令和元年度　重点研究課題

2011年 東京電力福島第一原子力発電所事故後における土木技術等の貢献事例の体系的整理

－事故時の緊急時対応、汚染拡大防止対策等への技術蓄積の整理・体系化－

概要報告

2020年11月24日

土木学会エネルギー委員会
低レベル放射性廃棄物・汚染廃棄物対策に関する研究小委員会
分科会2（事故廃棄物対策技術検討）

研究の背景と目的

2011年3月11日に発生した東日本大震災における東京電力福島第一原子力発電所（以下、1F）の事故から約10年近くが経過した。事故発生当初から、国・東電を中心に我が国が一丸となり、さらには国際的な広範な支援・協力も得た取組みにより、**初期段階での緊急時対応から冷温停止・復旧活動へ、その後の汚染水処理対策、さらには環境負荷低減・廃棄物対策**などの1Fの安定化が達成されるとともに、廃止措置に向けての新たな取組みのステージへと進展している。

本研究は、1Fにおける原子力事故対策事例を確実に伝えていくことが、現世代の技術者の重要な使命であるとの認識のもと、

- **●将来において仮に原子力事故が起こるというリスクを想定した場合にも適切な対応がとれるように、土木工学としても十分な備えを受け継いでいくこと**
- **●そのための基礎資料として、また次世代を担う若手土木技術者等への貴重な技術情報・教訓としてのメッセージとして資すること**

を目的とし、
これまでの1Fにおける取組み全体を俯瞰して、
事故に対して土木技術等がどのように対応し、原子力事故環境下において土木技術者がいかに苦労と工夫を重ねて果たし役割について、体系的に調査・整理・分析を行った。

報告書の構成(1/3）

事故発生以降、2018年度までの土木分野における汚染拡大防止対策の取組みを**表-1**に示す。汚染拡大防止対策は以下のように区分できる。

対策工の区分	時系列的な対策工の区分
Ⅰ.汚染水処理対策 Ⅱ.環境負荷低減・廃棄物対策 Ⅲ.放射性汚染廃棄物の合理的保管・管理	①事故初期段階の復旧活動 ②3つの方針に基づく汚染水処理対策 ③事故直後から継続実施している環境負荷低減・廃棄物対策ならびに放射性汚染廃棄物の保管・管理

上記の対策について、**2018年12月**までの**公開情報**[*1]の収集・体系的整理

報告書の構成

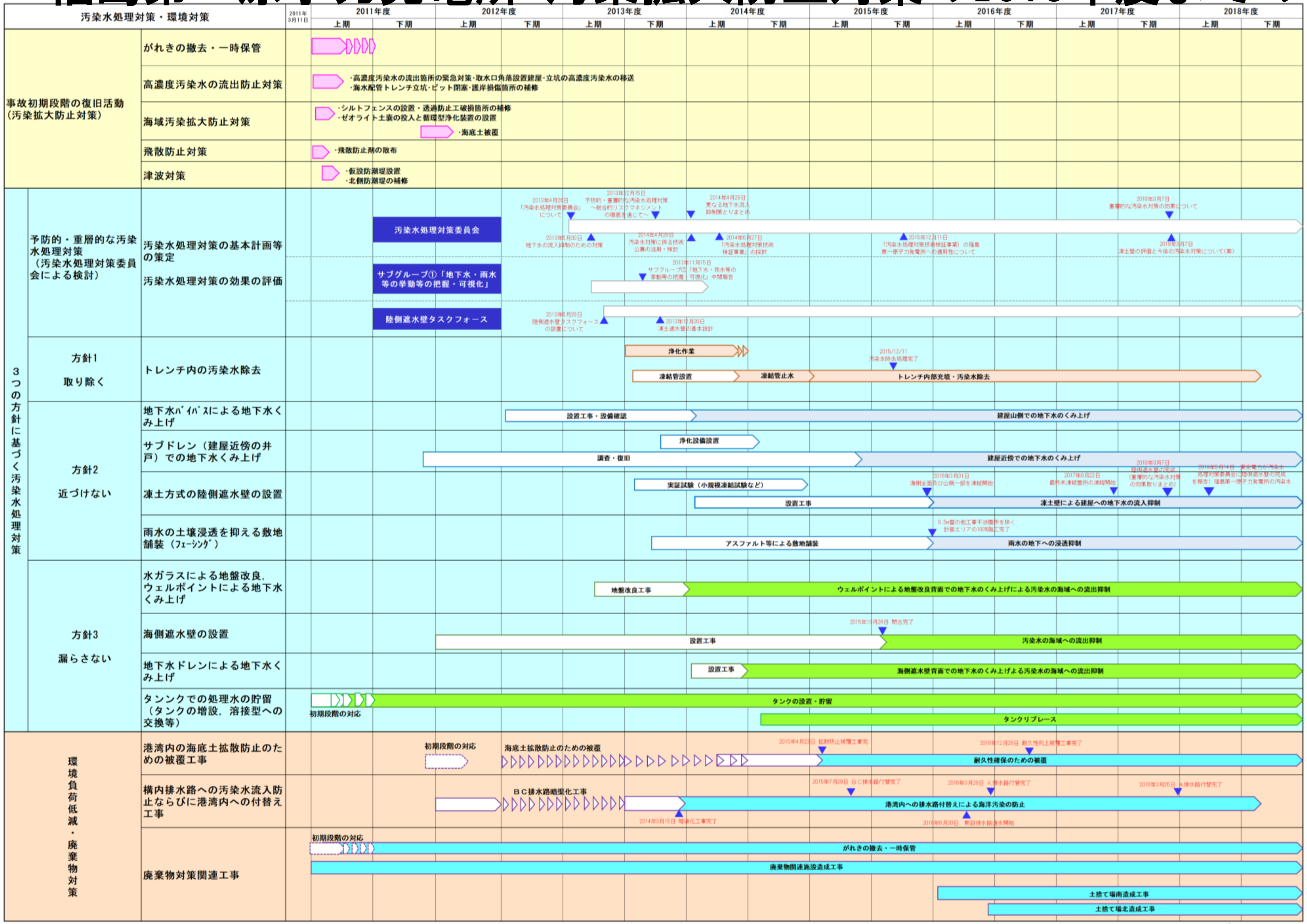
1.概説
2.事故初期段階の土木分野の復旧活動
3.汚染水処理対策、環境負荷低減・廃棄物対策
4.放射性汚染廃棄物の合理的な安定保管・管理技術
5.技術提案の公募

主な公開情報[*1]
- 東京電力
- 原子力規制委員会 特定原子力施設監視・評価検討会
- 経済産業省 廃炉・汚染水対策ポータルサイト

等のホームページ
- 電力土木
- 土木施工

等の学協会誌

表-1　福島第一原子力発電所 汚染拡大防止対策の2018年度までの取組み



都築　進（2018）：汚染水対策・環境対策における土木技術の貢献，福島第一における廃炉・汚染水対策の現状報告と意見交換会講演資料（2018年7月12日）[1]を参考に作成

報告書の構成(2/3)

赤字は本資料（概要報告）での紹介事項

目　次

1.概説
- 1.1報告書作成の目的
- 1.2事故直後から現在までに発生したトラブルや取り組み
- 1.3報告書の構成

2.事故初期段階の土木分野の復旧活動
- 2.1構内道路の健全性確認及びがれきの撤去
- 2.2汚染水の流出防止対策及び海域汚染拡大防止対策
  - 2.2.1汚染水の流出防止対策
    - (1)汚染水流出箇所の緊急対策
    - (2)汚染水の流出防止対策
  - 2.2.2 海域汚染拡大防止対策
    - (1)シルトフェンスの設置
    - (2)1～4号機取水路開渠南側透過防止工の補修
    - (3)ゼオライト土嚢の投入と循環型浄化装置の設置
    - (4)海底土の被覆
- 2.3放射性物質の飛散防止対策
  - 2.3.1飛散防止剤の散布
  - 2.3.2散水
- 2.4津波対策
  - 2.4.1仮設防潮堤の設置
  - 2.4.2その他の津波対策

3.汚染水処理対策、環境負荷低減・廃棄物対策
- 3.1概説
- 3.2汚染水処理対策
  - 3.2.1全体計画の策定
    - (1)地質・水理地質構造
    - (2)地下水流動場の評価
    - (3)予防的・重層的な汚染水処理対策の検討方針
  - 3.2.2個別の汚染水処理対策
    - (1)汚染水を取り除く対策
      - (a)海水配管トレンチの汚染水除去及び充填
    - (2)汚染源に水を近づけないための対策
      - (a)地下水バイパス
      - (b)サブドレン
      - (c)陸側遮水壁
      - (d)フェ－シング
    - (3)汚染水を漏らさないための対策
      - (a)水ガラスによる地盤改良
      - (b)海側遮水壁及び地下水ドレン
      - (c)タンク
- 3.3環境負荷低減・廃棄物対策
  - 3.3.1汚染の拡大防止対策
    - (1)海底土の被覆
    - (2)構内排水路

報告書の構成(3/3)

赤字は本資料（概要報告）での紹介事項

3.3.2廃棄物関連対策
(1)がれきの撤去（がれきの撤去に資する遠隔操作技術）
(2)がれきの一時保管
(3)固体廃棄物貯蔵施設の敷地造成

4.放射性廃棄物の合理的な安定保管・管理技術
4.1対象廃棄物の分類
(1)福島第一原子力発電所事故で発生した放射性廃棄物
(2)安定保管・管理の対象廃棄物
4.2がれき等の保管・管理
4.2.1目的
4.2.2概要
(1)がれき等の種類
(2)がれき等の発生量と今後の発生予測
(3)保管・管理の方法
4.2.3特徴、工夫・効果
(1)廃棄物の保管方法に関する事項
(2)がれき類の一時保管場所の津波に対する安全対策
(3)覆土式一時保管施設における工夫
(4)伐採木一時保管槽における工夫
(5)可燃性廃棄物の火災対策
(6)モニタリング
4.2.4 課題等

4.3水処理二次廃棄物の保管・管理
4.3.1目的
4.3.2概要
(1)水処理二次廃棄物の種類
(2)水処理二次廃棄物の発生量と今後の発生予測
(3)保管・管理の方法
4.3.3特徴、工夫・効果
(1)一時保管における工夫
4.3.4課題等
(1)水処理二次廃棄物一時保管のリスク低減
(2)保管施設への移行による放射線影響の低減
(3)処理・処分方策の検討
(4)モニタリングの検討

5.技術提案の公募
5.1国際廃炉研究開発機構の公募
5.2経済産業省 資源エネルギ－庁の公募

1.2 事故直後から現在までに発生したトラブルや取組み

読者の理解促進を図るための報告書の導入として、東京電力が同社のホームページで1Fの廃炉作業の進捗等を紹介している「**廃炉への軌跡**」を編集して、事故直後から2018年10月までに発生した様々なトラブルや進捗した取組み、さらに土木分野が関わった取組み等を経時的に紹介した。

表 1-1　事故直後から2018年10月までに発生した様々なトラブルや進捗した取組み

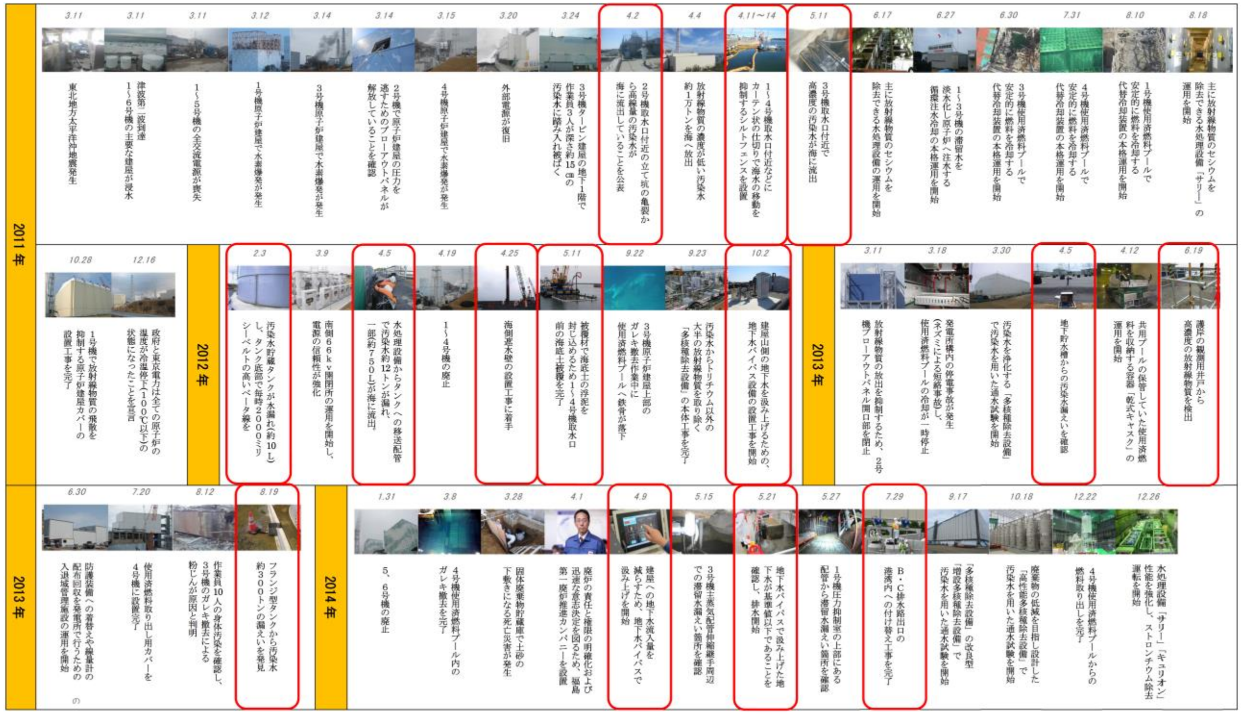
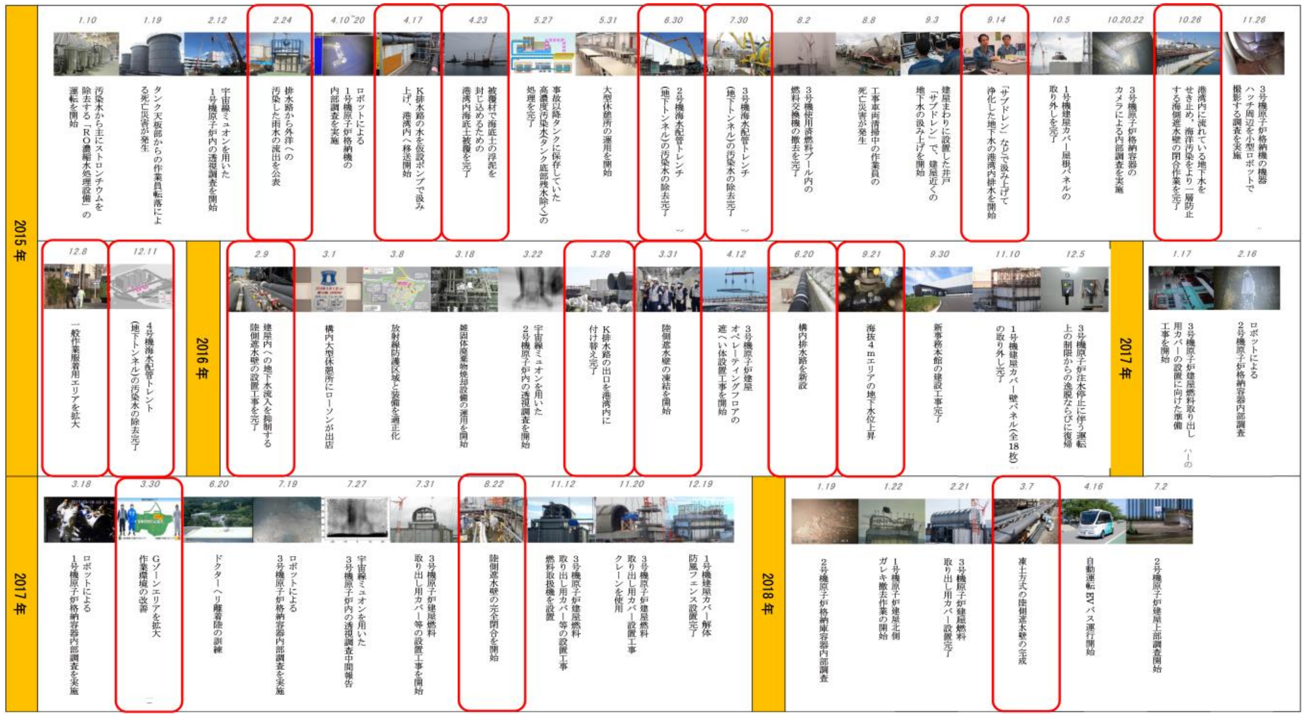


表 1-2　事故直後から2018年10月までに発生した様々なトラブルや進捗した取組み



土木分野が関わった取り組み等を赤枠で示した

2.1構内道路の健全性確認及びがれきの撤去

津波により流された重油タンク等が発電所建屋へのアクセスの障害となり、さらにその後の水素爆発により広範囲に飛び散ったがれきのため、**原子炉の冷却（冷却水の確保、冷却設備の設置、消防車やコンクリ－トポンプ車等による冷却）**を行うための**アクセス（動線)の確保に支障をきたしていた。**

地震の翌日からがれきの撤去を開始したが、広範囲に飛散した高濃度放射性物質に汚染されたがれき等により、**撤去作業に従事する作業員の被ばく線量が上昇した。**

このため、作業員の被ばく低減を目的として、有人の重機に加え**無人遠隔操作の重機による建屋周辺のがれの撤去**により、**安定した原子炉の冷却が可能となった。**

構内道路健全性調査(構内道理の状況)

津波で流されて道をふさいだ重油タンク
(直径 11.7m×高さ 9.2m)

重油タンクは，津波により 1 号機タービン建屋北側脇まで漂流

図 2-1　津波発生直後の状況

積み込み

操作車と作業状況

◆Sys1-2 ：1R/B北側周辺 （4/18～21）

施工前

施工後

◆Sys1-3 ：1R/B西側周辺 （4/22～26）

施工前

施工後

図 2-2　がれき撤去の状況

消防車による注水

コンクリートポンプ車による注水

図 2-3　建屋への注水の状況

2.2 汚染水の流出防止対策及び海域汚染拡大防止対策

事故直後から実施された主な汚染水の流出防止対策、海域汚染拡大防止対策

東京電力作成資料

図 2-5 事故直後から実施された主な対策

2.2.1汚染水の流出防止対策

(1)汚染水流出箇所の緊急対策

高濃度汚染水の流出状況

2号機取水口スクリ－ン室付近の電源ケーブルピット内に表面線量率が1,000mSv/h を超える高濃度汚染水が滞留していること、また、ピット脇のコンクリートの亀裂からスクリ－ンエリアに高濃度汚染水が流出していることが、2013年4月2 日に確認された。

3号機取水口スクリ－ン室付近の電源ケーブルピットへタ－ビン建屋から高濃度汚染水が流入していること、さらにスクリーンエリアへ水が流出していることが2013年5月11 日に確認された。

スクリーン室付近（2 号機）[11]　スクリーン室開渠（2 号機）[8]　ケーブルピット（3 号機）[8]

図 2-6　高濃度汚染水の流出状況

高濃度汚染水流出箇所の緊急対策

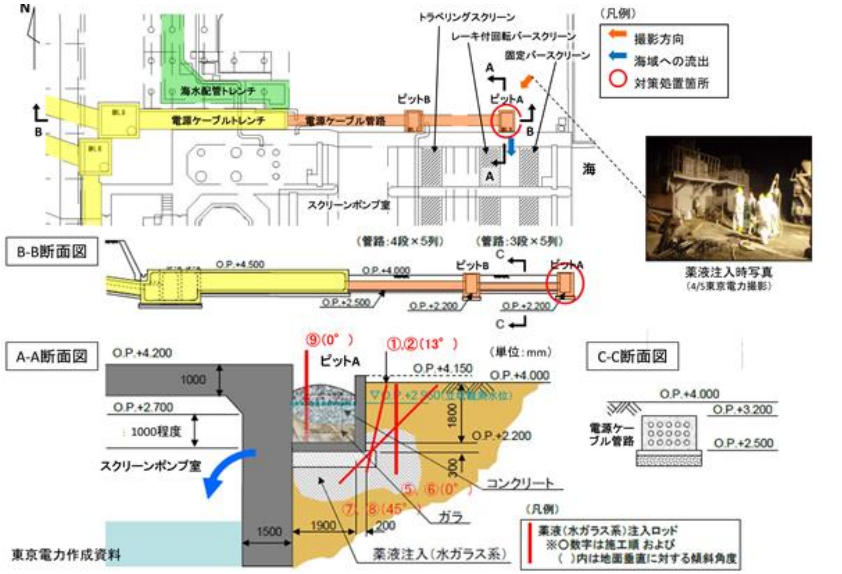


図 2-8　2号機取水口スクリ－ン室付近の流出防止対策

2号機取水口スクリ－ン室付近
ピットへのコンクリート注入、吸水性ポリマー等の投入を行ったが流出を止めることはできなかった。流出経路はピット及び**電線ケ－ブル管ではなく、電線ケ－ブル管下の砕石層である可能性が高いと考えられたため、この砕石層に水ガラスを注入**した結果、流出が停止したことが確認された。

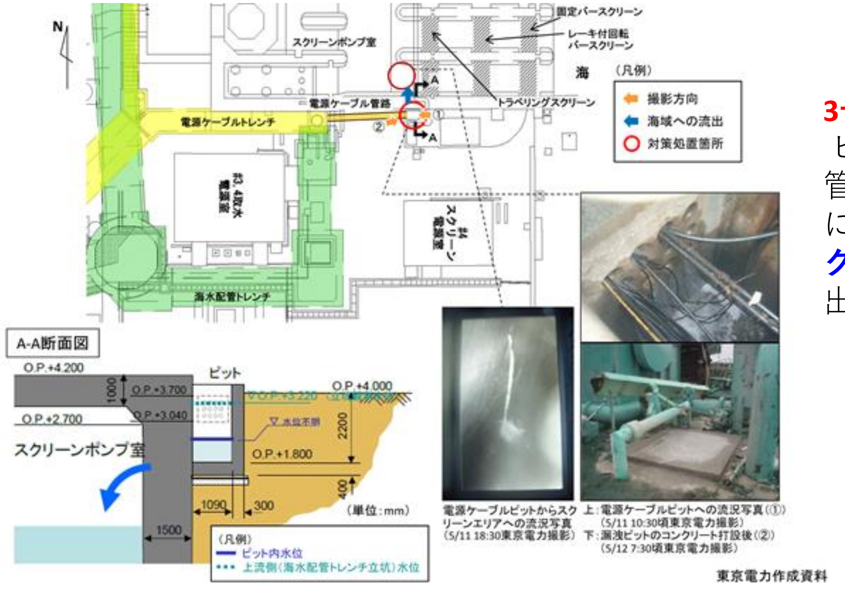


図 2-9　3号機取水口スクリ－ン室付近の流出防止対策

3号機取水口スクリ－ン室付近
ピットにつながる電線ケ－ブル管内のケーブルの撤去、ウエスによる閉塞、**ピット内へのコンクリート注入**を行った結果、流出が停止したことが確認された。

2.2.1汚染水の流出防止対策

(2)汚染水の流出防止対策

高濃度汚染水流出箇所の緊急対策完了後、汚染水流出の再発防止対策立案のため**建屋周辺に存在する立坑・トレンチ・ピット及び護岸の状況についての調査**が実施された。

調査結果に基づき、汚染水流出のリスクがある**立坑・トレンチ・ピットの閉塞**、**取水口の鋼製・コンクリ－ト製仕切り板（角落とし）による閉塞**、**護岸損傷箇所の補修**等の対策が実施された。

【凡 例】

● ：平成23年5月13～15日調査箇所 74箇所*1)

● ：平成23年5月23～25日調査箇所 7箇所*2)

*1)全81箇所のうち7箇所は既に閉塞済みのため調査対象から除外

*2)全8箇所のうち1箇所は既に閉塞済みのため調査対象から除外

図 2-12 ピットの状況調査位置

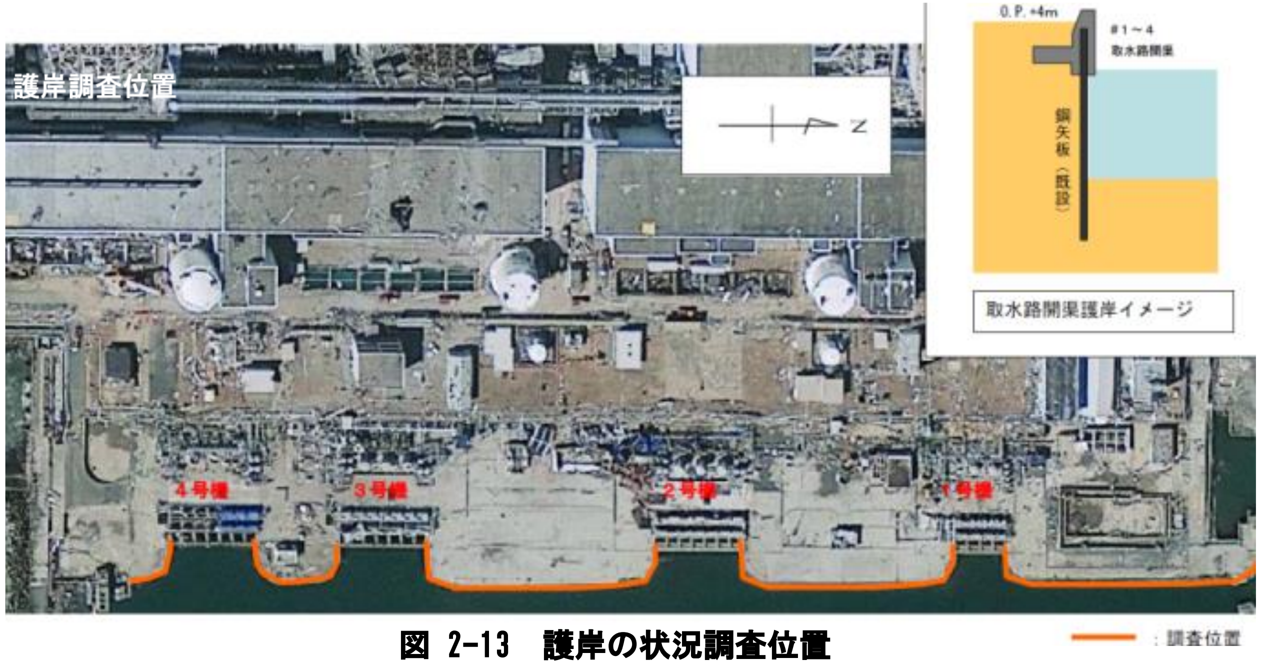


図 2-13 護岸の状況調査位置

2.2.1汚染水の流出防止対策

(2)汚染水の流出防止対策

(b)立坑・トレンチ・ピットの閉塞

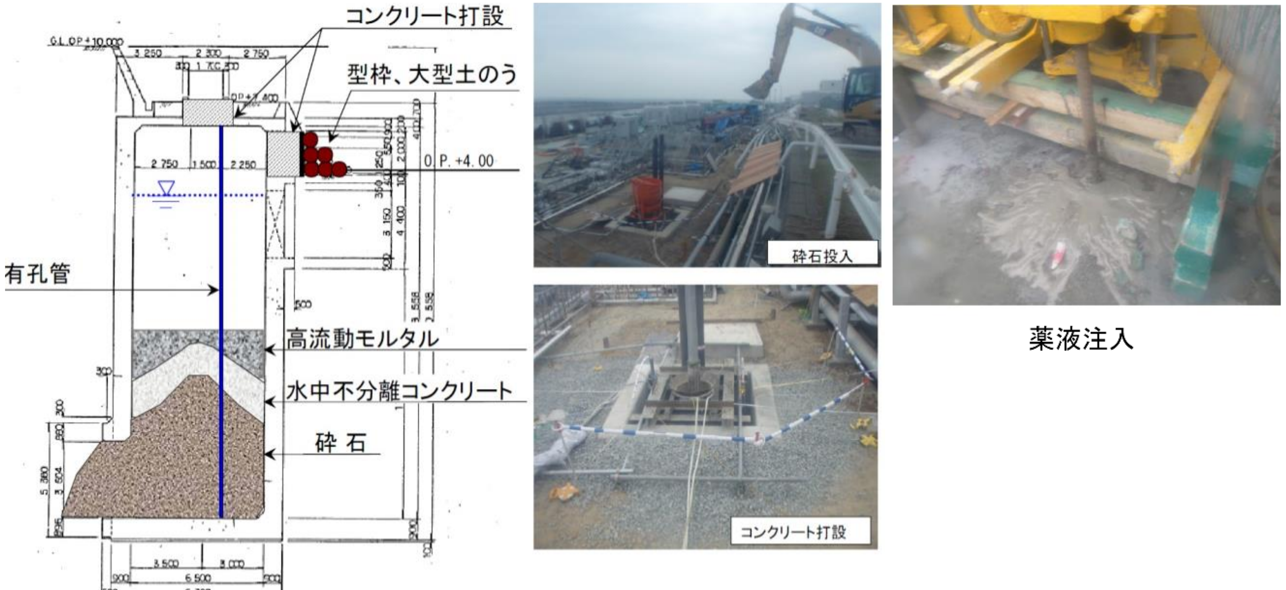
立坑やピット、海水配管トレンチに接続している電源ケーブルトレンチ等、あるいは流路は不明であるが流出経路となる可能性が否定できないピットの合計47箇所の閉塞が実施された。

①水ガラスセメント系薬液注入

流動性の高い水ガラスとセメントを同時注入する工法（LW工法）で閉塞が行われた。

②コンクリ－ト打設

がれきの状況やコンクリートによる充填性が確保される箇所については、ピットに直接コンクリートを打設する閉塞が実施された。



立坑の閉塞状況（2号機立て坑B）

図 2-14　立坑・トレンチ・ピットの閉塞状況

(C)スクリーンポンプ室前面等の閉塞

1～4号機の各スクリーンポンプ室前面と補機冷却用海水ポンプ室の前面には、**コンクリ－ト製仕切り板（角落とし）**を設置するとともに、2号機については**鉄板の設置**を併用する取水口の閉塞が実施された。

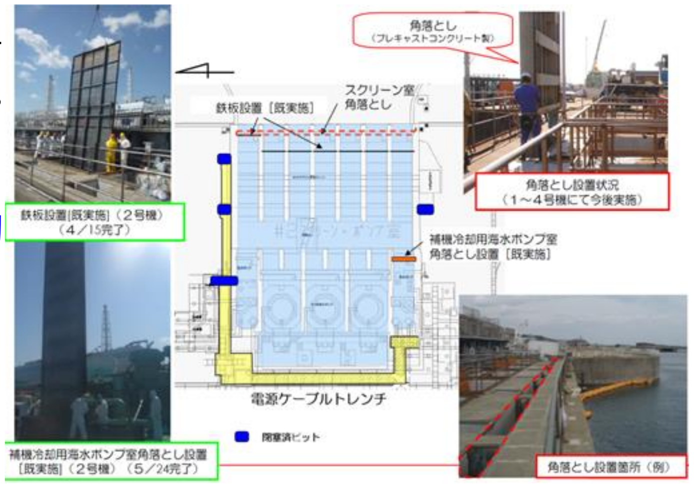


図 2-15　スクリーンポンプ室前面などの閉塞状況（2号機取水口）

(d)護岸損傷箇所の補修

汚染水が護岸損傷箇所から直接海域へ流出するリスクに備え、護岸の保全を兼ねた**グラウト材の充填による止水対策**が実施された。

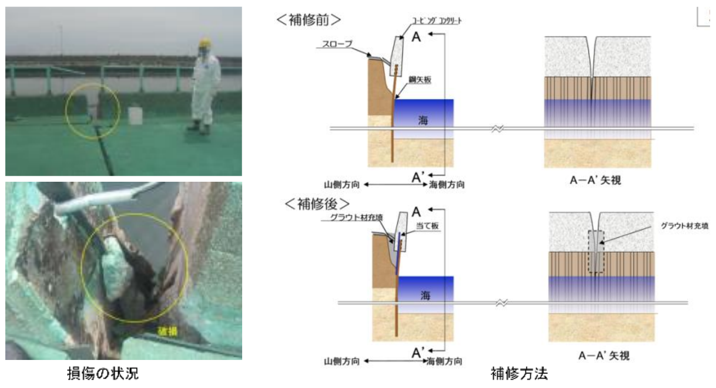


図 2-16　護岸損傷の状況、補修方法

2.2.2海域汚染拡大防止対策　(1)シルトフェンスの設置　(4)海底土の被覆

(1)シルトフェンスの設置

1～4号機の取水口前面、ならびに1～4号機取水路開渠北側・南側にシルトフェンスを設置し、**フェンス内側でのシルト等の汚濁粒子の滞留効果を促進させる海域への汚染拡大防止対策**が実施された。

1～4 号機取水路開渠北側

2 号機取水口前面

図 2-19　シルトフェンス設置状況

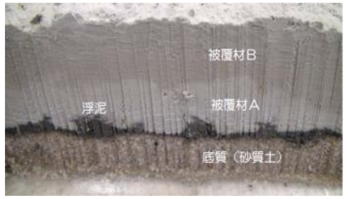
(4)海底土の被覆

港湾内の海底土調査の結果、最大約150×10^{4}Bq／kgの放射性物質が確認され、高波浪、潮流や作業船舶の航行等により海底から浮泥が巻き上がり**港口を経由して港湾外への汚染の拡散が懸念された**。

このため、海底土を**固化土により被覆**することにより拡散の防止を図る海洋汚染拡大防止対策が実施された。施工箇所は、第1期工事として港湾内の5・6号機前、1～4号機取水路開渠の約73×10^{3}m^{2}で、未施工箇所については、第2期工事として2014年から工事が実施された（2016年12月完了）。

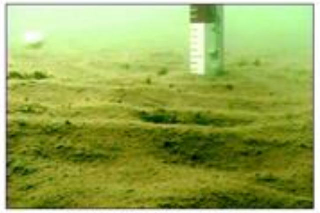
図 2-19　海底土の被覆施工箇所

表2-1　被覆材の配合

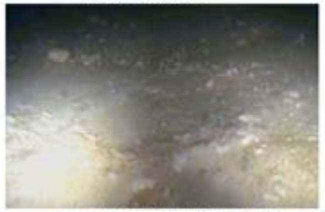


	配合1m^{3}あたり					性能確認	
	ベントナイト重量(kg)	真水重量(kg)	海水重量(kg)	セメント重量(kg)	スラリー水重量(kg)	湿潤密度(g/cm^3)	被覆材フロー値(cm)
被覆材A	78.9	434	433	88.6	88.6	1.106	23
被覆材B	120.4	541.6	173.4	187.7	187.7	1.21	20

① 1～4号機取水路前面エリアでの現地試験施工の様子
平成24年2月28日



② 被覆前の海底の様子
撮影：平成24年2月6日



③ 1層目被覆後の海底の様子
撮影：平成24年2月29日

④ 2層目被覆後の海底の様子
撮影：平成24年3月10日

図 2-26　海底土の被覆施工及び海底の状況

2.4.1仮設防潮堤の設置

東北地方太平洋沖地震の影響による**アウターライズ地震**の発生が専門家によって指摘された。このため、過去に大規模な発生に関する記録はないものの、福島沖のアウターライズ地震に伴う津波を想定した対策（**仮設防潮堤**）が実施された。

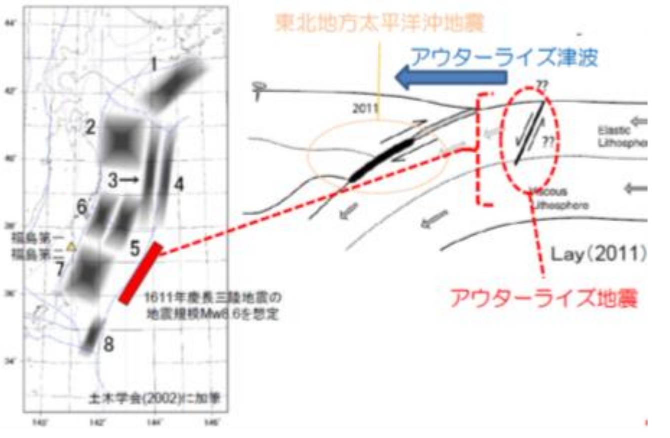


図 2-29　震源の位置

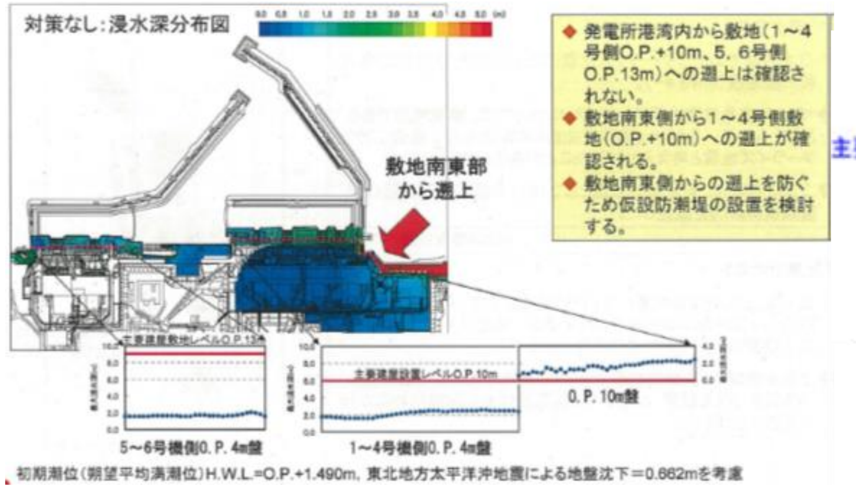
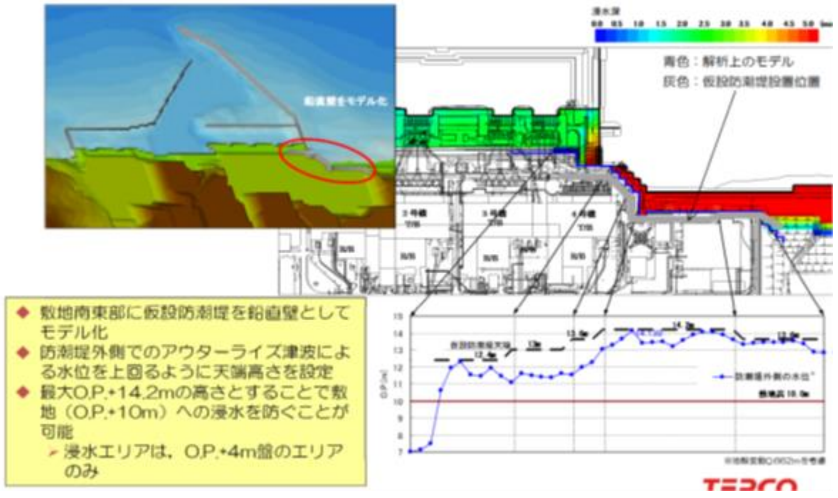


図 2-30　津波解析結果



仮設防潮堤	
材料	フィルターユニット（2.4×2.4×0.6m）
内容物	砕石（50～250mm　比重2.6以上）
重量	39.2kN/個
摩擦係数	0.6（地盤-フィルターユニット）
設計津波高さ	設置位置の進行波水深に応じて設定
防潮堤高さ	2.4～4.2m（4～7段積）
設置位置	敷地南側　O.P.10.0m盤
管理方法	経年変化を目視点検

図2-1　仮設防潮堤の施工状況

図 2-31　仮設堤防をモデル化した津波解析結果

図 2-32　設計の考え方と仮設防潮堤の形状

3.2汚染水処理対策

汚染水処理対策は、**経済産業省の「汚染水処理対策委員会」**の下に設置された小委員会、タスクフォース、サブグループと東京電力によって、地下水や雨水の挙動に関する検討を踏まえた汚染水処理対策についての精力的な議論が行われ、**「東京電力(株)福島第一原子力発電所における予防的・重層的な汚染水処理対策～総合的リスクマネジメントの徹底を通じて～」**とした報告書が取りまとめられ政府に提出された（平成25年12月10日）。報告書では、汚染水処理対策の**3つの方針（汚染水を取り除く、汚染源に水を近づけない、汚染水を漏らさない）**が示された。

汚染水処理対策は、この3つの方針に基づいた「**汚染水処理対策の全体計画の策定**」や「**個別の対策工の設計・施工**」について、原子力規制委員会、汚染水処理対策委員会での議論を経ながら現場の施工を展開し、2018年12月時点でほぼ全ての対策工が完成して稼働している。

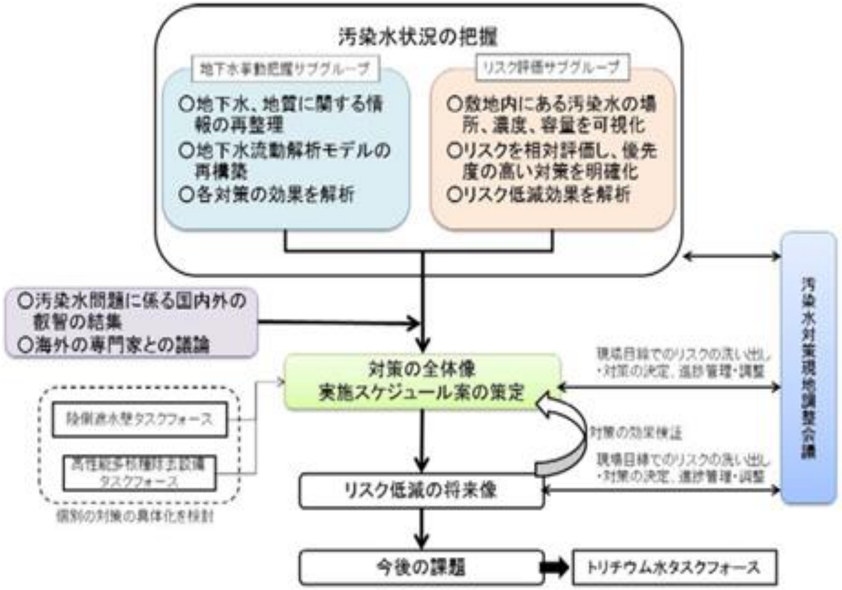


図1-1　汚染水処理対策委員会の検討の流れ

3.2.1全体計画の策定

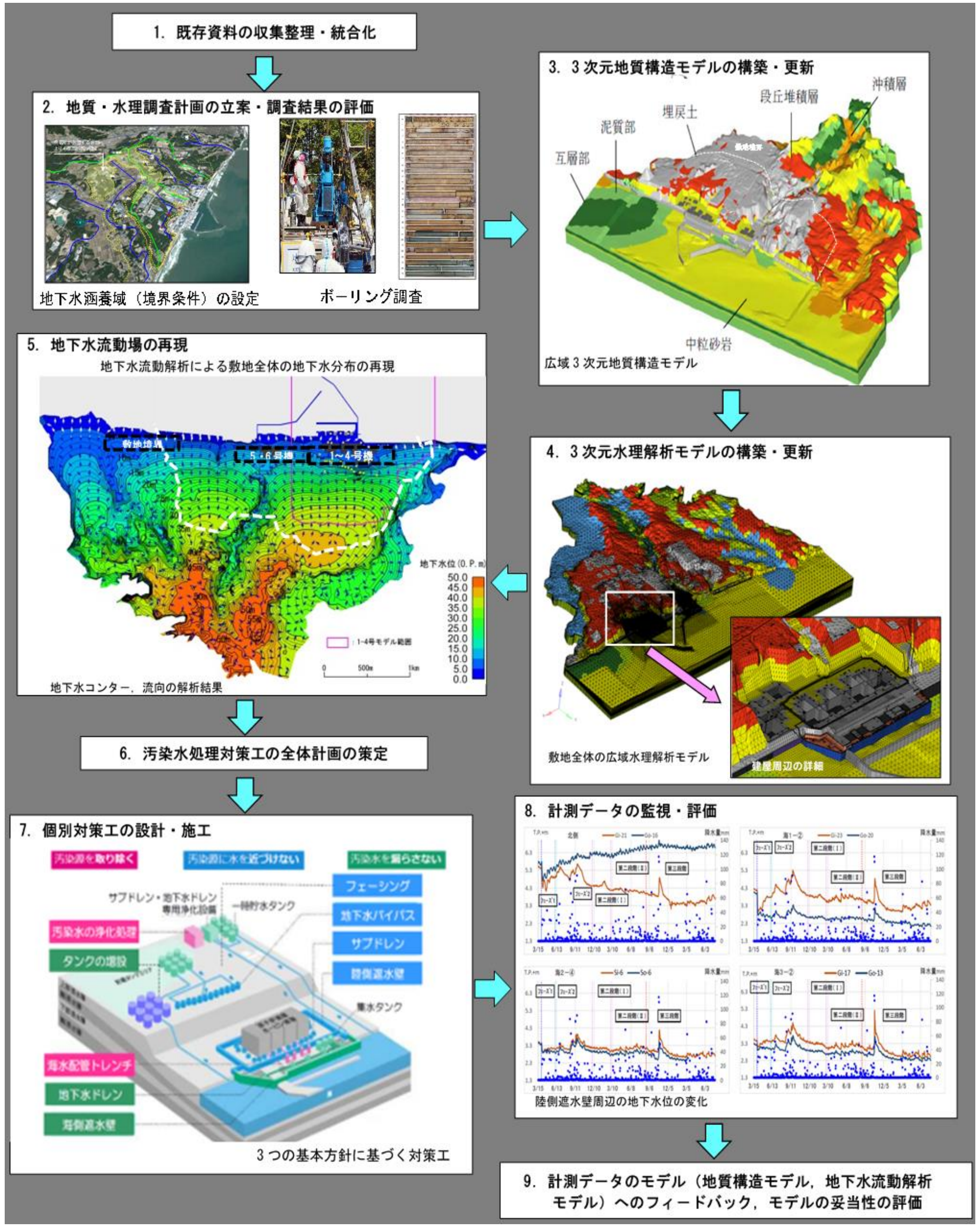


図3-9　汚染水処理対策の検討フロー

3.2.1全体計画の策定

(1)地質・水理地質構造

地質構造

福島第一原子力発電所の敷地を含む周辺地域の地層構成は、地表付近の**段丘堆積物（埋戻し土を含む）、中粒砂岩層（Ⅰ層）、泥質部（Ⅱ層）、互層部（Ⅲ層）**が分布している。さらに下部の**泥質部（Ⅳ層）**の中には、2層の**砂岩層（細粒砂岩層、粗粒砂岩層）**が存在する。
これらの地層は、海側へ約2度で東側（海側）に傾斜し、ほぼ平行で海域へ連続して分布する。

地質時代		地層名		主な岩相・層相
第四紀		沖積層		暗緑灰色～褐色の粘土及び砂，未固結
第四紀		段丘堆積物		黄褐色の砂礫及び砂，半固結
新第三紀	鮮新世	富岡層	T3部層	砂質泥岩～泥岩　軽石粒，凝灰岩を挟在 上部に砂岩を挟在
新第三紀	鮮新世	富岡層	T2部層	泥質砂岩　軽石粒，凝灰岩を挟在
新第三紀	鮮新世	富岡層	T1部層	泥質砂岩　軽石粒，凝灰岩を多く挟在
新第三紀	中新世	先富岡層		泥質砂岩～泥岩 軽石粒，スコリア粒，凝灰岩等を挟在
古第三紀	漸新世	先富岡層		

地層区分			層相	水理に関する既存の情報
段丘堆積物			中粒～粗粒の砂を主体とし径1～数cm程度の礫を含む	－
富岡層T3部層	中粒砂岩層	Ⅰ層	層厚は20m程度で塊状無層理の中粒砂岩を主体とする。層厚数mのシルト岩（泥質部）を挟在する。	中粒砂岩 透水係数 2.11E－03～4.14E－03cm／sec
富岡層T3部層	泥質部	Ⅱ層	層厚5～7m程度で、シルト岩を主体とする泥質部	泥質部 透水係数 1.00E－06～1.18E－06cm／sec
富岡層T3部層	互層部	Ⅲ層	層厚4～8m程度で、数cm～3m程度の間隔で砂質シルト岩と中粒砂岩が交互に分布する互層からなる。	互層部 透水係数 2.37E－04～8.07E－03cm／sec
富岡層T3部層	泥質部	Ⅳ層	層厚30m程度の無層理のシルト岩を主体とする泥質岩からなり、2層の連続性のよい砂層（細粒砂岩、粗粒砂岩を挟在する。 粗粒砂岩下部の泥質岩は砂質を呈する箇所がある。 ・細粒砂岩：Ⅲ層の下端から3mから層厚2m程度をもって分布する。 ・粗粒砂岩：Ⅲ層の下端から7mから層厚1m程度をもって分布する。	泥質部 透水係数 1.00E－06～1.18E－06cm／sec 細粒砂岩 透水係数 1.00E－04～5.14E－03cm／sec 粗粒砂岩 透水係数 6.20E－04～4.40E－03cm／sec
富岡層T2部層		Ⅴ層	層厚50m程度の泥質岩を主体とする地層	－
富岡層T1部層		Ⅵ層	層厚 70m～30m 程度の泥質岩を主体とする地層	－

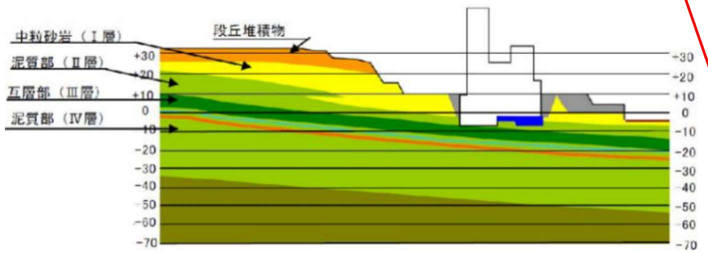


図3-13　福島第一原子力発電所の地質層序

広域3次元地質構造モデルの構築

汚染水処理対策の検討を行うため、下記の手順により地下水涵養域までを含めた広域地質構造モデルが構築された。

①事故直後に実施された調査ボ－リング
②既存のボ－リング情報の収集整理・統合化による地質構造モデルの再構築
③過去に実施された広域地表地質調査の地表露頭デ－タと敷地内の地質構造の統合化

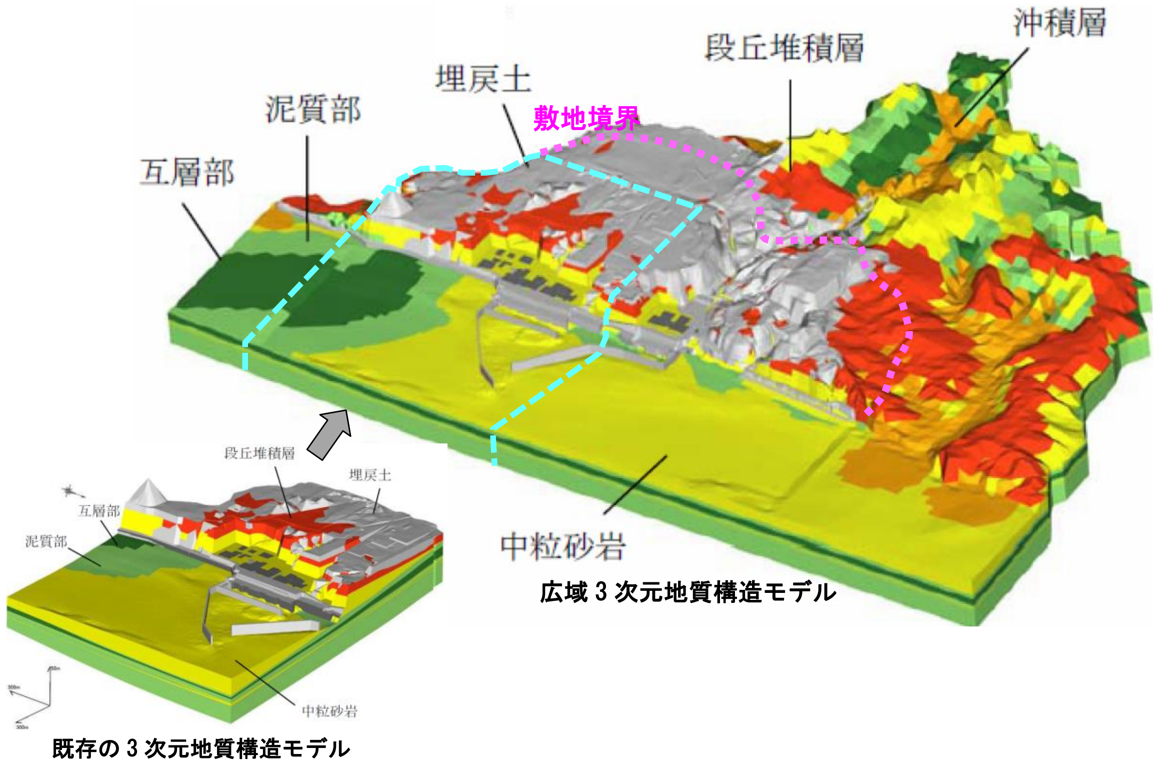


図3-16　広域3次元地質構造モデルの構築

3.2.1全体計画の策定

(1)地質・水理地質構造

水理地質構造

泥質部(Ⅱ)：敷地内にほぼ欠落なく分布する難透水性の地層。中粒砂岩層(Ⅰ層)には泥質部(Ⅱ)を水理的基盤とする**不圧地下水（自由地下水面）**が分布する。

互層(Ⅲ層)：泥質部(Ⅱ)をキャップロックとする**被圧地下水**が分布する。

泥質部(Ⅳ層)：30m以上の層厚をもつ難透水性の地層で、敷地を含む**周辺地域の水理的基盤**となる。

砂岩層（細粒砂岩、粗粒砂岩）：泥質部(Ⅳ層)には**被圧地下水を**もつ連続性の良い細粒砂岩、粗粒砂岩が分布する。

中粒砂岩層(Ⅰ層)を流れる不圧地下水（自由地下水面）は、敷地内の雨水の浸透によるものが支配的であること、**互層部(Ⅲ層)を流れる被圧地下水**は、敷地内の雨水の浸透によるものであるが、一部敷地外から流入する地下水が混在していること、**細粒砂岩層と粗粒砂岩層を含むより深部を流れる被圧地下水**は、敷地外から流入する地下水が支配的であることが推定された。

このうち、**汚染水対策を考える上では、汚染源となる高濃度汚染水が存在するトレンチや建屋がある中粒砂岩層(Ⅰ層)を流れる不圧地下水**が中心的な対象となり、一部において中粒砂岩層(Ⅰ層)の不圧地下水と連絡している**互層部(Ⅲ層)を流れる被圧地下水**にも注目する必要がある。

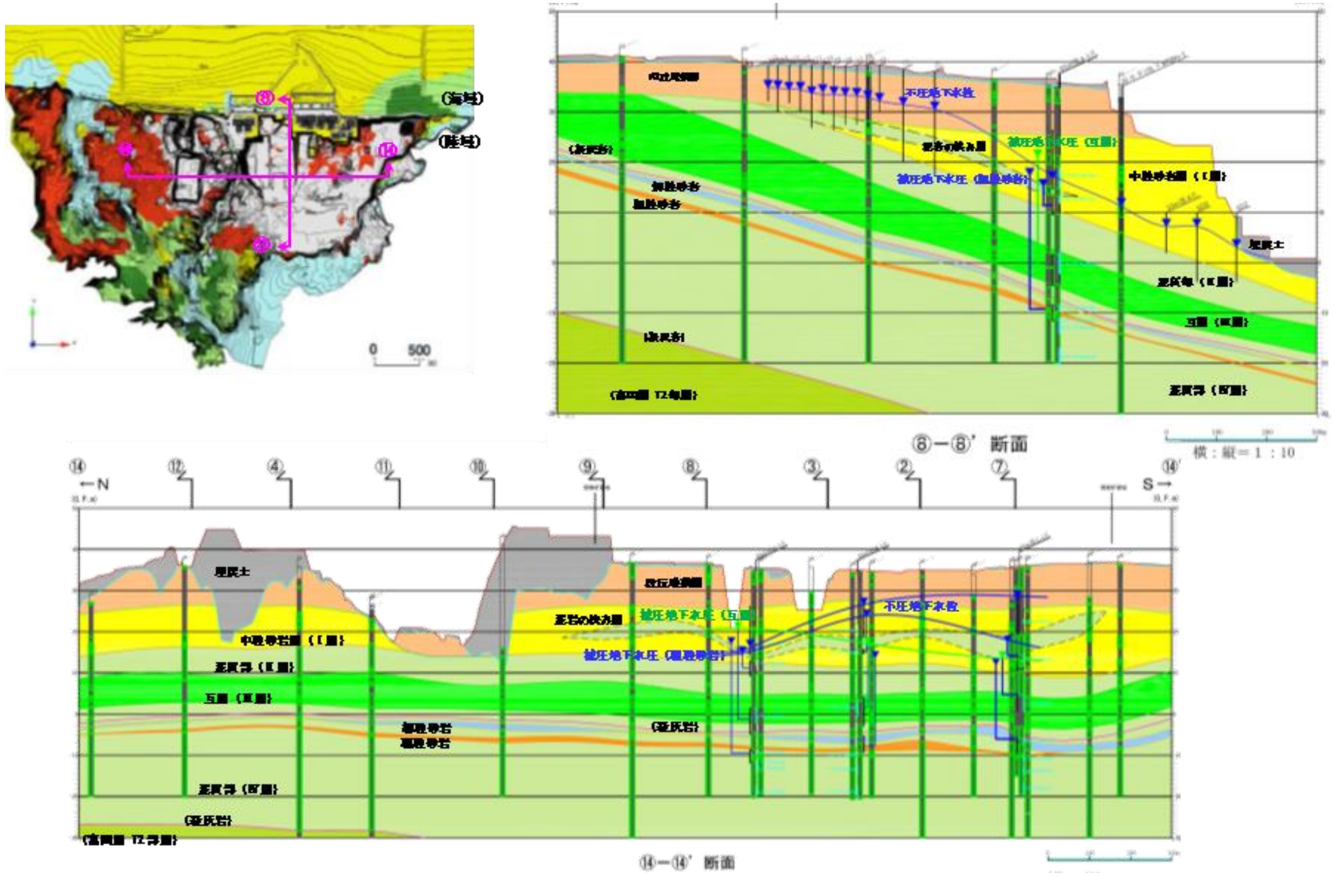


図3-18　地層構成と地下水の分布

表3-1　各地層の透水性

地層区分	透水係数(cm/sec)		有効間隙率	備考
地層名	水平	鉛直	(実流速換算時)	
盛土	2.8E-03	2.8E-03	0.46	
段丘堆積物	3.0E-03	3.0E-03	0.41	中粒砂岩層同様
沖積層	1.0E-03	1.0E-03	0.41	文献値
中粒砂岩(Ⅰ層)	3.0E-03	3.0E-03	0.41	
泥質部(Ⅱ層)	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
互層(Ⅲ層)	1.0E-03	1.1E-06	0.41	異方性考慮
泥質岩(Ⅳ層)	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
細粒砂岩	2.3E-03	2.3E-03	0.41	
泥質岩(Ⅳ層)	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
粗粒砂岩	2.0E-03	2.0E-03	0.41	
泥質岩(Ⅳ層)	1.1E-06	1.1E-06	0.54	

3.2.1全体計画の策定

広域3次元地質構造モデルに基づいて、地下水流動や地下水の建屋への流入量、地下水の汲上げ効果等に影響及ぼすと構造物を可能な限り正確に反映した**3次元地下水解析流動モデル**を構築した。

3次元地下水解析流動モデルによる定常浸透流解析では、**地下水位の実測データがある程度良好に再現されていること**、さらに、**事故前・後の建屋周囲のサブドレンからの地下水の汲上げ量も、比較的良い対応関係が見られた**。

また、**解析モデル、解析条件のバックチェック**を日本原子力研究開発機構（JAEA）に依頼し、その結果、解析モデル、解析条件は概ね妥当と判断された。このため、**この解析モデル、解析条件を用いた地下水流動解析結果は、実施すべき対策やその効果等を検討する上で有効と判断し、以降の汚染水処理対策の諸検討に用いられた**。

なお、逐次取得される地質・水理情報や地下水流動に影響を及ぼす地中埋設物、さらに対策工の詳細な情報などを継続的に地質構造モデル、地下水流動解析モデルに反映する**モデルの更新を適宜実施している**。

(2)地下水流動場の評価

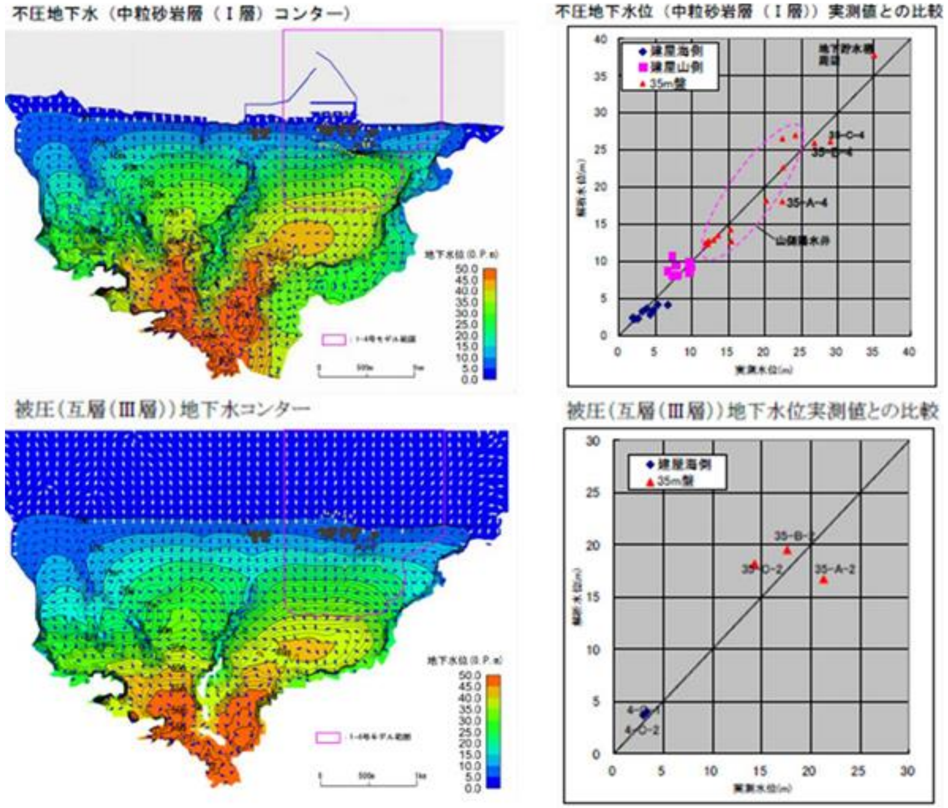


図3-22　地下水位の実測データと解析値の比較

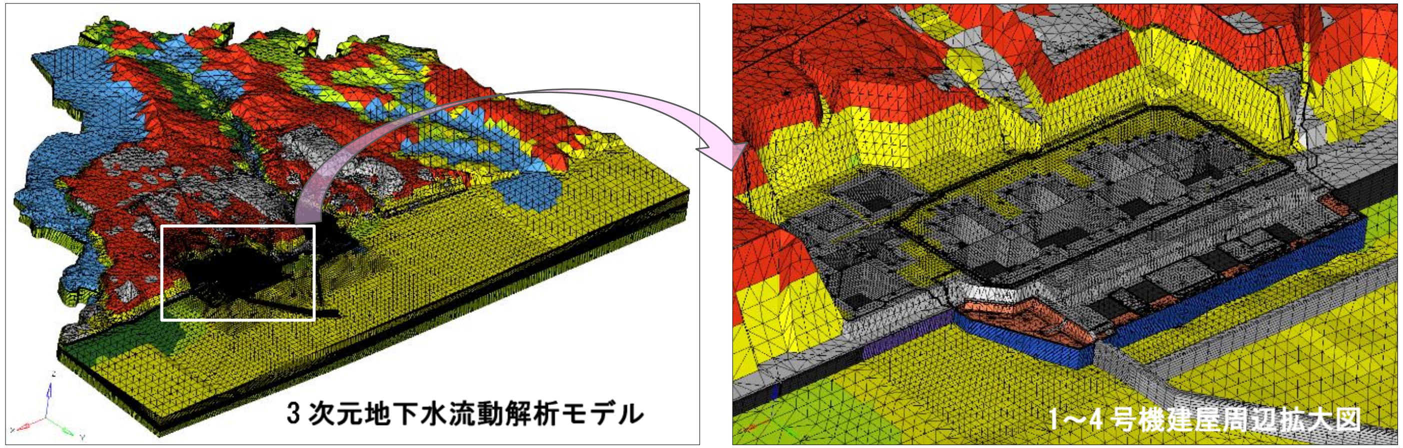


図3-21　解析モデルの鳥瞰図

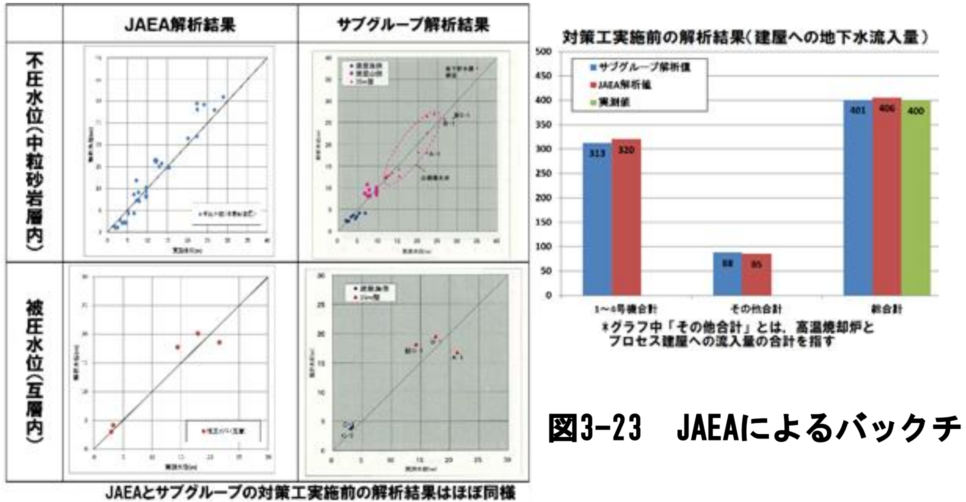


図3-23　JAEAによるバックチェック

3.2.1全体計画の策定

(3)予防的・重層的な汚染水処理対策の検討方針

汚染水処理対策は、汚染水を「**取り除く**」、汚染源に水を「**近づけない**」、汚染水を「**漏らさない**」の3つ対策に大別できる。

(a)汚染水を「取り除く」対策

建屋海側**トレンチ内の高濃度汚染水の汲上げ・閉塞**

(b)汚染源に水を「近づけない」対策、汚染水を「漏らさない」対策（地下水流動に影響を及ぼすもの）

地下水流動解析モデルを用いて各対策を個別・組合せで実施した場合の効果を把握し、予防的・重層的対策の観点からの解析により、**地下水バイパス、海側遮水壁・地下水ドレン（護岸付近の揚水施設）サブドレン、陸側遮水壁**が完全に機能すれば、地下水の建屋への流入量を相当程度軽減できること、また、**広域的なフェーシングによる表面遮水**の効果は大きいことが確認された。

(c)汚染水を「漏らさない」対策

溶接型タンクへのリプレ－ス、タンクエリアの堰のかさ上げ、排水路の暗渠化、排水口の港湾内へのルート変更、建屋の防水性向上

(d)汚染水を「漏らさない」対策（タンク容量の確保）

溶接型タンクの増設

表3-3　解析ケース、解析結果(定常計算)

ケース	対策工 4m盤対策	地下水バイパス	海側遮水壁	山側SD	山/海側SD	陸側遮水壁	フェーシング	山側遮水壁	建屋流入量(トン／日) 合計	1-4号機建屋	海域への流出量(トン／日)(注1)	くみ上げ量(トン／日)	くみ上げ量内訳(トン／日)(注2) 地下水バイパス	サブドレン	地下水ドレン(注3)
対策無し									400	310	290	400			
ケース1	●								410	320	220	460			50
ケース2	●	●							390 330 290	300 250 210	220 200 210	900 1210 1130	460 840 790		50 40 50
ケース3	●		●						400	320	0	750			350
ケース4	●			●					140	90	190	1000		820	40
ケース5	●				●				120	80	180	1070		920	30
ケース6	●					●			130	30	100	140			10
ケース7	●						● 約2.0km²		130	110	90	130			
ケース7-2	●						● 約1.7km²		160	130	100	160			
ケース8	●						●※ 約1.0km²		300	240	170	330			30
ケース8-2	●						●※	●※※	170	130	140	190			20
ケース9	●							●敷地境界内側	420	330	220	470			50
ケース10	●	●	●		●	●			70	0	0	1020	500	310	140
ケース11	●		●			●			130	30	0	270			140
ケース12	●	●	●			●			130	30	0	770	500		140
ケース13	●	●	●		●				60	20	0	1770	330	1230	150
ケース14	●	●	●		●	●	●※	●※※	30	0	0	400	130	140	90
ケース14-2	●	●	●		●	●	● 約1.7km²		30	0	0	320	140	130	20
ケース15	●		●			●	●※	●※※	110	30	0	200			90
ケース16	●	●	●			●	●※	●※※	100	30	0	340	150		90
ケース17	●	●	●		●		●※	●※※	60	40	0	550	10	440	40
ケース17-2	●	●	●		●		● 約1.7km²		60	40	0	590	20	490	20

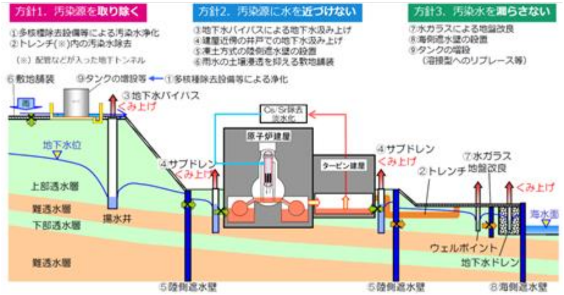


表3-4　廃炉・汚染水問題の追加対策

廃炉･汚染水問題に関する予防的･重層的な追加対策(案)　資料１－１

1. 汚染水問題に対する予防的･重層的な追加対策の実施

①汚染源を「取り除く」

これまでの主な対策:
- トレンチ内の汚染水のくみ上げ･閉塞
- 多核種除去設備(ALPS)による汚染水浄化
- 国費によるより高性能な多核種除去設備　等

主な追加対策:
- ◆多核種除去設備の増設
- ◆タンク漏えい水対策（土壌中のストロンチウム捕集）
- ◆港湾内の海水の浄化　等

②汚染源に水を「近づけない」

これまでの主な対策:
- 地下水バイパス
- 建屋近傍の井戸（サブドレン）での汲上げ
- 国費による凍土方式の陸側遮水壁
- 建屋海側の舗装　等

主な追加対策:
- ◆「広域的な舗装（表面遮水）」又は「追加的な遮水とその内側の舗装」
※地表面の除染等の線量低減も考慮
- ◆タンク天板への雨どいの設置

③汚染水を「漏らさない」

これまでの主な対策:
- 水ガラスによる地盤改良
- 海側遮水壁
- タンクの増設（ボルト締め型タンクから溶接型タンクへのリプレイス）　等

主な追加対策:
- ◆溶接型タンクの設置加速
- ◆大規模津波対策（建屋防水扉等）
- ◆建屋からの汚染水の漏えいの防止
- ◆汚染水移送ループの縮小　等

- 特に、汚染水貯水タンクの増設については、溶接型タンクの設置加速を進めるとともに、地震による液体表面の揺れ等に備えて十分なタンク容量を確保するため、関係事業者の協力を促す等、官民を挙げて可能な限り加速化する必要がある。
- 追加対策についても、港湾内の海水の浄化技術や土壌中の放射性物質除去技術など技術的難易度が高いものは、平成25年度補正予算を活用し、技術の検証等の取り組みを進めていく。
- なおリスクが残存するトリチウム水について、あらゆる選択肢について、総合的な評価を早急に実施し、対策を検討する。

2. 風評被害対策としての情報発信の一層の強化

- 引き続き、科学的な根拠に基づいた情報発信を国際的に開かれた形で行う。関係省庁の協力の下、廃炉･汚染水対策チームによる一元的な対応を強化する。

3.2.2個別の汚染水処理対策

(1)汚染水を取り除く対策

(a)海水配管トレンチの汚染水除去及び充填

水中で長距離流動可能なセメント系充填材の開発を行い、充填箇所の特徴に応じて以下の材料を用いたトレンチ内部の閉塞が行われ、トレンチ内部の汚染水の移送（除去）が行われた。

①低収縮性を有する水中不分離性コンクリート

立坑部の止水（間隙通過性と自己充填性）機能を有する材料。

②水中重量ペースト

トンネル部や立坑部の隙間やひび割れを埋める機能（密度が大きく粒径が小さい、化学的に不活性）を有する材料。

③中硬化型高流動エポキシ樹脂

立坑部の充填材をキャッピングする機能（水中を6m以上流動し自己充填性にも優れる）を有する材料。

④高流動コンクリート

立坑最上部の「ふた」の役割（ひび割れ抑制）を有する材料。

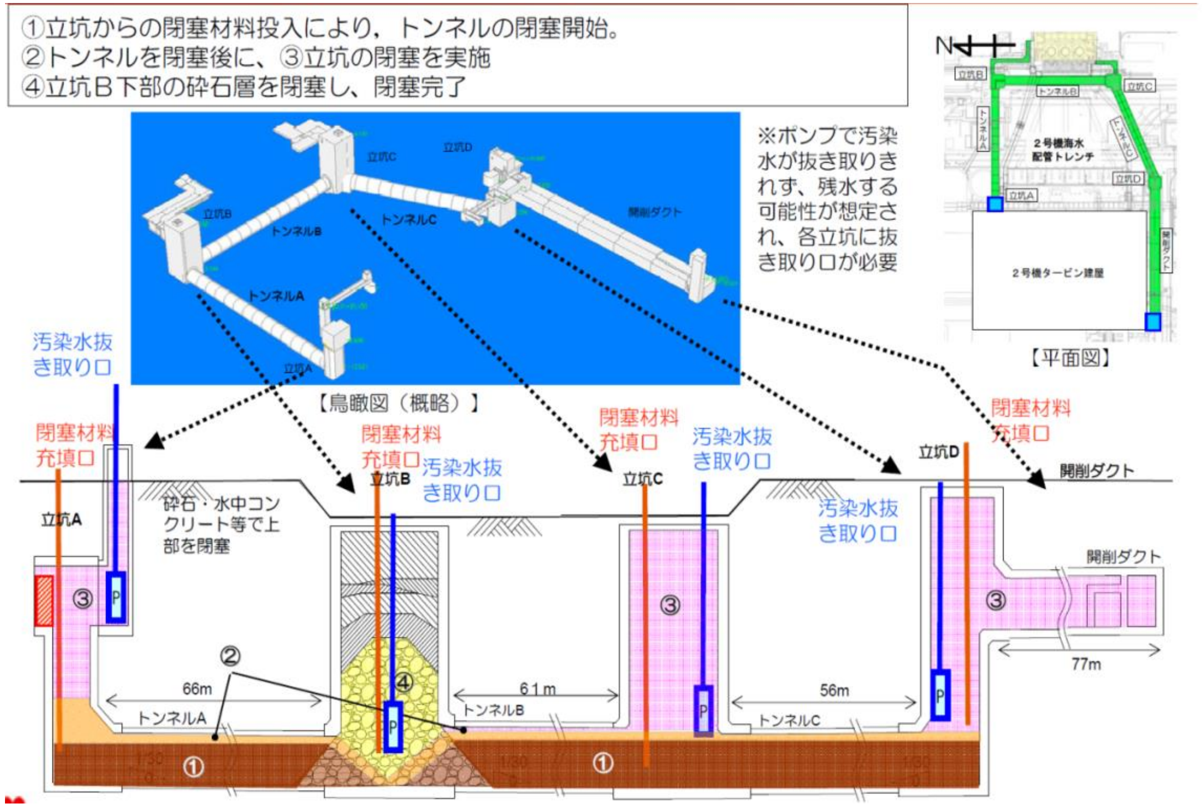


図3-32　海水配管トレンチ充填の概要図(2号機海水配管トレンチの例)

建屋直近の高線量環境での作業となるため、充填作業エリアでは、作業箇所への砕石・鉄板の敷設、側部はコンクリート擁壁・遮へいシート（鉛毛マット）を設置する等、**万全の被ばく低減対策**が実施された。

砕石・敷鉄板・コンクリート擁壁による遮へい

鉛毛マットによる遮へい及びタングステンベスト

図3-37　被ばく低減対策

3.2.2個別の汚染水処理対策

　地下水は山側（西）から海側（東）に向かって流下する。**汚染リスクが低い建屋山側で地下水を汲上げる**ことにより、建屋への地下水流入を抑制し、**汚染されていない汲上げ水を海洋放出**する地下水バイパスの主な検討項目は、以下とおりである。

①地下水バイパスの効果

　地下水流動解析による揚水井戸の本数、設置位置、施工深度、汲上げ量と効果等の検討により、**12孔の揚水井戸、3系統のタンク系列の設備**を設定

②建屋山側の水質の確認と揚水井設置工事の成立性

- **建屋山側の地下水の汚染**がないことの確認
- 発電所建屋近傍の高線量環境下での施工となるため、**十分な被ばく低減対策を考慮した施工方法の工夫**による工事の成立性の検討。

③地下水バイパスの運用（揚水井の運用とタンクの運用）

- 揚水井戸の運用は、建屋周辺の地下水位、水質等のモニタリングを行いながら、建屋内滞留水のアウトリークが発生しない段階的な水位低下を実施（**揚水井の運用**）。
- **貯留→分析→排水のサイクル**での運用が可能な設備の設置と**タンク運用**。

　地下水バイパス稼働（2014年4月9日）から約半年後では、地下水バイパスは**合計90m³／日程度の建屋流入量の抑制効果**があるものと評価された。

(2)汚染水源に水を近づけないための対策

(a)地下水バイパス

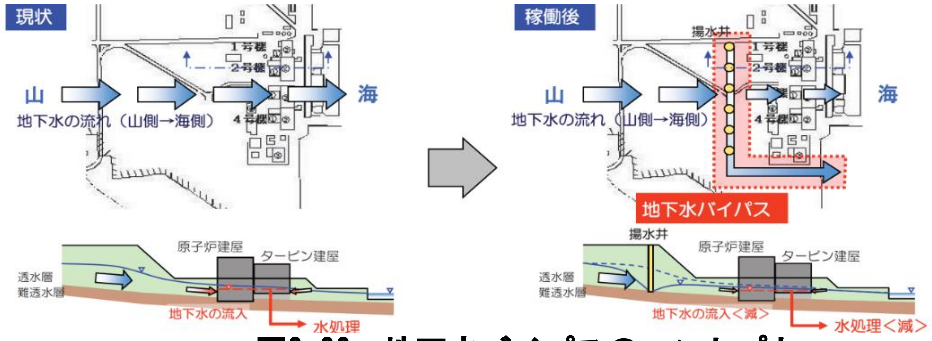


図3-38　地下水バイパスのコンセプト

図3-41　地下水バイパス設備全体平面図

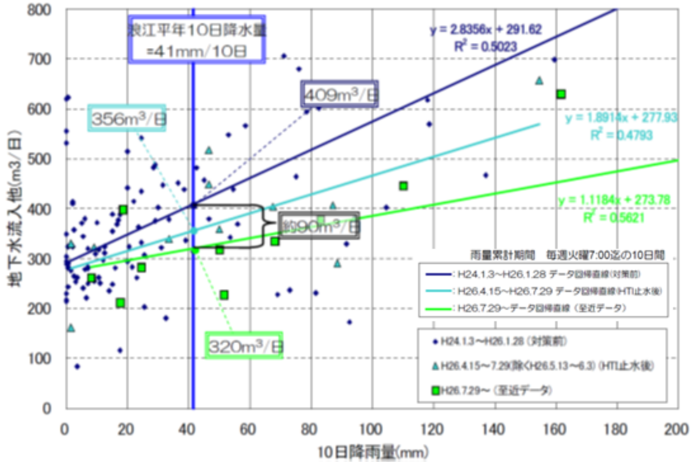


図3-44　地下水バイパスの建屋流入量への抑制効果

3.2.2個別の汚染水処理対策

(b)サブドレン

主要建屋周辺の地下水を汲上げるサブドレン（93基）は、津波や水素爆発による**ポンプ等の損傷、がれきの混入、高濃度汚染水の滞留などのため運転を停止していた。**このため、建屋周囲の地下水位が上昇し、**建屋への地下水流入の増加要因**となっていた。

また、地下水位をコントロールしながら低下させ**建屋への地下水流入量の低減を図ること**が急務であったこと、さらに、**将来のドライアップに向けた建屋水位の低下**を行うためにも**サブドレンによる地下水位のコントロ－ル**が重要である。

サブドレンについては、陸側遮水壁等の対策工を考慮した地下水流動解析により、**地下水位の低下量、汲上げ量などの予測、サブドレンの復旧や新設、浄化設備の容量**などの検討を踏まえ、以下の**方針での再稼働**が行われた。

①既設ピットのうち復旧可能なピットについては、ピット内の浮遊物質やがれきの除去、**ポンプの再設置を行い速やかに再稼働させる**（27基）。

②復旧が難しいピットについては、**ピットを新設して稼働させる**(15基）。

③サブドレン汲上げ水の移送・処理設備は、汲上げ水に含まれる**放射性核種（トリチウムを除く）を十分低い濃度になるまで除去し、水質を確認した後に排水できる設備**とする。

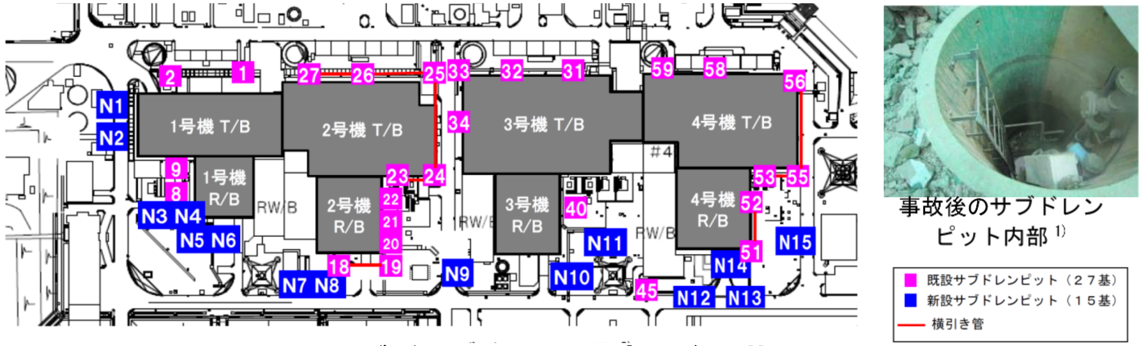


図3-45　サブドレンの配置と事故後の状況

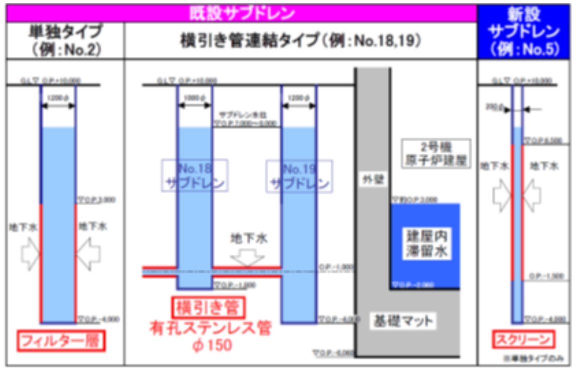


図3-46　サブドレンの構造（既設及び新設）

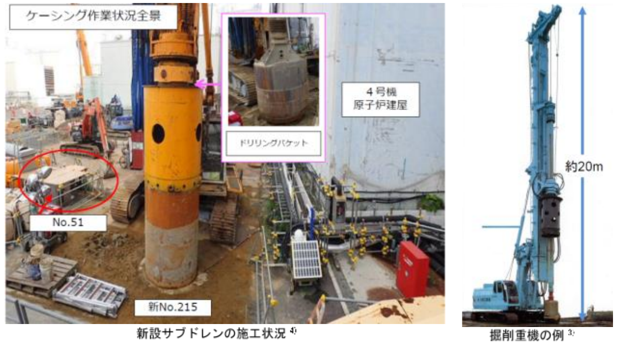


図3-47　新設サブドレンの施工状況

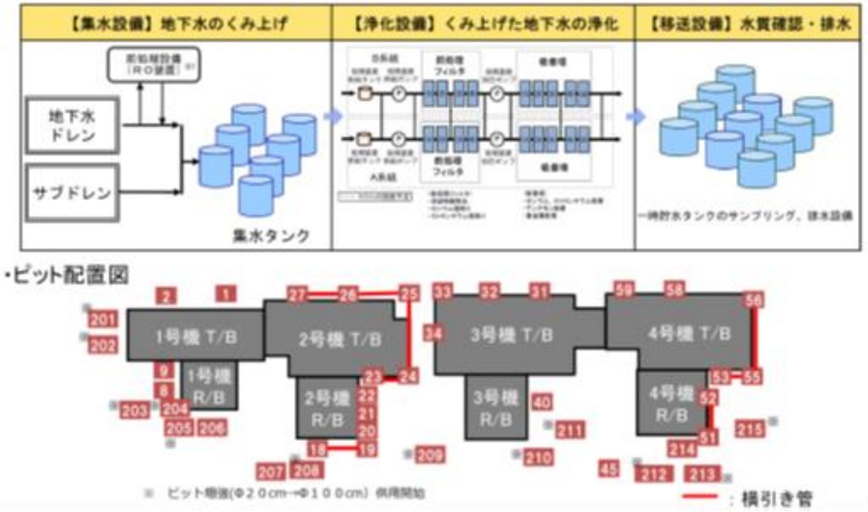


図3-48　サブドレンの設備構成

3.2.2個別の汚染水処理対策

(c)陸側遮水壁

凍土方式による陸側遮水壁の概要

凍土方式による陸側遮水壁は、建屋周りを凍土による遮水壁で取り囲み、また、海側遮水壁と接続させることにより、山側から海側へ流れる地下水を迂回させて建屋に近づけないことで汚染水を低減させる。

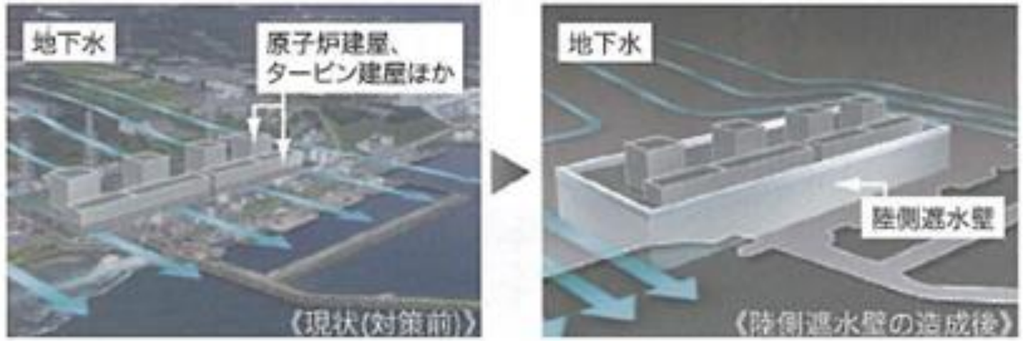


図3-53　陸側遮水壁の造成と地下水流れのイメージ

表3-8　陸側遮水壁の主要設備

陸側遮水壁の規模		全長：約1,500m 深度：約30m
凍結管	1,568本	凍結管間隔：1.0m，1.2m
測温管	359本	列数；1列（陸側遮水壁の外側，現地の状況により一部内側に設置） 測温管間隔：約5m 凍結管ラインからの離れ距離：0.85m
冷凍機	30台	ブライン温度：-30° C 凍結能力：約70冷凍t（0° Cも水を24時間で氷にできる能力）
水観測井戸	82孔	陸側遮水壁沿いの内外側に配置し，水位差により遮水効果を確認するための観測井戸
注水井戸	33孔	陸側遮水壁沿いの内側に配置し，建屋周辺の地下水位が建屋内水位より低くなる可能性がある場合，注水を行い建屋周辺の地下水位を保持するための補助設備

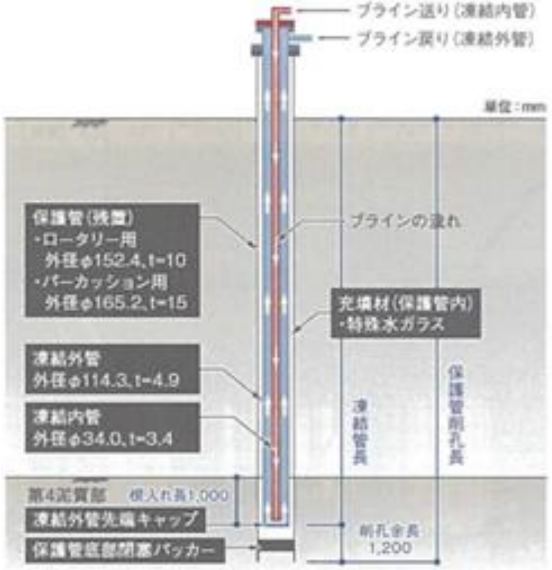


図3-55　凍結管の構造断面

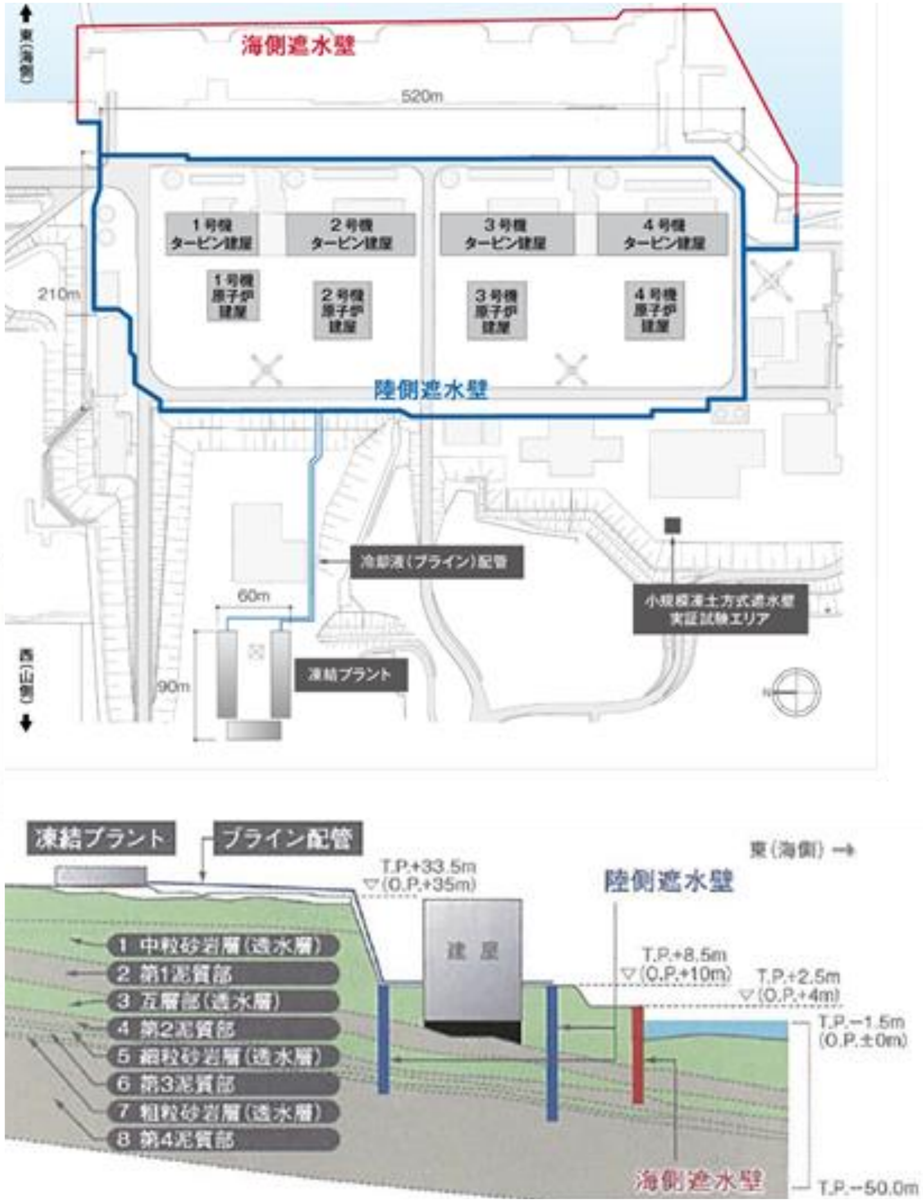


図3-56　陸側遮水壁の設備配置図

3.2.2個別の汚染水処理対策

(c)陸側遮水壁

凍土方式による陸側遮水壁採用の経緯

　汚染水処理対策委員会は、廃炉対策推進会議（第3回、平成25年4月19日）の議長（経済産業大臣）の指示により、建屋への**地下水流入抑制の具体的な方策についての公募**を行い、**陸側遮水壁に求められる要件**に基づいた評価を行った。

①遮水能力が高く、地下水の流入抑制効果が高いこと

- 地下水流入量の抑制効果が高いことが望ましく、透水性は小さいほどよい。
- 地震などによって遮水壁に亀裂入が発生した場合でも、遮水機能の低下が起こりにくいほどよい。

②施工期間の短さ、施工可能性の高さ、遮水壁で囲い込む範囲を狭くできること

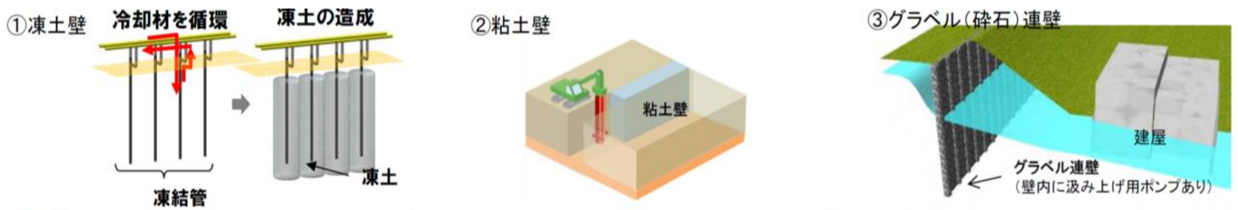
- 高線量下での作業のため、工期の短さや施工可能性が高いこと。
- 地下埋設物の存在があっても施工可能であること。
- 周辺へ汚染水を流出させない施工方式が好ましい。
- 取扱う地下水の総量が少なく、地下水水管理を容易とするため、囲い込む範囲が狭いことが好ましい。
- 発生する残土が少ないことが好ましい。

③既設の埋設構造物に大きな影響をあたえないこと

④完成後の地下水位管理が比較的容易であること

⑤完成後の補修等の管理が比較的容易であること

表3-10　陸側遮水壁の工法の比較



	①凍土壁	②粘土壁	③グラベル(砕石)連壁
透水係数（遮水効果）	0m／s	10^{-8}～10^{-9}m／s	グラベル連壁は水を通す設計であり、透水係数での比較は適さない
施工性	・重機が小型、建屋近傍設置に有利 ・重機が小型であるため、重機に遮へい措置をすることで、作業員被ばく対策が可能 ・他作業との作業エリア調整が容易 ・汚染掘削土をほとんど排出しない 凍土壁施工重機 2m×2m	・重機が大型、建屋近傍設置には不利 ・重機が大型であるため重機に遮へい措置をすることが困難。作業員被ばく対策も講じにくい ・他作業とのエリア調整が困難 ・汚染掘削土等が発生する 一般的な連続壁の施工重機 15m×15m	・重機が大型、建屋近傍設置には不利 ・重機が大型であるため重機に遮へい措置をすることが困難。作業員被ばく対策も講じにくい ・他作業とのエリア調整が困難 ・汚染掘削土等が発生する 一般的な連続壁の施工重機 15m×15m
工法概要	一定間隔で凍結管を設置し、氷点下数十度の冷却材を循環させ、凍土壁を造成	地盤を切削し、粘土を充填することで粘土壁を構築	地盤を切削し、グラベル(砕石)を充填。壁内にポンプを設置し、上流からの地下水を汲み上げることで、地下水位を管理。
工期	約18～24ヶ月	約24～30ヶ月	約24ヶ月

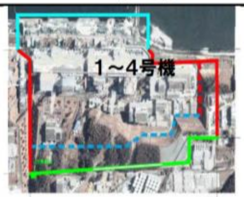
施工エリアの比較

全長約1400m（図中の水色部分）

＜

全長 約1500m（図中の緑＋ピンク部分）

＜



全長 約2000m（図中の赤色＋緑色部分）

評価結果

　応募のあった対策工のうち、凍土壁は既設構造物を取り壊さず、また、地下水の凍結で遮水性の高い壁の構築が可能なため、**他の方法に比べ要件に対する優位性がある**と判断され、第3回 汚染水処理対策委員会（平成25年5月30日）において「**遮水効果、施工性等に優れる凍土方式**」による陸側遮水壁が採用された。

3.2.2個別の汚染水処理対策

(c)陸側遮水壁

陸側遮水壁の設計検討

主な設計検討事項は表 3- 12のとおり。また、原子力規制委員会 特定原子力施設監視・評価検討会、汚染水処理対策委員会、陸側遮水壁タスクフォース等で**個別の技術課題や設計検討、工事の進捗管理、凍土壁の効果**などが検討された（**表 3- 13**）。

陸側遮水壁を支える技術としては、実証試験の評価、凍土の成立性評価、凍土壁ライン・深度や凍結プラント等の基本仕様、リチャージウェル（注水井）の成立性や設備設計、削孔や凍結順序などの

図3-58　4つの実証試験

表3-12　陸側遮水壁の主な設計検討事項

検討項目		検討事項	内 容	設計等への反映
大項目	小項目			
地下水流入抑制対策	1.遮水壁の範囲，位置（ライン），凍結管 のピッチ等の基本検討	①凍土の効果，被ばくを考慮した施工範囲等	・解析（地下水流動解析，熱・水連成解析）による施工範囲等の検討 ・放射線防護設備の検討	・凍土壁ライン，凍結プラント等の基本仕様、基本配置 ・凍土遮水壁の造成手順 ・凍土遮水壁設置後の地下水位管理の基本方針
		②凍土壁に支障のある埋設物の調査・評価	・施工・竣工図等に基づいた凍土壁ルート下の埋設物の位置・深度，形状・規模の確認 ・設計・施工への影響評価 ・補助工法や埋設物内の汚染水漏洩に対する対策検討	
		③リチャージシステムの効果の評価	・解析（地下水流動解析）によるリチャージ効果の検討 ・実証試験（現地小規模凍結試験）で確認	
		④遮水壁内地下水量処理策の検討	・解析（地下水流動解析）により凍結順序（山側先行施工と山海側同時施工）などによる建屋周辺地下水位の低下検討	
		⑤遮水効果・滞留水のアウトリークの可能性についての評価	・遮水効果を実証試験（現地小規模凍結試験）で確認 ・解析（地下水流動解析）によるアウトリークの可能性ならびに最適な施工順序の検討	
		⑥各建屋への流入量の把握・評価	・解析（地下水流動解析）による検討	
	2.遮水壁の深度	①下部透水層の地下水の影響評価	・解析（地下水流動解析，熱・水連成解析）によるリスクと効果を踏まえた最適な深度の検討 ・難透水層の遮水性を実証試験（現地小規模凍結試験）で確認	・凍土壁の深度 ・施工方法
		②難透水層（泥岩層）の遮水性確保の検討		
		③互層の地下水への汚染の拡大防止検討	・施工方法の検討	
	3.既設埋設物干渉箇所での凍土の成立性	①凍土壁施工に関する基礎データの取得	・実証試験（現地小規模結試験）で取得	・凍土壁ライン・凍結プラント基本配置 ・補助工法を含めた埋設干渉箇所の施工計画 ・凍土遮水壁の造成手順
		②凍土壁に支障のある埋設物の調査・評価	・施工・竣工図等に基づいた凍土壁ルート下の埋設物の位置，深度，形状，規模の確認 ・設計・施工への影響評価 ・補助工法，埋設物内の汚染水漏洩対策の検討	
		③埋設物による影響の評価	・解析（地下水流動解析，熱・水連成解析）による凍結範囲の検討 ・実証試験（モックアップ試験）での検討 ・補助工法や埋設物内の汚染水漏洩対策の検討	
		④埋設物横断部での施工方法の検討	・実証試験（現地小規模凍結試験）で検討 ・補助工法や埋設物内の汚染水漏洩の対策を検討	
	4.地下水流速の速い箇所での凍土の成立性	①補助工法適用（薬液注入工法など）も含めた施工方法の検証	・解析（地下水流動解析，熱・水連成解析）による検討 ・実証試験（モックアップ試験）で検討 ・地下水流速の速い箇所が極力発生しない施工順序の検討	・凍土遮水壁の造成手順 ・凍土遮水壁の造成・維持に関するモニタリング基本方針 ・未凍結箇所における補助工法
	5.フェーシング（降雨浸入防止対策）の成立性	①フェーシングの支障物の把握	・現地確認による支障物の把握	・フェーシング計画 ・凍土遮水壁設置後の地下水位管理の基本方針
		②フェーシングの効果の評価	・解析（地下水流動解析）による検討	
		③干渉する工事の抽出・影響の評価、緩和策	・干渉する工事の抽出・影響の評価、緩和策の検討	
	6.凍土遮水壁形成の確認	①凍土遮水壁形成の確認方法の検討	・データ管理システムの検討 ・実証試験（現地小規模結試験）等で検討	・凍土遮水壁の造成・維持に関するモニタリング基本方針，モニタリングシステム(地中温度，地下水位) ・データ管理システム
建屋滞留水の漏洩防止	7.建屋周辺地下水位の低下に併せた建屋内水位の低下	①遮水壁設置時の地下水位低下速度の評価	・解析（地下水流動解析）による検討	・凍土遮水壁設置後の地下水位管理の基本方針 ・凍土遮水壁の造成手順 ・移送設備，タンク増設計画
		②建屋内滞留水に併せた滞留水の移送・タンク増設の検討	・解析（地下水流動解析）による建屋流入量の検討 ・移送設備，タンク増設の検討	
		③凍結順序の違いによる地下水位低下の評価	・解析（地下水流動解析）による検討	
	8.建屋周辺地下水の低下による建屋内滞留水の漏えいの防止	①リチャージによる地下水位コントロールの予測	・解析（地下水流動解析）による検討	・凍土遮水壁設置後の地下水位管理の基本方針 ・データ管理システム
		②リチャージシステムの設計	・データ管理システムの検討	
		③現場試験による成立性の検証	・実証試験（現地小規模凍結試験）で確認	
他プロジェクトおよび既設備との干渉の緩和	9.ロードマップへの影響の緩和	①干渉する工事の抽出、影響の評価緩和の検討	・他工事との綿密な工程調整や地上構造物の調査の徹底 ・補助工法を含めた施工方法の検討	・凍土壁ライン・凍結プラント基本配置 ・施工工程
	10.凍土周辺の既設構造物に対する影響の緩和(凍結など)	①凍結膨張による周囲構造物への影響検討	・解析（地盤沈下，建屋の支持基盤等への影響など）による検討 ・実証試験で確認	・凍土壁ライン・凍結プラント基本配置 ・凍土遮水壁の造成手順 ・凍土壁造成，維持に関するモニタリング基本方針 ・データ管理システム ・凍土周辺の既設構造物に対する影響の緩和方策
		②解凍後の地盤の不安定性の検討	・実証試験(現地小規模凍結試験）で確認	
施工性	11.施工計画の成立性	①作業員、資機材（冷凍機など）の確保	・施工工程に基づいた作業員、資機材の確保	・事業工程 ・施工計画 ・凍土壁ライン，凍結プラント等の基本仕様，基本配置
		②施工品質の確保	・データ管理システム	
		③被ばくを考慮した施工範囲の検討	・放射線防護設備	
		④津波等を考慮した冷却プラント等のヤード確保	・津波襲来時を考慮したプラント配置	
保守管理	12.長期運用における保守管理	①長期運用のための電機設備監視システムの検討	・設備，機器等の仕様検討 ・点検，補修計画の検討 ・データ管理システムの検討	・凍土壁ライン，凍結プラント等の基本仕様，基本配置 ・長期運用における保守管理
		②長期運用、災害対応に適した電機設備の検討	・凍結プラント等の基本配置 ・災害時対応策の検討	

青字：解析による検討　　赤字：実証試験による確認・検討

表 3- 13　原子力規制委員会、汚染水処理対策委員会、陸側遮水壁タスクフォースでの審議事項（2018年12月20日現在）

年	原子力規制委員会 特定原子力施設監視・評価検討会 月日	回	報告・審議事項	報告	汚染水処理対策委員会 月日	回	報告・審議事項	報告	汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース 月日	回	報告・審議事項	報告
2013年	–	–	–	–	3月29日	1	地下水流入抑制のための対応方策	東京電力	7月1日	1	地下水の流入抑制のための対策（概要）-資源エネルギー庁-	資源エネルギー庁
	–	–	–	–			総合的流入抑制対策の提案－粘土系遮水壁による恒久的対策	大成建設			地下水の流入抑制のための対策	汚染水処理対策委員会
	–	–	–	–			凍土遮水壁による地下水流入抑制案	鹿島建設			陸側遮水壁（凍土方式）による 1～4号機 建屋 内へ の地下水 流入量 低減 方策の検討 について	東京電力
	–	–	–	–			東京電力株式会社福島第一原子力発電所 建屋内地下水流入抑制対策工に関する提案	清水建設	8月8日	2	平成25年度「発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業（地下水の流入抑制のための凍土方式による遮水技術に関するフィージビリティ・スタディ事業）」に関する企画提案書	鹿島建設
	–	–	–	–	5月16日	2	総合的流入抑制対策の提案－短中期的対策～中長期的対策－	大成建設			福島第一原発の地下埋設物について	東京電力
	–	–	–	–			凍土遮水壁による地下水流入抑制案 課題と対応策	鹿島建設	8月20日	3	平成25年度「発電用原子炉等廃炉・安全技術基盤整備事業（地下水の流入抑制のための凍土方式による遮水技術に関するフィージビリティ・スタディ事業）」に関する企画提案書	鹿島建設
	–	–	–	–			建屋内流入抑制対策工の比較	清水建設	11月15日	4	凍土遮水壁の目的・設計方針	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–			グラベル連続壁による地下水流入抑制案	安藤ハザマ			凍土遮水壁の検討事項に対する進捗状況（7／1タスクフォースでの検討事項）	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	5月30日	3	地下水の流入抑制のための対策	汚染水処理対策委員会			実証試験の現状報告	鹿島建設
	–	–	–	–					12月3日	5	凍土遮水壁の基本設計	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土遮水壁の検討事項	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			フィージビリティスタディ事業 検討状況	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–	12月20日	6	凍土遮水壁設置後の地下水位管理の基本方針（案）	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土方式の小規模遮水壁実証試験【FS①】ケーシング底部の止水性向上策検討状況報告	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土方式の小規模遮水壁実証試験【FS①】凍土造成状況報告【速報】	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			実証試験①：小規模遮水壁実証試験 光ファイバー方式測温システムの試適用（案）	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土方式の小規模遮水壁実証試験【FS①】凍結管1.2mピッチ試験（案）	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			リチャージ設備の性能と運用に関する解析的検討	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			1～4号機建屋貫通箇所を踏まえたリチャージの位置付け（案）	東京電力
2014年	–	–	–	–	–	–	–	–	2月25日	7	凍土遮水壁設置後の地下水位管理の基本方針（案）	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土方式の小規模遮水壁実証試験【FS①】ケーシング底部の止水性向上策検討状況報告	鹿島建設
	3月31日	19	凍土方式遮水壁の概要について	資源エネルギー庁	–	–	–	–	3月18日	8	凍土方式の小規模遮水壁実証試験【FS①】凍土造成状況報告【速報】	鹿島建設
			凍土方式遮水壁の概要について（参考資料）	東京電力 鹿島建設	4月28日	12	陸側遮水壁タスクフォースにおける検討状況について	資源エネルギー庁			実証試験①：小規模遮水壁実証試験 光ファイバー方式測温システムの試適用（案）	鹿島建設
	4月18日	20	凍土方式遮水壁について	資源エネルギー庁	7月25日	13	陸側遮水壁タスクフォースにおける検討状況について	汚染水処理対策委員会			凍土方式の小規模遮水壁実証試験【FS①】凍結管1.2mピッチ試験（案）	鹿島建設
			東京電力(株)福島第一原子力発電所における予防的・重層的な汚染水処理対策－添付資料－	汚染水処理対策委員会			凍土壁1.2mの施工について	東京電力 鹿島建設			リチャージ設備の性能と運用に関する解析的検討	東京電力 鹿島建設
			凍土方式遮水壁の設計について	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			1～4号機建屋貫通箇所を踏まえたリチャージの位置付け（案）	東京電力
	5月2日	21	「凍土方式遮水壁による汚染水対策に関する東京電力（株）への質問事項」へのご回答	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–	4月16日	9	水位管理に関する検討状況について	東京電力 鹿島建設
			凍土方式遮水壁による汚染水対策に関する東京電力(株)への質問事項	原子力規制庁	–	–	–	–			FS（実証試験④）による対象土層のリチャージ特性の確認	東京電力 鹿島建設
			凍土式遮水壁による汚染水対策に関する外部専門家から提出されたご意見	原子力規制庁	–	–	–	–			リチャージ特性評価試験の事後評価解析（解析目的・解析条件等）	東京電力 鹿島建設
			凍土方式遮水壁に関するこれまでの経緯について	原子力規制庁	–	–	–	–			注水井関連設備の詳細設計（実証試験結果を反映）	東京電力 鹿島建設
	5月26日	22	凍土方式遮水壁造成前後の地下水流動予測について	東京電力	–	–	–	–			リチャージ特性評価試験（実証試験④） 試験結果	鹿島建設
			凍土方式遮水壁造成による地盤影響評価	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			実証試験④ リチャージ特性評価試験 試験結果	鹿島建設
			資料編	東京電力	–	–	–	–			リチャージ特性評価試験の事後評価解析	鹿島建設
			凍土方式遮水壁による地盤沈下の可能性等に係る議論に当たっての論点整理について	原子力規制庁	–	–	–	–	6月13日	10	大規模実証事業の進捗について	東京電力 鹿島建設
			凍土方式遮水壁による汚染水対策に関する東京電力(株)への質問事項	原子力規制庁	–	–	–	–			大規模実証事業に関わる検討事項	東京電力 鹿島建設
			凍土方式遮水壁に関するこれまでの経緯について	原子力規制庁	–	–	–	–			凍結管構造に関する検討	東京電力 鹿島建設
	6月6日	23	凍土方式遮水壁の設置工事における地下埋設物等への考慮について	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			凍結管ピッチに関する検討	東京電力 鹿島建設
			資料編（その1）	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			スタンドパイプの設置に関する検討	東京電力 鹿島建設
			資料編（その2）	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			凍土方式遮水壁の設置工事における地下埋設物等への考慮について	東京電力 鹿島建設
			資料編（その3）	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			モニタリング計画	東京電力 鹿島建設
			凍土方式遮水壁の設置に伴う地下水および建屋内汚染水の水位管理について	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			リチャージウェルの目詰まり物質の推定と対策（案）	鹿島建設
			凍土方式遮水壁の設置に係る地下水等の監視および緊急時の対応について	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			実証試験① フィッティング解析及び複列部の閉合期間評価	鹿島建設
			凍土方式遮水壁による汚染水対策に関する東京電力(株)への質問事項	原子力規制庁	–	–	–	–			実証試験①維持運転実施状況	鹿島建設
			凍土方式遮水壁に関するこれまでの経緯について	原子力規制庁	–	–	–	–			実証試験①光ファイバに関する検討	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			実証試験①計測結果	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–	7月15日	11	凍土方式遮水壁大規模整備実証事業状況報告 (1)施工進捗状況 (2)ケーシング底部止水状況（ゴムパッカー）	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			スタンドパイプの設置に関する検討	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土造成解析　検討の流れ	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土方式の小規模遮水壁実証試験状況報告	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍結速度と地下水流速について	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			光ファイバによる温度検層システムに関する検討結果	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			室内試験結果	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–	8月18日	12	凍土方式遮水壁大規模整備実証事業状況報告	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			1.2mピッチの施工について	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			複列施工について	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			制御運転に関する検討	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土遮水壁施工における汚染拡散防止基本方針（案）	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–	10月22日	13	凍土方式遮水壁大規模整備実証事業状況報告	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土遮水壁閉合手順の検討	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	11月13日	14	陸側遮水壁タスクフォースにおける検討状況について	汚染水処理対策委員会			参考資料　凍土遮水壁閉合手順の検討	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–							制御運転に関する検討	東京電力

年	原子力規制委員会 特定原子力施設監視・評価検討会 月日	回	報告・審議事項	報告	汚染水処理対策委員会 月日	回	報告・審議事項	報告	汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース 月日	回	報告・審議事項	報告
2015年	2月9日	31	陸側遮水壁閉合後の水位管理について	東京電力 鹿島建設	3月17日	15	「汚染水処理対策技術検証事業」の進捗状況について	汚染水処理対策委員会	3月3日	14	陸側遮水壁（海側）トレンチ部の段階的な施工について	東京電力 鹿島建設
			陸側遮水壁閉合後の水位管理について 参考資料	東京電力			陸側遮水壁閉合後の水位管理について	東京電力			陸側遮水壁閉合後の水位管理について	東京電力 鹿島建設
	3月4日	32	陸側遮水壁閉合後の水位管理について 前回ご指摘事項へのご回答	東京電力 鹿島建設			陸側遮水壁閉合後の水位管理について 参考資料	東京電力			陸側遮水壁閉合後の水位管理について 参考資料	東京電力 鹿島建設
	3月25日	33	陸側遮水壁閉合後の水位管理について	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–	5月20日	15	陸側遮水壁の工事の進捗について	
			陸側遮水壁閉合後の水位管理について（第31回特定原子力施設監視・評価検討会資料3および参考3 より抜粋）	東京電力 鹿島建設	–	–	–	–			試験凍結の状況について	東京電力 鹿島建設
	5月22日	35	建屋への地下水流入抑制策について－基本シナリオにおける陸側遮水壁閉合の進め方－	東京電力	–	–	–	–			建屋への地下水流入抑制策について －各対策の実施手順と水位管理－	東京電力 鹿島建設
	7月1日	36	試験凍結実施状況・建屋内外水位が逆転した場合の影響検討	東京電力	7月29日	16	陸側遮水壁タスクフォースにおける検討状況について	汚染水処理対策委員会	7月10日	16	陸側遮水壁の工事の進捗について	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			試験凍結の状況について (1)地中温度及びブライン温度 (2)中粒砂岩層水位観測井（Ci-1）水位 (3)試験凍結箇所近傍の被圧水頭	東京電力 鹿島建設
	10月14日	37	陸側遮水壁の進捗状況報告	東京電力	–	–	–	–			試験凍結に関する報告	東京電力
	12月18日	38	陸側遮水壁等の地下水流入抑制対策に関する論点整理	原子力規制庁	–	–	–	–	11月17日	17	水位管理について	東京電力
			至近の地下水挙動ならびに陸側遮水壁閉合に関する検討結果	東京電力	12月11日	17	陸側遮水壁タスクフォースにおける検討状況について	汚染水処理対策委員会			水位管理について サブドレン稼働・海側遮水壁閉合時の地下水挙動に基づく陸側遮水壁閉合に関する監視・評価検討会報告事項（案）	東京電力
2016年	1月27日	39	陸側遮水壁の運用に係る設問事項及び評価	原子力規制庁	–	–	–	–	–	–	–	–
			陸側遮水壁に関する東京電力のこれまでの説明状況及び評価について	原子力規制庁	–	–	–	–	–	–	–	–
	2月15日	40	陸側遮水壁の検討結果（概要）	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
			陸側遮水壁の検討結果	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
			陸側遮水壁の検討結果［別冊資料］	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
			陸側遮水壁に関する東京電力のこれまでの説明状況及び評価について	原子力規制庁	–	–	–	–	–	–	–	–
	3月3日	41	陸側遮水壁の閉合について	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
	4月25日	42	陸側遮水壁の状況（第一段階フェーズ1）	東京電力	–	–	–	–	5月10日	18	陸側遮水壁の状況（第一段階フェーズ1）	東京電力
	6月2日	43	陸側遮水壁閉合（第一段階フェーズ1）の状況とフェーズ2への移行	東京電力	6月27日	18	陸側遮水壁の状況について	汚染水処理対策委員会事務局			陸側遮水壁の状況（第一段階フェーズ1） 参考資料集	東京電力
	7月19日	44	陸側遮水壁の状況	東京電力			陸側遮水壁の進捗状況	汚染水処理対策委員会	–	–	–	–
	8月18日	45	陸側遮水壁の状況	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
			陸側遮水壁の状況（参考資料）	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
	9月28日	46	陸側遮水壁の状況	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
			陸側遮水壁の状況（参考資料）	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
	10月19日	47	陸側遮水壁（山側）の一部閉合	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
	12月26日	49	陸側遮水壁の状況	東京電力	–	–	–	–	–	–	–	–
2017年	1月27日	50	地下水流入対策の現状	東京電力	7月7日	19	地下水流入対策の現状	東京電力	3月2日	19	陸側遮水壁の状況について（報告事項）	東京電力
	–	–	–	–	8月25日	20	地下水流入対策の現状	東京電力			陸側遮水壁の維持管理運転（審議事項）	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			凍土造成 解析結果（中粒砂岩層央付近の水平断面コンタ）	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–			注水確認について	鹿島建設
	6月28日	54	地下水流入対策の現状	東京電力	–	–	–	–			SD59 を対象とした注水確認結果の再現性に関する解析的検討	鹿島建設
	–	–	–	–	–	–	–	–	6月14日	20	地中温度，地下水位変化等の状況報告 1-① 地中温度分布図	東京電力
	–	–	–	–	–	–	–	–			互層凍結遅延箇所の凍結実績	東京電力
	–	–	–	–	–	–	–	–			陸側遮水壁について 資料1-②地下水位の変化状況	東京電力
	–	–	–	–	–	–	–	–			陸側遮水壁について 資料1-③ 建屋流入量・くみ上げ量等の状況	東京電力
	–	–	–	–	–	–	–	–			陸側遮水壁について 資料1-④ 注水効果に関する事項	東京電力 鹿島建設
	–	–	–	–	7月7日	19	地下水流入対策の現状	東京電力			陸側遮水壁について 資料2 西側③閉合に関する検討	東京電力
	8月30日	55	地下水流入対策の現状	東京電力	8月25日	20	地下水流入対策の現状	東京電力			陸側遮水壁について 資料3 維持管理運転の状況	東京電力
	10月30日	56	地下水流入対策の現状	東京電力	–	–	–	–	11月22日	21	陸側遮水壁の状況	東京電力
	12月26日	57	地下水流入対策の現状	東京電力	–	–	–	–			内外水位差	東京電力
2018年	2月14日	58	地下水および雨水流入対策の現状	東京電力	3月7日	21	陸側遮水壁の現況について	東京電力	1月17日	22	陸側遮水壁の効果に関する現時点での評価について	東京電力
	3月30日	59	地下水および雨水流入対策の現状	東京電力			重層的な汚染水対策の効果について	東京電力			系統毎のサブドレンくみ上げ量の経時変化	東京電力
	–	–	–	–			重層的な汚染水対策に伴う汚染水発生量の低減状況	東京電力	11月8日	23	汚染水処理対策委員会（第21回） 資料4（抜粋）	–
	–	–	–	–			凍土壁の評価と今後の汚染水対策について（案）	汚染水処理対策委員会事務局			汚染水処理対策に関わる対応状況	東京電力
	–	–	–	–			陸側遮水壁の現況について（参考資料）	東京電力			陸側遮水壁の維持管理運転の状況および地中温度状況と今後の対応について	東京電力
	–	–	–	–			三次元地下水浸透流解析（参考資料）	東京電力			–	–

19）原子力規制委員会特定原子力施設監視・評価検討会：
http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tokutei_kanshi.html
20）汚染水処理対策委員会：http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/archive/taisakusyori.html
21）汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース：
http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/archive/task_force.html

3.2.2個別の汚染水処理対策

(c)陸側遮水壁

陸側遮水壁の施工

①施工手順

②埋設物への対応

凍土ラインには**約１７０箇所の大小の埋設物横断箇所**が分布。埋設物の大きさ・形状、深度、隣接埋設管との位置・間隔、溜まり水の状況などにより施工方法を変更して凍土壁の造成を行っている。

③被ばく低減対策

作業時間は施工箇所の空間線量に応じて1日あたり3～4時間とし、除染（れき撤去、汚染土壌の除去）や遮へい物（砕石、敷き鉄板、コンクリート・鉄板・鉛フェンス）の設置などの被ばく低減対策、さらに、ブライン配管周りの断熱材や保護鋼板などは、プレキャスト材を多用する工夫により作業時間の短縮が図られた。

図3-59　陸側遮水壁の施工手順

表3-14　埋設物への対応方法

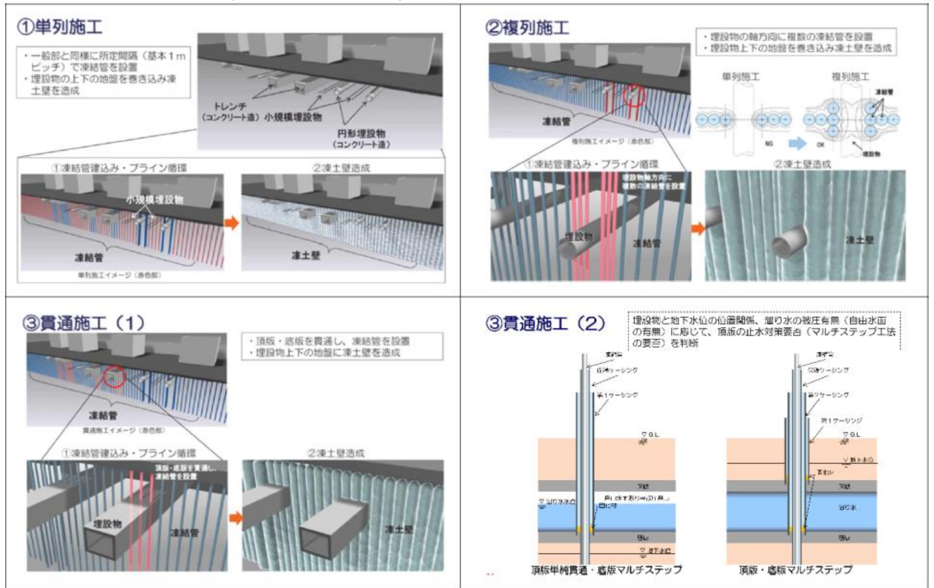


図3-61　被ばく低減対策の効果

図3-62　被ばく低減対策

3.2.2個別の汚染水処理対策

凍結開始後の水位管理

陸側遮水壁内側の水位管理は、**建屋滞留水の周辺地盤への漏えいを発生させないこと**を絶対条件として、陸側遮水壁内側の**地下水位のコントロ－ル**は、**サブドレン**（地下水の汲上げ、42孔）と**リチャ－ジウェル**（注入井、 33孔）で行われる。

地下水位の監視は、既存の観測孔を含め不圧地下水で69孔、被圧地下水で53孔の観測孔が配置された。

水位管理は、サブドレン・地下水ドレンの稼働と海側遮水壁の閉合を行う条件で、建屋水位に対する建屋周辺の地下水位の変化、建屋流入量やサブドレンの汲上げ量の変化などの**シミュレ－ション結果に基づいたシナリオ**を設定して、具体的な水位管理方法を定めている。

陸側遮水壁閉合後においても，閉合前と同様に，建屋滞留水の周辺地盤への漏えいを防止するために，下記の関係を維持する。
● 建屋滞留水水位（①）＜建屋周辺地下水位（サブドレン水位）（②）

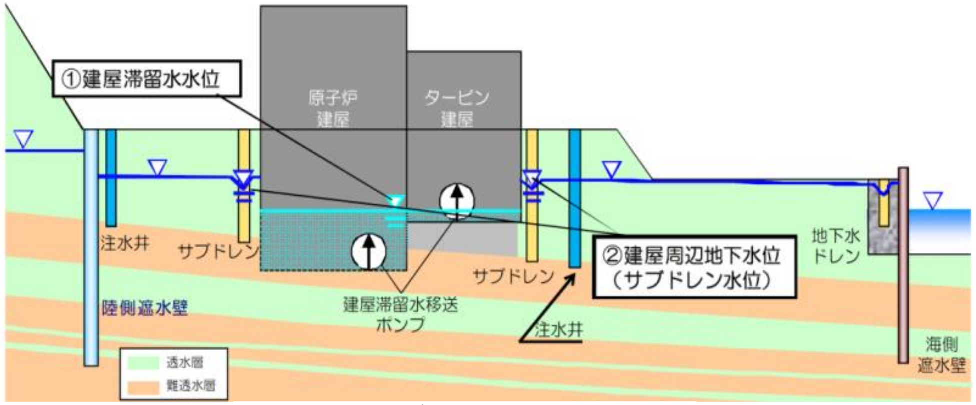


図3-64 水位管理の基本方針

(b)陸側遮水壁

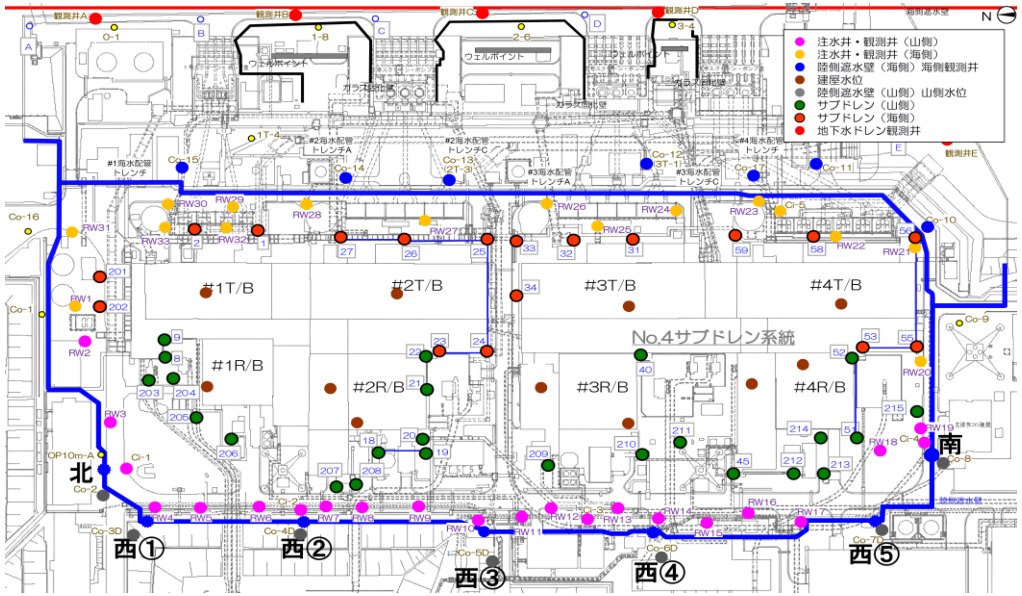
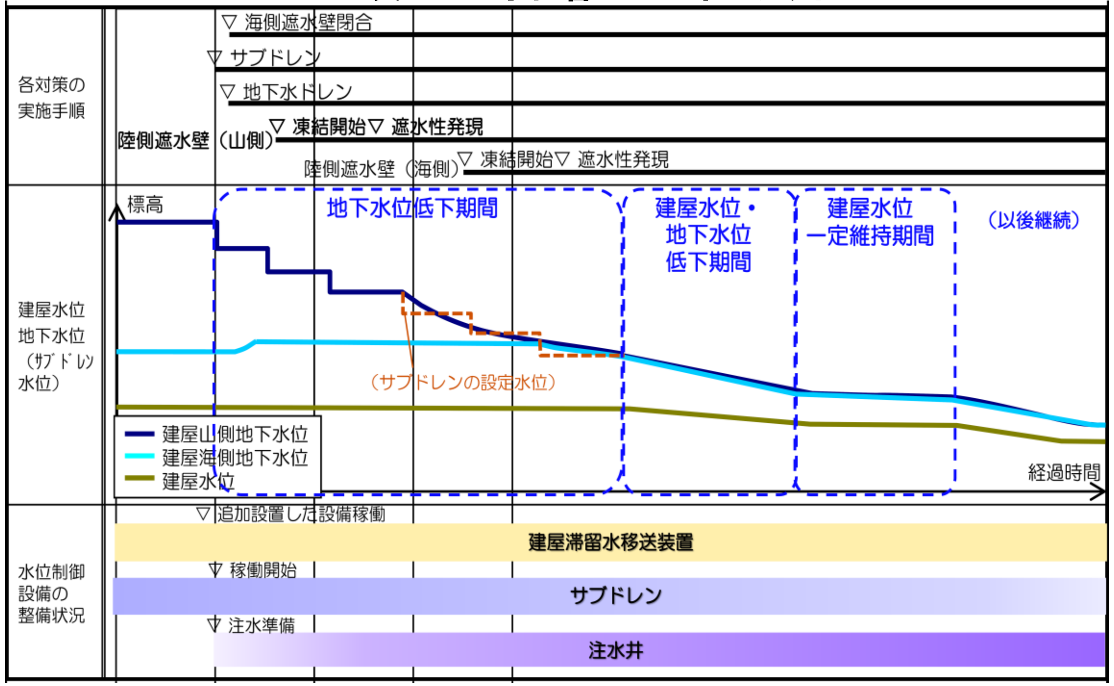


図3-65 サブドレン、リチャ－ジウェル(注入井)、地下水位観測孔配置図

表 3-16 水位管理の基本シナリオ



3.2.2個別の汚染水処理対策

(c)陸側遮水壁

陸側遮水壁の効果は、実測値、及び実測値の分析により陸側遮水壁の評価が行われた。

表 3-18 実測値に基づく評価項目

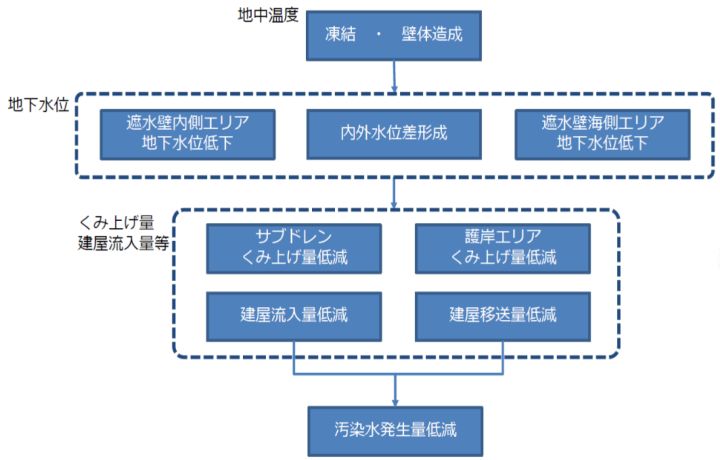
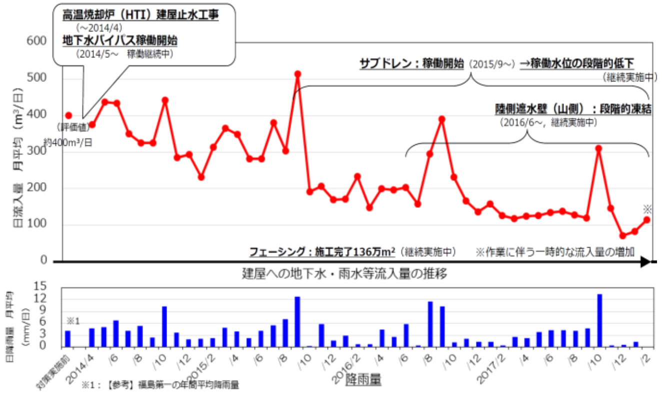


図 3-67 凍結状況(掘削調査、2018年3月)



対策実施前：約400m³／日
陸側遮水壁閉合前：約190m³／日
凍結開始後：約90m³／日

図 3-73 建屋への雨水・地下水流入量

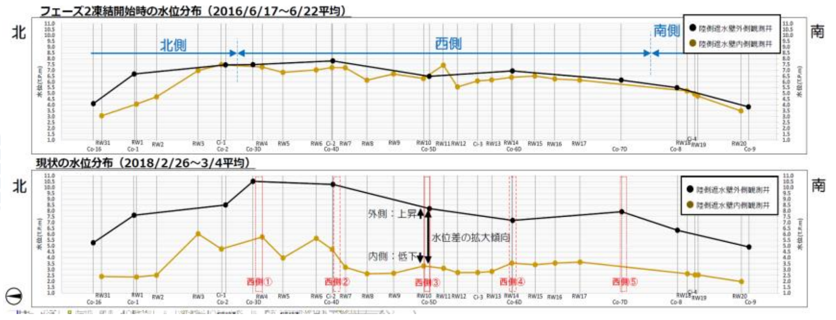


図 3-68 陸側遮水壁内外の地下水位分布の推移

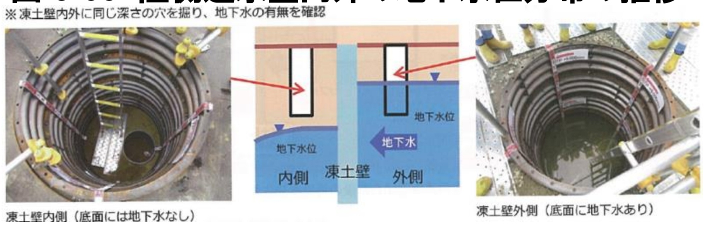
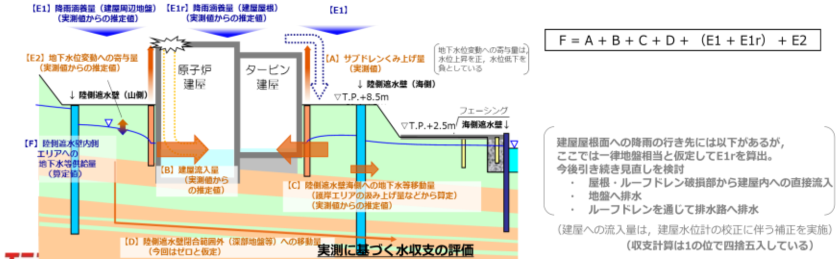


図 3-69 陸側遮水壁内外の地下水位分布(2018年3月)

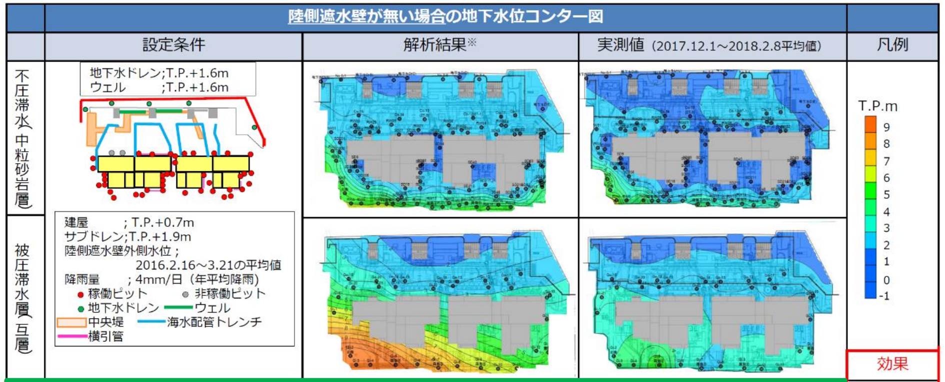
実績値(m³/日)	陸側遮水壁内側エリアへの地下水等供給量(実測からの推定値) F	<参考>サブドレン平均水位	<参考>日平均降雨量	サブドレンくみ上げ量(実測値) A	建屋流入量(実測からの推定値) B	陸側遮水壁海側への地下水等移動量 C※1 (実測からの推定値)	閉合範囲外への移動量 D※3	降雨涵養量(実測からの推定値)(E1+E1r)※1	地下水位変動への寄与量(実測からの推定値) E2※1
2015.12.1~2016.2.29	830	T.P.+3.7m	1.8mm/日	440	190	350	0	-(60+40)	-50
2017.12.1~12.31	370	T.P.+2.1m	0.6mm/日	390	70	70	0	-(20+10)	-130
2018.1.1~1.31	340	T.P.+1.9m	1.3mm/日	330	80	50	0	-(40+30)	-50
2018.2.1~2.28	450※4	T.P.+1.9m	0.0mm/日	320※4	120※4	50	0	0	-40※4
2017.12.1~2018.2.28	390	T.P.+1.9m	0.6mm/日	350	90	60	0	-(20+20)	-70

※1 FおよびCは陸側遮水壁内側および海側への地下水等の供給量を評価したものであるが，現状の評価方法では建屋への屋根破損部からの直接流入など，地下水以外の降雨の影響が一部含まれた量となっている。降雨の扱いについては，評価方法および適用期間を含め引き続きデータを分析し，その結果を踏まえて見直しを検討。
※2 上表は，降雨浸透率や有効空隙率を仮定して算出しているが，その仮定条件には不確実性が含まれている。
※3 現時点までで，深部透水層（粗粒，細粒砂岩）の水頭が互層部と同程度で，上部の中粒砂岩層よりも高いことから，深部地盤等への移動量Dをゼロとする。
※4 K排水路補修作業に伴う一時的な影響が含まれている（A、B、E2、F）。影響については資料3に記載。



・**陸側遮水壁内側**への地下水等の供給量(F)は、約830m³／日から約390m³／日に低減
・**陸側遮水壁海側**への地下水等の移動量(C)は、約350m³／日から約60m³／日に低減

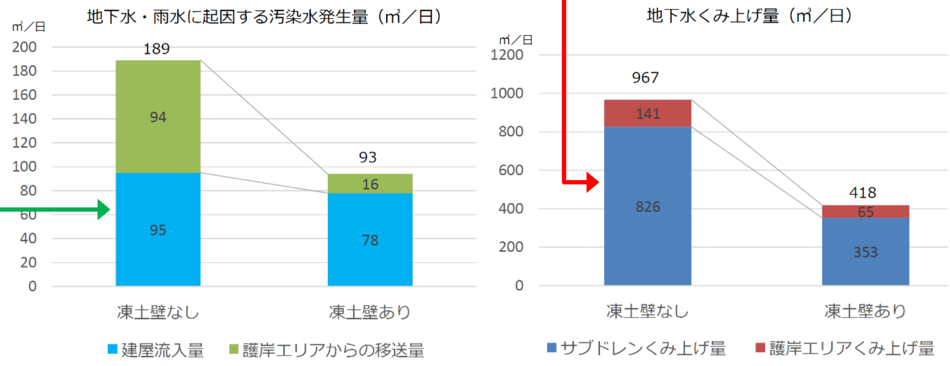
図 3-74 水収支による陸側遮水壁内側への地下水供給量の評価



	解析結果	実測値	効果
建屋への雨水・地下水流入量	95m³/日	78m³/日(再掲)	17m³/日
T.P.+2.5m盤 くみ上げ量	141m³/日	65m³/日（再掲）	76m³/日
サブドレンくみ上げ量	826m³/日	353m³/日（再掲）	473m³/日

※ 解析コンターについては，各井戸の位置に解析結果を反映して作成

3 次元浸透流解析結果 44)に一部加筆



陸側遮水壁単体の効果 43)に一部加筆

陸側遮水壁単体の効果は、3次元浸透流解析により陸側遮水壁がない場合のシミュレーションを行い、実測値との差分を陸側遮水壁単体の効果として評価した。解析結果からは、建屋への雨水・地下水流入量、サブドレン・T.P.+2.5m盤の汲上げ量は、合計が566m³/日低減したものと評価。

図 3-75 陸側遮水壁単体の効果の推定

3.2.2個別の汚染水処理対策

(d)フェーシング

フェ－シグ

○**雨水の地下浸透を抑制**し建屋への地下水流入量を低減する効果

○敷地内の**空間線量の低減効果**

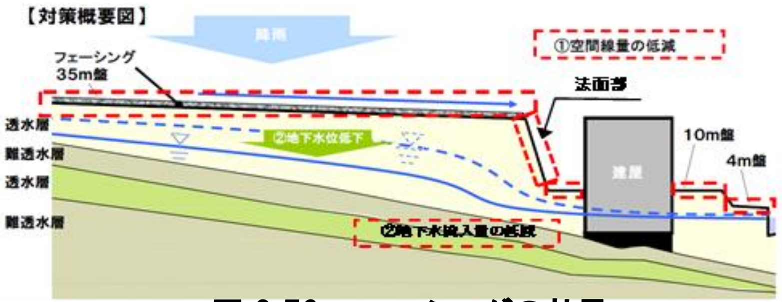


図 3-76 フェーシングの効果

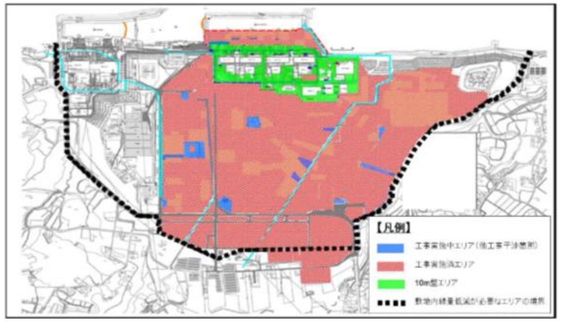


図 3-77 フェーシング施工エリア

耐久性、遮水性、遮へい性、施工性の観点から短繊維混入モルタルの吹付工法を採用した。吹付厚さは、**吹付後の表面線量率を5μSv／h以下**とするため、**吹付厚さを10cm**とした（市町村による除染実施ガイドライン、2011年8月26日)。

高線量環境下、急勾配での施工の特徴・工夫

水素爆発による高線量のがれきが多量に残置された1～4号機建屋西（山）側に位置する法面などに対して、以下のような工夫がなされた。

①表土除去工の遠隔自動化

急斜面用バックホウ(Rock Climbing Machine（RCM）)の採用

②がれき撤去工の効率化

高線量がれきのうち金属がれき対して、電磁式大型磁石を用いたリフテイングマグネットをクレーンに吊り下げ、がれき回収作業を行った。

図 3-82 RCMによる施工状況

図 3-83 がれき撤去装置と施工状況

③モルタル吹付工の機械化

法尻に重機の設置スペースが確保できるエリアでは、吹付ロボット（Robo-Shot：人力の5倍程度の作業能力）による施工が行われた。

図 3-85 Robo-Shotによる施工

3.2.2個別の汚染水処理対策

2013年6月に1号機、2号機取水口間護岸付近の地下水観測孔から、高い濃度の放射性物質の検出が確認された。このため、緊急止水対策が必要となり、資機材調達、及び施工の迅速性、さらに塩水環境下でも効果を発揮して1.0E-05cm／sec程度以下の透水性の止水壁を構築するため、注入材として**水ガラス系注入材**（シリカゾルグラウト）を用いた薬液注入工法により、護岸付近に止水壁を構築した。

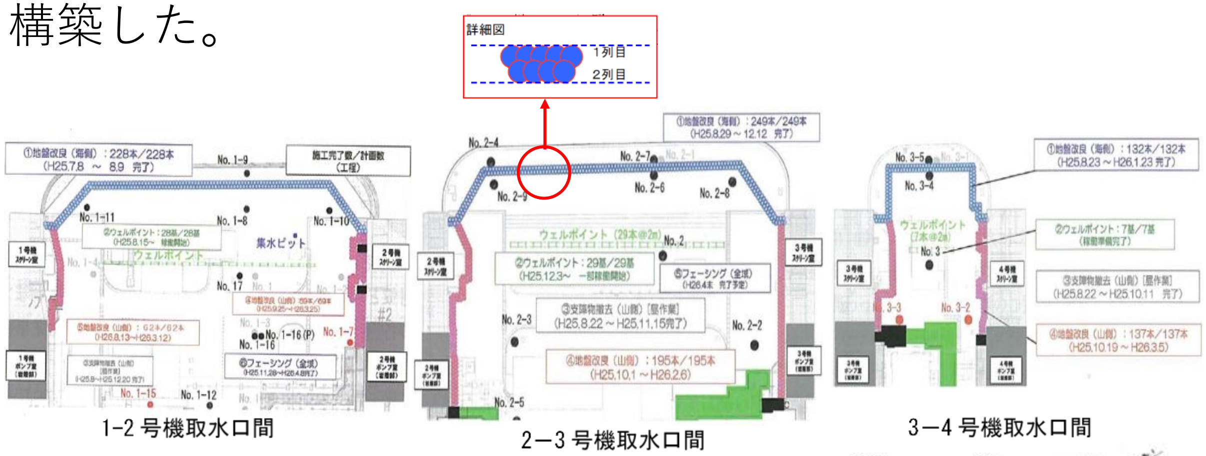


図 3-88 薬液注入工平面図

表 3-23 注入材性状及び注入要領

	一次注入材	二次注入材
使用薬液	瞬結性ゲル	浸透性ゲル
注入方式	2ショット方式	1ショット方式
ゲルタイム	5秒程度	60分程度(※)
吐出量	18L/分程度	12L/分程度
ステップ方式	上昇式(最深ステップ位置よりステップアップ)	
ステップ長	25cm	
注入圧力	深度1.0mあたり0.03～0.1MPa	
注入管	φ40.5mm 二重管ロッド	
注入管理	各ステップ定量管理(自記記録計による)	

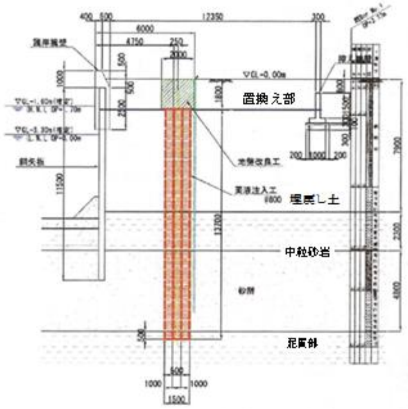
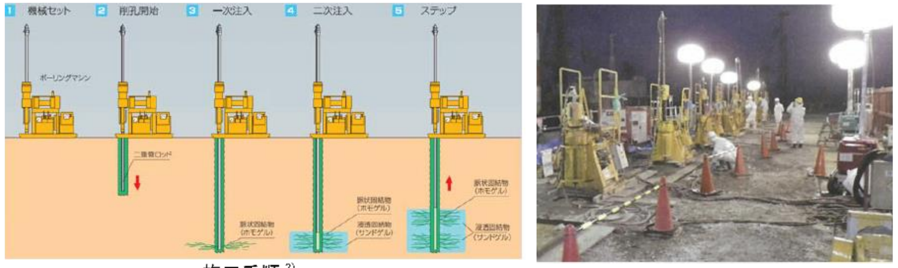


図 3-87　薬液注入工断面図

(3)汚染水を漏らさないための対策

(a)水ガラスによる地盤改良

地盤改良は**二重管ストレーナー工法**（複相式）で、二次注入として浸透性の高い薬液を注入して土粒子間への浸透を図り止水性の確保を図った。地盤改良開始以降、地下水観測孔の水位が上昇する改良効果が認められ、2014年3月に施工を完了した（全削孔数量：1、072孔）。



施工手順[3)]　施工状況（1-2 号機取水口間）[2)]

図 3-89 施工手順と施工状況

施工エリアは、空間線量率が0.08～1.90mSv/hと高い作業環境であったため、様々な被ばく対策が行われ、作業エリアの空間線量を0.04～0.32mSv/hまで低減させた後に作業を実施した。

施工基盤への砕石敷均し(50cm 程度)　1. 形鋼壁(h=2.25m)、鉛板遮へい壁による　作業盤ならびに作業架台(鉛板による遮へい)

図 3-90 図 3-90 線量低減対策

3.2.2個別の汚染水処理対策

(3)汚染水を漏らさないための対策

(b) 海側遮水壁、及び地下水ドレン

海側遮水壁、及び地下水ドレンは、汚染水の流出経路となる透水層に鋼管矢板の連続壁からなる海側遮水壁を設置して海域への汚染水の流出を防止するとともに、海側遮水壁により堰上がる地下水を地下水ドレンで汲上げる設備。

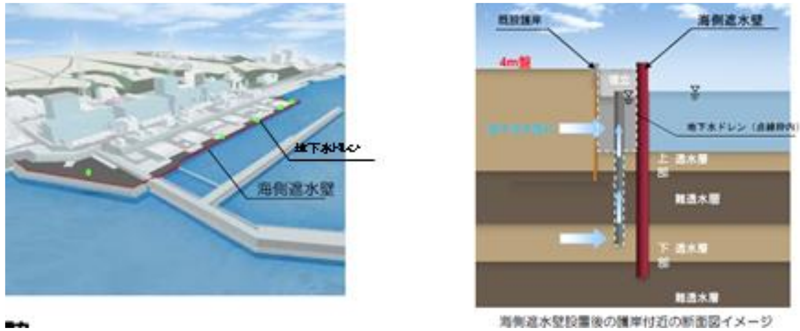


図 3-93 海側遮水壁のイメージ

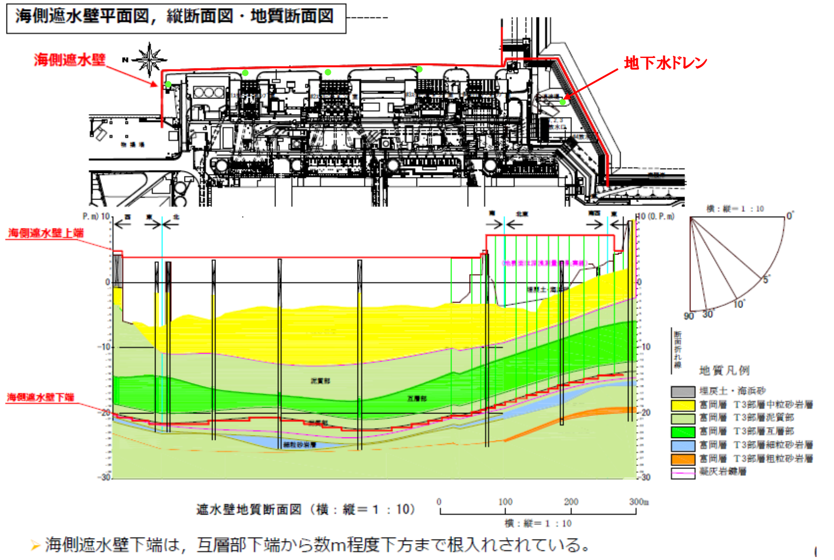


図 3-95 海側遮水壁の平面形状と地質断面図

①構造

自立式鋼管矢板

・鋼管径:1,000mm、1,200mm

・長さ:約21～26m(地中部は約14～17m)

図 3-96 鋼管矢板

継手

・漏水防止ゴム付P－T型

・透水係数1.0E-06cm/s以下

・変形追従性能保有

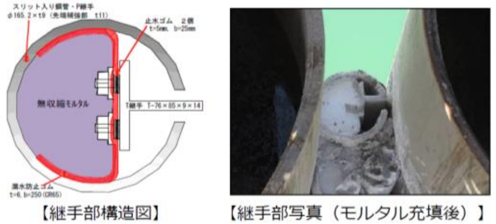


図 3-97 漏水防止ゴム付P－T型継ぎ手

②施工

先行掘削により互層（Ⅲ層）までの地盤をほぐした後、バイブロハンマーの打撃により鋼管を設置。下端部は難透水層の泥質部に打撃により数m程度の根入を行う。

継手処理は、カメラによる健全性の確認後、無収縮モルタルの注入する。

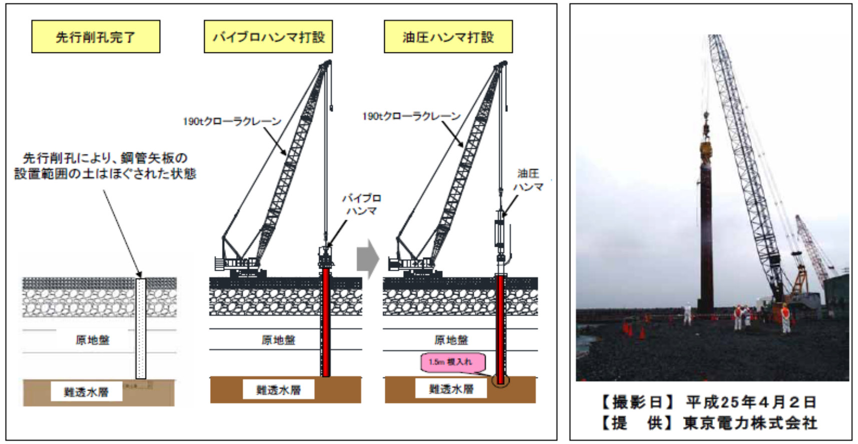


図 3-98 鋼管杭の打設施工手順

3.2.2個別の汚染水処理対策

海側遮水壁が完成した場合、建屋周辺の地下水が堰上がり**建屋流入量の増加**、また、地表面まで地下水位が上昇した場合は、**汚染水の越流による海洋汚染の拡大**も考えられた。このため、**海側遮水壁の一部区間を開放状態**とし、建屋周辺の地下水位をコントロールするサブドレンと汚染水の移送・浄化設備の本格稼働に合わせて海側遮水壁の閉合を行う手順とした。

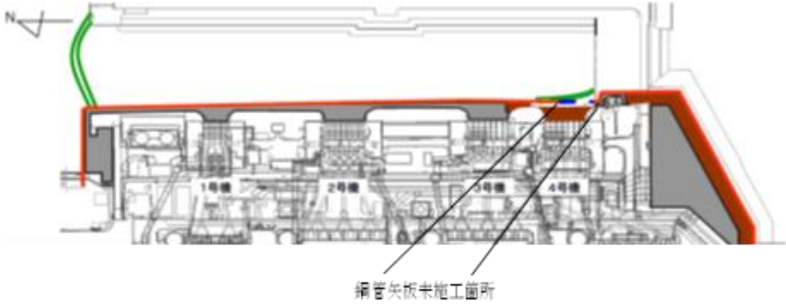


図 3-100 海側遮水壁の未施工区間

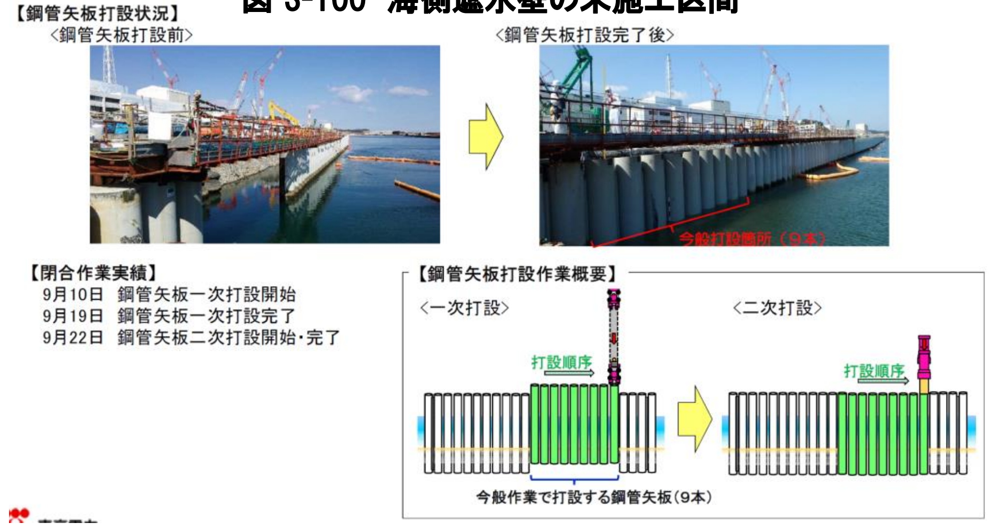
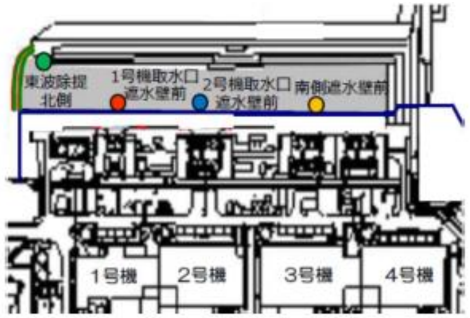


図 3-101 未施工区間の閉合手順と施工状況

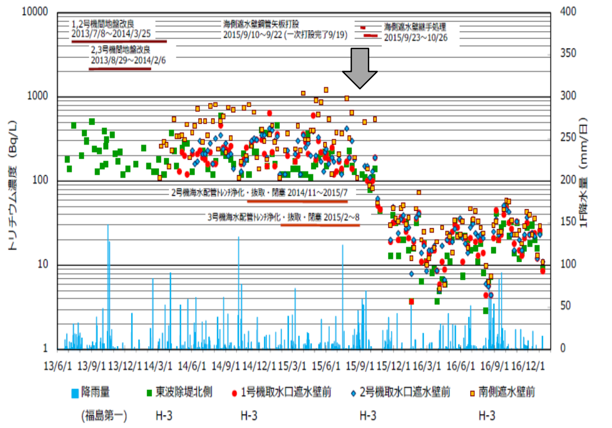
(3)汚染水を漏らさないための対策

(b) 海側遮水壁、及び地下水ドレン

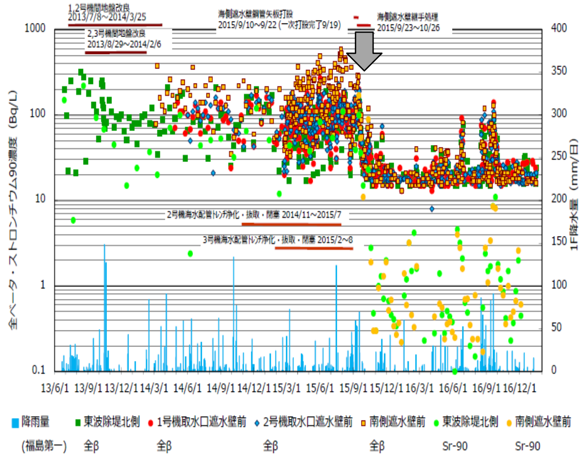
海側遮水壁の閉合は2015年9月19日から開始され、10月26日に継手処理が完了した。閉合作業に伴い、港湾内の**放射性物質濃度は大幅に低下**した。



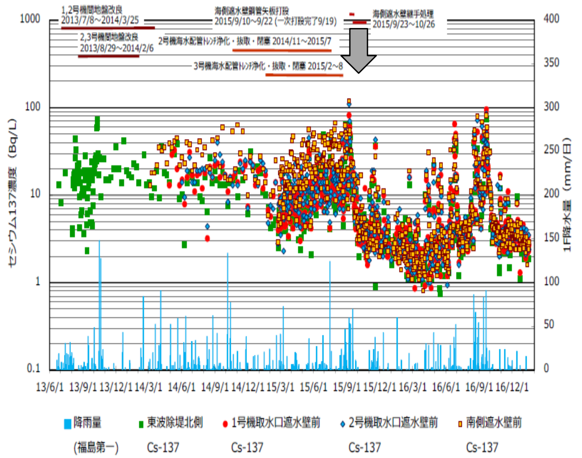
測定位置



トリチウム濃度の推移



全ベータ・ストロンチウム 90 濃度の推移



セシウム 137 濃度の推移

図 3-102 港湾内海水中の放射性物質濃度の推移

3.2.2個別の汚染水処理対策

(3)汚染水を漏らさないための対策

(c) タンク

タンクの設置は、事故直後から大量の処理水を迅速に保管するため、効率的に組立てができる**フランジ型タンクの設置**で対応していた。

初期段階では、フランジ型タンクの構造や配管に起因する漏えい移送の運用に起因する漏えいなどが発生していたため、日常点検の強化、万一、タンクから漏えいした場合でも**タンクヤードから地盤へ汚染水が流出しない対策**（浸透防止工、コンクリート堰、外周堰の設置）等、様々な対策が整備された。

図 3-105 フランジ型タンク(左ー組立中、右ー完成)

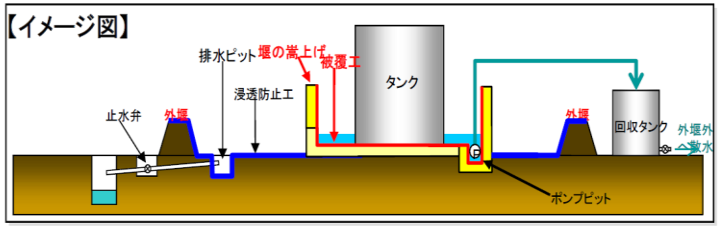


図 3-106 タンクヤード整備の概要

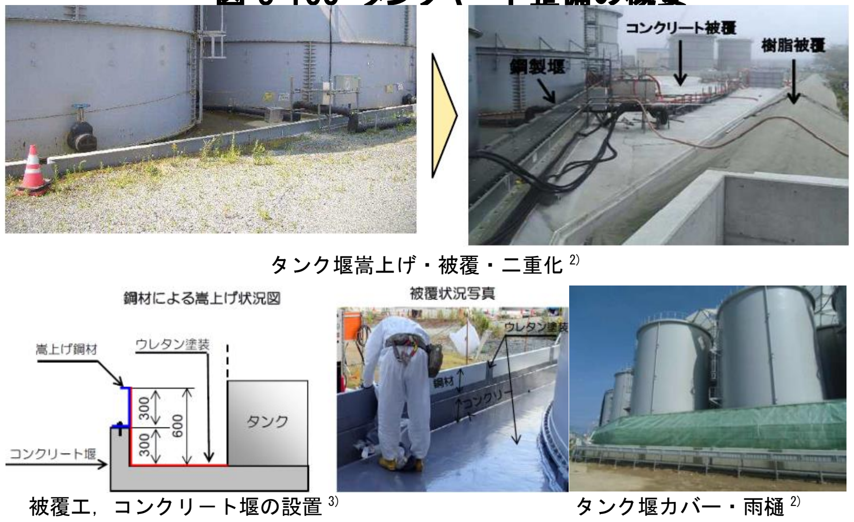


図 3-107 タンクヤード整備の概要

フランジ型タンクは長期的には漏えいのリスクが高く、このリスクを低減するための抜本的な対策として、**フランジ型タンクの撤去、溶接型タンクへの切替え（リプレース）**が実施された。

図 3-108 溶接型タンク(貯水容量1,200m³／基)

リプレースに際しては、今後増加する汚染水に備えるため、貯留容量の増加対策が図られた。

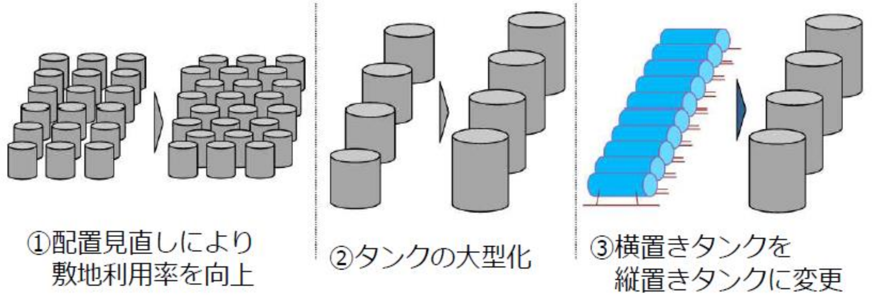


図 3-109 貯留容量の増加対策

3.2.2個別の汚染水処理対策

(3)汚染水を漏らさないための対策
(c) タンク

フランジ型タンクの解体

汚染水を抜き取った後の**表面線量率は40～50mSv/hと高く**、また、タンク基礎コンクリートは、過去の漏えいにより表面が汚染されていた。解体工事では、タンクからのダストの飛散抑制や作業員の被ばく低減対策、防護装備における熱中症リスクなどの多くの課題に対応する必要があった。

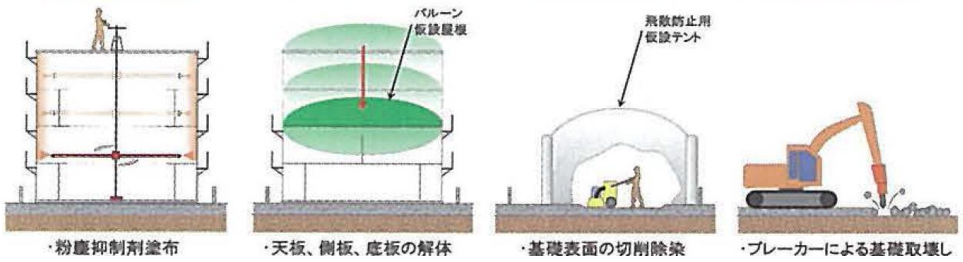


図 3-110 フランジ型タンクの解体フロー

タンク解体の手順

①タンク内面塗装（抑制剤塗布）

タンク内面に付着している放射性物質の物理的な抑え込みのため、タンク内面の洗浄と塗装を実施した。

②タンクの解体

雨水浸入防止とダストの飛散抑制のため、空気膜を用いた超軽量構造のバルーン天板、クレーンによる一括架設、容易な着脱による設置方式を確立した。

解体作業状況　　仮設屋根の設置によるダスト飛散抑制対策

図 3-113 フランジ型タンク解体作業状況

③コンクリート基礎切削除染

コンクリート基礎切削は、飛散防止用仮設テント内で実施し、ポータブル型切削機による除染が行われた。表面切削は切削ごとに表面線量率を測定し、10µSv/h未満になるまで切削を繰り返す作業が行われた。

汚染度 (µSv/h)	切削深さ (mm)
10	3
20	3
50	6
100	12
200	15

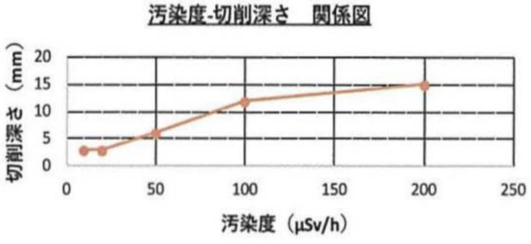


図 3-115 汚染度ー切削深さ関係

コンクリート基礎切削除染の状況　　汚染度測定状況

図 3-114 コンクリート基礎切削除染の状況

3.2.2個別の汚染水処理対策

(3)汚染水を漏らさないための対策
(c) タンク

溶接型タンクの設置

溶接型タンクは、**現地でタンクを組立・溶接を行う方式**と、福島第二原子力発電所で組立・溶接を行い**完成形のタンクを海上で運搬**する2つの方式の併用による施工が行われた。

タンクの組立・溶接

4 枚継側板　　1 枚もの側板

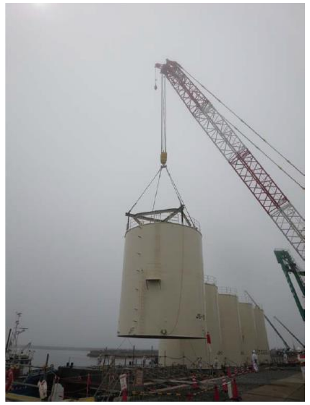
図 3-116 工場での部材作成(側板の作成)

図 3-117 仮組の状況(底板設置～側板建込み)

図 3-118 側板の溶接状況(左:溶接足場、右:溶接状況)

完成形タンクを搬入する方式

海上輸送の状況 [6)]



荷揚げの状況 [6)]

陸上輸送の状況 [1)]

福島第一原子力発電所までの約13kmは海上輸送を行い、設置箇所までの約2kmの陸上輸送は多軸式特殊台車で行った。

図 3-120 海上輸送、及び陸上輸送の状況

タンクの組立・溶接・水張り試験は福島第二原子力発電所での作業となるため、**作業時間の制約や放射能保護具が不要となり、作業効率が格段に向上した。**

図 3-119 福島第二原子力発電所での組立て・溶接の状況

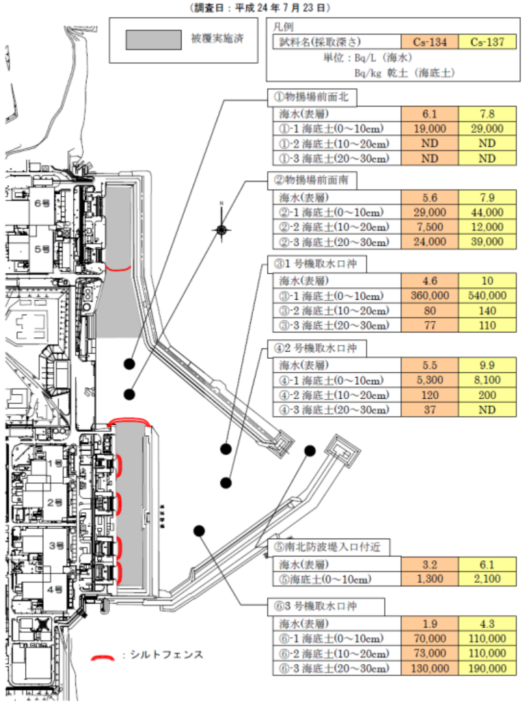
水張り試験は実施済みのため、設置後、底板の溶接線について磁粉探傷検査(MT)を行い、欠陥がないことを確認して供用を開始した。これにより、**供用開始までの時間が大幅に短縮された。**

図 3-121 タンクの設置状況

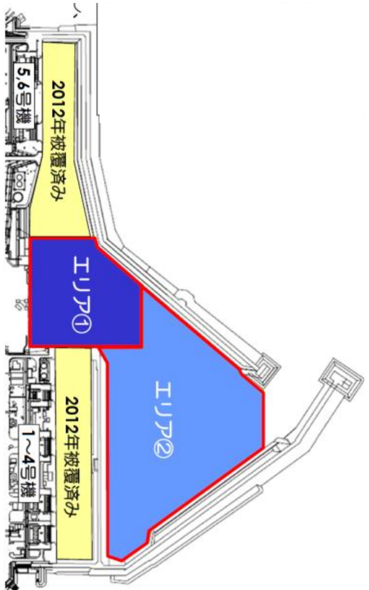
3.3 環境負荷低減・廃棄物対策

3.3.1 汚染の拡大防止対策　(1) 海底土の被覆

　第1期工事の被覆箇所以外の港湾内の汚染は依然高い状況であった。このため、約18万m^2の未施工エリアについて第2期工事として海底土被覆を実施した。対象エリアのうちエリア①は、海底に浮泥が存在するため、第1期工事と同様に浮泥の拡散を防止する2層（被覆材A、B）の被覆構造とした。浮泥の分布しないエリア②については、被覆材Bの1層の被覆構成とした。



港湾内海底土核種分析結果 1)



施工エリア	施工面積（m²）	打設量（m³）
エリア①	50,900	10,700
エリア②	129,700	21,800
合計	180,600	32,500

海底土被覆施工範囲 2)

図 3-124 海底土の汚染状況と海底土被覆施工範囲

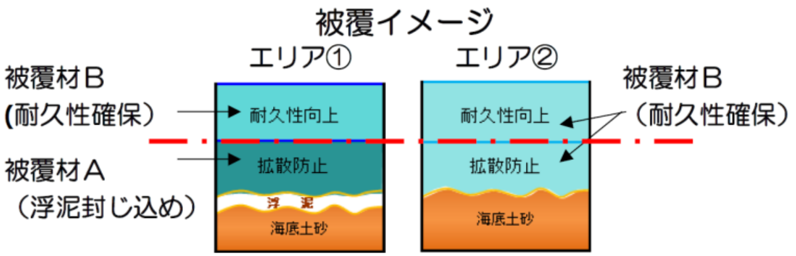


図 3-125 被覆土の構成

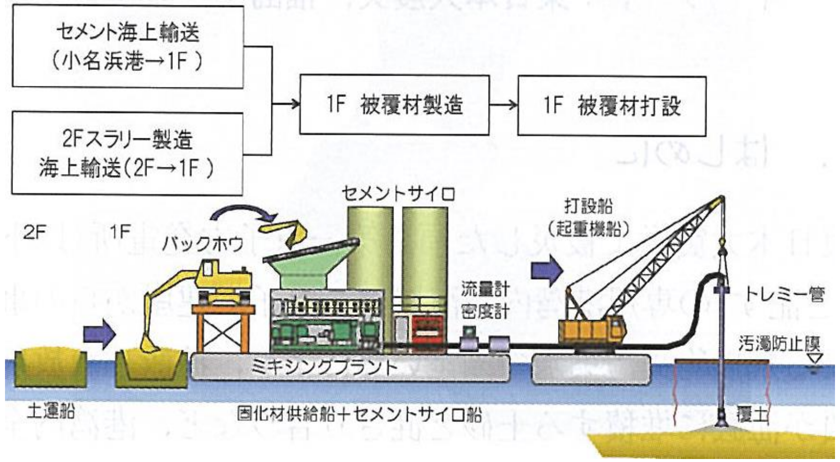


図 3-126 海底被覆土の施工システム

図 3-130 施工状況(第2期工事)

施工方法の工夫
（トレミー管筒先構造）

被覆材Ａに使用したスプレッダー

被覆材Ｂに使用したスプレッダー

筒先からの落下衝撃による**海底土の巻き上がり抑制**のため、落下する被覆材の鉛直力を水平方向に分散させると同時に被覆材の材料分離をおさえつつ、**被覆材を海底土上に広く均等に行き渡らせる**筒先冶具（スプレッダー）を開発

図 3-129 筒先冶具(スプレッダー)の工夫

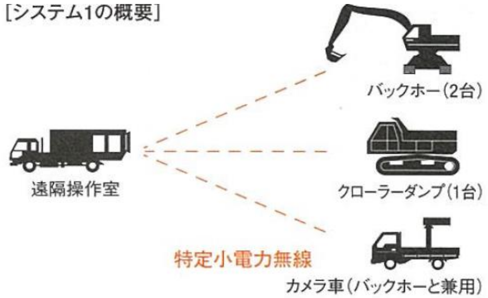
3.3 環境負荷低減・廃棄物対策

3.3.2 廃棄物関連対策

(1)がれきの撤去（がれきの撤去に資する遠隔操作技術）

(a)構内道路

遠隔操作は2種類のシステムから構成され、遠隔操作室でオペレータが重機を操作する（「**2.1構内道路の健全性確認及びがれきの撤去**」参照）。



遠隔操作室の様子(資料・写真:下2点も東京電力)

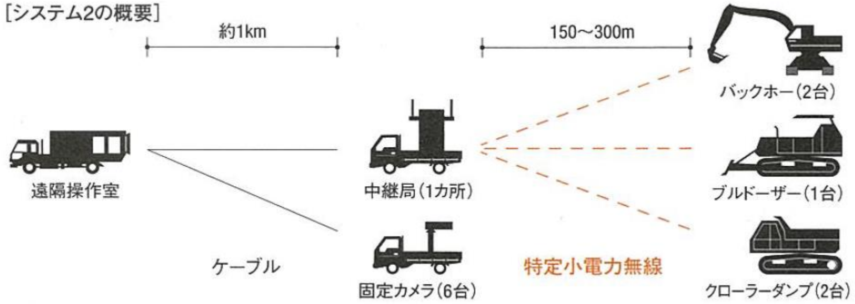


図 3-148 システム概念図

バックホ-でがれきを運び、クローラーダンプに積んだコンテナに載せる様子。右写真右下が移動式遠隔操作室である。

図 3-149 無人化施工の状況

(b) 3号機建屋

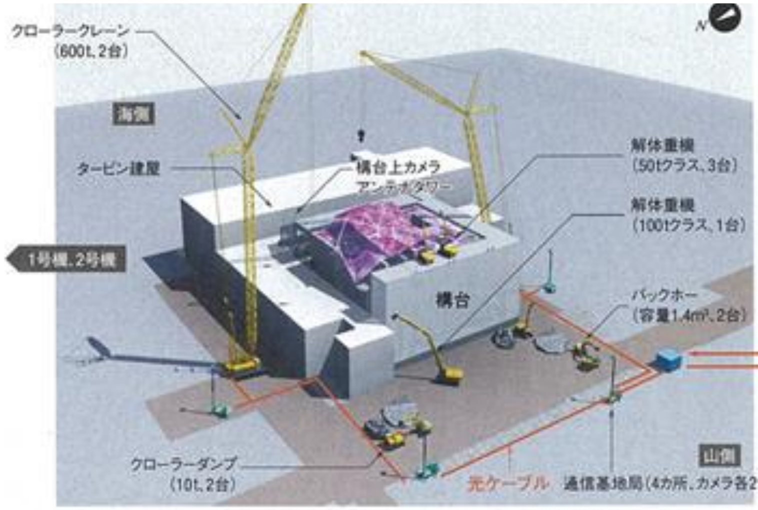
重機10台を遠隔により操作するシステムを構築。

操作室は、建屋から500mほど離れた免振重要棟に設置され、現場に4つの通信基地局を設け、その間を光ケーブルで接続することにより、通信基地局を介して重機に操作信号を送信するシステムでがれきを撤去。

橋台の上に重機を上げてタービン建屋の排気ダクトを解体した。

3号機原子炉建屋の南側などに落下したがれきの撤去する様子

図 3-151 がれき撤去の施工状況



·写真:鹿島)

現場から500m離れた遠隔操作室。写真はクローラークレーンを操作する様子

図 3-150 がれき撤去と付属建屋解体イメージ

3.3 環境負荷低減・廃棄物対策

3.3.2 廃棄物関連対策

(1)がれきの撤去（がれきの撤去に資する遠隔操作技術）

(c)3号機（搬送の自動化）

クローラーダンプ自動走行システム

　機械が自分で周囲の状況を判断して走行・停止し、障害物を検知して、衝突を回避する自動搬送システム。
　3号機原子炉建屋から搬出された高線量がれきを固体廃棄物貯蔵庫まで搬送する。

[11tクローラーダンプ(コマツ製)]

図 3-154 クローラーダンプ自動走行システム

フォークリフト自動走行システム

　貯蔵庫前では、コンテナをフォークリフトに遠隔操作で積み替え、所定の位置へコンテナを定置する。

[定格荷重8.5tのフォークリフト(三菱重工業製)]

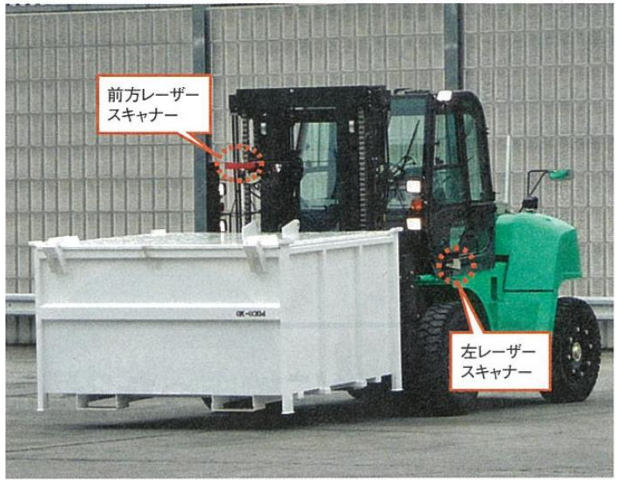


図 3-155 フォーク リフト自動走行システム

(d)オペレ－ションフロア

　オペレーションフロア上のがれきを遠隔操作により撤去した後、有人作業ができるように厚板鉄板等の敷設、遠隔操作式除染装置の吸引による小がれきや粉塵の除去による線量低減を図った。

図 3-155 フォーク リフト自動走行システム

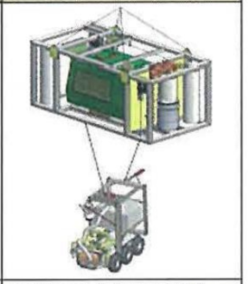
除染方法	①集積	②吸引	③吸引	④機械式はつり
外観				
除染機能	バケットでは集積できない小型瓦礫の集積	小型瓦礫および粉塵の吸引	②の代替機	躯体健全箇所の表層はつり
除染能力	集積最大重量300kg 自走式(20m²/h)	吸引瓦礫最大径100mm 自走式(10m²/h)	吸引瓦礫最大径 100mm 定位置	はつり最大厚 1.6 mm 自走式(3m²/h)

図 3-158 除染機器

4. 放射性廃棄物の合理的な安定保管・管理技術

対象廃棄物の分類

①がれき等（がれき類、伐採木、使用済保護衣等）

②水処理二次廃棄物（吸着塔類、廃スラッジ、濃縮廃液）

注：事故以前から発電所で保管されていた廃棄物、将来発生する燃料デブリ等は本報告の対象外

4.2がれき等の保管・管理

4.2.1目的

「がれき等」を将来の処理・処分までの期間安定的に保管管理するため、放射性物質の拡散（飛散、漏洩）と被ばく線量の抑制（隔離、遮へい）が可能な保管施設に収容する。直ちに保管施設に収容できない場合、まず一時保管施設に収容の後に一時保管を解消していく。

4.2.3特徴、工夫・効果

・廃棄物の処理処分のため、発生場所・表面線量率等を記録し、分類して保管した。

・津波評価を行い、浸水しない地点を保管場所とした。

・伐採木の一時貯蔵施設で、発火防止対策を実施するとともに延焼防止の防火帯を設置した。

・漏洩が無いことを確認するため、モニタリングを実施した。

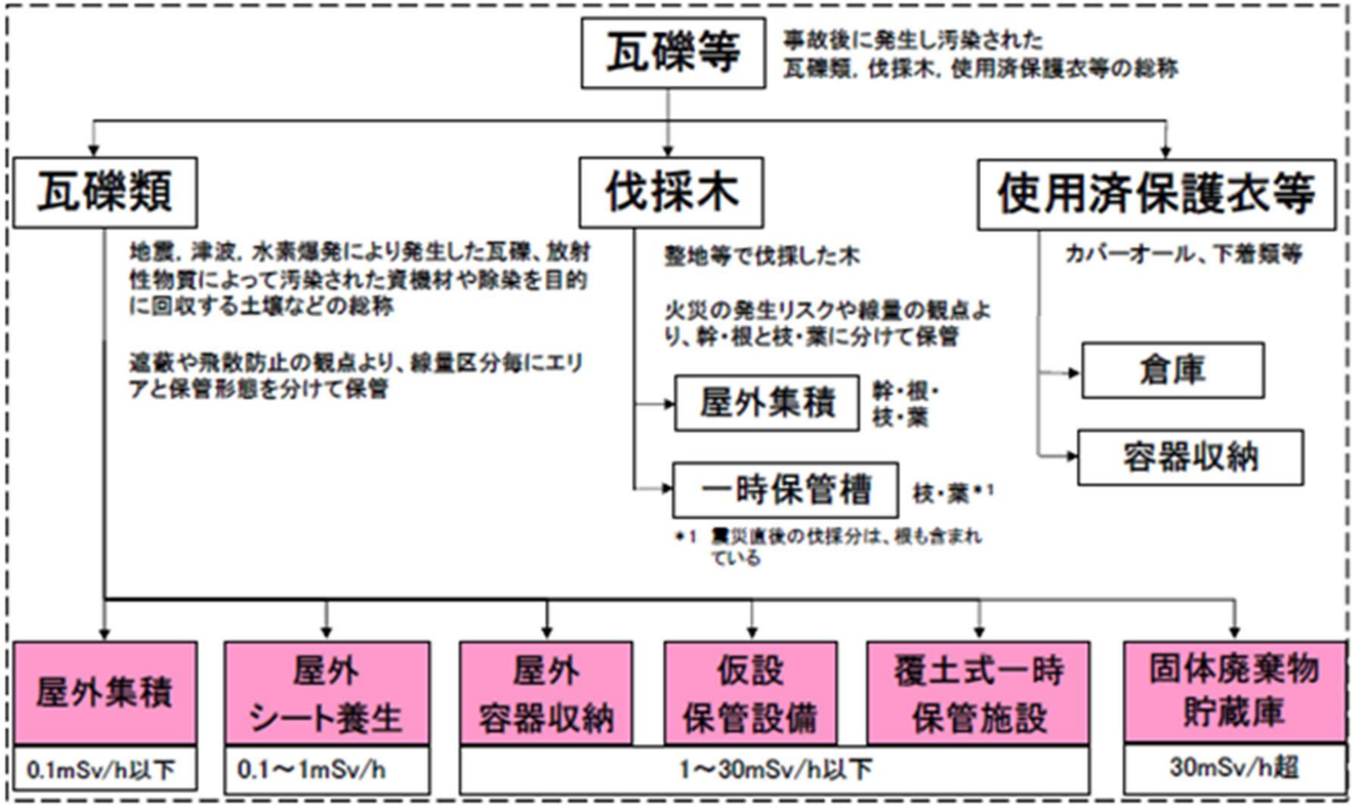


図4-5 がれき等の種類と保管施設

4.3水処理二次廃棄物の保管・管理

4.3.1目的

「水処理二次廃棄物」を将来の処理・処分までの期間に亘り安定的に保管管理するため、保管設備の経年劣化や放射性物質の飛散・漏えい、可燃性ガスの発生等のリスクに十分配慮した管理を行う。

4.3.3特徴、工夫・効果

・遮へいが必要な容器は、ボックスカルバート（一部は蓋付）に保管して遮へいで被ばく線量を抑制した。

・漏洩の可能性がある容器を保管するボックスカルバートは、水密構造とした。

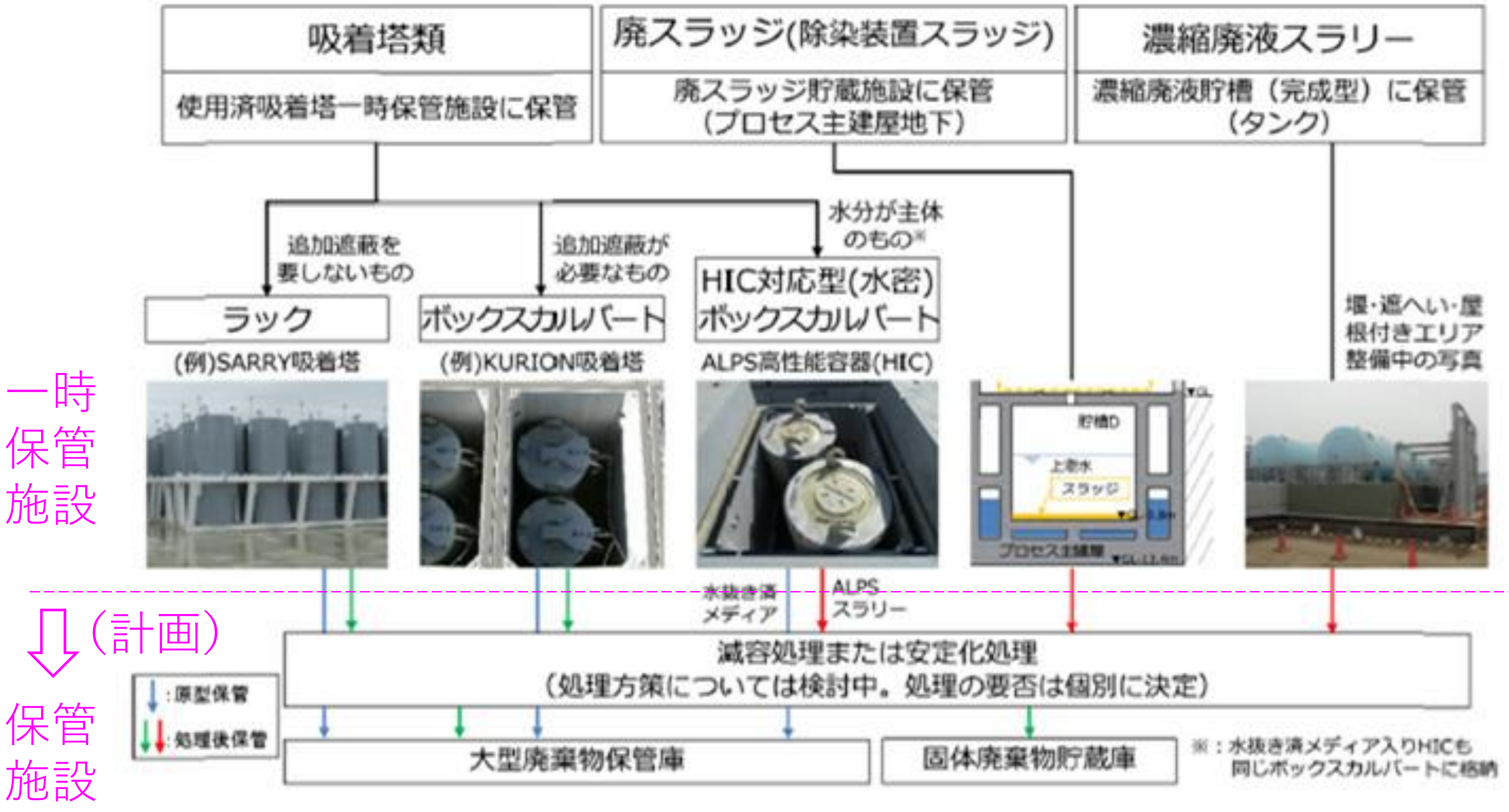


図4-15 水処理二次廃棄物の保管･管理フロー

5. 技術提案の公募

5.1 国際廃炉研究開発機構の公募

汚染水問題については国内外の叡智を結集するため、6分野について広く対応策を募集した。これを受けて、国内外から769件の提案があった。

技術提案については、専門家によるレビュー会議において、6分野ごとに

①福島第一原発と同様の環境下において実用化の実績があるもの。
②他分野において実用化の実績があるもの。
③原理は確立されており、研究レベルで一定の成果を上げているもの。
④アイデア提案として示されているもの。

の視点で整理・分類がなされ、数年以内に現場で一定の効果が発揮されるものかの観点から評価が行われ、汚染水処理対策委員会（第9回）に「**新たに活用すべき主な技術**」として報告された。

表5-4 国内外からの技術提案

「特に技術提案・助言をお願いしたい事項」として募集した分野	件数
１：汚染水貯留 （貯留タンク、微小漏えい検出技術 等）	206
２：汚染水処理 （トリチウム分離技術、トリチウムの長期安定的貯蔵方法 等）	182
３：港湾内の海水の浄化 （海水中の放射性 Cs、Sr 除去技術 等）	151
４：建屋内の汚染水管理 （建屋内止水技術、地盤改良施工技術 等）	107
５：地下水流入抑制の敷地管理 （遮水壁施工技術、フェーシング技術 等）	174
６：地下水等の挙動把握 （地質・地下水データ計測システム、水質分析技術 等）	115
その他（１～６に該当しないもの）又は、記載がないもの	34

表5-4 公募を踏まえ新たに活用すべき主な技術

①現地での適用性を確認した上で早急に活用すべき技術
- ○二重鋼殻タンク等の信頼性の高い大型タンク等
- ○鉛を用いない軽量な遮蔽シート
- ○汚濁防止膜（シルトフェンス等）
- ○止水技術（建屋内止水、建屋周辺止水）
- ○地質・地下水調査、観測網を整備

②施工性や費用対効果等を踏まえ実施手法を選定した上で、活用すべき技術
- ○遮水対策技術（フェーシング、遮水等）

③効果が期待されるが、活用するに当たって確認・検証が必要な技術
- ○微小漏えい検出技術（染料を含む）
- ○水を使わないタンク除染技術
- ○トリチウム水の貯蔵・分離技術
- ○港湾内の海水の浄化技術
- ○土壌中のストロンチウムの捕集技術
- ○無人ボーリング技術
- ※各技術の確認・検証内容に応じ、確認・検証を支援する体制を整備

④汚染水処理対策委員会等での検討を踏まえて進めて行くもの
- ○トリチウム水の取扱いについての総合評価
- ○タンカー、地下貯蔵等に係る諸問題への対応の可能性の検討

表5-5 現場で採用する技術提案

信頼性の高い大型タンク

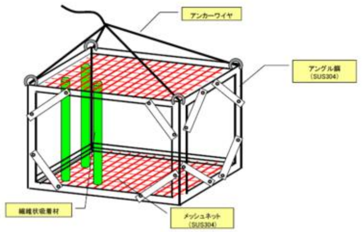
No.558
・工場にて一貫してタンクを完成させ現地搬入することにより現場作業を極小化
・据付エリアの敷地形状，貯蔵量ニーズに合わせた各種容量タンクを供給可能

鉛を用いない遮へいシート

No.83
柔軟性に富みかつ加工容易である Df シートを用いて測定器のプローブの入射窓以外の部分の外面を被覆することにより，周囲からのγ線並びにβ線を遮へいでき，水たまりのβ線表面汚染密度を測定する方法

吸着材を用いた海水浄化

No.408
①Cs 吸着繊維を港湾内に浸漬，または繊維に海水を通水し，海水から Cs を吸着除去
②Sr 吸着繊維を港湾内に浸漬，または繊維に海水を通水し，海水から Sr を吸着除去



【繊維状吸着材浄化装置の概念図】

Sr 汚染地下水を対象とした透過性浄化壁

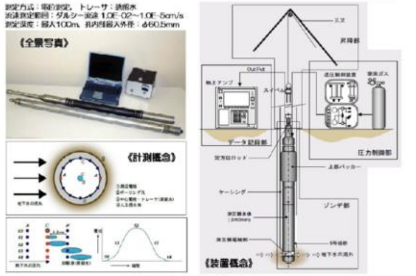
No.229
アパタイトによる土壌中 Sr 補集を実施予定（22 社提案の中から，現地適用性の高いものを比較評価し採用）

（回転振とう装置）
【カラム試験】

水みち検層（No.571）
単孔法流速流向測定技術（No.572）

No.571
裸孔状態のボーリング孔において，孔底までダウンホールプローブを挿入した後，揚水ポンプで揚水しつつプローブを段階的（または連続的）に引き揚げ，プローブ内に設置された電磁流量計により区間ごとの流量変化を計測（水みち検層）

No.572
測定場の間隙変化による乱流の影響を受けない電位差式測定法（単孔法流速流向測定技術）で，水みち検層技術と単孔法流速流向測定技術を組み合わせた調査



【測定技術概念図】

（No.は受付番号）

5. 技術提案の公募

5.2 経済産業省 資源エネルギー庁の公募

経済産業省 資源エネルギー庁は、平成25年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金」に係る補助事業として、以下の4つの汚染水処理対策技術検証事業に係る補助事業者の公募を行った。

① 海水浄化技術検証事業
② 土壌中放射性物質捕集技術検証事業
③ 汚染水貯蔵タンク除染技術検証事業
④ 無人ボーリング技術検証事業

公募の結果、11件の提案が採択され、検証事業が実施された。

図5-1 成果報告の例(無人ボーリング技術検証事業最終成果)

表5-6 汚染水処理対策技術検証事業

海水浄化技術検証事業	
海水中における、主として放射性セシウムや、放射性ストロンチウム等の浄化技術について、その除去性能を検証するための実証試験	①海水中の汚濁物質を除去する前処理装置と海水用に調整された独自の捕集材システムとを組み合わせた浄化システムの除去性能を検証
	②放射性核種の捕集について実績のある吸着材を採用し、これを導入した水中稼働式浄化システムの除去性能を検証
	③自然素材を活用して、セシウムだけでなくストンロンチウムに対しても高い吸着性能を持つ捕集材料の開発を実施し、この除去性能、放射線耐性、二次廃棄物量を検証
	④可燃性の吸着シートを新たに開発し、これを導入した水中可動式浄化システムについて、その除去性能と二次廃棄物量を検証
	⑤セシウムとストロンチウムの化学特性の相違を考慮して、繊維状吸着材を新たに開発し、海水からのセシウムとストロンチウムの除去性能と二次廃棄物量を検証
土壌中放射性物質捕集技術検証事業	
一定以上の塩化物イオン濃度下(200 ppm 以上)における、土壌中の放射性物質(主として放射性ストロンチウム)捕集技術の捕集性能を検証	⑥土壌中の放射性ストロンチウムに対する浸透式反応性バリア技術の捕集性能を検証
	⑦高いストロンチウム捕集性能を有する吸着剤(海水中での捕集率99%以上)を用いて、地下水中のストロンチウムを効率よく捕集・回収する仕組みを有する透過壁の構造およびその施工手順を確立を実証
汚染水貯蔵タンク除去技術検証事業	
解体作業における作業員の被ばくを低減する観点から、複雑な構造を有するボルト締め型タンク内部に貯留する汚染水を排水するの除染性能を検証	⑧複雑な形状のタンクの除染に超高圧液体窒素技術を適用した際の除染性能と廃棄物回収性能を検証
	⑨「ドライアイスブラスト」、「機械切削」、「ショットブラスト」の3 つの除染技術を最適に組み合わせた遠隔除染装置の除染性能を検証
	⑩タンク底部の残留汚染水を浄化用水として再利用することで、汚染水を増やすことなく、タンク内部を除染するシステムの性能を検証
無人ボーリング技術検証事業	
ボーリング作業時における作業員の被ばくを低減させる観点から、高線量下での無人ボーリング性能を検証	⑪ボーリング作業工程のうち ・初期掘削 ・コアリング掘削 ・拡掘を対象とした、衛星通信ネットワークを用いた遠隔操作ボーリングシステムの検証

まとめ

放射能汚染という大変厳しい環境下において、**事故発生当初からの緊急時対応と復旧活動**、**汚染水処理**や**環境負荷・廃棄物対策等様々な取り組みのほとんどにおいて土木技術は関わってきており**、多くの土木技術者がそれぞれの場面で創意・工夫と苦労を重ねて貢献した。**広範に実施された各種対策技術がどのようなものであったかということを、本調査報告書では、公開資料に基づいて、対象廃棄物・技術分野ごとの時系列的な流れも考慮して体系的な整理を行った。**

福島第一原子力発電所の事故対策で用いられた土木技術は、今までにない革新的な技術の適用例は少なく従来技術の展開で実施された。しかし、高線量下、さらに時間的な制約などの厳しい条件の下で実施された調査・設計検討、施工における様々な工夫、確実な品質管理、放射線防護対策、熱中症対策を含めた安全対策など、従来の土木工事とは大きく異なった活動が行われてきた。

原子力事故という過酷な状況下において、東電や国、あるいは原子力防災等の専門家の人々とともに、**多くの土木技術者もまた、縁の下の力持ち的な役割を果たしてきた**ということを技術者や一般の方々にも改めて知っていただくとともに、将来への貴重な基礎資料、あるいは教訓として若い世代の技術者の皆さんに広く有用な基礎資料として寄与できれば幸いである。

地盤改良 [4]　フランジタンクの解体 [5]
法面吹き付け [6]　陸側遮水壁 [7]

図3-4 高線量下(Yzone)での作業状況