

米国における原子炉安全停止に係る火災の影響軽減に関する規制要件 の調査結果とそれを踏まえた対応(案)

令和 3 年 9 月 9 日

技術基盤課

システム安全研究部門

1. 調査の概要

技術情報検討会における「規制対応する準備を進めている情報(要対応技術情報)リスト(案)」の一つである、「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」^(注 1)に対しては、将来的な「火災影響評価ガイド」¹への反映要否を含めて検討を行うこととしていることから、米国における原子炉安全停止に係る火災の影響軽減に関する規制要件について調査し、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「技術ノート」という。)」としてまとめ、令和 3 年 6 月に公表した。技術ノートでは、安全停止回路解析に関連する米国の規制要求と民間規格の関係及びその変遷を整理して米国における回路解析の規制上の位置づけを明確にするとともに、回路解析の概要、関連する米国原子力規制委員会(NRC)の規制活動、事業者の対応事例、解析結果の反映先等を調査し、我が国の火災時安全停止に関する規制要件との関係を整理した。調査の概要は以下のとおりである。

(1) 米国の火災防護規制

米国の火災防護規制を図 1 に示す。火災防護に係る規制制度には、決定論及び確率論に基づくものがある。共通する基本概念としては、火災の発生防止、火災の感知・消火及び火災の影響軽減であり、それらは 10CFR50.48、10CFR50 附則 A GDC3、10CFR50 附則 R に明記されている。

① 火災の影響軽減に係る規制要求

火災の影響軽減に紐付く「火災発生時における原子炉安全停止の達成・維持」という規制要件(10CFR50.48)に対して、決定論に基づく審査では系統分離対策が要求され、防護が必要な系統を特定し適切な分離対策が実施されているかを確認する。一方、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の裏付けが要求され、CDF^(注 2)及び LERF^(注 3)に係るリスクを評価する。関連する規制要求及び審査の概要を別紙 1 に示す。

② 決定論に基づく火災の影響軽減

決定論に基づく火災の影響軽減としては、系統分離対策を要求している。具体的には、同一火災区域内に故障・誤動作の原因になる電気ケーブル(関連する非安全回路を含む)や機器が存在する場合には、a)3 時間の火災障壁による分離、b)20ft(6.1m)以上の水平間隔による分離(その空間に可燃物が無いこと。)及び火災検知器・自動消火設備設置、あるいは c) 1 時間の火災障壁及び火災検知器・自動消火設備設置のいずれかの系統分離対策を実施する必要がある。

^(注 1) 実際に設備故障が生じた事例はなく、米国における火災時安全停止回路解析で抽出された報告である。

^(注 2) Core Damage Frequency: 炉心損傷頻度

^(注 3) Large Early Release Frequency: 早期大規模放出頻度

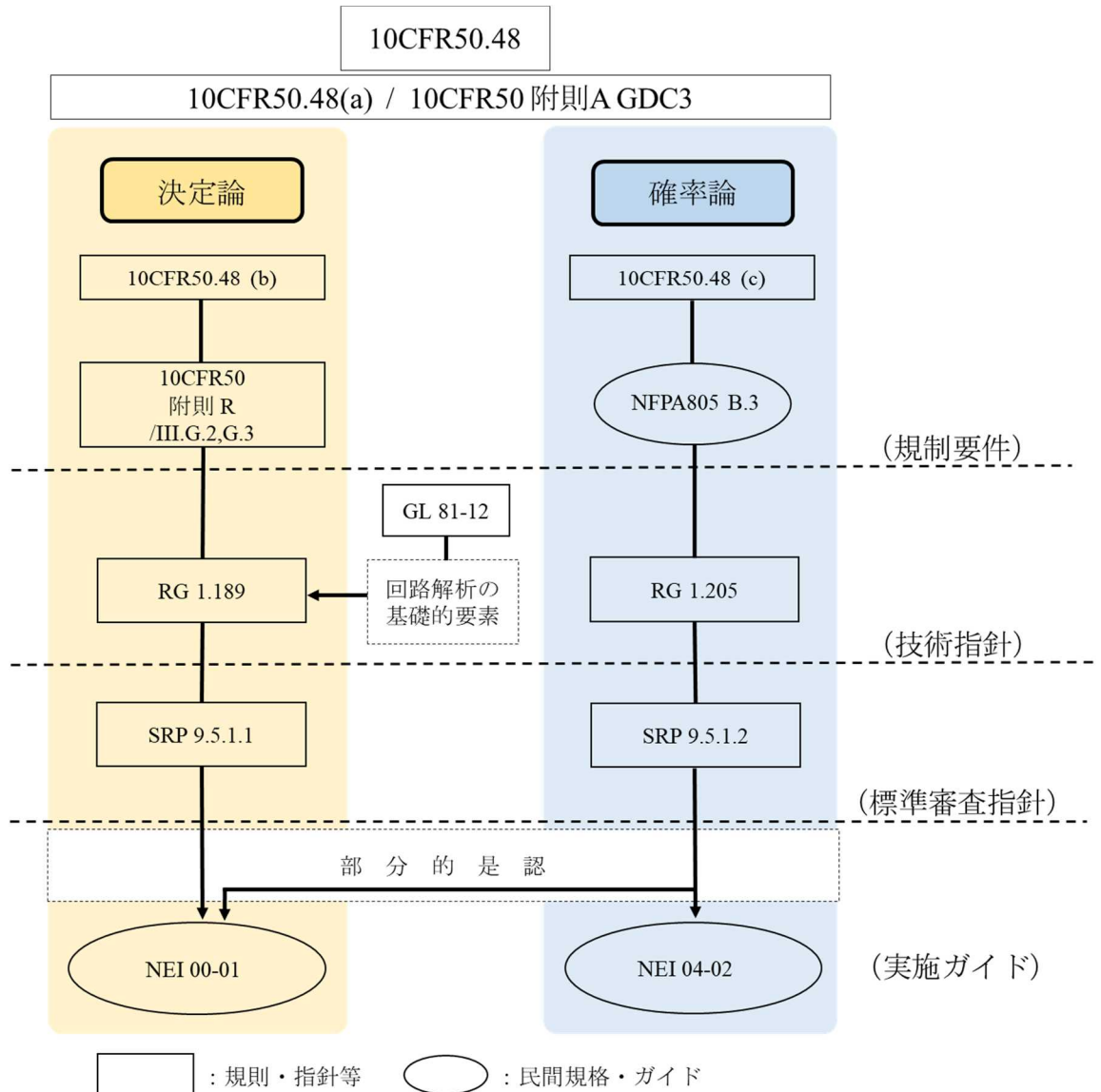


図1 米国の火災防護に係る現行規制

③確率論に基づく火災の影響軽減

(a)導入の背景

2004年以前は決定論に基づく火災の影響軽減については、10CFR50.48(a)^(注4)及び10CFR50.48(b)^(注5)のみが存在し、(1)②の系統分離対策が要求されていたが、当時から技術的要件に適合しないプラントが多数存在していた。

米国の認可制度には、本来の技術的要件に適合しない場合でも、代替となる特定の要件を満たすことによって、暫定的に適合除外が認められる場合があり(適合除外規定: 10CFR50.12)、過去に米国の事業者全体で正式に認可された火災防護に係る適合除外の申請数は数百件に上るとされている。即ち本来の規制要件である 10CFR50.48 が遵守できずに、

^(注4) 10CFR50.48(a)は 1979年1月以降に運転認可を受けたプラント及び新規建設炉に対する要件である。

^(注5) 10CFR50.48(b)は 1979年1月以前に運転を開始したプラントに対する要件である。

10CFR50.12 に基づく条件付き適合除外の承認を得ることによって、辛うじて運転認可を維持していた。このような状況は 20 年以上放置され続けていたが、適合除外の申請を恒久的に認めるのは 10CFR50.12 の趣旨ではなく、本来の 10CFR50.48 への適合への復帰が目指さなければならないとして、NRC は長年山積した諸々の不適合を総合的に解決する手段として、民間規格 NFPA805 の一部を引用するとともに確率論的規制の要件である 10CFR50.48(c)^(注 6)を 2004 年に策定した。

(b)規制要求の概要

確率論に基づく火災の影響軽減としては、回路レベルでの安全停止解析による安全性の裏付けを要求している。そのため安全停止解析の一部として回路解析が実施される場合がある。最終的には火災区域毎に火災シナリオの同定及び事故シーケンスの定量化を行い、プラント全体のリスクとして ΔCDF ^(注 2) と $\Delta LERF$ ^(注 3) の受容基準^(注 7) を満足する必要がある。

(2)回路解析について

①回路解析の概要

回路解析とは、「火災に起因する回路故障を想定する場合も原子炉の安全停止の達成・維持が可能であることを示す」という米国の規制要求を受けて実施される安全停止解析の一部であり、安全停止機能として必要な構築物、系統及び機器 (SSCs) が火災による回路故障 (短絡・地絡・断線・二次火災等による機能喪失) から防護され、安全停止が達成・維持されることを裏付けるために行うものであり、電気ケーブルを含む SSCs について実際の設置位置及び敷設経路を解析情報として、原子炉の安全停止成功パス^(注 8)に及ぼす火災の影響を (定性的又は定量的に) 評価する解析である (安全停止解析及び回路解析の概要を別紙 2 に示す。)

②回路解析の実施ガイド

回路解析を実施するための具体的手順を記載している民間ガイド NEI 00-01² は、NRC が RG1.189³ で部分的に是認している。また、2004 年には 決定論的規制の代替オプションとしての確率論的評価に基づく民間規格 NFPA805⁴ が一部引用され、関連する民間ガイド NEI 00-01² 及び NEI 04-02⁵ が部分的に是認されている。

③回路解析の活用先

回路解析の結果は、高温停止に必要な機器^(注 9) 又は安全停止に重要な機器^(注 10) に対する回路故障が安全停止に及ぼす影響を特定し、火災防護対策が安全停止の達成・維持を保障することを示すために用いられる。

^(注 6) 10CFR50.48(c)は 2004 年以降に導入されたリスク情報に基づくパフォーマンスベースの要件である。

^(注 7) リスク増加の受容基準は RG1.174 を参照。

^(注 8) 原子炉を高温停止及び低温停止にするために必要な安全停止機能を達成及び維持できる SSCs の組合せ。

^(注 9) 安全停止機能を果たす上で必要かつ十分な機器で、反応度制御、圧力制御、水量制御、崩壊熱除去、プロセス監視、補助機能で構築される安全停止パス上に存在する一次機器とそれらの補助的機能を持つスイッチや計測器等の二次機器。

^(注 10) 高温停止に必要な機器ではないが、その操作不良 (誤作動) が安全停止に影響を及ぼす機器で、安全停止機能を果たす系統に必要な流路からの分流を生じさせる弁が主なものであり、NEI 00-01² の Appendix H に具体的な例が示されている機器。

(3) 決定論に基づく NRC の規制と事業者の対応

①回路解析に関する NRC の審査・検査

審査:「火災発生時における原子炉安全停止の達成・維持」という規制要件に対しては、系統分離対策が要求されるため、NEI 00-01²に基づく回路解析の実務は審査の対象外になっている。

検査:3 年毎の火災防護検査では、回路解析に関する確認作業が検査手順書(FPTI) IP71111.21N.05⁶に基づき、特定の検査項目^(注11)が存在する場合に実施される。

②回路解析に関する米国外事業者の対応

事業者は、3 年毎の火災防護検査において火災時安全停止解析又は代替停止解析、火災 PRA の概要版等を提出し、検査官のレビューを受ける。また、回路解析を実施し摘出した火災による多重誤動作(MSO: Multiple Spurious Operation)問題の事例等を LER(Licensee Event Report)で報告する。

2. 我が国における回路解析の規制上の扱い

我が国では決定論に基づく審査が行われており、「火災発生時における原子炉安全停止の達成・維持」という規制要件に対しては、米国の決定論に基づく審査と同様に系統分離対策を要求しているため、回路解析は審査の対象外になっている。

一方、図2に示すように現行規制においても決定論に基づく審査の後に確率論に基づく安全性向上評価が実施されることになっており、「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」⁷では、「本評価で対象とする事象については、PRA実施手法の成熟状況に応じ、段階的に拡張していくものとする。」と記載され、内部事象の例として内部火災が挙げられている。したがって、回路解析がその手法の一部である火災 PRA の結果を届け出る制度は整備されている。

^(注11) ①安全停止に重要な機器^(注4)であるが安全停止の成功パスを構成しておらず、10CFR50 附則 R/III.G.2 項にも適合しないケーブルが存在する場合及び②安全停止能力に対して潜在的な影響が存在しないことを証明するために回路解析を行っている場合。

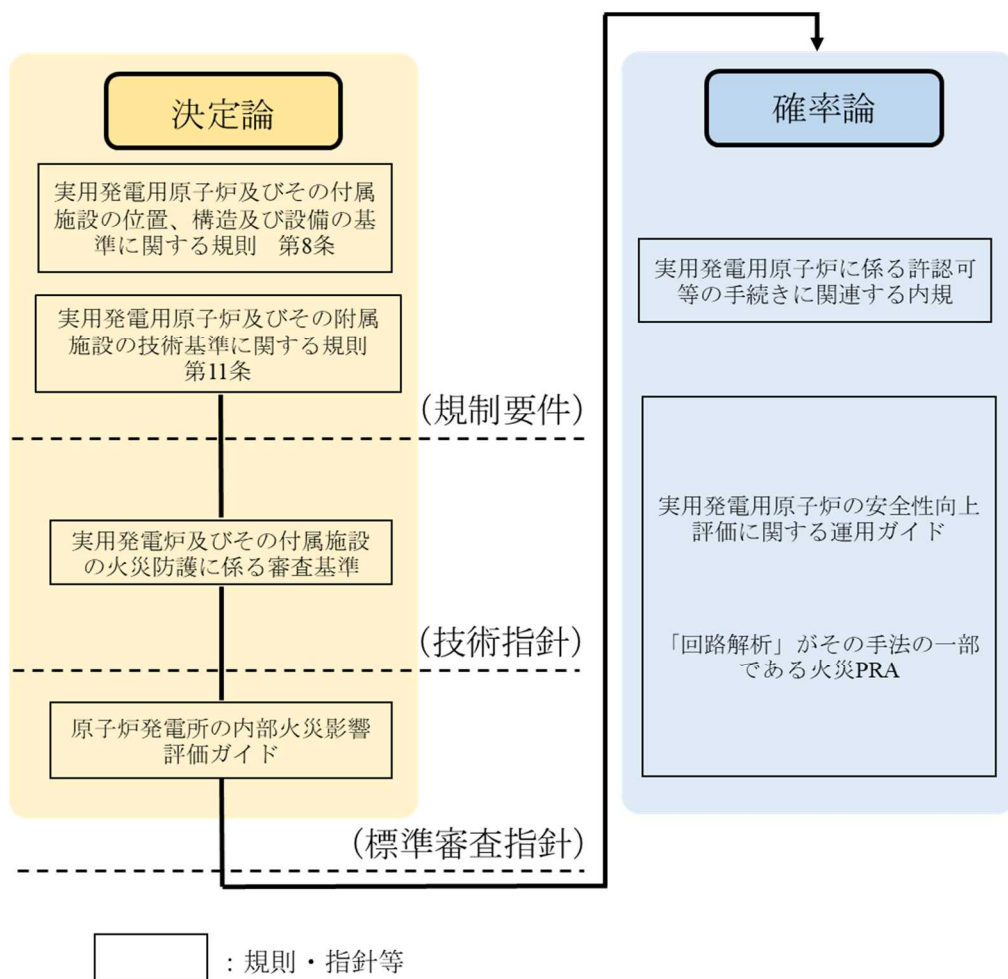


図2 我が国の火災防護に係る現行規制

3. 今後の対応

米国における原子炉安全停止に係る火災の影響軽減に関する規制要件を調査した結果、決定論に基づく審査では、「火災発生時における原子炉安全停止の達成・維持」という規制要件に対する我が国と米国の系統分離対策は同じであり対策を講じていることから、現時点で回路解析の「火災影響評価ガイド」への反映の必要性は低いものと考えられる。

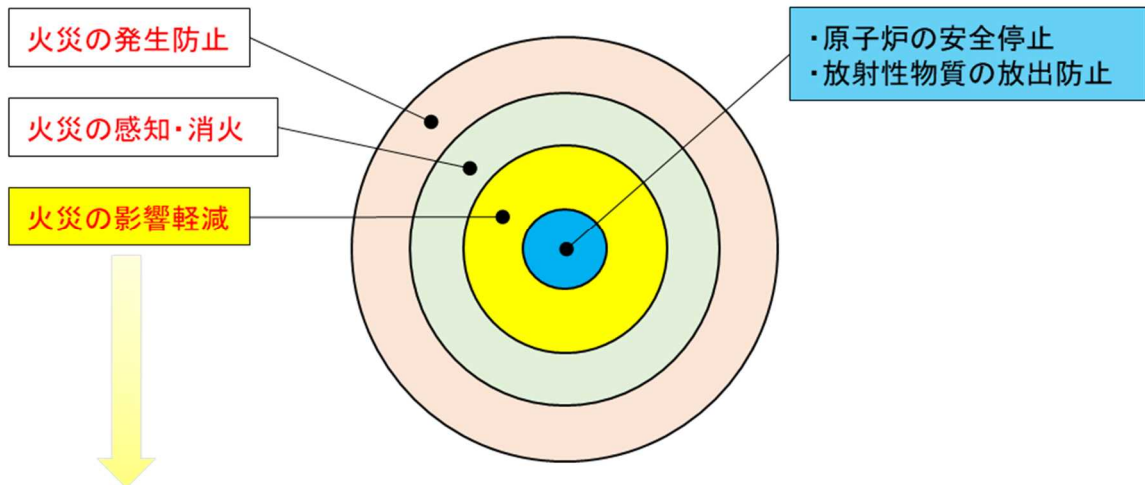
しかしながら、米国では MSO 等回路故障が安全停止に及ぼす影響を回路解析により幅広く検討し、事業者が不適合事例を報告している。そのため我が国においても火災 PRA 手法（回路解析が手法の一部である）により、その成熟状況に応じて安全性向上評価において段階的に事業者が評価を進めることが想定されることから、事業者における検討状況等について、時期をみて公開で意見を聴取することとしたい。

参考文献

1. 原子力規制委員会、“原子力発電所の内部火災影響評価ガイド”
(制定 平成 25 年 6 月 19 日、原規技発第 13061914 号)
改定 令和元年 9 月 6 日、原規技発第 1909069 号
2. Nuclear Energy Institute, NEI 00-01 Revision 2, “Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Circuit Analysis”, H-8p, June 5 2009.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “REGULATORY GUIDE 1.189, October 2009 Revision 2”, C-8p, October 2009.
4. National Fire Protection Association, NFPA805, “Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants”
5. Nuclear Energy Institute, NEI 04-02 Rev.2, “GUIDANCE FOR IMPLEMENTING A RISK-INFORMED, PERFORMANCEBASED FIRE PROTECTION PROGRAM UNDER 10CFR 50.48(c)”, February 2006.
6. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “ATTACHMENT 71111.05T Fire Protection (Triennial),” January 1, 2012, p.1-E3-4.
7. 原子力規制委員会、“実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド”
制定 平成 25 年 11 月 27 日、原規技発第 1311273 号

火災の影響軽減に係る規制要件及び審査の概要

■火災防護の基本概念



■「火災の影響軽減」に紐づく規制要件、規制要求及び審査

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

	決定論に基づく審査	確率論に基づく審査
規制要求	系統分離対策	回路レベルでの安全停止解析による安全性の裏付け
審査内容	防護が必要な系統を特定し適切な分離対策が実施されているかを確認。	炉心損傷頻度(CDF)及び早期大規模放出頻度(LERF)に係るリスクを評価

安全停止解析の一部として回路解析を実施

■火災防護に係る規制制度に関する日米比較

日本	米国	米国
決定論	決定論	確率論
系統分離対策が必須 系統分離対策が不十分なプラントは運転することができない。	系統分離対策が必須 系統分離対策が不十分なプラントは運転することができない。	<div style="border: 2px dashed red; padding: 10px; margin-bottom: 10px;"> 免除規定(10CFR50.12)により代替となる特定の要件を満たすことによって暫定的に適合除外が認められる場合があり、系統分離対策が不十分なプラントでも運転できる。 </div> 2004年以降に確率論に基づく規制制度へ移行

安全停止解析及び回路解析の概要

安全停止解析

A：安全停止機能・系統・パスの決定
【安全停止パスの構成要素】
 ①反応度制御、②圧力制御、③水量制御
 ④崩壊熱除去、⑤プロセス監視、⑥補助機能

安全停止 (SSD*1)機能を阻害する系統と要因も含める。
 ・ (補給機能を上回る) RPV*2/RCS*3水量喪失。
 ・ (補給機能を上回る) 分流、閉塞。
 ・ SSDに用いられる補給水系が火災エリア (FA*4) 内にある。
 ・ SSDに用いられる崩壊熱除去系がFA内にある。

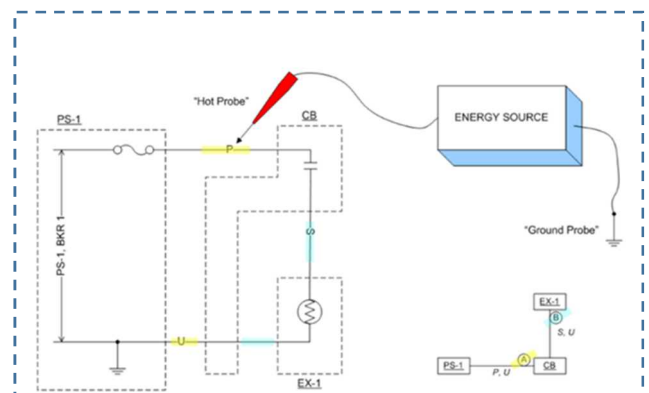
B：安全停止機器の選定
 SSD機能を担う機器及び阻害する機器を選出する。

C：安全停止ケーブルの選出
 ① 選出された機器の運転に必要なケーブル及び動作不良を引き起こすかもしれないケーブルを特定する。
 ② 当該機器の関連ケーブルも含む。
 ③ 火災エリアごとに、電線管・ケーブルトレイ、ケーブルの終端を特定する。
 ④ データを集合し、火災エリアごとにSSDケーブルとSSD機器を整理する。

D：火災エリア別評価及び緩和策 (防止策) の立案
火災エリア別評価
 火災エリアごとにSSD機器への影響を特定し、SSDパスを決定する。
 回路解析により、各ケーブルのそれぞれの導体について、断線、短絡、地絡の影響を評価する。

緩和策 (防止策) の立案
 高温停止に必要な機器に対しては以下の対応により安全停止を保証する。
 ・ 問題を解決するための回路、又は機器の再解析並びに再設計
 ・ 問題のケーブルの再布設
 ・ 問題のケーブルに対するAPP. R III.G.2項に沿った保護
 ・ 基本要件に対する免除・特例措置の申請
 ・ 火災ハザード解析による正当化
 ・ 同機能を果たす他の機器を特定し、バックアップを確保
 安全停止に重要な機器に対しては以下の対応により安全停止を保証する。
 ・ 運転員によるマニュアル・アクションを用意
 ・ 火災モデル評価による正当化

回路解析



Hot Probe 手法

仮想電源を用いて回路を構成する導体に“Hot Probe が接触した場合”と“Ground Probe が接触した場合”の回路の応答を下表の様に整理する。

表：下記の表記による導体の評価の例

導体	Hot Probe	Ground Probe
P	NC	LOP-BF
S	SO-HS	LOC
U	NC	NC

NC : No consequence (回路への影響なし)
 SO-HS : Spurious open due to a hot-short (ホットショートにより誤作動 (誤開))
 LOP-BF : Loss of power due to blown fuse (ヒューズが飛んで回路電圧が喪失)
 LOC : Loss of Control (制御不能)

- *1 安全停止 (SSD: Safe Shut Down (以下「SSD」という。))
- *2 原子炉圧力容器 (RPV: Reactor Pressure Vessel (以下「RPV」という。))
- *3 原子炉冷却系 (RCS: Reactor Cooling System「以下「RCS」という。))
- *4 火災エリア (FA: Fire Area (以下「FA」という。))