

## 第2章 屋外重要土木構造物の耐震性能

### 2.1 屋外重要土木構造物の要求性能

屋外重要土木構造物に求められる性能(要求性能)を明確にするために、安全審査に用いられる指針類(本マニュアル「第1章 総則」参照)に基づいて、屋外重要土木構造物と関連のある設備の機能を整理した。特に、「技術指針4601・補-1984」には、耐震重要度分類やその定義、各系統の機能とそれに属する設備類(主要設備、補助設備、直接支持構造物、間接支持構造物等：本指針「第1章 総則」解説表1.1-3参照)が体系的に整理され一覧表にまとめられている。ここでは、屋外重要土木構造物に関わる部分を一部抜粋し、屋外重要土木構造物の要求性能との対応が可能なように加筆して、表2.1-1にまとめた。

原子力発電施設のうち、耐震重要度分類AsクラスおよびAクラスの設備について、その機能上の分類を示すと以下の通りである。

#### (1) 耐震Asクラスの機能上の分類

- (i) 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」を構成する配管および機器
- (ii) 使用済燃料を貯蔵するための設備
- (iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設及び原子炉の停止状態を維持する設備
- (iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための設備
- (v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力障壁となり、放射性物質の拡散を直接防ぐための設備

#### (2) 耐震Aクラスの機能上の分類

- (i) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するために必要な設備
- (ii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための施設で耐震Asクラス(v)以外の設備
- (iii) その他

これらの分類のうち、屋外重要土木構造物は、耐震Asクラスの(iv)、耐震Aクラスの(i)、(ii)に関連している。その例としては、原子炉補機冷却系設備、非常用電源設備、非常用ガス処理系設備等が挙げられる。

耐震重要度は、主要設備と補助設備、また、それらを直接的に支持する直接支持構造物に対して定められている。間接支持構造物については、これら上位の設備の機能が維持できることが要求されているが、耐震重要度分類の対象にはなっていない。屋外重要土木構造物はこの間接支持構造物に位置づけられ、その支持する設備の耐震設計に適用される地震動に対して、当該設備を支持する機能を損なわないことを確認する必要がある。

### 2.2 Fault Tree Analysis (FTA)による限界状態の検討

#### 2.2.1 屋外重要土木構造物に対するFTA

Fault Tree Analysis (FTA)とは、システムにおいて発生することが望ましくない事象(これをトップ事象と呼ぶ)に着目して、その発生経路を逆方向にたどることにより、屋外重要土木構造物の機能喪失原因(基本事象)を探求する手法である。なお、事象間の時系列的な関係は表現しにくいこと、基本事象として構造的に直接には関係しない事象(例えば、海面の相対的な低下)も抽出されること等の特徴がある。

一般に構造物に要求される機能には、安全性、使用性、および経済性に関するものがあげられるが、原子力発電所については、核分裂エネルギーを利用するという特殊性ゆえに、特に、安全性を重視すべきであると考えられる。原子力発電所の安全性を考えるにあたっては、非常時における放射性物質の環境中への放出を抑制することが重要と考えられる。したがって、ここでも、原子力発電所にとって安全性の面から要求される基本的な機能である。“非常時にも放射性物質を過度に環境中に放出しない”が喪失される状態、すなわち、“非常時に環境放出放射能が過大となる”をトップ事象として選定した。

FTA 実施にあたって設定した前提条件を以下に示す。

- ① 常用系施設については、その機能が喪失しても他の常用系設備あるいは非常用系設備によってプラントの安全要求停止機能に支障が生じないことから、“常用系設備のトラブル”は対象外とする。
- ② 土木構造物の限界状態発生に関係のない事象(例えば、配管・機器自体の問題)、および展開が困難な事象は否展開事象とする。
- ③ ヒューマンエラー(例えば、操作ミス)、および改修、新設工事等の作業に伴う事故は考慮しない。

FTA の結果として作成された屋外重要土木構造物全体の Fault Tree 図(以下 FT 図という)を図 2.2-1(a)、(b)に示す。

## 2.2.2 構造物の限界状態の抽出

上記の FTA の結果、主要設備間の設計における重要度の定義の差は認められなかった。主要設備のうち原子炉補機冷却系設備は、取水口から原子炉建屋にいたる長大な構造物であること、かつ、同設備を構成するボックスラーメン構造に対する検討成果は、他の主要設備を構成するボックスラーメン構造にも適用可能であることから、ここでは海水管ダクトを例にとって詳細検討結果を紹介する。ここでは関連するシステムの耐震重要度を考慮して、 $S_2$ 地震時について検討を行なった。この結果として、図 2.2-2 に示す FT 図が得られた。この図は、 $S_2$ 地震時における屋外重要土木構造物の FTA 結果に基づいて、海水管ダクトの限界状態を抽出するために、システムに属する設備の機能が喪失する状態、すなわち、“海水管が損傷を受ける”ことをトップ事象として、地盤・構造物系の限界状態に展開したものである。

FT 図からも分かるように、最終事象は各ブランチとも、部材の耐力に関係するものとなっており、その上には、構造物と地盤の連成を考えた全体変形・挙動に関する事象がある。

## 2.3 屋外重要土木構造物の目標性能

取水ピット、取水路についても、FTA の結果を分析した。これらの屋外重要土木構造物の要求性能を確保するために、想定する地震動に対する構造物の限界状態として目標性能を整理し、その限界状態の解析可能な指標として照査項目を設定した。その結果を表 2.3-1～表 2.3-3 に示す。

ここでは構造物の限界状態を階層的に整理しており、これが照査のレベルに対応している。許容される限界状態の程度に応じて照査項目も階層的に整理される。照査レベル 1 から照査レベル 4 に向かうにつれて対象となる事象は局所的となるが、その指標で構造系全体の挙動を判断することになるので、限界状態も安全側に設定されている。したがって、最上位の限界状態(実際に想定される現象に対する限界状態；照査レベル 1)は、その下位の照査項目の限界状態を照査することによって担保できる。

照査のレベルは照査に用いる解析手法のレベルと考えることができる。すなわち、上位のレベルになるほど、屋外重要土木構造物の地震時挙動をより厳密に解析する手法が必要となる。従来の許容応力度による照

査や部材耐力による照査はレベル4に位置づけられる。本指針での手法は、基本的にはレベル3を想定するが、照査方法によりレベル2を志向するものであり、構造物の目標性能を“想定する地震動に対して崩壊しない”としている。研究の進展の程度および解析手法の精度を勘案して、照査のレベルを設定することにより、柔軟で合理的な性能照査が可能になる。

表 2.1-1(a) 原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例 (BWR)

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		間接支持構造物として扱われる土木構造物の例 (屋外重要土木構造物の例)	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	検討用地震動		
A <sub>3</sub> クラス： その破損により冷却材喪失を引き起こすおそれのあるもの、原子炉を緊急停止させ、かつ、安全停止状態に維持するために必要なもの、使用済燃料を貯蔵するための施設及び原子炉格納容器	(iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための設備	①原子炉隔離時冷却系 ②高圧炉心スプレイス ③残留熱除去系(停止時冷却モード運転に必要な設備) ④冷却水源としてのサブプレッションポンプ	A <sub>3</sub> A <sub>3</sub> A <sub>3</sub> A <sub>3</sub>	①残留熱除去海水系 ②炉心支持構造物 ③非常用電源及び計装設備	A <sub>3</sub> A <sub>3</sub> A <sub>3</sub>	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A <sub>3</sub>	1) 原子炉建屋 2) 海水ポンプ基礎等の構造物(非常用) 3) 胴御建屋	S <sub>1</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	①原子炉補機冷却用海水系設備 ・海水管ダクト ・取水ピット ・取水路 等 ②非常用電源設備 ・非常用電源ケーブルダクト ・ディーゼル発電用燃料配管ダクト ・ディーゼル発電用燃料タンク基礎 等 ③非常用ガス処理設備 ・非常用ガス処理系配管ダクト ・排気筒基礎 等	
A <sub>2</sub> クラス： 原子炉事故の際に放射線障害から公衆を守るために必要なもの及びその機能喪失が公衆に放射線障害を及ぼすおそれのあるもので耐震A <sub>3</sub> クラスに属する以外のもの	(i) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するために必要な設備 (ii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための施設で耐震A <sub>3</sub> クラス(v)以外の設備	①非常用炉心冷却系 1) 高圧炉心スプレイス系 2) 低圧炉心スプレイス系 3) 残留熱除去系(低圧炉心注水モード運転に必要な設備) 4) 自動減圧系 ②冷却水源としてのサブプレッションポンプ	A A A A A A	①残留熱除去海水系 ②非常用電源及び計装設備 ③中央制御室のしゃへいと空調設備	A A A A A A	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A	1) 原子炉建屋 2) 海水ポンプ基礎等の構造物(非常用) 3) 胴御建屋	S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	①原子炉建屋 2) 海水ポンプ基礎等の構造物(非常用) 3) 主排気筒(非常用ガス処理系の排気口を支持する場合) 4) 胴御建屋	S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub>

出典：「技術指針 4601・補-1984」より該当部分を抜粋・加筆

表 2.1-1(b) 原子力発電施設の機能別分類と耐震重要度分類の例 (PWR)

耐震重要度分類及び定義	機能別分類	主要設備		補助設備		直接支持構造物		間接支持構造物		間接支持構造物として扱われる土木構造物の例 (屋外重要土木構造物の例)	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	検討用地震動		
A <sub>3</sub> クラス： その破損により冷却材喪失を引き起こすおそれのあるもの、原子炉を緊急停止させ、かつ、安全停止状態に維持するために必要なもの、使用済燃料を貯蔵するための施設及び原子炉格納容器	(iv) 原子炉停止後、炉心から崩壊熱を除去するための設備	①主蒸気・主給水系(主給水逆止弁より蒸気発生器2次側を経て、主蒸気隔離弁まで) ②補助冷却系 ③取水タンク ④余熱除去系	A <sub>3</sub> A <sub>3</sub> A <sub>3</sub> A <sub>3</sub>	①原子炉補機冷却海水系(工学的安全設備に係わるもの) ②原子炉補機冷却海水系 ③燃料取替用海水タンク ④炉心支持構造物 ⑤非常用電源及び計装設備	A <sub>3</sub> A <sub>3</sub> A <sub>3</sub> A <sub>3</sub>	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A <sub>3</sub>	1) 内筒コンクリート 2) 原子炉建屋 3) 補助建屋 4) 胴御建屋 5) ディーゼル建屋 6) 海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物	S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	①原子炉補機冷却用海水系設備 ・海水管ダクト ・取水ピット ・取水路 等 ②非常用電源設備 ・非常用電源ケーブルダクト ・ディーゼル発電用燃料配管ダクト ・ディーゼル発電用燃料タンク基礎 等 ③給水系・補機冷却水系設備 ・復水タンク基礎 ・燃料取替用海水タンク基礎 ・配管ダクト 等	
A <sub>2</sub> クラス： 原子炉事故の際に放射線障害から公衆を守るために必要なもの及びその機能喪失が公衆に放射線障害を及ぼすおそれのあるもので耐震A <sub>3</sub> クラスに属する以外のもの	(i) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するために必要な設備 (ii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための施設で耐震A <sub>3</sub> クラス(v)以外の設備	①安全注入系 ②余熱除去系(ECCS) ③燃料取替用海水タンク ④燃料容器スプレイス ⑤燃料取替用海水タンク ⑥アンモニウム系空気浄化設備 ⑦燃料容器非蒸気設備 ⑧安全補機室換気設備(工学的安全施設に含まれるもの)	A A A A A A A	①原子炉補機冷却海水系 ②原子炉補機冷却海水系 ③中央制御室のしゃへいと空調設備 ④非常用電源及び計装設備	A A A A	機器・配管、電気計装設備等の支持構造物	A	1) 原子炉建屋 2) 補助建屋 3) 胴御建屋 4) ディーゼル建屋 5) 海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物	S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub>	①原子炉建屋 2) 補助建屋 3) 胴御建屋 4) ディーゼル建屋 5) 海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物	S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub> S <sub>1</sub>

出典：「技術指針 4601・補-1984」より該当部分を抜粋・加筆

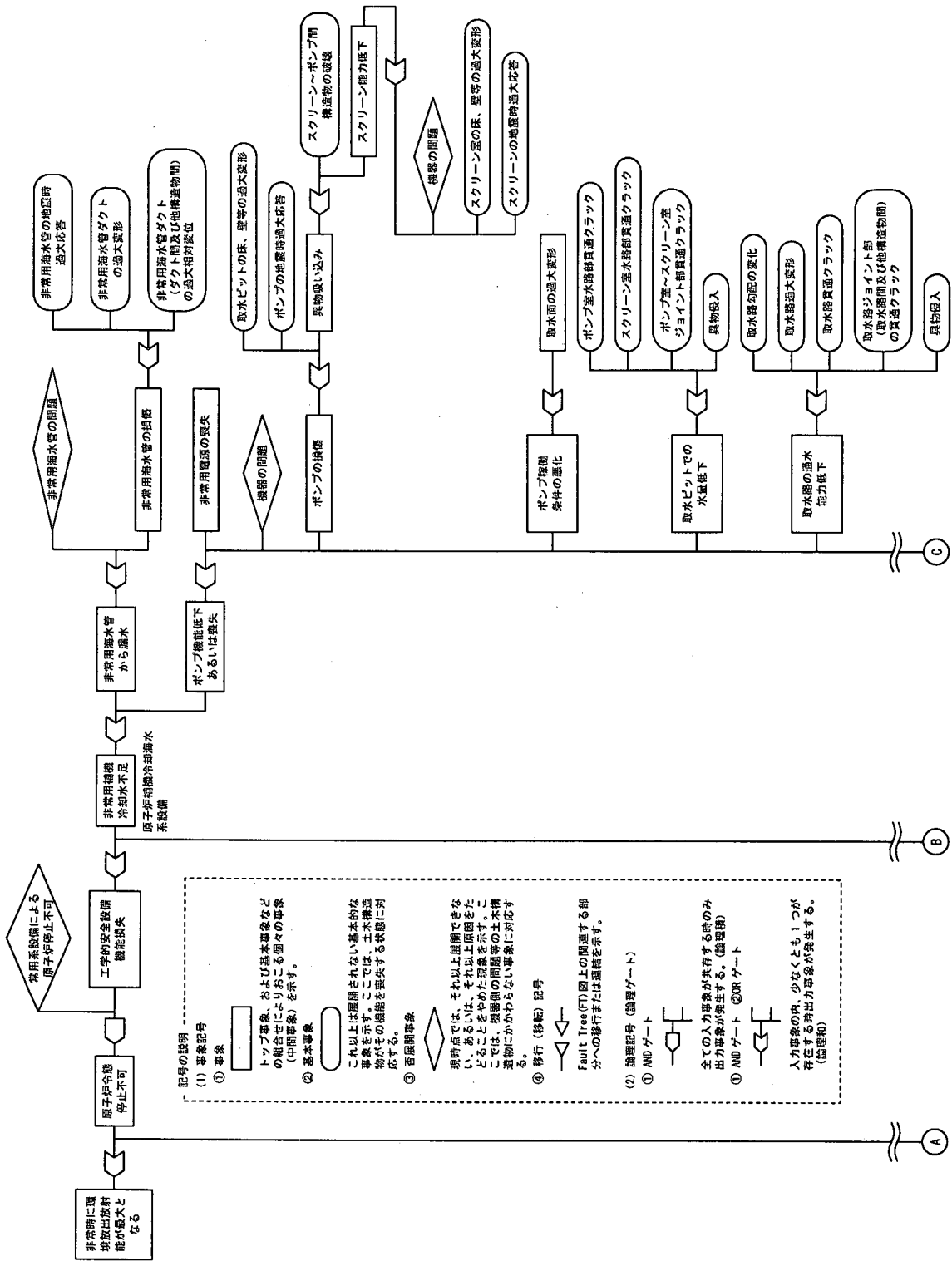


図 2.2-1(a) 屋外重要土木構造物の Fault Tree 図

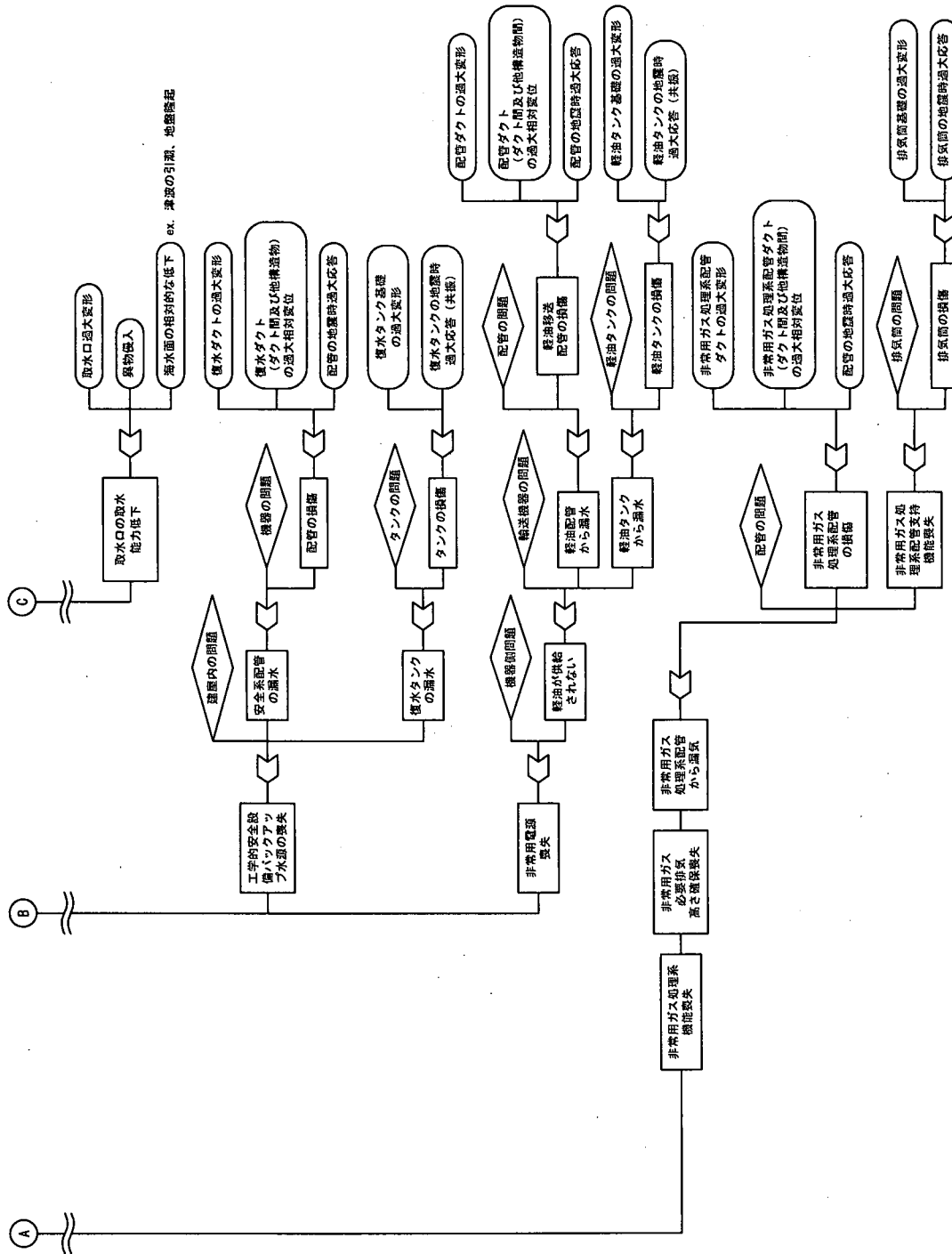


図 2.2-1(b) 屋外重要土木構造物の Fault Tree 図

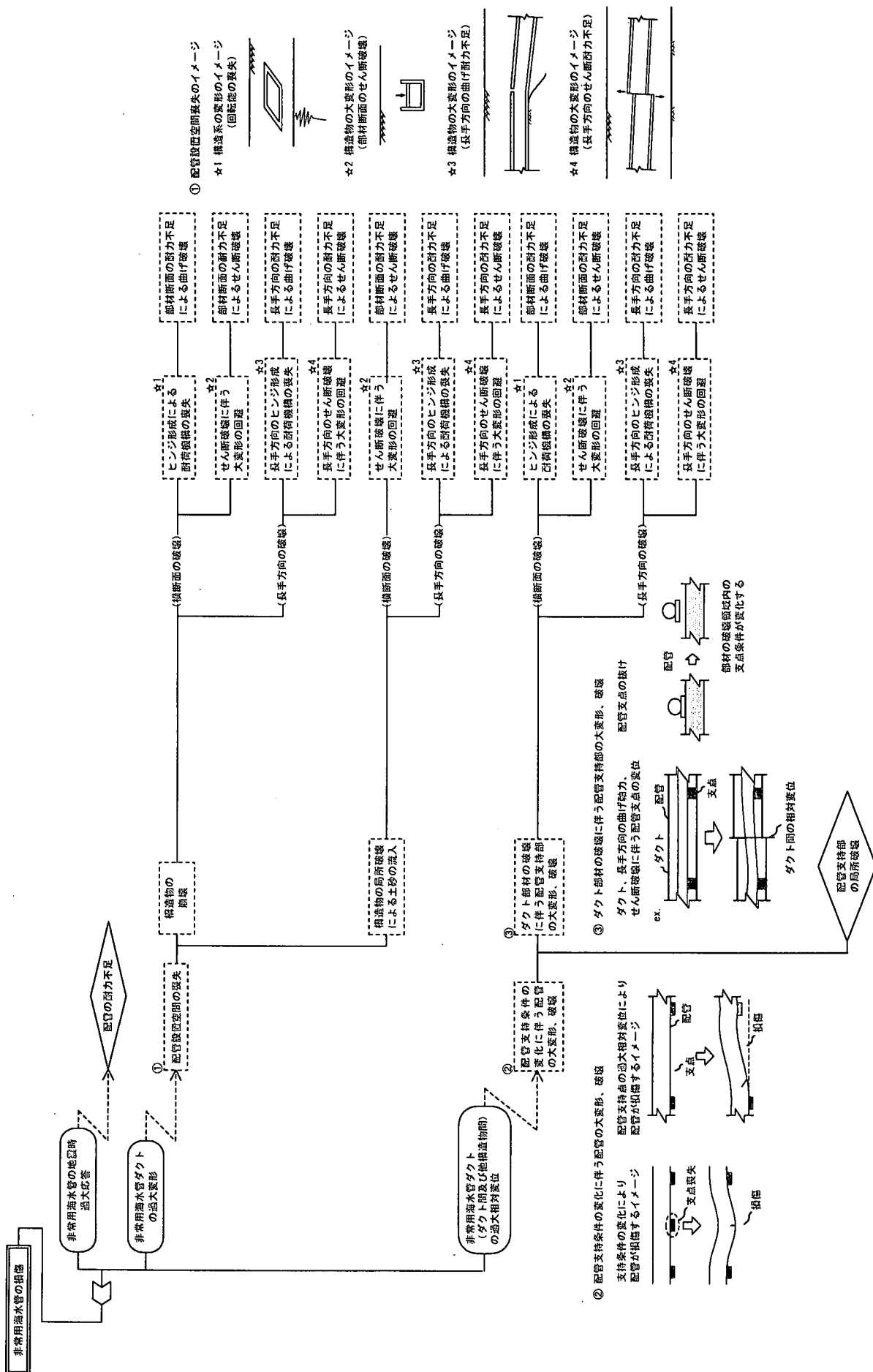


表 2.3-1 S<sub>2</sub>地震時における海水管ダクトの要求性能と目標性能の対応

要求性能	構造性能	目標性能(現象に着目して設定した限界状態)と照査レベル			
		実際に想定される現象 に対する限界状態 (照査レベル 1)	地盤構造物連成系の 全体挙動を考慮した 限界状態 (照査レベル 2)	構造物の変形に着目 した限界状態 (照査レベル 3)	部材の耐力に着目し た限界状態 (照査レベル 4)
支持機能 の確保	耐荷性能	配管設置空間の確保	構造物が崩壊しない	ヒンジ形成後の大変形 の回避	部材断面の曲げ耐力 の確保
				部材のせん断破壊に伴う 大変形の回避	部材断面のせん断耐力 の確保
				長手方向のヒンジ形成後の 大変形の回避	長手方向の曲げ耐力 の確保
				長手方向のせん断破壊に伴う 大変形の回避	長手方向のせん断耐力 の確保
		配管支持条件の変形に伴う 配管の健全性の確保	構造物の局所破壊により土砂 流入しない	部材のせん断破壊に伴う 大変形の回避	部材断面のせん断耐力 の確保
				長手方向のヒンジ形成後の 大変形の回避	長手方向の曲げ耐力 の確保
				長手方向のせん断破壊に伴う 大変形の回避	長手方向のせん断耐力 の確保
				ヒンジ形成後の大変形 の回避	部材断面の曲げ耐力 の確保
配管設置空間や配管支持条件 の変化に伴う配管の変形、 安全性	ダクト部材の破壊に伴う配管 支持部の健全性の確保	部材のせん断破壊に伴う 大変形の回避	部材断面のせん断耐力 の確保		
		長手方向のヒンジ形成後の 大変形の回避	長手方向の曲げ耐力 の確保		
		長手方向のせん断破壊に伴う 大変形の回避	長手方向のせん断耐力 の確保		
		ヒンジ形成に伴う変形 ・せん断破壊に伴う変形 ・長手方向のヒンジ形成による 変形 ・長手方向のせん断破壊に伴う 変形	部材断面の曲げ耐力 ・部材断面のせん断耐力 ・長手方向の曲げ耐力 ・長手方向のせん断耐力		
性能確保のための 照査項目	・配管設置空間や配管支持条件 の変化に伴う配管の変形、 安全性	・鉛直部材の倒壊や上床版の崩 落(部材の鉛直方向の大変形) ・構造系の局所破壊による土砂 流入 ・ダクト支持部の破壊に伴う配 管支持部の変形、安全性	・ヒンジ形成に伴う変形 ・せん断破壊に伴う変形 ・長手方向のヒンジ形成による 変形 ・長手方向のせん断破壊に伴う 変形	・部材断面の曲げ耐力 ・部材断面のせん断耐力 ・長手方向の曲げ耐力 ・長手方向のせん断耐力	

(注 1) 地盤の安定性は既に確認済みであるものとして、性能確保のための照査項目には挙げていない。

(注 2) 長手方向の耐震性能照査は、別途必要に応じて行うものとし、本指針、マニュアルでは取り扱わない。



表 2.3-2 S<sub>2</sub>地震時における取水ピットの要求性能と目標性能の対応

要求性能	構造性能	目標性能(現象に着目して設定した限界状態)と照査レベル			
		実際に想定される現象に対する限界状態 (照査レベル 1)	地盤構造物連成系の全体挙動を考慮した限界状態 (照査レベル 2)	構造物の変形に着目した限界状態 (照査レベル 3)	部材の耐力に着目した限界状態 (照査レベル 4)
取水機能の確保	耐荷性能	必要取水空間の確保	構造物が崩壊しない	ヒンジ形成後の大変形の回避	部材断面の曲げ耐力の確保
			部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材のせん断耐力の確保	
	構造物の局所破壊により土砂流入しない	部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保		
	止水性能	取水ピットからの過大漏水の回避	構造物に過大な開口が生じない	部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保
支持機能の確保	耐荷性能	配管設置空間の確保	構造物が崩壊しない	ヒンジ形成後の大変形の回避	部材断面の曲げ耐力の確保
			部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保	
	構造物の局所破壊により土砂流入しない	部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保		
	配管支持条件の変形に伴う配管の健全性の確保	ピット部材の破壊に伴う配管支持部の健全性の確保	ヒンジ形成後の大変形の回避	部材断面の曲げ耐力の確保	
				部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保
性能確保のための照査項目		<ul style="list-style-type: none"> <li>取水空間</li> <li>漏水量</li> <li>配管設置空間</li> <li>配管支持条件の変化に伴う配管の変形, 安全性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鉛直部材の倒壊や上床版の崩落(部材の鉛直方向の大変形)</li> <li>構造系の局所破壊による土砂流入</li> <li>構造物の開口発生</li> <li>ピット支持部の破壊に伴う配管支持部の変形, 安全性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ヒンジ形成に伴う変形</li> <li>せん断破壊に伴う変形</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材断面の曲げ耐力</li> <li>部材断面のせん断耐力</li> </ul>

(注 1) 地盤の安定性は既に確認済みであるものとして、性能確保のための照査項目には挙げていない。

(注 2) 長手方向の耐震性能照査は、別途必要に応じて行うものとし、本指針、マニュアルでは取り扱わない。

表 2.3-3 S<sub>2</sub>地震時における取水路の要求性能と目標性能の対応

要求性能	構造性能	目標性能(現象に着目して設定した限界状態)と照査レベル			
		実際に想定される現象に対する限界状態 (照査レベル 1)	地盤構造物連成系の全体挙動を考慮した限界状態 (照査レベル 2)	構造物の変形に着目した限界状態 (照査レベル 3)	部材の耐力に着目した限界状態 (照査レベル 4)
通水機能の確保	耐荷性能	通水空間の確保	構造物が崩壊しない	ヒンジ形成後の大変形の回避	部材断面の曲げ耐力の確保
				部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保
				長手方向のヒンジ形成後の大変形の回避	長手方向の曲げ耐力の確保
				長手方向のせん断破壊に伴う大変形の回避	長手方向のせん断耐力の確保
			構造物の局所破壊により土砂流入しない	部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保
				長手方向のヒンジ形成後の大変形の回避	長手方向の曲げ耐力の確保
				長手方向のせん断破壊に伴う大変形の回避	長手方向のせん断耐力の確保
				基礎の破壊の回避	地盤の支持力確保 液状化の回避
	流下性能	必要流水勾配の確保	構造物の不等沈下, 隆起の回避	基礎の破壊の回避	地盤の支持力確保 液状化の回避
	止水性能	取水路からの過大漏水の回避	構造物に過大な開口が生じない	部材のせん断破壊に伴う大変形の回避	部材断面のせん断耐力の確保
長手方向のヒンジ形成後の大変形の回避				長手方向の曲げ耐力の確保	
長手方向のせん断破壊に伴う大変形の回避				長手方向のせん断耐力の確保	
性能確保のための照査項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・通水空間</li> <li>・流水勾配</li> <li>・漏水量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鉛直部材の倒壊や上床版の崩落(部材の鉛直方向の大変形)</li> <li>・構造系の局所破壊による土砂流入</li> <li>・構造物の不等沈下, 隆起</li> <li>・構造物の開口発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ヒンジ形成に伴う変形</li> <li>・せん断破壊に伴う変形</li> <li>・長手方向のヒンジ形成による変形</li> <li>・長手方向のせん断破壊に伴う変形</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・部材断面の曲げ耐力</li> <li>・部材断面のせん断耐力</li> <li>・長手方向の曲げ耐力</li> <li>・長手方向のせん断耐力</li> </ul>	

(注 1) 地盤の安定性は既に確認済みであるものとして、性能確保のための照査項目には挙げていない。

(注 2) 長手方向の耐震性能照査は、別途必要に応じて行うものとし、本指針、マニュアルでは取り扱わない。

【参考文献】

- 1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987, 昭和 62 年 8 月
- 2) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル, 平成 4 年 9 月