

繊維ろ過とMF膜ろ過の組み合わせによる 浄水処理システム

🔗 MF膜, ファウリング, 繊維ろ過, 水の最適処理

* 中村 浩 Hiroshi Nakamura * 鮫島正一 Shoichi Sameshima * 宮本新也 Shinya Miyamoto

概要

膜ろ過は、高品質で信頼性の高い水を供給できる優れた処理であり、耐塩素性原虫対策を含む水質管理要求の高まりにより導入が進んでいる。今後はより大規模で水質変動のある水源への適用が増えると予想される。

当社は、高速ろ過プロセスである繊維ろ過をMF膜ろ過の前段に組み込んだ浄水処理システムを構築した。水質変動のある河川水を原水として実証試験を実施し、原水水質の変動にかかわらず安定した運転状況を維持できることを示し、大形膜モジュールを使用した膜ろ過装置の技術認定を取得することができた。この認定取得により、当社は、原水種別や浄水規模を限定することなく膜ろ過設備を提案できることとなった。



浄水処理システム

1. ま え が き

クリプトスポリジウムなど耐塩素性原虫対策を含む水質管理要求の高まりから、膜ろ過設備の導入が進んでいる。2008年度統計では、稼働及び建設予定の精密ろ過膜（MF膜）及び限外ろ過膜（UF膜）を使つたろ過設備は676か所に達している。総施設能力は100万 m^3 /日を超え、施設数の増加と共に大規模施設も増加傾向にある⁽¹⁾。今後の膜ろ過施設は、臭気や色度など溶解性物質が含まれている水源や、大規模で水質変動のある水源への適用が増えると予想される。従って、水源水質に対応した処理フローを選定し、適切な条件で運用をしなければ、早期に膜閉そく（ファウリング）が発生し、膜の薬品洗浄頻度の増加、膜の寿命の短期化及びランニングコストの増加を引き起こす。そのため、膜ろ過設備の導入において、水源に応じ

た適切な浄水フロー・前処理の選定・膜ろ過流速などの条件設定が重要である。なお、膜ろ過流速とは単位時間・単位膜面積あたりの膜ろ過水量を言う（ $m^3/m^2 \cdot 日 = m/日$ ）。

MF膜は、UF膜など他の膜種と比較して高い透水性を有することを利点としているが、表流水では凝集処理や凝集沈澱処理などで、ある程度濁度や色度成分を除去した後に適用することが多い。近年、繊維ろ材を利用した高速ろ過プロセスが開発され、工業用水の除濁や下水未処理放流水（CSO：Combined Sewer Overflow）分野へも適用され始めている。繊維ろ過とMF膜ろ過を組み合わせることで、MF膜の特長である高い透水性を生かしつつ、原水水質の変動幅が大きい河川水や湖沼水などに組み合わせプロセスを適用することが期待できる。

当社は、某所河川水を原水として、繊維ろ過と

*水・環境事業部 営業技術部

MF膜ろ過の組み合わせによる浄水システムの実証試験を実施した。本稿では、水質変動のある河川水に対する繊維ろ過の浄水処理性能と、その後段の膜ろ過の運転状況について紹介する。

2. 浄水システムの構成

2.1 繊維ろ過装置

繊維ろ過は、繊維を束ねた構造を有するろ材を用いてろ過することで、原水が50度程度の濁度を処理水で2度未満にすることができる。砂ろ過と比べて線速度（ろ過速度）が10倍程度速いため、省スペース化が可能である。水質の変動に対しても薬品注入率や洗浄頻度を自動的に追従できるため、膜ろ過との組み合わせによる自動運転可能なシステムに適している。ろ過時にはろ材を圧密状態とし、逆洗時にはろ材を展開するため、一定の除濁能力と高い逆洗効果を持つ特長がある。

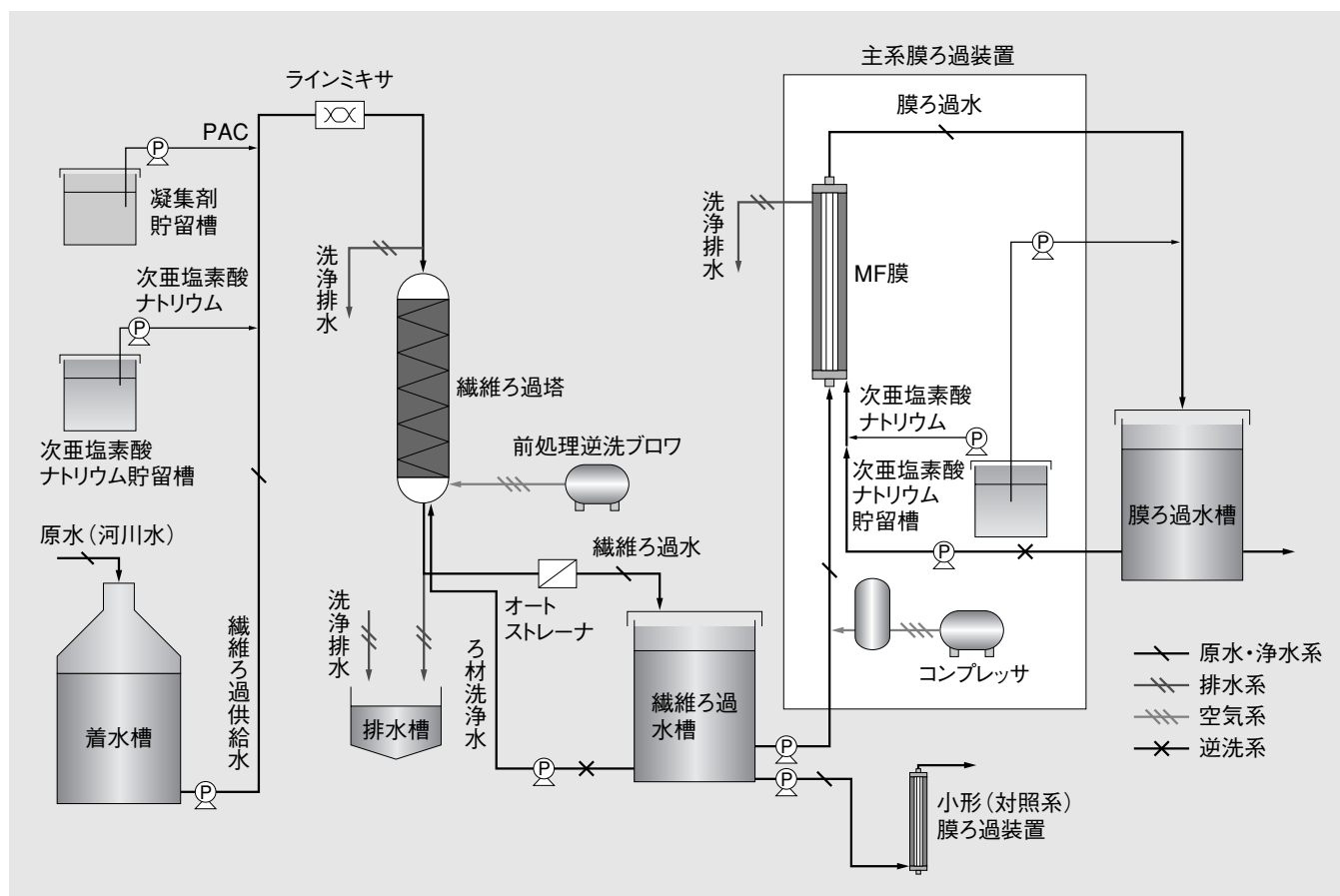
2.2 当社のMF膜ろ過装置の取得済み技術認定及び実証試験装置の仕様

上水道事業、簡易水道事業など公共の上水道向

け膜ろ過装置の技術制度として、(財)水道技術研究センターの浄水用設備等認定がある。本認定は、膜ろ過設備を含む浄水処理設備の設計、施工、製造及び管理に関する技術を有することを証明するものであり、本認定の取得が入札条件に含まれることが多い。

当社は、2006年に浸漬形有機MF膜を用いた浄水処理システムの技術認定を取得した。このシステムでは、吸引ポンプを使用するため膜差圧の運用範囲は加圧膜を利用した時と比較して狭くなるものの、高濁度河川水や膜ろ過や砂ろ過の洗浄排水を原水として使用できるという特長を有する。加圧膜の膜ろ過工程の洗浄排水に浸漬膜ろ過システムを適用した場合、浄水場全体の浄水回収率を更に高めることが可能となる。

また、2009年には小規模浄水場をターゲットとして、モジュール長1m、膜面積23m²のポリフッ化ビニリデン（PVDF：Polyvinylidene Difluoride）製有機MF膜を用いた浄水処理システムの技術認定を取得した。浸漬膜と異なり加圧ポンプを使用



第1図 実験設備のフロー図

実験設備の浄水フローは、着水槽・繊維ろ過装置・繊維ろ過水槽・膜モジュール・膜ろ過水槽から成る。主系膜及び小形膜ろ過装置には、繊維ろ過水槽から並列に送水した。



できるため膜差圧の運用範囲が広がり、設計膜ろ過流束を増加させることができるものの、モジュール内に濁質が蓄積しやすいため、高濁度原水へ使用するには前処理が必要である。

今回の実証試験では、大規模プラントにも適用が可能なモジュール長2m、膜面積50m²のPVDF製外圧式加圧形MF膜モジュールを用いた浄水処理システムを設置し、実証試験を実施した。繊維ろ過を前処理とするため、膜ろ過方式は全量ろ過とし、回収率は92%程度に設定した。実証試験の対照系として、モジュール長1m、膜面積1.2m²小形膜モジュールを用いた小形膜ろ過装置を設置し、各種比較実験を実施した。

2.3 繊維ろ過とMF膜ろ過の組み合わせ

第1図に実験設備のフロー図を示す。河川から取水した原水は着水槽を経て、繊維ろ過塔に導水した。その導水配管中で、原水濁度に応じて2~30mg/Lでポリ塩化アルミニウム（PAC：Poly Aluminium Chlorite）を注入し、マイクロフロックの形成を行った。繊維ろ過塔で凝集ろ過を行い、繊維ろ過水槽に導水した。繊維ろ過水槽水位を一定範囲内に制御するため、繊維ろ過は間欠運転とした。また、原水濁度に応じて逆洗間隔を変更することで、濁質漏えいを防いだ。第1表に繊維ろ過装置の仕様と運転条件を示す。

膜ろ過の前段にはストレーナを設置し、きょう雑物が繊維ろ過工程を万が一通過した場合でも、膜を保護することを図った。

繊維ろ過水槽に導水した繊維ろ過水を、主系膜ろ過装置と小形膜ろ過装置に供給した。繊維ろ過により膜供給水濁度が抑えられるため、膜ろ過は全量ろ過とした。逆洗間隔は30分とし、逆洗時次亜添加は4.0mg/Lとした。第2表に膜ろ過装置の仕様と運転状況を示す。

3. 組み合わせ処理の実証試験

3.1 繊維ろ過の除濁性能

第2図に繊維ろ過装置の除濁性能を示す。原水濁度は降雨などの要因で一時的な増減を繰り返し、実験期間中は最大62.5度まで上昇した。原水濁度の上昇中には繊維ろ過水濁度も上昇する傾向が見られるものの、PAC注入率や洗浄頻度を適切に設定することで、繊維ろ過水濁度は最大2.07度、平

第1表 繊維ろ過装置の仕様と運転条件

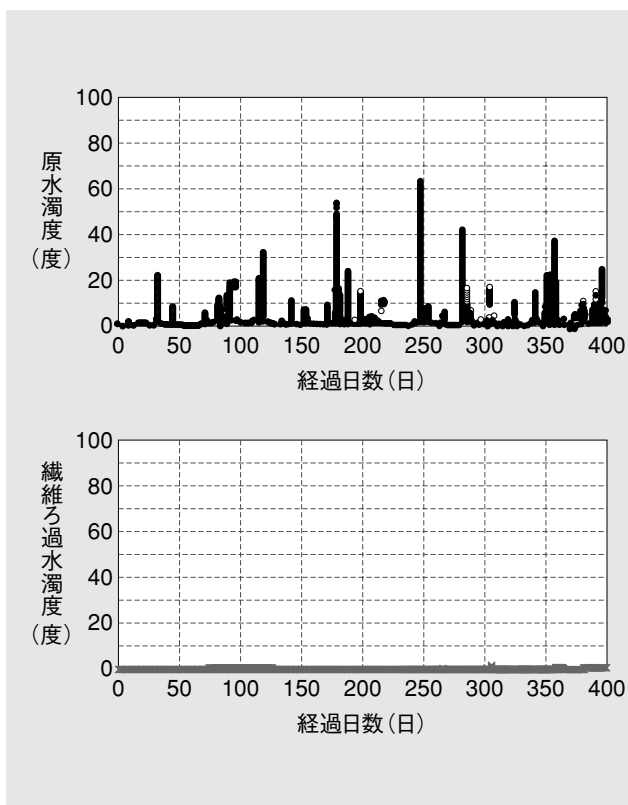
繊維ろ過装置は、大まかな濁質の除去を目的として設置されるものであり、除濁の原理は、PACによる凝集ろ過方式である。

項目	内容
原水	河川水
繊維ろ過ろ材	ポリプロピレン製繊維
繊維ろ過流量	5.0m ³ /時
凝集剤	PAC

第2表 膜ろ過装置の仕様と運転条件

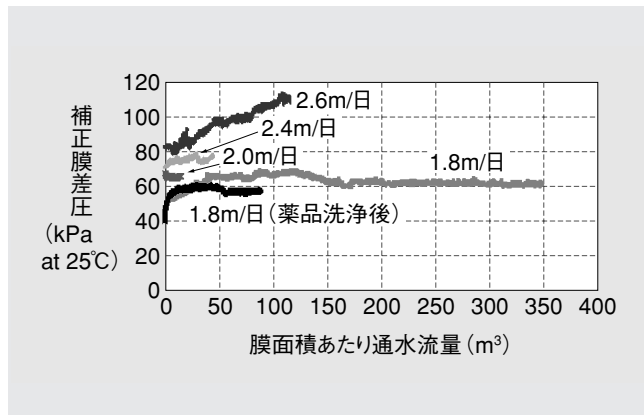
主系は大規模装置に市販されている膜モジュールを用いた装置であり、対照系は比較実験を目的とした小形の試験用の膜モジュールを用いた装置である。

系列	膜の形式	中空糸MF膜
主系	膜の材質	PVDF
	公称孔径	0.1μm
	膜面積	50m ²
	膜モジュール長	2m
	膜ろ過方式	外圧式全量ろ過
	膜ろ過流束	1.8~2.6m ³ /(m ² ・日)
	逆洗間隔	30分
	システム全体の回収率	90.6%
	膜ろ過の回収率	92.4%
対照系	膜の材質	PVDF
	公称孔径	0.1μm
	膜面積	1.2m ²
	膜モジュール長	1m



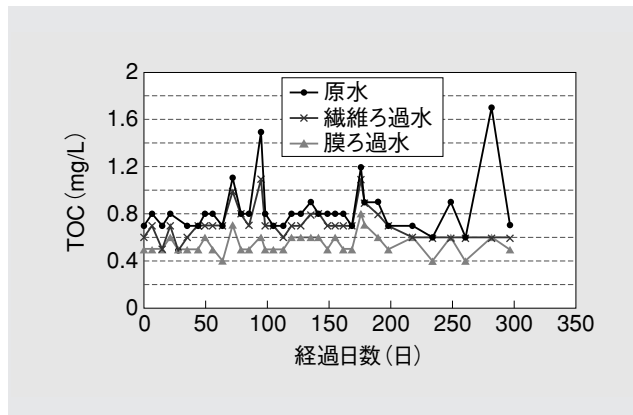
第2図 繊維ろ過装置の除濁性能

原水濁度は降雨などによる一時的増加を頻繁に繰り返したが、繊維ろ過水濁度は最大2度程度まで抑制できた。



第3図 主系膜の膜差圧

流束1.8m³/日のデータは、膜差圧の上昇が無く安定運転でき、薬品洗浄により元の状態に戻ることを示している。流束2.0～2.6m³/日のデータは、流束の増加に伴い緩やかに膜差圧上昇の変動が変化することを示している。



第4図 各処理工程のTOC

原水TOCは採水日により変動を示したが、繊維ろ過水、膜ろ過水で少しずつ低減していることを示している。

第3表 原水、繊維ろ過水及び膜ろ過水質

原水は最大濁度63度程度の河川水であり、降雨時などを除けば比較的清潔な水源である。低水温期には水温が3℃程度まで下がり、膜差圧を上昇させる要因となる。繊維ろ過水では最大濁度2度程度に低減でき、膜ろ過水では定量下限値未滿となる。

水質項目	原水			繊維ろ過水			膜ろ過水		
	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値
濁度(度)	62.54	0.27	1.89	2.07	<0.1	0.14	<0.1	<0.1	<0.1
一般細菌(個/mL)	2400	500	951	1100	76	442	0	0	0
大腸菌	陽性	陽性	陽性	陽性	陽性	陽性	陰性	陰性	陰性
TOC(mg/L)	0.9	0.7	0.8	0.9	0.6	0.7	0.7	0.4	0.5
pH値	7.9	7.4	7.6	7.7	7.4	7.5	7.6	7.3	7.4
色度(度)	5.6	2.2	3.4	3.1	1.4	2.1	2.2	0.7	1.3
鉄(g/L)	0.11	<0.03	0.05	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
マンガン(mg/L)	0.013	<0.001	0.005	0.002	<0.001	0.001	0.003	<0.001	0.001
アルミニウム(mg/L)	0.12	<0.01	0.03	0.18	0.06	0.12	0.07	0.02	0.04
水温(℃)	24.78	3.24	13.58	25.13	3.54	14.05	—	—	—

均0.14度に抑えることができ、安定した除濁性能を示した。

3.2 膜ろ過装置の運転トレンド

第3図に主系膜の各流束での膜差圧を示す。横軸は単位膜面積あたりの通水流量とし、異なる膜ろ過流束の場合においても同一の負荷となるように表現した。定流量ろ過の場合、膜閉そくの進行に伴い膜差圧が上昇する。しかし、繊維ろ過水濁度が低く抑えられていたことで、膜ろ過流束1.8m³/日における膜差圧は通水2000m³(単位膜面積あたり通水量40m³)経過頃から60kPa程度でほぼ横ばいとなった。最低水温3.2℃の低水温期を含んでいるにもかかわらず、通水17,500m³(単位膜面積あたり通水量350m³)まで膜差圧が上昇する

ことなく安定運転できた。

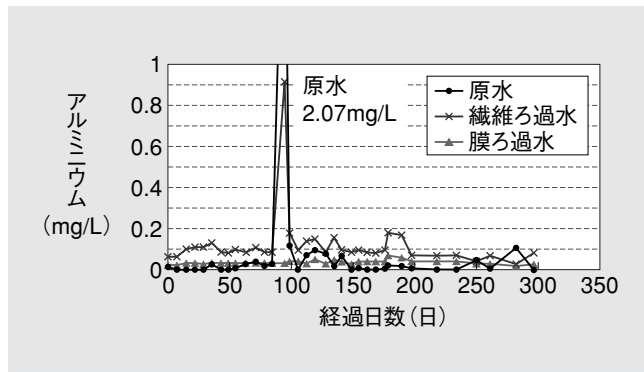
上記運転で膜差圧の上昇は見られなかったが、通水17,500m³時に薬品洗浄を実施した。その結果、運転開始時の膜差圧まで回復することを確認した。但し、実運用では上限膜差圧200kPa到達時あるいは所定の期間経過時に実施する。

膜ろ過流束2.4m³/日以上では、通水流量の増加に応じて膜差圧の上昇速度が速くなったが、いずれの条件でも急激な膜差圧上昇は見られず、継続的にろ過することができた。この原水においては1.8～2.0m³/日が、長期間安定運転できる条件であると考えられる。

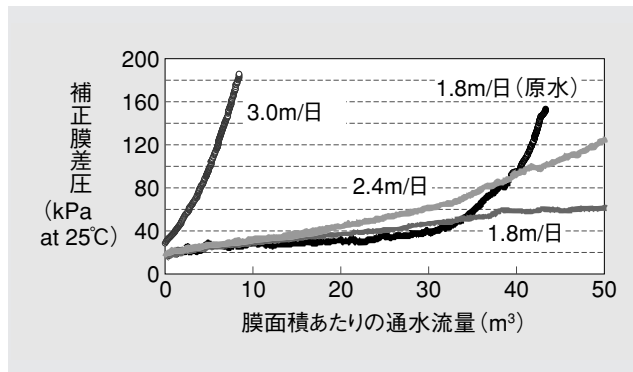
3.3 水質

第3表に原水、繊維ろ過水及び膜ろ過水の水質を示す。繊維ろ過で除去率が高かった項目は、濁度・鉄・マンガンであった。繊維ろ過水の一般細菌・大腸菌は、原水と比較して低減はできたものの、水道水質基準を満たさないことが多かった。また、降雨による原水水質悪化時には、すべての項目で繊維ろ過水水質が若干悪化した。これは、一時的に繊維ろ過に過剰な負荷がかかったことにより、濁質漏えいが生じたと考えられる。一方、膜ろ過水は原水水質悪化時を含めて、50項目の水道水質基準をすべて満たした。

第4図と第5図に各処理工程の全有機炭素(TOC: Total Organic Carbon)及びアルミニウ



第5図 各処理工程のアルミニウム
原水水質悪化時を除いて繊維ろ過水で増加したが、膜ろ過により低減できている。膜差圧には影響を与えなかった。



第6図 小形膜の膜差圧
流速1.8~3.0m/日のデータは、流速に応じて膜差圧上昇が速くなったが主系よりも閉そくしやすくなったことを示している。流速1.8m/日(原水)のデータは、繊維ろ過装置を通さない場合、繊維ろ過で取れない物質の蓄積により、急激に閉そくしたことを示している。

ムをそれぞれ示す。膜のファウリング原因物質の一つと考えられるTOCの膜での除去率は平均12.5%であり、除去はわずかであった。また、アルミニウムはPAC凝集剤添加の影響から繊維ろ過水で平均0.09mg/L増加したが、膜ろ過水では原水とほぼ同じ水準まで減少した。残存するTOCやアルミニウムがファウリングの原因となる可能性が考えられたが、実証試験では膜差圧の上昇は見られなかった。

このように、繊維ろ過はすべての水質項目について水質基準を満たすことができる処理工程ではないものの、膜ろ過の前処理における凝集沈殿プロセスの代替として、十分に機能し得ることを示すことができた。

3.4 装置規模が運転特性に与える影響

第6図に小形膜ろ過装置の膜差圧を示す。繊維ろ過を前処理とした場合の膜差圧は、膜ろ過流速1.8m/日において60kPaで安定した。膜モジュールの長さが短いと圧力損失が少なくなるため、主系の大形膜と比べて膜差圧が下がると考えられたが、3.2項の結果と比較して大きく低下しなかった。流速を増やした場合でも同じ膜ろ過流速では、主系の大形装置より小形装置の方が閉そくしやすい傾向が見られたものの、原水種別や高流速による処理特性を小流量で実施したい場合には、有効な手段となることが示された。

3.5 繊維ろ過有無の運転比較

河川原水を直接膜ろ過した場合、膜差圧は通水流量40m³(単位膜面積あたり通水量33m³)までは繊維ろ過水を膜ろ過した場合よりも緩やかに上昇した。この時、降雨などによる原水水質の悪化が

なく、繊維ろ過水に含まれる溶存アルミニウムが存在しなかったことが影響したと考えられる。しかしながら、通水流量が40m³を超えたところで膜差圧が急上昇した。原水濁度に増加は見られずほぼ均一の原水条件であったことから、膜閉そくの原因は、繊維ろ過で除去できた濁度・鉄・マンガンなどであると考えられる。

4. む す び

繊維ろ過とMF膜ろ過の組み合わせによる浄水プロセスについて、水質変動のある河川水でフィールド試験を行った。検証の結果、原水水質が変動した場合でも安定した運転状況を維持できることが実証でき、大形膜ろ過装置を使用した膜ろ過装置の技術認定を取得することができた。今回の認定取得により、当社は、原水種別や浄水規模によらずに膜ろ過設備を提案できる技術が備わっていることが示された。

今後も、水道事業者をはじめ、お客様のご指導、ご鞭撻を賜りながら、お客様からのご要求に対応できる膜処理技術開発を進めていく所存である。末尾ながら、本試験にご協力いただいた関係者各位に感謝の意を表す次第である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

(1) 財水道技術研究センター調査結果, 2009

《執筆者紹介》



中村 浩 Hiroshi Nakamura
上水処理システム企画開発に従事



宮本新也 Shinya Miyamoto
上水処理システム企画開発に従事



鮫島正一 Shoichi Sameshima
上水処理システム企画開発に従事

