

大洗研究所(南地区)
高速実験炉原子炉施設(「常陽」)

主冷却機建物の地盤改良工法の変更について

令和4年1月28日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

令和3年11月29日 第421回審査会合コメント(抜粋)

- ・ 抑止杭工法による地盤改良を用いる場合、以下の観点から抑止杭工法による第3条1項への適合性を説明すること。
 - (1) 基準地震動による地震力に対して中抜けしないことについて引用文献の適用性
 - (2) 杭根入れ部の周辺地盤の破壊領域を踏まえた評価により杭の支持性能等を期待できることの根拠とその妥当性
 - (3) 他サイトでの抑止杭工法と地盤・地形・併用工法が異なることを踏まえても、同様の抑止効果が期待できるとした根拠
 - (4) 千鳥配列(2列)の抑止杭を1列に集約してモデル化することの根拠とその妥当性
 - (5) 平面ひずみ状態である抑止杭を梁要素にモデル化することの根拠とその妥当性

今回の説明内容

- ・ 審査会合におけるコメントを踏まえ、杭周辺地盤の中抜け、杭根入れ部の破壊領域への対策、他サイト等での適用事例の観点から、地盤改良の工法選定について再検討を行った。
- ・ 再検討結果より、主冷却機建物の基礎地盤のすべり対策については、これまでの抑止杭工法から周辺地盤改良工法へ見直しを行う。
- ・ 周辺地盤改良工法による地盤改良を考慮した基礎地盤の設置許可基準規則への適合性の確認方針、基礎地盤の安定性評価方針について説明する。

1. 地盤改良の工法比較の再検討結果
2. 設置許可基準規則への適合性の確認方針
3. 基礎地盤の安定性評価方針

1. 地盤改良の工法比較の再検討結果
2. 設置許可基準規則への適合性の確認方針
3. 基礎地盤の安定性評価方針

主冷却機建物の地盤改良について

- ・耐震重要施設（Sクラスの施設）を有する建物である「原子炉建物及び原子炉附属建物」、「主冷却機建物」に対して基準地震動Ssによる基礎地盤のすべり安全率を評価している。
- ・主冷却機建物（東西断面）は、すべり安全率が評価基準値を下回り、これを改善するための地盤改良の工法比較を再検討し、工法を選定した。（工法比較を次ページに示す）

<耐震重要施設（Sクラスの施設）を有する建物>

- ・ 原子炉建物及び原子炉附属建物
- ・ **主冷却機建物**

※Sクラスに属する機器・配管系は、すべて原子炉建物及び原子炉附属建物、主冷却機建物内に設置されている。

<B、Cクラスの施設を有する建物>

- ・ 第一使用済燃料貯蔵建物
- ・ 第二使用済燃料貯蔵建物
- ・ メンテナンス建物
- ・ 廃棄物処理建物
- ・ 旧廃棄物処理建物
- ・ 放射線管理室

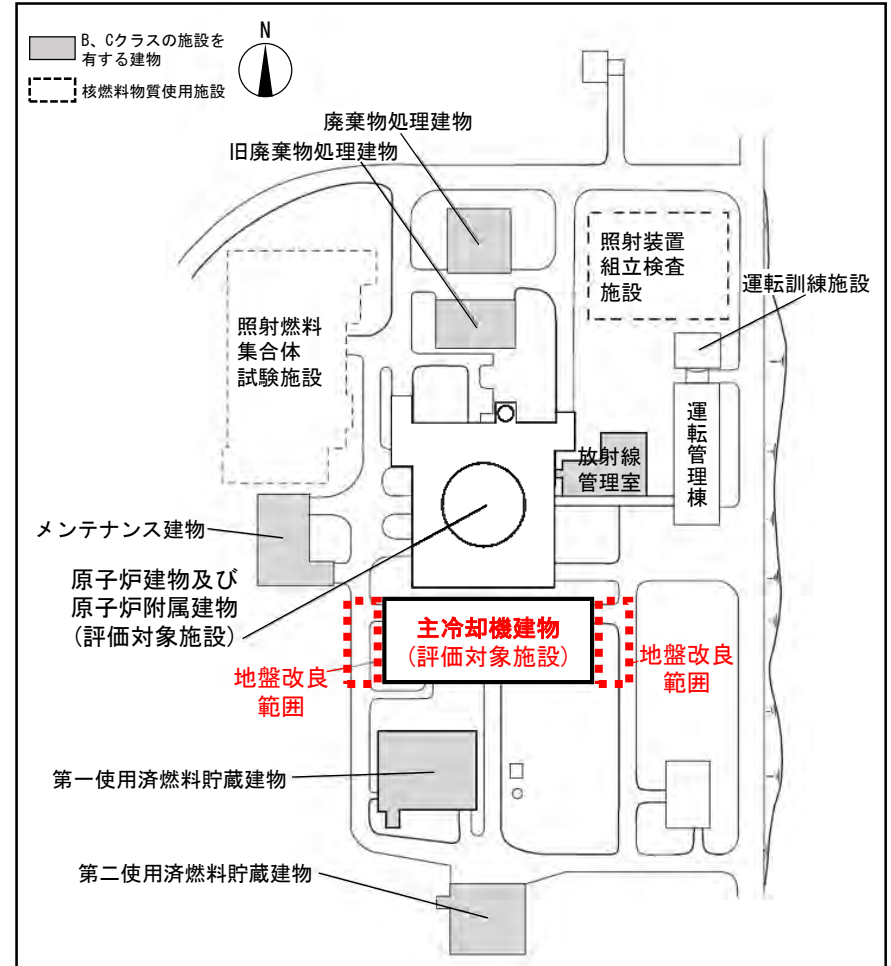


図 施設配置図

地盤改良の工法比較

- ・抑止杭工法については、杭間の地盤の中抜け、杭根入れ部への対策として、杭周辺地盤の地盤改良、根入れ長さの延長が考えられるが、抑止杭工法の検討に用いた技術基準は一般産業施設での斜面のすべりを対象とするものであり、また、他サイトでの基礎地盤の安定性評価での適用事例もないことから、抑止杭の適用性には課題がある。
- ・周辺地盤改良工法については、施工性、既設設備への影響に関して、改良範囲の最適化、深層混合処理工法等による地上部からの施工等を検討することで施工性の向上が可能となる。また、周辺地盤改良工法は、他サイトで基礎地盤のすべり対策等において適用事例があり、技術基準等が明確である。
- ・このため、主冷却機建物の地盤改良については、周辺地盤改良工法に工法を見直す。

	抑止杭工法	周辺地盤改良工法		
工法概要	<ul style="list-style-type: none"> ・建物側面の地中に抑止杭(鋼管杭+H鋼で約30m)を設置する工法。 ・設置する抑止杭の抵抗力により、すべりを抑える。 	<ul style="list-style-type: none"> ・建物周辺の埋土部分を地盤改良※を行う工法。 ・周辺地盤の抵抗力を向上させることにより、すべりを抑える。 		
杭間の地盤の中抜けへの対策	<ul style="list-style-type: none"> ・杭周辺地盤を改良土で改良し、杭が確実に力を負担できるようにするため、杭と地盤の一体性を向上させる対策が考えられる。 ・Ss地震時に杭間の地盤が中抜けせず杭が力を負担できることを検証する必要があり、これまで審査実績のある2次元解析のほか、杭と杭周辺地盤の応力状態を詳細な3次元解析等により求める必要があるため、検証の難度が高い。 	△	(改良体を奥行方向に連続的に造成し、 周辺地盤と一体ですべりに抵抗する。)	○
杭根入れ部への対策	<ul style="list-style-type: none"> ・杭の根入れ部(支持部)を破壊が生じない地盤(Is-S1層)とし、確実に根入れによる支持力を確保する対策が考えられる。 	○	(改良範囲下端は、破壊が生じない地盤(Is-S1層)とする。)	○
施工性・品質	<ul style="list-style-type: none"> ・地上部からの施工となり、地下深部での作業や広範囲の掘削がないため、施工性が高い。 ・杭の施工にあたり、すべり線を横断する広範囲の掘削が必要ないため、施工中も基礎地盤の安定性が損なわれない。 ・鋼管杭等の強度や寸法を直接確認できる。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・広範囲かつ深さ約30mの開削、山留等の地盤崩落防止対策等のデメリットに対しては、改良範囲を最適化することで、地下部の作業範囲を最小化し、深層混合処理工法等による地上部からの施工を行うことで、作業の合理化を図る。 ・改良体の強度や打設範囲を直接確認できる。 	○
既設設備への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・既設埋設物を避けて施工できるため、既設設備への影響は小さい。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・既設埋設物を避けて施工することで、既設設備への影響は小さい。 	○
基礎地盤の安定性評価適用事例	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎地盤では事例がないものの、高浜3、4号機原子炉建屋の周辺斜面のすべり対策では事例がある。 	△	<ul style="list-style-type: none"> ・女川2号炉防潮堤の基礎地盤のすべり・津波対策で事例がある。 	○

1. 地盤改良の工法比較の再検討結果
2. 設置許可基準規則への適合性の確認方針
3. 基礎地盤の安定性評価方針

2. 設置許可基準規則への適合性の確認方針

設置許可基準規則（第3条）における確認内容

- ・ 設置許可基準規則（第3条 設計基準対象施設の地盤）の条文及び条文に対する確認内容を下表に示す。
- ・ 主冷却機建物の地盤については、第3条第1項の確認として、周辺地盤の地盤改良を考慮したすべり安全率が評価基準値以上となることを確認する。

設置許可基準規則 第3条(設計基準対象施設の地盤)		適合性の確認内容
本文	別記	
<p>第1項 施設を十分に支持することができる地盤に設けなければならない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震力が作用した場合においても、接地圧に対する十分な支持力を有すること 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 動的解析の結果に基づいて算定した基礎の接地圧が評価基準値を超えないことを確認する。 ・ 動的解析の結果に基づいて算定したすべり安全率が評価基準値以上となることを確認する。主冷却機建物は周辺地盤の地盤改良を行い、すべり安全率を確保する。 ・ 動的解析の結果に基づいて算定した基礎底面の傾斜が評価基準値を超えないことを確認する。 ・ 基礎地盤が液状化するおそれがないことを確認する。
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震力が作用することによって弱面上のずれ等が発生しないことを含め、地震力に対する支持性能が確保されていること 	
<p>第2項 施設は変形した場合においてもその安全機能が損なわれるおそれがない地盤に設けなければならない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震発生に伴う地殻変動によって生じる支持地盤の傾斜及び撓みにより、施設の安全機能が損なわれるおそれがないこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震発生に伴う地殻変動によって生じる地盤の傾斜を算出し、地震動による地盤の傾斜も考慮した最大傾斜が、評価基準値を超えないことを確認する。 ・ 地震発生に伴う周辺地盤の変状(不等沈下、液状化、揺すり込み沈下等)により、評価対象施設の安全機能が影響を受けないことを確認する。
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地震発生に伴う建物・構築物間の不等沈下、液状化及び揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状により、施設の安全機能が損なわれるおそれがないこと 	
<p>第3項 施設は変位が生ずるおそれがない地盤に設けなければならない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 震源として考慮する活断層のほか、地震活動に伴って永久変位が生じる断層に加え、支持地盤まで変位及び変形が及ぶ地すべり面が生じるおそれがないこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 評価対象施設が設置される地盤には、将来活動する可能性のある断層等が存在しないことを確認する。

地盤改良を考慮したすべり評価の評価項目、評価基準値

- ・ 周辺地盤改良工法による地盤改良を行う主冷却機建物のすべり評価の評価項目、評価基準値を下表に示す。
- ・ 改良体は周辺地盤の一部であり、改良体のせん断抵抗力を加えたすべり安全率が評価基準値1.5以上であることを確認する。

表 地盤改良を考慮したすべり評価の評価項目、評価基準値

部位		機能	第3条（設計基準対象施設の地盤）
地盤	基礎地盤	・ 基礎地盤のすべり安定性に寄与する。 (せん断抵抗力①)	評価項目 : すべり安全率 評価基準値 : 1.5以上
	周辺地盤	・ 基礎地盤のすべり安定性に寄与する (原地盤 : せん断抵抗力②) (改良体 : せん断抵抗力③)	

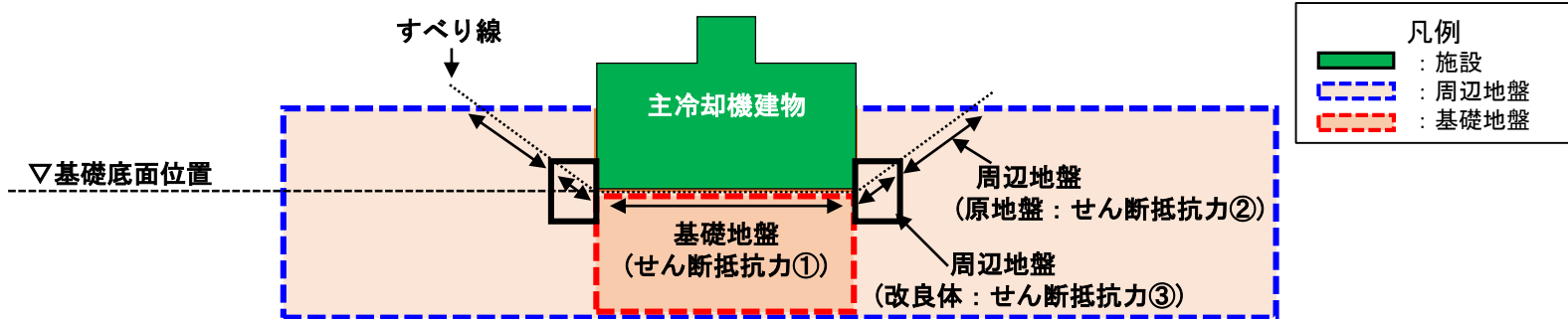


図 各部位の区分

1. 地盤改良の工法比較の再検討結果
2. 設置許可基準規則への適合性の確認方針
3. 基礎地盤の安定性評価方針

地盤改良を考慮したすべり安全率の評価方針

■ 評価方針

- ・ 地盤改良を考慮したすべり安全率の評価は、Ss地震時の想定すべり線上の応力状態をもとに、すべり線上のせん断抵抗力の和をすべり線上のせん断力の和で除して求めたすべり安全率が評価基準値1.5を上回ることを確認する。

$$\text{すべり安全率} = \frac{\sum(\text{すべり線上のせん断抵抗力})}{\sum(\text{すべり線上のせん断力})}$$

地盤改良を考慮したすべり安全率の評価フロー

- ・ 地盤改良を考慮したすべり安全率の評価フローを下図に示す。
- ・ 設置許可段階において、すべり安全率が評価基準値1.5以上となるよう改良体の物性値、改良範囲を設定する。
- ・ 設定した改良体を主冷却機建物の地盤モデルに反映し、地盤改良後のすべり安全率の評価を実施する。

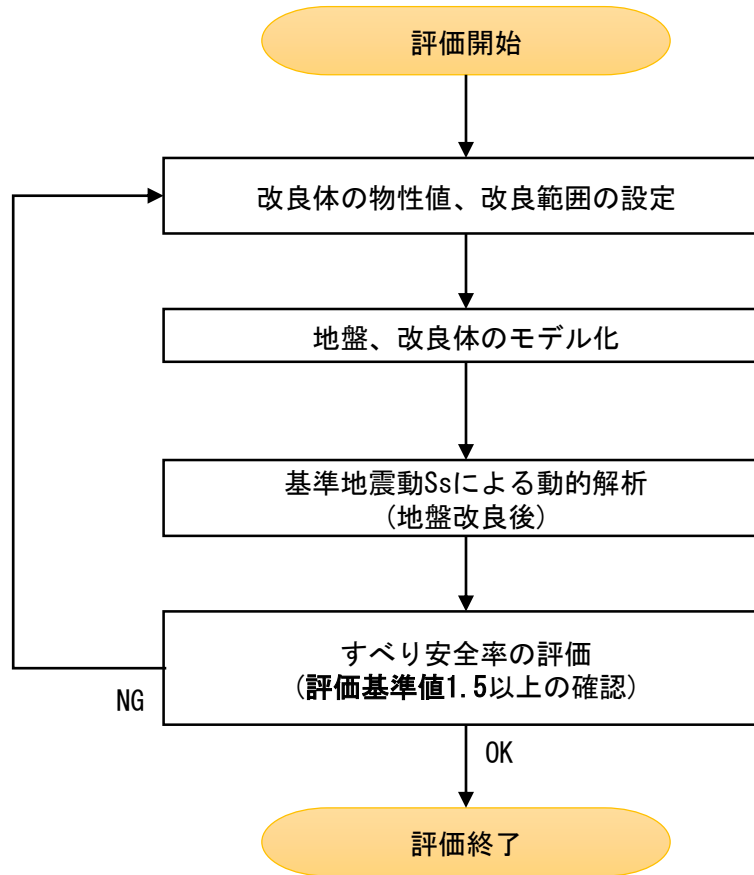
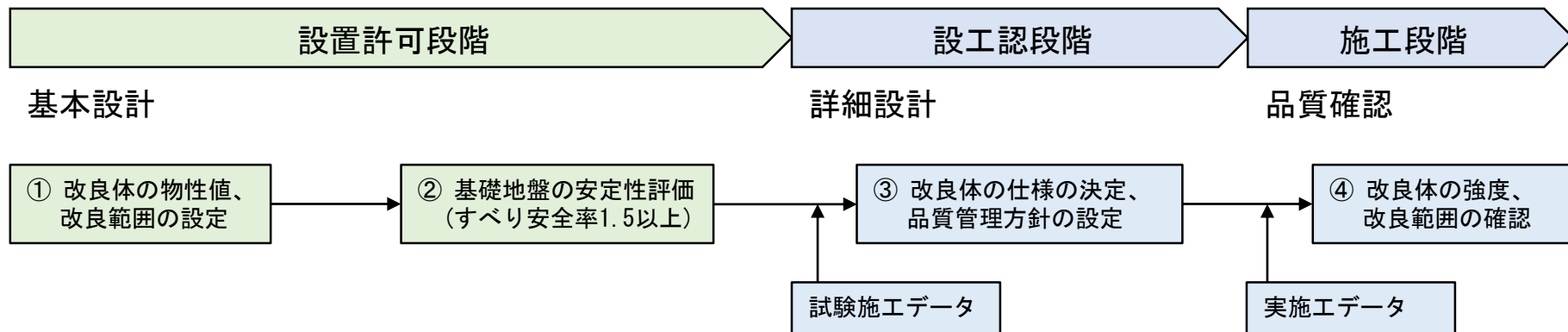


図 地盤改良を考慮したすべり安全率の評価フロー

改良体の設定方針

- ・ 設置許可段階において改良体の物性値、改良範囲を文献等を踏まえ設定し、すべり安全率の評価により設置許可基準則第3条第1項に適合することを確認する。
- ・ 設置許可段階において設定する物性値のうち、すべり安全率の向上に関係する改良体の強度、改良範囲を後段規制における管理目標値とする。
- ・ 後段規制において試験施工・実施工データを踏まえ、設置許可段階において設定した改良体の強度、改良範囲が確保されることを確認する。



- ①-1 すべり安全率の向上に関係する改良体の強度、改良範囲を設定。
- ①-2 設定した「改良体の強度」から文献等を踏まえ、解析に必要な物性値（物理特性、変形特性）を設定。
- ② すべり安全率が評価基準値1.5以上となることを確認。

- ③ 試験施工データを踏まえ、改良体の仕様を決定し、品質管理方針（項目、方法、頻度等）を設定する。
- ④ 実施工データを踏まえ、改良体の強度、改良範囲が確保されることを確認。

地盤改良を考慮したすべり安全率の評価 解析条件

・ 解析条件は地盤改良前のすべり安全率の評価と同様とし、改良体の物性値、改良範囲を解析モデルに反映する。

■ 地震応答解析手法

・ 2次元動的FEM解析（等価線形化法）を使用し、応力状態を算出する。

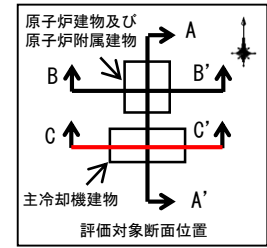
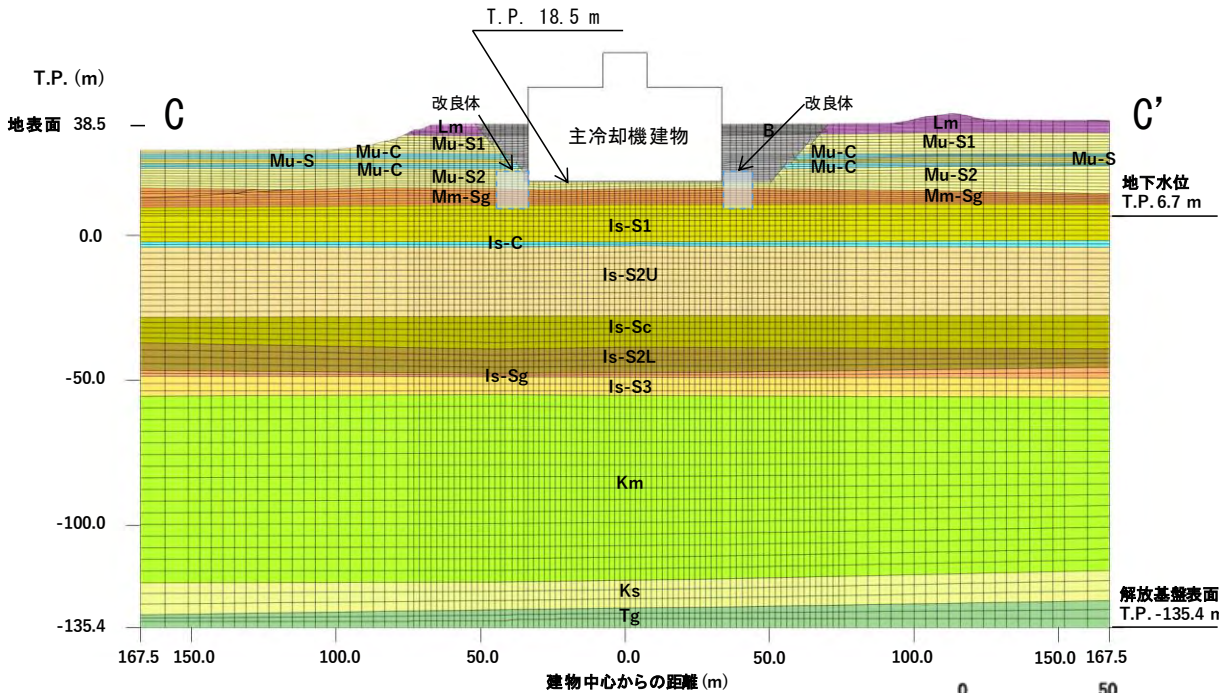
■ 入力地震動

・ 基準地震動 S_s (S_s -D、 S_s -1~5) を使用し、解析モデル下端（解放基盤表面）に水平及び鉛直地震動を同時入力する。

■ 解析モデルの設定

・ 解析モデルの設定方法を以下に示す。

項目	設定方法
モデル領域	境界条件が地盤及び建物の応力状態に影響を及ぼさないように十分に広い領域とする。
境界条件	エネルギーの逸散効果を評価するため、側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とする。
地盤、改良体のモデル化	平面ひずみ要素でモデル化する。



凡例					
B	埋戻土	Mm-Sg	礫質土	Km	砂質泥岩
Lm	ローム	Is-S1	砂質土	Ks	砂岩
Mu-S1	砂質土	Is-C	粘性土	Tg	砂岩泥岩互層
Mu-C	粘性土	Is-S2U	砂質土		
Mu-S	砂質土	Is-Sc	砂質土		
Mu-S2	砂質土	Is-S2L	砂質土		
		Is-Sg	礫質土		
		Is-S3	砂質土		

図 解析モデル (C-C' 断面)

※詳細な解析条件は令和2年11月6日審査会合資料に示す。

改良範囲の設定方針

- ・地盤改良の範囲は、必要なせん断抵抗力が確保されるよう建物側面の東側、西側に設定する。
 - ・地盤改良の範囲の下端は、破壊が生じない地盤 (Is-S1層) に設定する。
- ※詳細な範囲については、今後のすべり安全率の評価結果等により決定する。



図 平面図

■想定する改良体

部位	期待する効果	改良材
改良体	周辺地盤のせん断抵抗力を向上させる。	セメント系固化材

※地盤改良の詳細な範囲は今後のすべり安全率の評価等により決定する。

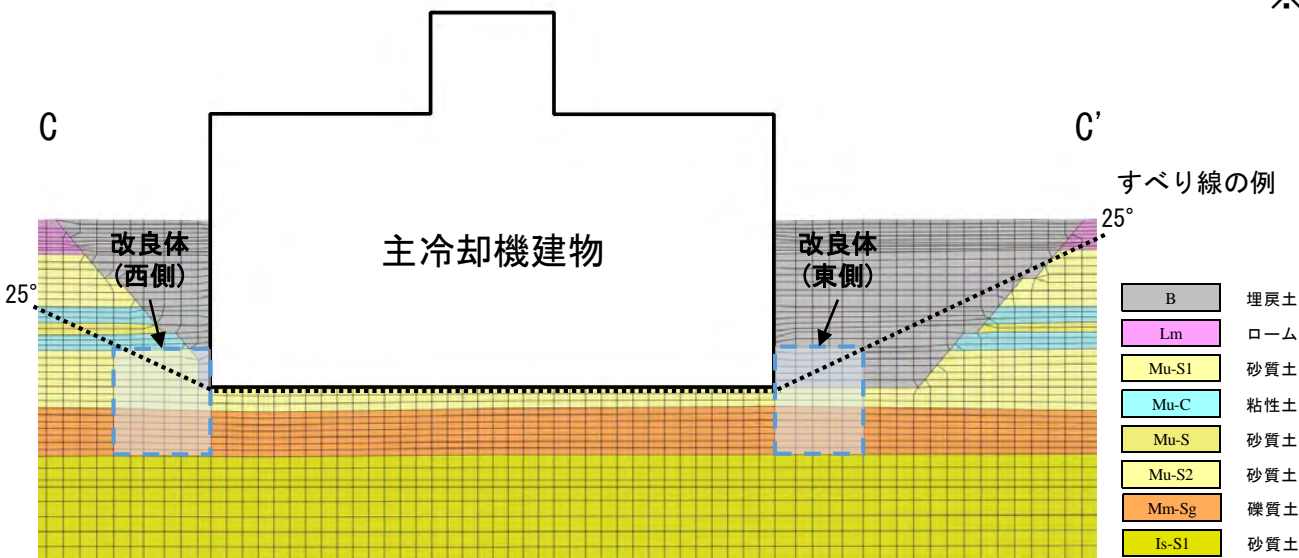


図 断面図 (C-C' 断面)

改良体の解析用物性値

- ・ 想定する改良体の解析用物性値を下表に示す。物性値は文献等を参考に設定する。
 ※詳細な物性値については、今後のすべり安全率の評価への影響を踏まえ決定する。

品質確認の項目

表 改良体の解析用物性値

地層名	埋戻土	M1段丘堆積物	東茨城層群	設定根拠	
地質記号	改良B	改良Mu-S2	改良Mm-Sg		
強度特性	一軸圧縮強度 q_u (N/mm ²)	3.0	3.0	3.0	文献 ^{※1} による砂質土の圧縮強度の設計値 (3.0 N/mm ²) を設定。
	せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	0.6	0.6	0.6	文献 ^{※2} よりSs地震時荷重に対する検討で用いる改良体の許容せん断応力度が許容圧縮応力度の1/5とし設定。
物理特性	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.90	1.87	2.21	文献 ^{※3} の「改良前後の土の湿潤密度」、文献 ^{※4} の「セメント改良土の湿潤単位体積重量測定例」を参考に、スラリー状のセメント系固化材の密度 (水/固化材比100%のとき1.5 g/cm ³) から密度の増減がわずかと考えることから、改良対象の原地盤の値を設定。
変形特性	S波速度 V_s (m/s)	500	500	500	文献 ^{※5} の「沖積層における改良体の V_s と q_u の関係」を参考に設定。
	初期動せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	475	468	553	ρ_t 、 V_s より算定。
	剛性低下率 G/G_0	0.5	0.5	0.6	Ss地震時での改良対象の原地盤の剛性低下率に基づき設定。 改良体は剛性低下させた線形要素とする。
	剛性低下後動せん断弾性係数 G (N/mm ²)	238	234	332	G_0 、 G/G_0 より算定。
	動ポアソン比 ν_d	0.35	0.31	0.35	文献 ^{※5} の「三軸圧縮 (CD) 試験より得られたポアソン比の分布」より砂層の改良体は最頻値が0.30~0.40であり、改良対象の原地盤 (砂質土、礫質土) と大きな差がないと考えることから、改良対象の原地盤の値を設定。
	減衰定数 h (%)	3	3	3	Ss地震時での改良対象の原地盤の減衰定数に基づき、保守的にそれより小さい値を設定。

※1 SUPERJET工法 設計基準強度 (SUPERJET研究会)

※2 乾式キャスク使用済燃料中間建屋の基礎構造の設計技術規程JEAC4616 (日本電気協会)

※3 セメント系固化材による地盤改良マニュアル第3版 (セメント協会)

※4 陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版 (土木研究センター)

※5 改良地盤の設計及び品質管理指針 (日本建築センター)

1. 地盤改良の工法比較の再検討結果

- ・ 主冷却機建物のすべり対策として、審査会合におけるコメントを踏まえ、杭周辺地盤の中抜け、杭根入れ部の破壊領域への対策、他サイト等での適用事例の観点から、周辺地盤改良工法を選定した。

2. 設置許可基準規則への適合性の確認方針

- ・ 周辺地盤改良工法は設置許可基準規則（第3条 設計基準対象施設の地盤）の中で適合性を確認する。
- ・ 設置許可基準規則の条文における確認内容を整理した。

3. 基礎地盤の安定性評価方針

- ・ 基礎地盤の安定性評価は地盤のせん断抵抗力和Ss地震時のせん断力からすべり安全率を算定し評価する。
- ・ 設置許可段階において改良体の物性値、改良範囲を設定し、すべり安全率の評価により設置許可基準規則第3条第1項に適合することを確認する。
- ・ 設置許可段階において設定する改良体の強度、改良範囲を後段規制における管理目標値とする。
- ・ 後段規制において試験施工・実施工データを踏まえ、設置許可段階において設定した改良体の強度、改良範囲が確保されることを確認する。

基礎地盤の安定性評価結果については、次回以降の審査会合にて説明する。

- ・ 地盤改良の工法見直しに伴い、これまでの審査会合におけるコメントの再整理を行った。
- ・ 次回以降の審査会合において、以下の項目についてコメント回答を実施する。

No.	審査会合	コメント	回答状況
1	令和2年11月6日 第382回審査会合	抑止杭の周辺地盤について、新規規制基準への適合性の観点から説明すること。	周辺地盤改良工法での新規規制基準への適合性について 次回以降ご説明
2	〃	周辺地盤変状による影響について、埋戻土の液状化影響を説明すること。また、周辺地盤の変状による影響だけでなく、すべり安全率に対しては施設を横から押す起動力となることも考えられるため、抑止杭の構造、成立性にどのような影響を与えるか説明すること。	周辺地盤改良工法での周辺地盤変状による影響を次回以降ご説明
3	〃	解析用地盤物性値について、HTTRとの相違点を整理し、使用した物性値が「常陽」とHTTRで本質的に変わらないことを定量的に示すこと。	次回以降ご説明
4	〃	すべり安全率の評価結果について、最小すべり安全率発生時刻が異なるため、各発生時刻の結果を比較し、説明すること。	〃
5	〃	各断面について、建物基礎底面のみでのすべり安全率の評価結果を提示すること。	〃
6-1	〃	最小すべり安全率を示す時刻の抑止杭の応力分布を示し、応力が適切に算定されているか説明すること。	周辺地盤改良工法での応力状態を次回以降ご説明
6-2	〃	抑止杭の応力は時々刻々深度方向に変わることから、抑止杭にとって安全側かの観点で評価方法の妥当性を説明すること。	抑止杭工法から周辺地盤改良工法への変更に伴い不要となる項目
7-1	〃	抑止杭による地盤改良前後に地盤に生じるせん断応力の変化を示し、現在の設計・評価に相互作用が影響しないか説明すること。	周辺地盤改良工法での建物との相互作用を次回以降ご説明
7-2	〃	抑止杭と主冷却機建物が非常に近接しているため、建家と杭の相互作用(建家が地盤を介して杭にもたれる現象や杭反力が建家に過剰な荷重を与えていないか)を説明すること。	
7-3	〃	抑止杭設置による原子炉建物、主冷却機建物の耐震評価(建物・機器)への影響について説明すること。	

No.	審査会合	コメント	回答状況
8	令和2年11月6日 第382回審査会合	抑止杭の対策効果を確認するため、抑止杭の設計仕様、施工方法及び施工管理項目について説明をすること。	周辺地盤改良工法での設計及び施工について次回以降ご説明
9	〃	抑止杭のモデル化について、根入れ深さが妥当であること等、設計方針を踏まえ説明すること。	抑止杭工法から周辺地盤改良工法への変更に伴い不要となる項目
10	令和3年3月5日 第396回審査会合	地下水位は東西方向に高低差がある。解析用地下水位 (T.P. +6.7m) の設定については、後段規制への影響も含め、その妥当性について説明すること。	次回以降ご説明
11	〃	地下水位より上部に分布する宙水について、解析上の位置づけを明確にすること。	〃
12	〃	用語(洪積層)について、地質学の用語を踏まえた記載に適正化すること。	〃
13	令和3年11月29日 第421回審査会合	抑止杭工法による地盤改良を用いる場合、以下の観点から抑止杭工法による第3条1項への適合性を説明すること。 (1) 基準地震動による地震力に対して中抜けしないことについて引用文献の適用性 (2) 杭根入れ部の周辺地盤の破壊領域を踏まえた評価により杭の支持性能等を期待できることの根拠とその妥当性 (3) 他サイトでの抑止杭工法と地盤・地形・併用工法が異なることを踏まえても、同様の抑止効果が期待できるとした根拠 (4) 千鳥配列(2列)の抑止杭を1列に集約してモデル化することの根拠とその妥当性 (5) 平面ひずみ状態である抑止杭を梁要素にモデル化することの根拠とその妥当性	今回ご説明 抑止杭工法から周辺地盤改良工法へ変更を行い、解析結果を次回以降ご説明
14	〃	抑止杭工法の適合性については、原子力施設に限らず一般産業施設での杭工の地震被害事例等も参考に検討すること。	抑止杭工法から周辺地盤改良工法への変更に伴い不要となる項目
15	〃	工法選定について、評価基準値1.5を満足する対策範囲の精緻な検討を行い、再整理すること。	今回ご説明 抑止杭工法から周辺地盤改良工法へ変更を行い、解析結果を次回以降ご説明