

## 第7章 RSSCT 結果と実施設の比較

RSSCT の主旨は、各活性炭の PFOS 等に関する処理性能を同条件で相互比較することである。一方、実施設処理との関係性を確認することも重要である。

このため、RSSCT と令和元年 12 月～令和 3 年 1 月の実施設の処理状況を比較した。

### 7-1. 検証データの選択

RSSCT 結果と実施設測定結果を用いて比較するに当たり、実施設と RSSCT の処理条件の違いを整理した。

#### 1) 処理条件の比較

実施設と RSSCT における処理条件を表 7-1 に示す。表 7-1 に示すとおり、実施設と RSSCT では、通水速度、層厚は、実施設の有効径をもとに試算された値であることから、違いはないと考えられる。一方、炭層厚、逆流洗浄有無などの処理条件に違いがみられる。

表 7-1 実施設と RSSCT の処理条件

		実施設	RSSCT	主要な処理条件の違い	
活性炭重量	g	活性炭吸着池=104m <sup>3</sup> 104×0.5=52t 52,000,000g	2.0～2.1	—	
粒径 平均	mm	0.9～1.2	0.107		
通水速度 LV	m/時	6.71	56.5		
空間速度 SV	1/hr	3.35	236.3		
寸法		ろ過面積 52m <sup>2</sup> 層厚 2m	φ 4.6mm 層厚24cm <sup>※2</sup>	○	
原水濃度 <sup>※1</sup>	PFOS	ng/L	1～31 平均 8.7	—	
	PFOA	ng/L	<1～10 平均 3.0		
	合計	ng/L	1～41 平均 10.0		
	PFHxS	ng/L	<1～21 平均 6.0		
水温		°C	15～30	22	
逆流洗浄			あり	なし	○

※1 実施設活性炭吸着池: 令和元年12月～令和2年12月の運用条件

※1 RSSCT: 令和2年9月21日～11月10日

※2 平均粒径の違いにより補正換算(24÷3.1684=7.57cm)

令和 2 年度は水源水量に比較的余裕があったために、北谷浄水場では 6 月 19 日～10 月 29 日まで比謝川取水を停止していたため、原水濃度の変動範囲が大きい。一方、RSSCT における原水濃度は、ほぼ一定となるように管理した。

## 2) 参考値と RSSCT 結果

水質管理事務所の測定値（以下参考値と称す。）で得られた実施設と RSSCT における PFOS+PFOA 結果を整理すると図 7-1 のとおりであった。

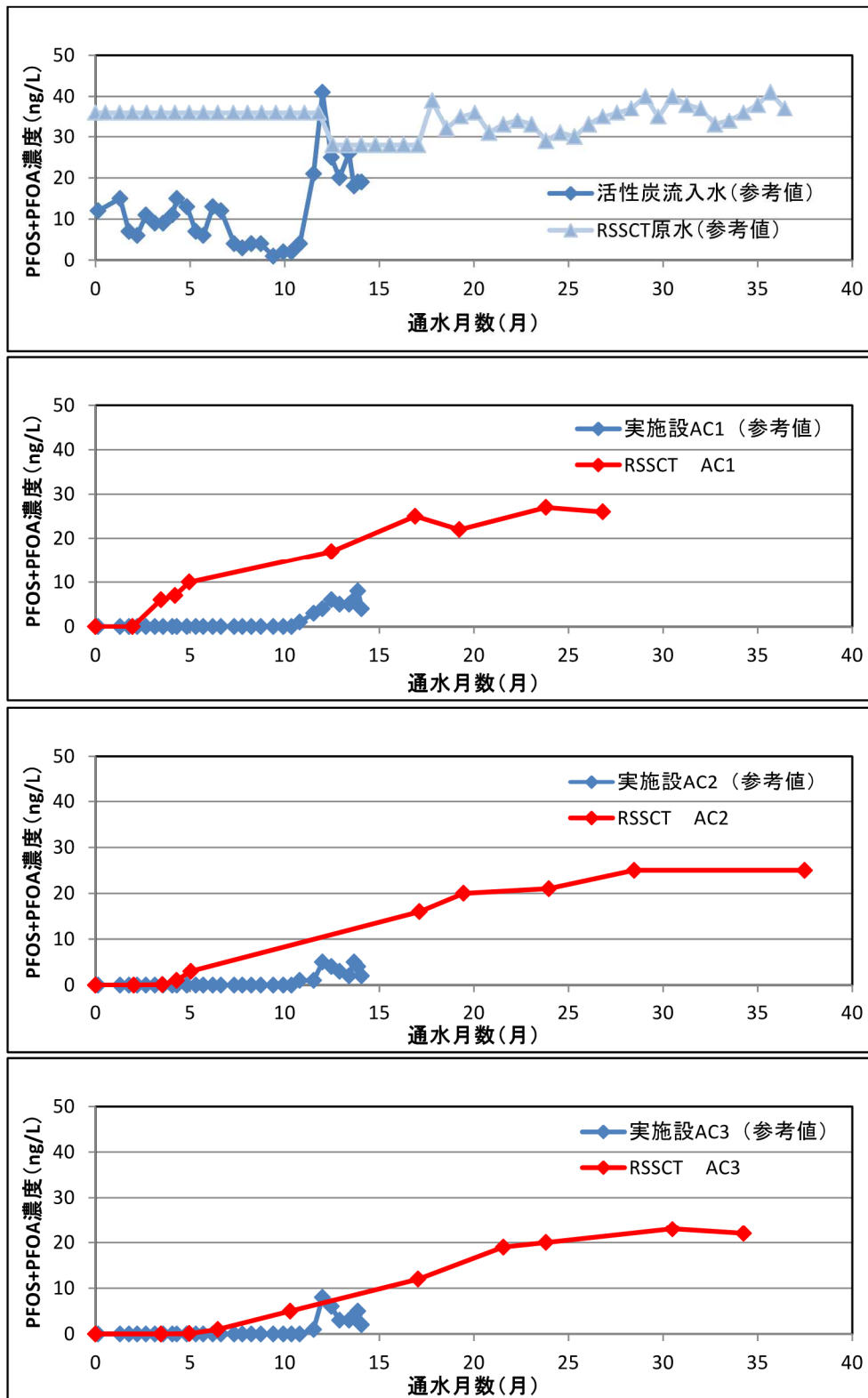


図 7-1 実施設と RSSCT の結果 (PFOS+PFOA 合計)

#### 【活性炭流入水濃度】

- 北谷浄水場においては、令和2年6月19日から10月29日まで比謝川取水を停止する水源運用を実施していた。
- 活性炭流入水濃度は、比謝川取水停止時の前ではPFOS+PFOA合計で平均18ng/L、比謝川取水停止期間中は平均5ng/L程度、比謝川取水再開後は平均35ng/Lと濃度変動がみられた。

#### 【活性炭処理水濃度】

- 比謝川取水停止により活性炭流入水のPFOS等の活性炭流入濃度が低下した時期に活性炭処理水濃度が変動する状況がみられた。

#### 【実施設とRSSCTの処理濃度の関係】

- AC3については、実施設とRSSCTの処理水濃度の変化の傾向は類似していた。
- AC1、AC2については、RSSCTの方が実施設より早く立ち上がる傾向がみられた。

### 3) 参考値による考察

活性炭流入水濃度低下時の活性炭処理水濃度変化について検討するため、分析値より多い頻度で行われた実施設AC3の参考値を用いて検討した。

①活性炭流入水濃度と活性炭処理水濃度の関係を図7-2に示す。

- 活性炭流入水濃度が高くなると活性炭処理水濃度が高くなる傾向がある。
- 一方、実施設では比謝川取水を停止し、活性炭流入水濃度が低い時期に活性炭処理水濃度のバラツキが大きくなる時期がみられた。

②TOC流入負荷量（累積）を区間別に別けて整理した結果を図7-3に示す。

- 実施設AC3は、TOC流入負荷量（累積）30～60mg/gにおいて、活性炭流入水濃度が低濃度の場合でも活性炭処理水濃度のバラツキが大きくなった。
- RSSCT AC3では、TOC累積負荷量が増加するにしたがって、活性炭処理水濃度が概ね一定の勾配で増加していた。
- これらのことから、実施設において活性炭流入水濃度が低い時期に活性炭処理水濃度が検出されていることは、比謝川取水を停止した影響で、活性炭流入水濃度が低下し、吸着より脱着が優勢になったと推察される。

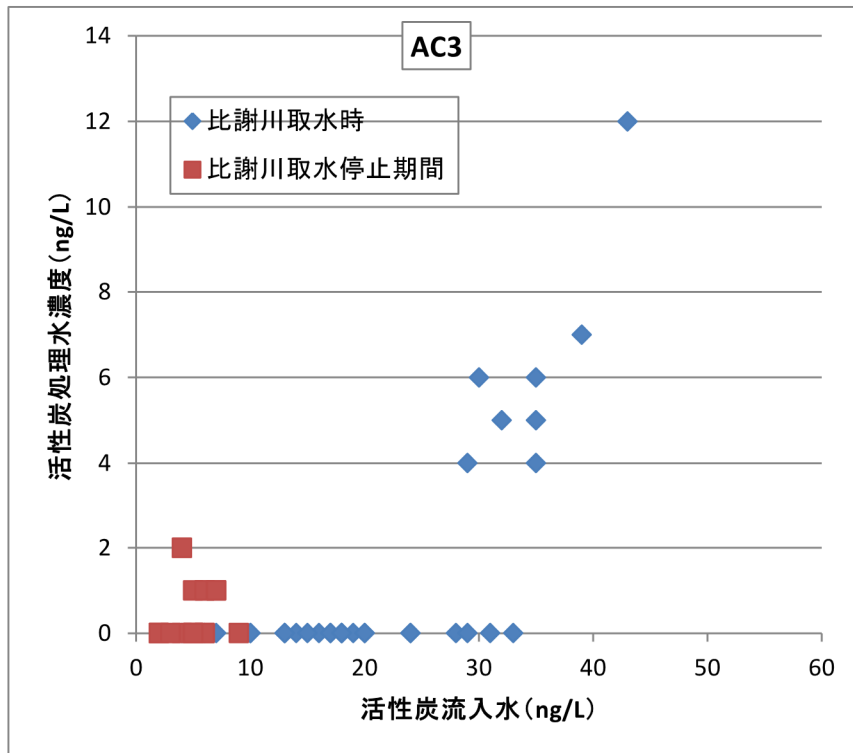


図 7-2 活性炭流入水濃度と活性炭処理水濃度の関係

実施設  
AC3

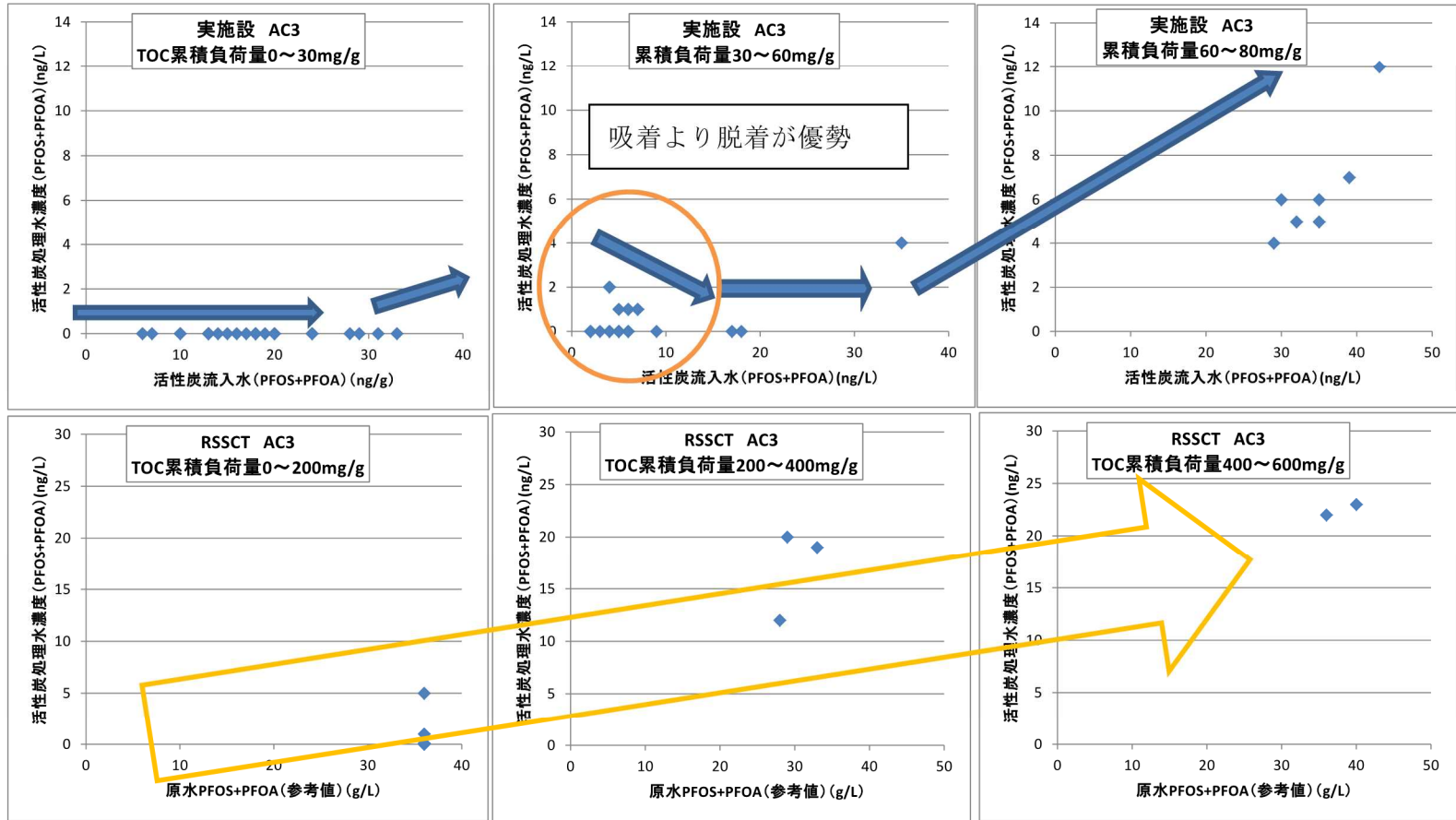


図 7-3 TOC 流入負荷量（累積）区間別における活性炭流入水（PFOS+PFOA）と活性炭処理水（PFOS+PFOA）の関係  
実施設 AC3 と RSSCT AC3

#### 4) 解析対象データの選択

参考値の傾向より比謝川取水停止期間のデータは、原水濃度の変化（低下）に伴い、吸着より脱着が優勢となる現象がみられた。一方、RSSCT では原水濃度はほぼ一定としたため、この様な傾向はみられなかった。このため、この期間のデータは実施設とRSSCTの結果の比較には馴染まないものと仮定し、PFOS等の処理水濃度のデータは、検討から除外した。

表 7-2 実施設と RSSCT での傾向の違い

	吸着より脱着が優勢となる事象
RSSCT AC3	「なし」 (図 7-3 下段での右上がり一定)
実施設 AC3	「あり」 TOC 流入負荷量 35~60mg/g に発生

また、分析値は 2 回/月の頻度であったが、参考値と比較すると、相関が確認されたため、分析値で検討することとした。

解析対象データは以下のとおりとした。

- PFOS 等処理水濃度 比謝川取水停止期間は除外
- TOC 活性炭流入水 全期間で使用 (負荷量算出に使用)
- PFOS 等活性炭流入水 全期間で使用 (負荷量・吸着量算出に使用)

### 7-2. RSSCT 結果と実施設の比較

#### 1) 比較方法の検討

RSSCT は活性炭粒径を小さくし、小型カラムを用いて通水することで短期間の実験で、実施設で使用している活性炭の吸着寿命の相互比較ができる手法である。しかし、RSSCT から導かれる「吸着寿命の絶対値」については、RSSCT と実施設の処理条件の違いなどのため、実施設との関係性を確認しておく必要がある。このため、実施設とRSSCTを比較する指標を抽出し、実施設とRSSCTについて、それぞれの実態を同一座標軸上で比較した。

#### (1) 各指標による検討

縦軸は除去率及び活性炭処理水濃度として、横軸を以下の条件で作図した結果を図 7-4~7 に示す。

#### 【比較指標】

- 実施設通水月数
- 活性炭 1g 当たりの PFOS+PFOA、PFHxS 流入負荷量 (累積)
- 活性炭 1g 当たりの PFOS+PFOA、PFHxS 吸着量 (累積)
- 活性炭 1g 当たりの TOC 流入負荷量 (累積)

図 7-4~7 より次の視点で RSSCT 結果の傾向を分類した結果を表 7-3 に示す。

#### 【評価基準】

- : 線形の傾向が類似、除去率もしくは処理水濃度は近似
- △ : 線形の傾向が類似、除去率もしくは処理水濃度は異なる

- ▲：線形の傾向が異なり、除去率もしくは処理水濃度は近似  
×：線形の傾向が異なり、除去率もしくは処理水濃度は異なる

①実施設通水月数について

- PFOA+PFOA、PFHxS とともに、AC3 は除去率及び活性炭処理水濃度とも○であるが、AC1 及び AC2 は除去率及び活性炭処理水濃度とも△となった。
- 活性炭処理水濃度は、活性炭流入水の流入濃度の影響を受けているため、活性炭処理水濃度が近似しなかったものと考えられる。

②活性炭 1g 当たりの TOC 流入負荷量（累積）について

- PFOA+PFOA、PFHxS とともに、AC3 は除去率で実施設通水月数と同じに○であるが、活性炭処理水濃度は△であった。AC1 及び AC2 は実施設通水月数と同様に除去率及び活性炭処理水ともに△となった。
- RSSCT では、蛍光強度や TOC は通水期間 5～15 ヶ月でほぼ破過の結果が得られていることから、活性炭における TOC と PFOS 等の吸着特性の違い（細孔容積の違い）による影響のため、TOC 流入負荷量（累積）では、活性炭処理水濃度が一致しなかったと推察される。

③活性炭 1g 当たりの PFOS+PFOA、PFHxS 流入負荷量（累積）について

- 除去率で見ると、PFOS+PFOA、PFHxS とともに、AC1 が○、AC2 及び AC3 が△となった。活性炭処理水濃度で見ると、PFOS+PFOA は除去率と同じ傾向であるが PFHxS では全て○となった。
- 実施設通水月数や TOC 流入負荷量（累積）に比べるとグラフ形状は類似していることから、活性炭への吸着特性（細孔容積）の違いによるものと推察される。

④活性炭 1g 当たりの PFOS+PFOA、PFHxS 吸着負荷量（累積）について

- 除去率で見ると、PFOS+PFOA、PFHxS とともに AC1 及び AC2 が○、AC3 は△となった。活性炭処理水濃度で見ると、PFOS+PFOA は AC1 が○、AC2 及び AC3 が△であった。PFHxS では AC1 及び AC2 は▲、AC3 は△となった。
- 活性炭処理水濃度は、活性炭流入水の流入濃度に差があるため除去率と違った結果となったと推察される。

以上のことから、PFOS+PFOA、PFHxS 流入負荷量（累積）もしくは PFOS+PFOA、PFHxS 吸着量（累積）で、縦軸指標は流入濃度の影響を考慮した除去率で RSSCT と実施設の回帰式の比較を行った。

表 7-3 RSSCT 結果と実施設結果の指標比較

横軸指標	縦軸指標	項目	AC1	AC2	AC3
実施設 通水月数 (月)	除去率	PFOS+PFOA	△	△	○
		PFHxS	△	△	△
	活性炭 処理水濃度	PFOS+PFOA	△	△	△
		PFHxS	△	△	△
TOC 流入負荷量 (mg/g)	除去率	PFOS+PFOA	△	△	○
		PFHxS	△	△	△
	活性炭 処理水濃度	PFOS+PFOA	△	△	△
		PFHxS	△	△	△
PFOS等 流入負荷量 (ng/g)	除去率	PFOS+PFOA	○	△	△
		PFHxS	○	△	△
	活性炭 処理水濃度	PFOS+PFOA	○	△	△
		PFHxS	○	○	○
PFOS等 吸着量 (ng/g)	除去率	PFOS+PFOA	○	○	△
		PFHxS	○	○	△
	活性炭 処理水濃度	PFOS+PFOA	○	△	△
		PFHxS	▲	▲	△

- ：線形の傾向が類似、除去率もしくは処理水濃度は近似
- △：線形の傾向が類似、除去率もしくは処理水濃度は異なる
- ▲：線形の傾向が異なり、除去率もしくは処理水濃度は近似
- ×：線形の傾向が異なり、除去率もしくは処理水濃度は異なる  
数値は比率が1.5以内の場合、近似しているものとした



傾向が類似、除去率もしくは処理水濃度近似：○

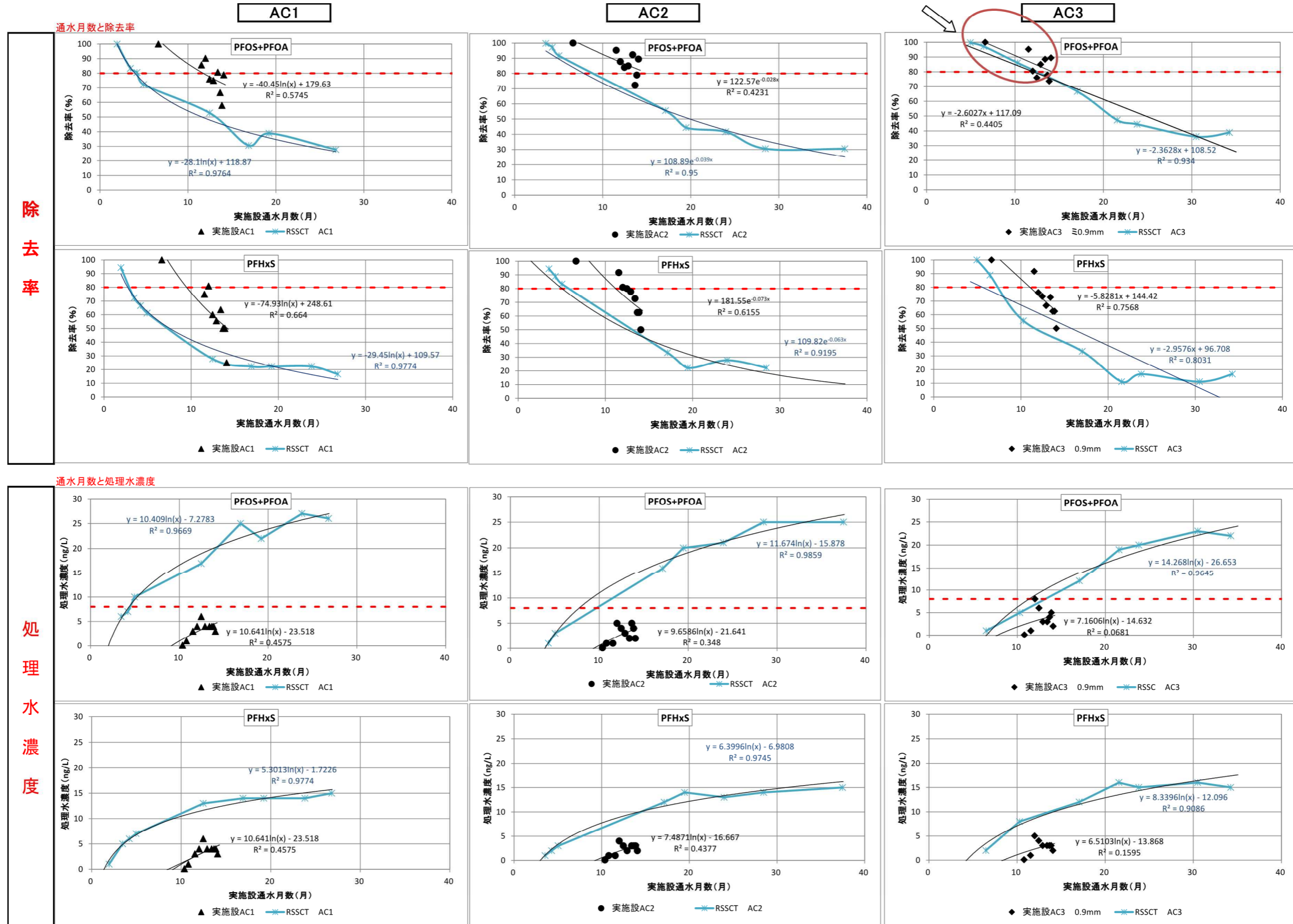


図 7-4 実施設通水月数に関する RSSCT と実施設の類似性の検討

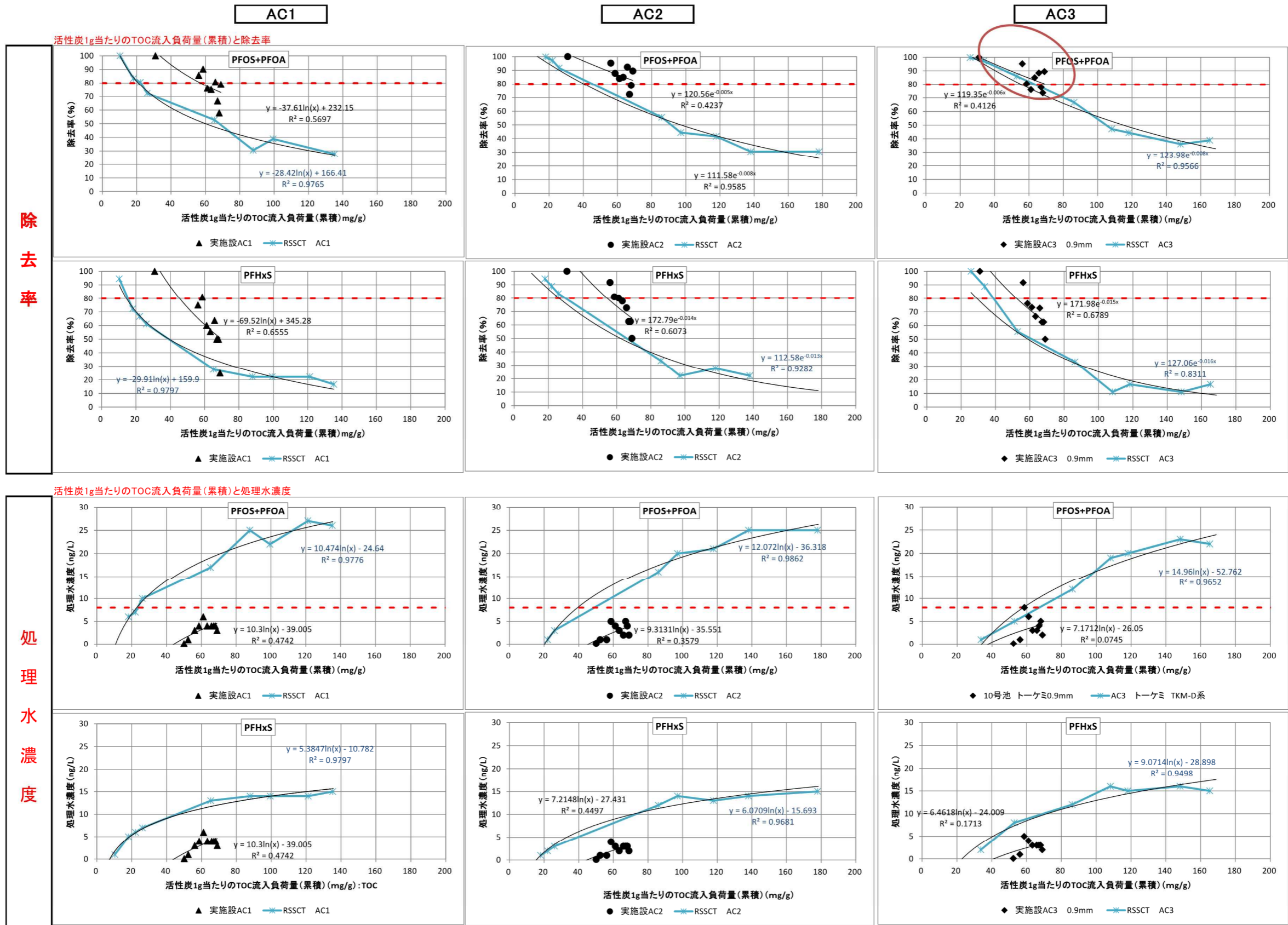


図 7-5 TOC 流入負荷量 (累積) に関する RSSCT と実施設の類似性の検討

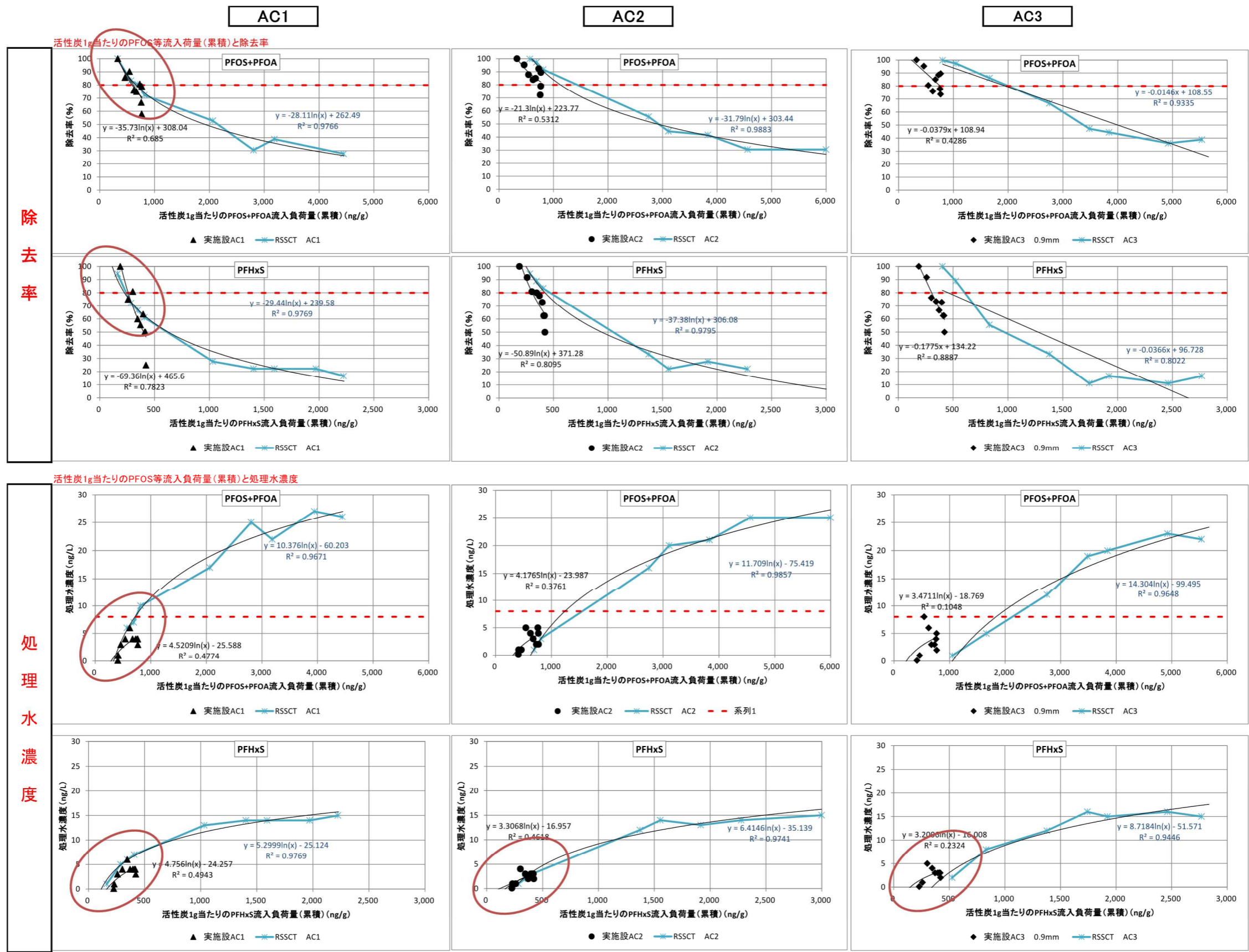


図 7-6 PFOS+PFOA 流入荷量 (累積) に関する RSSCT と実施設の類似性の検討



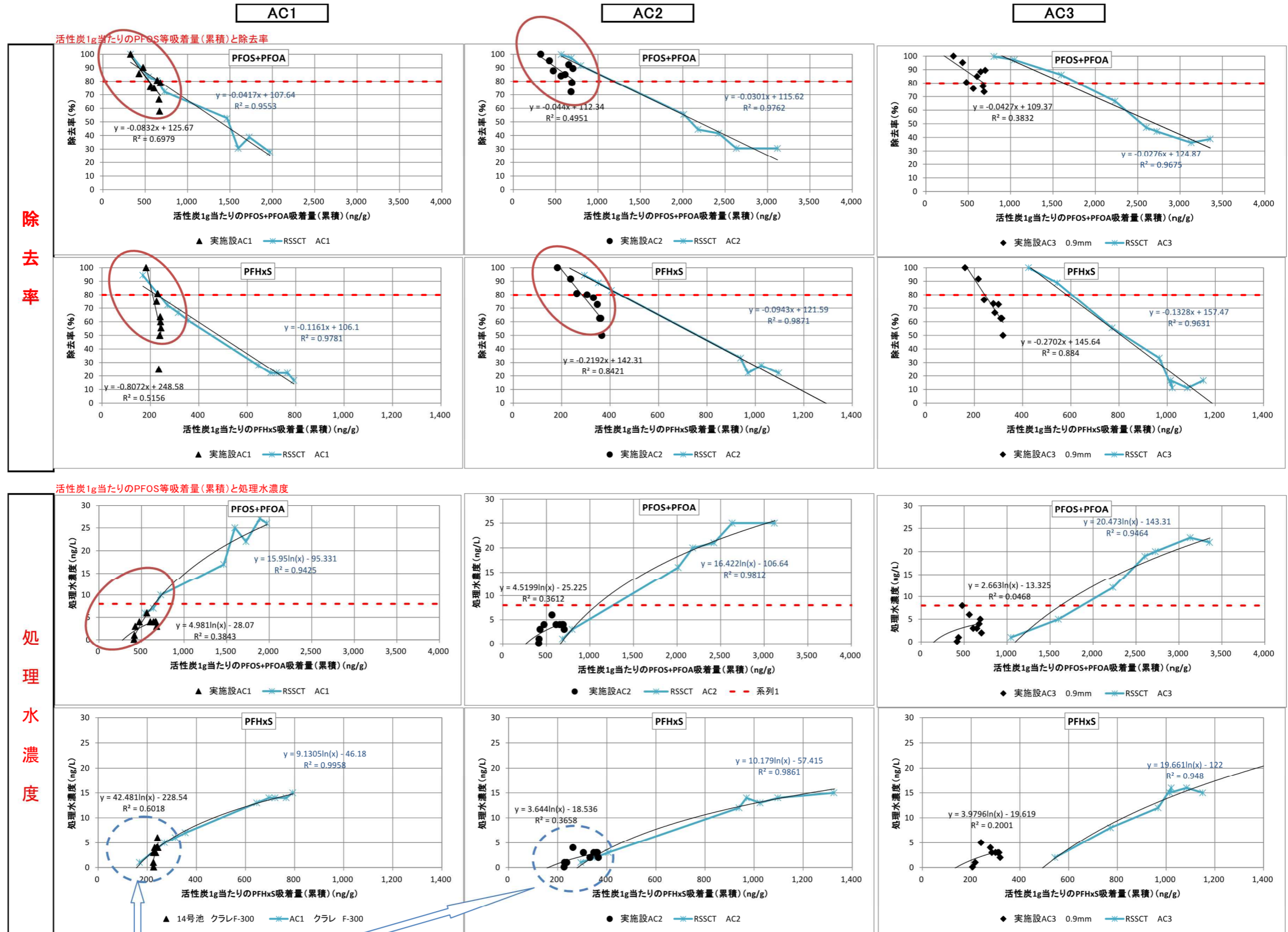


図 7-7 PFOS+PFOA 吸着量 (累積) に関する RSSCT と実施設の類似性の検討

傾向が異なり、除去率もしくは処理濃度は近似: ▲

## (2) 回帰式による検討

前節における RSSCT と実施設の指標比較から絞り込まれた PFOS 等吸着量（累積）と PFOS 等流入負荷量（累積）について、回帰式の比較を行った。結果は表 7-4 に示すとおりである。

表 7-4 回帰式（除去率）での評価

PFOS+PFOA									
AC No.	横軸	実施設 回帰式				RSSCT 回帰式			
		回帰種別	傾き	y切片	R <sup>2</sup>	回帰種別	傾き	y切片	R <sup>2</sup>
AC1	PFOS等吸着量	直線回帰	-0.083	125.7	0.70	直線回帰	-0.042	107.6	0.96
	PFOS流入負荷	対数回帰	-35.7	308.0	0.69	対数回帰	-28.1	262.5	0.98
AC2	PFOS等吸着量	直線回帰	-0.044	112.3	0.50	直線回帰	-0.030	115.6	0.98
	PFOS流入負荷	対数回帰	-21.3	223.8	0.53	対数回帰	-31.8	303.4	0.99
AC3	PFOS等吸着量	直線回帰	-0.043	109.4	0.33	直線回帰	-0.028	124.9	0.97
	PFOS流入負荷	直線回帰	-0.038	108.9	0.43	直線回帰	-0.015	108.6	0.93

PFHxS									
AC No.	横軸	実施設 回帰式				RSSCT 回帰式			
		回帰種別	傾き	y切片	R <sup>2</sup>	回帰種別	傾き	y切片	R <sup>2</sup>
AC1	PFOS等吸着量	直線回帰	-0.81	248.6	0.52	直線回帰	-0.12	106.1	0.98
	PFOS流入負荷	対数回帰	-69.4	465.6	0.78	対数回帰	-29.4	239.6	0.98
AC2	PFOS等吸着量	直線回帰	-0.22	142.3	0.84	直線回帰	-0.09	121.6	0.99
	PFOS流入負荷	対数回帰	-50.9	371.3	0.81	対数回帰	-37.4	306.1	1.00
AC3	PFOS等吸着量	直線回帰	-0.27	145.6	0.88	直線回帰	-0.13	157.5	0.96
	PFOS流入負荷	直線回帰	-0.18	134.2	0.89	直線回帰	-0.04	96.7	0.80

### 【回帰式による検討】

- ① PFOS+PFOA について実施設の回帰式を見ると、AC1 では比較的決定係数（R<sup>2</sup>）が大きく、RSSCT と同じ回帰式で評価できることが分かる（表 7-4）。AC2 や AC3 は決定係数（R<sup>2</sup>）が小さいが、除去率がまだ 80%程度までしか低下していないため、ばらつきが大きく影響しているものと考えられる。したがって、今後さらにデータを蓄積して評価する必要があると考えられる。
- ② PFHxS について実施設の回帰式を見ると、いずれの活性炭でも決定係数（R<sup>2</sup>）は大きくなっている。PFHxS について決定係数（R<sup>2</sup>）が大きいのは、二次的ではあるが、RSSCT では PFOS に比べて PFHxS の破過は短いと考えられるため、除去率が 50%程度まで低下し、ある程度の除去率変化をとらえたデータの収集ができ

たためと考えられる。

【指標及び回帰式の考察】

- ① 実施設と RSSCT 結果 (図 7-6、7) を見ると、PFOS 等の漏出が始まる時期が大きく異なっている。
- ② 実施設における PFOS 等の漏出開始時期は各活性炭ともほぼ同じであるが、RSSCT の PFOS 等の漏出が始まる時期は AC1 が実施設とほぼ同じで最も早く、AC3 が最も遅い。AC2 は中間である。
- ③ RSSCT と実施設の PFOS 等の漏出開始時期の違いについて、参考文献 (活性炭・基礎と応用 炭素材料科学会編) から推察すると、図 7-8 に示す活性炭吸着に関する知見から図 7-9 の模式図が考えられる。これは推察であり、今後の調査検討で確認を行うことが望ましい。

【活性炭固定層における考え方】

図 7-8 (上) に示す様な固定吸着層を考える場合、上層から次第に飽和に達し、各層における流出濃度は図 7-8 (下) のよりに示される。すなわち、上層 (図 7-8 ではブロック 1) が最初に飽和に達するためにブロック 1 の処理水濃度は流入濃度 ( $C_0$ ) に達する。吸着層は次第に下層に移動し、最終的には最下層まで飽和に達して、流出濃度は流入濃度と同じになる。

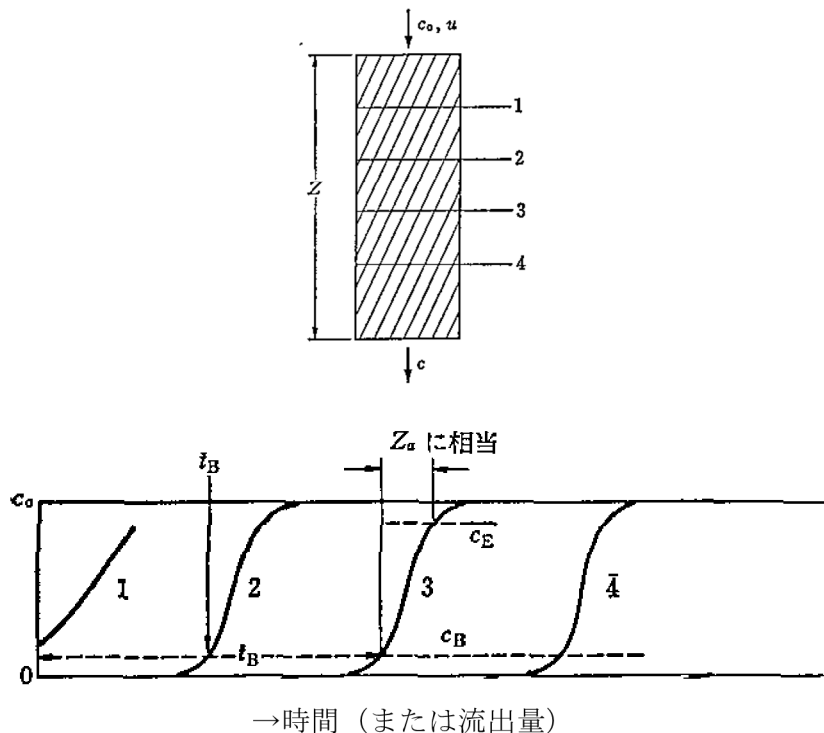


図 7-8 固定層活性炭の破過曲線の形

(出典：炭素材料科学会編 活性炭・基礎と応用)

【知見からの推察】

- RSSCT は逆洗操作がなく、短絡流が少ない系となるため、活性炭の吸着能力全量を使い切っていくと考えられることから、完全破過した層（図 7-9 黒色部分）が徐々に流出側へ移行する。
- 一方、実施設では定期的な逆洗操作が行われることから、全層がほぼ均等な状態となり、劣化は全層において徐々に進行するモデルが推察される。
- 上記の吸着モデルの違いにより、実施設では活性炭の吸着能力を完全には使い切れないため、実施設の漏出開始時期は RSSCT よりも早くなることが推察される。ただし、逆洗浄があれば、活性炭は全体的に一様に使用され、また吸着された PFOS 等も洗い流される可能性も否定できない。
- 図 7-10 で AC3 の処理水濃度が若干低く推移していることは、AC3 の反応速度が AC1、2 に比べて速いことを示すものと考えられる。これにより RSSCT の AC3 では、活性炭の吸着能力を使い切る傾向が促進され、十分な吸着能力が残存する層（図 7-9 白色部分）の残留期間が AC1、AC2 に比べて長くなったことが推察される。
- 以上の推察は、RSSCT と実施設の層別吸着能力を回分式吸着実験で実測することで実態に近づくことが可能になると考えられる。

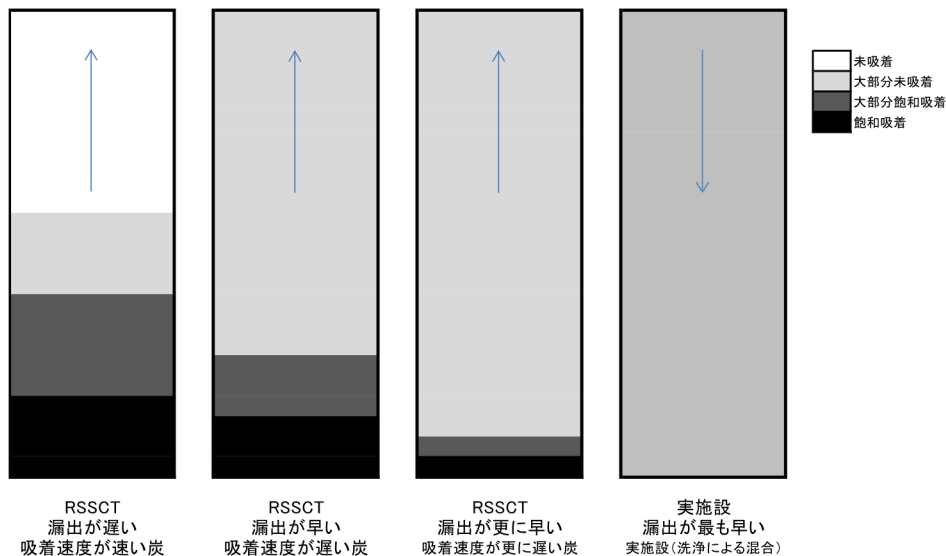


図 7-9 活性炭層内の吸着状態推定模式図（仮説）

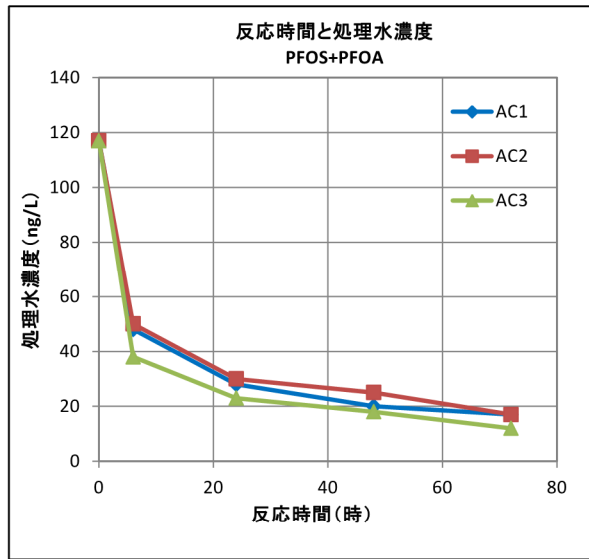


図 7-10 回分試験 反応時間変更結果 (PFOS+PFOA)

## 2) 比較検討のまとめ

比謝川取水停止期間の PFOS 等処理水濃度を比較検討から除外するのが望ましいと判断した。比較検討結果をまとめると以下のとおりである。

- 実施設と RSSCT の破過曲線形状は基本的に同様となることを前提に考えた。脱着が優勢となる現象は活性炭の内部濃度と外部濃度のバランスが影響すると考えられるが、その定量的反応機構は、現状では不明である。このため、脱着が優勢となった時期のデータを含めると RSSCT でみられた破過曲線とは異なる形状となるため、このようなデータの選択は妥当と考えられる。
- 縦軸の指標としては、活性炭処理水濃度よりも流入濃度変動の影響が少ない除去率の方が適していると考えられる。
- PFOS+PFOA 流入負荷量 (累積)、PFOS+PFOA 吸着量 (累積) を横軸とすることにより、RSSCT 結果は実施設と類似した傾向がみられていた。
- 指標比較から絞り込まれた PFOS+PFOA 流入負荷量 (累積)、PFOS+PFOA 吸着量 (累積) に関する回帰式の比較も行ったが、実施設の測定期間が短く、現状では判断ができない。



### 7.3 今後の課題

- 実施設の通水期間は約1年間であるが、RSSCTでは約3年間の通水期間に相当する実験データが得られており、比較を行うには期間不足が考えられる。例えば、過渡特性の比較を考えると実施設では初期段階しか得られておらず、破過に至る全体像を得ることが望ましい。(図7-11 イメージ参照)

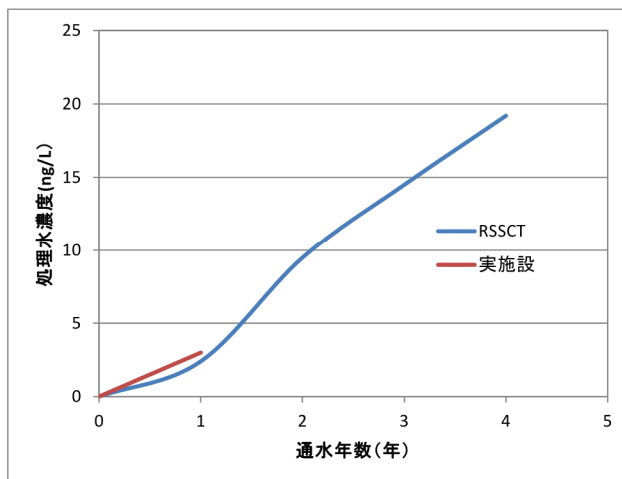


図 7-11 RSSCT 結果と実施設結果のイメージ

- 実施設における浄水水質の悪化のリスクを伴う長期間（4年以上：RSSCT シミュレーション結果より）の調査は困難である。そのため、継続調査を行う方法も検討すべきである。継続調査を行う方法としては、各吸着池より活性炭を採取してカラム実験を実施する。
- カラム実験装置の諸元を以下に示す。
  - カラム径 :  $\phi$  300mm
  - 活性炭層厚 : 2m
  - ろ過速度 : 実施設と同じ
  - 対象原水 : 北谷浄水場活性炭流入水
  - 逆洗浄 : 実施設と同じ頻度で実施

