[Regular Paper]

Estimation of Bioethanol Production Cost from Rice Straw by On-site Enzyme Production

Osamu TAKIMURA, Takashi YANAGIDA^{†1)}, Shinji FUJIMOTO, and Tomoaki MINOWA*Biomass Refinery Research Center, Advanced Industrial Science and Technology,
3-11-32 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8527, JAPAN

(Received September 21, 2012)

Production of bioethanol by the conversion of lignocellulosic material such as rice straw, based on enzyme hydrolysis and yeast fermentation has attracted much interest in recent years. Furthermore, the on-site production of cellulase enzyme is an important strategy for the development of commercial ethanol production. The cost-effectiveness analysis of bioethanol production from rice straw was analyzed in various scenarios of on-site cellulase enzyme production and cellulase enzyme purchase, assuming 15 JPY/kg rice straw cost and 15,000 kL/year facility size. Bioethanol production cost by on-site cellulase enzyme production was estimated at 177 JPY/L-ethanol. The equivalent enzyme cost suitable for the same ethanol production cost was 938 JPY/10⁶ FPU. The analysis showed that decreasing aeration from 1.0 to 0.5 VVM reduced the cost of bioethanol production to 171 JPY/L-ethanol and increasing cellulase productivity from 10.5 FPU/100 mg rice straw to 21.0 FPU/100 mg rice straw reduced the cost of bioethanol production to 147 JPY/L-ethanol. Therefore, bioethanol production cost was greatly affected by the enzyme productivity.

Keywords

Biomass, Rice straw, Bioethanol production cost, On-site enzyme production

1. 緒 言

バイオエタノールは石油に代わる輸送用燃料として注目されている¹⁾。デンプン・糖質系バイオマスを原料とする第一世代バイオエタノール製造技術は既に確立されており、米国でのコーン、ブラジルでのケーンジュースからのバイオエタノール燃料は商業化されている²⁾。近年、バイオエタノールの原料として、食糧と競合しない木材、稲わらなどのリグノセルロース系バイオマスを原料とする第二世代バイオエタノール製造の技術開発が進められているが、プロセスが非常に複雑で、技術的・経済的に難易度が高い^{3),4)}。そのプロセスは、原料の前処理、多糖から単糖への加水分解、単糖からエタノールへの変換、エタノールの蒸留が含まれ、技術開発とともにコスト削減に向けた経済性の評価も重要である。バイオマス・ニッポン総合戦略推進会議報告「国産バイオ燃料の大幅な生産拡大」⁵⁾においても、原料コスト15円/kgで生産コストの目標を100円/L-エタノール(EtOH)程度と考えた場合、稲わら、林地残材等の未利用バイオマスは量的ポテンシャルが大きい⁶⁾、低コスト収集技術や低コスト生産技術などの課題を解決することが不可欠であると述べている。

バイオエタノール製造コストは原料価格が多くを占め、セルラーゼ酵素価格、設備費が大きく影響する⁶⁾。セルラーゼ酵素は酵素メーカーが糸状菌を用いて生産し、商業的に販売している。多くの第二世代バイオエタノール製造システムのコスト評価は、酵素メーカーから購入したセルラーゼ酵素価格を基準に算出している。メーカー市販のセルラーゼ酵素は、主に飼料添加、食品工業用に販売され、販売価格は一般的に高い⁷⁾。ノボザイムズ社やジェネンコアは世界的産業用酵素のサプライヤーであるが、それでもバイオエタノール製造用途で産業用セルラーゼ酵素を用いるには価格が高いのが現状である。そこで、バイオマス原料の前処理の工夫によるセルラーゼ酵素使用量の低減や、産業用酵素を購入せずに自前で糸状菌を培養してセルラーゼ酵素を生産する(オンサイト生産)ことで、バイオエタノール製造コストの削減が検討されている^{8),9)}。さらに、酵素オンサイト生産において、セルラーゼ酵素生産のための炭素源として原料バイオマス自身を利用することも試みられている¹⁰⁾。原料バイオマスの利用は、炭素源としてのケミカル(ソルカフロック等)の購入費用が削減されるが、原料コストや前処理コストが必要になる。加えて、オンサイトで生産されるセルラーゼ酵素の性能は購入酵素の性能とは異なっている。たとえば、生産酵素濃度が低くなると使用する培養酵素液の量が増え、後段での発酵、蒸留のコストが増加することも考えられる。すなわち、酵素オンサイト生産工程だけで評価するのではなく、トータルプロセスとして評価する必要がある。

我々は、従来から水熱前処理をベースにした稲わらからのバ

* To whom correspondence should be addressed.

* E-mail: minowa.tom@aist.go.jp

^{†1)} (Present) Div. of Energy and Environment, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8527,
JAPAN

1) HCWT: Hot compressed water treatment. 2) WDM: Wet disk milling. 3) P1-8: Pumps.

Fig. 1 Process Flow Diagram for Conversion of Rice Straw to Bioethanol

イオエタノール製造技術の開発を行っており、メカノケミカル前処理／水熱前処理・酵素糖化法を用いた稲わらからのバイオエタノール製造技術を報告し¹¹⁾、さらにはバイオエタノール製造技術に伴う経済性評価を報告している¹²⁾。本研究では、セルラーゼ酵素のオンサイト生産がエタノール製造の低コスト化に有効であるかどうか、商業規模での稲わらからのバイオエタノール製造コストについて、オンサイト酵素生産シナリオと市販酵素購入シナリオで原料の前処理からエタノールの蒸留までのトータルプロセスで算出し、経済性を評価した。

2. 方 法

2.1. プロセスの概要と評価範囲

稲わらからのバイオエタノール製造プロセスは、原料の受入れ、粗粉碎工程と前処理工程、オンサイト酵素生産工程、酵素を用いた加水分解工程、酵母による発酵工程とそれに続く蒸留工程とした (Fig. 1)。粗粉碎された稲わらの一部が酵素オンサイト生産工程に供される。前処理工程は、酵素オンサイト生産用に湿式ディスクミル法を、バイオエタノール生産用には水熱処理法を取り入れたシステムでコスト計算を行うこととした。そして、本研究でのエタノール製造の評価範囲は稲わらの購入から粗エタノール生産までとした。本研究における製造コスト分析は柳田ら¹²⁾の報告に準じ、市販の表計算ソフト Microsoft Excel® (マイクロソフト(株))を用いて物質収支、エネルギー消費を計算し、その計算結果を基に製造コストを算出した。

2.2. プラント規模と装置の仕様設定

プラント規模は、バイオ燃料技術革新協議会の計画しているバイオマス・ニッポンケースの拠点単位を参考に 15,000 kL/年とし、運転時間は 24 時間/日、稼働日数は 300 日間/年とした。各工程に必要な主要装置は、シュレッダー、ディスクミル、水熱反応器、酵素生産タンク、加水分解タンク、酵母培養タンク、発酵タンク、蒸留塔、貯水タンク、およびポンプである。これら主要機器の能力およびサイズは、各種設定条件から導出した年産 15,000 kL のバイオエタノール製造に必要な物質フローをベースに算出し、装置の余裕率係数 1.3 を乗じて決定した。ただし、各装置の最大容量あるいは最大能力を超える場合は、平均能力の装置を複数台設置することとした。

2.3. 各工程の条件設定

稲わら中の糖組成は、実験値¹⁰⁾を参考にグルカン を 344 mg/g-稲わら、キシランを 136 mg/g-稲わらに設定した。粗粉碎工程では、稲わらをシュレッダーで 2 mm 以下まで切断した。

水熱前処理工程は、スクリーフフィーダータイプの連続式水熱反応器を想定して、反応温度 180 °C、固形分濃度は 10 % 重量とした。温度差 50 K で熱回収が可能と想定した。

オンサイト酵素生産工程は、粗粉碎稲わらを湿式ディスクミルで微粉碎した後、糸状菌 *Acremonium cellulolyticus* によるセルラーゼ酵素発酵を想定した。糸状菌の培養は、培地にリン酸二水素カリウム; 1 g/L, ツイン 80; 1 g/L, 硫酸アンモニウム; 5 g/L, 硫酸マグネシウム・七水和物; 1.2 g/L, 硫酸亜鉛・七水和物; 0.01 g/L, 硫酸マンガン・六水和物; 0.01 g/L, 硫酸銅・五水和物; 0.01 g/L, 尿素; 4 g/L を用いた好気的培養を想定し、曝気条件は 1.0 VVM (volume of air/volume of fermenter/minute) とした。酵素生産タンク 7 基で 30 °C, 7 日間の培養とした。セルラーゼ酵素生産量は実験値¹³⁾に基づき 10.5 FPU/100 mg-稲わらとした。一方、市販酵素購入の場合における酵素使用濃度は 125 FPU (filter paper unit)/mL に設定した。

酵素による加水分解工程は、加水分解タンク 1 基を用いて 45 °C, 72 時間とした。糖化率は、実験値 (未発表) に基づき酵素使用 10 FPU/g-稲わらあたり、六炭糖 88 %, 五炭糖 60 % とした。

エタノール発酵工程は、発酵用酵母にグルコースとキシロースを変換可能な酵母¹⁴⁾を使用すると仮定した。酵母生産は、培養タンク 1 基を用いて培地にはリン酸二水素カリウム; 1 g/L, 硫酸アンモニウム; 5 g/L, 腐酵母; 40 g/L を用いた。エタノール発酵は、発酵タンク 1 基を用いて 30 °C, 24 時間とした。発酵率はグルコースとキシロースともに 85 % と仮定した。

蒸留工程は、蒸留塔段数 30 段、エタノール回収率 99 %, 製品濃度 83 mol% (92.5 wt%) に条件設定した。蒸留塔の計算は、プロセスシミュレーター PRO/II® (インベンシス社)を用いて、粗エタノール 39.5 トン/日で一定とし、入口エタノール濃度に対するリボイラー熱量を計算した。なお、蒸留塔入口とリボイラー出口で熱交換することとした。

2.4. エタノール製造コストの試算方法

エタノールの製造コストは、原料費、材料費、装置償却費、電力費、燃料費、労務費とその他 (修繕費、固定資産税、利子

Table 1 Production Cost of Bioethanol Production

Item	Production cost			
	Enzyme fermentation		Enzyme purchase ^{b)}	
	[JPY/L]	[%]	[JPY/L]	[%]
Raw materials	70.6	40	64.5	36
Chemicals	9.0	5	42.7	24
Apparatus depreciation	28.4	16	20.9	12
Electricity	19.9	11	5.9	3
Direct heat	27.9	16	25.7	15
Labor cost	6.4	4	6.4	4
Others ^{a)}	14.8	8	10.9	6
Total	177.0	100	177.0	100

a) Others: Property tax, repair costs and interest costs.

b) Equivalent enzyme cost in enzyme purchase: 938 JPY/10⁶ FPU.

費を含む)を一年間あたりの費用で算出し、その合計を年間エタノール生産量で除して、エタノール単位あたりの製造コストとして表した。

原料費は、稲わら調達価格を農林水産省プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発」であらかじめ設定されている15円/kg・稲わらとし、これに必要量を乗じて算出した。材料費は市販酵素購入費用と酵素生産・酵母生産の培地費用の合計とした。

培地費用は化学工業日報社の「15911の化学商品」¹⁵⁾の単価に基づき算出した。また、電力費と燃料費は、それぞれ10円/kWh、60円/L-EtOHに設定し、労務費は6.4円/L-EtOH(21人/雇用)に設定した。その他の経費として、固定資産税を減価償却費計の2%、修繕費をプラント建設費の2%、利子費をプラント建設費の3%とした。装置償却費は、プラントの総建設費用を減価償却年数9年(残存簿価0、均等償却)と設定し、一年間あたりの費用を算出した。プラントの総建設費用は、各機器のコスト(余裕率係数含み)を積み上げ、建設に関する係数(計装、建物、配管等の費用込み)として3.3を乗じて算出した。各機器のコストは文献¹⁶⁾および当研究センターが保有している機器費基礎データを基に試算した。

3. 結果と考察

3.1. 酵素オンサイト生産によるバイオエタノール製造コスト

酵素オンサイト生産シナリオによるバイオエタノール製造コストにおいて、原料費、材料費、装置償却費、電力費、燃料費、労務費と修繕費、固定資産税、利子費を含むその他経費のコストをTable 1(左項)に示す。原料費、材料費などを合計したバイオエタノール製造コストは、177円/L-EtOHと算出された。また、177円/L-EtOHと同額で製造できる市販酵素購入シナリオによるコストをTable 1(右項)に示す。市販酵素の調達価格はエタノールの製造コストが同じになるように設定した。

等価となる酵素の調達価格は938円/10⁶ FPUであることが分かった。この金額は、市販酵素が938円以上であると酵素オンサイト生産が有効であるが、938円以下であると市販酵素を購入した方がよいことを示している。酵素オンサイト生産シナリオと酵素購入シナリオの各コストは、労務費以外で変動が認

められた。原料費の稲わらは、酵素購入シナリオの215トン/日に対して酵素オンサイト生産シナリオでは糸状菌培養の炭素源にも使用するために235トン/日必要であるため、酵素オンサイト生産シナリオの原料費が1割程度増加した。材料費は酵素オンサイト生産シナリオで大きく削減した。これは酵素オンサイト生産における糸状菌培養のための培地ケミカル費用(6.4円/L-EtOH)に対して、酵素購入シナリオにおける酵素購入費用(40.3円/L-EtOH)が大きく影響していることに起因した。装置償却費は、酵素購入シナリオに比べてオンサイト酵素生産シナリオで7.5円/L-EtOHの増加が認められた。これは、酵素生産用タンク費用5.8円/L-EtOHと湿式ディスクミル費用0.5円/L-EtOHに起因し、その他の要因として糖化タンク、発酵タンクの容量増加によることが分かった。電力費は、酵素購入シナリオの5.9円/L-EtOHからオンサイト酵素生産シナリオの19.9円/L-EtOHに著しく増加した。これは、糸状菌培養における曝気(11.4円/L-EtOH)に大部分費やされることが分かった。これらの結果から、稲わらからのバイオエタノール製造で最もコストがかかるのは原料費であり、両者とも全体コストの36~40%を占めることが分かった。Royら¹⁷⁾は、稲わらからのバイオエタノール生産の環境影響評価を行い、生産コストの削減は原料費が焦点になると述べている。本研究では、稲わら調達価格15円/kgでバイオエタノール製造コストを算出したが、稲わらの価格低減に向けた技術的・制度的な取り組みが必要であると考えられる。一方、電力費は酵素購入シナリオに比較して酵素オンサイト生産シナリオで大きく増額し、その要因は糸状菌培養の曝気に係わる電力であった。そこで、コストに及ぼす曝気量の影響を次に検討した。

3.2. バイオエタノール製造コストに及ぼす酵素オンサイト生産の曝気量の効果

多くの微生物の培養は酸素の供給を必要とし、セルラーゼ酵素を生産する糸状菌の培養にも酸素が必要である。酵素オンサイト生産において、効果的な曝気は糸状菌が生産するセルラーゼ酵素の量を増加し、その曝気に係わる電力はエタノール製造コストの重要な因子である。一般に、好気培養における曝気量は0.5~1.0 VVMの範囲内であり、曝気0.5~1.0 VVMにおける酸素移動量はタンクスケールなどの諸因子にもよるが大きく影響を受けないことが認められている¹⁸⁾。本研究において、曝気量は1.0 VVMを基準にした。一方で、Reczeyら¹⁹⁾は、

Table 2 Production Cost of Bioethanol Production in the Case of Low Aeration^{a)}

Item	Production cost	
	[JPY/L]	[%]
Raw materials	70.6	41
Chemicals	9.0	5
Apparatus depreciation	28.4	17
Electricity	14.1	8
Direct heat	27.9	16
Labor cost	6.4	4
Others ^{b)}	14.8	9
Total	171.2	100

a) Aeration: 0.5 VVM.

b) Others: Property tax, repair costs and interest costs.

Trichoderma reezi によるセルラーゼ生産において、曝気量 0.5 VVM で高い酵素活性を報告し、Himmel ら²⁰⁾ はセルラーゼ酵素の生産において、曝気量を 0.5 VVM に設定して生産コストを評価している。これらのことから、酵素オンサイト生産における糸状菌培養の曝気量は 0.5 VVM でも十分であると考え、曝気量削減によるバイオエタノール製造コストの向上を試みた。

曝気量を 0.5 VVM に設定して、酵素オンサイト生産によるバイオエタノール製造コストを計算した。なお、曝気量を減らしても、酵素の生産速度や酵素活性は変化しないと仮定した。結果を Table 2 に示す。計算の結果、原料費、材料費、装置償却費、電力費、燃料費、労務費と修繕費、固定資産税、利子費を含むその他経費を合計したコストは 171 円/L-EtOH であった。そのコストは、Table 1 で示した曝気量 1.0 VVM の 177 円/L-EtOH に比べて、若干の減額に留まった。電力費は 1.0 VVM の 19.9 円/L-EtOH から 0.5 VVM の 14.1 円/L-EtOH と約 1/3 に減少したが、全体コストに占める割合は 11 % から 8 % の減少に過ぎないことが分かった。また、171 円/L-EtOH と同じバイオエタノール生産コストとなる市販酵素購入シナリオの酵素調達価格は、938 円/10⁶ FPU から 804 円/10⁶ FPU に減額することが認められた。これらのことから、酵素オンサイト生産によるバイオエタノール製造における糸状菌培養の曝気量は、0.5~1.0 VVM の範囲内でバイオエタノール製造コストに大きく影響しないことが分かった。

3.3. バイオエタノール製造コストに及ぼす酵素オンサイト生産の酵素生産量の効果

ここまで、酵素オンサイト生産における酵素生産量は 10.5 FPU/100 mg-稲わら（実験値）を基準にしてバイオエタノール製造コストを算出した。一方、糸状菌からの酵素生産量の向上は各種タンクの小規模化・省電力化を招き、バイオエタノール製造コストの削減に大きく寄与すると考えられる。そのため、セルラーゼ酵素の生産に係わる技術開発が進められており、Hideno ら¹⁰⁾ は、ソルカ・フロック、市販酵素、稲わら前処理物を炭素源として糸状菌 *Acremonium cellulolyticus* を用いてセルラーゼ酵素生産特性を調べ、稲わらは *A. cellulolyticus* 培養の基質に適していると報告した。また、Fujii ら²¹⁾ は、この *A. cellulolyticus* から生産されるセルラーゼ酵素を用いてユーカリ、米松、稲わらの加水分解特性を明らかにし、高い糖化能力を有

Fig. 2 Effect of Enzyme Productivity on Equivalent Enzyme Cost

Table 3 Production Cost of Bioethanol Production in the Case of High Enzyme Productivity^{a)}

Item	Production cost	
	[JPY/L]	[%]
Raw materials	66.0	45
Chemicals	4.0	3
Apparatus depreciation	23.3	16
Electricity	9.4	6
Direct heat	26.2	18
Labor cost	6.4	4
Others ^{b)}	12.1	8
Total	147.4	100

a) Enzyme productivity: 21 FPU/100 mg rice straw.

b) Others: Property tax, repair costs and interest costs.

していることを報告している。さらに、Fang ら¹³⁾ は *A. cellulolyticus* の突然変異株を用いて、酵素活性を 12.9 FPU/mL から 18.0 FPU/mL に増大させている。このように、糸状菌のセルラーゼ酵素生産量は技術の進歩により改善されると考えられる。

そこで、酵素生産量が改善されると仮定して、バイオエタノール製造コストに及ぼす酵素オンサイト生産の酵素生産量の効果を検討した。酵素生産量を変えた時のバイオエタノール製造コストと等価となる酵素の調達価格を計算し、Fig. 2 に示す。等価酵素価格は 10.5 FPU/100 mg-稲わらの 938 円/10⁶ FPU から酵素生産量の増加とともに急激に減少し、14.0 FPU/100 mg-稲わらの 540 円/10⁶ FPU に、さらに 21.0 FPU/100 mg-稲わらの 250 円/10⁶ FPU に大きく減少することが分かった。

この結果を踏まえて、酵素生産性が 10.5 FPU/100 mg-稲わらから 2 倍の 21.0 FPU/100 mg-稲わらに向上したと仮定して、酵素オンサイト生産によるバイオエタノール製造コストを計算した。結果を Table 3 に示す。原料費、材料費などを合計したバイオエタノール製造コストは 147 円/L-EtOH であった。酵素生産量 10.5 FPU/100 mg-稲わら設定のバイオエタノール製造コスト (Table 1) に比べて、燃料費と労務費以外の原料費、材料費、装置償却費、電力費、修繕費、固定資産税、その他経費が減少した。特に電力費は、19.9 円/L-EtOH から 9.4 円/L-EtOH に約半分に減額されることが分かった。これは、酵素オンサイト生産の消費電力の削減だけでなく、糖化タンクと発

酵タンクの消費電力、および蒸留までのポンプ消費電力の削減に起因していた。また、酵素生産量が高い結果、原料費や材料費が減額され、全体で20%弱のコスト削減となった。従来、セルラーゼ酵素の生産コストは基質価格に大きく影響されることが知られており、Ballerini ら²²⁾は、糸状菌のセルラーゼ酵素の生産を安価な乳糖を基質・炭素源に用いることでコスト削減を報告している。このように、商業規模でのセルラーゼ酵素生産は安価な炭素源の供給が有効な手段であるが、本研究のように、バイオエタノール製造用の原料を糸状菌培養の炭素源に用いることもバイオエタノール製造コストの削減に有効である。

4. 結 言

稲わらからのバイオエタノール製造は、食料と競合しない原料からの変換として注目されており、その製造工程に稲わらを炭素源としたセルラーゼ酵素のオンサイト生産を導入してコスト評価を行った。稲わらからのバイオエタノール製造コストは、酵素オンサイト生産を取り入れることで177円/L-EtOHと試算され、同額での市販酵素購入によるバイオエタノール製造コストにおける等価酵素価格は938円/10⁶FPUであった。酵素オンサイト生産によるバイオエタノール製造コストに占める課題として、糸状菌培養の曝気、糸状菌の酵素生産量を検討した。その結果、製造コストは酵素生産量が曝気よりも強く影響し、酵素生産量を10.5 FPU/100 mg-稲わらから21.0 FPU/100 mg-稲わらに増加すると、製造コストは147円/L-EtOHに大きく減額され、等価酵素価格は250円/10⁶FPUに著しく低下した。稲わらからのバイオエタノール製造コストは原料費に影響を受けるが、酵素オンサイト生産における酵素生産量がコスト削減に寄与することが分かった。

謝 辞

本研究は、農林水産省委託研究「地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発」の一環として行われた。

References

- 1) Saiki, T., "Biomass · Energy · Environment," ed. by Saka, S., Industrial Publishing & Consulting, Inc., Tokyo (2001), p. 380. 齊木 隆, "バイオマス・エネルギー・環境," 坂 志朗編, アイピーシー, 東京 (2001), p. 380.
- 2) The Japan Institute of Energy, "Biomass Handbook," Ohmsha, Ltd., Tokyo (2002), p. 157.
- 3) Binod, P., Sindhu, R., Singhanian, R. R., Vikram, S., Devi, L., Nagalakshmi, S., Kurien, N., Sukumaran, R. K., Pandey, A., *Bioresour. Technol.*, **101**, 4767 (2010).
- 4) Chen, H., Qiu, W., *Biotechnol. Adv.*, **28**, 556 (2010).
- 5) Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, <http://www.maff.go.jp/j/press/2007/pdf/20070227press-1b.pdf>. 農 林 水 産 省, <http://www.maff.go.jp/j/press/2007/pdf/20070227press-1b.pdf>.
- 6) von Sivers, M., Zacchi, G., *Bioresour. Technol.*, **56**, 131 (1996).
- 7) Kawamura, K., Honma, H., Iwasaki, T., Tanisho, S., *Chem. Edu. J.*, **12**, (2), (2009).
- 8) Sukumaran, R. K., Singhanian, R. R., Mathew, G. M., Pandey, A., *Renewable Energy*, **34**, 421 (2009).
- 9) Barta, Z., Kovacs, K., Reczey, K., Zacchi, G., *Enzyme Res.*, doi: 104061/2010/734182 (2010).
- 10) Hiden, A., Inoue, H., Tsukahara, K., Fujimoto, K., Minowa, T., Inoue, S., Endo, T., Sawayama, S., *Bioresour. Technol.*, **100**, 2706 (2009).
- 11) Hiden, A., Inoue, H., Tsukahara, K., Yano, S., Fang, X., Endo, T., Sawayama, S., *Enzyme Microb. Technol.*, **48**, 162 (2011).
- 12) Yanagida, T., Fujimoto, S., Hiden, A., Inoue, H., Tsukahara, K., Sawayama, S., Minowa, T., *J. Jpn. Soc. Energy Resour.*, **30**, (5), 8 (2009).
- 13) Fang, X., Yano, S., Inoue, H., Sawayama, S., *J. Biosci. Bioeng.*, **107**, 256 (2009).
- 14) Matsushika, A., Inoue, H., Murakami, K., Takimura, O., Sawayama, S., *Bioresour. Technol.*, **100**, 2392 (2009).
- 15) The Chemical Daily Co., Ltd., "15911 Chemical products in 2011," Tokyo (2011). 化学工業日報社, "15911の化学商品," 東京 (2011).
- 16) Saito, Y., "Cost Estimation Handbook for Chemical Engineers, 3rd Edition," Kogyo Chosakai Publishing, Inc., Tokyo (2000). 斎藤義己, "化学装置コストハンドブック改訂三版," 工業調査会, 東京 (2000).
- 17) Roy, P., Orikasa, T., Tokuyasu, K., Nakamura, N., Shiina, T., *Bioresour. Technol.*, **110**, 239 (2012).
- 18) Stabury, P. F., Whitaker, A., "Principles of Fermentation Technology," Japan Scientific Societies Press, Tokyo (1988), p.169-190. Stabury, P. F., Whitaker, A., "発酵工学の基礎," 学会出版センター, 東京 (1988), p.169-190.
- 19) Reczey, K., Szengyel, Zs., Eklund, R., Zacchi, G., *Bioresour. Technol.*, **57**, 25 (1996).
- 20) Himmel, M. E., Ruth, M. F., Wyman, C. E., *Current Opinion in Biotechnology*, **10**, 358 (1999).
- 21) Fujii, T., Fang, X., Inoue, H., Murakami, K., Sawayama, S., *Biotechnol. Biofuels*, doi: 10.1186/1754-6834-2-24 (2009).
- 22) Ballerini, D., Desmarquest, J. P., Pourquie, J., Nativel, F., Rebeller, M., *Bioresour. Technol.*, **50**, 17 (1994).

要 旨

オンサイト酵素生産による稲わらからのバイオエタノール製造コストの評価

滝村 修, 柳田 高志^{†1)}, 藤本 真司, 美濃輪 智朗

(独)産業技術総合研究所 バイオマスリファイナリー研究センター, 739-0046 広島県東広島市鏡山3-11-32

^{†1)} (現在) 広島大学大学院工学研究院エネルギー・環境部門, 739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1

稲わらを炭素源としたセルラーゼ酵素のオンサイト生産による稲わらからのバイオエタノール製造コストをプロセスシミュレーションに基づき算出した。その結果, 酵素オンサイト生産によるバイオエタノール製造コストは177円/L-エタノールで, 同じエタノール製造コストに相応する等価酵素価格は938円/10⁶ FPUであった。そのバイオエタノール製造コストは,

曝気量を1.0 VVMから0.5 VVMに削減設定すると171円/L-エタノールに減額され, 酵素生産量を10.5 FPU/100 mg-稲わらから21.0 FPU/100 mg-稲わらに増加設定すると147円/L-エタノールに減額された。稲わらからのバイオエタノール製造コストは, 酵素オンサイト生産による酵素生産量に大きく影響されることが分かった。

.....