

バイオマスカスケード発電プラント

仕様書 v1.0

Biomass Cascade Power Plant — Specification v1.0

ライセンス：CC BY-SA 4.0

村方純 (librefoodsystem.org)

公開日：2026年6月

1. システム概要

1-1. 構想の背景

全国に稼働するバイオマス発電所の多くは、発電後の廃熱を大気中に捨てている。FIT 期間終了が近づくとつれ、発電収益だけでは事業継続が困難になる施設も出てくる。

この仕様書は、既存のバイオマス発電プラントに改造を加えることで、廃熱を活用したバイオエタノール製造ラインを付設するシステムの設計概念を示す。

1-2. 設計思想

- ・ 「捨てている熱」を収益に変える
- ・ 既存プラントへの後付け改造を前提とする
- ・ 収益を上げながら炭素を固定する（DAC との根本的な差異）
- ・ オープンな仕様として公開し、横展開を妨げない

1-3. システム名称

バイオマスカスケード発電プラント (Biomass Cascade Power Plant)

1-4. 参照プラント規模

以下の試算は、パレット廃材を燃料とする 3,550kW バイオマス火力発電プラントを参照モデルとして作成した。他規模プラントへの適用は比例換算で対応可能。

※利用にあたっての注意点として、数値の妥当性のチェックをお願い致します。

2. 熱カスケード設計

バイオマス発電プラントから得られる熱を温度帯別に役割分担し、各工程に最適な設備へ供給する。本システムは背圧タービン設計を採用し、タービン排気蒸気をコンデンサーに捨てず、蒸気ヘッダーを介して各工程設備の調節弁（コントロールバルブ）へ供給する。調節弁の切り替えにより各工程設備に必要な蒸気の圧力と温度帯・冷却水を制御する。

2-1. 熱源の種類と温度帯

熱源	温度	供給先設備
ボイラー排ガス	150～180℃（120～150℃に制御）	ロータリードライヤー（リグニン乾燥・独立系統）
タービン排気蒸気（P1：高圧）	160～180℃	水蒸気爆砕装置
タービン排気蒸気（P2：中圧）	80～100℃	フィルタープレス補助・蒸留塔
タービン排気蒸気（P3：低圧）	50～55℃	ジャケット付き攪拌槽（SSF 糖化フェーズ）
タービン排気蒸気（P4：超低圧）	30～40℃	ジャケット付き攪拌槽（SSF 発酵フェーズ・冷却水併用）

2-2. 調節弁による蒸気圧帯の設定

背圧タービン排気蒸気を蒸気ヘッダーから各工程設備の調節弁（コントロールバルブ）を経由して供給する。調節弁の切り替えにより工程に応じた蒸気の圧力と温度帯を制御する設計。発電後の蒸気（約 10,100kW・57%）が丸ごとエタノール製造工程の熱源となり、追加燃料は不要。圧力値は飽和蒸気表（スチームテーブル）より算出。

供給ポイント	温度帯	飽和蒸気圧	対応工程
P1（高圧）	160～180℃	0.62～1.00 MPa	前処理・水蒸気爆砕
P2（中圧）	80～100℃	0.047～0.101 MPa	固液分離補助・エタノール蒸留
P3（低圧）	50～55℃	0.012～0.016 MPa	酵素糖化
P4（超低圧）	30～40℃	0.004～0.007 MPa	アルコール発酵

2-3. 発電所の熱収支（3,550kW プラント参照値）

背圧タービン設計により、タービン排気蒸気（約 10,100kW・57%）をコンデンサーに捨てずに全量エタノール製造工程の熱源として利用する。

項目	熱量 (kW)	割合
投入熱量（3,550kW ÷ 発電効率 20%）	17,750	100%
発電出力	3,550	20%
タービン排気蒸気（調節弁制御・工程熱源）	約 10,100	57%
ボイラー排ガス保有熱（リグニン乾燥専用）	約 4,075	23%
放熱ロス等	約 25	0%

P1～P4 への熱量配分はプラント仕様・各工程の熱需要に依存するため、実装段階でプラントメーカーにて確認が必要。

3. 工程設計

3-1. 設計の基本思想

本システムの目的は廃熱のカスケード利用にある。各工程に最適な専用設備を選定し、背圧タービン排気蒸気の各圧力・温度帯を無駄なく割り当てる。「一つの汎用設備で全工程を賄う」のではなく、「各設備に最適な熱を届ける」ことが設計の核心。

発想の源泉は厨房機器（ロボクーボ等）のジャケット蒸気加熱・冷却構造と発酵食品工場の工程設計。

3-2. 工程別設備構成

工程	設備	熱源
前処理・水蒸気爆砕	水蒸気爆砕装置（専用圧力容器＋急速開放弁）	P1（高圧・160～180℃）
固液分離	フィルタープレス等（独立設備）	P2 補助（中圧・80～100℃）
酵素糖化・アルコール発酵（SSF）	ジャケット付き攪拌槽	P3（低圧・50～55℃）→ P4（超低圧・30～40℃）＋冷却水制御
エタノール蒸留	蒸留塔	P2（中圧・80～100℃）
リグニン乾燥	ロータリードライヤー（独立系統）	ボイラー排ガス（120～150℃）
CO ₂ 炭酸化・CaCO ₃ 固定	炭酸化タンク（スラリー式）	常温・常圧（追加熱源不要）

3-3. 工程フロー

原料投入（木質系バイオマス：パレット廃材・間伐材等）

↓ 異物除去・粉砕

【水蒸気爆砕装置】 P1 高圧蒸気 160～180℃（0.62～1.00 MPa）

高温高圧加熱 → 急速圧力開放 → セルロース解繊・リグニン軟化

↓

【フィルタープレス等】 P2 中圧蒸気補助 80～100℃

固液分離

└─ リグニン → ロータリードライヤー（ボイラー排ガス） → 含水率 15%以下 → ボイラー燃料

└─ セルロース液 → SSF へ

↓

【ジャケット付き攪拌槽】 SSF（同時糖化発酵）

P3 低圧蒸気 50～55℃（0.012～0.016 MPa）で糖化スタート

↓ 冷却水で段階的に降温

P4 超低圧蒸気 30～40℃（0.004～0.007 MPa）＋冷却水制御で発酵

処理時間：72～96 時間（参照値）

└─ 発酵排ガス（CO₂ 95～99%・ほぼ純 CO₂） → 炭酸化タンクへ

↓

【蒸留塔】 P2 中圧蒸気 80～100℃

エタノール蒸留・精製 → バイオエタノール（製品）

【炭酸化タンク】 常温・常圧（追加熱源不要）

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ （RT-CaCCO 前処理後の回収品） + CO₂ → CaCO₃ + H₂O

└─ CaCO₃ → 農地還元（土壌 pH 改良・鉱物として永続固定）

| 生成量：約 2,041 t-CaCO₃/年（898 t-CO₂ を鉱物固定）

└─ 余剰 CO₂（約 480 t-CO₂/年） → 農業用液化 CO₂・施設園芸転用候補

RT-CaCCO 消費 Ca(OH)₂ を発酵 CO₂ で完全炭酸化（自己完結ループ）

3-4. 擬似連続化の設計

水蒸気爆砕はバッチ処理のため、複数台の爆砕装置を時間差で稼働させることでリグニン・セルロース液の連続供給を実現する。酵素糖化・発酵槽は装置サイズと台数で処理量を調整する。リグニンバツファーホッパーを介してボイラーへの供給を連続化する。

最低装置台数・装置サイズは各工程の処理時間試験後に確定する。

3-5. 技術的新規性

食品工場のジャケット加熱・蒸留操作・固液分離はいずれも公知技術である。本システムの新規性は以下の組み合わせにある：

1. バイオマス発電プラントの背圧タービン排気蒸気を蒸気ヘッダー経由で各工程設備に調節弁制御で供給する設計
2. 発電廃熱（57%・約 10,100kW）を追加燃料なしで多段階バイオプロセスの熱源として全量利用する構成
3. ボイラー排ガス（リグニン乾燥）とタービン排気蒸気（糖化・発酵・蒸留）の役割分担による熱の使い切り
4. SSF 発酵排ガス（ほぼ純 CO₂）を RT-CaCCO 消費 Ca(OH)₂の炭酸化に直接利用し、CaCO₃ 鉱物として永続固定する自己完結ループ（BECCS 相当・追加熱源不要）

4. 各工程の仕様

※ 以下の数値は現時点での設計概念値。プラントメーカーにより精査が必要。確定・仮置きの別を明示する。

4-1. 原料

項目	内容	確定状況
主原料	木質系バイオマス（パレット廃材・間伐材等）	確定
セルロース含有率	40～45%（木質系） / 草本系は別途	参照値
リグニン含有率	20～28%（木質系）	参照値
注意点	木質系は釘・金属異物の混入→異物除去設備が必須	確定

4-2. P1：前処理・水蒸気爆砕

項目	値	確定状況
設備	水蒸気爆砕装置（専用圧力容器＋急速開放弁）	確定
熱源	タービン排気蒸気（P1：高圧）	確定
蒸気温度	160～180℃	確定
蒸気圧力	0.62～1.00 MPa（飽和蒸気圧）	確定
処理時間	未定	要試験
目的	セルロース解繊・ヘミセルロース分解・リグニン軟化	確定

【オプション：草本系バイオマス（稲藁等）向け前処理】

農研機構が開発した RT-CaCCO 法（水酸化カルシウムによるアルカリ前処理）を採用することで、稲藁・葦・麦わら等の草本系バイオマスにも本システムを適用できる。RT-CaCCO 法の加熱工程には本システムの蒸気熱をそのまま利用可能であり、熱カスケード設計との親和性が高い。副産物の炭酸カルシウム（CaCO₃）は土壌改良材として農地還元できる。

4-3. P2：固液分離

項目	値	確定状況
設備	フィルタープレス等（独立設備）	確定
熱源	タービン排気蒸気（P2：中圧）補助	確定
蒸気温度	80～100℃	確定
蒸気圧力	0.047～0.101 MPa（飽和蒸気圧）	確定
目的	リグニン排出・セルロース液の分離	確定

固液分離は機械的操作が主体。蒸気は粘度低減・温度維持のための補助熱源として利用する。

4-4. P3+P4 : SSF (同時糖化発酵)

項目	値	確定状況
設備	ジャケット付き攪拌槽	確定
方式	SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation : 同時糖化発酵)	確定
糖化温度	50~55°C (P3 低圧蒸気 : 0.012~0.016 MPa)	確定
発酵温度	30~40°C (P4 超低圧蒸気 : 0.004~0.007 MPa) + 冷却水制御	確定
温度推移	糖化 (50~55°C) 開始 → 冷却水で段階的に降温 → 発酵 (30~40°C) へ移行	確定
攪拌	必要 (酵素・酵母・基質の接触効率向上・均一化)	確定
使用酵素	セルラーゼ系 (Novozymes 等の市販品が利用可能)	商業品として入手可能
使用酵母	サッカロマイセス・セレビスシエ等 (市販品が利用可能)	商業品として入手可能
処理時間	72~96 時間 (参照値)	要試験
目的	セルロース→グルコース→エタノールへの一槽変換	確定

SSF 方式により糖化と発酵を同一槽で行う。糖化で生成したグルコースを酵母がその場で発酵するためグルコース蓄積による酵素阻害が起きにくく、工程を分けるより処理時間を短縮できる。ジャケット蒸気加熱・冷却水制御・攪拌の三機能が本工程のために必要な設備要件であり、本システムがジャケット付き攪拌槽を採用する核心理由となる。

酵素コストが現時点での商用化最大のボトルネック。

4-5. エタノール蒸留

項目	値	確定状況
設備	蒸留塔	確定
熱源	タービン排気蒸気（P2：中圧）80～100℃	確定
エタノール沸点	78℃	確定
追加燃料	不要（タービン排気蒸気活用）	確定

4-6. CO₂炭酸化・CaCO₃固定（BECCS 相当）

SSF 発酵工程から発生する排ガスはほぼ純 CO₂（95～99%）であり、大気中 420 ppm の CO₂ を濃縮する DAC と根本的に難易度が異なる。この純 CO₂ を RT-CaCCO 前処理で消費した Ca(OH)₂ に吹き込み炭酸化することで、バイオ由来炭素を鉱物として永続固定する自己完結ループを構成する。追加の熱源・加圧設備は不要で、常温・常圧で反応が進行する。

項目	値	確定状況
設備	炭酸化タンク（Ca(OH) ₂ スラリー式）	確定
反応式	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	確定（既知反応）
反応条件	常温・常圧（追加熱源・加圧設備不要）	確定
CO ₂ 供給源	SSF 発酵排ガス（95～99%純 CO ₂ ）	確定
発酵 CO ₂ 発生量	約 1,380 t-CO ₂ /年（エタノール 1,444t × 0.957）	参照値
Ca(OH) ₂ 消費量	約 1,511 t/年（バイオマス処理量の 7.5%）	参照値
炭酸化必要 CO ₂	約 898 t-CO ₂ /年（Ca(OH) ₂ 全量分）	参照値
余剰 CO ₂	約 482 t-CO ₂ /年	ドライアイス製造・CO ₂ 施用（施設園芸）への転用候補。炭素固定効果なし。地中貯留は規模拡大後に検討
CaCO ₃ 生成量	約 2,041 t/年	農地還元（土壌 pH 改良材）
CO ₂ 永続固定量	約 898 t-CO ₂ /年（鉱物固定）	参照値

発酵 CO₂（1,380 t-CO₂/年）は Ca(OH)₂全量の炭酸化（898 t-CO₂/年）に十分であり、余剰の約 480 t-CO₂/年は農業用液化 CO₂・施設園芸への CO₂ 施用として転用できる。CaCO₃は農地還元することで土壌 pH 改良材として機能し、地質学的タイムスケールで炭素を固定する。これは BECCS（バイオエネルギー＋炭素回収貯留）の地方実装版であり、地中貯留インフラを必要としない点で農村展開に適している。

5. アウトプットと物質収支

5-1. 分流設計 (3,550kW プラント・140t/日参照)

発電出力を維持しながらエタノール製造を行うには、原料の一部をエタノールラインに分流し、リグニン残渣をボイラーへ還流させる設計が必要。

原料 140t/日

- └ エタノールライン：約 60~70t/日 (43~50%)
 - | ↓ 糖化・発酵・蒸留
 - | └ リグニン排出：約 15~18t/日 → ボイラーへ
 - └ 直接燃焼ライン：約 70~80t/日 → ボイラーへ
- ボイラー燃料合計：約 85~98t/日
- 発電効率 20% で 3,550kW を維持

最適分流比率 (43~50%のどこが最も採算が良いか) は詳細試算が必要。

5-2. エタノール生産量の試算

項目	値	備考
糖化対象セルロース	約 29.25t/日	65t × 45%
実効収率	約 72%	糖化率 80% × 発酵転換率 90%
エタノール収率	280L/t-dry	日鉄エンジニアリング実証値 (2019 年)
エタノール生産量	約 5.9kL/日	—
年間生産量	約 1,830kL	310 日稼働

5-3. 主要アウトプット

本システムのアウトプットは単なるエネルギー回収ではなく、炭素を製品として固定することを主眼とする。バイオエタノールをバイオプラスチック原料とすることで、大気中の CO₂ を長期間製品中に封じ込める炭素固定の経済的実装を目指す。

アウトプット	用途	参照値
バイオエタノール	バイオプラスチック原料 (Revolefin™等)	年間約 1,830kL
リグニン素材	ボイラー燃料 (即時) → 将来的に素材化	—
CaCO ₃ (炭酸カルシウム)	農地還元 (土壌 pH 改良・鉱物固定)	約 2,041 t/年
余剰 CO ₂ (ドライアイス・CO ₂ 施用)	ドライアイス製造・施設園芸 CO ₂ 施用 (収益化目的・炭素固定効果なし)	約 482 t-CO ₂ /年
CO ₂ 固定 (合計)	Jクレジット申請対象 (BECCS 相当)	約 898 t-CO ₂ /年

5-4. 収益試算 (3,550kW プラント参照)

項目	金額 (万円/年)	備考
エタノール売却収益	約 16,470	90 円/L × 1,830kL
酵素コスト (低位)	▲3,660	20 円/L × 1,830kL
酵素コスト (高位)	▲7,320	40 円/L × 1,830kL
純増収益 (低位)	約 12,810	廃熱蒸留コストゼロ前提
純増収益 (高位)	約 9,150	廃熱蒸留コストゼロ前提

設備投資・酵素リサイクルコストは別途試算が必要。

6. 既存プラントへの適用

6-1. 追加設備の想定

既存の発電設備・ボイラーには手を加えない。追加する設備：

- ・ 蒸気ヘッダーからの分岐配管・調節弁（コントロールバルブ）
- ・ 水蒸気爆砕装置（専用圧力容器・急速開放弁）
- ・ フィルタープレス等（固液分離）
- ・ ジャケット付き攪拌槽（酵素糖化・発酵）
- ・ 蒸留塔
- ・ ロータリードライヤー（リグニン乾燥・排ガス熱風活用）
- ・ リグニンバッファホッパー
- ・ 異物除去装置（磁選機・渦電流選別機）

6-2. FIT 終了後の転用シナリオ

FIT 期間終了が近づく発電所にとって、バイオエタノール製造ラインの付設は新たな収益源となる。発電事業を継続しながらエタノール製造を行う複合運用が基本形。

6-3. 規制対応

エタノール製造には以下の許認可対応が必要。

規制	所管	対応時期
燃料用アルコール製造免許（酒税法）	税務署	事業開始前
FIT 認定への影響確認	経済産業省	設計段階
大気汚染防止法（VOC 排出）	環境省	設備設計段階

7. 概念図

添付：biomass_cascade_concept_v1.svg (CC BY-SA 4.0)

8. 実装パートナーを求めています

この仕様書は CC BY-SA 4.0 で公開するオープンな設計概念です。誰でも自由に実装できます。

実装を検討するメーカー・事業者にとり組みんでいただきたい領域：

- ・ 各工程設備（水蒸気爆砕装置・フィルタープレス・攪拌槽・蒸留塔）の既存プラントへの適用設計
- ・ 蒸気ヘッダー・調節弁システムの設計と施工
- ・ 各工程の温度・圧力・処理時間の最適化試験
- ・ 分流比率の最適解詳細試算

お問い合わせはこちら：info@librefoodsystem.org

本仕様書は CC BY-SA 4.0 ライセンスのもとで公開します。出典を明記すれば自由に使用・改変・再配布できます。改変した場合は同一ライセンスで公開してください。

参照資料

- ・ 日鉄エンジニアリング セルロースエタノール実証試験（2019 年完了）：エタノール収率 280L/t-dry
- ・ 農研機構 RT-CaCCO 法（草本系バイオマス向けアルカリ前処理技術）