

地球規模課題対応国際科学技術協力(SATREPS)
分野・領域「環境・エネルギー(気候変動)」

課題・案件名「サトウキビ廃棄物からのエタノール生産」
(相手国:ブラジル)

終了報告書

期間 平成21年9月～平成25年8月

代表者氏名:

坂西 欣也(平成25年1月まで)

平田 悟史(平成25年2月から)

(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長(平田)

§ 1 プロジェクト実施の概要

世界最大のサトウキビおよびサトウキビからのエタノール生産国であるブラジルでは、国内の燃料用エタノールの需要が急増していることに加え、輸出品としても重視されていることから、更なるエタノールの増産が要求されているが、サトウキビ栽培地の拡大は新たな環境破壊と温暖化促進の要因になる危険性も秘めている。一方、サトウキビ産業では収穫されたサトウキビから糖液を絞った残渣であるバガスが大量に発生している。従来より製糖、エタノール工場ではバガスの燃焼によるエネルギー回収が行われているが、ボイラーの効率向上等により、余剰バガス量が増大する傾向にある。また以前は人手による収穫の作業性向上のために畑での野焼きが行われていたが、機械化の進展と政府が禁止の方針を示していることから野焼きする面積が減少しており、畑に残された茎葉等の処理も問題になりつつある。そこでこれらのサトウキビ産業から発生する廃棄物系バイオマスをエタノール原料として利用できれば、処理を兼ねた廃棄物の有効利用になり、また耕地面積を増やさずにかつ食料との競合の問題を回避したエタノールの増産が可能になる。しかしこれらの廃棄物からエタノールを生産するためには、廃棄物を糖化酵素と反応しやすい状態に変える「前処理技術」、現状で最大の高コスト要因である糖化酵素を低コストで生産することを中心とする「糖化酵素技術」、およびこれらの廃棄物に多量に含まれるが通常の酵母では発酵できないキシロースをいかに利用するかを中心とする「発酵技術」の3つが重要な技術課題として存在する。加えて本事業は地球規模課題対応の気候変動の緩和に資する研究であるため、ライフサイクルアセスメント(LCA)手法による温室効果ガス(GHG)排出量削減効果等を解析する「システム解析・評価技術」も必要になる。これらの課題について、該当する研究ポテンシャルを持つブラジルの2大学(リオデジャネイロ連邦大学:UFRJ、サンタカタリーナ連邦大学:UFSC)と、産業技術総合研究所(産総研)とが共同研究で実施した事業の概要を報告する。

(1) サトウキビ廃棄物に適した前処理技術の研究開発

サトウキビ廃棄物に対して、木質、稲わら等のバイオマスに対して産総研で実績がある湿式ディスクミル方式による微粉碎前処理を試みたが、同じイネ科植物の地上部である稲わらに比べて低い糖化率しか得られなかった。そのため湿式ディスクミルと、水熱、アルカリ、過酸化水素、オゾン等の処理との複合処理法を検討し、水熱処理、またはオゾン処理との組み合わせにより高い処理効果が得られることを明らかにした。また近年注目されているイオン性液体を用いた前処理法のサトウキビ廃棄物への適用性を検討した結果、最も適したイオン性液体を選抜し、これにより100%に近い収率で糖が回収できることを明らかにした。さらに多量のイオン性液体の使用が必要であるという問題に対して、高せん断力により高濃度の試料を扱える特性を持つ二軸エクストルーダーの適用を考案し、これにより必要なイオン性液体の量を従来の15%程度にまで削減できることを示した。

以上のような種々の処理方法を検討した中で処理効果が高い処理物の解析を行った結果から、原料バイオマスの微細繊維化が高い糖化率を得るために重要であり、これは微細繊維化による稠密な構造の崩壊と表面積の増大により、糖化酵素の分子が接触、反応しやすくなることによるものと考察した。なおイオン性液体の使用はまだコスト面から現実性はなく、オゾンの使用もコスト高であるので、ブラジルでの当面の実用化に向けては、水熱処理と湿式ディスクミル粉碎の組み合わせ処理が適当と考える。

<スケールアップしての実証評価>

開発された前処理技術の実証を中心とするベンチ規模のエタノール生産実験をUFRJで行う計画であったが、UFRJ側の準備が遅れたため、ブラジル産のバガスを用いて産総研でベンチ規模実験(1kg 絶乾バガス/バッチ)を行った。水熱処理、湿式ディスクミル処理、水熱処理後湿式ディスクミル処理の3種の処理をそれぞれ行って酵素糖化したところ、水熱処理単独では糖化率が非常に低く、水熱処理後湿式ディスクミル処理したものが最も高い糖化率を与えた。またブラジルの優良エタノール生産酵母として選抜されたCAT-1株を用いて糖化物の発酵を行い、湿式ディスクミル単独、および水熱処理後湿式ディスクミル処理において、ヘキソースに対して90%以上の発酵収率を得た。最もエタノール収率が良かった水熱処理後湿式ディスクミル処理を行った実験では、バガス1kg(絶乾)から0.139kg(0.176L)のエタノールが得られた。

(2) サトウキビ廃棄物に適した糖化酵素の開発及び糖化技術の研究開発

UFRJで開発されている*Trichoderma reesei*によるセルラーゼ生産と*Aspergillus awamori*によるセルラーゼ以外の補助酵素を組み合わせる酵素系と、産総研で標準的に使用している*Acremonium cellulolyticus*のセルラーゼに市販酵素のOptimash BGを加えた酵素系とで、サトウキビ廃棄物に対する糖化性を比較したところ、グルコースの回収率には差がみられないが、キシロースの回収率はUFRJの酵素系の方が低いことが明らかになった。このため、*A. awamori*による補助酵素の生産を強化する必要があると考えられた。キシロースの回収率向上にはキシラナーゼとβ-キシロシダーゼが重要であり、特にβ-キシロシダーゼの生産には基質となるキシロオリゴ糖が豊富に含まれる水熱処理の液体画分を用いることが有効と考えられるので、これを炭素源として*A. awamori*の培養を行い、併せてキシラナーゼ、β-グルコシダーゼ、α-アラビノフラノシダーゼ等の補助酵素の生産性を検討した。その結果、水熱処理の液体画分を炭素源として、これらの補助酵素が生産でき、また酵素生産性は培養時のpHに影響されることを明らかにした。

また糸状菌培養ではスケールアップによって酵素生産性が変動する例が知られているので、従来ほとんど検討されていなかった糸状菌培養における通気に注目して、大規模化への移行を円滑に進めるための基盤的研究を行った。

(3) サトウキビ廃棄物に適したエタノール発酵微生物の研究開発(キシロース発酵性微生物の開発を含む)

ブラジルにおいて、エタノール発酵用酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)の中で、エタノール生産性、副生成物のグリセロール生成量、発泡性、安定性等の観点から、優良な数種の工業用酵母株が選抜されている。産総研が持つ遺伝子組み換えによるキシロース発酵能の付与技術をこれらのブラジルの酵母に適用して、キシロース発酵能を持つ優良株を得ることができた。またキシロースとスクロースの混合糖において相乗的にエタノール生産性が良くなる酵母株が得られたが、サトウキビ糖液からの大規模なエタノール生産が既に行われているブラジルでは、スクロースに富んだケーンジュースに廃棄物からの糖液を加えて培養することが想定されるので、スクロースとの混合糖で高い発酵収率が得られたことは、実用的に意味があると考えられる。

また UFSC では従来から酵母の糖の取り込みに関わるトランスポーターの研究を行っているが、キシロースは *S. cerevisiae* が利用できない糖であり、キシロースを炭素源にした培養ができないこともあってその取り込み機構についての研究は行われていなかった。本事業で産総研開発のキシロース発酵性酵母が利用できることにより、キシロースの取り込みについての研究が可能になった。キシロース発酵能を付与しかつグルコースなどの取り込みに使われる HXT トランスポーターの欠損株を作成する実験を行い、キシロース専用のトランスポーターを持たない *S. cerevisiae* では、HXT によりキシロースが取り込まれていること、HXT の種類によってキシロースの取り込み特性が異なる、などの知見が得られた。発酵能に加えて取り込みも優れた酵母株が開発されれば、エタノール収量を向上させるために有効な技術になると期待される。

(4) プロセス統合とライフサイクルアセスメント

実際の製糖工場の調査結果に基づいて評価範囲の設定、評価範囲内のプロセスフローの設定、バックグラウンドデータの取得等を行い、また UFRJ の Bon 教授、UFSC の Stambuk 教授らとの検討により、統合プロセスの構築を行った。そのフォアグラウンドデータの作製のため、物質収支を計算する化学プロセスシミュレータを作製し、更にこれにバックグラウンドデータを組み込むことで、GHG 排出量を算出する計算シミュレータを作製した。これを用いてサトウキビ廃棄物から生産されるエタノールの GHG 排出量の試算を行ったところ、23.7 g_{CO₂eq.}/MJ となり、同エネルギー値のガソリンからの排出量の 27.9% となった。この値は、バイオエタノール燃料をサトウキビジュースから製造した場合の GHG 排出量とほぼ同等の数字である。またキシロースも発酵利用できる場合では、GHG 排出量は 16.2 g_{CO₂eq.}/MJ (対ガソリン比 19.1%) にまで低減すると計算されたが、これはサトウキビジュースからの製造に対して 31.6% の GHG 排出量の低減になる。

余剰バガスの利用法としては、エタノール生産以外に発電が考えられるが、これについて経済性および環境性(GHG)における損益分岐線／損益分岐点の検討を行い、経済的には現状では発電が有利であるが、酵素コスト低減によりエタノールでも経済性が見込めるようになること、電力供給における水力の比率が高いブラジルでは、エタノールを生産した方が GHG 排出量削減効果が大きいことを示した。

§ 2. プロジェクト構想(および構想計画に対する達成状況)

(1) 当初のプロジェクト構想

ブラジルは世界最大のサトウキビおよびサトウキビからのエタノール生産国である。1970年代からエタノールの燃料利用が積極的に行われており、現在ガソリンには18-25%の範囲でエタノール添加が義務づけられていることに加え、エタノールのみを燃料とするフレックス燃料車の普及が急速に進んでおり、国内の燃料エタノール需要が急増している。またブラジル政府の政策として、燃料用エタノールを重要な輸出品として育成する方針も打ち出されている。これらに対応するエタノールの増産は、当面現在のサトウキビ糖液を原料とする方法が想定されるが、サトウキビ栽培地の拡大は新たな環境破壊と温暖化促進の要因になる危険性も秘めている。

一方、サトウキビ産業では収穫されたサトウキビから糖液を絞った残渣であるバガスが大量に発生している。製糖、エタノール工場ではバガスの燃焼によるエネルギー回収が行われているが、ボイラーの効率向上等により、余剰バガス量が増大する傾向にある。また以前は人手による収穫の作業性向上のために畑での野焼きが行われていたが、機械化の進展と政府が野焼き禁止の方針を示していることから野焼きする面積が減少しており、畑に残された茎葉等の処理も問題になりつつある。

そこでこれらのサトウキビ産業から発生する廃棄物系バイオマスをエタノール原料として利用できれば、処理を兼ねた廃棄物の有効利用になり、また耕地面積を増やさずにかつ食料との競合の問題を回避したエタノールの増産が可能になる。しかしこれらのサトウキビ廃棄物からエタノールを生産するためには、これらに含まれる多糖類、特にセルロースを効率的に発酵可能な単糖(グルコース)に変換する技術が必要である。しかし、これらの廃棄物において、セルロースはリグニン、ヘミセルロースによって保護されており、セルロース自体も強固な構造を持っているため、この保護を外しかつセルロースの構造を緩めて酵素と反応させやすくするための前処理が不可欠である。適切な前処理がされれば酵素による分解(酵素糖化)が可能であるが、現状では糖化酵素のコストが高いことが実用化の最大の問題となっている。このため酵素メーカーから酵素を購入するのではなく、エタノール生産者が自ら酵素も生産する(オンサイト酵素生産)ことで酵素コストの大幅な低減を図ることが有力な考え方であり、そのための生産菌と生産技術の開発が重要である。またバガス等の廃棄物系バイオマスに含まれるヘミセルロースは糖を中心とした構造の高分子であり、ヘミセルロースからも糖を回収して発酵

§4 プロジェクト実施内容及び成果

4.0 プロジェクト全体(サブテーマなし)

成果目標とその成果状況

＜プロジェクト目標＞

実用規模でのサトウキビ廃棄物からのエタノール生産の見通しを得る。

→1kg/バッチでバイオエタノール生産実験を行い、実証用パイロットスケール設備（1t/d）の基本設計作成に必要なデータを取得した。

＜マイルストーン＞

数十 kg/バッチを目安としたベンチプラントにおいてサトウキビ廃棄物からのエタノールを生産する。

→ 1kg/バッチのスケールでエタノールを生産し、絶乾バガス 1kg から 139g (176ml) のエタノールが生産された。

キシロースの発酵とエタノール生産システムの有効性(LCA、経済性)を確認する。

→ 開発した酵母によるキシロースの発酵が確認された。LCA では、温室効果ガス排出削減効果が従来法より最大 31.6%向上すること、経済性では酵素価格が 300 円/10⁶ FPU 程度であればバガスを発電に使うよりもエタノール生産した方が有利になる可能性を確認した。

サトウキビ廃棄物に適した前処理と酵素処理により 75%以上の糖化効率を得る(原料中セルロース糖化率)

→ 対セルロースで 75%以上の糖化率が得られている。

高効率エタノールの生成技術の確立:85%以上のヘキソース(六炭糖)からの発酵効率を得る。

→ ヘキソースから 90%以上の発酵効率を得られた。

キシロース発酵性微生物の探索・開発(キシロース(五炭糖の一種)の発酵が可能となる)。

→ブラジルで工業的なエタノール生産に用いられている *S. cerevisiae* CAT-1 株等にキシロース代謝系遺伝子を導入することにより、キシロースの発酵が可能となった。

従来型の生産方法と比較して、温室効果ガス排出削減効果が 20%以上向上することが確認される。

→キシロースを利用することにより、従来のサトウキビジュースから製造する場合に比べて温室効果ガス排出削減効果が 31.6%向上することが確認された。

(1) サトウキビ廃棄物に適した前処理技術の研究開発

産総研ではリグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産の研究開発を行っており、前処理法としては微粉碎処理と水熱処理を中心に実験を行ってきた。特に微粉碎処理は前処理効果が高く、発酵阻害物質などの生成も起こらず、廃液も発生しない特性を持つため、これを中心として前処理技術の開発を進めている。当初はボールミルを用いた乾式による微粉碎法を中心に実験を行っていたが、この方式では消費電力が大きくエネルギー利用を目的としたエタノール生産では問題があるため、ボールミル粉碎と同程度の処理効果が得られかつ消費電力を大幅に削減できるディスクミル方式による湿式粉碎へと方式を転換している。本研究で材料とするサトウキビのバガス、茎葉に対しては、微粉碎方式による前処理の適用についてはまだ報告が無かったので、ボールミル、ディスクミル、それぞれの方式でこれらの試料の前処理効果を調べる実験を行った。実験にはブラジル・ゴイアス州の Usina Itarumã という製糖工場から送付されたサトウキビのバガス、茎葉(straw)を用いた。その組成を表1に示す。

表1 実験に使用したサトウキビ廃棄物の組成

Component	Composition of biomass (%)		
	Bagasse	Straw ^{1*}	Straw ^{2*}
Glucan	38.8 ± 0.66	33.6 ± 0.86	32.4 ± 0.55
Xylan	23.5 ± 0.44	25.5 ± 0.59	21.7 ± 0.89
Arabinan	2.5 ± 0.02	3.4 ± 0.15	3.6 ± 0.10
Ash	2.8 ± 0.9	5.7 ± 0.06	6.0 ± 0.10
Lignin and others	32.4	31.8	36.3

^{1*}Material used for ball milling pretreatment; ^{2*}Material used for wet disk milling pretreatment

茎葉については、ボールミル処理に使用したものとディスクミル処理に使用したもので、若干の組成の違いがみられたので、それぞれの値を表1に示している。これらの試料を遊星型ボールミル(Pulverisette 7, Frisch, Germany)およびディスクミル(スーパーマスコロイダー MKZA10, 増幸産業、川口)を用いて微粉碎処理を行った。なおディスクミル処理は水を加えた湿式(固形分濃度 6.7% w/v)で行い、また1回の処理効果は大きくないので、処理した試料を再びミルに通すサイクルを最大20回まで行う実験を実施した。前処理物をセルラーゼ 15 FPU/g (アクレモニウムセルラーゼ、Meiji Seika ファルマ) + 0.2 % (v/v) Optimash BG (ヘミセルラーゼ; Du Pont Genencor, USA)の酵素液を用い、45℃で72時間反応させ、得られた糖をHPLCにより定量した。

バガス、茎葉をそれぞれ乾式ボールミル、湿式ディスクミルで微粉碎前処理したものを酵素糖化して得られた糖収量を図1に示す。ボールミル処理では粉碎時間の増加と共に糖収量が増え、粉碎時間120分での糖化率は、バガスについてはグルコースで83.3%、キシロースで77.2%、茎葉についてはグルコースで82.1%、キシロースで61.7%、という結果が得られ、茎葉のキシロースについて値が低い以外は、良好な糖化率が得られた。一方湿式ディスクミル処理ではサイクル数の増加に伴って糖収量の増加がみられたものの、糖化率は20サイクル処理でも、バガスについてはグルコースで49.3%、キシロースで36.7%、茎葉についてはグルコースで68.0%、キシロースで44.9%、とボールミル処理の糖化率に比べて明らかに劣るものであった。

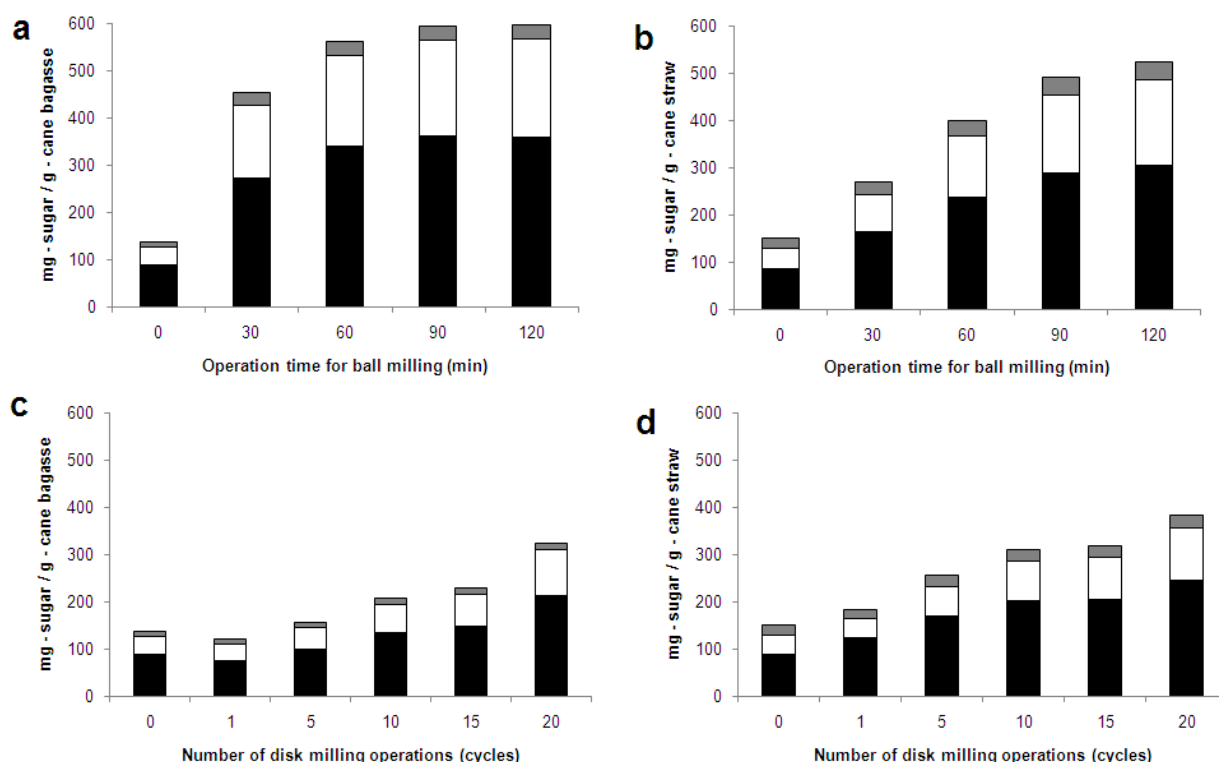


図1. サトウキビバガス、茎葉をボールミルまたはディスクミル処理し、酵素糖化して得られた糖収量
a. バガスーボールミル、b. 茎葉ーボールミル、c. バガスーディスクミル、d. 茎葉ーディスクミル
グラフの黒、白、灰色部分はそれぞれ、グルコース、キシロース、アラビノースの量を示す。

産総研ではこれまでに木質、稲わらについて、湿式ディスクミルによる前処理の研究を行ってきたが、いずれの試料もボールミル処理よりは低いものの、概ね満足できる糖化率が得られていた。特に稲わらはサトウキビと同じイネ科植物の地上部であるため、バガス等でも稲わらと同程度の糖化率が得られることを期待して実験を行ったが、結果は予想に反するものであった。稲わらとバガスのボールミル、ディスクミル粉碎による糖収率の比較を表2に示す。

表2 ボールミルまたはディスクミルにより粉碎処理された稲わら、サトウキビバガスの糖収率およびエネルギー消費量の比較

	稲わら			サトウキビバガス		
	グルコース 収率 (%)	全糖収率 (%)	エネルギー 消費量 (MJ/Kg biomass)	グルコース 収率 (%)	全糖収率 (%)	エネルギー 消費量 (MJ/Kg biomass)
ボールミル粉碎 30 分	75.9	64.4	54	61.7	61.1	54
ボールミル粉碎 60 分	89.4	78.2	108	78.7	77.1	108
湿式ディスクミル粉碎 5 回	59.4	51.3	2.3			
湿式ディスクミル粉碎 10 回	78.5	67.5	5.4	31.5	28.6	10.6
湿式ディスクミル粉碎 20 回				49.3	44.7	48

ボールミル粉碎処理では、バガスは稲わらより糖収率が劣るものの、60 分粉碎で 80%近いグルコース収率が得られているが、湿式ディスクミル粉碎ではバガスの糖収率は明らかに低く、バガスの 20 回処理の値が稲わらの 10 回処理の値の6割程度にしか達していない。なお表2には、それぞれの処理によるエネルギー消費量の試算値も示しているが、ボールミル粉碎に比べてディスクミル粉碎がエネルギー消費量が少ないことが明白に示されている。しかしバガスのように糖化性が悪く処理回数が多くなるとエネルギー消費量も増大するので、この点からもバガスの湿式ディスクミル粉碎の結果は問題である。

以上のようにサトウキビ廃棄物のディスクミル粉碎処理では低い糖化率しか得られないことが明らかになった。この原因は不明であるが、糖化率を上げるため、また糖化率に影響している要因を探索するために、湿式ディスクミル処理と他の処理の組み合わせ、および原理が異なる処理方法での検討を行った。

まず産総研でも研究を行っている水熱処理を行うことを検討した。水熱処理における問題の1つに、ヘミセルロースの分解によって側鎖のアセチル基由来の酢酸等が生成して pH が下がると、生成した糖の過分解が起きやすくなり、糖収率が下がる点が知られている。そこでアルカリの添加によりこの現象を緩和することも併せて実験を行った。バガス重量に対して 1-6%の炭酸ナトリウムを添加して水熱処理 (150 °C, 2 h) を行ない、酵素により糖化した。その結果、いずれの実験区においても水熱処理後に pH が中性以下に低下するが、アルカリ濃度が高いほど pH の低下は少なく、アルカリが 5%より高い濃度において、無添加系の水熱処理物より酵素糖化性が高くなることが分かったが、セルロース量に対するグルコース収率はアルカリ無添加で 28%、6%アルカリ添加で 43%と低いものであった (図2)。

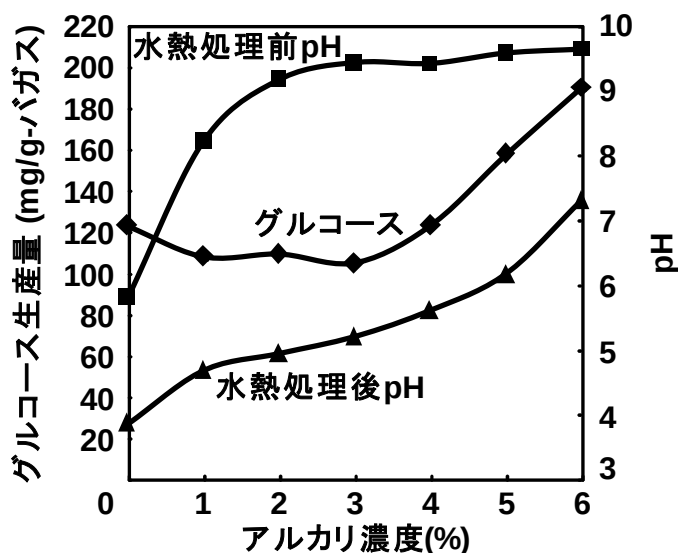


図2.水熱処理におけるアルカリ(Na_2CO_3)濃度が酵素糖化性と pH に及ぼす影響

さらに、3 および 6%のアルカリを添加した水熱処理により、アルカリ無添加系と比較してバガス中に含まれるキシランの分解が抑制され、6%アルカリ水熱処理ではリグニンの分解が促進されることが分かった (表3)。

表3. 希アルカリ水熱処理バガス残渣の成分

組成(%) ^a	未処理物	炭酸ナトリウム含有量(%)		
		0	3	6
グルカン	40.1	39.9	38.8	38.8
キシラン	24.7	16.0	21.8	20.4
酸不溶性リグニン	22.8	21.1	21.9	17.6

^a 未処理物重量に対する割合

次に、アルカリ無添加と6%アルカリ添加での水熱処理物について、固形分濃度2%でディスクミル処理を行なった。その結果、ディスクミル処理によって比表面積が増加し、結晶性が減少することがわかり(表4)、グルコース生産量も増加したが、水熱処理時のアルカリ添加による差は見られなくなり、糖化率はいずれも88%程度であった(図3)。

表4 水熱処理後湿式ディスクミル処理したバガスの比表面積と結晶化度

組成 (%)	0%炭酸ナトリウム		6%炭酸ナトリウム	
	HT	HT-DM (7)	HT	HT-DM (6)
比表面積 (m ² /g)	52.7	145	73.9	146
結晶化度 (%)	37	22	38	26

HT, 水熱処理; DM, ディスクミル処理
括弧内はディスクミル処理回数を表す

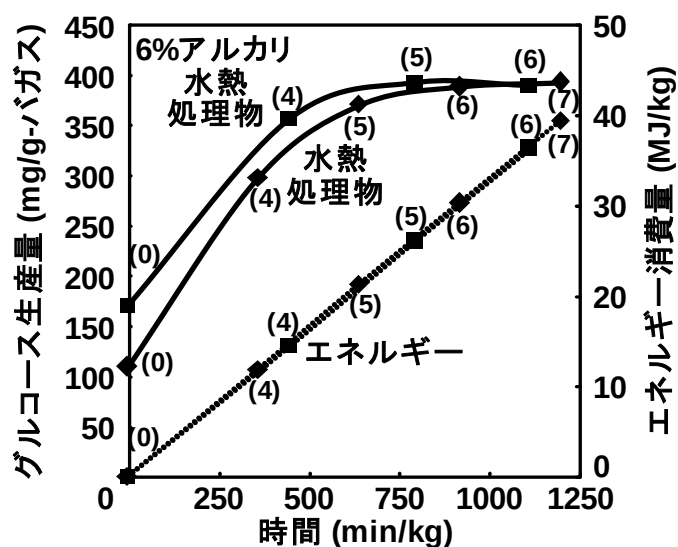


図3. 水熱処理後湿式ディスクミル処理したバガスからのグルコース生産量:括弧内はディスクミル処理回数を表す。

さらに、6%アルカリ水熱処理後の湿式ディスクミル処理物について、10% (w/v)の高基質濃度で、ヘミセルラーゼ存在下セルラーゼ添加量を変化させて72 hの酵素糖化反応を行なった(図4)。その結果、20 FPU/g-基質のセルラーゼを添加することにより、未処理バガスの糖含有量の77%のグルコースと67%のキシロースを得ることができた。また10 FPU/g-基質の酵素量でも、73%という糖化率が得られた。

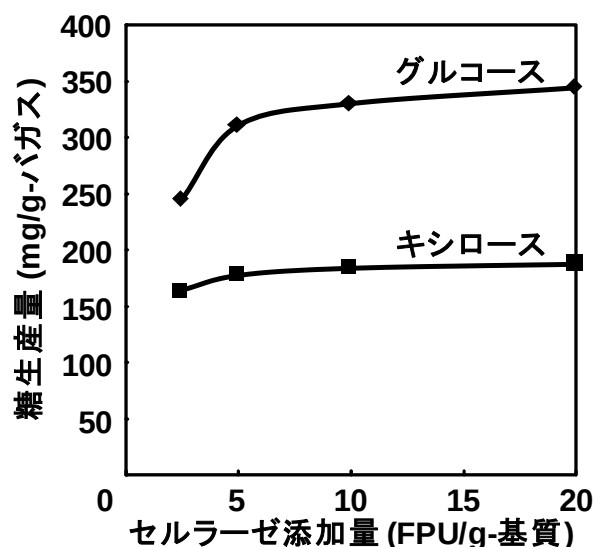


図4. 6%アルカリ添加水熱処理後ディスクミル処理したバガスに対するセルラーゼ添加量が酵素糖化性に及ぼす影響

以上のように水熱処理後湿式ディスクミル処理を行うことにより、ディスクミル処理単独の場合に比べて、糖化率を大きく向上できることが明らかになった。

同じく湿式ディスクミル処理での糖化性を高める方策として、その酸化作用による前処理効果が期待される過酸化水素処理との組み合わせを検討した。湿式ディスクミル処理後のバガスに2% (w/v) の過酸化水素水を加え、温度を50℃または70℃に設定し、攪拌しながら48時間反応させ、洗浄後酵素糖化を行った。それによる糖収率を図5に示す。これからわかるように、過酸化水素処理単独では糖収率が湿式ディスクミル処理単独の場合に及ばず、湿式ディスクミル処理と組み合わせることで糖収率は増加するが、バイオマス量を少なくした場合にのみ湿式ディスクミル処理単独の値を上回った。またキシロースの収率は過酸化水素でヘミセルロースが分解されるために湿式ディスクミル処理単独より減少した。従って、過酸化水素処理を湿式ディスクミル処理と組み合わせることは糖収量の向上には効果が無いことが分かった。なお過酸化水素処理の効果はその酸化作用で、特にリグニンを分解することにあると考えられている。これにより相対的にセルロース含量が高まっており、別途行った湿式ディスクミル処理後過酸化水素処理を行ったバガスを炭素源とする酵素生産菌の培養実験では、粉末セルロースと同程度の酵素生産性を得ている。

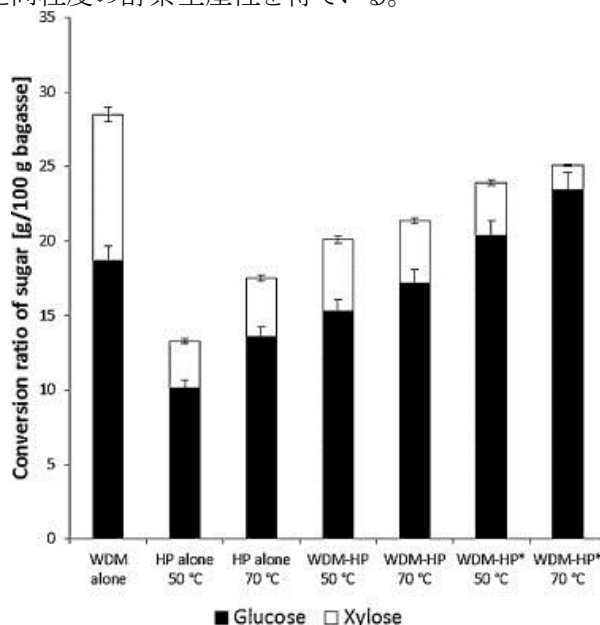


図5.湿式ディスクミル処理と過酸化水素処理したバガスからの糖収率。過酸化水素処理では5%のバガスを使用した、*印については2.5%で行った。

また過酸化水素と同様に酸化作用によって前処理効果を示すオゾン処理と湿式ディスクミルの複合処理についても検討を行った。固形分濃度2.5%(W/V)で15 FPU/g アクレモニウムセルラーゼ+ 0.2 % (v/v) Optimash BGを用いて糖化した際のグルコース収量に対する、バガスに対する複合処理の効果(図6)、および茎葉に対する複合処理の効果(図7)を示す。図からわかるように湿式ディスクミル単独処理に比べて糖収量の増加がみられた。また湿式ディスクミル処理後にオゾ

ン処理(60分)した場合のグルコース収率は90%、逆にオゾン処理(60分)湿式ディスクミル処理した場合のグルコース収率は81%であり、湿式ディスクミル処理後オゾン処理するプロセスが効果が高いことが明らかになった。

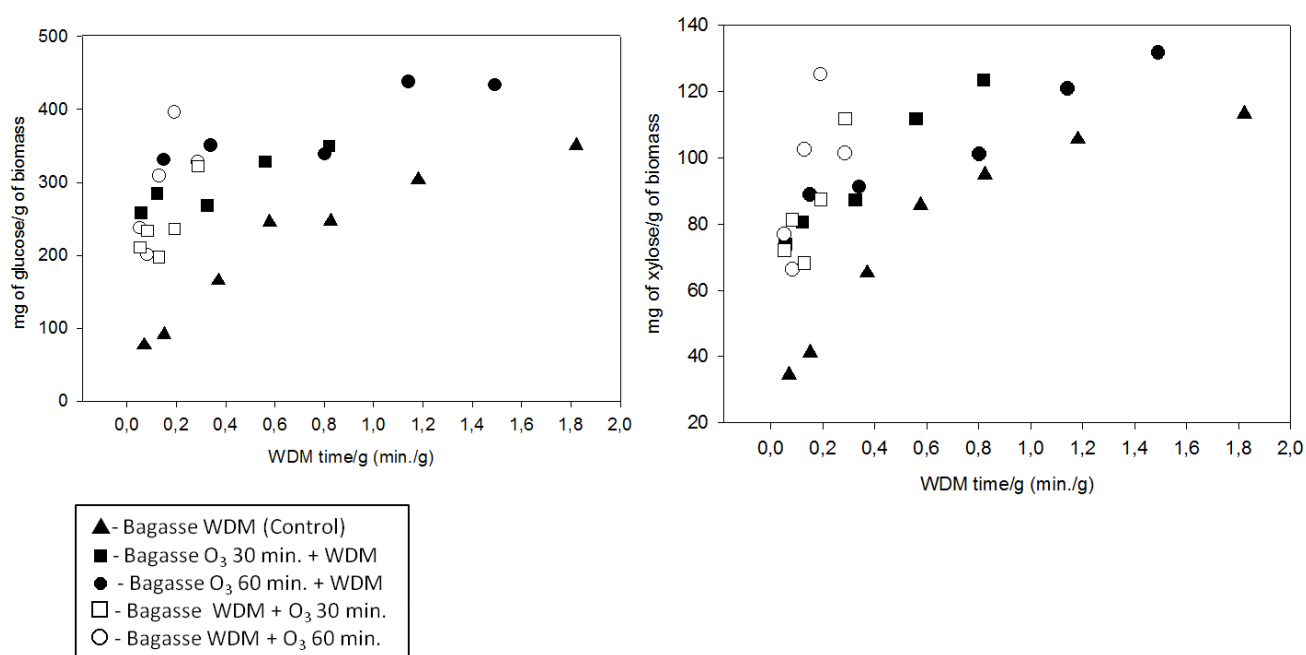


図6. 湿式ディスクミルとオゾンの複合処理によるバガスからの糖収量
左:グルコース、右:キシロース

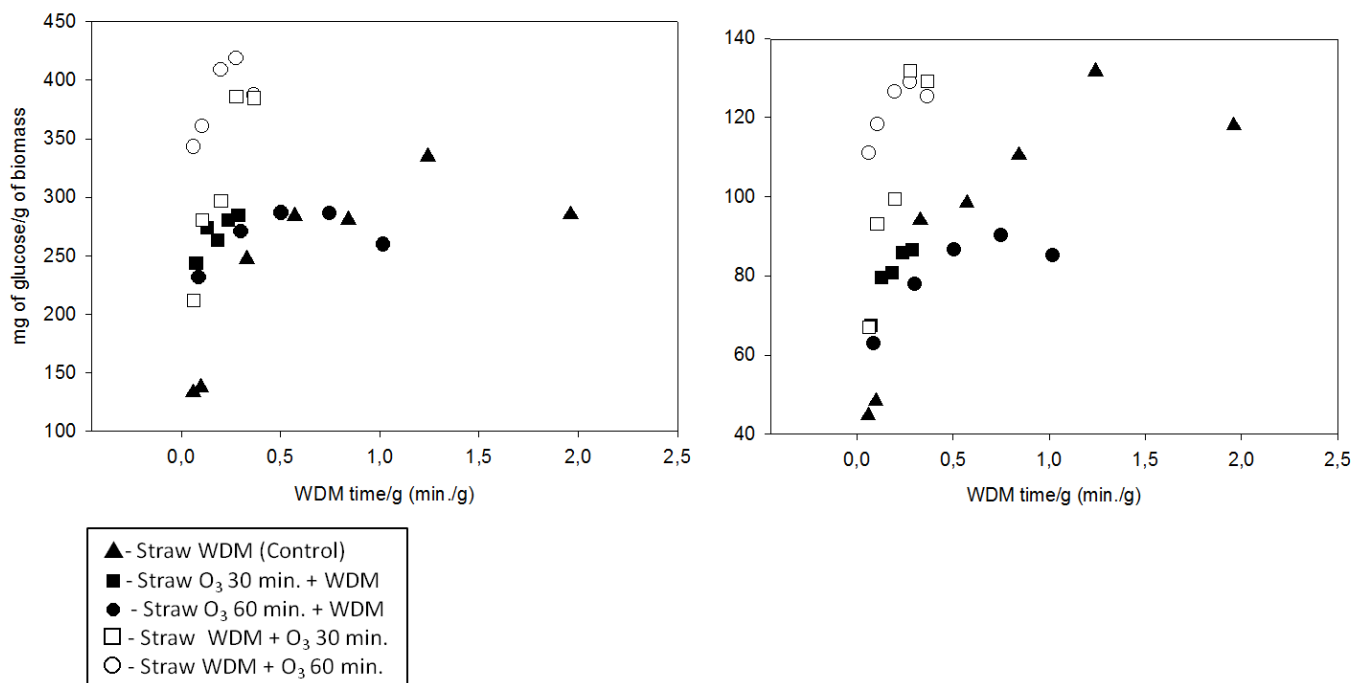


図7. 湿式ディスクミルとオゾンの複合処理による茎葉からの糖収量
左:グルコース、右:キシロース

これらの処理物の SEM による観察(図8)、および比表面積の測定(図9)により、処理の効果を解析したところ、これらの処理、特に複合処理によって原料の微細繊維化が進み、細胞壁が脆弱化されることによる機械的解繊処理効率が向上し、比表面積が増加したことが主たる要因であると推察された。

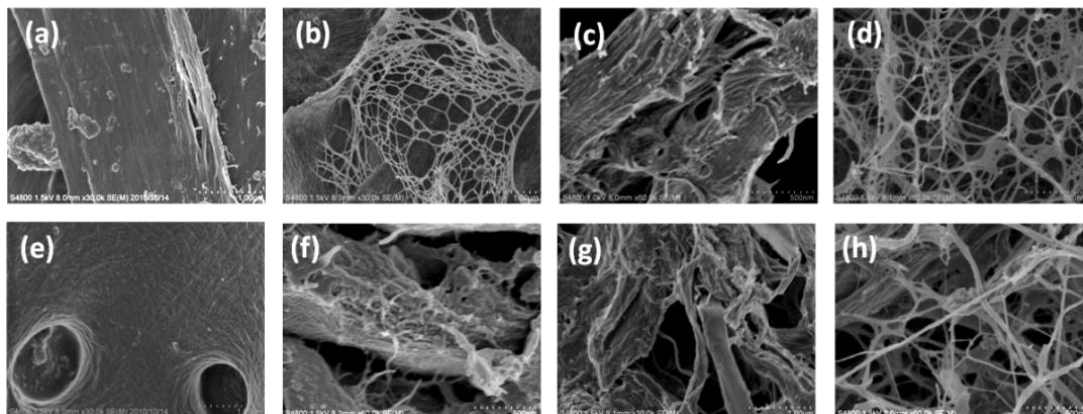


図8.オゾン処理及び湿式ディスクミル複合処理で得られた微細繊維物の形態性質

(a) Raw bagasse; (b) O₃ treated bagasse after 60 min. (c) 7 cycles WDM treated bagasse (d) WDM + O₃ treated bagasse; (e) Raw straw; (f) O₃ treated straw after 60 min. (g) 7 cycles WDM treated straw; (h) WDM + O₃ treated straw.

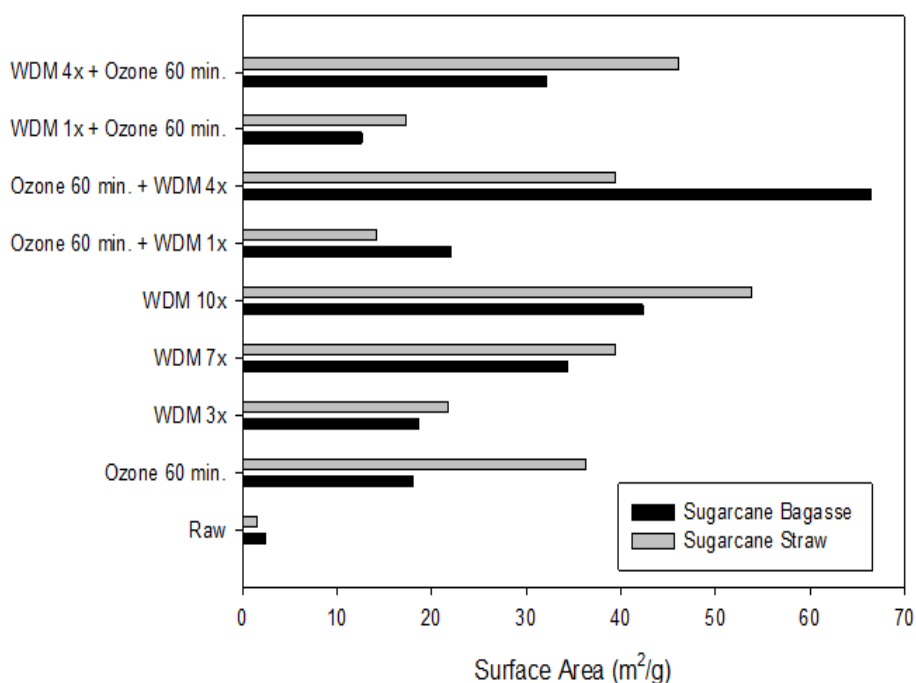


図9. オゾン処理及び湿式ディスクミル複合処理で得られた微細繊維物の比表面積

最後に、微粉碎とは全く異なる方法であるが、近年注目を集めているイオン性液体による前処理効果について、以下の6種を用いてイオン性液体によるバガスの前処理を行い、15 FPU/ g アクレモニウムセルラーゼ+ 0.2 % (v/v) Optimash BGを用いて糖化した場合のグルコース収量を調べた。

- 1-butyl-3-methylimidazolium chloride [Bmim] [Cl]、
- 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate [Emim] [Ac]、
- 1-allyl-3-methylimidazolium chloride [Amim] [Cl]、
- 1,3-dimethylimidazolium dimethyl phosphate (Mmim DMP)、
- 1-butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide[Bmim] [NTf2]、
- 1-ethyl-3-(hydroxymethyl) pyridine ethyl sulfate

これらのイオン性液体の中では、[Emim] [Ac]が一番効果的に酵素糖化性を向上させることを見出し (図 10)、これを用いると 98%のグルコース収率が得られた。

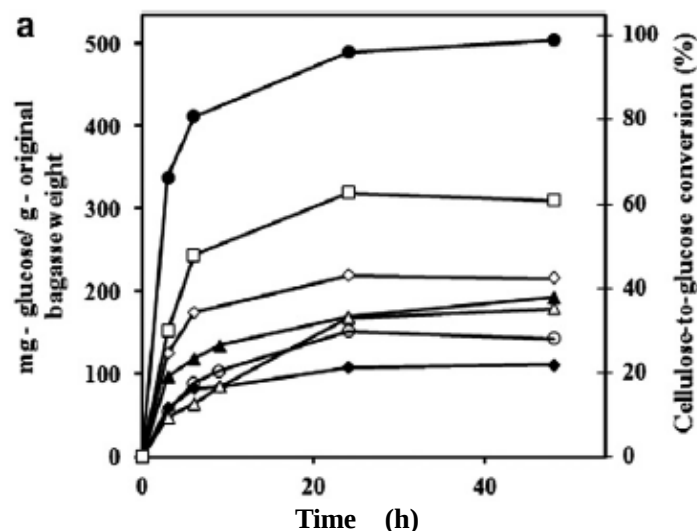


図 10. 各種イオン性液体を用いて前処理したバガスからのグルコース収量および変換効率

◆: 未処理、▲: [Bmim][Cl]、●: [Emim][Ac]、◇: [Amim][Cl]、□: [Mmin][DMP]、○: [Bmim][NTf2]、
△: 1-ethyl-3-(hydroxymethyl) pyridine ethyl sulfate.

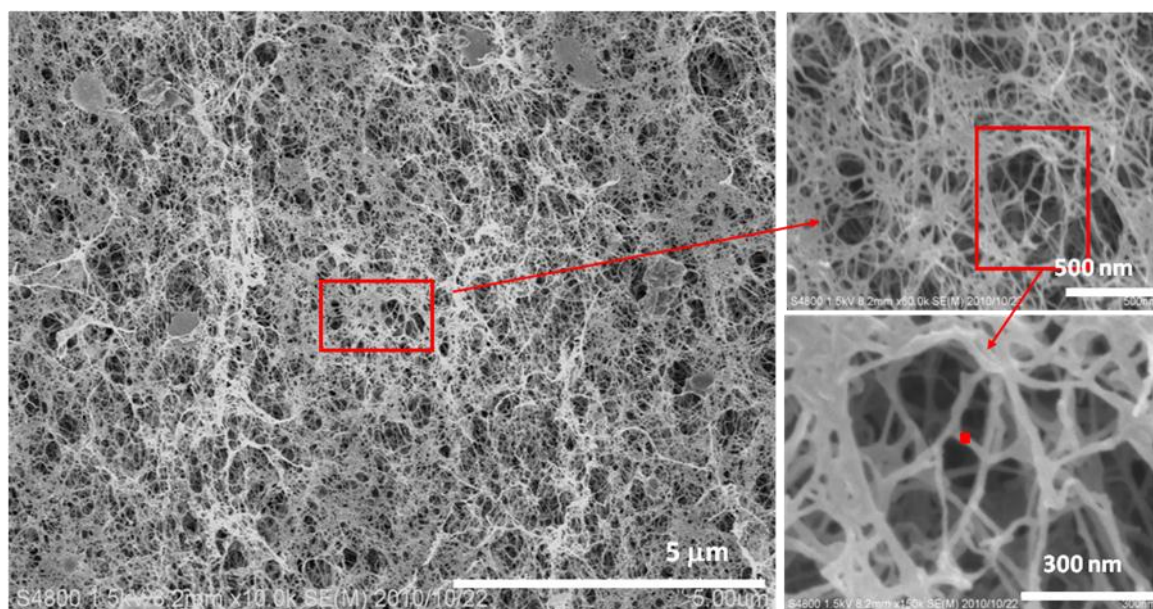


図11. [Emim][Ac]で処理したバガスの SEM 観察

また[Emim][Ac]で処理したバガスの SEM 観察を行ったところ、図 11 に示すように、原料の微細繊維化が進み、きれいなナノファイバーが生成していることがわかり、これが高い糖収率を与える要因と考えられた。

しかしこの実験条件ではバイオマスに対して 15~20 倍の体積のイオン性液体を使用しており、イオン性液体による前処理自体がまだ基礎研究段階であるとはいえ、イオン性液体の使用量を減らすことが重要な課題と考えられた。そのために、高せん断力を付加することで高濃度のバガス処理を連続的に行うことができるメリットがあると考えられる二軸エクストルーダーを使用する実験を行った (図 1 2)。これにより、イオン性液体量をバイオマスの 3 倍量まで低減させても 90%以上のグルコース収率が得られることがわかった。イオン性液体量がバイオマスと等量の場合はグルコース収率が低下した。

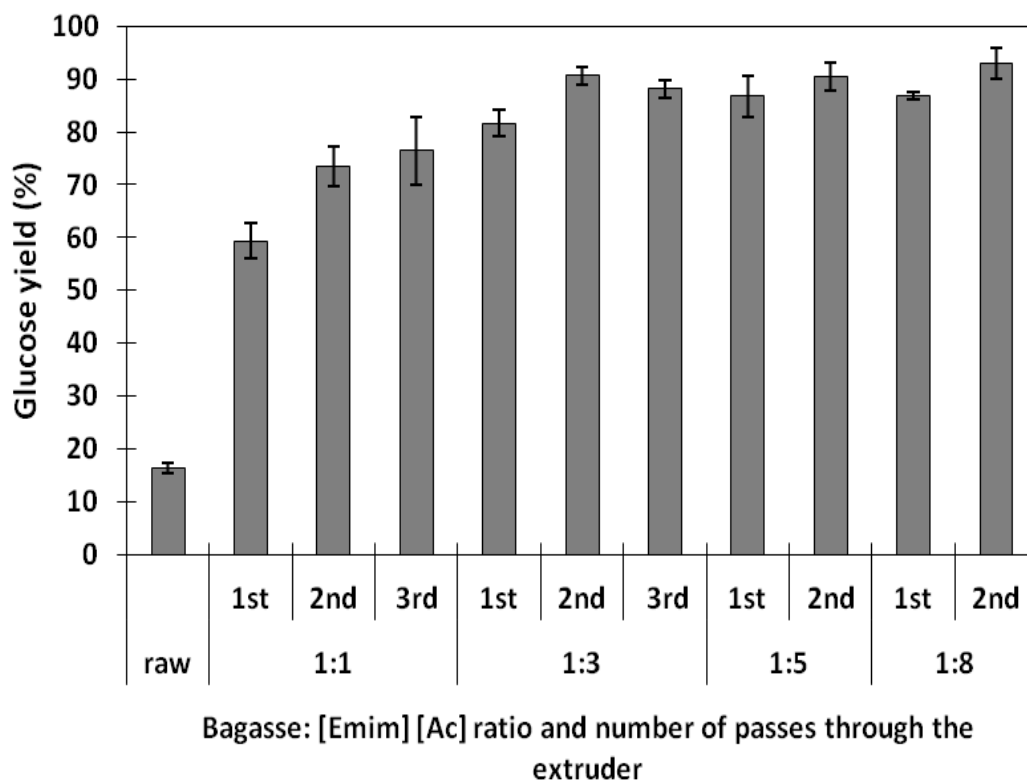


図 12. 二軸エクストルーダーを用いたイオン性液体によるバガス前処理における体積比とグルコース収率
2nd、3rd は二軸エクストルーダーで 2 回、3 回処理した試料を示す。

以上のように、サトウキビ廃棄物の前処理は、木質や稲わらなどで実績があった湿式ディスクミル処理単独では糖化率が低いという問題があったが、水熱処理や、オゾン処理との組み合わせにより高い処理効果が得られることを明らかにした。酵素糖化に対する効果が高い処理物の解析から、原料バイオマスの微細繊維化が高い糖化率を得るために重要であることが明らかになり、これは微細繊維化による稠密な構造の崩壊と表面積の増大により、糖化酵素の分子が接触、反応しやすくなることによるものと推察された。

<スケールアップしての実証評価>

開発された前処理技術の実証を中心とするベンチ規模のエタノール生産実験を UFRJ で行う計画であったが、UFRJ 側の準備が遅れたため、ブラジル産のバガスを用いて産総研でベンチ規模実験 (1kg 絶乾バガス/バッチ) を行った。前処理は、水熱処理、湿式ディスクミル処理、水熱処理後湿式ディスクミル処理の 3 方式について、各 1kg (乾燥重) のバガスの処理を行った。水熱の処理条件は 150℃、2 時間で、湿式ディスクミル処理はクリアランスを調整しながら 10 サイクル行った。酵素糖化はリグノセルロース系バイオマス用に開発されブラジルでも入手可能な市販酵素 Cellic CTec2

(Novozymes 社) を使い、酵素使用量は実用面でのコストを考慮して、10 FPU/g 基質の低酵素量で実施した。各処理物のスラリー 5L を全容量 10L のジャーファーメンター内で pH5.0、50℃ で 3 日間反応させ、生成した糖の分析を行った (図 13)。その結果、水熱および湿式ディスクミルの単独処理では、ラボ実験での結果と同様にいずれも糖化率が低く、特に水熱処理で低かったが、水熱処理後さらに湿式ディスクミル処理することで糖化率は向上した。その値は 68% であった。

次に得られた糖化液を用いて、ブラジルで工業的なエタノール生産に使用されている酵母株 *S. cerevisiae* CAT-1 による発酵実験を行った。この酵母は非組み換えでキシロースは発酵できないが、グルコースからは、ディスクミル単独、および水熱+ディスクミルの前処理を行った糖化液からは理論値に対して 90% 以上の収率でエタノールが生産できた。最もエタノール収量が多かったのは、水熱+ディスクミル処理を行った実験で、絶乾バガス 1kg から 139g (176ml) のエタノールを得ることができた (表 5)。糖化率では 75% の目標値を達成できなかったが、発酵収率では目標の 85% を上回る収率が得られたので、結果としては目標の糖化率 75%、発酵収率 85% を達成した場合と同等のエタノール生産量が得られた。なおこの実験は 10 FPU/g 基質という低酵素量で行ったが、同じ材料を用いて別途行ったラボ実験では、酵素量を 20 FPU/g 基質にすると、糖化率 78% と、目標を超える値が得られている。

このように 1kg/バッチのスケールで、前処理からエタノール発酵までの一貫プロセスによるエタノール生産を実証することができた。

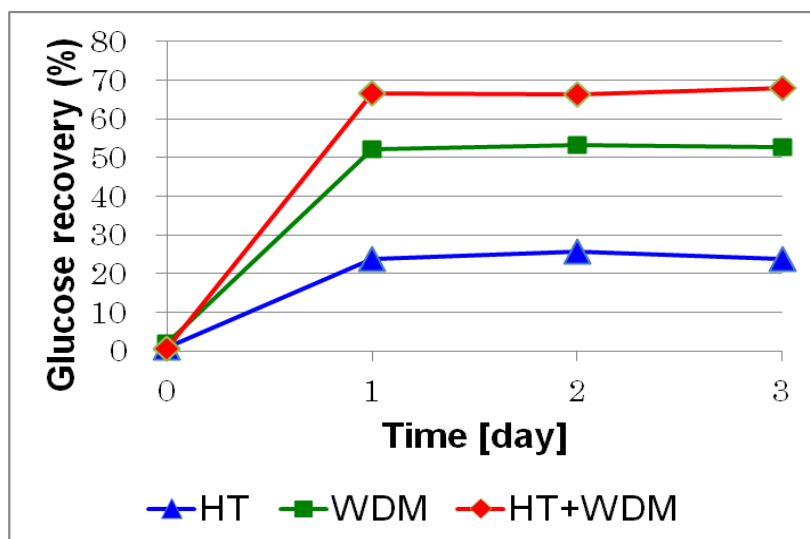


図13. ベンチ規模実験によるブラジル産バガスからのグルコース収率
HT：水熱処理、DM：湿式ディスクミル処理、HT+DM：水熱処理後湿式ディスクミル処理

表5. ベンチ規模実験によるバガスからのグルコース収量、発酵収率、エタノール収量

前処理	グルコース (g/kg バガス)	発酵収率 (%)	エタノール収量 (g/kg バガス)
水熱処理	102	64.3	34
湿式ディスクミル処理	226	90.6	105
水熱＋湿式ディスクミル	289	94.5	139

(2) サトウキビ廃棄物に適した糖化酵素の開発及び糖化技術の研究開発

UFRJ の Bon 教授の研究室は種々の有用酵素を微生物により生産する研究が行われている。前処理されたサトウキビ廃棄物を糖化するために必要なセルラーゼ、ヘミセルラーゼ等についても研究されていて、セルラーゼ生産糸状菌の *T. reesei* RUT-C30 株と、セルラーゼ以外の補助酵素を多く生産する *A. awamori* 2B.361 U2/1 株が生産する酵素液を混合してバイオマスを総合的に糖化する技術の研究が行われており、水熱処理されたバガスを基質にしての糖化実験も行われている。一方産総研でも糸状菌 *A. cellulolyticus* によるセルラーゼ生産の研究を行っている。この菌は 1982 年に産総研の前身の 1 つである旧微生物工業技術研究所の研究者によって福島県の土壌から単離された日本オリジナルのセルラーゼ生産菌である。UFRJ と産総研それぞれの酵素系の性能を比較するために、両者によるサトウキビ廃棄物の糖化性の実験を行った (図 14、15)。

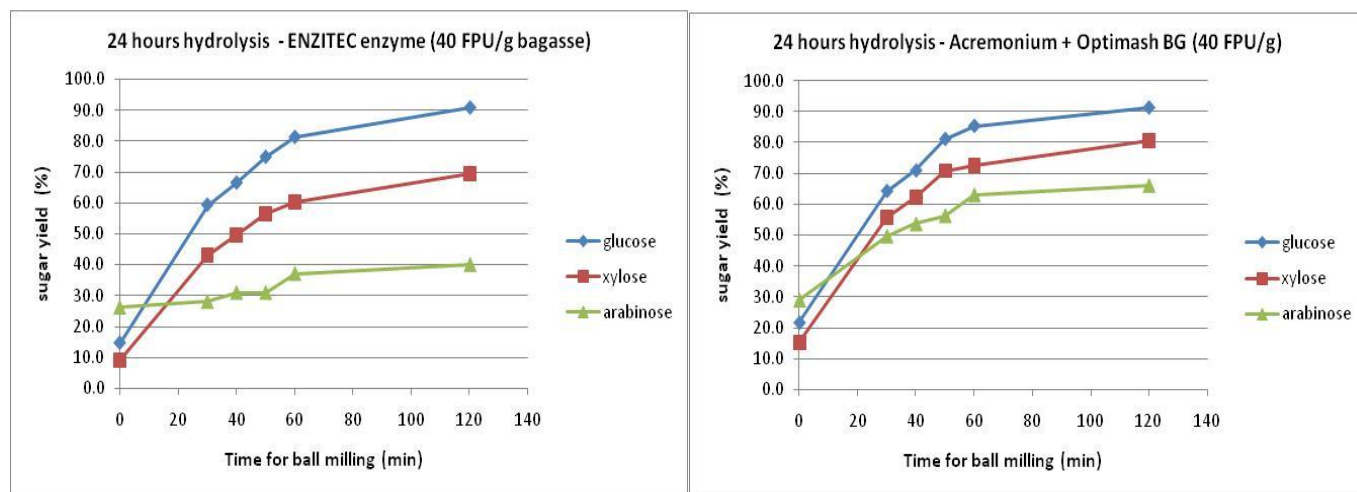


図14. UFRJ(左)と産総研(右)の酵素系を用いたバガスからの糖収率

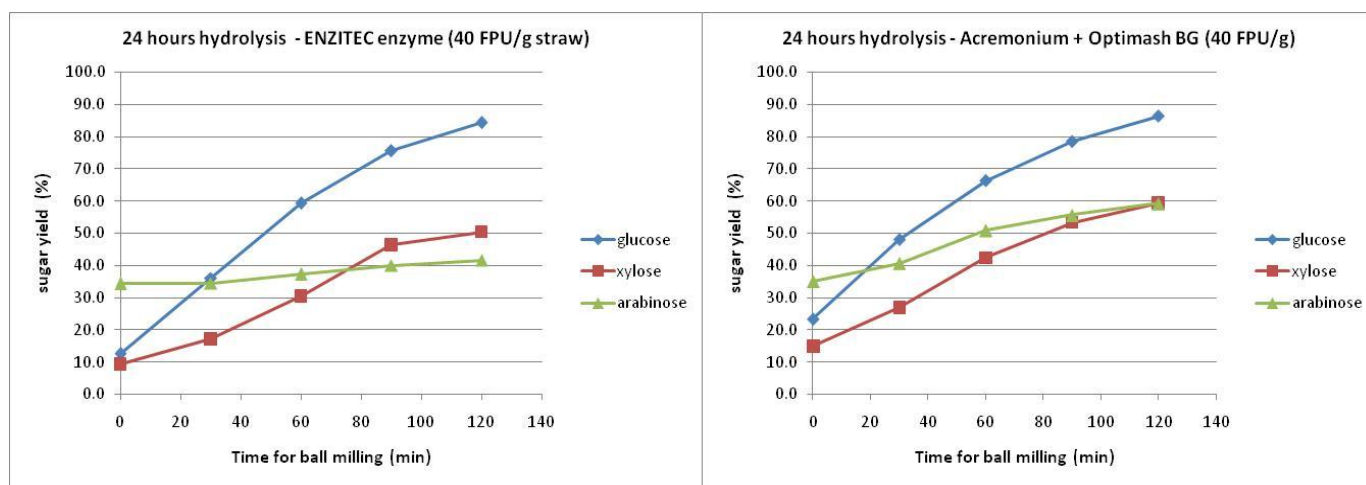


図15. UFRJ(左)と産総研(右)の酵素系を用いた茎葉からの糖収率

糖収率を比較すると、FPU 値を合わせた場合、産総研の酵素系の方がキシロース、アラビノースの収率が高い傾向がみられたが、グルコースには対してほぼ同等であった。このため UFRJ の酵素系の使用では、ヘミセルロース分解酵素などの補助酵素を強化する必要があると考えられた。キシロースの回収率向上にはキシラナーゼと β -キシロシダーゼが重要であり、特に β -キシロシダーゼの生産には基質となるキシロオリゴ糖が豊富に含まれる水熱処理の液体画分を用いることが有効と考えられるので、これを炭素源として *A. awamori* の培養を行い、併せてキシラナーゼ、 β -グルコシダーゼ、 α -アラビノフラノシダーゼ等の補助酵素の生産性を検討した。その結果、水熱処理の液体画分を炭素源として、これらの補助酵素が生産でき、また酵素生産性は培養時の pH に影響されることを明らかにした(図16、17)。

なお水熱処理で得られる液体画分の主構成成分はキシロースであり、これは遺伝子組み換え酵母等を使用しないとエタノール発酵できない。当面サトウキビ廃棄物からのエタノール生産を既存のエタノール生産設備に併設する形での実用化が想定され、その場合キシロースは利用しないので、これを酵素生産の炭素源にすることは、資源の有効利用につながる。セルロースの糖化に必要な β -グルコシダーゼが生産できるほか、キシロースを利用しない場合でも、ヘミセルロースの分解がセルロースの糖化率向上に寄与するため、キシロースの発酵を行わない場合でも意味があると考えられる。さらに将来キシロースの発酵を行う場合でも、酵素生産に用いる分はキシロースの全体量に対して大きくないと考えられるので、この場合でも有効な技術と考える。

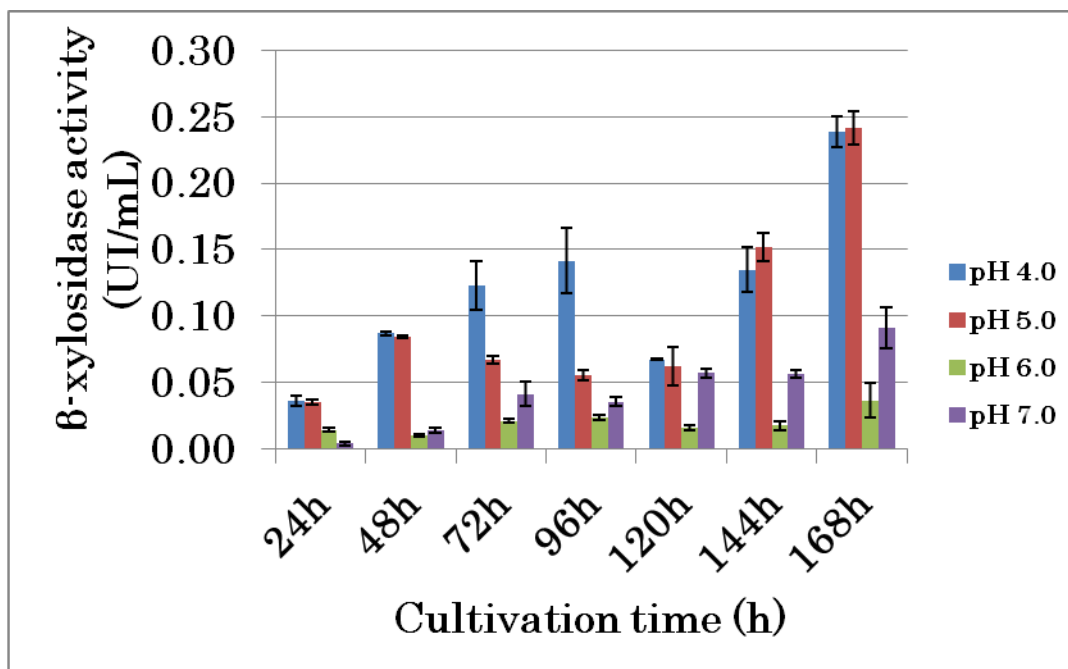


図16. バガスの水熱処理による液体画分を炭素源として培養した、*A. awamori* による β -キシロシダーゼ生産

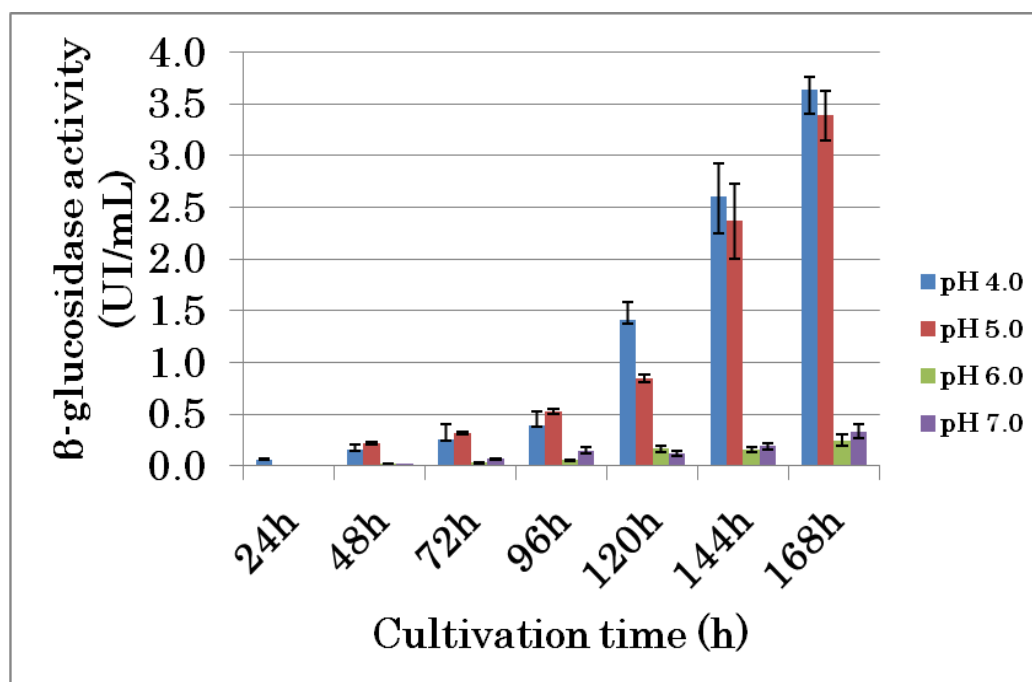


図17. バガスの水熱処理による液体画分を炭素源として培養した、*A. awamori* による β -グルコシダーゼ生産

以上のような成果も活用しながら、UFRJ でベンチ規模での酵素生産実験を予定していたが、設備整備の遅れから事業期間内に行うことが困難になった。糸状菌による酵素生産ではスケールアップの際に生産性が変動する例が知られているので、大規模化への移行を円滑に進めるために、酵素生産糸状菌培養のスケールアップに関する基盤的な研究を行った。糸状菌は好気性であり、酸素の供給が菌の生育や酵素生産性に影響することが知られている。培養における酸素供給に関しては、一般に kLa と呼ばれる総括酸素移動容量係数が重要なパラメーターであるが、糸状菌によるセルラーゼの生産において、 kLa 値 を測定して解析した研究報告例は極めて少ない。そこでまず糸状菌の培養を想定したジャーファーメンター培養において kLa 値に影響すると考えられる通気速度と攪拌速度を変えて kLa 値の測定を行い、以下の式で kLa 値が計算できることを明らかにした。

$$kLa = 2.2(P/V)^{0.45}U_s^{0.24}$$

ここで P は攪拌動力で表した攪拌速度、V はファーメンター容積、Us は通気の線速度(m/s)である。種々の条件について、kLa の実測値と上記の式で計算した値の関係をグラフに示したのが図18で、予測値と実測値が計算値の20%にほぼ入ることがわかり、この式の有効性が示された。kLa 値の測定には煩雑な操作が必要なことが研究上の問題であるが、これにより通気速度と攪拌速度から容易に kLa 値を推計することが可能になり、今後の研究の進捗に有用であると考えられる。

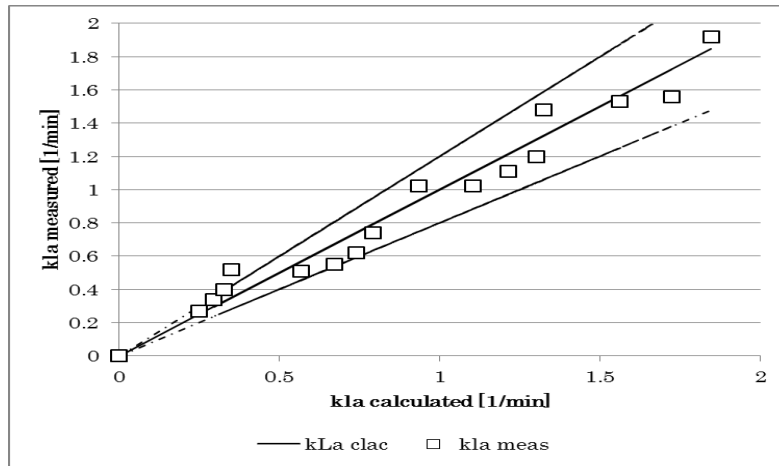


図18. 本研究で提案した計算式によるグラフ(中央)と実測値 (□) の比較

次に kLa 値とセルラーゼの生産性(FPU/L・d)の関係について UFRJ で酵素生産に使用される *T. reesei* RUT-C30 株を培養して調べたところ、図19に示したように、両者に相関があることがわかり、酵素生産における KLa 値の重要性が明らかになった。小スケールで良い生産性が得られている場合、スケールアップの際に小スケールでの KLa 値が確保されるように留意することが重要である。

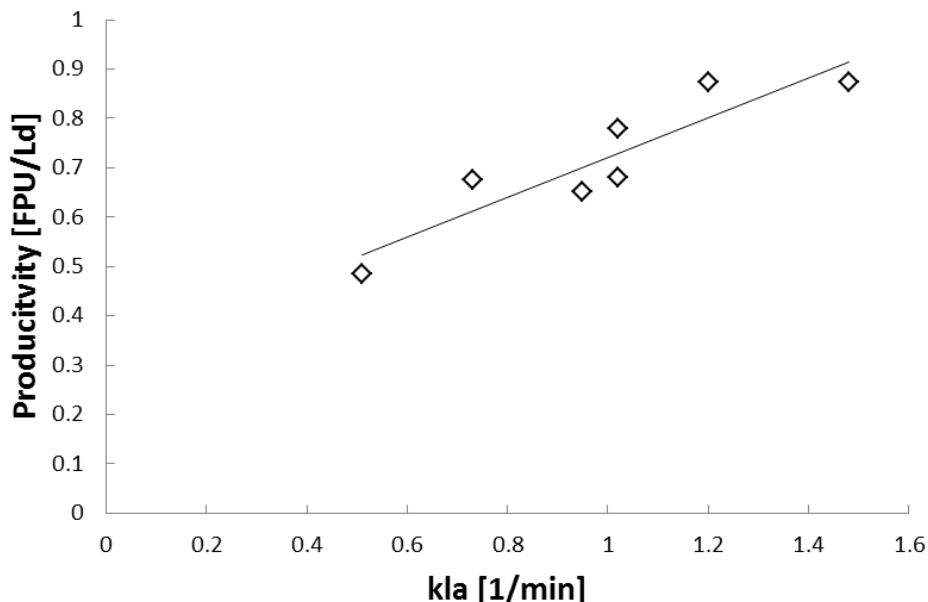


図 1 9 *T. reesei* RUT-C30 株の培養における kLa 値とセルラーゼ生産性の関係

(3)) サトウキビ廃棄物に適したエタノール発酵微生物の研究開発(キシロース発酵性微生物の開発を含む)

通常の六炭糖を基質としたエタノール発酵は、ブラジルでは既にサトウキビ糖液からの燃料用エタノール生産が幅広く行われており、またサトウキビ糖液を原料とする酒造もあるため既に多くの *S. cerevisiae* の工業用株が利用可能である。これらのブラジルの工業用株、およびブラジルのエタノール生産工場周辺から単離された *S. cerevisiae* の各株の発酵特性を解析し、エタノール生産性、副生成物のグリセロール生成量、発泡性、安定性の観点から評価が行われ、最も好適な数

種の酵母株 (CAT-1、PE-1、BG-1 等) が選抜されている。またキシロース発酵性酵母については UFSC によりブラジルでスクリーニングが行われ、腐朽木材よりキシロース発酵性の酵母が単離され、rRNA の D1/D2 領域の遺伝子解析により *Spathaspora arborariae* と同定されている。この酵母株はグルコースと同時にキシロースを消費できる特性を持っており、キシロースを含む糖液の発酵用酵母として使用できる可能性があるが、エタノール耐性、エタノール生産性等、まだ検討すべき課題があるため、キシロースの発酵については既に産総研が開発している遺伝子組み換え *S. cerevisiae* による技術を基に研究を行った。

エタノール発酵に用いられる酵母 *S. cerevisiae* はキシロースを代謝できないが、その異性体であるキシルロースは代謝してペントースリン酸回路 (PPP) に導入することができる。従ってキシロースをキシルロースに変換するための酵素遺伝子を導入すれば、*S. cerevisiae* でのキシロースからのエタノール発酵が可能になる。この考え方に基づき、キシロース発酵能を持つ酵母 *Scheffersomyces stipitis* 由来の、キシロースをキシリトールに変換する xylose reductase (XR)、およびキシリトールをキシルロースに脱水素化する xylitol dehydrogenase (XDH) の酵素遺伝子を導入することで、キシロースからのエタノール発酵が可能になった。また生成したキシルロースをリン酸化して PPP に導入するための酵素 xylulokinase (XK) は *S. cerevisiae* がもともと保有しているがその活性が十分ではないため、産総研ではこの遺伝子も併せて導入することで、効率良くキシロースをエタノールに変換できる *S. cerevisiae* 株の開発に成功している。

一方 UFSC の Stambuk 教授の研究室では *S. cerevisiae* における糖取り込みのためのトランスポーターの研究を精力的に行っているが、キシロースは *S. cerevisiae* が利用できない糖であり、キシロースを炭素源にした培養ができないこともあってその取り込み機構についての研究は行われていなかった。本研究では、産総研の技術により、ブラジルにおける実用酵母株へのキシロース発酵能付与の検討を行うこと、および *S. cerevisiae* の糖取り込み機構の研究に蓄積がある UFSC との共同研究により、*S. cerevisiae* におけるキシロースの取り込み機構の解析を行い、それを基にキシロースの取り込み能に優れたキシロース発酵性 *S. cerevisiae* 株の取得を目指した研究を行った。

ブラジルでの有用な実用株として選抜されている酵母株に産総研開発の染色体組み込み型 XR-XDH-XK 遺伝子発現カセット (図20) を導入した。最も優良な工業株である CAT-1 株に遺伝子を導入して得られた株 (CAT-1X) を用いたグルコース、キシロースの混合糖からの発酵実験の結果を図21に示す。グルコースよりは消費速度が遅いものの、キシロースも培養の初期から消費され、それに応じてエタノールが生産されている。これにより、ブラジルの優良工業酵母株にキシロースからのエタノール生産能を付与することに成功した。

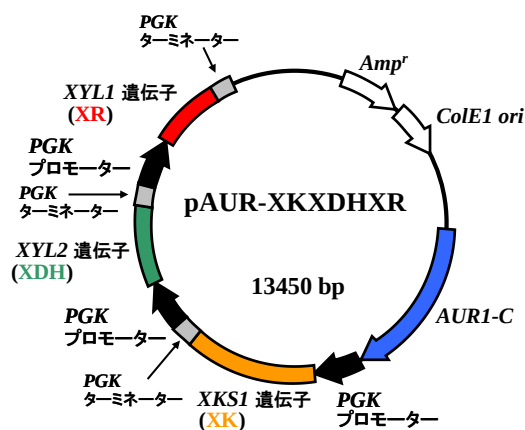


図20. *S. cerevisiae* にキシロースは効能を与える染色体組み込み型遺伝子発現カセット

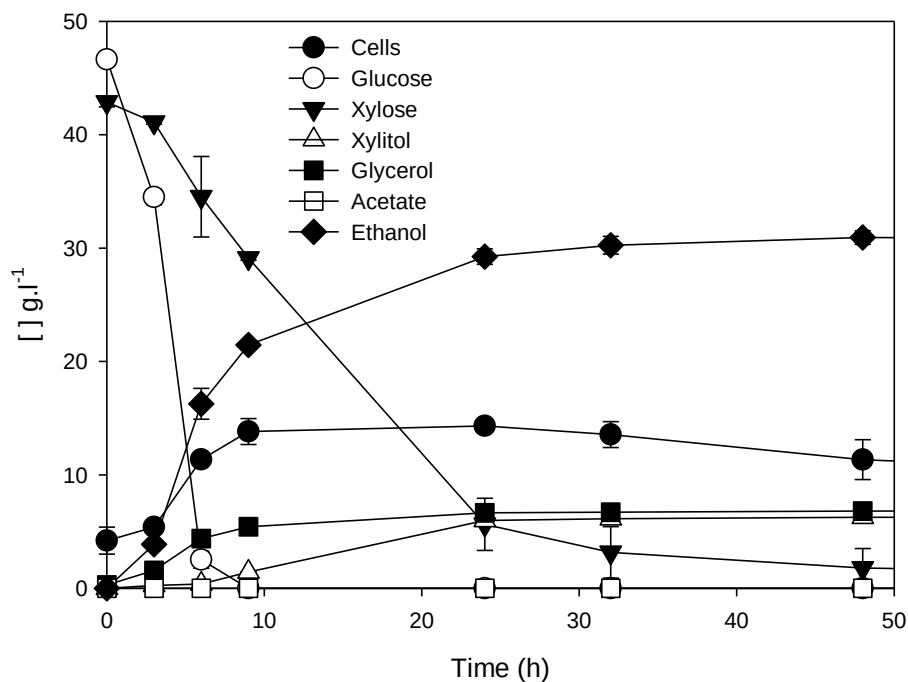


図21. キシロース発酵能を付与した CAT-1X 株によるグルコース/キシロース同時発酵

また細胞外インベルターゼ活性を持たない CAT-1 株の変異株である GMY-08 株にも図 19 の遺伝子発現カセットを導入してキシロース発酵能を付与した GMY-08X 株を得たので、CAT-1X 株と発酵特性の比較を行った。その結果、キシロースのみを炭素源とした場合は CAT-1X 株の方がエタノール収量がやや高いが、キシロース+スクロースで培養した場合は、GMY-08X 株の方がエタノール収量が 35%高いという結果が得られた(図22)。

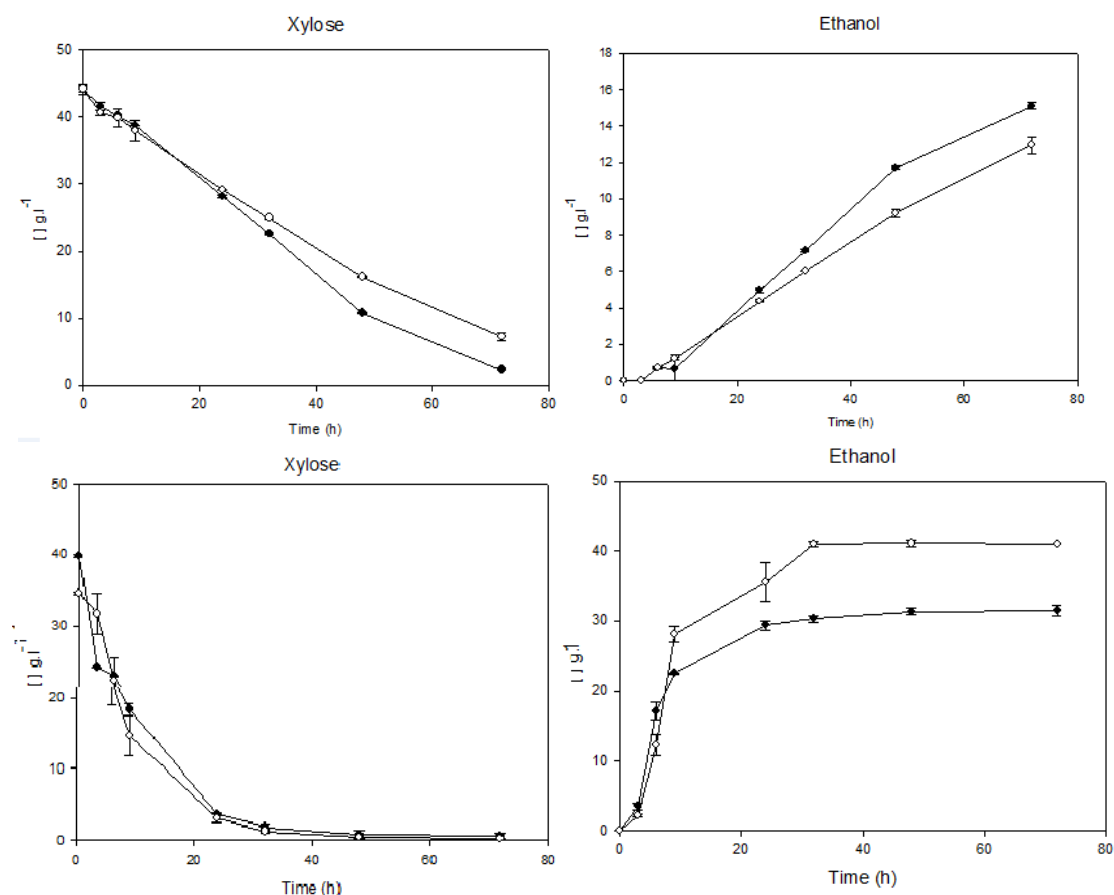


図22 キシロース発酵能を付与した CAT-1 株(黒)と GMY-08X 株(白)のキシロース消費(左側)とエタノール生産(右側) YP 培地に、上段は炭素源としてキシロースを添加、下段はキシロース+スクロースを添加

サトウキビ糖液からの大規模なエタノール生産がすでに行われているブラジルでは、スクロースに富んだサトウキビジュースに廃棄物からの糖液を加えて培養することが想定されるので、スクロースとの混合糖で高い発酵収率が得られたことは、実用的な意味が大きいと考えられる。またブラジル産の各種酵母のキシロース代謝系酵素の活性や補酵素特異性についての解析も行っており、遺伝子工学による更なる改良の素材として利用されることが期待される。

糖の取り込み機構については、まず XR-XDH-XK 遺伝子発現カセットを導入した *S. cerevisiae* 株において、ヘキソーストランスポーターとして知られている HXT の全欠損株を作成して培養実験を行ったところ欠損株ではキシロースを含む糖の取り込みが抑制されること、またグルコースが存在しないとキシロースの発酵が起きないことが分かった。これにより、キシロース専用のトランスポーターを持たない *S. cerevisiae* では、HXT によりキシロースが取り込まれていることが示唆された。また HXT 全欠損株に特定の HXT 遺伝子を過剰発現させた株を作成して行った培養実験により、HXT の種類によって、キシロースの取り込み能力に差があり、例えば HXT1、HXT5 はキシロース単独投与では共にこれを取り込まないが、キシロース+グルコースでは HXT1 はキシロースを取り込むようになる一方、HXT5 はほとんど取り込まないことが分かった(図23)。これらの知見は *S. cerevisiae* のキシロース取り込みにおける HXT の役割を明らかにすると共に、適切な HXT の発現やその改変等によるキシロース取り込み速度向上の可能性を示すものである。

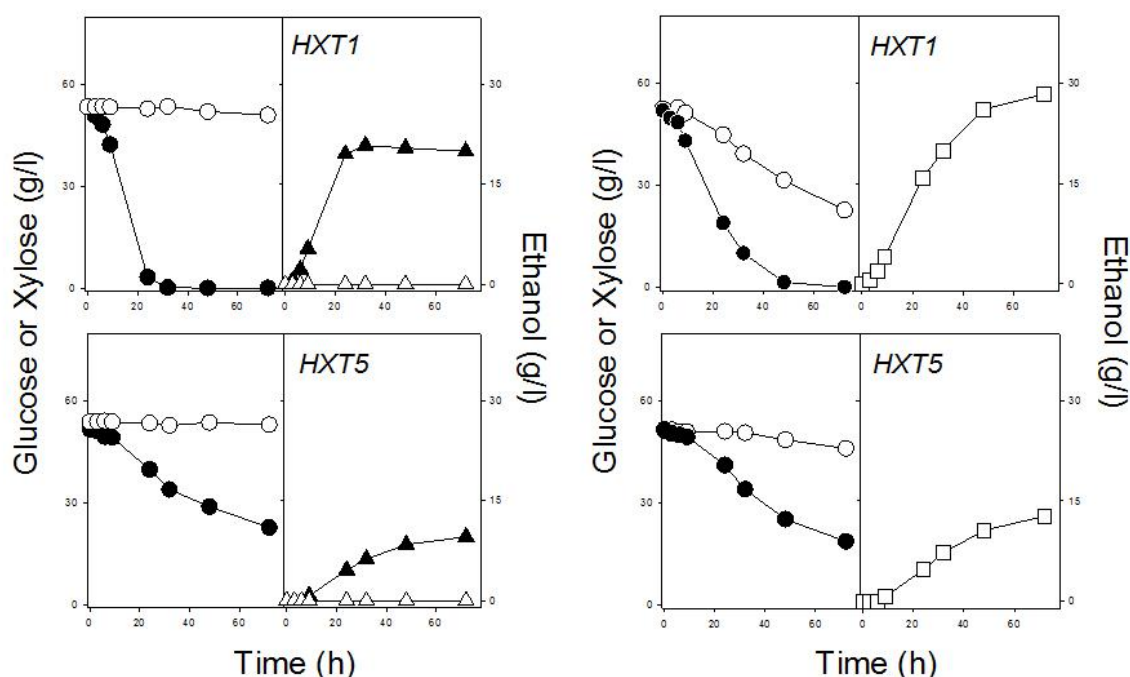


図23. グルコースまたはキシロース単独(左)およびグルコース+キシロースでの単一 HXT 発現株の発酵における、グルコース(●)、キシロース(○)とエタノールの量

(4) プロセス統合とライフサイクルアセスメント

評価範囲の設定、評価範囲内のプロセスフローの設定、バックグラウンドデータの調査、統合プロセスにおけるフォアグラウンドデータの作製、および解析の実施を行った。

まず、評価範囲の設定においては、ブラジルおよび宮古島、徳之島の、サトウキビからの製糖・エタノール工場の調査、ブラジルにおける企業の立場からの意見等の情報を元に、既存の製糖・エタノール工場に、余剰バガスからのエタノール製造プロセスを導入するシナリオを、現実的であるとして設定した(図24)。既存工場では、搾汁液を製糖とエタノール発酵に振り分けて生産している。搾汁残渣であるバガスはエネルギー回収のために燃焼・発電を行っている。バガスの一部を本プロジェクトで開発したエタノール生産統合プロセスで利用することになる。エタノール燃料は増産できるが、余剰電力は減産することになる。

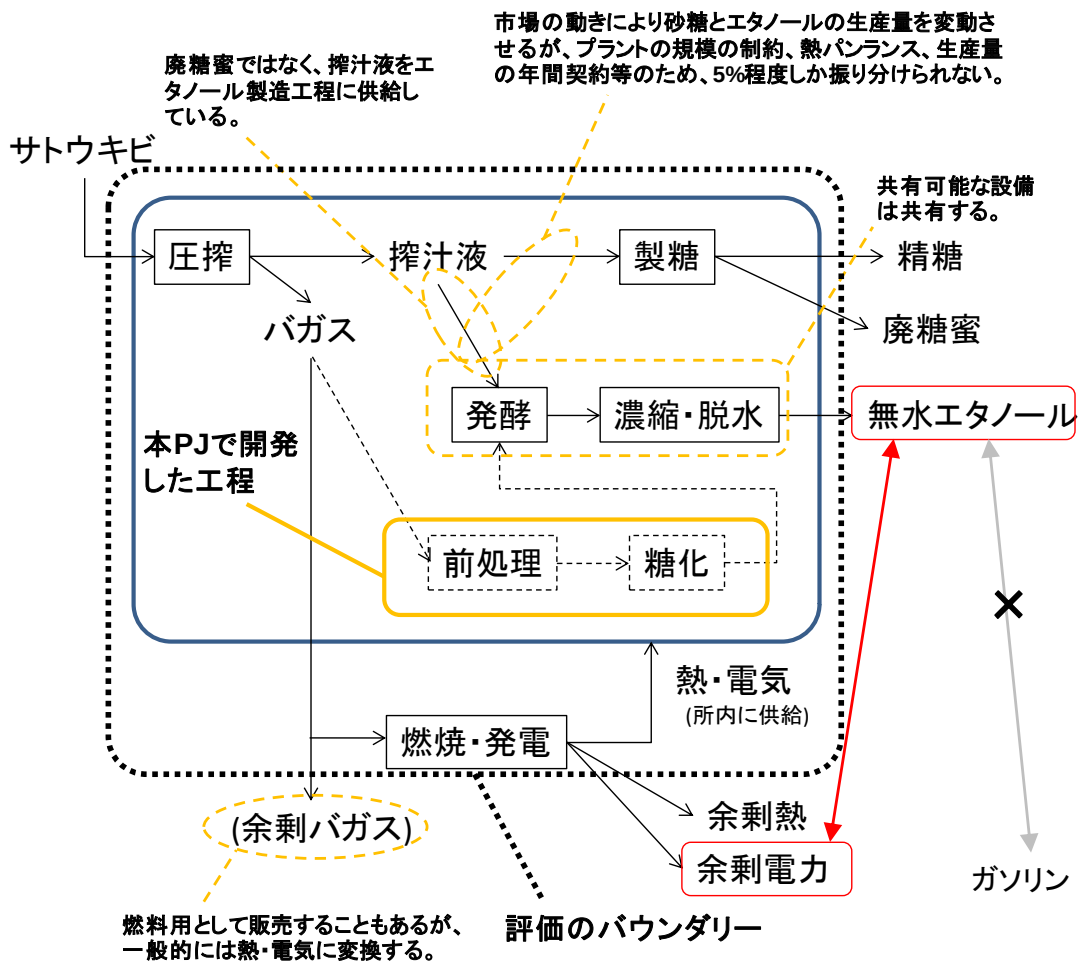


図 2 4 評価範囲の設定および評価範囲内での概略プロセスフロー

次に本プロジェクトで開発する統合プロセスの構築について、UFRJ の Bon 教授、UFSC の Stambuk 教授らと単位操作の検討を重ね、プロセスの絞込みを行った。最終的に構築した統合プロセスのプロセスフローを図25に示す。ブラジル側は省エネが期待できる膜分離の採用を強く求めており、糖化後の酵素回収に UFM (Ultra-Filtration Membrane)を採用した。また、バガスから製造される糖液は濃度が低いことから、モラセスと混合して一緒にエタノール発酵を行うプロセスとした。

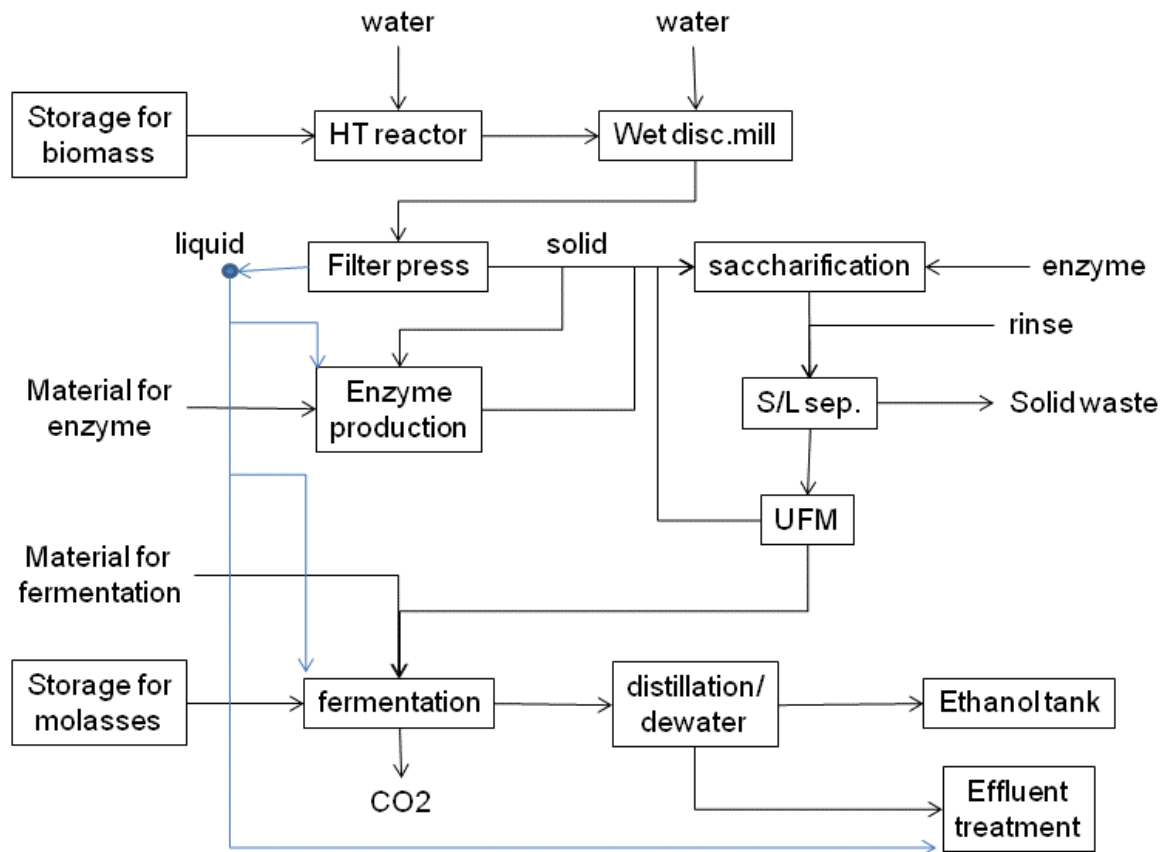
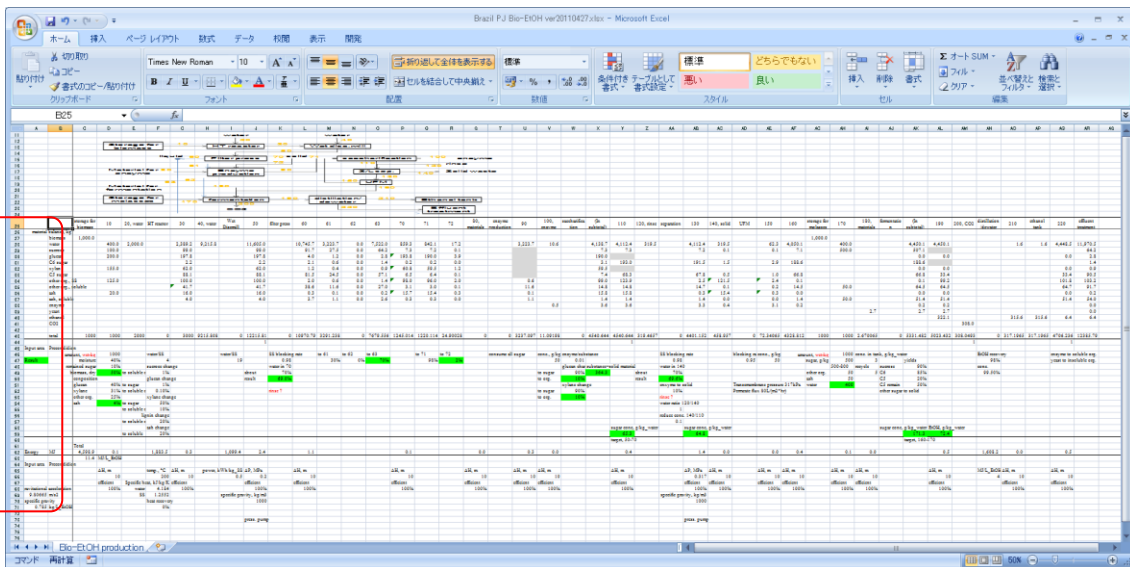


図 2 5 構築した統合プロセスのプロセスフロー

統合プロセスにおけるフォアグランドデータの作製のため、物質収支を計算する化学プロセスシミュレータを作製した(図26)。本シミュレータでは、バガスやトラッシュ(工場に持ち込まれる茎葉)の成分組成、前処理・糖化・発酵などの反応条件・変換効率などを反映できるようになっているとともに、エネルギー計算も組み込んでいる。作製したシミュレータは、ブラジルの研究者も含め、関係者で共有した。



		storage for biomass	10	20, water	HT reactor	30
material balance, kg						
	biomass	1,000.0				
	water		400.0	2,000.0		2,389.2
	sucroce		100.0			99.0
	glucan		200.0			197.8
	C6 sugar					2.2
	xylan		155.0			62.0
	C5 sugar					88.1
	other org., SS		125.0			100.0
	other org., soluble					41.7
	ash		20.0			16.0
	ash, soluble					4.0
	enzyme					
	yeast					
	ethanol					
	CO2					
	total	1000	1000	2000	0	3000
Input area	Precondidion					
	amount, wet-kg		1000		water/SS	
Result	moisture		40%			4
	remained sugar		10%		sucroce change	
	biomass, dry		50%	to soluble org		1%
	conposition				glucan change	
	glucan		40%	to sugar		1%
	xylane		31%	to soluble org		0.10%
	other org.		25%		xylane change	
	ash		4%	to sugar		50%
				to soluble org		10%
					lignin change	
				to soluble org		20%
					ash change	
				to soluble		20%
	Total					
Energy	MJ	4,598.9	0.1		1,883.5	0.3
		11.4	MJ/L_EtOH			
Input area	Precondidion					
			ΔH , m		temp., °C	ΔH , m
			10		200	10
			efficient		Specific heat, kJ/kg/K	efficient
gravitational acceleration		100%		water	4.184	100%
9.80665 m/s2				SS	1.2552	
specific gravity					heat recovery	
0.785 kg/L_EtOH					0%	

図 2 6 作製した物質収支計算シミュレータ（上：シミュレータ全体の画面。下：赤枠部分を拡大して表示。上から物質収支、前提条件、エネルギー計算の領域となっている。）

上記の物質収支計算シミュレータにバックグランドデータを組み込むことで、GHG を算出する GHG 計算シミュレータを作製した (図 27)。上記の物質収支計算シミュレータと同様に、バガスやトラッシュの成分組成、前処理・糖化・発酵などの反応条件・変換効率などを反映できるようになっている。

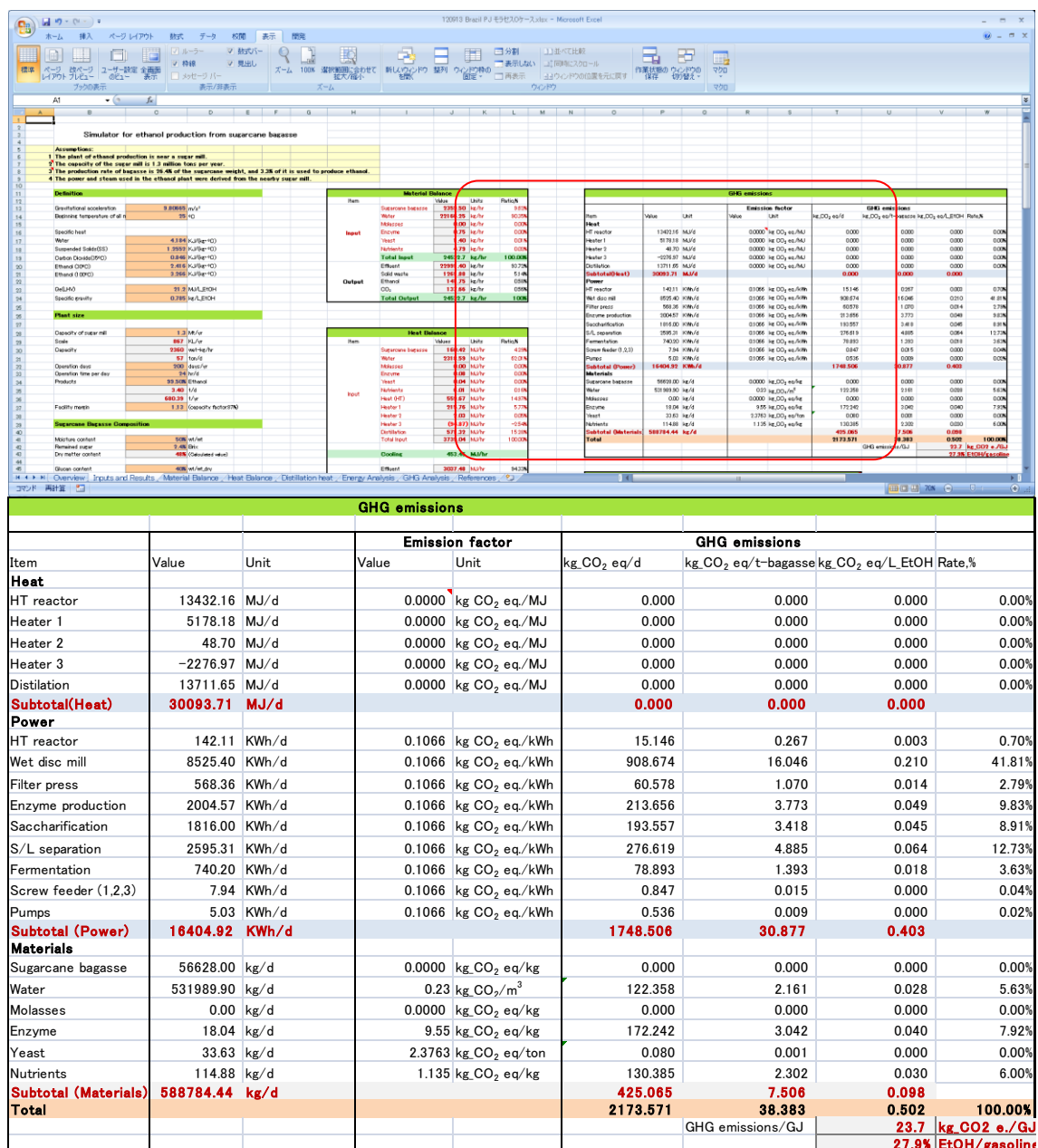


図 27 作製した GHG 計算シミュレータ (上: シミュレータ画面の一部。下: 赤枠部分 (GHG 排出量の集計表部分) を拡大して表示。)

ブラジルにおけるベンチプラントデータがまだ入手できないことから、本プロジェクトの目標値(糖化率 75%、ヘキソースからの発酵収率 85%)を基に、モラセスを使用せずキシロースの利用を行わない条件での GHG 排出量の試算を行ったところ、23.7 g_CO₂eq./MJ で、同エネルギー値のガソリンからの排出量の 27.9%となった。この値は、バイオエタノールをサトウキビジュースから製造した場合の GHG 排出量(図28)とほぼ同等の数字である。またキシロースも発酵利用できる場合では、GHG 排出量は 16.2 g_CO₂eq./MJ(対ガソリン比 19.1%)に低減すると計算された。これはサトウキビジュースからの製造に対して 31.6%の GHG 排出量の低減になる。なお本プロジェクトでは図25に示すように、未利用のモラセスを有効利用することも想定している。未利用モラセスの半分を利用した場合、GHG 排出量は 4.0 g_CO₂eq./MJ(対ガソリン比 4.8%)と試算され、GHG 排出量を大きく低減できることがわかった。

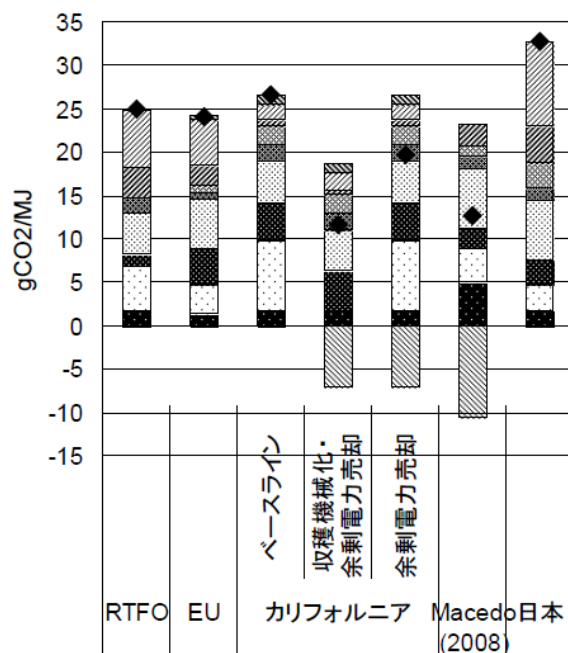


図28. サトウキビジュースから製造されるバイオエタノールの GHG 排出量（出典：バイオ燃料導入に係る持続可能性基準等に関する検討会中間とりまとめ、平成 22 年 3 月）

図24に示したように、バガスの一部をエタノール生産に利用することにより、エタノール燃料は増産できるが、余剰電力は減産することになるため、経済性および環境性（GHG）における損益分岐線／損益分岐点の検討を行った。経済性の検討においては、規模の設定が必要であるので、ここでは 10,000 t-サトウキビ/日規模の製糖・エタノール工場に新しい設備（バガスの前処理・糖化設備：図24参照）を導入して実施するものと想定した。経済性の検討結果を図29に示す。エタノール価格と電力価格との間に損益分岐線を描くことができ、右下の領域ではエタノール製造が有利になり、左上の領域では新規設備の導入は行わずに、従来通り発電を行う方が有利になる。酵素価格に大きく影響を受け、酵素価格が 300 円/kg (10⁶ FPU/kg と仮定) 程度まで下がってくれば、最近の市場価格（経済性の観点）からバガスからのエタノール製造を導入できる可能性が出てくる。

環境性（GHG）の検討結果を図30に示す。PG は発電、EP1 はエタノール製造（製造エネルギーを外部から購入）、EP2 はエタノール製造（製造エネルギーをバガス利用で調達）であり、それぞれの技術の不確実性を考慮し、低い、中間、高い技術レベルとした。線が交差する点が損益分岐点となる。グリッドの GHG 排出係数が低い国、場所では EP1（外部からエネルギーを購入してエタノール製造を行うケース）が有利であり、逆にグリッドの GHG 排出係数が高い国、場所では PG（発電利用）が有利となる。ブラジルはグリッドの GHG 排出係数が低い（0.3kg-CO₂eq./kWh 程度）ので、環境性（GHG）の観点からはエタノール製造が有利であり、GHG 削減量に経済性の付加価値を足すことで、経済性の改善も可能かもしれない。日本ではグリッドの GHG 排出係数が 0.5～0.6 kg-CO₂eq./kWh なので、高効率発電が有利であるが、発電効率の低いボイラーが導入されているような工場では、エタノール製造を導入した方が環境面で有利になる可能性もある。

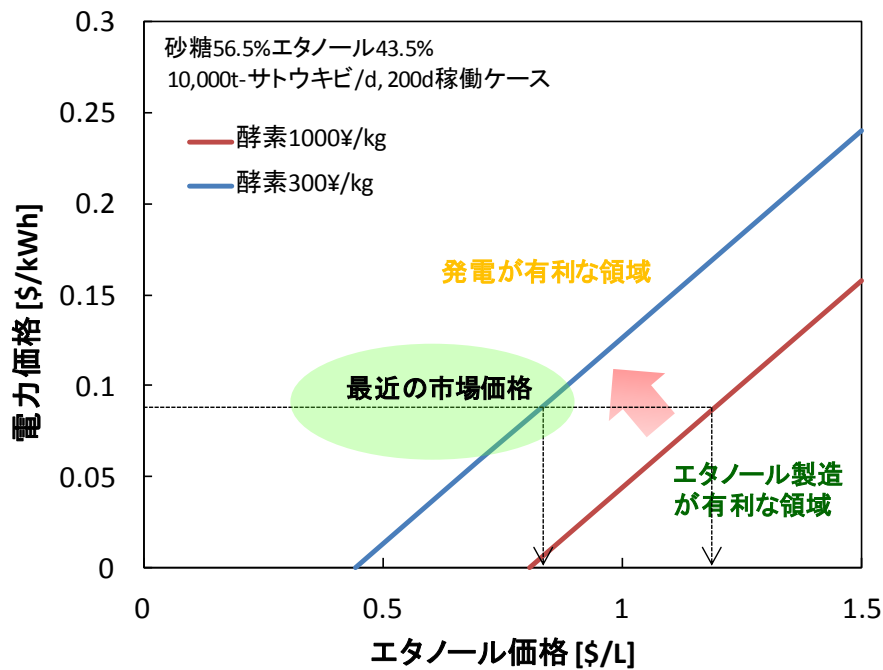


図 2 9 経済性の損益分岐線

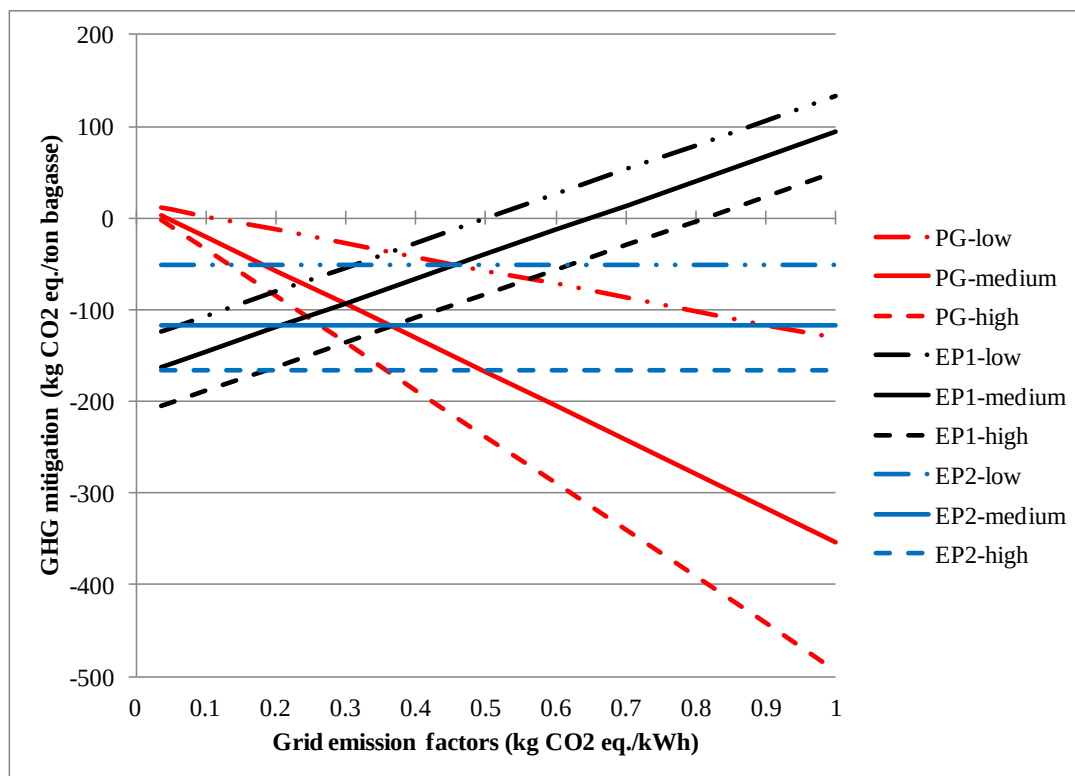


図 3 0 環境性 (GHG) の損益分岐点の推算

(2) 今後期待される効果

産総研は水熱/微粉碎前処理技術、酵素生産技術、およびキシロースの発酵技術を統合してその実用化への展開を図っているが、余剰のサトウキビ廃棄物があり、既存の製糖工場・エタノール工場に隣接した前処理・糖化設備の追加が可能なブラジルでは、特に早期の事業化への展開が期待される。食料と競合せず、土地利用変化も伴わない画期的な第二世代バイオエタノール生産技術により、石油等の化石資源への依存低減と温室効果ガス排出量低減による地球温暖化緩和への貢献が期待できる。

ベンチ規模以上のより大きな規模での実験を行って技術の有効性を実証し、実用化・普及に向けた道筋を示せば、

ブラジルは米国に次ぐ世界第2位のエタノール生産国であるので早期の実用化が期待できる。ブラジルにはエタノール生産工場が400か所以上存在し、サトウキビ糖液からの効率良いエタノール生産が行われているので、当面これらの既存の工場にサトウキビ廃棄物の糖化設備を併設し、得られた糖液をサトウキビ糖液と合わせて発酵することが考えられる。この場合原料のバガスは工場で発生し、また茎葉も収穫したサトウキビと共に移送することにより、原料の収集に伴うエネルギー・コストを最小化することができる。また発酵以降のプロセスについては現有の設備をそのまま使用できる利点がある。ただし現状の発酵酵母はキシロースを利用できないため、廃棄物からの糖はグルコース等の六炭糖のみの利用となるが、その場合でもLCA解析で示したように、GHG排出量削減効果が期待できる。将来的に遺伝子組み換えによるキシロース発酵性酵母が使用できるようになれば、さらにGHG排出量削減効果が増加する。なおこれらのGHG排出量削減効果にはサトウキビ栽培面積を拡大した場合の土地利用変化については考慮していない。現状では森林を破壊してのサトウキビ栽培地の拡大はあまり行われていないが、サトウキビ廃棄物を原料に使用できれば同じ面積から多くのエタノールが生産できるため、サトウキビの栽培面積を増やさなくてもエタノール需要の増大に対応できる点でもGHG排出量削減に貢献できる。

以上のようにサトウキビ廃棄物からのエタノール生産はGHG排出量削減については非常に効果が大いだが、削減の絶対量を確保するためには、多くの工場で実施される必要があり、そのためには経済性が重要である。これには原油価格、エタノール販売価格等の要因が関係するが、廃棄物からのエタノール生産コストの中で高い割合を占める糖化酵素コストの影響が大きいことを図29に示した。本研究で酵素を生産するための基本的技術は開発されたが、今後生産システムの合理化等で更なるコスト削減を図ることが経済性を上げるための重要な事項と考えられる。サトウキビ廃棄物を原料とするエタノール生産にはブラジルの複数の企業が高い関心を示しており、国立開発銀行によるセルロース系エタノール事業への大規模融資もブラジル政府の主導で進められている。

以上のように、ブラジルではサトウキビ廃棄物からのエタノール生産を実用化するための条件が整っており、数年後には商業化規模に進展することが期待される。またブラジルではエタノールを脱水して製造したエチレンを用いたポリエチレンなどの化学品の生産が既に事業化されており、サトウキビ廃棄物から生産したエタノールが燃料だけではなく、化学原料として使用される可能性も考えられる。世界最大のサトウキビ生産国であるブラジルでサトウキビ廃棄物由来のエタノール生産が商業化されれば、大きなGHG排出量削減効果が見込まれる。なお産総研は東南アジアに製糖工場を持つ日本企業とバガスからのエタノール生産についての共同研究を開始しているが、この技術が東南アジア、インドなどの他のサトウキビ生産国に移転されれば、更に大きなGHG排出量削減が可能になり、地球温暖化緩和効果が期待できる。

§5 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0件、国際(欧文)誌 8件)

1. A. S. da Silva, H. Inoue, T. Endo, S. Yano, E. P. S. Bon, Milling pretreatment of sugarcane bagasse and straw for enzymatic hydrolysis and ethanol fermentation. *Bioresource Technology*, **101**, 7402-7409 (2010)
2. A. S. da Silva, S.-H. Lee, S. Inoue, T. Endo, E. P. S. Bon, Major improvement in the rate and yield of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse via pretreatment with the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate. *Bioresource Technology*, **102**(22), 10505-10509 (2011)
3. T. Miura, S.-H. Lee, S. Inoue, T. Endo, Improvement of enzymatic saccharification of sugarcane bagasse by dilute-alkali-catalyzed hydrothermal treatment and subsequent disk milling, *Bioresource Technology*, **105**, 95-99 (2012)
4. M.-T. Gao, S. Yano, H. Inoue, K. Sakanishi, Combination of wet disk milling and hydrogen peroxide treatments for enhancing saccharification of sugarcane bagasse, *Biochemical Engineering Journal*, **68**, 152-158 (2012)
5. X.-Z. Sun, S. Fujimoto, T. Minowa, A comparison of power generation and ethanol production using sugarcane bagasse from the perspective of mitigating GHG emissions, *Energy Policy*, **57**, 624-629 (2013)
6. R. R. O. de Barros, R. S. Paredes, T. Endo, E. P. S. Bon, S.-H. Lee, Association of wet disk milling and ozonolysis as pretreatment for enzymatic saccharification of sugarcane bagasse and straw. *Bioresource Technology*, **136**, 288-294 (2013)
7. A. S. da Silva, R.S.S. Teixeira, T. Endo, E. P. S. Bon, S.-H. Lee, Continuous pretreatment of sugarcane bagasse at high loading in an ionic liquid using a twin-screw extruder, *Green Chemistry*, **15**, 1991-2001 (2013)
8. R. S. S. Teixeira, A. S. da Silva, H.-W. Kim, K. Ishikawa, T. Endo, S.-H. Lee, E. P. S. Bon, Use of cellobiohydrolase-free cellulase blends for the hydrolysis of microcrystalline cellulose and sugarcane bagasse pretreated by either ball milling or ionic liquid [Emim][Ac]. *Bioresource Technology*, **149**, 551-555 (2013)

(2)研修コースや開発されたマニュアル等

- ① 研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数なし
- ② 開発したテキスト・マニュアル類

1. サトウキビからのエタノール生産用化学プロセスシミュレータ
2. サトウキビからのエタノール生産用 GHG 計算シミュレータ

(3) その他の著作物(総説、書籍など)

1. 矢野伸一、機械的前処理バイオマスの酵素分解、バイオマス分解関連酵素研究の最前線 pp. 242-246、シーエムシー出版、2012 年 3 月

(4) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 0件、国際会議 1件)

1. K. Sakanishi (産総研)、Biofuel production technologies from non-edible biomass resources for their sustainable utilization system, ENZITEC 2010, Rio de Janeiro, 2010年11月10日

② 口頭発表 (国内会議 1件、国際会議 4件) 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

1. K. Sakanishi (産総研)、Bio-fuel production technologies from ligno-cellulosic biomass resources, Japan-Brazil Workshop on Biomass and Biotechnology, Rio de Janeiro, 2010 年 3 月 16 日
2. E. P. S Bon (UFRJ)、UFRJ /AIST collaboration on bioethanol, Japan-Brazil Workshop on Biomass and Biotechnology, Rio de Janeiro, 2010 年 3 月 16 日
3. A. S. da Silva, R. S. S. Teixeira, E. P. S Bon (以上UFRJ), T.Endo, S.-H. Lee(以上産総研): Use of a twin-screw extruder as a mixing tool to promote sugarcane bagasse pretreatment with ionic liquids at high solid contents, 34th Symposium on Biotechnology for fuels and chemicals, New Orleans, 2012年5月3日
4. D. L. Gonçalves, G. Muller, M. Purificação (以上UFSC), T. Goshima, A. Matsushika, S. Yano (以上産総研), E. P.S Bon (UFRJ) B. U. Stambuk (UFSC): Genomic engineering strategies in industrial fuel ethanol *Saccharomyces cerevisiae* strains for efficient 1st and 2nd generation bioethanol production from sugarcane, SIBM Annual Meeting and Exhibition, Washington, DC, 2012年8月13日
5. 坂西欣也 (産総研)、サトウキビ廃棄物からのエタノール生産、バイオマス燃料の事業化に向けた国際戦略シンポジウム、東京、2012年9月4日

③ポスター発表 (国内会議 4件、国際会議 6件) . 発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日

1. 三浦豊和、李承桓、井上誠一、遠藤貴士(産総研)、サトウキビバガスの酵素糖化のための複合前処理、第 61 回日本木材学会大会、京都、2011 年 3 月 19 日
2. R. R. O. de Barros, E.P.S. Bon(以上 UFRJ), Seung-Hwan Lee, T. Endo (以上産総研)、Effect of ozone oxidation on enzymatic saccharification of sugarcane bagasse and sugarcane straw, 第 61 回日本木材学会大会、京都、2011 年 3 月 19 日
3. R. S. Paredes, E.P. S. Bon(以上 UFRJ), H. Inoue, S. Yano(以上産総研)、Effect of hydrothermal treatment on enzymatic saccharification of sugarcane bagasse. 第 61 回日本木材学会大会、京都、2011 年 3 月 19 日
4. A. S. da Silva, E.P.S. Bon, (以上 UFRJ), S.-H. Lee, T. Endo (以上産総研) Understanding the effects of 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate [Emim] [Ac] on sugarcane bagasse, 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, 2011 年 6 月 7 日
5. 藤本真司(産総研)、バガスからのバイオエタノール製造に関する経済性の検討、第7回バイオマス科学会議、盛岡、2012 年 1 月 18 日
6. R. S. S. Teixeira, A. S. da Silva, E.P. S. Bon(以上 UFRJ) H.-W. Kim, K. Ishikawa, T. Endo, S.-H. Lee (以上産総研)、Coproduct of monosaccharides and cellulose nanocrystal from disk milled biomasses by enzymatic hydrolysis, 34th Symposium on Biotechnology for fuels and chemicals, New Orleans, 2012 年 5 月 1 日
7. R. R. O. de Barros, R. S. Paredes, E.P. S. Bon(以上 UFRJ), T. Endo, S.-H. Lee (以上産総研)、Ozonolysis associated to wet disk milling treatment for improvement of enzymatic digestibility of sugarcane bagasse Symposium on Biotechnology for fuels and chemicals, New Orleans, 2012 年 5 月 1 日
8. X.-Z. Sun, S. Fujimoto, T. Minowa(産総研)、Evaluation of GHG mitigation for power generation and ethanol production using sugar cane bagasse, 20th European Biomass Conference and Exhibition, Milan, 2012 年 6 月 19 日
9. A. S. da Silva, R. S. S. Teixeira, E.P. S. Bon(以上 UFRJ), T. Endo, S.-H. Lee (以上産総研)、Application of a twin-screw extruder as a continuous stirring reactor for sugarcane bagasse pretreatment with ionic liquids at high solid contents. 20th European Biomass Conference and Exhibition, Milan, 2012 年 6 月 19 日
10. R. S. S. Teixeira, A. S. da Silva, E.P. S. Bon(以上 UFRJ) H.-W. Kim, K. Ishikawa, T. Endo, S.-H. Lee (以上産総研)、Hydrolysis of pretreated sugarcane bagasse with ball milling and ionic liquid using a

hyperthermophilics endoglucanases and β -glucosidase and commercial enzymes: investigation of the requirement of cellobiohydrolases on hydrolysis of biomass with reduced cellulose crystallinity, 20th European Biomass Conference and Exhibition, Milan, 2012 年 6 月 19 日

(5)知財出願

①国内出願 (0 件)

②海外出願 (1 件)

Process production of organic molecules for biomass, A. S. da Silva, R. S. S. Teixeira, E. P. S. bon, T. Endo, S.-H. Lee, Registration number: BR10201301041, 2013 年 4 月 30 日 (ブラジル)

(6)受賞・報道等

“受賞や新聞報道等について、具体的に記入してください。”

① 受賞 A. S. da Silva, Student Award, Understanding the effects of 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate [Emim] [Ac] on sugarcane bagasse, 19th European Biomass Conference and Exhibition (Berlin), 2011 年 6 月

②マスコミ(新聞・TV等)報道 なし

③その他 なし

(7)成果展開事例

①実用化に向けての展開

まだ具体的な企業等との連携は無いが、本研究で得られた成果を含むリグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産技術については、各種セミナー、講演会等で紹介をしている。

②社会実装(研究成果の社会還元)への展開活動

本事業によりブラジルから招へいし、日本でイオン性液体による前処理の研究をした学生が European Biomass Conference での発表で学生賞を受賞した。また招へいした学生が日本で行った研究を基に修士論文を作成し、担当の産総研職員の名前が学位記に指導教官として記載されるなど、人材育成に貢献した。

§ 6 プロジェクト期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

① “ワークショップ、シンポジウム、小中高での特別授業、地域での講演、研究機関の一般公開での講演、その他チーム内ミーティング（主なもの）を行った場合、月日、名称、場所、参加人数、目的や内容などを記入。”

年月日	名称	場所	参加人数	概要
20100611	在伯日系企業への事業説明セミナー	JICA サンパウロ	15	在伯日系企業を中心とした参加者に、本事業の考え方と産総研の技術を説明
20101208	ブラジル研修生成果発表会(非公開)	産総研中国センター	25	本事業により招へいした2名の研究者の研究成果の発表・討論を実施
20101216	広島中央サイエンスパーク研究公開フォーラム	産総研中国センター	60	産総研のエタノール生産技術の説明の中で、本事業を紹介
20110202	ブラジル研修生成果発表会(非公開)	産総研中国センター	20	本事業により招へいした1名の研究者の研究成果の発表・討論を実施
20110901	ブラジル研修生成果発表会(非公開)	JICA 中国	20	JICA 集団研修事業により招へいした2名のブラジル人研究者の研究成果の発表・討論を実施
20111102	ブラジル研修生成果発表会(非公開)	産総研中国センター	20	本事業により招へいした1名の研究者の研究成果の発表・討論を実施

20121203	広島大学付属高校スーパーサイエンスクラス講義	産総研中国センター	42	エタノール生産技術の説明の中で本事業を紹介
20111208	ブラジル研修生成果発表会(非公開)	産総研中国センター	25	本事業により招へいた2名の研究者の研究成果の発表・討論を実施
20120322	産総研バイオマス研究センター研究成果発表会	メルパルク広島	150	エタノール生産技術の説明の中で本事業を紹介
20120903,04	バイオマス燃料の事業化に向けた国際戦略シンポジウム	大手町サンケイプラザ(東京)	870	SATREPS プロジェクトの紹介で本事業について発表

②合同調整委員会開催記録

年月日	出席者	議題	概要
2010年11月15日	Bon, Stambuk, Valle, 林、江口、畠野、村上、坂西、矢野、三浦	PO の承認、研究進捗状況、プラント準備状況	まだ確定されていなかったPO について原案が承認された。3研究機関の研究進捗状況の報告があり、討論が行われた。UFRJ でのプラント準備状況の説明があり、質疑が行われた。
2011年5月24日	Bon, Stambuk, Valle, Watanabe, Sposina, Alves, Knopp, Silva, Ferrara, Pereira, Vilela, 林、石田、蔵方、滝本、江口、畠野、村上、坂西、矢野、	研究進捗状況、実験棟建設準備状況、機材の調達状況、研究者招へい計画、終了時評価の日程	研究進捗状況の報告があり、糖化率、発酵収率についてはラボレベルで目標値を達成していることが報告された。UFRJ でのベンチ規模実験に向けた、実験棟、機材を含めた準備状況の報告、討論が行われた。終了時評価を2012年5月に行うことで合意された。
2012年2月13、14日	Bon, Stambuk, 佐藤、石田、蔵方、江口、畠野、村上、坂西、矢野、三浦、高	事業期間の延長、終了時評価の日程、プラント準備状況、研究の進捗	事業期間を2012年12月末まで延長すること、終了時評価を9～10月に行うことが合意された。プラントの準備状況について報告、議論された。研究の進捗についても報告された。
2012年12月18日	Bon, Stambuk, Pereira, 石田、石丸、畠野、村上、平田	プロジェクト目標、期間の延長、実験棟に関する諸事項の協議	事業期間を2013年8月末まで延長すること、プロジェクト目標を変更することが承認された。その他実験の進め方、機材の調達、特許、菌株譲渡、LCA 等の事項について協議し合意を得た。
2013年8月29日	Bon, Stambuk, Silva, Teixeira, Barros, 井上、佐藤、石丸、畠野、村上、平田	プロジェクト目標、期間の延長、実験棟に関する諸事項の協議	プロジェクトの終了にあたり、事業のまとめを行うと共に、今後の連携、展開について協議した。

§ 7 国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など

(1) 共同研究全体

本プロジェクトは平成 20 年度に採択され、ブラジル側との R/D 署名を経て、平成 21 年度当初から本格的に開始される予定であったが、R/D 署名の前提であるブラジル側のプロジェクト予算獲得が遅れたために、R/D 署名も遅れ、本格的な研究開始も平成 21 年 9 月からとなった。その後本プロジェクトの成果である各要素技術の研究開発は、それぞれ概ね順調に進捗したが、それらを統合したベンチ規模のエタノール生産設備を UFRJ に建設して、より大きな規模での実証を行うことは、ブラジル側の準備の遅れにより期間内に本格的に行うことはできなかった。

UFRJ の元の研究室は学生、研究者数に比べて非常に狭く、ここにはベンチ施設の機材の搬入はできないし、日本人専門家を派遣しても実験もままならないような状態であった。幸いブラジル側(FINEP)の予算で新しい実験棟を建設することなので、ここに大型の設備を設置してベンチ規模の実験を行うことに期待を持っていた。平成 22 年 6 月に訪問した時点では、実験棟は簡素なもので 3 カ月程度で建設できる予定とのことだったので、早ければ平成 22 年度内に実験ができるものと考えていたが、同年 11 月には建物が 3 階建ての立派なものに設計変更され、建設が遅れることになった。それでも当初は平成 23 年の秋には機材の設置も含めて実験が可能と説明されていたが、建物の着工が遅れた。このため当初 24 年 8 月末までだった事業期間を 12 月まで延長し、本プロジェクトの成果である各要素技術の研究開発は達成した。しかし、建物ができても電力の導入や機材の調達の遅れにより、当初のプロジェクト目標であったベンチスケールの実験は事業期間内の実施が困難になったため、再度事業期間を平成 25 年 8 月まで延長した。延長期間において、日本でのベンチ規模の実験を実施し、ブラジルでは準備段階まで進んだものの本格的な実験には至らなかった。このような研究の本質以外のプロジェクトの外部要因により計画した実験・研究が十分できなかったことは誠に残念である。なお、平成 24 年 12 月の合同調整委員会において、ブラジル側と協議のうえ、プロジェクト目標を変更した。

日本側としては常に準備を急ぐよう要請を行っていたが、結果的には効果が少なく、物事の進行中に計画が変わっていくことがブラジル側にあまり問題視されないように感じられた。また大学の事務担当者等のレスポンスも遅く、入札のシステムにも非効率な点があるように感じた。

これ以外の問題として、ブラジルは地理的に遠いことに加えて、日本人は渡航に必ずビザが必要で、かつ派遣専門家は公用旅券を取得して使用するため、渡航準備に 1 カ月以上を必要とし、迅速な対応ができないことがある。このためブラジル側とは電子メールを中心とした連絡が中心となるが、そのためにも実際に会った際に十分コミュニケーションをとっておくことが重要であった。また JICA ブラジル事務所の方々や、研修で来日しているブラジル研究者の存在は大きく、円滑なコミュニケーションに貢献した部分は大きい。来日研究者は皆優秀で、実際の研究活動においても重要な成果を挙げており、研究計画と受入れ体制の準備を十分行うことが効率化のためにも重要である。

今後研究開発成果を技術移転につなげるための課題としては、ブラジルとの研究成果・知財・人材育成・技術移転等に関する価値観の違いを克服することを目指して、現地日本企業および現地カウンターパート、現地政府プロジェクトとの連携強化によって持続的に技術開発の実証と事業化への取り組みを実施していくことが重要と考える。特に、ブラジルとの共同研究成果を、現地の製糖工場やバイオエタノール製造プラントで可及的速やかに実証するために、ラボ・ベンチ試験レベルの研究に加えて、原料であるサトウキビ廃棄物が存在する現地での実証を行って、実用化につなげることが重要と考える。

§ 8 結び

ブラジル側との研究成果・知財・人材育成等に関する価値観を共有することを優先し、積極的な若手研究者との交流と人材育成支援、研究成果の共有による研究推進を図ってきた。本プロジェクトにおいては、ブラジル側で JICA 予算に対する政府予算(FINEP)のマッチングが前提となっており、双方の予算の使用時期や項目等についてブラジル側の調整不足があり、結果的に UFRJ でのベンチプラント運転による実証研究計画が当初予定より大幅に遅れる原因となった。

UFRJ、UFSC との共同研究契約を 2015 年 3 月まで延長し、また実証研究を続けるプロジェクト提案をしており、引き続き両大学との関係を維持して研究を継続していく。今後は、対象国側研究機関のニーズだけでなく、現地民間企業等との連携の推進が、JST/JICA 連携による科学技術外交に基づいた日本からの技術移転を実現するために必要と考える。

一方、招へいしたブラジル人研究者は皆優秀で、かつ熱心に日本の技術の吸収と更なる研究を進めており、日本側ポスドク研究者と併せて、人材育成という点では大きな成果を挙げることができたと考えられる。特に 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災および東京電力福島第一原子力発電所の事故により、産総研に滞在して研究を行っていたブラジル人研究者 2 名に対して、ブラジルの大学関係者、家族などから至急帰国するよう勧告があったが、研究者本人は産総研での研究を継続することを希望し、ブラジル側に日本の状況を説明して理解を得ることで、そのまま滞在して研究を続けた。これにより十分な研究成果をあげることができたことは特筆される。今後はこのようにして構築されたブラジル人研究者との関係を維持して、両国にメリットのある研究活動に発展させることが必要である。

以上