

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

Investigation and Analysis of Hydrogen Ignition and Explosion Events in Foreign Nuclear Power Plants

奥田 恭令 (Yasunori Okuda)*

要約 海外の原子力発電所における水素燃焼および爆発事象について、1980年から2001年までに発行された文献をもとに調査を行った結果、31件の事例があることが判明した。その内容を分析すると、水素燃焼および爆発事象は、外部漏えい引火と内部発火に大別できる。このうち、加圧水型軽水炉 (PWR) では発電機からの外部漏えい引火が中心となっており、沸騰水型軽水炉 (BWR) ではオフガス系の内部発火が中心となっている。特に、外部漏えい引火の原因は、火種を伴う作業の不良、運転上の不注意および発電機からの漏えいとなっている。また、内部発火の主原因としては、設備不良と監視不十分が挙げられ、これらの排除が再発防止の鍵となる。

キーワード 原子力発電所, 水素燃焼, 水素爆発, 発電機, オフガス系, データベース

Abstract Reports about hydrogen ignition and explosion events in foreign nuclear power plants from 1980 to 2001 were investigated, and 31 events were identified. Analysis showed that they were categorized in (1) outer leakage ignition events and (2) inner accumulation ignition events. The dominant event for PWR (pressurized water reactor) was outer leakage ignition in the main generator, and in BWR (boiling water reactor) it was inner accumulation ignition in the off-gas system. The outer leakage ignition was a result of work process failure with the ignition source, operator error, or main generator hydrogen leakage. The inner accumulation ignition events were caused by equipment failure or insufficient monitoring. With careful preventive measures, the factors leading to these events could be eliminated.

Keywords nuclear power plants, hydrogen ignition, hydrogen explosion, main generator, off-gas system, database

1. はじめに

原子力発電所において、水素は冷却材の水質調整や機器の冷却に使用されているが、燃焼・爆発の危険性があることから、火災防護の観点でその使用が厳しく規制されている。しかしながら、それでも水素燃焼・爆発事象が発生している。

さらに、2001年11月7日に発生した(株)中部電力浜岡原子力発電所1号機の余熱除去系配管破断事故では、炉心での放射性分解により生じる水素が配管内で滞留したことに起因して水素爆発が発生したといわれている⁽¹⁾。一方海外の原子力発電所においては、2001年12月14日にドイツBrunsbuttel発電所の原子炉圧力容器 (RPV) ヘッドスプレ配管で、水素爆発によるものと推定される配管破断が発生した⁽²⁾。こうしたことから、原子力発電所における水素燃焼・爆発事象について関心が高まっている。このため、これまでに発生した海外の水素燃焼・爆発事象に対する実

態を調査し、その結果にもとづいて再発防止対策を提案する。

2. 調査方法

水素燃焼・爆発事象の調査にあたっては、本研究所原子力情報研究プロジェクトで構築した「海外原子力発電所不具合情報データベース」⁽³⁾による事象の検索の他、日本原子力研究所が公開している「I N E S 和訳情報データベース」⁽⁴⁾および国内の新聞報道における海外の原子力発電所の水素爆発・燃焼事象の記事をもとに、1980年から2001年の間に発行された情報を収集した。

収集した情報は、図1に示す「水素燃焼・爆発事象調査票」に整理した。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

No	8	
プラント名	James A. Fitzpatrick	
型式	BWR	
国	米国	
発生発見日	1999.01.14_1	発生年 1999
件名	水素ガス火災に伴う異常事象宣言	
状況	<p>定格出力運転中、水素注入及び発電機冷却に使用している水素ガス系を供用とするために、水素ガス貯蔵施設において系統構成を行っていたところ、弁操作ラックで水素ガスが発火し、火災が発生した。</p> <p>火災の原因は、水素ガス系の流量制御弁のパッキン等から漏えいした高圧の水素が漏えい経路の金属表面を通過する際の摩擦により、発火に至ったことである。根本原因は、水素ガス系の弁の予防保全が不十分であったことである。</p>	
原因1	保守不良	
原因2	—	
引火・着火原因		
引火・着火時の状況	ラインアップ	
引火・着火時の状況(その2)	操作関連	
引火・着火の形態	水素漏洩	
人身事故の状況		
発生個所(大分類)	水素貯蔵・供給施設	
発生個所(小分類)	水素ガス貯蔵施設	
備考	LER 99-001-01 NRC IN 2001-12	

図1 水素燃焼・爆発事象調査票

整理内容は表1に示すとおりである。項目としては、プラント名や炉型、発生発見日といった一般的な情報の整理項目の他に、今回の場合には発生原因と引火原因を区別するとともに、さらに引火時の状

況や形態を整理することにより、より具体的な対策の検討につながるように配慮した。また原因区分の詳細を表2に示す。

表1 水素燃焼・爆発事象整理票の整理内容

No	項目	説明
1	No	整理番号
2	プラント名	水素燃焼・爆発事象の対象プラント名
3	炉型	原子力発電所の炉型
4	国	当該プラントの設置されている国
5	発生発見日	事象の発生発見日
6	発生年	暦年別発生状況を整理するための整理データ
7	件名	入手情報の件名
8	状況	入手情報の内容の概要
9	原因1	入手情報における原因を「水素滞留」, 「水素反応」, 「運転ミス」, 「作業ミス」等の原因に区分（詳細は表2参照）
10	原因2	複合又は従属原因がある場合に記載区分は「原因1」と同じ.
11	引火・着火原因	電氣的スパークや高温部接触のように、水素爆発・燃焼の引火の原因が明確な場合のみ記載
12	引火・着火時の状況	具体的な引火時の状況の内容
13	引火・着火時の状況（その2）	操作・作業・設備不具合の区別
14	引火・着火の形態	外部漏えい引火と内部発火の区別
15	人身事故の状況	火傷等事故の程度と被害者の数
16	発生個所（大分類）	発生個所の系統・機器別分類
17	発生個所（小分類）	具体的な発生個所
18	備考	情報の出典等

表2 水素燃焼・爆発事象調査表における原因1, 原因2の区分の詳細

区分	説明
1.設備不良	設計不良,材料選定不良によるもの
2.設備劣化	経年的劣化(パッキンの劣化,弁のシート洩れ等)によるもの
3.運転不良	操作計画・要員配置の立案,実施の不備
4.保守不良	予防保全計画・要員配置計画の立案,実施の不備
5.操作ミス	人的ミスによる規則・手順書からの逸脱
6.作業ミス	人的ミスによる規則・手順書からの逸脱
7.手順書不備	手順書の検討不足,記載ミスによるもの
8.水素滞留	水素滞留によるもの
9.水素反応	触媒の介在を含み,酸素と水素の反応によるもの
10.原因不明	原文に原因が記載されていないもの

3. 調査結果と分析

3.1 炉型別発生状況

調査の結果, 収集した事象は全部で31件であった。その結果を炉型別に整理した結果を図2に示す。図に示すとおり, 発生件数的には, PWR(加圧水型軽水炉)が最も多く61%で, 次いでBWR(沸騰水型軽水炉)が29%, PHWR(加圧重水炉)やLWGR(軽水冷却・黒鉛減速圧力管型炉), GCR(黒鉛減速炭酸ガス冷却型原子炉)といったPWR・BWR以外の炉型が10%の順となっている。これに対し, 2000年12月31日現在の稼働中の商用炉数⁵⁾をもとに, 水素燃焼・爆発事象が発生した国のPWRの炉数とBWRの炉数から発生率を算定すると, PWR(全109基)が0.17件/炉, BWR(48基)が0.19件/炉となる。

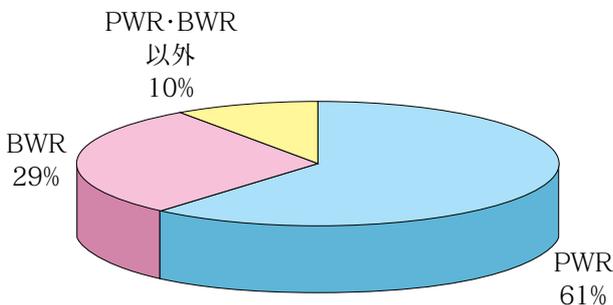


図2 水素燃焼・爆発事象に対する炉型別整理結果

3.2 暦年別発生状況

収集した31件についての事象件数を暦年別に整理した結果を図2に示す。図に示すとおり, 1977年に発生した件数が1件あったが, その後しばらく停滞期があり, 1982年から1999年までの間はほぼ毎年のように発生している。

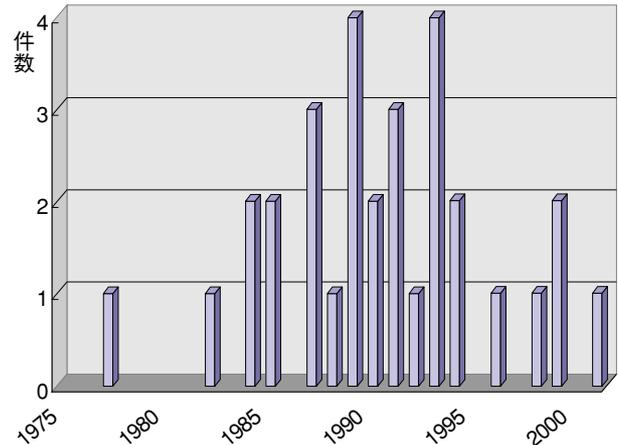


図2-2 水素燃焼・爆発事象の暦年別発生状況

3.3 系統別内訳

収集した31件の発生系統別に整理した結果を図3に示す。図に示すように, 発生系統別の事象数でみた場合には, 冷却用の水素に引火した「発電機(励磁機)」が15件で最も多く, ついで炉心の放射線分解で発生した水素や水素注入による余分な水素を含む非凝縮性ガスを除去する系統内外で発火・引火した「オフガス系(BWR)」が6件, 「RCS(一次冷却材系統)廻り」および「水素貯蔵・供給施設」が各2件という結果であった。

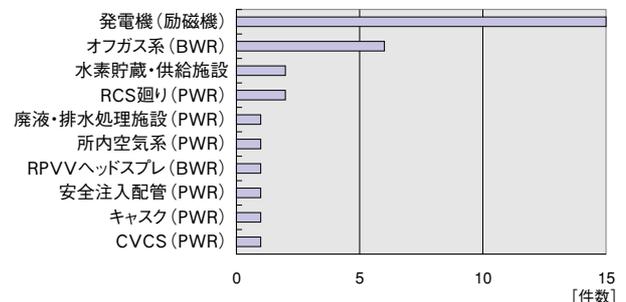


図3 水素燃焼・爆発事象の系統別内訳

3.4 発生形態別内訳

収集した31件を発生形態別として、系外に水素が漏えいした後引火に至ったものを「外部漏えい引火」、系統内に留まったまま引火にいたったものを「内部発火」として二つに区別して整理した結果を図4に示す。図に示すように、「外部漏えい引火」が全体の77%を占めているが、「内部発火」も23%の割合で発生していることが分かった。

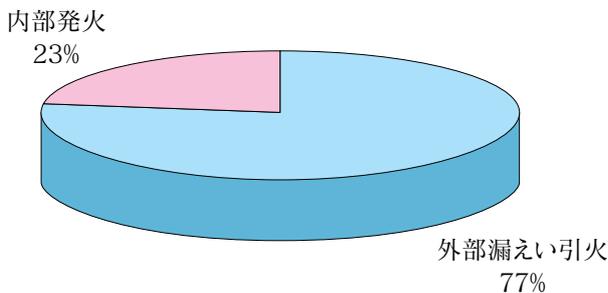


図4 水素燃焼・爆発事象の発生形態別内訳

3.5 外部漏えい引火の発生時の状況

「外部漏えい引火」の24件に対する発生状況について、「作業」時に発生したものと「操作」時に発生したものの、さらに「設備不具合」によって発生したものの3つに分類にした件数別内訳を図5に示す。

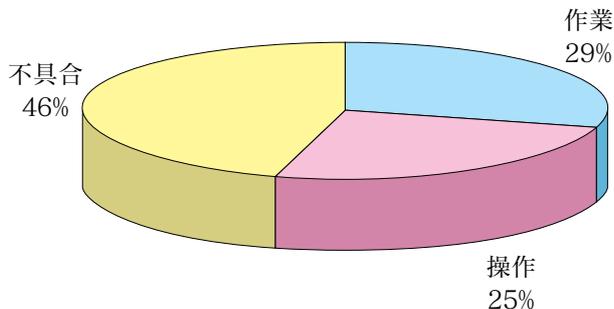


図5 外部漏えい引火の発生状況の内訳

まず「作業」については、全体の29%を占めている。その作業の詳細を表3に示す。

表3 作業の詳細

溶接作業	: 3件
グラインダ作業	: 2件
解放作業	: 1件
別の不具合時の対応	: 1件

表に示すように、溶接作業やグラインダ作業の他、開放作業に伴う機器の接触、別の不具合時の対応の際における回転機への部材の接触といったいずれも火種を伴う作業で、作業前・作業中の水素濃度の監視や確認が不十分であったため、作業場所周辺に漏えいしていた水素に気付かず引火に至ったものである。このため再発防止のためには、念には念を入れた作業前・作業中の水素を含めた可燃性ガスの管理が要求される。

次に「操作」については、全体の25%を占めている。その操作の詳細を表4に示す。表に示すように、水素を伴う系統の操作であったが、その注意を怠り弁の急激な操作や調整ミスにより水素が外部に漏えいし、漏えい時の摩擦によるものとされた1件を除き正確な着火源は明確ではないが引火に至っている。このため再発防止のためには、水素を外部に漏えいさせないために、再度水素を扱う系統操作の手順とその注意事項が適切かどうか、また運転操作のそのような注意事項が時間とともに風化する恐れがないかどうかについて、点検する必要がある。

表4 操作の詳細

ラインアップ	: 2件
ベント操作	: 1件
発電機密封油装置操作	: 1件
発電機水素濃度上昇操作	: 1件
水素ガス充てん操作	: 1件

次に「設備不具合」について、そのすべてが発電機水素冷却系の直接的な故障やタービン翼の損傷に関連する間接的な故障により、水素が漏えいし引火に至ったものである。

対象事象11件を炉型別に見てみると、以下のとおりとなる。

PWR	: 7
BWR	: 1
GCR	: 1
LWGR	: 1
PHWR	: 1

さらにPWRとBWRについて、発生件数を水素燃焼・爆発が発生した国の稼動中商業炉数で割った発生率でみてみてもPWR（全109基）が0.064件/炉、BWR（48基）が0.021件/炉となり、PWRでの発生率が高いことがわかる。

対象事象11件について、その発生原因について整理した結果を図6に示す。図に示すように、「水素冷却系配管破断」や「水素冷却系故障」といった直接的原因による件数は2件に留まっており、残り9件は「タービン軸振動大」・「地絡」および「発電機ブッシング不良」といった間接的原因により、発電機水素冷却系の配管・シールが損傷し、その結果水素が外部に漏えいして引火に至ったものである。このため再発防止対策としては、タービン・発電機・発電機水素冷却系の予防保全の徹底が挙げられる。

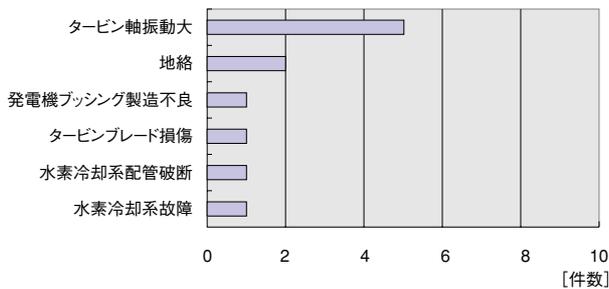


図6 発電機（励磁機）水素外部漏えい引火事象の原因の内訳

3.6 内部発火の対象機器別内訳

内部発火対象事象7件について、その発生機器・系統別に整理した結果を図7に示す。図に示すように、炉心の放射線分解で発生した水素や水素注入による余分な水素を含む非凝縮性ガスを除去する系統内で発火した「オフガス系（BWR）」が5件で最も多い。炉型別ではBWRが6件、PWRが1件という状況である。

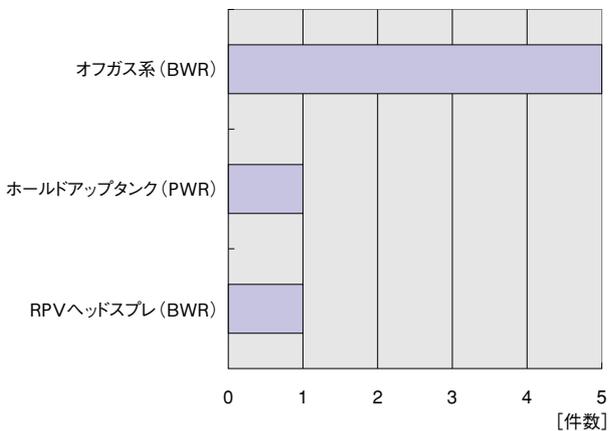


図7 内部発火事象の対象機器別内訳

3.7 内部発火のメカニズムと対策の検討

内部発火対象事象7件のうち、原因不明の2件を除く5件についてそのメカニズムを整理した結果を図8に示す。図に示すように、原因は「設備不良」と「監視不良」の二つのパターンに大別される。

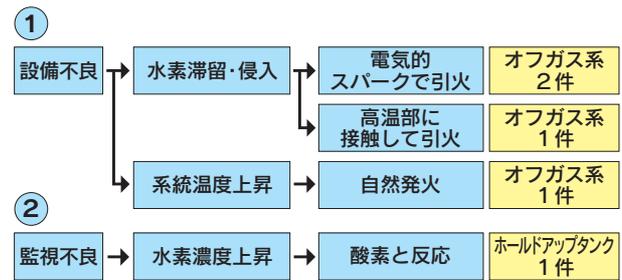


図8 内部発火のメカニズム

まず一つ目のパターンはすべて炉心の放射線分解で発生した水素や水素注入による余分な水素を除去する系統であるオフガス系におけるものであり、「設備不良」を根本原因として系統内に「水素滞留・侵入」を招き、その結果「電気的スパーク」、「高温部への接触」によって引火している。一方「設備不良」により水素と酸素の反応を招き、「系統温度が上昇」した結果、「自然発火」に至ったケースも報告されている。

次に二つ目のパターンは、一次冷却材系統から排出される余分な一次冷却材を溜めるタンクの水素濃度監視不良によりタンク内の「水素濃度が上昇」し、「酸素と反応」して発火に至った事例が報告されている。

以上の結果から再発防止対策としては、弁のシート漏れ等設備不良により、系統内に水素が滞留あるいは侵入する可能性のある個所や水素と酸素の反応が発生する個所、および反応の触媒となる可能性のある材料の使用部位を洗い出し、弁のシート漏れ等設備不具合のないように、予防保全を徹底する他、弁を二重化する等の信頼性向上策をとることも有効であると考えられる。一方、監視不良の個所については、水素濃度監視計器の電源・系統の多重化を図る等の処置が必要である。さらに内部発火を未然に防止する対策としては、水素含有系とのバウンダリとなる配管の定期的なパージにより、水素滞留を防止する必要がある。

3.8 水素燃焼・爆発事象発生時の状況のPWRとBWRの比較

外部漏えい引火と内部発火について整理してきた結果にもとづいて、PWRとBWRに分けて整理した結果を図9に示す。図に示すように、外部漏えい引火はPWRで支配的であり、中でも発電機（励磁機）が最も多く、これがPWRの特徴となっている。

これに対して内部発火は、BWRで支配的であり系統的にオフガス系が最も多く、これがBWRの特徴となっている。

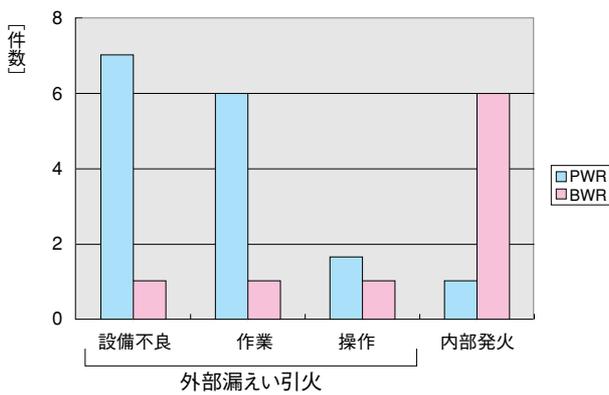


図9 水素燃焼・爆発事象発生時の状況のPWRとBWRの比較

3.9 再発防止対策

これまでの海外の原子力発電所における水素燃焼・爆発事象31件に対する再発防止対策の内容を整理すると以下のとおりである。

(1) 外部漏洩引火

- (a) 設備不具合
 - タービン発電機・発電機水素冷却系の予防保全の徹底
- (b) 作業
 - 火種を伴う作業時に対する可燃性ガスの事前確認の徹底
- (c) 操作
 - 可燃性ガス系の運転操作の注意事項の再確認

(2) 内部発火

- (a) 設備不良
 - 設備不良に伴う水素滞留・系統温度上昇対象機器の選定と予防保全の徹底
- (b) 監視不良
 - 水素濃度監視機器の充実
- (c) 共通
 - 定期的なガスパージの実施

4. 日本の一般産業界における水素燃焼・爆発の発生状況

前章まで、海外原子力発電所における水素燃焼・爆発事象の状況について分析を実施したが、水素燃焼・爆発は、原子力発電所に固有の事象ではない。そこで1980年から2001年までの国内の新聞記事をもとに、日本の一般産業界における水素燃焼・爆発の発生状況を調べた。その結果、全69事例を収集した。暦年別発生状況を図10に示す。図に示すように1983年以降、1984年を除いて、連続的に発生しており、1995年以降特に発生件数が4件以上と高くなっていることが分かる。

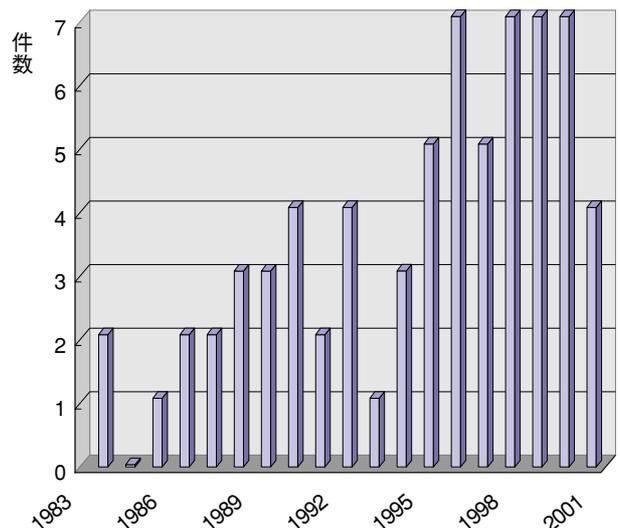


図10 日本の一般産業界における水素燃焼・爆発の発生状況 (暦年別内訳)

次に発生箇所別内訳を図11に示す。図に示すように、最も多いのは、水素を取り扱っている化学工場の38件であるが、次いで学校での理科実験中に12件発生していることが注目できる。

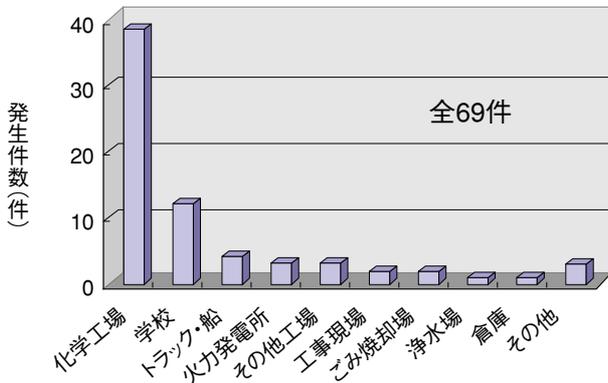


図11 日本の一般産業界における水素燃焼・爆発の発生状況（発生個所別内訳）

以上のように、原子力発電所における水素燃焼・爆発だけでなく、一般産業界においても継続して水素燃焼・爆発が発生している。このため今後燃料電池等の普及により、ますます水素利用が増大するにあたって、火災防止と労働安全衛生の両面において、事故防止の注意喚起と安全教育の徹底を図り、水素燃焼・爆発防止のための歯止めが必要である。

5. 今後の課題

2001年12月14日に発生したドイツBrunsbuttel発電所RPVヘッドスプレ配管破断でも、原因は明確ではないが、水素爆発が発生した可能性があることが指摘されている。このような事象に対し、現行の規制上のルールを原子力先行国である米国を対象に調査した結果、水素燃焼・爆発を火災防護および事故時の格納容器健全評価から規制しているが、配管内での水素燃焼・爆発に対する具体的な規制内容は見当たらない。

このため前述の事象の原因調査結果によっては、今後新たな再発防止対策や基準の制定が必要となる可能性がある。

6. おわりに

- (1) 1980年から2001年の間に報告された事故・故障情報について文献調査した結果、31件の事例を収集した。
- (2) PWRでは発電機からの外部漏えい引火が中心となっており、BWRではオフガス系の内部発火が中心となっている。

- (3) 外部漏えい引火は、火種を伴う作業の不良・運転上の不注意・発電機からの漏えい引火で構成されており、再発防止のため、水素関連システムの予防保全の徹底と火種を伴う作業の事前確認の徹底及び、運転操作上の注意事項の再確認が必要である。
- (4) 内部発火のメカニズムは大きく二つのパターンに分かれ、設備不良・監視不良といった主要因の排除が再発防止の鍵となる。
- (5) また国内一般産業界においても、多数の水素燃焼・爆発が発生しており、水素の取り扱いについては、事故防止の注意喚起と安全教育の徹底が必要である。
- (6) ドイツBrunsbuttel発電所の原因調査により新たな再発防止対策が必要となる可能性がある。

文献

- (1) 原子力安全・保安院，“中部電力株式会社浜岡原子力発電所1号機における配管破断事故について（最終報告書）”（2002）
- (2) 原子力安全委員会原子力事故・故障調査専門部会ワーキンググループ，“ブルンスビューッテル原子力発電所（独）で発生した事象について”，平成13年度第9回資料第WG-9-1-1号（2002）
http://nsc.jst.go.jp/senmon/shidai/senkaisi_kensaku_f.htm
- (3) 奥田 恭令 柳 千裕，“原子力発電所技術情報に関するデータベースの構築について”，INSS JOURNAL Vol. 6, 195-201（2002）。
- (4) 日本原子力研究所，INES和訳情報データベース，<http://nsdel.tokai.jaeri.go.jp/./ines/index.html>
- (5) 花光圭子，中尾克巳，三田剛，石井敬之，窪田秀雄，“世界の原子力発電開発の動向”，70，（社）日本原子力産業会議（2002）