

琵琶湖システム 2.0

～稲藁・葦・廃材から始まる滋賀発・循環革命～

Biwako System 2.0 — A Shiga-Based Circular Revolution

提案者：村方 純（滋賀県在住・洋菓子店経営）

専門：機械工学（熱エネルギーシステム・LCA）

提案日：2026年5月

はじめに——起点となる思い	6
第1章 なぜ今か——危機の現状.....	6
1-1 温暖化は既に臨界点を超えつつある	6
1-2 次の危機が迫っている	7
見えていない問題：海洋熱量（OHC）の加速	7
ENSO サイクルの変容——農業攪乱の加速	7
2040 年代に産業革命前比+2.0°C超——単年での到達シナリオ	7
1-3 日米政府間合意と四重リスク	7
1-4 都道府県規模マイクログリッドという構想	8
マイクログリッドの三層構造	8
第2章 琵琶湖システム 2.0 の全体像	10
2-1 既存の文脈を継承・発展させる	10
琵琶湖システム（原型）	10
ダイハツ×竜王町モデル（先行実績）	10
J&T 環境×仙台・小牧モデル（参照先進事例）	10
三モデルの補完関係.....	10
三社 LLP との戦略的接続（最重要）	10
2-2 三段階技術戦略：バイオ炭先行・エタノール実証並行・商用化	11
フェーズ 1 メイン：バイオ炭製造による農家収益化（実証済み技術・即着手）	11
フェーズ 1 サブ：NEDO 実証フィールドへの名乗り（種蒔き）	11
フェーズ 2：酵素コスト低下後のエタノール商用化.....	11
2-3 統合物質・エネルギーフロー	12
廃バイオプラ三段階リサイクルヒエラルキー	12
2-4 稼働率の平準化.....	12
2-5 野焼き代替とバイオ炭製造プラントの統合	12
2-6 炭素循環型食糧生産システムへの拡張	13
作物別・畜種別の適用可能性	13
循環ループの全体像.....	13
農機具燃料のバイオメタン化（フェーズ 3）——原料優先順位	14
稲藁・草ヨシの用途優先順位	14
第3章 経済性と優位性	15
3-1 収益の多層構造.....	15
3-2 FIT 依存からの脱却	15
3-3 廃熱活用によるコスト優位	15
3-4 CO ₂ 固定ポテンシャルと比較優位	16
CO ₂ 固定量の積み上げ試算（保守的条件・稲藁回収率 50%）	16
手段別コスト比較	16

第4章 政策提言：DAC 相当 CO2 固定支援制度	17
4-1 提言の核心	17
4-2 関連制度との接続	17
第5章 推進体制	18
5-1 コンソーシアム構成	18
5-2 各ステークホルダーへの訴求ポイント	18
地域バイオマス発電事業者	18
農協・農家	18
三社 LLP	19
5-3 デンマークモデルとの比較と日本型移行戦略	19
第6章 法規制対応ロードマップ	20
第7章 フェーズ別ロードマップ	21
フェーズ1（1～2年）：バイオ炭先行立ち上げ+NEDO 実証フィールド名乗り	21
バイオ炭製造（メイン・即着手）	21
NEDO 実証フィールド名乗り（並行・種蒔き）	21
フェーズ2（3～5年）：実証進行+バイオ炭本格展開+循環スキーム構築	21
フェーズ3（5年以降）：エタノール商用化+横展開・国際発信	22
第8章 まとめ—五方よしの現代版	23
フェーズ別エネルギー構成と自給率	23
カーボンネガティブへの条件と現在地	24
五方よしの現代版	25
売り手よし	25
買い手よし	25
世間よし	25
地球よし	25
未来よし	25
付録 数値根拠・計算の中身	26
付録A 稲藁野焼きの CO2 排出量（1トンあたり約 1.5 t-CO2）	26
付録B 滋賀県の稲藁発生量・回収量試算	26
付録C 野焼きゼロ化による CO2 排出回避量（約 20.7 万 t-CO2/年）	27
付録C-2 SSF 発酵 CO2→CaCO ₃ 鉱物固定（BECCS 相当）の質量収支	27
反応式	27
質量収支計算	27
付録D バイオ炭土壌固定による CO2 固定量（約 1.1 万 t-CO2/年）	28
付録E 森林換算（約 5.5 万 ha 相当）	28
付録F DAC コスト換算（約 980～1,960 億円/年）	29
付録G 稲藁 1t あたり野焼き CO2 と稲作面積あたり CO2 固定ポテンシャル	29

付録 H ヤンマーバイオ炭装置の転換効率	29
付録 I 琵琶湖ヨシ・道路刈り草のバイオマス量試算	29
付録 J 廃熱カスケード利用の熱収支設計 (NEDO 実証フィールド向け)	30
①リグニン乾燥 (ロータリードライヤー)	30
②水蒸気爆砕 (専用圧力容器)	30
③SSF (同時糖化発酵) ジャケット付き攪拌槽	30
④エタノール蒸留 (蒸留塔)	31
⑤炭酸化工程 (SSF 発酵 CO ₂ →CaCO ₃ 鉱物固定)	31
熱収支まとめ	31
工程フロー	32
温度帯による用途の棲み分け (物理的必然)	33
付録 K CO ₂ 固定手段のスケール感——排出回避が最優先である数値的根拠	33
前提: 20 年前の CO ₂ 水準に戻すために必要な除去量	33
バイオプラスチックへの炭素固定で賄うとしたら	34
本システムの設計方針への含意	34
付録 L 主要 CO ₂ 固定・排出回避技術の比較と本提案の位置づけ	35
バイオ由来プラスチックのリサイクル階層と CO ₂ 炭素固定価値	35
リグニン素材化の可能性と現段階での位置づけ	36
付録 M 大気エネルギーの変化——温度計に見えない気候変動の本質	36
「相対湿度が同じ」でも水蒸気は増えている	36
気候指標の比較 (1995 年→2024 年)	36
農業と生活への影響	37
【技術的補足: 比エンタルピーの計算根拠】	37
付録 N 熔融塩炉 (MSR) ——使用済み核燃料を資源に変える次世代炉	38
現在の開発状況と実現時期	38
本提案における位置づけ	39
付録 O 堆肥需給バランス試算——滋賀県の畜産堆肥は農地面積を十分に賄える	39
標準的な堆肥施用量と必要量	39
滋賀県の畜産からの堆肥生産量 (現状推計)	40
需給バランス	40
畜産連携拡大後の試算 (牛 2 倍・豚鶏 1.5 倍)	40
量的余裕はあるが、実運用には三つの課題がある	41
鶏糞・牛豚糞尿の役割分担	41
付録 P バイオプラスチック需給バランス試算——農業資材・食品パッケージへの充足率	41
バイオマス発電 1 拠点のバイオプラスチック生産能力	41
滋賀県の農業資材・食品パッケージのプラスチック需要 (推計)	42
需給バランス	42

フェーズ別生産能力と滋賀県充足率 43

※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。

はじめに——起点となる思い

環境への関心の原点は、滋賀の小学生なら誰もが経験する環境学習船「うみのこ」と、中学時代の環境教育にあります。琵琶湖という身近なカーネルが、環境問題を自分ごととして考える出発点になりました。高専・大学では機械工学を専攻し、伝熱・熱エネルギーシステム・LCA（ライフサイクルアセスメント）を学びました。学ぶほどに強くなっていったのが、「経済活動を炭素サイクル側に寄せたい」という思いです。

その思いを実現する手段として選んだのがパティシエという職業でした。食への危機感を伝えやすい媒体であること、農業大国フランスへの渡仏がしやすいこと、6次産業化・地方創生への接続があること、そして炭素サイクルの末端である食卓に立てること——複数の理由が重なった選択でした。

洋菓子店の経営が安定したら気候変動の情報発信を始めようと考えていた矢先、2025年の異常な暑さに強い違和感を覚えました。気候変動の実態を調べると、看過できない状況になっていました。このままでは食文化の維持が難しくなる——その危機感が、行動を早める決断につながりました。

毎日、素材の味と向き合う中で感じるがあります。果物の糖度や香りの変化、乳製品の風味のばらつき、小麦の製菓適性の低下——素材の高温障害による弊害を、菓子職人として現場で感じ始めています。パティシエと農家は同じ問題の被害者であり、同じ解決者になれます。

熱エネルギーシステムとLCAを学んだ専門的背景から見れば、廃熱のカスケード利用・稲藁バイオマスのライフサイクルCO₂固定・三段階リサイクルヒエラルキーという本提案の核心は、炭素サイクルを経済活動に組み込むための必然的な設計です。滋賀の地から、稲藁と廃材という誰も欲しがらない廃棄物を起点に、カーボンネガティブ農業圏を実現する循環システムを提案します。近江商人が三方よしと説いた哲学を現代に拡張し、売り手・買い手・世間・地球・未来の五方よしを体現する構想です。

第1章 なぜ今か——危機の現状

1-1 温暖化は既に臨界点を越えつつある

2024年の世界平均気温は産業革命以前比で1.60°C上昇し、パリ協定の1.5°C目標を単年で初めて超えました。過去10年間で観測史上最も気温の高い10年間となっており、2024年の日本の平均気温も観測史上最高を記録しています。

さらに深刻なのはフィードバック増幅の問題です。MDPI Climate誌（2026年2月）に掲載された査読済み論文では、フィードバックプロセスが2025年時点で温暖化全体の約54%を占める可能性が推計されています。水蒸気増加・海氷融解・永久凍土融解などの正のフィードバックが連鎖的に温暖化を加速しており、排出削減だけでなく大気中CO₂の積極的固定が急務であるという認識です。

1-2 次の危機が迫っている

気象庁の最新予測（2026年4月）では、2026年夏にエルニーニョ現象が発生する可能性が70%と評価されており、スーパーエルニーニョに発達する可能性を示す予測モデルも複数存在します。2027年は観測史上最高気温を再び更新する可能性が高く、産業革命前比で1.7°C超の可能性も指摘されています。

見えていない問題：海洋熱量（OHC）の加速

気温の数字だけでは温暖化の実態は見えません。地球が受け取る過剰な熱エネルギーの約90%は海洋に吸収されており、海洋熱量（OHC：Ocean Heat Content）の変化が気候システムの本物の「貯金残高」です。

2025年の全球上層2000mのOHCは2024年比で約23ゼタジュール（ZJ）増加し、観測史上最高を記録しました。この1年間の増加量だけで、2023年の全人類の総エネルギー生産量の約39倍に相当します。さらに海洋の熱吸収率は1960～2025年の平均0.14 W/m²/10年から2005～2025年には0.32 W/m²/10年へと倍以上に加速しており、温暖化のペースそのものが速まっています。

ENSO サイクルの変容——農業攪乱の加速

気候モデルはENSOの強度が今世紀末にかけて増大することを一貫して予測しています。強いエルニーニョはアメリカのコーンベルトに干ばつ・高温をもたらし、日本には記録的猛暑・豪雨・夜温高温障害を引き起こします（付録M参照）。

2040年代に産業革命前比+2.0°C超——単年での到達シナリオ

Hansenらは現在の温暖化加速率を0.31°C/10年と推計しており、2025年の基盤気温（ENSO効果除去後）約+1.38°Cに15年分の上昇を加えると2040年の基盤気温は約+1.85°Cに達します。2040年頃に同規模以上のエルニーニョが発生すれば、その年の単年気温は+2.0°Cを容易に超えます。+2.0°Cという水準は農業・水文・食料システムへの影響が1.5°Cと比べて質的に異なる臨界点です。

出典：James Hansen et al. '2026 On Track for Warmest Year' (2026) / IAP/CAS 'Ocean Heat Content Sets Another Record in 2025' (2026)

1-3 日米政府間合意と四重リスク

旭化成・三井化学・三菱ケミカルの三社は2026年1月、西日本エチレン生産体制のグリーン化に向けた有限責任事業組合（LLP）を設立し、旭化成が開発中のRevolfin™技術（バイオエタノール→エチレン・プロピレン）を用いて2034年度の商用生産開始を目指す基本契約を締結しました。

2025年7月22日の日米関税交渉合意のホワイトハウスのファクトシートには、日本がとうもろこし・大豆・バイオエタノール・SAFを含む農産物を80億ドル（約1兆2000億円）購入することが明記されました。この政府間合意は、三社LLPのRevolfin™向けエタノール原料がアメリカ産とう

もろこし由来に傾斜する構造的な圧力を意味します。

リスク① 高温による受粉不良

とうもろこしは受粉期の高温に極めて弱く、スーパーエルニーニョはアメリカのコーンベルトに干ばつと高温をもたらす傾向があり、受粉不良と干ばつが重なる最悪のシナリオが現実味を帯びています。

リスク② 食料・飼料との競合

日本のとうもろこし輸入量は年間約 1600 万トン以上で、その 65%は飼料として消費されています。温暖化で世界的な収量が低下すれば、食料・飼料が優先されエタノール原料の調達が最初に犠牲になるリスクがあります。

リスク③ 水の奪い合い

AI データセンターの年間水使用量は米国で 660 億リットルと 9 年で 3 倍に増加。農業灌漑・データセンター・フラッキング・生活用水の四者が限られた水資源を奪い合う構図が深刻化しています。農業は政治力が最も弱く最初に割を食います。

リスク④ 地政学リスク

アメリカ産とうもろこしへの依存は、貿易政策・気候災害・港湾問題など一点集中型のサプライチェーンリスクを内包しています。政府間合意は政権交代や外交情勢により一夜で変わり得るものでもあります。

琵琶湖の水は誰にも奪われません。稲藁は水を奪わない。琵琶湖システム 2.0 は政府間合意の脆弱性を分散する国産調達源として機能します。

1-4 都道府県規模マイクログリッドという構想

琵琶湖システム 2.0 はバイオエタノール・炭素固定・農業循環の提案にとどまりません。エネルギー・食料・物質の三つの流れを県域で閉じるという、都道府県規模のマイクログリッド構想です。

マイクログリッドの三層構造

- ・ エネルギー層 — バイオマス発電（電力）・バイオメタン（熱・農機具燃料）・グリーンアンモニア（余剰エネルギー貯蔵・輸送）が県内で循環する。化石燃料・輸入電力への依存を段階的に低下させる。
- ・ 食料層 — 肥料三成分（N・P・K）の地域自給・地産地消型畜産・低コスト有機農業への遷移により、輸入依存の食料サプライチェーンリスクを県域で分散するとともに、より安全な農畜産物へのシフトを図る

- ・ 物質層 — バイオプラスチック（農業資材・食品パッケージ）を稲藁・廃材由来のエタノールから製造し、マテリアルおよびケミカルリサイクルで長期にわたり炭素を固定する

輸送部門の移行期間と農業圏の役割

乗用車・緊急車両・重輸送という輸送部門のカーボンニュートラル化には、MSR等の次世代電源あるいは地熱発電の本格開発が実現するまで移行期間が不可避である。乗用車のEV化は安定した大規模電力供給を前提とし、緊急車両や重輸送の内燃機関を代替燃料で完全に置き換えることは現段階では非現実的である。

地熱はベースロード電源として日本の地形的ポテンシャルが高く、国立公園規制の緩和と温泉事業者との合意形成が進めば輸送部門の電化を前倒しできる可能性を持つ。地熱の開発速度はMSR商用化とともに、この移行期間の長さを左右する重要変数である。

この移行期間に農業圏が果たす役割がある。琵琶湖システム2.0が農業圏で年間21.9万t-CO₂を正味除去することは、輸送部門が次世代電源を待つ間の炭素排出を相殺する橋渡しとして機能する。農業圏をカーボンネガティブOSにすることで、社会全体のカーボンニュートラルに向けた「時間を買う」——これが琵琶湖システム2.0の戦略的役割である。

都道府県は農政・エネルギー政策・廃棄物行政・農業試験場・土地利用計画のすべてを一つの意思決定圏に収められる、実行可能な最小単位です。滋賀県は琵琶湖という全国区の資産・稲作面積・バイオマス発電施設・農研機構との連携基盤が揃っており、全国で最初にこのモデルを実証できる条件を持っています。

第2章 琵琶湖システム 2.0 の全体像

2-1 既存の文脈を継承・発展させる

琵琶湖システム（原型）

2022年に世界農業遺産として認定された琵琶湖システムは、水田農業と琵琶湖生態系の持続的共存モデルとして国際的評価を得ています。

ダイハツ×竜王町モデル（先行実績）

竜王町は2023年1月に滋賀県の市町村として初めてバイオマス産業都市に認定されました。NEDOが2021年から助成したダイハツのバイオメタン・液肥製造事業は、食品廃棄物・農業残渣からバイオメタンと液肥を製造し地域に還元する先進モデルとして全国的注目を集めています。

J&T 環境×仙台・小牧モデル（参照先進事例）

J&T 環境株式会社は、仙台市において国内初のプラ新法再商品化計画第1号認定を取得し、年間約1万3,000トン进行处理するワンストップリサイクルを実現。小牧市では食品廃棄物から1日最大120トンを受け入れ、バイオガス発電（1,100kW）・発酵残渣の肥料化・容器プラのサーマルリサイクルを一体で行う食品リサイクルモデルを展開しています。

三モデルの補完関係

ダイハツ竜王モデル：近江牛糞等畜産系	→	メタン・液肥
J&T 環境型モデル	：	食品廃棄物系 → バイオガス発電・肥料・マテリアルリサイクル
琵琶湖システム 2.0：稲藁・木質廃材系	→	エタノール・グリーン基礎化学品

三社 LLP との戦略的接続（最重要）

2026年1月、旭化成・三井化学・三菱ケミカルの三社は西日本エチレン生産体制のグリーン化に向けた LLP を設立しました。Revolefin™技術によりバイオエタノールからエチレン・プロピレン等のグリーン基礎化学品を製造し、2034年度の商用生産開始を目指しています。

滋賀県（稲藁バイオエタノール製造）
↓ 約 60km
OPC 泉北工業所（大阪府高石市）
三社 LLP・Revolefin™商用プラント
2034年グリーン基礎化学品商用生産開始

滋賀県から大阪府高石市まで約60kmという地理的近接性は、国産バイオエタノールの安定供給源として最適な立地です。

2-2 三段階技術戦略：バイオ炭先行・エタノール実証並行・商用化

フェーズ1メイン：バイオ炭製造による農家収益化（実証済み技術・即着手）

もみ殻バイオ炭製造は JA カントリーエレベーターへの設置が現実的な出発点です。ヤンマーエネルギーシステムが NEDO グリーンイノベーション基金のもとで開発した高効率もみ殻バイオ炭製造装置は JA ぎふでの実証済みであり、即着手できます。

フェーズ1サブ：NEDO 実証フィールドへの名乗り（種蒔き）

セルロースエタノール製造は現状、酵素コストが商用採算の最大のボトルネックです。地域バイオマス発電事業者（廃熱・土地・廃材チップを保有）を NEDO 実証フィールドとして位置づけ、農研機構主体の実証事業に場所を提供する形で関与します。設備費は国が負担し、発電事業者の自己リスクを最小化します。

フェーズ2：酵素コスト低下後のエタノール商用化

酵素コストの低下見通しが立った段階で、実証期間中に蓄積したノウハウを活かし廃材系統・稲藁系統（RT-CaCCO）を並行して商用稼働させます。三社 LLP Revolefin™の商用生産開始（2034年）に間に合わせる設計です。

フェーズ1メイン（即着手・採算確保）
もみ殻 → バイオ炭製造（JA×ヤンマー）
→ Jクレジット・農地還元・農家収益化

フェーズ1サブ（種蒔き・リスクなし）
発電事業者の廃熱・土地 → NEDO 実証フィールド提供
→ 設備費国負担・自己リスクなし

フェーズ2（酵素コスト低下後・商用化）
廃材系統＋稲藁系統を並行商用稼働
→ 三社 LLP Revolefin™商用生産（2034年）に間に合う

2-3 統合物質・エネルギーフロー

廃バイオプラ三段階リサイクルヒエラルキー

第一優先：マテリアルリサイクル（J&T 環境）

→ 炭素をプラスチックとして固定継続・CO₂ 排出ゼロ

第二優先：油化型ケミカルリサイクル（三菱ケミカル×ENEOS/Revolfin™還流）

→ ナフサ→新たなプラスチックへ。バイオ由来炭素を材料循環に維持

※ レゾナック×マイクロ波化学（GI 基金採択・直接オレフィン化）も同等

第三優先：ガス化型ケミカルリサイクル（レゾナック KPR）

→ 化石由来プラ、または分別困難な混合廃プラ（バイオ由来混在含む）

※ 分別可能なバイオ由来プラへの単独適用は不適：

CO₂ がドライアイス・炭酸飲料に転用され数日～数週間で大気に戻るため

光合成固定炭素の価値が消滅する。

ただし分別困難な混合廃プラにバイオ由来が混在する場合は、

サーマルリサイクルより水素回収のあるガス化を優先する。

最終手段：サーマルリサイクル（バイオマス発電）

→ 上記三手段で処理できなかった残余のみ

2-4 稼働率の平準化

稲藁だけでは収穫期（9～10月）に原料が集中します。複数原料を組み合わせることで年間75～80%の稼働率を確保します。通年ベース：間伐材・林地残材・竹・木質廃材・道路刈り草。季節原料：琵琶湖ヨシ（1～3月）・麦わら（5～7月）・稲藁（9～10月）。

2-5 野焼き代替とバイオ炭製造プラントの統合

稲藁1トンを野焼きすると約1.5トンのCO₂が大気に放出されます。そのCO₂が気温上昇を加速させ、翌年の田んぼで米の白未熟粒や品質低下を引き起こします。つまり野焼きは、農家が自らの首を絞めるサイクルに加担していることとなります。

「野焼きで燃やした稲藁1トンから約1.5トンのCO₂が大気に放出されます。そのCO₂が気温を上げ、翌年のあなたの田んぼの米を白未熟粒にします。稲藁を燃やさずに渡していただければ、炭素は製品の中に閉じ込められ大気に戻りません。高温障害の悪化を少しでも抑え、あなたの農業を守るために一緒にCO₂を固定しましょう。」

2-6 炭素循環型食糧生産システムへの拡張

作物別・畜種別の適用可能性

飼料原料	牛	豚	鶏	備考
稲藁・麦藁	◎粗飼料	×	×	反芻動物のみ消化可能。和牛粗飼料として前例あり
飼料用米	○エネルギー源	○エネルギー源	○エネルギー源	配合比率に上限あり（鶏 30～40%目安）。国の直接支払交付金対象
飼料用大豆	○タンパク源	◎タンパク源	◎タンパク源	輸入大豆粕の代替として最も有望。規格外品・飼料専用品種の活用が現実的

循環ループの全体像

水田・畑

稲藁・麦藁 → 牛の粗飼料

飼料用米 → 牛・豚・鶏のエネルギー源

飼料用大豆 → 豚・鶏のタンパク源

↓

畜産（牛・豚・鶏）

↓

糞尿 → 堆肥

↓

水田・畑への還元（化学肥料削減）

農機具燃料のバイオメタン化（フェーズ3）——原料優先順位

原料	メタン収率	優先順位	本提案との関係
草・ヨシ（年間約18,000t）	中（約200～250 m ³ /t-VS）	★★★最優先	RT-CaCCO ラインの季節補完が第一。余剰分をエタノール→バイオメタンの順で活用
牛糞尿・豚糞尿	高（牛糞：約200～300 m ³ /t-VS）	★★優先	含水率高くメタン発酵に最適。草ヨシとのコファーマンテーションで収率向上
リグニン残渣	中（約250～300 m ³ /t-VS）	将来	将来的な余剰分・競合なし
稲藁	中	③最後	①牛の粗飼料→②エタノール→③余剰分のみバイオメタン
廃材	中	—	バイオプラスチック優先・農機具燃料には回さない
鶏糞	—	—	含水率低くメタン発酵不向き・発酵堆肥として圃場還元（付録O）

稲藁・草ヨシの用途優先順位

稲藁の配分優先順位

- ①牛の粗飼料（反芻動物向け・地産地消型畜産の基盤）
- ②エタノール（セルロース糖化→バイオプラスチック）
- ③バイオメタン（①②で余った分のみ）

草・ヨシの配分優先順位

- ①RT-CaCCO ラインの季節補完（稲藁端境期）
- ②エタノール（季節補完後の余剰分）
- ③バイオメタン（①②で余った分→農機具燃料+三社LLP）

第3章 経済性と優位性

3-1 収益の多層構造

単一の収益源に依存しないことがリスクヘッジになります。

収益源	主体	備考
エタノール売却	バイオマス発電事業者	三社 LLP・OPC 泉北工業所 (Revolefin™) への供給
グリーン基礎化学品販売	三社 LLP	ポリエチレン・PP・PET 等幅広い製品展開
売電収益	バイオマス発電事業者	既存 FIT+新規
CaCO ₃ 農地還元	バイオマス発電事業者	農家との関係構築
バイオ炭販売・農地施用	農協	野焼き代替・土壌改良
Jクレジット (エタノール等)	各主体按分	CO ₂ 固定の経済価値化
DAC 相当支援制度 (提言)	農家・製造事業者	後述

3-2 FIT 依存からの脱却

バイオマス発電事業者は FIT 価格への依存が高く、制度変更リスクを抱えています。エタノール製造という新たな収益柱の追加は、この構造的脆弱性への対策として刺さります。

3-3 廃熱活用によるコスト優位

蒸留工程は従来エタノール製造コストの最大のボトルネックでした。既存発電の廃熱を蒸留・乾燥・CaCCO 加熱に還流することで、エネルギーコストが大幅に削減され事業採算性が改善します。

3-4 CO2 固定ポテンシャルと比較優位

CO2 固定量の積み上げ試算（保守的条件・稲藁回収率 50%）

固定手段	CO2 固定量 (t-CO2/年)	算出根拠
野焼きゼロ化（排出回避）	約 20.7 万	回収稲藁 13.8 万 t × 1.5 t-CO2/t
バイオ炭土壌固定	約 1.1 万	もみ殻等 1 万 t 処理・IPCC ガイドライン準拠
SSF 発酵 CO2→CaCO ₃ 鉱物固定（BECCS 相当）	約 900t	エタノール 1,444t × 0.957（化学量論比）→ Ca(OH) ₂ 全量炭酸化分
合計（保守試算）	約 21.9 万	

21.8 万 t-CO2/年 ÷ 4 t-CO2/ha/年（日本の森林平均吸収量） = 約 5.5 万 ha の森林が吸収する量に相当

手段別コスト比較

手段	CO2 1 トン固定コスト	副次的便益
DAC（直接空気回収）	4.5~9 万円/t-CO2	なし（固定のみ）
日本の森林	管理費のみ（新植は高コスト）	木材・生態系サービス
琵琶湖システム 2.0	DAC 以下を目標	製品・雇用・農村維持・食文化継承

第 4 章 政策提言：DAC 相当 CO2 固定支援制度

4-1 提言の核心

直接空気回収（DAC）の CO2 固定コストは現状\$300~600/t-CO2（約 4.5~9 万円/t-CO2）です。本システムは同等以下のコストで CO2 を固定しながら、製品・エネルギー・雇用・農村維持を同時に生み出します。

CO2 固定手段	21.8 万 t 固定に要するコスト/ 年	得られるもの
DAC	約 980~1,960 億円	CO2 固定のみ
琵琶湖システム 2.0	DAC 以下の支援で実現	CO2 固定+製品+雇用+農村維持+ 食文化継承

DAC に 1,000 億円規模の国費を投じるより、同額を本システムへの支援に振り向ければ、CO2 固定に加えてグリーン基礎化学品の国産化・農業廃棄物の全量活用・農村雇用の創出・琵琶湖保全という多層の政策目標を同時達成できます。予算効率は比較にならない。

4-2 関連制度との接続

- ・ Jクレジット制度（環境省）：各工程の CO2 削減量を主体別に計上
- ・ 農山漁村活性化交付金（農水省）：農業廃棄物・農村振興
- ・ グリーンイノベーション基金（NEDO）：技術開発・実証
- ・ HtA 支援事業（経済産業省）：三社 LLP が採択済・琵琶湖システム 2.0 との連携軸
- ・ バイオマス産業都市（農水省・経済産業省・環境省）：竜王モデルの横展開

第5章 推進体制

5-1 コンソーシアム構成

【技術】農研機構：CaCCO 法・RT-CaCCO 法のライセンス提供・実証事業への技術支援

【製造】旭化成・三井化学・三菱ケミカル（三社 LLP）：Revolefin™技術によるバイオエタノール→グリーン基礎化学品。OPC 泉北工業所（大阪府高石市）に 2030 年集約・2034 年商用生産開始

【運営】地域バイオマス発電事業者：稲藁・廃材調達、CaCCO 前処理、エタノール製造、発電

【循環 M】J&T 環境株式会社（JFE エンジニアリンググループ）：食品廃棄物バイオガス発電・肥料化。バイオプラマテリアルリサイクル第一優先

【循環 C-1】三菱ケミカル×ENEOS：超臨界水油化（HydroPRS™）による廃プラ油化→ナフサクラッカー還流。バイオ由来プラスチックの炭素循環維持に最適

【循環 C-2】レゾナック株式会社：CirculaC（KPR）ガス化ケミカルリサイクル。化石由来・分別困難プラ専用。炭酸ガス用途の短命性からバイオ由来プラへの適用は限定的

【農協・JA】もみ殻・稲藁の集荷・供給。カントリーエレベーター活用バイオ炭製造

【設備】ヤンマーエネルギーシステム：高効率もみ殻バイオ炭製造装置の供給・技術サポート

【回収】滋賀県内自治体：バイオプラ・食品廃棄物の一括回収スキーム運営

【調整】滋賀県：県全体の政策文脈での位置づけ・横断的調整

【資金】NEDO・環境省・農水省・経済産業省：グリーンイノベーション基金・HtA 支援事業・バイオエコノミー関連公募

5-2 各ステークホルダーへの訴求ポイント

地域バイオマス発電事業者

第一層（リスクなし）：NEDO 実証フィールドとして名乗りを上げることで、廃熱・土地・廃材チップを提供するだけで設備費・酵素費用は国（NEDO）が負担。発電事業者の自己リスクはほぼゼロ。

第二層（中期・差別化）：実証期間中に廃材系統・稲藁系統（RT-CaCCO）両技術のノウハウを先行取得。酵素コスト低下段階で商用化移行時、実証実績を持つ事業者は後発との差別化が決定的。

第三層（長期・需要確定）：三社 LLP の Revolefin™商用生産開始（2034 年）という確実な需要先が存在。FIT 期間終了後の収益多様化という中長期の経営課題への布石。

農協・農家

稲藁・もみ殻の有償買取（現状ほぼゼロ）、CaCO₃・バイオ炭による野焼き代替と土壌改良の向上、Jクレジット収益の按分という多層の恩恵。カントリーエレベーターへのバイオ炭製造装置設置という具体的な接点で農協を推進体制に組み込みます。

三社 LLP

国産バイオエタノールの安定調達先確保という最重要課題に対して、滋賀県から大阪府高石市 OPC 泉北工業所まで約 60km という地理的近接性が輸送コストと供給安定性の両面で圧倒的な優位をもたらします。

5-3 デンマークモデルとの比較と日本型移行戦略

デンマークでは農家組合が主体のバイオガス事業が成功していますが、日本では農家の零細・分散構造や地域暖房インフラの欠如により直接移植は困難です。

- ・ フェーズ 1：JA・バイオマス発電事業者が実務主体（現実的な出発点）
- ・ フェーズ 2：農協・自治体が運営参加（意思決定への農家参画）
- ・ フェーズ 3：営農法人・地域主体との連携深化（地域実情に即した分散型モデルへ）

第 6 章 法規制対応ロードマップ

エタノール製造には複数の法規制が関わります。事業開始前に関係省庁との事前調整を組み込むことが不可欠です。

法律	所管省庁	必要な対応	タイミング
アルコール事業法	経済産業省	製造・販売許可（90 度以上が対象）	事業開始前
消防法	消防署（市町村）	危険物製造所設置許可・甲種危険物取扱者選任（400L 以上）	設備設置前
酒税法	国税庁	変性剤添加による変性アルコール化で課税回避	製造設計段階
大気汚染防止法	環境省	発酵・蒸留工程の VOC 排出管理	設備設計段階
化審法	経済産業省	製造数量届出	製造開始後毎年

実証段階では産業競争力強化法に基づく規制のサンドボックス制度を活用し、一部規制の特例適用を申請することで初期ハードルを下げられます。

第7章 フェーズ別ロードマップ

フェーズ1 (1~2年) : バイオ炭先行立ち上げ+NEDO 実証フィールド名乗り

バイオ炭製造 (メイン・即着手)

- ・ 滋賀県への打診 (全体像の共有)
- ・ JA 北びわこ等への打診 (カントリーエレベーター設置協議)
- ・ ヤンマーエネルギーシステムとの連携協議 (JA ぎふ先行事例を参照)
- ・ もみ殻バイオ炭製造装置の設置・稼働
- ・ Jクレジット方法論の整備申請 (環境省) ・ 農家収益還元スキーム確立
- ・ 野焼きゼロ化への農家合意形成開始

NEDO 実証フィールド名乗り (並行・種蒔き)

- ・ バイオマス発電プラント事業者への公開打診
- ・ 農研機構との技術連携協議・CaCCO ライセンス・共同研究交渉
- ・ NEDO グリーンイノベーション基金・HtA 支援事業への申請準備
- ・ 滋賀県・農協との稲藁調達スキーム協議開始

フェーズ2 (3~5年) : 実証進行+バイオ炭本格展開+循環スキーム構築

- ・ NEDO 実証プラント稼働 (廃材系統・稲藁 RT-CaCCO 系統を並行実証)
- ・ J&T 環境仙台・小牧モデルの滋賀版稼働 (食品廃棄物リサイクル)
- ・ 三菱ケミカル×ENEOS 油化ラインとの廃バイオプラ処理連携検討 (バイオ由来炭素の材料循環維持)
- ・ レゾナック KPR との連携は化石由来・分別困難プラに限定して接続
- ・ DAC 相当支援制度の政策提言 (環境省・農水省・経産省)
- ・ バイオ炭製造を県内複数 JA カントリーエレベーターへ横展開

フェーズ3（5年以降）：エタノール商用化＋横展開・国際発信

- ・ 酵素コスト低下の見通しが立った段階でエタノール商用稼働を判断
- ・ 三社 LLP との長期供給契約締結・CaCO₃ 農地還元スキーム本格化
- ・ 三社 LLP Revolefin™商用生産開始（2034年）への国産エタノール本格供給
- ・ 全国モデルとしての横展開（稲作地帯：新潟・秋田・山形・北海道等）
- ・ 農家組合共同出資によるデンマーク型への移行・カーボンネガティブ農業圏の実現

第 8 章 まとめ——五方よしの現代版

琵琶湖システム 2.0 の本質は、化石資源に依存しないカーボンネガティブな食糧生産システムの設計図です。

フェーズ別エネルギー構成と自給率

フェーズ	主エネルギー源	県内自給率（目安）	時間軸
フェーズ 1	バイオマス発電（既存）＋ 系統電力	低（FIT 依存）	今すぐ
フェーズ 2	バイオマス＋バイオメタン ＋水力	中（30～50%）	2028～2034 年
フェーズ 3	上記＋グリーンアンモニア ＋再エネ拡大	高（50～80%）	2034～2040 年
フェーズ 4	上記＋小型 MSR	完全自給圏	2040 年代～

輸送部門の移行期間と農業圏カーボンネガティブの社会的役割

なお輸送部門——乗用車・緊急車両・重輸送——については、MSR あるいは地熱の本格開発が実現するまで化石燃料への依存が続く移行期間が不可避である。乗用車の EV 化は大規模な安定電力供給を前提とし、緊急車両や重輸送の内燃機関を代替燃料で完全に置き換えることは現段階では非現実的である。

地熱はベースロード電源として日本の地形的ポテンシャルが高く、国立公園規制の緩和と温泉事業者との合意形成の進展が移行期間の短縮を左右する重要変数である（1-4 節参照）。

農業圏が正味カーボンネガティブを達成することは、輸送部門が MSR・地熱を待つ間の炭素排出を相殺する橋渡しとして機能する。フェーズ 1～4 を通じた農業圏の段階的カーボンネガティブ化は、農業・食糧圏の課題解決にとどまらず、社会全体のカーボンニュートラルに向けた「時間を買う」戦略的役割を担っている。

カーボンネガティブへの条件と現在地

条件	フェーズ1	フェーズ2	フェーズ3	フェーズ4
野焼きゼロ化（排出回避）	✓	✓	✓	✓
バイオ炭による永続固定	✓	✓	✓	✓
バイオプラスチックによる中期固定	△種蒔き	✓	✓	✓
畜産糞尿・ヨシのバイオメタン化	△準備	✓	✓	✓
地産地消型畜産（飼料循環）	△準備	✓	✓	✓
低炭素電力によるシステム運用	△系統依存	△	✓	✓
グリーンアンモニア（窒素肥料N）	X	△接続準備	✓	✓
下水リン回収（リン肥料P）	X	△協議	✓	✓
リグニン素材化（長期炭素固定）	X	△検討	✓	✓
県域エネルギー完全自給	X	X	△	✓
高温工程の完全オフグリッド化	X	X	△	✓
正味カーボンネガティブ	近傍	達成圏	✓	✓（完全）

五方よしの現代版

売り手よし

バイオマス発電事業者・化成業者の収益多様化と FIT 依存からの脱却。畜産農家の輸入飼料コスト削減と地域ブランド化。稲作農家の稲藁・もみ殻収益化と Jクレジット収益。

買い手よし

バイオプラスチック利用者・社会の CO2 削減とサプライチェーンリスク解消。地産地消型畜産物・地域産飼料で育てた食の消費者価値。

世間よし

農村雇用創出・野焼き解消・琵琶湖保全・地域エネルギー自立・飼料自給率向上・下水リン有効活用による水環境改善。

地球よし

CO2 の積極的固定・カーボンネガティブへの段階的到達・化石炭素を生物圏に引き込む循環の確立・輸入リン鉱石依存の削減。

未来よし

リサイクルループの確立・N・P・K 三成分の地域循環・次世代への持続可能な農業圏の継承・カーボンネガティブな食糧生産システムの国際モデル化。

子供たちに、豊かな食文化を。そして持続可能な炭素循環の未来を。

世界農業遺産を炭素循環型食糧生産の国際モデルに進化させる——滋賀発、日本発の挑戦を始めます。

付録 数値根拠・計算の中身

本文中に示した主要数値の算出根拠を示します。以下の数値は 2026 年 5 月時点の公開データに基づきます。

付録 A 稲藁野焼きの CO2 排出量 (1 トンあたり約 1.5 t-CO2)

- ・ 稲藁の炭素含有率：約 40～45% (乾重ベース・農研機構データ)
- ・ 野焼き時の燃焼効率：約 85～90% (不完全燃焼分を考慮)
- ・ CO2 換算係数：炭素 1kg が完全燃焼すると $44/12 \approx 3.67$ kg-CO2 を生成

$$\begin{aligned} & \text{稲藁 } 1\text{t} \times \text{炭素含有率 } 0.42 \times \text{燃焼効率 } 0.88 \times \text{CO2 換算 } 3.67 \\ & \approx 1.36 \text{ t-CO2} \end{aligned}$$

加えて CH4・N2O の温室効果ガス (GWP 換算) が約 0.1～0.15 t-CO2 相当加算されるため、合計で約 1.5 t-CO2/t (IPCC 農業廃棄物燃焼排出係数と整合)。

出典：IPCC 2006 Guidelines for National GHG Inventories, Volume 4 / 農林水産省「農業分野の温室効果ガス排出・吸収量」

付録 B 滋賀県の稲藁発生量・回収量試算

項目	数値	出典
滋賀県水田面積	46,200 ha	農林水産省作物統計・令和 6 年
水稲 1ha あたり稲藁発生量	約 6 t/ha (乾重)	農水省バイオマス活用推進基本計画
年間稲藁発生総量	$46,200 \times 6 = 27.7$ 万 t	上記より算出
現実的回収率	50%	すき込み残置・農家合意必要分を考慮した保守値
回収量	$27.7 \text{ 万} \times 0.5 = 13.8$ 万 t	上記より算出

付録 C 野焼きゼロ化による CO2 排出回避量（約 20.7 万 t-CO2/年）

回収稲藁量 13.8 万 t × 野焼き排出係数 1.5 t-CO2/t
= 20.7 万 t-CO2/年

付録 C-2 SSF 発酵 CO2→CaCO₃ 鉱物固定（BECCS 相当）の質量収支

SSF 発酵工程の排ガスはほぼ純 CO₂（95～99%）であり、大気から CO₂ を濃縮する DAC と異なり、追加の分離・濃縮工程なしに直接炭酸化反応に利用できる。RT-CaCCO 前処理で消費した Ca(OH)₂ を発酵 CO₂ で炭酸化することで、システム内で CO₂ を鉱物（CaCO₃）として永続固定する自己完結ループが成立する。

反応式

$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
(消石灰) (発酵 CO₂) (炭酸カルシウム) 常温・常圧で進行

質量収支計算

【SSF 発酵 CO₂ 発生量】

年間エタノール生産量：1,830kL × 0.789 kg/L = 1,444 t/年

CO₂/エタノール質量比（化学量論）：44/46 ≒ 0.957

発酵 CO₂ 発生量：1,444 × 0.957 ≒ 約 1,380 t-CO₂/年

【RT-CaCCO Ca(OH)₂ 使用量】

バイオマス処理量：65 t/日 × 310 日 = 20,150 t/年

Ca(OH)₂ 添加率：7.5%（RT-CaCCO 標準条件）

Ca(OH)₂ 使用量：20,150 × 0.075 ≒ 1,511 t/年

【炭酸化に必要な CO₂ 量】

Ca(OH)₂ 74g + CO₂ 44g → CaCO₃ 100g

必要 CO₂：1,511 × (44/74) ≒ 898 t-CO₂/年

【収支】

発酵 CO₂（1,380t） > 炭酸化必要量（898t） → 余剰約 482 t-CO₂/年

余剰分：ドライアイス製造・CO₂ 施用（施設園芸）への転用候補

※ 炭素固定効果なし（光合成後に大気へ戻る）・CO₂ 固定量には算入しない

※ 地中貯留も可能だが 480t 規模では圧縮・注入設備の固定費が不釣り合い

【生成 CaCO₃量】

$898 \text{ t-CO}_2 \times (100/44) \approx 2,041 \text{ t-CaCO}_3/\text{年} \rightarrow \text{農地還元}$

【炭素固定の主役】CaCO₃鉱物固定（約 898 t-CO₂/年）は地質学的タイムスケールで安定。DAC+地中貯留と同等の永続性を追加エネルギーなしで実現する BECCS 農村実装版。【余剰 CO₂ の位置づけ】余剰 CO₂（約 482 t-CO₂/年）のドライアイス製造・施設園芸 CO₂ 施用は炭素固定効果なし（光合成後に大気へ）。農業生産性向上と収益化を目的とした転用であり、CO₂ 固定量には算入しない。地中貯留も原理的に可能だが、この規模では圧縮・輸送・注入設備の固定費が不釣り合いであるため現段階では採用しない。

付録 D バイオ炭土壌固定による CO₂ 固定量（約 1.1 万 t-CO₂/年）

固定量 = バイオ炭投入量(t) × Fc × Fperm × (44/12)

パラメータ	値	内容
バイオ炭投入量	1 万 t (乾重)	もみ殻・リグニン残渣等からの製造量（保守値）
Fc (有機炭素含有率)	0.38	もみ殻バイオ炭の標準値
Fperm (100 年後炭素残存率)	0.80	IPCC デフォルト値
CO ₂ 換算係数 (44/12)	3.67	炭素→CO ₂ 換算

$1 \text{ 万 t} \times 0.38 \times 0.80 \times 3.67 \approx 1.12 \text{ 万 t-CO}_2/\text{年}$

→ 約 1.1 万 t-CO₂/年

付録 E 森林換算（約 5.5 万 ha 相当）

CO₂ 固定合計 21.8 万 t-CO₂/年 ÷ 日本の森林平均吸収量 4 t-CO₂/ha/年

= 5.45 万 ha ≈ 約 5.5 万 ha

付録 F DAC コスト換算（約 980～1,960 億円/年）

21.8 万 t-CO₂ × DAC コスト 4.5～9 万円/t-CO₂
 = 981 億～1,962 億円/年
 → 約 980～1,960 億円/年

\$300 × 150 円 = 45,000 円 = 4.5 万円/t-CO₂
 \$600 × 150 円 = 90,000 円 = 9.0 万円/t-CO₂

付録 G 稲藁 1t あたり野焼き CO₂ と稲作面積あたり CO₂ 固定ポテンシャル

稲藁発生量 6 t/ha × 野焼き排出係数 1.5 t-CO₂/t = 9 t-CO₂/ha/年（野焼きゼロ化最大値）
 回収率 50%適用後：9 × 0.5 = 4.5 t-CO₂/ha/年

つまり野焼きをゼロにするだけで、水田 1ha は森林 1ha とほぼ同じ CO₂ 吸収効果を持つことになり
 ます。新たな植林不要で、すでにある農地が森林と同等の気候緩和機能を発揮できるという強力な
 メッセージです。

付録 H ヤンマーバイオ炭装置の転換効率

もみ殻投入 100 kg/h → バイオ炭 30 kg/h
 転換率 = 30 / 100 = 30%

出典：ヤンマーエネルギーシステム社資料（NEDO 成果報告）／JA ぎふ実証報告

付録 I 琵琶湖ヨシ・道路刈り草のバイオマス量試算

項目	数値	根拠
ヨシ原面積（現在）	約 100ha	淡海環境保全財団・滋賀県資料
地上部バイオマス	約 3～5 t/ha（乾重）	滋賀県・琵琶湖博物館によるバイオマス調査
年間発生量	約 300～500 トン（乾重）	上記より算出
ヨシ刈り時期	1～3 月	稲藁収穫期（9～10 月）と完全に外れる

ヨシ発生量 400t (中央値) × 排出係数 1.5 t-CO₂/t
 ≒ 約 600 t-CO₂/年 (火入れゼロ化による排出回避ポテンシャル)

滋賀県の道路延長は約 6,800km で、法面の年間刈取量は保守的に見ても数千トン規模と推定されます。現状は自治体が処分コストを負担しており、「処分費ゼロ+買取収入」という提案は行政側の経済的インセンティブになります。

出典：公益財団法人淡海環境保全財団「ヨシ原自慢」/滋賀県ホームページ「ヨシ刈り活動によるCO₂回収量の算定について」

付録 J 廃熱カスケード利用の熱収支設計 (NEDO 実証フィールド向け)

本付録は、地域バイオマス発電事業者 (3,550kW 規模) を NEDO 実証フィールドとして活用する際の廃熱利用可能量と必要熱量の収支試算です。

①リグニン乾燥 (ロータリードライヤー)

リグニン発生量：65t × 0.27 (リグニン比率) = 約 17.6t/日 (乾重)
 除去水分量：含水率 70%→15%への乾燥
 $17.6t \times (0.70 - 0.15) / (1 - 0.70) \approx 32t/\text{日}$
 蒸発熱：32,000kg × 2,260kJ/kg ÷ 86,400s ≈ 約 836kW
 熱源：ボイラー排ガス (120~150°Cに温度制御して投入)

②水蒸気爆砕 (専用圧力容器)

処理量：約 65t/日のセルロース系バイオマス
 高温高圧加熱 (160~180°C・0.62~1.00 MPa) → 急速圧力開放
 必要熱量：約 200~350kW (概算・要試験)

③SSF (同時糖化発酵) ジャケット付き攪拌槽

糖化フェーズ (P3 低圧蒸気 50~55°C・0.012~0.016 MPa)
 セルラーゼ系酵素 (市販品) によるセルロース→グルコース変換
 ↓ 冷却水で段階的に降温
 発酵フェーズ (P4 超低圧蒸気 30~40°C・0.004~0.007 MPa + 冷却水制御)
 処理時間：72~96 時間 (参照値)
 必要熱量：約 150~250kW (概算・要試験)

④エタノール蒸留（蒸留塔）

エタノール沸点：78℃

蒸留塔の熱消費：約 3.5MJ/L × 生産量

→ 年間 1,830kL 生産時：約 100～150kW

熱源：タービン排気蒸気（P2 中圧 80～100℃）

⑤炭酸化工程（SSF 発酵 CO₂→CaCO₃鉱物固定）

反応： $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ （常温・常圧・追加熱源不要）

設備：炭酸化タンク（Ca(OH)₂スラリーへの CO₂ 吹き込み）

CO₂ 供給源：SSF 発酵排ガス（95～99%純 CO₂・約 1,380 t-CO₂/年）

Ca(OH)₂消費量：約 1,511 t/年（バイオマス処理量の 7.5%）

CO₂ 消費量（炭酸化分）：約 898 t-CO₂/年

余剰 CO₂：約 482 t-CO₂/年 → ドライアイス製造・CO₂ 施用（施設園芸）転用候補

※ 炭素固定効果なし。CO₂ 固定量合計（898 t-CO₂/年）には含めない

CaCO₃生成量：約 2,041 t/年 → 農地還元（土壌 pH 改良・永続固定）

追加エネルギー：不要（常温・常圧反応）

熱収支まとめ

用途	必要熱量	利用熱源
①リグニン乾燥	約 836kW	ボイラー排ガス（独立系統）
②水蒸気爆砕	約 200～350kW	タービン排気蒸気（P1 高圧）
③SSF（糖化・発酵）	約 150～250kW	タービン排気蒸気（P3/P4）
④エタノール蒸留	約 100～150kW	タービン排気蒸気（P2 中圧）
タービン排気蒸気消費合計	約 450～750kW	
タービン排気蒸気保有熱	約 10,100kW	
タービン排気蒸気余剰	約 9,350～9,650kW （93%以上余剰）	
ボイラー排ガス消費（①）	約 836kW	
ボイラー排ガス保有熱	約 4,075kW	
ボイラー排ガス余剰	約 3,239kW（79%余剰）	

タービン排気蒸気（10,100kW）の93%以上が余剰であり、熱量がボトルネックになる心配はありません。設備規模・稼働台数の拡張に対して十分な熱的余裕があります。

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・粉碎

【水蒸気爆砕装置】 P1 高圧蒸気 160～180°C（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】 固液分離（P2 中圧蒸気 補助）

└─ リグニン → ロータリードライヤー（ボイラー排ガス 120～150°C）

└─ → 含水率 15%以下 → バッファホッパー → ボイラー燃料（連続供給）

└─ セルロース液 → SSF へ

↓

【ジャケット付き攪拌槽（SSF）】

P3 低圧蒸気（50～55°C）で糖化 → 冷却水で降温 → P4 超低圧（30～40°C）で発酵

処理時間：72～96 時間

└─ 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°C）

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

└─ Ca(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） → ドライアイス製造・CO₂ 施用（施設園芸）収益化

└─ ※ 炭素固定効果なし（光合成後に大気へ）

└─ RT-CaCCO への Ca(OH)₂ 必要量を発酵 CO₂ で完全炭酸化（自己完結ループ）

温度帯による用途の棲み分け（物理的必然）

温度帯による用途の棲み分け（物理的必然）

発電所廃熱（～200℃）

→ 水蒸気爆砕・SSF・リグニン乾燥・エタノール蒸留

バイオ炭製造（500～600℃必要）

→ 発電所廃熱では温度が根本的に足りない

→ ヤンマー装置（自燃式）で自立稼働

→ JA カントリーエレベーターに設置が合理的

結論：発電所と JA カントリーエレベーターへの

役割分担は温度帯の物理的必然から導かれる

出典：NEDO「セルロース系エタノール生産システム総合開発実証事業」事後評価報告（2020年）／
ヤンマーエネルギーシステム「もみ殻バイオ炭製造装置」技術資料

付録 K CO2 固定手段のスケール感——排出回避が最優先である数値的根拠

前提：20年前のCO2水準に戻すために必要な除去量

項目	数値	根拠
大気中CO2濃度（2005年頃）	約 380 ppm	NOAA 観測データ
大気中CO2濃度（2026年現在）	約 424 ppm	NOAA 観測データ
差分	44 ppm	上記より
大気 1 ppm 相当のCO2質量	約 7.8 Gt-CO2	大気総質量・分子量比から算出
除去すべきCO2総量	約 343 Gt-CO2	44 ppm × 7.8 Gt/ppm

バイオプラスチックへの炭素固定で賄うとしたら

$93 \text{ Gt-C} \div 0.67$ (炭素含有率) \approx 約 140 Gt のプラスチックが必要

$140 \text{ Gt} \div 0.4 \text{ Gt/年} \approx$ 約 350 年分

プラスチックへの炭素固定だけで 20 年前の水準に戻すには 350 年かかる。現実的な主役にはなれない。四手段（野焼きゼロ化・バイオ炭・バイオプラ・SSF 発酵 CO₂ の BECCS 的 CaCO₃ 固定）の複合効果が唯一の現実解です。

本システムの設計方針への含意

固定手段	特性	本システムでの位置づけ
野焼きゼロ化（排出回避）	即効・大量・低コスト	最優先・主役
バイオ炭土壌固定	永続固定・農業便益あり	重要な補完手段
バイオプラスチック炭素固定	リサイクルで固定期間延長	「やらないよりマシ」の上乗せ

出典：NOAA Global Monitoring Laboratory / IEA "CO₂ Emissions in 2023" / Plastics Europe "Plastics - the Facts 2023"

付録 L 主要 CO2 固定・排出回避技術の比較と本提案の位置づけ

バイオ由来プラスチックのリサイクル階層と CO2 炭素固定価値

重要：バイオ由来プラスチック（Bio-PE 等）は光合成で大気 CO2 を固定した炭素を含む。この炭素を材料循環に留め続けることが炭素固定の本質。ガス化型ケミカルリサイクル（KPR）は廃プラを水素+CO2 に分解し、CO2 をドライアイス・炭酸飲料・医療ガスに利用するが、これらは数日～数週間で大気に放出される。バイオ由来プラに適用すると、光合成で固定した炭素価値が短期間で消滅する。油化型ケミカルリサイクル（三菱ケミカル×ENEOS）はナフサを経由して新たなプラスチックへ再生するため、炭素を材料循環に維持できる。

技術	持続性	コスト目安	副次便益	本提案との関係
植林・再植林	低～中	\$5～50/t	生態系・景観	なし
バイオ炭土壌固定	高（100～1000年）	\$30～200/t	農業・土壌改良	含む（もみ殻・リグニン）
BECCS	高（地中貯留）	\$100～300/t	発電	部分的に近い・地質制約あり
強化風化	高（炭酸塩化）	\$50～200/t	農地 pH・ミネラル	CaCO3 農地還元が類似
CO2 コンクリート	高（建物寿命）	\$20～100/t	建設材料	接続可能性あり
カーボンファイバー	高（製品寿命）	素材価値で回収	軽量高強度素材	リグニン由来で接続可能
リグニン建材・素材	高（建物・製品寿命）	素材価値で回収	建材・断熱材	リグニン残渣の上位活用候補
CLT・木材建築	中～高（数十～百年）	建材価格に内包	建設・林業振興	なし
海洋アルカリ化・鉄散布	不明	不明	不明	なし（生態系リスク・条約制約）

リグニン素材化の可能性と現段階での位置づけ

セルロースエタノール製造の副産物リグニンは、現在の設計ではボイラー燃料（サーマルリサイクル）として処理します。しかしリグニンは炭素含有率が約 60～65%と高く、燃やさずに素材化できれば炭素固定期間を大幅に延長できます。

- ・ リグニン由来カーボンファイバー（東レ・帝人が研究中）：軽量高強度で自動車・航空機・建材への応用
- ・ リグニン系バインダー・接着剤：合板・パーティクルボードへの応用
- ・ リグニン系断熱材・建材パネル：断熱性能と炭素固定を両立

リグニンの素材化（熱分解・重合反応・炭素化工程）には 200～1000℃以上の高温工程が含まれ、発電所廃熱（60～200℃）では温度が根本的に不足します。現段階ではボイラー燃料として使い、フェーズ 3 以降の拡張として接続する設計です。

出典：東レ株式会社「リグニン系炭素繊維の研究開発」／帝人株式会社 サステナビリティレポート

付録 M 大気エネルギーの変化——温度計に見えない気候変動の本質

「今年も猛暑だったね」「最高気温が 2～3℃上がっただけでしょ」——こう感じる方は多いはずです。しかし気温計と湿度計が示す数字の裏に、見えていない現実があります。

「相対湿度が同じ」でも水蒸気は増えている

気象庁の彦根観測データを見ると、夏の相対湿度は 1995 年も 2024 年も 75～77%とほぼ変わりません。しかし気温が上がると飽和水蒸気量が増えるため、同じ 75%でも絶対的な水蒸気量は増えています。相対湿度が同じ 77%でも、2024 年の夏は 1995 年より大気中の水蒸気量が約 13%多いのです。

気候指標の比較（1995 年→2024 年）

指標	1995 年→2024 年の変化	
気温（温度計の数字）	+2.0℃ (+8%)	
水蒸気量（湿度計には見えない）	+13%	
大気エネルギー（見えない）	+11%	

温度計は 2℃しか上がっていない。湿度計も変わっていない。でも大気エネルギーは 11%増えている。これが「見えにくい」構造の正体です。

農業と生活への影響

- ・ 豪雨の激化：大気中の水蒸気が増えれば、積乱雲が発達する際に使えるエネルギーが増え、短時間に激しい雨が降りやすくなります
- ・ 夜間の気温が下がらない：水蒸気は温室効果ガスであり、夜間に地面から放出される熱を吸収・再放射するため夜間気温が下がりにくくなります。白未熟粒は登熟期（8月）の夜間気温 26℃超で急増します
- ・ 暑さの過小評価：農家が気温計を見て判断しますが、実際に身体や作物が受けるストレスは水蒸気を含めたエネルギー量で決まります

【技術的補足：比エンタルピーの計算根拠】

飽和水蒸気圧 (Magnus 式)

$$e_s(T) = 6.112 \times \exp \left[\frac{17.67 \times T}{T + 243.5} \right] \quad [\text{hPa}]$$

気温 T	飽和水蒸気圧 e_s
24.6℃ (1995 年夏平均)	30.93 hPa
25.1℃ (平年値)	31.86 hPa
26.6℃ (2024 年夏平均)	34.83 hPa

実際の水蒸気圧と比湿

$$\text{水蒸気圧: } e = (\phi / 100) \times e_s(T)$$

$$\text{比湿: } x = 0.622 \times e / (P - e) \quad (P = 1010 \text{ hPa})$$

年	気温 T	相対湿度 ϕ	水蒸気圧 e	比湿 x
1995 年夏平均	24.6℃	77%	23.81 hPa	15.02 g/kg'
平年値夏平均	25.1℃	75%	23.90 hPa	15.07 g/kg'
2024 年夏平均	26.6℃	77%	26.82 hPa	16.97 g/kg'

比エンタルピー

$$h = c_{pa} \times T + x \times (L_0 + c_{pv} \times T)$$

定数： $c_{pa} = 1.006 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $c_{pv} = 1.86 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $L_0 = 2501 \text{ kJ}/\text{kg}$

年	比エンタルピー h	
1995 年夏平均	63.00 kJ/kg	
平年値夏平均	63.65 kJ/kg	
2024 年夏平均	70.03 kJ/kg	

1995 年→2024 年の増加：+7.03 kJ/kg (+11.2%)

出典：気象庁「過去の気象データ検索」彦根観測所（1995 年・2005 年・2015 年・2024 年）／農研機構「水稻高温障害の発生メカニズムと対策」／ASHRAE Fundamentals Handbook（湿り空気の熱力学）

付録 N 溶融塩炉（MSR）——使用済み核燃料を資源に変える次世代炉

本付録は、フェーズ 3 のエネルギー基盤として溶融塩炉（Molten Salt Reactor：MSR）が琵琶湖システム 2.0 と整合する理由を技術的・政策的に説明します。

現在の開発状況と実現時期

機関・企業	炉型	状況	想定時期
中国・TMSR-LF1	トリウム MSR	実験炉稼働中（2023 年）	2030 年代商用化目標
カナダ・Terrestrial Energy	溶融塩炉 IMSR	NRC 審査中	2030 年代前半
米国・Kairos Power	フッ化物塩冷却炉	NRC 承認済・建設中	2030 年前後実証
欧州・Transmutex	核廃棄物燃焼型 MSR	概念設計段階	2035～2040 年
日本・京都大学・東北大学	溶融塩炉研究	基礎研究段階	2040 年代以降

文部科学省・経産省の次世代炉開発ロードマップ（2023年策定）では溶融塩炉を含む革新炉が明記されており、2040年代の実証・商用化が政策目標とされています。

本提案における位置づけ

溶融塩炉はフェーズ1～2の実施条件ではなく、フェーズ3の完成形を支える理想的なエネルギー基盤です。700～800℃の高温熱出力はリグニン素材化・高温水電解（グリーン水素製造）と直接接続でき、フェーズ3の完成形を支える最も整合性の高いエネルギー源です。

グリーンアンモニア合成技術：つばめ BHB の接続

グリーンアンモニアの合成技術として、つばめ BHB（神奈川県横浜市・東工大発スタートアップ）の低温・低圧エレクトライド触媒技術を接続候補として位置づける。従来型ハーバー・ボッシュ法が400～500℃・150～300気圧を必要とするのに対し、エレクトライド触媒は低温・低圧での合成を可能にし、再生可能エネルギーとの直接接続・小型分散型オンサイト生産が実現できる。JA 拠点に設置可能な規模感の本提案の都道府県規模マイクログリッドの設計思想と整合する。つばめ BHB は2025年11月に INPEX 柏崎水素パークへ商用設備を納品し試験生産を開始、2025 Global Cleantech 100 に日本で唯一選出されている。なお水素は中間生成物としてその場でアンモニアに変換するため、水素脆性・輸送・貯蔵インフラの問題は生じない。

「稲藁を燃やさない」という農家の一歩と、「核廃棄物を燃やす」という原子力技術の進化が、同じ「廃棄物を資源に」という哲学のもとで出会う——これが本提案の最終形です。

出典：文部科学省・経産省「革新炉開発ロードマップ」（2023年）／IAEA ARIS／中国科学院「TMSR-LF1 実験炉」研究報告（2023年）

付録 O 堆肥需給バランス試算——滋賀県の畜産堆肥は農地面積を十分に賄える

滋賀県の農地面積のうち水田は46,200haで水田率は約93%（令和6年）、畑は約3,400haで農地合計は約49,600haです。

標準的な堆肥施用量と必要量

農地種別	面積	標準施用量	必要堆肥量
水田	46,200 ha	1.5 t/ha/年	69,300 t/年
畑	3,400 ha	2.5 t/ha/年	8,500 t/年
合計	49,600 ha	—	77,800 t/年

滋賀県の畜産からの堆肥生産量（現状推計）

畜種	飼養規模	糞尿発生量	堆肥化率	堆肥生産量
肉用牛	約 2,800 頭	15 t/頭/年	80%	33,600 t/年
乳用牛	約 2,800 頭	25 t/頭/年	80%	56,000 t/年
豚	約 2,000 頭	2 t/頭/年	70%	2,800 t/年
鶏	約 200 万羽	0.04 t/羽/年	90%	72,000 t/年
合計	—	—	—	164,400 t/年

需給バランス

指標	数値
全農地への必要堆肥量	約 77,800 t/年
現在の畜産からの堆肥生産量	約 164,400 t/年
充足率（現状）	約 211%
バイオ炭施用（0.5 t/ha）による補完	約 24,800 t/年相当
充足率（バイオ炭込み）	約 243%

現在の畜産規模だけで、全農地への施用必要量の約 2 倍以上の堆肥を生産できます。量的な制約は存在せず、むしろ余剰堆肥の活用先をどう設計するかが課題です。

畜産連携拡大後の試算（牛 2 倍・豚鶏 1.5 倍）

条件	堆肥生産量	充足率
現状	164,400 t/年	211%
畜産拡大後（牛 2 倍・豚鶏 1.5 倍）	291,400 t/年	374%
畜産拡大後＋バイオ炭	316,200 t/年	406%

量的余裕はあるが、実運用には三つの課題がある

- ①空間的ミスマッチ：畜産農家と水田の場所が必ずしも一致しません。JAが堆肥センターとして集約・再配送する機能を担うことで解決できます。
- ②堆肥の品質調整：鶏糞は窒素含有率が高く、そのまま大量施用すると過剰になります。バイオ炭との混合（C/N比調整）が必要です。
- ③農家の受け取り意欲：JAによる代行散布・散布機の共同利用スキーム・Jクレジット収益による費用補填という三点セットで解決を図ります。

鶏糞・牛豚糞尿の役割分担

鶏糞（含水率 50～60%・窒素高い）

→ 発酵堆肥 → バイオ炭と混合（緩効性化） → 圃場還元

牛糞尿・豚糞尿（含水率 80～90%）

→ メタン発酵（+ヨシとのコファーマンテーション）

→ バイオメタン（農機具燃料）

→ 消化液（液肥・補助的利用）

出典：農林水産省「畜産統計」（令和5年）／JA滋賀中央会「滋賀の農業」（令和6年）／農研機構「堆肥の施用基準と土壌有機物管理」

付録P バイオプラスチック需給バランス試算——農業資材・食品パッケージへの充足率

本付録は、バイオマス発電1拠点（3,550kW規模）のバイオプラスチック生産量が、滋賀県内の農業資材・食品パッケージのプラスチック需要をどの程度賄えるかを試算します。

バイオマス発電1拠点のバイオプラスチック生産能力

項目	数値	根拠
エタノール生産量	年間 1,830 kL（約 1,444 t）	分流 43～50%・付録Eより
バイオPE換算生産量	約 750 t/年	エタノール→エチレン→PE・収率 85%

滋賀県の農業資材・食品パッケージのプラスチック需要（推計）

需要区分	全国需要	滋賀県シェア	滋賀県需要
農業資材プラスチック	約 95,000 t/年	農地面積比 1.15%	約 1,100 t/年
食品パッケージ	約 200 万 t/年	人口比 1.13%	約 22,600 t/年
合計	—	—	約 23,700 t/年

需給バランス

対象	需要	生産量	充足率
農業資材のみ	約 1,100 t/年	約 750 t/年	約 68%
食品パッケージのみ	約 22,600 t/年	同上	約 3%
合計	約 23,700 t/年	同上	約 3%
フェーズ 3（稲藁 ライン追加・2.5 倍）	同上	約 1,870 t/年	約 8%

農業資材は 1 拠点でほぼ賄える射程にあります（約 68%）。食品パッケージは三社 LLP との接続で初めてスケールします。フェーズ 3 の滋賀県内 5 拠点展開により農業資材・食品パッケージ需要の 83%に達し、県内ほぼ自給できる水準になります。

フェーズ別生産能力と滋賀県充足率

シナリオ	拠点数	生産量	滋賀県充足率（簡素化 50%後）
フェーズ 1（1 拠点）	1	750 t/年	7%
フェーズ 2（稲藁追加）	1	1,870 t/年	17%
フェーズ 3（滋賀県内複数拠点）	5	9,350 t/年	83%

出典：プラスチック循環利用協会「プラスチックのマテリアルフロー図」（2022 年）／農林水産省
「園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査」／Plastics Europe "Plastics – the Facts 2023"