

Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3 | 排水処理用ラッカーゼ酵素

Enzymes.bio リサーチチーム · ニュージーランド · ウェリントン · June 18, 2026

Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3は、排水中のフェノール類、染料、リグニン関連芳香族化合物、一部の医薬品・抗生物質様微量汚染物質を、酸素依存的な酸化反応で変換するために使われるラッカーゼ酵素です。ラッカーゼは有機汚染物質から電子を引き抜き、分子状酸素を水へ還元するマルチ銅酸化酵素であり、脱色、毒性低減、難分解性有機物の反応性向上を目的とした排水処理補助に適しています^[1]。Enzymes.bioは本製品の供給業者であり、1kg単位でオンライン直接販売し、注文時にCoAおよびSDSを併せて提供します。

排水処理用ラッカーゼ酵素とは

ラッカーゼは、真菌、細菌、植物などに見られる酸化還元酵素で、排水処理分野では特に白色腐朽菌由来ラッカーゼの研究蓄積が多い酵素です。分類上は「青色マルチ銅酸化酵素」に属し、典型的には銅中心を介して基質の一電子酸化を進め、最終電子受容体として分子状酸素を利用します。このため、過酸化水素を必須とするペルオキシダーゼ系とは異なり、酸素を利用する穏やかな酸化触媒として、フェノール性化合物、芳香族アミン、リグニン関連物質、染料、環境中の難分解性有機物の変換に応用されてきました^[2]。

排水処理で重要なのは、ラッカーゼが「すべての有機物を無差別に分解する酵素」ではなく、酸化されやすい電子構造を持つ化合物に選択的に作用する点です。フェノール性水酸基、共役芳香環、アミノ基を含む発色団、リグニン様構造などは、ラッカーゼ反応の対象になりやすく、反応後にラジカル中間体、カップリング生成物、開裂生成物、沈降・吸着されやすい高分子化物などへ変わる場合があります。近年のレビューでも、ラッカーゼは環境修復における生体触媒として、染料脱色、フェノール性汚染物質の処理、微量汚染物質の変換に関して継続的に研究されていると整理されています^[3]。

Enzymes.bioが供給する**Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3**は、排水処理用途でラッカーゼを利用したい事業者向けの酵素製品です。Enzymes.bioは製造業者または研究機関ではなく、オンラインで1kg単位の直接購入ルートを提供する供給業者です。CoAおよびSDSは注文時に併せて提供され、受領後の社内保管、安全確認、記録管理に利用できます。

ラッカーゼの反応機構：酸素で汚染物質を酸化する仕組み

ラッカーゼ反応は、簡略化すると「有機基質から電子を1つずつ取り出し、その電子を酵素内部の銅中心を通じて酸素へ渡す反応」です。多くのラッカーゼは、基質酸化に参与するT1銅中心と、酸素還元に関与するT2/T3銅クラスターを備えています。基質はT1銅付近で一電子酸化されてラジカル化し、蓄積された電子はT2/T3部位で分子状酸素の4電子還元に使われ、酸素は最終的に水へ変換されます^[2]。

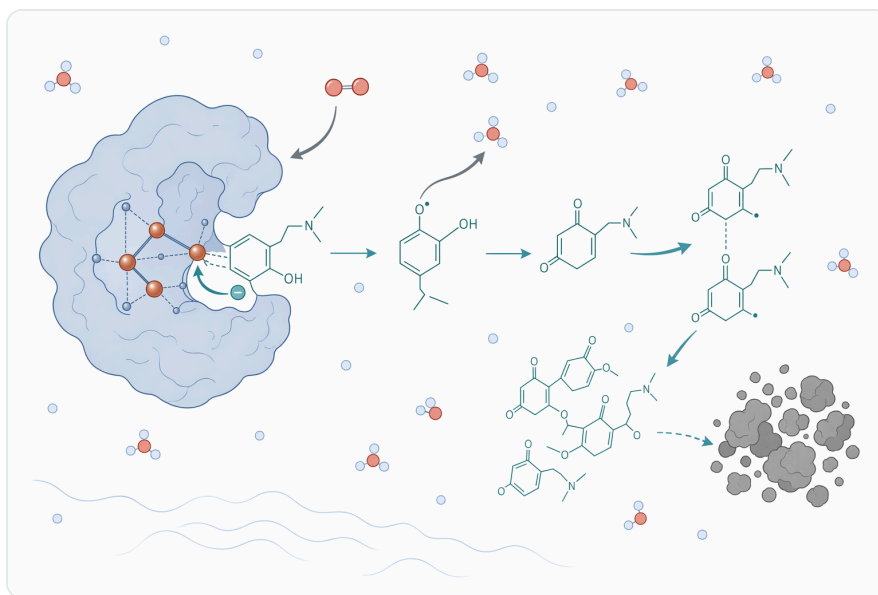


Figure 1. 라카아제는 산소를 물로 환원시키는 동시에 페놀성 오염물질과 염료 오염물질을 산화시키며, 이 과정에서 종종 라디칼이 형성되어 서로 결합해 용해도가 낮은 생성물을 만듭니다.

この「一電子酸化」は排水処理で大きな意味を持ちます。フェノール類ではフェノキシラジカルが生じ、ラジカル同士のカップリング、側鎖酸化、芳香環構造の変化が進むことがあります。アゾ染料、アントラキノン系染料、トリフェニルメタン系染料などの発色構造を持つ化合物では、電子分布が変わることで可視光吸収が弱まり、脱色として観察される場合があります。リグニン関連物質では、芳香族ユニットの酸化により、分子量分布や親水性、後段処理での分解性が変わる可能性があります^[1]。

ラッカーゼ単独では酸化しにくい非フェノール性化合物に対しては、低分子の酸化還元メディエーターが関与する研究もあります。メディエーターはラッカーゼによって酸化され、その酸化体がより高い酸化力または異なる反応性を持つ拡散性酸化剤として働くため、酵素の活性部位へ直接入りにくい基質にも反応が及ぶ可能性があります。ただし、メディエーターの選定や副生成物の評価は用途依存であり、排水処理では処理後水質と毒性を含めて検討される領域です^[3]。

対象となりやすい排水課題

ラッカーゼが特に検討される排水は、単純なBOD低減だけでは解決しにくい有機汚染を含む排水です。代表例は、繊維染色排水の着色、紙パルプ排水のリグニン由来色度、化学工業排水のフェノール性成分、食品・発酵系排水のポリフェノール、製薬・都市下水処理水中の微量有機汚染物質です。ラッカーゼ系処理のレビューでは、持続可能な排水処理への応用可能性が議論される一方、対象物質、排水マトリクス、酵素安定性によって効果が左右されることも指摘されています^[1]。

染料・着色排水の脱色

繊維染色排水では、色度が低濃度でも視覚的・規制上の問題になり、染料分子の安定な芳香族構造が通常の生物処理で残りやすい場合があります。ラッカーゼは染料の発色団または補助発色団を酸化し、 π 電子系を変化させることで脱色を促進します。磁性金属有機構造体に固定化したラッカーゼを用いた研究では、排水脱色に向けて、酵素の回収性や反応場の安定化を含む固定化アプローチが検討されています^[4]。

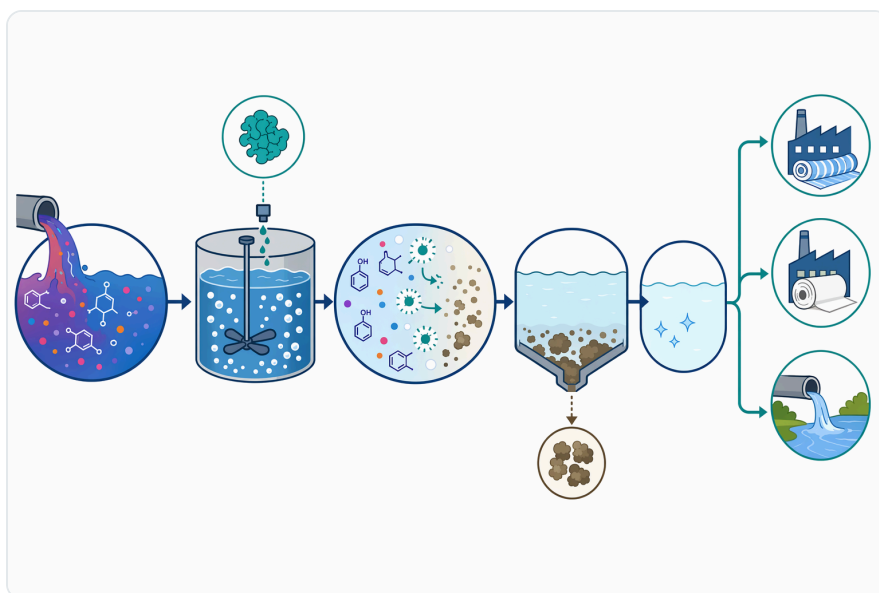


Figure 2. 일반적인 라카아제 폐수 처리 공정에서는 색도와 산화 가능한 유기 오염물질을 줄이기 위해 효소와 폭기를 적용한 뒤 침전·분리 공정을 거칩니다.

染料排水に対するラッカーゼ利用では、単に色が消えることだけでなく、変換生成物の毒性が低減するかが重要です。**Pycnoporus**由来ラッカーゼを用いた分散染料製造排水の処理研究では、脱色だけでなく生態毒性の低減も評価されており、ラッカーゼ処理を排水品質改善の一部として捉える考え方を示しています^[5]。

フェノール類・塩素化フェノール

フェノール、クロロフェノール、ビスフェノール類などは、毒性、臭気、難分解性、処理障害の観点から問題になりやすい化合物です。ラッカーゼはフェノール性水酸基を一電子酸化し、フェノキシラジカルを生成します。その後、ラジカルカップリングによる高分子化、酸化開裂、吸着・沈降しやすい生成物への変換などが起こり、後段処理と組み合わせた除去に寄与する可能性があります[6]。

p-クロロフェノールに対しては、電界紡糸ポリウレタン／再生セルロースナノファイバー膜へ固定化したラッカーゼを用いる研究が報告されています。この種の膜固定化は、酵素を水相へ単回投入するだけでなく、反応面として保持し、処理水との接触効率と酵素の再利用性を高めるための設計として注目されています[7]。

ビスフェノールAのような内分泌かく乱性が懸念される化合物でも、ラッカーゼによる酸化変換が研究されています。セルロース／廃棄Cu²⁺活性炭複合材料を用いてラッカーゼ活性とビスフェノールA分解を高める研究は、担体材料、金属イオン環境、吸着と酸化の組み合わせが、排水中の対象化合物処理に影響することを示しています[8]。

抗生物質・医薬品様微量汚染物質

都市下水処理水や製薬関連排水では、抗生物質、鎮痛薬、ホルモン様物質、カンナビノイド関連物質など、低濃度でも環境影響が懸念される微量汚染物質が検出されることがあります。ラッカーゼは、フェノール性または電子供与性の官能基を持つ医薬品様化合物を酸化変換できる可能性があり、活性汚泥や膜処理だけでは残留しやすい成分への補助技術として研究されています[9]。

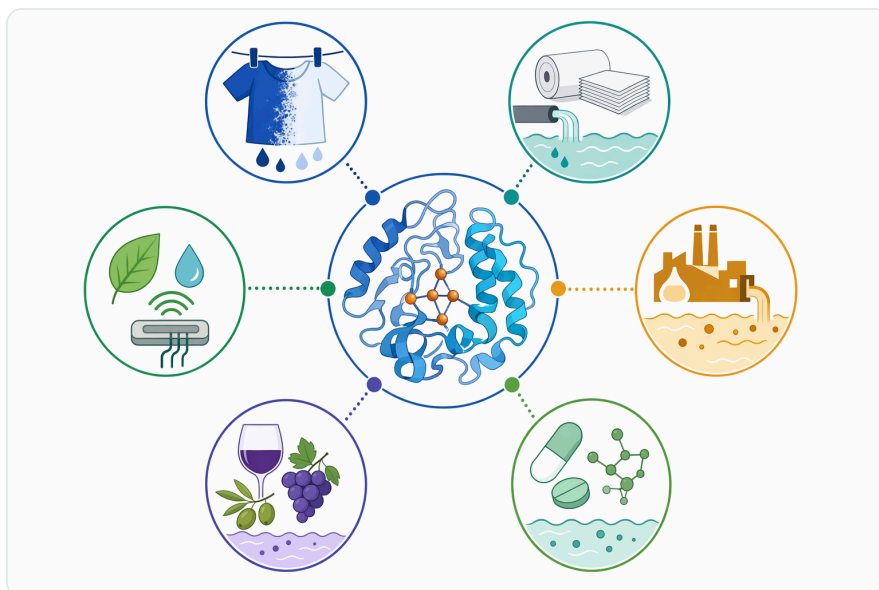


Figure 3. 폐수 처리용 라카아제는 염료, 제지, 페놀성 물질, 농산업 폐수 및 미량 유기 오염물질 처리 등 다양한 분야에 사용됩니다.

抗生物質分解では、ラッカーゼを無機ナノ構造体と組み合わせたハイブリッド触媒が実排水流出水へ適用された研究もあります。階層構造を持つラッカーゼ@Ni₃(PO₄)₂ハイブリッドナノフラワーを用いた研究では、抗生物質分解に加えて実排水中での応用と毒性評価が扱われており、モデル溶液だけでなく実マトリクスでの挙動を見る重要性が示されています^[10]。

リグニン関連物質・紙パルプ系排水

紙パルプ排水やリグノセルロース処理工程では、リグニン由来の芳香族化合物が色度、COD、難分解性の要因となることがあります。ラッカーゼは白色腐朽菌のリグニン分解系と深く関係する酵素であり、フェノール性リグニンユニットの酸化を通じて、分子構造や反応性を変えることができます。真菌ラッカーゼのバイオレメディエーション応用に関するレビューでも、リグニン様芳香族汚染物質の酸化能力は主要な特徴として位置づけられています^[2]。

用途別に見たラッカーゼの役割

排水・対象物質	ラッカーゼが関与する主な反応	期待される処理上の効果	研究上の位置づけ
繊維染料・染色排水	発色団、芳香族アミン、フェノール性部位の酸化	脱色、色度低減、後段処理性の改善	固定化ラッカーゼや担体化による脱色研究が多い ^[11]
フェノール類・クロロフェノール	フェノキシラジカル生成、カップリング、酸化変換	毒性低減、沈降・吸着されやすい生成物への変換	実水・廃水中のフェノール性微量汚染物質処理で研究 ^[6]
ビスフェノールA	フェノール性部位の酸化、担体吸着との複合除去	内分泌かく乱性物質の低減補助	セルロース／活性炭複合材料などとの組み合わせが検討 ^[8]
抗生物質・医薬品様物質	酸化的構造変換、メデイエーター反応の可能性	微量汚染物質の分解・毒性変化	実排水流出水での応用と毒性評価が進む ^[10]
リグニン関連芳香族物質	フェノール性リグニンユニットの酸化	色度低減、難分解性有機物の反応性向上	真菌ラッカーゼの環境修復用途として古くから研究 ^[2]

この比較から分かるように、ラッカーゼの価値は対象物質の完全な無機化を単独で保証することではなく、酸化変換により汚染物質の性質を変える点にあります。排水処理では、脱色、毒性低減、吸着・凝集・生物分解のしやすさの向上など、工程全体の中で意味のある変化を作る補助触媒として評価されます^[1]。

固定化ラッカーゼが注目される理由

ラッカーゼはタンパク質であるため、実排水中のpH変動、塩類、界面活性剤、溶存有機物、金属イオン、酸化還元性物質、温度変化の影響を受けます。これに対し、固定化は酵素を担体へ保持して、回収性、再利用性、局所環境の安定化、連続処理への適用性を高める手段として研究されています。**Trametes versicolor**ラッカーゼを架橋酵素凝集体として不溶化し、都市下水中の微量有機汚染物質修復に用いる研究は、遊離酵素ではなく反応体として保持する設計の代表例です^[9]。



Figure 4. 더 강한 화학적 산화나 응집 처리와 비교했을 때, 라카아제 처리는 더 온화한 조건에서 운전할 수 있으며 색을 유발하는 오염물질을 줄일 수 있습니다.

担体材料は多様で、磁性粒子、金属有機構造体、アルギン酸ビーズ、層状複水酸化物、セルロース膜、ナノファイバー膜、無機リン酸塩ナノ構造体などが報告されています。たとえば、LDH/アルギン酸複合ビーズに**Trametes versicolor**ラッカーゼを固定化した研究では、繊維染料の脱色性能向上を目的に、担体の保護効果と反応場制御が検討されています^[12]。

膜固定化は、酵素反応と固液分離の考え方を近づける技術です。セルロースアセテート精密ろ過膜にラッカーゼを固定化し、微量汚染物質修復へ応用する設計研究では、膜表面または膜内部に酵素を配置することで、処理水が通過する際に反応機会を作る発想が示されています^[13]。

磁性担体を用いる場合、反応後に外部磁場で触媒を回収しやすい点が利点として研究されています。磁性トラス型マイクロリアクターやマグネタイトナノ粒子に固定化したラッカーゼを用いて、排水、フェノール、染料処理を検討した研究は、微小反応場、混合、回収性を組み合わせた処理設計の方向性を示しています^[14]。

遊離ラッカーゼと固定化ラッカーゼの比較

観点	遊離ラッカーゼ	固定化ラッカーゼ
反応開始のしやすさ	水相へ分散しやすく、対象物質と接触しやすい	担体表面または内部で反応するため、拡散の影響を受ける場合がある
回収・再利用	処理水中へ残りやすく、回収は難しい	磁性担体、膜、ビーズなどでは回収・保持がしやすい
実排水中の安定性	pH、塩、界面活性剤、阻害物質の影響を直接受けやすい	担体が保護環境を作り、安定性向上が期待される
連続処理への適性	単回添加またはバッチ処理向き	固定床、膜、カートリッジ、リアクター化に展開しやすい
主な研究用途	基質反応性、脱色、毒性変化の基礎評価	実排水適用、再利用性、プロセス統合の検討

遊離ラッカーゼは反応評価や短時間処理には扱いやすい一方、工業排水では酵素の流出、失活、処理後水への残存が課題になり得ます。固定化ラッカーゼは、反応速度が担体内拡散に制限される場合があるものの、連続処理や再利用性を考える際に有利です。産業染料分解に関する固定化ラッカーゼの研究レビューでも、固定化は工業排水処理へ酵素を応用するための重要な方向性として扱われています^[11]。

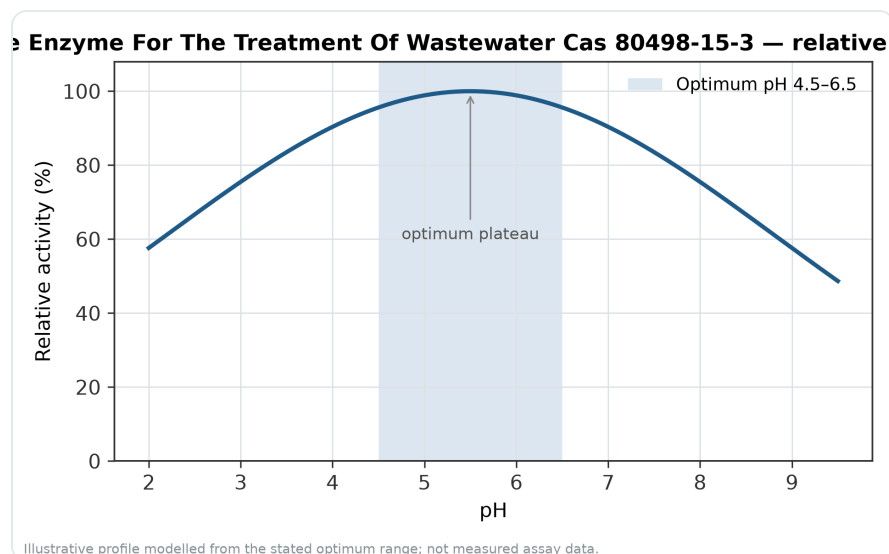


Figure 5. pH에 따른 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 상대 활성으로, pH 4.5-6.5에서 최적 활성 구간이 나타납니다.

実排水で性能を左右する要因

実排水はモデル水溶液と異なり、対象汚染物質以外に多量の共存有機物、塩類、界面活性剤、懸濁物質、金属、酸化還元性物質を含みます。これらは、ラッカーゼの活性部位への基質接近、酵素タンパク質の立体構造、酸素供給、ラジカル中間体の反応経路に影響します。そのため、モデル染料がよく脱色されても、実排水で同じ結果になるとは限りません。ラッカーゼベース排水処理のレビューでも、実排水の複雑性とプロセス条件の最適化は主要課題として扱われています^[1]。

pHはラッカーゼ反応において特に重要です。基質のイオン化状態、酵素表面電荷、銅中心の酸化還元挙動がpHに依存するため、同じ酵素でもフェノール類、染料、医薬品様化合物で最適な反応領域が異なる場合があります。温度も反応速度と失活速度の両方に影響し、温度上昇で初期反応が速くなっても、長時間処理ではタンパク質の安定性が低下する可能性があります。深共晶溶媒中でのラッカーゼ安定性と活性を扱った研究は、溶媒環境が酵素構造と触媒機能へ影響することを示す例です^[15]。

酸素供給も見落とせない要素です。ラッカーゼは分子状酸素を最終電子受容体として使うため、反応液中の溶存酸素が不足すると、基質酸化の電子を受け取る側が制限されます。特に高有機負荷排水や粘性の高い排水では、混合状態、気液接触、処理槽形状によって反応効率が変わります。これは化学酸化剤を大量添加する処理とは異なる、酸素依存型生体触媒ならではの設計上の論点です^[2]。

阻害物質の存在も実務上の制約になります。強いキレート性物質、重金属、還元性物質、界面活性剤、有機溶媒、極端な塩濃度などは、酵素構造または銅中心の機能に影響する場合があります。また、ラッカーゼ反応で生じるラジカル中間体が共存有機物と反応し、意図しない生成物を作る可能性もあります。このため、ラッカーゼ処理は単独の「魔法の分解剤」ではなく、既存処理の前段・中間・後段のどこに置くかで成果が変わる技術です^[3]。

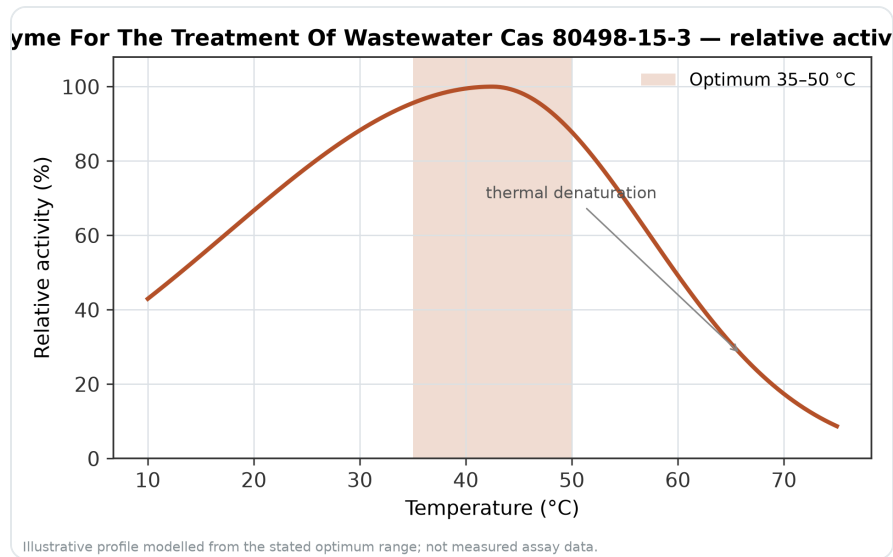


Figure 6. 온도에 따른 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 상대 활성으로, 35–50° C에서 최적 활성을 보이며 최적 온도 이상에서는 열변성에 따른 특징적인 활성 감소가 나타납니다.

既存排水処理との組み合わせ方

ラッカーゼは、活性汚泥、嫌気処理、膜分離、凝集沈殿、吸着、湿地処理、化学酸化などを全面的に置き換えるものではありません。むしろ、これらの工程が苦手とする着色、フェノール性毒性、難分解性微量汚染物質に対して、酸化変換の役割を追加する補助技術として位置づけるのが現実的です。持続可能な排水処理技術の評価研究では、排水処理は単一技術ではなく、処理性能、環境負荷、運用性を含めて複数技術を比較・統合する領域であることが示されています^[16]。

たとえば、染色排水では、前処理で懸濁物質や高濃度界面活性剤を低減した後、ラッカーゼで発色団を酸化し、後段で活性汚泥、吸着、膜処理により残留物や生成物を除去する構成が考えられます。フェノール性排水では、ラッカーゼ酸化によってフェノール類を高分子化または反応性の高い生成物へ変え、凝集・吸着・生物処理で除去しやすくする考え方があります。フェノール性微量汚染物質を実飲料水・排水中で扱った研究でも、酵素処理は水マトリクスの影響を受けながら評価されています^[6]。

膜バイオリアクターや藻類・細菌複合系などの生物処理技術と比較すると、ラッカーゼは窒素・リン除去やバイオマス増殖を主目的としません。藻類ベース膜バイオリアクターのレビューでは、膜構成、物理化学特性、利点と課題が体系的に整理されていますが、ラッカーゼはそのような包括的水処理システムではなく、特定の酸化反応を担う生体触媒です^[17]。

ラッカーゼ処理で期待できる成果と期待すべきでない成果

ラッカーゼ処理で期待しやすい成果は、染料排水の色度低減、フェノール性化合物の酸化変換、リグニン様芳香族化合物の反応性変化、一部微量汚染物質の分解または毒性低減です。特に、対象物質がフェノール性構造、芳香族アミン、電子供与性置換基を持つ場合、ラッカーゼ酸化の対象になりやすくなります。固定化ラッカーゼによる工業染料分解のレビューでは、染料分解における酵素触媒の有効性と、固定化による応用性向上が整理されています^[11]。

一方、アンモニア、硝酸、リン酸、塩分、重金属、無機酸・無機アルカリ、病原体、一般的な懸濁固形物は、ラッカーゼ単独の主対象ではありません。CODやTOCについても、ラッカーゼ反応は有機物を必ずしも二酸化炭素まで完全分解するわけではなく、構造変換や重合にとどまる場合があります。したがって、ラッカーゼ処理の成果は「完全無機化」ではなく、「後段で除去しやすい形への変換」「毒性や色度の低減」「特定難分解性成分の反応性改善」として評価するのが適切です^[1]。

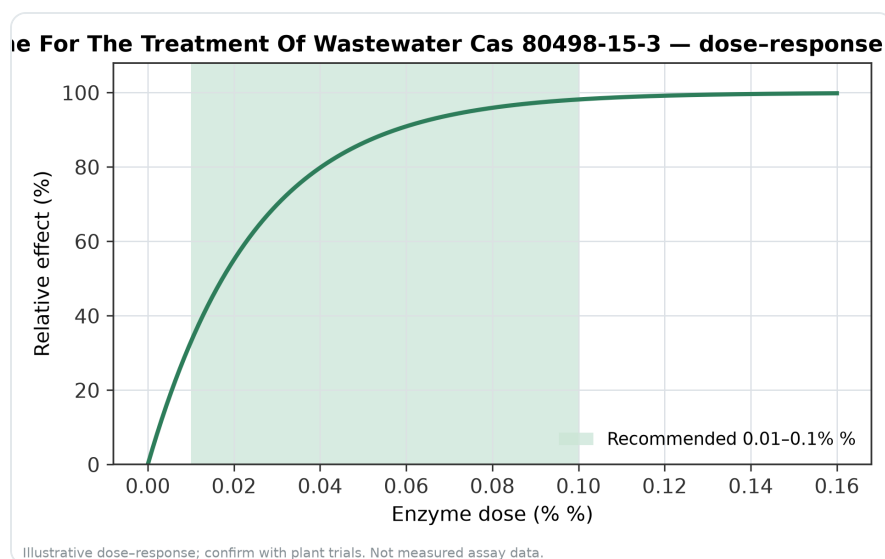


Figure 7. 권장 사용 범위(0.01-0.1%)에서 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 예시적 용량-반응 관계를 보여줍니다.

また、脱色は必ずしも安全性の完全な証明ではありません。発色団が壊れると色は低下しますが、生成物が低毒性であるか、より分解しやすいか、排水基準や放流先に対して問題がないかは別の論点です。分散染料製造排水のラッカーゼ処理研究が生態毒性低減まで扱っていることは、脱色と毒性評価を分けて考える必要性を示しています^[5]。

Enzymes.bio製品としての位置づけ

Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3は、排水処理における酸化型生体触媒としてラッカーゼを活用したい企業向けの製品です。対象となる利用者は、繊維・染色、紙パルプ、化学、食品・飲料、製薬関連、環境エンジニアリング、水処理薬剤配合、工場排水

管理など、着色、フェノール性汚染、難分解性有機物、微量汚染物質への対策を検討する部門です。Enzymes.bioは供給業者であり、製品は1kg単位でオンライン購入できます。

本製品の価値は、単なる酵素原料としてではなく、既存処理へ「酸素を使う選択的酸化反応」を加える選択肢として理解すると明確になります。化学酸化剤を用いる処理とは異なり、ラッカーゼは酵素の基質認識と銅中心の電子移動を利用して、特定の有機構造を変換します。これにより、排水処理プロセスの中で脱色、毒性低減、吸着・生物分解の補助、微量汚染物質対策といった役割を担う可能性があります^[3]。

Enzymes.bioは製造業者または研究所ではないため、本資料では製造条件、独自分析法、活性単位の定義、特定グレードの主張を行いません。注文時にCoAおよびSDSが提供されるため、受領後の社内文書管理と安全管理に利用できます。排水処理用ラッカーゼをオンラインで1kg単位から入手できることは、実装検討、配合設計、工程評価を進める事業者にとって、調達しやすい供給形態です。

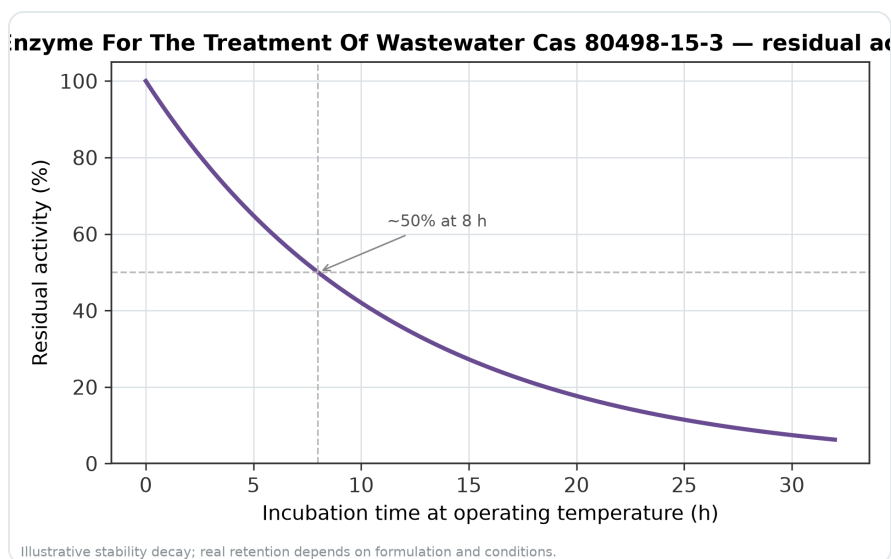


Figure 8. 폐수 처리용 라카아제 효소(CAS 80498-15-3)의 예시적 열 안정성 감소 곡선으로, 운전 온도에서 시간이 지남에 따라 잔존 활성이 감소하는 것을 보여줍니다.

まとめ：ラッカーゼは排水中の難分解性有機物を酸化変換する補助酵素

Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater CAS 80498-15-3は、フェノール類、染料、リグニン関連芳香族化合物、一部の医薬品・抗生物質様微量汚染物質を酸化的に変換するための排水処理用ラッカーゼ酵素です。ラッカーゼは、基質から電子を取り出し、分子状酸素を水へ還元するマルチ銅酸化酵素であり、脱色、毒性低減、難分解性成分の反応性改善に関与します^[2]。

研究面では、染料脱色、フェノール性汚染物質、ビスフェノールA、抗生物質、微量有機汚染物質に対するラッカーゼ処理が、遊離酵素、固定化酵素、膜、ビーズ、磁性担体、ナノ構造体など多様な形で検討されています。特に固定化技術は、酵素の安定性、回収性、再利用性、連続処理への展開を高める方向として重要です^[13]。

ただし、ラッカーゼは排水処理全体を単独で置き換える万能剤ではありません。窒素・リン、無機塩、重金属、病原体、懸濁固形物の除去は別工程が担うべき領域であり、ラッカーゼは酸化されやすい有機汚染物質に焦点を当てた補助触媒として位置づけるのが現実的です。Enzymes.bioは供給業者として、本製品を1kg単位でオンライン直接販売し、注文時にCoAおよびSDSを併せて提供します。

Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater Cas 80498-15-3をオンライン注文

1 kg単位で販売、在庫あり・即出荷可能です。オンラインストアで直接ご注文・決済いただければ、当社でご注文を処理します。すべてのご注文に試験成績書（CoA）と安全データシート（SDS）が付属します。

[Laccase Enzyme For The Treatment Of Wastewater Cas 80498-15-3を購入 →](#)

参考文献

初出引用順に番号を付けています。各出典はオープンアクセスで、公開時にアクセス可能であることを確認済みです。本文中の引用番号からこちらにリンクしています。

1. Sutaoney, P., Pandya, S., Gajarwar, D., Joshi, V., & Ghosh, P. (2022). Feasibility and potential of laccase-based enzyme in wastewater treatment through sustainable approach: A review. *Environmental science and pollution research international*, 29, 86499 - 86527.
2. Kilic, N., Nasiri, F., & Cansaran-Duman, D. (2016). Fungal Laccase Enzyme Applications in Bioremediation of Polluted Wastewater.
3. Younus, H., Khan, M. A., Khan, A., & Alhumaydhi, F. (2025). Eco-Friendly Biocatalysts: Laccase Applications, Innovations, and Future Directions in Environmental Remediation. *Catalysts*.
4. Amari, A., Alzahrani, F. M., Alsaiani, N., Katubi, K. M., Rebah, F. B., & Tahoona, M. (2021). Magnetic Metal Organic Framework Immobilized Laccase for Wastewater Decolorization. *Processes*, 9, 774.
5. Wang, B., Chen, Y., Guan, J., Ding, Y., He, Y., Zhang, X., Shukurov, N., ... et al. (2022). Biodecolorization and Ecotoxicity Abatement of Disperse Dye-Production Wastewater Treatment with *Pycnoporus Laccase*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19.

6. Maryskova, M., Linhartova, L., Novotný, V., Rysová, M., Cajthaml, T., & Ševců, A. (2021). Laccase and horseradish peroxidase for green treatment of phenolic micropollutants in real drinking water and wastewater. *Environmental science and pollution research international*, 28, 31566 - 31574.
7. Lin, H., Chen, Y., Li, D., Gao, J., Song, J., Tao, Y., Zhang, J., ... et al. (2025). Laccase immobilized on electrospun polyurethane/regenerated cellulose nanofiber membranes for efficient P-Chlorophenol degradation from wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 144990 .
8. Li, N., Yu, F., Li, H., Meng, X., Peng, C., Sheng, X., Zhang, J., ... et al. (2024). Cellulose / waste Cu²⁺-activated carbon composite: A sustainable and green material for boosting laccase activity and degradation of bisphenol A in wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136121 .
9. George, J., Rajendran, D., Venkataraman, S., Rathankumar, A., Saikia, K., Muthusamy, S., Singh, I., ... et al. (2022). Insolubilization of Trametes versicolor laccase as cross-linked enzyme aggregates for the remediation of trace organic contaminants from municipal wastewater. *Environmental Research*, 112882 .
10. Jafari-Nodoushan, H., Fazeli, M., Faramarzi, M., & Samadi, N. (2023). Hierarchically-structured laccase@Ni₃(PO₄)₂ hybrid nanoflowers for antibiotic degradation: Application in real wastewater effluent and toxicity evaluation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123574 .
11. Naseem, S., Rawal, R., Pandey, D., & Suman, S. (2023). Immobilized laccase: an effective biocatalyst for industrial dye degradation from wastewater. *Environmental science and pollution research international*, 30, 84898-84917.
12. Nouaa, S., Aziam, R., Carja, G., Chiban, M., & Froidevaux, R. (2025). Immobilization of Trametes versicolor laccase on LDH/alginate composite beads for improved textile dyes decolorization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140577 .
13. Varga, B., Meiczinger, M., Jakab, M., & Somogyi, V. (2023). Design and Optimization of Laccase Immobilization in Cellulose Acetate Microfiltration Membrane for Micropollutant Remediation. *Catalysts*.
14. Peñaranda, P. A., Noguera, M. J., Florez, S., Hussler, J., Ornelas-Soto, N., Cruz, J., & Osma, J. (2022). Treatment of Wastewater, Phenols and Dyes Using Novel Magnetic Torus Microreactors and Laccase Immobilized on Magnetite Nanoparticles. *Nanomaterials*, 12.
15. Hatimuria, M., Vishwakarma, J., Mohan, A., Krishnan, R. R., Chandran, C. N., Gavvala, K., & Pabbathi, A. (2025). Laccase stability and activity in diol-based deep eutectic solvents: An experimental and computational study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149711 .
16. Mishra, A., Rani, P., Cavallaro, F., & Alrasheedi, A. (2023). ASSESSMENT OF SUSTAINABLE WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES USING INTERVAL-VALUED INTUITIONISTIC FUZZY DISTANCE MEASURE-BASED MAIRCA METHOD. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*.
17. Jayaraman, J., Kumaraswamy, J., Rao, Y. K. S. S., Karthick, M., Baskar, S., Anish, M., Sharma, A., ... et al. (2024). Wastewater treatment by algae-based membrane bioreactors: a review of the arrangement of a membrane reactor, physico-chemical properties, advantages and challenges. *RSC Advances*, 14, 34769 - 34790.


Enzymes.bioへお問い合わせ


ご注文に関するご質問は、当社チームが喜んでサポートします。

メール wholesale@enzymes.bio

電話（米国） **+1 (507) 428-6057**

[お問い合わせ →](#)

 **400+** B2B顧客

 **60+** 大学研究パートナー

 **54** 世界各国に供給

© 2026 Enzymes.bio · 産業用 · 食品加工用酵素の供給 · 人の摂取用または小売販売用ではありません。