

【凍土遮水壁】  
リチャージ設備の性能と運用に関する解析的検討

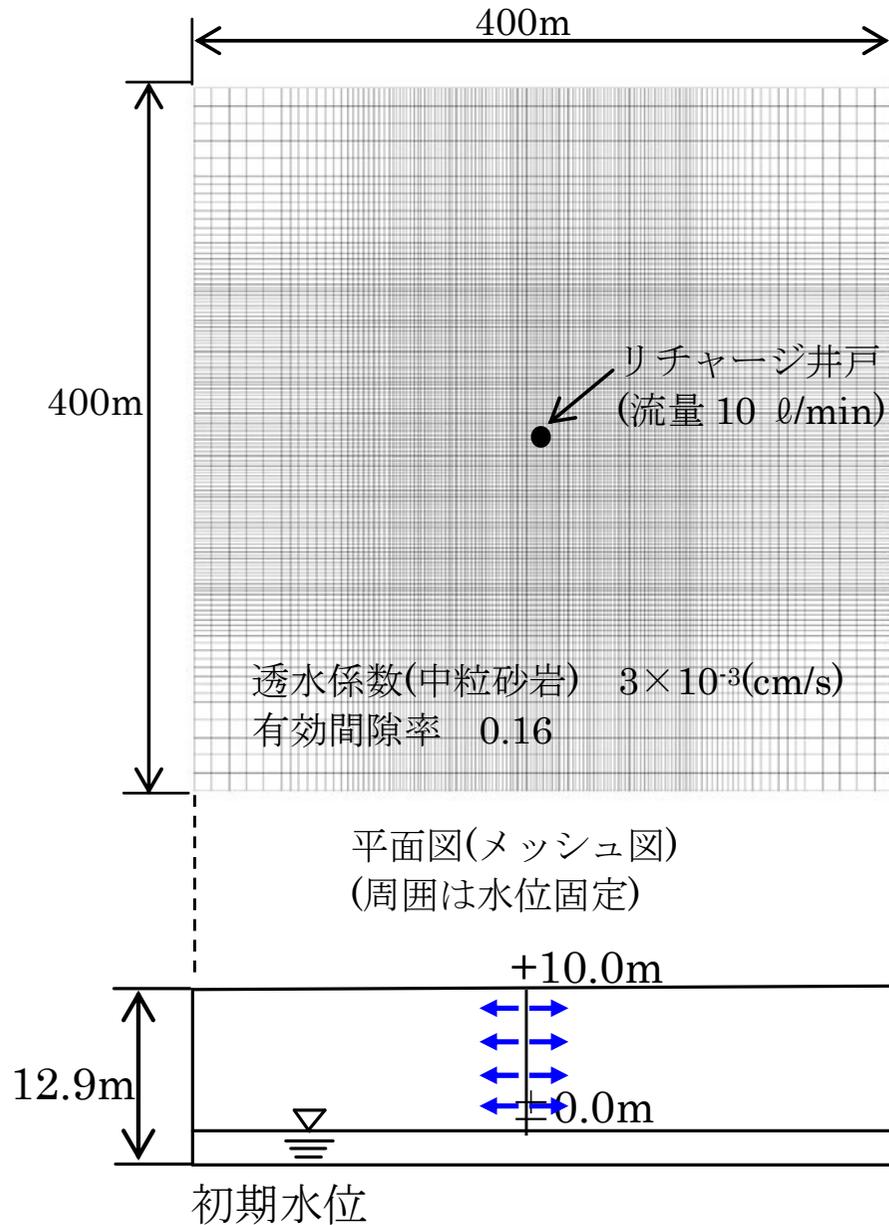
2014年3月18日  
鹿島建設株式会社  
東京電力株式会社

---

# 1. リチャージの性能

## (1) 水位上昇効果について (単井)

# リチャージの性能—水位上昇効果（単井）について（解析条件）—



初期状態での水位と帯水層厚さ

## ■ 解析目的

- 注水井（単井）からの注水による水位上昇効果の確認

## ■ 解析手法

- 準3次元浸透流解析プログラム（GWAP）による

非定常浸透流解析〔GWAPについて（P28,29）参照〕

## ■ 解析領域

- 影響半径Rが165m\*であることから400m四方とした。

$$* : R = 3000s\sqrt{k} \quad (\text{ジハルトの式})$$

s:水位差(m)  $\Rightarrow 10\text{m}$

k:透水係数(m/s)  $\Rightarrow 3 \times 10^{-3}\text{cm/s}$

## ■ 透水係数： $3 \times 10^{-3}\text{cm/s}$

3次元浸透流解析結果（汚染水処理対策委員会にて報告）における“中粒砂岩”の透水係数より設定。

## ■ 有効間隙率：0.16

3次元浸透流解析結果（汚染水処理対策委員会にて報告）における地下水位低下速度に基づき、本解析手法によって感度解析を行って同定した。

# リチャージの性能—水位上昇効果（単井）について—

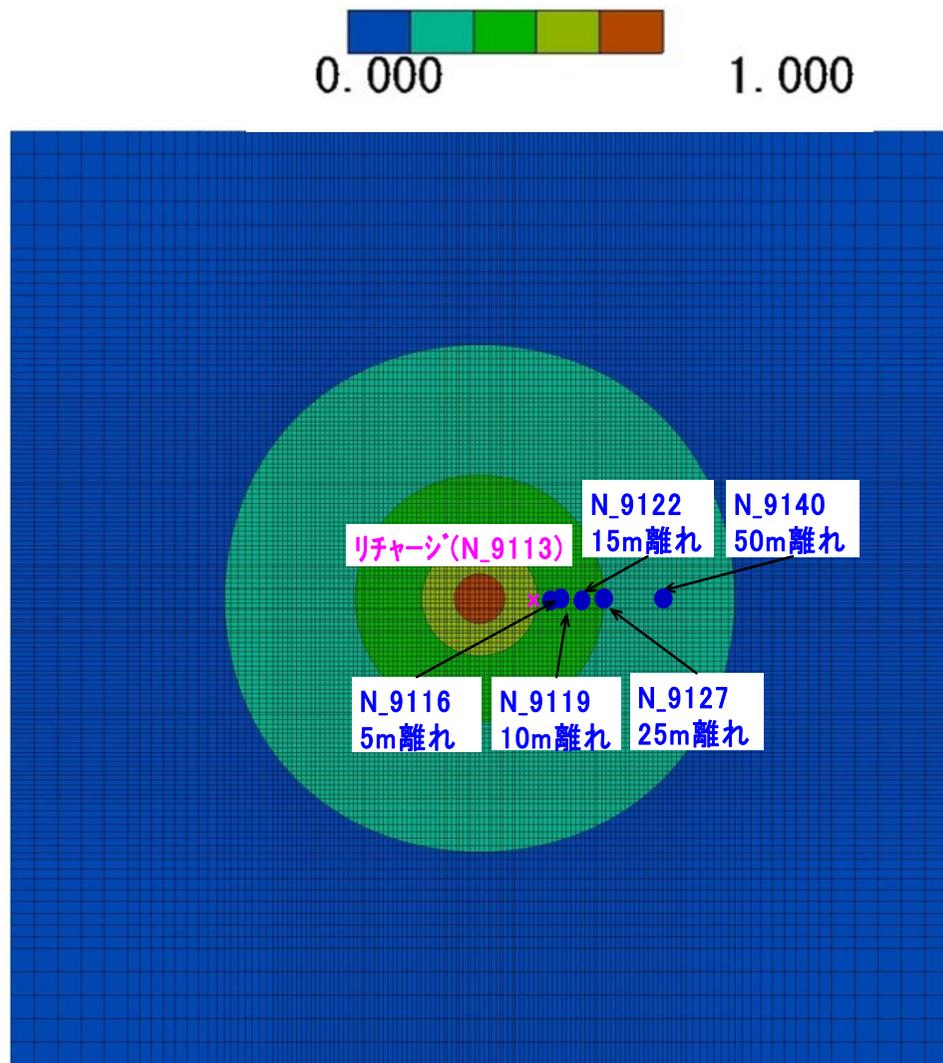


図 水位上昇量分布（100日後）

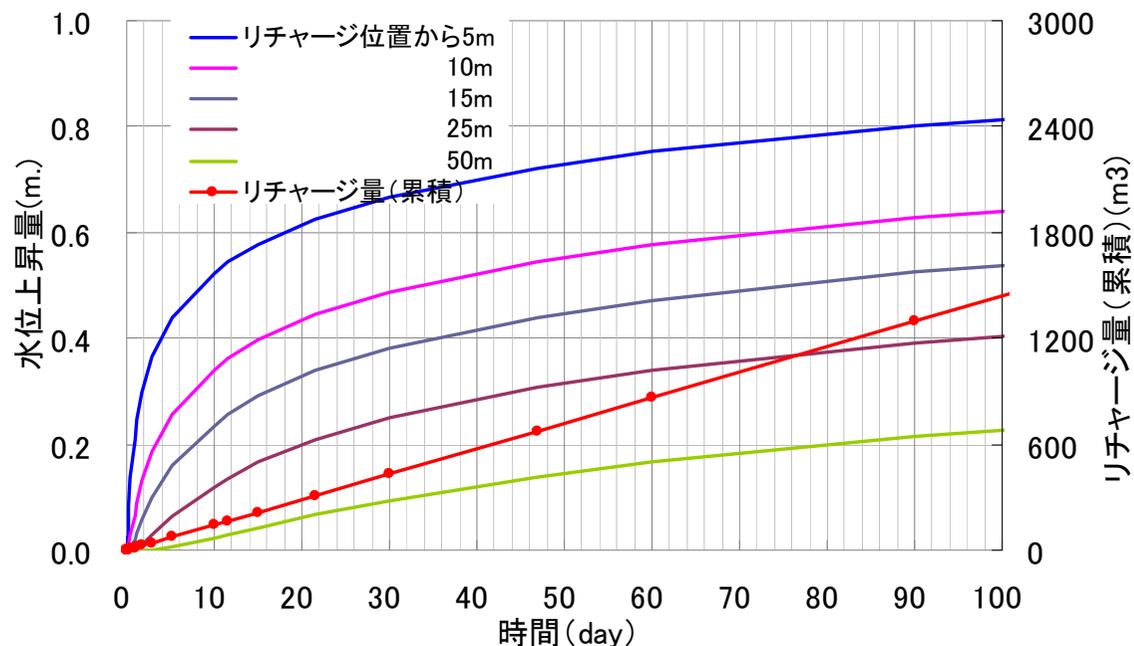
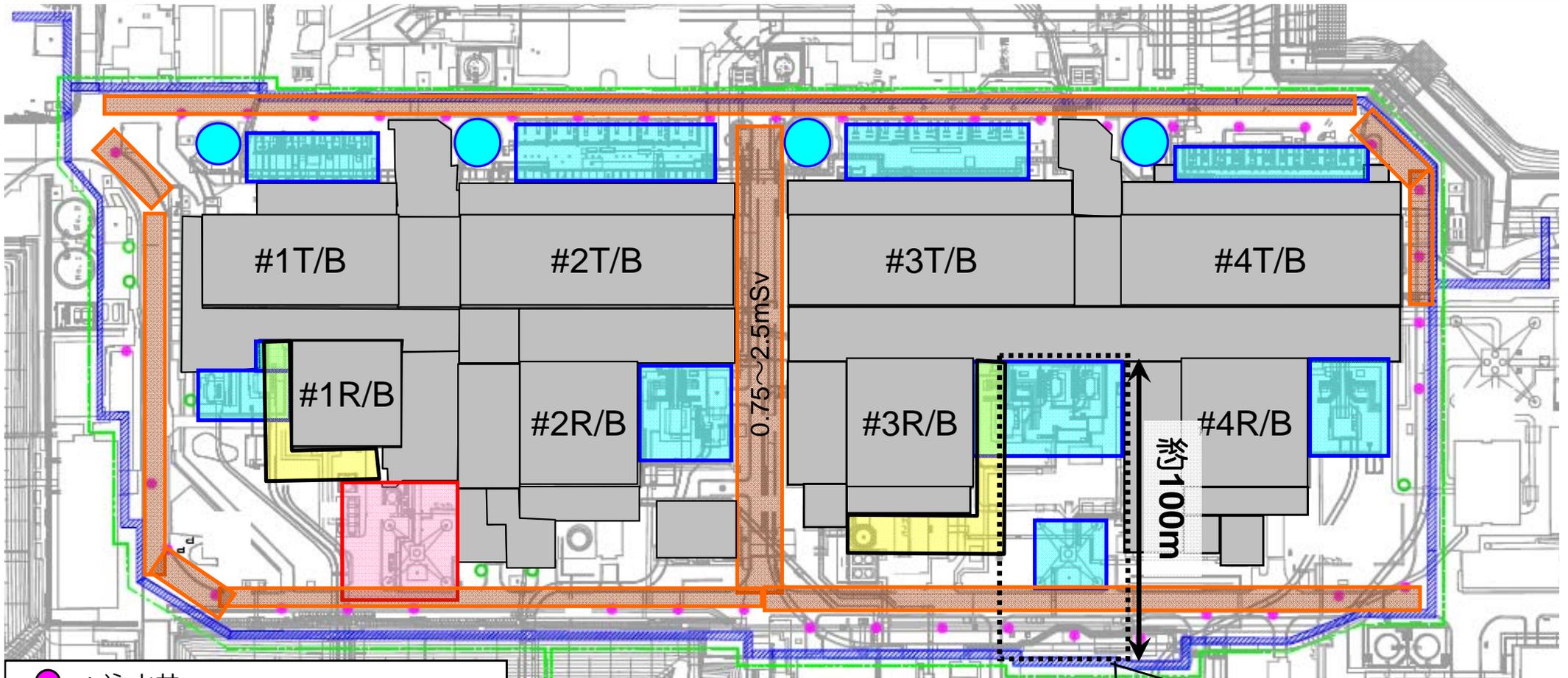


図 リチャージ井からの距離と水位上昇量の経時変化

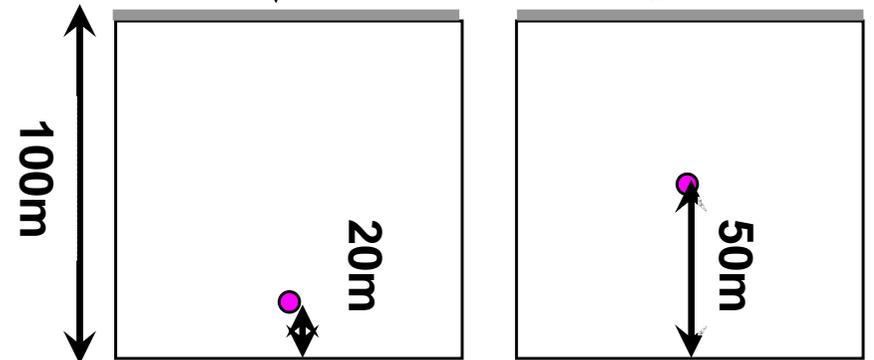
- 単井からのリチャージでは、1孔当たり10L/min（14.4m<sup>3</sup>/日）の注水により、リチャージ井から半径5、10m程度であれば、10日でそれぞれ50cm、30cm程度水位上昇する。
- 単純化のため、下記条件となる。
  - ・ 建屋への流入を考慮していない。  
（流入考慮の場合、上昇速度は小さくなる。）
  - ・ 遮水壁による囲まれ効果は見込まれない。  
（囲まれを考慮した場合、上昇速度は大きくなる。）
 そのため、実際の水位上昇速度は、上図とは異なる。

# リチャージの性能—水位上昇効果（単井）について2（解析条件） —

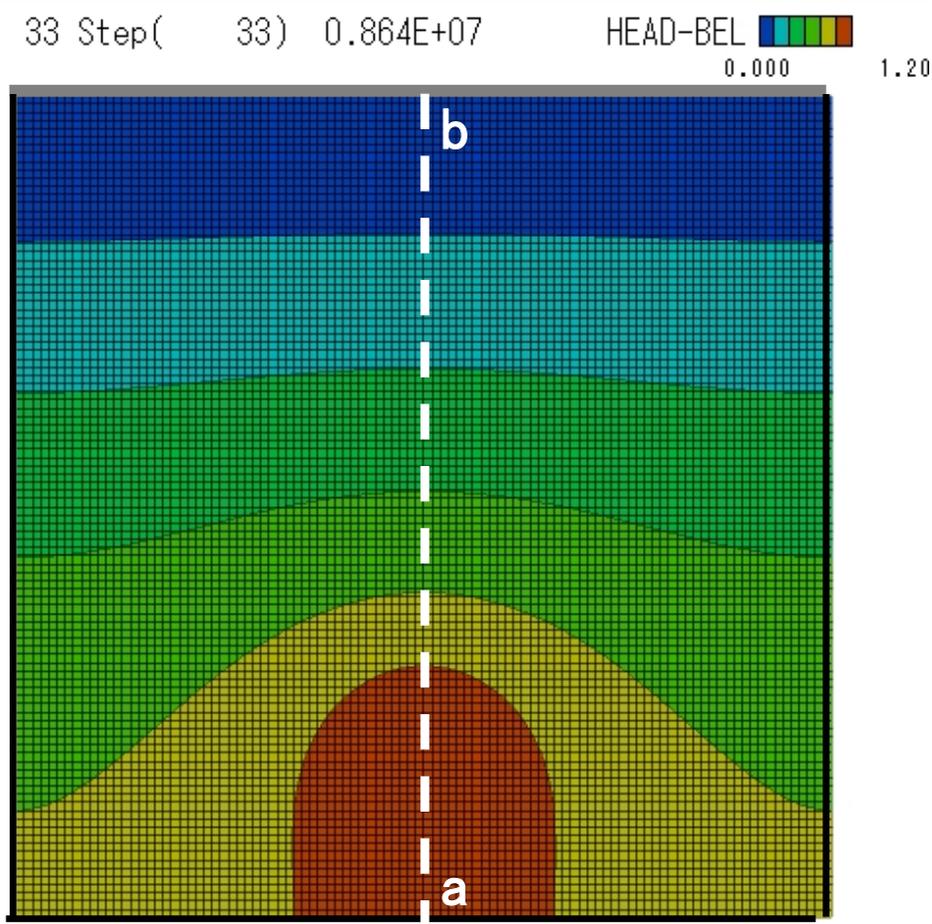
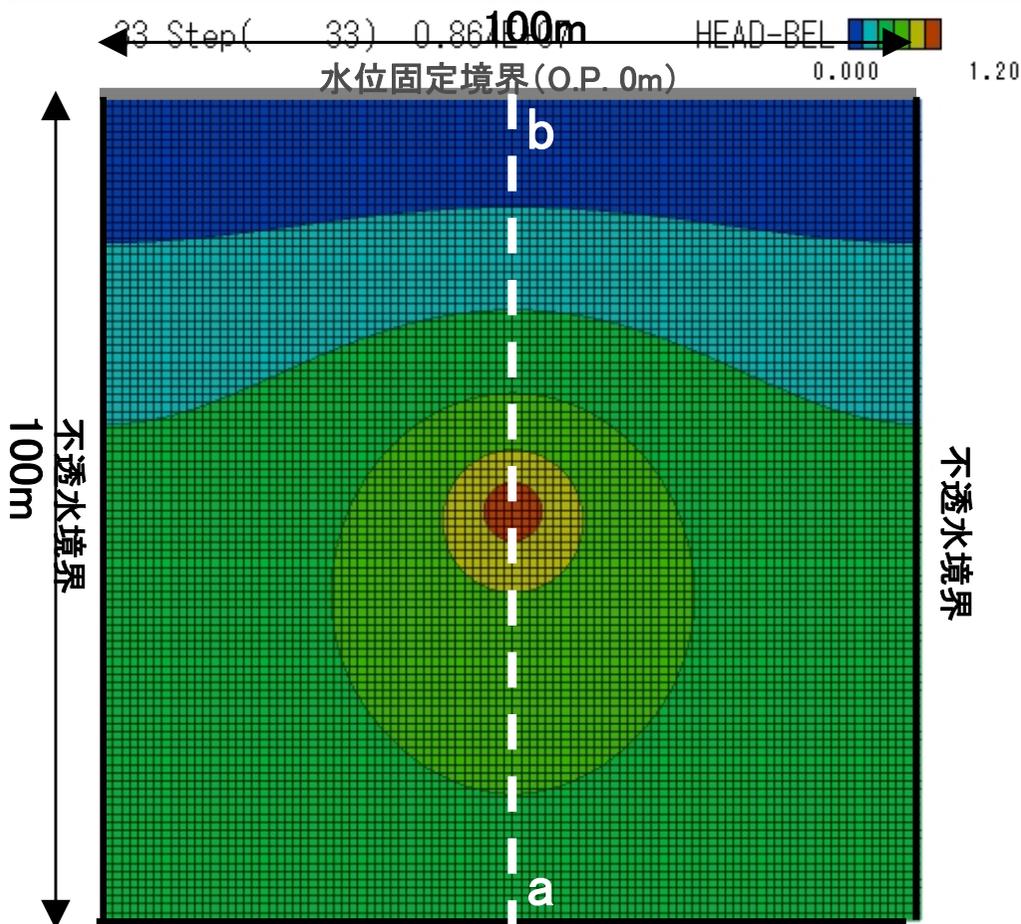


- : 注水井
- : 高線量（10,000mSv以上）
- : 道路
- : 重機器類（トランス等）設置範囲  
・ 地中構造物による障害範囲
- : （将来）コンテナ取出しヤード

■ 注水井の配置を検討するに当たって、建屋との距離の差異が、注水効果に与える影響を解析にて分析することとした。



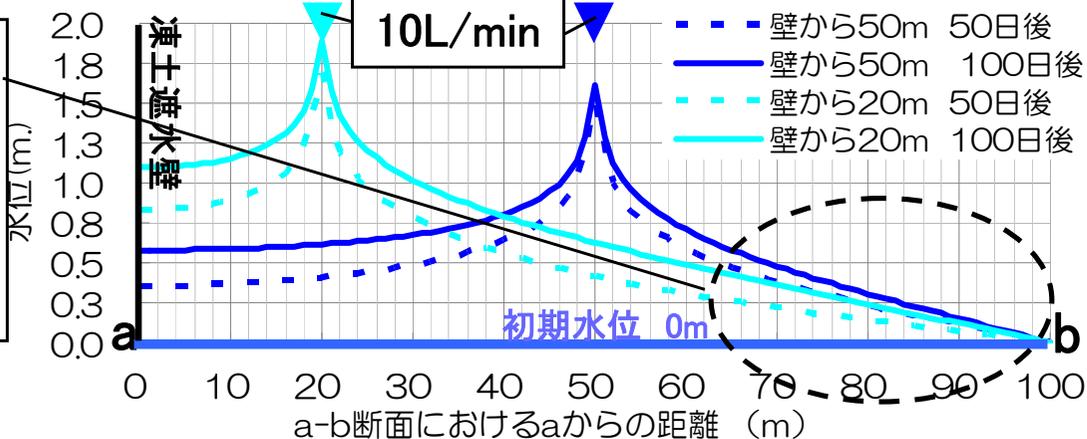
# リチャージの性能—水位上昇効果（単井）について2 解析結果—



不透水境界(凍土遮水壁)  
 水位分布 Case A (100日後)

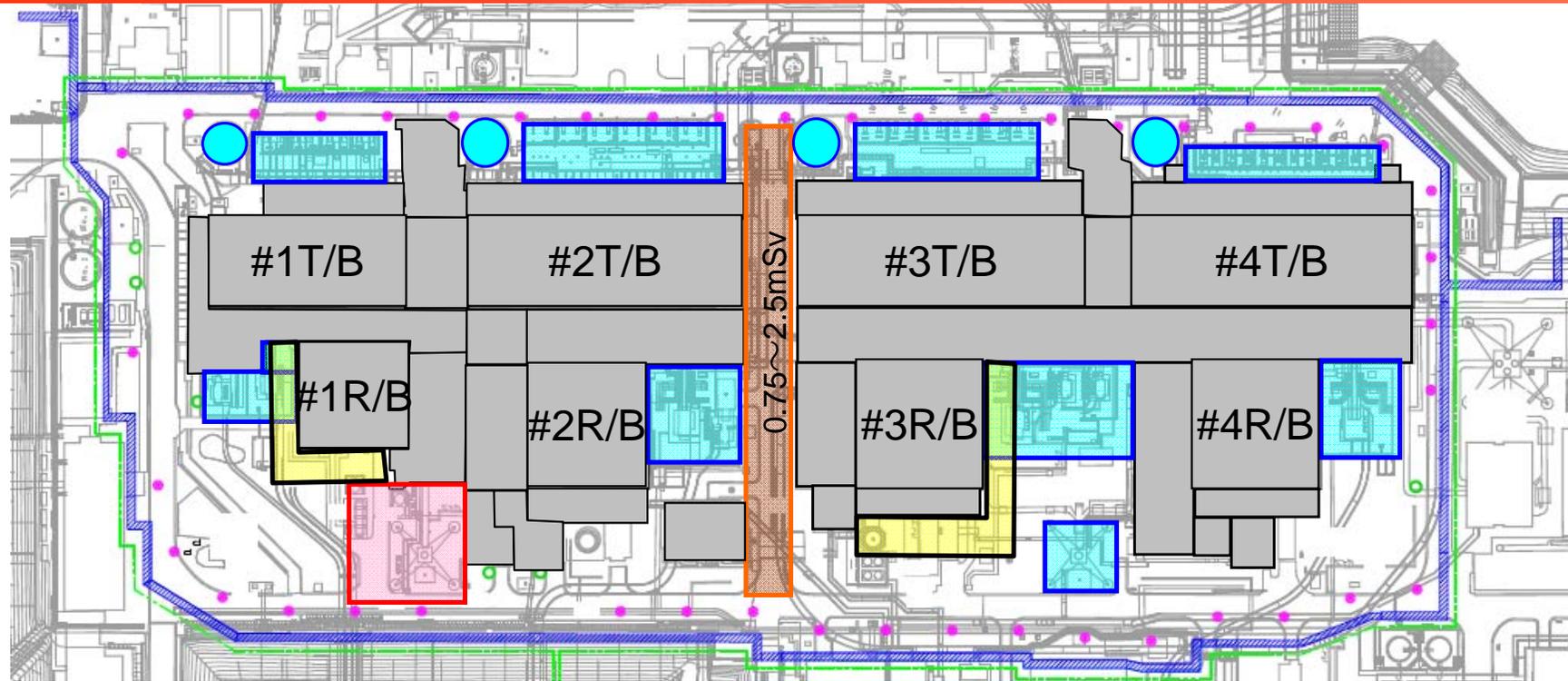
水位分布 Case B (100日後)

注水井の距離が建屋外壁からある程度離れると、距離は、水位上昇の効果に大きく影響しない。



解析手法	準3次元浸透流解析 (GWAP)
モデル深さ	12.9m (砂岩部)
透水係数	$3 \times 10^{-3}$ cm/s (砂岩)
有効間隙率	0.16 (砂岩)

# 検討における注水井の配置（仮設定）について



■ 注水井の配置においては、下記に該当する箇所については除外した。

- 建屋類設置エリア
- 重機器類（トランス等）設置エリア
- 地中構造物による障害エリア
- 高線量エリア（10,000mSv以上）
- 2, 3号機間道路周辺（比較的高線量かつスペース小）
- 将来コンテナ取出し等に必要なヤード

■ 単井の検討結果より、建屋直近に配置しない限り、注水井の位置は水位上昇効果にそれほど大きく影響しない。

⇒結果、凍土壁内周沿いに均等に配置することとした。但し、一部道路上などに設定している箇所があるが、今後調整を進める。

■ 配置間隔については「仮設構造物の計画と施工」土木学会より、ディープウェルの標準配置間隔に関する記載（15～30m間隔程度）を参考に25m間隔程度で仮に設定した。

■ 今後現地（5/6号付近）で実施したフィージビリティスタディの結果を踏まえ、最適配置について検討する。

● ：注水井（新設）

○ ：注水井（サブドレン活用）

■ ：高線量（10,000mSv以上）

■ ：道路

■ ：重機器類（トランス等）設置エリア  
・ 地中構造物による障害エリア

■ ：（将来）コンテナ取出しヤード

---

1. リチャージの性能
  - (2) 水位上昇効果について（群井）

# リチャージの性能—水位上昇効果（群井）について（解析条件）—

## ■ 解析目的

注水井からの注水による水位上昇効果の確認

## ■ 解析手法

準3次元浸透流解析プログラム（GWAP）による  
非定常浸透流解析〔GWAPについて（P28,29）参照〕

## ■ 解析条件

- モデル化領域：凍土遮水壁内（右図参照）  
〔遮水壁内外への水移動は無いと仮定〕
- 建屋モデル化部分：1～4号のタービン建屋  
・原子炉建屋・廃棄物処理建屋
- 降雨浸透：無し（0 mm/日）
- 深部岩盤からの湧き上がり：無し（0 m<sup>3</sup>/日）
- 水位：

	O.P. +m	条件
建屋内滞留水	1.9	固定#
建屋周辺地下水位	2.4	注水量に応じ上昇

#：1号タービン建屋床面付近で水位維持の期間が発生すると仮定。

### ● 注水量：

ケース	注水量（L/分/本）		注水総量（m <sup>3</sup> /日）
	海側(25本)	山側(25本)	
1-1	0.5	1.0	54
1-2	4.0	8.0	432

山側の注水井の注水量を多くし、平均的に上昇するようにした。

- シミュレーション計算時間：80日

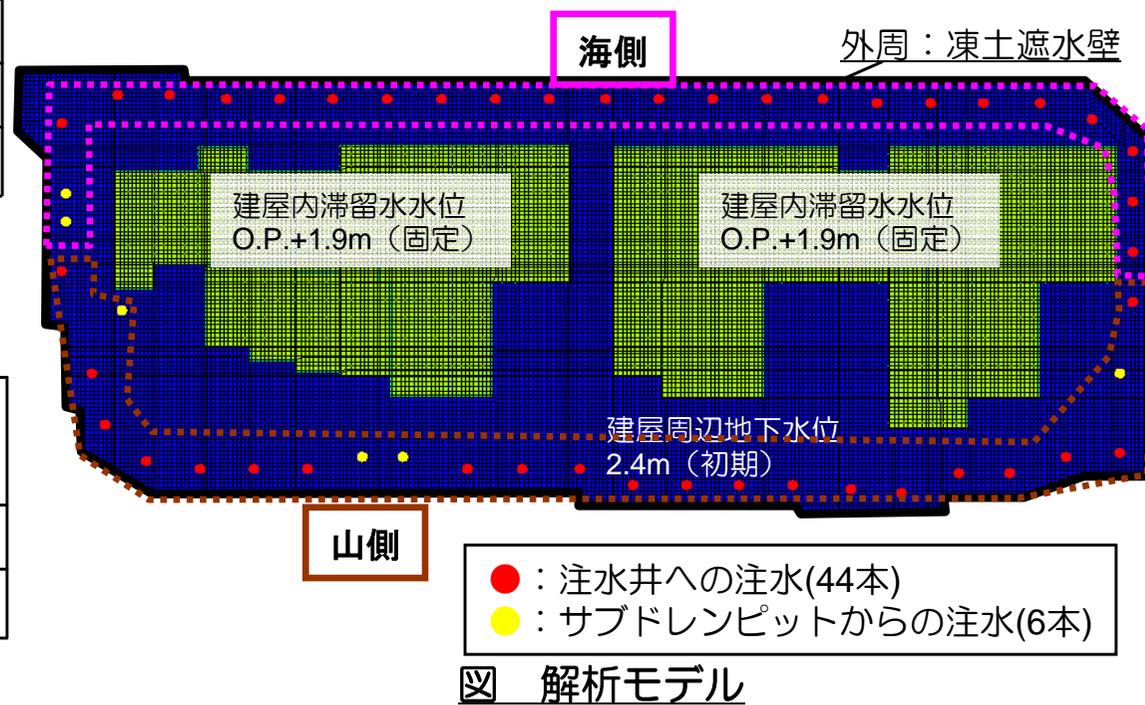
### ● 物性値（透水係数・有効間隙率）

	透水係数(cm/s)	有効間隙率
建屋外地盤	3.0×10 <sup>-3</sup> ※1	0.16※3
建屋外壁	1.0×10 <sup>-5</sup> ※2	—

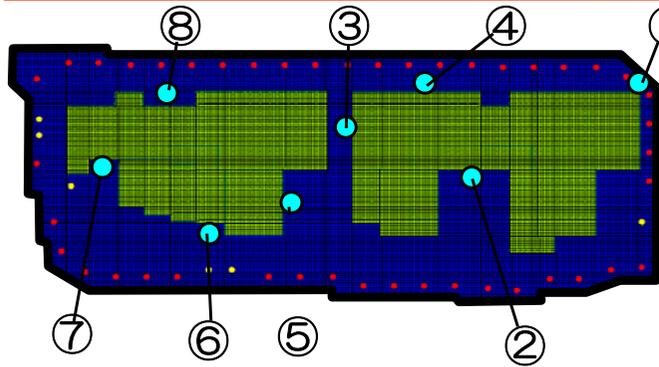
※1：3次元浸透流解析結果（汚染水処理対策委員会にて報告）における“中粒砂岩”の透水係数より設定。

※2：3次元浸透流解析結果（汚染水処理対策委員会にて報告）における建屋内流入量に基づき感度解析を行って同定した。

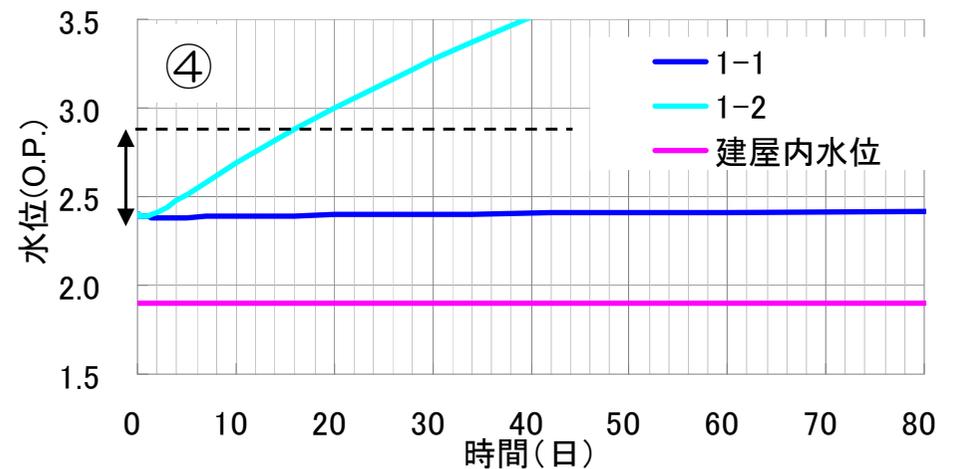
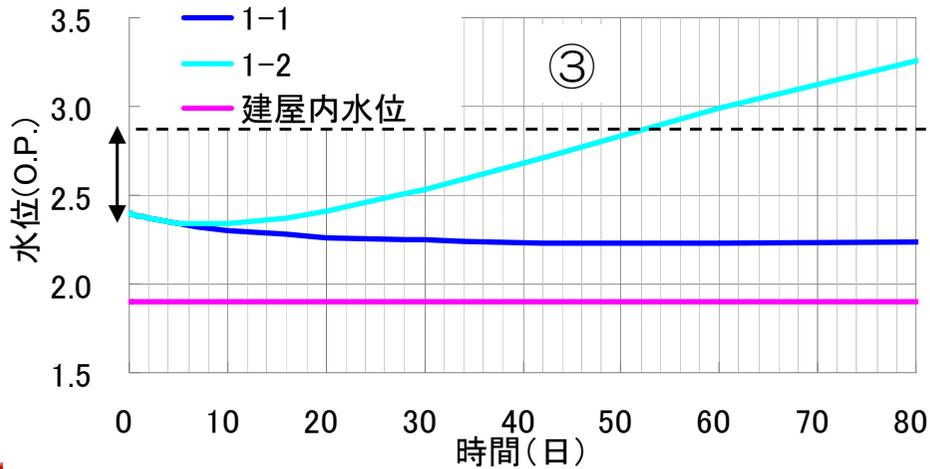
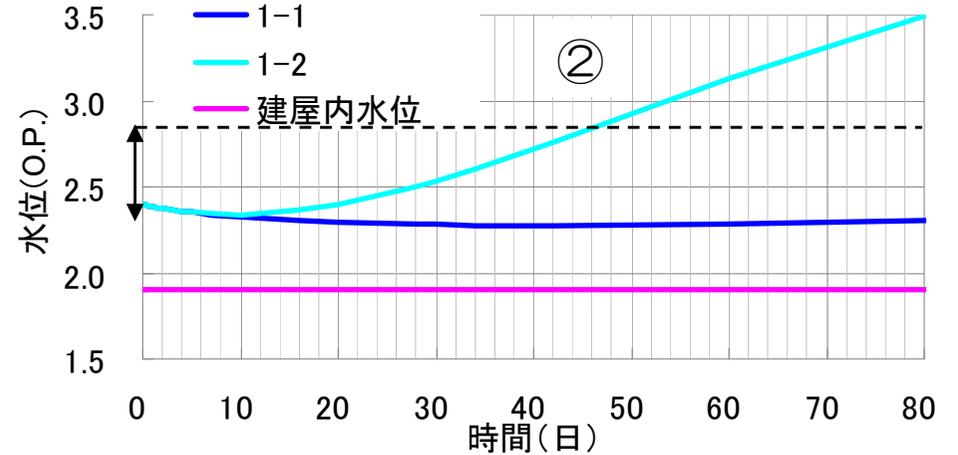
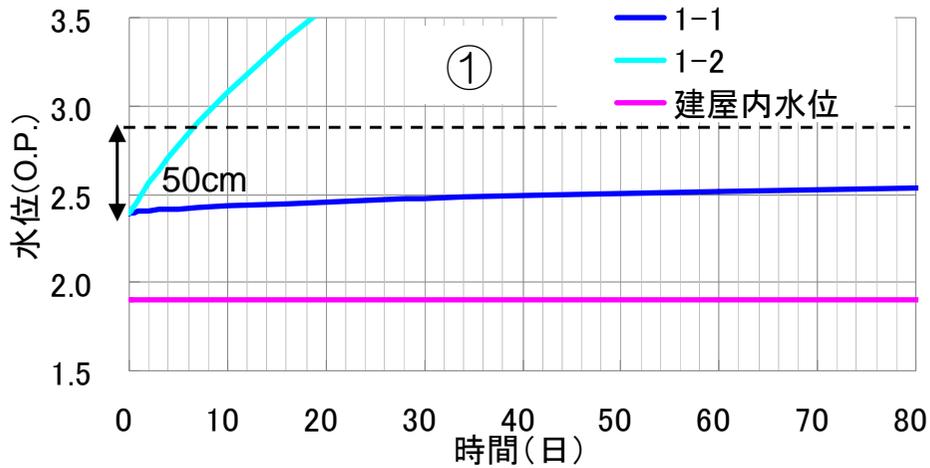
※3：3次元浸透流解析結果（汚染水処理対策委員会にて報告）における地下水位低下速度に基づき、感度解析を行って同定した。



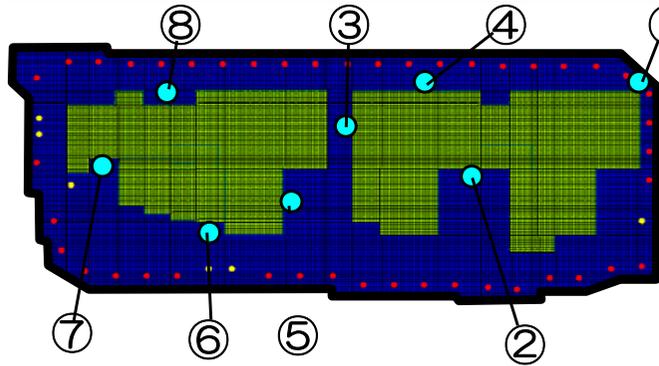
# リチャージの性能－水位上昇効果①－



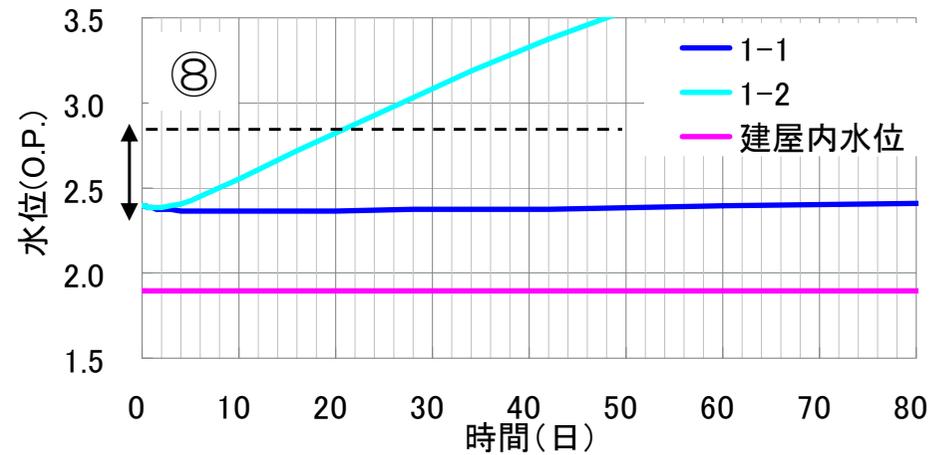
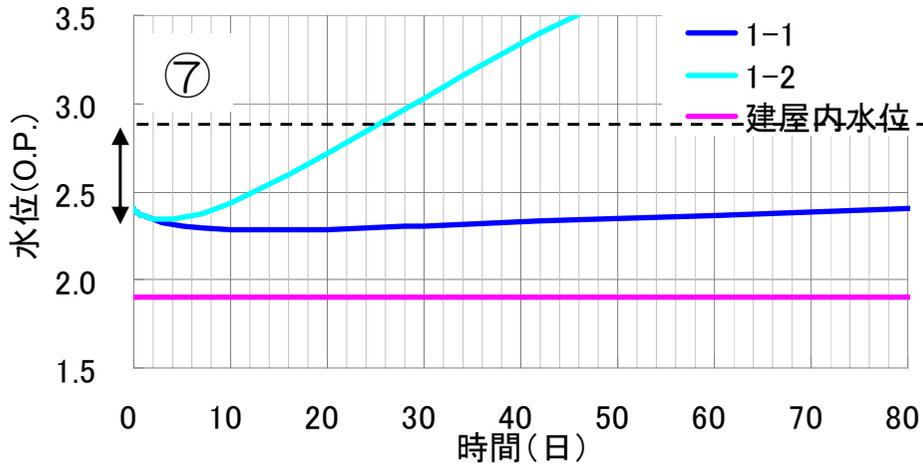
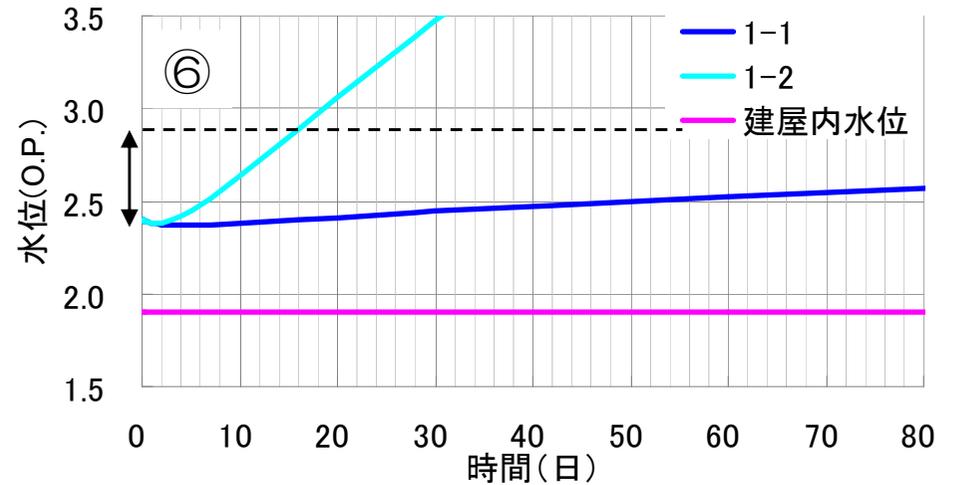
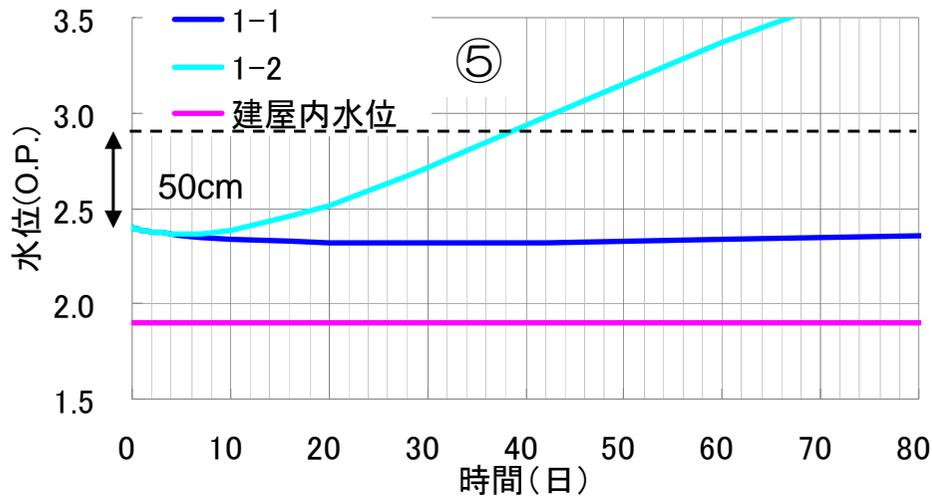
Case	建屋滞留水水位 (固定)	周辺地下水位 (初期)	注水量 (L/分/本)		注水総量 (m <sup>3</sup> /日)	降雨浸透量 (mm/日)
			海側 (25本)	山側 (25本)		
1-1	O.P. +1.9m	O.P. +2.4m	0.5	1.0	54	0
1-2			4.0	8.0	432	



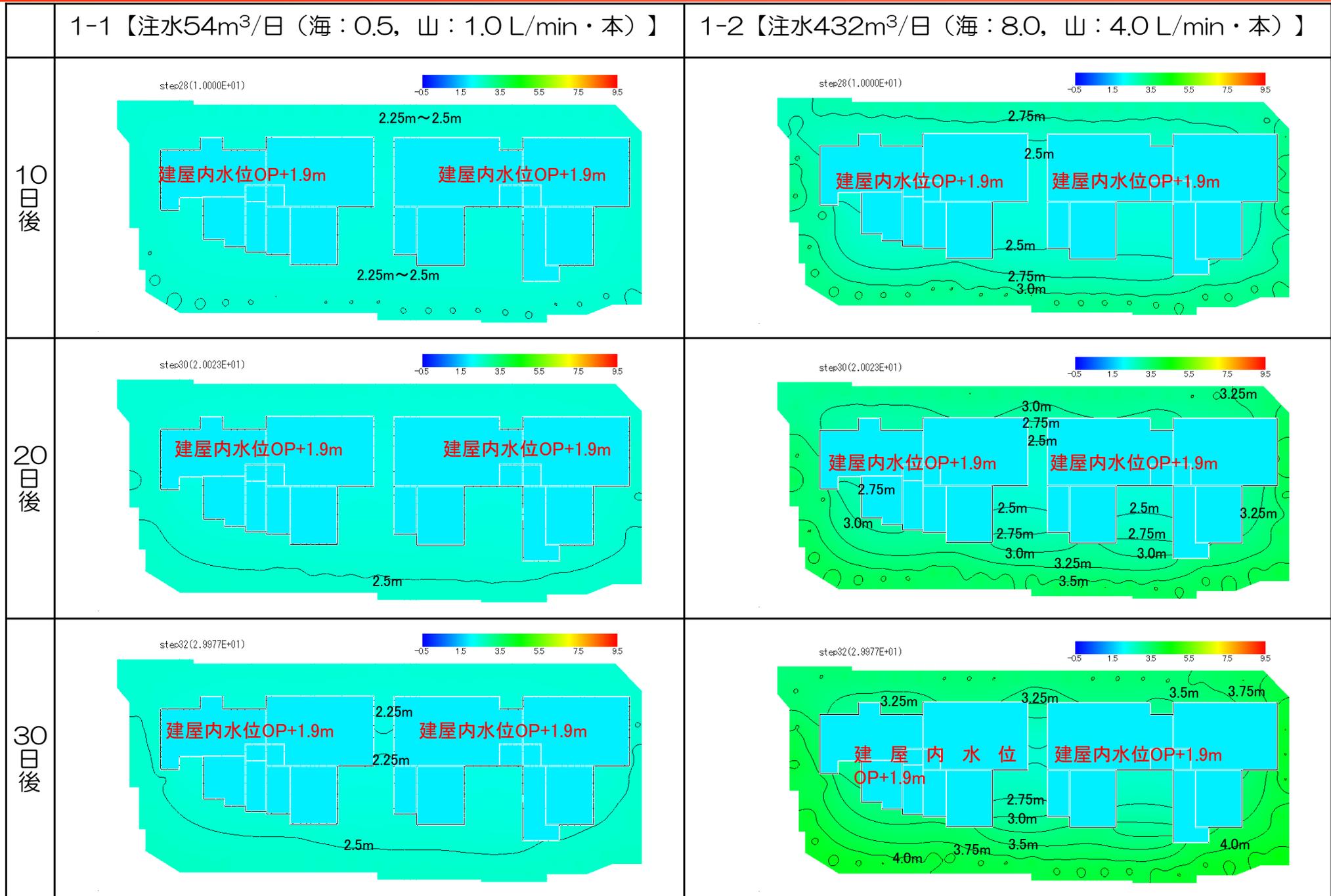
# リチャージの性能－水位上昇効果①－



Case	建屋滞留水水位 (固定)	周辺地下水位 (初期)	注水量 (L/分/本)		注水総量 (m3/日)	降雨浸透量 (mm/日)
			海側 (25本)	山側 (25本)		
1-1	O.P. +1.9m	O.P. +2.4m	0.5	1.0	54	0
1-2			4.0	8.0	432	



# リチャージ設備の性能—水位上昇効果②—



## リチャージ設備の性能—水位上昇効果について—まとめ

- 建屋周辺地下水水位—建屋滞留水水位差が50cm確保した初期状態において、注水井50本に対し、全体で約50m<sup>3</sup>/日、約400m<sup>3</sup>/日を80日間注水した場合について、準3次元浸透流解析（GWAP）による非定常解析を行い、水位上昇効果についてシミュレーション解析により確認した。
- 全体で約 50 m<sup>3</sup>/日の注水を行った場合
  - 水位上昇はせず、全体としてほぼ平均的に約50cmの水位差を維持していた。
  - 但し、2、3号機のタービン建屋間など、注水井からの距離が比較的遠く、対象面積が広い場合には、注水の効果が小さくなった。
- 全体で約 400 m<sup>3</sup>/日の注水を行った場合
  - 海側など、凍土遮水壁と建屋で囲まれた領域が狭い場合には、比較的早めに水位上昇がみられるが、50cm程度の水位上昇に早くても7日程度かかっている。
  - 2、3号機のタービン建屋間など、注水井からの距離が比較的遠い場合には、50cmの水位上昇に50日以上必要な箇所もみられる。
  - 水位上昇させる場合には、注水井近傍のみが上昇するため、全体的にムラのある水位になりやすい。
  - また、注水井の対象面積の差が、水位上昇が始まるまでの期間および上昇速度に大きく影響を与えることが判った。

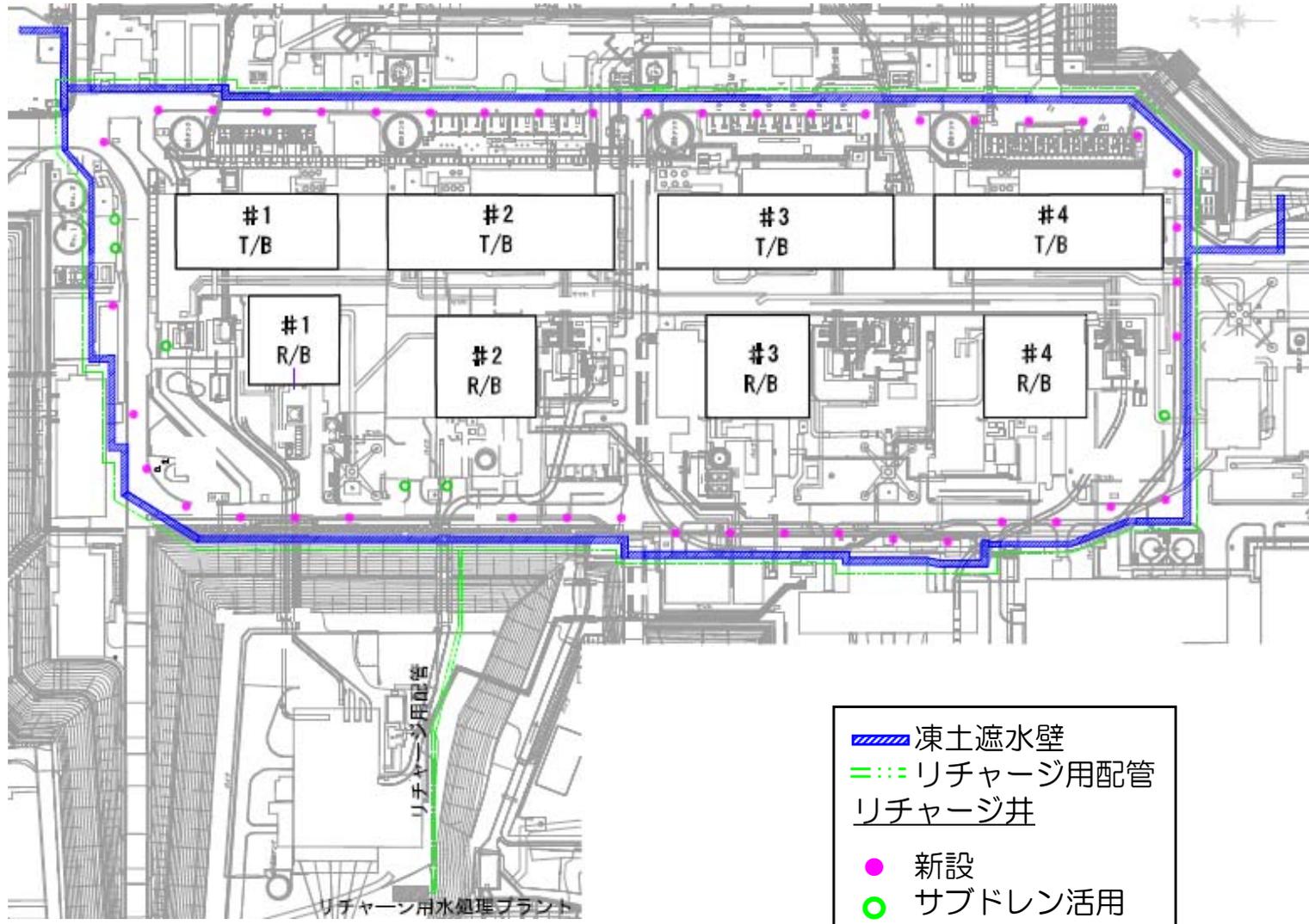
---

## 2. リチャージ設備の基本設計

# リチャージ井および観測井の配置（案）

## ■リチャージ井配置の考え方

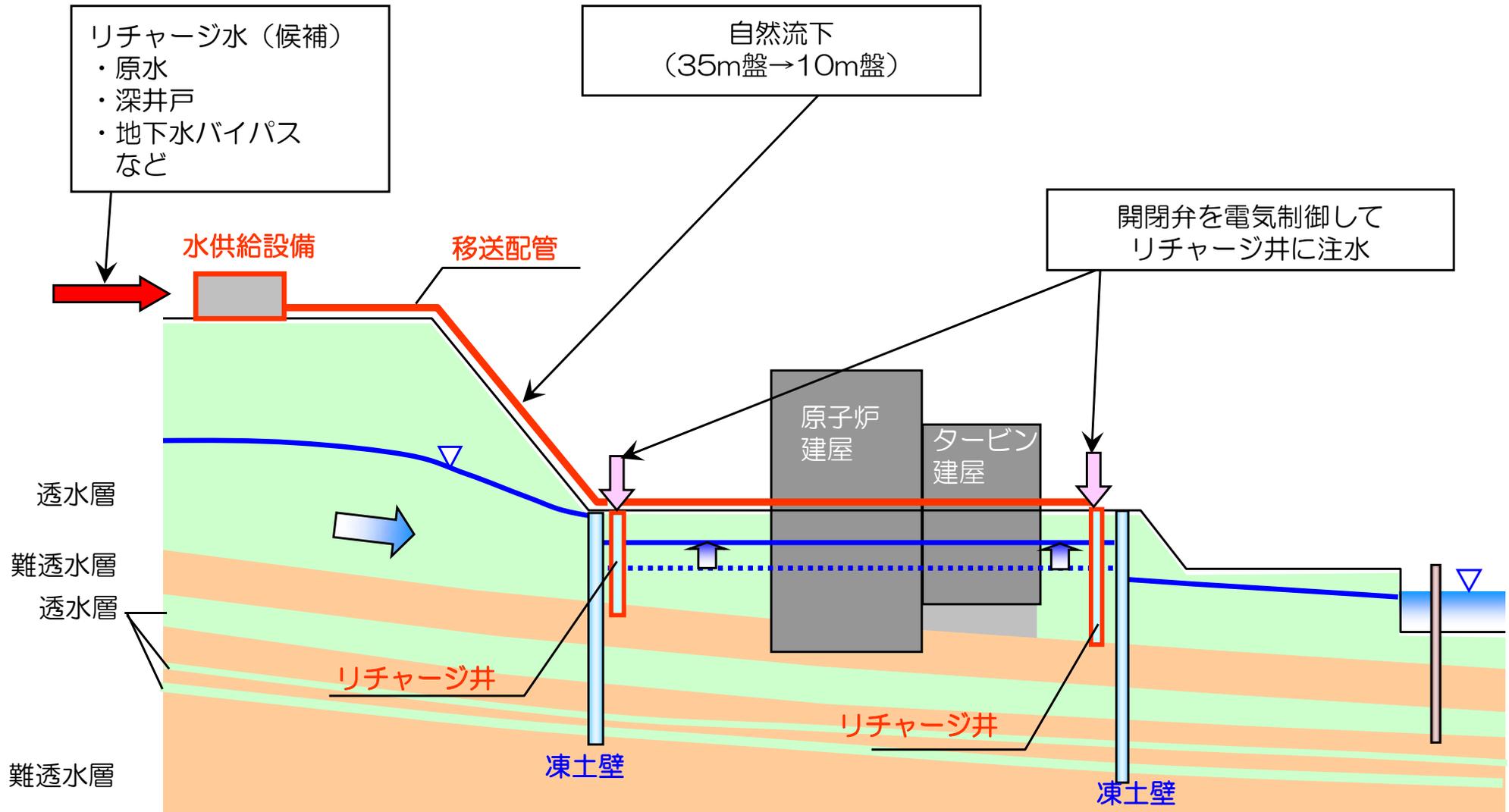
- ・実証試験結果を踏まえて、再度解析等を実施し、必要なリチャージの井戸数量、配置等を検討する。  
（下図は一例）



# リチャージ設備配置 (案)

## ■リチャージ設備の配置 (案)

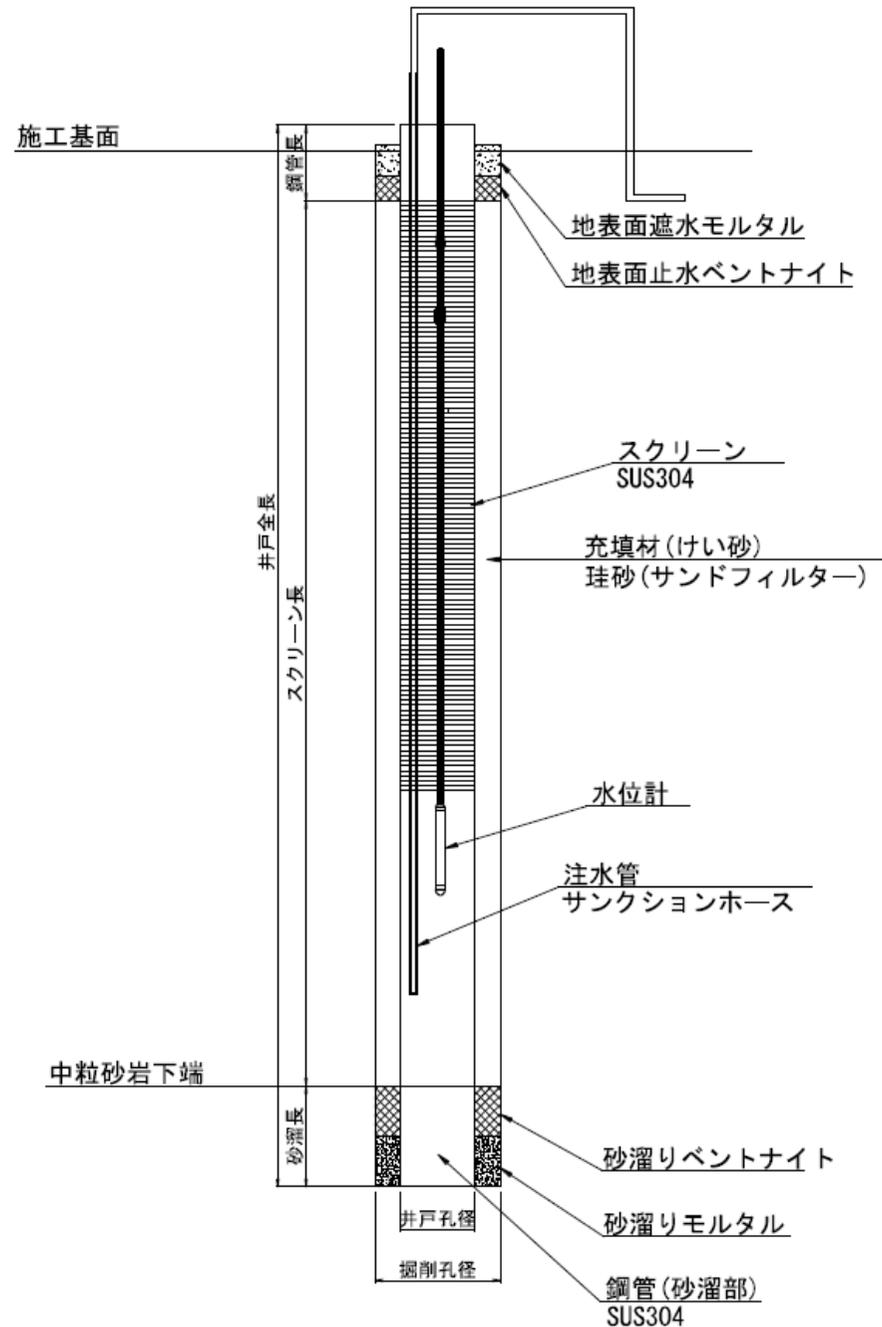
- ・上部透水層を対象に注水する。



# リチャージ井 (案)

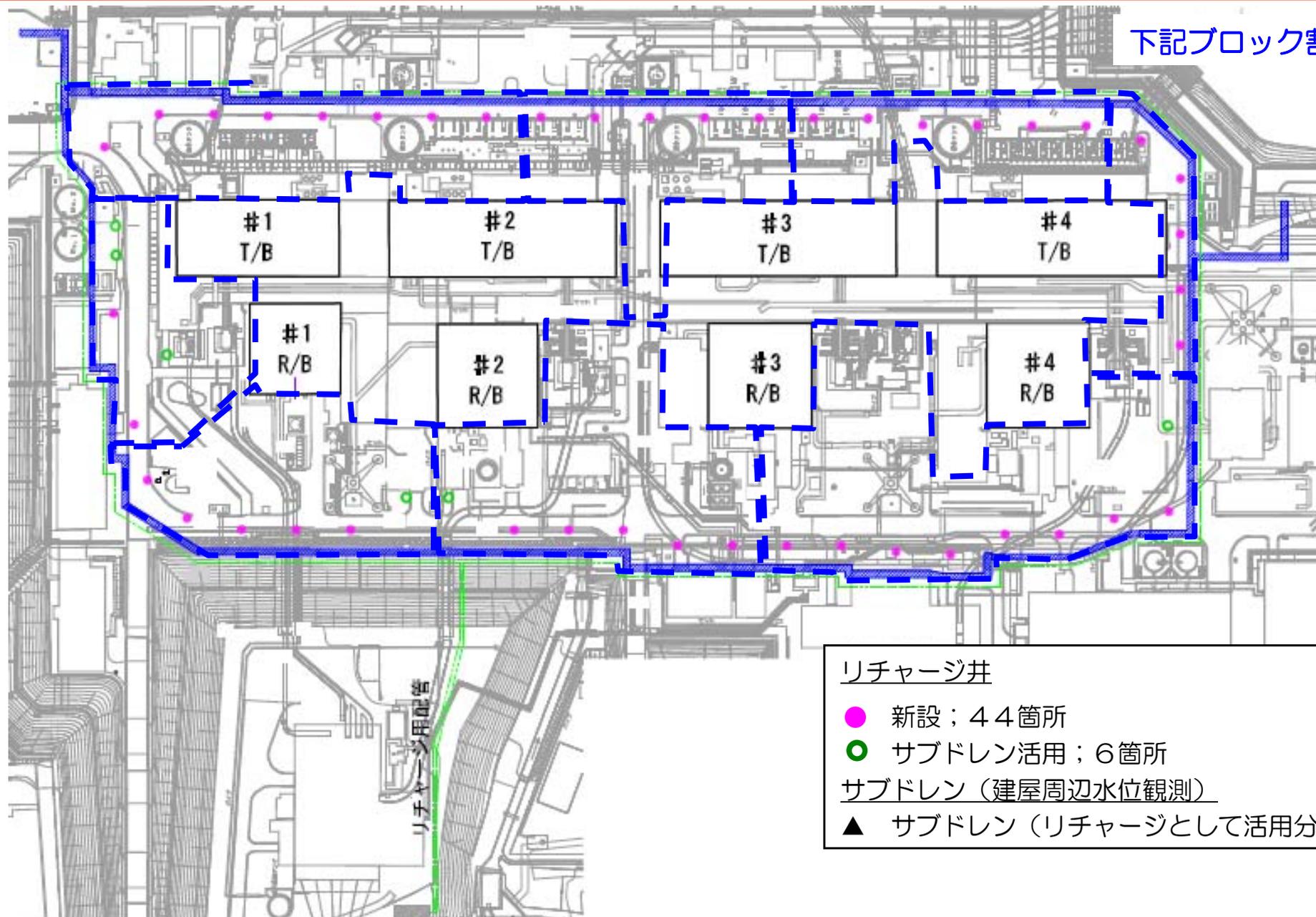
## ■リチャージ井 (案)

- ・井戸径：～450mm
- ・井戸深：10～20m程度



# リチャージにおける注水管理について

下記ブロック割は一例



## リチャージ井

- 新設；44箇所
  - サブドレン活用；6箇所
- サブドレン（建屋周辺水位観測）
- ▲ サブドレン（リチャージとして活用分を除く）

- 8～10ブロック程度（最適なブロック数・配置等に関しては今後要検討）に分割し、ブロックごとに建屋周辺地下水位を管理する。ただし、隣接するブロックについても、連動した運用管理方法を構築する。

---

### 3. 水位低下時のリチャージ稼動開始時期に関する検討

# 水位低下時のリチャージ稼動開始時期に関する検討

## ■ 解析目的

水位低下時におけるリチャージ稼動の開始時期  
フェーシングの影響検討

## ■ 解析手法

準3次元浸透流解析プログラム (GWAP) による  
非定常浸透流解析 [GWAPについて (P28,29) 参照]

## ■ 解析条件

- モデル化領域：凍土遮水壁内 (右図参照)  
〔遮水壁内外への水移動は無いと仮定〕
- 建屋モデル化部分：1～4号のタービン建屋
  - ・ 原子炉建屋
  - ・ 廃棄物処理建屋
- 降雨浸透：無し (0 mm/日)
- 深部岩盤からの湧上り：無し (0 m<sup>3</sup>/日)
- 地下水位 (初期)：O.P.+3.5m
- 建屋水位低下スケジュール：
  - ・ 10cm/月で低下を仮定  
O.P.+3m⇒0m (0⇒30ヶ月)
- 注水量：0, 0.5 L/分/本
- シミュレーション計算時間：70ヶ月

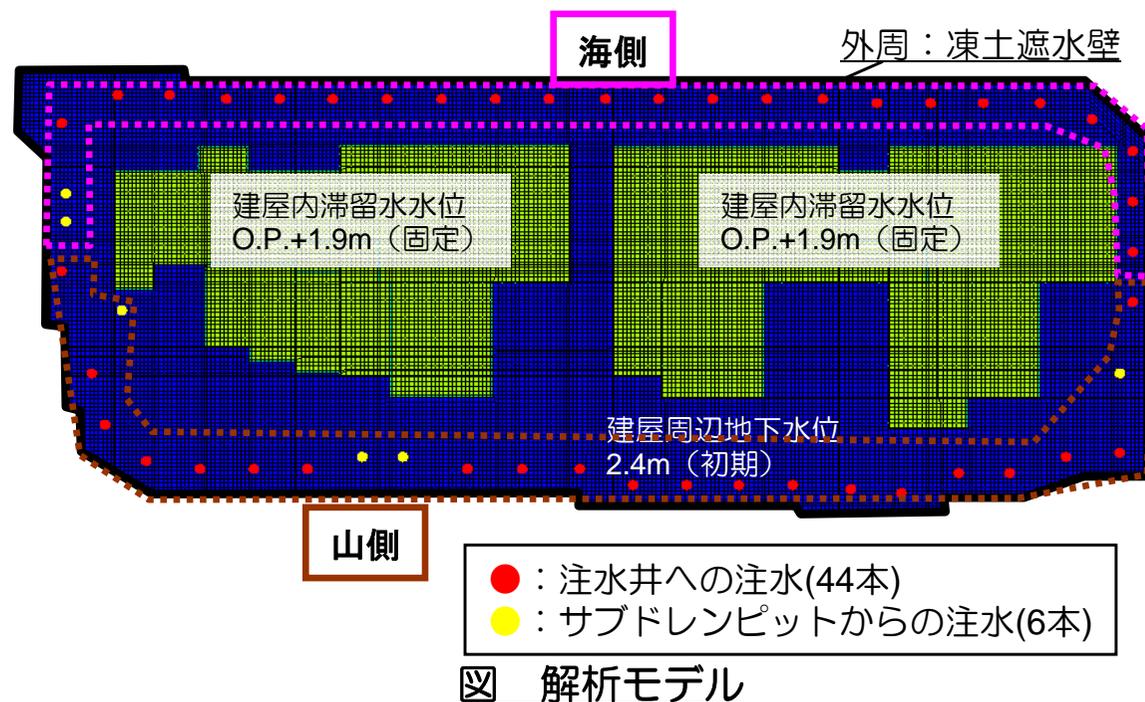
## ● 物性値 (透水係数・有効間隙率)

	透水係数(cm/s)	有効間隙率
建屋外地盤	3.0×10 <sup>-3</sup> ※1	0.16※3
建屋外壁	1.0×10 <sup>-5</sup> ※2	—

※1：3次元浸透流解析結果 (汚染水処理対策委員会にて報告) における“中粒砂岩”の透水係数より設定。

※2：3次元浸透流解析結果 (汚染水処理対策委員会にて報告) における建屋内流入量に基づき感度解析を行って同定した。

※3：3次元浸透流解析結果 (汚染水処理対策委員会にて報告) における地下水位低下速度に基づき、感度解析を行って同定した。



# 水位低下時のリチャージ稼働開始時期に関する検討

Case	建屋滞留水水位	周辺地下水位 (初期)	注水開始時期 (水位一定開始に対して)	注水量(L/分/本)		注水総量 (m3/日)	降雨浸透量 (mm/日)
				海側(25本)	山側(25本)		
3-1	O.P. +3.0m ⇒0.0m (0⇒30ヶ月)	O.P. +3.5m	—	0.0	0.0	0	0
3-2			0ヶ月前	0.5	0.5	36	
3-3			1ヶ月前				
3-4			2ヶ月前				

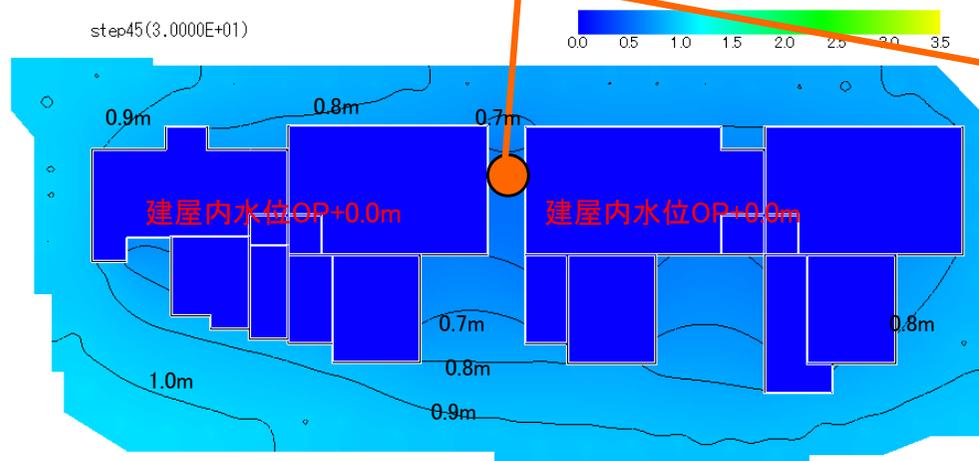
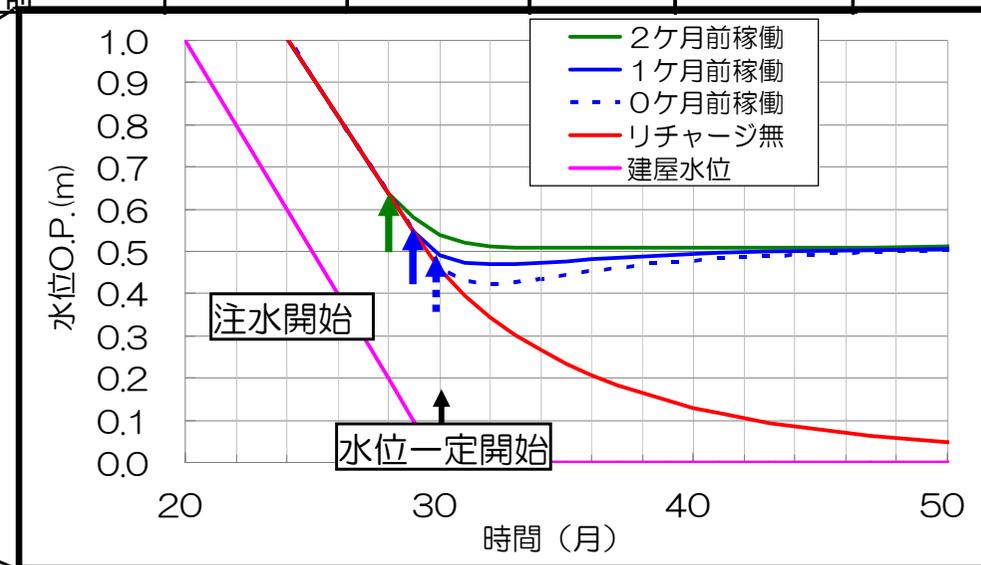
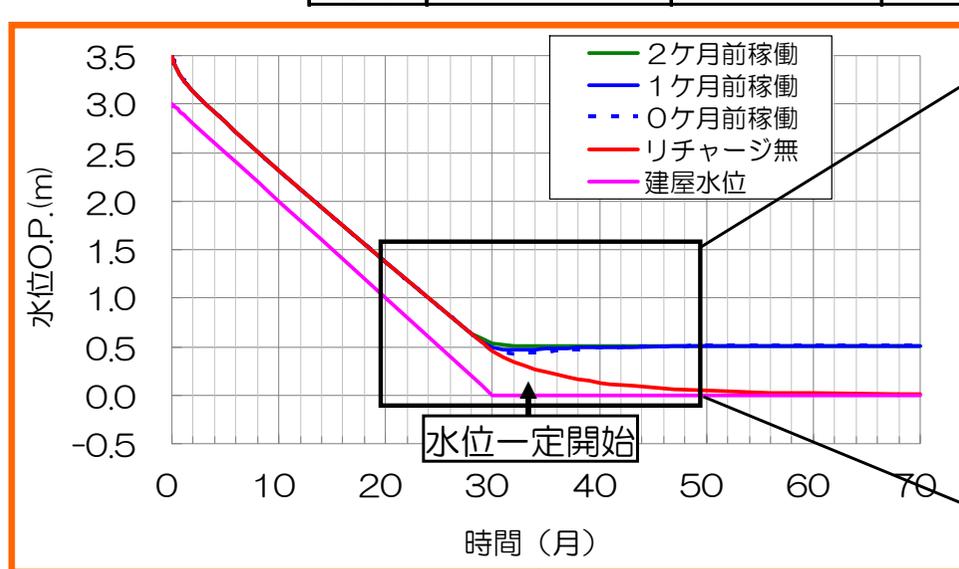


図 水位コンター（2ヶ月前稼働 30ヶ月目）

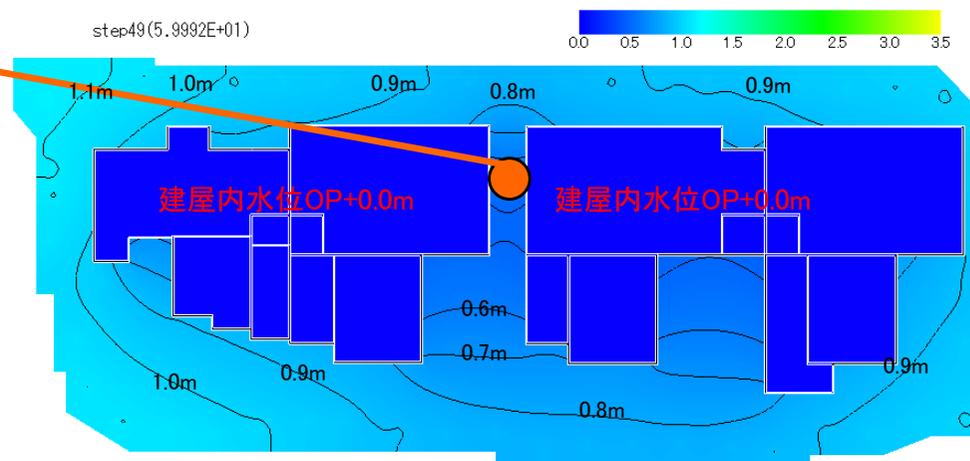


図 水位コンター（2ヶ月前稼働 60ヶ月目）

水位低下時において、建屋水位を一定水位を維持する2ヶ月程度前に、40m<sup>3</sup>/日（50本の場合、0.5L/min/本）程度の注水を開始することで、建屋周辺地下水位を建屋内滞留水水位に対して約50cm程度以上高く維持することが可能。

# 有限要素法による準三次元浸透流解析(GWAP)の概要(1/2)

## ■ 準三次元浸透流解析

平面二次元浸透流解析を基本に、深さ方向の層構成を1つの帯水層とみなし、かつ地下水は水平方向にのみ流れるものとした解析。地下水位の変化に伴う透水量係数(透水係数と帯水層厚さの積)の変化を考慮できるようにしているため、通常の平面二次元浸透流解析に比べ、より現実に近い地下水挙動評価が可能。

## ■ 準三次元浸透流解析プログラム

GWAP (Ground Water flow Analysis Program) : 岡山大学・西垣研究室開発

## ■ 準三次元浸透流解析の支配方程式

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial h} \left( T_{ij}(h) \left( \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \right)}_{\text{①}} + Q = \underbrace{S(h) \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)}_{\text{②}}$$

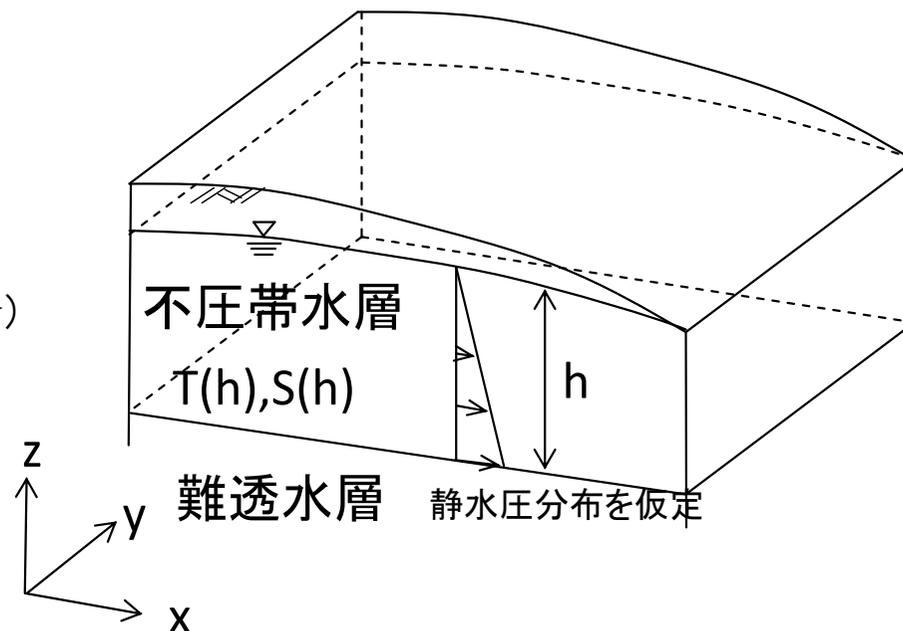
$T_{ij}(h)$  : 透水量係数テンソル ( $i, j = 1, 2 \mid 1: x, 2: y$ )

$Q$  : 帯水層全体に対する外部からの流出入量

$S(h)$  : 不圧帯水層の場合、有効間隙率  
被圧帯水層の場合、貯留係数

$h$  : 水頭(地下水位)

- ① 鉛直方向に積分した微小単位体積を通過する地下水流量を表す。
- ② 鉛直方向に積分した微小単位体積に単位時間当たり貯留する地下水量を表す。



準三次元浸透流解析の概念  
(不圧帯水層における水圧分布と透水量係数の考え方)

# 有限要素法による準三次元浸透流解析(GWAP)の概要(2/2)

	準三次元浸透流解析	三次元浸透流解析
基本的考え方	鉛直方向の流れを無視し、水平方向の流れのみに簡略化した解析手法 (深さ方向は静水圧分布を仮定)	三次元方向の地下水流れを考慮した詳細な解析手法で、上下帯水層間の流れを考慮可能
解析パラメータ及び、不飽和領域の取り扱い	透水量係数 $T$ ,有効間隙率 $S$ がパラメータであり、それらが水位 $h$ の関数であるような非線形問題として解く	透水係数 $K$ と不飽和特性(負圧-飽和度関係、飽和度-不飽和透水係数関係)がパラメータとなる非線形問題として解く
帯水層の層構成	深さ方向の各層における透水量係数を積分してモデル化	直接三次元的にモデル化
境界条件	浸出面境界のような複雑な境界条件は設定困難	どのような境界条件も設定可能