

「国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業
/キャッサバパルプからのバイオエタノール製造技術実証事
業(タイ)」

事業原簿

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--------------------------------------

—目次—

本紙	I-3
用語集	I-10

本 紙

		最終更新日	平成 28 年 7 月 27 日	
事業名	国際エネルギー消費効率化等技術・システム実証事業			
実証テーマ名	キャッサバパルプからのバイオエタノール製造技術実証事業(タイ)	プロジェクト番号	P93050	
担当推進部/ PM、PTメンバー	<p>新エネルギー部 PM 氏名 井出本 穰 主査(28年4月現在) PTメンバー氏名 鈴木 剛 主査(28年4月現在) PTメンバー氏名 矢野 貴久 主査(28年4月現在) 国際部 PTメンバー氏名 檜垣 徹 主査(28年4月現在) PTメンバー氏名 浅井 美佳 主任(28年4月現在)</p> <p>新エネルギー部 PMまたはPTメンバー氏名 大久 幸昭(26年4月～27年7月) PTメンバー氏名 澤 誠治 主査(26年1月～27年11月) 担当者氏名 土生 和典 主査(25年4月～25年12月) 担当者氏名 西川 向一 主査(23年12月～25年3月) 担当者氏名 齋藤 紳一郎(25年7月～26年7月) 担当者氏名 鷲見 勇(25年4月～25年7月) 担当者氏名 木村 聡輔(22年12月～25年3月) 担当者氏名 山下 恭平(23年5月～24年8月)</p>			
委託先	<p>サッポロビール(株) PM 三谷 優 平成23年12月～平成27年11月 TM 渡里 彰 平成23年12月～平成27年11月 阿部 透 平成23年12月～平成27年11月 清水 千賀子 平成23年12月～平成27年11月 駒田 義広 平成24年10月～平成27年11月 澤田 和宜 平成23年12月～平成25年12月</p> <p>磐田化学工業(株) PM 阿野 明彦 平成23年12月～平成24年9月 関口 喜則 平成24年10月～平成27年11月 TM 池田 健太郎 平成23年12月～平成24年12月 高野 喜明 平成23年12月～平成24年9月 夏目 裕二 平成23年12月～平成24年10月 伊藤 千鶴 平成24年10月～平成27年11月</p>			
1. 事業の概要				
(1)概要	<p>タイでは、近年の急速な経済発展により、エネルギー消費量が著しく増加する傾向にあるものの、その大半を輸入に依存している。このため、タイ国政府は、輸入石油依存度低減（エネルギー自給体制の確立）等に向けた燃料用エタノールの導入を推進しており、今後の導入拡大に向けて、バイオエタノールの増産を目指す意向である。</p> <p>タイ国はキャッサバ生産量が世界第 2 位であり、これの主要農産加工産業であるキャッサバスターチ製造からは副産物としてキャッサバパルプが大量に発生する。キャッサバパルプは土壌改良材に利用される以外は一部が家畜飼料の添加物に利用される程度であり有効利用されているとは言えない。</p>			

	<p>本事業では、安価で豊富なバイオマスであるキャッサバからデンプンを抽出した農業残渣のキャッサバパルプを原料とするバイオエタノール製造技術を確認し、今後の普及を図ることを目的として実証事業を実施する。</p>
(2) 目標	<p>〔実証事業の目標〕 石油代替エネルギー効果目標値：22,571kL/年 温室効果ガス削減目標値：62,736t-CO₂/年 (エタノール生産能力 30,000kL/年 (稼働日数：年間 300 日) での試算結果)</p> <p>現在有効活用されていないキャッサバパルプを原料に、代替エネルギーとしてのバイオエタノールを製造することにより、タイの化石燃料消費量を低減させ、温室効果ガス排出量を削減するとともに、タイにおけるバイオエタノールの生産能力向上、安定供給、生産コストの低減ならびにバイオエタノール製造技術の普及を目指す。 実証事業の目標を達成するための技術課題は主に次の 4 点である。</p> <p>①水和・糊化 キャッサバパルプ (風乾物) は 40%弱のスターチ、約 25%のリグノセルロース、25%ほどの水溶性食物繊維などの炭水化物が含まれる。蒸留工程で過剰にエネルギー消費しないためには発酵液に 8 v/v%程度のエタノール濃度が必要であり、風乾キャッサバパルプ濃度 25 w/v %という高濃度を調製する (仕込む) ことを目標とした。原料水和・糊化装置に高速蒸煮を用い、条件の確立を目指した。</p> <p>②高温発酵酵母 並行複発酵には高温発酵 (40℃) が可能な <i>Kluyveromyces marxianus</i> を用いて、8v/v%程度のエタノール濃度を得る (温度 40℃) ことと、高温発酵により糖化・加水分解酵素の至適温度 (50℃~60℃) に近づけ、酵素使用量低減を狙った。加えて、<i>Kluyveromyces marxianus</i> のペクチナーゼ産生による追加的発酵液粘度低下も目論んだ。</p> <p>③連続蒸留 発酵終了後のキャッサバパルプ液は多量の固形物 (乾燥重量で 10%) を含む。蒸留工程前処理に固液分離を採用すると製造コスト高の要因になることから、発酵液の蒸留塔への直接連続投入・連続蒸留による蒸留方法の確立を目標とした。</p> <p>④菌株の維持管理 使用菌株候補である高温発酵性酵母 <i>Kluyveromyces marxianus</i> をパイロットプラントに安定供給する方法を確認するために、菌株の輸送法の確立、菌株長期保管方法の確認及び酵母の活性評価試験系の構築を目標とした。</p> <p>本技術実証は、以上の課題のソリューションを得るために、想定される商用設備サイズのおよそ 1/30 のパイロット設備 (発酵槽 10kL 容) を製作して実証試験を行った。</p>

(3)内容・計画	主な実施事項	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	H27fy	
	① 現地調査・協定関連業務		—				
	② 設計		—				
	③ 機器製作・輸送			—			
	④ 据付・試運転			—			
	⑤ 実証運転				—	—	
(4)予算 (単位:百万円) 契約種類: (委託)	会計・勘定	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	H27fy	総額
	特別会計(需給)	2	24	421	39	20	506
	総予算額	2	24	421	39	20	506
(5)実施体制	MOU 締結先	タイ科学技術省国家イノベーション庁(National Innovation Agency)					
	委託先	サッポロビール株式会社、磐田化学工業株式会社					
	実施サイト企業	EBP エタノール株式会社(EBP Ethanol. Co., Ltd.)					

2. 事業の成果

①水和・糊化

スチームクッカーを採用した。クッカー滞留空間時間；1分、0.2-0.3 MPa、100 - 105 °Cの至適条件を得た。実証試験中、適宜キャッサバパルプ水和・糊化物のヨウ素デンプン反応を調べたところ、本操作条件でキャッサバパルプのスターチが十分糊化されることが確認された。

②高温発酵酵母

エタノール発酵法として普及している *Saccharomyces cerevisiae* (32°C) より高い発酵温度(40°C)を採用し、ペクチナーゼ産生効果も寄与したことで、繊維素分解酵素使用量を酵素メーカー提案量の1/10に低減できた。キャッサバパルプのロット差が大きく粘度低下に要する時間は6-20時間の開きがあったが、条件検討によって概ね8時間以内で高粘度スラリー(数10,000mPa・s)の粘度を低下する操作を開発した(粘度 数100 mPa・s 台まで低下)。これにより冷却水量の大幅低減と操作時間短縮に成功した。

③連続蒸留

原料キャッサバパルプの水和・糊化法の確立、*Kluyveromyces marxianus* の使用、本原料用に開発したシーブトレイの採用によって棚段内部の汚れは少なく、連続操作に対応できると考察した。

④菌株の維持管理

- 菌株の輸送法の確立：スラントの形態で、発泡スチロール素材のボックス・保冷剤を用いた簡易包装での輸送で菌株能力に問題ないことを確認した。
- 菌株長期保管方法の確認：試験系を用いて保存菌株の能力評価を実施し、長期保管に耐えることを確認した。
- 評価試験系の構築：グリセロールストックした保存菌株からの液体培養試験までのプロトコル確定し、菌株評価基準を設定した。

3. 実証成果の普及可能性

キャッサバイモの加工工場にはキャッサバスターチ製造、その製造スターチを原料とするメディアイドスターチ製造、キャッサチップ製造、そしてキャッサバペレット製造工場などがある。キャッサバチップ工場やペレット工場からはキャッサバパルプが発生しないことから、本技術実証事業の成果移転先としてはキャッサバスターチ製造工場が対象となる。キャッサバスターチ工場はタイ全体に約 90 工場あり、1 日当たり数 100 t の製造能力を有する大規模工場が 9 工場ほどあり、まずはこれらが有力移転先である [Thai Tapioca Starch Association (2015 年 10 月) ; (http://www.thaitapiocastarch.org/download_information_detail.asp?id=11), TTSA]。

スターチの 1 日当たりの製造能力が 900 t 規模の工場（タイ国内の工場としては最上位規模工場）では、キャッサバパルプ排出量は、キャッサバの作柄やスターチの市場動向によるが、乾燥品で年間 80,000 t に上る。エタノール生産にはスケールメリットを追求することが望ましく、少なくとも年間 30,000 kl 規模の商業生産が相応しいとされる。年間 30,000kl のバイオエタノールをキャッサバパルプのみで製造する場合、およそ 94,000 t のキャッサバパルプ（乾燥品として）を使用する。キャッサバスターチの製造能力 900 t/日の工場のキャッサバパルプ量は、年間 30,000 kl のエタノール生産には若干不足する。年間 30,000 kl 以上の商業製造に取り組むには、原料欠減のリスクを生じないしっかりした原料サプライチェーンの構築が必要である。それには近隣のキャッサバスターチ工場とのタイアップやキャッサバスターチ組合組織の連携の模索などが必要と推察される。

・バイオエタノール製造事業主体

技術実証試験はサケーオ県の EBP Ethanol Co., Ltd.で実施した。同社はキャッサバスターチ製造会社 Eiamburapa Co.,Ltd.のエタノール製造事業を担う目的で設立された子会社であるが、本技術実証試験を開始する時点ではエタノール製造に着手していなかった。EBP Ethanol Co., Ltd.及び Eiamburapa Co., Ltd.のバイオエタノール製造事業参入意欲を技術実証 FS にて調査したところ、強い希望があることが分かった。そこで、エタノール製造事業実施の能力を有するかを本技術実証の共同実施によって確かめ、さらには日本側による技術指導を反映した技術技能向上が認められるかについても確認した。その結果、EBP Ethanol Co., Ltd.及び Eiamburapa Co., Ltd.は技術実証期間を通してバイオエタノール製造事業着手を希望し、そのための行政面や財務面での準備を進めていることを把握した。本技術実証事業の技術を導入したバイオエタノール製造事業の開始にあたっては、EBP Ethanol Co., Ltd.がバイオエタノール製造会社の核となり、これに加えてバイオエタノール事業のサプライチェーンを構成する各社、即ち、原料供給、製造技術、製品エタノール流通・販売などの機能を持つ事業者が何らかの構成体として参加することがバイオエタノール事業成功には望ましいと考察した。

・バイオエタノールの製造コスト等

エタノール製造コストの高低は製造設備の初期投資コストとエタノールの生産性に依る。生産設備については高額で特殊な装置機器類を使用しないプロセスの設計が肝要である。これについては、本技術実証のパイロットプラント試験を通じて技術開発を行い、ほぼ達成目処が得られた。エタノールの生産性は原料からエタノールへの各変換工程の効率に依る。その中でもキャッサバパルプに含まれる多糖類を酵母資化性糖に変換する酵素剤の使用量が主要なコスト要因となる。本技術実証では酵素剤使用量の至適化に注力して試験を行い、本技術実証の FS プロジェクト（キャッサバパルプからのバイオエタノール製造実証事業（タイ）実施可能性調査）で想定した使用量を下回る量のプロセス設計に成功した。

ユーティリティコストに関しては本試験で使用する耐熱性酵母の高温発酵によるメリットを最大限活用する。

・事業実施体制及び商業製造開始後の事業範囲

図 1 に商業製造開始後の事業範囲案を示す。バイオエタノール製造主体はバイオエタノール製造事業者単独、あるいは、バイオエタノール製造のサプライチェーンを構成する各事業者が参加した複合体が想定される。複合体にはバイオエタノールを製造する工場事業者の他にキャッサバ

パルプを排出するキャッサバスターチ製造事業者、キャッサバパルプの流通を担う集配卸事業者、生産技術の支援や製造装置の保守管理等を担う生産技術会社、そしてガソール製造事業者などが参加するのが望ましいと考えられる。

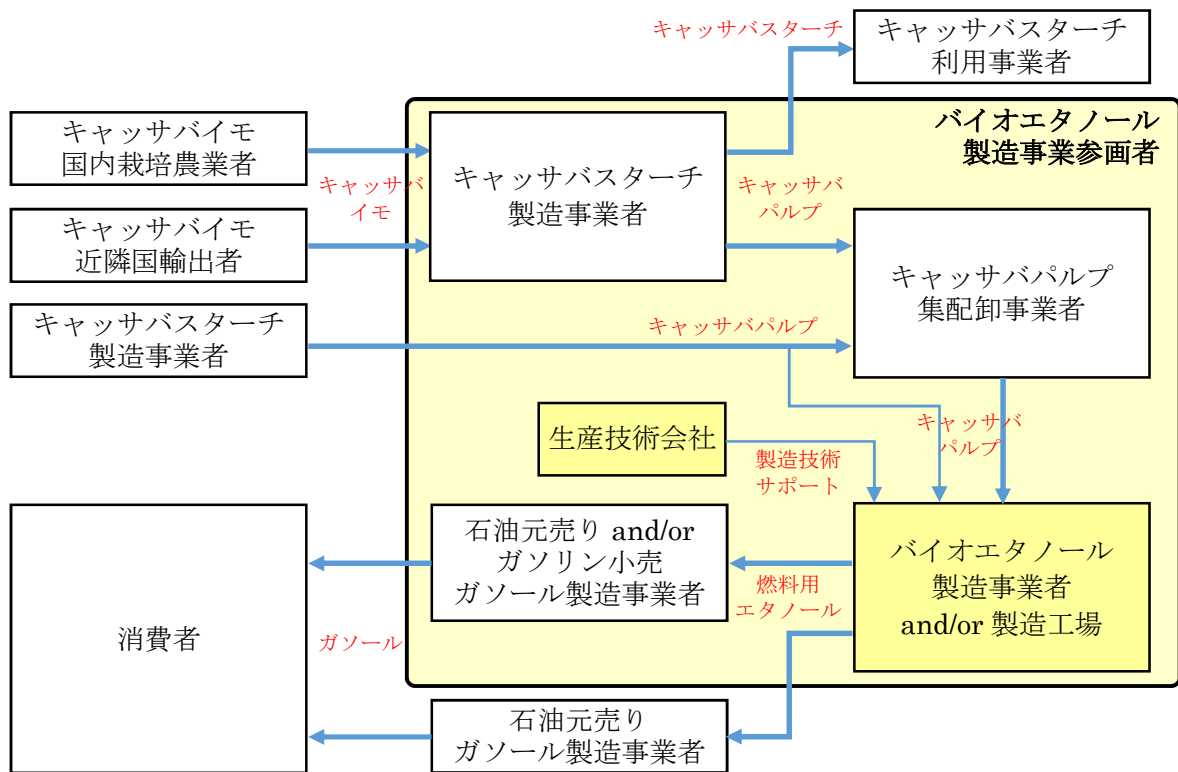


図1 バイオエタノール商業製造開始後の事業主体と事業範囲

- ・ キャッサバパルプの調達

キャッサバイモの流通形態は、現状のキャッサバイモ栽培農業者がキャッサバスターチ製造事業者販売に加えて、ASEAN 経済共同体が発足した今後は近隣のキャッサバ生産国からの低価格品輸入が増加すると思われる。バイオエタノール工場が購入するキャッサバパルプはキャッサバスターチ製造工場から直接購入するものに加えて、キャッサバパルプ流通の専門事業者から購入するケースも起こる。即ち、キャッサバパルプを原料とするバイオエタノールの普及に伴い、キャッサバパルプはコモディティ商品化する可能性があるため、専門の流通事業者による需給調整がバイオエタノール製造の平準化には好ましいと考えられる。

- ・ バイオエタノールの流通

バイオエタノール商品はガソール製造事業者販売される。今日、ガソール製造は石油元売会社が担うが、ガソリン販売チェーン事業者などが自社でガソール製造を始めることも想定できる。バイオエタノール製造設備は幾分まだ高度な製造工程を使用していることから、設備ベンダーなどによる製造技術支援が欠かせない。製造されたガソールの最終消費形態はガソール販売スタンドから需要者への販売であり移動体による消費である。

- ・ 商業化における設備投資費用

本試算における商業規模エタノール製造プラントの製造能力は年産 30,000 kL とした。エタノール製造プラントの主要設備構成は前処理工程、液化工程、糖化工程、発酵工程、蒸留工程、ユーティリティー設備などである。年産 30,000 kL のエタノール製造プラント建設にあたって必要な設備費用はおよそ 5.0 億円と試算された。なお、EBP Ethanol Co., Ltd.は工場建設に必要な土地を既に保有しているため、土地購入代金は不要である。

- ・ 事業採算性評価のベースとなる前提条件
事業採算性評価のベースシナリオの前提条件を表1に示す。本前提に基づき回収期間を評価したところ、5年以内に可能である試算結果が得られた。

【表1 前提条件】

項目	内訳	備考
プラント製造能力	年産 30,000 kL	—
設備投資費用	5.0 億パーツ	—
プラント操業度	100%	—
エタノール販売価格	19 パーツ/L	2015年の政府リファレンス価格（平均的価格 24 パーツ/リットル）に対して、販価をその8割と想定した。
原料購入価格	ウェットパルプ	0.2 パーツ/kg キャッサバスターチ製造工場の排出キャッサバパルプをグループ会社及びそれ以外から調達するとして、平均価格を想定した。
	ドライパルプ	2.5 パーツ/kg キャッサバスターチ製造工場が乾燥加工するキャッサバパルプをグループ会社及びそれ以外から調達するとして、平均価格を想定した。
酵素剤費	2.0 パーツ/EtOH L	—
用役費	2.1 パーツ/EtOH L	—
人件費	1.3 パーツ/EtOH L	—
設備維持管理費	1.5%	設備投資費用の1.5%とする
原価償却費	10%	10年定額法を用いる
保険費	0.14 パーツ/EtOH L	—
廃棄物処理費	無し	—
土地購入代金	無し	製造事業実施主体の社有地を充当する
融資金額	5.0 億パーツ	全額借り入れとする
金利	6.5%	商業銀行の最低貸出一般金利とする
法人税	0%; 8年間 15%; 9年以降	BOIによる優遇税制適用を前提とする

4. 省エネ効果・CO₂削減効果

	実証事業段階	普及段階（2020）	普及段階（2030）
(1) 省エネ効果による原油削減効果	—	—	—
(2) 代エネ効果による原油削減効果	—	22,571kL/年	135,426kL/年
(3) 温室効果ガス排出削減効果	—	62,736t-CO ₂ /年	376,416t-CO ₂ /年
(4) 我が国、対象国への便益	<p>対象国には、増加するバイオエタノールの消費量に対して、非食料の農産物加工残渣を燃料用バイオエタノールに転換する新産業技術の普及によって、未利用農林残渣の有効利用や新たな雇用を創出する。</p> <p>本製造技術の普及によりタイ国内の化石燃料消費量が低減され、温室効果ガス排出量が削減される。更にインドネシアやカンボジア等の東南アジア諸国へ本製造技術が普及することで更なる化石燃料消費量の削減、温室効果ガス排出量の削減が見込まれ、我が国のエネルギーセキュリティ</p>		

	ティの確保に資する。
--	------------

用語集

用語	意味
ウェットパルプ	デンプン製造工程時に副産物として排出されるデンプン搾汁粕。
液化工程	酵素による加水分解で高分子の糖を低分子に分解し原料の粘度を下げるプロセスを指す。
ガソール	ガソールともいう。ガソリンに一定量割合のエタノールを混合したもの。
ガソール製造事業者	ガソリンとバイオエタノールを混合し、ガソールを製造する事業者のこと。
キャッサバ	キントラノオ目トウダイグサ科イモノキ属の熱帯低木。根茎にデンプン質を多く蓄積し、生食用、デンプン原料として熱帯地方で多く栽培されている。
キャッサバイモ	キャッサバの根茎部分でデンプン質を多量に蓄積している個所
キャッサバスターチ	キャッサバの根茎部分から得られるデンプンでタピオカと称せられる。
キャッサバスターチ組合	正式英名は Thai Tapioca Starch Association。タイ国キャッサバスターチ製造業界の組合組織
キャッサバパルプ	キャッサバの根茎部分からデンプンを搾汁した後のデンプン粕。
キャッサバペレット	キャッサバイモをランダムにカッティング又は押しつぶしたものを天日乾燥した乾燥キャッサバをペレット状に成形したもの
金利	商業銀行から調達した費用に掛かる利息
原価償却費	資産の購入金額を資産の耐用年数に渡って費用化する費用。
酵母資化性糖	酵母が資化可能な糖。多くの酵母は通常 3 単糖までの糖が資化可能である。
固形残渣	水不溶性の残渣物。液化、糖化、発酵処理を経ても分解・可溶化されなかった成分で、本プロセスでは主にリグノセルロースの一部、ペクチン質等。
サケーオ県	タイ国中西部に位置する。県西部はカンボジア国境となる。面積 7159km ² 、人口約 50 万を有する。北部地域はカオヤイ山地が連なり、域内のパーンシーダー国立公園は貴重な野生生物の宝庫である。
シーブトレイ	蒸留塔内部に棚段状に組まれたトレイ
商業銀行	個人および法人向けに預金業務や貸出業務、支払い決済手段の提供などを行う金融機関
蒸留工程	物質ごとの蒸気圧の差を利用して混合物の特定成分を濃縮する操作。燃料用エタノール蒸留の場合は低濃度のエタノール発酵液を蒸留し 99.5% 以上のエタノールに濃縮する。
人件費	プラントでの製造、管理、運営に関わる役職員の給与等に係る費用
水溶性食物繊維	水に溶ける種類の食物繊維。果物、野菜に多く含まれるペクチン、わかめなど海藻類に多く含まれるアルギン酸、生のこんにやく芋に含まれるグルコマンナンなど。キャッサバなどのイモ類はペクチンが多量に含まれる。
設備維持管理費	プラントのメンテナンスに係る費用
設備ベンダー	ユーザーにプラント設備を提供している会社。
糖化・加水分解酵素	高分子の糖であるデンプン、セルロースなどをその構成糖単位又は複数の構成糖単位に分解する酵素
糖化工程	酵素による加水分解で酵母資化糖が形成されるプロセスを指す。並行複発酵を採用しているため発酵工程終了時まで糖化工程が続く。
土地購入代金	プラント建設のための土地の購入費
ドライパルプ	同上の搾汁粕を含水率 13%前後にまで天日乾燥したもの。

熱移動係数	伝熱において、壁と空気、壁と水といった2種類の物資間での熱エネルギーの伝え易さを表す値で、単位面積、単位時間、単位温度差あたりの伝熱量(すなわち単位温度差あたりの熱流束密度)である。
燃料用バイオエタノール	バイオエタノールのうち、燃料用に用いられるものを指す。流通の段階で不可飲処置、変性処理をする場合もある。
廃棄物処理費	プラント運転開始後の発酵残渣処理費
発酵工程	酵母により糖からエタノールを製造する工程
風乾キャッサバパルプ	キャッサバパルプはデンプンを搾汁した後の搾りかすとして含水率 80%程度の湿潤状態で排出される。これを天日乾燥し含水率 13%程になったもの
並行複発酵	発酵工程中に糖化が同時進行するプロセス。前もって糖化を完了させた後、発酵させる単行複発酵に比べ原料糖液濃度を高くする必要がないことから高濃度のエタノールが得やすい。
ペクチナーゼ産生	キャッサバイモ中に存在する水溶性食物繊維であるペクチンを低分子に分解する酵素(ペクチナーゼ)を発酵中に産生する
法人税	決算書上の税引き前利益に加算する税のこと。
保険費	プラント運転開始後の損害保険
前処理工程	原料キャッサバパルプの選別、粉碎、スラリー化の工程を指す。広義にはこれに液化・糖化工程を加えたものを指す。
ユーティリティークスト	製造コストの内ユーティリティーク(電気、ガス、水、湯、蒸気、空気、等)に係るコスト
融資金額	商業銀行からプラントの建設運営のために調達する費用
用役費	電気代、水道代、燃料代等のプラント運転に係る費用
リグノセルロース	植物細胞壁の成分であり、主にセルロース、ヘミセルロースそしてリグニンからなる。
BOI	タイ国投資委員会 Thai Board of Investment の略。投資政策の策定、投資案件の認可や恩典の付与を担うタイ工業省傘下の投資誘致機関
EBP Ethanol Co., Ltd.	100%EBP 社出資の子会社でエタノール製造、他を事業目的として設立。
Eiamburapa Co., Ltd.	タイ国サケーオ県ワッタナコン郡でキャッサバデンプン製造を営む。本製造技術実証事業での現地パートナー企業 EBP Ethanol Co., Ltd.の親会社。