

| | |
|-----------------------|------------------------|
| 女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | 02-補-E-19-0600-25-1_改2 |
| 提出年月日 | 2021年4月8日 |

補足-600-25-1 【地下水位低下設備の設計方針に係る補足説明資料】

2021年4月
東北電力株式会社

目次

| | |
|---------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 地下水流入量の評価 | 2 |
| 2.1 検討方針 | 2 |
| 2.2 モデルの妥当性確認 | 5 |
| 2.3 予測解析 | 8 |
| 3. 地下水位低下設備の機能を考慮しない場合の評価 | 12 |
| 3.1 検討方針 | 12 |
| 3.2 時間余裕の評価指標について | 12 |
| 3.3 評価条件 | 14 |
| 3.4 評価結果 | 15 |
| 4. 地下水流入量と設備の排水能力 | 29 |
| 4.1 地下水流入量と排水能力（揚水ポンプ） | 29 |
| 4.2 地下水流入量と排水能力（ドレーン） | 29 |
| 4.3 排水能力の妥当性について | 31 |

1. はじめに

本書は、「VI-2-1-1 別添 1 地下水位低下設備の設計方針」に引き継ぐ三次元浸透流解析結果のうち、地下水流入量及び地下水位低下設備の機能を考慮しない場合の評価について、詳細を補足するものである。

2. 地下水流入量の評価

2.1 検討方針

設置変更許可においては、地下水流入量は、保守的な条件（地下水流入量が多めに評価される条件）を与えた浸透流解析により評価する方針としていた。この方針を踏まえて、地下水流入量は地下水位低下設備の機能を考慮した三次元浸透流解析（非定常解析）を用いて評価する。

浸透流解析のアウトプットは、揚水ポンプの排水能力設定において参照することも踏まえて、妥当な浸透流解析モデルであることを確認した上で、地下水流入量が多めに算出される解析条件を与えた予測解析により評価する必要がある。

このため、設計用地下水位の設定に係るプロセスと同様に、広域モデルを用いてモデルの妥当性を確認した上で、予測解析として解析の保守性を考慮した「地下水流入量評価モデル」を作成する。

広域モデルを用いたモデル妥当性確認は、既往の揚水ポンプ稼働実績との対比により確認するため、既設ドレーン範囲を全てモデル化した上で、解析の再現状況に応じて地下水位・地下水流入量に影響の大きい透水係数のパラメータチューニングを行う。

地下水流入量を評価する地下水流入量評価モデルは、設計用地下水位の設定プロセスと同様、安全対策工事として実施する防潮堤の沈下対策などの各種工事やドレーン新設等の工事完了段階における施設配置等を反映し、広域モデルより O.P. +14.8m 盤周辺エリアを切り出した上で、地下水流入量が多めに算出される解析条件を設定する。

ここでは、設計用地下水位の設定に係る予測解析に用いた「水位評価モデル」*¹をベースとして、地下水流入量の観点から保守的な条件設定*²は踏襲した上で、透水係数を大きめに、ドレーン範囲を広めに設定することで、流入量評価の保守性を確保する方針とする。

地下水流入量の評価フローを図 2-1 に、浸透流解析の目的に対応したモデル選択と設備設計へのインプットの関係を図 2-2 に示す。

注記* 1：水位評価モデルの概要及び妥当性の確認結果については、「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」に記載する。

* 2：解析境界における水位は、流入量を多めに算出するため、水位評価モデルと同様に山側を地表面（法肩）に固定、海側を朔望平均満潮位に固定する。

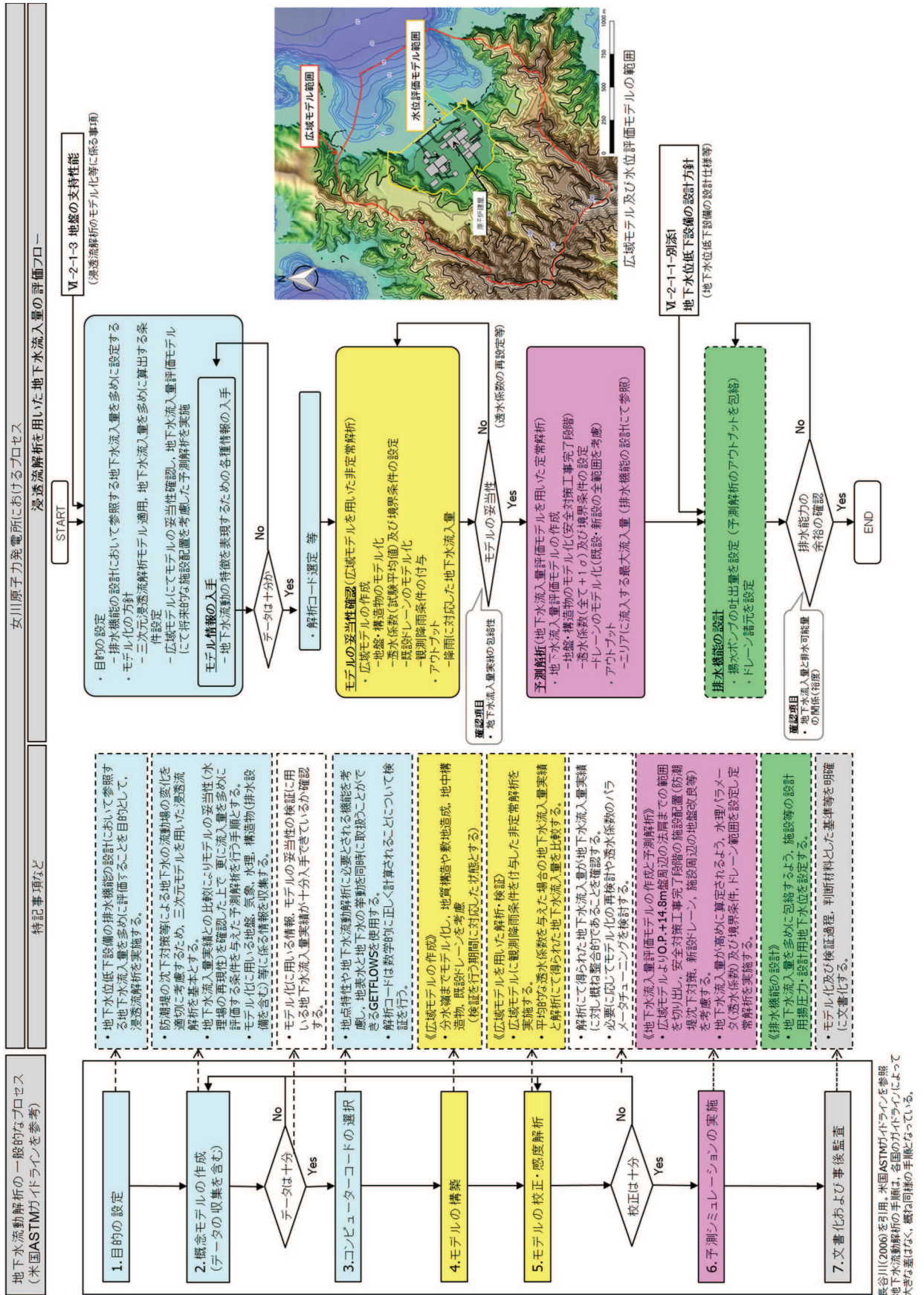


図 2-1 地下水流入量の評価フロー

・長谷川(2006)を引用。米国ASTMガイドラインを参照
 ・地下水流動解析の手順は、各国のカイバラインによって大きな差はなく、概ね同様の手順となっている。

2.2 モデルの妥当性確認

2.2.1 評価条件

モデルの妥当性確認においては、表 2-1 に示す既往の揚水ポンプ稼働実績（平成 27 年度～平成 30 年度）を参照し、再現解析を用いた妥当性の確認を行う。

ここで、妥当性確認に用いる期間は、既往の稼働実績で最大湧水量を確認している平成 29 年 9 月～平成 29 年 10 月を選定する。

既往の揚水ポンプ月別排水量合計を図 2-3 に、妥当性確認において用いる広域モデルの評価条件を表 2-2 に示す。

表 2-1 既往の揚水ポンプ稼働実績

| 系列 | 揚水ポンプ最大排水量 (m ³ /日) | | | | 備考 |
|------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----|
| | H27 年度 | H28 年度 | H29 年度 | H30 年度 | |
| 1・2 号機 系列*1 | 5042 (961) | 4076 (918) | 6228 (1050) | 2927 (1025) | |
| 3 号機系列*1 | 2377 (756) | 2025 (647) | 2711 (561) | 1089 (424) | |
| 各系列の 排水量合計 | 7419 (1717) | 6101 (1565) | 8939 (1611) | 4016 (1449) | |
| (参考) 日最大排水量*2 | 7239 (1661) | 5961 (1564) | 8522 (1610) | 3574 (1449) | |

注記*1：系列毎の日最大値，（ ）内の数値は日平均値を示す。

*2：1・2 号機と 3 号機を合算した全体の排水量における日最大値，（ ）内の数値は日平均値を示す。

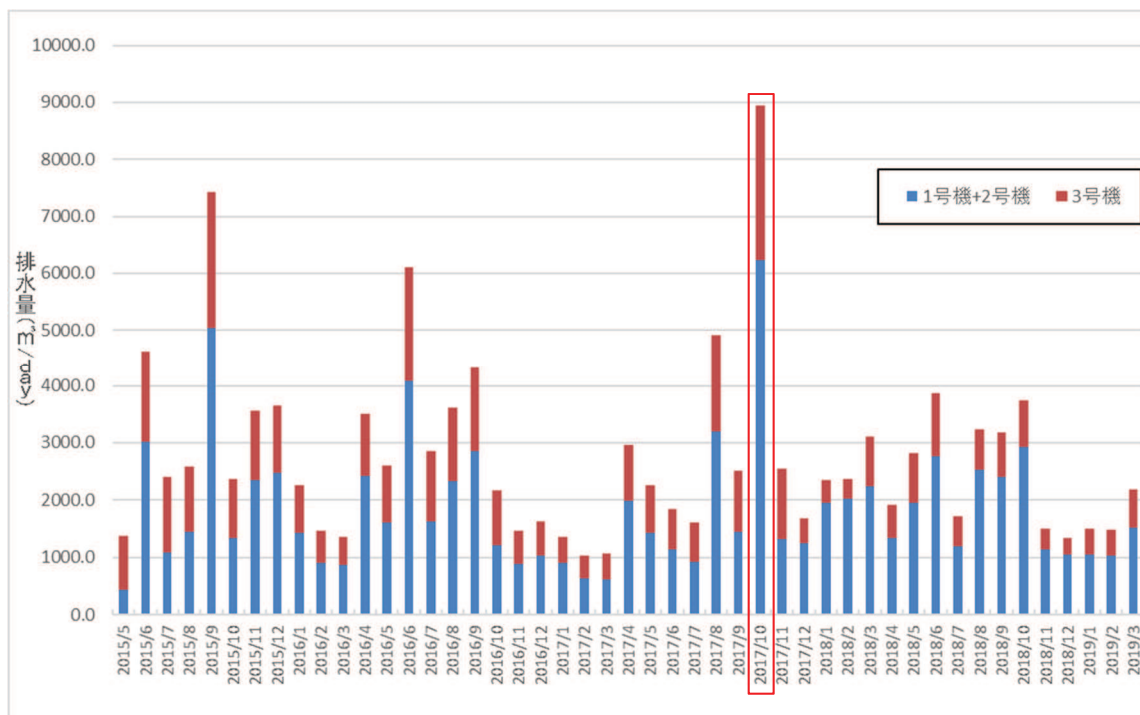
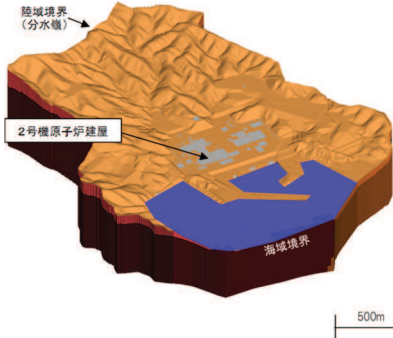


図 2-3 既往の揚水ポンプ月別排水量合計

表 2-2 広域モデルにおける評価条件

| 項目 | 広域モデル |
|---------------|---|
| 1a. 目的 | ・モデル化の妥当性を確認すること（観測結果の再現性を確保） |
| 1b. アウトプットの活用 | －（モデル検証のみ） |
| 2. 解析コード | ・GETFLOWS Ver. 6. 64. 0. 2 |
| 3a. 解析領域 | <ul style="list-style-type: none"> ・分水嶺を山側境界とし水位評価モデルを包絡する範囲  |
| 3b. 格子数 | <ul style="list-style-type: none"> ・平面格子数：約 33.4 万 ・総格子数：約 1600 万 ・格子寸法：0.5～6m 程度（構造物近傍は最小 0.5m 程度，山側領域は 3～6 m 程度） |
| 4. 解析種別 | ・非定常解析 |
| 5a. 検証期間 | ・平成 29 年 9 月～平成 29 年 10 月（既往の揚水ポンプ稼働実績最大観測期間を含む期間） |
| 5b. 降雨条件 | <ul style="list-style-type: none"> ・初期状態：3.57mm/日（観測降雨（2001～2018 年）の日平均） ・降雨時：上記検証期間の降雨実績 |
| 5c. 気象条件 | 降水量・気温・日射量・相対湿度・風速：構内観測所データ（欠測値は，周辺気象庁データから欠測補間） |
| 5d. 蒸発散 | <ul style="list-style-type: none"> ・定常状態：ハーモン法^{*1} ・非定常状態：熱収支法^{*2} |
| 6a. モデル（地形） | ・検証期間に対応した状態 |
| 6b. "（地盤） | ・検証期間に対応した状態 |
| 6c. "（構造物） | ・検証期間に対応した状態 |
| 6d. "（ドレーン） | ・既設の全範囲を管路として考慮（新設は考慮しない） |
| 7. 境界条件 | <ul style="list-style-type: none"> ・実態に則した設定 <ul style="list-style-type: none"> －山側：閉境界 －海側：平均潮位に水位固定 －ドレーン：ドレーン計画高に水位固定 |
| 8. 透水係数 | <ul style="list-style-type: none"> ・試験等の平均値（ケース A） ・試験等の平均値より盛土を+1σ（ケース B） |
| 9. 有効間隙率 | ・文献値 ^{*3} |
| 10. 粗度係数 | ・文献値 ^{*4} |

注記*1：平均気温・平均降水量は発電所内観測値，日照時間は地下水ハンドブックによる

注記*2：検証期間における敷地内の気温，風速，日射時間等を参照する

注記*3：地下水ハンドブック（建設産業調査会），水理公式集（土木学会）等を参照し設定

注記*4：水理公式集（土木学会），河川砂防技術基準（国土交通省）等を参照し設定

2.2.2 評価結果

評価結果を表 2-3 に示す。

ケースAは、設計用地下水位の設定における妥当性確認と同様、透水係数を試験結果等の平均値とした結果であり、ケースBは盛土の透水係数を+1 σ とした場合の結果である。

ケースAのとおり、広域モデルによる降雨条件を与えた非定常解析を行ったところ、既往の揚水ポンプ稼働実績を下回る評価結果が得られた。設計用地下水位の設定における妥当性確認では、ケースAに相当する透水係数（試験結果等の平均値）を用いているが、水位がやや高めに算出されていたことから、流入量としては非保守側の条件となっていたと考えられた。このため、既設ドレーンへの流入量へ影響が大きいと考えられる盛土の透水係数を試験結果等の+1 σ に再設定し、ケースBとして改めて解析を実施したところ、既往の揚水ポンプ稼働実績を上回る評価結果が得られた。

以上の検討から、盛土の透水係数を試験結果等の+1 σ に再設定した条件において、モデルの妥当性を確認した。

表 2-3 広域モデルにおける妥当性確認結果

| 系列 | 揚水ポンプ最大排水量 (m ³ /日) | | | 備考 |
|----------------|--------------------------------|------|------|----|
| | 稼働実績 | ケースA | ケースB | |
| 1・2号機 系列 | 6228 | 2463 | 6363 | |
| 3号機系列 | 2711 | 1170 | 3256 | |
| 各系列の 排水量合計 | 8939 | 3633 | 9619 | |
| (参考) 日最大排水量 | 8522 | 3584 | 9416 | |

2.3 予測解析

2.3.1 評価条件

予測解析において用いる地下水流入量評価モデルの評価条件を表 2-4 に示す。

2.2 にて既往の揚水ポンプ稼働実績を包絡するよう設定したモデル条件（盛土の透水係数を試験結果等の $+1\sigma$ ）に対して、予測解析においては更に地下水流入量を多めに評価するようなモデル条件として、透水係数を大きく（全て $+1\sigma$ ）設定するとともに、図 2-4 のとおり、ドレインは既設及び新設の全ての範囲を考慮する。

表 2-4 地下水流入量評価モデルにおける評価条件

| 項目 | 【参考】水位評価モデル | 地下水流入量評価モデル |
|---------------|---|---|
| 1a. 目的 | ・ 工事完了後に想定される地下水位を評価すること（液状化影響検討対象施設を幅広く抽出するため高めに評価） | ・ 工事完了後に想定される地下水の流入量を評価すること（設備設計の保守性を確保するため多めに評価） |
| 1b. アウトプットの活用 | ・ 耐震設計（各施設） | ・ 設備設計（ポンプ・ドレインの排水能力） |
| 2. 解析コード | <ul style="list-style-type: none"> ・ GETFLOWS Ver. 6. 64. 0. 2 ・ 0. P. +14. 8m 盤及び 0. P. +14. 8m 周辺の法面 | |
| 3a. 解析領域 | | |
| 3b. 格子数 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 平面格子数：約 16.7 万 ・ 総格子数：約 770 万 ・ 格子寸法：0.5～2m 程度（構造物近傍は最小 0.5m 程度） | |
| 4. 解析種別 | ・ 定常解析 | |
| 5a. モデル（地形） | ・ 安全対策工事完了段階を反映 | |
| 5b. "（地盤） | ・ 安全対策工事完了段階を反映（施設周辺の地盤改良を含む） | |
| 5c. "（構造物） | ・ 安全対策工事完了段階を反映 | |
| 5d. "（ドレイン） | <ul style="list-style-type: none"> ・ 既設・新設のうち信頼性の確保状況に応じ、信頼性が確保された範囲を管路として扱う（それ以外の範囲は耐久性・耐震性・保守管理性等の確保状況に応じて透水層または周辺地盤として扱う） | ・ 既設・新設の全範囲を管路として扱う |
| 6. 境界条件 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 水位が高めに評価されるよう設定 －山側：地表面に水位固定 －海側：H. W. L. に水位固定 －ドレイン：ドレイン計画高^{*1} | <ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水流入量が多めに評価されるよう設定 －山側：地表面に水位固定 －海側：H. W. L. に水位固定 －ドレイン：ドレイン計画高^{*1} |
| 7. 透水係数 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 水位が高めに評価されるよう設定（岩盤 I を試験結果の平均値-1σ） | <ul style="list-style-type: none"> ・ 流入量が多めに評価されるよう設定（妥当性確認の結果を踏まえ、全て試験結果等の平均値$+1\sigma$） |
| 8. 有効間隙率 | ・ 文献値 ^{*2} | |
| 9. 粗度係数 | — | |

注記*1：ドレインの中心高さ

注記*2：地下水ハンドブック（建設産業調査会），水理公式集（土木学会）等を参照し設定

注) ■は目的に対して妥当な評価とするために水位評価モデルより変更している条件

■は目的に対して妥当な評価とするために水位評価モデルを踏襲している条件

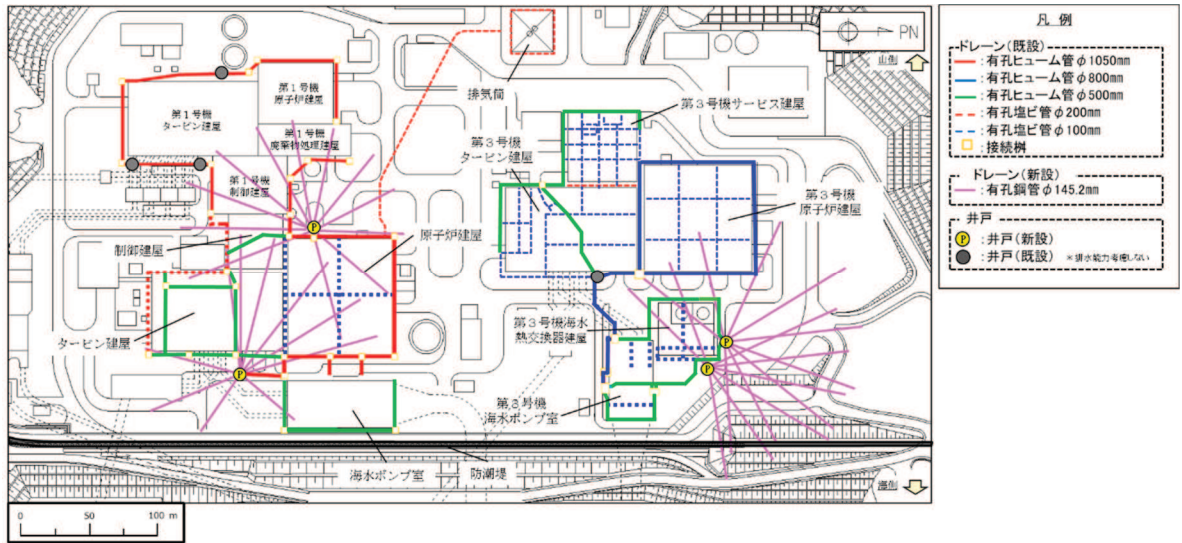


図 2-4 地下水流入量算定モデルにおけるドレーン範囲

地下水流入量の評価は、表 2-4 及び図 2-4 に示す条件にて実施するケース 1 を基本とするが、既設ドレーン（有孔ヒューム管）の排水能力確認においては、保守的に新設するドレーン（鋼管）を考慮しない場合（ケース 2）の評価を行い、これを参照する。

2.3.2 評価結果

地下水流入量の評価結果を表 2-5 に示す。

表 2-5 における集水エリアの区分は、図 2-5 に示すとおり、建屋外周の既設ヒューム管（2号機系列：エリア①，3号機系列：エリア③）と建屋下に新設する鋼管（2号機系列：エリア②，3号機系列：エリア④）に対応している。

なお、下表における流入量は、1・2号機エリア，3号機エリアの各エリア単位で記載しており、揚水井戸への流入量とは異なるものである。

表 2-5 地下水流入量の評価結果

| | | 地下水流入量 (m ³ /日) | | |
|--------------|--------------|----------------------------|-------|------|
| | | ケース 1 (基本) | ケース 2 | |
| 解析条件 | ドレーン (鋼管) | 考慮 | 考慮しない | 備考 |
| | 透水係数 | 試験結果等の平均値+1σ | | |
| | 防潮堤 沈下対策 | 考慮 | | |
| 1・2号機 エリア | エリア① | 6083 | 6633 | 建屋外周 |
| | エリア② | 1995 | — | 建屋下 |
| | 計 | 8078 | 6633 | |
| 3号機 エリア | エリア③ | 1683 | 5449 | 建屋外周 |
| | エリア④ | 5363 | — | 建屋下 |
| | 計 | 7046 | 5449 | |
| 合計 | | 15124 | 12082 | |

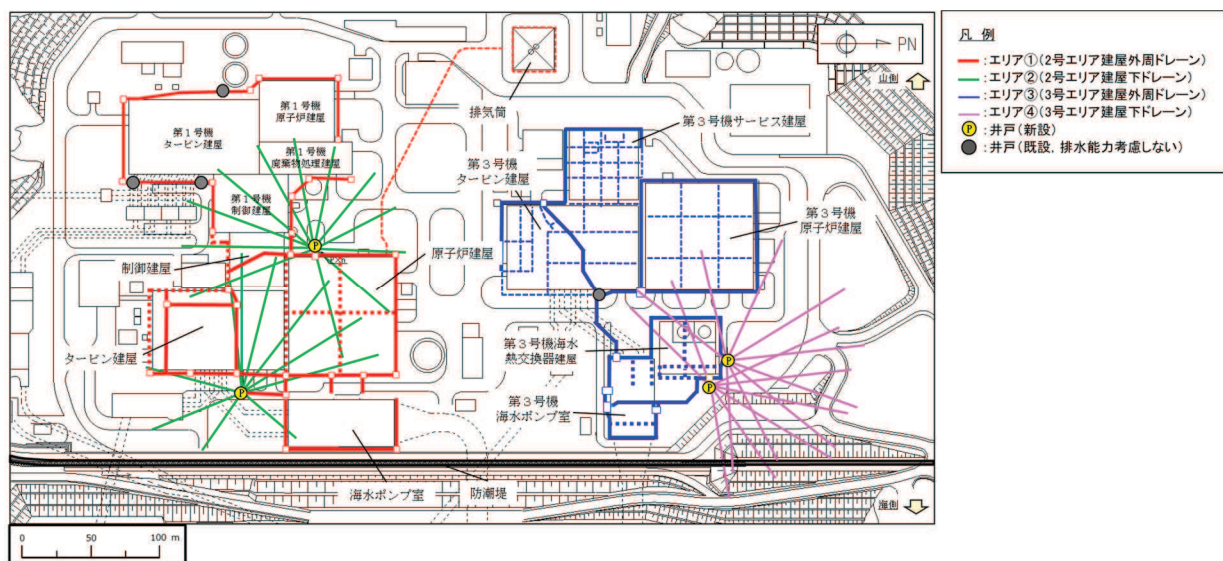


図 2-5 地下水流入量評価における集水エリア区分

前述の妥当性確認とドレーン等の条件が同一で透水係数の設定をすべて試験等の平均値+1 σ であるケース2において、透水係数を大きく設定したこと及び境界条件の保守性により、モデルの妥当性確認ケースBにおいて算定した地下水流入量(Q=9416m³/日)より大きな流入量が評価された。さらに、建屋下ドレーンを考慮したケース1においては、ケース2よりも大きな流入量を示している。

また、ケース1においては、1・2号機系列と3号機系列で建屋外周と建屋下の排水量の傾向が異なっており、1・2号機系列においては建屋外周(エリア①)、3号機系列においては建屋下(エリア④)が支配的となっている。この相違の主な要因としては、3号機側のドレーン(鋼管)が2号機側に比べて山側(地下水の流れ方向に対し上流側)に配置されているためと考えられる。

以上の検討から、揚水ポンプの排水能力の設定においてはケース1の地下水流入量を参照する。また、ドレーンの排水能力の確認においては、エリア②・④(建屋下に新設する鋼管)についてはケース1、エリア①・③(建屋外周の既設ヒューム管)についてはケース2の地下水流入量を参照する。

3. 地下水位低下設備の機能を考慮しない場合の評価

3.1 検討方針

設置変更許可においては、ポンプ故障等により通常の運転状態（各エリア2系列にて集水する定常状態）から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行した場合を仮定し、その後の水位上昇により設計値に到達するまでの時間余裕*を浸透流解析（非定常解析）により評価し、地下水位低下設備の復旧措置に係る検討において参照する方針としていた。

また、アクセスルートの評価においては、地下水位低下設備の機能を考慮しない状態が長期間（約2ヵ月）継続した場合の浸透流解析（非定常解析）により解析水位を評価し、アクセスルートの設計用地下水位の設定において参照する方針としていた。

この場合の水位上昇を評価する場合は、水位評価モデルをベースとして、水位上昇を速めに（水位上昇速度を短めに）算出される解析条件を与えた「水位上昇評価モデル」を作成する。

時間余裕の評価に用いる水位上昇評価モデルは、水位評価モデルと同様、安全対策工事として実施する防潮堤の沈下対策などの各種工事やドレーン新設等の工事完了段階における施設配置等を反映する。また、地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行する際の初期水位を高くすることで時間余裕が短めに算定されることから、ドレーン範囲や解析境界における水位、透水係数は水位評価モデルと同様に、信頼性の確保された範囲に限定する。

アクセスルートの評価において参照する解析水位も、時間余裕の評価と同様に水位上昇評価モデルを用いるものとし、通常の運転状態から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行した段階から2ヵ月後の水位を評価する。

3.2 時間余裕の評価指標について

地下水位の上昇による施設の耐震性への影響として、揚圧力（建物・構築物へ作用する揚圧力の上昇。基礎版の耐震性に影響）、液状化（周辺地盤の液状化に伴う施設へ作用する土圧等の変化。躯体の耐震性に影響）、浮上り（周辺地盤の液状化に伴う地下構造物の浮上り。躯体の安定性と地中構造物上方のアクセスルート通行性に影響）が考えられ、設置変更許可段階では、これらのうち最も早く影響が生じる揚圧力に着目する方針としていた。

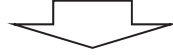
詳細設計段階においては、この方針を踏襲し、時間余裕の評価指標として揚圧力に着目した。また、液状化に対する時間余裕についても併せて確認を行った。

なお、詳細設計段階における検討を踏まえた各影響に対する時間余裕は図3-1の通りである。

注記*：時間余裕は、通常の運転状態から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行した場合に、その影響が早期に現れる指標として揚圧力に着目し、各建屋に作用する平均揚圧力が設計用揚圧力に到達するまでの時間として定義。

ステップ1: 揚圧力 [約 25 時間後～*1]

建物・構築物へ作用する揚圧力の上昇（基礎版の耐震性に影響）



ステップ2: 液状化 [約 1 ヶ月後～*2]

周辺地盤の液状化に伴う施設へ作用する土圧等の変化（躯体の耐震性に影響）



ステップ3: 浮上り [約 2 ヶ月後～*3]

周辺地盤の液状化に伴う地下構造物の浮上り（躯体の安定性に影響）

注記*1：本章における評価結果のうち、最も時間余裕の短い原子炉建屋を記載。

*2：本章補足2における評価結果から、いずれの土木構築物においても30日後の水位上昇を考慮しても耐震評価上影響がないことを確認。

*3：0.P.+14.8m 盤のアクセスルートの通行性の評価においては、浸透流解析により得られた2ヵ月後の解析水位分布を包絡するように評価用の水位を設定し、地中構造物の浮上りによる影響が生じないよう必要な対策を講ずる。

図 3-1 地下水位上昇による耐震性への影響

時間余裕の評価に用いる水位上昇評価モデルは、水位評価モデルと同様、安全対策工事として実施する防潮堤の沈下対策などの各種工事やドレーン新設等の工事完了段階における施設配置等を反映する。また、地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行する際の初期水位を高くすることで時間余裕が短めに算定されることから、ドレーン範囲や解析境界における水位、透水係数は水位評価モデルと同様とする。

時間余裕の評価対象施設は原子炉建屋、制御建屋、3号機海水熱交換器建屋とする。

3.3 評価条件

水位上昇評価モデルにおける評価条件を表 3-1 に示す。

表 3-1 水位上昇評価モデルにおける評価条件

| 項目 | 【参考】水位評価モデル | 水位上昇評価モデル |
|-------------|---|--|
| 1. 目的 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 工事完了後に想定される地下水位を評価すること（液状化影響検討対象施設を幅広く抽出するため高めに評価） ・ 耐震設計（各施設） | <ul style="list-style-type: none"> ・ 工事完了後に想定される地下水の流入量を評価すること（設備設計の保守性を確保するため多めに評価） ・ 設備設計（ポンプ・ドレーンの排水能力） |
| 2. 解析コード | <ul style="list-style-type: none"> ・ GETFLOWS Ver. 6. 64. 0. 2 | |
| 3a. 解析領域 | <ul style="list-style-type: none"> ・ O. P. +14. 8m 盤及び O. P. +14. 8m 周辺の法面  <p>凡例</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 盛土・旧表土 ■ 新盤I(青銅) ■ 新盤II(青銅) ■ 新盤III(白銅) ■ 新盤IV(白銅) ■ 構造物 ■ セメント改良土 ■ 重砕コンクリート | |
| 3b. 格子数 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 平面格子数：約 16.7 万 ・ 総格子数：約 770 万 ・ 格子寸法：0.5～2m 程度（構造物近傍は最小 0.5m 程度） | |
| 4. 解析種別 | ・ 定常解析 | ・ 非定常解析*1 |
| 5a. モデル（地形） | ・ 安全対策工事完了段階を反映 | |
| 5b. "（地盤） | ・ 安全対策工事完了段階を反映（施設周辺の地盤改良を含む） | |
| 5c. "（構造物） | ・ 安全対策工事完了段階を反映 | |
| 5d. "（ドレーン） | <ul style="list-style-type: none"> ・ 既設・新設のうち信頼性の確保状況に応じ、信頼性が確保された範囲を管路として扱う（それ以外の範囲は耐久性・耐震性・保守管理性等の確保状況に応じて透水層または周辺地盤として扱う） | <ul style="list-style-type: none"> ・ 初期水位（通常運転時）が高くなるよう、既設・新設のうち耐久性・耐震性・保守管理性等の確保された範囲を管路として扱う（それ以外の範囲については、耐震性等の確保状況に応じて透水層または周辺地盤として扱う） |
| 6. 境界条件 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 水位が高めに評価されるよう設定 — 山側：地表面に水位固定 — 海側：H. W. L. に水位固定 — ドレーン：ドレーン計画高*2 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 地下水位の上昇速度を速めに評価されるよう設定 — 山側：地表面に水位固定 — 海側：H. W. L. に水位固定 — ドレーン：ドレーン計画高*2 |
| 7. 透水係数 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 水位が高めに評価されるよう設定（岩盤 I を試験結果の平均値-1σ） | <ul style="list-style-type: none"> ・ 初期水位が高くなるよう設定（岩盤 I を試験結果の平均値-1σ） |
| 8. 有効間隙率 | ・ 文献値*3 | |
| 9. 粗度係数 | — | |
| 10. ドレーンの状態 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 各エリア 1 系列で設計値を保持するよう設計（水位設定上の余裕として各エリア 1 系列喪失の重畳を考慮） | <ul style="list-style-type: none"> ・ 通常運転時（各エリア両方の井戸で排水）から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行し、その状態が継続することを仮定（時間余裕は設計用揚圧力超過迄の時間、アクセスルート評価では 2 ヶ月後の水位を評価） |

注記*1：水位評価モデル同様、降雨条件を与えないため、蒸発散は考慮していない

注記*2：ドレーンの中心高さ

注記*3：地下水ハンドブック（建設産業調査会），水理公式集（土木学会）等を参照し設定

注) ■は目的に対して妥当な評価とするために水位評価モデルより変更している条件

■は目的に対して妥当な評価とするために水位評価モデルを踏襲している条件

3.4 評価結果

3.4.1 時間余裕

通常の運転状態から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行した場合の地下水位について、図 3-2 は排水機能を失ってから 10 時間後、図 3-3 は 25 時間後の解析結果であり、それぞれ解析水位の分布と初期水位からの差分を示しているが、ドレーンの配置に対応して相対的に水位が低い位置に保持されている範囲において水位上昇が大きく、水位上昇範囲が周囲に拡大していく。

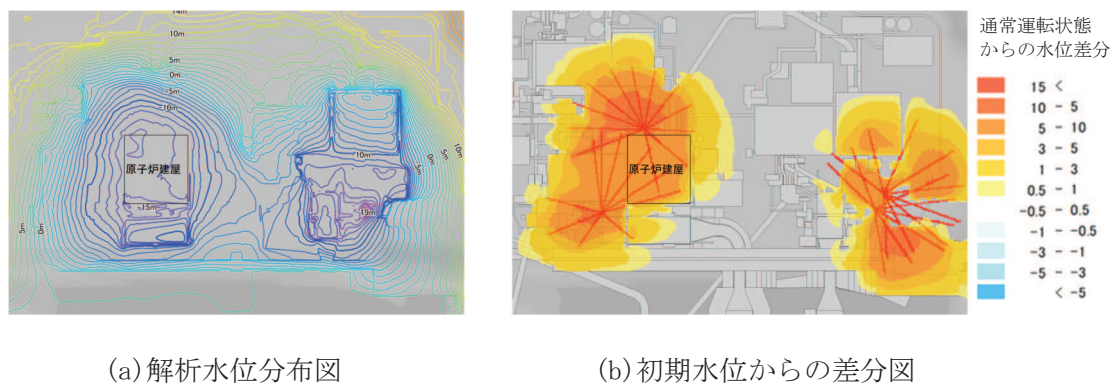


図 3-2 地下水位の分布（排水機能停止後 10 時間経過）

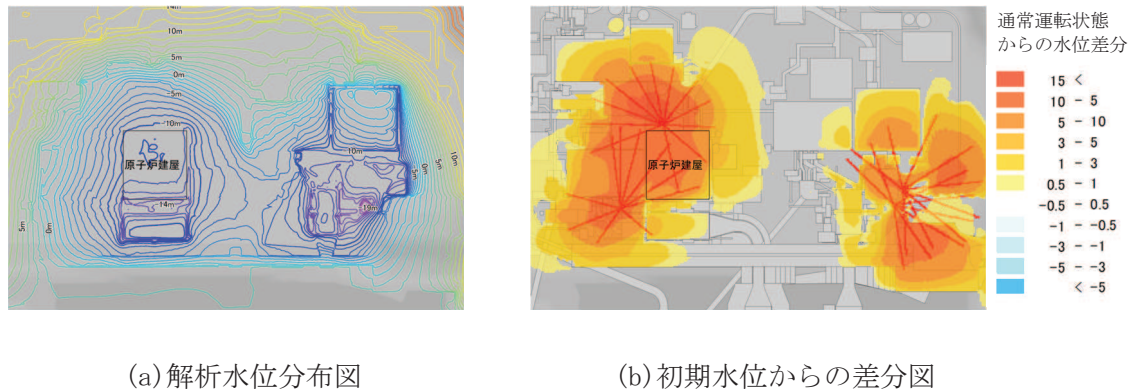
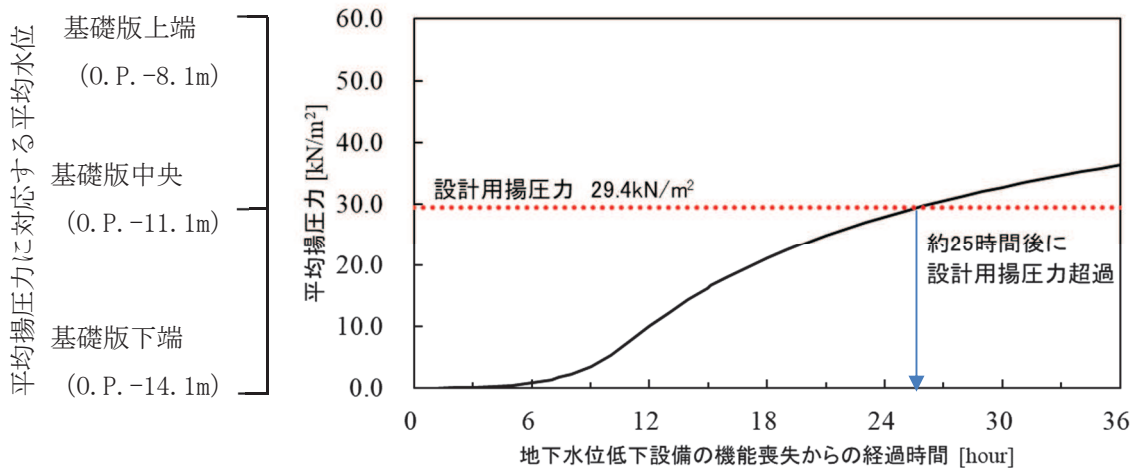


図 3-3 地下水位の分布（排水機能停止後 25 時間経過）

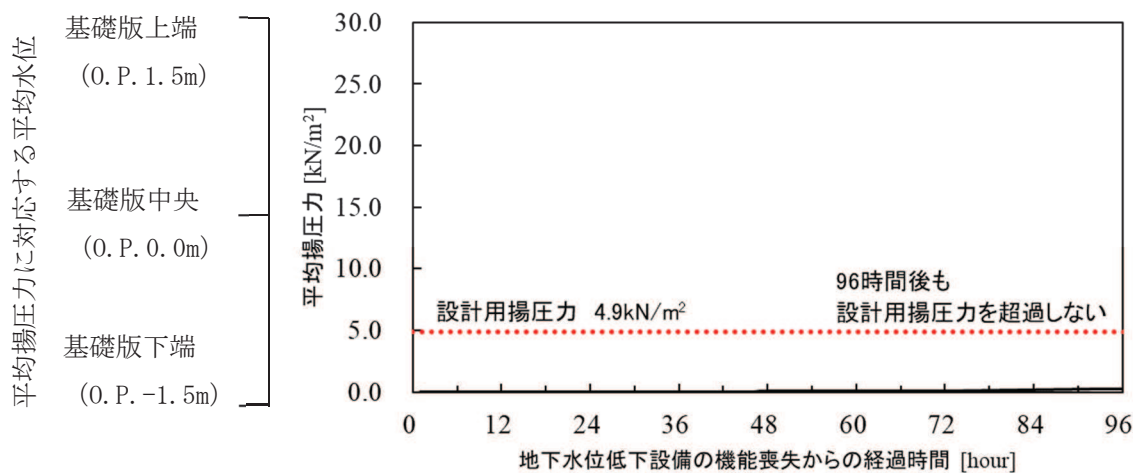
各建屋において、通常の運転状態から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行した場合の平均揚圧力の評価結果を図 3-4 に示す。

解析より得られた平均揚圧力は経時的に漸増する傾向が確認され、設計用揚圧力を上回るまでの時間余裕は原子炉建屋において約 25 時間と最も短く、3 号機海水熱交換器建屋において約 67 時間であった。また、制御建屋は 96 時間後も設計用揚圧力を超過しないとの結果が得られた。

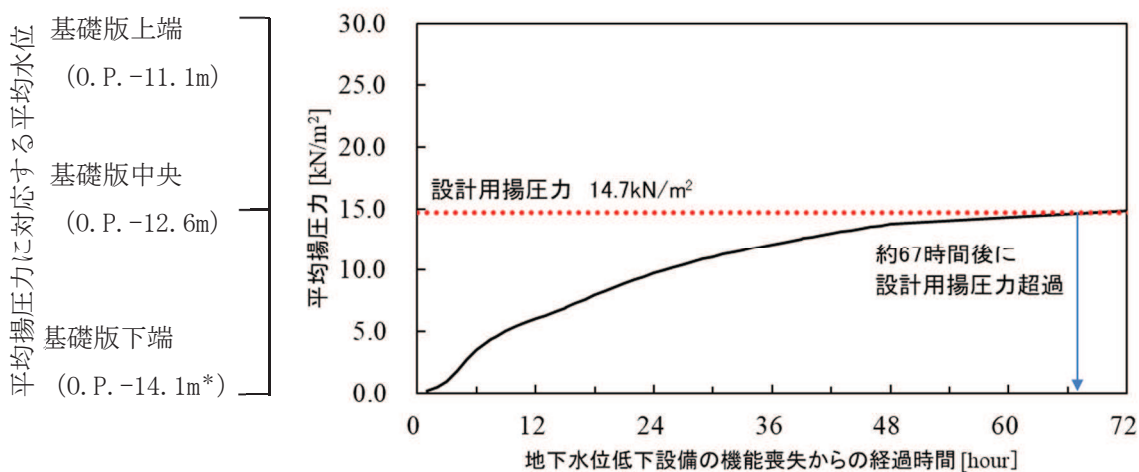
2 号機エリアにおいては、制御建屋は原子炉建屋に対し相対的に設置レベルが高いため、原子炉建屋に対して相対的に長い時間余裕が確保されている。



a. 原子炉建屋



b. 制御建屋



注記* : 基礎版下端は O.P. -12.5m から O.P.-16.25m の平均高さ

c. 3号機海水熱交換器建屋

図 3-4 時間余裕の評価結果

また、時間余裕の評価結果に係る補足事項として、(補足 1) に揚水井戸水位と周辺地盤の水位の関係性、(補足 2) に液状化による影響に対する時間余裕、(補足 3) に地下水位上昇時間評価に影響を与える水理パラメータと取扱いを示す。

以上の検討から、地下水位低下設備の復旧措置に係る検討においては、本項にて算出した時間余裕を参照する。

地下水位低下設備の復旧措置に係る検討については、「VI-2-1-1-別添 1 地下水位低下設備の設計方針」に示す。

(補足1) 揚水井戸水位と周辺地盤の水位の関係性について

(1) エリア内の両方の揚水井戸で排水されない場合

時間余裕の評価において、経過時間0の点は、ドレーン（ヒューム管・鋼管）により集水され、揚水ポンプにより排水される通常の運転状態に対応し、地下水位が維持されている状態（①初期水位）である。その後、何らかの要因によって、エリア内の全ての揚水井戸で排水されない状態に移行した場合（②排水機能を失った状態）、揚水井戸内の水位はいずれもドレーンからの流入量に応じた速度で上昇する。

一方、地盤中の地下水位は地盤中の空隙を満たしながら緩やかに上昇、これに応じて各建屋に作用する平均揚圧力も緩やかに漸増し、設計用揚圧力に到達する（③設計用揚圧力に到達）。

図3-5に揚圧力の推移、図3-6に地盤中の水位および図3-7に揚水井戸を移動する地下水の挙動を示す。

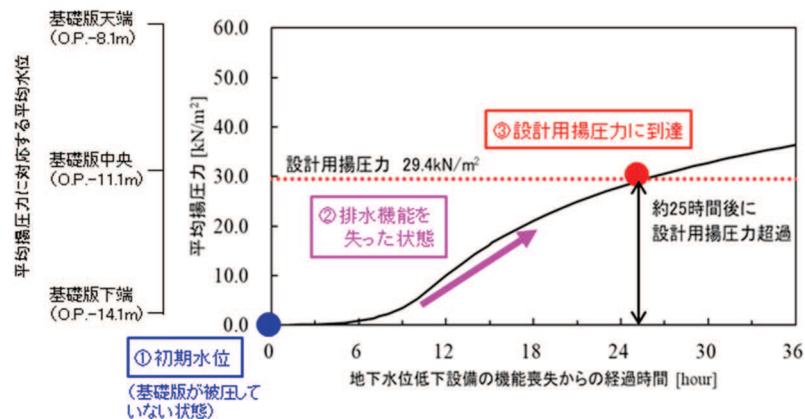


図3-5 建屋に作用する揚圧力の推移（原子炉建屋の例）

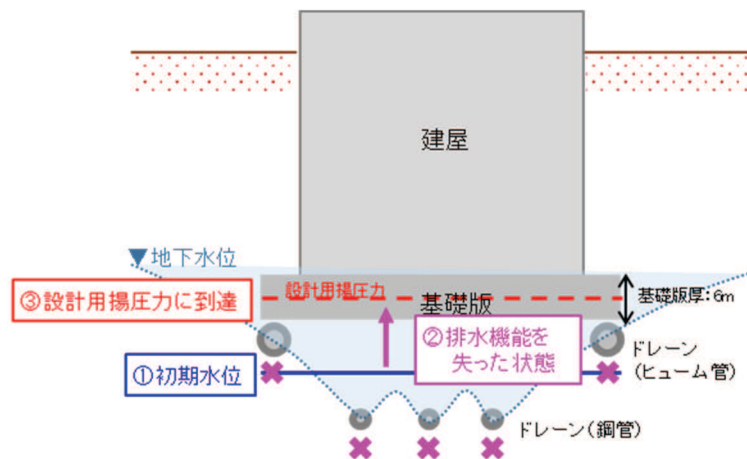


図 3-6 地盤中の地下水位の挙動 (概念図)

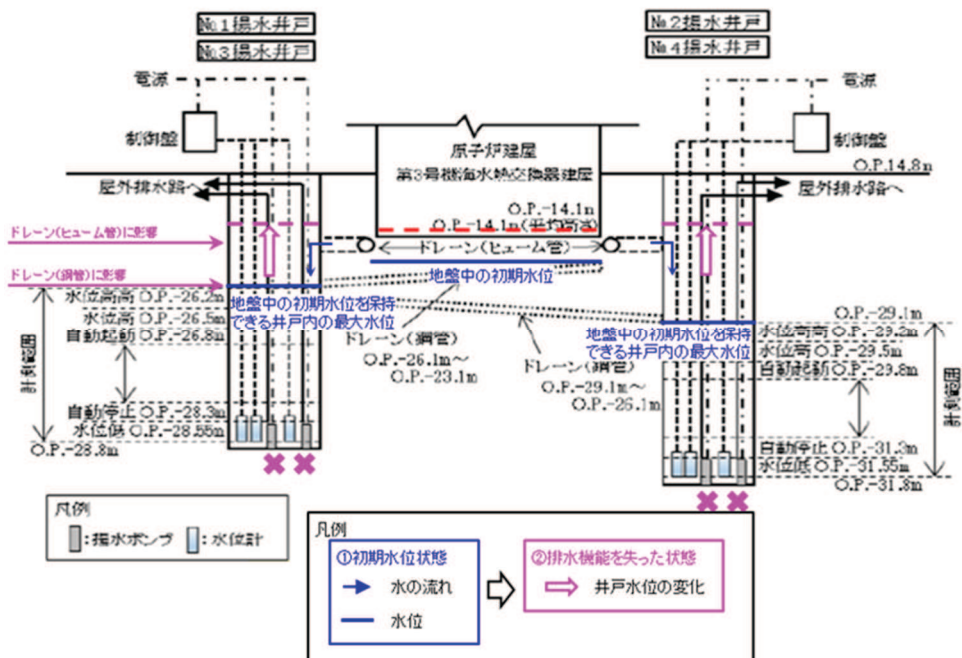


図 3-7 揚水井戸内の水の挙動 (概念図)

(2) エリア内の片方の揚水井戸で排水されない場合

通常運転状態 (①初期水位) から、何らかの要因によりエリア内の片方の揚水井戸で排水されない状態に移行した場合 (②排水機能を失った状態)、当該井戸内の水位はドレーンからの流入量に応じた速度で上昇し、ドレーン (ヒューム管) を介してもう一方の揚水井戸へ流入する。

一方、地盤中の地下水位は通常運転状態より上昇し、建屋に作用する揚圧力も変動 (平均揚圧力は上昇) するが、設計用揚圧力以下に維持される。

図 3-8 に地盤中の水位および図 3-9 に揚水井戸を移動する地下水の挙動を示す。

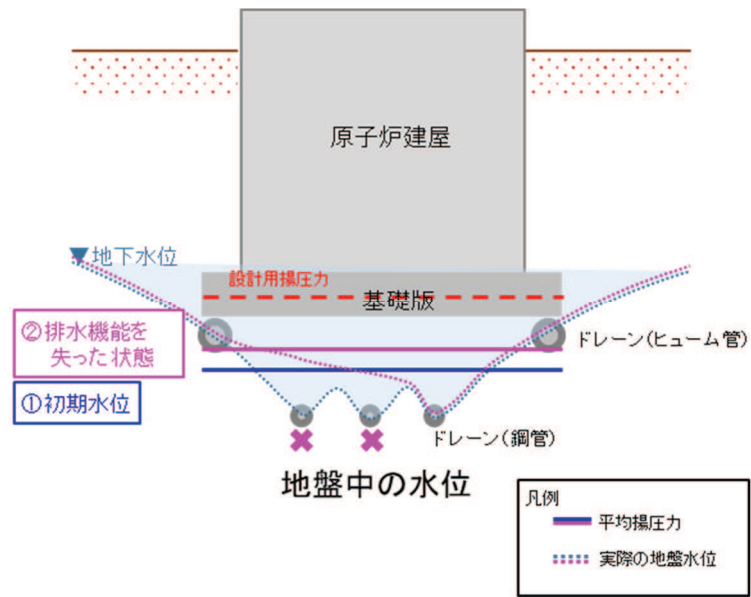


図 3-8 地盤中の地下水位の挙動（概念図）

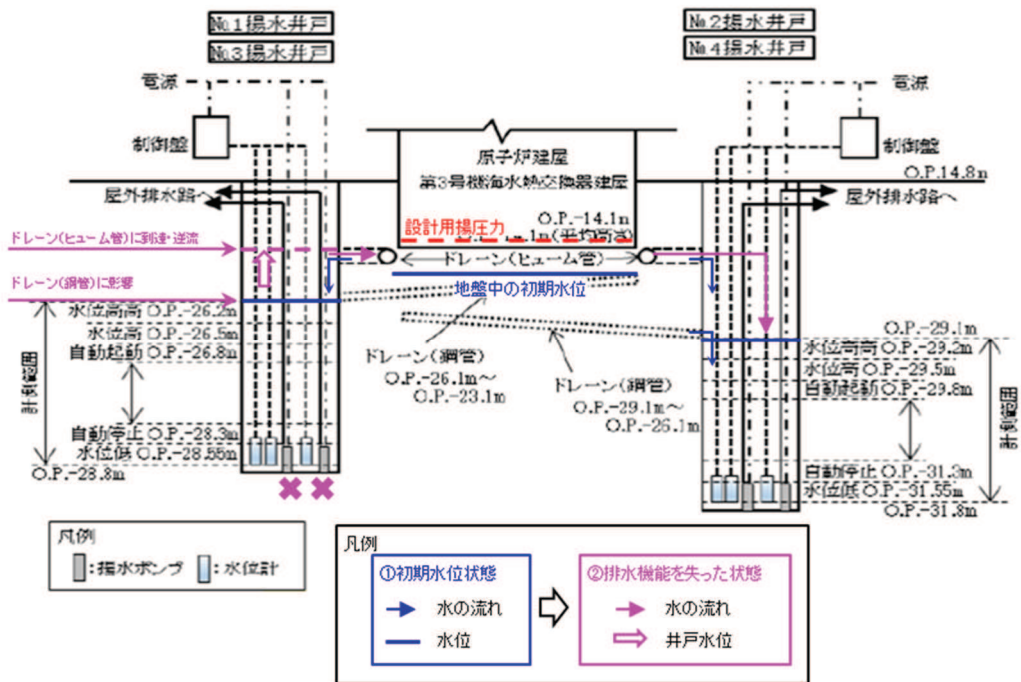


図 3-9 揚水井戸内の水の挙動（概念図）

(補足2) 液状化による影響に対する時間余裕について

地下水位低下設備の復旧措置に係る検討において参照する時間余裕について、原子炉建屋等の揚圧力影響に着目し設定することの妥当性として、周辺の土木構造物等へ液状化による影響が生じうるまでの時間を検討した。

ここでは、通常の運転状態から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行した場合に、土木構造物の設計用地下水位に到達するまでの時間を評価した。(土木構造物は岩盤中に設置される施設及び地表面又は朔望平均満潮位に設計用地下水位を設定している施設を除く)

評価結果を表 3-2 に示す。

この結果から、土木構造物においては、地盤の液状化による影響が生じうるまでに少なくとも1ヵ月以上の時間的な離隔があり、揚圧力に着目した時間余裕に比べて大きいことを確認した。

表 3-2 水位上昇と土木構造物の設計用地下水位との関係 (1 / 4)

| 施設名称 | | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (初期水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (7日後の水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (30日後の水位) | 備考 |
|------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----|
| 原子炉機器 冷却海水 配管ダクト | 横断 | -8.8m | -3.9m | -1.1m | |
| 排気筒 連絡ダクト | 横断 (断面①) | -25.6m | -12.8m | -8.9m | |
| | 横断 (断面②) | -24.4m | -10.8m | -7.7m | |
| | 横断 (断面③) | -23.1m | -9.9m | -7.0m | |
| 軽油タンク連絡ダクト | | -8.3m | -5.4m | -3.1m | |
| 取水路 | 曲がり部 南北 | -7.2m | -6.8m | -5.9m | |
| | 曲がり部 東西 | -5.6m | -4.2m | -2.7m | |
| | 漸拡部 東西 | -5.9m | -3.8m | -1.7m | |

表 3-2 水位上昇と土木構造物の設計用地下水位との関係 (2 / 4)

| 施設名称 | | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (初期水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (7日後の水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (30日後の水位) | 備考 |
|-------------------|----|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----|
| 海水 ポンプ室 | 縦断 | -8.1m | -4.2m | -2.7m | |
| | 横断 | -3.3m | -2.0m | -1.0m | |
| 軽油 タンク室 | 南北 | -11.6m | -5.4m | -3.1m | |
| | 東西 | -5.8m | -4.1m | -2.7m | |
| 軽油 タンク室 (H) | 南北 | -6.1m | -3.8m | -1.5m | |
| | 東西 | -5.8m | -4.1m | -2.7m | |
| 復水貯蔵 タンク基礎 | 南北 | -11.6m | -5.4m | -3.1m | |
| | 東西 | -8.3m | -5.4m | -3.1m | |

表 3-2 水位上昇と土木構造物の設計用地下水位との関係 (3 / 4)

| 施設名称 | | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (初期水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (7日後の水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (30日後の水位) | 備考 |
|-----------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| 防潮堤 (鋼管式鉛直壁) | 横断 (一般部①) | -16.0m | -7.5m | -5.2m | |
| | 横断 (一般部②) | -5.0m | -4.7m | -4.3m | |
| | 横断 (一般部③) | -9.5m | -8.7m | -7.3m | |
| | 横断 (一般部④) | -21.0m | -14.6m | -13.0 | |
| 防潮堤 (盛土堤防) | 横断① | -14.9m | -8.9m | -7.8m | |
| 防潮壁 | 第 2 号機 海水ポンプ室 | -3.2m | -1.9m | 0.2m | 液状化による影響が及ばないよ う設計用地下水位+1.0mの範囲 を地盤改良予定 |
| | 第 2 号機 放水立坑 | -10.8m | -4.7m | -2.8m | |
| | 第 3 号機 海水ポンプ室 | -11.1m | -9.9m | -8.0m | |
| | 第 3 号機 放水立坑 | -2.8m | -2.4m | -1.8m | |

表 3-2 水位上昇と土木構造物の設計用地下水位との関係（4 / 4）

| 施設名称 | | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (初期水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (7日後の水位) | 設計用地下水位 と解析水位の差分 (30日後の水位) | 備考 |
|--------------------------------------|----|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 第 3 号機 海水ポンプ室 | 縦断 | -3.1m | -2.1m | -1.0m | |
| | 横断 | -6.8m | -4.1m | -1.6m | |
| 揚水井戸 (第 3 号機海水 ポンプ室防潮壁 区画内) | 南北 | -2.3m | -1.8m | -0.3m | |
| | 東西 | -3.0m | -1.8m | 0.9m | 液状化による影響が及ばないよう設計用地下水位+1.0mの範囲を地盤改良予定 |
| 第 3 号機補機冷却海水系 放水ピット | | -2.6m | -1.7m | -0.4m | |

(補足3) 地下水位上昇時間評価に影響を与える水理パラメータと取扱い

地下水位上昇時間評価については、下記式にして示される地盤の浸透速度に依存する。よって、浸透速度に影響を与える主な要因は、透水係数と有効間隙率の2つである。

$$V_i = V / n_e$$

$$V = k \cdot i$$

ここに、

V_i : 地盤の浸透流速 (実流速) (m^3/s)

V : 地盤の浸透流速 (ダルシー流速) (m/s)

n_e : 有効間隙率

k : 透水係数

i : 動水勾配

透水係数については、水位評価用モデル同様に岩盤 I を試験結果の平均値-1 σ に設定することとしており、通常の運転状態における初期水位が高くなることでその保守性を確保している。その妥当性については補足 600-1 (参考資料 4) に示している。

有効間隙率については、文献等を参照し設定しているが、設定値とその根拠について表 3-3 に示す。また、盛土については現場粒度試験に基づく間隙率を、岩盤については試掘坑内で実施した岩石試験結果を表 3-4 に示す。地下水位上昇時間の評価に用いる有効間隙率については、試験値等より小さな値を設定しており、水位上昇時間を短く算定する安全側の設定となっていると判断される。

以上より、地下水位上昇時間評価に影響を及ぼす要因に対して、いずれも保守側 (水位上昇時間を短く算定) の設定となっている。

表 3-3 水位上昇評価モデルに用いた有効間隙率の設定根拠

| 地層 | | 設定値 | 設定根拠 |
|--------------|-------|------|-----------------------------|
| 盛土・旧表土 | | 0.15 | 水理公式集(土木学会に基づき礫質土砂の下限値) |
| 岩盤 (岩盤 I) | 孤崎部層 | 0.05 | 地下水ハンドブックに基づき砂岩及び頁岩の最大値の中間値 |
| | 牧の浜部層 | 0.05 | |

表 3-4 有効間隙率に係る試験データ

| 地層 | | 試験結果等の 平均値 | 備考 |
|--------------|-------|--------------------------|--------------------------------------|
| 盛土・旧表土 | | 0.28 | 現場粒度試験に基づく推定間隙率 |
| 岩盤 (岩盤 I) | 孤崎部層 | 砂岩 : 0.067 頁岩 : 0.057 | 試掘坑内で実施した岩石試験結果 (C _M 級岩盤) |
| | 牧の浜部層 | 砂岩 : 0.073 頁岩 : 0.099 | 試掘坑内で実施した岩石試験結果 (C _M 級岩盤) |

3.4.2 地下水位低下設備の機能を考慮しない状態が一定期間継続することを仮定した評価

地盤の液状化による影響として、地中構造物の浮上りによるアクセスルートの通行性への影響が考えられる。

地盤の液状化によるアクセスルートへの影響については、設置変更許可の方針（次頁参照）と同様に、通常の運転状態から地下水位低下設備の機能を考慮しない状態に移行することを仮定し、一定の期間（2ヵ月間。外部からの支援が可能となるまでの一定期間（7日間）を超え、長期に及ぶ場合を想定し設定）が経過した後の地下水位を浸透流解析（非定常解析）により評価し、この水位を参照して地中構造物の浮上りを評価の上、アクセスルートの通行性を確保する設計としている。

アクセスルートの評価において参照する予測解析結果を図3-10に示す。

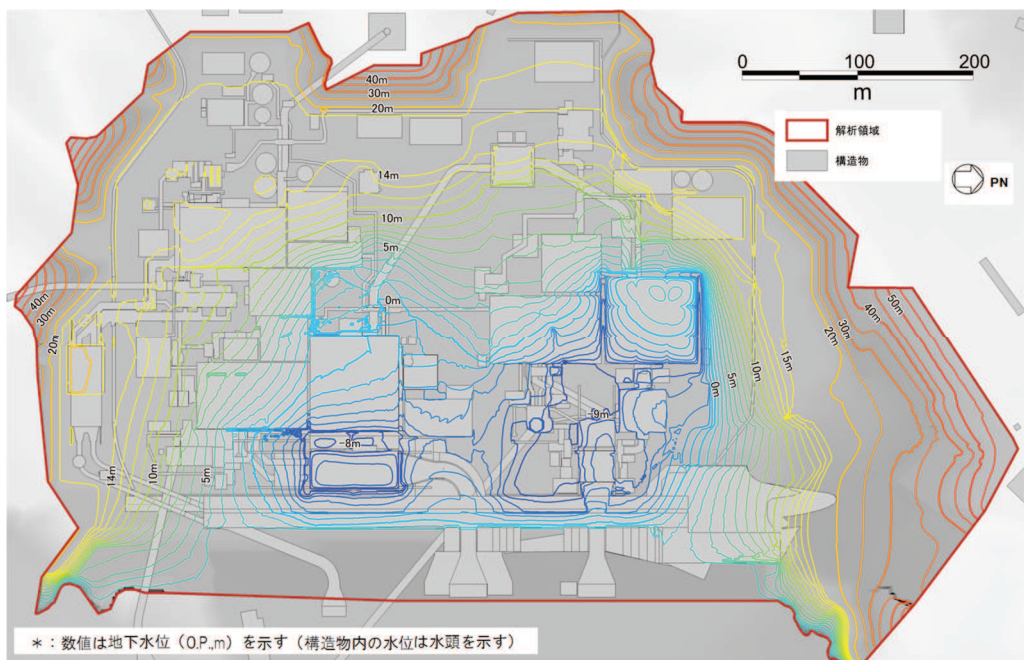


図3-10 アクセスルートの評価において参照する地下水位分布（O.P., m）

＜参考＞ 設置変更許可におけるアクセスルートの機能維持の方針（まとめ資料）

アクセスルートは、地震時の液状化に伴う地下構造物の浮き上がり*¹の影響を受けることなく通行性を確保する設計とする。アクセスルートの機能維持に係る配慮事項を下表及び以下に示す。

- ・ 地下水位低下設備の重要安全施設への影響に鑑み、安全機能の重要度分類を踏まえて講ずる設計上及び機能喪失時の配慮*²により、地下水位は一定の範囲に保持される。このことから、地下水位低下設備の機能を考慮した設計用地下水位を設定する区間においては、地震時の液状化に伴う地下構造物の浮き上がりが発生せず、アクセスルートの通行性は確保される。
- ・ また、地下水位低下設備の機能喪失を想定しても、地震時の液状化に伴う地下構造物の浮き上がりに対してアクセスルートの通行性を一定期間確保する設計*³、*⁴とする。
- ・ 地下水位低下設備が機能喪失した場合に復旧作業等を行うため、必要な資機材として、可搬型設備及び予備品を確保する。
- ・ 地下水位低下設備の機能喪失が外部からの支援が可能となるまでの一定期間を超え長期に及ぶ場合においては、予め整備する手順と体制に従い、外部支援等によりアクセスルートの通行性を確保する。

注記*¹：アクセスルートの地下構造物の浮き上がり評価において用いる地下水位は、地下水位低下設備の機能を考慮した水位又は地表面とする。

*²：機能喪失時の配慮については、第Ⅱ編で詳述する。

*³：地下水位低下設備が機能喪失した場合を想定して、工事計画認可段階で機能喪失に伴う地下水位の上昇程度を評価した上で、地震時の液状化に伴う地下構造物の浮き上がりによるアクセスルートへの影響について評価し、アクセスルートの通行性を一定期間確保する設計とする。この結果、アクセスルートの通行性が一定期間確保できない場合は、地盤改良等の対策を講ずる。

*⁴：外部からの支援が可能となるまでの期間を踏まえ、一定期間として2か月程度を確保することを目安に、工認段階における詳細評価も踏まえて地盤改良等の対策要否を判断する。

表 アクセスルートの機能維持に係る配慮事項

| 配慮事項 | 通常運転状態 | 設計基準事故等状態 | 重大事故等状態 |
|----------------------|--|-----------|---------|
| 地下水位低下設備に対する設計上の配慮 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 安全機能の重要度分類におけるクラス1相当の配慮（外部事象等への配慮、非常用交流電源設備に接続等） ・ 耐震性の確保（S_s機能維持*） ・ 常設代替交流電源設備（GTG）に接続 | | |
| 地下水位低下設備に対する機能喪失時の配慮 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 可搬型設備及び予備品による復旧 | | |
| アクセスルートに対する配慮 | <ul style="list-style-type: none"> ・ アクセスルートの通行性が一定期間確保できない場合は、地盤改良等の対策 ・ 外部支援等の活用による通行性の確保 | | |

注記 *：基準地震動 S_s に対し機能維持することを確認する。

4. 地下水流入量と設備の排水能力

4.1 地下水流入量と排水能力（揚水ポンプ）

各井戸に設置する揚水ポンプの諸元を表 4-1 に示す。揚水ポンプの排水可能量は定格吐出量 9000m³/日（0.104m³/s）であり、2. にて評価した地下水流入量を包絡する。

表 4-1 地下水流入量と排水能力（揚水ポンプ）

| 系列 | 井戸 | 地下水流入量 (m ³ /日) | 吐出量 (m ³ /日) | 全揚程 (m) | 井戸深さ (m) | 備考 |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|-------------|-------------------|
| 1・2号機 系列 | R/B 西側 (No. 2 揚水井戸) | 8078 | 9000 | 52 | 47.2 | 1 台当たり (全 2 台) |
| | R/B 東側 (No. 1 揚水井戸) | | 9000 | 52 | 44.2 | 同上 |
| | 小計 | | 18000 | — | — | — |
| 3号機 系列 | 3号機 Hx/B 北側 (No. 4 揚水井戸) | 7046 | 9000 | 52 | 47.2 | 同上 |
| | 3号機 Hx/B 東側 (No. 3 揚水井戸) | | 9000 | 52 | 44.2 | 同上 |
| | 小計 | — | 18000 | — | — | — |
| 合計 | | — | 36000 | — | — | — |

4.2 地下水流入量と排水能力（ドレーン）

既設のヒューム管（φ1050mm, 800mm, 500mm）及び新設の鋼管（φ145.2mm）を対象として、自由水面を有する管路流れとして排水能力を評価し、三次元浸透流解析により得られる最大流入量を流下させる能力を有しているかを確認する。

ドレーンにおける排水可能量は、表 4-2 のとおり、自由水面を有する管路流れの評価として、以下の Manning 式により算定する。

各ドレーンの排水可能量は、表 4-3 のとおり、いずれも地下水流入量を上回っている。

$$Q = V \cdot A$$

$$V = 1/n \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

ここに、

Q：排水可能量（m³/s）

V：平均流速（m/s）

A：ドレーン流水断面積（m²）

n：Manning の粗度係数

R：径深 = A/S（m）（S：潤辺（m））

I：勾配

表 4-2 ドレーンの断面諸元及び排水可能量

| 集水 エリア | 仕様 | 断面積*1 [m ²] | 径深*1 [m] | 粗度 係数*2 | 勾配 [%] | 流速 [m/s] | 流量 (排水可能量) | |
|--------------|------------------|----------------------------|-------------|------------|-----------|-------------|---------------------|---------------------|
| | | | | | | | [m ³ /s] | [m ³ /日] |
| 1・2号機 エリア | ヒューム管 φ1050mm | 0.697 | 0.317 | 0.013 | 0.1 以上 | 1.130 | 0.787 | 67996 |
| | 鋼管 φ145.2mm | 0.014 | 0.044 | 0.012 | 1以上 | 1.039 | 0.014 | 1209 |
| 3号機 エリア | ヒューム管 φ800mm | 0.404 | 0.241 | 0.013 | 0.1 以上 | 0.943 | 0.381 | 32918 |
| | ヒューム管 φ500mm | 0.158 | 0.151 | 0.013 | 0.1 以上 | 0.689 | 0.109 | 9418 |
| | 鋼管 φ145.2mm | 0.014 | 0.044 | 0.012 | 1以上 | 1.039 | 0.014 | 1209 |

注記 *1: 有効水深を 3/4 水深 (H=0.75D) として計算

*2: 「火力原子力発電所土木構造物の設計—増補改訂版— ((社) 電力土木技術協会編) 」を参照し、ヒューム管はコンクリート管: 0.013, 鋼管はライニングした水路 (鋼, 塗装なし, 平滑): 0.012 に基づき設定

表 4-3 地下水流入量と排水能力 (ドレーン)

| 集水 エリア | 仕様 | 地下水流入量 [m ³ /日] | 流量 (排水可能量) [m ³ /日] |
|--------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1・2号機 エリア | ヒューム管 φ1050mm | 6633 | 67996 |
| | 鋼管 φ145.2mm | 182*1 | 1209 |
| 3号機 エリア | ヒューム管 φ800mm | 5449 | 32918 |
| | ヒューム管 φ500mm | 5449 | 9418 |
| | 鋼管 φ145.2mm | 632*2 | 1209 |

注記 *1: 2号機原子炉建屋下ドレーン (全 22 本) の 1 本当たりの平均流入量 (1995m³/日 ÷ 22 本 ÷ 91 m³/日・本) に、ドレーン単位での流入量のばらつきを考慮して、2 倍とする。

*2: 3号機海水熱交換器建屋下ドレーン (全 17 本) の 1 本当たりの平均流入量 (5363m³/日 ÷ 17 本 ÷ 316 m³/日・本) に、ドレーン単位での流入量のばらつきを考慮して、2 倍とする。

4.3 排水能力の妥当性について

各エリアにおける揚水ポンプ及びドレーンの設計上の地下水流入量と、前頁で設定した排水能力との関係を表 4-4 に整理した。

揚水ポンプへの地下水流入量は、妥当性が確認されている水位評価モデルをベースに、地下水流入量の観点から保守的な透水係数・ドレーン範囲を設定した地下水流入量評価モデルにて算出しており、得られた地下水流入量を上回る排水可能量（ポンプ能力）が設定されている。

なお、地下水流入量は各集水エリア単位の値であるが、各集水エリアには揚水井戸を 2 箇所設置し、各揚水井戸には各エリアへの地下水流入量を排水可能な揚水ポンプを 2 台常設する設計としており、各井戸の揚水ポンプ 1 台を 2 系列同時に起動することも可能な設計であることから、設計上は十分な余裕を有する。

また、ドレーンについては流入量に対して排水可能量が十分大きいことを確認している。

以上の評価から、揚水ポンプ及びドレーンは想定される地下水流入量に対して余裕のある設備構成であることを確認した。

表 4-4 地下水流入量と排水可能量の比較結果

| 集水 エリア | 項目 | 地下水流入量 Q ₁ (m ³ /日) | 排水可能量 Q ₂ (m ³ /日) | 安全率 Q ₂ /Q ₁ | 備考 |
|--------------|---------------------|--|---|---------------------------------------|-----------------------|
| 1・2号機 エリア | 揚水ポンプ | 8078 | 9000 * ¹ (18000) | 1.11 * ¹ (2.22) | ケース 1 (エリア①+②) |
| | ドレーン (φ 1050mm) | 6633 | 67996 | 10.25 | ケース 2 (エリア①) |
| | ドレーン (φ 145.2mm) | 182* ² | 1209 | 6.64 | ケース 1 (エリア①) |
| 3号機 エリア | 揚水ポンプ | 7046 | 9000 * ¹ (18000) | 1.27 * ¹ (2.54) | ケース 1 (エリア③+④) |
| | ドレーン (φ 800mm) | 5449 | 32918 | 6.04 | ケース 2 (エリア③) |
| | ドレーン (φ 500mm) | | 9418 | 1.73 | ケース 2 (エリア③) |
| | ドレーン (φ 145.2mm) | 632* ³ | 1209 | 1.91 | ケース 1 (エリア④) |
| 合計 | 揚水ポンプ | 15124 | 18000 * ¹ (36000) | 1.19 (2.38) | ケース 1 (エリア①+②+③+④) |

注記 *1: 各エリアに設置した揚水ポンプ 4 台 (2 台/井戸×2 箇所) のうち 1 台のみ稼働時 (3 台待機) の値。

() 内は各井戸 1 台ずつ稼働時 (各井戸 1 台稼働, 1 台待機) の値。

*2: 2号機原子炉建屋下ドレーン (全 22 本) の 1 本当たりの平均流入量 (1995m³/日÷22 本≒91 m³/日・本) に、ドレーン単位での流入量のばらつきを考慮して、2 倍とする。

*3: 3号機海水熱交換器建屋下ドレーン (全 17 本) の 1 本当たりの平均流入量 (5363m³/日÷17 本≒316 m³/日・本) に、ドレーン単位での流入量のばらつきを考慮して、2 倍とする。