

Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase (ALDC) : 啤酒與發酵飲料中降低二乙酰的食品級酵素

Enzymes.bio 研究團隊 · 紐西蘭威靈頓 · June 21, 2026

Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase (α -乙醯乳酸脫羧酶，以下簡稱 ALDC) 主要用於啤酒與部分發酵飲料製程，透過將 α -acetolactate 直接轉化為 acetoin，降低二乙酰 (diacetyl) 形成機會。對釀造廠而言，ALDC 的價值在於改善奶油味、奶油糖味等二乙酰相關異味風險，並協助縮短熟成或調溫等待時間。Enzymes.bio 供應的 Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase 以 1 kg 單位在線上銷售，CoA 與 SDS 會隨訂單提供，供使用者進行內部品質與合規文件管理。

什麼是 α -Acetolactate Decarboxylase (ALDC)

α -Acetolactate Decarboxylase 是一類作用於 α -acetolactate 的脫羧酵素。其核心反應是催化 α -acetolactate 去羧化生成 acetoin，而不是讓 α -acetolactate 經非酵素性氧化路徑形成二乙酰。這一點使 ALDC 在啤酒釀造中具有明確的工藝意義：它並不是在二乙酰已大量形成後才「補救」，而是在前驅物階段改變反應去向，降低二乙酰累積的機率^[1]。

在食品與發酵工業中，ALDC 可由微生物來源取得；公開研究亦顯示，*Bacillus subtilis* 可作為食品酵素與食品成分相關生產平台之一，而 ALDC 本身也已有以 *Bacillus subtilis* 菌株進行食品酵素生產研究的案例^[2]。對使用者而言，重點不在於把它視為一般「風味添加物」，而是把它定位為製程用酵素：其作用目標是發酵代謝中間物，最終目的是穩定二乙酰控制與熟成效率。

Enzymes.bio 供應的 Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase 屬於食品級酵素產品資訊與訂購頁所列品項，供應角色是產品供應與文件交付，不是製造商或實驗室服務提供者；相關品質與安全文件會隨訂單提供，而非以本文替代批次文件或法規審查。

二乙酰為什麼是啤酒製程中的關鍵風味風險

二乙酰是啤酒中最典型的發酵相關異味之一，常被描述為奶油、奶油糖、爆米花或乳脂感。少數啤酒風格可容忍極低程度的二乙酰感，但對多數淡色拉格、皮爾森、清爽型艾爾與許多精釀產品而言，二乙酰會削弱乾淨度、脆口感與批次一致性。它的問題不只是感官不佳，也會造成生產排程不確定，因為啤酒可能需要額外停留在罐中，等待二乙酰被酵母進一步還原。

二乙酰的形成通常與支鏈胺基酸代謝相關。酵母在合成 valine 等胺基酸時會產生 α -acetolactate；部分 α -acetolactate 會排出細胞外，在麥汁或啤酒中經化學氧化形成二乙酰。之後，活性酵母可將二乙酰還原為 acetoin，再進一步形成 2,3-butanediol，但這段自然消除過程會受到溫度、酵母健康狀態、溶氧、pH、糖化與發酵條件影響^[3]。

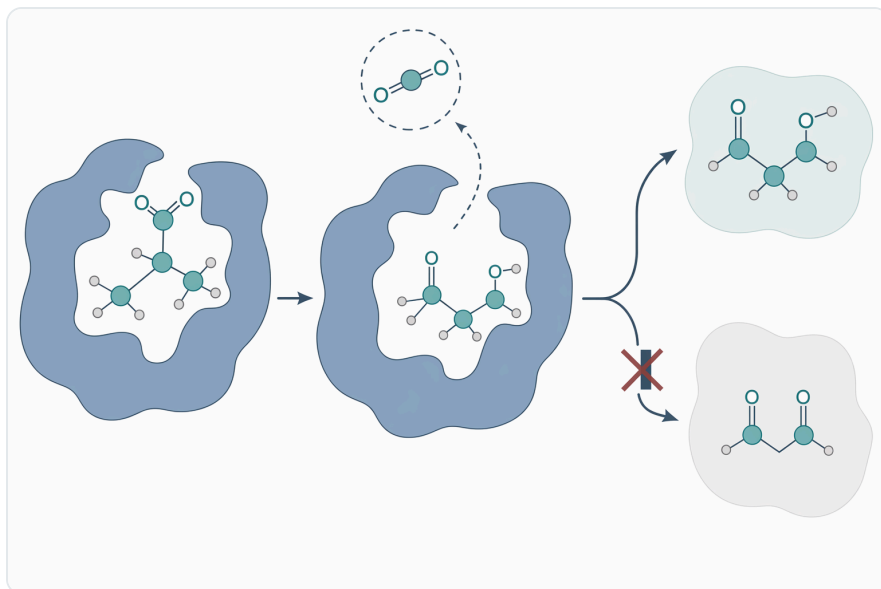


Figure 1. ALDC 作用於雙乙酰形成上游的 α -乙酰乳酸，將此前驅物轉化為乙酰酮和二氧化碳。

因此，傳統二乙酰管理往往依賴「時間」與「酵母活性」：例如延長熟成、保留足夠酵母、提高發酵末段溫度或調整發酵曲線。這些方法有效，但會佔用罐體、延長周轉，且不同批次之間容易因原料、酵母代數與發酵表現而出現差異。ALDC 的優勢正是在這個環節：它把控制點提前到 α -acetolactate 階段，而非完全等待二乙酰形成後再由酵母慢慢還原^[1]。

ALDC 的作用機制：把前驅物導向 acetoin，而非二乙酰

從反應路徑來看，ALDC 的工藝價值可用一句話概括：讓 α -acetolactate 優先成為 acetoin，減少它氧化為二乙酰的機會。 α -acetolactate 若未被 ALDC 處理，可能在啤酒中經非酵素性氧化變成二乙酰；一旦二乙酰形成，就需要靠酵母還原能力與時間來降低濃度。ALDC 則提供一條更直接的酵素催化路徑，使前驅物在形成明顯異味前被轉化^[1]。

acetoin 與 2,3-butanediol 同屬發酵代謝中的 C4 化合物，與二乙酰有密切代謝關係。多種微生物工程研究在討論 acetoin 或 2,3-butanediol 生成時，都會涉及 pyruvate、 α -acetolactate、acetoin 與 2,3-butanediol 之間的代謝連結；這些研究雖不等同於啤酒應用試驗，但有助於理解 ALDC 介入的位置：它作用於 α -acetolactate 到 acetoin 的節點，而不是直接處理所有風味化合物^[4]。

這種機制也解釋了為什麼 ALDC 常被用於縮短啤酒熟成時間。若 α -acetolactate 已先被轉化為 acetoin，後續需要由酵母還原的二乙酰負荷就會降低，熟成等待時間也較有機會縮短。實際縮短幅度仍會受配方、酵母株、發酵溫度、投加時間與工廠標準影響，因此 ALDC 應被視為製程控制工具，而非取代整體發酵管理的單一解方^[2]。

與傳統二乙酰控制方式的比較

ALDC 不排斥傳統熟成或調溫策略，而是可與既有發酵管理並行。差別在於，傳統方法多半依賴酵母在後段消除已形成的二乙酰；ALDC 則降低前驅物轉為二乙酰的機會。以下比較表可協助研發、品管與生產端理解兩者在工藝邏輯上的差異。

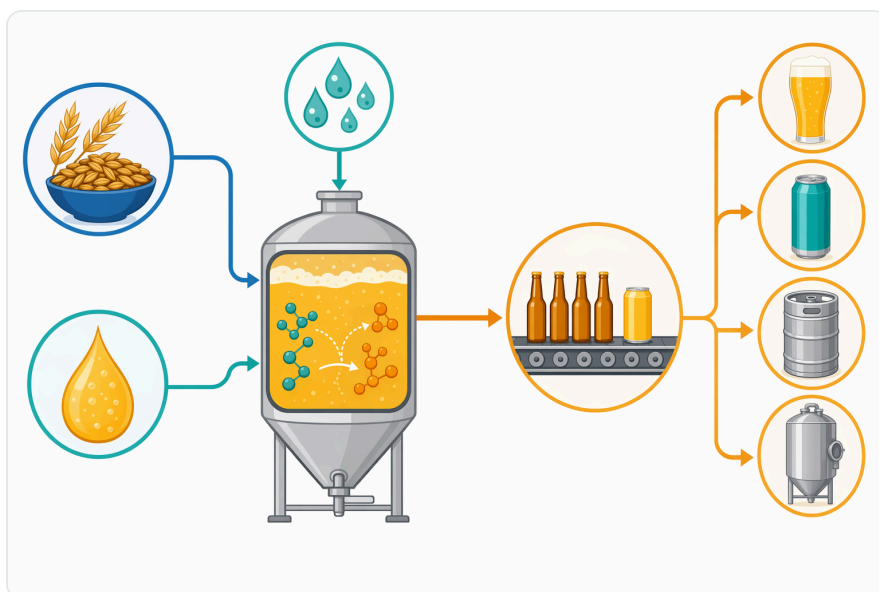


Figure 2. 雙乙醯風險會隨著前驅物排出、化學轉化，以及酵母隨時間進行清除而形成；ALDC 則在異味化合物累積之前介入。

控制策略	主要作用點	優點	可能限制	適合情境
延長熟成或低溫貯酒	等待二乙酰被酵母還原	不需新增酵素；符合傳統製程	佔用罐體時間；批次差異較大；對酵母狀態敏感	產能壓力較低、風格需要長時間熟成的啤酒
發酵末段升溫或 diacetyl rest	提升酵母還原二乙酰的速度	易與現有發酵曲線整合	溫度策略可能影響其他風味；需維持酵母活性	拉格、混合型發酵或需加速後段代謝的製程
使用 ALDC	將 α -acetolactate 轉為 acetoin，減少二乙酰形成	從前驅物階段介入；有助風味一致性與縮短熟成	效果受投加時點、配方與製程條件影響	需降低二乙酰風險、提高罐體周轉率的發酵飲料

控制策略	主要作用點	優點	可能限制	適合情境
綜合管理： ALDC + 發酵曲 線控制	同時降低前驅物與維持 酵母代謝	風險分散；較適合 工業化穩定生產	需建立內部製程參 數與品評標準	商業啤酒、精釀放 大生產、品質穩定 優先的產品

在 *Lactococcus lactis* 的研究中，ALDC 缺失突變株被用於提高二乙酰形成，這從反向角度支持 ALDC 在代謝上會降低 α -acetolactate 流向二乙酰相關路徑的能力：當 ALDC 活性不足或缺失時，二乙酰生成潛力反而提高^[1]。這類證據雖來自乳酸菌系統，但對理解 ALDC 與二乙酰形成之間的代謝關係相當有幫助。

主要應用：啤酒、麥芽飲料與其他發酵飲料

ALDC 最成熟的應用場景是啤酒釀造，尤其是對二乙酰感官門檻敏感、又需要穩定出貨週期的產品。大型拉格生產線關注罐體週轉、熟成時間與批次一致性；精釀廠則常面臨多品項切換、酵母管理複雜與產能有限的挑戰。對這兩類使用者而言，ALDC 的共同價值在於降低二乙酰風險，使熟成判定不完全依賴長時間等待。

在麥芽飲料、低酒精或無酒精發酵基底中，若製程仍包含酵母或細菌代謝產生 α -acetolactate 的環節，也可能有二乙酰管理需求。不過，這些產品的糖組成、熱處理、過濾方式與風味基底可能與傳統啤酒不同，因此 ALDC 的實際表現仍需放在特定配方與製程中評估。酵素介入的原理相同，但工藝結果不應直接從啤酒製程外推到所有飲料品類^[3]。

部分發酵食品也會關注二乙酰，尤其是乳製品與乳酸菌發酵系統。值得注意的是，二乙酰在某些乳製品中可能是正面風味，而非異味；例如奶油、優格或發酵乳香氣中，二乙酰有時被視為 desirable note。因此，ALDC 是否適合食品發酵並非取決於「二乙酰越低越好」，而是取決於目標產品是否需要保留或降低該風味特徵^[1]。

製程導入時的技術重點

ALDC 的導入通常要考慮三個製程變數：前驅物何時出現、酵素何時能接觸到基質、以及後段是否仍有足夠時間讓風味達到穩定。若投加過晚， α -acetolactate 可能已經部分轉化為二乙酰；若投加過早，則需確認酵素在當時的發酵環境中能維持作用。實務上，許多工廠會把它設計在主發酵後段、轉罐前後或熟成初期的控制策略中，但最佳安排仍應依個別製程建立。

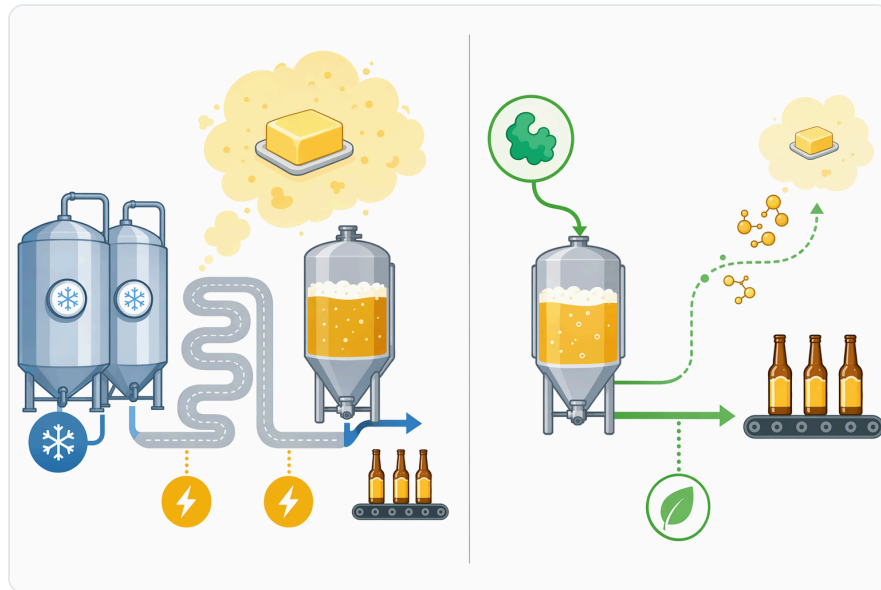


Figure 3. 預防性的 ALDC 處理不同於傳統雙乙醯管理，因為它會降低 α -乙醯乳酸庫存量，而不是只依賴後期酵母對雙乙醯的還原作用。

溫度與 pH 也會影響酵素表現，但不宜把 ALDC 視為只靠單一參數即可預測結果的材料。啤酒中仍存在酒精、溶解氧、酵母懸浮量、金屬離子、酚類物質與其他製程助劑等多種因素；這些因素可能改變酵素可及性、反應速率或後段風味走向。因此，導入 ALDC 時的重點是把它納入整體發酵曲線與品質規格，而不是把它當成發酵失控後的單點修正^[2]。

對品管端而言，ALDC 的效果應以最終產品的風味一致性、二乙醯相關品質指標與批次穩定度來判斷。感官品評仍不可省略，因為二乙醯並不是唯一影響熟成風味的化合物；若發酵壓力、酵母自溶、硫化物、乙醛或氧化風味沒有被妥善控制，即使二乙醯降低，產品也未必達到理想品質。ALDC 最適合放在完整品質管理系統中發揮作用，而不是取代釀造基本功。

可能帶來的生產效益

ALDC 對啤酒廠最直接的效益是縮短等待二乙醯下降所需的時間。熟成時間若更可控，發酵槽與貯酒槽的排程就更容易規劃；對產能緊繃的工廠而言，罐體週轉率往往比單批原料成本更關鍵。這也是 ALDC 在工業釀造中受到重視的原因：它改善的不只是風味，也關係到產線節奏與庫存週期。

第二個效益是降低批次差異。二乙醯形成與消除受到酵母狀態、麥汁營養、溫度曲線與氧暴露影響；這些因素在小型或多品項生產中特別容易波動。ALDC 透過前驅物轉化，為製程增加一個較直接的控制點，有助減少「同一配方不同批次」的二乙醯感官落差。

第三個效益是降低返工與延遲出貨風險。若產品在包裝前才發現二乙醯偏高，常見處理方式包括延長等待、混批、重新調整貯酒計畫或延後包裝；這些都會增加營運成本。ALDC 無法保證所有批次都免除風味問題，但可作為降低二乙醯風險的工藝工具，尤其適合需要穩定供貨節奏的啤酒與發酵飲料生產線。

科學證據的強度與邊界

ALDC 的機制證據相對清楚：它催化 α -acetolactate 到 acetoin 的反應，因此能減少二乙酰前驅物進入氧化路徑。與二乙酰相關的代謝研究也從不同微生物系統支持了這個節點的重要性，例如以 ALDC 缺失策略提高二乙酰形成的研究，反向說明 ALDC 活性與二乙酰生成之間的關係^[1]。

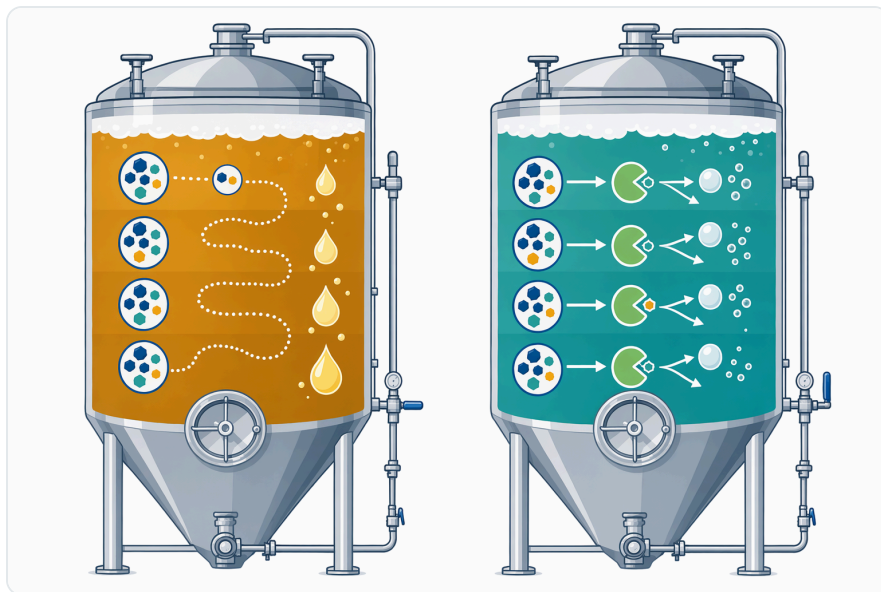


Figure 4. 釀造研究支持在發酵期間利用 ALDC 活性，以減少通往雙乙酰生成的途徑。

食品酵素生產研究方面，已有文獻探討以 *Bacillus subtilis* ICA 56 生產 ALDC，並評估以農工副產物作為培養基來源的可能性。此類研究說明 ALDC 不只是理論上的酵素，也已被放在食品酵素生產與工業化資源利用的脈絡中討論^[2]。另有關於 *Bacillus subtilis* 作為食品成分與特殊化學品細胞工廠的綜述，則提供了微生物平台在食品生物製造中的背景^[5]。

需要區分的是，公開研究證明了反應機制與應用潛力，但不同品牌、不同批次產品的實際製程表現，仍取決於使用者的配方、設備與生產條件。本文不提供活性單位、檢驗定義或批次規格；實際批次文件以訂單隨附的 CoA 與 SDS 為準。

食品安全、法規與文件管理

食品酵素的安全性評估通常會考慮生產微生物、製程殘留、毒理資料、暴露情境與使用目的。FAO/WHO JECFA 長期針對食品添加物與食品酵素相關安全議題進行評估與彙整，提供各國監管與產業使用時的重要參考框架^[6]。這類國際資料不等同於單一產品的核准文件，但可作為理解食品酵素安全管理邏輯的基礎。

FAO 亦設有食品酵素相關資訊頁，說明 JECFA 對食品酵素的評估工作與資料脈絡；對 B2B 使用者而言，這提醒我們食品酵素不能只從功能性角度看待，也必須納入原料來源、製程控制、標示法規與工作場所安全管理^[7]。不同市場對食品酵素的法規定位可能不同，使用者應依自身銷售地與產品類別進行內部合規判斷。

酵素作業還涉及職業安全。Enzyme Technical Association 提供多種酵素產業文件，涵蓋酵素使用、工作場所暴露與安全管理等主題；這些文件的核心精神是避免粉塵或霧化暴露、遵守 SDS、使用適當工程控制與個人防護^[8]。即使食品級酵素可用於食品製程，也不代表操作人員可忽略吸入性致敏或接觸暴露風險。



Figure 5. ALDC 最適用於追求乾淨風味的發酵飲品，例如拉格、皮爾森、淡色拉格、科隆風格啤酒、風味乾淨的愛爾，以及其他不希望出現奶油味的飲品。

Enzymes.bio 作為供應商，會隨 Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase 訂單提供 CoA 與 SDS。這些文件適合納入使用者的內部品質留存、原料接收紀錄與安全訓練資料；本文則作為技術背景與應用說明，不替代批次文件、法規意見或第三方實驗室分析。

與其他發酵代謝工具的關係

ALDC 與一般糖化酵素、蛋白酶或澄清酵素不同，它的目標不是提高可發酵糖、分解蛋白質或改善過濾性，而是作用在特定風味前驅物。這使它特別適合被歸類為「發酵風味控制酵素」。在啤酒工藝中，它通常與酵母管理、發酵溫度控制、溶氧控制、熟成策略共同構成二乙酰風險管理系統。

從代謝工程角度看， α -acetolactate、acetoin 與 2,3-butanediol 是許多微生物生產研究中的核心節點。例如 *Corynebacterium glutamicum* 被工程化生產 2,3-butanediol 的研究，便涉及 pyruvate 轉向 C4 產物的代謝配置；這些研究雖以生物製造為目的，仍可幫助理解為何 ALDC 所在反應節點會

影響二乙酰與相關還原產物的平衡^[3]。

因此，ALDC 的價值不應被簡化為「去除異味」。更精確的說法是：它調整二乙酰前驅物的代謝去向，讓發酵體系在更早階段降低二乙酰生成壓力。這種機制型工具尤其適合對風味乾淨度、一致性與生產週期都有要求的工業發酵流程。

使用者可期待的實務定位

Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase 適合被納入啤酒與發酵飲料的製程改善方案，尤其是二乙酰控制已成為產能瓶頸或品質波動來源時。它的作用不在於掩蓋風味，也不是香料或矯味劑，而是透過酵素反應降低二乙酰前驅物累積，讓後段熟成負擔下降。

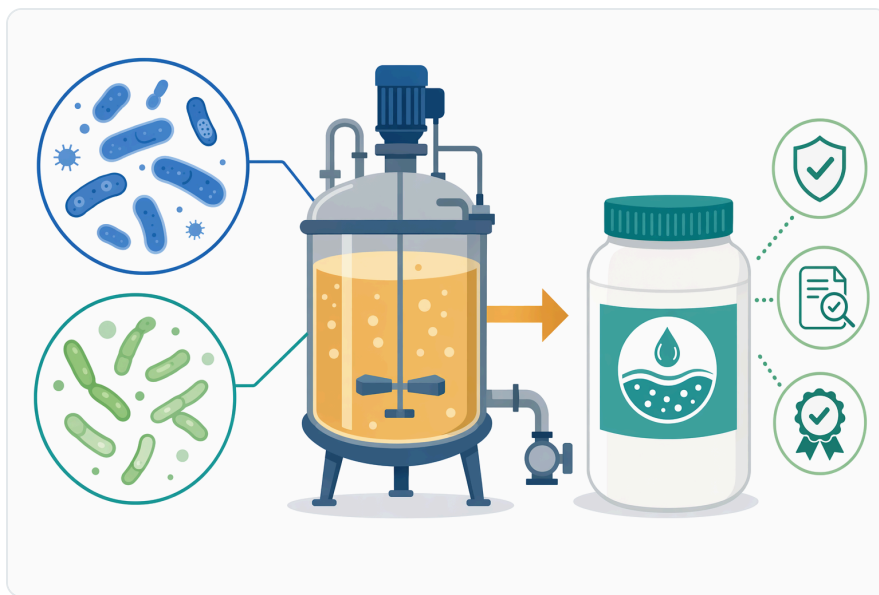


Figure 6. ALDC 是已確立的食物酵素類別，並有微生物、生產、結構與安全性評估方面的文獻支持。

對生產管理而言，ALDC 最適合與穩定的酵母管理、合適的發酵曲線、低氧操作與一致的包裝標準搭配。若上游發酵條件波動過大，ALDC 仍可降低部分二乙酰風險，但無法補償所有製程缺陷。換言之，它是提高控制力的工具，而不是替代整體製程紀律的工具。

Enzymes.bio 所供應的 Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase 以 1 kg 單位在線上直接銷售，適合需要固定規格包裝與文件留存的食物與飲料製程使用者。訂單隨附的 CoA 與 SDS 可支援內部品質、倉儲與職安流程；產品應依企業自身製程、當地法規與內部標準進行使用管理。

結論

ALDC 是啤酒與發酵飲料中控制二乙酰的明確機制型酵素：它將 α -acetolactate 直接轉化為 acetoin，降低前驅物氧化成二乙酰的機會，因而有助於改善風味一致性並縮短熟成等待時間。公開研究從代謝路徑、ALDC 缺失對二乙酰形成的影響、以及食品酵素生產等面向，支持其作為發酵風味控制工具的科學基礎^[2]。

對啤酒廠與發酵飲料製造者而言，Food Grade α -Acetolactate Decarboxylase 的實務價值在於把二乙酰管理從「事後等待」推向「前驅物控制」。在產能、批次一致性與風味乾淨度都重要的製程中，ALDC 可成為有力的製程輔助工具；最終效果仍應依各廠配方、酵母、設備與品質標準建立內部數據。

線上訂購 Food Grade A-Acetolactate Decarboxylase

以 1 kg 單位販售，現貨供應，可立即出貨。請直接於我們的線上商店下單並付款，我們將為您處理訂單。每筆訂單皆附分析證明書與安全資料表。

[購買 Food Grade A-Acetolactate Decarboxylase →](#)

參考文獻

依首次引用順序編號。所有來源皆為開放取用資料，並於發布時確認可連線；正文中的引用編號會連結至此。

1. Curic, M., Stuer-Lauridsen, B., Renault, P., & Nilsson, D. (1999). [A General Method for Selection of \$\alpha\$ -Acetolactate Decarboxylase-Deficient Lactococcus lactis Mutants To Improve Diacetyl Formation](#). *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 1202 - 1206.
2. Oliveira, R. C., Maciel, V. M. M., Hissa, D. C., França, Í., & Gonçalves, L. (2022). [Production of the Food Enzyme Acetolactate Decarboxylase \(ALDC\) from Bacillus subtilis ICA 56 Using Agro-Industrial Residues as Feedstock](#). *Fermentation*.
3. Radoš, D., Carvalho, A. L., Wieschalka, S., Neves, A., Blombach, B., Eikmanns, B., & Santos, H. (2015). [Engineering Corynebacterium glutamicum for the production of 2,3-butanediol](#). *Microbial Cell Factories*, 14.
4. Förster, A. H., Beblawy, S., Golitsch, F., & Gescher, J. (2017). [Electrode-assisted acetoin production in a metabolically engineered Escherichia coli strain](#). *Biotechnology for Biofuels*, 10.
5. Chen, T., Brul, S., & Hugenholtz, J. (2023). [Exploring the potential of Bacillus subtilis as cell factory for food ingredients and special chemicals](#). *bioRxiv*, 22.

6. Evaluation of certain food additives and contaminants. Forty-ninth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. *Semantic Scholar* (1999).
7. En. Fao.
8. Documents. *Enzymetechnicalassociation.*


聯絡 Enzymes.bio


對訂單有疑問嗎？我們的團隊很樂意協助。


電子郵件 wholesale@enzymes.bio

電話 (美國) **+1 (507) 428-6057**

聯絡我們 →

 **400+** B2B 客戶

 **60+** 大學研究合作夥伴

 **54** 服務遍及全球

© 2026 Enzymes.bio · 工業與食品加工用酵素供應 · 非供人體食用或零售銷售。