

JAERI-Research
2000-021



JP0050375



ブチルアミン電解基礎試験
～ブチルアミン溶媒洗浄剤に対応した電解条件の検討～

2000年3月

亀井一成・宝徳 忍・朝倉俊英・渡辺眞樹男・内山軍蔵・藤根幸雄

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

ブチルアミン電解基礎試験
～ブチルアミン溶媒洗浄剤に対応した電解条件の検討～

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部

亀井 一成・宝徳 忍・朝倉 俊英
渡辺眞樹男・内山 軒蔵・藤根 幸雄

(2000年3月3日受理)

ソルトフリー溶媒洗浄剤として開発しているブチルアミン化合物洗浄剤について、硝酸濃度、銀濃度、温度、電解電位をパラメーターとして、ブチルアミン(0.18 g/L)の電気分解挙動を調べた。ブチルアミンは硝酸濃度 3 M、銀濃度 8 g/L、温度 60 °C、電解電位 1.7 V vs. SCE で迅速かつ安定に電解され、電解所要時間は 90 % のブチルアミンの電解に 120 分、95 % の電解に 270 分であった。また、この条件における 70 % 迄の分解速度定数は 3.09×10^{-1} mg/min であった。

A Basic Study on Electrolytic Decomposition of Butylamine
~ A Study on Decomposition of Butylamine Solvent Washing Reagent ~

Kazushige KAMEI, Shinobu HOUTOKU, Toshihide ASAKURA,
Makio WATANABE, Gunzo UCHIYAMA and Sachio FUJINE

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 3, 2000)

Butylamine (0.18 g/L), used as solvent washing reagent for degraded solvent, was decomposed changing the concentration of nitric acid, the concentration of silver, temperature and electric potential. The optimum condition for decomposition of butylamine was the nitric acid concentration of 3 M, the silver nitrate concentration of 8 g/L, the solution temperature of 60 °C and the decomposition electric potential of 1.7 V vs. SCE. 90 % of butylamine in this solution decomposed rapidly and stably within 120 minutes, and 95 % butylamine in this solution decomposed within 270 minutes. The decomposition rate constant (decomposed 0 ~ 70 %) on the optimum condition was 3.09×10^1 mg/min.

Keywords: Reprocessing, Salt-free Technology, Butylamine, Solvent Washing Reagent, Reduction of Wastes, Silver Catalyst, Electrolysis

目 次

1. はじめに	1
2. プチルアミンの性質	2
3. 銀触媒酸化電解の原理および効果	2
4. 試験	3
4. 1 試験方法	3
4. 1. 1 試験装置	3
4. 1. 2 試験方法	3
4. 2 分析方法	3
5. 試験結果および考察	4
5. 1 プチルアミン電解に対する硝酸濃度変化の影響	4
5. 2 プチルアミン電解に対する銀濃度変化の影響	4
5. 3 プチルアミン濃度変化に対するプチルアミン電解の影響	5
5. 4 電解電位変化に対するプチルアミン電解の影響	5
5. 5 温度変化に対するプチルアミン電解の影響	6
5. 6 最適条件時におけるプチルアミン電解および分解速度定数の算出	7
5. 7 プチルアミン電解最適条件時におけるシュウ酸の電解	7
5. 8 プチルアミン電解最適条件時におけるシュウ酸プチルアミンの電解	7
5. 9 プチルアミンおよびシュウ酸プチルアミン電解時に発生する副生成物について	8
6. まとめ	9
謝 辞	9
参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Properties of Butylamine	2
3. Theory and the Effect of Silver Catalyzed Electrochemical Oxidation	2
4. Experimental	3
4.1 Experimental Procedure	3
4.1.1 Apparatus	3
4.1.2 Experimental Procedure	3
4.2 Analytical Method	3
5. Results and Discussion	4
5.1 Effect of Nitric Acid Concentration on Butylamine Electrolysis	4
5.2 Effect of Silver Concentration on Butylamine Electrolysis	4
5.3 Effect of Butylamine Concentration on Butylamine Electrolysis	5
5.4 Effect of Electric Potential on Butylamine Electrolysis	5
5.5 Effect of Temperature on Butylamine Electrolysis	6
5.6 Butylamine Electrolysis and Decomposition Factor on the Optimum Condition	7
5.7 Oxalate Electrolysis in the Best Condition	7
5.8 Butylamine Oxalate Electrolysis in the Best Condition	7
5.9 By-products in the Electrolysis of Butylamine and Butylamine Oxalate	8
6. Conclusions	9
Acknowledgements	9
References	10

1. はじめに

日本原子力研究所では、再処理プロセス安全性研究の一環として、軽水炉燃料の高燃焼度化などに対応した再処理プロセスの高度化研究を行っている。その研究項目のひとつとして、ソルトフリー技術、すなわち、工程から排出される含塩廃棄物の発生量を抑えるため、ネプツニウムやプルトニウム等の長寿命核種の原子価制御のための酸化還元試薬や溶媒洗浄剤に、ガス化分解可能な有機試薬を用いる技術¹⁻⁶⁾を研究している。ソルトフリー技術については、他にも、多くの研究が行われている⁷⁻⁹⁾。原研では、ソルトフリー技術として、ブチルアミン化合物（炭酸塩あるいはシュウ酸塩）を溶媒洗浄剤に用いる方法を開発した⁵⁾。この洗浄剤は、従来のナトリウム化合物とは違い、電気化学的に二酸化炭素、窒素化合物および水にガス化分解が可能であること¹⁰⁻¹²⁾、ヒドラジン化合物では、微量とはいえ爆発性のアジ化水素が発生するが、ブチルアミン化合物では発生しないこと、等を特徴とする。

アミン類の中から n-ブチルアミンを溶媒洗浄剤として選択した理由を以下に示す。ブチルアミンよりも低分子量のアミンであるメチルアミン、エチルアミンはそれ自身が低沸点物質であるため、洗浄剤として使用する場合、揮散による洗浄効果の減少、油水分離後の溶媒中に混入し燃焼する危険性が考えられる。プロピルアミンは再処理工程で発生する亜硝酸による分解性があるため、アミノアルコール類では酸と反応しやすい性質があるため、洗浄効果に影響を与えることが考えられる^{13、14)}。また、ブチルアミンより高分子量であるものは水溶性が乏しいため洗浄剤として用いることができないものが多く、また、水溶性があるものでも、分解時、二酸化炭素等の揮発成分が、不必要に多くなることが考えられるため不適である。ブチルアミンの4種類の異性体は、いずれの場合でもほぼ塩基性は等しいが、沸点を比較すると n-ブチルアミンが最も高い（n-ブチルアミン：78 °C、iso-ブチルアミン：68 °C、sec-ブチルアミン：63 °C、tert-ブチルアミン：46 °C）ため^{13、14)}、n-ブチルアミンが、溶液の温度変化に最も広く対応できると考えられる。

このブチルアミン化合物溶媒洗浄剤の開発に伴い、廃棄物発生量低減のための分解方法を検討する必要がある。ガス化分解の方法として、電解が簡便かつ一般的である。有機物の電気分解方法のうち、銀イオンを酸化触媒として加える方法に開発実績がある^{11、12、15-18)}。この方法は、電解によって銀イオン（I）を銀イオン（II）に酸化し、銀イオンが2価から1価に還元される際に発生するOHラジカルまたはOラジカルで有機物を酸化分解する方法である。

この方法を用いた、ブチルアミン溶液の電解基礎試験を行い、硝酸濃度、銀濃度、ブチルアミン濃度、電解電位および電解温度をそれぞれ変化させた場合の電解への影響を検討して電解最適条件を決定した。また、この最適条件下で、シュウ酸およびシュウ酸ブチルアミンの電解について検討した。さらに、電解に伴い発生すると考えられる副生成物についての検討をした。本報告はこのブチルアミン電解基礎試験について述べたものである。

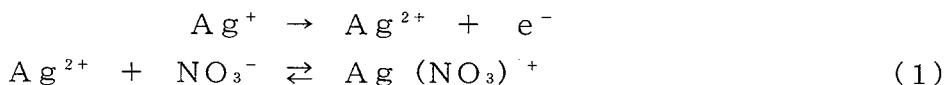
2. ブチルアミンの性質

試験に用いた n-ブチルアミンは分子量 73.2、沸点 78 ℃の物質で、塩基性はアンモニアと同程度 ($K_b = 3.36$ at 25 ℃) の安定した塩基性有機物質である¹³⁾。ブチルアミンは極性が強く、分子間水素結合を形成しやすいため、水に良く溶け、また、有機溶媒にも溶ける性質を持つ。これに対し、鉱酸やカルボン酸と塩を形成すると、水溶性はブチルアミンと同様に高いが、有機溶媒には不溶となる性質を持つ¹⁴⁾。n-ブチルアミンについて、再処理工程で抽出溶媒として使用する 30 % TBP/n-ドデカンに対する分配実験を行った。その実験フロー¹⁹⁾を Fig. 1 に、結果を Table 1 に示す。塩を形成する硝酸に対し、ブチルアミンが過剰な場合には（硝酸濃度：0, 0.1 M）、溶媒相からブチルアミンが確認されたが、硝酸とブチルアミンが等量存在する場合（硝酸濃度：0.5 M）を境として、硝酸がブチルアミンより多く存在する場合には、溶媒相からブチルアミンは検出されなかった。また、ブチルアミンの塩は水酸化物イオンの存在によって、遊離ブチルアミンに戻ることから¹⁴⁾、pH の調整によって、ブチルアミンは挙動を変えることが予想される。

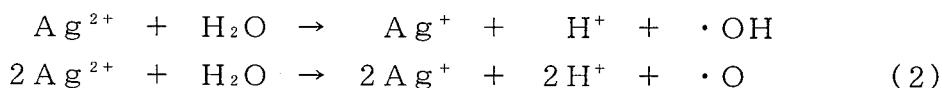
3. 銀触媒酸化電解の原理および効果

銀触媒の有機物に対する酸化電解の原理を以下に示す^{11), 12), 18)}。

陽極において、銀 (I) イオンは 1 電子を放出し、銀 (II) イオンに酸化される。この際、銀 (II) イオンは硝酸と Ag^{+} 錯体を形成し、溶液は暗茶褐色を呈する。 $\text{Ag}^{+}(\text{NO}_3)^+$ 錯体は、酸化性が強く、酸性溶液中では比較的に安定に存在する。



陽極電解液中の銀 (II) イオンは、水溶液中に多量に存在する水と反応し、 $\cdot\text{OH}$ ラジカルまたは $\cdot\text{O}$ ラジカルを生成する。



さらに、 $\cdot\text{OH}$ ラジカルおよび $\cdot\text{O}$ ラジカルが、陽極電解液中に溶解した有機物と反応して、有機物を酸化分解し、二酸化炭素、一酸化炭素、水およびその他無機化合物を生成する。



(2) 式で発生する銀 (I) イオンは再び酸化されて、銀 (II) イオンとなる。陰極では、硝酸イオンが還元され、亜硝酸が発生する。



この銀触媒を用いた酸化電解法は、下記に示すように安全性および簡便性の点でメリットがあ

る。

- ①電圧をかけたときにのみ反応は進行するため、分解作業が任意に進行または停止できる。
- ②酸化効率が高い。
- ③電気分解に用いる銀触媒は回収、再利用ができる。

4. 試験

4. 1 試験方法

4. 1. 1 試験装置

試験にはガラス製の電解セル（最大容積 100 ml）を用いた。電解セルの概略図を Fig. 2 に示す。内部には、白金メッキを施したチタン製電極 1 対（陽極 10×5 mm, 陰極 20×5 mm 共に厚さは 1 mm）、参照電極として飽和カロメル電極を装備した。陰極には隔膜の役目をする微細多孔質のガラス製フリットを下部に施した電極カバーを被せた。空気攪拌により発生するオフガスは、環流管を通って大気中に放出されるが、温度は 5 °C 以下に制御し、ブチルアミン等が揮散しないような構造とした。

4. 1. 2 試験方法

分解成分として使用したブチルアミンおよびシュウ酸、電解液主成分である硝酸、銀触媒として用いた硝酸銀は、全て和光純薬社製特級試薬を用いた。硝酸濃度、銀濃度、電解液温度、電解電位を試験パラメーターとし、それぞれ 1 条件のみを変化させてブチルアミン電解に対する影響を調べた。各電解条件を Table 2 に示す。各条件の電解試料を電解セルに 80 ml 取り、セッティング後、空気中の二酸化炭素の影響を省くために水酸化カルシウム溶液と攪拌、通過させた空気でセル内をバブリング（200 ml/min）し、同時に、セル下部を温度制御機能の付いたマントルヒーターで加熱し、温度を所定条件にまで上昇させた。所定温度到達後、サンプルを採取し、電解 0 hr 試料とした。0 hr サンプル採取後、各条件の電位および温度で電気分解を行い、その後、一定間隔で試料を採取した。なお、電解経過時間は各試料を採取した時間とした。

4. 2 分析方法

本試験では、サンプル中の残存ブチルアミンおよびシュウ酸を定量することによって、ブチルアミンおよびシュウ酸の分解量を求ることとした。全有機炭素分析計（T O C）を用いて陽極液中の全有機炭素の濃度を定量し、その値からブチルアミンおよびシュウ酸の濃度を算出した。

電解時に発生すると思われる副生成物の分析は、液体クロマトグラフィー、ガスクロマトグラフィーおよびガスクロマトグラフ質量分析計を用いて行った。各分析方法を Fig. 3～5 に示す。

5. 試験結果および考察

5. 1 プチルアミン電解に対する硝酸濃度変化の影響

Table 2 に示す、硝酸濃度を変化させた条件でのプチルアミン電解に対する影響を調べた。この試験結果を Fig. 6 に示す。硝酸濃度 0.01 M ではほとんどプチルアミンが電解しなかったが、硝酸濃度を徐々に高くすると分解率が向上した。電解液を観察すると、硝酸濃度 0.01 M で灰白色もしくは黒色の銀酸化物が沈殿しており、硝酸濃度が高くなるにつれ沈殿の生成量は減り、電解開始後から $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2^+$ 特有の暗茶褐色の着色が認められた。触媒として加える銀は硝酸銀として添加しているので、 $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2^+$ の生成は化学量的には充分生成可能であると思われる。しかし、この観察結果から、 $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2^+$ を、プチルアミン電解に効果をもたらすのに十分な量だけ生成させるためには、ある程度硝酸を添加して液中に過剰な硝酸イオンを共存させることにより、 $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2^+$ から銀酸化物が生成して液中の銀イオン濃度が低下することを抑制する必要があると考えられる。この電解条件において、最も電解効率が良かったのは、硝酸濃度 3 M であった。廃液処理の工程を考慮すると、操作上、これ以上硝酸濃度を高くすることは好ましくないことから、プチルアミン電解に用いる硝酸濃度は 3 M が適当であると考えられる。硝酸 3 M の条件では、240 分の電解でプチルアミンの約 90 %が電解され、420 分の電解で 95 %以上のプチルアミンを電解することができた。

5. 2 プチルアミン電解に対する銀濃度変化の影響

Table 2 に示す、銀濃度を変化させた条件でのプチルアミン電解に対する影響を調べた。この試験結果を Fig. 7 に示す。銀を添加しなかった場合にはほとんどプチルアミンが電解しなかったが、銀濃度を徐々に高くすると分解率が向上した。このことから、プチルアミンの電解には銀触媒（銀の添加）が必要であることが確認された。銀濃度 6 g/L までは、プチルアミンの量に対し充分な量の $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2^+$ が生成されないため、銀濃度が高くなるにつれ、分解速度が向上したと考えられる。また、銀濃度 8 g/L および 16 g/L でほぼ同等な分解性を示していることから、含まれているプチルアミン量に対し銀濃度 8 g/L が適当な量と考えられ、これ以上の銀濃度では含まれている銀全てが $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2^+$ を生成しない、つまり、この試験に用いた電極面積に対する、または電解電位 (1.6 V vs. SCE) に対する $\text{Ag}(\text{NO}_3)_2^+$ の生成が限界であるものと考えられる。したがって、銀濃度 8 g/L 以上での大きな分解速度の向上はみられないものと思われ、今回用いた装置による電解では、銀濃度 8 g/L が適当であるものと考えられる。

5. 3 ブチルアミン濃度変化に対するブチルアミン電解の影響

Table 2 に示す、ブチルアミン濃度を変化させた条件でのブチルアミン電解に対する影響を調べた。電解時間に対するブチルアミン総分解量(mg)の変化を Fig. 8 に示す。電解時間 120 分までの範囲において、ブチルアミン 0.18 g/L (溶液中ブチルアミン: 約 15 mg 相当量) および 0.36 g/L (溶液中ブチルアミン: 約 30 mg 相当量) の時間あたりブチルアミン分解量はほぼ等しく、ブチルアミン 0.72 g/L (溶液中ブチルアミン: 約 60 mg 相当量) はそれらに比べ、時間あたり約 2 倍の分解量 (1.9 ~ 2.2 倍) であった。

この結果は、分解反応の律速段階が、ブチルアミン濃度により変化することによると考えられる。しかし、本報告では、分解反応機構の詳細を取り扱うことはせず、初期段階、すなわち電解率 0 ~ 70 % の範囲、での反応が、ブチルアミン濃度に依存しない零次反応であるもの仮定として反応速度定数を算出し、以後の議論に用いるに留める。分解速度定数は以下の式で算出する。

$$k = - \frac{W_a - W_b}{t_a - t_b} \quad (\because W_a > W_b)$$

k : 分解速度定数 (mg/min)

W_a : 時間 t_a における電解液中に含まれるブチルアミン量 (mg)

W_b : 時間 t_b における電解液中に含まれるブチルアミン量 (mg)

t_a, t_b : 電解時間 (min) (ただし分解率 0 ~ 70 % の範囲)

5. 4 電解電位変化に対するブチルアミン電解の影響

Table 2 に示す、電解電位を変化させた条件でのブチルアミン電解に対する影響を調べた。各電位 (1.5 ~ 1.9 V vs. SCE) における分解速度定数の変化を Fig. 9 に示す。

分解速度定数は、電解電位を 1.5 ~ 1.7 V vs. SCE と高くするにつれ、顕著に電解速度が大きくなり、1.9 V vs. SCE において極大値を示した。電解状態を観察すると、1.8 V vs. SCE の場合には、電解中に液温が緩やかに上昇する傾向がみられ、1.9 V vs. SCE の場合には、電圧印加直後から、断続的な過電流および緩やかな液温の上昇が観察され、2.0 V vs. SCE の場合には、継続的な過電流状態となり、全く液温の温度制御ができなかった。この結果、試験溶液に対して 1.8 V vs. SCE 以上では過電流に伴う液温の上昇が考えられ、電解の安全性の見地から、電解に適した電解電位は電解速度が最も速い 1.9 V vs. SCE ではなく、1.7 V vs. SCE 以下に設定することが望ましいと思われる。

銀酸化触媒によるブチルアミンの分解に係わる反応は、複雑な反応機構であるため、また、ブチルアミン酸化還元電位も不明なことから、電流効率を判断する指標として、各電解電位に対するブチルアミン 1 mol の分解に要する電気量を算出した。電気量を算出するための測定電流値を Table 3 に、算出結果を Fig. 10 に示す。各電解電位に対するブチルアミン 1 mol の分解に要する

電気量の算出は、電解開始から 15 分間の実測した電流値の平均から算出した電気量と、電解開始から 15 分間に電解したブチルアミン量から行った。ブチルアミン分解に要する電気量は 1.5 V vs. SCE 時が最も低く、1.6 および 1.7 V vs. SCE で分解に要する電気量が一定、1.8 V vs. SCE 以上で再び電気量に増大の傾向が見られた。分解に対する電流効率が 1.5 V vs. SCE において最も良いと思われるが、これまでの結果から電解にかかる所要時間を比較すると電解電位が高いほうが望ましい。しかしながら、1.6 および 1.7 V vs. SCE で分解に要する電気量が一定となり、1.8 V vs. SCE 以上でブチルアミン分解に対する電気量が増大している。また、1.9V vs. SCE 以上の電位では、過電流が生じている。これらは、1.8V vs. SCE 以上の電位で、作用極において Ag (II) 生成以外の副反応が起きることを示していると考えられる。副反応は、NO₃⁻の分解、あるいは、溶媒である水そのものの電気分解であると考えられる。これらを総合して、ここでの電解条件において最も適した電解電位は 1.7 V vs. SCE とした。

5. 5 温度変化に対するブチルアミン電解の影響

Table 2 に示す、温度を変化させた条件でのブチルアミン電解に対する影響を調べた。この試験結果を Fig. 11 に示す。温度の範囲は、常温からブチルアミンの気化が起こらないと思われる範囲として常温（温度制御なし）～60 ℃まで検討した。どの温度条件の場合も Ag (NO₃)⁺ の呈色は、電極を所定の電解電位にしたときに始まり、数分で暗茶褐色を呈するが、加温を行わなかった常温での電解効率が最も悪く、常温から 50 ℃までは電解効率が大きく向上し、50 ℃に比べ、やや、60 ℃の電解効率が良かった。常温電解での液温は、開始時、22 ℃、通電に伴い緩やかに上昇した。Fig. 11 は、28 ℃付近をしきい値として、その温度以下ではブチルアミンの電解は、ほとんど進行しなかったが、その温度以上では、電解が開始したことを示すと思われる。したがって、溶液中に含まれるブチルアミンの量や液量等で、多少、電解の始まる温度に差違が生じるが、試験に用いたブチルアミンを含む溶液を速やかに電解するためには、一定の加温が必要であると考えられる。

各温度条件における分解速度の結果をアレニウスプロットしたものを Fig. 12 に示す。ただし、温度未設定で行った条件に関しては分解が始まってから（28 ℃以上）の平均温度と分解速度でプロットした。この結果、ほぼ直線上にプロットされたことから、ブチルアミンの分解はアレニウスの理論にほぼ一致し、このことからもブチルアミンの分解（分解速度）は温度による効果があることを示しているものと思われる。このプロットの傾きから求められる、反応の見掛けの活性化工エネルギーは約 1.85×10^4 kJ/mol、切片から求められる見掛けの頻度因子は、約 5.48 であった。

以上の結果から、ブチルアミン分解性に温度の効果が認められ、温度が高いほど効果があると思われるが、この試験条件の範囲では 60 ℃が最も適している温度とした。

5. 6 最適条件時におけるブチルアミン電解および分解速度定数の算出

以上の5. 1～5. 5の結果から、ブチルアミン 0.18 g/L 水溶液の電解に対して、硝酸濃度 3 M、銀濃度 8 g/L、電解電位 1.7 V vs. SCE、電解温度 60 °C の条件で電解が、安全かつ迅速な電解条件であることが判った。その条件で電解を行った結果を Fig. 13 示す。約 120 分で 90 % の電解が完了し、270 分で 95 % 以上のブチルアミンが電解した。また、電解率 0～70 % の範囲で算出した分解速度定数は 3.09×10^{-1} (mg/min) であった。

5. 7 ブチルアミン電解最適条件時におけるシュウ酸の電解

実際の劣化溶媒を洗浄する際、洗浄剤はブチルアミンのみで調製するのではなく、シュウ酸もしくは二酸化炭素と反応（炭酸水素塩）させて洗浄剤として用いる。したがって、塩としての分解性を確認する必要がある。しかし、5. 6 に示した最適条件の硝酸濃度では炭酸水素塩の炭酸基は、硝酸によって、容易に二酸化炭素と水に化学分解されるため、この試験はシュウ酸のみにに関して行った。シュウ酸 0.6 g/L の電解結果を Fig. 14 に示す。シュウ酸もブチルアミン同様、銀の添加無しには分解性が乏しく、シュウ酸も $A g (NO_3)^+$ の生成による酸化分解で電解されるものと思われる。ブチルアミン電解（銀添加）の最適条件におけるシュウ酸の分解は、電解約 5 分で 66 % の電解、10 分で 95 % 以上の電解が確認された。実験観察から、試験溶液の $A g (NO_3)^+$ の生成の確認ができるものの、溶液全体に呈色は拡大せずに、直ちに色は消滅することから、 $A g (NO_3)^+$ の生成量に対し、シュウ酸の分解に消費される量が上回ったため、呈色が認められなかつたものと思われる。シュウ酸の電解が極めてブチルアミンに比べ速く、電解速度を求めるためのデータを詳細にとることができなかつたため、電解速度定数の算出は困難であったが、定数は 6.24 (mg/min) 以上あるものと推測される。

5. 8 ブチルアミン電解最適条件時におけるシュウ酸ブチルアミンの電解

5. 6 に示した最適条件で 0.3 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液 (0.18 g/L ブチルアミン溶液中に含まれるブチルアミンに過不足無くシュウ酸を反応させた溶液) を電解した。その結果を Fig. 15 に示す。電解時間 15 分までは分解率が大きく上昇し、それ以降においては緩やかに分解率が上昇する、2段階の電解率上昇傾向が確認された。5. 7 で示した結果と同様に、約 10 分程度までは溶液に着色がみられなかつた。ブチルアミンと共に存在する溶液中でもシュウ酸はブチルアミンよりも分解されやすく、電解開始からブチルアミンおよびシュウ酸が分解されたが、15 分後には既にシュウ酸はほとんど分解されたものと思われる。さらに、15 分以降から電解率 70 % までの分解速度定数とブチルアミン単身の分解速度定数を比較するとよく一致（シュウ酸ブチルアミン : 3.08×10^{-1} (mg/min)、ブチルアミン : 3.08×10^{-1} (mg/min)）することからも、15 分まではシュウ酸の電解が完了し、以降ブチルアミンのみが電解したと思われる。

5. 9 ブチルアミンおよびシュウ酸ブチルアミン電解時に発生する副生成物について

水野の報告¹⁰⁾によると、ブチルアミンを希硫酸中で PbO₂ - Pb または Pt 陽極と Pb 陰極を用いて電解した場合、カルボン酸（約 13 ~ 57 %）、アルデヒドおよび二酸化炭素が生成すると報告している。そこで、銀触媒を用いた硝酸中のブチルアミンおよびシュウ酸ブチルアミンの電解で、副生成物が生成するかを調べた。

1) カルボン酸副生成物

溶液中に生成するカルボン酸副生成物を調べるために、液体クロマトグラフィーによる分析を行った。0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液をそれぞれ電解し、約 40 % および 95 % 電解完了時に電解液の一部を取り、直ちに液体クロマトグラフィーで分析を行った。標準溶液は、亜酸、酢酸、プロピオン酸および n-酪酸を含むもので、測定する試料と硝酸および銀濃度をあわせた等組成標準溶液とした。その標準溶液のクロマトグラムを Fig. 16 に、40 % 電解完了時の 0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液のクロマトグラムを Fig. 17 および 18 に、95 % 電解完了時の 0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液のクロマトグラムを Fig. 19 および 20 に示す。これらの結果全てにおいて、硝酸に起因するピーク以外にカルボン酸のピークが検出されなかった。このことから、希硫酸中ブチルアミンとは違い、硝酸中では大量にカルボン酸を生成することはないものと思われる。

2) 挥発性有機副生成物

溶液中の全有機炭素は溶液中で 95 % 以上の分解を確認していることから、ブチルアミンが途中でどのような中間生成物の形態をとったとしても、最終的には溶液中で電解されると思われる。そこで、電解中に発生するオフガス中に含まれる副生成物として揮発性有機成分の定性分析を行った。分析試料は、0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液をそれぞれ電解し、約 40 % および 95 % 電解完了時に攪拌用バーリングを 1 分間停止し、その後ヘッドスペース・ガス分析専用のサンプル瓶（容量 100 ml）に電解液 50 ml 採り、密栓した。静置後、密閉したまま 80 °C の温浴上で 30 分間加熱および加圧し、空気相の一部を採取し分析した。炭素数 1 ~ 4 の炭化水素等の低分子量物質をガスクロマトグラフィーで、分子量 33 以上の揮発性有機物質をガスクロマトグラフ質量分析計で測定した。

ガスクロマトグラフィーによる 40 % 電解完了時の 0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液のクロマトグラムを Fig. 21 および 22 に、95 % 電解完了時の 0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液のクロマトグラムを Fig. 23 および 24 に示す。炭素数 1 ~ 4 の炭化水素等の低分子量物質由来のピークが確認されなかったことから、揮発性の低分子量物質は生成しないと考えられる。

ガスクロマトグラフ質量分析による 40 % 電解完了時の 0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液のクロマトグラムを Fig. 25 および 26 に、95 % 電解完了時の 0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液のクロマトグラムを Fig. 27 および 28 に示す。これらの結果全てに検出されている 1 分付近のピークは空気由来のものであるが、40 % 電解完了時の 0.9 g/L ブチルアミンおよび 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液の 5.4 分付近にはピークが検出された。このピークについての質量スペクトルをデータベースと比較した結果を Fig. 29

および30に示す。その解析結果から、極微量 ($0.1 \pm 0.0\text{n } \mu\text{g/ml}$) ではあるが、硝酸ブチルが検出されていたことが判った。さらに、硝酸ブチル標準を同様にガスクロマトグラフ質量分析で測定したクロマトグラムおよび質量スペクトルをFig. 31および32に示す。この結果はデータベースとほとんど一致し、上述の同定を支持する。しかし、硝酸ブチルは濃度が低いためか、同様の試料を調整しても必ずしも再現性良く検出されることはないと、今回の試験においては生成する可能性があるとしか言えない。今回の結果であるクロマトグラムにみる硝酸ブチルの推定濃度は $0.1 \pm 0.0\text{n } \mu\text{g/ml}$ で、バーピングを止めた1分間滞留ガス中の硝酸ブチルとすると、1分間に電解されたブチルアミンにより生成されたものと考えられ、1分間に電解されるブチルアミンに対する硝酸ブチルの生成割合は 1.5 % 前後と推定される。また、95 % 電解完了時の 1.5 g/L シュウ酸ブチルアミン溶液の 1.7 分付近に亜硝酸ブチルが検出されたが、硝酸ブチルよりも極めて微量であり、量的な推測は出来なかった。その質量スペクトルを Fig. 33 に示す。その他の有機成分については検出されなかった。

生成した硝酸ブチルは電解時、常にエアバーピングを行っているため、電解セル中に留まることは考えにくく、空気によって実験で得た濃度よりも希釈する可能性が高く、爆発を伴う反応は起こりにくいと考えられる。しかし、ブチルアミンの電解において、プロセス化する場合は硝酸ブチルの生成の可能性を考慮してオフガス系の設計をする必要がある。

6. まとめ

ブチルアミン化合物溶媒洗浄剤の開発に伴い、廃棄物低減のためにブチルアミンおよびその化合物の銀触媒を用いた電解基礎試験を行った。その結果から、迅速かつ安全に分解できる条件は、ブチルアミン 0.18 g/L 水溶液の電解に対して、硝酸濃度 3 M、銀濃度 8 g/L、電解電位 1.7 V vs. SCE、電解温度 60 °C の条件であることがわかった。その条件における電解速度定数は 3.09×10^1 (mg/min) で、電解率は 95 % 以上であることが確認された。今回の試験では、分析上、定量的に確認できる電解率は 98 % まであるため、分解率がそれ以上、100 % 近い値となるかは確認できない。この点については、ブチルアミン濃度がより高い条件での試験を行い、100 % にどの程度近い値まで到達できるかを確認する必要がある。また、電解による有機副生成物は硝酸ブチルおよび亜硝酸ブチルが極微量検出された。これらを総合して、今後の課題としては、実際に溶媒洗浄剤として使用する濃度における分解性および副生成物の調査、溶媒洗浄後の洗浄剤に対する分解性および副生成物の調査が必要である。

謝 辞

本試験の実施にあたり、放射線振興協会（財）の佐藤真人氏、高橋由博氏、澤田睦氏、吉田悟氏のご協力を頂いた。さらに、プロセス安全研究室員の方々から種々のご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Uchiyama G., Fujine S., Hotoku S., Maeda M.: "New separation process for neptunium, plutonium and uranium using butyraldehydes as reductants in reprocessing", Nucl. Technol., 102, 341 (1993).
- 2) Fujine S., Uchiyama G., Kihara T., Asakura T., Maeda M., Sakurai T.: "Development of process technology for reprocessing which reduces the environmental impact", Proc. of 10th Pacific Basin Nuclear Conference, 1125 (1996).
- 3) Uchiyama G., Asakura T., Fujine S. and Hotoku S.: "Long-lived nuclides separation techniques for advancing PUREX process", Proc. of 6th Int. Conf. on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ICEM97, 225 (1997).
- 4) Uchiyama G., Fujine S. and Maeda M.: "Solvent washing process using butylamine in fuel reprocessing", Nucl. Technol., 120, 41 (1997).
- 5) 原子力安全性研究の現状・平成8年度、日本原子力研究所、61(1996)。
- 6) 大型再処理施設安全試験研究（廃溶媒処理試験）平成3年度成果報告書、日本原子力研究所、70(1992)。
- 7) 鷺谷忠博、上田吉徳、河田東海夫：「ソルトフリー電解酸化槽工学試験」、動燃技報、No.83、(1992)。
- 8) Hamasaki A., Kamishima N., Murasawa K. and Hujimoto K.: "Solvent cleanup system using hydrazine carbonate", RECOP'91, 1140 (1991).
- 9) 小沢正基、鷺谷忠博、岸本洋一郎：「ソルトフリー試葉電解酸化基礎試験（Ⅱ）－パラメーター試験による電解条件の最適化の検討」、日本原子力学会 1989 年会 L 3 9 (1989)。
- 10) 水野三郎：「低級アルキル (C₁–C₅) 第1級アミンとそのN–アルキルコハク酸アミドの電解酸化」電気化学、29、28 (1961)。
- 11) Almon, A. C. and Dewberry, R. A.: "Small scale electrolytic destruction of spent tributylphosphate extractant", WSRC-RP-89-1229 (1989).
- 12) Uchiyama G. and Fujine S.: "Destruction of butyraldehyde isomers using silver catalyzed electrochemical oxidation", J. Radioanal. Nucl. Chem., 230, 105 (1998).
- 13) 日本化学会（編）：「化学便覧 基礎編 改訂4判」、丸善、341 (1982)。
- 14) Morrison R. T. and Boyd R. N.: 「有機化学（下）第4版」、東京化学同人 1135 (1985)。
- 15) 小沢正基、田中康正、星野吉廣、田沼弘之、川上知佐子、岸剛陸、丸本正孝：「電気化学反応による有機物分解処理法の研究－（3） CMPO電解酸化法における金属メディエータの効果－」、日本原子力学会 1996 年秋の大会 L 4 1 (1996)。
- 16) Ahmad F., Sabir S. and Baswani V. S. : "Kinetics and Mechanism of the Oxidation of Benzamide by Silver(II), Cobalt(III), Manganese(III) Ions in Aqueous Perchlorate Medium," J. Indian Chem. Soc., LX, 1052 (1983).

- 1 7) Kumar A. : "Kinetics of Complexation and Oxidation of Ethanolamine and Diois by Silver(II)," J. Phys. Chem. Soc., 86, 1674 (1982).
- 1 8) Farmer J. C., Wang F. T., Hawley-Fedder R. T., Lewis P. R., Summers L. J. and Foiles L. : "Electrochemical Treatment of Mixed and Hazardous Wastes," J. Electrochem. Soc. 139, 654 (1992).
- 1 9) 酒井忠雄, 渡邊志央, 大野典子, "トリフェニルメタン染料による電荷移動錯体の生成とそのサーモクロミズムを利用する脂肪族アミンの分別分析" 分析化学、45, 1033 (1996)。

Table 1 0.5 M プチルアミン水溶液硝酸濃度別分配比

硝酸濃度(M)	分配比(Corg/Caq)
0	0.42
0.1	0.35
0.5	<0.01
1.0	<0.01
2.0	<0.01

Table 2 試験条件

検討項目	硝酸濃度	銀濃度	ブチルアミン濃度	電解電位	電解温度	考察項目
硝酸濃度変化	0.01 M	8 g/L	0.18 g/L	1.6V vs.SCE	60 °C	4.1
	1.0 M					
	2.0 M					
	3.0 M					
銀濃度変化	3.0 M	0 g/L	0.18 g/L	1.6 Vvs.SCE	60 °C	4.2
		2 g/L				
		4 g/L				
		6 g/L				
		8 g/L				
		16 g/L	0.18 g/L			
ブチルアミン濃度変化	3.0 M	8 g/L	0.18 g/L	1.6 Vvs.SCE	60 °C	4.3
			0.36 g/L			
			0.72 g/L			
			0.72 g/L			
電解電位変化	3.0 M	8 g/L	0.72 g/L	1.5 Vvs.SCE	60 °C	4.4
				1.6 Vvs.SCE		
				1.7 Vvs.SCE		
				1.8 Vvs.SCE		
				1.9 Vvs.SCE		
			2.0 Vvs.SCE			
電解温度変化	3.0 M	8 g/L	0.72 g/L	1.7 Vvs.SCE	温度未設定	4.5
					40 °C	
					50 °C	
					60 °C	

注) 表中□枠は、変化条件を示す。表中の銀溶液は硝酸銀水溶液を用い、銀濃度に換算している。

各試験に用いた試薬は和光純薬社製の特級試薬を用いている。

Table 3 電位電流値実測電流値 (電解開始～15分迄)

電解電位 (V vs SCE)	電解電流値 (A)	電気量 (C)
1.5	0.03	27
1.6	0.14	126
1.7	0.43	367
1.8	0.49	441
1.9	0.95	855
2.0	>1.0	-

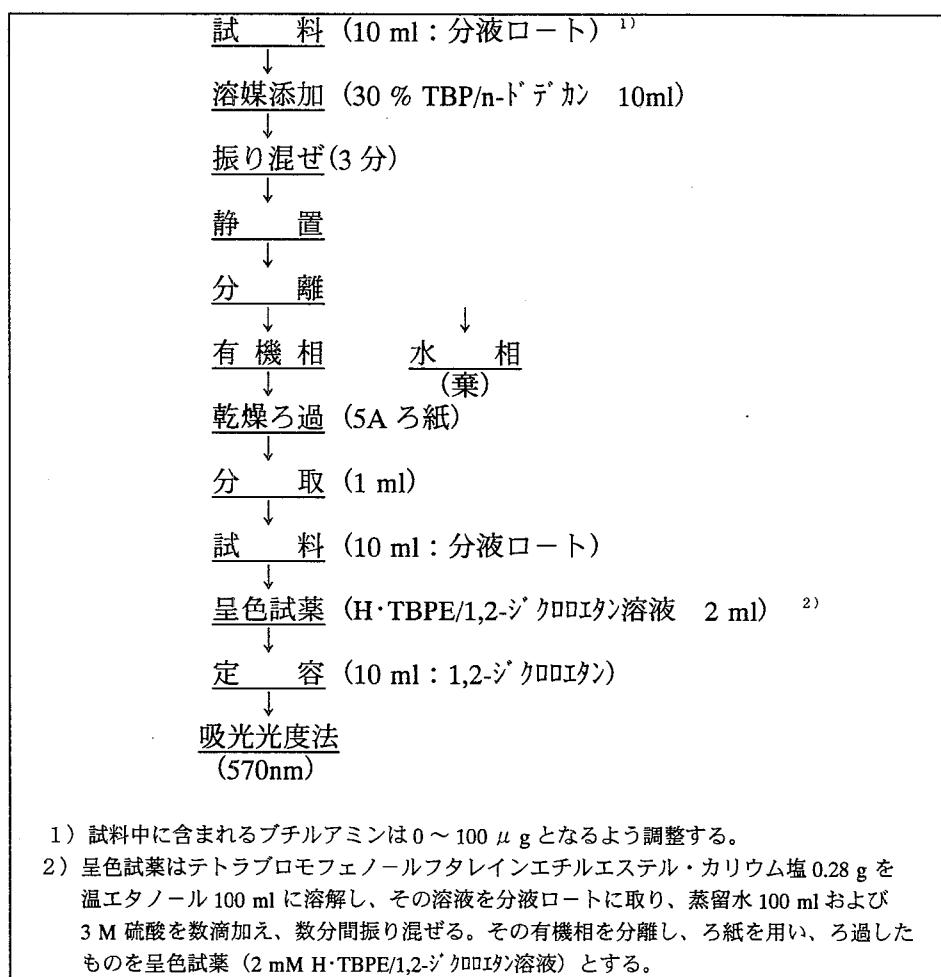


Fig. 1 ブチルアミン分配比測定方法

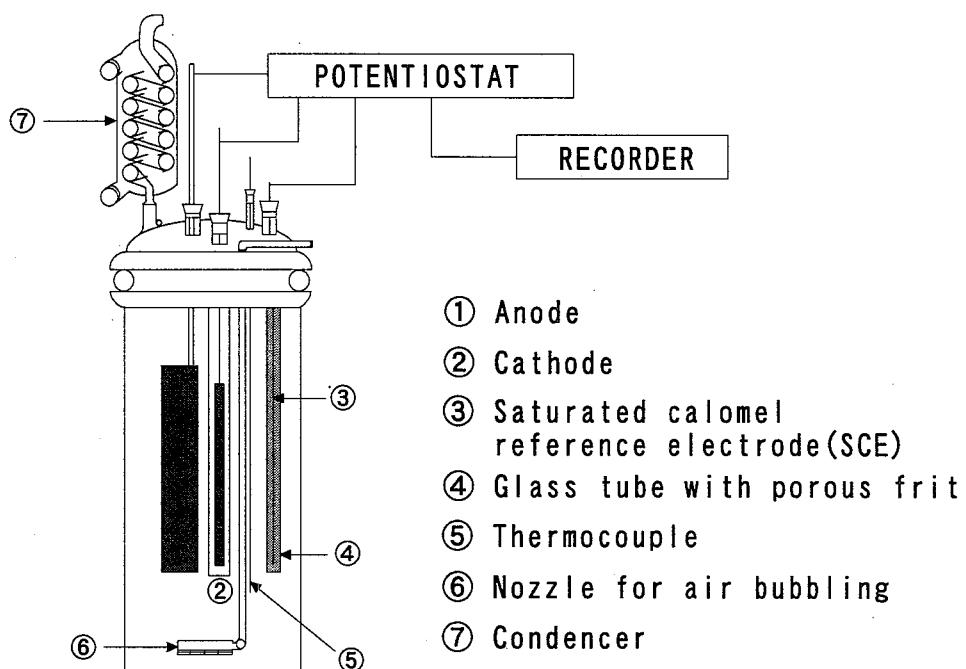


Fig. 2 電解セル概略図

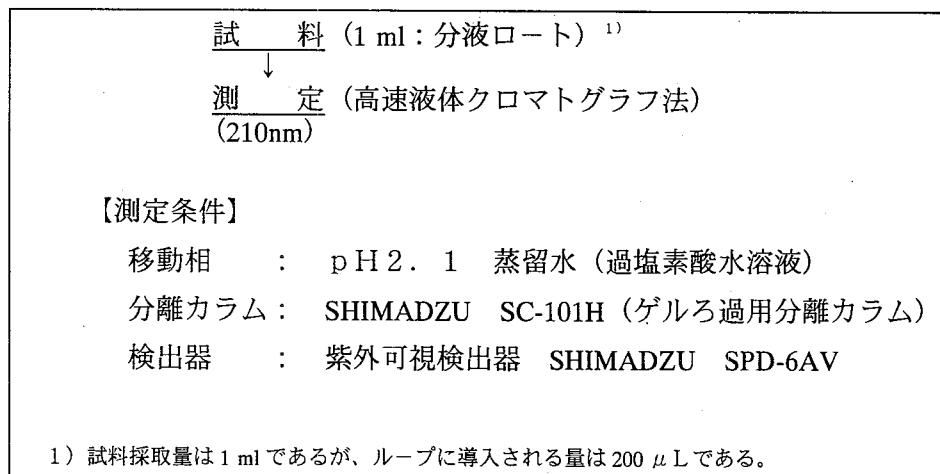


Fig. 3 カルボン酸（有機酸）分析方法

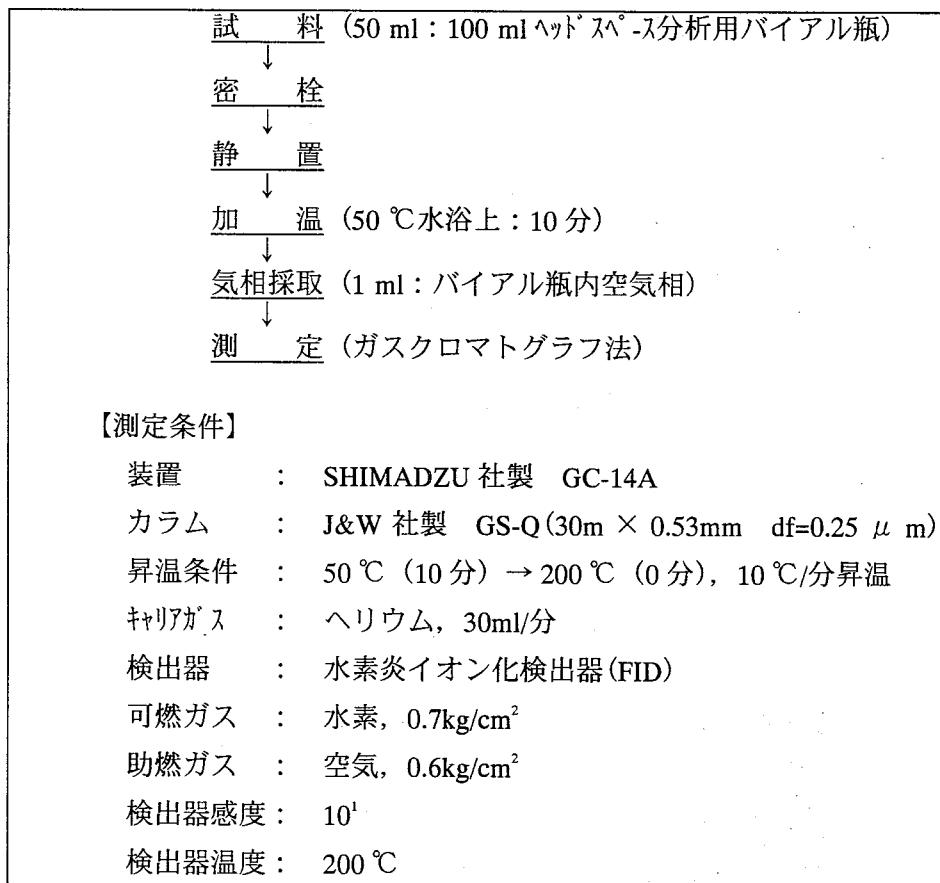
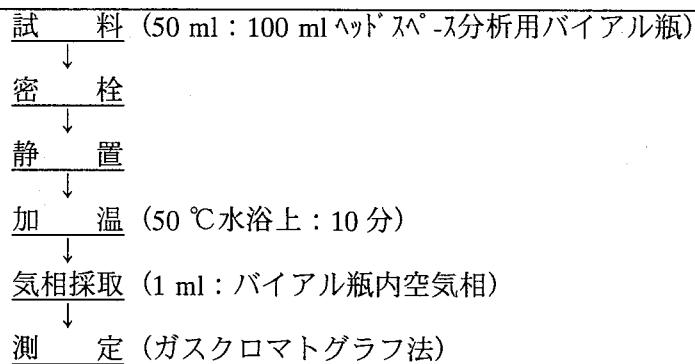


Fig. 4 挥発性低級炭化水素分析方法



【測定条件】

(クロマト部)

装置 : SHIMADZU 社製 GC-17A

カラム : J&W 社製 DB-5 (30m × 0.25mm df=0.25 μ m)

昇温条件 : 40 °C (5 分) → 300 °C (5 分), 10 °C/分昇温

キャリアガス : ヘリウム, 100kPa

注入法 : スプリット (スプリット比 10:1)

注入口温度 : 300 °C

(質量分析計部)

装置 : SHIMADZU 社製 QP-5000

測定質量範囲 : m/e=33 ~ 500

イオン化方法 : EI

Fig. 5 挥発性有機物 (分子量 33 以上) 分析方法

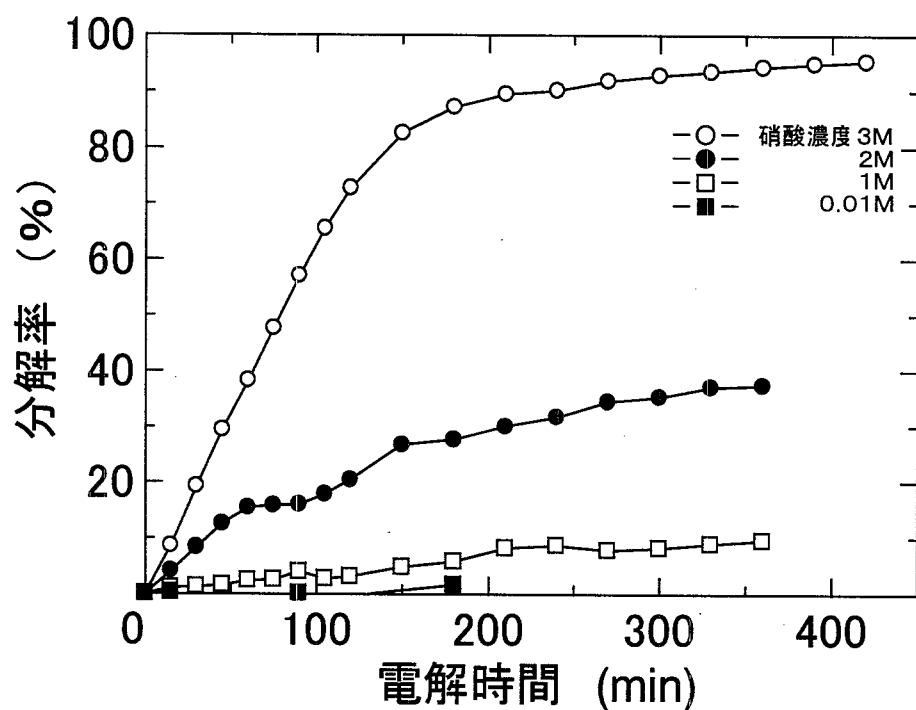


Fig. 6 硝酸濃度別ブチルアミン電解結果

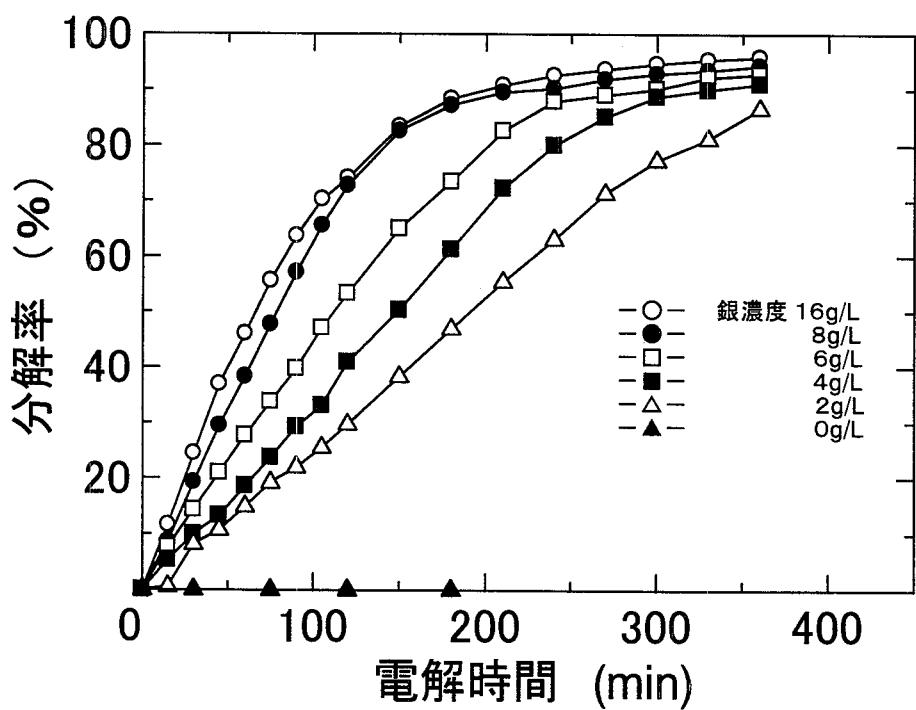


Fig. 7 銀濃度別ブチルアミン電解結果

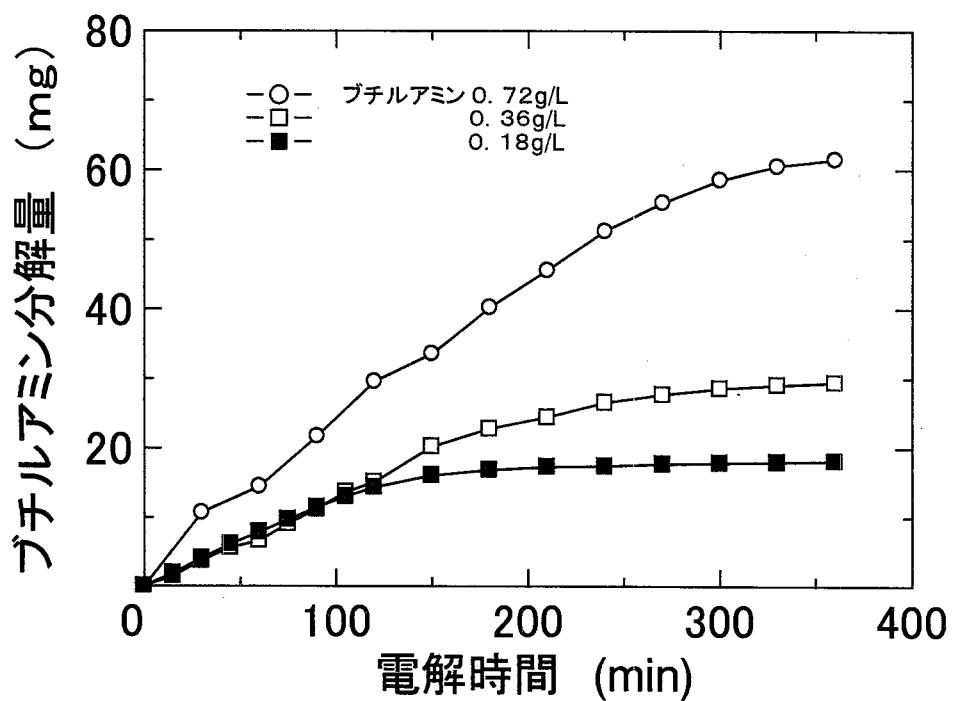
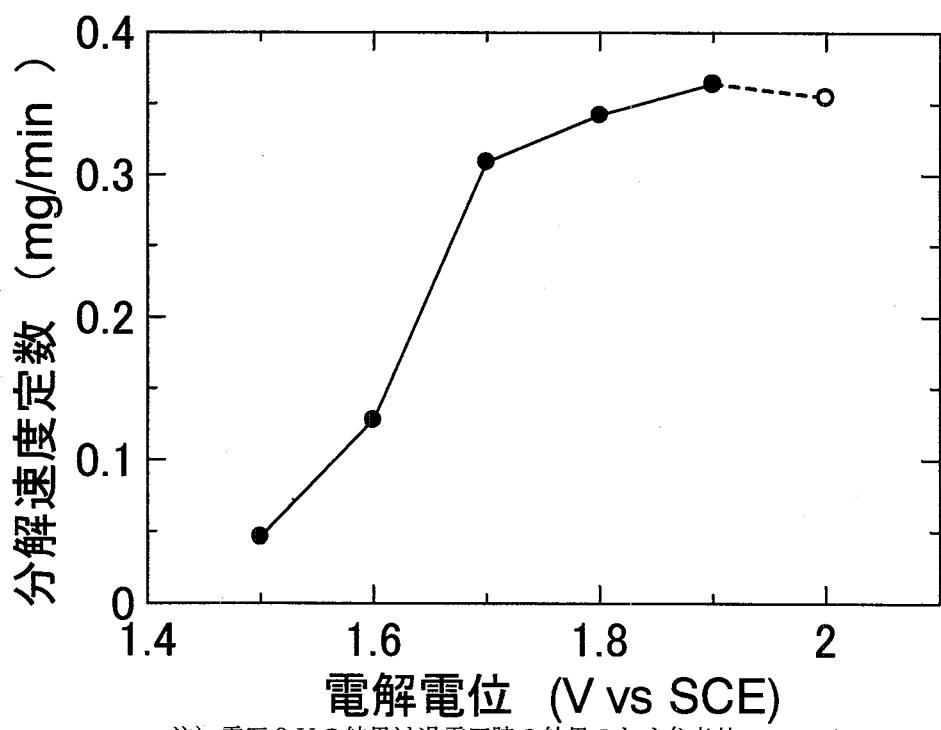


Fig. 8 ブチルアミン濃度別ブチルアミン電解結果



注) 電圧 2 V の結果は過電圧時の結果のため参考値

Fig. 9 電解電位変化に伴うブチルアミン分解速度定数の変化

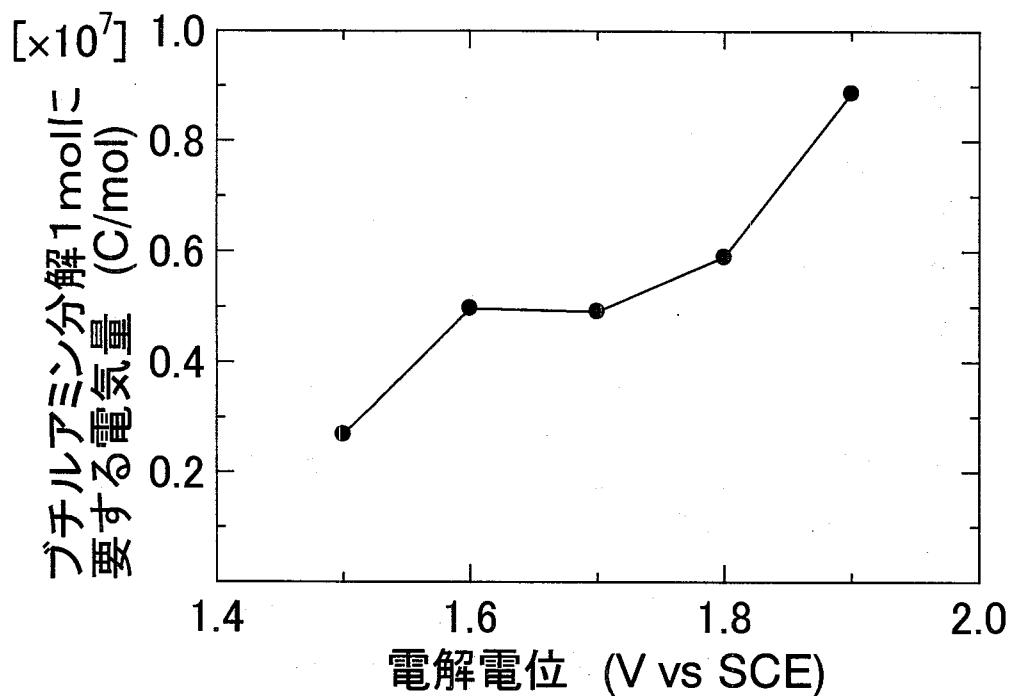


Fig. 10 各電解電位におけるブチルアミン分解所用電気量の変化

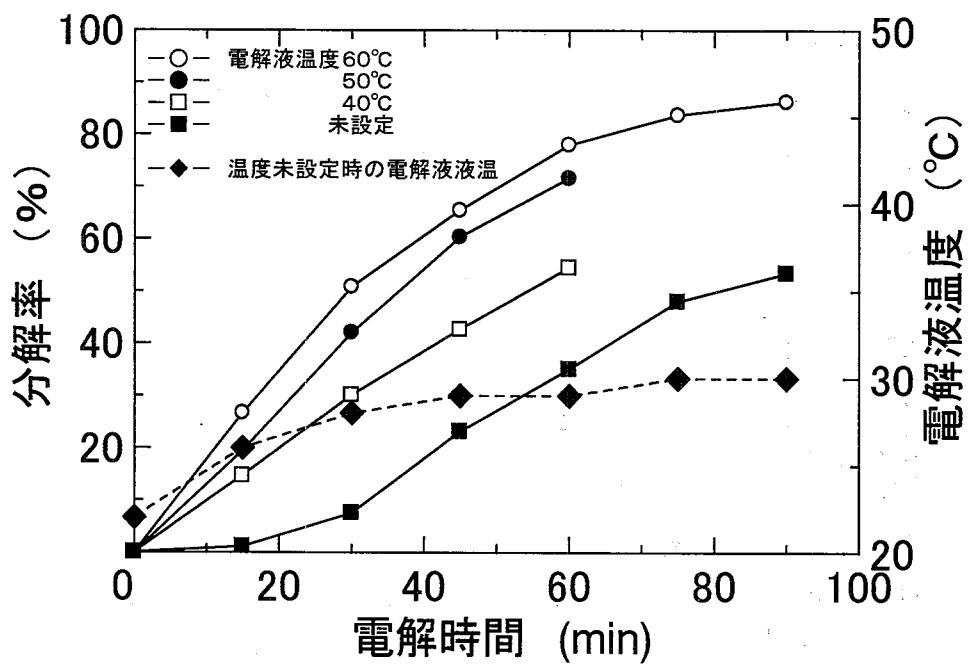


Fig. 11 電解液液温変化に伴うブチルアミン電解

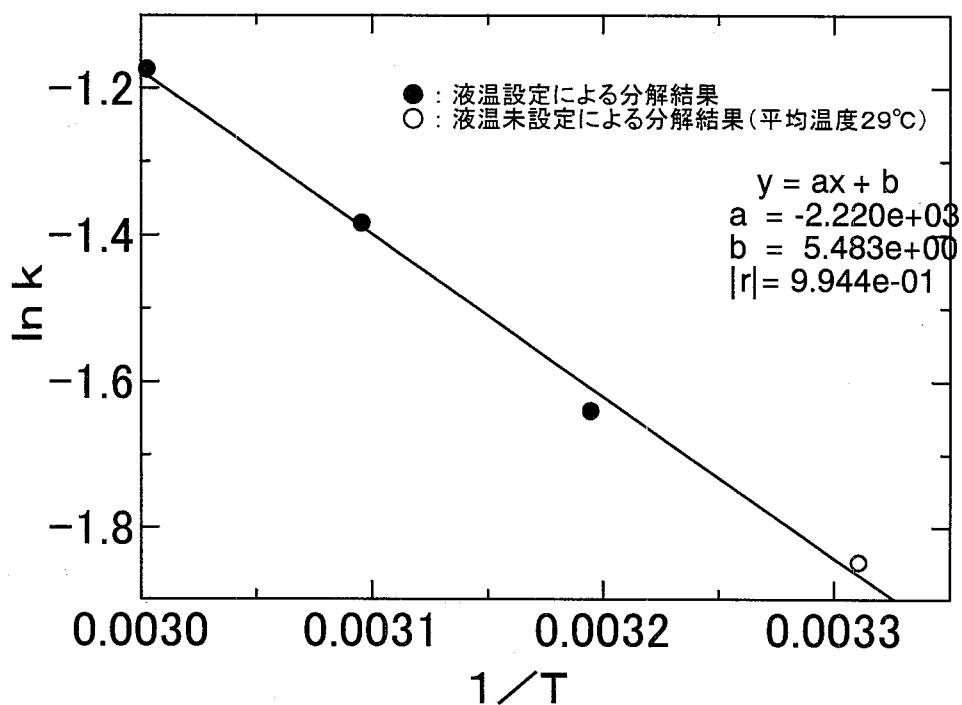


Fig. 12 温度変化条件下におけるブチルアミン電解のアレニウスプロット

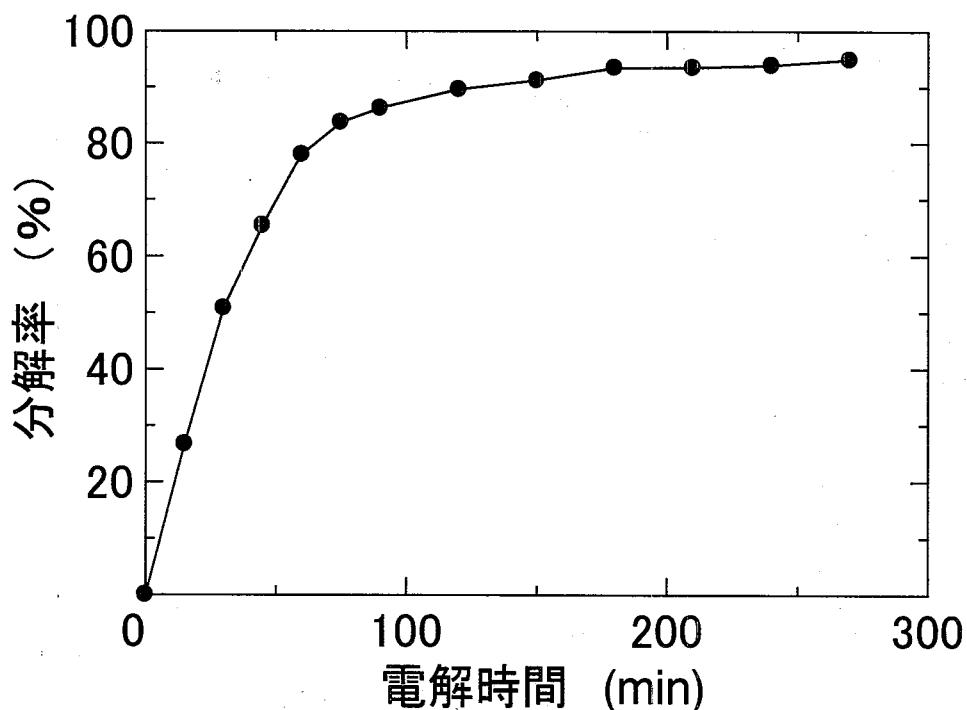


Fig. 13 最適条件下におけるブチルアミン電解の結果

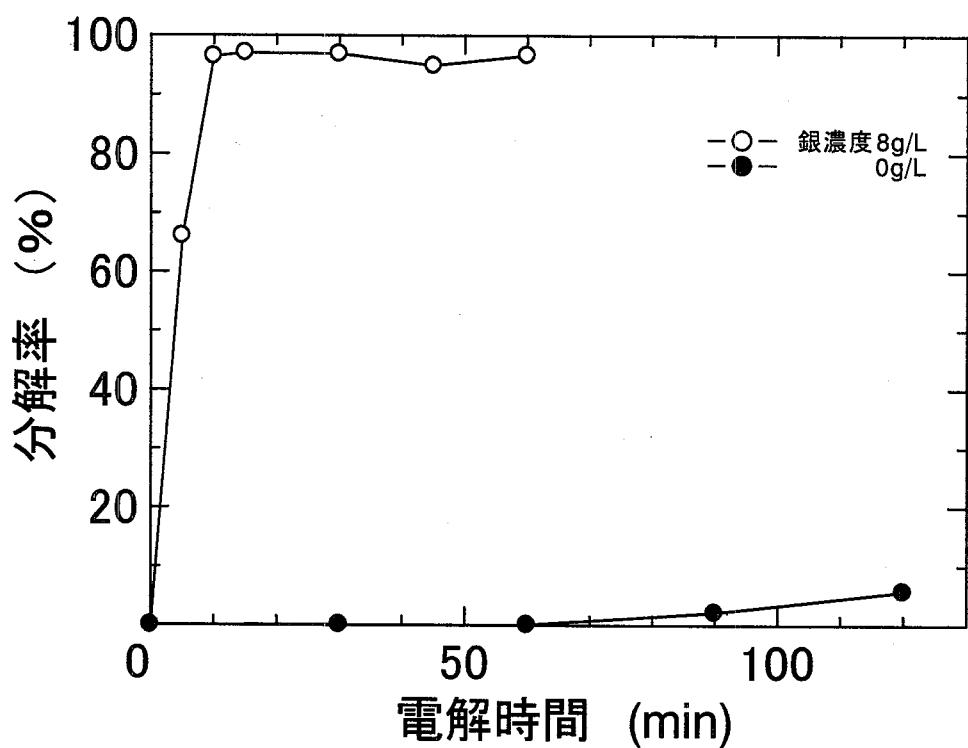


Fig. 14 最適条件下におけるシュウ酸電解の結果

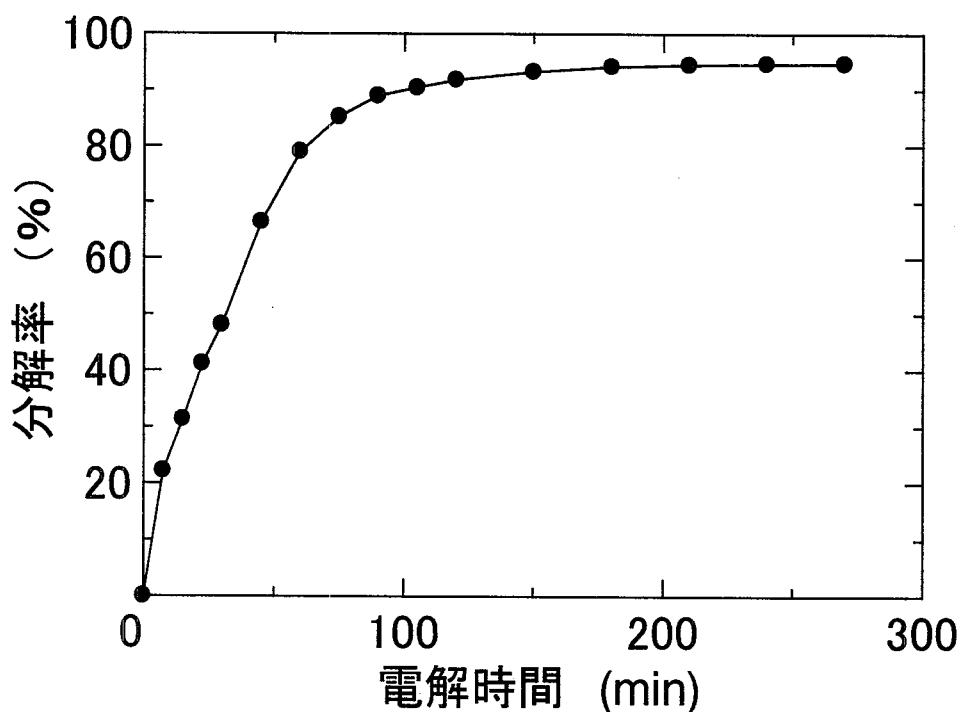


Fig. 15 最適条件下におけるシュウ酸ブチルアミン電解の結果

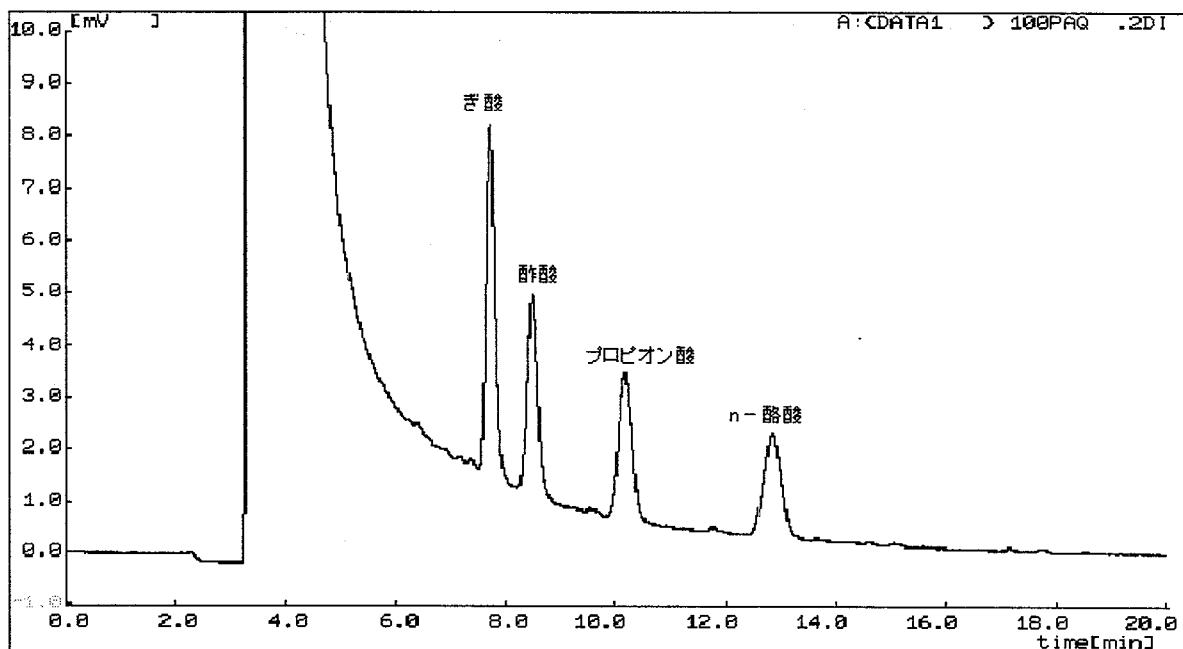


Fig. 16 混合カルボン酸標準溶液($100 \mu\text{g}/\text{ml}$)のクロマトグラム(液体クロマトグラフィー)

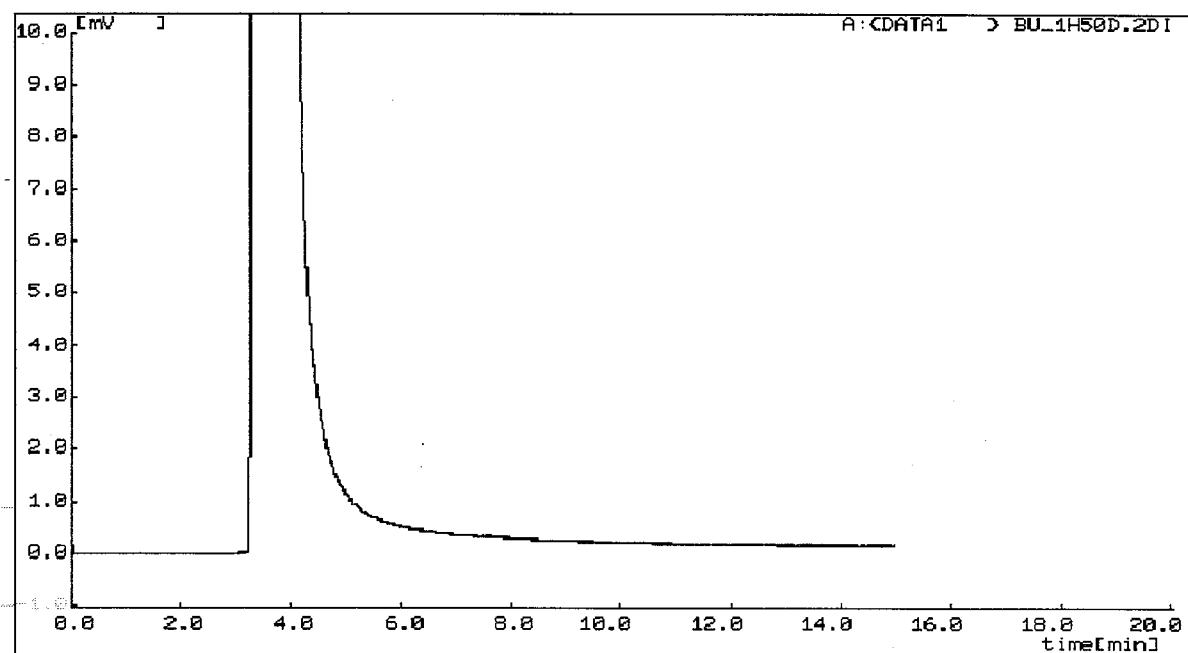


Fig. 17 ブチルアミン40%電解試料のクロマトグラム(液体クロマトグラフィー)

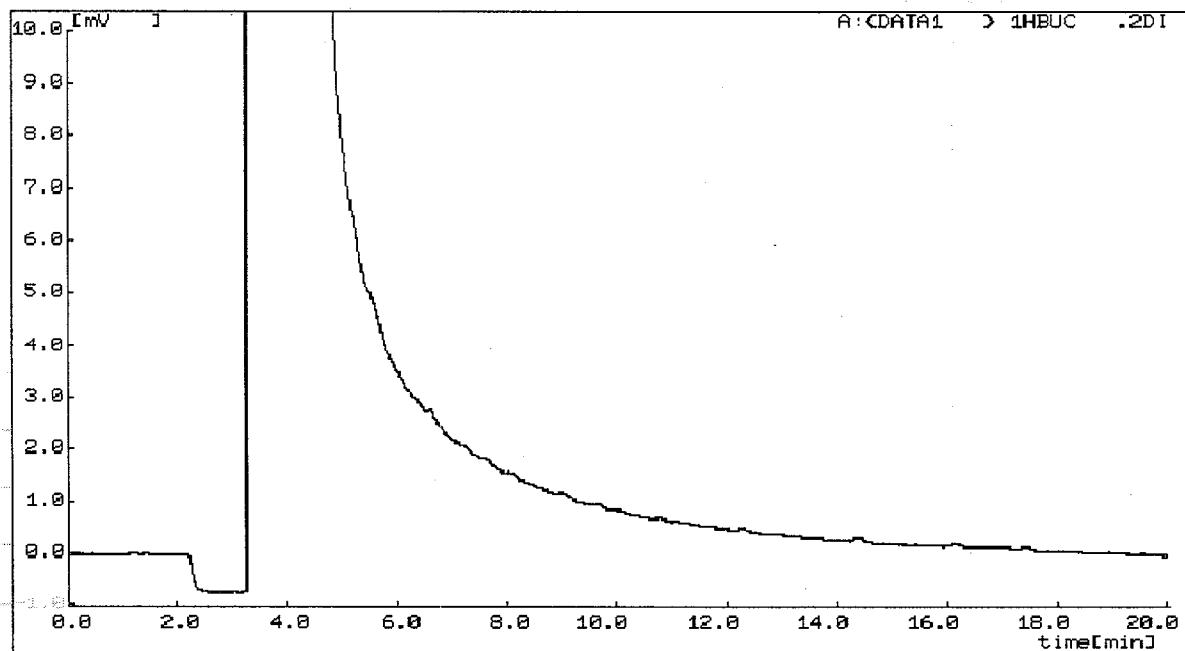


Fig. 18 シュウ酸ブチルアミン 40 % 電解試料のクロマトグラム（液体クロマトグラフィー）

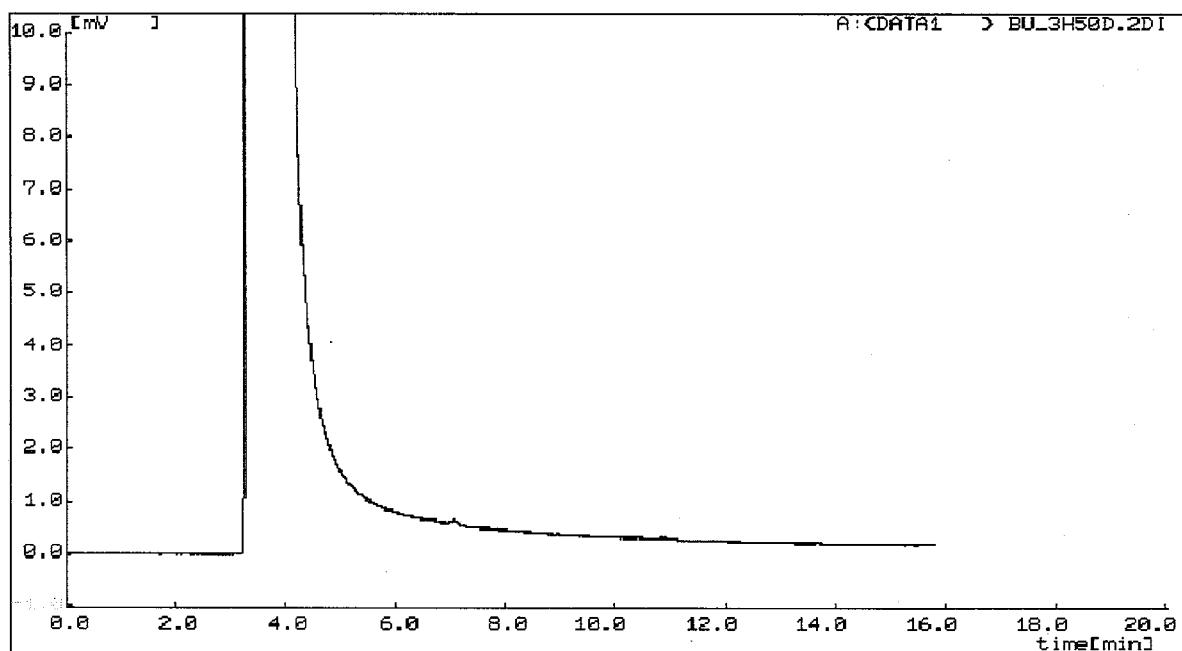


Fig. 19 ブチルアミン 95 % 電解試料のクロマトグラム（ガスクロマトグラフィー）

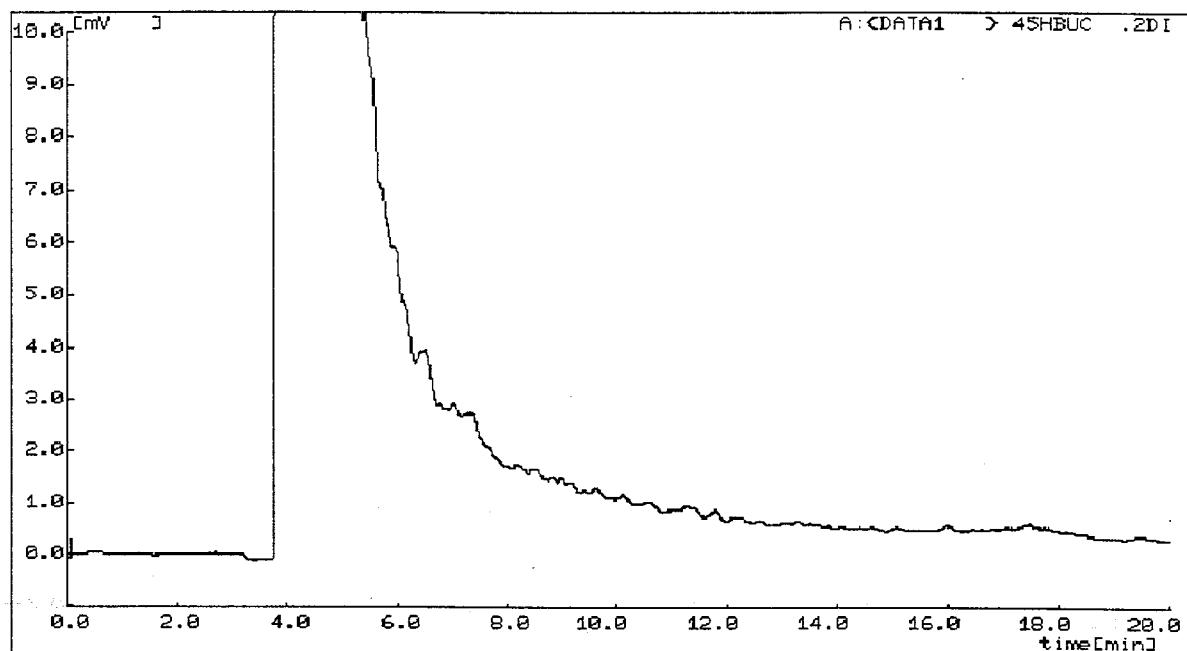


Fig. 20 シュウ酸ブチルアミン 9.5 % 電解試料のクロマトグラム（液体クロマトグラフィー）

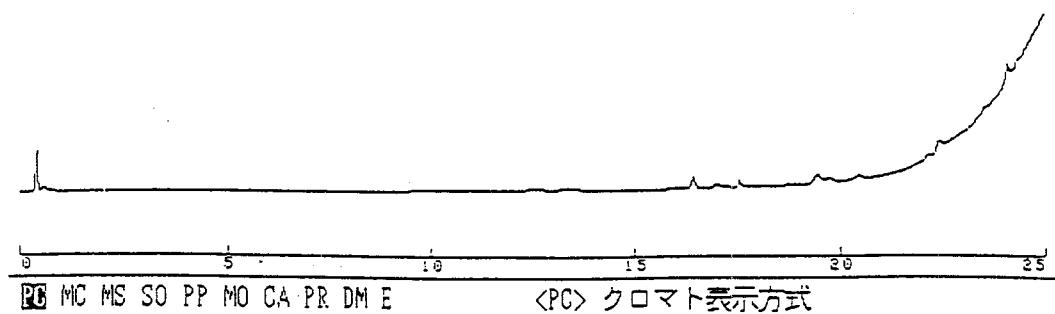


Fig. 21 ブチルアミン 4.0 % 電解試料のクロマトグラム（ガスクロマトグラフィー）

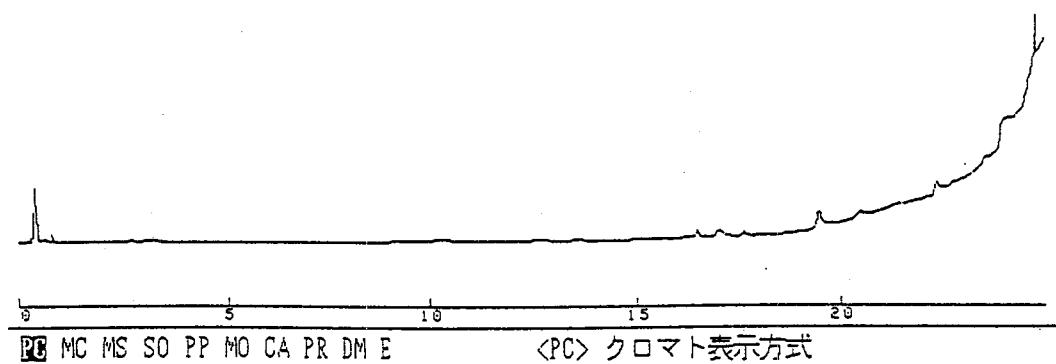


Fig. 22 シュウ酸ブチルアミン40%電解試料のクロマトグラム（ガスクロマトグラフィー）

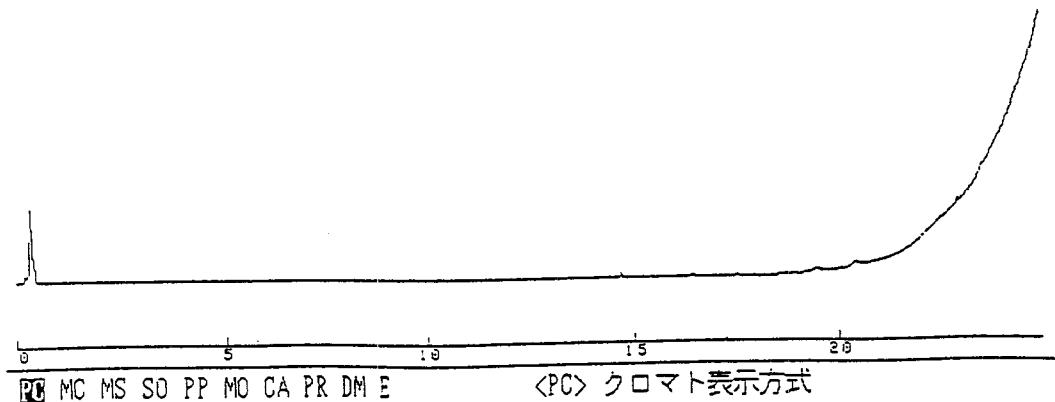


Fig. 23 ブチルアミン9.5%電解試料のクロマトグラム（ガスクロマトグラフィー）

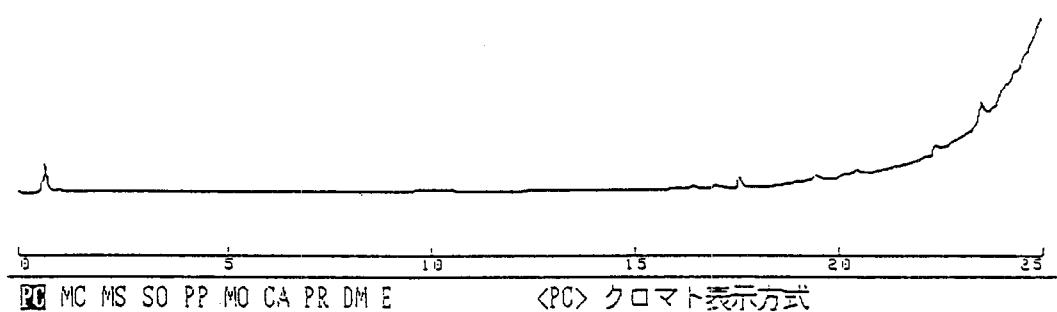


Fig. 24 シュウ酸ブチルアミン 9.5% 電解試料のクロマトグラム（ガスクロマトグラフィー）

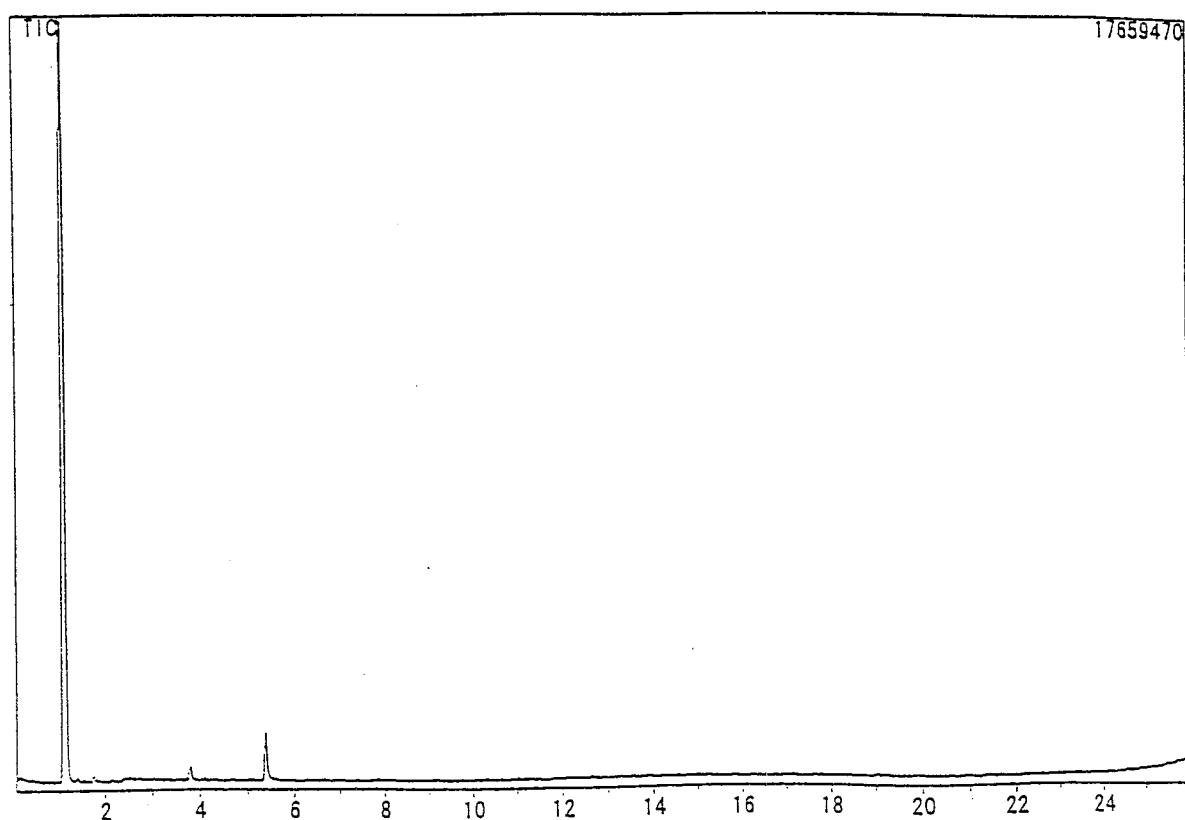


Fig. 25 ブチルアミン 4.0% 電解試料のクロマトグラム（ガスクロマトグラフ質量分析）

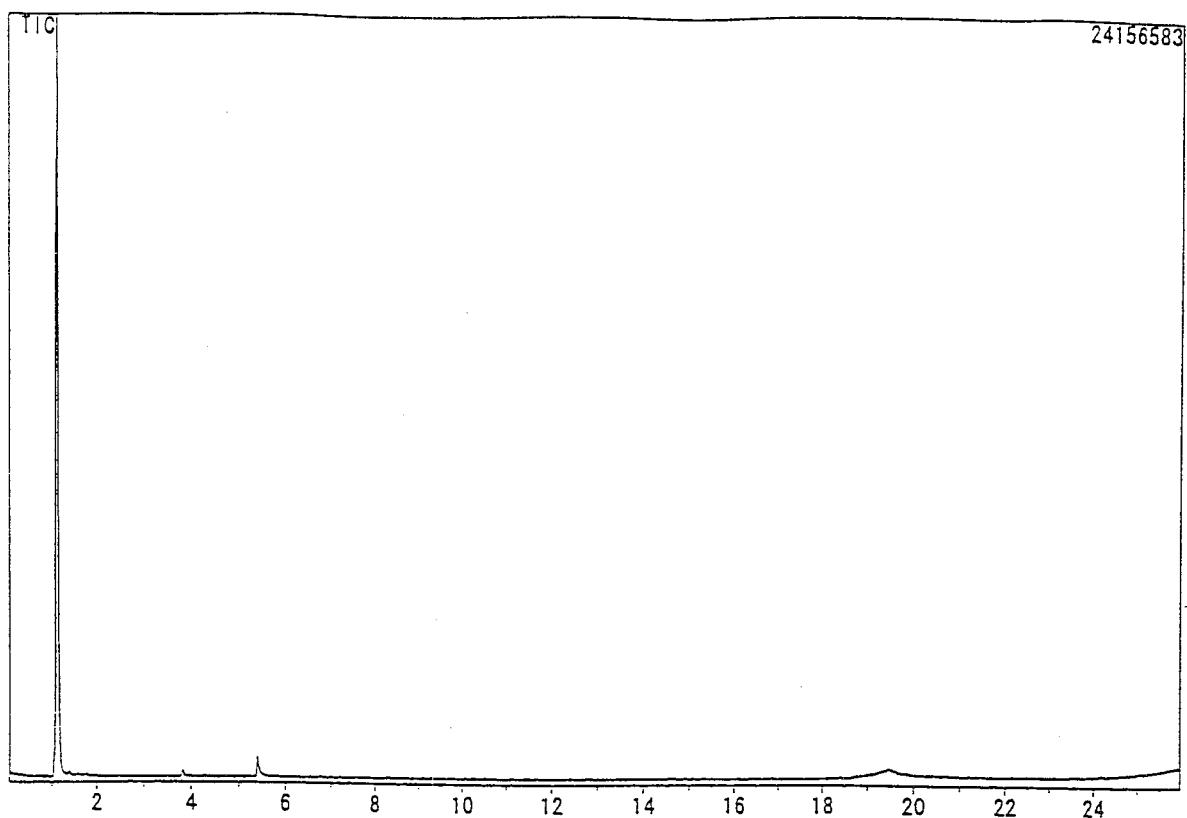


Fig. 26 シュウ酸ブチルアミン40%電解試料のクロマトグラム(ガスクロマトグラフ質量分析)

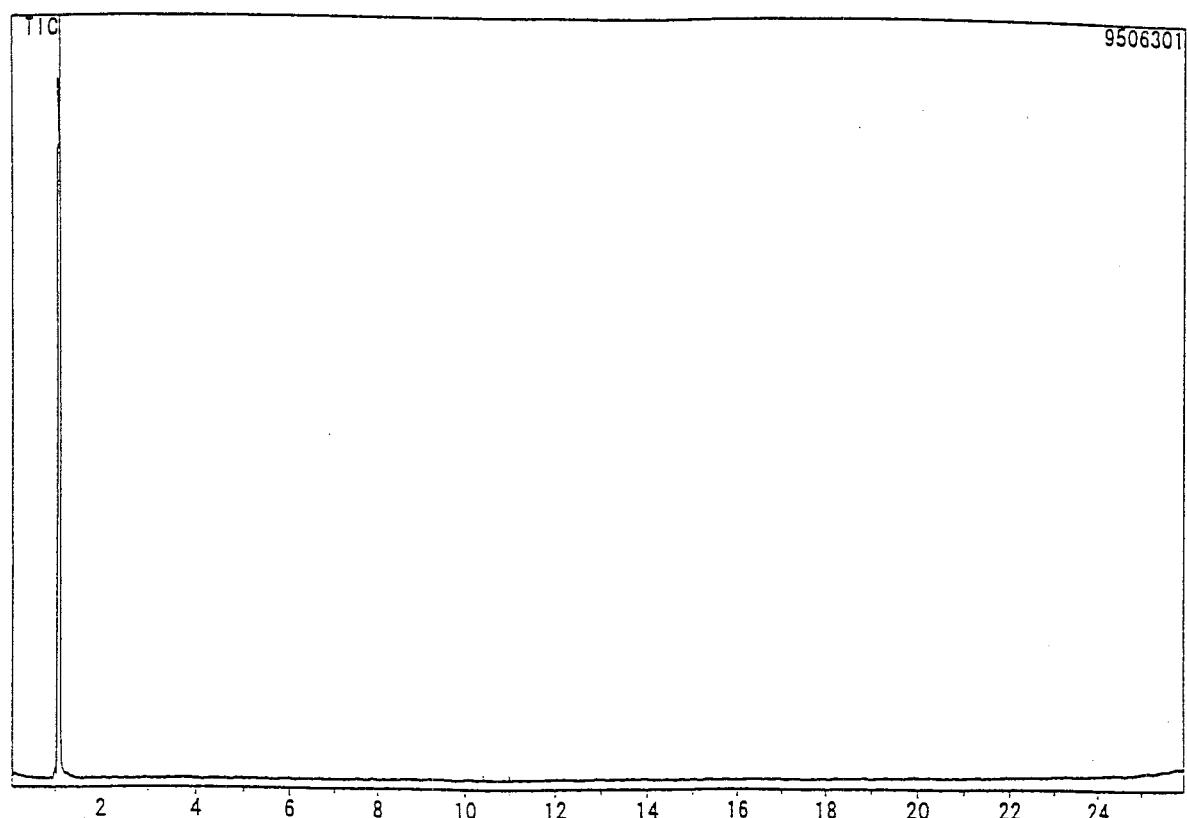


Fig. 27 ブチルアミン95%電解試料のクロマトグラム(ガスクロマトグラフ質量分析)

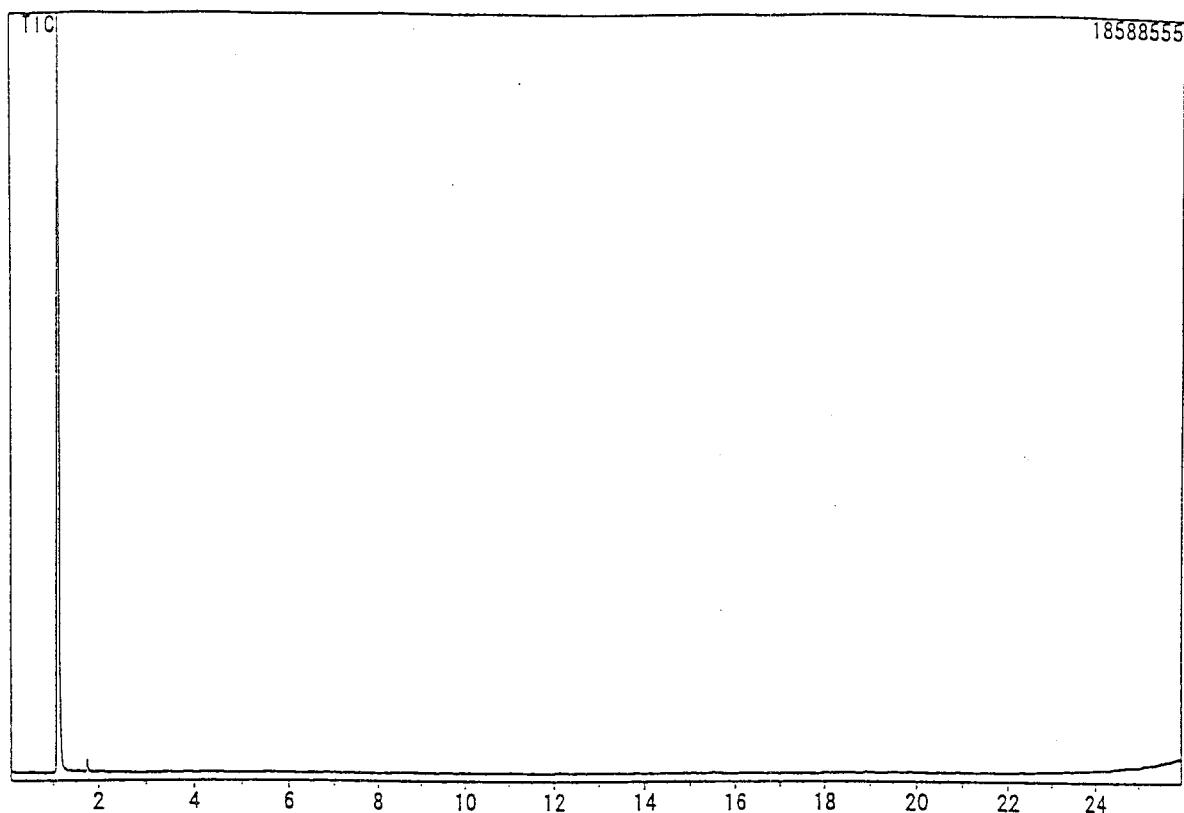
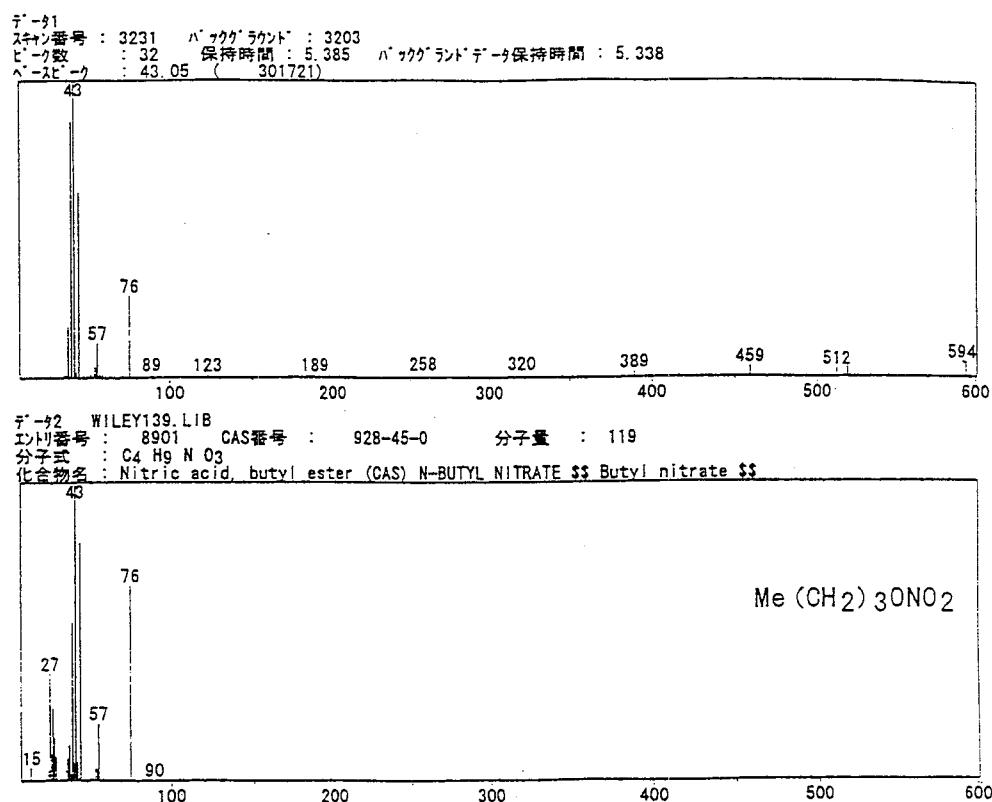


Fig. 28 シュウ酸ブチルアミン 9.5% 電解試料のクロマトグラム (ガスクロマトグラフ質量分析)

Fig. 29 ブチルアミン 4.0% 電解試料 5.4分ピーケの質量スペクトル (上) と
データベース検索 (下)との比較 (ガスクロマトグラフ質量分析)

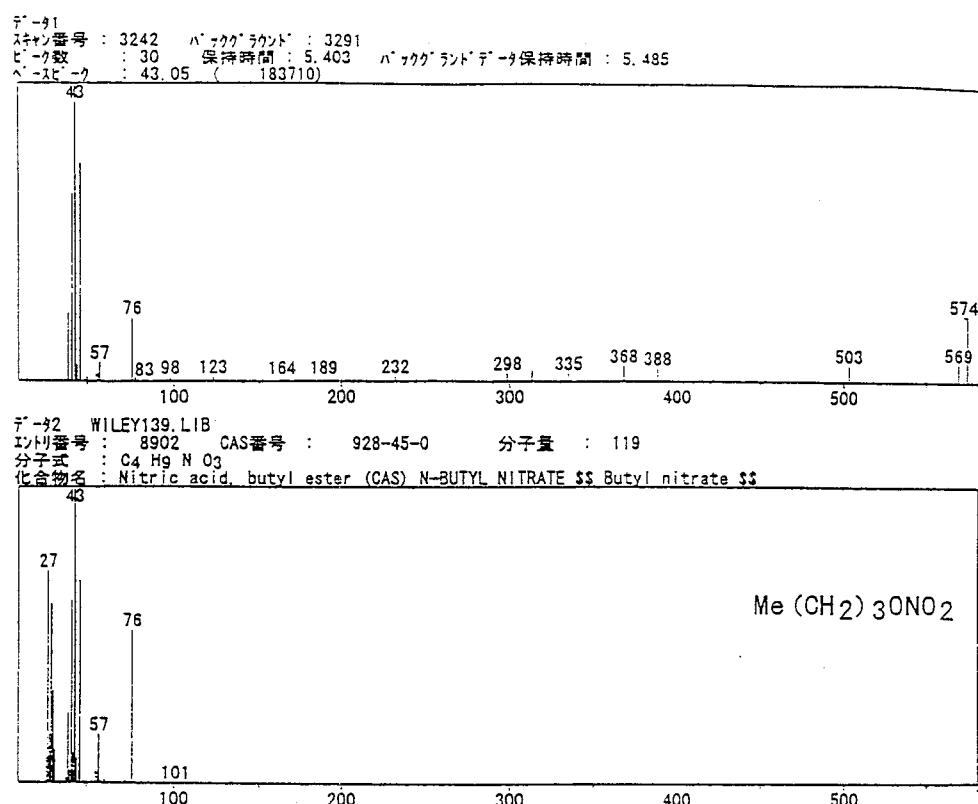


Fig. 30 シュウ酸ブチルアミン40%電解試料5.4分ピークの質量スペクトル（上）とデータベース検索（下）との比較（ガスクロマトグラフ質量分析）

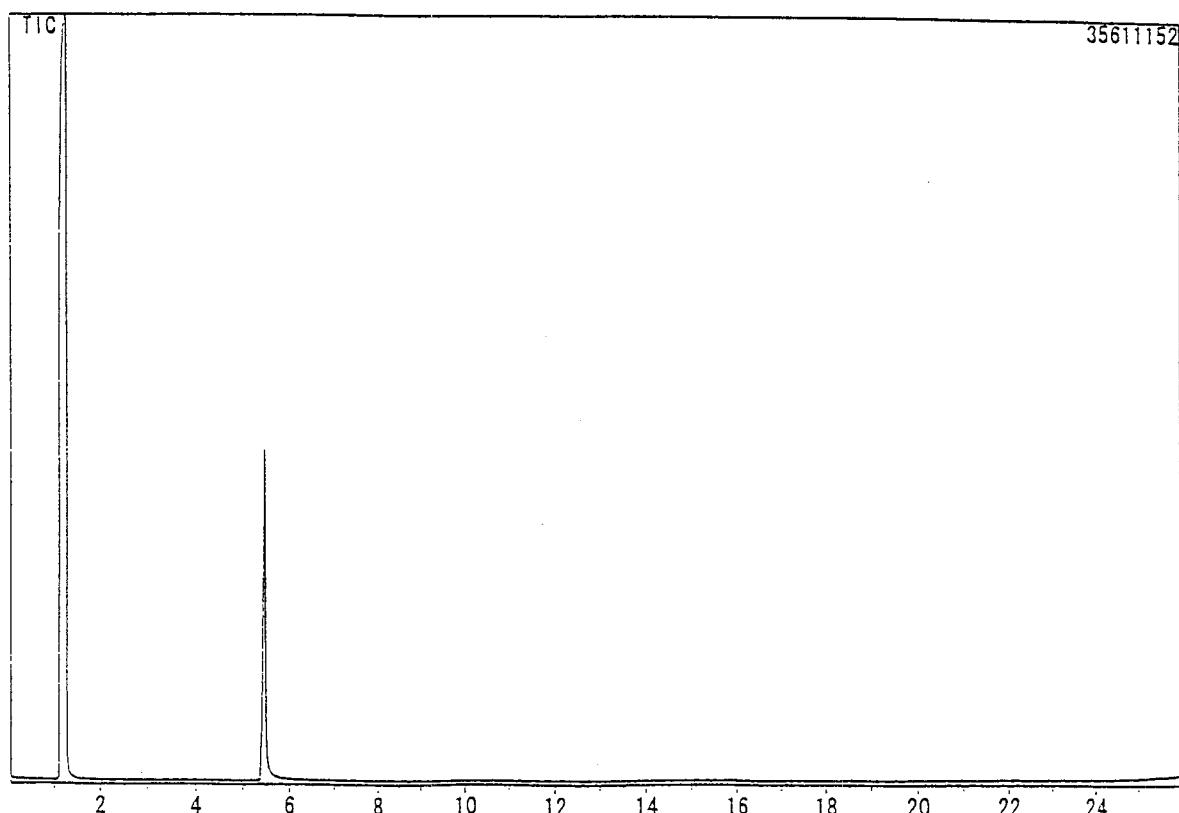


Fig. 31 硝酸ブチル標準（絶対量：2 μg）のクロマトグラム（ガスクロマトグラフ質量分析）

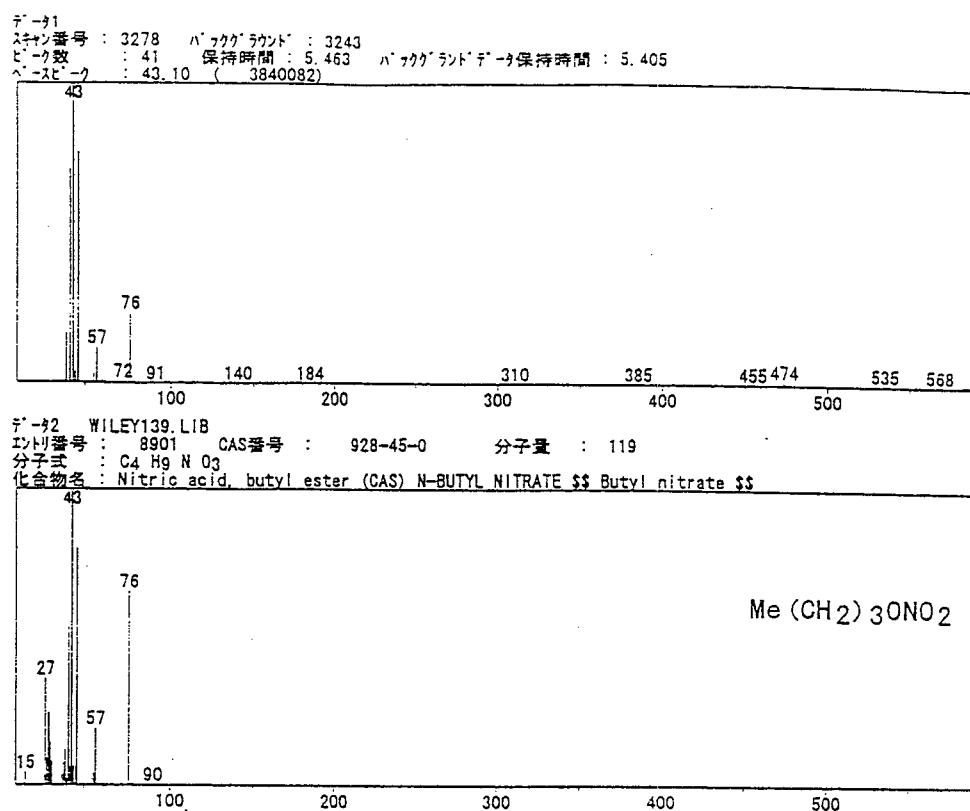


Fig. 32 硝酸ブチル標準 5.4 分ピーカの質量スペクトル（上）とデータベース検索（下）との比較（ガスクロマトグラフ質量分析）

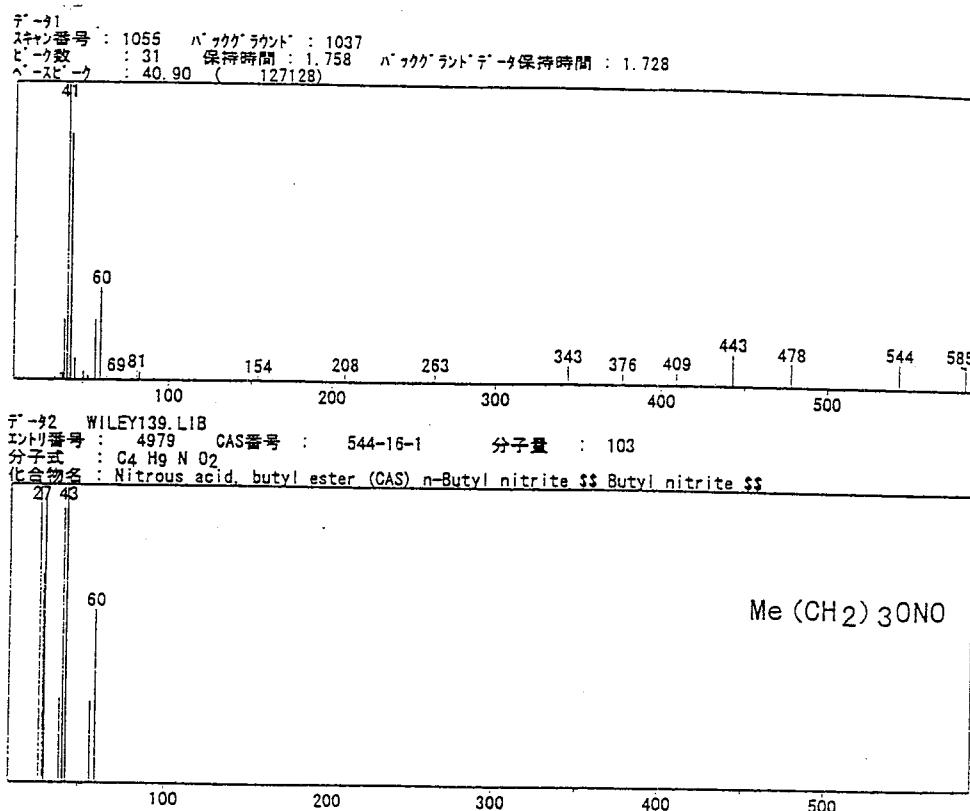


Fig. 33 シュウ酸ブチルアミン 9.5 % 電解試料 1.7 分ピーカの質量スペクトル（上）とデータベース検索（下）との比較（ガスクロマトグラフ質量分析）

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	1bf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)(cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	1bf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855J (15°C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868J (国際蒸
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

