

原子力発電所における水撃事象の分析

Analysis of Water Hammer Events in Nuclear Power Plants

佐藤 正啓 (Masahiro Sato)* 柳 千裕 (Chihiro Yanagi)*

要約 水撃事象は、米国の原子力発電所における未解決安全問題の1つとして取り上げられ、解決済とされた。しかしその後も発生件数は減少傾向にあるものの、現在も依然として発生している。

本調査では、これまでに経験した国内および米国加圧水型軽水炉 (PWR) の事故・故障情報データや米国規制関連文献の中から水撃事象に関するものを収集して、分析するとともに、国内PWRでの対応状況を調査した結果、いずれの水撃事象に関しても水撃が発生しないよう設計・運転などの面から対応がとられていたり、水撃が発生しても設計面で対応がとられているが、水撃防止にあっては、運転操作への依存度も大きく、継続的な配慮が必要であることが確認された。

キーワード 水撃, 未解決安全問題, 原子力発電所の事故・故障

Abstract A water hammer issue in nuclear power plants was one of unresolved safety issues listed by the United States Nuclear Regulatory Commission and was regarded as resolved. But later on, the water hammer events are still experienced intermittently, while the number of the events is decreasing. We collected water hammer events of PWRs in Japan and the United States and relevant documents, analyzed them, and studied corrective actions taken by Japanese plants. As a result, it is confirmed that preventive measures in design, operation etc. have been already taken and that mitigation mechanisms against water hammer have also been considered. However, it is clarified that attention should be continuously paid to operation of valves and/or pumps, as the prevention of water hammer still relies on operation.

Keywords water hammer, unresolved safety issue, incident and malfunction of nuclear power plants

1. はじめに

国内外の原子力発電所の事故・故障情報を分析することから教訓を学び、同種の事故・故障を防止することは、原子力発電の信頼性向上を図るために有益である。当研究所では、これまで「重要事象に係わる信頼性向上の研究」として「非常用炉心冷却系 (ECCS) 作動事象の分析」⁽¹⁾「原子力発電所における弁不具合事象の分析」⁽²⁾等を実施してきた。

今回は、米国においても安全上重要な問題として早くから認識されている問題、いわゆる未解決安全問題 (USI: Unresolved Safety Issue)⁽³⁾の1つとして取り上げられ、解決済とされた。しかしその後も発生件数は減少傾向にあるものの、現在も依然として発生している水撃事象に係わる調査分析を実施し

た。

ここでは、水撃事象に関する米国と国内における調査分析結果について述べるとともに、今回の調査に際し、米国では、1984年に水撃事象に関する技術調査結果が、原子力規制委員会 (NRC: Nuclear Regulatory Commission) から NUREG-0927 Rev.1⁽⁴⁾として発行されているため、この文献を参考に、米国における水撃に関する状況についてもまとめた。

2. 米国の状況

米国では、1984年に水撃事象に関する技術調査結果が NUREG-0927 Rev.1として発行されている。この中で、水撃事象を完全に排除することは不可能

* (株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

であるとするとともに、技術的解決策がまとめられ、解決済としていた。まずは、この文献などをもとに、米国の原子力発電所における水撃に関する状況についてまとめた。

- (1) 原子力発電所の種々の系統に蒸気・水・ボイドが共存する可能性があるため、水撃の発生を完全に排除することは不可能である。
- (2) 損傷は配管サポート関連が主である。
- (3) 発生の約半分がプラント運転開始前の試運転段階から運転開始後1年以内に集中しており、これは、一定の学習期間が存在し、その間に設計上の欠陥が是正され、運転上のエラーが減少することを示している。
- (4) PWRは沸騰水型原子炉（BWR）に比べて、発生回数は少なく、重大事象も少ない。これは、主として2つの要因に起因する。1つは、BWRの方がECCSに給水するサブプレッションボールの高さが低いため、BWRのECCS管路で漏洩によるボイドが発生しやすいこと、もう1つは、BWRには蒸気と水の相界面が存在することである。
- (5) 最も重要な水撃要因は配管部でのボイド（蒸気・空気等）の存在である。

(6) 発生頻度は1970年代半ばが最高で、新規プラント運転開始数が最高に達したときに一致するが、その後、経験に基づく設計変更等で低減している。

- (7) 水撃発生の回避が不可能な場合は、水撃の発生を予想し、その際の機械的荷重を配管およびサポートの設計基準に取り入れることが必要である。
- (8) 可能な対策として、ボイド検知、系統満水化設備設置、ベント設備設置および運転員訓練などをあげている。

これらのうち(8)について、表1にNRCが提案する系統別水撃対策について示す。その中でボイド計設置について提案されており、図1、2にはその概念設計について示す。NRCは、PWRでボイド計の設置による対策が適用できる系統として、ECCS（安全注入）と補機冷却水系を挙げている。本調査では、このボイド計について、米国PWRでの設置状況を問い合わせ等により調査したが、設置されているプラントは見あたらなかった。

なお、その後、1997年7月に、発生件数は減少傾向にあるものの、依然として水撃が発生していると

表1 NRCが提案する系統別水撃対策（PWR）

（出典：NUREG-0927 Rev.1（1984年3月））

系 統	水撃発生動作	水 撃 発 生 防 止 策	
		設 計 面	運 転 面
主給水系	給水制御弁不安定	制御弁適正化	
	人的ミスなど		手順書整備,教育・訓練
主蒸気系	弁閉止による蒸気水撃	サポート設計	
	逃がし弁吹き出し	サポート設計	
	人的ミスなど		手順書整備,教育・訓練
一次冷却系	逃がし弁吹き出し	サポート設計	
余熱除去系	ボイド	ベント弁	手順書整備,教育・訓練
ECCS	ボイド	ベント弁,ボイド計	手順書整備,教育・訓練
化学体積制御系	蒸気泡潰れまたは振動		手順書整備,教育・訓練
補機冷却水系	ボイド	ベンディング,系統満水化,解析	系統満水化,手順書整備,教育・訓練
蒸気発生器	蒸気ボイド潰れ	Jチューブ,配管長最適化,給水流量制限	

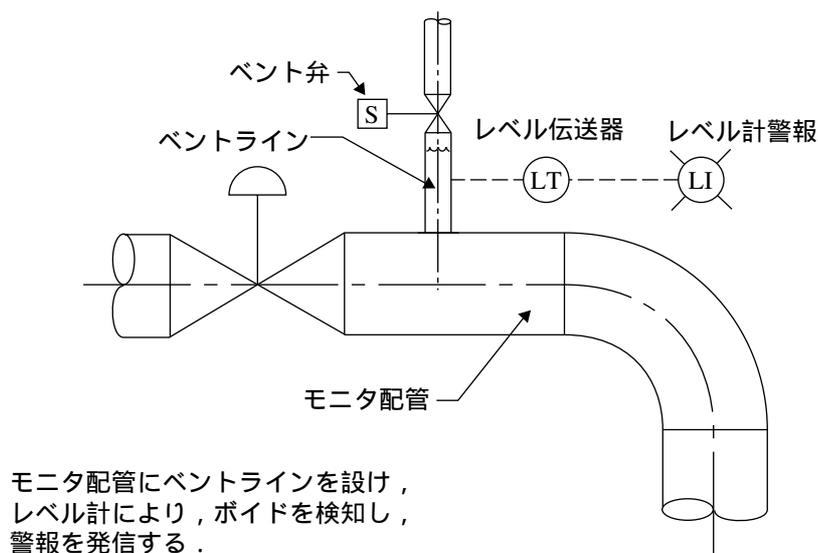


図1 NRCが提案する水撃対策案 ボイド計の概念図 その1 (レベル計)
(出典：NUREG-0927 Rev.1 (1984年3月))

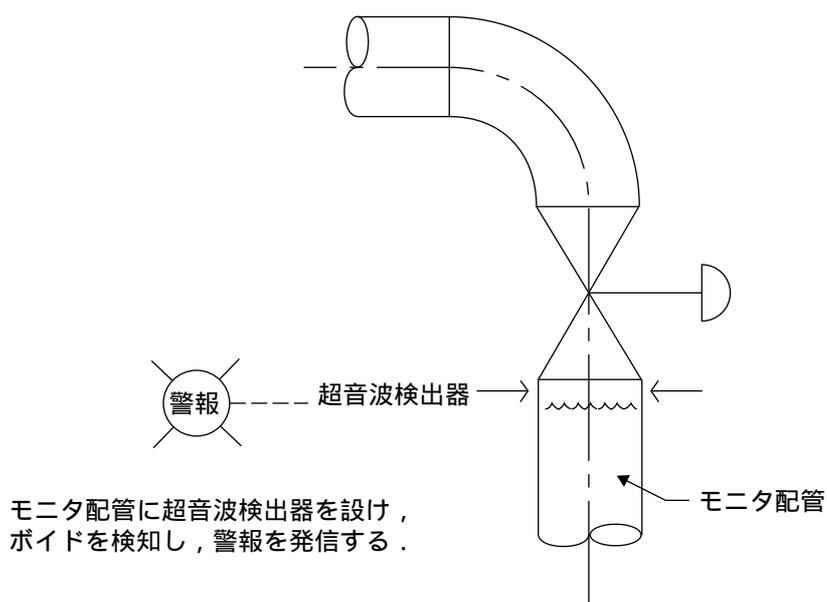


図2 NRCが提案する水撃対策案 ボイド計の概念図 その2 (超音波検出器)
(出典：NUREG-0927 Rev.1 (1984年3月))

してNRCから原子力発電所設置者に対して注意喚起が図られている⁽⁵⁾。

3. 水撃事象の調査分析

3.1 対象情報

米国の事象は、法律に基づきNRCへの報告が義

務付けられている原子力発電所設置者事象報告 (LER:Licensee Event Report)⁽⁶⁾, NRCが安全上重要な問題について発行するIN (Information Notice)⁽⁷⁾, BL (Bulletin)⁽⁸⁾, GL (Generic Letter)⁽⁹⁾およびNUREG (Nuclear Regulatory Commission Report)⁽¹⁰⁾といった公開情報を対象とした。一方,国内事象は,法律や大臣通達に基づき通商産業省に報告が義務付けられており公開されている事故報告⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁴⁾を対象とした。

3.2 調査対象期間と調査対象プラント

水撃に関する事象報告の総件数が結果的に少ないこともあり,米国と国内の事象とも1982年1月から1998年3月までの期間に報告された事象を調査の対象とした。ただし,それ以前の事象についても,NUREGの中で分析されている場合には取り上げるようにした。

対象プラント型式は,国内と米国とも,ウェスティングハウス社 (WH:Westinghouse Electric Corporation) 型のPWRとした。

米国の事象抽出時には,実際に水撃が発生し,報告された事象63件以外に,実際には発生していない

が,設計レビュー中に水撃発生の可能性を指摘され,LER報告対象となったもの11件や,そのほか参考となる情報18件も抽出した。

国内は実際に発生した事象1件を抽出し,総件数93件を抽出した。

3.3 データの整理

LERは,事象内容の記述については自由記述であるため,分析に適した形に整理し直す必要があったため,次の通りデータ項目の検討を行った。まず,水撃事象についての着眼点として,

- (1) 流体の相・圧力・流速・温度といった流体の状態
- (2) 系統構成
- (3) 運転操作
- (4) 水撃発生時の影響・損傷

を取り上げ,これらに対応するデータ項目として,

- (1) 水撃形態
- (2) 発生系統
- (3) 発生箇所
- (4) 発生原因・動作
- (5) 実施された対策
- (6) 損傷箇所

ID	プラント名	プラント番号	炉型	運開日	発生年月日	運開～発生(年)	引用文献
14	H.B.Robinson-2	261	PWR/WH	71/03/07	96/10/	25.6	IN91-50S1

事象概要	
設置者は逆止弁の漏洩試験を終え,この際,注入配管を部分的に排水した。その後,蓄圧器隔離弁を開き,配管内に再注水した時,蓄圧器内の600psigの水によってドレン配管内が急速に加圧され,水撃が発生した。	

水撃形態	発生系統	発生箇所	発生原因動作	プラントへの影響	損傷箇所
ガス圧縮水撃	安全注入系	蓄圧器ドレン管	弁開	設備運転不能宣言	レストレイント損傷

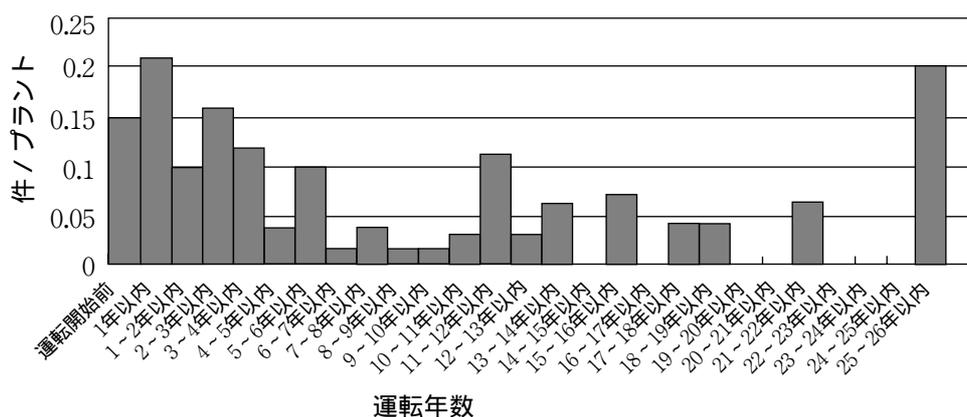
原因	原因記述
人的ミス(運転)	蓄圧器隔離弁を開き,配管内に再注水した時に,蓄圧器内の600psigの水により空気ボイドが急速に加圧されたことで水撃発生。

対策	対策記述
記載なし	記載なし

評価	
蓄圧タンクラインのRCS圧力バウンダリ境界弁である逆止弁漏洩試験を実施する際には燃料取替用水タンクに還流するテストラインの昇圧確認で行うか,あるいは同ラインの流量計による計測,もしくはサンプル弁からの落下水の採取計量で行う。このとき,逆止弁部に空隙部が発生しないように実施する。さらに漏洩試験終了後の蓄圧タンク隔離弁の再開に際しては,空気ボイドが存在している可能性があったとしても,水撃が発生しないように,緩速微開操作を行うことになっている。	

検討要否	理由
検討不要	運転面での対応済

図3 データ整理の様式



運転年数は調査期間終点の1998年3月31日での年数

図4 運転年数毎の発生率（運転年数毎の水撃発生件数を当該運転年数のプラント数で除した値）（合計：64件）

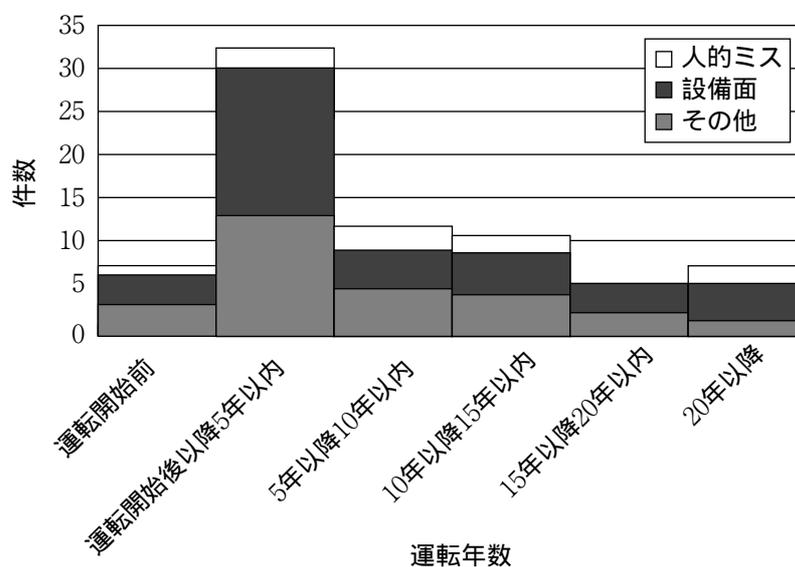


図5 運転年数別および原因別の分類（合計：75件）

を設定することとした。

データ項目のうち、水撃形態については、次の4種類に分類した。

(1) 単相圧力波水撃

単相状態で圧力波が発生し、相変化は伴わない。

(2) ガス圧縮水撃

系統内に空気等のガスだまりが、ポンプ起動時等による急激な圧力上昇で過剰圧縮され、その反動で生じるもの。相変化は伴わない。

(3) 再結合水撃

静圧低下により発生した蒸気により水柱分離が発生し、その後の静圧回復により再結合する際発生するもの。

(4) 蒸気水撃

蒸気が冷水に接触して急激に凝縮することにより発生するもの。

3. 1項で調査した個々の事象・規制関連文献について、事象の状況・原因・対策に、上記の通り設定したデータ項目を加えた様式を定め、データを整理した。(図3) その際、事象の類似性を明確にし、発生事象の傾向把握・分析を容易に行うことができ

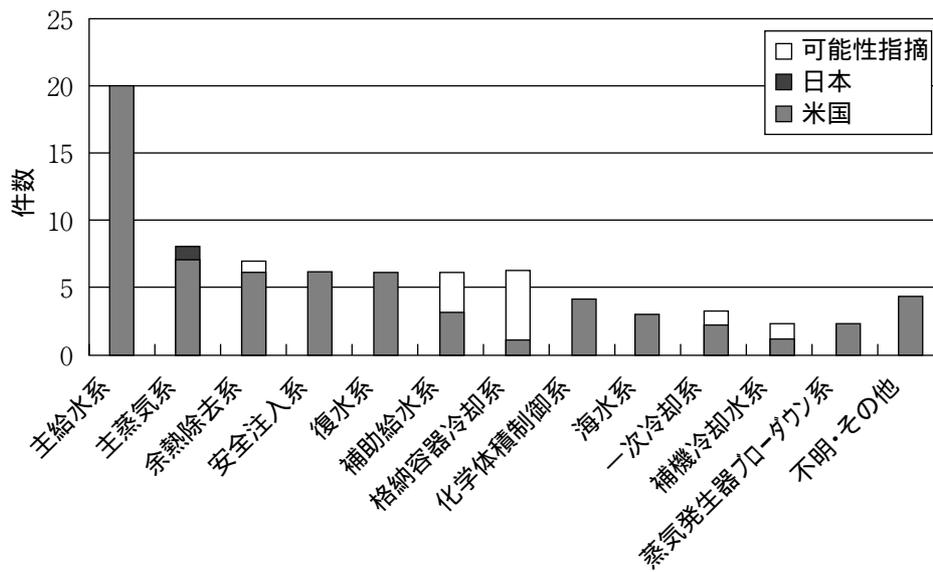


図6 発生および可能性指摘系統
(1つの事象に対し、2系統の発生の記述があるため、合計は77件)

表2 系統別水撃形態
(1つの事象に対し、2系統の発生の記述があるため、合計は76件)

	再結合水撃	单相圧力波水撃	蒸気水撃	ガス圧縮水撃	不明	小計
主給水系	2	11	1		6	20
主蒸気系	1	0	4		2	7
余熱除去系	3	1		2	1	7
安全注入系	3	1		2		6
復水系					6	6
補助給水系	3	1	2			6
格納容器冷却系	6					6
化学体積制御系	2	2				4
海水系	1	2				3
一次冷却系			1		2	3
補機冷却水系	2					2
蒸気発生器ブローダウン系	2					2
不明・その他			1		3	4
小計	25	18	9	4	20	76

るように分類した。

3.4.1 発生年とその推移

3.4 不具合事象分析結果

前項で整理したデータを基に傾向分析を行った。

図4に水撃発生事象64件が、運転開始後どの程度の期間後発生したかを調査するため、運転年数毎の発生件数を当該運転年数のプラント数で除した値を

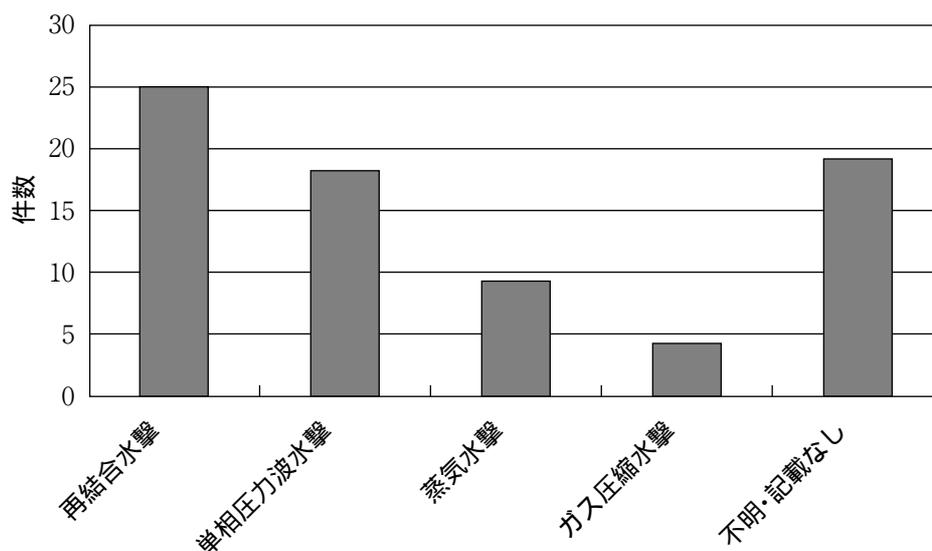


図7 水撃形態分類（合計：75件）

示しており、運転開始前の試運転時および運転開始後の数年以内での発生率が高いことがわかる。このことは、NRCの見解である「発生の約半分がプラント運転開始前の試運転段階から運転開始後1年以内に集中しており、これは、一定の学習期間が存在し、その間に設計上の欠陥が是正され、運転上のエラーが減少する」(NUREG-0927 Rev.1) ことと同等である。運転開始前と1年以内のものは19件で、1998年3月末までの件数の約30%を占めている。国内で唯一発生した事象も1.8年で発生している。なお、発生したもののうち運転開始から最長の事象は25.6年で、人的ミスにより発生している。

運転開始後25年から26年の間の発生率が大きいのは、発生件数が1件なのに対してプラント数は5であり、プラント数が少ないことにより件数1件の影響が高くなったものである。

また、図5は原因別の発生件数を示しており、人的ミスによる事象の件数は運転年数には依存していないように見受けられる。

3.4.2 水撃事象の傾向分析

図6に示すように、最も事象が多く発生しているのが主給水系であり、その中でも単相圧力波水撃が11

件と多くなっている。

また、表2に示すように、主蒸気系では、蒸気水撃が多くなっている。一方、ガス圧縮水撃は、安全注入系および余熱除去系で発生しているが、これらは、窒素ガス等の影響によるものである。

原因、系統、水撃形態、水撃発生につながった動作、水撃の影響および損傷箇所について傾向分析を行った結果、以下の傾向が見られた。

- (1) 水撃形態として、再結合水撃および単相圧力波水撃が多い(図7)
- (2) 水撃につながった動作として、弁開閉およびポンプ起動・停止が大半を占めている(表3)
- (3) 水撃の影響として、設備が損傷または運転不能と見なし、当該設備に対して運転不能として扱うケース(設備運転不能宣言)が多い(表4)
- (4) 損傷箇所として、サポートが多い(表5)

4. 反映要否の検討

抽出した事象93件全てに対し、反映要否の検討を行った。その際、系統および水撃発生動作別の国内PWR対応状況について調査し、反映要否を検討し

表3 動作別水撃形態（合計：75件）

	再結合水撃	単相圧力波水撃	蒸気水撃	ガス圧縮水撃	不明	小計
弁開閉	5	4	3	2	10	24
ポンプ起動・停止	10	2	3	2		17
水滞留及びポンプ起動	6					6
凝縮水滞留			2			2
逆流		5	1			6
流量制御不安定	1	6				7
不明	3	1			9	13
小計	25	18	9	4	19	75

表4 系統別影響
（1つの事象に対し、2系統の発生の記述があるため、合計は77件）

	トリップ	安全注入動作	RCS漏洩	設備運転不能宣言の可能性	配管損傷の可能性	ECCS機能低下の可能性	逃がし弁開	ポンプトリップ、外部電源喪失発生	影響なし	記載なし	小計
主給水系	3	3					1			13	20
主蒸気系	3			1						4	8
余熱除去系				3		1			1	2	7
安全注入系				3						3	6
復水系							1		2	3	6
補助給水系				2					1	3	6
格納容器冷却系				1		5					6
化学体積制御系			4								4
海水系				2				1			3
一次冷却系					1					2	3
補機冷却水系					1					1	2
蒸気発生器ブローダウン系									1	1	2
不明・その他				1						3	4
小計	6	3	4	13	2	6	2	1	5	35	77

た．その結果を集約したものを図8に示す．図に示された項目毎の概要は次の通りである．

(1)「発生しないよう設計面に対処済」

水撃発生を防止するための設計が行われている事象である．この対応が最も多く43%を占めている．例として、蒸気発生器でのJチューブ（2次側水位低下後の水抜け・蒸気侵入

の抑制）を設置した給水管の採用などがある．

(2)「発生しても設計面に対処済」

水撃現象そのものを防止するのではなく、水撃の影響を考慮した設計が行われている事象であり、22%を占めている．上記の(1)と合わせると、設計面から対応している事象は、全体の65%に達しており、大半の事象が

表5 系統別損傷箇所（発生した事象64件のみ）
（1つの事象に対し、損傷は複数ある場合があるため、合計は79件）

	サポート損傷	溶接部損傷	弁損傷	その他損傷	損傷なし	記載なし	小計
主給水系	10		3	8	5	1	27
主蒸気系	5			2	1	1	9
余熱除去系	2	1			2	1	6
安全注入系	5		3	1			9
復水系	1			4	1	1	7
補助給水系	2			1			3
格納容器冷却系	1						1
化学体積制御系		2		1	1		4
海水系		2	1				3
一次冷却系	1			1			2
補機冷却水系				1			1
蒸気発生器ブローダウン系	2			1			3
不明・その他			1			3	4
小計	29	5	8	20	10	7	79

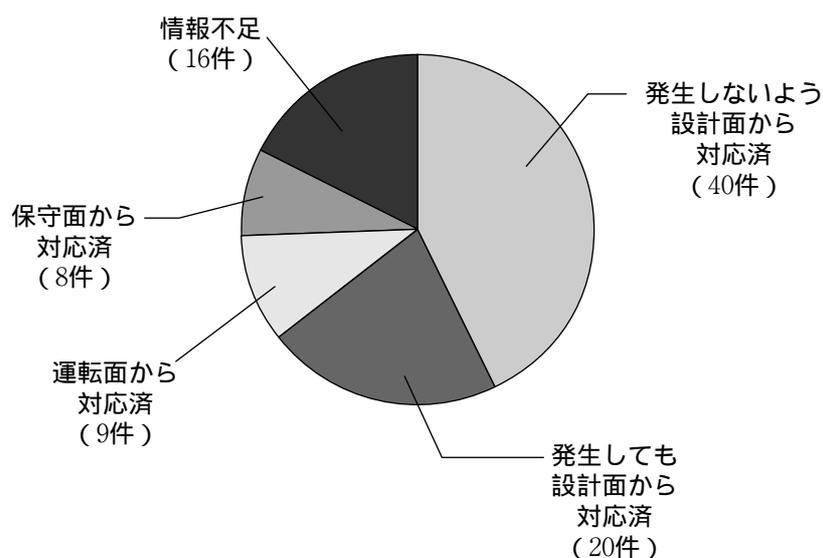


図8 反映要否検討結果

設計対応されていることになる。例として、プラント出力運転中に、主給水制御弁あるいは主給水隔離弁が原子炉保護信号を受けて急速自動閉止すると主給水の急激な運動量変化に伴う水撃が発生する可能性があるが、この弁急速閉止は原子炉保護動作としては避けられないため、プラント建設段階で、弁急閉止に伴う水撃荷重が解析で評価され、サポート

設計などに反映されている。

(3)「運転面から対応済」

水撃現象が運転面から防止されている事象であり、設計面からの対応に次いで多く、10%を占めている。運転面からの対応の特徴は、設計面での対応と異なり、運転操作する毎に配慮する必要があることである。例として、余熱除去ポンプ起動時にはミニマムフロ

ーラインをあらかじめ開としておき，余熱除去熱交換器部分が完全締切状態にならないよう運用されている。

(4)「保守面から対応済」

保守面から設備の機能を維持することにより，水撃の発生が抑制されている事象であり，9%を占める。例として，1次冷却系あるいは蓄圧タンク注入ラインに接する，余熱除去系戻りラインあるいは低圧注入ラインの逆止弁が漏洩すると，漏洩水のフラッシング蒸気ポイド，窒素ガスポイドが形成され，ポンプ起動時の圧力上昇で再結合水撃，ガス圧縮水撃発生に至る可能性があるが，最下流の一次冷却系圧力バウンダリを構成する逆止弁は定期的な漏洩試験が実施されている。

(5)「情報不足」

情報に「トリップ時，運転員が水撃音を聞いた」とだけ記述があり，水撃自体についての情報の記載がないものなどにより検討可能な事象である。

以上の結果，今回調査した水撃事象に対して直接反映要となった事象はなかったが，水撃の発生は運転操作への依存度が高いと考えられるため，運転面に対応している事象については，継続的な配慮が必要である。

5. まとめ

米国と国内のPWRにおける水撃事象の分析を行い，その傾向を把握した。今回調査した水撃事象に対して，国内PWRでの水撃対応状況を調査した結果，直接反映要となった事象はなかったが，水撃の発生は運転操作への依存度が高いと考えられるため，運転面に対応している事象については，継続的な配慮が必要である。

参考文献

- (1) 麻坂顯一，加藤啓之，木田正則，原信一，熊田雅充，非常用炉心冷却系（ECCS）作動事象の分析，INSS JOURNAL No.2, p.169（1995）
- (2) 木田正則，橋場隆，原子力発電所における弁不具合事象の分析，INSS JOURNAL No.3, p.177（1996）
- (3) NRCが1974年エネルギー再編成法第210条に基づき発行する文書
- (4) NUREG-0927 Rev.1 "Evaluation of Water Hammer Occurrence in Nuclear Power Plants"（1984）
- (5) Information Notice 91-50 Supplement 1, Water Hammer Events Since 1991（1997）
- (6) NRCが Code of Federal Regulation（CFR）Title 10 Part 50.73（a）（2）（iv）に基づき発行する文書
- (7) NRCが適宜発行する通知
- (8) NRCが1954年原子力法第182条a項に基づき発行する通達
- (9) NRCが Code of Federal Regulation（CFR）Title 10 Part 50.54（f）に基づき発行する文書
- (10) NRCスタッフが作成する公式報告書
- (11) 電気事業法第106条
- (12) 電気関係報告規則第3条
- (13) 核原料物質，核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第67条
- (14) 実用発電用原子炉の設置・運転等に関する規則第24条第2項