

「有機フッ素化合物環境中残留実態調査事業」 汚染源調査に係る専門家会議 資料

令和4年3月

沖縄県環境保全課

目 次

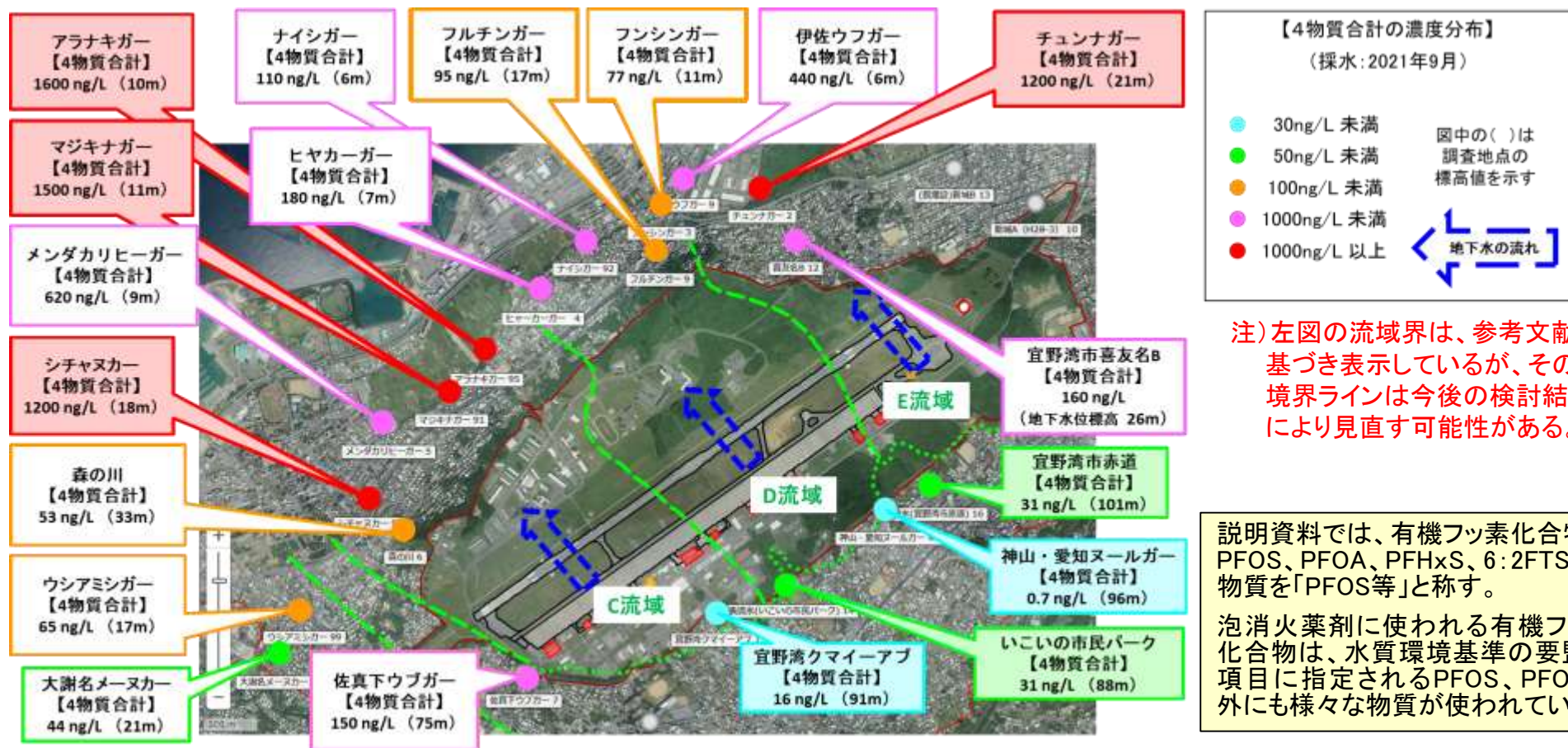
1.	PFOS等の検出状況と汚染源検討に係る諸元整理.....	1
	(1) PFOS等の検出状況.....	2
	(2) 検討目的及び検証項目.....	6
	(3) PFOS等の排出源.....	7
	(4) PFOS等含有物の使用等状況.....	11
	(5) 地表部から地下への浸透.....	18
	(6) 地下水によるPFOS等の移動.....	21
2.	汚染メカニズムと汚染源の推定及び絞込み.....	28
	(1) 想定される汚染メカニズム.....	29
	(2) 汚染源の推定及び絞込み.....	32
	(3) 汚染源の特定に向けた今後の課題.....	34

1. P F O S等の検出状況と汚染源検討に係る諸元整理

1 - (1) PFOS等の検出状況

◆PFOS等の濃度分布(4物質の合計値:最新の結果)

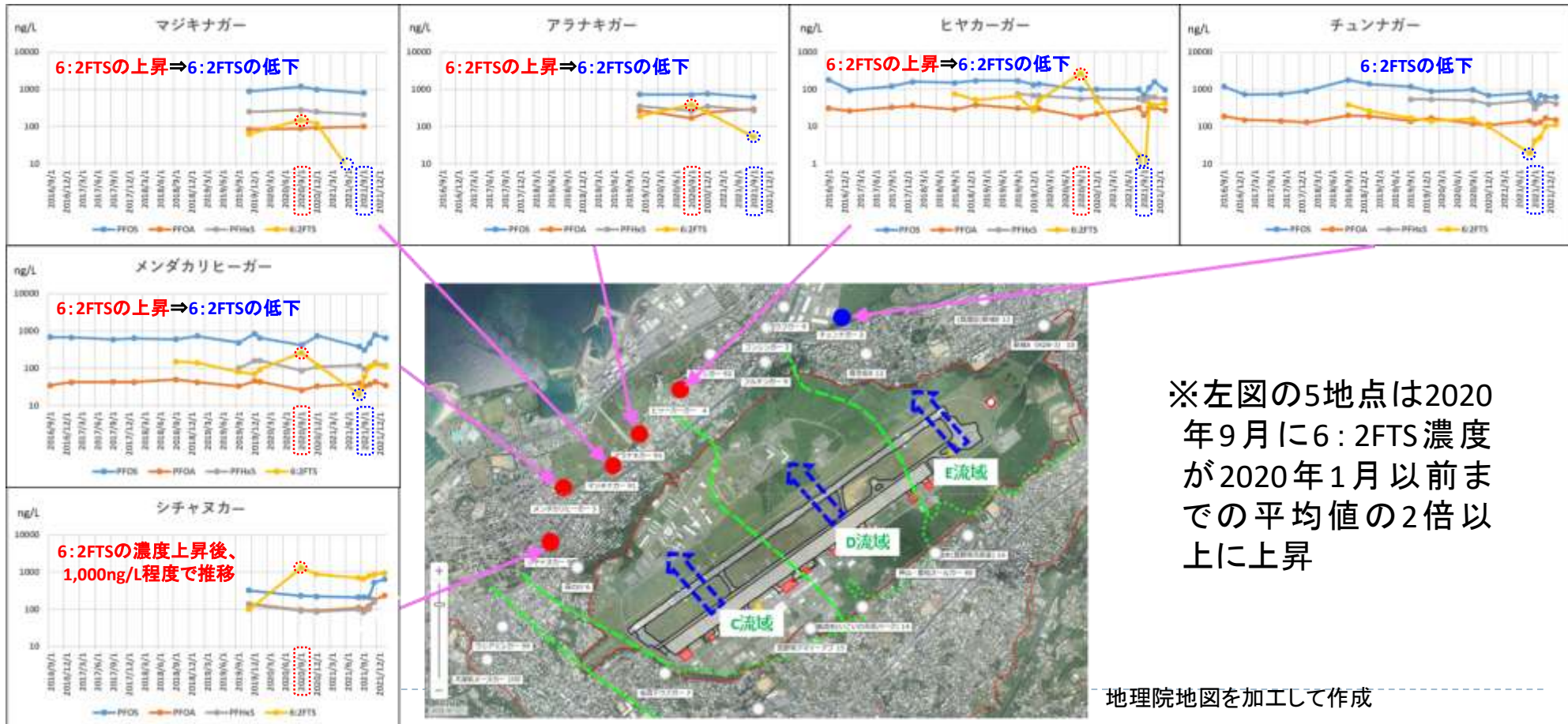
✓ 普天間飛行場周辺の地下水上流側は31 ng/L以下の濃度、飛行場内を經由した後の下流側のC流域とE流域では、1,200 ng/L以上の濃度で検出する地点が分布している。



1 - (1) PFOS等の検出状況

◆PFOS等の経時変化(各流域の特徴)

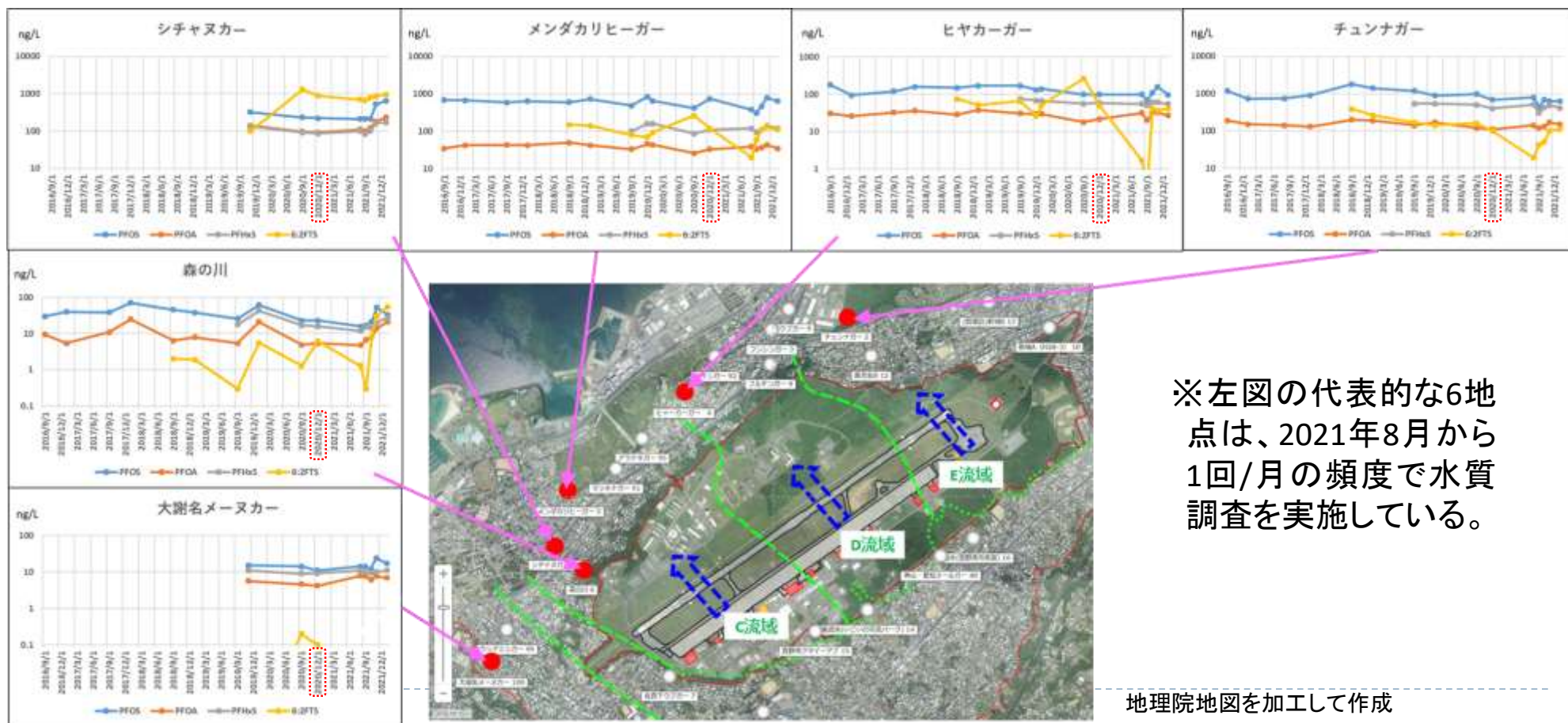
- ✓ PFOS、PFOA、PFHxS濃度は経時的な変化が認められるものの、比較的変動幅が小さく、同一地点での濃度上昇・低下の傾向は概ね一致している。
- ✓ 6:2FTS濃度は他の3物質と比較的して変動幅が大きく、2020年9月にはC～D流域の下流側の複数地点で濃度上昇※、2021年8～9月には濃度低下が確認される。E流域では6:2FTSの大きな濃度上昇は確認されない。



1 - (1) PFOS等の検出状況

◆PFOS等の経時変化(代表的な湧水地点での特徴)

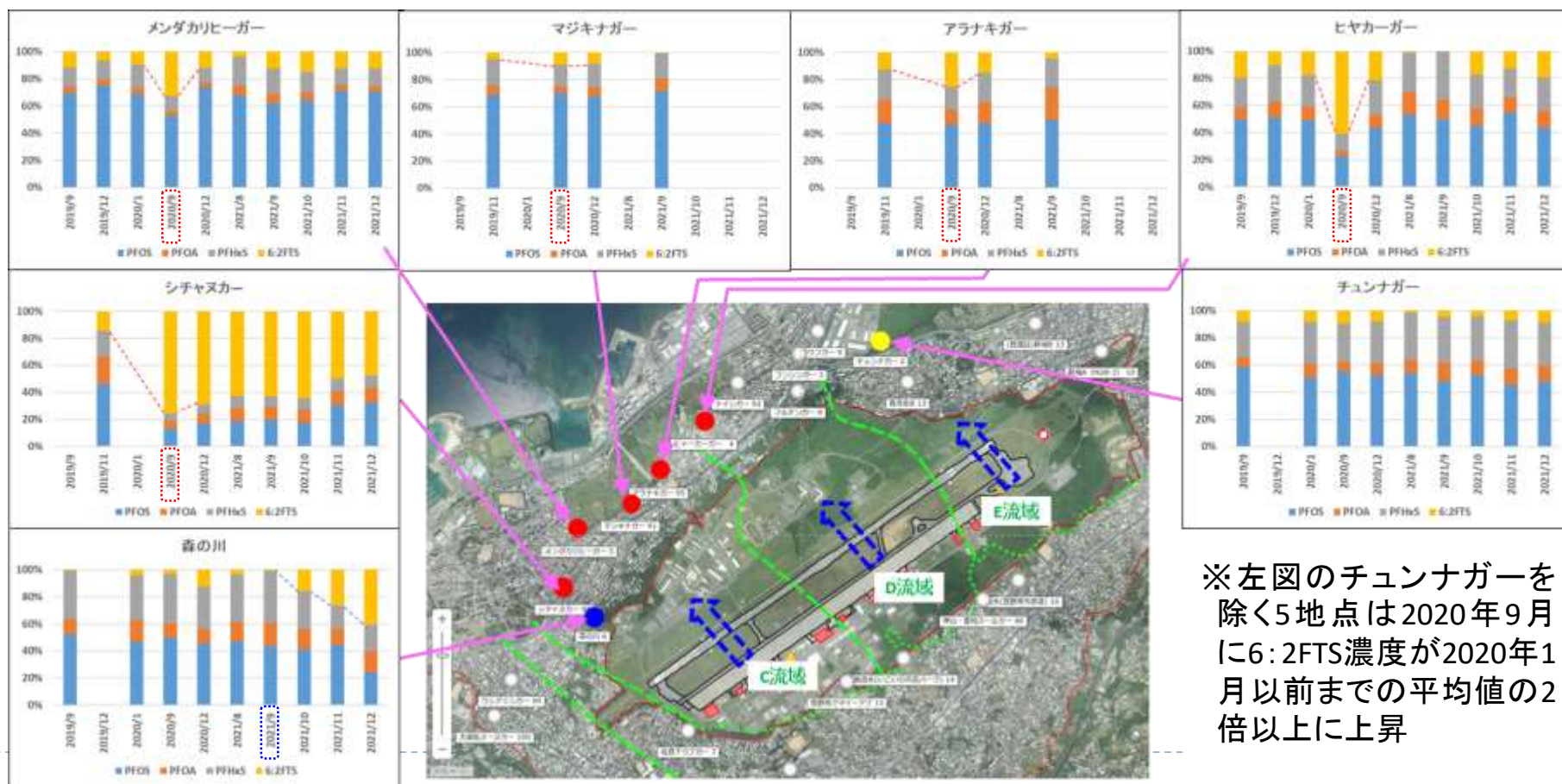
- ✓ PFOS、PFOA、PFHxS濃度は2020年12月以降も経時的な変動幅は小さく、概ね一定の濃度で継続して検出している。
- ✓ 6:2F7S濃度は2020年12月以降も比較的に変動幅の大きい傾向が確認される。



1 - (1) PFOS等の検出状況

◆PFOS等の構成比(各流域の特徴)

- ✓ 6:2FTSの構成比の一時的な上昇が、2020年9月にC～D流域下流側の複数地点で確認されたが、E流域の地点では確認されない。C流域の「森の川」では2021年9月以降、6:2FTSの構成比が上昇している。
- ✓ C流域の「シチャヌカー」では2020年9月以降、4物質の中で6:2FTSの構成比が最も大きい。



※左図のチュンナガーを除く5地点は2020年9月に6:2FTS濃度が2020年1月以前までの平均値の2倍以上に上昇

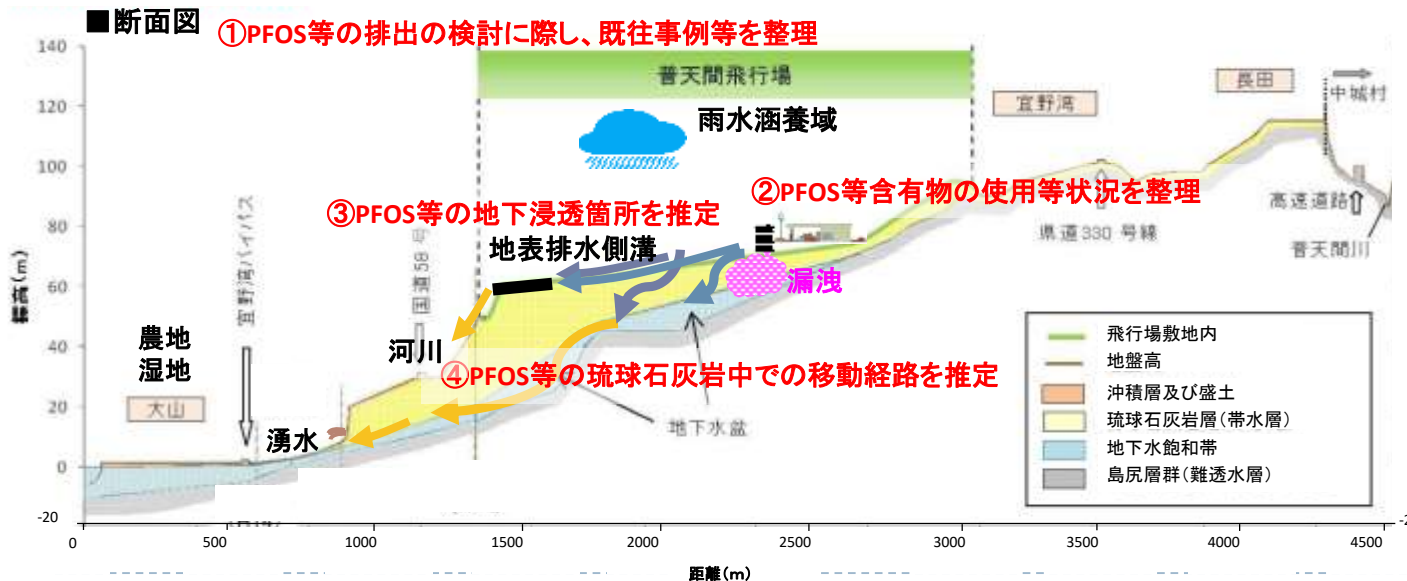
1 - (2) 検討目的及び検証項目

◆ 検討目的

- ✓ 普天間飛行場返還時の有機フッ素化合物に係る汚染状況調査及び浄化対策への寄与、円滑な跡地利用につなげることを目的に、同飛行場周辺における既存調査結果や地形・地質に関する資料等を収集及び整理し、有識者からなる専門家会議からの意見を踏まえて有機フッ素化合物による汚染源の推定及び絞込みを行った。

◆ 検証項目

- ✓ PFOS等の使用や地盤中の移動に関し、4項目に区分して資料収集・整理



1 - (3) PFOS等の排出源

検証項目	主な検証内容	資料収集からの判明事項	地下水下流側の湧水におけるPFOS等の検出状況との関連
① PFOS等の排出源	既往の事例から得られたPFOS等の主な排出源	<ul style="list-style-type: none"> ●PFOS等の主な用途は、泡消火薬剤、半導体等のエッチング・レジスト剤、家具や衣類の防汚処理剤、食品包装である。 ●水質調査地点の上流側で、PFOS等を使用する可能性のあるサイトとして、普天間飛行場、宜野湾市消防署、写真店が確認される。 ●家庭、商業施設、作業場で使用される製品（撥水剤など）にも若干のPFOS等が含有されており、その濃度については人口密度との相関関係を検討した事例がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ●地下水下流側でPFOS等が1,000 ng/Lを超える濃度で検出されている箇所がある。 ●普天間飛行場周辺の人口密度から試算されるPFOS・PFOA濃度は、飛行場の地下水下流側で確認される濃度と概ね一致する。 ●水質調査地点の地下水下流側と下流側の間に位置するのは普天間飛行場である。

1 - (3) PFOS等の排出源

◆PFOS等の用途と排出源

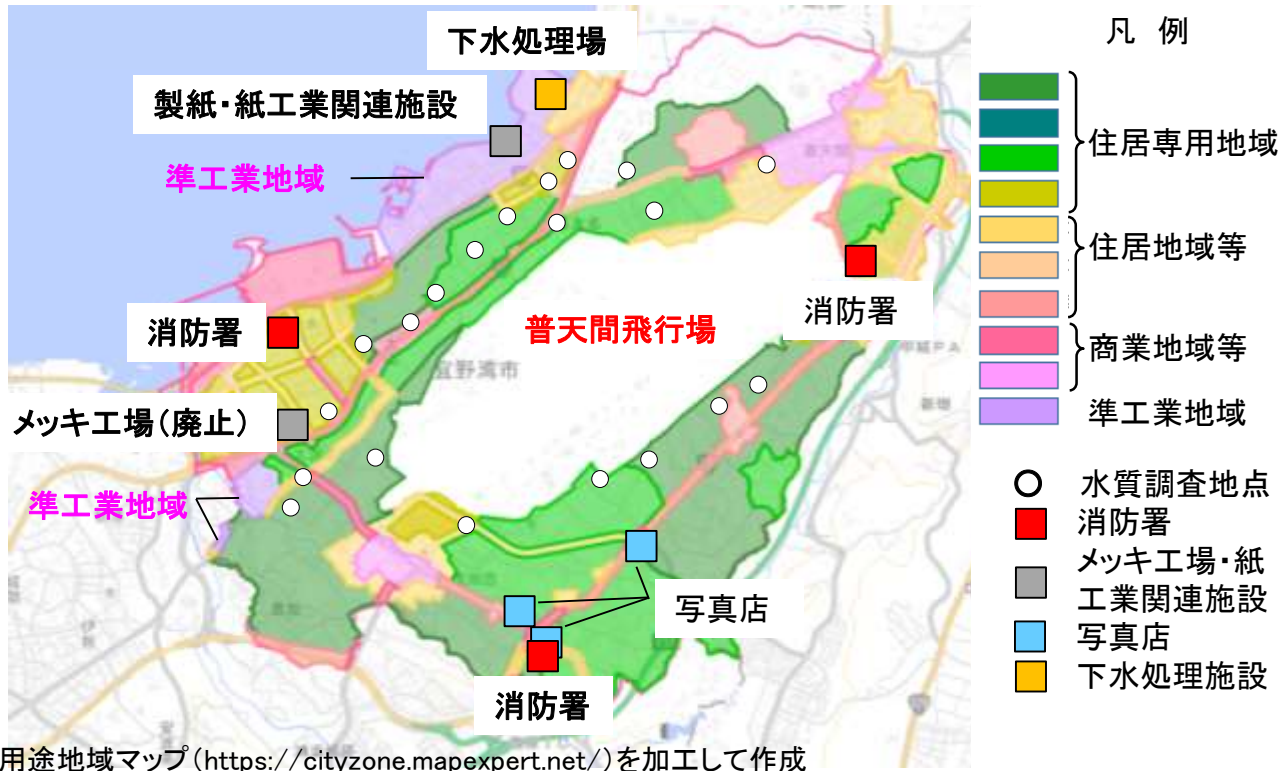
- ✓ PFOS等の用途には、泡消火薬剤、半導体等のエッチング・レジスト剤、家具や衣類の防汚処理剤、食品包装等が挙げられる。(出典:環境省「PFOS及びPFOAに関する対応の手引き」他)
- ✓ 上記用途の使用場所または製造場所である飛行場内の消火訓練・消火対応サイト、飛行場外の工業用地、埋立地、廃水・下水処理場がPFOS等の主な排出源になり得ると考えられる。(出典:ITRC: PFAS Technical and Regulatory Guidance Document and Fact Sheets PFAS-1, 2020revice)

用途の分類	PFOS等の主な用途	
	工業製品等	日用品等
単体あるいは低分子のまま使われる用途	<ul style="list-style-type: none">・泡消火薬剤・フッ素系界面活性剤・航空機用の作動油・エッチング・レジスト剤・金属メッキ処理剤・フッ素系樹脂	<ul style="list-style-type: none">・家庭用クリーナー・ワックス、床磨き・調理器具表面コート・写真フィルム処理・アリやゴキブリの誘因剤
表面処理・加工	<ul style="list-style-type: none">・右記製品の処理剤	<ul style="list-style-type: none">・家具類(カーペット、寝具、テーブル掛け、椅子・ソファ等)・衣類(レインコート、革ジャン、ハンドバッグ、手入れ用スプレー等)
紙・包装製品保護剤	<ul style="list-style-type: none">・右記製品の保護剤	<ul style="list-style-type: none">・食品包装紙

1 - (3) PFOS等の排出源

◆PFOS等の排出源となり得るサイト

- ✓ 普天間飛行場周辺では、同飛行場、宜野湾市消防署、準工業地域(大規模な工業用地及び埋立地)、下水処理場がPFOS等の排出源となり得るサイトに該当する。
- ✓ 水質調査地点よりも上流側にPFOS等を使用する可能性のある水質汚濁防止法の特定事業場として、写真店が確認される(2019年3月時点)。



PFOSの排出源となり得る 宜野湾市の特定事業場*1

PFOS等の排出源 となり得る施設	事業場数*1
金属メッキやエッチング関連施設	1 (廃止)
製紙・紙工業関連施設	1 (準工業地域内)
写真感光剤関連施設(写真店)	3
下水処理施設	1

*1 沖縄県 水質汚濁防止法の特定事業場(2019年3月時点)

用途地域マップ(<https://cityzone.mapexpert.net/>)を加工して作成

普天間飛行場周辺におけるPFOS等の主な排出源の該当箇所

1 - (3) PFOS等の排出源

◆地下水・上流側のPFOS・PFOA濃度の試算

- ✓ 調理器具、ワックス、皮革製品、カーペットの撥水剤など、日用品にもPFOS等が含まれる場合がある。
- ⇒ 不特定多数の家庭、商業施設、作業場からの排水にもPFOS等が含まれると仮定すると、普天間飛行場周辺では地下水・上流側で検出されている程度のPFOS・PFOA濃度(10~20ng/L)が検出される可能性はある。

＜文献を参考に宜野湾市統計データから試算した普天間飛行場地下水・上流側のPFOS・PFOA濃度＞

下水道利用人口を除く流域人口密度と河川水のPFOS・PFOA濃度は正の相関関係にある。

普天間飛行場の地下水・上流側のPFOS・PFOA濃度を宜野湾市人口密度から試算

- 基地を除く宜野湾市の面積: $14.0\text{km}^2 = 19.8\text{km}^2 - 5.8\text{km}^2$
- 宜野湾市の人口: 99,549人 ● 下水道使用人口: 78,612人
(宜野湾市HPより、平成31年3月末時点)
- ◆ 宜野湾市の人口密度(下水道利用人口を除く)
⇒ $1,500\text{人}/\text{km}^2 \doteq (99,549 - 78,612) \div 14.0$
- 右図の相関関係からPFOS+PFOAの濃度を試算
⇒ $10\text{ng}/\text{L} = 3\text{ng}/\text{L}(\text{PFOS}) + 7\text{ng}/\text{L}(\text{PFOA})$

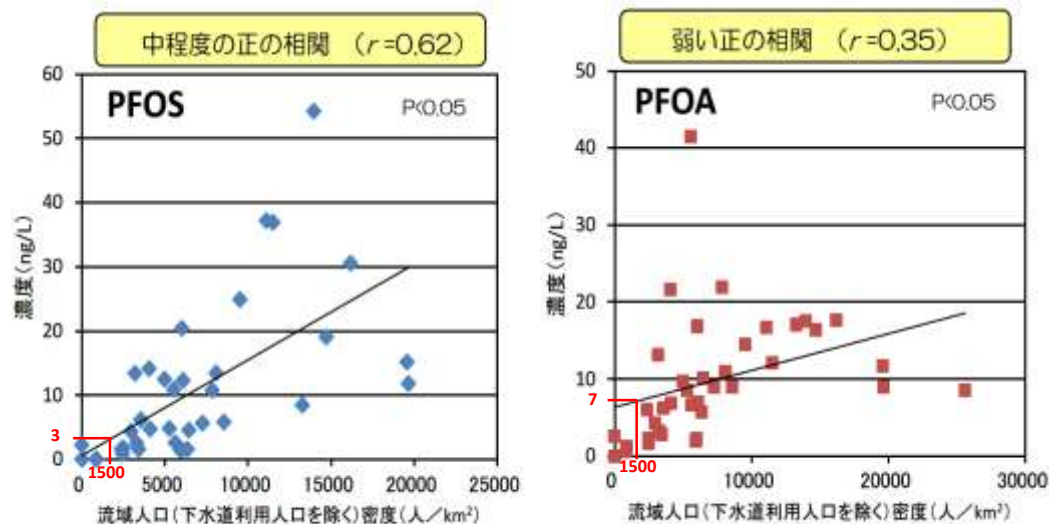


図4 下水道利用人口を除く流域人口密度とPFOS、PFOA濃度の関係

(出典: 茂木守: 県内河川残留性有機フッ素化合物の汚染実態、2012、埼玉県環境科学国際センター講演会要旨)

※水質環境基準暫定指針値: PFOS・PFOA の合計で50ng/L

1 - (4) PFOS等含有物の使用等状況

検証項目	主な検証内容	資料収集からの判明事項	地下水下流側の湧水におけるPFOS等の検出状況との関連
② PFOS等含有物の使用等状況	泡消火薬剤の構成成分と変遷	<ul style="list-style-type: none"> ●市場流通している泡消火薬剤の成分の特徴 ・レガシーPFOS泡消火薬剤 ⇒PFOS主体、PFOA含有で電解フッ素化で製造するため、分岐異性体が多く含まれる。 ・モダンフルオロテロマー泡消火薬剤 ⇒6:2FTS主体でテロマー合成で製造するため、分岐異性体が含まれない。 ●普天間飛行場での泡消火薬剤成分の変遷 ・1970年～2015年頃⇒ レガシーPFOS泡消火薬剤 ・2016年頃～2021年⇒ モダンフルオロテロマー泡消火薬剤に入替え ・2020年4月に流出した泡消火薬剤は6:2FTS主体 	<ul style="list-style-type: none"> ●普天間飛行場周辺での使用等が考えられるPFOS等含有物の中で、現段階で使用や保管の履歴が確認されるものは、泡消火薬剤である。 ●2020年9月にC、D流域の複数地点で6:2FTSの濃度上昇が確認された。 ●PFOS等の直鎖体と分岐異性体の比率から、レガシーAFFF (PFOS主体、PFOA含有)が地下浸透し、現在も地盤中に滞留している可能性がある。
	泡消火薬剤の使用・保管・流出(時期・規模)	<ul style="list-style-type: none"> ●泡消火薬剤は消火訓練施設で使用され、格納庫では流出事故も発生している。泡消火薬剤の廃水は格納庫内の地下貯水槽に2021年10月まで貯留されていた。 	

1 - (4) PFOS等含有物の使用等状況

◆ 普天間飛行場周辺で使用等の可能性があるPFOS等含有物

- ✓ 普天間飛行場周辺での使用等が考えられるPFOS等含有物のうち、現段階で使用や保管の履歴が確認されるものは、泡消火薬剤である。
- ✓ 泡消火薬剤以外のPFOS等の用途としては、航空機の作動油、航空機や部品等の洗浄剤などが普天間飛行場での使用で考えられるが、使用履歴等に関しては確認されなかった。
- ✓ 写真感光剤、表面処理剤、金属メッキについて、水質汚濁防止法に係る特定事業場の情報からはPFOS等含有物の使用等に関する情報は確認されなかった。

PFOS等含有物	排出源と考えられる場所	使用等の履歴	使用等に関して入手できた資料
泡消火薬剤	普天間飛行場	使用・保管・廃水流出の履歴あり	米軍プレスリリース資料 廃水流出に係る調査結果 他
	宜野湾市消防署	使用履歴なし	宜野湾市消防本部ヒアリング
航空機用の作動油や洗浄剤	普天間飛行場	不明	米軍からの「沖縄防衛局への覚書」に対する疑義照会
写真感光剤	写真店	不明	水質汚濁防止法特定事業場台帳
表面処理剤	製紙・紙工業関連施設	不明	水質汚濁防止法特定事業場台帳
金属メッキ	金属メッキやエッチング関連施設	不明	水質汚濁防止法特定事業場台帳

1 - (4) PFOS等含有物の使用等状況 <泡消火薬剤>

◆泡消火薬剤の構成成分とその変遷

- ✓ 市場流通している泡消火薬剤(原液)のうち、PFOS等(フッ素系界面活性剤)の組成比は2%未満(重量)である。米軍では1970年代から使用していたレガシーPFOS泡消火薬剤をモダンフルオロテロマー泡消火薬剤に入替えている。

(出典:ITRC: PFAS Technical and Regulatory Guidance Document and Fact Sheets PFAS-1, 2020revice)

・レガシーPFOS泡消火薬剤(Legacy PFOS AFFF)

フッ素界面活性剤は電解フッ素化で製造され、分岐異性体を多く含む。PFOSが主体的であり、PFH_xSやPFOAが含有する。代表的な製品として米国3M社「Light Water」がある。

・モダンフルオロテロマー泡消火薬剤(Modern fluorotelomer AFFF)

フッ素界面活性剤は主にフッ素置換炭素数が6つの構造(6:2FTSなど)であり、テロマー合成法で製造され、分岐異性体をほとんど含まない。

◆泡消火薬剤を使用する場所

- ✓ 米軍基地では、消火訓練施設、格納庫、消火対応で泡消火薬剤が使用され、消火訓練施設での使用量が比較的多い。(R. Hunter Anderson et al.: Occurrence of select perfluoroalkyl substances at U.S. Air Force aqueous film-forming foam release sites other than fire-training areas: Field-validation of critical fate and transport properties, 2016)
- ✓ 宜野湾市消防署に保管している泡消火薬剤は平成29年にPFOS等を含まないものに切換えを完了し、訓練等での泡消火薬剤の使用履歴は無い。

1 - (4) PFOS等含有物の使用等状況 <泡消火薬剤>

◆ 普天間飛行場で使用された泡消火薬剤の成分の変遷

泡消火薬剤の使用年代	消火訓練	普天間飛行場での事故等
1970年代～2015年頃 ・古いタイプの泡消火薬剤を使用 (レガシーPFOS泡消火薬剤)	・2014年 5回 ・2015年 3回 ・2016年2月まで 2回	・2005～2009年に少なくとも3回、計2,700Lの泡消火薬剤を含む水が流出
2016年頃～2021年8月 ・新しいタイプの泡消火薬剤(モダンフルオロテロマー泡消火薬剤)への入替え期間 ・古いタイプの泡消火薬剤も残存	・ <u>2016年3月以降、消火訓練には水を使用</u> ・2016年3月以降 4回 ・2017年 5回 ・2018年 4回 ・2019年 2回 ・2020年 1回 ・2021年8月まで 2回	・2019年8月、PFOS等を含む泡消火薬剤378Lがタンクから漏出 ・2019年12月に95,000～114,000Lの泡消火薬剤を含む水が発生し、一部が飛散または雨水管に流出 ・2020年1月、泡消火薬剤128Lのうち少量が飛行場外へ流出 ・2020年4月に227,100Lの泡消火薬剤を含む水が発生し、そのうち143,830Lが飛行場外へ流出 ・2021年8月、PFOS等を含む水64,000Lを下水へ放出
2021年9月～ ・新しいタイプの泡消火薬剤への入替え完了(2021年9月)	・2021年10月まで 1回	・2021年10月7日、地下貯水槽に貯留していたPFOS等を含む水360,000Lを防衛省が引取り完了

*1 米軍、米国会計検査院、宜野湾市の公表資料、新聞報道、雑誌記事等から作成。

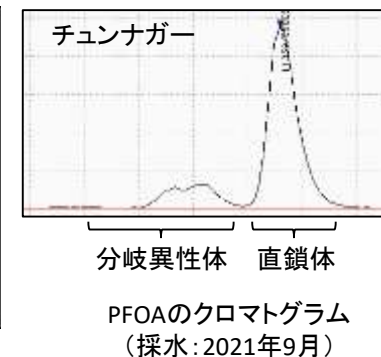
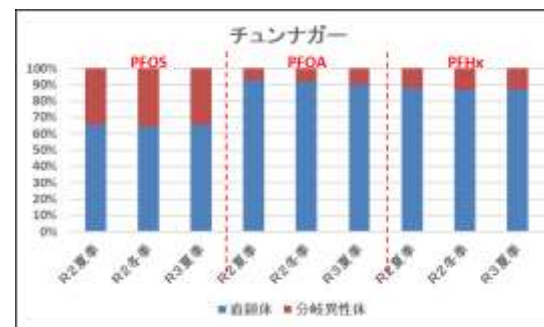
*2 消火訓練は宜野湾市が米軍側から実施の報告を受けた件数であり、消火訓練が中止になったものも含んだ件数である。

*3 宜野湾市の公表資料、新聞報道、雑誌記事等には、流出した泡消火薬剤を含む水やPFOS等を含む水の性状について詳しい記載はないが、放出された泡消火薬剤やそれらの除去で使用した水の混合水が考えられる。

1 - (4) PFOS等含有物の使用等状況 <泡消火薬剤>

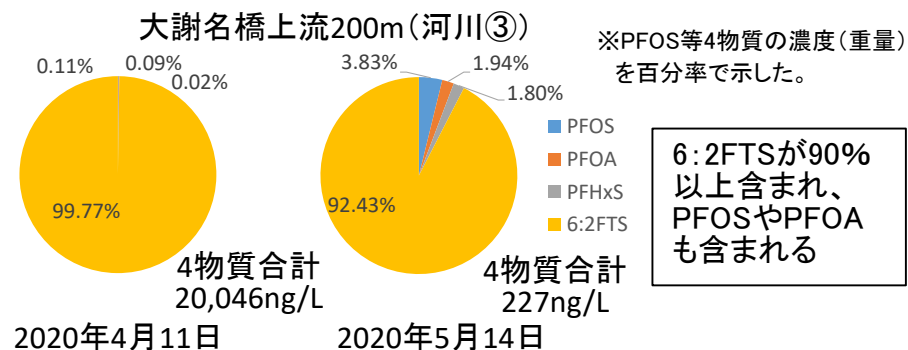
◆ 普天間飛行場で使用された泡消火薬剤の成分の変遷

✓ 普天間飛行場周辺の湧水や地下水にはPFOS、PFOAの分岐異性体が含まれ、PFOAのクロマトグラムでは分岐異性体の複数のピークが確認される。これらは電解フッ素化で製造されたPFOS、PFOAの特徴であり、レガシーPFOS泡消火薬剤が地下浸透した可能性が示唆される。



地下水下流側水質調査地点(チュンナガー)のPFOS及びPFOAの分岐異性体の比率とクロマトグラム

✓ 2020年に泡消火薬剤が流入した河川水から検出されたPFOS等の90%以上が6:2FTSであり、飛行場内の泡消火薬剤がモダンフルオロテロマー泡消火薬剤に入替えられていることが示唆される。



6:2FTSが90%以上含まれ、PFOSやPFOAも含まれる

泡消火薬剤流出事故(2020年4月10日)後の下流側河川水の水質分析結果

(出典: 普天間飛行場泡消火薬剤漏出事故に伴う環境調査結果(第4報))

1 - (4) PFOS等含有物の使用等状況 <泡消火薬剤>

◆ 普天間飛行場における泡消火薬剤の使用・保管(時期・規模)

- ✓ 泡消火薬剤は消火訓練施設、航空機の格納庫で使用される。
- ✓ 泡消火薬剤は格納庫や消火設備タンク、消火車両に保管される。
- ✓ 使用後の泡消火薬剤を含む廃水は格納庫の地下貯水槽に貯留されていた。



地理院地図を加工して作成

【消火訓練施設】

- 四半期～月に1回の頻度で訓練を実施。
- 廃水の濃度(2016年2月18日)
PFOS 27,000ng/L
PFOA 1,800ng/L
- 2016年3月以降の訓練には水のみ使用。

【機体洗淨施設】

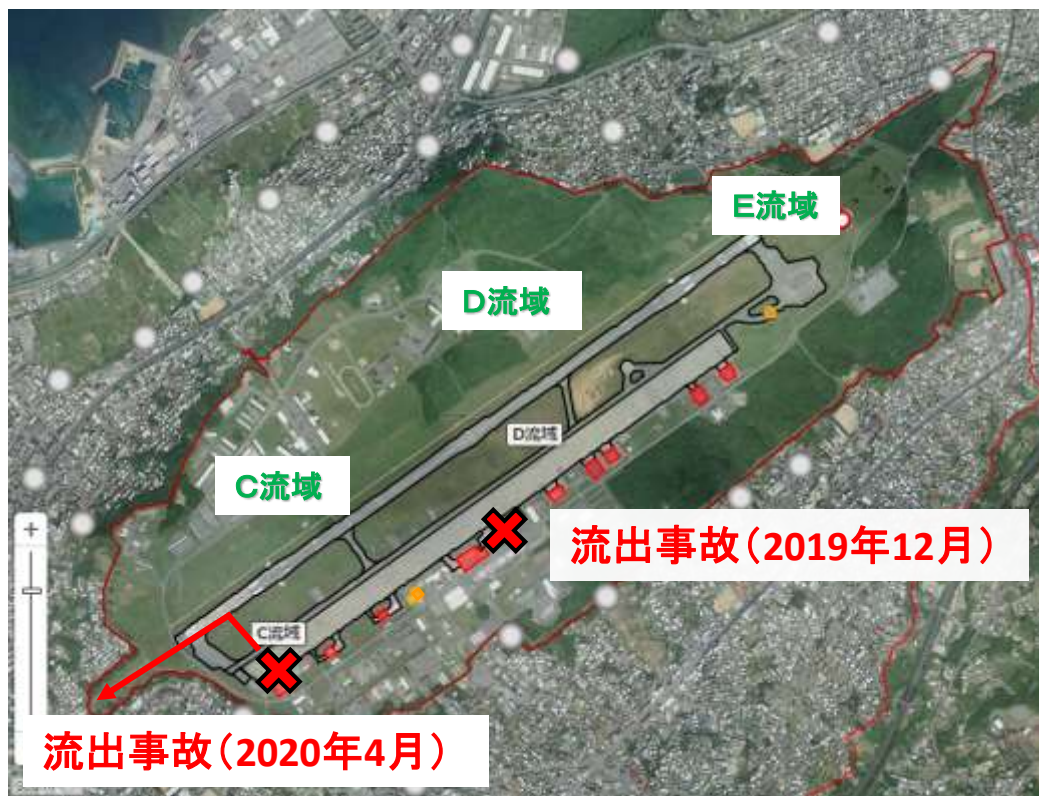
【格納庫(赤印)・消防署(黄印)】

- 格納庫内には消火設備タンク及び地下貯水槽が付随。
⇒ 地下貯水槽の廃水36万Lを2021年10月7日までに防衛省が引取処分。

1 - (4) PFOS等含有物の使用等状況 <泡消火薬剤>

◆ 普天間飛行場での泡消火薬剤の廃水流出(時期・規模)

- ✓ 泡消火薬剤の廃水が飛行場外に流出する事故が、2005年～2009年に少なくとも3回、2019年に1回、2020年に1回発生した。
- ✓ 2020年4月には格納庫に放出された泡消火薬剤の廃水143,000Lが飛行場外へ流出した。



地理院地図を加工して作成

【2019年12月の流出事故】

- 格納庫で放出された泡消火薬剤を含む水の一部が飛散又は雨水管から飛行場外へ流出。流出量は不明。米軍の報告では泡消火薬剤のほとんどは地下貯水槽へ回収されたとされている。

【2020年4月の流出事故】

- 格納庫で放出された泡消火薬剤を含む水227,100Lが発生し、143,000Lが飛行場外へ流出。

【その他の流出事故等】

- 2005～2009年に少なくとも3回、計2,700Lの泡消火薬剤を含む水が流出(事故の位置や飛行場外への流出量は不明)。
- 2019年8月、PFOS等を含む泡消火薬剤378Lが消防車タンクから漏れ出た。飛行場外への流出はなかったとされている。
- 2020年1月、消防車から誤放出された泡消火薬剤128Lのうち少量が飛行場外へ流出(事故の場所は不明)。
- 2021年8月、米軍がPFOS等を含む水64,000Lを公共下水道へ放出。放出直後の下水道汚水のPFOS・PFOA濃度は670ng/L。

1 - (5) 地表部から地下への浸透

検証項目	主な検証内容	資料収集からの判明事項	地下水下流側の湧水におけるPFOS等の検出状況との関連
③ 地表部から地下への浸透	表流水の動き、地下水への浸透 不飽和帯におけるPFOS等の挙動	<ul style="list-style-type: none"> ● 飛行場中央～北側(E流域の消火訓練施設、D・E流域の格納庫)の地表排水は、地表面からの地下浸透や飛行場内の地表排水側溝を經由して吸込穴(ポノール)から地下に浸透すると考えられる。 ● 飛行場南側(C流域の格納庫周辺)の地表排水の一部は、地表排水側溝を經由して比屋良川に放流されると考えられる。 ● PFOS等の消火訓練施設での使用終了後18年間に渡り地下水汚染が継続し、1,200m下流側に汚染が到達した事例があり、有機フッ素化合物が土壌に吸着されることがその要因とされている。 	<ul style="list-style-type: none"> ● C、D流域では、格納庫でPFOS等を含む泡消火薬剤の流出事故が発生し、泡消火剤含有水が地下浸透した可能性がある。 ● E流域では、消火訓練で使用したPFOS等を含む泡消火薬剤含有水が地下浸透した可能性がある。 ● PFOS等は、調査を開始した2016年から1,000ng/Lの濃度で継続的に検出されている。

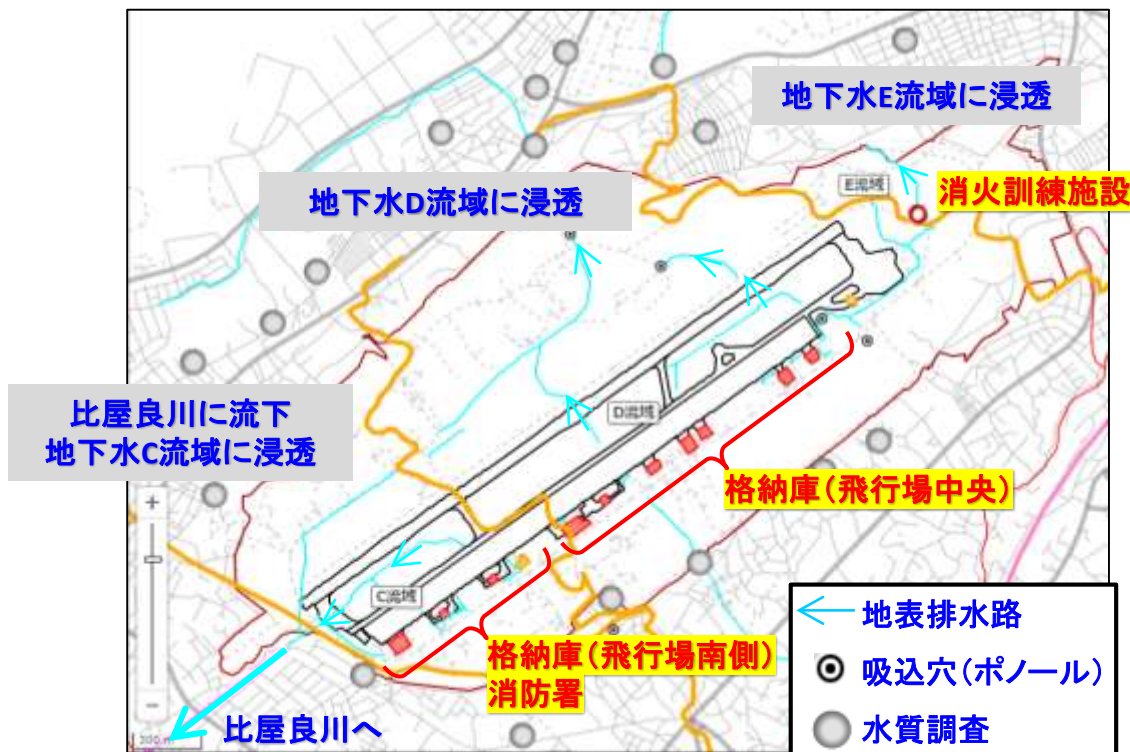
1 - (5) 地表部から地下への浸透

◆表流水の動きと地下水への浸透

- ✓ 格納庫や消火訓練施設周辺の、表流水の動きと地下水への浸透を以下のように整理した。
 - ・飛行場南側の格納庫：地表排水側溝を經由し、比屋良川に流出
 - ・飛行場中央の格納庫：地表排水側溝を經由し、吸込穴(ポノール)から地下水D流域に浸透
 - ・消火訓練施設：地表排水側溝に流入した地表水は地下水E流域に浸透

- ✓ 泡消火薬剤を使用した場所の地表面が緑地である場合、地下保管施設や地表排水側溝に亀裂等があれば、それらの場所から地下へ浸透する可能性がある。

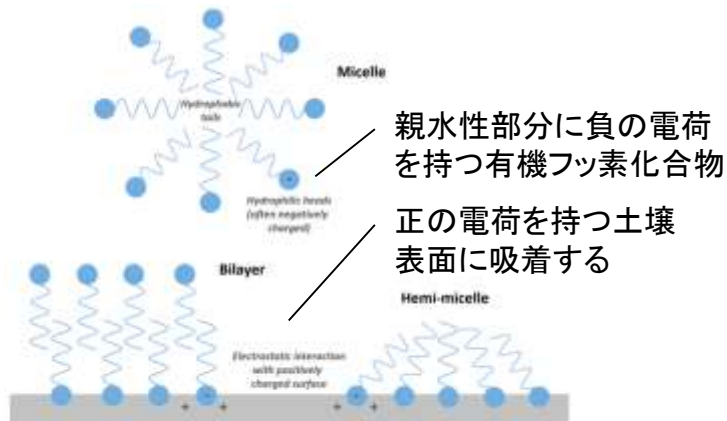
- ✓ 飛行場内の緑覆率は約70%で、上流側の水質調査地点より下流側では、普天間飛行場内の緑地が降雨の主要な地下浸透の場となる。



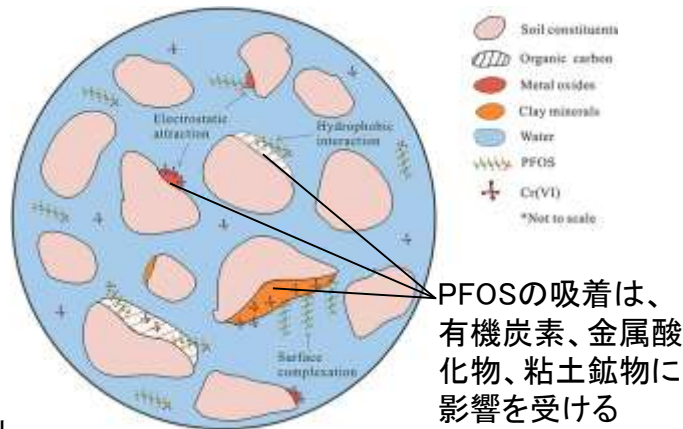
1 - (5) 地表部から地下への浸透

◆地下浸透時の不飽和帯におけるPFOS等の挙動に関する既往知見

- ✓ 有機フッ素化合物には陽イオン・陰イオン・両性イオンが存在する。その移動・吸着特性は有機フッ素化合物毎及び土壌との相互作用に依存しており、移動を予測するにはサイト毎の詳細な情報が必要となる(出典を含め左下図)。
- ✓ 有機フッ素化合物の吸着は、3つの土壌成分の寄与(有機炭素、金属酸化物、粘土鉱物)など地球化学的因子により影響を受けるとされる(出典を含め右下図)。
- ✓ 消火訓練施設の使用終了後18年間に渡り汚染が継続し、1,200m下流側に汚染が到達した事例がある。(出典: Andrea K. Weber et al. : Geochemical and Hydrologic Factors Controlling Subsurface Transport of Poly- and Perfluoroalkyl Substances, Cape Cod, Massachusetts, 2017)



有機フッ素化合物ミセルの、正に帯電した土壌への吸着例(正の電荷の有機フッ素化合物が、負に帯電する土壌へ吸着することも考えられる)



(出典: Dandan Huang et al. : The Co-Transport of PFAS and Cr(VI) in porous media, 2022に加筆)

★石灰岩で推定されるPFOS等の挙動

〈石灰岩でのPFOS等の汚染機構〉
汚染機構を明らかにした事例は、国内・海外含め確認されていない。

〈有機炭素・金属酸化物・粘土鉱物〉
この3つの土壌成分は、石灰岩自体には少ないと推測されるが、琉球石灰岩では粘土混じり砂礫状の部分が確認される。
粘土鉱物が負に帯電していた場合は、陽イオン性の有機フッ素化合物が吸着する可能性はある。

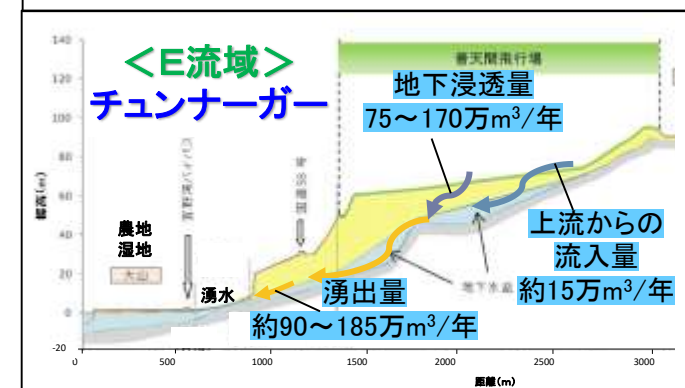
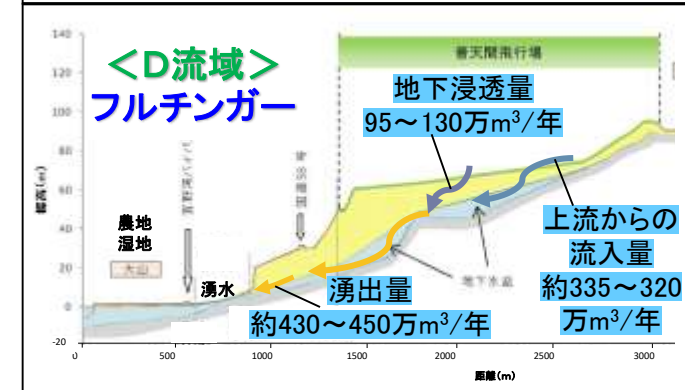
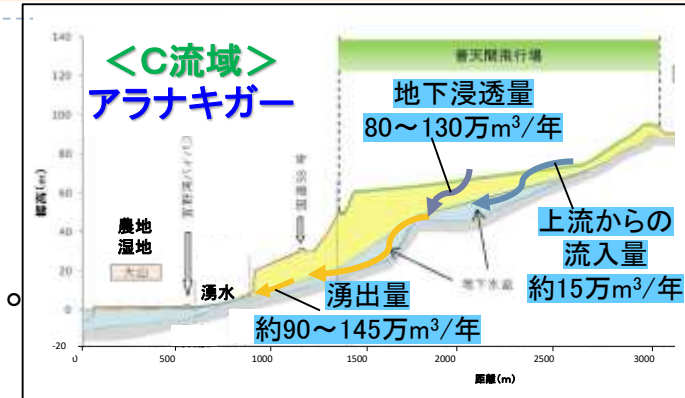
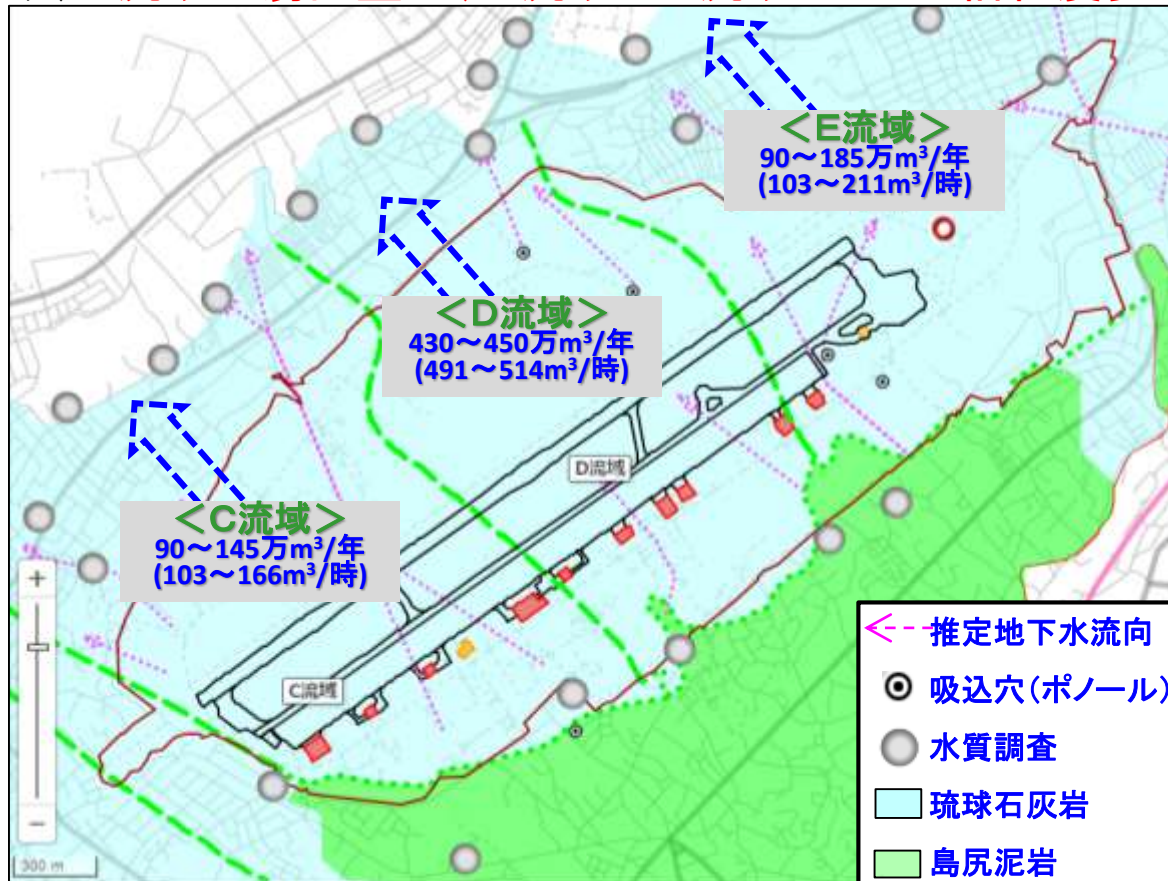
1 - (6) 地下水によるPFOS等の移動

検証項目	主な検証内容	資料収集からの判明事項	地下水下流側の湧水におけるPFOS等の検出状況との関連
④ 地下水によるPFOS等の移動	既往検討の地下水の流下方向、流速	<ul style="list-style-type: none"> ● 地下水流向は、島尻泥岩(基盤)上面標高の等高線に影響されると考えられ、不透水基盤等高線図や地下水位等高線図を合成した水文地質図が作成されている。 ● 普天間飛行場内の地下水は南東⇒北西方向に流下し、大きく3つの地下水流域(C、D、E)に区分される。 ● 調査事例によると、透水係数は、琉球石灰岩で$10^{-5} \sim 10^{-3} \text{m/sec}$オーダー、島尻泥岩で$10^{-8} \text{m/sec}$オーダー。琉球石灰岩の有効間隙率は、0.03~0.35。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設定する透水係数や有効間隙率のオーダーに幅があるため、地下水流速は大きく変動するが、34m~46,000m/年の範囲にあると試算される。 ● 地下浸透した泡消火薬剤が、透水性の高い領域を流下した場合は下流側湧水へ比較的短期間で到達、低い領域を流下した場合は十年単位の期間をかけて到達する可能性がある。 ● 既往検討の地下水流域界とPFOS等の濃度変化が整合しない地点もあることから、今後把握される地下水流向やPFOS等の濃度変化も踏まえ、引き続き検討する必要がある。

1 - (6) 地下水によるPFOS等の移動

◆地下水の流下方向と水収支

- ✓ 地下水は南東⇒北西に流下し、C・D・E流域に区分される。
- ✓ 各地下水流域の湧出量は、上流からの表流水流入量で異なり、D流域の湧出量は、C流域やE流域と比べ4倍程度多い。



1 - (6) 地下水によるPFOS等の移動

◆琉球石灰岩と島尻泥岩の透水係数等

- ✓ 透水係数は、琉球石灰岩で $10^{-5} \sim 10^{-3}$ m/secオーダー、島尻泥岩で 10^{-8} m/secオーダー。
- ✓ 琉球石灰岩の有効間隙率は、0.03~0.35。
- ✓ 地下ダム¹⁾の流動解析モデルでは、ダルシー則を基礎方程式に用い、空洞部分を高い透水係数に設定することで、琉球石灰岩の地下水流動系を疑似的に表現した事例^{*1}があるため、琉球石灰岩に対し地下水流動シミュレーションが適用できる可能性がある。

地質名	調査地	透水係数(m/sec)	透水係数の調査方法等	有効間隙率	間隙率
琉球石灰岩	沖縄本島南部	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	不明	—	—
	沖縄本島南部	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	不明	—	0.09
	沖縄本島南部	$7.4 \times 10^{-5} \sim 4.4 \times 10^{-3}$	現場透水試験	—	—
		$4.8 \times 10^{-5} \sim 9.3 \times 10^{-3}$	PEST推定値	—	—
	沖縄県宮古島	10^{-3}	不明	0.1	—
	沖縄県宮古島	3.5×10^{-3}	揚水試験結果の最頻値	—	—
	沖縄県宮古島	—	—	0.03~0.35 平均 0.123	0.05~0.40 平均 0.188
沖縄県伊江島	—	—	0.066	0.164	
島尻泥岩	沖縄県宮古島	10^{-8} 以下	不明	—	—
	沖縄県宮古島	1.0×10^{-8}	不明	—	—

(*1出典:安元純ほか:琉球石灰岩帯水層における広域地下水流動モデルの構築, 2016)

1 - (6) 地下水によるPFOS等の移動

◆推定される移動経路上の地下水流速

✓ 把握・推定された地下水位・動水勾配・透水係数から、**地下水流速は「34m～46,000m/年」**の範囲と試算された(設定する透水係数により地下水流速は大きく変動)。

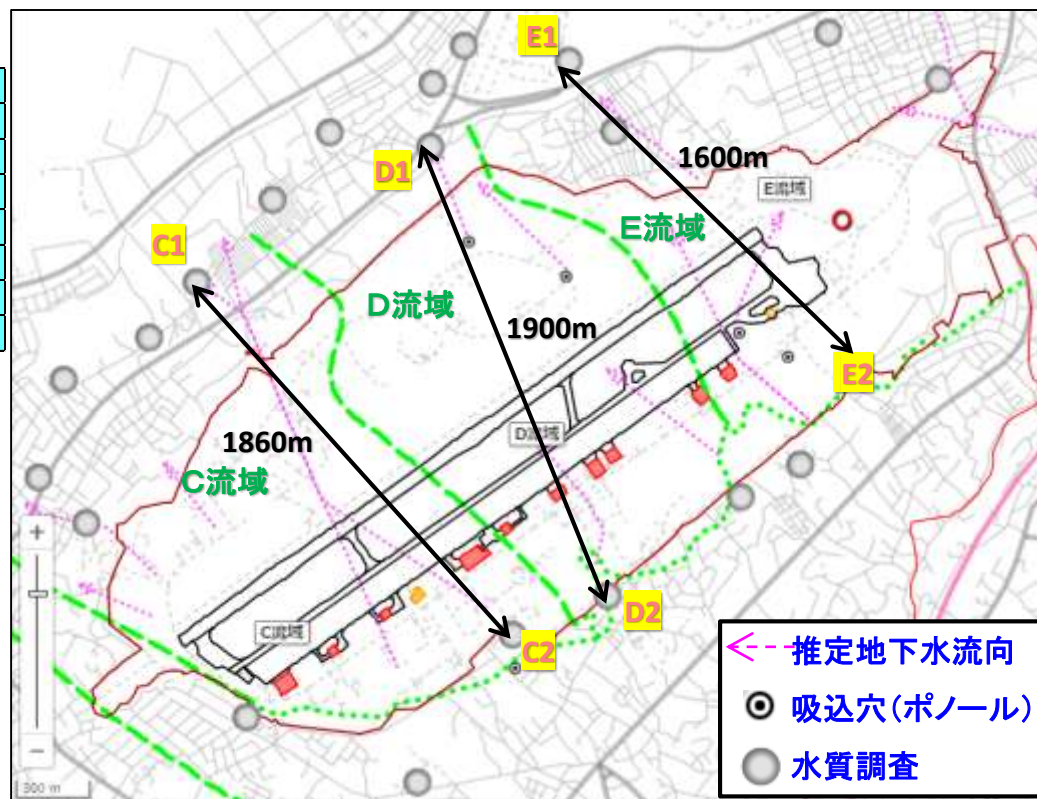
⇒ 琉球石灰岩の不均質性により地下水流速に幅が生じ、PFOS等を含む地下水が**下流側の湧水へ迅速に移動する領域**と、**琉球石灰岩中で緩慢に移動する領域**が複雑に分布すると推定される。

評価地点	水頭差	距離	動水勾配	有効間隙率	透水係数	地下水流速
	Δm				m	m/sec
C2→C1	81	1860	0.043548	0.03	1.0. E-03	45809
					0.35	1.0. E-05
D2→D1	71	1900	0.037368	0.03	1.0. E-03	39309
					0.35	1.0. E-05
E2→E1	63	1600	0.039375	0.03	1.0. E-03	41419
					0.35	1.0. E-05

※有効間隙率、透水係数は、文献資料からの読取値のうち、**地下水流速が最大となる組合せ、最小となる組合せ**を用いた。

※地下水流速 = 動水勾配 ÷ 有効間隙率 × 透水係数

格納庫周辺で地下浸透した泡消火薬剤が、透水係数の高い領域を流下した場合は下流側湧水へ**比較的短期間で到達**、低い領域を流下した場合は**十年単位の期間をかけて到達**する可能性がある。



地理院地図を加工して作成

1 - (6) 地下水によるPFOS等の移動

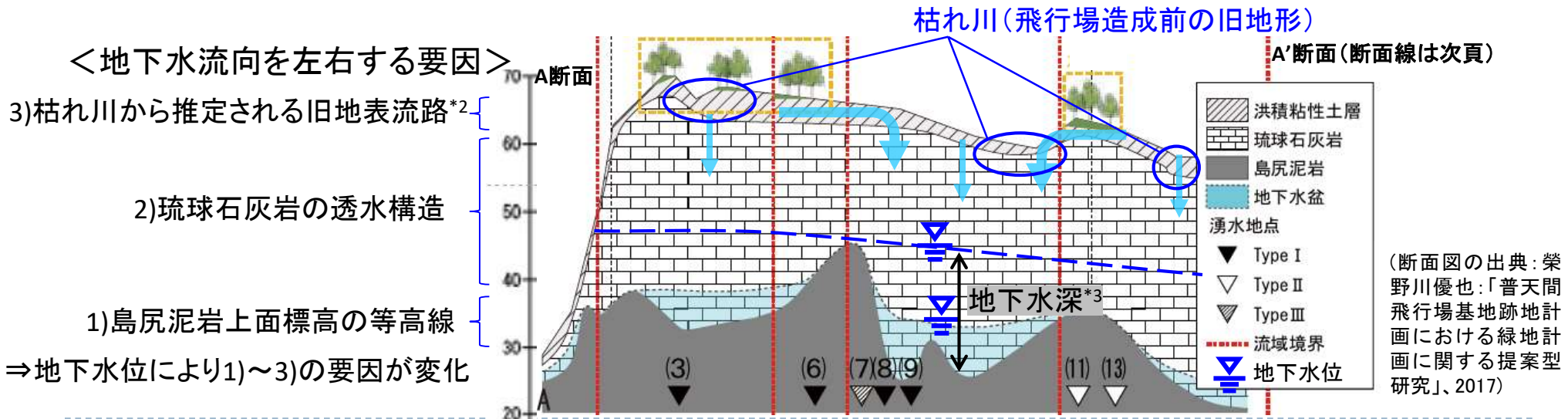
◆地下水流向を左右する要因

- ✓ 琉球石灰岩内の地下水流向は、複数の要因に左右される。
- ✓ 地下水流向を左右する要因は、地下水位測定*1により確認できる。

地下水位	地下水流向を左右する要因	左記の要因を把握する調査方法
1)低い	島尻泥岩上面標高の等高線	既往柱状図の整理、ボーリング地質確認
2)中程度	琉球石灰岩の透水構造	ボーリング(オールコア採取)による地質確認
3)高い*2	枯れ川から推定される旧地表流路	飛行場造成前の旧地形確認

*1 観測井に自記水位計を設置し、連続観測を行うことが望ましい。

*2 既往自然環境調査、柱状図地下水位、地下水位連続観測結果(喜友名B)等から、3)に該当する高い地下水位となる可能性は低いと考える。

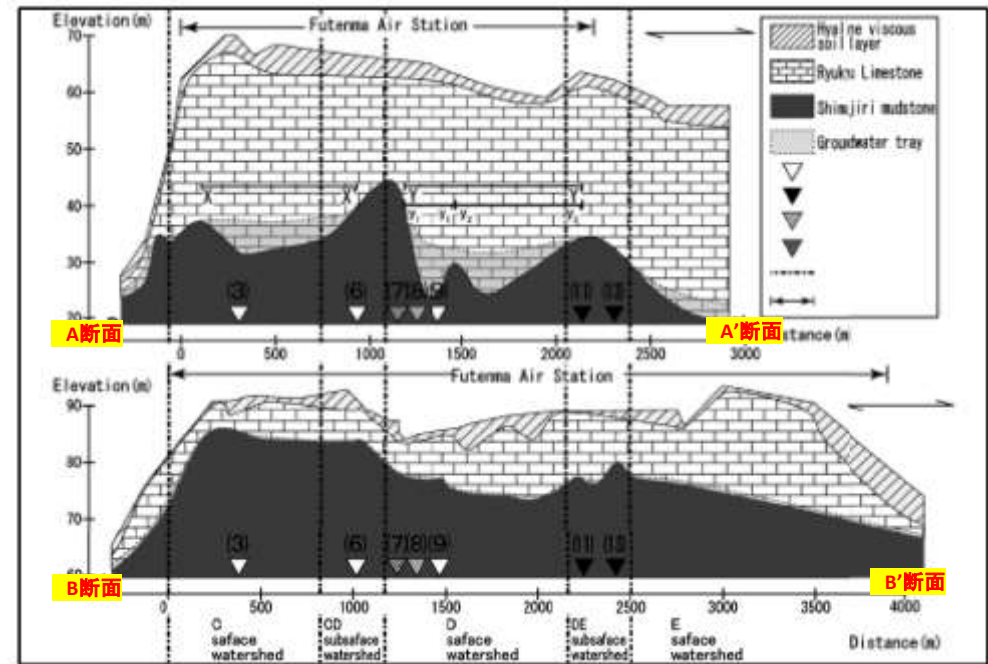


*3 地下水深(島尻泥岩～地下水位)は上流部1~2m、下流部1~9m程度

1 - (6) 地下水によるPFOS等の移動

◆ 島尻泥岩上面標高の等高線に影響を受ける地下水流向

- ✓ 島尻泥岩(基盤)上面標高の等高線は、既往ボーリング柱状図、電気探査結果から推定される。
- ✓ 地下水下流側(AA'断面)に比べ上流側(BB'断面)の起伏はなだらかで、流域界が不明瞭である可能性もある。

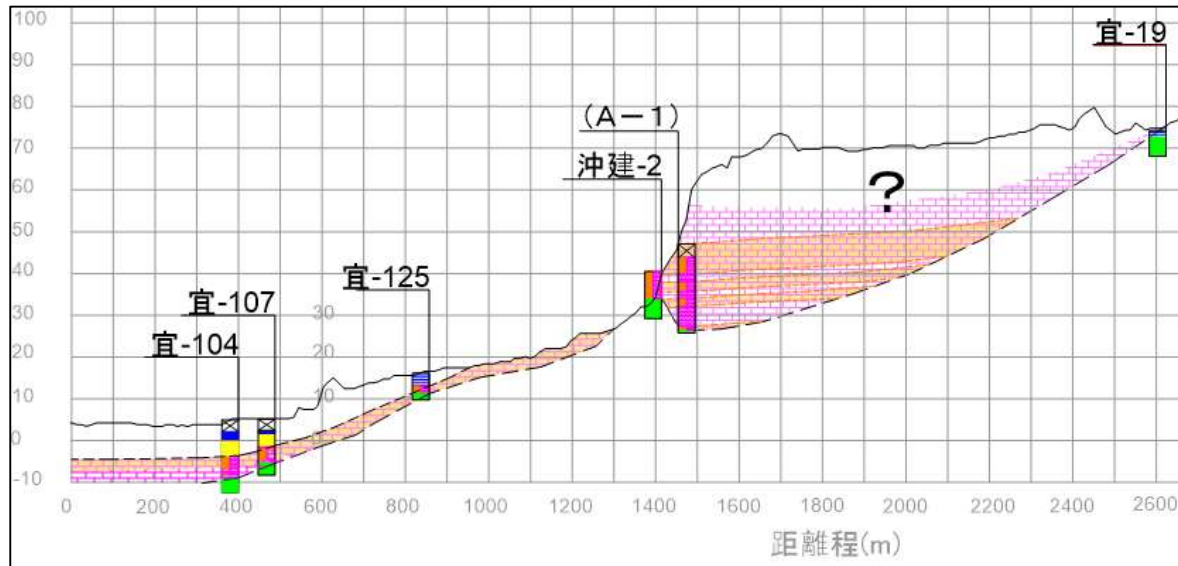


(等高線・断面図の出典: 榮野川優也:「普天間飛行場基地跡地計画における緑地計画に関する提案型研究」、2018を用いて地理院地図を加工)

1 - (6) 地下水によるPFOS等の移動

◆琉球石灰岩の透水性に影響を受ける地下水流動

- ✓ 琉球石灰岩は、岩屑状石灰岩と塊状石灰岩からなり、ボーリングコア観察やN値で区分される。
- ✓ 岩屑状石灰岩・塊状石灰岩は断面方向や平面方向で入り乱れた分布となり、透水性が高い岩屑状石灰岩に沿って、地下水は流動すると考えられる。



岩屑状石灰岩 (透水性：高と推定)
塊状石灰岩

2. 汚染メカニズムと汚染源の推定・絞込み

2 - (1) 想定される汚染メカニズム

◆PFOS等の検出状況

項目	検出状況
濃度の分布	<ul style="list-style-type: none">● 普天間飛行場内を経由した地下水下流側では、PFOS等（泡消火薬剤にも含まれるPFOS、PFOA、PFHxS、6:2FTSの4物質）が1,000 ng/Lを超える濃度で検出される地点が分布している。● それらの地点は、C流域とE流域に分布している。
濃度の変化	<ul style="list-style-type: none">● PFOS、PFOA、PFHxS濃度は経時的な変化が認められるものの、変動幅が小さい。● 6:2FTS濃度及び構成比は他の3物質と比較して変動幅が大きく、2020年9月にはC、D流域の地下水下流側の複数地点で濃度上昇が確認される。

◆検出状況から想定される汚染シナリオ

- ✓ 地下水下流側のPFOS等の濃度が上流側よりも高くなっており、上流側と下流側の水質調査地点の間でPFOS等を含む泡消火薬剤等の使用や漏洩が生じていると想定される。

PFOS等による汚染へのシナリオ

PFOS等の使用	泡消火薬剤等のPFOS等の含有製品を使用、排水する。
PFOS等の漏洩	使用する（使用した）PFOS等の含有製品が保管容器等から漏洩する。
流出事故の発生	PFOS等の含有製品が非意図的に放出される。

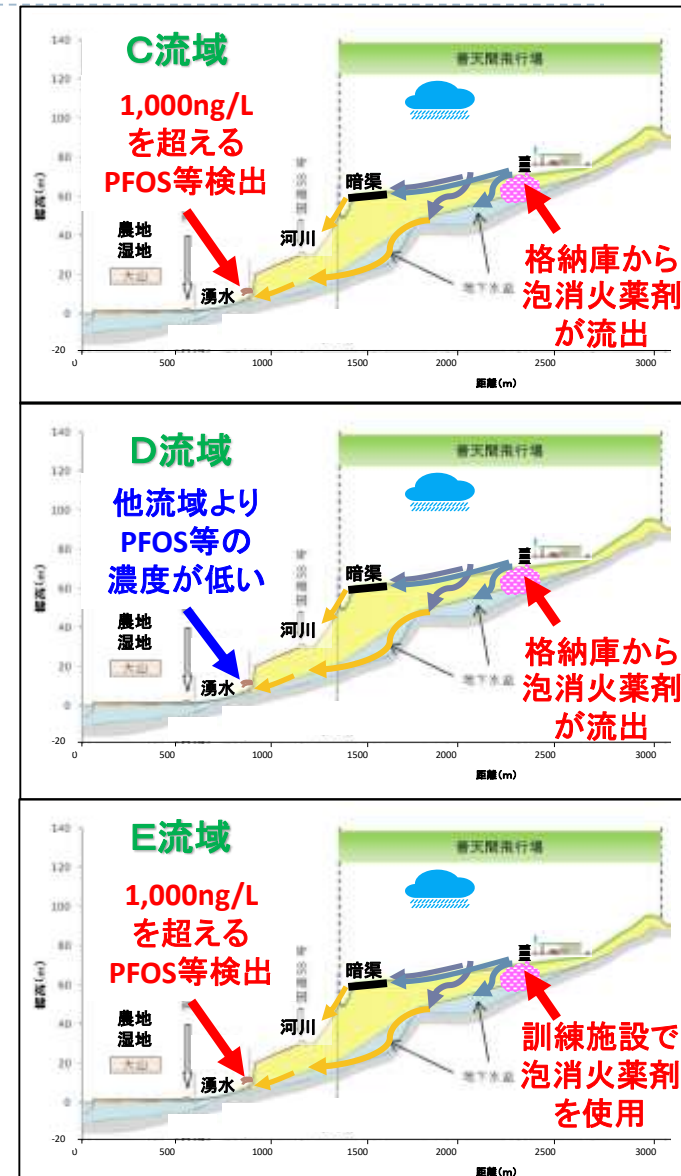
2 - (1) 想定される汚染メカニズム

◆ PFOS等の使用・流出と下流側濃度の関係

- ✓ C流域には格納庫からの泡消火薬剤流出事故の履歴があり、下流側湧水では1,000ng/Lを超えるPFOS等が検出されている。
- ✓ D流域には格納庫からの泡消火薬剤流出事故の履歴があり、C流域やE流域と比べてPFOS等の濃度は低い。
- ✓ E流域には消火訓練施設があり、下流側湧水では1,000ng/Lを超えるPFOS等が検出されている。

地下水流域	泡消火薬剤の使用・流出			下流側湧水の湧出量	下流側湧水のPFOS等	
	格納庫 (地下貯水槽)	訓練施設	流出量		濃度	構成比
C	あり 【流出事故あり】	なし	不明*1	90～ 145 万m ³ /年	64～ 2,000 ng/L	6:2FTS濃度 一時的変化 (4地点で確認)
D	あり 【流出事故あり】	なし		430～ 450 万m ³ /年	49～ 290 ng/L	6:2FTS濃度 一時的変化 (1地点で確認)
E	あり	あり 【消火訓練】		90～ 185 万m ³ /年	80～ 1,600 ng/L	6:2FTS濃度 の変化なし

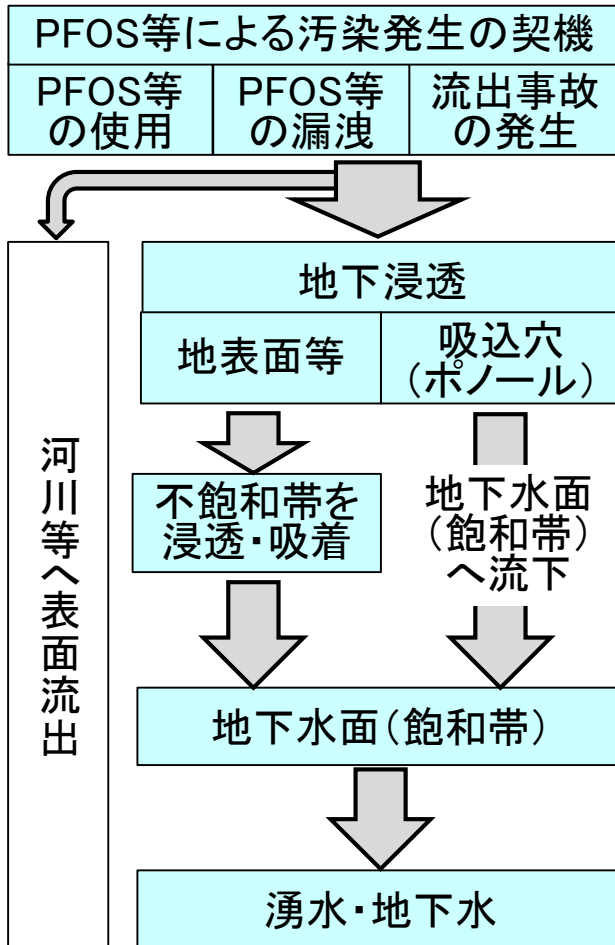
*1 泡消火薬剤が地下へ浸透した流域ごとの詳細な位置、流出量の情報は確認できない。



2 - (1) 想定される汚染メカニズム

◆ 普天間飛行場周辺における汚染メカニズム

✓ 既存資料等より判明した事項から、推定されるPFOS等の移動について整理した。



● 水質調査地点の間でPFOS等の使用等が確認されるサイトとして普天間飛行場が存在する。

● 環境中に放出されたPFOS等は表流水に含まれ、一部は地表面等や吸込穴(ポノール)から地下に浸透し、一部は河川等へ流出する。

● 地表面等から地下に浸透したPFOS等は、降雨の浸透と共に下方へ移動する。また、一部は不飽和帯(地下水面より上位の地盤)の土壤に吸着して残留する。

● 吸込穴(ポノール)へ放流されたPFOS等を含む表流水は、地盤中の亀裂・間隙へ浸透すると共に、表流水の一部は直接地下水面に到達する。

● 地下水面に到達したPFOS等は地下水と共に飽和帯を移動する。

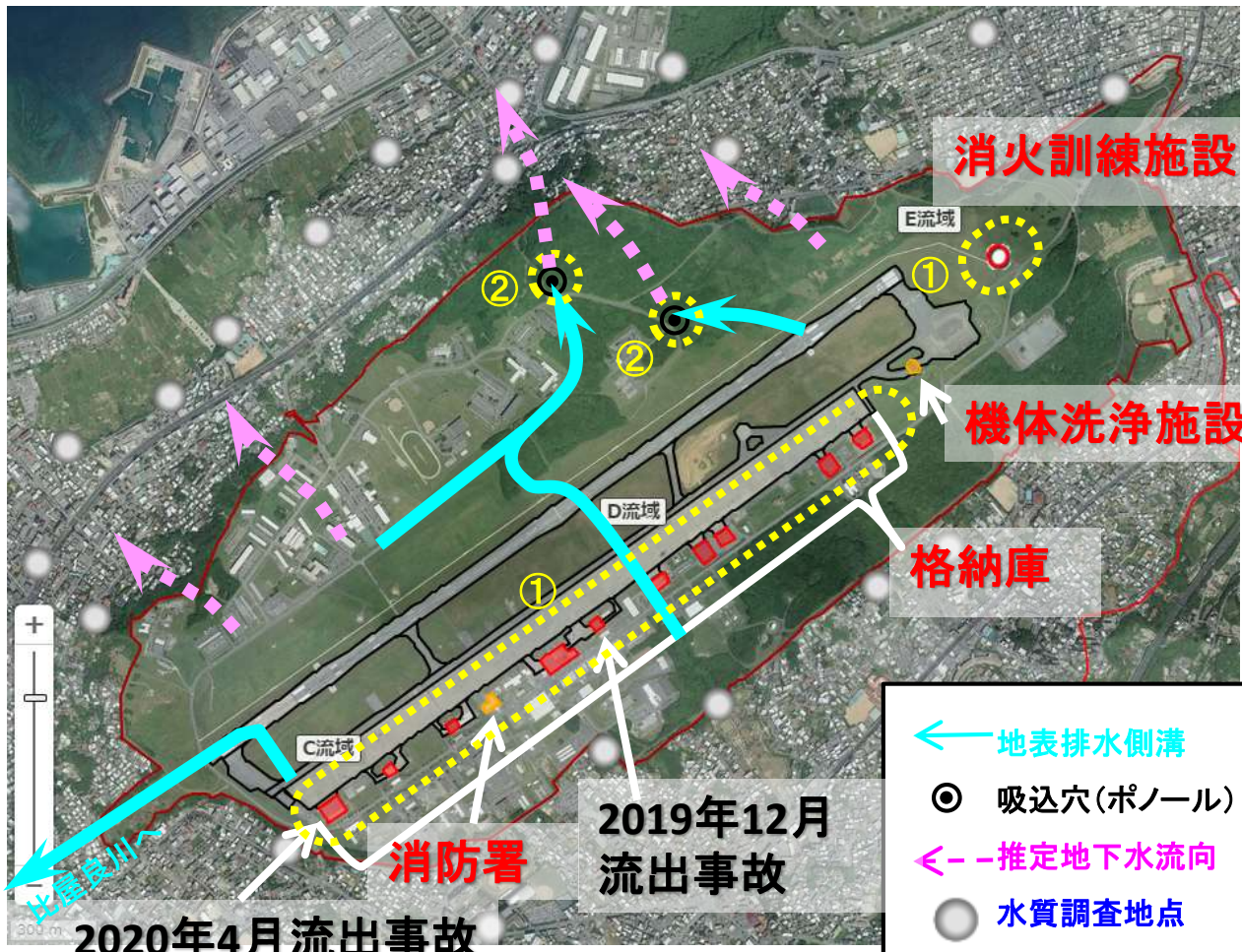
● 流速の大きい領域に到達したPFOS等は、比較的短期間に、下流側の湧水・地下水へ到達する。

● 流速の小さい飽和帯に到達したPFOS等は、十年単位の期間をかけ、下流側の湧水・地下水へ到達すると推定される。

2 - (2) 汚染源の推定・絞込み

◆ 普天間飛行場周辺におけるPFOS等の汚染源(推定)

✓ PFOS等の汚染源と推定される場所を以下の平面図に示す。



① 普天間飛行場内の格納庫、消火訓練施設及びそれら周辺の地表面等

PFOS等を含む泡消火薬剤の使用・漏洩・流出が確認された場所である。
2021年10月までにPFOS・PFOAを含む泡消火薬剤やその廃水は処分されているが、過去に地表面等から地下浸透したPFOS等は、地盤中に残留している可能性がある。

② 普天間飛行場内の吸込穴(PFOS等を含む地表排水を放流)

PFOS等含有物を含む地表排水の流末に位置する場所である。
ここから地下浸透したPFOS等は、速やかに地下水面に到達する可能性がある。

※ 留意点

PFOS・PFOAを他の有機フッ素化合物で代替した泡用消火薬剤の使用等や泡消火薬剤以外のPFOS等の用途については、今後も継続して情報を収集する必要がある。

2020年4月流出事故

地理院地図を加工して作成

2 - (2) 汚染源の推定・絞込み

◆ 普天間飛行場周辺におけるサイト概念モデル

✓ PFOS等の汚染源と推定される場所から湧水等までの移動経路の概念図を、以下の断面図に示す。



① PFOS等の使用・漏洩・流出事故が発生。

② 地表面等から地下に浸透したPFOS等は降雨の浸透によって下方へ移動（不飽和帯土壌へ吸着）

③ 吸込穴（ポノール）へ放流されたPFOS等を含む表流水は地盤中の亀裂・間隙へ浸透すると共にその一部は直接地下水面に到達。

④ 地下水面に到達したPFOS等は地下水とともに地盤中を移動。地下水は島尻泥岩上面の形状や地下水頭の影響を受け流動。

④-1 流速の大きい領域に到達したPFOS等は、比較的短期間で、下流側の湧水へ到達。

④-2 流速の小さい領域に到達したPFOS等は、十年単位の期間をかけて下流側の湧水へ到達。

⑤ 湧水・地下水で暫定指針(50ng/L)を超過したPFOS等が検出。

※留意点

普天間飛行場内の島尻泥岩上面の形状や地下水頭は詳細な調査ができない部分が多く、飛行場外に比べて不確実性が大きい。そのため、今後も継続した検討が必要である。

2 - (3) 汚染源の特定に向けた今後の課題

課題項目	課題項目
1	① 地下水の流向・流速及びPFOS等の濃度分布
	② 地下水下流側の湧水地点におけるPFOS等々の濃度変動
2	③ 地下水流動シミュレーション及び地盤モデル
	④ PFOS等の汚染源
	⑤ PFOS等の地下浸透箇所
	⑥ 不飽和帯におけるPFOS等の吸着及び残留状況
3	⑦ 飛行場内の地下水中のPFOS等濃度

2 - (3) 汚染源の特定に向けた今後の課題

課題項目	① 地下水の流向・流速及びPFOS等の濃度分布
本検討で把握できた事項	<ul style="list-style-type: none"> ● 地形や文献による島尻泥岩上面等高線から、飛行場周辺の大局的な地下水流向を把握 ● 既往資料や文献等から抽出したパラメーターから、地下水流速を試算
今後把握すべき事項	<ul style="list-style-type: none"> ● 収集した島尻泥岩上面等高線の妥当性の検証 ● 詳細な地下水の流向・流速に基づいた推定汚染源から下流側湧水地点までのPFOS等の移動経路
今後の調査や対応案	<ul style="list-style-type: none"> ● 島尻泥岩上面等高線の作成過程をボーリング柱状図、電気探査結果、旧地形図等との照合で確認 ● 飛行場外(敷地境界部)のボーリング調査及び地下水調査 <p>【琉球石灰岩の採取・分析】【観測井の設置、地下水の測定】【地下水の採取・分析】</p>
調査目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 地下水分析を踏まえ飛行場外(敷地境界部)のPFOS等濃度を把握することにより、PFOS等の汚染源が飛行場内に存在する可能性を実証する。

課題項目	② 地下水下流側の湧水地点におけるPFOS等々の濃度変動
本検討で把握できた事項	<ul style="list-style-type: none"> ● 一時的な濃度変動は確認されるが、経時的な変動幅は小さく、概ね一定の濃度で継続してPFOS等が検出される傾向を確認
今後把握すべき事項	<ul style="list-style-type: none"> ● 降雨や季節変動、飛行場内での不定期な活動等の影響によるPFOS等の濃度変動の有無
今後の調査や対応案	<ul style="list-style-type: none"> ● 毎月の湧水及び地下水のモニタリング調査 <p>【湧水及び地下水の採取・分析】【経時的な濃度変動の傾向把握】【降雨量や地下水位との対比】</p>
調査目的	<ul style="list-style-type: none"> ● 毎月のモニタリング調査を実施し、濃度変動の要因を把握する(観測井を設置した場合、必要に応じてモニタリング対象とする)。

2 - (3) 汚染源の特定に向けた今後の課題

課題項目		③ 地下水流動シミュレーション及び地盤モデル
本検討で把握できた事項		<ul style="list-style-type: none"> ● 既往調査や文献等より、琉球石灰岩の透水係数や有効間隙率等の参考データを確認 ● 琉球石灰岩の地下水流動系を擬似的に表現した事例を確認
今後把握すべき事項		<ul style="list-style-type: none"> ● 適用できる地下水流動シミュレーションの解析方法 ● 地盤モデル構築に必要な各種パラメーターの入手
今後の調査や対応案		<ul style="list-style-type: none"> ● 概略的な地盤モデルを作成 ● 各種パラメーターの収集整理を継続 ● 揚水試験により透水係数等のパラメーターを入手 【揚水井と観測井の設置】【揚水試験及び水理解析】 ● 適用可能な解析手法の検討及び選定
調査目的		<ul style="list-style-type: none"> ● 将来の地下水シミュレーションに向け、概略的な地盤モデルを作成する(飛行場内外での有効な追加データが入手出来れば地盤モデルを更新) ● 地下水流動シミュレーションにより、汚染源の検証やPFOS等の移動経路を予測する。

課題項目		④ PFOS等の汚染源	
		<泡消火薬剤>	<泡消火薬剤以外>
本検討で把握できた事項		<ul style="list-style-type: none"> ● 消火訓練施設の位置等を確認 ● 格納庫等での流出事故の履歴を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ● 洗浄剤を使用すると考えられるリンスエリアや格納庫の位置を確認
今後把握すべき事項		<ul style="list-style-type: none"> ● 泡消火薬剤の使用量や処分量などの収支 ● 使用した泡消火薬剤の含有成分 	<ul style="list-style-type: none"> ● PFOS等を含む洗浄剤や潤滑油の関連情報 ● その他のPFOS等含有物の使用等の有無
今後の調査や対応案		<ul style="list-style-type: none"> ● 米軍への照会(沖縄防衛局経由など) ● 文献や公表資料の収集整理の継続 	
留意事項(実現性)		<ul style="list-style-type: none"> ● これまで具体的な情報は得られていないため、継続して回答を求めていく。 	

2 - (3) 汚染源の特定に向けた今後の課題

課題項目	⑤ PFOS等の地下浸透箇所
本検討で把握できた事項	● 地下浸透の可能性があるPFOS等含有水の排水経路等の概略位置を確認
今後把握すべき事項	● 消火訓練施設や格納庫からの排水経路周辺における地下浸透箇所の特定
今後の調査や対応案	● 飛行場内での土壌調査 【表層部の土壌の採取・分析】
留意事項(実現性)	● 現状では飛行場内の立ち入りが実現していないため実施できていないが、調査の重要度は高い。

課題項目	⑥ 不飽和帯におけるPFOS等の吸着及び残留状況
本検討で把握できた事項	● 不飽和帯にPFOS等が吸着及び残留する事例を文献より確認
今後把握すべき事項	● 飛行場内の地下水以浅の不飽和帯におけるPFOS等の濃度分析
今後の調査や対応案	● 飛行場内でのボーリング調査 【琉球石灰岩の採取・分析】
留意事項(実現性)	● 現状では飛行場内の立ち入りが実現していないため実施できていないが、調査の重要度は高い。

課題項目	⑦ 飛行場内の地下水中のPFOS等濃度
本検討で把握できた事項	● PFOS等の濃度は、飛行場の地下水上流側が低く、下流側が高いことを確認
今後把握すべき事項	● 飛行場内における詳細な地下水の流向・流速 ● 飛行場内の地下水におけるPFOS等の濃度分布
今後の調査や対応案	● 飛行場内での地下水調査 【観測井の設置、地下水位の測定】 【地下水の採取・分析】
留意事項(実現性)	● 現状では飛行場内の立ち入りが実現していないため実施できていないが、調査の重要度は高い。