<論文>

電気分解を利用した糖蜜廃液の脱色処理 —電極材料の影響と実用化の検討—

長野晃弘* 鈴木昌治**

Decolorization Treatment by Electrolysis of Molasses Wastewater -Effects of Materials of Electrodes on Decolorization Efficiency and Pilot Scale Experiment for Practical Use-

Akihiro NAGANO* and Masaharu SUZUKI**

* Technical Research Laboratories, Sanki Engineering Co., Ltd., 1742-7, Shimotsuruma, Yamato, Kanagawa 242-0001 Japan

** Department of Brewing and Fermentation, Tokyo University of Agriculture, 1-1-1, Sakuragaoka, Setagaya, Tokyo 156-8502, Japan

Abstract

In the decolorization treatment of molasses wastewater by electrolysis, the effect of anode material on the decolorization efficiency (η) was studied. Five sorts of anode material, which are PdO, PbO₂, IrO₂, Pt and graphite, were certified under the electrolysis condition of wastewater from an alcohol distillery with 5% NaCl. PdO was the most effective anode. η with PdO was 750 U·l·kC⁻¹ three times larger than η with Pt, and η with graphite was 470 U·l·kC⁻¹. In order to study for practical use, the pilot scale electrolysis reactor was made with a graphite anode and a stainless steel cathode. When methane fermentation was used for pre-treatment and the treated water diluted with sea water, η was obtained the highest value. The energy balance of the glutamate wastewater treatment system which was combined a methane fermentation, electrolysis decolorization and co-generation was estimated. The recovery electric energy from co-generation was calculated as 75% of the required electric energy for electrolysis decolorization.

Key Words : electrolysis decolorization, molasses wastewater, electrode, methane fermentation

1. はじめに

糖蜜廃液は、生物難分解性の有機性の色素を含むためにメタン発酵処理¹⁾や活性汚泥処理等の生物処理²⁾によってBODやSSは十分に除去しても高度に着色しており河川や近海に放流することは難しい³⁾。そのために活性炭吸着法⁴⁾や凝集法⁵⁾などが検討されてきたが、二次廃棄物として汚泥が大量に発生する問題があった。二次廃棄物を生成しない脱色方法としてオゾン等による酸化脱色⁶⁾が提案されている。

そのひとつとして電気分解による脱色方法をいくつかの糖蜜廃液に適用し、電気分解による脱色は糖蜜廃液に対し総じて有効であり特に塩素イオンの添加が有効で脱色効率が塩素イオン濃度の0.5乗に比例して増加することを示した⁷⁾。また、糖蜜中に含まれるメラノイジン、カラメル、ポリフェノールの色素について電解脱色が有効であること、塩素を含まない電解質を用いた場合でも脱色が可能であること、アノードにおいて脱色反応が起こることも併せて示し、酸化反応が脱色反応の根幹をなすことを確認

した⁸⁾。さらに酸素発生量を定量することで酸素発生は有機物の酸化反応の効率を落とすことが明らかになった。

これまでの研究^{7,8)}では糖蜜廃液の脱色特性を調べるために不活性の電極として一般に電気分解実験に用いられる白金を用いてきた。一方、実際のソーダ工業では塩化ナトリウム水溶液を電気分解して工業用の原料を生産するために、塩素発生効率の高い電極が開発され、広く利用されている⁹⁾。そこで、電気分解による脱色効率をさらに高めて実用化を図るために、電極素材の影響について評価を行う。電極素材として塩化ナトリウムの電気分解において塩素発生効率が高いと報告されている白金族の酸化物をチタンの表面に焼結した電極^{10,11)}と染色廃液の電解脱色で検討されているカーボングラファイト製の電極^{12,13)}を選定した。これらの電極素材で製作した電極を用いて、糖蜜廃液の脱色効率に対する影響について実験的に検討を行い、塩素イオンが高濃度に存在する状況下においては、酸化パラジウムをコーティングした電極が最も脱色効率がよく、ついでカーボングラファイトが有効であることがわかった。

* 三機工業株式会社開発本部 〒242-0001 神奈川県大和市下鶴間 1742-7

** 東京農業大学醸造科学科 〒156-8502 東京都世田谷区桜ヶ丘 1-1-1

実際の廃液処理においては、生物分解性の有機物の除去も併せてシステム化する必要がある。そこで、メタン発酵処理の脱色特性をカーボングラファイト電極を装着したパイロットスケールの電解槽を用いて調べた。電解脱色するには電解質として塩化ナトリウムを添加することが好ましいが、処理コストが増加する。本報では塩化ナトリウムの代替物として海水を用いて希釈し脱色する方法について検討した。

2. 実験方法

2.1 電極特性用実験装置

陰極・陽極のそれぞれの電極から発生するガス量を測定できるように電極上部に 20ml 容のビュレットを装着したガラス容器を作成し電解脱色実験を行った。装置の概要図を Fig.1 に示す。電極間距離は直線距離で 10cm であるが、発生したガスがビュレットにうまく捕集できるようにビュレット下部に T 字溶接したガラス管から差込むようにした。対象液 500ml をガラス容器内に投入し、リザーバを調節してビュレット内のガスを追い出した状態から直流電源で電圧を 15V に固定して通電してビュレットの目盛りでガス発生量を定量する。通電中は、マグネットスターを回転させ反応器内の液を攪拌する。ビュレット内にガスが溜まると通電を停止し、ガスをシリンジでサンプリングして組成を分析する。そのときリザーバ内の液を反応器内の液と慎重に混合し混合液をサンプリングポートから採取した。採取した液は pH, 色度を測定した。

電極は、酸素過電圧が高く塩素過電圧の低い素材を用いると、酸素発生量を減少させ、塩素イオンを効率よく酸化することが可能となる。そこで、塩素発生時の電圧が低いと思われる PbO_2 , IrO_2 , PdO , Pt に加え、graphite の電極を作成した。酸化物の電極は、Ti の表面を粗面加工しその表面に焼結する方法で作成する。そこで、電極の形状を等しくするために、直径 5mm 長さ 100mm の丸棒の先端部 50mm に酸化物を焼結させる形状とした（昭和鉛鉄製）。また、同様の構造とするため、Pt は、先端 50mm に Pt を巻き付けた。カーボングラファイトは、直径 5mm の丸棒を用いた。電極は、シリコン製のゴム栓に接液部が 20mm になるようにセットし、反応器に装着した。電極の表面積は、 3.34cm^2 と計算された。

2.2 パイロットスケール電解槽

メタン発酵処理等を組み合わせた実用段階の検討を行うために波多野ら¹³⁾が染色廃液の脱色に使用したものを参考にしパイロットスケール用電解槽を製作した。電解槽の外形図を Fig.2 に示す。電極の材質は、陽極をカーボングラファイトに、陰極を SUS316 のステンレス鋼にした。それぞれの電極を 5 枚ずつ交互に装着した。電源として直流電源発生器（KIKUSUI PAK10-100）を用いた。

この装置に処理対象液を 5l 投入して電極に 2.8V の一定電圧を印加して脱色実験を行った。電気分解で発生するガスにより著しく発泡するため、消泡剤として antifoamSI（和光純薬）を数 ml 添加した。5l 投入時の電極面積は両面で 2250cm^2 である。

2.3 対象液

実験に用いた 2 種類の廃液の分析値を Table1 に示す。糖蜜を原料とするアルコール蒸留廃液(ALC)を 600 倍に希釈し、色度をおよそ 1,000 に調整して実験に供した。電極の特性を調べる実験の電解質の添加量は、NaCl の添加の場合には NaCl として $50,000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ とした。

Fig. 1 Experimental Apparatus of Electrolysis using burettes for gas sampling

Fig. 2 Pilot scale electrolysis reactor

Table 1 Characteristics of Molasses Wastewater

	ALC	GLT
COD _{cr} ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	600,000	310,000
Color (U)	670,000	220,000
PH	5.2	4.0
BOD ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	200,000	140,000
Total Nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	13,000	31,000
Total Phosphate ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	880	260
Total Solids ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	560,000	400,000
Volatile Solids ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	400,000	320,000
SO_4^{2-} ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	15,000	7,600
K ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	34,000	16,000
Na ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	1,000	8,800
Ca ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	5,100	6,200
Cl^- ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	30,000	69,000
Fe ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)	480.0	99.0

ALC : Wastewater from molasses alcohol distillery

GLT : Wastewater from glutamate mill

メタン発酵処理の影響を調べる実験では、グルタミン酸工場の廃液(GLT)を 40 倍に希釈して容積 8 l の実験用 UASB に食品工場の UASB プラントのグラニュール汚泥を 4 l 投入しメタン発酵処理を行った。この処理液を海水または水道水で適宜希釈し電解脱色に供した。

2.4 分析方法

通電時間 t 、廃液量 V 、電流値 I 、pH、色度 C 、CODer 濃度 O を測定した。色度は、下水試験方法¹⁴⁾に従った。下水試験方法では、対象が下水であることから分光光度計の波長は 380~420nm としているが、糖蜜色素を扱った脱色試験で一般に用いられている 475nm の波長を採用した。色度 1,000U の色度標準液(和光純薬社製)を用いて検量線を作成した。色度の高い試料については吸光度で 0.2 以下になるように希釈して測定した。色度の単位は、Standard Methods for Water and Wastewater¹⁵⁾に従い Unit を用い略して U で表記する。CODer 濃度は HACH 社製の吸光光度計による簡易測定法¹⁶⁾にて測定した。ガスの発生速度はビュレットに定量のガスが捕集されるまでの時間から求めた。捕集したガスをビュレット上部からガスタイトシリンジで注意深く取り出し、TCD 検出器付きのガスクロマトグラフィ(Shimadzu, GC14A)で水素、酸素、二酸化炭素の濃度を測定した。カラムは、ユニビーズC、カラム温度は 160℃とした。その他の分析は JIS-K0102 に従った。

2.5 ガス発生量に使われた電気量と酸素発生率

ガス発生と有機物酸化は以下の方法で電気量に表した。各成分の標準ガスによる一点検量線法で Factor を計算し、それにガスクロマトグラフィで求めた各ガスの Area を乗ずることでガス濃度を求めた。ここで、実験での発生ガス量を乗ずると 1atm、室温 20℃当たりの各ガス量 V_g が計算できる。そして標準状態(0℃)でのガス量 V_s を求めるため 273/293 を乗じた。

$$V_s = \text{Factor} \times \text{Area} \times V_g \times 273/293$$

V_s : 標準状態のガス容積

V_g : 測定時のガス容積

ガス発生に使われた電気量 Q_g はガスのモル数にガス 1mol 発生に必要な電子のモル数とファラデー定数(96500C/mol)を乗じて表した。

$$Q_g = V_s / 22.4 \times n \times 96500$$

n : 各ガス 1mol 発生に必要な電子のモル数

H_2 では $H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + OH^-$ より $n = 2$

CO_2 では $C + 2OH^- \rightarrow CO_2 + 2H^+ + 4e^-$ より $n = 4$

O_2 では $4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$ より $n = 4$

酸素発生率は、通電した電流と時間の積から求めた通電電気量 Q に対する Q_g の割合を百分率で表した。

3. 実験結果および考察

3.1 電極材料の影響試験

Fig. 3 Time course of Color Unit in Electrolysis of Molasses with some kinds of Electrodes

●—graphite ○—IrO₂ ■—PbO₂
□—PdO ▲—Pt

電極材料により電気分解反応の起こる活性化エネルギーが変化し、理論電解電圧に加わえて過電圧と呼ばれる電圧を印加する必要がある¹⁷⁾。この過電圧は、電極材料だけではなく、電解質の種類や濃度によっても変化する²⁰⁾。塩化ナトリウムを添加して電解脱色を行う場合には、発生した塩素ガスが水和して生成する次亜塩素酸イオンによって脱色する反応が大きく寄与していると考えられる¹²⁾ので、塩素過電圧の小さい電極材料を使用することが好ましい。Pt の 1.86V¹⁸⁾に対し電解における塩素発生時の電圧の低い材料として 1.2V¹⁹⁾の PdO、1.39V¹⁸⁾の IrO₂、1.6V¹⁹⁾の PbO₂を用いた。これらの電圧は、必ずしも同一条件で得られたものでないので、一律に取り扱うことは難しい。さらに、これらの電圧と次亜塩素酸の発生効率が比例するものはないことは、高橋が報告してい¹⁰⁾。また、graphite は、塩素過電圧が低いことから塩素発生に広く使用されており²⁰⁾、染色廃液の脱色に有効であることが示されている¹³⁾。塩化ナトリウム水溶液 5 W/V%を添加して 15V の電圧を印加し電気分解による脱色処理を行った。電流は、多少の変動はあるもののどの電極を用いた場合もおおよそ 0.3A であった。色度が 90%程度除去できるまで実験を継続した。色度の時間変化を Fig.3 に示す。どの電極材料を用いても脱色ができることが可能で、PdO、graphite が他の電極と比べて明らかに短時間で脱色していることがわかる。また、Pt と IrO₂を用いた場合にポリフェノール類を酸化したときのような着色現象⁹⁾が見られるが、この着色現象は、アルコール蒸留廃液に含まれるポリフェノー

Table 2 Results of the electrolysis decolorization with various anodes

Anode Material	Time (min)	EQ (C)	gas production			Color		RCQ (U·l)	η RCQ/EQ (U·l·kC ⁻¹)
			H ₂	O ₂	CO ₂	initial	Last		
			(ml)	(ml)	(ml)	(U)	(U)		
PdO	35	632	67	2.7	0.5	1040	74	475	750
Graphite	48	941	108	13	1.7	1020	65	443	470
IrO ₂	52	1090	124	29	2.4	1010	82	426	390
PbO ₂	96	2080	245	55	7.6	1000	99	429	210
Pt	84	1520	176	35	5.5	991	119	400	260

EQ: electricity quantity, RCQ: removal color quantity, DE:Decolorization Efficiency

Fig. 4 Relationship between Oxygen Production Ratio and Decolorization Efficiency

ルが酸化した結果生じたものであると思われる。

通電時間、累積電気量 (EQ)、水素、酸素、二酸化炭素の発生量、色度の変化、累積除去色度量 (RCQ) を Table 2 に示す。実験終了時の色度に多少差があるため単純比較はできないが、通電した電気量あたりの除去色度量である脱色効率 (η) を比較すると、PdO, graphite, IrO₂, Pt, PbO₂ の順になった。塩化ナトリウム水溶液を電気分解する場合、PdO 電極は塩素発生効率が高いことを報告しており¹⁾、その結果と一致する。また、SPE 電極による糖蜜廃液の脱色の実験で PbO₂ 電極で良い脱色性能を得たとの報告²⁾があるが、電極と着色液を直接接触させる本実験においては、他の電極よりも劣る結果となった。また、PdO 電極では、これまで使用してきた Pt 電極の 3 倍、graphite 電極では 2 倍近い脱色効率となった。このように塩化ナトリウムを添加する系では電極を選定することで脱色効率を大幅に改善でき、処理に必要な電気使用量を大幅に削減できることがわかった。

発生したガスは、水素と酸素と二酸化炭素で占められていた。水素は陽極から発生し、電気分解で移動した電子は、ほとんど水素の発生に使用されていることが、本実験においても確認された。酸素発生率と脱色効率の関係を表わしたものが Fig. 4 である。電極材料の異なる実験においても酸素発生率が増加すると脱色効率が減少する傾向があることがわかった。

3.2 実用化検討実験

実用化の検討実験としてグルタミン酸製造工場の廃液 (GLT) とそのメタン発酵処理液 (MGLT) を用いた。メタン発酵処理が及ぼす効果と塩化ナトリウムの添加効果を調べるために、Table 3 に示す条件で GLT, MGLT, 蒸留水、海水を混合した。メタン発酵処理により有機物を代表する COD_{Cr} は 70% 程度除去され、pH は 4 から 8 になった。また、色度は過去の報告³⁾と同様ほとんど除去されることはなかった。

各条件における色度の時間変化を Fig. 5 に示す。廃液の希釈液の色度変化を示す RUN1 と RUN2 では、海水で希釈した RUN2 の方がおよそ半分の時間で脱色していることがわかる。メタン発酵処理液を脱色した RUN3 と RUN4 では、さらにその時間差は大きくなり、海水を使用していない RUN3 は脱色するものの 600 分を経過しても

Table 3 Operating conditions of pilot scale test

	mixing ratio				color (U)	pH	COD _{Cr} (mg·l ⁻¹)
	GLT	MGLT	DW	SW			
Run 1	1	0	9	0	21,000	3.7	33,000
Run 2	1	0	4	5	21,000	4.0	32,000
Run 3	0	1	1	0	2700	8.2	950
Run 4	0	1	0	1	2700	8.1	1000

GLT : Wastewater from glutamate mill,
MGLT : Methane fermentation treated water,
DW : distilled water, SW : sea water

Fig. 5 Time course of color of GLT in electrolysis decolorization with a carbon graphite anode

Fig. 6 Time course of current in electrolysis decolorization of GLT with a carbon graphite anode and a stainless steel cathode

Fig. 7 The relationship between temperature and current in pilot scale experiments

脱色率は 50%であった。小規模実験では電流量は変化しなかったが、パイロット規模の実験では電流が大きく変化した。電流値の時間変化を Fig.6 に示す。初期の電流値は、RUN1 で 12A, RUN2 で 19A, RUN3 で 3.3A, RUN4 で 9A である。この初期の電流値は、液中の電解質の濃度に依存し、RUN1 と RUN3 では、原液からの希釈倍率が 4 倍で初期の電流値もおおよそ 4 倍になっている。海水を添加した場合、電流値が GLT の系である RUN1 と RUN2 の差が 7A, MGLT の系である RUN3 と RUN4 の差が 6.7 A とほぼ同等になった。

また、初期の電流値が高い RUN1 と RUN2 の場合には、実験の経過とともに電流値は増加した。パイロットスケール実験では、電圧は 2.8V と電極材料の実験等で印加した 15V よりも低い電圧であったが、電流密度が高くなると電力の一部が熱に変化し電解槽の温度が上昇した。温度と電流値の関係を Fig.7 に示す。温度が上昇すると電気伝導率が増加しその結果として電流値が上昇したと考えられる。RUN3 のように電流値が低い場合や、電流値が 10A と高くても RUN4 のように実験時間の短い場合には、外気への放熱によって温度変化が小さくなり電流値の変化も小さく維持できた。この現象を利用すると液の温度を上昇させることで同じ電圧でも電流量を増加させることができ反応速度を上昇させることが可能となる。

電流値が変化すると、電極表面で起こる電気分解の反応速度が変化し脱色速度も変化する。そこで、通電電気量と除去色度量を計算し、プロットしたのが Fig.8 である。電気量で整理してみると、RUN1 と RUN2 の差はそれほど小さくなく、海水による希釈を行ってもそれほど改善されていないことがわかる。一方メタン発酵処理を行った RUN3 と RUN4 では明らかに大きな改善が見られる。この結果をもとに計算した電気量あたりの除去色度量を表す脱色効率を Table4 に示す。メタン発酵処理液では、海水を加え希釈原液を処理したものと比べると 4 倍、海水を混合して希釈したものと比べても 3 倍の効率があることがわかった。

3.3 トータルシステムのエネルギーバランス

糖蜜廃液の一つであるグルタミン酸ソーダ製造廃液の処理を例にとって本実験で行った条件でエネルギーバランスを検討した。電気分解を廃液処理として用いる場合最も問題となるのが電気エネルギーを非常に多く消費することである。メタン発酵処理で発生するメタンガスと電気分解で生成する水素は、重要なエネルギー源であり、ガス

Fig.8 Relationship between electricity quantity and removal color quantity in a pilot scale experiments

エンジン^{22,23)}や燃料電池²⁴⁾を使用して電気エネルギーに転換する技術として確立されている。ここでは転換した電気エネルギーを電気分解のエネルギーとして利用した場合のエネルギーバランスを計算した。計算条件を Table5 に示す。得られるガス量と低位発熱量より熱エネルギーを計算し、これに発電効率をかけて電気量を計算した。通常、

Table 4 Decolorization efficiency η in pilot scale experiments

	tested solutions	η (U·l·kC ⁻¹)
Run1	GLT	117
Run2	GLT with sea water	155
Run3	MGLT	92
Run4	MGLT with sea water	449

Table 5 Conditions in estimation of energy balance

Wastewater	COD _{Cr} in GLT	310 kg·m ⁻³
	Color in GLT	220,000 U
Dilution	Dilution ratio for methane fermentation	40 m ³ ·m ⁻³
Methane Fermentation	COD _{Cr} removal efficiency	74 %
	CH ₄ Conversion Ratio	15.6 mol/kg-removed COD
	Gas Recovery	90 %
Electrolysis Decolorization	Decolorization Efficiency	450 U·m ³ ·MC ⁻¹
	Voltage in electrolysis	2.8 V
	H ₂ production rate	5.18 mol·MC ⁻¹
	H ₂ recovery	95 %
	Color removal efficiency	90 %
	COD _{Cr} removal efficiency	20 %
Gas Engine or Fuel Cell	Energy conversion rate	30 %
	Heat conversion rate	50 %
	Heat energy of H ₂	242 kJ·mol ⁻¹
	Heat energy of CH ₄	802 kJ·mol ⁻¹

Fig.9 Energy balance in the total treatment of 1 m³ of molasses wastewater from a glutamate mill

電気エネルギーと同時に熱が得られるので、熱量についても併せて計算した。ここでは、得られる処理水の水質についてもデータをもとに算定した。

処理のフローとエネルギーバランスの計算値を Fig.9 に示す。処理フローは淡水で希釈後、メタン発酵処理を行い、さらに海水で希釈し電気分解で脱色処理したあとで放流する。メタン発酵処理で回収するメタンと電気分解で回収した水素は、ガスエンジンまたは燃料電池で電力と熱エネルギーに変換し、電力は電気分解のエネルギーに活用する。電気分解に必要な電気エネルギーが 1,230MJ であるのに対し、回収ガスから得られる電気エネルギーは 900MJ であり、必要電気エネルギーの 75%を回収できる結果となった。また、同時回収できる熱はメタン発酵槽の加温や、電気分解槽の加温に活用できる。

実験結果を活用するために希釈倍率や印加電圧を本文中の実験条件と同様に決めたが、実際には、希釈倍率をさらに低くし印加電圧も低くできる適正な条件を設定・検証することで外部からの電気供給量をさらに削減することができる。メタン発酵では COD_{Cr} 濃度 60,000mg/l で処理した例もあり⁽¹⁾、条件によっては電気供給がなくても処理できる可能性もでてきた。このように糖蜜廃液を電気分解で脱色することは、廃液中に有機物をエネルギーとして利用することで実用化への道が拓かれると思われる。

4. まとめ

糖蜜廃液の電気分解の処理について電極材料およびメ

タン発酵処理との組み合わせについて検討し以下の結論が得られた。

1) 塩化ナトリウム 5%を添加したアルコール蒸留廃液を用いた場合脱色効率は、PdO, graphite, IrO₂, Pt, PbO₂ の順で大きく、PdO では Pt の 3 倍、graphite では 2 倍と非常に大きくできることがわかった。

2) 実用化への第一ステップとして、アノードに graphite を用いてパイロットスケールの電解槽を製作し実験を行った。グルタミン酸製造工場の廃液について、メタン発酵処理後に海水希釈して電気分解脱色する方法が有効であることがわかった。

3) メタン発酵処理と電気分解によって発生するメタンと水素を活用することで、電気分解脱色に必要な電気エネルギーの 70%以上の電気エネルギーをまかなえる可能性を示した。

(原稿受付 2000 年 9 月 14 日)

(原稿受理 2001 年 4 月 4 日)

参考文献

- 1) Sanchez Riera, F., Cordoba, P., Sineriz, F.(1985) Use of the UASB reactor for the anaerobic treatment of stillage from sugar cane molasses, *Biotech. and Bioeng.*, 27, 1710-1716
- 2) 太宰宙朗, 吉田豊, 小川誠, 小野英男 (1963) 糖蜜アルコール廃液の凝集沈殿法による脱色について, 発酵協会誌, 21, 432-435
- 3) 小林浩志, 戸田浩之, 長野晃弘, 有川悦朗 (1991) メンブレンバイオリアクターによる糖蜜アルコール発酵廃液の嫌気性処理, 第 27

回衛生工学研究討論会講演集 43-45.

- 4) Serikawa, R. M., Funazukuri, T., Wakao, N.(1993), Removal of colorants from vinasse with activated carbon., *Int Sugar J*, 95(132), 153-155
- 5) Migo, V.P., Del Rosario, E. J., Matsumura, M., Kataoka, H.(1993), Decolorization of Molasses Wastewater Using an Inorganic Flocculant. *J Ferment Bioeng* 75(6), 438-442
- 6) 市川広保, 和田慎二, 辰巳憲司, 平良直秀(1996) 精蜜廃液のオゾン酸化と生物処理の併用による処理, 水環境学会誌 19, 1004 - 1008
- 7) 長野晃弘, 仲本千尋, 鈴木昌治(1999) 糖蜜廃液の電気分解による脱色処理－脱色効率に及ぼす電解条件の影響－, 水環境学会誌, 22, 498-504.
- 8) 長野晃弘, 仲本千尋, 鈴木昌治(2000) 糖蜜廃液の電気分解による脱色処理－糖蜜色素の脱色特性と電解質の種類の影響－, 水環境学会誌, 23, 34-40.
- 9) 川嶋幸雄 (1999), 金属電極の特徴－T D K 電極を中心に－, *THE HOTLINE*, 31, 23-27
- 10) 高橋正雄(1985), 塩水電解用高性能電極の開発に関する研究, ソーダと塩素, 36, 231-246
- 11) 高橋正雄(1988), 工業電解用チタン基体白金熱分解被覆電極の高性能化に関する電気化学的研究その1, ソーダと塩素, 39, 261-27
- 12) 東義昭, 植田直隆(1991) 電解法による染色排水の脱色について, 奈良県工業試験場研究報告, 17, 11-14.
- 13) 波多野泰弘, 他(1996) 染色排水の電解処理, 大阪府立産業技術総合研究所報告, 9, 144-149

- 14) 建設省都市局下水道部・厚生省生活衛生局水道環境部監修(1997), 色度 2.透過光測定法, 95-96, 下水道試験方法上巻, 日本下水道協会
- 15) APHA-AWWA-WPCF edited(1975) Color, 64-66 Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, 14th edition, American Public Health Assc..
- 16) Gobbs, C.R.(1987) Introduction to Chemical Oxygen Demand, *In Technical Information Series, Booklet No.8*, Hach Company.
- 17) 田島榮(1969), 10 過電圧, 186-189, 電気化学通論－改訂版－, 共立出版
- 18) 小柳伸行(1984), 貴金属被覆チタン陽極の特性と利用, 工業レアメタル, 83, 31-39
- 19) 笛木和雄、他、電気化学協会編(1985), d. 酸化物電極の酸素過電圧と塩素過電圧, 227, 電気化学便覧, 丸善
- 20) 浅原照三、他、日本化学会編, 3. 7. 4 食塩電解, 208, 化学便覧応用化学編 I プロセス編, 丸善
- 21) 平良直秀, 他(1997) 固体高分子電解質を用いた電解法による染料含有着色水の脱色処理, 水環境学会誌, 21, 47-50.
- 22) 玉井孝生(1984), 下水汚泥消火ガス発電システム, 環境創造, 14, 17-21
- 23) 柏木孝夫監修 (1998), 天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル'98, 日本工業出版
- 24) 東郷芳孝, 多田羅昌浩, 後藤雅史(2000), 注目される燃料電池発電の最新開発状況 生ごみ燃料電池発電システム, O H M, 87, 49-52