

# Alpha-Acetolactate Decarboxylase ( ALDC ) 用於釀造業：降低啤酒 Diacetyl、縮短熟成壓力的酵素輔助方案

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

Alpha-Acetolactate Decarboxylase (  $\alpha$ -乙醯乳酸脫羧酶，ALDC ) 在釀造中的核心用途，是將 diacetyl 的前驅物  $\alpha$ -acetolactate 直接轉化為 acetoin，藉此降低啤酒中奶油味、奶糖味異味形成的機率。它不是用來「分解已生成的 diacetyl」，而是把前驅物流向導離 diacetyl 生成途徑，因此通常更適合在發酵早期使用。Enzymes.bio 供應的 Alpha-Acetolactate Decarboxylase For Brewing Industry 以 1 kg 單位線上銷售，CoA 與 SDS 會隨訂單提供；Enzymes.bio 為供應商，並非原始製造商或實驗室。

## ALDC 是什麼？在啤酒製程中的主要應用

Alpha-Acetolactate Decarboxylase，常簡稱 ALDC，是一類催化  $\alpha$ -acetolactate 脫羧反應的酵素。釀造業關注 ALDC，主要不是因為它改變酒精生成，而是因為它能處理 diacetyl 的上游前驅物；diacetyl 是啤酒常見揮發性雙酮之一，在多數拉格與淡色啤酒中，過高時會帶來奶油、爆米花、奶糖或滑膩感，被視為風味缺陷。針對 diacetyl 及其酵素控制的釀造研究，已將 ALDC 視為降低 diacetyl 生成壓力的重要技術之一<sup>[1]</sup>。

在啤酒發酵過程中，酵母合成支鏈胺基酸時會形成並釋放  $\alpha$ -acetolactate。若  $\alpha$ -acetolactate 留在麥汁或啤酒中，它可經非酵素性的氧化脫羧途徑轉變為 diacetyl；而 ALDC 則將  $\alpha$ -acetolactate 直接導向 acetoin。這個差異很關鍵：acetoin 的感官衝擊通常低於 diacetyl，因此降低  $\alpha$ -acetolactate 可減少後續 diacetyl 峰值，並降低對長時間熟成或 diacetyl rest 的依賴<sup>[2]</sup>。

Enzymes.bio 所供應的 Alpha-Acetolactate Decarboxylase For Brewing Industry 可被定位為釀造用加工輔助酵素，適用於希望改善 diacetyl 管控、提高批次一致性、縮短等待成熟時間壓力的啤酒生產情境。由於 Enzymes.bio 不是製造商，也不是檢測實驗室，本文不以製造端規格或分析方法描述產品；實際批次文件、合規與安全資訊，以隨訂單提供的 CoA 與 SDS 為準。

## Diacetyl 為什麼會成為釀造瓶頸？

Diacetyl 的問題不只在於「有味道」，而在於它常出現在製程時間與品質放行的交界處。啤酒主發酵結束時，乙醇與糖度可能已達目標，但若 diacetyl 或其前驅物仍偏高，產品仍需等待酵母再吸收並還原 diacetyl，否則放行後可能出現明顯奶油味。這使 diacetyl 成為許多啤酒廠在槽體週轉、冷藏熟成時間與風味穩定性之間必須處理的限制因子<sup>[1]</sup>。

傳統上，釀造端常用三種方向控制 diacetyl：第一是選擇較合適的酵母株與發酵條件，降低  $\alpha$ -acetolactate 釋放；第二是在主發酵末段安排 diacetyl rest，透過較有利的溫度與活性酵母促進 diacetyl 還原；第三是延長低溫熟成，使殘餘 diacetyl 逐步降低。這些方式有效，但也意味著時間、能源、罐容與排程成本。拉格生產尤其容易受此影響，因為低溫發酵與熟成常使整體生產週期更長<sup>[3]</sup>。

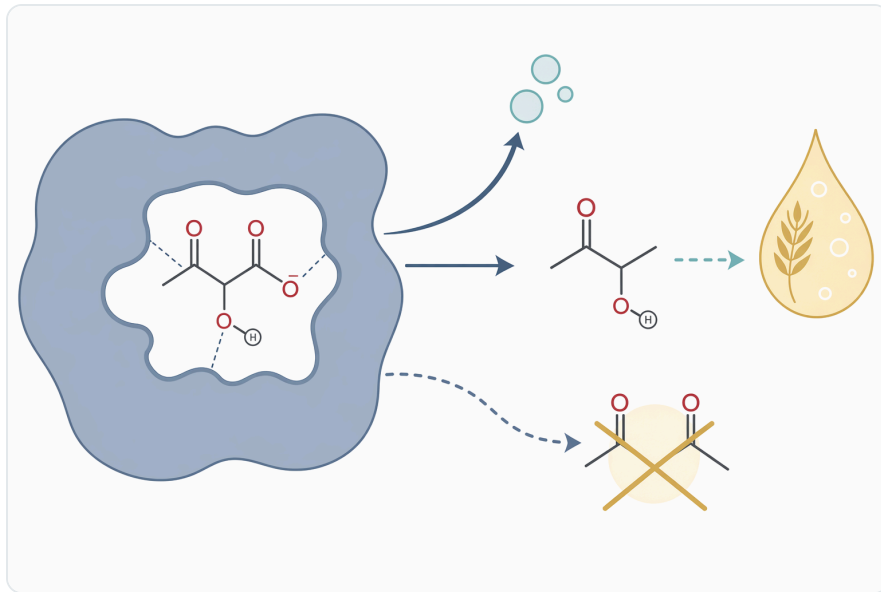


Figure 1. ALDC 會將  $\alpha$ -乙醯乳酸直接轉化為乙偶姻，減少原本可能形成具風味活性的雙乙醯之前驅物流向。

對中大型釀造廠而言，diacetyl 管控失敗可能造成延後包裝、重新調整製程、延長槽占用，甚至導致成品感官不一致。對精釀或代工釀造場而言，問題則常表現在批次排程緊、槽體少、產品線多時，任何一次 diacetyl 超標或感官偏差，都可能干擾後續排程。ALDC 的價值正是在前驅物階段介入，而不是等 diacetyl 已形成後再依賴長時間修正。

# ALDC 的作用機制：把 $\alpha$ -acetolactate 導向 acetoin

---

## 從 valine 生合成到 diacetyl 形成

酵母在發酵過程中需要合成 valine 等支鏈胺基酸，代謝途徑中會形成  $\alpha$ -acetolactate。部分  $\alpha$ -acetolactate 會外排到細胞外環境，也就是正在發酵的麥汁或啤酒中。這些細胞外  $\alpha$ -acetolactate 可在氧化條件、溫度與時間作用下轉變為 diacetyl；diacetyl 再被活性酵母吸收，還原為 acetoin 與後續較低感官衝擊的化合物。Sone 等人早期將 *Enterobacter aerogenes* 的 ALDC 基因導入釀酒酵母進行表現研究，正是基於此代謝邏輯：若能讓系統具備  $\alpha$ -acetolactate decarboxylase 活性，就能在前驅物階段減少 diacetyl 形成<sup>[2]</sup>。

ALDC 的催化位置位於  $\alpha$ -acetolactate 與 diacetyl 之間的分岔點。沒有 ALDC 時， $\alpha$ -acetolactate 可能先變成 diacetyl，再等待酵母還原；有 ALDC 時， $\alpha$ -acetolactate 可直接脫羧為 acetoin，跳過形成 diacetyl 的高風險步驟。這也解釋了為什麼 ALDC 常被描述為「預防 diacetyl 生成」而不是「清除 diacetyl」：它主要處理前驅物，而非已經形成的雙酮本身。

## 為什麼添加時機通常偏向發酵早期？

ALDC 需要接觸  $\alpha$ -acetolactate 才能發揮效果。從機制上看， $\alpha$ -acetolactate 在發酵過程中逐步形成並釋放，因此發酵初期至主發酵階段通常比成熟後期更適合介入。如果等到啤酒已進入後段熟成， $\alpha$ -acetolactate 可能已有相當比例轉化為 diacetyl；此時再加入 ALDC，對已生成的 diacetyl 幫助有限，仍需依靠酵母活性與時間來降低<sup>[1]</sup>。

此外，酵素活性會受製程環境影響，包括 pH、溫度、底物可及性與啤酒基質。成熟啤酒的 pH、酒精、低溫與其他成分都可能讓酵素作用受限；相較之下，發酵早期通常更有機會讓 ALDC 接觸到新生成的  $\alpha$ -acetolactate。Lallemand Brewing 的 ALDC 產品資料也將其定位於降低發酵期間 VDK 風險與縮短成熟時間壓力的應用脈絡，反映產業端對「早期處理前驅物」的共同理解<sup>[4]</sup>。

## 傳統 diacetyl 控制與 ALDC 輔助的差異

---

ALDC 並不是取代良好發酵管理的工具，而是讓前驅物控制更主動。下表整理傳統方式與 ALDC 輔助方式在製程角色上的差異，便於釀造、品管與生產排程人員理解其定位。

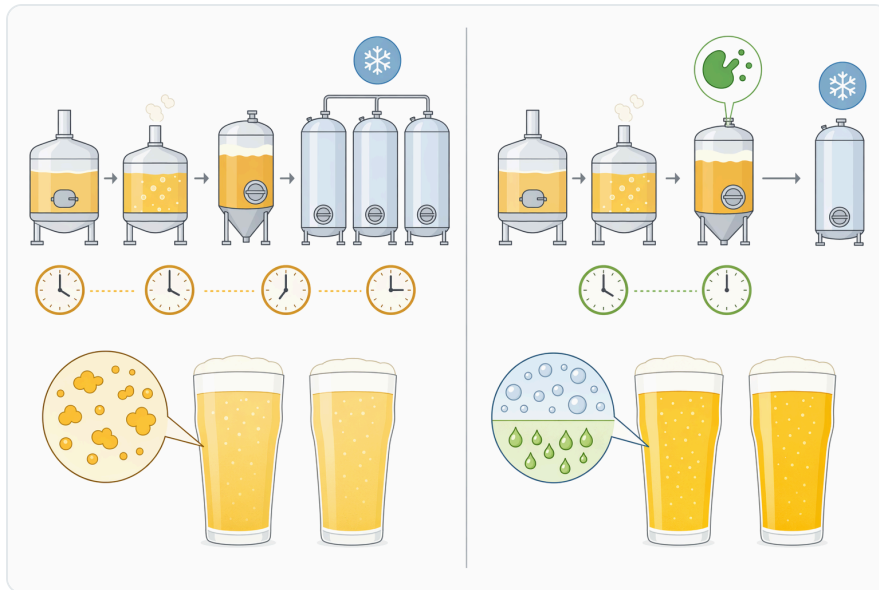


Figure 2. 傳統的雙乙醯控制仰賴酵母在雙乙醯形成後將其還原，而 ALDC 輔助控制則更早作用於  $\alpha$ -乙醯乳酸。

控制方式	主要作用點	優點	限制	適合情境
酵母株與營養管理	降低 $\alpha$ -acetolactate 生成或外排	屬於根本製程控制，對整體發酵品質有幫助	受配方、酵母健康、麥汁組成與發酵條件影響大	所有啤酒製程的基礎管理
Diacetyl rest	促進酵母吸收並還原已形成 diacetyl	技術成熟，容易整合至傳統製程	需要時間與溫控，可能延長槽占用	拉格、低溫發酵或 diacetyl 風險較高批次
延長熟成	讓殘餘 diacetyl 逐步下降	對風味穩定有整體幫助	佔用罐體、增加冷能與庫存時間	傳統拉格、需長時間風味整合產品
ALDC 輔助	將 $\alpha$ -acetolactate 轉為 acetoin	在前驅物階段降低 diacetyl 形成壓力	不直接分解已形成 diacetyl，效果受加入時機與製程條件影響	需提高週轉、降低 VDK 風險、追求批次一致性之產線

這個比較也凸顯 ALDC 的實務價值：它不是把啤酒「加速成熟」的單一答案，而是減少 diacetyl 形成來源之一。若酵母健康不佳、衛生控管不足或發酵條件失衡，仍可能產生其他風味缺陷；ALDC 只能針對  $\alpha$ -acetolactate 至 diacetyl 這條路徑提供幫助，不能補償所有製程問題。針對啤酒品質，啤酒花成分、氧化、微生物狀態與發酵副產物都會共同影響成品表現<sup>[3]</sup>。

## 研究證據：ALDC 與 diacetyl 前驅物控制

---

### 基因表現與釀酒酵母研究

ALDC 在釀造應用中的證據，並非僅來自商業宣稱。早期研究已經將細菌來源 ALDC 基因導入釀酒酵母，觀察其對釀造性狀與 diacetyl 形成的影響。Sone 等人報告 *Enterobacter aerogenes* alpha-acetolactate decarboxylase gene 在 brewer's yeast 中的表現，提供了用 ALDC 活性改變釀造代謝結果的基礎證據<sup>[2]</sup>。

Yamano 等人則建構了將 *Acetobacter aceti* ssp. *xylinum* 的 ALDC 基因整合進基因組的釀酒酵母。這類研究的重點在於證明：當釀造系統中具備 ALDC 活性時，可望降低  $\alpha$ -acetolactate 往 diacetyl 方向累積的機率。雖然今日許多啤酒廠更常採用外加酵素作為加工輔助，而非使用改造酵母，但這些研究仍有助於理解 ALDC 在釀造代謝中的可行性<sup>[5]</sup>。

### 乳酸菌研究對機制的補充

ALDC 不只在啤酒酵母研究中重要，在乳酸菌代謝研究中也常被用來解析  $\alpha$ -acetolactate 與 diacetyl 的關係。Aymes 等人研究 *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar *diacetylactis* 中 ALDC 失活對  $\alpha$ -acetolactate 與 diacetyl 生成的影響，顯示當 ALDC 功能受損時，前驅物與 diacetyl 生成動態會被改變<sup>[6]</sup>。

Curic 等人進一步探討 ALDC impaired 的 *Lactococcus lactis* 在 glucose/citrate cometabolism 下的代謝行為。這類乳酸菌文獻雖不同啤酒製程本身，但對「ALDC 活性如何影響  $\alpha$ -acetolactate 與 diacetyl 流向」提供了生化層面的旁證。換言之，ALDC 的釀造應用不是孤立經驗，而是與微生物代謝中  $\alpha$ -acetolactate 分岔點的基本機制一致<sup>[7]</sup>。

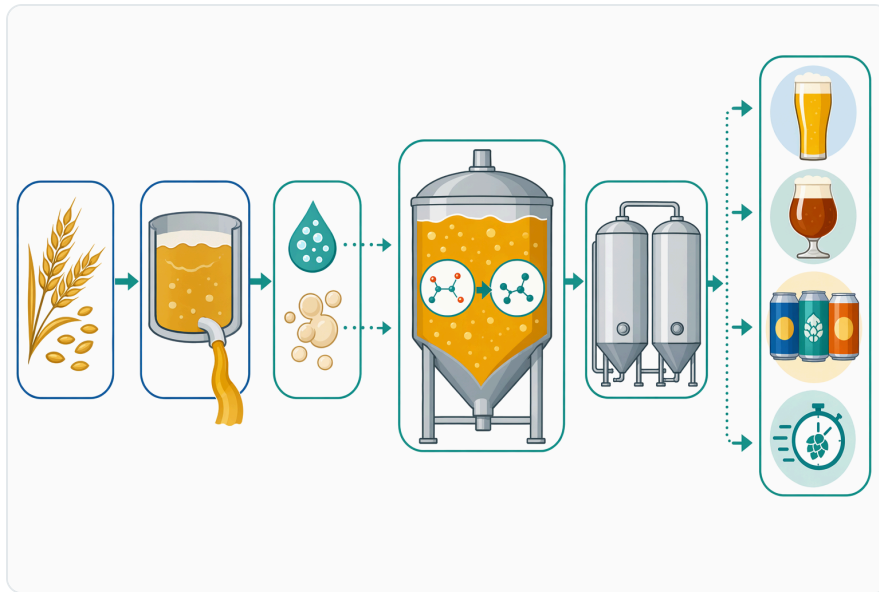


Figure 3. ALDC 最適合添加於冷卻麥汁轉移、投酵母或發酵初期前後，使其能在  $\alpha$ -乙酰乳酸生成時發揮作用。

Monnet 等人建立 *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* biovar *diacetylactis* 產生  $\alpha$ -acetolactate 的篩選程序，也反映  $\alpha$ -acetolactate 作為 diacetyl 前驅物在食品發酵中的重要性。對釀造端而言，這些研究提醒我們：若只量測終點 diacetyl，可能低估前驅物在後續加工、升溫或包裝前後轉化的風險；因此 ALDC 的價值在於讓前驅物更早被導向低風險路徑<sup>[8]</sup>。

## 產業應用場景：哪些製程最常考慮 ALDC？

### 拉格與低溫發酵產品

拉格啤酒常以較低溫度發酵與熟成，風味要求乾淨，對 diacetyl 的容忍度通常較低。低溫環境有利於某些風味穩定性，但也可能拉長酵母還原 diacetyl 的時間，使熟成週期成為產能瓶頸。ALDC 若在  $\alpha$ -acetolactate 生成早期介入，可降低後續 diacetyl 峰值，讓成熟與放行決策更可控<sup>[1]</sup>。

對大型拉格線而言，即使每批縮短的等待時間不大，累積到全年罐體週轉、冷卻負載與排程彈性上，也可能具有可觀意義。不過這類效益必須回到廠內條件評估：相同 ALDC 輔助策略，在不同酵母株、麥汁氮源、發酵溫度、罐型與排程壓力下，結果不會完全相同。

### 高週轉、代工釀造與穩定供貨產品

對需要穩定交期的產品線，diacetyl 常是放行風險之一。若感官或品質指標顯示仍有奶油味，批次可能被迫延後包裝，導致後續排程壓縮。ALDC 在這類情境中的角色，是降低 diacetyl 形成的不確定性，而非讓品管流程省略必要確認。產業資料也常將 ALDC 與 VDK 管理、縮短成熟時間、降低風味偏差連結在一起<sup>[9]</sup>。

精釀廠或代工廠的產品型態較多，啤酒風格與酵母切換頻繁，發酵排程也更容易受到單一批次延誤影響。ALDC 可作為某些乾淨型風格、快速周轉產品或穩定供貨 SKU 的輔助選項，但若風格本身允許或需要少量 diacetyl，例如特定英式或特殊風味設計產品，則不一定適合一概導入。



Figure 4. ALDC 常用於乾淨型拉格、快速釀造排程、高濃度麥汁發酵、酵母回收再使用流程、乾投啤酒，以及細緻的中性風格啤酒。

## 非酒精與低酒精啤酒的延伸考量

非酒精與低酒精啤酒的風味平衡較脆弱，酒精與酯類提供的遮蔽感較少，微量不良風味更容易被放大。若製程涉及發酵或受酵母代謝影響，diacetyl 控制仍可能是品質議題。ALDC 在此類產品中的可行性需結合實際配方、熱處理、酵母管理與最終風味目標，不宜只以一般啤酒經驗直接套用。

## 使用上的工藝重點與限制

ALDC 最重要的使用邏輯，是在  $\alpha$ -acetolactate 尚未大量轉為 diacetyl 前提供催化路徑。因此，實務上多會把它整合在發酵早期或主發酵階段，而不是作為包裝前的補救工具。若啤酒中 diacetyl 已明顯形成，ALDC 無法直接把 diacetyl 分解掉；此時仍需要活性酵母還原、時間、溫度管理或其他製程修正來處理<sup>[1]</sup>。

其次，ALDC 的效果取決於它與底物的接觸、基質環境與製程條件。不同啤酒風格的 pH、酒精、原麥汁濃度、酵母活性與發酵溫度差異，都會影響實際表現。因此，將 ALDC 視為「固定答案」並不準確；更務實的看法，是把它放入既有的酵母健康管理、麥汁組成控制、溫度曲線與衛生管理框架中。

第三，ALDC 不能解決微生物污染造成的根本問題。若 diacetyl 來自乳酸菌、片球菌或其他污染菌活動，單靠 ALDC 並不能取代 CIP、原料控管、酵母回收衛生、管線與包裝端管理。乳酸菌研究顯示  $\alpha$ -acetolactate 與 diacetyl 代謝可因菌種與酵素狀態而變動，這也提醒釀造端必須區分「正常酵母代謝

造成的 VDK 壓力」與「污染造成的異常生成」<sup>[6]</sup>。

## 與風味品質的關係：降低 diacetyl，不等於改變所有風味

ALDC 的風味效果主要集中在 diacetyl 路徑。它不會直接處理硫化物、醛類、氧化紙板味、酚味、乙醛或啤酒花氧化造成的品質問題。啤酒品質是一個多因子結果，啤酒花衍生成分、苦味品質、氧化穩定性與發酵副產物都會交互影響；因此，ALDC 應被視為 diacetyl 管理工具，而不是整體風味穩定劑<sup>[3]</sup>。

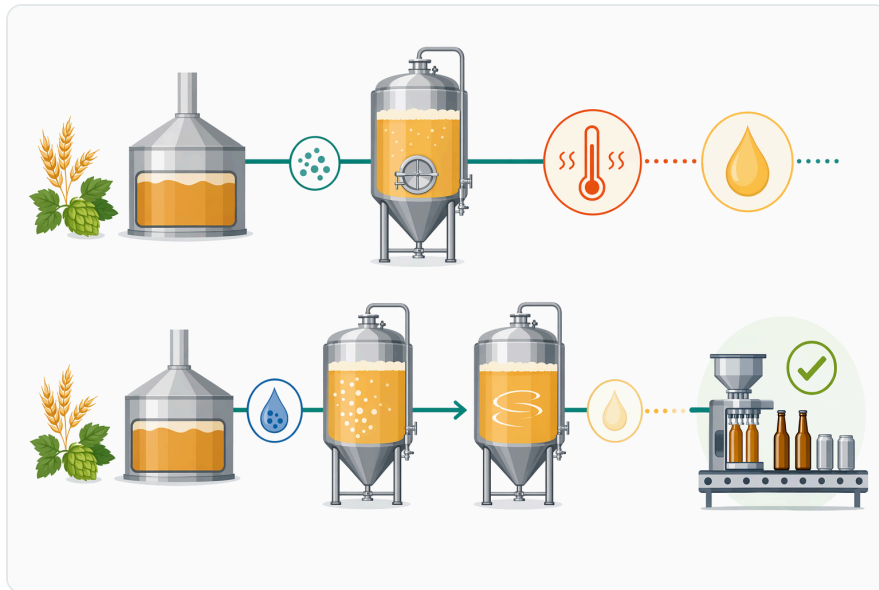


Figure 5. 透過減少雙乙醯的形成，ALDC 可降低熟成對後期長時間清除階段的依賴。

把  $\alpha$ -acetolactate 轉為 acetoin，通常有助於降低奶油味風險，但仍可能對極敏感產品的風味輪廓產生細微影響。對乾淨型拉格而言，這通常是正向的；對某些傳統風格或特意保留發酵副產物層次的產品，則需要確認最終感官是否符合品牌目標。這也是為什麼 ALDC 的導入不宜只看速度，還要看最終風味、口感與消費者期待。

## 固定化與新型應用研究的啟發

除了直接添加酵素，學術界也研究過酵素固定化系統，例如以無機奈米花或藻酸鹽微珠作為酵素固定化平台。Zhao 等人的研究顯示，酵素固定化可作為提升穩定性、便於回收或重複使用的技術方向；雖該研究不是釀造廠日常最常見的 ALDC 使用方式，但對未來連續化或可回收酵素處理系統具有參考價值<sup>[10]</sup>。

固定化 ALDC 若要真正進入啤酒產線，仍需面對多項工程問題，包括與啤酒基質接觸效率、清洗相容性、微生物風險、壓降、風味吸附、材料法規與成本。換言之，固定化研究提供了可能性，但現階段多數釀造應用仍以液態或可直接投加的加工輔助方式較容易整合。

## 法規、安全與文件：以訂單隨附資料為準

工業酵素用於食品或飲料製程時，法規重點通常包括來源、生產管理、殘留、標示與安全資料。不同市場對加工助劑、酵素製劑與最終產品標示的要求不完全相同，因此釀造廠應依銷售地規範與內部品質系統管理文件。Enzymes.bio 作為供應商，會隨 Alpha-Acetolactate Decarboxylase For Brewing Industry 訂單提供 CoA 與 SDS，供使用者進行批次留存、內部審核與安全處理參考。

若產品來源涉及微生物發酵生產，使用者也可能需要在內部合規文件中區分「酵素製劑的生產來源」與「最終啤酒是否含有生產微生物或其相關成分」。早期以 ALDC 基因建構釀造酵母的研究說明了此酵素可透過不同生物來源取得或表現，但商業外加酵素與基因改造釀酒酵母在法規與消費者溝通上是不同情境，不能混為一談<sup>[5]</sup>。

## 導入 ALDC 時的實務定位

在釀造製程中，ALDC 最適合被定位為「降低 diacetyl 形成風險的前段輔助工具」。它的導入目標通常包括：降低主發酵後期的 diacetyl 峰值、減少長時間 diacetyl rest 的壓力、提升放行時間可預測性，以及降低因 VDK 造成的批次延遲。這些目標都與產能、風味一致性和冷藏熟成安排有關，但實際效益仍取決於各廠條件。



Figure 6. ALDC 是針對  $\alpha$ -乙醯乳酸的預防性控制點，無法去除已經累積的雙乙醯。

導入時，釀造廠應把 ALDC 放在既有品質系統中評估，而不是孤立使用。酵母健康、充氧、麥汁 FAN、發酵溫度曲線、酵母回收代數、衛生狀態與包裝前溶氧，都會影響最終產品品質。ALDC 可以降低  $\alpha$ -acetolactate 轉為 diacetyl 的風險，但若其他因素失控，產品仍可能出現非預期風味或穩定性問題。

對 Enzymes.bio 的客戶而言，較務實的作法是將產品視為可在線上以 1 kg 單位採購的釀造加工輔助酵素，並依內部 SOP 管理接收、儲存、投加紀錄與批次文件。由於 CoA 與 SDS 會隨訂單提供，使用者可將文件納入品保留存與安全訓練資料，但不應把供應商文件等同於製造商現場製程說明或第三方實驗室報告。

## 結論：ALDC 的價值在於前驅物控制與製程可預測性

Alpha-Acetolactate Decarboxylase For Brewing Industry 的技術核心，是在  $\alpha$ -acetolactate 尚未轉化為 diacetyl 前，將其導向 acetoin，降低奶油味 VDK 在啤酒中形成的風險。這一機制受到釀酒酵母基因表現研究、乳酸菌代謝研究與釀造應用文獻支持，並與產業上以 ALDC 縮短 diacetyl 管控壓力的使用邏輯一致<sup>[2]</sup>。

它的主要限制也同樣清楚：ALDC 不是已生成 diacetyl 的直接分解劑，不能取代酵母健康、衛生控管、發酵條件管理與品質放行判斷。對希望提高拉格週轉、降低 VDK 風險、改善批次一致性的釀造廠而言，ALDC 是值得納入製程評估的加工輔助選項；對需要保留特定發酵風味輪廓的產品，則應以最終感官與品牌目標為準。Enzymes.bio 供應此產品並以 1 kg 單位線上銷售，訂單隨附 CoA 與 SDS，適合需要以文件化方式管理酵素輔助製程的 B2B 釀造使用者。

### 線上訂購 Alpha-Acetolactate Decarboxylase For Brewing Industry

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 Alpha-Acetolactate Decarboxylase For Brewing Industry →](#)

## 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. Jiying, Q. (2007). Research Progress of Diacetyl and its Enzymatic Control in Brewing. *Modern Food Science and Technology*.
2. Sone, H., Fujii, T., Kondo, K., Shimizu, F., Tanaka, J., Inoue, T., Erdal, K., ... et al. (1988). Nucleotide sequence and expression of the Enterobacter aerogenes alpha-acetolactate decarboxylase gene in

- brewer's yeast. *Applied and Environmental Microbiology*, 54, 38 - 42.
3. Shellhammer, T., & Lopetcharat, K. (2009). Particular features of hop-derived compounds and beer quality.
  4. Abv Alpha Acetolactate Decarboxylase. *Lallemandbrewing*.
  5. Yamano, S., Kondo, K., Tanaka, J., & Inoue, T. (1994). Construction of a brewer's yeast having alpha-acetolactate decarboxylase gene from Acetobacter aceti ssp. xylinum integrated in the genome. *Journal of Biotechnology*, 32 2, 173-8 .
  6. Aymes, F., Monnet, C., & Corrieu, G. (1999). Effect of alpha-acetolactate decarboxylase inactivation on alpha-acetolactate and diacetyl production by Lactococcus lactis subsp. lactis biovar diacetylactis. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 87 1, 87-92 .
  7. Curic, M., Richelieu, M., Henriksen, C. M., Jochumsen, K. V., Villadsen, J., & Nilsson, D. (1999). Glucose/citrate cometabolism in Lactococcus lactis subsp. lactis biovar diacetylactis with impaired alpha-acetolactate decarboxylase. *Metabolic Engineering*, 1 4, 291-8 .
  8. Monnet, C., Schmitt, P., & Diviès, C. (1997). Development and Use of a Screening Procedure for Production of (alpha)-Acetolactate by Lactococcus lactis subsp. lactis biovar diacetylactis Strains. *Applied and Environmental Microbiology*, 63, 793 - 795.
  9. Understanding Vdks In Brewing How Aldc Can Enhance Your Beer. *Brewing-products*.
  10. Zhao, F., Wang, Q., Dong, J., Xian, M., Yu, J., Yin, H., Chang, Z., ... et al. (2017). Enzyme-inorganic nanoflowers/alginate microbeads: An enzyme immobilization system and its potential application. *Process Biochemistry*, 57, 87-94.


## 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](mailto: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。