"FM モジュール"の膜分離活性汚泥法への適用

Application of "FM Module" to Membrane Bioreactor System





(技)研究開発部第5研究室 野中信 Shinichi Nonaka (プ)カスタマーサービス部 松田 躯 Tsutomu Matsuda

膜分離活性汚泥法において、膜分離装置で高 Flux をえるためには膜透過性に優れた汚泥性状を維持することが重要と考えられる。そこで高 Flux を維持するための曝気槽運転方法を検討した。 曝気槽に蓄積する生物代謝産物(SMP:Soluble Microbial Products)に着目してベンチ試験で調査した結果、SMP が高いほど Flux は低くなることが示唆された。さらに FM モジュールをもちいたパイロット実験において曝気槽の SRT を適正に管理することにより SMP を一定の範囲に維持することができ、その結果より高い Flux において安定した膜間差圧を維持して運転できることが確認できた。また FM モジュールは浸漬方式にくらべて2.5倍程度の高 Flux がえられることがわかった。

Maintaining high permeability of activated sludge is important to get high flux with a membrane bioreactor operation. Contributing factors to obtaining excellent permeability were investigated by using bench scale equipment. The bench test suggested that flux lowered with the increasing soluble microbial products (SMP) accumulated in bioreactor. The pilot experiment using FM module proved that SMP could be maintained in the fixed range by controlling the SRT of bioreactor, and verified that the low transmembrane pressure was also stably maintained in higher flux condition with the activated sludge of low SMP. Furthermore, it turned out that the FM module could obtain 2.5 times as high flux as the submerged membrane system.

Key Words:

膜	5	}	离隹	
膜分	離活	性汚れ	尼法	
平.			膜	
S	M		P	
逆	圧	洗	浄	

Membrane separation
Membrane bioreactor system
Flat sheet membrane
Soluble microbial products
Back pressure cleaning

まえがき

膜分離活性汚泥法は従来の活性汚泥法における固 液分離などの運転管理上の煩わしさの解消,設置面 積の低減,処理水質の向上を目的として開発されて きた。膜分離活性汚泥法は工場排水処理や浄化槽の 分野で着実に実績を伸ばしており,また近年では小 規模下水道分野での採用が決まるなど、適用拡大が期待される技術である。当社はROCHEM-UF System 社と独占販売契約を締結し、クロスフロー型の膜分離装置 "FM モジュール"の販売を開始した。1)FM モジュールは平膜でありながら逆圧洗浄が可能、また自動薬品洗浄ができるなどの優れた特

長を有している。しかし従来法とくらべるとコスト 面でやや高く,処理能力アップ,建設費削減など総 合的なコスト低減を目指した改良・改善が必要であ る。

前報²⁾では,膜分離活性汚泥法でもちいられる膜 モジュールの方式や設置方法などを概説するととも にFM モジュールをもちいた膜分離活性汚泥法の実 証実験結果を紹介した。本報では膜分離性能を高め ることを目的として実施した,汚泥の性状面に着目 した曝気槽運転管理手法に関する調査検討結果を中 心に,浸漬膜方式との性能比較結果もあわせて報告 する。

1. FM モジュールをもちいた膜分離活性 汚泥法

1.1 FM モジュール概要

FM モジュールは膜モジュールを曝気槽外に設置するクロスフロー方式に分類される。FMモジュールをもちいた膜分離活性汚泥法では、排水と汚泥を含んだ活性汚泥混合液を循環ポンプで曝気槽から膜

モジュールに加圧供給することでろ過処理水がえられる。FMモジュールの構造、特長およびFMモジュールをもちいた膜分離活性汚泥法の処理性能²⁾などを図1にまとめた。

1.2 FM モジュールの課題

膜分離活性汚泥法でもちいられる膜分離装置にはクロスフロー方式のほかに浸漬方式があるが、現在主流となっているのは浸漬方式である。浸漬方式が採用されている理由の一つは動力コストが安いことである。浸漬方式では曝気空気を利用してファウリングを防止するが、クロスフロー方式ではポンプで一定の液流速を与えて防止する。両者を比較するとポンプ動力のほうが大きくなる。FM モジュールは従来のクロスフロー方式より小さい流速で処理できるよう開発されたものであるが、さらに動力コストを削減するための工夫が必要である。一方で、浸漬方式は難ろ過性汚泥への適用が困難で、また、薬品洗浄をおこなう際に膜モジュールを槽外に取り出さなければならないといった問題がある。この槽外薬

Basis	Type Licenser	Flat Membrane ROCHEM-UF SYST	TEM INC. (Germany)	
Composition		Permente Drain	Pressure Vessel Semi Cartridge Rubber Strip Peed Membrane Permeste Spacer Support Plate Permeste	
Characteristics	 Mambrane type can be selected according to use. The interval of membranes can be adjusted according to turbidity of the influent. Back pressure cleaning is possible. Chemical cleaning can be performed automatically. 			
	Aeration Tank		FM Module	
Experimental Performance	Inf. BOD Inf. SS BOD Loadi BOD Removal	1 070 mg/L	MLSS 10-15 000 m Viscosity 150-400 ml Flux 0.6 Transmembrane Pressure 0.1-0.2 M	Pa•s m/d

図 1 FM モジュール技術概要 Fig. 1 Summary of FM module

品洗浄には多大な手間と労力を要する。FM モジュールは薬品洗浄をワンボタンもしくは全自動でおこなうことができ、浸漬方式が不得意としていた難ろ過性汚泥など、新規分野の開拓が期待できる。システム全体のコスト縮減を図り、より競争力を持った商品に育てるために様々な課題解決に取組んでいるところである。

2. 膜分離に対する汚泥性状の影響

処理設備の膜面積は運転費および建設費に大きく 影響し、コストを縮減するには Flux を高めて膜面 積を削減しなければならない。Flux は汚泥の性状、 すなわち粘度や粒径などのろ過性に関する性状に影 響される。このことは膜分離のろ過抵抗式からも推 窓できる。

$$Jv = \Delta P/\mu (Rm + Rp + Rg + Rc) \cdots (1)$$

Jv : Flux (膜透過流束) [m/d] ΔP : 操作 圧 力 [Pa] μ : 液の 粘 度 $[Pa \cdot s]$ Rm : 膜 抵 抗 [1/m] Rp : 目詰まり抵抗 [1/m] Rg : ゲル 層 抵 抗 [1/m] Rc : ケーキ 層 抵 抗 [1/m]

(1) 式における各々の因子は、 ΔP と Rm が膜装置に、 μ と Rp が汚泥性状に関わり、Rg と Rc が両方に関わるものである。汚泥性状は排水の成分と曝気槽運転条件に左右される。曝気槽の運転条件を最適化することにより μ , Rp および Rg を小さくし、かつFMモジュールの洗浄方法を工夫することにより Rp, Rg および Rc を小さくすることが高Fluxをえることに結びつくと考えられる。

汚泥性状を表す指標には粘度,粒子径などがあるが,生物代謝産物 SMP (Soluble Microbial products) もその一つである。桃井らは SMP の蓄積特性および膜透過に対する影響について研究し,次のように報告している。3)

① SMP は a) 中間代謝成分, b) 最終代謝成分 (a の分解生成物), c) 微生物の内生呼吸由

- 来代謝成分の3種類に分類される。
- ② SMP 濃度は曝気槽運転時間経過とともに増加し、成分 (a~c) 構成比も時間とともに変化する。
- ③ SMP はゲル層、ケーキ層形成に大きく関与 し、SMP 増加にともない膜 Flux は減少する。

膜分離活性汚泥法で高 Flux をえるには膜透過性に優れた汚泥を安定的に維持することが重要であり、そのためには SMP の挙動、 SMP 蓄積に対する影響因子を把握し、 SMP を制御する曝気槽運転方法の確立が必要と考えられる。

ベンチ試験による SMP に関する基礎調査

SMP の挙動, SMP 蓄積に対する影響因子を把握することを目的としてベンチ試験をおこなった。

3.1 試験装置

試験装置は下記に示すように、曝気槽には有効容積5Lの円筒形槽を使用し、膜分離装置には日東電工(株)製のC10-T型薄層流式平膜テストセルを使用した。

曝 気 槽

寸 法: 内径150 mm×高さ360 mm 反応容積: 範囲3~5L (常用4L)

膜分離装置

形 式: 薄層流式平膜テストセル C10-T型 膜 種 類: UF 膜, 分画分子量50 000

3. 2 試験方法

1) 試験原水

試験にはグルコースと酢酸ナトリウムを BOD 源 とする合成排水を使用した。合成排水の BOD 濃度は試験条件によって $1\,200\sim7\,200\,\mathrm{mg/L}$ の範囲で変化させた。また合成排水には,BOD:N:P=200:5:1の割合で窒素とリンを添加した。

2) 曝気槽運転条件

試験条件を表1に示す。試験は膜透過水量が制限 されるため、原水供給量を固定し、BOD 負荷、原 水 BOD 濃度および MLSS 濃度を変化させ4条件に 設定しておこなった。

表 1 ベンチ試験条件 Table1 Condition of bench test

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Flow Rate	[L/d]	2.0	2.0	2.0	2.0
Influent BOD	[mg/L]	1 200	2 800	5 600	7 200
BOD-SS Loading Rate	[kg/(kg•d)]	0.1	0.2	0.4	0.4
MLSS in Aeration Tank	[mg/L]	6 000	7 000	7 000	9 000
Frequency of Sludge Discharge	[times/d]	1	1	1	1

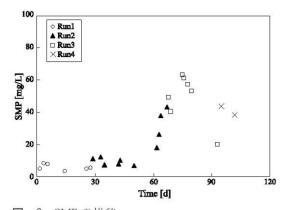


図 2 SMPの推移 Fig. 2 Change of SMP

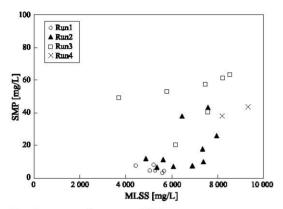


図 3 MLSSとSMPの関係

Fig. 3 Relationship between MLSS and SMP

3) 装置運転方法

試験にもちいた膜分離装置は流量,圧力を制御していないため,時間とともに透過水量が変動し,曝気槽水位が変化する。このため,原水供給時間の調整や膜透過水を曝気槽に返送することでMLSS 濃度,BOD負荷およびSRTを一定に維持した。膜の洗浄は1日に1回,装置を解体しておこなった。

3.3 試験結果

試験期間のSMPの推移を図2に示す。ここでSMPは下記方法で求めた。

$$SMP = (TOC_{MF} - TOC_{UF}) \cdot \cdots \cdot (2)$$

TOC_{MF}: 曝気槽混合液の遠心分離上澄液の

0.45 μm フィルターろ液の

TOC [mg/L]

TOC_{UF}: 膜透過水の TOC [mg/L]

SMP は Run2の途中から上昇し Run3で最大値に達した。しかし、その後上昇することはなかった。

曝気槽運転操作因子のMLSS 濃度,BOD 負荷および SRT と SMP の関係を図3~5に示す。SMP は3因子の中では SRT との間により高い相関が認

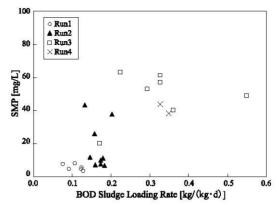


図 4 BOD-SS 負荷と SMP の関係

Fig. 4 Relationship between BOD sludge loading rate and SMP

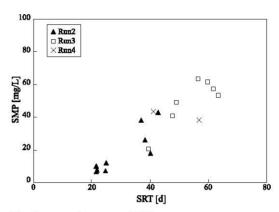


図 5 SRT と SMP の関係

Fig. 5 Relationship between SRT and SMP

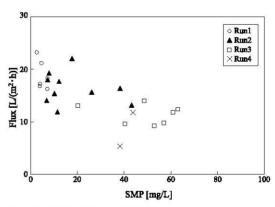


図 6 SMPとFluxの関係

Fig. 6 Effect of SMP on Flux of membrane

められた。連続運転における日平均 Flux 値をもちいて、SMP と Flux の相関を求めたところ、図6に示すように SMP が小さいほど Flux は大きくなる傾向があった。

4. パイロット実証実験

ベンチ試験にて SMP が膜透過性に影響をおよぼ すことが確認され、 SRT を適正に管理することに より SMP 濃度を一定範囲に制御できる可能性が示 唆された。 高 Flux をえるための曝気槽運転管理方法確立を 目的として、実排水によるパイロット実証実験をお こなった。実証実験ではゲル層抵抗、ケーキ層抵抗 を増大させることなく、安定した Flux をえるため の膜洗浄方法の検討を併せておこなった。

4.1 実験装置

実験装置の仕様を表2に示す。曝気槽は有効容積が2m³の円筒形槽である。FMモジュールは膜総面積が17.4 m²で、モジュール3本を直列に配して使用した。膜にはベンチ試験と同様の分画分子量

表 2 実験装置仕様 Table2 Specification of pilot test equipment

	Item	Specification
Aeration Tank	Size Capacity	$\phi 800 \text{ mm} \times 4 000 \text{ mm}^{\text{WD}} $ 2 m ³
Membrane	Membrane Type Material MWCO*	UF Polyacrylonitrile 50 000
Module	Quantity of Module Arrangement Total Membrane Area	Series

*MWCO: Molecular Weight Cut off

表 3 パイロット実験条件 Table3 Condition of pilot test 50 000の UF 膜を使用した。実験フローを図7に示す。曝気槽と FM モジュールの間に中間槽を設け、中間槽の水位検知により曝気槽への原水供給をON-OFF 制御した。原水流量を透過水量より大きく設定することで、FM モジュールの24時間連続的運転を図った。

4.2 実験方法

1) 実験原水, 種汚泥

A工場のリンス系排水を実験原水とした。原水の主成分は製品洗浄用の有機溶剤であり、固形物はほとんど含まれておらず SS 濃度は10 mg/L 以下である。曝気槽への原水供給量は膜透過水量が制限要因となるため、所定の TOC 負荷を与えるために排水の主成分となる薬品を添加して実験に供した。曝気槽の種汚泥には工場内の浄化槽の返送汚泥を使用した。

2) 実験条件

実験はリンス排水の主成分に対する汚泥の馴養, 曝気槽の適正 TOC 負荷の確認および FM モジュールの洗浄方法の確認などを終えた後におこなった。 実験条件を表3に示す。実験は曝気槽 SRT を44~ 67日とした Run1および SRT を30日とした Run2の

	Item		Run 1	Run 2
Aeration Tank	TOC-SS Loading Rate MLSS SRT Frequency of Sludge Discharge	[kg/(kg•d)] [mg/L] [d] [times/d]	0.05 8 000~10 000 44~67 4	0.05 6 500 30 6
FM Module	Flux Cross Flow Velocity Frequency of Back Pressure Cleaning Frequency of Chemical Cleaning	[m/d] [m/sec] [times/d] [times/month]	0.35~0.5 0.8 12~24 1	$0.35 \sim 0.4$ 0.8 24 1

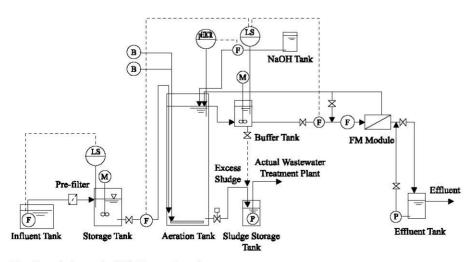


図 7 パイロット実験フローシート Fig. 7 Flow diagram of pilot test

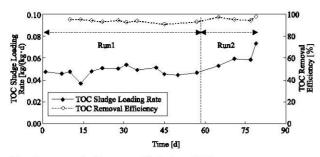


図 8 TOC 負荷, TOC 除去率の推移

Fig. 8 Change of TOC sludge loading rate and TOC removal efficiency

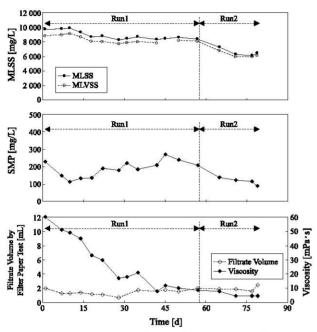


図 9 MLSS, SMP, 粘度およびろ紙ろ過性の推移 Fig. 9 Change of MLSS, SMP, viscocity and filtrate volume by filter paper test

2条件でおこない、SRT による SMP 制御の検討および SMP の FM モジュール Flux への影響を調査した。 曝気槽の TOC-SS 負荷は $0.05 \text{ kg/(kg} \cdot \text{d)}$ に固定した。

3) FM モジュール運転方法

FM モジュールの運転は定流量ろ過方式を採用し、クロスフロー流速を約0.8 m/sec とした。ろ過時間の経過にともない膜間差圧が上昇するが、定期的な逆圧洗浄と薬品洗浄により膜面付着物を排除して差圧回復を図った。逆圧洗浄は膜の処理水側から水もしくは空気を送り、ファウリング物質を除去する方法である。今回は膜処理水をもちいて1~2hに1回の頻度で逆圧洗浄をおこなった。薬品洗浄は曝気槽混合液の代わりに次亜塩素酸ナトリウムを500 mg/L 濃度に調整した膜処理水を膜モジュールに供

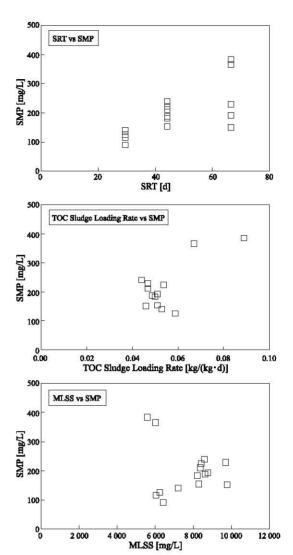


図 10 曝気槽操作因子と SMP の関係

Fig. 10 Dependence of operating factors of aeration tank on SMP

給してポンプ循環と静置浸漬を繰返す方法とし、1 回/1~1.5カ月の頻度でおこなった。

4.3 実験結果

1) 曝気槽処理水質

TOC-SS 負荷および TOC 除去率の推移を図8に示す。TOC-SS 負荷約0.05 kg/(kg•d)においておおむね95 %以上の TOC 除去率がえられた。

2) 汚泥性状

曝気槽汚泥の MLSS 濃度、SMP、ろ紙ろ過性および粘度の推移を図9に示す。 MLSS 濃度は SRT によって変化し、Run1で8 300~9 800 mg/L、Run2で6 100~7 200 mg/L であった。 SMP は Run1では時間経過とともに上昇する傾向にあったが、Run2で SRT を下げると SMP は約 1/2 に低下した。

ろ紙ろ過性は一定条件の下,汚泥を5分間ろ過してえられるろ液量を表し,浸漬方式膜分離装置の適

用可否判断にもちいられる指標である。通常, ろ紙 ろ過性は10 mL 以上が望ましいとされている。実験 汚泥のろ紙ろ過性はおおむね 2 mL 以下であり, 膜 分離活性汚泥法の適用は困難と判断される汚泥であった。粘度については45日目までは60から10 mPa・s へと時間経過とともに低下した。この期間の粘度低下は原水成分に呼応した菌相およびフロック状態の変化によると推定される。一般に粘度は MLSS 濃度に比例するが, 実験汚泥はその相関がみられず, 特異な汚泥ということができる。

3) SMP 影響因子および SMP の制御

曝気槽運転操作因子と SMP の相関関係を求めた。 その結果を図10に示す。 SMP はベンチ試験の結果 と同様に SRT との間により高い相関関係が認めら れた。ろ紙ろ過性についても調べたが、図11に示す ように SRT との間に相関関係が認められた。

4) SMP の膜透過性に対する影響

SMP と膜透過性能の関係を調べるため、SMP の 異なる汚泥について回分ろ過試験をおこなった。回 分ろ過試験は回転子で攪拌しながら窒素ガスで一定 の圧力を加える方法とし、パイロット実験で使用し た膜と同じ UF 膜をもちいて操作圧力を0.2 Mpa と しておこなった。膜透過性能は、ろ過時間15分後の 膜透過流束 Flux₁₅ をもちいて評価した。

SMP と Flux₁₅ の関係を図12に示す。SMP70~180 mg/L の範囲では SMP が小さいほど、Flux₁₅ は大きくなった。以上の結果より、SRT を適切に制御し SMP を一定の範囲に維持することで、高い膜透過性能がえられることが確認できた。

5) FM モジュールの膜透過性能

クロスフロー流速をおおむね0.8 m/sec として運転したときの膜間差圧および Flux の推移を図13に示す。実験開始から500 h までは膜間差圧は0.2 Mpa以下で安定した(区間 A)が、500~1 100 h の間は膜間差圧が短時間で上昇し、かつ変動が大きかった(区間 B)。1 100 h 以降は膜間差圧が安定する傾向にあった。

1500 h 経過時点で薬品洗浄を実施した。洗浄効果により膜間差圧は0.1 Mpa に低下した。この後、Flux を高めて運転したが、膜間差圧が一時的に上昇したものの1850 h まで安定して推移した(区間C)。区間 A~C における SMP の推移をみると、区間 A は SMP が150 mg/L 以下の期間、区間 B は SMP が180 mg/L から270 mg/L に上昇する期間、そして区間 C は SMP が200 mg/L から100 mg/L に低下する期間である。このことからも、SMP が膜処

理性能に影響することが伺える。なお FM モジュールではクロスフロー流速を高めればさらに高い Flux をえることができる。短時間の運転データではあるが流速 1 m/sec にて Flux 0.6 m/d がえられて

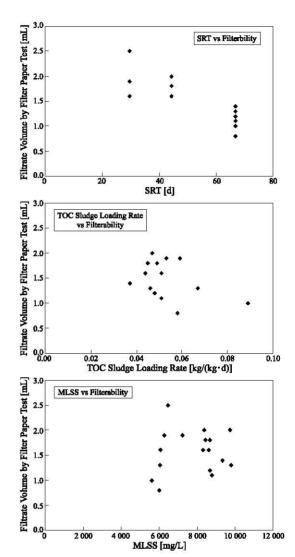


図 11 曝気槽操作因子とろ紙ろ過性の関係

Fig. 11 Dependence of operating factors of aeration tank on filterability

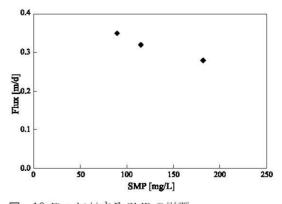


図 12 Flux に対する SMP の影響 Fig. 12 Effect of SMP on Flux of FM module

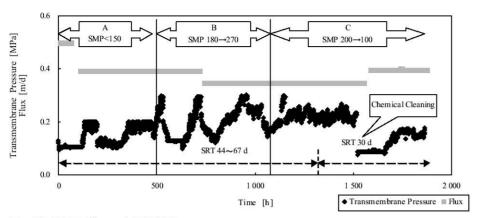


図 13 FM モジュール運転結果

Fig. 13 Timecourse of transmembrane pressure and flux

いる。本実験により FM モジュールは、浸漬方式を 適用できないような非常にろ過性の悪い汚泥でも安 定運転が可能であることが確認できた。

5. 浸漬方式の膜透過性能

総膜面積 2 m² の平膜をもちいた小型の浸漬方式膜分離活性汚泥処理試験装置により FM モジュールとの膜分離性能比較をおこなった。試験は同一汚泥をもちいておこない、パイロットテスト機の曝気槽から汚泥を連続的に導入・返送する方法とした。また、ろ過方法は間欠吸引方式とし、13分吸引、2分停止とした。Flux 0.25 m/d で運転した場合、膜間差圧は時間経過とともに上昇し30 kPa に達した。実験終了時点の Flux 0.1 m/d における膜間差圧は30 kPa であったが、さらに上昇する傾向にあった。以上の結果より浸漬方式の標準的な基準とされる30 kPa 以下の膜間差圧で運転できる Flux は0.15 m/d 以下であると推察された。

むすび

FM モジュールをもちいた膜分離活性汚泥法にお

いて、膜透過性に優れた汚泥をえるための曝気槽運転方法を検討した。曝気槽に蓄積する SMP に着目してベンチ試験をおこなった結果、SMP が高いほど Flux は低くなることが示唆された。FM モジュールをもちいたパイロット実験では、曝気槽 SRT 管理により SMP を高濃度に蓄積させることなく一定の範囲に維持できることがわかった。また SRT 管理が高 Flux 化および膜間差圧安定化に効果があることを確認できた。さらに、FM モジュールは難ろ 過性の汚泥に適用が可能なこと、浸漬方式にくらべて2.5倍程度の Flux がえられることがわかった。

[参考文献]

- 1) 島田光重ほか:神鋼パンテツク技報, Vol.45 No.2 (2001), p.46
- 2) 松田勉ほか:神鋼パンテツク技報, Vol.46 No.1 (2002), p.18
- 3) 桃井青至ほか:用水と廃水(限外ろ過膜の膜透過流 束に及ぼす生物代謝産物の影響), Vol.41 No.4 (1999), p.23-26

連絡先

野中信一 技術開発本部

研究開発部 第5研究室 主任研究員

TEL 078 - 992 - 6525 FAX 078 - 992 - 6504

E-mail s.nonaka@pantec.co.jp