

玄海3/4号機 海水ポンプ取替工事に係る設工認変認 説明事項リスト

資料(1)

No.	対象資料	ページ	説明項目	説明内容
1	補足説明資料5 砂移動による影響について	補5-8	・今回考慮すべき粒径の範囲(0.1mm~1.2mm)においては、粒径の大きさによらず、濃度が高いほど、耐摩耗評価において厳しくなる旨を追記する。また、粒径0.1mmを用いることが、摩耗と閉塞、両方の観点で最も厳しい条件であることが分かるよう修文する。	補足説明資料に記載を追記しました。
2	補足説明資料5 砂移動による影響について	補5-14,16	・閉塞に関するメーカー知見が、海水ポンプにも適用できる理由について追記する。	補足説明資料に実験の概要を追記しました。また、軸受内部は軸方向に障害物となるような凹凸が無いため、上昇流と下降流の差は閉塞に影響しない旨の説明も追記しました。
3	補足説明資料5 砂移動による影響について	補5-16	・説明文中にある「濃度」が、「質量%濃度」であることを明記する。	補足説明資料に記載を追記しました。
4	補足説明資料5 砂移動による影響について	補5-16	・どのような原理で、摩耗が粒径に依存しなくなるのか、関連する文献等を提示する	臨界粒径については、メーカー知見に基づき記載しておりましたが、テフロン材に対する具体的な臨界粒径を示す公開文献の方がメーカー知見より説明性が増すと判断し、補足説明資料の記載を修正・追記しました。また、臨界粒径の文献としては笹田直著「摩耗」のp148~p150の記載が参考になります。
5	補足説明資料5 砂移動による影響について	補5-15	・砂の粒径・濃度に対して、摩耗・閉塞の観点から、網羅的に評価・設計していることが確認できるよう、まとめを追加する。	補足説明資料に記載を追記しました。

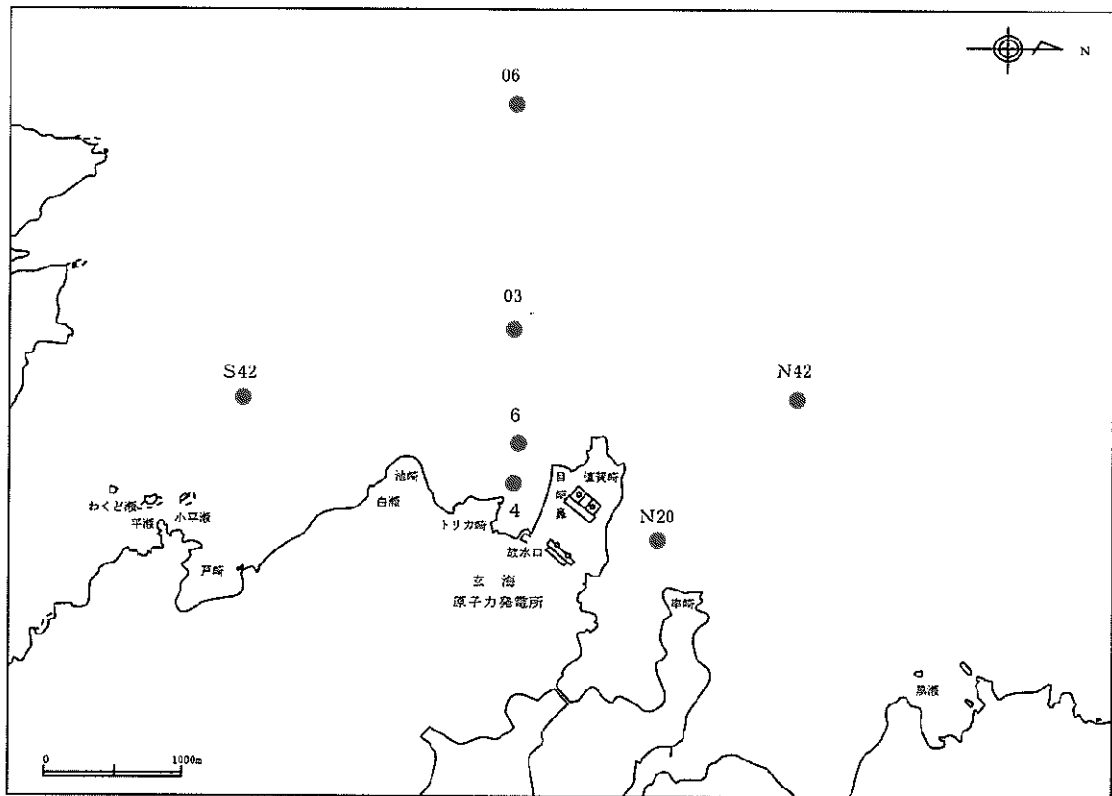
補足説明資料 5-1

砂移動による影響確認について

1. 玄海原子力発電所周辺海域における底質土砂の分析結果

発電所周辺海域における底質土砂の分析結果では、粒径 0.075mm ～ 2mm の砂分が主体で、 2mm 以上の礫分は少なく、平均粒径*は 0.5mm 程度であった。試料採取場所を第1図に分析結果を第1表及び第2表に、代表箇所における粒径加積曲線を第2図～第9図に示す。

※ 特に断りがない場合、各地点における粒径加積曲線の平均粒径に対し、全地点を平均したものを平均粒径とする。各地点における粒径加積曲線の平均粒径については、これを付記し、平均粒径（各地点）とする。



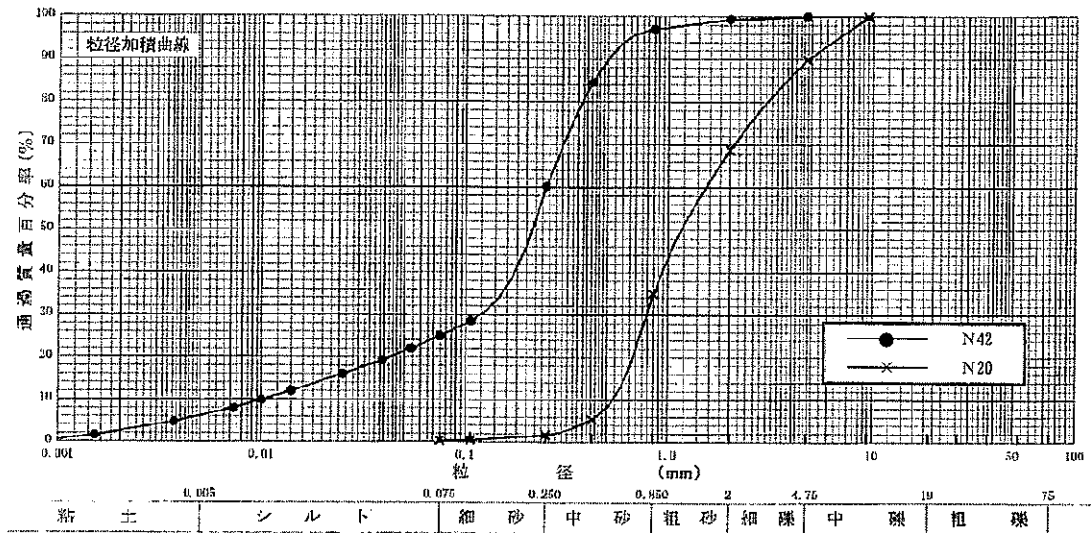
第1図 粒径観測位置

第1表 底質土砂分析結果（平成25年2月22日）

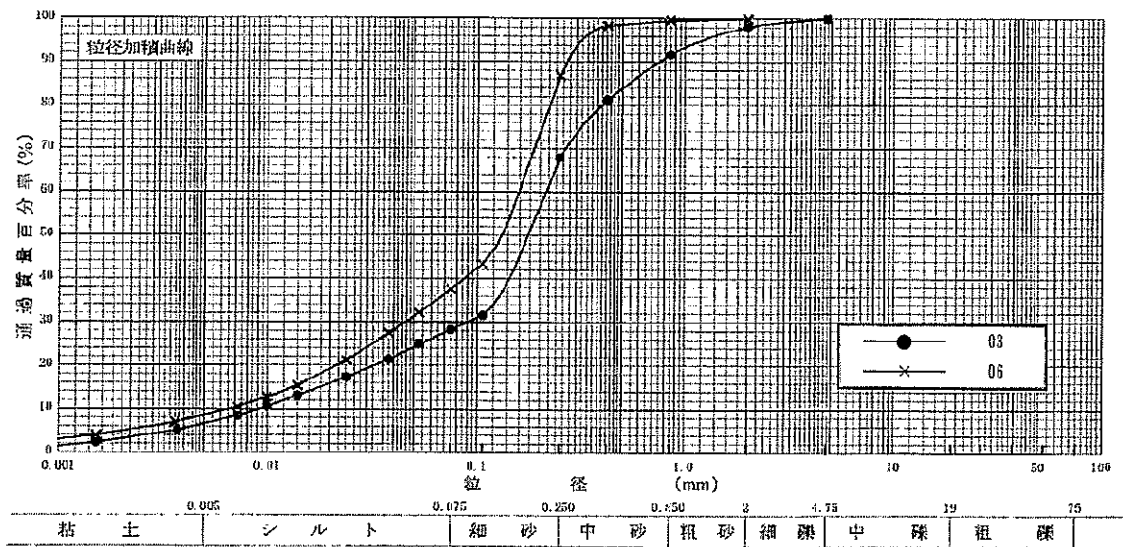
測点	分類	礫分	粗砂分	細砂分	シルト分	粘土	50%粒径 mm
		2.0mm以上	2.0~0.425mm	0.425~ 0.075mm	0.075~ 0.005mm	0.005mm以下	
		%					
N42	細粒分まじり砂	1	14	60	25		0.220
N20	礫質砂	31	63	5	1		1.200
03	細粒分まじり砂	2	17	53	28		0.180
06	細粒分まじり砂	0	2	60	38		0.130
S42	礫質砂	17	62	13	8		1.200
4	砂	9	49	38	4		0.500
6	砂	2	29	68	1		0.330
平均		8.9	34	42	15		0.537

第2表 底質土砂分析結果（平成25年8月23日）

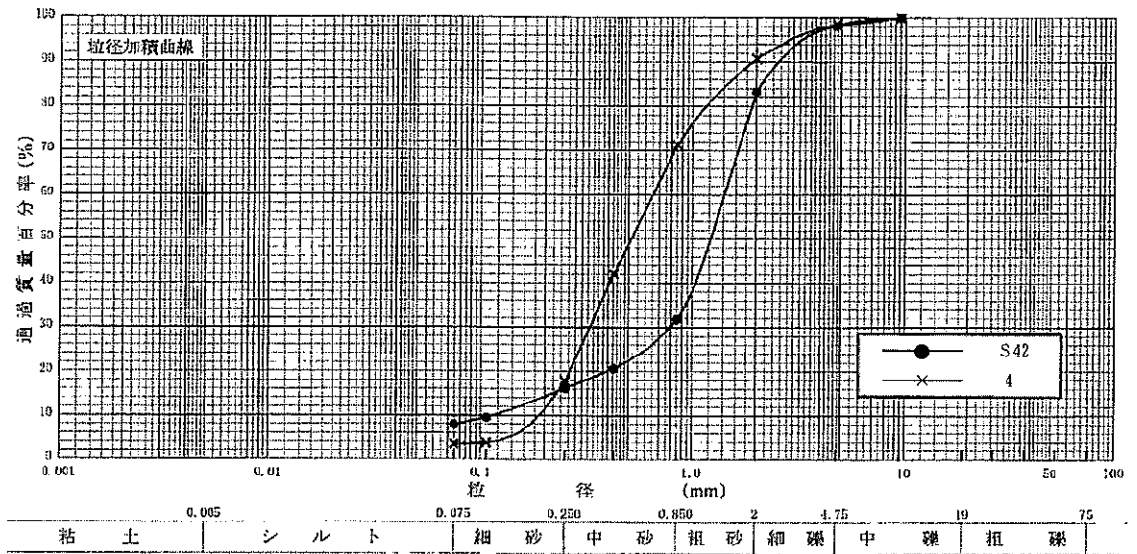
測点	分類	礫分	粗砂分	細砂分	シルト分	粘土	50%粒径 mm
		2.0mm以上	2.0~0.425mm	0.425~ 0.075mm	0.075~ 0.005mm	0.005mm以下	
		%					
N42	礫質砂	18	34	45	3		0.460
N20	礫質砂	23	62	10	5		1.000
03	細粒分まじり砂	1	13	62	24		0.210
06	細粒分まじり砂	0	1	62	37		0.130
S42	細粒分まじり砂	0	4	62	34		0.110
4	砂	0	22	75	3		0.320
6	砂	2	21	75	2		0.320
平均		6.3	22	56	15		0.364



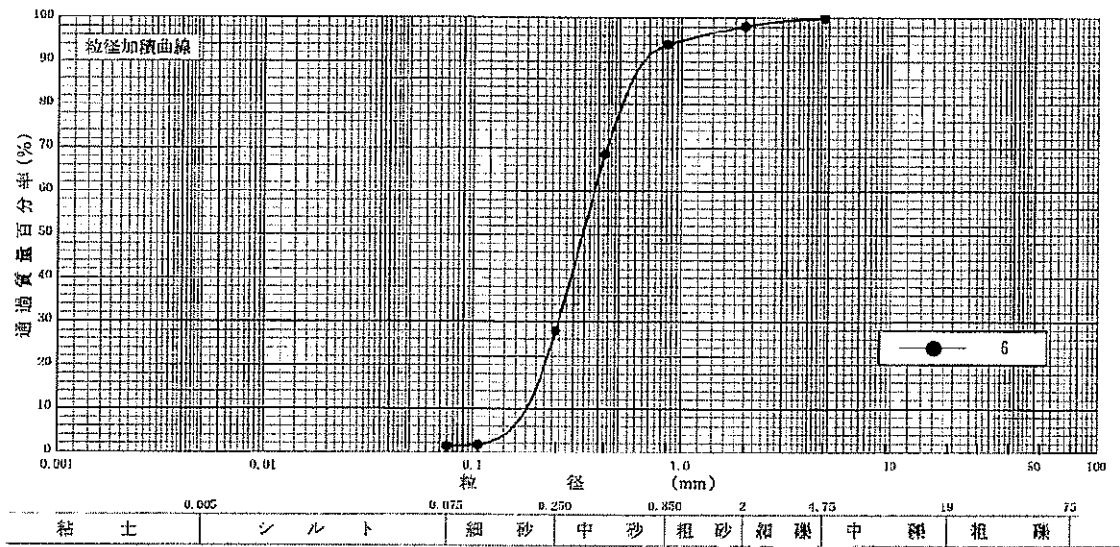
第2図 粒径加積曲線 (平成25年2月22日調査 N42/N20)



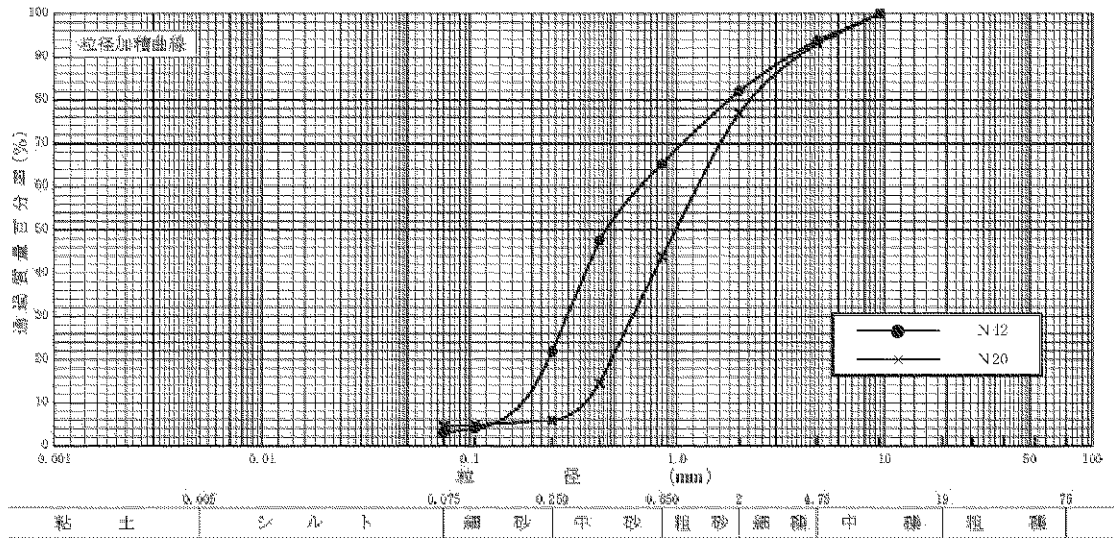
第3図 粒径加積曲線 (平成25年2月22日調査 03/06)



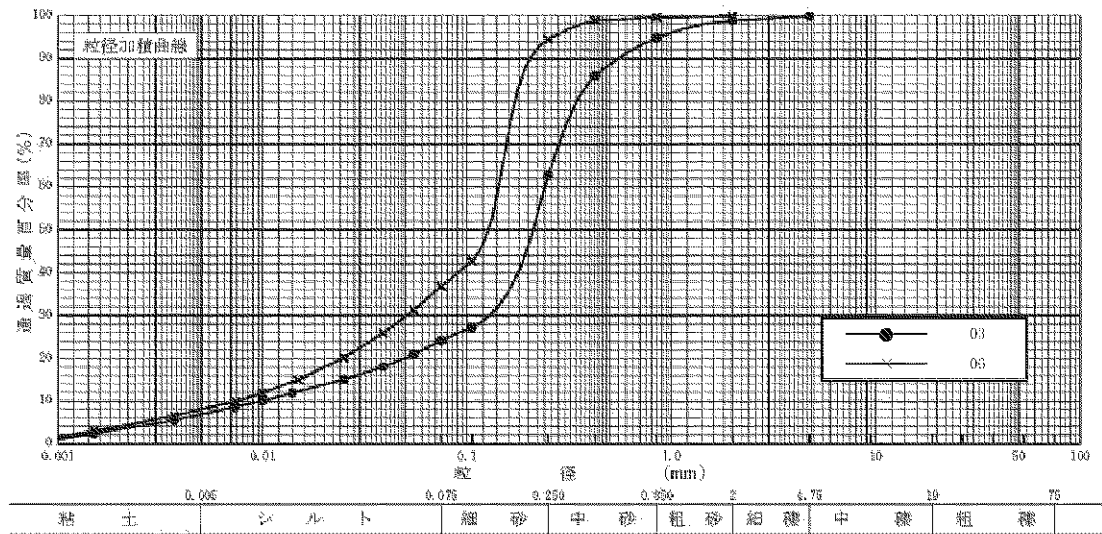
第4図 粒径加積曲線 (平成25年2月22日調査 S42/4)



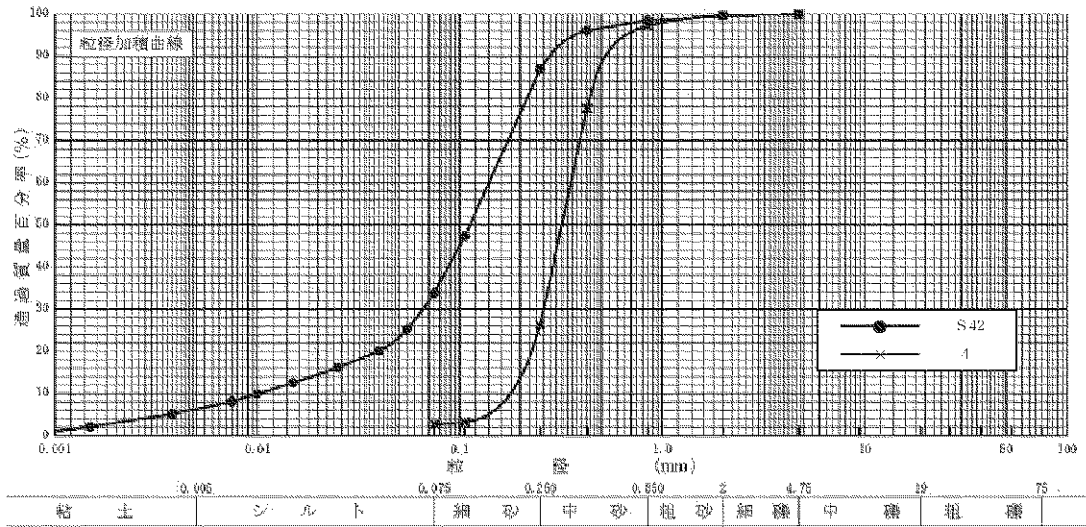
第5図 粒径加積曲線 (平成25年2月22日調査 6)



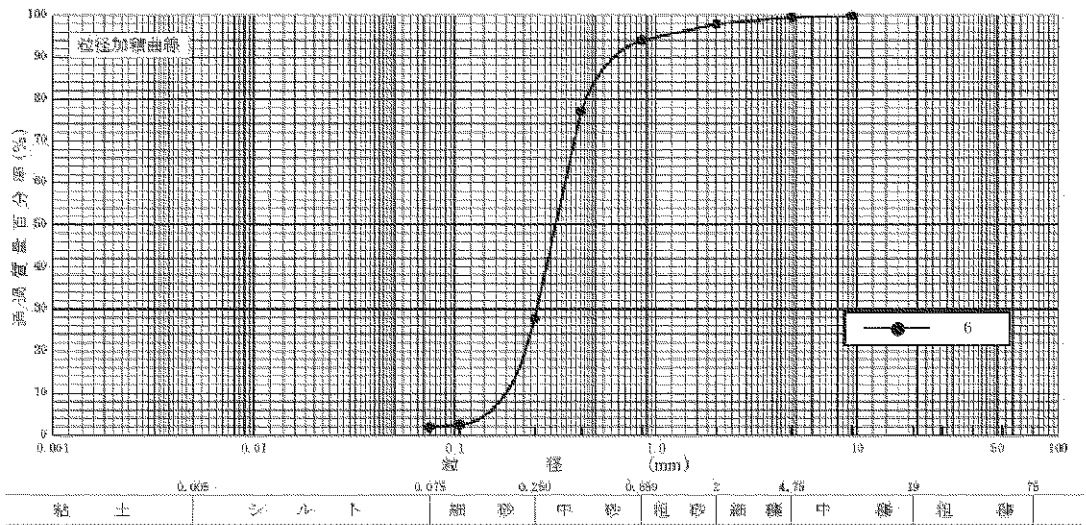
第6図 粒径加積曲線 (平成25年8月23日調査 N42/N20)



第7図 粒径加積曲線 (平成25年8月23日調査 03/06)



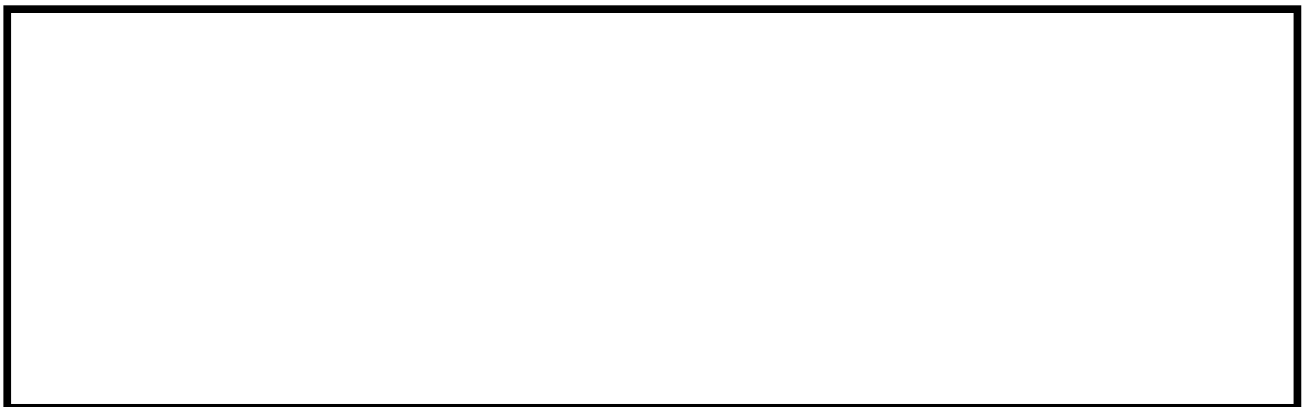
第8図 粒径加積曲線 (平成25年8月23日調査 S42/4)



第9図 粒径加積曲線 (平成25年8月23日調査 6)

2. 砂移動による取水口の堆積状況の確認

玄海原子力発電所3号機及び4号機の取水口呑口下端レベルはEL. -13.5mに対して、海底面はEL. -15.0mであり、砂の堆積高さが取水口の呑口下端に到達しにくい構造となっている。取水施設の断面図を第10図に示す。砂移動に関する数値シミュレーションを実施した結果、取水口位置での砂の堆積はほとんどなく、取水口の呑口レベルが海底面より1.5m高い位置にあるため、砂の堆積に伴って、取水口が閉塞することはない。



第10図 取水施設の断面図

3. 砂混入時の海水ポンプ取水機能維持の確認

(1) 砂混入時の海水ポンプ取水機能維持の確認方針

基準津波に伴い発生する浮遊砂の一部が軸受潤滑水として軸受に混入した場合における軸受部の摩耗耐性について確認する。評価に当たっては、砂移動の解析（シミュレーション）を実施することで取水口付近の浮遊砂濃度（質量パーセント濃度、以下同じ）を算出し、別途実施した軸受摩耗試験の試験条件と比較することで、軸受の寿命評価に必要な比摩耗量を設定する。設定した比摩耗量を用いて軸受寿命を算出し、基準津波到達後、浮遊砂濃度が無視できる程度まで低下する時間に対して十分余裕があることを確認する。

また、浮遊砂による摩耗に加えて閉塞についても、取水口付近の浮遊砂濃度が閉塞を考慮する浮遊砂濃度に対して十分小さいことを確認する。

(2) 基準津波による砂移動の解析について

摩耗及び閉塞の評価において必要な浮遊砂濃度を確認するために、「1. 玄海原子力発電所周辺海域における底質土砂の分析結果」において、取水口付近はN20であるが、周囲からの砂移動を考慮し、平均粒径（全体：粒径0.5mm）を用いた解析を基本的なシミュレーションとして対馬南西沖断層群と宇久島北西沖断層群の連動による地震に伴う津波（以下、「上昇側」という。）と西山断層帯による地震に伴う津波（以下、「下降側」という。）に対し、実施する。

また、発電所周辺の平均粒径（各地点）は0.1mm～1.2mmで分布しており、一般的に粒径が小さいほど浮遊砂濃度は大きくなる。粒径変化による影響を定量的に確認するため、摩耗量が粒径に依存しない粒径範囲であり、かつ摩耗及び閉塞の評価に必要な浮遊砂濃度が最も厳しくなる粒径0.1mmを用いたシミュレーションを別途実施する。

結果を以下に示す。浮遊砂濃度は下降側の方が大きくなり、取水口付近の浮遊砂濃度は、3号機取水口付近で最大 [] wt%、4号機取水口付近で最大 [] wt%となった。

また、摩耗及び閉塞の評価において必要な浮遊砂濃度が最も厳しくなる下降側における粒径0.1mmを用いたシミュレーション結果では、最大 [] wt%となった。

波源	対馬南西沖断層群と宇久島北西沖断層群の連動による地震に伴う津波（上昇側）		
砂移動モデル	藤井ほか(1998)の手法による検討結果		
算出点	取水口付近	浮遊砂体積濃度上限値	5%



波源	西山断層帯による地震に伴う津波（下降側）		
砂移動モデル	藤井ほか(1998)の手法による検討結果		
算出点	取水口付近	浮遊砂体積濃度上限値	5%

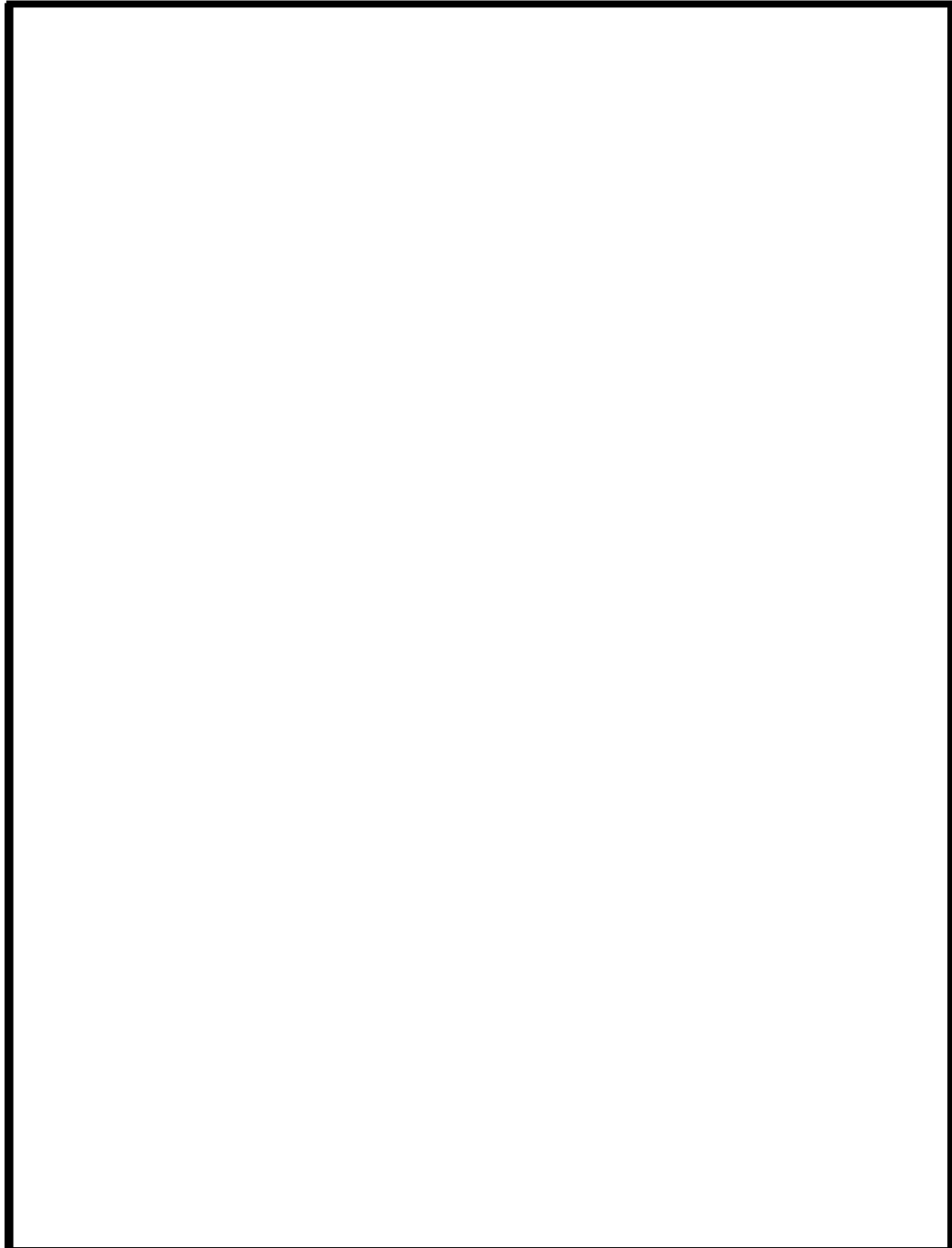


波源	西山断層帯による地震に伴う津波（下降側）		
砂移動モデル	藤井ほか(1998)の手法による検討結果		
算出点	取水口付近	浮遊砂体積濃度上限値	5%



(3) メーカーにおける軸受摩耗試験結果

実機海水ポンプを模擬し、異物濃度 wt% の連続注入試験をそれぞれの濃度で実施して、軸受の摩耗量を測定した。第11図に海水ポンプ軸受摩耗試験装置を、第3表に試験条件を示す。



第11図 海水ポンプ軸受摩耗試験装置

第3表 海水ポンプ軸受摩耗試験条件・試験結果

項目	試験条件
軸径(mm)	
回転数(rpm)	
周速(m/s)	
面圧(kgf/mm ²)	
異物濃度(wt%)	
砂粒径	
軸受材料	FF軸受 ^{※2}

項目	試験結果
比摩耗量(mm ² /kgf)	

※1 砂粒径の分布は下図の通り。試験で用いた軸受の軸受すきま
以下の大きさの粒径分布を持つ試験粉体を採用。

※2 無給水軸受（摺動面：テフロン加工）を指す。以下、同じ。

試験用粉体粒径分布



(4) 比摩耗量の設定と耐摩耗評価

シミュレーションの結果から、取水口付近の浮遊砂濃度は、3号機取水口付近で最大 [] wt%、4号機取水口付近で最大 [] wt%となる。また、評価結果が最も厳しくなる下降側における粒径0.1mmを用いたシミュレーション結果では、最大 [] wt%となった。いずれの浮遊砂濃度も「(3) メーカーにおける軸受摩耗試験結果」の異物濃度 [] wt%未満であることに加え、シミュレーションで用いた砂粒径と軸受摩耗試験で用いた砂粒径の範囲では、濃度一定であれば、摩耗量が粒径に依存しないため、軸受の寿命評価に用いる比摩耗量として、第3表の比摩耗量を設定する。

設定した比摩耗量と式①（機械工学便覧参照）より、実機海水ポンプのパラメータを用いて、寿命時間を算出した結果、寿命時間は最短で約2,900時間であった。計算条件を第4表に示す。寿命時間は2,900時間以上であり、津波到達後約3～4時間経過すれば、浮遊砂濃度は無視できる程度まで低下するため、海水ポンプ軸受は津波時の浮遊砂に対し十分な摩耗耐性がある。

第4表 海水ポンプ軸受寿命評価条件（異物濃度 [] wt%）

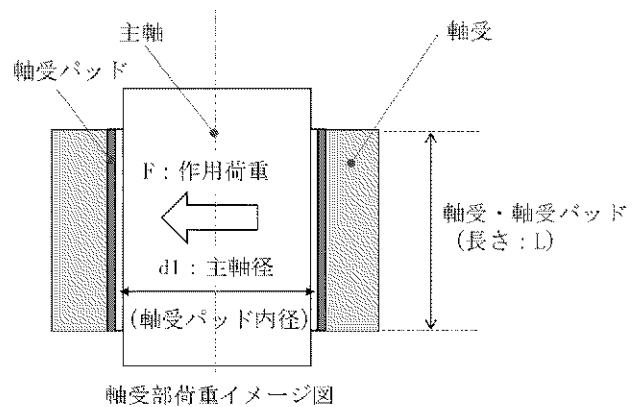
項目	計算条件
軸径(mm)	[]
周速(m/s)	
面圧(kgf/mm ²)	
比摩耗量(mm ² /kgf)	
許容摩耗量(mm)	

$$K = \frac{\delta}{PVT} \dots \textcircled{1}$$

K:比摩耗量(mm²/kgf)
 δ:摩耗量(mm)
 P:軸受面圧^{*1*2*3}(kgf/mm²)
 V:周速(mm/s)
 T:運転時間(寿命時間)(s)

※1 軸受面圧の定義について

軸受面圧については、軸受に対する作用荷重 (F) を、軸受パッド内径 (d1) と軸方向長さ (L) の積で求まる面積で除した値を『面圧』と定義している。



※2 軸受に対する作用荷重の考え方

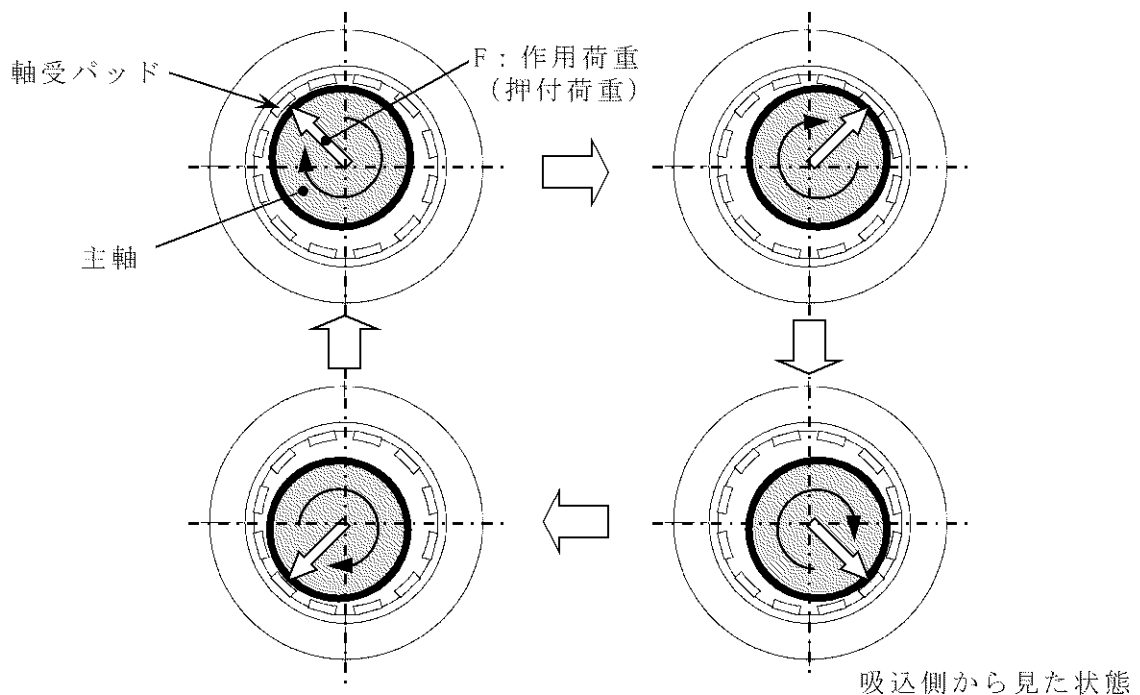
軸受に対する作用荷重 (F) は、ポンプ運転中に回転体のアンバランスにより振れ回った主軸が軸受パッドを押付ける荷重である。

$$F = mr\omega^2$$

m : 回転体質量

r : 重心の振れ回り距離

ω : 回転体の回転角速度



※ 3 摺動部分以外の摩耗について

軸受の砂摩耗に対する影響としては、摺動部分のアブレイブ摩耗以外にも軸受内の流体によるエロージョン摩耗が考えられる。しかし、軸受摩耗としては摺動部分のアブレイブ摩耗が支配的であり、軸受内の流体によるエロージョン摩耗の影響は小さい。(砂摩耗試験において、軸側の状態を観察すると、摺動部分(アンバランス側)以外では、摩耗量が小さくエロージョン摩耗の影響は小さかった。)

(5) 浮遊砂に対する軸受閉塞の評価

浮遊砂による軸受摩耗に加えて軸受閉塞についての評価を実施する。閉塞は軸受すきま部分に砂が混入し、軸固着が発生する事象であり、メーカー知見を踏まえる wt%※ を超える異物濃度で発生する。一方、取水口付近の浮遊砂濃度は「(3) メーカーにおける軸受摩耗試験結果」の異物濃度 wt%未満であり、閉塞を考慮する浮遊砂濃度に対して十分小さい。

なお、閉塞の発生は粒径には依存せず異物濃度が寄与するが、軸受すきまに侵入できる粒径の浮遊砂の影響が支配的である。一方、局所的に異物濃度が上昇する事象として、異物逃がし溝と同程度の粒径の浮遊砂が、異物逃がし溝に侵入し、閉塞することも考えられるが、浮遊砂濃度から算出される異物逃がし溝と同程度の大きさの粒子の個数は1個/L未満である。また、「1. 玄海原子力発電所周辺海域における底質土砂の分析結果」で示すとおり発電所周辺の砂の平均粒径は約0.5mm、中央粒径は最大でも約1.2mmと微小であり、数ミリ以上の粒子は少なく、そもそも粒径数ミリの砂は浮遊し難いものであることを踏まえると、大きな粒径の砂は揚水管内にほとんど混入しないと考えられ、大きな粒径の砂混入による閉塞の影響は小さい。

※ 当該浮遊砂濃度における実験(実験装置: 第11図と同じ、軸受材料: FF軸受、試験粉体: 90%以上が軸受すきま以下の大きさ)でも、実験用モータは運転継続可能であり、軸固着は発生しなかった。

(6) まとめ

津波襲来時に海水ポンプ軸受部に細かな砂が混入したとしても、海水ポンプ軸受は発電所周辺の砂の粒径分布(平均粒径(各地点)):

0.1mm～1.2mm) に対して、以下の通り摩耗及び閉塞に対する耐性が十分にあり、取水性に問題がないと評価する。

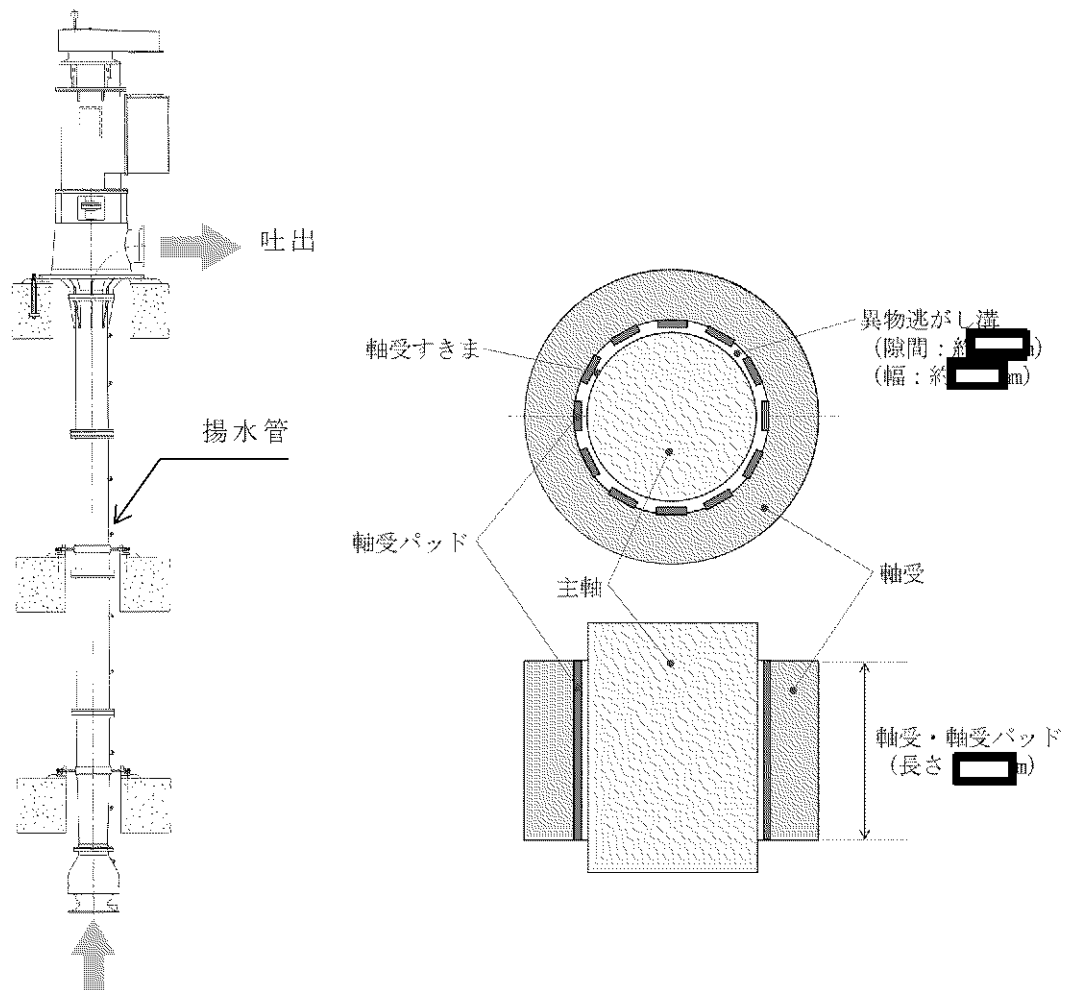
粒径(mm)	0.1 ～ <input type="text"/> *	<input type="text"/> * ～ 1.2
摩耗	軸受摩耗試験より十分な軸受寿命を有する。	軸受すきまを超える粒径のため、摩耗に寄与しない。
閉塞	津波時の浮遊砂濃度が十分小さいため、閉塞は発生しない。	

※軸受すきまの最大値

4. その他補足説明事項

(1) 軸受の構造について

海水ポンプ取水時に浮遊砂の一部が軸受潤滑水としてポンプ軸受に混入したとしても、第12図に示すとおり、海水ポンプの軸受に設けられた異物逃がし溝(総mm)から排出される構造であり、異物逃がし溝未満の異物による摩耗や閉塞の影響を低減する設計である。



第12図 海水ポンプ軸受構造図

(2) 砂粒径と摩耗の関係

砂混入時の軸受の摩耗は軸受すきまに砂が混入し、軸受摺動部分がすり減る事象であり、軸受すきま [] に侵入できる粒径の浮遊砂が寄与する。

また、一般的に粒径と摩耗の関係は粒径が大きくなるに従って、摩耗も大きくなるが、質量パーセント濃度一定の条件下では、臨界粒径を超えると、粒径によらず一定になる。公開文献「プラスチックの摩擦・摩耗」から、 [] mmを超える粒径であれば、本軸受の摩耗は粒径によらず一定となる。

なお、「3. (3) メーカーにおける軸受摩耗試験結果」の軸受摩耗試験で用いた試験粉体の [] μm以上が上記粒径を超えている。

(3) 上昇流と下降流の違いによる閉塞への影響について

第11図で示す通り、軸受摩耗試験では浮遊砂を上部から注入するため、軸受部では下降流となる。一方、実機海水ポンプはポンプアップされた海水を軸受潤滑水として利用するため、上昇流となる。軸受すきま内部の浮遊砂は周方向の流速及び軸の振れ回りにより軸受逃がし溝に導かれ、軸方向の流速により軸受逃がし溝より軸受外へ排出されることを踏まえると、第12図に示す通り、軸受内部は軸方向に障害物はなく、浮遊砂濃度が一定の条件では、軸方向の一部分のみが閉塞することはないため、上昇流と下降流の違いは閉塞に寄与しない。

(4) 砂移動評価の計算手法について

砂移動の計算手法については、藤井ほか（1998）の手法を用いて実施している。初期条件として、敷地周辺海域の海底地質調査結果を参考に海底の初期砂層厚を設定し、入力条件として基準津波による流速を与えることで、基準津波による砂移動のシミュレーション評価を行い、取水口付近の浮遊砂濃度を算出している。

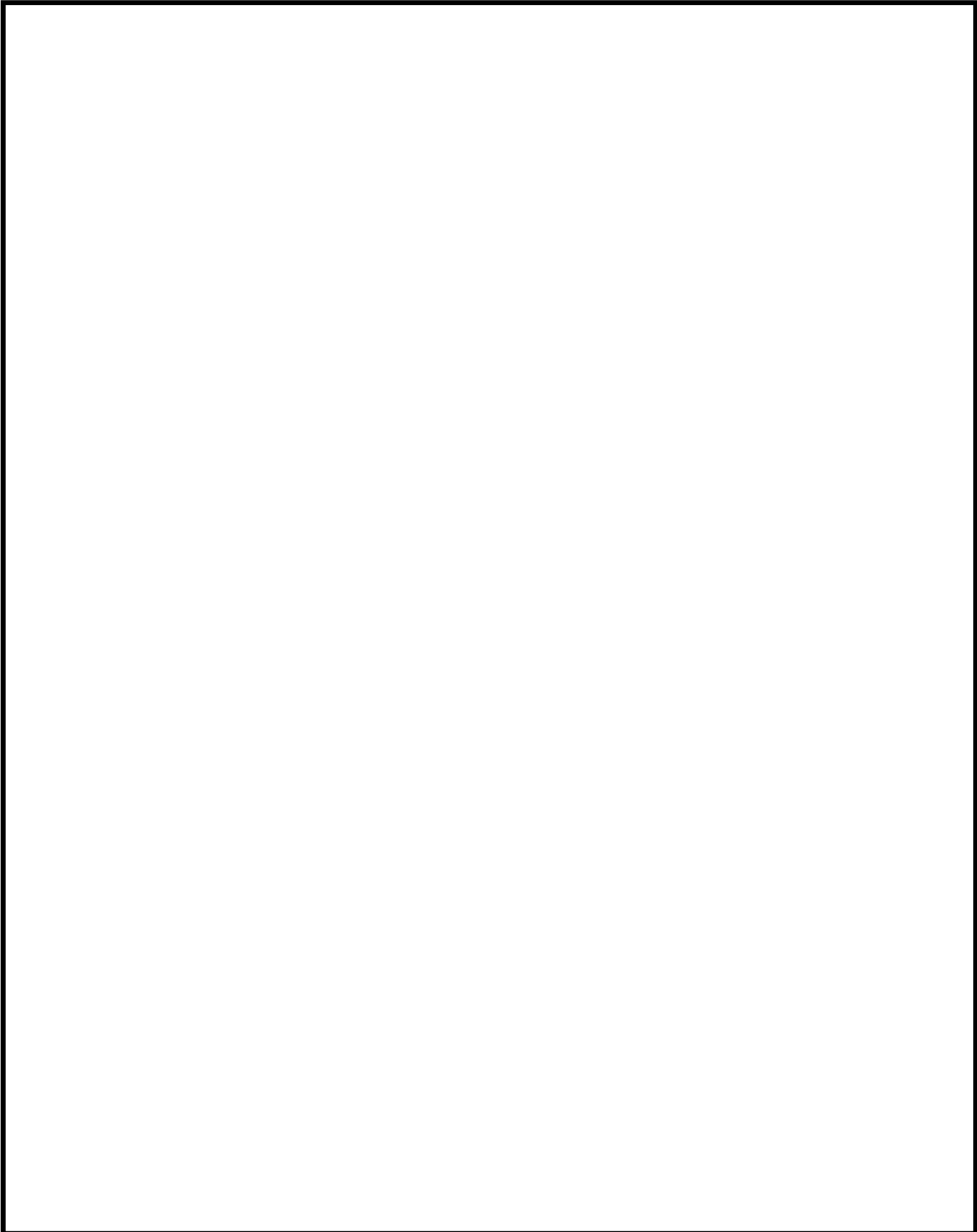
なお、保全業務（航路・泊地の喫水深さ確保）として定期的に行っている発電所周辺海域の深浅測量では、取水口周辺の海底の地形変化はほとんど見られないことに加え、基準津波も再稼働時から変更がないため、浮遊砂濃度の解析結果は再稼働時と同じである。

(5) 取水口付近の砂堆積への粒径の影響について

砂堆積についても、平均粒径0.5mmと粒径0.1mmを用いたシミュレーション結果を以下に示す。砂の堆積については、粒径が小さくなることにより、砂の堆積が減少する傾向にあるが、取水口付近の砂の堆積に変化はなく、砂の粒径の影響が取水口付近の砂の堆積に与える影響は小さい。

波源	西山断層帯による地震に伴う津波（下降側）		
砂移動モデル	藤井ほか(1998)の手法による検討結果		
算出点	取水口付近	浮遊砂体積濃度上限値	5%

	粒径	3号機取水口 A管	3号機取水口 B管	4号機取水口 C管	4号機取水口 D管



※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

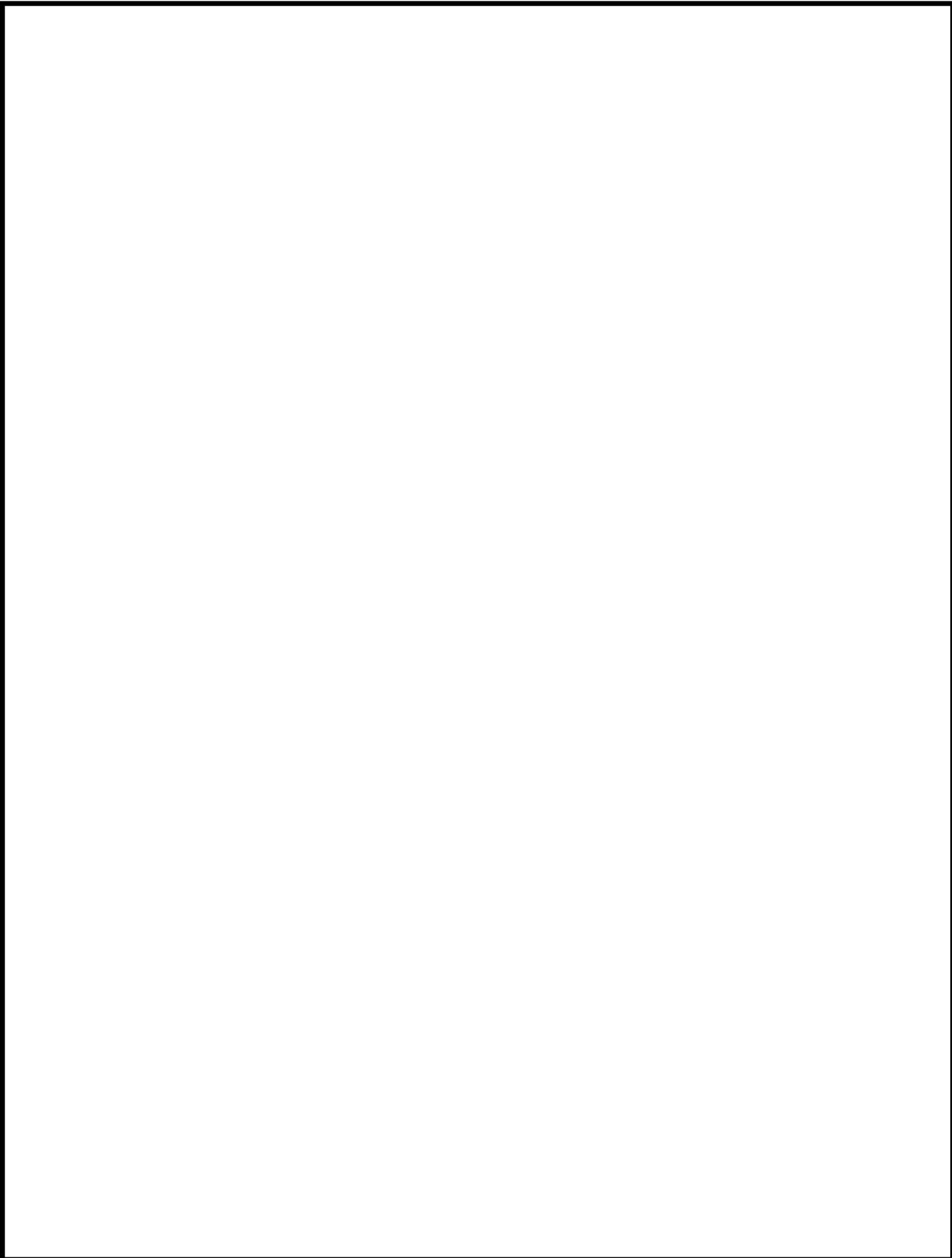
※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。



※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。



※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

※ 枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。