

東日本大震災におけるプラントオペレーションに 関するアンケート調査報告書

(公社) 化学工学会 システム・情報・シミュレーション部会
プラントオペレーション分科会

2013年2月

はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、現代の日本に生きる我々が経験したことの無い、未曾有の災害をもたらしました。我々、化学産業やそれに近い業態の製造業にとっても、それまでの地震対策だけでは必ずしも十分ではなく、特に、津波に対してはなすすべもないことを図らずも経験することとなってしまいました。

被災された皆様には心からお見舞いを申し上げますとともに、1日も早い復興を願ってやみません。

プラントオペレーション分科会では、1995年の阪神淡路大震災の際にもアンケート調査を行い報告書を発刊していますが、より大きな被害が出ている今回の東日本大震災における教訓についても産業界で共有化すべきとの考えに立ち、また、今後予想される南海トラフでの大地震や大都市の直下型地震に対する備えをより強固なものとしていくために、今回の調査活動を開始しました。

今回の震災で甚大な被害を受けられた企業では復旧にも非常に時間が掛かっているため、ある程度落ち着いたと思われる2012年の春から、遅れ馳せながらアンケート調査を開始しました。また、並行して、被災された企業を訪問させていただき、被害の状況や復旧作業の進め方などについて、貴重なお話を聞かせていただきました。さらに、震災関連の情報を収集していくうちに、より広い分野の情報を様々な方々からお教えいただくことも必要となりました。

本冊子では、ただ単にアンケート調査結果の報告に留まらず、このようにして得られました震災関連の情報を出来る限りまとめて掲載させていただきました。アンケート調査、および、本冊子の編纂にご協力頂きました皆様に心から御礼申し上げます。

本冊子に掲載した大地震への対策や備えについての貴重な教訓を産業界で共有化して生かしていくことによって、今後発生しうる大震災による被害を少しでも抑えることができますことを祈念いたします。

2013年2月

公益社団法人 化学工学会 システム・情報・シミュレーション部会
プラントオペレーション分科会
代表 馬場 一嘉

本報告書の構成

本報告書は、以下の4部で構成されています。

第1部は、アンケートの回答の集計結果を設問ごとに掲載しました。一部の設問は、回答にあった震度の大きさなどで分類したかたちで表示して、分かりやすくしています。

第2部は、アンケートの結果を阪神大震災のときに実施したアンケート結果と比較して、阪神大震災以降の変化を中心に議論しています。阪神大震災のときには調査していなかった項目についても、今回のアンケートの複数の設問に対する回答の関連性を解析し、地震・津波に対する回答者の意識を整理することを試んでいます。

第3部は、アンケート以外に得られた情報として、東日本大震災で大きな被害にあわれた鹿島地区の企業を訪問してのヒアリング結果をもとにした記述や、計装設備などの改善によって地震による影響を軽減するアイデア、そして、地震の強さを表す「ガル」などの単位の解説および地震計についての技術解説を盛り込みました。

第4部は、東日本大震災で得られた特に計装制御面に関する教訓について、元名古屋工業大学の伊藤利昭先生にご執筆頂き、また、プラントの緊急停止を含むコンビナートの保安・防災に関する教訓を、元東洋エンジニアリング(株)にお勤めで、現在(有)プラント地震防災アソシエイツの代表である稲葉 忠 様にご執筆をお願いしました。

本報告書が少しでも皆様のお役に立ちますことを希望します。

目 次

第1部 アンケート各設問への回答の集計結果	1
今回のアンケート調査の概要	2
設問1 回答者のプロフィール	3
設問2 事業所の主要な製品の分類	4
設問3 プラント群の製造形態	5
設問4 事業所での取り扱い物質	6
設問5 緊急停止後の処置	7
設問6 地震の観測規模	8
設問7 主要プラントの停止状況	1 2
設問8 用役供給の停止状況	1 3
設問9 プラント停止以外の被害	1 4
設問10 津波による被害状況	1 6
設問11 その他の被害状況	1 9
設問12 地震におけるDCS画面の監視操作	2 0
設問13 プラント自動停止システムの挙動	2 1
設問14 プラント停止後の二次処置実施での支障	2 3
設問15 プラントを安全に停止するための特別な措置	2 5
設問16 プラントの安全な停止のための見直し事項	2 6
設問17 追加装備を検討した設備など	2 8
設問18 津波に備えた措置	2 9
設問19 保安用電源の従来の設計	3 0
設問20 保安用電源の保持時間の妥当性	3 2
設問21 計装用電源や保安用電源の見直し	3 3
設問22 無停電電源装置のバックアップ対象	3 4
設問23 無停電電源装置のバックアップ範囲	3 5
設問24 震度計などの導入状況	3 6
設問25 地震発生時のプラント停止基準	3 8
設問26 地震計との非連動の理由	3 9
設問27 緊急地震速報をプラント停止に用いない理由	4 0
設問28 今後のプラント停止のあり方	4 1
設問29 オペレータが揺れの大きさを知る方法	4 2
設問30 津波の予測情報を知る手段	4 3
設問31 地震や津波の情報伝達手段変更の検討	4 4

設問 3 2	オペレータの落ち着き度合い	4 5
設問 3 3	普段の防災訓練の有効性	4 6
設問 3 4	オペレータの迅速行動のためのマニュアルの工夫	4 7
設問 3 5	オペレータの対応能力	4 8
設問 3 6	緊急時の対応人員の増強手段	4 9
設問 3 7	安否確認システムの利用	5 0
設問 3 8	東日本大震災を契機に見直した項目	5 1
設問 3 9	既存設備の耐震設計基準	5 2
設問 4 0	今後の新設時の耐震設計基準	5 3
設問 4 1	耐震設計基準の根拠	5 4
設問 4 2	危険性の高いプラントへの対策	5 6
設問 4 3	ユーティリティプラントの稼動継続対策	5 7
設問 4 4	計装設備の被害状況	5 8
設問 4 5	計装設備の被害状況	5 9
設問 4 6	ディスプレイ等の固定	6 0
設問 4 7	地震での現場計器・機器の状況	6 1
設問 4 8	地震での計装配線・空気配管の状況	6 2
設問 4 9	地震という外乱での制御システムの挙動	6 3
設問 5 0	計装設備の要改善点	6 5
設問 5 1	今回の震災での教訓	6 6
第 2 部	アンケート調査結果の解析	6 9
2.1	阪神大震災時のアンケート調査との回答事業所の比較	7 0
2.2	地震被害の比較からみる耐震設計の変化	7 3
2.3	津波による被害と対策	8 0
2.4	緊急停止体制	8 1
2.5	オペレータの行動と備え	9 1
2.6	連絡手段	9 8
2.7	大地震に対する耐震性向上以外の対策の見直し	1 0 1
2.8	計装の被害	1 0 6
第 3 部	アンケートに関連した情報	1 0 9
3.1	鹿島地区被災企業へのヒアリング調査	1 1 1
3.2	安全性を向上させる現場の工夫集	1 1 4
3.3	耐震設計基準、プラント停止基準の震度やガル、カイン	1 1 7

3.4 自動停止システム用地震計	1 2 6
第4部 東日本大震災の教訓と今後に備えて	1 3 1
「3・11からの教訓 ―プロセス計装分野を主として―」	
元 名古屋工業大学教授 伊藤 利昭氏	1 3 2
「東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の教訓 （コンビナートの保安・防災）」	
(有)プラント地震防災アソシエイツ 代表 稲葉 忠 氏	1 4 1
まとめ	
大震災に備えた今後のプラント運転のあり方	1 6 1

第 1 部

アンケート各設問への回答の集計結果

今回のアンケート調査の概要

阪神大震災の際に実施しましたアンケート調査では、対象を阪神地域の企業に限定せず、全国の事業所にご協力をお願いしましたが、今回は、貴重な教訓の収集を主眼に置き、何らかの被害を受けていると思われる事業所だけを調査の対象とし、東北地方と関東地方に立地する化学、石油精製、製紙、食品、医薬、都市ガスなどの業種の企業をアンケートの配布先と致しました。鉄鋼や電力は業態がやや異なるため、対象外としました。

化学工学会 システム・情報・シミュレーション部会の会員各社の事業所と、計測自動制御学会の産業部門の会員企業の事業所などを中心にアンケートのお願いをし、また、それ以外の企業についてもインターネットの地図からピックアップして、各社のホームページで住所を調べて事業所長殿宛にアンケートのお願いを郵送させていただきました。

その結果、本来であれば社外への開示が難しい可能性がある被害に関する情報を含むアンケートでありながら、合計で 40 件（回収率約 45%）のご回答を頂くことができました。

ご回答にご協力をいただきました皆様、そして、回答の送付を許可いただきました関係者の皆様に、心から感謝を申し上げます。

アンケートの送付は 2012 年の 7 月に行い、8 月に回答を頂きました。その後、集計作業を行い、集計結果の速報につきましては、9 月に仙台で開催されました化学工学会の第 44 回秋季大会にて「東日本大震災での教訓と今後への備え」というシンポジウムを開催し、被災企業からのご発表などと併せ、簡単にご報告させていただきました。また、計測自動制御学会の産業応用部門でも 11 月に「3. 1 1 震災で計測制御エンジニアが見たこと、感じたこと、そして考えること。」と称する産業システムシンポジウムが開催され、同様の発表が行われました。

最終的なまとめが大変遅くなってしまいましたが、ここに報告書を発刊させていただきます。

なお、アンケートにお答え頂きました企業とのお約束で、ご回答企業や事業所の一覧は掲載いたしません。ご了承ください。

設問1 回答者のプロフィール

会社名、事業所名、製造部課名について、よろしければお答えください。

(アンケートの集計時には会社名等は伏せて処理をいたしますが、記述していただきました内容にご質問させていただく場合にご連絡を取らせて頂くことができますよう、できましたらご回答ください。)

会社名

事業所名

所在地 (「〇〇県△△市」など)

製造部課名

ご回答者氏名

メールアドレス

集計結果

回答者の所在地についての分布は以下のようになりました。

	回答数	%
青森県	2件	5%
山形県	1件	2%
宮城県	4件	10%
福島県	4件	10%
茨城県	12件	30%
千葉県	5件	13%
栃木県	2件	5%
東京都	1件	2%
神奈川県	9件	23%
合計	40件	100%

コメント

今回のアンケートでは何らかの被害を受けていると思われる東日本の化学等の分野の企業にご回答をお願いしている。

コンビナートが立地している県は回答数が多いなど、企業数の分布には濃淡がある。また、被災の程度によって本アンケートへの回答の是非の判断などがあって、このような回答者の分布となったものと推定される。

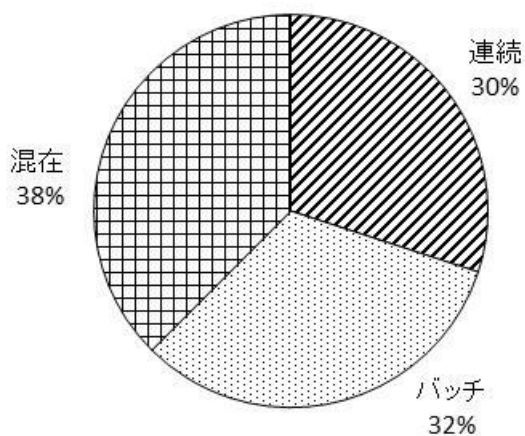
設問3 プラント群の製造形態

貴事業所のプラント群の製造形態についてご回答ください。

- ① 主に連続プラント
- ② 主にバッチプラント
- ③ 連続とバッチが混在
- ④ その他 ()

集計結果

	回答数	%
① 主に連続プラント	12 件	30 %
② 主にバッチプラント	13 件	32 %
③ 連続とバッチが混在	15 件	38 %
④ その他	0 件	0 %



コメント

連続、バッチ、混在がほぼ同数ずつとなった。石油化学コンビナートの連続プラントから、ファインケミカルのバッチプラントまで広い範囲の設備を持つ企業から回答を頂いた。

設問4 事業所での取り扱い物質

貴事業所では、以下の物質を取り扱っていますか。 (複数回答可)

- ① 可燃性ガス
- ② 液化ガス
- ③ 毒性ガス

集計結果

	回答数	%
① 可燃性ガス	35 件	88 %
② 液化ガス	29 件	73 %
③ 毒性ガス	25 件	63 %

また、組み合わせで見ると以下のようになった。

	回答数	%
① 可燃性ガスのみ	6 件	15 %
② 液化ガスのみ	3 件	7 %
③ 毒性ガスのみ	0 件	0 %
④ 可燃性かつ液化ガス	4 件	10 %
⑤ 可燃性かつ毒性ガス	3 件	7 %
⑥ 液化かつ毒性ガス	0 件	0 %
⑦ すべて該当	22 件	55 %
⑧ いずれも該当せず	2 件	5 %

コメント

90%近い事業所が可燃性ガスを、60%以上が毒性ガスを扱っており、漏洩や爆発の危険性を伴っていることがわかる。

組み合わせで見ると、いずれも該当しないのは2件のみで、半数以上が可燃性、毒性、液化ガスのすべてに該当するという回答であった。

設問6 地震の観測規模

貴事業所での東日本大震災の観測規模はどの程度でしたか。

(データのあるものについて、ご回答ください)

- ① 震度 (気象庁等のデータなど)
- ② 加速度 (貴事業所での観測データなど)
- ③ 揺れの大きさ (最大速度)
- ④ 津波予想高さ (警報等で予想された高さ) [非該当の場合はゼロを記載]
- ⑤ 地震から津波襲来まで予想された時間[非該当の場合は空白]
- ⑥ 津波の観測高さ (貴事業所または近隣での観測値)
- ⑦ 主要プラントの操業停止は何日間程度でしたか。

集計結果

① 震度 (気象庁等のデータなど)

(件数)

震度	総計	青森	山形	宮城	福島	茨城	千葉	栃木	東京	神奈川
6 強	5			2	1	1		1		
6 弱	7			1	1	5				
6 (注)	4			1		2		1		
5 強	5	1			1	1	1			1
5 弱	6				1		2		1	2
5 (注)	7	1				2	2			2
4	2		1							1
無回答	4					1				3
合計	40	2	1	4	4	12	5	2	1	9

(注) 気象庁の震度階級では「6」および「5」は、それぞれ「6 強」と「6 弱」、「5 強」と「5 弱」に分類される。

コメント

回答者のすべてが震度4以上の回答である。特に宮城、福島、茨城の3県では、震度6強および6弱の回答が多くを占めた。

② 加速度（貴事業所での観測データなど）

加速度（gal）の値	回答数
>1500	1 件
1000～1500	1 件
500～1000	2 件
300～500	2 件
200～300	6 件
100～200	11 件
～100	3 件
無回答	14 件

コメント

100gal 未満から最大で 1,800gal まで、広く分布している。

③ 揺れの大きさ（最大速度）

揺れの大きさ	回答数
～29 カイン	1 件
30～39 カイン	0 件
40～49 カイン	1 件
50～59 カイン	1 件
無回答	37 件

(注)カイン(kine)は観測点での地震の大きさを表す単位で、速度と同じ次元で、
1kine=1cm/sec である。最大加速度（gal）よりも最大速度（kine）の
ほうが、建物の被害状況との相関が高いと言われている。(3.3 節参照)

コメント

揺れの大きさ（最大速度）を回答したのは 3 件のみであった。地震の大きさを揺れの
大きさ（カイン）で表すことは、まだ、あまり普及していないようである。

④ 津波予想高さ（警報等で予想された高さ）

津波予想高さ(m)	回答数
10m 以上	5 件
5～10m	1 件
2～5m	3 件
～2m	3 件
非該当	28 件

⑤ 地震から津波襲来まで予想された時間

津波予想到達時間	回答数
～30 分	1 件
31～60 分	4 件
61～90 分	1 件
91 分以上	3 件
不明	1 件
無回答	3 件
非該当	27 件

⑥ 津波の観測高さ（貴事業所または近隣での観測値）

津波観測高さ(m)	回答数
5m 以上	9 件
3～5m	3 件
2～3m	0 件
1～2m	2 件
～1m	3 件
非該当	23 件

コメント

津波の観測高さを回答したのは 17 件と、総回答数の半数近くを占めた。うち半数の 9 件が 5m 以上を観測しており、今回の津波でのプラントなどへの被害が大きかったことが想像される。到達予想時間も最短 30 分と短かった。

⑦ 主要プラントの操業停止は何日間程度でしたか。

主要プラント停止日数	合計	6強,6弱	5強,5弱	4以下	無回答
300日以上	1件	1件			
201～300日	1件		1件		
151～200日	2件	2件			
101～150日	0件				
51～100日	6件	3件	2件		1件
31～50日	3件	3件			
21～30日	3件	2件	1件		
11～20日	6件	1件	3件	1件	1件
2～10日	7件		6件		1件
1日	1件			1件	
0日	5件		5件		
無回答	5件	3件	1件		1件
合計	40件	15件	19件	2件	4件

コメント

停止日数が20日以下の比較的軽度のグループと、それ以上停止した重度のグループとが、ほぼ同数であった。上の表は、震度別の解析結果を掲載した。

設問7 主要プラントの停止状況

東日本大震災で貴事業所の主要な製造プラントは停止しましたか。

- ① 震度計により自動的に主要プラントが停止した。
- ② 停電をトリガーとして停止シーケンスが起動し、自動的に停止した。
- ③ 主要機器(コンプレッサなど)の異常停止により主要プラントが停止した。
- ④ 計器の誤作動により、自動的にプラント全体が停止した。
- ⑤ 一部機器が自動停止(または計器の誤作動)したので、手動停止させた。
- ⑥ 自動停止ではなかったが、地震対応マニュアルに従って手動停止させた。
- ⑦ 自動停止が作動する以下の震度だったが、念のため手動停止させた。
- ⑧ 外部からのユーティリティー(電力等)が停止したので、手動停止させた。
- ⑨ 原料の受入れや製品の払出しができなくなり、手動で運転を停止させた。
- ⑩ 停止しなかった。運転はそのまま継続した。
- ⑪ もともとその時刻にはプラントが稼働していなかった。
- ⑫ その他 ()

集計結果

	回答数
① 震度計により自動的に主要プラントが停止	11件
② 停電をトリガーとしてシーケンスで自動的に停止	9件
③ 主要機器(コンプレッサなど)の異常停止で主要プラントが停止	4件
④ 計器の誤作動により、自動的にプラント全体が停止	1件
⑤ 一部機器が自動停止(または計器の誤作動)し、手動停止	4件
⑥ 地震対応マニュアルに従って手動停止	12件
⑦ 自動停止するまでの震度だが、念のため手動停止	0件
⑧ ユーティリティーが停止し、手動停止	9件
⑨ 原料受け入れや製品払い出し不能で手動で運転停止	1件
⑩ 停止せず、運転そのまま継続	5件
⑪ プラントが稼働していなかった	0件
⑫ その他	5件

コメント

大きく分類すると、自動的に停止したのが 28 件、手動停止したのが 27 件、運転継続できたのが 5 件であった。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・地震発生約 1 分後構内全停電
- ・停電により、停止してしまった。
- ・最終的に送電停止で全設備が一斉に緊急停止
- ・停止したが設備により状況は違う
- ・一部の誘導品プラントでは⑨による停止あり

設問 8 用役供給の停止状況

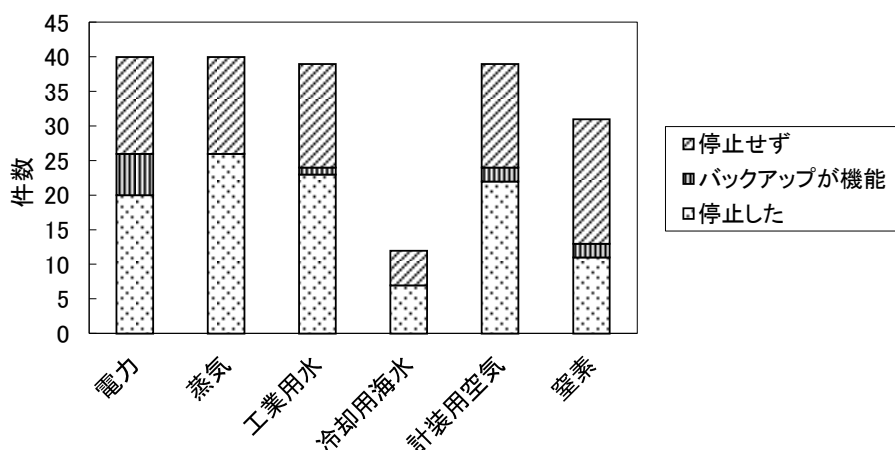
東日本大震災で貴事業所の用役供給は停止しましたか。

(1=停止した。2=バックアップが機能した。0=停止しなかった。)

- ① 電力
- ② 蒸気
- ③ 工業用水
- ④ 冷却用海水
- ⑤ 計装用空気
- ⑥ 窒素

集計結果

	停止した	バック アップが 機能	停止せず
① 電力	20 件	6 件	14 件
② 蒸気	26 件	0 件	14 件
③ 工業用水	23 件	1 件	15 件
④ 冷却用海水	7 件	0 件	5 件
⑤ 計装用空気	22 件	2 件	15 件
⑥ 窒素	11 件	2 件	18 件



コメント

70%程度の事業所で電力、蒸気ともに停止し、うち、一部では電力のバックアップが機能した。工業用水や計装用空気について60%以上の事業所で停止しており、これらのバックアップが機能したのはごく一部であった。

窒素や冷却用海水の回答数が少ないのは、利用していない事業所があるためと考えられる。

設問9 プラント停止以外の被害

東日本大震災で、地震によるプラント停止以外の被害はありましたか。

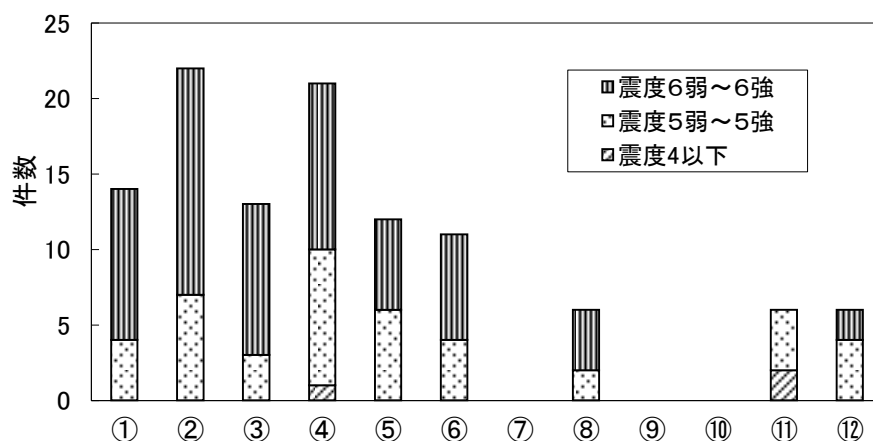
(津波による被害は除きます) (複数回答可)

- ① 建物、ストラクチャーの損壊
- ② 建物のひび割れ、ストラクチャーの傾きなど
- ③ 機器の亀裂、破損、内容物の漏洩
- ④ 配管の亀裂、破損、内容物の漏洩
- ⑤ 防液堤の亀裂、破損
- ⑥ 道路や敷地内の液状化
- ⑦ 火災の発生
- ⑧ 計器、計装、コンピューター、制御系のトラブルや保存データ遺失
- ⑨ 人的被害(負傷)
- ⑩ 人的被害(死亡)
- ⑪ 特に設備的、人的な被害はなかった。
- ⑫ その他 ()

集計結果

	回答数
① 建物、ストラクチャーの損壊	14 件
② 建物のひび割れ、ストラクチャーの傾きなど	23 件
③ 機器の亀裂、破損、内容物の漏洩	15 件
④ 配管の亀裂、破損、内容物の漏洩	22 件
⑤ 防液堤の亀裂、破損	13 件
⑥ 道路や敷地内の液状化	12 件
⑦ 火災の発生	0 件
⑧ 計器、計装、コンピューター、制御系のトラブル、データ遺失	7 件
⑨ 人的被害（負傷）	0 件
⑩ 人的被害（死亡）	0 件
⑪ 特に設備的、人的な被害はなし	7 件
⑫ その他	6 件

震度別に分けてみると、次のようになった。



コメント

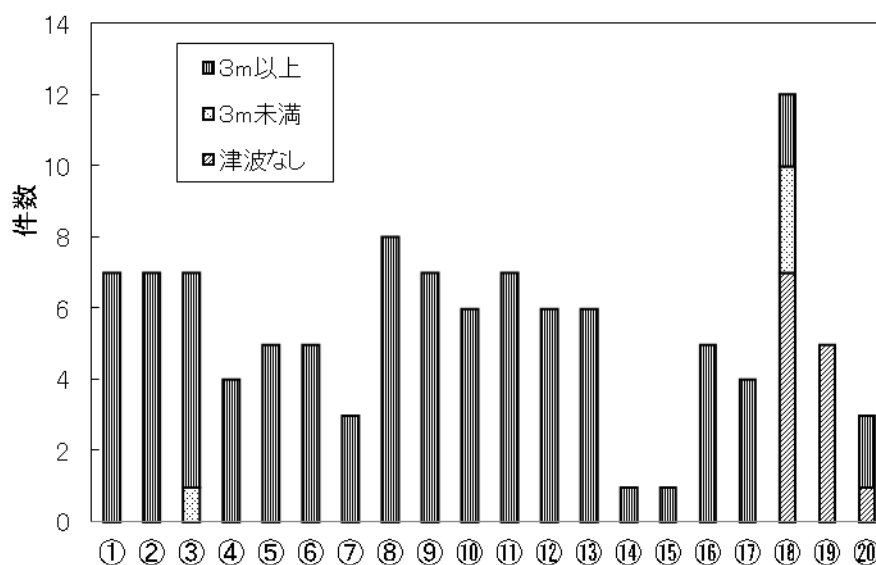
回答いただいた事業所では火災の発生および人的被害ともにゼロであった。

建物のひび割れ、ストラクチャーの傾き、配管の破損・漏洩が主な内容であり、防液堤の亀裂・破損および道路や敷地内の液状化のようなインフラ面での被害も発生している。計装設備については地震による被害は比較的少なかったようである。

集計結果

	回答数
① 建物、ストラクチャーの損壊	7件
② 建物への浸水	7件
③ 機器の亀裂、破損、内容物の漏洩	7件
④ タンク等の流失	4件
⑤ タンク等の基礎の浮き上がり	5件
⑥ プロセス配管の亀裂、破損、内容物の漏洩	5件
⑦ DCSの冠水、破損	3件
⑧ 計装盤、分電盤類の冠水、破損	8件
⑨ 現場計装設備の冠水、破損	7件
⑩ 計装空気配管などの破損	6件
⑪ 電気ケーブルや計装ケーブルの浸水	7件
⑫ 電気室の設備の破損	6件
⑬ プラント内設置の電動機等の破損	6件
⑭ 人的被害（負傷）	1件
⑮ 人的被害（死亡）	1件
⑯ 技術図書、図面等の冠水、流失	5件
⑰ バックアップメディアの冠水、流失	4件
⑱ 津波の到来はなく、被害はなかった	12件
⑲ 内陸部に立地しており、津波の影響は無い	5件
⑳ その他	3件

観測された津波到達高さで分類してグラフ表示してみた。



コメント

「⑱津波の到来はなく被害なし」と「⑲内陸部に立地」は被害の無かったケースである。観測高さが3m以上でも被害が無かった事業所もある。

4つの回答事業所では、ほとんどすべての選択肢に「Yes」の回答があり、壊滅的な被害に遭われている。ただし、人的被害は最小限にとどまったようである。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・護岸の損壊土砂の流出基礎回りの土砂の流出
- ・バース及び海水ポンプの冠水
- ・バースエプロン土砂流出による原料受け入れローディングアームの沈下
- ・小津波到来するも護岸高さ以下

集計結果

	回答数
① 地震でセンサが破損し、トリガーが検出できず作動しなかった	0件
② 地震で操作端が一部破損、機能しない部分があった	1件
③ 地震で計装配管が破損し、作動しなかった	0件
④ 停電や電気系統の故障で、作動しなかった	0件
⑤ 計装空気が大量漏洩し、弁が作動しなかった	0件
⑥ 計装電源の故障で、シーケンスが稼働しなかった	0件
⑦ 冷却水停止になり、冷却シーケンスが有効に作動しなかった	0件
⑧ 窒素供給が止まり、安全な停止ができなかった	0件
⑨ 停止シーケンスが作動せず、フェールセーフの弁作動で停止した	1件
⑩ 特に支障は生じなかった	14件
⑪ その他	3件

コメント

大多数では特に支障は生じておらず、正常に作動したようである。操作端が一部破損したり、理由は不明だが停止シーケンスが作動しなかったりした場合もあったが、代替の防護手段によって安全にプラント停止できたようである。また、地震とほぼ同時に全停電が発生したため、停止シーケンスの詳細な動きが確認できなかったところもあったようである。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・即停電で機器類は停止した。
- ・システム挙動の詳細は不明
- ・地震センサーで自動停止処理する前に全送電停止
- ・地震連動停止信号出力前に受電停止し設備は停止

設問 14 プラント停止後の二次処置実施での支障

設問7でプラントが停止したと答えた方に伺います。

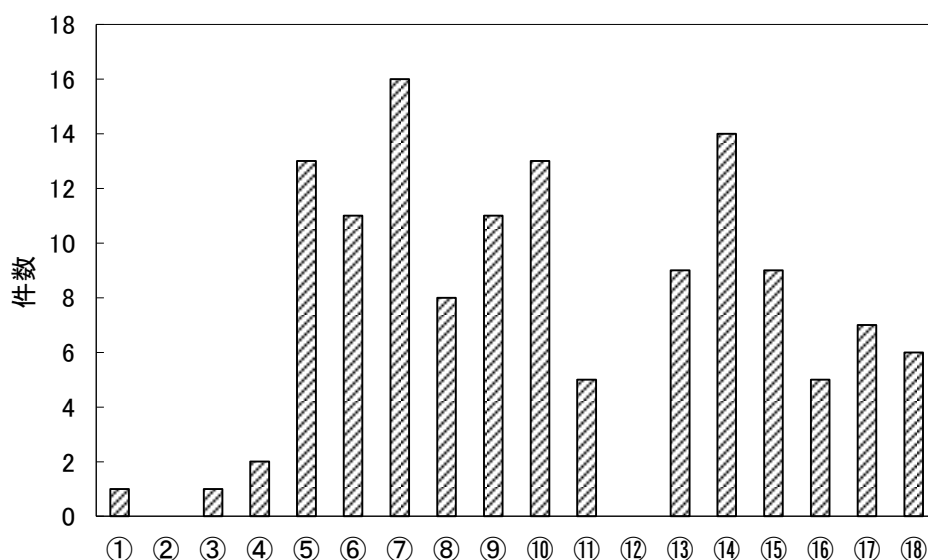
手動停止操作や停止後の二次処置を実行する上で、支障はありましたか。

- ① 地震で一部のセンサが破損し、必要な情報が得られなかった
- ② 地震で一部操作端が破損し、操作できなかった
- ③ 地震で計装空気配管が破損し、操作できなかった
- ④ 地震でDCSや計装盤が破損し、操作できなかった
- ⑤ 計装電源が失われ、操作ができなかった
- ⑥ 計装空気がなくなり、弁が操作できなくなった
- ⑦ 停電や発電設備停止のため、電力が確保できなくなった
- ⑧ 停電や発電設備停止のため、運転継続に必要な攪拌機を作動できなかった
- ⑨ 冷却水停止になり、冷却の継続ができなくなった
- ⑩ スチームが止まり、継続必要な加熱できなくなった
- ⑪ 窒素供給が止まり、安全の確保ができなくなった
- ⑫ 機器の故障で、無線ページングが使用できなくなった
- ⑬ 停電で場内の電話連絡等に支障がでた
- ⑭ 停電でプラント内の照明がなく作業に支障があった
- ⑮ プラントの状況を把握するのに時間が掛かった
- ⑯ 関連する他プラントや他工場の状況を把握するのに時間が掛かった
- ⑰ 交代要員や応援者の出勤ができず、作業負荷が高かった
- ⑱ 特に支障は生じなかった
- ⑲ その他 ()

集計結果

	回答数
① 地震で一部のセンサが破損し、必要な情報が得られなかった	1件
② 地震で一部操作端が破損し、操作できなかった	0件
③ 地震で計装空気配管が破損し、操作できなかった	1件
④ 地震でDCSや計装盤が破損し、操作できなかった	2件
⑤ 計装電源が失われ、操作ができなかった	13件
⑥ 計装空気がなくなり、弁が操作できなくなった	11件
⑦ 停電や発電設備停止のため、電力が確保できなくなった	16件
⑧ 停電や発電設備停止のため、攪拌機を作動できなかった	8件
⑨ 冷却水停止になり、冷却の継続ができなくなった	11件

⑩ スチームが止まり、継続必要な加熱できなくなった	13 件
⑪ 窒素供給が止まり、安全の確保ができなくなった	5 件
⑫ 機器の故障で、無線ページングが使用できなくなった	0 件
⑬ 停電で場内の電話連絡等に支障がでた	9 件
⑭ 停電でプラント内の照明がなく作業に支障があった	14 件
⑮ プラントの状況を把握するのに時間が掛かった	9 件
⑯ 他プラントや他工場の状況を把握するのに時間が掛かった	5 件
⑰ 交代要員や応援者の出勤ができず、作業負荷が高かった	7 件
⑱ 特に支障は生じなかった	6 件
⑲ その他	4 件



コメント

計装空気源を失ったり、電力やスチームが得られなかったりすることを挙げる回答が多かった。一方で、センサーや操作端の被害は比較的少なく、無線ページングにも問題は生じていなかったようである。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・ 余震のため、現場作業は危険の無いところにとどまった。
- ・ 地震発生約 1 分後構内全停電
- ・ 余震が続き、危険を感じたのでプラント停止後に退避した。
- ・ 東電と解離したため、保安電力(自家発)のみとなった。
- ・ 電話不通により他社との連絡が困難

設問 15 プラントを安全に停止するための特別な措置

設問7でプラントが停止したと答えた方に伺います。

プラントを安全に停止させるための特別な措置は実施しましたか。

- ① 重合禁止剤などを使用した
- ② ブローダウンピットへの放出を行った
- ③ 脱圧作業を実施した
- ④ 非常用発電機を移設してきて対応した
- ⑤ 窒素ポンベなどを保安用に緊急調達した
- ⑥ 電気の仮配線を敷設した
- ⑦ 冷却の確保などのために仮配管を設置した
- ⑧ 通常の手順で停止できたので、特別な措置は実施していない
- ⑨ その他 ()

集計結果

	回答数
① 重合禁止剤などを使用した	3 件
② ブローダウンピットへの放出を行った	1 件
③ 脱圧作業を実施した	6 件
④ 非常用発電機を移設してきて対応した	0 件
⑤ 窒素ポンベなどを保安用に緊急調達した	1 件
⑥ 電気の仮配線を敷設した	0 件
⑦ 冷却の確保などのために仮配管を設置した	3 件
⑧ 通常の手順で停止できたので、特別な措置は実施していない	19 件
⑨ その他	4 件

コメント

約半数は、通常の手順で停止できたため、特別な措置は実施していないが、残りの回答では、ほとんどが想定範囲内だとは言え、安全に停止させるための様々な手段を講じている。

中には、冷却用仮配管の設置や窒素ポンベの緊急調達など、想定範囲を超えた対応が必要となったケースもある。種々の事例を参考にして、最悪ともいえるケースへの対応策を事前に検討しておく必要があると思える。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・ ガスの元バルブを手動で閉じた。
- ・ 地震発生約 1 分後構内全停電
- ・ 停電で何もできなかった
- ・ 受電設備やガスの元弁を遮断した

設問 16 プラントの安全な停止のための見直し事項

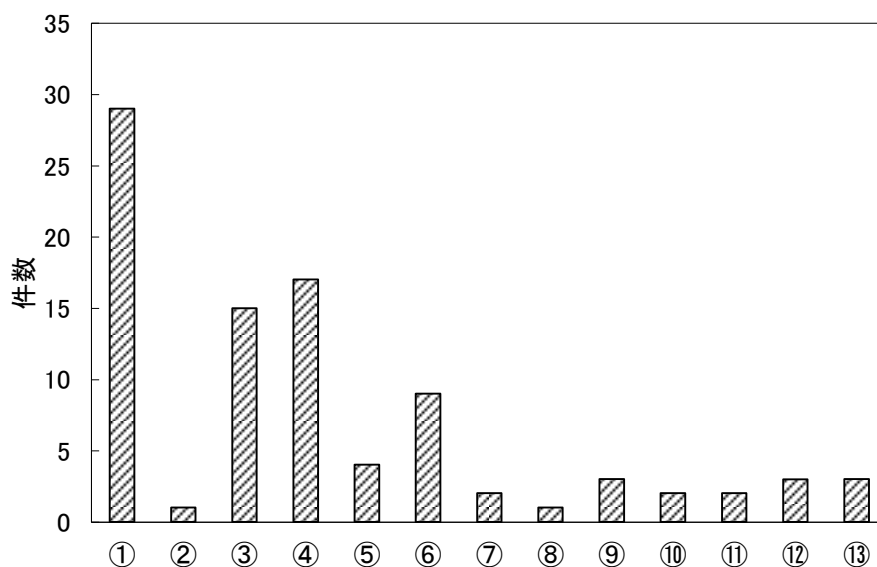
東日本大震災での状況を教訓に、プラントの安全な停止のために見直しや検討をした事項はありますか。 (複数回答可)

- ① 非常時マニュアル等の部分改定
- ② 非常時マニュアル等の全面改定
- ③ 工場在勤者の役割分担の見直し
- ④ 非常時用資材や機材の追加
- ⑤ 計装用電力確保方法の見直し
- ⑥ 保安用電力確保方法の見直し
- ⑦ 安全計装システムの設置
- ⑧ DCS とは独立させた重要計器の監視設備の設置
- ⑨ 計装空気喪失時の操作方法の検討
- ⑩ 冷却継続方法の見直し
- ⑪ 緊急用窒素の供給方法の見直し
- ⑫ 消火設備、火災拡大防止設備の検討
- ⑬ その他 ()

集計結果

	回答数
① 非常時マニュアル等の部分改定	29 件
② 非常時マニュアル等の全面改定	1 件
③ 工場在勤者の役割分担の見直し	15 件
④ 非常時用資材や機材の追加	17 件
⑤ 計装用電力確保方法の見直し	4 件
⑥ 保安用電力確保方法の見直し	9 件
⑦ 安全計装システムの設置	2 件
⑧ DCS とは独立させた重要計器の監視設備の設置	1 件

⑨ 計装空気喪失時の操作方法の検討	3件
⑩ 冷却継続方法の見直し	2件
⑪ 緊急用窒素の供給方法の見直し	2件
⑫ 消火設備、火災拡大防止設備の検討	3件
⑬ その他	3件



コメント

「非常時マニュアル等の部分改定」、「工場在勤者の役割分担の見直し」、「非常時
用資材や機材の追加」の回答が比較的多数であった。今回のような大規模な災害を経験
したことによって、見直しが必要な点が明らかとなったケースが多かったようである。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・ BCP の観点から見直し中
- ・ 津波浸水対策
- ・ 工場ユーティリティ関係の津波対策検討
- ・ 電力供給優先順位の見直し

設問 17 追加装備を検討した設備など

今回の大震災を教訓に、装備しておくことを検討した設備等がありますか。

- ① 特に無い。
- ② ある。（以下に具体的にご記入ください。）

集計結果

	回答数
① 特に無い	13 件
② ある	25 件

「②ある」の場合の具体的な回答は以下の通りであった。

非常用発電機（12 件）

衛星電話（3 件）

防消火用水バックアップ設備（2 件）

非常用構内放送設備（2 件）

以下、1 件ずつの回答である。

地震自動放送システム、P 波地震連動警報装置、非常時用出荷設備、パイプラックの補強、防災資機材の増強、非常食の増強、屋上非難用手すり、津波避難場所、ガスエンジン、遠隔遮断設備、ライフジャケット

コメント

これまであまり想定されていなかった長時間にわたる停電に備え、非常用発電機を挙げる回答が多かった。また、通信・連絡手段の確保として、衛星携帯電話や非常用構内放送設備が挙げられた。

また、まず身を守るための P 波地震連動警報装置や地震自動放送システムの回答があった。

設問 18 津波に備えた措置

津波の襲来や到達予想があった事業所の方にお伺いします。

津波の襲来に備えた措置は実施しましたか。

- ① タンクの元弁の閉止などの措置を実施した。
- ② 倉庫のシャッター閉止などの措置を実施した。
- ③ 荷積み、荷揚げを中止し、船舶の緊急離岸を実施した。
- ④ 人的被害を防ぐための避難を優先し、対応措置は実施できなかった。
- ⑤ 想定したマニュアルが無かったので何も対応できなかった。
- ⑥ プラント停止が精一杯で、津波対応は実施できなかった。
- ⑦ 予想された津波規模が小さかったため、対策不要と判断した。
- ⑧ その他（ ）

集計結果

	回答数
① タンクの元弁の閉止などの措置を実施した	4 件
② 倉庫のシャッター閉止などの措置を実施した	0 件
③ 荷積み、荷揚げを中止し、船舶の緊急離岸を実施した	5 件
④ 人的被害を防ぐ避難を優先し、対応措置は実施できなかった	9 件
⑤ 想定したマニュアルが無かったので何も対応できなかった	3 件
⑥ プラント停止が精一杯で、津波対応は実施できなかった	2 件
⑦ 予想された津波規模が小さかったため、対策不要と判断した	6 件
⑧ その他	2 件

コメント

人的被害を無くすことを最優先とし、設備への被害防止策は十分に実施できなかったようである。津波を想定した対応マニュアルが無く、何を実施すべきかの判断も即座にできなかったものと思われる。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・津波が来るという想定ができなく、対応出来なかった。
- ・避難および設備停止措置の実施
- ・放水溝の遮断弁を閉止した

設問 19 保安用電源の従来の設計

計装用電源や保安用電源について、東日本大震災前まではどのような考えに基づいた設計となっていましたか。 (複数回答可)

- ① 計装設備用に無停電電源装置を導入していた
その場合、バッテリーでの保持時間の設計は何分でしたか
- ② 計装設備用に非常用ディーゼル発電機を備えていた
その場合、保有燃料での運転可能時間はどれぐらいでしたか
- ③ 保安電源用にバッテリー（直流電源）を備えていた
その場合、バッテリーでの保持時間の設計は何分でしたか
- ④ 保安電源用に非常用ディーゼル発電機を備えていた
その場合、保有燃料での運転可能時間の設計は何時間でしたか
- ⑤ その他 ()

集計結果

	回答数	%
① 計装設備用に無停電電源装置を導入していた	31 件	78
② 計装設備用に非常用ディーゼル発電機を備えていた	14 件	35
③ 保安電源用にバッテリー（直流電源）を備えていた	19 件	48
④ 保安電源用に非常用ディーゼル発電機を備えていた	21 件	53
⑤ その他	4 件	10

計装設備用無停電電源装置の保持時間

	回答数
10 分以下	9 件
10 分超～30 分以下	19 件
30 分超	3 件

保安電源用バッテリーの保持時間

	回答数
10 分以下	1 件
10 分超～30 分以下	7 件
30 分超	9 件

計装設備用非常用ディーゼル
発電機の保有燃料での運転可能時間

	回答数
8 時間以下	8 件
8 時間超～24 時間	2 件
24 時間超	4 件

保安電源用ディーゼル発電の
保有燃料での運転可能時間

	回答数
8 時間以下	10 件
8 時間超～24 時間	4 件
24 時間超	3 件

コメント

計装設備用の無停電電源装置は 80%近い事業所で保有している。しかしながら、その保持時間は 10 分以下が 9 件、また、これらを含めて 30 分以下が 28 件と大多数を占め、30 分以内にプラントを安全に停止してしまうので、それ以上の電源保持は必要ないとの考えに立った設計が多いようである。

これを超えて、さらに計装設備を運用したいために 14 の事業所では非常用ディーゼル発電装置を保有しているが、保有燃料での運用可能時間は 14 件中 8 件が 8 時間以下としており、長時間にわたる大停電は考慮されていなかったと思われる。

保安用電源については、バッテリーを保有が 19 件、ディーゼル発電を保有が 21 件と、いずれも半数程度の回答であったが、これらのうち、バッテリーのみは 6 件、ディーゼル発電のみは 8 件で、13 件がバッテリーとディーゼル発電の両方を保有している。

保安電源という言葉があいまいで、照明やページング用電源などから攪拌機や冷却用ポンプに電源まで、幅広い内容を指すと考えられ、工場の規模やプロセスの性質などから必要とされる電源の種類も自ずから変わってくると思われる。

設問 20 保安用電源の保持時間の妥当性

無停電電源装置や非常用ディーゼル発電機、保安用バッテリー電源を導入していた事業所にお伺いします。これらの保持時間は十分でしたか。

- ① 計装設備用の無停電電源装置の保持時間
(1=十分であった、2=不十分であった、空白=導入していない)
- ② 計装設備用の非常用ディーゼル発電機の運転可能時間
(1=十分であった、2=不十分であった、空白=導入していない)
- ③ 保安電源用にバッテリー（直流電源）の保持時間
(1=十分であった、2=不十分であった、空白=導入していない)
- ④ 停電しなかった

集計結果

	十分	不十分	未導入
① 計装設備用の無停電電源装置	21 件	2 件	17 件
② 計装設備用の非常用ディーゼル発電機	10 件	0 件	30 件
③ 保安電源用にバッテリー（直流電源）	13 件	2 件	25 件
④ 停電しなかった	14 件		

コメント

計装設備用の無停電電源装置は、導入済み事業所の大多数は保持時間が十分だったという回答であった。非常用ディーゼル発電機の保持時間も保有している事業所すべてが十分であったとの回答である。保安用バッテリー（直流電源）についても同様に大多数が十分な保持時間であったと回答している。

設問 2 1 計装用電源や保安用電源の見直し

東日本大震災後に、計装用電源や保安用電源の見直しはありましたか

(複数回答可)

- ① 計装設備用に無停電電源装置の導入をすることにした
- ② 計装設備用に無停電電源装置のバッテリー容量を見直した
その場合、バッテリーでの保持時間を何分間としましたか
- ③ 計装設備用に非常用ディーゼル発電機を導入することにした
- ④ 保安電源用にバッテリー（直流電源）を導入することにした
- ⑤ 保安電源用のバッテリー（直流電源）容量を見直した
その場合、バッテリーでの保持時間の設計を何時間としましたか。
- ⑥ 保安電源用に非常用ディーゼル発電機を導入することにした。
- ⑦ その他（ ）

集計結果

	回答数
① 計装設備用に無停電電源装置の導入をすることにした	0 件
② 計装設備用に無停電電源装置のバッテリー容量を見直した	0 件
③ 計装設備用に非常用ディーゼル発電機を導入することにした	2 件
④ 保安電源用にバッテリー（直流電源）を導入することにした	0 件
⑤ 保安電源用のバッテリー（直流電源）容量を見直した	0 件
⑥ 保安電源用に非常用ディーゼル発電機を導入することにした	2 件
⑦ その他	10 件

コメント

非常用ディーゼル発電機を導入することにしたのが、合計 4 事業所ある。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあつた。

- ・計画停電対応で非常用ディーゼル発電機を急遽、設置した。
- ・発電機の軽油の備蓄量を増やした。60 時間→間→機時間
- ・非常用発電機の燃料タンクを増強
- ・バッテリー設備を 1 階から 2 階に移設した。
- ・コージェネレーションシステムを単独で運転できるようにした。
- ・非常用ディーゼル発電機の系統見直し
- ・保安用電源について検討中

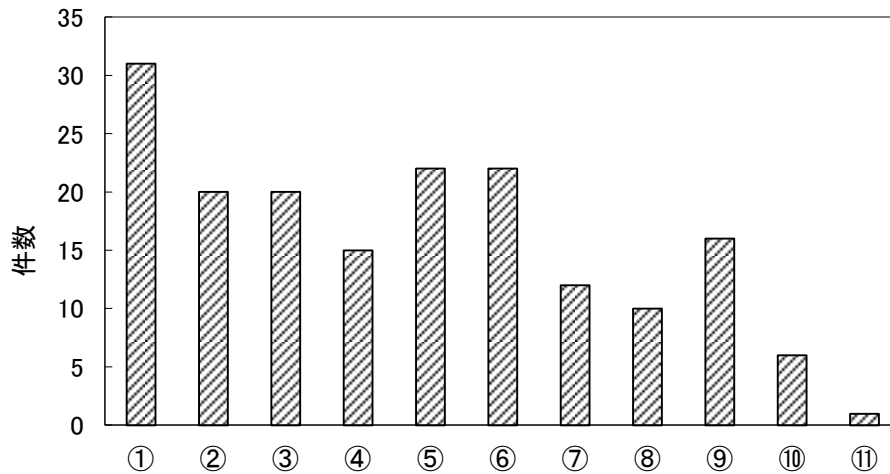
設問 2 2 無停電電源装置のバックアップ対象

無停電電源装置による電源バックアップ対象に何が含まれていますか。

- ① DCS や信号変換機
- ② DCS 外部の緊急シャットダウンシステム
- ③ ガス検知器
- ④ 無線ページング親機
- ⑤ 構内放送設備
- ⑥ 電話交換機
- ⑦ プロセスデータ収集システム
- ⑧ 運転支援システム、高度制御システム
- ⑨ 操作室非常照明
- ⑩ プラント内照明
- ⑪ その他 ()

集計結果

	回答数	%
① DCS や信号変換機	31 件	78
② DCS 外部の緊急シャットダウンシステム	20 件	50
③ ガス検知器	20 件	50
④ 無線ページング親機	15 件	38
⑤ 構内放送設備	22 件	55
⑥ 電話交換機	22 件	55
⑦ プロセスデータ収集システム	12 件	30
⑧ 運転支援システム、高度制御システム	10 件	25
⑨ 操作室非常照明	16 件	40
⑩ プラント内照明	6 件	15
⑪ その他	1 件	3



コメント

「DCS や信号変換機」が 80%近くの事業所では無停電電源でバックアップされている。そのほか、「②DCS 外部の緊急シャットダウンシステム」、「③ ガス検知器」、「⑤ 構内放送設備」、「⑥ 電話交換機」が約半数の事業所で無停電電源のバックアップ対象となっている。

「その他」の回答は、「操作室及びプラント内非常用照明はバッテリー内臓」というものであった。

設問 2 3 無停電電源装置のバックアップ範囲

無停電電源装置でバックアップしていた範囲は適切でしたか。

- ① 適切であった
- ② 不十分であった
具体的に何が不十分であったか記述ください
- ③ 過剰であった
具体的に何が過剰であったか記述ください
- ④ 停電しなかったため、何ともいえない

集計結果

	回答数
① 適切であった	22 件
② 不十分であった	4 件
③ 過剰であった	0 件
④ 停電しなかったため、何ともいえない	12 件

- ③ の「不十分であった」の具体的な例としては、以下のものが挙げられた。
- ・ 2日間送電が停止したため役に立たなかった。
 - ・ 構内放送設備（近隣工場間が公衆回線を利用しているため不通）
 - ・ 自動弁の取組み不足

コメント

無停電電源装置のバックアップ範囲としては、ほぼ適切だったとする回答が多かった。
想定外だったのは電源喪失の期間が長かったことのようにである。

設問 2 4 震度計などの導入状況

震度計や緊急地震速報と連動したプラントの自動停止システムは導入していますか。
(複数回答可)

- ① P波検知による緊急地震速報に連動させた緊急運転停止システムがある
- ② P波検知による緊急地震速報を聞き、オペレータが運転を停止する
- ③ 震度計により事業所全体を同時に緊急運転停止させている
- ④ 震度計により一部のプラントを自動で緊急運転停止させている
- ⑤ 震度計により自動で運転停止させる基準（しきい値）はプラントで異なる
- ⑥ 信頼性を高めるため、2 out of 3 の方式を用いている
- ⑦ 震度計による自動停止はさせず、震度に従い手動停止させている
- ⑧ 震度計による自動停止はさせず、オペレータの判断に任せている
- ⑨ その他（ ）

集計結果

	回答数
① P波検知の緊急地震速報に連動の緊急運転停止システムがある	6件
② P波検知の緊急地震速報を聞き、オペレータが運転を停止する	0件
③ 震度計により事業所全体を同時に緊急運転停止させている	5件
④ 震度計により一部のプラントを自動で緊急運転停止させている	13件
⑤ 震度計で自動運転停止させるしきい値はプラントで異なる	8件
⑥ 信頼性を高めるため、2 out of 3 の方式を用いている	10件
⑦ 震度計による自動停止はさせず、震度に従い手動停止させている	15件
⑧ 震度計による自動停止はさせず、オペレータの判断に任せている	4件
⑨ その他	3件

コメント

震度計によりプラントを緊急運転停止させるは、プラントの特性によってしきい値を変えたり、連動させるかどうかを決めていたりしているようである。また、信頼性を確保するため、2 out of 3 方式を採用しているところが多い。

緊急自動運転停止システムで、緊急地震速報に連動させたものは、まだ6件の導入例に留まっている。

一方で、震度情報やオペレータの判断に従って手動停止させている場合も約半数ある。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・震度計によりエレベーターが最寄りの階に停止する。
- ・タンク底弁を震度計により自動遮断するシステムを導入している。
- ・管理監督者による判断で手動にて停止

設問 2 5 地震発生時のプラント停止基準

地震発生時のプラント停止基準はどのように定められていますか。

- ① 危険性の高いプラントの装置の停止基準は、どんな値ですか
(停止基準を設けていない場合は空白としてください)
- ② 一般的なプラントの装置の停止基準は、どんな値ですか
(停止基準を設けていない場合は空白としてください)
- ③ ユーティリティプラントの停止基準は、どんな値ですか
(停止基準を設けていない場合は空白としてください)

集計結果

【gal で回答の場合】

	①危険性の高い装置	②一般的な装置	③ユーティリティー
100 gal 以下	4 件	1 件	2 件
100 gal 超～150 gal 以下	9 件	8 件	2 件
150 gal 超～200 gal 以下	4 件	4 件	2 件
200 gal 超～250 gal 以下	5 件	4 件	5 件
250 gal 超～300 gal 以下	0 件	0 件	1 件
合計	22 件	17 件	12 件

【震度で回答の場合】

	①危険性の高い装置	②一般的な装置	③ユーティリティー
5	2 件	1 件	2 件
5 弱	4 件	2 件	2 件
5 強	0 件	1 件	1 件
6	0 件	0 件	0 件
6 弱	0 件	0 件	0 件
合計	6 件	4 件	5 件

コメント

危険性の高い装置の場合は、150 gal や震度 5 弱を基準としていることが多い。危険性の高い装置で 100gal 以下とする回答がやや多かったほかは、一般的な装置と危険性の高い装置の差異はあまり見られなかった。

ユーティリティープラントの場合は、250 gal を基準としているケースが増えている。

設問 2 6 地震計との非連動の理由

震度計との連動をさせていないプラントについて、理由をお教えてください。

- ① 地震計の信頼性に疑問があり、自動運転停止に連動させていない
- ② 地震動がおさまった後のオペレータによる停止操作でも十分と考えている
- ③ 地震による事故発生の危険性が低いので、地震震度計とは連動させていない
- ④ 危険な状態になれば自動緊急停止が掛かるため、地震計連動は不要と考える
- ⑤ 用役プラントはできるだけ運転を継続したいので、震度計と連動させない
- ⑥ その他 ()

集計結果

	回答数
① 地震計の信頼性に疑問がある	10 件
② 地震動がおさまった後のオペレータによる停止操作でも十分	15 件
③ 地震による事故発生の危険性が低い	8 件
④ 危険になれば自動緊急停止がするため、地震計連動は不要	5 件
⑤ 用役プラントはできるだけ運転を継続したい	11 件
⑥ その他	3 件

コメント

「手動操作でも十分」とする回答が最も多かった。用役プラントについては、運転をできるだけ継続したいために自動停止させないという回答も多数であった。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・地震発生＝災害発生とならないため
- ・ユーティリティーや除害設備は除く
- ・地震計との連動を検討中

設問 2 8 今後のプラント停止のあり方

今回の大震災のような事態において、今後プラントの停止はどうあるべきだと思いますか。（公式な見解でなくても結構です。）

- ① 安全を最優先させ、P波検知による緊急地震速報により停止動作を開始すべきである
- ② 人の判断を介在させず、すべてのプラントを震度計との連動で停止させるべきである
- ③ プラントによって、自動停止するプラントと、人の判断で停止するプラントとに区別すべきである
- ④ 自動停止は誤作動などがあるので、すべてのプラントを人の判断で停止すべきである
- ⑤ その他（ ）

集計結果

	回答数
① 安全最優先で、P波検知による緊急地震速報で停止すべき	5件
② 人を介在させず、全プラントを震度計との連動で停止すべき	8件
③ 自動停止のプラントと、人の判断で停止するプラントに区別	26件
④ 誤作動などがあるため、すべて人の判断で停止すべき	0件
⑤ その他	1件

コメント

自動停止させるプラントと、人の判断で停止させるプラントとに区分すべきという意見が過半数を占めた。

「その他」の回答としては、「今回問題なく停止しているため。今後も継続する」があった。

設問 29 オペレータが揺れの大きさを知る方法

発生した地震の揺れの大きさを、オペレータはどのようにして知るようになっていきますか。

- ① 操作室に震度計や震度表示があり、オペレータがすぐに読み取れる
- ② 工場内に設置してある震度計数値が自動で一斉放送される
- ③ 工場内に設置してある震度計数値を担当者が一斉放送する
- ④ 工場内に設置してある震度計数値を担当者が電話連絡してくる
- ⑤ 地震を感知したら、オペレータが所定場所へ電話をかけて数値を聞く
- ⑥ テレビ、ラジオなどのメディアから情報を得る
- ⑦ 知る手段は決められていない
- ⑧ その他（ ）

集計結果

	回答数
① 操作室に震度表示があり、オペレータがすぐに読む	12 件
② 震度の数値が自動で一斉放送される	17 件
③ 震度の数値を担当者が一斉放送する	8 件
④ 震度の数値を担当者が電話連絡してくる	0 件
⑤ オペレータが所定場所へ電話をかけて聞く	0 件
⑥ テレビ、ラジオなどのメディアから情報を得る	7 件
⑦ 知る手段は決められていない	1 件
⑧ その他	2 件

コメント

一斉放送（自動および担当者が実施）による場合と、操作室に表示がある場合がほとんどである。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・ 保安係からの構内放送
- ・ テレビ、ラジオなどのメディアから情報を得る＋その情報の一斉放送

設問 30 津波の予測情報を知る手段

津波の予測情報を、オペレータはどのようにして知るようになっていきますか。

- ① 工場内で波高と到達予想時刻が担当者から一斉放送される
- ② 地震を感知したら、オペレータが所定場所へ電話をかけて情報を聞く
- ③ テレビ、ラジオなどのメディアから情報を得る
- ④ 知る手段は決められていない
- ⑤ その他 ()

集計結果

	回答数
① 工場内で担当者から一斉放送される	15 件
② オペレータが所定場所へ電話をかけて情報を聞く	0 件
③ テレビ、ラジオなどのメディアから情報を得る	16 件
④ 知る手段は決められていない。	3 件
⑤ その他	3 件

コメント

担当者からの一斉放送か、または、テレビなどのメディアからが、ほぼ同数であった。担当者もテレビなどのメディアから情報を得ていることも考えられる。

「その他」の回答は、以下のようなものであった。

- ・ 対策本部で情報を入手
- ・ テレビ、ラジオなどのメディアから情報を得る＋その情報の一斉放送
- ・ 内陸部に立地しており、津波の影響は無い。
- ・ 海岸線から離れており、また高台にあるので津波の心配はない。
- ・ 津波危険なし

設問 3 1 地震や津波の情報伝達手段変更の検討

地震の揺れの大きさや津波情報の伝達手段について変更の検討をしていますか。

(複数回答可)

- ① 操作室への表示を検討している
- ② 自動放送を検討している
- ③ 特に検討していない
- ④ その他 ()

集計結果

	回答数
① 操作室への表示を検討している	1 件
② 自動放送を検討している	2 件
③ 特に検討していない	26 件
④ その他	8 件

コメント

特に検討していないとする回答が多数であった。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあつた。

- ・地震計を更新し DCS 監視
- ・無線機常設
- ・各建屋の避難場所と主要管理職へ無線配備
- ・津波警報の全体放送を追加した。
- ・BCP の観点より模索中
- ・津波情報は、担当者からの一斉放送を検討中
- ・市の防災無線放送を受信出来る設備を設ける。
- ・バックアップとしてラジオからの情報入手方法の明確化
- ・河川堤防決壊の情報

設問3 2 オペレータの落ち着き度合い

東日本大震災で、オペレータは落ち着いたアクションを取れましたか。

- ① 地震直後はほとんど何もできなかった（何が起きたかわからなかった）
- ② プラント停止にかかりきり、緊急連絡が後手にまわった
- ③ 緊急連絡に手間取り、プラント停止や2次作業に手が回らなかった
- ④ プラントの状態について、結果的にかなり誤った判断をした
- ⑤ 作業の優先順位について、結果的にかなり誤った判断をした
- ⑥ 特に問題なく、マニュアル通りに落ち着いてアクションが取れた
- ⑦ その他（ ）

集計結果

	回答数
① 地震直後は何もできなかった（何が起きたかわからなかった）	11件
② プラント停止にかかりきり、緊急連絡が後手にまわった	4件
③ 緊急連絡に手間取り、プラント停止や2次作業に手が回らず	0件
④ プラントの状態について結果的にかなり誤った判断をした	0件
⑤ 作業の優先順位について結果的にかなり誤った判断をした	0件
⑥ マニュアル通りに落ち着いてアクションが取れた	27件
⑦ その他	3件

コメント

70%近くで「マニュアル通りに落ち着いてアクションが取れた」としているが、25%程度は「地震直後はほとんど何もできなかった」という回答であった。

「その他」の回答やコメントとしては、以下のようなものがあった。

- ・問題なく状況判断しながら落ち着いて行動できた。
- ・マニュアル通りにアクションが取れた。
- ・落ち着いてアクションがとれた。
- ・平日の昼間だったので、大きな問題はなかったが、夜間や休日に発生していたら違った状況になった可能性がある。

設問35 オペレータの対応能力

東日本大震災での対応として、人数的、技量的にはどうでしたか。

(複数回答可)

- ① 緊急時におけるオペレータの人数不足を感じた
- ② 緊急時におけるオペレータの判断能力の不足を感じた
- ③ 緊急時におけるオペレータの対応能力の不足を感じた
- ④ 必要な対応ができており、特に問題はなかった
- ⑤ その他 ()

集計結果

	回答数
① 緊急時におけるオペレータの人数不足を感じた	9件
② 緊急時におけるオペレータの判断能力の不足を感じた	2件
③ 緊急時におけるオペレータの対応能力の不足を感じた	2件
④ 必要な対応ができており、特に問題はなかった	24件
⑤ その他	4件

コメント

「必要な対応ができており、特に問題はなかった」が過半数の回答であったが、20%あまりは「緊急時におけるオペレータの人数不足を感じた」としている。

「その他」の回答やコメントとしては、以下のようなものがあった。

- ・人命を守ることで精一杯であった。
- ・地震規模が大き過ぎて、対応能力を超過していた。
- ・他工場からの応援を要請した。
- ・地震後の現場点検では応援が必要であった。
- ・幸い、平日の日中および交替勤務者の引継ぎ時間帯であり、人数を確保できた。夜間、休日ではどうなったか？
- ・平日の昼間だったので、大きな問題はなかったが、夜間や休日に発生していたら違った状況になった可能性がある。

設問 3 6 緊急時の対応人員の増強手段

緊急時の対応人数不足を解消するには、どうしたらいいと思いますか。

(複数回答可)

- ① 休日、夕勤、夜勤も日勤と同じ体制（オペレータ、判断者）を確保する
- ② 警備要員や当直者などにも任務を与え、在勤者での総力戦とする
- ③ 判断を極力減らすように、マニュアル化を推進する
- ④ 作業を極力減らすように、機械化、自動化を推進する
- ⑤ 日頃から訓練を積み重ねて対応能力を上げておく
- ⑥ 工場周辺の社宅を拡充し、応援者がすぐに駆けつけられるようにする
- ⑦ 食料を備蓄し、交替や応援者なしでも長期戦に臨めるようにしておく
- ⑧ その他（ ）

集計結果

	回答数
① 休日、夕勤、夜勤も日勤と同じ体制を確保する	2 件
② 警備要員や当直者などにも任務を与え、総力戦とする	8 件
③ 判断を極力減らすように、マニュアル化を推進する	9 件
④ 作業を極力減らすように、機械化、自動化を推進する	12 件
⑤ 日頃から訓練を積み重ねて対応能力を上げておく	28 件
⑥ 工場周辺の社宅を拡充し、応援者がすぐに駆けつけるように	3 件
⑦ 食料を備蓄し、交替や応援者なしでも長期戦に臨めるように	15 件
⑧ その他	1 件

コメント

日頃からの訓練によって対応能力を上げておくという回答が 70%を占めた。

「その他」の回答としては、「駆けつけられる応援者を決めている」があった。

設問 3 7 安否確認システムの利用

従業員の緊急呼び出しや安否確認のシステムは機能しましたか。

- ① 従業員の携帯電話での呼び出し
(1=利用できた、2=利用できなかった、空白=使用していない)
- ② 従業員の自宅への固定電話での呼び出し
(1=利用できた、2=利用できなかった、空白=使用していない)
- ③ 従業員の携帯へのメールでの連絡
(1=利用できた、2=利用できなかった、空白=使用していない)
- ④ 外部業者の安否確認システム
(1=利用できた、2=利用できなかった、空白=使用していない)
- ⑤ その他 ()
(1=利用できた、2=利用できなかった、空白=使用していない)

集計結果

	利用できた	利用できず	使用せず
① 携帯電話での呼び出し	3 件	19 件	18 件
② 固定電話での呼び出し	3 件	16 件	21 件
③ 携帯へのメールでの連絡	10 件	11 件	19 件
④ 外部業者の安否確認システム	8 件	8 件	24 件
⑤ その他	4 件	1 件	35 件

コメント

携帯電話、固定電話ともに利用できなかったという回答が多い。携帯メールと外部業者の安否確認システムは利用できたと利用できなかったがほぼ同数である。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・従業員、家族について、電話にて安否確認した。
- ・地震後数日は電話（固定、携帯）による安否確認システムは機能しなかった。
- ・5弱で安否システム使用しなかった。

「その他」の回答やコメントとしては、以下のようなものがあった。

- ・ 緊急連絡網の連絡先は、従来は固定電話、または携帯電話であったが、携帯電話のメールアドレスも追加した。
- ・ 浸水被害の避難判断基準、避難経路、避難方法
- ・ テレビ及びブースターを非常用電源でバックアップ
- ・ BCP の観点より見直し
- ・ 多くは現在検討中

設問 3 9 既存設備の耐震設計基準

プラントの構成設備（既設の主なもの）の耐震設計基準は何ガルですか。

- ① 主要建物
- ② ストラクチャー
- ③ 特に危険性の高いプラントの塔槽類などの設備
- ④ 一般のプラントの塔槽類などの設備
- ⑤ ボイラー等、用役プラントの塔槽類などの設備
- ⑥ 電気計装設備

集計結果

	≤150gal	150-200gal	>200gal
主要建物	2 件	9 件	11 件
ストラクチャー	3 件	5 件	10 件
危険性の高いプラントの塔槽類など	2 件	1 件	14 件
一般のプラントの塔槽類など	3 件	4 件	10 件
ボイラー、用役の塔槽類など	2 件	1 件	13 件
電気計装設備	1 件	3 件	9 件

コメント

プラントの塔槽類については、プラントの種類や危険性によらず、200gal を超える値の回答が多かった。企業ごとに意外とばらつきが見られたように感じられる。

設問 40 今後の新設時の耐震設計基準

プラントの構成設備（今後新設の場合）の耐震設計基準は何ガルですか。

- ① 主要建物
- ② ストラクチャー
- ③ 特に危険性の高いプラントの塔槽類などの設備
- ④ 一般のプラントの塔槽類などの設備
- ⑤ ボイラー等、用役プラントの塔槽類などの設備
- ⑥ 電気計装設備

集計結果

	≦150gal	150-200gal	>200gal
主要建物	1 件	3 件	17 件
ストラクチャー	2 件	0 件	15 件
危険性の高いプラントの塔槽類など	0 件	1 件	13 件
一般のプラントの塔槽類など	1 件	1 件	15 件
ボイラー、用役の塔槽類など	2 件	0 件	14 件
電気計装設備	0 件	0 件	14 件

コメント

既存設備についての耐震設計基準を問う設問 39 と比べて、200gal 超をとする回答が増えている。具体的な数値は、300gal や 400gal が多いが、最高 1,000gal までばらついている。

設問 4 1 耐震設計基準の根拠

貴事業場での耐震設計に関する基準や指針は何を使用していますか。

(複数回答可)

【主要建物】

- ① 建築基準法
- ② 各種法令 (消防、高圧ガス)
- ③ 自社基準
- ④ その他 ()

【ストラクチャー】

- ① 建築基準法
- ② 各種法令 (消防、高圧ガス)
- ③ 高圧ガス設備等耐震設計基準
- ④ 自社基準
- ⑤ その他 ()

【電気計装設備】

- ① 建築基準法
- ② 各種法令 (消防、高圧ガス)
- ③ 高圧ガス設備等耐震設計基準
- ④ 自社基準
- ⑤ JEM (日本電気工業会) 規格
- ⑥ その他 ()

集計結果

【主要建物】

	回答数	%
① 建築基準法	37 件	93
② 各種法令 (消防、高圧ガス)	32 件	80
③ 自社基準	13 件	33
④ その他	1 件	3

「その他」の 1 件は、「既設設備は、建設当時の基準」としている。

【ストラクチャー】

	回答数	%
建築基準法	28 件	70
各種法令（消防、高圧ガス）	31 件	78
高圧ガス設備等耐震設計基準	22 件	55
自社基準	13 件	33
その他	1 件	3

「その他」の1件は、「既設設備は、建設当時の基準」としている。

【電気計装設備】

	回答数	%
建築基準法	24 件	60
各種法令（消防、高圧ガス）	25 件	63
高圧ガス設備等耐震設計基準	14 件	35
自社基準	11 件	28
JEM（日本電気工業会）規格	15 件	38
その他	3 件	8

「その他」の回答としては、「JEAG5003 変電所等における電気設備の耐震設計指針」、「JEAC,JEAG,JIS,JEC,JEM,SBA」があった。

コメント

建築基準法、高圧ガス設備等耐震設計基準などに従っていると回答が多かったが、必ずしもすべての設備に適用されているわけではないようである。

設問 4 2 危険性の高いプラントへの対策

危険性の高いプラントには、耐震性向上以外にどのような対策が実施されていますか。

(複数回答可)

- ① 装置の破壊があっても被害規模を抑制するために、ブロック化を徹底し、それぞれのブロックのホールドアップを極力小さくしている。
- ② 装置に亀裂が入っても外部への漏洩を防ぐように二重配管などを適用している
- ③ 万一の漏洩時にブロックごとに内容物を移送できる仕組みがある。
- ④ 遠隔遮断弁を多く設置している。
- ⑤ 漏洩や火災に備えて、スチームカーテンなどの拡大防止設備を設置している。
- ⑥ 配管の応力をできるだけ逃がすような設計をしている。
- ⑦ プラント専用の発電機を備えている。
- ⑧ プラント専用の窒素のリザーバタンクを保有している。
- ⑨ プラント専用で計装空気のバックアップがある。
- ⑩ DCS とは別に安全計装システムを導入している。
- ⑪ 重要計器は DCS とパネル計装とで二重化している。
- ⑫ 他のプラントと特に区別はしていない。
- ⑬ その他 ()

集計結果

	回答数
① ブロック化とホールドアップの極力化	9 件
② 二重配管などを適用	5 件
③ 漏洩時に内容物を移送できる仕組み	8 件
④ 遠隔遮断弁を多く設置	23 件
⑤ スチームカーテンなどの拡大防止設備を設置	11 件
⑥ 配管の応力をできるだけ逃がすような設計	15 件
⑦ プラント専用の発電機を設置	14 件
⑧ プラント専用の窒素のリザーバタンクを保有	9 件
⑨ プラント専用で計装空気のバックアップを保有	10 件
⑩ DCS とは別に安全計装システムを導入	6 件
⑪ 重要計器は DCS とパネル計装とで二重化	8 件
⑫ 他のプラントと特に区別はせず	8 件
⑬ その他	1 件

コメント

プラントの特性が様々なためか、種々の回答にばらついた。「遠隔弁を多く設置」が比較的共通する回答であった。

「その他」の回答は、「危険性の高い部位は除害設備と繋がる建屋内に収納」というものであった。

設問 4 3 ユーティリティプラントの稼働継続対策

ユーティリティプラントには、耐震性向上以外に、稼働を継続するためにどのような対策が実施されていますか。

- ① 近隣の他事業所等と蒸気の融通ができるような配管がある
- ② 近隣の他事業所等から非常用の電気の供給が受けられるような系統がある
- ③ 液体窒素をバックアップに使えるよう、気化設備がある
- ④ 全停電時でも消火用水や一部設備の冷却用水を供給できる仕組みがある
- ⑤ その他（ ）

集計結果

	回答数
① 近隣の他事業所等と蒸気の融通ができるような配管がある	7 件
② 近隣の他事業所等から非常用の電気の供給が受ける系統がある	3 件
③ 液体窒素をバックアップに使えるよう、気化設備がある	12 件
④ 全停電時でも消火用水や冷却用水を供給できる仕組みがある	26 件
⑤ その他	3 件

コメント

「全停電時でも消火用水や冷却用水を供給できる仕組み」を持っている事業所が多い。

「その他」の回答としては、以下のようなものがあつた。

- ・ 鹿島地区は数社が運営する共同発電所からの送蒸・送電のため、緊急時は各社協力して対応
- ・ 全停電時でも消火用水を供給できる。
- ・ NAS 電池
- ・ 他プラントと違った特別な対策は講じていない。

設問 4 4 計装設備の被害状況

地震でDCS、リレー盤、変換器盤、デスク盤の被害はありましたか。

(ディスプレイ等は除きます。)(複数回答可)

- ① 全てのシステム機器で故障や誤動作がなかった
- ② 転倒があった。
- ③ 位置ズレがあった。
- ④ 機器の転倒や振動での断線があった。
- ⑤ 誤動作した機器があった(例:振動でリレー接点が働いた可能性がある)
- ⑥ その他()

集計結果

	回答数
① 全てのシステム機器で故障や誤動作が無かった	23件
② 転倒があった	4件
③ 位置ズレがあった	6件
④ 機器の転倒や振動での断線があった	2件
⑤ 誤動作した機器があった	1件
⑥ その他	3件

コメント

約60%の事業所からは、「故障や誤動作が無かった」との回答があった。

しかしながら、震度の大きいところでは、転倒や位置ずれ、さらには断線などが発生している。

「その他」の回答やコメントとしては、以下のように津波による水没被害を挙げている。

- ・装置冷却用の海水取水場の現場にある変換器盤や操作盤は、水没被害があった。
- ・地震後に津波がきたので地震の時に実際にどうだったか不明(地震後の点検未実施)
- ・現場制御盤は7割浸水、使用不能
- ・水没被害あり

設問 4 5 計装設備の被害状況

デスク上に設置のディスプレイ等についての転倒・転落はありましたか。

- ① 無かった。
- ② あった。(状況を具体的にご記入ください。)

集計結果

	回答数
① 無かった	31 件
② あった	8 件

「あった」の具体的回答やコメントとしては、以下のようなものがあった。

- ・机の上から床に落下した
- ・PC モニターが落下
- ・PC 本体、ディスプレイ落下
- ・液晶 CRT がデスクより落下したが破損無し
- ・机上置き液晶ディスプレイはすべて転倒、落下
- ・測定機器が転倒落下した。
- ・机ごと転倒など
- ・転倒転落あり
- ・今回はディスプレイの転倒は無かったが、固定すべきである。

コメント

被害があったとする回答も 8 件あり、ディスプレイ等が落下している。

設問 4 6 ディスプレイ等の固定

デスク上に設置のディスプレイ等は固定していましたか。

- ① ポール等に固定していた。
- ② 天板にボルトで固定していた。
- ③ 転倒防止の粘着シートを使用していた。
- ④ その他 ()

集計結果

	回答数
① ポール等に固定していた。	8 件
② 天板にボルトで固定していた。	1 件
③ 転倒防止の粘着シートを使用していた。	8 件
④ その他	10 件

コメント

「その他」の回答やコメントとしては、以下のようなものがあった。

- ・ 運転監視用のディスプレイは操作盤に組み込まれている。
- ・ 専用コンソールに収まっている。
- ・ 壁面埋め込みタイプ
- ・ 固定していない箇所もあった。
- ・ 固定していない。
- ・ 液晶CRTは向きを変えるために固定していない。
- ・ 運転用は固定、監視用は対応なし

設問 4 7 地震での現場計器・機器の状況

地震で現場計器・機器は影響を受けましたか。

- ① 全ての現場機器での誤動作や故障はなかった。
- ② 現場計器の指示・動作が一時的に異常となったが自動で復旧した。
- ③ 故障した現場機器があった。
- ④ 液面が振動し、液面計アラームが多発した。
- ⑤ 誤動作した現場機器があった。
- ⑥ 落下・転倒・移動などした現場機器があった。
- ⑦ その他（ ）

②～⑥は、状況を具体的にご記入ください。

集計結果

	回答数
① 全ての現場機器での誤動作や故障はなかった	15 件
② 現場計器の指示・動作が一時的に異常となったが自動で復旧	1 件
③ 故障した現場機器があった	15 件
④ 液面が振動し、液面計アラームが多発した	5 件
⑤ 誤動作した現場機器があった	4 件
⑥ 落下・転倒・移動などした現場機器があった	8 件
⑦ その他	3 件

具体的状況の回答としては、以下のようなものがあった。

- ・液面の変動による指示変化やアラーム発生はあり、特に出荷栈橋周辺の浸水した計器の動作異常もあり、栈橋や護岸流失にともない計器が無くなったものがあった。
- ・放射線液面計などの故障
- ・配管の変形により破損した計器があった。
- ・現場計器の被害は比較的少なかった。
- ・一部の測定機器が転倒・落下した。
- ・津波により、1m以下設置の機器等は壊滅的状态であった。
- ・ロードセル計量器のセルが破損
- ・ガス検知器のアラームがなり、緊急排出を実施したが、結果的には誤作動であった。

- ・液面計、圧力計、調節弁、分析計
- ・タンクリモートゲージ損傷
- ・ロードセルがずれて、機能しなくなった。
- ・マグネット式液面計のマグネットが脱落し指示不良となった。
- ・軸振動計が動作し回転機が停止した。
- ・建屋壁崩れ・損壊に伴う機器破損

コメント

「その他」の回答としては、以下のものであった。

- ・液状化により小形ピットの浮上とポンプの沈下
- ・ガス検知器の誤作動
- ・多数被害あり

設問 4 8 地震での計装配線・空気配管の状況

地震で現場から計器室までの計装配線や空気配管は影響を受けましたか。

- ① 全ての計装配線や空気配管で切断や短絡・地絡はなかった。
- ② 一部の計装配線で切断、短絡・地絡があった。
- ③ 一部の空気配管で切断や漏れがあった。
- ④ その他 ()

②と③は、状況を具体的にご記入ください。

集計結果

	回答数
① 全ての計装配線や空気配管で切断や短絡・地絡はなかった。	21 件
② 一部の計装配線で切断、短絡・地絡があった。	7 件
③ 一部の空気配管で切断や漏れがあった。	12 件
④ その他	1 件

具体的状況の回答としては、以下のようなものがあつた。

- ・出荷栈橋周辺の浸水した計器の動作異常もあり、栈橋や護岸流失にともない計器が無くなったものがあつた。
- ・各所で配線ラックが落下した。空気配管は、継手からの漏れが発生した。

- ・白ガス管接続部で一部漏れが発生した。
- ・構内各所において甚大な被害があった。
- ・計装空気の配管に一部の漏れがあったが自動弁の遠隔制御には影響なし
- ・ねじ部折損
- ・主に導管接続部での外れ・切断（チューブは被害無し）

コメント

「その他」の回答としては、「水没被害あり」があった。

設問 4 9 地震という外乱での制御システムの挙動

地震の揺れという外乱に対して制御システムの動作の挙動についての調査は実施しましたか。実施していない場合は、理由をお答えください。

- ① 調査を実施した。
- ② 調査は特に実施していない

②の場合の理由を以下にお答えください。

- 1) 地震や津波の被害が大きく、調査どころでは無かった
- 2) リアルタイムの詳細なトレンド情報も無いため実施していない
- 3) プラントが運転停止したため、調査に意味がないと判断した
- 4) 地震の揺れという嘘の制御動作での制御を考慮しても意味がない
- 5) その他（ ）

①の場合、調査結果はどうでしたか。

- 1) 地震の揺れという外乱による制御動作への影響はなかった
- 2) 地震の揺れという外乱による制御動作はあったが、プラントへの大きな影響はなかった
- 3) 地震の揺れという外乱により制御が不安全な方向に動いたものがあった。

上記の内容を具体的にお教えください。

（どのような構成のループ、どんな影響、改善策など）

集計結果

	回答数
① 調査を実施した。	8 件
② 調査は特に実施していない	31 件

②の場合の理由

	回答数
1) 地震や津波の被害が大きく、調査どころでは無かった	8 件
2) リアルタイムの詳細なトレンド情報も無いため実施していない	4 件
3) プラントが運転停止したため、調査に意味がないと判断	12 件
4) 地震の揺れという嘘の制御動作での制御の検討は意味がない	3 件
5) その他	8 件

具体的状況の回答としては、以下のようなものがあつた。

- ・ 正常に地震停止システムが作動したので問題ないとしている。
- ・ 異常が無かったので調査していない。
- ・ 地震発生直後に受電が停止し設備停止していたから
- ・ 制御システムの挙動異常がなく、調査の必要性を感じない。
- ・ 揺れによる外乱であっても運転対応は必要
- ・ 運転再開時に動作チェックを実施した。
- ・ 製造開始優先であつたため
- ・ それほど大きな揺れではなかつた。
- ・ 特に影響がなかつた。
- ・ 問題は認められなかつた。

①の場合の調査結果

	回答数
1) 地震の揺れという外乱による制御動作への影響はなかつた	7 件
2) 地震の揺による制御動作はあつたが、大きな影響はなかつた	1 件
3) 地震の揺れという外乱で制御が不安全になつたものがあつた	1 件

コメント

制御動作については十分な調査を実施していないところが多い。また、実施していても「影響は無かつた」の回答が多数を占めた。

設問50 計装設備の要改善点

計装機器について、改善すべき点、良かった点などをお教えてください。

集計結果

以下のような回答があった。

【改善すべき点】

- ・ 正確な測定データが出力されているのかを、簡易に判断するのが困難でした。
- ・ ロードセルに載っているタンクの芯がずれた。
- ・ ロードセルの振れ止め対策を強化する必要があると感じた。
- ・ 改善点：ロードセル計量機にフレックスロックを検討中
- ・ リンク、巻き取り式のレベルゲージで多くの障害が出た。マイクロウェーブや超音波式等への更新が望ましい。
- ・ 計装機器の物的被害の99%は津波起因であり、地震による被害はほとんど無かった。今後、今回の様な、想定外の津波レベルまで想定して改善対策を打つべきか否かは、対費用効果の面から充分必要であると考えます。
- ・ 津波対策が必要
- ・ 機器操作は工場内にあるため緊急停止操作を行なうのに工場内に立ち入らねばならなかった。

【良かった点】

- ・ 保安検査により機能の検証を実施しているため、プラント自動停止等問題なかった。
- ・ 宮城県沖地震を想定していたため、DCS キャビネットは転倒防止の処置が施されており有効であった。
- ・ 自立式パネルをアンカーボルトでの固定だけに留まらず、列盤連結や壁からのサポート補強を実施済みであった。
- ・ 停電時のシーケンスによる自動停止が日常のメンテナンスもあり問題なく作動した。

【その他のご意見など】

- ・ 津波（浸水）強化として、空気式から電気式に変更
- ・ 空気式計器とエアフェイルによるフェールセーフの設計は、良いと実体験として経験した。

コメント

ロードセルやレベルゲージなど、地震に弱い設備についての知見が明らかになった。可能な対応策が検討されるよう希望する。

設問 5 1 今回の震災での教訓

その他、今回の震災での教訓などがございましたらご自由にご記入ください。

集計結果

具体的状況の回答としては、以下のようなものがあった。

【発災時の対応】

- ・プラント制御が出来ない状況で如何に安全を確保するかが課題。プラント維持を考えると想定外が発生すると思う。
- ・常設の非常用発電機（燃料含め）が健全であったので緊急対策本部などの保安電源が確保でき全体運営に大きな効果を発揮した。そして短期間での操業復旧に寄与したと考える。
- ・非常用ディーゼルエンジン用の燃料確保。（震災で陸路、海路とも断たれ、燃料の品薄状態が数週間継続した。）
- ・在宅者への安否確認システムを地震発生時にも稼働させる（従来は夜間、休日のみ）

【設備改善の方向性】

- ・緊急停止時に必要な用役の確保、緊急時マニュアルの一部に問題がある事が判った。これらの課題について見直しを行い、改善計画を作成した。
- ・震災直後より長期間停電したため、当初は手動操作だけとなった。操作が必要な設備は、手動でも必要最小限の動作が実施出来るようにしておくべきと考えます。
- ・緊急時の通信手段について、今後の検討が必要と考える。建設時の耐震基準が現行に適合していないものについては優先順位をつけて耐震性を向上させる必要があると判断している。
- ・電力会社からの送電が停止し、電気を使用する機器は全て停止してしまい。危機管理用のシステムも機能しなくなった。今後は教訓を活かし体制の再構築を準備中である。
- ・建屋、プラントを耐震法改正にあわせ、1981年以前のプラント・建物全て検証し耐震強度不足対策を自主で実行したため被害がなかった。また、以下の点も対応していく。①津波情報の収集と避難指示の徹底、②津波発生時の避難場所の設定と確保、③帰宅判断基準の明確化
- ・津波対策に対してはより検討して行きたい。
- ・プラントの設備配置を検討するときは、津波の影響を考慮する。
- ・これまで想定されていた津波高さ以上の津波が襲来したため、津波に対する対策が不十分であったことが顕在化した。
- ・津波を想定し、避難場所および各種機材（ポータブル発電機やその燃料等）の

保管場所を階上へ設置する必要あり

【サポート体制】

- ・ガソリンが不足し、従業員通勤に支障が出そうになったため、備蓄した軽油を提供することを条件にチャーターバスを臨時運行した。
- ・非常食は、停電も考慮し調理の必要のない物が有効
- ・その他として、地震後すぐに出勤してくれるオペレーターが多かったが、道路が地震で損傷して渋滞している。津波に巻き込まれるなどのケースがあり、応援出勤時の危険についても周知する必要がある。

【BCPについて】

- ・BCPが不十分であったため、BCP作成を実施中である。本棚の転倒があったので、固定方法の見直しを実施。
- ・震災に対して自社対応だけでなくサプライチェーンの改善がなければ設備稼働は困難である。

【ソフトのバックアップ】

- ・DCSソフトのバックアップを定期的に行い、長期停電後のスタートアップに対応できる様に継続して実施して行く。
- ・バックアップメディアを耐火金庫にて保管していたが、防水でなかったため、すべて消滅した。防水機能もしくは高所による保管を推奨します。

【その他のご意見など】

- ・古い時代に戻るが、空気式計器とエアフェイルによるフェールセーフの設計は、自動制御プラントの安全設計の最後の砦であると感じました。震災時に自衛消防隊として活動中に、無線で計装用空気の残圧経過を聞きながら、安全に装置は止まるはずだと自分に言い聞かせて、周囲の関係者にも声かけして、落ち着こうと意識した時をはっきりと思い出します。
- ・幸いに、当工場では全従業員が怪我無く無事であった。震災後の復旧期間においても、この全員無事であったことが、従業員の意識高揚、安心感に大きく寄与していたと考える。当然であるが、まずは人命最優先とした対策の重要性を再認識した。また、現地調査、メーカ/工事会社への支援依頼等、早期復旧に向け、初動体制を如何に早期に立ち上げるかが非常に重要であると考えている。
- ・今回の震災ではプラントを停電による自動停止若しくは手動停止で安全に停止できた。結果として漏洩もなかったが危険流体の漏洩があれば状況は変わっていた。地道な訓練の重要性を再認識すると共に閉止の必要がある手動弁の遠隔閉止及び回転機の遠隔停止の強化などを実施した。
- ・発生と同時に工場全停電となった、その状態では何も出来ない事を思い知らされた。
- ・電気計装設備の津波被害(海水被害)による腐食進行は極めて早い。出来るだけ早く洗浄すること。基本的には、津波の恐れのある場所では、電気関係設備を1階に設置しないこと。また、大津波警報が出されたら、停止処置よりも、ま

ず非難。通信手段の確保が大切。

- ・ 今回の震災において当事業所では幸いなことに火災・津波による被害がなかったため、速やかにプラントを立ち上げることができました。設備破損時の復旧を速やかに行うためにも設備資料保管場所について検討したいと思います。
- ・ 設備の被害は幸いにして小さかったのですが、原発問題で不安な日々が続きました。(福島第2原発から約50kmの距離にありましたが…) 原発問題に加え、断水、食糧不足、ガソリン不足の問題があり、操業再開よりも従業員の生活の安定化が大きな課題となりました。

コメント

様々な知見をいただいた。読者の皆様の事業所における震災への備えに、ぜひ役立てていただきたい。

第 2 部

アンケート調査結果の解析

第2部では、今回のアンケートの結果と阪神大震災のときに実施したアンケート結果とを比較して、阪神大震災のときに見直された地震対策の有効性や見直しを中心に解析する。

さらに、今回の震災の大きな特徴で、阪神大震災のときにはなかった津波についても、他の設問への回答に現れる被害や対策と関連づけて解析し、地震・津波に対する回答者の意識を整理することを試みる。

2.1 阪神大震災時のアンケート調査との回答事業所の比較

プラントオペレーション分科会(当時は、プラントオペレーション工学特別研究会)は、1995年の阪神大震災の発災時にもアンケート調査を行っている。阪神大震災は、1995年1月17日5時46分に明石海峡を震源地とするM7.3の直下型地震で、ビルの倒壊、高速道路や鉄道の高架の倒壊や落橋など大きな被害が発生した。6400名を超える死者の8割以上が、倒壊にともなう圧死であった。この地震動の想像を超えた破壊力に対して、プラントオペレーションのありかたを検討することが、前回のアンケートの課題であった。そして、オペレータは大きく揺れている間には、なんの対応もできず、人間に停止の判断を委ねるよりも、地震計で自動的に停止して、被害を最小化すべきで、地震計連動の停止システムの普及を提案するのが、報告書の主な内容であった。

東日本大震災は、2011年3月11日14時46分に三陸沖を震源としたM9.0の地震をかわきりに、連動地震が発生し、東日本の広い地域に甚大な被害を与えた。阪神大震災から東日本大震災までの16年の間、地震計連動の停止システムは普及して、被害の拡大を防止するのに有効に働いたかが、アンケートを行う一つの着眼点であった。

阪神大震災では、大きな被害にあった化学プラントの数は多くなかったので、アンケートは、実態調査というだけでなく、地震に対する対応について広く意識を調べるという意味で、調査対象を全国の事業所とした。東日本大震災では、震源地近くの東北地方のみでなく、大きな長周期振動は東京や神奈川にも及んでおり、調査対象を東日本にしぼり、その被害と対応策を調査することにした。

表 2.1 阪神淡路大震災時と今回のアンケート調査

	阪神大震災に関する調査	東日本大震災に関する調査
調査時期	1995年11月(発災は1995年1月17日)	2012年7・8月(発災は2011年3月11日)
調査項目	26項目 地震被害,オペレータの行動,プラントの停止方法,防災対策,情報伝達,耐震基準	51項目 地震被害,津波被害,オペレータの行動,プラントの停止方法,二次処理,防災対策,情報伝達,耐震基準,計装
回答数	全国108事業所	東日本40事業所

東日本大震災では、死者と行方不明者を合わせると1万8千人を超える甚大な被害が発生したが、9割を超える方が津波により亡くなっている。プラントでも津波から逃げ遅れた犠牲者が出てしまい、冠水による被害も多く報告されている。今回のアン

ケートでは、津波による被害と今後への対策の調査も重要な課題であるが、阪神のときには、津波被害がないので、比較の対象にはできない。

また、東日本大震災では、福島第一原子力発電所で大事故が発生し、その排出された放射能が復興をより困難にしているのも特徴である。原子力発電所では、地震発生時、制御棒による緊急停止は成功したものの、その後の津波で、非常用電源が冠水し、冷却を維持することができなくなり、原子炉内の水位計の誤指示により状態の把握が正しくできないうちに大事故に進展してしまった。今回のアンケート調査においては、阪神大地震の際の調査項目に加え、津波の影響や対応、二次処理や計装についても調査した。

2.1.1 阪神大震災時のアンケート調査項目

阪神大震災のアンケートの設問は、表 2.2 に示す 26 問である。今回のアンケート調査で、はずした設問も存在するが、対応する今回のアンケートの設問番号を表の右端に示している。

表 2.2 阪神淡路大震災時のアンケートの設問

設問番号	阪神大震災時のアンケートでの設問	対応する 今回設問
問1	今回のアンケート調査に答えていただくプラントについて差支えなければ記入して下さい。	問1,2,3,6
問2	阪神大震災でプラントは停止しましたか。	問7,8
問3	阪神大震災で、プラント停止以外どのような被害を受けましたか(複数回答可)。	問9
問4	地震震度計と連動した、プラント全体の自動インターロックシステムはありますか。	問24
問5	地震震度計の信頼性をどう思いますか。	問26
問6	地震発生時のプラント停止基準は定められていますか。	問25
問7	発生した地震の震度を、オペレーターはどのようにして知ることになっていましたか。	問29
問8	阪神大震災の震度を、実際オペレーターは決められた通りの方法で知りましたか。	なし
問9	阪神大震災で、基準に沿ったプラント停止あるいは運転継続がされましたか。	問13
問10	なぜ、基準通り、停止できませんでしたか。	なし
問11	地震発生時に、プラント停止以外にオペレーターが実施する基準がありますか(複数回答可)	なし
問12	今回の大震災のような事態において、今後プラントの停止はどうあるべきだと思いますか。	問28
問13	緊急時には情報の収集およびその判断が重要だとされていますが、阪神大震災ではどうでしたか。	問34
問14	交替オペレーターの直人員数を決めている基準は何ですか。	なし
問15	阪神大震災の対応として、実際人数的にはどうでしたか。	問35
問16	緊急時の人数不足を解消するには、どうしたらいいと思いますか(複数回答可)。	問36
問17	阪神大震災で、実際にオペレーターは落ち着いたアクションを取れましたか。	問32
問18	阪神大震災で実際に起きたオペレーション内容、オペレーターの行動、その他をお書き下さい。	なし
問19	緊急時のマニュアルで、オペレーターがとっさに行動できるような工夫は何かありますか。	問34
問20	阪神大震災で、オペレーターの役割の重要性を強く感じたことは何ですか。	なし
問21	普段実施している防災訓練や教育は、阪神大震災に対して有効でしたか(複数回答可)。	問33

問22	電話回線の不通などで、緊急連絡網での従業員への連絡ができなかったという事例はありますが	問37
問23	プラントの主要建物、ストラクチャーの耐震設計強度は何ガル(震度)ですか。	問39,40
問24	貴事業場での耐震設計に関する基準、指針は何を使用していますか。	問41
問25	阪神大震災を契機に、緊急時の対応マニュアルの見直しなどを行いましたか。	問38
問26	その他地震に対するコメント、アンケート解析に対する研究会への要望などを記入して下さい	問51

継続性のある設問については、阪神大震災時と東日本大震災時の回答の比較を加え、解析を行ってみた。

2.1.2 回答いただいた事業所の比較

阪神大震災のときのアンケート調査結果と今回の結果を比較する上で、回答いただいた事業所の差異を解析しておく必要がある。

図 2.1 に阪神大震災時のアンケートの回答と今回のアンケートの回答の業種、図 2.2 にはプラントの運転形態の比較を示す。

業種としては、今回のアンケート調査では、有機ファインの回答の比率が上がって、無機化学、石油ガスからの回答の比率が下がっている。そして、運転形態では、阪神大震災時の回答の 6 割だった連続運転が 3 割になっており、今回の回答は、阪神大震災の回答よりも、有機ファインのバッチプラントの比率が高くなっていると考えられる。

インフラとして連続運転が必要な石油化学を代表とする大規模プラントの比率が低くなっているが、今回の設問 4 で危険物の扱いについて訊ねたところ、図 2.3 に示すように、可燃性ガス、液化ガス、毒性ガスのいずれも扱っていないと答えたのは、わずか 2 事業所(5%)であり、ほとんどの事業者が危険物を扱っており、リスクを感じて操業しているプラントからの回答であると考えられる。

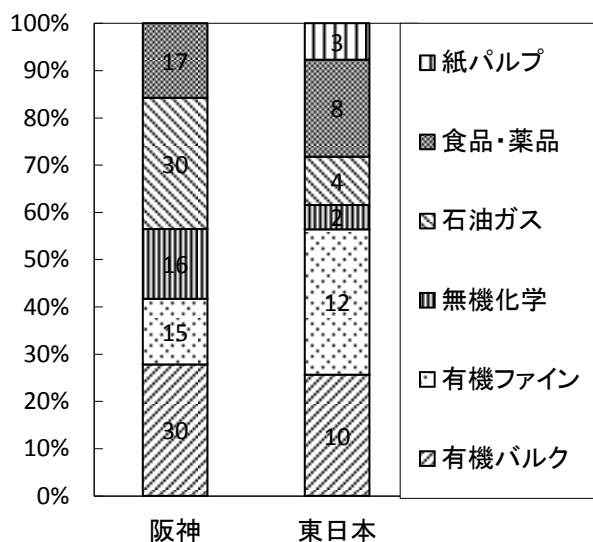


図 2.1 回答事業所業種

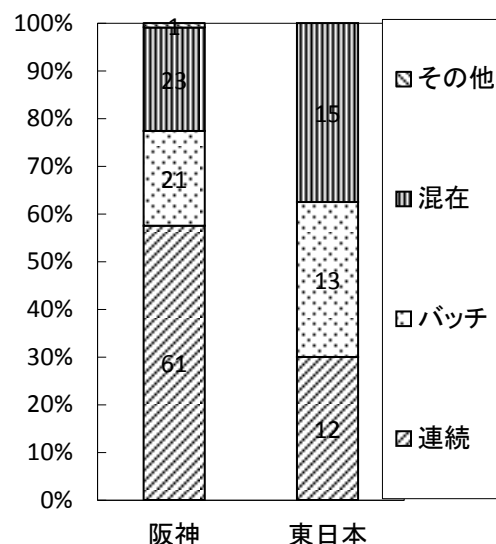


図 2.2 回答事業所運転形態

阪神大震災時には大きな震度の地域は狭く、震度 6 以上の回答は 7 件で割合としては 7%を下回っていたが、東日本大震災では、16 件で 40%もの割合の回答が震度 6 を超えている。阪神大震災のときには、ほとんど被害のない震度 4 以下の事業所からの回答が 7 割を超えていたが、今回の回答では、2 件 5%にしかない。そのため、阪神大震災の時よりも回答数は少ないが、地震による被害の情報としては、より有効なものと考えられる。

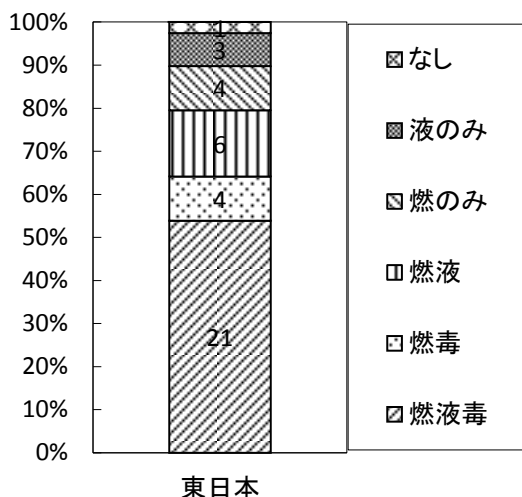


図 2.3 回答事業所が取扱う危険物

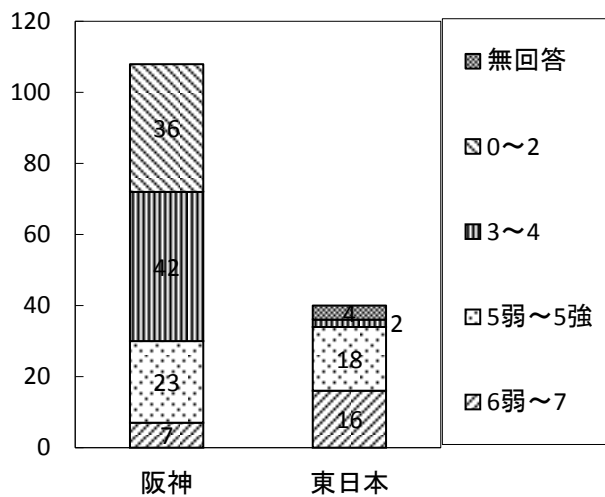


図 2.4 回答事業所測定震度

2.2 地震被害の比較からみる耐震設計の変化

2.2.1 地震被害の変化

阪神大震災のときのアンケート調査では、全国 108 事業所からの回答が得られ、被害がなかったという回答が多かったが、回答のあった被害を割合で比較すると、図 2.5 のように整理できる。(阪神の設問 3 と東日本の設問 9)

東日本大震災では、阪神大震災のときよりも震度が大きい事業所からの回答が多いため被災の回答数が多いが、被害のなかの割合としては、建物、ストラクチャーの被害が少し減っている。割合は、他の被害が増えれば相対的に減るので、割合が減ったからといって、阪神大震災以後の 15 年間で耐震設計や耐震補強が進んだとはいえない。本報告書の第 4 部で稲葉氏より解説がある地震動の性質の差異による影響も大きい可能性がある。東日本大震災の地震動は建物や装置を破壊する周波数成分が弱く、M9.0 という地震の規模や、加速度や震度という指標の大きさだけでは評価できない面が現れているとも考えられる。

阪神大震災では報告がなかったが、東日本大震災では、安全の独立防護層では第 6 層である防液堤の被害が 13 件と多く報告されている。故障や誤操作などのトラブルでは、その波及を閉じ込める形で独立な層という位置付けが IPL(Independent Protection Layer=独立防護層)の各層となっているが、地震や津波に対しては、各層が同時に被害にあうことを考慮する必要があることが理解できる。阪神大震災のときよりも、今回の設問は分類が細くなっているが、図 2.5 に示すように①と②、③と④とまとめて比較

してみると、被害の割合はあまり変化しておらず、この防液堤の被害が現れていることが異なる点としてとらえることができる。

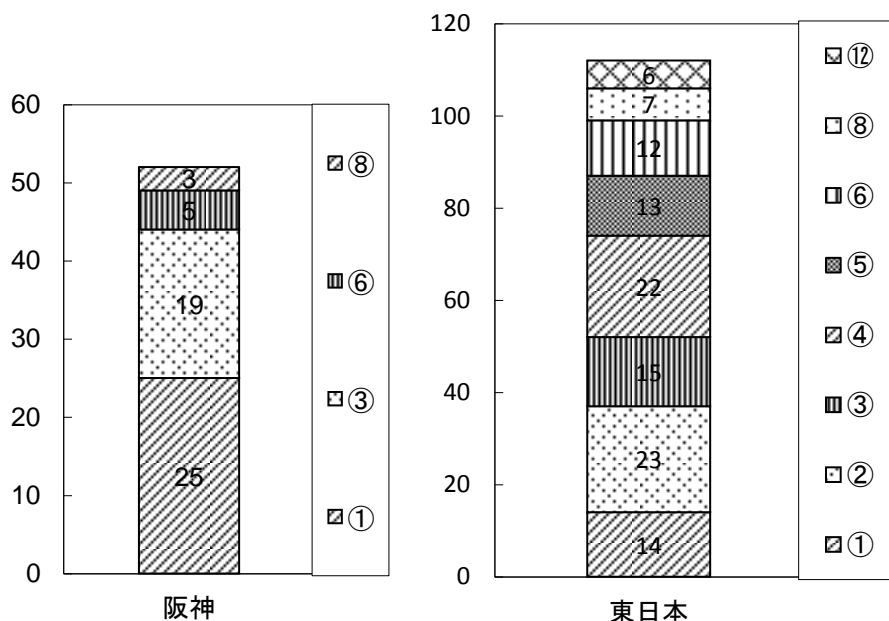


図 2.5 地震による被害内容の比較

表 2.3 独立防護層 (IPL)

独立防護層 (IPL)	
第一層	プロセス設計
第二層	基本プロセス制御システム
第三層	重要警報による運転員の介入
第四層	自動安全計装システム
第五層	物理的防護 (1) 安全弁・ラプチャーディスク
第六層	物理的防護 (2) 防液堤
第七層	プラント内緊急対応計画
第八層	地域防災計画

東日本大震災では、連動地震の長時間振動で液状化の被害が広い範囲で発生しており、防液堤の被害が発生していると考えられる。消防庁の報告¹⁾では、防油堤の地震による被害は、タンクの被災箇所 378 のうち 178 箇所が発生しており、そのうち 153 件がひび割れや亀裂となっている。防油堤の沈下による変形や傾斜も 26 件発生しており、地震に対しては、タンク損壊に対する多重防護として機能しない危険性が高いことがわかる。防液堤が、地震時においても、多重の安全確保策として機能するために、南海トラフ地震など、次の大地震への備えとして、防液堤の設置方法（基礎）の見直しが必要と考えられる。

2.2.2 耐震設計基準の変化

耐震設計の基準は、どちらのアンケートでも調査対象としている（阪神：設問 23,24, 東日本：設問 39,40,41）。図 2.6～2.8 に耐震設計の基準や指針の調査結果を示しているが、主要建物やストラクチャーに関しては、阪神大震災のときよりも、建築基準法の比率が下がり、消防などの各種法令の比率が高くなっている。また、自社基準という回答も増えている。電気計装設備に関しては、JEM（日本電機工業会）規格の割合が 15% 程度で各基準の比率も変わらないが、東日本での調査では、高圧ガスが調査結果に表れている。1997 年に緊急遮断弁などに対しての高圧ガス設備等耐震設計基準が改定されており、その改定が影響していると考えられる。

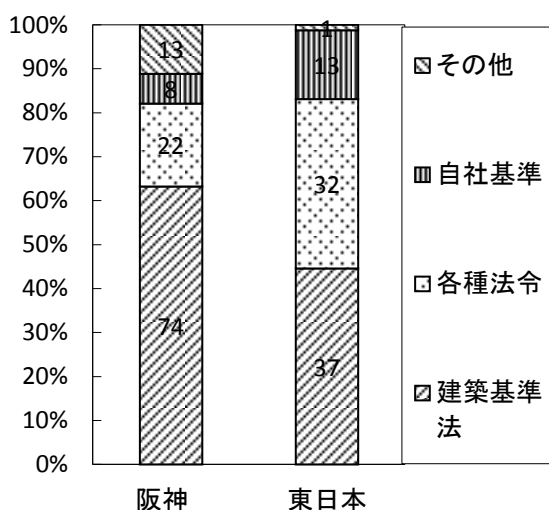


図 2.6 主要建物耐震設計基準

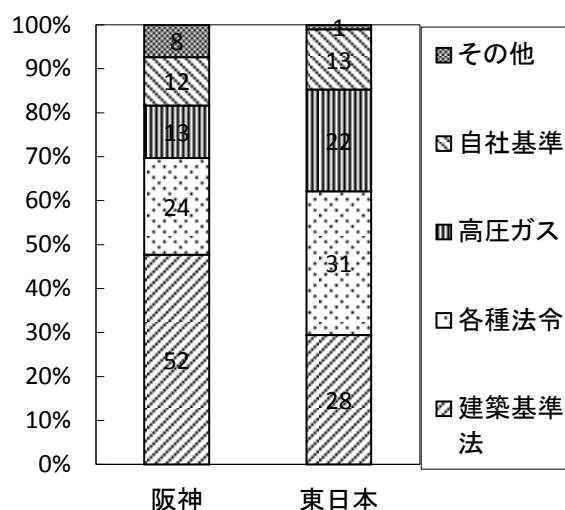


図 2.7 ストラクチャー耐震設計基準

1) 総務省消防庁 施設形態別の被害状況の分析及び課題の抽出

http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/h23/2312/231222_1houdou/02/03.pdf

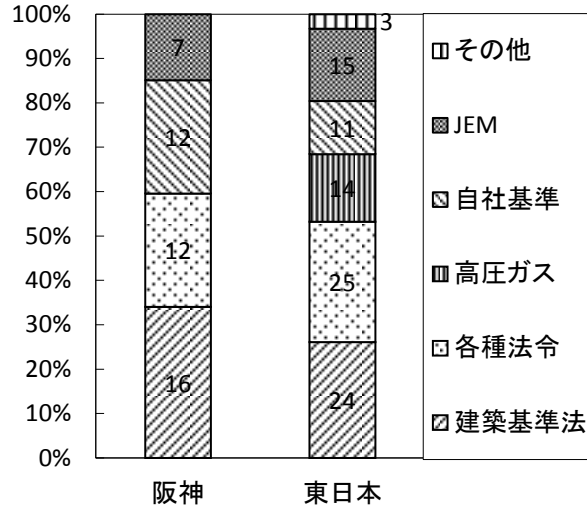


図 2.8 電気計装設備耐震設計基準

耐震設計基準値が、阪神大震災のころからどのように変化しているかを調べるために、阪神大震災のときの設問 23 の回答と今回の設問 39 の回答を比較する。阪神大震災のときは、主要設備の耐震設計強度と建設後の年数と現在の耐震強度という設問であった。阪神は設計以後の劣化が興味の対象であったが、劣化の情報としての回答ではなく、現在建設するとすればどのような値にするかという回答が混在していたのと、劣化の把握は難しいであろうとの認識のもと、今後、建設するとしたらという既設との差異を問う設問に変更し、耐震設計基準の設備ごとの差異に注目して調査した。

図 2.9 には主要設備に対する耐震設計基準値の阪神大震災時の調査と今回の回答の比較を示す（阪神：設問 23， 東日本：設問 39）。100 ガル以下の基準である例は、どちらも少なく、阪神大震災のときには、300 ガルより大きな回答は 5%程度であったが、

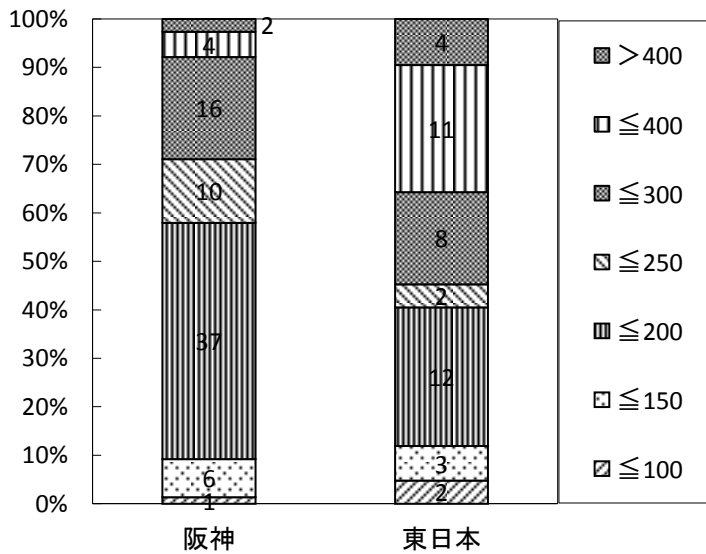
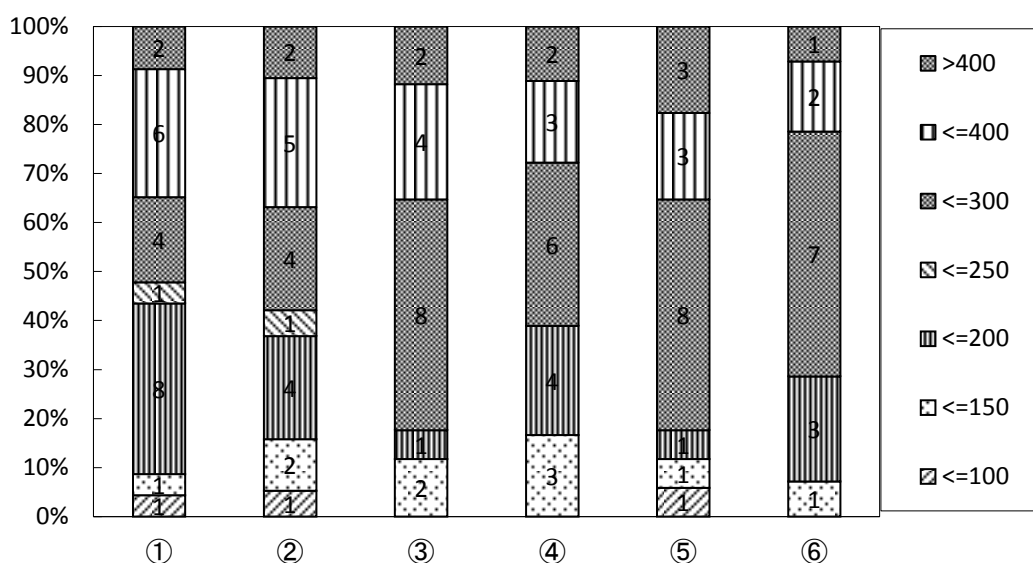


図 2.9 既設主要設備の耐震設計基準強度(ガル)

今回の調査では、40%近くにもなっており、阪神大震災後、耐震設計強度の見直しが進み、強度が高められていることが理解できる。

図 2.10 が設備ごとに、既設の耐震設計強度を比較したものである(東日本 設問 39)。緊急停止時にも安全確保のために稼働し続けてほしいユーティリティプラントでは、400 ガルを超える高い設定の割合が、他の設備よりも高くなっている。特に危険性の高いプラントでは 150 ガル以上の回答になっており、250 ガルを超える設定が大半であることがわかる。250 ガルを超える設定の割合は、危険性の高いプラントとユーティリティプラントが高くなっている。電気計装設備の耐震性も高い設定になっていることが理解できる。

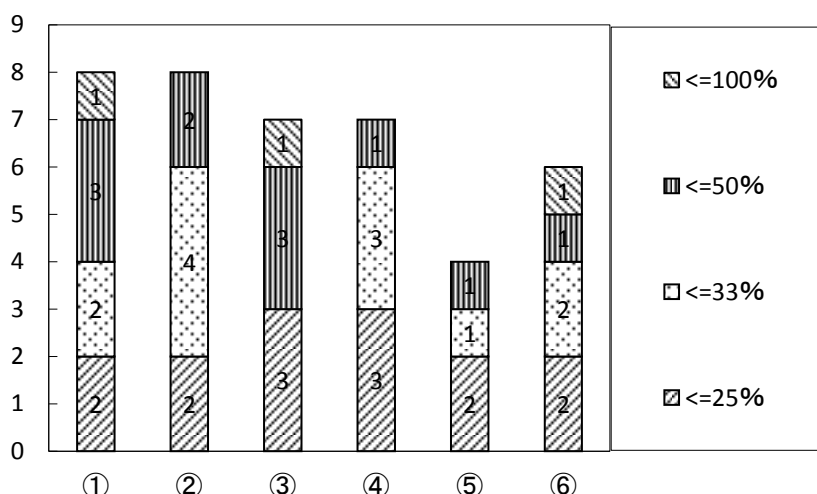


既設耐震基準(ガル)	<=100	<=150	<=200	<=250	<=300	<=400	>400	無回答
① 主要建物	1	1	8	1	4	6	2	17
② ストラクチャー	1	2	4	1	4	5	2	21
③ 危険設備	0	2	1	0	8	4	2	23
④ 一般設備	0	3	4	0	6	3	2	22
⑤ 用役プラント	1	1	1	0	8	3	3	23
⑥ 電気計装設備	0	1	3	0	7	2	1	26

図 2.10 既設設備の耐震設計強度 (ガル)

さらに、東日本大震災を経験したことによる見直しを調べるため、今後新設の場合の基準について質問した(設問 40)。この新設に対する値と既設に対する値を比較したのが、図 2.11 である。既設の耐震基準よりも新設の耐震基準を高くすると回答したものを、その改善率ごとに図示し、表には、改善幅ごとの回答数を示している。見直しをするという回答数が最も少ないのは用役プラントで、主要プラントやストラクチャーが最も多い。また、危険性の高いプラントや主要設備、電気設備では、増加幅が 200 ガルを超える大幅な見直しを行っている例があることが理解できる。

$$\text{改善率} = ((\text{新設耐震基準} / \text{既設耐震基準}) - 1) \times 100 \quad (\%)$$



改善幅(ガル)	0	<=50	<=100	<=150	<=200	>200	無回答
① 主要建物	14	0	4	2	1	1	18
② ストラクチャー	10	1	5	1	1	0	22
③ 危険設備	10	1	2	0	1	3	23
④ 一般設備	10	1	5	0	1	0	23
⑤ 用役プラント	13	1	2	0	1	0	23
⑥ 電気計装設備	8	0	4	0	1	1	26

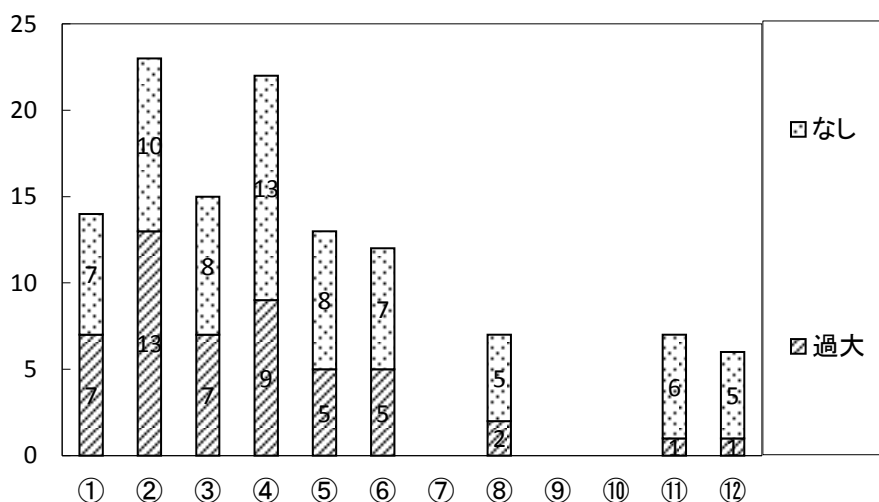
図 2.11 耐震設計強度の見直し

装置が破壊されてしまうとプラント・オペレータの対応は、被害の拡大防止に限られ、現場の危険を除去することは難しい。今回、コスモ石油千葉製油所のガスタンクの水張り検査中の倒壊事故以外、地震動による大きな破損事故はなかったが、各事業所において、装置が破壊する危険性が考慮され、耐震基準の見直しが進められていることが理解できる。

2.2.3 地震による被害の変化

図 2.9 に示されるように、阪神大震災以降に耐震設計強度の見直しが進んだことにより、被害はどのように変化したかを調べてみる。今回のアンケートでの地震による被害に関する設問 9 の回答を図 2.12 に示す。耐震基準を回答いただいた事業所に関しては、観測された震度 (ガル) と耐震設計強度基準を比較した結果を示している。回答無としているのは耐震設計強度基準値の回答がなかった事業所からの被害回答である。

機器の破損や漏洩の項目への回答が多く存在する。耐震設計強度基準を超える地震動を経験した事業所からの回答は 15 件であったが、特に被害がなかったというのは、千葉の事業所からの 1 件だけで、それ以外のすべては、少なくとも建物のひび割れや、ストラクチャーの傾きが発生しており、それ以外にも何らかの被害が発生している。



		過大	なし	計	比率
①	建物、ストラクチャーの損壊	7	7	14	35%
②	建物のひび割れ、ストラクチャーの傾きなど	13	10	23	58%
③	機器の亀裂、破損、内容物の漏洩	7	8	15	38%
④	配管の亀裂、破損、内容物の漏洩	9	13	22	55%
⑤	防液堤の亀裂、破損	5	8	13	33%
⑥	道路や敷地内の液状化	5	7	12	30%
⑦	火災の発生	0	0	0	0%
⑧	計器、計装、コンピューター、制御系のトラブルや保存データ遺失	2	5	7	18%
⑨	人的被害（負傷）	0	0	0	0%
⑩	人的被害（死亡）	0	0	0	0%
⑪	特に設備的、人的な被害はなかった。	1	6	7	18%
⑫	その他	1	5	6	15%

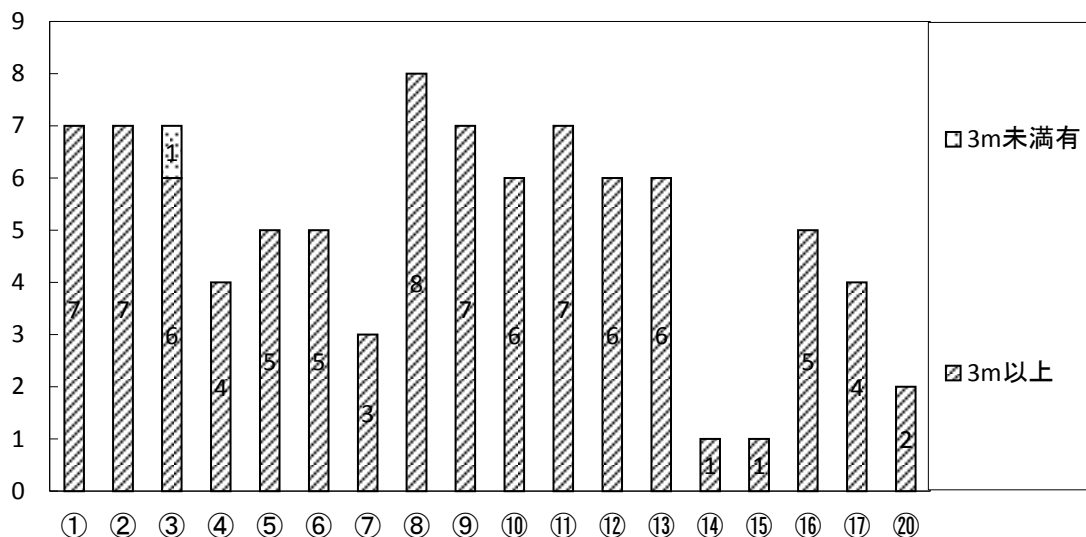
図 2.12 東日本大震災での地震による被害

ただ、配管等が変形した事例は数多いが、それが深刻な漏洩事故になったという報告はほとんどない。設問では損壊と漏洩を区別していなかったため、アンケート調査からは、漏洩の発生を特定できない。ただ、今回の地震では、耐震設計強度基準値を超える地震動が発生しており、漏洩の有無に関らず、損壊が発生しているので、図 2.11 に示すような耐震基準の見直しが行われていると考えられる。

今回の地震動では、装置の破壊につながる周波数成分が弱かったという解析があり、損壊の被害が少ないというアンケート調査になるのではと予想したのだが、意外に被害が多く報告されているし、耐震設計強度基準も見直されており、「化学プラントは安全だ」と油断しているのではと危惧する必要はなかったのかもしれない。ただ、新設に対して耐震基準の見直しをしたとしても、既設のプラントの耐震性を向上させる工事をすることにはならないので、既設のプラントに対しては、耐震性が低いことを意識した防災・減災対策が必要であることがわかる。

2.3 津波による被害と対策

東日本大震災の大きな特色は大規模な津波である。4階の病室が流され、大型の船がビルの上に乗るといった津波は、プラントでも貯蔵タンクの流出や自動車が流されて装置に衝突するなどの被害を発生させた。



津波による被害		件数	大内比率
①	建物、ストラクチャーの損壊	7	54%
②	建物への浸水	7	54%
③	機器の亀裂、破損、内容物の漏洩	6	46%
④	タンク等の流失	4	31%
⑤	タンク等の基礎の浮き上がり	5	38%
⑥	プロセス配管の亀裂、破損、内容物の漏洩	5	38%
⑦	DCSの冠水、破損	3	23%
⑧	計装盤、分電盤類の冠水、破損	8	62%
⑨	現場計装設備の冠水、破損	7	54%
⑩	計装空気配管などの破損	6	46%
⑪	電気ケーブルや計装ケーブルの浸水	7	54%
⑫	電気室の設備の破損	6	46%
⑬	プラント内設置の電動機等の破損	6	46%
⑭	人的被害（負傷）	1	8%
⑮	人的被害（死亡）	1	8%
⑯	技術図書、図面等の冠水、流失	5	38%
⑰	バックアップメディアの冠水、流失	4	31%
⑳	その他	2	15%

図 2.13 津波による被害

設問 10 に対する津波観測高さが 3m 以上の回答が 13 件、3m 未満 7 件であった。③の機器の破損が 1 件、津波観測高さが 3m 以下のところで発生しているが、ほとんどは 3m 以上の地域である。宮城・多賀城の JX では大被害が発生したことがよく知られているが、鹿島などでも津波被害が発生しており、被害が発生したところでは様々な被害が同時に発生していることがわかる。津波観測高が 3m 以上であった回答のう

ち、被害を報告しているものの比率も、図 2.13 中の表の右端(大内比率)に示している。東日本大震災では、巨大な津波の破壊力が印象的であるが、浸水、冠水による計装の被害が多く発生しており、設備の損壊以外に、浸水対策も重要課題であることがわかる。

浸水対策としては、計器の高位置設置、コントロール・ルームの水密化、ケーブルの計器室への取り込み口の高位置設置などが考えられる。

津波の破壊力に耐える装置設計というのは困難かもしれないが、被害の拡大を防ぐ孤立化を地震後に確実にできるような自動化や、装置に津波に流された自動車がぶつかる被害を防ぐために、駐車場の配置やタンクローリーの受入れ場所の見直しなどが検討可能である。構内に駐車するタンクローリーを固定して浮遊と激突を防ぐという対策を検討している企業も存在する。

2.4 緊急停止体制

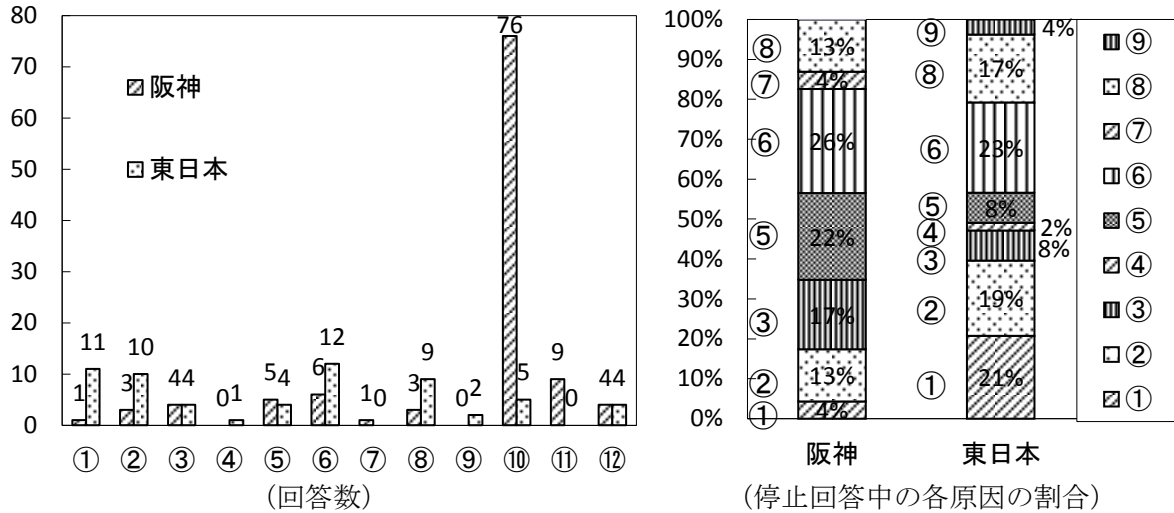
阪神大震災のアンケートでは地震計連動で停止した例が少なく、地震計連動緊急停止システムの普及の提案を行った。地震による停止について、阪神大震災のときのアンケートと今回のアンケートを比較して、15 年間での緊急停止システムに対する取り組みを探ることにする。

2.4.1 プラント停止原因の変化

プラント停止についての回答の比較(阪神の設問 2 と東日本の設問 7)を図 2.14 に示す。右のグラフは停止した事業所での原因の割合を示すが、地震計による自動停止の割合が 4%から 21%へと大きく増えており、停止全体での自動停止の割合も 34%から 50%へと増加している。これは、阪神大震災での教訓が活かされた結果とも考えられるが、阪神大震災の時点で、東日本では地震計連動のシステムが関西よりも普及していたので、アンケートの数値で単純に教訓が活かされたと判断するのは難しい。

2.4.2 用役プラントの停止とその影響

阪神大震災のときには調査しなかったのだが、プラント停止については、用役プラントに注目した設問 8 を用意した。福島第一原発では冷却を維持できなかったために大事故になったこともあり、ユーティリティも同時に停止してしまうことは問題であると考えたためである。図 2.15 は、設問 8 への回答を、プラントの停止状態について整理したものである。プラントは自動あるいは手動で停止したが、用役施設は停止しなかったという回答は、電力と蒸気では 12 件、計装空気では 12 件、窒素では 23 件存在した。ユーティリティは、プラント停止後にも二次処理にも必要であり停止させないという方針の事業所がこれだけ存在したことがわかる。しかし、電力が止まってどうしようもなかったとの回答もあり、ユーティリティを停止させるつもりではなかったが、停止してしまったという事業所もこれ以外に存在する。用役が停止してもプラントの運転を継続できた例はひとつもなく、用役がバックアップできた場合もプラントは自動あるいは手動で停止している。電力供給が停止してしまうと、プラント停止は不可避で、せいぜい停止できるまでの電力のバックアップが用意されている状態であると考えられる。



①	震度計により自動的に主要プラントが停止した。
②	停電をトリガーとして停止シーケンスが起動し、自動的に停止した。
③	主要機器(コプレッサなど)の異常停止により主要プラントが停止した。
④	計器の誤作動により、自動的にプラント全体が停止した。
⑤	一部機器が自動停止(または計器の誤作動)したので、手動停止させた。
⑥	自動停止ではなかったが、地震対応マニュアルに従って手動停止させた。
⑦	自動停止が作動する以下の震度だったが、念のため手動停止させた。
⑧	外部からのユーティリティ(電力等)が停止したので、手動停止させた。
⑨	原料の受入れや製品の払出しができなくなり、手動で運転を停止させた。
⑩	停止しなかった。運転はそのまま続した。
⑪	もともとその時刻にはプラントが稼働していなかった。
⑫	その他

図 2.14 プラント停止に関する回答の比較

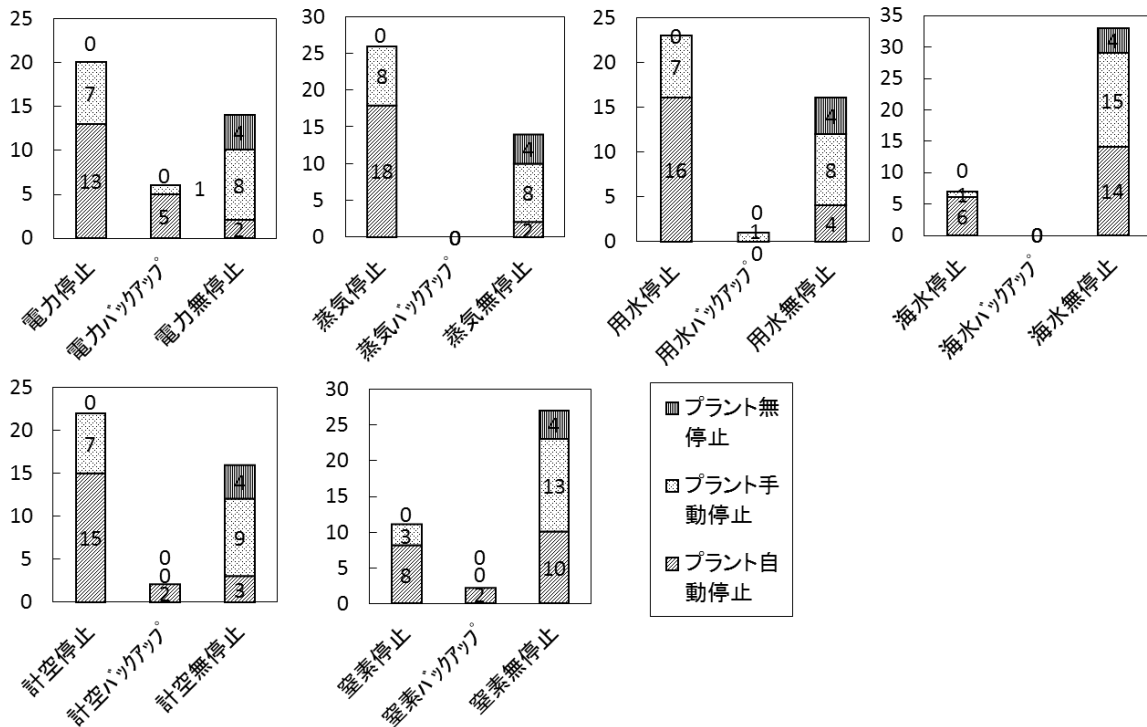
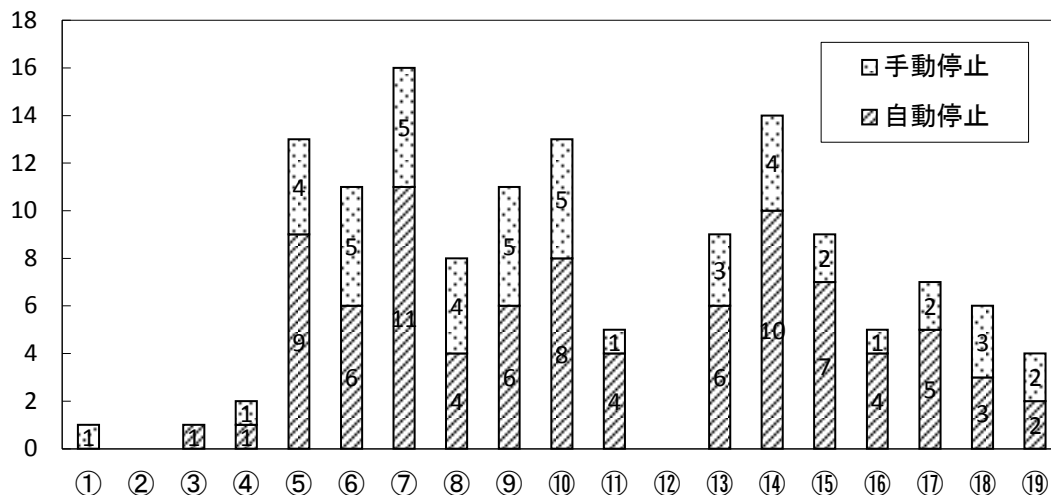


図 2.15 プラントの停止状態と用役の運転状況

設問 14 で、停止後の二次処置への支障をたずねた結果を図 2.16 に示すが、電力や計装空気など、用役の停止による支障が数多く報告されている。プラントの停止が自動にしる手動にしる、ユーティリティが停止してしまつて支障が発生しており、この耐震性と停止基準の向上により、ユーティリティは地震後も供給し続けられる体制を築くことが望まれる。



- ① 地震で一部のセンサが破損し、必要な情報が得られなかった。
- ② 地震で一部操作端が破損し、操作できなかった。
- ③ 地震で計装空気配管が破損し、操作できなかった。
- ④ 地震で DCS や計装盤が破損し、操作できなかった。
- ⑤ 計装電源が失われ、操作ができなかった。
- ⑥ 計装空気がなくなり、弁が操作できなくなった。
- ⑦ 停電や発電設備停止のため、電力が確保できなくなった。
- ⑧ 停電や発電設備停止のため、運転継続に必要な攪拌機を作動できなかった。
- ⑨ 冷却水停止になり、冷却の継続ができなくなった。
- ⑩ スチームが止まり、継続必要な加熱できなくなった。
- ⑪ 窒素供給が止まり、安全の確保ができなくなった。
- ⑫ 機器の故障で、無線ページングが使用できなくなった。
- ⑬ 停電で場内の電話連絡等に支障がでた。
- ⑭ 停電でプラント内の照明がなく作業に支障があった。
- ⑮ プラントの状況を把握するのに時間が掛かった。
- ⑯ 関連する他プラントや他工場の状況を把握するのに時間が掛かった。
- ⑰ 交代要員や応援者の出勤ができず、作業負荷が高かった。
- ⑱ 特に支障は生じなかった。
- ⑲ その他

図 2.16 停止後の二次処置に対して生じた支障

2.4.3 プラント停止基準

阪神大震災のときにも、あるべきプラント停止基準値を調査したが(阪神の設問 6)、そのときには、プラントの種別を区別していなかった。今回は、プラントの種類別に、あるべき停止基準をたずねている(東日本の設問 25)。停止基準値を阪神大震災のときと今回で比較してみたのが、図 2.17 と表 2.4 である。

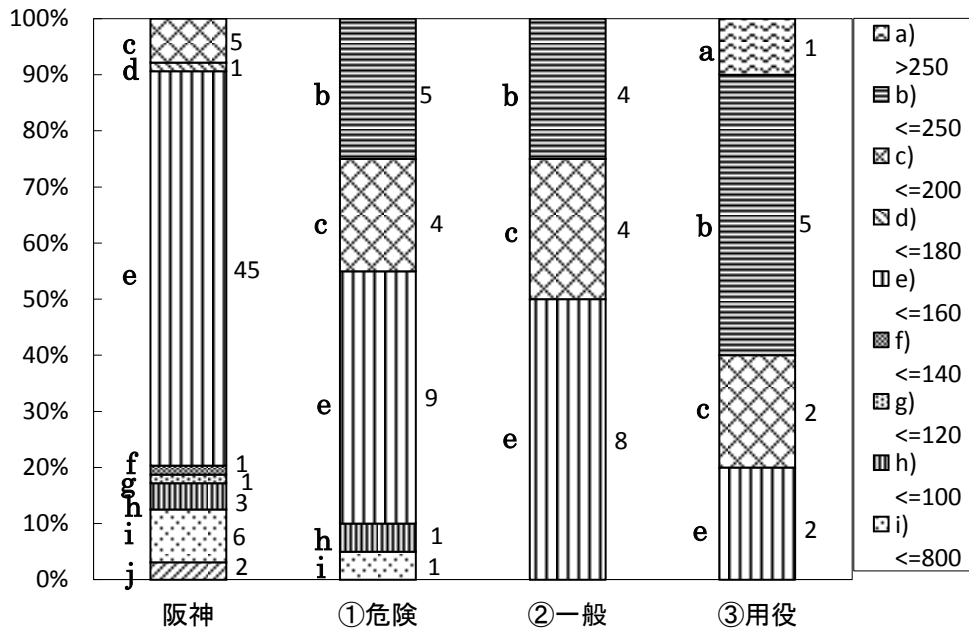


図 2.17 プラント停止基準地震動加速度 (ガル)

表 2.4 プラント停止基準

	~ 60	61 ~ 80	81~ 100	101~ 120	121~ 140	141~ 160	161~ 180	181~ 200	201~ 250	250~	震度 5 弱	震度 5 強	震度 6
阪神	2	6	3	1	1	45	1	5		7		1	
①危険	0	1	1	0	0	9	0	4	5	0	4	3	0
②一般	0	0	0	0	0	8	0	4	4	0	2	4	0
③用役	0	0	0	0	0	2	0	2	5	1	2	3	0

その他の回答には、震度 4 以上の放送で、全設備停止
今回の回答の数値は 150, 200, 250 がほとんどであった

阪神大震災のときも今回の調査でも、150 ガルを停止基準としている例が最も多い。図 2.17 の 4 本の棒グラフを比較すると、停止基準値の分布は、右に行くにつれて高い数値の方に移行していることが理解できる。

停止基準のガルの数値が大きいほど装置が破壊される危険性が高いとともに、震度計の誤検知により不必要に停止する可能性が低くなる。逆に、停止すべきだったのに停止しなかったという危険性は、停止基準のガルの数値が小さいほど低いと考えられる。そのため、危険性が高いほど小さな停止基準値となり、運転を継続したいユーティリティプラントでは、大きな数値になっている傾向が存在する。

阪神大震災のときには、用役設備は 200~250 ガル、高圧 PE,PO などは 40 ガル、高圧ガス設備に対しては 80 ガルという基準があるという回答があった。

今回の調査では、危険性の高いプラントで 80 ガルという低い値を設定している回答

が1例あっただけで、高い停止基準値が設定されている。耐震性を向上させ、漏洩等の危険を避けることができれば、弱い地震動でも停止するという安全策をとる必要はないとの判断が現れているのではないかと考えられる。

用役設備は安全性維持にも必要であるので、他のプラントが停止したのちにも運転を継続できるように、耐震性を上げるとともに停止基準を上げるという対策が進んでいることが、図 2.17 の棒グラフを比較することより推察できる。

2.4.4 停止システムのあるべき姿の意識の変化

さらに、今後のプラントの停止のあるべき姿について調査した結果（設問 28）について考察する。阪神大震災の時には現在の状態は調査せず、あるべき姿だけ調査したが（問 12）、今回は、現在の自動停止システムの導入状況と、今後あるべき姿と両方調査した。

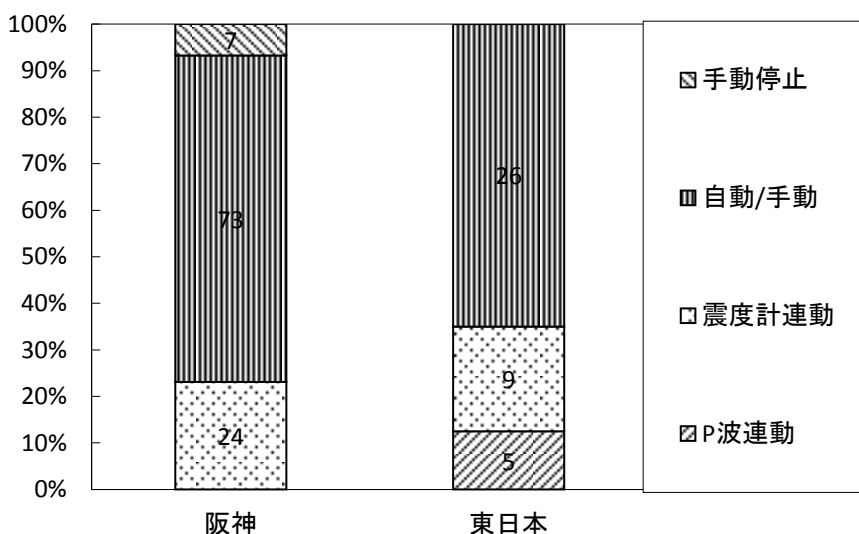


図 2.18 今後のプラント停止のあるべき姿

あるべき姿を、阪神大震災のときの調査と今回の調査で比較したのが、図 2.18 である。図 2.19 には、設問 24 の回答である現在の停止方法を示している。

阪神大震災のときには、④「自動停止は誤作動などがあるので、すべてのプラントを人の判断で停止すべきである」という回答があったが、今回の調査では無かった。③「プラントの種類によって、自動停止するプラントと、人（オペレータなど）に判断で停止するプラントに区別すべきである」という回答が大部分を占めたが、今回の調査では、最多ではあるものの割合は下がった。手動を選択する必要性として、地震計の誤作動などへの不安ではなく、自動停止しなくても、安全を確保できるプラントも存在するという見極めが進んでいると感じる。

図 2.19 に、回答事業所の運転形態の情報を示しているが、手動停止を選択する回答にも連続運転のプラントが3件含まれていたが、これらは、自動停止システムを導入しない理由（設問 26）として複数の回答を選択していたが、いずれも地震計の信頼性への疑問が含まれていた。今回のアンケート調査は回答数が全部で40であるので、統計

的な議論は難しいが、時間的に運転モードが変化するバッチプラントの方が、停止させ方にバリエーションがありうるので、手動停止の割合が高くなると予想していたが、それほど明らかな傾向は、図 2.19 にはみられない。

②「人の判断を介さず、すべてのプラントを震度計との連動で停止させるべきである」は、阪神大震災の時も今回も 20%程度で、同程度であるが、阪神大震災のときにはなかった P 波検知によるシステムによる自動停止を加えると、すべてのプラントを自動停止すべきという回答は、10%以上増加したことになる。

図 2.19 に現状の停止方法を示しているが、すべてのプラントを自動で停止させるという回答は合計 28%であるので、阪神大震災時のあるべき姿の回答よりは増加している。今回の自動停止させるというあるべき姿の回答は、現状より少し増加しているが、まだ全体の 1/3 程度にとどまっている。

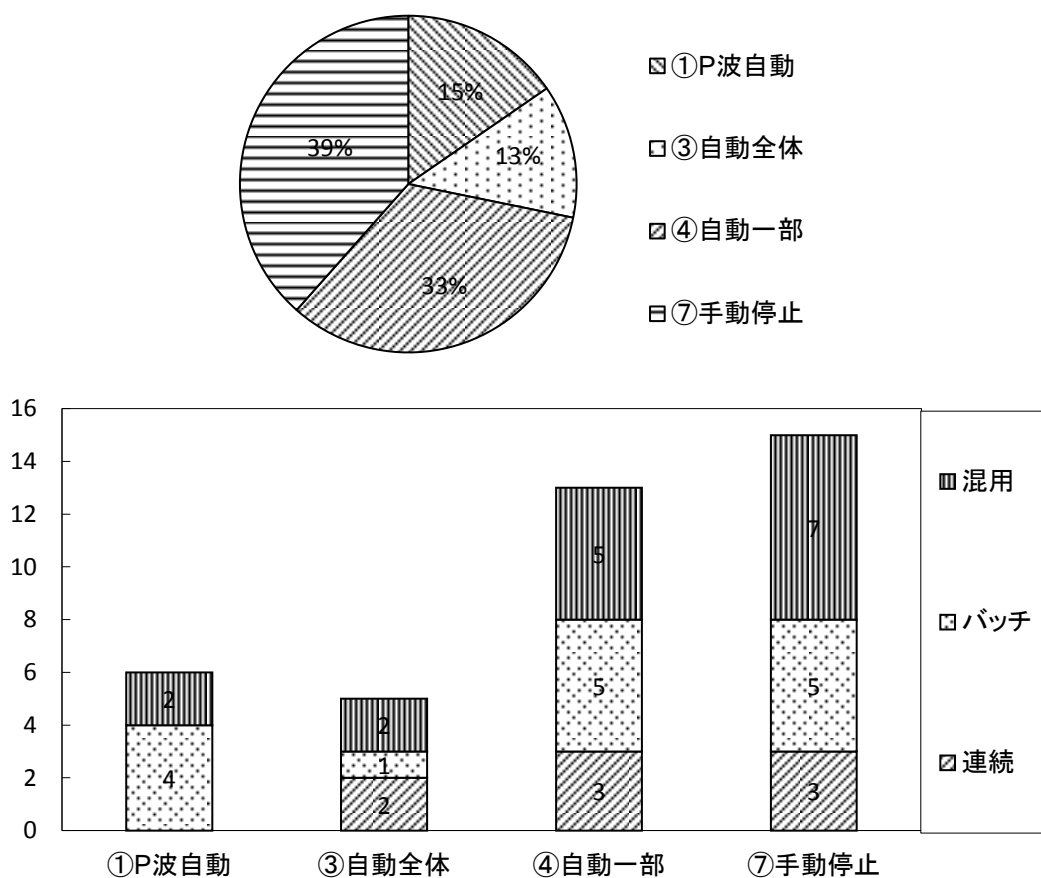


図 2.19 現状の停止システム

東日本大震災では、大津波の圧倒的な破壊力を目の当たりにし、オペレータは運転操作よりも退避して命を守ることが必要であるという認識が広がっているため、アンケート作成時には、もっと自動停止が選択されると考えていたが、すべてを自動停止にする必要はないと考えている事業所の割合は依然高かった。

①「安全を最優先させ、P 波検知による緊急地震速報により停止動作を開始すべきである」を選択した回答は 5 件存在するが、すべて同じ企業であった。図 2.19 に示され

ている現在 P 波システムを利用していると回答した 6 事業所もやはり、その企業であった。あるべき姿として P 波システムを選択しなかった 1 事業所は、あるべき姿としては、③の自動と手動の区別を回答している。P 波に関しては、1 社を除いて、ほとんどすべての企業が、あるべき姿として認識していないのが、現状であることはわかった。

2.4.5 自動停止システムを導入しない理由の変化

阪神大震災の時には、プラント停止に連動させる地震計の信頼性について調査したが、今回は、地震計をプラント停止に使用していない場合のその理由（設問 26）と、P 波検知をプラント停止に利用していない理由（設問 27）について調べた。その比較が表 2.5 である。

表 2.5 地震計連動システムを利用しない理由に関する調査結果

阪神問 5 地震計の信頼性	回答数	(%)
① 信頼性は十分	34	37
② 信頼性に疑問、インターロック連動なし	19	20
③ 信頼性に疑問、設置しない	1	1
④ 信頼性は分からない	35	38
⑤ その他	4	4

設問 26 地震計を利用しない理由	回答数	(%)
① 信頼性に疑問	10	19
② 地震後の操作で十分	15	29
③ 危険性が低く不要	8	15
④ 他の自動停止システムで安全	5	10
⑤ 継続したい	11	21
⑥ その他	3	6

設問 27 P 波を利用しない理由	回答数	(%)
① 信頼性に疑問	18	42
② 地震計との時間差の有用性？	11	26
③ コストが高い	6	14
④ その他	8	19

阪神の時には地震計の信頼性についての質問になっており、今回調査の「地震計との連動システムを利用しない理由」という形式の質問ではないが、21%の回答が、信頼性に疑問があるからプラント停止に用いないと回答している。今回の調査では、地震計連動や P 波連動を利用していない場合、その理由をお聞かせくださいという質問なので、分母が利用していない人になり、割合の数値をそのまま比較できるわけではないが、今回の調査でも、地震計の信頼性に疑問と答えている割合が 19%となり、阪神大震災のときとほとんど変わらない割合の人が、15 年経過した今も、信頼性に疑問を感じていることがわかった。

アンケートを整理する段階になり、プラント停止に連動させる地震計、感震計にはバリエーションがあり、単に地震計の信頼性と質問したのは適切でなかったのかもしれ

ないと感じた。そのため、この報告書では、地震計、感震計のバリエーションの説明と最新の連動システムの解説を一つの節として用意した。

現在、プラント停止に地震計を利用していないのは、信頼性への疑問よりも、利用しなくても安全は確保できると判断した結果であることが設問 26 に対する回答からわかる。地震波がおさまった後のオペレータによる手動操作で十分との回答が 3 割ほどになっている。地震による装置の損壊の可能性が否定できないのであれば、手動でも十分という判断には疑問が残る。オペレータによる手動操作の必然性がなければ、地震計で自動停止させてもよいと考えられる。

地震計の測定震度により、装置の被害がないことを確認できれば、すぐにでもホットスタートアップが可能な停止モードと反応停止剤の投入などホットスタートアップが不可能な停止モードを使い分けているという事業所が存在したが、この停止モードの使い分けも、自動停止の導入を推進する有効な方法であると考えられる。

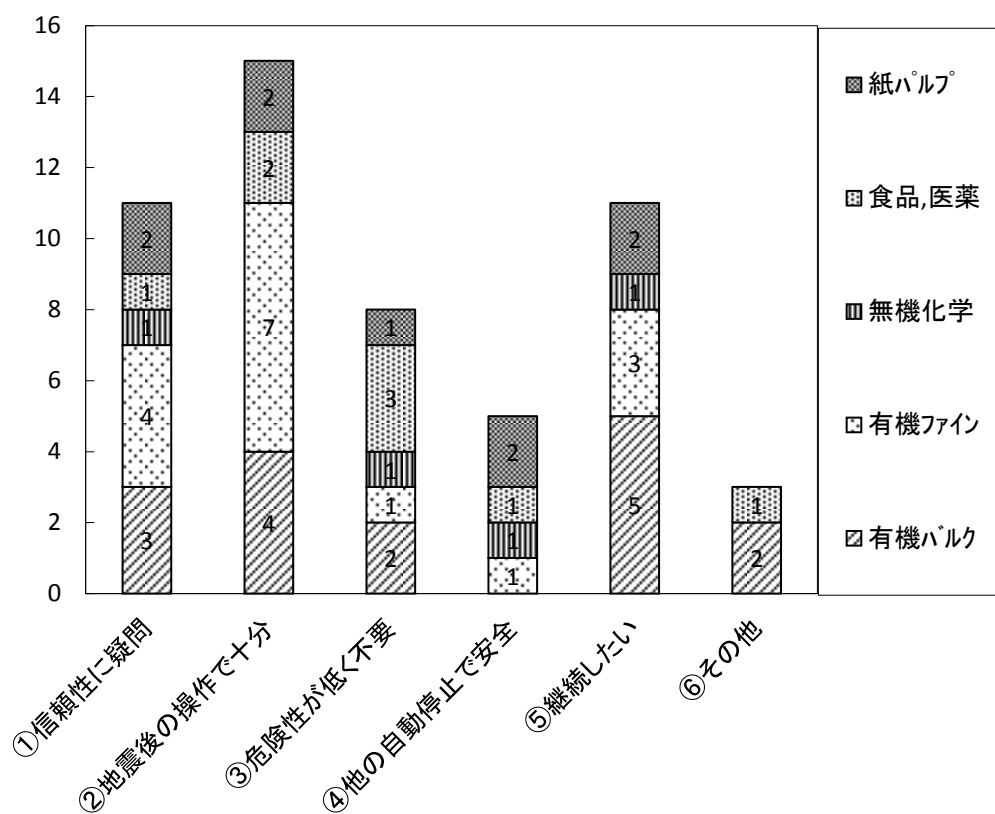


図 2.20 地震計連動を利用しない理由の業界別整理

図 2.20 に業種別、図 2.21 に運転形態別の整理結果を示す。図 2.20 では、石油・ガス業種の棒が存在しないが、これは、石油・ガスでは、すべて地震計連動停止システムを導入しているため、地震計連動を利用していない理由を問う設問 26 への回答はないためである。

②地震後の手動操作で十分と考えているのは、有機ファインのバッチプラントが多いことが読み取れる。バッチプラントでは、様々な運転モードがありうるため、それぞ

れで停止する方法を切り替えることも考えられ、手動停止を選択している可能性もある。手動停止の必然性を質問すると、その区別ができたかもしれないが、今回のアンケート調査では、そこまでの解析はできない。自動停止を導入するには、状況認識と状況による操作のバリエーションの用意が必要で、手動を選択しているのであれば、地震計と連動させないという対応ではなく、きめ細やかな自動停止を可能にする環境と体制を整備することも検討すべきかもしれない。

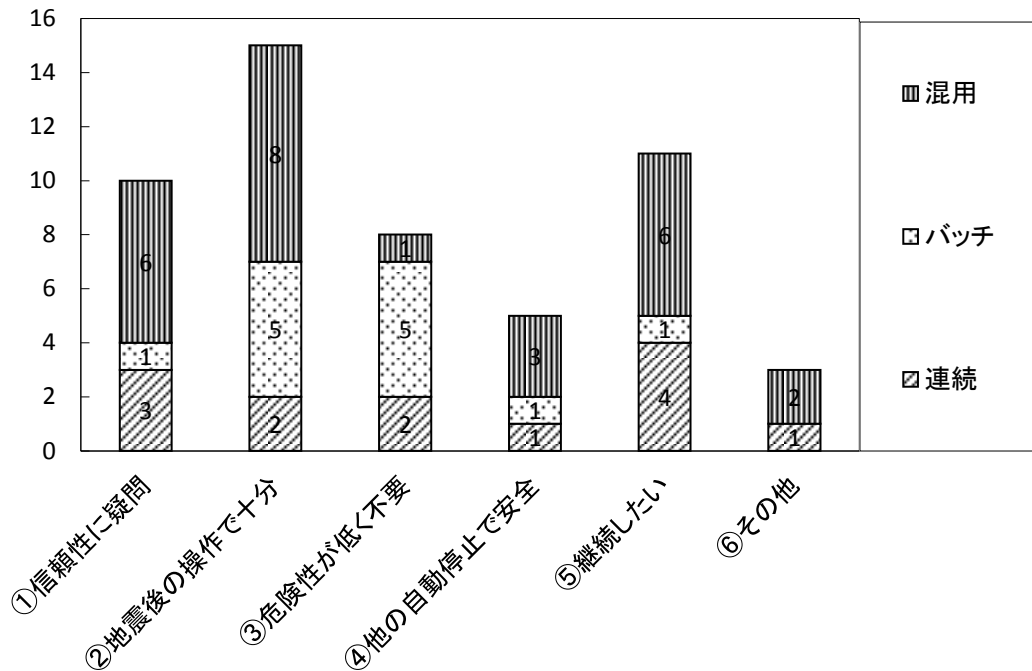


図 2.21 地震計連動を利用しない理由の操業形態別整理

2.4.6 P波検知による自動停止システムの導入

P波による緊急地震速報での停止システムは、新幹線などで実績も上げており、プラントでも、大きな地震動を受ける前に、退避操作することで安全性の向上が期待できると思うのだが、P波検知システムを導入しない理由を聞いた設問 27 に対する回答では、42%もの回答が、P波検知システムの信頼性への疑問を示している。

現在P波連動停止システムを利用していると回答した事業所に、アンケート調査後、聞き取りにうかがった。気象庁からの震源と強度の通報を受けて、各事業所への到達時間と震度を推算し、推定震度により、運転継続、運転中断(すぐに運転が再開できるモード)あるいは緊急停止(完全な運転停止モード)を選択するシステムになっている。その震度推算値には震度1~2の誤差があることも想定されるが、安全を優先して導入しているとのことであった。運転中断はP波による予報値もS波による測定値も、ともに震度5弱以上をしきい値にしているが、緊急停止についてはP波では震度6弱、S波では震度5強と停止基準に差をつけている。その企業では東日本大震災およびその後の余震で運転中断が発生したが、緊急停止は発生しなかったそうである。特に、震災後、P波の観測網が被害に遭い、余震に対するP波検知の誤報が頻発し、その影響で数回、

運転中断が引き起こされたそうである。しかし、実際に大きな地震が発生した際の安全確保を優先することにして、運転中断による被害が大きくなかったことと誤報の件数が減少傾向にあった面もあり、そのシステムの利用は継続したそうである。

事業所に P 波の検知機を設置し、気象庁の速報と併用することにより S 波到来の信頼性を向上させるという取り組みが、宮城沖電気から報告²⁾されているなど、信頼性向上への取り組みは今後も検討されるが、地震動の到来以前に対応できることで、安全性を向上させることができる対象は、新幹線に限らず、危険物を扱うプラントにおいても多く存在すると考えられる。たとえば、今回、被害が多く報告されているロードセルなどは、S 波の到来前にロックできれば、破損が回避できると期待できるし、危険物の注入操作などの安全対策にも有効であると考えられる。

P 波検知による時間的余裕の短さは、人間が退避することぐらいにしか生かせないという回答も存在したが、さらなる可能性は存在するのではないかと考えられる。

停止システムの導入の選択には、うまく稼働した時のメリット、間違えて稼働した、あるいは、稼働しなかった時のデメリット、稼働することの信頼性が関係する。

- ① 直前に停止操作する
- ② 地震を検知して停止操作する
- ③ 地震がおさまってから停止操作する
- ④ 地震後も停止操作をしない

上記の 4 つの違いによる装置の破損、漏洩や爆発などの危険性の変化を整理する必要がある。容器や配管等の静機器の場合、あらかじめ内部を空にするとか、圧力を減らすとかの操作が、P 波検知から S 波到来までの短い時間で効果を得られるかが問題になるであろうし、回転機器などの動機器の場合には、機器の損壊あるいは、内容物の漏洩を回避できるかが問題になる。

地震計が信用できるならどうせ止めることになるのだから自動で止めようという判断と、地震発生後でも停止操作はできて被害が変わらないのなら、地震計の信頼性に関係なく地震が収まってから手動で止めればよいという判断が、回答には両存するように考えられる。

地震発生後でも、停止操作は確実にを行うことができ、事前に止めようが事後に止めようが被害は変わらないというのは、さまざまな条件が成立したうえでの仮定であり、東日本大震災のように、津波に対する避難が必要だとか、地震や津波で装置や計装が被害にあうことも考えられるので、安全性を向上する方向への検討が進められることが期待される。

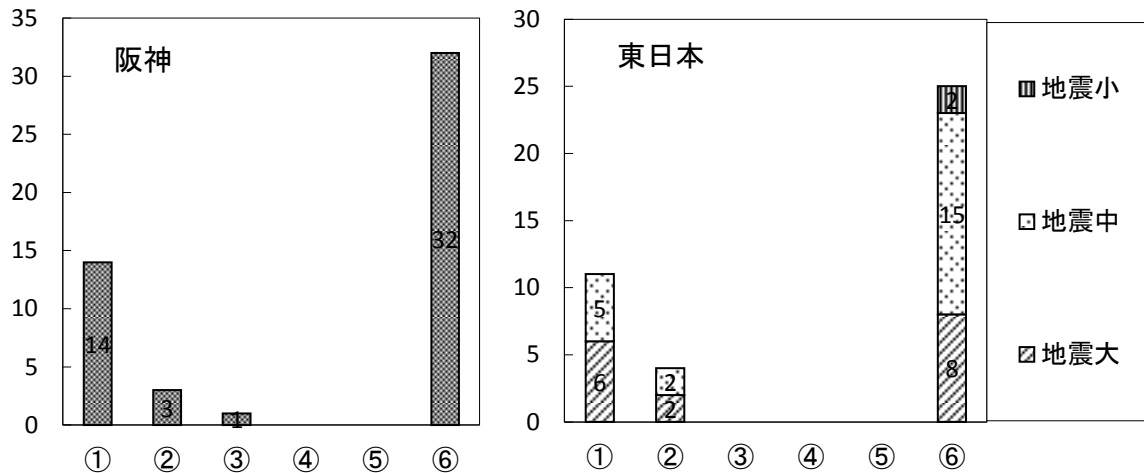
P 波検知による緊急地震速報に関しては、システム自体の信頼性の向上も求められるが、導入コストは決して高価なものではなく、S 波到来までの時間を利用する検討も含めた停止システムが進むことを期待する。

2) 緊急地震速報を応用した防災システムの開発と実用化：OKI テクニカルレビュー, pp10-13, Vol.74, No.1(2007 年 1 月)

2.5 オペレータの行動と備え

2.5.1 地震時のオペレータの行動

地震計連動でなく、オペレータによる手動停止で十分であると判断されている事業所が少なくないことがわかったが、オペレータの行動についての回答を阪神大震災時と比較してみる。



- ① 地震直後はほとんど何もできなかった（何が起きたかわからなかった）。
- ② プラント停止にかかりきり、緊急連絡が後手にまわった。
- ③ 緊急連絡に手間取り、プラント停止や2次作業に手が回らなかった。
- ④ プラントの状態について、結果的にかなり誤った判断をした。
- ⑤ 作業の優先順位について、結果的にかなり誤った判断をした。
- ⑥ 特に問題なく、マニュアル通りに落ち着いてアクションが取れた。

図 2.22 緊急時のオペレータの行動

震度 5 弱以上（地震中）では、①ほとんど何もできなかったという回答が現れる。震度 5 弱では、3/4 の回答が⑥落ち着いて対応できたとなり、震度 5 強以上でも、何もできなかったという回答数を上回っている。②のプラント停止にかかりきり、緊急連絡が後手に回ったという回答は、東日本大震災でも発生しているが、自動停止した事業所でも 3 例と、自動停止しても、オペレータは対応に忙しかったことがうかがわれる。しかし、⑥特に問題なく、マニュアル通りに行えたという回答が最も多く、震度 5 強のところでも、半数は落ち着いて対応できたとしている。

阪神大震災の時に誤判断の回答はなかったが、東日本大震災でも、誤判断の回答はない。福島第一原発では、圧力容器内の水位に関する誤判断などが発生したようだが、アンケート調査の対象となったプラントでは、誤判断になる状況は発生しなかったと考えられる。

緊急時のオペレータの行動として、特に地震発生中、または発生直後の DCS 監視行動について、設問 12 を設けている。その結果を体験した地震の大きさにより整理したのが、図 2.23 である。

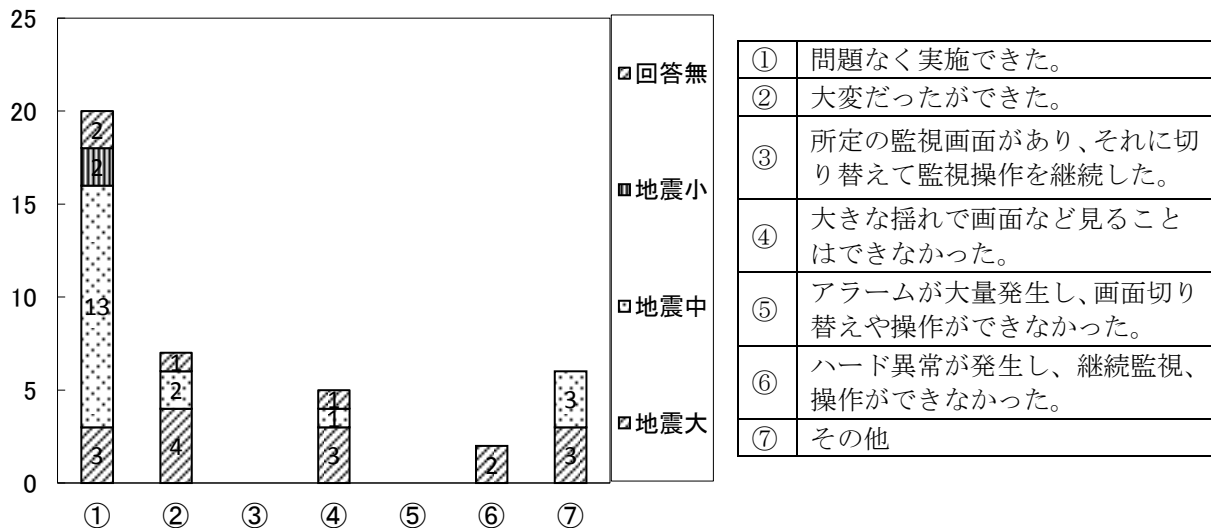


図 2.23 地震発生中の DCS 監視行動

地震では、一度に多くの装置の液位が揺れるし、アラームが大量に発生すると考えられるが、⑤の回答はゼロであった。アラームの確認よりも、停止することが必要とされるので、アラームは問題にならなかったとも考えられる。

震度 6 以上の大きな震度でも、揺れで画面を見られなかったという回答は、3/16 の割合であり、その瞬間に行うべき操作がなければ、直後の手動操作も問題ではないと考えられる。大きな地震動が発生している間に、運転操作ができるとは考えられないが、地震動中への操作を要求されているわけではなく、地震動がおさまってからマニュアル操作で問題ないことが、訓練や教育等で理解できていたというのが、落ち着いた行動に結びついたのではなかろうか。

2.5.2 地震への訓練や教育

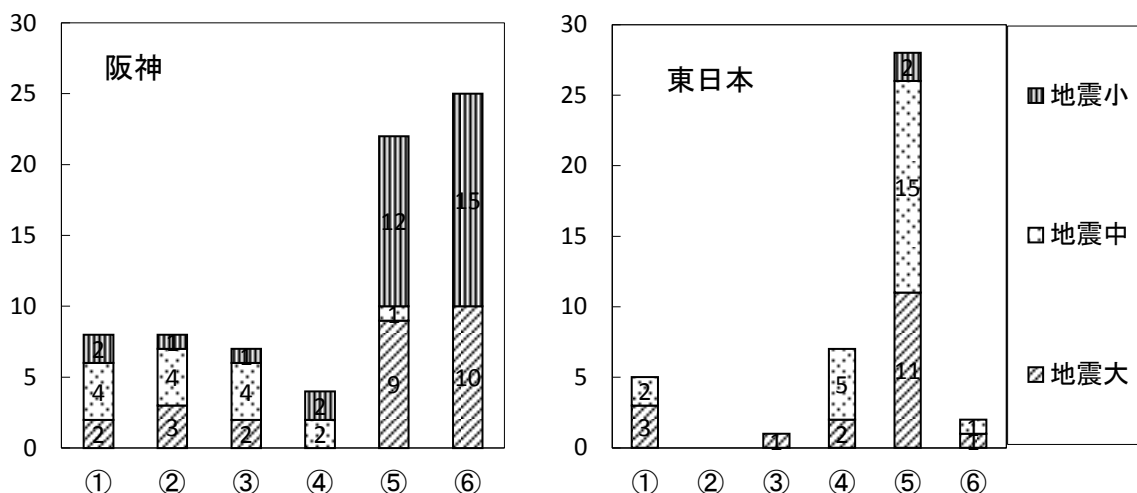
普段実施している防災訓練や教育は有効でしたかという設問に対する阪神大震災時の回答(問 21)と今回の回答(設問 33)を比較したのが図 2.24 である。

東日本大震災では、これまで想定していなかった大規模な津波による被害が発生したが、③の想定外で役に立たなかったという回答はほとんどなかった。阪神大震災のときにも、「訓練が有効だった」の声は、地震動の大きなところでも「役に立たなかった」を大きく上回ってはいたが、東日本でも、訓練が有効であったとの回答が多く、特に震度 5 弱以上の地震を体験した回答者の多くが、有効と答えている。

2.5.3 緊急時のマニュアルに関する工夫

緊急時のマニュアルで、オペレータがとっさに行動できるような工夫は何かありますかという問いが、阪神大震災の時には、あるか、ないか、その他という形式でされた(問 19)。

業種別で整理すると、有機バルクと石油・ガスが工夫しているとの回答が多く、全体では半数が工夫しているという回答であった。工夫内容には、自由記述で、多くの回答があり、今回のアンケートでは、大地震専用マニュアル、カード化、訓練を取り出してたずねている。



- ①地震の規模が大きすぎて、訓練はほとんど役に立たなかった。
- ②隊員がプラント停止等を優先し、自衛消防隊や対策本部の編成が遅れた。
- ③訓練では想定しないトラブルが多く、訓練はあまり役に立たなかった。
- ④複合したトラブルが多すぎて、対処の優先順位付けができなかった。
- ⑤訓練どおり対処でき、訓練は有効だったと思う。
- ⑥その他

図 2.24 普段の教育・訓練の有効性

表 2.6 に示すように、今回のアンケートの設問 34 への回答から、マニュアルに従った訓練は多くの事業所で行われており、専用マニュアルやカード化も 1/4 の事業所では取り入れられていることがわかる。阪神大震災以降、マニュアルを整備するだけでなく、訓練等の工夫がなされており、前問にあるように、訓練が有効であったという評価に結びついているのだと考えられる。

有効であった訓練がどのようなものであったかはアンケートでは深く聞くことはできていないが、訓練への高い評価が現れているので、企業ごと、業種ごと、地域ごとの機会を利用して、有効な訓練が共有されることが望まれる。

表 2.6 緊急時マニュアルの工夫

阪神:問 19								
	有機バルク	有機フィン	無機化学	石油, ガス	食品, 医薬	その他	小計	(%)
あり	21	7	5	19	5	5	62	50
なし	8	8	8	10	9	9	52	42
その他	1	0	2	1	3	3	10	8
小計	30	15	15	30	17	17	124	100

東日本:設問 34								
	有機バルク	有機フィン	無機化学	石油, ガス	食品, 医薬	紙バル プ	小計	(%)
①	3	2	0	1	2	1	9	17
②	3	2	1	1	1	2	10	19
③	9	10	2	2	7	2	32	60
④	0	1	0	0	0	1	2	4
小計	15	15	3	4	10	6	53	100

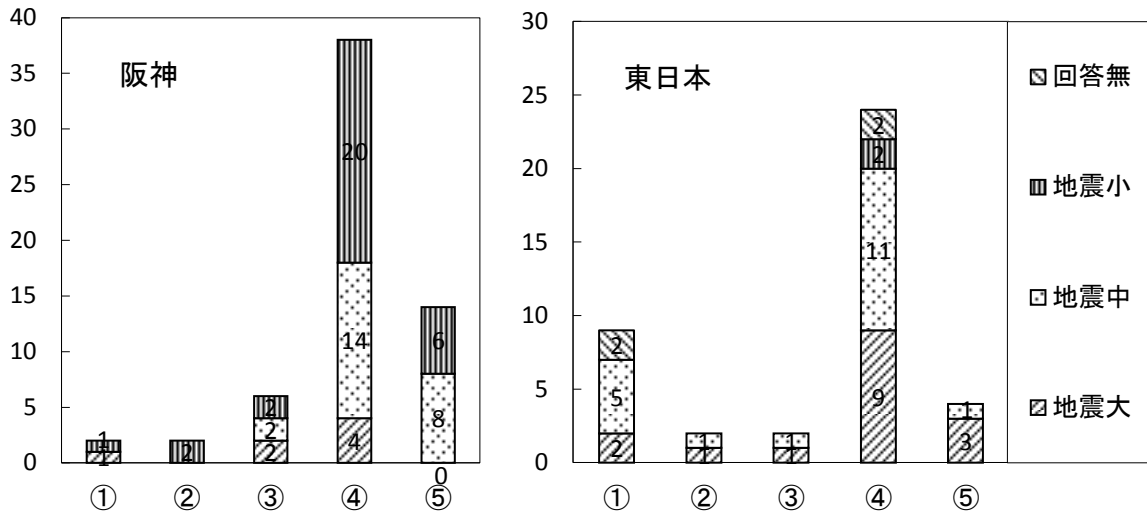
- ① 大地震を想定した専用のマニュアルを作成している。
- ② 要点を1～2枚に整理してカードケースで携帯しやすいようにしている。
- ③ 定期的に訓練を実施している。
- ④ その他

2.5.4 オペレータの人数と技量

図 2.25 にオペレータの人数と技量についての回答の比較を示しているが、オペレータの人数不足の回答率が、阪神大震災時よりも大幅に増えている。これは、阪神大震災以降の省人化の進行、ベテランオペレータの退職が影響していると考えられる。緊急時の対応能力不足の回答は減少しており、設問 36 の人数不足の対策にも、緊急時の訓練の回答数が多く、訓練が有効であったという設問 32 の回答とも関連し、訓練による対応能力の向上が期待できるという評価がなされていると理解できる。

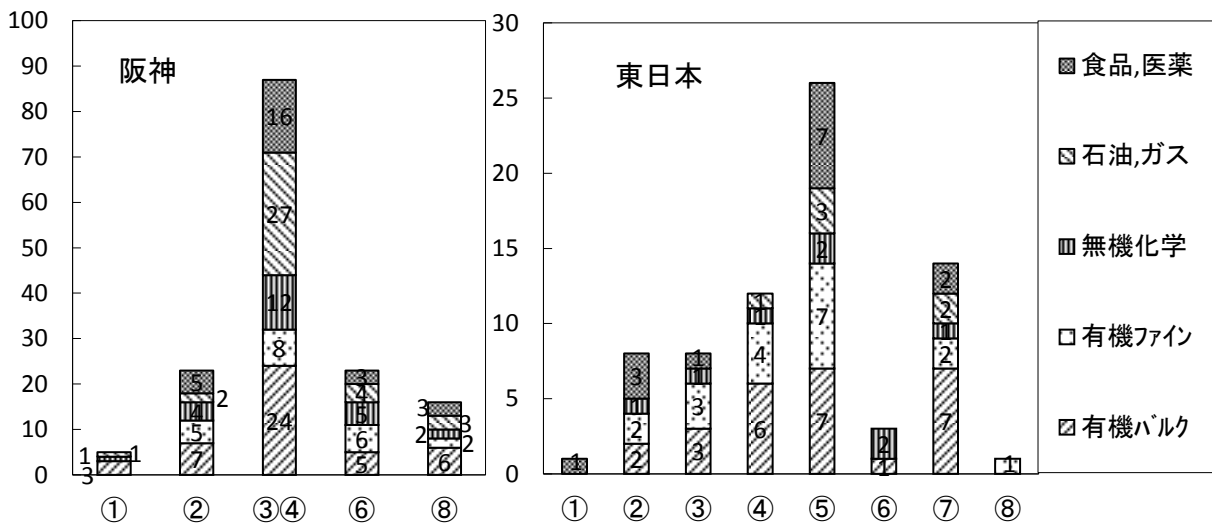
阪神大震災のときには、図 2.26 の阪神の問 16 のグラフに示されるように、緊急時にオペレータの判断を要求するのは避けるべきとの判断が強く表れていたが、東日本では訓練を重視する結果が現れているとも考えられる。阪神大震災以降、省人化と自動化が進展しているため、今回の調査でも、さらなる自動化やマニュアル化に対する回答は1/4ほど存在するが、割合としては低下しているものと考えられる。

しかし、タンクからの流出防止のための自動遮断弁の設置について、基準の見直しも行われているので、さらなる自動化による安全性の向上が期待される。



- ①緊急時におけるオペレータの人数不足を感じた。
- ②緊急時におけるオペレータの判断能力の不足を感じた。
- ③緊急時におけるオペレータの対応能力の不足を感じた。
- ④必要な対応ができており、特に問題はなかった。
- ⑤その他

図 2.25 オペレータの人数と技量



- ①休日、夕勤、夜勤も日勤と同じ体制（オペレータ、判断者）を確保する。
- ②警備要員や当直者などにも任務を与え、在勤者での総力戦とする。
- ③判断を極力減らすように、マニュアル化を推進する。
- ④作業を極力減らすように、機械化、自動化を推進する。
- ⑤日頃から訓練を積み重ねて対応能力を上げておく。
- ⑥工場周辺の社宅を拡充し、応援者がすぐに駆けつけられるようにする。
- ⑦食料を備蓄し、交替や応援者なしでも長期戦に臨めるようにしておく。
- ⑧その他

図 2.26 オペレータの人数不足解消案

2.5.5 オペレータによる二次処理

福島第一原発事故では、緊急停止が成功しても、その後、安全確保のために冷却が必要だったように、化学プラントでは、事故発生を防ぐために、様々な二次処理が必要である。設問 5 では、緊急停止後に必要となる二次処理をたずねており、半数以上のプラントで、なんらかの二次処理が必要であると答えている。

図 2.27 に二次処理が必要と回答があった事業所で停止した用役を、二次処理の種類別に積み上げたグラフを示す。安全確保に必要な冷却や除害に必要な用役が停止している例が少なくない。

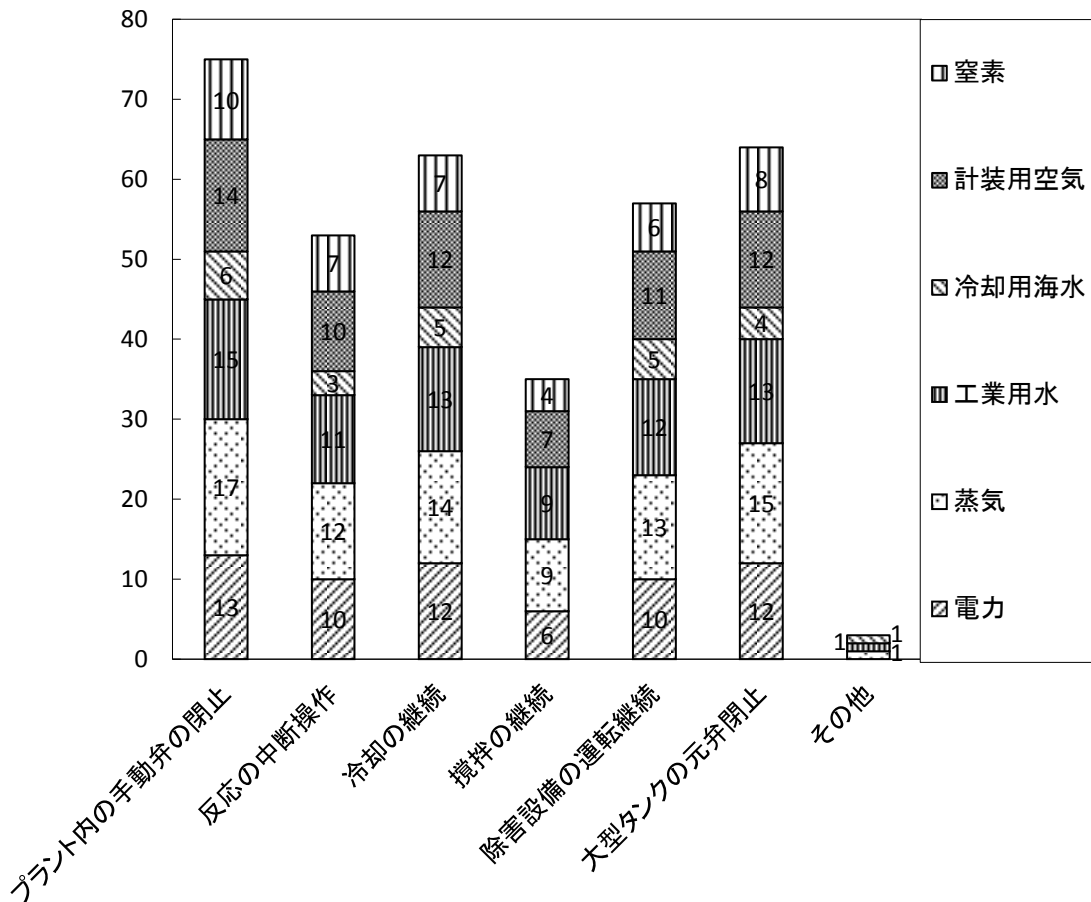
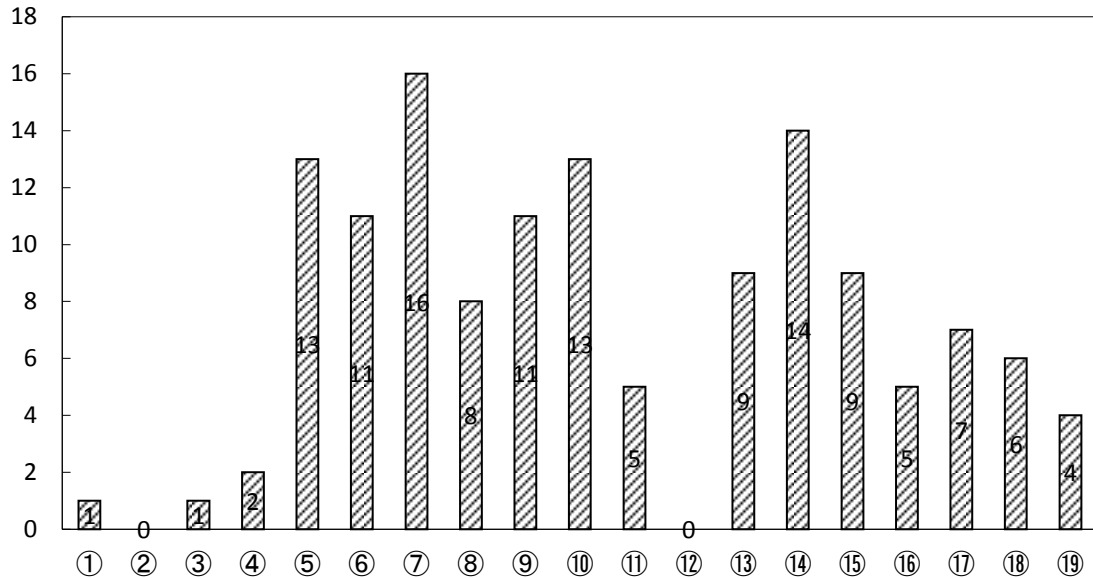


図 2.27 必要な二次処理に対して停止した用役

図 2.28 には、停止や二次処理で発生した質問である設問 14 の回答を示している。40 回答には、地震動も津波も小さく被害のなかった事業所も含まれるのであるが、⑩の特に支障がなかったという回答は 6 件に留まっている。停電が広域で長時間発生しており、装置に被害がなくても、二次処理に支障が生じたものと考えられる。電力以外にも、計装空気、冷却水、スチーム等のユーティリティの停止による支障が多く報告されている。それでも、福島第一原発のような事故が発生しなかったのは、現場のオペレータの活躍があったためと考えられる。



- ①地震で一部のセンサが破損し、必要な情報が得られなかった。
- ②地震で一部操作端が破損し、操作できなかった。
- ③地震で計装空気配管が破損し、操作できなかった。
- ④地震でDCS や計装盤が破損し、操作できなかった。
- ⑤計装電源が失われ、操作ができなかった。
- ⑥計装空気がなくなり、弁が操作できなくなった。
- ⑦停電や発電設備停止のため、電力が確保できなくなった。
- ⑧停電や発電設備停止のため、運転継続に必要な攪拌機を作動できなかった。
- ⑨冷却水停止になり、冷却の継続ができなくなった。
- ⑩スチームが止まり、継続必要な加熱できなくなった。
- ⑪窒素供給が止まり、安全の確保ができなくなった。
- ⑫機器の故障で、無線ページングが使用できなくなった。
- ⑬停電で場内の電話連絡等に支障がでた。
- ⑭停電でプラント内の照明がなく作業に支障があった。
- ⑮プラントの状況を把握するのに時間が掛かった。
- ⑯関連する他プラントや他工場の状況を把握するのに時間が掛かった。
- ⑰交代要員や応援者の出勤ができず、作業負荷が高かった。
- ⑱特に支障は生じなかった。
- ⑲その他

図 2.28 二次処理で発生した支障

図 2.29 に停止や二次処理で行った特別な工夫（設問 15）を必要な二次処置ごとに整理した図を示す。必要だと回答した数に比べ、特別な処理は不要であったとの回答数は少なく、停止あるいは二次処置の項目に対応する特別な処置の回答数も不足している。各停止あるいは二次処置の項目別に、特別な処置を聞いたのではないので、図 2.29 の各棒グラフの内訳を不自然に感じるかもしれない。たとえば、攪拌の継続には、電力が必要だと思われるが、電気の仮配線も非常用発電機の移設も回答はゼロである。反応停止剤が拡散するまでの電力は確保できたが、攪拌の継続以外で、通常の処置では不十分な事態が発生していれば、特別な処置が不要という回答にならない。

冷却用の仮配管や窒素ポンベの確保などの対応を行うことで、安全が確保された例

が4例存在する。できるだけ、特別な措置というより、予定された措置で対応できるべきではあるが、予想外の事態にも対応するためには、人間の判断が必要で、柔軟な対応が可能な体制を用意しておくという視点も必要であろう。

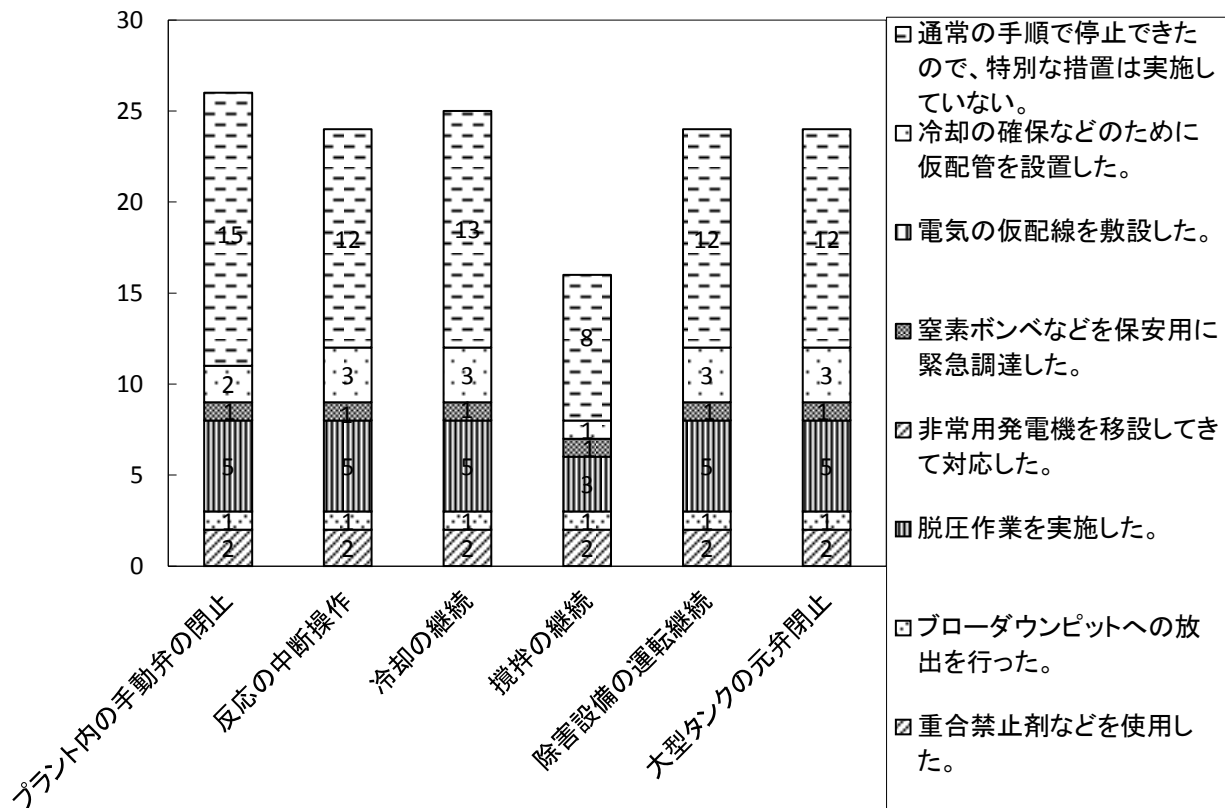


図 2.29 必要な二次処理と安全停止のための特別な作業 (設問 5 と設問 15)

2.6 連絡手段

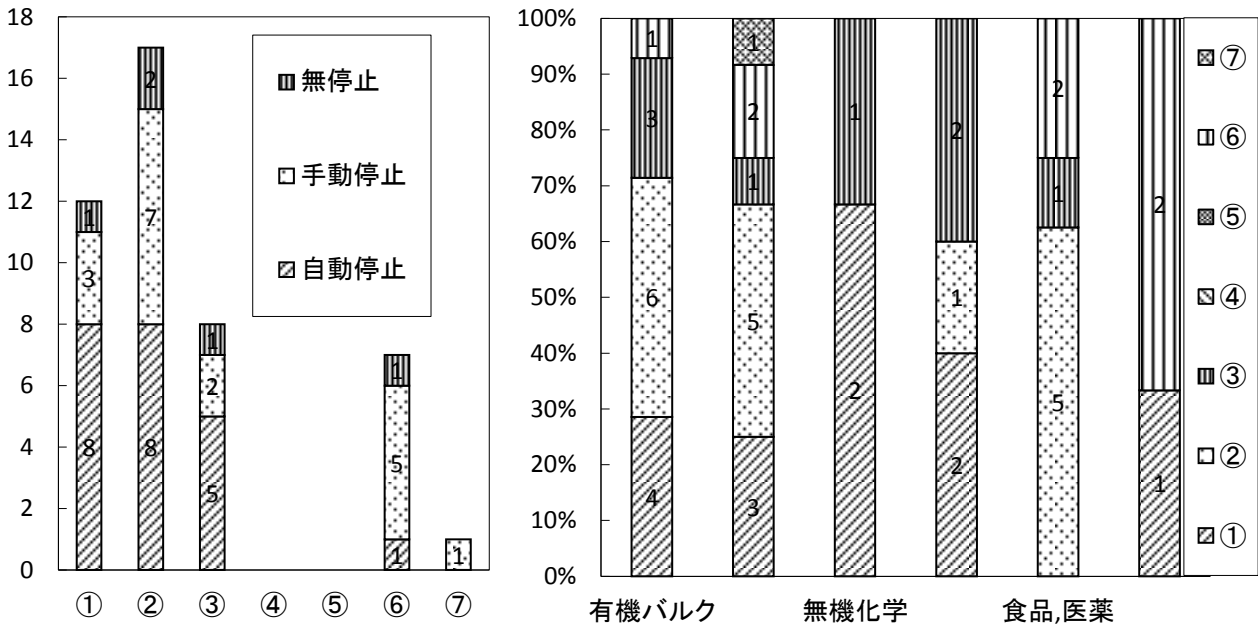
地震発生時には、事業所内の緊急連絡、被災情報確認、安否確認、社員への連絡、所轄官庁や自治体への連絡など、様々な連絡が必要になる。今回、停電で場内放送が機能しなかったなどの報告もあり、今後の大地震に備えて、検討すべき課題だと考えられる。阪神のときの状況や認識も含め、今回現れた課題を整理し、今後の備えを考える。

地震の大きさを知るための手段に加え、津波に関する情報の伝達の重要性が今回の震災では注目された。

地震情報をオペレータが知る手段について、テレビ、ラジオなどのメディアという回答も少なくないが、携帯電話にもワンセグTV機能があり、メディアの情報も得やすくなっていると考えられる。ただ、制御監視室には携帯電話は持ち込み禁止にしている事業所も存在するし、テレビが停電でも利用できる状態になっているかなどの検討課題も存在すると考えられる。

図 2.30 に、今回、自動で停止したプラント、手動で停止したプラントという区別と業種による区別で整理した図を示す。一斉放送を伝達手段とする回答が多い。この放送は、P波検知による予報とは異なり、地震が発生した後のもので、自動停止より手動停

止を体制としている事業所の方が、震度情報を適切に知ることが重要だと考えられるが、回答の分布にあまり大きな差異はなかった。業種ごとの回答の割合に、少し違いがみられる。紙パルプ^oには一斉放送の回答がなく、食品医薬はオペレータが震度計を読み取るという回答がない。また、石油・ガスや無機化学には、テレビ・ラジオという回答はなかった。



(今回の停止方法と手段回答の関係)

(業種ごとの手段回答の選択割合)

- ①操作室に震度計や震度表示があり、オペレータがすぐに読み取れる。
- ②工場内に設置してある震度計数値が自動で一斉放送される。
- ③工場内に設置してある震度計数値を担当者が一斉放送する。
- ④工場内に設置してある震度計数値を担当者が電話連絡してくる。
- ⑤地震を感知したら、オペレータが所定場所へ電話をかけて数値を聞く。
- ⑥テレビ、ラジオなどのメディアから情報を得る。
- ⑦知る手段は決められていない。

図 2.30 地震の大きさをオペレータが知る手段 (設問 29)

図 2.31 は、津波情報伝達方法を、プラントが自動停止した、手動停止させたという区別で整理したものである。地震と同じように、オペレータが電話をかけて知るという回答はなかったが、メディアからの情報と担当者からの一斉放送がほとんどである。津波情報は到達する前に入手することが必要であり、地震のように現地の測定に頼ることはできない。地震発生時に、メディアからの情報を確保し、確実に従業員全員に伝えることが必要であるので、単に放送だけでなく、複数の手段を検討すべきであると考えられる。

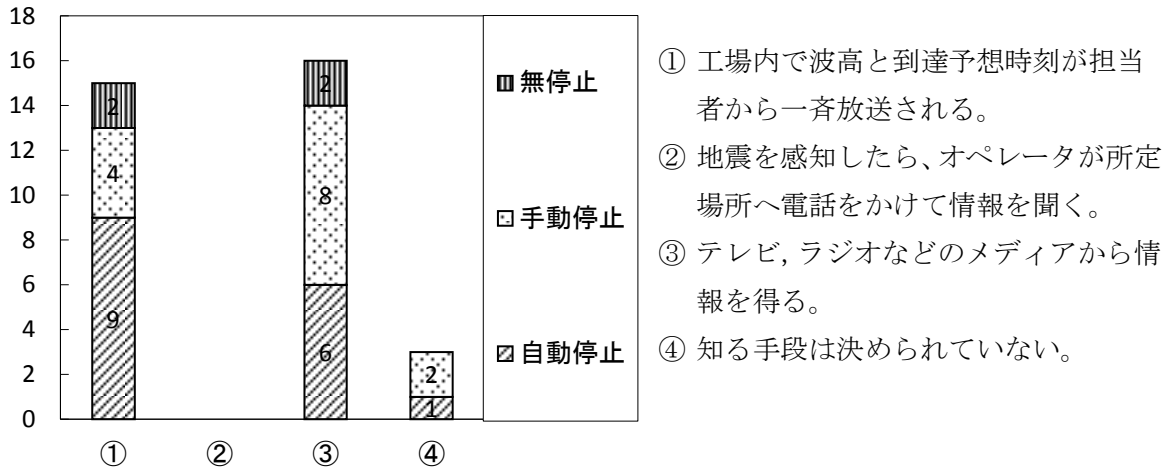


図 2.31 津波の大きさ、到着時刻をオペレータが知る手段 (設問 30)

阪神大震災のときには、携帯電話は普及しておらず、ポケットベルの時代であった。東日本大震災のときには、気象庁からの P 波検出による緊急地震速報のサービスも行われており、連絡手段も変化している (図 2.32)。携帯電話や固定電話は、利用できない状態が、東日本大震災でも発生しているが、メールや外部業者の安否確認システムが機能できた例が多いことが理解できる。ただ、利用できなかったという回答も、ほぼ同数存在するので、各手段の可用性の向上を図るだけでなく、複数の手段を併用することが必要であることがわかる。

新たなメディアの導入を常に意識するとともに、その利用方法に対する日頃からの訓練、利用方法の周知徹底も必要であると考えられる。

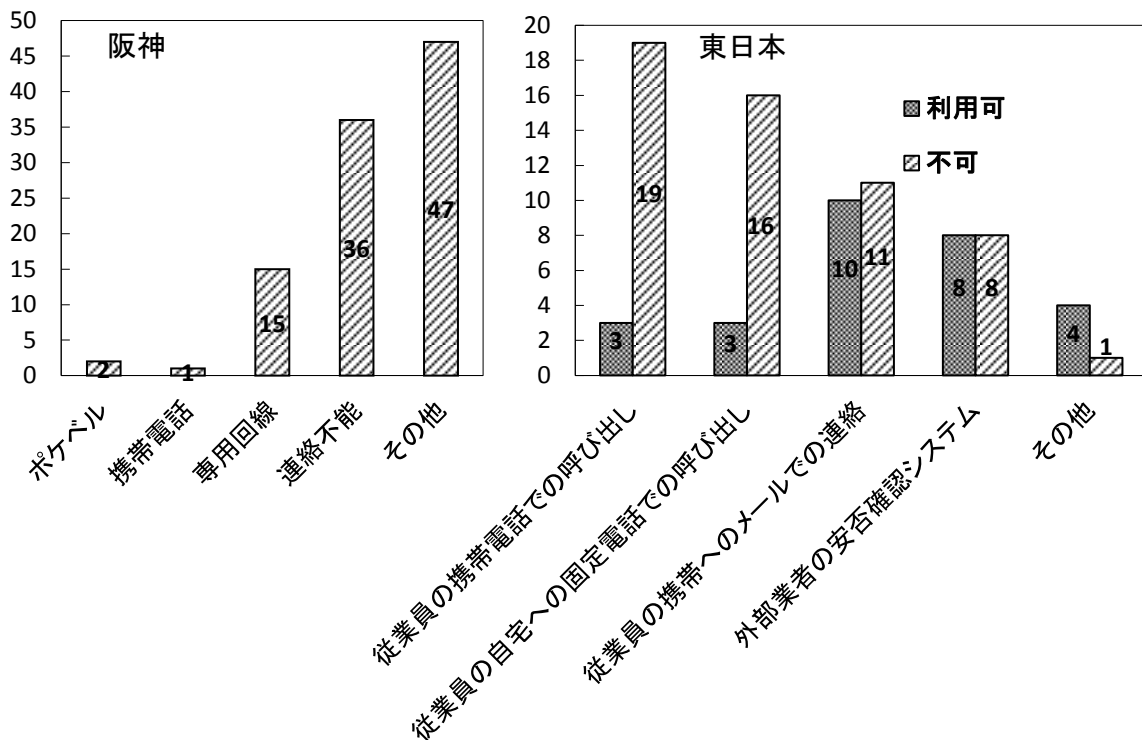


図 2.32 緊急呼び出し安否確認方法

2.7 大地震に対する耐震性向上以外の対策の見直し

東日本大震災をうけてのアンケートは、震災後 1 年以上経過した後の調査であったため、どのような見直しを行ったかを尋ねた。

2.7.1 安全停止のための防災体制の見直し

ユーティリティが停止して、特別な措置を行うことで、安全を確保できたという回答があったことを 2.3.5 節で述べた。東日本大震災での状況を教訓に、プラントの安全な停止のための見直しや検討について調べた設問 16 では、図 2.33 に示すように、マニュアルの部分改定との回答が多い。これまでの検討も十分機能しており、一部の追加修正という形で行われていることが理解できる。

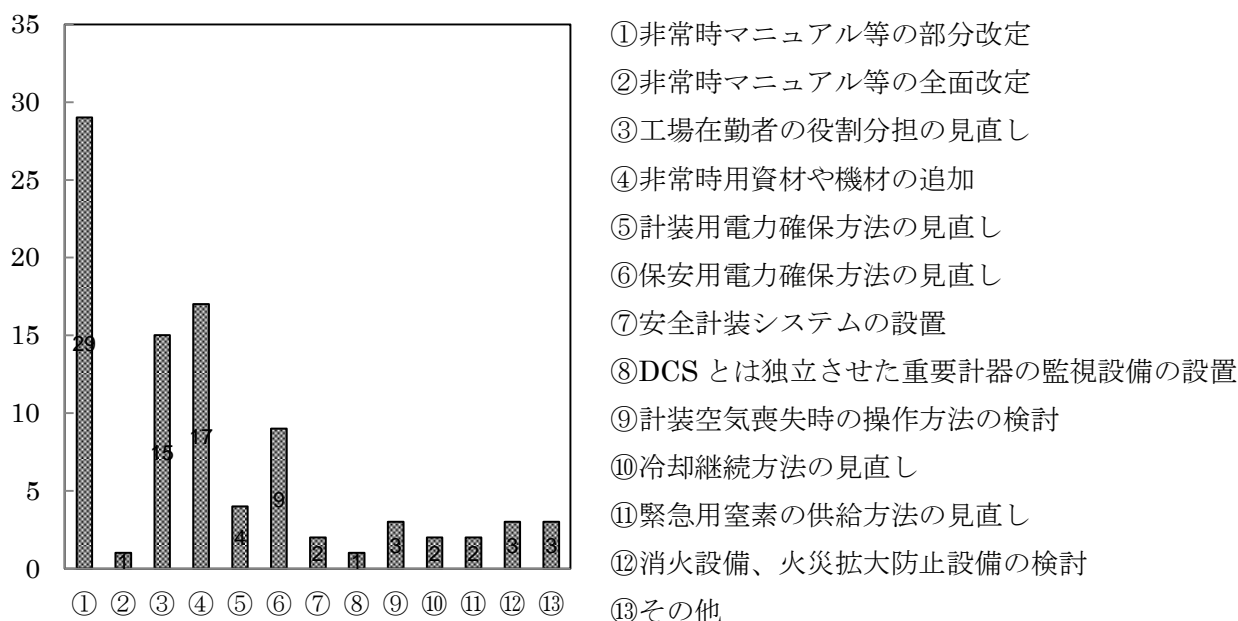


図 2.33 安全のための防災体制の見直し（設問 16）

2.7.2 非常用発電機等の設備の見直し

設問 17 において、今回を教育にして装備しておくことを検討した設備を尋ねているが、図 2.34 に示されるように、非常用発電機の回答が 12 事業所と多い。

その非常用電源については福島第一原発事故でも注目されたので、設問 20 で保持時間の不足を、設問 21 で非常用電源のうち計装用電源や保安用電源の見直しがありましたかと、別に質問している。

設問 20 に対しては、不足だったと答えたのは、わずかに食品と紙パルプの 1 社ずつで、計装設備の無停電電源と保安用電源用のバッテリーの保持時間の不足に、一つずつであった。この設問の回答により、ほとんどの場合、計装設備や保安設備は、停電時にも緊急時の動作に必要な電力は確保できていたことがわかる。

設問 21 に対しても、①計装用非常発電機導入が、有機バルクと有機ファインで 1 事業所ずつ、②保安用非常発電機導入が、食品で 2 事業所から回答があっただけで、設問 17 で回答が多かった非常用発電機は、福島第一原発事故後の計画停電など、プラント

が正常になっても操業に影響がある電力不足が発生したことへの対応を答えており、緊急時操作を確実にするための電源の確保を示すものとは異なると考えられる。

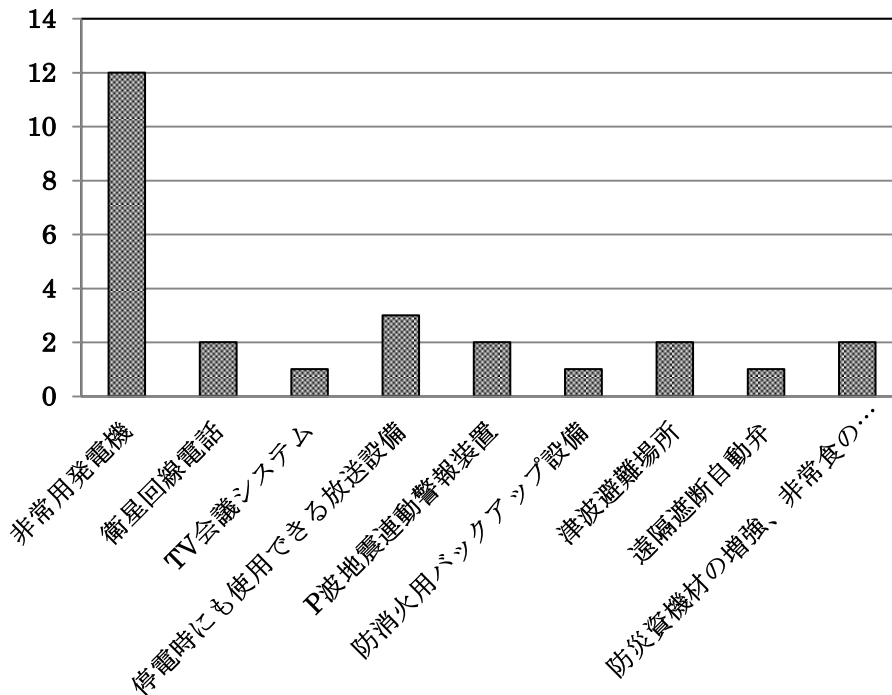


図 2.34 今回を教訓に装備しておく設備(設問 17)

2.7.3 計装やオペレータの体制等の見直し

図 2.34 に示した設問 17 は、設備に対する見直しであったが、図 2.35 に示す設問 38 の回答は、計装やオペレータに関する見直しについて質問している。

東日本大震災では、津波被害と BCP が大きな話題になった。図 2.35 に示されるように業界的な偏りもあまりなく、⑧の津波への回答が多くなっている。さらに、⑦対策本部の機能や設備、⑨食料や水などの備蓄の回答が多い。

図 2.36 に、阪神大震災のときの見直し項目の調査を示す。項目は今回の調査と同じではないが、阪神の時に回答が多い緊急連絡や応援者の出勤命令、さらに消防隊などの出勤基準が、今回の調査の⑦の対策本部に集約されているとすると、回答数が増えることが理解できる。

また、直接被害だけでなく、電力や復旧用資材の調達が困難になることでの被害の長期化や、被災地での部品生産が停止したことで全国的に製造が停止したという BCP の問題も、⑦の対策本部の見直しに関係していると考えられる。

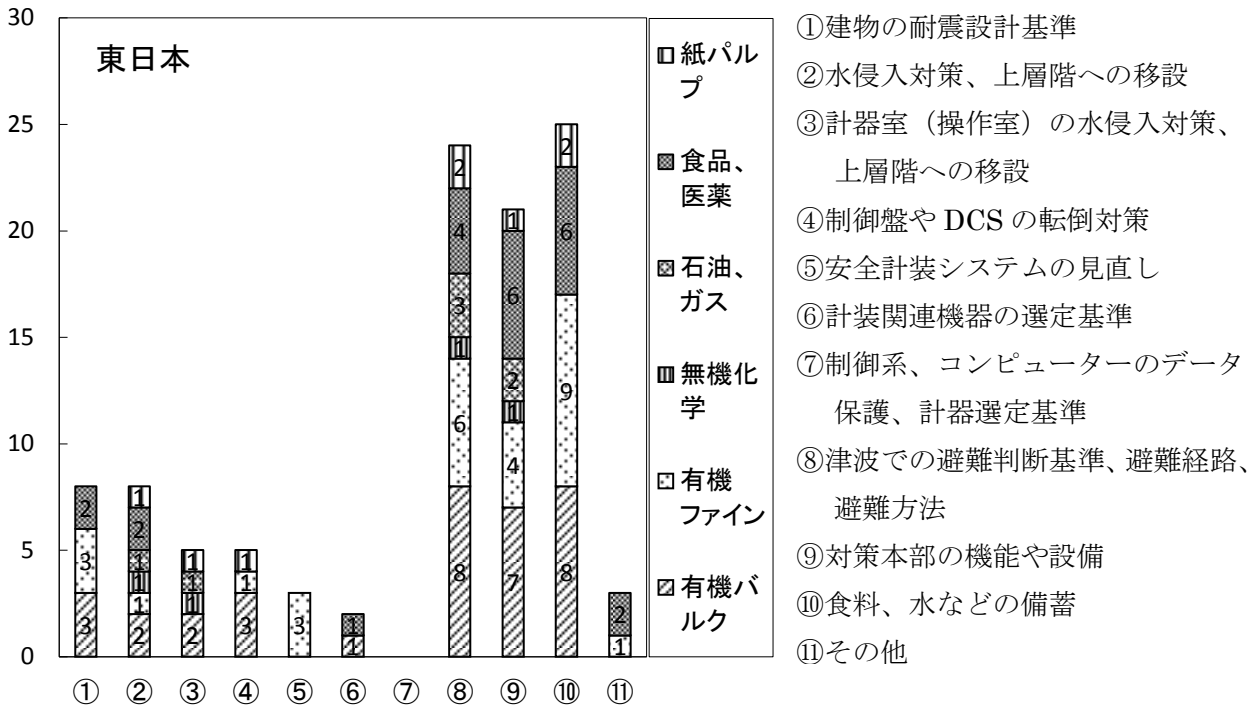


図 2.35 東日本大震災後の見直し項目 (設問 38)

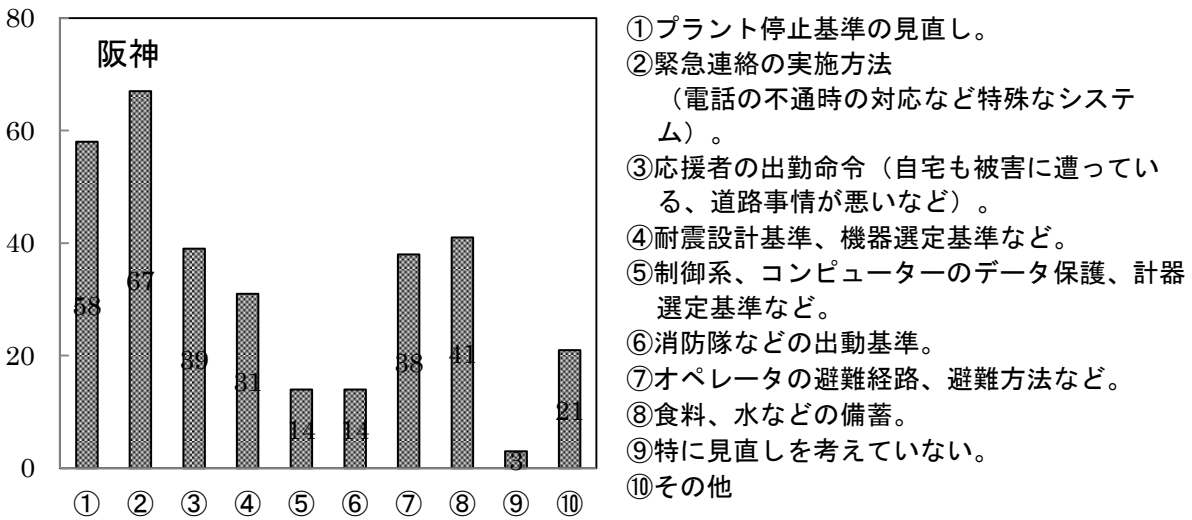
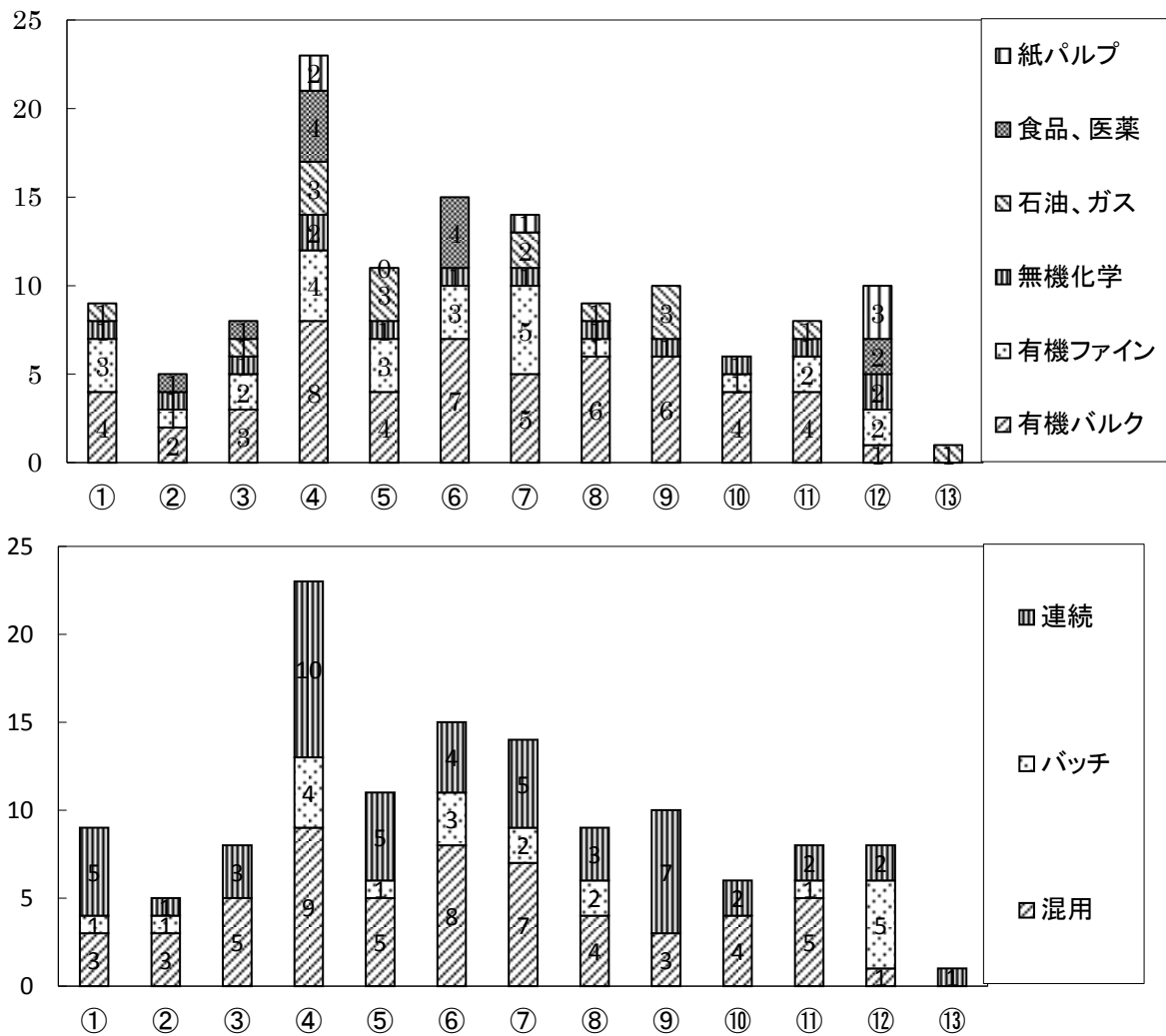


図 2.36 阪神大震災後の見直し項目 (設問 25)

2.7.4 危険性の高いプラントの耐震性向上以外の地震対策

すでに、2.2 で耐震基準などについて検討したが、ここでは、設問 42 で尋ねている耐震性向上以外の危険性の高いプラントへの地震対策の調査結果について述べる。

図 2.37 は、業種の情報を加えて、設問 42 の回答を整理した図である。④の遠隔遮断弁を多く設置するという回答が、業種の偏りを持たず多くの回答が得られている。津波で流されるような被害を受けた場合の被害を局所化するためにも、遮断弁による孤立化はリスク低減に有効であり、東日本大震災後、緊急遮断弁設置を義務化するタンク容量が引き下げられ、多くの業種で対策が進んでいるものと考えられる。



- ①装置の破壊があっても被害規模を抑制するために、ブロック化を徹底し、それぞれのブロックのホールドアップを極力小さくしている。
- ②装置に亀裂が入っても外部への漏洩を防ぐように、二重配管などを適用している
- ③万一の漏洩時にブロックごとに内容物を移送できる仕組みがある。
- ④遠隔遮断弁を多く設置している。
- ⑤漏洩や火災に備えて、スチームカーテンなどの拡大防止設備を設置している。
- ⑥配管の応力をできるだけ逃がすような設計をしている。
- ⑦プラント専用の発電機を備えている。
- ⑧プラント専用の窒素のリザーバタンクを保有している。
- ⑨プラント専用で計装空気のバックアップがある。
- ⑩DCS とは別に安全計装システムを導入している。
- ⑪重要計器は DCS とパネル計装とで二重化している。
- ⑫他のプラントと特に区別はしていない。
- ⑬その他

図 2.37 危険性の高いプラントの耐震性向上以外の地震対策

また、配管の損傷が発生しても漏洩に至らないように、配管接続方法や固定の方法を工夫するなど、⑥配管の応力をできるだけ逃がす設計をしているという回答も多くなっている。

⑦⑧⑨というユーティリティのバックアップに対する回答も多い。

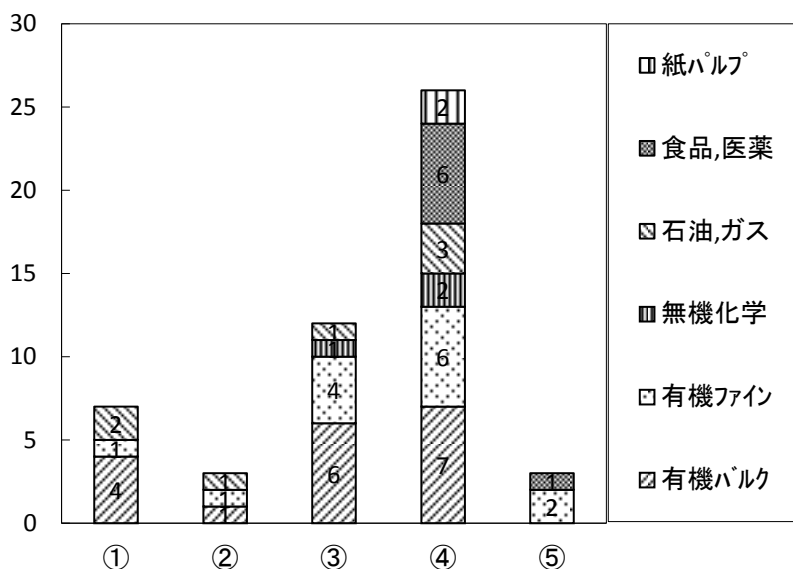
業種別に回答をみると、⑨計装空気のバックアップがあると答えているのは、有機バルクや石油ガスの大型プラントが多く、有機ファインや食品からの回答はないという特徴がある。連続かバッチかという観点でも、⑨にはバッチからの回答はない。大型の連続プラントでは、計装空気がなくなって操作ができない状況において、手動弁の閉止操作だけで短時間にプラントを停止させることは困難であるためと考えられる。

2.7.5 ユーティリティプラントの耐震性向上以外の地震対策

二次処理にも必要であり、地震発生後にも運転継続が望まれるユーティリティプラントについても、耐震性向上以外の地震対策を設問 43 で尋ねている。

すべての業種において、消火用水と冷却水の確保については配慮されており、爆発を防ぐための窒素の確保にも留意されていることがわかる。

地震では、近隣のプラントが軒並み被害を受けることが想定できるので、近隣からの融通という①と②の回答は少なくなっている。しかし、地震被害は、すぐ近くでも地盤の違いがあると大きく異なる結果が出ており、一部生き残ることも否定されるものではなく、その地盤を考慮したリスク評価で、融通するネットワークも検討できる可能性はあると考えられる。



- ①近隣の他事業所等と蒸気の融通ができるような配管がある。
 ②近隣の他事業所等から非常用の電気の供給が受けれるような系統がある。
 ③液体窒素をバックアップに使えるよう、気化設備がある。
 ④全停電時でも消火用水や一部設備の冷却用水を供給できる仕組みがある。
 ⑤その他

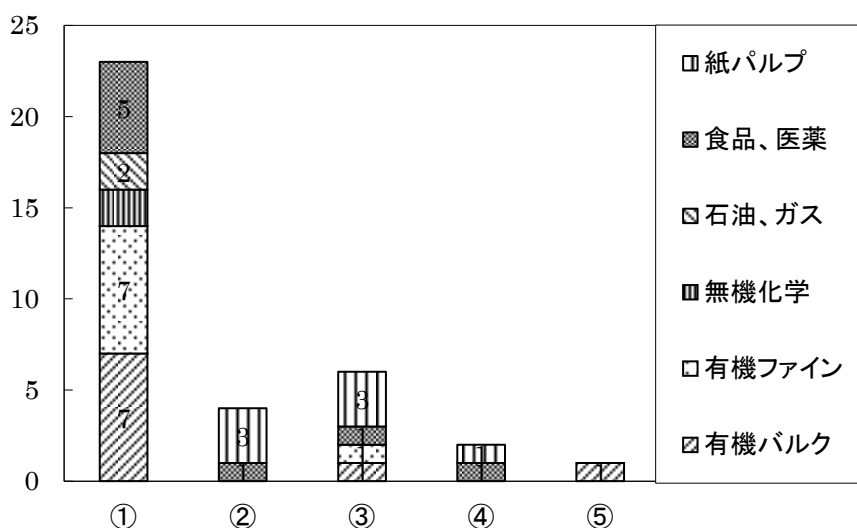
図 2.38 ユーティリティプラントの耐震性向上以外の地震対策

2.8 計装の被害

今回の震災では、福島第一原発事故という甚大な被害を起こした事故が発生したが、そこでは、水位計の指示が不適切であったことが影響していることや、津波による冠水で計装が機能せず、現場の状態を把握できなくなったなど、計装の健全性維持の重要性も注目された。今回のアンケート調査では、計測自動制御学会の計測技術交流部会が参加し、計装に関する項目を追加した。

2.8.1 DCS, リレー盤等の被害

図 2.39 に、地震での DCS、リレー盤、変換器盤、デスク盤の被害についての設問 44 の回答を示す。被害がなかったという回答が最も多いが、少なくともはあるが、断線や水没による被害が発生していることがわかる。津波に対する避難も含め、計装の情報が見えなくなる事態は、福島第一原発だけでなく、化学プラントでも発生していたことがわかる。

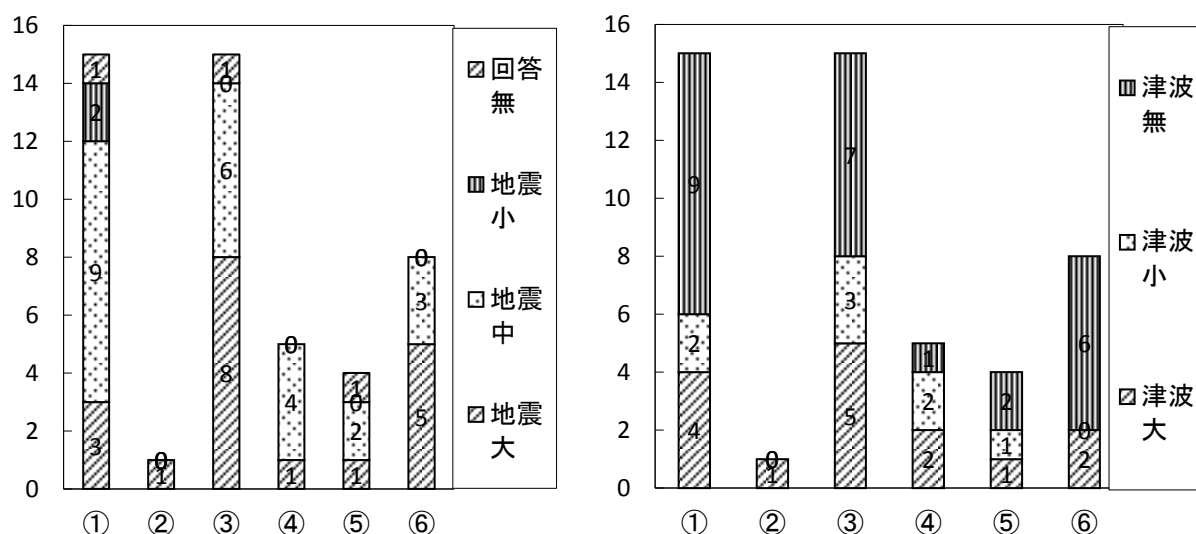


- ①全てのシステム機器で故障や誤動作がなかった
 ②転倒があった。
 ③位置ズレがあった。
 ④機器の転倒や振動での断線があった。
 ⑤誤動作した機器があった(例:振動でリレー接点が働いた可能性がある)

図 2.39 DCS、リレー盤等の被害(設問 44)

2.8.2 現場計器の被害

設問 47 の現場計器の被害に関する回答を整理したのが、図 2.40 である。現場機器が故障したという回答③は、被害がなかったという回答①と同数存在した。津波に関する影響は大きく、ロードセルの破損を報告するものも複数存在する。

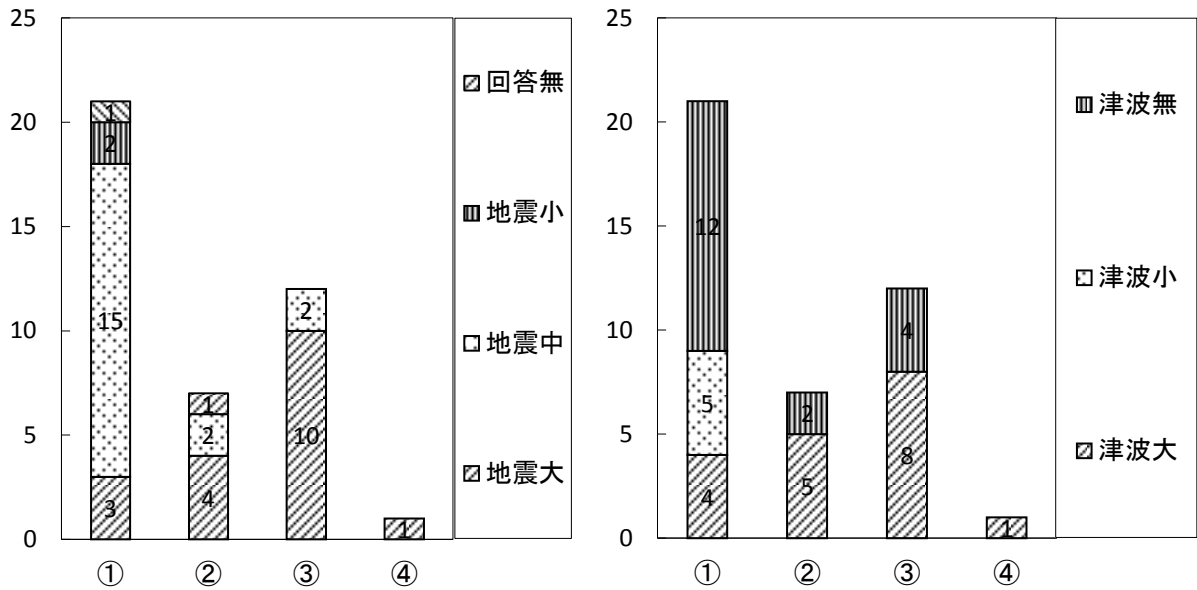


- ①全ての現場機器での誤動作や故障はなかった。
- ②現場計器の指示・動作が一時的に異常となったが自動で復旧した。
- ③故障した現場機器があった。
- ④液面が振動し、液面計アラームが多発した。
- ⑤誤動作した現場機器があった。
- ⑥落下・転倒・移動などした現場機器があった。

図 2.40 現場機器の被害(設問 47)

2.8.3 計装配線、計装配管の被害

プロセス配管も地震動や液状化での移動により損傷を受けているが、装置と配管の固定端を同一基礎にするなど、これまでの震災での教訓を生かした対策がなされ、毒劇物の漏洩などのリスクが軽減されてきていると考えられる。しかし、計装配管自体は空気しか流れておらず、それ自体のリスクは低いため、その地震対策は徹底されていない危険性が高い。設問 48 の回答を図 2.41 に示す。被害がなかったという回答が最も多いが、計装空気配管には 1/4 を超える回答で被害が報告されている。計装空気配管についてもプロセス配管の地震対策と同様な観点での取り組みが必要であると考えられる。



- ①全ての計装配線や空気配管で切断や短絡・地絡はなかった。
- ②一部の計装配線で切断、短絡・地絡があった。
- ③一部の空気配管で切断や漏れがあった。
- ④その他

図 2.41 計装配線、計装配管の被害(設問 48)

2.8.4 計装の対策

第1部の設問50への回答に示すように、計装に関してよかった点や改善すべき問題が集まった。ロードセルについては、気象庁の緊急地震速報でなくても、P波を検知したらロックするという装置を加えることで、破損を防ぐことができる可能性があるし、自動化をさらに進展させるなど、対策の検討を進めるとともに、保安検査や日常のメンテナンスなど、良かった点の徹底を広げることで、二次処置にも必要な計装機能が維持でき、安全の確保と復旧の早期化が実現できるようになることを期待する。

第 3 部

アンケートに関連した情報

今回のアンケート調査を実施する前に、アンケートの設問を具体化するための情報を収集する目的で、東日本大震災で大きな被害に遭われた鹿島地区の企業を訪問してのヒアリングを行った。そのとき得られた情報の概要を 3.1 に記載した。

また、化学工学会 SIS 部会プラントオペレーション工学分科会の幹事会および計測自動制御学会の計測技術交流部会でアンケート調査の作成・整理の議論が行われた際に得られた様々な情報を中心に、「安全性を向上させる現場の工夫集」として 3.2 に示した。

さらに、アンケートではプラント自動停止の基準となる加速度や速度についての設問を設けたが、これらの数値の算出方法はひとつではないことが解析を行っている段階で指摘された。そこで、地震動の加速度や速度とは、そもそもどのようなもので、地震による破壊力の指標としてどのような問題があるのかを 3.3 に整理した。

そして、3.4 では、アズビル株式会社アドバンスオートメーションカンパニー 林 功氏に、地震計の技術的変遷、現在使用されている地震計の種類およびその適用分野について概説いただき、東日本大震災後、需要が高まりつつある、地震対策 BCP（事業継続計画）向け地震計システムの特長について紹介いただいた。

3.1 鹿島地区被災企業へのヒアリング調査

東日本大震災の教訓をアンケートで収集するためには設問においても相当の工夫が必要と考えられたため、アンケートの設問を検討する前の2012年6月に、まずは被害の実情や復旧までの様々な内容について教えていただくために、鹿島コンビナートの2社を訪問させていただいた。

以下は、その内容からピックアップして、いくつかの側面についての実情を記載させていただく。

3.1.1 発災当時の状況

鹿島地区は、14:46の震度5強の地震に引き続き、15:15に震度6弱ないし6強の地震に見舞われた。最初の地震に対処をしていた最中に、より大きな地震があり、その後の余震への心配が増大したため、安全確保のために作業を中断したという状況が発生したようである。

当事、現場に居られた方の話では、大型の球形タンクが揺れているのが現認でき、万一倒れたりしたらどうなるだろうかと非常に不安になったということである。また、揺れは非常に長く感じたということである。

自動停止システムのあるプラントはそれが自動的に働き、操作端の破損は無かったため、安全な状態になったようである。手動停止のプラントでは揺れが収まってから対処方法の判断をして着実に操作を実施できたとのことである。

現場の状況確認は、上述のように余震の心配があり、上層階の点検などは、すぐには十分に実施できなかつたようである。

3.1.2 津波への対応

鹿島コンビナートには人工の入り江があり、掘割港として活用されている。入り口には防波堤があるが、北東方向に開いていて、今回は津波を呼び込むかたちになってしまった。湾の奥ほど水深が浅く、それに伴い津波の水面高さが増すようになってしまう。

従来の子想では、M8.2クラスの地震では湾の入り口で1m、湾の奥でも2mの津波予想高さであったため、工場は浸水しないと判断して特別な準備をしていなかったが、今回の地震では実際には、湾の入り口で2m、湾の奥では6.9mの津波が観測された。15:48に第1波があり、その後、16時ごろには一旦引き波となって、16:30ごろに最大の津波が襲来した。

津波がぶつかる湾の曲がり口や入り江の一番奥では、浸水の被害が大きく、護岸の破壊も発生した。湾の中では操船不能になった船が漂流して護岸にぶつかった。また、鹿島地区全体に通じる幹線道路も一部が冠水した。

工場の地盤は平均海面から3.5～7mの高さがあり、タンクヤードなどは冠水したが、プラントエリアは被害を免れたというケースが多かつたようである。

従業員の方たちは敷地内の建物の上の階や、鹿島地区内ある公園の小さな丘の上などに避難された。しかし、避難命令が全員に伝わっていなかったなどという事態も混乱の中で発生したようである。

3.1.3 プラント停止後の処置

プラント停止後に必要な処置は、設計された通りに進めることができたようである。これまでの経験に基づく周到な準備が行われ、必要な機能を設計して、その通りに作動させることができています。

多くのプラントが一斉に停止したため、フレアが大きくなったり、長時間にわたる除害設備などの運用で燃料や中和剤が不足気味となったりしたが、近隣企業などからの供給を請けることで無事に対処ができたようである。

3.1.4 被害の実態

鹿島地区には「神之池」（ごうのいけ）という池があり、港を掘った土を使ってその一部が埋め立てられたということである。この、元々池であった地域は液状化の被害が大きく、地中に埋設されたコンクリートピットやマンホールなどが2m程度も隆起した。これにより、設備の大きな被害や交通の遮断などが発生した。

地震の直接的な被害としては、プラントを支える鉄骨のプレスの一部などが破断したり、アンカーボルトが外れたりした。タンクは基礎からずれてしまい、液状化によって傾いたりした。パイプラックも傾き、配管は波打ったような状態になったが、配管の破断や漏洩は幸いにもほとんど発生しなかった。

3.1.5 用役の供給

鹿島地区には2箇所の共同火力発電所があり、これらは共に停止した。窒素の供給をしている企業も供給能力や圧力が大幅に低下した。窒素を消費する各事業所は、受け入れ圧に差があるため、ある企業では供給が継続されたが、別の企業では受け入れがストップするというように明暗を分ける事態となったようである。

震災発生後、鹿島地区の企業間で毎日連絡会が開かれ、困っていることに対して互いに何ができるかを話し合い、相互に支援する体制ができたということである。

電力は東京電力からの送電が当日の18時ごろに再開され、また、計画停電の対象からも除外されたため、復旧のための電力が継続して確保されることとなった。

工業用水は県の努力により、複数の送水管の無事だった部分を組み合わせることで、早期に供給が再開されたが、飲料水は復旧まで45日も掛かっている。

3.1.7 食料や飲料水

工場では本社や他事業所からの支援もあって燃料や飲料水の確保ができたため、復旧作業にあたる方々の食事を炊き出しによって確保した。また、地元の弁当業者との協力も行われた。逆に社宅や自宅では水道水が得られなかったため、しばらくは、従業員の家族の分も含めて炊き出しが継続された。

3.1.8 本社部門との連絡

携帯電話がある程度利用できたが、情報のルートが一本化されていないために、様々な混乱が生じたようである。災害優先電話は有効に機能したようである。

3.1.9 復旧作業

1~2ヶ月が経過し、余震の数が減ってきたころから、本格的な復旧作業が開始された。資材や重機を全国から調達しての総力戦となり、プラントの点検と改修が実施され

た。付近の交通は普段にも増して大きな渋滞となった。燃料の供給不足で通勤が困難な場合は乗り合わせるなどの対応が取られた。

甚大な被害を受けられたにも関わらず、数ヶ月程度で操業再開を果たされたところが多いようである。関係者のご努力に敬意を表したい。

3.2 安全性を向上させる現場の工夫集

今回のアンケート調査や聞き取り調査の整理の段階で、地震対策のための様々な情報やアイデアが得られた。ここでは、得られた情報を対策の項目ごとに示すことにする。

3.2.1 遮断あるいは解放を確実にする対策

計装空気がなくなると、空気駆動型弁は操作できなくなる。通常はフェイルセーフとして、計装空気が失われた場合にバネにより自動で安全側の全閉あるいは全開になる弁が多く設置されている。長時間の停電になって計装空気が失われても、このフェイルセーフ機能により、安全な状態に保持できたと考えられる。

大口径バルブの駆動でスプリングリターンにできない遮断弁では 3 ストローク程度の計装空気を貯めるドラムを据え付けることにより、計装空気の供給が止まったり、動作限界圧以下に下がっても必要な動作ができるように設計している場合がある。

プラント緊急停止時に脱圧する脱圧弁や、重要な遮断弁については、以下のような 2 重化が考慮され、確実な動作ができるよう設計されている。

- 1) 電磁弁の 2 重化
- 2) 電磁弁へのケーブルの 2 重化

後者は別々の SIS システム I/O モジュールへのアサイン、別のマルチコアケーブルやジャンクションボックスの適用、ジャンクションボックスからバルブまでの別ルートでブランチケーブルを据え付けることである。

3.2.2 安全対策の地震被災時の稼働確保

加熱炉やボイラーが失火した場合は、自動シーケンスで強制換気して、滞流ガスを大気にパージする。空気ダンパーを全開にしたり、エアブロワを稼働させるような設計が多く見受けられる。

LNG 用のボイルオフガス圧縮機が停止した場合は、窒素を使う場合には自動シーケンスが起動して窒素でパージしている。

地震によりブロアが停止したり、停電したりしても、このような安全対策が確実に稼働できるような検討が必要。

重合反応の暴走を避けるためには、反応液の粘度が高い状態でも、重合禁止剤を確実に投入し分散させることが必要である。投入と攪拌を停電時にも可能とするため、様々な工夫が多重になされている。

- ・計装空気がなくても、確実に投入できるような手動操作弁や緊急投入方法の確保
- ・攪拌動力用の非常用発電機の用意
- ・タンク下部から窒素を噴入して攪拌するため専用窒素タンクの装備
- ・一部放圧によって沸騰現象を起こし攪拌と除熱を図る

3.2.3 延焼防止

遮断弁の空気配管を熱溶解性のものにしたたり、熱溶解性のプラグ（溶栓）を空気配管に設け、火災時には空気が抜けて自動で閉止するようにすることが考えられる。

3.2.4 伝送系の維持

東日本の震災では、津波による浸水で計装が使用不可能になった例が発生した。無線式センサは防水構造・電池内蔵・配線不要などの点で有利であり、今後注目すべきものと言える。センサや伝送器の設置位置を冠水しない高さまで移動するという改造を行った企業も存在する。

計装用空気の漏れや浸水による信号線の損傷は発生していたが、ケーブルの断線はあまり報告されていない。配線や配管に浮き上がりにも対応できる余裕をとるなど、耐震施工の工夫が有効である。

空気配管の耐震性はあまり厳密に検討されていなかった可能性があるが、空気配管（白ガス管）のねじ込みによる接続をやめて溶接にしたり、通常の配管と同様、設置する基礎を装置の基礎と共通化するなどの配慮が必要である。

プラント計装の健全性の確認への対策としては、スマート計装の活用が挙げられる。フィールドバスなどと組み合わせて遠隔での計器の迅速な状態診断も可能である。大規模災害時にこそ、緊急停止システムの健全性を確認する必要があり、そのためにも、スマート計器と緊急停止システムの間にはフィールドバスの適用を検討する必要があると思われる。

3.2.5 津波対策

津波に関しては、津波から人命を守るという観点、流された浮遊物がプラントに衝突して破壊される危険性を低減するという観点、冠水による電気システムの損傷を防ぐという観点が存在する。

津波から人命を守るためには、その避難場所や避難経路の確保はもちろん、現場での作業を不要にすることも望まれる。遮断弁の自動化だけでなく、二次処理の自動化も、避難をスムーズにする工夫といえる。また、津波が到達するまでの時間に、何をすべきかを事前に十分検討し、安全を優先しながらも、事前に決められた被害拡大防止のための作業をチェックリストにしたがって可能な範囲で実施することが望まれる。

浮遊物による破壊を避けるためには、プラント内に浮遊物を置かない、あるいは、浮遊物となるものを固定することが必要である。プラントの海側にあった駐車場を陸側に移設したり、重要な配管や遮断弁などをコンクリート壁で保護することなどが考えられる。また、プラント内に駐車しているタンクローリーをワイヤーでアンカーにつなぐという工夫をしている企業も存在する。

冠水の被害を防ぐために、非常用電源設備を高いところに移動するという対策はアンケートの回答にもみられる。現場計器の取り付け位置を高くするとか、配線の計器室への取り入れの防水対策、計器室の水密化などの対策も報告されている。

3.2.6 リスクの洗い出しと対策の検討

地震対策を想定するのに、リスクの洗い出しが必要であるが、リスク項目をどう洩れなく推定して対処するかが重要な課題である。異常状態は変化するため、状況に応じた想定と対策の組み合わせが多く検討が困難であるが、従来から行われているHAZOPの結果を活用することもその対策の一つになり得るかもしれない。

HAZOP では複数の異常を同時には想定しないが、地震や大規模停電によってユーティリティーが長時間にわたって喪失するような想定を含めて検討をする必要があることが今回の震災から分かった。

また、全プラントが同時に停止してしまうような事態においては、大気放出するガスがフレアスタックで処理できるか、保安のための窒素が足りるかなど、定量的な検討も必要になる。このような場合は、ダイナミックシミュレータを利用して詳細に検討することも必要となってくるであろう。

また、船が岸壁にぶつかってローディングアームが破損する、機器を結ぶ配管系が損傷を受けて漏洩するなど、HAZOP の想定原因を地震や津波による損壊まで拡張することも必要ではないかと思われる。

3.2.7 非常用バックアップ電源

計装やコンピュータ関係の電源のバックアップには無停電電源装置（UPS）が用いられていることが多いが、プラントを安全に停止するための必要時間からバッテリーの保持時間を決めているために、停電時の計装システムの不都合は生じていない。また、無停電電源装置自体、余裕をみた設計となっていることも多いと思われる。

しかしながら停電が長期化することを想定していなかったため、その後の経過監視や二次処置のために計器が読めなくなっている。非常用発電機を併設や、他の電源系統への接続換えが容易なような設計としておくことなどが必要である。

非常用バックアップ電源については、以下の例のように電源の用途ごとに整理することが必要である。

バックアップ電源の区分と対策の例

1. 火災とガス検知システム(ペーキングなども含む) : 蓄電池による
2. 重要電動機 : ディーゼル発電機などによる
3. 消火設備用 : 専用のディーゼル駆動ファイアポンプを有する場合がある
4. 建屋内非常灯 : 通常は蓄電池による
5. その他

海外では、取水ポンプや消火水ポンプなどについて、NFPA(National Fire Protection Association=全米防火協会)で規定されたバックアップ時間で稼働する容量の軽油タンクと発電機とをポンプ個別に持つようになっている。大型ガスタービン駆動圧縮機などは、ループオイルの直流モータ用に個別の蓄電池をもっていて、主電源が停止した場合でもループオイルが循環し、圧縮機の損傷を防ぐようになっている。

法規で定められている設備と、社内規程による設備があるが、津波の危険性も考慮した見直しが必要であると考えられる。

3.2.8 連動地震への備え

最初の地震よりも大きな地震が遅れて襲ってくることは、今後発生が予想されている大地震に対して、想定しておかねばならない。地震速報も最初の数値が小さいとして油断してしまわないように、訓練も含めて、新たな取り組みが求められる。

3.3 耐震設計基準値、プラント停止基準の震度やガル、カイン

東日本大震災では、防災科学技術研究所の全国強震観測網の観測点である K-NET 築館（宮城県栗原市築館）で 2933gal もの加速度が観測された。岩手県、福島県、栃木県、千葉県の多くの地点の観測所でも 1000gal 以上が観測されている。アンケート調査の耐震基準値（設問 39）での回答の最大値は 500gal であり、多くは、400gal 以下であり、150gal 以下の回答も少なくない。今回の地震で観測された地震波の最大加速度は耐震基準値をはるかに超えたものであり、壊滅的な装置の損壊が発生して当然なのではないかと感じたが、実際にはプラントだけでなく、一般の建物でも地震動による倒壊はあまり発生していない。

そもそも耐震基準値の加速度と観測されている加速度は同じものなのかという疑問を感じた。プラントの自動停止の基準値も今回のアンケートの設問 25 でたずねているが、その値も上記の観測加速度に対応するものなのかも疑問を感じた。プラントの自動停止に用いる地震計、感震計についても、バリエーションが存在し、停止基準値としての回答が同じでも、安全性は同じではないかもしれない。

そこで、この節では、地震動の加速度、震度、速度とは、そもそもどのようなもので、地震による破壊の指標としてどのような問題があるのかを整理することにする。

3.3.1 ガル(gal)とカイン(kine)

ガル gal は、加速度の単位であり、 cm/s^2 である。980gal が重力加速度と一致する。カイン kine は、速度の単位で cm/s である。地震により構造物にかかる力は、構造物の質量×加速度で評価できるので、地震動の加速度が地震の破壊力に関係することがわかる。そのため、耐震基準にガルという単位が用いられる。しかし、大きな加速度でも一瞬でその振動が終われば、そのエネルギーは小さく、破壊に至らない可能性が高い。そのため、エネルギーを評価するのに加速度を時間積分した値が用いられる。その積分値が速度に相当し、カインという単位で表される。

3.3.2 震度と SI 値と周波数特性

震度(seismic intensity)は 1996 年 9 月までは、0~7 の 8 段階の震度階級に分かれ、気象台の職員が、体感や被害などから判定していた。阪神大震災後の 1996 年、5 と 6 が強弱の 2 段階に分離され 10 段階となり、計測震度計によるものに改訂された*。震度は、被害の規模に相当するものになるように、周波数特性が考慮されている。

物体には、固有振動数が存在し、振動の周波数と固有振動数が一致すると共振が発生し、大きな振動になる。タンクのスロッシングは、液面の揺動と地震波のうちの長い周期の成分が共振する現象である。震度で考慮されている周波数特性を気象庁の web 情報¹⁾を利用して説明する。

図 3.1 は、2000 年 10 月 06 日の鳥取県西部地震の加速度波形である。南北方向の水

*震度は、世界的に共通な尺度ではなく、日本で利用されている気象庁震度階級（JMA seismic intensity scale）以外に、ヨーロッパで主に利用されているヨーロッパ震度階級（European macroseismic scale, EMS）、アメリカ、韓国で利用されているメルカリ震度階級（Mercalli intensity scale）などがあり、中国でも独自のものが用いられている。

平加速度の最大値が 280.2gal で 3 方向の加速度では最高で、3 方向の値を 3 次元で合成したベクトルの最大値は、285.2gal であった。

図 3.1 の加速度波形を周波数に分析したのが図 3.2 で、0~5Hz (周期で 0.2 秒以上) に大きなパワーがあり、20Hz (周期 0.05 秒) 程度までの成分が含まれることがわかる。

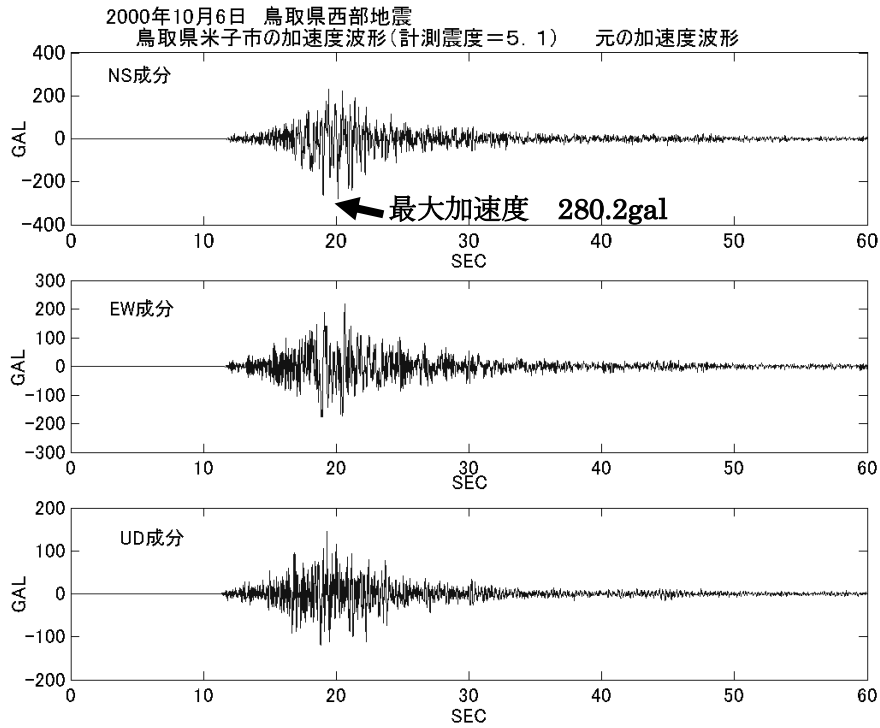


図 3.1 三方向の加速度波形（水平方向は、地盤の場合東西南北、建物の場合、長短方向）

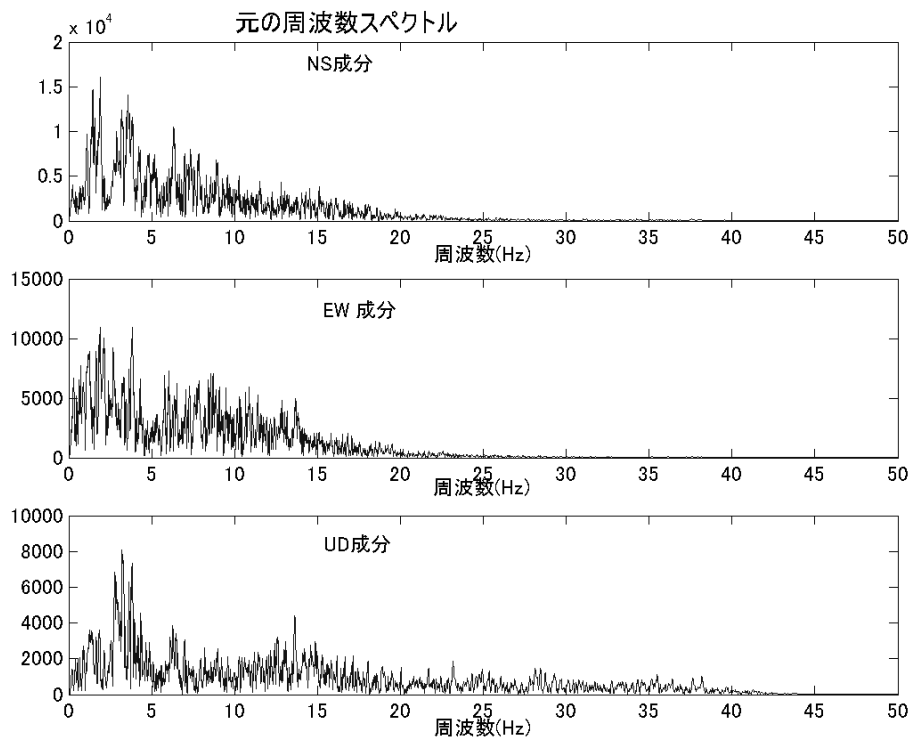


図 3.2 加速度の周波数成分

2階建ての新耐震・木造住宅の固有周期は0.2秒前後、2階建ての旧耐震・木造住宅で0.3秒前後、高さ20mの新耐震・鉄筋コンクリート造建物で0.3秒前後、高さ15mの新耐震・鉄骨造建物で0.3秒前後である。震度は、地震の被害を評価するための指標であるため、建物の固有振動数より低い周波数領域と高い領域をフィルタを用いてカットする。さらに高周波成分は低周波成分に比べると破壊力が下がるという周波数降下も考慮した補正する。この補正計算の特性を示したのが図3.3で、このフィルタを通した各加速度で3次元のベクトルを合成し、そのノルムの時間変化をプロットしたのが、図3.4である。

オリジナルの加速度波形の最大値が285.2galであったのに対して、フィルタを通すことによって、図3.4の加速度の最大値は、1/2程度になっている。

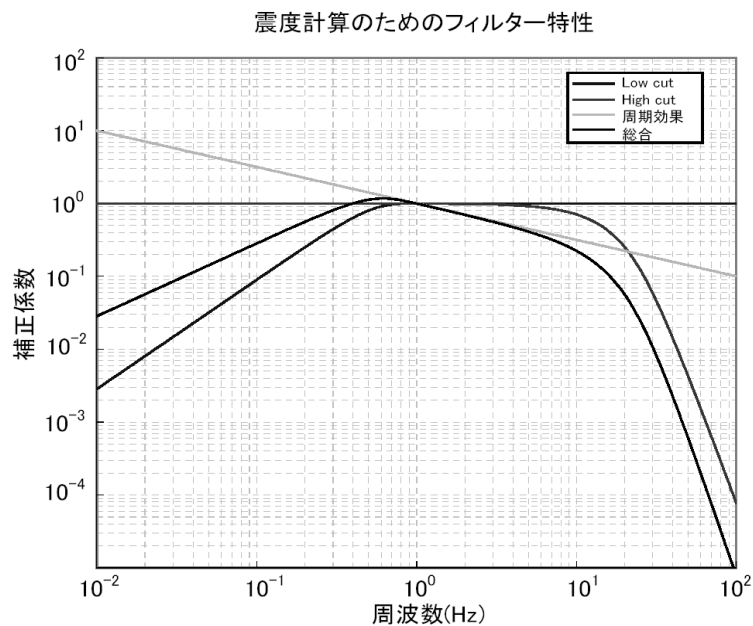


図 3.3 震度計算用フィルターの周波数特性

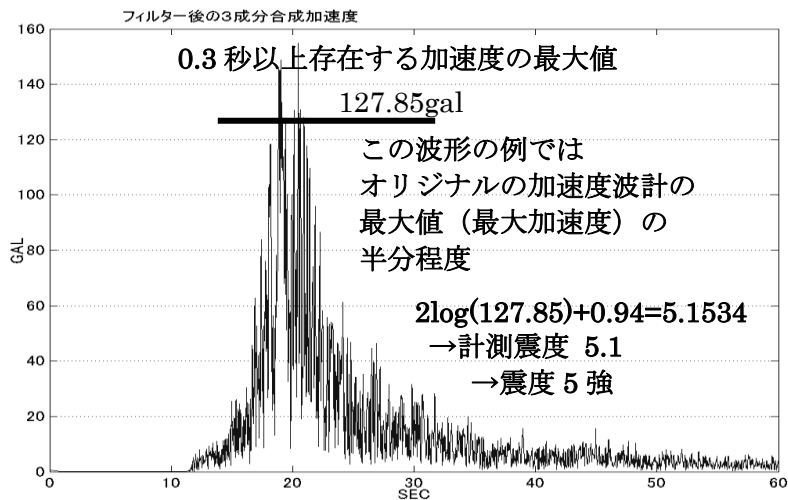


図 3.4 加速度の3次元ベクトルのノルムの時間変化

震度の算出の場合、瞬間値では破壊力の適切な評価にならないため、建物の固有振動の周期である 0.3 秒以上存在する加速度の最大値を求めていることになっており、この波形の場合、127.85gal となっている。

この加速度の値を震度に換算する関数に適用し、 $2\log(127.85)+0.94=5.1534$ と算出し、小数点以下第 3 位で四捨五入し、その後小数点以下第 2 位を切り捨てるというルールを適用して、計測震度が 5.1 と得られる。この計測震度を表 3.1 に適用し、震度階級が 5 強という評価が得られる。

表 3.1 気象庁震度階級と計測震度の関係

震度 0	震度 1	震度 2	震度 3	震度 4
計測震度 0.5 未満	計測震度 1.5 未満	計測震度 2.5 未満	計測震度 3.5 未満	計測震度 4.5 未満
震度 5 弱	震度 5 強	震度 6 弱	震度 6 強	震度 7
計測震度 5.0 未満	計測震度 5.5 未満	計測震度 6.0 未満	計測震度 6.5 未満	計測震度 6.5 以上

震度は、上記のように周波数と時間長を考慮して、地震の被害と震度階級の関連性を確保しようとしたものである。

速度波形は、図 3.1 の正負の値をもつ加速度を時間積分して求められ、その最大速度値も地震のエネルギーの指標として用いられる。最大速度 PGV(Peak Ground Velocity)をカインで表現した数値は、最大加速度をガルで表現した値と比例関係にはないが、ほぼ 1/10 になる地震も多いことが知られている。

最大加速度 PGA(Peak Ground Acceleration)については、周波数 0.1~5Hz のバンドパス・フィルタを通した加速度波形の最大値を用いる 5HzPGA(Peak Ground Acceleration)もあり、1985 年より JR や東京メトロで警報用に利用されている²⁾。

震度は、上記のように周波数と時間長を考慮して、地震の被害と震度階級の関連性を確保しようとしたものである。SI 値(Spectral Intensity)は 1961 年にアメリカのハウスナー(G.W.Housner)によって、地震による一般的な建物の被害程度を評価することを目的に、提唱された指標である³⁾。減衰係数 20%の速度応答スペクトルを一般建築物の固有周期の範囲である 0.1~2.5 秒の範囲で平均をとったものを SI 値とし、単位はカインである。

ここで、応答スペクトルは、地震動が図 3.5 のような減衰係数 h 、固有円振動数 ω の一点質点系に働いたときの動きを計算し、その時間変化の最大値を求めるもので、固有円振動数 ω を変化させながら計算し、周期の関数として整理したものである⁴⁾。速度応答スペクトルは、速度 dx/dt の最大値を求めたもので、加速度応答スペクトルは、加速度 d^2x/dt^2 の最大値を求めたものである。

加速度応答スペクトルは、加速度信号をフー

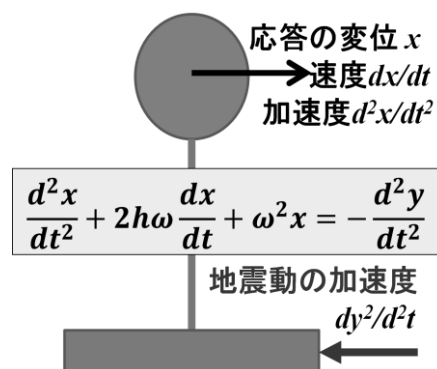


図 3.5 応答スペクトルの計算

リエ変換したものとは異なり、構造体への影響を評価するものである⁵⁾。

震度と最大加速度、SI 値を厳密に対応させることはできないが、概ねの対応表が表 3.2 のように示されている⁶⁾。SI 値が 100 を超えると、1981 年以降の新耐震基準による建物でも「中破、大破、倒壊」する危険性があると考えられる。

表 3.2 震度、最大加速度、SI 値の概略の対応表⁶⁾

震度階級	最大加速度(gal)	S I 値(kine)
震度 4	40～ 110 程度	4～ 10 程度
震度 5 弱	110～ 240 程度	11～ 20 程度
震度 5 強	240～ 520 程度	20～ 40 程度
震度 6 弱	520～ 830 程度	41～ 70 程度
震度 6 強	830～1,500 程度	71～ 99 程度
震度 7	1,500 程度～	

3.3.3 建物の損壊と周期特性

地震による被害は地震の周波数特性に大きく関係し、震度や SI 値の算出では周波数特性が考慮されている。しかし、これらで周波数の考慮の仕方が異なる。

表 3.3 に、地震でビルの倒壊など大きな被害が発生した阪神大震災のときの観測地と東日本大震災での 2 地区の例を示す⁷⁾。東日本大震災での栗原市築館地区がずば抜けて大きな最大加速度と震度を観測しているが、住居の被害は、それほど大きくない。被害は、阪神大震災の神戸市鷹取地区がずば抜けて大きく、地区の半数以上の住宅が全壊している。東日本大震災では、加速度も震度も栗原市築館地区よりは小さい大崎市古川地区の方が、多くの住宅が全壊の被害にあっている。

図 3.6、図 3.7⁸⁾より、築館は 0.2~0.3 秒周期の成分は大きいですが、1~2 秒の周期の成分は阪神大震災の鷹取が最も大きく、築館は古川よりも小さくなっていることがわかる。

表 3.3 東日本大震災と阪神大震災での最大加速度の大きな観測地のデータ⁷⁾

東日本大震災	最大加速度	計測震度	震度	最大速度	SI 値	地区住家全壊
MYG004 築館	2933gal	6.6	7	109.27kine	109.17kine	3 棟
MYG006 古川	583gal	6.0	6 強			154 棟
1995JR 鷹取	759gal	6.10	6 強	138kine	163kine	59.4% ^{*)}

^{*)}筑波大学境研究室(<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/hgn.htm>)から追記

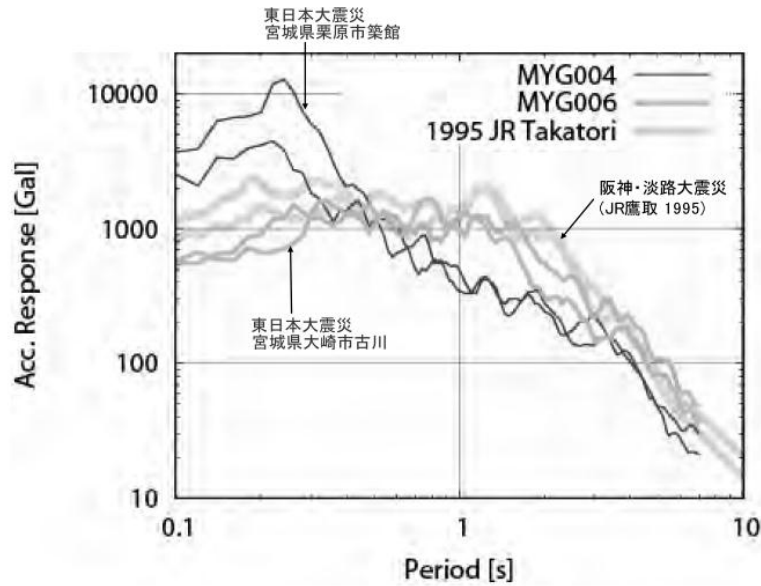


図 3.6 加速度応答スペクトルの地震による差異⁸⁾

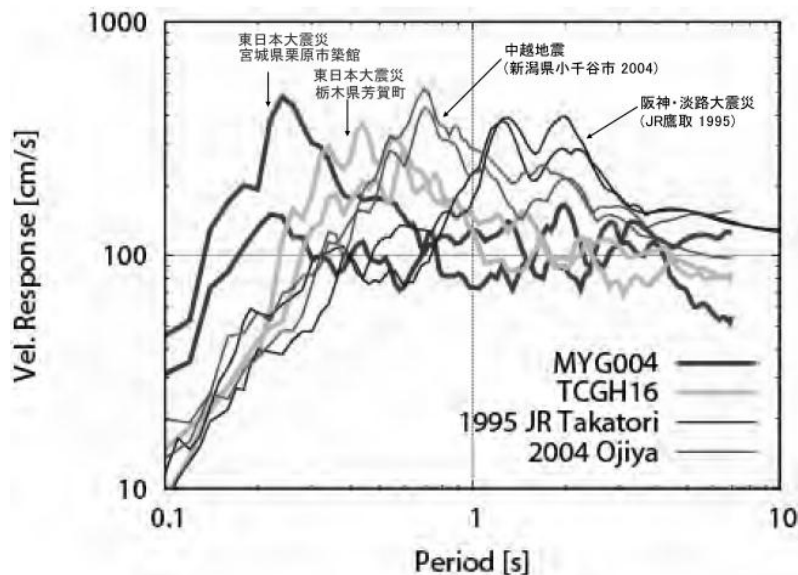


図 3.7 速度応答スペクトル⁸⁾

弾性速度応答スペクトルの周期に対応する弾性速度応答と実際の建物被害（全壊、大破）との相関を表した図 3.8⁹⁾を見ると、相関が強いのは 1～2 秒の地震動の周期帯で、建物の固有周期に対応する 0.2～0.3 秒前後の周期帯は相関が小さい。この 1～2 秒の周期帯は、建物の塑性化による固有周期の伸びを考慮した等価周期と対応している⁹⁾。

SI 値は、その周波数の積分領域が 0.1～2.5 秒であるので、震度よりも建物の損壊の指標として適切なものと考えられるが、積分する周期範囲については再考の余地があるかもしれない。

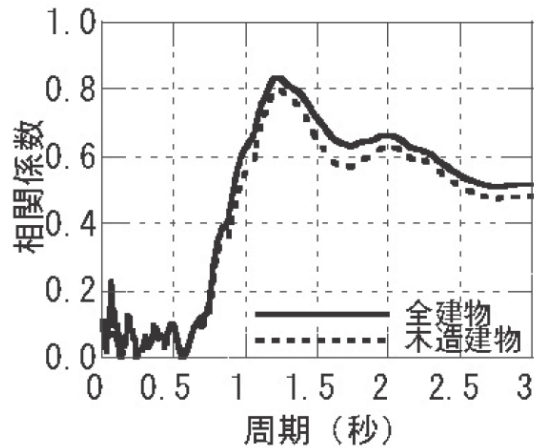


図 3.8 弾性応答スペクトルの周期と建物被害の相関関係 (実被害データ) ⁹⁾

3.3.4 耐震基準と設計基準の振動

構造物の耐震設計では、使用期間中に発生する確率が高い地震動 (レベル 1 地震動) と、発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動 (レベル 2 地震動) の 2 段階のレベルの設計地震動を考慮することが要求されている ¹⁰⁾。図 3.9 に土木構造物のレベル 1 とレベル 2 のタイプ 2 の例を示すが、どちらも、標準加速度応答スペクトルが地盤に応じて与えられており、それに、減衰定数別補正係数と地域別補正係数を乗じることで設計地震動が設定される。

レベル 2 の標準スペクトルは、プレート境界型と直下型の 2 タイプが用意され、関東大震災と阪神大震災を想定して設定されている。土木構造物に対するレベル 2 のタイプ 2 の I 種地盤 (良好な岩盤) に対する 0.5 秒周期あたりの最大加速度応答は 2000gal にもなっている。

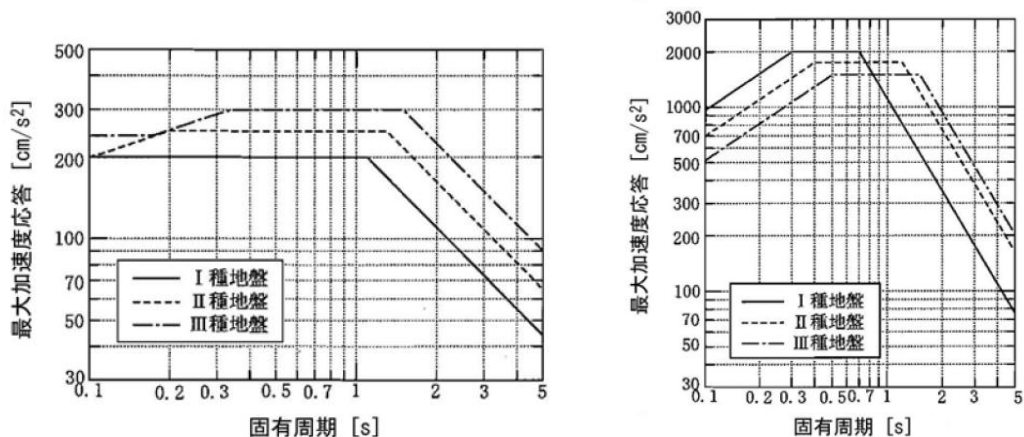


図 3.9 レベル 1 とレベル 2 タイプ 2 の地震動の標準加速度応答スペクトル ¹⁰⁾

耐震構造設計を時刻歴応答解析によって行う際には、その加速度応答スペクトルに近い周期特性をもつ時間変化の加速度信号を図 3.10 に示すように合成する。

アンケートでは、耐震設計基準は何ガルですかと、質問したが、耐震設計を厳密に担当する方にとっては、答えにくい設問になっていたかもしれない。

地震のことを十分に理解せずにアンケートの設問を設定しまっていた反省をすることともに、今後、地震計に対するプラント停止体制を見直す際には、周期特性を考慮することが重要であることを理解できた。

そして、今回、大きな震度や加速度に関らず、プラントに大きな損壊がほとんど発生しなかったのは、耐震対策が功を奏したのではなく、周波数特性の問題で地震自体の破壊力が小さかった可能性があることも理解できた。したがって従来の耐震対策に慢心することなく、地震の危険性を詳細に検討しなおすことが求められる。

装置損壊の危険性を適切に判断するためには、装置ごとの重要な周期や設置場所の地盤の周期特性を把握することが重要であり、事業所内の危険性が一様でないことも意識することが必要であると考えられる。さらに、自動停止に用いる地震計にも、周期特性も含めた停止基準の選択ができる機能が望まれる。

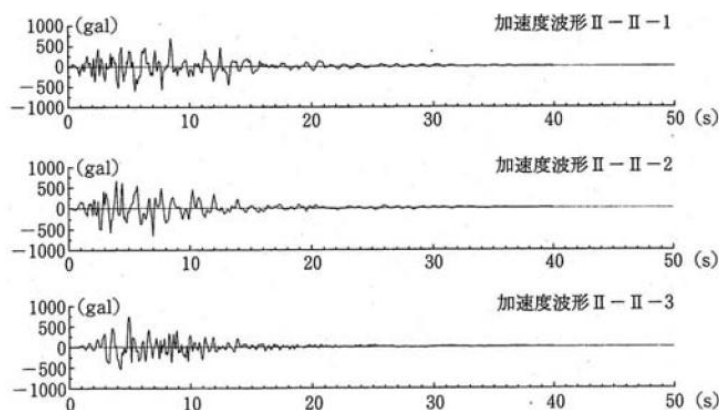


図 3.10 時刻歴応答解析に用いる地震動の例¹⁰⁾

<参考文献>

- 1) 気象庁：計測震度の算出方法、
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm
- 2) 株式会社システムアンドデータリサーチ：リアルタイム震度、計測震度、SI 値、最大加速度 PGA および 5HzPGA について：http://www.sdr.co.jp/papers/ri_5hzpga.html
- 3) 鈴木、島倉：地震時運転規制方法の研究：JR 東日本研究開発センター安全研究所
http://www.jreast.co.jp/development/tech/pdf_3/53-60.pdf
- 4) 鈴木：防災工学概論：山梨大学
http://civil.cec.yamanashi.ac.jp/~takeyasu/disaster_management/Lecture_No6.pdf
- 5) 気象庁：フーリエスペクトルと応答スペクトル
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/outou.htm>
- 6) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：観測情報の利用にあたって、
<http://www.nilim.go.jp/japanese/database/nwdb/html/how-to-use.htm>
- 7) 源栄：地震動と建物被害の関係：東北大学災害制御研究センター

http://www.dcrc.tohoku.ac.jp/surveys/20110311/docs/20110610_2-3_motosaka.pdf

- 8) 厚生労働省：東日本大震災水道施設被害状況 2.2 地震動とその特徴

http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/houkoku/suidou/dl/121214_022.pdf

- 9) 境有紀：地震動の性質と建物被害の関係，特集：地震動の性質と被害－近年の地震からの知見－，日本地震工学会誌 No.9, pp.12-19, 2009年1月

<http://www.jaee.gr.jp/stack/mag-j/kaishi09.pdf>

- 10) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：土木構造物の設計地振動

<http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/division/hazard/kouza.pdf>、土木技術資料(2007)

3.4 自動停止システム用地震計

アンケート回答を整理する段階で、地震計連動プラント停止システムには、利用される地震計にバリエーションがあり、その差異を特定せずに、信頼性や有効性を論じることが難しいことがわかった。そのため、アズビル株式会社アドバンスオートメーションカンパニー 林 功氏に以下の地震計の情報を提供いただいた。

3.4.1 地震計の技術的変遷

いわゆる地震計と呼ばれるものには、地震動の波形を記録する「地震計」と、地震動の波形を記録するのではなく、地面が揺れたことを捉える「感震器」とに大別される。現在では、感震機能に特化したものを感震器、地震動の波形記録に感震機能も具備したものを地震計と呼ぶことが多い。

感震器の歴史は古く、少なくとも132年に張衡（ちょうこう、78年～139年、後漢代の政治家、科学者、文学者）が発明したとされる「地動儀」と呼ばれる、玉が落ちて地震を知らせる感震器に遡る。この「落球式」の原理は、現在でも使用されており長い歴史を有する。近代になって機械式地震計が登場した際には、地震計を起動させる装置として用いられた。その後その役割は不要となったが、より精度を上げた感震器が開発され、地震を検知して緊急通知をしたり装置を停止させたりして二次災害を防止するために使用されている。

地震計は、明治の初めに来日した外国の科学者たちが地震を体験して驚き、科学的に地震を捉えようとして地震計を作り出したことに始まり、その後日本人の研究者も出てきて改良を加えていった。

地震を捉えるために各種の試みが行われたが、「振り子」を使うことが現実的であるという結論に至り、振り子を利用した精密な機械仕掛けの地震計が製作された（ユーングレイの円盤式地震計（1880年初頭）、大森式地震計（1898年頃）、ヴィーヘルト式水平動地震計（1904年）、今村式2倍地震計（1911年。1923年の関東大震災を記録している）、石本式加速度計（1931年）など）。現在でも原理的にはこの振り子を利用したものが多い。機械式地震計は、1880年初頭から1960年代頃まで普及した。

機械式地震計は、針先や、てこの支点の摩擦に打ち勝って性能を向上するために大型化が図られ、1トンを超えるおもりのものも登場したが取扱いが容易でなく、かつ拡大倍率には限界があった。

その欠点を克服するために、振り子の動きを光学的な仕組みで捉えて印画紙に記録する地震計が登場した（ミルン水平振り子地震計（1894年）、ウッド-アンダーソン式地震計（1924年））。しかし、摩擦の問題は解消できたものの、現像する手間がかかる短所があったことと、その後登場する電磁式の利便性が高かったこともあり、1970年代頃までは製作されたものの、大きな普及には至らなかった。

電磁式は、同じく機械式地震計の摩擦の問題を克服するために、コイルを磁場の中に置き地震動を電圧の変化に変えることで記録をする方式である（ガリッチン式地震計（1907年）、59型電磁式地震計（1959年））。当初は地震計のコイルの起電力で

じかに電流計を動かして記録する方法をとっていたが、後のエレクトロニクスの発達により増幅器が使われるようになり、拡大倍率が数千倍から数万倍を超えるようになった。また、地震動をいったん電気信号に変えれば、記録データの保存性もよく、かつデジタル化によるデータ処理も容易なことから急速に普及し、現在ではほとんどの地震計が電磁式になっている。

1990年頃からは、マイクロプロセッサ技術を応用してデジタル回路を組み合わせて記録する地震計が登場してきた。マイクロプロセッサ技術が劇的に向上していく中、小型・高精度・高機能な地震計が安価で実現できるようになった。地震の震度は、揺れに対する人の感覚や地震動の建造物と自然界への影響の大きさを表す尺度であり、従来は体感や被害の程度から人が決めていたが、1995年兵庫県南部地震を契機に、客観性や速報性が一層強く求められるようになり、従来の震度階（旧震度階：8段階）から、震度を機器により計測（計測震度）する方式に対応した新震度階（10段階）に1996年に変更された。このことに対応して1996年に初の計測震度計が登場した。このことは、マイクロプロセッサ技術の向上により、複雑な演算処理が高精度かつ高速で行えるようになったことが大きく貢献している。

2000年以降は、マイクロプロセッサベースの地震計はさらに発展し、計器の自己診断により高信頼化を図ったもの、液状化判定など複雑な信号処理技術を搭載したものが登場している。また、小型・高機能かつ高信頼な地震計が登場したこととインターネットなどの大規模ネットワーク網が登場したことにより、従来の少数点在の観測網から多点観測網が実現できるようになり、気象観測用の他、鉄道網や道路網、ガス供給網などの大規模な社会インフラの管理・制御用としても発展している。さらに一般の工場や事務所などの二次災害防止用としての地震警報装置や自動緊急遮断装置への活用が進んでいる。

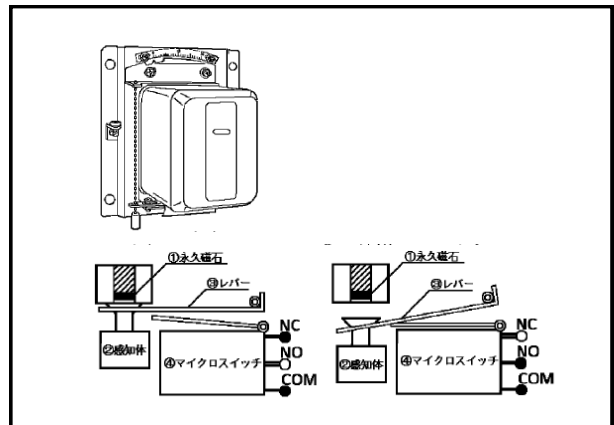


図 3.11 磁石式感震器の例

3.4.2 地震計の種類と適用分野

地面が揺れたことを捉える機能に限定した「感震器」は、現在でも機械式的のものが多く、落球式、倒立棒式、摩擦式、バネ式、磁石式などがある。これらは地面の揺れにより単純な機械的動作をする仕組みで精度には限界があり誤作動や不作動を防ぐ対策が取りにくい面があるが、単純・小型・安価であるのでエレベータ、ストーブ、温水器、小型ボイラなどに多く使用されている。磁石式の例を示す（図 3.11）。

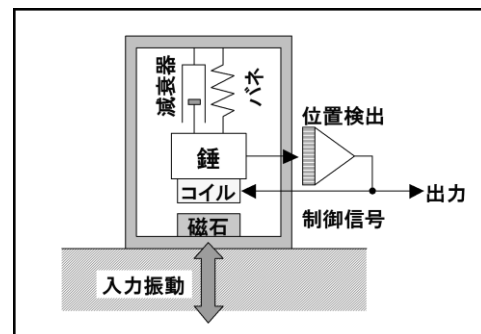


図 3.12 サイズモ系サーボ型地震計

現在の「地震計」の多くは、上述したように振り子の原理を利用した電磁式で、地震動の波形を記録することができ、かつ感震機能を持つ。この振り子の原理を利用した地震計は、サイズモ系地震計と呼ぶ。サイズモ系地震計は、質量（錘（おもり））、弾性要素（ばね）、減衰要素（ダンパ）

表 3.4 地震計の機能と適用用途

	機 能		用 途
H I 地震計測・解析	監視／測定装置 (センサ部+演算部) ・データ収集機能 ・表示機能 ・テレメータ機能	価格 高 ↓ 小型 機能の絞り込み ↑	・気象 ・ダム ・振動分析 ・電力 ・JR(新幹線) ・JR(在来線)
MID 二次災害防止(HI)	感震器 ・接点出力(設定値可変) アンプ内蔵型センサ ・加速度測定		・道路公団 ・石油・化学プラント ・工場
LOW 二次災害防止(LOW)	感震器 ・接点出力(設定値固定)	高信頼性 高機能 ↓ 価格 低	・エレベータ ・温水ボイラ ・暖房機 ・ストーブ

で構成されている。また、現在サイズモ系地震計で主流になっているのは、「サーボ型」である(図 3.12)。サーボ型は、サイズモ系のおもりの位置を検出しサーボアンプでその信号を駆動コイルにフィードバックし、磁石との反発力などを使っておもりの位置を元に戻すよう制御し、その制御信号を地震動波形として取り出す方式で、可動部を持つサイズモ系センサでありながら、可動部を動かさずに計測ができるという特徴があり、精密かつ高信頼な計測ができる。その他の方式としては、圧電式、静電容量式、ピエゾ抵抗式などがある。

適用分野としては、地震動の計測および解析を目的とするもの、二次災害を防止することを目的とするものに大別される。さらに二次災害防止には、小さな装置や機器などの小規模なものから、産業用プラント、社会インフラおよび交通システムなど大規模なものまで幅広い利用分野があり、目的に応じてそれに適用する感震器や地震計は、計測の原理的には同じでも具備すべき機能が異なる(表 3.4)。

3.4.3 地震対策 BCP 向け地震計システム

地震動の計測および解析を目的とする地震計においては、東日本大震災規模の経験を踏まえ、さらなる測定上限の拡大や広域・多点データ収集能力の向上と解析機能の向上が求められている。また、その観測網を生かした地震予報システムの構築は未だ精度的な課題が多いものの早期の完成が望ま

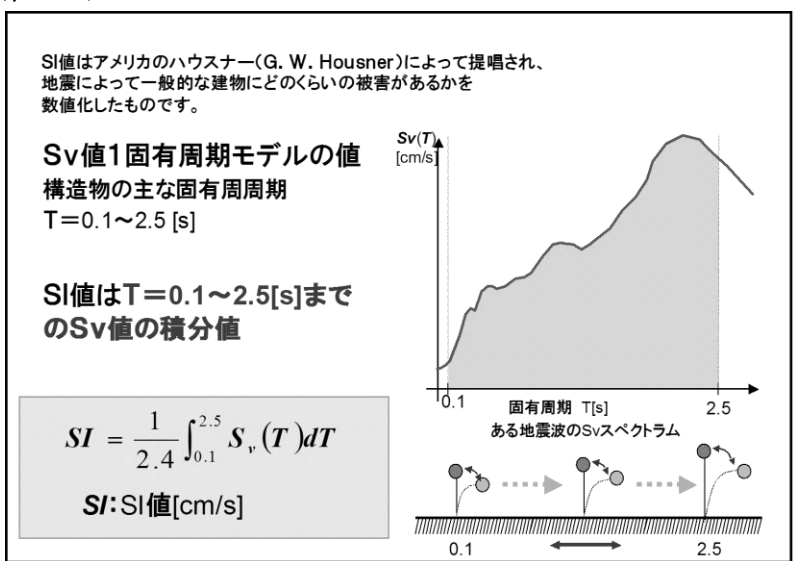


図 3.13 SI(Spectrum Intensity)の計算式

れている。

また、二次災害防止目的の地震動計測においては、その地震動が建造物にどの程度の被害を与えるのかを知ることが必要であり、SI (Spectrum Intensity) 値が使用されている。SI 値は、建造物への地震動による破壊力を表すひとつの指数であり、Dr. G. W. Housner により提唱された (図 3.13)。この SI 値は建造物への被害度との相関が高く、計測震度とも相関が高いことが確認されている (図 3.14)。最新型地震計では、加速度や計測震度はもとより、この SI 値さらには地震動波形から地盤の液状化判定をリアルタイムに計測・演算できるインテリジェント型の地震計も登場している (図 3.15)。

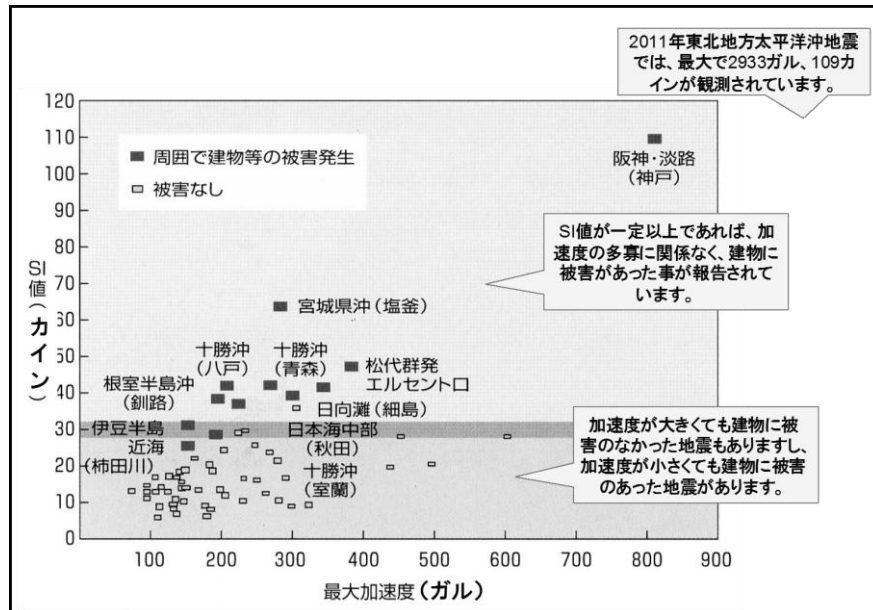


図 3.14 SI 値と加速度の被害度の相関



図 3.15 インテリジェント型地震計(SI センサ)

二次災害防止目的の地震計の運用としては、地震計の感震機能による緊急通知を受けての設備の自動または手動停止と避難という行動になるが、東日本大震災においては、地震計の不作動、揺れが激しいため、手動停止の冷静な判断や操作自体ができなかった、緊急解放できず部屋に閉じ込められたなどの問題が浮上した。また、緊急に停止はできたものの、安定した状態ではなかったため、復旧に手間取った事例も報告された。これらを解決すべく、緊急時には自動的に設備を安全・安定で停止させて、避難ゲートの緊急開放を自動的に行うことができるシステムも登場した。

製造設備の自動停止や避難ゲートの緊急開放を目的とする地震判定システムにおいては、誤作動 (地震が発生していないのに地震と判定してしまうこと) と不作動 (地震が発生しているのに地震と判定しないこと) を極力少なくするシステム設計が必要である。1 系統のシステム (非冗長システム) では、ひとつの誤作動がシステムの誤作動につながり、ひとつの不作動がシステムの不作動になるため、地震計センサや論理演算回路の冗長化が考えられる。

しかし、2 系統だけを用いた『直列システム』や『並列システム』では、誤作動、不

作動の問題を十分に解決することはできない。基本的に 2 系統だけを用いたシステムでは、どちらの系統の判定が正しいのかを判定結果から判断することはできない。

そしてさらにこの判定結果を用いて『直列システム』、『並列システム』を構成したとき、『直列システム』の場合、どちらかの系統が不動作状態となったとき、地震判定が正しく出力されない。また、『並列システム』の場合、どちらかの系統が誤作動したとき、地震判定が誤って出力されてしまう。

このシステムは、平常時の誤作動や緊急時の不動作を極限に少なくするため、システム全体を 3 重化し、3 系統による多数決 (2 out of 3) システムとし、どの系統の判定が正しいかを高い精度で判断することができるようにした。この判定結果を用いることにより、ひとつの系統が誤作動をしても、不動作をしても、システムの地震判定出力に影響を与えることが極めて少なくなる。

さらに地震計やコントローラ単体の健全性のみならず、それらの接続配線も含めたループ全体が正しく動作するよう保つことが重要である。従来、ループの動作チェックは定期点検時に手動による確認を行っていることが多いが、数ヶ月～数年毎の動作チェックでは高信頼性を保つには必ずしも十分とはいえず、かつ手動による動作チェックには手間とヒューマンエラーによる誤動作リスクも生じる。このシステムでは、地震計の点検とループ配線チェックも自動的に定期点検を行うことにより、システム全体の健全性を常に保つことができる仕組みを備えている。

このことでシステムに潜在している不動作状態を検出し、システムの信頼性をさらに向上させている。このチェックは地震判定処理を中断することなく行うことができる (図 3.16)。

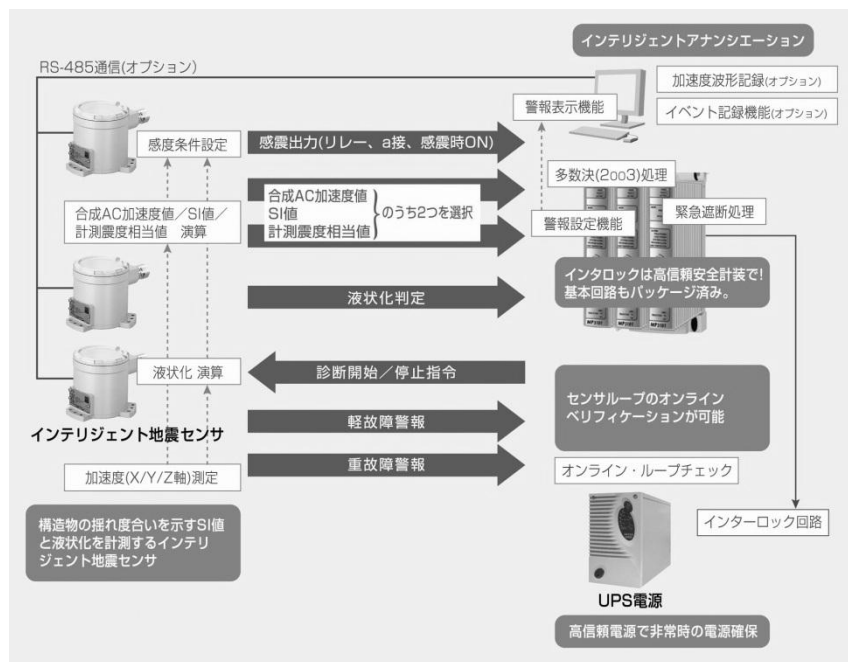


図 3.16 高信頼型地震時緊急停止システム

<参考文献>

- 1) 「地震計の歴史」, 国立科学博物館/日本館
- 2) 林, 茨木, 瀬戸口, インテリジェント地震緊急停止システム, 計装, 2012年6月号
- 3) 古川, 田久保, 築田, 市田, 清水, 小金丸, 中山, インテリジェント地震センサの開発, Savemation Review, 1999年8月

第 4 部

東日本大震災の教訓と今後に備えて

3・11からの教訓 —プロセス計装分野を主として—

伊藤 利昭

1. はじめに

3.11 震災から2年近くが経過した。その間に消防庁、高圧ガス保安協会および各地域の保安防災組織などで、被災状況の解析と地震・津波への対応に関する報告書が出された^{1), 2), 3), 4)}。福島第一原発の事故についても、政府、国会、東電、民間の調査報告書が出揃って^{5), 6), 7), 8), 9), 10), 11), 12)}、事故の経緯や課題もある程度理解できるようになった。

一方 プロセス計装分野では、計測自動制御学会(SICE)を中心に

- ・ 2011年7月 ARC Forum「東日本大震災を契機にオートメーションのあり方を問う(パネル討論)」(ARC ジャパン主催 SICE 協賛)
- ・ 2011年9月 SICE50周年記念行事「After3.11我々はどう行動すべきか(パネルディスカッション)」
- ・ 2011年10月 計装制御技術会議「震災体験談(講演とパネル討議)」(日本能率協会主催 SICE 協賛)
- ・ 2012年7月 ARC Forum「大震災からオートメーションは何を学ぶべきか(パネル討論)」(ARC ジャパン主催 SICE 協賛)
- ・ 2012年11月 SICE 産業システムシンポジウム「3.11 震災で計測制御エンジニアが見たこと、感じたこと、そして考えること」(SICE 産業応用部門 2012年度大会)

などで、工学の社会的使命、技術者のなすべきこと、計測制御技術とシステム工学のあり方、3.11 から学ぶべき教訓、事前の備えや現場における対応力の重要性、BCP/BCMの重要性など 広範囲にわたって議論がおこなわれた。

本稿では以上のような議論や報告書をもとに本アンケート調査の結果を踏まえて、3.11 震災を通じて得られた教訓をプロセス計装分野の将来に活かすという視点から私見を述べてみたい。

2. 地震時の保安防災における計装システムの役割

図1は、稲葉氏が提案した外部事象として破壊的地震を想定した保安防災の流れ¹³⁾である。図1には、下記の3つの保安防災上重要なプロセス計装システムの役割が含まれている¹⁾。

¹⁾ 化学プラントで使い慣れている AICHe/CCPS の多重独立防護層(AICHe/CCPS: Guideline for Safety automation of Chemical Processes, p.14, AICHe, 1993)は、誤操作や装置・機器の故障などの内部起因事象による異常への防護層としては適切であるが、地震や津波、強風や洪水のような自然現象や、テロ行為のような意図的外部起因事象に適しているとは思われないので、図1に基づいて論ずる。

- ① 事故未然防止：地震に伴う原料・用役供給の異常、機器・装置の故障、誤操作などに起因するプロセスの異常とその進展を防止するために予めプラントを停止する
- ② 事故局限化：地震による装置やタンク・配管などが破損やプロセスの異常によりプラント内容物が漏洩した場合、遮断弁によりプラントやタンク・配管系をブロック化して漏洩流出の拡大を防止する
- ③ 監視：図 1 の事故の未然防止、事故災害の局限化、生命保護の各段階に亘ってプラントの状況を監視する

①は「構造安全による破壊漏洩の防止」とともに「事故の未然防止」システムを構成し、②は「事故災害の局限化」システムの一部として機能し、③は保安防災の全段階において判断と意思決定のベースとなる情報を提供する役割を担っている。

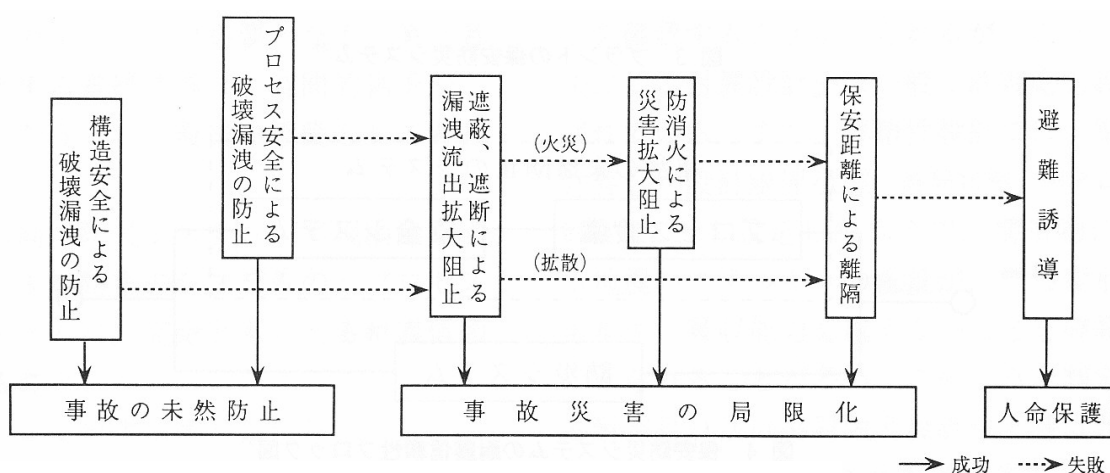


図 1 破壊的地震時における保安防災の流れ

3. 保安防災のために必要なプロセス計装システムの機能

3.11 震災の教訓をもとに、プロセス計装システムがもつべき機能と検討すべき課題などを述べる。

事故未然防止 - 緊急停止システム

前項における①の機能は一般的な緊急停止システムと大きな違いはないが、地震時の保安防災システムとして機能させるためには、プラントを停止する地震動の基準を下記のように事業所全体の保安防災を考慮して体系的に決める必要がある。

- ・高温・高圧設備、酸化反応設備、毒性ガスや可燃性ガス・液体を取り扱う設備など、地震防災上危険な設備を優先的に停止する
- ・電力、冷却水、窒素、計空など保安に必要な用役設備は可能な限り運転を継続する

阪神淡路大震災における前回の調査¹⁴⁾によれば、震度7～6の場合、運転員は避難あるいは自身を守るだけで精一杯であると述べられており、激しい地震動の最中に運

転を継続するか否かの判断を運転員に期待することはできない。

また、高レベルの地震動は設備や装置に損傷をもたらす可能性が高いため、地震直後からの設備・装置の点検と安全措置が欠かせない。さらに、津波の来襲がある場合には避難を優先するので、設備・装置の点検と安全措置にかけられる時間は限られる。

今回のアンケート調査によれば、地震計と連動して自動停止した事業所はプラントが停止した 35 事業所中 11 事業所であり多くはないが、以上のような理由から地震計と連動した自動停止が必要ではないだろうか²。

消防庁の調査によると、津波によりタンク付属の配管が損傷を受けたり、タンクが浮上移動したりしている。津波によるタンクからの危険物流出を最小限にする対策として、津波が到達する前にタンク元弁を閉止すること（緊急遮断弁の設置）が必要と考えられているが、タンクの元弁閉止までに必要な時間と津波襲来までの余裕時間の関係が問題になっており¹⁵、このような場合にも緊急遮断弁を自動シーケンスで閉止することが必要であろう。

事故局限化 - 緊急遮断システム

前項②の目的は、遮断弁によってプラントやタンク・配管系をブロック化し、装置やタンク・配管などの損傷に伴う漏洩を局限化することにあるが、コスモ石油千葉および J X 仙台における事故の調査報告など^{16), 17), 18), 19)} を読むと、事故を局限化するための操作は現場で漏洩箇所を確認して遮断弁を操作することになっているように見受けられる。

コスモ石油千葉の火災爆発事故では、ガス検知器の発報箇所を示す警報盤や緊急操作スイッチが現場の無人計器室や現場ヤードにおかれていたために、漏洩箇所の特定と緊急遮断操作が遅れた。

J X 仙台の火災事故では、大津波警報が発令されていたため現場の設備には近づくことができず、緊急遮断弁の遮断操作は行われなかったとされ、火災発生後も津波警報下で現場に入ることができず、ヘリコプターで火災現場を視察して発災場所と発災場所への油の供給源を特定している²⁰。

このような事例からみれば、コスモ石油千葉の火災爆発事故の再発防止策に掲げられているように、事故を局限化するために必要な計測と操作は運転員の常駐する計器室からおこなえるようにするべきである。

先人は、タンクの受入側には遮断弁に代えて逆止弁を用いる、遮断弁への空気配管に熱溶融性のプラスチックチューブを用いる、あるいは遮断弁の空気圧駆動部（スプリングクローズ）に熔栓を用いるなど、シンプルで確実に作動する緊急遮断システムを実用化した。このような先人の知恵に学ぶことも必要であろう。

² アンケートによれば、40 回答事業所のうち 10 事業所が「地震計の信頼性に疑問あり」と答えている。地震計そのものが信頼性に欠けるのか、計測値がプラントの損傷を招く地震動を代表する値であるかどうかに関する疑問か、あるいは他の理由によるものかが明確でないがこの点にも大きな課題が残されている。

監視

東電福島第一原発では、直流電源喪失により計測監視機能を喪失したことが原子炉の状況および非常用炉心冷却系の作動状況の誤認を招いて、炉心溶融に至る一因となった。このことから、保安防災における計測監視機能は極めて重要なことは明らかである。

原子炉の状況および非常用炉心冷却系の作動状況の誤認を招いたもう一つの原因にウェットレグを用いた差圧測定による原子炉水位計の誤指示がある。蒸気が凝縮してドレンポットで一定レベルに保持されているはずの基準側のウェットレグの液柱が、原子炉圧力の低下あるいは高温となった原子炉からの伝熱によって蒸発し、その分だけ実際の水位より高く指示されていたにもかかわらず、水位計の指示を信じて燃料棒が冠水していると判断したために代替給水が遅れた。

このように事故時には、プロセスの状況が変化して計測条件が変化する可能性があることに留意し、計測原理の異なる計器を並置して、計器指示の異常に気付かせるための配慮をすることが必要である。

原子力安全・保安院がまとめた教訓²¹⁾には、事故時における計装設備の信頼性確保、監視カメラやロボットの活用によるプラント状態の監視機能の強化、事故時モニタリング機能の強化などが述べられているが、これらはプロセスプラントでも共通する課題であろう。

出光興産では、十勝沖地震(平成15年)において発生したタンク火災を教訓として、地震計データから地震の特性をリアルタイムで解析しタンクの液レベルやタンク寸法等に基づいて被害予測をおこない、点検すべきタンクや点検箇所に関するガイダンスをおこなうシステムが開発され(開発:出光エンジニアリング)、実用に供されている²²⁾。

危険が迫っている緊急時に点検監視をガイドする上述のようなシステムや、第一線の運転員や作業者に代わって現場の状況を把握し操作するための工夫、ワイヤレス計装²³⁾のような新しい技術の普及・実用化などが期待される。

フェイルセーフ

緊急停止システムや緊急遮断システム、監視機能を正常に作動させるためには電源や計空などの用役が必要であるが、地震動が用役源の耐震性能レベルを超えて用役の供給が停止する場合があります。今回のアンケート調査では、40事業所のうち20事業所で電源を喪失し、22事業所で計空を喪失している。

地震防災のための緊急停止システムや緊急遮断システムでは、電源や計空などの駆動源喪失がおこることを前提としたフェイルセーフ機能を備えねばならない。

電源、計空のバックアップ

東電福島第一原発では、地震と津波によって全電源を喪失した際にフェイルセーフ動作が作動して原子炉格納容器が隔離されたが(1号機)、同時に外部冷却源による炉心冷却が停止して炉心溶融を招いた。隔離解除スイッチがあったようだが、全停電のため隔離解除操作をおこなえなかったのではないかと想像される。

原子炉では核分裂反応の停止後も発生する崩壊熱を除熱するために冷却を継続する必要があるが、化学プラントでも、重合反応のようにモノマーと重合触媒が存在する限り反応し続ける場合や自然冷却のみでは気化により圧力が上昇するなどの場合には、それぞれに応じた二次処理を行わねばならない。

二次処理に必要な冷却源、電源、計空などの用役のバックアップや、前述の監視に使用される計器類の作動に必要な電源、計空のバックアップが必要である。

保安防災に必要な手動運転

東電福島第一原発では弁の駆動源を喪失したために、格納容器からのベントラインの遠隔操作弁³や主蒸気逃し安全弁の開操作に手間取った。そのために原子炉の減圧が遅れ、速やかに非常用炉心冷却から代替注水に移行することができず、炉心損傷に至った。

このような事態を避けるためには、保安防災に必要な現場での最小限の計測と手動運転を可能にするための準備が必要である。従来から装備されている調節弁・自動弁の手動ハンドルやバイパス弁、現場機器への圧力ゲージや直視型液面計、温度計さや管などの装備に加え、バッテリー、可搬型計測器、可搬型小型発電機や小型空気圧縮機、空気ポンプ、工事用資材などの準備が必要になろう。

東電福島第一原発の現地責任者へのヒヤリングでは、計装制御設備の復旧にあたる要員が絶対的に不足していたことが明らかにされており²⁴、資材のみではなく要員についても考慮しておく必要がある。

4. 計装設備の地震・津波対策からみた教訓と課題

計装設備の地震・津波対策と被災後の復旧について述べる。

計装設備の地震・津波による被害と対策

アンケート結果によれば、地震被害では計空配管の折損や漏れが多い。白ガス管のねじ接合部への応力集中による折損や、銅管配管の変位吸収能力不足による計器や弁類との接続部における漏れと考えられる。遮断弁まわりの計空配管の破損や漏れは、遮断弁の不動作や動作不良を招く可能性があるため、ステンレス配管を用いて溶接継ぎ手を採用したり、配管末端にループをつくって変位吸収能力をもたせたりするなどの工夫をすることが好ましい。

津波被害では、現場計器やDCSなどの計装設備やの冠水と記憶メディアや図面・文書の冠水・流出が目立つ。津波は地震と異なり面的に被害を及ぼすため、水密化と高い場所への設置以外に有効な対策を見出しにくい。記憶メディアや書類・図面等は津波被害の及ばない場所に保管する必要がある。

表1、表2に計装設備の地震・津波対策例を示したが、施工上の工夫で被害を避けられるものも多い。地震や津波を想定した施工基準を整備したり、現状の施工状況を点検したりすることが必要であろう。

³ 欧米には、ベント弁にシャフトを接続してかなり離れた場所から操作できるように工夫された原子炉もあるらしい（福島原発事故独立検証委員会調査・検証報告書 p.263）。

表 1 計装設備の地震対策例

損傷原因	対象計器類	対策例
装置内部の液体の慣性力	液面計	非接触式の採用
自らの揺れの慣性力	盤、ディスプレイ、弁類、重量計	耐震設計、免震、固定/サポート
支持構造物が揺れる際の支持点の相対変位の違い	ケーブルダクト、ケーブル、計空配管、電線管、現場計器・弁セット	可とう性ある配管・配線による余裕ある接続、適切な支持点、ねじ込み継ぎ手⇒溶接継ぎ手、共通基礎
液状化による地盤変状		
周囲の構造物との干渉・衝突	盤、現場計器・弁類、ケーブル	外傷保護、適切な設置場所

表 2 計装設備の津波対策例

損傷原因	対象計器類	対策例
冠水	盤類、現場計器・弁、メディア・図面・書類	設置高さ、開口部シール、水密化、メディア多重化
津波の波力	盤類、現場計器・弁、ケーブルダクト	固定
海水の浮力	盤類、ケーブルダクト、	固定
洗掘	盤類	適切な設置場所
漂流物の衝突	盤類、現場計器・弁類、ケーブルダクト	適切な設置場所

被災後の点検と復旧

今回のアンケートでは被災後の復旧に関する設問がなかったが、SICE 産業システムシンポジウム、ARC Forum、計装制御技術会議では被災後の復旧に関する多くのプレゼンテーションと議論がおこなわれた^{25), 26), 27), 28), 29), 30), 31)}。代表的な教訓と課題は下記の通りである。

- ・ 保安事故を発生させない（安全にプラントを停止する）ことが早期に生産を再開できるための必須要件である。
- ・ 計装設備の点検/健全性確認は生産再開のネックである。目視点検→作動点検→精密点検からなる点検/健全性確認プロセスを効率よく進めるためには、点検対象の優先順位付け、運転員の協力を含む体制の確立、計器の自己診断機能を利用した点検時間の短縮などが必要である。自己診断機能のない計器（ガス検知器など）については自己診断機能が、また自己診断機能をもつ計器についても診断機能の充実（運転状態における精度診断、絶縁診断、S/N 診断など）が望まれる。
- ・ 津波により浸水したプリント基板は、電源 OFF とバッテリーの取り外しを早急に行って洗浄すれば機能が回復することが多い（長期にわたる作動は確認されていない）。
- ・ システムを再構成や再製作が必要になる場合があるので、ソフトウェアや図面、バックアップメディアなどの日頃の管理が欠かせない。

詳細は参考資料を参照願いたい。

5. おわりに

3.11 震災はマグニチュード 9 という巨大地震であったが、幸いにも化学産業をはじめとするプロセス産業では死亡者がでるような保安事故は発生しなかった。これは事前の備えに設計技術者が努力し、事前の備えの不足や不備を運転現場の対応力（現場力）でカバーしたからであろう。

このような事前の備えと現場力を向上させるためには、図 2 に示すように教訓と新技術に基づく継続的改善、教育訓練によるスパイラルアップが必要である。

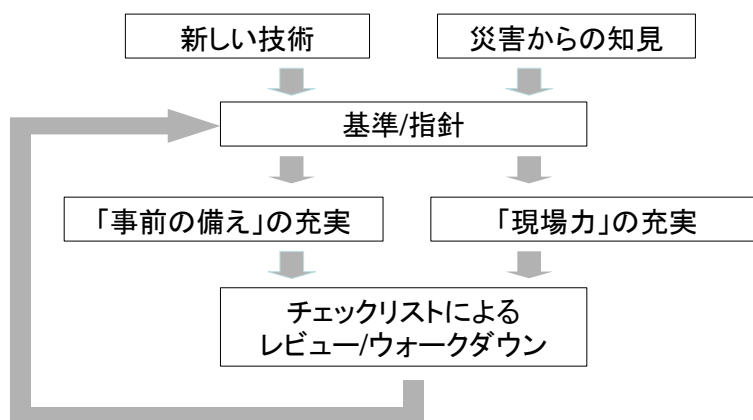


図 2 教訓と新技術に基づく継続的改善、教育訓練によるスパイラルアップ

都市ガス業界では 1964 年の新潟地震以来、業界全体でスパイラルアップに取り組み、導管網のブロック化、地震計やマイコンメーターの設置推進、PE 管の普及などで成果をあげ、相互応援体制の確立にまで至っている^{32), 33)}。

今回のアンケート調査を機会に、化学産業をはじめとするプロセス産業でも業界全体のスパイラルアップに関する議論が進展することを期待したい。

SICE 産業システムシンポジウムでは、本稿の範囲を超える下記のような課題に関する議論もおこなわれた。今後の議論の進展になかでさらに深い議論がおこなわれることを期待したい。

- ・ 自然現象による災害リスクはプラントの立地や敷地により異なるので、基準や指針を遵守するだけでは不十分である。プラントの立地や敷地におけるリスク評価をおこなない、その結果に基づく的確な対応が必要である³⁴⁾。
- ・ 海外の防災技術研修が紹介され、彼我の防災戦略/戦術の違いを認識した。防災管理の重要性の認識と世界標準へのキャッチアップをはかる必要がある³⁵⁾。
- ・ 本稿のような事例からの帰納法的アプローチのみでは網羅性に欠けるので、演繹法によるアプローチと組み合わせた「未経験の事故にも対応できる工学」の提案がおこなわれた³⁶⁾。産学連携による推進が必要である。

<参考文献>

- 1) 「東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について」,総合資源エネルギー調査会 高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会（平成 24 年 4 月）

- 2) 「東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討報告書」消防庁危険物保安室・特殊災害室（平成 23 年 12 月）
- 3) 「東日本大震災を踏まえた都市ガス供給の災害対策検討報告書」総合資源エネルギー調査会都市熱エネルギー部会 ガス安全小委員会 災害対策ワーキンググループ（平成 24 年 3 月）
- 4) 千葉県石油コンビナート防災アセスメント検討部会耐震対策分科会検討結果報告書（平成 23 年 10 月）
- 5) 「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書」（平成 23 年 6 月）
- 6) 「国際原子力機関に対する日本国政府の追加報告書」（平成 23 年 6 月）
- 7) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会「中間報告」（平成 23 年 12 月）
- 8) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会「最終報告」（平成 24 年 7 月）
- 9) 東京電力株式会社「福島原子力事故報告書」(平成 24 年 6 月)
- 10) 大前研一「原発再稼働 最後の条件」小学館（2012 年 7 月）
- 11) 「福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書」ディスカバー・トゥエンワン(2012 年 3 月)
- 12) 「国会事故調 報告書」徳間書店（2012 年 9 月）
- 13) 稲葉忠「化学産業における地震災害のリスクマネジメント」化学工学 Vol.60, No.7 (1996)
- 14) 「阪神淡路大震災におけるプラントオペレーションに関するアンケート調査報告」社団法人化学工学会・教育専門委員会 プラントオペレーション工学特別研究会（1996 年 1 月 17 日）
- 15) 参考文献 2 p.153-167、および参考文献 2 中の参考資料 8
- 16) 佐野,上田,赤塚,小林「LPG 球形貯槽の倒壊による火災及び爆発」 p.47-57, 高圧ガス Vol.49, No.6（2012）
- 17) 山口「東日本大震災にいける仙台製油所の防災活動について」Safety & Tomorrow No.144（2012）
- 18) 赤塚,佐野,上田「東日本大震災における高圧ガス事業所の被災状況の現地調査」高圧ガス Vol.49, No.6（2012）
- 19) 消防庁 東日本大震災を踏まえた危険物施設等の地震・津波対策のあり方に係る検討会屋外タンク貯蔵所等分科会資料
- 20) JX 日鉱日石エネルギー ニュースリリース 2011 年 3 月 15 日
- 21) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について」原子力安全・保安院（平成 24 年 3 月）
- 22) 菊池「十勝沖地震災害から得た教訓と自然災害対策の実践」計測自動制御学会 2012 年度産業応用部門大会講演論文集（2012 年 11 月）
- 23) 金子「今回の地震で気づいた課題と災害に強いワイヤレス計装++計装技術」計測自動制御学会 2012 年度産業応用部門大会講演論文集（2012 年 11 月）
- 24) 「福島第一原子力発電所の事故にかかる保安調査について」経済産業省・ニュースリリース・2011 年度一覧・東京電力福島第一原子力発電所の事故に係る保安調査に関連する文書の公開について
- 25) 三島「プラント安全停止と再稼働」第 42 回計装制御技術会議（2011）
- 26) 川中「バッチプラントにおける震災の被害と学ぶこと」第 42 回計装制御技術会議（2011 年 10 月）
- 27) 三島「鹿島事業所被害と復旧で得た計装設備の教訓」第 14 回 ARC 東京フォーラム（2012 年 7 月）
- 28) 伊東「オートメーション業界は大震災から何を学んだか」第 14 回 ARC 東京フォーラム(2012 年 7 月)
- 29) 木村「東日本震災からの復旧と計測制御への期待」計測自動制御学会 2012 年度産業応用部門大会講演論文集（2012 年 11 月）
- 30) 三島「鹿島事業所プラントの安全停止と再稼働」計測自動制御学会 2012 年度産業応用部門大会講演論文集（2012 年 11 月）
- 31) 飯田「震災復旧事例から見る DCS のライフサイクルソリューション」計測自動制御学会

- 2012 年度産業応用部門大会講演論文集（2012 年 11 月）
- 32) 中西「東京ガスの地震対策」第 14 回 ARC 東京フォーラム（2012 年 7 月）
 - 33) 参考文献 3 中の参考資料Ⅲ-2
 - 34) 参考文献 22
 - 35) 同上
 - 36) 北森「未経験の事故にも対応できる工学の構築を考える」計測自動制御学会 2012 年度産業応用部門大会講演論文集（2012 年 11 月）

東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の教訓 (コンビナートの保安・防災)

有限会社プラント地震防災アソシエイツ 稲葉 忠

1. はじめに

1995年に兵庫県南部地震が発生し、神戸市東灘区のコンビナートでは強い地震動と大規模な液状化による被害を受けた。2011年には東北地方太平洋沖地震が発生し、東北地方から東関東にわたる地域の多くのコンビナートで地震動、液状化、津波による被害を受けた。前者の地震はマグニチュード 7.3 の直下型で、後者の地震はマグニチュード 9.0 の海溝型であった。近い将来に発生が予想されている東海・東南海・南海地震(3連動型)は、震源が日本列島に近く、海溝型と直下型の特徴を併せ持つものと予想されている。ここでは、相次いで発生した2つの大地震の被害経験から教訓を得て、きたるべき次の大地震に備えることを考えたい。なお、プラントの被害状況の概要は、公表された報告書を基に作成させていただいた。

2. 東北地方太平洋沖地震による被害からの教訓(その1)

2011年3月11日に三陸沖(牡鹿半島の東南東130km付近)を震源にマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生した。被害は東北地方から東関東にわたる広い地域にわたり、仙台、鹿島、千葉、川崎などのコンビナートも被害を受けた。個別プラントの事例から、得られた教訓について述べる。

2.1 石油精製プラントの地震動による被害からの教訓

石油精製プラントで球形貯槽が倒壊し、火災、爆発が起きた。報告書^①を基に、地震発生から BLEVE の発生までの過程を流れ図にして図 1 に示す。

ブレース破断の原因

球形貯槽は、本震でブレースが破断し、余震で柱脚が座屈し、倒壊に至った。ブレース破断の原因は、鋼管ブレースの交差部が軸部に比べて変形しやすい構造をしていたこと、開放検査のために満水状態であったこと、長周期成分を含む継続時間の長い地震動であったこと、の3つの条件が重なり、入力エネルギーが塑性変形によるエネルギー吸収能力の限界を越え、ブレースの破断に至ったものと考えられる。

教訓1 塑性変形によるエネルギー吸収能力の確保

今回と同じような周期特性を有する継続時間の長い地震動であって、加速度が2倍を越えれば、通常の運転状態であっても事故は起こり得る。大地震に備えるには、終局強度設計の理念、考え方を基に、局所に構造的弱点を残さず、弾性限界を越えてからの塑性変形によるエネルギー吸収能力を高める設計(既設のものは改善)が大切。このことは球形貯槽に限定したことはない。

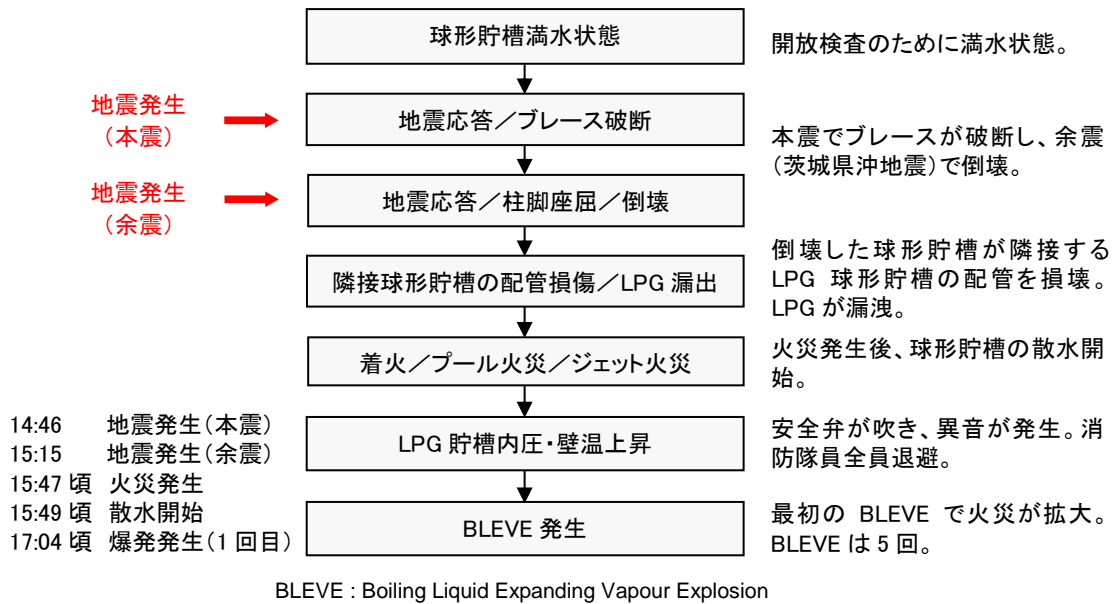


図 1 石油精製プラントにおける球形貯槽の倒壊と BLEVE の発生

教訓 2 水張り状態における耐震安全性の確保

満水状態の液重量は設計重量 (比重、規制液位、動的な有効液重量率で計算される) の 3 倍を超える。内容物が水であっても、倒壊して運転中の球形貯槽の配管を損傷させれば火災の危険を生じる。開放検査で満水にすることがあるのであれば、そうした条件を耐震設計で考慮するか、倒壊してもそうした事態にいたらぬよう配慮することが必要。

教訓 3 散水設備の耐震信頼性の確保

球形貯槽が倒壊して LPG が流出した後、プール火災が発生し、次第にジェット火災の様相を示し、77 分後に BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) が発生した。1985 年に MEXICO PEMEX で起きた同種事故では、プール火災が始まって 10-15 分後に BLEVE が発生した。諸条件の違いはあると思われるが、散水による冷却の効果もあったと判断される。散水できていなかったら、BLEVE がもっと早く起き、避難、防災活動に支障をきたしていたかもしれない。散水設備の大地震に対する耐震信頼性^(注)の確保は、延焼防止のみならず、避難、初期消火の時間的猶予の確保のためにも必要。

(注):地震時におけるシステムの信頼性のことをいう。システムはいくつかのサブシステム、システム構成要素より成り、それらが地震時に機能を維持しなければ、システムも機能を維持できない。つまり、システムの耐震信頼性を確保するためには、全てのサブシステム、システム構成要素の耐震信頼性、耐震性を確保しなければならない。なお、本稿では、津波に耐える能力を耐津波性、津波襲来時におけるシステムの信頼性のことを耐津波信頼性と呼ぶこととする。耐震信頼性の場合に同じく、サブシステム、システム構成要素の耐津波信頼性、耐津波性を確保しなければ、システムの耐津波信頼性を確保することはできない。

教訓 4 事業所間のリスクコミュニケーション

BLEVE によってタンクの破片が飛散した。また、隣接事業所にも飛び火した。BLEVE や有毒性ガス拡散など、隣接事業所に被害が及ぶリスクが潜在している場合には、それぞれの立場で防護策を講じたり、また、円滑な避難ができるよう、リスクを共有化することが望ましい。

2. 2 石油化学プラント・化学プラントの安全停止の事例からの教訓

今回の地震では、多くの事業所でプラントを自動、手動で安全に停止している。報告書^{(2),(3),(4)}を基に、石油化学プラント及び化学プラントの事例について、地震発生から運転停止、安全確認までの経過を流れ図にして図 2、図 3 に示す。

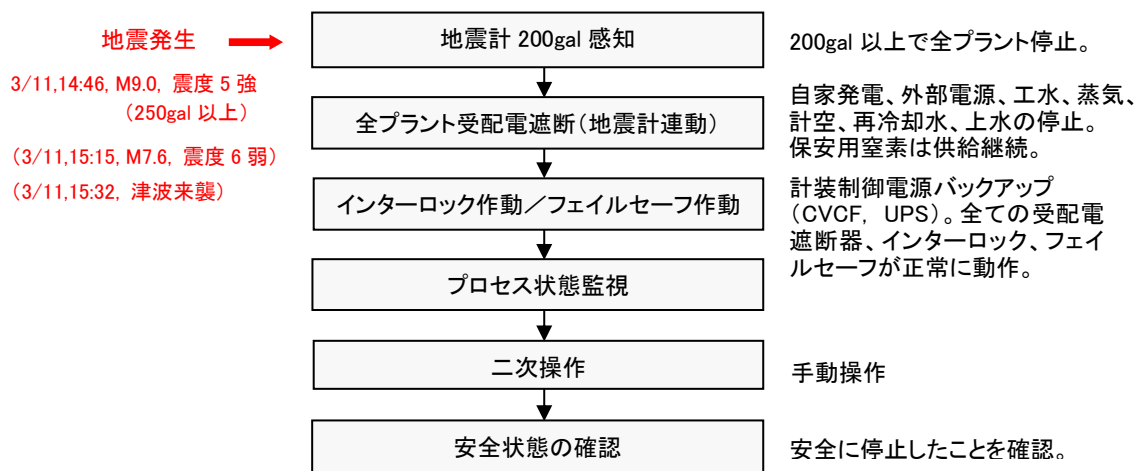


図2 石油化学プラントの自動停止の事例

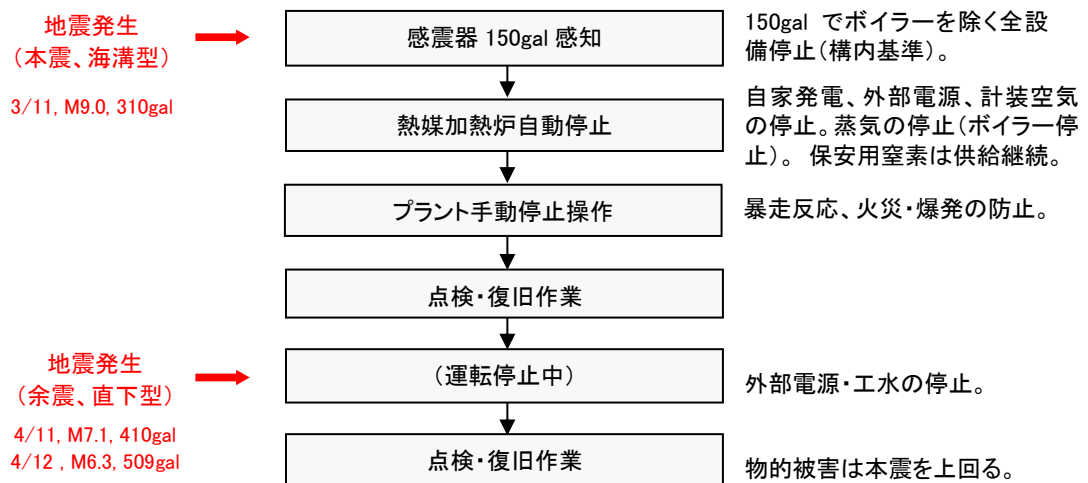


図3 化学プラントの自動・手動停止の事例

教訓 1 外部電源・工業用水の停止を前提とした防災計画

大地震では、外部電源、工業用水（工水）ともに停止する可能性が高い。大地震における安全な運転停止と保安、そして防災は、外部電源、工業用水の停止を前提に計画することが必要。

教訓 2 保安用窒素設備の耐震性・耐震信頼性の確保

両事業所ともに、保安用窒素の供給が維持されたことにより、プラントを安全に停止することができた。安全な運転停止に窒素が欠かせないプラントでは、保安用窒素供給設備（構内窒素配管を含む）の大地震に対する耐震性・耐震信頼性の確保が必要。

教訓 3 保安用用役供給設備の耐震性・耐震信頼性の確保

安全な運転停止に必要とされる用役はプラントの種類によって異なる。必要とされる保安用用役につき、供給設備の大地震に対する耐震性・耐震信頼性の確保が必要。

教訓 4 震度が本震を上回る余震への備え

鹿島、いわき市ともに、最大加速度は余震が本震を上回った。海溝型地震では余震の規模も大きく、震源は広域にわたり、震源が陸地であれば直下型地震となる。海溝型地震の場合には、運転を停止した後も、余震に備えた防災体制が必要。

2.3 石油精製プラントの津波による被害からの教訓

石油精製プラントが、地震で運転を停止した後、津波に襲われた。交流電源の喪失によって運転中の大型石油タンクの緊急遮断弁は閉止機能を失い、手動による閉操作の時間的余裕もなく、緊急避難した。運転中の中・小型のタンクで元弁が開状態のものも同様であった。避難指示が出ている中で、火災が発生した。報告書⁶⁾を基に、地震の発生から火災の鎮火までの経過を流れ図にして図 4 に示す。

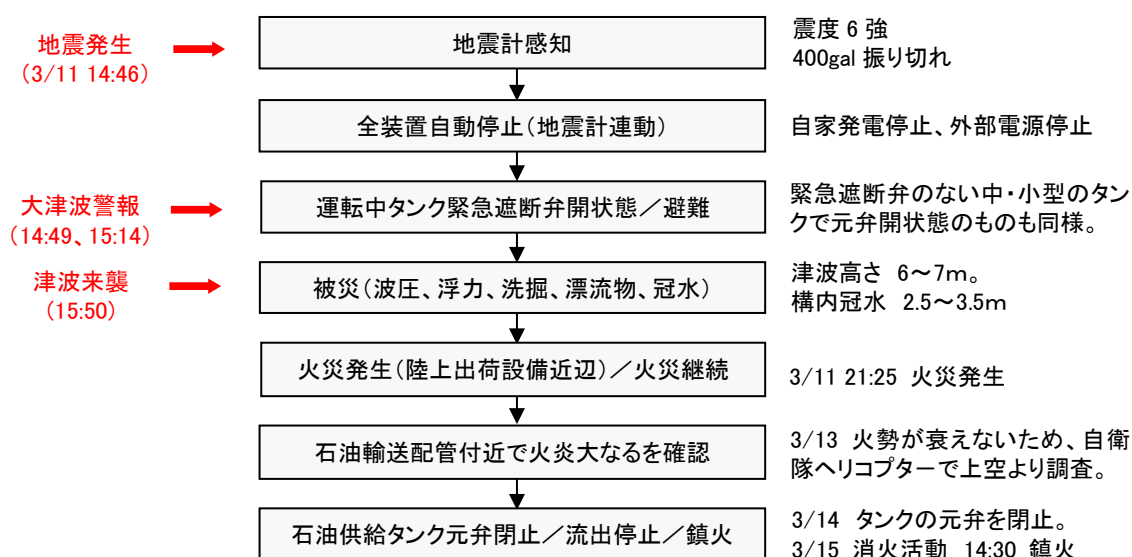


図4 石油精製プラントの津波による火災発生と鎮火

火災発生の概況

火災は津波が来襲してから5時間半後に石油ローリー出荷設備付近で発生し、LPG 出荷設備、ガソリンタンク、アスファルトタンク、サルファータンクに延焼した。

教訓1 危険物・高圧ガス等の大規模な漏洩の防止

大津波の来襲時は人の手による防災活動はできない。コンビナートの津波火災を防ぐには、危険物等（危険物、高圧ガス、毒物・劇物）が広範囲に流出、拡散することのないよう、津波による大規模な漏洩事故を起こさないことが大切。

教訓2 緊急遮断弁等の遠隔操作弁の耐震信頼性の確保

数多くの緊急遮断弁等の動力を同一電源に依存する場合には、非常用発電設備（非常用を兼ねる常用を含む）及び構内電気設備（電気の供給経路）について、大地震に対する耐震信頼性の確保が必要。フェイルセーフの動力を個別に備えれば、緊急遮断弁の耐震信頼性はより高いものとなる。

教訓3 津波警報発令時の離栈・避難・連絡・情報収集に関する教訓

報告書⁶⁾には、栈橋作業中の緊急避難、広大なエリアにわたる作業員の緊急避難、津波襲来後の通信手段、電力喪失後の津波情報収集、夜間の退避、消防車両の退避、津波避難訓練などについて、経験から得られた教訓が述べられている。

教訓4 設備の耐津波設計に関する教訓

プラントが大津波に襲われたのは日本では初めてのことであり、設備の耐津波設計に関する多くの教訓が得られた。これについては3.4でまとめて述べる。

2.4 排ガス燃焼設備の機能維持に関する事例からの教訓

石油精製プラントのLPGタンクヤードでは、地震及び津波の影響を受けながら、フレアスタックの燃焼機能が維持され、BOGの地上降下を免れた。その過程を流れ図にして図5に示す。

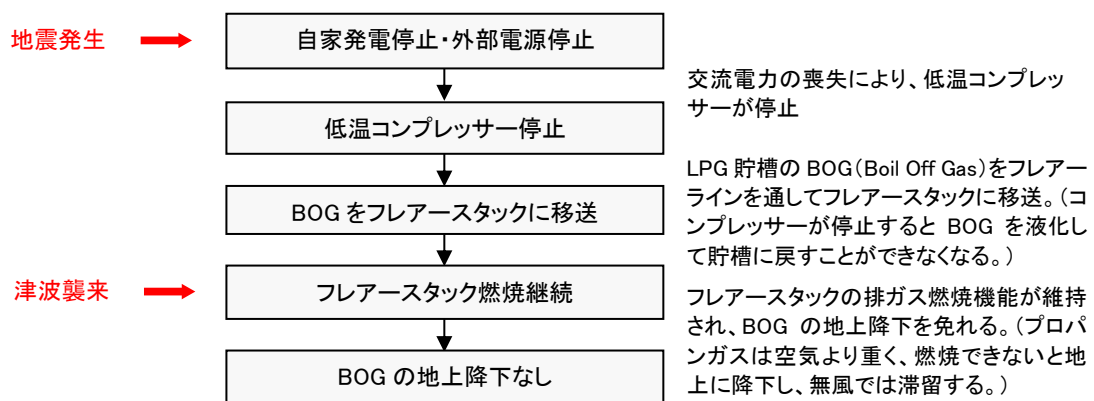


図5 フレアスタックの燃焼機能の維持

教訓1 フレアシステムの耐震信頼性、耐津波信頼性の確保

可燃性の排ガスを燃焼して大気に放出するフレアシステムは、地震時及び地震後にあって機能が維持されるよう、大地震に対する耐震信頼性と、大津波に対する耐津

波信頼性の確保が必要。空気より重い排ガスを燃焼させる場合は特に重要。（グラウンドフレアーによる排ガス燃焼の場合には、津波による影響について別途検討が必要と思われる。）

2.5 石油岩盤備蓄基地の大津波による被害からの教訓

地下岩盤タンク方式の久慈国家石油備蓄基地（容量 175 万 kl）が大津波に襲われ、地上設備（受配電設備、非常用発電機、廃水処理設備等）が壊滅的な被害を受けた。3階建ての管理棟は2階床上まで浸水し、3階計器室は無事であった。サービストンネル坑口の防潮扉を閉止し、地下備蓄タンクの被災は免れた。報告書⁶⁾を基に、地震の発生から仮設設備運転による原油漏洩未然防止までの経過を流れ図にして図6に示す。

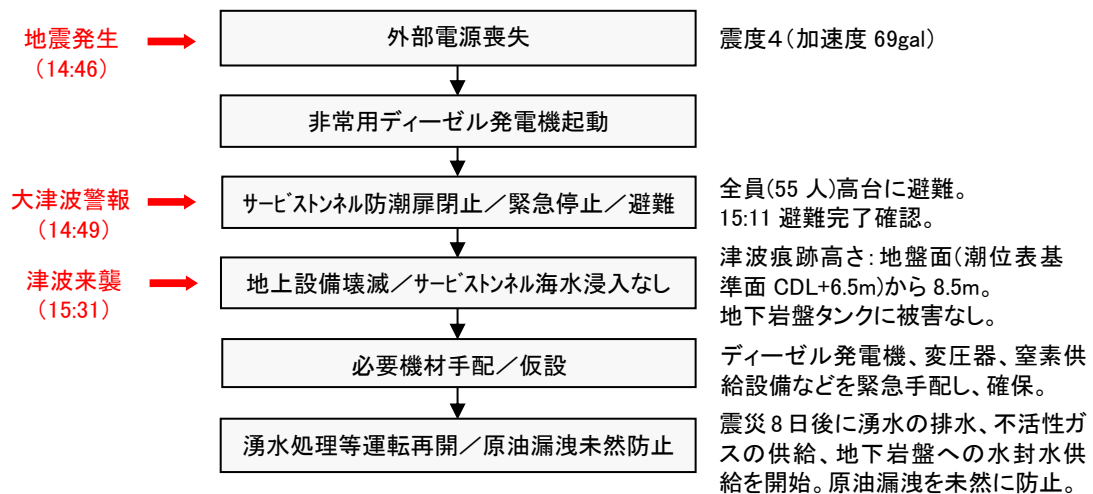


図6 石油岩盤備蓄基地の大津波による被災と応急対策による原油漏洩回避

教訓 1 サービストンネル防潮扉閉止システムの耐震信頼性の確保

基地の震度は低かったが（震度 4）、外部電源が停止し、非常用発電機が自動起動した。大津波警報が出て、計器室からボタン操作でサービストンネルの防潮扉を閉め、地下岩盤タンク関連設備の津波による被災を免れた。同種の基地では防潮扉の閉止が防災の要であり、防潮扉閉止システム（電源を含む）の大地震に対する耐震信頼性の確保が重要。

教訓 2 定期的な津波避難訓練の実施

基地では年に 3 回津波避難訓練を実施していた。大津波警報が出てから 22 分後に全員（55 人）の避難完了を高台で確認し、その 20 分後に津波が来襲した。平時の訓練が功を奏した。

教訓 3 計器室の上層階配置

地上の受配電設備や計装ケーブルは被災したが、3階の計器室は無事であった。岩盤タンクの安全運転の維持のため、応急的に現場計測を続け、受電の開始とともに地上部と計器室間の計装設備を復旧し、運転監視装置による自動計測を早期に再開できた。計器室を3階に配置していたことが功を奏した。

教訓 4 地下岩盤タンクの湧水処理に関する教訓

基地の地下岩盤タンクは常圧貯蔵横穴水封固定水床式で、岩盤からの湧水の排水を継続しないと原油の液位が上昇し、外部への漏洩の危険を生じる。地上設備が壊滅した後、ただちに必要機材を手配し、震災 8 日後には仮設設備で運転を再開し、そうした事態を未然に防いだ。報告書には、その時の防災活動から得られた教訓が述べられている。

3. 東北地方太平洋沖地震による被害からの教訓（その 2）

東北地方太平洋沖地震によって危険物施設、高圧ガス設備等が受けた被害は関係機関から報告されている^{(7),(8),(9)}。ここでは、一般事例及び東北地方太平洋沖地震の特徴から得られた教訓を、地震動^(註)、液状化、津波によるものに分けて述べる。

(注)：新潟地震で液面揺動によるタンク火災を経験し、長周期の地震動への取り組みが始まった頃、長周期地震動と言えれば地震学で周期 20 秒以上の地震動のことを言っていた。そのため、平底貯槽の液面揺動に影響を及ぼすような、周期が数秒から十数秒の地震動は“やや長周期地震動”と呼ばれていた。最近では、周期 2,3 秒を境に(明確な区分はない)、それより短周期の地震動は短周期地震動、それより長周期の地震動は長周期地震動と呼ばれることが多くなった。本稿も、両者を区別するときはこの呼称を用いる。

3.1 短周期地震動による設備の被害からの教訓

教訓 1 塔槽類、架構構造物の塑性変形によるエネルギー吸収能力の確保

短周期地震動による塔槽類の被害には、球形貯槽のブレース破断の他に、反応塔架台基礎座屈、塔槽類アンカーボルト破断、平底円筒形貯水槽の象の脚座屈などがあつた。エネルギー吸収能力の確保に関する教訓については 2.1 で述べたとおりである。象の脚座屈については 4.2 で述べる。

教訓 2 定性的配慮による配管系の耐震性確保

短周期地震動による配管系の被害には架構支持ベッセルの頂部配管破断、ボイラー配管の亀裂発生、配管・自動弁のサポートからの落下などがあつた⁽⁴⁾。配管系の地震被害は接続される設備の種類に応じてパターンがあり、多くは定性的配慮だけで耐震性を確保できる。過去の地震被害に学ぶことが大切⁽¹⁰⁾。

教訓 3 設備の耐震性評価式の安全裕度の検証

震源に近い仙台の石油精製プラント(仙台市宮城野区港)では、最大加速度 400gal 越えを記録し、事務所建屋も耐震補強ブレースが全て破断した⁽⁶⁾。同じ沖積平野に位置する近隣の観測所(仙台市若林区卸町、仙台市宮城野区苦竹)で記録された地震動の速度応答スペクトル^{(11),(12)}を見ると、兵庫県南部地震における JR 鷹取の地震動(震災の帯と言われる震度 7 の地域で観測された地震動)ほどの破壊力はないが、JMA 神戸の地震動(震度 6。現在の計測震度 6 強)に近いレベルの強さであったと推察される^(註)。被害(無被害を含む)との相関による設計裕度の検証が望まれる。

(注)：短周期地震動の周期特性は、震源過程(断層のどこがどのように壊れるかを言う)、

伝播経路、直下の地盤特性によって決定される。近隣でも地盤特性が異なれば周期特性は違ったものになる。

教訓 4 東北地方太平洋沖地震の短周期地震動の特徴

東北地方太平洋沖地震は、観測点によっては大きな最大加速度が記録されているが、それらは短周期の成分（例えば、0.1-0.3 秒）が卓越した地域のものであって、建物の倒壊との相関が強いと云われる 1-2 秒の周期成分が卓越している地域の最大加速度はそれほど大きくはない。このことは実際の被害状況と整合する。

気象庁・気象研究所の震源過程解析によれば、破壊開始点を気象庁の一元化震源（北緯 38.104 度、東経 142.861 度、深さ 23.7km）として、①すべりの大きな領域は、破壊開始点の東から北東側（震源よりも浅い部分）にあり、最大すべり量は 38m、②主な断層の長さは約 450km、幅は約 150km で、Mw は 9.0、③断層の破壊は、破壊開始点付近で徐々に拡大した後（0～60 秒）、南北方向に分かれて進行、④破壊継続時間は約 170 秒間、と報告されている⁽¹³⁾。

マグニチュード 9.0 の巨大地震にしては地震動が比較的弱かったのは、破壊伝播速度が遅かったためではないかと云われている。滑りの大きな領域が陸地から遠く、ここで発生した強い地震動が減衰していたとも考えられる。南海スラブの震源域は陸地に近く、東海・東南海・南海地震の地震動も同じレベルとってはならない。

3.2 長周期地震動による設備の被害からの教訓

被害状況

仙台、鹿島の他、震源から離れた市原、川崎、新潟、新発田、酒田で、液面揺動による石油タンクの被害がみられた⁽⁷⁾。長周期地震動^(注)によって励振されたものである。液面揺動の振幅はそれほど大きくはなく、最大で 2m 程度であった。

(注)：長周期地震動は、震源が浅くて規模の大きな地震で発生し、減衰が小さくて遠くまで伝わり、平野(堆積盆地)では厚い堆積層で増幅して表面波が形成され、揺れは長時間続くという特徴を有する。

教訓 1 東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の特徴

東北地方太平洋沖地震の長周期地震動は、大規模な海溝型地震にしては、それほど強いものではなかった。その一因として、日本海溝には付加体^(注)が形成されていないことがあげられている。南海トラフには付加体が形成されており、東海・東南海・南海地震の長周期地震動は東北地方太平洋沖地震の数倍の強さになるとの解析結果も報告されている。東北地方太平洋沖地震をもって東海・東南海・南海地震の長周期地震動も同じレベルとってはならない。

(注)：海洋プレートが陸側プレートの下に潜り込むときに表面の堆積物が剥がれ、陸側プレートに付加されてできる地層のことをいう。海洋プレートに沿って付加体が形成されていると、長周期地震動はそこで増幅されてから岩盤を伝わると言われている。

3.3 液状化／地盤変状による設備の被害からの教訓

被害状況

東京湾沿岸のコンビナートでは、震度 5 弱で液状化が起き、地盤変状^(注)を生じた。また、鹿島コンビナートでは、震度 5 強(余震は 6 弱)で防油堤は大きく沈下し、配管トレンチは浮き上がった。

(注)：液状化に伴う地盤の沈下、水平移動及び地盤定数の低下のことをいう。液状化が起きると構造物の地中部に浮力が働き、軽いものは浮き上がり、重いものは沈み込む。基礎などが沈み込むのをめり込み沈下という。

教訓 1 液状化への地震動の継続時間の影響

地震動の継続時間が長かったり、大きな余震が続いたりすると、比較的低い震度で液状化、地盤変状、めり込み沈下が進行する。海溝型地震では、液状化の評価、地盤変状量の推算において、このことの考慮が必要。

教訓 2 防油堤の液状化対策

防油堤が大きく沈下し、機能を喪失した。防油堤の沈下、目地部開口が複数個所にわたると、短時間での応急措置は困難となる。地震の影響下において防油堤の機能^(注)を維持できる構造を採用することが必要。このことは防液堤も同じ。

(注)：貯槽の内容液が流出した場合において流出油を堤内にとどめ、広域に流出、拡散するのを防ぐ。

教訓 3 東北地方太平洋沖地震の液状化の特徴

仙台のコンビナートは陸地を開発して造成されたものであり、強い地震動の影響を受けたにもかかわらず、液状化はほとんど起きていない。鹿島コンビナートも陸地を開発したものであって、池、水田の埋立地などに限定して液状化が起きている。一方、東京湾沿岸、東海から九州にかけての太平洋沿岸、及び瀬戸内海沿岸のコンビナートは、ほとんどが海の埋立地である。東海・東南海・南海地震は地震動が強く、継続時間も長く、大規模な液状化が多く、コンビナートで一斉に起きることが予想される。地域によっては、兵庫県南部地震の神戸市東灘区（以下、東灘区という）のコンビナートにおけるものに匹敵する規模のものとなり、余震によってさらに進展することも考えられる。

3.4 津波による設備の被害からの教訓

津波のエネルギー、破壊力は波高、速度、形態（射流か常流か）によって異なり、設備の耐津波設計、津波対策は段階的に考える必要がある。各方面で検討されていることであり、ここでは、報告書の事例の範囲で得られた教訓について述べる。

教訓 1 津波による主な設備の損傷モード

耐津波設計では、津波の影響によってどこがどのように壊れるか、津波による損傷モードを知ることが大切なこととなる。仙台コンビナートと鹿島コンビナートの事例^{(2),(5),(7)}から、実際にどのような影響を受けたか、その大略（全てではない）を表 1 に示す。詳細については、ここではふれない。

表1 津波の影響の種類と影響を受ける主な設備

津波の影響	津波の影響を受ける主な設備								
	栈橋・ローディングアーム	岸壁・護岸	海水ポンプ・ポンプ室	防油堤・防液堤	危険物タンク	ヤード配管	電気設備	計装設備	タンクローリー
波力	○	○ ⁽¹⁾	○	○	○	○	○	○	○
浮力					○ ⁽²⁾	○			○
洗掘・浸食		○ ⁽¹⁾		○ ⁽¹⁾	○ ⁽¹⁾ (盛土基礎)	○ ⁽¹⁾ (ローカル基礎)			
漂流物衝突	○ ⁽³⁾				○	○	○	○	
冠水			○				○ ⁽⁴⁾	○ ⁽⁵⁾	

(1): 地盤変状で被覆がはがれたり、地面が荒れたりすると、洗掘、浸食による被害を受けやすくなる。

(2): 浮き上がると波力によって移動する。

(3): 漂流大型船舶の衝突 (4): 短絡、地絡、絶縁不良など (5): 目詰まり、基板腐食など

教訓 2 地盤変状と津波の重畳による被害拡大の防止

岸壁・護岸、防油堤・防液堤、危険物タンク(盛土基礎)などは、地盤変状によって被覆がはがれたり地盤が荒れたりすると、洗掘、浸食の被害を受けやすくなる。土木構造物の被覆工、地盤変状対策は、津波の影響軽減のためにも大切。

教訓 3 海水ポンプの耐津波信頼性の確保

海水ポンプは揚程の関係で一般に護岸沿いに置かれ、護岸が高い場合は一段下げて置かれ、津波の影響を受けやすい。ディーゼルエンジン駆動などの海水ポンプは、交流電源を喪失した状況で大規模火災が発生したときに防消火の要となるものであり、耐津波信頼性の確保が必要となる。予想される波高に応じ、ポンプ室浸水防止、燃料補給ポンプの防護、移動式海水ポンプの配備などの対策が考えられよう。海水ポンプは耐震信頼性の確保も大切であり、これについては4.3で述べる。

教訓 4 波高の高い射流に対する耐津波設計・津波対策

久慈国家石油備蓄基地の陸上設備及び福島原子力発電所の海水ポンプ設備は壊滅的な被害を受けた。波高が高く(地盤からの高さ8-9m)、射流の直撃を受けた可能性もある。津波が護岸に衝突して上方に向きを変え、落下時に斜め上空から直撃したことも考えられる。地形によってはこうした津波が予想され、波力、耐津波性の評価方法に加え、レイアウト、エネルギー軽減策(例えば背が高く堅牢な防油堤、防液堤など)などを考えることも必要と思われる。

4. 兵庫県南部地震による被害からの教訓

平成7年1月17日に淡路島北部を震源とするM7.3の地震が発生した。神戸市を中心とする阪神地域および淡路島北部が甚大な被害を受け、東灘区のコンビナートも被害を受けた。この地震による被害から得られた教訓について述べる。

4.1 平底円筒形貯槽受払配管のLPG漏出事故からの教訓

東灘区のコンビナート一帯で液状化が起き、いたるところで噴砂、噴水が見られ、地盤は沈下した。護岸は海側に数mせり出し、背後の地盤は海側に移動し、沈下も生じた。護岸の移動に伴う地盤の沈下、移動は護岸に近いほど大きく、護岸沿いの地盤面は海側に傾斜した。この地盤変状の影響により、平底円筒形貯槽の受払配管の元弁フランジからLPGが漏出した。報告書⁽¹⁴⁾を基に、地震発生から危険を回避するまでの過程を流れ図にして図7に示す。

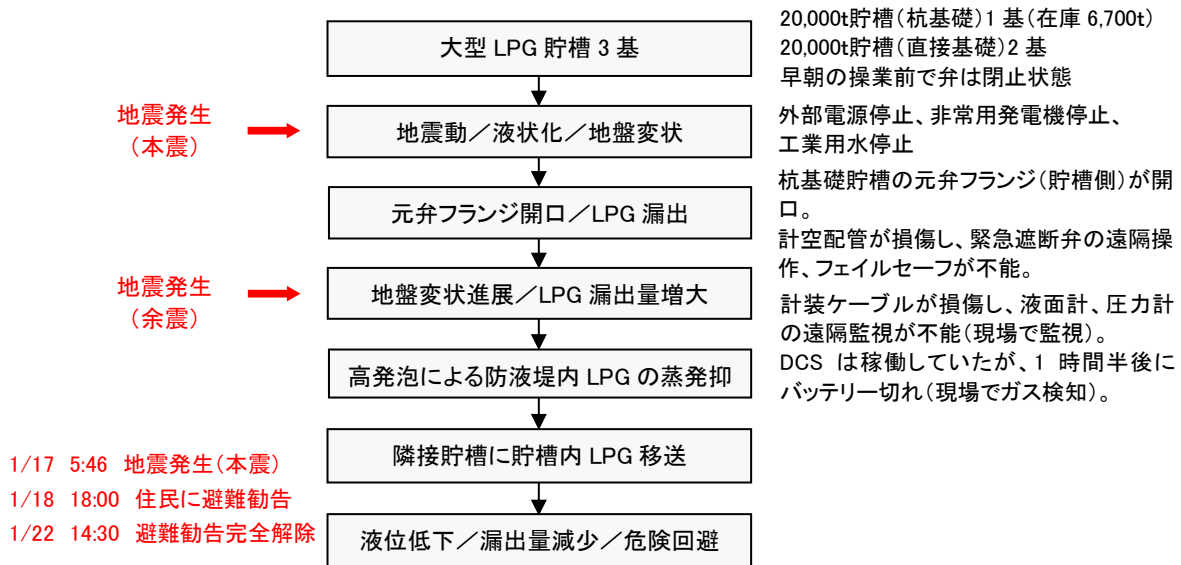


図7 地盤変状によるLPG貯槽元弁フランジ開口とLPG漏出

漏出の原因と状況

LPG漏出事故は杭基礎の平底円筒形貯槽の緊急遮断弁周り受払配管で起きた。貯槽が杭基礎で緊急遮断弁を吊っていた架台が直接基礎であったため、地盤変状を生じたときに架台の基礎が沈下して梁がハンガー、緊急遮断弁を押さえつけ、配管に過大な曲げモーメント、せん断力が生じ、地盤の水平移動の影響で軸力も加わり、貯槽の元弁フランジが開いてLPGが漏出した。

なお、地震発生時は緊急遮断弁、元弁ともに閉じていた。地震の影響で計装配管が損傷しており、開状態であった場合には、遠隔操作が不能で、フェイルセーフ(空気溜めの空気を利用)も機能しない状況にあった。また、地震で計器室と現場計器間の計装ケーブルが損傷したため、貯槽の液面計、圧力計の遠隔監視が不能となり、現場で監視を続けた。

教訓1 貯槽内容物の受払配管からの流出防止の基本的考え方の理解

貯槽内容物の受払配管からの流出を防止するには、①緊急遮断弁が確実に閉じる、②貯槽ノズルと緊急遮断弁の間で配管が損傷しない、の2つの条件を同時に満足することが必要。損傷個所が緊急遮断弁と元弁の間であっても、漏洩量が多いと元弁に接近するのが困難になり、危険も伴う。

教訓 2 貯槽受払配管の地盤変状に対する設計思想

貯槽の受払配管は、緊急遮断弁を越えた位置（貯槽と反対側）で貯槽と共通基礎の支持架台に固定するなど、地盤変状の影響を排除、軽減する設計思想、構造計画が必要。

教訓 3 緊急遮断弁周り計装配管の地盤変状に対する設計思想

空気溜の空気をフェイルセーフの動力源とする緊急遮断弁は、地盤変状の恐れがある場合、空気溜を貯槽と同一基礎にするなど、地盤変状の影響を排除、軽減する設計思想、構造計画が必要。

教訓 4 状態量監視システムの耐震信頼性の確保

状態量の遠隔監視システムの機能喪失が重大な事態を招く恐れがある場合には、当該システムの大地震に対する耐震信頼性の確保が必要。計装ケーブル断線の事態を想定しておくことも必要。

教訓 5 最大仮想事故の規模に応じた耐震性、耐震信頼性の確保

地震が発生したのは1月の早朝で、六甲おろしの陸風が吹き、入荷前で液位が低い時であった。真夏の日中、海風が吹き、入荷後で3基ともに液位が高かったら、状況は変わっていたかもしれない。防災計画では最大仮想事故（現実に起こり得る最大の事故災害）を把握、認識し、リスクの大きさに応じて耐震性、耐震信頼性を高め、リスクを軽減することが必要。

4.2 平底円筒形貯水槽の象の脚座屈からの教訓

神戸市内で平底円筒形貯水槽3基が象の脚座屈を起こし、側板下部に亀裂を生じて工水が全量流出した⁽¹⁵⁾。設計震度は0.2で、高さと直径の比(H/D)が比較的大きく(1.1-1.3)、満水状態にあった。設計震度が0.3で設計された危険物タンクで、H/Dが比較的大きく、ほぼ満液状態であったものの中にも、亀裂の発生には至らなかったが、象の脚座屈を起こしたものがあつた。

亀裂発生の原因

平底円筒形貯水槽の象の脚座屈は、荷重-変形曲線が劣化型で、座屈耐力に達してからの塑性変形によるエネルギー吸収能力に乏しい。亀裂の発生は、設計震度0.2で設計された平底円筒形貯水槽について、象の脚座屈の裕度の限界に達したことを意味する。

教訓 1 平底円筒形貯水槽の象の脚座屈の防止

設計震度0.2で設計された平底円筒形貯水槽は、大地震に際し、側板最下部に亀裂を生じて工水が全量流出する可能性が高い。平底円筒形貯水槽は、使用用途に応じ、設計震度を高めることが望ましい。既設のものについては液位を下げるのも1つの方法。

教訓 2 高圧ガス平底貯槽、危険物タンクの象の脚座屈の防止

高圧ガスの平底円筒形貯槽及び危険物タンク(平底円筒形貯槽)は、以前は設計震度0.3で設計されていた。基準が制定されてからは動的な応答が考慮されるようになり、既設のもので裕度に乏しい貯槽は最高液位の調整が行われた。兵庫県南部地震以後、

大地震に対する漏洩防止に耐震設計の主眼が移ってきており、貯槽の重要性、危険性に応じ、象の脚座屈の損傷モードについて、大地震に対する余裕を再度確認しておくことが望ましい。

4.3 防消火設備の地盤変状による被害からの教訓

防消火設備の被害

防消火設備の被害には、前述の地震動による工水タンクの被害に加え、液状化、地盤変状によるものとして、海水ポンプの送水不能、コンクリート製貯水槽の亀裂発生と用水流出、消防車庫シャッターゆがみによる出動障害などがあった⁽¹⁶⁾。

教訓 1 防消火設備の耐震信頼性の確保

防消火設備（システムを成している）を構成する幾つかの設備が地震で損壊し、火災が発生した場合において初期消火が困難な状況にあった。防消火設備は、意図するところに従い、サブシステム・システム構成要素の耐震信頼性・耐震性の確保が必要。

教訓 2 海水ポンプ設備の耐震信頼性の確保

ディーゼル駆動海水ポンプの吸入配管が地盤変状で損傷し、ポンプが停止した。ポンプ室から出る吸入・吐出配管は地盤変状の影響を受けやすく、影響を排除、軽減するための配慮が必要。また、損傷した場合の応急措置の方法を考えておくことが望ましい。このことは、ディーゼルエンジン（又はガスタービン）の燃料配管、冷却水配管（冷却式の場合）についても同様。

4.4 盛土基礎の危険物タンクの地盤変状対策

東灘区のコンビナートでは、盛土基礎の危険物タンクがめり込み沈下や不等沈下を起こした。護岸近くでは地盤の水平移動の影響も受けた。既設の大型タンク（特定屋外貯蔵タンク）の液状化対策は進められていたが、小型のタンク（準特定屋外貯蔵タンク）についても行われることになった。

5. その他の地震による被害からの教訓

地震によるコンビナートの災害として忘れてはならないものに、新潟地震におけるタンク火災、広域火災がある。このときに得られた多くの教訓が現在のコンビナートの地震防災に生きている。また、計器の誤作動、誤認による事故事例として、千葉県東方沖地震における除害設備の機能喪失がある。教訓が得られた事例は他にもあるが、ここでは特にこの2つを取り上げることとする。

5.1 新潟地震のタンク火災からの教訓

1964年6月16日に新潟県沖を震源にマグニチュード7.5の新潟地震が発生した。同地震では、液面揺動が関係する大型タンクの火災（第一火災）と、液状化と津波が関係する広域火災（第二火災）が発生した。報告書等^{(17),(18)}を基に、第一火災については液面揺動から鎮火までを、第二火災については液状化から鎮火までを、それぞれ流れ図にして図8、図9に示す。

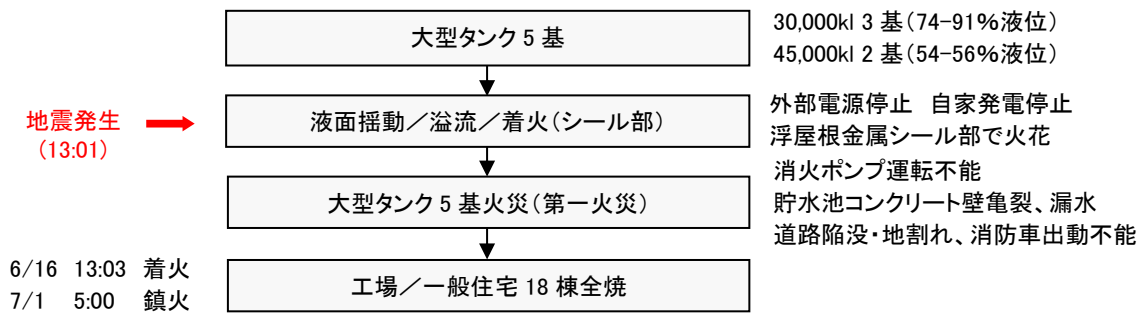


図8 液面揺動による大型石油タンク火災(第1火災)

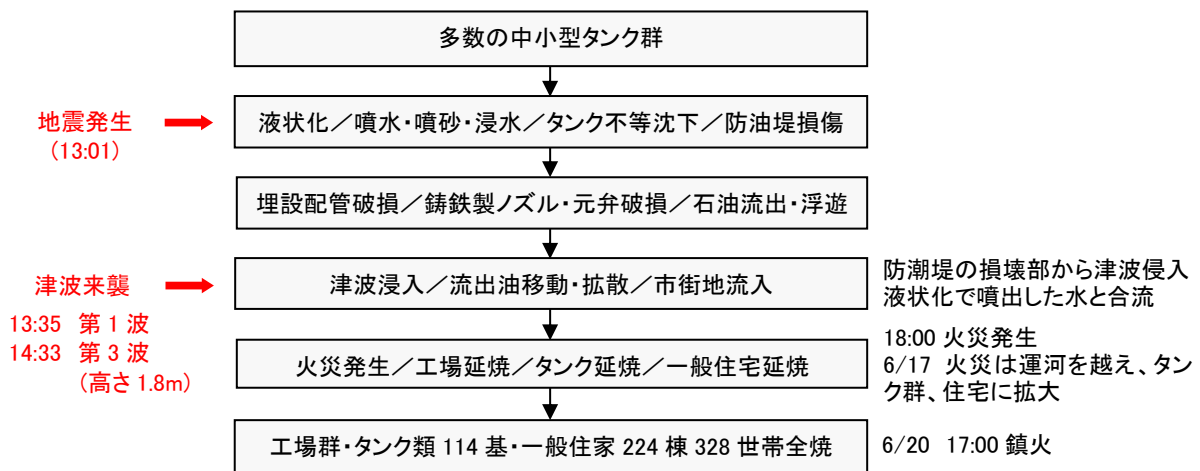


図9 液状化による石油配管損傷と津波の相乗による広域火災(第二火災)

第一火災の原因と状況

地震が発生して大型原油タンク 5 基が液面揺動を起こし、液位の高かったタンクから原油が溢流し、防油堤内に溜まった。揺動を繰り返すうちにタンク 1 基から発火し、防油堤内の原油が炎上し、次々に他の 4 基に延焼し、大火災となった。45,000kl タンク 2 基の側板が内側に倒れ、火の付いた油が溢れ、防油堤を倒して堤外に流出し、工場の一部と近くの民家が延焼した。着火の原因は浮屋根の金属シールが側板との摩擦、衝突で火花を出したためと推定されている。

第二火災の原因と状況

地震によって液状化が起き、構内一帯で地下水が噴き出し、地盤は沈下し、冠水した。地盤変状によって防油堤は損壊し、タンクは不等沈下を起こした。埋設配管が損傷し、铸铁製のタンクノズル、元弁が割れ、石油が流出し、水の上に浮かんだ。しばらくして津波が来襲し、防潮堤の損壊部から海水が構内に侵入し、地下水と混合した。油を浮かべた海水は広域に拡散、移動し、市街地まで流入した。地震から 5 時間後に工場で火災が発生し、火は水面の油に移り、隣接工場、タンク群、市街地へと延焼し、広域火災となった。

教訓 1 液面揺動、液状化の設計への反映

被災したプラントの復旧に当たり、タンク液面の上部空間の確保、タンク基礎地盤の改良、浮屋根ソフトシールの採用、可撓管の採用、埋設配管の制限、鋳鉄製ノズル・元弁の不採用、防消火配管の地上化、鉄筋コンクリート製防油堤の採用、柱脚の耐火被覆、流出油防止堤の築造、送水ポンプと駆動部の共通基礎化、散水設備の設置などの対策がとりいれられた。これらの多くが法規に規定され、現在も生きている。

教訓 2 津波の前の大規模な漏洩事故の回避

第二火災では、津波が損壊した防潮堤から侵入し、流出油が海水に浮かんで移動、拡散し、広域火災の原因の1つとなった。津波が生じても広域火災が生じないようにするには、津波の前に大量漏洩を起こさないようにすることが必要。

5.2 千葉県東方沖地震における排ガス除害設備機能喪失の事例からの教訓

1987年12月17日に九十九里浜付近を震源にマグニチュード6.7の千葉県東方沖地震が発生した。この地震により、千葉のコンビナートで、石油化学プラントの排ガス除害設備が、僅かな時間ながら機能を喪失した。事故事例集⁽¹⁹⁾を基に、誤作動から危険回避までの流れを図10に示す。

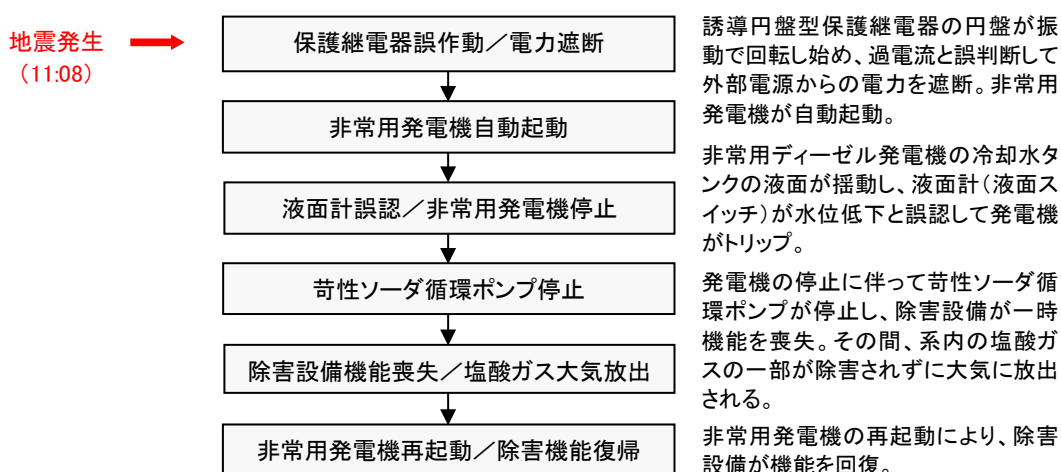


図10 計器の誤作動、誤認による除害設備の機能停止

教訓 1 除害設備の耐震信頼性の確保

保護継電器の誤作動と液面計の誤認によって、非常用発電機を再起動するまでの時間、除害設備が運転を停止した。実際に外部電力が停止し、非常用発電機も停止すれば、同様な事態となる。有毒性ガスを無害化して大気に放出する除害システムは、大地震に対する耐震信頼性の確保が必要。

教訓 2 保安システムの継電器・計器の選定

プラントの安全な運転停止などの保安システムに使用される継電器、計器にあって、それが誤作動、誤認した場合にプラントの安全を脅かす恐れがある場合には、当該計器は振動、液面揺動によって誤作動、誤認しないものを選定することが必要。

6. 東海・東南海・南海地震への備え

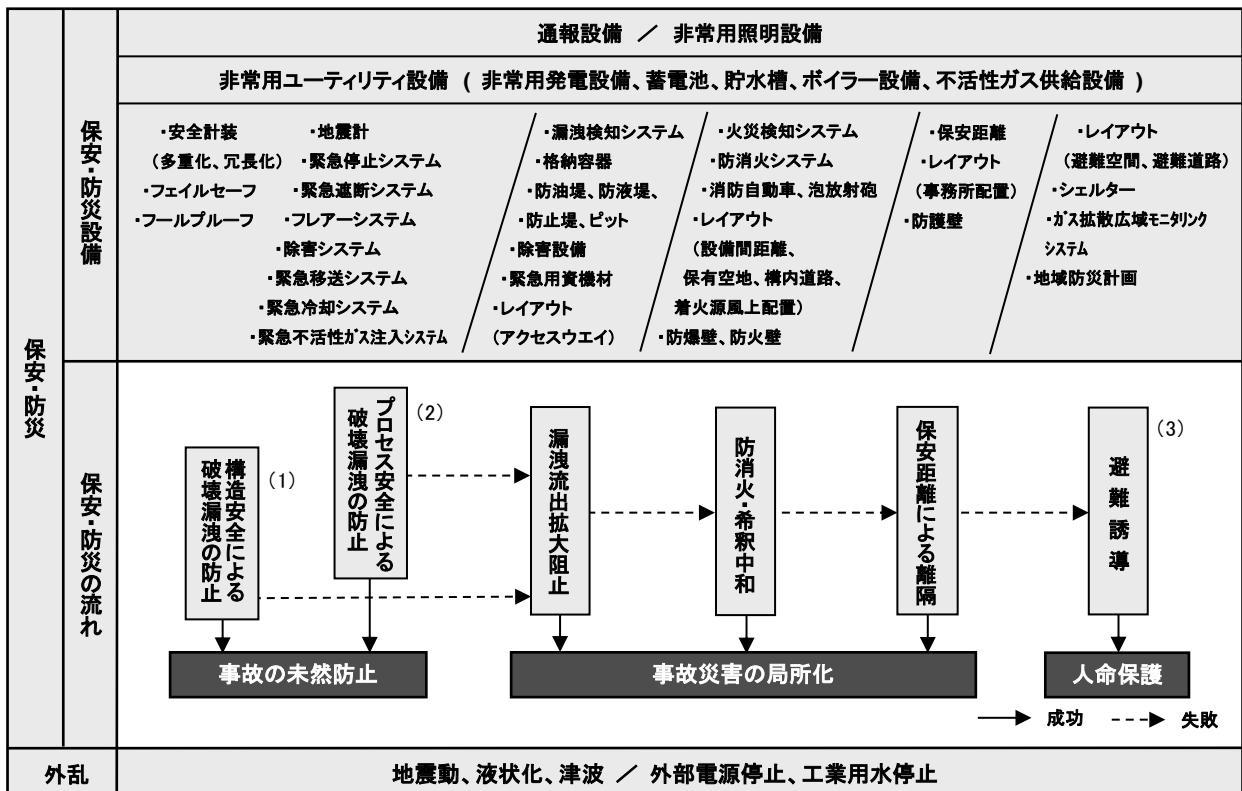
6.1 保安・防災の流れと事故災害の防止

図11は、地震時の外乱の中で、プラントの保安・防災がどのように進められて行くのか、その概略の流れを示したものである⁽²⁰⁾。東海・東南海・南海地震に備えるには、外乱の地震動、液状化、津波として、相応規模のものを想定することになる。

流れ自体は、平時の場合も地震時の場合も基本的には変わらない。根本的に異なるのは、地震時には保安設備・防災設備も同時に地震の影響を受けており、そうした影響下において保安防災活動を進めていかなければならない点にある。

大地震に際して事故を未然に防止するには、危険物等を保有する設備の破壊を防止するとともに、プラントを安全に停止することが必要となる。そのためには、高圧ガス設備、危険物施設等について大地震に対する耐震性を確保するとともに、保安設備について大地震に対する耐震信頼性を確保することが必要となる。又、事故を生じた場合において事故災害の局所化（局限化ともいう）を図るには、防災設備についても大地震に対する耐震信頼性を確保することが必要となる。

大津波の場合には、地震の場合とは違って人は避難しており、避難指示が解除されるまでは人の手による保安・防災活動はできない。大津波に際して災害を防ぐには、大津波の前に大規模な漏洩事故を起こさないようにし、また、大津波の影響を受けて



- (1): 構造物が地震によって破壊されることなく、内容物の漏洩がない。
- (2): 地震時及び地震後において、構造物の破壊に至るような温度、圧力の上昇がなく、かつ、適切な処置がされないままに内容物が外部に放出されてしまうようなことがない。
- (3): 従業員の避難誘導と地域住民の避難誘導の2局面がある。

図11 地震時におけるプラントの保安・防災の流れ

も大規模な漏洩事故を起こさないようにすることが必要となる。前者は耐震設計、後者は耐津波設計によることとなる。

6.2 耐震性・耐震信頼性確保の手段

ここでは、耐震性・耐震信頼性の確保の手段としての耐震診断と耐震性改善について、その概念を述べる。耐津波性、耐津波信頼性の確保も、基本的には同じである。

既設プラントの諸設備の耐震診断は、目視で可能な範囲で、地震時の挙動を想像しながら効率的、効果的に審査を進め、必要と判断された場合には定量的な評価を行う。診断の対象は、高圧ガス設備、危険物施設等の他、保安・防災に係る電気設備、計装設備、非常用(保安用)用役設備、通報設備、非常用照明設備などが優先される。弱小構造物は周辺構造物との干渉の影響も評価する。歩きながら審査することから、欧米ではウォークダウンまたは耐震ウォークダウンと呼んでいる。

防災体制の診断では、現場を見て周り、その場で地震被害状況を推測し、事故が起きた場合の地震災害のシナリオ(ET)を想定し、設備の損傷し易さと災害への進展し易さから、地震災害のリスクを感覚的に評価する。必要と判断された場合には定量的評価を行う。リスクが大きいようであれば、構造の弱点や防災体制の不備を改善し、リスクを軽減することを考える。



図12 ウォークダウンによる診断と改善案作成

地震時挙動の想像では過去の地震被害と損傷モードを思い浮かべ、地震災害シナリオの想定では過去の地震災害・事故災害と災害拡大要因を思い浮かべる。ウォークダウンを仕組みとして発展させるには、データの蓄積・整備、教材の作成、研修など、組織的な対応、取り組みが必要となる。

7. おわりに

エネルギー保有量の大きなプラントが最大仮想事故を起こしたら、また、多くの産業にエネルギー、ユーティリティ、基礎製品を供給するプラントが広域にわたって同時に生産機能を喪失したら、社会・経済への影響は計り知れない。東海・東南海・南海地震が発生した場合において、大規模な事故災害を未然に防止し、また、生産機能への影響を最小限に抑えることは、企業の存続のみならず、国力維持のためにも大切なこととなる。このことは、東北地方太平洋沖地震で得られた最も大きな教訓のように思われる。

プラントの地震被害・地震災害を防止、軽減するには、実際の被害経験から得られた教訓を生かすことが大切である。地震被害・地震災害のデータを蓄積し、それらを分析し、手段、手法を考え、次代に伝えていくことは、地震国の日本にあって、現代に生きる我々の責務のように感じる。

最後に、東北地方太平洋沖地震で被災され、その経験を公開された事業所、及び事業所の皆様に心から敬意を表します。また、防災活動で負傷された方や体調を崩された方にお見舞いを申し上げるとともに、亡くなられた方に謹んで哀悼の意を表します。

参考文献

- (1) コスモ石油株式会社千葉製油所、東日本大震災時のLPGタンク火災・爆発事故における防災活動について、Safety & Tomorrow、No.143、2012.5
- (2) 羽尾 務、東日本大震災における被害と震災時の対応状況、2012 化学工学会 第44回秋季大会 S-47、2012.9
- (3) 三島信行、東日本大震災『鹿島事業所被害プラント安全停止と再稼働』、SICE 産業応用部門 2012 年度大会 産業システムシンポジウム
- (4) 安全工学会地震被害調査委員会、株式会社クレハ いわき事業所 地震被害調査報告（一般公表報告書）
- (5) 山口健志、東日本大震災における仙台製油所の防災活動について、Safety & Tomorrow No.144、2012.7
- (6) 吉田久雄・大藤友詳、東日本大震災における久慈国家石油備蓄基地の防災活動について、Safety & Tomorrow No.143、2012.5
- (7) 消防庁 消防研究センター、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の被害及び消防活動に関する調査報告書（第1報）、平成23年12月
- (8) 総合資源エネルギー調査会 高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会、東日本大震災を踏まえた高圧ガス施設等の地震・津波対策について、平成24年4月
- (9) 日本電設工業協会 技術・安全委員会、東日本大震災電気設備被害調査報告書、2012.2
- (10) 稲葉 忠、過去の地震被害から学ぶ配管系の耐震設計、配管技術、Vol.47 No11、2005
- (11) 源栄正人、東日本大震災における地震動と建物被害の実態と教訓、東日本大震災に関する技術講演会論文集－巨大地震・巨大津波がもたらした被害と教訓、2012.2

- (12) 例えば、国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による K-NET 観測記録の応答スペクトル、平成23年3月23日
 - (13) 気象庁・気象研究所「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定 ― 近地強震波形を用いた解析 ―、(2012/10/15更新)
 - (14) 高圧ガス保安協会、兵庫県南部地震に伴う LP ガス貯蔵設備 ガス漏洩調査中間報告書、平成 7 年 5 月
 - (15) 自治省消防庁消防研究所、阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書
 - (16) 消防研究所、兵庫県南部地震による危険物施設の地震被害調査報告書、平成 7 年 5 月
 - (17) 白崎正彦、新潟地震から25年―その 1―、同一その 2―、高圧ガス、Vol.29 No.8, 9、1989.8, 9
 - (18) 岩淵洋子・今村文彦・越村俊一、1964年新潟地震津波にみる港湾域での複合災害の実態と今後の課題、海岸工学論文集、第53巻、pp.1326-1330、2006
 - (19) 高圧ガス保安協会、石油精製及び石油化学装置事故事例集 (1995)
 - (20) 稲葉 忠、化学産業における地震災害のリスクマネジメント、化学工学、 第 60 巻 第 7 号、1996
 - (21) 高圧ガス保安協会、コンビナート保安・防災技術指針 -化学工場における地震対策-、1974.9
- 注：参考文献 (21) は本文中では引用していないが、コンビナートの保安・防災の基本書として掲げた。

まとめ

大震災に備えた今後のプラント運転のあり方

これまで解説してきたアンケート結果やその考察ならびに有識者の皆様からのご意見などを踏まえ、プラントオペレーション分科会の幹事会メンバーにて議論をした内容から抜粋して、以下に本報告書のまとめとして掲載させていただきます。

(1) プラントの自動停止について

まず、大地震が発生したときのプラント自動停止システムについては、一部の自治体から導入するよう要請が出ているところもあるようである。これまで、信頼性に疑問があり、誤作動によってプラントを停止させてしまうというリスクを考慮して導入が進んでいなかったとも考えられるが、近年の地震計は波形を解析して地震かどうかの判定もするようになり、誤検知の心配は少ないようである。また、2 out of 3 にして、しかも設置場所を分散させることにより、誤った検出をするという心配は大幅に軽減できるものと考えられる。

バッチプラントではステップによって運転停止のための対処方法が異なるなど、自動停止システムを構築することが難しいという場合もある。また、切り替え運転プラントのように運転停止/開始操作の頻度が普段から高ければ、大規模地震発生の直後であっても、オペレータは落ち着いて普段どおり対処が可能なのかもしれない。装置の耐震設計が十分であり、基本的にどんな大地震でも装置は破壊されないということであれば、揺れが止まってからオペレータが対処するということでも問題にはならないのかもしれない。

しかしながら、装置や配管が地震動によって破壊され漏洩が発生するという万一のことを考えれば、1秒でも早くプラントを停止させることで漏洩量を減少させたり、着火を防止できたりする可能性はあると思われる。P波検知による地震到来の予測も、精度が上がりさえすれば導入が可能となるかもしれない。気象庁から送られる緊急地震速報の情報だけでは誤報が心配されるのであれば、実際にP波が到来したこととAND条件にすれば、より大きなS波の到来までに、少し早くプラントを安全な状態に遷移させることが可能になるとと思われる。地震の揺れが収まるまでの1～数分の間、身を伏せて待つだけになるよりも、自動停止システムによってプラントを確実により安全な方向に移行させることは非常に重要なことである。

プラントの自動停止システムを一気に導入することが難しい場合は、大型の遠隔操作弁などの自動化や遠隔操作化を少しでも進めることにより、緊急時のオペレータの作業負担を低減させることができ、休日や夜間など、最小限の人員しか工場に居ない場合においても、より安全で確実にプラントを停止させることができるものと考えられる。

(2) 設備の安全性確保について

個々の装置や配管の耐震補強については、どこまで投資が可能かという問題に直面

する。プラントの改造によって装置の運転中の荷重が設計時から増大していたりするようなケースが考えられるため、そのような弱点が無いかの再確認が必要なのではないだろうか。

今回の震災の被害の実態を聞かせていただくと、共通の基礎を取っておれば大事には至らなかったという話がある。ポンプと装置の基礎が別々に設置されていたため、配管が大きく変形したり、ポンプのケーシングが破損したりというということがあったようである。

液状化についても工場敷地内で部分的に液状化の発生があるようである。地盤調査などで、事前に対策を打つことができれば、設備の被害も間違いなく軽減できるはずである。

化学産業では該当する事業所は少ないかもしれないが、電子産業などでは精密加工のための高価な装置に対する被害を防ぐため、P波検知の地震警報によって装置を原点に復帰させて機械的なロックをおこなってしまうことが考えられる。稼動状態で大きな衝撃を受けて装置が破損しないよう、数秒間もあれば確実な対策は取れるのではないかと考えられる。化学産業においても、フィルム加工などの分野では類似の対策を取ることが可能であると思われる。また、大型の装置であっても、例えば振動流動乾燥機やロードセルなど、振動に弱い装置の運転を緊急停止させてロックをしてしまうという仕組みを導入することも検討が可能なのではないかとと思われる。

(3) 津波への備え

仮に 5m の津波が襲来したとしても、地盤のかさ上げがあるため、プラントの設置基準面からの最高到達高さは、せいぜい 1~2m 程度ではないかと考えられる。それでも十分な脅威ではあるが、何らかの対応策を検討できる範囲にあるのではないかと想像される。

プラントの立地する地域によるが、津波襲来までの時間は 1~2 時間程度はあるものと想定される。その間に、自工場のみならず、周辺地域や環境への影響を最小限に食い止められるよう、タンクの元弁閉止や、装置や配管内の内容物をより強固なタンクなどに移送してしまうことが考えられる。

大型弁の場合、人手で閉め切るまでに非常に時間と労力が掛かるものがあるが、これらを自動化・遠隔化しておかなければ、オペレータの手に負えるものでなくなることは明らかである。短時間で、かつ、現場に出るといった身の危険を冒さずに津波への事前対処ができるようにしておくことは、重要である。

計器室や電気室を 2 階以上に上げておくことも、重要な予防措置となる。一朝一夕にできる問題ではないが、計装設備の更新時期などに計画的に実行に移していくべき内容である。同時に、これらの重要設備の水密化が挙げられる。完全な浸水防止は難しいかもしれないが、時間稼ぎができるだけでも被害を相当抑えられる可能性は高いと考えられる。

ここで問題になるのが、ケーブルの進入口である。しばしば、ケーブルを床下から

電気室などに通線しているが、津波対策を考える上では建物の上部からケーブルを入れるようにしなければならない。

津波の被害に遭われた事業所では、従業員の自家用車が流されてきて、プラントなどの設備に被害を与えたという話を聞いている。従業員の駐車場を事業所内のどの位置に確保するかも、津波対策を考える上で重要となる。タンクローリーが出入りする入出荷設備の設置場所についても同様である。

ある企業では、津波での浮遊物による被害を防ぐために、重要設備の周りに丈夫な柵を設置することを計画中ということである。コンクリート壁なども含め、防護措置が可能な部分は実施していくことも必要であろう。

ポンプや重要なセンサーの設置位置についても変更していくことの検討が必要である。ポンプの場合は NPSH の関係で高いところに設置することができない可能性もあるが、非常用発電機などは、高いところへの移設が可能である。センサーについては、ワイヤレス計器が水没しても信号を発信し続けたという情報がある。

(4) 日ごろの備え

大地震に備えて何をすべきかという情報も、今回のアンケートの結果や設問 51 への回答としていただいたご意見から読み取れるところがある。

今回の東日本大震災では用役や燃料の供給が長期間にわたってマヒしたという実態がある。非常用の発電機の設置、そして、電源が確保できれば通信手段の確保が可能となってくる。保安用に窒素が必要な事業所では、ボンベなどによる備蓄も検討が必要であろう。

今回の震災では、関係者のご努力などにより、何とか必要な用役を確保して安全を確保した事例もあったようである。普段からリスクの解析を行い、今回のような大規模災害にも対処して安全を確保できるよう、再確認が必要だと思われる。

休日や夜間に大地震が発生したような場合は、応援体制の確保もままならない。工場に居る最低限の人員だけで対処を行い、応援が無いまたは少ないままで保安体制を継続することが必要となる。食料の備蓄や連絡体制、そして、必要物資の補給体制をいかにして確保するかが非常に重要となってくる。普段から周到な対応策を練っておくことが必要となる。

編集後記

東日本大震災が発生して、早くも2年近くが経過します。発災当時、テレビ等で目にした惨状は、今をもって忘れがたいものがあります。石油精製プラントでの大きな爆発火災などが報道されていましたが、化学企業については、当時は各社のホームページなどから断片的な情報が得られるだけで、どこでサプライチェーンが切れているかさえ、なかなか分からない状況でした。

今回のアンケート実施や関連した調査活動によって、それまであまり公表されていなかった各社の被害の実情、復旧までのご苦労、そして、大きい痛手を負いながら得られた貴重な教訓や知見が、ある程度明らかになったと思われます。

アンケートのご回答にご協力いただきました皆様には、心から御礼を申し上げます。

今回のアンケートならびに調査活動の実施にあたっては、化学工学会システム・情報・シミュレーション部会の幹事会メンバーだけでなく、計測自動制御学会の産業応用部門計測技術交流部会の皆様にも、設問の検討や結果の考察など、多大なるご努力をいただきました。ここに御礼申し上げます。

また、化学工学会秋季大会におけるシンポジウムの開催では、化学工学会安全部会のご協力をいただき、共催という形式を取らせて頂きました。関係者の皆様に心から感謝致します。

さらに、本冊子の発刊にあたり、ご多忙の中、ご執筆をいただきました伊藤利昭先生、稲葉 忠 様、林 功 様には、厚く御礼申し上げます。

アンケート実施から本冊子の発刊まで、編集者の力不足のために、ずいぶんと日数が経過してしまいましたことを、お詫び申し上げます。

ぜひともこの貴重な情報を、今後発生が予想される南海トラフの大地震や、直下型の大地震への備えとして、各企業が役立てていかれることを希望いたします。

2013年2月

化学工学会 SIS部会 プラントオペレーション分科会

東日本大震災におけるプラントオペレーションに関する
アンケート調査報告書

2013年2月

発行 (公社)化学工学会 SIS部会 プラントオペレーション分科会
編集 (公社)化学工学会 SIS部会 プラントオペレーション分科会 幹事会