

成果報告書「概要版」

1. 事業の概要

1-1 事業の背景と目的

近年、温室効果ガスの排出抑制による地球温暖化防止や、資源の有効利用による循環型社会の形成等が求められている。中でもバイオマスの利活用技術は、化石資源依存からの脱却により、持続可能な社会の実現に大きく貢献することが期待できる。木質バイオマスのリファイナリ技術である水蒸気爆砕法では、既往技術の問題点であった汚染物質を大幅に削減できる。そのため、電気機器などへの新たな利用が期待でき、木質バイオマスの全構成成分を有効に利活用することが可能である。本事業では、セルロース、ヘミセルロースの応用、リグニンからのエポキシ樹脂創生及びその電気機器への応用の観点から水蒸気爆砕システムを最適化し、水蒸気爆砕法による木質バイオマスリファイナリシステムの確立を目的とする。

1-2 事業の概要

事業受託者：国立大学法人徳島大学

事業実施場所：徳島大学 常三島キャンパス (徳島市南常三島町2丁目1番地)

事業管理責任者：徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 中村嘉利

技術実証責任者：同上

実証事業担当者：徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 佐々木千鶴

徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 浅田元子

施設整備・管理責任者：徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 中村嘉利

経理責任者：徳島大学工学部予算管理係 貝出嘉幸

本事業は、水蒸気爆砕により得られたリグニンをエポキシ樹脂化するシステムの構築を図ることを目的としており、平成21年度の事業計画では、水蒸気爆砕システム及び樹脂加工・評価設備の導入と立ち上げ、平成22、23および24年度の事業計画では、水蒸気爆砕・抽出条件の最適化に関する実証、リグニンのエポキシ樹脂化及び硬化物に係る実証、リグニンのエポキシ樹脂化及び硬化物に係る実証、セルロースの高強度化添加材利用に係る実証、セルロースの糖化・発酵に係る実証を行った。

2. 実施体制

2-1 実証体制及び事業運営体制

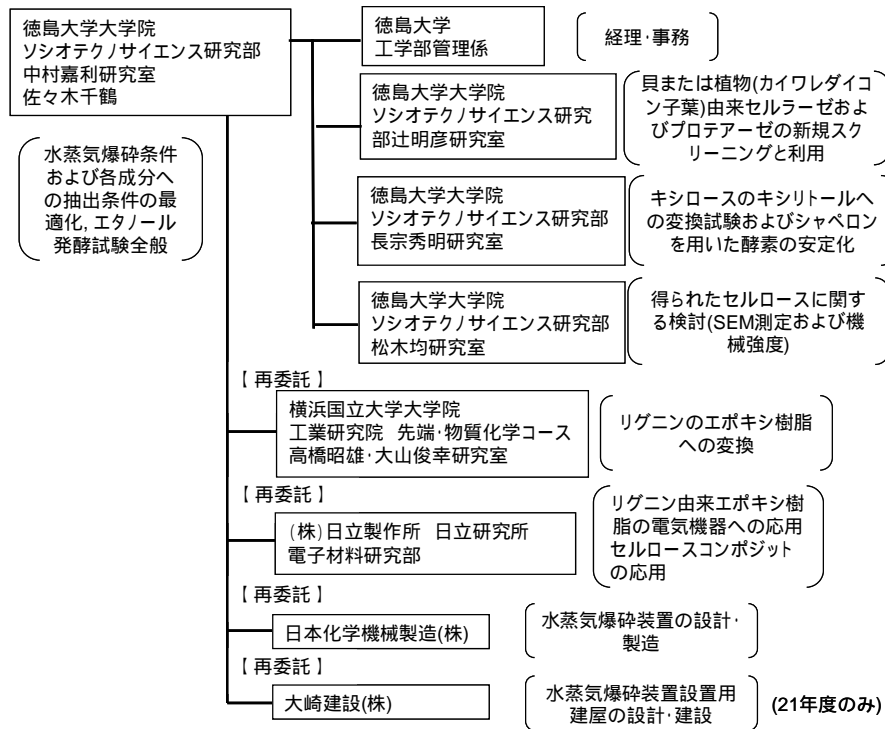


図2-1 本事業の実施体制 (平成21年度～平成22年度)

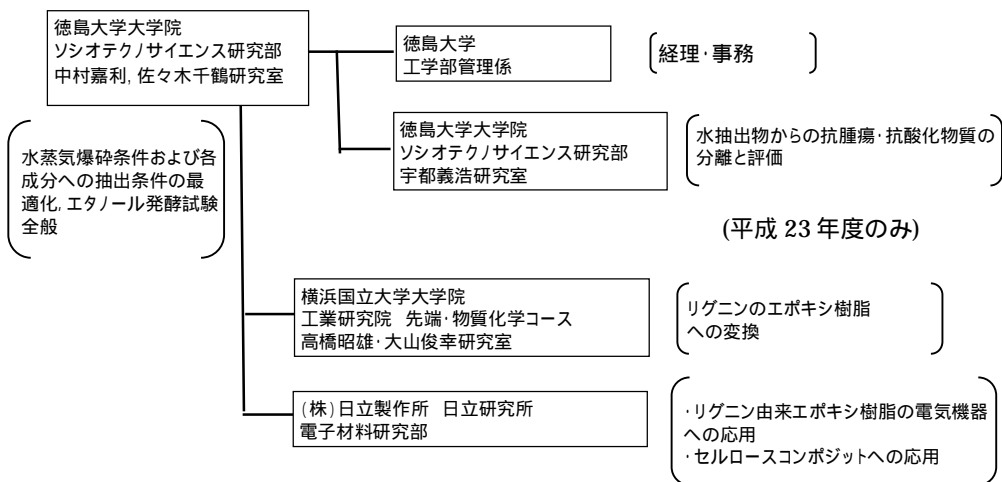


図2-2 本事業の実施体制 (平成23年度～平成24年度)

2-2 推進委員会

【技術評価委員 (3名)】

技術評価委員会は、技術実証に対する効果的なアドバイスを得るため、エポキシ樹脂の専門家(越智委員)、セルロース分解酵素等の酵素全般に関する専門家(櫻庭委員)および木質バイオマスの前処理と糖化発酵全般に関する専門家(渡辺委員)から構成される。

| | | |
|-------------|----|------|
| 関西大学化学生命工学部 | 教授 | 越智光一 |
| 香川大学農学部 | 教授 | 櫻庭春彦 |
| 京都大学生存圏研究所 | 教授 | 渡辺隆司 |

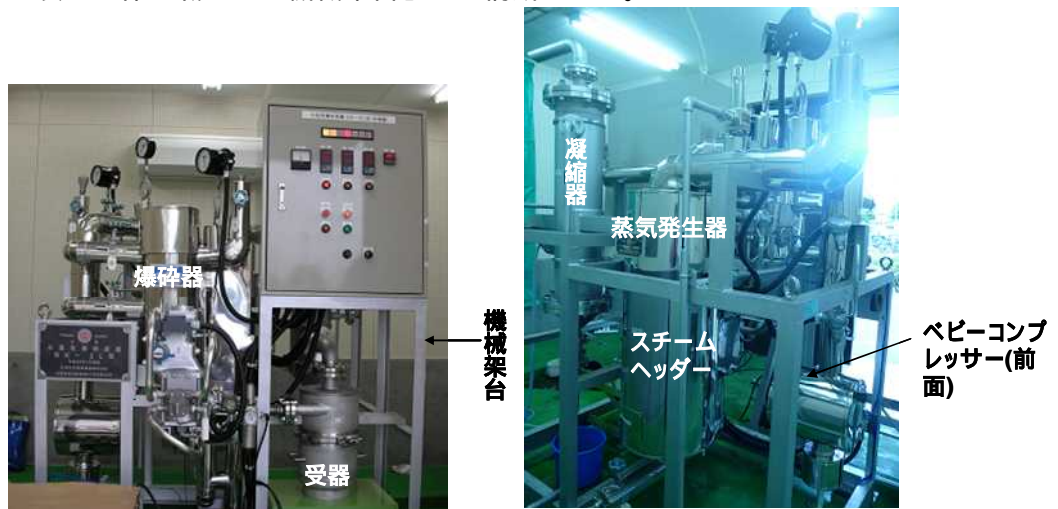
【年度の開催回数】

| | |
|--------|----|
| 平成21年度 | 2回 |
| 平成22年度 | 3回 |
| 平成23年度 | 2回 |
| 平成24年度 | 2回 |

3. 実証プラント(平成21年度～平成24年度)

実証プラントにある水蒸気爆砕装置は、木材などの試料を耐圧容器中で高温（100～280）、高圧（1.0～6.5MPa）の飽和水蒸気によって短時間（20秒～20分間）蒸煮し、その後急激に大気圧に放出して、急速に100以下に冷却し、断熱膨張により木質構造を破壊する装置であり、いわゆるポップコーンやポン菓子を作るのと同じ原理を用いて、木質中の成分すなわち、リグニン、セルロース及びヘミセルロースを分離しやすくするための木質試料の前処理用の装置である。

上記の操作をするために本製造装置は、1. 試料を短時間蒸煮するための水蒸気を発生させる「水蒸気発生器」、2. 試料を蒸煮後、一気に大気圧に放出して試料を爆砕する「爆砕器」、3. 爆砕した試料を受ける「受器」、4. 爆砕の際に高温高圧の蒸気の冷却および凝縮させる「凝縮器」、5. 爆砕器の温度降下を防ぐ「スチームヘッダー」、6. 自動弁開閉のエア源となる「ベビーコンプレッサー」、7. 装置全体を載せる「機械架台」から構成される。



装置前面

装置背面

図 3 - 1 水蒸気爆砕装置とそれぞれの構成部位

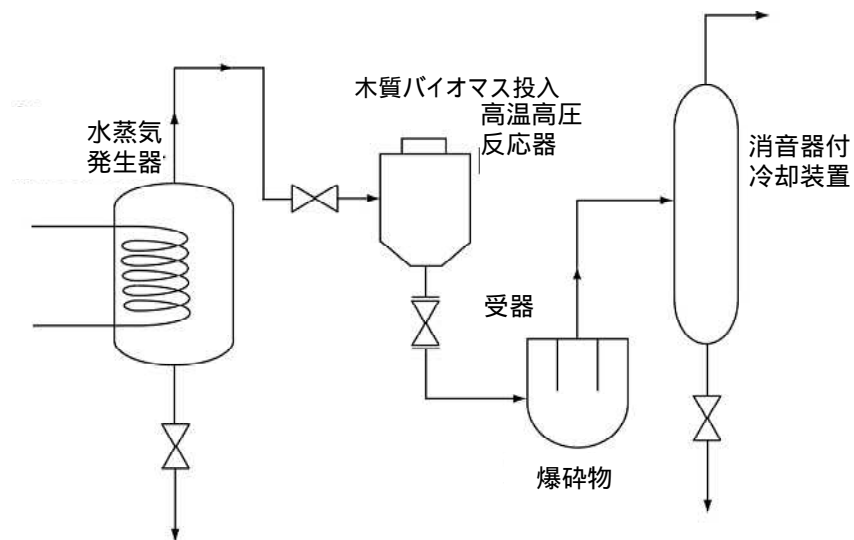


図 3 - 2 水蒸気爆砕装置のシステムフロー

4. 実証内容 (平成21年度～平成24年度)

4-1 抽出するリグニン分子量目標値の決定

リグニン由来エポキシ樹脂は分子量により特性が変わるため、リグニン分子量の目標値を決定する。

4-2 抽出するセルロース径目標値の決定

セルロース径とセルロース由来樹脂の強度に相関関係があることから、セルロース径の目標値を決定する。

4-3 水蒸気爆砕・抽出条件の最適化

リグニン等の高付加価値利用のため水蒸気爆砕の爆砕条件、抽出条件の最適化を図る。

4-4 超高温高压水蒸気爆砕条件の最適化

爆砕で得られた固形物(セルロース成分)をグルコースに変換するのに必要な超高温高压水蒸気爆砕条件の最適化。

4-5 発酵条件の最適化

爆砕で得られた固形物(セルロース成分)をエタノールに変換するのに必要な発酵条件の最適化。

4-6 水抽出物からの抗腫瘍・抗酸化物質の分離と評価

スギ爆砕物の水抽出物からの抗腫瘍・抗酸化物質の分離及び評価(一般的な抗腫瘍・抗酸化物質と同等以上の活性を目標)

4-7 発酵後残渣(高分子リグニン)の利用

爆砕で得られた固形物(セルロース成分)をエタノールに変換した後に残った高分子リグニンの利用法の開発。

4-8 製造品生成の費用対効果を考慮した総合的評価

製造品(セルロース、リグニン、エタノール、エポキシ樹脂)生産に係る費用に対する利益の試算。

5. 実証の目標と達成度、構築した製造システム

本事業が対象とする水蒸気爆砕システムは、既往技術と比較し、汚染物(廃酸・アルカリ等)が少なく、環境負荷が小さいという特徴を有する。そのため木質バイオマスから得られた分解抽出物を、電気抵抗や誘電特性といった各種電気特性が要求される電気機器に適用可能である。また、高効率でアルコールなどの化学物質に変換できる。一方で本製造システムを事業化するためには、

リグニンをエポキシ樹脂に変換する技術の確立、リグニン由来エポキシ樹脂を電気機器に適用するための水蒸気爆砕及び抽出条件の最適化、エタノール発酵の高効率化、が必要である。そのため、以下の技術実証課題に取り組んだ(表5-1)。

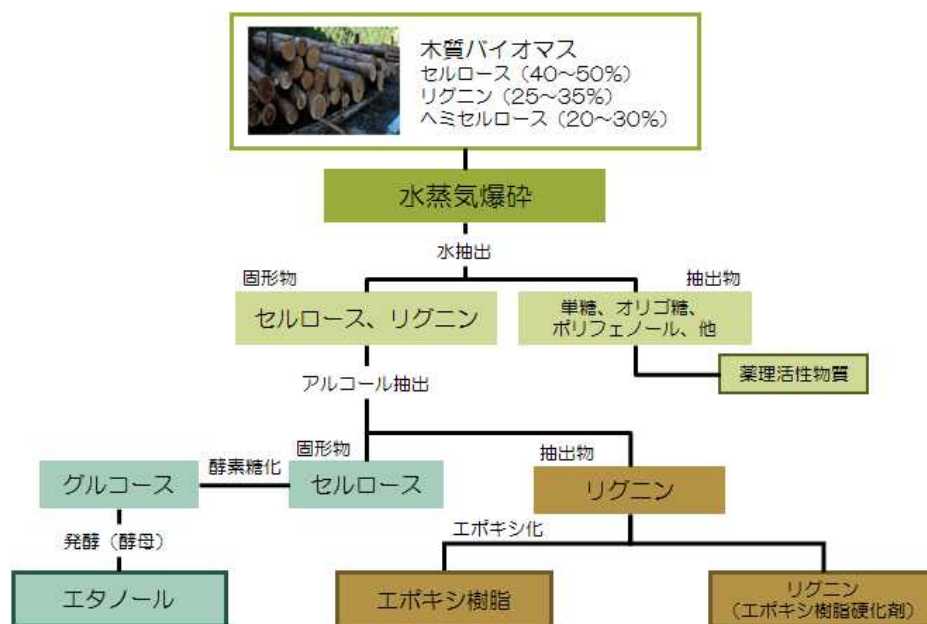


図5-1 構築した製造システム

表 5 - 1 実証の目標と達成度

| | 実証課題 | 達成目標 | 達成度 |
|-----|--------------------------------------|--|---|
| (a) | 抽出するリグニン分子量の決定 | エポキシ当量500g/eq以下で溶媒可溶性であること。 石油由来エポキシ樹脂硬化物と同等以上の熱・機械特性であること。 | 達成(303 g/e q) 一部達成(熱重量減少温度のみ未達) |
| (b) | 抽出するセルロース径目標値の決定 | 樹脂単体の曲げ強度の2倍。 | 未達 |
| (c) | 水蒸気爆砕・抽出条件の最適化 | (a)で決定したリグニンの分子量であること。セルロース径が(b)で決定した値以下であること。低分子リグニン量が最大、すなわち固形分(セルロース成分)の脱リグニン度が70%以上。抽出に要する溶媒の回収率90%以上。 | 達成(リグニン分子量約1000-1400、脱リグニン度70%、溶媒回収率90%) |
| (d) | 超高温高圧水蒸気爆砕条件の最適化 | 単糖収率40%以上かつセロオリゴ糖収率80%以上 | 一部達成(セルロースモデル物質について単糖収率41%) |
| (e) | 発酵条件の最適化 | セルロースから得られるエタノール理論収率の85%以上。 | 達成(85%) |
| (f) | 水抽出物からの抗腫瘍・抗酸化物質の分離と評価(23年度のみ) | 一般的な抗腫瘍活性物質、抗酸化活性物質と同等あるいはそれ以上の活性 | 一部達成(抗酸化活性のみ) |
| (g) | 発酵後残渣(高分子リグニン)の利用 | 発酵後残渣(高分子リグニン)の新規利用法の確立 | 未達(低分子量リグニン回収は可能) |
| (h) | 製造品(リグニンおよびエタノール等)生成の費用対効果を考慮した総合的評価 | 全製造品の価格が全費用よりも大きいこと(利益創出システムであること)。 | 達成(エタノールの製造コストは一般目標価格の半分以下、リグニンの製造コストは市販フェノール樹脂の約60%) |

ビジネスモデルの検討

木質バイオマスは山林に広く分散しているため、木質バイオマスを集積・運搬することによるコスト負担が大きい。そこで、どのように木材の集積・運搬コストを抑制するかという観点から、以下のビジネスモデルを提案する。また設備規模については、販売量及び投資余力なども勘案し、個々の事業者が決定すべきものであるが、目安として、100L及び200Lの水蒸気爆砕装置を用いた場合をモデルとして提案する。

・ビジネスモデル案1：中規模分散型

本事業のためだけに木材を大量に集積し、大規模設備で水蒸気爆砕、エタノール、リグニン製造を行うことは、コストの観点から望ましくない。一方で、エタノール及びリグニン単価に占める設備償却費、労務費を希釈する(割合を低減する)ためには、ある程度の規模でリグニン製造を行う必要がある。従って、運搬費を含めた原料価格と、設備の減価償却費、労務費を勘案したうえで、中規模レベルの設備により、地方分散型でリグニンを製造する。

水蒸気爆砕装置サイズ(蒸煮窯サイズ): 100L

水蒸気爆砕装置サイズから算出したエタノール製造可能量: 53L/日

木材価格及び水蒸気爆砕エネルギーを100%リグニンに案分した場合のエタノール製造コスト(変動費のみ): 42円/L

水蒸気爆砕装置サイズから算出したリグニン製造可能量: 45kg/日

木材価格及び水蒸気爆砕エネルギーを100%リグニンに案分した場合のリグニン製造コスト(変動費のみ): 266 円/L

・ビジネスモデル案2: 既存インフラ活用型大規模製造

木材が大量に集積・利用されている設備の周辺に水蒸気爆砕設備及び後工程設備を設置し、既存の木材集積のインフラを活用する。これにより、原料集積・運搬費が削減可能となる。この場合は設備を大型化・連続運転化し、大量製造によるコスト低減を図る。

水蒸気爆砕装置サイズ(蒸煮窯サイズ): 200L

水蒸気爆砕装置さいずから算出したエタノール製造可能量: 107L/日

木材価格及び水蒸気爆砕エネルギーを100%リグニンに案分した場合のエタノール製造コスト(変動費のみ): 42 円/L

水蒸気爆砕装置サイズから算出したリグニン製造可能量: 91kg/日

木材価格及び水蒸気爆砕エネルギーを100%リグニンに案分した場合のリグニン製造コスト(変動費のみ): 263 円/L

実証課題と達成状況 高付加価値型製造システム:水蒸気爆砕法樹脂製造タイプ(エポキシ樹脂)

| 計画内容(仕様書) | | | H21 (達成状況) | H22 (達成状況) | H23 (達成状況) | H24 (達成状況) |
|--------------------|--|--|--|--|---|---|
| 抽出するリグニン分子量の設定 | <ul style="list-style-type: none"> リグニンのエポキシ樹脂変換 溶媒への溶解性、リグニン由来エポキシ樹脂の有機溶媒への溶解性検証 | <ul style="list-style-type: none"> エポキシ当量 500g/eq以下 溶媒可溶性 | <ul style="list-style-type: none"> モデル化合物によるエポキシ化条件検討 リモデル化合物のエポキシ化及びエポキシ化モデル化合物の硬化成功 | <ul style="list-style-type: none"> リグニンのエポキシ化検討 エポキシ当量236~350g/eq リグニンのエポキシ化成功 低分子量化・収率向上が課題 | <ul style="list-style-type: none"> リグニンのエポキシ化条件最適化 収率改善:50% 70%以上 低分子量化(3000以下)成功 耐熱性の向上が課題 | <ul style="list-style-type: none"> エポキシ当量 安定的に300g/eq以下 |
| 抽出するセルロース径の設定 | <ul style="list-style-type: none"> 樹脂混練・樹脂強度向上に適した各種爆砕条件とセルロース径及び樹脂強度の各相関の検証及び最適値の設定 | <ul style="list-style-type: none"> 樹脂単体の曲げ強度2倍を達成し得る各種条件 | <ul style="list-style-type: none"> セルロース解繊・樹脂混練技術調査 | <ul style="list-style-type: none"> 各種爆砕条件で抽出されたセルロースの分析・調査 熱可塑性樹脂へのセルロース混練 解繊可能な水蒸気爆砕条件明確化 セルロース・熱可塑性樹脂の混練達成 強度向上無、弾性率向上を確認 | <ul style="list-style-type: none"> 熱硬化性(エポキシ)樹脂へのセルロース混練 セルロース・熱硬化性樹脂の混練達成 曲げ強度・線膨張率低下を確認 | <ul style="list-style-type: none"> 樹脂強度 2倍以下 目標製造効率 固形分の脱リグニン度70%以上 抽出溶媒回収率90%以上 |
| 水蒸気爆砕・抽出条件の最適化 | <ul style="list-style-type: none"> 樹脂原料・発酵原料として最適な爆砕・抽出条件の設定 爆砕物と抽出溶媒の量比の検討による抽出溶媒の最少化 | <ul style="list-style-type: none"> ハミセルロースの有価物化 80%以上 低分子リグニン量(セルロースの脱リグニン度70%以上)・溶媒回収率90%以上 | <ul style="list-style-type: none"> 実証施設整備 セルロース解繊技術調査 爆砕試験 | <ul style="list-style-type: none"> 水蒸気爆砕・抽出条件の比較検証 爆砕物の水・メタノール抽出 加温法より常温法が低分子リグニン抽出に適することが判明 | <ul style="list-style-type: none"> 爆砕条件と抽出リグニン、セルロースの性状等の相関関係確認、最適条件設定 | <ul style="list-style-type: none"> 単糖収率 40%以上 達成した成果による製造システムの構築 |
| 超高温高圧水蒸気爆砕条件最適化 | <ul style="list-style-type: none"> 爆砕後の固形分(セルロース成分)の超高温高圧水蒸気爆砕処理による、セルロースの糖化のための爆砕条件を決定。 | <ul style="list-style-type: none"> 単糖収率40%以上 セロオリゴ糖収率80%以上 | | <ul style="list-style-type: none"> 爆砕試験 市販セルロース原料による超高温高圧爆砕実施。単糖収率40%以上 セロオリゴ糖収率52% | | <ul style="list-style-type: none"> 単糖収率 40%以上 |
| 発酵条件の最適化 | <ul style="list-style-type: none"> 発酵条件最適化(酵素添加でのエタノール発酵 酵素量1/10) ハミセルロースからのキリトール発酵 | <ul style="list-style-type: none"> エタノール収率 85%以上 キシリトール理論収率50%以上 | <ul style="list-style-type: none"> セルロース分解酵素の選定、酵素活性の測定 爆砕セルロース+市販酵素の酵素糖化試験、メイセラールが有効 酵素糖化に適した爆砕条件判明、40atm | <ul style="list-style-type: none"> 溶媒可溶性を確保 リグニン分子とガラス転移温度爆砕条件の関係検討 | <ul style="list-style-type: none"> エタノール収率 安定的に85% | |
| 水抽出物から抗酸化物質等の分離・評価 | <ul style="list-style-type: none"> 水抽出物中の抗腫瘍物質・抗酸化物質の分離・精製及び各活性評価 爆砕条件との関連検証 | <ul style="list-style-type: none"> 一般的な活性と同等以上 | | | <ul style="list-style-type: none"> 水抽出物中の抗腫瘍、抗酸化物質の分離・精製 活性の分析調査 | <ul style="list-style-type: none"> 一般的な抗酸化活性物質以上 |
| 発酵後残渣の利用検証 | <ul style="list-style-type: none"> 高分子リグニンの用途検証(高分子リグニンのエポキシ樹脂への混練、高分子リグニンの低分子化など) | <ul style="list-style-type: none"> 醗酵後残渣(高分子リグニン)の新規用途確立 | | <ul style="list-style-type: none"> 高分子リグニンのエポキシ樹脂混練 高分子リグニンの低分子化検証 | | <ul style="list-style-type: none"> 低分子量リグニン回収可能 |
| 製造品の費用対効果を考慮した総合評価 | <ul style="list-style-type: none"> 本製造システムの実用化時 想定コスト試算 想定される製品価格・価値の検証、評価 システム全体評価 | <ul style="list-style-type: none"> 製造品の精製を考慮した費用対効果(セルロース、リグニンなど) | | <ul style="list-style-type: none"> 試作品作製 製造条件決定 | <ul style="list-style-type: none"> コスト試算 | <ul style="list-style-type: none"> 低コスト化 エタノール製造コスト(変動費):42円/L リグニン製造コスト(変動費):市販樹脂価格の60% |

木材を原料としたエポキシ樹脂生産事業モデルの確立