

上水用大容量 UF 膜の実証実験

Demonstration Test of Large-scale UF Membrane Module for Drinking Water



技術本部技術部第2技術室
長谷川 雅宏
Masahiro Hasegawa
中町 真美
Mami Nakamachi
環境本部計画部第2計画室
西尾 弘伸
Hironobu Nishio

現在、国内では UF 膜ろ過装置は小・中規模浄水場へ適用されているが、中・大規模浄水場への導入を検討するため大容量 UF 膜モジュールをもちいて実証実験をおこなった。このモジュールは原水濁度に応じて全量ろ過とクロスフローろ過を自動的に切替え、消費電力を低減できる特長を有す。琵琶湖の表流水をもちい、従来の約2.5倍の膜面積を有するこの膜モジュールにて、流束を1.3から $3.0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ まで上昇させ、7カ月運転した。高濁度実験では原水中の鉄、マンガン、アルミニウムは100 %除去でき、一般細菌、大腸菌は検出されなかった。また、流束の上昇とともに増加した膜差圧は次亜塩素酸ナトリウムとクエン酸を使った薬品洗浄により回復できた。

This module is efficient in reducing energy consumption, with its capability of dead-end filtration and cross-flow filtration at automatic changeover depending on turbidity. UF membrane filtration is applied to small and medium purification plants at present. For application to medium and large purification plants, a demonstration test was conducted with large-scale UF membrane modules. The surface water of Lake Biwa was filtered with the module having a filter area about 2.5 times as large as conventional ones, at flux from 1.3 to $3.0 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ for seven months. The high turbidity test proved 100 % removal of iron, manganese and aluminum in raw water. General and coliform bacteria were not detected. Transmembrane pressure increased with increasing flux was recovered by chemical cleaning with sodium hypochlorite and citric acid.

Key Words :

大容量 UF 膜モジュール
中・大規模膜ろ過施設
全量ろ過

Large-scale UF membrane module
Medium and large-scale plants
Dead-end filtration

まえがき

膜ろ過施設は、水道原水中の病原性原虫（クリプトスピロジウム）や濁質を完全に除去できること、加えて設置面積が少なく、維持管理が容易であることから現在日本国内では、 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 程度から $10,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 程度の小・中規模の浄水場へ導入が進んでいる。海外においては、中・大規模膜ろ過施設で、す

でに数多く稼動している。¹⁾ 本実証実験と同じ大容量 UF 膜ろ過施設は海外で、建設中のものをふくめて、5カ所で採用されている。「膜利用型新浄水システム開発研究」(MAC21) などで膜ろ過技術が高められたこと、浄水場に導入された膜ろ過施設の実績より、膜ろ過施設の安全性・安定性が確認されたことから、最近、中・大規模浄水場への導入が期待

されるようになった。しかし、中・大規模浄水場に現在使用されている膜モジュールを適用すると、膜モジュールの数が多大となり、コストが高く、設置面積が大きく、取扱が煩雑となるため、膜ろ過法の本来の長所が生かされない。そこで、中・大規模浄水場に適した膜ろ過施設を考える必要がある。そのひとつとして膜ろ過施設の設置面積あたりの膜ろ過水量を増加させることが重要であり、このためには膜モジュールの高流束化、大容量化、高充填率化が要求される。高流束化は、従来の膜モジュールの透水性を高め、より高い流束でろ過することで、1本あたりの膜モジュールからの膜ろ過水量を増加させることができる。大容量化は、膜モジュールを大型化し、膜モジュール内の膜面積を大きくすることで、1本あたりの膜モジュールの膜ろ過水量を増加させることができる。高充填率化は、槽内にモジュールを高密度に集積させた浸漬型やモジュールを高さ方向に積重ねることにより、一定の敷地面積からの膜ろ過水量を増加させることができる。²⁾ 本報では、膜モジュールの大容量化に着目し、中空糸型の大容量UF膜をもちいた実証実験をおこない、中・大規模膜ろ過施設に向けての運転性能や処理性能などの知見をえたので報告する。

1. 大容量UF膜装置の特長

大容量UF膜ろ過装置は、次のような特長を有する。

- ① 膜モジュール1本あたりの有効膜面積が125 m²と従来型の2.5倍であり、省スペース化が図れる。
- ② UF膜の材質は、セルロース系高分子化合物であり、親水性を有するため、膜ファウリングが起こりにくく安定した運転が可能である。

③ 本UF膜ろ過装置は、地下水のように清澄で濁度変動の少ない原水に対しては、消費電力の低い全量ろ過方式を標準とする。なお、濁度変動の大きい原水の場合は、濁度に応じて自動的に全量ろ過方式とクロスフローろ過方式を切替えることが可能である。

④ 膜破断の検知方法は、膜ろ過水の濁度を常時監視することに加え、一定期間ごとに、自動で膜モジュール内に圧縮空気を送り一定圧とし、所定時間の圧力変化を監視する膜破断検知テスト機能を有している。

2. 実証実験

2.1 実験装置

実験フローを図1に、実験装置の仕様および実験条件を表1に示す。また、実験装置の外観を写真1に、膜モジュールの模式図³⁾を図2に示す。

本実験装置は原水槽、膜モジュール、自動洗浄式ストレーナ、膜ろ過ポンプ、逆洗ポンプ、循環ポン

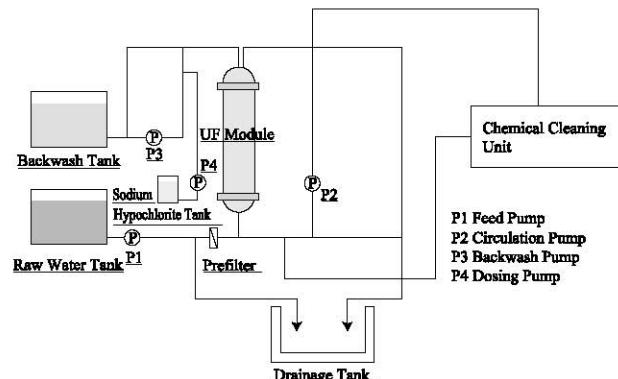


図1 実験フロー図
Fig. 1 Schematic flow diagram

表1 実験装置の仕様および運転条件

Table 1 Specification and operating condition of test unit

Type of Membrane	UF Membrane
Molecular Weight Cutoff	100 000 Da (0.01 μm)
Material	Hydrophilic Polymer
Type of Module	Internal Pressure Type Hollow Fiber Ultrafiltration Membrane
Module	Size : Length 1 320 mm, Diameter 450 mm Effective Membrane Surface Area : 125 m ² /module Module Number : 2 Total Effective Membrane Surface Area : 250 m ²
Type of Filtration	Dead End Filtration and Cross-flow Filtration
Flux	1.3-3.0 m ³ /m ² /d
Backwash Frequency	Once/45-64 min.
Recovery	84-93 %



写真1 実験装置の外観
Photo 1 Outside view of pilot plant

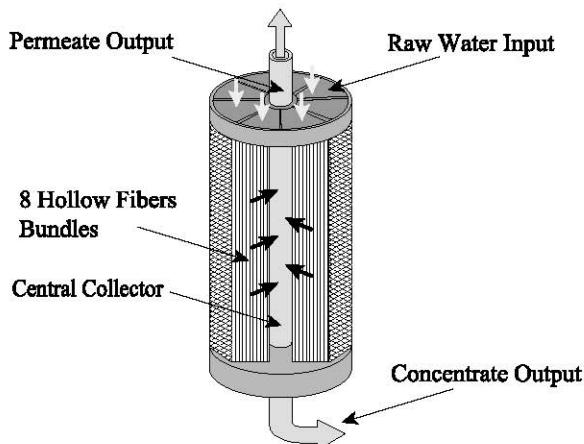


図2 膜モジュールの模式図
Fig. 2 Schematic diagram of membrane module

ブ、逆洗用次亜塩素酸ナトリウム注入設備、洗浄水槽、排水槽、空気圧縮機で構成されている。

膜モジュールはケーシング収納方式であり、中空糸はケーシング内で8分割されて配置され、モジュールの中央部に集水装置を有する構造である。

2.2 実験方法

実験にもちいた原水は、琵琶湖表流水である。原水を原水槽に受け、膜ろ過ポンプにより原水中の夾雑物を自動洗浄式ストレーナ（目開200 μm）で除去した後、膜モジュールに供給し、膜ろ過する。物理洗浄は45から64分の一定時間ごとに逆圧水洗浄を実施する。逆圧水洗浄は、膜ろ過水に洗浄排水中の残留塩素濃度が2から5 mg/Lとなるように次亜塩素酸ナトリウムを注入しておこなった。

本実験では原水濁度10度で全量ろ過方式からクロスフローろ過方式へ自動切替となるが、実験期間中では原水濁度は平均0.6度と濁質が低い原水であつ

表2 原水水質分析結果
Table 2 Analysis of raw water quality

Parameter		Raw Water
Color	degree	1
Turbidity	degree	0.9 (0.4~1.5)
pH	—	7.5 (6.9~8.3)
Permanganate Value	mg/L	2.1 (1.8~2.5)
Total Iron	mg/L	0.02 (<0.01~0.05)
Total Manganese	mg/L	<0.005 (<0.005~0.006)
General Bacteria	N/mL	85 (2~480)
Coliform Bacteria	—	Positive (+)

表3 膜ろ過水水質分析結果
Table 3 Analysis of filtered water quality

Parameter		Filtered Water
Color	degree	<1
Turbidity	degree	<0.1
pH	—	7.5 (6.9~8.4)
Permanganate Value	mg/L	1.7 (1.5~1.9)
Total Iron	mg/L	<0.01
Total Manganese	mg/L	<0.005
General Bacteria	N/mL	0
Coliform Bacteria	—	Negative (-)

たため、全実験期間の227日中、数時間を除き全量ろ過方式による運転であった。

3. 実証実験結果

3.1 原水性状

原水の水質分析結果を表2、4に示す。原水濁度は0.4から1.5度を示し、一般細菌が最大で480個/mLであり、大腸菌群が検出されたものの、鉄、マンガン、過マンガン酸カリウム消費量は水質基準を満足した。

また、実験期間内に3回実施した水質基準46項目試験においては、大腸菌群が検出され、臭気は藻臭を呈したが、そのほかの項目については水質基準を満足した。

3.2 運転状況

流束の経日変化を図3に示す。2002年1月12日に流束1.3 m³/m²/dで開始し、最大3.0 m³/m²/dまで流束を上昇させたが、約7ヶ月間薬品洗浄をすることなく運転が可能であった。本実験期間中の原水の水温は最小5.8 °C、最大27.7 °C、平均11.9 °Cであった。

補正膜差圧の経日変化を図4に示す。補正膜差圧は当初の30 kPaから流束の上昇とともに上昇した。約7ヶ月後の流束3.0 m³/m²/dにおいて、補正膜差圧は90から110 kPa程度を示した。流束3.0 m³/m²/dにおいても補正膜差圧の急激な上昇は認められず安定した運転が可能であった。

表 4 水質基準46項目の水質分析結果

Table4 Analysis of water quality

	Parameter	Water Quality Standards of Waterworks Law	2002/5/9	
			Raw Water	Filtered Water
1	General Bacteria	100 or Less (count/mL)	48	0
2	Coliform Bacteria	Not Detectable	Positive (+)	Negative (-)
3	Cadmium	0.01 mg/L or Less	<0.001	<0.001
4	Mercury	0.0005 mg/L or Less	<0.00005	<0.00005
5	Selenium	0.01 mg/L or Less	<0.001	<0.001
6	Lead	0.05 mg/L or Less	<0.001	<0.001
7	Arsenic	0.01 mg/L or Less	<0.001	<0.001
8	Hexavalent Chromium	0.05 mg/L or Less	<0.005	<0.005
9	Cyanide	0.01 mg/L or Less	<0.001	<0.001
10	Nitrate Nitrogen and Nitrite Nitrogen	10 mg/L or Less	0.17	0.16
11	Fluorine	0.8 mg/L or Less	0.08	0.08
12	Carbon Tetrachloride	0.002 mg/L or Less	<0.0002	<0.0002
13	1,2-dichloroethane	0.004 mg/L or Less	<0.0004	<0.0004
14	1,1-dichloroethylene	0.02 mg/L or Less	<0.001	<0.001
15	Dichloromethane	0.02 mg/L or Less	<0.001	<0.001
16	Cis-1,2-dichloroethylene	0.04 mg/L or Less	<0.001	<0.001
17	Tetrachloroethylene	0.01 mg/L or Less	<0.0005	<0.0005
18	1,1,2-trichloroethane	0.006 mg/L or Less	<0.0006	<0.0006
19	Trichloroethylene	0.03 mg/L or Less	<0.001	<0.001
20	Benzene	0.01 mg/L or Less	<0.001	<0.001
21	Chloroform	0.06 mg/L or Less	<0.001	<0.001
22	Dibromochloromethane	0.1 mg/L or Less	<0.001	<0.001
23	Bromodichloromethane	0.03 mg/L or Less	<0.001	<0.001
24	Bromoform	0.09 mg/L or Less	<0.001	<0.001
25	Total Trihalomethane	0.1 mg/L or Less	<0.001	<0.001
26	1,3-dichloropropene	0.002 mg/L or Less	<0.0002	<0.0002
27	Simazine	0.003 mg/L or Less	<0.0003	<0.0003
28	Thiuram	0.006 mg/L or Less	<0.0006	<0.0006
29	Tiobencarb	0.02 mg/L or Less	<0.001	<0.001
30	Zinc	1.0 mg/L or Less	<0.005	<0.005
31	Iron	0.3 mg/L or Less	0.01	<0.01
32	Copper	1.0 mg/L or Less	<0.01	<0.01
33	Sodium	200 mg/L or Less	7.8	7.8
34	Manganese	0.05 mg/L or Less	<0.005	<0.005
35	Chloride Ion	200 mg/L or Less	9.6	9.6
36	Calcium, Magnesium Hardness	300 mg/L or Less	38.9	38.8
37	Evaporated Residue	500 mg/L or Less	64	62
38	Anionic Surface Active Agent	0.2 mg/L or Less	<0.02	<0.02
39	1,1,1-trichloroethane	0.3 mg/L or Less	<0.0005	<0.0005
40	Phenolic Compounds	As Phenol 0.005 mg/L or Less	<0.005	<0.005
41	Permanganate Value	10 mg/L or Less	2.2	1.6
42	pH Value	5.8 or More 8.6 or Less	7.7	7.7
43	Taste	Not Abnormal	—	Not Abnormal
44	Odor	Not Abnormal	Algous	None
45	Color	5 degree or Less	1	<1
46	Turbidity	2 degree or Less	1.3	<0.1

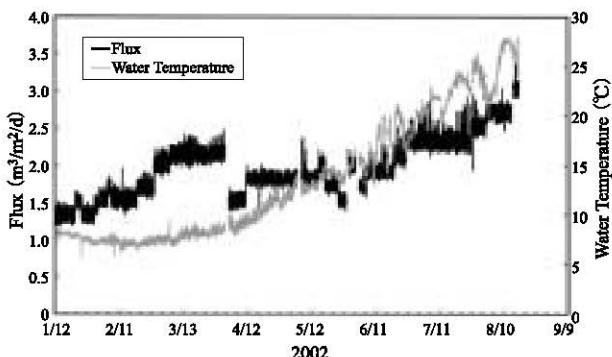


図 3 流束の経日変化
Fig. 3 Change of flux

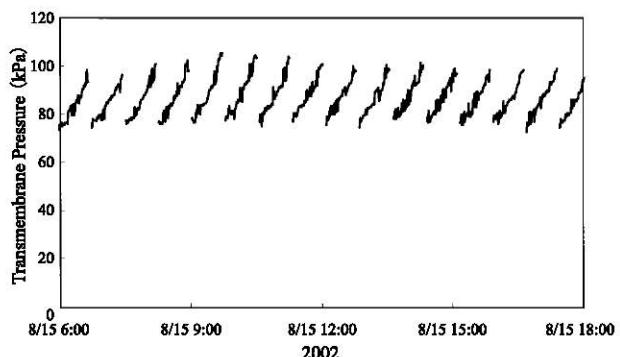


図 5 膜差圧の経時変化
Fig. 5 Change of transmembrane pressure

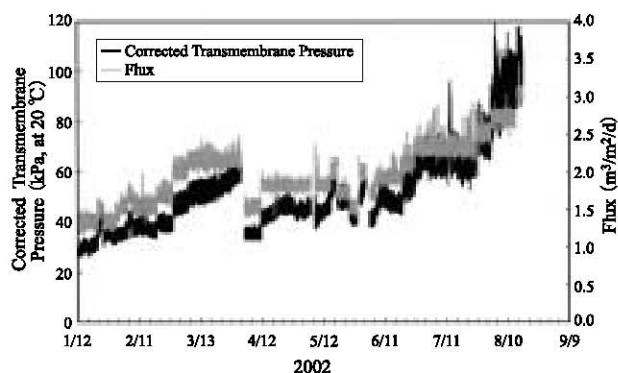


図 4 補正膜差圧の経日変化
Fig. 4 Change of corrected transmembrane pressure

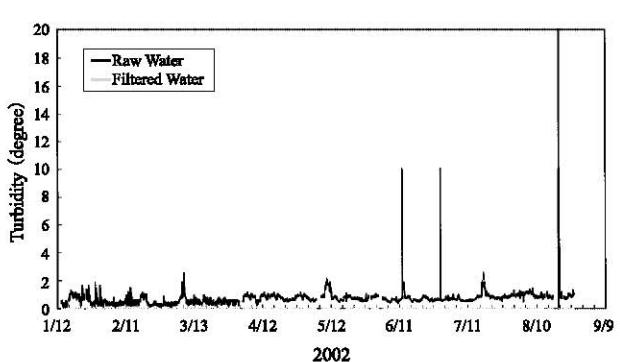


図 6 濁度の経日変化
Fig. 6 Change of turbidity

ろ過開始から逆圧水洗浄までの期間ごとの膜差圧の経時変化を図5に示す。膜差圧はろ過の継続にともない上昇し100 kPa程度を示したが、逆圧水洗浄により80 kPa程度に回復した。本実験では次亜塩素酸ナトリウムを注入して逆圧水洗浄をおこなっているが、本原水は琵琶湖表流水であり、藻類などの生物に由来する濁質が多いいため、ろ過性の回復には次亜塩素酸ナトリウムが有効であることが考えられる。

3.3 処理性能

膜ろ過水の水質分析結果を表3、4に示す。原水の濁度はおおむね1度程度を示し、膜ろ過水の濁度は0.1度以下と100%の除去がえられた。膜ろ過水の鉄、マンガンはそれぞれ0.01 mg/L以下、0.005 mg/L以下であり、常に100%の除去がえられた。

原水に検出された一般細菌、大腸菌群は膜ろ過により完全に除去された。また、水質基準46項目試験においてもすべての項目で水質基準以下と良好な処理状況を示した。

原水および膜ろ過水の濁度をオンラインで監視した結果を図6に示す。これより原水の濁度は通常は1度程度であり、10度を超えたのは2回であった。膜ろ過水の濁度は0.001度以下を示し、全実験期間

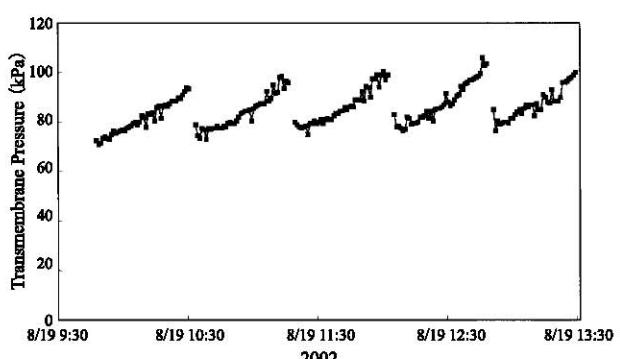


図 7 膜差圧の経時変化
Fig. 7 Change of transmembrane pressure

において良好な処理性能が継続してえられた。

3.4 高濁度実験

実験期間中の原水濁度は1度程度と低い値を示したため、降雨などにより原水の濁度が急激に上昇した際の運転性能、処理性能の調査・確認をおこなう高濁度実験を実施した。浄水場内の土を原水に所定量添加し、100度程度の高濁度水を人工的に調整して実験をおこなった。

運転は流束1.5 m³/m²/d、クロスフローろ過方式にて4時間程度おこなった。膜差圧の経時変化を図7

表 5 原水および膜ろ過水の分析結果

Table 5 Analysis of water quality

Parameter		2002/8/19		Raw Water		2002/8/19	
		Raw Water	Filtered Water			Raw Water	Filtered Water
Turbidity	degree	120	<0.1	Dissolved Manganese	mg/L	<0.005	—
Color	degree	7 (130)	<1	Dissolved Iron	mg/L	0.07	—
pH	—	7.1	7.0	Permanganate Value	mg/L	24	1.9
Total Manganese	mg/L	0.25	<0.005	General Bacteria	N/mL	45 000	0
Total Iron	mg/L	7.2	<0.01	Coliform Bacteria	—	Positive(+)	Negative(-)
Aluminum	mg/L	6.1	<0.01	Color : (Apparent Color)			

表 6 膜差圧の回復状況

Table 6 Recovery of transmembrane pressure

Flux	Transmembrane Pressure (kPa, at 25 °C)			Recovery Rate (%)
	Start of Operation	Before Chemical Cleaning	After Chemical Cleaning	
1.5 m³/m²/d	29.4	36.4	29.4	100
3.0 m³/m²/d	63.5	84.0	63.8	100

に示したように、急激な膜差圧の上昇は認められなかった。ろ過開始時の膜差圧は80 kPaを示し、ろ過の継続とともに上昇し、逆圧水洗浄の直前では100 kPa程度を示したが、逆圧水洗浄によりろ過開始時の80 kPaまで回復した。

原水および膜ろ過水の水質分析結果を表5に示す。原水の濁度は120度であったが、膜ろ過水は0.1度以下であり100 %の除去率がえられた。原水の色度は7度（見かけ色度130度）であったが、膜ろ過水は1度以下であり100 %の除去率がえられた。原水の過マンガン酸カリウム消費量は24 mg/Lであったが、膜ろ過水は1.9 mg/Lであり92 %の除去率がえられた。原水のマンガンは0.25 mg/Lであったが、膜ろ過水は0.005 mg/L以下であり100 %の除去率がえられた。原水の鉄は7.2 mg/Lであったが、膜ろ過水は0.01 mg/L以下であり100 %の除去率がえられた。原水のアルミニウムは6.1 mg/Lであったが、膜ろ過水は0.01 mg/L以下であり100 %の除去がえられた。一般細菌、大腸菌群は原水で検出されたが、膜ろ過水では検出されず、完全に除去された。

このように高濁度時においても本UF膜ろ過装置の運転性能および処理性能とも安定しており、良好な結果がえられた。

3.5 薬品洗浄

長期間運転すると、濁質成分などの膜への蓄積により、膜差圧が上昇し、逆圧水洗浄でも回復しなくなる。この場合薬品による洗浄をおこない、膜ろ過性能を回復させる。薬品洗浄に使用する薬品は、ア

ルカリ洗浄としては次亜塩素酸ナトリウム、酸洗浄としてはクエン酸をもちいて薬品洗浄を実施する。

薬品洗浄後の膜差圧の回復状況を表6に示す。流束1.3 m³/m²/d および3.0 m³/m²/dにおいても膜差圧の回復率は100 %と良好で、運転初期とほぼ同等の回復がえられた。

3.6 実証実験まとめ

大容量UF膜をもちいた膜ろ過装置において、流束1.3 m³/m²/dから3.0 m³/m²/dで約7ヶ月間薬品洗浄することなく安定した運転が可能で、膜ろ過水は常に水質基準を満足した。また、原水の濁度が100度を超えるような一時的で急激な濁度上昇に対してもクロスフローろ過方式により安定した運転を継続し、膜ろ過水は水質基準を満足した。

薬品洗浄では、アルカリ洗浄で次亜塩素酸ナトリウム、酸洗浄でクエン酸をもちいることで、運転初期と同程度の回復がえられた。

4. 海外での導入実績

海外で稼動している実施設の導入実績を表7に示す。その一例としてルーアン浄水場の実施設写真を写真2に、膜ろ過施設ユニット図を図8に示す。本浄水場はフランス首都パリの北西部セーヌ川のほとりに位置し、2000年より運転を開始した計画浄水量24 000 m³/dの膜ろ過施設である。原水は地下水であり、膜ろ過後、塩素消毒により浄水としている。

むすび

当社では、1991年より始まった水道分野の官・学・民の共同プロジェクトMAC21、ACT21に参画し、

表 7 海外における大容量 UF 膜モジュールを採用している浄水場例
Table 7 Purification plants provided with large-scale UF membrane modules

Country	Start of Operation	Capacity (m³/d)	Raw Water	Combined Treatments
USA	2002	30 000	Surface Water	Clarification Pre-treatment
USA	2002	15 000	Groundwater	
	2003	30 000		
FRANCE	2002	120 000	Surface Water	Pre-O ₃ , Settling, Sand Filtration, Cristal ^(※)
FRANCE	2001	20 400	Surface Water	Remineralization, Pre-O ₃ , Powdered Activated Carbon, Final Chlorination
FRANCE	2000	24 000	Groundwater	Final Chlorination

(※) Cristal : Combined reactors integrating a separation by membrane and a treatment of an adsorption in liquid



写 真 2 ルーアン浄水場
Photo 2 Rouen purification plant

膜ろ過技術の開発、研究を進めてきた。その知見に基づき本実験を実施し、大容量 UF 膜の実用化を可能とした。さらに、大容量膜ろ過技術や浄水処理トータルシステムの開発を進めるべく、2002年から始まった「環境影響低減化浄水技術開発研究」(e-Water)に参画しており、今後も浄水膜ろ過の研究開発に積極的に取組んでいく所存である。

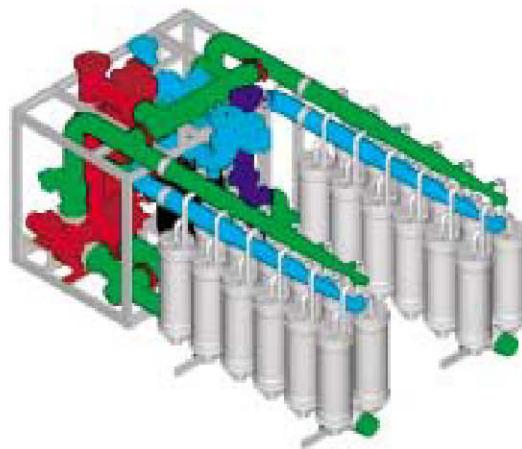


図 8 膜ろ過装置ユニット図
Fig. 8 Membrane purification unit

[参考文献]

- 1) 永井康敏：水道技術ジャーナル（膜ろ過装置の調査結果報告），No.23，(2002)，p.4-9
- 2) 西尾弘伸：神鋼パンテック技報，Vol.46，No.2，(2003)，p.32-40
- 3) Frederic Colasほか：Huge Scale Plant Ultrafiltration Unit，第52回全国水道研究発表会講演集，(2001)，p.690-691

連絡先

長谷川 雅 宏

技術本部
技術部
第2技術室

T E L 078 - 232 - 8119
F A X 078 - 232 - 8058
E-mail m.hasegawa@pantec.co.jp