

**令和6年度「基地周辺環境対策推進事業」
有機フッ素化合物汚染源調査に係る専門家会議 資料**

令和7年3月

沖縄県

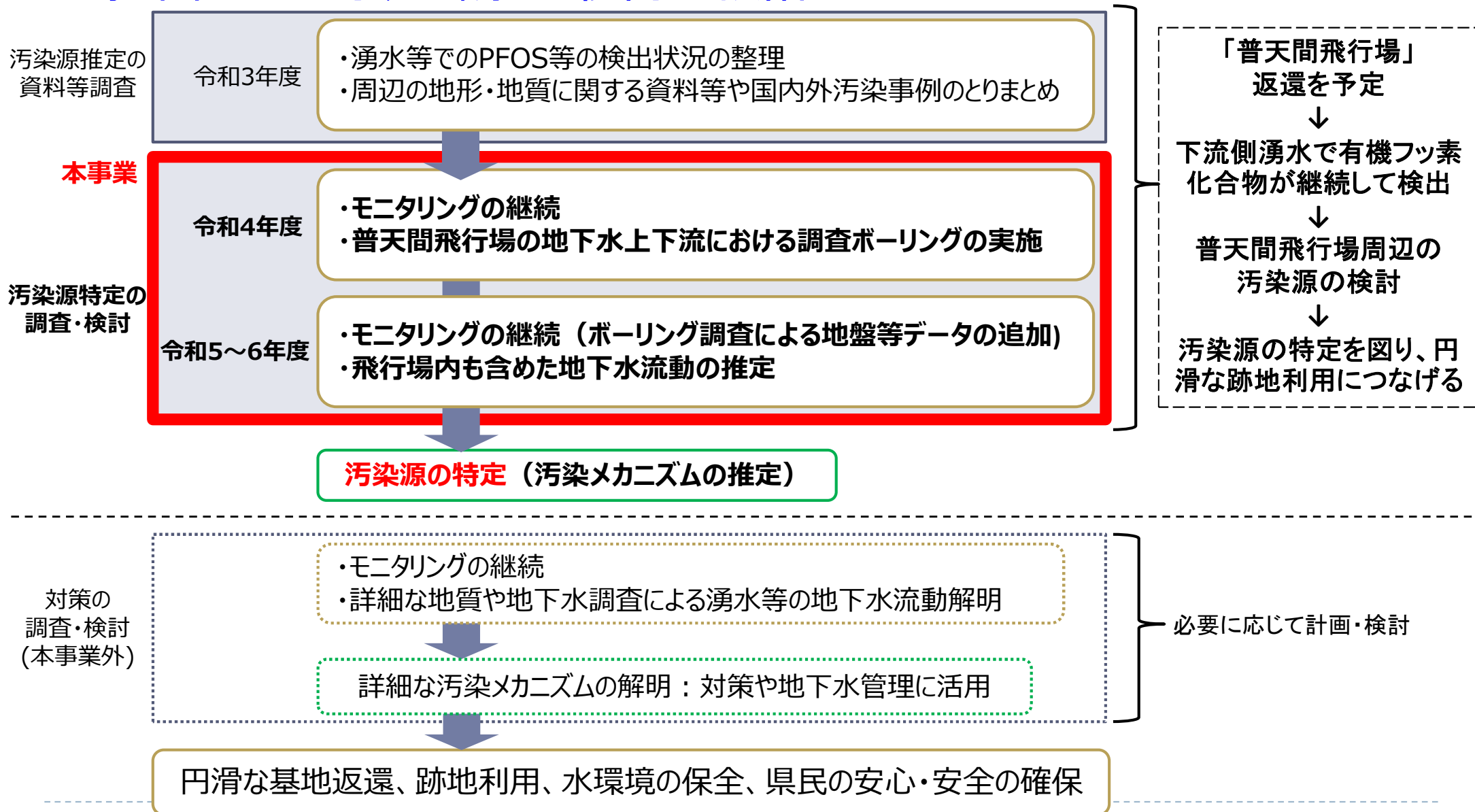
目 次

1. 汚染源検討の経緯と令和6年度の調査・検討事項	1
1-1. 本事業の位置づけ	2
1-2. 汚染源の推定・絞込み(令和3年度の検討)	3
1-3. 汚染源特定に向けた方針	5
2. 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要	7
2-1. 地質及び観測井戸設置の状況	8
2-2. 各種試験・分析の結果	15
3. PFOS等の定期モニタリング結果	18
3-1. PFOS等の水質モニタリング	19
3-2. PFOS等濃度の特徴	24
4. 汚染源特定に関する検討	27
4-1. 課題に対する調査結果の考察	28
4-2. その他の調査結果の考察	34
5. 本専門家会議における総括	38
5-1. 専門家会議での検討の総括	39
5-2. 検討課題として残った事項	43
5-3. 今後必要とされる事項	44

1. 汚染源検討の経緯と令和6年度の調査・検討事項

1-1. 本事業の位置づけ

◆事業目的に対する調査・検討の段階



1-2. 汚染源の推定・絞込み(令和3年度の検討)

◆普天間飛行場周辺におけるPFOS等の汚染源の推定

既存資料などを収集・整理した結果、PFOS等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の使用等が確認された普天間飛行場内の **①格納庫や消火訓練施設** と考えられ、**②地表排水の流末に位置する吸込穴（ポノール）** も泡消火薬剤の漏洩や流出があった場合は、地下へ浸透する場所となり得ると考えられる。



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

- 日本政府は、格納庫地下貯水槽に残る未処理の汚染水を全て防衛省が引きとり、焼却処分すると発表。(2021年10月17日)
- しかし、過去に使用等されたPFOS等を含む泡消火薬剤が地表面等から地下浸透して、土壌中や地盤中に残留している可能性あり。

② 普天間飛行場内の吸込穴(PFOS等を含む地表排水を放流)

地表排水の流末に位置する場所

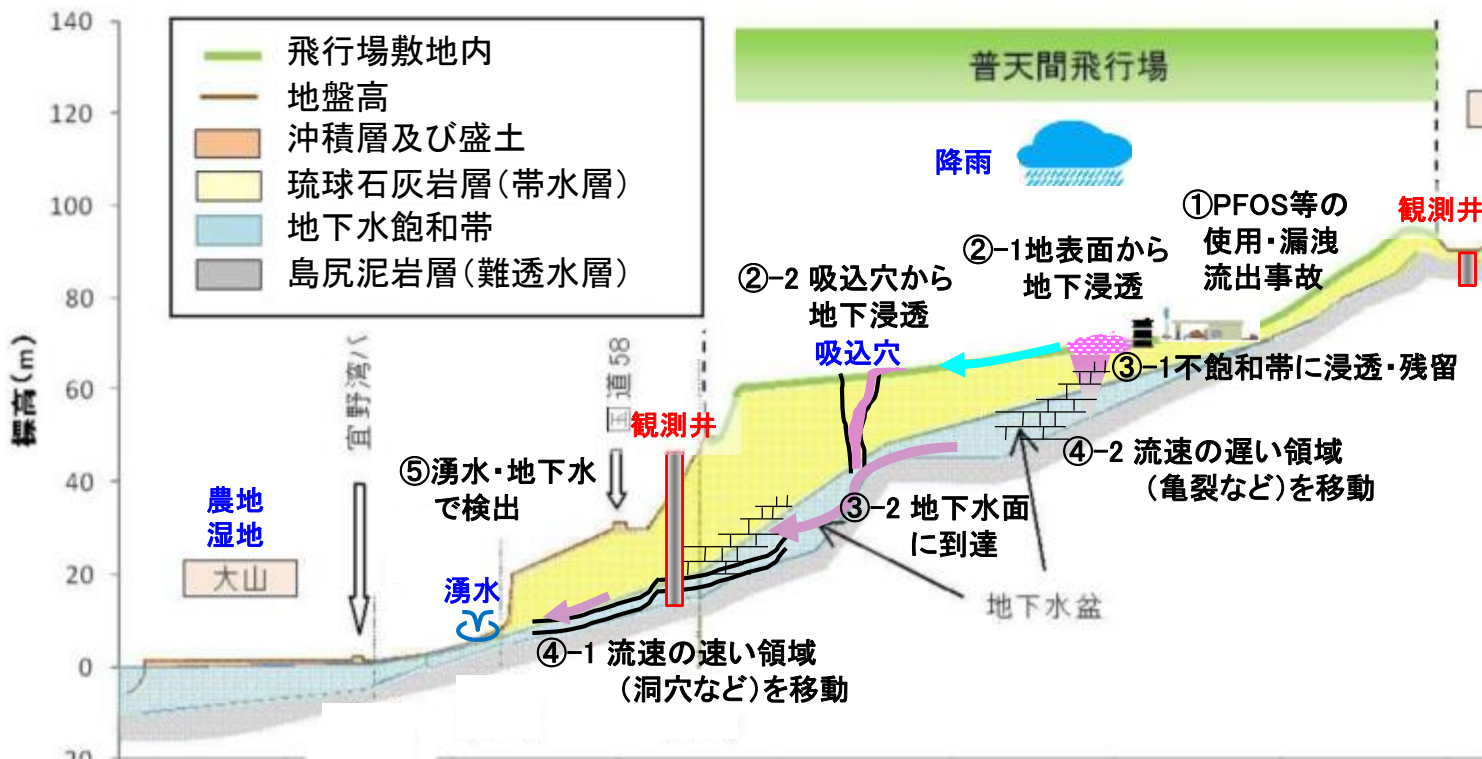
- 事故等により、PFOS等を含む泡消火薬剤が流出した場合は、速やかに地下水面に到達する可能性あり。

注) 左図の吸込穴(ポノール)と地表排水路の概略位置は、「宜野湾市史第9巻資料編8 宜野湾市史編集委員会」と「在沖米軍基地周辺環境マップ普天間飛行場報告書 平成15年3月 沖縄県文化環境部」をもとに表示している。

1-2. 汚染源の推定・絞込み(令和3年度の検討)

◆ 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・地下水までの移動経路の概念図を、以下の断面図に示す。



出典) 宜野湾市自然環境保全に関する基本方向
(平成24年3月)の一部に加筆して作成

※ 留意点

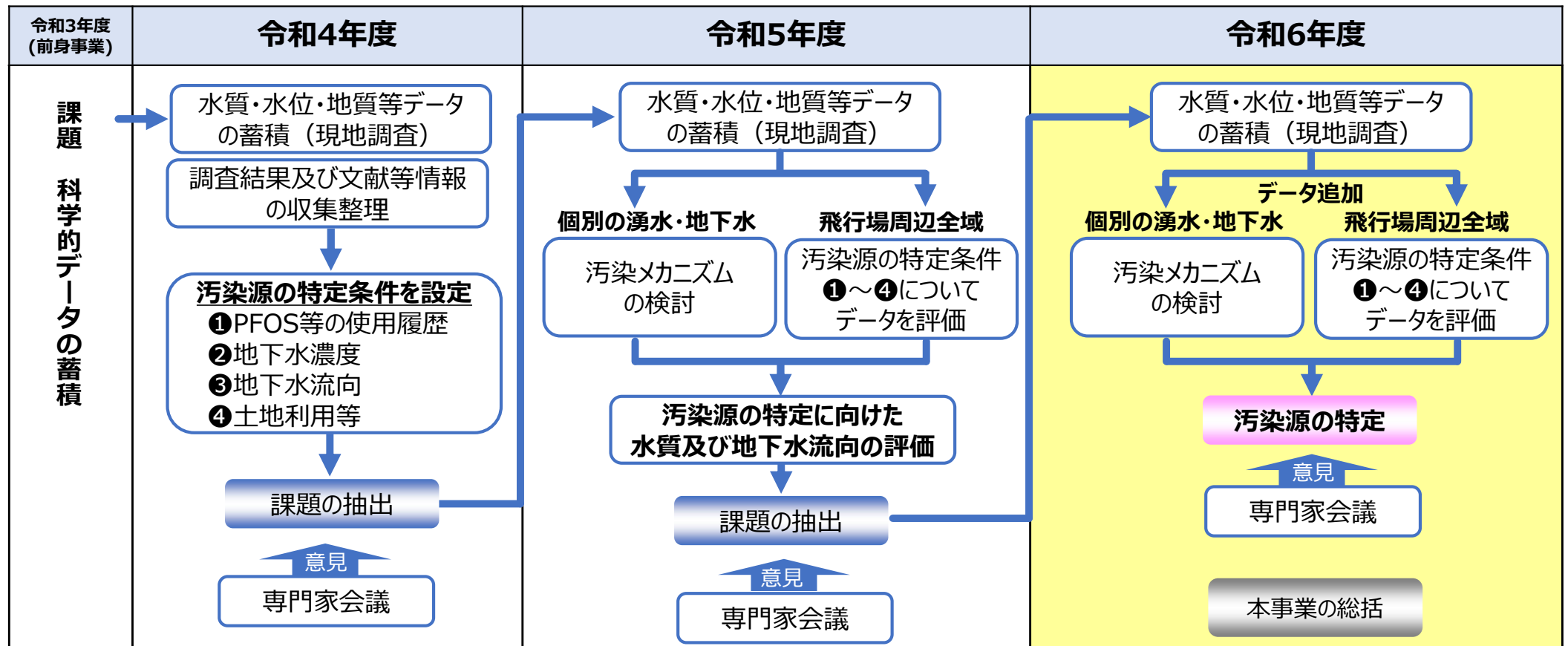
普天間飛行場内の島尻泥岩層上面の形状や地下水位については詳細な調査ができないため、飛行場外に比べて不確実性が大きく、今後も継続した検討が必要である。

- ① PFOS等の使用・漏洩・流出事故が発生する。
- ②-1 地表面等から地下浸透する。
- ②-2 吸込穴(ポノール)から地下浸透する。
- ③-1 降雨の浸透によって下方へ移動、PFOS等の一部は不飽和帯に残留する。
- ③-2 PFOS等の一部は地下水面に到達する。
- ④ 地下水面に到達したPFOS等は地下水とともに島尻泥岩層上面の形状*や地下水位の影響を受け地盤中を移動する。
- ④-1 流速の速い領域に到達したPFOS等は数週間程度の短い期間で、下流側の湧水へ到達する。
- ④-2 流速の遅い領域に到達したPFOS等は数十年の期間をかけて下流側の湧水へ到達する。
- ⑤ 湧水・地下水で検出される。

1-3. 汚染源特定に向けた方針

◆3カ年事業における令和6年度業務の位置づけ

- ✓ 水質・水位・地質等のデータを蓄積し、飛行場周辺における地下水濃度の把握、大局的な地下水流向の評価、6:2FTSに着目した汚染メカニズムの検討を行い、**汚染源を特定**する。
- ✓ 3カ年事業で得られた成果を踏まえて、本事業の総括を行う。



1-3. 汚染源特定に向けた方針

◆汚染源の特定条件の評価

✓ 湧水におけるPFOS等の長期的な検出、6:2FTSの変動要因等の汚染メカニズムを継続して検討
⇒ **【課題Ⅰ】**

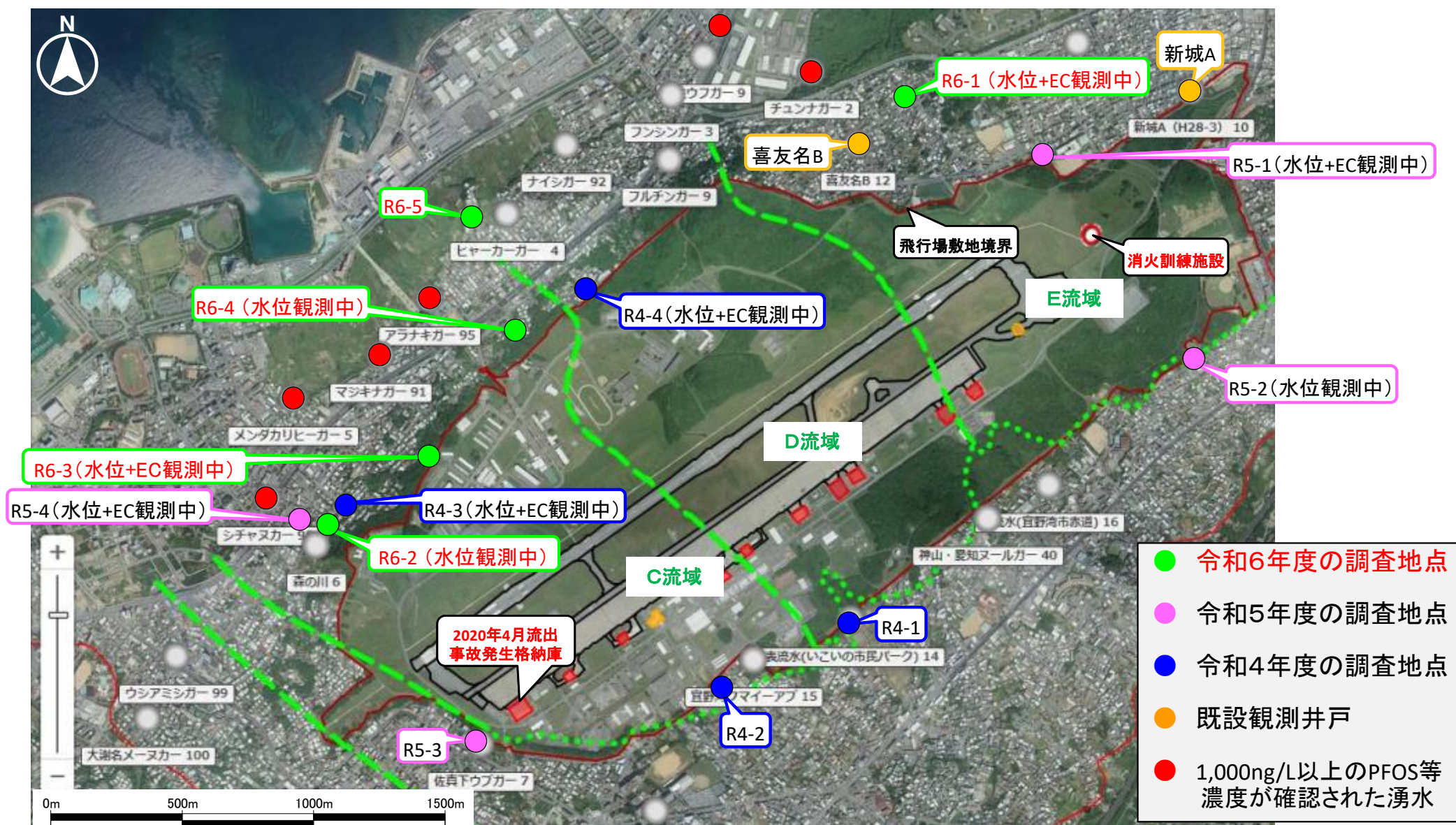
✓ 令和6年度業務では、下記の②の条件について、データの補完や精度の向上を図る調査を実施
⇒ **【課題Ⅱ】【課題Ⅲ】**

汚染源特定に向けて明らかにする項目		令和6年度までの状況	評価結果など
①	PFOS等の使用・保管・漏洩の履歴がある。	✓ 普天間飛行場で履歴あり (令和3年度の資料等調査)	✓ 把握済み
②	普天間飛行場の地下水上流側のPFOS等濃度は指針値未満、地下水下流側のPFOS等濃度は下流側湧水と同レベルで検出される。	✓ 地下水上流側のR4-1、R4-2、R5-2孔 ⇒指針値未満 ✓ 地下水下流側のR4-3、R5-1孔※ ⇒1,000ng/L以上(最大8,600ng/L) ※ E流域の飛行場直近で湧水の最大濃度の3倍を上回る地下水を確認	✓ 概ね把握済み ✓ 調査密度が少ないエリアでの地下水の水質調査を実施(C流域のメンダカリヒーター～アラナキガー上流側)⇒ 【課題Ⅱ】 ✓ E流域のR5-1孔～チュンナガー間での地下水の水質調査を実施⇒ 【課題Ⅲ】
③	地下水の流れが南東⇒北西の方向以外には無いことを示すことができる。	✓ 普天間飛行場北西側の地域の地下水は飛行場を上流とする流れとなっていることを定性的に検証	✓ 概ね把握済み ✓ 島尻泥岩層の上面形状や地形的な特徴を考察し、地下水流動を評価
④	普天間飛行場と観測地点との間に、PFOS等の地下浸透が生じるような土地利用がない。	✓ 普天間飛行場～R4-3孔は主に住宅地、R5-1孔は飛行場直近に位置し、PFOS等の使用や埋設の履歴は確認されない。	✓ 把握済み

2. 調査ボーリング及び試験・分析結果の概要

2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆調査地点位置(調査ボーリング+観測井戸設置)



地理院地図を加工して作成した。

注) 本図の流域界は、参考文献(平成16年度宜野湾市自然環境調査 報告書 宜野湾市)に基づき表示しているが、その境界ラインは今後の検討結果により見直す可能性がある。

2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆令和6年度調査の課題と対応

【課題Ⅰ】 地下水質の不均質性(C流域)

- ✓ シチャヌカーで検出される6:2FTSの構成比が大きい地下水の移動経路を確認するため、R4-3孔～R5-4孔の間のR6-2孔で調査を実施した。
- ✓ 琉球石灰岩を帯水層とする同一の地下水盆内での水質の違い、島尻泥岩層上面形状との関係を確認した。

【課題Ⅱ】 地盤・地下水の調査範囲の拡大(C流域)

- ✓ 1,000ng/Lを超えるPFOS等が検出しているメンダカリヒーガー～マジキナガー～アラナキガーの上流側のR6-3孔とR6-4孔で調査を実施した。
- ✓ C流域とD流域の境界付近のR6-5孔で地質調査ボーリングを行い、島尻泥岩層の尾根部の分布状況を確認した。

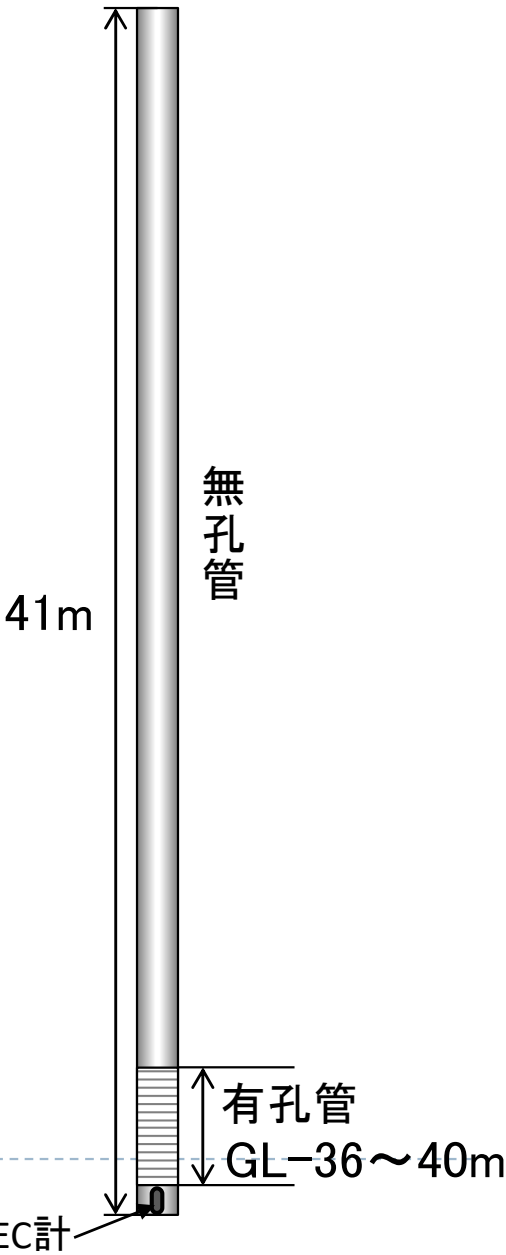
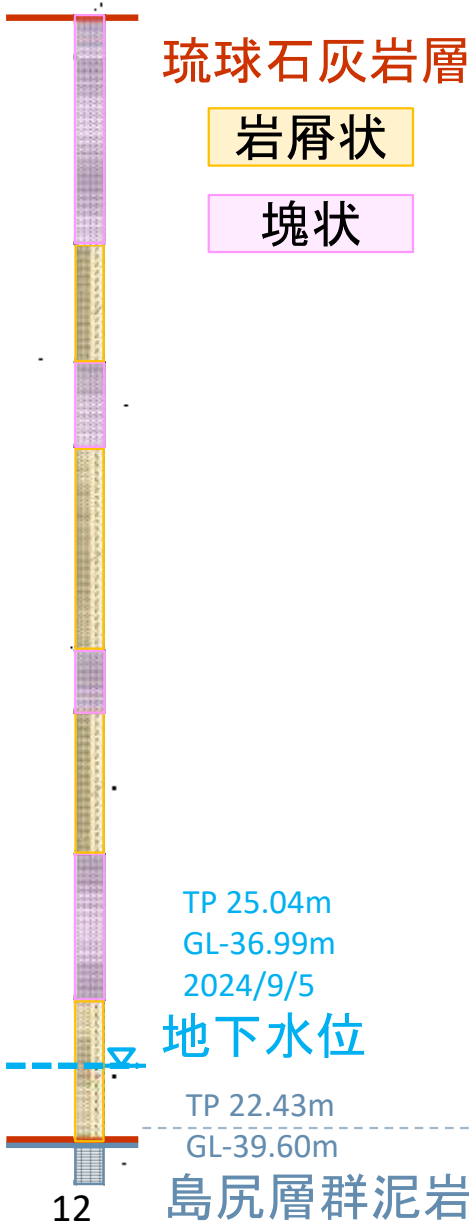
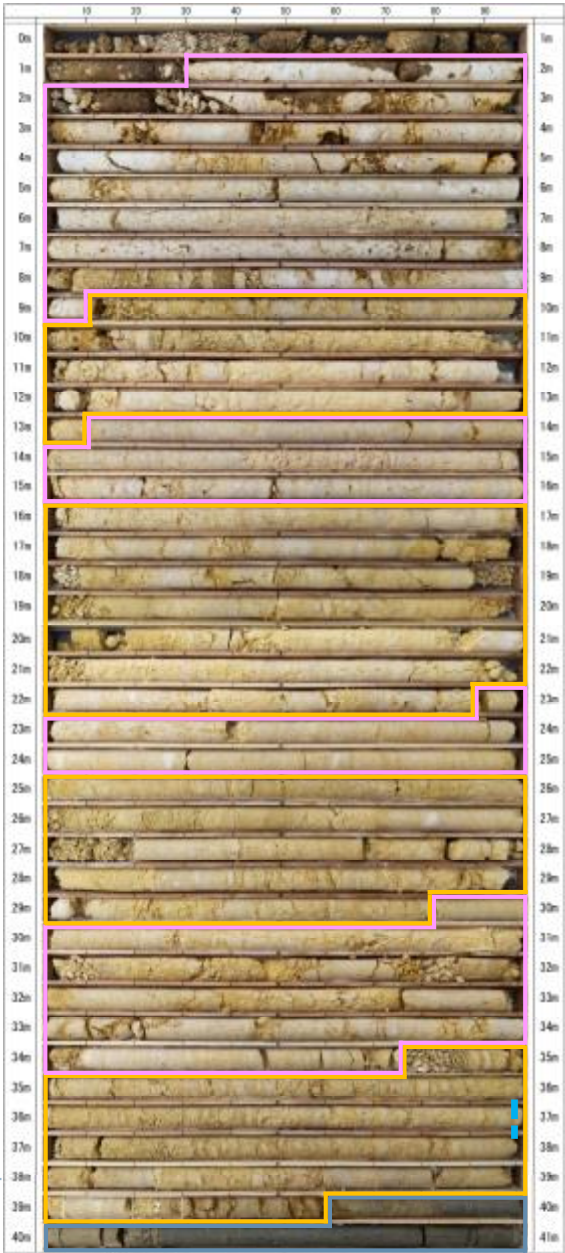
【課題Ⅲ】 地下水流向とPFOS等濃度の整合性確認(E流域)

- ✓ 消火訓練施設の地下水下流側のR5-1孔と西普天間地区の湧水では、PFOS等濃度に大きな差がある。
- ✓ R5-1孔とチュンナガーの中間地点のR6-1孔でPFOS等濃度及び島尻泥岩上面標高を確認し、地下水流向とPFOS等の検出状況、既往調査で想定されている等高線との整合性を確認した。

2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

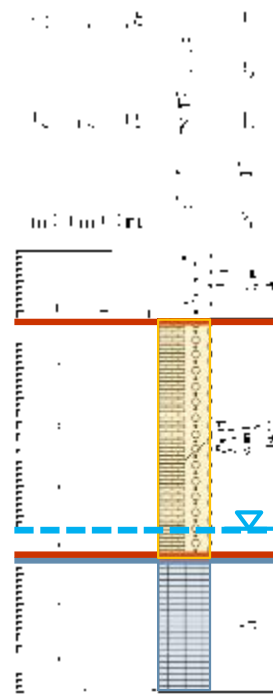
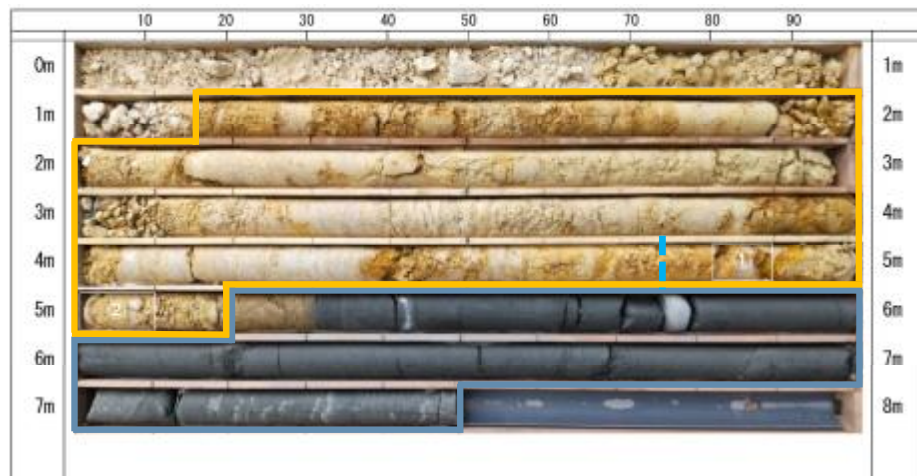
◆R6-1孔(E流域の下流側)

【観測井戸 模式構造図】



2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆R6-2孔(C流域の下流側)



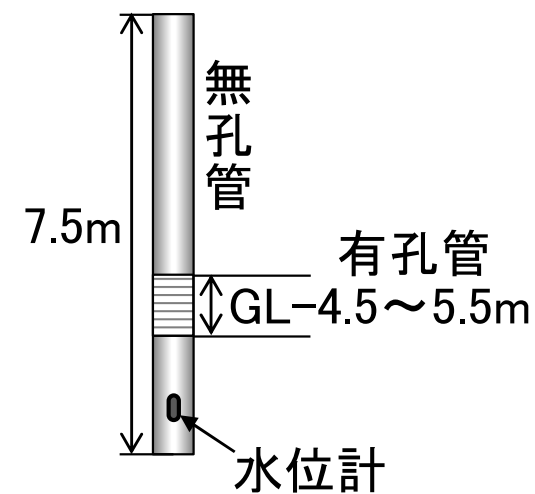
岩屑状
琉球石灰岩層

TP 31.47m
GL-4.76m
2024/9/5

地下水位

島尻層群泥岩
TP 31.03m
GL-5.20m

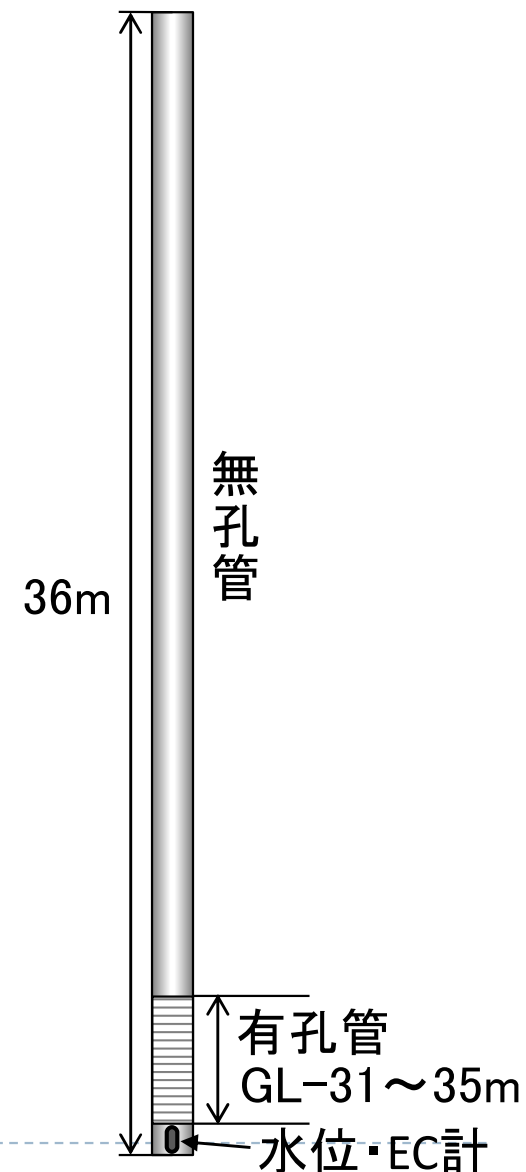
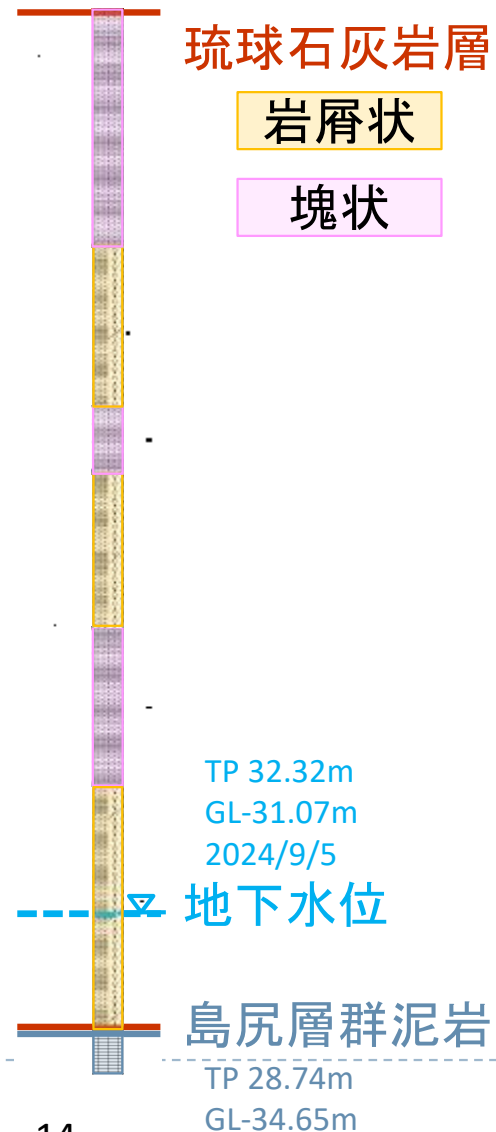
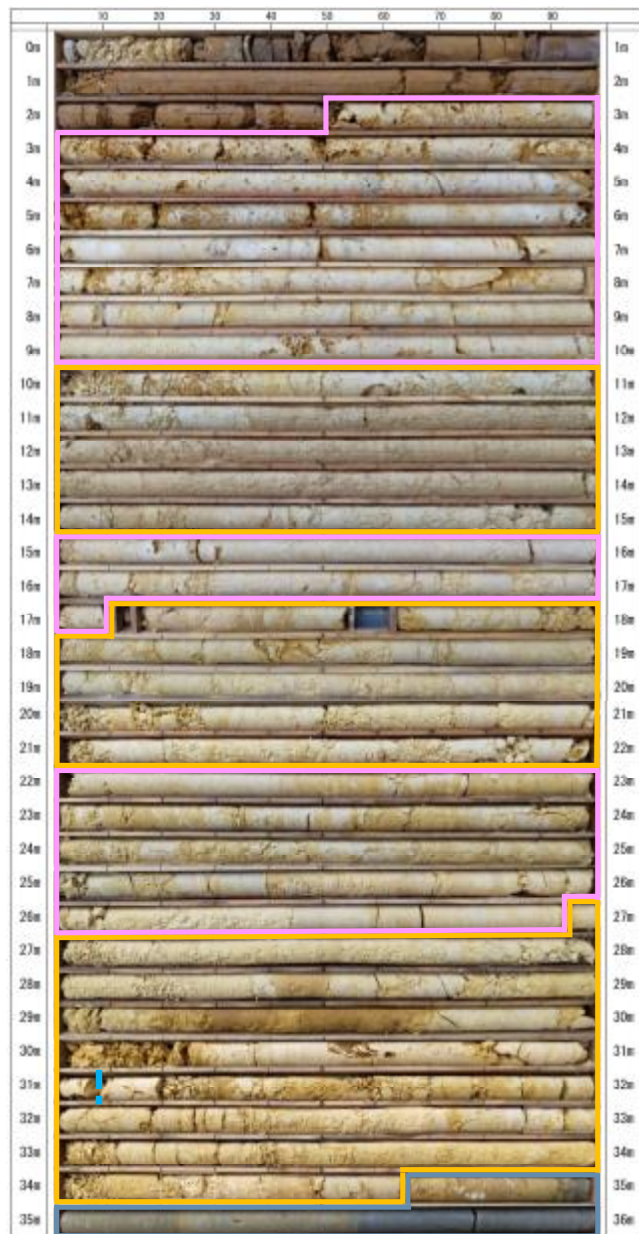
【観測井戸 模式構造図】



2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

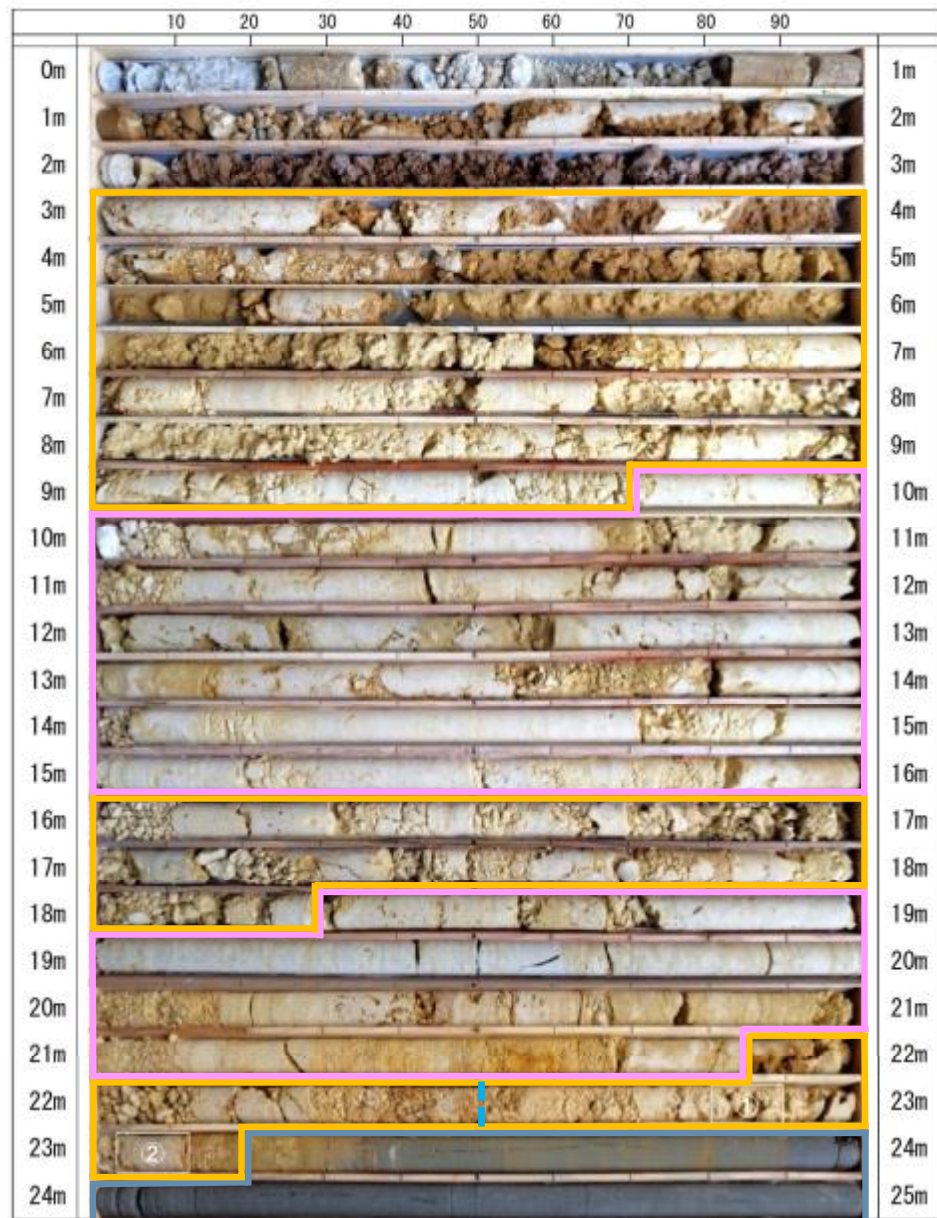
◆R6-3孔(C流域の下流側)

【観測井戸 模式構造図】

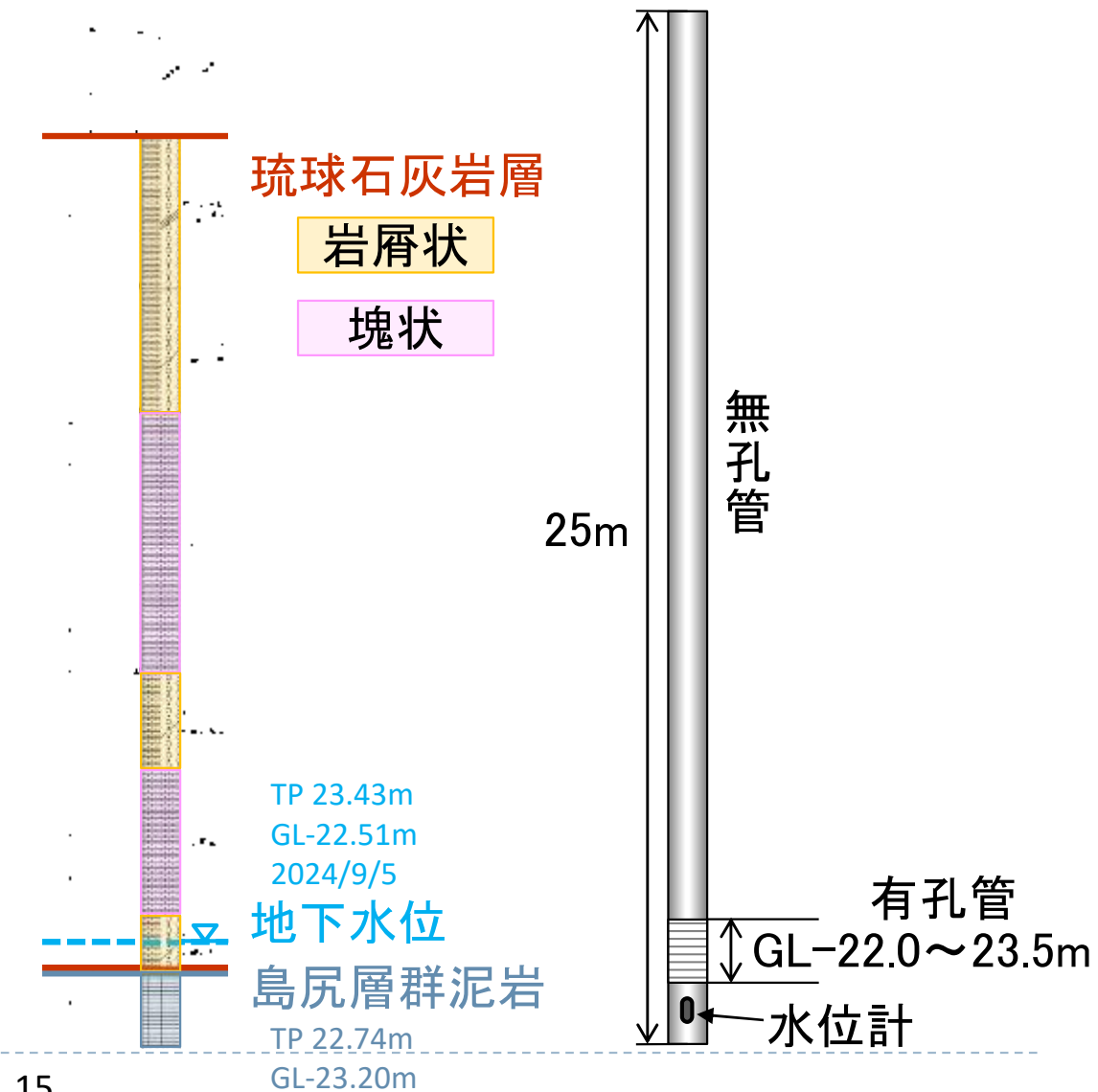


2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆R6-4孔(C流域の下流側)

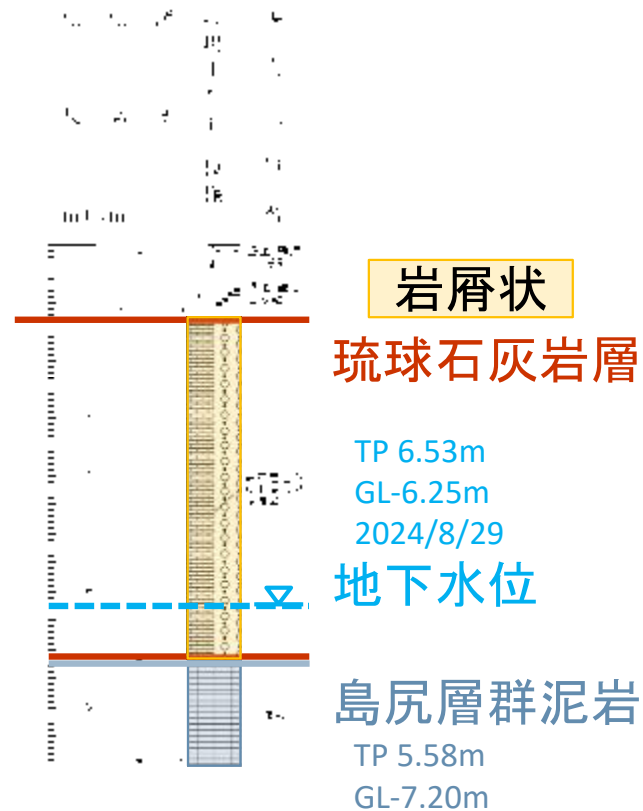
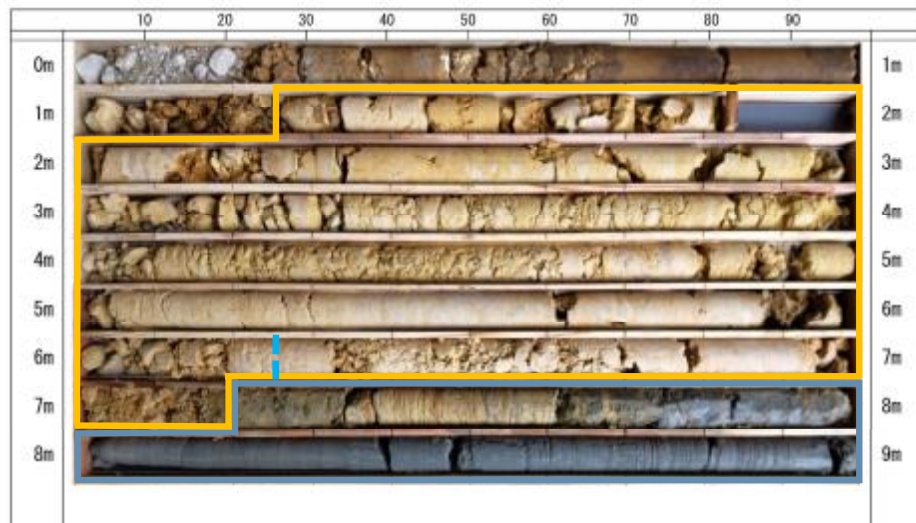


【観測井戸 模式構造図】



2-1. 地質及び観測井戸設置の状況

◆R6-5孔(C~D流域の境界部)



2-2. 各種試験・分析の結果

◆R6-1～R6-4孔における石灰岩等試料の分析結果（令和6年度実施）

- ✓ R6-2孔の地下水位以深の石灰岩からPFOSと6:2FTSが検出されたが、地下水位以浅の盛土及び石灰岩からは検出されなかった。
- ✓ R6-1、R6-3、R6-4孔の石灰岩の地下水位以深からPFOS等は検出されなかった。

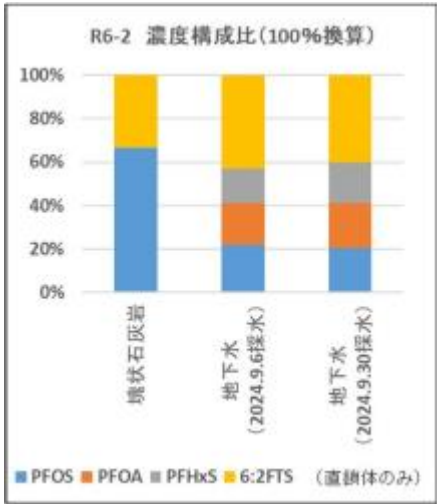
分析項目	単位	R6-1(地下水位 以深)						R6-2(地下水位 以浅)															R6-2(地下水位 以深)					
		塊状石灰岩			岩屑状石灰岩			盛土上部			盛土下部			岩屑状石灰岩			岩屑状石灰岩			岩屑状石灰岩			塊状石灰岩			岩屑状石灰岩		
		試料深度: 39.05～39.20m			試料深度: 39.20～39.30m			試料深度: 0.10m～0.20m			試料深度: 1.05～1.15m			試料深度: 2.05～2.15m			試料深度: 3.10～3.20m			試料深度: 4.40～4.50m			試料深度: 4.82～4.90m			試料深度: 5.00～5.10m		
		合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計※1	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐
PFOS	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.04	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
PFOA	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
PFHxS	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
6:2FTS	ng/g	<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			0.02			<0.02		
4物質合計	ng/g	<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			<0.02			0.06			<0.02		
有機物含有量※2	%	1.2			0.6			—			—			—			—			—			0.8			0.7		

分析項目	単位	R6-3(地下水位 以深)						R6-4(地下水位 以深)					
		塊状石灰岩			岩屑状石灰岩			岩屑状石灰岩			塊状石灰岩		
		試料深度: 32.88～33.00m			試料深度: 34.20～34.30m			試料深度: 22.80～22.90m			試料深度: 23.03～23.13m		
		合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐	合計	直鎖	分岐
PFOS	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
PFOA	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
PFHxS	ng/g	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
6:2FTS	ng/g	<0.02			<0.02			<0.02			<0.02		
4物質合計	ng/g	<0.02			<0.02			<0.02			<0.02		
有機物含有量※2	%	2.2			0.5			1.4			0.8		

※1 各物質の合計値を算出する際は「<0.02」を0.02として合算している。また、合計値は数値の丸めの関係で各項目の和と一致しない場合がある。
※2 強熱減量550℃・4時間による測定結果を示す。

PFOS等を検出

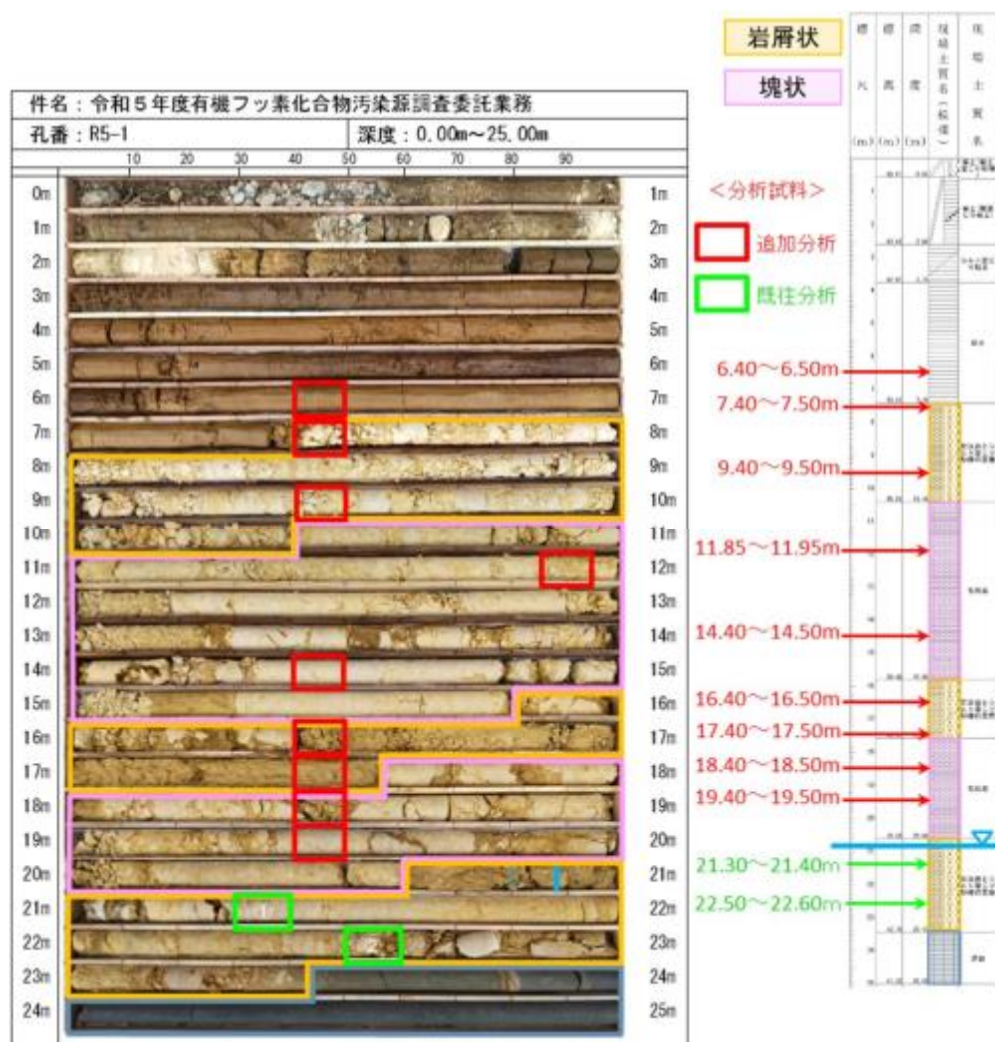
注) 6:2FTSも含めPFOS等の分析は、石灰岩試料に風乾・破碎・篩別等の処理を行い「土壤中のPFOS、PFOA及びPFHxSの暫定測定方法について（令和5年7月31日環境省水・大気環境局環境管理課事務連絡）」の＜参考＞土壤中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法で定量した。



2-2. 各種試験・分析の結果

◆R5-1孔における深度方向の石灰岩試料の分析結果(令和5年度実施)

- ✓ 地下水位以浅の粘土層及び石灰岩から、PFOS等 4 物質が検出された。
- ✓ 粘土層から地下水位までPFOS等濃度は低下していたが、地下水位以深から濃度は上昇していた。



【今後の課題】

地表から地下水(石灰岩中)へのPFOS等の地下浸透の可能性について、普天間飛行場内も含め、石灰岩上位の粘土層の層厚や分布状況を把握する必要がある。

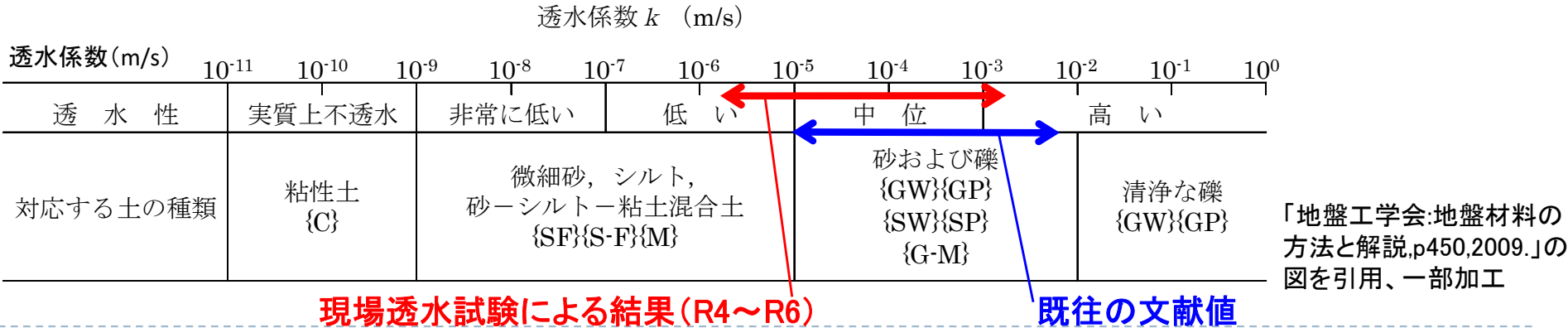
2-2. 各種試験・分析の結果

◆石灰岩の透水性に関する試験結果

✓ 既往文献値の透水係数（ $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ ）と比べ、現場透水試験から得られた透水係数（ $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ ）は1オーダー程度の差で、より既往文献値に近い結果が得られた。

実施年度など	透水係数 (m/s)				試験方法
令和4～5年度	R4-3	R4-4	R5-1	R5-4	現場透水試験※
	5.53×10^{-6} 1.70×10^{-6}	2.97×10^{-5} 2.18×10^{-5}	— 4.37×10^{-4}	— 4.82×10^{-4}	
令和6年度	R6-1	R6-2	R6-3	R6-4	
	— 1.56×10^{-3}	— 7.55×10^{-4}	— 1.00×10^{-3}	— 1.26×10^{-3}	
試験値の範囲	$1.70 \times 10^{-6} \sim 1.56 \times 10^{-3}$				
既往の文献値	$10^{-5} \sim 10^{-3}$ オーダー				現場透水試験、 揚水試験など

※ R4-3、R4-4では、観測井戸での揚水による試験（上段に定常法による結果、下段に非定常法による結果）、
R5-1、R5-4、R6-1～R6-4では、スラグの投入による試験（非定常法）



3. PFOS等の定期モニタリング結果

3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS等(4物質の合計値)の濃度分布(2023年8月～2024年11月採水)

- ✓ 普天間飛行場周辺の上流側は50ng/L未満、飛行場内を経由した後の下流側のC流域とE流域では1,000ng/L以上の濃度で検出する地点が分布(最大濃度: 6,300ng/L)。



注) 左図の流域界は、参考文献(平成16年度宜野湾市自然環境調査 報告書 宜野湾市)に基づき表示しているが、その境界ラインは今後の検討結果により見直す可能性がある。

3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS+PFOAの濃度分布(2023年8月～2024年11月採水)

- ✓ 普天間飛行場周辺の上流側で50ng/Lを超過する地点は確認されないが、一部の地点を除き、下流側では50ng/Lを超過する地点を確認（最大濃度：4,600ng/L）。

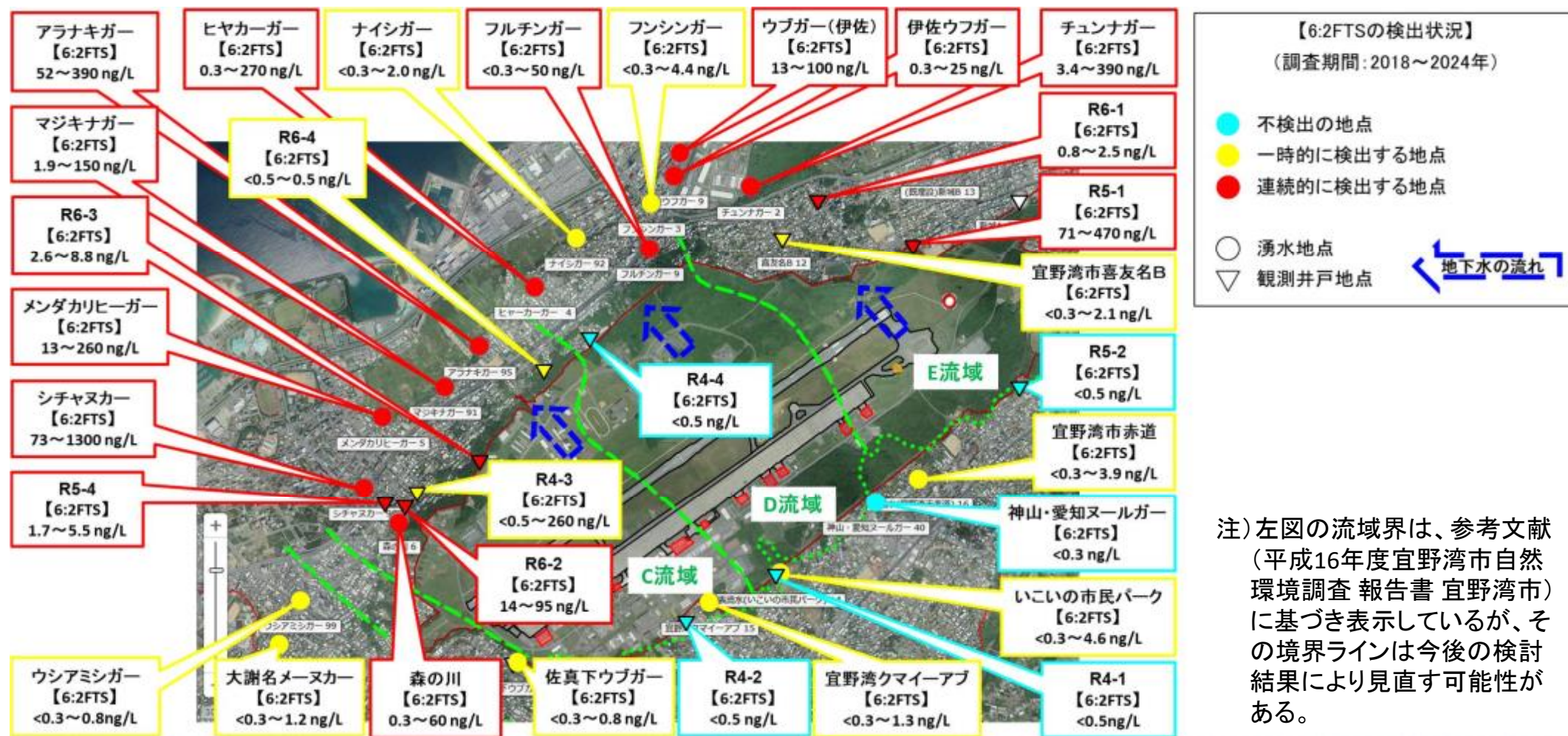


地理院地図を加工して作成

3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆6:2FTSの検出状況(調査期間:2018~2024年)

- ✓【地下水 上流側】 不検出または一時的に検出する地点が分布 (最大濃度: 4.6ng/L)
- ✓【地下水 下流側】 一部を除き、連続的に検出する地点が分布 (最大濃度: 1,300ng/L)



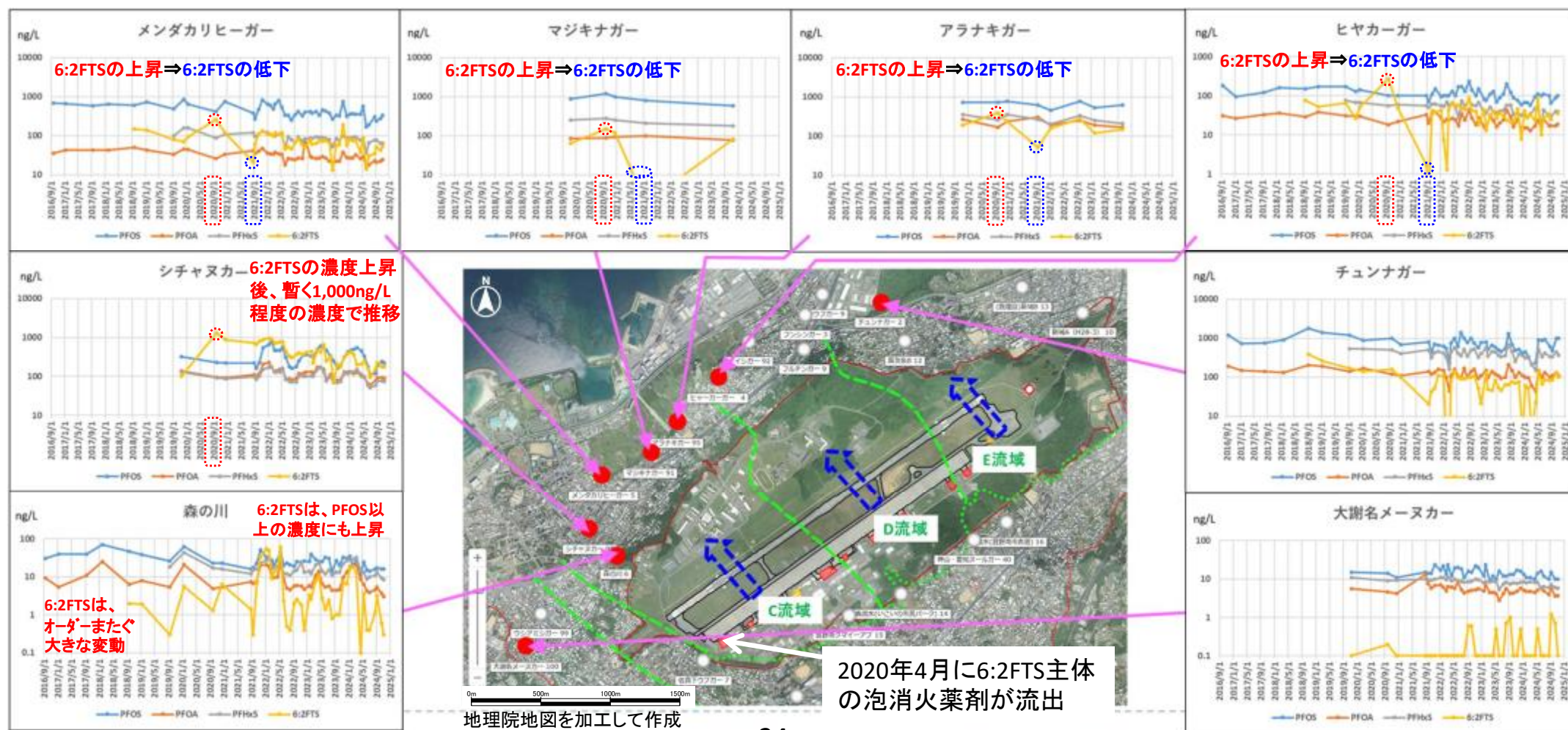
注) 左図の流域界は、参考文献(平成16年度宜野湾市自然環境調査 報告書 宜野湾市)に基づき表示しているが、その境界ラインは今後の検討結果により見直す可能性がある。

3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS等の経時変化(下流側の湧水)

- ✓ オーダーをまたぐ濃度変動を示す6:2FTSと比べ、PFOS、PFOA、PFHxSは濃度変動が小さく、経時的な変化は認められるものの、概ね一定の濃度で推移。
- ✓ C～D流域の下流側の複数地点では2020年9月に6:2FTS濃度の上昇、2021年9月には低下を確認。

注) 2016年からの継続した経時変化を把握するため、2016年から測定している直鎖体のみの濃度をもとに経時変化を作成(分岐異性体は含まず)

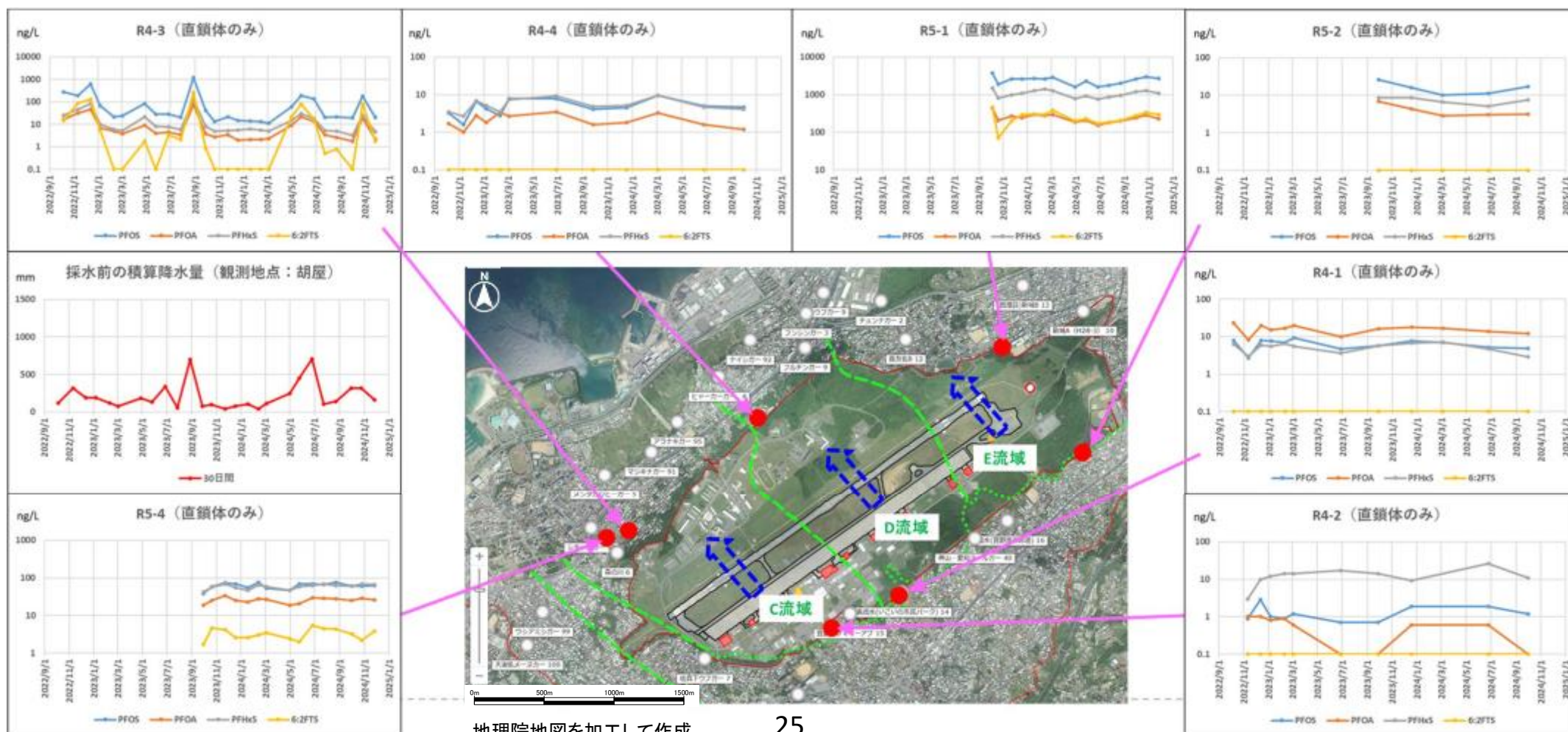


3-1. PFOS等の水質モニタリング

◆PFOS等の経時変化(観測井戸の地下水)

注)22ページの下流側の湧水の経時変化と比較できるように、2016年から湧水で測定している直鎖体のみの濃度をもとに経時変化を作成(分岐異性体は含まず)

- ✓ R4-3孔のPFOS等濃度の変動は、採水前30日間の積算降水量と正の相関性を示し、オーダーをまたぐ範囲で濃度の上昇・低下を繰り返す傾向がある(降水量:増加⇒PFOS等濃度:上昇)。
- ✓ 普天間飛行場周辺で最も高いPFOS等4物質の濃度が確認されているR5-1孔では、概ね一定の濃度で推移しているが、今後データを蓄積して変動傾向の把握が必要である。



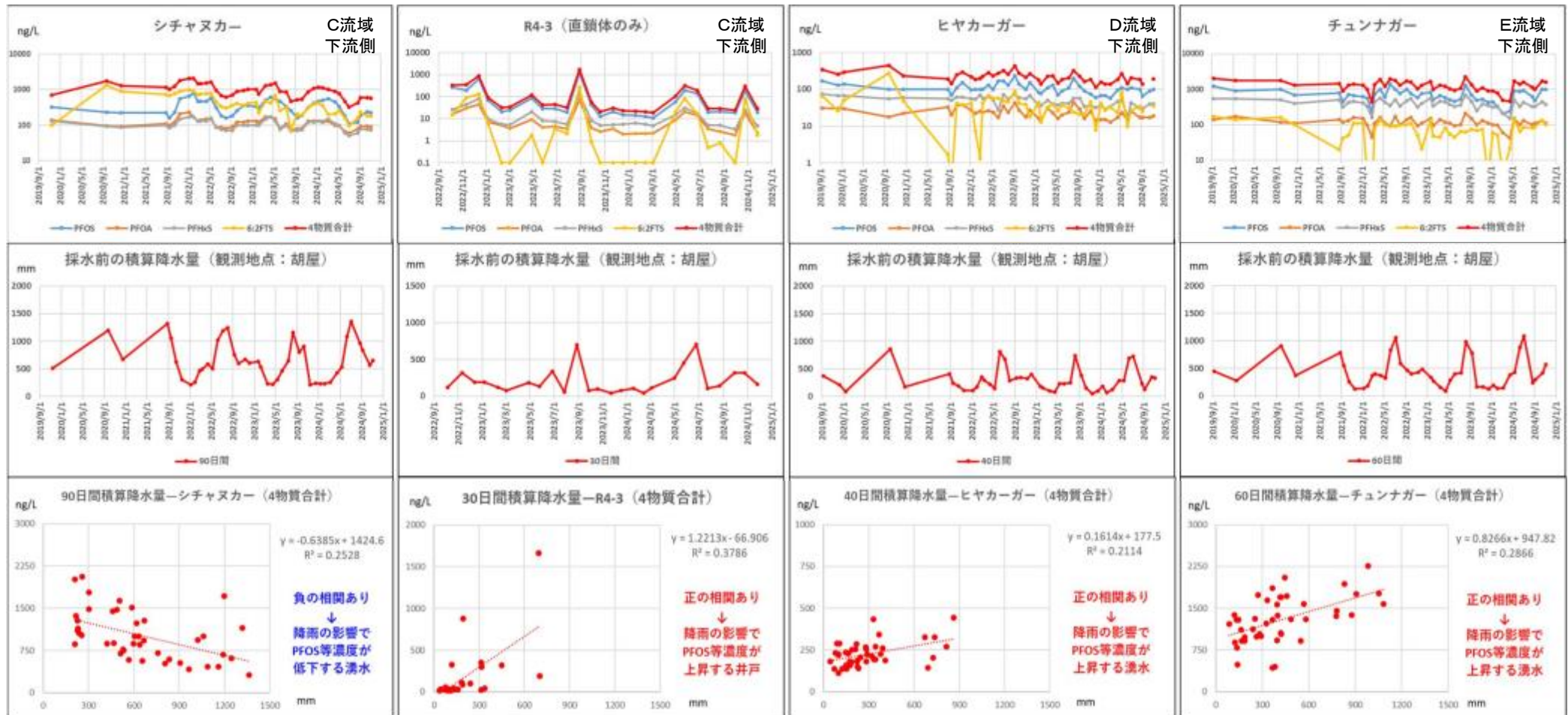
地理院地図を加工して作成

3-2. PFOS等濃度の特徴

◆積算降水量とPFOS等濃度の相関関係

注) 2019年からの継続した経時変化を把握するため、2016年から測定している直鎖体のみの濃度をもとに経時変化を作成(分岐異性体は含まず)

- ✓ 地点毎にPFOS等濃度の変動は、採水前の積算降水量に相関する傾向がある。
- ✓ 下流側では、降雨の影響でPFOS等濃度が上昇する地点（汚染源経由の雨水が流込み易い）とPFOS等濃度が低下する地点（汚染源経由の雨水が流込み難い）が認められる。

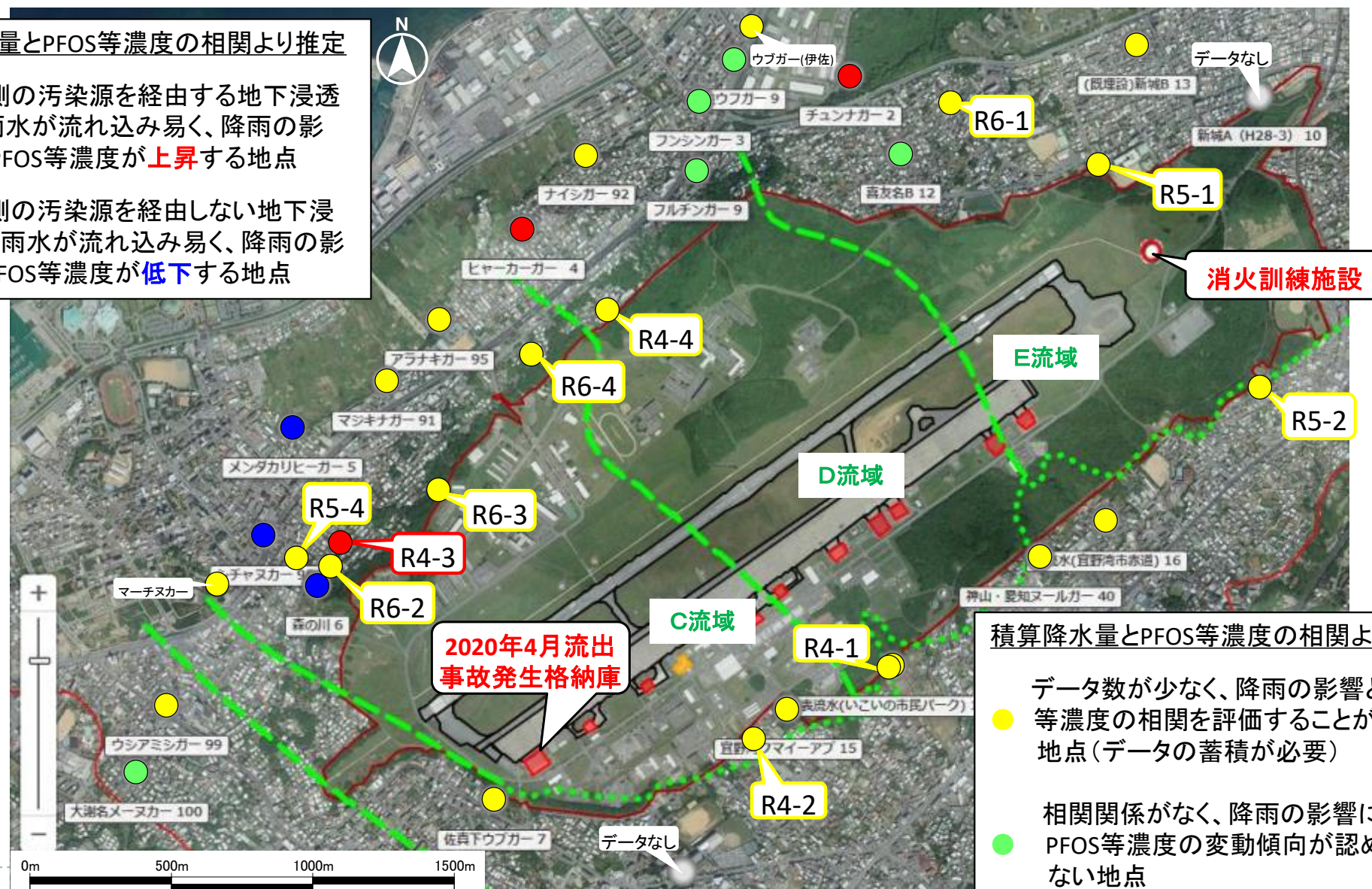


3-2. PFOS等濃度の特徴

◆降雨の影響によるPFOS等濃度の変動傾向

積算降水量とPFOS等濃度の相関より推定

- 上流側の汚染源を経由する地下浸透した雨水が流れ込み易く、降雨の影響でPFOS等濃度が**上昇**する地点
- 上流側の汚染源を経由しない地下浸透した雨水が流れ込み易く、降雨の影響でPFOS等濃度が**低下**する地点



積算降水量とPFOS等濃度の相関より推定

- データ数が少なく、降雨の影響とPFOS等濃度の相関を評価することが難しい地点(データの蓄積が必要)
- 相関関係がなく、降雨の影響によるPFOS等濃度の変動傾向が認められない地点

3-2. PFOS等濃度の特徴

◆PFOS等濃度の構成比による水質分布

- 水質A: 類似した構成比を示し、6:2FTSは概ね不検出である。
- 水質B: 6:2FTSを除く3物質の構成比は、水質Aに類似するが、6:2FTSが継続して検出している。
- 水質C: 類似した構成比を示す(6:2FTSの構成比が30~40%程度)。
- 水質D: 類似した構成比を示す。
- 水質E: 類似した構成比を示す。

注) 表記したPFOS等の構成比は2023年8~2024年11月に採水した最新の結果を示している。

但し、新城Bはデータがないため2020年12月に採水した結果を示している。

また、神山・愛知ヌールガーは4物質とも不検出であったため2023年2月に採水した結果を示している。



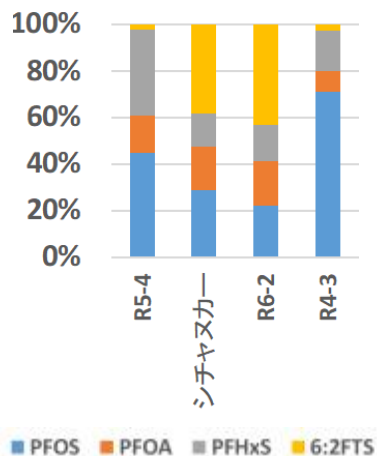
4. 汚染源特定に関する検討

4-1. 課題に対する調査結果の考察

【課題Ⅰ】 地下水質の不均質性(C流域)

- ✓ シチャヌカーに類似した6:2FTSの構成比が40%程度と大きい水質を、R6-2孔の地下水で確認。
- ✓ R6-2孔のPFOS等濃度はシチャヌカーより低いため、普天間飛行場内からシチャヌカーへ流下する地下水は、R6-2孔の近傍をすり抜けるなど比較的狭い範囲を流動していると推定される。
- ✓ 石灰岩が帯水層となる地盤中では、同一の地下水盆内とされていた場所でも、局所的な地下水流動の影響で、水質が異なると考えられる。

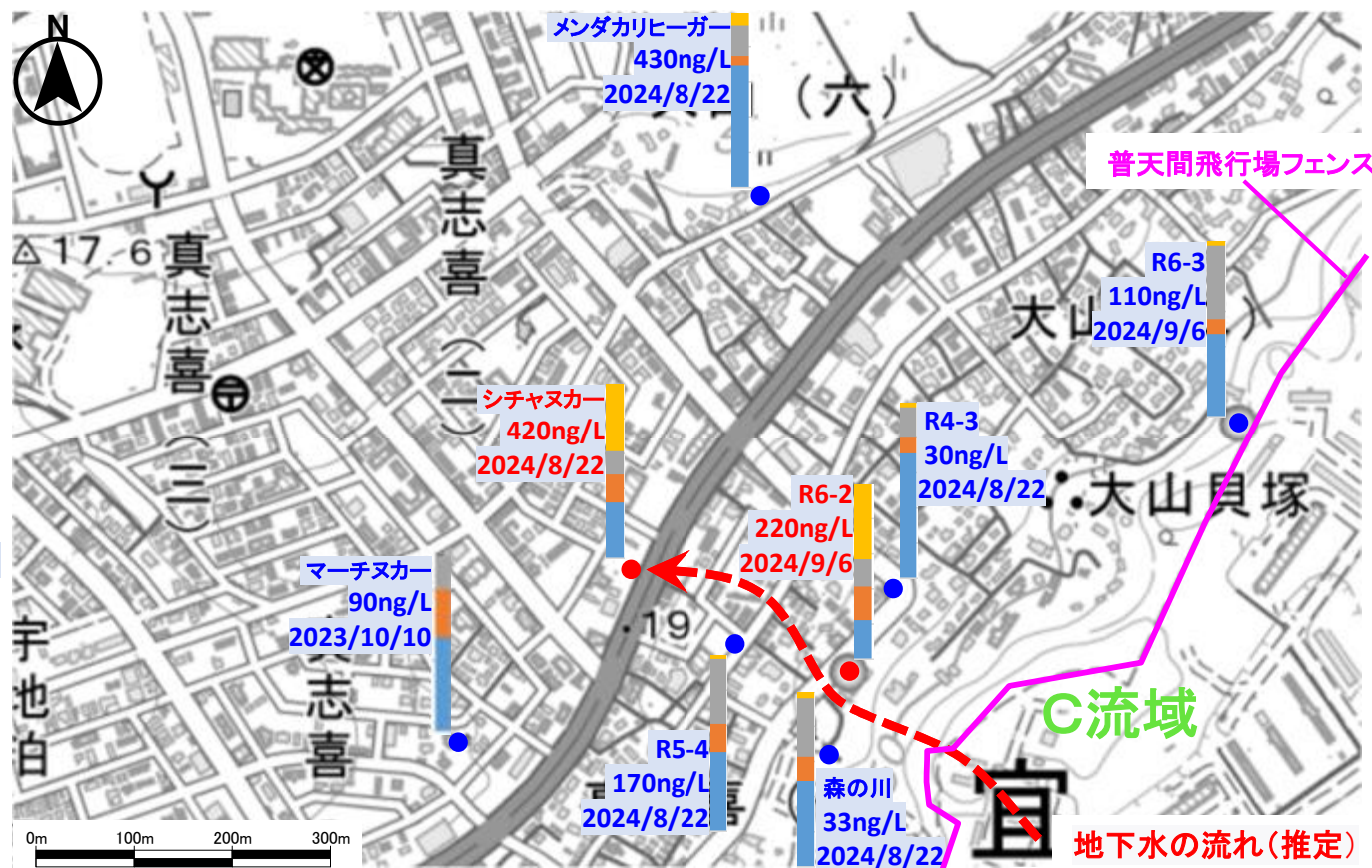
PFOS等4物質の構成比
(直鎖体のみ)



PFOS等の分析結果 (直鎖体のみ)

- ・ PFOS等の合計濃度⇒ 420ng/L
- ・ 分析試料の採水日⇒ 2024/8/22

注) 表記したPFOS等の構成比では2024年8～9月のデータがないマーチヌカーは2023年10月採水の結果を示している。

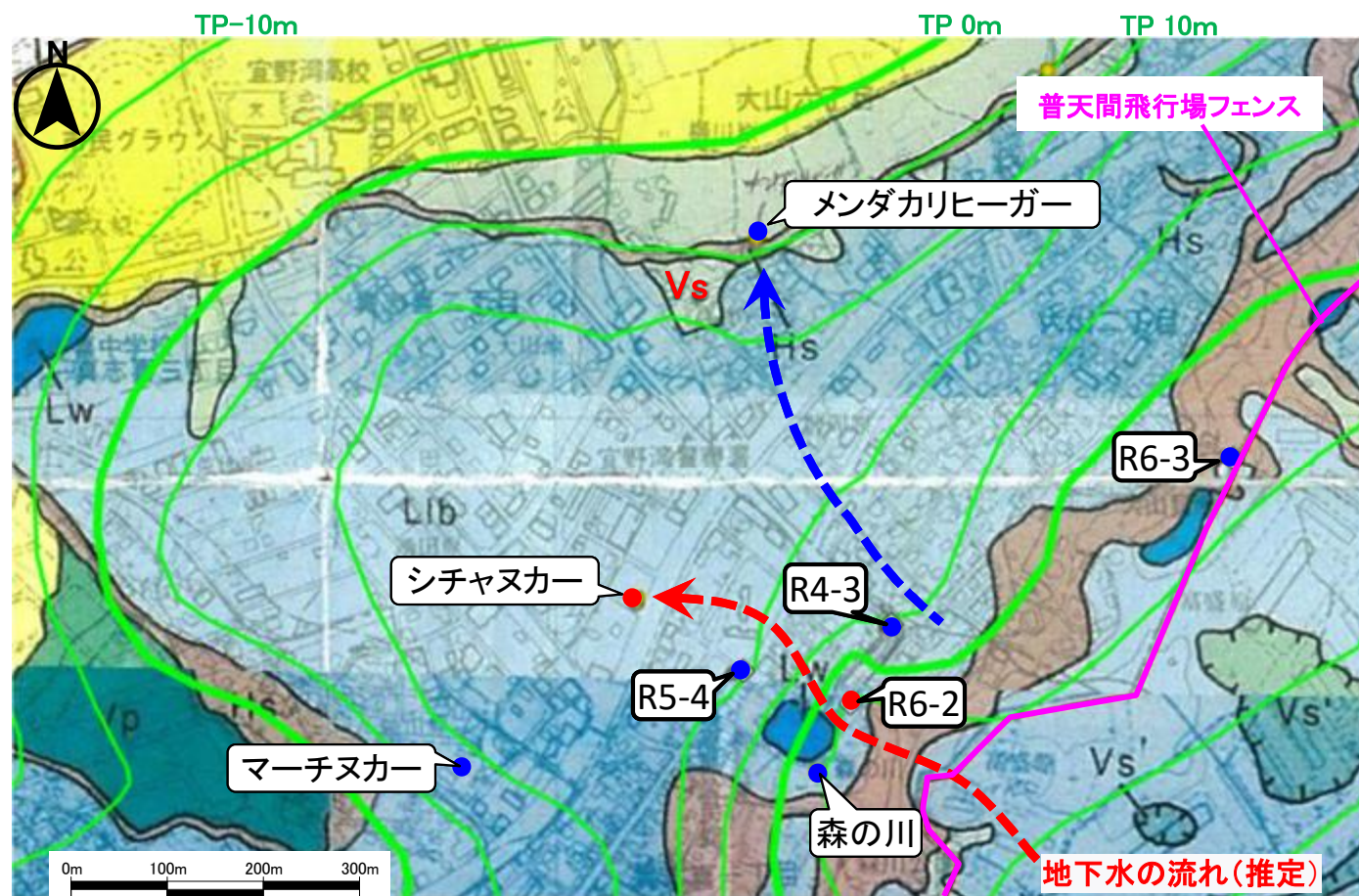


4-1. 課題に対する調査結果の考察

【課題Ⅰ】 地下水質の不均質性(C流域)

- ✓ 地形分類図と島尻泥岩層上面等高線を重ね合わせて、地下水の流れを考察した。
- ✓ シチャヌカー付近の島尻泥岩層の上面勾配は比較的平坦だが、森の川付近では急な傾斜となる。
- ✓ 島尻泥岩層の上面の形状から見ても、普天間飛行場内からシチャヌカーへ流下する地下水はR5-4～R4-3孔間のR6-2孔近傍をすり抜けるなど比較的狭い範囲を流動していると推定される。
- ✓ メンダカリヒーガーからR4-3孔にかけて、島尻泥岩層上面には、緩やかな谷部が分布する。

島尻泥岩層上面等高線(—)は収集したボーリングデータ及び本事業での調査結果をもとにして作成



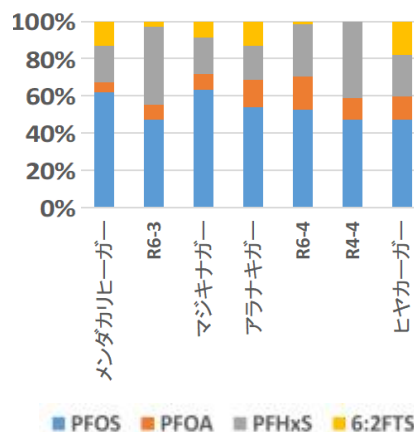
(地形分類図の出典: 宜野湾市史 第九巻 資料編八「自然」・別刷)

4-1. 課題に対する調査結果の考察

【課題Ⅱ】 地盤・地下水の調査範囲の拡大(C流域)

- ✓ メンダカリヒーガー～マジキナガー～アラナキガーの上流側のR6-3孔とR6-4孔の地下水から1,000ng/Lを超えるPFOS等は検出されず、普天間飛行場内から当該の湧水へ流下する地下水の経路は確認されなかった。
- ✓ ただし、普天間飛行場の直近のR6-3孔の地下水から100ng/Lを超えるPFOS等が検出しているため、当該のPFOS等は同飛行場内から流出した可能性が高いと考えられる。

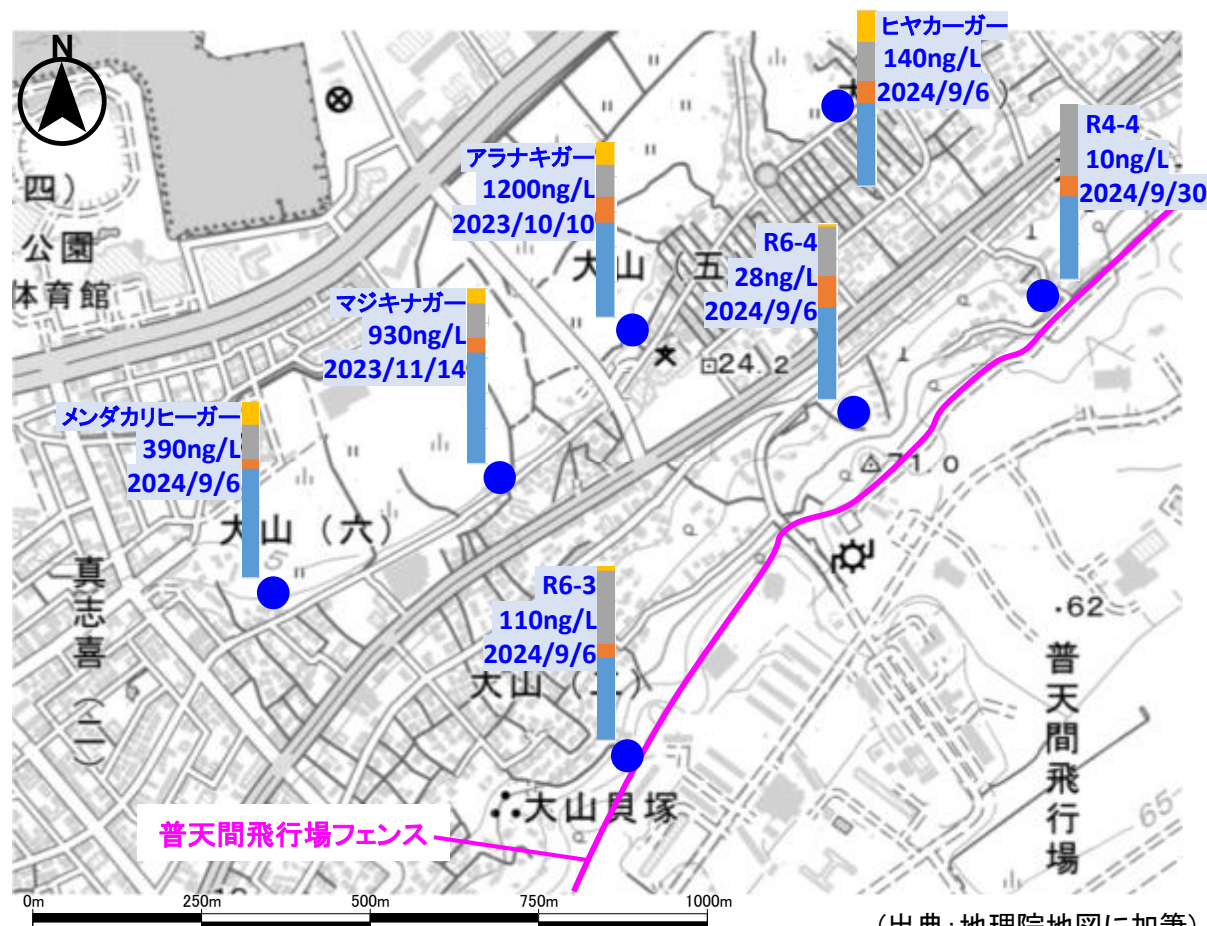
PFOS等4物質の構成比
(直鎖体のみ)



PFOS等の分析結果 (直鎖体のみ)

- ・ PFOS等の合計濃度⇒ **110ng/L**
- ・ 分析試料の採水日⇒ **2024/9/6**

注) 表記したPFOS等の構成比では、2024年9月のデータがないマジキナガーは2023年11月の採水、アラナキガーは2023年10月の採水における結果を示している。



(出典: 地理院地図に加筆)

4-1. 課題に対する調査結果の考察

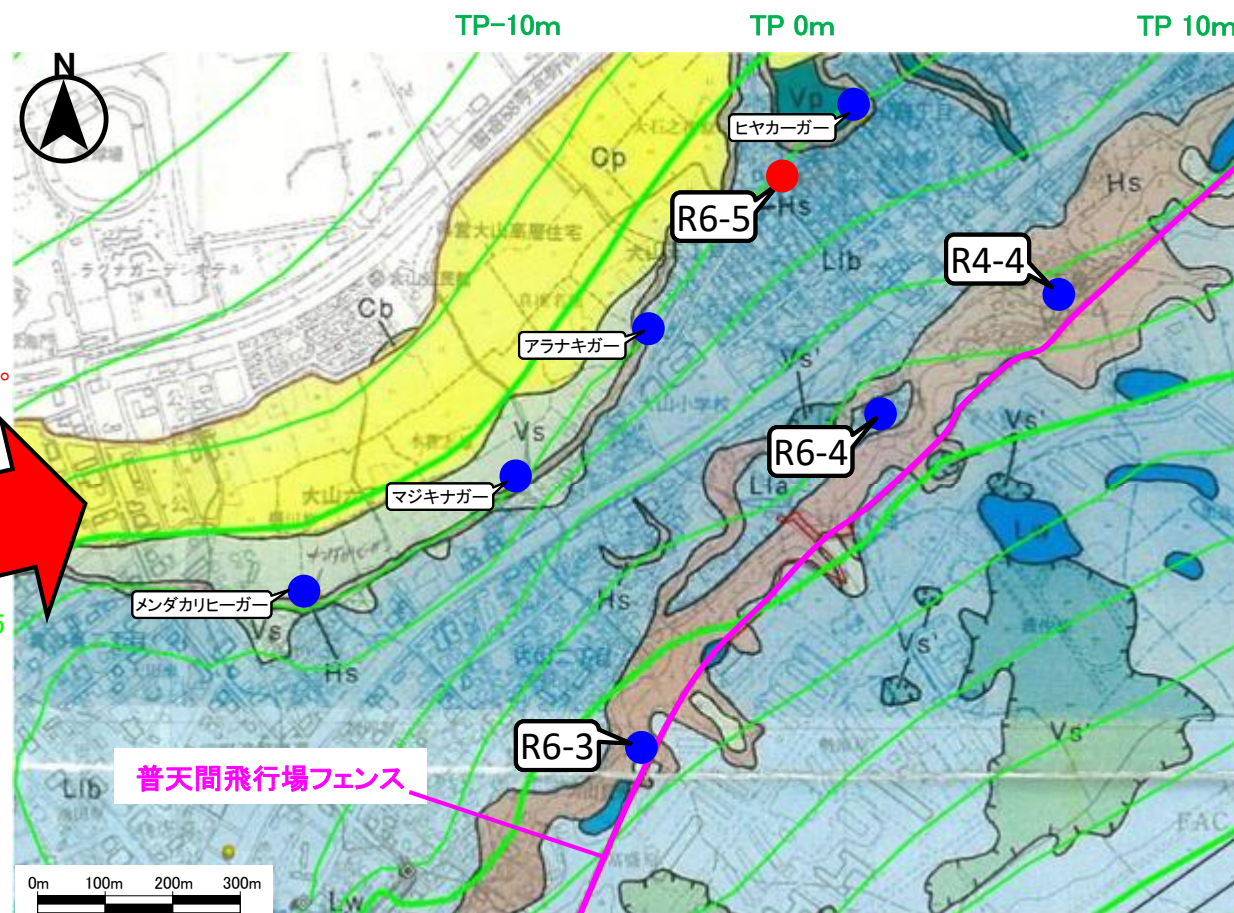
【課題Ⅱ】 地盤・地下水の調査範囲の拡大(C流域)

- ✓ R6-5孔付近やR6-4孔～R4-4孔の間にC流域とD流域を隔てる明瞭な島尻泥岩層の尾根部は確認されなかった。
- ✓ 既往ボーリングデータを見直した結果（地盤標高値の錯誤）、アラナキガー付近に島尻泥岩層上面の谷部は分布しないと考えられる。

これまでは島尻泥岩層上面の谷部や尾根部(流域界)が想定されていた。



(出典: 地理院地図に加筆)



島尻泥岩層上面等高線(—)は収集したボーリングデータ及び本事業での調査結果をもとにして作成

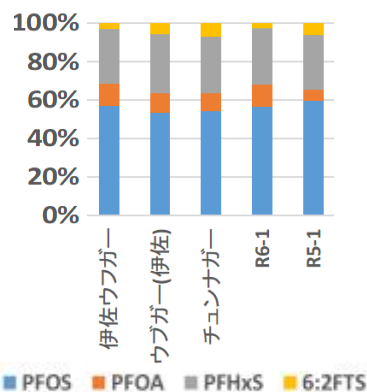
(出典: 地理院地図に加筆)

4-1. 課題に対する調査結果の考察

【課題Ⅲ】 地下水流向とPFOS等濃度の整合性確認(E流域)

- ✓ 消火訓練施設の下流側であるR5-1孔の地下水において、3,400ng/LのPFOS等を確認。
- ✓ 下流側の湧水に向かうにつれ、チュンナガー1,100ng/L、ウブガー(伊佐) 920ng/Lと濃度が低下。
- ✓ R5-1孔はPFOSが主体で6:2FTSも検出。R6-1孔と伊佐ウブガーも含めPFOS等の構成比が類似。
(ただし、喜友名B孔とフンシンガーは概ね6:2FTSが不検出で、R5-1孔とは異なる系統と推定)

PFOS等4物質の構成比(直鎖体のみ)



PFOS等の分析結果(直鎖体のみ)

- ・ PFOS等の合計濃度⇒ 3,400ng/L
- ・ 分析試料の採水日⇒ 2024/8/22

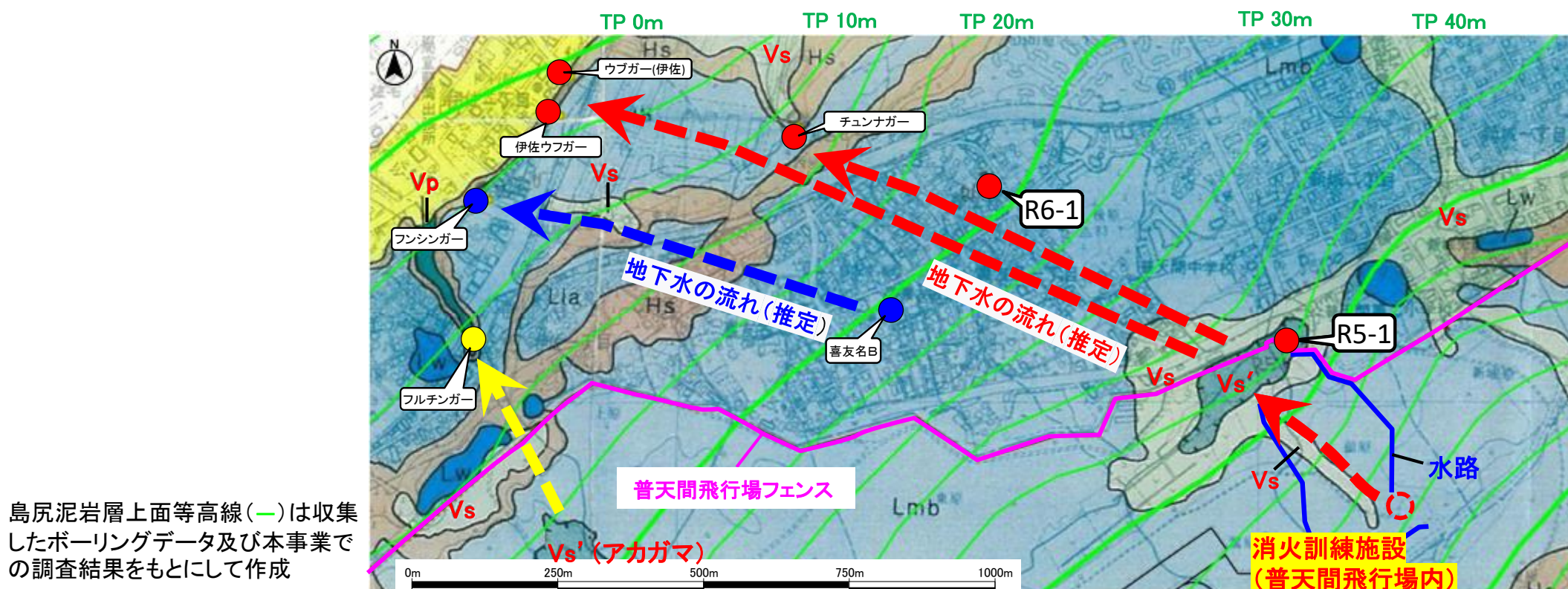
注) 表記したPFOS等の構成比では2024年8～9月のデータがない伊佐ウブガー・ウブガー(伊佐)・喜友名Bは2023年10月の採水、フンシンガーは2023年8月の採水における結果を示している。



4-1. 課題に対する調査結果の考察

【課題Ⅲ】 地下水流向とPFOS等濃度の整合性確認(E流域)

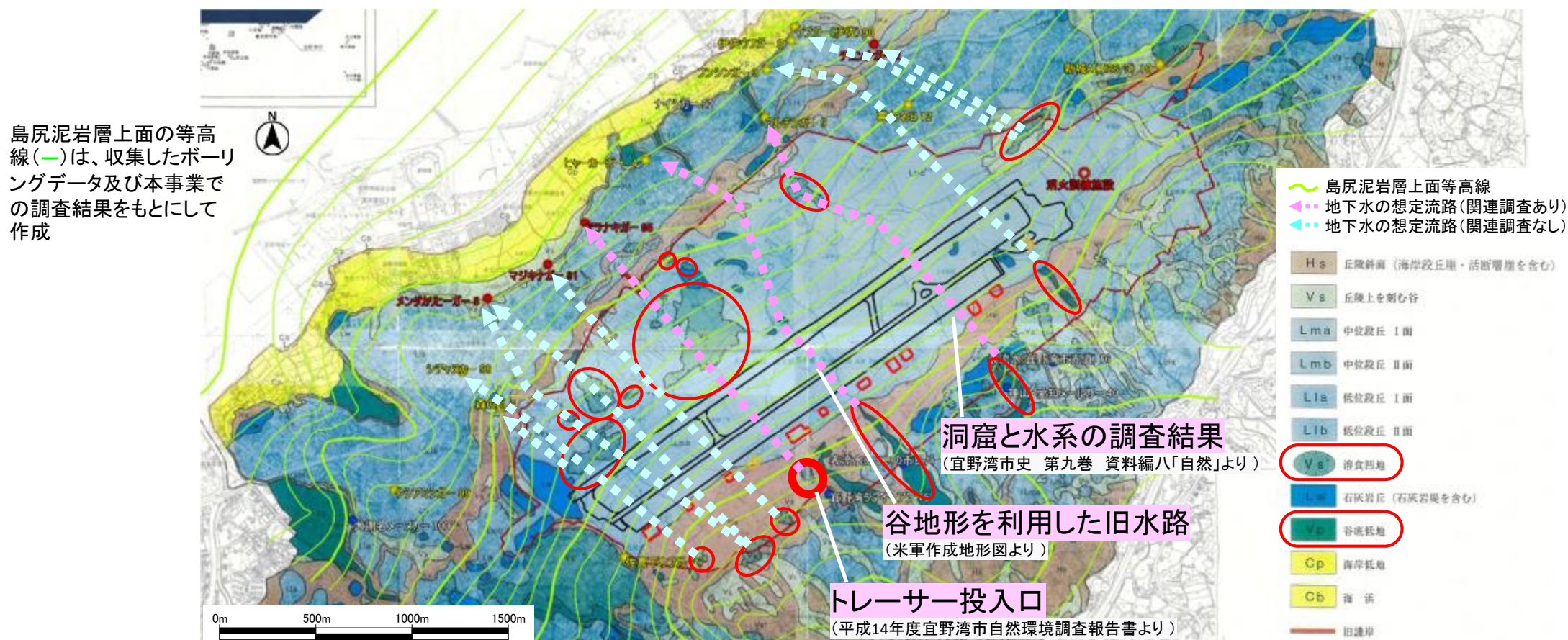
- ✓ 地形分類図と島尻泥岩層上面等高線を重ね合わせて、地下水の流れを考察した。
- ✓ 湧水地点から谷(Vs)や谷底低地(Vp)が刻まれた方向へ辿ると、溶食凹地(Vs')が分布している。
- ✓ 島尻泥岩層の上面勾配の影響も受け、これらを繋ぐライン上を地下水が流動しやすい可能性がある。
- ✓ R5-1孔が位置する溶食凹地(Vs')には、消火訓練施設からの水路も存在している。



4-2. その他の調査結果の考察

◆地下水流路の想定

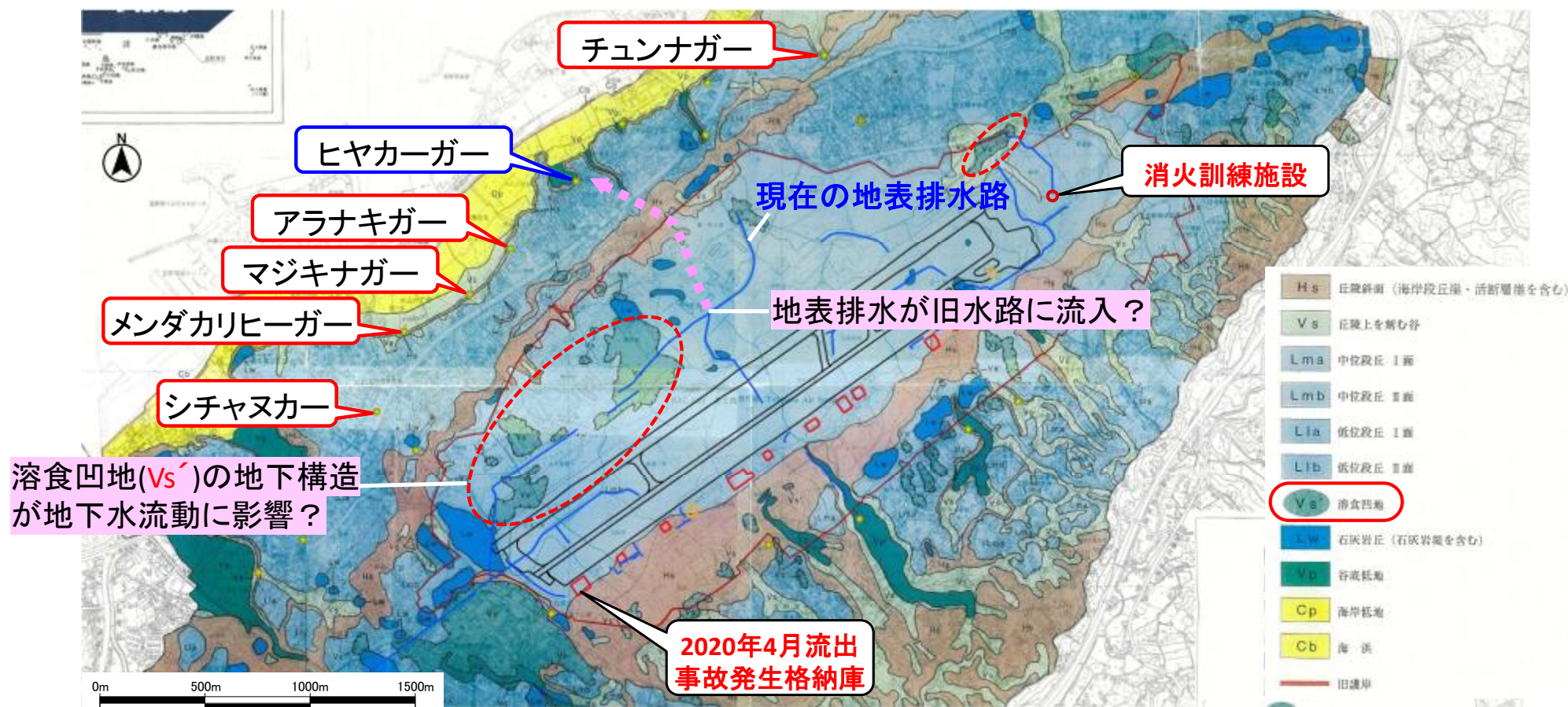
- ✓ 過去のトレーサー試験結果などから、飛行場内の溶食凹地(Vs')や谷底低地(Vp)は北西側の湧水と繋がって、流量が豊富な地下水流路が形成されている可能性がある。
- ✓ 今回作成した島尻泥岩層上面の等高線と重ね合わせても、妥当な流下方向と考えられる。



4-2. その他の調査結果の考察

◆PFOS等の濃度変動との関連

- ✓ 1,000ng/Lを超えるPFOS等4物質が継続的に検出されている湧水地点の上流側には、飛行場内の段丘面に比較的大きい溶食凹地(Vs')が分布している。
- ✓ 2020年4月の事故で流出したPFOS等は地下水流路に地下浸透し、C流域の湧水のほか隣接するD流域のヒヤカーガーに流れ込んだ可能性も、特徴的な6:2FTSの濃度変動から想定される。



4-2. その他の調査結果の考察

◆ 普天間飛行場で使用された泡消火薬剤の成分

- ✓ 2016年以前に使用されていた古いタイプの「レガシーPFOS泡消火薬剤」の成分は**PFOSが主体**であった。
- ✓ 2016年頃から**PFOSおよびPFOAを主成分としない**新しいタイプの「モダンフルオロテロマー泡消火薬剤」へ入替えが開始されたと考えられる。
- ✓ 2020年4月の泡消火薬剤の流出事故において、泡消火薬剤が流入した河川水を分析したところ、検出したPFOS等の**90%以上は6:2FTS※**であることが判明し、普天間飛行場内の泡消火薬剤が新しいタイプの泡消火薬剤に入替えられていたことが示唆される（下表の分析結果を参照）。

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

泡消火薬剤の使用年代
1970年代～2015年頃 ・古いタイプの消火薬剤を使用
2016年頃～2021年8月 ・新しいタイプの泡消火薬剤への 入替え期間 (2016年6月米軍発表資料より)
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月米軍発表資料より)

採水地点	採水日	分析結果(ng/L)			
		PFOS	PFOA	PFHxS	6:2FTS※
比屋良川 大謝名橋 上流200m	2020年 4月11日	23	18	4.9	20,000
比屋良川 大謝名橋 上流200m	2020年 5月14日	8.7	4.4	4.1	210

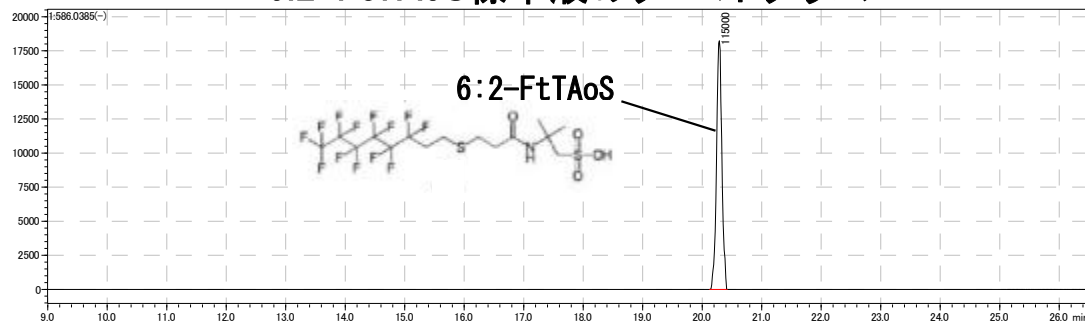
※ 新しいタイプの泡消火薬剤の主成分である物質は、環境中で酸化などすると「6:2FTS」に変化すると考えられ、普天間飛行場周辺で「6:2FTS」の測定を開始した2018年から検出を確認している。

4-2. その他の調査結果の考察

◆ 流出事故時の泡消火薬剤の成分

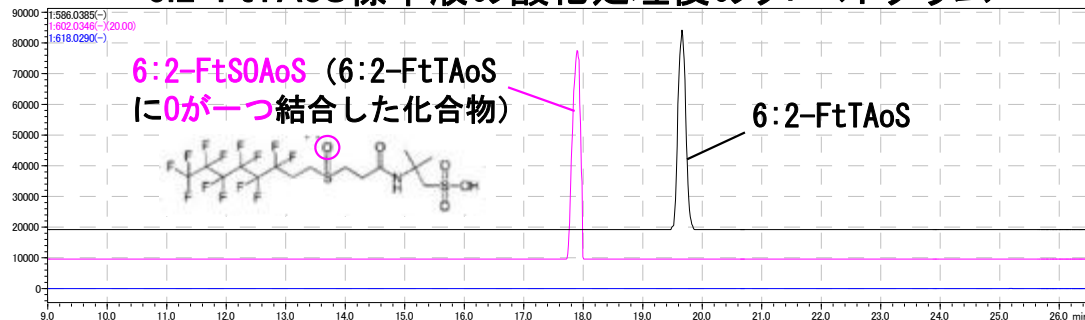
- ✓ C流域で発生した流出事故時の泡サンプルやC流域のシチャヌカーの試料を分析した結果より、新しいタイプの泡消火薬剤の主成分である「6:2-FtTAoS」は、環境中に放出された後、地下水や湧水に至るまでに酸化され、「6:2FTS」へと変化して、検出されていると推定される。

6:2-FtTAoS標準液のクロマトグラム



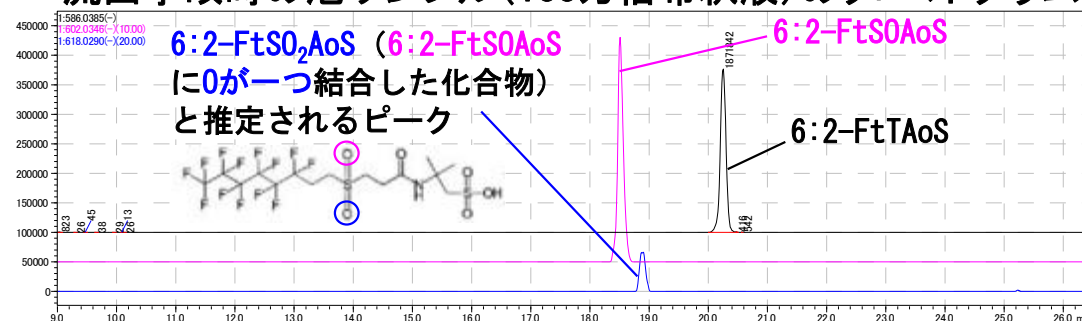
6:2-FtSO₂AOsや6:2-FtSO₂AOsは、6:2-FtTAoSから6:2FTSへ変化する過程で生成される物質

6:2-FtTAoS標準液の酸化処理後のクロマトグラム



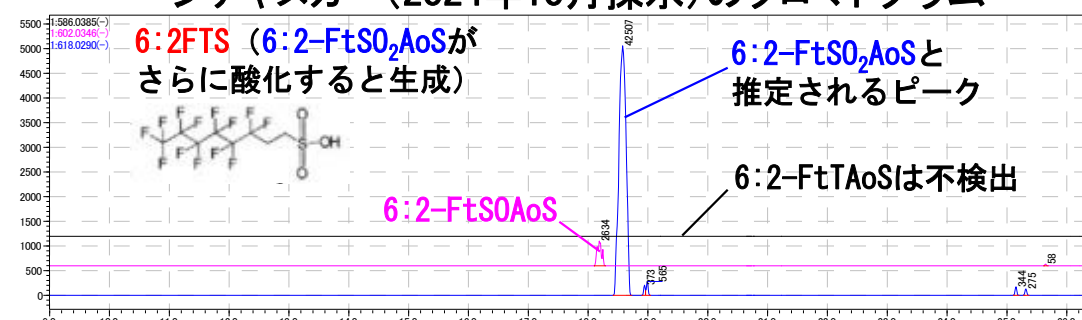
「6:2-FtTAoS」の標準液と酸化促進剤の二酸化マンガン(MnO₂)を添加したメタノール溶液を60℃に加温し、24時間経過した検液の分析結果である。

流出事故時の泡サンプル(100万倍希釈液)のクロマトグラム



泡消火薬剤の放出後の環境中または冷蔵庫での保管中での酸化作用により、生成の過程が推定できる3物質のピークが確認される。

シチャヌカー(2024年10月採水)のクロマトグラム



湧水中では既に酸化が促進しており、「6:2-FtTAoS」は検出されず、「6:2FTS」の生成前の物質「6:2-FtSO₂AOs」のピークが確認される。

5. 本専門家会議における総括

5-1. 専門家会議での検討の総括

◆ 普天間飛行場全域における成果のまとめ

対象	把握および推定された事項	汚染源の特定およびメカニズムに関する評価
全域	✓ 普天間飛行場周辺の地下水は、飛行場の南東側を上流として北西側へ流れている。 ✓ 地下水上流側では、PFOS等の発生源となり得る土地利用は確認されず、高濃度の地下水も確認されない（PFOS等の濃度は、50ng/L以下）。また、6:2FTSは、一時的に検出される程度である。 ✓ 地下水下流側では、高濃度な地下水が継続して確認されている（PFOS等の濃度は、1,000ng/L以上）。また、6:2FTSは、継続して検出される。 ✓ C流域で発生した流出事故時の泡サンプルやC流域のシチャヌカーの試料を分析した結果より、新しいタイプの泡消火薬剤の主成分である「6:2-FtTAoS」は、環境中に放出された後、地下水や湧水に至るまでに酸化され、「6:2FTS」へと変化して、検出されると推定される。	✓ PFOS等の汚染源となり得る場所は、普天間飛行場内に存在すると考えられる。 ✓ 地下水下流側で検出される「PFOS、PFOA、PFHxS」は古いタイプのレガシーPFOS泡消火薬剤、「6:2FTS」は新しいタイプのモダンフルオロテロマー泡消火薬剤に由来している可能性が考えられる。

5-1. 専門家会議での検討の総括

◆C流域における汚染源の推定

対象	把握および推定された事項	汚染源の特定およびメカニズムに関する評価
C流域	✓ 普天間飛行場内に泡消火薬剤を保管等していた格納庫が存在し、一部の格納庫では泡消火薬剤の流出事故が発生している。 ✓ 飛行場より地下水下流側では、PFOS等濃度が1,000ng/L以上を示す地点が分布している。 ✓ 2020年4月の泡消火薬剤流出事故後の9月に6:2FTSが濃度上昇した地点（シチャヌカー、メンダカリヒーガー、マジキナガー、アラナキガー）が確認された。 ✓ 特徴的に6:2FTSの構成比が大きいシチャヌカーと類似する水質がR6-2孔で確認されている。ただし、PFOS等濃度は上流側のR6-2孔の方が低い。 ✓ 降雨の影響でPFOS等濃度が上昇する傾向の地点（R4-3）と低下する傾向の地点（シチャヌカー、森の川、メンダカリヒーガー）が分布している。	✓ PFOS等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の保管等が確認されたC流域内の格納庫と考えられる。 ✓ シチャヌカーで湧出する地下水は、R5-4孔～R4-3孔の間（R6-2孔近傍）の比較的狭い範囲を流下していると考えられる。 ✓ 降雨の影響による濃度変動より、地下浸透したPFOS等は、地下水とともに下流側へ直ちに流下するだけでなく、不飽和帯に残留して雨水とともにPFOS等が地下水へ供給されていることが考えられる。

5-1. 専門家会議での検討の総括

◆D流域における汚染源の推定

対象	把握および推定された事項	汚染源の特定およびメカニズムに関する評価
D流域	✓ 普天間飛行場内に泡消火薬剤を保管等していた格納庫が存在し、一部の格納庫では泡消火薬剤の流出事故が発生している。 ✓ 飛行場より地下水下流側では、地下水の上流側より高いPFOS等濃度が確認されているが、C流域及びE流域と比べてPFOS等濃度が低い地点が分布している。 ✓ 2020年4月の泡消火薬剤流出事故後の9月に6:2FTSが濃度上昇した地点（ヒヤカーガー）が確認された。 ✓ 降雨の影響でPFOS等濃度が上昇する傾向の地点（ヒヤカーガー）が分布している。 ✓ C流域とD流域を隔てる明瞭な島尻泥岩層上面の尾根部（流域界）は、下流側の湧水付近までは分布していない。	✓ PFOS等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の保管等が確認されたD流域内の格納庫の可能性があると考えられる。 ✓ 降雨の影響による濃度変動より、地下浸透したPFOS等は、地下水とともに下流側へ直ちに流下するだけでなく、不飽和帯にも残留して雨水とともにPFOS等が地下水へ供給されていることが考えられる。

5-1. 専門家会議での検討の総括

◆E流域における汚染源の推定

対象	把握および推定された事項	汚染源の特定およびメカニズムに関する評価
E 流域	✓ 普天間飛行場内には、泡消火薬剤を使用していた消火訓練施設が存在している。 ✓ 飛行場より地下水下流側では、PFOS等濃度が1,000ng/L以上を示す地点が分布している。 ✓ 地下水下流側の飛行場フェンス至近のR5-1孔では、飛行場周辺で最も高いPFOS等濃度が継続して検出している。 ✓ R5-1孔のPFOS等の構成比は、その下流側の地点（R6-1孔、チュンナガー、ウブガー(伊佐)、伊佐ウフガー）と類似している。 ✓ R5-1孔のPFOS等の含有量は、地下水位より浅い部分の粘土層や石灰岩では深度方向に濃度が低下し、地下水位より深い部分では濃度が上昇していた。 ✓ 降雨の影響でPFOS等濃度が上昇する傾向の地点（チュンナガー）が分布している。	✓ PFOS等の汚染源となり得る場所は、泡消火薬剤の使用等が確認された消火訓練施設と考えられる。 ✓ 消火訓練施設で使用した泡消火薬剤由来の高濃度なPFOS等を含む地下水は、R5-1孔付近を經由してチュンナガーなどの湧水地点へ向かい流下している。 ✓ 降雨の影響による濃度変動より、地下浸透したPFOS等は、地下水とともに下流側へ直ちに流下するだけでなく、不飽和帯にも残留して雨水とともにPFOS等が地下水へ供給されていることが考えられる。

5-2. 検討課題として残った事項

①汚染源におけるPFOS等の残留状況

一部の湧水や地下水で積算降水量とPFOS等濃度の変動傾向との相関関係が把握でき、普天間飛行場内の汚染源におけるPFOS等の残留が推定されたが、その濃度や位置、深さを推定できるまでのデータは得られなかった。

対応例

- ・湧水及び観測井戸の水質モニタリングの継続
- ・降雨後の連続採水・分析

②D流域の地下水流路

C流域とE流域については、普天間飛行場からのPFOS等を含む地下水流路はほぼ把握されたが、D流域では下流側の湧水と同等のPFOS等濃度の地下水は確認されず、十分に把握できなかった。

対応例

- ・これまでに調査対象としていない地下水下流側の湧水地点での水質分析
- ・地下水の流路形成に関わる調査（文献調査、現地踏査など）
- ・トレーサー試験等による地下水流路の確認

③PFOS等4物質以外による水質の分類

PFOS等4物質の構成比から水質を分類したが、さらに分類の精度を向上することで、より具体的な汚染源の特定につながる可能性がある。

対応例

- ・PFOS等4物質以外のPFASの分析
- ・前駆体の検出の有無やその他指標となり得る物質の検討

5-3. 今後必要とされる事項

- ✓ 普天間飛行場周辺の地下水下流側において、高濃度のPFOS等が検出されていることから、湧水及び観測井戸を対象に、地下水位やPFOS等濃度を把握するモニタリングを実施し、汚染状況の監視を継続する。
- ✓ 一部の湧水や地下水で積算降水量とPFOS等濃度の変動傾向との相関関係を把握できたが、より詳細に検証する。
- ✓ PFOS等4物質の構成比から水質を分類したが、泡消火薬剤中（レガシーPFOS及びモダンフルオロテロマー）の有機フッ素化合物の前駆体や生成物等に係る情報を収集し、実試料を分析することで汚染源の特定につなげる。
- ✓ 蓄積されたモニタリングデータ等の精査や評価を行い、溶食凹地など普天間飛行場内の地形的な特徴も考慮した調査ボーリングを実施し、特にC流域の汚染メカニズムのさらなる解明を行うことが、汚染の浄化など対策へ繋げるために必要である。