

海外原子力発電所における爆発事象の傾向分析

Trend Analysis of Explosion Events at Overseas Nuclear Power Plants

島田 宏樹 (Hiroki Shimada)*

要約 原子力安全システム研究所（以下「INSS」という）の原子力情報データベースに登録されている海外の原子力発電所における不具合事象から、1995～2007年の13年間の災害による不具合事象（暴風、豪雨、地震、爆発、火災等）を抽出したところ、火災（分析済）の次に爆発が多く発生していることが注目される。そこで、海外の原子力発電所で発生した爆発事象について傾向分析を行った。爆発事象における設備別、原因別、プラントへの影響別等の分析を行った結果、全体として主に電気設備で発生しており、電気設備の保守管理が爆発防止の上で最も重要であることが分かった。また、わが国では経験していない変圧器、蓄電池設備の爆発事象が55%と多く発生していることが分かった。これは変圧器に対する保全方法の違い（状態基準保全の実施）、蓄電池を保全する保全要員の違い（直営点検の実施）が背景にあると推定される。

キーワード 原子力発電所, 爆発, 傾向分析, 変圧器, 蓄電池, 保全

Abstract We surveyed failures caused by disasters (e.g., severe storms, heavy rainfall, earthquakes, explosions and fires) which occurred during the 13 years from 1995 to 2007 at overseas nuclear power plants (NPPs) from the nuclear information database of the Institute of Nuclear Safety System, Incorporated (INSS). The results revealed that explosions were the second most frequent type of failure after fires. We conducted a trend analysis on such explosion events. The analysis by equipment, cause, and effect on the plant showed that the explosions occurred mainly at electrical facilities, and thus it is essential to manage the maintenance of electrical facilities for preventing explosions. In addition, it was shown that explosions at transformers and batteries, which have never occurred at Japan's NPPs, accounted for as much as 55% of all explosions. The fact infers that this difference is attributable to the difference in maintenance methods of transformers (condition based maintenance adopted by NPPs) and workforce organization of batteries (inspections performed by utilities' own maintenance workers at NPPs).

Keywords nuclear power plant, explosions, trend analysis, transformers, batteries, maintenance

1. はじめに

INSSでは、継続的に海外の原子力発電所の不具合情報を入手し、マニュアルに従って原子力情報データベースを構築している。その情報で述べられている内容から得られる教訓の中で、国内の原子力発電所（主に加圧水型炉（PWR））で対策を必要とする項目がないか分析し、必要により提言を行っている。

原子力発電所では、爆発事象によって直接的に設備が損壊し、機器の誤動作や電源の喪失等により重大な事故に発展する可能性がある。国内では2001年

11月に中部電力浜岡発電所1号機の水素爆発による配管破断が発生し、また、海外でも2001年12月にドイツ・ブルンズビュッテルで同様の事象が発生しており、水素爆発・燃焼事象の事例が報告されている⁽¹⁾。これらを含めた爆発事象において電気設備（変圧器、蓄電池等）の爆発はかなりの頻度で発生したが、幸い重大な事故に至ったものはない。しかしながら、そう多くはないが爆発に伴う人的被害が発生している。こうした状況を踏まえ、国内の原子力発電所における爆発事象を予防する観点から、海外の原子力発電所における爆発事象の発生傾向などを分析した。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

本研究では海外の原子力発電所における爆発事象について傾向分析を行い、教訓となることはないかについて検討した。特に、(1)爆発発生設備、(2)爆発要因(着火源)、(3)プラント運転状況とプラントへの影響、(4)人的被害について分析し、更に海外情報の約60%を占める米国と国内の保全方法の比較も行った。

2. 原子力発電所の爆発事象の傾向分析

2.1 爆発事象の抽出

海外の原子力発電所について、INSSの原子力情報データベースに登録されている1995~2007年(13年間)の事象のうち、災害対策基本法に明記されている災害(暴風、豪雨、豪雪、洪水、高潮、地震、津波、火災、爆発)をキーワードとして不具合事象を抽出した。不具合発生件数は合計332件で事象の発生割合を図1に示す。その中では火災が全体の61%と最も多く、次いで爆発が15%を占める。既に、火災について分析し報告している⁽²⁾ことから、ここでは2番目に多い爆発事象について分析した。爆発とは、一般的には燃焼を伴う気体(可燃性ガス等)の急速な熱膨張を指す。変圧器の場合は絶縁油が加熱され、そこから発生した可燃性ガスの膨張を指し、外気に触れると発火⁽³⁾することもある。海外の原子力発電所における爆発事象の不具合件数は合計54件でその内訳は、米国31件、英国5件、ベルギー5件、仏4件、その他9件であった。なお、国内の原子力発電所については、浜岡1号機「余熱除

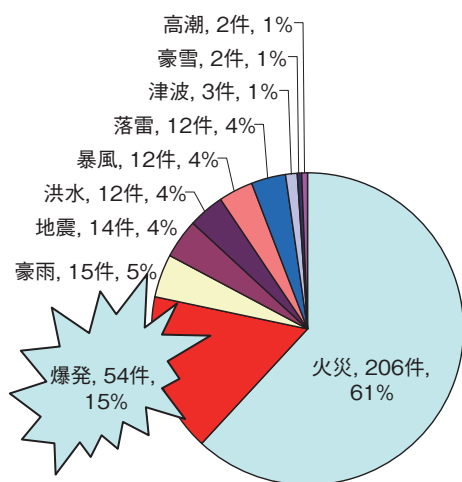


図1 災害に関する海外原子力発電所不具合事象の発生割合

去系配管破断」が発生しており、その原因は炉水の放射線分解により発生した水素の爆発燃焼である。国内ではこの1件だけのため、国内の分析は実施していない。

2.2 爆発発生設備・爆発気体

海外の原子力発電所で実際に爆発が発生した不具合(54件)の設備別爆発事象件数を図2に示す。変圧器、蓄電池で全体の55%を占め、全体として主に電気設備で発生しており、日本では経験していない事象⁽⁴⁾である。爆発気体別の事象件数を図3に示す。水素と絶縁油分解ガスによるものが全体の66%を占める。

水素爆発は可燃濃度で静電気等により着火した事象で、蓄電池、タンク、配管等で発生している。絶縁油分解ガスは変圧器で発生したもので、変圧器の内部故障による短絡電流、アーク等の熱エネルギーで絶縁油が加熱され、絶縁油分解ガスが発生し、その量が急峻で放圧弁が動作するまでに、タンク内圧が破壊圧力以上に上昇することで発生する。タンクが破壊した時点で、火災を伴う事象が多い。

年度別爆発発生件数を図4に示す。2~6件/年で

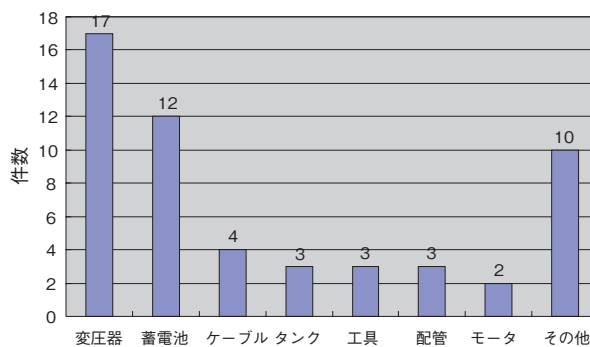


図2 設備別爆発事象件数 N = 54

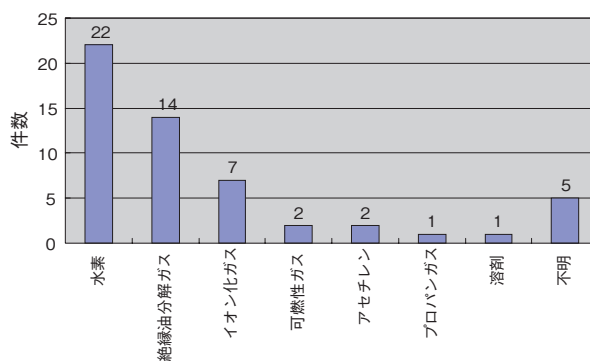


図3 爆発気体別事象件数 N = 54

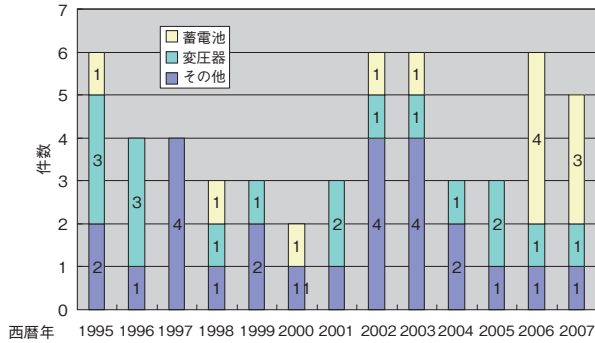


図4 年度別発生件数 N = 54

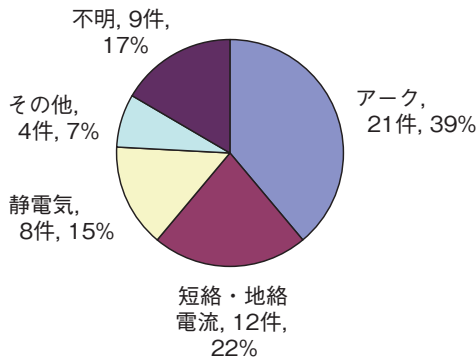


図5 爆発要因 (着火源) の内訳 N = 54

継続的に発生している。全体の55%を占める変圧器と蓄電池の爆発事象を年度別に見ると、最近、蓄電池の爆発事象が増加傾向であることがわかる。

次に爆発要因となった着火源の内訳を図5に示す。アーク21件中、15件は電気アークであり、溶接等の工具による切削アークは6件だけである。また、短絡・地絡は主に変圧器内部故障によって発生したものである。

2.3 爆発発生時のプラント (発電所) 運転状況およびプラントへの影響

海外の原子力発電所における爆発発生時のプラン

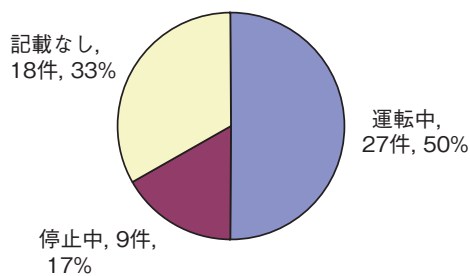


図6 爆発時のプラント運転状況 N = 54

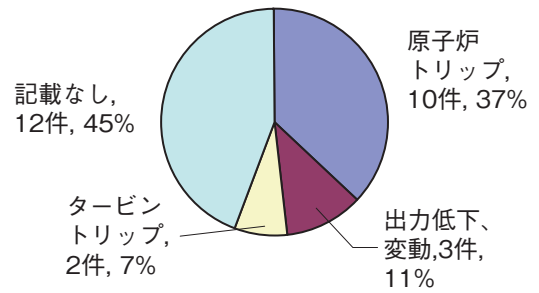


図8 運転中に爆発した設備によるプラントへの影響内訳 N = 27

ト運転状況を図6に示す。運転中の爆発事象が50%を占め、その内、56%が変圧器爆発(図7)であることがわかる。プラントへの影響は、図8で示すように原子炉トリップ、出力低下・変動が48%を占める。これは変圧器爆発による電源喪失の影響が主な原因となっており、その影響が非常に大きいことが分かる。

2.4 爆発による人的被害

海外の原子力発電所における爆発による人的被害の発生割合を図9に示す。人的被害が発生した事象は全体の13%と少ない。これは変圧器爆発が多く発生しているが、プラント運転中のために周辺に人がいなかったと推測される。図10に示す死亡1名は遮断器爆発による重度の火傷によるものである。図11に示すように、人的被害は作業時に多く(57%)発生しており、その内容が溶接、切削時のアークによる可燃性ガス爆発または蓄電池取扱時による被災であることから、入念な作業計画により回避可能である。また、運転操作時の人的被害は、負荷の起動時に発生し、爆風による飛散物で被災したもので、避けることは難しいと考える。その他は、変圧器爆発時の飛散した破片で被災してのものであり、これも避けることは難しいと考えられ、これらは、まず第一に爆発事象を発生させない対策が必要である。

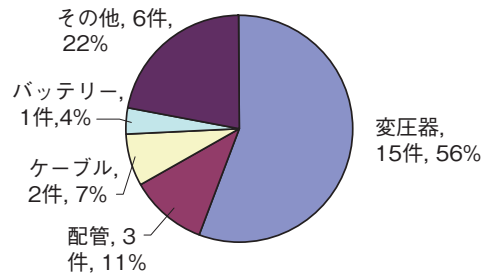


図7 運転中に爆発した設備 N = 27

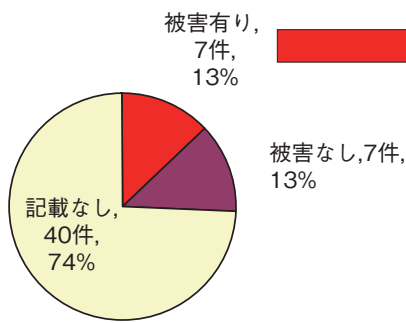


図9 人的被害の発生割合 N = 54

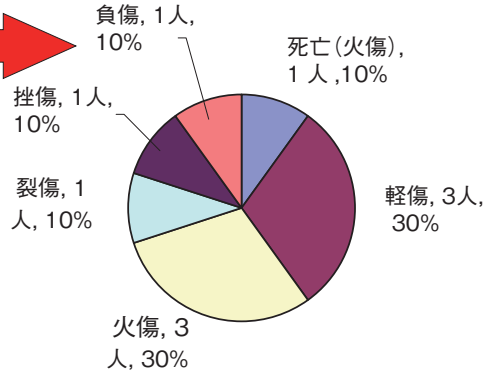


図10 人的被害の内訳 N = 10人

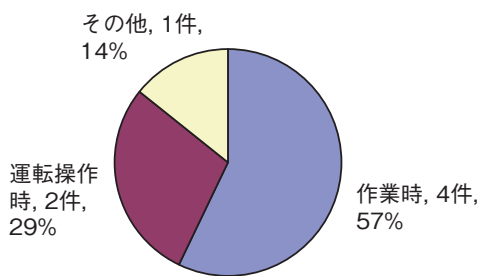


図11 人的被害発生事象の内訳 N = 7件

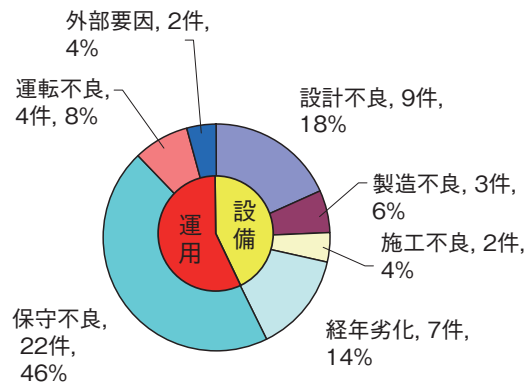


図12 爆発発生原因の内訳 N = 49

2.5 爆発原因（設備・運用別）

爆発事象の原因分類⁽⁵⁾を図12に示す。運用(58%)が設備(42%)より多くなっており、運用では保守不良が多く、設備では経年劣化と設計不良が多い。これは年度毎の全不具合の原因分類と同じ傾向を示している。保守不良に関する原因(図13)については保守計画不良が全体の63%を占め、作業準備および作業時の注意事項が手順書に抜けているために発生している事象が多い。このことから、作業手順書の充実と遵守および作業前打ち合わせの励行等により、爆発事象を未然に防止できると考えられ、作業管理が非常に重要であることが分かる。

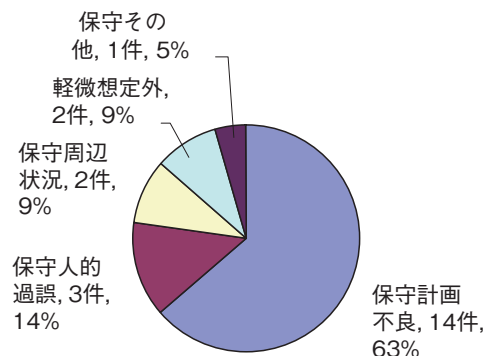


図13 保守不良の内訳 N = 22

3. 米国とわが国の保全方法の比較

3.1 米国の保全方法

(保全方法)

1980年代の米国における保全方法は、わが国と同様に時間計画保全であり、保全頻度はメーカー推奨頻度によって実施し、その多くはプラント停止時に

行われてきた。1990年代前半からは保全方式の見直しにより信頼性重視保全手法(RCM: Reliability Centered Maintenance)及び確率論的安全評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment)が導入⁽⁶⁾され、状態基準保全により機器の異常兆候や劣化の傾向を把握し、適切に保守することを優先して、時間計画保全の作業量を減少させてきた。また、一般

的に保守を過度に行うと人的過誤による故障が発生しやすいことが知られており、作業を減らすことで故障率を低くしようとする背景もあった。

状態基準保全の代表的なツールである振動診断、潤滑油分析、赤外線サーモグラフィなどは、現在、一般的に回転機器、電気設備にほぼ適用されており、時間計画保全から状態基準保全への移行が図られている。

(点検周期を定めている点検項目数)

わが国と米国の時間計画保全により点検周期を定めている設備別点検項目数割合(米国/日本)の代表例を表1に示す。BWRプラントの場合が約70%、PWRプラントの場合は50%以下であることが分っている。特にPWRプラントの回転機器、電気設備は、約30%で米国はわが国に比べ非常に点検項目数が少ないことが特徴になっており、ほとんど時間計画保全を採用していない。

爆発事象が多発している変圧器、蓄電池の点検は、不具合事象の内容や独自に調査した結果から、サーモグラフィにより定期的に点検されている。変圧器の場合では、Pilgrim発電所において分解点検を実施していないことが分っている。

このように米国では時間計画保全よりも状態基準保全が主流になっており、特に電気設備についてはその傾向が強く、変圧器、蓄電池等はサーモグラフィなどにより定期的に状態監視されており、分解点検周期を定めない発電所もある。

(保全要員)

米国では全般に直営での保全作業の割合が高い。これはオンラインメンテナンスの導入によって、年間を通して保守作業が必要なことから、作業量が比較的少ない運転中は基本的に保守部門の人間が直営で作業を実施する。停止時は短期間に作業が集中するために、協力会社による請負工事が主体で、保守部門の人間は原則常時立会いを実施している。従って、運転中に実施している蓄電池などの定期サーベ

ランス試験は直営で実施されていると考えられる。

3.2 わが国の原子力発電所の保全方法との比較

(保全方法、点検周期、保全要員)

表1に米国とわが国の原子力発電所における保全方法の比較を示す。わが国では「原子力発電所の設備点検指針」に基づいて時間計画保全が実施されてきた。その後、「検査の在り方に関する検討会」により保守管理の基本的な理念が示され、2003年に指針名称を変更し「原子力発電所の保守管理規程」として制定された。これにより、点検計画の策定においては、予防保全として時間計画保全もしくは状態基準保全のどちらか1つ以上を選択して策定することとなった。

実際には、まだどのような状態基準保全を適用するかは模索状態であり、時間計画保全中心の保全方式である。点検周期、点検項目数については、運転経験や科学的知見を基に定期的に見直ししている。保全要員は、まだ米国のようなオンラインメンテナンスが普及していないので、定期検査時に集中して設備点検を行うため多くの要員が必要となり、請負(協力会社)主体の保全要員構成になっている。

3.3 爆発事象(変圧器・蓄電池)に関する米国とわが国の比較検討

海外(主に米国)で変圧器爆発が多く発生している理由の一つに保全方法の違いが考えられる。米国では時間計画保全よりも状態基準保全が主流になっており、特に電気設備についてはその傾向が強く、変圧器はサーモグラフィや油分析等により定期的に状態監視され、変圧器の分解点検周期を定めない発電所もある。変圧器爆発の起点の殆どが巻線や導体接続部の故障による短絡・地絡から起こっており、サーモグラフィや油分析のような定期的な監視(一例では3~6ヶ月毎に実施しており常時監視ではな

表1 米国とわが国の原子力発電所における保全方法の比較

	保全方法	点検周期を定めている点検項目数(米国/日本)の割合(%)	保全要員(体制)
日本	時間基準保全	-	請負主体
米国	状態基準保全が主体	BWRプラント:約70% PWRプラント:約50%以下	運転中:直営 停止中:請負

い)により故障の兆候をタイムリーに発見できない場合は、分析間(3~6ヶ月)に巻線劣化が地絡・短絡故障に移行してしまう可能性がある。このことがこの結果に繋がっている理由の一つと推定できる。

わが国の場合、定期的に油分析を行い、更に定期の分解点検時には油を抜いて目視、打診点検により巻線や絶縁材料の変色や緩みがないことを確認している。保守コストは高いが変圧器内部の健全性の確認という観点では、米国より優れていると言える。

また、米国では故障しても、全米電力会社共通の資材共有化システムにより変圧器の予備品を早期に入手出来るために、早期取替により修復時間が短いことも理由の一つと考えられる。一方、わが国の原子力発電所において大型変圧器予備品を保有している発電所はほとんどない。

もう一つ、蓄電池爆発が多く発生している理由は、保全要員の違いが考えられる。爆発事象発生の原因は蓄電池セルの取扱時に、静電気除去を実施しなかったため、または設備故障のために爆発が多発している。一方、わが国では類似事象は発生していない。

米国では蓄電池についてもサーモグラフィによる状態基準保全を実施しており、且つサーバランス試験(蓄電池の電圧測定等)を実施しているが、その保全要員は発電所員による直営が主体であるため、蓄電池取扱時の注意事項の認識(静電気による爆発の危険性)が薄れ、取扱前に体に帯電している静電気を除去することを怠ったことおよび経年劣化(例:劣化による極の腐食、電流増加による水素の多量発生)が主な原因である。

わが国では蓄電池の定期点検が請負化(メーカー実施)しており、静電気に対する予防措置が自主的に実施されていることおよび劣化する前に定期的に交換しているため発生していないと推定できる。

4. まとめ

- (1) 海外の原子力発電所で、実際に爆発が発生した不具合(54件)の設備別爆発事象件数では、変圧器、蓄電池で全体の55%を占め、全体として主に電気設備で発生しており、これらはわが国では経験していない事象である。また、爆発気体別の事象件数では、水素と絶縁油分解ガスによるものが全体の66%を占める。
- (2) 年度別爆発発生件数では、2~6件/年で継続的

に発生している。全体の55%を占める変圧器と蓄電池の爆発事象を年度別に見ると、継続的に発生しており、最近、蓄電池の爆発事象が増加傾向である。

- (3) 爆発要因となった着火源は、アークが全体の39%(21件)を占め、そのうち15件は電気アークによるもので、溶接等の工具による切削アークは6件だけである。短絡・地絡が22%(12件)を占めるのは、主に変圧器内部故障によって発生したものである。
- (4) 運転中の爆発事象が50%を占め、その内、56%が変圧器爆発である。発電所への影響は、原子炉トリップ、出力低下・変動が48%を占めている。変圧器爆発による電源喪失の影響は非常に大きいことが分かる。
- (5) 人的被害が発生した事象は全体の13%(7件)と少ない。これは変圧器爆発が多く発生しているが、プラント運転中のために周辺に人がいなかったと推測される。
- (6) 爆発事象の原因分類では、運用(58%)が設備(42%)より多くなっており、運用では保守不良が多く、設備では経年劣化と設計不良が多い。これは年度毎の全不具合の原因分類と同じ傾向を示している。
- (7) 海外(主に米国)で変圧器爆発が多く発生している理由の一つに時間計画保全よりも状態基準保全が採用されていることが考えられる。また、蓄電池爆発が多く発生している理由は、保全要員が請負ではなく直営であることが考えられる。

以上

文献

- (1) 奥田 恭介,「海外の原子力発電所における水素燃焼および爆発事象の調査と分析」, INSS JOURNAL, Vol.9, P.212 (2002).
- (2) 島田 宏樹,「原子力発電所における火災事象の傾向分析」, INSS JOURNAL, Vol.14, P.326 (2007).
- (3) 日本電気協会,「変電所等における防火対策指針 JEAG5002-2001」, 2002年5月.
- (4) 日本原子力技術協会, 原子力施設情報公開ライブラリー, <http://www.nucia.jp/> (2007年12月現在).

- (5) 宮崎 孝正, 「経年劣化や人的過誤等を含めた原子力発電所不具合事象の新たな原因分類法とその適用結果」, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.6, No.4, PP.434~443 (2007).
- (6) 電力中央研究所, 研究調査資料, No.P01906, 「米国原子力発電所における保守方式の特徴」, 2001年8月.