

第5章 実験結果に基づく活性炭の仕様検討

PFOS 等吸着性能の高い活性炭仕様を検討するに当たっては、RSSCT 結果を基に実施設を想定した吸着性能のシミュレーションを行って、コストを含めた総合的な評価を行い、性能と関連する物性値を活性炭仕様へと反映することとした。実施設を想定したシミュレーションでは粒状活性炭吸着池 16 池の交換サイクルや破過曲線の過渡特性を含め、より実施設の状況に即した推定方法とした。

手順と評価方法は以下のとおりである。

1. 実施設における処理水濃度と活性炭交換コストのシミュレーション
2. 参考規制値のその考え方
3. シミュレーション結果と参考規制値への適合状況
4. コストを含めた吸着性能の総合評価

5-1. 実施設における処理水濃度と活性炭交換コストのシミュレーション

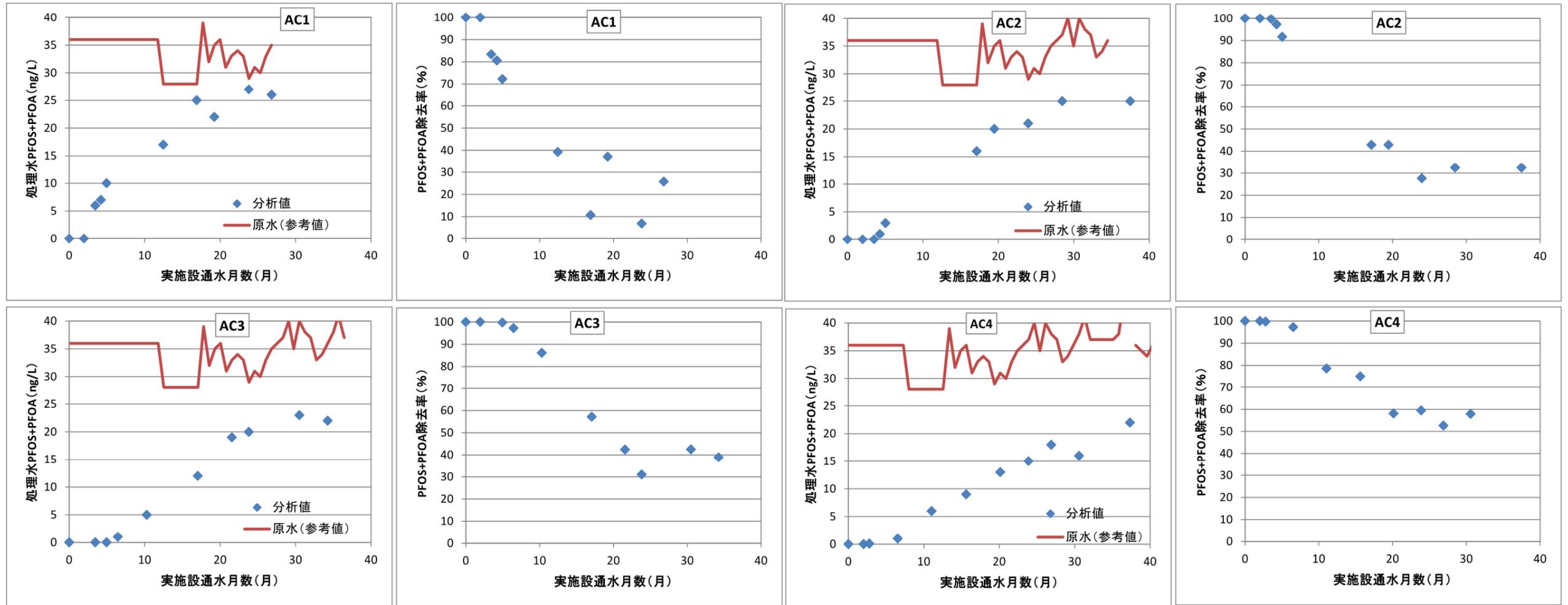
実施設における処理水濃度と活性炭交換コストのシミュレーションを行うために、以下の項目について整理を行い、活性炭交換コストシミュレーションを実施した。

- ①データ棄却検証
- ②回帰式の選定（回帰式 4 種類の比較）
- ③シミュレーションの考え方整理
- ④活性炭単価設定
- ⑤実施設を想定した交換サイクル（年）（0.66 年（8 ヶ月）、1、2、3、4、5、6 年）
- ⑥活性炭交換コストシミュレーション

1) データ棄却について

AC1～AC8 について、実施設通水月数と処理水濃度及び除去率の関係を図 5-1、2 に示す。

図 5-1、2 に示すとおり、処理水濃度の変動形状、除去率の変動形状より特に異常のあるデータはみられなかったため、データ棄却は行わず全ての分析値データを使用して検討を行った。



※最後のデータは原水に関する参考値なし

図 5-1 分析値と除去率 (その 1)

※原水濃度は水質管理事務所の測定値を参考値として用いた。

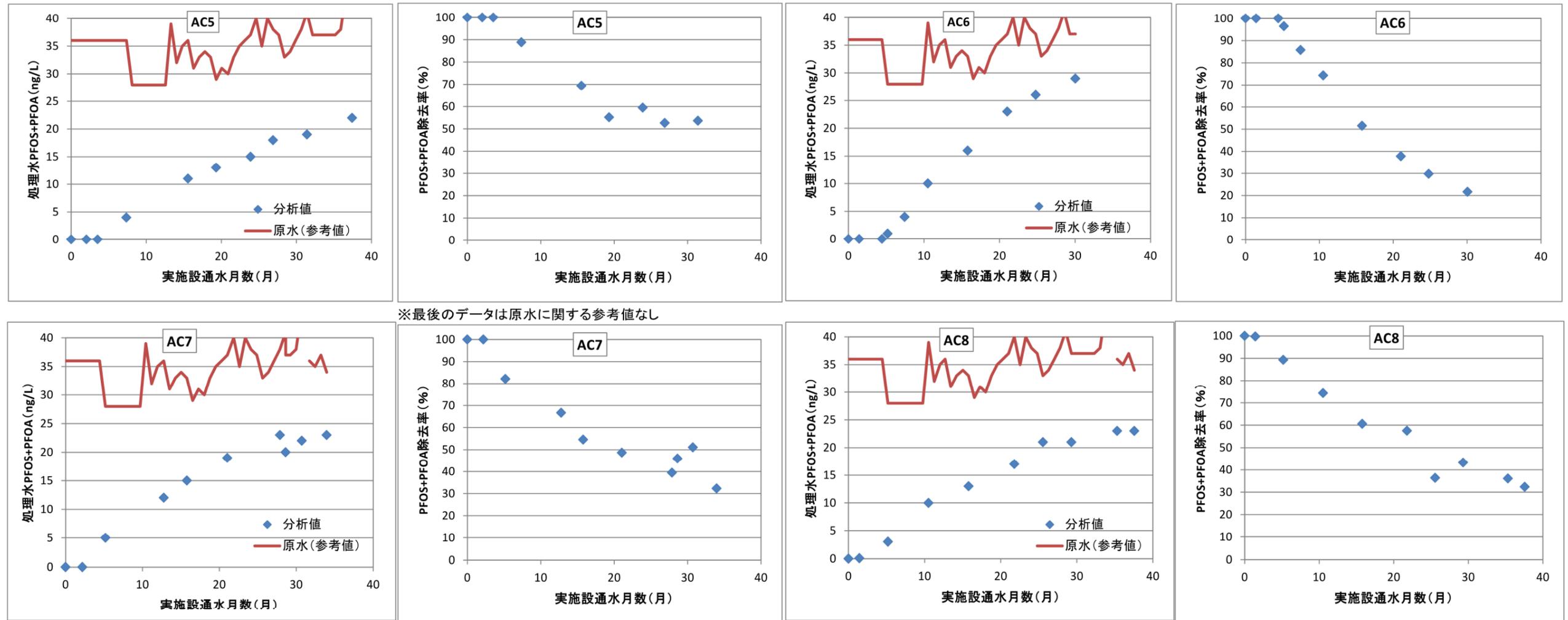


図 5-2 分析値と除去率 (その 2)

※原水濃度は水質管理事務所の測定値を参考値として用いた。

2) 回帰式の選定

回帰式の選定は次の条件で行った。

- 通水初期の合致の度合いを高めるため、処理水濃度が定量下限値未満のデータは回帰計算から除外した。
- 各実験結果から、4種類の回帰計算（直線回帰、指数回帰、累乗回帰、対数回帰）を行った。
- 決定係数（ R^2 ）が大きいこと、通水初期の合致の度合いが良好なことを主な評価軸として選定した。

結果を表 5-1、図 5-3～6 に示す。

AC1 は決定係数（ R^2 ）で判断すると累乗回帰が選定されるが、通水初期の合致の度合いが悪いことから、次に決定係数（ R^2 ）が大きい対数回帰を採用した。他の AC2～AC8 では対数回帰の決定係数（ R^2 ）が大きいことから採用した。したがって、表 5-1 に示すとおり 8 炭種ともに採用した回帰式は対数回帰となった。

表 5-1 採用回帰式一覧

AC No.	データ数	回帰種類	回帰式	決定係数(R ²)	採用
AC1	10	直線回帰	$y=0.9193x+4.6471$	0.9230	
		指数回帰	$y=6.2902e^{0.0628x}$	0.8729	
		累乗回帰	$y=2.6541x^{0.7314}$	0.9671	
		対数回帰	$y=10.409\ln(x)-7.2783$	0.9669	○
AC2	10	直線回帰	$y=0.7825x+0.6752$	0.8928	
		指数回帰	$y=1.7623e^{0.0912x}$	0.7477	
		累乗回帰	$y=0.2064x^{1.4396}$	0.9249	
		対数回帰	$y=11.674\ln(x)-15.878$	0.9859	○
AC3	10	直線回帰	$y=0.8239x-2.3692$	0.9113	
		指数回帰	$y=1.3292e^{0.0991x}$	0.7530	
		累乗回帰	$y=0.0499x^{1.8417}$	0.9170	
		対数回帰	$y=14.268\ln(x)-26.653$	0.9645	○
AC4	10	直線回帰	$y=0.6478x-1.4292$	0.9493	
		指数回帰	$y=1.6081e^{0.0826x}$	0.7221	
		累乗回帰	$y=0.0763x^{1.6401}$	0.8989	
		対数回帰	$y=11.619\ln(x)-21.681$	0.9651	○
AC5	10	直線回帰	$y=0.5853x+1.0426$	0.9741	
		指数回帰	$y=3.889e^{0.0524x}$	0.8490	
		累乗回帰	$y=0.5544x^{1.0413}$	0.9762	
		対数回帰	$y=10.892\ln(x)-18.469$	0.9816	○
AC6	10	直線回帰	$y=1.1649x-3.5289$	0.9762	
		指数回帰	$y=1.5188e^{0.1158x}$	0.7656	
		累乗回帰	$y=0.0874x^{1.8067}$	0.9176	
		対数回帰	$y=16.682\ln(x)-28.333$	0.9865	○
AC7	10	直線回帰	$y=0.6084x+3.9949$	0.9258	
		指数回帰	$y=5.6305e^{0.0471x}$	0.8289	
		累乗回帰	$y=1.4422x^{0.8115}$	0.9693	
		対数回帰	$y=9.9336\ln(x)-11.965$	0.9704	○
AC8	10	直線回帰	$y=0.5991x+2.8227$	0.9277	
		指数回帰	$y=4.3175e^{0.0523x}$	0.7625	
		累乗回帰	$y=0.7545x^{0.9902}$	0.9401	
		対数回帰	$y=10.536\ln(x)-14.765$	0.9854	○

○: 選択した回帰式

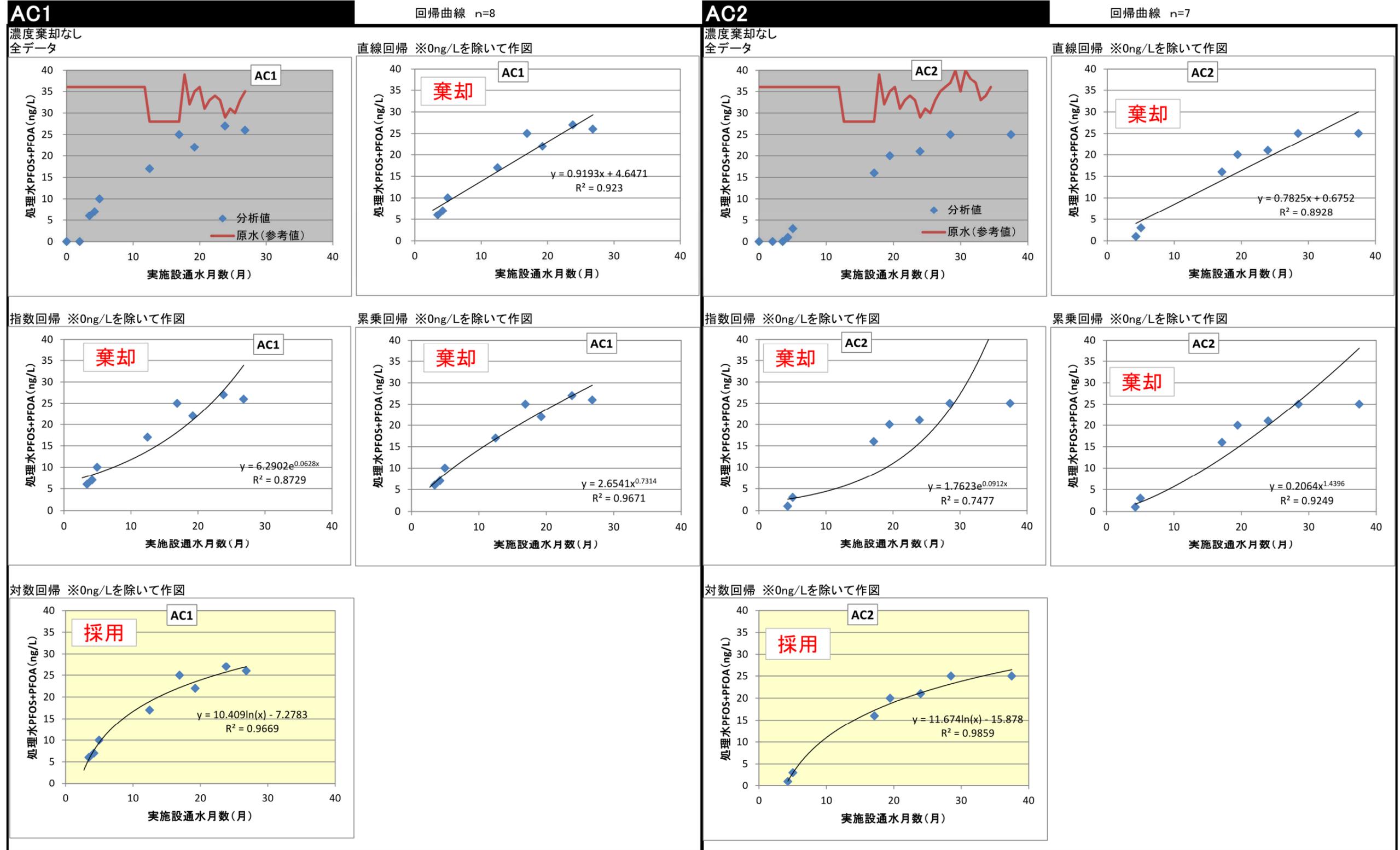
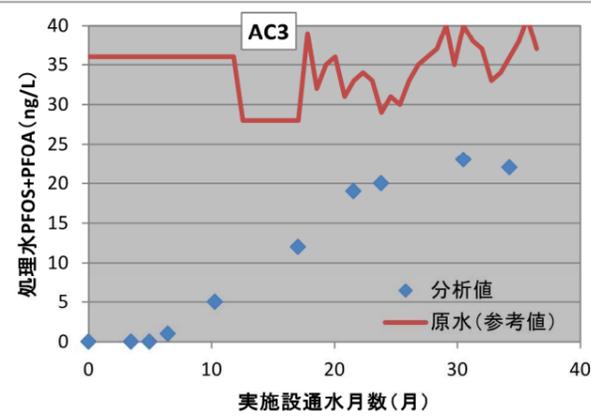


図 5-3 回帰式解析結果 (AC1、AC2)

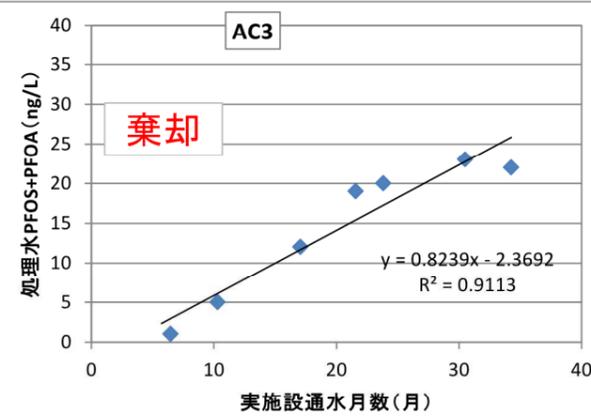
AC3

回帰曲線 n=7

濃度棄却なし
全データ



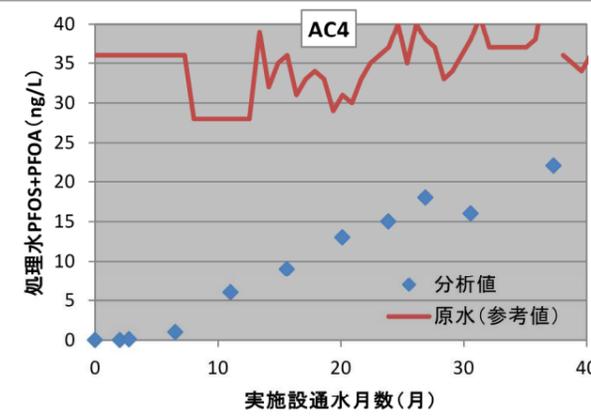
直線回帰 ※0ng/Lを除いて作図



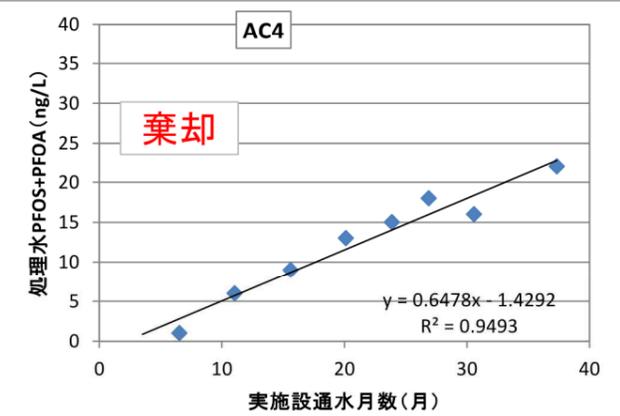
AC4

回帰曲線 n=8

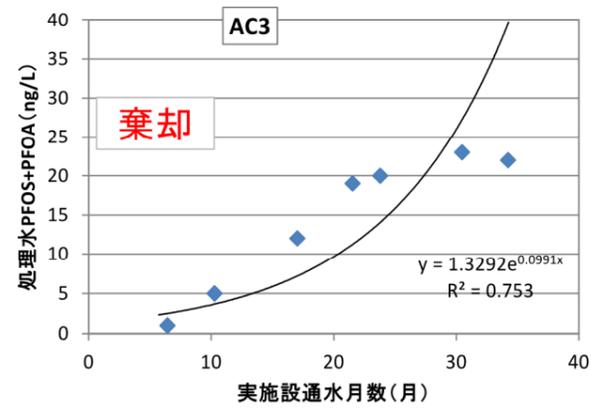
濃度棄却なし
全データ



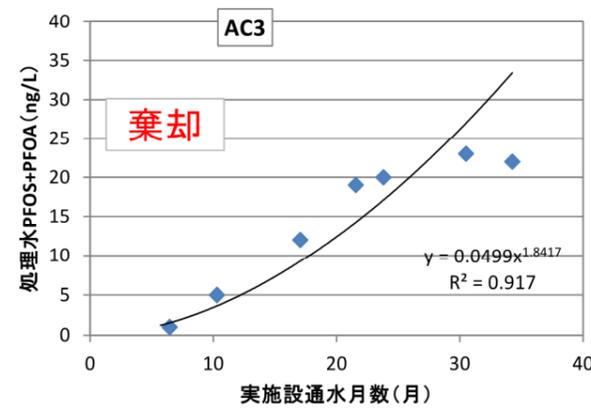
直線回帰 ※0ng/Lを除いて作図



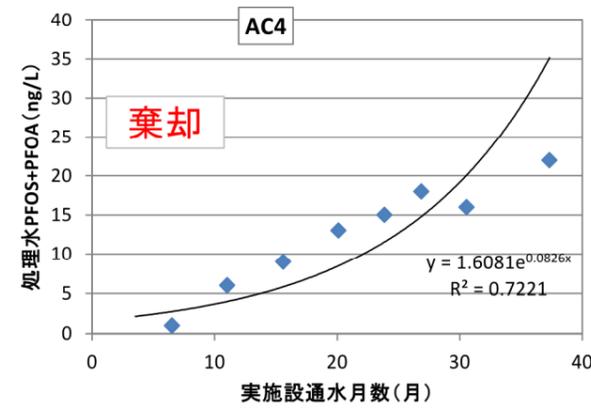
指数回帰 ※0ng/Lを除いて作図



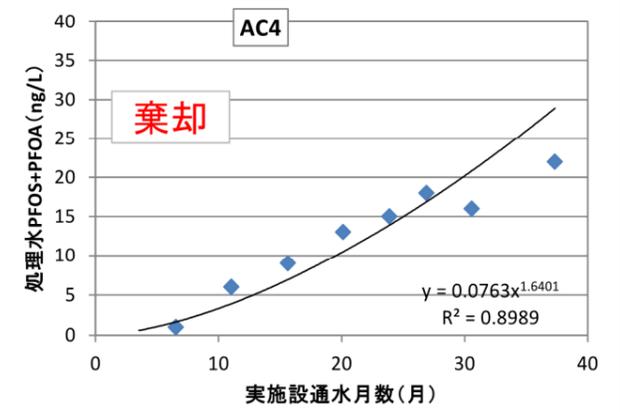
累乗回帰 ※0ng/Lを除いて作図



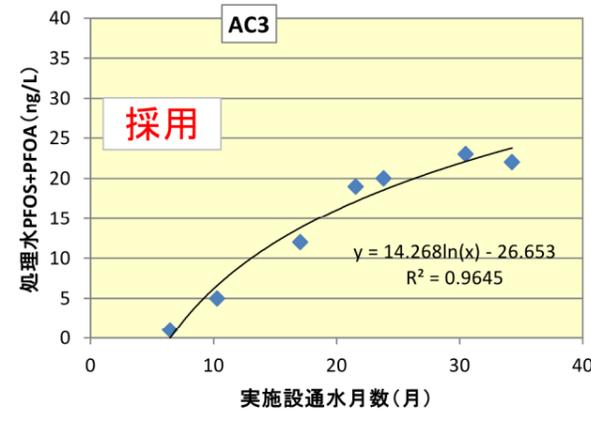
指数回帰 ※0ng/Lを除いて作図



累乗回帰 ※0ng/Lを除いて作図



対数回帰 ※0ng/Lを除いて作図



対数回帰 ※0ng/Lを除いて作図

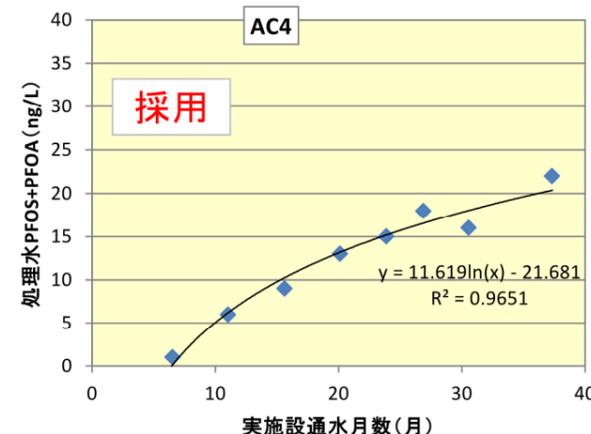
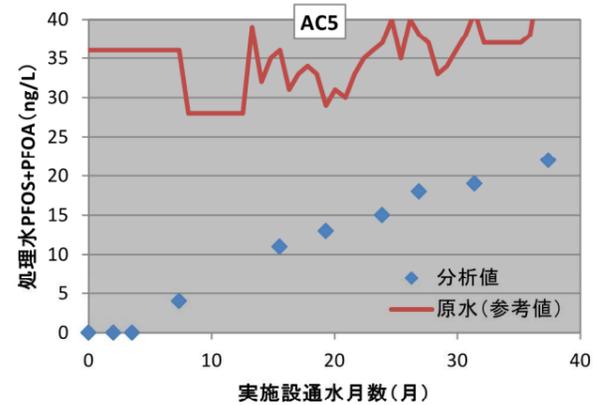


図 5-4 回帰式解析結果 (AC3、AC4)

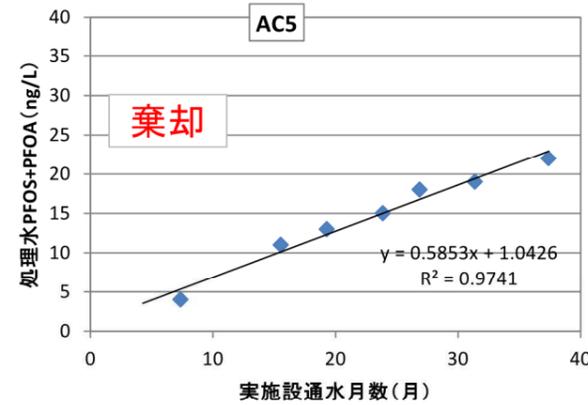
AC5

回帰曲線 n=7

濃度棄却なし
全データ



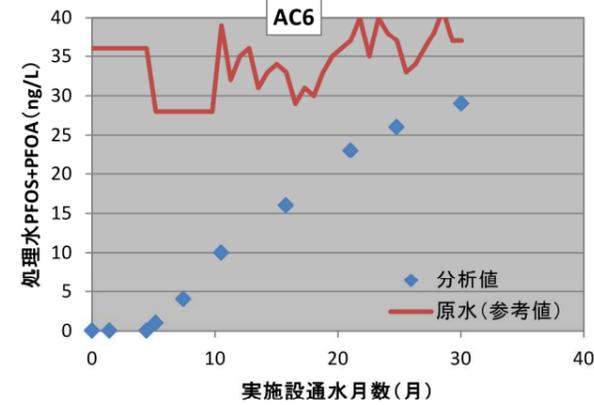
直線回帰 ※0ng/Lを除いて作図



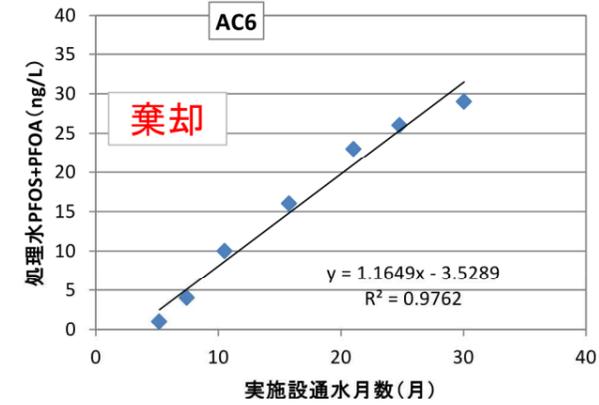
AC6

回帰曲線 n=7

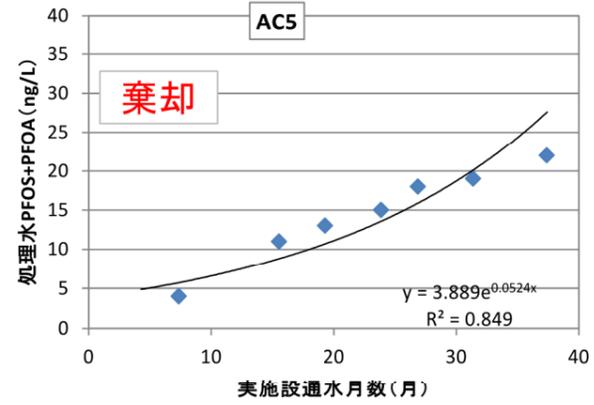
濃度棄却なし
全データ



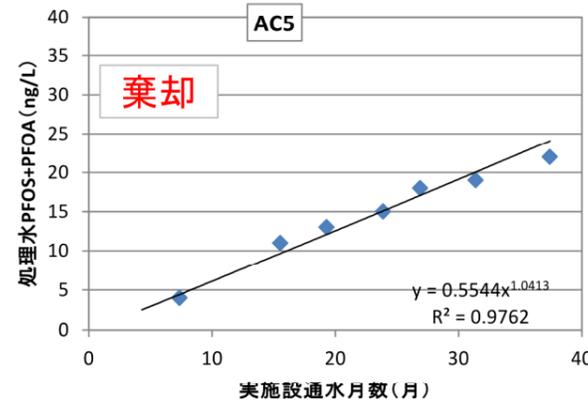
直線回帰 ※0ng/Lを除いて作図



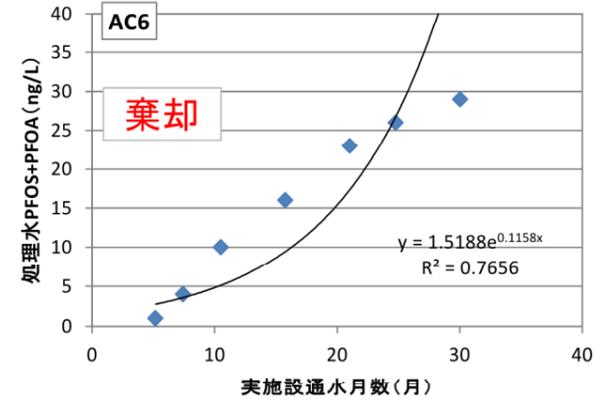
指数回帰 ※0ng/Lを除いて作図



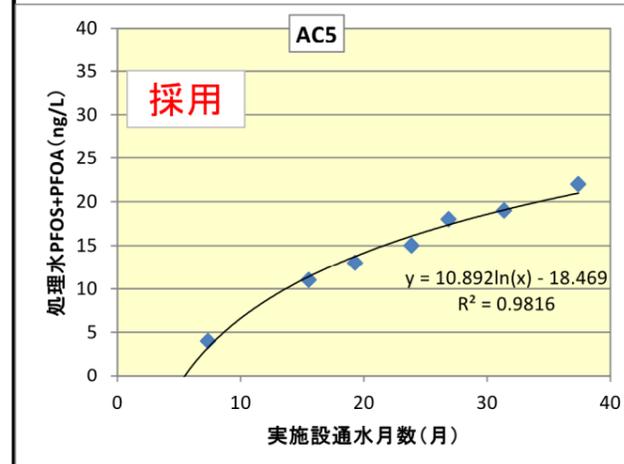
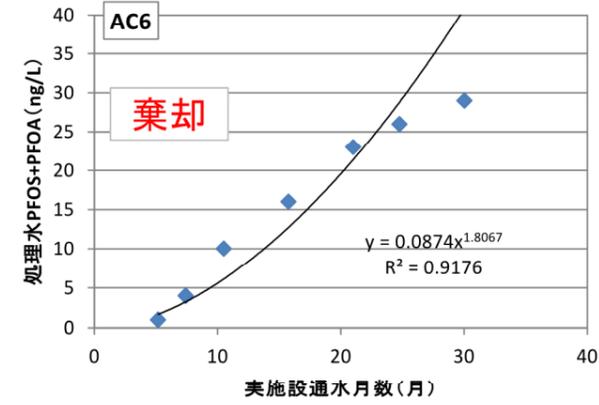
累乗回帰 ※0ng/Lを除いて作図



指数回帰 ※0ng/Lを除いて作図



累乗回帰 ※0ng/Lを除いて作図



対数回帰 ※0ng/Lを除いて作図

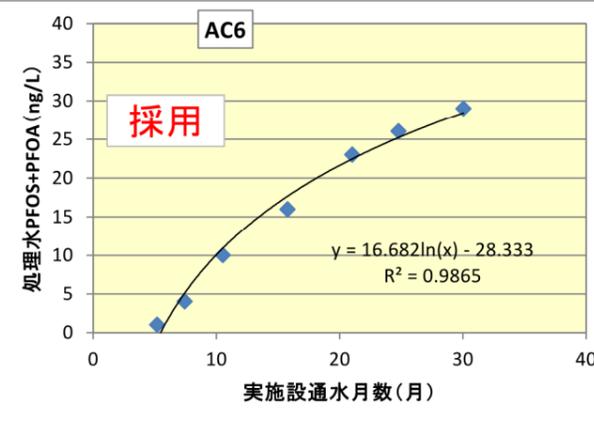


図 5-5 回帰式解析結果 (AC5、AC6)

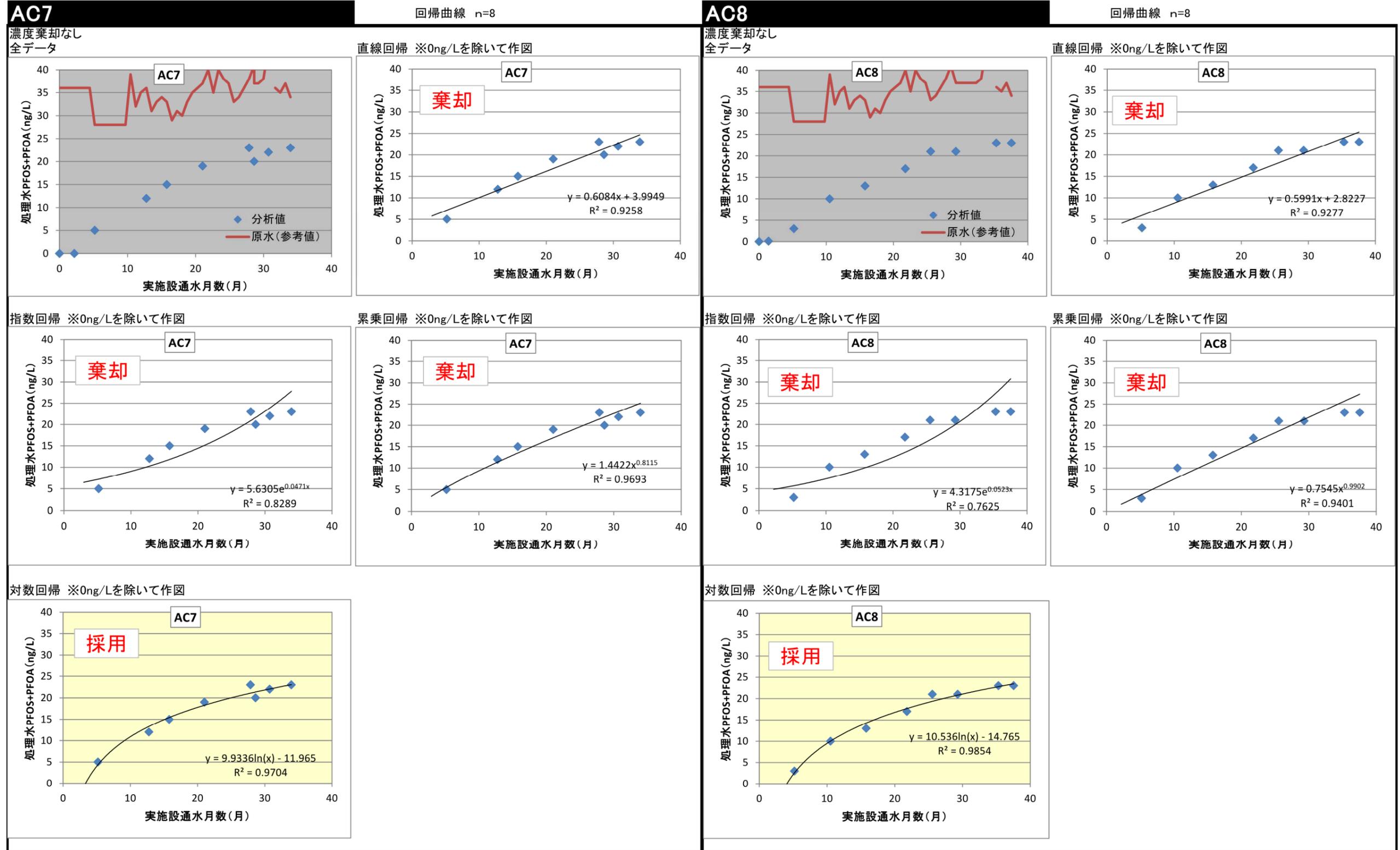


図 5-6 回帰式解析結果 (AC7、AC8)

3) シミュレーションの考え方 (交換サイクル(年)2年を例として)

シミュレーションは以下の考え方で行った。

- 採用回帰式より処理水濃度を計算 (図 5-8 参照)
流入原水濃度 36ng/L であるため、処理水濃度が 36ng/L を超過する場合は 36ng/L で固定した。
- 従前から交換サイクル(年)2年で繰り返してきたことを前提にして、1~4 系列次回交換時期を設定した。
- 1 系列活性炭交換時には、1 ヶ月停止とし、通水量を 4/3 系列 ($4 \div 3 = 1.3$) で運転するため、1 系列当たり 0.3 ヶ月を通水月数にプラスした。
- 回帰式に通水月数を入力し、処理水濃度を計算して、各系列で処理水濃度を記録した。
- 活性炭処理水濃度は、上記の系列別濃度を単純平均とした。
- 平均値列の最大値を交換サイクル(年)2年時の最大値とした。
- シミュレーション結果(例)を図 5-7 に示す。

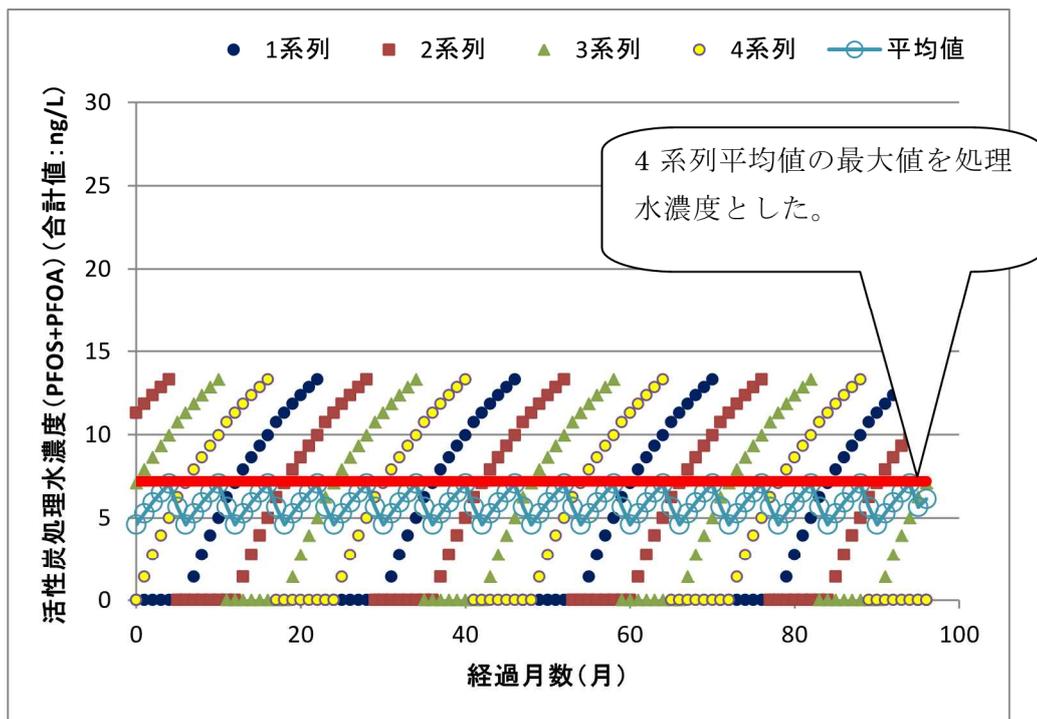


図 5-7 シミュレーション結果(例)と最大値

【シミュレーション内容】

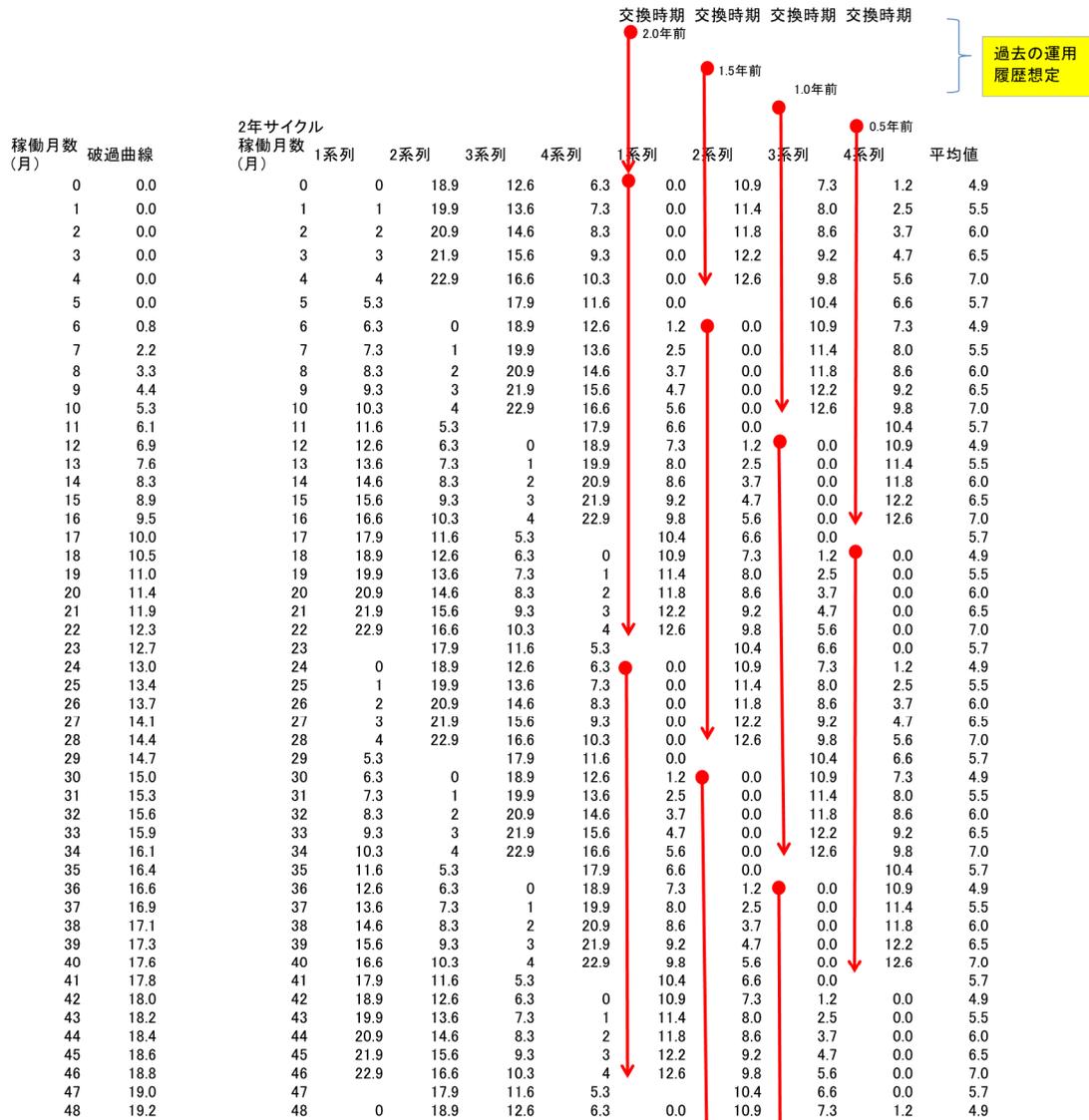


図 5-8 シミュレーションの考え方（交換サイクル（年）2年を例として）

4) 活性炭の単価設定

活性炭の単価は、1系列4池単位で交換する場合を想定し、活性炭量 408.96m³/池を活性炭メーカーに提示して、企業局が見積依頼を行った結果を基に設定した。ここでは請負工事費に活性炭材料費を含んでいる。

$$\text{活性炭の単価 (円/m}^3\text{)} = \text{請負工事費総額 (円)} \div 408.96 \text{ (m}^3\text{/4 池)}$$

11 メーカーの活性炭単価表を表 5-2 に示す。

表 5-2 活性炭入替え工事費（見積ベース）

見積もり条件

・4池取替費用

・投入活性炭量 408.96m³

・請負工事費は4池取替、408.96m³投入するものとして見積もり徴収

AC No.	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8
原料	石炭	石炭	石炭	石炭	石炭	亜炭	石炭	ヤシ殻
形状	破碎炭							
活性炭単価 (円/m ³)	470,000	450,000	460,000	520,000	648,000	590,000	510,000	660,000
請負工事費 (円)	310,794,000	301,092,000	305,943,000	334,488,000	394,548,000	367,246,000	329,659,000	400,268,000
工事費込み単価 (円/m ³)	760,000	736,000	748,000	818,000	965,000	898,000	806,000	979,000
最小値に対する比率	1.03	1.00	1.02	1.11	1.31	1.22	1.10	1.33
RSSCT対象活性炭	○	○	○	○	○	○	○	○
AC No.	AC9	AC10	AC11					
原料	石炭	石炭	石炭					
形状	破碎炭	球状(成形)	破碎炭					
活性炭単価 (円/m ³)	586,000	1,100,000	600,000					
請負工事費 (円)	365,299,000	607,728,000	372,020,000					
工事費込み単価 (円/m ³)	893,000	1,486,000	910,000					
最小値に対する比率	1.21	2.02	1.24					
RSSCT対象活性炭								

5-2. 参考規制値とその考え方

シミュレーション結果を比較のための目安とする浄水濃度を設定するに当たり、国内の暫定目標値が今後強化されることを見越して、諸外国の事例を踏まえて参考規制値として設定した。

1) PFOS 等の諸外国の規制値

諸外国における PFOS 等の規制値を整理すると以下のとおりであった。

- ①アメリカ環境保護庁 (EPA) 2016.5
PFOS、PFOA の合計値 (生涯健康勧告値) 70ng/L
- ②欧州連合 (EU) 2020.12
全ての PFAS 類 (飲料水指令) 500ng/L
20 種の PFAS 類合計 (飲料水指令) 100ng/L
- ③スウェーデン食品庁 2016.12
11 種の PFAS 類合計 (Action Level : 許容摂取量の 10% を超えない限界値) 90ng/L
- ④アメリカ ニューヨーク州飲料水品質評議会 2018.12.18
PFOS、PFOA (最大許容濃度) それぞれ 10ng/L
合計 : 20ng/L
- ⑤アメリカ バーモント州自然資源庁
5 種の PFAS 類合計 (最大許容濃度) 20ng/L
- ⑥厚生労働省 2020.4.1
水質管理目標設定項目
PFOS、PFOA 合計 50ng/L (暫定) 以下

※PFAS : (poly- and perfluoroalkyl substances, 「PFAS」、パーフルオロアルキル化合物及びペルフルオロアルキル化合物) 4,000種以上の異なる化合物の総称。

2) 参考規制値の根拠

シミュレーションを実施するに当たって、参考規制値を表 5-3 に示す。

表 5-3 参考規制値設定とその根拠

参考規制値	設定根拠
20ng/L	ニューヨーク州の最大許容濃度を採用
15ng/L	スウェーデン食品庁の Action Level 値を参考 $90\text{ng/L} \div 11 \text{種} \times 2 \text{種} = 16.3 \div 15\text{ng/L}$
8ng/L	バーモント州の最大許容濃度を参考 $20\text{ng/L} \div 5 \text{種} \times 2 \text{種} = 8\text{ng/L}$

5-3. シミュレーション結果と参考規制値への適合状況

シミュレーションは、分析値を基にデータの棄却は行わず、得られた回帰式を用いて、16池を4池毎の4系列に分割して、交換サイクル内に活性炭を交換する条件で行った。参考規制値以下とするために必要な交換サイクル（年）のシミュレーション結果を表5-4に、表5-4を基に参考規制値への適合状況及び活性炭取替ランニングコストをまとめたものを表5-5に示す。

表5-5にまとめた参考規制値以下を満足する為に必要な交換サイクル（年）と同サイクルにおける処理水濃度及び活性炭取替ランニングコストの結果より、吸着寿命が比較的長いものとして次の4種が挙げられた。

【活性炭処理水濃度 20ng/L 以下を維持できる交換サイクル（年）】

AC3 : 4年間

AC4 : 5年間

AC5 : 5年間

AC8 : 4年間

表 5-4 シミュレーション結果と参考規制値への適合状況

活性炭1回再生当たり活性炭量: 408.96 m³/4池

		単位	活性炭の種類								備考	
			AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8		
採用回帰式	速報値を用いて作図し、決定係数が大きい回帰式を採用	—	対数回帰 10.409 × ln(x) - 7.2783 決定係数0.9669	対数回帰 11.674 × ln(x) - 15.878 決定係数0.9859	対数回帰 14.268 × ln(x) - 26.653 決定係数0.9645	対数回帰 11.619 × ln(x) - 21.681 決定係数0.9651	対数回帰 10.892 × ln(x) - 18.469 決定係数0.9816	対数回帰 y=16.682 × ln(x) - 28.333 R ² =0.9865	対数回帰 9.9366ln(x) - 11.965 決定係数0.9704	対数回帰 10.536ln(x) - 14.765 決定係数0.9854	AC1~8破過曲線	
北谷浄水場系列数	—	—	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
年当たりの活性炭交換系列数	0.66年(8ヶ月)	系列数 ÷ 交換サイクル(年)	系列/年	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	
	1年			4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
	2年			2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
	3年			1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
	4年			1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
	5年			0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	
	6年			0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
所要活性炭量	0.66年(8ヶ月)	408.96m ³ /4池・系列×年当たりの活性炭交換系列数	m ³ /年	2478.5	2478.5	2478.5	2478.5	2478.5	2478.5	2478.5	2478.5	
	1年			1635.8	1635.8	1635.8	1635.8	1635.8	1635.8	1635.8	1635.8	
	2年			817.9	817.9	817.9	817.9	817.9	817.9	817.9	817.9	
	3年			545.3	545.3	545.3	545.3	545.3	545.3	545.3	545.3	
	4年			409.0	409.0	409.0	409.0	409.0	409.0	409.0	409.0	
	5年			327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	
	6年			272.6	272.6	272.6	272.6	272.6	272.6	272.6	272.6	
活性炭単価	県提示 ・1系列=4池単位で交換する場合を想定し、408.96m ³ をメーカーに提示して見積採取 ・請負工事費を含む	千円/m ³	760	736	748	818	965	898	806	979		
交換サイクル(年)毎の処理水濃度(最大値)及び1年当たりのランニングコスト	0.66年(8ヶ月)	16池処理水の混合した濃度(最大値)	ng/L	5.8	2.2	0.2	0.2	0.6	1.0	2.6	2.3	【処理水濃度(最大値)】 AC1~8シミュレーション結果より 【ランニングコスト】 活性炭単価×所要活性炭量
		ランニングコスト	千円/年	1,884,000	1,825,000	1,854,000	2,028,000	2,392,000	2,226,000	1,998,000	2,427,000	
	1年	16池処理水の混合した濃度(最大値)	ng/L	9.8	5.2	2.4	2.0	2.8	4.3	5.6	4.4	
		ランニングコスト	千円/年	1,244,000	1,204,000	1,224,000	1,339,000	1,579,000	1,469,000	1,319,000	1,602,000	
	2年	16池処理水の混合した濃度(最大値)	ng/L	17.9	12.3	9.5	7.8	8.7	13.3	12.0	10.7	
		ランニングコスト	千円/年	622,000	602,000	612,000	670,000	790,000	735,000	660,000	801,000	
	3年	16池処理水の混合した濃度(最大値)	ng/L	22.7	17.8	14.5	11.8	12.9	19.8	16.7	15.6	
		ランニングコスト	千円/年	415,000	402,000	408,000	447,000	527,000	490,000	440,000	534,000	
	4年	16池処理水の混合した濃度(最大値)	ng/L	26.6	22.2	19.8	16.2	17.0	26.0	20.4	19.6	
		ランニングコスト	千円/年	311,000	301,000	306,000	335,000	395,000	368,000	330,000	401,000	
	5年	16池処理水の混合した濃度(最大値)	ng/L	28.5	24.3	22.4	18.3	19.0	29.0	22.2	21.5	
		ランニングコスト	千円/年	249,000	241,000	245,000	268,000	316,000	294,000	264,000	321,000	
	6年	16池処理水の混合した濃度(最大値)	ng/L	30.3	26.5	25.2	20.5	21.1	30.1	24.1	23.5	
		ランニングコスト	千円/年	208,000	201,000	204,000	224,000	264,000	245,000	220,000	267,000	
コストパフォーマンスが良い活性炭			—	—	3	1	2	—	—	4		

参考規制値① 20 ng/L以下
 参考規制値② 15 ng/L以下
 参考規制値③ 8 ng/L以下

表 5-5 参考規制値以下を満足する為に必要な交換サイクル（年）と
同サイクルにおける処理水濃度及び活性炭取替ランニングコスト

参考規制値		単位	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8
8ng/L 以下	交換サイクル(年)	年	0.66	1	1	2	1	1	1.0	1
	処理水濃度	ng/L	5.8	5.2	2.4	7.8	2.8	4.3	5.6	4.4
	ランニングコスト	千円/年	1,884,000	1,204,000	1,224,000	670,000	1,579,000	1,469,000	1,319,000	1,602,000
15ng/L 以下	交換サイクル(年)	年	1	2	3	3	3	2	2	2
	処理水濃度	ng/L	9.8	12.3	14.5	11.8	12.9	13.3	12.0	10.7
	ランニングコスト	千円/年	1,244,000	602,000	408,000	447,000	527,000	735,000	660,000	801,000
20ng/L 以下	交換サイクル(年)	年	2	3	4	5	5	3	3	4
	処理水濃度	ng/L	17.9	17.8	19.8	18.3	19.0	19.8	16.7	19.6
	ランニングコスト	千円/年	622,000	402,000	306,000	268,000	316,000	490,000	440,000	401,000

5-4. コストを含めた吸着性能の総合評価

コストを含めた吸着性能の総合評価の手法は、次に示す考え方で行った。

1) 活性炭選定条件

①吸着寿命の比較

参考規制値 3 条件を満たす吸着寿命を比較し優れた活性炭を選定した。

②コストを含めた吸着性能の総合評価

①で選定した活性炭について以下の考え方で総合評価を行った。

(a)選定活性炭の順位付け

(a)-1 同一処理水濃度までの吸着寿命を比較した。

(a)-2 4 年を交換サイクルとしたランニングコスト比較した。

(b)活性炭の総合評価

「同一処理水濃度までの吸着寿命」と「4 年を交換サイクルとしたランニングコスト」を併せて活性炭の総合評価を行った。

2) 活性炭選定結果

(1)吸着寿命の比較

表 5-5 にまとめた参考規制値以下を満足する為に必要な交換サイクル（年）と同サイクルにおける処理水濃度及び活性炭取替ランニングコストの結果より、吸着寿命が比較的長いものとして次の 4 種が挙げられた。

【活性炭処理水濃度 20ng/L 以下を維持できる交換サイクル（年）】

AC3 : 4 年間

AC4 : 5 年間

AC5 : 5 年間

AC8 : 4 年間

一方、上記 4 種につき、同様な交換サイクル（年）4 年における処理濃度を比較すると表 5-6 のとおりであり、16.2～19.8ng/L の範囲であった。

表 5-6 交換サイクル 4 年における活性炭処理水濃度の倍率

活性炭種	処理水濃度 (ng/L)	比率(-)
AC3	19.8	1.22
AC4	16.2	1.00
AC5	17.0	1.05
AC8	19.6	1.20

活性炭処理水濃度が最も低い AC4 を 1.00 とした比率を求め、比率の低い次の 2 種を選定した。

【交換サイクル（年）、処理水濃度からの選定結果】

AC4

AC5

表 5-7 参考規制値の交換サイクル（年）の比較結果

参考規制値	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8
8ng/L以下	0.66	1	1	2	1	1	1	1
15ng/L以下	1	2	3	3	3	2	2	2
20ng/L以下	2	3	4	5	5	3	3	4

(2) コストを含めた吸着特性の総合評価

一定の処理水濃度における交換サイクル(年)からの評価結果は前章のとおりである。しかし破過曲線の形状及び過渡特性は活性炭毎に異なるため、この様な一断面のみの評価では不十分である。

このため、処理水濃度 2ng/L ピッチ毎に通水可能期間を回帰式から計算し、その平均値の比率で、破過曲線形状及び過渡特性を含めた総合的特性で検証を行うこととした。

(a)-1 同一処理水濃度までの吸着寿命

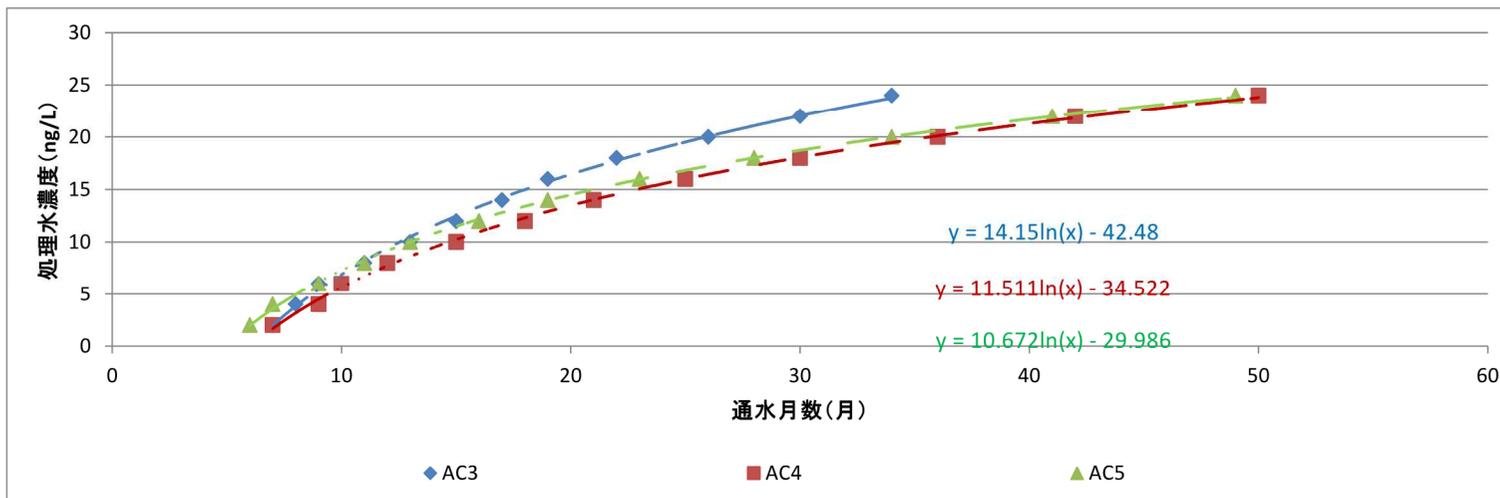
選定された 2 種類のそれぞれの回帰式を用いて、処理水濃度 2~24ng/L (2ng/L 間隔) とした場合の吸着寿命 (実施設通水月数) を求めた。

ここで、実施設運用炭である AC3 を対照として (1.00 倍)、AC4、5 に対する寿命比率を求めた。吸着寿命は全濃度範囲平均と 3 条件参考規制値範囲 (8~20ng/L) の平均とした。結果は図 5-9、表 5-8 に示すとおりであった。

全濃度範囲及び 3 条件規制値範囲において、AC4 は 1.24 倍、1.25 倍、AC5 は 1.13 倍、1.14 倍と長い結果となった。

表 5-8 同一処理水濃度までの吸着寿命のまとめ

—	AC No.	全濃度範囲平均 (2~24ng/L)	3 条件参考規制値範囲 (8~20ng/L)
吸着寿命で選定した 活性炭	AC4	1.24	1.25
	AC5	1.13	1.14
比較対照 (実施設運用炭)	AC3	1.00	1.00



処理水濃度 (ng/L)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	平均	8~20ng/L範囲 平均
異定活性炭 AC4(通水月数)	7	9	10	12	15	18	21	25	30	36	42	50	22.9	
異定活性炭 AC5(通水月数)	6	7	9	11	13	16	19	23	28	34	41	49	21.3	
比較対照 AC3(通水月数)	7	8	9	11	13	15	17	19	22	26	30	34	17.6	
寿命比率 AC4	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.24	1.25
AC5	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.13	1.14
AC3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00	1.00

※実施運用炭AC3を1.0とした。

通水月数算定に用いた回帰式

AC3: $y = 14.268 \ln(x) - 26.65$ Y: 処理水濃度 ng/L X: 月数

AC4: $y = 11.619 \ln(x) - 21.681$ Y: 処理水濃度 ng/L X: 月数

AC5: $y = 10.892 \ln(x) - 18.46$ Y: 処理水濃度 ng/L X: 月数

図 5-9 各処理水濃度に到達する通水期間（吸着寿命）の比較

(a)-2 4年交換サイクルのランニングコスト比較

つづいて吸着寿命の比較で選定した活性炭 AC4、5 及び比較対照の AC3 のランニングコストを比較した。同一の交換サイクル条件における比較が適当であることから、以下の根拠に基づき 4 年交換サイクルの単年ランニングコスト（千円/年）を比較することとした。

4 年交換サイクルとした根拠は以下のとおりである。

- 北谷浄水場は令和 2 年度から 4 年間に於いて国庫補助による活性炭取替を 4 年に 1 回のサイクル（全 16 池を 1 年に 4 池取替）で実施する予定である。
- 北谷浄水場の過年度浄水実績（令和元年度平均 23ng/L）を下回るには 4 年以下の交換サイクルが必要（比較対照の AC3 を含む場合）であるため。

ここでは、実施設運用炭である AC3 のランニングコストを 1.00 倍として AC4、AC5 のランニングコスト比率を求めた。交換サイクル（年）4 年のランニングコスト比較の結果を表 5-9 に示す。表 5-9 に示すとおり、ランニングコストは AC3 1.00 倍に対して、AC4 は 1.09 倍、AC5 は 1.29 倍の結果であった。

表 5-9 4 年交換サイクルのランニングコスト比較結果

	AC No.	4年交換サイクル ランニングコスト (千円/年)	ランニングコスト 比率(-)
吸着寿命で選定した 活性炭	AC4	335,000	1.09
	AC5	395,000	1.29
比較対照 (実施設運用炭)	AC3	306,000	1.00

3) 活性炭の総合評価

上記の検討結果を踏まえて、選定された 2 種類について総合評価を行った。それぞれの条件における最も優れている活性炭は以下のとおりであった。

吸着寿命の比較結果 AC4

4 年交換サイクルのランニングコスト比較結果 AC3

AC4 は AC3 に対して、ランニングコストは 1.09 倍掛かるが、3 条件参考規制値の範囲（8、15、20ng/L）で 1.25 倍の吸着寿命が期待できる結果となった。一方、AC5 は AC3 に対して、3 条件参考規制値の範囲（8、15、20ng/L）で 1.14 倍の吸着寿命が期待できるが、ランニングコストは 1.29 倍掛かる結果となった。

したがって、総合的*に AC4 が優れていると判断した。

*総合的内容

- ・吸着寿命が AC3 に対して 1.25 倍と優位となる。
- ・ランニングコストは AC3 に対して 1.09 倍と大きな差がない。

5-5. PFOS 等の処理に適した活性炭仕様の検討

コストを含めた吸着性能の総合評価で活性炭は AC4 が選定された。

ここでは、PFOS 等の処理に適した活性炭仕様を検討するに当たって、その活性炭の物性値を採用することが可能であるか検討を行い、活性炭仕様案を作成した。

1) 活性炭物性値との相関確認

活性炭吸着性能で最も重要な要素は、浄水場の浄水が一定濃度に達するまでの期間が長いことである。北谷浄水場を想定した吸着性能シミュレーションで算出した結果を用いて、各炭種の一定濃度になるまでの期間を求め、物性値と比較した。次に、活性炭物性項目を指定することにより、活性炭の寿命（能力）を選定できることを確認した。

北谷浄水場を想定した吸着性能シミュレーションの処理水濃度と交換サイクルの結果を表 5-10 に示す。その相関関係は図 5-9 に示すとおりであった。図 5-10 の関係式より参考規制値（8、15、20ng/L）に対する交換年数を求めると表 5-11 に示すとおりであった。

表 5-10 交換サイクル（年）と処理水濃度（ng/L）

交換サイクル(年)	0.66年 (8ヶ月)	1年	2年	3年	4年	5年	6年
AC1	5.8	9.8	17.9	22.7	26.6	28.5	30.3
AC2	2.2	5.2	12.3	17.8	22.2	24.3	26.5
AC3	0.2	2.4	9.5	14.5	19.8	22.4	25.2
AC4	0.2	2.0	7.8	11.8	16.2	18.3	20.5
AC5	0.6	2.8	8.7	12.9	17.0	19.0	21.1
AC6	1.0	4.3	13.3	19.8	26.0	29.0	30.1
AC7	2.6	5.6	12.0	16.7	20.4	22.2	24.1
AC8	2.3	4.4	10.7	15.6	19.6	21.5	23.5

表 5-11 参考規制値を満たす最長の交換年数（年）

	8ng/L	15ng/L	20ng/L
AC1	0.8	1.5	2.4
AC2	1.2	2.3	3.5
AC3	1.5	2.8	4.2
AC4	1.8	3.7	6.1
AC5	1.6	3.4	5.7
AC6	1.2	2.0	2.8
AC7	1.2	2.5	4.0
AC8	1.3	2.7	4.4

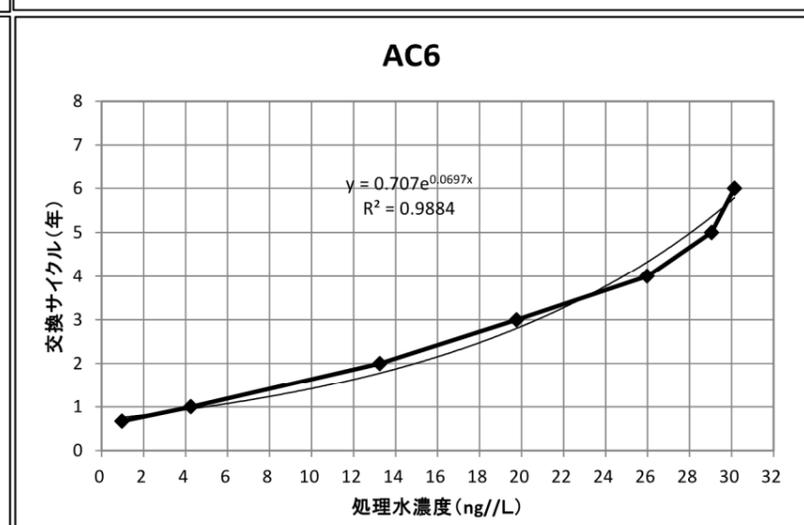
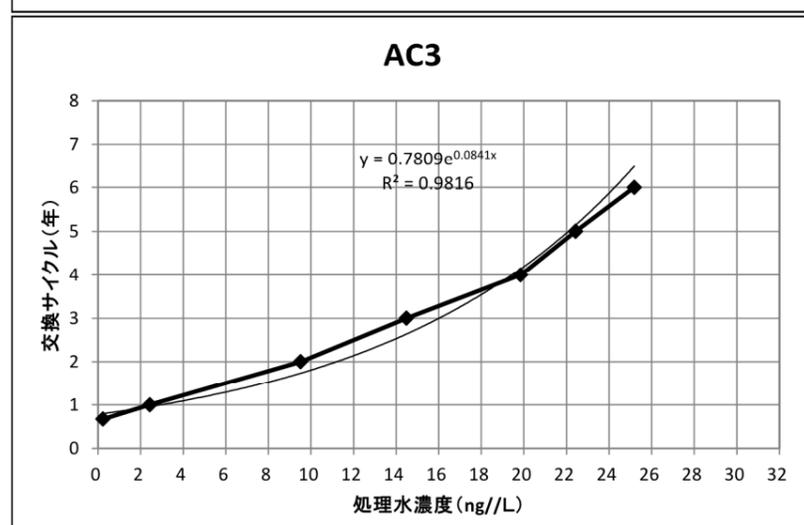
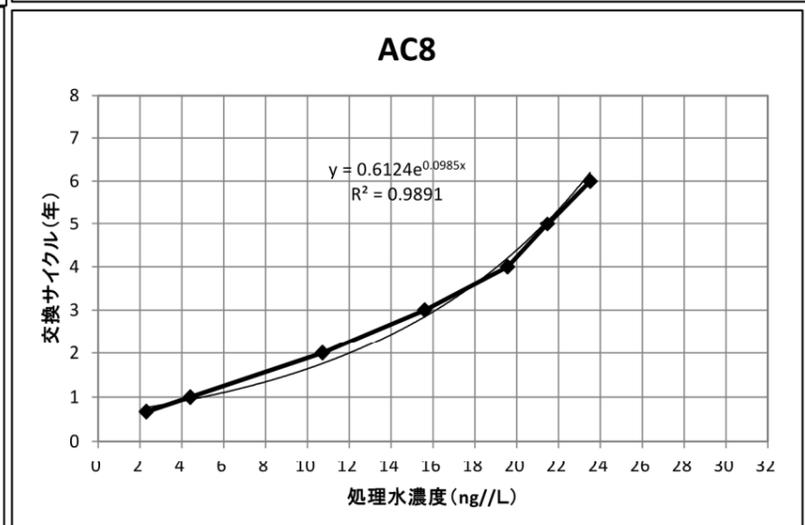
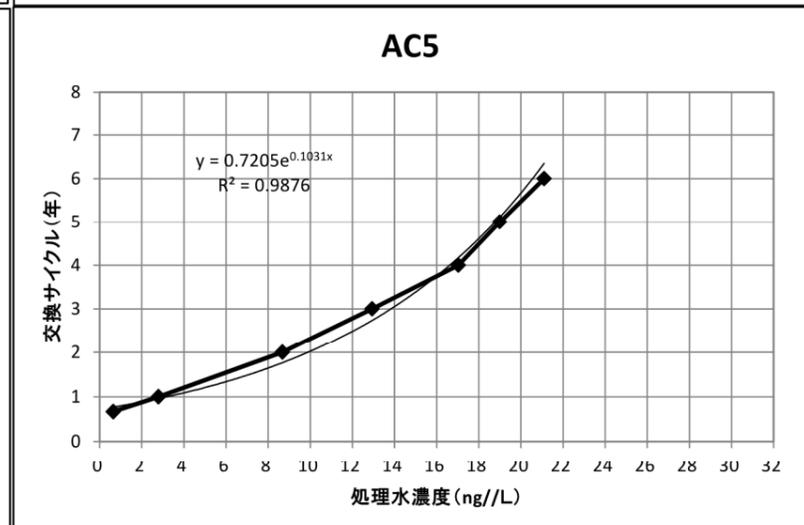
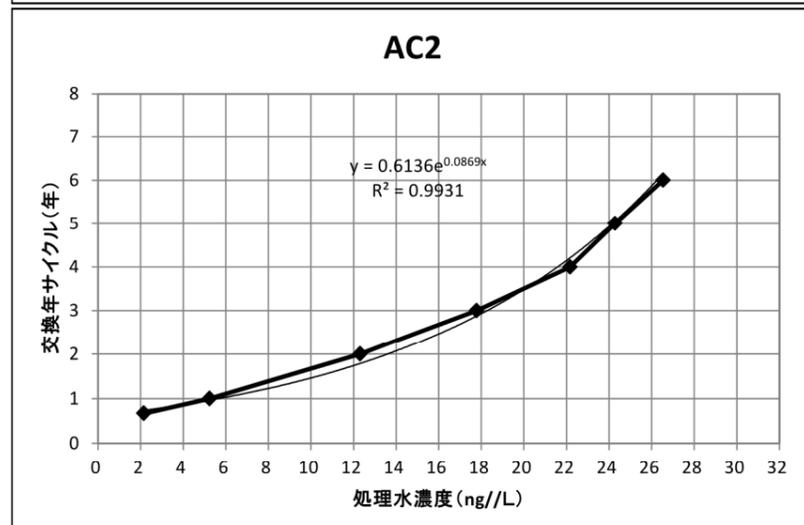
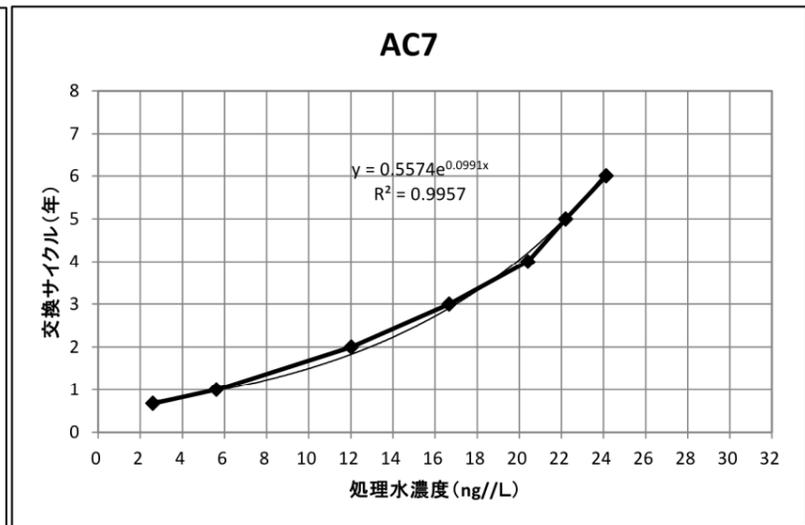
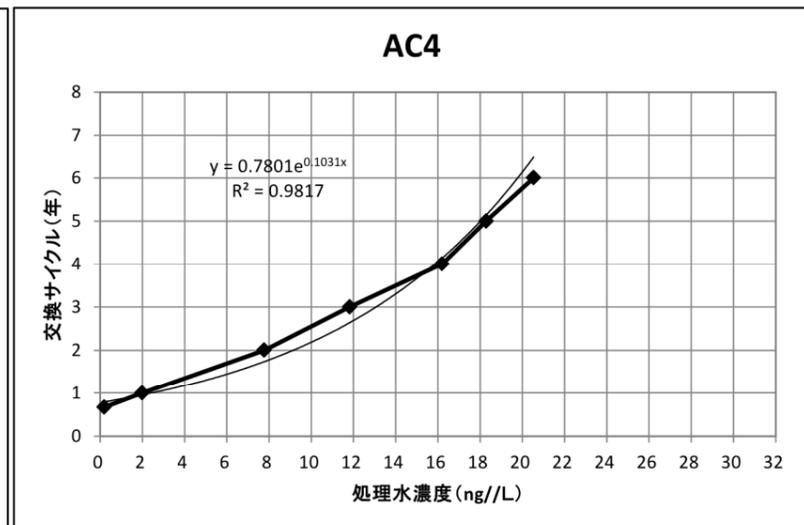
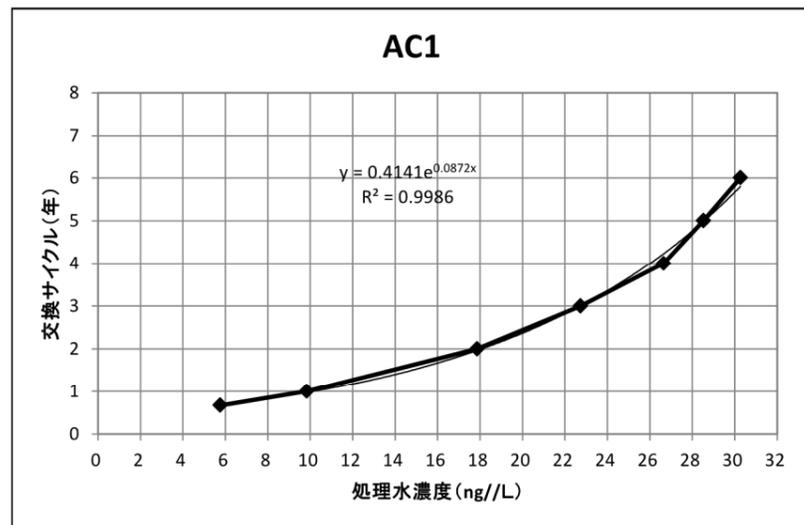


図 5-10 処理水濃度と交換サイクル (年) の関係

PFOS等の処理能力が比較的良い活性炭原材料は石炭系であり、ヤシ殻は処理能力が悪い結果であったことから、ヤシ殻は棄却した。また、石炭系の一種である亜炭についても、ヨウ素吸着性能、メチレンブルー脱色力、ABS価がJWWA品質規定より大きく外れているため棄却した。

活性炭物性項目と交換年数の関係を図5-11に示す。決定係数(R²)において、0.6以上を一定の相関があると判断した場合、表5-12に示す活性炭物性項目が抽出された。

- ・ヨウ素吸着性能
- ・メチレンブルー脱色力
- ・ABS価
- ・細孔容積(マイクロ孔+メソ孔、マイクロ孔)

表5-12 決定係数(R²)が0.6以上の活性炭物性項目

項目	8ng/L	15ng/L	20ng/L
ヨウ素吸着性能	0.85	0.67	0.75
メチレンブルー脱色力	0.95	0.88	0.81
ABS価	0.83	0.71	0.63
フェノール価	0.30	0.42	0.48
マイクロ孔+メソ孔	0.98	0.91	0.85
マイクロ孔	0.82	0.92	0.94

フェノール価は決定係数(R²)が0.30~0.48の範囲で0.6を下回る結果であり、相関はないと判断されるが、参考文献によると細孔容積(マイクロ孔)と関連があるとされるため、仕様書案にはフェノール価も採用した。

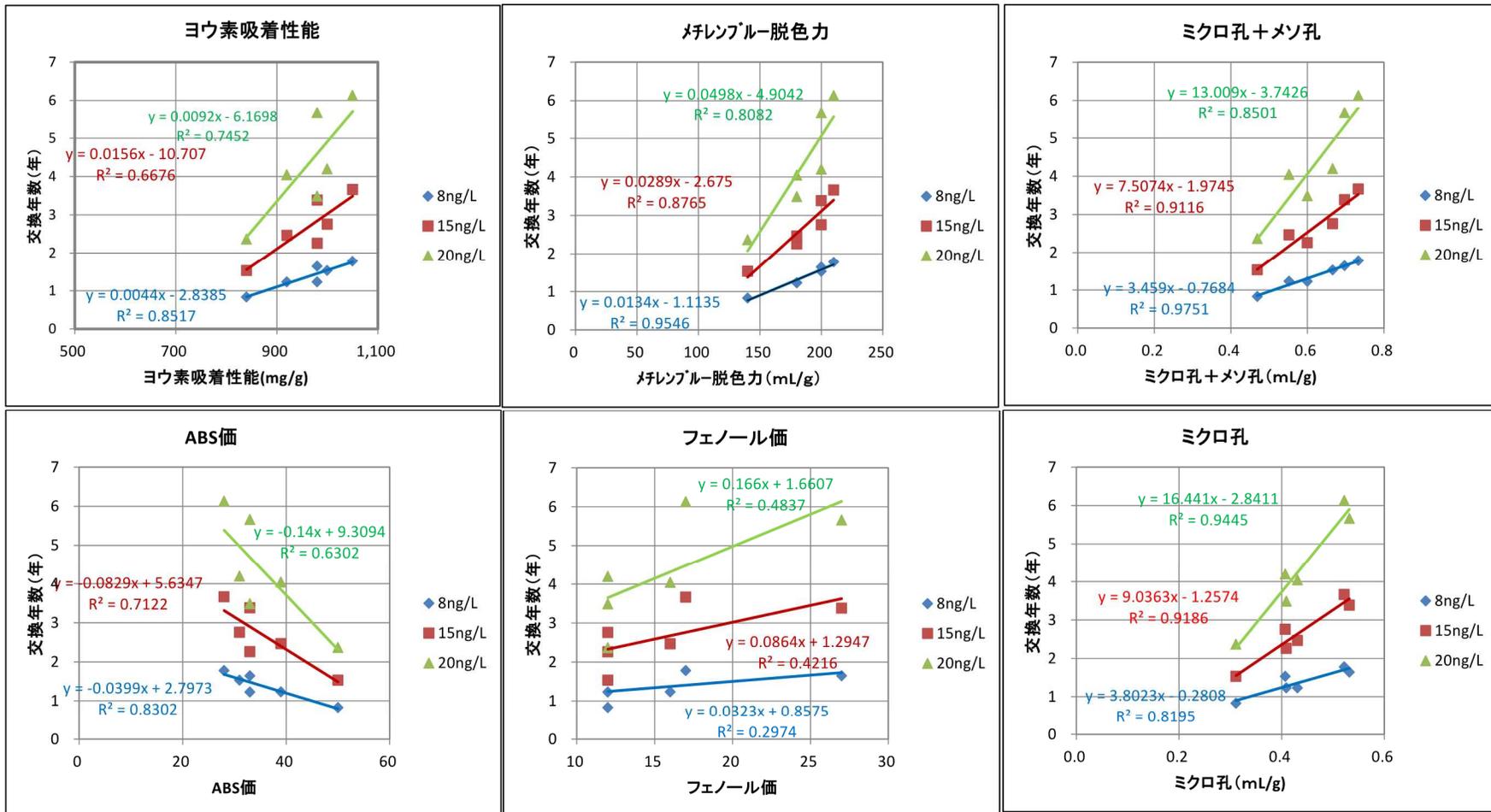


図 5-11 活性炭物性項目と交換年数の関係

2) 粒径、均等係数の検討

活性炭は想定される粒径の大小によって、吸着性能への影響が考えられる。活性炭粒径が小さい場合には、容積当たりの活性炭表面積が増加し、活性炭への反応速度が上昇する。

ここでは、実施設運用炭において、同一銘柄、粒径の違う活性炭を令和元年12月より連続モニタリングを行っている結果を用いて粒径の違いによる処理効果を比較した。

検討対象

実施設運用炭 AC3

実施設 AC3 の活性炭粒径仕様は以下のとおりである。

表 5-13 実施設運用炭 AC3 活性炭仕様

	AC3	AC3
有効径	0.9mm	1.2mm
均等係数	1.5 以下	1.3 以下

北谷浄水場における水源運用期間も含め、実施設運用炭 AC3 の処理水濃度 (PFOS+PFOA 合計) の令和2年7月～令和3年1月までの変動結果を図 5-12 に示す。

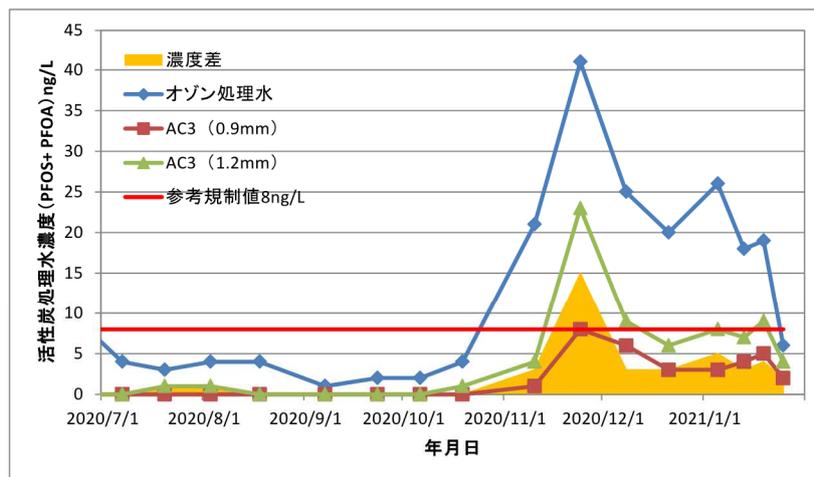


図 5-12 実施設運用炭測定結果 (AC3 0.9mm、1.2mm : 2020/7/1～2021/1/25)

図 5-12 に示すとおり、0.9mm 活性炭が低い濃度を維持していた。活性炭は長期間使用することが前提であり、長い使用期間 (2～4 年) においては逆転の可能性も考えられるが、参考規制値 8ng/L で判断すると有効径 0.9mm は調査期間内において常に参考規制値を下回る濃度を維持できていた。

したがって、暫定評価ではあるが、有効径 0.9mm、均等係数 1.5 以下を採用する。

3) PFOS 等の処理性からみた活性炭仕様案

活性炭物性項目と交換年数には相関関係があること、活性炭粒径は 0.9mm が有効であることを踏まえて、PFOS 等に処理性に適した活性炭仕様案を検討した。

総合評価で最も高い効果が得られた AC4 の物性値を仕様値として採用することとする。ただし、本業務で得られた物性値は 1 分析機関が行った値であり、分析機関による測定精度の差を考慮する必要がある。したがって、本業務で得られた物性値を絶対値として仕様書に用いることができないことから、AC4 の製造メーカーが公表している代表特性値を用いて、該当する物性値を活性炭仕様値へ反映させることとし、活性炭仕様案とする。結果を表 5-14 に示す。

採用仕様案は、粒径は 0.9mm、均等係数 1.5 以下とし、ヨウ素吸着性能、メチレンブルー脱色力、ABS 価、フェノール価は、AC4 の代表特性値を採用した。他の項目については JWVA 品質規定より設定した。

表 5-14 PFOS 等の処理に適した活性炭仕様 (案)

仕様項目	単位	JWWA品質規定	沖縄県企業局 見積仕様	選定活性炭 AC4 代表特性値	最終仕様案	試験方法	備考
原料			石炭系	石炭系	石炭系		
形状			圧密成型破碎炭 (WET40~50%)	破碎炭	破碎炭		
乾燥減量	%						
平均粒径	mm						
有効径	mm	0.3~1.3	1.2		0.9	JWWA-A-114 (2006)	実施設活性炭池実績 より
均等係数	-	1.2~2.0	1.3以下		1.5以下	JWWA-A-114 (2006)	
粒度							
充填密度	g/mL	0.4以上	0.4~0.5		0.4以上	JWWA-A-114 (2006)	JWWA品質規定
硬度	%	90以上	95以上		90以上	JWWA-A-114 (2006)	JWWA品質規定
pH値	-	4.0~8.0	5.8~8.0		5.8~8.0	JWWA-A-114 (2006)	沖縄県見積仕様参照
ヨウ素吸着性能	mg/g	900以上	1,000以上	1,070	1,070以上	JWWA-A-114 (2006)	選択活性炭資料
メチレンブルー脱色力	mL/g	150以上	180以上	200	200以上	JWWA-A-114 (2006)	
ABS価	-	50以下	50以下	25	25以下	JWWA-A-114 (2006)	
フェノール価	-	25以下	25以下	21	21以下	JWWA-A-114 (2006)	
比表面積	m ² /g		1,000以上		1,000以上	JIS-Z-8830(2013)	沖縄県見積仕様参照
細孔容積 (マイクロ孔及びメソ孔)	mL/g		0.4以上	0.733 ^{注1}	0.7以上	JIS-Z-8831(2010)	選択活性炭 分析結果参照
細孔容積 (マイクロ孔)	mL/g			0.522 ^{注1}	0.5以上	JIS-Z-8831(2010)	
ヒ素	mg/kg		2ppm以下		2以下	JIS-K-1474(2014)	設計指針参照
亜鉛	mg/kg		50ppm以下		50以下	JIS-K-1474(2014)	設計指針参照
カドミウム	mg/kg		0.5ppm以下		0.5以下	JIS-K-1474(2014)	沖縄県見積仕様参照
鉛	mg/kg		10ppm以下		10以下	JIS-K-1474(2014)	設計指針参照
塩化物	%	0.5以下	0.5以下		0.5以下	JIS-A-114 (2006)	JWWA品質規定
強熱残分	%	10以下	10以下		10以下	JIS-A-114 (2006)	JWWA品質規定
電気伝導率	μ S/cm	900以下			900以下	JWWA-A-114 (2006)	JWWA品質規定

注 1 : 細孔容積 (マイクロ孔及びメソ孔)、細孔容積 (マイクロ孔) は物性項目分析値より記載

4) 市販活性炭の適合状況

検討した仕様案について、メーカー代表特性値、もしくはメーカー規格値と比較した。

結果は表 5-15 に示すとおり、今回の実験対象活性炭で適合が判明したのは AC4 のみであったが、メーカーカタログ表示においては、「顧客仕様に合わせて製造」とした製品もあることから、1 社以上から調達できる可能性がある。

5) 改良工事時の留意点

これまでの北谷浄水場の活性炭改良工事においては、活性炭の生物活性炭(以下 BAC と称す)を促進するために、使用炭の再投入を行っていた。

これまでの調査結果を踏まえると、フルボ酸等が破過に到達する約 5 ヶ月までは、PFOS 等の除去性は有機物の共存による、吸着に寄与する細孔領域は一部分は両者を吸着し競合・阻害が生じていると推察されるが、それ以降は競合・阻害の影響を受けないと考えられる。

参考文献(日本水道協会 水道維持管理指針 2016 7.12.4 生物活性炭吸着設備)によると、微生物が繁殖するまでに、夏季で 2~4 週間、冬季で 3 ヶ月程度とされている。

短期間で BAC 化が立ち上がる点、今回の RSSCT で約 5 ヶ月までは TOC、蛍光強度の物理吸着が継続する点を考えると、再投入しなくても BAC 化するまでは物理吸着能があることとなるため、RSSCT 結果を踏まえると再投入は不要と考えられる。

表 5-15 活性炭仕様案の適合状況

実験対象活性炭物性値はメーカーの代表特性値あるいはメーカーの規格値

		最終仕様案	AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC6	AC7	AC8	AC9	AC10	AC11
ヨウ素吸着量	mg/g	1,070以上	△	■ ×	■ ×	1070 ○	■ ×	■ ×	■ ×	■ ○	△	△	■ ×
メチレンブルー 脱色力	mL/g	200以上	△	△	■ ×	200 ○	■ ×	—	■ ×	■ ○	△	△	■ ×
ABS価	—	25以下	△	△	△	25 ○	■ ×	—	△	△	△	△	△
フェノール価	—	21以下	△	△	△	21 ○	■ ×	—	△	△	△	△	△
細孔容積 ミクロ孔・メソ孔	mL/g	0.7以上	△	△	△	△	△	—	△	△	△	△	△
細孔容積 ミクロ孔	mL/g	0.5以上	△	△	△	△	△	—	△	△	△	△	△
原材料		石炭	石炭							ヤシ殻		石炭	
備考			製品の平均値	標準仕様	代表特性値	性状・規格	製品の平均値	一般物性	一般物性	標準仕様なし	規格値		

△ : 顧客仕様に合わせて製造できる可能性がある。

— : ヨウ素吸着量500mg/gの低い結果より製造が難しいと考えられる。

【参考資料】回分式吸着実験結果との比較

RSSCT から選定された AC4 の性能を、回分式吸着実験結果（K 値、1/n 値）から評価すると以下のとおりであった。回分式吸着実験結果を表 5-16 に示す。

K 値は、活性炭への吸着容量を示す値であり、1/n 値は、活性炭と吸着質の親和性を示す値である。したがって、K 値が大きいことは低濃度領域での吸着量が多いことを示している。

- PFOS に対しては、AC4 が他の種類に比べて K 値が最も大きく、1/n 値は 2 番目に大きかった。
- PFOA に対しては、AC4 が他の種類に比べて K 値、1/n 値とも最も大きく、吸着性能が高いことを示している。
- PFHxS に対しては、AC4 が他の種類に対して K 値、1/n 値とも最も大きく、吸着性能が高いことを示している。
- AC4 の吸着特性から判断すると、回分式吸着実験対象の 11 種の中では、実施設における低濃度の流入水に対する吸着能力も高く、より低減できる。さらに、高濃度流入に対しても比較的能力が高い活性炭であると言える。
- 今後は PFOS 等含有水源の取水抑制などによって、より低い原水濃度への対応が求められる場合も多くなると考えられることから、吸着特性の観点からも AC4 は優れた活性炭であると考えられる。

表 5-16 回分試験結果

項目		AC1	AC2	AC3	AC4	AC5	AC7	AC9	AC10	AC11
PFOS	K	8.88	9.49	12.98	15.01	12.82	12.57	9.16	9.84	13.04
	1/n	4.08	5.34	7.30	8.31	11.41	0.83	2.09	0.67	3.33
	R ²	0.99	0.99	0.99	0.99	0.72	0.95	0.88	0.90	0.99
PFOA	K	1.46	1.55	1.80	1.96	1.61	1.83	0.85	1.88	1.45
	1/n	0.05	0.05	-0.01	0.60	0.25	0.03	0.28	-0.09	0.23
	R ²	0.76	0.89	0.12	0.99	0.94	0.27	0.62	0.84	0.83
PFHxS	K	3.21	3.01	3.38	4.71	3.66	4.23	2.45	3.56	3.71
	1/n	0.24	0.46	0.54	1.06	0.59	0.19	0.37	0.02	0.40
	R ²	0.98	1.00	1.00	0.98	0.95	0.86	0.79	0.06	0.98