

2011年 東京電力福島第一原子力発電所事故 における土木技術等の適用事例の体系的整理 — 事故時の緊急時対応、汚染拡大 防止対策等の技術蓄積 —

2024年4月



社団法人 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

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 委員構成

(2024年3月現在: 敬称略, 50音順)

委員長 大西 有三 (京都大学 名誉教授)
副委員長 勝見 武 (京都大学)
幹事長 河西 基 (株)アサノ大成基礎エンジニアリング/
(一財)電力中央研究所 名誉研究アドバイザー)

委員

遠藤 和人 (国立環境研究所)	加藤 和之 (原子力損害賠償・廃炉等支援機構)
苅込 敏 ^{*1)} (日本原子力発電 (株))	窪田 茂 (原子力発電環境整備機構)
佐々木 泰 (日本原燃 (株))	佐藤 努 (北海道大学)
杉山 大輔 ((一財)電力中央研究所)	土 宏之 ^{*2)} (清水建設 (株))
中居 邦浩 (日揮 (株))	新堀 雄一 (東北大学)
西坂 直樹 (四国電力 (株))	万福 裕造 (農業・食品産業技術総合研究機構)
森本 英雄 (前田建設工業 (株))	
森本 良 (東京電力ホールディングス (株))	宮脇 健太郎 (明星大学)

幹事

山本 武志 ((一財)電力中央研究所) 渡邊保貴((一財)電力中央研究所)

オブザーバー (常時参加者)

白土 博司^{*3)} (東電設計 (株))

前委員 (所属は就任時)

赤村 重紀 ((東京電力ホールディングス (株))	末広 俊夫 (東京電力ホールディングス (株))
高橋 利昌 (四国電力 (株))	蓮本 清二 (東京電力ホールディングス (株))
久田 真 (東北大学)	油井 三和 (福島工業高等専門学校) ¹
横山 信吾 ((一財)電力中央研究所)	

【注】 *1) 分科会 3 主査(L3 処分施設検討)

*2) 分科会 1 主査(除染廃棄物対策検討)

*3) 分科会 2 主査(1F 事故廃棄物対策検討)

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（1F 事故廃棄物対策検討） 委員構成

（2024年3月現在：敬称略，50音順）

主査 白土 博司（東電設計 株）

副主査 須山 泰宏（鹿島建設 株）

幹事 大田 哲也（鹿島建設 株）

委員

杉本 映湖（大日本ダイヤコンサルタント 株） 土 宏之^{*1}（清水建設 株）

長峰 春夫（大成建設 株）

福田 和人（前田建設工業 株）

山本 武志^{*2}（一財）電力中央研究所

分科会代表幹事

河西 基^{*3}（株）アサノ大成基礎エンジニアリング／

（一財）電力中央研究所 名誉研究アドバイザー）

前委員（所属は就任時）

井尻 裕二（前副主査，大成建設 株）

金子 俊輔（前副主査，東電設計 株）

納多 勝^{*4}（株）大林組

畠中 千野（大成建設 株）

樋口 義弘（清水建設 株）

菱谷 智幸（大日本ダイヤコンサルタント 株）

【注】*1) 分科会 1 主査 (除染廃棄物対策検討)

*2) 研究小委員会幹事

*3) 研究小委員会幹事長

*4) 分科会 1 副主査 (除染廃棄物対策検討)

【表紙写真】



1: 消防車による原子炉の冷却(図 2-3)

2: 高濃度汚染水の流出状況(図 2-6)

3: 仮設防潮堤の施工状況(図 2-33)

4: 水ガラスによる地盤改良の施工状況(図 3-96)

5: 陸側遮水壁の施工状況(図 3-4)

6: 法面吹付けの施工状況(図 3-4)

7: 溶接型タンクの組み立て状況(図 3-121)

8: 3号機原子炉建屋周辺のがれきの撤去状況(図 3-159)

9: 無人化施工機械による高線量のがれきの収容状況(図 3-175)

()内は本文中の図番号

はじめに

2011年3月の東日本大震災では、マグニチュード9.0の地震に起因する大津波が東京電力福島第一原子力発電所(以下、「1F」)を襲い、1~4号機で未曾有の事故が発生した。それから既に13年が経過したが、事故発生直後より国・東電が中核となり、まさに国が一丸となつて、さらには国際的に広範な支援・協力も得た総力を挙げての取り組みにより、初期段階における緊急時対応と復旧活動、その後の汚染水対策など、比較的早期に1Fの安定化が達成されるとともに、継続的な汚染水対策、環境負荷低減・廃棄物対策、さらには今後の廃止措置に向けての取り組みへと進展が図られてきている。

本調査研究では、このようなオールジャパンでの取り組みの全体を俯瞰しつつ、特に原子力発電所事故の放射能汚染という大変過酷な環境下において、主に土木分野の技術や技術者がどのような役割を果たしてきたかについて、以下のような体系的な調査・取りまとめを行った。

1) 事故時の緊急時対策・汚染水対策等へ土木技術が果たした役割の体系的整理

国内外で検討され適用されてきた緊急時・汚染水対策等の技術に係る土木分野の技術情報を中心に収集・分類・整理するとともに、それらの広範な技術蓄積を事故時対策事例として、また、これまでどのような役割を果たしてきたか等の貢献状況を時系列的な進展も考慮しつつ、下記の構成で体系的に取りまとめた。

・初期段階の土木分野の復旧活動

構内道路の健全性確認、がれきの撤去、汚染水の流出防止対策、あるいは海域汚染拡大防止対策、放射性物質の飛散防止対策、津波対策等の情報の整理

・汚染水処理対策

汚染水処理対策の全体像、ならびに3つの汚染水対策の方針（汚染源を取り除く、汚染源に水を近づけない、汚染水を漏らさない)に基づいて検討・適用された個別対策技術の分類・整理

・環境負荷低減・廃棄物対策

海底土被覆等の汚染拡大防止対策、がれきの撤去に資する遠隔操作等の技術、がれきの一時保管等の情報の整理

2) 固体廃棄物*1の合理的な安定保管・管理技術

- ・1F 事故で発生したがれき等の安定保管・管理の対象となる固体廃棄物の種類と発生量，ならびに将来の発生量予測について公表された内容等の整理
- ・安定かつ合理的な保管・管理方法に関して，対象廃棄物ごとの処理・保管施設の整備・管理状況の推移を調査し，さらに減容・安定化等も考慮したそれぞれの保管方法の特徴，工夫した点や効果及び課題に関する分類・整理
- ・水処理二次廃棄物の種類・発生量と管理状況，将来の発生量予測について公表された内容等の整理
- ・水処理二次廃棄物の保管・管理方法のフローと施設の整備状況，それらの特徴，工夫した点や効果及び課題等に関する分類・整理

3) 技術提案の公募

放射性物質による汚染拡大防止等の対策について，国内外の英智を集めるため，国際廃炉研究開発機構(IRID)や経済産業省・資源エネルギー庁により実施された国際的な技術公募に対して多くの技術提案があり，その一部は実際に採用・適用されるなど，1F の安定化に寄与した経緯等を分類・整理

以上，本調査研究の結果は，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でも，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が重要であるとの認識のもと，1Fにおける甚大な原子力事故の対策事例を確実に伝えていくことが現世代の我々技術者の重要な使命であると考え，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への貴重な技術情報，教訓としてのメッセージに資することができれば幸いである。

2024年4月

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

委員長 大西 有三

分科会2主査 白土 博司

*1 本調査研究では，福島第一原子力発電所事故で発生したがれき類（がれき，資機材，土壤等），伐採木，使用済保護衣及び水処理二次廃棄物等の廃棄物を総称して「固体廃棄物」と称す。

目 次

1. 概説	1
1.1 報告書作成の目的	1
1.2 事故直後から現在(2018年10月)までに発生したトラブルや取り組み	1
1.3 報告書の構成	5
2. 事故初期段階の土木分野の復旧活動	10
2.1 構内道路の健全性確認及びがれきの撤去	10
2.2 汚染水の流出防止対策及び海域汚染拡大防止対策	12
2.2.1 汚染水の流出防止対策	12
(1) 汚染水流出箇所の緊急対策	12
(a) 2号機取水口スクリーン室付近	13
(b) 3号機取水口スクリーン室付近	15
(2) 汚染水の流出防止対策	17
(a) 立坑・トレンチ・ピットと護岸の状況調査	17
(b) 立坑・トレンチ・ピットの閉塞	18
(c) スクリーンポンプ室前面等の閉塞	19
(d) 護岸損傷箇所の補修	20
(e) 汚染水の移送	21
2.2.2 海域汚染拡大防止対策	22
(1) シルトフェンスの設置	22
(2) 1~4号機取水路開渠南側透過防止工の補修	22
(3) ゼオライト土嚢の投入と循環型浄化装置の設置	23
(4) 海底土の被覆	23
2.3 放射性物質の飛散防止対策	25
2.3.1 飛散防止剤の散布	25
2.3.2 散水	25
2.4 津波対策	26
2.4.1 仮設防潮堤の設置	26
2.4.2 その他の津波対策	29
3. 汚染水処理対策、環境負荷低減・廃棄物対策	34
3.1 概説	34
3.2 汚染水処理対策	41
3.2.1 全体計画の策定	42
(1) 地質・水理地質構造	42
(a) 地形	42
(b) 地質構造	43

(c) 水理地質構造	46
(2) 地下水流動場の評価	51
(3) 予防的・重層的な汚染水処理対策の検討方針	55
(a) 汚染源を「取り除く」対策	55
(b) 汚染源に水を「近づけない」対策, 及び汚染水を「漏らさない」対策 (地下水流動に影響を及ぼすもの)	55
(c) 汚染水を「漏らさない」対策 (地下水流動に影響を及ぼさないもの)	60
(d) 汚染水を「漏らさない」対策 (タンク容量の確保)	60
3.2.2 個別の汚染水処理対策	64
(1) 汚染源を取り除く対策 (海水配管トレンチの汚染水除去及び充填)	64
(a) 長距離流動可能なセメント系充填材の開発及び施工	68
(b) 被ばく低減対策	70
(2) 汚染源に水を近づけない対策	73
(a) 地下水バイパス	73
(b) サブドレン	79
(c) 陸側遮水壁	84
(i) 凍土方式による陸側遮水壁の概要	84
(ii) 凍土方式による陸側遮水壁の採用の経緯	86
(iii) 陸側遮水壁の設計検討	90
(iv) 施工	94
(v) 凍結順序	98
(vi) 水位管理	100
(vii) 陸側遮水壁の効果	102
(d) フェーシング	115
(3) 汚染水を漏らさない対策	123
(a) 水ガラスによる地盤改良	123
(b) 海側遮水壁及び地下水ドレン	128
(c) タンク	135
(i) フランジ型タンクの解体	137
(ii) 溶接型タンクの設置	139
3.3 環境負荷低減・廃棄物対策	145
3.3.1 汚染の拡大防止対策	145
(1) 海底土の被覆	145
(2) 構内排水路	151
3.3.2 廃棄物関連対策	161
(1) がれきの撤去 (がれきの撤去に資する遠隔操作技術)	161
(a) 構内道路	161
(i) 目的	161
(ii) 概要	161

(iii) 特徴	162
(iv) 課題等	162
(b) 3号機建屋	162
(i) 目的	162
(ii) 概要	162
(iii) 特徴	164
(iv) 課題等	165
(c) 3号機（搬送の自動化）	165
(i) 目的	165
(ii) 概要	165
(iii) 特徴	166
(d) オペレーションフロア	167
(i) 目的	167
(ii) 概要	167
(iii) 特徴	169
(iv) 課題等	170
(2) がれきの一時保管	172
(a) 覆土式一時保管	173
(b) 伐採木の一時保管	175
(3) 固体廃棄物貯蔵施設の敷地造成	178
4. 固体廃棄物の合理的な安定保管・管理技術	180
4.1 対象廃棄物の分類	180
(1) 福島第一原子力発電所事故で発生した廃棄物	180
(2) 安定保管・管理の対象廃棄物	180
4.2 がれき等の保管・管理	181
4.2.1 目的	181
4.2.2 概要	181
(1) がれき等の種類	181
(2) がれき等の発生量と今後の発生予測	181
(a) がれき類・伐採木・使用保護衣等の管理状況と保管量の推移	181
(b) 将来の発生予測	183
(3) 保管・管理の方法	185
(a) 保管・管理のフロー	185
(b) 一時保管	187
(i) 一時保管施設	187
(ii) 施設の運用	190
(c) 保管のための施設	191
(i) 運用を開始した施設	191
(ii) 2018年度時点で計画中の施設	192

(d) 安定保管・管理における対象物の処理施設	192
(i) 運用を開始した施設及び建設中の施設	192
(ii) 2018年度時点で計画中の施設	192
4.2.3 特徴, 工夫・効果	193
(1) 廃棄物の保管方法に関する事項	193
(a) 廃棄物の分類	193
(b) 減容・安定化における廃棄物データの取得	193
(c) 再利用の検討	194
(2) がれき類の一時保管場所の津波に対する安全対策	194
(3) 覆土式一時保管施設における工夫	194
(4) 伐採木一時保管槽における工夫	194
(5) 可燃性廃棄物の火災対策	195
(6) モニタリング	195
4.2.4 課題等	196
4.3 水処理二次廃棄物の保管・管理	197
4.3.1 目的	197
4.3.2 概要	197
(1) 水処理二次廃棄物の種類	197
(2) 水処理二次廃棄物の発生量と今後の発生予測	197
(a) 水処理二次廃棄物の管理状況とそれまでの保管量の推移	197
(b) 将来の発生量予測	198
(3) 保管・管理の方法	200
(a) 保管・管理のフロー	200
(b) 一時保管	200
(c) 保管	201
4.3.3 特徴, 工夫・効果	201
4.3.4 課題等	202
(1) 水処理二次廃棄物一時保管のリスク低減	202
(2) 保管施設への移行による放射線影響の低減	203
(3) 処理・処分方策の検討	203
(4) モニタリングの検討	203
5. 技術提案の公募	206
5.1 国際廃炉研究開発機構の公募	206
5.2 経済産業省 資源エネルギー庁の公募	211

1. 概説

1.1 報告書作成の目的

本報告書作成の目的は、以下のとおりである。

①事故時の緊急時対応、汚染拡大防止対策等の技術蓄積の整理・体系化

東京電力福島第一原子力発電所では、事故直後より国内外の技術を総動員して事故収束・汚染水対策等、多方面の検討が行われ対策工が実施されてきた。そこで、国内外で検討された土木分野の公開情報を収集・分類・整理して、福島第一原子力発電所で実施してきた広範な技術を事故時対策事例として体系的に取りまとめ、次世代への重要な技術情報として伝えていくことに寄与することを目的とする。

②固体廃棄物の合理的な安定保管・管理技術

福島第一原子力発電所の廃止措置等については、2017年度内に「廃棄物の処理・処分に関する基本的な考え方」を取りまとめるとともに、2021年度頃までを目途に、処理・処分方策とその安全性に関する技術的な見通しを得ることとしている^{1)*}。

今後の固体廃棄物の合理的な安定管理・保管技術の検討に資することを目的に、2017年度に国により取りまとめられた「廃棄物の処理・処分に関する基本的な考え方」²⁾、³⁾を考慮しつつ、処理・処分の実施に至るまでの数10年の長期を見据え、サイトにおいて発生している固体廃棄物の現状把握も踏まえ、これまでに実施した合理的な安定保管・管理技術等について取りまとめた。

1.2 事故直後から2018年10月までに発生したトラブルや取り組み

東京電力は、同社のホームページで福島第一原子力発電所の廃炉作業の進捗等を紹介する「廃炉への軌跡～since 2011.3.11～」を公開し、事故直後からのトラブルや汚染水処理対策、環境負荷低減・廃棄物対策等の現在までの取り組み状況を時系列で掲載している⁴⁾。

表1-1、表1-2は、事故直後から現在までに発生した様々なトラブルや進捗した取り組みを示したもので、土木分野が関わった取り組み等を赤枠で示した。

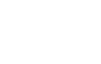
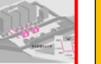
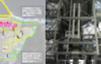
*2 肩番号は参考文献の番号を示す。

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り組み

2011年	3.11	3.11	3.11	3.12	3.14	3.14	3.15	3.20	3.24	4.2	4.4	4.11~14	5.11	6.17	6.27	6.30	7.31	8.10	8.18		
	東北地方太平洋沖地震発生	津波第一波到達 1~6号機の主要な建屋が浸水	1~5号機の全交流電源が喪失	1号機原子炉建屋で水素爆発が発生	3号機原子炉建屋で水素爆発が発生	2号機で原子炉建屋の圧力を逃すためのブローアウトパネルが解放していることを確認	4号機原子炉建屋で水素爆発が発生	外部電源が復旧	3号機タービン建屋の地下1階で作業員3人が深さ約15cmの汚染水に踏み入れ被ばく	2号機取水口付近の立て坑の亀裂から高濃度の汚染水が海に流出していることを公表	放射線物質の濃度が低い汚染水約1万トンを超えて放出	1~4号機取水口付近などにカーテン状の仕切りで海水の移動を抑制するシルフトランスを設置	3号機取水口付近で高濃度の汚染水が海に流出	主に放射線物質のセシウムを除去できる水処理設備の運用を開始	1~3号機の滞留水を淡水化し原子炉へ注水する循環注水冷却の本格運用を開始	3号機使用済燃料プールで安定的に燃料を冷却する代替冷却装置の本格運用を開始	4号機使用済燃料プールで安定的に燃料を冷却する代替冷却装置の本格運用を開始	1号機使用済燃料プールで安定的に燃料を冷却する代替冷却装置の本格運用を開始	主に放射線物質のセシウムを除去できる水処理設備「サリ」の運用を開始		
	10.28	12.16	2012年		2.3	3.9	4.5	4.19	4.25	5.11	9.22	9.23	10.2	2013年		3.11	3.18	3.30	4.5	4.12	6.19
	1号機で放射線物質の飛散を抑制する原子炉建屋カバーの設置工事を完了	政府と東京電力は全ての原子炉の温度が冷温停止(100℃以下)の状態になったことを宣言			汚染水貯蔵タンクが水漏れ(約10L)し、タンク底部で毎時200ミリシーベルトの高いベータ線を検出	南側66kV開閉所の運用を開始し、電源の信頼性が強化	水処理設備からタンクへの移送配管で汚染水約12トが漏れ、一部約750Lが海に流出	1~4号機の廃止	海側進水壁の設置工事に着手	被覆材で海床土の浮泥を封じ込めるため、1~4号機取水口前の海底土被覆を完了	3号機原子炉建屋上部のガレキ撤去作業中に使用済燃料プールへ鉄骨が落下	汚染水からトリチウム以外の大半の放射線物質を取り除く「多核種除去設備」の本格工事を完了	建屋山側の地下水を汲み上げるための地下水バイパス設備の設置工事を開始			放射線物質の放出を抑制するため、2号機ブローアウトパネル開口部を閉止	発電所構内の停電事故が発生(システムによる短絡事故)、使用済燃料プールの冷却が一時停止	汚染水を浄化する「多核種除去設備」で汚染水を用いた通水試験を開始	地下貯水槽からの汚染水漏えいを確認	共用プールの保管していた使用済燃料を収納する容器「乾式キャスク」の運用を開始	護岸の観測用戸から高濃度の放射線物質を検出
	6.30	7.20	8.12	2014年		1.31	3.8	3.28	4.1	4.9	5.15	5.21	5.27	7.29	9.17	10.18	12.22	12.26			
	防護設備への新替えや線量計の配布回収を発電所で行うための入道域管理施設の運用を開始	使用済燃料取り出し用カバーを4号機に設置完了	作業員10人の身体汚染を確認し、粉じんが原因と判明		フランジ型タンクから汚染水約300トンの漏えいを発見	5、6号機の廃止	4号機使用済燃料プール内のガレキ撤去を完了	固体廃棄物貯蔵庫で土砂の下敷きになる死口被害が発生	廃炉の責任と権限の明確化および迅速な意思決定を図るため、福島第一廃炉推進カンパニーを設置	建屋への地下水流入量を減らすため、地下水バイパスで汲み上げを開始	3号機主蒸気管伸縮継手周辺での滞留水漏れ箇所を確認	地下水バイパスで汲み上げた地下水が基準値以下であることを確認し、排水開始	1号機圧力抑制室の上部にある配管から滞留水漏れ箇所を確認	B・C排水路出口の港湾内への付け替え工事を完了	「多核種除去設備」の改良型「増設多核種除去設備」で汚染水を用いた通水試験を開始	廃棄物の低減を目指した設計した「高性能多核種除去設備」で汚染水を用いた通水試験を開始	4号機使用済燃料プールからの燃料取り出しを完了	水処理設備「サリ」・「キヌコヤ」性能強化し、ストロンチウム除去運転を開始			

東京電力:廃炉への軌跡~since 2011.3.11~⁴⁾, 2018年10月15日現在を基に作成

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り組み

2015年	1.10	1.19	2.12	2.24	4.10~20	4.17	4.23	5.27	5.31	6.30	7.30	8.2	8.8	9.3	9.14	10.5	10.20,22	10.26	11.26
																			
	汚染水から主にストロンチウムを除去する「RO濃縮水処理設備」の運転を開始	タンク天板部からの作業員転落による死亡災害が発生	宇宙線モニオンを用いた1号機原子炉内の透視調査を開始	排水路から外洋への汚染した雨水の流出を公表	ロボットによる1号機原子炉格納機の内部調査を実施	K排水路の水を仮設ポンプで汲み上げ、港湾内へ移送開始	被覆材で海底土の浮沈を封じ込めるための港湾内海底土移植を完了	事故以降タンクに保存していた高濃度汚染水タンク底部残水除きの処理を完了	大型休憩所の運用を開始	3号機海水配管トレンチ(地下トンネル)の汚染水の除去完了	3号機海水配管トレンチ(地下トンネル)の汚染水の除去完了	3号機使用済燃料プール内の燃料交換機の搬去を完了	工事車両清掃中の作業員の死亡災害が発生	建屋まわりに設置した井戸「サブドレン」で、建屋近くの地下水の汲み上げを開始	「サブドレン」などで汲み上げて浄化した地下水の港湾内排水を開始	1号機建屋カバ―屋根パネルの取り外しを完了	3号機原子炉格納容器のカマラによる内部調査を実施	港湾内に流れている地下水をせき止め、海洋汚染をより一層防止する港側遮水壁の閉合作業を完了	3号機原子炉格納機の機器ハッチ周辺を小型ロボットで撮影する調査を実施
2016年	12.8	12.11	2.9	3.1	3.8	3.18	3.22	3.28	3.31	4.12	6.20	9.21	9.30	11.10	12.5	1.17	2.16		
																			
	一般作業服着用エリアを拡大	4号機海水配管トレンチ(地下トンネル)の汚染水の除去完了	建屋内への地下水流入を抑制する陸側遮水壁の設置工事を完了	構内大型休憩所にローソンが来店	放射線防護区域と設備を適正化	雑固体廃棄物焼却設備の運用を開始	宇宙線モニオンを用いた2号機原子炉内の透視調査を開始	K排水路の出口を港湾内に付け替えた	陸側遮水壁の凍結を開始	3号機原子炉建屋オベレーティングフロアの進へい体設置工事を開始	構内排水路を新設	海抜4mエリアの地下水位上昇	新事務本館の建設工事を完了	1号機建屋カバ―壁パネル(全18枚)の取り外し完了	3号機原子炉注水停止に伴う運転上の制限からの運転ならびに復帰の取り外し完了	3号機原子炉建屋燃料取り出し用カバ―の設置に向けた準備工事を開始	ロボットによる2号機原子炉格納容器内部調査		
2017年	3.18	3.30	6.20	7.19	7.27	7.31	8.22	11.12	11.20	12.19	1.19	1.22	2.21	3.7	4.16	7.2			
																			
	ロボットによる1号機原子炉格納容器内部調査を実施	Gゾーンエリアを拡大作業環境の改善	ドクターヘリ離着陸の訓練	ロボットによる3号機原子炉格納容器内部調査を実施	宇宙線モニオンを用いた3号機原子炉内の透視調査中間報告	3号機原子炉建屋燃料取り出し用カバ―等の設置工事を開始	陸側遮水壁の完全閉鎖を開始	3号機原子炉建屋燃料取り出し用カバ―設置工事をクレーンを使用	3号機原子炉建屋燃料取り出し用カバ―設置工事を燃料取扱機を設置	1号機建屋カバ―解体防風フェンス設置完了	2号機原子炉格納容器内部調査	1号機原子炉建屋北側ガレキ撤去作業の開始	3号機原子炉建屋燃料取り出し用カバ―設置完了	凍土方式の陸側遮水壁の完成	自動運転Eバス運行開始	2号機原子炉建屋下部調査開始			

東京電力:廃炉への軌跡~since 2011.3.11~⁴⁾, 2018年10月15日現在を基に作成

参考文献

- 1)経済産業省廃炉・汚染水対策チーム事務局(2017):中長期ロードマップの改訂について,平成29年9月26日,
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2017/09/2-00-01.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 2)原子力損害賠償・廃炉等支援機構(2017):東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2017,概要版,2017年8月31日,
https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20170831_SP2017OV.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 3)廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議(2017):東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ(案),平成29年9月26日,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/hairo_osensui/dai3/siryou2.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 4)東京電力(2018):廃炉への軌跡～since 2011.3.11～,
<https://www.tepco.co.jp/decommissiontraject/index-j.html>, 2018年10月15日掲載確認

1.3 報告書の構成

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り組みを表 1-3 に示す。汚染拡大防止対策は大きく以下のように区分される。

- I. 汚染水処理対策
- II. 環境負荷低減・廃棄物対策
- III. 固体廃棄物の安定保管・管理

また、時系列的には以下のように区分することができる。

- 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事故直後から継続して実施している環境負荷低減・廃棄物対策、ならびに固体廃棄物の保管・管理

本報告書は、「I. 汚染水処理対策」、「II. 環境負荷低減・廃棄物対策」、ならびに「III. 固体廃棄物の安定保管・管理」における土木分野の取り組み状況、さらに「① 事故初期段階の土木分野の復旧活動」等の情報を取りまとめ、以下の構成とした。

- 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. 固体廃棄物の合理的な安定保管・管理技術
- 5. 技術提案の公募

本報告書で用いた情報は、主に東京電力、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に掲載されている数多くの公開情報のうち、汚染水処理対策工がほぼ全て完成して稼働を開始した**2018年12月**までの情報を主な対象とした。

本報告書の作成に際しては、公開情報の内容が適切である、不適切である、間違っているなどの評価を避け、資料に基づいて調査・設計検討、施工、対策工の効果、品質管理、安全対策などに着目した情報を収集して体系的な取りまとめを行った。

事故初期段階の土木分野の復旧活動は主に以下の対策が実施され、これらの取り組みを「2. 事故初期段階の土木分野の復旧活動」でまとめた。

- 高濃度汚染水の流出防止対策
(高濃度汚染水の流出箇所の緊急対策, 取水口角落の設置, 海水配管トレンチ立坑・ピットの閉塞, 護岸損傷箇所の補修, 高濃度汚染水の移送等)
- 海域汚染防止対策
(シルトフェンスの設置, 透過防止工破損箇所の補修, ゼオライト土嚢の投入と循環型浄化装置の設置, 海底土被覆等)
- 放射性物質の飛散防止対策
(飛散防止剤の散布等)
- 津波対策
(仮設防潮堤の設置, 北側防潮堤の補修等)

汚染水処理対策, 環境負荷低減・廃棄物対策のうち汚染水処理対策は、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、リスクの洗い出し, 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

対策の全体像についての精力的な議論が行われ(図 1-1),「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～」²⁾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(汚染源を取り除く, 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(図 1-2)。

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。現在は、計測データ等に基づいた対策工の効果の評価、ならびに今後の汚染水の発生量予測や中期的なリスク低減などの更なるリスク対策についての検討を行っている段階である。これらの取り組みを「3.2 汚染水処理対策」でまとめた。

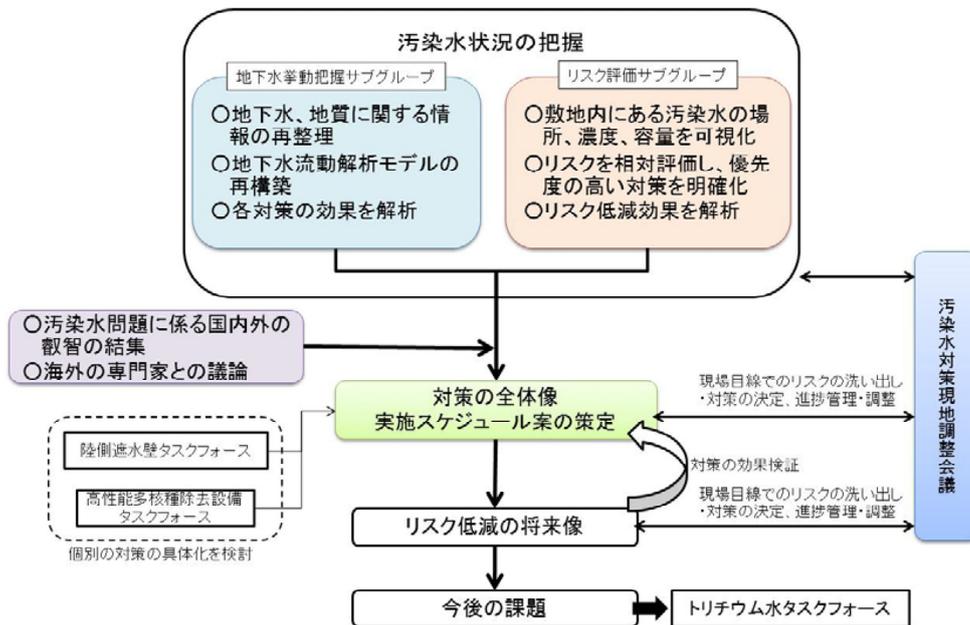


図 1-1 汚染水処理対策委員会の構成と検討の流れ ²⁾より引用

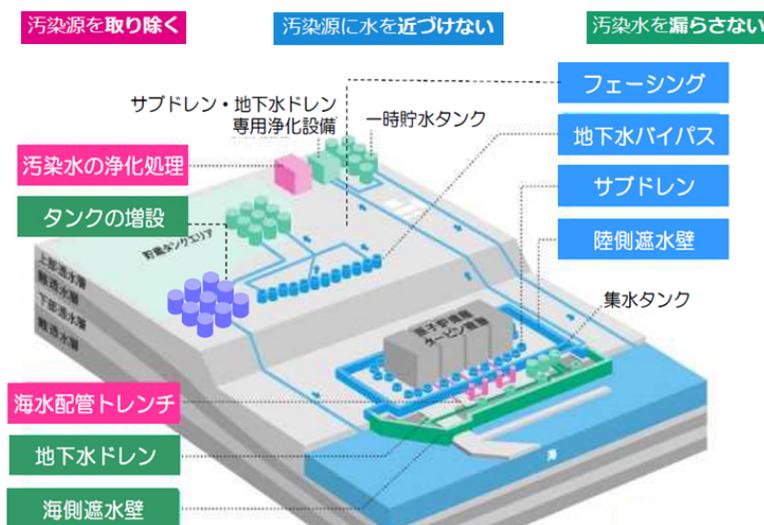


図 1-2 3 つの方針に基づいた汚染水処理対策 ³⁾より引用

表 1-3 福島第一原子力発電所 汚染拡大防止対策の現在までの取り組み

汚染水処理対策・環境対策		2011年度		2012年度		2013年度		2014年度		2015年度		2016年度		2017年度		2018年度		
		上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期	
事故初期段階の復旧活動 (汚染拡大防止対策)	がれきの撤去・一時保管	[初期段階の対応]																
	高濃度汚染水の流出防止対策	[高濃度汚染水の流出箇所の緊急対策・取水口角落設置建屋・立坑の高濃度汚染水の移送 海水配管トレンチ立坑・ピット閉塞・護岸損傷箇所の補修]																
	海域汚染拡大防止対策	[シルトフェンスの設置・透過防止工破損箇所の補修 ゼオライト土壌の投入と循環型浄化装置の設置 [海底土被覆]																
	飛散防止対策	[飛散防止剤の散布]																
	津波対策	[仮設防潮堤設置 北側防潮堤の補修]																
3つの方針に基づく汚染水処理対策	予防的・重層的な汚染水処理対策 (汚染水処理対策委員会による検討)	汚染水処理対策の全体計画の策定	[汚染水処理対策委員会] 2013年4月26日 「汚染水処理対策委員会」について 2013年5月30日 地下水の流入抑制のための対策 2013年12月15日 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～ 2014年4月28日 更なる地下水流入抑制策とりまとめ 2014年6月27日 「汚染水処理対策技術検証事業」の採択 2015年12月11日 「汚染水処理対策技術検証事業」の福島第一原子力発電所への適用性について 2018年3月7日 凍土壁の評価と今後の汚染水対策について(案)															
		汚染水処理対策の効果の評価	[サブグループ①「地下水・雨水等の挙動等の把握・可視化」] 2013年11月15日 サブグループ①「地下水・雨水等の挙動等の把握・可視化」中間報告 2018年3月7日 凍土壁の評価と今後の汚染水対策について(案)															
		陸側遮水壁タスクフォース	[陸側遮水壁タスクフォースの設置について] 2013年6月28日 陸側遮水壁タスクフォースの設置について 2013年12月20日 凍土遮水壁の基本設計 2014年10月22日 凍土方式遮水壁大規模整備実証事業状況報告 2018年1月17日 陸側遮水壁の効果に関する現時点での評価															
	方針1 取り除く	トレンチ内の汚染水除去	[浄化作業] [凍結管設置] [凍結管止水] 2015/12/11 汚染水除去処理完了 トレンチ内部充填・汚染水除去															
		地下水パイプによる地下水くみ上げ	[設置工事・設備確認] [建屋山側での地下水のくみ上げ]															
	方針2 近づけない	サブドレン(建屋近傍の井戸)での地下水くみ上げ	[調査・復旧] [浄化設備設置] [建屋近傍での地下水のくみ上げ]															
		凍土方式の陸側遮水壁の設置	[実証試験(小規模凍結試験など)] [設置工事] 2016年3月31日 海側全面及び山側一部を凍結開始 凍土壁による建屋への地下水の流入抑制 2017年8月22日 最終凍結箇所の凍結開始															
		雨水の土壌浸透を抑える敷地舗装(フェーシング)	[アスファルト等による敷地舗装] [雨水の地下への浸透抑制] T.P. 8.5m盤の他工事干渉箇所を除く計画エリアの100%施工完了															
	方針3 漏らさない	水ガラスによる地盤改良, ウェルポイントによる地下水くみ上げ	[地盤改良工事] [ウェルポイントによる地盤改良背面での地下水のくみ上げによる汚染水の海域への流出抑制]															
		海側遮水壁の設置	[設置工事] 2015年10月26日 閉塞完了 汚染水の海域への流出抑制															
地下水ドレンによる地下水くみ上げ		[設置工事] [海側遮水壁背面での地下水のくみ上げによる汚染水の海域への流出抑制]																
タンクでの処理水の貯留(タンクの増設, 溶接型への交換等)		[初期段階の対応] [タンクの設置・貯留] [タンクリプレース]																
環境負荷低減・廃棄物対策	港湾内の海底土拡散防止のための被覆工事	[初期段階の対応] [海底土拡散防止のための被覆] 2015年4月23日 拡散防止被覆工事完了 2016年12月26日 耐久性向上被覆工事完了 耐久性確保のための被覆																
	構内排水路への汚染水流入防止ならびに港湾内への付替え工事	[B/C排水路暗渠化工] [港湾内への排水路付替えによる海洋汚染の防止] 2015年7月29日 B/C排水路付替完了 2016年3月28日 K排水路付替完了 2018年3月26日 A排水路付替完了 2014年3月15日 暗渠化工完了 2016年6月20日 新設排水路通水開始																
	廃棄物対策関連工事	[初期段階の対応] [がれきの撤去・一時保管] [廃棄物関連施設造成工事] [土捨て場南造成工事] [土捨て場北造成工事]																

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⁾を基に作成

環境負荷低減・廃棄物対策は、事故の初期段階から主に以下の対策が実施され、これらの取り組みを「3.3 環境負荷低減・廃棄物対策」でまとめた。

○汚染の拡大防止対策

- ・港湾内の海底土拡散防止のための海底土の被覆
- ・構内排水路への汚染水流入防止，ならびに排水口の港湾内への付替え

○廃棄物対策関連対策

- ・がれきの撤去
- ・がれき一時保管施設の設置
- ・廃棄物貯蔵施設の敷地造成

固体廃棄物の合理的な安定保管・管理については、サイトの現状把握も踏まえ「4 固体廃棄物の合理的な安定保管・管理技術」として取りまとめを行った。

また、汚染水処理対策については、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構，ならびに経済産業省 資源エネルギー庁で技術提案の公募が行われた。これらの公募に対する技術提案を「5 技術提案の公募」として取りまとめた。

福島第一原子力発電所の標高の表示については、小名浜港工事基準面で使用されている O.P.m 表示が建設当初から用いられてきた。一方、国土地理院の図面標高は T.P.(東京湾中等潮位)上の高さで表示しているため、2015 年 7 月以降、公開情報の標高の表示は T.P.m 表示で統一された。このため、公開資料を引用した図表や文章中の高さ表示は、O.P.m(小名浜港工事基準面)と T.P.m(東京湾中等潮位)の 2 種類が混在した表示となっていることにご留意いただきたい(地震後の敷地の地盤沈下量⁴⁾を考慮した O.P.m と T.P.m の関係を図 1-3 に示す)。

また、図表については、参考文献(PDF など)から切り取り・貼り付けを行ったものが多いため、解像度の低いものがあることをご容赦いただきたい。

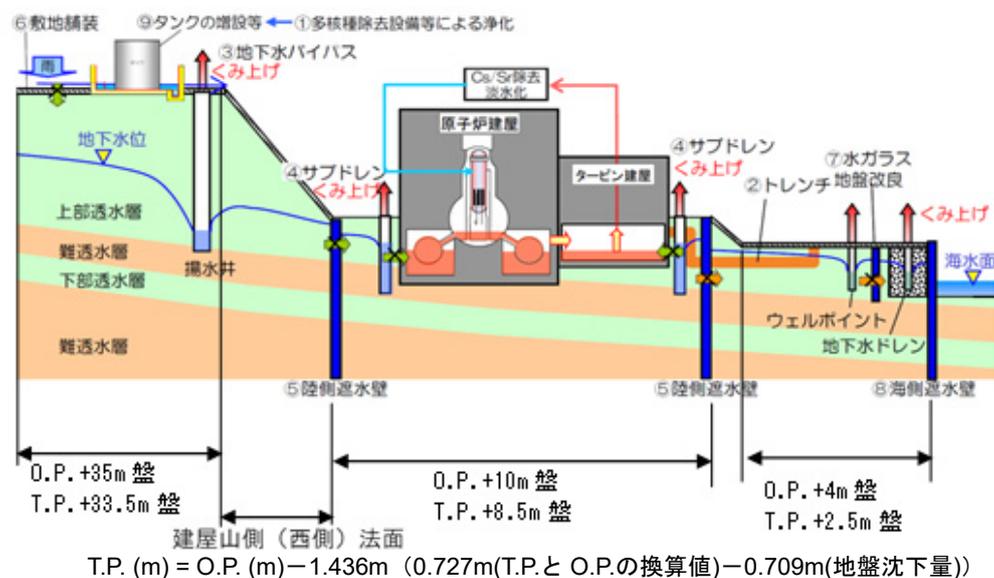


図 1-3 本報告書における場所と高さの表記³⁾より引用・一部改変

参考文献

- 1)都築進(2018):汚染水対策・環境対策における土木技術の貢献, 土木学会 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, 配布資料, 2018年7月12日
- 2)経済産業省 汚染水処理対策委員会(2013):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～, 平成 25年12月10日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131210/131210_01d.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 3)東京電力(2018):汚染水対策の状況
<http://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watermanagement/>, 2018年9月27日掲載確認
- 4)東京電力(2015):測量結果に基づくサブドレン・建屋滞留水水位の見直しについて, 2015年7月21日,
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts_150721_08-j.pdf, 2015年10月15日掲載確認

2. 事故初期段階の土木分野の復旧活動

事故初期段階の高線量の厳しい作業環境下で実施された土木分野の主な復旧活動(事故発生直後から約1年間の活動)について、以下の4項目の情報を取りまとめた^{1) 2)}。

- ①構内道路の健全性確認及びがれきの撤去(がれきの撤去に資する遠隔操作技術に関する情報については「3.3.2(1)」を参照)
- ②汚染水の流出防止対策及び海域汚染防止対策
- ③放射性物質の飛散防止対策
- ④津波対策

2.1 構内道路の健全性確認及びがれきの撤去

事故発生直後に実施された構内道路の健全性調査により、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っていることが確認された(図 2-1)。さらにその後の水素爆発(1号機:3月12日, 3号機:3月14日, 4号機:3月15日)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, 消防車やコンクリートポンプ車等による注水)を行うためのアクセスの確保(動線の確保)に支障をきたしていた。

2011年3月12日からがれきの撤去を開始したが、広範囲に飛散した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がれきの撤去を開始した(図 2-2)。

建屋周辺のがれきの撤去により、安定した原子炉の冷却が可能となり(図 2-3)、2011年9月までに予定していたがれきの撤去を完了した(図 2-4)。なお、大きながれきを撤去しても空間線量が下がらなかった地点では、集塵機や遠隔操作の無人重機で撤去しきれなかった小さながれきやダストの撤去が行われた。



構内道路健全性調査
(構内道路状況)



津波で流され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^{3)より引用}

◆Sys1-2 : 1R/B北側周辺 (4/18~21)



積み込み

施工前

施工後

◆Sys1-3 : 1R/B西側周辺 (4/22~26)



操作車と作業状況



施工前

施工後

図 2-2 がれき撤去の状況 4)より引用



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 1)より引用

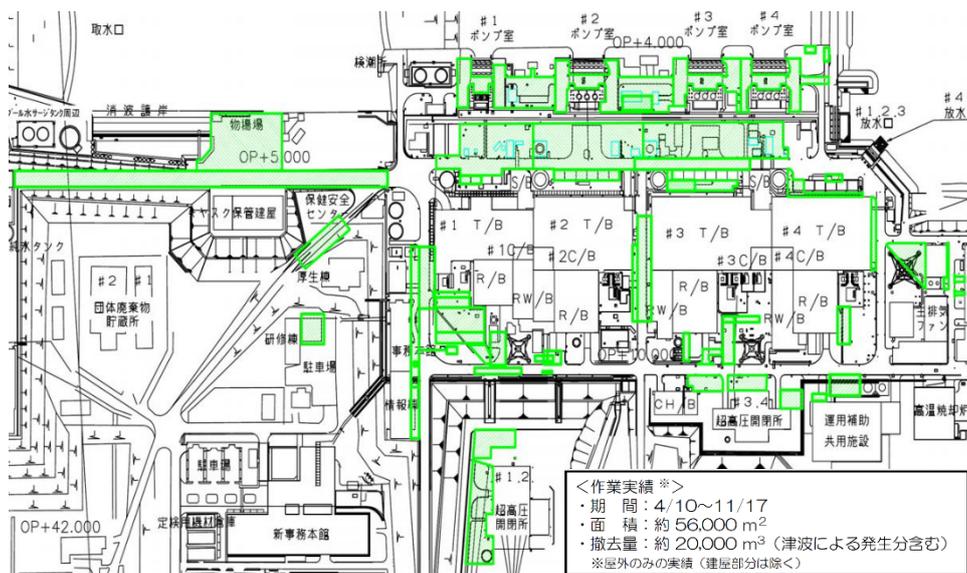


図 2-4 建屋周辺の重機による屋外がれき撤去の施工実績 5)より引用

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を図 2-5 に示す。以下に個別の対策の概要を取りまとめた。



図 2-5 事故直後から実施された主な対策 (6),7)より引用・一部改変

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号機, 3号機の取水ロススクリーン室付近では, 原子炉建屋, タービン建屋の地下に溜まっている高濃度汚染水の港湾内への流出が確認された(図 2-6)。高濃度汚染水の海域への流出防対策として, 流出箇所の閉塞と流出経路の止水対策が実施された。

高濃度汚染水の流出により, 発電所周辺海域のみならず発電所沖合 15km のポイントにおいても, 2号機からの流出の影響と考えられる放射能濃度の上昇が確認されていたが, 緊急対策の結果, 濃度は減少傾向を示し 5月初旬には検出限界値以下(約 10Bq/L)となった。なお, 3号機からの流出の影響は認められていない(図 2-7)。



図 2-6 高濃度汚染水の流出状況

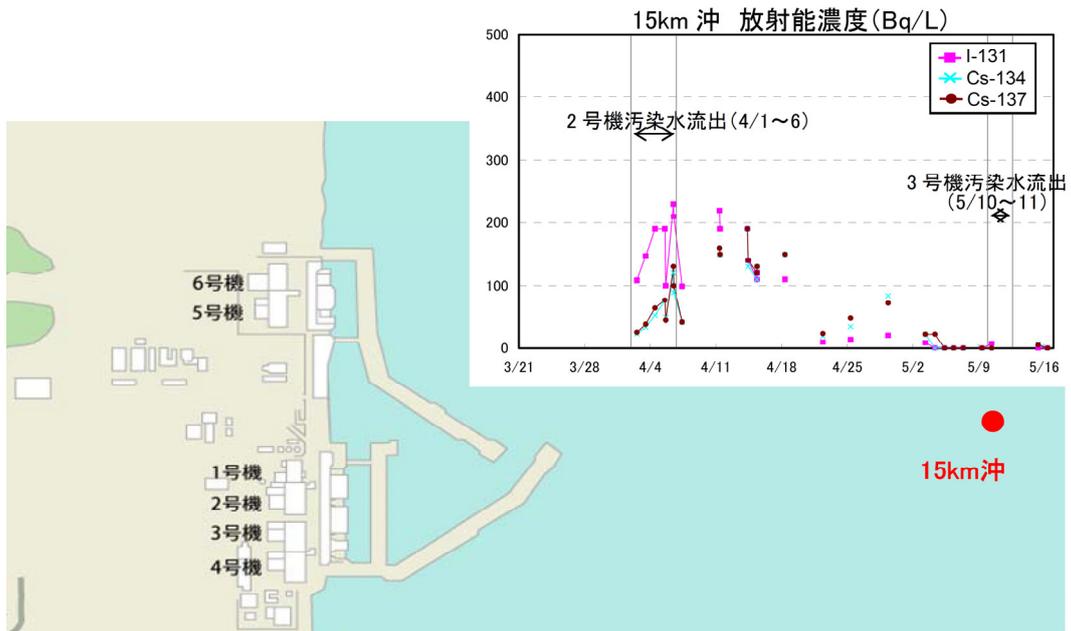
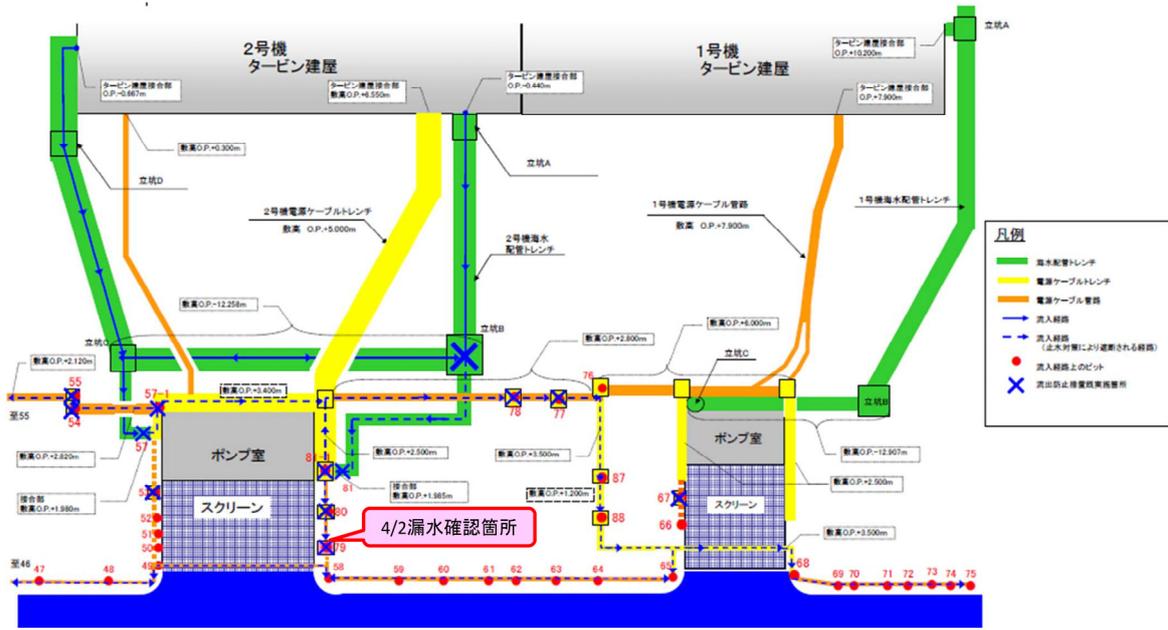


図 2-7 海域の放射能濃度 9)より引用

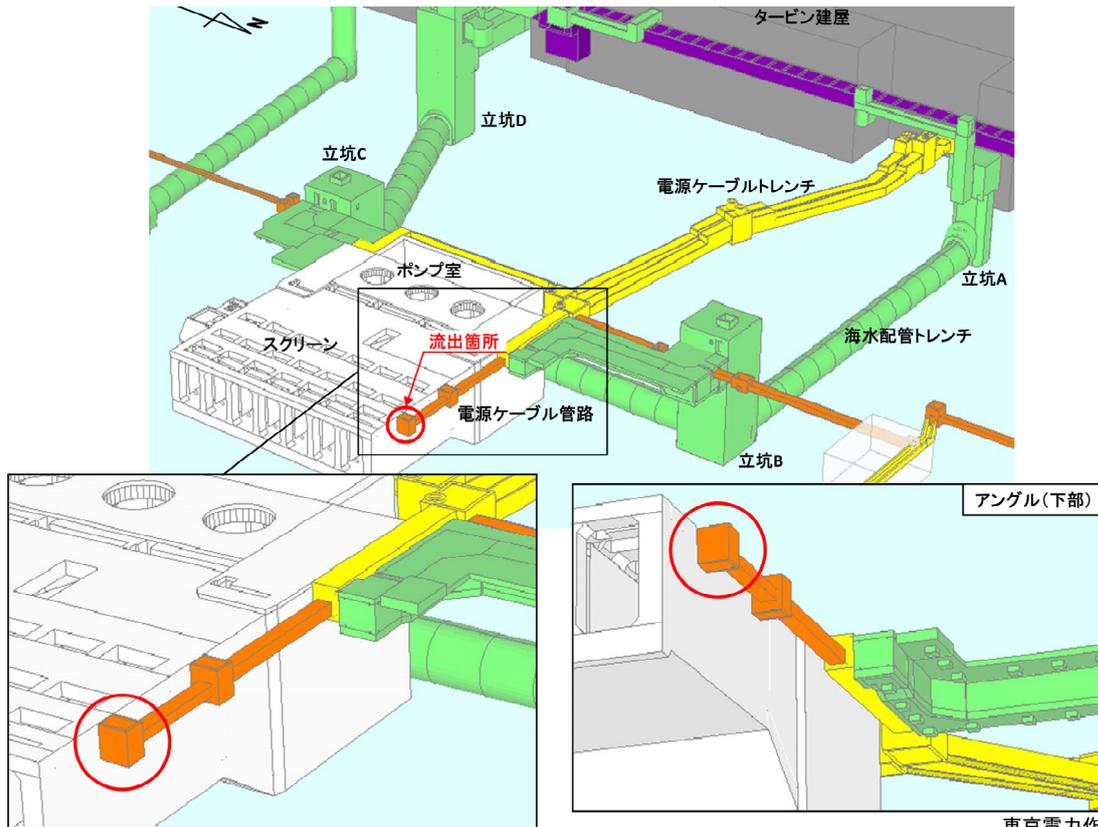
(a) 2号機取水口スクリーン室付近

取水口スクリーン室付近の電源ケーブルを収めているピット内に、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、さらに 2013 年 4 月 2 日には、ピット脇のコンクリートの亀裂からスクリーンエリアに高濃度汚染水の流出が確認された(図 2-6, 図 2-8)。

当初はピット及び電源ケーブル管を流出経路と想定して、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ーブル管ではなく、その下の碎石層である可能性が高いと考えられたため、この碎石層に水ガラスを注入した結果、流出の停止が確認された(図 2-9)。なお、高濃度汚染水の海域への総流出量は 520m³と推定された⁸⁾。



平面図



鳥瞰図

東京電力作成資料

図 2-8 2号機取水ロススクリーン室付近の流出箇所 7)より引用

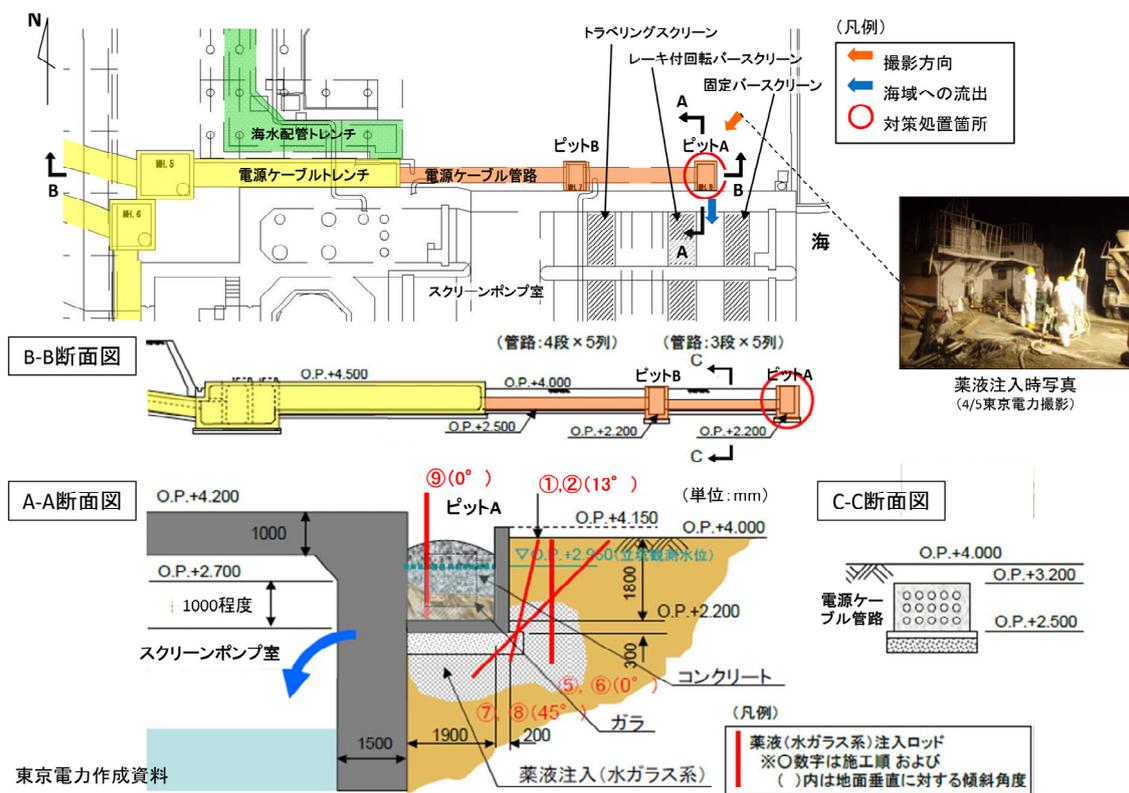
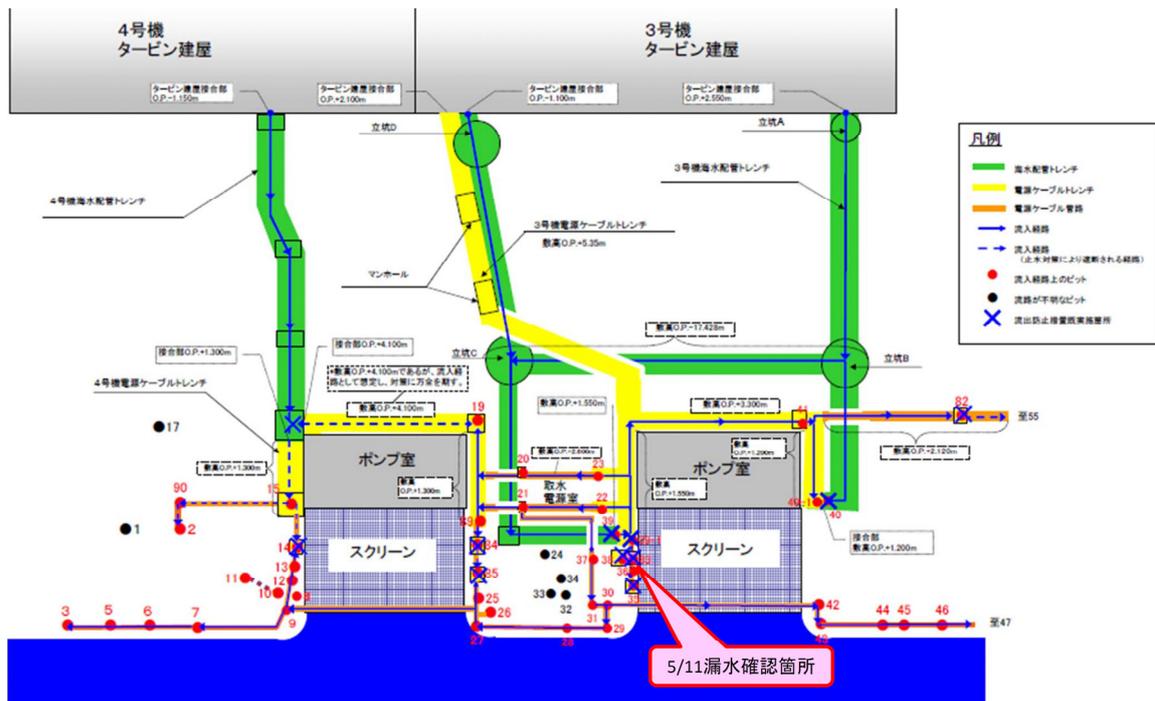


図 2-9 2号機取水口スクリーン室付近の流出防止対策⁷⁾より引用

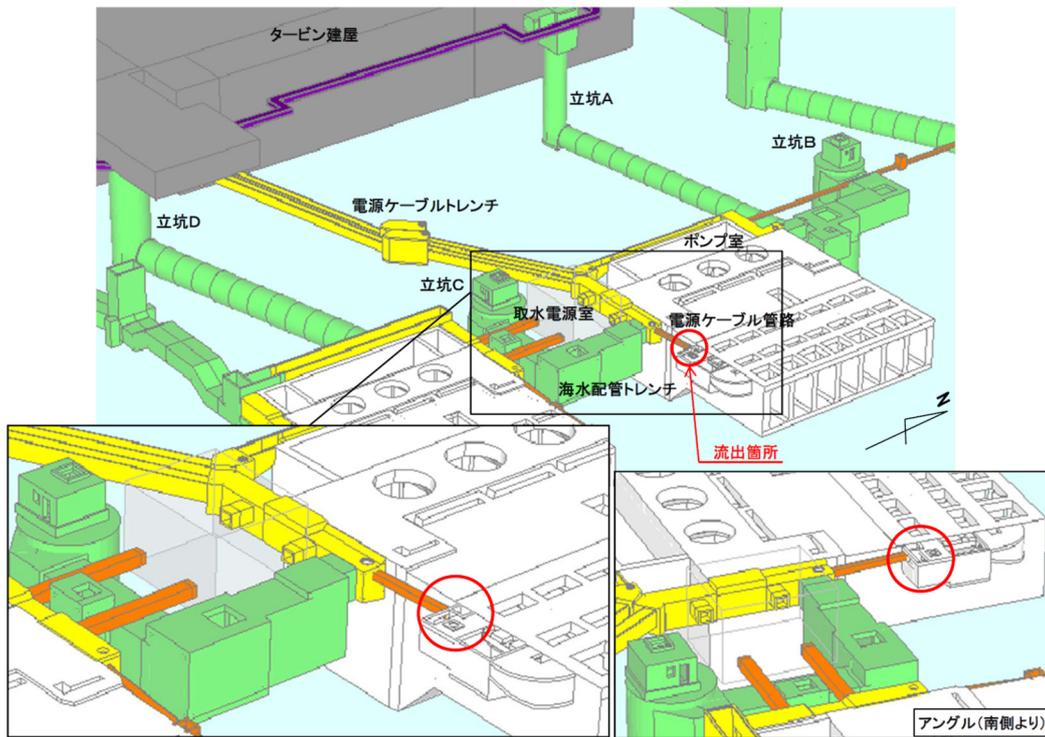
(b) 3号機取水口スクリーン室付近

取水口スクリーン室付近の電源ケーブルを収めているピットへタービン建屋から高濃度汚染水が流入していること、さらにピットからスクリーンエリアへ高濃度汚染水の流出が5月11日に確認された(図 2-6, 図 2-10)。

ピットにつながる電線ケー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、流出の停止が確認された(図 2-11)。なお、高濃度汚染水の海域への総流出量は 250m^3 と推定された^{8),10)}。



平面図



鳥瞰図

図 2-10 3号機取水口スクリーン室付近の流出箇所 7)より編集

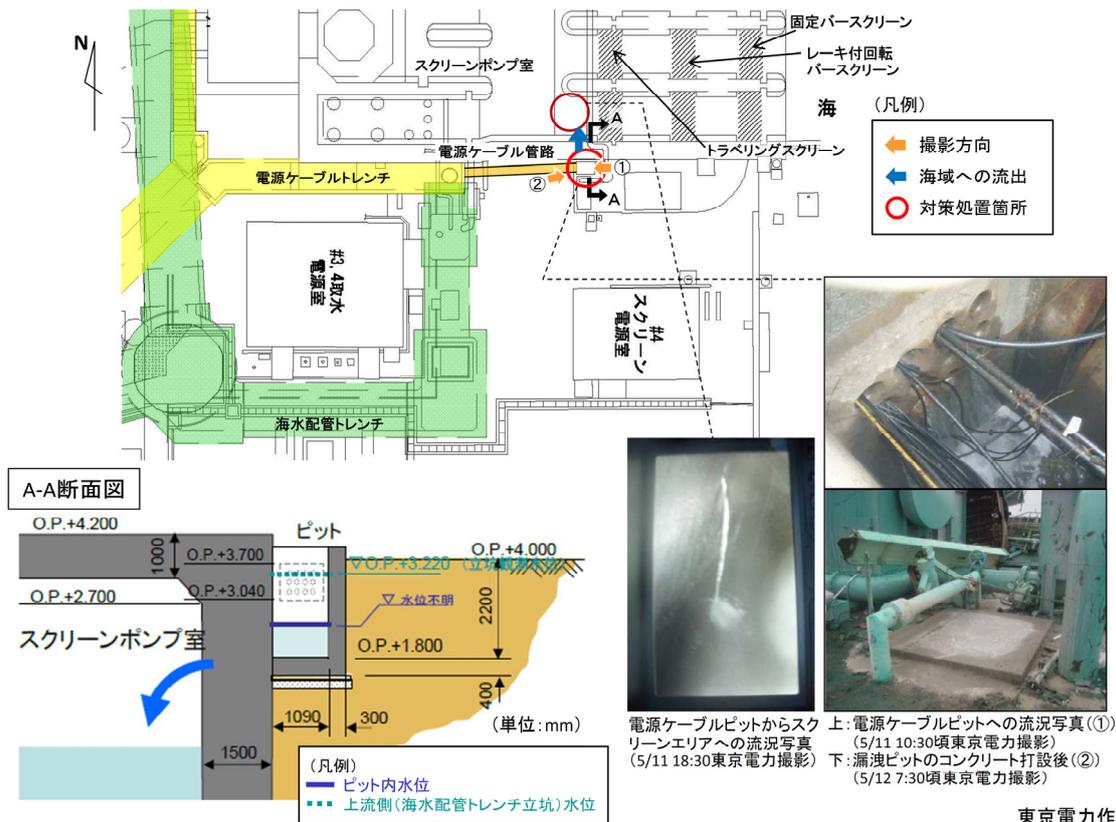


図 2-11 3号機取水口スクリーン室付近の流出防止対策 7)より引用

(2) 汚染水の流出防止対策

(a) 立坑・トレンチ・ピットと護岸の状況調査

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、取水口周辺（O.P.+4.0m 盤）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、以下の内容の調査が実施された（図 2-12、図 2-13）。

- ・タービン建屋から海側ヤードの O.P.+4.0m 盤への流出経路
- ・海側ヤードの O.P.+4.0m 盤の流入経路及びピットの状況
- ・護岸近傍まで流下する経路及び護岸周辺のピットの状況
- ・護岸（岸壁等の亀裂等）の状況

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・コンクリート製仕切り板（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。

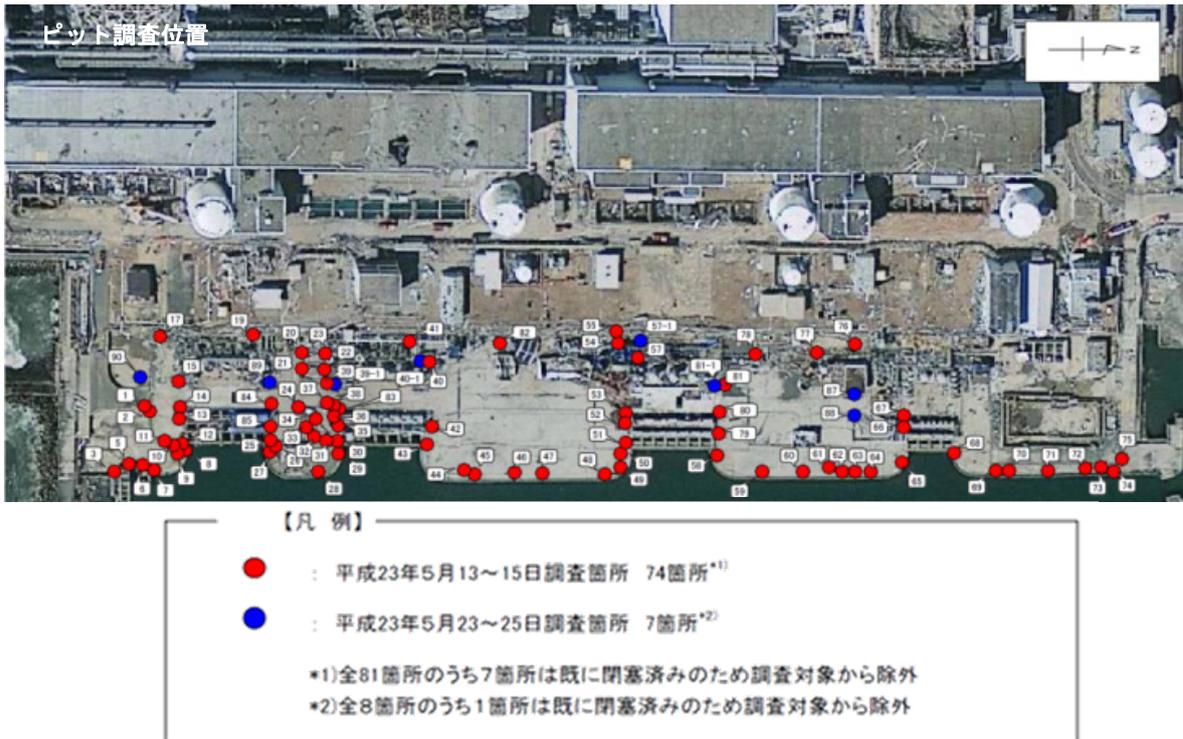


図 2-12 ピットの状況調査位置 12)より引用・一部改変

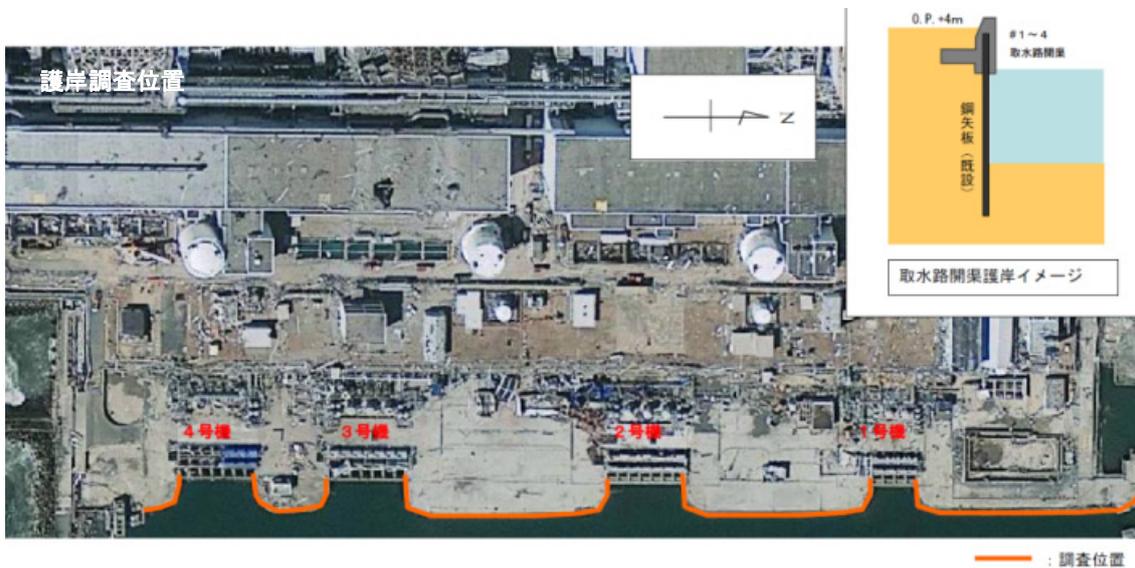


図 2-13 護岸の状況調査位置 12)より引用・一部改変

(b) 立坑・トレンチ・ピットの閉塞

調査結果に基づき、海水配管トレンチの立坑、スクリーンポンプ室に隣接するピット、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の接続部、流入先の流路延長上にあるピット、あるいは流路は不明であるが流出の可能性を否定できないピットの合計 47 箇所の閉塞が実施された。

閉塞方法は次のとおりである（図 2-14）。

①水ガラスセメント系薬液注入

がれきやケーブル等の残置状況によりコンクリートでは充填性に支障がある箇所，ならびに電源ケーブル管路下部の碎石層等は，汚染水の流動経路になる可能性がある。これらの箇所について，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コンクリート打設

重機の寄り付きに支障が少ない箇所，コンクリートによる充填性が確保される箇所などについては，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。



図 2-14 立坑・トレンチ・ピットの閉塞状況 ¹²⁾より引用

(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，コンクリート製仕切り板（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）。

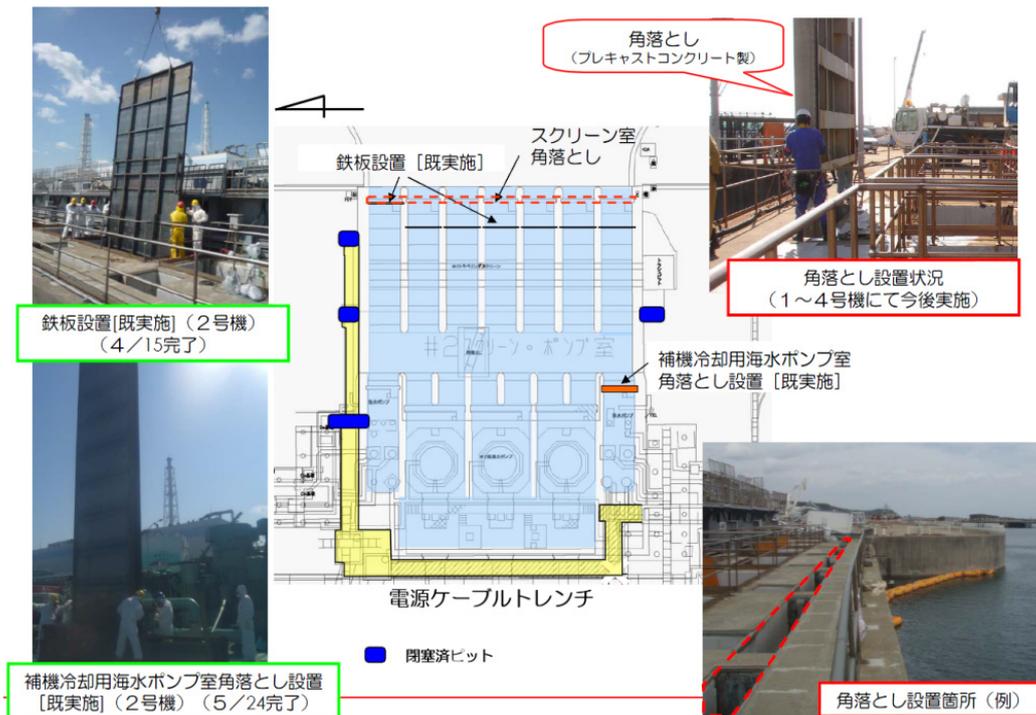


図 2-15 スクリーンポンプ室前面等の閉塞状況 (2号機取水口) 12)より引用

(d) 護岸損傷箇所の補修

護岸の著しい損傷箇所 (1箇所, 図 2-5) については, 損傷部に近接するトレンチ等はない。また, 海水配管トレンチ等の汚染水が流入する可能性のあるトレンチ・ピットについては, 上流部で閉塞や止水対策が既に行われているため, 汚染水が護岸損傷箇所から直接海に流出する可能性は低いと考えられたが, 念のため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)。

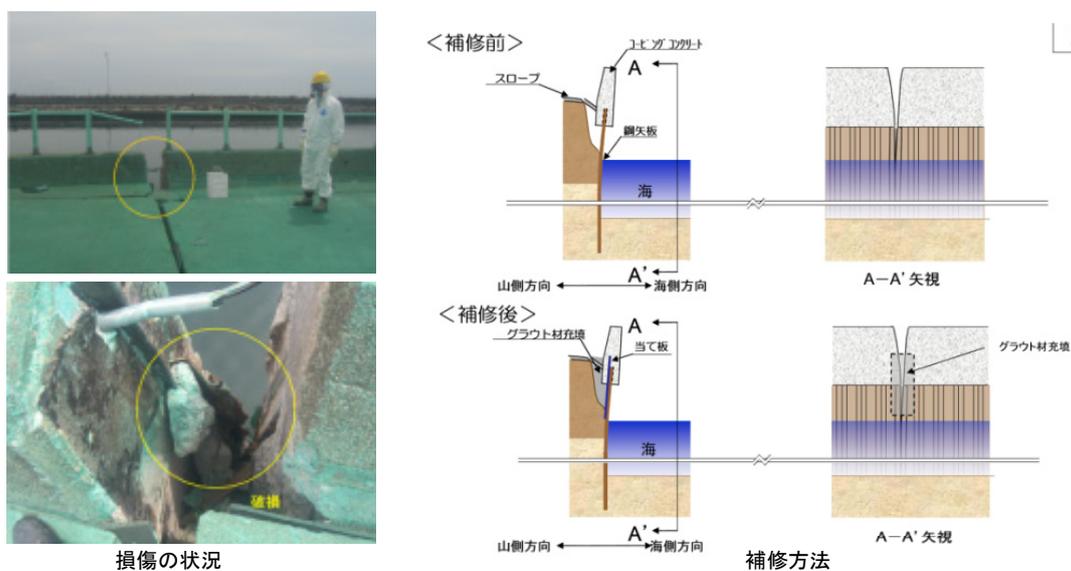


図 2-16 護岸損傷の状況, 補修方法 12)より引用

(e) 汚染水の移送

2号機, 3号機の発電所建屋や海水配管トレンチに滞留している高濃度汚染水については, 建屋の止水性が確認されているプロセス主建屋と高温焼却炉建屋への移送が実施された。

また, 汚染水処理設備(セシウム吸着装置など)の稼働に伴う処理水受用タンクの設置が行われた。タンクの設置は, 事故直後から発生した汚染水を迅速に保管するために種々のタンクが集められ, 応急的な対応が実施された(図 2-17)。

5・6号機に滞留している低濃度の汚染水は, 敷地内に設置した低レベル用タンクへの移送, さらに静岡から搬送し港湾内に係留させたメガフロート(容量約 10,000m³)への移送が実施された(図 2-18)。

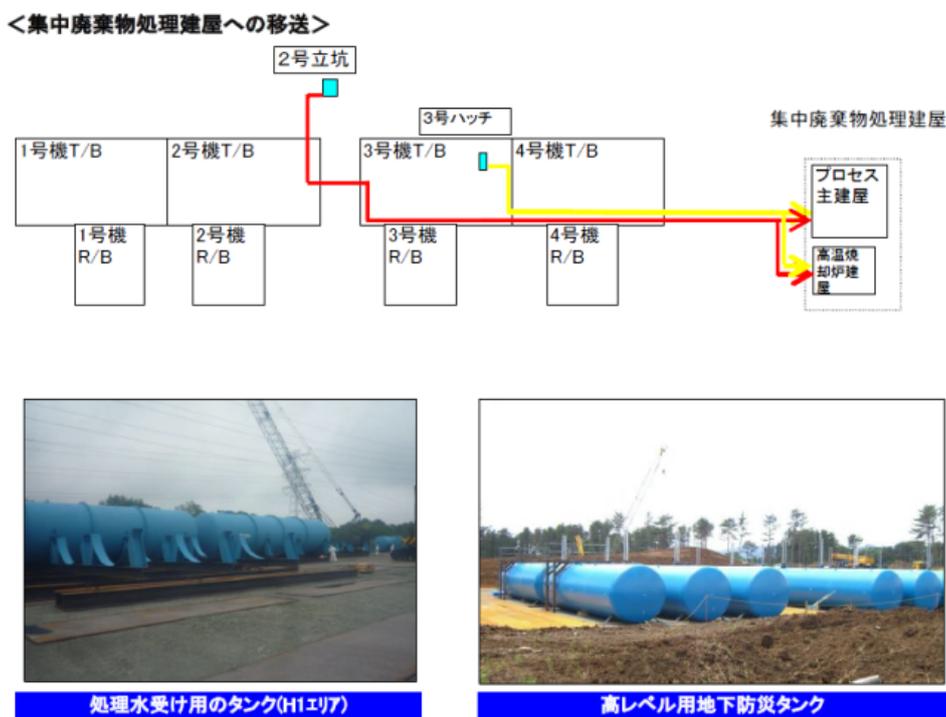


図 2-17 処理水受用タンクの設置 ¹³⁾より引用



図 2-18 低レベル用タンク及びメガフロートの設置 ¹³⁾より引用

2.2.2 海域汚染拡大防止対策

(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汚染拡大防止対策が実施された(図 2-19)。



図 2-19 シルトフェンス設置状況 ¹⁴⁾より引用

(2) 1～4号機取水路開渠南側透過防止工の補修

津波により破損を受けた1～4号機取水路開渠南側透過防止工については、鋼管矢板及び大型土嚢の設置による汚染水の海域への流出・拡散防止対策が実施された(図 2-20)。

鋼管矢板の施工では、起重機船の出入りのためのシルトフェンスの開閉による汚染の拡大が懸念された。このため、シルトフェンスの開閉による汚染水の拡散予測を行い、1回当たりの開閉時間を必要最小限(2時間以内)にするとともに、船舶の移動を慎重に行うことで海底土の巻き上がり抑制等の汚染拡大低減に配慮した施工が実施された。また、施工中はモニタリング測定頻度の増加などの監視強化が行われた ¹⁵⁾。



図 2-20 鋼管矢板及び大型土嚢の施工・設置状況 ¹⁴⁾より引用

(3) ゼオライト土嚢の投入と循環型浄化装置の設置

海水中に流出した放射性物質の除去を目的として、ゼオライト入りの土嚢(ゼオライト入り土嚢をカゴに充填)を護岸付近に投入するとともに(図 2-21)、海水循環型浄化装置(ゼオライトによる吸着)を2・3号機のスクリーンポンプ室間の護岸部に設置して海水の浄化を図った(図 2-22)。



図 2-21 ゼオライト入りの土嚢 6)より引用

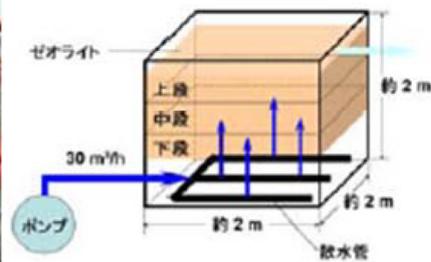


図 2-22 海水循環型浄化装置の設置 7)より引用

(4) 海底土の被覆

2011年11月に実施された港湾内の海底土調査の結果、高濃度の放射性物質が確認された⁹⁾。海底土については、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、港口を經由して港湾外への汚染の拡散が懸念され、港湾内の放射性物質の拡散を早期に抑制することが喫緊の課題となっていた。

このため、海底土を固化土により被覆して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期工事として図 2-23 に示す港湾内の5号機、6号機前、ならびに1～4号機取水路開渠の約73,000m²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)。

広範囲に固化処理土を利用して浮泥を封じ込める方法は過去に例がない。このため、37種類の被覆材料の配合試験結果(水中打設試験)から、海域環境に影響に与えず、浮泥の巻き上げが少なく、施工品質のばらつきが少ない材料であるベントナイトにセメントを添加した材料を選定し、1層目は海底面の浮遊性が高い浮泥を被覆するための軽量の固化土(被覆材A)、2層目は充填性、耐久性に優れた固化土(被覆材B)を用いた(表 2-1、図 2-24)。

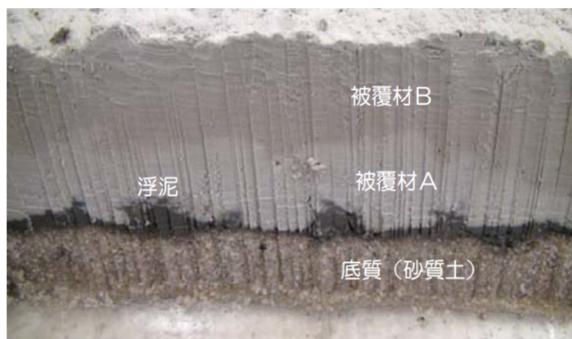
施工は、被覆材料を福島第二原子力発電所及び小名浜港から海上運搬し、福島第一原子力発電所港湾内の固化材混合船で攪拌混合して固化土を製造し、クレーン台船に設置したトレミー管から吐出して海底土を被覆する方法で行われた(図 2-25、図 2-26)。



図 2-23 海底土の被覆施工箇所 16)より引用

表 2-1 被覆材の配合 17)を基に作成

	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	434.0	433.0	88.6	88.6	1.106	23
被覆材B	120.4	541.6	173.4	187.7	187.7	1.210	20



固化土の構成 16)より引用



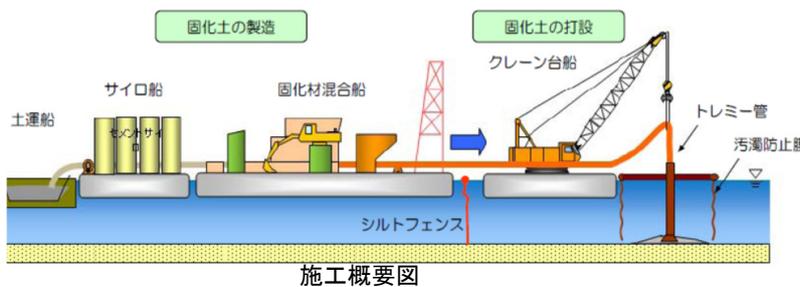
1層目層厚確認サンプリング (4月3日実施)



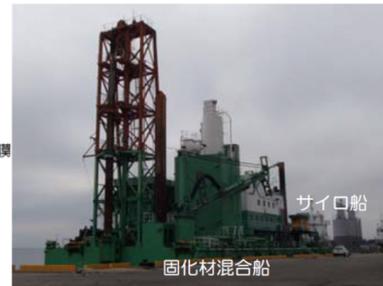
2層目層厚確認サンプリング (4月29日実施)

層厚確認サンプリング結果 18)より引用

図 2-24 固化土の構成と層厚確認サンプリング結果



施工概要図

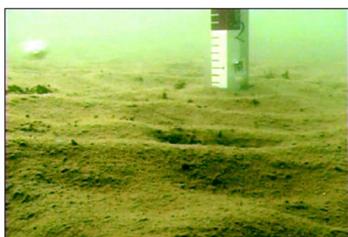


固化材混合船

図 2-25 海底土の被覆施工概要 16)より引用



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 19)より引用

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

2011年4月より人力による飛散防止剤の散布を開始し、その後、クローラードンプ、屈折放水塔車(高压放水車)とコンクリートポンプ車を用いて、発電所構内(平地・法面)及び建物周りの合計約560,000m²に対して散布を実施した(図 2-27)。



図 2-27 飛散防止剤の散布状況 2)より引用

2.3.2 散水

自然発火防止のための伐採木への散水や粉塵の飛散防止のため、浄化した水(海水浴場の指針を満足する水)を再利用した構内散水を実施した(図 2-28)。

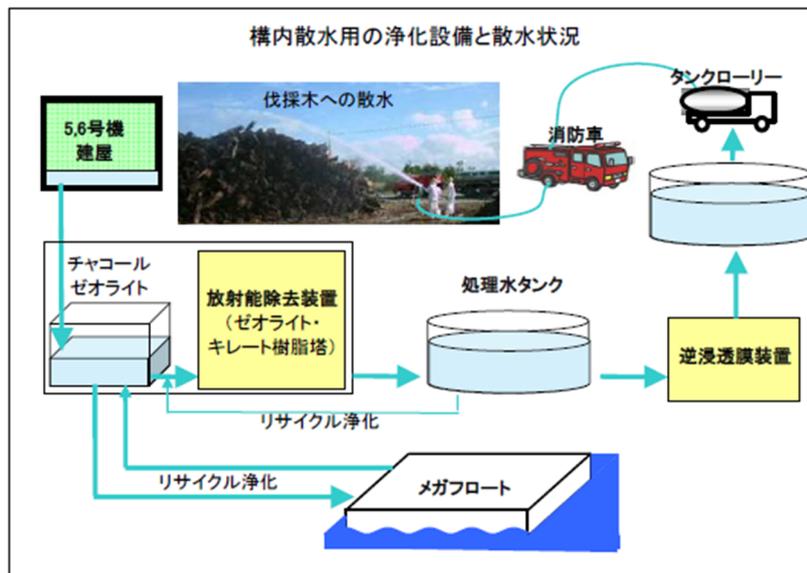


図 2-28 構内散水用の浄化設備と散水状況 ²⁾より引用

2.4 津波対策

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トラーイズ地震の発生が専門家によって指摘されている(Thorne Lay et al, 2011)²⁰⁾。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、福島沖のアウトラーイズ地震に伴う津波を想定した対策が実施された²¹⁾。

津波の想定は以下のとおりである(図 2-29)。

【地震の規模】

- ・日本海溝でのアウトラーイズ地震の既往最大規模は、1933 年昭和三陸地震(Mw8.4)である(土木学会, 2002)²²⁾。
- ・1611 年慶長三陸地震については、津波地震であると考えられているが(地震調査研究推進本部, 2002)²³⁾、過去にアウトラーイズ地震と考えられていたことがある(相田, 1977)²⁴⁾。
- ・上記を踏まえ、安全側の想定として 1611 年慶長三陸地震の地震規模 Mw8.6 を設定した。

【波源の位置】

- ・東北地方太平洋沖地震で最も大きなすべり量の発生が指摘されているのは宮城県沖であるが、福島県沖でも 10~20m 程度のすべり量が推定されている。
- ・上記を踏まえ、安全側の想定として、発電所において最も厳しい影響を与える福島県沖から茨城県沖にかけての波源を設定した(図 2-29)。

津波解析結果では、発電所港湾内から敷地(1~4 号機側:O.P.+10m, 5 号機, 6 号機側:O.P.+13m)への遡上は確認されず、敷地南東側から 1~4 号機側(O.P.+10m)への遡上が想定された(図 2-30)。このため、敷地南東側からの遡上を防ぐための仮設防潮堤の検討が行われた。

仮設防潮堤を鉛直壁とした解析結果(図 2-31)から、防潮堤外側でアウターライズ津波による水位を上回る仮設防潮堤(天端高:最大 O.P.+14.2m)を設置することで、敷地(O.P.+10m)への浸水を防ぐことが可能であることを確認している。この結果に基づいた仮設防潮堤の設計、ならびに施工状況を図 2-32, 図 2-33 に示した。

なお、今後想定される千島海溝津波と日本海溝津波についての対策を検討中である。

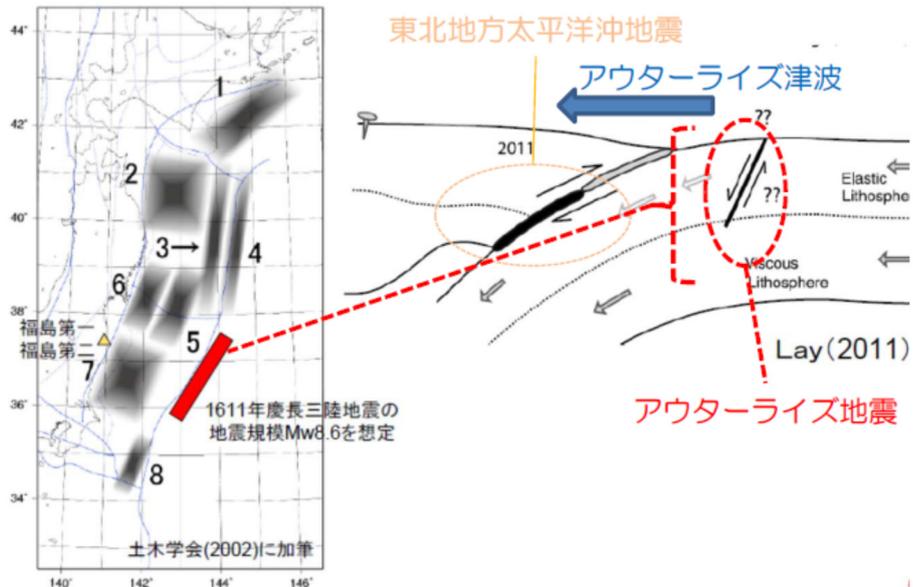
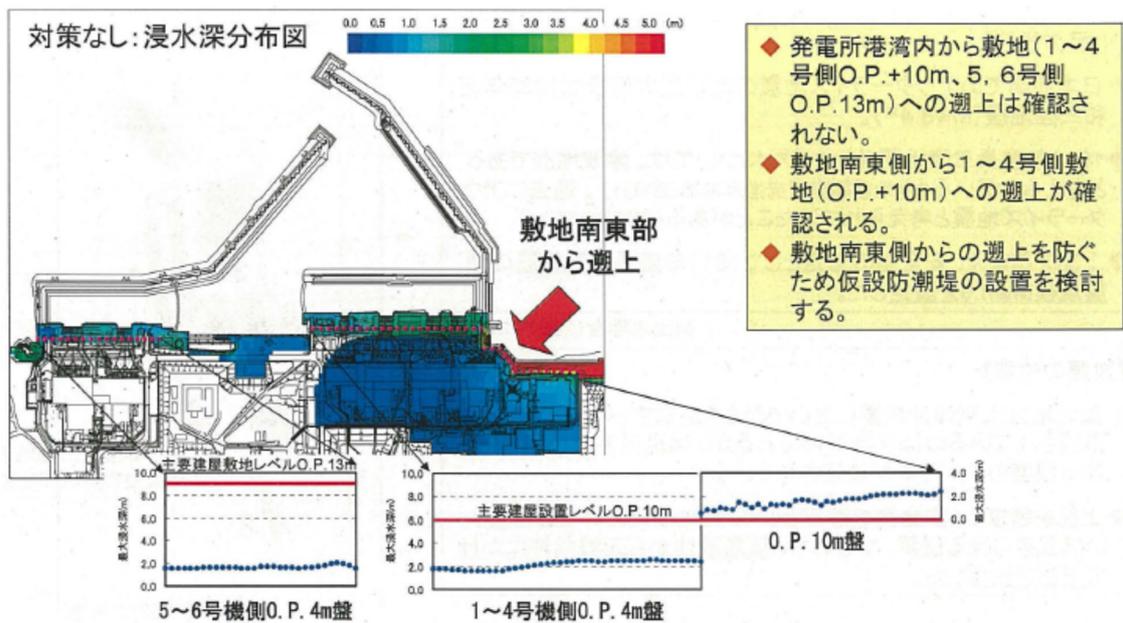


図 2-29 震源の位置 ²¹⁾より引用



初期潮位(期望平均満潮位)H.W.L.=O.P.+1.490m, 東北地方太平洋沖地震による地盤沈下=0.662mを考慮

図 2-30 津波解析結果 ²⁵⁾より引用

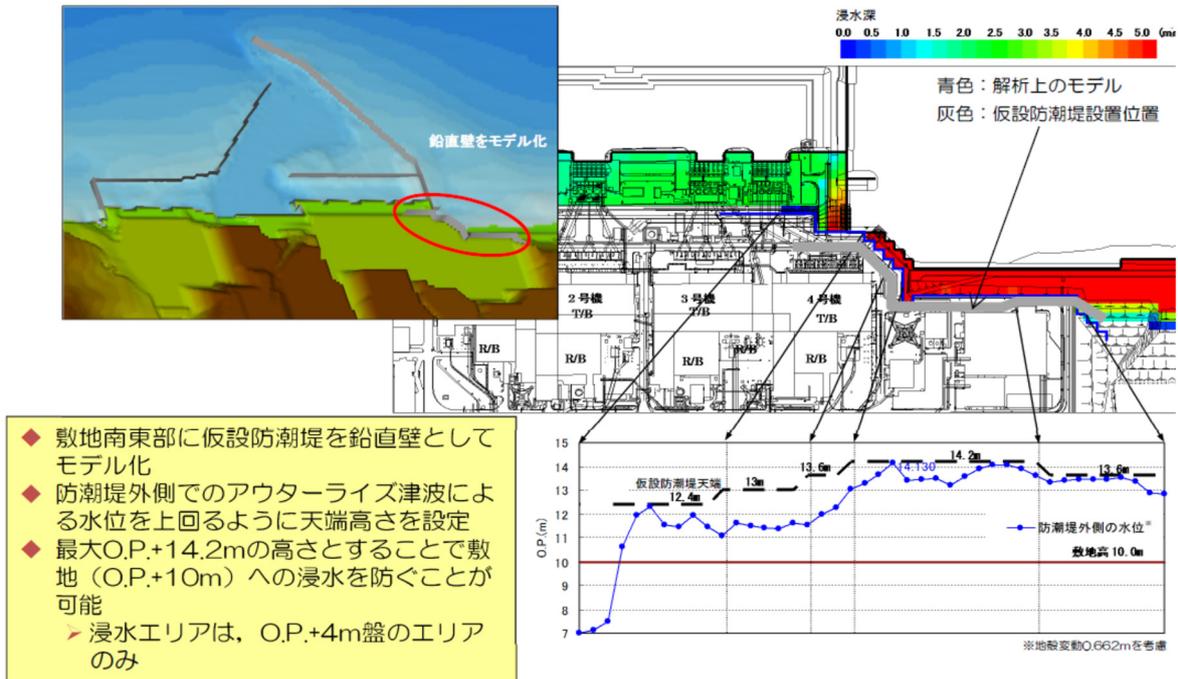


図 2-31 仮設堤防をモデル化した津波解析結果 25)より引用



- 仮設防潮堤は、アウターライズ津波に対して、越流せず、波力に対する安定性を保持するよう設計
- 15m級津波に対しては、越流するものの、フィルターユニットの内容物として、砕石（比重2.6以上）を使用していることから、水より比重が大きく、漂流することはないと評価
- 15m級津波の波力による移動は想定されるものの、周辺に安全上重要な施設等はないことから、影響はないものと評価



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

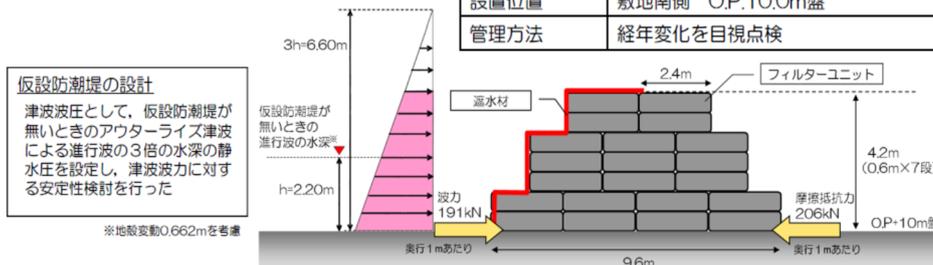


図 2-32 設計の考え方と仮設防潮堤の形状 21)、26)より引用



図 2-33 仮設防潮堤の施工状況 26)より引用

2.4.2 その他の津波対策

その他に以下の津波対策が実施された。

①建屋の浸水対策

津波襲来時の汚染水流出防止を目的として、津波の調査結果(図 2-34)に基づいた津波高さを設定して、建屋開口部などの閉塞(壁区画の設置), 建屋内の浸水対策(壁・床併用区画の設置)を実施した(図 2-35, 図 2-36)。

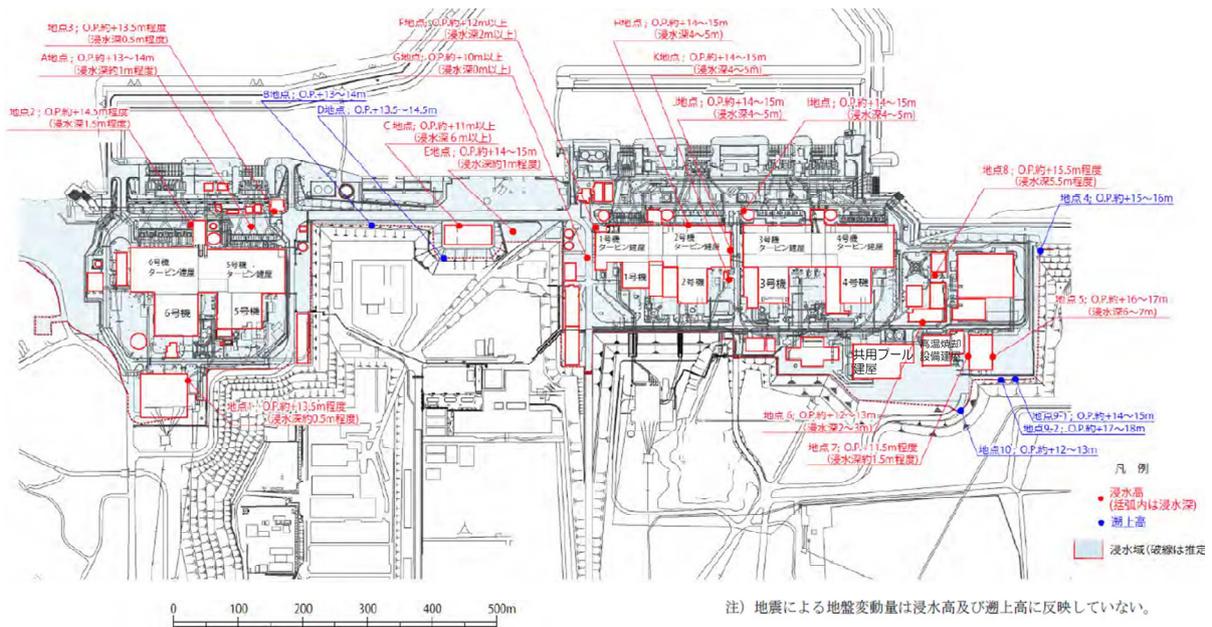


図 2-34 津波の調査結果(浸水高, 浸水深及び浸水域) 21)より引用

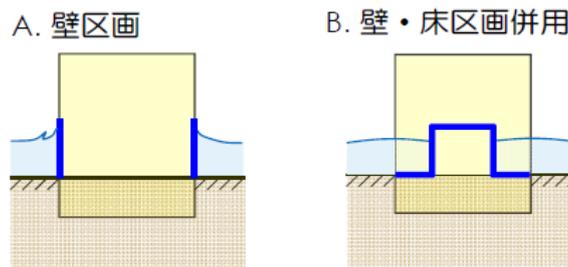


図 2-35 建屋の浸水対策のイメージ 21)より引用

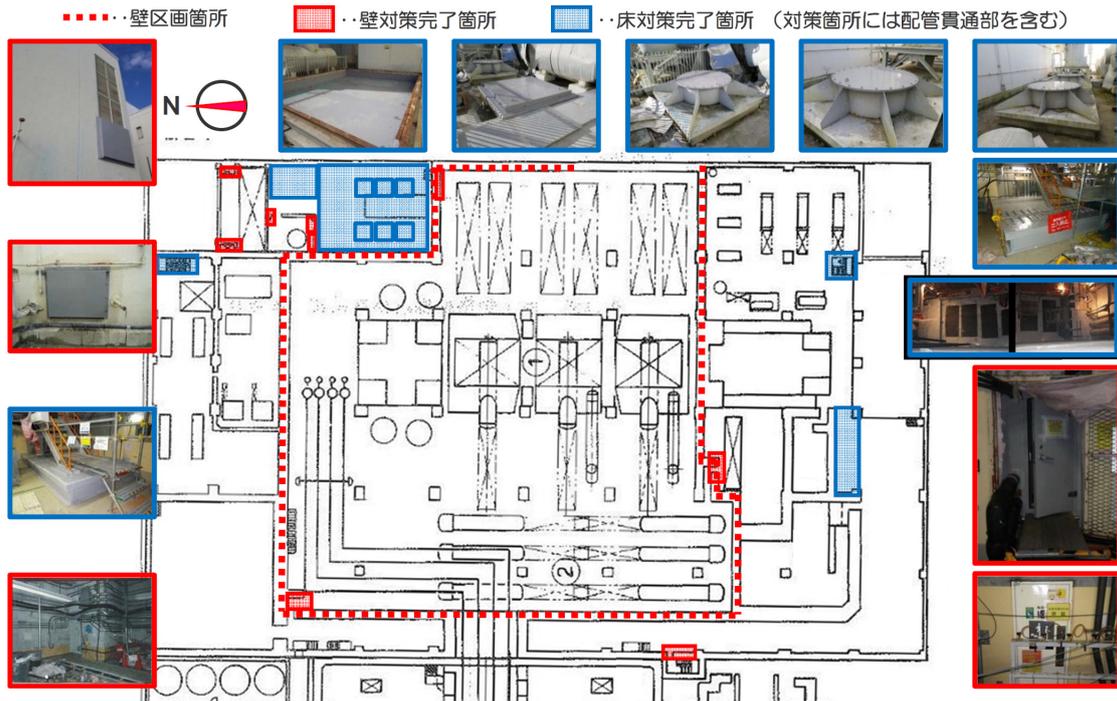


図 2-36 建屋の浸水対策の例（2号機タービン建屋の1F平面図） 21)より引用

②染水処理設備，固体廃棄物等の移設

汚染水処理設備，固体廃棄物等は，アウターライズ津波が遡上しない高さ，ならびに仮設防潮堤により津波の影響のない場所に移設した。

③北側防波堤の補修

損傷の著しい5号機，6号機前の北側の防波堤の補修を実施した（図 2-37）。



震災後の5・6号機前の状況 27)より引用



施工状況 28)より引用



補修完了後 28)より引用

図 2-37 北側防波堤の補修状況

参考文献

- 1)東京電力(2012):福島第一原子力発電所 この一年の振り返り, 2012年3月,
<https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/review/images/review.pdf>, 2018年9月27日掲載確認
- 2)原子力災害対策本部 政府・東京電力統合対策室(2011):東京電力福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋 ステップ2完了報告書, 平成23年12月16日,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai22/22_04_gensai.pdf, 2018年12月1日掲載確認
- 3)東京電力(2011):福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における対応状況について(平成23年12月版), 資料一覧,
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0305.pdf, 2018年9月27日掲載確認
- 4)東京電力(2011):福島第一原子力発電所事故対策におけるロボット(遠隔操作化機器)の活用, 2011年4月28日,
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl-roadmap/images/11042801a-j.pdf>, 2018年9月26日掲載確認
- 5)東京電力(2012):飛散瓦礫調査の結果報告, 2012年4月23日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120423/120423_02s.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 6)東京電力(2012):ゼオライト土嚢の投入と効果の確認について, 2012年4月23日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120423/120423_02t.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 7)内閣府 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(2011):中間報告(資料V-1～資料V-21), 平成23年12月26日
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/111226Siryo5.pdf>, 2018年12月1日掲載確認
- 8)内閣府 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(2011):中間報告(本文編), 平成23年12月26日,
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/post-1.html>, 2018年12月10日掲載確認
- 9)東京電力(2012):福島原子力事故調査報告書, 平成24年6月20日,
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0303.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 10)東京電力(2011):福島第一原子力発電所3号機取水口付近からの放射性物質を含む水の外部流出への対応について(概要), 平成23年5月21日,
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110521b.pdf, 2014年6月12日掲載確認
- 11)東京電力(2011)写真・動画集, 2011年4月1日～4月6日,
<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201104-j/110401-03j.html>, 2018年9月26日掲載確認
- 12)東京電力(2011):福島第一原子力発電所における高濃度の放射性物質を含む水の外部への流出防止計画について, 平成23年6月1日,
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110602c.pdf, 2018年9月26日掲載確認

- 13)東京電力(2011):課題別取り組み状況(写真・図面集),平成23年8月17日
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110817e.pdf, 2018年6月25日掲載確認
- 14)東京電力(2011):課題別取り組み状況(写真・図面集),平成23年10月17日,
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111017n.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 15)東京電力(2011):福島第一原子力発電所1~4号機取水路開渠南側透過防止工復旧工事の実施について,平成23年7月11日
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/110711i.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 16)東京電力(2012):福島第一原子力発電所 港湾内海底土被覆工事の開始について 平成24年2月21日,
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120221_02-j.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 17)亀井達也,古川園健朗,橋本敦(2017):福島第一原子力発電所港湾内海底土被覆工事の概要,電力土木, No.389
- 18)東京電力(2012):福島第一原子力発電所港湾内海底土被覆工事の状況,平成24年5月16日,
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120516_02-j.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 19)東京電力(2012):福島第一原子力発電所取水路前面エリア海底土被覆工事現場試験施工状況及び被覆状況について,平成24年3月13日,
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120313_01-j.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 20)Thorne Lay, Hiroo Kanamori, Charles J. Ammon, Keith D. Koper, Alexander R. Hutko, Lingling Ye, Han Yue, Teresa M. Rushing(2011):Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 117, B04311, doi:10.1029/2011 JB009133, 2012
- 21)東京電力(2016):地震・津波対策の実施状況について,2016年4月25日,原子力規制委員会,特定原子力監視・評価検討会(第42回),
<https://www.nra.go.jp/data/000148348.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 22)土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2002):原子力発電所の津波評価技術,平成14年2月
- 23)地震調査研究推進本部地震調査委員会(2002):三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について,平成14年7月31日,
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso.pdf, 2018年10月15日掲載確認
- 24)相田 勇(1977):三陸沖の古い津波のシミュレーション,東京大学地震研究所彙報, Vol52
- 25)東京電力(2012):福島第一・福島第二原子力発電所におけるアウトターライズ津波対策,平成24年4月27日,原子力安全・保安院,地震・津波に関する意見聴取会(津波関係),
<https://www.da.nsr.go.jp/file/NR000023498/000143469.pdf>, 2018年9月26日掲載確認

- 26)東京電力(2012):福島第一原子力発電所この1年～安定化への取り組みを中心に～,平成24年3月,
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima.../handouts_120311_01-j.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 27)相澤善吾(2011):福島第一原子力発電所の事故と対応について,平成23年11月4日,
第3回東大エネルギー・環境シンポジウム「エネルギーと環境の調和した発展を求めて」,
福島第一原子力発電所の事故と対応について,
https://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/html_seminar/20111104/20111104-3-1.pdf, 2018年9月26日掲載確認
- 28)東京電力(2011):課題別取り組み状況(写真・図面集),平成23年12月16日
https://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111216x.pdf, 2018年6月25日掲載確認

3. 汚染水処理対策，環境負荷低減・廃棄物対策

3.1 概説

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。

本節では，福島第一原子力発電所で実施された広範な汚染水処理対策，環境負荷低減・廃棄物対策の技術蓄積を事故時対策事例として体系的に取りまとめ再整理した。

具体的な汚染水処理対策は，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策定された予防的・重層的な汚染水処理対策の方針（汚染源を取り除く，汚染源に水を近づけない，汚染水を漏らさない）¹⁾に基づいた全体計画の策定と個別の対策工の設計・施工があげられる。

汚染水処理対策は，前節で示した震災直後の活動から現在まで継続的に実施され，対策工の効果により汚染水の発生量（建屋流入量と T.P.+2.5m 盤，T.P.+8.5m 盤の汲上げ量の合計）は大幅に低減している（図 3-1）。

また，事故発生以降の福島第一原子力発電所港湾内と港湾外における放射性物質の濃度の推移は図 3-2 のとおりで，事故直後には海水中の濃度は告示濃度限界を大きく超える状況であったが，その後の汚染水処理対策等の進捗とともに濃度は低下し，2016 年 8 月時点では告示濃度を下回る状況を維持している。特に，2015 年 10 月に海側遮水壁が完了した効果による濃度低下は明瞭である。

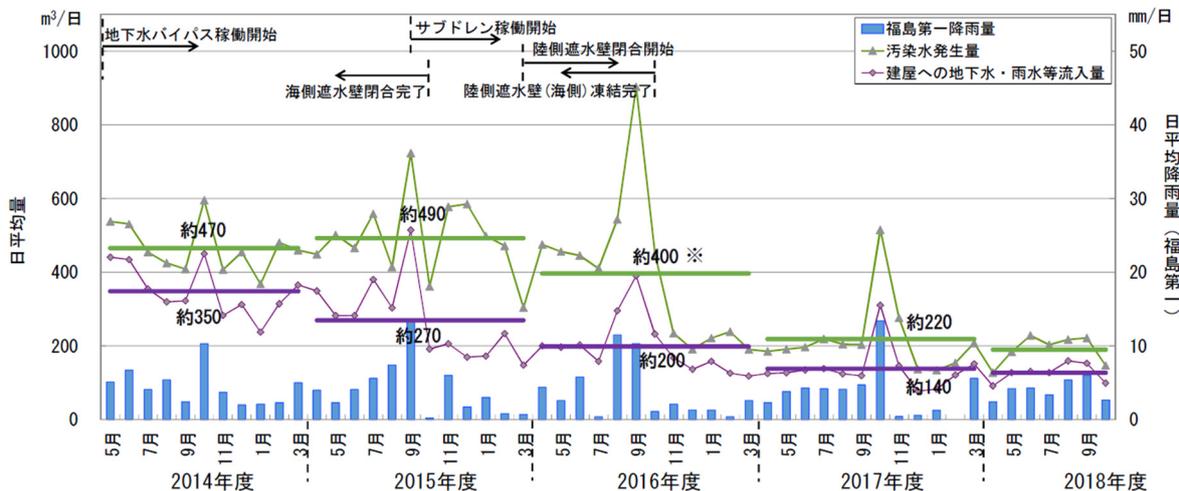


図 3-1 汚染水発生量の推移 ²⁾より引用

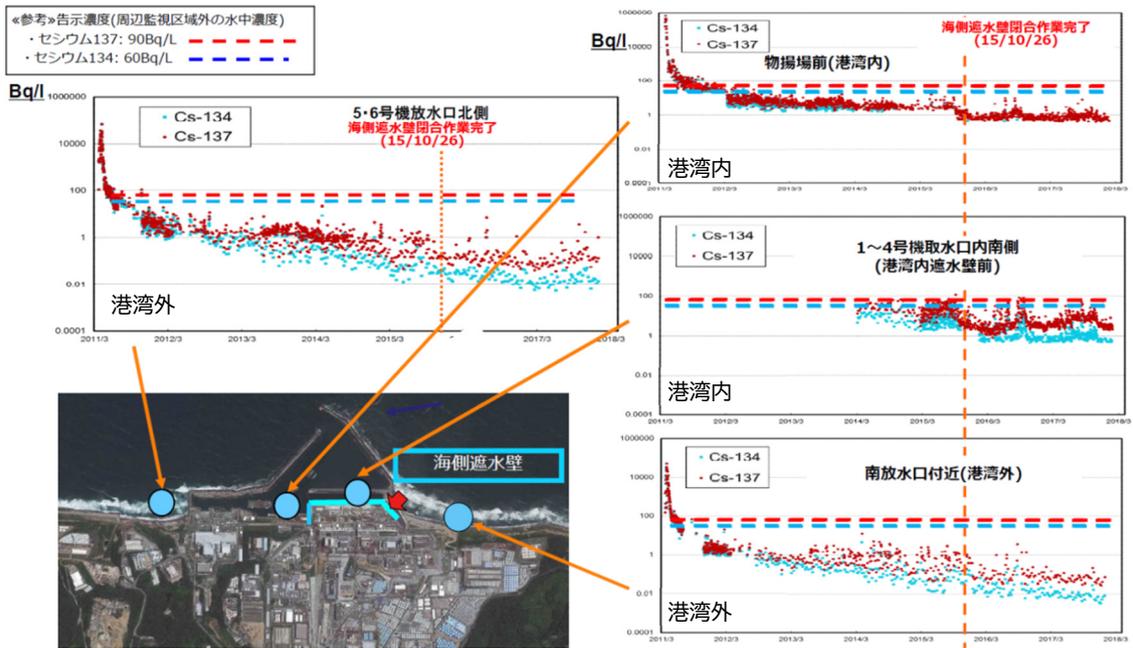


図 3-2 港湾内及び港湾外における放射性物質濃度の推移 ³⁾より引用・一部改変

一方、工事ヤード整備などに伴うがれきの撤去・一時保管、敷地内の除染（汚染土の除去、樹木の伐採等）、建屋の遮へい対策、フェーシング等の環境負荷低減・廃棄物対策により、構内の空間線量は大幅に低減したため（図 3-3）、1～4 号機建屋周辺等の汚染の高いエリアとそれ以外のエリア（ $5 \mu\text{Sv/h}$ 以下のエリア）に区分することができた。

これにより、全域で全面マスクと防護服が必要であった Yzone の作業（図 3-4）は大幅に縮小し、簡易マスク、一般作業服で作業可能な Gzone 範囲が拡大され防護装備の適正が図られるとともに（図 3-5、図 3-6）、被ばく対策の様々な工夫（厚生労働省、「被ばく低減対策好事例集」^{10),11),12)}により作業時の負荷軽減による安全性と作業性の向上が図られた。

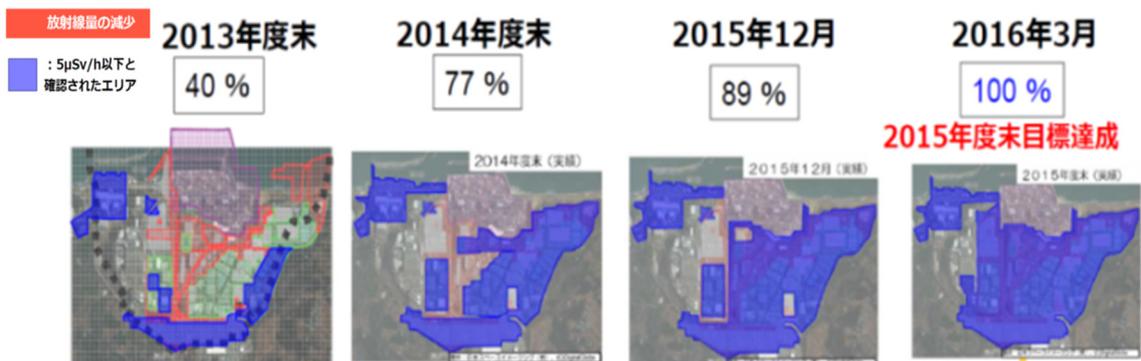


図 3-3 構内の空間線量の推移 ³⁾より引用



地盤改良 6)より引用



フランジタンクの解体 5)より引用



法面吹き付け 4)より引用



陸側遮水壁 7)より引用

図 3-4 Yzone の作業状況



図 3-5 構内の装備区分（2018年11月） 8)より引用

R zone (アノラックエリア)	Y zone (カバーオールエリア)	G zone (一般服エリア)
全面マスク 	全面マスク 又は 半面マスク ※1※2 	使い捨て防塵マスク 
カバーオールの上 にアノラック 	カバーオール 	一般作業服※3 構内専用服 
又はカバーオール2重		



図 3-6 作業エリアに応じた防護装備 8),9)より引用・一部改変

また、構内の対策の進捗に応じて、敷地境界に設置されているモニタリングポストの空間線量も低減し(図 3-7, 図 3-8), 敷地境界の空間線量は 2015 年度末以降から 1mSv/y 以下に維持されていると評価されている(図 3-9)。



図 3-7 敷地境界のモニタリングポスト位置図 13)より引用

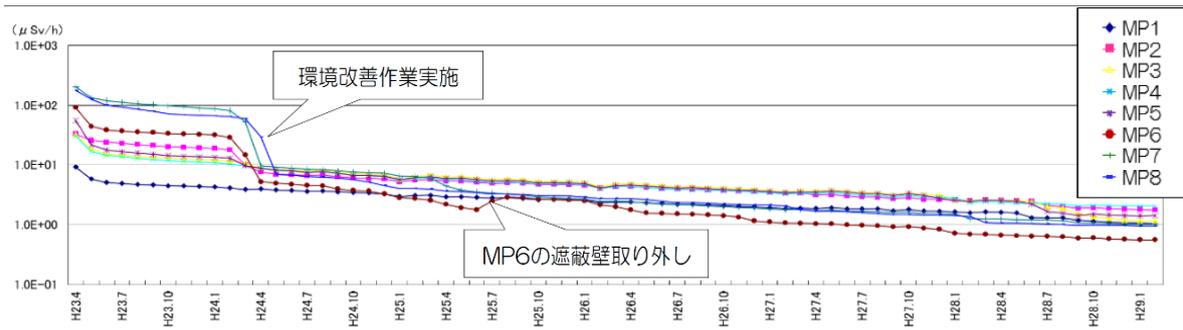


図 3-8 敷地境界のモニタリングポスト空間線量の推移 14)より引用

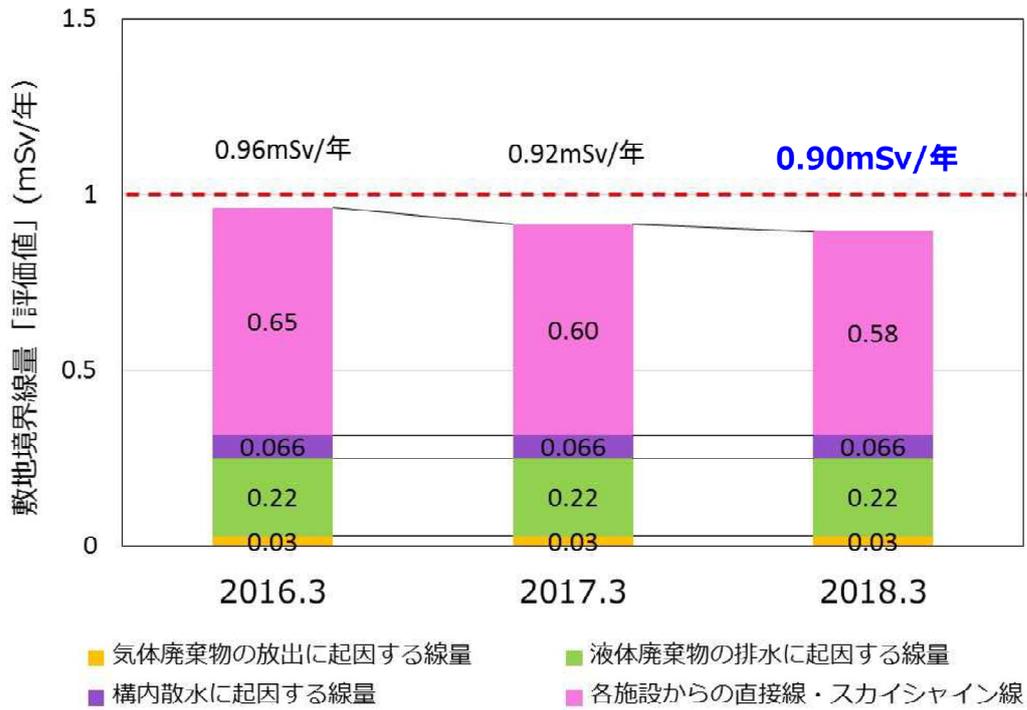


図 3-9 敷地境界の空間線量の評価 15)より引用

参考文献

- 1)経済産業省 汚染水処理対策委員会(2013):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～, 2013年12月10日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131210/131210_01d.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 2)廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(2018):中長期ロードマップ進捗状況, 廃炉・汚染水対策の概要, 資料2, 2018年11月29日,
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/12/2-1.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 3)増田尚宏(2018):福島第一原子力発電所における廃炉・汚染水対策の現状と今後の課題, 2018年3月2日, フォーリン・プレスセンター,
<https://fpcj.jp/wp/wp-content/uploads/2018/03/cbcflca4357385913d3c925c1e678923.pdf>, 2018年12月1日掲載確認
- 4)日経コンストラクション(2017):地味だが大変な法面吹付け, 2017年2月27日
- 5)日経コンストラクション(2017):ヤードの狭さを技術と知恵で克服, 2017年2月27日
- 6)東京電力:写真集,
<https://photo.tepco.co.jp/date/2013/201307-j/130717-01j.html>, 2018年9月26日掲載確認
- 7)東京電力:写真集,
<https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201708-j/170822-01j.html>, 2018年9月26日掲載確認
- 8)廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(2018):中長期ロードマップ進捗状況, 廃止措置等に向けた進捗状況, 敷地内の環境改善等の作業, 2018年11月29日,
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/12/2-4.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 9)東京電力(2017):私がお応えします。～作業エリアの安全性向上(2017年5月現在),
http://www.tepco.co.jp/decommission/visual/answer/work_env/index-j.html, 2018年9月26日掲載確認
- 10)厚生労働省(2016):「平成28年度東電福島第一原発廃炉等作業における被ばく低減対策の強化事業」, 被ばく低減対策好事例集, 平成29年2月,
https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/anzen/touden/itaku/files/28-00-01.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 11)厚生労働省(2017):「平成29年度東電福島第一原発廃炉等作業における被ばく低減対策の強化事業」, 被ばく低減対策好事例集, 平成30年2月,
https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/anzen/touden/itaku/dl/29-00-01.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 12)厚生労働省(2018):「平成30年度東電福島第一原発廃炉等作業における被ばく低減対策の強化事業」, 被ばく低減対策好事例集, 平成31年2月,
https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/anzen/touden/itaku/files/30-00-01.pdf, 2018年12月10日掲載確認

- 13)東京電力(2018):福島第一原子力発電所敷地境界でのモニタリングポスト計測状況,
http://www.tepco.co.jp/decommission/data/monitoring/monitoring_post/index-j.html, 2018
年9月26日掲載確認
- 14)東京電力(2017):福島第一原子力発電所の現状と周辺環境に与える影響について, 2017
年3月22日, 原子力規制委員会 特定原子力施設監視・評価検討会(第52回), 資料1,
別添1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130823/130823_01g.pdf, 2018年12月10日
掲載確認
- 15)東京電力(2018):福島第一原子力発電所構内の線量状況について, 2018年4月26,
廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第53回),
[https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/
2018/05/3-06-03.pdf](https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/05/3-06-03.pdf), 2018年7月15日掲載確認

3.2.1 全体計画の策定

(1) 地質・水理地質構造

(a) 地形

福島第一原子力発電所は福島県双葉町と大熊町の境界付近に位置し、双葉断層で境される阿武隈山地東部沿岸域の丘陵地域に位置している（図 3-11）。

発電所の敷地は海拔 30m 以上の台地が海岸に接する海岸段丘であったが、発電所建設に当たり海拔 10m～4m 程度の平地が造成され、1～4 号機建屋が設置された（図 3-12、図 3-13）。

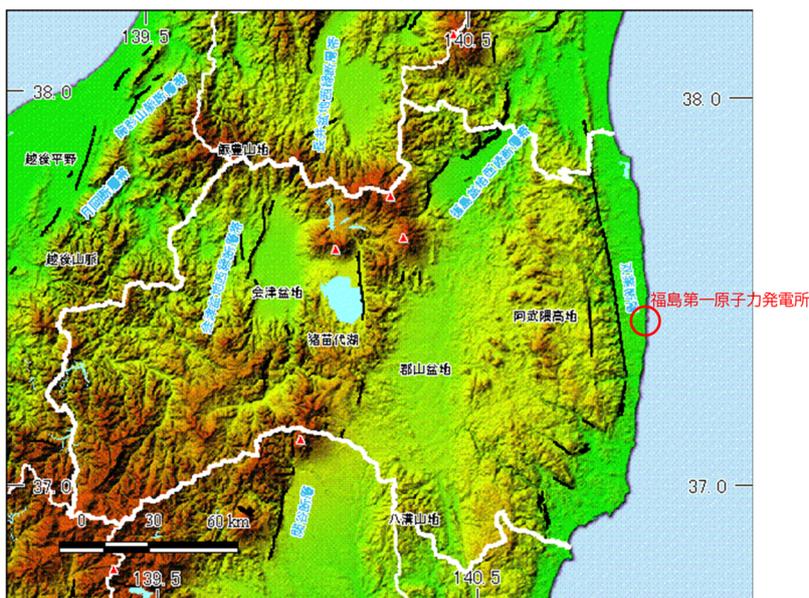


図 3-11 福島県の地形 2)より引用・一部改変



図 3-12 敷地全体鳥瞰図 3)より引用・一部改変



図 3-13 建屋周辺鳥瞰図 4)より引用

(b) 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）より下位層が富岡層の T3 部層と呼ばれる新第三紀に堆積した地層で（図 3-14）、上部から中粒砂岩層（Ⅰ層）、泥質部（Ⅱ層）、互層部（Ⅲ層）等が分布している。

このうち、泥質部（Ⅱ層）とその下部の互層部（Ⅲ層）が原子力発電所建屋の支持地盤となっている。互層部（Ⅲ層）より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、ボーリングデータや露出している地層の観察から海側へ約2度で東側に傾斜し、ほぼ平行で海域へ連続しているものと考えられた（図 3-14）。

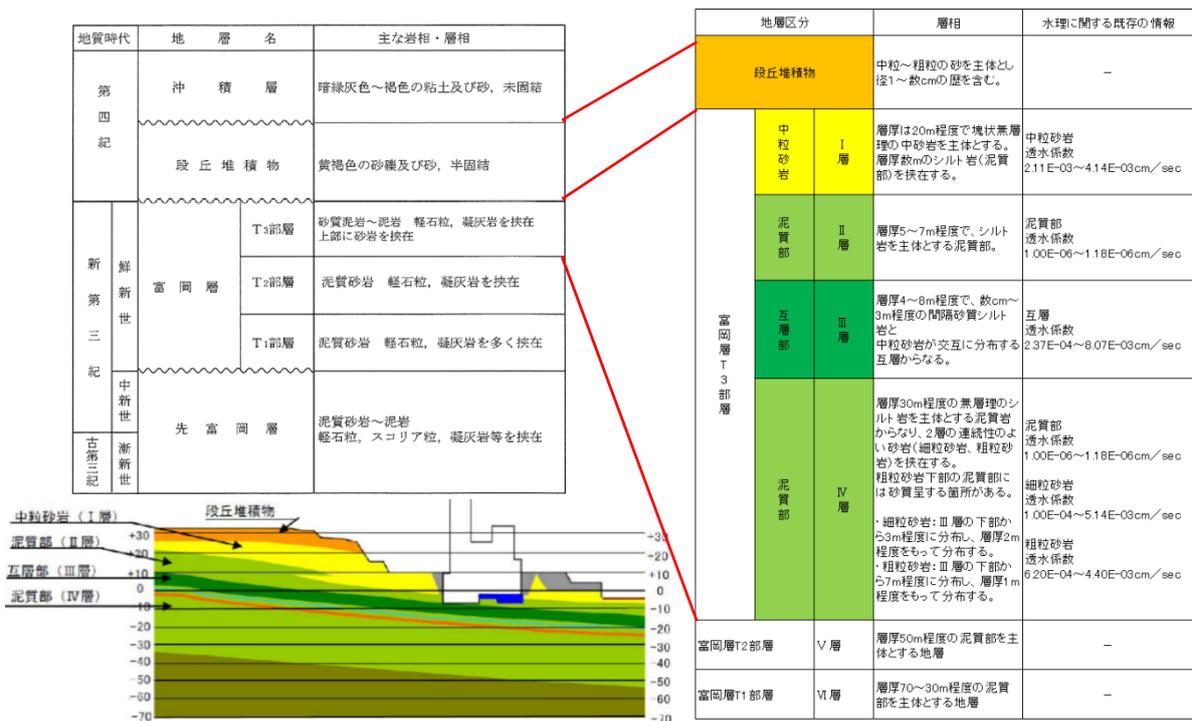


図 3-14 福島第一原子力発電所の地質層序 5)より引用

発電所敷地周辺の地形・地質等に関する情報については、建設時及びその後の増設、改良工事等で必要な調査が実施されているが、一部の情報については、必ずしも収集整理・統合化がなされておらず、また、事故に伴い確認が困難な状態のものもあった。このため、事故直後から既存情報の収集整理・統合化が行われた。

一方、既存の地質情報は発電所敷地内に限られ、さらに原子炉建屋等の重要施設周辺では詳細なボーリング調査が実施されているが、それ以外の領域での調査ボーリングは少ないという課題があった。また、地下水流動場の再現を行う3次元水理解析モデルの設定を行うためには、地下水涵養域までを含めた広域地質構造モデルを構築する必要があった。

このため、

- ①事故直後の調査ボーリング(3孔)により、既存の情報(地質構造モデル(地層構成、層序等)、地下水位、地層の透水性等)を確認(図3-15)。
- ②既存のボーリング柱状図の収集整理・統合化の情報を基に、敷地全体の地質構造モデルを再構築。
- ③敷地外については、過去に実施された広域地表地質調査¹⁾の地表露頭データと、敷地内の地質構造を統合化したモデルの構築(図3-16)。

を行い、広域3次元地質構造モデルの構築を行っている(図3-17)。

なお、地質構造モデルについては、2012年以降に実施された対策工の検討や効果等を予測・評価するための調査ボーリングの情報等を取り込むモデルの更新を適宜行っている。

また、一般の方々へ福島第一原子力発電所の地質構造や地下水の状況、汚染水対策等をご理解いただくことを目的としたジオラマの作成を行っている(図3-18)。

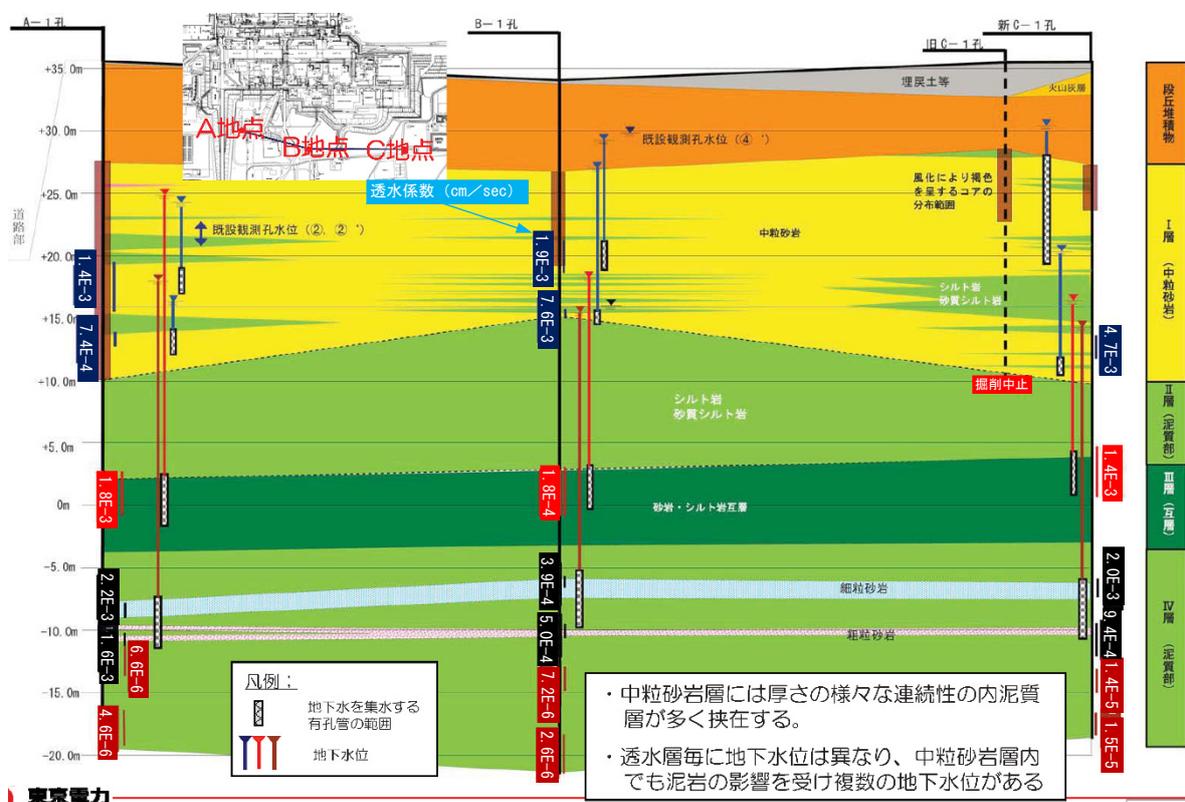


図 3-15 事故直後の調査ボーリング結果³⁾より引用・一部改変

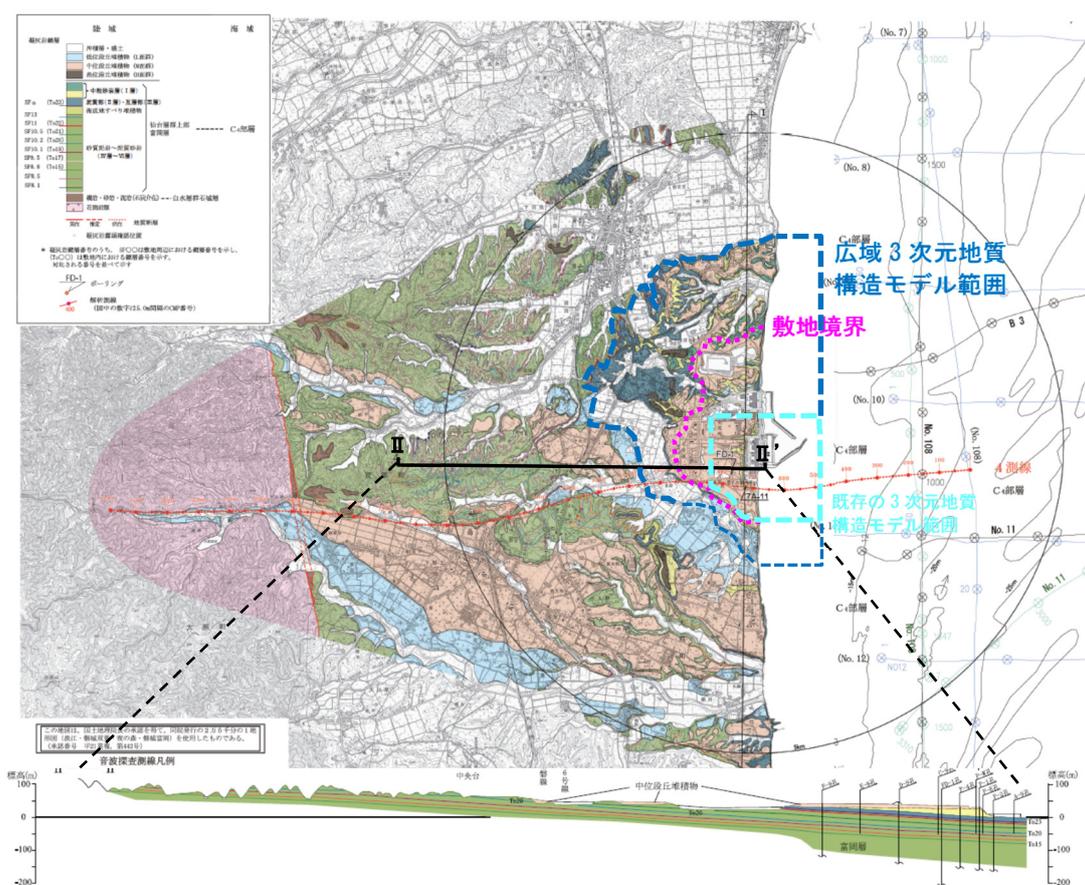


図 3-16 広域地質平面図及び地質構造モデル構築の範囲 1)より引用・一部改変

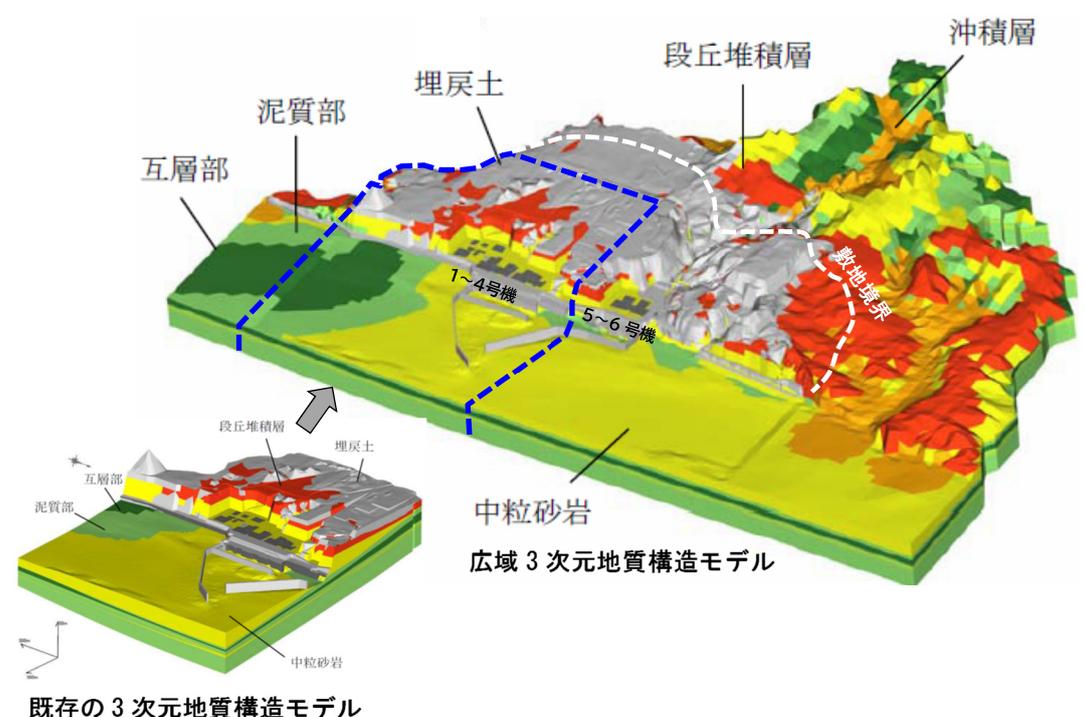


図 3-17 広域 3次元地質構造モデルの構築 5)より引用・一部改変



図 3-18 福島第一原子力発電所のジオラマ

(c) 水理地質構造

地下水流動場を規定する地層の透水性，地下水位・水圧分布等の水理地質構造に関する情報を以下に取りまとめた。

福島第一原子力発電所の敷地を含む周辺地域の地質断面図を図 3-19 に，事故後に実施した調査ボーリングのコア写真を図 3-20 に示す。

地層構成は地表付近の段丘堆積層(埋戻し土を含む)の下部に中粒砂岩層(Ⅰ層)，泥質部(Ⅱ層)，互層部(Ⅲ層)，泥質部(Ⅳ層)が累重し，ほぼ2度で東方向へ傾斜して分布する。

泥質部(Ⅱ)は敷地内にはほぼ欠落なく分布すると考えられる難透水性の地層で，上部の中粒砂岩層(Ⅰ層)には，泥質部(Ⅱ)を水理的基盤とする不圧地下水が分布して自由地下水面を形成している。中粒砂岩層(Ⅰ層)には泥岩の挟み層が分布し，挟み層による2重地下水の形成も確認されている。このため，ボーリングデータで連続性が確認される泥岩の挟み層については，地質構造モデルに反映されている(図 3-19)。

泥質部(Ⅱ層)の下部の互層部(Ⅲ層)には，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。また，互層(Ⅲ層)の下部には30m以上の層厚をもつ難透水性の泥質部(Ⅳ層)が分布し，敷地を含む周辺地域の水理的基盤となっている。泥質部(Ⅳ層)には被圧地下水をもつ連続性の良い砂岩層(細粒砂岩，粗粒砂岩)が2層分布している。

汚染水処理対策委員会¹⁾は，このような水理地質構造について，中粒砂岩層(Ⅰ層)を流れる地下水は主として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)を流れる地下水は主として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るとしている。

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であるが，建設工事により，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)の被圧地下水にも注目する必要があるとしている。

さらに地下深部(富岡層 T2 部層)には，双葉断層付近で涵養された，あるいは阿武隈山系等から流入する地下水が流れる帯水層が存在するが，中粒砂岩層(Ⅰ層)や互層(Ⅲ層)を流

れる地下水への影響はほとんどないと推測されるとしている。

建屋の海側で採取した互層部(Ⅲ層)の地下水からは、放射性物質はほとんど検出されていないことが確認されている(平成 25 年 12 月 9 日現在)¹⁾。このことを踏まえると、互層部(Ⅲ層)の地下水の汚染の度合いは低いと考えられるが、一部基礎工事において互層部下面までの掘削・埋め戻しを実施していることから、安全サイドで考えると、海域への汚染水の流出防止対策については、互層部(Ⅲ層)までを対象とすることが適切と考えられた。また、互層部(Ⅲ層)より下の細粒砂岩層と粗粒砂岩層を流れる地下水は、汚染されている可能性は低いと考えられるとしている。

各地層の水理特性を表 3-1 に示す。地層の透水係数などは、既存の試験データと震災後に実施された調査ボーリングで得られた試験結果の平均値を採用している。

互層部(Ⅲ層)については、互層を構成する砂岩、泥岩の単層の層厚が数 cm～数 10m 程度の薄層で構成されているため、透水性の異方性は顕著なものと想定された。このため、既存の孔間透水試験結果や砂岩、泥岩の分布比率などから、異方性を考慮した透水係数(鉛直、水平方向の透水性)を設定している。

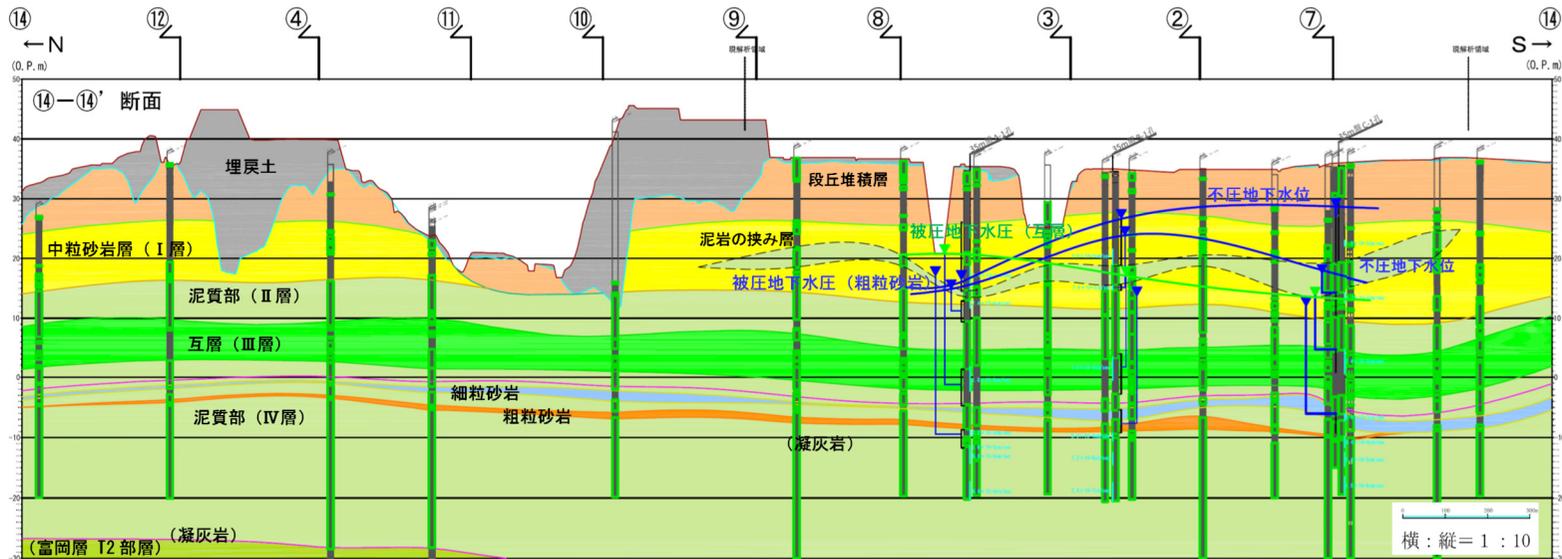
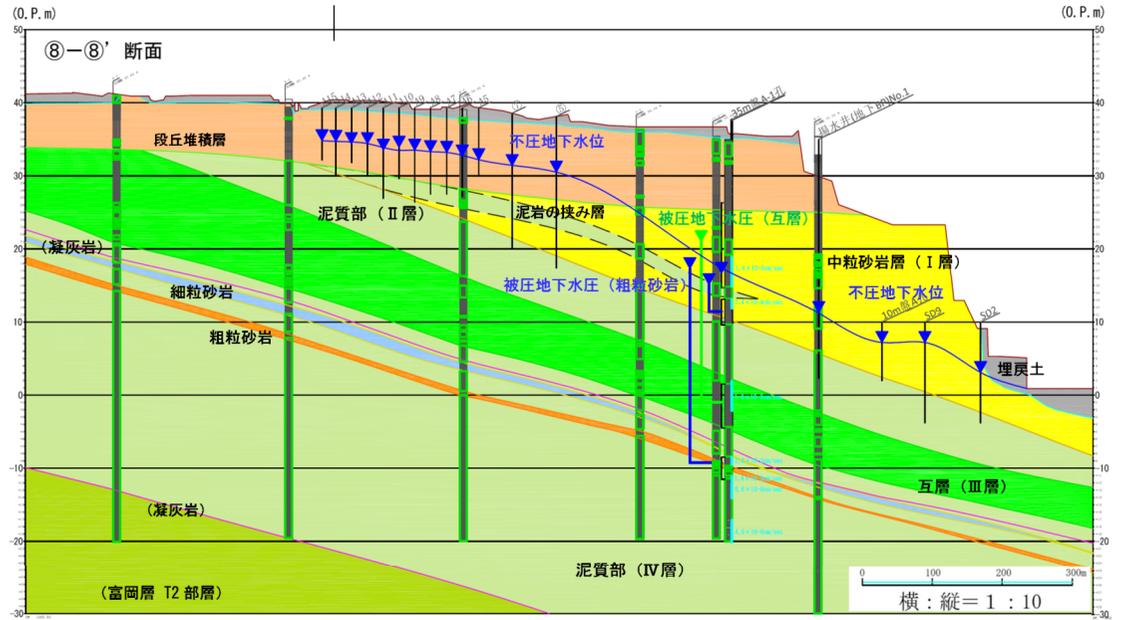
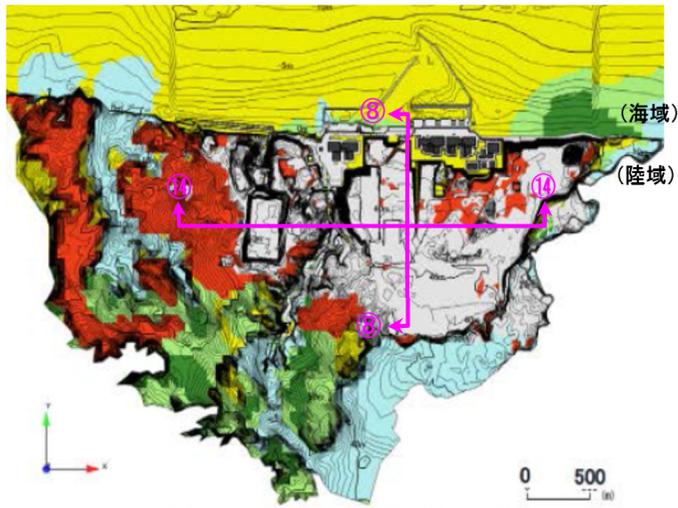


図 3-19 地層構成と地下水の分布 5)より引用

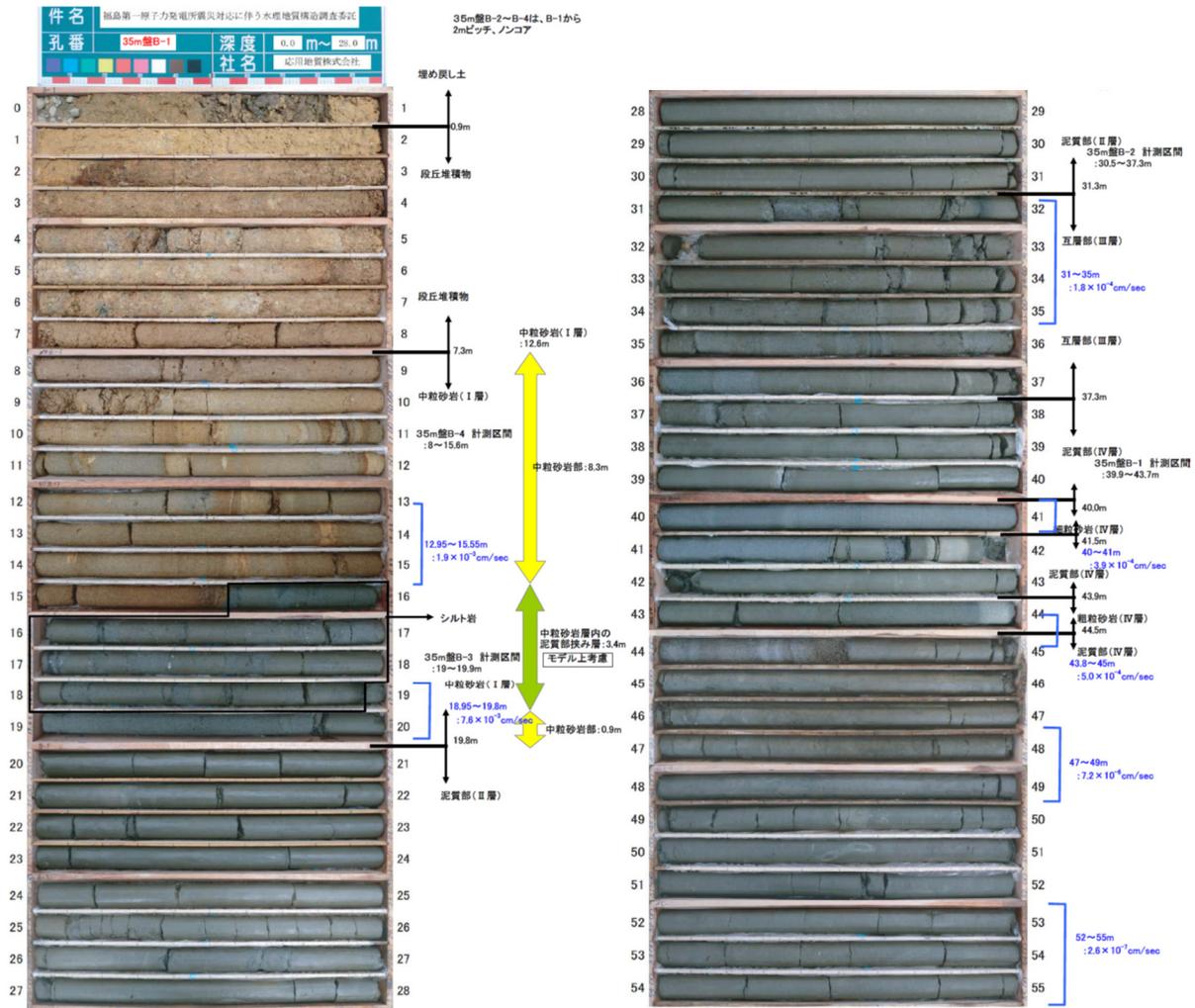


図 3-20 調査ボーリングのコア写真 5)より引用

表 3-1 各地層の水理特性 1)を基に作成

地層区分	透水係数(cm/sec)		有効間隙率 (実流速換算時)	備考
	水平	鉛直		
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	

参考文献

- 1)経済産業省 汚染水処理対策委員会 (2015) : 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～, 平成 25 年 12 月 10 日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131225/131225_01e.pdf, 2018 年 12 月 1 日
掲載確認
- 2)地震調査研究推進本部 : 福島県の地形と活断層,
<https://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/f4-55.htm>, 2022 年 1 月 13 日掲載確認
- 3)東京電力 (2013) : 福島第一原子力発電所周辺の地質・地下水及び解析, 第 5 回汚染水処理対策委員会, 資料 3, 平成 25 年 8 月 23 日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130823/130823_01g.pdf, 2018 年 12 月 10 日
掲載確認
- 4)大西有三 (2013) : 「東電福島第一原発の廃炉措置に向けての汚染水処理対策と現場で今行われていること」, 日本原子力学会関西支部「平成 27 年度講演会 (第 1 回)」, 平成 27 年 11 月 6 日,
http://www.aesj.or.jp/~kansai/material/H27/AESJ_kansai_H271106_oonishi.pdf, 2018 年 12 月 10 日掲載確認
- 5)経済産業省 汚染水処理対策委員会 (2015) : サブグループ①「地下水・雨水等の挙動等の把握・可視化」中間報告, 第 9 回汚染水処理対策委員会, 資料 2-1, 2013 年 8 月 23 日,
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8380059/www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131115/131115_01d.pdf,, 2018 年 12 月 10 日掲載確認

(2) 地下水流動場の評価

事故直後から、東京電力において既存の 3 次元地質構造モデル(図 3-17)に基づいた地下水流動解析が行われ、その結果を基にいくつかの対策が計画・実施されている。これまでの検討は、建屋周辺の地下水の流れをどのように抑制するかに着目し、敷地境界より内側の狭い解析領域の地下水流動解析が進められていた(図 3-21 の現行モデル範囲)。

汚染水処理対策委員会は、これまでの狭い解析領域での検討についてもその範囲における地下水流動解析結果の妥当性は認められるが、前節で示した地質・水理地質構造を踏まえると、敷地境界付近における対策を含めたより広範囲において予防的・重層的な対策を検討する必要があると指摘した。このため、広域 3 次元地質構造モデルに基づいて、大幅に解析領域を拡張した 3 次元水理解析モデルを構築した(図 3-22)。

解析モデルの構築に当たっては、データの得られている範囲や対策の内容に応じて、また、解析時間も考慮して解析メッシュには濃淡を設け、建屋周辺等は細かく、建屋周辺等から遠ざかるに従い粗い解析メッシュとしている。また、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を及ぼすと考えられる構造物については、可能な限り正確にモデルに反映した 3 次元水理解析モデルが構築された(図 3-22)。

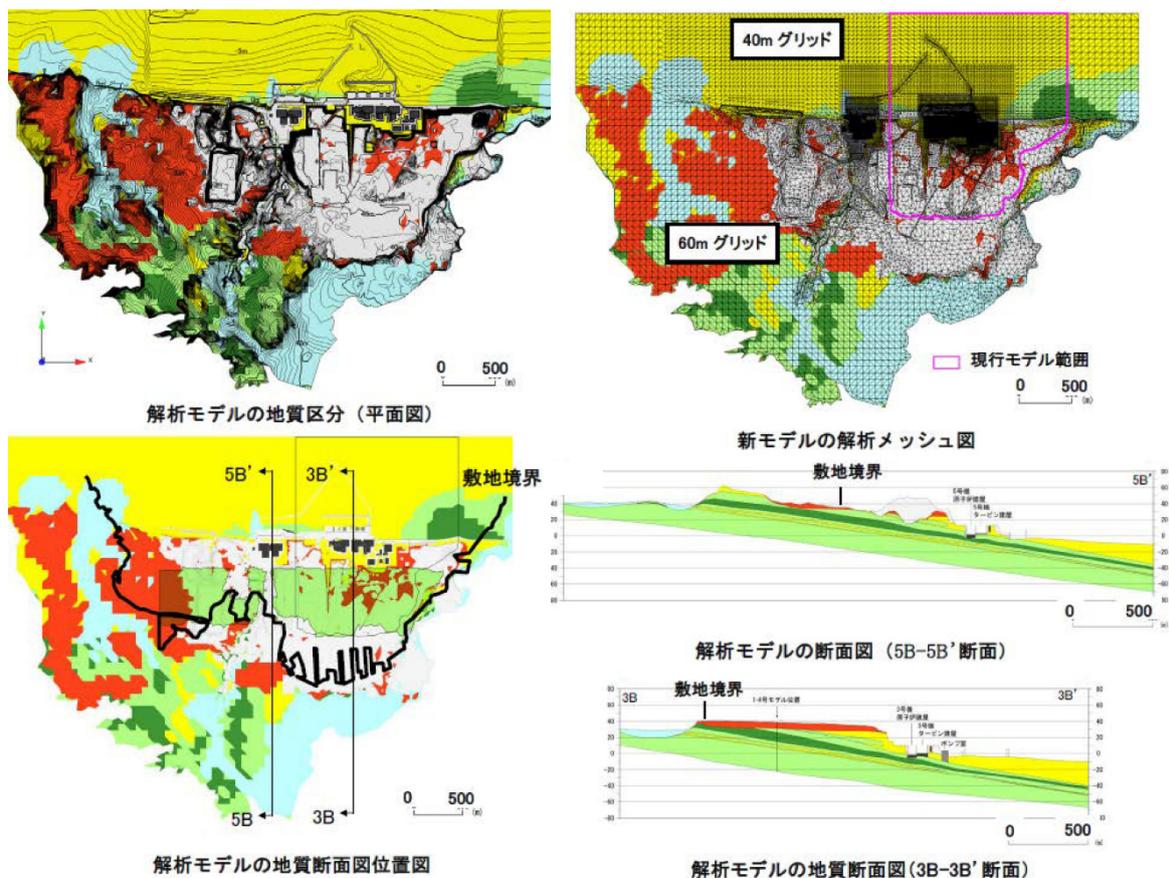


図 3-21 メッシュ図, 地質断面図 1)より引用

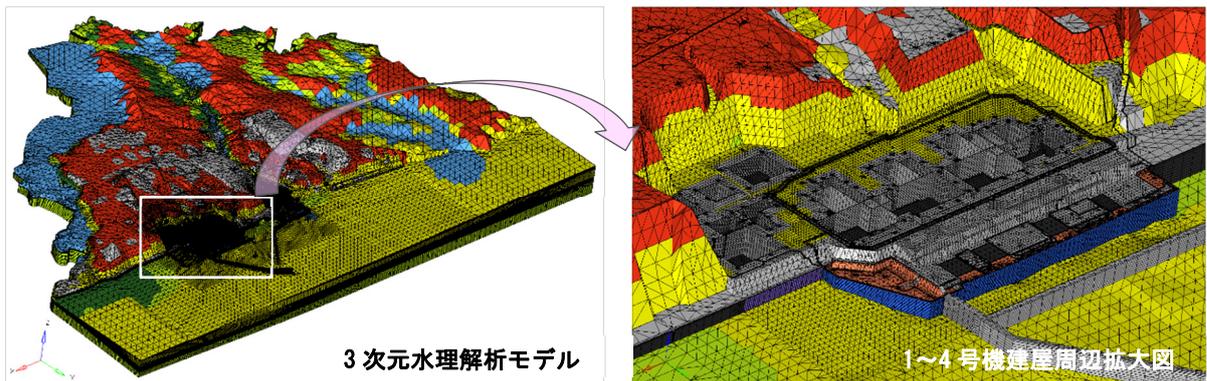


図 3-22 解析モデルの鳥瞰図

拡張された解析領域の陸側は、地下水流動解析の主対象である富岡層 T3 部層の分布と沖積河川(水の出入りが可能な静水圧境界条件)の分布を基に設定し、海側の領域は、陸側領域の南北端を海岸線と直交方向に沖合約 2km まで延伸した領域とした(図 3-21, 図 3-22)。

なお、海側領域の東側の境界条件については、水の出入りが可能な(=静水圧境界)条件と、水の出入りが無い(=不透水境界)条件のそれぞれの解析結果を比較して、解析領域を海側に更に拡張する必要性を検討したところ、両解析結果にはほとんど差異がみられないことから、海側へこれ以上解析領域を広げる必要がないことを確認した上で、静水圧境界条件を設けている。

透水係数等の水理特性や降雨条件等の解析条件を表 3-2 に示す。前節で示した地層の水理特性に加え、既存の資料に基づいたコンクリート等の建造物の透水係数等を設定した。なお、事故後の建屋側壁コンクリートの透水係数については、地下水が平均的に約 400m³/日程度で建屋内に流入していること、また、既設の護岸コンクリートは損傷が大きいことから震災前の透水係数を適用することはできない。このため、建屋側壁コンクリートは、事故後の建屋流入量(約 400m³/日)が再現できる透水係数、護岸コンクリートは、事故後に測定されている地下水位の実測データを再現できる透水係数を解析によるパラメータスタディにより設定した。

これらの解析条件の下で、敷地内の複数地点で事故後に測定されている地下水位の実測データ(年間を通じて代表的な値)と解析結果を比較したところ、定常解析において対策実施前の状況がある程度良好に再現された(図 3-23)。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についても、実測値と解析値に比較的良好な対応関係が見られた。

また、汚染水処理対策委員会は、解析モデルと解析条件のチェックを日本原子力研究開発機構(JAEA)に依頼しており、その結果、解析モデル、解析条件は概ね妥当と判断された(図 3-24)。このため、この解析モデルと解析条件を用いた地下水流動解析結果は、ある程度の差分があるものの、実施すべき対策やその効果等を検討する上で有用と判断し、以降の汚染水処理対策の諸検討に用いられた。

なお、解析モデルや解析条件については、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、水理解析モデルに反映（モデルの更新）するとともに、計測データの再現解析によるモデルの更新を適宜実施している。

表 3-2 解析条件 ¹⁾より引用

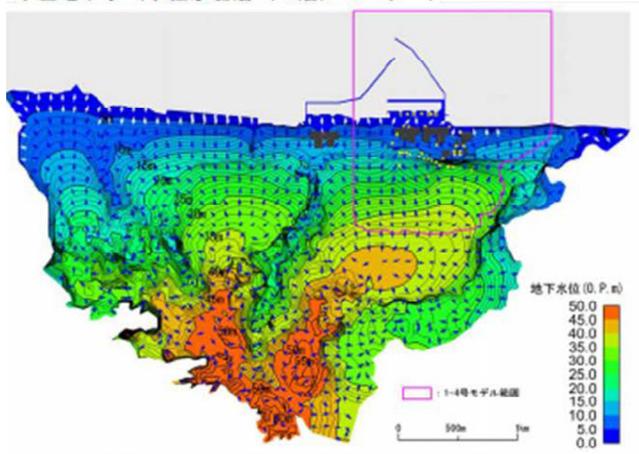
①降雨量: 年平均降水量 1545mm(4.2mm/日)						
②降雨浸透率 55%(蒸発散量を年間700mmとした)						
③地山ならびに構造物の透水係数						
地層区分	震災前		震災後		間隙率 (実流速換算時)	備考
	透水係数(cm/sec)		透水係数(cm/sec)			
地層名	水平	鉛直	水平	鉛直		
盛土	2.8E-03	2.8E-03	2.8E-03	2.8E-03	0.46	
段丘堆積物	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	0.41	中粒砂岩層同様
沖積層	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	0.41	文献値
中粒砂岩	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	3.0E-03	0.41	
中粒砂岩(南側、上部)	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	35m盤の3B-3B'測線以南範囲
中粒砂岩(南側、下部)	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
互層	1.0E-03	1.1E-06	1.0E-03	1.1E-06	0.41	異方性考慮
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
細粒砂岩	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
粗粒砂岩	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	2.0E-03	0.41	
泥岩	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	1.1E-06	0.54	
建屋基礎およびMMR	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	0.30	コンクリート相当
建屋側壁	1.0E-06	1.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	0.30	感度解析から設定 ^{※1}
既設矢板	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-04	1.0E-04	0.30	感度解析から設定、施工幅0.8m ^{※2}
ポンプ室およびピット	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	0.30	コンクリート相当
4m盤グラウチング	—	—	3.0E-05	3.0E-05	0.30	中粒砂岩層の1/100相当、施工幅2m
砕石	—	—	1.0E-01	1.0E-01	0.41	埋立部
海側遮水壁	—	—	1.0E-06	1.0E-06	0.30	施工幅1m
陸側遮水壁	—	—	0.0E+00	0.0E+00	—	施工幅2m

※1: 建屋への流入量が400m³/日を再現できる透水係数
 ※2: 地下水位(C-3, C-4, C-5)が再現できる透水係数

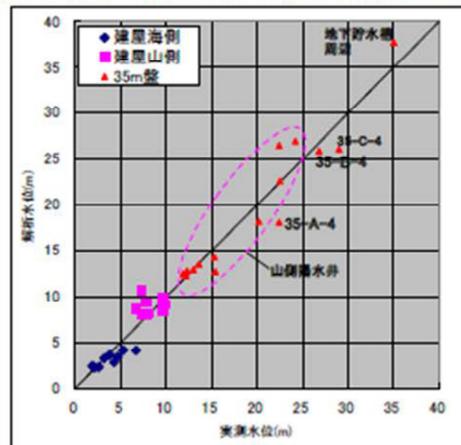
④境界条件 海域: 平均潮位の静水圧
陸域: 地表からの静水圧

沖積層の透水係数については実測データがないため、日本の地盤を対象とした地下水データベース(梅田浩司, 柳澤孝一, 米田茂夫(1995): 日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成, 地下水学会誌, 第37巻, 第1号, 1995)の第四紀更新世(平均値: 1.2E-03 cm/sec)と第四紀完新世(平均値: 5.6E-04 cm/sec)の透水係数の平均値(8.1E-4 cm/sec)から1E-3(cm/sec)と設定した。

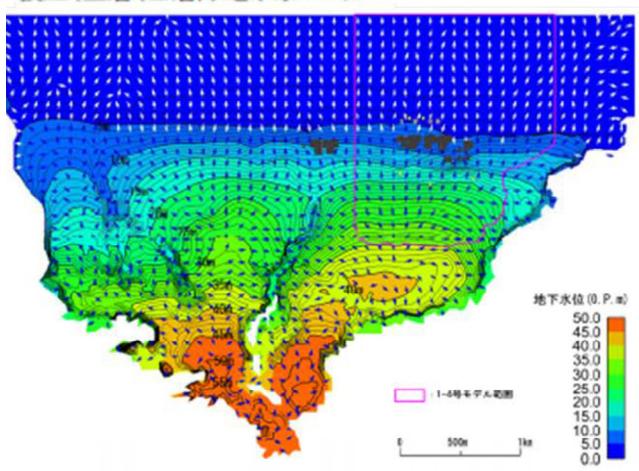
不圧地下水（中粒砂岩層（I層））コンター



不圧地下水位（中粒砂岩層（I層））実測値との比較



被圧(互層(III層))地下水コンター



被圧(互層(III層))地下水位実測値との比較

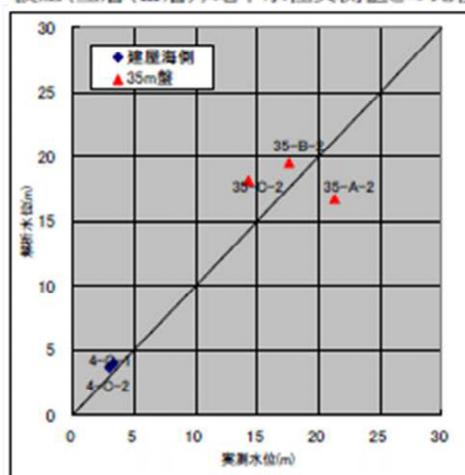
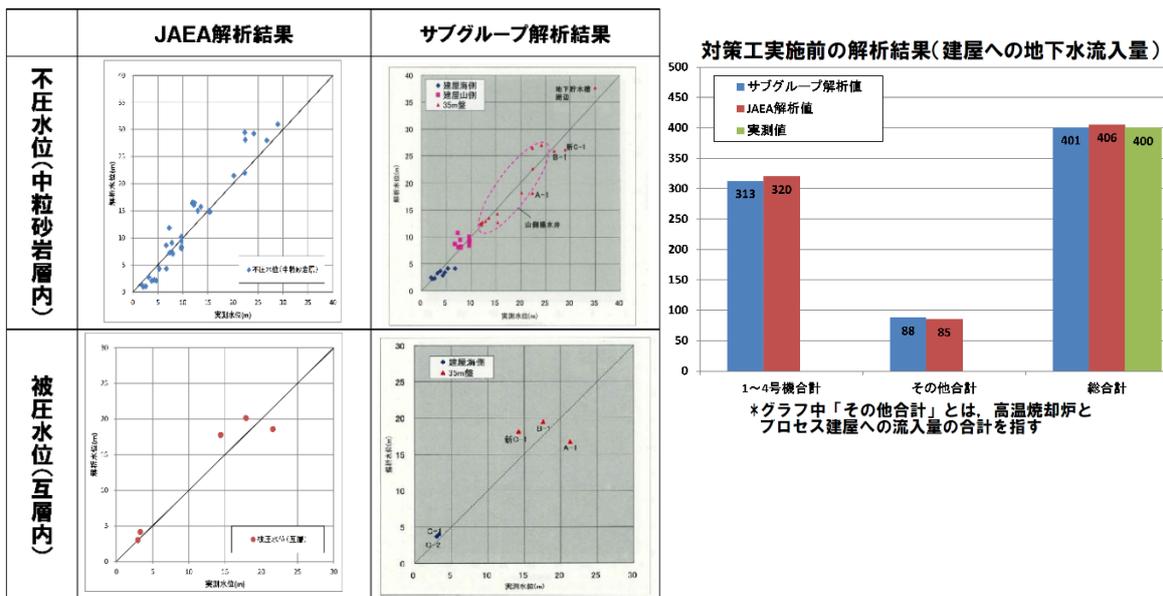


図 3-23 実測データと解析値の比較 1)より引用



JAEAとサブグループの対策工実施前の解析結果はほぼ同様

図 3-24 JAEAによるチェック 2)より引用

(3) 予防的・重層的な汚染水処理対策の検討方針

汚染水処理対策委員会は、汚染水処理対策を「汚染源を取り除く」、「汚染源に水を近づけない」、「汚染水を漏らさない(地下水流動に影響を及ぼすもの、影響を及ぼさないもの)」の3つに大別でき、それぞれについて複数の対策があるとした¹⁾。

複数の対策については、時間的、人的、費用的な制約や作業スペース等の現場における制約を考慮すると、考え得る全ての対策を同時に着手・完了することは困難であり、各対策の優先順位を踏まえ、対策の組合せや実施時期を最適化する必要がある。

汚染源を「取り除く」対策、汚染源に水を「近づけない」対策、汚染水を「漏らさない」対策では、それぞれ対策のねらいが異なるとともに、施設整備などのハード対策、パトロールの強化などのソフト対策などの手法も異なることから、全ての対策を同一の指標・考え方で整理することは困難であるとした。このため、対策の分類ごとに、優先順位、対策の組合せ、実施時期などの考え方を整理して、以下の方針を定めた。

(a) 汚染源を「取り除く」対策

汚染源を「取り除く」対策は汚染水処理の抜本的対策として重要なものであり、汚染源を「除去」と「浄化」に分類できる。このため、除去や浄化によるリスク低減の程度を相対指標として考慮した優先度の検討を行った。

除去対策としては、建屋海側トレンチ内の高濃度汚染水の汲上げ・閉塞の優先度が高く、次いで漏えいが発生したタンク周辺の汚染された土壌の回収・汚染水の汲上げの優先度が高い。特に前者は高いリスク要因となっており、直ちに実施すべき対策であるとした。

浄化対策としては、多核種除去設備による汚染水の浄化と設備増設による汚染水浄化の加速、より処理効率の高い多核種除去設備の導入等による建屋海側トレンチ内の高濃度汚染水の浄化の優先度が高く、直ちに実施すべきであるとした。これらに加え、建屋内の高濃度汚染水の浄化を行うとともに、タンクからの漏えい水により汚染された地下水の海洋流出防止(薬剤の注入、土壌中のストロンチウム捕集)、さらに沈殿・吸着・分離等による港湾内の海水の浄化についても、検証を行った上で対応すべきであると指摘した。なお、検証と平行して簡易な設備(シルトフェンス等)による港湾内の海水の浄化、港湾内海底土の被覆等の放射性物質が拡散しないための対策を実施すべきであるとした。

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

汚染源に水を「近づけない」対策、ならびに海側遮水壁等の地下水流動に影響を及ぼす汚染水を「漏らさない」対策については、3次元地下水流動解析モデルを用いて各対策を個別に実施した場合の効果、さらに建屋への流入量や海への流出の抑制量から、対策の組合せ効果を把握し、優先度を検討する上での一つの指標とした。また、複数の対策の組合せの効果を検討するに当たっては、予防的・重層的対策の観点から、検討対象とした対策の一部が十分に機能しないリスク等、いくつかのシナリオを想定した上で組合せの条件を設定した。

実施した50ケースを超える解析のうち、主な解析ケース及び解析結果を表3-3に示す。なお、解析結果には、すでに実施を決定している対策(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)等)の運用を前提とした効果を記載している。

表 3-3 解析ケース，解析結果（定常計算） 1), 3)より引用

ケース	対策工								建屋流入量 (トン/日)		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)		
	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	合計	1-4 号機 建屋			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2.0km ²	130	110	90	130			
ケース7- 2	●						●	約1.7km ²	160	130	100	160			
ケース8	●						●	※ 約1.0km ²	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1.7km ²	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1.7km ²	60	40	0	590	20	490	20

※：1-4号機の東西(35m盤、10m盤)のフェーシング
※※：フェーシングエリア周辺に遮水対策を実施するケース
(遮水壁長約3km)

〔注1〕「海域への流出量」は、1-4号機建屋群における流出量。
〔注2〕「くみ上げ量」は、建屋流入量に、地下水バイパス・サブドレン(SD)等からのくみ上げ量を加えた量。
〔注3〕「地下水ドレン」とは、「海岸付近の揚水設備」の意味。
〔注4〕海側遮水壁は、地下水ドレン運用を前提とした効果を記載。
〔注5〕地下水バイパス、サブドレンは、運用条件等により効果が異なる。
〔注6〕地下水バイパス上側は建屋流入抑制最小のケース、中側は互層まで揚水したケース、下側は中粒砂岩層に追加の井戸を設置した最大のケース。

方針1. 汚染源を取り除く

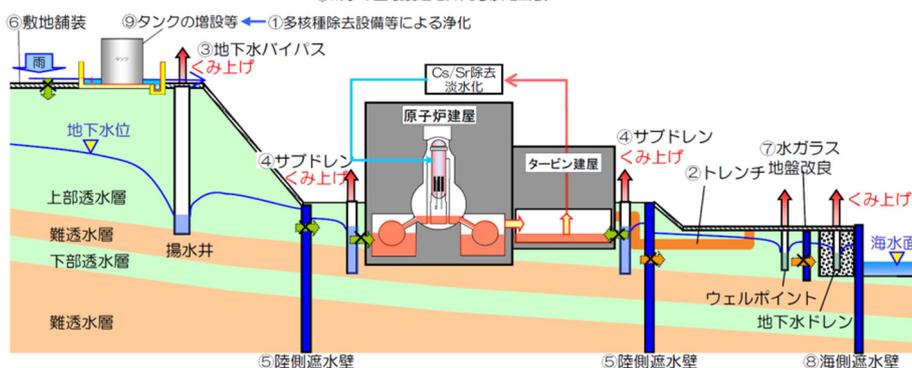
- ①多核種除去設備等による汚染水浄化
- ②トレンチ(※)内の汚染水除去
- (※)配管などが入った地下トンネル

方針2. 汚染源に水を近づけない

- ③地下水バイパスによる地下水汲み上げ
- ④建屋近傍の井戸での地下水汲み上げ
- ⑤凍土方式の陸側遮水壁の設置
- ⑥雨水の土壌浸透を抑える敷地舗装

方針3. 汚染水を漏らさない

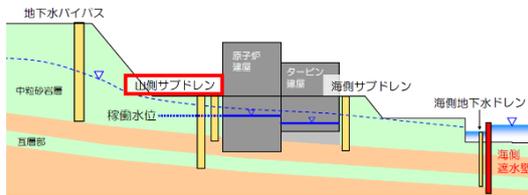
- ⑦水ガラスによる地盤改良
- ⑧海側遮水壁の設置
- ⑨タンクの増設
(溶接型へのリプレース等)



この検討の結果から、汚染水処理対策委員会での検討以前に東京電力が実施を決定している対策(O.P.+4m 盤対策(水ガラスによる地盤改良)、地下水バイパス、海側遮水壁(地下水ドレンを含む)、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が確認された。これらの決定済みの対策のうち、すでに実施中のO.P.+4m 盤対策や海側遮水壁は海への流出量を低減する効果が大きく、汚染水を漏らさない対策として必要不可欠なものであるとしている。

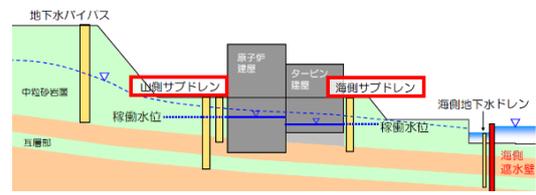
また、陸側遮水壁やサブドレンは建屋への流入量を低減する効果が大きいいため、汚染源に水を近づけない対策として重要な位置付けであることが確認された(表 3-3 のケース 4, 5, 6, 図 3-25)。このことは、陸側遮水壁やサブドレンが十分に機能しない場合、さらに将来的に運用を停止した場合には、地下水流入抑制対策が十分に機能しない可能性を示唆していることに留意する必要があると指摘している。

- ・山側サブドレンのみを稼働し、サブドレン稼働水位は近傍建屋水位とした。
- ・建屋水位 3~4m とした。

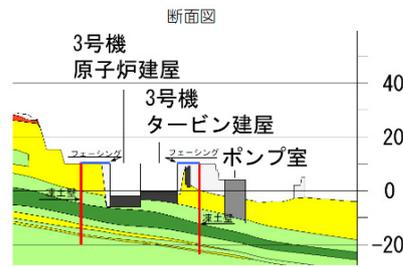
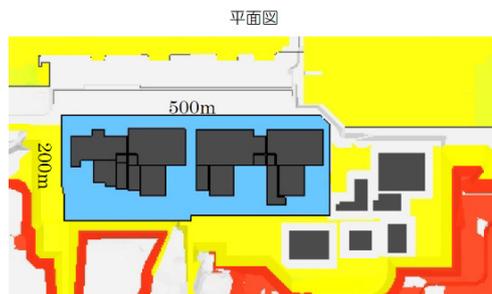


ケース 4 山側サブドレンのモデル

- ・山側/海側サブドレンを稼働し、サブドレン稼働水位は近傍建屋水位とした。
- ・建屋水位 3~4m とした。



ケース 5 山側/海側サブドレンのモデル



凍土壁で囲まれる領域。領域の面積の80%がフェーシングされていると仮定。残りの20%は降雨が浸透するとした。

- ・凍土壁の範囲は1~4号機を囲む範囲とした。(南北約500m, 東西約200m)
- ・凍土壁の深度は粗粒砂岩層までとした。
- ・凍土壁の幅は2mで不透水とした。
- ・凍土壁内側の表面は、内側の面積の80%がフェーシングされているとした。

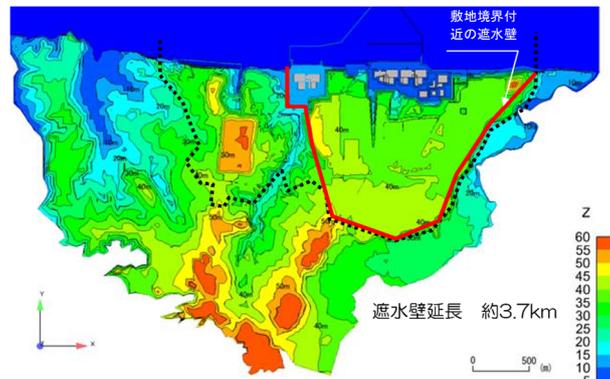
ケース 6 陸側遮水壁のモデル

図 3-25 解析モデルの概要図(サブドレン, 陸側遮水壁) 1)より引用

予防的・重層的な対策を講じるためには、陸側遮水壁やサブドレンが機能しない場合も想定した対策を検討する必要がある。その場合の追加対策を検討したところ、敷地境界付近における遮水(遮水壁、バイパス等)は、ほとんど効果が期待できないことが確認された(表 3-3 のケース 9, 図 3-26)。

一方、敷地内における遮水については、「広域的なフェーシングによる表面遮水」の効果は大きい、「一部領域のフェーシングによる表面遮水」の効果は、施工範囲によっては限定的であることが確認された(表 3-3 のケース 7, ケース 7-2, ケース 8, 図 3-27)。また、「追加的な遮水とその内側のフェーシング」を行えば、広域的なフェーシングと同様の効果が得られる

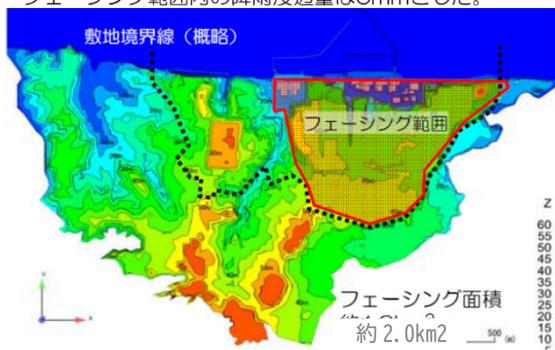
ことが確認された(表 3-3 のケース7-2, ケース8, 図 3-27)。ただし, 今後の精査が必要であるが, 非定常地下水流動解析結果では, フェーシング効果発現までには長期間を要する傾向が確認されている。早期効果発現の観点からは, 陸側遮水壁等の建屋近傍における対策が優位であるとしている。



ケース 9

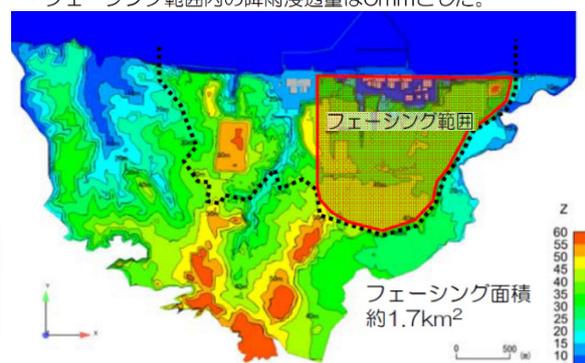
図 3-26 解析モデルの概要図 (敷地境界付近の遮水壁) 1)より引用

- ・北側は6号機まで、南側および西側は敷地境界までの範囲をフェーシングした場合(1~6号機を包括)。
- ・フェーシング範囲内の降雨浸透量は0mmとした。



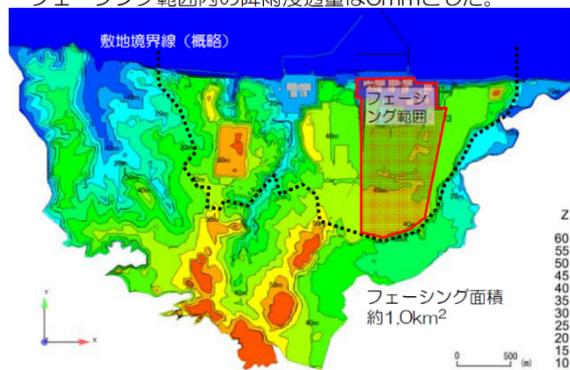
ケース 7 のモデル (フェーシング面積 : 約 2.0km²)

- ・北側は1号機の北側まで、南側および西側は敷地境界までの範囲をフェーシングした場合(1~4号機を包括)。
- ・フェーシング範囲内の降雨浸透量は0mmとした。



ケース 7-2 (フェーシング面積 : 約 1.7km²)

- ・南北方向は1~4号機の範囲とし、西側は敷地境界までとした。
- ・フェーシング範囲内の降雨浸透量は0mmとした。



ケース 8 (フェーシング面積 : 約 1.0km²)

図 3-27 解析モデルの概要図 (フェーシング) 1)より引用

ただし、フェーシングは降雨の地下浸透を抑制して地下水位を低下させる効果がある反面

- ・表流水の流量や流出速度が増大すること。
- ・建屋内外の水位コントロールのため注水が必要になる可能性が高まること。

などが考えられるため、必要な措置を講ずる必要があるとしている。このうち、表流水を適切に処理するためには、

- ・豪雨の発生や流出形態の変化等も念頭に流出量を設定すること。
- ・設定流出量を上回る流量が発生することも念頭に、流出量に余裕を加味した排水路網、排水路断面を計画すること。
- ・計画を上回る流量が発生した場合に備え、排水路からの溢水ルートの設定等を適切に行うこと。

などの指摘を考慮して、雨水と汚染水を混在させないよう留意するとともに、排水路網の水質のモニタリング、建屋内外の水位コントロールに支障が発生しない施設計画や地下水観測を適切に行う必要があるとしている。

追加的な遮水とその内側のフェーシングを行う場合にも、建屋内外の水位コントロールのための注水が必要になる可能性が高まるとともに、地下埋設物や他の工事等との干渉も考慮して必要な措置を講ずる必要があるとしている。

なお、以上に示した対策は、限られた情報で構築したモデルを基に、主として定常解析を行った結果としての評価であり、今後さらに検討を充実させることが期待されるとしている。

さらに、汚染水処理対策委員会は、上記の結果を踏まえ次のような整理を行っている。

定常地下水流動解析から導かれる最終到達効果量だけを指標とするのではなく、効果発現までに要する時間、対策実施の難易度(被ばく低減対策を含めた施工の難易度)、建屋内外の水位コントロール、対策実施に伴う新たな水の発生の有無やその汚染の可能性、他の対策への影響、対策の相互関係等の多様な指標を基に対策工を総合的に評価する必要がある。例えば、広域的なフェーシングは、効果は大きいものの効果発現までに時間を要する。このため、広域的なフェーシングのみでは当面の効果が見込めないが、先行する他の施策を補完する役割としては期待できるとしている。

また、建屋周辺で実施する陸側遮水壁やサブドレンは、効果が大きく効果発現も早い。しかし、技術的・社会的に対策実施の難易度が高く、単独の対策に期待すると実現できないリスクが大きくなる。このため、相互に補完する組合せと並行実施を図ることでそのリスクを低下させることができるとしている。

これらの整理から、陸側遮水壁、地下水バイパス、サブドレンなどの組合せによる既存の対策を加速化させることに加え、重層的な対策として時間は要するが効果が期待できる「広域的なフェーシング」、または「追加的な遮水とその内側のフェーシング」を追加的に実施することが効果的であるとしている。

以上に示したポイントを押さえつつ、さらに他の指標についても吟味して総合的な評価を踏まえて重層的な対策を講じていくべきである。なお、以上の既存の対策及び追加的な対策を実施して建屋内への地下水流入を抑制するとともに、建屋の止水(建屋外壁貫通部、建屋間ギャップ、建屋周辺)を実施することで廃炉対策の推進を図る必要があるとしている。

(c) 汚染水を「漏らさない」対策（地下水流動に影響を及ぼさないもの）

汚染水を「漏らさない」対策のうち、局所的な対策等で敷地全体の地下水流動には影響を及ぼさないものについては、個々の対策の効果(リスク低減の程度)等を評価した実施の優先度を検討して、以下の取りまとめを行っている。

ボルト締め型タンクや鋼製横置きタンクから溶接型タンクへのリプレース、タンクエリアの堰のかさ上げ・二重化、排水路の暗渠化、排水口の港湾内へのルート変更、ボルト締め型タンクの底面の漏水対策、津波対策(建屋の防水性向上)、地下水位低下に備えた建屋内水位のコントロール(原子炉建屋深部への排水ポンプの設置等)の優先度が高く直ちに実施すべきである。

次いで、高温焼却炉建屋・プロセス建屋に滞留している汚染水の量の低減、汚染水移送ループの縮小、より安全な配管ルートへの変更、耐放射線性に優れた配管への取替え等を順次実施していくべきである。また、津波対策(防潮堤の設置等の追加対策)、大量の汚染水漏えい発生時に海洋流出を防止するシステムの構築については、調査・検討を行った上で実施を検討すべきであるとしている。

(d) 汚染水を「漏らさない」対策（タンク容量の確保）

汚染水の量が増加して貯留タンクの不足等により汚染水が貯留できなくなる事態を回避するため、汚染水貯留タンクの増設や設置の加速化等は直ちに実施すべきであるとしている。

解析結果(汚染水の増加量)の厳しい条件を想定すると、汚染水貯留容量が逼迫するリスクを排除できず、汚染水の増大を最小化することが必要である。このため、効果が大きく、効果の発現が早い地下水流入抑制対策として、陸側遮水壁、サブドレン、地下水バイパスなどの既存対策を加速することが重要であるとしている。

ただし、タンク容量と汚染水の貯留必要量とのバランスは、施設の運用計画だけではなくALPS 処理水*³(以下、「処理水」)の処理・貯留とも密接に関係する。このため、処理水に残置するトリチウムの処理技術についての検証や、トリチウムを含む処理水のリスクについて総合的に評価する取り組みが重要である。現在のタンク増設計画と貯留必要量の関係を考慮すると、平成 26 年度中はタンク容量の逼迫は起きないと想定されるが、地震時のスロッシングのリスクを考慮してタンクの水位に余裕を確保する場合には、タンク容量の逼迫が早まることから、平成 26 年度のできるだけ早い時期にタンク容量が不足するリスクを見極め、必要に応じ追加対策を講じられるようにする必要があるとしている。

上記までの汚染水処理対策委員会の報告¹⁾では、地下水流入抑制のための重層的な対策として「広域的なフェーシング」、または「追加的な遮水とその内側のフェーシング」の追加的な実施が重要と位置づけられ、その主旨に沿った廃炉・汚染水問題に対する追加対策が原子力災害対策本部(第 33 回、2013 年 12 月 20 日)^{4), 5)}において決定された(表 3-4)。

決定された追加対策のうち「汚染源に水を近づけない」対策の陸側遮水壁については、汚染水処理対策委員会による技術公募が行われ、応募された工法についての検討により凍土

*³トリチウムを除く放射性物質を除去対象とした多核種除去設備 (ALPS) で処理をした水

方式による陸側遮水壁が採用された。採用の経緯を含めた陸側遮水壁の情報については、「3.2.2 個別の汚染水処理対策」で取りまとめた。

表 3-4 廃炉・汚染水問題の追加対策 ⁶⁾より引用

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		
<p>① 汚染源を「取り除く」</p> <p>これまでの主な対策： <ul style="list-style-type: none"> ・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</p> <p>主な追加対策： <ul style="list-style-type: none"> ◆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</p>	<p>② 汚染源に水を「近づけない」</p> <p>これまでの主な対策： <ul style="list-style-type: none"> ・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</p> <p>主な追加対策： <ul style="list-style-type: none"> ◆「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」 <small>※地表面の除染等の線量低減も考慮</small> ◆タンク天板への雨どいの設置 </p>	<p>③ 汚染水を「漏らさない」</p> <p>これまでの主な対策： <ul style="list-style-type: none"> ・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</p> <p>主な追加対策： <ul style="list-style-type: none"> ◆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</p>
<p>➤ 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。</p> <p>➤ 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。</p> <p>➤ 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。</p>		
2. 風評被害対策としての情報発信の一層の強化		
<p>➤ 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。</p>		

汚染水処理対策委員会は、対策案の施工の可能性・難易度(施工性)、効果や効果発現までの時間に着目した検討を継続して実施している。検討に当たっては、現場の条件を考慮する必要があることから、一般社団法人日本建設業連合会から推薦を受けた現場での施工に関する知見と経験を有する委員を加え、現地調査を含めた具体的な対策案の検討を行っている^{7) 8)}。

現地調査では、他工事との関係や地形条件等を考慮した施工の可能性・難易度(施工性)に着目した評価を行い、効果や効果発現までの時間については、対策工の組合せや範囲・形状などを地下水流動解析(定常解析、非定常解析)により評価している(図 3-28)。

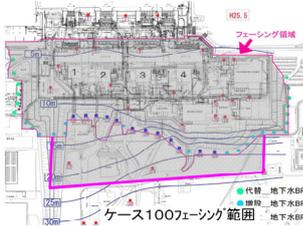
検討の結果、建屋への地下水流入量抑制の観点からは、サブドレン、陸側遮水壁に代替できる対策はないと評価され、効果発現までの時間を考慮すると、陸側遮水壁の構築(及びサブドレンの復旧)を最優先で実施すべきことが再確認された(図 3-29, ケース 6)。

また、サブドレン・陸側遮水壁が機能しない場合も想定し、重層的な対策としてフェーシングについて「追加的な遮水とその内側のフェーシング」と「広域的なフェーシング」の比較を行った結果、広域的なフェーシングと地下水バイパスを組み合わせることで効果発現までの時間が短縮され(図 3-29, ケース 111)、地下水バイパスの運用を前提とすれば、「広域的なフェーシング+地下水バイパス」がより優位であると結論している⁷⁾。

ケース	フェーシング (km ²)	北 (数字は透水係数)	西 (数字は透水係数)	南 (数字は透水係数)	深さ	定常解析(m ³ /日)		非定常		概算想定追加工事費※
						建屋流入量	1-4号流入量	A:300m ³ /日、B:200 ³ /日		
2	-	-	地下水BP(連続孔~12孔)	-	中粒砂岩	291~388	208~300	-	-	-
104-2	-	山側のみ薬注:1×10 ⁻⁵	地下水BP(12孔)	山側のみ薬注:1×10 ⁻⁵	中粒砂岩	388	301	-	-	-
6	0.15(80%)	凍土(凍土内のフェーシングは80%)			粗粒砂岩	126	29	2ヶ月	6ヶ月	-
101-1	0.4	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec)	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec)	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec)	粗粒砂岩	146	120	-	-	数百億以上
101-2	0.4	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec)	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec)	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec)	中粒砂岩	206	164	-	-	百億以上
8-2	1.0	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec);南北は海~敷地境界まで			粗粒砂岩	165	131	3年	10年以上	-
102-2	0.4	薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	粘土壁:1×10 ⁻⁶ (cm/sec)	薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	粗粒砂岩	224	176	12ヶ月	未達	数百億以上
100-2	0.4	-	地下水BP(12孔)	-	中粒砂岩	291	222	-	-	-
102-1	0.4	薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	地下水BP(12孔)	薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	粗粒砂岩	262	205	-	-	数百億程度
103-1	0.4	薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	地下水BP(12孔+増設16孔)	薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	粗粒砂岩	230	177	-	-	数百億以上
103-2	0.4	地下水BP(代替6孔)	地下水BP(12孔+増設16孔)	地下水BP(代替6孔)	粗粒砂岩	223	172	3ヶ月	未達	数十億程度
103-3	0.4	地下水BP(代替6孔)+薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	地下水BP(12孔+増設16孔)	地下水BP(代替5孔)+1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	中粒砂岩	214	168	-	-	百億以上
103-4	0.4	地下水BP(代替8孔)	地下水BP(12孔+増設16孔)	地下水BP(代替5孔)+1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	中粒砂岩	218	172	-	-	数十億以上
104-1	0.4	山側のみ薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	地下水BP(12孔)	山側のみ薬注:1×10 ⁻⁵ (cm/sec)	粗粒砂岩	279	215	-	-	数十億以上
100	0.4	フェーシング:比較の基本ケース(全てに共通:下図左(0.4km ²))			-	346	274	-	-	-
7-2	1.7	広域フェーシング(1.7km ²)			-	159	134	2年	9年	-
110	1.45	広域フェーシング(実際の1.45km ² 程度)			-	167	138	ケース7-2同等と評価	-	数十億程度
110-2	1.15	広域フェーシング(実施計画済みの1.15km ² 程度)			-	310	260	-	-	-
111	1.45	広域フェーシング(実際の1.45km ² 程度)+地下水BP(連続孔~12孔)			-	93~130	68~103	2~6ヶ月	7ヶ月~3.5年	数十億程度

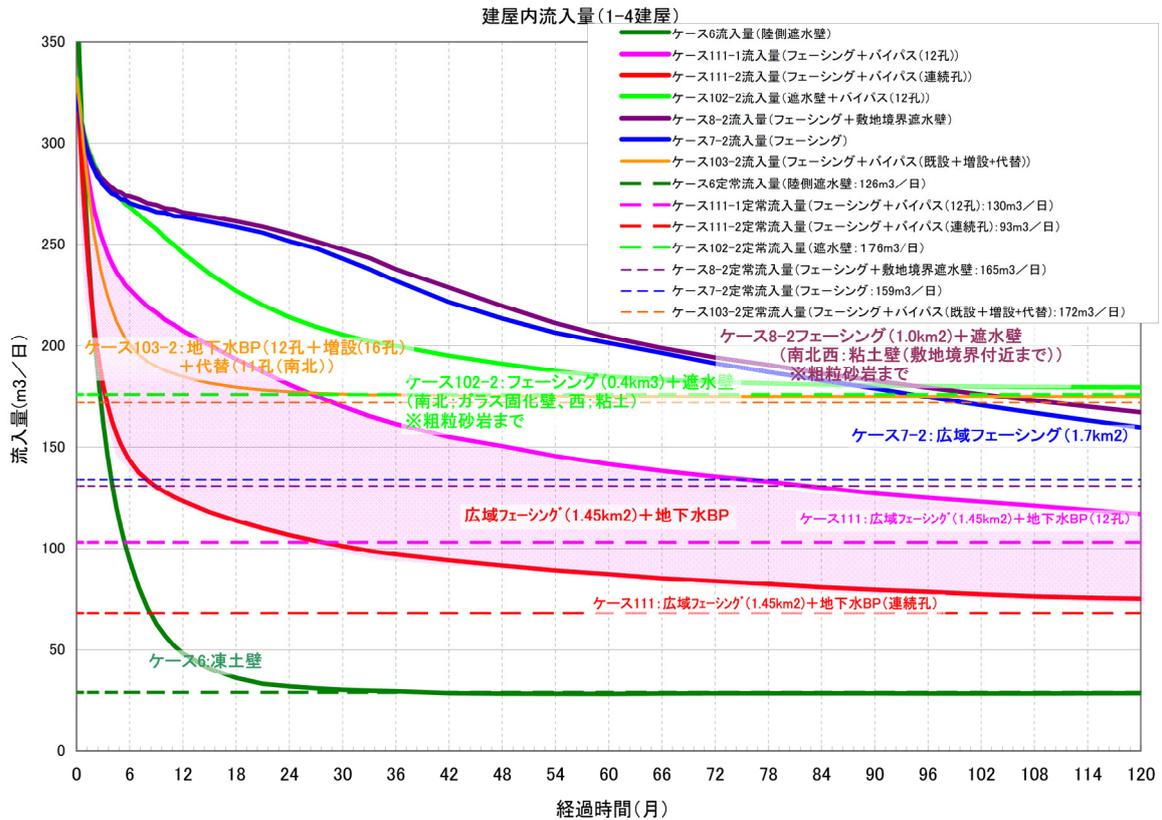
- 施工可能:確実性高
- 施工可能:確実性中
- 施工要検討:確実性低
- 施工困難:確実性極低

確実性の評価には、深部まで対策した際の汚染拡大防止や、他工事との人員の調達調整は考慮していない。



- 建屋流入量:170m³/日以下、1年以内
- 建屋流入量:170~250m³/日、1~3年程度
- 建屋流入量:250~350m³/日、4~8年程度
- 建屋流入量:350m³/日~、9年以上

図 3-28 現地調査結果, 地下水流動解析ケース 7)より引用



(解析ケースは、表 3-3、図 3-28 を参照)

図 3-29 解析結果 (定常解析, 非定常解析) 7)より引用

参考文献

- 1)経済産業省 汚染水処理対策委員会(2013):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～,平成25年12月10日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131210/131210_01d.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 2)日本原子力研究開発機構(2013):福島第一原子力発電所を対象とした地下水流動解析,経済産業省 汚染水処理対策委員会(第11回),平成25年12月10日,資料1-3,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131210/131210_01e.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 3)東京電力(2018):汚染水対策の状況
<http://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watermanagement/>,2018年9月27日掲載確認
- 4)原子力災害対策本部(2013):平成25年度(第33回)原子力災害対策本部会議(第3回)原子力防災会議,議事要旨,平成25年12月20日,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/dai03/gijiyousi.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 5)原子力災害対策本部(2013):東京電力(株)福島第一原子力発電所における廃炉・汚染水問題に対する追加対策(案),平成25年12月20日,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/dai03/siryoul-2.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 6)原子力災害対策本部(2013):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,平成25年12月20日,
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/dai03/siryoul-1.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 7)経済産業省 汚染水処理対策委員会(2014):更なる地下水流入抑制策取りまとめ(案),平成26年4月28日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140428/140428_01h.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 8)汚染水処理対策委員会(2015):地下水の流入抑制のための対策,汚染水処理対策委員会(第3回),平成25年5月30日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130531/130531_01c.pdf,2018年12月10日掲載確認

3.2.2 個別の汚染水処理対策

(1) 汚染源を取り除く対策（海水配管トレンチの汚染水除去及び充填）

2011年4月に2号機のタービン建屋から、5月に3号機のタービン建屋から海水配管トレンチを経由した高濃度汚染水が港湾内へ流出したことにより、トレンチ内はタービン建屋と連通して高濃度汚染水が滞留していることが判明した。この高濃度汚染水流出箇所については、事故初期段階の高濃度汚染水流出箇所の緊急対策(2.2.1(1)参照)により流出を防止しているが、その後の調査により、1号機を除く海水配管トレンチには、高濃度汚染水が滞留して漏れいリスクを抱えたままの状態であることが確認された(図 3-30)。

このため、2013年10月から凍結工法によるタービン建屋とトレンチ接続部の対策工を開始し、2014年11月から水中不分離で長距離流動可能なセメント系充填材を用いたトレンチ内部の閉塞とトレンチ内部の汚染水の移送が行われた。

トレンチ内部の閉塞は、タービン建屋とトレンチの接続部に大型のパッカーと凍結管により止水壁を設置し、汚染水の流れを抑制して汚染水を凍結させる方法で(図 3-31, 図 3-32)、建屋からの海水配管トレンチへの汚染水の供給を遮断した後、海水配管トレンチ内の汚染水の移送(汲上げ)を行い、トレンチ・立坑をコンクリートにより閉塞(充填)する対策が計画された。

従来の凍結工法は、地盤中の間隙水を凍結させて地下水の流れを止める工法で、海水配管トレンチに滞留しているような水を直接凍結させた実績はない。このため、以下のような課題が考えられた²⁾。

- ・水そのものの凍結の可否
- ・凍結によるコンクリート躯体や配管類等への影響
- ・パッカーを設置するためのボーリング掘削時の汚染水の流出
- ・パッカーの膨らみ不良による不完全な止水

これらの課題については、事前の実証試験で止水壁の成立性を確認した後、施工を開始している(図 3-33)。

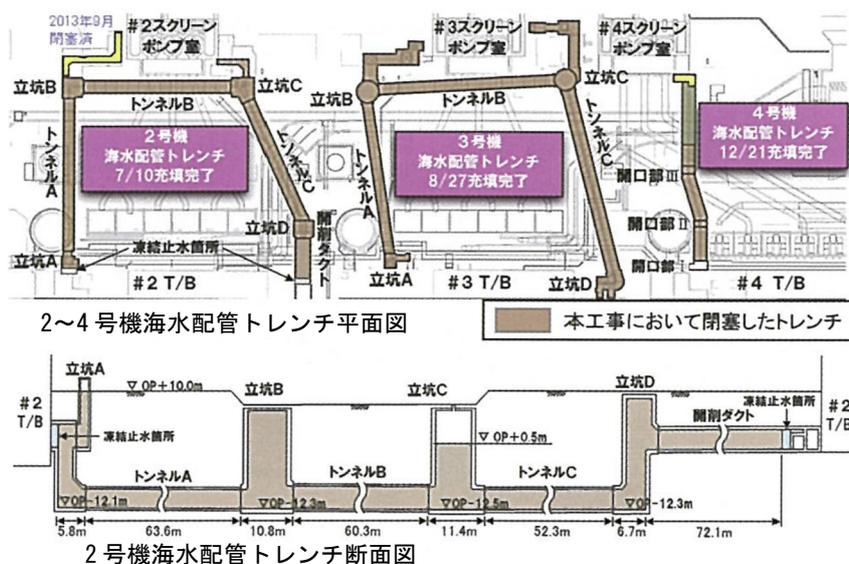


図 3-30 海水配管トレンチの概要 ¹⁾より引用

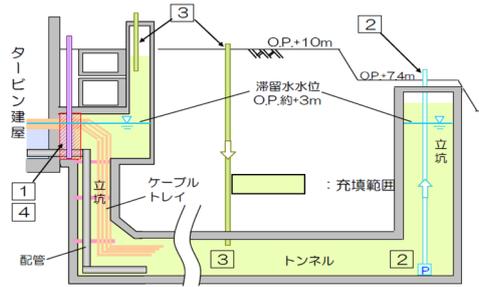
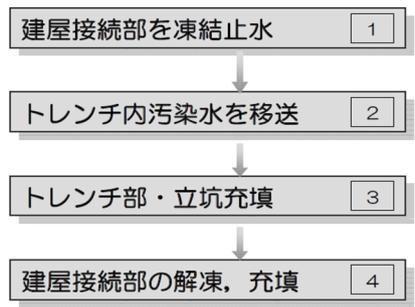


図 3-31 海水配管トレンチ汚染水対策の流れ 2)より引用

【凍結による、タービン建屋と海水配管トレンチ接続部の止水について】

- 地上部からトレンチ頂版に開けた穴に凍結管とパッカー（ナイロン製の袋）を挿入する。
- パッカー内にセメントとベントナイトの混合物を充填し拡張させる。これにより、凍結時に発生する水の対流を抑制し、凍結の向上を図る。
- 凍結管内に冷媒を循環させる。
- パッカー内の間隙水を凍結させるとともに、周囲の水も凍結させ、氷の止水壁を構築する。

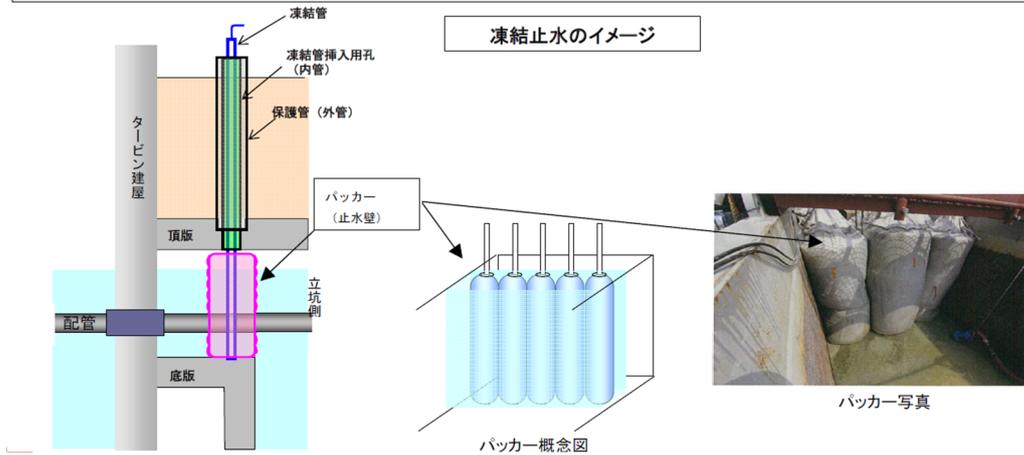


図 3-32 タービン建屋と海水配管トレンチの接続部の凍結（イメージ） 2)より引用

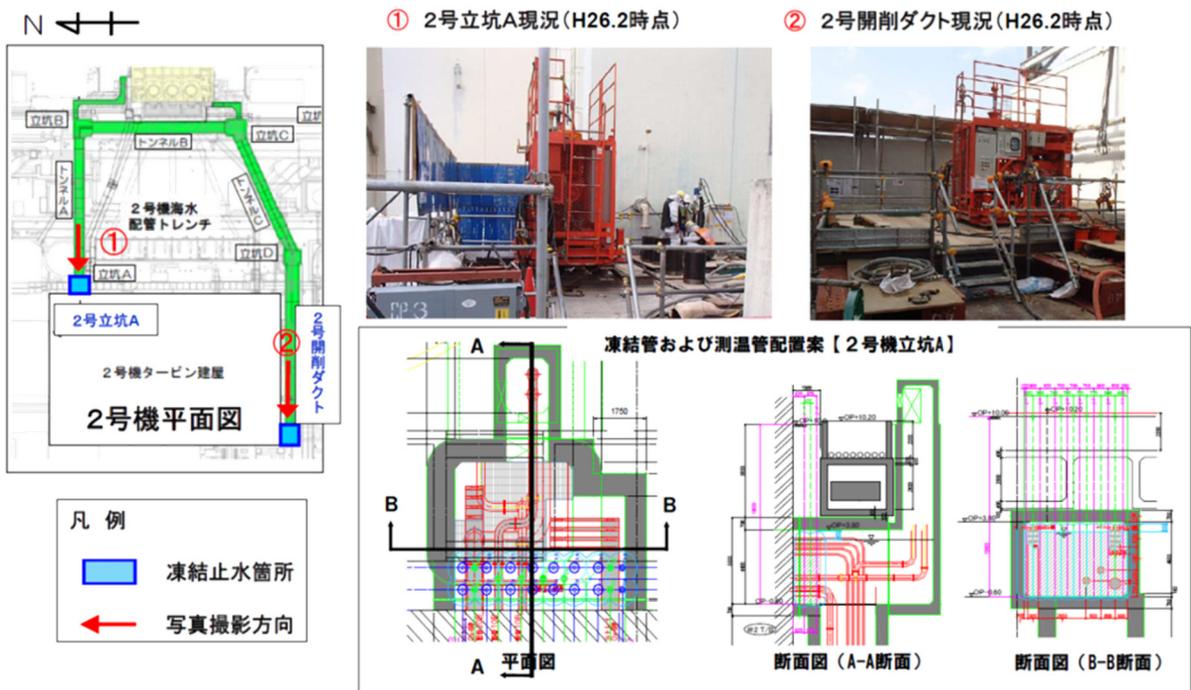


図 3-33 海水配管トレンチ充填工事（2号機）の状況 ³⁾より引用

凍結開始以降、温度データや流向・流速計による測定により凍結効果の確認を行っている。測定の結果、滞留水は建屋側の水位変動に伴い建屋とトレンチ間の貫通部を通じて流出入し、パッカーのない箇所や配管・ケーブルトレイ周辺部に水流が発生して凍結の支障となり、凍結による完全な止水壁の構築には至っていないことが確認された⁴⁾。

このため、原因の調査や対策の検討を行い（詳しい検討経緯は、原子力規制委員会、特定原子力施設監視・評価検討会 第25回～第37回を参照）、充填材料（砕石、コンクリートなど）の投入によるトレンチの閉塞を実施することとなった（図 3-34）。

特定原子力施設監視・評価検討会での検討では、この方法による課題は以下のとおりとされた。

- ①凍結止水付近からの流入、トレンチ内への地下水の流入などが発生する可能性は否定できず、汚染水が存在する状態で閉塞することを考慮することが必要。
- ②閉塞材料については、水中で長距離を流動し性状が変わらない材料が必要。
- ③閉塞中に地下水流入等が生じた場合の対応が必要。
- ④水中充填による閉塞となるため、立坑の水位観測を確実に実施して立坑の水位上昇による汚染水の溢水を防止する管理が必要。

①～③については、水中で長距離流動可能なセメント系充填材の開発により課題の解決を図っている。また、充填箇所の特徴に応じて以下の材料を使用している⁶⁾。

・長距離水中流動特殊充填材

トンネル部を対象に、水中を 85m 流動しても材料分離に伴う品質低下や回収する

汚染水のアルカリ濃度の上昇を生じさせない材料として開発された充填材。

- 低収縮性を有する水中不分離性コンクリート

立坑部の止水性を確保する目的で使用する。高流動コンクリートに相当する間隙通過性と自己充填性を有し、各種混和材(剤)の添加によって水密性と低収縮性を付与した材料。

- 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をもつ。自重によって細かい隙間に入り込むように密度が大きく(4.3 g/cm³)、粒径が小さく(平均粒径 10 μm)、かつ化学的に不活性な硫酸バリウム微粉末を混入した材料。

- 水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をもつ材料。水中を 6m 以上流動して自己充填性にも優れた材料。

- 高流動コンクリート

立坑最上部の「ふた」の役割を担う材料。ひび割れ抑制対策としてフライアッシュセメント、石灰岩骨材に膨張材を添加した材料。

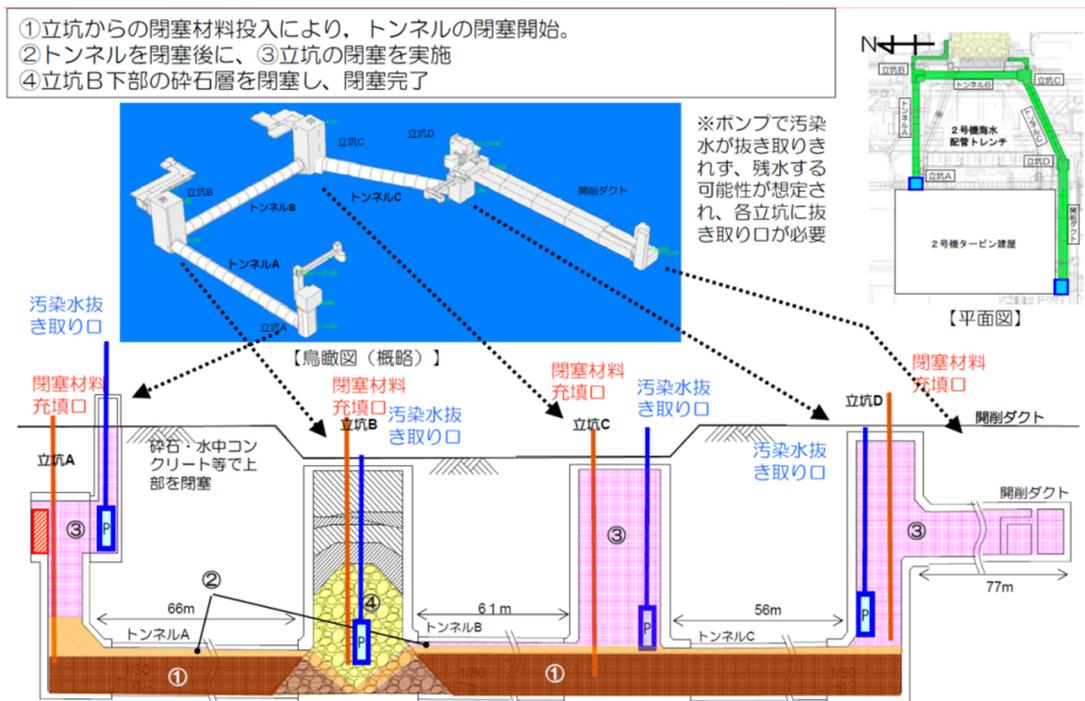


図 3-34 海水配管トレンチの充填の概要図 (2号機海水配管トレンチの例) 5)より引用

なお、海水配管トレンチに隣接するスクリーンポンプ室については(図 3-30)、汚染水の流入を早急に回避する必要があったため、海水配管トレンチの充填に先行して、海水配管トレンチ向けに開発を進めていた充填材を用いた閉塞工事(合計約 20,400 m³の打設、図 3-35)を行い 2015 年 7 月に閉塞作業を完了させた。



図 3-35 スクリーンポンプ室へのコンクリート打設状況 ⁶⁾より引用

(a) 長距離流動可能なセメント系充填材の開発及び施工

高濃度汚染水が滞留した状態でトレンチ内を充填することから、汚染水の漏えいリスク及び削孔作業に伴う作業員の被ばくリスクを考慮して、トンネル部に中間孔を設けず、充填孔と打上がり高さの確認のための調査孔は既設立坑に設ける計画とした。このため、充填材は立坑間(最長区間で80m程度)を水中流動可能で、かつ水中不分離性を有することが条件となる。この条件を満足する材料は、骨材を使用せずセメント・フライアッシュ及び特殊混和剤で構成するものとし、下記の仕様を設定した¹⁾。

- ・モルタルフロー(JIS R 5201:0 打):370~450mm
- ・空気量(JIS A 1128) :5%以下
- ・温度:5~35°C
- ・水中圧縮強度(JIS A 1108) : $\sigma_{28} \geq 2.0 \text{ N/mm}^2$
- ・水中気中強度比(JSCE-D104):0.8以上
- ・ブリーディング率(JSCE-F522) :0%
- ・体積変化(JSCE-F522):0.5%以下

充填材については、室内試験練りにより材料・配合を選定し(表 3-5)、トレンチ内の支障物(ケーブルトレイ, 配管等)を模擬したモックアップ試験で流動性及び充填性の確認を行った上で施工を実施した。

表 3-5 高流動充填材の配合 ¹⁾より引用

水セメント比 W/C (%)	モルタル フロー (mm)	単位量(kg/m ³)			高機能特殊 増粘剤 VT (kg) [※]	高性能減水材 SP (kg) [※]
		水 W	セメント C	混和剤 F		
189	370~450	660 (地下水)	350	513 (フライアッシュ II種)	29.7 (W×4.5wt%)	38.8 (W×4.5wt%)

W: 地下水

C: 高炉セメントB種(密度3.04g/cm³)

VT: 高機能特殊増粘剤(液体界面活性剤)

※水の一部として計量

F: フライアッシュ (JIS-II種)(密度2.31g/cm³)

SP: 高性能減水材(ポリカルボン酸系)

施工ではトレンチ立坑の頂版に注入孔を設け、以下の構成の設備を各海水配管トレンチの構造に適合させて設置した(図 3-36)。

- ・充填孔: 充填用の配管を入れる孔(φ 350mm 程度)
- ・観測孔: 充填材の打設高さの測定(有孔管を挿入)と水位計を設置する孔(φ 200mm 程度)
- ・ポンプ孔: 汚染水を汲上げて移送するポンプを挿入設置する孔(φ 450mm 程度)

施工時の課題としては、トレンチ内の汚染水が被圧している区間で削孔時に汚染水が地中に流出すること、汚染水がケーシングの根元から地中に流出すること等が考えられた。

このため、前者については、薬液注入により地下水位以深の地盤を改良した後、図 3-37 に示すマルチステップボーリング工法による削孔で流出防止対策が行われた。また、後者については、削孔部より海側に観測井戸を設置して水質を監視する対策がとられた。

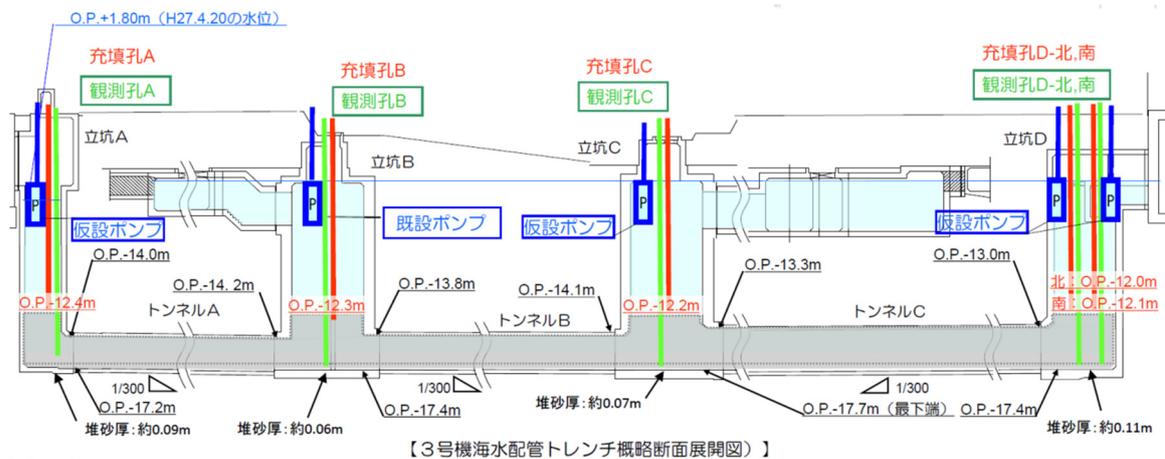


図 3-36 施工方法 (3号機海水配管トレンチの例) 7)より引用

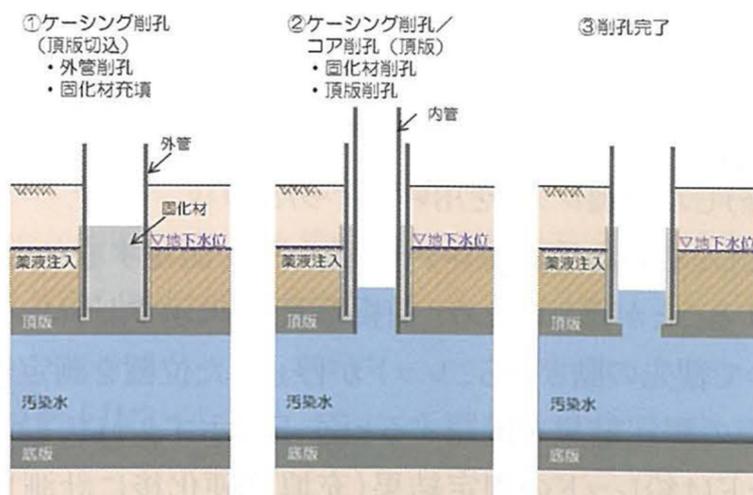


図 3-37 マルチステップボーリング工法 1)より引用

施工は、各段階ごとの揚水試験(図 3-38)による水位変動(連通)の有無で充填効果を確認しながら実施し、合計約 11,270m³の充填を完了した(表 3-6)。

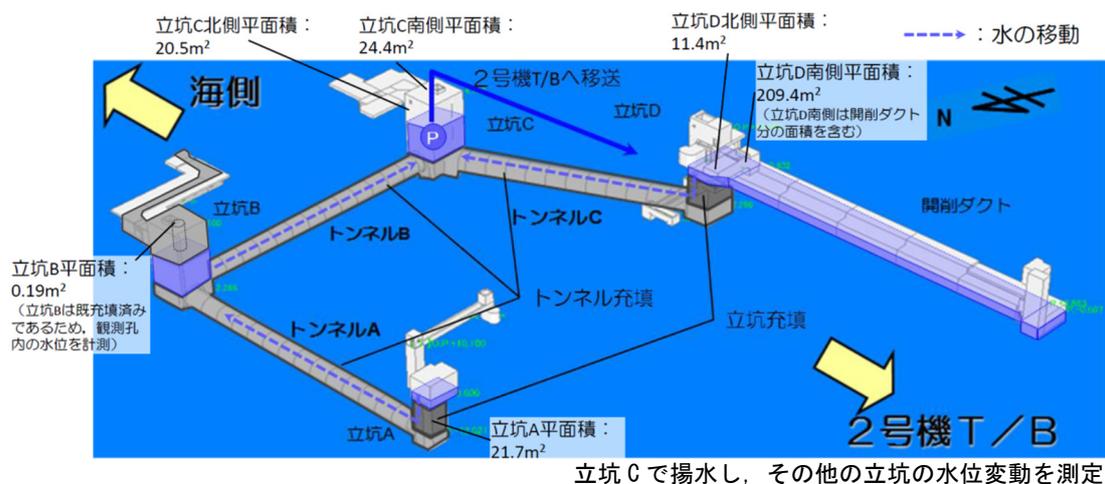


図 3-38 揚水試験概要図 (2号機の例) 7)より引用

表 3-6 施工実績 (2015年10月13日時点) 8)より引用

号機	2号機	3号機	4号機
状況	<ul style="list-style-type: none"> トンネル部充填: 12/18完了 トレンチ内汚染水除去: 6/30完了 立坑充填: 9/11完了 立坑C水位・水質監視: 実施中 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル部充填: 4/8完了 トレンチ内汚染水除去: 7/30完了 立坑充填: 8/27完了 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル部(開口部Ⅰ～Ⅲ間)充填: 3/21完了 開口部Ⅱ・Ⅲ充填: 4/28完了
残滞留水量 (除去進捗率)	0m ³ (100%)	0m ³ (100%)	約60m ³ (約91%)
充填量	約4,660m ³	約5,980m ³	約630m ³

なお、海水配管トレンチの汚染水除去及び充填に関しては、以下の学会等から表彰が行われた。

日本コンクリート工学会

2017年 日本コンクリート工学会賞 技術賞

福島第一原子力発電所 汚染水対策工事に用いられた「長距離水中流動特殊充填材」

土木学会

平成28年度 土木学会賞 技術賞・Iグループ

福島第一原子力発電所汚染水対策工事—海水配管トレンチ/スクリーンポンプ室閉塞工事—

内閣総理大臣感謝状

2016年度 福島第一原子力発電所海水配管トレンチ内部閉塞工事

(b) 被ばく低減対策

高線量環境での作業となるため、現地充填材製造プラント(200~300m³/日の打設に対応できる供給能力)は、発電所全体の工事計画に整合したヤード(空間線量が低い5号機, 6号機側)に設置してプラント運転員の被ばく線量低減を図るとともに、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)の設置等の

被ばく低減対策が実施された(図 3-39)。



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 3-39 被ばく低減対策 ¹⁾より引用

参考文献

- 1)日比康生, 柳井修司(2016):地中トレンチ閉塞における超高流動材料の開発と施工ー2~4号機海水配管トレンチ閉塞工事ー, 土木施工, Vol.57, No.3, オフィス・スペース
- 2)東京電力(2014):2, 3号機海水配管トレンチ建屋接続部止水工事の概要について, 平成26年3月31日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第19回), 資料1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051042.pdf>, 2018年12月1日掲載確認
- 3)東京電力(2014):2, 3号機海水配管トレンチ建屋接続部止水工事進捗状況について, 平成26年4月18日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第20回), 資料7,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051068.pdf>, 2018年12月1日掲載確認
- 4)東京電力(2014):2, 3号機海水配管トレンチ建屋接続部止水工事進捗状況について, 平成26年7月7日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第24回), 資料1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051115.pdf>, 2018年12月1日掲載確認
- 5)東京電力(2014):2, 3号機海水配管トレンチ建屋接続部止水工事の進捗について, 平成26年10月3日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第27回), 資料1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000126142.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 6)日比康生, 柳井修司, 西郡一雅, 相馬裕(2016):福島第一原子力発電所 汚染水対策工事 海水配管トレンチとスクリーンポンプ室の閉塞, コンクリート工学, 54巻6号
- 7)東京電力(2015):海水配管トレンチ汚染水対策工事の進捗状況について, 2015年4月22日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第34回), 資料1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000104663.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 8)東京電力(2015):2, 3号機海水配管トレンチ汚染水対策工事の完了について, 2015年10月14日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第37回), 資料1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000126142.pdf>, 2018年12月10日掲載確認

(2) 汚染源に水を近づけない対策

(a) 地下水バイパス

地下水バイパスは、2011年下期から1～4号機建屋周りの地下水位低下対策として検討が進められていた(図 3-40)。

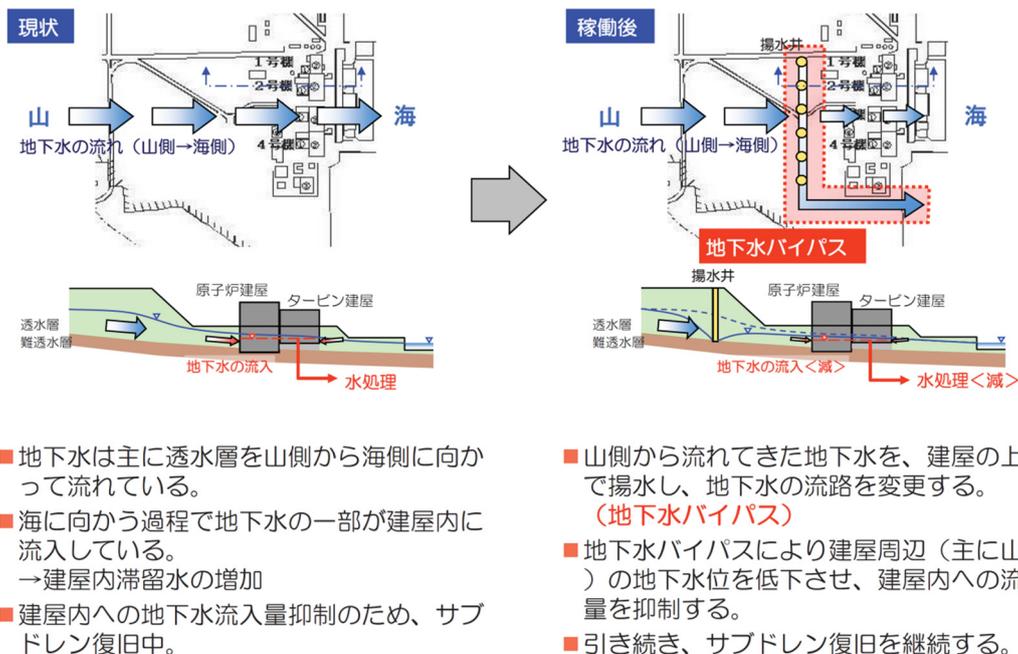


図 3-40 地下水バイパスのコンセプト 1)より引用

1～4号機建屋の滞留水については、今後の燃料取り出しに向けて段階的に水位を低下させていく計画であり、これにあわせてサブドレンを復旧し、建屋内へ流入する地下水も低減させる必要がある。検討実施時点では、サブドレンから汲上げた地下水を浄化して、海洋放出することについての社会的同意が得られる見通しがたっていなかった。

このような現状を踏まえ、地下水は山側から海側に向かって流下していることから、汚染リスクが低いと考えられる建屋山側で地下水を汲上げ、建屋への地下水流入を抑制して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成立性について、以下の項目の検討が行われた。

① 地下水バイパスの効果

東京電力において用いられている既存の3次元地質構造モデルに基づいた地下水流動解析により、揚水井の本数、設置位置、施工深度、汲上げ量と建屋内に流入する地下水の低減効果等について、事故直後から検討が行われていた(図 3-41)。

② 建屋山側の水質の確認

震災直後に建屋の山側で実施された調査ボーリング(3孔、図 3-15)の地下水の定期的な水質分析結果から、建屋山側の地下水の汚染の可能性は少ないものと判断された。また、地下水バイパスの揚水井削孔後の水質検査でも、地下水は汚染されていないこと

が確認された¹⁾。

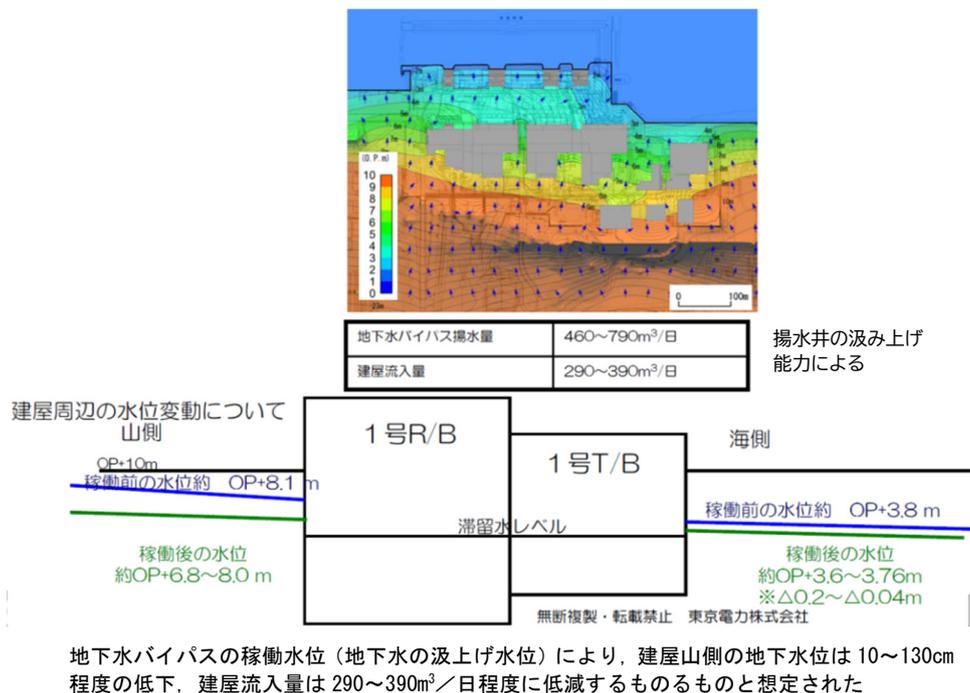


図 3-41 地下水バイパスの効果予測（浸透流解析結果：建屋周辺の地下水位）²⁾より引用・一部改変

③揚水井設置工事の成立性

施工箇所は発電所山側の O.P.+35m 盤の台地上に位置しているため、発電所建屋からのスカイシャインや残置されている高線量がれきなどによる高線量環境下での施工となる。このため、十分な被ばく低減対策（大型土嚢による遮へい、施工時間の短縮など）を考慮した施工方法の工夫により工事の成立性を確認している。

地下水バイパスは、12本の揚水井を帯水層（中粒砂岩（I層））の下端部まで掘削し、汲上げた地下水を3系統の配管ルートで移送する設備とし（図 3-42、図 3-43）、汲上げ試験、水質の確認を行った後、2014年4月9日から順次稼働し、2014年5月21日から本格的な運用を開始した³⁾。



No.3揚水井および揚水・移送設備



No.9揚水井および揚水・移送設備

図 3-42 地下水バイパス 揚水井の設備²⁾より引用

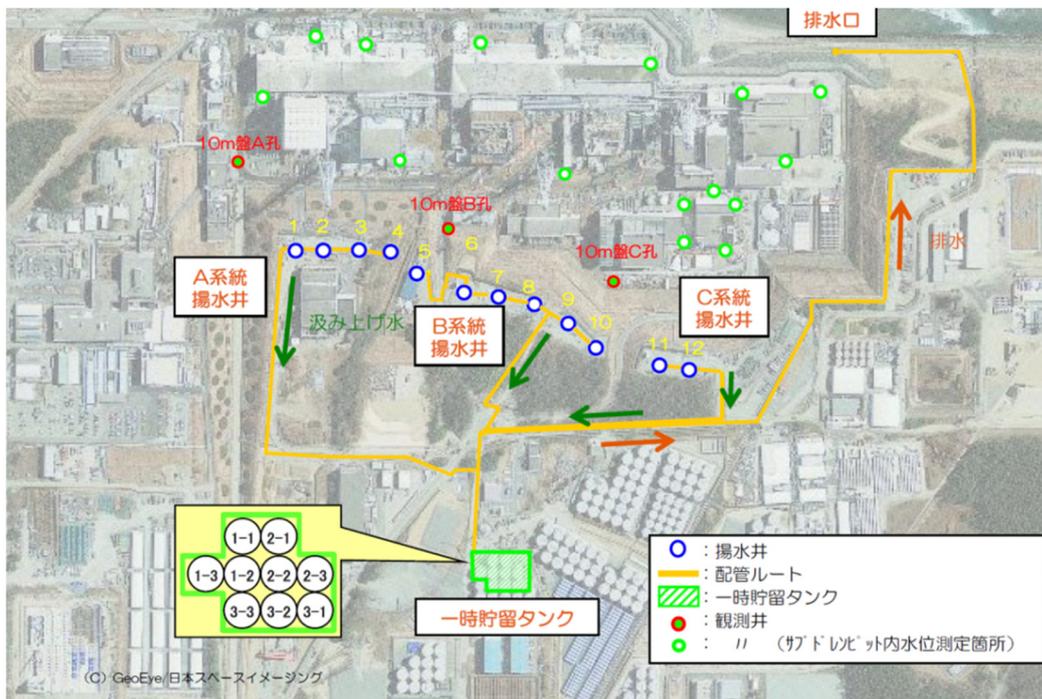


図 3-43 地下水バイパス設備全体平面図 2)より引用

地下水バイパスの運用方法を以下に示す。

①運用の基本方針(表 3-7)

- ・汲上げた地下水は一旦タンクに貯留し、水質が運用目標を満足していることを確認した上で排水する。
- ・揚水井やタンクに貯留した水を定期的にモニタリングするとともに、第三者機関による分析を実施する。

表 3-7 地下水バイパス水の管理方法 2)より引用

		セシウム134	セシウム137	全ベータ (ストロンチウム90)	トリチウム	告示濃度限度に 対する割合の和 (裕度)
運用目標		1 Bq/L	1 Bq/L	全ベータ: 5 Bq/L	1,500 Bq/L	0.22
定例 モニタリング	一時貯留 タンク	—	—	全ベータ 1回/10日 ND(検出限界値) < 1 Bq/L	—	
	1回/月 詳細分析(セシウム、ストロンチウム90、トリチウム、全アルファ、全ベータ)					
	揚水井	—	—	全ベータ 1回/週 No.7,12:ND < 5 Bq/L その他 :ND < 15 Bq/L	1回/週	

※運用目標は、上記のほか、セシウム134,137に関する運用目標を確認する計測を行った際、その他の人工ガンマ核種が検出されていないこと、また、これまでの揚水井水の詳細分析結果を参考に、他の核種も含めて告示濃度を満たすことも確認する。

②揚水井の運用

- ・地下水バイパスの運用は段階的に揚水井水位を低下させ、建屋周辺の地下水位低下状況及び汲上げ水の水質等のモニタリングを行いながら、建屋内滞留水が建屋外に漏れ出さないように慎重な水位管理を実施する(図 3-44, 図 3-45)。
- ・建屋周辺のサブドレンや原子炉建屋と揚水井の間の観測孔を利用して、地下水の水質を確認する。

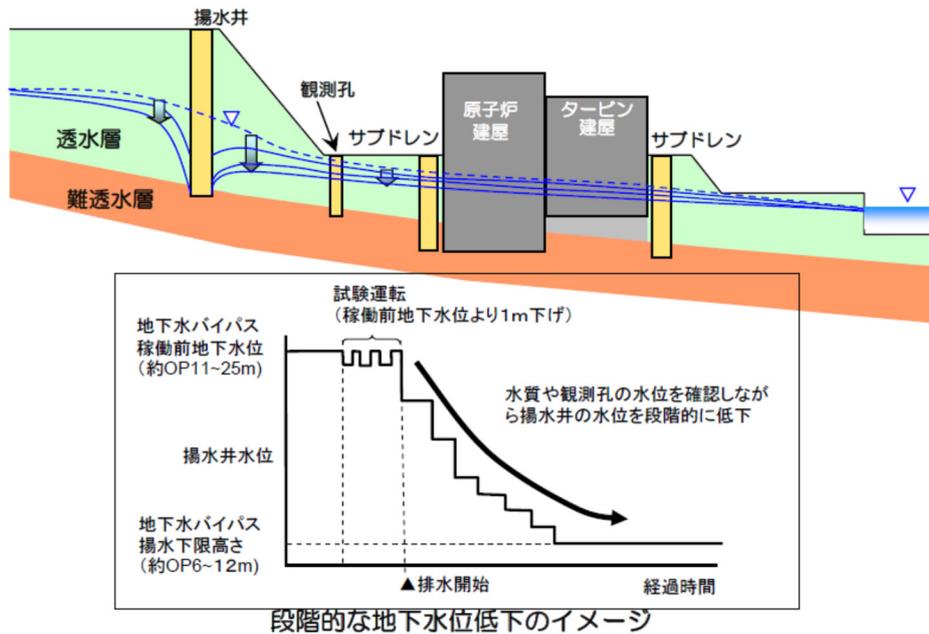


図 3-44 地下水バイパス揚水井の運用イメージ 2)より引用

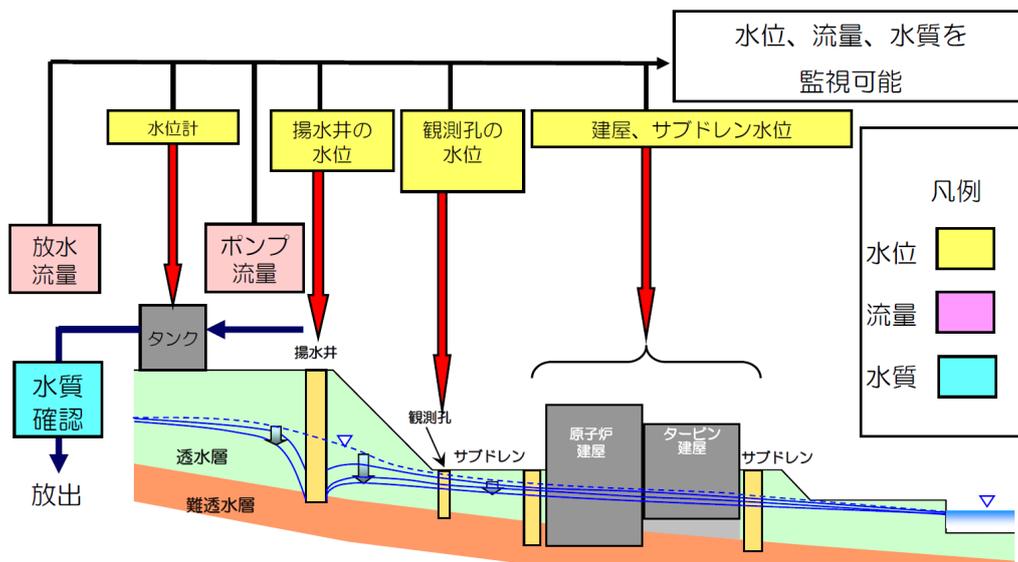


図 3-45 基本的な水位等の監視計画 2)より引用

③タンクの運用

- ・タンクは Gr1~Gr3 の 3 系列からなり、各系列に 3 基(合計 9 基)のタンクを設置し、図

3-46 に示す方法(貯留→分析→排水のサイクル)で運用を行う。

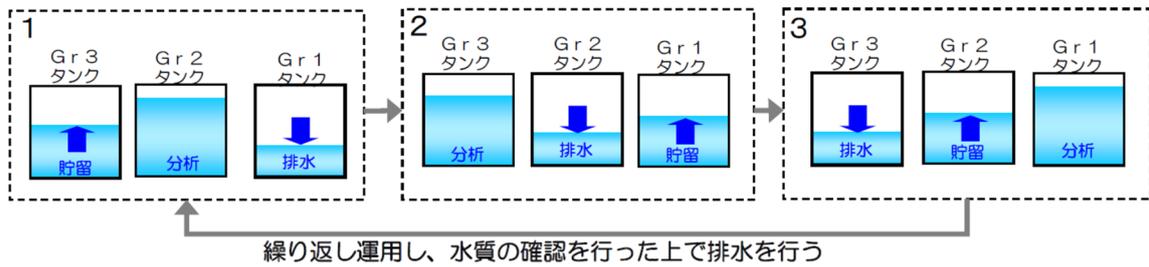


図 3-46 地下水バイパス貯留タンクの運用イメージ²⁾より引用

地下水バイパスの稼働(2014年4月9日)から約半年後(2014年10月14日)の建屋流入量の低減は、高温焼却炉建屋の止水に加え地下水バイパスの稼働により、合計 $90\text{m}^3/\text{日}$ 程度の建屋流入量の抑制効果があるものと評価された(図 3-47)。

地下水バイパスの運用開始以降、地下水の流れの上流側に位置する汚染水貯留タンクや地下貯水槽の汚染水漏えい⁴⁾の影響により、一時的にトリチウム濃度が上昇して一部の揚水井の汲上げを停止した時期もあったが、運用開始以降ほぼ順調に稼働し、2018年11月27日までの累積排水実績は $426,198\text{m}^3$ となっている⁵⁾。

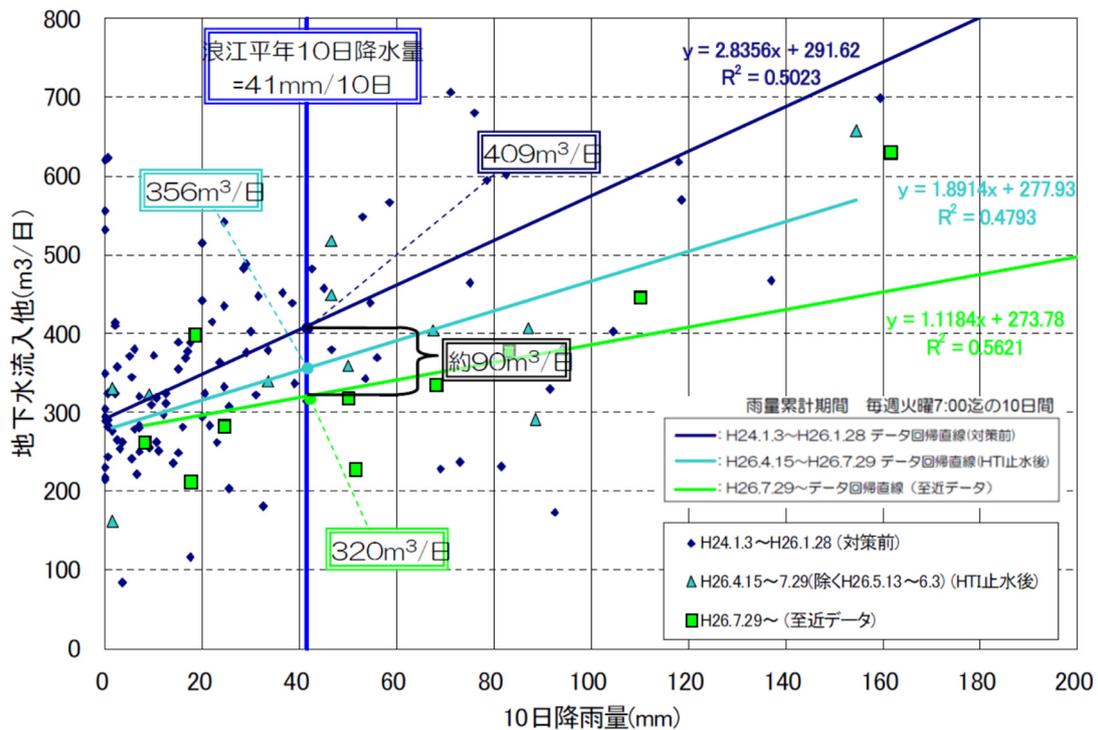


図 3-47 地下水バイパスの建屋流入量への抑制効果²⁾より引用

参考文献

- 1)東京電力(2013)：地下水バイパスの進捗状況，経済産業省 汚染水処理対策委員会（第5回），平成25年8月23日，資料2-2，
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130823/130823_01e.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 2)東京電力（2014）：地下水バイパスの稼働状況について，平成26年10月31日，原子力規制委員会，特定原子力施設監視・評価検討会（第28回），資料5，
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051155.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 3)廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(2018)：中長期ロードマップ進捗状況，廃炉・汚染水対策の概要，2018年9月6日，
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/09/2-1.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 4)原子力規制庁（2013）：東京電力福島第一原子力発電所における地下貯水槽からの漏えいについて，原子力規制委員会，特定原子力施設監視・評価検討会（第8回），平成25年4月12日，資料1-1，
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000050905.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 5)廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(2018)：中長期ロードマップ進捗状況，廃炉・汚染水対策の概要，2018年11月29日，
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/12/2-1.pdf>, 2018年12月10日掲載確認

(b) サブドレン

発電所の主要建屋については、地震時の浮力低減(地下水水位低下)と建屋内への地下水流入抑制を目的として、ピット内のポンプにより中粒砂岩(I層)の地下水(不圧地下水)を汲上げるサブドレンが、建屋近傍に93基(このうち、1~4号機建屋周りには57基、一部のサブドレンは底部で横引き管により接続)設置されていた(図3-48)。

サブドレン設備は、津波やその後の水素爆発によるポンプ等の損傷、がれきの混入、さらに高濃度汚染水の滞留などのため運転を停止していた(図3-48)。このため、建屋周囲の地下水水位が上昇し、建屋への地下水流入増加の要因となっていた。

また、地下水バイパスの運転だけでは、建屋周囲の地下水水位を十分にコントロールすることができないため、サブドレン設備を復旧して建屋周囲の地下水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となっていた。

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は、サブドレンの稼働水位調整(低下)による地下水水位のコントロールが重要となる。このため、サブドレンについては、陸側遮水壁や表面フェーシング等のその他の対策工を考慮した地下水流動解析により、地下水水位の低下量、汲上げ量などの予測を行い、サブドレンの復旧や新設、浄化設備の容量等の検討を踏まえ、2012年から以下の方針で再稼働に向けた準備が開始された^{1) 2)}。

- 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、近接位置で施工性確認のための試験掘削を行い、施工の可能性を確認した後、ピットを新設して稼働させる(15基、図3-49、図3-50)。
- ③サブドレン汲上げ水の移送・処理設備は、サブドレンピットの汲上げ水の他に、海側遮水壁と既設護岸の間に設置される地下水ドレンからの汲上げ水を対象とする。汲上げた水に含まれている放射性核種(トリチウムを除く)を十分低い濃度になるまで除去し、浄化された水は水質を確認した後に排水できる設備構成とする(図3-51)。
- ④本格運転に際しては、以下の事項に留意する。
 - ・安定的な水位を維持した運転を行うこと(サブドレンの安定運転)。
 - ・地下水水位の高い山側サブドレンから運転させること(運転順序)。
 - ・建屋水位と地下水の逆転(建屋水位よりも地下水水位が低くなり、建屋内汚染水の地山への流出)を発生させないこと。
 - ・浄化性能の確認等の安定運転確認試験を行った後、本格運転に移行すること。

安定運転確認試験で安定的な水位を維持した運転と浄化性能等を確認した後、2015年9月14日より本格運転を開始した。2018年11月27日までに浄化した地下水の累積排水量の実績は、634,052m³となっている⁶⁾。

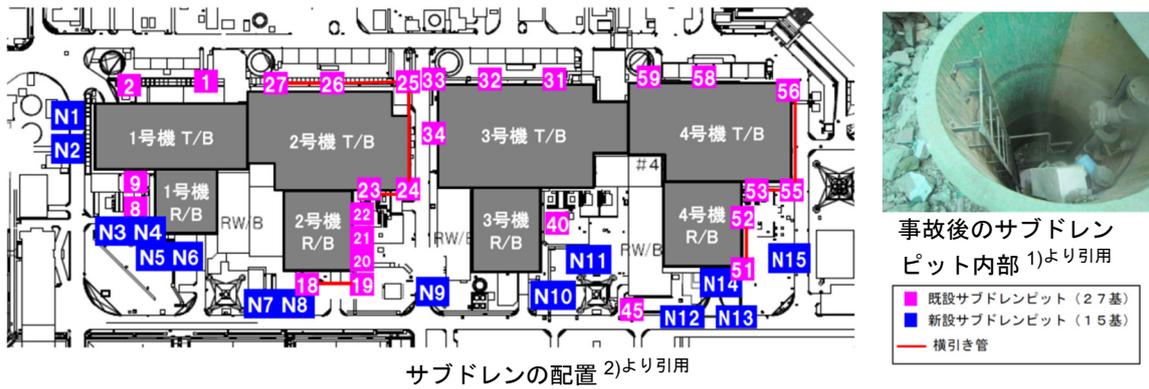


図 3-48 サブドレンの配置と事故後の状況

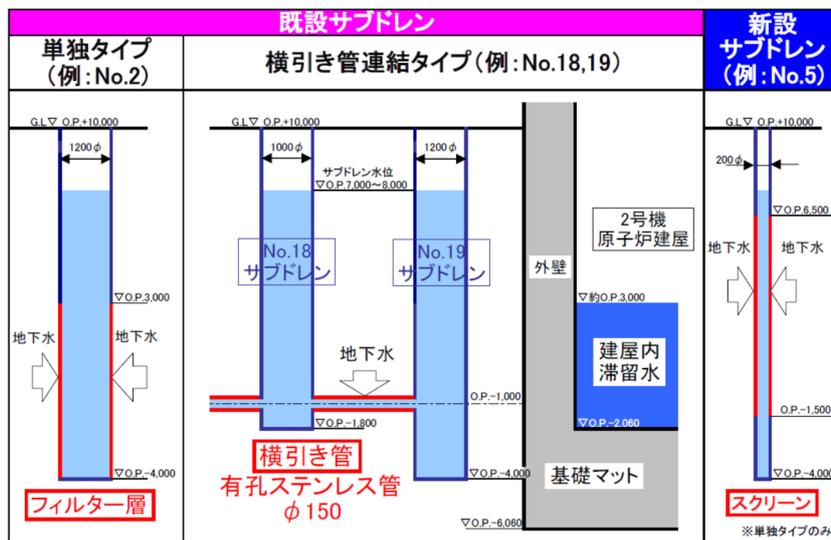


図 3-49 サブドレンの構造 (既設及び新設) の概要図 2)より引用

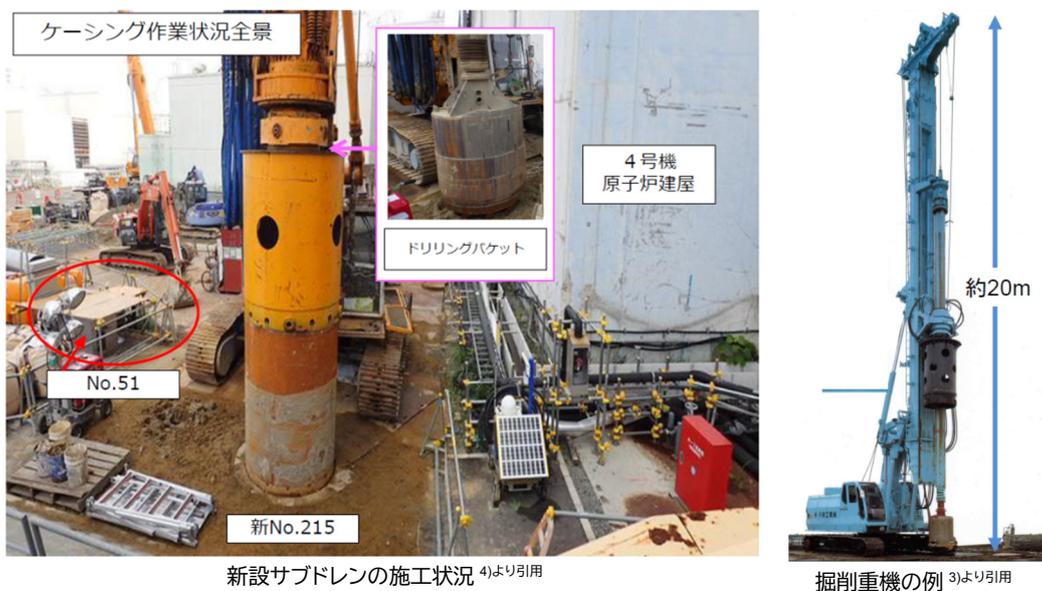
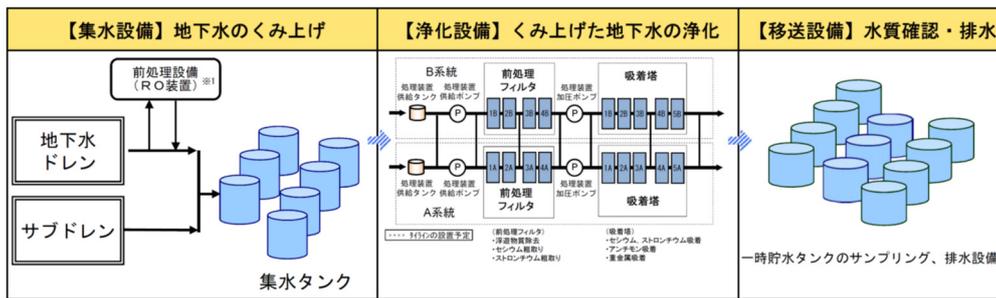


図 3-50 新設サブドレンの施工状況

・設備構成



・ピット配置図

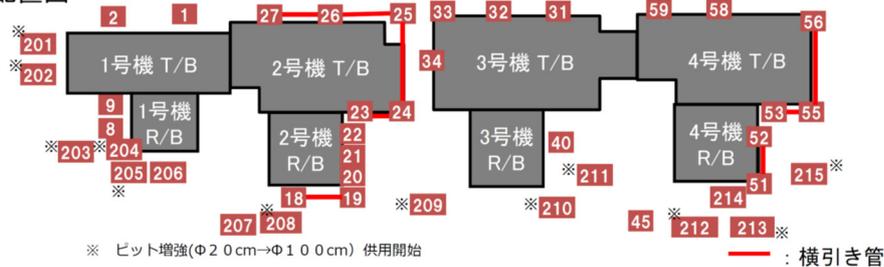


図 3-51 サブドレンの設備構成 5)より引用

サブドレン汲上げ時の最低水位(L値)の推移を図 3-52 に示す。サブドレンの本格運転以降、建屋周辺の地下水位の状況及び汲上げ量の増減に着目しながら、段階的にL値の低下(汲上げ水位の低下)を実施して、建屋周辺の地下水位のコントロールを図っている。

なお、現在は大雨時でも確実に建屋周辺地下水位の上昇を抑え、建屋への地下水流入を抑制するため、サブドレン信頼性向上対策(サブドレン設備全体の増強(新設ピットの増強(大口径化), サブドレンの増設, 未復旧サブドレンの復旧), 移送管の増強, 集水タンク・一時貯留タンクの増設, 浄化設備の2系列化)が進められている(図 3-53)。

また、サブドレンをはじめとした水処理設備(地下水バイパス, 地下水ドレンなど)の共通の課題である配管等の付着物による汲上げ能力の低下については、定期的な清掃(付着物の除去, 図 3-54)と共有配管の単独化などの対策が取られている(図 3-55)。

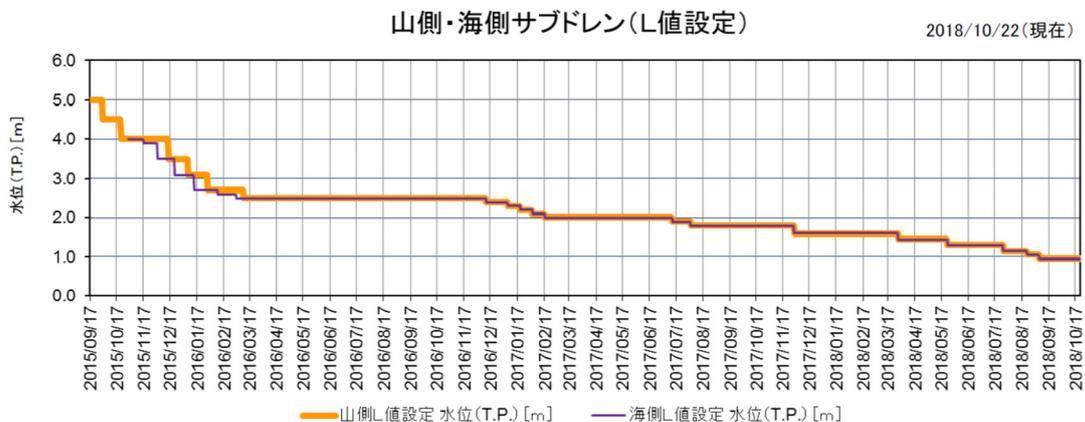


図 3-52 サブドレン L 値の推移 5)より引用

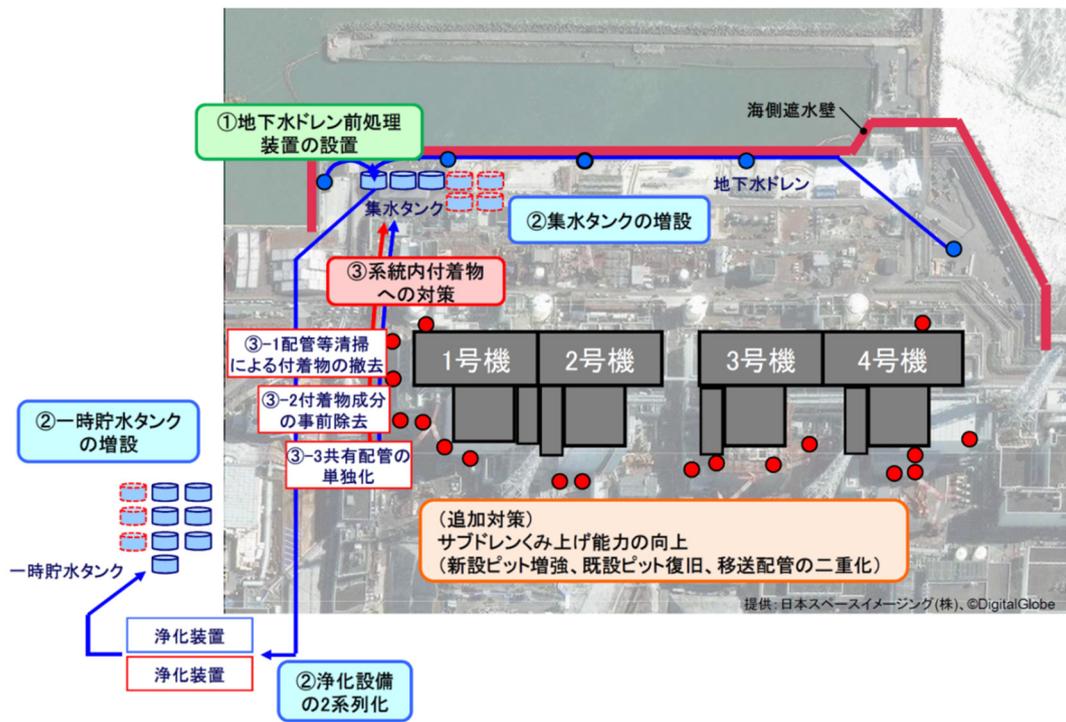


図 3-53 サブドレンの強化対策 3)より引用

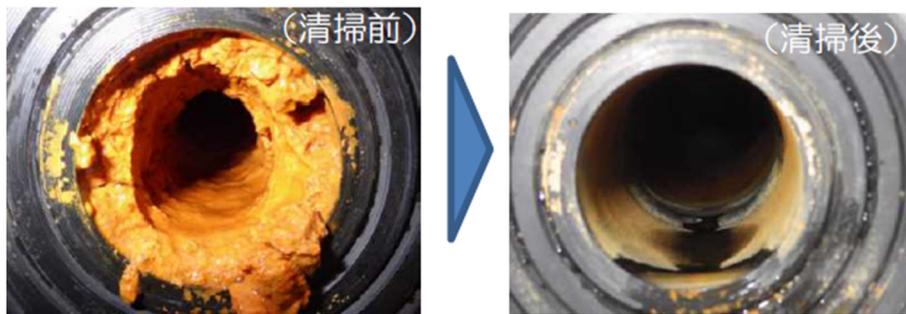


図 3-54 配管の清掃状況 7)より引用

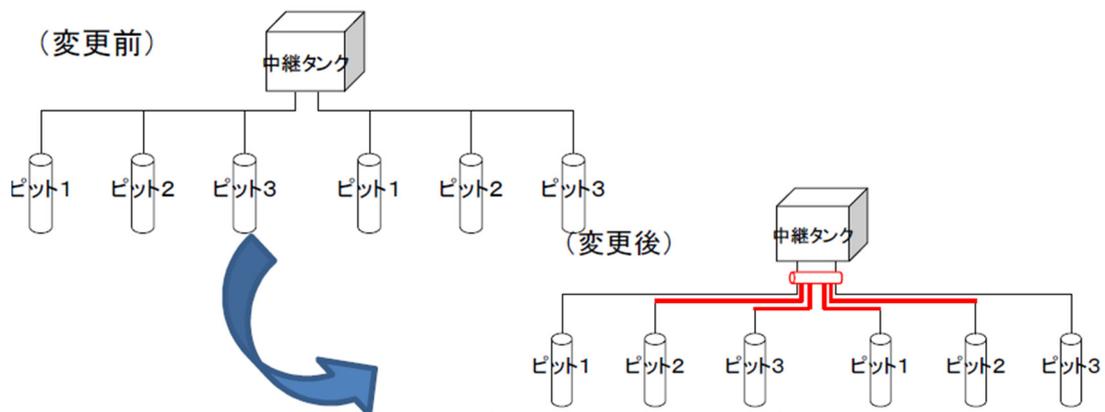


図 3-55 配管単独化のイメージ 7)より引用

参考文献

- 1)東京電力(2013)：地下水流入抑制のための対応方策，経済産業省 汚染水処理対策委員会（第1回），平成25年4月26日，資料3-1，
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130426/130426_02h.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 2)東京電力(2014)：サブドレン他水処理施設の状況について，平成26年10月31日，原子力規制委員会，特定原子力施設監視・評価検討会（第28回），資料2，
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051152.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 3)東京電力(2016)：サブドレン他強化対策工程について，2016年11月18日，原子力規制委員会，特定原子力施設監視・評価検討会（第48回），資料3，
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000170572.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 4)東京電力(2017)：サブドレン No.51 の水位低下について（原因と対策），2017年10月30日，原子力規制委員会，特定原子力施設監視・評価検討会（第56回），資料4，
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000170572.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 5)東京電力(2018)：サブドレン他水処理施設の運用状況等，中長期ロードマップ進捗状況，汚染水対策，2018年10月25日，東京電力福島第一原子力発電所廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第59回），資料3-1，
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/11/3-1-4.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 6)東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議／事務局会議(2018)：中長期ロードマップ進捗状況，廃炉・汚染水対策の概要，2018年11月29日，
<https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/decommissioning/committee/osensuitaisakuteam/2018/12/2-1.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 7)東京電力(2016)：福島第一原子力発電所の最近の状況，経済産業省 汚染水処理対策委員会（第18回），2016年9月27日，資料1，
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/osensuisyori/2016/pdf/0927_01c.pdf, 2018年12月10日掲載確認

(c) 陸側遮水壁

(i) 凍土方式による陸側遮水壁の概要

1～4号機建屋では、地下水が流れ込み新たな建屋内滞留水が発生している。建屋内滞留水は回収して浄化処理した後、冷却水として一部再利用されているが、増加分はタンクを増設して貯留し続けている。

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（深さ約30m、全長約1,500m）で取り囲み、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の増加を低減させる（図 3-56）。

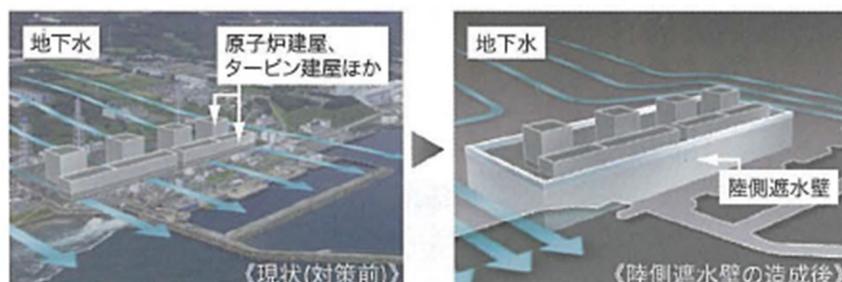


図 3-56 陸側遮水壁の造成と地下水流れのイメージ 1)より引用

陸側遮水壁の構築は、国の補助事業（平成 25 年度 汚染水処理対策事業のうち凍土方式遮水壁大規模整備実証事業²⁾）として実施され、凍結管を地中に約 1m 間隔で鉛直に設置し、ブラインと呼ばれる約 -30℃ の冷却媒体（塩化カルシウム 30% 水溶液）を循環させ、管周りの土を凍らせ太く成長させることで連続した止水壁を形成する工法である（図 3-57）。ブラインは凍結内管の中を下り凍結外管を上昇する。この凍結に必要な内外の二重管を保護管内に収めた三重管構造とすることで、長期運用期間中に必要に応じて凍結管の交換を可能にしている。保護管は、削孔管の底部をパッカーで閉塞して地中に残置する（図 3-58）。陸側遮水壁の設備構成は、図 3-59 及び表 3-8 に示すとおりである。

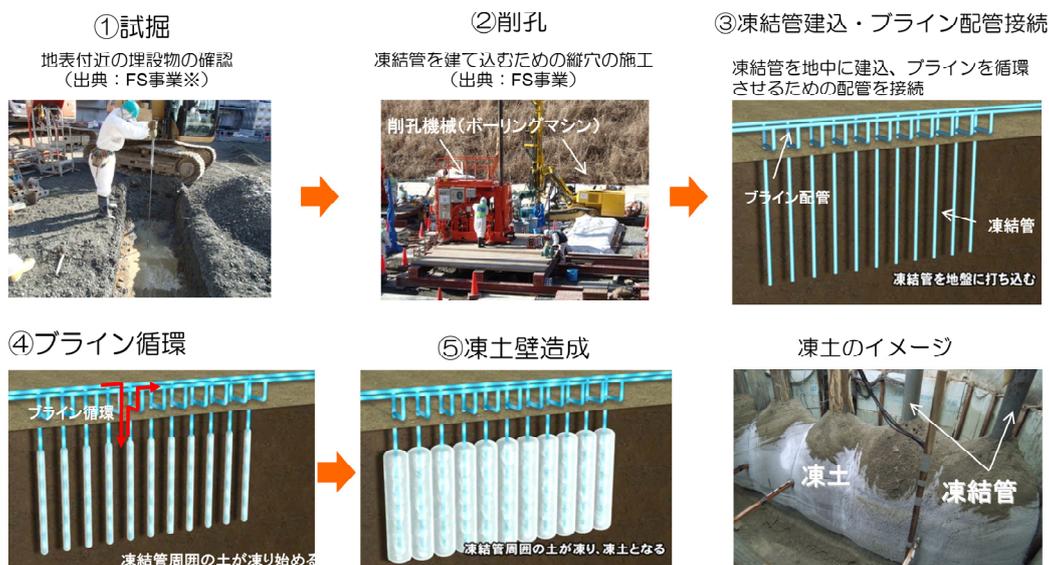


図 3-57 凍土造成の手順及び凍土のイメージ 3)より引用

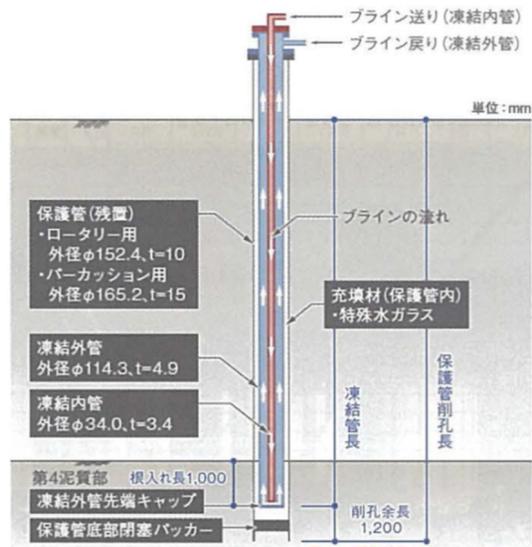


図 3-58 凍結管の構造断面 1)より引用

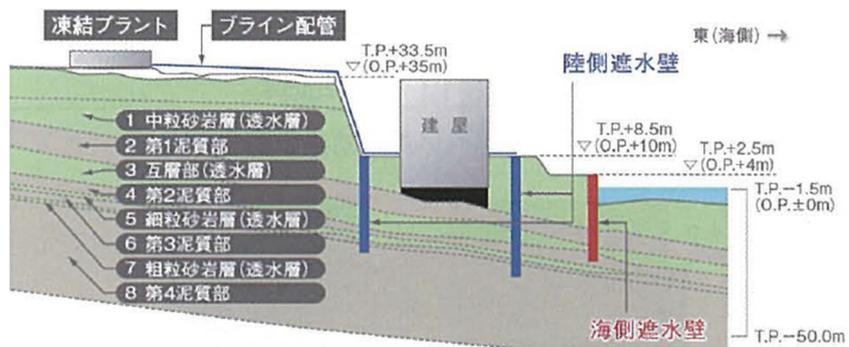
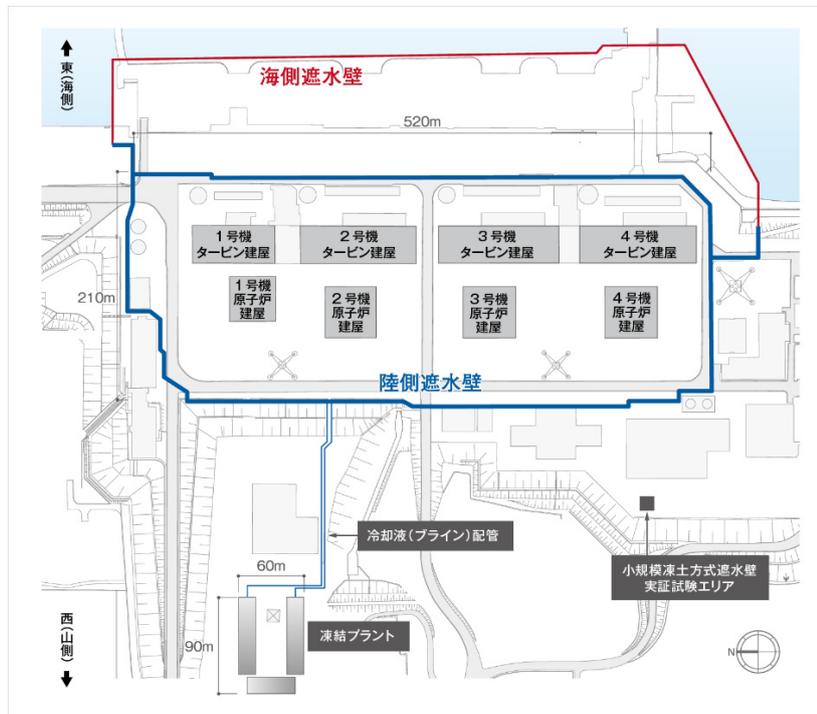


図 3-59 陸側遮水壁の設備配置図 1)より引用

表 3-8 陸側遮水壁の主要設備 ¹⁾に基づいて作成

陸側遮水壁の規模		全周約:1,500m 深度約:30m
凍結管	1,568本	凍結管間隔:1m
測温管	359本	列数:2列(陸側遮水壁の内・外側) 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℃ 凍結能力:約70冷凍t(0℃の水70tを24時間で氷にできる能力)
水位観測井戸	82孔	陸側遮水壁沿いの内外に配置し、水位差により遮水効果を確認するための観測孔
注水井戸	33孔	陸側遮水壁沿いの内側に配置し、建屋周辺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水位を保持するための補助設備

(ii) 凍土方式による陸側遮水壁の採用の経緯

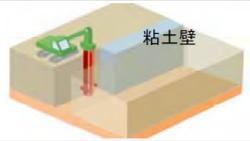
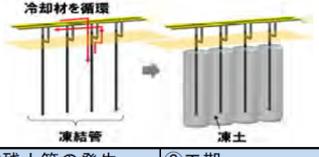
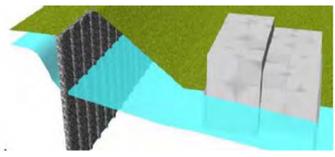
汚染水処理対策委員会は、廃炉対策推進会議(第3回,平成25年4月19日)の議長(経済産業大臣)の指示(当面の対応,短中期的な対応,中長期的な対応の検討)⁴⁾に基づき,これまでの対策を総点検して,汚染水処理問題を根本的に解決する方策や汚染水漏えいへの対応,特に地下水の建屋への流入についての対応策を整理し,第2回汚染水処理対策委員会(平成25年5月16日)で,今後の検討の方向性について報告している⁵⁾。

報告では,計測データや地下水流動解析結果に基づいた地下水流動と建屋内滞留水の流動等の状況分析を進めるとともに,建屋への地下水流入抑制の具体的な方策については,ゼネコンから提案を受けた陸側遮水壁の工法(凍土壁案⁶⁾,粘土壁案⁷⁾,グラベル連壁案⁸⁾,その他⁹⁾)についての評価を行った(表3-9)。

なお,提案には一般的なコンクリートや鋼管による遮水壁の構築案はなく,その理由は以下のとおりと考えられた¹⁰⁾。

- ・建屋周辺にはケーブルダクトなどの埋設構造物が非常に多く分布し,その中には汚染水が溜まっていることが懸念された。遮水壁構築の際にこれらを取り壊した場合,埋設構造物及びその周辺からの放射性物質の流出につながるリスクが大きいと考えられる。その場合は,工事は停止し,最悪の場合は計画の見直しにつながる。
- ・掘削に伴う地下水の流出はポンプで処理することになるが,放射性物質が検出された場合,濃度によっては現場作業が困難で地下水の浄化も必要となり,貯留水の増加の原因となる可能性がある。
- ・大量に発生する残土も放射性廃棄物になることが懸念される。
- ・コンクリートや鋼管による遮水壁構築の施工機械は大型になる。建屋周辺の施工環境では,約30mの掘削もしくは鋼管杭の打ち込み等は厳しい。

表 3-9 陸側遮水壁の工法に対する提案概要 11)より引用

提案者	構造	工法概要			工法概念図	
大成建設	粘土壁	・遮水壁を構築する部分の地盤を切削し、切削土を除去。 ・粘土を充填することで粘土壁を構築。				
①透水係数	②施工性	②耐震性	④長期耐久性	⑤残土等の発生	⑥工期	
$10^{-8} \sim 10^{-9} \text{m/s}$	・重機が大型 ・建屋近傍設置には不利	粘土であるため、追従性がある	塩分濃度が高い場合は対策が必要	残土が発生する	約24～30ヶ月	
提案者	構造	工法概要			工法概念図	
鹿島建設	凍土壁	・凍結管を設置する部分の地盤を切削し、切削土を除去。 ・所定の間隔で、凍結管を設置。 ・凍結管の中を、氷点下数十度の冷却材を循環させ、凍結管の周辺土壌を水分とともに凍結させることで、凍土壁を造成。				
①透水係数	②施工性	②耐震性	④長期耐久性	⑤残土等の発生	⑥工期	
0m/s	・重機が小型 ・建屋近傍設置には有利	クラックが入ってもすぐに再凍結する	冷却材の継続循環、機材の交換が必要	残土はほとんど発生しない	約18～24ヶ月	
提案者	構造	工法概要			工法概念図	
安藤ハザマ	グラベル連続壁	・遮水壁を構築する部分の地盤を切削し、切削土を除去。 ・グラベル(碎石)を充填することで地下水を透しやすい壁を作り、壁内にポンプを相当数設置。 ・壁内で上流からの地下水をくみ上げることで、建屋周辺からの地下水位を管理。 (・地下水位管理が不要となった後、壁内にセメントを注入し充填することでコンクリート壁を構築。) ※グラベル連続壁は地下水の上流側のみの設置で、その他は遮水効果の高い鋼製壁を設置。				
①透水係数	②施工性	②耐震性	④長期耐久性	⑤残土等の発生	⑥工期	
グラベル連続壁は、水を通す設計であり、比較には適さない	・重機が大型 ・建屋近傍設置には不利	地震でグラベルがずれても、機能に大きな影響は無い	ポンプ等の設備の更新が必要	残土が発生する	約24ヶ月	

その他(清水建設)については、参考文献9)を参照

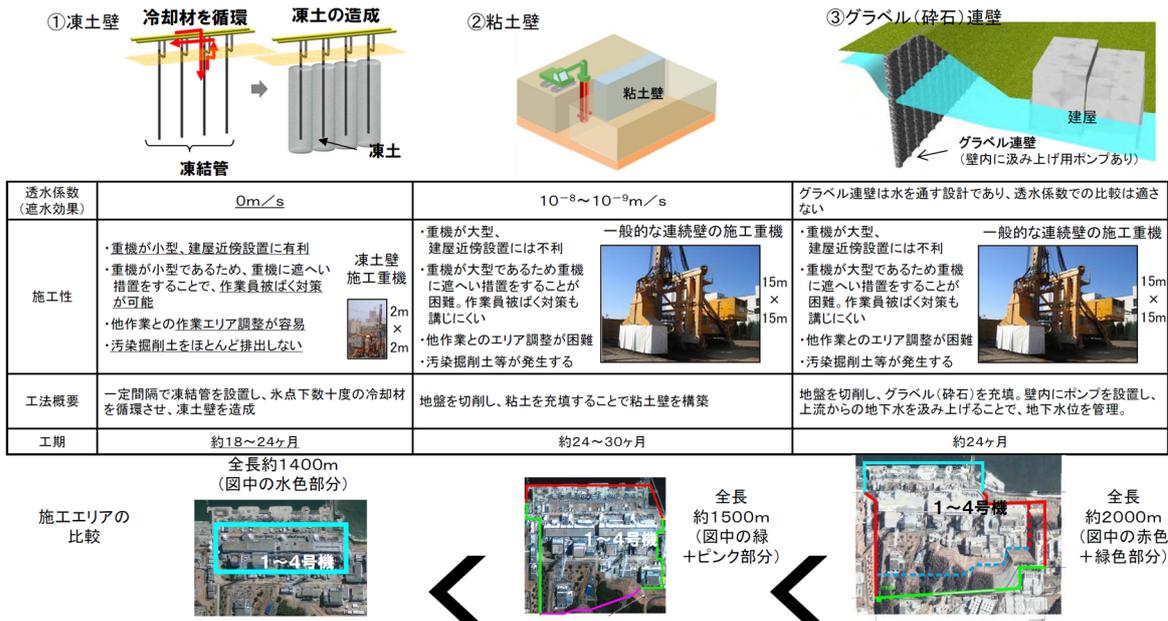
陸側遮水壁に求められる要件は以下のとおりである 12)。

- ①遮水能力が高く、地下水の流入抑制効果が高いこと。
 - ・地下水の流入量の抑制効果が高いことが望ましく、遮水壁の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。
 - ・高線量下での作業を考慮すると、施工期間の短さや施工可能性が高いことが好ましい。
 - ・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。
 - ・取り扱う地下水の総量を少なくし、また、地下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与えないこと。
- 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。

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のため、他の方法に比べ前記の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)¹¹⁾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(表3-10)。

表 3-10 陸側遮水壁の工法の比較 ^{11), 22)}より引用



また、汚染水処理対策委員会¹¹⁾は、凍土方式による陸側遮水壁の採用に際して以下の留意点を示している。

- 最短で進めた場合でも施工計画の策定に約6ヶ月、施工に約1年が必要であり、燃料取り出しカバー工事、その後に計画している使用済み燃料の共用プールへの輸送作業等の工事との工程調整が必要である。
- 凍土による遮水壁はこれまで2年程度の運用実績はあるが、このように大規模で10年を超える運用実績はない。また、継続的に冷凍機を運転させる必要があることから、津波対策を含めた凍土システム(凍結装置、電源設備)の長期的な信頼性を確保する必要がある。
- 陸側遮水壁を設置して山側からの地下水流入が抑制されると、遮水壁内側の地下水位が低下し、建屋内滞留水の水位との差が縮まることで建屋内汚染水の外部への流出リスクが高まる。このため、地下水と建屋内滞留水の水位管理は必要不可欠で、それぞれの水位を正確に把握して挙動の予測を行うとともに、建屋周囲で地下水の供給、排出を的確に行う地下水位管理が重要である。

このうち、サブドレンや新設のリチャージウェル(注水井)等による遮水壁内の排水や注水の

前例はなく、今後の検討次第では設置が困難となる場合もあり得る。その場合には、粘土による遮水壁の設置を検討するべきであり、また、両者の設置が困難な場合には、グラベル連続壁による対応も考えられるとしている。

(iii) 陸側遮水壁の設計検討

陸側遮水壁の主な設計検討事項を集約して

表 3-12 に示す^{15)・16)・17)}。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で議論された個別の技術課題や工事の進捗管理、凍土壁の効果などの審議事項^{18)・19)・20)}を表 3-13 に示した。

表 3-12 陸側遮水壁の主な設計検討事項 15),16),17) に基づいて作成

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	・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	・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	
		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(現地小規模凍結試験)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
		②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	
	5. フェーシング(降雨浸入防止対策)の成立性	①フェーシングの効果の評価	・解析(地下水流動解析)による検討	・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フェーシングの支障物の把握	・現地確認による支障物の把握	
		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(現地小規模凍結試験)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
		②凍土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	
	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	・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	
		③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	
	8. 建屋周辺地下水位の低下による建屋内滞留水の漏えいの防止	①リチャージシステムの設計	・データ管理システムの検討	・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		
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		
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	
	②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		
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	・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		
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		
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

陸側遮水壁を支える技術としては、実証試験の評価、凍土壁の成立性、平面形状・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造成手順、運用方法(水位管理)の設定などを行う上で用いた解析技術(地下水流動解析、凍結解析(熱・水連成解析)、図 3-60)等の他、以下の4つの実証試験^{1), 22)}があげられ、技術的な課題の解決を図っている(図 3-61)。

・実証試験①(現地盤)

小規模凍土方式遮水壁の造成(凍土壁の成立性)

・実証試験②(モックアップ試験(構外), 室内試験)

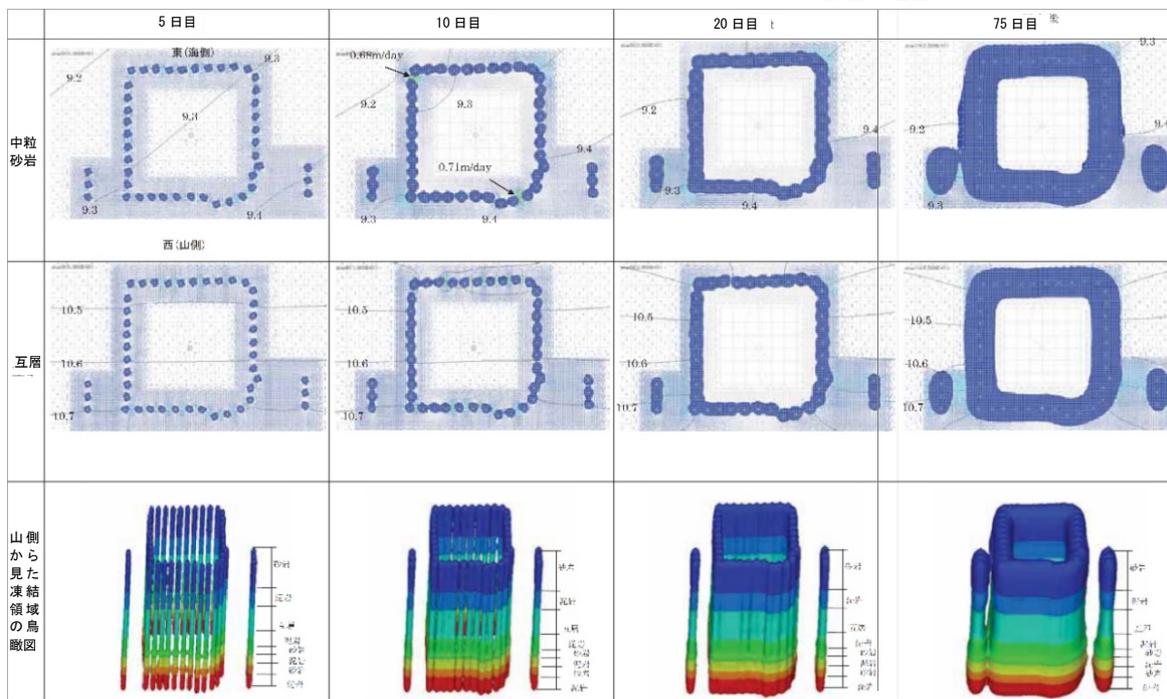
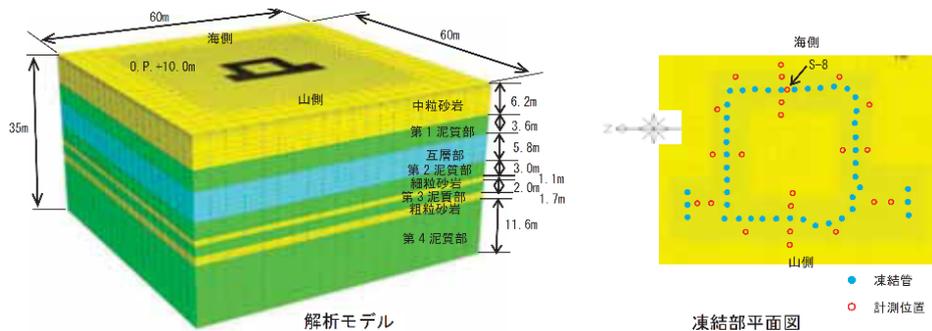
埋設物貫通削孔と水密性(埋設物存在箇所での施工技術の成立性)

・実証試験③(モックアップ試験(構外), 室内試験)

地下水流速に対する凍結(高地下水流速下での成立性, 補助工法)

・実証試験④(現地盤)

注水井の特性(リチャージ特性の評価, 成立性)



南西隅部と北東隅部の凍結間隔が一部やや広がっているため、その部分の凍結が若干遅れ、地下水の流れが集中して流速が速くなっている状況が分かる。しかし全体的なダムアップは生じないため凍結閉合には大きな影響を与えず、FS1の凍土壁は約20日間で全て概ね閉合したと推定できる。また、75日後の矩形凍土壁厚は概ね2mに達しているが、種別施工部は75日後でも閉合していないと推定できる。

(実証試験をモデルとした凍結の可否や閉合日数の検討)

図 3-60 3次元凍結解析(熱・水連成解析)の例²¹⁾より引用・一部改変

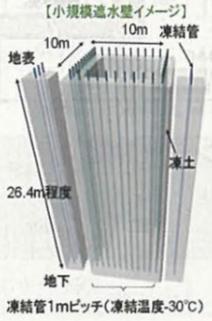
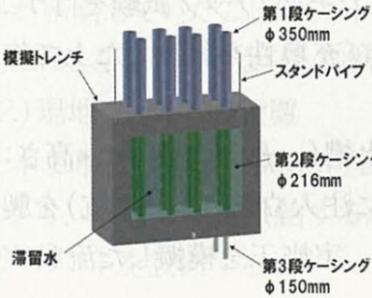
実証実験①(現地盤) 小規模凍土方式遮水壁の造成	実証実験④(現地盤) 注水井戸の特性
<p>10×10×深さ26mの凍土壁を陸側遮水壁現地近傍に造成し、遮水効果等を確認</p>  	<p>現地近傍の50×15mの敷地内に、注水井戸3孔と地下水位観測井戸10孔を設置し、注水特性(注水箇所数と注水量に応じた地下水の拡散効果)を確認</p>  <p>注水井戸 孔径φ450mm 3孔</p>  <p>地下水位観測井戸 孔径φ50mm 10孔</p>
実証実験②(構外、供試体) 埋設物貫通削孔と水密性	実証実験③(構外、供試体) 地下水流速に対する凍結
<p>幅3.4×高さ2.1×奥行2.1mの模擬鉄筋コンクリートトレンチにて、多重管と先端固化での貫通削孔を行い、模擬滞留水の漏洩がないことを確認</p> 	<p>地下水流向を鉛直下向きとした3×2×2mの模擬地盤供試体にて、流速に応じた凍結の可否を確認</p> 

図 3-61 4つの実証試験 ¹⁾より引用

(iv) 施工

1) 施工手順

地下の凍結管と地上のブライン配管の施工手順を図 3-62 に示す。



写真-1 凍結管とブライン配管の施工手順

図 3-62 陸側遮水壁の施工手順 1)より引用・一部改変

2) 埋設物への対応

凍土ラインには、約 170 箇所の大の埋設物横断箇所が分布している(図 3-63)。横断箇所に対しては、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、表 3-14 に示す方法を用いて凍土壁の造成を行っている。

①単列施工

小規模な埋設物箇所。

②複列施工

滞留水水位や排水管などで貫通施工できない箇所では、凍結管を埋設物の軸方向に複数本配置。

③貫通施工(1)

①、②以外の箇所で、埋設物が地下水位レベル以浅、かつ滞留水が被圧していない箇所。

④貫通施工(2)

①、②以外の箇所で、埋設物が地下水位レベル以深、または、滞留水が被圧している箇所。

凍土壁ラインの埋設物横断箇所；約170箇所

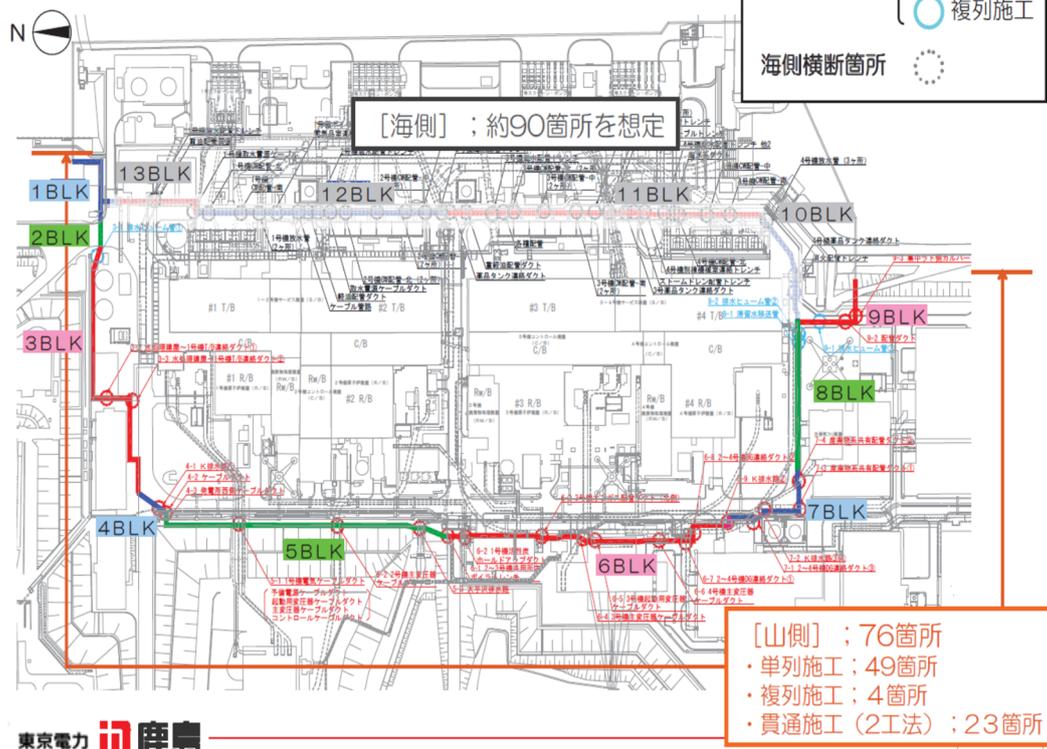


図 3-63 陸側遮水壁の埋設物横断箇所 23)より引用

表 3-14 埋設物への対応方法 23)より引用

<p>①単列施工</p> <ul style="list-style-type: none"> 一般部と同様に所定間隔（基本1mピッチ）で凍結管を設置 埋設物の上下の地盤を巻き込み凍土壁を造成 <p>トレンチ（コンクリート造） 小規模埋設物 円形埋設物（コンクリート造）</p> <p>①凍結管建込み・ブライン循環 ②凍土壁造成</p> <p>凍結管 凍土壁</p> <p>単列施工イメージ（赤色部）</p>	<p>②複列施工</p> <ul style="list-style-type: none"> 埋設物の軸方向に複数の凍結管を設置 埋設物上下の地盤を巻き込み凍土壁を造成 <p>凍結管 埋設物</p> <p>単列施工 複列施工</p> <p>①凍結管建込み・ブライン循環 ②凍土壁造成</p> <p>埋設物軸方向に複数の凍結管を設置</p> <p>凍結管 凍土壁</p> <p>複列施工イメージ（赤色部）</p>
<p>③貫通施工（1）</p> <ul style="list-style-type: none"> 頂版・底版を貫通し、凍結管を設置 埋設物上下の地盤に凍土壁を造成 <p>凍結管 埋設物</p> <p>①凍結管建込み・ブライン循環 ②凍土壁造成</p> <p>頂版・底版を貫通し、凍結管を設置</p> <p>凍結管 凍土壁</p> <p>貫通施工イメージ（赤色部）</p>	<p>③貫通施工（2）</p> <ul style="list-style-type: none"> 埋設物と地下水位の位置関係、溜り水の液圧有無（自由水面の有無）に応じて、頂版の止水対策要否を「マルチステップ工法」を判断 <p>頂版単純貫通 頂版・底版マルチステップ</p> <p>頂版単純貫通 頂版・底版マルチステップ</p>

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日当たり3~4時間とし、除染(がれき撤去, 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が行われた(図 3-64, 図 3-65)。また, ブライン配管周りの断熱材や保護鋼板などは, 工場や構外で予め組み立てたプレキャスト材を多用し, 現場では, ワンタッチジョイントを用いるなどの工夫により作業時間の短縮が図られた(図 3-65)。



図 3-64 被ばく低減対策の効果の例 1)より引用

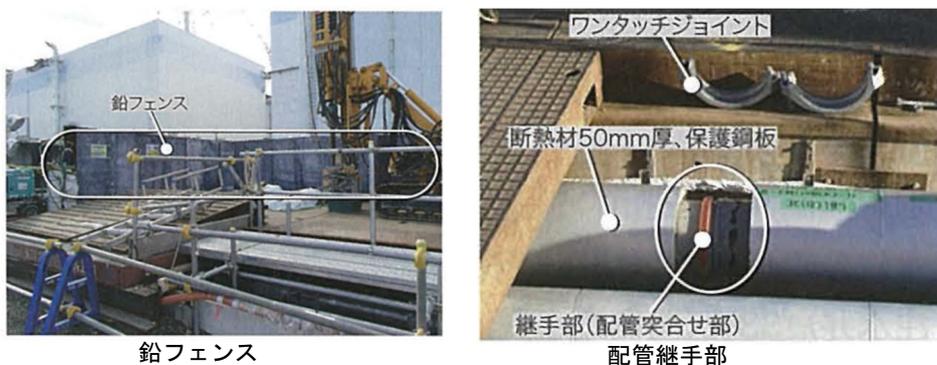


図 3-65 被ばく低減対策 1)より引用

(v)凍結順序

凍土壁の凍結については、地下水の建屋流入量を最小限に抑えるために、確実性の高い凍土壁の凍結順序(閉合手順)が検討された²⁴⁾。

当初は建屋周りの地下水位の特徴を考慮して、全ての凍結管の凍結開始を同時に行う「4辺同時凍結」と、流速が速く凍結に時間がかかると想定された「山側先行凍結」の2案が検討されていた。

原子力規制委員会 特定原子力施設監視・評価検討会(第38回)では、凍結の開始に際して「陸側遮水壁等の地下水流入抑制対策に関する論点整理²⁵⁾」が原子力規制庁により示され、その中の「Ⅱ.陸側遮水壁の運用に関わる論点 4.運用と地下水水位へ与える影響」で、以下の懸念が示された。

『陸側遮水壁には山側と海側があるが、山側からの地下水流を遮断する陸側遮水壁(山側)の運用により、日量約1,000tの建屋周辺への地下水の供給がなくなり、地下水位の低下など大きな影響を与える』

さらに、「4-1 陸側遮水壁(山側)を運用する場合における事前確認事項」として、以下の3つの論点が示された。

1. タービン建屋等周辺の地下水位の予測に関する論点

- 予期せぬ地下水位変動(低下)が発生した場合の凍結解除から元の地下水位に復帰するまでの時間。
- 地下水位変動の予測シミュレーションの妥当性(予測能力)。
- 地下水位変動の予測シミュレーションが確実でないとするれば、
 - ・ 時間をかけた陸側遮水壁の凍結(段階的な凍結)が必要。
 - ・ 絶対下限水位(タービン建屋等の周辺の地下水位が大きく低下した場合においても、これ以上は下がらない水位)の設定と、それを基準とした地下水位の制御方法の確立。
- 地下水位変動予測のための境界条件設定の妥当性。

2. タービン建屋周辺の地下水位の計測能力に関する論点について

- 管理すべき水位として、地下水位を周辺サブドレンの最低水位、汚染水水位を建屋内水位の最高水位とする妥当性。
- 高線量区域の存在等による制約を踏まえた場合、建屋周辺で測定される地下水位の測定精度を含めた確からしさ。
- 実際の地下水位データ(サブドレンの運転実績等も含む)に基づいた地下水流入量抑制効果。

3. タービン建屋等内部の汚染水水位の制御能力に関する論点

- 建屋周辺の地下水位の変動速度に対し、漏えいが防止できる十分な建屋内滞留水位の制御能力(速度、水位変動幅など)。
- 地下水位制御のための規定運用ルール。

また、安全確保の観点から、山側の陸側遮水壁は運用せず、陸側遮水壁は海側を凍結すべきとの指摘もなされている(「4-2 陸側遮水壁(山側)を運用しない場合における事前確認事項」)。

凍結順序は、これらの論点の検討(検討の詳細は、汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース, 第13回～第18回資料^{24)・26)～33)}を参照), 及び以下の①～③の状況を勘案した総合的な再評価が行われた結果、海側から凍結を開始し海側の凍土壁の閉合を先行して完成させ、その他の3辺については段階的な凍結による閉合を行うことが決定された^{34)～37)}(表3-15, 図3-66)。

- ① 建屋内滞留水の水位と周辺地下水の水位の逆転を回避することが最重要。
- ② サブドレンの運転及び海側遮水壁閉合後の水位挙動の検討から、建屋周辺からT.P.+2.5m盤への地下水の回り込みを抑制するニーズが高まったこと。
- ③ 陸側遮水壁海側の施工がすでに完了していること。

実際の凍結に際しては、フェーズ1(海側と山側の一部(北側)を凍結)からフェーズ2への移行(山側の北～西～南側の凍結)及び第2段階(山側の部分的な未凍結箇所(約5%)の凍結)への移行は、凍結状態の確認、建屋水位と地下水位との関係、凍土壁内側と外側の地下水位の関係(水位差)などについての慎重な評価を行った後、次段階への移行を実施することとなった。

表 3-15 凍結の順序^{37)より引用}



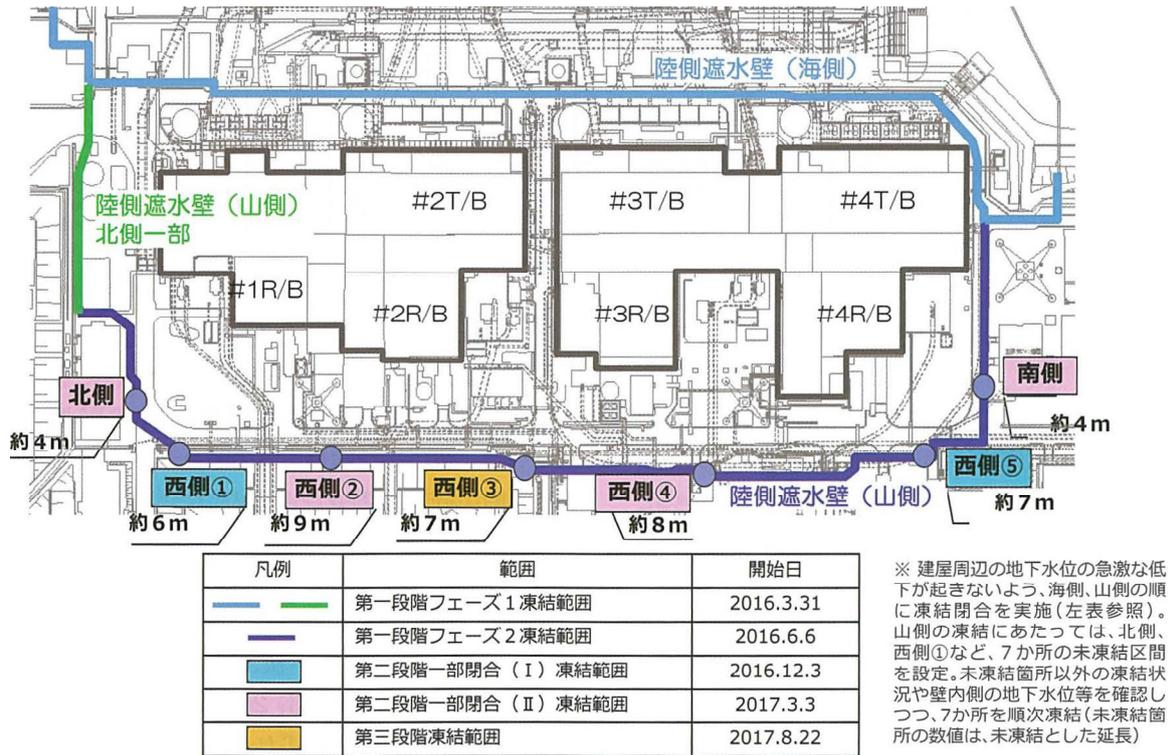


図 3-66 場所別の凍結順序 38)より引用

(vi) 水位管理

陸側遮水壁内側の凍結開始後の水位管理は、凍結開始前と同様に建屋内滞留水の周辺地盤への漏えいを発生させないことを基本方針³⁹⁾として実施されている(図 3-67)。

陸側遮水壁内側の地下水位のコントロールは、サブドレン(地下水の汲上げ設備, 42 箇所)とリチャージウェル(注入井, 33 孔)で行われる(図 3-68)。

水位管理は、サブドレン・地下水ドレンの運転と海側遮水壁の閉合を行う条件で、陸側遮水壁の凍結(凍結の順序や凍結状態)、サブドレンの運転水位(汲上げ水位)、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汲上げ量の変化等のシミュレーション結果に基づいたシナリオ(図 3-69)を設定して、具体的な水位管理方法を定めている(表 3-16)。

なお、地下水位の監視は、既存の観測孔を含め不圧地下水(中粒砂岩(I層))で69孔(観測孔36孔, 注水井33孔)、被圧地下水(互層(III層), 泥質部(IV層)中の粗粒・細粒砂岩)で53孔の観測孔が配置された(図 3-68)。

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)

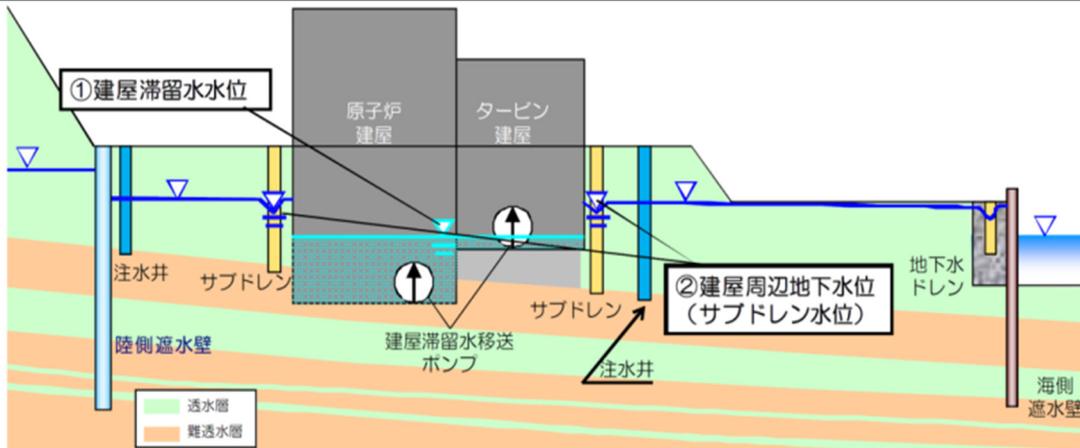


図 3-67 水位管理の基本方針 39)より引用

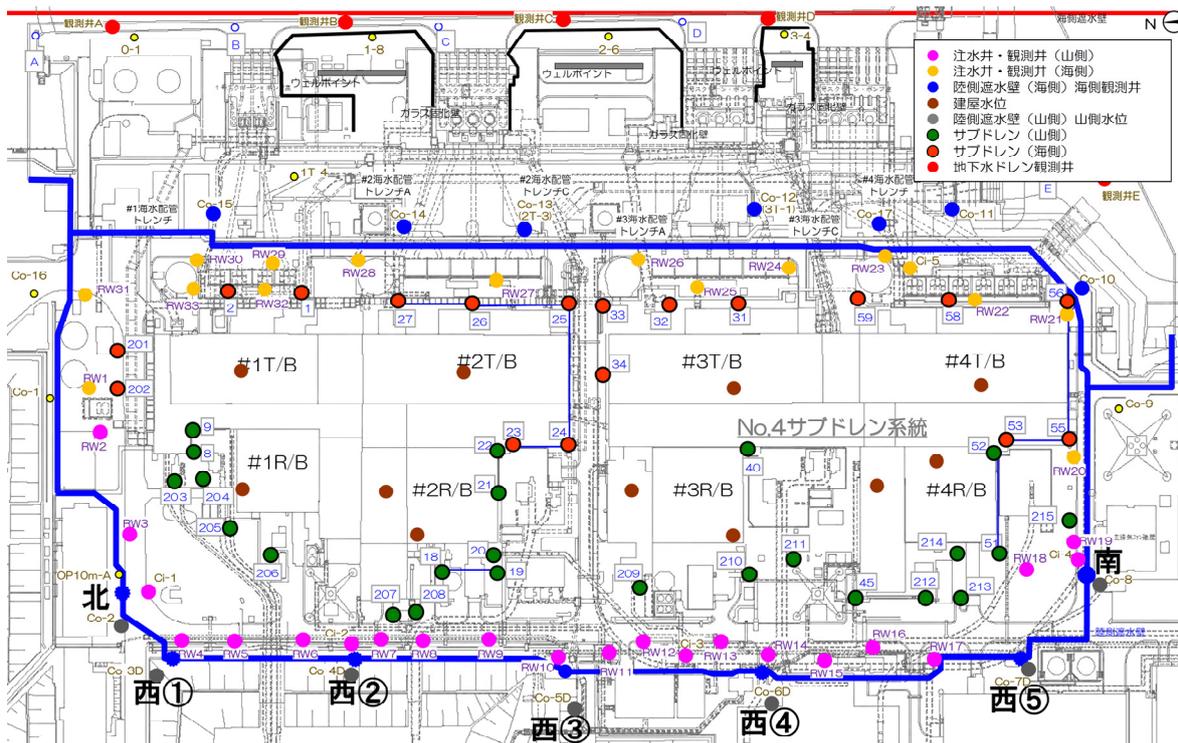


図 3-68 サブドレン、リチャージウェル（注入井）及び地下水位観測孔（不圧地下水）配置図 40)より引用

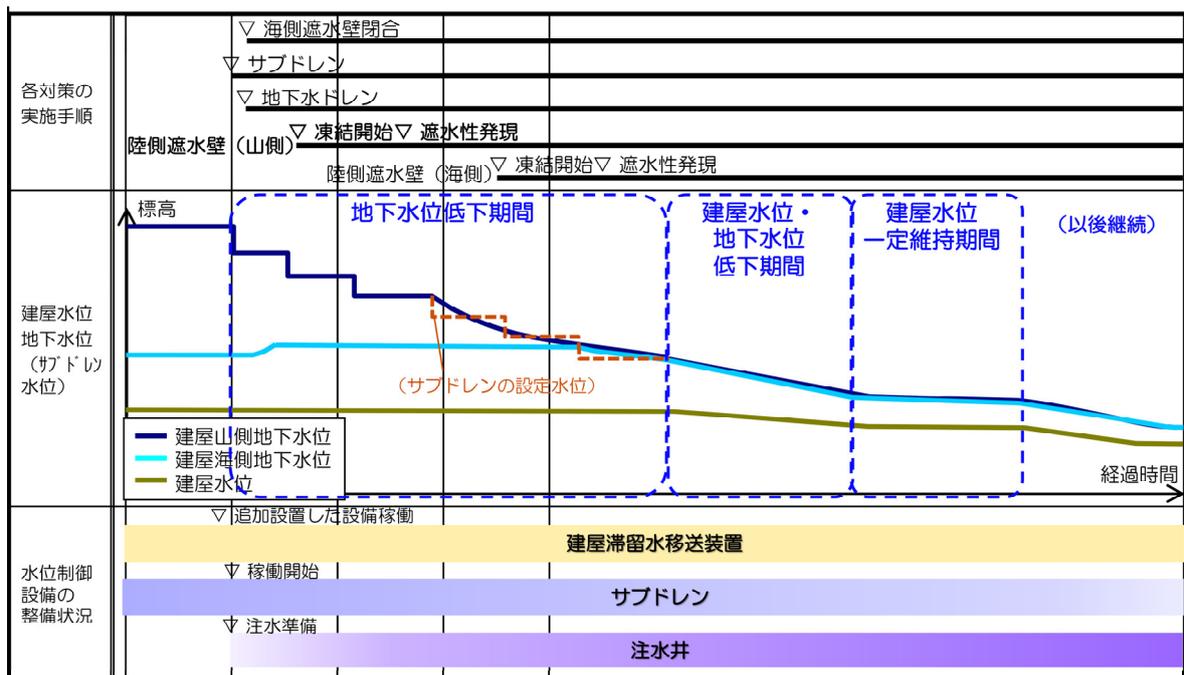


図 3-69 水位管理の基本シナリオ ³⁹⁾より引用

表 3-16 水位管理の方法 ³⁹⁾より引用

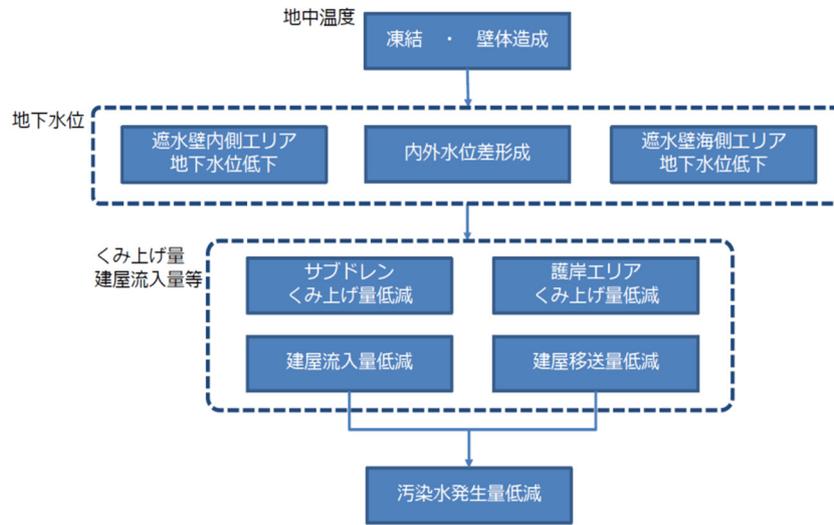
設備稼働状況	状態	水位管理の方法
サブドレン稼働前		【建屋滞留水移送】 ・ 移送ポンプにより建屋水位維持。
サブドレン稼働後		【建屋滞留水移送】 ・ 移送ポンプにより建屋水位維持。 【サブドレンポンプ稼働・停止】 ・ サブドレン稼働により地下水位低下。 ・ 建屋-地下水位近接時にはサブドレン停止。
サブドレン稼働+陸側遮水壁閉合後	地下水位低下期間	【建屋滞留水移送】 ・ 移送ポンプにより建屋水位維持。 【サブドレンポンプ稼働・停止】 ・ サブドレン稼働により地下水位低下。 ・ 建屋-地下水位近接時にはサブドレン停止。 ・ 陸側遮水壁閉合後はゆっくりと地下水位が低下。
	建屋水位・地下水位低下期間	【建屋滞留水移送】 ・ 地下水位低下に合わせて、移送ポンプにより建屋水位を低下。 【サブドレンポンプ稼働・停止】 ・ サブドレン稼働により地下水位低下。 ・ 建屋-地下水位近接時にはサブドレン停止。 ・ 陸側遮水壁閉合後はゆっくりと地下水位が低下。
	建屋水位一定維持期間	【建屋滞留水移送】 ・ 移送ポンプにより建屋水位維持。 【サブドレンポンプ稼働・停止】 ・ サブドレン稼働により地下水位低下。 ・ 建屋-地下水位近接時にはサブドレン停止。 ・ 基本的には、降雨浸透による地下水涵養によって、建屋内外に水位差が生じる。但し降雨の補助を目的として、必要に応じ注水井からの注水を行う。

(vii) 陸側遮水壁の効果

東京電力は、実測値の評価(表 3-17)及び実測値の分析により陸側遮水壁の効果の評価を行っている。また、評価結果は、汚染水処理対策委員会(第21回, 2018年3月7日)^{41) 42)}

で報告が行われた。

表 3-17 実測値に基づく評価項目一覧表 40)より引用



1) 実測値による評価

①陸側遮水壁は 2017 年 8 月に最終閉合箇所の凍結を開始し、現時点(2018 年 2 月 26 日)では、深部の互層部、細粒・粗粒砂岩層の一部を除き、地中温度が 0℃を下回っており、深部の一部を除き陸側遮水壁は完成している(図 3-70、図 3-71)。

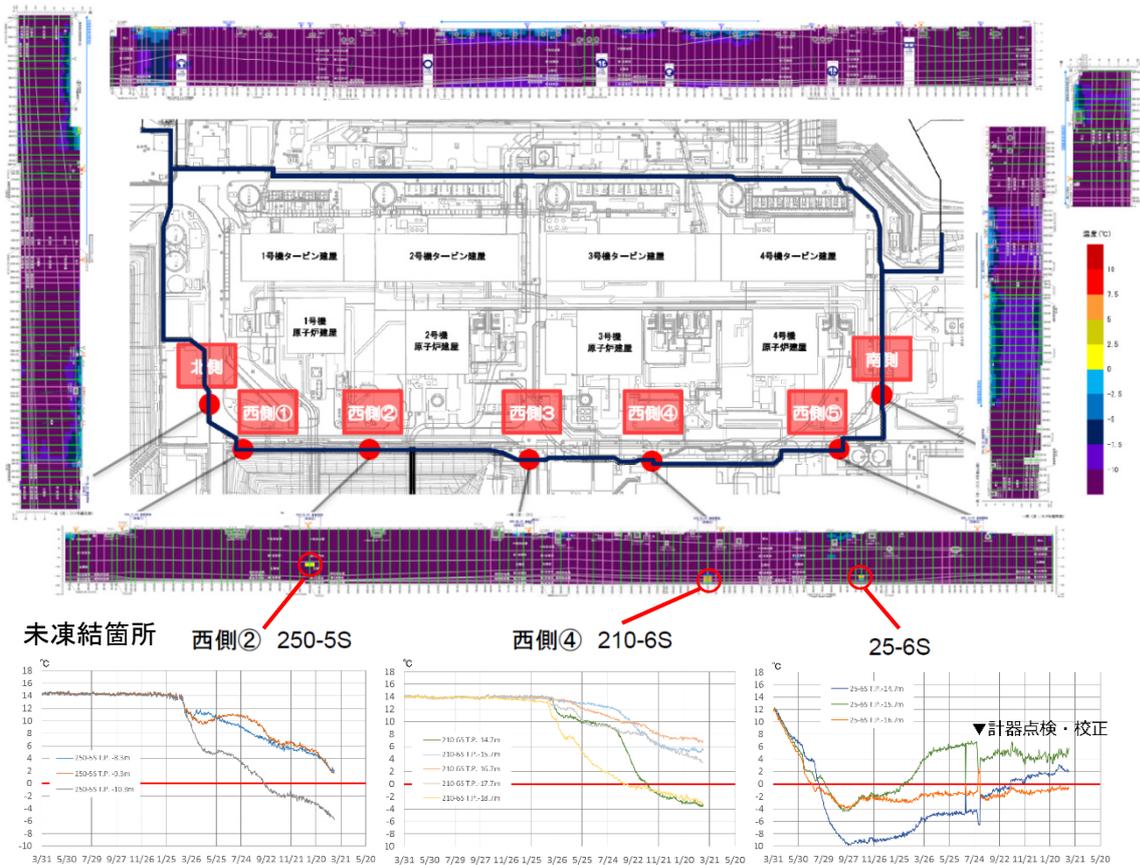


図 3-70 凍結状況(地中温度分布)と未凍結箇所の温度状況 41)より引用・作成

※ 凍土壁 周辺を掘り下げ、壁の造成状況を確認



図 3-71 凍結状況（掘削調査，2018年3月15日）38)より引用

②陸側遮水壁の山側では、平均的に約4~5mの内外水位差が形成され、山側からの地下水が迂回して陸側遮水壁内側エリアへの地下水供給が抑制されているものと考えられた(図 3-72, 図 3-73)。また、陸側遮水壁閉合以前に確認された地下水位変動時の内外での圧力伝播は、閉合以降には確認されず遮水性が認められた(図 3-74)。

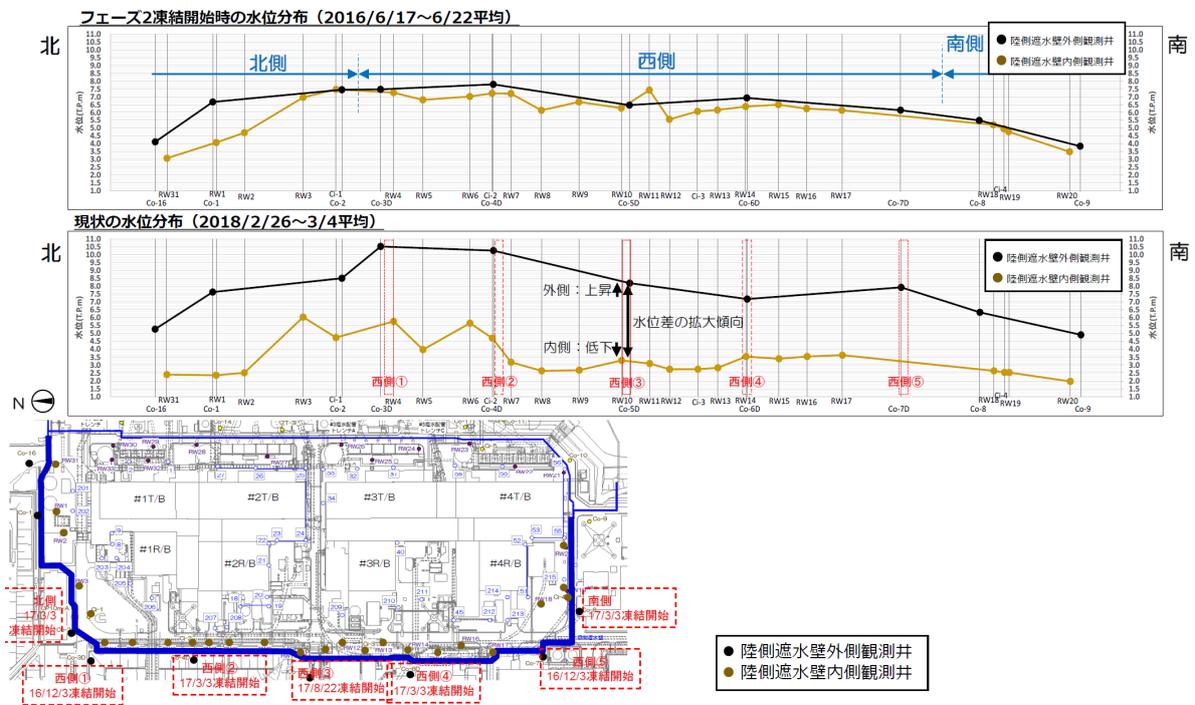


図 3-72 陸側遮水壁内外の地下水位分布の推移 41)より引用

※ 凍土壁内外に同じ深さの穴を掘り、地下水の有無を確認

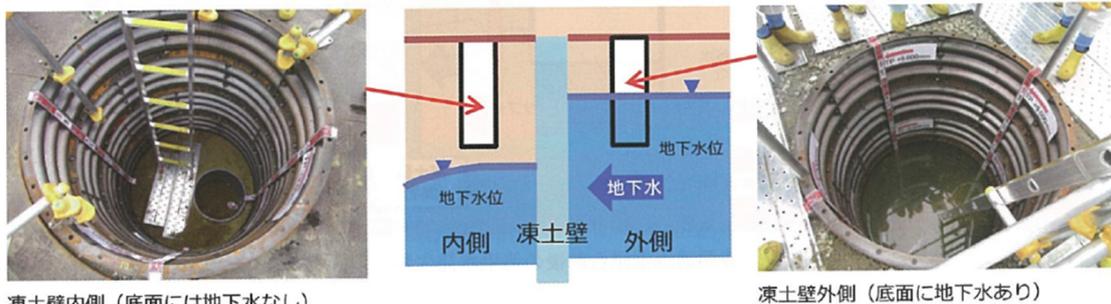


図 3-73 陸側遮水壁内外の地下水位分布（掘削調査，2018年3月15日）38)より引用

陸側遮水壁閉合前に地下水位変動に伝播が認められた観測井は数が少ないものの、いずれも凍結閉合後には地下水位変動の伝播が認められなくなった。

- 陸側遮水壁の凍結閉合前では、サブドレンNo.18停止時のサブドレン水位上昇が、陸側遮水壁の外側の観測井Co-4Dへ伝播し水位が上昇していたが、凍結閉合後にはサブドレン停止時に観測井の水位に変化が認められていない。

(内側)サブドレンNo.18 (外側)観測井Co-4D

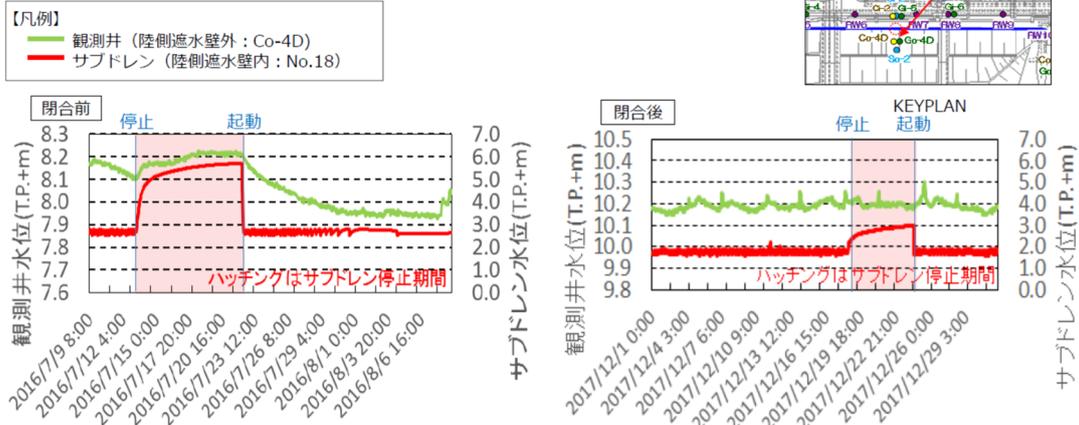


図 3-74 陸側遮水壁内外における地下水位変動の伝播特性 41)より引用

③遮水壁閉合前と現時点(2018年1月17日)を比較すると、サブドレン汲上げ量や建屋流入量等は以下のように低減している。

【サブドレン汲上げ量】

- ・汲上げ量は降雨条件が異なるものの、サブドレンの稼働率が比較的高かった時期(2017年3月～8月)の平均汲上げ量約530m³/日に対して、現状(2017年12月～2018年2月)では約350m³/日まで低減している(図3-75)。
- ・サブドレン汲上げ能力は、サブドレン信頼性向上対策の実施により段階的に向上(汲上げ量の増加)してきた。また、サブドレンの汲上げ水位(L値)も段階的に引き下げてきているが(引き下げにより汲上げ量は増加する)、汲上げ量は減少してきている。このことは、段階的な閉合に伴う遮水効果の発現と考えられる。

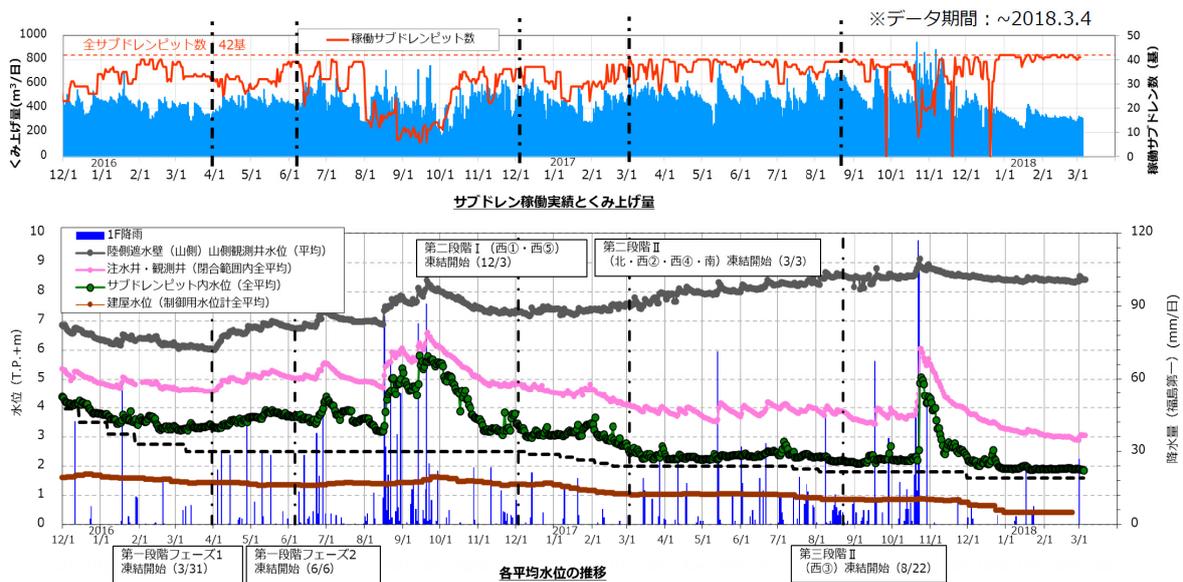


図 3-75 サブドレン汲上げ量 41)より引用

【T.P.+2.5m 盤(地下水ドレン, ウェルポイント)汲上げ量】

T.P.+2.5m 盤の汲上げ量は, 凍結閉合前の約 370m³/日から現状(2017 年 12 月～2018 年 2 月)では約 60m³/日にまで減少しており, 2018 年 2 月 25 日には既往最少の 14m³/日となった(図 3-76)。

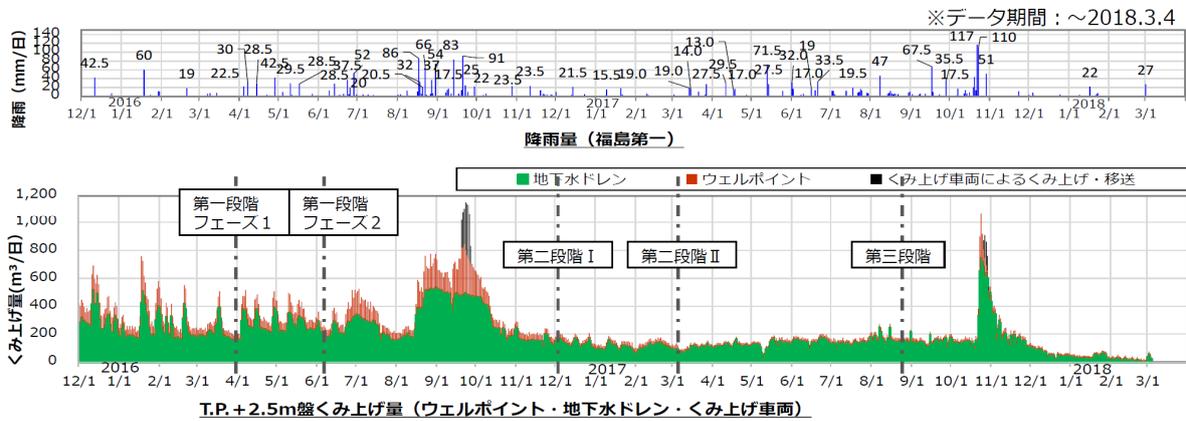


図 3-76 T.P.+2.5m 盤 (地下水ドレン, ウェルポイント) 汲上げ量 41)より引用

【建屋流入量】

建屋流入量(建屋への雨水・地下水流入量)は, 各低減対策(地下水バイパス, フェーシング, サブドレン及び陸側遮水壁)の実施により, 対策実施前には約 400m³/日であったものが, 陸側遮水壁閉合前には約 190m³/日と低減してきており, 大雨による一時的な増加はあるものの, 凍結開始後(2017 年 12 月～2018 年 2 月)では約 90m³/日まで減少している。(図 3-77)。

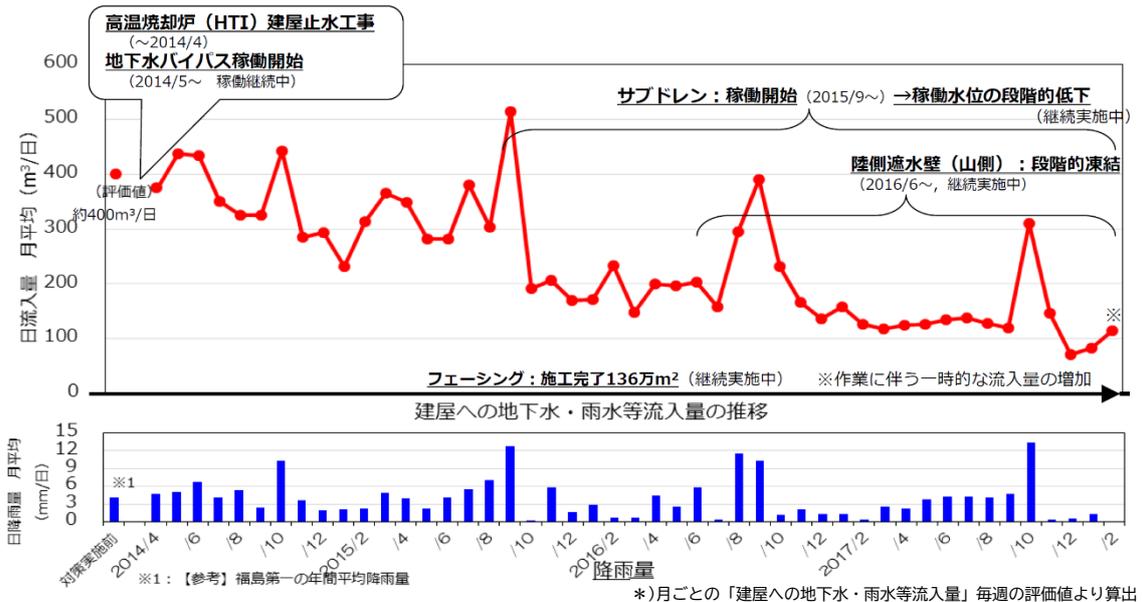


図 3-77 建屋への雨水・地下水流入量 41)より引用・一部改変

これらの実測値から、建屋周辺の地下水位は陸側遮水壁閉合前より低い水位(建屋内滞留水の水位よりも高い)で安定的な管理がなされるようになり、サブドレン汲上げ量、護岸エリア(T.P.+2.5m 盤)の汲上げ量の減少、さらに、サブドレンの効果とも相まった建屋流入量の抑制効果が認められた。

汚染水発生量について、東京電力は凍土壁閉合前に比べ約27%程度(約520m³/日⇒約140m³/日)に低減しているものと評価している(図 3-78)。

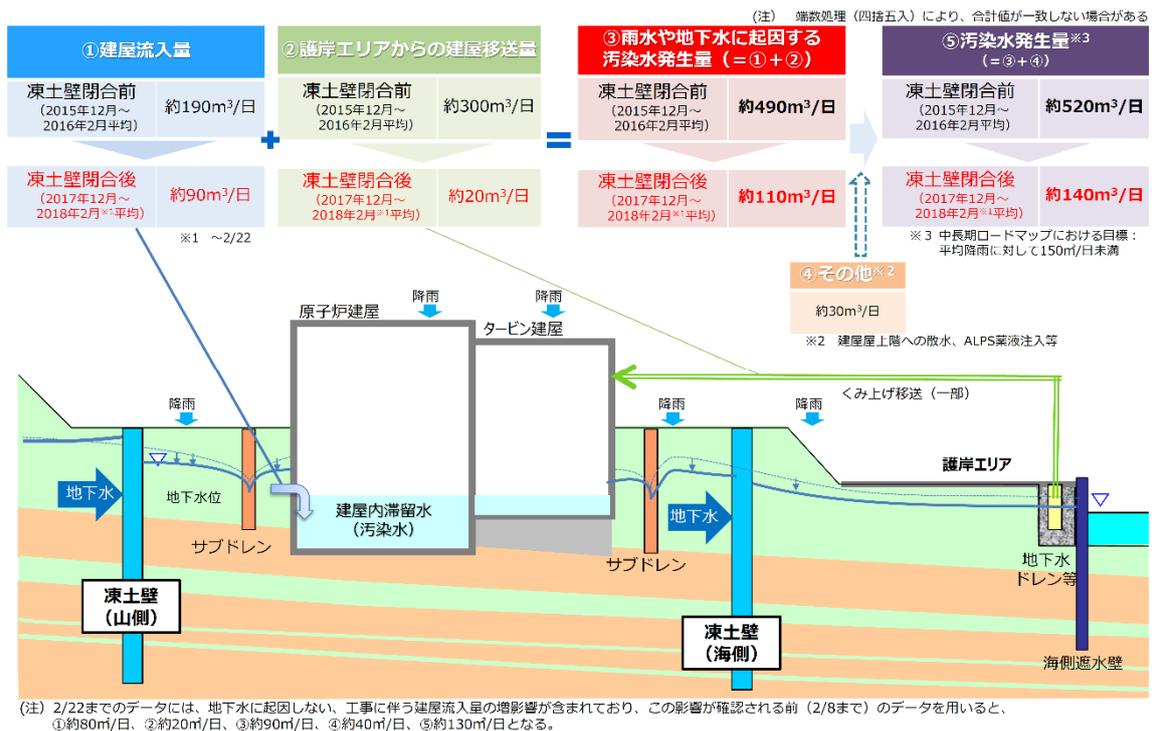


図 3-78 重層的な汚染水対策の効果 42)より引用

2) 水収支による陸側遮水壁内側への地下水供給量の評価

陸側遮水壁内側への地下水等の供給量については、図 3-79 に示す実測値を基にした水収支による評価が行われた。

遮水壁閉合前の評価値を 2015 年 12 月～2016 年 2 月までの平均値とし、現時点の評価値を 2017 年 12 月～2018 年 2 月の平均値として比較すると、以下のような評価ができるとしている(図 3-79)⁴²⁾。

- ・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

実績値(m ³ /日)	陸側遮水壁内側エリアへの地下水供給量 (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 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、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。

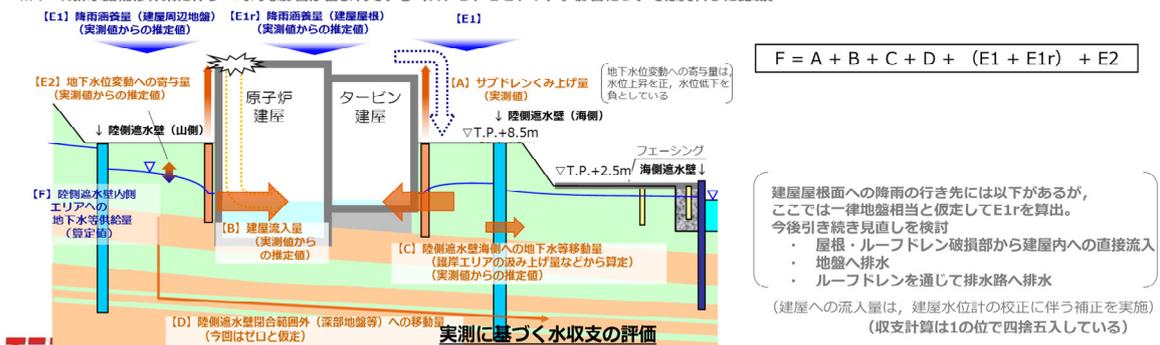
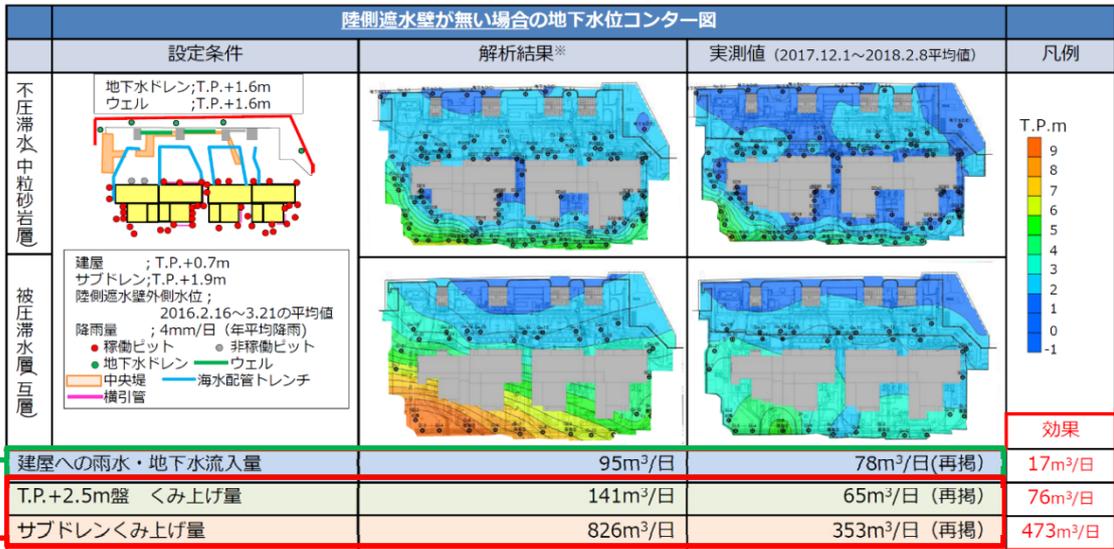


図 3-79 凍結開始前と現状の陸側遮水壁内側への地下水供給量の比較⁴¹⁾より引用

3) 陸側遮水壁単体の効果の推定

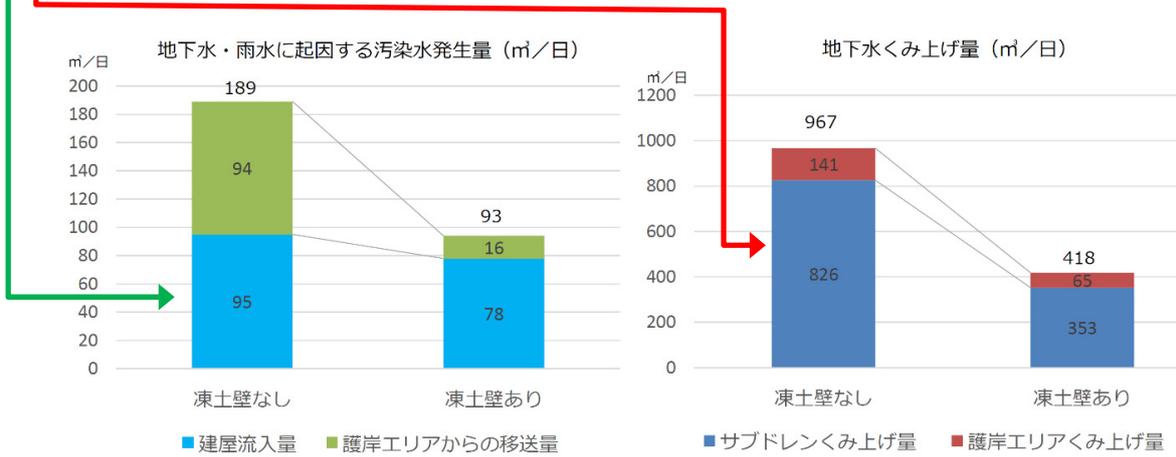
陸側遮水壁とサブドレン等は同時に実施していることから、陸側遮水壁単体の効果はその他の対策の効果と切り分けて評価する必要があるが、この場合、地下水位(サブドレン水位)を一定にするなど、一定の仮定を設けた試算を行う必要がある。このため、現時点(2017年12月1日～2018年2月8日)の各サブドレン水位の平均を用いた3次元浸透流解析により、陸側遮水壁がない場合のシミュレーションを行い、実測値との差分が陸側遮水壁単体の効果として評価できるとして、陸側遮水壁単体の効果を推定している(図 3-80)。

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 566m³/日低減したものと評価している。



※ 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 43)より引用・一部改変



陸側遮水壁単体の効果 42)より引用・一部改変

図 3-80 陸側遮水壁単体の効果の推定

なお、東京電力は以上の陸側遮水壁の効果の評価に基づいて、陸側遮水壁造成の完了を第21回 汚染水処理対策委員会(2018年3月7日)で報告している⁴¹⁾。

参考文献

- 1)木田博光, 浅村忠文(2016):凍土方式による陸側遮水壁の造成—凍結管の掘削・建て込み, 凍結設備の設置工事—, 土木施工, Vol.57, No.3, オフィス・スペース
- 2)経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 原子力政策課 原子力発電所事故収束対応室(2013):平成 25 年度「汚染水処理対策事業」に係る補助事業者公募要領, 平成 25 年 9 月 11 日,
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11217428/www.enecho.meti.go.jp/appli/public_offer/130911a/pdf/aplpof_130911a2.pdf, 2018 年 12 月 10 日掲載確認
- 3)東京電力, 鹿島建設(2014):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(1/4), 平成 26 年 6 月 6 日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第 23 回), 資料 1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051100.pdf>, 2018 年 12 月 1 日掲載確認
- 4)東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議(2013):汚染水処理対策に関する課題と対応の方向(案), 東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議(第 3 回), 平成 25 年 4 月 19 日, 資料 2,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130419/130419_01d.pdf, 2018 年 9 月 26 日掲載確認
- 5)汚染水処理対策委員会事務局(2013):地下水流入抑制のための抜本策に係る検討の方向性(案), 汚染水処理対策委員会(第 2 回), 平成 25 年 5 月 16 日, 資料 1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130516/130516_01c.pdf, 2018 年 12 月 10 日掲載確認
- 6)鹿島建設(2013):凍土遮水壁による地下水流入抑制案, 汚染水処理対策委員会(第 1 回), 平成 25 年 4 月 26 日, 資料 3-3,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130426/130426_02k.pdf, 2018 年 12 月 10 日掲載確認
- 7)大成建設(2013):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—, 汚染水処理対策委員会(第 1 回), 平成 25 年 4 月 26 日, 資料 3-2,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130426/130426_02j.pdf, 2018 年 12 月 10 日掲載確認
- 8)安藤・ハザマ(2013):グラベル連続壁による地下水流入抑制案【恒久対策としての遮水壁への転用可能案】, 汚染水処理対策委員会(第 2 回), 平成 25 年 5 月 16 日, 資料 3-2-4,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130516/130516_01q.pdf, 2018 年 12 月 10 日掲載確認
- 9)清水建設(2013):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, 汚染水処理対策委員会(第 1 回), 平成 25 年 4 月 26 日, 資料 3-4,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130426/130426_02m.pdf, 2018 年 12 月 10 日掲載確認

- 10)大西有三(2016):陸側遮水壁の疑問に答える, Vol.57, No.11, オフィス・スペース
- 11)汚染水処理対策委員会(2013):地下水の流入抑制のための対策, 汚染水処理対策委員会(第3回), 平成25年5月30日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130531/130531_01c.pdf, 2018年12月10日
掲載確認
- 12)経済産業省 資源エネルギー庁 原子力政策課(2013):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)」に係る企画競争募集要領, 平成25年7月5日,
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11217428/www.enecho.meti.go.jp/appli/public_offer/130705c/pdf/aplpof_130705c2.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 13)鹿島建設(2013):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, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第2回), 2013年8月8日, 資料3,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130808/130808_03e.pdf, 2018年12月10日
掲載確認
- 14)資源エネルギー庁 原子力発電所事故収束対応室(2014):凍土方式遮水壁について, 平成26年4月18日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第20回), 資料1-1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051059.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 15)東京電力, 鹿島建設(2013):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), 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第4回), 平成25年11月15日, 資料3,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131115/131115_02e.pdf, 2018年12月10日
掲載確認
- 16)東京電力, 鹿島建設(2013):凍土遮水壁の基本設計, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第6回), 平成25年12月20日, 資料1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131220/131220_03c.pdf, 2018年12月10日
掲載確認
- 17)東京電力, 鹿島建設(2013):凍土遮水壁の検討事項(1/2), 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第6回), 2013年12月20日, 資料1-1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131220/131220_03d.pdf, 2018年12月10日
掲載確認
- 18)原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会
https://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tokutei_kanshi/index.html, 2018年12月20日掲載確認
- 19)経済産業省 汚染水処理対策委員会, 福島第一原子力発電所における汚染水対策,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku.html#osensuitaisaku_mt, 2018年

12月20日掲載確認

- 20)経済産業省 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku.html#task_force , 2018年12月20日掲載確認
- 21)鹿島建設(2014):凍土造成解析 検討の流れとフィッティング解析結果について, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第11回), 2014年7月15日, 資料3,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140715/140715_01e.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 22)汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(2014):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(第12回), 平成26年4月28日, 資料2-1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140428/140428_01d.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 23)東京電力, 鹿島建設(2014):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(1/4), 平成26年6月6日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第23回), 資料1,
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11451236/www.nsr.go.jp/data/000051100.pdf>, 2018年12月1日掲載確認
- 24)東京電力, 鹿島建設(2014):凍土遮水壁 閉合手順の検討, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第13回), 2014年10月22日, 資料2,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/141022/141022_01d.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 25)原子力規制庁(2015):陸側遮水壁等の地下水流入抑制対策に関する論点整理, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第38回), 平成27年12月18日, 資料1-1,
<https://www.nra.go.jp/data/000133827.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 26)東京電力, 鹿島建設(2015):陸側遮水壁閉合後の水位管理について, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第14回), 2015年3月3日, 資料4-1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/150303/150303_01f.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 27)東京電力, 鹿島建設(2015):陸側遮水壁閉合後の水位管理について, 参考資料, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第14回), 2015年3月3日, 資料4-2,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/150303/150303_01g.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 28)東京電力, 鹿島建設(2015):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—, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第15回), 2015年5月20日, 資料2,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/rikugawa_tusk/pdf/150520_01f.pdf, 2018年12月10日掲載確認

- 29)東京電力(2015):試験凍結に関する報告, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第17回), 2015年11月17日, 資料3,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/rikugawa_tusk/pdf/151117_01e.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 30)東京電力(2015):水位管理について, 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第17回), 2015年11月17日, 資料4-1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/rikugawa_tusk/pdf/151117_01f.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 31)東京電力(2015):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), 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第17回), 2015年11月17日, 資料4-2,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/rikugawa_tusk/pdf/151117_01g.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 32)東京電力(2016):陸側遮水壁の状況(第一段階フェーズ1), 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第18回), 2016年5月10日, 資料1-1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/rikugawa_tusk/pdf/160510_01c.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 33)東京電力(2016):陸側遮水壁の状況(参考資料), 汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第18回), 2016年5月10日, 資料1-2,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/rikugawa_tusk/pdf/160510_01d.pdf, 2018年12月10日掲載確認
- 34)東京電力(2016):陸側遮水壁の検討結果(概要), 平成28年2月15日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第40回), 資料1-1,
<https://www.nra.go.jp/data/000139730.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 35)東京電力(2016):陸側遮水壁の検討結果, 2016年2月15日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第40回), 資料1-2,
<https://www.nra.go.jp/data/000139731.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 36)東京電力(2016):陸側遮水壁の検討結果[別冊資料], 2016年2月15日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第40回), 参考1,
<https://www.nra.go.jp/data/000139732.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 37)東京電力(2016):陸側遮水壁の閉合について, 2016年3月3日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第41回), 資料3,
<https://www.nra.go.jp/data/000142215.pdf>, 2018年12月10日掲載確認
- 38)大西有三(2018):陸側遮水壁の疑問に答える 第4回, 土木施工, Vol.59, No.7, オフィス・スペース
- 39)東京電力(2015):陸側遮水壁の進捗状況報告, 2. 陸側遮水壁閉合後の水位管理検討状況, 2015年10月14日, 原子力規制委員会, 特定原子力施設監視・評価検討会(第37回), 資料3,
<https://www.nra.go.jp/data/000126147.pdf>, 2018年12月10日掲載確認

- 40)東京電力(2018):陸側遮水壁の効果に関する現時点での評価について,汚染水処理対策委員会 陸側遮水壁タスクフォース(第22回),2018年1月17日,資料1-1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/rikugawa_tusk/pdf/180117_01c.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 41)東京電力(2018):陸側遮水壁の現況について,汚染水処理対策委員会(第21回),資料1,2018年3月7日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/osensuisyori/2018/pdf/020_01_00.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 42)汚染水処理対策委員会事務局(2018):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(第21回),資料4,平成30年3月7日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/osensuisyori/2018/pdf/020_04_00.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 43)東京電力(2018):三次元地下水浸透流解析【参考資料】,汚染水処理対策委員会(第21回),資料2-参考資料,2018年3月7日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/osensuisyori/2018/pdf/020_s02_00.pdf,2018年12月10日掲載確認

(d) フェーシング

フェーシングには雨水の地下浸透を抑制して建屋への地下水流入量を低減する効果と、敷地内の空間線量率低減効果が期待され(図 3-81), 汚染水処理対策委員会では, 地下水流入抑制のための重層的な対策として, 「広域的なフェーシング」, または「追加的な遮水とその内側のフェーシング」の実施が重要と位置づけられている¹⁾。

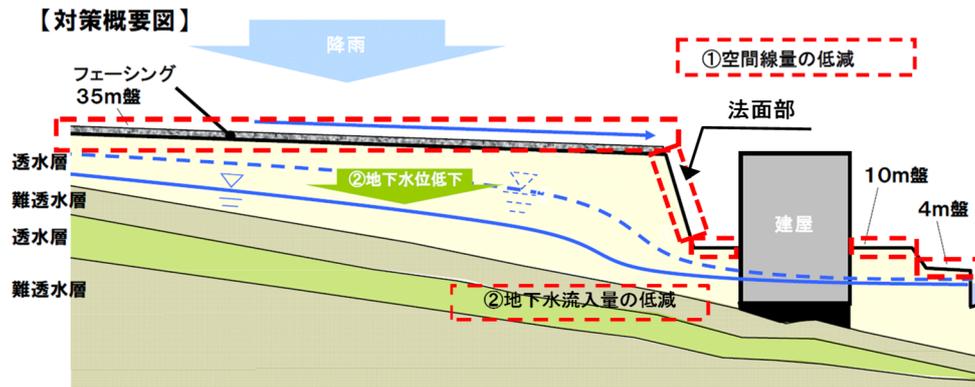


図 3-81 フェーシングの効果²⁾より引用・一部改変

「広域的なフェーシング」は敷地全域のうち施工可能なエリアを対象に, 「追加的な遮水とその内側のフェーシング」は陸側・海側遮水壁で囲まれたエリアを対象として, 図 3-82 に示す範囲の施工が完了している。O.P.+10m 盤(凍土壁で囲まれた範囲)のフェーシングについては, 廃炉作業の進捗にあわせて実施する計画としている。

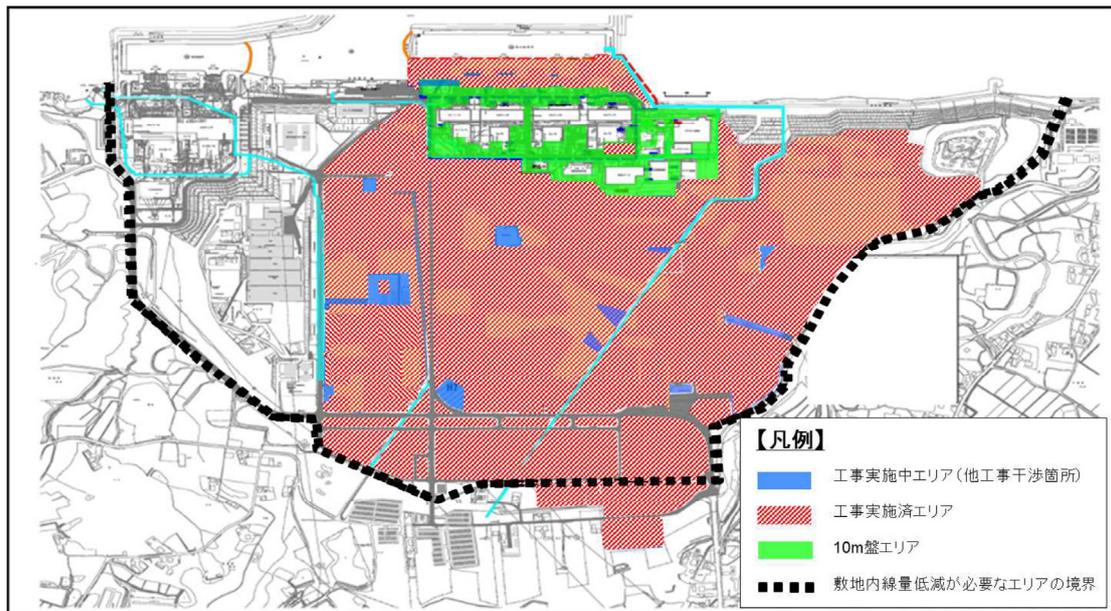


図 3-82 フェーシング施工エリア³⁾より引用

フェーシングは、平地部と法面部に施工区分される(図 3-83)。平地部フェーシングの施工手順を図 3-84 に、法面部フェーシングの施工手順を図 3-85 に示す。

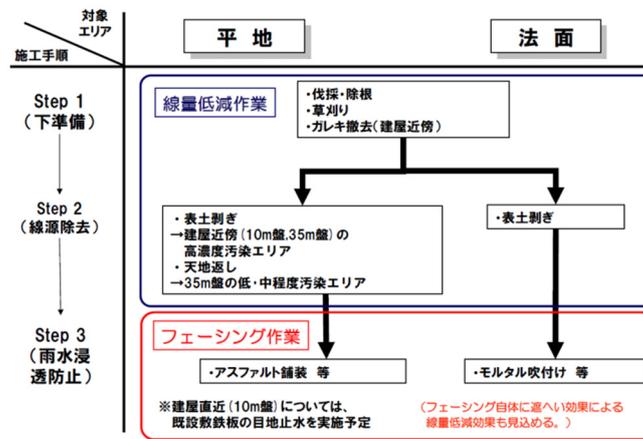
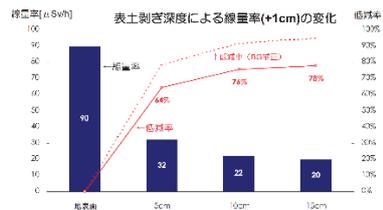


図 3-83 フェーシングの施工手順 2)より引用

a. 表土剥ぎ

地表面から深度10cmまでの表土剥ぎで、地表面の線量率が約75%低減。

表土剥ぎ試験状況



または

b. 天地返し

地表面の線量率が約75%低減。表土剥ぎと変わらない効果が得られ、汚染土壌の発生もない。

- ✓ 作業前の線量率 : 120 μSv/h
- ✓ 天地返し後の線量率 : 30 μSv/h

天地返し試験状況



さらに、表土剥ぎ又は天地返し実施後

c. アスファルト施工

コンクリートの半価層、1/10価層と同程度とすると、厚さ約5cmで50%、厚さ約16cmで90%低減。

d. 超高压水切削

アスファルト舗装の超高压水切削で、地表面の線量率が約60%低減

■ 事務本館駐車場(透水性舗装)による試験結果

除染方法		超高压水切削
地表面の線量率	除染前	129 μSv/h
	除染後	48 μSv/h
	低減率(※1)	63%
廃棄物		スラッジ 排水(約5L/m ²)
施工スピード		250~300m ² /日

※1: 表内は1回除染の低減率(複数回除染時の低減率は、2回除染77%、3回除染81%)



施工前



施工後



除染装置



超高压水切削システム全景

図 3-84 平地部フェーシングの施工手順 4)より引用

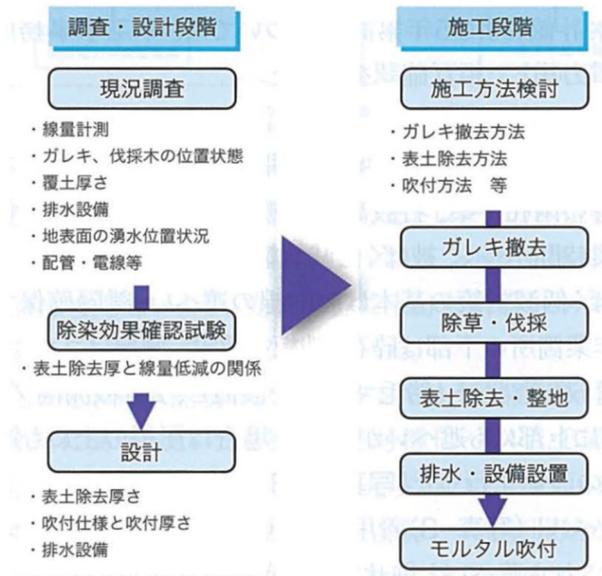


図 3-85 法面部フェーシングの施工手順 ⁵⁾より引用

施工箇所のうち1～4号機建屋西(山)側に位置するO.P.+10～35mの法面は、水素爆発による高線量のがれきが多量に残置され汚染が著しく、さらに急勾配のため施工が厳しいエリアである。このため、45,500m²の法面部については、モルタル吹付けを主体とした施工が実施された(図 3-83)。

施工に先立って実施した現況調査(図 3-86)では、図 3-87 に示すエリア③～⑤の法面内に高線量の飛散がれきが多く分布し、エリア⑩、⑪の法尻付近には津波によって流されたがれきが数多く残っていた。また、法面上段では地層境界からの湧水が確認された。



図 3-86 現況調査の状況(覆土厚調査) ⁵⁾より引用

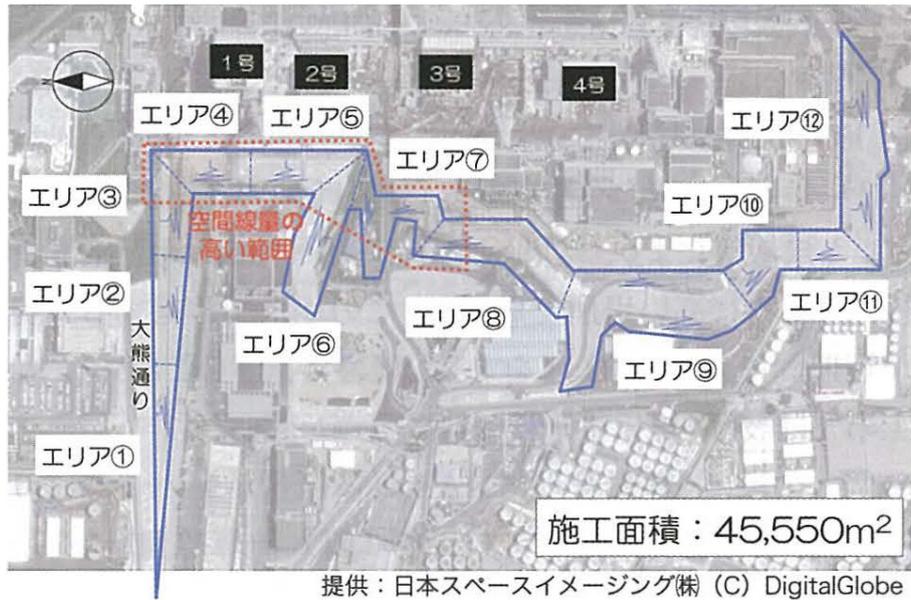


図 3-87 法面フェーシング現況調査範囲 ⁵⁾より引用

フェーシングは、耐久性、遮水性、遮へい性、施工性の観点からモルタル吹付け工法が採用された。吹付け厚さは一般的には 8~10cm であるが、法面フェーシングには遮へい効果も期待されている。

吹付けコンクリートの遮へい効果については、「市町村による除染実施ガイドライン」⁶⁾で覆土やコンクリート厚さと放射線遮へい効果の関係が示されており(表 3-18)、コンクリート厚さが 10cm の場合では、放射線が 79%低減するとされている。

この関係から、モルタル吹付け前の地表面の線量と吹付け後の線量の関係を試算した結果(表 3-18)、吹付け後の表面線量率を $5 \mu\text{Sv/h}$ 以下とするために吹付け厚さを 10cm とした。なお、表面線量率が高く $5 \mu\text{Sv/h}$ 以下とならない箇所については、表土除去厚さの増加、吹付け厚さの増加による対応を行い $5 \mu\text{Sv/h}$ 以下を確保している。

吹付けモルタルは短繊維混入モルタルとした(表 3-19)。短繊維混入モルタルは、一般的なモルタルに比べてクラックの発生が抑制され遮水性が向上するだけでなく、ラス金網の設置が不要となるため、工期短縮による作業員の被ばく量を低減する効果が得られる。

表 3-18 コンクリート厚さと放射線遮へい効果

コンクリート厚さと放射線遮へい効果 ⁶⁾より引用

5 cm	57%減
10cm	79%減
15cm	89%減
30cm	99%減

吹付け後の表面線量の試算 ⁵⁾より引用

		単位： $\mu\text{Sv/h}$			
モルタル吹付け厚さ(cm)		5	10	15	30
モルタルによる線量低減率		57%	79%	89%	99%
モルタル吹付け前線量 ($\mu\text{Sv/h}$)	300	129	63	33	3.0
	200	86	42	22	2.0
	100	43	21	11	1.0
	50	22	11	5.5	0.5
	30	13	6.3	3.3	0.3
	20	8.6	4.2	2.2	0.2
	15	6.5	3.2	1.7	0.2
10	4.3	2.1	1.1	0.1	

表 3-19 モルタル吹付け工法の仕様⁵⁾より引用

厚さ	10cm
配合	モルタル配合は1:4 短繊維を7.8kg/m ³ 混入

法面では、上段の地層境界からの湧水が発生していた。法面に所定の間隔で水抜き孔を設置する一般的な湧水対策の場合、水抜き孔周辺からクラックが発生し遮水性に影響があると考えられたため、裏面排水工による方法を採用した(図 3-88)。また、法面への雨水に対しては、全て法面下端の排水側溝で処理すること(地山への供給をカットする)としたが、既存の排水側溝では処理能力が不足するため、排水側溝の増設を行い法面への雨水を全て排水処理可能となる仕様とした。

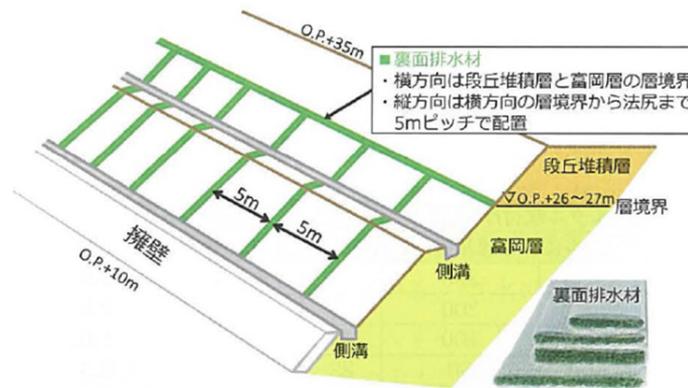


図 3-88 裏面排水工 (イメージ)⁵⁾より引用

高線量環境下、急勾配での施工の特徴・工夫としては、次の事項があげられる。

①表土除去工の遠隔自動化

表土除去作業は、施工性、被ばく防護性、汎用性、国内実績、遠隔操作性等の観点からの比較検討により、急斜面用バックホウ (Rock Climbing Machine (RCM)) を採用した(図 3-89)。線量の高いエリアにおいては、作業員の被ばく量低減のため遠隔操作による自動運転が行われた。

②がれき撤去工の効率化

建屋西側に位置するエリア③～⑤(図 3-87)には、多くの高線量ががれきが飛散していた。がれきは建屋外壁の金属材料が多かったことから、作業員の被ばく量低減と作業の効率化のため、電磁式大型磁石を用いたリフティングマグネットをクレーンに吊り下げてがれき回収作業を行った(図 3-90)。これにより、作業員が高線量ががれきに近づくことなく、効率的にがれきを回収することが可能となった。

③モルタル吹付け工の機械化

通常はモルタル吹付けを人力で行っているが(図 3-91)、法尻に重機の設置スペースが確保できるエリアでは、作業の効率化と高線量エリアにおける作業員の被ばく量低

減のため、吹付けロボット(Robo-Shot)による施工が行われた(図 3-92)。吹付けロボットは最大で人力の5倍程度の作業能力を有しており、作業の大幅な効率化と高線量エリアでの作業員の被ばく量低減に寄与した。



図 3-89 RCM による施工状況 5)より引用



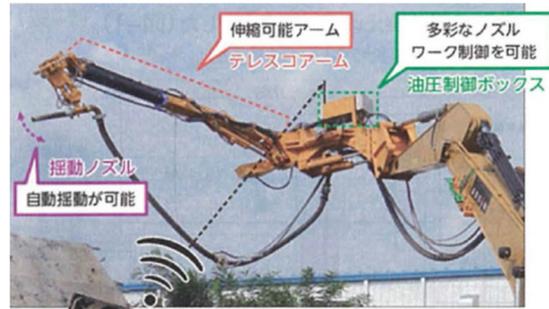
図 3-90 がれき撤去装置と施工状況 5)より引用



図 3-91 吹付けの施工状況 (人力施工) 5)より引用



吹付けの施工状況



遠隔操作システム

Robo-Shot の吹き付け部

図 3-92 吹付けロボット (Robo-Shot) による施工 ⁵⁾より引用

参考文献

- 1)経済産業省 汚染水処理対策委員会(2013):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～,平成25年12月10日,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/131210/131210_01d.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 2)東京電力(2014):福島第一原子力発電所敷地内の線量低減概要について,平成26年9月9日,福島県原子力発電所の廃炉に関する安全監視協議会,第5回(平成26年度第2回)労働者安全衛生対策部会,資料3-1,
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/83636.pdf>,2018年12月1日掲載確認
- 3)東京電力(2017):福島第一原子力発電所における汚染水対策の進捗状況～ロードマップ改訂(2015年6月)以降の進捗状況～,汚染水処理対策委員会(第19回),2017年7月7日,資料1,
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committee/osensuisyori/2017/pdf/0707_01.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 4)東京電力(2014):福島第一原子力発電所敷地内の線量低減概要について,平成26年4月24日,廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第5回),
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/140424/140424_01_023.pdf,2018年12月10日掲載確認
- 5)伊藤寿章,西名伸博,沖原光信(2016):高線量エリアにおける法面フェーシング ー作業員の被ばく低減対策への取り組みー,土木施工,Vol.57, No.3, オフィス・スペース
- 6)原子力災害対策本部(2011):市町村による除染実施ガイドライン,平成23年8月26日,
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2011/siryu33/siryu1-5.pdf>,2018年12月10日掲載確認