

別添1 大規模な地震に係る防災及び減災対策に関する
対応策の例示案

1. 危機対応と危機耐性

大規模地震によって事業所や製造設備に被害が発生した場合、被害が周囲に拡大しないように対応を行う必要がある。地震発生後に行う対応を「危機対応」と呼ぶこととする。

一方、危機対応を行うためには当該事業所においてどのような被害が発生し得るかを地震が発生するまでに想定し、それに対応可能な対策を実施しなくてはならない。これを広い意味での「事前対策」と呼ぶ。一般には、どのような地震外力（地震動だけでなく液状化等の地盤変状や津波等の地震にともなう種々の現象を含む）が作用するかを想定した上で事前対策を実施することになるが、想定には限界があり、実際に地震が発生した場合、それが想定を超える規模の地震外力となることもあり得る。想定を超える地震外力が製造設備等に作用した場合、何らかの被害が発生することが予想される。想定外の地震外力を想定することは本質的に不可能であるが、想定外の地震外力によって発生する被害を想定することは可能である。そのため、設計や対策を実施する際に、たとえ想定を超える地震外力によって被害が発生したとしても、その被害が周囲に拡大せず破滅的（catastrophic）な状況に陥らないような能力や機能を当該事業所に具足させておくことが有用である。このような想定外の地震外力に対する対応能力や機能のことを「危機耐性」と呼ぶこととする。なお、「破滅的な状態」とは施設の被害によって人命保護や公共の安全確保等、極めて基本的な安全目標の達成さえも困難となる状態を意味する。

地震発生後に行われる「危機対応」は必ずしも想定外の地震外力を受けた場合にのみ行うものではなく、想定内の地震外力を受けた際にも事前に決めた手順にしたがって実施されるべきものであり、「危機耐性」の概念とは独立した概念である。また、両者ともソフト的およびハード的な対策が行われることが期待される。

適切な危機対応を行い得るよう事前対策を十分に行うことはもちろんであるが、事業所における危機耐性を向上させることは事前対策のなかでも特に重要な対策のひとつとして位置づける。

2. 大規模な地震に係る防災及び減災対策の基本方針

大規模な地震に係る防災及び減災対策の基本方針を以下のように定める。なお、対策の対象事業所において津波を受けることが予想される場合、「津波対策として危害予防規定に規定すべき項目」もあわせて参照すること。

- （耐震性能の向上）適切な地震外力の想定のもとで事業所内の構造物や人員等の挙動を推定し、地震外力によって被害が生じないように事前に必要な対策を行う。
- （危機耐性の向上）想定を超える大規模な地震が発生し、事業所内の製造設備や構造物が想定を超える大きな地震外力をうけたことにより、これらの設備等になんらかの被害が生じた場合であっても、事業所内外へ被害が拡大せず、破滅的な状況に陥らないこと。

大規模な地震に係る防災および減災のための方策の具体的手順は次項以降に示す。次項以降に記載した手順（ステップ）を全て実施する必要はなく、事業所ごとの防災対策の方針を精査のうえ、事業所の責任において当該事業所において必要と考えられる手順を適宜取舍選択して採用すべきものである。また、事業所によっては、これらの手順のいくつかを同時並行に実施したり、次項に述べる危機耐性向上のための手順もあわせて実施することが有用な場合もあることに留意して対策計画を立案すべきものである。

2.1 耐震性能の向上のための手順

当該事業所においてどのような地震外力をうけるかを想定した上で、事業所内の製造設備や構造物等がどのような応答を示すか、事業所内の人員がどのような行動をとるか等を推定し、当該事業所の地震外力に対する「真の実力」を明確にする。そのうえで、想定された地震外力のもとで被害が生じないように構造物等の耐震改修、人員の訓練、近隣住民との協力体制の構築、地震発生後の行動規範の制定などを行う。

このためには、以下の手順を参考に対策を実施する。

- [i] **（作用の想定）**地震によって当該事業所がうけるであろう地震外力の作用を適切に想定する。
- [ii] **（応答の想定）**想定される地震外力の作用によって製造設備等の個々の構造物がどのような挙動を示すかを推定する。また、想定を超える地震外力を受けた際の構造物の挙動をあわせて想定する。
- [iii] **（被災シナリオの作成）**想定される地震外力をうけた場合に製造設備等を構成する構造物のどこでどのような被害が発生し、製造設備がシステムとしてどのように被害の連鎖を生じ得るかという被災シナリオを作成する。
- [iv] **（弱点の発見）**作成された被災シナリオから、当該事業所における弱点となる部分がどこかを同定し、被害を最小限にとどめることができる適切な対策とその優先順位を決定する。
- [v] **（被害防止対策の実施）**想定される地震外力の作用によって製造設備等に被害が発生しないよう、構造物の耐震改修等の対策を実施する。
- [vi] **（危機対応策の策定）**作成された被災シナリオにおいて、想定される地震外力のもとでなんらかの被害を許容する場合には、地震発生後に製造設備等に被害が発生した際にどのように対応するか、危機対応活動を策定する。
- [vii] **（被災シナリオの再構築）**弱点の改修等にもなつて被災シナリオは変化する。そのため、[iii] → [vii]のループを繰り返して、現実にあわせた対策をすすめる。必要に応じて、想定にかかわる[i]、[ii]、[viii]のいずれかまたは全てに立ち戻つて想定の高高度化や高精度化をすすめ、対策に反映する。
- [viii] **（モニタリングの実施）**製造設備等の常時の挙動を測定・監視し、測定記録に基づいてそれらの動特性をモデル化し、構造物等の弱点の発見 [iv] に利活用する。地震時には設備等の挙動をリアルタイムに把握し、それに基づく被災判定や危機対応を支援する。

2.2 危機耐性向上のための手順

具体的には、たとえ貯槽や配管類が地震外力によって破壊されても内容物等が外部に漏洩しない、あるいは漏洩しても爆発や有害物質の周囲への拡散といった重大な事態に発展しない、等を確実に実現することを意味する。

このためには、以下の手順を参考に対策を実施する。必ずしも以下に記載した手順（ステップ）を全て実施する必要はなく、事業所ごとに必要と考えられる手法を適宜取捨選択して採用することが適切である。また、事業所によっては、以下の手順のいくつかを同時並行に実施したり、前項の耐震性能の向上のための手順もあわせて実施することが有用な場合もあると考えられる。

- [I] **（被災シナリオの作成）**想定を超える地震外力をうけた場合に製造設備等を構成する構造物のどこでどのような被害が発生し、製造設備がシステムとしてどのように被害の連鎖を生じ得るかという被災シナリオを作成する。
- [II] **（弱点の発見）**作成された被災シナリオから、当該事業所における弱点となる部分が

どこかを同定し、被害を最小限にとどめることができる適切な対策とその優先順位を決定する。

- [III] **（危機耐性の向上）** 想定を超える地震外力をうけた際の危機耐性を高めるための対策を行う。すなわち、被災シナリオをもとに被害が事業所内外に拡大しないよう弱点となる部分を中心として危機耐性を向上させるよう改修、補修等を実施する。
- [IV] **（危機対応策の策定）** 想定を超える地震動によって製造設備等に被害が発生した場合にどのように対応するかを危機対応活動を策定する。
- [V] **（被災シナリオの再構築）** 危機耐性の向上にともなって被災シナリオは変化する。そのため、[I] → [V] のループを繰り返して、現実にあわせた対策をすすめる。
- [V] **（モニタリングの実施）** 地震時には設備等の挙動をリアルタイムに把握し、それに基づく被災判定や危機対応を支援する。

3. 耐震性能および危機耐性向上のための方法の例示

大規模な地震によって事業所が想定された、あるいは想定を超える地震外力をうけた際に、どのような被害が発生し得るかを平時において詳細に調査、検討し、対策を実施することが重要である。当該事業所がもつ「真の」耐震性能を正しく把握するために、当該事業所がどのような地震外力をうけ得るか、を想定する。そのうえで、事業所内の製造設備等を構成する個々の構造物が大規模な地震による想定された、あるいは想定を超える地震外力をうけたときにどのような挙動を示すかを予測したうえで、多数の構造物が連携してひとつのシステムとして機能している事業所全体の被災シナリオを作成する。被災シナリオの作成には「耐震ウォークダウン」のような調査手法を用いることができる。被災シナリオに基づいて耐震性能および危機耐性の向上のための具体的な対策を進める。これは事業所ごとの判断に基づいて適切な対策や手法を取捨選択することが望ましい。

以下に、2. 節に掲げた項目ごとに事業所の耐震性能および危機耐性を高めるための方法を例示する。各項目の後ろの[]内のローマ数字は2.1 項および2.2 項の対応する項目の番号を示している。

なお、「地震外力」とは、地震による地震動だけでなく液状化による地盤変状や津波等の地震にともなう種々の現象を含む構造物に対する作用を意味するものとする。

1) （作用の想定） ← [i]

地震によって当該事業所がうけるであろう地震外力の作用を適切に想定する。なお、当該事業所において津波による影響を受けることが予想される場合には、「津波対策として危害予防規定に規定すべき項目」をあわせて参照のこと。

(a) （文献等の調査）

当該事業所周辺に存在する活断層、過去に発生した地震の震源、規模等について歴史地震まで遡って調査する。また、敷地内において、過去の地震において断層変位による変位の痕跡が残っていないか、液状化等の地盤変状の発生についての記録の有無、地盤変状の痕跡が残っていないかどうか、等を調査する。

(b) （地震動の空間分布特性の調査）

事業所の敷地が広い場合、あるいは敷地が広くなくても地下の地質構造が変化に富むことが予想される場合には敷地内での地震動が場所によって大きく異なる場合が考えられる(これを地震動の空間変動と呼ぶ)。このような地震動の空間変動分布を事前に予測しておくことが有用である。

そのためには、ボーリング、PS 検層、微動探査、重力探査等の種々の物理探査

手法により地盤構造の空間変動（地下の地層の傾斜や不整形構造等）をモデル化したうえで、適切な解析手法により地盤震動の空間変動を予測する。特に重要な構造物周辺を中心として敷地内の複数の地点で長期間にわたる地震観測を実施し、地震動の空間変動をモニタして解析結果の検証を行うことが望ましい。

敷地内の地震動の空間変動特性の予測には以下のような手法を用いることができる。

- （理論的手法）1次元重複反射理論によって地盤の応答特性を理論的に求める。
- （数値的手法）2次元または3次元の有限要素法や差分法を用いて数値的に求める。
- （経験的手法）ボーリング孔に地震計を設置した鉛直アレー観測や水平方向に地震計を展開したアレー観測を行い、観測記録に基づいて地盤の周波数応答関数や空間変動特性を求める。
- （ハイブリッド手法）経験的手法と理論的または数値的手法を組み合わせることでより高い精度で地盤の周波数応答関数や空間変動特性を推定する。

(c) (サイトスペシフィック地震動の推定)

地震動は地震によって大きく異なるため、対象とする事業所周辺に大きな影響を及ぼすと考えられる地震を複数選択する。前項の調査結果を勘案して構造物の場所における地震動（サイトスペシフィック地震動）を複数作成し、被害の予測に用いる。地震の性質によって、影響をうける構造様式が異なると考えられるため、構造様式ごとに検討すべき地震が異なることに注意する。

サイトスペシフィック地震動の作成方法は高圧ガス設備の耐震設計において用いられるものに準ずるものとする。

事業所周辺に活断層やプレート境界がなく、大きな地震の発生を予測しにくい場合においても、高圧ガス設備の耐震設計の場合と同様に当該事業所直下で、かつ、地表面に断層がギリギリ現われない程度程度の深さ（上部地殻内、コンラッド面の深さ 15km 程度以浅）で発生するM6.5 程度の地震による地震動を想定する。

(d) (液状化等の地盤変状の発生リスクの調査)

事業所内に地下水位が高く、十分に締っていない砂地盤などがある場合、地震時に液状化等の地盤変状が発生するリスクが高い。そのため、敷地内で地盤変状が発生しやすい場所を同定しておくことが重要である。

重要構造物の基礎周辺の地盤変状のリスクは構造物への影響が大きいため詳細な調査が望まれる。また、製造設備とは直接関係しない場所や構造物であっても、災害時の避難や二次災害を防止するための緊急対応活動等で利用される敷地内道路等についても地盤変状のリスクについて調査が必要である。

敷地内の特に重要な個所においては地下水位や地盤のN 値等をボーリングによって調査し、有効応力解析等の高度な解析手法を適用して地盤変状を定量的に推定しておくことは有効である。一方、敷地内全域の液状化危険度を簡易に推定するためには、液状化抵抗率(FL 値)等の指標も利用可能である。

2) (応答の想定) ← [ii]

想定される地震外力の作用によって製造設備等の個々の構造物がどのような挙動を示す

かを推定する。また、想定を超える地震外力を受けた際の構造物の挙動をあわせて想定する。

(a) (文献等の調査)

製造設備の個々の構造様式に応じて、過去の地震等による被害事例、実験、解析結果等を調査し、同様の構造様式、規模の構造物に発生した被害から当該構造物の被害を予測する。

(b) (構造物の動特性の同定)

事業所内の個々の構造物が地震外力をうけた時にどのような挙動を示すかという動的応答特性について検討する。すなわち、個々の構造物の入出力関係(地盤震動入力に対する応答特性)を適切に同定する。

動特性の同定にあたっては、以下の方法を用いることができる。

- (理論的手法) 設計図書、設計図書がない場合には実構造物の寸法や材料の計測結果等に基づいて、次項で述べる理論的方法を用いて数理モデルを作成する。
- (経験的手法) 地盤上および構造物上で(構造物の規模や構造様式に応じて複数箇所)、入出力関係の常時モニタを実施し、応答特性にかかるデータを蓄積する。その際、構造様式に応じて適切と考えられる物理量(加速度、速度、変位、ひずみ、層間変形角等)をモニタする。入力特性のバリエーション(周波数特性の違いや地震動の振幅の大小)が広いほど高い精度で構造物の動特性を同定可能となるため、長期間にわたってデータを蓄積することが有効である。

なお、モニタリングによって得られる記録は地盤、構造物のいずれについても、ほとんどの場合、弾性域における応答に留まると考えられる。長期間のデータの蓄積により、ごく稀な大きな地震動を経験することで非線形応答特性のモデル化に必要な情報が得られることも期待できる。しかし、そのような記録が得られるまでは、大きな地震動が入力された場合の地盤や構造物の塑性化に対して、実験や理論的手法等に基づいて適切な非線形・弾塑性応答をモデル化する必要がある。

(c) (構造物の動特性のモデル化)

構造物の動特性のモデル化にあたっては、以下のような手法を用いることができ、費用対効果を勘案して適切と考えられる手法を採用する。

- (理論的手法) 構造物の物理的諸元に基づいて有限要素解析などに適用可能な詳細な数値モデルを作成する。
- (簡易な理論的手法) 構造物の動特性を適切に表現できる簡易な数理モデルを作成する。簡易なモデルは解析が容易である反面、解析結果が実構造物の単純化のあり方に大きく依存する。単純化にあたっては被害を予測するという目的に合致するように、現象の本質を正しく反映したモデルを注意深く作成しなくてはならない。
- (経験的手法) 実構造物における測定結果に基づいて入出力関係の数理モデルを作成する。測定結果から得られた入出力関係を用いて構造物の動特性を規定するパラメータを同定した上で動特性のモデル化を行うことができる。一方、構造物の物理特性を考慮せずに、入出力関係のみを直接結び付ける深層学習等の手法を採用することも可能である。

(d) (構造物の動特性の最適化)

設計値（または動特性モデルから想定される値）と実構造物における測定値との比較をすることで構造物の動特性モデルのパラメータ等をより適切な値に補正（または修正）する。構造物の地震時挙動をより精度よく予測するためには、多くの測定記録の蓄積が有効である。

(e) (被害の判定規準の設定)

以上の手順によって得られたサイトスペシフィック地震動および構造物の動特性モデルを用いて個々の構造物が地震時にどのような挙動を示すかを推定する。被害の有無の判断にあたっては、被害発生の状態を適切に定義することが重要である。構造様式および動特性モデルの特性にあわせて応力、変位、塑性率等の適切な物理量の閾値を設定し、被災判定を行う。被災判定には以下に示す判断の詳細レベルが考えられる。構造様式や構造物の重要度等に応じて適切な詳細レベルで被災判定を行うことが望ましい。

- (二値判定) 被害の有無のみを判定する。
- (被災レベル判定) 被災レベルの大小をいくつかの段階にわけて判定する。
- (被災個所判定) 対象構造物のどの部分がどのように破壊(または損傷)するかを推定するとともに、被害形態に応じて被災レベルを判定する。

3) (被災シナリオの作成) ← [iii] [I]

想定される、または想定を超える地震外力をうけた場合に製造設備等の構造物のどこでどのような被害が発生し、製造設備がシステムとしてどのように被害の連鎖を生じ得るかという被災シナリオを作成する。

(a) (個々の構造物の被害形態の列挙)

何らかの理由により想定内の地震動にたいして十分な対策を行うことができずある程度の被害を許容する場合や、想定を超える地震動をうけた場合に、製造設備等の個々の構造物においてどのような被害が発生し得るかを、構造物の動特性のモデルに基づいて推定する。さらに、その被害によって発生し得る事象を列挙する。

(b) (想定される危機対応活動の列挙)

多数の構造物が互いに連携をしあってシステムとして機能しているような場合、個々の構造物等の被害が他の構造物の機能や安全性、また当該事業所における危機対応活動に対して大きな影響を及ぼすことにより、思わぬ二次災害につながる可能性がある。個々の構造物の被害だけではなく、被災後にどのような活動が期待されるのか、その活動にあたって何が必要となるか（資材の運搬に必要な道路や危機対応活動に必要な特殊車両等）も可能な限り列挙する。

(c) 被災シナリオの作成に際して、考慮すべき事象を可能な限り想定しておくことが重要である。そのために以下のような手法が利用できる。

- 過去の被害事例の調査。
- 他事業所における同様の検討内容の調査、情報共有。
- 複数の異なる専門分野の技術者によるブレインストーミング(KJ法等の採用)。

(d) (複数のシナリオの作成)

一般に、地震の性質（震源特性や伝播経路特性等の違い）によって被害の様態や被害を受ける構造物が異なることが考えられる。そのため複数の被災シナリオを想定することが必要である。

複数の異なるタイプの想定地震のもとで、上で列挙した種々の事象を考慮しながら

ら複数の被災シナリオを作成する。想定される事象が多岐にわたる場合には、たとえばイベントツリーを作成してどのような現象が発生し、どのような終局状態が想定されるかをシステムティックに検討することができる。

4) (弱点の発見) ← [iv] [III]

作成された被災シナリオから、当該事業所における弱点となる部分がどこかを同定し、被害を最小限にとどめることができる適切な対策とその優先順位を決定する。ここで、被害のきっかけとなる事象を「弱点」とよぶこととする。

(a) (弱点の同定)

複数のシナリオの中で特に鍵となる事象に着目し、当該事業所における地震に対する弱点の抽出を行う。鍵となる事象とは、シナリオの上流に位置し、かつ複数のシナリオに共通して現われる事象が候補となる。

(b) (対策の優先順位の決定)

弱点となる事象を解消（または改善）することによって被災シナリオがどのように変化するかを検討する。これにより、対策による費用対効果の高い事象を抽出することができる。このような検討に基づいて、必要な対策の優先度を判断する。

5) (被害防止対策の実施) ← [v]

想定される地震外力の作用によって製造設備等に被害が発生しないよう、構造物の耐震改修等の対策を実施する。

取りうる対策には以下のものが考えられる。

(a) (構造物の直接的な補強)

対象とする弱点が構造物の強度に起因する場合は、想定される地震動に対して構造物そのものが十分な耐力を有するように改修（または補修）する。

しかし、設備の運用上または費用等の制約により容易には改修をおこなうことができない場合には、次に示す何らかの間接的な手法によって補完することで耐震性能の向上をはかることもできる。

(b) (直接的な構造物の補強ができない場合の対策)

対象とする弱点を直接的な補強によって解消できない場合、何らかの間接的な手法を用いて補完し、対策する。例えば、以下のような対策が考えられる。

- 配管類や配管と貯槽のとりつけ部分のように構造物そのものを直接、補強することによって耐震化することには限界がある構造物の場合、既に多くの事業所において導入されている緊急遮断弁の設置などによって内容物が漏洩量を制限するようにする。
- 対象とする弱点がどのような物理量にもっとも強く依存するかを構造物の動特性モデル等に基づいて検討した上で、弱点部分において被害と相関が高いの物理量を常時モニタリングする。その際、対象とする物理量の値と被害レベル、被害形態等の関係を明らかにしておくことが重要である。被害形態と対応するように当該物理量の閾値を設定したうえで、物理量の閾値ごとにどのような事象が発生しうるか、というシナリオを作成しておく。それによって、地震発生時にモニタされた物理量から即時に適切なシナリオを選択して確実な危機対応を行う。
- 被害を受けた後の事業所内の人員の行動規範等を事前に決定し、平時において

定期的に訓練を行う。

6) (危機耐性の向上) ← [III]

被災シナリオをもとに被害が事業所内外に拡大しないよう弱点となる部分を中心として危機耐性を向上させるよう改修、補修等を実施する。

想定を超える強震外力を事業所が受けた場合、当初、想定された被災シナリオとはまったく異なる事象が発生することも考えられる。想定を超える地震外力による被害の拡大を防止するためには、想定外の地震外力によって発生する事象を可能な限り想定範囲内にとどめるための工夫が必要である。

耐震性能の向上の対策をおこなう過程で事業所内の弱点を明確化して被災シナリオを作成していることを前提とすると、想定外の地震外力を受けた場合にも弱点が弱点として挙動することで被災シナリオが想定外のものとならないようにすることが期待できる。

そのために以下のような対策が考えられる。

- 想定外の地震外力を当該事業所が受けた場合には、何らかの被害が生じる可能性が高いことを事業所内の人員、事業所外の住民等に周知するためのルールや方法を策定しておく。
- 想定外の事象が生じて電力等を喪失した場合にあっても装置を安全に停止させることができるよう、パッシブな自動停止機構を導入する。
- 事業所内外へ被害が拡大しないためには、たとえ貯槽や配管類が破壊されても内容物等が外部に流出しないように対策を行う。以下にその例を挙げる。
 - 貯槽の脚や架台が倒壊したとしても、貯槽本体が損傷をしなければ内容物の漏洩は生じない。そこで、配管類の緊急遮断弁による内容物の確保のみならず、貯槽本体の倒壊方向や倒壊過程を制御することで貯槽本体が致命的な損傷をうけないような対策を施す。
 - 万一、貯槽本体の損傷により内容物が漏洩した場合しても、耐震性の高い防液堤を用いることによって内容物が周囲に拡散しないようにする、といったことが考えられる。また、有害物質の拡散の有無を定量的に判断できるように事業所の敷地境界付近で有害物質の濃度等を常時モニタしておく。
- 想定外の地震外力によって当初想定されている弱点以外の部分が被災しないように、構造物全体系の構成に留意する¹。
- 高圧ガス施設では、圧力容器等の機器に比べて支持構造物等の非耐圧部材の強度が相対的に低い場合、部材接合部分等の構造不連続部分に高い応力が発生する場合、配管系が周囲から外力を受ける場合等において、支持構造物、部材接合部分、配管系等は構造物全体系における弱点となりえるが、これらの弱点のなかでも破壊する場所を特定できるように、構造物を構築する。
- 弱点を重点的にモニタすることで、全体の挙動を予測できるようにする。すなわち、弱点に損傷がなければ全体も健全である、という判断ができるものと考えて、最小限のモニタリングによって事業所内のシステム全体の挙動を直ちに判断できるようにする。

¹高圧ガス施設には機器の破壊を防止するために爆風や爆圧を逃がすための爆発扉等が設けられることがあるが、これと同様の考え方を地震時の構造物全体系の挙動に対して導入することを念頭に置いている。すなわち、想定外の地震動による破壊カ所を特定することで構造全体系の破壊過程を制御しようとするものである。

にする。

- 弱点の破壊等により被災した場合に、被災した構造物等がその後の防災活動等を妨害しないように破壊の過程を制御する。以下にその例を挙げる。
 - 被災した構造物による道路閉塞が生じないように倒壊方向を制御する。
 - 構造物が倒壊する際に、危険物を含む別の構造物や重要な情報通信設備等を破壊しないように、倒壊過程を制御する。または、なんらかの防護工を設置する。

7) (危機対応策の策定) ← [vi] [IV]

作成された被災シナリオの中で被害を許容する場合や、想定を超える地震動によって製造設備等に被害が発生した場合にどのように対応するかの危機対応活動を策定する。

当該事業所において想定される地震動ごとに被災シナリオが作成されるが、実際の地震発生時には現場の人員（技術者や作業員等）には全体の事象を俯瞰することはできない。このことによって危機対応に遅れを生ずる場合があり、その後の二次災害等につながるリスクを有している。このような問題を回避するためには、以下のような対策が考えられる。

- (中央集約型対応) 地震外力や被災状況に関する情報を集約して最高責任者が意思決定をする。そのためには、情報伝達システムや指揮系統の明確化が必要となる。
- (現場分散型対応) 現場にいる人員にとっては目の前の事象が全てであり、それに全力で対応することが当面の目標となる。そのため、被災シナリオにおいて特定の部署で発生するであろう事象を個別に抽出し、その部署の担当者に期待される対応を単純化しておくとともに、常時の訓練を行っておくことが必要である。
- (判断の優先順位) 現場における判断と中央の判断が異なる場合、どちらを優先して対応を進めるか、を事業所ごとに方針を決定しておくことが必要である。さもなくば、現場が混乱してますます対応に遅れが生ずるリスクが増す。

大規模な地震が発生して、実際に被災するまで現実にどのような事象が発生するかはわからない。しかし、事前に作成した被災シナリオに基づいてできる限り最適な対応を行うことが求められる。そのためには以下のような準備が考えられる。

- (訓練) 事業所内の人員が異常時にどのような行動をとるべきかの規範を明確にし、常時に定期的に訓練を実施する。訓練は必ずしも設備を停止するような大規模なものではなく、図上訓練のようなものを担当部署ごとに実施する、といった方法も有効である。
- (整備) 常時に利用せず、緊急時のみに利用することが想定されている装置等が必要なときに確実に動作するためには常時のメンテナンスが必要である。異常時のみに用いられる装置等は必要なときに忘れられるリスクが高いため、できる限り、常時の装置を緊急時にも転用できるような仕組みを工夫することが有効である。
- (自動処理) 大規模な地震時には、複数の個所が同時多発的に異常に至ることが考えられる。このような場合には、現場の判断と対応には限界があるため、モニタリングデータを活用して自動化できる部分は自動化して、担当者の負担を軽減することは有効である。

危険物等を取り扱う構造物等では、大きな地震動を受けると同時に運転等を停止して安全な状態を移行しなくてはならない場合がある。そのような場合、運転員等

の判断を待たずに換震器（地震計）の記録に基づいて自動的に運転等を停止するようなシステムの導入は有効である。

このような自動処理を活用することによって、担当者は冷静に対応ができる余裕を持つことができると期待される。

ただし、自動処理には、一般に、第一種と第二種の過誤による誤作動が含まれることに注意して、保守的または積極的な対応アルゴリズムを事業所ごと、担当部署ごとの目的にあわせて検討することが重要である。

- （危機対応支援） 現実に発生した事象が事前に準備した複数のシナリオのうちどのシナリオに近いのかを判断することができればその後の危機対応をスムーズに進めることができる可能性がある。種々のモニタリングデータをもとに適切と考えられるシナリオを選択して自動的に提示するといった支援は有効と考えられる。
- （冗長化） 事業所内の多くのシステムが電力に依存しているため、電力の喪失にもなって全ての機能が失われると制御不能に陥るリスクがある。製造設備等のためだけでなく危機対応に必要な電力まで含めて自家発電等によって確保しておくことが期待される。

8) （被災シナリオの再構築） ← [vii] [V]

弱点の改修等にもなって被災シナリオは変化する。そのため、[iii] → [vii] または [I] → [V] のループを繰り返して、現実にあわせた対策をすすめる。必要に応じて、想定にかかわる [i]、 [ii]、 [viii]、 [VI] のいずれかまたは全てに立ち戻って想定的高度化や高精度化をすすめ、対策に反映する。

9) （モニタリングの実施） ← [viii] [VI]

製造設備等の常時の挙動を測定し、測定記録に基づいてそれらの動特性をモデル化し、構造物等の弱点の同定に利用する。地震時には設備等の挙動をリアルタイムに把握し、それに基づく被災判定や危機対応を支援する。

目的に応じて適切なモニタリング記録を組み合わせる。

(a) （サイトスペシフィック地震動の想定）

少なくとも事業所の敷地内の構造物による地盤震動の影響が少ないと思われる地表面に地震観測点を設置して、長期間にわたって地震動を観測する。得られた記録は、半経験的グリーン関数法を用いて当該事業所において精度の高いサイトスペシフィック地震動を推定するために利用することができる。

(b) （地震動の地盤増幅特性の推定）

ボーリング孔に地震計を埋めて、地表面における地震計とあわせて地震観測を行うことで（これを鉛直アレー観測という）、事業所の地盤における地震動の増幅特性を推定するために記録 を利用することができる。これにより、より高い精度で当該事業所の地震動特性をモデル化できる。

(c) （地震動の空間変動特性の推定）

事業所の敷地が広い場合、広くなくても地下の地質構造が変化に富んでいることが予想される場合は、敷地内の異なる場所ごとに地震動が大きく異なることがある。敷地内の複数個所に地表面または鉛直アレーによる地震観測を実施することで当該事業所において地震時に揺れやすい場所、揺れにくい場所を推定することができる。鉛直アレー観測を複数地点で実施すると、敷地内における地震動の 3 次元の空間変

動特性を得ることができる。

(d) (地下水位、気象状態等のモニタ)

事業所が液状化の発生可能性のある場所や地滑りの危険がある場所に立地する場合、地下水位や雨量等の気象データをモニタすることは有用である。液状化リスクの季節変動等を勘案することにより、より適切な危機対応を策定することが可能となる。

(e) (構造物の動特性の推定)

地下を含む地盤および構造物上の 1 つ以上の個所で同時に地震観測を継続することで、構造物の動特性のモデル化のための記録を得ることができる。地震時に当該構造物がどのような振動をするかを動特性を規定するパラメータを同定することで数理モデルを構築することができる。また、構造物の入出力関係を深層学習等の手法を利用して直接、モデル化することも可能である。

対象とする構造物の規模が大きい場合には、振動特性を同定しやすい場所を適切に選んで複数の地震計を設置することでより高い精度で構造物の数理モデルを構築できる。

(f) (システムの健全度のリアルタイムモニタ)

モニタすべき物理量は地震による振動とは限らず、製造設備内の内容物の容量、流量等多岐にわたる。事業所における製造設備等の相互の関係を考慮した上で、製造設備全体のシステムが正しく機能しているかどうかを種々の物理量をモニタすることによってリアルタイムに知ることは有用である。

(g) (弱点のモニタ)

被災シナリオを作成することで弱点の抽出が可能となるが、弱点となる部分を重点的にモニタすることで、システム全体の健全度を判定することに有効である。当該弱点における破壊状態がどのような物理量と高い相関関係にあるかを勘案して適切な物理量をモニタする。

(h) (危機対応の自動化)

常時にはモニタリングシステムは通常システムの健全度の確認および、事前対策としての構造物等の動特性のモデル化のために利用される。しかし、地震等の緊急時にはシステムの緊急停止等の自動処理のトリガとして利用することができる。また、大規模な地震の場合は、多くの異常が検出されるために現場において対応の優先順位が決定できなくなることが考えられる。そのような場合には、モニタされたデータをもとに緊急対応支援を行うよう事前に準備をしておくことが可能である。

(i) (モニタリングシステムの冗長化)

事業所内の各所から得られるモニタデータに基づいて、危機対応を行う場合、重要なデータのエラー、誤表示が誤った意思決定を引き起こす可能性がある。そのため、電源の冗長化やモニタリングシステムの冗長化などを行うことで危機対応をスムーズに実施できるようにすることが有効である。