

福島第一原子力発電所事故に対する 前兆事象の検討

Study on Precursors to Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

渡邊 憲夫

Norio WATANABE

安全研究・防災支援部門

安全研究センター

規制情報分析室

Office for Analysis of Event and Regulatory Information

Nuclear Safety Research Center

Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

August 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

福島第一原子力発電所事故に対する前兆事象の検討

日本原子力研究開発機構

安全研究・防災支援部門 安全研究センター 規制情報分析室

渡邊 憲夫

(2014年5月27日受理)

運転経験から教訓や知見を得て原子力施設の設計、建設、運転及び管理にフィードバックすることの重要性が認識されている。実際、多くの事例において、過去に発生した類似の事象やシーケンスを伴っている。これらの事例は、「前兆事象」と呼ばれ、学ぶべき安全上重要な教訓が含まれている。本検討では、運転経験の分析を通して、福島第一原子力発電所事故（以後、「福島事故」と呼ぶ）に対する前兆事象を明らかにするとともに、それらの事象から学ぶべきであった教訓や知見について議論する。福島事故に対する前兆事象として、本検討では、次の6件の事例を特定した：1)火災と大規模な内部浸水及び安全系の機能喪失、2)火災と制御室機能及び崩壊熱除去機能の喪失を伴う長時間の全交流電源喪失(station blackout)、3)安全系の機能喪失を伴う外部浸水と複数基立地サイト問題、4)外部電源喪失と非常用ディーゼル発電機2台中1台の動作不能、5)津波起因の浸水、及び、6)計装電源の共通モード故障。また、これら6件の中で福島事故に最も近かったニアミス事例についてそのシナリオを分析しシビアアクシデントに至らずに済んだプロセスについて検討した。なお、本報告書は、著者の博士論文（英文）の一部を抜粋し翻訳したものである。

Study on Precursors to Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

Norio WATANABE

Office for Analysis of Event and Regulatory Information,
Nuclear Safety Research Center,
Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 27, 2014)

It has been recognized an important and effective means to learn lessons from operating experience and to feed them back to the design, construction, operation and management of facilities. A lot of events involved a series of similar occurrences and/or sequences which have been experienced in the past. These are referred to as precursors which might have safety significant lessons to be learned. In the present study, identified and discussed are the precursors to the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (hereinafter, the Fukushima accident) through the analysis of the operating experience to obtain the generic lessons which should have been learned. As precursors to the Fukushima accident, six events are identified: 1) fire, massive internal flooding and loss of safety systems, 2) fire and prolonged station blackout involving loss of control room and loss of residual heat removal, 3) external flooding involving loss of safety systems and multi-unit site issue, 4) loss of offsite power with one of two emergency diesel generators inoperable, 5) tsunami-induced flooding, and 6) common-mode loss of instrument power. Furthermore, the most notable near-miss to the Fukushima accident is discussed. This report is a translated version of part of the author's doctoral thesis in English.

Keywords; Fukushima Accident, Precursor, Operating Experience, Lessons Learned, IRS Reports, Flooding, Station Blackout, Loss of Power, Loss of Safety Systems

目 次

1. はじめに.....	1
2. 福島事故に寄与した主要な異常	1
3. 情報源	3
4. 前兆事象の選定.....	4
4.1. 個別事例の概要	4
4.2. 有効な安全設備に関する主な特徴	10
4.3. 前兆事象からの教訓	12
5. 前兆事象と福島事故に関するイベントツリー	15
6. おわりに.....	16
謝辞.....	18
参考文献	18

Contents

1. Introduction	1
2. Major Occurrences Contributing to Fukushima Accident.....	1
3. Information Sources	3
4. Selected Precursors	4
4.1. Short Description of Events	4
4.2. Main Features on Effective Safety Layers or Provisions	10
4.3. Lessons Learned from Precursor Events	12
5. Event Tree for Precursor Event and Fukushima Accident	15
6. Conclusion.....	16
Acknowledgment	18
References	18

略語リスト

- ASDV : atmospheric steam discharge valve (大気蒸気放出弁)
CCW : condenser cooling water (復水器冷却水系)
DC : direct current (直流)
EDG : emergency diesel generator (非常用ディーゼル発電機)
EPSW : emergency process seawater (非常用プロセス海水系)
ESWS : essential service water system (必須サービス水系)
HPCI : high pressure coolant injection (高圧注水系)
IAEA : International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
IC : isolation condenser (非常用復水器)
IRS : International Reporting System for Operating Experience (国際運転経験報告システム)
MCR : main control room (主制御室)
OECD/NEA : Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency (経済協力開発機構/原子力機関)
PORV : pressurizer power-operated relief valve (加圧器逃がし弁)
PSW : process seawater (プロセス海水系)
RCIC : reactor core isolation cooling (原子炉隔離時冷却系)
RCP : reactor coolant pump (原子炉冷却材ポンプ)
RCS : reactor coolant system (原子炉冷却系)
SBO : station blackout (全交流電源喪失)
SFP : spent fuel pool (使用済み燃料プール)
SG : steam generator (蒸気発生器)
SPDS : safety parameter display system (安全パラメータ表示系)
SRV : safety relief valve (逃がし安全弁)
TG : turbine generator (タービン発電機)
TMI-2 : Three Mile Island Unit 2 (スリーマイル島原子力発電所 2号機)
UPS : uninterruptible power supply (無停電電源)

This is a blank page.

1. はじめに

原子力分野のみならず他の全ての技術分野において、施設の設計段階で気付かなかった事項や運転・管理に対して考慮すべき事項を明らかにして適切に対処するために、運転経験や事故から教訓を得ることが重要かつ有効な手段であると認識されている。特に、原子力施設の安全を確保するためには、実際に発生した事例の原因分析を通して教訓や知見を得て、それらを施設の設計、建設、運転及び管理に反映させることが重要な要素の1つである。こうした活動は、「運転経験フィードバック」として世界各国で行われてきており、事象の報告が原子力施設の運転や規制の重要な側面となっている。

しかしながら、事故や故障が全く新しい現象や要因によって起こるケースは稀であり、その多くにおいては過去に類似の不具合／異常やシーケンスが発生している。例えば、1979年3月28日に Three Mile Island-2 号機 (TMI-2) で発生した事故は、1977年に同型の原子力発電所 Davis Besse で起こった事象⁽¹⁾と類似している。Davis Besse の事象は、蒸気・給水制御系の故障により2基の蒸気発生器(SG)への給水弁が閉止したことで始まり、その結果、SG水位が低下して原子炉冷却系(RCS)の圧力及び温度が上昇した。その後、加圧器逃がし弁(PORV)が9度にわたって開閉を繰り返し、その後開固着したため、クエンチタンクのラプチャディスクが破損した。RCS圧力は6分以内に飽和圧まで低下し蒸気が形成されたため、加圧器に水が流れ込み水位が最大値まで上昇した。事象開始から21分後、運転員は、PORVが開固着したものと判断し加圧器元弁を閉止した。これによって、トランジェントが収束し、その後、原子炉は安全停止状態に移行された。この事象シーケンスは、TMI-2事故の初期段階と極めて類似していたが、その安全上の重要性が十分に認識されず、また、TMI-2の運転員はこの事象を知らなかったと言われている。当時、ある一人の原子力エンジニアが Davis Besse の事象の重要性に気付き、この事象の潜在的なリスクについて警告したが、この警告にも殆ど誰も注意を向けず、結局、TMI-2事故により彼の予言が的中した格好となった⁽²⁾。後に、Davis Besse の事象は、TMI-2事故の前兆事象と認識されるようになった。

本検討では、学ぶべき一般的な教訓を得るために、過去の運転経験の分析を通して福島第一原子力発電所事故(以後、「福島事故」と呼ぶ)に対する前兆事象を取り上げて議論している。なお、本報告書は、著者の博士論文(英文)⁽³⁾の一部を抜粋し翻訳したものである。

2. 福島事故に寄与した主要な異常

福島事故は、地震とその後の津波に起因した浸水によって始まった。地震による安全関連系や構築物の著しい損傷はなかったと考えられるが、広い範囲において地震により外部電源グリッドが機能喪失し福島第一原子力発電所での外部電源喪失となった。その結果、停止中の3基を含む6基の原子炉全てが外部電源を失った。

津波により設計基準を大きく超えるサイト内浸水が起こった。これによってその様

相は僅かに異なるものの全ての原子炉が影響を受けた⁽⁴⁾。1号機では、非常用ディーゼル発電機(EDG)とDCバッテリー（あるいはそれらに関連した電源盤）が浸水し津波襲来後に利用不能となった。その結果、DC電源の動作不能を伴う長時間の全交流電源喪失(SBO)となり、炉心冷却、圧力制御、残留熱除去及び格納容器冷却などの安全機能が喪失した。2号機では、1号機と同様、浸水によりEDG及びDCバッテリーが喪失したが、原子炉隔離時冷却系(RCIC)がその制御機能を失いながらも約70時間作動し続けた。2号機でも長時間のSBOとDCバッテリーの機能喪失が起こり、炉心冷却、圧力制御、残留熱除去及び格納容器冷却の機能が失われた。一方、3号機では、DCバッテリーの一部が利用可能であったためRCICを制御したり高圧注水系(HPCI)を作動させることができた。そのため、RCICとHPCIはそれぞれ約20時間、14時間作動した。バッテリーが枯渇した後、3号機でも、長時間に及ぶSBOにより炉心冷却、圧力制御、残留熱除去及び格納容器冷却の機能が喪失した。4号機は停止中であり、燃料集合体は全て使用済み燃料プール(SFP)に移されていた。SBOとDC電源喪失により、SFP冷却ができなくなった。1～4号機では、DC電源喪失により主制御室(MCR)におけるプラントパラメータの表示が全てなくなったため、運転員はブラインド運転を余儀なくされた。5、6号機も停止中であったが、全ての燃料集合体は原子炉内に装荷されていた。6号機では、津波襲来後も、1台のEDGとDC電源が利用可能であったため、電力は5、6号機に交互に供給され、逃がし安全弁(SRV)の開閉と復水移送ポンプの手動作動により炉心の冷却が行われた。

結果的に、福島第一原子力発電所の1～3号機では、以下のタイプの不具合／異常を経験し、これらは炉心損傷に寄与した主要な不具合／異常であるとともに、設計基準を超える地震や津波と同様、当該事故を特徴づけるものである。

- ・ 外部電源喪失（地震による）
- ・ 浸水（津波による）
- ・ 所内電源の喪失、即ちEDGの利用不能（浸水による）
- ・ 長時間に及ぶSBO（地震による外部電源喪失と浸水による所内電源の喪失）
- ・ DC電源の喪失（浸水による）
- ・ MCRの機能喪失（主にDC電源の喪失による）
- ・ 原子炉減圧機能喪失と炉心冷却機能の喪失（DC電源喪失による）
- ・ 最終ヒートシンクの喪失（主に津波による）
- ・ 格納容器機能の喪失（主に長時間に及ぶ熱除去機能の喪失による）

上記不具合／異常間の関係を**Figure 1**に示す。

これらの不具合／異常は、その原因が福島事故の場合と異なるものの、過去に幾つかのプラントで起こっており安全上重要な事象として認識されてきた。以下では、上記の不具合／異常と過去の設計基準を超える事象に焦点を当て、福島事故の前兆事象について議論する。

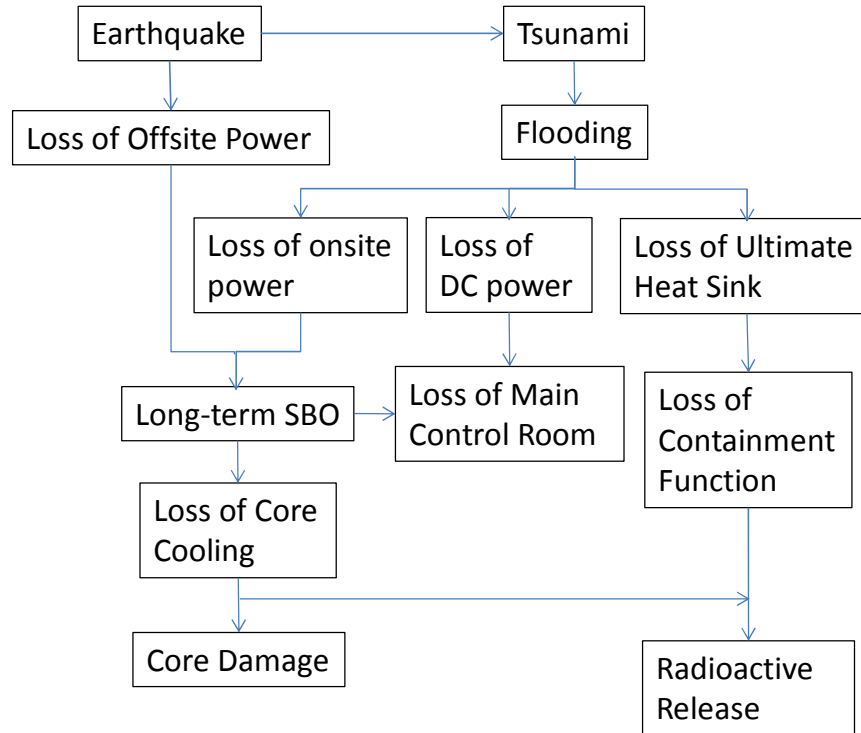


Figure 1 Relations among Major Occurrences in Fukushima Accident

3. 情報源

本検討では、主として、国際原子力機関(IAEA)と経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)が共同で運営する国際運転経験報告システム(IRS)に報告された事象報告書を活用した。IRSは、主に原子力分野における技術的専門家に資することを目的としているため、報告される情報は一般公衆に配布することを意図していない。従って、IRSへのアクセスは、原則として、加盟国のコーディネータによる承認を受け登録された個人に限定され、事象の詳細や関連するプラントの対応を含め原子力コミュニティ内での情報公開を推奨している^(5,6)。そのため、本検討では、事象に関する情報や検討の結果として得られる知見を原子力コミュニティ内でより一層広めることができるよう、IRSの基本原則に従い、事象に関する情報を概括することとした。

1988年以降、著者らは、2000件以上のIRSレポートのレビューを行ってきた。最初の10年間は、700件以上のIRSレポートをレビューしその結果を原子力安全委員会に提供した。その後、個々のIRSレポートについて分析を行い、その結果を年ごとに限定公開文書としてまとめている。この限定公開文書では、個々のレポートに記される事象を概括するとともに、安全上重要な事象や一般性のある問題を含む事象を取り上げているIRSレポートを同定し、国外の事例を理解する上での助けになるようIRSの基本原則に従って我が国の規制機関や電力会社に配布している。

包括的なレビューにより、外部電源喪失やEDGの故障、ヒートシンクの喪失など様々なタイプの安全上重要な事象を取り上げた約200件のIRSレポートを同定してきた。特

に、数多くの再発事象が同定されており、以前の是正措置が再発防止に必ずしも効果的ではなかったことを示している。次章で述べるように、そのうちの幾つかは、福島事故の前兆事象と考えられる。特に、外部事象については、幾つかのプラントで設計基準を超える事象を経験しており、こうした事象のプラントへの潜在的な影響を考慮しより一層の注意を払うべきであった。

4. 前兆事象の選定

4.1. 個別事例の概要

安全上重要な事例として同定した約200件の事象の中から、福島事故に対する前兆事象として以下に示す6件の事例を選定した。これらの前兆事象は、福島第一原子力発電所1～3号機でのシビアアクシデントと同様に設計基準事象を超えたり、2章で取り上げた福島事故の原因あるいは寄与因子となった不具合／異常を1つ以上伴うものとして選定した。

- ・ 事例1：火災とその後の大規模な内部浸水及び安全系の機能喪失
- ・ 事例2：火災と制御室機能及び崩壊熱除去機能の喪失を伴う長時間のSBO
- ・ 事例3：安全系の機能喪失を伴う外部浸水と複数基立地サイト問題
- ・ 事例4：外部電源喪失とEDG 2台中1台の動作不能
- ・ 事例5：津波起因の浸水
- ・ 事例6：計装電源の共通モード故障

これらよりも安全上の重要性の高いものもあるかもしれないため、本検討において選定した事例は完全さを意図したものではないことに注意されたい。しかしながら、選定した事象は、福島事故に対する前兆事象を議論する上で適切な事例である。以下に記す事象の概要は、それぞれの事例に関するIRSレポート⁽⁷⁻¹²⁾を基にしているものの、その幾つかについては公開文書も参照している⁽¹³⁻¹⁵⁾。

(1) 事例1

本事象における主要な不具合／異常を**Figure 2**に示す。タービンプレードが破損してタービンの著しい振動を引き起こした。これにより、タービン発電機TG-2が自動的にトリップした。その直後、原子炉が手動でスクラムされTG-1もトリップした。また、TG-2では火災と爆発が発生した。潤滑油の飛散に伴って火災が拡大し多数のケーブルトレイが影響を受けたため幾つかの安全設備やそのサポート系が利用できなくなった。さらに、電気建屋と制御室に煙が入り込み自律設備の使用を余儀なくさせた。

TG-2復水器冷却系からの海水、機器冷却系脱塩水タンク及び火災防護設備からの水といった幾つかの水源から大量に漏れ出したため原子炉建屋が浸水した。この浸水により停止時熱交換器ポンプや停止時換気系コンプレッサ、使用済み燃料冷却ポンプなどプラントの復旧に重要な設備が影響を受けた。

本事象による放射線影響はなく炉心は継続的に冷却された。しかし、本事象では、幾つかの安全系が故障し炉心の適切な冷却に影響を及ぼしたため、プラントの安全性

に対する重大な脅威となった。プラントの設計は、共通モード故障（主として火災と浸水）に対処するのに不十分であり、こうした複雑な事象に対応するための手順は用意されていなかった。特に、原子炉建屋には水位計装がなく、安全設備に対する物理的分離やペデスタルなどの他の防護措置も講じられていなかった。

このように、本事象は、火災、浸水、48 VDC制御母線の部分的喪失による制御室機能の一部喪失、及び、安全系の部分喪失を引き起こした。

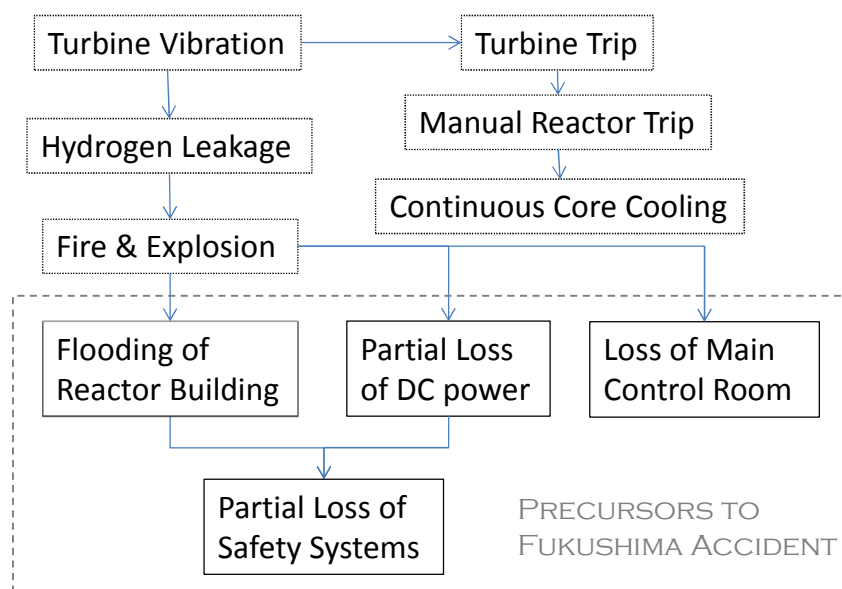


Figure 2 Major Occurrences in Event-1

(2) 事例2

本事象における主要な不具合／異常をFigure 3に示す。出力運転中、タービンブレードが破損したためタービンが振動して冷却用の水素が漏れ出しタービン建屋内で水素爆発を伴う火災が発生した。タービン発電機が自動的にトリップし原子炉が直ぐに停止した。火災により電力ケーブルが焼損し原子炉の電源供給が喪失したが、炉心冷却はサイホン効果（自然循環）により維持された。また、ディーゼル駆動消火ポンプが起動しSG二次側に給水するとともに、大気蒸気放出弁(ASDV)が開放されSG圧力が下げられた。大量の煙がMCRに流れ込んだため、運転員はMCRからの退避を余儀なくされた。そのため、非常用制御室から事態を收拾するための試みがなされたが、電源の喪失により原子炉パネルの表示がなくなったためうまくいかなかった。MCRは約13時間後に復旧した。

事象中、2台のEDGが自動的に起動したが、制御電源の喪失によりトリップした。2基の原子炉に共用の3台目のEDGが起動され、6時間後には母線の1つに通電された。停止時冷却ポンプ1台が17時間後に起動された。そのため、SBOは約17時間継続したものであると考えることができる。

長時間に及ぶSBOとその後の安全系の機能低下は、ケーブル火災と、適切な防火障壁／耐火措置の欠如に多重の安全関連ケーブルの不適切な物理的分離が加わったこと

による。

SBOが設計段階で考慮されなかったため、本事象は「設計基準を超える事故」であった。また、本事象では、MCRの喪失が起これば緊急時制御室でも利用可能な表示がなかった。従って、重要なパラメータは現場で直接測定しなければならなかったため、プラントのブラインド運転となった。

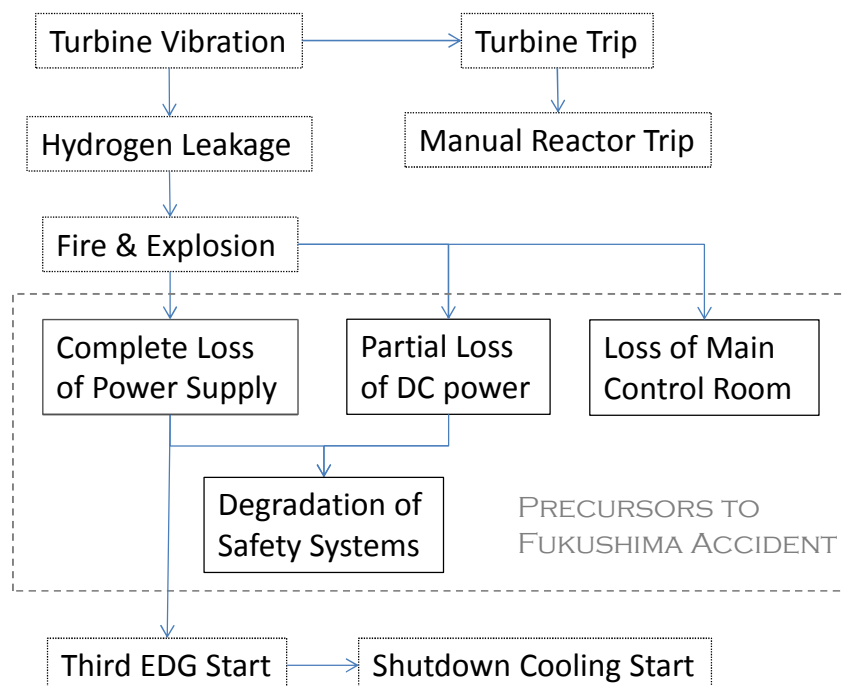


Figure 3 Major Occurrences in Event-2

(3) 事例3

Figure 4に、本事象における主要な不具合／異常を示す。異常な悪天候（強風と降雨、高潮の組合せ）により高波が河川を上り4基の原子炉サイトが部分的に浸水した。同時に、2基の原子炉への400 kV外部電源供給が数時間にわたって喪失するとともに、4基の原子炉への225 kV補助電源供給が約24時間喪失した。ケーブル貫通部と防火ドアが水により損傷したため幾つかの区画が浸水した。浸水によりモータが水没したため、必須サービス水系(ESWS)トレインAポンプが機能を喪失した。さらに、48 VDC電源盤において隔離故障が起これば、また、ピットが浸水したため低圧注入ポンプと格納容器スプレーポンプが利用不能と宣言された。結果的に、2基の原子炉は停止され、SGを用いて一次冷却材を冷やすことにより停止状態に置かれた。

事象開始から最初の数時間、暴風雨による損傷（アクセスルートの浸水や多数の倒木など）によりプラント外部からの支援チームが到着できなかった。プラント職員は、建屋からの排水作業を開始した。

本事象は、浸水に対する防護策が不適切であったことを浮き彫りにした。従って、主要な変更には、河川に面する防護堤防を高くするとともに堤防の上部に越流防止壁

が建設された。

本事象の結果、当事国の現行基準への適合性をチェックするとともに本事象のフィードバックを迅速に実施するために、全ての原子力発電所の状態が再評価された。発電所の防護手法も改訂され、各サイトに対する新しい手法が開発された。この手法は、必要に応じて防護策の変更を明らかにし実施するのに用いられた。

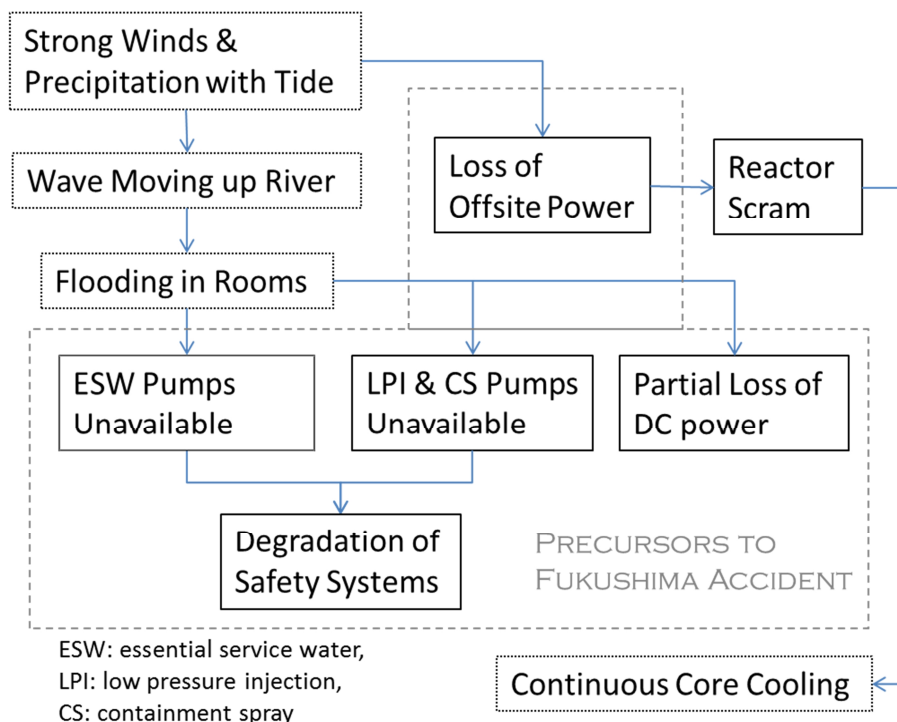


Figure 4 Major Occurrences in Event-3

(4) 事例4

Figure 5に示すように、本事象では、2つの独立した故障により2台のEDGのうちの1台が動作不能となり、また、外部電源が喪失した。この事象は、2つの安全分電盤のうちの1つにおけるリレー故障により始まり、EDGに接続することができなかった。本事象中、発電機ブレーカにおいて別の故障が起こり、その結果、電源系のブレーカが開いたため、原子炉は400 kV主外部電源ラインから切り離された。さらに、運転手順に従って補助の外部電源供給が切断され、結果的に外部電源が全て喪失した。

外部電源の喪失により原子炉がスクラムし原子炉冷却材ポンプ(RCP)が停止した。また、残り1台のEDGが自動起動し安全系に電力を供給した。その後、熱サイホンモード(自然循環)で二次冷却系を介して原子炉冷却材を循環させることにより炉心は継続的に冷却された。同時に、SBO対応用EDGを非常用分電盤に接続するための準備が開始された。事象開始から数時間後に外部電源が復旧したため、RCP 1基を起動することができ、RCSによる冷却材の強制循環が可能となって原子炉は安全状態に移行された。

当事国における個々のプラントでは、外部電源及び所内電源の全喪失に対処するために、1980年代に、SBO対応用EDG（可搬式発電機）及び非常用タービン発電機の設置という設計変更が行われていることに注目すべきである。これらの設備によって一層厳しい状況になった場合でも対処することができたであろう。

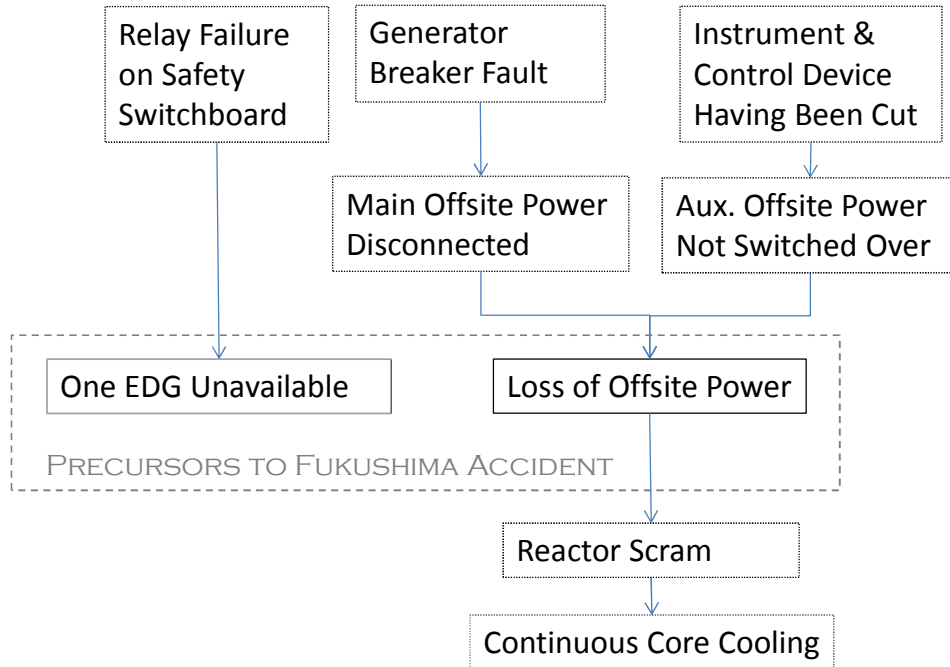


Figure 5 Major Occurrences in Event-4

(5) 事例5

Figure 6に、本事象における主要な不具合／異常を示す。サイトから数千km離れた島の沖で発生した巨大地震に起因して津波がサイト近傍まで到達したため、予想外の高波が生じサイト浸水が起こった。その結果、海水が取水トンネルを経てポンプ建屋に入り込み、同建屋の水位が復水器冷却水系(CCW)ポンプの台座高さまで上昇したため、これらのポンプがトリップした。MCR運転員がタービンを停止したため、これに伴い原子炉がトリップした。一次系は、ASDVを開けることにより冷却された。ポンプ建屋の水位上昇によって、CCWポンプと1台を除く全てのプロセス海水系(PSW)ポンプが利用できなくなった。さらに、非常用プロセス海水系(EPSW)ポンプも水没したため利用不能となった。外部電源は利用可能な状態にあったため、原子炉は安全停止状態に移行された。液体流出物を回収するためのサンプリングタンクが位置ずれを起こし、セメント煉瓦筐体は栈橋から海の方に約60 m流された。

このように、本事象では、津波によりプロセス水系が影響を受けたものの、原子炉建屋、タービン建屋及びサービス建屋への水の流入がなかったため、プラントの安全性への影響はなかった。サイトの一部が津波による高波で浸水し非安全関連の構築物が押し流されたことに注目すべきである。

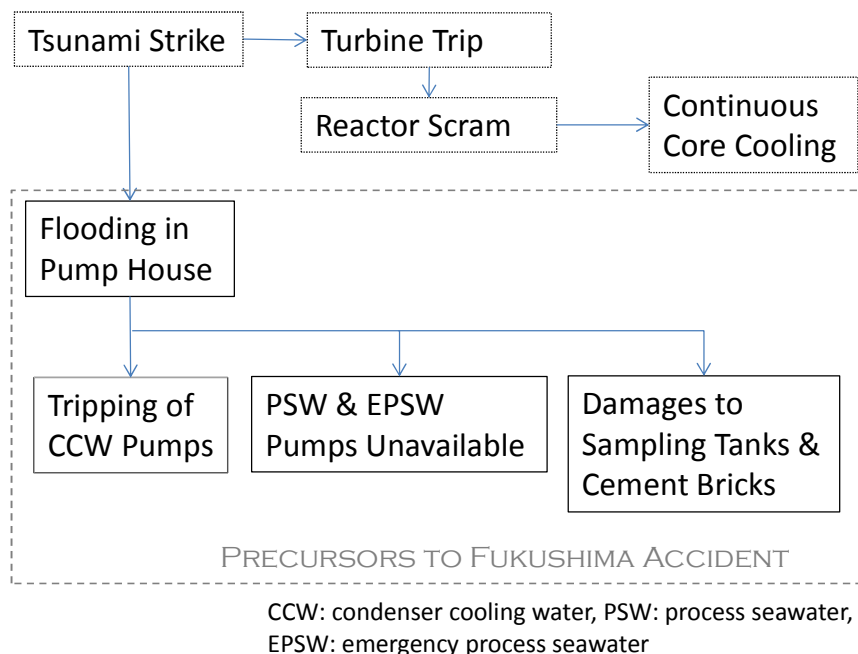


Figure 6 Major Occurrences in Event-5

(6) 事例6

本事象における主要な不具合／異常を**Figure 7**に示す。定格出力運転中、主変圧器の内部故障により発電機、タービン及び原子炉がトリップした。発電機トリップ後、配電系において瞬間的な電圧降下が起こった。この電圧低下により、8台の非安全関連無停電電源(UPS)のうちの5台が同時に喪失した。これらのUPSは、MCRにおける重要な計装及び他のプラント設備に電力を供給していた。2台の安全関連UPSは影響を受けなかったが、制御棒位置表示が全て喪失したため、運転員は原子炉が停止状態に維持されていることを確認できなかった。また、MCRアナランシエータ（アラーム）も全て喪失し、運転員によるプラントのスクラム後操作を妨げた。さらに、所内の無線及びページングなどの通信手段も利用できなくなりMCRと所内のプラント職員とのコミュニケーションが制限された。他の非安全関連の系統／機器も喪失したが、この中には、安全パラメータ表示系(SPDS)、プロセス計算機、プラント内照明の一部が含まれている。これらのUPSには、制御ロジックの喪失を防ぐために、継続的に充電される内部バックアップバッテリーが付いているが、このバックアップバッテリーはその使用寿命を過ぎており、また、予防保全が不適切であったため放電していた。UPS電源は約30分で復旧し通常の冷原子炉却が行われた。5台のUPS全てに共通した未知の内部欠陥により電源供給が電圧低下に起因した故障の影響を受けやすくなった。

このように、本事象では、原子炉保護系が適切に作動し全ての工学的安全施設も利用可能であり必要時に利用されたため、プラントの安全性に対する脅威はなかった。しかし、通常時利用可能なプラント状態表示が多数喪失したことにより運転員が直面した困難な状況はUPS喪失の重要性を浮き彫りにした。

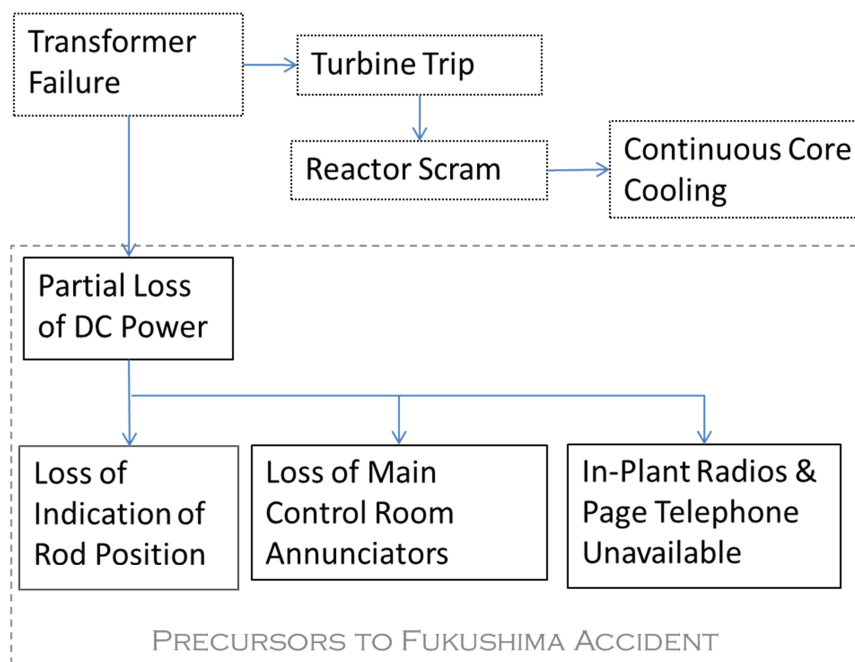


Figure 7 Major Occurrences in Event-6

4.2. 有効な安全設備に関する主な特徴

選定した6件の事象では、炉心冷却が維持されたり事象が炉心損傷に進展する前に復旧したため、それぞれの事象による影響は福島事故に比べるとはるかに小さい。有効であった安全設備の観点から、選定した事象の相違点を整理し、Table 1にそれら事象の主要な特徴をまとめる。以下では、個々の事象に対して有効な安全設備について簡単に記述する。

Table 1. Main Features of Safety Layers or Provisions in Selected Events

Event No.	Offsite Power	Onsite AC Power (EDG)	DC Power	Heat Removal (Core Cooling)	Main Control Room
1	not lost	not lost	partly lost	partly lost	partly lost
2	completely lost	completely lost	completely lost	shortly lost	lost (evacuated)
3	partly lost	not lost	not lost	partly lost	not lost
4	completely lost	partly lost	not lost	partly lost	not lost
5	not lost	not lost	not lost	not lost	not lost
6	not lost	not lost	partly lost	not lost	partly lost

Event 1: Fire, massive internal flooding and loss of safety systems

Event 2: Fire, prolonged SBO involving loss of control room and loss of residual heat removal

Event 3: External flooding involving partial loss of safety systems and multi-unit site issue

Event 4: Loss of offsite power with one EDG inoperable

Event 5: Tsunami-induced external flooding

Event 6: Common-mode loss of instrument power

(1) 事例1

炉心冷却が完全に喪失することはなかったが、停止時熱交換器ポンプなどプラントの復旧に重要な設備が浸水による影響を受けた。事象中、サイト内の電源は利用可能であったが、火災によりケーブルが影響を受けたことによりDC電源は部分的に喪失し煙の侵入によってMCRの居住性が損なわれた。火災や浸水による共通モード故障に対して設計上の特性が不十分であったことが明らかとなった。

(2) 事例2

ケーブルの焼損により電源供給が完全に喪失し停止時冷却もできなくなったが、ディーゼル駆動消火ポンプの手動起動とASDVの開放などの緊急時対策を用いた自然循環により炉心冷却が行われた。また、煙の侵入によりMCRから退避し非常用制御室も表示機能を失った。結果的に、運転員はプラントのブラインド運転を余儀なくされた。

(3) 事例3

悪天候条件により複数の原子炉において外部電源が喪失したが、事象中、個々の原子炉における電源は利用可能であった。SGにより熱除去を確保することができたため、炉心冷却の喪失はなかった。しかし、浸水によりESWSが部分的に喪失し低圧注入ポンプと格納容器スプレーポンプが動作不能と宣言された。浸水した区画は排水作業により復旧した。本事象では、浸水に対する防護が不十分であったことが浮き彫りになった。

(4) 事例4

本事象では、外部電源が喪失するとともに、独立した2つの電氣的故障により2台のEDGのうちの1台を接続することができなかった。原子炉は、外部電源に加えて、1つのトレインに関する電源盤が機能を失った。そのため、安全設備への電源は残りの1台のEDGによってのみ供給された。熱除去機能が喪失することはなくDC電源も利用可能であった。状況の悪化に備えて可搬式発電機が電源盤に接続された。

(5) 事例5

本事象は、地震起因の津波によるものであり非安全設備のみが影響を受けた。原子炉建屋、タービン建屋及びサービス建屋への水の流入はなかったため、事象中、外部電源は利用可能であり、炉心冷却及び熱除去機能も動作可能であった。また、必須母線へのDC電源も供給された。従って、プラントの安全性には何の影響もなかったが、ポンプ建屋の水位が高くなったため規制要求の見直しが行われた。

(6) 事例6

本事象では、8台の非安全関連UPSのうちの5台が故障し制御棒位置表示機能とMCRアナライザが喪失した。そのため、運転員は、スクラム後のプラント状態を監視するにあたって困難な状態に直面した。しかし、安全関連のUPSは影響を受けず外部電源も利用可能であったため、全ての安全機能は動作可能であり緊急時運転手順に従って原子炉は冷温停止状態に移行された。プラント職員は、代替電源を用いることに

よりUPSからの電気出力を手動で回復させた。

4.3. 前兆事象からの教訓

選定した事象に関するIRSレポートにおいては、それぞれの事象の安全上の意義に基づき、教訓が示されている。これらの教訓は、他の原子力発電所での類似事象の再発防止やその潜在的な影響の緩和に役立つものと考えられるが、個々の事象に特有のものであり必ずしも福島事故に適用可能なものではない。以下では、福島事故に寄与した主要な不具合／異常の原因等に着目して一般性のある教訓を導き出し議論する。

(1) 事例1

本事象では、共通モード故障を引き起こした2つの起因事象、即ち火災と浸水によりプラントの安全性が著しく損なわれた。火災の影響は、以下のように甚大なものであった：

- ・ タービン発電機区画において全てのケーブルが焼損し炉心冷却機能が部分的に喪失した；
- ・ 圧縮空気系が著しく損傷し給水制御が困難になるとともに空気作動隔離弁に影響を及ぼした；
- ・ 48 VDC制御母線が喪失し重要な機能に関する制御室からの制御や弁の位置変更ができなくなった。

原子炉建屋の大規模な浸水によりプラントの復旧に重要な設備が影響を受けた。原子炉建屋には排水ポンプが設置されていたが、火災により電源供給がなくなったため作動できなかった。プラントは、こうした大規模な浸水に対処できるよう設計されていなかったため、原子炉建屋の水位計装もなく、安全設備に対する物理的障壁やペDESTアルなどの防護措置も講じられていなかった。根本原因は、建屋及び火災区画の物理的分離が不適切であったことによる。また、安全系の独立性にも欠陥があった。

本事象は、火災により状況を悪化させるような内部浸水が起こる可能性を実証しており、共通モード故障を防止するためにプラントの設計や設備のレイアウトにおいて火災や浸水に対する防護措置を考慮すべきである。特に、電力ケーブルの引き回しに特別な注意を払うべきであり、安全系に対する電源設備はトレインごとに物理的に離れた区画に配置すべきである。また、必要に応じて、例えば、ケーブルに対する難燃材の使用や機器間の物理的分離など更なる防護策を講じるべきである。

重要な機能に関するMCRからの制御ができなくなり、運転員は現場での手動対応を余儀なくされた。これは、MCRから独立した非常用制御室の重要性を示唆するものである。

(2) 事例2

本事象では、約17時間にわたるSBOとなった。この長時間に及ぶSBOとそれによる安全系の機能低下の原因は、ケーブル火災と、適切な火災障壁／耐火設備の欠如に多重の安全関連ケーブルの不適切な物理的分離が組み合わさったことによる。また、本事象において、煙の流入によりMCRから退避しなければならなくなり、制御電源の喪

失により非常用制御室の表示もなくなった。そのため、重要なパラメータの幾つは現場で測定しなければならなかった。結果的に、運転員はプラントのブラインド運転を余儀なくされた。当該プラントが長時間のSBOに耐え消火系とASDVを用いて自然循環を確立することにより炉心冷却が維持されたことに注目すべきである。本事象は、アクシデントマネジメントが成功した良好事例と考えられる。

こうした事象の再発を防止するために、設置者及び規制機関は以下のような一般的な教訓を得ている：

- ・ 共通モード故障を防止するために、電力ケーブル及び制御ケーブルに対する物理的分離と火災防護措置に関する詳細なレビューを行うべきである；
- ・ 外部の悪条件下において制御室の居住性を確保すべきである；
- ・ SBOの継続時間に従って長時間に及ぶSBOへの対処能力をレビューすべきである；
- ・ 消火とSGへの給水が同時に必要となった場合に対応できるよう消火系からの給水の適性と信頼性を検討すべきである。

(3) 事例3

本事象では、極端な悪天候状態と不適切な防護対策が重なったことにより原子炉建屋の浸水が起り、2基の原子炉において安全関連系が同時に利用できなくなった。また、アクセスルートの浸水や多くの箇所での倒木などにより、プラント外部からの支援チームの到着が妨げられた。電力は利用可能な状態に維持されたため、これらの原子炉はSGを用いることにより停止状態に移行された。

この浸水事象により、外部浸水に対するサイトの防護に幾つかの弱点が見つかった。具体的には、ダクトカバースラブに水が入り込み管理建屋と共通補助建屋のより低いレベルが浸水し、さらに、ドアや水の侵入によって損傷したケーブル貫通部を経て2基の原子炉の区画内に水が入って電気建屋と揚水ポンプ場の低いレベルに達した。本事象は、水がサイト内や建屋内に入り込む可能性のある経路を全て特定し必要に応じてそれらの経路を取り除くことの重要性を浮き彫りにした。また、浸水のような外部事象によってサイト内の複数の原子炉が影響を受ける可能性が示された。

事象後、当該プラントでは幾つかの防御ラインが強化されたことに注目すべきである。例えば、河川に面する堤防を高くしその上に越流防止壁が取り付けられた。また、支援チームの早期到着を可能とするために、アラート前及びアラートに対する平均風速閾値を導入することにより警報システムが変更された。さらに、原子炉間での安全設備の独立性を強化することにより多数基立地サイト問題に対処すべきである。

(4) 事例4

本事象中、外部電源の他、1トレインの電源盤が機能喪失した。そのため、安全設備への電源供給は1台のEDGのみから行われた。しかし、可搬式発電機が安全母線に接続され、原子炉はより悪化した状態にも対処できる状態にあった。また、外部電源と両EDGが喪失した場合にも、二次冷却系で生成される蒸気で作動する非常用タービン発電機が直ぐに利用できる状態にあった。本事象では、SBOの際に短時間で熱除去に必要な設備に電力を供給するために多様性のある方策を用意すべきであることを強

調している。また、外部電源と所内電源が両方とも喪失した場合に対処できるよう1980年代に数多くの設備変更が行われたことにも注目すべきである。

さらに、電源盤の故障は過電流保護リレーの不具合に起因するものであり、この不具合はスズホイスターに類似した亜鉛フィラメントの形成によるものであった。この現象は、他国においてその発生が認められてきたが、当該プラントではこれまでに起こっていなかった。こうした予想外の現象や事象が発生しプラントの安全性に影響を及ぼす可能性があるため、新技術の導入や設計変更に際しては特別な注意を払う必要があると考えられる。また、本事象では、非常用バッテリーの消費を抑えるための方策により2つの電氣的故障が次々と起こったことへの対処がより複雑なものとなった。この事象から得られる教訓は、プラクティスの変更を行う際に考慮すべきものである。

(5) 事例5

津波がサイトに襲来しポンプ建屋が浸水したが、原子炉建屋やタービン建屋などの重要区画への海水の流入はなく、プラントの安全性への影響はなかった。しかし、幾つかの非安全系や機器が損傷したり利用不能となったためプラントの停止に至った。本事象後、ポンプ建屋の水位高を表示するためにMCRに新たな警報が取り付けられた。

ポンプ建屋内で記録された最高水位は10.56 mであり、これは通常運転水位より4.56 m高い値であった。規制要求によれば、津波はプラントの立地及び設計に対して考慮すべき外部事象の1つである。当時の要求は15年前の情報に基づくものであったため、津波の経験を考慮して規制要求の見直しが検討された。本事象は、プラントの設計要件や規制要求において遠地地震による津波の影響を考慮することの必要性を示唆している。

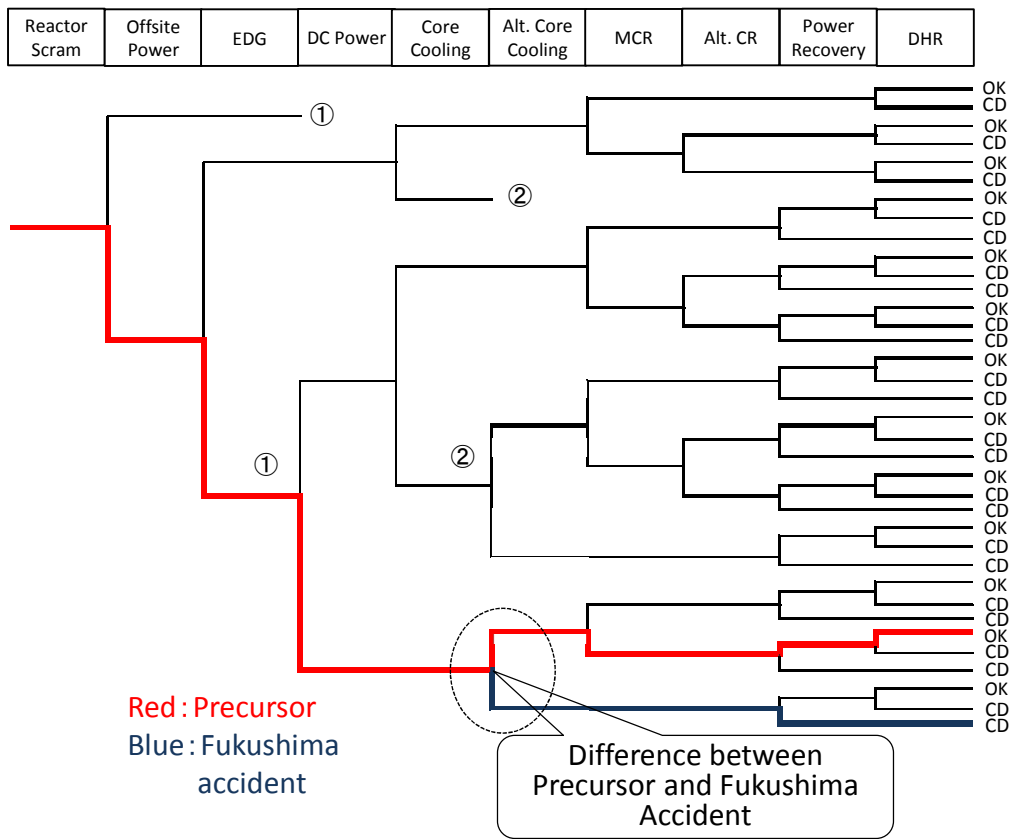
(6) 事例6

UPSの同時トリップは、各々のUPSにおける制御ロジックバッテリーの設計上の欠陥とバックアップバッテリーの不適切な予防保全によるものである。電圧が低下した状況下において、電圧がトリップ設定値を大きく下回るまでUPSのロジック電源切替回路が作動しなかった。しかし、本事象中、バックアップバッテリーは、保守不良により放電した。いずれかの欠陥が是正されていれば、UPSの同時トリップは避けられたであろう。本事象において、制御棒位置表示機能が喪失したため、運転員は原子炉が停止状態に置かれていることを確認できなかった。これは、安全上重要なパラメータがMCRにおいて監視できない場合に代替策を規定する手順書を用意することの必要性を意味するものである。

本事象では、複数の非安全関連系の共通モード脆弱性を浮き彫りにした。プラント職員は、非安全系／機器に対してであっても設計においてプラントの安全性を低下させる可能性のある故障を特定するための解析を行うべきである。また、制御ロジックにバックアップ電源を供給するバッテリーを使用するにあたって、当該設備の説明書には十分な記載がない場合もあるため特別な注意を払うべきである。こうした非安全関連システム／機器はアクシデントマネジメント方策に用いられるかもしれないため、プラント職員はプラントの安全性に影響を及ぼすような潜在的故障を考慮すべきである。

5. 前兆事象と福島事故に関するイベントツリー

6 件の前兆事象のうちの 1 つ（事例 2）は、福島事故のニアミス事象として最も注目すべきものであり、当該事象について **Figure 8** に示すようなイベントツリーを作成してその事故シーケンスを表現し福島事故のシーケンスと比較した。このイベントツリーにおいて、赤線は前兆事象における実際のシーケンス、青線は福島事故におけるシーケンスを示している。福島事故は、地震とその後の津波に起因するものであるが、前兆事象は内部火災によるものである。しかしながら、両事象において、それぞれのプラントの挙動は次のように類似している：原子炉はスクラムした；外部電源が喪失した；EDG が自動起動したがトリップし長時間の SBO となった；DC 電源が（部分的に）利用不能となった；電源喪失により非常用炉心冷却系が利用不能となった；MCR が機能を喪失しブラインド運転を余儀なくされた。



Note) EDG: emergency diesel generator, MCR: main control room, Alt. CR: alternative control room, DHR: decay heat removal

Figure 8 Event Tree for Precursor (Event-2) and Fukushima Accident

幸いにも、前兆事象においては、ディーゼル駆動消火ポンプを用いて SG 二次側に冷却水を供給することにより代替炉心冷却が確保され自然循環により炉心の冷却が行われた。また、事象開始から約 17 時間後に電源が復旧した。これに対して、福島事故で

は、タイマりに代替炉心冷却が行われず電源も復旧しなかったため炉心損傷に至りその後の放射性物質の放出に繋がった。これら 2 つの事象における決定的な違いは、Figure 8 に示すように、代替炉心冷却が成功したか否かである。福島第一原子力発電所においても、原子炉に水を供給するための代替手段としてディーゼル駆動消火ポンプが用意されており、また、1号機ではこれらの消火ポンプから非常用復水器(IC)の二次側にも給水できるようになっていた。しかしながら、事故時、原子炉圧力がポンプ吐出圧未満に下げられなかったため、これらの消火ポンプにより原子炉への注水を行うことができず、1号機では、津波の襲来前に IC が手動で停止されその後利用できなくなったため、結果的に、ディーゼル駆動消火ポンプは代替給水の役割を果たすことができなかった。前兆事象においては、ASDV を開放したままにすることで SG 圧力を下げディーゼル駆動消火ポンプにより SG への給水を継続的に行うことができた。

これらの事実を踏まえると、タイマリな原子炉減圧に成功するか否かがプラントの運命を左右したと言っても過言ではないであろう。言い換えれば、これは、前兆事象及び福島事故はいずれも安全関連系が炉心冷却に利用できなくなった場合にタイマりに代替給水を行うためのロバストな減圧手段を事前に準備することの重要性を浮き彫りにしている。

6. おわりに

本検討では、安全上重要な事象として同定された約200件のIRSレポートの中から、福島事故の前兆事象として6件の事例を選定した: 1)火災と大規模な内部浸水及び安全系の機能喪失、2)火災と制御室機能及び残留熱除去機能の喪失を伴う長時間のSBO、3)安全系の機能喪失を伴う外部浸水と複数基立地サイト問題、4)外部電源喪失及びEDG 2台中1台の動作不能、5)津波起因の浸水、及び、6)計装電源の共通モード喪失。

1つ目の事象では、火災により内部浸水が起こり状況が悪化する可能性を示した。また、安全系の電源を物理的に離れた区画に配置し電力ケーブルのレイアウトや火災あるいは浸水などによる共通モード故障の防止に特別な注意を払うとともに、難燃性ケーブルを使用し必要に応じて機器間に物理的障壁を追設することの必要性を示唆している。2つ目の事象は、安全系を共通モード故障から守るために電力ケーブル及び計装ケーブルに対する物理的分離や火災防護措置について詳細なレビューを行うとともに、外部での悪条件下において制御室の居住性を確保し長時間のSBOへの対処能力をレビューすることの重要性を浮き彫りにした。3つ目の事象では、外部浸水に対するサイトの防護策における幾つかの弱点を露呈するとともに、浸水に起因した安全性の低下によりサイト内の全ての原子炉が同時に影響を受ける可能性のあることを強調した。4つ目の事象はSBOには至らなかったものの、より厳しい状況に対応するために可搬式発電機や非常用タービン発電機などの電源供給設備の追設の必要性を明らかにした。また、この事象では、外部事象によりサイト内の複数の原子炉が同時に影響を受ける可能性のあることを実証した。5つ目の事象は、プラントの安全性を脅かすものではなかったが津波起因の浸水事例であり、プラントの設計要求や規制要件において遠地地震により引き起こされる津波の影響を考慮することの必要性を示唆している。事象後、過去の津波の経験を考慮して規制要件の見直し等が行われた。6つ目

の事象では、非安全関連のUPSが喪失し制御棒位置表示機能や制御室アナンシエータが予想外に喪失するという事態を招いた。この事象は、プラントの安全性を脅かすような共通モード故障を評価するために設計解析を行うことの必要性を強調している。

これらの事例の幾つかは、新たな現象や予想外の悪条件を引き起こす可能性があり、プラントの設計やアクシデントマネジメント方策に特別な注意を払うべきである。特に、2つ目の事象は、福島事故に対するニアミス事象として最も注目すべきであり、タイムリな減圧とその後の代替給水によりシビアアクシデントを回避することができた。当該事象は、タイムリに代替給水を行うためにロバストな減圧手段を事前に準備することの重要性を強調している。

福島事故では、浸水に対する脆弱性を浮き彫りにした。福島第一原子力発電所においては、防潮堤の設置や海水ポンプモータの嵩上げなどの津波対策が講じられてきたが、レイアウトの変更や物理的分離の改善などが行われてこなかったため、設計基準を超える津波がサイトに襲来しこれらの防護策が役に立たなかった。また、制御室機能も喪失したが、これは、ブラインド運転を回避するために主制御室から独立した非常用制御室の設置が必要であることを物語っている。福島事故の再発防止のため、上述したような過去の事例から得られる教訓を綿密に検討し実現させることが必要である。また、外部事象に起因した複数基立地サイト問題については、原子炉間の安全対策の独立性を強化することにより対処すべきである。最後に、本検討で取り上げた6件の事象の他にも福島事故に反映すべき教訓や知見が得られていたものがあると考えられる。これらの教訓や知見が十分に検討、反映されていれば、福島事故を回避できたと言えないまでもその深刻さは現実よりも軽減できたのではないかと考える。

謝辞

本報告書は、著者の博士論文（英文）の一部を抜粋し翻訳したものであり、博士論文の指導教官であった筑波大学・阿部豊教授から国内での情報共有を図るために日本語の報告書を作成するよう助言をいただき、その助言に基づいて作成したものである。また、報告書作成にあたっては、安全研究センター規制情報分析室の船田晃代氏の協力を得た。阿部教授並びに船田氏に心から謝意を表したい。

参考文献

- (1) Rapid Depressurization Occurs, Nuclear Safety, 1978 Mar-Apr, Vol.19, p.241.
- (2) 佐藤一男, 原子力安全の論理, 日刊工業新聞社, 1984, p.65.
- (3) N. Watanabe, Study on Analysis of Incidents and Accidents at Nuclear Installations, Doctoral Thesis, 2014.
- (4) 東京電力(株), 福島原子力事故調査報告書, 2012.
- (5) IAEA and OECD/NEA, Nuclear Power Plant Operating Experience from the IAEA-NEA International Reporting System for Operating Experience 2009-2011, 2012, ISBN 978-92-99193-4.
- (6) IAEA and OECD/NEA, THE IAEA/NEA INCIDENT REPORTING SYSTEM (IRS) Using Operating Experience to Improve Safety.
- (7) IAEA and OECD/NEA IRS Report (私信).
- (8) IAEA and OECD/NEA IRS Report (私信).
- (9) IAEA and OECD/NEA IRS Report (私信).
- (10) IAEA and OECD/NEA IRS Report (私信).
- (11) IAEA and OECD/NEA IRS Report (私信).
- (12) IAEA and OECD/NEA IRS Report (私信).
- (13) Vandellos fire may lead to closure, Nucl Eng Int, 1989 Dec, Vol.34, p.3.
- (14) Narora 1 turbine hall gutted by fire, Nucl Eng Int, 1993 Jun, Vol.38, p.2.
- (15) USNRC, Transformer Failure and Common-Mode Loss of Instrument Power, 1991, NUREG-1455.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min = 60s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV = 1.602 176 53(14) × 10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da = 1.660 538 86(28) × 10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u = 1 Da
天文単位	ua	1 ua = 1.495 978 706 91(6) × 10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm ² = (10 ¹² cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P = 1 dyn s cm ⁻² = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1 cm s ⁻² = 10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1 G cm ² = 10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G = 1 Mx cm ⁻² = 10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

