為事象 | ○ | 多様化設備では当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |

別表5 多様化設備の自然現象、外部人為事象等に対する影響評価整理表

(判定記号) ○：影響なし ー：該当なし

| 設置(変更)許可において想定される自然事象等 | (参考)設置許可での想定/対策の概要 | 各事象に対する多様化設備への影響評価 | |
|------------------------|---|--------------------|-------------------------------|
| | | 結果 | 理由 |
| 12条(安全)施設 | タービンサイルが貫通しない障壁を設ける設計とする。 <ul style="list-style-type: none"> ・ポンプ、モータ、タービン(RCIC系、給水系)などの異常によりサイルが発生する確率が10^{-7}/年以下であること。 ・上記が不可能な場合には、安全上重要な系統、機器へのミサイル落下確率(破損に至らしめる確率)が10^{-7}/年以下であること。 ・上記が不可能な場合には、離隔壁を追加すること。 | ○ | 多様化設備は当該事象の影響を受けない建屋内に設置している。 |

II. 添 付 書 類

目 次

(1) 添付資料

添付1 「3. 多様化設備要件」における設計図書

添付1-1 柏崎刈羽原子力発電所 6,7 号炉における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設備について

添付1-2 【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について

添付1-3 【技術検討書】デジタル安全保護回路のソフトウェアに起因する共通要因故障への対応方針について

添付1-4 KK-7M ソフトウェアCCF対策 電気工事計画書

添付1-5 インターロックブロック線図

添付1-5-1 原子炉緊急停止系 インターロックブロック線図

添付1-5-2 苛酷事故対策設備 インターロックブロック線図

添付1-5-3 後備原子炉停止系 インターロックブロック線図

添付1-5-4 ソフトウェアCCF対策設備警報 インターロックブロック線図

添付1-6 展開接続図

添付1-6-1 原子炉緊急停止系及び主蒸気隔離系 展開接続図

添付1-6-2 原子炉系計装 展開接続図

添付1-6-3 原子炉再循環流量制御系 展開接続図

添付1-6-4 原子炉冷却材浄化系 展開接続図

添付1-6-5 原子炉隔離時冷却系 展開接続図

添付1-6-6 高圧炉心注水系 展開接続図

添付1-6-7 高圧代替注水系 展開接続図

添付1-6-8 原子炉系 故障表示回路 展開接続図

添付1-7 耐震計算書

添付1-7-1 格納容器補助盤の耐震性についての計算書

添付1-7-2 ATWS 緩和設備制御盤の耐震性についての計算書

添付1-7-3 高圧代替注水系制御盤の耐震性についての計算書

添付1-7-4 中央運転監視盤の耐震性についての計算書

添付1-7-5 運転監視補助盤の耐震性についての計算書

添付2 「4. 有効性評価」における有効性評価図書

(1) 添付資料

添付1 「3. 多様化設備要件」における設計図書

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-1 柏崎刈羽原子力発電所 6,7 号炉における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設備について

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-2 【技術メモ】KK7 多様化設備の範囲及び要求事項について

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-3 【技術検討書】デジタル安全保護回路のソフトウェアに起因する共通要因故障
への対応方針について

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-4 KK-7M ソフトウェアCCF対策 電気工事計画書

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-5 インターロックブロック線図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-5-1 原子炉緊急停止系 インターロックブロック線図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-5-2 苛酷事故対策設備 インターロックブロック線図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-5-3 後備原子炉停止系 インターロックブロック線図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-5-4 ソフトウェアCCF対策設備警報 インターロックブロック線図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-1 原子炉緊急停止系及び主蒸気隔離系 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-2 原子炉系計装 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-3 原子炉再循環流量制御系 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-4 原子炉冷却材浄化系 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-5 原子炉隔離時冷却系 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-6 高圧炉心注水系 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-7 高压代替注水系 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-6-8 原子炉系 故障表示回路 展開接続図

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-7 耐震計算書

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-7-1 格納容器補助盤の耐震性についての計算書

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-7-2 ATWS 緩和設備制御盤の耐震性についての計算書

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-7-3 高圧代替注水系制御盤の耐震性についての計算書

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-7-4 中央運転監視盤の耐震性についての計算書

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付1-7-5 運転監視補助盤の耐震性についての計算

本資料は、機密に係る情報のため公開できません

添付2 「4. 有効性評価」における有効性評価図書

沸騰水型原子力発電所

デジタル安全保護回路の ソフトウェア共通要因故障影響緩和対策の 有効性評価書

2022 年 10 月

東芝エネルギーシステムズ 株式会社
日立 GE ニュークリア・エナジー 株式会社

目次

1. はじめに
2. ソフトウェア CCF とその対策について
 - 2.1 ソフトウェア CCF について
 - 2.1.1 ソフトウェア CCF 想定範囲
 - 2.1.2 ソフトウェア CCF 発生時の安全保護回路故障モード想定
 - 2.2 ソフトウェア CCF 対策について
 - 2.2.1 設置要求
 - 2.2.2 機能要求
 - 2.2.3 多様化設備の範囲
3. 有効性評価の目的
4. 評価方針
 - 4.1 評価対象の整理
 - 4.2 判断基準
 - 4.3 解析に当たって考慮する事項
 - 4.4 解析に使用する計算プログラム
 - 4.5 解析条件
5. 運転時の異常な過渡変化+ソフトウェア CCF の解析
 - 5.1 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化
 - 5.1.1 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き
 - 5.1.2 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き
 - 5.2 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化
 - 5.2.1 原子炉冷却材流量の部分喪失
 - 5.2.2 外部電源喪失
 - 5.2.3 給水加熱喪失
 - 5.2.4 原子炉冷却材流量制御系の誤動作
 - 5.3 原子炉冷却材圧力又は原子炉冷却材保有量の異常な変化
 - 5.3.1 負荷の喪失
 - 5.3.2 主蒸気隔離弁の誤閉止
 - 5.3.3 給水制御系の故障
 - 5.3.4 原子炉圧力制御系の故障
 - 5.3.5 給水流量の全喪失

- 6. 設計基準事故+ソフトウェア CCF の解析
 - 6.1 原子炉冷却材の喪失又は炉心冷却状態の著しい変化
 - 6.1.1 原子炉冷却材喪失
 - 6.1.2 原子炉冷却材流量の喪失
 - 6.2 反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化
 - 6.2.1 制御棒落下
 - 6.3 環境への放射性物質の異常な放出
 - 6.3.1 放射性気体廃棄物処理施設の破損
 - 6.3.2 主蒸気管破断
 - 6.3.3 燃料集合体の落下
 - 6.3.4 原子炉冷却材喪失
 - 6.3.5 制御棒落下
 - 6.4 原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化
 - 6.4.1 原子炉冷却材喪失
 - 6.4.2 可燃性ガスの発生
 - 6.4.3 動荷重の発生

7. まとめ

8. 参考文献

添付1 評価対象事象について

添付2 代表プラント以外への適用性

添付3 プラント設計の代表性及び燃料型式の影響

添付4 多様化設備が作動させる設備に対するサポート系の機能確保

添付5 有効性評価で仮定する運転員対応操作について

参考1 LOCA+ソフトウェア CCF における常用系設備の作動タイミングに関する感度解析について

1. はじめに

デジタル安全保護回路のハードウェアは、4区分の検出器、2 out of 4回路、チャンネル間の独立性確保、運転中の試験可能性、自己診断機能による計算機の異常検知等、ハードウェアに対するランダム故障と共通要因故障に対してその安全機能に相応した十分に高い信頼性を確保してきている。

また、デジタル安全保護回路のソフトウェアについても、一度に一つのタスクのみ実行するシングルタスク処理を採用するとともに、実行中のタスクを中断する割り込み処理を行わないシンプルなソフトウェア構造の適用、可視化言語の適用により第三者による検証を容易にすること等、設計上の取り組みに加え、品質保証活動・検証及び妥当性確認により、十分に高い信頼性を確保してきており、ソフトウェア CCF の発生は十分低く抑えられている。

しかしながら、特定できない不具合がソフトウェアに内在することを想定した場合に、ソフトウェア CCF が顕在化することにより、多重化されたデジタル安全保護回路が同時に故障し、安全保護機能が喪失するという可能性は否定できない。このようなソフトウェア CCF リスクに対し、デジタル安全保護回路を設ける場合には、ソフトウェア CCF の影響を受けない代替機能を有する多様化設備を自主的に設置してきた。安全保護回路をデジタル化している ABWR では、自主設置している多様化設備に、運転員のソフトウェア CCF 発生 の認知のため警報を追加することにより、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳した場合でも適切に事象を緩和し、炉心損傷を防止することが可能になる。また、BWR5 では、核計装系の一部及び放射線モニタ等がデジタル化されているプラントがあるが、安全保護回路自体のデジタル化は当面計画されておらず、ソフトウェア CCF の影響は限定的である。

本資料は、自主的にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF 影響緩和対策を行うにあたり、対策設備である多様化設備の有効性評価の、評価条件及び評価結果について取りまとめたものである。

2. ソフトウェア CCF とその対策について

2.1 ソフトウェア CCF について

2.1.1 ソフトウェア CCF 想定範囲

ソフトウェア CCF を想定する設備の範囲は、デジタル計算機を適用した安全保護回路のうち設定値比較機能、論理演算機能とする。図 2.1-1 にソフトウェア CCF の発生を想定する範囲の例を示す。

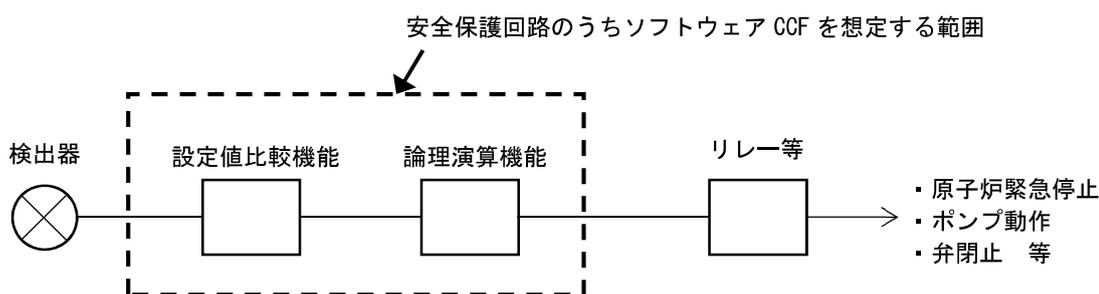


図 2.1-1 安全保護回路のうちソフトウェア CCF を想定する範囲 (例)

2.1.2 ソフトウェア CCF 発生時の安全保護回路故障モード想定

デジタル安全保護回路のソフトウェアに不具合が潜在しているところで、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生しデジタル安全保護回路の自動作動が要求された時に、その不具合が顕在化しソフトウェア CCF が発生することにより、原子炉停止系統及び工学的安全施設を自動起動する信号が出力されず、安全保護機能が喪失する状態を故障モードとして想定する。

なお、ソフトウェア CCF の発生により安全保護機能が喪失する場合においても、それ以前にデジタル安全保護回路の信号により起動、運転しているポンプ等の機器は、ソフトウェア CCF の影響を受けないものとして機器の作動状態の変化は想定しない。

また、デジタル安全保護回路のソフトウェア CCF により誤作動信号が出力され、ソフトウェア CCF による誤作動が起因事象となる場合は、工学的安全施設の機器の作動、原子炉緊急停止等のプラント状態の変化を伴うことにより、運転員等に認知され、適切に対処可能である。

2.2 ソフトウェア CCF 対策について

「1. はじめに」で述べた背景のもと、安全保護回路をデジタル化している ABWR では、多様化設備を自主的に設置してきた。さらに、参考文献[1]の発刊を受け、「運転時の異常な過渡変化」および「設計基準事故」の全事象に対してソフトウェア CCF が重畳する場合の影響を評価し、必要な影響緩和対策を抽出した。本有効性評価において期待する多様化設備を、表 2.2-1 に示す。これらの多様化設備は、以下の基本 requirements を満足するように設計される。

2.2.1 設置要求

デジタル安全保護回路を設ける場合には、代替機能を有する多様化設備を設置する。

ただし、ソフトウェア CCF が発生するおそれがない場合、若しくは運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、かつ安全保護回路の一部がソフトウェアにより作動するものがある場合で、当該ソフトウェアが機能しない場合を想定しても、他の安全保護機能が作動することにより設計基準事故の判断基準を概ね満足することが有効性評価により確認できる場合には、多様化設備を設けないこととする。

2.2.2 機能要求

多様化設備は、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故が発生し、かつソフトウェア CCF により安全機能が喪失した場合においても、設計基準事故の判断基準を概ね満足できるよう、原子炉停止系統、工学的安全施設等を自動、又は手動で作動させることができるようにする。

さらに、原子炉停止系統、工学的安全施設等を手動により作動させる場合には、運転員が必要な時間内に操作を開始し、判断基準を概ね満足した状態で事象を収束させることができるよう、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故の発生時に安全保護機能動作の異常の発生を認知し、必要な操作の判断を行える機能を設ける。

2.2.3 多様化設備の範囲

多様化設備の範囲は、「2.2.2 機能要求」を達成するために必要となる、検出器、操作スイッチ、論理回路、指示計・警報等の計測制御設備とする。多様化設備の範囲を図 2.2-1 に示す。

この計測制御設備の構成要素は、参考文献[1]の「3.5 多様化設備への要求事項」を満足する限り、デジタル安全保護回路のソフトウェア CCF 影響緩和対策として設けた設備以外の設備（安全保護回路の検出器及び操作スイッチ、重大事故等対処設備等）も多様化設備として用いることができる。

表 2.2-1 本有効性評価において期待する多様化設備

| 基本安全機能 | 自動緩和機能 | 手動緩和機能 | 指示機能 | 警報機能 |
|--------|--|--|--|--|
| 止める | <ul style="list-style-type: none"> 代替制御棒挿入 (ARI) 原子炉再循環ポンプトリップ | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉スクラム | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉水位 原子炉圧力 ドライウエル圧力 高圧炉心注水系起動状態 高圧炉心注水系系統流量 主蒸気隔離弁の状態 主要な隔離弁の状態 | <ul style="list-style-type: none"> ARI 作動 原子炉水位低 原子炉圧力高 |
| 冷やす | — | <ul style="list-style-type: none"> 高圧炉心注水系起動 | | |
| 閉じ込める | — | <ul style="list-style-type: none"> 主蒸気隔離弁閉止 主要な格納容器隔離弁閉止 | | |

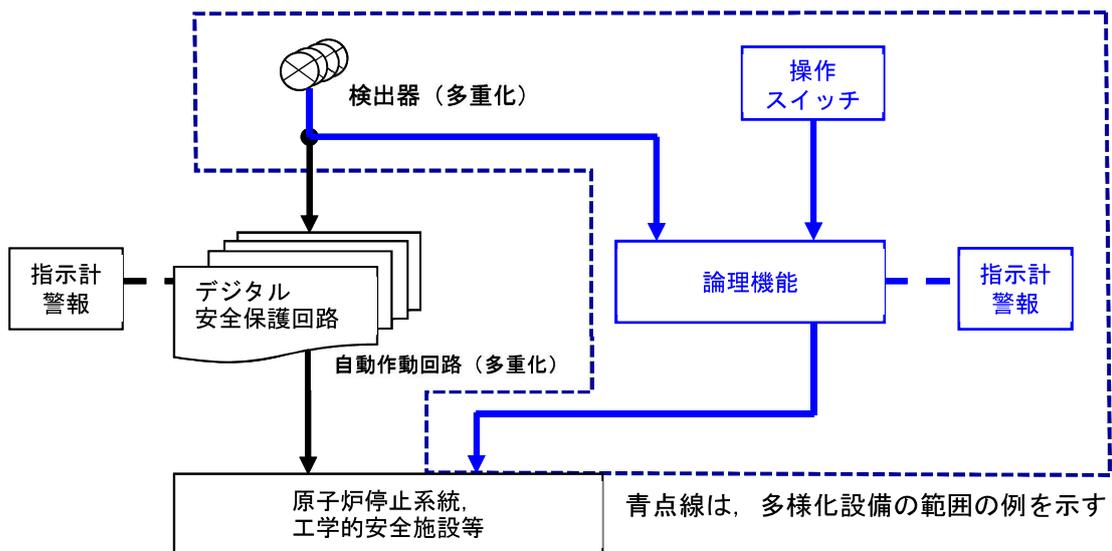


図 2.2-1 多様化設備の範囲

3. 有効性評価の目的

本資料における有効性評価（以下、CCF 有効性評価という）は、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳する場合に、炉心の著しい損傷を防止する上で、安全保護回路の代替機能を有する設備である多様化設備が有効であることを確認するものであり、具体的には、4.2 節で述べる判断基準を概ね満足し、事象が収束することを解析等により確認することを目的とする。

4. 評価方針

4.1 評価対象の整理

安全保護回路を含む原子炉施設の安全設計の妥当性を確認するため、原子炉設置許可申請書では、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」に基づき、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の全事象について解析し評価を行っている。

多様化設備は、安全保護回路の代替機能を有する設備であることから、CCF 有効性評価においても、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の全事象を対象とする。

評価に際しては、ソフトウェア CCF が同じ影響を与える事象は、グルーピングを行い、また、判断基準に照らし合わせて影響の程度が軽微である事象、グルーピングしたグループ内の代表事象に包絡されることが定性的に評価できる事象、及びデジタル安全保護回路の動作を期待しない事象は解析を省略する。

具体的な評価対象事象の選定については添付 1 に示す。

選定した評価対象事象にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF が重畳した場合でも、多様化設備等が有効に機能することで適切に対処可能であることを評価する。評価にあたっては、以下に示す代表プラントを対象にソフトウェア CCF 対策の有効性を評価する。代表プラント以外の型式のプラントに対する評価結果の適用性については添付 2 に、評価対象としたプラント設計の代表性及び燃料型式の影響については添付 3 に示す。

代表プラント：ABWR 9×9 燃料 (A 型) ウラン炉心

なお、デジタル安全保護回路のソフトウェア CCF により誤作動信号が出力され、ソフトウェア CCF による誤作動が起因事象となる場合は、工学的安全施設の機器の作動、原子炉緊急停止等のプラント状態の変化を伴うことにより、運転員等に認知され、適切に対処可能であり、以下のように誤作動の影響は設計基準事象とソフトウェア CCF が重畳する事象に包絡される。

- ・原子炉停止機能の誤作動は、スクラムが発生するだけであり、他の異常な過渡変化に包絡される。
- ・炉心冷却機能のうち、注水系の誤作動によるプラント挙動への外乱は小さい。自動減圧系の誤作動による影響は、主蒸気管破断に包絡される。
- ・閉じ込め機能のうち、原子炉系の隔離弁の誤閉止は、主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。二次格納施設や原子炉制御室に係る空調の誤閉止や SGTS の誤起動は、原子炉の運転状態に直ちに悪影響はない。
- ・非常用電源の誤作動による原子炉への外乱はない。

4.2 判断基準

CCF 有効性評価では、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重

疊するという設計基準を超える事象に対し、ソフトウェア CCF 影響緩和対策により、炉心損傷防止が可能になることを確認することから、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故のいずれに対しても、判断基準は設計基準事故において使用される判断基準（「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下、「設置許可基準規則」という。）第十三条第一項第二号）を準用し、その判断基準を概ね満足することの確認を行う。

なお、設備の健全性が別途確認されている原子炉格納容器の限界圧力、温度等の条件、又は炉心の著しい損傷防止が達成できることを適切に確認できる他の判断基準を用いる場合は、当該の評価で記載する。

4.3 解析に当たって考慮する事項

運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳する事象は、設計基準を超える事象であり、これらのプラント応答を評価するにあたっては、安全設計の妥当性確認に用いる安全解析（運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故）のような保守的評価ではなく、最も確からしいプラント応答を評価する観点から、重大事故等対策の有効性評価（以下、SA 有効性評価という）のような最適評価を基本的な考え方とする。すなわち、プラント初期条件、機器の作動状態の想定等の最適評価条件の考慮及び想定する事象を現実的に予測できる最適評価コードの使用により、運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故に対する評価を行うことである。

ただし、ソフトウェア CCF が重畳する場合においても、保守的評価によって解析した結果が余裕をもって判断基準を満足する場合には、最適評価を行わず、保守的評価を採用する。

4.3.1 解析にあたって考慮する範囲

CCF 有効性評価においては、事象発生前の状態として、通常運転範囲及び運転期間の全域を対象とする。すなわち、サイクル期間中の炉心燃焼変化、燃料交換等による長期的な変動及び運転中に予想される運転状態を考慮する。

解析は、想定した事象が、判断基準を概ね満足しながら、多様化設備等の作動によって過渡状態が収束しプラント状態が整定するまでを基本とし、その後原子炉が支障なく安定状態へ移行できることが合理的に推定できる時点までとした。

4.3.2 解析で想定する現実的な条件等

最適評価で想定する現実的な条件の例を以下に示す。

- ・事象発生前のプラント初期条件は、設計値等に基づく現実的な値を用いる。
- ・事象発生によって生じる外乱の程度、炉心状態（出力分布、反応度フィードバック等）、機器の容量等は、設計値等に基づく現実的な値を用いる。なお、作動設定点等については計装上の誤差は考慮しない。

- ・誤操作が起因事象となる評価では、運転手順に基づく現実的な操作条件を用いる。

4.3.3 安全系機能に対する仮定

ソフトウェア CCF 発生時のデジタル安全保護回路、原子炉停止系統及び工学的安全施設を含む安全設備の作動状態については、以下を仮定する。

- ・ソフトウェア CCF によりデジタル安全保護回路の機能が喪失し、原子炉停止系統及び工学的安全施設が自動作動しない。
- ・デジタル安全保護回路を経由しない、自動起動信号又は運転員が事象の発生を認知した場合の手動起動信号により、原子炉停止系統及び工学的安全施設は作動可能とする。
- ・自動起動信号又は運転員の手動操作による、最も確からしいプラント応答を評価するため、安全機能を有する機器の単一故障は想定しない。
- ・安全機能のサポート系（電源系、冷却系、空調系等）は、起因事象との従属性がなく、かつソフトウェア CCF の影響を受けない場合は、起因事象が発生する前の作動状態を維持する。

4.3.4 常用系機能に対する仮定

常用系設備の機能については、以下を仮定する。

- ・起因事象として外部電源の喪失を仮定する事象以外は、外部電源は利用可能とする。
- ・事象発生前から機能しており、かつ事象発生後も機能し続ける設備は、故障の仮定から除外する。
- ・常用系機能の喪失が起因となる事象が前提である場合は、当該事象を評価する際にはその機能を期待しない。

4.3.5 多様化設備に関連する条件

多様化設備に関連する条件を以下に示す。

(1) 機器条件

- ・多様化設備がもつ緩和機能の有効性を確認する観点から、多重性を要求しない多様化設備の単一故障は想定しない。
- ・多様化設備がもつ緩和機能の有効性を確認する観点から、多様化設備が代替作動させる原子炉停止系統、工学的安全施設等の故障及び誤動作が起因となる事象は想定しない。
- ・ソフトウェア CCF によりデジタル安全保護回路は、機能喪失するものの、多様化設備が代替し、利用可能である原子炉停止系統、工学的安全施設等を作動させることができるものとする。ただし、想定する起因事象及びソフトウェア CCF が発生した状態において、原子炉停止系統、工学的安全施設等のサポート系（電源系、冷却系、空調系等）が使用できない場合には、原子炉停止系統、工学的安全施設等は利用できないものとする。多様化設備が作動させる設備に対するサポート系の有効性を添付 4 に示す。

(2) 操作条件

- ・事象に応じ、運転員による手動操作をソフトウェア CCF 対策として期待する。なお、CCF 有効性評価において運転員に期待する手動操作については、運転操作手順書及び教育訓練計画に適切に反映する。
- ・事象に応じ、原子炉制御室での運転操作開始時間を現実的な想定とする。その場合においては、運転員による事象の認知から運転操作開始までの時間を適切に設定する。期待する操作及びその成立性を、添付 5 に示す。
- ・事象に応じ、原子炉制御室外における運転員による現場操作を考慮する。その場合においては、原子炉制御室における運転員による事象の認知から現場操作場所までの移動時間、及び現場操作場所に到着してから操作開始までの時間は適切に設定する。なお、今回のソフトウェア CCF 有効性評価では運転員による現場操作は考慮していない。

4.4 解析に使用する計算プログラム

解析に使用する計算プログラムを表 4-1 及び表 4-2 に示す。

- (1) CCF 有効性評価で用いる計算プログラム及びモデルの詳細は、参考文献[2]及び[3]に記載している。
- (2) 使用する計算プログラム及びモデルの妥当性確認及び検証については、参考文献[2]及び[4]に記載している。

4.5 解析条件

解析に用いる主要な条件を表 4-3～表 4-8 に示す。

表 4-1 解析に使用する計算プログラム一覧表
(運転時の異常な過渡変化+ソフトウェア CCF)

| 解析項目 | | 使用するプログラム |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化 | 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| | 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化 | 原子炉冷却材流量の部分喪失 | — |
| | 外部電源喪失 | — |
| | 給水加熱喪失 | — |
| | 原子炉冷却材流量制御系の誤操作 | — |
| 原子炉冷却材圧力又は原子炉冷却材保有量の異常な変化 | 負荷の喪失 | — |
| | 主蒸気隔離弁の誤閉止 | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| | 給水制御系の故障 | — |
| | 原子炉圧力制御系の故障 | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| | 給水流量の全喪失 | TRAC 系コード [2], [3], [4] |

表 4-2 解析に使用する計算プログラム一覧表
(設計基準事故+ソフトウェア CCF)

| 解析項目 | | 使用するプログラム |
|---------------------------------|---------------------|-------------------------|
| 原子炉冷却材の喪失 又は炉心冷却状態の 著しい変化 | 原子炉冷却材喪失 | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| | 原子炉冷却材流量の喪失 | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| 反応度の異常な投入 又は原子炉出力の急 激な変化 | 制御棒落下 | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| 環境への放射性物質 の異常な放出 | 放射性気体廃棄物処理施設の 破損 | — |
| | 主蒸気管破断 | TRAC 系コード [2], [3], [4] |
| | 原子炉冷却材喪失 | — |
| | 燃料集合体の落下 | — |
| | 制御棒落下 | — |
| 原子炉格納容器内圧 力、雰囲気等の異常 な変化 | 原子炉冷却材喪失 | — |
| | 可燃性ガスの発生 | — |
| | 動荷重の発生 | — |

表 4-3 主要解析条件 (共通)

| 項目 | CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|----------|---------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 原子炉熱出力 | 3,926 MW (100%) | 4,005 MW (102%) | 定格原子炉熱出力として設定 |
| 原子炉圧力 | 7.07 MPa [gage] | 7.17 MPa [gage] | 定格原子炉圧力として設定 |
| 原子炉水位 | 通常水位 | 同左 | 通常運転時の原子炉水位として設定 |
| 炉心入口流量 | 47.0×10^3 t/h (90%) | 同左 | 定格出力での炉心流量幅 (90%~120%) のうち低流量側を設定* |
| タービン蒸気流量 | 7.64×10^3 t/h | 7.82×10^3 t/h | 定格タービン蒸気流量として設定 |
| 原子炉給水温度 | 原子炉出力, 炉心流量, 原子炉圧力により定まる値 | 217 °C | TRAC システムによる計算値 |

* 運転時の異常な過渡変化 + ソフトウェア CCF : 初期炉心流量は、今回評価対象としている主蒸気隔離弁の誤閉止, 原子炉圧力制御系の故障, 給水流量の全喪失, 原子炉冷却材流量の喪失の事象の特徴 (圧力上昇/流量低下) を踏まえて, 低流量側の 90% としている。
原子炉冷却材喪失 + ソフトウェア CCF : 燃料被覆管温度の最高値を厳しく評価するため, 低流量側の 90% としている。

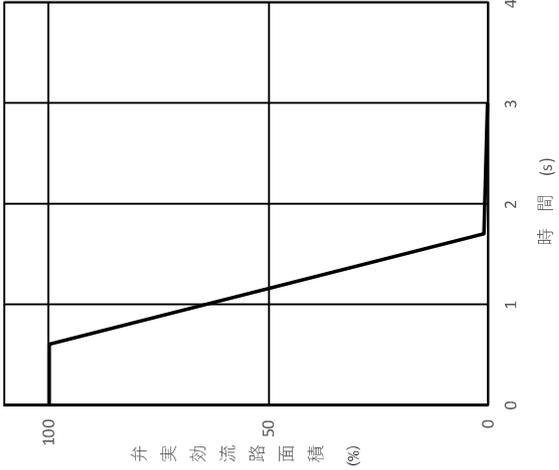
表 4-4 主要解析条件 (運転時の異常な過渡変化 (制御棒の誤引き抜きを除く) 又は原子炉冷却材流量の喪失+ソフウェア CCF)
(a) 炉心・燃料条件

| 項目 | CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|-----------------|--|-------------------------------------|---|
| 炉心・燃料 (炉心状態) | 9×9 燃料 (A 型) 平衡炉心 サイクル初期 (原子炉冷却材流量の喪失) サイクル末期 (他 3 事象*) | 同左 | サイクル期間中から代表点を適用*2。 |
| ボイド反応度係数 | 炉心 as is | サイクル初期×0.9 倍, 又は サイクル末期×1.25 倍*1 | 最適評価コードを用いた, より実現象に 即したモデルの採用 |
| ドップラ反応度係数 | 炉心 as is | サイクル初期×1.1 倍, 又は サイクル末期×0.9 倍*1 | 最適評価コードを用いた, より実現象に 即したモデルの採用 |
| ギャップ熱伝達係数 | 約 7,380 W/(m ² ・K) (平均出力バندوقル) 約 10,800 W/(m ² ・K) (高出力バندوقル) | 同左 | 許認可適用値 |
| 出力分布 | 炉心 as is | 設計軸方向出力分布 (下方ピーク) | 最適評価コードを用いた, より実現象に 即したモデルの採用 |
| 初期 MCPR | 1.22 | 同左 (原子炉冷却材流量の喪失は 1.19) | 運転制限値として設定 |
| 初期 MLHGR | 44.0 kW/m | 同左 (原子炉冷却材流量の喪失は 44.0×1.02) | 運転制限値として設定 |
| 崩壊熱 | ANSI/ANS5.1-1979 (燃焼度 33 GWd/t) | GE (平均) +3σ | サイクル末期の燃焼度のばらつきを考 慮し, 10%の保守性を考慮して設定 |

*1 事象の特性に応じて評価が厳しくなるように設定

*2 サイクル期間中から, 事象の特徴 (圧力上昇/流量低下) を踏まえて代表点を選定している。燃焼度でボイド反応度係数とドップラ反応度係数が異なるが, ボイド率変化に伴う投入反応度の方が燃料温度変化に伴う投入反応度よりも大きい。基本的にはボイド反応度係数の絶対値の大小から代表点を選定している。

(b) 主蒸気系条件 [1/2]

| 項目 | CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|--------------------|--|----------------|----------|
| 主蒸気隔離弁 閉止特性 | 3秒で閉止 (主蒸気隔離弁の誤閉止 ケースのみ)  | 同左 | 許認可適用特性 |
| 主蒸気止め弁 閉止特性 | 0.1秒で閉止 | 同左 | 許認可適用特性 |
| 蒸気加減弁 閉止特性 | 0.075秒で閉止 | 同左 | 許認可適用特性 |
| タービンバイパス弁 (TBV) | <ul style="list-style-type: none"> タービントリップにより作動 部分開 (原子炉圧力制御系の故障ケースのみ) | 同左 | 許認可適用特性 |

(b) 主蒸気系条件 [2/2]

| 項目 | CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|------------------|--|--|---------------------------------|
| タービンバイパス 流量 | 33% | 同左 | 許認可適用特性 |
| タービントリップ 設定点 | 原子炉水位高 (レベル8) | 同左 | 許認可適用特性 |
| 圧力制御装置最大出 力信号 | 115% | 117% | 仕様値 |
| 逃がし安全弁 | 逃がし弁機能 7.51 MPa[gage] × 1 個 (363 t/h) 7.58 MPa[gage] × 1 個 (367 t/h) 7.65 MPa[gage] × 4 個 (370 t/h) 7.72 MPa[gage] × 4 個 (373 t/h) 7.79 MPa[gage] × 4 個 (377 t/h) 7.86 MPa[gage] × 4 個 (380 t/h) | 逃がし弁機能 7.66 MPa[gage] × 1 個 (371 t/h) 7.73 MPa[gage] × 1 個 (374 t/h) 7.80 MPa[gage] × 4 個 (378 t/h) 7.87 MPa[gage] × 4 個 (381 t/h) 7.94 MPa[gage] × 4 個 (385 t/h) 8.01 MPa[gage] × 4 個 (388 t/h) | 現実的な値として逃がし安全弁の逃し 弁機能の設計値を設定 |
| | | (原子炉冷却材流量の喪失は安全弁 機能を仮定) | |

(c) 設備作動条件 [1/2]

| 項目 | CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|---------------------------------|--|--|---|
| 制御棒挿入 作動条件 挿入速度 スクラム曲線 | 動作を想定しない | 各スクラム信号 60%挿入：1.71 秒 100%挿入：3.70 秒 設計スクラム曲線 | ソフトウェア CCF の影響により期待しない |
| 代替制御棒挿入 作動条件 全挿入完了時間 | 原子炉圧力高(7.48 MPa[gage]) 又は 原子炉水位低(レベル2) 起動条件成立から 25 秒 | 動作を想定しない (制御棒挿入の条件のため) | 代替制御棒挿入機能の設計値として設定 25 秒以内の仕様値に対して保守的に最も 遅い 25 秒に設定 |
| 給水喪失時の給水流 量時間変化 | 5 秒で 0 | 同左 | SA 有効性評価・従来過渡と同様の設定 |
| 電動機駆動 給水ポンプ | T/D 停止後 M/D バックアップ | 同左 | T/D 給水ポンプトリップ後, M/D 給水ポン プが自動起動するものとする。給水は継続 する方が原子炉出力が高めに推移するた め, 解析条件としては厳しい設定となる。 |

(c) 設備作動条件 [2/2]

| 項目 | CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|----------------------|--|--|--|
| HPCF 起動条件 注入流量 | 手動起動 182~727 m ³ /h | D/W 圧力高又は 原子炉水位低(レベル 1.5) 同左 | ソフトウェア CCF のため自動起動しない ものと仮定 HPCF の安全要求値として設定 |
| 再循環ポンプ・ トリップ | 原子炉圧力高(7.48 MPa [gage]) 又は 原子炉水位低(レベル 3):4 台 原子炉水位低(レベル 2):6 台 | 原子炉水位低(レベル 3):4 台 原子炉水位低(レベル 2):6 台 | 代替再循環ポンプ・トリップ機能の設計 値として設定 |
| 再循環ポンプ 慣性定数 | 0.7 秒 | 同左 (原子炉冷却材流量の喪失: 0.62 秒) | 設計値 |
| 再循環流量制御系 運転モード | 自動 | 同左 | 設計仕様 |

表 4-5 主要解析条件 (原子炉冷却材喪失+ソフトウェア CCF) [1/2]

| 項目 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|----------|--|--|---|
| 事故条件 | 原子炉の出力運転中に給水配管、主蒸気配管、又は RHR 出口配管が瞬時に両端破断する | 原子炉の出力運転中に高圧炉心注水配管が瞬時に両端破断する | 安全評価審査指針の要求に基づき、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する配管の破損を想定することとし、ソフトウェア CCF の影響を踏まえ燃料被覆管最高温度評価の観点から最も厳しい破断箇所を選定 |
| 炉心・燃料 | 9×9 (A型) 平衡サイクル末期炉心 (出力分布 (ノミナル)) | 9×9 燃料 (A型) | サイクル期間中から代表点を適用* |
| 初期 MCPR | 1.22 | 1.19 | 運転制限値として設定 |
| 初期 MLHGR | 44.0 kW/m | 44.0 kW/m×1.02 | 運転制限値として設定 |
| 崩壊熱 | ANSI/ANS-5.1-1979 (燃焼度 33 GWd/t) | GE (平均) +3σ | サイクル末期の燃焼度のばらつきを考慮し、10%の保守性を考慮して設定 |
| 単一故障 | 仮定しない | <ul style="list-style-type: none"> 安全保護系 (炉心流量急減スクラム) の単一故障 健全側の高圧炉心注水系に給電する非常用デューゼル発電機の故障 | 現実的条件として、多様化設備の単一故障は想定しない |
| 外部電源 | 健全 | 事故発生と同時に喪失 | 現実的条件として、事故発生前から機能しており、事故発生後も機能すると仮定 |

* 制御棒が全引き抜きとなり、出力分布が上方ピークとなる平衡サイクル末期炉心を設定。LOCA+ソフトウェア CCF 事象では水位低下により燃料が露出し、燃料被覆管温度が上昇するため、上方ピークの軸方向出力分布の方が燃料被覆管最高温度が高くなる傾向にある。

表 4-5 主要解析条件 (原子炉冷却材喪失+ソフトウェア CCF) [2/2]

| 項目 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|------------------------------|---|--|--|
| 原子炉スクラム機能 作動条件 挿入速度 | 動作を想定しない — | 炉心流量急減 60%挿入：1.71 秒 100%挿入：3.70 秒 | ソフトウェア CCF の影響により期待しない |
| 代替制御棒挿入機能 作動条件 全挿入完了時間 | 原子炉水位低 (レベル2) 起動条件成立から 25 秒 | 動作を想定しない — | 代替制御棒挿入機能の設計値として設定 25 秒以内の仕様値に対して保守的に最も遅い 25 秒に設定 |
| 再循環ポンプ・トリップ機能 | 原子炉水位低 (レベル3)：4 台 原子炉水位低 (レベル2)：6 台 | 外部電源喪失による全台トリップ | 代替再循環ポンプ・トリップ機能の設計値として設定 |
| 逃がし安全弁 | 逃し弁機能 7.51MPa[gage]×1 個 7.58MPa[gage]×1 個 7.65MPa[gage]×4 個 7.72MPa[gage]×4 個 7.79MPa[gage]×4 個 7.86MPa[gage]×4 個 | 安全弁機能 8.07MPa[gage]×2 個 8.14MPa[gage]×4 個 8.21MPa[gage]×4 個 8.28MPa[gage]×4 個 8.35MPa[gage]×4 個 | 逃がし安全弁の逃し弁機能の設計値として設定 |
| ECCS 起動信号 | ソフトウェア CCF による ECCS 起動失敗を仮定。ただし、多様化設備による HPCF の手動起動に期待する。 | RCIC：水位低レベル 1.5 HPCF：水位低レベル 1.5 LPFL：水位低レベル 1 ADS：水位低レベル 1 and D/W 圧力高 | ソフトウェア CCF の影響により ECCS の自動起動を期待しない |
| HPCF 注水流量 | 182～727 m ³ /h | 同左 | HPCF の安全要求値として設定 |
| 給復水系 | 給水配管破断：配管破断による全給水流量喪失 給水配管破断以外：給復水系による注水継続 | 外部電源喪失による全給水流量喪失 | 常用系が正常に作動することを仮定 |

表 4-6 主要解析条件 (原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き + ソフトウェア CCF) [1/2]

| 項目 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|----------|------------------------------------|----------------|------------------------------|
| 事故条件 | 原子炉の起動時の臨界近接時に運転操作を誤り、制御棒を連続引き抜きする | 同左 | |
| 原子炉熱出力 | 定格出力の 10^{-8} | 同左 | |
| 原子炉圧力 | 0.0 MPa [gauge] | 同左 | |
| 冷却材温度 | 50°C | 20°C | 現実的条件として、実炉心で想定される運転条件を想定 |
| 炉心流量 | 定格炉心流量の 40% | 定格炉心流量の 20% | ボイド反応度フィードバックの観点から保守的な高流量を設定 |
| 炉心・燃料 | 9×9 燃料 (A 型) 平衡炉心 | 同左 | サイクル初期及びサイクル末期を選定 |
| ドップラ反応度 | 炉心 as is | 同左 | |
| ボイド反応度 | 炉心 as is | 考慮しない | 最適評価コードを用いた、より実現象に即したモデルの採用 |
| 減速材温度反応度 | 炉心 as is | 考慮しない | 最適評価コードを用いた、より実現象に即したモデルの採用 |
| 燃料エンタルピー | 初期燃料温度に対応するコード内部で計算された値 | 8kJ/kg | |

表 4-6 主要解析条件 (原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き + ソフトウェア CCF) [2/2]

| 項目 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|-----------|---|---|---|
| 引抜制御棒価値 | 0.010 Δk | 0.035 Δk | 保安規定に基づき作成された制御棒引抜操作手順を考慮し, 複数人の運転員の監視等によって異常を認知できることから, 0.010 Δk まで引き抜かれる間に運転員が異常引き抜きに気づき, 連続引き抜きを中断する想定 |
| 制御棒引抜速度 | 33mm/s | 同左 | |
| 制御棒引抜阻止条件 | 0.010 Δk まで引き抜かれる間に運転員が連続引き抜きを中断する想定 | スクラムと同時に制御棒の引き抜きが阻止される | |
| 原子炉スクラム信号 | スクラム失敗を仮定 | 原子炉周期短 (SRNM) | |
| 逃がし安全弁 | 逃し弁機能 7.51MPa[gage] × 1 個 7.58MPa[gage] × 1 個 7.65MPa[gage] × 4 個 7.72MPa[gage] × 4 個 7.79MPa[gage] × 4 個 7.86MPa[gage] × 4 個 | 逃し弁機能 7.66MPa[gage] × 1 個 7.73MPa[gage] × 1 個 7.80MPa[gage] × 4 個 7.87MPa[gage] × 4 個 7.94MPa[gage] × 4 個 8.01MPa[gage] × 4 個 | 逃がし安全弁の逃し弁機能の設計値として設定 |
| 主蒸気隔離弁 | 閉 | 同左 | |

表 4-7 主要解析条件（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き＋ソフトウェア CCF） [1/2]

| 項目 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件（参考） | 条件設定の考え方 |
|------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| 事故条件 | 出力運転中の制御棒引き抜き操作を誤り、制御棒を連続引き抜きする | 同左 | |
| 炉心入口流量 | 47.0 × 10 ³ t/h (90%) | 58.0 × 10 ³ t/h (111%) | 燃料被覆管温度の最高値を厳しく評価するため、低流量側の 90% を設定 |
| 炉心・燃料 | 9 × 9 燃料 (A 型) 平衡炉心 | 同左 | サイクル初期及びサイクル中期を選定 |
| ドップラ反応度 | 炉心 as is | 同左 | |
| ボイド反応度 | 炉心 as is | 同左 | |
| 初期 MCPR | 1.22 | 同左 | 運転制限値として設定 |
| 初期 MLHGR | 44.0 kW/m | 同左 | 運転制限値として設定 |
| 原子炉給水温度 | 原子炉出力, 炉心流量, 原子炉圧力により定まる値 | 同左 | |
| タービンバイパス流量 | 33% | — | 設計値 |
| 代替制御棒挿入機能 作動条件 全挿入完了時間 | 原子炉圧力高 (7.48 MPa [gage]) 起動条件成立から 25 秒 | 作動を想定しない | 代替制御棒挿入機能の設計値として設定 25 秒以内の仕様値に対して保守的に最も遅い 25 秒に設定 |

表 4-7 主要解析条件（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き+ソフウェア CCF） [2/2]

| 項目 | ソフウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件（参考） | 条件設定の考え方 |
|-------------------|--|-----------------------------------|------------------------------|
| 再循環ポンプ・トリップ機能 | 原子炉水位低（レベル3）：4台 原子炉水位低（レベル2）：6台 | — | |
| 再循環ポンプ慣性定数 | 約 0.7 秒 | — | |
| 逃がし安全弁 | 逃がし弁機能 7.51MPa[gage] × 1 個 7.58MPa[gage] × 1 個 7.65MPa[gage] × 4 個 7.72MPa[gage] × 4 個 7.79MPa[gage] × 4 個 7.86MPa[gage] × 4 個 | — | 逃がし安全弁の逃がし弁機能の設計値として設定 |
| 再循環流量制御系 運転モード | 手動モード | — | |
| 崩壊熱 | ANSI/ANS-5.1-1979 | — | |
| 制御棒パターン | 定格出力運転時に挿入されている制御棒パターンからの引き抜き | 熱的制限値の状態になっている燃料が引抜制御棒の近傍に来るように設定 | 現実的条件として、実炉心で想定される制御棒パターンを想定 |
| 制御棒引抜阻止信号 | ロッドブロック失敗を仮定 | 定格出力の 105% 又は 108% | |
| 解析で仮定する状態 | 過渡計算 | 定常計算（表面熱流束は中性子束に対し時間遅れなし） | |

表 4-8 主要解析条件 (制御棒落下 + ソフトウェア CCF) [1/2]

| 項目 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|----------|--|----------------|------------------------------|
| 事故条件 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 臨界又は臨界近傍にあるときに、制御棒駆動軸から分離して炉心内にとどまっていた制御棒及びこれと結合した中空ピストンが落下 | 同左 | |
| 原子炉熱出力 | 定格出力の 10^{-8} | 同左 | |
| 原子炉圧力 | 0.0 MPa [gage] | 同左 | |
| 冷却材温度 | 50°C | 20°C | 現実的条件として、実炉心で想定される運転条件を想定 |
| 炉心流量 | 定格炉心流量の 40% | 定格炉心流量の 20% | ボイド反応度フィードバックの観点から保守的な高流量を設定 |
| 炉心・燃料 | 9×9 燃料 (A 型) 平衡炉心 | 同左 | サイクル初期及びサイクル末期を選定 |
| ドップラ反応度 | 炉心 as is | 同左 | |
| ボイド反応度 | 炉心 as is | 考慮しない | 最適評価コードを用いた、より実現象に即したモデルの採用 |
| 減速材温度反応度 | 炉心 as is | 考慮しない | 最適評価コードを用いた、より実現象に即したモデルの採用 |
| 燃料エンタルピー | 初期燃料温度に対応するコード内部で計算された値 | 8kJ/kg | |

表 4-8 主要解析条件 (制御棒落下 + ソフトウェア CCF) [2/2]

| 項目 | ソフトウェア CCF 有効性評価の解析条件 | 安全評価の解析条件 (参考) | 条件設定の考え方 |
|-----------|---|--|------------------------|
| 落下制御棒価値 | 0.010 Δk | 0.013 Δk | 制御棒価値ミニマイザの制御棒価値制限値を設定 |
| 制御棒落下速度 | 0.95m/s | 0.7m/s | 保守的に BWR5 の制御棒落下速度を設定 |
| 原子炉スクラム信号 | スクラム失敗を仮定 | 中性子束高 (APRM) | |
| 逃がし安全弁 | 逃し弁機能 7.51MPa[gage] × 1 個 7.58MPa[gage] × 1 個 7.65MPa[gage] × 4 個 7.72MPa[gage] × 4 個 7.79MPa[gage] × 4 個 7.86MPa[gage] × 4 個 | 安全弁機能 8.07MPa[gage] × 2 個 8.14MPa[gage] × 4 個 8.21MPa[gage] × 4 個 8.28MPa[gage] × 4 個 8.35MPa[gage] × 4 個 | 逃がし安全弁の逃し弁機能の設計値として設定 |
| 主蒸気隔離弁 | 閉 | 同左 | |

5. 運転時の異常な過渡変化+ソフトウェア CCF の解析

5.1 炉心内の反応度又は出力分布の異常な変化

5.1.1 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き

表 5.1.1-1 に解析結果，表 5.1.1-2 に主要事象のクロノロジー，図 5.1.1-1，図 5.1.1-2 に主要パラメータの時間変化を示す。

運転員による制御棒の連続引き抜き（ギャング引き抜き）により，中性子束は急激に増加する。本来であれば SRNM ペリオド短による原子炉スクラムにより事象は整定するが，ソフトウェア CCF によりスクラムが失敗することを仮定している。運転員は連続引き抜き中に異常に気づき，速やかに制御棒の手動挿入に移ることが期待できる。

結果として，燃料エンタルピは約 32 秒後に 717[kJ/kg]まで増加するものの，燃焼及びガドリニア添加に伴う融点低下分を保守的に考慮した判断基準（837kJ/kg）を満足することが分かる。

表 5.1.1-1 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き+CCF の判断基準パラメータの解析結果

| 項目 | 解析結果 | 判断基準 |
|-------------------------------|-----------|--------------------------|
| 燃料エンタルピ最大値 [kJ/kg]／[cal/g] | 約 717/171 | 963／230※ |
| 破損割合 (%) | 約 2 | - |
| 原子炉冷却材バウンダリ圧力 (MPa[gage]) | 約 0.15 | 10.34 (最高使用圧力の 1.2 倍) |

※燃焼（75Gwd/t）に伴う融点低下分に相当するエンタルピ約 105kJ/kg（25cal/g）及びガドリニア添加（10wt%）に伴う融点低下分に相当するエンタルピ約 21kJ/kg（5cal/g）を対象燃料棒に応じて考慮が必要である。保守的に両者を考慮した場合，837kJ/kg（200cal/g）となる。

表 5.1.1-2 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き+CCF の主要事象のクロノロジー

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|--------------|
| 0 秒 | 制御棒引き抜き開始 |
| 約 18 秒 | 制御棒連続引き抜き中断 |
| 約 30 秒 | 制御棒挿入開始 |
| 約 32 秒 | 燃料エンタルピ最大値到達 |
| 約 40 秒 | (解析終了) |

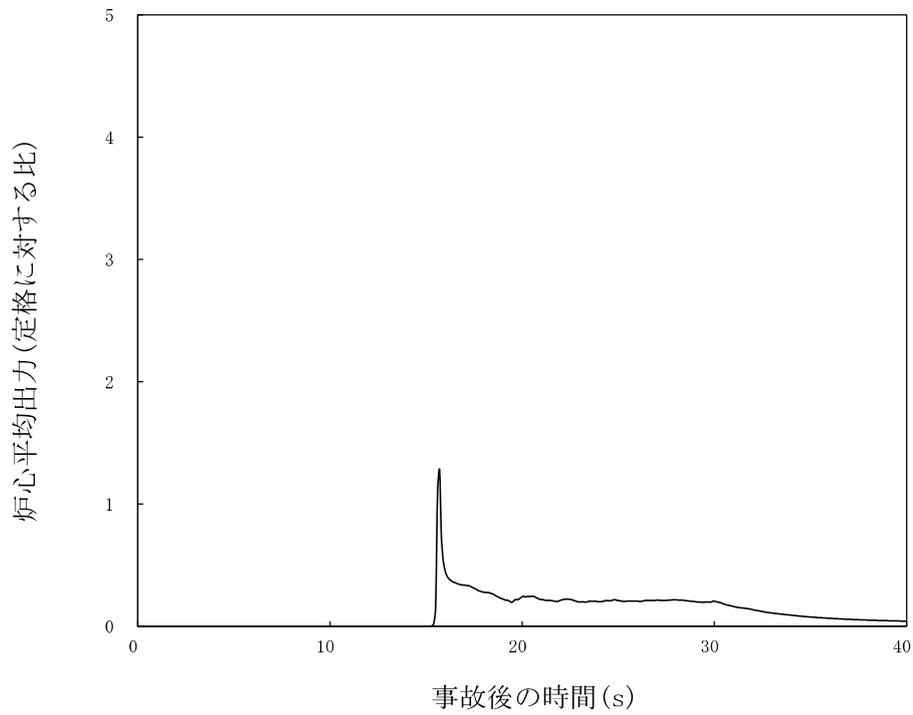


図 5. 1. 1-1 中性子束の時間変化 (原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き+CCF)

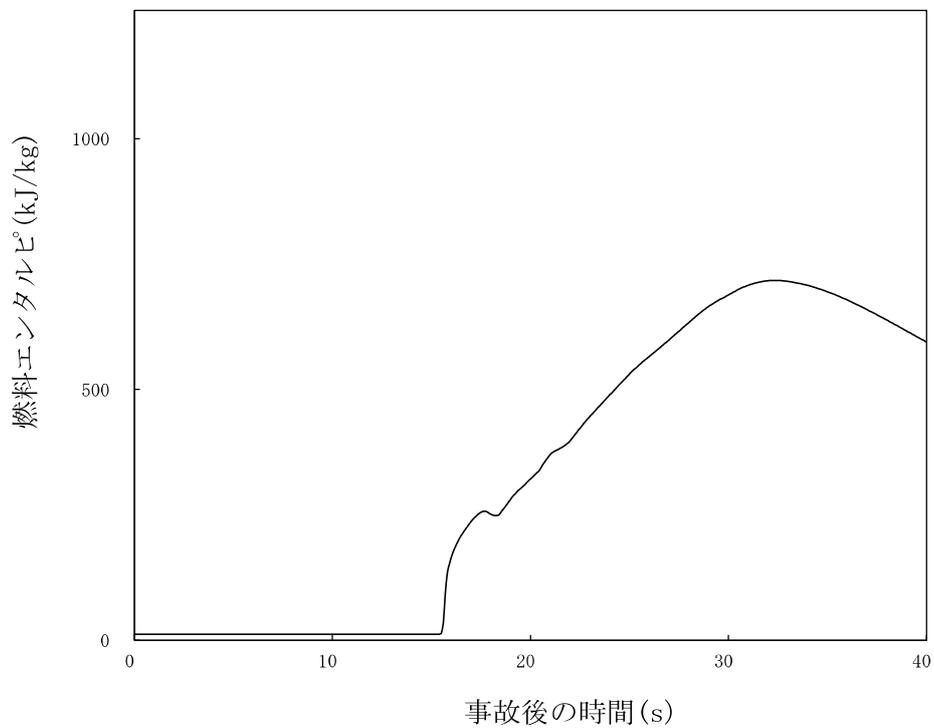


図 5. 1. 1-2 燃料エンタルピーの時間変化 (原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き+CCF)

5.1.2 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

表 5.1.2-1 に解析結果，表 5.1.2-2 に主要事象のクロノロジー，図 5.1.2-1～図 5.1.2-4 に主要パラメータの時間変化を示す。

出力運転中の制御棒の連続引き抜き（ギャング引き抜き）により，出力は徐々に増加する。本来であれば制御棒引抜監視装置により制御棒引き抜きが阻止されるが，ソフトウェア CCF により制御棒引抜阻止が失敗することを仮定している。このため，制御棒の引き抜きは継続し出力は増加し続けるが，原子炉圧力高による再循環ポンプトリップ及び代替制御棒挿入により事象は整定する。

結果として，燃料被覆管温度は約 55 秒後に 894℃まで増加するものの，判断基準(1200℃)を満足することが分かる。また，燃料被覆管の酸化量は 1%以下であり，判断基準 15%以下となる。

表 5.1.2-1 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き+CCF の判断基準パラメータの解析結果

| 項目 | 解析結果 | 判断基準 |
|----------------------|--------|--------------------------|
| 燃料被覆管温度 (℃) | 約 894 | 1200℃ |
| 原子炉圧力 (MPa[gage]) | 約 7.52 | 10.34 (最高使用圧力の 1.2 倍) |

表 5.1.2-2 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き+CCF の主要事象のクロノロジー

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|--|
| 0 秒 | 制御棒引き抜き開始 |
| 約 27 秒 | RPS によるスクラム失敗（原子炉圧力高） |
| 約 33 秒 | 多様化設備の ATWS-RPT(原子炉圧力高)による 4 台 RPT 多様化設備の ARI(原子炉圧力高)による制御棒挿入機能作動 |
| 約 55 秒 | 燃料被覆管温度最大値到達 |
| 約 58 秒 | 制御棒挿入完了 |
| 約 80 秒 | (解析終了) |

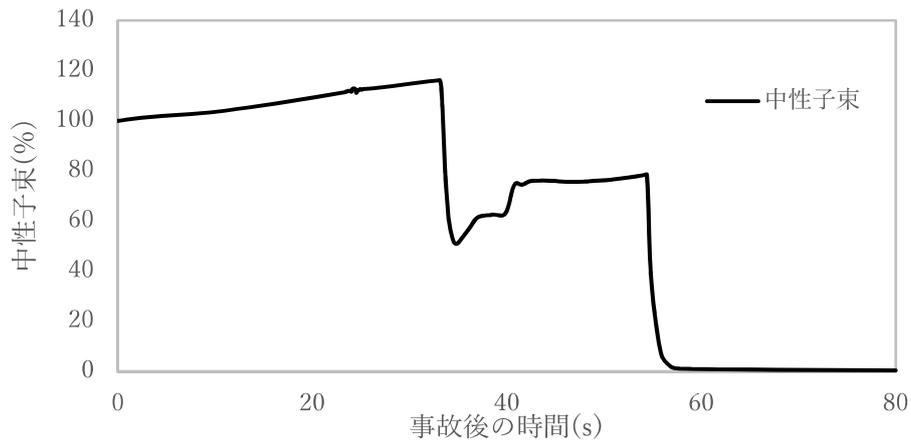


図 5. 1. 2-1 中性子束の時間変化（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き+CCF）

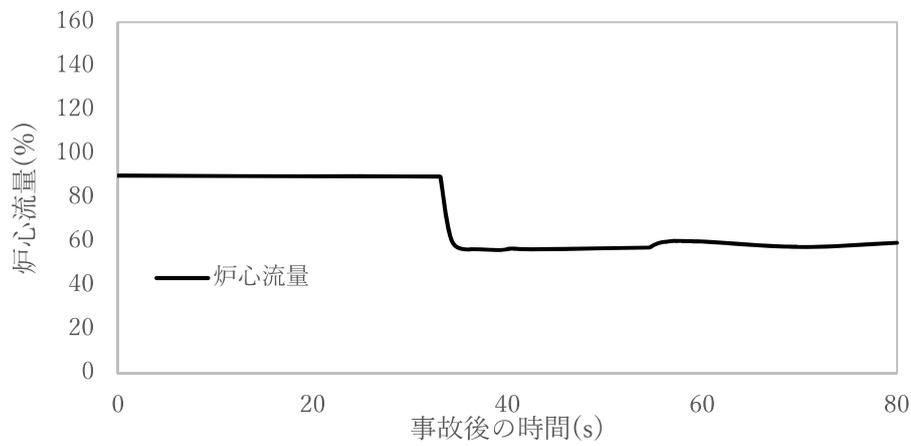


図 5. 1. 2-2 炉心流量の時間変化（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き+CCF）

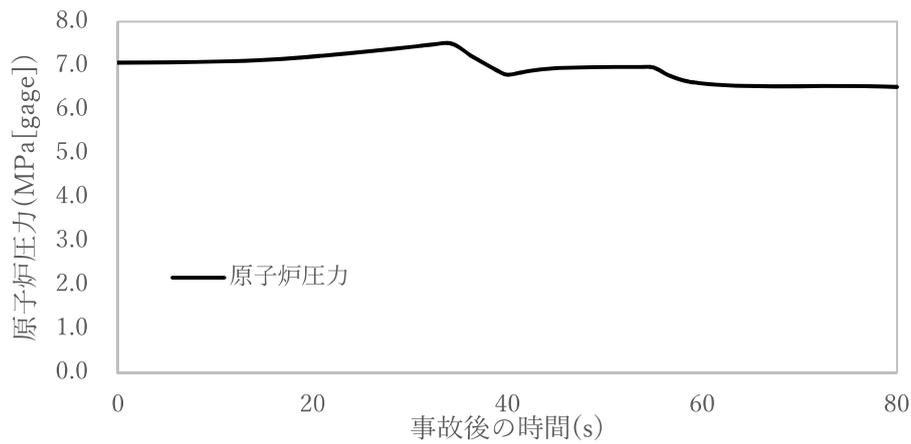


図 5. 1. 2-3 原子炉圧力の時間変化（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き+CCF）

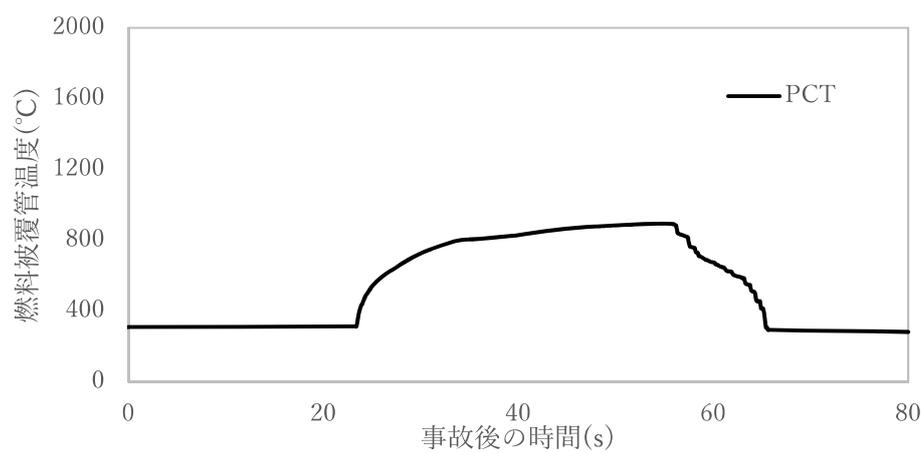


図 5. 1. 2-4 燃料被覆管温度の時間変化（出力運転中の制御棒の異常な引き抜き+CCF）

5.2 炉心内の熱発生又は熱除去の異常な変化

5.2.1 原子炉冷却材流量の部分喪失

原子炉冷却材流量の部分喪失は、炉心流量低下によるボイドの増加によって原子炉水位は上昇するものの原子炉水位高（レベル 8）には到達せず、タービントリップしないため、スクラム条件に至らず整定する事象であり、ソフトウェア CCF によるスクラム失敗の有無に影響されない。

5.2.2 外部電源喪失

外部電源喪失は、蒸気加減弁急閉により再循環ポンプトリップする事象である。原子炉圧力高信号により再循環ポンプトリップする主蒸気隔離弁の誤閉止に比べて、再循環ポンプトリップのタイミングが早いためボイド発生により出力が抑制されることから、ソフトウェア CCF を想定した場合のスクラム遅れの影響は主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。

5.2.3 給水加熱喪失

給水加熱喪失は、炉心入口サブクーリングの増加によるボイドの減少により中性子束は上昇するが、原子炉水位はレベル 1.5 まで低下することはないため MSIV 閉条件に至らず、原子炉圧力の上昇は緩やかなため ARI も作動しない事象である。ソフトウェア CCF を想定した場合のスクラム遅れの影響は主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。

5.2.4 原子炉冷却材流量制御系の誤動作

原子炉冷却材流量制御系の誤動作は、炉心流量増加によるボイドの減少によって中性子束は増加するが、原子炉水位はレベル 1.5 まで低下することはないため MSIV 閉条件に至らず、原子炉圧力の上昇は緩やかなため ARI も作動しない事象である。ソフトウェア CCF を想定した場合のスクラム遅れの影響は主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。

5.3 原子炉冷却材圧力又は原子炉冷却材保有量の異常な変化

5.3.1 負荷の喪失

負荷の喪失は、蒸気加減弁急閉により再循環ポンプトリップする事象である。原子炉圧力高信号により再循環ポンプトリップする主蒸気隔離弁の誤閉止に比べて、再循環ポンプトリップのタイミングが早いためボイド発生により出力が抑制されることから、ソフトウェア CCF を想定した場合のスクラム遅れの影響は主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。

5.3.2 主蒸気隔離弁の誤閉止

表 5.3.2-1 に解析結果，表 5.3.2-2 に主要事象のクロノロジー，図 5.3.2-1～5.3.2-7 に主要パラメータの時間変化を示す。

主蒸気隔離弁（MSIV）誤閉止の発生後，主蒸気隔離弁閉信号が発生するが，RPS による原子炉スクラムに失敗する。約 2 秒後に原子炉圧力高信号で代替再循環ポンプトリップ（再循環ポンプ 4 台トリップ）および代替制御棒挿入機能（ARI）が作動する。

MSIV 閉止により原子炉圧力が上昇し中性子束が急上昇するため，沸騰遷移が生じて燃料被覆管温度は上昇する。その後，代替再循環ポンプトリップにより原子炉出力が減少するため燃料被覆管表面はリウエットし，燃料被覆管温度は約 715 °C に抑えられる。また燃料被覆管の酸化量は酸化反応が著しくなる前であり，判断基準 15% 以下となる。原子炉圧力は代替再循環ポンプトリップと逃がし安全弁の作動により約 8.42 MPa [gage] 以下に抑えられる。原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力は，原子炉圧力と原子炉圧力容器底部圧力との差（高々約 0.3 MPa）を考慮しても，判断基準を十分下回る。事象開始後約 27 秒までに ARI による全制御棒挿入は完了して原子炉出力が低下し事象は収束する。

表 5.3.2-1 主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF の判断基準パラメータの解析結果

| 項目 | 解析結果 | 判断基準 |
|-------------------|------------------|--------------------------|
| 燃料被覆管温度 (°C) | 約 715[16/24]* | 1200 |
| 中性子束 (%) | 約 293 | - |
| 原子炉圧力 (MPa[gage]) | 約 8.42 | 10.34 (最高使用圧力の 1.2 倍) |
| S/P 水温 (°C) | 約 43 (解析終了時点) | 104 (最高使用温度) |

* []内の数値は、燃料棒軸方向 24 ノード中の位置を示す。

表 5.3.2-2 主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF の主要事象のクロノロジー

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|--|
| 0 秒 | 主蒸気隔離弁誤閉止開始 スクラム失敗 (MSIV10%閉止に伴う MSIV 閉スクラム) * |
| 約 2 秒 | 原子炉圧力高到達 代替再循環ポンプトリップ作動 (再循環ポンプ 4 台トリップ) ARI 弁励磁 SRV (逃し弁機能) 作動 |
| 3 秒 | 主蒸気隔離弁全閉 |
| 約 4 秒 | 原子炉圧力最大値到達 |
| 約 6 秒 | 燃料被覆管温度最大値到達 |
| 約 27 秒 | 全制御棒挿入完了 |
| 約 30 秒 | 原子炉水位低 (レベル 2) 到達 再循環ポンプ 6 台トリップ |
| 60 秒 | (解析終了) |

* RPS (ソフトウェア CCF) による失敗

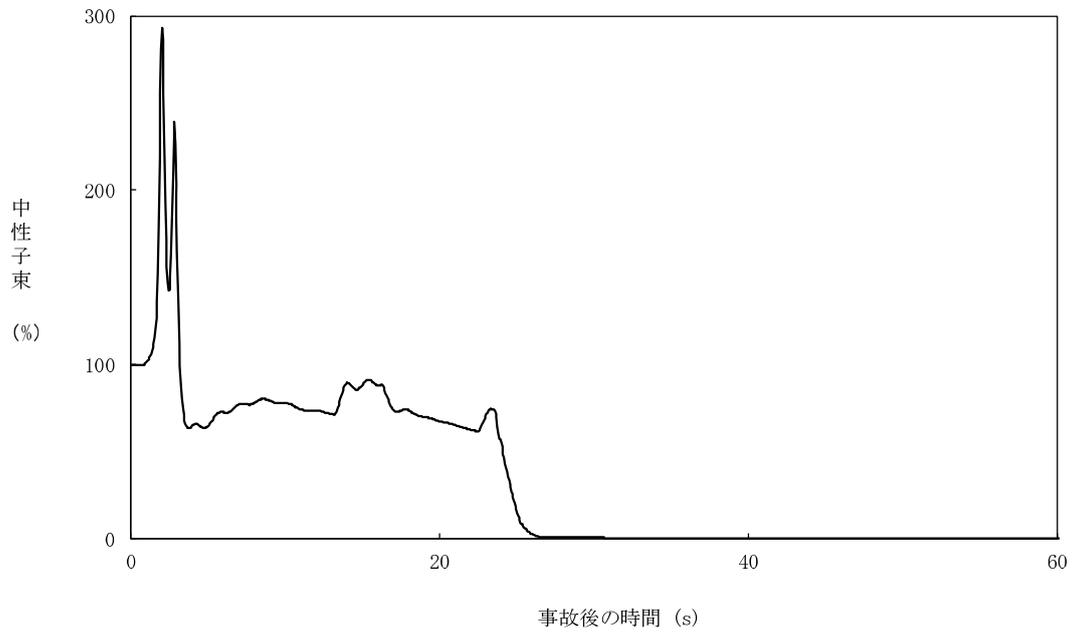


図 5. 3. 2-1 中性子束の時間変化 (主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF)

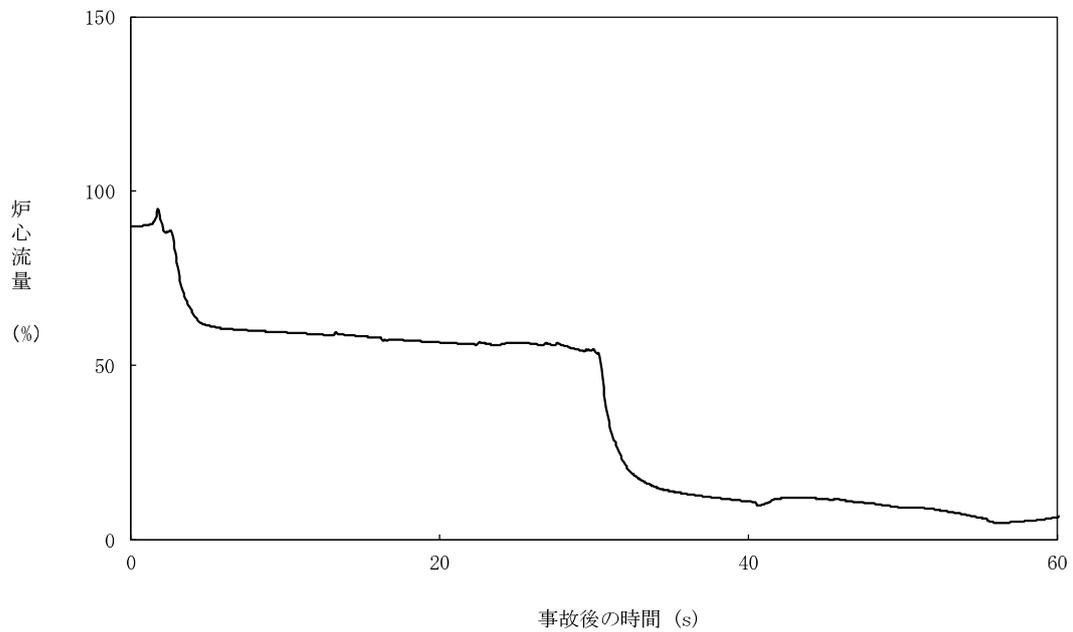


図 5. 3. 2-2 炉心流量の時間変化 (主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF)

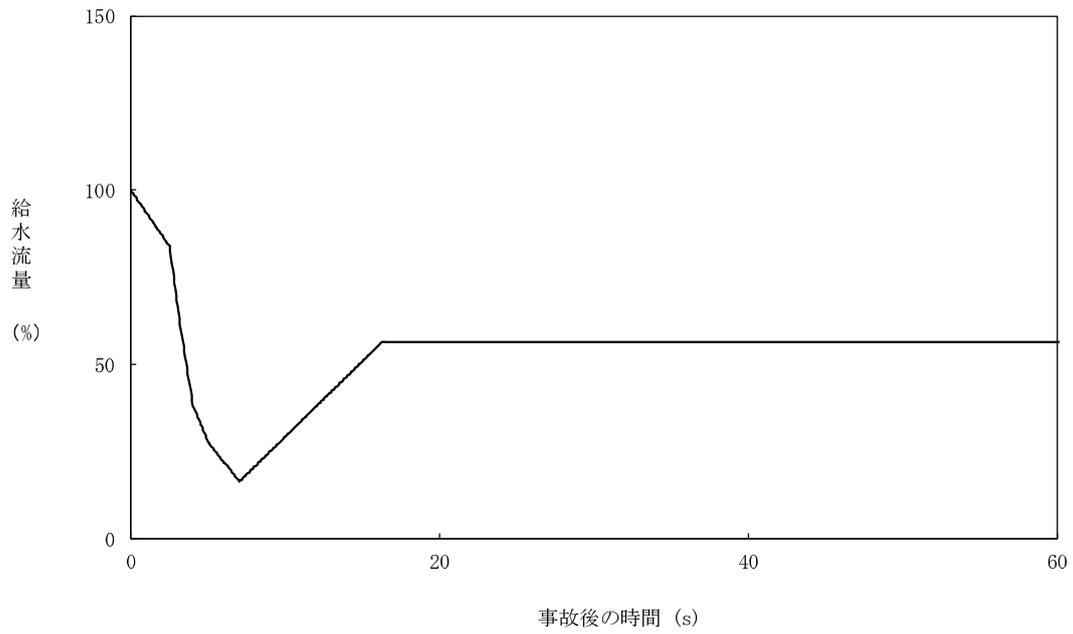


図 5.3.2-3 給水流量の時間変化（主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF）

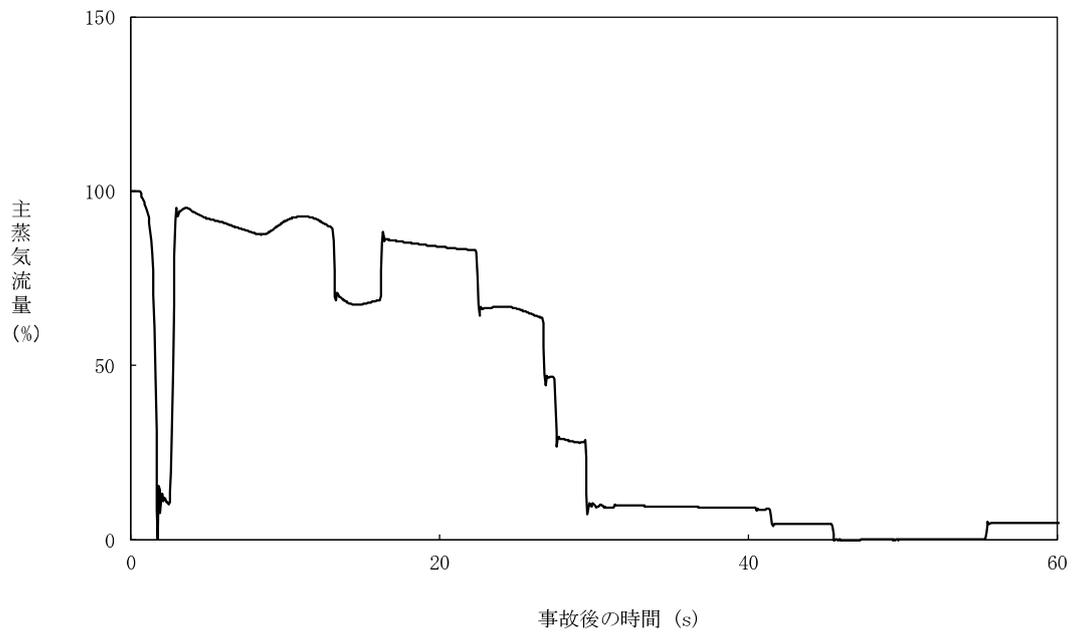


図 5.3.2-4 主蒸気流量の時間変化（主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF）

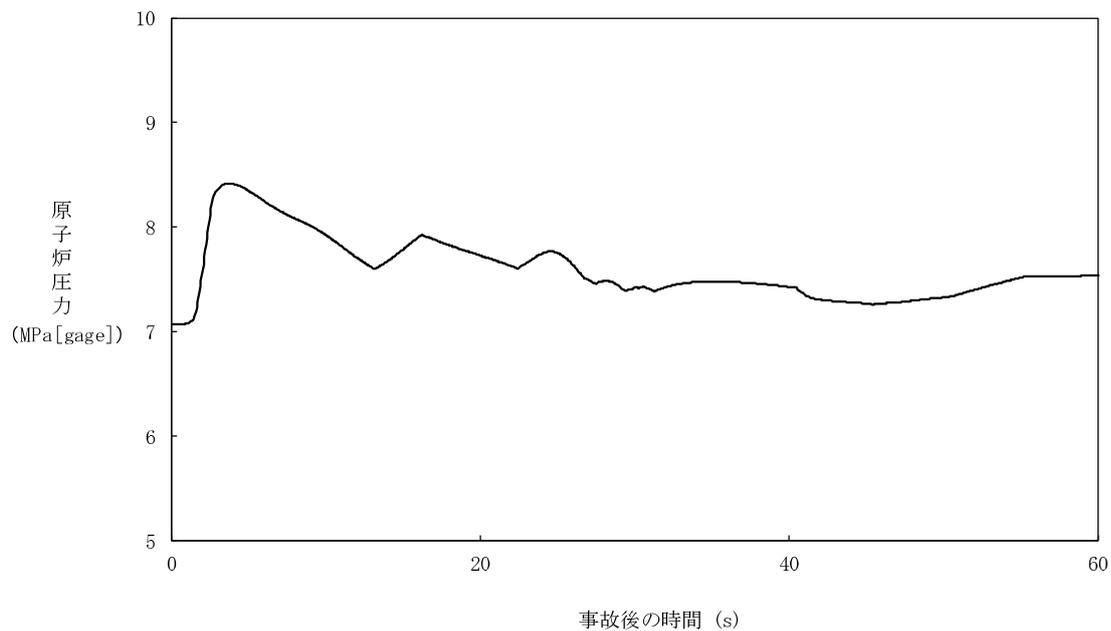


図 5.3.2-5 原子炉圧力の時間変化（主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF）

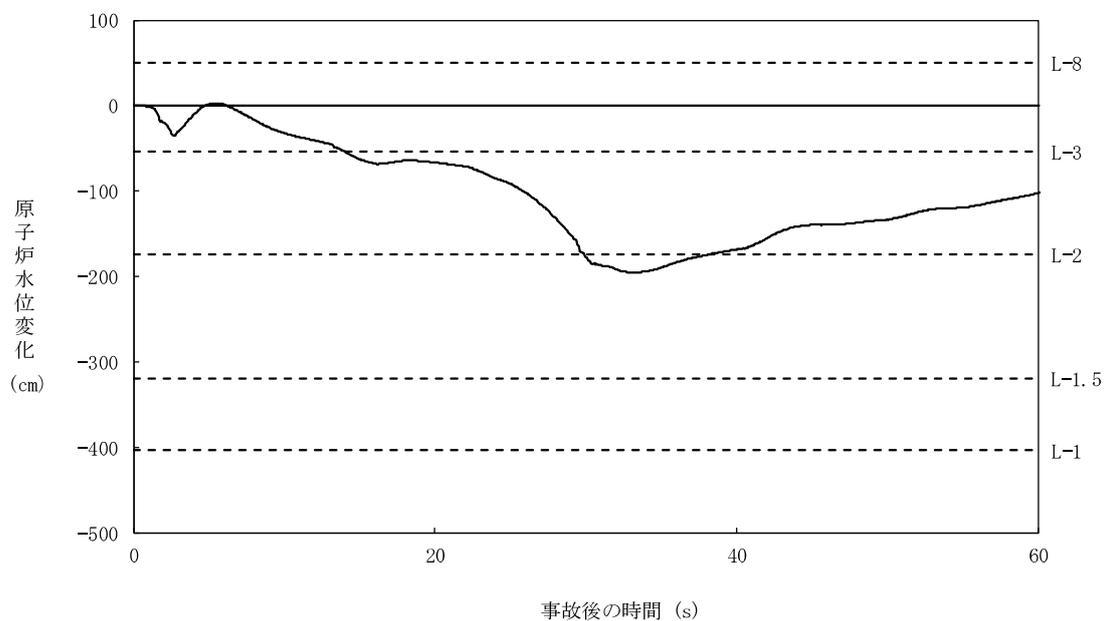


図 5.3.2-6 原子炉水位(シュラウド外水位)の時間変化（主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF）

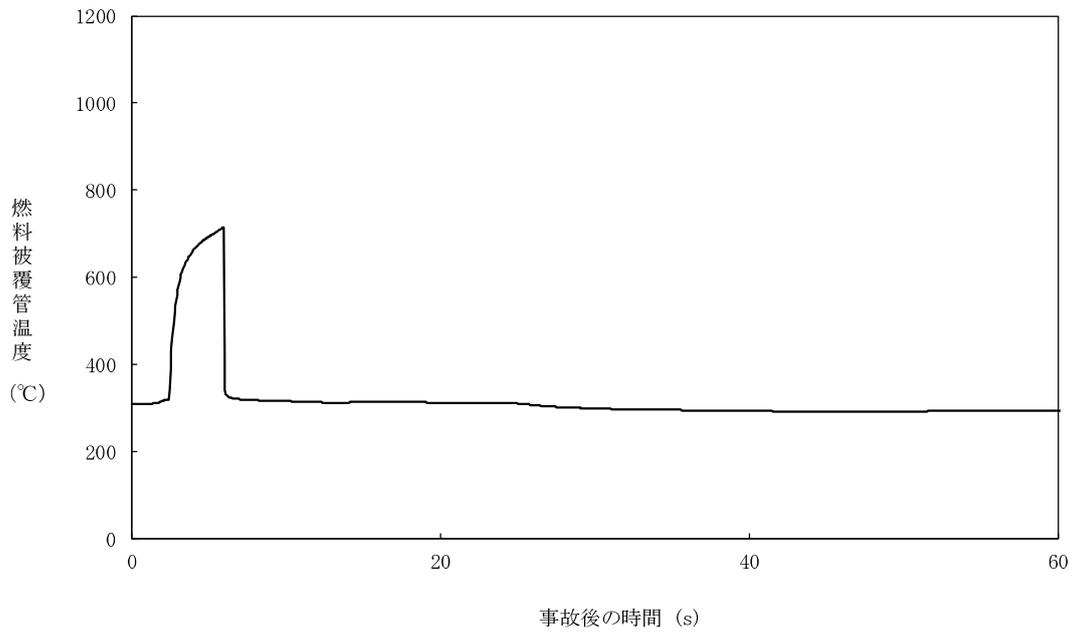


図 5.3.2-7 燃料被覆管温度の時間変化（主蒸気隔離弁の誤閉止+CCF）

5.3.3 給水制御系の故障

給水制御系の故障は、給水流量増加によって原子炉水位は上昇し原子炉水位高（レベル8）によるタービントリップに至るが、ARI 作動により原子炉圧力の上昇は抑えられ、注水により原子炉水位も回復するため事象収束までに MSIV 閉条件には至らない事象である。ソフトウェア CCF を想定した場合のスクラム遅れの影響は主蒸気隔離弁の誤閉止に包絡される。

5.3.4 原子炉圧力制御系の故障

表 5.3.4-1 に解析結果、表 5.3.4-2 に主要事象のクロノロジー、図 5.3.4-1～5.3.4-7 に主要パラメータの時間変化を示す。

圧力制御装置の故障により最大出力信号が発生すると、主蒸気流量が増大するとともに原子炉圧力は低下し、約 8 秒後にタービン入口圧力低が発生する。主蒸気隔離弁閉止に失敗するため、原子炉はスクラムしない。減圧による炉心内のボイドが増加し、約 17 秒で原子炉水位高（レベル8）によるタービントリップおよび給水ポンプトリップが発生する。約 22 秒で原子炉水位低（レベル3）により再循環ポンプ 4 台トリップが発生するが、RPS による原子炉水位低スクラムに失敗する。またタービン主蒸気止め弁の閉止により原子炉圧力が上昇し、約 23 秒後に原子炉圧力高信号で代替制御棒挿入機能（ARI）が作動する。

その後、代替再循環ポンプトリップにより原子炉出力が減少するため燃料被覆管表面はリウエットし、燃料被覆管温度は約 748 °C に抑えられる。また燃料被覆管の酸化量は酸化反応が著しくなる前であり、判断基準 15% 以下となる。原子炉圧力は代替再循環ポンプトリップと逃がし安全弁の作動により約 8.04 MPa[gage] 以下に抑えられる。原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力は、原子炉圧力と原子炉圧力容器底部圧力との差（高々約 0.3 MPa）を考慮しても、判断基準を十分下回る。事象開始後約 48 秒までに ARI による全制御棒挿入は完了して原子炉出力が低下し事象は収束する。

表 5.3.4-1 原子炉圧力制御系の故障+CCF の判断基準パラメータの解析結果

| 項目 | 解析結果 | 判断基準 |
|-------------------|---------------|--------------------------|
| 燃料被覆管温度 (°C) | 約 748[19/24]* | 1200 |
| 中性子束 (%) | 約 196 | - |
| 原子炉圧力 (MPa[gage]) | 約 8.04 | 10.34 (最高使用圧力の 1.2 倍) |
| S/P 水温 (°C) | 約 42 | 104 (最高使用温度) |

* []内の数値は、燃料棒軸方向 24 ノード中の位置を示す。

表 5.3.4-2 原子炉圧力制御系の故障+CCF の主要事象のクロノロジー

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|--|
| 0 秒 | 最大出力信号発生 蒸気加減弁開度増 タービンバイパス弁作動 |
| 約 8 秒 | タービン入口圧力低発生 MSIV 閉 (スクラム) 不作動 * |
| 約 17 秒 | 原子炉水位高 (レベル 8) 到達 タービントリップ (タービン主蒸気止め弁閉止) スクラム失敗 (主蒸気止め弁閉スクラム) * |
| 約 22 秒 | 原子炉水位低 (レベル 3) 到達 スクラム失敗 (原子炉水位低スクラム) * 再循環ポンプ 4 台トリップ |
| 約 23 秒 | 原子炉圧力高到達 ARI 弁励磁 |
| 約 24 秒 | SRV (逃し弁機能) 作動 原子炉圧力最大値到達 |
| 約 37 秒 | 燃料被覆管温度最大値到達 |
| 約 41 秒 | 原子炉水位低 (レベル 2) 到達 再循環ポンプ 6 台トリップ |
| 約 48 秒 | 全制御棒挿入完了 |
| 60 秒 | (解析終了) |

* RPS (ソフトウェア CCF) による失敗

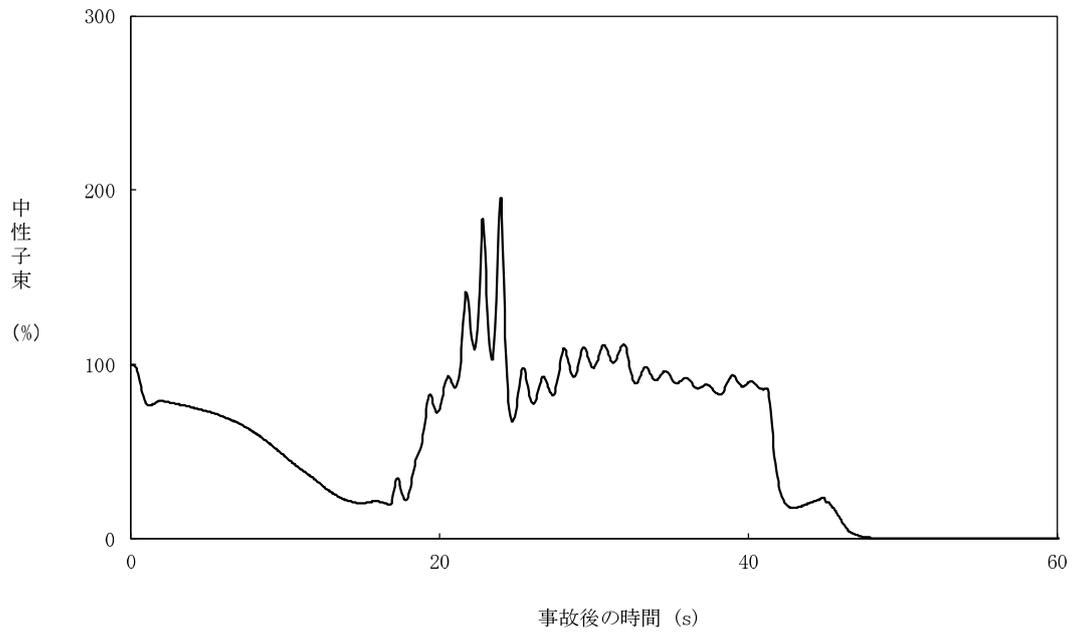


図 5.3.4-1 中性子束の時間変化（原子炉圧力制御系の故障+CCF）

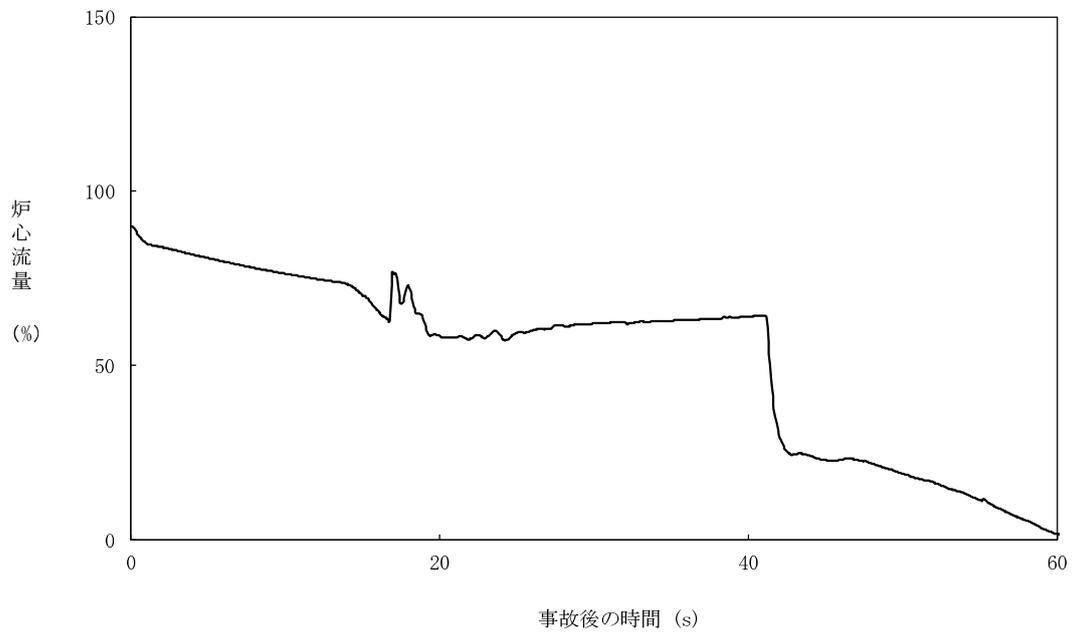


図 5.3.4-2 炉心流量の時間変化（原子炉圧力制御系の故障+CCF）

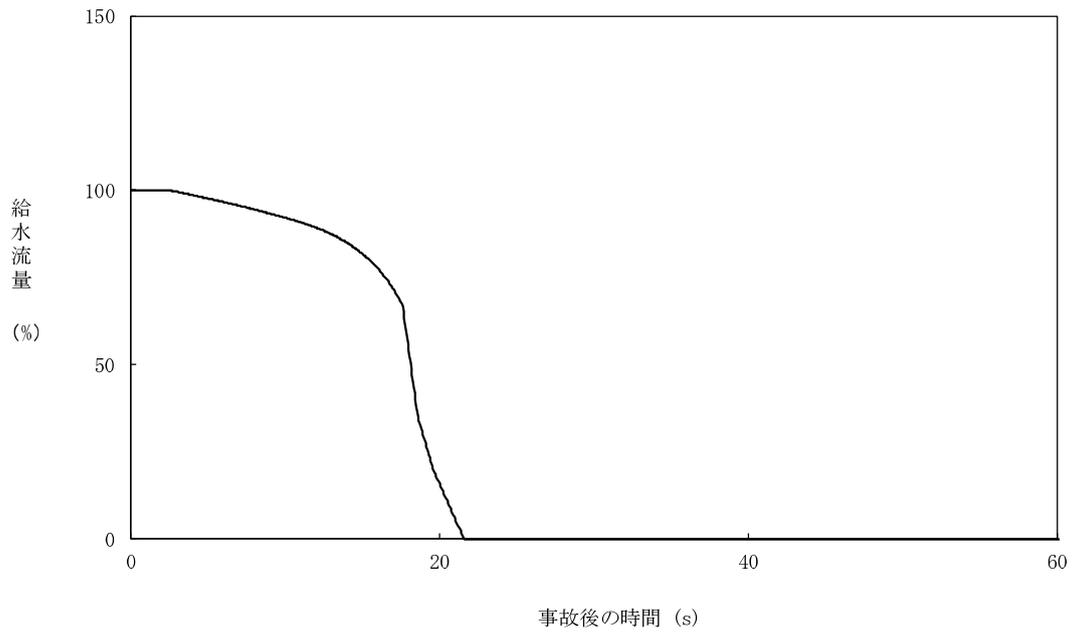


図 5.3.4-3 給水流量の時間変化（原子炉圧力制御系の故障+CCF）

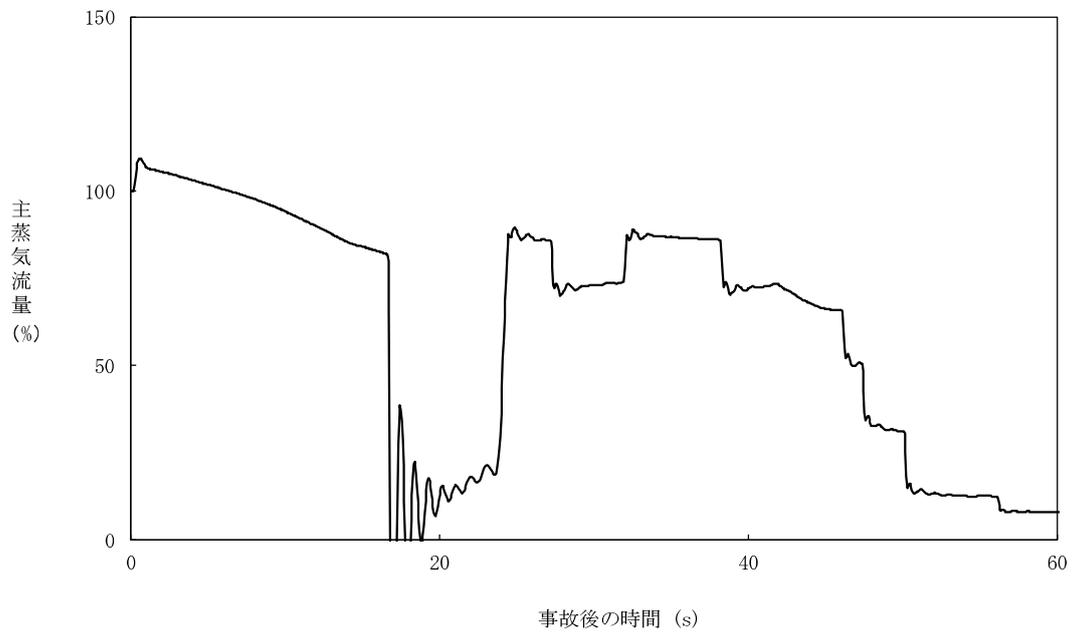


図 5.3.4-4 主蒸気流量の時間変化（原子炉圧力制御系の故障+CCF）

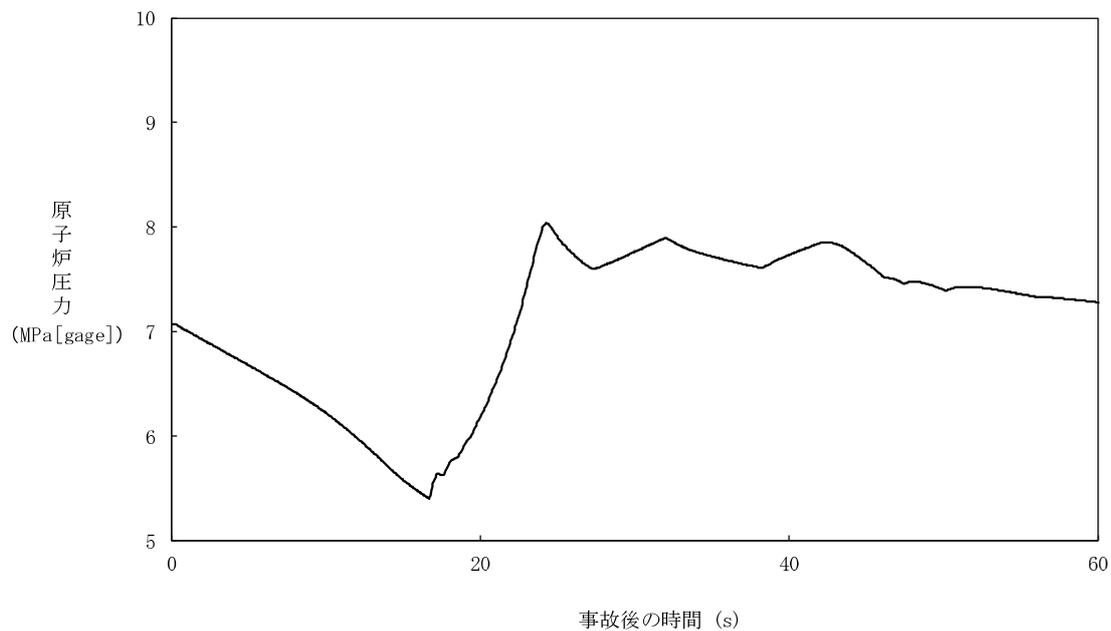


図 5.3.4-5 原子炉圧力の時間変化 (原子炉圧力制御系の故障+CCF)

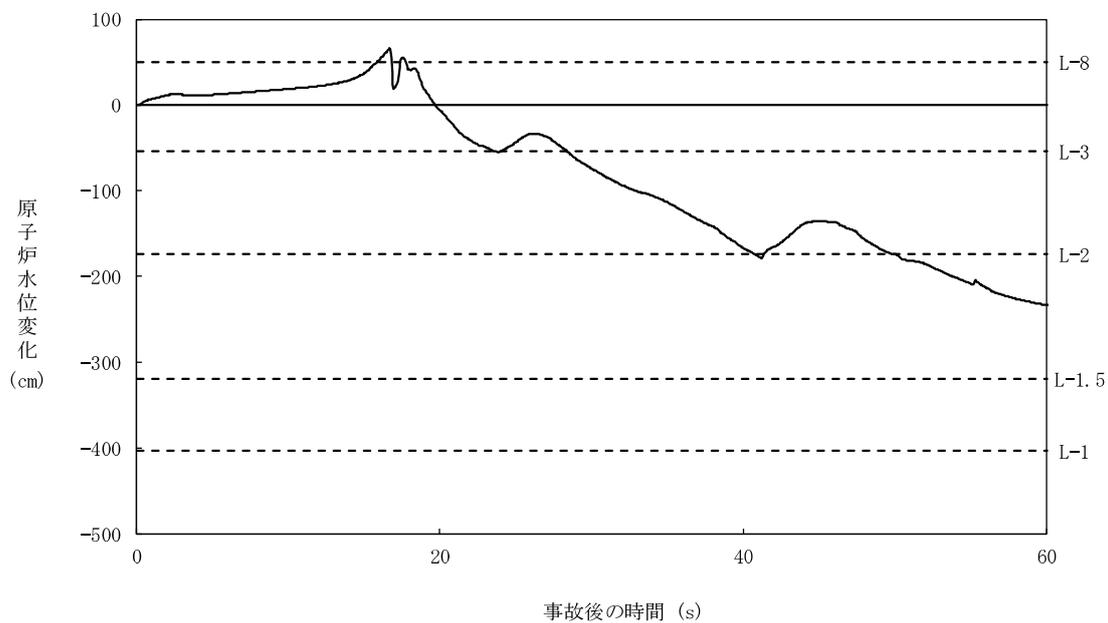


図 5.3.4-6 原子炉水位(シュラウド外水位)の時間変化 (原子炉圧力制御系の故障+CCF)

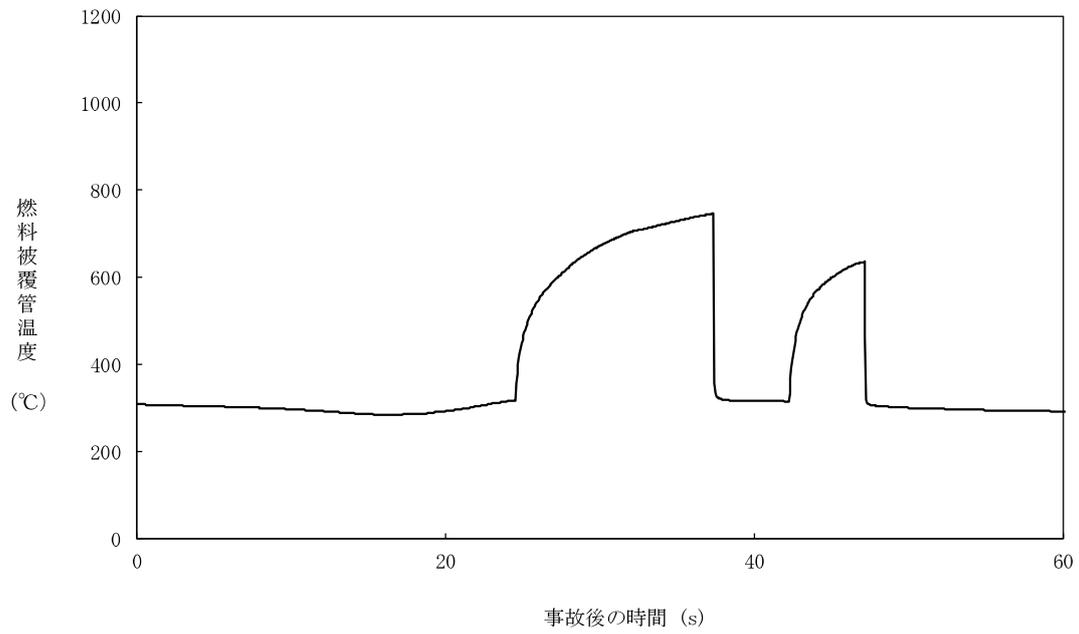


図 5.3.4-7 燃料被覆管温度の時間変化（原子炉圧力制御系の故障+CCF）

5.3.5 給水流量の全喪失

表 5.3.5-1 に解析結果，表 5.3.5-2 に主要事象のクロノロジー，図 5.3.5-1～5.3.5-7 に主要パラメータの時間変化を示す。

給水ポンプトリップの発生により原子炉水位が低下する。約 8 秒で原子炉水位低（レベル 3）により再循環ポンプ 4 台トリップが発生するが，RPS による原子炉水位低スクラムに失敗する。さらに約 19 秒で原子炉水位低（レベル 2）により再循環ポンプ 6 台トリップおよび代替制御棒挿入機能（ARI）が作動する。

原子炉水位低（レベル 2）による RCIC の起動に失敗するものの，HPCF の手動起動により原子炉水位は回復する。解析では HPCF 作動まで行っていないが，このとき既に ARI が作動しており，出力は十分減少しているため，原子炉圧力，燃料被覆管温度および燃料被覆管の酸化量は初期値を超えることない。また，注水の時間余裕は LOCA に包絡される。事象開始後約 44 秒までに ARI による全制御棒挿入は完了して原子炉出力が低下し事象は収束する。

表 5.3.5-1 給水流量の全喪失+CCF の判断基準パラメータの解析結果

| 項目 | 解析結果 | 判断基準 |
|-------------------|-----------|--------------------------|
| 燃料被覆管温度 (°C) | 初期値を超えない* | 1200 |
| 中性子束 (%) | 約 102 | - |
| 原子炉圧力 (MPa[gage]) | 初期値を超えない | 10.34 (最高使用圧力の 1.2 倍) |
| S/P 水温 (°C) | 初期値を超えない | 104 (最高使用温度) |

* 本評価では BT しない。

表 5.3.5-2 給水流量の全喪失+CCF の主要事象のクロノロジー

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|--|
| 0 秒 | 給水ポンプトリップ |
| 約 8 秒 | 原子炉水位低 (レベル 3) 到達 スクラム失敗 (原子炉水位低スクラム) * 再循環ポンプ 4 台トリップ |
| 約 19 秒 | 原子炉水位低 (レベル 2) 到達 再循環ポンプ 6 台トリップ ARI 弁励磁 |
| 約 44 秒 | 全制御棒挿入完了 |
| 60 秒 | (解析終了) |

* RPS (ソフトウェア CCF) による失敗

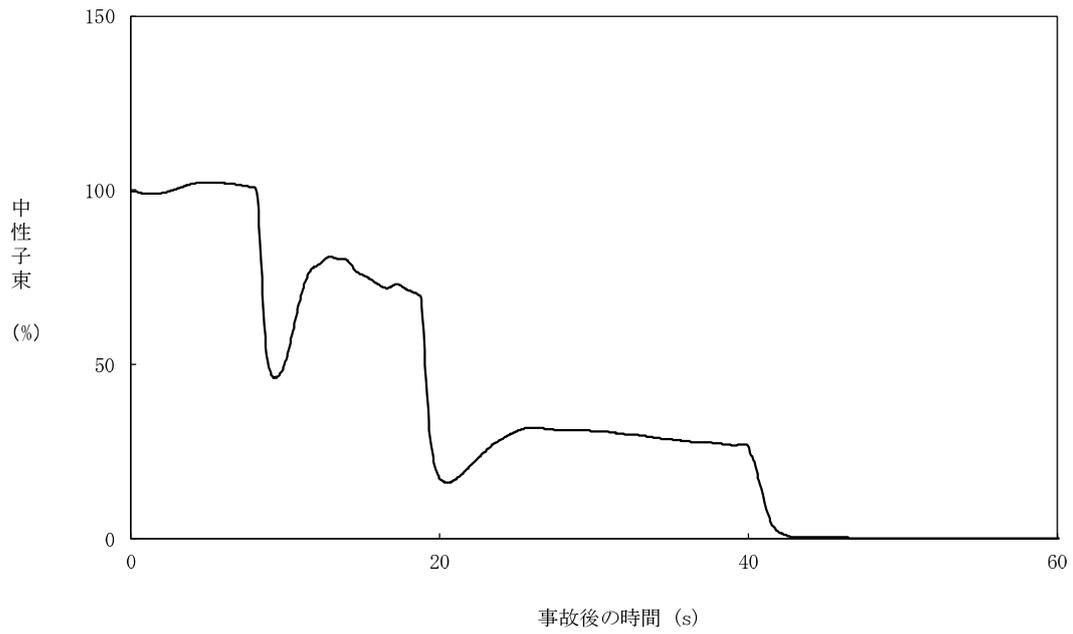


図 5.3.5-1 中性子束の時間変化（給水流量の全喪失+CCF）

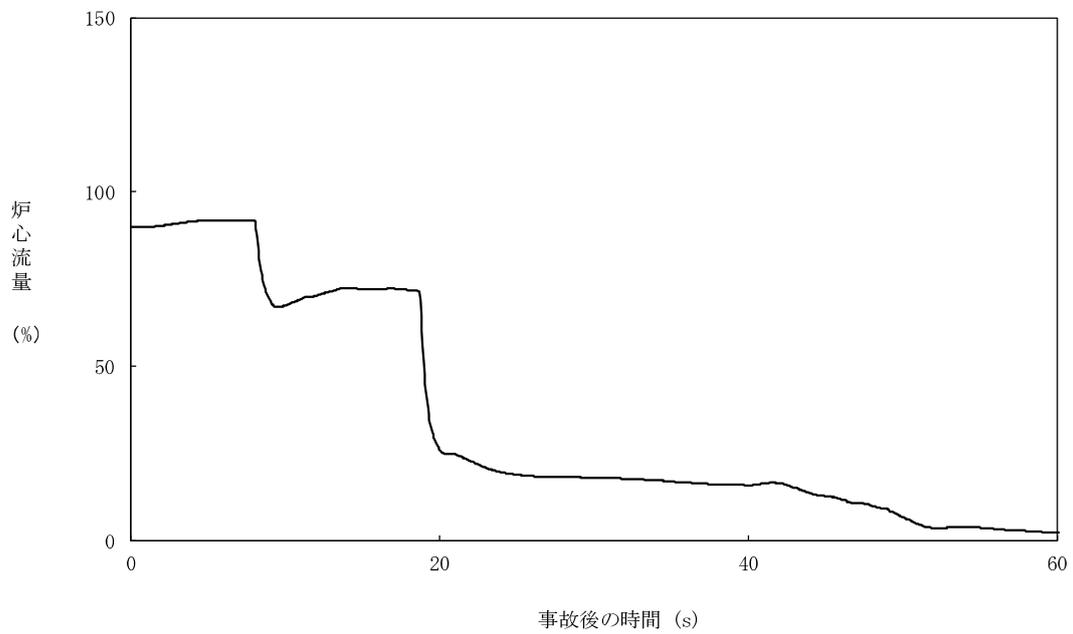


図 5.3.5-2 炉心流量の時間変化（給水流量の全喪失+CCF）

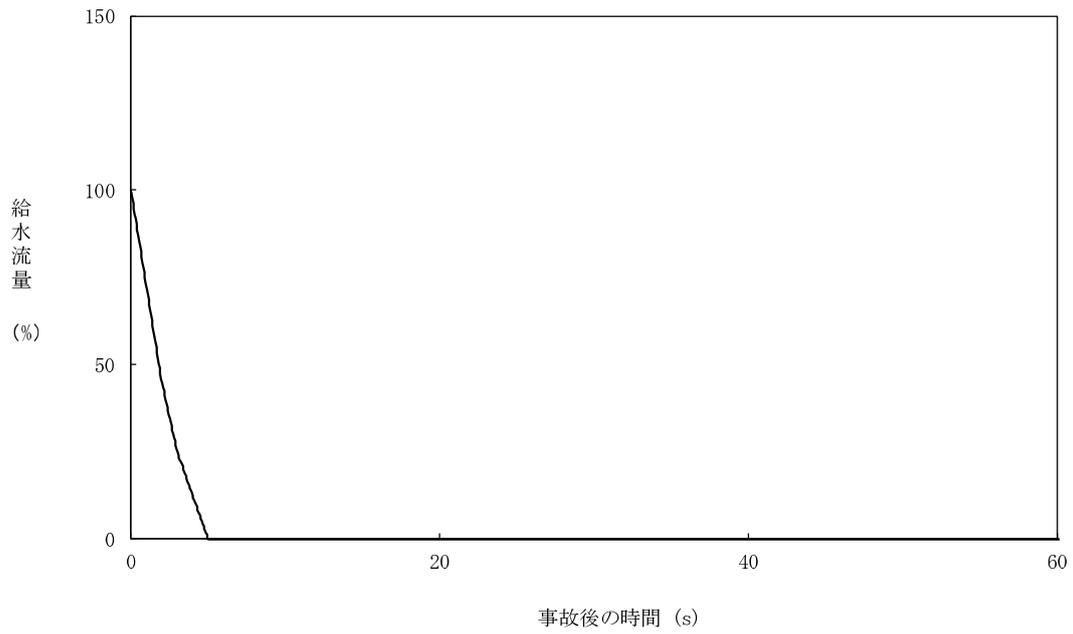


図 5.3.5-3 給水流量の時間変化（給水流量の全喪失+CCF）

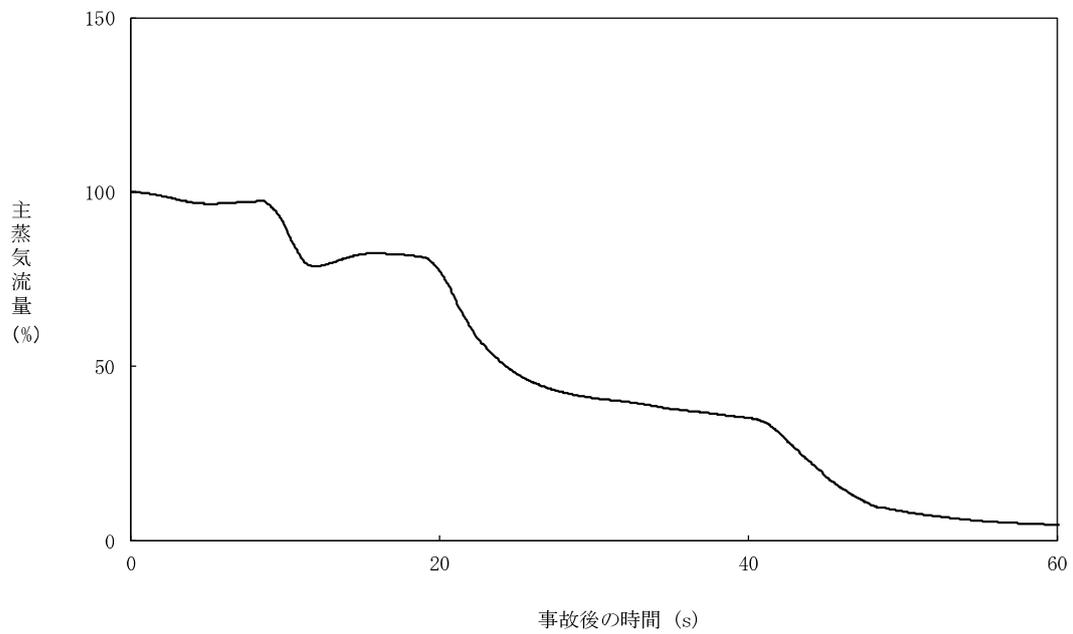


図 5.3.5-4 主蒸気流量の時間変化（給水流量の全喪失+CCF）

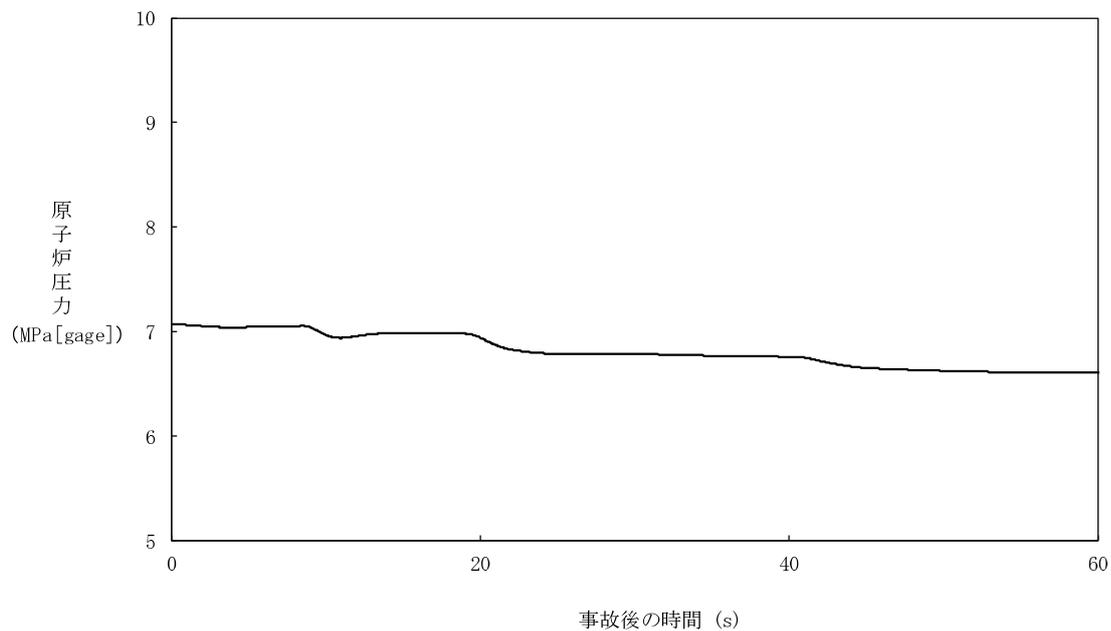


図 5.3.5-5 原子炉圧力の時間変化 (給水流量の全喪失+CCF)

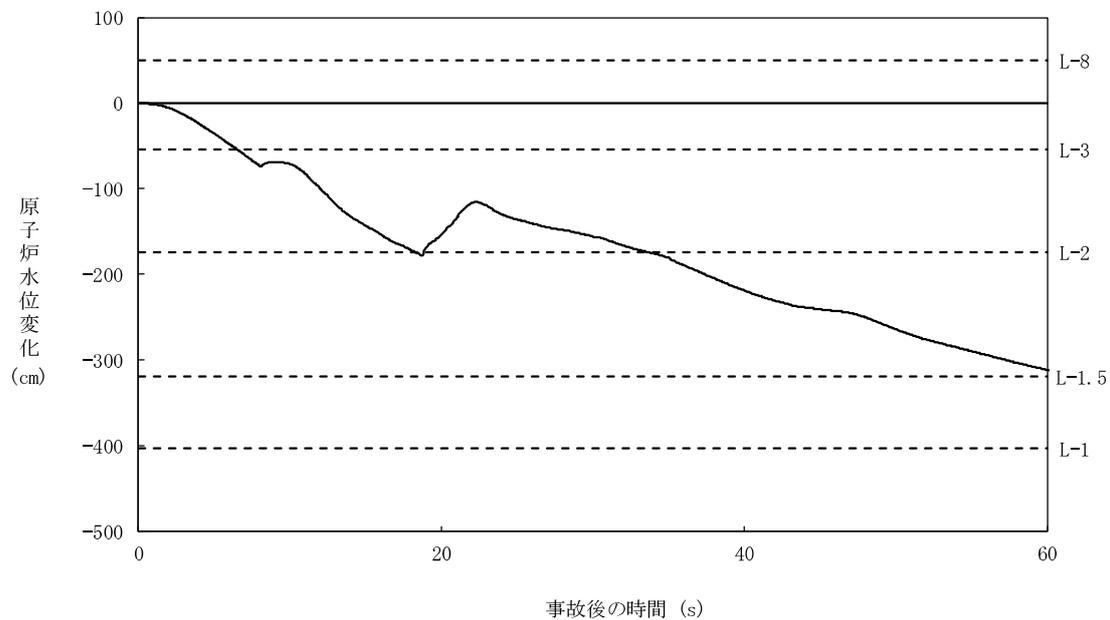


図 5.3.5-6 原子炉水位(シュラウド外水位)の時間変化 (給水流量の全喪失+CCF)

6. 設計基準事故+ソフトウェア CCF の解析

6.1 原子炉冷却材の喪失又は炉心冷却状態の著しい変化

6.1.1 原子炉冷却材喪失

ABWR を対象に原子炉冷却材喪失事故 (LOCA) とソフトウェア CCF が重畳する場合に、炉心損傷を防止する上で、多様化設備による原子炉停止機能及び炉心冷却機能の有効性、並びに多様化設備による手動操作に対する時間余裕を評価した。ここで、ソフトウェア CCF はデジタル安全保護回路に対して安全保護機能の喪失を想定するものであることから、常用系が正常に作動することを仮定した。

表 6.1.1-1 に LOCA+ソフトウェア CCF における HPCF 手動起動に対する時間余裕の評価結果を示す。また、図 6.1.1-1 に HPCF 手動起動時間と燃料被覆管温度の関係を示す。給水配管破断+ソフトウェア CCF が最厳ケースとなり、炉心の著しい損傷を防止 (燃料被覆管の最高温度 $\leq 1200^{\circ}\text{C}$ 、燃料被覆管の酸化量 $\leq 15\%$) するための HPCF 手動起動に対する時間余裕は約 13 分と評価される。給水配管破断ケースは、給水継続が行われないため、多様化設備による手動操作に対する時間余裕が他のケースに比べ最も小さい。

また、被ばく評価への影響を考慮した手動操作の時間余裕を評価した。表 6.1.1-2 に被ばく評価への影響を考慮した手動操作の時間余裕の評価結果を示す。最厳ケースの給水配管破断+ソフトウェア CCF において燃料被覆管の破裂を防止するための HPCF 手動起動に対する時間余裕は約 10 分と評価される。

なお、RHR 出口配管破断+ソフトウェア CCF では、タービン駆動給水ポンプ (T/D-RFP) トリップ及びその後の電動駆動給水ポンプ (M/D-RFP) の自動起動のタイミングが、原子炉減圧の状態等によって変わり得ることから、M/D-RFP が自動起動しない保守的な条件で感度解析を実施し、保守的な条件を仮定した場合でも手動操作に対する要求時間は 10 分以上となることを確認している (参考 1 参照)。

表 6.1.1-1 LOCA+CCF における HPCF 手動起動に対する時間余裕

| 起回事象 | HPCF 手動起動に対する時間余裕 |
|------------|-------------------|
| 給水配管破断 | 13 分 |
| 主蒸気管破断 | 22 分 |
| RHR 出口配管破断 | 20 分 |

表 6.1.1-2 被ばく評価への影響を考慮した HPCF 注水の手動操作に対する時間余裕

| 起回事象 | 燃料被覆管の破裂防止のための HPCF 手動起動に対する時間余裕 |
|--------|----------------------------------|
| 給水配管破断 | 10 分 |

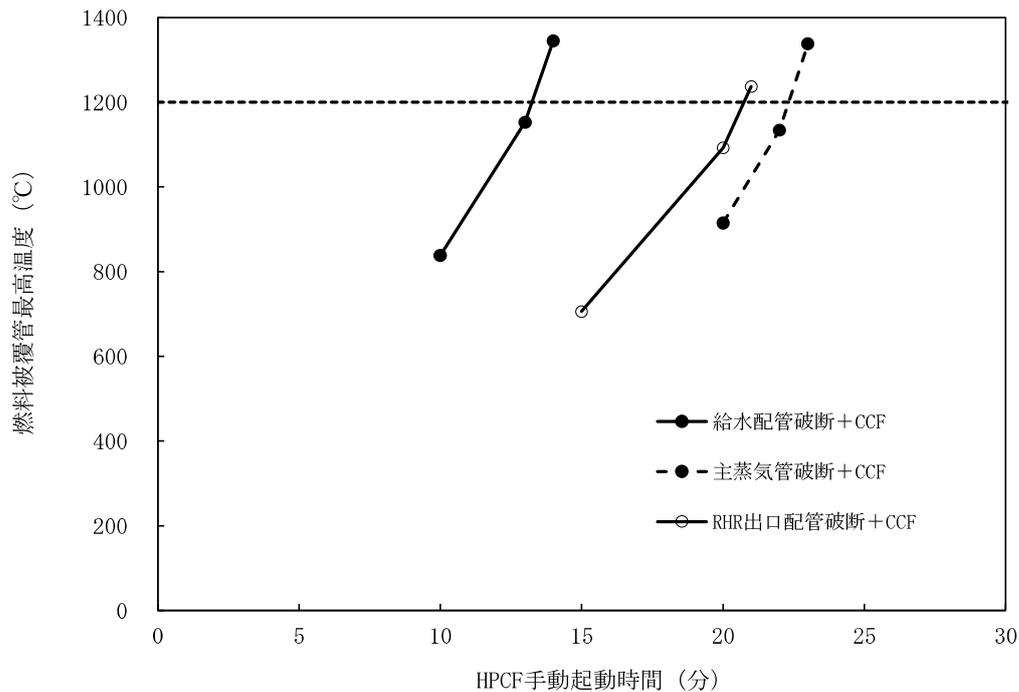


図 6.1.1-1 LOCA+CCF における HPCF 手動起動時間と燃料被覆管温度の関係

最厳となる給水配管破断+ソフトウェア CCF について、境界条件となった HPCF1 台 13 分手動起動ケースの解析結果を以下に示す。

表 6.1.1-3 に主要事象のクロノロジー、図 6.1.1-2～6 に主要パラメータの時間変化を示す。

給水配管破断により、事象発生と同時に給水流量は全喪失するが、CRD ページ水による注水は継続される。破断口からの冷却材流出により原子炉水位は徐々に低下し、原子炉水位低（レベル 3）信号は事故後約 2 秒で発生する。原子炉水位低（レベル 3）信号発生後、RPS によるスクラムに失敗するが、多様化設備の ATWS-RPT により再循環ポンプ 4 台はトリップする。さらに水位が低下して、原子炉水位低（レベル 2）信号が事故後約 7 秒で発生し、多様化設備の ARI による制御棒挿入機能が作動する。原子炉水位低（レベル 2）信号発生後、ATWS-RPT により残りの再循環ポンプ 6 台がトリップするとともに、約 32 秒後に ARI による制御棒挿入が完了する。その後、原子炉水位は低下し、約 4 分後にシュラウド内水位は燃料有効長上端を下回り、燃料被覆管温度は上昇するが、13 分後に多様化設備による HPCF1 台

手動起動により注水が開始され、炉心は再冠水する。

燃料被覆管最高温度は事象発生から約 13 分後に約 1153℃（有効発熱部の下から約 74% の位置）となるが、判断基準である 1200℃を下回る。また、燃料被覆管酸化割合の最大値は約 10%であり、判断基準である 15%を下回る。

表 6.1.1-3 主要事象のクロノロジー
（給水配管破断+CCF, HPCF1 台 13 分手動起動）

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|---|
| 0 秒 | 給水配管破断 給水流量の全喪失 （但し、CRD パージ水による注水は継続） |
| 約 2 秒 | RPS によるスクラム失敗（水位低レベル 3） 多様化設備の ATWS-RPT（水位低レベル 3）による 4 台 RPT |
| 約 7 秒 | 多様化設備の ARI（水位低レベル 2）による制御棒挿入機能作動 ATWS-RPT（水位低レベル 2）による 6 台 RPT |
| 約 32 秒 | 制御棒挿入完了 |
| 約 4 分 | 原子炉水位 TAF 到達 |
| 13 分 | 多様化設備による HPCF1 台の手動起動 |
| 約 23 分 | 炉心再冠水 |

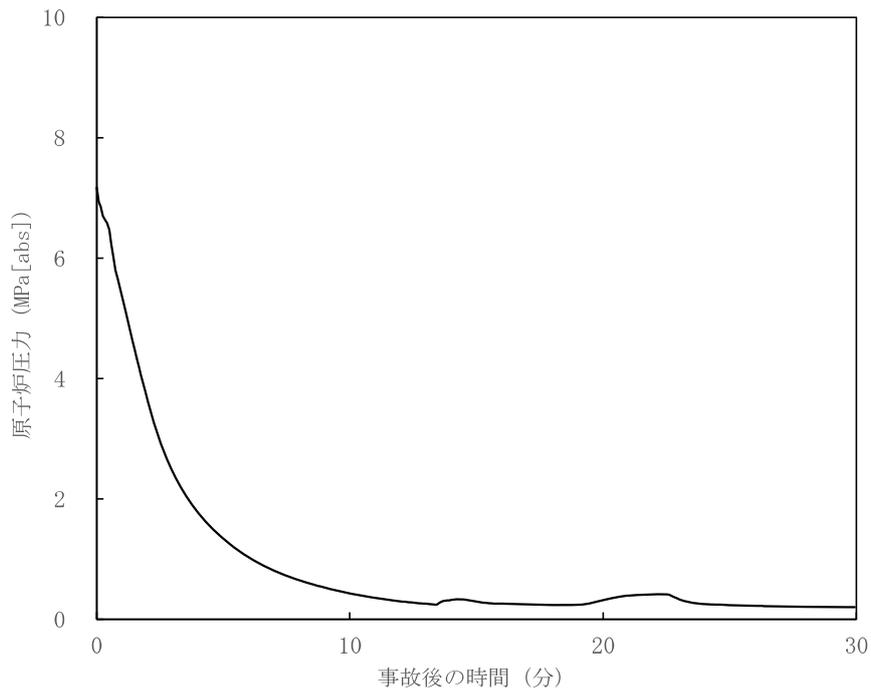


図 6. 1. 1-2 原子炉圧力の時間変化（給水配管破断+CCF）

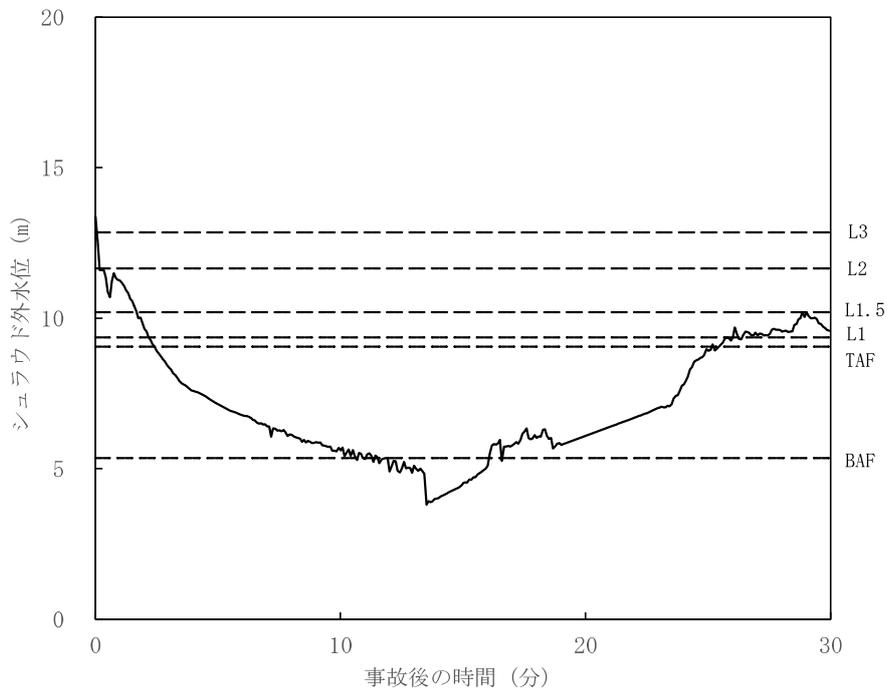


図 6. 1. 1-3 原子炉水位（シュラウド外水位）の時間変化
（給水配管破断+CCF）

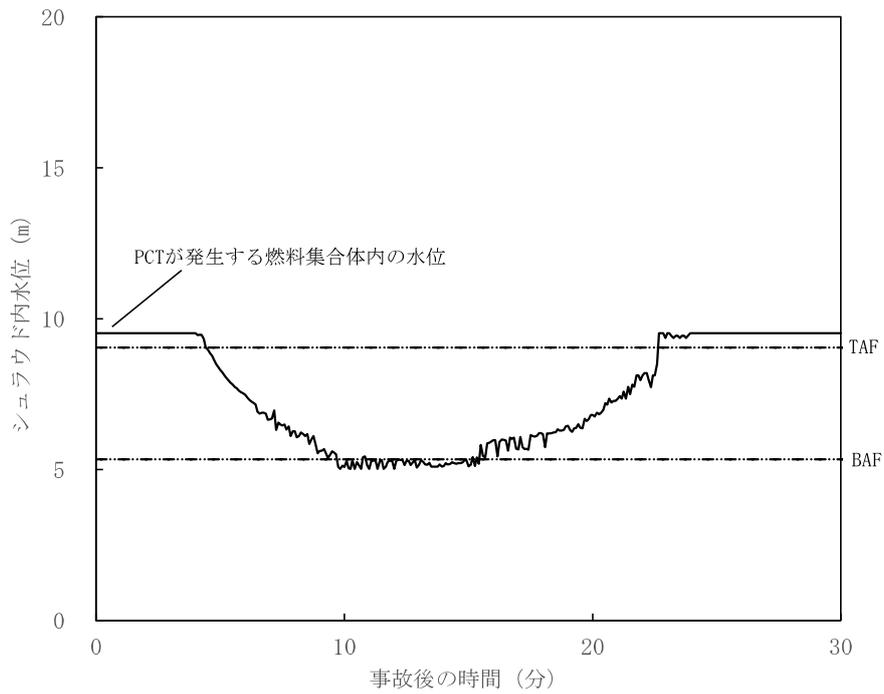


図 6. 1. 1-4 原子炉水位（シュラウド内水位）の時間変化
（給水配管破断+CCF）

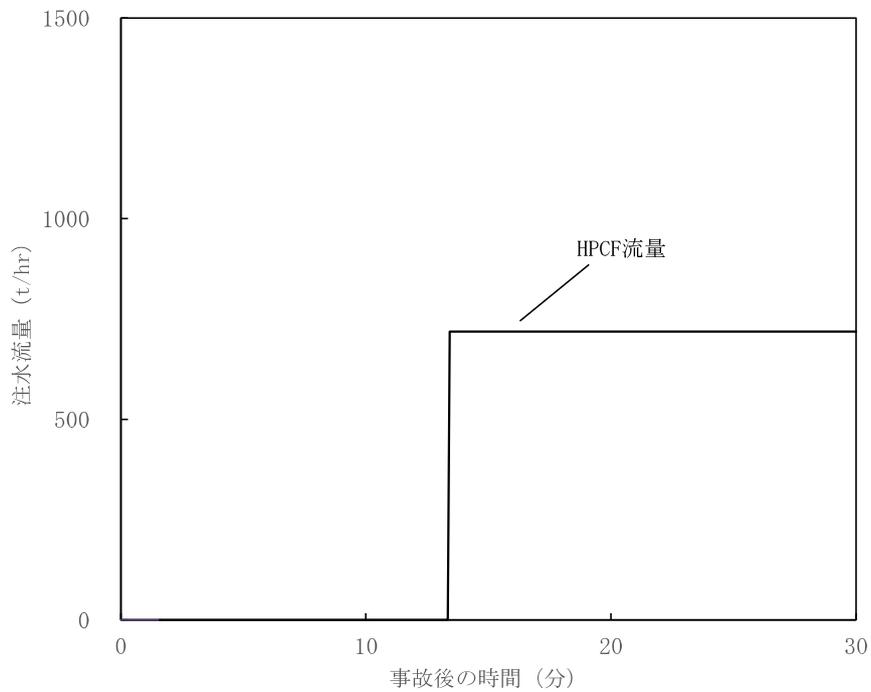


図 6. 1. 1-5 HPCF 注水流量の時間変化（給水配管破断+CCF）

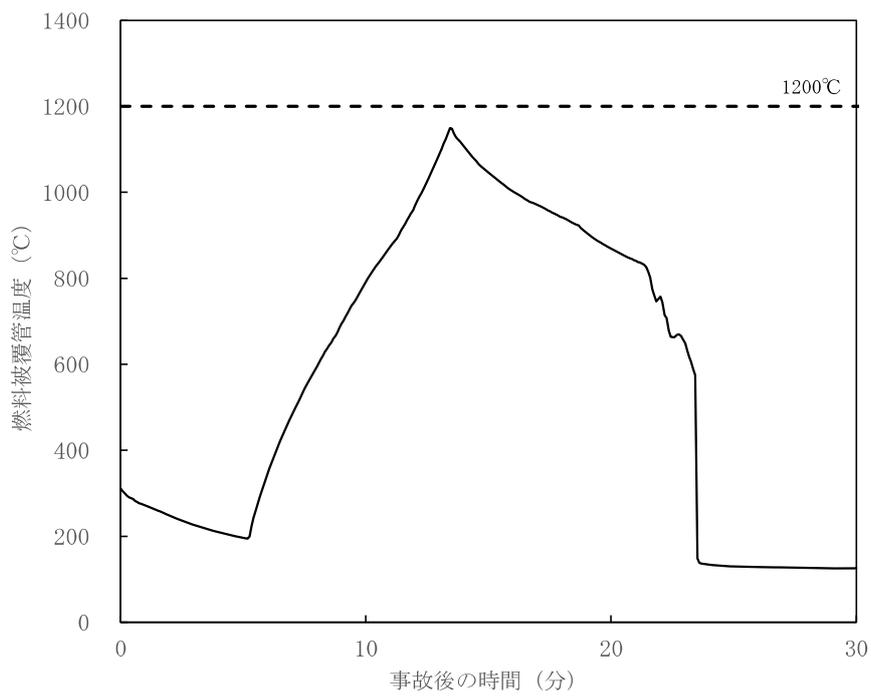


図 6. 1. 1-6 燃料被覆管温度の時間変化（給水配管破断+CCF）

6.1.2 原子炉冷却材流量の喪失

表 6.1.2-1 に解析結果, 表 6.1.2-2 に主要事象のクロノロジー, 図 6.1.2-1~6.1.2-7 に主要パラメータの時間変化を示す。

再循環ポンプが同時に全台停止すると炉心流量は急激に減少する。炉心流量の減少によって, ボイド率が増加して炉心に負の反応度が投入されるが, RPS による原子炉スクラム(流量急減)に失敗する。一方, ボイド率の増加で原子炉水位は増加し, 約 3 秒で原子炉水位高(レベル 8)によるタービントリップ(タービン主蒸気止め弁閉止)および給水ポンプトリップが発生する。タービントリップにより原子炉圧力が上昇し約 4 秒後に原子炉圧力高信号で代替制御棒挿入機能(ARI)が作動する。また, 原子炉出力の減少に応じて燃料被覆管表面はリウエットし, 燃料被覆管温度は約 472 °C に抑えられる。また燃料被覆管の酸化量は酸化反応が著しくなる前であり, 判断基準 15%以下となる。原子炉圧力は逃がし安全弁の作動により約 7.97 MPa[gage]に抑えられる。原子炉冷却材圧力バウンダリにかかる圧力は, 原子炉圧力と原子炉圧力容器底部圧力との差(高々約 0.3 MPa)を考慮しても, 判断基準を十分下回る。事象開始後約 29 秒までに ARI による全制御棒挿入は完了して原子炉出力が低下し事象は収束する。

表 6.1.2-1 原子冷却材流量の喪失+CCF の判断基準パラメータの解析結果

| 項目 | 解析結果 | 判断基準 |
|-------------------|------------------|--------------------------|
| 燃料被覆管温度 (°C) | 約 472[20/24]* | 1200 |
| 中性子束 (%) | 初期値を超えない | - |
| 原子炉圧力 (MPa[gage]) | 約 7.97 | 10.34 (最高使用圧力の 1.2 倍) |
| S/P 水温 (°C) | 約 41 (解析終了時点) | 104 (最高使用温度) |

* []内の数値は、燃料棒軸方向 24 ノード中の位置を示す。

表 6.1.2-2 原子炉冷却材流量の喪失+CCF の主要事象のクロノロジー

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|--|
| 0 秒 | 再循環ポンプ全台トリップ |
| 約 2 秒 | スクラム失敗 (流量急減スクラム) * |
| 約 3 秒 | 原子炉水位高 (レベル 8) 到達 タービントリップ (タービン主蒸気止め弁閉止) スクラム失敗 (主蒸気止め弁閉スクラム) * |
| 約 4 秒 | 燃料被覆管温度最大値到達 原子炉圧力高到達 ARI 弁励磁 |
| 約 5 秒 | SRV (逃し弁機能) 作動 原子炉圧力最大値到達 |
| 約 29 秒 | 全制御棒挿入完了 |
| 60 秒 | (解析終了) |

* RPS (ソフトウェア CCF) による失敗

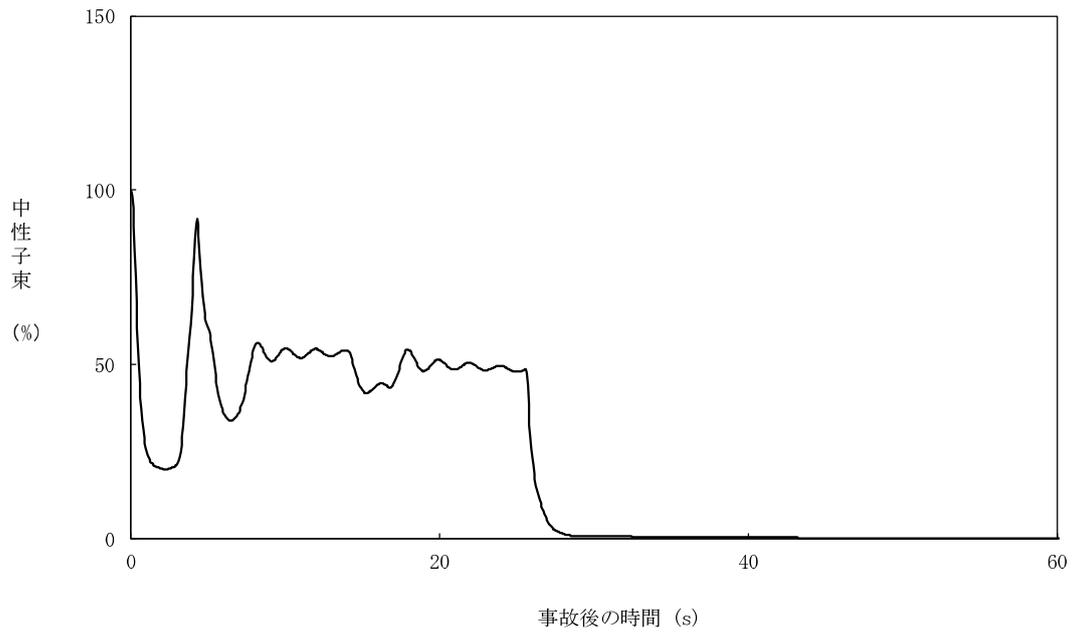


図 6. 1. 2-1 中性子束の時間変化 (原子炉冷却材流量の喪失+CCF)

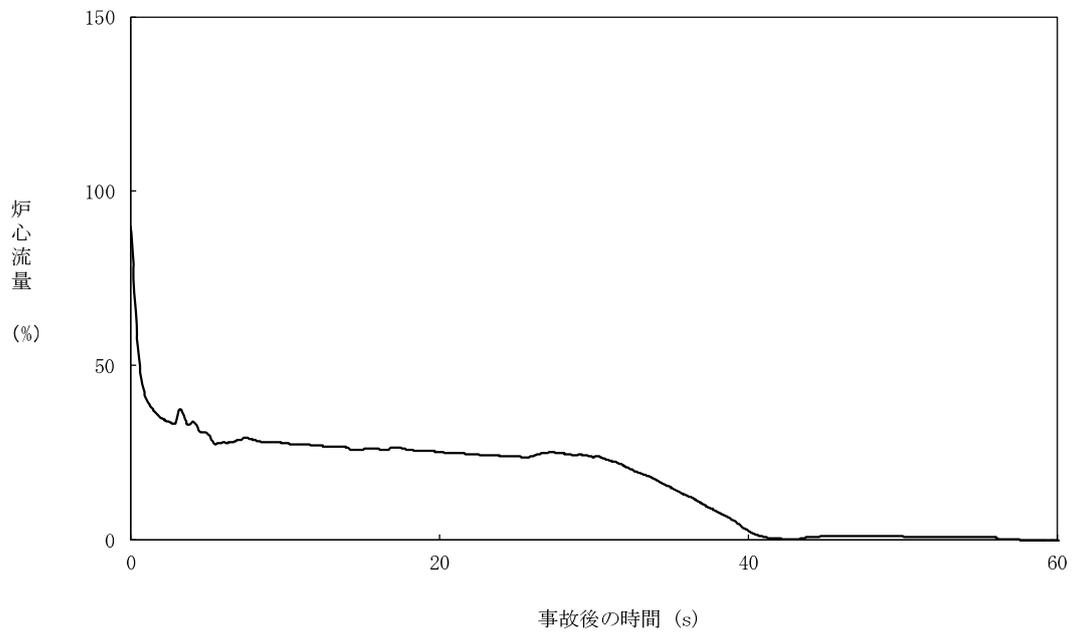


図 6. 1. 2-2 炉心流量の時間変化 (原子炉冷却材流量の喪失+CCF)

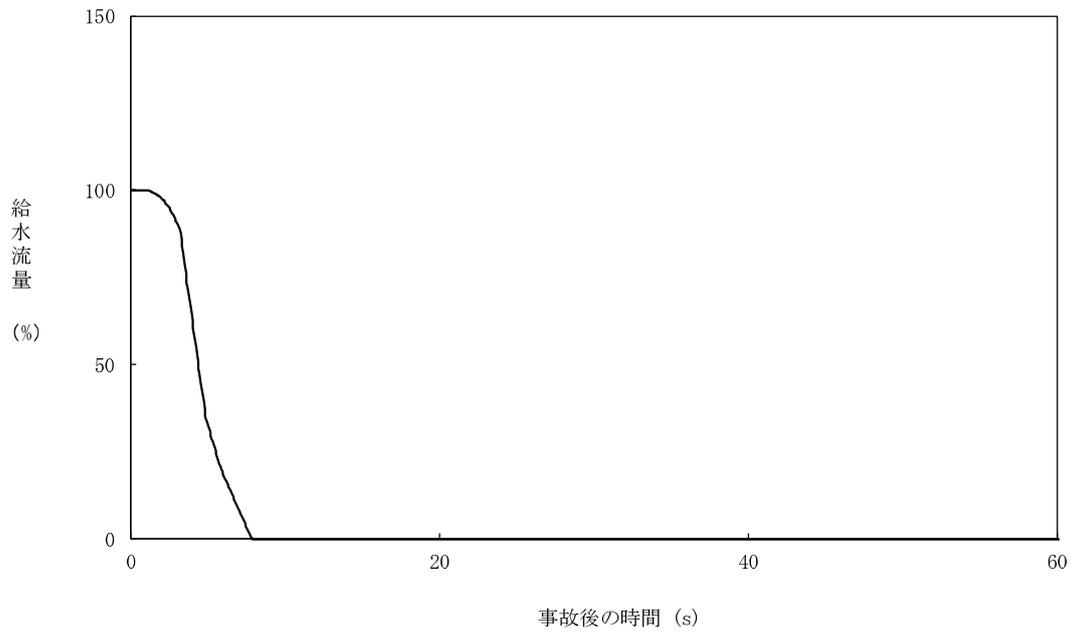


図 6. 1. 2-3 給水流量の時間変化 (原子炉冷却材流量の喪失+CCF)

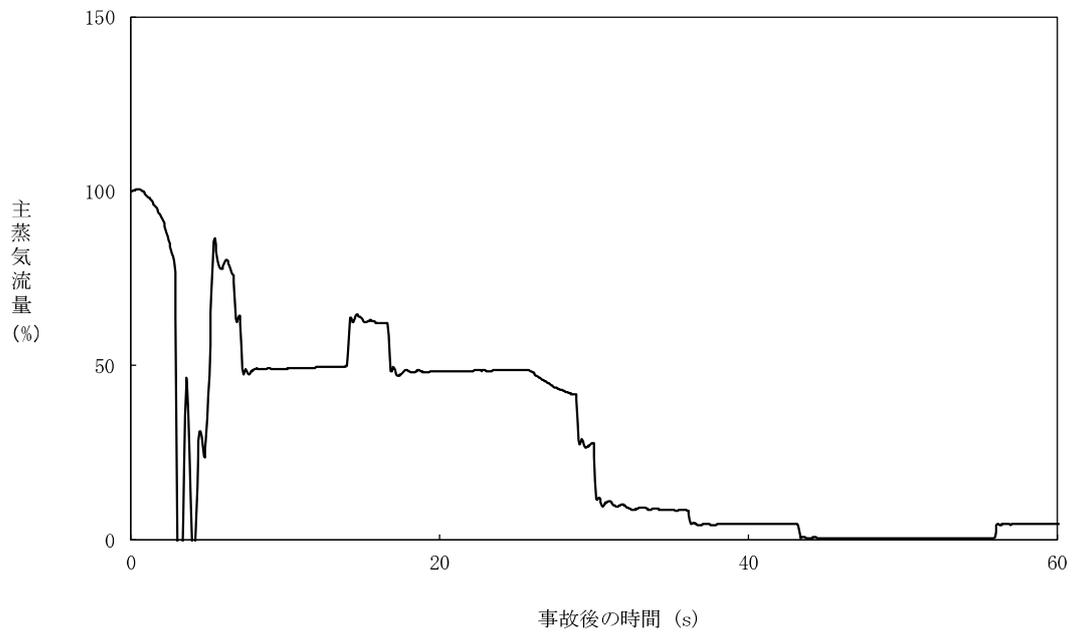


図 6. 1. 2-4 主蒸気流量の時間変化 (原子炉冷却材流量の喪失+CCF)

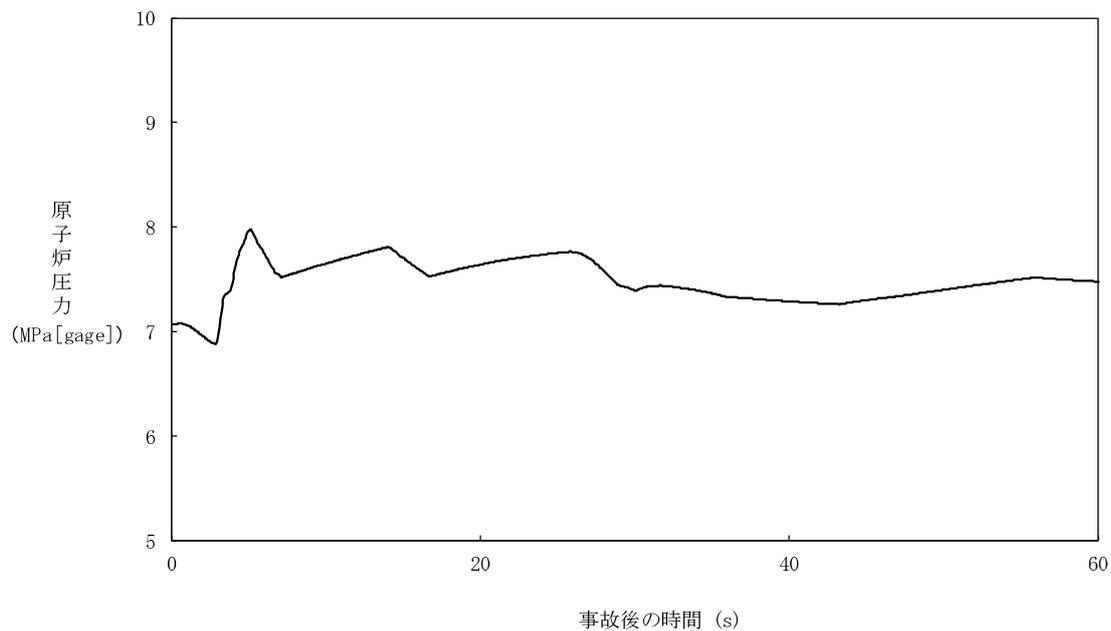


図 6. 1. 2-5 原子炉圧力の時間変化 (原子炉冷却材流量の喪失+CCF)

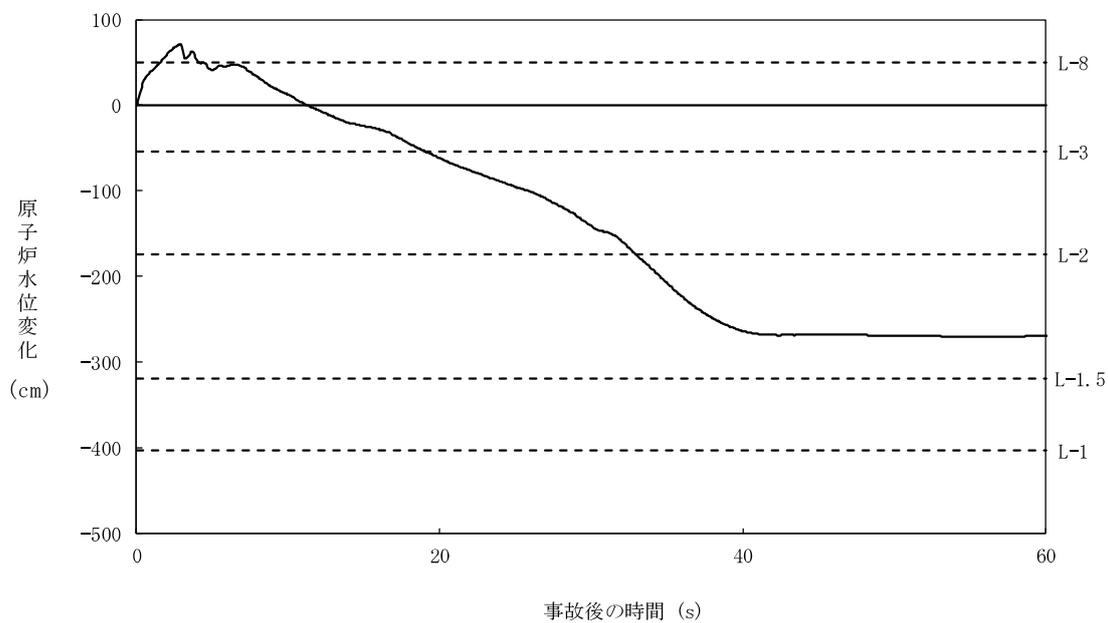


図 6. 1. 2-6 原子炉水位(シュラウド外水位)の時間変化 (原子炉冷却材流量の喪失+CCF)

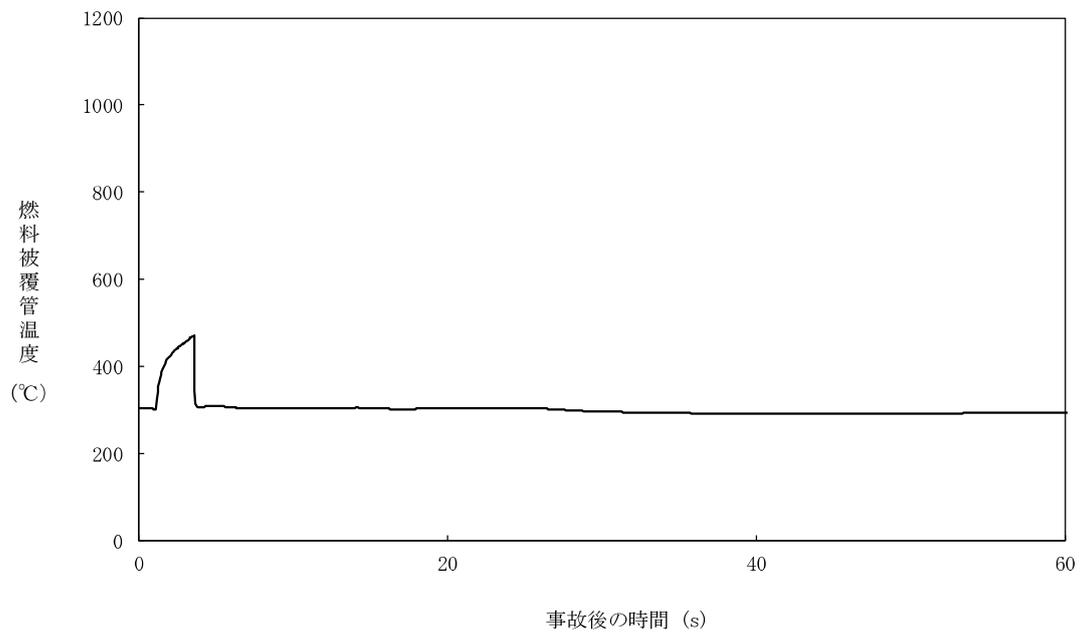


図 6. 1. 2-7 燃料被覆管温度の時間変化 (原子炉冷却材流量の喪失+CCF)

6.2 反応度の異常な投入又は原子炉出力の急激な変化

6.2.1 制御棒落下

表 6.2.1-1 に解析結果，表 6.2.1-2 に主要事象のクロノロジー，図 6.2.1-1，図 6.2.1-2 に主要パラメータの時間変化を示す。

制御棒の落下により，中性子束は急激に増加する。本来であれば SRNM ペリオド短による原子炉スクラムにより事象は整定するが，ソフトウェア CCF によりスクラムが失敗することを仮定している。運転員による対応は期待しないが，ドブプラ反応度フィードバック，ボイド反応度フィードバックといった固有の安全性により，燃料エンタルピの増加は緩和される。

結果として，燃料エンタルピは約 26 秒後に 775[kJ/kg]まで増加するものの，燃焼及びガドリニア添加に伴う融点低下分を保守的に考慮した判断基準 (837kJ/kg) を満足することが分かる。

表 6.2.1-1 制御棒落下+CCF の判断基準パラメータの解析結果

| 項目 | 解析結果 | 判断基準 |
|-------------------------------|-----------|--------------------------|
| 燃料エンタルピ最大値 [kJ/kg]／[cal/g] | 約 775/185 | 963／230※ |
| 破損割合 (%) | 約 0.7 | - |
| 原子炉冷却材バウンダリ圧力 (MPa[gage]) | 約 0.14 | 10.34 (最高使用圧力の 1.2 倍) |

※燃焼 (75GWd/t) に伴う融点低下分に相当するエンタルピ約 105kJ/kg (25cal/g) 及びガドリニア添加 (10wt%) に伴う融点低下分に相当するエンタルピ約 21kJ/kg (5cal/g) を対象燃料棒に応じて考慮が必要である。保守的に両者を考慮した場合，837kJ/kg (200cal/g) となる。

表 6.2.1-2 制御棒落下+CCF の主要事象のクロノロジー

| 解析結果 | 主要事象 |
|--------|--------------|
| 0 秒 | 制御棒落下開始 |
| 約 4 秒 | 制御棒落下終了 |
| 約 26 秒 | 燃料エンタルピ最大値到達 |
| 約 30 秒 | (解析終了) |

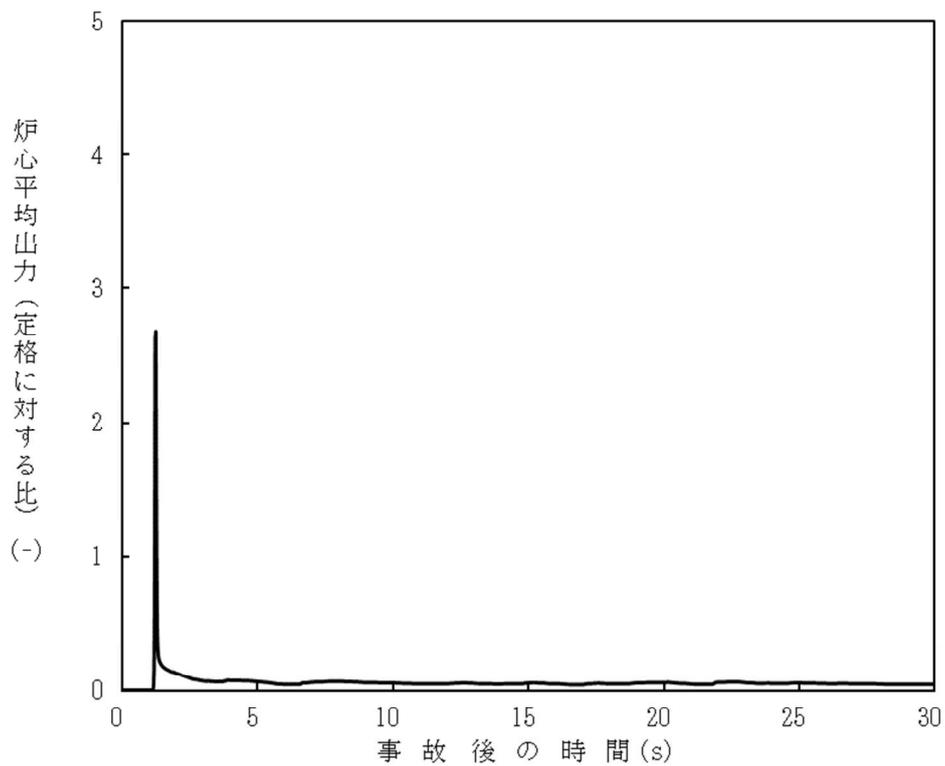


図 6.2.1-1 中性子束の時間変化 (制御棒落下+CCF)

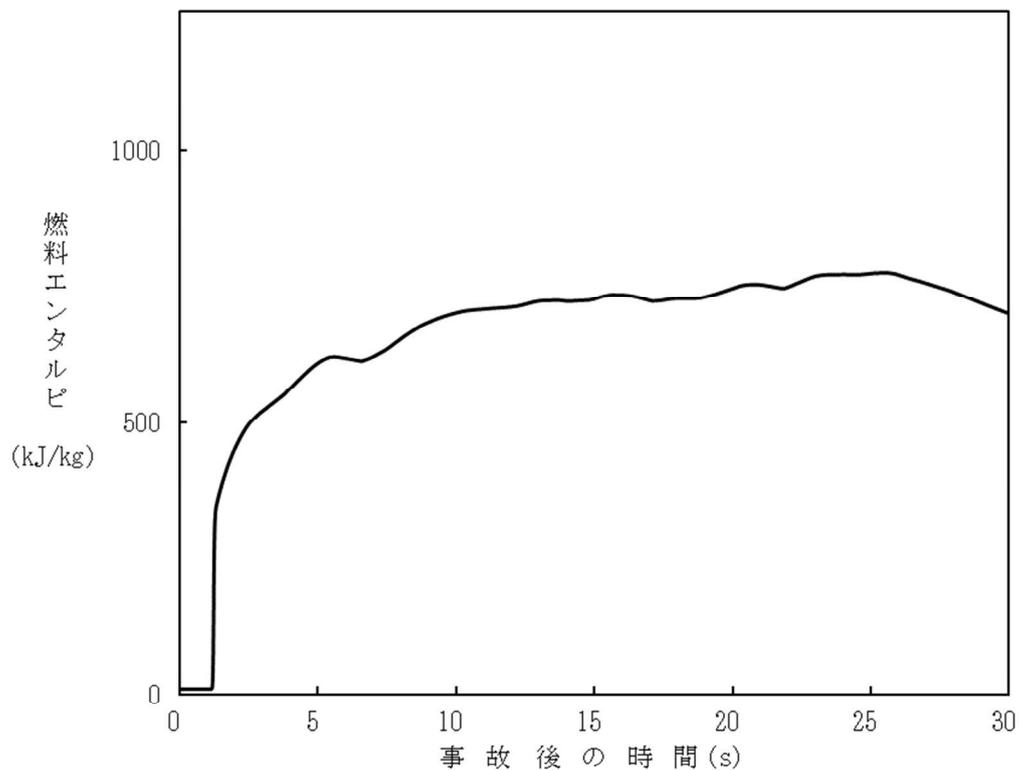


図 6.2.1-2 燃料エンタルピの時間変化 (制御棒落下+CCF)

6.3 環境への放射性物質の異常な放出

6.3.1 放射性気体廃棄物処理施設の破損

放射性気体廃棄物処理施設の破損は、破損した気体廃棄物処理系から環境へ放射性物質が放出される事象である。デジタル安全保護回路による工学的安全施設の自動起動に期待していないため、ソフトウェア CCF を想定しても気体廃棄物処理系の隔離弁を手動閉止することで放出は停止でき、線量影響は判断基準に対して大きな余裕がある。

6.3.2 主蒸気管破断

主蒸気管破断は、主蒸気管破断時に燃料棒からの微小な追加放出を含む原子炉冷却材が環境へ放出される事象である。評価例^[5]によれば、ソフトウェア CCF を想定し主蒸気隔離弁が自動閉止しない場合でも、高圧炉心注水系 (HPCF) を手動起動して原子炉へ注水することにより燃料被覆管の健全性を確保することで、線量影響は判断基準を下回ると考えられる。

注：評価例では、代表サイトを対象に以下のような想定で評価を行い、判断基準 (5 mSv) を下回る結果 (約 2.3 mSv) を得ている。

- ・燃料被覆管からの追加放出を想定 (被覆管の破裂なし)
- ・放出された放射性物質は全量が気相へ移行
- ・現実的な希ガス漏えい率 (f 値) を仮定

6.3.3 燃料集合体の落下

燃料集合体の落下は、落下により破損した燃料から原子炉建屋内へ放出された放射性物質が環境へ漏えいする事象である。評価例^[5]によれば、ソフトウェア CCF を想定し非常用ガス処理系 (SGTS) が自動起動しない場合でも、現実的には原子炉建屋の換気空調系が事象発生前から運転継続しているため、高所放出により線量影響は抑制されると考えられる。

注：評価例では、代表サイトを対象に以下のような想定で評価を行い、判断基準 (5 mSv) を下回る結果 (約 1.9 mSv) を得ている。

- ・破損燃料本数、使用済燃料プール水による DF 等は設置許可申請解析と同一
- ・SGTS は不作動 (地上放出)
- ・建屋換気率は 0.5 回/d と仮定

6.3.4 原子炉冷却材喪失

原子炉冷却材喪失における放射性物質の環境への放出は格納容器からのわずかな漏えいを経ることから他の事故に比べると緩慢であり、ソフトウェア CCF を想定し SGTS が自動起動しない場合でも、高圧炉心注水系 (HPCF) の手動起動により燃料被覆管の健全性を確保でき、また現実的には原子炉建屋の換気空調系が事象発生前から運転継続しており、高所放出により線量影響は抑制されることから、判断基準に対して厳しい結果とはならない。

6.3.5 制御棒落下

制御棒落下は、出力の急上昇により破損した燃料から放出された放射性物質が主蒸気隔離弁の閉止前に復水器へ移行し、環境へ漏えいする事象である。ソフトウェア CCF を想定し主蒸気隔離弁が自動閉止しない場合でも、主蒸気隔離弁は手動閉止できること、また、手動閉止の場合には隔離に要する時間が長くなるものの、現実的には蒸気式空気抽出器 (SJAE) が事象発生前から運転継続しているため、復水器からタービン建屋への漏えいはなく、環境への放射性物質の放出は抑制される。

なお、参考として、設計基準事故時における線量影響が判断基準に対して大きな余裕を有していることを表 6.3-1 に示す。

表 6.3-1 事故時の線量影響（設計基準事故時，ABWR）

| 事故 | プラント A | プラント B |
|-----------------|----------------------|----------------------|
| 放射性気体廃棄物処理施設の破損 | 1.0×10^{-2} | 1.1×10^{-2} |
| 主蒸気管破断 | 5.1×10^{-2} | 2.8×10^{-2} |
| 燃料集合体の落下 | 1.1×10^{-2} | 2.7×10^{-1} |
| 原子炉冷却材喪失 | 1.6×10^{-5} | 3.7×10^{-4} |
| 制御棒落下 | 1.6×10^{-3} | 1.1×10^{-3} |
| 判断基準 | 5 | |

（単位：mSv）

6.4 原子炉格納容器内圧力，雰囲気等の異常な変化

6.4.1 原子炉冷却材喪失

原子炉冷却材喪失時の格納容器内圧力・温度の上昇を支配する破断流量は破断面積によって決まり，ソフトウェア CCF によるスクラム遅れの影響は小さい。また，圧力抑制型格納容器では，破断口から放出される蒸気はサブプレッション・チェンバ・プール水で凝縮し，格納容器圧力の上昇が緩和されることから，格納容器スプレイを自動起動させる必要はないため，ソフトウェア CCF を想定しても格納容器スプレイ起動有無の影響を受けない。

6.4.2 可燃性ガスの発生

ソフトウェア CCF を想定し可燃性ガス濃度制御系（FCS）が起動できない場合でも，設計基準事故条件下での現実的な G 値や炉心における沸騰状態の変化を考慮すれば，事故時の判断基準は満足される。

6.4.3 動荷重の発生

原子炉冷却材喪失時の動荷重は，主として破断流量（破断面積）の大きさに支配される。また，逃がし安全弁作動時の動荷重は，原子炉圧力上昇に対する感度が小さいことから，いずれもソフトウェア CCF によるスクラム遅れの影響は小さい。

7. まとめ

本資料では、自主的にデジタル安全保護回路のソフトウェア CCF 影響緩和対策を行うにあたり、対策設備である多様化設備の有効性評価の評価条件及び評価結果について取りまとめた。

運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故とソフトウェア CCF が重畳する場合に、炉心の著しい損傷を防止する上で、安全保護回路の代替機能を有する多様化設備が有効であり、設計基準事故において使用される判断基準を概ね満足し、事象が収束することを解析等により確認した。

8. 参考文献

- [1] 原子力エネルギー協議会, 「原子力発電所における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技術要件書」, ATENA 20-ME05 Rev. 1
- [2] 東芝エネルギーシステムズ株式会社, 「炉心三次元動特性解析に係る最適評価コード (TRACT) の概要」, TLR-101
- [3] 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン, 「TRACG モデル解説書」, GLR-010
- [4] 株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン, 「TRACG 適格性確認報告書」, GLR-011
- [5] 原子力エネルギー協議会, 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 第4回会合 資料1

添付 1 評価対象事象について

運転時の異常な過渡変化+ソフトウェア CCF, 設計基準事故+ソフトウェア CCF に対して, ソフトウェア CCF の影響を確認するために影響評価が必要な解析対象事象を選定するため, グルーピングの考え方などを整理する。

なお, 国内の BWR5 については, 核計装系の一部及び放射線モニタ等がデジタル化されているプラントはあるが, 安全保護回路自体のデジタル化は当面計画されていないことを踏まえ, 評価対象事象を選定する。

添付図 1-1 に解析対象事象の選定フローを示す。安全保護系及び工学的安全施設の作動回路がデジタル化されている ABWR を対象として, 運転時の異常な過渡変化又は設計基準事故時にソフトウェア CCF の発生を仮定した場合の影響を考慮し, 解析対象となる事象を整理したものを添付表 1-1~添付表 1-3 に示す。また, 添付図 1-2 に添付表 1-2 の補足として ABWR において RPV に接続される主要配管の位置を示す。

原子力発電所における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技術要件書 (ATENA 20-ME05) で例示されている考え方に従い, 評価対象とする事象はまず原子炉停止の観点から, 反応度の異常な変化又は投入事象と, それ以外の事象の 2 種類に大別できる。

また, 反応度の異常な変化又は投入事象以外の事象は, 炉心冷却の観点から初期の水位低下速度が速い LOCA と LOCA 以外の 2 種類に分類できる。LOCA (炉側) は, ソフトウェア CCF の影響で工学的安全施設の自動起動に期待できず, また, 他の事象と比較して水位低下速度が速いため, その影響を確認する必要がある。

過渡事象及び LOCA 以外の事故事象では, スクラムによって事象を直接緩和・収束しており, ソフトウェア CCF の影響でスクラムに期待できず制御棒挿入が遅れることによる炉心への熱影響, 原子炉圧力への影響を確認する必要がある。SA 有効性評価 (原子炉停止機能喪失) の知見も参考として, スクラムが失敗した場合に最も早く影響が生じる原子炉圧力の上昇する事象を評価する (圧力上昇に伴うボイド反応度フィードバックが最も厳しい MSIV 誤閉止を代表とする)。また, その他の過渡事象は圧力上昇事象に比べボイド反応度フィードバックの観点で厳しくならないか, プラント状態の変化が緩慢で設計基準事象ではあるがスクラムに至らない (スクラム失敗の影響がない) 事象である。ただし, MSIV 自動閉止条件に至る事象はソフトウェア CCF による MSIV 自動閉止失敗を想定すると単なる ATWS とは挙動が変わるため, 参考として影響を確認する。なお, 原子炉冷却材流量の喪失 (APTA) は SA 有効性評価では解析対象外であるが, ソフトウェア CCF の影響評価としては解析を行い, 過渡事象及び LOCA 以外の事故事象全体として代表性を確認する。以上の考え方を添付表 1-1 に示す。

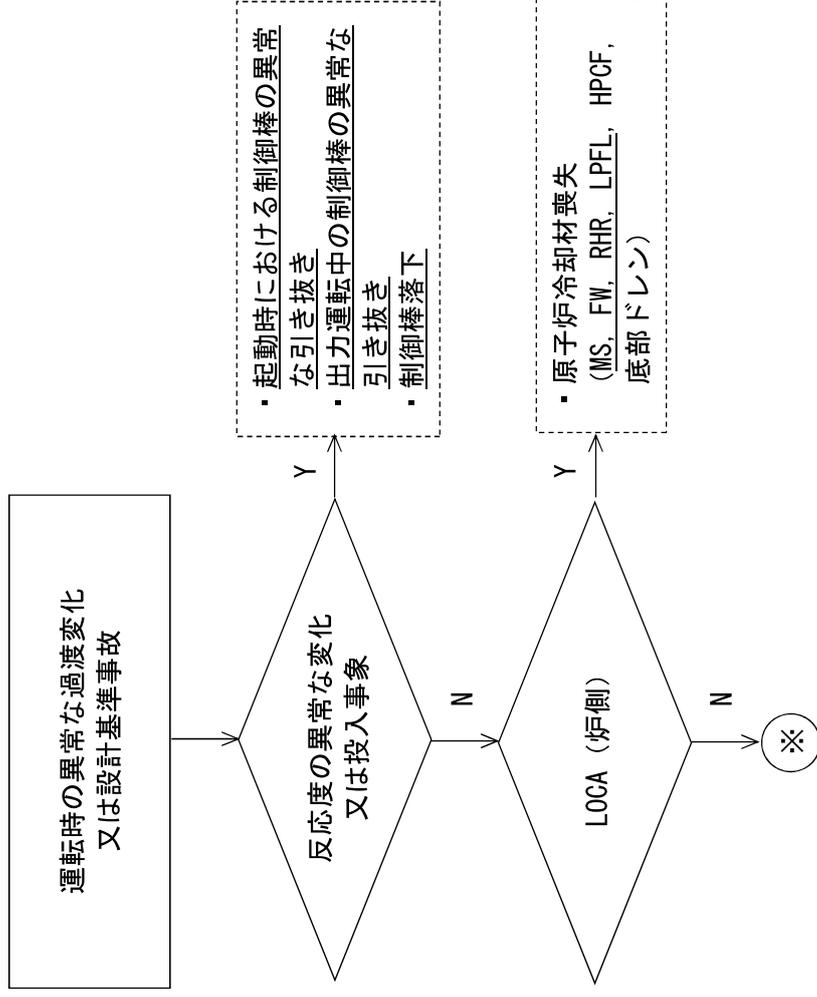
過渡及び事故のうち, 工学的安全施設の自動起動によらず収束する事象は, 解析対象外となる。具体的には, 冷却材流量の部分喪失時にはスクラムに至らずプラント状態は安定する。放射性気体廃棄物処理施設の破損時には工学的安全施設の自動起動を要せず, 仮に検知・隔

離が遅れて放出量が増加しても判断基準に対しては大きな余裕があるため、これらの事象は解析対象外とする。

また、工学的安全施設の自動起動によって収束する事象であっても、起動する工学的安全施設が事象発生後短期の影響緩和に直接寄与していないものは解析対象外とする。具体的には、原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化のうち、原子炉冷却材喪失時の格納容器内圧力・温度の上昇を支配する破断流量は破断面積によって決まり、スクラム遅れの影響は小さいことと、設計基準事故時の圧力は判断基準に対する裕度が大きい。さらに、放射性物質の環境への漏えいは他の事故に比べると緩慢であり、高圧炉心注水系（HPCF）の手動起動により燃料被覆管の健全性を確保でき、また現実的には原子炉建屋の換気空調系が事象発生前から運転継続しており、高所放出により線量影響は抑制されることから、解析対象外とする。なお、LOCA 時の動荷重は、主として破断流量（破断面積）の大きさに支配され、また、逃がし安全弁作動時の動荷重は原子炉圧力上昇に対する感度が小さいことから、いずれもソフトウェア CCF によるスクラム遅れの影響は小さいため、解析対象外とする。また、可燃性ガスの発生は可燃性ガス濃度制御系（FCS）の機能が期待できない場合でも、設計基準事故条件下での現実的な G 値や炉心における沸騰状態の変化を考慮すれば、事故時の判断基準は満足されるため、解析対象外とする。制御棒落下は、ソフトウェア CCF により MSIV の自動閉止に失敗するものの、現実的には SJAE が事象発生前から運転継続しているため放出量は抑制されるため、解析対象外とする。

環境への放射性物質の異常な放出のうち、主蒸気管破断は、隔離弁（MSIV）の自動閉止を期待しているが、その機能が期待できない場合でも、高圧炉心注水系（HPCF）を手動起動し燃料被覆管の健全性を確保することで、線量影響は判断基準を下回ることを過去の評価例により確認する。燃料集合体の落下は、工学的安全施設（SGTS）の自動起動を期待しているが、その機能が期待できない場合でも、現実的には原子炉建屋の換気空調系が運転継続しているため、高所放出により線量影響は抑制されることを過去の評価例により確認する。

以上の選定の考え方の流れを添付図 1-1 に示す。これらの分類それぞれについて、ソフトウェア CCF の多様化設備の有効性を確認するため、基本的には判断基準に対し挙動が最も厳しくなると考えられる事象を解析対象として選定する。



添付図 1-1 解析対象事象の選定フロー [1/2]

添付表 1-1 運転時の異常な過渡変化及び LOCA 以外の事故の解析対象事象 (ABWR)

| 分類 | 事象 | 必要性 | 対象 |
|--------|---------------------------|--|----|
| 圧力上昇過渡 | MSIV 全閉 外部電源喪失 負荷遮断 | DCD の解析結果より, ATWS (ARI 作動) 時においては, EP 過渡解析と異なり, 原子炉圧力最大値は再循環ポンプトリップタイミングの遅い MSIV 全閉で最も高くなる。原子炉圧力高信号により再循環ポンプトリップする MSIV 全閉に比べ, 負荷遮断や外部電源喪失は蒸気加減弁急閉により早期に再循環ポンプトリップするため原子炉圧力は低い傾向であり解析結果はこれに包絡される。したがって MSIV 全閉を代表事象とする。ARI (原子炉圧力高) に期待しない SA 有効性評価 (MSIV 全閉 ATWS) に包絡されるが, ARI 作動時の挙動を確認する。 | ◎ |
| 圧力低下過渡 | 圧力制御系の故障 | 設計基準事象ではスクラム時に原子炉出力が低下しており中性子束は初期値を超えない事象であるため, MSIV 全閉に包絡される。タービン入口圧力低の MSIV 閉条件に至るもののソフトウェア CCF 発生時は MSIV が動作しないため, 不作動時の影響を確認する。 | ○ |
| 流量減少過渡 | 冷却材流量の部分喪失 | 炉心流量低下によるボイドの増加によって原子炉水位は上昇するものの原子炉水位高 (レベル 8) には到達せず, タービントリップしないため, ARI 作動に至らない事象である (設計ベースでスクラムしない)。解析結果は MSIV 全閉に包絡されるため, 解析対象とはしない。 | — |
| 流量増加過渡 | 流量制御系の誤動作 | 炉心流量増加によるボイドの減少によって中性子束は増加するが, 原子炉水位はレベル 1.5 まで低下することはないため MSIV 閉条件に至らず, 原子炉圧力の上昇は緩やかなため ARI も作動しない事象である。解析結果は MSIV 全閉に包絡されるため, 解析対象とはしない。 | — |

| 分類 | 事象 | 必要性 | 対象 |
|---------|----------|---|----|
| サブクール過渡 | 給水加熱喪失 | 炉心入口サブクーリングの増加によるボイドの減少により中性子束は上昇するが、原子炉水位はレベル 1.5 まで低下することはないため MSIV 閉条件に至らず、原子炉圧力の上昇は緩やかなため ARI も作動しない事象である。スクラム遅れの影響は、SA 有効性評価 (MSIV 全閉 ATWS) に包絡されるため、解析対象とはしない。 | — |
| 水位低下過渡 | 給水流量の全喪失 | 給水流量の喪失により原子炉水位は低下し、さらに原子炉水位低 (レベル 3/レベル 2) で再循環ポンプトリップする。注水により原子炉水位も回復するため熱的に厳しい事象ではないが、水位の観点から評価を行う。注水が遅れた場合、原子炉水位が低下し MSIV 閉条件に至るものの、ソフトウェア CCF 発生時は MSIV が自動閉止しないため不作動時の影響も確認する。 | ○ |
| 水位上昇過渡 | 給水制御系の故障 | 給水流量増加によって原子炉水位は上昇し原子炉水位高 (レベル 8) によるタービントリップに至るが、ARI 作動により原子炉圧力の上昇は抑えられ、注水により原子炉水位も回復するため事象収束までに MSIV 閉条件には至らない事象である。スクラム遅れの影響は、SA 有効性評価 (MSIV 全閉 ATWS) に包絡されるため、解析対象とはしない。なお、原子炉水位高 (レベル 8) によるタービントリップが発生しない場合においては、主蒸気止め弁閉止に伴う圧力上昇も生じないため、タービントリップが発生した場合の結果に包絡される。 | — |

| 分類 | 事象 | 必要性 | 対象 |
|--------|--------------------|--|----|
| 流量急減事故 | 原子炉冷却材流量の喪失 (APTA) | LOCA 以外の事故の代表事象 * 再循環ポンプ全台トリップによる原子炉出力と流量のミスマッチによって沸騰遷移が生じ、炉心流量急減スクラムしないが、ボイド量増加によって原子炉水位は上昇し原子炉水位高 (レベル 8) によるタービントリップに至り、ARI 作動し事象収束となる。沸騰遷移が生じるため不作動時の影響を確認する。 | ◎ |

DCD : ABWR Design Control Document, Rev.7 (2019)

◎ : 代表事象 (運転時の異常な過渡変化及び LOCA 以外の事故)

○ : 参考解析 (過渡変化のタイプと CCF の影響を受ける機器 (MSIV 等) の有無に着目して選定

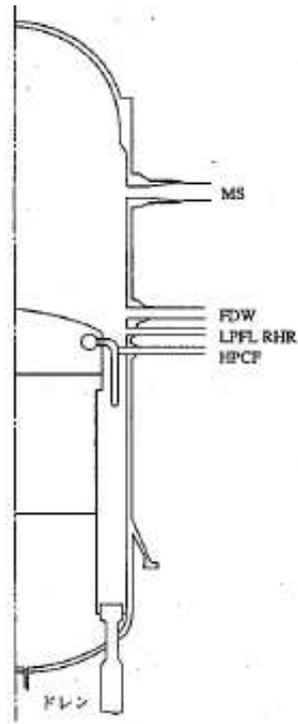
— : 対象外

* 原子炉冷却材流量の喪失 (APTA) は設計基準事故であり、SA 有効性評価 (原子炉停止機能喪失) では解析を実施していないため、今回確認のために評価対象としている。

添付表 1-2 LCOA の解析対象事象 (ABWR)

| 事象 | 配管径 (mm) | 有効断面積を与える箇所 | 有効破断面積 (m ²) | 必要性 | 対象 |
|------------|----------|-------------|--------------------------|---|----|
| 主蒸気配管破断 | 700 | フローリミッタ部×4 | 0.39 | 枯渇するまでの間、給復水系による注水が継続するものの、破断面積が最大で、主蒸気隔離弁が閉止しないため挙動を確認 | ○ |
| 給水配管破断 | 550 | スパージャノズル部 | 0.084 | 給水配管破断は、破断時に冷却材流出を律速する有効断面積、及び給復水系による注水継続の可否の観点から、運転員操作に要求される時間余裕に対する最厳ケースとなる。 | ○ |
| RHR 出口配管破断 | 350 | 配管部 | 0.079 | RHR 出口配管破断は、給復水系による注水が継続するものの、破断配管の圧力容器接続位置が給水の注水位置より低く、効果が限定的であることから、運転員操作に要求される時間余裕を確認 | ○ |
| LPFL 配管破断 | 200 | スパージャノズル部 | 0.021 | 破断配管の圧力容器接続位置が RHR 出口配管と同じであり、破断面積が RHR 出口配管破断より小さいため、RHR 出口配管破断の解析に包絡される。 | — |
| HPCF 配管破断 | 200 | スパージャノズル部 | 0.0082 | 破断面積が小さく、給復水系による注水が枯渇するまで原子炉水位が維持されるため、運転員操作に要求される時間余裕は大破断 LOCA+CCF の解析に包絡される。 | — |
| ドレン配管破断 | 65 | ベッセルノズル部 | 0.002 | 燃料有効長上端より下に接続される配管であるが、破断面積が小さく、給復水系による注水が枯渇するまで原子炉水位が維持されるため、運転員操作に要求される時間余裕は大破断 LOCA+CCF の解析に包絡される。 | — |

○：解析対象，—：対象外



添付図 1-2 ABWR における RPV 接続主要配管の位置

添付表 1-3 事故（環境への放射性物質の異常な放出・原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化）の解析対象事象（ABWR）

| 分類 | 事象 | 必要性 | 対象 |
|-----------------------|-----------------|--|----|
| 環境への放射性物質の異常な放出 | 放射性気体廃棄物処理施設の破損 | 工学的安全施設は自動起動しない事象であり、仮に検知・隔離が遅れても、線量影響は判断基準に対して大きな余裕があるため、解析対象とはしない。 | — |
| | 主蒸気管破断 | 主蒸気隔離弁の自動閉止に期待しているため、ソフトウェア CCF の影響により主蒸気隔離弁が自動閉止しない場合でも、高圧炉心注水系（HPCF）を手動起動し燃料被覆管の健全性を確保することで、線量影響は判断基準を下回することを、過去の評価例から確認する。 | # |
| | 燃料集合体の落下 | 非常用ガス処理系の自動起動に期待しているため、ソフトウェア CCF の影響により非常用ガス処理系（SGTS）が自動起動しない場合でも、現実的には原子炉建屋の換気空調系が事象発生前から運転継続しているため、高所放出により線量影響は抑制されることを、過去の評価例から確認する。 | # |
| | 原子炉冷却材喪失 | 放射性物質の環境への放出は格納容器からのわずかな漏えいのみで他の事故に比べると緩慢であり、SGTS が自動起動しない場合でも、判断基準に対して厳しい結果とはならないため、解析対象とはしない。 | — |
| | 制御棒落下 | 現実的には蒸気式空気抽出器（SJAE）が事象発生前から運転継続しているため、復水器からタービン建屋への漏えいはなく、環境への放射性物質の放出は抑制されるため、解析対象とはしない。 | — |
| 原子炉格納容器内圧力、雰囲気等の異常な変化 | 原子炉冷却材喪失 | 格納容器内圧力・温度の上昇を支配する破断流量は破断面積によって決まり、スクラム遅れの影響は小さい。また、圧力 | — |

| 分類 | 事象 | 必要性 | 対象 |
|----|----------|---|----|
| | | 抑制型格納容器では格納容器スプレイを自動起動させる必要はないため、解析対象とはしない。 | |
| | 可燃性ガスの発生 | 可燃性ガス濃度制御系 (FCS) が起動できない場合でも、設計基準事故条件下での現実的なG値や炉心における沸騰状態の変化を考慮すれば、事故時の判断基準は満足されるため、解析対象とはしない。 | — |
| | 動荷重の発生 | 原子炉冷却材喪失時の動荷重は、主として破断流量（破断面積）の大きさに支配され、また、逃がし安全弁作動時の動荷重は、原子炉圧力上昇に対する感度が小さいことから、いずれもスクラム遅れの影響は小さいため、解析対象とはしない。 | — |

○：解析対象，#：評価例^[5]から判断基準を満足すると考えられる，—：対象外

添付 2 代表プラント以外への適用性

ソフトウェア CCF 対策の有効性評価では、ABWR を代表プラントとして検討している。ABWR では安全保護系のデジタル化範囲はプラント間で同一である。BWR5 では、核計装と放射線モニタが一部デジタル化されているプラントがある。

具体的には、添付表 2-1 及び添付表 2-2 に示す緩和系の作動信号がソフトウェア制御となっている場合は、当該の事象に対してソフトウェア CCF の重量を想定することになる。なお、緩和系のうち、静的機器、外部からの動力の供給によらず作動する設備（安全弁）は、ソフトウェア制御の影響を受けないため表から除いている。また、BWR5 の想定事象である原子炉冷却材系の停止ループの誤起動と原子炉冷却材ポンプの軸固着は、デジタル安全保護系により収束する事象ではないため、ソフトウェア CCF の想定対象とはならない。

・核計装

起動時の制御棒の異常な引き抜きについては、制御棒落下速度の方が制御棒引き抜き速度よりも速いため制御棒落下事象で包絡される。

出力運転中の制御棒の異常な引き抜きについては、設計基準事象と異なりロッドブロックされないため、複数本引き抜かれる ABWR の方が投入反応度が大きくなることから、ABWR の評価に包絡される。

制御棒落下事象では落下制御棒近傍が重要であり、炉心サイズによる直接的な影響は基本的にはない。そのため、ABWR において制御棒落下速度を BWR5 条件とすることで、BWR5 も含めた代表解析としている。

運転時の異常な過渡変化（制御棒系の過渡以外）のうち、核計装信号によるスクラムを期待しているのは、給水加熱喪失及び原子炉冷却材流量制御系の誤動作である。これらの事象は、スクラム失敗時でも原子炉水位がレベル 2 まで低下することはないため MSIV 閉条件に至らず、原子炉圧力の上昇は緩やかなため ARI も作動しない事象であり、主蒸気隔離弁の誤閉止より原子炉圧力の上昇が大きくなることはない。主蒸気隔離弁の誤閉止は、原子炉停止機能喪失時でも多様化設備等により炉心の健全性が確保できることが重大事故等対策の有効性評価で確認済みであり、これらの事象はその結果に包絡される。

・放射線モニタ

制御棒落下時の破損燃料本数は、前述のように制御棒落下速度を BWR5 条件とすることで代表性のある評価としている。ABWR 及び BWR5 いずれも、主蒸気隔離弁を手動閉止することで放射能放出は停止でき、また、現実的には蒸気式空気抽出器（SJAE）が事象発生前から運転継続しているため、復水器からタービン建屋への漏えいはなく、環境への放射性物質の放出は抑制される。

放射性気体廃棄物処理施設の破損は、ABWR 及び BWR5 いずれも、気体廃棄物処理系の隔離弁を手動閉止することで放射能放出は停止でき、線量影響は判断基準に対して大きな余裕がある。

主蒸気管破断時の環境への冷却材放出は、主蒸気管流量大や主蒸気管放射能等の信号で

隔離されるが、BWR5 ではソフトウェア CCF を想定しても原子炉水位低（アナログ）により隔離されるため、ABWR の評価に包絡される。

燃料集合体落下時の挙動は炉型に依存しない。ソフトウェア CCF を想定し非常用ガス処理系（SGTS）が自動起動しない場合でも、現実的には原子炉建屋の換気空調系が事象発生前から運転継続しているため、高所放出により線量影響は抑制される。

添付表 2-1 設計基準事象における緩和系の作動信号（運転時の異常な過渡変化）

| 事象 | 解析で考慮する緩和系の作動信号 | | 備考 |
|------------------------|-------------------------------|---------------|----------------|
| | 原子炉停止系 | 工学的安全施設 | |
| 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き | 原子炉周期短 *1 | — | *1 核計装 |
| 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き | 制御棒引抜監視装置（RBM 信号）*2 による引き抜き阻止 | — | *2 核計装 |
| 原子炉冷却材流量の部分喪失 | — | — | |
| 原子炉冷却材の停止ループの誤起動（BWR5） | — | — | |
| 外部電源喪失 | CV 急速閉 | — | |
| 給水加熱喪失 | 中性子束高（熱流束相当）*2 | — | *3 核計装 |
| 原子炉冷却材流量制御系の誤動作 | 中性子束高 *3 | — | *4 核計装 |
| 負荷の喪失 | CV 急速閉 | — | |
| 主蒸気隔離弁の誤閉止 | MSIV 閉 | — | |
| 給水制御系の故障 | MSV 閉 | — | |
| 原子炉圧力制御系の故障 | MSIV 閉 | — | |
| 給水流量の全喪失 | 原子炉水位レベル 3 | 原子炉水位レベル 2 *4 | *5 RCIC(補給水機能) |

添付表 2-2 設計基準事象における緩和系の作動信号（事故）

| 事象 | 解析で考慮する緩和系の作動信号 | | 備考 |
|--------------------------|-----------------------|--|------------------------------|
| | 原子炉停止系 | 工学的安全施設 | |
| 原子炉冷却材喪失 (ABWR) | 原子炉水位レベル 3 D/W 圧力高 | 原子炉水位レベル 1.5 or D/W 圧力高（高压系） 原子炉水位レベル 1 or D/W 圧力高（低压系） 原子炉水位レベル 1 and D/W 圧力高（ADS） 原子炉水位レベル 3 (SGTS) 原子炉水位レベル 1.5 (MSIV) 手動（格納容器スプレイ 冷却系，可燃性ガス濃度 制御系） | |
| (BWR5) | 同上 | 原子炉水位レベル 2 or D/W 圧力高（高压系） 原子炉水位レベル 1 or D/W 圧力高（低压系） 原子炉水位レベル 1 and D/W 圧力高（ADS） 原子炉水位レベル 3 (SGTS) 原子炉水位レベル 2 (MSIV) 手動（格納容器スプレイ 冷却系，可燃性ガス濃度 制御系） | 一部のプラント の高压系作動は レベル 1H |
| 原子炉冷却材流量の喪失 (ABWR) | 炉心流量急減 ^{*6} | — | ^{*6} 核計装系内で 判定 |
| (BWR5) | MSV 閉 | | |
| 原子炉冷却材ポンプの軸 固着 (BWR5) | MSV 閉 | — | |
| 制御棒落下 | 中性子束高 ^{*5} | 主蒸気管放射能高 (MSIV) | ^{*7} 核計装 |

| 事象 | 解析で考慮する緩和系の作動信号 | | 備考 |
|---------------------|-----------------|--------------------------------|---|
| | 原子炉停止系 | 工学的安全施設 | |
| 放射性気体廃棄物処理施設 の破損 | — | 気体廃棄物処理設備エリア放射能高 ^{*6} | ^{*8} MS-3(気体廃棄物処理系隔離弁を 手動閉) |
| 主蒸気管破断 | MSIV 閉 | 主蒸気管流量大 | |
| 燃料集合体の落下 | — | 原子炉区域放射能高 | |

添付3 プラント設計の代表性及び燃料型式の影響

(1) プラント設計

有効性評価では ABWR (3,926MW) プラントを対象としているが、解析に関連する個別プラント間の設計差異がある項目を添付表 3-1 に示す。

- ・炉心流量幅は、個別プラントの流量幅を包絡する 90～120%の範囲で、解析結果が厳しくなるように低流量側の下限 (90%) としている。
- ・逃がし安全弁は、原子炉過圧事象の観点で厳しめの従来型 SRV としており、また、原子炉冷却材喪失では破断により原子炉は減圧されるため、影響はない。
- ・再循環ポンプ電源の違いにより RPT 台数が異なるが、運転時の異常な過渡変化+CCF では RPT 台数が 4 台から 5 台となり、RPT による炉心流量減少が大きくなるが、出力低下の効果も大きくなるため、代表ケースより過度に厳しくなることはない。また、原子炉冷却材喪失+CCF では再循環ポンプが全台トリップした後に炉心が露出し、燃料被覆管温度が上昇するため、RPT 台数の違いによる影響はない。
- ・FMCRD の構造の違いにより、制御棒の常駆動速度仕様値 ($30 \pm 3\text{mm/s} \rightarrow 28 \pm 5\text{mm/s}$) 及びステップ幅 (約 18mm→約 37mm) が異なるが、制御棒の誤引き抜き+CCF において解析条件として用いる制御棒引き抜き速度の上限値は 33mm/s で変わらず、また、制御棒引き抜き阻止条件として 0.010 Δk まで引き抜かれる間に運転員が連続引き抜きを中断することを想定しているため、ステップ幅の違いによる影響もない。

添付表 3-1 プラント設計の主な差異

| 項目 | 代表ケースの解析条件 | 差異のあるプラント |
|----------|---|--|
| 炉心流量幅 | 定格流量の 90～120% | 定格流量の 95～120% |
| 逃がし安全弁 | 従来型 SRV×18 弁 | 大容量 SRV×16 弁 |
| 再循環ポンプ電源 | ASD (10 台) +MG セット (2 台) RPT 台数: 4 台 (炉圧高, 水位低 L3) 6 台 (水位低 L2) | 流体継手付き MG セット (2 台) RPT 台数: 5 台 (炉圧高, 水位低 L3) 5 台 (水位低 L2) |
| 制御棒駆動機構 | FMCRD (軸封型) | FMCRD (シールレス型) |

(2) 燃料型式

対象事象のうち、評価結果が燃料設計に依存する事象への影響は以下ようになる。

a. MOX(8×8)燃料

・運転時の異常な過渡変化及び LOCA 以外の事故

Pu 装荷割合が多いため、ボイド反応度の観点で原子炉圧力の上昇は厳しくなる傾向はあるが、その影響は BWR5 の評価例によれば比較的小さく、判断基準に対しては十分な余裕がある。また、軸方向出力分布はウラン(9×9)燃料より下方ピークとなる傾向であるため、炉心上部が沸騰遷移する事象における燃料被覆管温度の上昇は代表ケースより厳しくならない。

・原子炉冷却材喪失 (LOCA)

評価対象期間ではウラン燃料より崩壊熱が小さく、また、MOX 炉心はウラン(9×9)炉心より軸方向出力分布が下方ピークとなる傾向があるため、炉心露出時の燃料被覆管温度の上昇は代表ケースより厳しくならない。なお、ウラン燃料と MOX 燃料の違いが被ばく評価に及ぼす影響は、解析条件の保守性に包絡される。

・制御棒の誤引き抜き/制御棒落下

“原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き”及び“制御棒落下”において、遅発中性子割合が小さくなることで事象初期における出力パルスは大きくなる傾向はあるが、特にボイド反応度による負の反応度がウラン(9×9)燃料より大きく、また運転時の最大線出力密度の制限を満足させるため、低温時の軸方向出力分布ピーキング係数及び局所ピーキング係数が小さくなる方向であることとあいまって、燃料エンタルピが代表ケースより過度に厳しくなることはない。

“出力運転中の制御棒の異常な引き抜き”については、ボイド反応度及びドップラ反応度による負の反応度がウラン(9×9)燃料より大きく、また単位長さあたりの燃料棒表面積が大きいことで同じ線出力密度条件では除熱されやすいこととあいまって、燃料被覆管温度が代表ケースより過度に厳しくなることはない。

b. 9×9(B)型燃料

・運転時の異常な過渡変化及び LOCA 以外の事故

9×9(A)型燃料より水対ウラン比が大きく、ボイド率増減に伴う減速材水量の変化は小さいため、リミティング事象において圧力上昇に伴うボイド減少による反応度増加が相対的に小さく、ボイド反応度の観点で9×9(A)型燃料より厳しくはならない。また、軸方向出力分布は9×9(A)型燃料と大きな相違はない。

・原子炉冷却材喪失 (LOCA)

事象発生後早期に ARI (原子炉水位低) が作動するため、制御棒が挿入され一定時間を経た後の炉心露出により上昇を始める燃料被覆管温度に対する反応度 (ボイド及びドップラ)

の違いの影響は小さい。軸方向出力分布は9×9(A)型燃料と大きな相違はなく、また、燃料集合体形状の違いが炉心露出時の燃料被覆管温度に及ぼす影響もわずかである。

・制御棒の誤引き抜き/制御棒落下

“原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き”及び“制御棒落下”において、9×9(A)型燃料と比較して、9×9(B)型燃料のボイド反応度の絶対値が小さく、かつ、軸方向出力分布が上歪傾向となるため、9×9(A)型燃料よりも厳しくなる傾向にあると考えられる。軸方向出力分布については、部分長燃料棒がない9×9(B)型燃料では、より上方ピークになりやすい傾向を持つ。出力運転中においてはスクラム反応度曲線が設計用スクラム曲線を上回るよう設計するため、軸方向出力分布が過度に上歪となることはなく、大きな相違は生じない一方、低温時/高温待機時においては9×9(B)型燃料で上方ピークとなる傾向が表れやすい。しかしながら、9×9(B)型燃料のボイド反応度は十分負の値を有していること、及び9×9(A)型燃料の評価で軸方向出力分布がより上歪の炉心を対象に評価していることから、燃料エンタルピが代表ケースより過度に厳しくなることはない。なお、局所ピーキング係数は燃料格子によっても異なるが、運転時の最大線出力密度の制限を満足させる制約から大きな違いはなく、代表ケースより過度に厳しくならない。これは9×9(A)型燃料についても同様である。

“出力運転中の制御棒の異常な引き抜き”についても傾向は同様であり、燃料被覆管温度が代表ケースより過度に厳しくなることはない。

添付 4 多様化設備が作動させる設備に対するサポート系の機能確保

CCF 有効性評価において、多様化設備が作動させる原子炉停止系統・工学的安全施設等は、そのサポート系が使用できない場合には利用できないものとして扱うこととしている。ここで、サポート系が使用可能とは、起因事象との従属性がなく、かつソフトウェア CCF の影響を受けないことをいう。外部電源喪失のような一部のサポート系が期待できなくなる起因事象についても、以下に示すように事象収束に必要な機能は確保される。

| サポート系 | 説明 |
|---------|--|
| 電源系 | <p>起因事象として外部電源の喪失が生じる事象以外は、外部電源は利用可能であるため、多様化設備により作動させる工学的安全施設等の各設備のサポート系に必要な電源は供給可能である。</p> <p>起因事象として外部電源が喪失する事象では、常用電源が期待できなくなるものの、対処設備となる原子炉停止系統及び主蒸気逃がし安全弁は、交流動力電源に依らずその動作が期待できるものであり、事象収束の機能を果たすことができる。また、現実的には他号機からの D/G 融通や常設代替交流電源等の利用が可能であるが、保守的にこれらすべてが期待できない場合でも非常用電源系を手動起動することにより、長期冷却及び冷温停止に移行することができる。</p> |
| 冷却系、空調系 | <p>CCF 有効性評価において、ソフトウェア CCF による安全保護系の機能喪失を想定するものの、起因事象発生以前から正常に運転していたサポート系はソフトウェア CCF の影響を受けない。したがって、「運転時の異常な過渡変化」または「設計基準事故」にソフトウェア CCF が重畳しても、補機冷却系のように通常時から運転されており各々の起因事象との従属性がなくソフトウェア CCF の影響を受けないサポート系は利用可能である。</p> <p>起因事象としての外部電源の喪失が生じた場合については、対処設備となる原子炉停止系統及び主蒸気逃がし安全弁は、冷却系、空調系等に依らず期待できるものであり、事象収束の機能を果たすことができる。また、補機冷却系及び空調系を手動起動することにより、長期冷却及び冷温停止に移行することができる。</p> |

添付5 有効性評価で仮定する運転員対応操作について

ソフトウェアCCF有効性評価のうち、「原子炉冷却材喪失」では、運転員によるHPCF手動起動操作を仮定している。「原子炉冷却材喪失」とソフトウェアCCFが重畳した場合に、運転員によるHPCF手動起動操作完了までの時間余裕が最も厳しい事象は「給水配管破断」であるが、多様化設備の警報等により事象を認知でき、原子炉制御室からHPCFを手動起動することが可能である。

各操作の所要時間は以下のとおり算定しており、必要な操作が添付表5-1に記載の時間内に実施可能であることは、事業者の確認結果に基づき記載している。

- ・ソフトウェアCCFに対応するために整備される手順書に基づき、事象認知から機器操作までに必要な項目として、多様化設備作動確認、多様化設備警報確認、計器確認、事象判断、操作場所までの移動等を選定する。
- ・各事業者において、操作に必要な各項目に対して、運転員による模擬操作時間を計測する。
- ・各計測結果をもとに、全BWRプラントを包絡させる時間として算定する。

なお、運転時の異常な過渡変化とソフトウェアCCFが重畳した場合に運転員によるHPCF手動起動操作が最も早く必要になる事象は「給水流量の全喪失」であるが、多様化設備の警報等により事象を認知でき、多様化設備のARIによる制御棒挿入完了後の崩壊熱による原子炉水位の低下は比較的緩やかであることから、十分な時間余裕を持って原子炉制御室からHPCFを手動起動することができるため、注水の時間余裕は「原子炉冷却材喪失」に包絡される。

添付表5-1 HPCF手動起動操作の所要時間

| 原子炉冷却材喪失（給水配管破断） | | |
|------------------|------|----------------|
| 操作内容 | 所要時間 | 備考 |
| (1) 事象発生～事象判断 | 5分* | |
| (2) 事象判断～操作完了 | 5分* | |
| 合計 | 10分 | 全BWRプラントを包絡する値 |

* 計測結果をもとに各操作の所要時間を安全側に切り上げた値を設定。

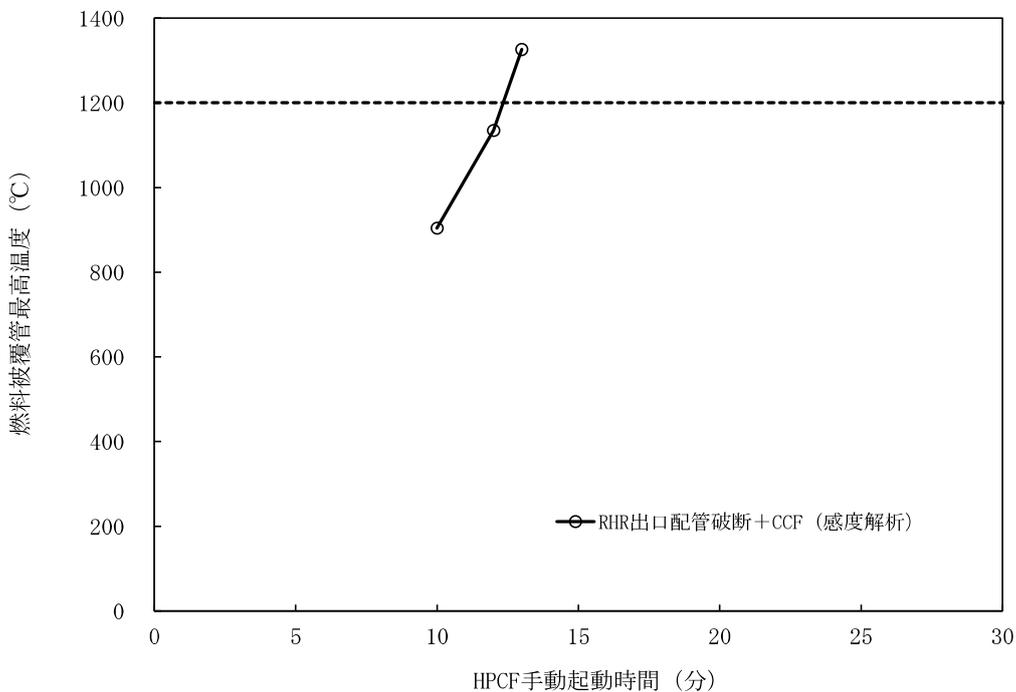
参考 1 LOCA+ソフトウェア CCF における常用系設備の作動タイミングに関する感度解析について

LOCA+ソフトウェア CCF のうち、RHR 出口配管破断+ソフトウェア CCF では、主蒸気配管断破断に比べ破断面積が小さく原子炉減圧速度が緩やかであり、原子炉の減圧速度によってタービン駆動給水ポンプ (T/D-RFP) トリップ及びその後の電動駆動給水ポンプ (M/D-RFP) の自動起動のタイミングが変わり得ることから、保守的な条件として M/D-RFP が自動起動しない場合の多様化設備による手動操作の時間余裕に対する感度を確認した。

添付表 6-1 に、RHR 出口配管破断+ソフトウェア CCF において保守的に M/D-RFP が自動起動しないことを仮定した感度解析における HPCF 手動起動に対する時間余裕の評価結果を示す。また、添付図 6-1 に HPCF 手動起動時間と燃料被覆管温度の関係を示す。HPCF 手動起動に対する時間余裕は約 12 分と評価される。

添付表 6-1 RHR 出口配管破断+CCF における HPCF 手動起動に対する時間余裕 (感度解析)

| 起因事象 | HPCF 手動起動に対する時間余裕 |
|------------|-------------------|
| RHR 出口配管破断 | 12 分 |



添付図 6-1 RHR 出口配管破断+CCF における HPCF 手動起動時間と燃料被覆管温度の関係 (感度解析)