

第 6 3 回 技術情報検討会 議事次第

1. 日時：令和 6 年 1 月 2 5 日（木） 1 0 : 0 0 ~ 1 2 : 0 0
2. 場所：原子力規制委員会 1 3 階 A 会議室 （TV 会議システムを利用）
3. 議題
 - (1) 国内外の原子力施設の事故・トラブル情報
 - 1) PRA に用いる機器故障率のためのデータ収集について
（説明者）米林 賢二 原子力規制部検査グループ検査監督総括課検査評価室 上席検査監視官
 - 2) 要対応技術情報：回路の故障が 2 次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性に関する調査結果
（説明者）齋藤 健一 原子力規制部原子力規制企画課火災対策室長
 - 3) 米国 PWR の炉心そう溶接部で発見された亀裂に関する事業者の対応
（説明者）小嶋 正義 技術基盤グループシステム安全研究部門 統括技術研究調査官
 - (2) 安全研究及び学術的な調査・研究から得られる最新知見
 - 1) 最新知見のスクリーニング状況の概要（自然ハザード以外に関するもの）（案）
・High burnup fuel source term accident sequence analysis
（説明者）星 陽崇 技術基盤グループシビアアクシデント研究部門 上席技術研究調査官
 - 2) 伊豆鳥島近海で近年発生した津波の特徴と 2023 年 10 月 9 日津波の発生原因の推察
（説明者）道口 陽子 技術基盤グループ地震・津波研究部門 主任技術研究調査官

配布資料

議題(1)

- 資料 6 3 - 1 - 1 PRA に用いる機器故障率のためのデータ収集について
- 資料 6 3 - 1 - 2 要対応技術情報：回路の故障が 2 次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性に関する調査結果
- 資料 6 3 - 1 - 3 米国 PWR の炉心そう溶接部で発見された亀裂に関する事業者の対応

議題(2)

- 資料 6 3 - 2 - 1 最新知見のスクリーニング状況の概要（自然ハザード以外に関するもの）（案）
- 資料 6 3 - 2 - 2 伊豆鳥島近海で近年発生した津波の特徴と 2023 年 10 月 9 日津波の発生原因の推察

PRA に用いる機器故障率のためのデータ収集について

令和 6 年 1 月 2 5 日
検査監督総括課
シビアアクシデント研究部門

1. はじめに

確率論的リスク評価（以下「PRA」という。）を実施する際、プラントを構成し、事故の起因となる機器の故障確率（以下「機器故障率」という。）が入力値となる。この機器故障率は、これまで事業者等によって故障実績が収集され、データ集としてまとめられてきた。最近では、一般財団法人電力中央研究所（以下「電中研」という。）が事業者とともに故障実績の収集方法及び機器故障率のデータ集を整備してきた。

令和 3 年 9 月に電中研及び事業者がまとめた機器故障率のデータ集「国内原子力発電所の PRA 用一般機器信頼性パラメータの推定（令和 3 年 9 月）」（以下「データ集」という。）が公開され、そこに故障実績の収集方法が記載されていたことから、原子力規制庁（以下「規制庁」という。）において内容を確認したところ、収集対象となる故障として「完全機能故障」のみが対象とされ、当初は所定の安全機能を発揮した機器であっても、時間の経過とともに劣化が拡大し、使命時間（安全機能を有する機器が動作を継続しなければならない時間）内に機能喪失に至りうるような故障事例が、収集対象とならないおそれがあることがわかった（米国では収集されている）。

令和 5 年 1 月 31 日の第 57 回技術情報検討会において、規制庁は本件について説明し、電中研及び事業者による故障実績の収集が実態よりも過小になる可能性があることを報告した。その際、米国における故障実績の収集実態について、規制庁において調査すべきであるとの意見があった。

その後、電中研による故障実績の収集方法が「確率論的リスク評価（PRA）のための機器信頼性データ収集実施ガイド」（以下「収集ガイド」という。）として、令和 5 年 5 月に公表された（添付 1 参照）。

今般、規制庁はこの収集ガイドの内容を確認し、気付き事項を電中研に提示したところ、令和 5 年 9 月 28 日の面談で回答を得たことから（添付 2 参照）、その概要及び当該回答に対する規制庁の見解と今後の対応について報告する。

2. 電中研が公表した収集ガイドの特徴¹

電中研は、以下の点に留意し、収集ガイドを作成したとしている。

○機器母集団は、従来は許認可図面の機器から抽出して構成したが、収集ガイドでは、各プラントの PRA モデル用系統図の機器から構成する。

○故障件数は、従来は原子力施設情報公開ライブラリー（NUCIA）の登録情報から抽出したが、収集ガイドでは、品質マネジメントシステムにおける機器の不適合情報から抽出する。

○起動デマンド数や機器運転時間²は、従来は1サイクル分³に年数を乗じる概算であったが、収集ガイドでは、プラント内の情報から直接収集する。

なお、令和5年4月20日に実施した規制庁と原子力エネルギー協議会及び電中研との面談において電中研は、事業者に故障実績の収集方法を説明する際には、使命時間中に要求される機能を満足するかどうかも考慮して故障を判断する旨伝えていたとし、令和5年5月発行予定（面談当時）のデータ収集ガイドにその判断基準も追記すると説明した。

規制庁は、令和5年5月に公開されたデータ収集ガイドにおいて、使命時間中に機能維持ができない場合は故障と判断する旨の記載があることを確認した。

3. 収集ガイドの規定に対する規制庁と電中研及び事業者とのやりとり

規制庁からは10の気付き事項を提示したが、そのうち重要な項目は以下の3. 1～3. 5に示す5項目である。この5項目以外は、記載の適正化に関するもの等であり、各事業者が回答の方針に沿って対処していくことを今後面談等で確認する。

3. 1 モデル化されていない故障モードのデータの未収集 (ガイドの規定)⁴

ある機器で内部リーク等の不具合があっても、当該 PRA でそれをモデル化していない場合、データ収集は不要である。【3.2.3(6)】

(規制庁の気付き事項)

現在の事業者の PRA モデルでは、ある故障モードが発生しても、系統上安全機能の喪失に至らない場合は不要として、当該故障が必ずしもモデル化されていないことがある。しかし、本来、機器故障そのものは、プラント毎の PRA モデ

¹ 第8回検査制度に関する意見交換会合(令和4年3月29日)資料 1-5「国内原子力発電所の一般機器故障率の推定 (PRA用原子力機器信頼性パラメータの整備) 一般財団法人電力中央研究所」に基づく。

² 起動デマンド数とは安全機能要求が発動した回数であり、機器運転時間とは機器が供用されている時間をいう。

³ 定期検査後に原子炉を起動し、再び定期検査に入るため停止するまでの間

⁴ 【 】内は「確率論的リスク評価(PRA)のための機器信頼性データ収集実施ガイド」の章の項目である。

ルの違いによって発生が左右されるものではなく、リスク情報の客観性を向上させるために網羅的に機器故障率を収集する観点からは、可能な限り全ての故障モードを収集対象とすべきである。

例えば、電動弁（海水）の作動失敗に関するデータ収集対象は27基であるが、外部リークの収集対象はこのうち8基のみである（添付3参照）。これは、個別プラントのモデル化の程度によりデータ収集の範囲が限定されたためと考えられる。その結果、電動弁（海水）の外部リーク率が過小評価されているおそれがある。

（電中研及び事業者の回答）

同じ電動弁の同じ規模のリークであっても、ある系統では機能喪失となり、別の系統では機能喪失にはならない場合がある。このような場合は、当該弁の運用方法も異なっており、機能喪失とはならなかった系統のリーク事象を故障としてカウントし、それを機能喪失した系統の信頼性評価に用いるのは適切ではない。

また電動弁（海水）の例では、27基の電動弁機器母集団の中から8基のみをリーク故障のカウント対象としていれば過小評価だが、8基でモデル化している電動弁（外部リーク）機器母集団の中から8基の外部リークを収集しているので問題はない。

ただし、PRAでモデル化されていない機器の故障データが活用できるかどうかは、今後、産業界内で収集方法を検討する。

（規制庁の対応方針）

PRAのモデル化の範囲に左右されない故障データの採取方法を事業者が検討し、それをガイドに反映するとともに、改訂されたガイドによる網羅的なデータ収集を行うよう要請する。

3. 2 不明確な人的過誤の扱い

（ガイドの規定）

運転時誤操作による機器の機能喪失事象は、PRA上は人間信頼性解析で別途モデル化するため、故障実績としてのデータ収集は不要である。【3.2.3(3)】

（規制庁の気付き事項）

日本原子力学会のPRAデータ収集に係る民間規格⁵（以下「実施基準」という。）では、「試験又は保守後の人的過誤及び計器の校正ミスから生じる故障が、系統のモデルに明示的に含まれている場合は、このような人的過誤は機器のハードウェアの故障原因に含めるべきでない。（略）しかし、PRAモデルの中にこのような人的過誤が明示的に含まれていない場合もある。そのときには、人的過誤に

⁵ 日本原子力学会標準 原子力発電所の確率論的リスク評価用のパラメータ推定に関する実施基準：2015（AESJ SC RK001:2015）

よる寄与を該当する機器故障率又は確率に含めるべきである。」という記載があるが、収集ガイドでは、そのようになっていない。

また、非常用ディーゼル発電機（以下「DG」という。）の機器バウンダリ内のインジケータコック弁⁶を運転員が閉め忘れた事例を当該 DG の所有事業者は、誤操作が原因の不具合のため故障から除外していた。そこで規制庁は、モデル化されていない人的過誤は機器故障とすべきとコメントしたところ、個別プラントの PRA でモデル化する旨の回答があった。

しかし、このような人的過誤は機器故障率に含めた方が、モデル化は容易であり、プラント毎の PRA モデルの違いに左右されずに機器故障データを収集できる。データ収集の可否を後段の PRA モデルに依存する形で運用することは PRA データの均一性が損なわれるおそれがある。

（電中研及び事業者の回答）

実施基準の当該記載は、「起因事象発生前の人的過誤」についての記載であり、収集ガイドも「起因事象発生前の人的過誤」を故障データの収集対象としているため、実施基準と矛盾していない。

DG のインジケータコック弁閉め忘れの事例について、当該 DG の所有事業者は、PRA モデル上、定期試験時等での運転員による人的過誤は、設備本体の弁操作であっても運転員が手順に従い操作する弁であれば、人的過誤として考慮する対象とし、機器故障のカウントはしないとしている。

今後、人的過誤による機器故障の事例は、PRA の事故シーケンスを構成するかどうかを検討し、事故シーケンスを構成する場合は、全体のリスクへの有意な影響の有無を判断し、影響があれば、人的過誤でモデル化するか機器故障で考慮する。また、影響が小さくモデル化しなかった場合は、その理由を明文化して残すことを検討中である。

（規制庁の対応方針）

DG のインジケータコック弁閉め忘れ事例は「起因事象発生前の人的過誤」であり、当該 DG を有する事業者の回答は、収集ガイドの考え方と異なっている。また別の事業者もタービン動補助給水ポンプの定期起動試験前点検時（起因事象発生前に相当）に運転員が誤って弁のハンドルに接触し、その後当該試験に失敗した事例を誤操作が原因の不具合のため機器故障から除外したと回答している。（PRA 上、人的過誤としてモデル化されていない）。

以上のことから、収集ガイドの意図が適切に伝わるようにガイドを改訂し、これを周知することを要請する。

⁶シリンダ毎に設置されており、起動前の準備として、シリンダ内に溜まったガスを排出するために使用する。運転中及び待機中は閉とするが、起動前及びターニングの際には弁を開けてシリンダ内のガスを排出する。

3. 3 営業運転開始前データの未収集

(ガイドの規定)

データ収集期間を営業運転開始以降とする。【3. 2. 2】

(規制庁の気付き事項)

収集ガイドでは、データ収集期間として「保安規定などで機能が要求されている期間」も記載されているが、営業運転開始の起点は、機器に要求されるオペラビリティと技術的に無関係なため、営業運転開始前であっても、保安規定の適用期間中に機能要求を満たさなければ、故障とすべきである。

事業者は、試運転期間中（建設段階）の DG の定例試験での LCO 逸脱事例を営業運転開始以前のため、故障としていないが、これは原子炉起動後 100%電気出力に到達した日から約 1 ヶ月後に発生したものであり、通常運転時と同じプラント状態であった。

(電中研及び事業者の回答)

機器故障の収集期間は、通常安定した運転状態における機器の故障を取り扱うため、「試運転期間」という非常に特殊な運転モードを除き、営業運転開始以降の故障を収集している。

当該 DG の故障原因は、メーカーの製作時のボルト締め付けが不十分であったためであり、製作後の DG の初期故障であることから、通常状態の故障とすべきではない。

収集ガイドの記載は「営業運転開始以降に保安規定などで機能が要求されている期間…」へと次回改訂する。

(規制庁の対応方針)

当該 DG の事例の原因は保守不良であり、同様の故障は既設プラントでも発生していることを踏まえれば、試運転特有の故障とは言えないことから、建設段階の試運転時であっても、保安規定などで機能が要求されている期間中は故障とするとともに、既設プラントにおける設備の新設、改造時にあっては、営業運転開始の時期にかかわらず、当該設備に係る最終の使用前事業者検査合格後の不具合は、故障とするようガイドを改訂し、周知することを要請する。

3. 4 起動失敗と継続運転失敗の分かりにくい定義

(ガイドの規定)

DG の起動失敗を「要求時に起動しないか、起動直後に自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障」と定義し、それを直接判断できるものとして「遮断器投入後、基準を要求時間⁷内に負荷が確立できない(確立しなかった)場合」とし、継続運転失敗はそれ以外としている。【3. 2. 3(7)、附録表 A】

(規制庁の気付き事項)

⁷ 事業者の設置(変更)許可申請書に記載されている非常用ディーゼル発電機が信号を受け起動し、電圧を確立するまでの時間

電中研及び事業者は DG のガバナの応答性の低下により 1 分以内に過速度トリップに至った事例⁸を「起動失敗」とせずに「継続運転失敗」としており、「起動失敗」と「継続運転失敗」の分類が困難な定義となっている。

「起動失敗」の考え方については、米国では起動後 1 時間以内に生じた故障とし、国内の実施基準では起動後 30 分間程度までに生じた故障としているが、どのような理由で、冒頭の定義としたかについての理由が明示的に記載されていない。

（電中研及び事業者の回答）

ガバナ不良による故障は、NUCIA と事業者情報から、電圧確立「後」に運転継続した後に停止したので継続運転失敗と判断したものである。

米国では起動失敗、起動後 1 時間以内の継続運転失敗及び起動後 1 時間以降の継続運転失敗の 3 つに分けており、起動後 1 時間以内の故障は起動失敗ではない。起動後 1 時間を境に故障率が変わるため継続運転失敗を 2 つに分けたとしている。我が国にはそのような知見がないため、今後はデータを蓄積したうえで、その要否を検討する。なお、国内の実施基準の分類は技術的根拠が乏しいことから使っていない。

（規制庁の対応方針）

事業者の PRA モデルでは国内に十分な知見が無くとも、人的過誤値の計算などで既に米国の知見を幅広く採用しているほか、国内でも DG の 24 時間運転により長時間の運転データも蓄積されている。

以上のことから、米国の知見と長時間運転データを活用して起動失敗と継続運転失敗の分類基準を明確にするよう要請する。

3. 5 外的要因による故障の未考慮のおそれ

（ガイドの規定）

機器の不具合の原因が、外的事象 PRA で対象とするハザードの場合は、データ収集は不要である。【3.2.3(5)】

（規制庁の気付き事項）

外的事象 PRA の評価手法はまだ整備中かつ完成時期が未定であるほか、対象範囲の詳細が明らかではないため、現時点において故障にカウントしないとすると、PRA による評価結果が過小評価となるおそれがある。

（電中研及び事業者の回答）

外的事象による一部の機器故障を機器故障データベースに含めただけでは当該事象によるリスク全体を評価できない。

しかし、不適合事例を基に故障を判定し、それらを内的事象、外的事象で選別し、見落としがないように記録を残してモデル化の要否の判定につなげるこ

⁸ NUCIA に拠れば、工場調査の結果、正常なガバナは起動後 0.2 秒でエンジンの回転数が安定したが、不具合のあったガバナは 50 秒かかったとのことから、**要求基準**時間内に負荷が確立できていない可能性がある。

とは可能であり、事業者の相互レビューで共通の対応策を検討する。

(規制庁の対応方針)

外的事象に係る不適合事例を収集し、このような事例が漏れなく外部事象 PRA に含まれるように電中研の外部事象毎の PRA 実施ガイドに追記、公開するとともに、将来的には民間規格への反映を要請する。

4. 米国における活動の調査

第 57 回技術情報検討会において調査の指示があった米国における故障実績の収集実態については、現時点の調査結果を以下のとおり報告する。

米国の事業者からの聞き取りによれば、米国原子力規制委員会（以下「NRC」という。）が規則によって要求するメンテナンス・ルール（10 CFR 50.65）に基づき、事業者は機器等のパフォーマンスや状態を監視している。プラントで何らかの不具合事象が発生すれば、事業者は 10 CFR 50.65 に基づくプロセスによって、自ら定めた性能の基準に照らして故障かどうかを判断している。故障と判断された事案は、事業者が米国原子力発電運転協会（以下「INPO」という。）の故障データベースに入力することになっており、この INPO の故障データベースは、PRA に用いるか否かに関係なく、広く故障データを蓄積しているとのことであった。

他方、NRC 及び米国アイダホ国立研究所によれば、両者は INPO の故障データベースや、NRC が事業者から受領した Licensee Event Report 等の情報を元に、PRA で用いるべき故障か否かについてのスクリーニングを実施し、そこで得られた故障データから平均機器故障率を算出している⁹。そのスクリーニングの際、各事業者の PRA のモデル化の範囲にかかわらず、広く収集された故障データベースを分析した上で、故障率を算出しているとのことであった。

また、PRA における機器故障の取扱いにおいては、単独で故障するものだけではなく、共通の要因により複数の機器が故障する共通要因故障が重要であり、この共通の要因としては、手順書の不備、環境要因等が考えられる¹⁰との考えが示された。

5. 今後の対応

今回の確認により、故障判断が事業者の PRA での故障モードのモデル化に依

9 S. A. Eide et al., Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6928 (INL/EXT-06-11119), January 2007.
10 A. Mosleh, et al., Guidelines on Modeling Common-Cause Failures in Probabilistic Risk Assessment, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-5485 (INEEL/EXT-97-01327), June 1998.

存するなど、米国と異なり、人的過誤、外的要因等による不具合など共通要因故障の要因となり得るようなものも含め、故障実績が網羅的に収集されないおそれがあると考えられることから、以下のとおり対応を進めていく。

- 上記3. 1～3. 5の規制庁の対応方針に従って、電中研及び事業者に改善を要請する。その改善状況を確認して、意見の相違があれば議論していく。その状況は、必要に応じて技術情報検討会に報告する。
- 故障データの収集に関する論点は、電中研が作成するデータ収集ガイドだけでなく、故障データの収集及び PRA の実施主体である事業者にも共通の課題であることから、主要原子力施設設置者の原子力部門の責任者との意見交換会等も活用して、意見交換する。
- 現時点では、規制庁は電中研が公表した国内故障率に係る品質確保の方針を確認できないため、当面の間、原子力規制検査の検査指摘事項に対し定量的な重要度評価を行う場合は、事業者が作成する PRA モデルに米国の故障率を組み込んで算出した Δ CDF なども活用することを検討していく。

添付 1 電力中央研究所報告「確率論的リスク評価（PRA）のための機器信頼性データ収集実施ガイド（2023 年 5 月）（抜粋）

添付 2 『電力中央研究所報告「確率論的リスク評価（PRA）のための機器信頼性データ収集実施ガイド（2023 年 5 月）」に関する気付き』に対する産業界の回答と今後の改善活動（2023 年 9 月 28 日 電力中央研究所（NRRC）、原子力エネルギー協議会）

添付 3 電力中央研究所報告「国内原子力発電所の PRA 用一般機器信頼性パラメータの推定」（2021 年 9 月）（抜粋）

3.1.1 機器故障情報源の要件

PRA 用の機器故障情報としては、PRA 対象機器の機能要求期間における機能喪失事象の情報、すなわち、機器バウンダリ、機種・故障モード、機能喪失の具体的状況、などの情報が必要である。そのため、当該プラントの是正措置情報源から下記のような情報を調査するのが良い。

- 機能喪失発生プラント
- 機能喪失発生日時
- 機能喪失した機器の名称、系統名称、装置名称など
- 機能喪失の形態 (判断根拠を含む)
- その他機能喪失の詳細 (発生および対応の状況、原因分析・対応など是正措置内容)

利用できる情報源としては、以下の例が挙げられる。

- 運転日誌および運転報告書
- プラントの内部資料 (保守記録および機器履歴記録等)
- 事故速報および事故詳報並びにデータベース (NUCIA など)

必ずしも PRA の対象ではない機器の故障であっても、PRA 対象機器の信頼性評価に役立つと考えられる情報であれば利用してもよい。ただしそれらの情報では、機器バウンダリや故障モードが PRA 機器の定義と異なる場合があるので、PRA 用への変換や読み替えが必要である。

3.1.2 露出データに関する情報源の要件

PRA 用の運転経験情報としては、PRA 対象機器の母集団数、および露出データ (デマンド数、供用時間・運転時間) の情報が必要である。以下のような情報源を利用して露出データを収集する。

- 運転日誌
- 試験・検査記録
- プラントコンピュータに格納されている機器作動記録

また、正確な記録がない場合でも、機器試験手順、プラント運転手順などから露出データを合理的な推定ができる場合もある。例えば、定期試験において電動ポンプの起動・停止がある場合には、電動ポンプ起動失敗のデマンド数や運転時間を推定することができる。

3.1.3 機器信頼性データ収集期間

国内原子力プラント機器の現状の適切な信頼性水準を表す機器信頼性パラメータ (故障率/故障確率) を得るためには、当該機器の運用方法や保全方法、環境、性質が大きく変化しない (機器故障発生の可能性があまり変わらない) と考えられる範囲で、できる限り長い期間のデータを収集するべきである。

3.2 機器信頼性データ収集の方法と手順

PRA 対象機器の信頼性分析では、機能喪失した機器の機種・故障モード、機能喪失の程度/要因、機能喪失の影響などを調べるため、当該機器に求められている機能・役割、材料、構造などの機器仕様情報や、運用・保守情報、是正措置情報が必要となるため、当該プラントの PRA 要員のみならず、設備保全、運用などの専門知識を持つ要員の協力が不可欠である。

3.2.1 機器信頼性データの対象と属性

機器信頼性データ収集の対象機器は、PRA で基事象としてモデル化されている機器である。各機器に対して、以下に示す属性を定義する。

- 故障と機能喪失

本実施ガイドでは、機器の故障と機能喪失とは当該機器に要求される機能が完全に喪失した状態をいい、具体的には PRA において当該機器に対して定義されている要求機能が発揮されず（使命時間が定義されている場合はその使命時間まで機能維持することができず）、成功基準が満たせない状態を対象とする。機器故障率や故障確率を算出するには、機器の故障事象を収集する。

なお、機器が故障に至っていない事象として、劣化事象、予兆事象がある。劣化事象とは、機器機能は維持されているが十分な性能が発揮されていない状態、予兆事象とは、重大な性能の劣化はないが、機能喪失に発展する兆候が見られる状態である。劣化事象も予兆事象も、本実施ガイドでは故障率や故障確率の推定に用いる故障事象には含まない⁷。

- 機種

PRA で基事象としてモデル化されている主要な機器を用途、機能等別にグループ化した機種（電動ポンプ、タービン駆動ポンプ、電動弁、空気作動弁、油圧作動弁、逆止弁、手動弁、非常用ディーゼル発電機、ファンブローア、熱交換器、MG セット、蓄電池、充電器、遮断器、オリフィス、ストレーナ/フィルタ、変圧器、インバータ、等々）を定める。国内の機器について整理したものを「附録 A 機種・故障モードの定義」⁸（以下「附録 A」という）に示す。

- 故障モード

機種別に機能喪失の様態（動的機器の起動失敗・継続運転失敗、弁の開失敗・閉失敗、等々）である故障モードを定める。国内機種に対する故障モードを附録 A に示す。

- 機器バウンダリ

不具合事象がどの機器で発生したものかを明確にするため、機器の範囲、すなわち機器バウンダリを定める。国内機器のバウンダリを「附録 B 機器バウンダリの定義」⁹（以下「附録 B」という）に定める。

なお、上記の機種・故障モード、機器バウンダリはこれに限るものではなく、今後の PRA モデルの高度化やスコープ拡大に伴って加除修正することがありうる。

3.2.2 データ収集対象機器の特定

個別プラントの PRA において、故障事象が基事象としてモデル化されている機器¹⁰を、機器 ID、機器名称、系統、機種、故障モード等で分類整理し、データ収集対象機器リストを作成する¹¹。このとき、必要に応じて

- 非展開事象（情報がないためにこれ以上の展開をしない事象又は展開を省略する事象）を構成する機器
- 配管・母線などのセクション数を考慮する機器（附録 B 参照）

も収集対象とする。

⁷ 共通原因故障事象の判定（別途ガイドを定める）では、劣化事象、予兆事象も部分的な故障事象として収集の対象とする。

⁸ 従来、国内の故障判定に使われていた機種・故障モード定義[2]-[7]を、本実施ガイドの策定にあたってあらたに見直し、国内プラントの PRA で実際にモデル化される機種・故障モードを取捨選択あるいは追加した（ただし、プラント個別特有の機器など、事業者全体で共有する必要がないと考えられる機種・故障モードは含まない）。

⁹ 従来、国内の故障判定に使われていた機器バウンダリ[2]-[7]を、本実施ガイド策定にあたってあらたに見直し、追加機種のバウンダリ設定や従来機種のバウンダリ変更を行った。

¹⁰ 機器の故障（機能喪失）事象ではない基事象（ハウスイベント、メンテナンス状態を設定する基事象、運転員操作を表わす基事象など）は抽出対象外とする。

¹¹ 各社または各プラントの保全データベースの中で PRA 用対象機器を特定でき、保修部門の保全情報が直接 PRA 機器故障モードの判断に活用できるような環境を整備すれば、作業が効率的に実施できると考えられる。

なお、冗長化されている系統のうち、PRAでは特定の1系統のみが代表としてモデル化されている場合がある。そのような場合であっても、系統全体の信頼性を評価するため、モデル化されていないほうの冗長化系統の機器も故障データ収集の対象とする。

また、データ収集の対象は営業運転開始以降のプラントを対象とする。廃止措置計画を申請、または認可されたプラントの機器については、仕様や運用経験の類似性などの観点から運転中プラントの機器信頼性評価に役立つと判断する場合は、必要に応じてデータ収集対象とするのが望ましい。

さらに、現時点ではPRAにモデル化されていない機種・故障モードであっても、今後モデル化が予想される、またはモデル化を予定している機種・故障モードであれば収集対象として挙げておくのがよい。

3.2.3 機器故障データの収集

各プラントで実施する機器故障データ収集手順を図3-1に示す。この手順は、プラントの保全データベースなどの全不具合情報を格納した情報源から、PRA対象機器のランダムな不具合に該当しない事象を条件a-eで仕分けし、除外していく手順となっている¹²。この除外操作の結果残った事象は、PRAモデルの基事象に該当する機種・故障モードの不具合となる。このうち、条件fによって完全機能喪失でない事象を除外し、最後に残った事象を機器信頼性パラメータ推定のための機器故障データとする。

以下、仕分け除外条件a~fの詳細を(1)~(8)に説明する。仕分けた結果は、表3-1の様式で理由、根拠とともに記録しておく。

(1)「機器以外の不具合事象」を除外

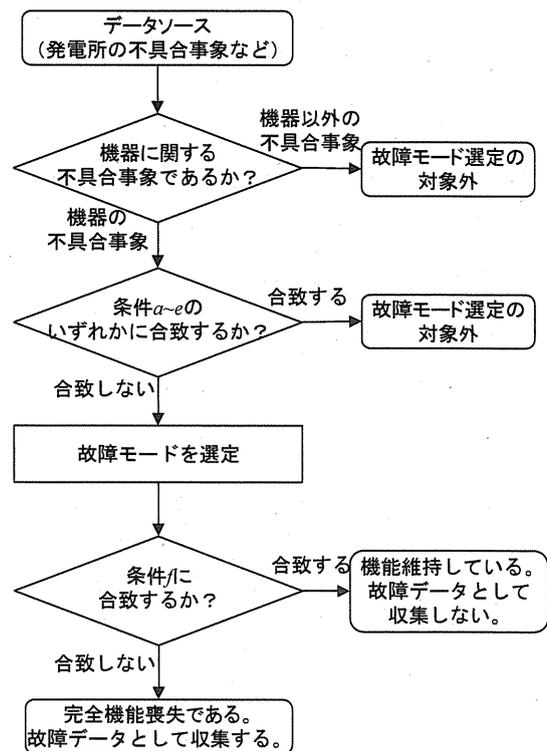
最初に、手順書の不具合など、機器の不具合を

伴わない事象は除外する。

(2)「条件a：データ収集対象機器のバウンダリ外の不具合」を除外

上記(1)で除外しなかった事象はなんらかの機器の不具合であり、この中からPRA対象機器に関係しないものを除外する。具体的には、

- 3.2.2で作成したデータ収集対象機器リストを参照して、不具合が発生した機器がこの機器リストに挙がっていないければ、当該事象は対象外として除外する。



故障判定にかかる条件

条件a-e…PRA対象機器のランダムな不具合に該当しない条件

条件a：データ収集対象機器のバウンダリ外の不具合である。

条件b：運転時誤操作(保修員による代行操作も含む)が原因の不具合である。

条件c：評価対象期間外の不具合である。

条件d：外的要因が原因の不具合である。

条件e：対象故障モード以外の機能の不具合である。

条件f：データ収集対象機器の完全機能喪失でない不具合である。

(劣化事象、あるいは予兆事象、あるいは再現性のない一過性の不具合事象である。)

図3-1 PRA機器故障データ収集手順

¹² 一般に、不具合事象全体の中ではPRA用機器故障事象に関係のない事象のほうが多いため、そのような事象を早い段階で除外しておくという手順になっている。

- 不具合が発生した機器がデータ収集対象機器リストに挙がっている場合は、附録Bを参照して、不具合発生箇所が当該機器のバウンダリ外であれば、対象外として除外する。

後者のバウンダリ内外を判断する際は、附録Bのバウンダリ内外表と、バウンダリ図の実線（バウンダリ内）と点線（バウンダリ外）、を参照する。図3-2に具体的な機器故障バウンダリの考え方の例を示す。機器バウンダリの定義から、当該機器がフロント系の場合、そのサポート系はバウンダリ外である。

なお、図3-2にあるように、我が国では、バウンダリ内に“遮断器”がある機種、あるいは、バウンダリ内に“リミットスイッチ”がある弁装置においては、それら“遮断器”あるいは“リミットスイッチ”の機能喪失は、当該電動弁、弁装置の故障としてだけでなく、“遮断器”あるいは“リミットスイッチ”の故障としてもカウントす

ることとしている¹³。（ただし、前者において、“遮断器”ではなく“電磁接触器”がある場合は、その故障は、“遮断器”の故障には含まない。）

(3)「条件b：運転時誤操作が原因の不具合」を除外

運転時誤操作（保守員による運転代行作業の誤操作を含む）による機器機能喪失事象は、PRA上は人間信頼性解析で別途モデル化するため、機器故障データ収集対象から除外する¹⁴。

運転時誤操作以前から機器が故障状態にあり、運転の誤操作は単に当該機器の故障状態の発現のきっかけになっただけであると判断される場合には「運転時誤操作が原因の不具合」ではないので、本条件bでは除外せず、機器故障データの収集対象とする。

同様に、保守作業時の計器誤較正、および、保守作業不良による機器健全性の喪失についても、本条件bでは除外せず、機器故障データの収集対象とする¹⁵。

表3-1 機器不具合データ仕分けの記録様式

仕分け除外した条件、すなわち、「機器以外の不具合」がまたは条件a-fのどれかに印をつけておく。複数指定可。

| 整理番号 | 発見日 | 不具合名称 | 内容 | 不具合の対象機器 | 不具合機器ID | 不具合対象機器のPRA機種 | 機器以外の不具合事象 | 条件a | 条件b | 条件c | 条件d | 条件e | 条件f | 故障モード | 仕分け理由 |
|------|-----|-------|----|----------|---------|---------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | |

¹³ 従来、我が国のデータ収集方法では、電動ポンプや電動弁などの機器内の遮断器は当該機器（ポンプや弁など）のバウンダリ外としていたが、NRRC 技術諮問委員会 Stetkar 委員長の推奨により、欧米のバウンダリの決め方と整合性をとり、本ガイドではそれら遮断器は当該機器のバウンダリ内とすることを基本とした。技術的には、そのようにしたほうが、不具合がバウンダリ内で発生したかどうかの判断が容易である。なお、従来のデータ収集方法が“遮断器”の信頼性に影響していたかどうかを後日検証できるようにするため、上記本文では従来と同じ遮断器単体としてのデータ収集も継続することとしている。

¹⁴ 保守作業不良であっても機器自体の機能が低下していない場合（手動弁の開け忘れ、閉め忘れ等）は、人間信頼性解析の扱いになり、機器故障データの収集対象にはならない。

¹⁵ 保守作業不良による機器の不具合は、本来は保守作業中の人間信頼性解析で扱うべきであるが、対象作業数が膨大となることから、我が国では現時点で保守作業中の人間信頼性解析を実施していないため、当面は機器故障データの収集対象として扱う。

(4)「条件c：評価対象期間外に発生した不具合」を除外

保安規定などで機能が要求されている期間¹⁶、あるいは、基本的には機器が供用されている期間を機器信頼性評価の「評価対象期間¹⁷」とし、それ以外の期間である「評価対象期間外」で発生した不具合事象は除外する。評価対象期間の詳細は、3.2.4で述べる。

なお、下記3つの場合においては、評価対象期間外に発生したと考えられる機器不具合事象であっても、当該機器の機能要求期間における信頼性に影響することから、故障データ収集の対象候補とし、本条件cでは除外しない。

【収集対象候補から除外しない場合 その1】

保安規定などによる機能要求期間外に潜在的な不具合が発生し、それが機能要求期間中に発現した場合は、評価対象期間内の不具合であるとしてデータ収集の対象候補とし、本条件cでは除外しない。

【収集対象候補から除外しない場合 その2】

機器の状態が機能要求期間と同じであるとみなすことのできる機能試験中に当該機器の不具合が発生した場合は、機能要求期間中に起こりうる不具合であるため、データ収集の対象候補とし、本条件cでは除外しない。

例えば、法令で義務付けられている定期事業者検査中に検知された不具合は、故障データ収集対象候補の不具合とみなし、本条件cでは除外しない。

【収集対象候補から除外しない場合 その3】

機能要求期間外に発見された不具合であっても、その不具合がその直前の機能要求期間中に起こり得たと判断できる不具合は、データ収集の対象候補とし、本条件cでは除外しない。

保全計画書等で計画した点検・試験を実施するために当該機器を供用除外した場合、あるいは、保安規定の「予防保全を目的とした点検・修理を実施する場合」の条文に基づいて計画的に運転上の制限外に移行した場合は、当該機器は当該点検・試験中に機能喪失するが、これらの事象は故障とはみなさないため本条件cで除外する。

(5)「条件d：外的要因等が原因の不具合」を除外

機器の不具合の原因が、地震、津波、内部火災、内部溢水など、内的事象以外のPRAで対象とするハザードである場合には、当該ハザードPRAにおいて当該機器に対するフラジリティ評価（機能喪失確率の評価）を実施しているので、当該不具合は本故障データ収集の対象外として除外する。したがって、PRAが実施されていない外部ハザード（現在では落雷、竜巻、降雨など）に起因した機器の不具合については、本条件dによって除外はせず、故障データ収集の対象とする。

なお、PRA対象機器自身が内部火災、内部溢水を引き起こした場合は、当該不具合は故障データ収集の対象とする。

(6)「条件e：附録Aの故障モード以外の機能の不具合」を除外

機器の不具合が、当該機種に対して附録Aに定めた故障モードに該当しない場合は、当該不具合は故障データ収集の対象外であるとして除外する。この作業では、下記附録も参考とする。

- ・ 附録E 機器信頼性パラメータ評価に用いる事象ではない事例（以下「附録E」という）

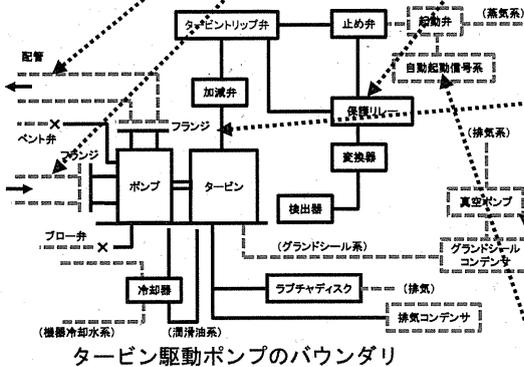
例えば、通常、電動弁は手動操作を行うことが

¹⁶ 保安規定や所則に定められている、機器の機能が要求されている期間。

¹⁷ 機能要求期間の設定が困難で、原子炉運転時間（または歴時間）と当該基事象の機能要求期間との差が小さい場合には、統一的に原子炉運転期間（または歴時間）を評価対象期間として設定してもよい。

| 項目 | バウンダリ内 | バウンダリ外 |
|------------|---------------------------------------|--------------------------|
| 機器本体 | ポンプ、タービン、その他 | — |
| 駆動用蒸気 | 蒸気止め弁から排気コンデンサの手前まで *(ラプチャディスクを含む) | 起動弁、排気コンデンサ |
| 計測制御装置 | 冷却水流量・潤滑油圧力等に保つ検出器・変換器・保護リレー、その他 | 自動起動信号系 |
| 潤滑油装置 | 潤滑油系(ポンプ、冷却器を含む) | 機器冷却水系 |
| 軸封装置 | 自給水系 | 給給水系 |
| グランド蒸気装置 | — | タービングランドからコンデンサまで、真空ポンプ |
| サポート類 | 支持脚、アンカー等 | 配管のハンガース |
| 配管・ダクトとの接続 | フランジ等 | 機器側フランジ、パッキン、フランジボルト、その他 |
| | 溶接部 | 溶接部及び熱影響部(配管側) |
| 付属弁 | 機器本体に接続されたブロー弁、ベント弁等、及びそこまでの接続配管 | — |

*ただし、BWR高圧注水系及び原子炉隔離降圧冷却系については、蒸気止め弁からタービンまで(排気ラインを除く)とする。



タービン駆動ポンプのバウンダリ

タービン駆動ポンプのバウンダリ外
これら点線部の配管は、「タービン駆動ポンプ」のバウンダリ外である。
配管は、別途、「配管(3インチ以上(又は3インチ未満))の故障」として収集を検討する。

「保護リレーの誤動作」が判明した場合、タービン駆動ポンプは起動信号発信時に起動しないと考えられるため、「タービン駆動ポンプの起動失敗」とする。
一方、「保護リレーの不動作」が判明した場合、それがタービン駆動ポンプの起動失敗、継続運転失敗のいずれも起こさない場合は、タービン駆動ポンプの起動失敗や継続運転失敗にはしない。

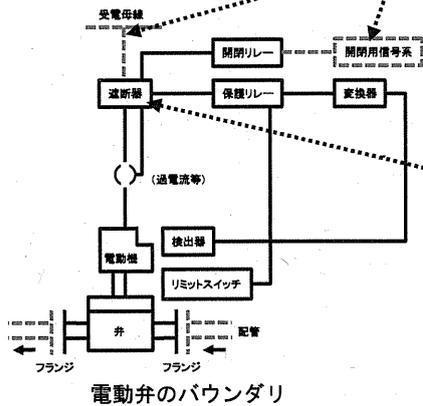
タービン駆動ポンプのバウンダリ内
これら実線部の配管や制御ケーブル等は、「タービン駆動ポンプ」の故障として収集する。
「配管」や「制御ケーブル」の故障として収集しない。

タービン駆動ポンプのバウンダリ外
これら点線部は「タービン駆動ポンプ」のバウンダリ外である。
バウンダリ外の部位の故障については、その部位が他機種のバウンダリ内に定義されている場合はその機種について故障判定をする。

バウンダリ外
これら点線部の信号系は、バウンダリ外である。

| 項目 | バウンダリ内 | バウンダリ外 |
|---------------|--|---------------|
| 機器本体 | 弁体(ドレン・ベント管及び弁が付置している場合は第一止弁まで)、弁種、弁種、フランジ、その他 | — |
| 駆動機構 | 電動機、減速ギア、その他 | — |
| 計測制御装置 | リミットスイッチ、電流等に保つ検出器、保護リレー、開閉リレー、その他 | 開閉用信号系 |
| サポート類 | アンカー等 | 配管サポート等 |
| 配管・ダクトとの接続 | フランジ等 | 機器側フランジ(機器本体) |
| | 溶接部 | 熱影響部(機器側) |
| 受電母線・ケーブルとの接続 | ケーブル、遮断器 | 受電母線 |

電動弁のバウンダリ外
これら点線部の母線は、「電動弁」のバウンダリ外である。
別途、「母線」の故障として収集する。



電動弁のバウンダリ

電動弁のバウンダリ内の遮断器の取扱について
これら実線部の遮断器は、「電動弁」のバウンダリ内であるが、遮断器の故障により電動弁の機能喪失した場合は、「電動弁」の故障だけでなく、「遮断器」の故障としてもカウントする。
「電動弁」だけではなく「遮断器がバウンダリ内にある機種」についても、同様に、遮断器の故障があった場合は、「当該機種」の故障だけでなく、「遮断器」の故障としてもカウントする。(「遮断器」ではなく「電磁接触器」の故障の場合は、「遮断器」の故障には含まない)

図 3-2 機器故障バウンダリの考え方の例

青の実線はバウンダリ内、緑の点線はバウンダリ外を表す。

できるが、手動操作のハンドルの不具合で手動操作ができないという場合は、(手動操作機能は喪失するが) 電動弁の故障モード(開失敗、閉失敗、作動失敗、誤開又は誤閉、外部リーク、内部リーク、閉塞)の機能喪失ではないため、附録Aに定めた故障モード以外の機能の不具合となり、したがって故障データ収集の対象外であるとして除外する。

一方、機器の不具合が附録Aに定める故障モードであっても、当該プラントのPRAにモデル化されておらず機能喪失程度の判断が難しい場合は、データ収集の対象外として除外する。例えば、ある機器において内部または外部リークの不具合があったものの、当該PRAではそれらの故障モードが(不要であるとして)モデル化されていないため機能喪失か否かの判断が困難な場合は、データ収集の対象外として除外する。

(7) 故障モードの選定

条件eでデータ収集対象の故障モードでない不具合を除外したので、ここまでに除外されずに残った事象はデータ収集対象機器の不具合で、かつ、その故障モードが同定される。この不具合事象について、既出附録の他、以下の附録を参照して、最終的な故障モードを確認・判定する。

- 附録A 機種・故障モードの定義
- 附録D 故障モード選定事例
- 附録E 機器信頼性パラメータ評価に用いる事象ではない事例

待機系機器の不具合が検査や保守作業中に見つかった場合は(「設計や製作の不良」が原因であった場合も含む)、事象から直ちに故障モードを判定することは難しいので、供用中にその不具

合状態で起動または作動要求があったと想定し、起動または作動しなかったと考えられる場合は「起動失敗」または「作動失敗」の故障モードとする。

(8) 「条件f: データ収集対象機器の完全な機能喪失でない不具合(劣化、予兆、再現性のない不具合事象)」を除外

ここまでに除外されずに故障モード判定されたデータ収集対象機器の不具合のうち、機器への要求機能が完全に喪失した不具合のみを最終的なPRA用データ収集対象とする。完全な機能喪失ではない不具合、すなわち、劣化、予兆、あるいは再現性がなく機能は完全には失われていないと判断できる不具合は、故障データ収集の対象外として除外する¹⁸。

ここで、完全機能喪失、劣化、予兆とは、以下のような状態を指す¹⁹。

- 完全機能喪失: PRAにおいて当該機器に対して定義されている要求機能が発揮されず(使命時間が定義されている場合はその使命時間まで機能維持することができず)、成功基準が満たせない状態。
- 劣化: 当該機器への要求機能は発揮できているが最適な水準には至っていない状態。
- 予兆: 当該機器への要求機能に深刻な劣化はないが、機能を阻害する状況に発展する何らかの兆しが現れている状態。

条件fの除外作業において、劣化や予兆の程度の判定は容易ではないが、機器信頼性評価に必要なのは完全機能喪失事象の収集であり、機能喪失の判定は劣化や予兆の判定よりも比較的容易なので、実際には劣化や予兆の正確な判定をする必要

¹⁸ 条件fで除外した完全機能喪失未満の事象のうち、冗長系機器の事象については共通原因故障データ収集の対象候補となるので、除外記録を残しておくことが特に必要である。

はない。機器に劣化や予兆が疑われる状態がみられても、当該機器に要求されている安全機能が発揮できる（使命時間が定義されている場合は少なくともその使命時間は機能維持できる）と判断される場合は、「完全な機能喪失」ではないので、PRA用故障データの対象とはしない。

以下、機能喪失の判定についての留意点について述べる。判定にあたっては、前掲附属 A、D、Eの内容に加え、以下(A)、(B)、(C)に留意する。

(A) 他の機器からの波及影響で別の機器が故障する場合

他の機器の機能喪失の波及影響を受けて故障した機器については、以下のとおりに取り扱う。

- ① 波及影響を受けた機器自身も機能喪失し、機能回復のために修繕を要した場合：波及影響を受けた機器も機能喪失とする。
- ② 波及影響を受けた機器が修繕せずに機能復旧した場合：波及影響を受けた機器は機能喪失としない。波及影響を受けた機器を“念のために部品交換”した場合も、修繕せずと取り扱い、機能喪失としない。

したがって、①に該当する機能喪失は、波及影響を与えた機器の故障データに加えて、波及影響を受けた機器の故障についても、もう1件の故障データとして収集する。

以下に他の機器からの波及影響の例を示す。

【波及影響を受けた機器も機能喪失とする場合】

- i. 配電盤においてアーク事象が発生し、過電流の発生後に保護継電器が動作せず、接続機器であるポンプの駆動部モータに損傷が発生した。配電盤の機器、継電器の機能喪失により波及影響を受けた接続機器であるポンプは機能喪失と判定する。

【波及影響を受けた機器を機能喪失としない場合】

- i. 過電流の発生で保護継電器が動作しメタクラ遮断器が開放したため、接続された継続運転中の機器が停止した。この機器は、過電流発生箇所を保修することにより通常状態に復帰したため、機能喪失とはしない。
- ii. 主蒸気止め弁の開度指示計用の検出器の一部の部品が脱落したことで信号が低下し、主蒸気止め弁が一時動作できない状態となった。この主蒸気止め弁は、油圧作動弁としての機能は維持しているため、機能喪失とはしない。

(B) 機器の故障はないが系統との相性が悪く、警報誤発報や誤動作する場合

機器がカタログどおり作動し、故障していない場合であっても、警報誤発報や、誤動作し系統運転を阻害する場合は、その機器はその系統に適していないもの（設計不良・不足で採用されたもの）とみなし、機能喪失と判定する。

表 3-2 機器故障データの記録様式

(1件の事象に対して2件の故障データが抽出される場合には、2行使って2件の故障を記録する。)

| 整理 No. | 機器 ID | 機器名称 | 故障の発見日 | 機種 | 故障モード | 事象の概要 | 属性 (表 C-* 機種・属性一覧) | NUCIA 番号 |
|--------|-------|------|--------|----|-------|-------|-----------------------|----------|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | |

(C) 短時間内で同じ機器が繰り返し故障する場合

機器故障が短時間内に繰り返し発生した場合、その故障を引き起こす原因がただ1つで、かつ、繰り返し発生する事象であれば、それら事象は単一の故障とし、このとき作動要求も1回とする。

【短時間内の同じ機器の繰り返し故障】¹⁹

短時間内の電動ポンプの起動デマンドに対し、下記のような繰り返し起動失敗事象が発生したとする。

- ① 起動デマンド 1 回目で起動失敗（機能喪失が発生）
- ② 起動デマンド 2 回目で起動失敗（再現性の確認）
- ③ 修繕後起動デマンド 3 回目で起動失敗（修繕の失敗）
- ④ 再修繕後起動デマンド 4 回目起動成功（修繕の成功）

この場合、4回の起動デマンドのうち3回起動失敗となったが、この原因がただ1つである場合には、①と②の起動失敗は短時間の繰り返し故障として、起動デマンド1回に対して起動失敗が1回発生したとする。ここで、③と④の起動デマンドは修繕の成否の確認作業であるため、③と④の事象データは機器信頼性評価には用いない。

収集した故障データは、表 3-2 の様式で記録を残しておく。なお、それぞれの機種には、機器信頼性を左右すると考えられる属性の違い（作動機構、材料、運用形態、など）があるが、将来、十分なデータが蓄積されたときに属性の違いによる信頼性の違いを分析できるように、「附録 C 機種属性一覧と露出データ様式」表 C-1 を参照して属性の記録もしておく。

¹⁹ NRRC 技術諮問委員会 Stetkar 委員長のご教授による。

3.2.4 露出データの収集

機種・故障モードごとに収集すべき露出データの要件を「附録 F 機器・故障モードごとの露出データ」（以下「附録 F」という）にまとめた。収集すべき露出データは、以下の3種類である。

- デマンド数
- 継続運転時間（通常運転、通常待機）
- 供用時間（待機機器の待機時間も含む）

運転日誌、試験・検査記録、プラントコンピュータ等により採取された機器の作動記録から各機器の運転実績の露出データを収集する。各機器の試験手順およびプラント運転手順等の情報を用いることによっても、各機器の運転実績をほぼ正確に導出することができる。

露出データの収集対象機器と故障データの収集対象機器は一致していることが肝要であり、また、収集した機器故障は、基本的に当該機器の露出データの期間に発生したものであることが必要である。3.2.2 で特定したデータ収集対象機器に対して、3.2.3 (4)「条件 c」で定義した評価対象期間の露出データを収集する。収集にあたって、「附録 G 露出データ収集時の留意事項および事例」（以下「附録 G」という）および下記(A)–(D)に留意する。

- (A) 分解点検や部品交換等の保守・補修における試験による起動デマンドは露出データには含めない。これらのデマンドは供用期間外の保守・補修作業の成否を確認するためのデマンドであり、デマンド時の機器状態が供用状態と異なり、供用中の故障発生の可能性を推定するための証拠データとしては適していない。

附録表 A 機種故障モードの定義 (1/5)

| 機種 | 故障モード定義 | PRA 上の定義 | 故障モードが直接判断できるもの | 故障モードが保守管理により判断できるもの (点検時) |
|--------------------|----------------|--|--|---|
| 非常用ディーゼル発電機 | 起動失敗 | 起動失敗とは、要求時に起動しないうち、起動直後に自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 (待機中に故障が発見された時は、起動要求があったものとして、起動が可能かどうかを判定する。) | 要求時起動しない場合 各パラメータ (振動、異音、異臭、漏えい他)、構成機器 (ガバナ機構不良、発電機短絡等) の異常により自動停止又は手動停止が必要となる場合。 送断器投入後、基準時間内に負荷が確立できない (確立しなかった) 場合。 (規程時間内に電圧が立たない場合、起動するもの設計電圧が立たない場合等) | 起動要求があった場合に起動失敗に繋がる不具合 (燃料系統の異常、発電機端子巻線短絡、シーケンス異常等) が認められる場合。 |
| | 継続運転失敗 | 継続運転失敗とは、起動後安定な状態が確立した後、自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 | 各パラメータ (発電機出力等) の異常により自動停止又は手動停止が必要となる場合。 | 性能低下する不具合 (燃料系統の異常、発電機の回転数不足等) が認められる場合。 |
| 電動ポンプ | 起動失敗 | 起動失敗とは、要求時に起動しないうち、起動直後に自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 (待機中に故障が発見された時は、起動要求があったものとして、起動が可能かどうかを判定する。) | 要求時起動しない、起動直後、自動停止する場合。 各パラメータ (振動、異音、異臭、漏えい等)、構成機器の異常等が認められる場合。 | 起動要求があった場合に起動失敗に繋がる不具合 (ケーブル断線、ポンプ主軸の固着等) が認められる場合。 |
| | 継続運転失敗 | 継続運転失敗とは、起動後安定な状態が確立した後、自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 | 定格 (吐出圧吐出量等) 指示に異常が認められる場合。 | 性能低下する不具合 (ウエアリングの拡大、インペラの磨耗、電動機の回転数不足等) が認められる場合。 |
| タービン駆動ポンプ | 起動失敗 | 起動失敗とは、要求時に起動しないうち、起動直後に自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 (待機中に故障が発見された時は、起動要求があったものとして、起動が可能かどうかを判定する。) | 要求時起動しない、起動直後、自動停止する場合。 各パラメータ (振動、異音、異臭、漏えい等)、構成機器の異常等に手動停止が必要となる場合。 | 起動要求があった場合に起動失敗に繋がる不具合 (ケーブル断線、ポンプ主軸の固着等) が認められる場合。 |
| | 継続運転失敗 | 継続運転失敗とは、起動後安定な状態が確立した後、自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 | 各パラメータ (吐出圧吐出量等) の異常により自動停止又は手動停止が必要となる場合。 | 性能低下する不具合 (ウエアリングの拡大、インペラの磨耗、タービン駆動機構の異常等) が認められる場合。 |
| ディーゼル駆動ポンプ | 起動失敗 | 起動失敗とは、要求時に起動しないうち、起動直後に自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 (待機中に故障が発見された時は、起動要求があったものとして、起動が可能かどうかを判定する。) | (電動ポンプ、タービン駆動ポンプと同様) | (電動ポンプ、タービン駆動ポンプと同様) |
| | 継続運転失敗 | 継続運転失敗とは、起動後安定な状態が確立した後、自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。 | (電動ポンプ、タービン駆動ポンプと同様) | (電動ポンプ、タービン駆動ポンプと同様) |
| 電動弁 | 開失敗/閉失敗 (作動失敗) | 開失敗/閉失敗とは、開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない故障。 | 開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない場合。(リミット位置まで開閉しない、シーケンスが動かない場合を含む) | ケーブル断線、グランド部の過度のフレクション増大、駆動部の故障等不具合が認められる場合。 |
| | 誤開または誤閉 | 誤開または誤閉とは、開 (または閉) 要求がないにもかかわらず開 (または閉) 状態になる故障。 | 開 (または閉) の操作なしに、開 (または閉) 状態になる場合。 | 制御回路の異常が認められる場合 |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障。 | 機器からの漏洩で、増し締め等の手当てを実施しても止まらない場合。 破断等により漏えいが認められる場合。 | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障。 | 性能に影響を与える異物の噛み込み等により(ワンダリ)機能が維持できていない場合。 | 分解時に明らかにシート面に損傷等が認められる場合。 |
| | 閉塞 | 閉塞とは、弁の損壊、異物混入等により十分な流量が得られない故障。 | 運転中十分な流量が得られず、分解点検時、弁体落下等の構造の損壊、性能に影響を与える異物残留等異常が認められる場合。 | 弁体の落下、性能に影響を与える異物の付着等不具合が認められる場合。 |
| 空気作動弁 | 開失敗/閉失敗 (作動失敗) | 開失敗/閉失敗とは、開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない故障。 | 開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない場合。(リミット位置まで開閉しない、シーケンスが動かない場合を含む) | 空気供給ライン閉塞、グランド部の過度のフレクション増大、軸の腐食等不具合が認められる場合。 |
| | 誤開または誤閉 | 誤開または誤閉とは、開 (または閉) 要求がないにもかかわらず開 (または閉) 状態になる故障。 | 開 (または閉) の操作なしに、空気供給が停止 (開始) され、開 (または閉) 状態になる場合。 | 制御回路の異常が認められる場合。 |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障。 | 機器からの漏洩で、増し締め等の手当てを実施しても止まらない場合。 破断等により漏えいが認められる場合。 | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障。 | 性能に影響を与える異物の噛み込み等により(ワンダリ)機能が維持できていない場合。 | 分解時に明らかにシート面に損傷等が認められる場合。 |
| | 閉塞 | 閉塞とは、弁の損壊、異物混入等により十分な流量が得られない故障。 | 運転中十分な流量が得られず、分解点検時、弁体落下等の構造の損壊、性能に影響を与える異物残留等異常が認められる場合。 | 弁体の落下、性能に影響を与える異物の付着等不具合が認められる場合。 |
| 油圧作動弁 | 開失敗/閉失敗 (作動失敗) | 開失敗/閉失敗とは、開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない故障。 | 開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない場合。(リミット位置まで開閉しない、シーケンスが動かない場合を含む) | ケーブル断線、グランド部の損傷、駆動部の損傷等不具合が認められる場合。 |
| | 誤開または誤閉 | 誤開または誤閉とは、開 (または閉) 要求がないにもかかわらず開 (または閉) 状態になる故障。 | 開 (または閉) の操作なしに、油供給が停止 (開始) され、開 (または閉) 状態になる場合。 | 制御回路の異常が認められる場合 |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障。 | 機器からの漏洩で、増し締め等の手当てを実施しても止まらない場合。 破断等により漏えいが認められる場合。 | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障。 | 性能に影響を与える異物の噛み込み等により(ワンダリ)機能が維持できていない場合。 | 分解時に明らかにシート面に損傷等が認められる場合。 |
| | 閉塞 | 閉塞とは、弁の損壊、異物混入等により十分な流量が得られない故障。 | 運転中十分な流量が得られず、分解点検時、弁体落下等の構造の損壊、性能に影響を与える異物残留等異常が認められる場合。 | 弁体の落下、性能に影響を与える異物の付着等不具合が認められる場合。 |
| 逆止弁 (注)試験可能逆止弁も含む。 | 開失敗/閉失敗 (作動失敗) | 開失敗/閉失敗とは、開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない故障。 (部分閉度でステイックした場合も含む) | 開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない場合 (開失敗)。非過水時、圧力流量が得られない場合 (閉失敗)。 | 分解時、軸固着等により部分閉度でステイックした場合。 |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障。 | 機器からの漏洩で、増し締め等の手当てを実施しても止まらない場合。 破断等により漏えいが認められる場合。 | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障。 | 性能に影響を与える異物の噛み込み等により(ワンダリ)機能が維持できていない場合。 | 分解時に明らかにシート面に損傷等が認められる場合。 |
| 手動弁 | 開失敗/閉失敗 (開閉失敗) | 開失敗/閉失敗とは、操作時に開または閉状態にならない故障。(誤操作を除く) | 通常操作時に開または閉状態にならない場合。 | 分解時に弁軸の固着等不具合が認められる場合 |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障。 | 機器からの漏洩で、増し締め等の手当てを実施しても止まらない場合。 破断等により漏えいが認められる場合。 | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障。 | 性能に影響を与える異物の噛み込み等により(ワンダリ)機能が維持できていない場合。 | 分解時に明らかにシート面に損傷等が認められる場合。 |
| | 閉塞 | 閉塞とは、弁の損壊、異物混入等により十分な流量が得られない故障。 | 運転中十分な流量が得られず、分解点検時、弁体落下等の構造の損壊、性能に影響を与える異物残留等異常が認められる場合。 | 弁体の落下、性能に影響を与える異物の付着等不具合が認められる場合。 |
| 安全弁 | 開失敗/閉失敗 (開閉失敗) | 開失敗とは、開要求時に開状態にならない故障。閉(戻り)失敗とは、閉状態になった後閉状態にならない故障。 | 所定の設定圧力で閉状態にならない場合 (開失敗)。系統圧力流量が低下し、所定の状態が維持できない場合 (閉(戻り)失敗)。 | シート面の損傷等不具合が認められる場合 (閉 (戻り) 失敗)。 |
| | 誤開 | 誤開とは、開要求がないにもかかわらず開状態になる故障。 | 所定の設定圧力以下で閉状態になる場合。 | - |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障および多量の流体損失を起こす故障。 | 機器からの漏洩で、増し締め等の手当てを実施しても止まらない場合。 破断等により漏えいが認められる場合。 | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障および多量の流体損失を起こす故障。 | 性能に影響を与える異物の噛み込み等により(ワンダリ)機能が維持できていない場合。 | 分解時に明らかにシート面に損傷等が認められる場合。 |
| 逃がし安全弁 (BWR) | 開失敗/閉失敗 (開閉失敗) | 開失敗とは、開要求時に開状態にならない故障。閉(戻り)失敗とは、閉状態になった後閉状態にならない故障。 | - | - |
| | 誤開 | 誤開とは、開要求がないにもかかわらず開状態から閉状態になる故障。 | - | - |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障および多量の流体損失を起こす故障。 | - | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障および多量の流体損失を起こす故障。 | - | - |
| 真空逃がし弁 (PWR) | 開失敗/閉失敗 (作動失敗) | 開失敗/閉失敗とは、開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない故障。 | 開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない場合。(リミット位置まで開閉しない、シーケンスが動かない場合を含む) | ケーブル断線、シート面の損傷等不具合が認められる場合。 |
| | 閉塞 | 閉塞とは、弁の損壊、異物混入等により十分な流量が得られない故障。 | 運転中十分な流量が得られず、分解点検時、弁体落下等の構造の損壊、性能に影響を与える異物残留等異常が認められる場合。 | 弁体の落下、性能に影響を与える異物の付着等不具合が認められる場合。 |
| 電磁弁 | 開失敗/閉失敗 (作動失敗) | 開失敗/閉失敗とは、開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない故障。 | 開 (または閉) 要求時に開 (または閉) 状態にならない場合。(リミット位置まで開閉しない、シーケンスが動かない場合を含む) | シート面の損傷等不具合が認められる場合。 |
| | 誤開または誤閉 | 誤開または誤閉とは、開 (または閉) 要求がないにもかかわらず開 (または閉) 状態になる故障。 | 開 (または閉) の操作なしに、例えば、電磁石が励磁から非励磁に、開 (または閉) 状態になる故障。 | - |
| | 外部リーク | 外部リークとは、機器/ポンプからの漏洩で、所定の機能が喪失する故障。 | 機器からの漏洩で、増し締め等の手当てを実施しても止まらない場合。 破断等により漏えいが認められる場合。 | - |
| | 内部リーク | 内部リークとは、閉状態にもかかわらず流量が存在するもので、所定の機能が喪失する故障。 | 性能に影響を与える異物の噛み込み等により(ワンダリ)機能が維持できていない場合。 | 分解時に明らかにシート面に損傷等が認められる場合。 |

『電力中央研究所報告「確率論的リスク評価 (PRA) のための機器信頼性データ収集実施ガイド (2023年5月)」に関する気付き』に対する産業界の回答と今後の改善活動

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|---------|---|--|
| 1 | 人的過誤の扱い | <p>日本原子力学会が作成したパラメータ実施基準¹「B2.2 故障(failure)の定義」(p27)では、試験又は保守後の人的過誤や計測器の校正ミスから生じる故障が、PRA モデルの中に明示的に含まれている場合は、このような人的過誤は機器の故障に含めず人間信頼性解析で定量化するが、明示的に含まれていない場合は、人的過誤による寄与を該当する機器故障率または確率に含めるべき、という要求がある。</p> <p>しかしデータ収集実施ガイド 3.2.3(b)「条件 b: 運転時誤操作が原因の不適合」を除外(p8)では、運転時誤操作による機器機能喪失事象は、PRA 上は人間信頼性解析で別途モデル化するためデータ収集から除外するとの記載のみである。</p> <p>こうした中、非常用ディーゼル発電機(DG)について確認したところ、機器バウンダリ範囲内の機器の運転員による誤操作や並列後の出力増加操作ミスが故障から除外した事例(NUCIA8205,8827)が見られ、当該事業者が理由を確認したところ、「ガイドの条件 b に基づき除外した」との回答があった。そこでモデル化されていない人的過誤であれば故障とすべきコメントしたところ、個別プラントの PRA でモデル化する旨の回答があった。</p> <p>しかし、DG のバウンダリ内には大量の弁があり、これらの個々の操作の人的過誤をモデル化するのは現実的でなく、適切性確認済み PRA モデルでも機器バウンダリ内の弁等の操作はモデルされていない。また、並列後の出力増加操作のような手動操作による信号発信のバックアップも適切性確認済み PRA モデルには含まれておらず、これらはいずれも機器故障率に含める方がモデル化は容易である。</p> <p>特定のプラントに拠らない機器故障率を収集する観点からは、このような人的過誤を機器故障率に含めることで考え方を統一しないと適切な機器故障率が導出されないおそれがある。また、今回の DG の事例を踏まえると、DG 以外の機器でも事業者全体で考え方が統一されていないことで、適切な故障率が導出されないおそれがある。</p> | <p>引用されている原子力学会基準で「(HRA に明示的に含まれていない場合は) 機器故障率または確率に含めるべき」としている人的過誤は「起因事象発生前の人的過誤、pre-initiator human failure events(HFEs)」のことであり、NRRC データ収集ガイドで「機器故障データ収集対象から除外する」としている人的過誤は「起因事象発生後の人的過誤、post-initiator human failure events(HFEs)」のことであり、両者を混同しないことが必要です。NRRC データ収集ガイドの「条件 b: 運転時誤操作が原因の不適合」の項にも、“保守作業時の計器誤較正、および、保守作業不良による機器健全性の喪失についても、本条件 b では除外せず、機器故障データの収集対象とする。”と記載しているように、「起因事象発生前の人的過誤」は(HRA で扱わないで) 機器故障データの収集対象とすることとしており、原子力学会基準とは矛盾しません。</p> <p>「起因事象発生前の人的過誤、pre-initiator human failure events(HFEs)」と「起因事象発生後の人的過誤、post-initiator human failure events(HFEs)」については、下記 ASME/ANS RA-Sb-2013 “1-2.2 DEFINITIONS”を参照。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>pre-initiator human failure events: human failure events that represent the impact of human errors committed during actions performed prior to the initiation of an accident (e.g., during maintenance or the use of calibration procedures)</i> (注: メンテナンスや較正作業時の過誤で機器を機能喪失状態にしてしまったもの) ■ <i>post-initiator human failure events: human failure events that represent the impact of human errors committed during response to abnormal plant conditions.</i> (起因事象対応の緩和操作の過誤で機器を機能喪失にしたもの) <p>原子力学会基準、ASME/ANS 標準の要件にあるとおり、上記の人的過誤は両方とも本来は人間信頼性評価(HRA)で扱うべきですが、我が国では以前(1997年原安協報告書、およびその後の電中研報告書、JANTI/JANSI 報告書)から、pre-initiator HFEs は扱う事象が膨大となるため HRA でのモデル化は困難という理由で、メンテナンス時・計器較正時等の人的過誤による機器の機能喪失事象は機器故障の中に含めて扱ってきました。この扱いは米国 NRC の NUREG/CR-6823 “Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment,” U.S.NRC, 2003 にも記載されています。</p> <p>“5.2.3.1 Component Failure Event Allocation”</p> <p>11 <i>If failures resulting from human errors after testing, maintenance, and instrument miscalibrations are explicitly included in system models, these events should not be included as component hardware failure events. Such events are typically quantified using human reliability analysis methods. However, some PRAs have not explicitly included these human errors in the models. In such cases, the contribution from human-related failures should be incorporated into the appropriate component failure rate or probability.</i></p> <p>(試験・保守後の人的過誤や計器の誤較正による故障がシステムモデルとして陽に表されている場合には、それらの事象を機器故障事象の中に含めてはいけません。そういった事象は、通常、人間信頼性解析手法で評価するものである。ただし、PRA によってはこれら人的過誤をモデルの中に陽に組み込んでいないものもある。そのような場合は、人為的な故障による寄与も適宜機器故障率/故障確率として扱うべきである。)</p> |

1 日本原子力学会標準 原子力発電所の確率論的リスク評価用のパラメータ推定に関する実施基準: 2015(AESJ-SC-RK001:2015)

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|----|-------|--|
| | | | <p>原子力学会基準の「機器故障率または確率に含めるべき」という記述は、この実態の取扱いに合わせて定められたものです。したがって、NRRC データ収集ガイドの条件 b)でも同じ主旨のルールを定め、<u>post-initiator HFES</u> による機器の機能喪失は機器故障データベースに含めない（で HRA により評価する）が、<u>pre-initiator HFES</u> による機器の機能喪失は（上記の原子力学会基準の記述と同様に）機器故障データベースに含めるとしています。</p> <p>規制庁のご指摘の NUCIA8205,8827 の事象発生状況と事業者の見解、PRA 上の考え方は以下のとおりです。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ NUCIA8205（日本原電、東海第二：事象発生状況）：2006年4月11日9時16分より EDG-2C の定期試験を開始し、手動起動試験準備のターニング操作のため、インジケータコック弁を開操作したところ、18個ある弁のうち1個が動かないことを確認した。弁のストローク等詳細を確認したところ開状態であったため、閉操作したが閉操作できず、開状態で固着していることを確認した。このため、10時30分、EDG-2C について運転上の制限逸脱を宣言した。 <u>事業者の故障判定</u>：通常閉状態の弁であるが、運転員の操作忘れにより開弁であったことから、開弁で高温状態となったことで変形がおこり、開固着となった事象となるため、「条件 b)誤操作が原因の不具合」で除外しています。PRA モデルでは、定期試験時等での運転員による人的過誤（弁の開け忘れ/閉め忘れ等）を設備本体の弁操作であっても運転員が手順に従い操作する弁であれば、起因事象発生前の人的過誤（pre-initiator HFES）として考慮する対象として機器故障のカウントはしていません。この考えに従って発生したインジケータコック弁の閉め忘れ事象についても、起因事象発生前の人的過誤として考慮する対象となりますが、PRA モデル整備時にはターニング操作を実施しない定期試験の手順に変更していたため、起因事象発生前の人的過誤としてモデル化はしていません。 <u>PRA 上の考え方</u>：本事象は、起因事象発生前の人的過誤になりますが、PRA の観点（EDG に要求される安全機能の観点）からは、この EDG がインジケータコック弁開固着の状態でも自動起動して電力供給可能かどうか重要で（この判断には設備の専門家の知識と意見が必要です）。もし可能であれば、本事象は PRA での考慮は（HRA でのモデル化も機器故障としての扱いも）不要となります。もし可能でなければ、現 NRRC ガイドのルールでは EDG 起動失敗として機器故障にカウントすることになります。なお、EDG の定期試験でターニングをしないプラントでは本事象は起こり得ないため、これを PRA 上考える必要はありませんので、この事象を機器故障として処理している場合は、ターニングをしないプラントにとっては若干保守側の評価になります。一方、ターニングをするプラントにとっては将来的には、起因事象前人的過誤として HRA モデル化する必要も考えられるので、PRA モデルでどのように考慮すべきかに関して相互レビューを実施する等の改善策を検討します。 ■ NUCIA8827（北陸電力、志賀 2 号機：事象発生状況）：定期検査中において、2007年4月11日10時10分頃、定例試験のため起動した EDG-A を所内電源系統に並列したところ自動停止した。このため、同日10時10分に原子炉施設保安規定に定める運転上の制限を満足しない状態であると判断し、原子炉施設保安規定に基づく必要な措置を実施した。 <u>事業者の故障判定</u>：EDG-A が自動停止した原因は、EDG-A を所内電源系統へ並列した後、最初の負荷出力調整において出力の増加操作が不足し、逆電力リレーが動作したことによるものであり、「条件 b)誤操作が原因の不具合」で除外しています。本事象の原因となった誤操作は定例試験時特有の操作（実際に EDG の機能に期待する事象が発生した際には行わない操作）であるため、PRA モデルでは人的過誤としてモデル化していません。 |

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|----|-------|---|
| | | | <p><u>PRA上の考え方</u>：PRAの観点（EDGに要求される安全機能の観点）からは、EDGには緊急時に自動起動して電力供給することが要求されるので、EDGについて自動起動のみをPRAでモデル化した場合、手動操作はPRAの事故シーケンス上に登場することではなく、PRAでモデル化する必要はないと考えられます。一方、EDG自動起動失敗後の手動起動操作をPRAで考慮するのであれば、本事象の誤操作をHRAでモデル化する必要があるか検討することはあると思います。</p> <p>NRRCでは、原子力学会基準、ASME/ANS PRA標準の要件を踏まえ、人的過誤による機器の機能喪失は基本的にHRAでの評価を検討すべきと考えています。しかしながら、現状は高度化の過渡期なのですべてをHRAで扱えず、NRRCガイドでは暫定的にpre-initiator HFEsによる故障のみをランダム機器故障として扱うこととしています。規制庁のご指摘は、post-initiator HFEsによる故障も含め、HRAで扱っていない人的過誤はすべて機器故障として扱うべきということのようですが、PRA標準の要件や海外レビューアの指摘を踏まえてPRA高度化に繋げるため、データ収集ガイドとしてはこれ以上人的過誤を機器故障に含めるような規定にはしないつもりです。</p> <p>以上のことから、人的過誤による機器故障については、PRAでのモデル化の要否を検討し、モデル化が必要であれば海外事例等を参考にしながらHRAにおける扱いも含めて産業界内で検討した上で報告することとします。</p> <p>【今後の改善活動】短期・中期対応：一部の機種を選定し、事業者間で相互レビューを実施して故障判定にばらつきがないことを確認しています。相互レビュー結果において大きな認識の差異がなかったことから、早急に全体の確認をする必要はないと判断しています。今後は、継続的に相互レビューの範囲を拡げていく取り組みを行っていきます。</p> <p>具体的には、人的過誤による機器故障の事例については、PRAの事故シーケンスを構成するかどうかを検討します。例えば「当該故障が事故シーケンスを構成する場合は、感度解析などを実施して全体のリスクに有意な影響があるかを判断し、影響ありとした場合は、HRAでモデル化するか、あるいはモデル化が困難であれば機器故障で考慮する。また、影響が小さいと判定して特にモデル化しなかった場合は、その判定理由を明文化して残す。」というような対応を考えています。産業界内で相互レビューを実施し共通の対応策を検討した上で、規制庁の個社の「PRAの適切性確認」の場で議論し、抽出された課題については、対応方針を検討します。</p> |

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|---------|---|---|
| 2 | 対象となる期間 | <p>データ収集期間を 3.2.2「データ収集対象機器の特定」(p7)では営業運転開始以降としている一方、3.2.3(4)「条件 c: 評価対象期間外に発生した不具合」を除外(p9)では保安規定などで機能が要求されている期間としているが、前者の起点は機器のオペラビリティと技術的に無関係という問題がある。</p> <p>すなわち、営業運転開始前であっても保安規定が適用されていれば、機能要求を満たさなければ故障と判定すべきところ、建設段階の試運転期間中の DG の定例試験での LCO 逸脱宣言事例を、営業運転開始以前という理由で故障としない事例(NUCIA 10534)が見られた。この事例は、様々な試運転時の試験を経て 100% 電気出力に到達した日から約 1 ヶ月後に発生しており、試運転の最終的な段階にあった。</p> <p>これに対し電力中央研究所(電中研)から、一般に試運転時は営業運転開始後とは設備信頼性の性質が異なる、試運転時は様々な試験が行われるため、デマンド数等の収集条件が定めにくい、試運転期間を範囲内としても結果に殆ど影響が無いため、現行のままで問題ない旨の回答を受け取っているが、機器のオペラビリティの観点からの回答ではないため、故障件数が適切にカウントされていないおそれがある。</p> | <p>一般的にパラメータ推定のための機器故障データ収集を行うためには、まず当該対象機器の信頼性を適切に代表すると考えられる収集期間を定義することが必要となります。機器故障の収集期間は通常の安定した運転状態における機器の故障を取り扱うため、「試運転期間」(通常の安定運転とは異なると考えられる建設後の初臨界から出力を上昇させつつ各種試験を行う期間)という非常に特殊な運転モードは除き、営業運転開始以降の原子炉運転期間のデータ収集をしています。「試運転期間」に故障があったという理由だけで収集期間を設定すると、故障が多く発生する期間を恣意的に収集期間とすることにもなりかねず(一方、故障率を下げるため故障の少ない期間を収集期間と定めることと同様になり)、適当な収集期間の設定としては妥当ではないと考えます。</p> <p>このような考え方は、NUREG/CR-6823 の”5.2.2.1 Event Screening” に下記のように示されています。なお、起因事象発生頻度の推定でも、同様に「試運転期間」のデータは含めず運転開始後の一貫性のあるデータ収集を実施しています。</p> <p>NUREG/CR-6823 の”5.1.2 Data Window”</p> <p><i>Consideration of design changes is one example of where censoring of data can and should be performed. Other reasons can be used for data censoring if they are well supported and valid. For example, it is not uncommon to eliminate data from the first year of plant operation since it represents failures that occurred during the plant break-in period. However, any data censoring should be approached carefully to avoid losing important information and biasing results (eliminating the first year of data actually makes the results less biased).</i></p> <p>(設計変更はデータを除外できる/すべき場合の一例である。その他にも、十分な裏付けと妥当性があれば、除外の理由とすることができる。例えば、<u>プラント運転開始初年度のデータを除外することはめずらしくなく、それはプラントの慣らし運転期間中に発生した故障を表しているためである。ただし、データの除外は慎重に行うべきで、重要な情報が失われて結果に偏りが生じないようにしなければならない(初年度のデータを除外すると実際には結果の偏りは少なくなる。)</u>)</p> <p>規制庁コメントの『「条件 c: 評価対象期間外に発生した不具合」を除外(p9)では保安規定などで機能が要求されている期間としている…営業運転開始前であっても保安規定が適用されていれば、機能要求を満たさなければ故障と判定すべき…100%電気出力に到達した日から約 1 ヶ月後に発生しており、試運転の最終的な段階にあった。』については、上記 NUREG/CR-6823 に記載されているような理由が念頭にあり、NRRC ガイドでは営業運転開始以降のデータを収集することはほぼ自明と考えていました。しかしながら、ご指摘のとおりガイドで定めたルールと実態との齟齬が生じますので、データ収集実施ガイドの次回更新時に「<u>営業運転開始以降に保安規定などで機能が要求されている期間…</u>」と、実態と齟齬のない適切な記載に改めます。</p> <p>規制庁のご指摘の NUCIA 10534 (北海道、泊 3) の事象は、電圧確立後にしばらく運転継続した後、過給器不調による出力低下のため手動停止したので、故障モードは「継続運転失敗」(継続運転時間 1 時間 17 分)となります。この事象の原因は、NUCIA の記載によれば、EDG メーカーにおける製作時のボルト締め付けが不十分であったため過給機が損傷したもので、運転初期の故障として原子炉運転中の機器故障には算入しない方が適切ではないかと考えます。</p> |

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|----|-------|---|
| | | | <p>【今後の改善活動】対応なし：機器信頼性評価の対象期間は、発電所の運転管理、保守管理の運用が同等となる信頼性期間を対象に収集すべきことから、データ収集ガイドには営業運転開始以降をデータ収集対象期間とするよう明記します。</p> <p>「試運転期間」を含めることは発電所の運用が相違することになり適切ではないと考えますので収集開始点の変更は考えていません。データの信頼性を向上させるために今後の運転経験の蓄積に応じて故障件数と露出データの拡充を実施していきます。</p> <p>なお、発電所が運転年数を重ねるにつれて、設計・運転管理・保守管理の運用の変更により機器故障率をはじめ設備信頼性の傾向が変わった場合は、収集期間を適切に見直すこと（例えば、OLM の導入等の保守管理の見直しによって明らかに機器故障率の傾向が変わった場合）が必要となります。</p> |

| | | | |
|---|---------|--|---|
| 3 | 起動失敗の扱い | <p>附録表 A「機種故障モードの定義」では、DGの「起動失敗」を「要求時起動しない場合、各パラメータ(振動、異音、異臭、漏えい他)、構成機器(ガバナ機構不良、発電機短絡等)の異常により自動停止又は手動停止が必要となる場合、遮断器投入後、基準時間内に負荷が確立できない(確立しなかった)場合」とし、「継続運転失敗」を「各パラメータ(発電機出力等)の異常により自動停止又は手動停止が必要となる場合」としている。しかし、10秒以内に電圧を確立する設計のDGが15秒で自動停止した事例(NUCIA 7947)、や1分で自動停止した事例(NUCIA 9321)は、基準時間内に負荷を確立したと考えられるが、起動失敗としている一方、ガバナの応答性の低下により1分間も運転せずに過速度トリップに至った事例(NUCIA 3143)を継続運転失敗とするなど、起動失敗と継続運転失敗の分類が困難な定義となっている。</p> <p>また、米国では起動失敗は1時間以内に生じた故障²、パラメータ実施基準の「表 B.2—故障モードの例」では起動後30分間程度までを起動失敗としているが、どのような理由で今回のように定義を変更したかの説明がない。</p> <p>更に電中研の新故障率³の表 3-2「国内一般機器デマンド故障確率の推定結果」(p15)には、DG以外の電動ポンプ等の起動失敗確率が掲載されているが、これらの機器に対する「起動失敗」の定義は「要求時起動しない、起動直後、自動停止する場合」だけであり、DGと違って「起動直後」の時間的な定義がないため、故障件数が適切にカウントされていないおそれがある。</p> | <p>附録表 A「機種・故障モードの定義」では、EDGの「起動失敗」の定義を「要求時に起動しないか、起動直後に自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。」、EDGの「継続運転失敗」の定義を「起動後安定な状態が確立した後、自動停止する故障及び手動停止する必要がある故障。」としています。規制庁が挙げられている附録表 Aの説明は、上記定義の下で故障モードを不具合状況から直接判断できる場合の例を示したものです(同表の見出し項目を参照)。</p> <p>上記定義にしたがって、規制庁が挙げられている3つのNUCIA事例のEDG故障モードを、NUCIAトラブル情報(http://www.nuciac.jp/nuciac/kn/KnTop.do)と各事業者情報から判定すると、それぞれ以下のようになりました。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NUCIA 7947(日本原電 敦賀2) …電圧・周波数が安定確立する「前」に停止したので起動失敗 ・NUCIA 9321(北海道 泊1) …電圧・周波数が安定確立する「前」に停止したので起動失敗、 ・NUCIA 3143(関西 高浜4) …電圧確立「後」に運転継続した後に停止したので継続運転失敗 <p>ここで、規制庁が挙げられている各NUCIA事例の説明(「15秒で自動停止」、「1分で自動停止」、「1分間も運転せず…」)は、過去に電中研/JANSI/JANTIで故障判定したもの(NRRCウェブサイトの原子力発電信頼性システム https://nrcc.denken.or.jp/kisnrr/index.do)ですが、当時は「起動失敗」のみ収集し「継続運転失敗」を収集していなかったことから「起動失敗」のデータを「継続運転失敗」にも流用しており、同じ事象に両方の故障モードを充てるという矛盾している部分がありますので、過去の判定情報は使わない方が良いと思います。一方、今回発行したデータ収集ガイドでは、「起動失敗」と「継続運転失敗」を区別して定義し収集するように修正しています。</p> <p>次に、米国や日本原子力学会のパラメータ実施基準のEDG故障モード定義についてですが、まず、米国NRCのPRAモデル(SPARモデル)に使われている機器故障率/確率は、EDGについては</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 起動に失敗するFTS(Failure To Start)の起動失敗確率 (2) 起動後1時間以内に継続運転失敗する場合FTLR(Failure To Load and Run)の継続運転失敗率 (3) 起動後1時間以降に継続運転失敗する場合FTR(Failure to Run)の継続運転失敗率 <p>の3つに分けて計算されています。</p> <p>(参考文献)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ S. A. Eide, et.al., “Industry Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants,” NUREG/CR-6928, U.S. NRC, 2007. ■ (NUREG/CR-6928のアップデート評価のウェブサイト) https://nrcoe.inl.gov/AvgPerf/ ■ S.A. Eide, “Historical perspective on failure rates for US commercial reactor components,” Reliability Engineering and System Safety 80 (2003). <p>米国が継続運転失敗を起動後1時間前後で分けた理由は、起動後1時間を境に故障率の値が変わるためとされています(Grant GM, et.al., “Reliability study: emergency diesel generator power system, 1987-1993,” NUREG/CR-5500, vol. 5. US NRC, (1999).)</p> <p>上記(1)~(3)からわかるように、NRCのSPARモデルの方法は、起動操作後1時間以内に起こった故障を起動失敗としてカウントしているわけではありません。NRRCのデータ収集方法は、上記NRCの方法に倣って起動失敗と継続運転失敗に分けましたが、起動後1時間で故障率が変わるか否かはまだわかりませんので、現在はそのような分類はせず、今後データを蓄積して、分ける必要があるかどうかを検討することにしています。EDG以外の待機安全系機器(デマンド故障確率を計算している機器)についても同じ理由で時間的な定義は設定していません。時間定義に関係なく、発生した故障事象はどちらかの故障モードで収集していますので、「時間的な定義がないため、故障件数が適切にカウントされていない」ということはありません。</p> |
|---|---------|--|---|

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|----|-------|--|
| | | | <p>最後に、日本原子力学会パラメータ実施基準の「表 B.2-故障モードの例」の起動失敗定義（起動後 30 分以内の故障）は、上述しました過去の電中研/JANTI/JANSI での収集方法を記載しているものですが、NRRC 収集ガイドでは、「起動後 30 分」の技術的根拠が乏しいことから、この定義は使っていません。</p> <p>【今後の改善活動】短期対応：起動失敗、継続運転失敗の機器故障データ収集方法は米国と同様であり、故障率を不当に小さく見積もることにはならないので、故障モード定義を是正する必要はないと考えています。</p> <p>中期対応：米国のように「x 時間以内の継続運転失敗」と「x 時間以降の継続運転失敗」の仕分けが必要かどうかを検討する（x が米国同様に 1 [時間]になるかどうかさえまだ不明）ために、今後、データを拡充し分析を行ない、その結果をもとに産業界全体としての方法を定めます。</p> |

2 Enhanced Component Performance Study Emergency Diesel Generators 1998-2020 (INL/RPT-22-66601) March 2022 の p1 では Annual failure probabilities (failure per demand) are provided for FTS and FTLR events and annual failure rates (failure per run hour) are provided for FTR>1H としている。NUREG/CR-6928 では FTS は fail to start、FTLR は fail to load and run for one hour、FTR は fail to run としている (p xii の脚注)。Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment (NUREG/CR-6823) の p 5-6 では、it is not unusual in PRAs to define "diesel generator fails to start" as encompassing a failure to start or a failure during the first hour given that the start was successful. としている。

3 電力中央研究所報告 国内原子力発電所の PRA 用一般機器信頼性パラメータの推定 (2021.9)

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|------------|---|--|
| 4 | 露出データの収集方法 | <p>データ収集は、3.2.4「露出データの収集」(p13)において、附録 G に留意して実施することとなっているが、BWR(附録表 G-1)に比べ PWR(附録表 G-2,3,4)は実データの収集に関する解説が殆ど無く、推定例のみである。例えば、PWR では補助給水ポンプ室の換気空調系のデマンドは夏季 1 回、継続運転時間を 3 ヶ月としてデータを推定するとしているが、BWR の換気空調系は運転引継日誌等による実データの収集を規定しており、データの精度に大きな差異がある。</p> <p>なお、ASME/ANS 基準 DA-C8 のカテゴリーII、IIIの要求では、機器の待機時間を求める必要がある場合はプラントの固有の運転記録を使用するとなっている(カテゴリーIは推定で良い)。</p> | <p>NRRC データ収集ガイドに記載しているとおり露出データは実績値を記録等から収集するのが原則です。何らかの理由でそれができない場合には定められた試験回数や試験間隔等から推定せざるを得ませんが、なるべく実績値に近い推定ができるように推定の考え方の例を挙げています。</p> <p>具体的には、ガイドの附録表 G を参考に発電所の運転監視記録等から実績値を収集可能な露出データとして収集しており、実績値を収集できない露出データについても附録表 G を参考に推定値を算出しています。</p> <p>BWR の「系統・機器ごとの露出データの考え方整理表」(附録表 G-1)にも露出データを推定する方法を例示しており、BWR と PWR で例示の仕方・詳細さには差があるものの、実績値の収集と推定値の算出の考え方を記載しているという点は共通です。</p> <p>露出データを推定する方法は収集できる情報や機器の運用状況によって異なるため、PWR では推定に関する記載が多くなっていますが実績値を収集していないということではありません。なお、機器ごとに実績値を用いるか推定値を用いるかの判断は、各事業者が収集できる情報によって異なっており、また、止むを得ず推定値を用いる場合には、実績値との乖離が大きくなるよう各事業者で算出方法を検証しています。露出データとして推定値を用いる機器とその推定値の算出方法の妥当性については、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で議論することになります。</p> <p>なお、規制庁のご指摘の「換気空調系(補助給水ポンプ室)のデマンドと継続運転時間」は、指定機の間欠運転の露出データ収集の考え方※に基づき推定する収集方法を例示しているものになります。補助給水ポンプ室の換気空調系について推定している具体的な例を説明しますと、多くのプラントでは指定機が運転・停止する(例えば、室温 30℃以上で自動起動、15℃以下で自動停止)時間をプラント計算機に記録する仕様になっていないため、指定機が起動から停止まで連続運転すると推定してデマンドと継続運転時間を収集しています。指定機は実際に起動から停止までの期間は連続運転となり、推定でも同様にその間連続運転するとしてデマンドを 1 回と集計しており、実績値と推定値に差はありません。また、継続運転時間の推定でも同じく起動から停止までの間は連続運転するとして継続運転時間を集計しており、実績値と推定値にほとんど差はありません。露出データに推定値を用いるのは、プラント計算機による運転記録がないため止むを得ず行っているものであり、他の系統において露出データの実績値と推定値に不確かさがある場合は、PRA モデルにおいて影響のある推定値になっているかどうかを事業者間で相互レビューし対応策を検討することにします。また、各事業者の露出データを推定する収集方法については、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で確認できます。</p> <p>※ 通常運転の機器で指定機として運転している機器が間欠運転している場合には、指定機として設定されている期間を供用(運転)期間として設定し、指定機として設定されている期間の最初の起動を起動デマンド 1 回として集計する。(NRRC データ収集ガイド 3.2.4(C) を参照)</p> <p>【今後の改善活動】短期対応(、必要に応じて中期対応)：露出データ収集方法として重要なのは実際に収集されたデータの質なので、個社の機器故障率の中で確認するのが妥当と考えています。</p> <p>事業者の露出データ(デマンド数、継続運転時間、供用時間)の記録を調査し、産業界内で相互レビューを実施し共通の対応策を検討します。その上で、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で議論し(確認方法：ある機種を抜き取って実記録であるか、現場の運用による推定値であるかを確認しデータの妥当性を判定する等)得られた課題については、対応方針を検討します。</p> <p>なお、附録表 G の BWR と PWR の例示の仕方は、可能な範囲で統一し、変更箇所を示す記録を残して確実に次回更新時に反映することとします。</p> |

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|----------------|--|--|
| 5 | 故障モードのデータ収集の範囲 | <p>3.2.3(6)「条件 e：附録 A の故障モード以外の機能の不具合」を除外(p11)では、「ある機器において内部または外部リークの不具合があったものの、当該 PRA ではそれらの故障モードが（不要であるとして）モデル化されていないため機能喪失か否かの判断が困難な場合は、データ収集の対象外として除外する」としている。しかし特定のプラントに拠らない機器故障率を収集する観点からは、全ての故障モードを収集対象とすべきである。</p> <p>例えば、電中研の新故障率³(p12)では、電動弁(海水)の作動失敗は 27 基からデータ収集されたが、外部リークは 8 基からしかデータ収集されていない。これは、或るプラントでは原子炉補機冷却海水系の電動弁の外部リークをモデル化している一方、他のプラントではモデル化していないなど、個別プラントのモデル化の程度によりデータ収集の範囲が制限されたためと考えられる。その結果、電動弁(海水)の外部リーク率が過小評価されているおそれがある。</p> | <p>機種・故障モードによっては、当該機器に期待される役割によってその機能喪失の基準が異なる場合があり、一概に故障データと決められない場合があります。例えば、同種同一電動弁の同じ規模のリーク事象であっても、ある系統では許容されず機能喪失となり、別の系統では許容されるため機能喪失にはならない、となる場合があります。このような場合には、当該弁の運用も異なっており、後者の系統において機能喪失とはならないリーク事象を機能喪失とカウントして前者の系統の信頼性の計算に使うのは適切とは言えなくなるため、PRA でモデル化されている範囲の機種・故障モードを収集対象としています。もちろん、PRA でモデル化されていない機器の故障情報がモデル化されている機器の信頼性評価の参考になると考えられればモデル化されていない機器の事象からデータ収集してもよいと考えていますが、それは個別プラントで実態が異なるため具体例を見て判断せざるを得ませんので、そのような扱いが可能かどうか産業界内で収集方法を検討します。</p> <p>なお、一般機器故障率は、「特定のプラントに拠らない」というものではなく、PRA でモデル化した機種・故障モードについて産業界内の個別プラント故障率のばらつきを包絡的に表わしたもので、すべての故障モード、というよりは、モデル化した機種・故障モードの信頼性を表現するのに役立つと判断したデータを収集すべきと考えます。</p> <p>電動弁（海水）の例については、8 基においてモデル化されている電動弁（外部リーク）機器母集団の中から当該 8 基で起こった外部リークの事象を収集して故障率を推定していますので、データ収集の仕方としては必要十分で正しく、過小評価にはなっていません。仮に 27 基における電動弁機器母集団の中で 8 基のみから外部リークの事象を収集して推定をしているのならば過小評価になりますが、そのような不整合な処理はしていません。もちろん、当該 8 基以外の 19 基の実績データが当該 8 基の信頼性を表現するのに役立つと判断できれば、そのデータはさらなる信頼性向上に寄与する可能性はあると思いますが、それをしていないからといって評価不足であるとか過小評価であるということではありません。</p> <p>【今後の改善活動】短期対応（必要に応じて中期対応）：現在は PRA の基事象としてモデル化した機器の機種・故障モードを収集対象と設定していますが、PRA でモデル化していない機器の故障情報が活用できるかどうかは、今後産業界内で収集方法を検討します。</p> |

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|---------------|--|--|
| 6 | 機器のグループ化 | <p>日本原子力学会が作成したパラメータ実施基準「C.4.3.5 機器のグループ化」(p46~47)には、以下の内容が示されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・機器をグループ化する場合、設計の類似性(規模、製造元など)、運転頻度、運転環境条件(温度、湿度、放射線など)、運転モード(待機、通常運転、連続運転など)、及び移送媒体(空気、純水、ホウ酸水など)などの機器特性について慎重な検討が必要である ・「グループ」の定義においては、例えば、試験対象でない弁又は殆ど作動していない弁、試験対象の弁又は頻繁に作動している弁を同じ一つのグループにしないなど、原則として機器特性が異なるものを一つのグループとしてはいけない ・一方、十分な機器データが得られないような場合、又は機器特性が異なっても故障率が同等となるよう保守の方法及び頻度等が考慮されている場合などでは、妥当性確認の結果に基づき、一つのグループとすることもできる <p>3.2.1「機器信頼性データの対象と属性」の「・機種」(p6)では用途、機能等別にグループ化した機種を定めるとし、国内の機器について整理したものを「附録A 機器・故障モードの定義に示す。」とあるが、附録表Aでは「電動弁」「オリフィス」といった機器ごとに故障モードが定義されているのみのため、パラメータ実施基準が規定している、設計や運転頻度、運転環境条件等を考慮した上でグループ化する、十分なデータが無い時は妥当性確認結果に基づき一つのグループとするという規定を満たしているのか不明確である。</p> | <p>今回実施した機器グループ化の方法は、ほぼ ASME/ANS PRA 標準 DA-B1 に基づいています。「用途、機能等別にグループ化」とは、このレベルでの分類を意図しています。</p> <p>(参考)ASME/ANS RA-Sb-2013 “Table 2-2.6-3 Supporting Requirements for HLR-DA-B” <i>DA-B1(Capability Category II)</i> <i>For parameter estimation, GROUP components according to type (e.g., motor-operated pump, air-operated valve) and according to the characteristics of their usage to the extent supported by data: パラメータを推定するには、タイプ(電動ポンプ、空気作動弁等)に応じて、またデータで裏付けられる範囲でその使用の特性に従って機器をグループ化する。</i></p> <p>(a) mission type (e.g., standby, operating) 使命の種類 (例: 待機、作動中) (b) service condition (e.g., clean vs. untreated water, air) 使用状態 (例: 純粋水と未処理水、空気)</p> <p>規制庁が引用されている原子力学会実施基準の 1 つ目の bullet は ASME/ANS PRA 標準の Capability Category III に相当すると思われませんが、この要件については、実際の故障データもない状態で設計・運転頻度・環境条件の分類基準を定めるのは事実上無理であり、仮に分類したとしてもそれぞれの分類のデータ数が少なく、意味のある統計処理ができないと考えられます。なお、最新の ASME 標準(2022 年版)では Capability Category III は削除されています(総じて Category III の要求事項は事実上実施不可能なものが多いと思います)。なお、将来、十分なデータが蓄積されたときに属性の違いによる信頼性の違いを分析できるように、「附録C 機種属性一覧と露出データ様式」表 C-1 を参照して属性の記録も残しておくようにしています。</p> <p>規制庁が引用されている 2 つ目の bullet (ASME/ANS PRA 標準の DA-B2 の規定)については、上述の状況も踏まえて、附録Aの定義とおり PRA でモデル化されている主要な機器を同一種類別にグループ化しているものを各事業者でデータ収集しています。各事業者の PRA モデルとの整合において適切にグループ化されていることは、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で確認できます。</p> <p>3 つ目の bullet については、プラント間のばらつきがあるかどうかを統計的検定により推定しています。</p> <p>【今後の改善活動】中期対応: 機器故障データの評価方法として機器特性の区別を示すことができるほど十分なデータ数が蓄積されるまで時間が必要ですので、直ちに是正する必要はないと考えています。</p> <p>機器のグループ化では同一機種と類似機種を含めてデータ収集の拡充を行っているところであり、データが拡充できたある段階で分析を行い機種の属性を明示的に整理し、産業界内で相互レビューを実施し共通の対応策を検討します。その上で、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で議論し(確認方法: ある機種を抜き取ってグループ化されている具体的な機種の属性を確認する等)得られた課題については、対応方針を検討します。</p> |
| 7 | 附録Dの故障モード選定事例 | <p>3.2.3(7)「故障モードの選定」(p11)では、附録Dを参照して、最終的な故障モードを確認・判定しているが、附録表D-1にある故障選定事例は、NUCIAの事象判定ルールに基づくことから、電中研の新故障率の収集方法と整合が取れていない場合がある。</p> <p>例えば、附録表D-1のNo.32, 94は、データ収集実施ガイドに基づく「故障」とはならない事例である。</p> | <p>附録A 機種・故障モードの定義に従って故障モードを設定することを基本としており、附録Dの事例の中で、NRRC データ収集ガイドに基づく故障モード設定例示として正しくない(旧 NUCIA PRA の分析例であるため)事例については、間違いであることを産業界内で周知し、次回更新時に削除します。実際の判定に際しては、本文の記述に従って考える限り致命的な誤りを生ずることはないと考えています。</p> <p>【今後の改善活動】次回更新時 ご指摘の記載上の不整合が生じている箇所は産業界内で検討した上で、変更箇所を示す記録を残して確実に次回更新時に訂正します。</p> |

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|--------------|--|---|
| 8 | 機器故障に関する事例要約 | <p>故障の判断では3.2.3(8)のとおり、少なくとも使命時間は機能維持できるか否かの評価が必要(p12)であるが、附録表 E の事例要約の説明は、初期状態だけで故障の有無を判断しており、使命時間に渡り機能維持できるか否かの評価が不明確である(No.3,14,25 等)。</p> <p>またヒューマンエラーによる故障は全て故障から除外しており、PRA モデルで別途考慮しているか否かの評価が不明確である(No.9, 39, 42 等)。このため、現在の附録表 E を参照すると、故障か否かの判断をミスリードするおそれがある。</p> | <p>通常の不具合事例では、使命時間の間、機能を果たせる/果たせないということを示す確実なエビデンスが得られることは稀なので、不具合の発生した部位の機能が継続運転に関わるのかどうか設備の専門家の経験・意見を踏まえて工学的判断をする場合が多いと思います。ただし、そのような判断をしたことは記録しておく必要があると考えています。なお、待機安全系で使命時間中に継続運転が必要な機器については、サーベイランス試験等の結果から、試験成功の場合と失敗の場合の継続運転時間を収集し、統計的に継続運転時間分布を推定することによって、使命時間内に機能維持できない確率を求めています。</p> <p>人的過誤で除外している扱いについては、本表 No.1 の回答で述べたとおり、機器のメンテナンスの際に誤って不具合が残ってしまう事例以外は機器故障として含めない方針であり、附録表 E に人的過誤として機器故障から除外判定するために参考となる事例を記録するようにしています。故障率に含まず、PRA 上必要となる人的過誤は、各事業者の PRA モデルにおいて運転員操作などで考慮されているはずで、PRA モデルでどのような運転員操作の人的過誤が考慮されているかは、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で確認できます。</p> <p>【今後の改善活動】次回更新時：使命時間内の機能が維持できていたかどうかの判断は、NRRC データ収集ガイドで故障判定時に記録を残すようにルール化することで対応できると考えています。</p> <p>人的過誤を除外している扱いについては事例調査を行い、産業界内で相互レビューを実施し共通の対応策を検討します。その上で、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で議論し得られた課題については、対応方針を検討します。（人的過誤へのご指摘は本表 No.1 の回答のとおり対応します。）</p> <p>規制庁のご指摘の使命時間内の機能維持に関して記載上の不適合が生じている箇所は、変更箇所を示す記録を残して確実に次回更新時に訂正します。</p> |
| 9 | 外的要因の扱い | <p>3.2.3(5)「条件 d： 外的要因等が原因の不具合」を除外」(p9)では、外的事象 PRA で対象とするハザードによる故障はデータ収集の対象外としている。</p> <p>例えば、予備変圧器での消火用水実放出試験による消火用水が、近傍の屋外電気マンホールに浸入し、シール不完全であった電線管を經由して DG 室内の現地操作盤に滴下した事例(NUCIA 8130)について、事業者は内部溢水 PRA の範囲とし、今後機器故障率には含めないとしている。しかし、内部溢水の PRA 評価手法はまだ整備中かつ完成時期が未定であるほか、対象範囲の詳細が明らかではないため、現時点では故障にカウントしないと全体的なリスクを過小評価してしまうおそれがある。</p> <p>また地震については、地震加速度高による原子炉トリップが発生する場合を地震 PRA の対象範囲としているが、トリップが発生しない程度の地震で生じる故障はどの PRA でも範囲外となってしまう。</p> | <p>内的事象以外の外的事象に起因するリスクは、当該外的事象 PRA の中で当該外的事象をリスク源として包括的に考慮して評価する必要があります。外的事象による一部の機器故障を機器故障データベースに含めただけでは当該外的事象リスク全体を適切にカバーできない（当該外的事象による起因事象や緩和系影響などの事故シーケンスまで考慮されない）。</p> <p>なお、外的要因で発生した損傷事象の情報は、当該外的事象のフラジリティ評価や事故シーケンス評価において必要に応じて検討に利用するものと考えています（機器故障データベースに登録しても良いが、機器一般故障率評価には使わない）。</p> <p>地震影響については、内的事象 PRA と地震 PRA にわざわざ分けられない方が整合性があると考えています。</p> <p>【今後の改善活動】短期対応（必要に応じて中期対応）：外的要因等ハザードのリスクは基本的に当該ハザードの PRA で考えるべきものであって、機器故障データベースでカバーすることではないと考えています。</p> <p>機器故障の収集対象は内的事象であり、内的事象以外が原因の故障は対象としていません。しかしながら、不適合事例を基に故障の判定をしており、それらの結果を内的事象（人的過誤の要因も含む）、外的事象の選別を行い、見落としがないように記録を残してモデル化の可否の判定につなげることは可能であり、産業界内で相互レビューを実施し共通の対応策を検討します。その上で、規制庁の個社の「PRA の適切性確認」の場で議論し（確認方法：ある年度の不適合事象リストを基に内的事象が原因の故障か、外的事象が原因の故障かの選別を確認する等）得られた課題については、対応方針を検討します。</p> |
| 10 | その他 | <p>3.2.3(8)(A)の「【波及影響を受けた機器を機能喪失としない場合】」のii主蒸気止め弁の例示(p12)では、開度指示計用の検出器の一部の部品の脱落で「一時動作できない状態」になったにもかかわらず、「油圧作動弁としての機能は維持している」というのは、誤解を与えかねない。</p> | <p>左記の例は、(A)②の「波及影響で機能喪失した機器が修繕せずに機能復旧する」という具体例として、開度指示計用の検出器と油圧作動弁を別機器としている場合を想定しています。本事象を検出器の故障とし、その影響を受けた側の油圧作動弁の故障とはしないという判断です。ただし、油圧作動弁が「一時動作できない状態」にも関わらず「機能は維持している」とはどのようなことかがわかりにくいので、事業者に例示の趣旨を説明し、記載の見直しについては次回更新時に訂正します。</p> <p>【今後の改善活動】次回更新時：機器故障データ収集ガイドの記載内容の明確化で対応できると考えています。</p> |

| No | 項目 | 気付き事項 | 産業界の回答と今後の改善活動 |
|----|----|-------|---|
| | | | <p>ご指摘の記載上矛盾が生じている箇所は、事業者に例示の趣旨を説明し、変更箇所を示す記録を残して確実に次回更新時に訂正します。（例えば、「波及影響で安全機能が喪失していないとすると、何が機能喪失したのか明確でない（例えば、常用系の機能喪失が生じたのか）」に依る整合性のある記述に訂正します。）</p> |

表 3-1 国内一般機器時間故障率推定結果

“JNID/IL※”は、 p 値<0.05(太字下線)から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したものを。

| No. | ID | 機種 | 故障モード | 国内データ | | | 評価手法 | p 値 | 国内新故障率 (ガンマ分布) | | | |
|-----|-----|----------------|--------|-------|-------------|-------|----------|---------------|----------------|------|----------|-------------|
| | | | | 故障件数 | 運転時間(h) | プラント数 | | | Mean(/h) | EF | α | β |
| 1 | T1 | 非常用ディーゼル発電機 | 起動失敗 | 11 | 3,309,689 | 27 | JNID/IL | 0.242 | 3.5E-06 | 1.6 | 11.5 | 3,309,689 |
| 2 | T2 | 非常用ディーゼル発電機 | 継続運転失敗 | 7 | 6,907 | 27 | JNID/IL | 0.214 | 1.1E-03 | 1.7 | 7.5 | 6,907 |
| 3 | T3 | 電動ポンプ(通常運転、純水) | 起動失敗 | 2 | 20,934,842 | 27 | JNID/IL | 0.512 | 1.2E-07 | 2.5 | 2.5 | 20,934,842 |
| 4 | T4 | 電動ポンプ(通常運転、純水) | 継続運転失敗 | 1 | 10,431,547 | 27 | JNID/IL | 0.514 | 1.4E-07 | 3.3 | 1.5 | 10,431,547 |
| 5 | T5 | 電動ポンプ(通常運転、海水) | 起動失敗 | 3 | 7,889,157 | 27 | JNID/IL※ | 0.048 | 4.4E-07 | 2.2 | 3.5 | 7,889,157 |
| 6 | T6 | 電動ポンプ(通常運転、海水) | 継続運転失敗 | 0 | 4,697,834 | 27 | JNID/IL | — | 1.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 4,697,834 |
| 7 | T7 | 電動ポンプ(通常待機、純水) | 起動失敗 | 1 | 11,633,408 | 27 | JNID/IL | 0.465 | 1.3E-07 | 3.3 | 1.5 | 11,633,408 |
| 8 | T8 | 電動ポンプ(通常待機、純水) | 継続運転失敗 | 0 | 13,331 | 27 | JNID/IL | — | 3.8E-05 | 8.4 | 0.5 | 13,331 |
| 9 | T9 | 電動ポンプ(通常待機、海水) | 起動失敗 | 0 | 508,439 | 5 | JNID/IL | — | 9.8E-07 | 8.4 | 0.5 | 508,439 |
| 10 | T10 | 電動ポンプ(通常待機、海水) | 継続運転失敗 | 0 | 4,057 | 5 | JNID/IL | — | 1.2E-04 | 8.4 | 0.5 | 4,057 |
| 11 | T11 | タービン駆動ポンプ | 起動失敗 | 1 | 1,212,040 | 27 | JNID/IL | 0.436 | 1.2E-06 | 3.3 | 1.5 | 1,212,040 |
| 12 | T12 | タービン駆動ポンプ | 継続運転失敗 | 0 | 831 | 27 | JNID/IL | — | 6.0E-04 | 8.4 | 0.5 | 831 |
| 13 | T13 | ディーゼル駆動ポンプ | 起動失敗 | 0 | 88,000 | 2 | JNID/IL | — | 5.7E-06 | 8.4 | 0.5 | 88,000 |
| 14 | T14 | ディーゼル駆動ポンプ | 継続運転失敗 | 0 | 76 | 2 | JNID/IL | — | 6.6E-03 | 8.4 | 0.5 | 76 |
| 15 | T17 | 電動弁(純水) | 作動失敗 | 9 | 148,453,308 | 27 | JNID/IL | 0.092 | 6.4E-08 | 1.6 | 9.5 | 148,453,308 |
| 16 | T18 | 電動弁(純水) | 誤開又は誤閉 | 0 | 148,036,418 | 27 | JNID/IL | — | 3.4E-09 | 8.4 | 0.5 | 148,036,418 |
| 17 | T19 | 電動弁(純水) | 外部リーク | 0 | 99,577,958 | 21 | JNID/IL | — | 5.0E-09 | 8.4 | 0.5 | 99,577,958 |
| 18 | T20 | 電動弁(純水) | 内部リーク | 4 | 60,486,595 | 26 | JNID/IL | 0.805 | 7.4E-08 | 2.0 | 4.5 | 60,486,595 |
| 19 | T21 | 電動弁(純水) | 閉塞 | 0 | 144,939,288 | 27 | JNID/IL | — | 3.4E-09 | 8.4 | 0.5 | 144,939,288 |
| 20 | T24 | 電動弁(海水) | 作動失敗 | 5 | 18,274,928 | 27 | JNID/IL | 0.096 | 3.0E-07 | 1.9 | 5.5 | 18,274,928 |
| 21 | T25 | 電動弁(海水) | 誤開又は誤閉 | 0 | 18,219,232 | 27 | JNID/IL | — | 2.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 18,219,232 |
| 22 | T26 | 電動弁(海水) | 外部リーク | 0 | 6,707,431 | 8 | JNID/IL | — | 7.5E-08 | 8.4 | 0.5 | 6,707,431 |
| 23 | T27 | 電動弁(海水) | 内部リーク | 3 | 9,118,729 | 14 | JNID/IL | 0.167 | 3.8E-07 | 2.2 | 3.5 | 9,118,729 |
| 24 | T28 | 電動弁(海水) | 閉塞 | 0 | 18,163,536 | 27 | JNID/IL | — | 2.8E-08 | 8.4 | 0.5 | 18,163,536 |
| 25 | T31 | 空気作動弁 | 作動失敗 | 15 | 77,690,319 | 27 | JNID/IL | 0.081 | 2.0E-07 | 1.5 | 15.5 | 77,690,319 |
| 26 | T32 | 空気作動弁 | 誤開又は誤閉 | 1 | 77,465,541 | 27 | JNID/IL | 0.459 | 1.9E-08 | 3.3 | 1.5 | 77,465,541 |
| 27 | T33 | 空気作動弁 | 外部リーク | 1 | 60,978,708 | 21 | JNID/IL | 0.739 | 2.5E-08 | 3.3 | 1.5 | 60,978,708 |
| 28 | T34 | 空気作動弁 | 内部リーク | 4 | 39,865,996 | 25 | JNID/IL※ | 0.018 | 1.1E-07 | 2.0 | 4.5 | 39,865,996 |
| 29 | T35 | 空気作動弁 | 閉塞 | 0 | 75,906,300 | 27 | JNID/IL | — | 6.6E-09 | 8.4 | 0.5 | 75,906,300 |
| 30 | T38 | 油圧作動弁 | 作動失敗 | 1 | 6,037,453 | 17 | JNID/IL | 0.145 | 2.5E-07 | 3.3 | 1.5 | 6,037,453 |
| 31 | T39 | 油圧作動弁 | 誤開又は誤閉 | 0 | 6,037,453 | 17 | JNID/IL | — | 8.3E-08 | 8.4 | 0.5 | 6,037,453 |
| 32 | T40 | 油圧作動弁 | 外部リーク | 0 | 1,652,120 | 4 | JNID/IL | — | 3.0E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,652,120 |
| 33 | T41 | 油圧作動弁 | 内部リーク | 0 | 4,743,976 | 11 | JNID/IL | — | 1.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 4,743,976 |
| 34 | T42 | 油圧作動弁 | 閉塞 | 0 | 6,037,453 | 17 | JNID/IL | — | 8.3E-08 | 8.4 | 0.5 | 6,037,453 |
| 35 | T45 | 逆止弁 | 作動失敗 | 5 | 142,730,961 | 27 | JNID/IL※ | 1.E-04 | 3.9E-08 | 1.9 | 5.5 | 142,730,961 |
| 36 | T46 | 逆止弁 | 外部リーク | 0 | 98,164,738 | 21 | JNID/IL | — | 5.1E-09 | 8.4 | 0.5 | 98,164,738 |
| 37 | T47 | 逆止弁 | 内部リーク | 1 | 28,061,015 | 26 | JNID/IL | 0.761 | 5.3E-08 | 3.3 | 1.5 | 28,061,015 |
| 38 | T50 | 手動弁 | 開閉失敗 | 4 | 441,207,321 | 27 | JNID/IL | 0.148 | 1.0E-08 | 2.0 | 4.5 | 441,207,321 |
| 39 | T51 | 手動弁 | 外部リーク | 0 | 378,640,021 | 21 | JNID/IL | — | 1.3E-09 | 8.4 | 0.5 | 378,640,021 |
| 40 | T52 | 手動弁 | 内部リーク | 5 | 90,899,545 | 26 | EB/PL/KS | 0.003 | 4.9E-08 | 17.7 | 0.3 | 6,335,105 |
| 41 | T53 | 手動弁 | 閉塞 | 0 | 432,851,325 | 27 | JNID/IL | — | 1.2E-09 | 8.4 | 0.5 | 432,851,325 |
| 42 | T56 | 安全弁 | 作動失敗 | 0 | 38,985,411 | 27 | JNID/IL | — | 1.3E-08 | 8.4 | 0.5 | 38,985,411 |
| 43 | T57 | 安全弁 | 誤開 | 0 | 38,985,411 | 27 | JNID/IL | — | 1.3E-08 | 8.4 | 0.5 | 38,985,411 |
| 44 | T58 | 安全弁 | 外部リーク | 0 | 28,480,458 | 21 | JNID/IL | — | 1.8E-08 | 8.4 | 0.5 | 28,480,458 |
| 45 | T59 | 安全弁 | 内部リーク | 1 | 21,194,997 | 26 | JNID/IL | 0.511 | 7.1E-08 | 3.3 | 1.5 | 21,194,997 |
| 46 | T62 | 逃し安全弁(BWR) | 作動失敗 | 0 | 4,499,872 | 10 | JNID/IL | — | 1.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 4,499,872 |
| 47 | T63 | 逃し安全弁(BWR) | 誤開 | 0 | 4,499,872 | 10 | JNID/IL | — | 1.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 4,499,872 |
| 48 | T64 | 逃し安全弁(BWR) | 外部リーク | 0 | 2,063,229 | 4 | JNID/IL | — | 2.4E-07 | 8.4 | 0.5 | 2,063,229 |
| 49 | T65 | 逃し安全弁(BWR) | 内部リーク | 0 | 3,315,682 | 7 | JNID/IL | — | 1.5E-07 | 8.4 | 0.5 | 3,315,682 |
| 50 | T71 | 電磁弁 | 作動失敗 | 0 | 4,672,821 | 9 | JNID/IL | — | 1.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 4,672,821 |
| 51 | T72 | 電磁弁 | 誤開又は誤閉 | 0 | 4,672,821 | 9 | JNID/IL | — | 1.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 4,672,821 |
| 52 | T73 | 電磁弁 | 外部リーク | 0 | 1,686,295 | 3 | JNID/IL | — | 3.0E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,686,295 |
| 53 | T74 | 電磁弁 | 内部リーク | 0 | 2,124,931 | 7 | JNID/IL | — | 2.4E-07 | 8.4 | 0.5 | 2,124,931 |
| 54 | T75 | 電磁弁 | 閉塞 | 0 | 4,672,821 | 9 | JNID/IL | — | 1.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 4,672,821 |
| 55 | T76 | ファン/ブローア | 起動失敗 | 0 | 29,271,810 | 26 | JNID/IL | — | 1.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 29,271,810 |
| 56 | T77 | ファン/ブローア | 継続運転失敗 | 3 | 9,988,894 | 26 | JNID/IL | 0.086 | 3.5E-07 | 2.2 | 3.5 | 9,988,894 |
| 57 | T80 | ダンパ | 作動失敗 | 19 | 89,771,018 | 26 | EB/PL/KS | 0.004 | 2.0E-07 | 16.7 | 0.3 | 1,559,001 |
| 58 | T81 | ダンパ | 誤開又は誤閉 | 0 | 89,057,437 | 26 | JNID/IL | — | 5.6E-09 | 8.4 | 0.5 | 89,057,437 |
| 59 | T82 | ダンパ | 外部リーク | 1 | 57,916,097 | 21 | JNID/IL | 0.633 | 2.6E-08 | 3.3 | 1.5 | 57,916,097 |
| 60 | T83 | ダンパ | 内部リーク | 0 | 21,429,791 | 16 | JNID/IL | — | 2.3E-08 | 8.4 | 0.5 | 21,429,791 |
| 61 | T84 | ダンパ | 閉塞 | 0 | 89,771,018 | 26 | JNID/IL | — | 5.6E-09 | 8.4 | 0.5 | 89,771,018 |
| 62 | T85 | 熱交換器 | 伝熱管破損 | 3 | 43,723,715 | 27 | JNID/IL※ | 5.E-05 | 8.0E-08 | 2.2 | 3.5 | 43,723,715 |
| 63 | T86 | 熱交換器 | 外部リーク | 0 | 29,221,743 | 21 | JNID/IL | — | 1.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 29,221,743 |

表 3-1 国内一般機器時間故障率推定結果

"JNID/IL※" は、 p 値<0.05 (太字下線) から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したもの。

| No. | ID | 機種 | 故障モード | 国内データ | | | 評価手法 | p 値 | 国内新故障率 (ガンマ分布) | | | |
|-----|------|-----------------|---------|-------|-------------|-------|----------|---------------|----------------|-----|----------|-------------|
| | | | | 故障件数 | 運転時間(h) | プラント数 | | | Mean(/h) | EF | α | β |
| 64 | T87 | 熱交換器 | 伝熱管閉塞 | 0 | 43,039,331 | 27 | JNID/IL | — | 1.2E-08 | 8.4 | 0.5 | 43,039,331 |
| 65 | T88 | タンク | 破損 | 0 | 12,630,873 | 24 | JNID/IL | — | 4.0E-08 | 8.4 | 0.5 | 12,630,873 |
| 66 | T89 | タンク | 閉塞 | 0 | 12,187,429 | 24 | JNID/IL | — | 4.1E-08 | 8.4 | 0.5 | 12,187,429 |
| 67 | T90 | オフィス | 外部リーク | 0 | 83,011,062 | 21 | JNID/IL | — | 6.0E-09 | 8.4 | 0.5 | 83,011,062 |
| 68 | T91 | オフィス | 内部破損 | 1 | 115,266,008 | 26 | JNID/IL※ | 0.020 | 1.3E-08 | 3.3 | 1.5 | 115,266,008 |
| 69 | T92 | オフィス | 閉塞 | 2 | 114,609,897 | 26 | JNID/IL※ | 1.E-04 | 2.2E-08 | 2.5 | 2.5 | 114,609,897 |
| 70 | T93 | ストレーナ/フィルタ (純水) | 外部リーク | 0 | 18,205,762 | 21 | JNID/IL | — | 2.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 18,205,762 |
| 71 | T94 | ストレーナ/フィルタ (純水) | 内部破損 | 0 | 28,546,155 | 27 | JNID/IL | — | 1.8E-08 | 8.4 | 0.5 | 28,546,155 |
| 72 | T95 | ストレーナ/フィルタ (純水) | 閉塞 | 0 | 28,546,150 | 27 | JNID/IL | — | 1.8E-08 | 8.4 | 0.5 | 28,546,150 |
| 73 | T96 | ストレーナ/フィルタ (海水) | 外部リーク | 1 | 5,952,335 | 13 | JNID/IL | 0.325 | 2.5E-07 | 3.3 | 1.5 | 5,952,335 |
| 74 | T97 | ストレーナ/フィルタ (海水) | 内部破損 | 0 | 13,386,504 | 27 | JNID/IL | — | 3.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 13,386,504 |
| 75 | T98 | ストレーナ/フィルタ (海水) | 閉塞 | 1 | 13,052,328 | 27 | JNID/IL | 0.359 | 1.1E-07 | 3.3 | 1.5 | 13,052,328 |
| 76 | T99 | 制御駆動装置 (BWR) | 挿入失敗 | 0 | 6,032,868 | 7 | JNID/IL | — | 8.3E-08 | 8.4 | 0.5 | 6,032,868 |
| 77 | T103 | RPS、CRDM、MGセット | 機能喪失 | 0 | 204,902 | 2 | JNID/IL | — | 2.4E-06 | 8.4 | 0.5 | 204,902 |
| 78 | T104 | インバータ | 機能喪失 | 0 | 1,048,176 | 6 | JNID/IL | — | 4.8E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,048,176 |
| 79 | T108 | 遮断器 | 作動失敗 | 2 | 130,046,573 | 27 | JNID/IL | 0.913 | 1.9E-08 | 2.5 | 2.5 | 130,046,573 |
| 80 | T109 | 遮断器 | 誤閉又は誤開 | 2 | 130,046,573 | 27 | JNID/IL | 0.133 | 1.9E-08 | 2.5 | 2.5 | 130,046,573 |
| 81 | T110 | 変圧器 | 機能喪失 | 1 | 11,722,801 | 27 | JNID/IL | 0.139 | 1.3E-07 | 3.3 | 1.5 | 11,722,801 |
| 82 | T111 | 蓄電池 | 機能喪失 | 0 | 5,048,458 | 27 | JNID/IL | — | 9.9E-08 | 8.4 | 0.5 | 5,048,458 |
| 83 | T112 | 充電器 | 機能喪失 | 1 | 4,844,536 | 27 | JNID/IL | 0.343 | 3.1E-07 | 3.3 | 1.5 | 4,844,536 |
| 84 | T113 | 母線 | 機能喪失 | 1 | 44,012,575 | 27 | JNID/IL | 0.099 | 3.4E-08 | 3.3 | 1.5 | 44,012,575 |
| 85 | T117 | 配管 (3インチ未満) | リーク | 0 | 302,590,198 | 16 | JNID/IL | — | 1.7E-09 | 8.4 | 0.5 | 302,590,198 |
| 86 | T118 | 配管 (3インチ未満) | 閉塞 | 0 | 278,094,635 | 14 | JNID/IL | — | 1.8E-09 | 8.4 | 0.5 | 278,094,635 |
| 87 | T119 | 配管 (3インチ以上) | リーク | 0 | 670,678,331 | 19 | JNID/IL | — | 7.5E-10 | 8.4 | 0.5 | 670,678,331 |
| 88 | T120 | 配管 (3インチ以上) | 閉塞 | 0 | 393,872,221 | 15 | JNID/IL | — | 1.3E-09 | 8.4 | 0.5 | 393,872,221 |
| 89 | T121 | リレー | 不動作 | 1 | 378,212,352 | 27 | JNID/IL | 0.548 | 4.0E-09 | 3.3 | 1.5 | 378,212,352 |
| 90 | T122 | リレー | 誤動作 | 1 | 378,208,175 | 27 | JNID/IL | 0.839 | 4.0E-09 | 3.3 | 1.5 | 378,208,175 |
| 91 | T123 | 遅延リレー | 不動作 | 1 | 47,579,852 | 19 | JNID/IL | 0.078 | 3.2E-08 | 3.3 | 1.5 | 47,579,852 |
| 92 | T124 | 遅延リレー | 誤動作 | 0 | 47,582,365 | 19 | JNID/IL | — | 1.1E-08 | 8.4 | 0.5 | 47,582,365 |
| 93 | T125 | 演算器 | 不動作 | 0 | 12,388,533 | 9 | JNID/IL | — | 4.0E-08 | 8.4 | 0.5 | 12,388,533 |
| 94 | T126 | 演算器 | 高出力/低出力 | 0 | 12,388,533 | 9 | JNID/IL | — | 4.0E-08 | 8.4 | 0.5 | 12,388,533 |
| 95 | T127 | カード (半導体ロジック回路) | 不動作 | 0 | 35,745,155 | 15 | JNID/IL | — | 1.4E-08 | 8.4 | 0.5 | 35,745,155 |
| 96 | T128 | カード (半導体ロジック回路) | 誤動作 | 0 | 35,752,512 | 15 | JNID/IL | — | 1.4E-08 | 8.4 | 0.5 | 35,752,512 |
| 97 | T129 | 警報設定器 | 不動作 | 0 | 52,431,784 | 20 | JNID/IL | — | 9.5E-09 | 8.4 | 0.5 | 52,431,784 |
| 98 | T130 | 警報設定器 | 誤動作 | 0 | 52,431,784 | 20 | JNID/IL | — | 9.5E-09 | 8.4 | 0.5 | 52,431,784 |
| 99 | T131 | ヒューズ | 誤断線 | 0 | 9,721,873 | 8 | JNID/IL | — | 5.1E-08 | 8.4 | 0.5 | 9,721,873 |
| 100 | T132 | 流量トランスミッタ | 不動作 | 0 | 8,745,208 | 24 | JNID/IL | — | 5.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 8,745,208 |
| 101 | T133 | 流量トランスミッタ | 高出力/低出力 | 1 | 8,745,208 | 24 | JNID/IL※ | 0.015 | 1.7E-07 | 3.3 | 1.5 | 8,745,208 |
| 102 | T134 | 圧カトランスミッタ | 不動作 | 0 | 43,449,035 | 27 | JNID/IL | — | 1.2E-08 | 8.4 | 0.5 | 43,449,035 |
| 103 | T135 | 圧カトランスミッタ | 高出力/低出力 | 2 | 43,449,035 | 27 | JNID/IL | 0.591 | 5.8E-08 | 2.5 | 2.5 | 43,449,035 |
| 104 | T136 | 水位トランスミッタ | 不動作 | 3 | 30,809,449 | 27 | JNID/IL | 0.695 | 1.1E-07 | 2.2 | 3.5 | 30,809,449 |
| 105 | T137 | 水位トランスミッタ | 高出力/低出力 | 1 | 30,785,498 | 27 | JNID/IL | 1.000 | 4.9E-08 | 3.3 | 1.5 | 30,785,498 |
| 106 | T138 | 温度検出器 | 不動作 | 0 | 29,740,837 | 24 | JNID/IL | — | 1.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 29,740,837 |
| 107 | T139 | 温度検出器 | 高出力/低出力 | 2 | 29,741,845 | 24 | JNID/IL | 0.065 | 8.4E-08 | 2.5 | 2.5 | 29,741,845 |
| 108 | T140 | 放射線検出器 | 不動作 | 0 | 1,595,100 | 4 | JNID/IL | — | 3.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,595,100 |
| 109 | T141 | 放射線検出器 | 高出力/低出力 | 0 | 1,595,100 | 4 | JNID/IL | — | 3.1E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,595,100 |
| 110 | T142 | 流量スイッチ | 不動作 | 1 | 1,957,004 | 8 | JNID/IL | 0.578 | 7.7E-07 | 3.3 | 1.5 | 1,957,004 |
| 111 | T143 | 流量スイッチ | 誤動作 | 0 | 1,957,004 | 8 | JNID/IL | — | 2.6E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,957,004 |
| 112 | T144 | 圧力スイッチ | 不動作 | 1 | 14,081,319 | 18 | JNID/IL | 0.696 | 1.1E-07 | 3.3 | 1.5 | 14,081,319 |
| 113 | T145 | 圧力スイッチ | 誤動作 | 0 | 14,081,319 | 18 | JNID/IL | — | 3.6E-08 | 8.4 | 0.5 | 14,081,319 |
| 114 | T146 | 水位スイッチ | 不動作 | 2 | 8,637,686 | 11 | JNID/IL | 0.705 | 2.9E-07 | 2.5 | 2.5 | 8,637,686 |
| 115 | T147 | 水位スイッチ | 誤動作 | 0 | 8,637,686 | 11 | JNID/IL | — | 5.8E-08 | 8.4 | 0.5 | 8,637,686 |
| 116 | T148 | 温度スイッチ | 不動作 | 0 | 13,404,865 | 19 | JNID/IL | — | 3.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 13,404,865 |
| 117 | T149 | 温度スイッチ | 誤動作 | 0 | 13,404,865 | 19 | JNID/IL | — | 3.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 13,404,865 |
| 118 | T150 | リミットスイッチ | 不動作 | 2 | 42,922,407 | 22 | JNID/IL | 1.000 | 5.8E-08 | 2.5 | 2.5 | 42,922,407 |
| 119 | T151 | リミットスイッチ | 誤動作 | 1 | 42,922,407 | 22 | JNID/IL | 1.000 | 3.5E-08 | 3.3 | 1.5 | 42,922,407 |
| 120 | T152 | 手動スイッチ | 不動作 | 1 | 71,966,709 | 26 | JNID/IL | 1.000 | 2.1E-08 | 3.3 | 1.5 | 71,966,709 |
| 121 | T153 | 手動スイッチ | 誤動作 | 0 | 71,966,709 | 26 | JNID/IL | — | 6.9E-09 | 8.4 | 0.5 | 71,966,709 |
| 122 | T154 | コントローラ | 不動作 | 0 | 1,088,885 | 4 | JNID/IL | — | 4.6E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,088,885 |
| 123 | T155 | コントローラ | 高出力/低出力 | 0 | 1,088,885 | 4 | JNID/IL | — | 4.6E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,088,885 |
| 124 | T156 | 配線/電線 | 短絡 | 0 | 19,452,045 | 22 | JNID/IL | — | 2.6E-08 | 8.4 | 0.5 | 19,452,045 |
| 125 | T157 | 配線/電線 | 地絡 | 0 | 19,452,045 | 22 | JNID/IL | — | 2.6E-08 | 8.4 | 0.5 | 19,452,045 |
| 126 | T158 | 配線/電線 | 断線 | 0 | 19,452,045 | 22 | JNID/IL | — | 2.6E-08 | 8.4 | 0.5 | 19,452,045 |

表 3-1 国内一般機器時間故障率推定結果

“JNID/IL※”は、 p 値<0.05 (太字下線) から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したもの。

| No. | ID | 機種 | 故障モード | 国内データ | | | 評価手法 | p 値 | 国内新故障率 (ガンマ分布) | | | |
|-----|------|--------------------------|---------|-------|------------|-------|----------|--------------|----------------|------|----------|------------|
| | | | | 故障件数 | 運転時間(h) | プラント数 | | | Mean(/h) | EF | α | β |
| 127 | T159 | ヒーター | 機能喪失 | 0 | 1,158,301 | 10 | JNID/IL | — | 4.3E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,158,301 |
| 128 | T160 | アナンシエータ | 機能喪失 | 0 | 350,180 | 5 | JNID/IL | — | 1.4E-06 | 8.4 | 0.5 | 350,180 |
| 129 | T161 | 空気圧縮機 | 起動失敗 | 1 | 3,637,160 | 27 | JNID/IL | 1.000 | 4.1E-07 | 3.3 | 1.5 | 3,637,160 |
| 130 | T162 | 空気圧縮機 | 継続運転失敗 | 7 | 1,707,068 | 27 | EB/PL/KS | 0.020 | 4.1E-06 | 8.2 | 0.5 | 125,091 |
| 131 | T165 | 爆破弁 (BWR) | 開失敗 | 0 | 182,534 | 2 | JNID/IL | — | 2.7E-06 | 8.4 | 0.5 | 182,534 |
| 132 | T166 | 爆破弁 (BWR) | 誤開 | 0 | 182,534 | 2 | JNID/IL | — | 2.7E-06 | 8.4 | 0.5 | 182,534 |
| 133 | T167 | 爆破弁 (BWR) | 外部リーク | 0 | 87,590 | 1 | JNID/IL | — | 5.7E-06 | 8.4 | 0.5 | 87,590 |
| 134 | T168 | 爆破弁 (BWR) | 内部リーク | 0 | 87,590 | 1 | JNID/IL | — | 5.7E-06 | 8.4 | 0.5 | 87,590 |
| 135 | T169 | 爆破弁 (BWR) | 閉塞 | 0 | 182,534 | 2 | JNID/IL | — | 2.7E-06 | 8.4 | 0.5 | 182,534 |
| 136 | T170 | 主復水器 (BWR) | 伝熱管破損 | 2 | 1,186,653 | 11 | JNID/IL※ | 0.011 | 2.1E-06 | 2.5 | 2.5 | 1,186,653 |
| 137 | T171 | 主復水器 (BWR) | 外部リーク | 0 | 565,526 | 5 | JNID/IL | — | 8.8E-07 | 8.4 | 0.5 | 565,526 |
| 138 | T172 | 主復水器 (BWR) | 伝熱管閉塞 | 0 | 1,186,653 | 11 | JNID/IL | — | 4.2E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,186,653 |
| 139 | T173 | 復水器 (BWR) | 伝熱管破損 | 0 | 1,193,638 | 11 | JNID/IL | — | 4.2E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,193,638 |
| 140 | T174 | 復水器 (BWR) | 外部リーク | 0 | 487,139 | 5 | JNID/IL | — | 1.0E-06 | 8.4 | 0.5 | 487,139 |
| 141 | T175 | 復水器 (BWR) | 伝熱管閉塞 | 0 | 1,193,638 | 11 | JNID/IL | — | 4.2E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,193,638 |
| 142 | T176 | ラプチャーディスク(BWR) | 開失敗 | 0 | 317,897 | 8 | JNID/IL | — | 1.6E-06 | 8.4 | 0.5 | 317,897 |
| 143 | T177 | サンプスクリーン(PWR) | 閉塞 | 0 | 1,269,586 | 15 | JNID/IL | — | 3.9E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,269,586 |
| 144 | T180 | 冷凍機 | 起動失敗 | 16 | 5,468,469 | 25 | EB/PL/KS | 0.000 | 3.2E-06 | 11.5 | 0.4 | 125,826 |
| 145 | T181 | 冷凍機 | 継続運転失敗 | 20 | 2,940,278 | 25 | EB/PL/KS | 0.007 | 6.7E-06 | 4.6 | 0.9 | 137,632 |
| 146 | T187 | 再結合器 (OG含む) (BWR) | 機能喪失 | 2 | 594,379 | 10 | JNID/IL※ | 0.002 | 4.2E-06 | 2.5 | 2.5 | 594,379 |
| 147 | T188 | 補助ボイラー(BWR) | 機能喪失 | 19 | 670,207 | 8 | EB/PL/KS | 0.000 | 3.6E-05 | 7.1 | 0.6 | 16,279 |
| 148 | T209 | 窒素/空気ポンペ | 外部リーク | 0 | 337,531 | 1 | JNID/IL | — | 1.5E-06 | 8.4 | 0.5 | 337,531 |
| 149 | T210 | 窒素/空気ポンペ | 閉塞 | 0 | 845,375 | 4 | JNID/IL | — | 5.9E-07 | 8.4 | 0.5 | 845,375 |
| 150 | T213 | 演算装置 (デジタル制御機器) | 不動作 | 4 | 9,415,906 | 3 | JNID/IL | 0.273 | 4.8E-07 | 2.0 | 4.5 | 9,415,906 |
| 151 | T214 | 演算装置 (デジタル制御機器) | 誤動作 | 0 | 9,415,906 | 3 | JNID/IL | — | 5.3E-08 | 8.4 | 0.5 | 9,415,906 |
| 152 | T215 | インターフェイス (デジタル制御機器) | 不動作 | 0 | 7,843,186 | 1 | JNID/IL | — | 6.4E-08 | 8.4 | 0.5 | 7,843,186 |
| 153 | T216 | インターフェイス (デジタル制御機器) | 誤動作 | 0 | 7,843,186 | 1 | JNID/IL | — | 6.4E-08 | 8.4 | 0.5 | 7,843,186 |
| 154 | T217 | 入出力装置 (デジタル制御機器) | 不動作 | 4 | 25,984,628 | 3 | JNID/IL | 0.537 | 1.7E-07 | 2.0 | 4.5 | 25,984,628 |
| 155 | T218 | 入出力装置 (デジタル制御機器) | 誤動作 | 0 | 25,984,628 | 3 | JNID/IL | — | 1.9E-08 | 8.4 | 0.5 | 25,984,628 |
| 156 | T219 | ロジックカード (デジタル制御機器) | 不動作 | 0 | 555,720 | 2 | JNID/IL | — | 9.0E-07 | 8.4 | 0.5 | 555,720 |
| 157 | T220 | ロジックカード (デジタル制御機器) | 誤動作 | 0 | 555,720 | 2 | JNID/IL | — | 9.0E-07 | 8.4 | 0.5 | 555,720 |
| 158 | T221 | ロードドライバ (デジタル制御機器) | 不動作 | 1 | 7,104,373 | 3 | JNID/IL | 1.000 | 2.1E-07 | 3.3 | 1.5 | 7,104,373 |
| 159 | T222 | ロードドライバ (デジタル制御機器) | 誤動作 | 1 | 7,104,373 | 3 | JNID/IL | 1.000 | 2.1E-07 | 3.3 | 1.5 | 7,104,373 |
| 160 | T223 | 光ケーブル (デジタル制御機器) | 機能喪失 | 0 | 9,150,383 | 1 | JNID/IL | — | 5.5E-08 | 8.4 | 0.5 | 9,150,383 |
| 161 | T227 | 計装用電源装置 (E/S) (デジタル制御機器) | 機能喪失 | 0 | 28,830,300 | 2 | JNID/IL | — | 1.7E-08 | 8.4 | 0.5 | 28,830,300 |
| 162 | T228 | 中性子束検出器 (BWR) | 不動作 | 1 | 2,103,788 | 10 | JNID/IL | 0.863 | 7.1E-07 | 3.3 | 1.5 | 2,103,788 |
| 163 | T229 | 中性子束検出器 (BWR) | 高出力/低出力 | 0 | 2,103,788 | 10 | JNID/IL | — | 2.4E-07 | 8.4 | 0.5 | 2,103,788 |
| 164 | T232 | 真空破壊弁 (BWR) | 作動失敗 | 0 | 3,431,345 | 10 | JNID/IL | — | 1.5E-07 | 8.4 | 0.5 | 3,431,345 |
| 165 | T233 | 真空破壊弁 (BWR) | 外部リーク | 0 | 935,107 | 4 | JNID/IL | — | 5.3E-07 | 8.4 | 0.5 | 935,107 |
| 166 | T234 | 真空破壊弁 (BWR) | 内部リーク | 0 | 1,693,018 | 7 | JNID/IL | — | 3.0E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,693,018 |
| 167 | T235 | 空気貯槽 (BWR) | 破損 | 0 | 9,750,615 | 10 | JNID/IL | — | 5.1E-08 | 8.4 | 0.5 | 9,750,615 |
| 168 | T236 | 空気貯槽 (BWR) | 閉塞 | 0 | 9,750,615 | 10 | JNID/IL | — | 5.1E-08 | 8.4 | 0.5 | 9,750,615 |
| 169 | T237 | 格納容器 | リーク | 0 | 438,595 | 11 | JNID/IL | — | 1.1E-06 | 8.4 | 0.5 | 438,595 |
| 170 | T238 | 容積式流量積算計 | 外部リーク | 0 | 464,290 | 3 | JNID/IL | — | 1.1E-06 | 8.4 | 0.5 | 464,290 |
| 171 | T239 | 容積式流量積算計 | 閉塞 | 3 | 1,654,888 | 8 | JNID/IL※ | 0.015 | 2.1E-06 | 2.2 | 3.5 | 1,654,888 |
| 172 | T240 | 脱塩塔 (BWR) | 外部リーク | 0 | 1,019,178 | 5 | JNID/IL | — | 4.9E-07 | 8.4 | 0.5 | 1,019,178 |
| 173 | T241 | 脱塩塔 (BWR) | 閉塞 | 0 | 2,739,568 | 10 | JNID/IL | — | 1.8E-07 | 8.4 | 0.5 | 2,739,568 |
| 174 | T242 | 制御弁 (BWR) | 制御不能 | 3 | 5,710,342 | 9 | JNID/IL | 0.572 | 6.1E-07 | 2.2 | 3.5 | 5,710,342 |
| 175 | T243 | 制御弁 (BWR) | 誤開又は誤閉 | 0 | 10,154,725 | 10 | JNID/IL | — | 4.9E-08 | 8.4 | 0.5 | 10,154,725 |
| 176 | T244 | エゼクタ (BWR) | 外部リーク | 0 | 116,570 | 3 | JNID/IL | — | 4.3E-06 | 8.4 | 0.5 | 116,570 |
| 177 | T245 | エゼクタ (BWR) | 内部破損 | 0 | 739,259 | 8 | JNID/IL | — | 6.8E-07 | 8.4 | 0.5 | 739,259 |
| 178 | T246 | エゼクタ (BWR) | 閉塞 | 0 | 739,259 | 8 | JNID/IL | — | 6.8E-07 | 8.4 | 0.5 | 739,259 |

表 3-2 国内一般機器デマンド故障確率の推定結果

"JNID/IL※" は、 p 値 <0.05 (太字下線) から個別プラント間のばらつきがあると判断したが、最尤法の解がないためばらつきがないとして推定したもの。

| No. | ID | 機種 | 故障モード | 国内データ | | | 評価手法 | p 値 | 国内新故障確率 (ベータ分布) | | | |
|-----|------|-----------------|------------|-------|---------|-------|----------|---------------|-----------------|-----|----------|---------|
| | | | | 故障件数 | デマンド数 | プラント数 | | | Mean | EF | α | β |
| 1 | D1 | 非常用ディーゼル発電機 | 起動失敗 | 11 | 6,878 | 27 | JNID/IL | 0.139 | 1.7.E-03 | 1.6 | 11.5 | 6,868 |
| 2 | D3 | 電動ポンプ (通常運転、純水) | 起動失敗 | 2 | 19,318 | 27 | JNID/IL | 0.147 | 1.3.E-04 | 2.5 | 2.5 | 19,317 |
| 3 | D5 | 電動ポンプ (通常運転、海水) | 起動失敗 | 3 | 9,075 | 27 | JNID/IL※ | 0.003 | 3.9.E-04 | 2.2 | 3.5 | 9,073 |
| 4 | D7 | 電動ポンプ (通常待機、純水) | 起動失敗 | 1 | 20,895 | 27 | JNID/IL | 0.295 | 7.2.E-05 | 3.3 | 1.5 | 20,895 |
| 5 | D9 | 電動ポンプ (通常待機、海水) | 起動失敗 | 0 | 1,815 | 5 | JNID/IL | — | 2.8.E-04 | 8.4 | 0.5 | 1,816 |
| 6 | D11 | タービン駆動ポンプ | 起動失敗 | 1 | 2,047 | 27 | JNID/IL | 0.489 | 7.3.E-04 | 3.3 | 1.5 | 2,047 |
| 7 | D13 | ディーゼル駆動ポンプ | 起動失敗 | 0 | 150 | 2 | JNID/IL | — | 3.3.E-03 | 8.4 | 0.5 | 151 |
| 8 | D15 | 電動弁 (純水) | 開失敗 | 5 | 118,838 | 27 | JNID/IL | 0.237 | 4.6.E-05 | 1.9 | 5.5 | 118,834 |
| 9 | D16 | 電動弁 (純水) | 閉失敗 | 4 | 120,217 | 27 | JNID/IL | 0.113 | 3.7.E-05 | 2.0 | 4.5 | 120,214 |
| 10 | D22 | 電動弁 (海水) | 開失敗 | 3 | 365,722 | 25 | JNID/IL※ | 0.020 | 9.6.E-06 | 2.2 | 3.5 | 365,720 |
| 11 | D23 | 電動弁 (海水) | 閉失敗 | 2 | 365,687 | 25 | JNID/IL※ | 0.002 | 6.8.E-06 | 2.5 | 2.5 | 365,686 |
| 12 | D29 | 空気作動弁 | 開失敗 | 11 | 78,042 | 26 | JNID/IL※ | 0.005 | 1.5.E-04 | 1.6 | 11.5 | 78,032 |
| 13 | D30 | 空気作動弁 | 閉失敗 | 4 | 77,927 | 26 | JNID/IL | 0.126 | 5.8.E-05 | 2.0 | 4.5 | 77,924 |
| 14 | D36 | 油圧作動弁 | 開失敗 | 1 | 15,899 | 17 | JNID/IL | 0.668 | 9.4.E-05 | 3.3 | 1.5 | 15,899 |
| 15 | D37 | 油圧作動弁 | 閉失敗 | 0 | 15,801 | 17 | JNID/IL | — | 3.2.E-05 | 8.4 | 0.5 | 15,802 |
| 16 | D43 | 逆止弁 | 開失敗 | 0 | 141,286 | 27 | JNID/IL | — | 3.5.E-06 | 8.4 | 0.5 | 141,287 |
| 17 | D44 | 逆止弁 | 閉失敗 | 5 | 141,372 | 27 | JNID/IL※ | 3.E-04 | 3.9.E-05 | 1.9 | 5.5 | 141,368 |
| 18 | D48 | 手動弁 | 開失敗 | 1 | 20,449 | 26 | JNID/IL | 0.212 | 7.3.E-05 | 3.3 | 1.5 | 20,449 |
| 19 | D49 | 手動弁 | 閉失敗 | 3 | 20,448 | 26 | JNID/IL | 0.422 | 1.7.E-04 | 2.2 | 3.5 | 20,446 |
| 20 | D54 | 安全弁 | 開失敗 | 0 | 1,612 | 18 | JNID/IL | — | 3.1.E-04 | 8.4 | 0.5 | 1,613 |
| 21 | D55 | 安全弁 | 閉 (吹止まり)失敗 | 0 | 1,612 | 18 | JNID/IL | — | 3.1.E-04 | 8.4 | 0.5 | 1,613 |
| 22 | D60 | 逃し安全弁 (BWR) | 開失敗 | 0 | 1,535 | 8 | JNID/IL | — | 3.3.E-04 | 8.4 | 0.5 | 1,536 |
| 23 | D61 | 逃し安全弁 (BWR) | 閉 (吹止まり)失敗 | 0 | 1,535 | 8 | JNID/IL | — | 3.3.E-04 | 8.4 | 0.5 | 1,536 |
| 24 | D69 | 電磁弁 | 開失敗 | 0 | 84,701 | 4 | JNID/IL | — | 5.9.E-06 | 8.4 | 0.5 | 84,702 |
| 25 | D70 | 電磁弁 | 閉失敗 | 0 | 84,735 | 4 | JNID/IL | — | 5.9.E-06 | 8.4 | 0.5 | 84,736 |
| 26 | D76 | ファン/ブロー | 起動失敗 | 0 | 31,865 | 26 | JNID/IL | — | 1.6.E-05 | 8.4 | 0.5 | 31,866 |
| 27 | D78 | ダンパ | 開失敗 | 4 | 48,153 | 26 | JNID/IL | 0.155 | 9.3.E-05 | 2.0 | 4.5 | 48,150 |
| 28 | D79 | ダンパ | 閉失敗 | 15 | 48,070 | 26 | JNID/IL※ | 0.004 | 3.2.E-04 | 1.5 | 15.5 | 48,056 |
| 29 | D106 | 遮断器 | 開放失敗 | 1 | 52,694 | 26 | JNID/IL | 0.725 | 2.8.E-05 | 3.3 | 1.5 | 52,694 |
| 30 | D107 | 遮断器 | 投入失敗 | 1 | 94,552 | 26 | JNID/IL | 0.434 | 1.6.E-05 | 3.3 | 1.5 | 94,552 |
| 31 | D161 | 空気圧縮機 | 起動失敗 | 1 | 6,588 | 27 | JNID/IL | 1.000 | 2.3.E-04 | 3.3 | 1.5 | 6,588 |
| 32 | D180 | 冷凍機 | 起動失敗 | 16 | 3,235 | 25 | EB/PL/KS | 2.E-05 | 6.0.E-03 | 1.5 | 16.5 | 3,220 |
| 33 | D230 | 真空破壊弁 (BWR) | 開失敗 | 0 | 642 | 7 | JNID/IL | — | 7.8.E-04 | 8.4 | 0.5 | 643 |
| 34 | D231 | 真空破壊弁 (BWR) | 閉失敗 | 0 | 642 | 7 | JNID/IL | — | 7.8.E-04 | 8.4 | 0.5 | 643 |

要対応技術情報：回路の故障が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性に関する調査結果

令和6年1月25日
火災対策室
技術基盤グループ
検査グループ

1. はじめに

火災防護に関しては、日本では、火災の影響により安全機能が喪失することのないよう、火災防護基準において、系統分離等の対策を求めているが、第12回技術情報検討会¹において、米国の Information Notice (IN2014-10)「回路の故障が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性」に関する調査内容が報告された。その際、米国原子力規制委員会(NRC)が「直流電流計回路を含む解析要件に関して、未解析の状態が存在する可能性」があるとしたこと等を踏まえ、更に高度なレベルで火災による回路故障(短絡・地絡・断線・2次火災等による機能喪失)の影響を確認する要否を検討することとなり「回路の故障が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性」が、要対応技術情報と分類され、将来的な火災影響評価ガイドへの反映要否を含めた検討が開始された²。令和3年6月には、NRA技術ノート「米国における火災時安全停止回路解析の調査」(以下「NRA技術ノート(米国審査編)」という。)を発行し、安全停止回路解析の概要、関連するNRCの規制活動とともにいくつかの事業者事象報告書(LER)を紹介した。LERには、NRCが実施する3年ごとの火災防護検査等において発見、指摘された具体的な課題(潜在的課題含む)が含まれていることから、技術基盤課で調査を行い、第51回技術情報検討会において、「火災時安全停止回路解析に関わる米国事業者事象報告書の調査」として結果を報告した。

その後、以下の具体的実施項目について、調査を行うこととし³、このうち、④については、第59回技術情報検討会において報告した。

- ① 米国火災防護規制の最近の動向の調査
- ② 国内事業者と情報共有、事業者の対応状況について意見聴取
- ③ 関連するNRCの審査及び検査制度についての文献調査
- ④ 火災防護関連の検査について、NRCへ検査官等を派遣し情報収集

今般、残りの実施項目について調査を行ったことから、①～④について調査結果をとりまとめた。また、今後の対応についてもあわせて報告する。

¹ 平成27年1月19日

² 「我が国では、系統分離の徹底を求めているため、火災影響による炉停止機能及び崩壊熱除去機能の喪失の可能性は非常に低いと思われる。しかし、更に高度なレベルで火災による回路故障の影響を確認することについて、その要否を含めて検討することとし、本件は、要対応技術情報とする。」とされた。

³ 第52回技術情報検討会

2. 調査の結果概要

2. 1 米国火災防護規制の最近の動向の調査

米国の火災防護規制の概要を図1に示す。規制要件「火災発生時における原子炉安全停止の達成・維持」⁴に対して、火災の発生防止、火災の感知・消火及び火災の影響軽減を行う。なお、火災の影響軽減は、決定論に基づく審査では系統分離対策を要求し、確率論に基づく審査では回路レベルでの安全停止解析による安全性裏付けとしてCDF⁵及びLERF⁶の受容基準を満足することを要求している。米国規制要求の概要は、令和3年6月に公表した上記NRA技術ノート（米国審査編）において公表した。その後、米国の規制要求及びガイド等について追加調査を行ったが、要求事項の改定等の変化はなかった。

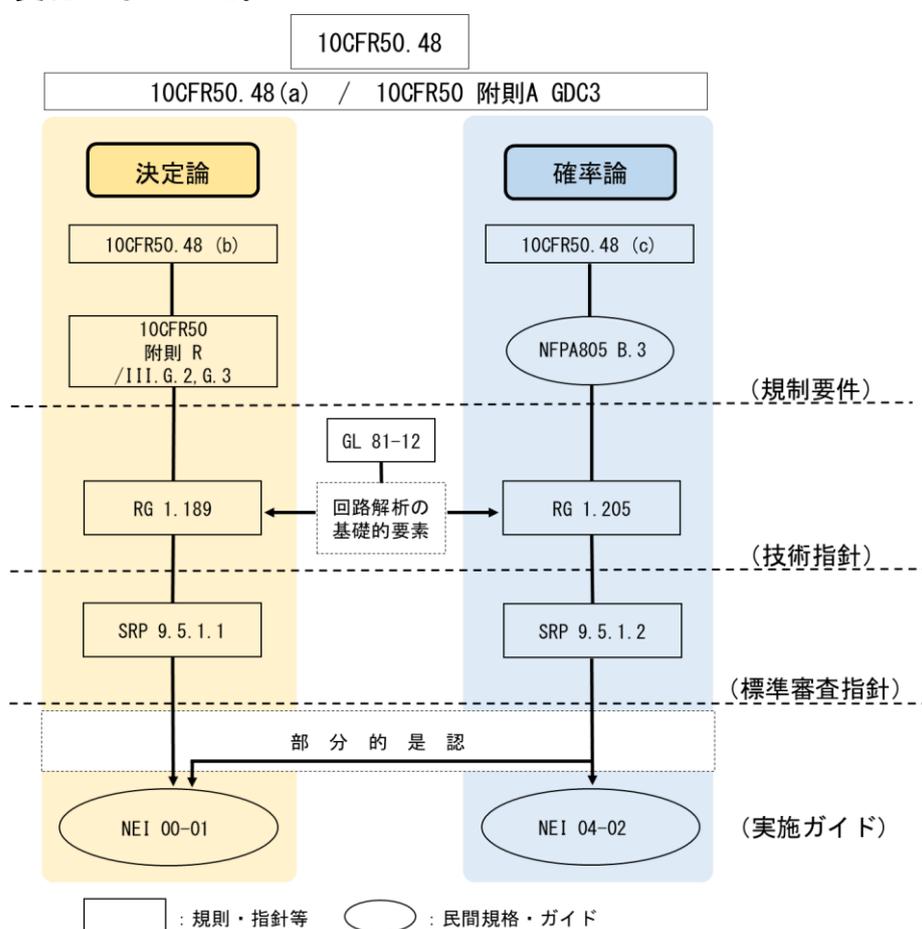


図1 米国の火災防護規制の概要

2. 2 国内事業者と情報共有、事業者の対応状況について意見聴取

米国において2014年にInformation Notice (IN2014-10)が発行され、日本において第12回技術情報検討会で報告された後、国内事業者はこれを検討し、取組を行っていることから、原子力エネルギー協議会(ATENA)及び電力中央研究所 原子

⁴ Code of Federal Regulation Title 10 “Energy”, Part50 “Domestic licensing of production and utilization facilities” 48 “Fire protection”

⁵ Core Damage Frequency: 炉心損傷頻度

⁶ Large Early Release Frequency: 早期大規模放出頻度

カリスク情報センター（NRRC）から、面談においてその内容を聴取した⁷。ATENA 及び NRRC の説明の概要は以下のとおり。

（1）火災時安全停止回路解析に係る検討状況⁸（参考 1）

第 51 回技術情報検討会で公表された、米国の火災時安全停止回路解析に関連する 32 件の LER 情報に対して、事業者としては自主的安全性向上の取り組みとして、

- ・ 短期対応として、LER 情報分析による現状把握
- ・ 中長期的対応として、火災 PRA、回路解析手法検討について実施していく方針である。

なお、新規制基準に適合しているプラントは、火災時に安全停止に必要な機器に対して、系統分離対策を実施しているため、火災時の安全停止機能は確保されていると考える。

（2）火災時安全停止回路解析に係る検討のうち LER 情報分析結果⁹（参考 2）

短期対応として、LER 情報分析による現状把握を事業者が行った結果、LER 情報を次の 3 つの観点から分析し、いずれもスクリーニングアウト可能と結論づけた。

- ・ ヒューマンエラーや設計管理の不備
- ・ 直流電流計回路へのヒューズ等の設置
- ・ 系統分離対策

ここで、2 点目の直流電流計回路へのヒューズ等の設置については、平成 27 年に原子力安全推進協会（JANSI）から、運転経験に基づく重要度文書「重要度-Ⅱ¹⁰：火災時の直流電流計回路損傷による 2 次的火災または機器損傷への対応」を発行し、事業者に対し直流電流計回路へのヒューズ設置等を提言した。各事業者においてヒューズの追加設置等の対応計画済。

（3）「重要度-Ⅱ：火災時の直流電流計回路損傷による 2 次的火災または機器損傷への対応」の対応状況

事業者の対応状況（廃止措置中プラントは除く。）は、以下のとおり¹¹。

【PWR】

- ・ 泊発電所 1， 2 号機：2024 年度末までに完了予定
- ・ 泊発電所 3 号機、玄海原子力発電所 3， 4 号機、川内原子力発電所 1， 2 号機、敦賀発電所 2 号機：過電流保護回路設置対策済

⁷ 令和 4 年 11 月 18 日及び令和 5 年 7 月 6 日

⁸ 令和 4 年 11 月 18 日面談資料

⁹ 令和 5 年 7 月 6 日面談資料

¹⁰ 平成 27 年 5 月 11 日に、運転経験に基づく重要度文書のうち、重要度-Ⅱの文書として発行した。重要度-Ⅱとは、原子力の安全性、信頼性に重要な影響を及ぼす事象あるいはその可能性がある事象であり、運転経験に基づく重要度文書では上から 2 番目のランクに相当する。

¹¹ 令和 6 年 1 月 18 日面談資料

- ・ 上記以外：対策が必要となる直流電流計回路が設置されていないため対策不要

【BWR】

- ・ 全プラント：対策が必要となる直流電流計回路が設置されていないため対策不要

【日本原燃】

- ・ 対策が必要となる直流電流計回路が設置されていないため対策不要

(4) まとめと評価

上記(1)及び(2)のとおり、ATENA 及び NRRRC は火災時安全停止回路解析に係る取組として、「直流電流計回路へのヒューズ等の設置」を実施中であり、また、中長期的取組として火災 PRA、回路解析手法検討を行うとしている。以上より、事業者側において対策を進めていることを確認した。

2. 3 関連する NRC の審査及び検査制度についての文献調査

NRC の審査制度については、上記「2. 1 米国火災防護規制の最近の動向の調査」のとおり。

NRC の検査制度については、回路解析を中心に文献調査を実施し、令和 5 年 5 月に NRA 技術ノート「米国における火災防護検査に関する調査(電気関係)」(以下「NRA 技術ノート(米国検査編)」という。)を公表した。NRA 技術ノート(米国検査編)の概要及び米国の審査及び検査の調査結果のまとめを以下に示す。

2. 3. 1 NRA 技術ノート(米国検査編)の概要

(1) 米国の火災防護検査の概要

NRC の火災防護検査の文書は、火災防護に係る巡回検査、事業者の自衛消防隊の訓練に係る検査、検査官活動内容等の検査手順が記載された文書¹²(以下「火災防護検査手順書」という。)と、その下位文書として、計画及び実施の詳細手順が記載された附属書で構成される。これらは、2011～2020 年の間、決定論に基づく規制を行うプラント向けの 3 年ごとの検査のための附属書¹³(以下「3 年ごと検査附属書(決定論)」という。)、確率論に基づく規制を行うプラント向けの 3 年ごとの検査のための附属書¹⁴(以下「3 年ごと検査附属書(確率論)」という。)、ウォークダウン、検査及び事業者の自衛消防隊の訓練に対する立会い等を四半期／1 年ごとに確認する附属書¹⁵(以下「四半期／1 年ごと検査附属書」という。)の 3 種類に整理されている。

具体の検査項目は、表 1 のとおり整理されている。

¹² Inspection Procedure 71111.05 “Fire Protection” ただし、2011 年 4 月までは、確率論についても記載されていた

¹³ Inspection Procedure 71111.05T “Fire Protection (Triennial)”

¹⁴ Inspection Procedure 71111.05XT “NFPA 805 (Triennial)”

¹⁵ Inspection Procedure 71111.05AQ “Fire Protection Annual/Quarterly”

表 1 米国における検査項目

| | |
|-------------------|-------------------------------|
| a 安全停止機能の防護 | b 火災区域/区画の耐火性 |
| c 感知・消火性 | d 消火活動、消火設備作動による安全停止機能への影響評価 |
| e 火災時の代替停止能力 | f 回路解析 |
| g 通信の健全性 | h 非常用照明の健全性 |
| i 低温停止機器の修理機能 | j 劣化した火災防護設備や安全停止に必要な深層防護の健全性 |
| k 火災防護計画の変更に対する評価 | |

なお、2020 年からは、火災防護を含む検査活動全般の削減、効率化、優先順位の見直し等を目的に、従来の火災防護検査手順書に四半期／1 年ごと検査附属書を統合し、3 年ごと検査附属書（決定論）と 3 年ごと検査附属書（確率論）を統合して新しい手順書¹⁶（以下「火災防護チーム検査手順書」という。）とした（表 2 参照）。

表 2 火災防護に係る検査実施手順書の変遷及び日米比較

| 米国 | | 日本 | |
|---------------------|----------------|--------------|-------------------------|
| ～2011年4月 | ～2020年1月 | ～現在 | 2020年4月～現在 |
| 火災防護検査手順書 | | 火災防護検査手順書 | — |
| 四半期/1年ごと検査附属書 | | | BE 0020（四半期/1年ごと火災防護検査） |
| 3年ごと検査附属書（決定論・確率論*） | 3年ごと検査附属書（決定論） | 火災防護チーム検査手順書 | BE 0021（3年ごと火災防護検査） |
| | 3年ごと検査附属書（確率論） | | — |

*確率論へ移行期間中のもの

原子力規制委員会の火災防護に係る基本検査運用ガイドと NRC の火災防護検査手順書との関係は次のとおりである。

- ・ 「BE0020 火災防護」（四半期検査と年次検査）：四半期／1 年ごと検査附属書を参考に作成されている。
- ・ 「BE0021 火災防護（3年）」（3 年ごと火災防護検査）：3 年ごと検査附属書（決定論）を参考に作成されている。

（2）火災防護検査における「回路解析」の位置づけ

火災防護チーム検査手順書は、3 年ごと検査附属書（決定論）の内容を包含し

¹⁶ Inspection Procedure 71111.21N.05 “Fire Protection Team Inspection (FPTI)”

ているものの簡素化されているため、決定論に基づく規制を行うプラントについて、詳細な記載のある3年ごと検査附属書（決定論）を使用して回路解析の位置づけを確認した。

3年ごと検査附属書（決定論）において、回路解析は、検査要件の一部¹⁷として位置づけられ、「潜在的な発火源」となる電気機器及び「安全停止状態の達成・維持」の確認に必要な制御系などの電気関係の健全性や電気ケーブルの敷設状態を考慮すること等の要点が記載されている。

（3） 3年ごと検査附属書（決定論）で求める「回路解析」の概要

3年ごと検査附属書（決定論）では、「02.02 f. 項 回路解析」の要点として次の3点が記載されている。

- ①「原子炉の安全停止に影響を及ぼす可能性のある回路」のブレーカー及びヒューズ（以下「SSD用ブレーカー及びヒューズ」という。）の配置及び設定（容量等）が適正であり、冗長化又は代替の安全停止系あるいは機器の電源を保護できることを確認すること¹⁸。
- ②断線、短絡、地絡及びホットショート¹⁹により原子炉の安全停止に影響を及ぼす可能性がある回路においては、10CFR50 附則 R, III. G. 2 項²⁰の防護が施されていることを確認すること。
- ③原子炉の安全停止に重要ではあるが成功パスは構成しておらず、10CFR50 附則 R, III. G. 2 項が適用されないケーブルに対しては、ケーブルの故障モードの影響を解析し、安全停止能力に影響を及ぼさないことを以下により確認すること²¹。
 - ✓ ケーブル損傷モードを確認する
 - ✓ 次のいずれかであることを確認する
 - (1) 想定される範囲で当該ケーブルにより炉心損傷に至る火災シナリオが存在しない
 - (2) (想定される火災シナリオがある場合、) 原子炉の安全停止機能を確保するために実行可能かつ信頼性の高い手動操作を用意している
 - (3) (想定される火災シナリオがある場合、) 回路故障解析を実行し、原子炉の安全停止機能に潜在的な影響が存在しない

（4） まとめ

火災防護規制に関連する NRC の検査制度についての文献調査を行い、NRA 技術

¹⁷ Fire Protection Inspection Requirements（火災防護検査の要件） f 項

¹⁸ 「ブレーカー及びヒューズの配置及び設定（容量等）がプラント設計図書の記載と相違ないことを確認すること。」という意味。

¹⁹ 同じ又は異なるケーブルの導線同士が互いに接触し、他方の回路に印加電圧又は印可電流を生じさせる状態。

²⁰ 日本の「実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準」における、火災の影響軽減として実施する系統分離対策（2.3.1（2））で示された対策と同等な内容。

²¹ ここでは、事業者が実施した回路解析の評価結果や信頼できる手動操作、「火災モデリング」を用いたシナリオ分析等が主な確認内容である。

ノート(米国検査編)にまとめ、決定論に基づく規制を行うプラントについては、回路解析の検査として、「電氣的な隔離に関する検査(SSD用ブレーカー及びヒューズの検査)」「系統分離検査」「系統分離対策が適用されないケーブルの回路レベルでの回路解析」を行っていることを確認した。なお、確率論に基づく規制を行うプラントについては、回路解析の検査として、原子炉の安全停止が確実になされるよう「回路レベルでの回路解析」を行っていることを確認した。

2. 3. 2 米国の審査及び検査に関する調査結果のまとめ

(1) 火災防護に関する決定論を使用するプラントについての回路解析の全体像

米国の審査及び検査に関する調査結果を基に、火災防護に関する決定論を使用するプラントについての回路解析全体像を表3のとおり整理した。

これまでの調査結果から、本件に係る具体的な課題として、米国で提示されたものは、次のA、Bの2点である。

A: 回路の隔離不足が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性

B: 決定論的防火防護プログラムと直流電流計回路を含む解析に関して、未解析の状態が存在する可能性

表3 米国の決定論プラントにおける回路解析(Circuit Analyses)に係る規制要件/技術指針と検査事項の関係(概要)

| | 規制要件/技術指針 | 検査事項 |
|--------------|--|---|
| 電氣的隔離 | ○懸念される回路の遮断装置(SSD用ブレーカー又はヒューズ)に関連する回路故障により、電源の喪失を引き起こす前に、当該故障電流を遮断すること。(10CFR50 附則 A GDC23 (Protection system failure modes)、RG1.189 (5.4 Alternative and Dedicated Shutdown Capability)) | ○SSD用ブレーカー及びヒューズの配置及び設定(容量等)が適正であり、冗長化又は代替の安全停止系あるいは機器の電源を保護できることを確認すること。 |
| 物理的隔離 | ○ホットショート、開回路もしくは地絡によって、高温停止状態に到達・維持するのに必要な多重系列システムの動作を妨げたり、誤動作させる可能性のある複数のケーブル/機器(関連非安全系回路含む)が、格納容器外の同一火災区画にある場合は、少なくとも1系列が火災損傷を受けないように、3時間耐火壁による隔離、水平距離20ft+感知+自動消火、1時間耐火壁による隔離+感知+自動消火の手段を最低一つ備えること。(10CFR50 附則 R (III.G.2)) | ○断線、短絡、地絡及びホットショートにより原子炉の安全停止に影響を及ぼす可能性がある回路においては、10CFR50 附則 R, III.G.2 項の防護が施されていることを確認すること。 |
| 物理的隔離ができない場合 | ○72時間にわたって安全に温態停止状態にとどまることができない原子炉設計については、冷温停止状態を実現して、必要な期間その状態を保つことが | ○原子炉の安全停止に重要ではあるが成功パスは構成しておらず、10CFR50 附則 R, III.G.2 項が適用されないケーブルに対しては、ケーブルの故障モードの影 |

| | | |
|----------------------|--|--|
| 物理的隔離ができない場合 (続き) | <p>できることを解析により実証すること。(10CFR50 附則 R (III.G.3)、RG1.189 (5.3 5. Safe-Shutdown Capability))</p> <p>○ 火災をモデル化して、サクセス・パスの一部ではない安全停止にとって重要な機器が防護されていることを実証してもよい。火災をモデル化する場合には、認可取得者の火災防護プログラム及び認可条件に基づいて行うこと。(適用除外申請で認められたもの、RG1.189 (5.3.1.4 Fire Modeling))</p> | <p>響を解析し、安全停止能力に影響を及ぼさないことを確認すること。</p> |
|----------------------|--|--|

※ 「電氣的隔離」及び「物理的隔離」、又は「電氣的隔離」及び「物理的隔離ができない場合」を満たす必要がある。

(2) 回路の隔離不足が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性 (課題A)

「回路の隔離」とは、検査における回路解析において、表3右側欄のとおり、電氣的な隔離と物理的な隔離の両面を指している。理論上、回路の故障が発生した際に、どちらかの隔離が不十分であった場合、2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性がある、指摘されたものである。

このうち、電氣的な隔離については、回路上のSSD用ブレーカー及びヒューズが正常に作動すれば、故障電流の遮断によって2次火災及び設備の損傷を防ぐことができるため、米国においては、SSD用ブレーカー及びヒューズの検査を行い、適切なブレーカー及びヒューズが装着されていることを、審査/検査の双方で確認している。

(3) 決定論的火災防護プログラムと「直流電流計回路を含む解析に関して、未解析の状態が存在する可能性」(課題B)

米国の決定論的火災防護プログラムでは、規制要求どおりの適切な系統分離対策ができない「安全停止に重要な機器の安全停止機能」の部分について、代替/専用停止設備の設置や特定区画の適用除外等により、回路故障解析を含む火災モデルによる評価による証明が認められている(表3の「物理的隔離ができない場合」)。火災モデルによる評価とは、必要な構築物、系統及び機器が、火災による回路故障から防護されることにより、安全停止が達成・維持されることを定量的又は定性的に裏付けるために行うものである。

米国では、火災モデルによる評価の一部として実施する回路故障解析には、SSD用ブレーカー及びヒューズがない(又は正常に作動しない)場合について考慮されていない。しかし、実際には、検査の際に直流電流計回路にヒューズの不備が見つかったことから、ヒューズの不備を前提とした解析が実施されていないことを「未解析の状態」とであると指摘し、「直流電流計回路を含む解析要件に関して、未解析の状態が存在する可能性」が課題として提示されたものである。

日本の規制要求では物理的に系統分離対策を求め、このような回路故障解析を使用した評価による証明を想定していないため、課題として考慮する必要はないといえる。

(4) まとめと評価

調査から、「回路の隔離不足が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性(課題A)」については、電気故障時の過電流事象により発生のある火災及び損傷に対する防護対策としてのSSD用ブレーカー及びヒューズの検査が重要であることが分かった。

我が国の実用発電用原子炉及びその附属施設の火災防護に係る審査基準では、「電気系統は、(中略)保護継電器と遮断器の組合せ等により故障回路の早期遮断を行い、過熱、焼損の防止する設計であること」を求めており、電氣的な隔離に関する検査(SSD用ブレーカー及びヒューズの検査)を行うことが可能である。

決定論的火災防護プログラムと「直流電流計回路を含む解析において、未解析の状態が存在する可能性」(課題B)については、日本の規制要求からすれば、課題として考慮する必要はないといえる。

2. 4 火災防護関連の検査について、NRCへ検査官等を派遣し情報収集

2022年11月25日から12月17日までの期間、検査グループの検査官をNRCへ派遣し、火災防護関連の検査手法として、サンプルの選定、検査方針の決定、各種火災解析(火災ハザード解析・火災PRA・火災時安全停止解析)の前提/モデルとの整合等火災シナリオに基づく検査について調査した。また、このような火災シナリオに基づく検査が、系統分離対策を含めた火災防護対策に不備があった場合、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対して、どのような影響を与えるかといった観点からの指摘を行う上で一つの有用な手法であることを確認した。(詳細は、資料59-3-1を参照。)

3. 調査を踏まえた電氣的な隔離に関する検査の実施可能性調査

「回路の隔離不足が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性(課題A)」について、電氣的な隔離に関する検査としてのSSD用ブレーカー及びヒューズの検査の実施可能性と有効性を評価するために、プラントにおいて試検査を実施した。概要は以下のとおりである。

(1) 実施プラントと実施日

川内原子力発電所：令和5年8月28日～9月1日、9月19日～22日

伊方発電所：令和5年10月23日～26日

(2) 実施方法

3年ごと検査附属書(決定論)「02.02 f. 項 回路解析」に記載された、「SSD用ブレーカー及びヒューズの配置及び設定(容量等)が適正であり、冗長化又は代

替の安全停止系あるいは機器の電源を保護できることを確認すること。ブレーカー及びヒューズの配置及び設定がプラント設計図書の記載と相違ないこと」に基づき、具体的には、次のような試検査を実施した。

- ・ 回路図面において、SSD 用ブレーカー及びヒューズが有効に作動すること。
また、SSD 用ブレーカー及びヒューズの保全計画（点検計画・周期）、点検方法等の確認
- ・ 現場において、回路図面どおりに、SSD 用ブレーカー、ヒューズが設置されていることの確認



回路図面に関する確認の様子



現場確認の様子

(3) 実施結果

(a) 回路図面に関する確認結果

両プラントとも、回路図面において、SSD 用ブレーカー及びヒューズの設置に問題がないことが確認できた。

SSD 用ブレーカー及びヒューズの保全計画（点検計画・周期）は、ブレーカーについては交換計画を定め、点検については、電気盤全体で行う計画になっていることを確認した。ヒューズについては、交換計画はないものの、点検については、ブレーカー同様、電気盤全体で行う計画となっていた。点検方法は、共に、外観点検等により機械的機構の健全性を確認することになっていた。

また、ブレーカー、ヒューズ共に、交換実績があることを記録により確認した。

(b) 現場確認の結果

両プラントとも、回路図面に基づき、必要な SSD 用ブレーカー及びヒューズが設置されていることを確認できた。

(4) まとめと評価

今回、3年ごと検査附属書（決定論）「02.02 f. 項 回路解析」に基づく、電氣的な隔離に関する検査としての SSD 用ブレーカー及びヒューズの試検査を実施し、原子力規制検査として実施可能であることを確認した。

これらのブレーカー及びヒューズは、適切に保全されていることを確認できれば、設置される電気盤が更新されない限り、3年ごとの火災防護検査で必ずしも行う必要はないものと考えられる。一方で、これらのブレーカー及びヒューズの検査は、ブレーカー及びヒューズが設置された電気盤そのものを更新した際、又は、系統分離対策の不備を指摘する際に、関連機器の電氣的な健全性を確認する際には有効であると考えられる。

今後、3年ごとの火災防護検査の中で SSD 用ブレーカー及びヒューズの検査も取り扱うこととし、設備更新等の状況に応じて実施する。

4. まとめと今後の対応

日本においては、原子炉の高温停止及び低温停止に係る安全機能を有する構築物、系統及び機器は、系統分離することが規制要件となっており、決定論的に系統分離することを求めている。米国では、確率論的手法を用いた火災防護が許容されており、これに関連して、第12回技術情報検討会において「回路故障が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性(Y2015-12-01)」が要対応技術情報となった。

これまで、長期間にわたり、付随する課題を含め、米国の火災防護に関する審査・検査の調査を実施してきた。その結果は以下のとおり。

- ・ 米国火災防護規制の最近の動向の調査の結果、過去の報告以降に新たに規制

要求の変更はなかった。

- ・ 国内事業者と情報共有、事業者の対応状況について意見聴取の結果、火災時安全停止回路解析に係る取組として、事業者は「直流電流計回路へのヒューズ等の設置」を実施中であり、2024年度までに対策を完了する予定である。また、ATENA 及び NRRC は中長期的取組として火災 PRA、回路解析手法検討を行うとしている。
- ・ 関連する NRC の審査及び検査制度についての文献調査の結果、電気故障時の過電流事象により発生のある可能性がある火災及び損傷に対する防護対策としての SSD 用ブレーカー及びヒューズの検査が重要であることが分かった。
- ・ 電氣的な隔離に関する検査としての SSD 用ブレーカー及びヒューズの試検査を実施し、3年ごとの原子力規制検査として実施可能であることを確認した。

以上により、本報告をもって「回路故障が2次火災又は設備の損傷を誘発させる可能性(Y2015-12-01)」については、現状で十分に対応が可能であり、さらに高度なレベルで火災による回路故障の影響を確認することは不要であるとして、スクリーニングアウトすることとしたい。また、今後も、米国等海外における、火災影響評価の高度化に関する重要性を示す情報を収集し、必要があれば、関連の検討を行う。

なお、原子力エネルギー協議会(ATENA)は、中長期対応として火災 PRA における回路解析を検討するとしており、「回路故障モード尤度解析」を2023年度までに試行予定としていることから、今後、聴取し、技術情報検討会に報告する。

参考1 火災時安全停止回路解析に係る検討状況について(令和4年11月18日面談資料)

参考2 火災時安全停止回路解析に係る検討のうち LER 情報分析結果(令和5年7月6日面談資料)

火災時安全停止回路解析に係る 検討状況について

2022年 11月
原子力エネルギー協議会
電力中央研究所 原子力リスク研究センター (NRRC)

1. はじめに

1

- 2022年3月10日の第52回技術情報検討会において、原子力規制庁より「火災時安全停止回路解析に関わる米国事業者事象報告書 (LER) の調査への対応方針 (案)」が報告され、令和4年度の上期末を目途に、事業者との意見交換を実施したい旨が示された。
- また、5月11日に日本版インフォメーションノート (NIN) 「原子力発電所の火災時安全停止能力に関わる米国運転経験調査から得られた潜在的懸案事項」が通知された。

- 5月11日に日本版IN(第51回技術情報検討会で紹介された、米国の火災時安全停止回路解析に関連する**32件のLER情報**)が発出。
- 新規制基準に適合しているプラントは、**火災時に安全停止に必要な機器に対して系統分離対策を実施**しているため、火災時の安全停止機能は確保されていると考えている。
- 但し、事業者としては自主的安全性向上の取り組みとして今後**短期対応 (LER情報分析による現状把握) を行うとともに、中長期的対応 (火災PRA、回路解析手法検討)**について検討を実施していく方針。

【短期対応：LER情報分析】

- INで示された32件のLERに関する情報を収集するとともに、自主的安全性向上の観点で対応が必要なものがないか内容を精査し、必要に応じて対応を検討する。(今年度中目途)

【中長期対応：火災PRAにおける回路解析対応】

- 火災PRAは、PRA手法の1つとして回路解析を実施することとしており、2020年6月に原子リスク研究センター(NRRC)にて国内原子力発電プラントを対象とした火災PRAガイドを策定。
- 2022年度は、モデルプラントによる火災PRAガイドの実機評価適用研究の2年目であり、2021年度に収集したケーブル情報に基づき、火災PRAにおけるタスク16「回路故障モード尤度解析」を2023年度までに試行予定。

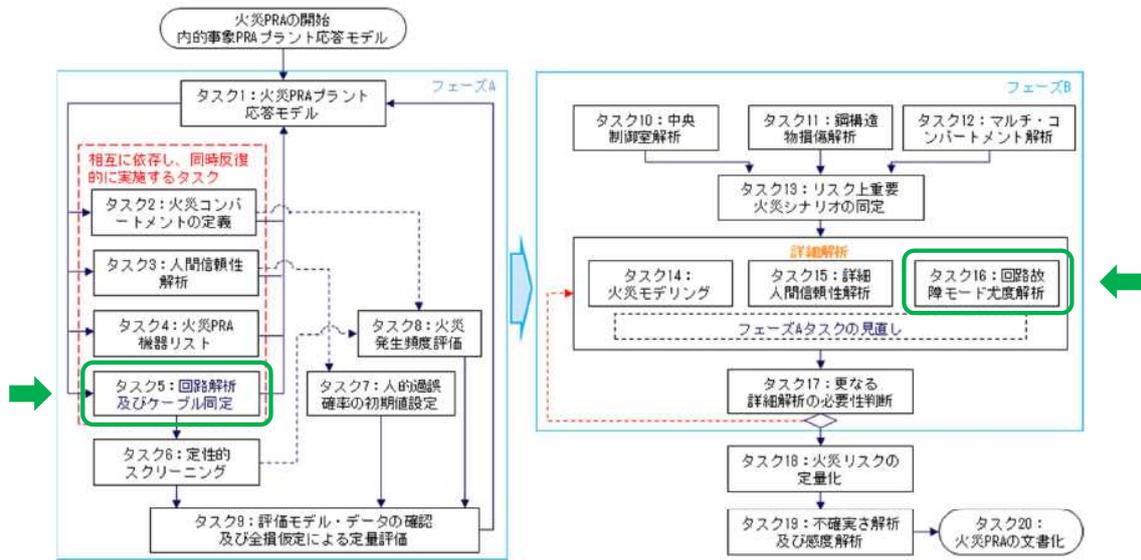


図 火災PRA 全体フローチャート

表 火災PRAを構成する各タスクの概要 (回路解析関連抜粋)

| タスクタイトル | | 概要 |
|---------|--------------|--|
| 5 | 回路解析及びケーブル同定 | <ul style="list-style-type: none"> 火災PRA機器リストに登録された機器に係る基事象の機能喪失を発生させる回路要素 (ケーブル、電源、インターロック) を同定 上記で同定されたケーブルの配置を同定 回路要素間の依存性を同定 機器、故障モード、ケーブル、電線路、火災コンパートメントの関連付け |
| 16 | 回路故障モード尤度解析 | <ul style="list-style-type: none"> リスク上重要なシナリオのケーブル損傷による誤動作確率を回路の設計情報に基づき定量化 |

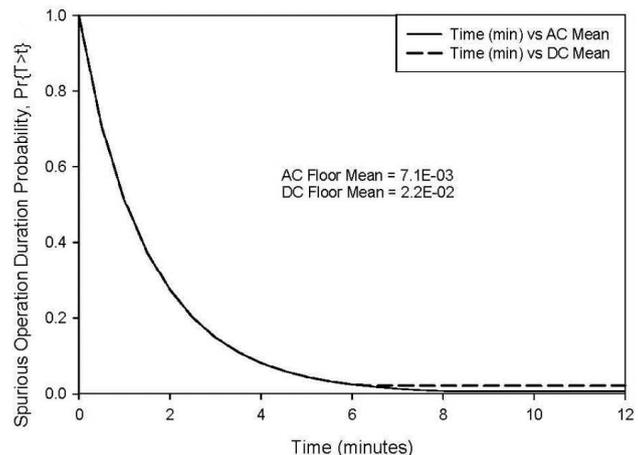
(参考) 国内原子力火災PRAガイドにおける回路解析概要(1/2)

◆ タスク5 : 回路解析及びケーブル同定

- 火災PRA機器の適切な動作に必要な回路及びケーブルを同定
- ケーブル損傷モードとその影響を評価し、火災PRA機器の適切な動作を阻害 (含、機器の誤動作) するケーブルを同定

◆ タスク16 : 回路故障モード尤度解析

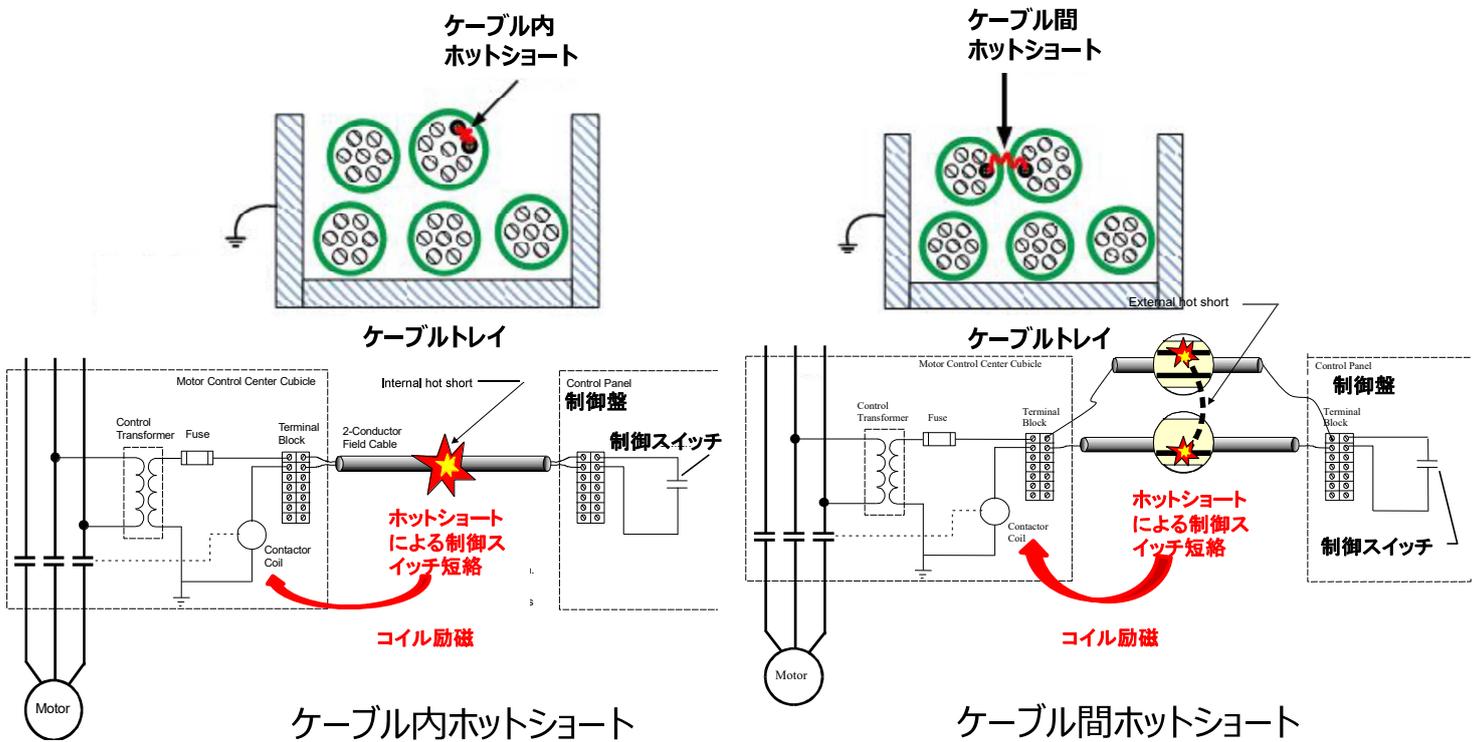
- 火災によるホットショート故障モード確率の推定
 - ✓ 誤動作に至るホットショートが懸念される回路と故障モード (次頁参照) を同定し、NUREG/CR-7150に記載のデータによる確率算定
- 誤動作継続解析 (右図)
 - ✓ ホットショート解消可能回路についてホットショート状態の継続時間確率推定
- 誤動作確率推定
 - ✓ ホットショート故障モード確率と継続時間確率による誤動作確率推定



◆ ホットショート

- ケーブル内又はケーブル間の特定の導体が接触する状態。少なくとも短絡している導体の一つが通電状態にあり、解析対象回路への電圧又は電流の印加に至る。

【ホットショート故障モードの例】



(参考) 火災PRA 研究ロードマップ (NRRC HPより抜粋)

| 項目 | ギャップ/解決策 | ~2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025~ | |
|---------------|---|---|----------------------|---------------------------------|---------------------------|--|------------------------------------|--|
| 内部火災PRA技術の構築 | <ul style="list-style-type: none"> 内部火災PRA実施ガイドや国内火災発生頻度データの実機評価適用性が未確認 地震誘因火災PRAの知見が不足 | <ul style="list-style-type: none"> ▼実施ガイド^① 公開^② 内部火災PRA手法の整備 | | | | | 実施ガイド改訂 ^② △ | |
| | | <ul style="list-style-type: none"> 内部火災パイロットPRAの調査・計画 国内プラント火災発生頻度評価 | | 実施ガイド改訂に向けた知見拡充・実施ガイド改訂 | 知見反映 | 知見反映 | | |
| 内部火災PRAプロジェクト | <ul style="list-style-type: none"> 内部火災PRAガイドの実機評価適用性の確認・向上が必要 モデルプラントを対象とした試評価と実施ガイドへのフィードバック | | ▼火災発生頻度 ^② | モデルプラントを対象とした内部火災PRAの試行 | 地震誘因火災PRA手法の調査 | | PRA手法開発 | |
| 火災進展評価技術の高度化 | <ul style="list-style-type: none"> NRAによるHEAF(電気盤や母線用バスダクトにおける高エネルギーアーク故障)規制化動向を踏まえたバックフィットへの先手管理 実火災を想定した煤煙と熱の伝播によるターゲット損傷条件が不明確 実規模電気盤やバスダクトを用いたHEAF火災試験による知見の蓄積 火災進展解析に必要な火災モデルの整備 国際共同研究や海外機関との連携による最新知見の導入・活用 | | | 火災進展解析手法の適用 | リスクロワイヤル分析 ^② △ | | 各社パイロットプラントを対象とした内部火災PRAへ展開 | |
| | | | | 火災進展モデルの整備 | 知見反映 | ゾーンモデル改良版・フィールドモデル ^{**} 整備 ^② △ | | |
| | | | | OECD国際共同研究(複数区画火災: PRISME3)への参画 | | 海外機関(EDF, INL)との連携 | | |
| | | 電源盤・バスダクトHEAF火災試験 | | 電源盤・バスダクトHEAFZOI評価試験 | 知見反映 | HEAFのZOI評価手法提案 ^① △ | | |
| | | HEAF火災発生防止評価手法提案 ^① ▼ | | | | | OECD国際共同研究(電源盤・バスダクト火災: HEAF2)への参画 | |

* 上下二層の空気層(ゾーン)の形成を前提とした計算負荷の小さい実用モデル
 ** 精緻な空気温度の空間分布が評価可能な数値流体力学モデルで計算負荷が高い

火災時安全停止回路解析に係る検討のうち LER情報分析結果について

2023年7月6日
原子力エネルギー協議会
電力中央研究所 原子力リスク研究センター (NRRC)

1. はじめに

1

- 2022年5月11日に日本版IN(第51回技術情報検討会で紹介された、米国の火災時安全停止回路解析に関連する**32件のLER情報**)が発出。
- 新規制基準に適合しているプラントは、**火災時に安全停止に必要な機器に対して系統分離対策を実施**しているため、火災時の安全停止機能は確保されていると考えているが、事業者としては自主的安全性向上の取り組みとして今後**短期対応 (LER情報分析による現状把握) を行うとともに、中長期的対応 (火災PRA、回路解析手法検討)** について検討を実施していく方針。
- 今回、短期対応としてのLER情報分析結果について報告する。

➤ 32件のLER情報の分析に際し、フローを作成。

➤ フローは以下の観点で場合分けを実施

① **HE（ヒューマンエラー）や設計管理不備等によるものか**

- ✓ 分離要求の対応不足、NFPA805へ移行する際のケーブルルート調査・評価時の見落としやケーブル敷設時の誤配線等、ヒューマンエラーや設計管理不備等によるものはスクリーングアウト可能と判断
- ✓ 但し、同様の事象が起こることのないよう**各事業者に周知、内容を確認**

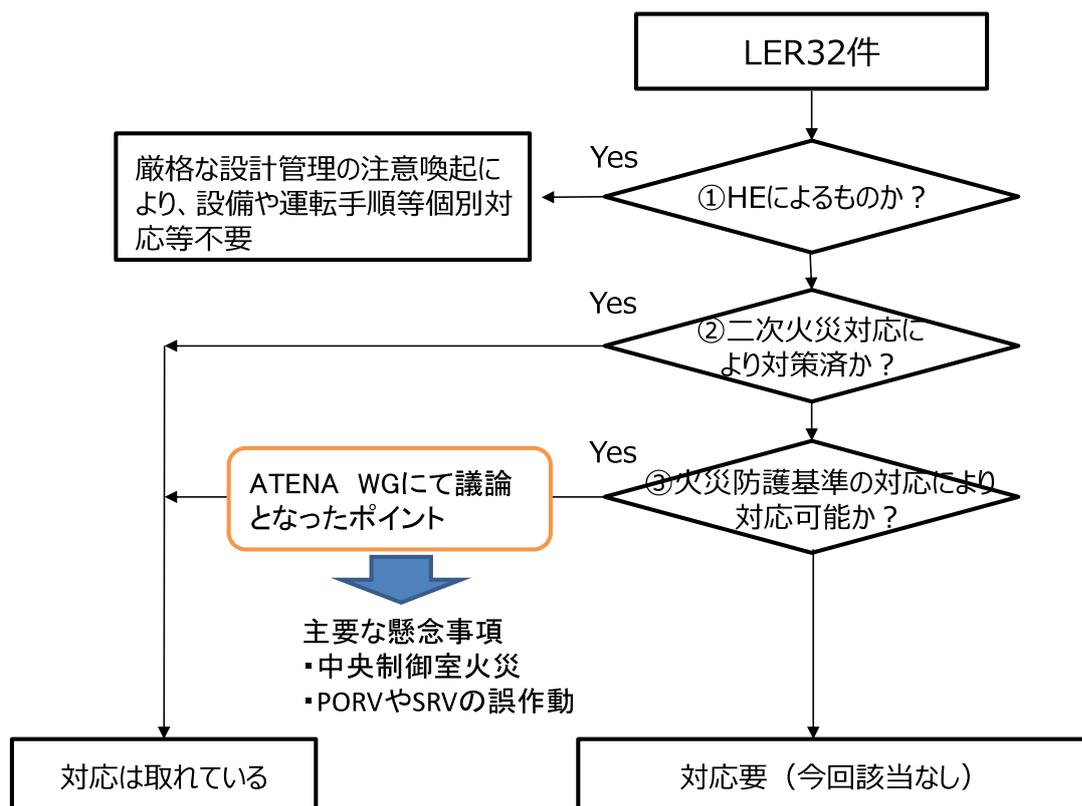
② **米国IN（2014-10）二次火災対応にて対応済みか**

- ✓ 米国IN2014-10の発出に伴い、事業者は自主的に直流電流計回路へのヒューズ設置等を実施し対応していることにより、スクリーングアウト可能と判断
- ✓ 事業者の自主的対応の内容は、4ページ参照

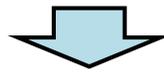
③ **火災防護審査基準の系統分離対策にて対応可能か**

- ✓ 新規制基準である火災防護審査基準の要求に基づき系統分離対策が実施されており、安全停止機能が確保される場合はスクリーングアウト可能と判断

➤ 上記①～③のいずれも該当しない場合は、短期的な対応が必要な情報として運用、設備面での改善を検討する。



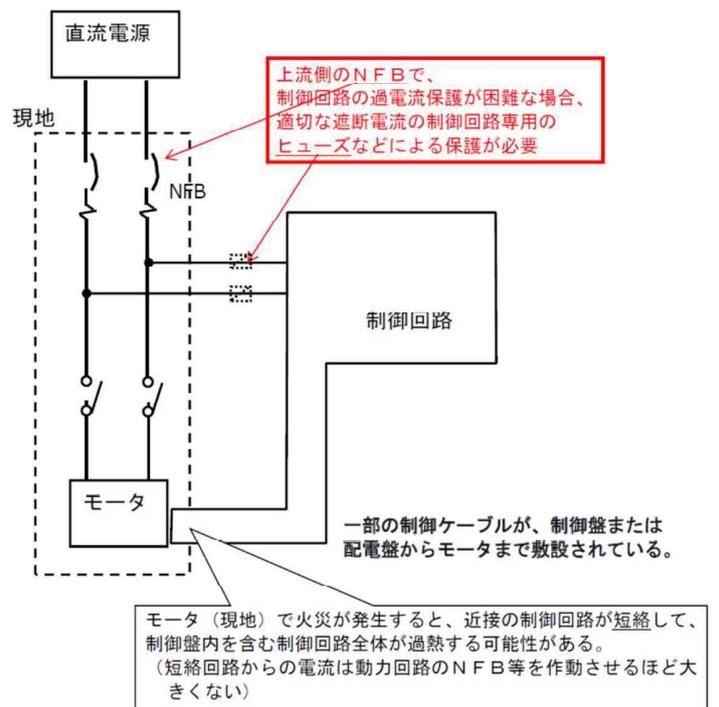
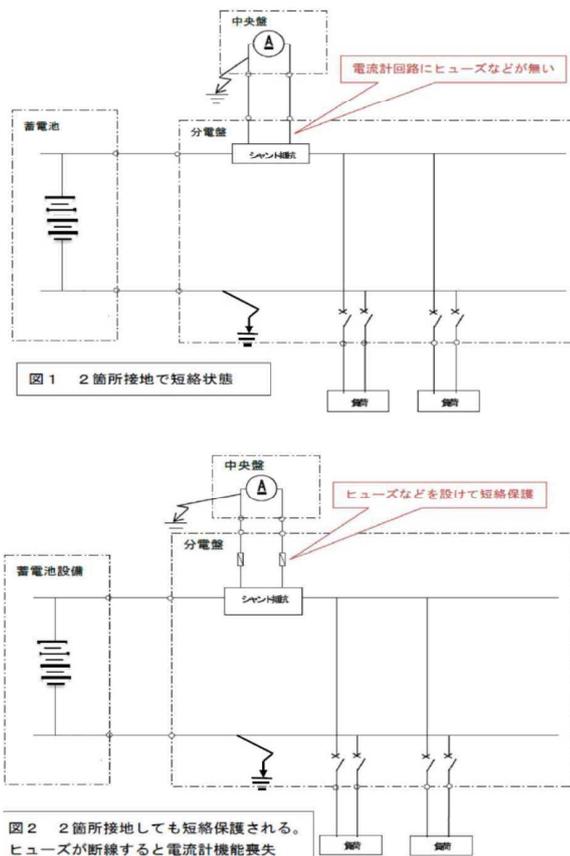
- 米国NRCは、回路の故障が2次火災事象又は設備の損傷を誘発させる可能性に関連した最近の運転経験を知らせるために、情報通知 (IN2014-10) を発行。
 - ✓ **直流電流計回路の設計における電氣的分離の不十分** (Browns Ferry, Clinton) 、又は**直流動力及び制御回路の回路分離の不十分** (Nine Mile Point) により、現地で発生した火災によって**中央制御室の制御盤等で2次的火災が発生する可能性**あり。(詳細は次ページ参照)
 - ✓ 火災発生時のプラント安全停止能力に影響を与える可能性について注意喚起するため、2014年9月16日付でIN2014-10を発行。
- NRAは、第12回技術情報検討会 (2015年1月19日) にて米国IN2014-10を紹介、**国内の火災時における安全停止は基本的には系統分離の徹底によって担保される**と考えられるものの、本件は要対応技術情報とし、引き続き調査することとした。
- その後、2015年5月19日に、JANSIより重要度文書「(重要度Ⅱ) 火災時の直流電流計回路損傷による2次的火災または機器損傷への対応」が発出され、**直流電流計回路へのヒューズ設置等が提言された。**



各事業者にて、水平展開対象の検討及びヒューズの追加設置等、対応計画済。

- 米国IN (IN2014-10) における回路設計の不備は以下の通り。

(JANSI重要度文書より抜粋)



直流電動機制御回路を主回路と共用している例

➤ 32件のLERについて、分析フローによる整理結果概要は下表のとおり。(詳細は参考資料を参照のこと)

| 分類 | 事例 | 評価 | 備考 |
|------------------------|---|-----------------------------|---|
| ①HEによるもの(3件) | 多重誤作動改造のためにケーブルを追加したが、当初のルートでない場所に追加した。 | 設計管理の注意喚起を図る | |
| ②二次火災対応により対策済(6件) | 直流電流計回路にヒューズが無いことからヒューズを追加する設計対応を行った。 | IN2014-10に関連したJANSI提言により対応済 | |
| ③火災防護基準の対応により対応可能(23件) | RHR停止時冷却隔離弁が誤開放し、IS-LOCAとなる可能性。(6件) | 健全側の安全系1区分により安全停止可能 | 誤作動に対する検討がATENA WGにて議論となった →中長期的に検討要 |
| | 中央制御室火災によるホットショートでMOVの誤作動が発生する(11件) | | |
| | 加圧器逃し弁のホットショートによる誤作動他(6件) | | |

➤ 現時点で短期的な対応が必要と考えられる情報は得られなかったが、火災に伴う機器の誤作動について、今後どのように対応すべきかがATENA WG※にて議論となった。

※ATENA、事業者、メーカ、NRRC等が参画するWG

➤ この確認の過程において安全停止上の懸念では無いものの、以下の事象についてどのように対応すべきかATENA WGにて議論となった。

✓ 中央制御室火災による多重誤作動 (Multiple Spurious Operation。以下「MSO」という。) 事象や加圧器逃し弁 (PWR) や主蒸気逃し安全弁 (BWR)の誤作動による冷却材喪失

<事例>

| 通番 | LER No. プラント名 | 件名 | 懸案 | フロー分類 | 検討結果 |
|----|---------------------------|-----------------------------|---|-------|--|
| 10 | 293/2015-010-00: Pilgrim | 電動弁制御回路の脆弱性 | IN92-18で指摘されたMOVの問題(トルク・リミットスイッチがないと、ホットショートによりMOVが損傷、手動操作も不能となり得る)の代償措置である火災監視が未確立であることが2015年の火災防護検査の準備中に判明した。 | ③-Yes | 中央制御室火災のホットショートによりMOVが誤作動して損傷する事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 |
| 11 | 305/2012-001-00: Kewaunee | 加圧器逃し弁と原子炉ベント弁に対する附則R誤動作の懸念 | 加圧器逃し弁のソレノイド用の制御室から格納容器に至る制御ケーブルが、専用の電線管で引き回されておらず、ホットショートの状態次第では、弁が誤開放し得る。原子炉ヘッドベント弁でも同様の問題が見つかった。I/F LOCAとなり得る。 | ③-Yes | ホットショートにより加圧器逃し弁が誤開放し、I/FLOCAとなる事象【過渡事象の起因となる事象】 【PORVが誤開放】 (【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】) |

<これらの事例のATENA WGにおける受け止め、理解、議論について>

中央制御室での火災は早期検知、消火を行い、系統分離された緩和系により安全停止機能は確保されるものの、米国では制御室での火災の懸念が示されている。また、火災による加圧器逃し弁の誤動作などの冷却材喪失事象に繋がる事象については、系統分離された緩和系により安全停止機能は確保されるものの、米国ではそれら起因事象に係る懸念が示されている。

国内においても中央制御室における火災リスクや冷却材喪失事故などの起因事象に係るリスクについて着目して評価していく必要があるのでは無いか20

- LER32件について確認検討した結果、過去の取り組み（米国 IN2014-10発出に伴う事業者の自主的対応）並びに現状の火災防護基準の対応により安全停止機能は確保されていることを確認した。
- この確認の過程において安全停止上の懸念では無いものの、以下の事象についてどのように対応すべきかATENA WGにて議論となった。
 - ✓ 中央制御室火災によるMSO事象
 - ✓ 加圧器逃がし弁（PWR）や主蒸気逃し安全弁（BWR）の誤作動による冷却材喪失など過渡事象の起因となる事象
- これらは火災発生時においても現状の火災防護基準により安全系1区分が確保されることから原子炉施設の安全停止機能は確保されており安全停止に係る懸念事項ではないが、本件の対応については潜在的なリスクと捉えて引き続き今後の中長期対応の中で検討する。

参 考

➤ 32件のLERについて、分析フローによる整理結果は下表のとおり。

| フローNo. | 件数 | LER 通番 |
|-------------------|-------------|--|
| ①HEによるもの | 3 | 7,12,19 |
| ②二次火災対応により対策済 | 6 | 1,2,3,22,26,32 |
| ③火災防護基準の対応により対応可能 | 23 (17)※ | 4,5,6,13,15,20 (8,9,10,11,14,16,17,18,21,23,24, 25,27,28,29,30,31) |
| 合計 | 32 | |

※ATENA WGにおける検討時議論となった項目数

➤ 32件のLERについて、分析フローによる整理結果は下表のとおり。

| 通番 | LER No. プラント名 | 件名 | 懸案 | フロー分類 | 検討結果 |
|----|----------------------------------|---------------------------------------|--|-------|---|
| 1 | 220/2014-002-00: Nine Mile Point | ヒューズのないMOV制御回路 | MOV のヒューズ（保護）のない DC 回路のホットショートにより、ケーブルの過電流・自己加熱により2次火災が発生し得る。 | ②-Yes | 制御回路のホットショートにより二次火災が発生する事象。国内では直流設備の制御回路へのヒューズ未設置はIN2014-10への水平展開として対応済み。ただし、国内BWRでは、直流設備の制御回路に万一異常があっても当該機器の運転継続を優先するとのプラント設計思想であることからヒューズを設置していない場合がある。 (以下ニューシア情報) http://www.nucua.jp/nucua/kg/KgTroubleView.do?troubleId=263 |
| 2 | 244/2014-002-00: Ginna | 複数の火災区画に影響するDC制御回路が絡むホットショート火災事象 | 非安全系の DC 制御回路に過電流保護がないと、ホットショートでケーブルが過熱し、2次火災が発生し得る。 | ②-Yes | 制御回路のホットショートにより二次火災が発生する事象。 【No.1と同様、水平展開対応済】 |
| 3 | 259/2011-010-00: Browns Ferry 1 | 適切に隔離されなかったDC電流計ケーブル | 火災により制御室退避した際に使う現場のバッテリー盤の安全系電流計回路が、制御室の遠隔電流計回路と適切に隔離されていない。制御室の非安全系電流計の回路が火災時ホットショートの影響で、2次火災を発生させ得る。 | ②-Yes | 充電器電流計回路が、安全系である現場と非安全系である制御室で電気的な分離がされていなかった事象。未解析状況であった。(制御室に充電器電流計回路が設置されているプラントが対象) 【No.1と同様、水平展開対応済】 |
| 4 | 259/2012-004-01: Browns Ferry 1 | 火災区画でのケーブル火災損傷によりRHRサービス水ポンプがご起動する可能性 | 制御室火災時に適切に遮断されない制御回路が見つかった。その回路がホットショートすると、補機冷却水系からの誤信号で RHR サービス水ポンプが誤起動し得る。 | ③-Yes | ホットショートによりRHRサービス水ポンプが誤起動し、EDGの負荷投入に影響を与える事象。 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 5 | 259/2013-008-00: Browns Ferry 1 | 火災区画におけるケーブルの火災損傷によりRHRポンプが誤動作する可能性 | 制御室火災時に適切に遮断されない制御回路が見つかった。その回路がホットショートすると、RHR ポンプが誤起動し得る。 | ③-Yes | 現場盤のホットショートによりRHRポンプが誤起動し、EDGの負荷に影響を与える事象。 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 6 | 260/2012-005-00: Browns Ferry 2 | NFPA805移行中に特定された第2区分RHR系統に影響する未解析状態 | 制御室火災時にホットショートにより LPCI の格納容器内弁の開失敗が発生し得る。 | ③-Yes | ホットショートによりRHR低圧注水内側隔離弁が誤閉止し、閉固化する事象。IN 92-18の事象に類似している。 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |

| 通番 | LER No. プラント名 | 件名 | 懸案 | フロー分類 | 検討結果 |
|----|-----------------------------------|------------------------------------|--|-------|--|
| 7 | 278/2011-004-00: Peach Bottom 3 | HPCIの不適切なケーブルルートにより火災後安全停止解析に悪影響 | 2010年代のHPCIタービン蒸気供給弁制御回路の改造により、想定火災区画でのホットショートによりHPCIが動作不能となり得ることが判明した。 | ①-Yes | MSO改造のためにケーブルを追加したが、当初のルートではない場所に追加した事象。設計エラー。HPCIタービン蒸気供給弁が誤作動し、故障する事象。 【HEとして整理】 |
| 8 | 282/2016-001-00: Prairie Island 1 | 不適合火災防護手動運転員操作 | IN92-18 制御室火災時に遠隔停止能力を喪失する可能性で指摘されたMOVのホットショートによる故障が、制御室火災以外でも発生し得ることがわかった。 | ③-Yes | 中央制御室火災のホットショートに関する運転経験IN 92-18の事象。ホットショートによりMOVが誤作動して損傷する可能性が多数確認された事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 |
| 9 | 285/2015-006-00: Fort Calhoun | 不適切な設計による未解析の火災脆弱性 | 1983年に改造した加圧器バックアップヒータバンクの制御回路の遮断設計に問題を発見。制御室火災時の制御室側でのホットショートにより、ヒータが意図したように動作しない可能性がある。 | ③-Yes | 中央制御室火災時のホットショートにより、加圧器ヒータの制御回路が隔離できず、現場からの操作ができない事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 |
| 10 | 293/2015-010-00: Pilgrim | 電動弁制御回路の脆弱性 | IN92-18で指摘されたMOVの問題（トルク・リミットスイッチがないと、ホットショートによりMOVが損傷、手動操作も不能となり得る）の代償措置である火災監視が未確立であることが2015年の火災防護検査の準備中に判明した。 | ③-Yes | 中央制御室火災のホットショートによりMOVが誤作動して損傷する事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 |
| 11 | 305/2012-001-00: Kewaunee | 加圧器逃がし弁と原子炉ベント弁に対する附則R誤動作の懸念 | 加圧器逃がし弁のソレノイド用の制御室から格納容器に至る制御ケーブルが、専用の電線管で引き回されおらず、ホットショートの状態次第では、弁が誤開放し得る。原子炉ヘッドベント弁でも同様の問題が見つかった。I/F LOCA となり得る。 | ③-Yes | ホットショートにより加圧器逃がし弁が誤開放し、I/F LOCAとなる事象 【過渡事象の起因となる事象】 【PORVが誤開放】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 12 | 361/2009-005-00: San Onofre 2 | DGの配線ミスにより火災隔離能力を喪失 | EDG-Aの保全作業で火災時遮断（隔離）フェーズを誤配線した。この状態では、制御室火災時に遠隔操作ができなくなる可能性がある。 | ①-Yes | 中央制御室火災時にホットショートが発生した場合、現場での非常用ディーゼル発電機起動ができなくなる事象。配線ミスにより、火災隔離のヒューズをバイパスする配線となっていた。 【HEとして整理】 |
| 13 | 366/2013-004-03: Hatch 2 | RHR停止時冷却系隔離弁に対する想定火災時ケーブル間電気故障の脆弱性 | 格納容器内 RHR 停止時冷却系隔離弁の制御ケーブルが想定火災でホットショートすると、同弁が誤開放し得る（I/F LOCA）。 | ③-Yes | RHR停止時冷却系隔離弁が誤開放し、I/F LOCAとなる可能性がある事象。リスク評価の結果、安全上の影響は低いとされている。 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |

| 通番 | LER No. プラント名 | 件名 | 懸案 | フロー分類 | 検討結果 |
|----|------------------------------|--------------------------------|--|-------|---|
| 14 | 369/2012-001-00: McGuire 1,2 | 附則R不適合により冷温停止に影響する可能性 | IN92-18で指摘されたMOVの問題が、両号機のSGの動力作動逃がし弁（PORV）にあることがわかった。想定火災区画での制御回路ホットショートで、弁が損傷し手動操作も不能となり得る。 | ③-Yes | 中央制御室火災のホットショートによりMOVが誤作動して損傷する事象。 【中央制御室で早期検知消火により対応不要】 |
| 15 | 390/2013-005-00: Watts Bar 1 | CVCS遠心充てんポンプの想定火災起因故障 | 補助建屋火災により CVCS 充てんポンプ（CCP）のサクシオン弁が偽閉止（正しい閉信号なしに閉）し、RWST 弁は開かないことから、CCP 故障、RCPシール喪失となり得ることがわかった。 | ③-Yes | ホットショートによりCCP故障、RCPシール喪失による小LOCAとなる事象。 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 16 | 390/2014-002-00: Watts Bar 1 | 附則R解析により特定された非保守的運転員手動操作 | 附則R 解析（安全停止能力に対する火災防護プログラム）で想定した加圧器過充填を防ぐための運転員余裕時間が保守的ではなかった。 | ③-Yes | 運転員の操作時間による対応想定時間に不備があった事象 【安全停止能力の系統分離は運転員の操作時間に期待していないため、対応不要】 |
| 17 | 390/2015-002-00: Watts Bar 1 | 附則R火災時の加圧器PORVに偽開放に関する未解析の状態 | 加圧器 PORV の制御ケーブルが想定火災区画を通っている場合は、ホットショートによりPORV が偽開放すると仮定しなければならない。PORV 隔離が遅れると、SI 信号が出て、加圧器がソリッドになるおそれがある。時間余裕等の確認要。 | ③-Yes | ホットショートによりPORV誤開放する事象。 【過渡事象の起因となる事象】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 18 | 395/2011-001-00: Summer | 附則Rに従う安全停止システムの1系列維持失敗の可能性 | 制御室、ケーブル室または制御建屋火災によるホットショートで安全母線の過電流リレーが作動し得る（給電遮断）。EDG-Bの給電遮断器が閉じない可能性もある。当該リレーをリセットする手順が火災時緊急手順に入っていることを確認要。 | ③-Yes | 制御室等の火災によるホットショートにより安全系母線が影響を受ける事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 19 | 395/2011-002-00: Summer | 附則Rに従う安全停止システムの1系列維持失敗の可能性 | 1985年の改造によって、火災によって制御室退避した際に EDG-B の制御回路を制御建屋から隔離（遮断）できるようになった。しかし、1992年のEDG制御回路の改造によって、ホットショートにより制御電源のリレーが停電して、EDGの現場制御が妨げられ得るようになった。 | ①-Yes | ホットショートによりEDGの自動起動が無効となる事象。火災による影響を防止するために改造を実施したものの、誤った変更が行われた。 【HEとして整理】 |
| 20 | 397/2015-006-01: Columbia | 火災後安全停止に悪影響し得る想定多重誤作動（MSO）シナリオ | HPCSの複数の電動弁がホットショートにより偽開放することをMSOシナリオに想定していなかった。SPからCSTへの流れが形成され、SP保有水量が減る（安全停止に影響し得る）。 | ③-Yes | ホットショートによりSP保有量が減り安全停止機能が影響を受ける事象。 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |

| 通番 | LER No. プラント名 | 件名 | 懸案 | フロー分類 | 検討結果 |
|----|------------------------------------|----------------------------------|---|-------|---|
| 21 | 440/2011-001-00: Perry 1 | 火災防護設計脆弱性による未解析の状態 | 制御室の2つの電流計回路に配線欠陥があり、制御室火災によるホットショートの発生時に電流計遮断器の保護リレーが作動し、安全停止に要するA系列ESWポンプとA冷凍機の電源が切れ得る。 | ③-Yes | 中央制御室のホットショートにより安全停止機能が影響を受ける事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 22 | 445/2013-002-00: Comanche Peak 1,2 | 無保護の電流計ケーブルからの2次火災 | クラス1Eのバッテリー制御室電流計に過電流保護が付いていないことが判明。制御室外での火災によるホットショートの発生時に故障電流が流れると、ケーブルトレイ上で2次火災が発生し得る。 | ②-Yes | No.1と同様、水平展開対応済み。 |
| 23 | 454/2015-004-00: Byron 1 | 誤開放した弁の手動閉止を妨げ得る加圧器電動逃がし弁回路の設計欠陥 | 火災防護点検の際に加圧器PORVのブロック弁制御回路に設計欠陥が見つかった。制御室火災時のホットショートの発生により、フューズがバイパスされ制御回路隔離が失敗し得る。 | ③-Yes | 中央制御室またはケーブル処理室での火災のホットショートにより加圧器PORV誤開放した場合、PORVブロック弁を現場MCCから閉止できない事象。 【過渡事象の起因となる事象】 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 24 | 456/2015-003-00: Braidwood 1 | 誤開放した弁の手動閉止を妨げ得る加圧器電動逃がし弁回路の設計欠陥 | 火災防護点検の際に加圧器PORVのブロック弁制御回路に設計欠陥が見つかった。制御室火災時のホットショートの発生により、フューズがバイパスされ制御回路隔離が失敗し得る。 | ③-Yes | 中央制御室またはケーブル処理室での火災のホットショートにより加圧器PORV誤開放した場合、PORVブロック弁を現場MCCから閉止できない事象。 【過渡事象の起因となる事象】 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 25 | 461/2011-001-00: Clinton | 想定されるHPCS誤作動 | 電線管内の自動起動ロジック計装ケーブルのホットショートによって、HPCSが誤起動し得る。HPCS停止ポンプと注水弁も閉するので、RPV満水後にHPCSを止められない可能性もある。 | ③-Yes | 中央制御室のホットショートにより安全停止系が影響を受ける事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 26 | 461/2011-007-00: Clinton | ヒューズなしの電流計回路 | フューズ（保護）のないDC回路のホットショートにより、接地ループが構成され、過電流により隣り合うケーブルに熱損傷を与え得る。 | ②-Yes | No.1と同様、水平展開対応済み。 |
| 27 | 482/2010-003-00: Wolf Creek | EDG-B電圧制御回路に係る火災時安全停止の課題 | 制御室火災のホットショートの発生によりユニット・パラレルリレーが通電され、EDGが意図しないモードで運転され、電圧制御にも悪影響し得ることが判明。 | ③-Yes | 中央制御室のホットショートにより非常電源が影響を受ける事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |

| 通番 | LER No. プラント名 | 件名 | 懸案 | フロー分類 | 検討結果 |
|----|-----------------------------------|-------------------------------|---|-------|--|
| 28 | 482/2010-007-01: Wolf Creek | 火災時安全停止火災に起因するMSO問題 | 5件のMSO問題が特定された。例：火災区画での火災で1台のRHRポンプ喪失と同時に火災起因の偽SISにより両RHRの作動が妨げられ得る。加圧器スプレイ弁が誤開放し、4台のRCPが制御室から停止できない可能性がある。 | ③-Yes | ホットショートにより安全停止系の機能喪失や加圧器スプレイ弁の誤開放、ホリ酸充填ポンプが誤起動する事象。 【過渡事象の起因となる事象】 【その他機器の誤動作】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 29 | 482/2010-013-00: Wolf Creek | 火災時安全停止回路解析で特定された未解析の状態 | 制御室火災によるホットショートの発生でEDG-Bの励磁器/電圧制御器のフューズが切れ、給電できない可能性がある。制御室火災で加圧器PORVが誤開し、熱水力解析で要求する3分間以内の閉止ができない可能性。制御室火災でEDG-B室の換気ダンパーが故障し、室温が設計温度範囲から出るおそれがある。 | ③-Yes | 中央制御室のホットショートにより非常電源が影響を受ける事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 30 | 482/2011-008-00: Wolf Creek | 火災時安全停止設計の隠れた課題が引き起こすESW流動不均衡 | 制御室火災でCCW熱交換器からのESWリターンラインの弁（安全停止には要閉）が開き得ることが判明。重要機器へのESW流量が減るおそれがある。 | ③-Yes | 中央制御室のホットショートにより安全停止機能が影響を受ける事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 31 | 528/2012-005-01: Palo Verde 1,2,3 | RSS制御回路欠陥によるTS禁止状態 | 制御室火災時にB系列加圧バックアップヒータの制御回路が隔離されない可能性が判明。CVCS隔離弁にも同様な問題が見つかった。 | ③-Yes | 中央制御室のホットショートにより安全停止機能が影響を受ける事象。 【中央制御室での早期検知消火により対応不要】 【系統分離対策により安全停止機能は確保されており、対応不要】 |
| 32 | 528/2013-003-00: Palo Verde 1,2,3 | 過電流保護のないDC電流計 | 系列BとDのクラス1Eバッテリーと充電器の電流計回路に過電流保護が付いていない。制御室火災によるホットショートの発生時に同回路に故障電流が流れると、ケーブルトレイ上でケーブルが2次火災し得る。 | ②-Yes | No.1と同様、水平展開対応済み。 |

米国 PWR の炉心そう溶接部で発見された亀裂に関する事業者の対応

2024 年 1 月 25 日
技術基盤課
システム安全研究部門

1. 経緯

米国ロビンソン発電所 2 号機¹の炉心そう²上部周方向溶接部（Upper Girth Weld、以下「炉心そう溶接部」という。）で発生した亀裂（以下「本事象」という。）について、第 61 回技術情報検討会において関連する米国情報を収集・整理し、また、日本国内における対応について原子力エネルギー協議会及び電気事業者（以下「事業者等」という。）からの聞き取りを行い、報告した。同検討会において、今後、以下の情報収集等を行い、適宜、技術情報検討会に報告することとなった。

- ① 安全停止できるとする技術的根拠及び今後の取組について、事業者等から説明を受ける。
- ② 米国産業界の原因調査は、2024 年秋以降に完了する見込みであることから、今後も原因調査に関する情報収集を継続し、適宜 NRC との意見交換を実施する。
- ③ 亀裂解釈³には、具体的な炉心そうの健全性評価手法が規定されていないことから、今後の維持規格の技術評価を見据え、原子力規制庁においても炉心そうの健全性評価手法について、情報収集を行う。

このうち、①について、面談で資料を受領したことから概要を報告する。

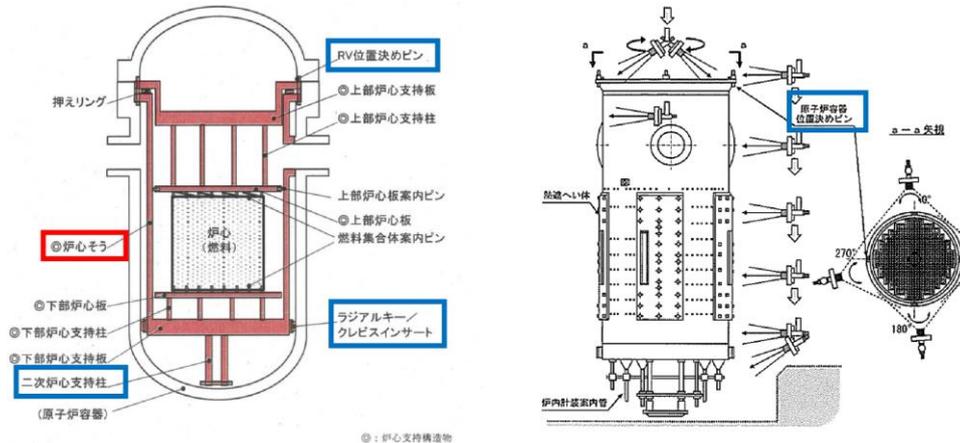


図 1 炉内構造物の概要^{4,5}

¹ サウスカロライナ州ハーツビル近郊の PWR プラント。出力は 759MW、1971 年運転開始。

² 原子炉の内部に設置された構造物で、上部が原子炉容器位置決めピンで原子炉に固定され、下部はラジアルキーにより回転しないように水平方向が、原子炉容器位置決めピン及び二次炉心支持構造物により上下方向が固定されている。その役割は、水平方向の炉心支持及び位置決め、冷却水流路の維持及び流量適正配分とされている。

³ 「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈」（原規技発第 2107219 号（令和 3 年 7 月 21 日原子力規制委員会決定））

⁴ PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [一般点検]「図 1 解説図 1-3-2 「炉心支持・位置決め」機能に関連する機器・部品」, 原子力安全推進協会

⁵ H.B. ロビンソン 2 号機 炉心槽割れに関する事業者の受け止めについて（令和 5 年 9 月 21 日 原子力エネルギー協議会との面談資料）, 原子力安全推進協会



図2 炉心そうの模式図⁶

2. 事業者等の資料の概要

原子力規制庁は、PWR の炉心そう溶接部に対する事業者等の対応状況について、面談を実施し、以下の内容について説明を受けた（参考参照）。

2. 1 目視試験（VT-3⁷）の見直し結果

事業者等は 2023 年 9 月～12 月に掛けて、国内 PWR プラントにおける下部炉心構造物の可視可能な範囲の溶接線（内外面）に対して過去に ISI（供用期間中検査）で実施した目視試験（VT-3）の録画映像を再確認した（ただし、泊 3 号機の外面に対する供用期間中検査は今後の ISI で実施予定）。「溶接線付近に亀裂はありえる」という意識で図 3 及び図 4 の青実線で示された溶接線を再確認した。その結果、録画映像で確認できる範囲で、溶接部近辺に変形、破損及び機器表面における異常はなかった。

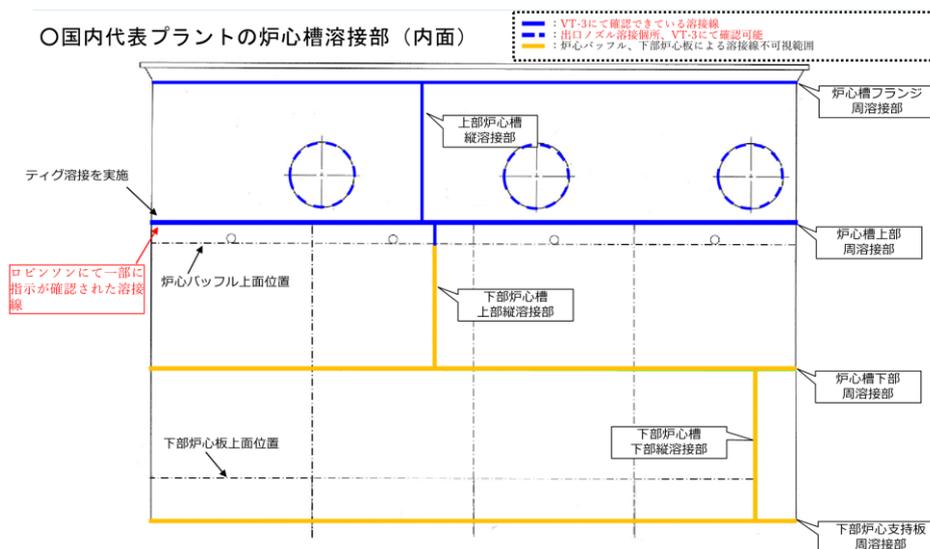


図3 下部炉心構造物内面の再確認範囲（青実線部）⁵

⁶ 米国電力中央研究所 (EPRI) の Materials Reliability Program: Pressurized Water Reactor Internals Inspection and Evaluation Guidelines (Revision 1-A)

⁷ VT-3 は機器の変形、心合せ不良、傾き、隙間の異常、ボルト締め付け部の緩み、部品の破損、脱落及び機器表面における異常の検出に使用される目視試験の方法で、日本機械学会維持規格 (IA-2523) で定義されている。

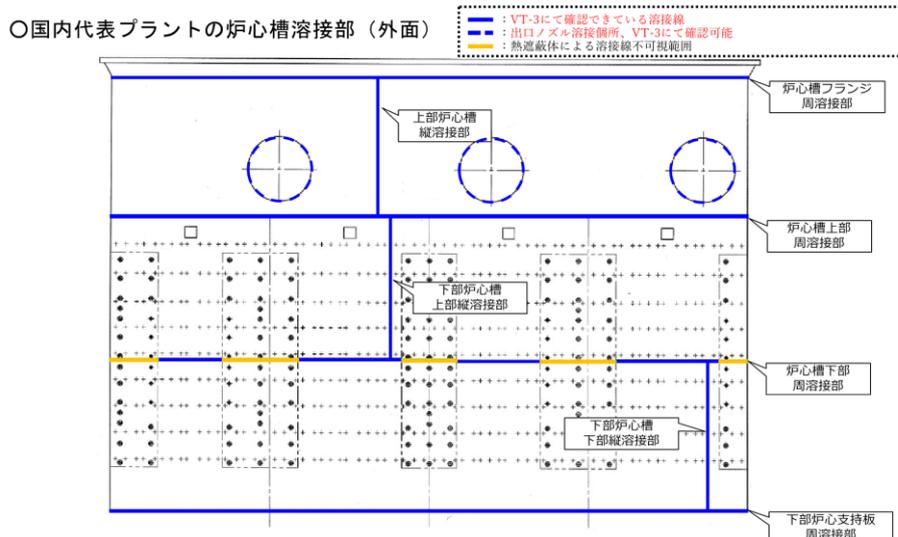


図4 下部炉心構造物外面の再確認範囲（青実線部）⁵

2. 2 安全停止できるとする技術的根拠

事業者等から炉心そうの全周破断時の安全停止について、静的及び動的な観点から説明があった。

(1) 炉心そう溶接部の全周破断時の炉心降下量の制限について

- 炉心そう溶接部が全周破断した場合でも炉心降下量が制限されるよう設計している。
 - 炉心そう破断により下部炉心構造物が落下すると二次炉心支持構造物の下端が原子炉容器下部鏡に着底し、炉心降下量が制限される。
 - ショックアブソーバが塑性変形することで炉心落下時のエネルギーを吸収する構造となっている。
 - 炉心降下量よりも燃料案内ピンの嵌り込み量が大きいため、燃料案内ピンが外れることはなく、燃料集合体への制御棒挿入機能は維持される。

(2) 炉心そう溶接部の全周破断時の制御棒挿入性の担保について

- 炉心そう溶接部が全周破断した場合の制御棒挿入性を担保するために、炉内構造物、制御棒及び燃料集合体は以下の設計上の考慮をしている。
 - 燃料案内ピンの挿入長さ管理：燃料集合体への燃料案内ピンの挿入長さを炉心降下量以上に設定している。
 - 制御棒の初期挿入長さ管理：燃料集合体への制御棒の初期挿入長さを炉心降下量以上に設定している。
 - 炉心降下量の制限：原子炉容器と底板との隙間、ショックアブソーバ構造により炉心降下量を制限している。
 - 上部炉内構造物・炉心そうフランジ部の変形・回転拘束：上部炉内構造物・炉心そうフランジ部は、原子炉容器上部ふた及び押えリングで挟むことに

より鉛直方向、水平方向及び回転を拘束している。

- 下部炉内構造物の回転拘束：下部炉内構造物（炉心そう下部）の下端は、ラジアルキーとクレビスインサートが凹凸形状で取り合うことで、下部炉内構造物の回転を拘束している。

（３）炉心そう溶接部の全周破断時の安全停止について

- 炉心そう溶接部の全周破断と地震が同時に発生し、炉心そうの破断部から炉心そう内側にバイパス流が発生するとともに、炉内構造物や燃料集合体等が地震により加振しても安全停止するよう設計している。
 - 設計上の配慮により炉心そう破断時の炉心降下量を制限しており、バイパス流や地震による振動を考慮しても制御棒は挿入される。
 - この炉心降下量の制限により冷却材流路は確保されるため、蒸気発生器を介した炉心の冷却は可能であり、安全に停止する。

（４）押えリングの応力緩和の影響について

- 仮に押えリングが応力緩和（リラクゼーション）した場合、炉心そう上端の支持条件が変化するため、炉心そうの振動挙動が変化する可能性があるが、国内プラントについては、応力緩和によって押えリングが機能を喪失する可能性がないことを高経年化技術評価で確認済みであり、炉心そうの振動挙動が有意に変化することはない。

2. 3 本事象対応に係る今後のスケジュール

事業者等から本事象に対する今後のスケジュール案について説明があった。

（１）炉心そう溶接部の詳細検査（MVT-1⁸、UT⁹）装置の製作等

- PWR 電力共同委託により検査装置を製作する。
- モックアップ実証、検査要員の訓練を実施する。

（２）炉心そうの健全性評価手法及び非破壊検査基準の整備

- PWR 電力共同委託により検討を進める。
- JANSI 炉内構造物ガイドラインの制定を検討する。
- 日本機械学会維持規格の制定を検討する。

（３）詳細検査の実施

- 2024年秋以降に完了見込みである米国産業界による原因調査の結果を精査し、

⁸ MVT-1 は機器の表面について、摩耗、亀裂、腐食、浸食等の異常を検出するために行う遠隔目視試験の方法で、日本機械学会維持規格 (IA-2525) で定義されている。

⁹ UT（超音波探傷試験）により目視試験で検出された傷等のサイジング（長さ及び深さの測定）を行う。

国内においても早期の実施が必要と判断される場合は詳細検査を行う。

- 詳細検査に向けて、健全性評価手法及び非破壊検査判定基準を文書化し、暫定基準として原子力規制庁へ提案、協議する。
- 詳細検査として内面及び外面の MVT-1 を実施する。
- MVT-1 で傷等を検出した場合は UT を実施する。

3. 今後の進め方

本事象について、安全停止できるとする技術的根拠及び今後の取組について、事業者等からの聞き取りを行った。過去の ISI における録画映像による VT-3 の見直し結果については、「溶接線付近に亀裂はありえる」という意識で確認し異常は認められなかったとのことであり、現時点で追加の検査等の必要はないと考える。また、安全停止できるとする技術的根拠についても説明を受け、仮に炉心そう溶接部に亀裂が発生し、全周破断したとしても、制御棒の挿入等に支障はない設計であることを確認した。今後、事業者等は、炉心そう溶接部の詳細検査（MVT-1、UT）装置の製作等、炉心そうの健全性評価手法及び非破壊検査基準の整備を行うとしていることから、引き続き聴取等を行い、適宜、技術情報検討会に報告する。

なお、上記 1. ②の NRC との意見交換は、3 月に実施する予定であり、その結果も、適宜、技術情報検討会に報告する。

（参考）（令和 6 年 1 月 18 日 原子力エネルギー協議会との面談資料）

H.B.ロビンソン2号機 炉心槽割れに係る 対応状況について

2024年1月18日
原子力エネルギー協議会

1. 炉心槽破断時の安全停止について 〔質問回答〕

炉心槽全周破断時の制御棒挿入性の担保について

炉心槽が破断した場合に制御棒挿入性を担保するため、炉内構造物、制御棒及び燃料集合体は以下の設計上の配慮をしている。

① 燃料案内ピンの挿入長さ管理

② 制御棒の挿入長さ管理

③ 炉心降下量の制限

④ 上部炉心構造物・炉心槽フランジ部の変位・回転拘束

⑤ 下部炉心構造物の回転拘束 (ラジアルキーによる垂直降下)

枠囲みの範囲は機密に関する事項ですので公開できません

炉心槽全周破断時の炉心降下量の制限について

| | 運転時 | 炉心槽全周破断時 |
|------------------|-----|----------|
| 燃料案内ピン | | |
| 二次炉心支持構造物 | | |

◆万一の炉心槽全周破断時

- 炉心槽破断により下部炉心構造物が落下すると、二次炉心支持構造物の下端が原子炉容器下部鏡に着底し、炉心降下量が制限される。
- ショックアブソーバが塑性変形することで炉心落下時のエネルギーを吸収する構造である。

- 炉心降下量 (A) よりも燃料案内ピンの嵌り込み量 (B) が大きい場合、燃料案内ピンが外れることは無く、**燃料集合体への制御棒挿入機能は維持される。**

| | 2ループ | 3ループ | 4ループ |
|-----|------|------|------|
| B | | | |
| A | | | |
| GAP | | | |

枠囲みの範囲は機密に関する事項ですので公開できません

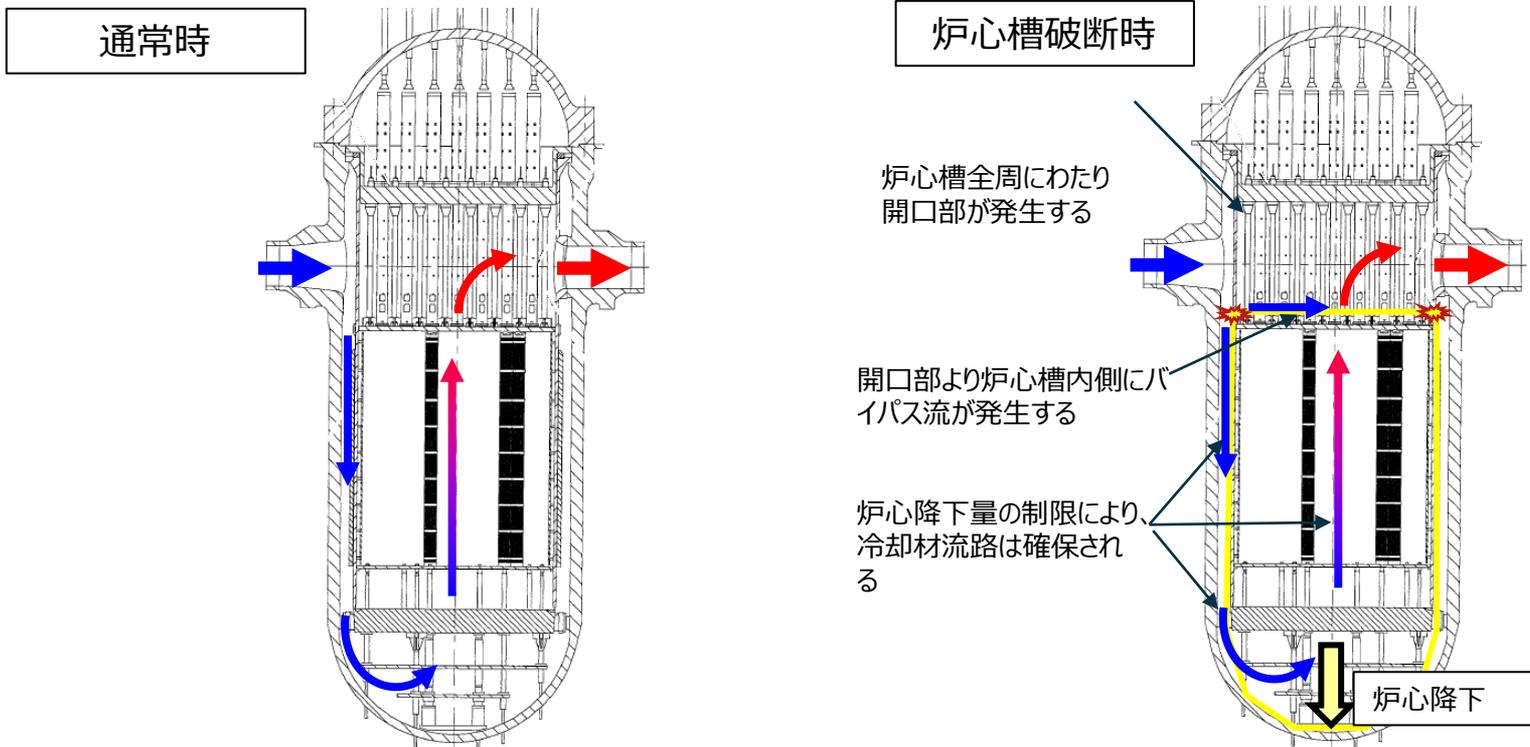
[補足] ショックアブソーバの設計

炉心降下量は以下の式で表される。
 $A = \text{Gap} + \Delta L$

(Gap : 運転時の底板と原子炉容器の隙間)
 (ΔL : ショックアブソーバの塑性変形量)

炉心槽全周破断時の安全停止について①

- 炉心槽溶接部の全周破断と地震が発生すると、炉心槽の破断部から炉心槽内側にバイパス流が発生するとともに、炉内構造物や燃料集合体等は地震により加振される。
- 設計上の配慮により炉心槽破断時の炉心降下量を制限しており、バイパス流や地震による振動を考慮しても制御棒は挿入される（添付2）。また、この炉心降下量の制限により冷却材流路は確保されるため、蒸気発生器を介した炉心の冷却は可能であり、炉心は安全に停止する。

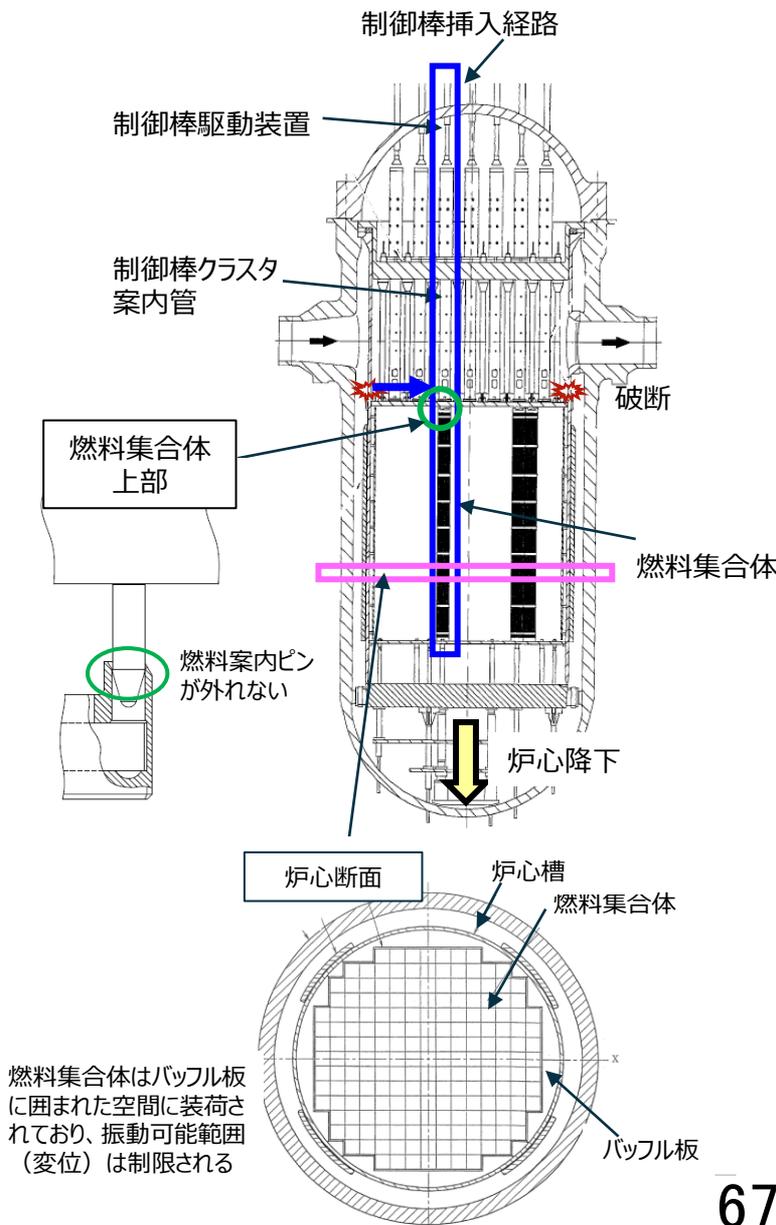


Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

炉心槽全周破断時の安全停止について② (地震時)

添付2 5

- 制御棒の挿入経路は、制御棒駆動装置、制御棒クラスタ案内管及び燃料集合体である。
- 制御棒駆動装置及び制御棒クラスタ案内管の支持状態は炉心槽破断前後で変わらないため、地震時の変位は変わらない。
- 炉心槽破断により炉心は降下するが、燃料案内ピンから燃料集合体は抜けず、燃料集合体の上下端は燃料案内ピンとかん合した状態である。また、燃料集合体は炉心槽内側のバッフル板で囲まれた空間にあり、地震時には限られた空間で振動するため、変位は制限される。
- 炉心降下の状態でも制御棒先端は燃料集合体に挿入されており、また、地震により加振された場合でも制御棒の挿入経路の変位は制限されるため、制御棒は燃料集合体に挿入される。
- 通常運転時において、炉心槽出口ノズルの近傍にある制御棒クラスタ案内管は、出口ノズルへ向かう1次冷却材が作用する厳しい横流れ環境で、制御棒挿入性に問題ないことを確認している。炉心槽破断に伴いバイパス流（炉心槽外面から内側に向かう流れ）が発生するが、その分、主流の割合は低下するため、横流れが有意に厳しくなることはなく、制御棒の挿入性に問題はないと考えられる。



【押えリングの応力緩和による影響について】

- 仮に押えリングが応力緩和（リラクゼーション）した場合、炉心槽上端の支持条件が変化するため、炉心槽の振動挙動が変化する可能性があるが、国内プラントについては、応力緩和によって押えリングが機能を喪失する可能性がないことを高経年化技術評価のとおり確認済みであり、炉心槽の振動挙動が有意に変化することは無い。

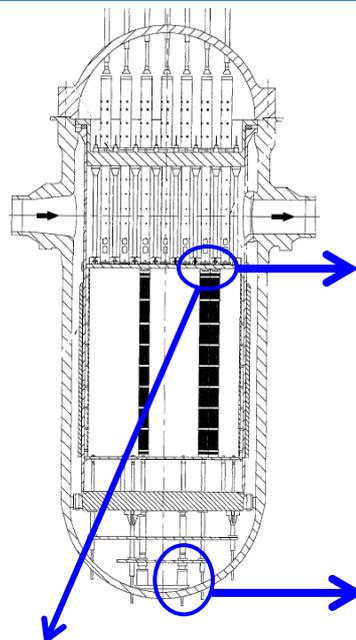
＜押えリングの応力緩和に関する高経年化技術評価：高浜2号機の例＞

| 部 位 | 経年変化事象 | 健全性評価 | 現状保全 | 総合評価 | 高経年化への対応 |
|-------|--------|---|--|---|---|
| 押えリング | 応力緩和 | リラクゼーション試験で得られたデータを基に、押えリングのリラクゼーション解析を実施した結果、炉内構造物の保持性を喪失する可能性はなく、健全性評価上問題ないと考える。 なお、運転開始後20年経過した国内他プラントでの計測結果に基づき評価した結果、十分な保持力を有していることを確認している。 | 定期的に下部炉内構造物を取り出して、水中テレビカメラによる目視検査を実施し、有意な変形がないことを確認している。 | 健全性評価結果から判断して、現時点の知見においては、押えリングの応力緩和は問題となる可能性はないと考え、今後、現状保全の適正化が可能と考える。 | 押えリングの応力緩和に対しては、現状保全項目に、高経年化対策の観点から追加すべきものはないと判断する。 |

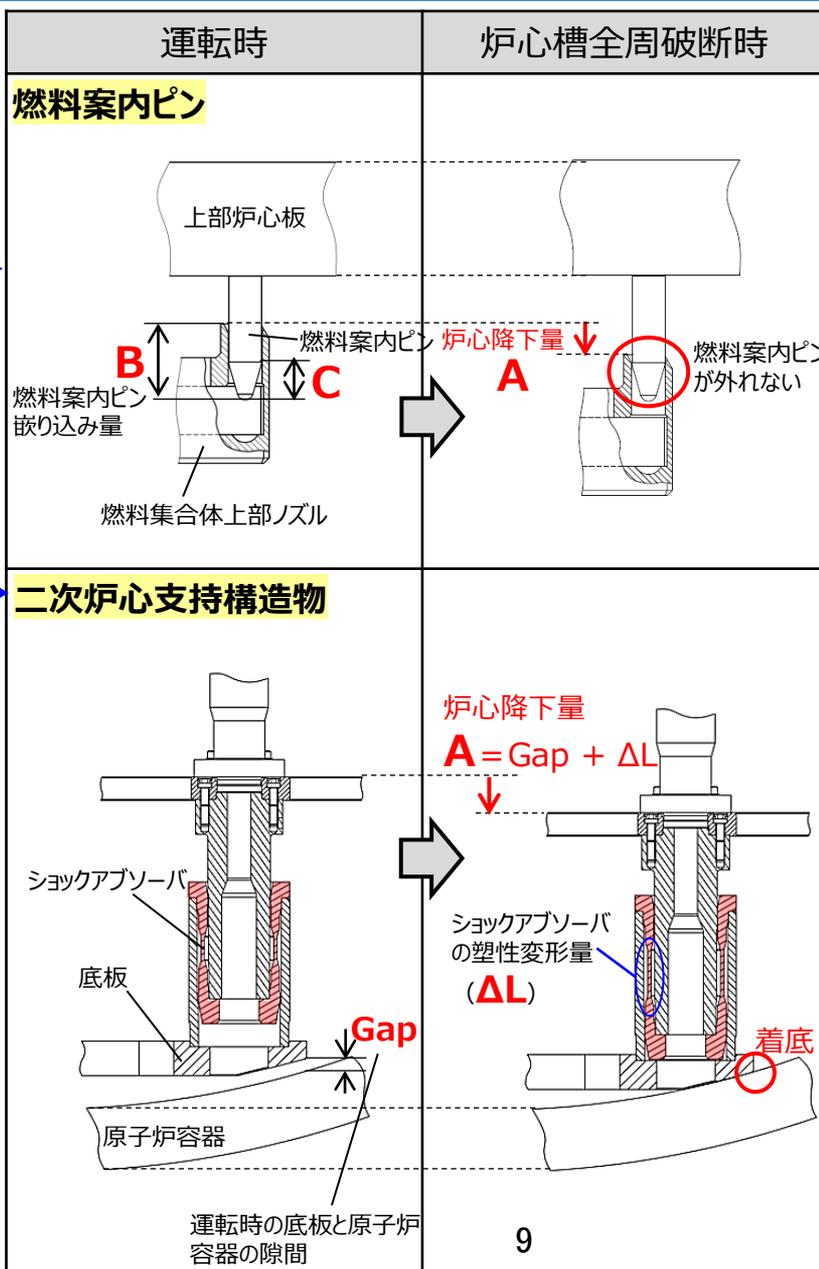
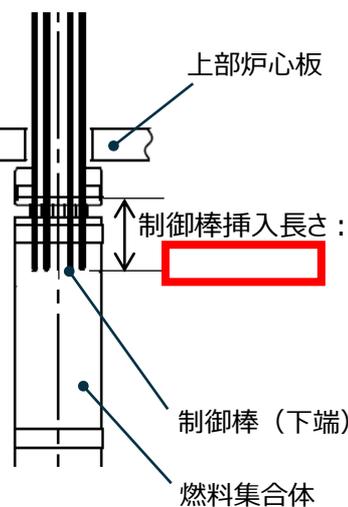


Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

＜参考＞ 炉心槽全周破断時の制御棒機能維持



制御棒の挿入長さ



・炉心槽破断により下部炉心構造物が落下すると、二次炉心支持構造物の下端が原子炉容器下部鏡に着底し、炉心降下量が制限される。

・加えて、制御棒挿入長さ()は、炉心降下量よりも十分長いことから、万一の炉心槽破断時においても、制御棒挿入機能は維持される。

| | 2ループ | 3ループ | 4ループ |
|--------|------|------|------|
| B | | | |
| (C) | | | |
| A (注1) | | | |
| GAP | | | |
| (注1) | | | |

枠囲みの範囲は機密に関する事項ですので公開できません

2. 至近の供用期間中検査のVT-3ビデオ画像見直し結果

至近の供用期間中検査のVT-3ビデオ画像見直し結果

| プラント | 対象：LCI内面 | | | 対象：LCI外面 | | |
|--------------|-----------------|--------------|----|-----------------|--------------|----|
| | I S I 実績年月 | VT-3動画見直し | | I S I 実績年月 | VT-3動画見直し | |
| | | 実施日 | 結果 | | 実施日 | 結果 |
| 泊1号機 | 第16回 (2010年1月) | 2023/12/7 | ✓ | 第15回 (2008年8月) | 2023/12/7 | ✓ |
| 泊2号機 | 第16回 (2011年9月) | 2023/12/7 | ✓ | 第15回 (2010年5月) | 2023/12/7 | ✓ |
| 泊3号機 | 第1回 (2011年1月) | 2023/12/7 | ✓ | 未実施 | | |
| 敦賀2号機 | 第17回 (2010年4月) | 2023/12/15 | ✓ | 第16回 (2007年9月) | 2023/12/15 | ✓ |
| 美浜3号機 (CIR後) | 第26回 (2021年11月) | 2023/12/20 | ✓ | 第26回 (2021年11月) | 2023/12/20 | ✓ |
| 高浜1号機 | 第27回 (2023年2月) | 2023/9/7(*1) | ✓ | 第27回 (2023年2月) | 2023/9/7(*1) | ✓ |
| | | 2023/12/20 | ✓ | | 2023/12/20 | ✓ |
| 高浜2号機 | 第27回 (2011年12月) | 2023/12/25 | ✓ | 第27回 (2011年12月) | 2023/12/25 | ✓ |
| 高浜3号機 | 第26回 (2023年12月) | 2023/12/25 | ✓ | 第24回 (2020年8月) | 2023/11/30 | ✓ |
| 高浜4号機 | 第24回 (2022年9月) | 2023/12/25 | ✓ | 第24回 (2022年7月) | 2023/12/25 | ✓ |
| 大飯3号機 | 第19回 (2022年9月) | 2023/12/20 | ✓ | 第15回 (2011年4月) | 2023/12/20 | ✓ |
| 大飯4号機 | 第17回 (2020年11月) | 2023/12/20 | ✓ | 第18回 (2022年4月) | 2023/12/20 | ✓ |
| 伊方3号機 | 第11回 (2008年9月) | 2023/12/14 | ✓ | 第13回 (2011年5月) | 2023/12/14 | ✓ |
| | 第13回 (2011年5月) | | | | | |
| 川内1号機 | 第25回 (2020年6月) | 2023/9/27 | ✓ | 第25回 (2020年6月) | 2023/9/27 | ✓ |
| 川内2号機 | 第25回 (2022年3月) | 2023/9/27 | ✓ | 第25回 (2022年3月) | 2023/9/27 | ✓ |
| 玄海3号機 | 第16回 (2022年7月) | 2023/10/31 | ✓ | 第16回 (2022年6月) | 2023/10/31 | ✓ |
| 玄海4号機 | 第15回 (2022年10月) | 2023/10/31 | ✓ | 第15回 (2022年10月) | 2023/10/31 | ✓ |

● 結果欄の「✓」は、供用期間中検査(VT-3)の録画映像で確認できる範囲で、「溶接線付近に亀裂がありえる」という意識づけ(本事象の周知教育)を行った上でビデオを見直した結果、溶接線付近に変形、破損および機器表面における異常は認められなかったことを示す。

● (*1)2023年9月はロビンソン事象のあった周溶接部のみ。2023年12月は残りの溶接部を確認。

〈技術情報検討会資料〉

技術情報検討会は、新知見のふるい分けや作業担当課の特定を目的とした事務的な会議体であり、その資料及び議事録は原子力規制委員会の判断を示すものではありません。

資料63-2-1

最新知見のスクリーニング状況の概要（自然ハザード以外に関するもの）（案）

令和6年1月25日 長官官房 技術基盤グループ

（期間：令和5年11月17日から令和6年1月5日まで）

| 最新知見等 情報シート番号 | 件名 | スクリーニング結果 (対応の方向性(案)) | 資料ページ |
|------------------|---|--------------------------|-------|
| 23SA-(B)-0002 | High burnup fuel source term accident sequence analysis | iv) | 2~3 |

対応の方向性（案）： i）直ちに規制部等関係部署に連絡・調整し、規制庁幹部に報告する。 ii）対応方針を検討し、技術情報検討会へ諮問する。 iii）技術情報検討会に情報提供・共有する。 iv）情報収集活動を行い、十分な情報が得られてから再度判断する（必要な場合には安全研究を実施する）。 v）安全研究企画プロセスに反映する。 vi）終了案件とする。以下同じ。

最新知見のスクリーニング状況（自然ハザード以外に関するもの）（案）

令和6年1月25日 長官官房 技術基盤グループ

（期間：令和5年11月17日から令和6年1月5日まで）

| 最新知見等情報シート番号 | 件名 | 情報の概要 | 受理日 | 1次スクリーニング | | 2次スクリーニング | | |
|---------------|---|--|-----------|-----------|---|-----------|----|------|
| | | | | 対応の方向性 | 理由 | 対応の方向性 | 理由 | 対応方針 |
| 23SA-(B)-0002 | High burnup fuel source term accident sequence analysis | <p>公表文献：SAND2023-01313, Sandia National Laboratories</p> <p>タイトル：High burnup fuel source term accident sequence analysis</p> <p>著者：L.I. Albright, L. Gilkey, D. Keesling, C. Faucett, D.M. Brooks, K.C. Wagner, L.L. Humphries, J. Phillips, D.L. Luxat</p> <p>公表日：2023年4月</p> <p>当該報告書は燃料の高燃焼度化と高濃縮度化が軽水炉の事故時ソースタームに与える影響を評価することを目的として、前報(SAND2011-0128)の手法を踏襲しながら、実際に導入が予定されている燃料を対象に、最新知見を反映した MELCOR コードによる解析を行っている*。その結果、燃焼度や改良されたモデルの影響によりソースタームに変化が生じるものの、事故時ソースタームに大きく影響を及ぼすことはなく、事故シナリオによる差異の方が大きいことが示された。例えば、事故時の高温環境下で原子炉圧力バウンダリが早期に破れる事故シナリオでは、格納容器への放射性物質の放出量が増加することが指摘されている。</p> | 2023/12/1 | iv) | <p>事故時のソースタームは、実用発電用原子炉の審査における確認、防護措置の評価等の基礎となる最も重要な情報であり、継続的に最新知見を反映する必要がある。</p> <p>実用発電用原子炉の審査では、事業者の事故対策について、「想定する格納容器破損モードに対して、原子炉格納容器の破損を防止し、かつ、放射性物質が異常な水準で敷地外へ放出されることを防止する対策に有効性があることを確認する。」必要がある。</p> <p>原子力災害対策指針では、緊急事態区分及び緊急時活動レベル（EAL）を定めているが、第7回緊急時活動レベルの見直し等への対応に係る会合において、新規規制基準を踏まえたオンサイトにおける EAL とオフサイトにお</p> | | | |

| 最新知見等情報シート番号 | 件名 | 情報の概要 | 受理日 | 1次スクリーニング | | 2次スクリーニング | | |
|--------------|----|--|-----|-----------|---|-----------|----|------|
| | | | | 対応の方向性 | 理由 | 対応の方向性 | 理由 | 対応方針 |
| | | <p>※炉心平均燃焼度：60GWd/MTU 及び 80GWd/MTU 濃縮度：5wt%及び 8wt%</p> | | | <p>ける防護措置となるよう、全体的見直しが必要とされている。</p> <p>本報告書は、燃料の高燃焼度化及び高濃縮度化が事故時のソースターム評価に大きな影響を与えないとしている。したがって、現行規制での審査の視点、基準等の変更を検討する情報には該当しないと判断する。</p> <p>一方、事故時のシナリオを検討することの重要性が指摘されているものとする。これまで米国 NRC 等が事故時ソースタームの評価を継続的に実施してきたことを鑑み、今後も継続的に情報を収集する。</p> | | | |

伊豆鳥島近海で近年発生した津波の特徴 と 2023 年 10 月 9 日津波の発生原因の推察

令和 6 年 1 月 25 日
地震・津波研究部門

1. 経緯

2023 年 10 月 9 日東京都八丈島八重根^{やえね}において、津波（以下「今回の津波」という。）が観測されたことから、気象庁は同日 6 時 40 分に伊豆諸島及び小笠原諸島に津波注意報を発表し、その後、津波注意報の範囲を拡大する続報を順次発表した（同日 12 時 00 分に解除）^[1]。今回の津波では、八丈島八重根において最大で津波高さ 0.7m など、伊豆諸島、小笠原諸島及び千葉県から沖縄県にかけての太平洋沿岸で津波が観測された^[1]。八丈島の八重根港では係留していた小型の船が 2 隻転覆した等の被害が報告されている^[2]。今回の津波は、同日の 4 時頃から 6 時台の間に伊豆鳥島近海で多発した地震との関連性が指摘されているが^[1]、それらの地震及び今回の津波の発生原因については未だ不明である（2024 年 1 月 15 日時点）。

第 42 回原子力規制委員会（2023 年 11 月 8 日）において、石渡委員より伊豆鳥島近海で発生した今回の津波に関して調査し、その結果を報告するよう指示があった。地震・津波研究部門では、今回の津波に関して現時点で公表されている知見を調査した。また、伊豆鳥島近海では、過去にも火山活動や地震活動に伴う津波が発生していることが知られており、その発生メカニズムの研究も行われているため、調査範囲を拡張し、近年伊豆鳥島近海で発生した津波に関する知見についての調査も行った。本調査の結果、今回の津波の発生原因は現時点では確定されていないが、地震・津波研究部門では、火山活動に関連する現象の可能性を考えている。本報告は、その調査結果と推察について説明するものである。

2. 報告内容

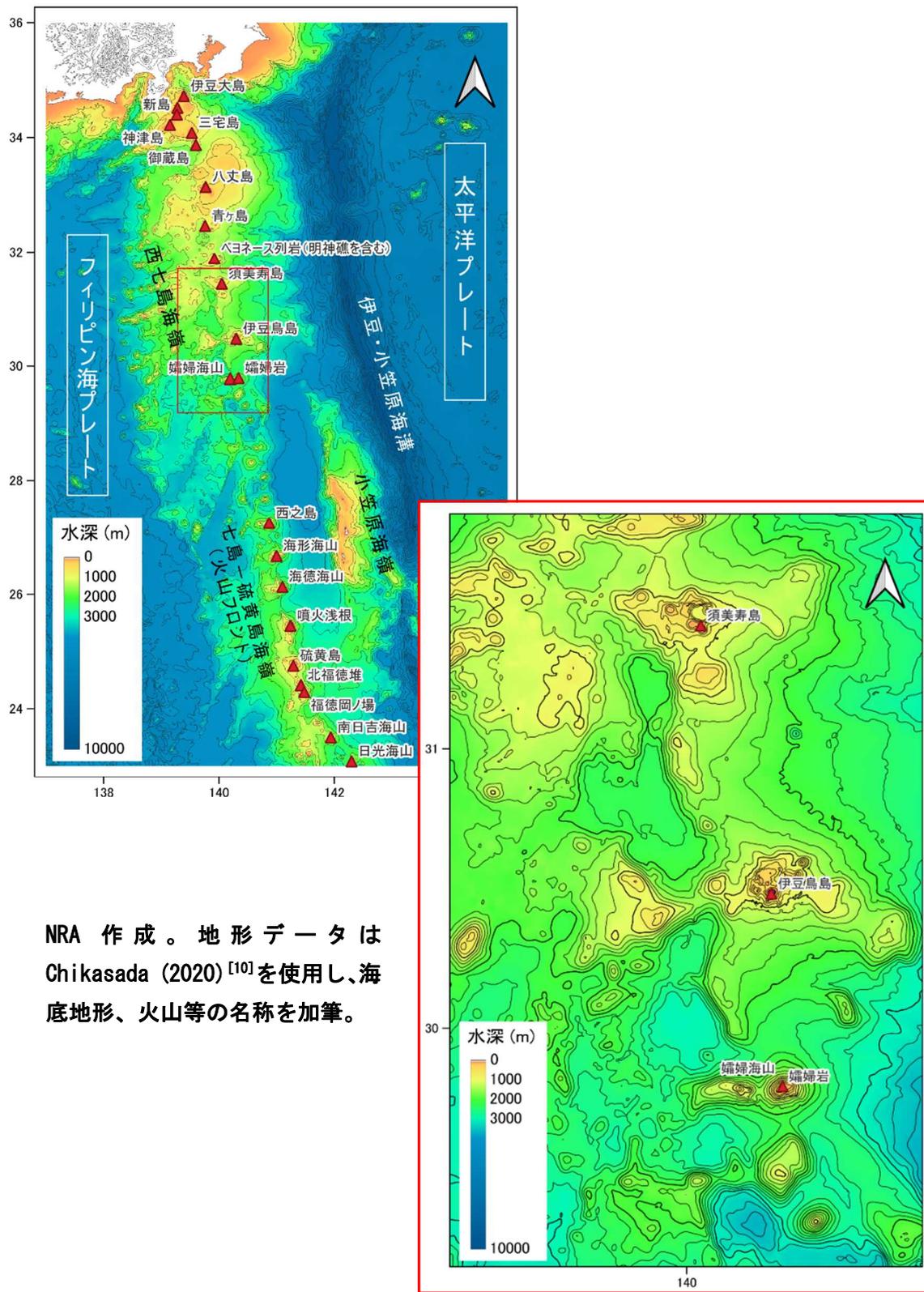
2. 1 伊豆鳥島近海のテクトニクスについて

伊豆鳥島は、東京都心部から約 600km 南に位置する伊豆・小笠原弧上の火山島の一つである（図 1）。伊豆・小笠原弧は、フィリピン海プレート北東縁部に位置し、伊豆・小笠原海溝において太平洋プレートがフィリピン海プレートの下に

沈み込んでいることに関連して形成・発達した海洋性島弧¹である^{[3][4]}。伊豆・小笠原海溝ではプレートが高角に沈み込むため背弧が発達し、また、プレート間の結合力が弱いこと等から、南海トラフと比較しても地殻変動は活発とはいえない^{[5][6]}。伊豆・小笠原海溝付近では、太平洋プレート内の深い領域で発生した地震（2015年5月30日 M8.1）が知られているものの、浅い領域において M8 程度の巨大地震の発生は知られていない^[7]。

伊豆・小笠原弧の地形の特徴は、プレートの沈み込みによってできる海溝軸に平行な南北の構造と、その構造を斜めに横切る北東—南西方向の構造の二つに分けて考えることが出来る。南北の構造は、三列の海嶺からなり、東から、小笠原海嶺、七島—^{しちとう}硫黄島^{いおうとう}海嶺、西七島海嶺と呼ばれている。七島—硫黄島海嶺は現在の火山フロントに当たり、伊豆大島から南硫黄島にいたる第四紀の火山列で火山活動が活発な地域である。また、七島—硫黄島海嶺と西七島海嶺の間には背弧凹地（背弧リフト）を形成した南北性の配列を示す正断層系の存在が知られている^[8]。

¹ 海洋プレートの下に別の海洋プレートが沈み込んだ場合に上盤プレートの縁に形成される島弧^[4]。島弧とは、海溝の陸側に存在する弧状の島列である。火山帯や深発地震帯などの特徴ある地形・地質現象を伴って島弧-海溝系をなし、プレートの収束境界と位置づけられる^[9]。海洋性島弧は、地殻が薄いために、海上に露出するのは列をなす火山島程度である^[4]。



NRA 作成。地形データは Chikasada (2020) ^[10] を使用し、海底地形、火山等の名称を加筆。

図 1 伊豆・小笠原弧及び伊豆島近海の海底地形図

2. 2 近年伊豆鳥島近海で発生した津波について

伊豆鳥島近海において、近年発生した津波を年代順に表1に示す。以後では、これらの津波の発生原因別に記載する。

表1 近年伊豆鳥島近海で発生した津波

| 発生日月 | 場所 | 規模 | 発生原因 | 津波高さ |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------------|---|---|
| ①1984年6月13日 | 須美寿島西側、水深1000m ^[11] | Mw5.6 ^[1]2] (GCMT) | マグマの貫入 ^[13] | 伊豆諸島、房総から四国に至る沿岸各地の検潮所で全振幅0.1~0.57m、周期5~9分の津波 ^[11] 八丈島の八重根漁港では全振幅1.3~1.5m ^[11] |
| ②1996年9月5日 | 須美寿島付近の伊豆・小笠原海嶺 ^[14] | Mw5.7 ^[1]2] (GCMT) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 波形の類似性から1984年の地震と同じタイプの地震^[14] ▪ トラップドア断層破壊^[12] | 最大波の全振幅値 ^[14] ・伊豆大島岡田 0.32m ・八丈島八重根 0.31m ・三宅島坪田 0.27m ・それぞれ5分の短周期波 |
| ③2006年1月1日 | 須美寿島付近の伊豆・小笠原海嶺 ^[14] | Mw5.6 ^[1]2] (GCMT) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 波形の類似性から1984年の地震と同じタイプの地震^[14] ▪ トラップドア断層破壊^[12] | 最大波の全振幅値 ^[14] ・伊豆大島岡田 0.25m ・三宅島坪田・阿古 0.18-0.2m ・それぞれ5分の短周期波 |
| ④2006年10月24日 | 鳥島近海 ^[15] | M6.8 ^[1] | 東北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型 ^[15] | 三宅島坪田で0.16m ^[16] |
| ⑤2015年5月3日 | 津波源を海底スミスカルデラ内に特定 ^[17] | Mw5.7 ^[1]2] (GCMT) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ カルデラ底の隆起と周辺部の小さな陥没^[17] ▪ トラップドア断層破壊^[12] | ・八丈島八重根で0.6m ^[18] ・神津島神津島港で0.21m ^[18] ・千葉県から沖縄県にかけての太平洋沿岸で微弱な津波 ^[18] |
| ⑥2018年5月6日 | 鳥島近海（スミスカルデラ付近） ^[19] | Mw5.4 ^[1]2] (GCMT) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ トラップドア断層破壊^[12] | ・八丈島八重根で0.3m※1 ・伊豆諸島と静岡県で微弱な津波 ※1：巨大津波観測計により観測（観測単位は0.1m） ^[19] |
| ⑦2023年10月5日 | 鳥島近海 ^[1] | M6.5 ^[1] | 北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型で、フィリピン海プレート内部で発生した地震 ^[1] | ・八丈島八重根で0.2m ^[1] （巨大津波観測計） |
| ⑧2023年10月6日 | 鳥島近海 ^[1] | M6.0 ^[1] | | ・八丈島八重根で0.2m ^[1] （巨大津波観測計） ・八丈島神湊と鹿児島県で微弱な津波 ^[1] （所属機関の観測波形データをもとに気象庁が検出した値） |

※地震調査研究推進本部資料^[1]の「過去の地震活動」を参考に期間及び範囲を設定

2. 2. 1 火山活動に伴う地震及び津波

スミスカルデラ付近(図 2)において、火山活動に伴い、中程度の地震(Mw5.4-5.7)^[12]及び津波が発生したと考えられている(表 1 の①②③⑤及び⑥)。Sandarbata et al. (2022)^[12]によると 2015 年の津波(表 1 の⑤)については、八丈島で地盤の揺れは感じられなかったものの、最大波高は 1m 程度あり、地震規模から推定される津波より大きな津波が観測された。他の 4 つの津波に関しても 2015 年の津波(表 1 の⑤)と同様の波形を示しており、地震規模から推定される津波より大きかった。これら 5 つの津波を発生させた地震の発震機構は互いに類似し、通常地震発震メカニズムとは異なることを示している。これらの津波の発生メカニズムモデルとして、従前より火山活動に伴う津波の発生モデルが複数の研究者から提案されてきたが、最近では、Sandarbata et al. (2022)^[12]によって、2015 年の津波(表 1 の⑤)に対して、「トラップドア断層破壊²」というカルデラ火山特有の地震現象が発生し、津波を引き起こしたというモデルが提唱された(図 3^[20])。なお、1996 年、2006 年及び 2018 年(表 1 の②③及び⑥)の津波についても発震機構等の類似性から「トラップドア断層破壊」と推察されている^[12]。

² カルデラ壁に沿って地中に伸びる円形の断層構造(環状断層)の破壊と、その直下でマグマを溜め込んだ水平な板状の割れ目(マグマだまり)の開口が同時に発生する連動現象であり、マグマだまり内の高圧マグマから受ける上向きの力を駆動力にして発生^{[12][20]}。これまで南米・ガラパゴス諸島の陸上火山(シエラネグラ火山)のみで測地記録が観測されていた^{[12][20]}。海域では、スミスカルデラ以外にニュージーランドのケルマデック弧の火山島、カーチス島及びチーズマン島付近で発生した地震(2009 年、2017 年)においてトラップドア断層破壊の可能性が示されている^[21]。

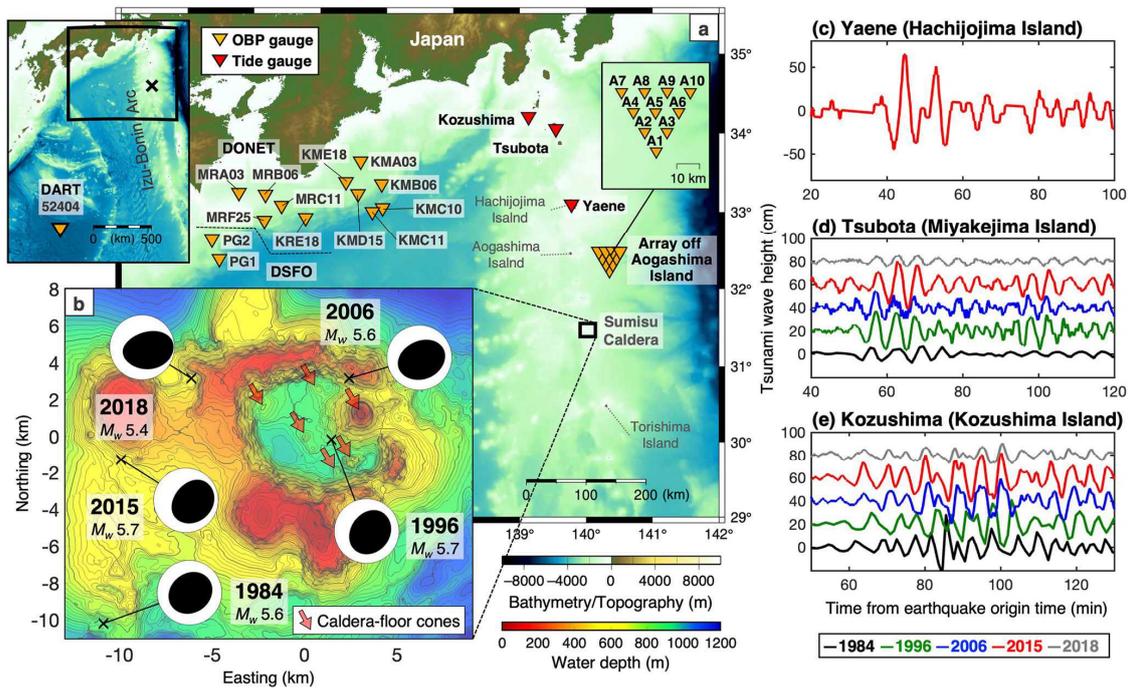


図 2 火山活動に伴う津波（スミスカルデラ）
(Sandanbata et al., 2022^[12])

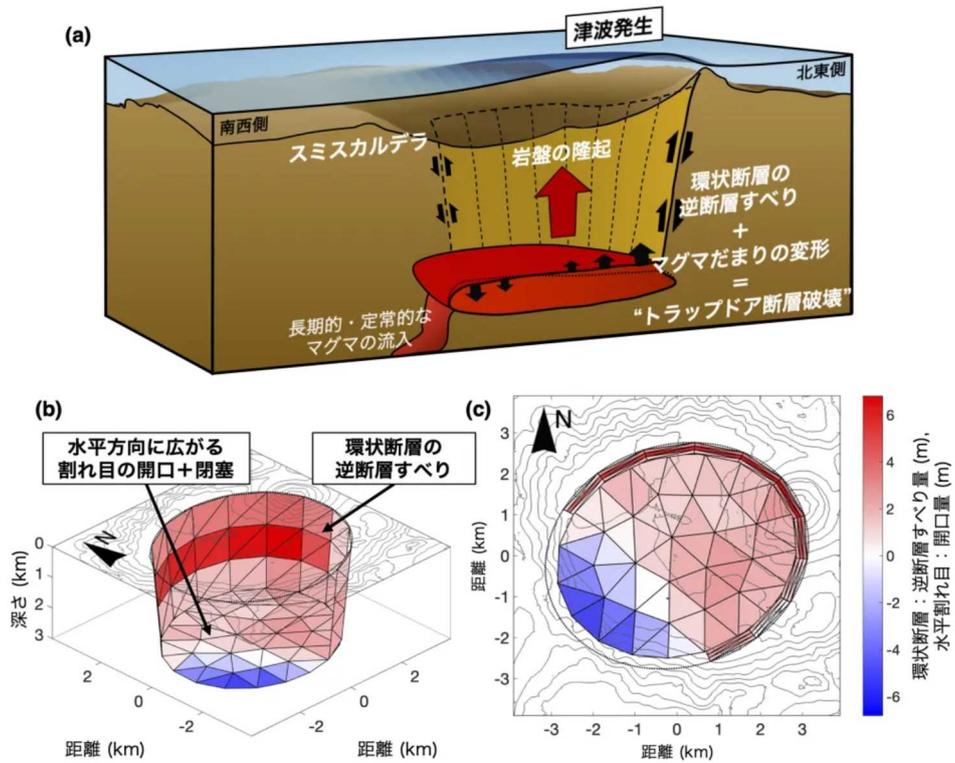


図 3 トラップドア断層破壊概念図（東京大学地震研究所、2022^[20]）

2. 2. 2 地震活動に伴う津波

2006年10月24日の津波（表1の④）は、伊豆鳥島近海の浅いところで発生したM6.8の地震が起因とされている（図4）。発震機構は東北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型^[15]であることから、2.2.1で前述したスミスカルデラ付近で発生した火山活動に伴う地震の発震機構とは異なり、通常地震発震メカニズムであった^[1]。

また、伊豆鳥島近海では、今回の津波発生前の10月2~8日の間にM6.0以上の地震が4回発生した。そのうち最大の地震は、10月5日に発生した震源深さ約10kmのM6.5の地震であり、津波を発生させた（表1の⑦）。その発震機構は、東北東-西南西方向に張力軸を持つ正断層型で、フィリピン海プレート内部で発生した地震である。また、10月6日にもM6.0の東北東-西南西に張力軸を持つ正断層型地震が津波を発生させた（表1の⑧）^[1]。

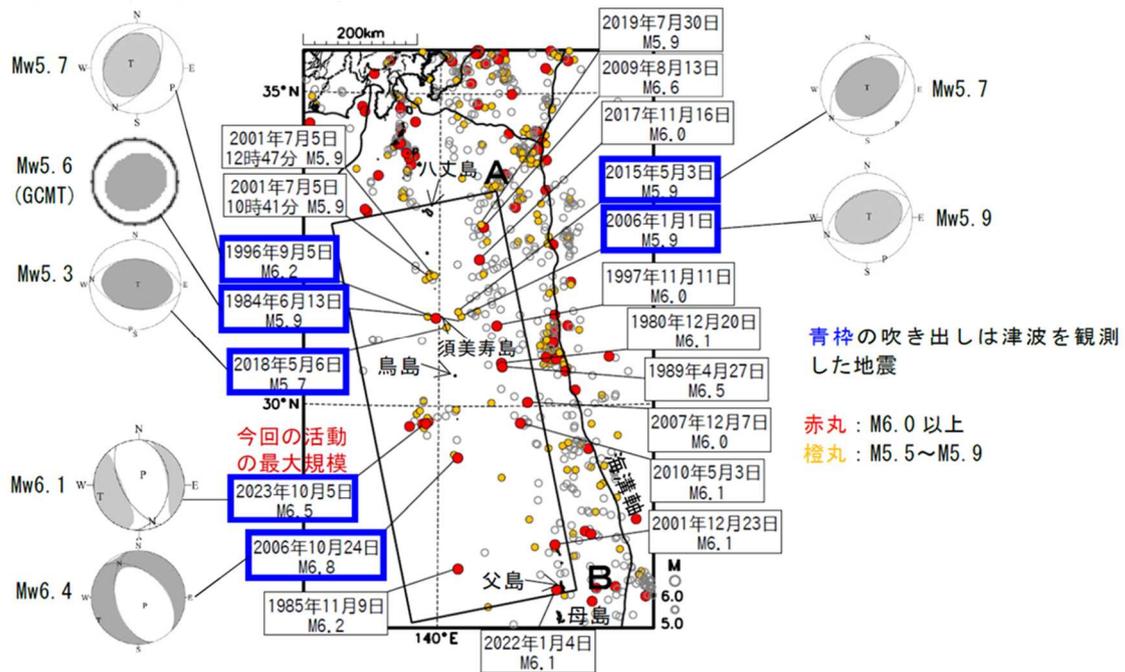


図4 地震活動に伴う津波（2006年10月24日、2023年10月5日）
（地震調査研究推進本部、2023^[1]）

2. 3 今回の津波について

2. 3. 1 10月9日の地震の特徴（発生源及び規模）について

2. 2. 2で前述した10月5日及び6日の地震の震源付近では、10月9日の4時頃から6時台にかけて地震が多発していたが、規模が小さく、震源の位置や規模を推定するのに用いられる地震波のP波及びS波が不明瞭であったため、震源が直ちに決定されなかった。その後の調査で、T波³と考えられる波を伴う地震が少なくとも14回発生していたことが分かり、T波の解析からこれらの地震の発生源がそうふかいざん孺婦海山に推定された（図1及び図5）^[1]。孺婦海山は、伊豆鳥島から南方約76kmの背弧リフト内にある。地震の発生源は、震源深さが非常に浅い地殻内又は海底にある可能性があることが示唆されている^[22]。

また、これらの地震活動の規模は、最大でM4.8^[1]と推定された。一方、最大波高分布に基づく津波マグニチュード⁴はMt8.0^[22]である。地震に伴う津波の場合にはMとMtは概ね同じ値になる傾向があり、津波地震のような場合はMt > Mになる傾向がある。これらは地震性津波か非地震性津波であるかを判断する1つの指標になると考えられ、今回の津波は一般的な地震に伴う津波の発生機構とは異なることを示している。なお、防災科学技術研究所が示した発震機構においても通常の地震発震メカニズムとは異なることを示している（**図6**）^[23]。

³ 通常、地震波のうちP波及びS波は固体地球内を伝播するが、水中を伝わることもあり、そのような波を「T波」という。T波は地震波が海底面を強く揺る際に音波（縦波）に変換することで生じるため、海底直下で発生する浅い地震や海底火山噴火に伴う振動によって生成されることが多い^[24]。

⁴ 地震の規模を表すマグニチュードには複数の種類があり、同じ地震でも種別により値が異なる。代表的なものに、気象庁が国内の地震計で観測した地震波の最大振幅を使って算出するマグニチュード（M）、地震計で観測した地震波全体を用いて求める震源の物理的な規模を表す地震モーメントという量を使って算出するモーメントマグニチュード（Mw）、津波の高さの空間分布を使って算出する津波マグニチュード（Mt）がある^[25]。

2023年10月 鳥島近海の地震活動（T相の発生源）

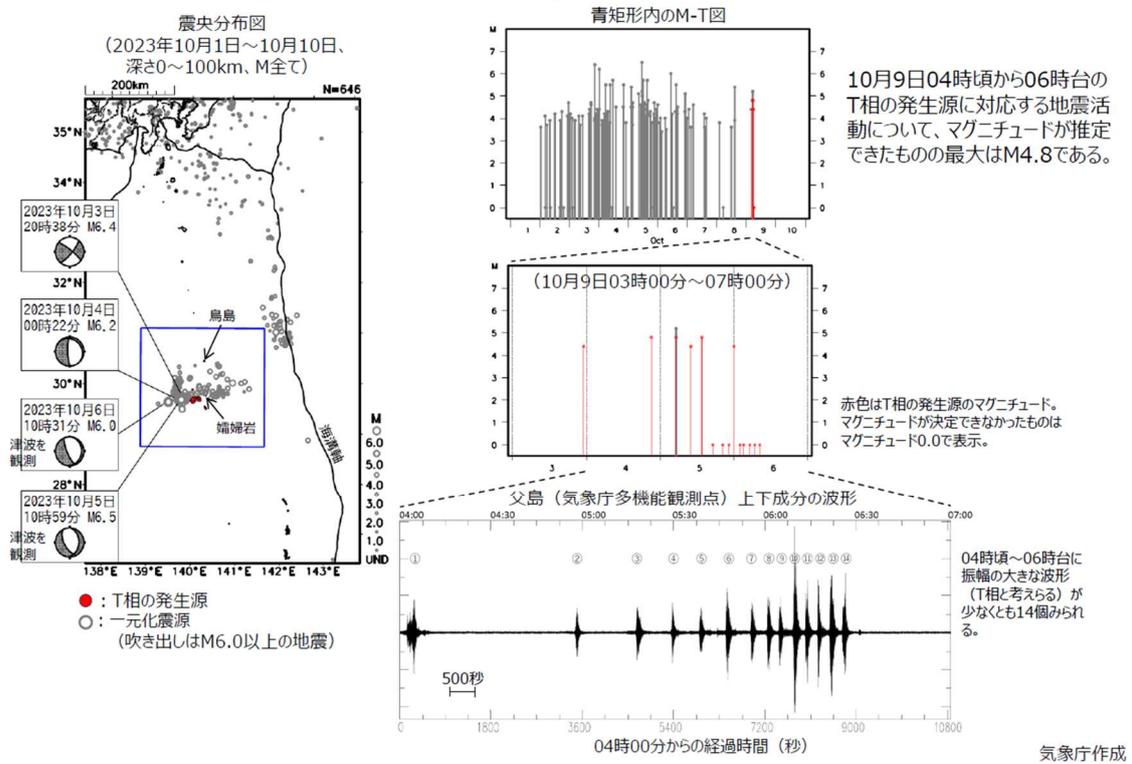


図 5 今回の津波による T 波の発生概要（地震調査研究推進本部、2023^[1]）

2023/10/09 06:00 (Mw 4.9) (暫定解)

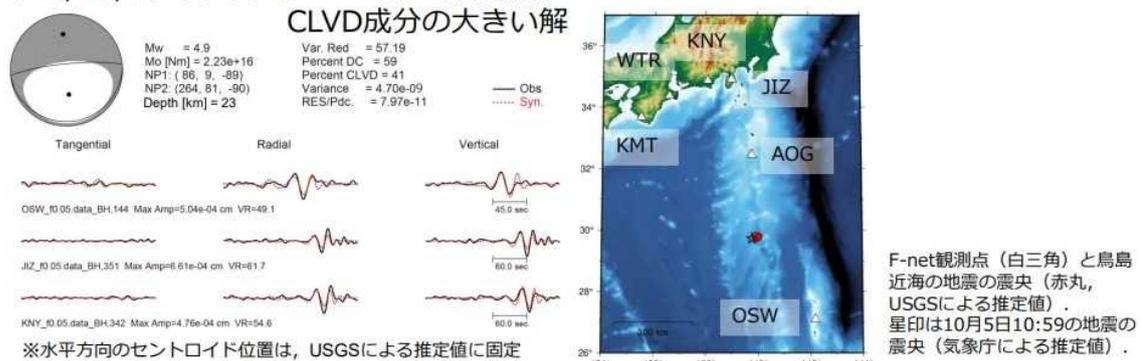


図 6 防災科学技術研究所による 2023 年 10 月 9 日 6 : 00 に発生した鳥島近海の地震の発震機構（防災科学技術研究所、2023^[23]）

2. 3. 2 発生源付近の海底地形調査について

今回の津波の発生後、海洋研究開発機構は発生源として推定された孀婦海山において海底地形調査を実施し、速報的な結果として、東西に延びる孀婦海山の中央付近にカルデラ状の海底地形があることを確認したとのことである（図 6 7）^[26]。そのカルデラ状地形の外輪の直径は約 6km、カルデラ状地形の北側に見られる中央火口丘の直径は約 2km、中央火口丘の最浅部の水深は約 900m とのことである^[26]。

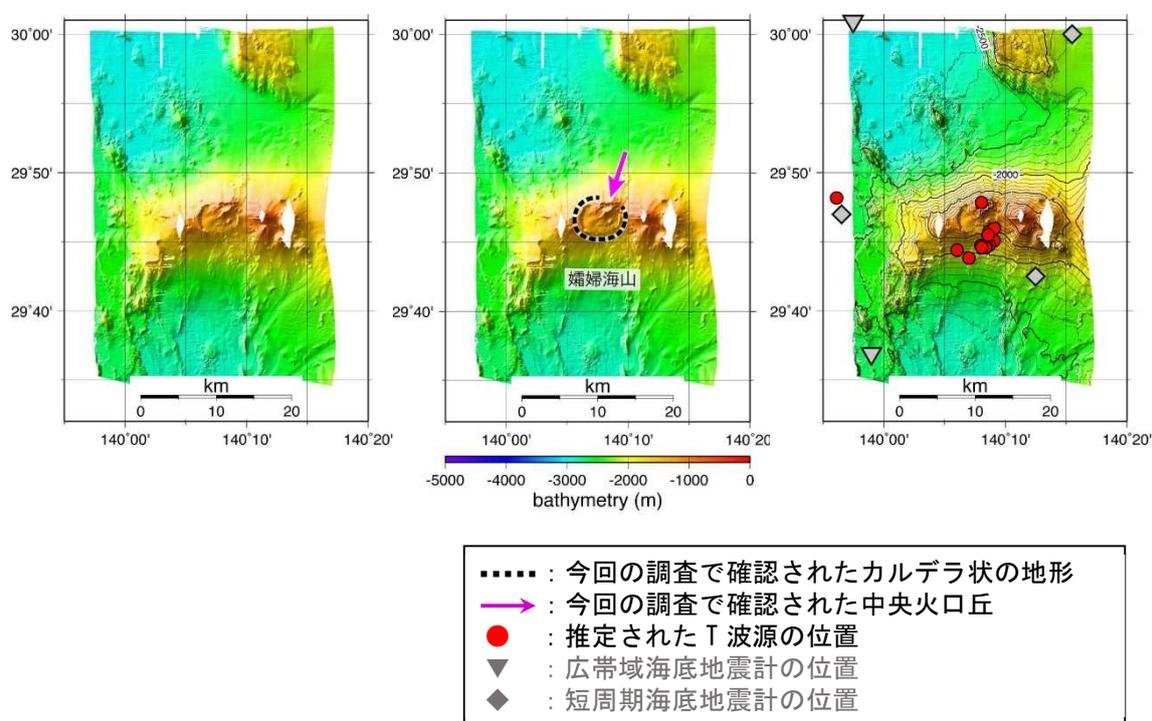


図 6 7 海洋研究開発機構による孀婦海山の海底地形調査結果^[26]

(提供 海洋研究開発機構)

2. 3. 3 鳥島沖の漂流軽石について

10月20日、海上保安庁の航空機からの観測で、鳥島西方約50kmの海域に軽石とみられる浮遊物が南北約80kmにわたり点在していることが確認され^[27]、その後、気象庁によって海面上を漂流している軽石が採取された。採取された軽石は、産業技術総合研究所及び東京大学地震研究所において分析が行われ、肉眼的特徴から灰色軽石と白色軽石に分けられた。そのうち白色軽石については、ほと

んど生物遺骸の付着が認められず、角張っているものが多く見られるとのことである。化学組成分析の結果、白色軽石は流紋岩の組成を示し、伊豆・小笠原弧火山フロント西方に連なる背弧リフト内に分布する海底火山由来と考えられる流紋岩の特徴と類似している。一方で、最近噴火活動が確認されている福德岡ノ場及び硫黄島、2022年に変色水が認められた海德海山並びに伊豆鳥島を含む伊豆・小笠原弧の火山フロント上の火山の噴出物とは明確に異なる。このため採取された白色軽石は、採取地点近傍を含む、背弧リフト内の海底火山の噴出物である可能性が高いと考えられる^[28]。

2. 3. 4 今回の津波発生のメカニズム

今回の津波は、地震規模から推定される津波に対して大きな津波を観測した。Sandanbata et al. (2024)^[22]によると、今回の津波の発生時刻歴がT波の発生時刻に対応していることから、津波の発生源とT波の発生源が共通し、孀婦海山と推定され、津波の発生源は、震源深さが非常に浅い地殻内又は海底にある可能性が示されている。発生原因の候補としては、海底噴火、山体崩壊、カルデラ内断層運動、カルデラ崩壊等の火山活動のほか、先行して多発していた地震によって不安定化した地盤の海底地すべりが挙げられている^[22]。

また、津波が大きくなった原因として、津波の発生源を孀婦海山と仮定して日本の南西沖の津波観測網で記録された波を分析した結果、津波は約1.5時間の間に同じ場所で同じようなメカニズムで断続的に繰り返し発生しており、特に振幅の大きな後半の主要イベントの発生間隔が、津波の周期(200~300秒)と同等であったために、波の増幅が生じたとの報告がある^[22]。

2. 3. 5 今回の津波の推察

本調査の結果より、伊豆鳥島近海では地震活動に伴う津波も発生するが、火山活動が比較的活発で、それに伴う火山性地震の規模が比較的小さいにもかかわらず、大きな津波が発生する特徴的な地域であることがわかった。孀婦海山で発見されたカルデラ地形及び周辺で採取された軽石の分析結果は状況証拠ではあるものの、伊豆鳥島近海地域の過去の津波発生履歴や今回の津波が地震規模に比べて大きな津波であること、さらに、断続的に発生したT波の発生源と津波の発生源が共通する可能性があることを踏まえると、今回の津波の原因は、火山活動に関連する現象が有力な候補の1つと考える。

3. まとめ

本調査の結果、今回の津波の発生原因は現時点では確定されていないが、火山活動に関連した可能性がある。伊豆鳥島近海では、これまでも火山活動による地震及び津波が発生しており、類似の活動によるものと考えられる。規制基準⁵では、津波を発生させる要因として火山活動についても考慮されていることから、現時点では、規制基準、ガイド⁶等へ反映する知見は無いと考えるが、今後引き続き情報収集活動を行い、十分な情報が得られてから再度判断する。

また、火山活動による地震及び津波の発生に関しては、新たな発生メカニズムも提案されつつあるが、火山活動に伴う津波に影響を与える因子等については不明な点も多く、事例の蓄積と共に、津波発生モデルも含めた更なる調査・分析が必要である。そのため、引き続き関連情報を収集する。

なお、伊豆鳥島近海での津波に関する個別の論文において、今後、最新知見等が得られた際には、技術基盤グループ最新知見等の反映プログラムに沿って情報共有を図ることとする。

参考文献

- [1] 地震調査研究推進本部、鳥島近海の地震活動の評価、令和5年11月10日
<https://www.jishin.go.jp/>（令和6年1月15日参照）
- [2] NHK、津波注意報 すべて解除も半日程度は潮位変化続く可能性 注意を
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20231009/k10014219591000.html>
（令和5年12月14日参照）
- [3] 渡辺一樹、伊豆小笠原弧の七島硫黄島海嶺における熱水鉱化作用、水路部研究報告、Vol. 32、1996.
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/kenkyu/report/rhr32/rhr32-01.pdf>
- [4] 高橋雅紀、東西日本の地質学的境界【第七話】火山フロントのずれ、GIS地質ニュース、Vol. 6、No. 5、pp. 149-157、2017.
- [5] 海宝由佳、伊豆・小笠原弧の地震活動、地学雑誌、Vol. 100、No. 4、pp. 503-513、1991.

⁵ 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の解釈

⁶ 基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド

- [6] 狩野謙一・村田明広、構造地質学 第12刷、朝倉書店、2017.
- [7] 地震調査研究推進本部、伊豆諸島及び小笠原諸島の地震活動の特徴
https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_kanto/p13_2_izu-ogasawara/
- [8] 藤岡他編、伊豆・小笠原弧の衝突-海から生まれた神奈川-、有隣新書、2004
- [9] 地学団体研究会編、新版 地学事典 初版第10刷、平凡社、2012.
- [10] Chikasada N, Global tsunami terrain model, 2020.
Accessed Jun 22, 2022. <https://doi.org/10.17598/NIED.0021>
- [11] 羽鳥徳太郎、1984年6月13日鳥島近海地震による特異な津波、東京大学地震研究所彙報、Vol.60、pp.87-95、1985.
- [12] Sandanbata, O. et al., Sub-Decadal volcanic tsunamis due to submarine trapdoor faulting at sumisu caldera in the Izu-Bonin Arc, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 127, e2022JB024213, 2022.
<https://doi.org/10.1029/2022JB024213>
- [13] Kanamori, H. et al., Seismic radiation by magma injection: An anomalous seismic event near Tori Shima, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 98, No. B4, pp.6511-6522, 1993.
- [14] 羽鳥徳太郎、1996年、2006年鳥島近海地震津波の規模と波源、津波工学研究報告、Vol.29、pp.71-73、2012.
- [15] 地震調査研究推進本部、10月24日 鳥島近海の地震
<https://www.jishin.go.jp/main/chousa/06nov/p09.htm> (令和5年12月14日参照)
- [16] 地震調査研究推進本部、10月24日 鳥島近海の地震 (2)
<https://www.jishin.go.jp/main/chousa/06nov/p10.htm> (令和5年12月14日参照)
- [17] Fukao, Y. et al., Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan, *SCIENCE ADVANCES*, 2018.
- [18] 気象庁、5月3日 鳥島近海の地震 (1)
<https://www.jishin.go.jp/main/chousa/15jun/p16.htm> (令和5年12月14日参照)

- [19] 気象庁、平成 30 年 5 月 地震・火山月報（防災編）5 月 6 日 鳥島近海の地震
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/gaikyo/monthly/201805/201805sonota_kobetsu_1.pdf（令和 5 年 12 月 14 日参照）
- [20] 東京大学地震研究所、プレスリリース「地震規模に比べて大きな津波を繰り返し引き起こす火山性地震の発生メカニズム：海底火山・須美寿カルデラにおける「トラップドア断層破壊」
<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/research/17626/>（令和 5 年 12 月 14 日参照）
- [21] Sandanbata, O. et al., Two volcanic tsunami events caused by trapdoor faulting at a submerged caldera near Curtis and Cheeseman Islands in the Kermadec Arc, *Geophysical Research Letters*, Vol. 50, e2022GL101086, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022GL101086>
- [22] Sandanbata, O. et al., Enigmatic tsunami waves amplified by repetitive source events near Sofugan volcano, Japan, *Geophysical Research Letters*, 2024. doi: 10.1029/2023GL106949 (in print)
- [23] 国立研究開発法人 防災科学技術研究所、2023 年 10 月 9 日鳥島近海の地震（F-net によるメカニズム解）
<https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/torishima231009/?LANG=ja>（令和 6 年 1 月 15 日参照）
- [24] 日本地震学会、日本地震学会広報紙「なみふる」、No. 75、2009.
- [25] 地震調査研究推進本部、日向灘及び南西諸島海溝周辺の地震活動の長期評価（第二版）、令和 4 年 3 月 25 日
https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/subduction_fault/
- [26] 国立研究開発法人 海洋研究開発機構、海底広域研究船「かいめい」による鳥島周辺海域の緊急調査航海の実施について（速報）
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20231121/（令和 6 年 1 月 15 日参照）
<https://www.zisin.jp/publications/pdf/nf-vol75.pdf>
- [27] 海上保安庁、鳥島近海の浮遊物について（10 月 20 日観測）
https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r5/k231020_1/k231020_1.p

df (令和6年1月15日参照)

[28] 国立研究開発法人 産業技術総合研究所、2023年10月に採取された鳥島近海の漂流軽石の特徴 (第2報)

<https://www.gsj.jp/hazards/volcano/kazan->

[bukai/yochiren/torishimakinkai_231115_1.pdf](https://www.gsj.jp/hazards/volcano/kazan-bukai/yochiren/torishimakinkai_231115_1.pdf) (令和6年1月15日参照)