電気限外濾過型バイオリアクターの特性†

箱田 優・千葉常則*・中村厚三

群馬大学工学部 生物化学工学科††

タンパク質溶液を限外濾過によって分離・濃縮を行うような場合、タンパク質は膜面上に堆積しゲル状になり、非常に大きな濾過抵抗を示す。電気限外濾過は、電場を印加することにより荷電粒子や溶質が膜面に堆積するのを防止する方法である。

本論文は、グルコアミラーゼによる澱粉の連続的加水分解を反応例として、電気限外濾過型バイオリアクターの酵素活性と濾過流束に及ぼす電場の影響について実験的に検討を行った。

電場による酵素活性の低下の原因は電解浮上分離と電気的な失活であり、それぞれ、電気量と電気エネルギーの関数であることが明らかとなった。緩衝液を用いない場合は、電場印加によっての電流値が小さく、酵素活性はわずかに減少するものの、濾過流束はかなり増大した。その結果、電気限外濾過型バイオリアクターは、実験条件によっては大変有効な方法であることがわかった。

緒 言

近年、食品工業、発酵工業等の諸工業を中心として、膜型反応器により酵素を固定化し有効利用することが試みられている^{1,2,4,5,7,8,11,12)}。このシステムの特徴は、酵素回収が可能であり、連続操作を行うことができ、連続的に生成物を反応系から取り除くため、生成物阻害があるような系においては特に有効である。また、基質が澱粉のように高分子物質の場合、包括法のような固定化法を用いたとき、基質の固定化粒子内部への拡散速度が遅いため、見かけの反応速度は低下することになる。さらに、膜型反応器では、物理的あるいは、化学的修飾を受けないため、酵素は自由な状態にあり、酵素本来の活性を維持し、したがって反応速度が大きいという利点がある。

しかしながら、分離に膜を用いた場合、基質や酵素のような膜の分画分子量より大きな分子は、限外濾過膜面上に堆積し濃縮されゲル状となり、その濾過抵抗は通常のケーキ濾過の比抵抗に比べておよそ $10^3 \sim 10^4$ 倍も大きくなるという大きな欠点がある。この膜のファウリングの対策としては、電場を利用し溶質を膜から遠ざけることにより、ファウリングを防止する電気限外濾過法が検討されている。油川ら^{14,15)}は、ファウリングによる濾過流束の減少を防止するため、電気限外濾過法をコロイ

ド溶液の分離に適用し、濾過流束の減少を防止するとともに、電気限外濾過過程を、1) 濃度分極成長過程、2) ゲル層成長過程、3) 定常過程と3段階に分け理論解析を行い、電気限外濾過法の有効性を明らかにした。木村ら⁶⁾は、アルブミン、ビタミンB₁₂を用いて、都留ら¹³⁾、Daufinら³⁾は、数種類のタンパクおよびアミノ酸の分離を行い、電気限外濾過法の有効性を明らかにした。Leeら⁸⁾は、アスパルターゼを膜内に固定化し、フマル酸塩からアスパラギン酸塩を生成する反応において電気泳動により、透過液中にアスパラギン酸塩が選択的に透過することを報告している。

しかし、生体触媒である酵素を用いた膜型反応器に電気限外濾過法を応用した研究例は少ないのが現状である。

本研究は、グルコアミラーゼによる澱粉の加水分解を反応例として、反応と生成物の分離を同時に行うことのできる電気限外濾過型バイオリアクター(EUFBR)を開発し、その有効性について検討を行った。特に、油川らの電気限外濾過における定常過程の濾過流束の式について検討するとともに、酵素活性の安定性に及ぼす電場の影響についても実験的に検討した。

1. 電気限外濾過型バイオリアクターの原理

EUFBRの模式図をFig. 1に示した。基質である澱粉は、反応器内でグルコアミラーゼにより加水分解され、グルコースになり、膜により濾過される。この時、未反応の澱粉およびグルコアミラーゼは、膜により阻止され、グルコースのみが透過する。ここで、未反応澱粉やグル

† 1990年4月5日受理；化学工学会一関大会（一関，1989年7月）にて発表

†† 〒376 桐生市天神町1-5-1

* 三井金属鉱業(株)

Fig. 1 Concept of electro-ultrafiltration bioreactor

コアミラーゼの濃度分極層、あるいは、ゲル層の形成により、透過流束が低下する。そこで、グルコアミラーゼが両性電解質であり、等電点が4.2であることからアルカリ側で負、酸性側では正の電位を有することに着目し、溶液のpHをグルコアミラーゼの最適pH4.5にコントロールし、電場を印加することにより、電気泳動によってグルコアミラーゼを膜から引き離すことによって膜のファウリングを防止し、透過流束の増大を計る。

2. 電気限外透過式

EUFBRの生産性を評価するに当たり、グルコース質量流束 J_{mg} は、Eq.(1)のようになる。

$$J_{mg} = J_v \cdot C_{p0} \quad (1)$$

$$= J_v \cdot C_{pi} (1-R)$$

ここで、 J_v は透過流束、 C_{p0} は、透過液中のグルコース濃度であり、 C_{pi} は反応器内グルコース濃度、 R は膜のグルコース阻止率である。 C_{pi} は滞留時間に依存するため、 J_v の増加とともに減少するが逆比例関係ではない。したがって、 J_v の増加によって生産性が向上すると思われる。 J_v は、油川らにより、Eq.(2)のように表される¹⁴⁾。

$$J_v = K \cdot \ln \frac{C_g}{C_b} + kE \quad (2)$$

ここで、 K は濃度分極層の物質移動係数、 C_g はゲル濃度、 C_b は溶液濃度、 k は電気泳動度、 E は電場強度である。本研究のメンブレンリアクターの場合は、 C_g 、 C_b は酵素と未反応基質の混合物濃度である。

3. 実験装置および方法

EUFBRの実験装置をFig. 2に示した。基質供給槽①より、澱粉溶液を④のポンプを用いて、反応器⑤に供給する。反応器では、酵素溶液がマグネチックスターラにより攪拌されている。未反応の基質と、酵素と生成物の混合溶液は、⑧の分離器に導かれ、生成物のみが分離される。未反応基質と酵素は、反応器に戻される。⑩の直流安定化電源により電場を印加した。Fig. 3に、電気限外透過法を利用した分離器を示した。電極間距離は、0.5

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 3 Schematic diagram of separator

cm、有効膜面積は28.3cm²電極は白金プレート、白金ネットを用いた。本実験の場合、上部電極は正、下部電極は負とした。限外透過膜は、ダイセル化学工業DUS-K5のポリエチレンスルホン膜であり、分画分子量5000のものである。澱粉は、和光純薬工業の生化学用澱粉、酵素はシグマ化学製 *Aspergillus niger* 由来のグルコアミラーゼ(23000 units/mg, 1 unitはpH 4.5, 328Kにおいて3分間に1mgのグルコースを生成する酵素量)を使用した。pHは、Table 1に示した3種類の緩衝液により4.5に調整した。グルコース定量分析は、和光純薬工業Glucose-C-Test-Wako法による酵素法により測定した。グルコアミラーゼ定量分析には、分光光度計(島津製作所製)波長280nmにより測定した。酵素活性は、pH 4.5 328Kにおけるグルコース生成速度より測定した。また、電場強度は電極間距離当たりの印加電圧として、実効電場強度を示した。

Table 1 Properties of buffer solution and experimental results ($M=\text{kmol}/\text{m}^3$)

Key	A-A buffer	C-C buffer	C-P buffer
Constituent	0.2 M acetic acid- 0.2 M sodium acetate	0.2 M citric acid- 0.2 M sodium citrate	0.1 M citric acid- 0.2 M sodium phosphate
Electric conductivity [S/cm]	0.42×10^{-3}	1.23×10^{-3}	1.32×10^{-3}
k_1	[1/C] 1.99×10^{-5}	2.60×10^{-5}	3.04×10^{-5}
k_2	[1/J] 1.03×10^{-5}	3.84×10^{-5}	4.51×10^{-5}

Fig. 4 Effect of electric field strength on relative enzyme activity

Fig. 5 Effect of buffer soln. concentration on relative enzyme activity

4. 実験結果および考察

4.1 酵素活性に及ぼす電場の影響

酵素活性の安定性に及ぼす電場の影響について回分式電場印加装置により実験的に検討した。この実験は、1リットルのビーカーにFig. 3と同様の白金電極を電極間距離0.5cmで設置し、 $C_E = 0.13 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $\text{Temp.} = 298 \text{ K}$ の実験条件でマグネチックスターラーにより攪拌し、酵素溶液に電場を印加した場合の酵素活性の経時変化を測定した。

(1) 電場強度の影響 酵素活性に及ぼす電場強度 E の影響について検討した。Fig. 4は、電場を印加する前の酵素活性を1とした場合の相対活性 ϕ に及ぼす E の影響を示した。図より、 $E = 0$ においては失活は全く無いのに対して、電場印加により電場強度に応じて失活速度が大きくなり短時間のうちに失活することが明らかとなった。

(2) pH 緩衝液濃度の影響 Fig. 5は、相対活性に及ぼす緩衝液濃度の影響を示した。この場合の緩衝液濃度は、先ほどの実験方法のところでの緩衝液濃度の1/100, 1/10と緩衝液無添加のものとの比較について電場強度3000 V/mで行った。図より、緩衝液無添加の場合は失活がほとんど無く、緩衝液濃度を大きくすると失活速度も大きくなった。以上の結果より、酵素活性に及ぼ

す電場の影響については緩衝液無添加の場合が最も安定していることが明らかとなった。

(3) 緩衝液の種類による影響 酵素反応において酵素活性に及ぼすpHの影響は大きく、pHをコントロールすることは重要であるため、電場印加による酵素失活の少ない緩衝液を選択することを目的として緩衝液の種類を変化させ実験的に検討した。緩衝液の種類を変化させた実験についてはTable 1に示した3種類の緩衝液について行った。Fig. 6は同一条件における相対活性に及ぼす緩衝液の影響を実線で示した。図より、A-A緩衝液を用いた場合の酵素活性が最も安定しており、C-C緩衝液、C-P緩衝液を用いた場合は同じように失活速度が早くなった。

4.2 電場による失活の原因

(1) 電解浮上分離による影響 大佐々ら¹⁰⁾は、電極反応から生成されるガスによる電解浮上分離を行い、電気分解により生成されるガスは細かく電解浮上分離に適していることを報告している。本実験においても気泡の生成は確認されており、電解浮上分離の可能性について検討を行った。そこで、先ほどの緩衝液の種類を変化させた実験における酵素の残存率の経時変化をFig. 6の破線で示した。図のように酵素残存率は、酵素の相対活性にほぼ等しく減少しており、相対活性の減少のほとんどは電解浮上分離による酵素の浮上が原因である。次に、

Fig. 6 Effects of buffer soln. on relative enzyme activity and residual enzyme

Fig. 7 Relation between residual enzyme and amount of electricity

酵素残存率とガス生成量および電気量との関係について検討した。電極反応により生成するガス量は次式のようになる。

$$V_{gas} = \left(\frac{2.24 \times 10^{-2}}{F \times (\text{酸素 1 mol 当たりの g 当量数})} + \frac{2.24 \times 10^{-2}}{F \times (\text{水素 1 mol 当たりの g 当量数})} \right) I \cdot t$$

ここで、 F は Faraday 定数である。Fig. 7 は酵素残存率 R_E に及ぼす電気量 $I \cdot t$ の関係を緩衝液の種類をパラメータとして示した。また、 $I \cdot t$ に相当する V_{gas} を Eq. (3) より求め図中に目安として示した。図より、 R_E は $I \cdot t$ と直線関係にあり、電極反応による生成ガス量は電流値と時間の積に比例することから、酵素残存率は電気量の関数となり Eq. (4) として表される。

$$R_E = \exp(-k_1 \cdot I \cdot t) \quad (4)$$

ここで k_1 は、緩衝液種類、電極の設置（縦型、横型）、攪拌の有無等さまざまな条件により異なることが実験的に確認された。また、各緩衝液による k_1 の値を Table 1

Fig. 8 Effect of buffer soln. on ϕ/R_E

Fig. 9 Relation between ϕ/R_E and electric energy

に示した。緩衝液種類による k_1 の相違は、緩衝液種類によってタンパク質の気泡への吸着特性が異なるためと思われる。

(2) 電気的な失活について 次に、酵素残存率当たりの相対活性 ϕ/R_E 、つまり電解浮上分離以外の酵素の失活について検討を行った。電解浮上分離以外の酵素失活は電気化学的な失活として考えられる。Fig. 8 は、緩衝液種類をパラメータとして ϕ/R_E の経時変化を示した。A-A 緩衝液は ϕ/R_E が比較的安定しているのに対して他の緩衝液は急激に減少している。A-A 緩衝液は電気的な失活に対しても優れていることを示している。Fig. 9 は、 ϕ/R_E と電気エネルギーとの関係を示した。各緩衝液について直線性を示していることから、 ϕ/R_E で示される電気的な失活は電気エネルギーで表され、次式で表される。

$$\phi/R_E = \exp(-k_2 \cdot V \cdot I \cdot \theta) \quad (5)$$

ここで、 θ は（電極間体積 / 溶液の全体積）× 経過時間であり、電場印加時間とする。また、 k_2 は電気的な酵素失活の定数であり、先ほどの k_1 と同じくさまざまな条件により異なると思われる。本実験条件における各緩衝液の k_2 の値は Table 1 に示した。また、この電気的な

酵素失活の原因については、局所的な温度、あるいは pH の変化による失活かと考えたが、実験的に検討した結果、そのようなことは考え難く、SH 基を持った酵素の電気的な酸化による失活、酵素に結合している、補酵素・金属イオンなどが通電中に解離することによる失活、タンパク質内のシステイン、チロシン、アルギニンなどのアミノ酸の部分的な酸化分解による失活等が一般的に考えられるが、現時点では、原因は明らかになっていない。

以上の結果より、電場による酵素の失活は、電気量および電気エネルギーの関数となることが明らかとなったため、失活を抑制する方法としては、印加電圧あるいは電流値を小さくすることになるが、Eq. (2) に示すように電場強度は電気泳動速度に影響を与えるため、電流値を最小限に抑える。すなわち、電気抵抗を大きくするために、pH 緩衝液を無添加で行うべきである。しかし、グルコアミラーゼの相対活性に及ぼす pH の影響を実験的に検討した結果、pH 4.5 から pH 3.5 になった場合相対活性は約 10% 減少することが明らかになった。つまり、pH 緩衝液を添加せずに電場による酵素失活を抑えるか、あるいは pH 緩衝液を添加して pH 変化による活性の低下を抑えるかは、使用する酵素の特性、つまり電場中における酵素活性の安定性および pH の変化による酵素活性の安定性により決定すべきである。

4.3 EUFBR における電場の影響

回分式における、酵素活性に及ぼす電場の影響について上述したが、ここでは実際に用いる EUFBR を用いて、透過流束および酵素活性に及ぼす電場の影響を Fig. 2 の実験装置を用いて実験的に検討する。また、EUFBR を用いた実験については緩衝液無添加で行った。

(1) 酵素溶液の限外濾過 EUFBR では、基質は酵素により分解され、基質濃度および分子量は変化するが、酵素濃度は実験条件によりほぼ一定であるため、まず、酵素溶液の濾過抵抗について検討を行った。

そこで、電場を印加せずに酵素溶液の限外濾過を行い、酵素濃度をパラメータとして濾過流束と濾過圧力の関係を実験的に求め、その結果から、各酵素濃度 C_E における臨界圧力 $\Delta P_{(cr)}$ を求めた。 $C_E = 0.026 \sim 0.26 \text{ kg/m}^3$ の範囲では、臨界圧力は酵素濃度の関数として次式のように表される。

$$\Delta P_{(cr)} = 8.04 C_E^{-0.10} \quad (6)$$

また、油川らの方法¹⁴⁾に従い Eq. (2) の関係より、縦軸に J_v を横軸に $\log C_E$ をプロットし、直線の傾きより物質移動係数 K 、横軸接片よりゲル濃度 C_g を求めると、 $K = 1.26 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、 $C_g = 52 \text{ kg/m}^3$ となった。

(2) 透過流束に及ぼす電場の影響 透過流束に及ぼす電場の影響を検討するにあたり、酵素活性に及ぼす電

Fig. 10 Effect of electric field strength on filtrate flux

場の影響を回避するため、酵素により基質を回分反応により完全に加水分解を行った後の、反応液を用いて電気限外濾過を行った。また、この実験は、pH 緩衝液は無添加で行った。実験条件は、 $C_s = 5.0 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_E = 0.26 \text{ kg/m}^3$ 、 $\Delta P = 245 \text{ kPa}$ 、 $\text{Temp.} = 328 \text{ K}$ において、電場強度をパラメータとして電気限外濾過を行い、濾過流束の定常値と電場強度の関係を Fig. 10 に示した。図のように、電場強度の増加とともに透過流束は増大するが、電場強度を増加しても透過流束が増大しない点（臨界電場強度 E_{cr} ）が存在する。本実験条件における、臨界電場強度 E_{cr} は、2200 V/m であった。また、この直線の傾きは電気泳動度であり、 $k = 6.7 \times 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ となった。また、電場強度が 2000, 4000 V/m の場合、電場を印加しない場合に比べて、透過流束は 4 倍に増加し、図中のグルコース溶液の透過流束（一点鎖線）に近い値となっている。これは、電場印加によってゲル層の形成が抑制されているためと思われる。このことより、透過流束に関しては電場印加はきわめて有効である。

また、この実験における酵素の限外濾過膜での阻止率は、電場強度に関係なく 30 分程度で 100% となることが実験的に確かめられた。これは、ゲル層が全く無い状態では、酵素は若干透過するが少しでもゲル層が形成されると 100% 阻止されると考えられる。

(3) 酵素活性に及ぼす電場の影響 EUFBR を用いて、電場内を通過することによる酵素活性の安定性について実験的に検討を行った。実験装置は、Fig. 2 の EUFBR を用い、酵素のみを循環し電場を印加した。実験方法は透過液を供給槽へ戻す全循環方式で行った。実験条件は、酵素の熱失活の影響を回避する意味から熱失活の影響の無いことを実験的に確認した 298 K において、電場の有無による比較を行った。Fig. 11 は、透過流束および酵素活性の経時変化を示す。図より、電場印加により透過流束は明らかに改善するが、酵素活性は電場を印加していない場合に比べて若干低下する。これは、緩衝液無添

Fig. 11 Effects of electric field on filtrate flux and relative enzyme activity

加であることから、気泡の生成はわずかであったが、そのわずかな気泡がピーカーの場合、瞬時に系外へ出てしまうため浮上分離には関与し難いが、EUFBRの場合、系内を流れる間に酵素を吸着するために、ピーカーの場合よりも失活が大きいのと思われる。

以上の結果より、グルコアミラーゼ-澱粉系においては、緩衝液無添加の条件により酵素失活は抑制され、この程度の失活であれば透過流量がかなり増大することから EUFBR は有効な手段であると思われる。

(4) 連続反応実験 Fig. 12 に EUFBR を用いた連続反応の実験結果を示した。澱粉の供給は透過流量と同量の澱粉溶液を連続的に供給した。実験結果より、実験開始後 6 時間においてグルコース質量流量は電場を印加していない場合に比べ電場強度 2000 V/m では 7 倍に、4000 V/m では 11 倍になった。これは透過流量は電場を印加しない場合の 3 倍と 4 倍であったが、澱粉供給量がそれだけ多くなるためグルコース質量流量も増大する結果となる。このことから、電場印加はかなり有効であることが明らかとなった。また、この場合の透過流量は Fig. 10 に示した反応後溶液の透過流量の 60～70% であった。これは、未反応澱粉が存在しているためにその未反応澱粉が透過抵抗となり透過流量を低下させているものと思われる。

結 言

電気限外透過型メンブレンリアクターにおける、透過流量・酵素活性に及ぼす電場の影響について次の知見を得た。

- 1) 電場を印加することによる失活の主な原因は電解浮上分離であり、ガスの生成を抑えることができれば電解浮上分離の影響を回避することができる。
- 2) 電気的な酵素の失活は、電気エネルギーの関数となる。
- 3) pH 緩衝液の種類により、電解浮上分離および電気的な失活の程度が異なる。また、今回使用した pH 緩

Fig. 12 Effect of electric field strength on mass flux of glucose in continuous operation

衝液の中では酢酸緩衝液が失活に対して最も優れていた。

4) pH 緩衝液無添加であれば酵素失活がかなり抑えられる。

5) 電場を印加することによって透過流量は増大し、透過流量に関して電場印加は有効である。

6) 酵素失活を抑制する実験条件を選択することにより EUFBR はかなり有効である。

[謝 辞] 本研究を遂行するにあたり、多大なるご指導を頂きました油川博氏、また、実験に協力頂きました諏訪恵美氏、菊入静子氏に感謝致します。

Nomenclature

C_B	= concentration of buffer solution	[kmol/m ³]
C_E	= concentration of enzyme	[kg/m ³]
C_g	= gel concentration of particles	[kg/m ³]
C_{p_i}	= glucose concentration of bulk	[kg/m ³]
C_{p_o}	= glucose concentration of filtrate	[kg/m ³]
C_S	= concentration of substrate	[kg/m ³]
E	= strength of electric field	[V/m]
E_{cr}	= critical strength of electric field	[V/m]
F	= Faraday constant	[C/mol]
I	= electric current	[A]
J_{mg}	= mass flux of glucose	[kg/(m ² ·s)]
J_v	= filtrate flux	[m ³ /(m ² ·s)]
K	= mass transfer coefficient at concentration polarization layer	[m/s]
k	= electroosmotic coefficient	[m ² /(s·V)]
k_1	= coefficient of Eq. (4)	[1/C]
k_2	= coefficient of Eq. (5)	[1/J]
ΔP	= filtration pressure	[kPa]
$\Delta P_{(cr)}$	= critical filtration pressure	[kPa]

R = rejection	[-]	5) Katoh, S., T. Yanagida and E. Sada: <i>J. Chem. Eng. Japan</i> , 11 , 143 (1978)
R_E = residual enzyme	[-]	6) Kimura, S. and T. Nomura: <i>MEMBRANE</i> , 7 , 245 (1982)
t = time	[s, h]	7) Koya, H, T. Osaki and S. Gondo: <i>Kagaku Kogaku Ronbunshu</i> , 4 , 522 (1978)
V = voltage	[V]	8) Lee, C.K. and J. Hong: <i>Biotech. and Bioeng.</i> , 32 , 647 (1988)
V_{gas} = total gas volume	[m ³]	9) Marshall, J.J. and W.J. Whelan: <i>Chemistry and Industry</i> , 19 , June 701 (1971)
θ = time in electric field	[s, h]	10) Osasa, K., M. Sambuichi and H. Nakakura: <i>Kagaku Kogaku Ronbunshu</i> , 12 , 206 (1986)
ϕ = relative enzyme activity	[-]	11) Shimizu, A. and H. Inoue: <i>ibid.</i> , 7 , 635 (1981)

Literature cited

- 1) Closset, G.P., J.T. Cobb and Y.T. Shah: *Biotech. and Bioeng.*, **26**, 345 (1974)
- 2) Closset, G.P., Y.T. Shah and J.T. Cobb: *ibid.*, **25**, 441 (1973)
- 3) Daufin, D. and L.K. Francois: *ICEF 5*, May 28-June 3 (1989)
- 4) Engasser, J.M., J. Caumon and A. Marc: *Chem. Eng. Science*, **35**, 99 (1980)
- 5) Katoh, S., T. Yanagida and E. Sada: *J. Chem. Eng. Japan*, **11**, 143 (1978)
- 6) Kimura, S. and T. Nomura: *MEMBRANE*, **7**, 245 (1982)
- 7) Koya, H, T. Osaki and S. Gondo: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **4**, 522 (1978)
- 8) Lee, C.K. and J. Hong: *Biotech. and Bioeng.*, **32**, 647 (1988)
- 9) Marshall, J.J. and W.J. Whelan: *Chemistry and Industry*, **19**, June 701 (1971)
- 10) Osasa, K., M. Sambuichi and H. Nakakura: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **12**, 206 (1986)
- 11) Shimizu, A. and H. Inoue: *ibid.*, **7**, 635 (1981)
- 12) Tachauer, E., J.T. Cobb and Y.T. Shah: *Biotech. and Bioeng.*, **26**, 545 (1974)
- 13) Tsuru, T., F. Yamaguchi, S. Nakao and S. Kimura: *MEMBRANE*, **13**, 350 (1988)
- 14) Yukawa, H., H. Obuchi and K. Kobayashi: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **6**, 288 (1980)
- 15) idem.: *ibid.*, **6**, 323 (1980)

Characteristics of Electro-Ultrafiltration Bioreactor

Masaru Hakoda, Tsunenori Chiba* and Kozo Nakamura

Dept. of Biol. & Chem. Eng., Gunma Univ., Kiryu 376

Key Words : Filtration, Membrane Separation, Bioreactor, Electro-ultrafiltration, Foam Separation, Electric Denaturation, Glucoamylase, Starch Hydrolysis

When protein solutions are separated and concentrated by ultrafiltration, protein molecules are accumulated on the membrane due to concentration polarization and form a gel layer with larger filtration resistance. Electro-ultrafiltration is a method that mitigates filtration resistance where an electric field is used to move electrically charged solutes or colloids away from the membrane. In this work electro-ultrafiltration was applied to enzymatic starch hydrolysis and the effect of the electric field on the activity of glucoamylase and ultrafiltration flux was examined experimentally.

An unfavorable effect of the electric field on the enzyme was produced with foam separation and electric denaturation. The loss of activity consisted of two terms, each of which was proportional to the amount of electricity or electric energy. When buffer solution was not used in the electro-ultrafiltration bioreactor (EUFBR) to decrease electric current, filtration flux was much improved with small loss of enzyme activity. The experimental results showed that EUFBR could be effective if the experimental conditions were chosen properly.

* Mitsui Mining & Smelting Co., Ltd.