

カンボジアにおける高濁度向け浄水システム 「Rapid Fiber Filtration System」の実証試験結果と今後の展開



藤田 哲朗 ①
藤岡 誠 ①

要旨

東南アジアの地方都市や農村部では、水道インフラの整備が重要課題となっており、高濁度原水や水質変動に対応可能な浄水技術の開発が求められている。そこで当社は、高濁度向け浄水システム「Rapid Fiber Filtration System」を開発し、カンボジアで実証試験を実施した。試験では最大547NTUの非常に濁った原水に対し安定した処理性能を示し、処理水は現地の水質基準を満たした。一方で、原水性状の変化により一時的な処理性能の低下も確認されたが、適切な対策により改善された。今後はシステムの即応性強化、運転管理の高度化、設備の標準化を推進し、コスト低減を図る。これらにより東南アジアにおける安全な水の安定供給と地域の持続的発展に貢献することを目指す。

キーワード

Rapid Fiber Filtration System, 繊維ろ過設備, 浄水設備, 高濁度対応

1. 緒 言

東南アジア諸国では、経済成長と都市化の進展に伴い、安全な水へのアクセス確保が喫緊の課題となっている。都市部では水道インフラの整備が進んでいる一方で、地方都市や農村部では依然として水道未普及の地域が多く、河川水や井戸水を生活用水として直接使用している事例も少なくない。こうした地域において安全な水を安定的に供給することは、地域社会の健康と持続的発展に直結する重要な課題である¹⁾。加えて、東南アジアの原水は日本と異なり、モンスーン気候の影響を受けて濁度が非常に高く、さらに降雨量に応じて水質が急激に変動するという特徴がある。これらの自然条件に適応した浄水技術が求められているが、従来の技術では対応が困難なケースも多い²⁾。

このような背景を踏まえ、当社では高濁度向け浄水システム「Rapid Fiber Filtration System」(以下、RFFS)を開発した。RFFSは、高性能な繊維ろ材を用いた高速ろ過技術を採用しており、小型・省スペース設計を実現している。また、分散配置が容易な構造であるため小規模集落や遠隔地への導入にも適しており、現地のオペレーターによる簡便な運転・管理が可能なシステムとなっている。

2023年度には、タイのバンコク郊外にあるバンケン浄水場に実証設備を設置し、原水の最大濁度239NTUの条件下で実証試験を行った。その結果、処理水濁度1NTU以下を安定して達成し、RFFSの高い処理性能が確認された。しかし、東南アジアには原水濁度が500NTUや1,000NTUを超える地域も存在するため、さらに過酷な条件下での性能検証を目的として、2024年度に独立行政法人国際協力機構（以下、JICA）の「中小企業・SDGsビジネス支援事業」の支援を受け、カンボジアのプルサット州で実証試験を実施した。本試験では、現地水道局と連携し、雨季・乾季を通じた長期連続運転により、水質変動への適応性や運転安定性を多角的に評価した。

本稿では、RFFSの概要、カンボジアにおける実証試験の結果、そして今後の展開について述べる。

2. RFFSの概要

2.1 装置構成と処理フロー

RFFSは、原水の受水から処理水の生成までを一体化したパッケージ型システムであり、主に高濁度の河川水や湖沼水を対象とした浄水設備である。

RFFSの装置構成を図1に示す。原水はまず、Pre-treatment unitに設置されたReceiving tankに導入される。次に、Mixing tankにて凝集剤等の薬品が注入

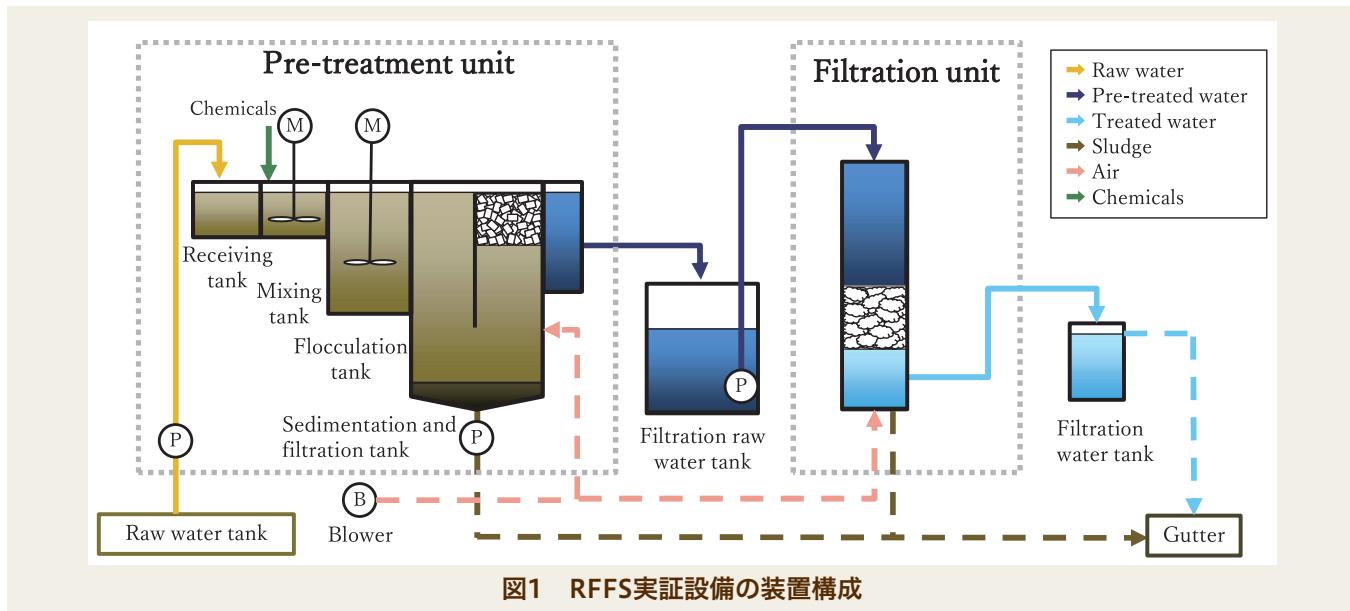


図1 RFFS実証設備の装置構成

され、Flocculation tankにおいて緩やかな攪拌処理が行われることで、微細な懸濁物質がフロックへと成長する凝集工程が進行する。続くSedimentation and filtration tankでは、形成されたフロックの一部が重力によって沈降し、残りのフロックはタンク上部に配置された纖維ろ材により捕捉される。このように、沈殿とろ過を一体化した前処理により、効率的な濁度の低減が可能となっている。

Pre-treatment unitで前処理された水はFiltration raw water tankに一時的に貯留され、Filtration unitに送水される。ここでは、より処理性能の高い纖維ろ材を通して、残存する微細なフロックをさらに除去し、最終的な処理水が生成される。

また、ろ過性能を維持するため、定期的な逆洗処理が行われる点も本システムの特長である。Pre-treatment unitでは空気による逆洗を、Filtration unitでは前処理水と空気を併用した逆洗を実施することで、ろ材に捕捉された懸濁物質の効率的な除去が図られている。

2.2 既存技術に対する優位性

RFFSと従来方式の比較を表1に示す。RFFSの最大の特長は、纖維ろ材を活用した高速ろ過処理にある。

Pre-treatment unitに組み込まれているSedimentation and filtration tankでは、沈殿とろ過の二つの機能が効果的に統合されている。この統合により、従来必要とされていた沈殿池や沈砂池といった個別装置を省略することが可能である。その結果、水面積負荷を大きく設定することが可能となり、限られた設置スペースでも高い処理能力を発揮することができる。

さらに、Filtration unitで採用している纖維ろ過は、従来の砂ろ過方式と比較してろ過差圧が低いという利点を持つ。これにより、従来の5倍以上の通水速度を実現することが可能となり、装置のコンパクト化と省スペース化を図ることができる。

表1 RFFSと従来方式の比較

	RFFS	従来方式
方式	沈殿 + 繊維ろ過	沈殿
前処理	水面積負荷 100~200m ² /日	横流式 : 15~30 m ² /日 傾斜板式 : 40~100 m ² /日
ろ過	方式 ろ過速度 500~1000m ² /日	纖維ろ過 砂ろ過 100~150m ² /日

なお、RFFSに使用されている纖維ろ材（図2、図3）は、当社の上下水や排水処理分野における水処理の実績と豊富な経験に基づいて独自に開発したものである。

図2 繊維ろ材
(Pre-treatment unit)図3 繊維ろ材
(Filtration unit)

3. 実証試験運転の条件と方法

3.1 実証試験サイト

本実証試験は、カンボジア工業化技術革新省 (Ministry of Industry, Science, Technology and Innovation、以下MISTI) の協力のもと、現地で実施したヒアリング調査の結果を踏まえて計画された。試験は、カンボジアのプルサット州に所在するプルサット水道局 (Pursat Water Utility、以下PSWU) の敷地内に設置した実証設備にて実施した。

試験に使用した原水はプルサット川から取水された河川水であり、PSWUが管理するRaw water tankからポンプを用いて送水した。また、処理水および洗浄排水については、PSWUの指示に従い、適切に排出した。

3.2 実証試験スケジュール

本試験は、雨季と乾季それぞれのデータを取得することを目的とし、2024年7月1日から9月26日までの期間（雨季）と、2024年10月18日から12月19日までの期間（乾季）にわたり実施した。なお、2024年8月11日から8月16日までの期間は、凝集剤注入量の設定ミスがあったため、実証データから除外している。

3.3 運転条件と操作管理

実証設備は24時間連続運転とし、夜間も含めた定常状態でのデータ取得を行った。主な運転パラメータは以下の通りである。

- 処理流量：4.1m³/時
- 前処理水面積負荷：100m²/日
- ろ過速度：500m²/日
- 逆洗頻度：1回/日

薬品注入量は、原水の濁度、pH、アルカリ度等に応じて適切に調整するため、定期的にジャーテストを実施し、その結果に基づいて注入量を決定した。

3.4 使用薬品

実証試験で使用した薬品を表2に示す。今回の実証試験においては、将来的なカンボジアでの事業展開を考慮して現地で調達可能な薬品を用いることとし、PSWUで既に使用されている薬品を採用した。なお、凝集剤は試験期間を通じて使用し、アルカリ剤は9月5日から、塩素剤は9月9日から必要に応じて使用した。

表2 使用薬品

種類	名称	目的
凝集剤	PAC (ポリ塩化アルミニウム)	水中に浮遊している濁りの原因となる微細な粒子（コロイド）を凝集・沈殿させる。
アルカリ剤 (9/5 以降)	消石灰 (水酸化カルシウム)	凝集剤の効果を最大限に引き出すために、pHを適切な範囲に調整する。
塩素剤 (9/9 以降)	さらし粉 (次亜塩素酸カルシウム)	凝集を阻害する藻類などの有機物を分解し、凝集フロックの形成を促進させる。

3.5 外部水質分析

処理水の水質評価においては、カンボジア国内での水道ライセンス取得要件に基づき、公的な第三者分析機関であるScience, Technology and Innovation National Laboratory（以下、STINL）に水質分析を依頼した。9月26日に原水および処理水のサンプリングを行い、カンボジア上水水質基準に準拠した全項目の分析を実施した。この分析により、処理水が基準を満たしているかを確認し、システムの信頼性と適合性を評価した。

4. 実証試験の結果

4.1 原水および処理水の濁度

原水および処理水の日次平均濁度の推移を図4、運転時の原水サンプルを図5、処理水サンプルを図6に示す。

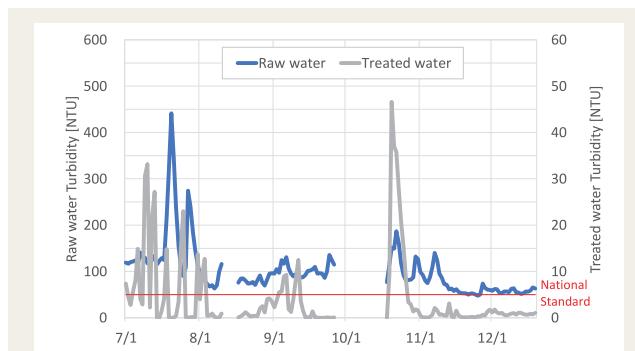


図4 原水および処理水の日次平均濁度



図5 原水サンプル

図6 処理水サンプル

試験期間中、原水の濁度は大きく変動した。特に雨季にあたる7月から9月には、上流からの懸濁物質の流入が影響し、原水の平均濁度は120 NTUとなり、最も濁度が高かった7月20日には日次平均で441 NTUに達した。一方で、乾季である10月から12月には、雨季に比べると濁度は比較的低く安定しており、平均濁度は78 NTUであった。

処理水の濁度については、雨季の平均値が4.4 NTU、乾季では3.9 NTUという結果であった。特に10月27日から試験終了の12月19日までの54日間にわたり、連続してカンボジアの上水水質基準である濁度5 NTU以下を達成した。この期間の平均濁度は0.9 NTUと良好な水質を維持し、設備の性能と安定性を示す結果となった。しかし、一時的に処理水の濁度が上昇し、処理プロセスが十分に機能しなかった期間も確認された。処理不良の具体的な要因とその対策については、4.3および4.4で詳述する。

4.2 高濁度原水での連続運転結果

7月上旬から中旬にかけて、カンボジア国内では大雨が続き、その影響で上流から土砂が流入し、原水の濁度が急激に上昇した。この高濁度の原水が継続した7月19日から21日の原水濁度および処理水濁度の実測値の推移を図7に示す。

この期間中、原水濁度は常に200 NTUを超え、最大で547 NTUに達した。一方、処理水の濁度はほとんどの時間で0 NTUを維持し、一時的な濁度上昇時でも最大で1.2 NTUに留まり、処理水濁度の基準超過は発生しなかった。また、Pre-treatment unitとFiltration unitでの逆洗は通常通り1日1回で対応可能であった。これらの結果から、RFFSは常時200 NTU以上、さらには最大で500 NTUを超える高濁度の原水に対しても、安定

カンボジアにおける高濁度向け浄水システム「Rapid Fiber Filtration System」の実証試験結果と今後の展開

した水処理能力を有することが確認された。しかし、その後は処理水濁度の上昇が確認されており、この時点ではまだ安定稼働に向けた課題が残る状態であった。



図7 高濁度時の原水濁度と処理水濁度の実測値

4.3 処理不良と原因分析

図4に示す通り、7月から10月にかけて処理水濁度が基準値である5 NTUを断続的に超過し、処理性能の低下が確認された。原因を調査した結果、複数の要因が複合的に影響していることが考えられた。

まず、原水のアルカリ度が短期間で大きく変動することが判明し、その結果として、凝集剤の凝集効果が十分に発揮されなかつた期間があったと推測された。アルカリ度が低い状況下では、凝集剤が効果的に機能せず、凝集フロックの形成が妨げられるため、これが処理性能の低下の要因³⁾の一つとなっていたと考えられる。

さらに、原水中に含まれる藻類やその他の有機物が、凝集フロックの形成を妨げる要因であったと考えられる。有機物の存在により凝集剤の作用が阻害され、フロックのサイズおよび強度が不十分となつたため、沈降・分離効率の低下を招いた⁴⁾と推察される。

加えて、薬品注入率の調整は手動で行われていたため、急激な原水性状の変化に対して注入率の調整が追いつかない状況が発生していた。このため、適切な凝集が行われず、処理効率が低下していた。

さらに、現地オペレーターとの意思疎通の遅れにより、問題が発生してから対応までに時間を要し、処理性能の低下が長引く結果となつた。

4.4 処理不良に対する対策

これらの課題に対する対策として、まず9月2日からはジャーテストの頻度を増やすことで、原水の急激な変化にも対応できる体制を整え、適切な薬品注入量の調整を行つた。この措置により、凝集条件を迅速かつ正確に把握することが可能となり、処理効率の向上が実現した。

さらに、9月5日より原水のアルカリ度を向上させる目的でアルカリ剤（消石灰）の注入を、続いて9月9日からは有機物の分解を目的として塩素剤（さらし粉）の注入を実施した。これらの薬品注入は常時行うのではなく、ジャーテストにより注入の必要性を判断し適宜調整した。その結果、凝集フロックの形成が促進さ

れ、処理性能の向上が確認された。

また、処理不良が発生した際にはオペレーターとの密なコミュニケーションを取るとともに、経験の浅いオペレーターが実践的な経験を積むことで原水性状の変化に対する運転技量が向上した。その結果、処理不良が発生した際にも即座に適切な対応が可能となり、全体的な処理性能の安定化に寄与した。

これらの対策により、処理性能の低下を克服し、安定した水質の確保が可能となつた。

4.5 外部水質分析結果

9月26日に原水および処理水のサンプリングを行い、STINLに水質分析を依頼した。その結果を表3に示す。サンプリング時における原水の濁度は150 NTUであり、処理水の濁度は0 NTUであった。また、処理水はカンボジアの上水基準の全項目において基準値を満たしていることが確認された。この結果は、処理プロセスが極めて効果的に機能していることを示しており、本処理システムが現地の水質基準に対して十分な適応性能を有していることが明らかとなつた。

表3 STINL 水質分析結果

Content	unit	Raw water	Treated water	National Standard Treated Water
pH	-	7.26	7.00	6.5-8.5
Turbidity	NTU	150	0	≤5
TDS	mg/L	29	39	≤800
Total hardness	mg/L	36.70	34.72	≤5300
As	μg/L	0	0	≤50
Fe	mg/L	1.88	0.00	≤0.3
SO4-	mg/L	0.0	0.0	≤250
Na	mg/L	3.429	3.578	≤250
NO3	mg/L	1.14	1.11	≤50
NO2	mg/L	0.01	0.05	≤3.0
Al	μg/L	449	13	≤200
Color	TCU	28	0	≤5
Conductivity	μs/cm	57	78	≤1,600
Ba	μg/L	14	20	≤700
Mn	mg/L	0.021	0.011	≤0.1
Hg	μg/L	0.156	0.121	≤1.00
F	mg/L	0.17	0.20	≤1.5
NH4	mg/L	0.2	0.01	≤1.5
Cd	μg/L	ND	ND	≤3.0
Pb	mg/L	ND	ND	≤10
Zn	mg/L	ND	ND	≤3.0
Cu	mg/L	ND	ND	≤1.0

5. 実証試験の成果と今後の課題および展望

5.1 実証試験の成果

5.1.1 高濁度への適応力

RFFSは、常時200 NTU以上、最大で547 NTUに達する高濁度の原水に対しても、適切な薬品注入で凝集効果が得られれば、日常的な運転管理および1日1回の逆洗のみで、処理水の濁度をほぼ0 NTUに維持することが可能であった。従来型の砂ろ過方式では、高濁度条件下でろ過速度の急激な低下およびろ材の目詰まりが生じ、頻繁な逆洗が必要となるため、生産水量の低

下が重要な問題となっている。これに対し、纖維ろ材を採用したRFFSは、高速通水性および高濁度原水対応において優れた特性を示し、従来方式に比べて明確な優位性を有することが示された。

5.1.2 運転の柔軟性と再現性

処理不良が発生した際も、適切な薬品注入量の調整や運転条件の見直しを行うことで、迅速に性能を回復できた。これは本システムの柔軟性と再現性を示すものである。さらに、適切な運転管理の下では、54日間にわたり処理水は連続して水質基準値を達成し、平均濁度は0.9 NTUであった。この結果は、短期的な水質変化に対しても、ある程度の操作熟練度があれば安定した運転が可能であることを示している。

5.1.3 注入薬品の選定に関する知見

2023年度にタイで実施された実証試験では、凝集剤(PAC)の単独注入による運転条件だけで、処理水の濁度を1 NTU以下に安定的に維持することが可能であった。これに対し、本試験においては、同様の運転条件下にもかかわらず処理性能の低下が確認された。原因調査の結果、原水の濁度の他にアルカリ度が低いこと、ならびに藻類等の有機物の存在が凝集処理の効果を阻害していたことが推察された。これらの要因に対し、アルカリ剤および塩素剤の適切な注入を行うことで、処理水質は安定し、以後の運転においても良好な処理性能が維持された。これらの結果より、原水の水質特性を踏まえた薬品選定および注入条件の最適化が不可欠であり、本知見は今後の設計・運転管理における有効な指針となった。

5.1.4 運用とメンテナンス性

RFFSは、24時間連続運転中においても、逆洗は1日1回、薬品注入も基本的にはジャーテストによる適正值に設定されており、過度なメンテナンスや複雑な操作が不要であった。これは小規模水道事業体にとって大きな利点となり、人的制約のある地域での普及に適した特性である。

5.1.5 上水水質基準の全項目達成

処理水は、カンボジアの上水水質基準に準拠した全項目において基準値を満たしており、水道事業ライセンス取得に必要な水質要件を満足することが確認された。これにより、RFFSはカンボジア国内の水質基準に適合する性能を有していることが明らかとなった。

5.1.6 ワークショップによるPR活動

JICA、MISTIおよびPSWUの協力のもと、RFFSの紹介および実証設備の見学を目的としたワークショップを開催した(図8、図9)。本ワークショップには、JICAカンボジア事務所、MISTI、カンボジア水道協会(CWA)、公営水道事業体、民間水道事業者(PWO)等から、計59名が参加した。参加者からは本システムに対して高い関心が寄せられ、ワークショップを通じて現地水道関係者とのネットワークが構築された。本取り組みは、今後の



図8 ワークショップ風景

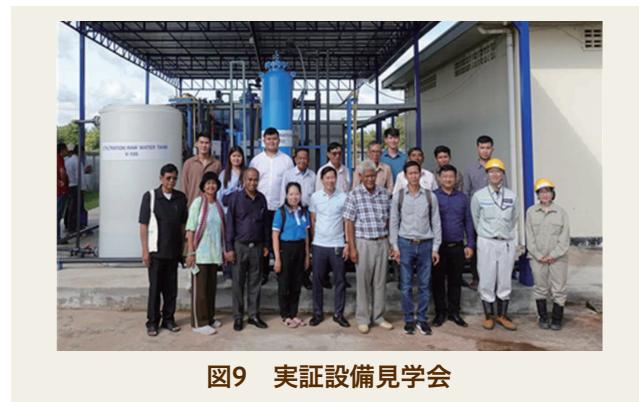


図9 実証設備見学会

事業展開における重要な基盤となることが期待される。

5.2 今後の課題

5.2.1 原水変動への対応

実証試験において、原水性状の急激な変化に即時対応できず、一時的に処理不良が発生した。原水変動への対応策としては、機械的対応と人的対応の二つが考えられる。

機械的対応としては、原水水質のリアルタイム計測と薬品注入量の自動制御を行うフィードバックシステムの導入がある。これは高い応答性と人的ミスの低減が期待される一方、初期導入費用や維持管理負担が大きく、小規模水道事業では導入が困難な場合がある。

人的対応としては、現地オペレーターへの教育と運転マニュアルの整備により、対応力の向上を図る方法がある。コスト面での利点はあるが、習熟度に依存するため操作ミスのリスクを伴う。このため、実証データに基づいた実践的なマニュアルや対応フローの整備が求められる。

これらのアプローチは、地域の技術的・経済的条件に応じて適切に選択、または組み合わせることが重要である。

5.2.2 コスト低減

東南アジアにおいては、技術的な検証が不十分な場合であっても、建設コストの低さが優先されて採用される傾向がある。このような状況下では、RFFSは初期導入コストが相対的に高くなる可能性があり、コスト低減に向けた対策が必要である。

対策として、まず設計の標準化およびモジュール化を進めることで、設計工数および施工コストの削減が期待される。また、装置および部品の現地調達を拡充することにより、輸送費や調達コストの低減が可能で

カンボジアにおける高濁度向け浄水システム「Rapid Fiber Filtration System」の実証試験結果と今後の展開

ある。さらに、ライフサイクルコスト (LCC) に基づく経済性評価を実施し、長期的な費用対効果を明示することで、RFFS導入の価値を定量的に示すことができる。

これらの取り組みによって、RFFSの経済性と実用性の両立を図り、現地ニーズに適応した持続可能な水処理技術としての展開が求められる。

5.3 今後の展望

2024年2月にカンボジアのコンポンチュナン州ボリボー郡の浄水施設増強案件において、現地水道の運営を手掛けるISZA TRADE SDN BHDよりRFFSの初めての商用案件を受注した。本案件の浄水処理能力は30m³/時であり、約1,600世帯へ安全な水を供給する。

本案件を成功裏に完了することは、RFFSの信頼性および実用性を裏付ける成果となり、今後のビジネス展開の基盤を築く上で極めて重要である。また、この取り組みを通じて、RFFSのさらなる普及および市場拡大が期待される。

6. 結 言

本稿では、高濁度向け浄水システムであるRFFSの概要と、カンボジアでの実証試験結果を紹介し、今後の展開に向けた方向性を示した。

実証試験の結果、RFFSは最大547 NTUの高濁度原水に対しても安定した水処理が可能であり、生成された処理水はカンボジアの上水水質基準を満たすことが確認された。一方で、原水性状の変化や運転条件の調整遅延により、一時的に処理性能の低下が確認された。しかし、適切な対策を講じた結果、システムの性能は回復し、適切な運転管理下では54日連続で安定した処理性能を維持することができた。この経験は、今後の運転条件の最適化に関する有益な知見を提供するものである。

今後は、実証試験で得られた知見を踏まえ、原水水質の変動に即応可能なシステムおよび人的対応の整備を図るとともに、設備の標準化および現地化を推進し、コスト低減を目指す。また、カンボジアでの受注案件の成功を契機に、東南アジア市場への本格的な展開を進める。

Demonstration Test Results and Future Prospects for the Rapid Fiber Filtration System for High-Turbidity Water in Cambodia

Abstract

Reliable water infrastructure remains a challenge in Southeast Asia's regional cities and rural areas. Kanadevia developed a "Rapid Fiber Filtration System" to treat high-turbidity raw water, and tested it in Cambodia. The system successfully treated water with very high turbidity levels of up to 547 NTU, generating treated water that met local quality standards. Although changes in raw water quality temporarily affected performance, these issues were effectively resolved through appropriate adjustments. Kanadevia plans to improve system responsiveness, optimize operations, and standardize equipment to reduce costs. These efforts are designed to ensure safe water supply and support sustainable development in the region.

Authors

Tetsuro Fujita (Kanadevia Corporation, E-mail: hitzgiho001@kanadevia.com)
Makoto Fujioka

これらの取り組みを通じて、RFFSの普及が東南アジアにおける安全で安定した水道インフラの整備に貢献し、地域住民の生活水準の向上と持続可能な社会構築に寄与することを期待する。

謝 辞

本実証試験の活動は独立行政法人国際協力機構 (JICA) の「中小企業・SDGsビジネス支援事業」として採択され (契約期間: 2024年3月1日～2026年3月31日)、実施したものです。

また、多大なご協力をいただきましたMISTI、PSWU、現地オペレーターの皆様に心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 渡部徹, 三浦尚之, 佐々木司ほか: メコン流域における水供給システムに着目した水系感染症のリスク評価, 環境工学研究論文集, 2006, 43, 245-254.
- 2) 兼澤真吾, 橋本崇史, 小熊久美子ほか: 高濁度河川の上流部と下流部での膜ろ過におけるファウリングの形成と粒子除去性, 土木学会論文集G(環境), 2017, 73(7), III_419-III_428.
- 3) 栗田志広, 大用光則: 綾瀬浄水場における原水アルカリ度低下時の対応策構築の取組み, 令和元年度全国会議(水道研究発表会)講演集, 2019, 4-73, 416-417.
- 4) 村田直樹, 青木伸浩, 本山信行ほか: 藻類を含有する水道水源に対する前塩素および凝集処理のセラミック膜ろ過ファウリングの抑制効果, 土木学会論文集G(環境), 2013, 69(7), III_29-III_38.

文責者

カナデビア株式会社 環境事業本部
設計統括部 水処理設計部 上下水設計第1グループ
藤田哲朗
E-mail: hitzgiho001@kanadevia.com