

〈論文〉

膜処理設備の膜破損検出システム

Detection System of a Broken Membrane
in Water Purification

村山 清一¹, 居安 巨太郎¹, 金子 政雄¹, 山梨 伊知郎²,
金元 幹男², 内田 祥司², 川路 等³, 竹内 賢治⁴

¹(株) 東芝 電力システム社 電力・産業システム技術開発センター/東京都府中市東芝町1番地

²(株) 東芝 社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部/東京都港区芝浦一丁目1番1号

³(株) 東芝 社会インフラシステム社 社会インフラシステムソリューション部/東京都府中市東芝町1番地

⁴(株) 東芝 社会インフラシステム社 社会・産業システム事業部/東京都府中市東芝町1番地

SEIICHI MURAYAMA¹, KOTARO IYASU¹, MASAO KANEKO¹, ICHIRO YAMANASHI²,

MIKIO KANAMOTO², SHOJI UCHIDA², HITOSHI KAWAJI³, KENJI TAKEUCHI⁴

¹ ¹Toshiba Corporation Power Systems & Services Company Power And Industrial Systems Research
And Development Center / 1, Toshiba-Cho, Fuchu-Shi, Tokyo, 183-8511, Japan

² Toshiba Corporation Social Infrastructure Systems Company Public & Industrial Systems Div. / 1-1,
Shibaaura 1-Chome, Minato-Ku, Tokyo 105-8001, Japan

³ Toshiba Corporation Social Infrastructure Systems Company Public Use Systems Solution Dept. / 1,
Toshiba-Cho, Fuchu-Shi, Tokyo, 183-8511, Japan

⁴ Toshiba Corporation Social Infrastructure Systems Company Public & Industrial Systems Div. / 1,
Toshiba-Cho, Fuchu-Shi, Tokyo, 183-8511, Japan

Abstract

Recently, a membrane system has been introduced into the water purification plant. The system removes turbidity, bacteria and viruses. When the membrane is broken, turbidity, bacteria and viruses in the feed water leak into the treated water. Now, this break can be detected by the treated water turbidity. In this method, the break cannot be detected unless the feed water turbidity is high. A more sensitive detection system is needed for a highly reliable membrane system. The detection system of a broken membrane, which uses pressured air, has been developed. When pressured air is supplied to a membrane module, air leaks from the membrane. In the case of a broken membrane, the leak air flow rate is much larger than that in the case of a non broken membrane by 70 to 900 times. Whether the membrane is broken or not can be detected by the leak air flow rate.

Key Words : membrane, filtration, detection system, broken membrane

1 はじめに

近年、塩素処理では殺菌できない耐塩素性微生物の水道水への混入事故が国内外を問わず発生しており、社会的な問題となっている。国内の浄水プロセスは、一般的に、凝集、沈殿、砂ろ過の工程で濁質を除去し、塩素殺菌により病原性微生物を死滅させているが、耐塩素性微生物の除去や不活化が困難である。このため、物理的に濁質および耐塩素性微生

物を除去する膜処理を採用する浄水施設が増えてきている。膜処理は、孔径 $1\mu\text{m}$ 以下の細孔を有した膜の表面で水中に存在する孔径以上の濁質を物理的に除去する方法で、維持管理が容易である。2001年5月現在、国内の水道用膜処理設備導入件数は235件¹⁾となっており、今後も導入件数の増加が予想される。

上記のように、膜処理では細孔径以上の濁質をほぼ完全に除去できるが、劣化や異物混入などにより

膜が破損すると破損箇所から濁質が漏れ出してしまう。原水中に病原性微生物が混入していた場合は破損箇所から漏れ出してしまう危険性が大きい。現在、膜破損の検出は、連続でモニタリングしている膜処理水濁度により判断しているが、原水が高濁度となった場合に初めて破損を検出することとなる。原水濁度が小さい場合は、膜が破損していても膜処理水濁度の上昇が僅かであるため検出が困難な場合が多い。

本研究では、膜破損を確実に検出できる技術として、加圧空気を膜に供給し漏れ出す空気流量から膜破損を検出する方法について検討した。

2 検出原理

浄水用膜処理設備で用いられている外圧型中空糸膜で破損検出の原理を示す。Fig.1に中空糸膜における膜破損検出の模式図を示す。中空糸膜外側を原水

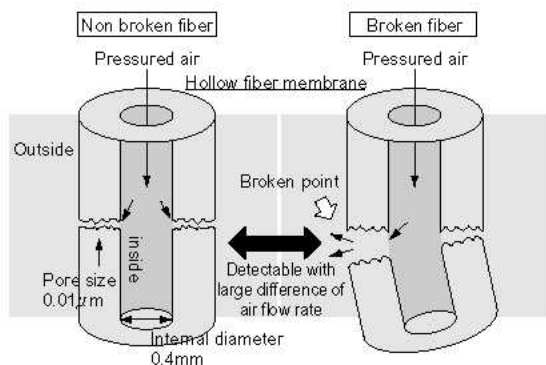


Fig.1 Schematic diagram of the detection system of a broken fiber

で満たされた状態とし、中空糸膜内側に加圧空気を供給する。膜表面の細孔 (Fig.1では、 $0.01\mu\text{m}$) では毛管吸引力が働くため、加圧空気が細孔から外へ流れ出るには毛管吸引力以上の高い圧力が必要となる。この原理は膜の最大細孔径を求める方法として利用されており、「バブルポイント法」²⁾と呼ばれている。次の(1)式により、膜の最大細孔径を求める。

$$D_{max} = \frac{4\sigma \cdot \cos\theta}{P} \quad (1)$$

(D_{max} :最大細孔径, P :バブルポイント圧力(ガスが膜細孔を透過して流れ出す時の圧力), σ :溶媒

の表面張力, θ :膜との接触角)

(1)式に対して、細孔の断面形状、接触角などを含めた経験的補正が行われており、毛管形状係数 $k_b = 0.714$ を使った次式 ((2)式) が報告されている³⁾。

$$D_{max} = \frac{4k_b \cdot \sigma}{P} \quad (2)$$

(2)式を用いて計算すると、膜細孔径 $0.01\mu\text{m}$ の場合、バブルポイント圧力は 21MPa となる。

一方、膜が破損すると破損箇所から空気が流れ出ることになる。中空糸膜の場合、破断面から空気が流れ出る。従って、(2)式において D_{max} は中空糸膜内径となり、中空糸内径が 0.4mm の時、破断面から空気が流れ出るのに必要な圧力を計算すると $5.25 \times 10^{-4}\text{MPa}$ となる。バブルポイント圧力と比較して非常に小さく、僅かな圧力で中空糸の破損箇所から大量の空気が流れ出ることがわかる。この時の空気流量を測定し、膜の破損を検出する。

3 実験

3.1 膜モジュール

Table 1 に実験に供した膜モジュール仕様を示す。限外ろ過 (UF) 膜として A 膜、精密ろ過 (MF) 膜として B 膜の 2 種類の外圧型中空糸膜モジュールを実験に使用した。A 膜、B 膜各々膜細孔の公称孔径は $0.01\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$ 、中空糸膜内径/外径は $0.4\text{mm}/0.7\text{mm}$, $0.6\text{mm}/1.0\text{mm}$ 、モジュール内の中空糸膜本数は 4,000 本、2,000 本、材質はポリアクリロニトリル (PAN)、ポリスルホン (PS) である。モジュールは、共に直径 114mm 、長さ約 1.2m の円筒形で、中空糸膜長さは約 1m である。

3.2 加圧空気による膜破損検出

Fig.2 に膜破損検出実験装置図を示す。コンプレッサから減圧弁にて圧力を調整し、加圧空気を膜モジュールに供給する。縦に設置された膜モジュールの上部より中空糸膜の内側へ加圧空気を供給する。膜モジュール内部は水で満たした状態とし、膜を透過した空気はドレンを通して膜モジュール外部へ流出する。ドレンを通した膜モジュールの外側は、大気

Table 1 Membrane module spec

	Membrane A(UF)	Membrane B(MF)
Nominal pore size	0.01 μ m	0.1 μ m
Membrane diameter I.D/O.D	0.4mm/0.7mm	0.6mm/1.0mm
Number of hollow fibers	4000	2000
Filtration mode	External pressure type dead end filtration	External pressure type dead end filtration
Material	Polyacrylonitrile (PAN)	Polysulfone (PS)

開放となっている。膜を通して外部へ流出する空気流量（以下、流出空気流量）は、Fig.2の膜破損検出ラインにある流量計にて計測し、20°C、1気圧の空気流量に換算した。加圧空気圧力は、Fig.2の圧力計（2次側用）で計測する。実験前に、中空糸膜以

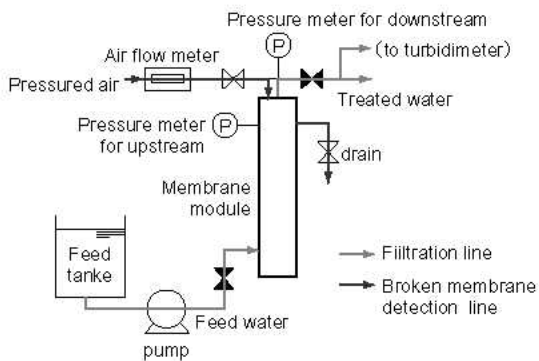


Fig.2 Flow chart of broken membrane detection system

外から空気が流出しないよう配管の漏れがないことを確認した。

A膜、B膜の2種類の膜で、破損の無い膜（以下、正常膜）と破損の有る膜（以下、破損膜）について加圧空気圧力と流出空気流量の関係を調べた。加圧空気圧力は0~0.3MPaの範囲で変化させた。破損膜は、中空糸膜を切断した膜で、切断した位置（破損位置）はA膜については最下部、B膜については上部から10cm(上部)、55cm(中央部)、98cm(最下部)の3種類とした。

3.3 濁度計による膜破損検出

従来の膜破損検出方法である膜処理水濁度による評価試験を行った。Fig.2において、ろ過ラインの

バルブのみ開とし、ポンプで原水を膜モジュールへ供給し膜処理する。ポンプから供給された原水は中空糸膜外側へ供給され、膜処理水は中空糸膜内側を通り膜モジュール上部から得られる。得られた膜処理水の濁度は、表面散乱光式高感度濁度計を用いて計測した。濁度計の検出限界は、0.001度である。

A膜を用い、正常膜と破損膜に対してカオリン懸濁液20度を原水として膜処理し、中空糸膜の破損本数と膜処理水濁度の関係を調べた。中空糸膜の破損位置は、「3.2 加圧空気による膜破損検出」と同様に最下部とし、破損本数は、1、2、3、4、5、6、8、12本とした。

3.4 膜破損位置の影響

B膜を用いて破損位置を変化させて膜処理実験を実施した。破損位置は、「3.2 加圧空気による膜破損検出」と同様、上部破損、中央部破損、下部破損の3種類とし、破損本数は1本とした。膜処理の条件は、「3.3 濁度計による膜破損検出」のA膜の場合と同様、カオリン懸濁液20度を原水として膜処理し、膜処理水濁度を計測した。

次に、上部破損、中央部破損、下部破損の3種類のB膜に対し、加圧空気圧力と流出空気流量の関係を調べた。

4 結果

4.1 加圧空気による膜破損検出

Fig.3にA膜、B膜の正常膜の加圧空気と流出空気流量の関係を示す。「2. 原理」より、膜細孔径が0.1 μ m、0.01 μ mでは、0.3MPa以下で流出空気が流れないと考えていたが、Fig.3に示したように実際に

は流出空気が観測された。(1)式における接触角, 細孔の形状, 孔径のパラツキなどが, 正常膜における流出空気流量に影響を与えていると考えられる。ま

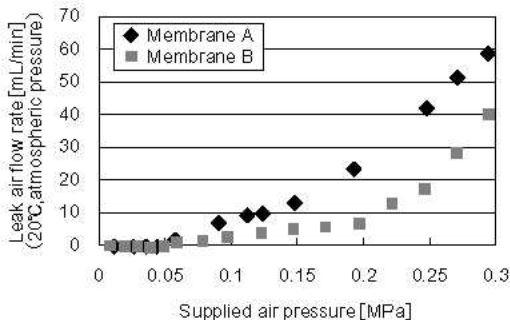


Fig.3 Leak air flow rate of non broken membrane

た, Fig.3より, 加圧空気圧力上昇に伴い流出空気流量は1次の比例関係以上の割合で増加している。孔径のパラツキが影響し, 圧力上昇に伴い孔径の小さな細孔からも流出空気が流れ出ていると考えられる。

Fig.4にA膜, Fig.5にB膜の正常膜と破損膜の加圧空気圧力と流出空気流量の関係を示す。A膜,

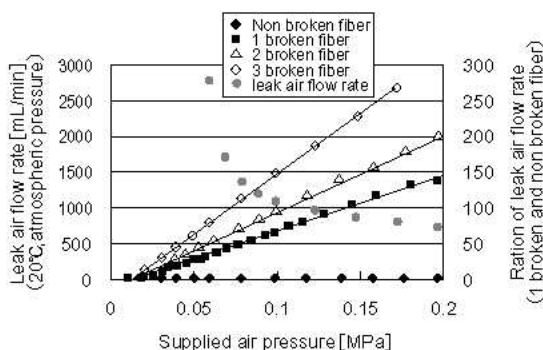


Fig.4 Leak air flow rate of damaged membrane (membrane A)

B膜共に, 破損膜では, 加圧空気圧力に比例して流出空気流量が増加している。また, モジュール内数千本中の1本の中空糸膜が破損した場合, 正常膜と比較すると過大な流出空気が流れていることがわかる。図中に流出空気流量比(= 中空糸膜1本破損時の流出空気流量 ÷ 正常膜の流出空気流量)も示しているが, 中空糸膜1本破損した場合に, A膜では70~300倍, B膜では300~900倍の流出空気流量が流れることが明らかになった。破損膜の流出空気流

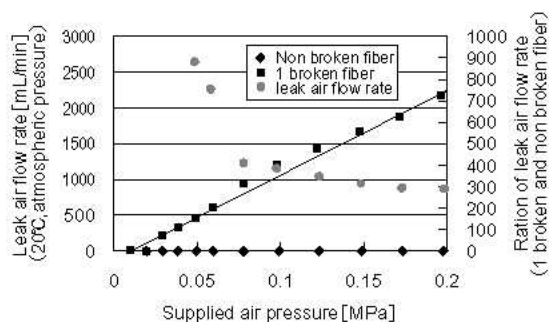


Fig.5 Leak air flow rate of damaged membrane (membrane B)

量は加圧空気圧力に1次比例しているが, 正常膜では上記のように1次比例でないため, 両者の比も加圧空気圧力により異なっている。容易に膜破損の検出が実施可能であることが明らかとなった。

4.2 濁度計による膜破損検出

Fig.6にA膜における中空糸膜破損本数と膜処理水濁度の関係を示す。中空糸膜破損本数に比例して

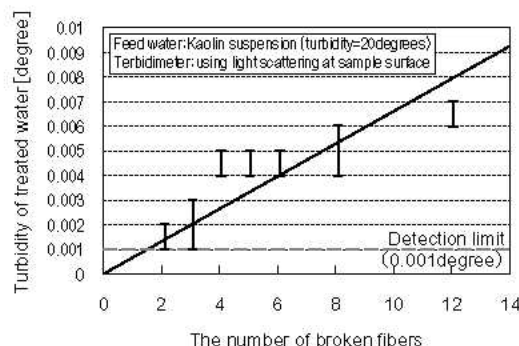


Fig.6 Treated water turbidity of damaged membrane (membrane A)

膜処理水濁度が増加している。また, 中空糸膜破損本数1本の場合は, 膜処理水濁度が0.001程度と小さいため, 膜処理水濁度から膜破損を検出することが困難であることがわかる。尚, Fig.6には濁度計検出下限以下の値も計測結果として示しているが, 参考データとして考えた。

4.3 膜破損位置の影響

Fig.7にB膜の中空糸膜破損本数1本の場合における膜処理水濁度の中空糸膜破損位置による影響を示す。加圧空気による破損検出方法の流出空気流量

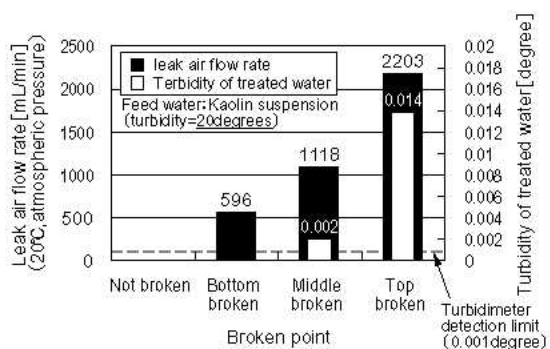


Fig.7 Effect of broken point on treated water turbidity (membrane B)

(0.06MPaにおける計測値)も合わせて示してある。破損位置が上部に近くなるに従い、膜処理水濁度が増加している。破損の位置により、膜ろ過水濁度が変化することが確認された。流出空気流量も破損位置に従い変化しており、同様の傾向を示している。

5 考察

5.1 破損検出感度の比較

膜処理設備は、通常複数の膜モジュールを並列に設置して使用する。今回実施した1モジュールを用いた実験結果から、100モジュールの場合を想定し、加圧空気による破損検出方法と濁度計による破損検出方法の感度をA膜で比較する。

まず、加圧空気による膜破損検出の感度を見積もる。100モジュール全てが正常膜の時の流出空気流量は、正常膜モジュール1本の場合 (Fig.3) の100倍と考えられる。100モジュール中の1モジュール内の中空糸膜1本が破損している場合の全体の流出空気流量は、正常膜モジュール1本の場合の99倍と中空糸膜1本破損した膜モジュールの流出空気流量 (Fig.4) の和と考えられる。Fig.8に100モジュール全てが正常膜の場合と100モジュール中1モジュール内の中空糸膜1本破損の場合の流出空気流量を示す。

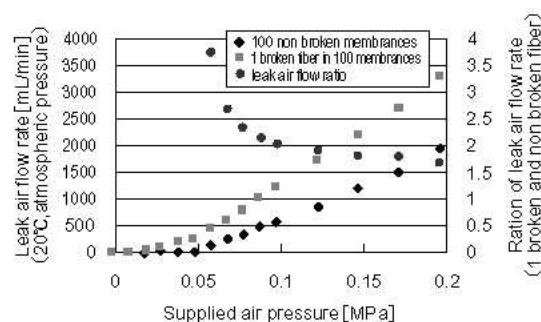


Fig.8 Detection sensitivity for 100 membrane modules

100モジュール中であっても、破損有りの場合は正常膜の場合と比べて2~4倍の流出空気流量が流れており、検出可能であると判断できる。

次に、濁度計による膜破損検出の感度を見積もる。原水の濁度及び濁質の種類により、膜破損時の流出量は異なるが、今回は原水をカオリン懸濁液20度とした場合について考察する。100モジュール中の1モジュール内の中空糸膜1本が破損している場合の膜処理水濁度は、中空糸膜1本破損した膜モジュールの濁度が他の正常膜モジュール99本で薄まる。従って、濁度は100分の1となる。Fig.6より、A膜1モジュール中の中空糸膜1本が破損している場合の膜処理水濁度は、濁度計検出限界以下であるが約0.0008度と類推されるので、その100分の1は 8×10^{-6} 度となる。濁度計の検出限界0.001度以上になるのは、中空糸膜が125本以上破損している場合である。

以上より、上記の条件のもとで、加圧空気による膜破損検出の感度は、濁度計による膜破損検出と比べて125倍ということになる。また、濁度計による方法においては、原水濁度を20度として検討したが、実機場では原水濁度が2度前後と非常にきれいなどところも多く、その場合は更に破損が進行しないと検出できないことになる。

5.2 破損時流出空気流量の予測

Fig.9に破損検出の様子を示す。供給された加圧空気は、中空糸膜内側を通り破損箇所から膜外へ流れ、上部のドレンからモジュール外へ排出される。中空

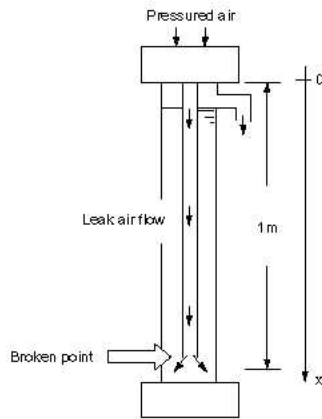


Fig.9 Schematic diagram of leak air flow from broken fiber

糸膜を円管と考え、中空糸膜が破損した場合の流出空気流量を、円管内を粘性流体が層流域で流れる時の圧力損失と平均流速の関係式、Hagen-Poiseuilleの式((3)式)を用いて計算した。

$$\Delta P = \frac{32\bar{u}x\mu}{gD^2} \quad (3)$$

(ΔP : 圧力損失, \bar{u} : 平均流速, x : 円管長, μ : 粘性係数, g : 重力加速度, D : 円管内径) 粘性係数 μ は、今回の圧力範囲ではほとんど変化しないため、一定とした。 \bar{u}_0 を 20°C, 大気圧 ($P_{\text{大気圧}}$) での平均流速とすると、(3)式は圧力 P が x の関数であることから、

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{32\bar{u}_0\mu P_{\text{大気圧}}}{gD^2} \times \frac{1}{P} \quad (4)$$

で表せる。境界条件として、 $x=0$ で $P=P(0)$ (加圧空気圧力), $x=L$ で $P=P(L)$ (水深による圧力) を考え (L は破損した中空糸膜の長さ), (4)式を解くと、

$$P(0) = \sqrt{\frac{64\bar{u}_0\mu L P_{\text{大気圧}}}{gD^2} + \{P(L)\}^2} \quad (5)$$

となる。

Fig.10, Fig.11 に A 膜, B 膜における流出空気流量の計算値と実験値との比較を示す。図中の実験値は、流出空気流量を破損本数で除すことで中空糸膜 1 本当りの平均値としてプロットした。計算結果が実験値とほぼ一致していることがわかる。

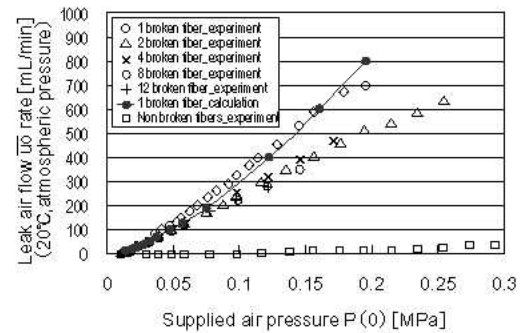


Fig.10 Calculation of leak air flow rate (membrane A)

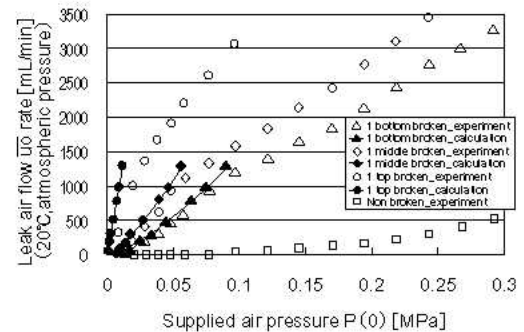


Fig.11 Calculation of leak air flow rate (membrane B)

5.3 実用化検討

本方法による膜破損検出は、加圧空気を膜へ供給するため、ろ過の運転が止まったときに実施することになる。通常、浄水処理における膜処理の運転方法は、ろ過 → 逆洗 → ろ過 → … のようにろ過と逆洗を繰り返しており、運転の切り替わり時に本方法による膜破損検出を割り込ませる。現在は、逆洗終了時に実施することを考えている。検出の頻度は、膜破損の頻度やリスク管理、そして収率から決定すべきであり、現状では 1 日に 1, 2 回が妥当な頻度だと思われる。

6 まとめ

加圧空気を供給し流出空気流量から膜破損を検出する方法と、濁度計を使用し膜処理水濁度から破損

検出する方法について実験的及び理論的検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 数千本の中空糸膜を有する膜モジュールにおいて、中空糸膜1本が破損した場合、流出空気流量が70~900倍となり、加圧空気を用いた方法で確実に検出できることを実験で確認した。
- (2) 実験結果から見積もった結果では、A膜100モジュール中、即ち40万本の中空糸膜のうち中空糸膜1本が破損した場合、加圧空気を用いた方法で破損を検出することができる。一方、濁度計を用いた方法では、中空糸膜125本以上破損で検出が可能となる。
- (3) 破損膜では、破損位置により原水中濁質の漏れ量が異なる。上部より膜処理水を得る縦置き型の膜モジュールの場合、破損位置が下部になるに従い漏れ量は少なくなる。加圧空気を用いた破損検出方法でも流出空気流量は同様の傾向を

示し、その流量は破損位置がわかれば計算により求めることができる。

以上のように、加圧空気による膜破損検出方法が非常に高感度であることが実験により証明でき、理論的な裏付けも得られた。今後は実システム構築を目指し開発していきたい。

参考文献

- 1) 永井康敏：膜ろ過施設の導入状況について、第11回水道技術セミナーテキスト「今世紀の水道を考えて」、水道技術研究センター、48(2001)
- 2) 日本規格協会：精密ろ過膜エレメント及びモジュールのバブルポイント試験方法、JIS規格票、JIS K 3832(1990)
- 3) 木村尚史、中尾真一：分離の技術—膜分離を中心として：大日本図書、111(1997)

(受付 2001. 2. 7)

(受理 2002. 3. 6)