

***Cupriavidus necator* を用いた Power-to-Food 技術 の実装可能性評価**

LCA ・ CAPEX ・ OPEX ・ 安全性 ・ プロセス工学上の課題の統合的レビュー

株式会社エウサピア

2026 年 7 月版

Executive Summary

Cupriavidus necator に代表される水素酸化細菌を用いた Power-to-Food 技術は、再生可能電力から水素を製造し、その水素をエネルギー源、CO₂を炭素源として微生物バイオマスを生産する技術である。土地利用、水利用、季節・気候依存性の低さという観点では、既存の植物・畜産タンパク質を補完し得る有望な生産方式である[1-4]。

一方で、現時点の投資判断では「生物学的に成立するか」よりも、「商業設備として安定・安全・低コストに運転できるか」が主要論点である。特に、水素コスト、ガス移動、熱除去、防爆設計、菌体回収・乾燥、CIP/SIP、培地リサイクル、Ni を含む微量金属循環、食品・飼料安全性がボトルネックになり得る[1,5-8]。

結論として、本技術は「技術的実現性は高いが、経済的実現性と投資適格性は実測データ待ち」と評価するのが妥当である。フルスケール設備への一括投資ではなく、ステップバイステップの投資判断基準を設定した段階投資が望ましい。

投資判断基準として確認すべき項目は以下である。

投資判断基準	判断に必要なデータ
電力・水素調達	低炭素電力または低炭素水素の長期価格、供給安定性、系統制約
生産性	kg-乾燥菌体/m ³ /day、g/L/h、連続運転日数、再立ち上げ時間
エネルギー効率	kWh/kg-乾燥菌体、kWh/kg-タンパク質、H ₂ 利用効率、乾燥エネルギー
設備費	電解、圧縮、ガス循環、防爆、冷却、乾燥、排水処理を含む installed cost
安全性	H ₂ /O ₂ 混合系の HAZOP、防爆区域、保険費、粉じん爆発、作業員曝露
製品規格	タンパク質、核酸、LPS、Ni、重金属、灰分、アレルギー性、消化性
培地循環	塩類蓄積、未知代謝物、微量金属分配、ブローダウン、排水処理
規制	食品・飼料承認、Novel Food/GRAS 相当性、自治体排水基準、廃棄物区分

環境価値は高い可能性があるが、それだけでは投資適格とはいえない。投資判断では、LCA と同時に、TEA、HAZOP、関連規制、長期パイロット運転データを統合して評価すべきである。

目次

Executive Summary	2
1. なぜ <i>C. necator</i> は有望視されているのか	5
1.1 Power-to-Food の基本概念	5
1.2 技術上の特徴.....	5
1.3 LCA で示されている可能性.....	6
2. なぜ商業化は難しいか.....	7
3. 技術 DD の全体フレーム	8
4. CAPEX 評価.....	10
4.1 CAPEX の構成.....	10
4.2 水電解装置	11
4.3 バイオリアクターとガス移動	12
4.4 防爆設備	14
4.5 冷却設備	14
4.6 菌体回収・濃縮設備	15
4.7 乾燥・粉体ハンドリング設備	16
4.8 CIP/SIP・排水処理設備	17
4.9 計装・自動制御・品質管理設備.....	18
5. OPEX 評価.....	18
5.1 OPEX の主要項目	18
5.2 電力・水素	19
5.3 ガス供給・圧縮・循環	20
5.4 攪拌・冷却	21
5.5 菌体回収・乾燥.....	22
5.6 培地・栄養塩・水・排水	22
5.7 CIP/SIP・保守・安全維持.....	23
5.8 品質保証・規制対応・ロット損失.....	23

6. 横断的リスク	25
6.1 ニッケルおよび微量金属管理	25
生物学的背景	25
培地中 Ni 濃度	25
商業化時の Ni 論点	26
6.2 腐食・材料	26
想定される腐食環境	26
材料選定	27
6.3 CIP/SIP	28
CIP/SIP の役割	28
C. necator プロセスでの重要性	28
6.4. 食品・飼料安全性	29
LPS・エンドトキシン	29
核酸	30
アレルギー性	30
食品・飼料規制	31
6.5. 培地リサイクル	31
背景	31
培地リサイクルの利点	32
技術課題	32
各技術の成熟度評価	33
7. 統合評価	35
7.1 強み	35
7.2 弱み・リスク	35
7.3 不足しているデータ	36
8. 投資判断上の結論	37
参考文献	38

Power-to-Food とは、水を電気分解して製造した水素をエネルギー源として微生物を培養し、得られた微生物バイオマスをタンパク質源として利用する技術群である。*C. necator* は代表的な水素酸化細菌であり、水素、酸素、CO₂を利用して増殖できるため、農地を介さないタンパク質生産プラットフォームとして注目されている[1,2]。

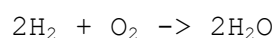
既存研究では、低炭素電力を前提とした場合に、微生物タンパク質は土地利用、水利用、富栄養化、温室効果ガス排出の面で従来タンパク質より優位となる可能性が示されている[2-4]。ただし、その優位性は電力源、電解効率、CO₂源、乾燥工程、栄養塩利用効率、代替される既存タンパク質に大きく依存する。

本資料は、*C. necator* を用いた Power-to-Food プロセスへの投資・事業開発・技術提携を検討する方向けに、商業化前に確認すべき技術 DD 論点を整理したものである。LCA、CAPEX、OPEX、安全性、Ni を含む微量金属循環、腐食、CIP/SIP、培地リサイクルの観点から実装可能性を評価する。

1. なぜ *C. necator* は有望視されているのか

1.1 Power-to-Food の基本概念

C. necator は水素酸化細菌であり、水素をエネルギー源、CO₂を炭素源として利用できる。水素酸化の概念的な反応は以下のように表される。



C. necator はこの反応から得たエネルギーと還元力を利用し、CO₂を固定して、タンパク質、脂質、核酸、多糖などの細胞成分を合成する。

一般的な発酵では、微生物はグルコースなどの単糖、スクロースなどの二糖、あるいはデンプン加水分解物などの糖質を、炭素源およびエネルギー源として利用する。一方、*C. necator* のような水素酸化細菌では、H₂がエネルギー源、CO₂が炭素源となる。そのため、理論的には農地由来の糖に依存しないタンパク質生産が可能となる。

1.2 技術上の特徴

本技術には以下の特徴がある[1,2]。

項目	評価
炭素源	CO ₂ を利用可能

項目	評価
エネルギー源	水素。水電解により再生可能電力と接続可能
生産場所	閉鎖型設備で運転可能。気候・季節依存性が低い
土地利用	高密度培養により、単位面積当たりタンパク質生産性が高い可能性
タンパク質含量	乾燥菌体中 50-65%程度
課題	H ₂ /O ₂ /CO ₂ のガス移動、防爆、冷却、菌体回収、食品安全性、消費者需要性

重要なのは、本技術が単純な「CO₂からタンパク質を作る技術」ではない点である。実際には、水電解、H₂供給、O₂供給、CO₂供給、ガス移動、発熱除去、培地循環、菌体回収、乾燥、排水処理を統合した複合システムである。

1.3 LCA で示されている可能性

既存 LCA 研究では、低炭素電力を用いる Power-to-Food プロセスについて、従来タンパク質と比較して環境負荷を下げられる可能性が示されている[1,2,7,9]。特に、土地利用、水利用、富栄養化負荷では優位性が出やすい。

優位性が期待される理由は以下である。

項目	理由
土地利用	微生物を閉鎖型リアクターで高密度培養できる
水利用	閉鎖型システムによる水分の回収とリサイクル
メタン排出	畜産を一部代替できる場合、畜産由来排出を回避し得る
栄養塩流出	閉鎖系で窒素・リンを管理できる可能性
気候耐性	日照、降雨、季節変動への依存が低い

2. なぜ商業化は難しいか

Power-to-Food の評価では、LCA だけでなく、TEA、保全計画、稼働率、規制対応を含む統合評価が必要である。

LCA 上の優位性が保たれるかどうかは、以下の条件に強く依存する。

条件	影響
電力源	化石燃料由来電力では GHG 優位性が失われる可能性
電力からバイオマスへの変換効率	変換効率の悪いリアクターを使用すると電力消費量が増加
CO ₂ 源	DAC、購入、発酵由来、排ガス由来で環境負荷が異なる
乾燥工程	微生物バイオマスは含水率が高く、乾燥エネルギーが大きい
栄養塩利用効率	N、P、S の利用率が低いと富栄養化・資源消費が増える
原材料の輸送	必要な栄養素・化学物質のサプライチェーンが長くなると優位性が失われる可能性
代替対象	大豆、魚粉、乳タンパク質、飼料原料のどれを代替するかで効果が変わる

また、CO₂を原料として利用することは、単独ではカーボンネガティブを意味しない。製品が食品・飼料として消費されれば、炭素は最終的に再び CO₂として戻る。したがって、本技術の環境価値は「CO₂利用」そのものよりも、「低炭素電力を用いた高効率タンパク質生産」と「高環境負荷タンパク質の代替」によって生じる。

公開 LCA では、建設段階、保守、CIP/SIP、防爆設備、腐食による設備更新、微量金属循環、停止・再起動、実プラントでの操業率などが十分に分析されていない場合がある[1,2,10]。

商業プラントでは、以下が LCA と経済性の両方に影響する。

- 洗浄・滅菌による停止時間
- バルブ、シール、センサー、ガス配管等の保守
- H₂/O₂系の防爆設計
- 長期腐食と部材交換
- 培地リサイクル失敗時のブローダウン
- 菌体回収・乾燥の実エネルギー
- 製品規格外ロットの廃棄
- 廃液処理プロセス

3. 技術 DD の全体フレーム

C. necator を用いた Power-to-Food プロセスの技術 DD では、個別技術の成立性だけでなく、電力、水素、ガス供給、発酵、冷却、回収、乾燥、品質保証、安全規制を一体のプラントシステムとして評価する必要がある。

本技術の投資判断では、「微生物が CO₂ と H₂ から増殖できるか」だけでは不十分である。商業化において重要なのは、低炭素電力を用いて製造した H₂ を、安全かつ高効率に液相へ移動させ、発生する熱を除去し、得られた菌体を食品・飼料規格に適合する形で回収・乾燥できるかである。

したがって、技術 DD では以下の 5 つの観点を統合して評価する。

評価軸	確認すべき内容	主な判断指標
技術成立性	<i>C. necator</i> が想定条件で安定的に増殖し、目的品質の菌体を生産できるか	生産性、連続運転日数、菌体濃度、タンパク質含量
スケールアップ性	ラボ・パイロット条件が商業設備で再現可能か	kLa、H ₂ 利用効率、冷却負荷、発酵槽稼働率
経済性	CAPEX・OPEX を含めた実効原価が競争力を持つか	導入総費用、kWh/kg-product、kg-H ₂ /kg-product、乾燥エネルギー
安全・規制・品質	H ₂ /O ₂ 混合系、食品・飼料規格、品質保証に対応できるか	HAZOP、H ₂ 検知、SIS/SIF、微生物規格、核酸、微量金属
環境性	LCA 上の優位性が実運転条件でも成立するか	電力源、CO ₂ 源、乾燥負荷、栄養塩利用率、排水負荷

特に重要なのは、各評価軸を独立に見るのではなく、相互依存関係として評価することである。たとえば、kLa を高めるために攪拌やガス循環を強めれば、生産性は上がる可能性がある一方で、攪拌電力、圧縮電力、発熱、冷却負荷、泡、せん断、保守費が増加する。H₂ 利用効率を高めるために排ガスリサイクルを導入すれば、H₂ ロスは減る一方で、圧縮、精製、パージ、不純物蓄積、安全設計のコストが発生する。

このように、単一 KPI の最適化ではなく、複数 KPI の同時最適化が必要となる。

技術 DD で特に重視すべき KPI は以下である。

KPI	意味
kg-乾燥菌体/m ³ /day	発酵槽容積当たりの実生産性
kWh/kg-乾燥菌体	電力・攪拌・圧縮・冷却・乾燥を含む実効エネルギー効率

kWh/kg-タンパク質	タンパク質原料としての実効エネルギー効率
kg-H ₂ /kg-乾燥菌体	水素投入量に対する製品化効率
H ₂ 利用効率	投入 H ₂ のうち実際に消費・製品化された割合
乾燥前固形分濃度	下流乾燥 OPEX を左右する主要指標
冷却負荷	高生産性運転時の除熱制約
CIP/SIP 停止時間	稼働率と実効原価への影響
排水負荷	N、P、COD、塩類、微量金属の処理負荷
製品規格	タンパク質、核酸、灰分、微量金属、微生物規格、安全性

商業化前のパイロットでは、単に「運転できること」ではなく、次段階投資に必要な実測データを取得できる設計であることが重要である。特に、H₂利用効率、排ガス組成、kWh/kg-product、乾燥前固形分濃度、冷却負荷、CIP/SIP 停止時間、排水負荷、品質ばらつきが取得できない設備は、投資判断材料として不十分である。

技術 DD では、以下の資料・データを確認する必要がある。

確認資料	確認目的
PFD・P&ID	プロセス全体、ガス供給、排ガス、CIP/SIP、排水の範囲確認
物質収支	H ₂ 、O ₂ 、CO ₂ 、N、P、Ni、排水、スラッジの流れ確認
エネルギー収支	電力、圧縮、攪拌、冷却、乾燥、蒸気使用量の確認
CAPEX 見積り	installed cost、BOP、防爆、建屋、ユーティリティの確認
OPEX モデル	実効水素コスト、電力、乾燥、CIP/SIP、保守、品質管理の確認
HAZOP・安全設計資料	H ₂ /O ₂ 混合系、防爆、緊急停止、安全排出の確認
品質試験データ	食品・飼料用途に必要な規格適合性の確認
LCA・TEA	環境性と経済性の前提条件の整合性確認
パイロット運転データ	連続運転、停止・再立ち上げ、品質ばらつき、設備信頼性の確認

以上より、*C. necator* プロセスの技術 DD では、個別技術の優劣ではなく、低炭素電力、水素製造、ガス移動、冷却、回収・乾燥、CIP/SIP、安全、品質保証を統合した実効原価と実装可能性を評価する必要がある。

4. CAPEX 評価

4.1 CAPEX の構成

Power-to-Food プラントの CAPEX は、一般的な食品発酵設備より広い範囲を含む[1,10,11]。

設備	主な役割
水電解装置	H ₂ と O ₂ の製造
ガス圧縮・貯蔵	H ₂ 、O ₂ 、CO ₂ の圧力・流量管理
バイオリアクター	<i>C. necator</i> の培養
ガス循環設備	未反応 H ₂ 、O ₂ 、CO ₂ の再利用
防爆設備	H ₂ /O ₂ 混合系の爆発リスク管理
冷却設備	水素酸化・代謝による発熱除去
菌体回収設備	遠心分離、膜分離、濃縮
乾燥設備	スプレードライ、ドラムドライ等
CIP/SIP 設備	洗浄・滅菌
排水処理設備	N、P、塩類、微量金属、CIP 排水処理
品質管理設備	食品・飼料規格、微生物・化学分析

RED FLAG
● 機器購入費だけで CAPEX を見ており、据付・配管・計装・建屋・防爆・ユーティリティ・排水処理・品質管理を含む installed cost になっていない ● ラボ・パイロットの装置費を単純スケールアップしている ● 電解装置、リアクター、ガス循環、冷却、乾燥を個別見積りし、統合時の BOP と制御系を見ていない ● H₂/O₂を扱うための防爆区域、換気、ガス検知、緊急遮断、HAZOP 後の追加対策費が薄い ● 再エネ変動に対応するための H₂貯蔵、バッファタンク、冗長設備、停止・再起動設備を入れていない ● 冷却、CIP/SIP、排水処理、菌体回収、乾燥、粉じん爆発対策を周辺設備として過小評価している ● 食品・飼料用途に必要な品質管理室、検査機器、トレーサビリティ、ロット隔離設備を入れていない

- 腐食、膜交換、スタック交換、センサー更新などの将来更新 CAPEX を見ていない
- 建設費、エンジニアリング費、許認可、試運転、予備品、コンティンジェンシーを明示していない
- 商業規模の見積り精度が低いのに、投資回収年数だけ精密に見せている

4.2 水電解装置

水電解装置は最大のコストドライバーとなり得るため、電解効率、稼働率、スタック交換、BOP、電力調達条件を一体で評価する必要がある[10-12]。

動作温度に基づいて、低温水電解と高温水電解に大別され、前者には液体アルカリ水電解（LA: Liquid Alkaline）、PEM 式水電解（Proton Exchange Membrane）、AEM 式水電解（Alkaline Exchange Membrane）、後者には酸化物イオン伝導型 固体酸化物水電解（O-SOEC）、プロトン伝導型 固体酸化物水電解（P-SOEC）がある[11]。

技術	利点	課題
LA	成熟度◎。低コスト材料を使用、実証済みの長寿命、確立されたサプライチェーン	変動する運用条件（太陽光や風力への負荷追従など）下での機械的・化学的劣化に弱い
PEM	成熟度○。高電流密度運転、高圧運転可能。風力や太陽光などの変動電源への応答性に優れる	酸性環境で働くため腐食・溶解の影響が大きい。Pt、Ir などの貴金属・希少材料や高価な膜を使用
AEM	低温・アルカリ環境で作動。非貴金属触媒・低コスト材料の利用	電極耐久性、長期運転実績。高い導電性を持つ耐久性のある膜とアイオノマーの開発
O-SOEC	高い電気効率。電気から水素を作るだけでなく、水素から電気を作ることができるため、エネルギー貯蔵システムとしてのポテンシャル。排熱利用可能。	700～850℃という超高温で作動するため、短寿命。高温管理のための設備コスト高。
P-SOEC	O-SOEC よりもやや低い温度（450～650℃）で動作。そのため部品を低コスト材料へ置き換えられる可能性。水素ガス側の追加乾燥システムを不要化し得る。	「十分な機械的強度」と「高いプロトン導電性」を両立する電解質材料の開発。一部劣化機構では O-SOEC より深刻となる可能性があり、耐久性実証が不足。高温管理のための設備コスト高。

RED FLAG
● 「安いグリーン水素」を前提にしているが、実効 LCOH を出していない ● 再エネは基本的に変動電源であるにもかかわらず、電解装置の稼働率と発酵槽の稼働率が整合していない ● スタック寿命・交換費を甘く見ている ● BOP を軽視している ● PEM を採用するのに、Ir・Pt・膜コストの説明がない ● AEM を「低コスト・非貴金属」とだけ説明している ● SOEC 系の高効率を強調するが、熱源と運転条件が曖昧

4.3 バイオリアクターとガス移動

C. necator プロセスでは、水に溶けにくいガス H_2 、 O_2 、 CO_2 を液相へいかに効率よく移動させる（物質移動：マス・トランスファーの改善）が商業化における最大の課題だ。

水素

H_2 はエネルギー源なので不足すると成長・還元力供給が制限される。ただし過剰な H_2 は排ガスロスと爆発リスクを増やす。

現状では一般的に *C. necator* が実際に消費できる量よりもかなり多く H_2 が投入されており、排ガスからのリサイクルの可能性も検討されているが十分に知見は揃っていない。排ガス中の H_2 を回収・圧縮して再投入するためのエネルギーコストと、新たに H_2 を製造するコストのバランスを見極める設計が求められる[1,8]。また、変動性のある再生可能エネルギーと電解装置を直接統合する場合、稼働率の低下を補い、需要に合わせて安定的に水素を供給するために水素貯蔵設備も必要となる[11]。

kLa 最適化

H_2 は水への溶解度が低く、 O_2 も高密度培養では律速になりやすい。水に溶けにくいガス（水素、酸素、 CO_2 など）を効率よく培養液中の微生物に供給するため、kLa（体積物質移動係数）を改善する必要がある。kLa 改善のアプローチとしてはバイオリアクターの構造・設計による工夫と物理的な運転条件の改善の 2 つのアプローチがある[8,10]。

バイオリアクターにおいては、気体と液体の接触面積を最大化し、kLa を高めるために、従来型の機械的攪拌槽（CSTR）に代わる、あるいはそれを改良する設計について検討が進み、一部は実用化されている。

ただし、kLa を高めるほど、攪拌電力、発熱、泡、せん断、機械摩耗、菌体への物理的ダメージが増えることから、膜バイオリアクターなどを用いた非攪拌型の装置にも注目が集まってい

る。以上より、設備設計では「最大 kLa 」ではなく、「水素利用効率、生産性、電力消費、安全性を同時に最適化する kLa 」が重要となる。

リアクター内の加圧（高圧培養）により、攪拌や通気の方法を変更することなく、培養液に溶け込むガス濃度およびガス流束を増加させる方法もある。実際に *C. necator* の培養において、高圧培養によって細胞量が 40% 増加したことが報告されているが[8]、ガス圧縮のコストや長期運転における菌体への影響が未知数であることが課題だ。

酸素

水を電気分解する際、水素と同時に酸素ガスが発生する。酸素ガスの処理設備のコストはシステム全体の 4~10% を占める重要なエンジニアリング要素である[11]。

二酸化炭素

外部から液化 CO_2 を購入する場合と、自社でエネルギーを使ってガスを回収・圧縮する場合がある[2]。ライフサイクル全体で生じる環境負荷を把握する必要がある。

以上より、*C. necator* プロセスのバイオリアクターには、以下の設計要素が含まれる。

- 培養槽、攪拌、スパージャー等の反応・混合設備
- H_2 、 O_2 、 CO_2 の供給・流量制御・分配設備
- 温度、pH、圧力、溶存酸素、ガス組成、泡の計測・制御設備
- 排ガス処理、 H_2 リサイクル、安全排出設備
- 冷却・除熱設備 防爆、ガス検知、緊急遮断、ベント等の安全設備
- CIP/SIP 対応のサニタリー配管・バルブ・センサー設備
- 培地、pH 調整剤、消泡剤、種培養の供給設備

RED FLAG
● 「CO_2 と水素から作るので原料費が安い」と言うが、H_2 製造・圧縮・未利用ロスを含めていない ● ラボの細胞濃度や収率だけで、$kWh/kg-product$ を出していない ● kLa 改善策はあるが、攪拌電力・冷却・泡・安全対策のコストがない ● 排ガス H_2 リサイクルを前提にしているが、回収・圧縮・再投入のエネルギー収支がない ● 「再エネ余剰電力利用」を前提にしているが、稼働率低下と設備償却を織り込んでいない ● 食品・飼料用途なのに、規制認可・品質保証・乾燥コストの議論が薄い ● LCA で電力源、CO_2 回収、H_2 貯蔵、下流乾燥を除外している ● 水電解装置と発酵設備の統合設計がない

4.4 防爆設備

防爆設計は CAPEX と OPEX の両方に影響する投資上の中核論点の一つである[8,10]。H₂は空気中で広い濃度範囲で可燃性を持つ。*C. necator* プロセスでは H₂と O₂を同時に扱うため極めて爆発性が高く、防爆対応は単なる安全付帯設備ではなく、リアクター設計、ガス供給、制御系、建屋、換気、保険、運転手順、メンテナンス頻度に波及する。

必要となる設計要素には以下が含まれる。

- 防爆モーター、防爆計装
- ガス検知器
- 緊急遮断弁
- 安全弁、ベント、安全排出設計
- 不活性化・パージ手順
- ガス組成の連続監視
- 爆発隔離・爆発放散
- HAZOP、保険対応

C. necator プロセスは、食品・飼料・バイオ素材向けの発酵技術である一方、H₂、O₂、CO₂を連続的に供給・制御するため、設備設計上は食品発酵設備というより、**水素・酸素を扱うガス化学プラントと発酵プラントのハイブリッド**として評価すべきである。防爆モーター、防爆計装、ガス検知、緊急遮断、ベント・安全排出、不活性化、ガス組成監視、HAZOP/LOPA/SIL 評価などの必要水準は、設備規模、圧力、H₂保有量、屋内外配置、危険区域分類、法域によって決まる。

RED FLAG
● 「食品発酵設備の延長」と説明している ● 防爆 CAPEX を原価計算に入れていない・OPEX としての安全維持費を見ていない ● H₂/O₂混合の安全思想が曖昧 ● ガス検知・遮断・換気が独立した安全層になっていない ● ベント・排ガス処理の設計が弱い ● LCA で電力源、CO₂回収、H₂貯蔵、下流乾燥を除外している ● HAZOP/LOPA/SIL が商業化前に未実施

4.5 冷却設備

水素酸化は強い発熱反応であり、*C. necator* の高生産性運転では H₂/O₂消費速度の上昇に伴って代謝熱の除去が重要になる。さらに実機では、攪拌、ガス循環、圧縮、排ガスリサイクル、ポ

ンプ、熱交換器の運転による熱負荷も加わる。*C. necator* は多くの培養例で約 30℃前後で運転されるため、高温側への逸脱は増殖・物質移動・安全制御に影響し得る[1,8]。

必要となる設計要素には以下が含まれる。

- 冷却ジャケット
- 内部冷却コイル
- 外部熱交換器
- 冷却水循環系
- 冷却塔またはチラー
- 温度制御と異常時停止系
-

商業スケールでは、発熱量は概ね容積に比例して増える一方、ジャケット等の伝熱面積は相対的に不足しやすいため、冷却設備は単なる付帯設備ではなく、生産性上限を決める主要設備として評価すべきである。

RED FLAG
● 熱収支を出していない ● ラボの温度制御データをそのままスケールアップしている ● kLa 改善と冷却負荷を独立に議論している ● チラーOPEX を原価に入れていない ● 内部冷却コイルの管理コストを見ていない ● 外部熱交換器ループを単純化し過ぎている ● 冷却設備に冗長性がない

4.6 菌体回収・濃縮設備

微生物バイオマスは水分を多く含むため、食品・飼料原料として保存・流通するには、濃縮、洗浄、脱水、乾燥、粉体化が必要である。工程には遠心分離、膜分離、洗浄、濃縮、加熱不活化、乾燥、粉砕、包装が含まれる [10]。

必要となる設計要素には以下が含まれる。

- 遠心分離機
- 膜分離・精密ろ過・限外ろ過
- 洗浄・再懸濁タンク
- 濃縮タンク
- 移送ポンプ、配管、シール
- CIP 対応の分離機・膜モジュール

- 濁度、固形分、導電率等のオンライン測定

投資判断では、分離効率だけでなく、乾燥前にどこまで固形分濃度を上げられるか、洗浄でどれだけ塩類・Ni・LPS・核酸を落とせるか、膜や遠心機の停止時間が操業率をどれだけ下げるかを確認すべきである。

RED FLAG
● 菌体回収を一般的な酵母・藻類プロセスと同等に扱っている ● 乾燥前固形分濃度を出していない ● 遠心分離だけで成立すると仮定している ● 凝集剤を用いるのに規制適合性が不明 ● 膜分離を使うのにファウリング・洗浄・膜交換費を入れていない ● 製品洗浄による水使用量と排水負荷を見ていない ● 細胞破碎、LPS、核酸、Ni の分配を確認していない

4.7 乾燥・粉体ハンドリング設備

菌体バイオマスを食品・飼料原料として販売する場合、保存性、輸送性、配合性を確保するため乾燥と粉体ハンドリングが必要になる。乾燥設備はエネルギー負荷が大きく、製品品質にも直接影響するため[2]、下流工程の中でも投資判断上の重要度が高い。

必要となる設計要素には以下が含まれる。

- 濃縮菌体スラリーの受槽、均質化、固形分調整設備
- 加熱不活化、洗浄、脱水、乾燥設備
- 排気処理、集じん、臭気対策設備
- 粉体搬送、サイロ、粉砕、篩分け、混合、包装設備
- 金属検出、異物除去、品質検査設備
- 粉じん爆発、静電気、着火源、粉じん堆積防止の安全対策設備

乾燥・粉体ハンドリング設備を過小評価すると、LCA と原価の両方が楽観的になる。投資判断では、乾燥前固形分、乾燥後水分、製品温度履歴、粉体安全、包装仕様、規格外ロットの扱いを一体で設計されているか確認すべきである。

RED FLAG
● 乾燥を単なる後工程として扱っている ● kg 水除去当たりの熱・電力を出していない ● スプレードライの熱負荷とタンパク質変性を評価していない ● 粉じん爆発対策を CAPEX に入っていない

- 包装後の吸湿・固結・酸化安定性を確認していない
- 乾燥工程で LPS、核酸、Ni、灰分がどう濃縮されるかを見ていない

4.8 CIP/SIP・排水処理設備

C. necator プロセスは、液相培養設備に加えて H₂、O₂、CO₂ のガス供給・循環系を持つ。CIP/SIP と排水処理は衛生管理の付帯設備ではなく、食品・飼料グレードで連続的に運転するための必須設備である[8]。

必要となる設計要素には以下が含まれる。

- CIP 薬液・リンス水の貯槽、加温・循環設備
- SIP 用クリーンスチーム供給、凝縮水回収設備
- 洗浄・滅菌対応のサニタリー配管、バルブ、ポンプ、スプレーボール
- 食品接触材質、表面仕上げ、自己排水性を含む衛生設計
- 無菌エア、窒素、ベントフィルター、最終リンス水等のユーティリティ設備
- CIP/SIP 自動制御・記録システム
- 排水中和、固液分離、金属・栄養塩・塩類管理設備
- ブローダウン受槽、異常時排水・汚染排水の隔離槽
- 洗浄確認・薬剤残留確認・微生物検査のための検査設備

CIP/SIP を小さく見積もると、設備費だけでなく操業率、排水負荷、腐食、品質保証費が過小評価される。特に食品用途では、洗浄できない構造は後から修正しにくいので、必ず初期設計段階で投資判断に含める必要がある。

RED FLAG
● CIP/SIP 設備を通常発酵設備の標準仕様として一括計上している ● ガスライン、センサー、フィルター、膜、遠心機まで洗浄範囲に入っていない ● CIP 排水にはリン酸塩、アンモニウム塩、微量金属、菌体残渣が含まれるが処理プロセスを小さく見積もっている ● ブローダウン時の処理能力に余裕がない ● 洗浄・滅菌中の停止時間を稼働率に反映していない ● デッドレグ、液だまり、コールドスポット評価がない ● 食品グレードを目指すのに衛生設計が十分ではない

4.9 計装・自動制御・品質管理設備

H₂/O₂/CO₂を同時に扱う *C. necator* プロセスでは、温度、圧力、ガス組成、溶存酸素、pH、導電率、流量、泡、排ガスを連続監視し、異常時には H₂/O₂供給の遮断、換気、ベント、安全停止へ自動的に移行できる制御系が必要である。これは生産性向上だけの問題ではなく、防爆、品質保証、保険、規制対応の前提条件であり、BOP の中でも重要なコスト要素である[2,11]。

必要となる設計要素には以下が含まれる。

- PLC/DCS、SCADA、インターロック、緊急停止、SIS/SIF 等の制御・安全計装設備
- H₂、O₂、CO₂、圧力、温度、pH、溶存酸素、流量、泡、液位等のオンライン計測設備
- 排ガス分析、ガス流量積算、H₂利用効率、CO₂固定率の計測・演算設備
- 電力、冷却水、蒸気、圧縮ガス、排水量等のユーティリティ計量設備
- CIP/SIP 記録、バッチ記録、アラーム履歴、監査証跡、データ保存システム
- 原料、培地、製品、排水の品質検査設備
- センサー校正、校正ガス、標準液、予備品、保守契約に対応する設備・体制

商業化前のパイロットでは、単に運転できることではなく、投資判断に使える実測データを取得できる計装設計が重要である。kWh/kg-product、H₂利用効率、冷却負荷、排水負荷、品質ばらつきが取得できない設備は、次段階投資の判断材料として弱い。

H₂/O₂供給の遮断、換気、ベント、安全停止へ自動的に移行できる制御系が必要である。

RED FLAG
● ラボ用センサーの延長で商業運転を想定している ● プロセス用ガス分析計と安全用 H₂検知器を区別していない ● H₂/O₂/CO₂供給量、排ガス量、H₂利用効率を連続的に把握できない ● 異常時停止、SIS/SIF、必要に応じた SIL 評価の設計がない ● 電力、冷却、ガス、排水の実測値が TEA/LCA に使える粒度で残らない ● 食品・飼料ロットの品質検査、トレーサビリティ、監査証跡を後回しにしている ● センサー校正、校正ガス、予備品、保守契約を CAPEX/OPEX に入っていない

5. OPEX 評価

5.1 OPEX の主要項目

OPEX には、電力、水素購入費または自社電解による実効水素製造費、O₂・CO₂の購入・回収・圧縮・貯蔵・供給コスト、攪拌・圧縮・冷却・回収・脱水・乾燥に要するエネルギー、培地、薬剤、水、CIP/SIP、人件費、保守、消耗品、センサー校正、スタック・膜・フィルター交換、

排水処理、廃棄物処理、品質管理、規制対応、保険、安全訓練、規格外ロット損失が含まれる。投資判断では、単価だけでなく、稼働率、歩留まり、停止時間、CIP/SIP 時間、規格外ロット、設備更新周期を含めた実効原価で見る必要がある。

項目	投資判断上の意味
電力・水素	最大級の原価要因。LCA にも直結
O ₂ ・CO ₂	購入、回収、圧縮、貯蔵、供給制御のコストが影響
攪拌・圧縮・ガス循環	kLa 確保と H ₂ 利用効率のトレードオフを決める
冷却	高生産性化と同時に増え、チラー・冷却水が OPEX を押し上げる
菌体回収・乾燥	下流工程の歩留まり、熱・電力、粉体安全を左右する
培地・栄養塩・水	N、P、S、Mg、Fe、Ni 等。リサイクル可否で変動
CIP/SIP・保守	薬剤、水、蒸気、停止時間、部品交換、排水処理コストを増加させる
品質保証・規制対応	食品・飼料用途では検査、記録、監査、申請費用が必要

RED FLAG
● 水素価格を楽観的に置き、電解・圧縮・貯蔵・ロス・リサイクルを含む実効水素コストを示していない ● 原料費だけで OPEX をみており、攪拌、圧縮、ガス循環、冷却、回収、乾燥等のユーティリティ費を十分に織り込んでいない ● 電力単価を固定値で置き、PPA 条件、系統制約、出力抑制、再エネ変動、稼働率への影響を織り込んでいない ● H₂、O₂、CO₂を名目単価で置き、圧縮・貯蔵・供給制御・管理・ロスを含めていない ● 乾燥、CIP/SIP、排水処理、品質保証、人件費、保険費を周辺費用として薄く扱っている ● 稼働率、歩留まり、規格外ロット、再立ち上げ時間、設備更新周期を実効原価に反映していない

5.2 電力・水素

C. necator は水素をエネルギー源として利用するため、水素製造と電力調達 は OPEX の中心である。水電解を用いる場合、電力価格、PPA 条件、系統制約、電解効率、電解装置の稼働率、スタック劣化・交換費、H₂の圧縮・貯蔵・乾燥、未反応 H₂の回収・リサイクル効率が製品原価を大きく左右する[1,2,8,10,11]。

考慮が必要となる項目は以下の通り。

- 電力価格、PPA 条件、系統制約、出力抑制
- 電解効率、スタック寿命、劣化率、交換費
- 電解装置、H₂貯蔵、発酵槽、乾燥設備の同時稼働率
- H₂圧縮、貯蔵、乾燥、純度管理、供給制御
- 未反応 H₂の回収率、排ガロス、リサイクル時の圧縮・精製コスト
- 非常時停止・パージ、再立ち上げ時の H₂損失

低炭素電力を安価かつ安定的に得られない場合、Power-to-Food の環境優位性と経済性は同時に悪化する。したがって、投資判断では kWh/kg-乾燥菌体、kWh/kg-タンパク質、kg-H₂/kg-product を実測値で置くべきである。

RED FLAG
● 安い再エネ電力を前提にしているが、年間稼働率、出力抑制、設備償却が整合していない ● LCOH ではなく電力単価だけで水素コスト議論している ● H₂圧縮・貯蔵・乾燥・純度管理、供給制御を原価に含めていない ● 未反応 H₂を全量リサイクルできる前提にしており、圧縮・精製・パージ損失・不純物蓄積を考慮していない ● H₂利用効率、排ガス中 H₂濃度、kg-H₂/kg-product を実測していない ● 安価な変動再エネを前提にしている一方で、H₂貯蔵、系統電力補完、発酵槽停止時の再立ち上げを考慮せず、高い発酵槽稼働率を置いている

5.3 ガス供給・圧縮・循環

酸素は水電解で副生する可能性があるが、酸素が副生することは酸素供給コストがゼロであることを意味しない。発酵槽へ供給するには、必要な圧力、純度、流量での分離、圧縮、バッファ、制御、余剰処理が必要となる。CO₂も、外部購入、発酵由来、排ガス由来、DAC 由来で、価格、純度、圧縮、LCA が異なる。ガス供給・循環は安全性、kLa、H₂利用効率、OPEX を同時に左右する[2,8,10,11]。

考慮が必要となる項目は以下の通り。

- O₂の回収、圧縮、流量制御、余剰処理
- CO₂の購入、回収、圧縮、輸送純度管理
- 未反応ガスの回収、圧縮、精製、再投入
- ベント、パージ、不活性化に伴うガロス
- 排ガス分析、H₂利用効率・CO₂固定率の計算

- 安全用ガス検知器、換気、監視、校正・保守費

RED FLAG
● O₂を副産物としてゼロコスト前提としており、圧縮、貯蔵、流量制御、余剰処理コストの評価がない ● CO₂の由来、純度、圧縮、輸送、供給安定性、LCA が曖昧 ● 排ガスリサイクルの圧縮電力、安全設計、不純物蓄積、パージ損失を考慮していない ● ガス流量を増やせば生産性が上がるという単純な前提になっている ● H₂、O₂、CO₂の未利用ロスを物質収支に入れていない ● プロセス用ガス分析、安全用ガス検知、ベント、パージの OPEX を見込んでいない

5.4 攪拌・冷却

ガス移動を高めるための攪拌、通気、加圧、循環は、生産性を上げる一方で電力消費と発熱を増やす。冷却は CAPEX だけでなく、冷却水、チラー電力、ポンプ、熱交換器洗浄、CIP/SIP 範囲の拡大、温度逸脱時の生産性低下やロット損失として OPEX にも現れる[2,9]。

考慮が必要となる項目は以下の通り。

- 攪拌電力、通気・循環ブロウ、圧縮機電力
- 冷却水、チラー、ポンプの電力
- チラーCOP、冷却水温、季節別の冷却能力と電力単価
- 熱交換器洗浄、スケール・バイオフィルム対策
- 内部コイル、外部熱交換器、外部循環ループに伴う CIP/SIP、無菌性維持、停止時間
- 温度制御異常時の緊急停止、再立ち上げ、ロット損失

RED FLAG
● kLa 改善だけを議論し、攪拌・圧縮・冷却電力を入れていない ● ラボの温度制御をそのままスケールアップしている ● チラーCOP、冷却水温、季節変動を織り込んでいない ● 外部熱交換器の汚れ、洗浄、保守、停止時間を見込んでいない ● 冷却設備の複雑化による CIP/SIP 範囲拡大、洗浄時間、無菌性維持コストを見込んでいない ● 温度逸脱時の生産性低下とロット廃棄を見込んでいない

5.5 菌体回収・乾燥

微生物バイオマスは水分を多く含むため、食品・飼料原料として保存・流通するには濃縮、洗浄、脱水、乾燥、粉体化が必要である。工程には遠心分離、膜分離、洗浄、濃縮、加熱不活性化、乾燥、粉碎、包装が含まれ、特に脱水・乾燥工程はエネルギー集約的であり、歩留まり、品質、安全性にも大きく影響する[10]。

考慮が必要となる項目は以下の通り。

- 乾燥前固形分濃度、洗浄・脱水後の歩留まり
- kg 水除去当たりの熱・電力
- 遠心分離・膜分離の電力、膜・フィルター等の消耗品
- 加熱不活化、核酸低減、微生物規格、生菌数確認
- 乾燥後のタンパク質変性、消化性、風味
- 粉じん爆発対策、集じん、清掃、作業員暴露対策、清掃
- 包装後の保存安定性、吸湿、固結

RED FLAG
● 乾燥前固形分濃度が低いまま熱乾燥を前提にしている ● kg 水除去当たりの熱・電力消費を示していない ● 遠心機・膜の電力、洗浄、消耗品、歩留まりロスを入れていない ● 加熱不活性化、核酸低減、LPS/エンドトキシン様成分、重金属・微量金属の残留管理を見込んでいない ● 乾燥によるタンパク質変性、消化性、風味、粉体物性への影響を考慮していない ● 粉じん爆発、作業員曝露、集じん、清掃、包装後安定性を OPEX に入れていない

5.6 培地・栄養塩・水・排水

C. necator は CO₂ と H₂ を利用できるが、菌体形成には窒素、リン、硫黄、マグネシウム、鉄、ニッケル、モリブデン、コバルト、銅、マンガン、亜鉛などが必要である。培地リサイクルが成立しない場合、栄養塩購入費と排水処理費が同時に増える[2]。

考慮が必要となる項目は以下の通り。

- 栄養塩単価、供給安定性、品質規格
- 培地リサイクル率、ブローダウン率
- 水使用量、用水処理、純水・軟水コスト
- 排水中の N、P、COD、塩類、金属、pH
- CIP 排水、薬剤残留、スラッジ、廃棄物、規格外ロット処理

RED FLAG
● CO₂と H₂だけで製品原価を評価している ● N、P、S、Mg、Fe、Ni 等の栄養塩コストを軽視している ● 培地リサイクル率を高く置いているがその根拠が明確ではない ● 塩類、未知代謝物、EPS の蓄積を評価していない ● ブローダウン、CIP 排水、規格外排水の処理費を考慮していない ● Ni や重金属の製品、スラッジ・CIP 排水への分配を考慮していない

5.7 CIP/SIP・保守・安全維持

CIP/SIP、保守、安全維持は、商業プラントでは継続的な OPEX として現れる。特に H₂/O₂系では、ガス検知器、遮断弁、シール、センサー、フィルター、防爆機器の点検・交換・校正が不可欠である[2,10,11]。

考慮が必要となる項目は以下の通り。

- CIP 薬剤、SIP 蒸気、水、排水処理
- 洗浄・滅菌による停止時間と稼働率低下
- 防爆機器、ガス検知器、緊急遮断弁、換気設備の点検
- センサー校正、校正ガス、膜・フィルター・シール交換
- 保守契約、予備品、保険費、安全教育、監査、HAZOP 更新

RED FLAG
● CIP/SIP を年数回の標準洗浄として扱い、薬剤、水、蒸気、排水、停止時間を原価に反映していない ● 防爆機器、ガス検知器、緊急遮断弁、換気設備の点検・校正・交換費を見込んでいない ● バルブ、シール、膜、フィルター、センサーの交換周期を設定していない ● HAZOP 後の追加対策費、保険費、安全教育費を OPEX に入っていない・洗浄・滅菌、点検、校正による稼働率低下を実効原価に反映していない

5.8 品質保証・規制対応・ロット損失

食品・飼料用途では、製品を作れることと販売できることは別である。製品規格、ロット検査、トレーサビリティ、表示、規制申請、規制変更への対応、顧客への信用醸成に必要なデータ整備、規格外ロット処理は、OPEX と上市スケジュールに影響する[8-10]。

考慮が必要となる項目は以下の通り。

- 原料、工程、製品のロット検査
- 核酸、Ni、重金属、微生物、菌体由来成分、灰分の規格管理
- タンパク質含量、消化性、アレルゲン性、風味、異物混入の確認
- 安全性試験、給与試験、規制申請、追加試験・規制変更、表示・輸出入規制、対象用途別基準への継続対応
- トレーサビリティ、監査、文書管理、表示対応、CoA・SDS等の顧客向け資料整備
- 顧客監査、第三者認証、サプライヤー評価、クレーム・リコール対応体制
- 規格外ロットの隔離、再処理、廃棄

RED FLAG
● 食品・飼料規制を承認後の話として後回しにしている ● 核酸、Ni、重金属、微生物、灰分、菌体由来成分の検査費を OPEX に入っていない ● 安全性試験、給与試験、規制申請に必要な費用と期間を上市計画に反映していない ● 規制変更、表示変更、輸出入規制、対象用途別基準への継続対応費を見込んでいない ● 顧客監査、第三者認証、CoA・SDS・トレーサビリティ資料の整備費を見込んでいない ● クレーム対応、リコール手順、危機管理体制を整備していない ● 規格外ロットの隔離、再処理、廃棄コストを考慮していない

6. 横断的リスク

6.1 ニッケルおよび微量金属管理

生物学的背景

C. necator の水素利用には[NiFe]ヒドロゲナーゼが関与する。[NiFe]ヒドロゲナーゼは活性中心にニッケルと鉄を含む酵素であり、水素酸化に必須である[7,8,13,14]。ニッケルは機能的に必要な微量元素である一方、高濃度では毒性を示し、食品・飼料原料や排水処理の観点でも管理対象になり得る。したがって、ニッケルをはじめとする微量金属は培地処方だけでなく、製品規格、排水、スラッジ、設備材料まで含めて評価する必要がある。

培地中 Ni 濃度

公開培地レシピでは、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ または $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ が微量元素として添加されることがある[15-18]。

例	最終濃度	元素 Ni 換算
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.02 mg/L [15]	0.02 mg/L	約 0.005 mg-Ni/L
$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.56 mg/L [16]	0.56 mg/L	約 0.117 mg-Ni/L
SL-6 を 10 mL/L 添加する場合 [17,18]	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.20 mg/L 相当	約 0.05 mg-Ni/L

これらの値は、培地中濃度としては低濃度の範囲にある。一方で、商業プラントでは、単回の培地濃度のみで評価するのではなく、Ni の投入量、菌体への取り込み、上澄みへの残留、排水、スラッジ、最終製品への移行、ならびに設備・配管由来の溶出を含めた物質収支として評価する必要がある。

なお、日本では国の全国一律排水基準として Ni の基準値は設定されていないが、自治体条例等により Ni 基準が明示されている場合がある。例えば神奈川県では、「神奈川県生活環境の保全等に関する条例」等に基づく事業所排水基準として、排水中の Ni について、適用条件に応じて 0.3 mg/L または 1 mg/L の基準値が示されている[19]。そのため、Ni は微量元素であっても、商業運転では排水管理、モニタリング、処理コストの観点から無視できない管理項目となり得る。

商業化時の Ni 論点

商業化時には、培地中 Ni 濃度だけでなく、培地、補給液、装置材料、洗浄薬剤、リサイクル培地を入力側として、製品、排水、スラッジ、CIP 排水、リアクター内蓄積への分配を確認する必要がある。

現在の公開文献では、*C. necator* 食品・飼料プラントを想定した Ni 完全物質収支は限定的であり、商業長期運転条件での実測データが不足している。

RED FLAG
● 培地中 Ni 濃度が mg/L 未満であることを理由に Ni 管理は不要と判断している ● 連続運転、培地リサイクル、濃縮、スラッジ移行を考慮していない ● 製品中 Ni、排水中 Ni、CIP 排水中 Ni の実測値がない ● 微量元素ミックス由来の Ni 以外の金属を評価していない ● 食品・飼料用途の規格と自治体排水基準を同時に確認していない

6.2 腐食・材料

想定される腐食環境

C. necator プロセスでは、以下が同時に存在する[2]。

- CO₂
- O₂
- リン酸塩
- 硫酸塩
- アンモニウム塩
- 微量金属
- 微生物菌体
- 細胞外高分子物質、EPS、バイオフィーム様沈着物
- CIP 薬剤
- SIP 時の高温蒸気

CO₂は水に溶けると炭酸を形成し、pH に影響する。塩化物、硫酸塩、酸・アルカリ洗浄剤、温度、溶接部、流速、滞留部、ガスライン凝縮液、菌体成分の沈着は、孔食、すき間腐食、応力腐食、沈殿物下腐食、汚れ付着に影響し得る。

RED FLAG
● 食品発酵であることを理由に SUS316L で十分と一括判断している

- CO₂、O₂、塩類、CIP 薬剤、温度、流速、滞留部を同時に評価していない
- 長期腐食、孔食、すき間腐食、沈着物下腐食、溶接部、ガスラインの凝縮液を考慮していない
- 菌体成分、EPS、バイオフィーム様沈着物による汚れ付着、CIP/SIP 負荷、腐食促進を考慮していない
- 腐食による Ni 等の金属溶出を製品・排水側から評価していない

材料選定

候補材料には以下がある。

- SUS304
- SUS316L
- 高耐食ステンレス
- 樹脂ライニング
- 特殊合金

食品・医薬品発酵では SUS316L が広く使われる。SUS316L は SUS304 より耐食性が高い場合が多いが、実際の寿命は培地組成、温度、pH、塩化物濃度、洗浄条件、溶接品質、表面仕上げ、滞留部の有無に依存する。20 年以上の商業運転を想定する場合、初期設備費だけでなく、腐食余裕、定期点検、交換周期、漏洩リスク、停止損失を含めて評価すべきである。

RED FLAG
● 初期 CAPEX を下げるために材料グレードを落としている ● 材料選定に CIP/SIP、塩類、温度、溶接、表面仕上げ、滞留部を反映していない ● 腐食余裕、点検周期、交換費、停止損失を OPEX に入っていない ● 食品接触面、ガスライン、排水ラインを同じ材料思想で扱っている ● 菌体成分、EPS、バイオフィーム様沈着物による伝熱低下、膜ファウリング、センサー汚れ、CIP/SIP 負荷、沈着物下腐食を評価していない ● 腐食試験、浸漬試験、加速試験、パイロット運転後の金属溶出データに基づかず、材料寿命を想定している

6.3 CIP/SIP

CIP/SIP の役割

CIP は Cleaning in Place、SIP は Sterilization in Place を意味する。CIP は設備を分解せずに洗浄する仕組みであり、残留培地、菌体成分、バイオフィーム、製品残渣を除去するために用いられる。SIP は設備を分解せずに蒸気等で滅菌・殺菌する仕組みであり、目的外微生物の混入や製品汚染を防ぐために重要である[2,9]。

C. necator プロセスでは、発酵槽本体だけでなく、配管、バルブ、センサー、サンプリングライン、外部循環ループ、熱交換器、菌体回収設備、膜・フィルター、ベントフィルターまで CIP/SIP 対象になり得る。そのため、CIP/SIP は衛生管理だけでなく、設備設計、稼働率、排水処理、腐食、品質保証に影響する横断的論点である。

CIP/SIP には以下が必要となる。

- 蒸気
- アルカリ洗浄剤
- 酸洗浄剤
- 水
- 洗浄確認
- 滅菌バリデーション
- 排水処理
- 停止時間

RED FLAG
● CIP/SIP を衛生管理だけの話として扱っている ● 洗浄対象範囲、頻度、時間、薬剤、水、蒸気、排水を定量化していない ● 発酵槽本体だけを CIP/SIP 対象とし、配管、バルブ、センサー、外部循環ループ、熱交換器、膜・フィルター、菌体回収設備を対象に入れていない ● 洗浄確認と滅菌バリデーションの費用・人員を考慮していない ● CIP/SIP による停止時間を操業率に反映していない ● CIP 薬剤が腐食、金属溶出、排水中 TDS、微量金属負荷に与える影響を評価していない

C. necator プロセスでの重要性

C. necator プロセスでは、液相ラインだけでなく、H₂、O₂、CO₂のガスライン、ガス循環配管、センサー、バルブ、フィルターが複雑になりやすい[1,2,4,8,9]。設備が複雑になるほど、洗浄しにくい箇所、滞留部、凝縮液の発生箇所、バイオフィーム形成リスクが増える。特に、リアク

ター近傍の配管、ガス循環ライン、ベントフィルター、外部循環ループ、膜、分離機、センサー挿入部は、CIP/SIP 対象範囲または分解洗浄・交換・保守対象として設計上確認する必要がある。

CIP/SIP は衛生管理だけでなく、以下にも影響する。

- 腐食
- 操業率
- 薬剤費
- 水使用量
- 排水処理
- バッチ廃棄リスク
- LCA

したがって、Power-to-Food の LCA と TEA では、CIP/SIP を標準的な周辺工程ではなく、稼働率と OPEX を左右する工程として明示すべきである。

RED FLAG
● リアクター本体だけを CIP/SIP 対象にしている ● ガス循環ライン、フィルター、センサー、膜、分離機を洗浄・滅菌・交換・保守設計に入っていない ● 洗浄しにくいデッドレグや滞留部、凝縮液発生箇所を設計レビューしていない ● CIP 薬剤が腐食・排水・微量金属溶出に与える影響を評価していない ● CIP/SIP による停止時間、薬剤費、水使用量、排水処理費を LCA・TEA に反映していない

6.4. 食品・飼料安全性

LPS・エンドトキシン

C. necator はグラム陰性菌であり、外膜に LPS を持つ。LPS はエンドトキシン活性を持ち、免疫反応を引き起こし得る物質として知られている[8]。

LPS のリスクは摂取経路によって異なる。注射剤で問題となるエンドトキシンリスクと、食品・飼料として経口摂取する場合のリスクを同一視すべきではない。一方で、乾燥粉体の製造・包装では、作業者の吸入曝露も評価対象となる。

食品・飼料用途では、以下を確認すべきである。

- 製品中 LPS 含量またはエンドトキシン活性の測定方法
- 加熱・乾燥・破碎による LPS 挙動

- 経口摂取時の安全性、想定摂取量、用途別の評価
- 乾燥粉体の吸入曝露管理、作業者安全
- 対象動物ごとの給与試験

RED FLAG
● 注射剤のエンドトキシンリスクと食品・飼料の経口リスクを混同している ● 経口摂取、吸入曝露、作業者安全を分けて評価していない ● 乾燥・破砕・粉体化で LPS またはエンドトキシン活性がどう測定・管理されるかを確認していない ● 想定摂取量、用途、対象動物別の安全性評価がない ● 対象動物別の給与試験がない

核酸

細菌バイオマスは一般に核酸、特に RNA 含量が高い。核酸はプリン体代謝を経て体内で分解され、最終的に尿酸となる。人では尿酸が過剰になると、高尿酸血症や痛風リスクに関係する[2,8]。

この問題は *C. necator* 特有ではなく、単細胞タンパク質全般で古くから知られている。食品用途では、核酸低減処理、残存核酸の管理方針、想定摂取量、対象集団ごとの安全性評価が必要である。飼料用途でも、対象動物、配合率、給与期間、畜産物・水産物への影響を踏まえた評価が必要となる。

RED FLAG
● 単細胞タンパク質の一般論として片付け、製品中核酸の管理方針を設計していない ● 核酸低減処理のコスト、歩留まり、排水負荷を評価していない ● 想定摂取量、配合率、対象集団ごとの安全性評価がない ● 飼料用途であれば核酸を無視できるとしている ● 対象動物別の配合率、給与期間、長期影響を評価していない

アレルギー性

C. necator 由来タンパク質は、酵母、大豆、乳タンパク質のように長い食経験があるわけではない。したがって、既存アレルギーとの比較、消化性、熱安定性、想定摂取量、安全性データを段階的に確認する必要がある[8,9]。

確認が必要となる項目は以下の通り。

- 既知アレルギーとの配列相同性

- 消化性
- 加熱処理後の安定性
- 血清反応性
- 長期摂取データ
- 対象動物への長期給与データ

RED FLAG
● タンパク質含量だけで食品価値を評価している ● 既知アレルゲンとの配列相同性、消化性、熱安定性を評価していない ● 長期摂取データ、血清反応性、対象動物別データがない ● 製造工程によるタンパク質変性を安全性評価に入れていない

食品・飼料規制

食品用途では、Novel Food、GRAS 相当、食品添加物・食品原料としての位置づけを国・地域ごとに確認する必要がある。飼料用途でも、対象動物、配合上限、残留物、畜産物への移行、表示、輸出入規制が論点となる。

RED FLAG
● 食品用途の承認を一括で語っている ● 対象国、用途、摂取量、表示、輸出入を分けていない ● 飼料用途なら規制が軽いと決めている ● LPS、核酸、Ni、重金属、微生物、アレルゲン性のデータパッケージがない ● 規制申請期間を上市計画に入れていない

商業化の初期ターゲットは、人向け食品よりも飼料・養殖飼料・ペットフード等の方が規制・受容性の観点で現実的な場合がある。ただし、飼料用途でも安全性データが不要になるわけではない。

6.5. 培地リサイクル

背景

C. necator は CO₂ と H₂ を利用できるが、菌体形成には窒素、リン、硫黄、マグネシウム、鉄、ニッケル、モリブデン、コバルト、銅、マンガン、亜鉛などが必要である[2]。

培地を毎回廃棄すると、栄養塩コストと排水処理コストが増加する。したがって、商業化では培地リサイクルは高い確率で重要な設計課題になる可能性が高い。

ただし、培地リサイクルといっても、使用済み培地をそのまま戻す場合、分離膜、固液分離、前処理、殺菌、センサー、洗浄設備などの追加 CAPEX と、膜・フィルターの駆動、洗浄、薬剤、分析、ブローダウン、排水処理に伴う OPEX が発生し得る。したがって培地リサイクルは単純なコスト削減策ではなく、水・栄養塩削減効果と、処理・管理コストのトレードオフとして評価すべきである。

RED FLAG
● 培地を水のように循環できると想定している ● 栄養塩コストと排水処理コストを別々に見ている ● 食品・飼料用途で回収栄養塩を使う場合の品質・汚染を考慮していない ● 培地リサイクルによってトレーサビリティが複雑化し、汚染・規格外発生時の原因追跡とリコール範囲設定が困難になるリスクを評価していない ● リサイクルできない場合の OPEX 上振れを感度分析していない

培地リサイクルの利点

培地リサイクルの目的は以下である[2]。

目的	効果
コスト削減	N、P、S、Mg、微量元素の再利用
排水削減	ブローダウン量、洗浄水、上澄み排水の削減
LCA 改善	富栄養化、資源消費、水使用量の低減
供給安定性	リン等の資源制約リスク低減

RED FLAG
● 培地リサイクルを LCA 改善の前提にしているが、リサイクル率とブローダウン率が評価されていない ● 栄養塩再利用の品質規格がない ● 水使用量削減だけを示し、処理・濃縮・監視のエネルギーを入れていない

技術課題

培地リサイクルでは以下が問題になり得る[2]。

課題	影響
----	----

塩類蓄積	浸透圧ストレス、生育阻害、腐食促進
未知代謝物蓄積	生産性低下、泡、膜ファウリング
EPS 蓄積	粘度上昇、配管汚れ、膜汚染
微量元素アンバランス	欠乏または過剰毒性
Ni 循環	製品・排水・スラッジへの分配不明
ブローダウン	排水処理負荷と栄養塩損失

下水処理や資源回収分野では N/P 回収技術の知見がある。しかし、食品グレードの閉鎖型 *C. necator* 発酵へそのまま適用できるとは限らない。用途が食品・飼料である以上、回収栄養塩の品質、トレーサビリティ、汚染リスクを別途管理する必要がある。

RED FLAG
● 長期連続運転の循環データがない ● 塩類、未知代謝物、EPS、微量元素アンバランスを見ていない ● ・培地に添加した Ni が、最終製品、排水、スラッジ、CIP 排水、リサイクル培地のどこへ移行するかを確認していない ● 膜ファウリング、泡、粘度上昇、CIP 頻度増加を OPEX に入っていない

各技術の成熟度評価

項目	成熟度	コメント
N 回収	高（下水分野） 中（食品発酵適用）	技術知見はあるが食品グレード適用は別問題
P 回収	高（資源回収分野） 中（食品発酵適用）	回収リンの品質規格が論点
プロセス水再利用	中	他産業知見はあるが <i>C. necator</i> 専用データは限定的
塩類管理	中	一般論はあるが長期運転データが必要
微量元素管理	中	培地設計知見はあるが循環時挙動は不明点が多い
Ni 循環管理	低	完全物質収支の公開データが乏しい

長期連続運転	低-中	パイロット以上の公開データが限定的
商業実績	低-中	企業データは非公開が多く、投資判断に使える実測値が不足しやすい

RED FLAG		
● 下水・資源回収分野の成熟技術をそのまま食品発酵に転用できると見ている ● パイロット以上の長期連続運転データがない ● 培地循環失敗時のブローダウン・排水処理・再立ち上げを設計していない ● 公開商業実績が限定的で、培地リサイクルを前提とした OPEX 削減効果を、業界標準値や他社実績と比較検証しにくい		

7. 統合評価

C. necator を用いた Power-to-Food 技術は、土地利用、水利用、気候依存性の低さという観点で有望なタンパク質生産方式である。一方で、投資判断では、生物学的成立性だけでなく、低炭素電力、水素供給、ガス移動、防爆、冷却、菌体回収・乾燥、CIP/SIP、培地リサイクル、品質保証、規制対応を統合した実装可能性を評価する必要がある。

7.1 強み

C. necator を用いた Power-to-Food 技術の強みは以下である。

- 高い土地利用効率の可能性
- CO₂を炭素源として利用可能
- 再生可能電力との親和性
- 閉鎖型設備による気候・季節依存性の低さ
- 飼料タンパク質輸入依存の緩和可能性
- 高環境負荷タンパク質を代替した場合の LCA 改善余地

特に、土地制約が大きい地域、低炭素電力が豊富な地域、飼料タンパク質を輸入に依存する地域では戦略的価値がある。

7.2 弱み・リスク

主要リスクは以下である。

- 水素・電力コスト依存
- 高 CAPEX
- 高 kLa 要求
- H₂/O₂系の防爆
- 冷却負荷
- 菌体回収・乾燥エネルギー
- 腐食・保守
- CIP/SIP による停止時間と排水
- 長期安全性データ不足
- 培地リサイクルの不確実性
- Ni を含む微量金属循環の不透明性

RED FLAG
● 生物学的成立性をもって投資適格と判断している ● LCA の優位性を示すが、TEA、HAZOP、規制、安全性、保守を統合していない ● CAPEX と OPEX を独立に評価し、稼働率・停止時間・製品規格外ロットを接続していない ● パイロット実測値なしにフルスケール投資へ進んでいる

7.3 不足しているデータ

投資判断に不足しているデータは以下である。

- 実測 kWh/kg-乾燥菌体
- 実測 kWh/kg-タンパク質
- 実測 kg-H₂/kg-乾燥菌体
- 実測 kg-H₂/kg-タンパク質
- 実測 H₂利用効率
- 連続運転での実生産性
- 冷却負荷
- 乾燥前固形分濃度
- 乾燥工程の実エネルギー
- 防爆設備を含む CAPEX
- 菌体回収・濃縮の歩留まりと電力
- CIP/SIP 頻度と停止時間
- 保守・センサー交換・防爆維持費
- 製品中の核酸、LPS または菌体由来成分、Ni、重金属
- Ni 完全物質収支
- 培地リサイクル時の塩類・代謝物、EPS、微量金属蓄積
- 規格外ロット率、再立ち上げ時間
- 食品・飼料承認、顧客採用に必要な安全性・品質データ

RED FLAG
● kg-product 当たりの実測値がない ● ラボスケールの収率・生産性だけで TEA を作っている ● 長期連続運転、停止・再起動、規格外ロット、設備保全のデータがない ● 製品安全性・規制申請・排水基準が設備設計と接続していない

8. 投資判断上の結論

C. necator を利用した Power-to-Food 技術は、生物学的には十分成立可能性が高い。低炭素電力を活用できる場合、土地利用、水利用、富栄養化負荷、温室効果ガス排出の面で既存タンパク質より優位となる可能性がある。

一方で、実際の商業化を左右するのは菌体性能や代謝工学だけではない。むしろ、水素製造、ガス移動、熱除去、防爆、腐食、洗浄、培地循環、菌体回収、乾燥、排水処理、食品・飼料安全性を統合した化学工学・設備工学の成熟度が重要である。

現時点での総合評価は以下である。

項目	評価
生物学的成立性	高
環境価値	条件付きで高
商業運転成熟度	中-低
CAPEX 見通し	不確実性大
OPEX 見通し	電力・水素価格依存大
食品用途	安全性・規制データが必要
飼料用途	食品より現実的だが、安全性・給与試験が必要
投資適格性	パイロット実測データ取得後に判断すべき

したがって、本技術への投資は、まずパイロット実証、TEA/LCA 統合評価、規制・安全性評価を目的とした段階投資とするのが妥当である。フルスケール商業設備への投資は、低炭素電力・水素調達条件、長期安定運転、製品安全性、培地リサイクル、Ni 物質収支、防爆・保険費を含む CAPEX/OPEX が確認された後に判断すべきである。

結論として、本技術は環境価値と戦略的意義を持つ一方、現時点ではフルスケール投資の前提を置くよりも、実測 KPI に基づく段階的な投資判断が適している。

参考文献

1. Bernal-Cabas M, Kumar K, Terpstra O, van den Bogaard S, Ammar AB, Mäkinen S, et al. Food production from air: gas precision fermentation with hydrogen-oxidising bacteria. *Trends Biotechnol.* 2026;44(4):906–920. doi:10.1016/j.tibtech.2025.08.003.
2. Sillman J, Uusitalo V, Ruuskanen V, Ojala L, Kahiluoto H, Soukka R, et al. A life cycle environmental sustainability analysis of microbial protein production via power-to-food approaches. *Int J Life Cycle Assess.* 2020;25(11):2190–2203. doi:10.1007/s11367-020-01771-3.
3. Sillman J, Nygren L, Kahiluoto H, Ruuskanen V, Tamminen A, Bajamundi C, et al. Bacterial protein for food and feed generated via renewable energy and direct air capture of CO₂: Can it reduce land and water use? *Glob Food Sec.* 2019;22:25–32. doi:10.1016/j.gfs.2019.09.007.
4. Järviö N, Maljanen NL, Kobayashi Y, Ryyänen T, Tuomisto HL. An attributional life cycle assessment of microbial protein production: A case study on using hydrogen-oxidizing bacteria. *Sci Total Environ.* 2021;776:145764. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145764.
5. Weldon M, Euler C. Physiology-informed use of *Cupriavidus necator* in biomanufacturing: A review of advances and challenges. *Microb Cell Fact.* 2025;24(1):30. doi:10.1186/s12934-025-02643-x.
6. Heijstra BD, Leang C, Juminaga A. Gas fermentation: Cellular engineering possibilities and scale up. *Microb Cell Fact.* 2017;16(1):60. doi:10.1186/s12934-017-0676-y.
7. Pander B, Mortimer Z, Woods C, McGregor C, Dempster A, Thomas L, et al. Hydrogen oxidising bacteria for production of single-cell protein and other food and feed ingredients. *Eng Biol.* 2020;4(2):21–24. doi:10.1049/enb.2020.0005.
8. Angenent SC, Schuttinga JH, van Efferen MFH, Kuizenga B, van Bree B, van der Krieken RO, Verhoeven TJ, Wijffels RH. Hydrogen oxidizing bacteria as novel protein source for human consumption: An overview. *Open Microbiol J.* 2022;16:e187428582207270. doi:10.2174/18742858-v16-e2207270.
9. Malila Y, Owolabi IO, Chotanaphuti T, Sakdibhornssup N, Elliott CT, Visessanguan W, et al. Current challenges of alternative proteins as future foods. *NPJ Sci Food.* 2024;8(1):53. doi:10.1038/s41538-024-00291-w.
10. Ye L, Bogicevic B, Bolten CJ, Wittmann C. Single-cell protein: Overcoming technological and biological challenges towards improved industrialization. *Curr Opin Biotechnol.* 2024;88:103171. doi:10.1016/j.copbio.2024.103171.
11. U.S. Department of Energy. Hydrogen Shot: Water Electrolysis Technology Assessment [Internet]. Washington (DC): U.S. Department of Energy; 2024 [cited 2026 Jul 2]. Available from: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/hydrogen-shot-water-electrolysis-technology-assessment.pdf>
12. Leger D, Matassa S, Noor E, Shepon A, Milo R, Bar-Even A. Photovoltaic-driven microbial protein production can use land and sunlight more efficiently than conventional crops. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2021;118(26):e2015025118. doi:10.1073/pnas.2015025118.
13. Tsang KL, Wong KB. Moving nickel along the hydrogenase-urease maturation pathway. *Metallomics.* 2022;14(5):mfac003. doi:10.1093/mtomcs/mfac003.
14. Watanabe S, Kawashima T, Nishitani Y, Kanai T, Wada T, Inaba K, et al. Structural basis of a Ni acquisition cycle for [NiFe] hydrogenase by Ni-metallochaperone HypA and its enhancer. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2015;112(25):7701–7706. doi:10.1073/pnas.1503102112.
15. DSMZ. Medium 81: Mineral Medium for Chemolithotrophic Growth (H-3) [Internet]. Braunschweig: Leibniz Institute DSMZ; [cited 2026 Jul 2]. Available from: <https://mediadive.dsmz.de/pdf/81?ccno=DSM%20430>

16. Kim S, Jang YJ, Gong G, Lee SM, Um Y, Kim KH, et al. Engineering *Cupriavidus necator* H16 for enhanced lithoautotrophic poly(3-hydroxybutyrate) production from CO₂. *Microb Cell Fact*. 2022;21(1):231. doi:10.1186/s12934-022-01962-7.
17. DSMZ. Medium 81: Mineral Medium for Chemolithotrophic Growth (H-3) [Internet]. Braunschweig: Leibniz Institute DSMZ; [cited 2026 Jul 2]. Available from: <https://bacmedia.dsmz.de/pdf/81?ccno=DSM%20430>
18. Gascoyne JL, Bommareddy RR, Heeb S, Malys N. Engineering *Cupriavidus necator* H16 for the autotrophic production of (R)-1,3-butanediol. *Metab Eng*. 2021;67:262–276. doi:10.1016/j.ymben.2021.06.010.
19. 神奈川県. 水質規制の手引き: 事業所排水の水質基準一覧表 [Internet]. 神奈川: 神奈川県; 2025 [cited 2026 Jul 2]. Available from: https://www.pref.kanagawa.jp/documents/23691/haisuikijunnichiran_20250701.pdf