

酵素簡介

緒論

1. 生物體具備執行多種化學反應的能力
反應需在環境時時變異下快速進行
反應間需相互協調
2. 反應通常在溫和的環境中(非高溫、高壓或有強烈的化學物質)進行，且受到嚴格但有彈性的控制
3. 許多在實驗室需加熱、加酸或加鹼才能發生的反應，卻可在生物體的體溫(37°C)及近中性的條件下進行
- 因生物體內有具催化劑作用的**酵素**存在
4. **大部份的酵素為蛋白質**

5. 有些酵素在催化反應時需非蛋白質的有機成分(如維生素類的**輔酵素**)或金屬離子(**輔因子**)的協助才具有活性
6. “酵素”一詞遲至1877年才被提出，但人類很早之前就已發現酵素的作用
如酵母細胞會加速由糖變成酒精的發酵作用
分離出的胃消化液可加速肉類的分解等
7. 當時許多化學家認為“活”的酵素(如酵母細胞)與“沒有生命”的胃消化液是不同的東西(即**生機論**)，但德國生理學家Kuhe卻提出後者是所謂的“酵素”(enzyme)，其原文即取自於希臘字“在酵母中”(in yeast)的意思，因Kuhe認為胃消化液的催化活性與酵母細胞是相同的(即**機械論**)

8. 生機論與機械論的爭論直至1897年
德國化學家Buchner以砂粒磨碎酵母細胞後，成功取得酵母細胞抽取液，可產生相同的發酵作用
- Buchner因此貢獻獲1907年諾貝爾化學獎
9. 接著，酵素的本质開始被研究
因酵素只要稍微加熱就會變質，使得許多生化學家懷疑酵素的本质就是蛋白質
此論點直到1926至1930年間，因Sumner與Northrop等人成功地將許多酵素結晶並證明其成分為蛋白質時才得以確立
- Sumner與Northrop因此貢獻同獲1946年諾貝爾化學獎



Eduard Buchner (1860 ~ 1917), left
- 1907 Nobel Prize in Chemistry
Biochemical researches and discovery of cell-free fermentation

James Sumner (1887 ~ 1955), right
- 1946 Nobel Prize in Chemistry
Discovery that enzymes can be crystallized

酵素的重要

1. 任何生物、任何細胞都含有許多酵素
細胞內所有重要反應進行的速度才能因應細胞的生理要求，
生物才能生存，生命才得以延續，因此生物的一切特性都
由酵素造成
由“Life is a system of cooperating
enzyme reactions”的敘述可看出酵素的重要性

2. 酵素是一些疾病的原因

先天性代謝異常者通常是患者體內缺乏某一種酵素所引起的

- 如半乳糖血症患者缺乏將半乳糖轉變成葡萄糖的酵素，導致血液中的半乳糖含量過高
- 苯酮尿症患者缺乏可將胺基酸中的苯丙胺酸代謝成酪胺酸的酵素
- 這些病症若無法及早診斷與治療，將會造成嚴重的智障等

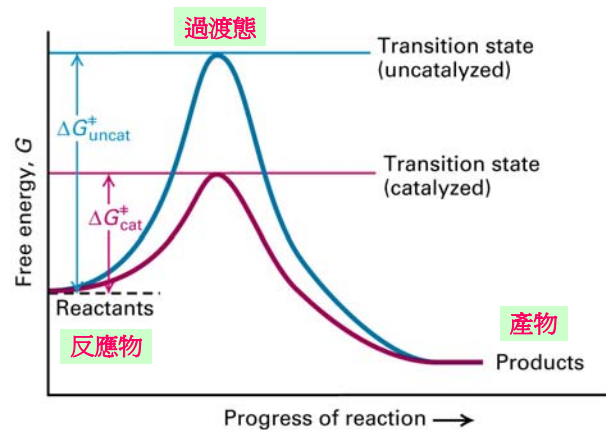
3. 使用含有機磷殺蟲劑、氰化物中毒或鉛中毒等原因也是因此類物質會阻害重要酵素的活性

4. 有些抗細菌藥物會干擾細菌的酵素系統，但不致嚴重影響宿主體內的代謝(如青黴素抑制細菌細胞壁的合成，磺胺類藥物干擾細菌的葉酸代謝等)

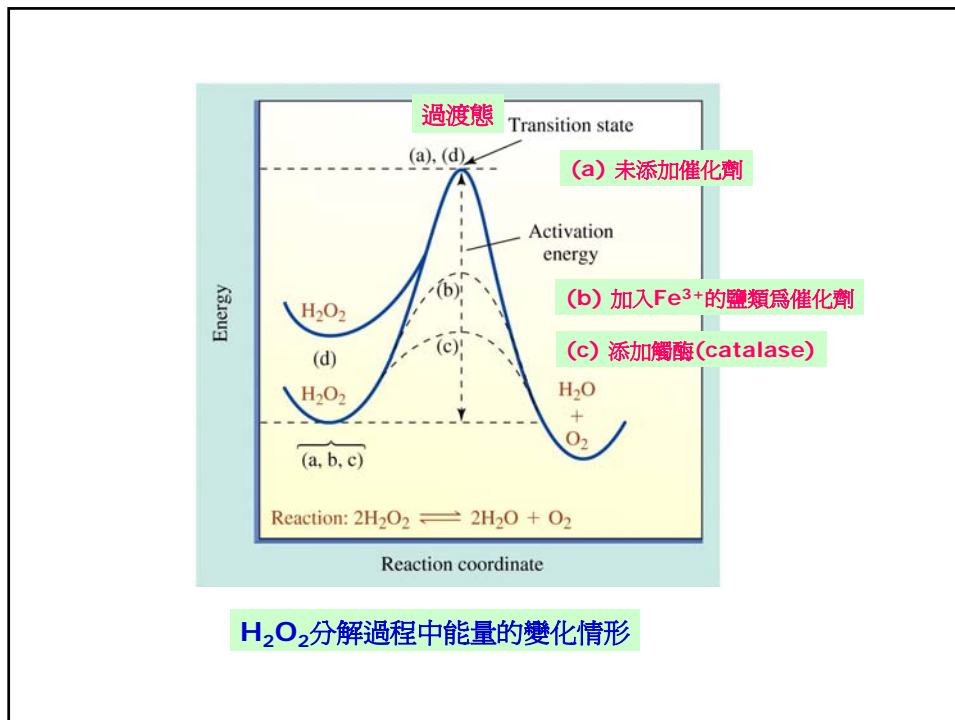
4. 現代的臨床醫學上，酵素甚至可用於疾病的診斷與治療

酵素的特性

1. 大部份酵素是蛋白質，因此具有蛋白質的一切特性
遇高溫、過酸、過鹼或重金屬時均可能發生變性，而使原來具有的催化活性降低或消失
2. 影響酵素作用的因子有酵素濃度、受質濃度、pH值、溫度與終產物濃度等
唯有將各因素做適度的調整才能使酵素的催化作用達到最高效率
3. 酵素的催化作用
可降低反應所需的活化能而加速反應趨向平衡，但不影響反應的平衡常數



化學反應過程中反應物所含能量的變化



酵素與化學催化劑一樣，只影響化學反應的動力學性質而非熱力學性質，因此酵素又稱為**生物催化劑**

所有酵素可歸為六類

- 氧化還原，異構化，轉移，水解，鍵結的生成與切除

4. 生物催化劑(酵素)與一般化學催化劑的不同處

效率高(可加速反應達 10^8 倍)

所需量少

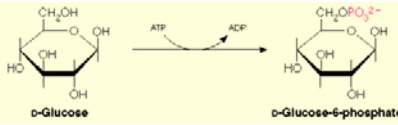
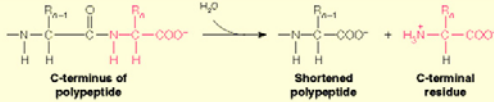
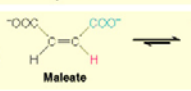
專一性高

作用條件溫和

具活體外活性

活性可接受阻害劑或活化劑的調節等

所有酵素依所催化的反應可歸為六大類

Class	Example (reaction type)	Reaction Catalyzed
1. Oxidoreductases	Alcohol dehydrogenase (EC 1.1.1.1) (oxidation with NAD ⁺)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} \xrightarrow{\text{NAD}^+} \text{CH}_3\text{C}(=\text{O})\text{H} + \text{NADH} + \text{H}^+$ <p style="text-align: center;">Ethanol Acetaldehyde</p>
2. Transferases	Hexokinase (EC 2.7.1.2) (phosphorylation)	 <p style="text-align: center;">D-Glucose D-Glucose-6-phosphate</p>
3. Hydrolases	Carboxypeptidase A (EC 3.4.17.1) (peptide bond cleavage)	 <p style="text-align: center;">C-terminus of polypeptide Shortened polypeptide C-terminal residue</p>
4. Lyases	Pyruvate decarboxylase (EC 4.1.1.1) (decarboxylation)	$\text{^-OOC-C(=O)-CH}_3 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H-C(=O)-CH}_3$ <p style="text-align: center;">Pyruvate Acetaldehyde</p>
5. Isomerases	Malate isomerase (EC 5.2.1.1) (cis-trans isomerization)	 <p style="text-align: center;">Malate Fumarate</p>
6. Ligases	Pyruvate carboxylase (EC 6.4.1.1) (carboxylation)	$\text{^-OOC-C(=O)-CH}_3 + \text{CO}_2 \xrightarrow{\text{ATP}} \text{^-OOC-C(=O)-CH}_2\text{-COO}^- + \text{ADP} + \text{P}_i$ <p style="text-align: center;">Pyruvate Oxaloacetate</p>

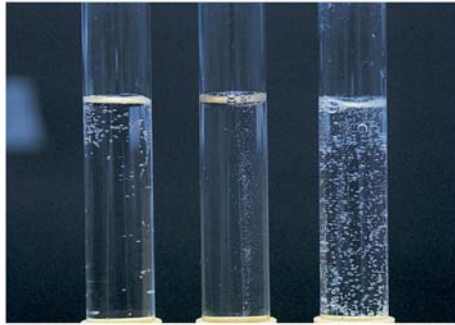
5. 以觸酶為例

觸酶催化 $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 的反應，而二氧化錳與鐵粉也可催化相同的反應，但兩者的效率相差甚遠

- 每分子的觸酶在0°C的條件下，每秒鐘仍可分解44,000個 H_2O_2 分子，因此只需微量

觸酶只催化 H_2O_2 的分解反應，而二氧化錳與鐵粉除了催化 H_2O_2 的分解外，尚可催化其它多種反應

- 專一性

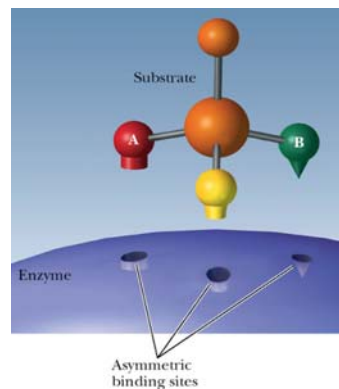
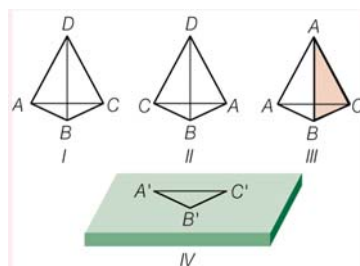


含3% H_2O_2 的水溶液置於37°C
 (a) 未添加催化劑
 (b) 加入 Fe^{3+} 的鹽類為催化劑
 (c) 添加酵素觸酶(catalase)

Lowering of the Activation Energy of Hydrogen Peroxide Decomposition by Catalysts			
Reaction Conditions	Activation Free Energy		Relative Rate
	$kJ\ mol^{-1}$	$kcal\ mol^{-1}$	
No catalyst	75.2	18.0	1
Platinum surface	48.9	11.7	2.77×10^4
Catalase	23.0	5.5	6.51×10^8

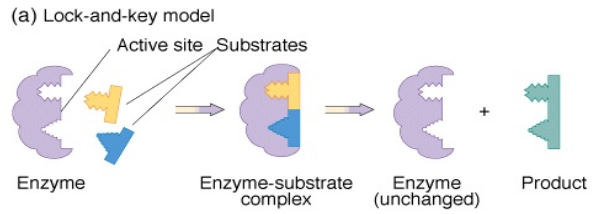
酵素的專一性(1)

三點接觸理論



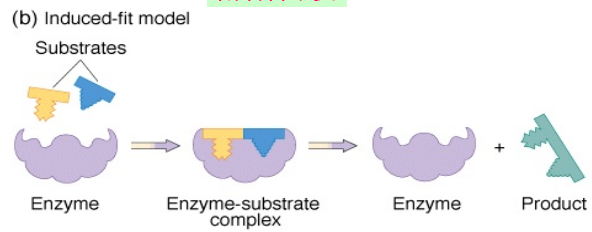
酵素的專一性(2)

鎖與鑰匙模型



兩者皆不變

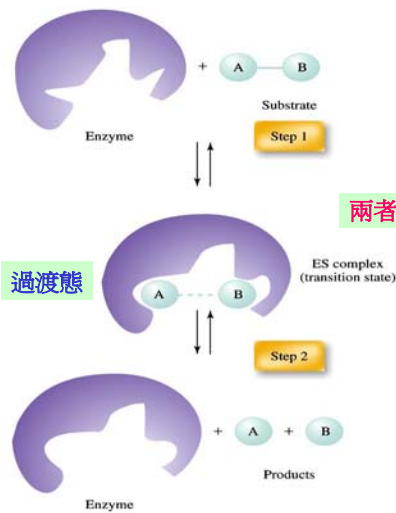
誘導填入模型



一者變一者不變

酵素的專一性(3)

過渡態穩定模型



兩者皆變

6. 酵素是生物體內特有的催化劑，但在適當的條件下，即使細胞的結構被破壞，原有的酵素在細胞外仍具有生物活性。各別的酵素可被分離、純化、結晶而用於代謝反應的研究、酵素結構與其它特性的研究、甚至發展成為化學試劑、藥物、及工業上的催化劑等。

酵素動力學簡介

1. 酵素動力學

研究酵素反應速率與影響反應速率的因子

2. 早期研究

蔗糖的水解

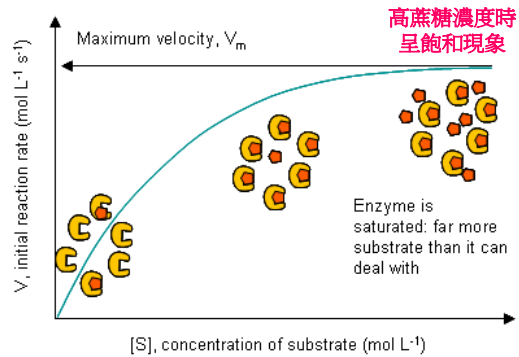
- 酸水解

- 酵素水解

3. Michaelis-Menten方程式

單一受質，單一產物系統

- S (受質) \rightarrow P (產物)



雙曲線關係

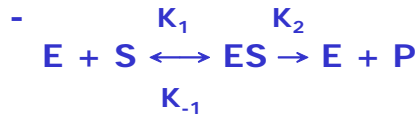
蔗糖濃度對蔗糖水解酶(sucrase)反應速率的影響



Leonor Michaelis (1875~1949, left)

- Famous for his work with **Maud Menten (1879~1960, right)** in enzyme kinetics and Michaelis-Menten kinetics
- Besides his role in the formulation of Michaelis-Menten equation (1913), he found that thioglycolic acid could dissolve keratin, making him the **father of the permanent wave**

反應過程



K_1 = ES (酵素受質複合體)形成的速率常數

K_{-1} = ES分解的速率常數

K_2 = 產物生成與釋出的速率常數

穩定態假說

- ES形成的速率等於ES分解的速率 ($d[\text{ES}]/dt = 0$)

Michaelis-Menten方程式

- $V_o = V_{\max} [\text{S}_o] / (K_m + [\text{S}_o])$, $K_m = (K_{-1} + K_2) / K_1$

當 $[\text{S}_o] \geq K_m$, $V_o = V_{\max}$ (零級反應)

當 $[\text{S}_o] = K_m$, $V_o = 1/2 V_{\max}$

當 $[\text{S}_o] \leq K_m$, $V_o = V_{\max} ([\text{S}_o] / K_m)$ (一級反應)

Michaelis-Menten方程式的重要性

- K_m

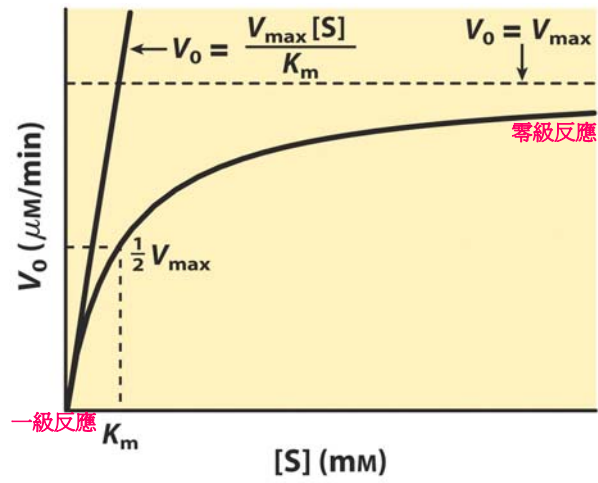
當 $K_{-1} \geq K_2$, $K_m = (K_{-1} + K_2) / K_1$

$= K_{-1} / K_1 = K_d$ (ES的解離常數)

為酵素與受質間親和力的指標

- V_{\max}

酵素催化的效率?



反應速率與受質濃度的關係

TABLE 6-6 K_m for Some Enzymes and Substrates		
Enzyme	Substrate	K_m (mM)
Hexokinase (brain)	ATP	0.4
	D-Glucose	0.05
	D-Fructose	1.5
Carbonic anhydrase	HCO_3^-	26
Chymotrypsin	Glycyltyrosinylglycine	108
	N-Benzoyltyrosinamide	2.5
β -Galactosidase	D-Lactose	4.0
Threonine dehydratase	L-Threonine	5.0

TABLE 6-7		Turnover Numbers, k_{cat} , of Some Enzymes
Enzyme	Substrate	k_{cat} (s^{-1})
Catalase	H_2O_2	40,000,000
Carbonic anhydrase	HCO_3^-	400,000
Acetylcholinesterase	Acetylcholine	14,000
β -Lactamase	Benzylpenicillin	2,000
Fumarase	Fumarate	800
RecA protein (an ATPase)	ATP	0.5

4. 完美酵素?

利用 K_{cat}/K_m 比常數評估催化效率

- 生理狀況下

$[S]/K_m$ 的比值介於 0.01 ~ 1.0

$$V = (V_{max}/K_m)[S_0] = (K_{cat}/K_m)[E_{total}][S]$$

其中 $K_{cat}/K_m = (K_1K_2)/(K_{-1} + K_2) \leq K_1$

受限於擴散速率 ($10^8 \sim 10^9 M^{-1}sec^{-1}$)

TABLE 6-8 Enzymes for Which k_{cat}/K_m Is Close to the Diffusion-Controlled Limit (10^8 to $10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$)

Enzyme	Substrate	k_{cat} (s^{-1})	K_m (M)	k_{cat}/K_m ($\text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$)
Acetylcholinesterase	Acetylcholine	1.4×10^4	9×10^{-5}	1.6×10^8
Carbonic anhydrase	CO_2	1×10^6	1.2×10^{-2}	8.3×10^7
	HCO_3^-	4×10^5	2.6×10^{-2}	1.5×10^7
Catalase	H_2O_2	4×10^7	1.1×10^0	4×10^7
Crotonase	Crotonyl-CoA	5.7×10^3	2×10^{-5}	2.8×10^8
Fumarase	Fumarate	8×10^2	5×10^{-6}	1.6×10^8
	Malate	9×10^2	2.5×10^{-5}	3.6×10^7
β -Lactamase	Benzylpenicillin	2.0×10^3	2×10^{-5}	1×10^8

Source: Fersht, A. (1999) *Structure and Mechanism in Protein Science*, p. 166, W. H. Freeman and Company, New York.

酵素活性的調節

1. 細胞代謝活性的調節對細胞生存極其重要

代謝活性的調節通常透過改變催化特定反應的酵素活性

影響酵素活性的因子

- 溫度、pH值、受質濃度、輔因子或調節劑的濃度等

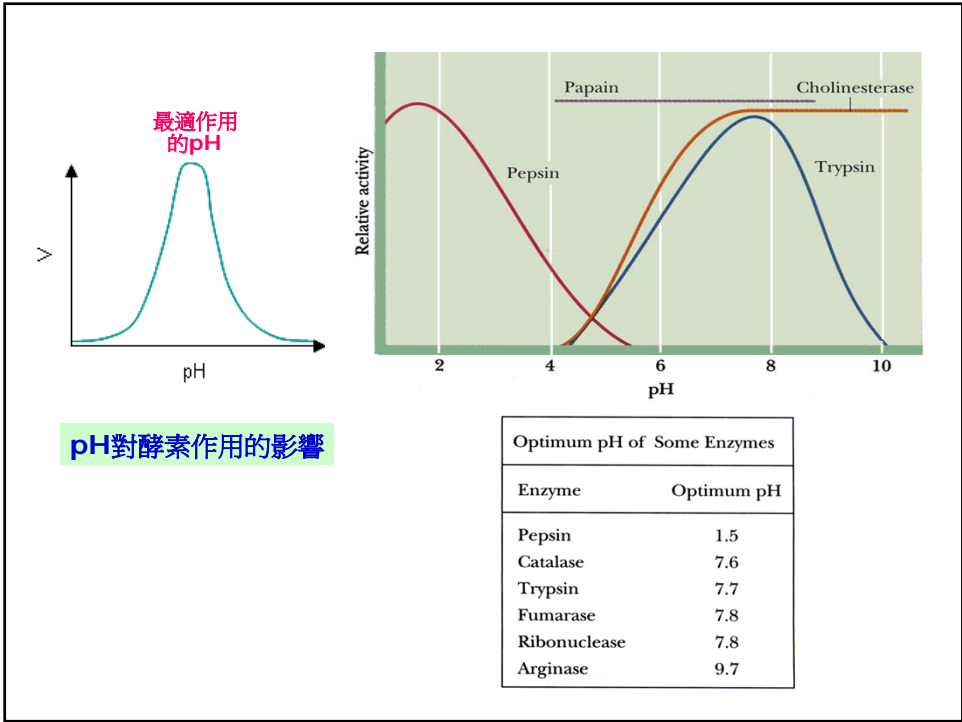
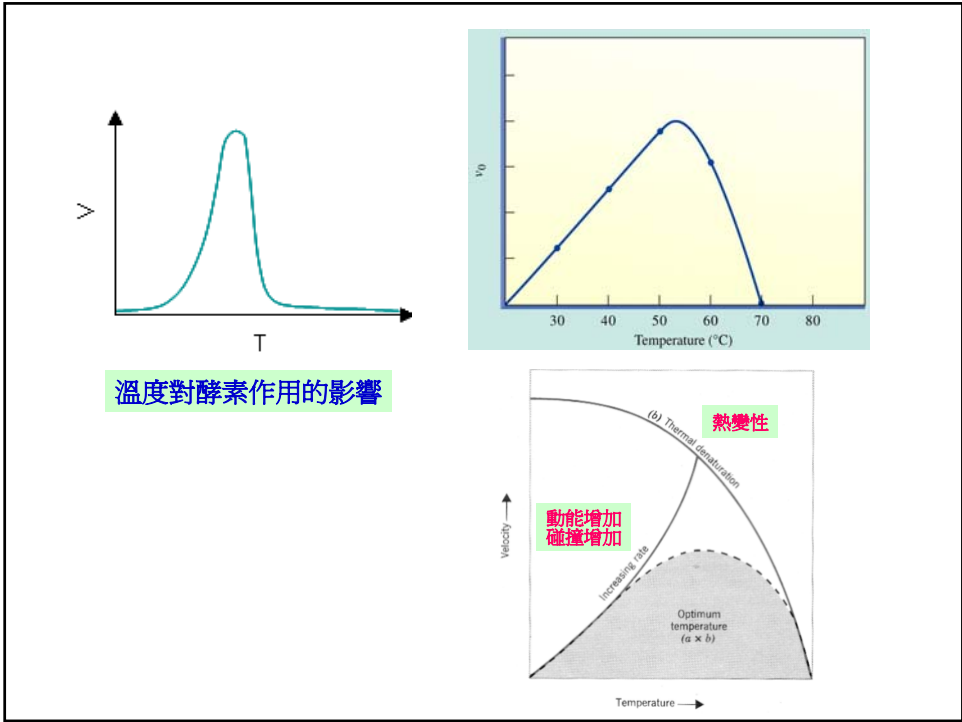
- 活性調控機制

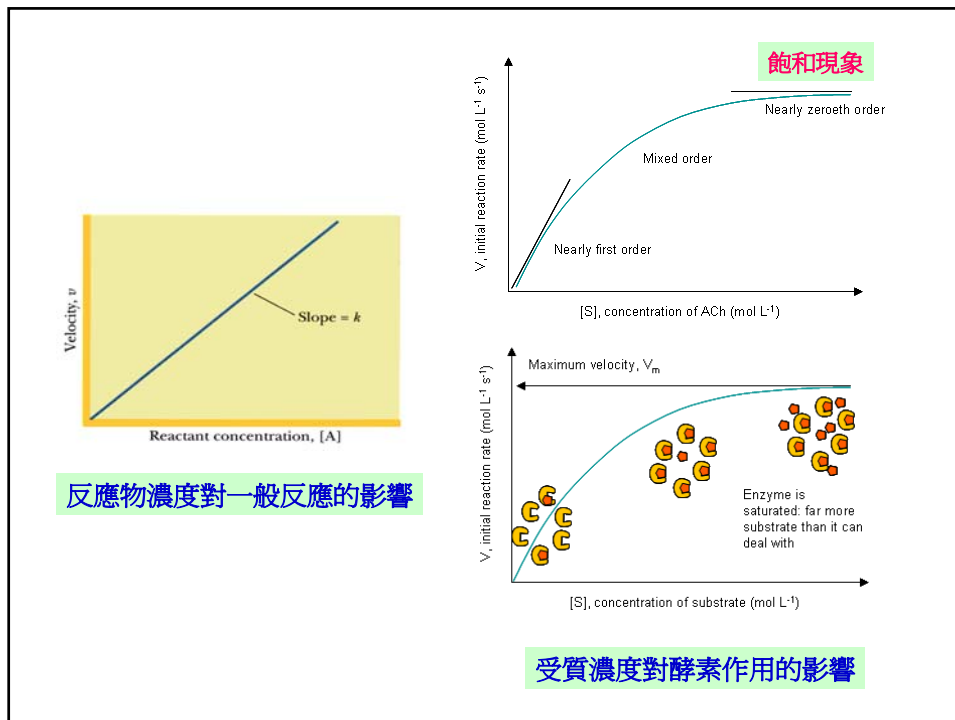
不可逆的切除活化作用

可逆的異位調節作用

可逆的共價修飾作用

其他





2. 不可逆的切除活化作用

如催化脂類、蛋白質、糖類等細胞成分水解的消化酵素

- 通常酵素製造時是以不具活性的先質形式存在

保護細胞本身結構的完整性

- 當需要時

不具活性的酵素先質會因一小段的肽鏈被切除而具有活性

凝血反應

- 凝血酶原，血纖維蛋白原

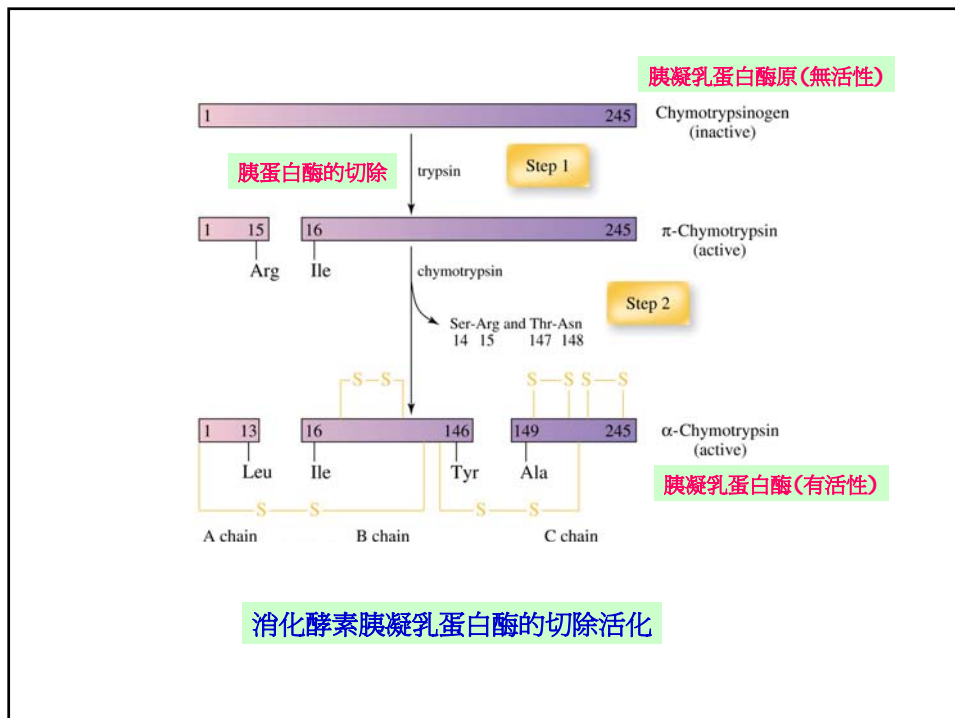
激素的活化

- 激素原

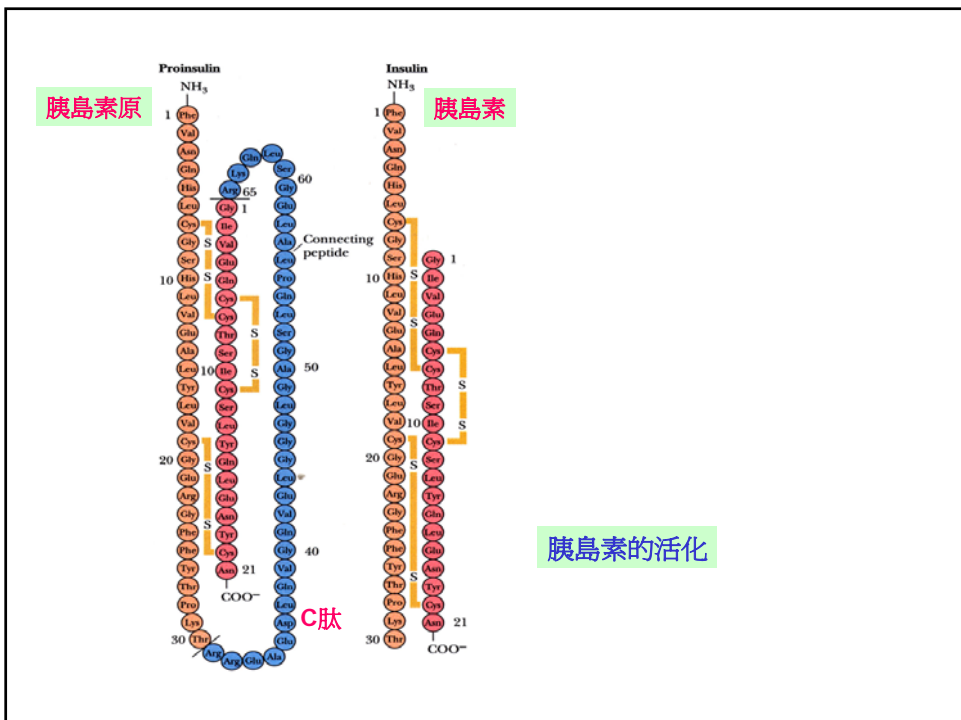
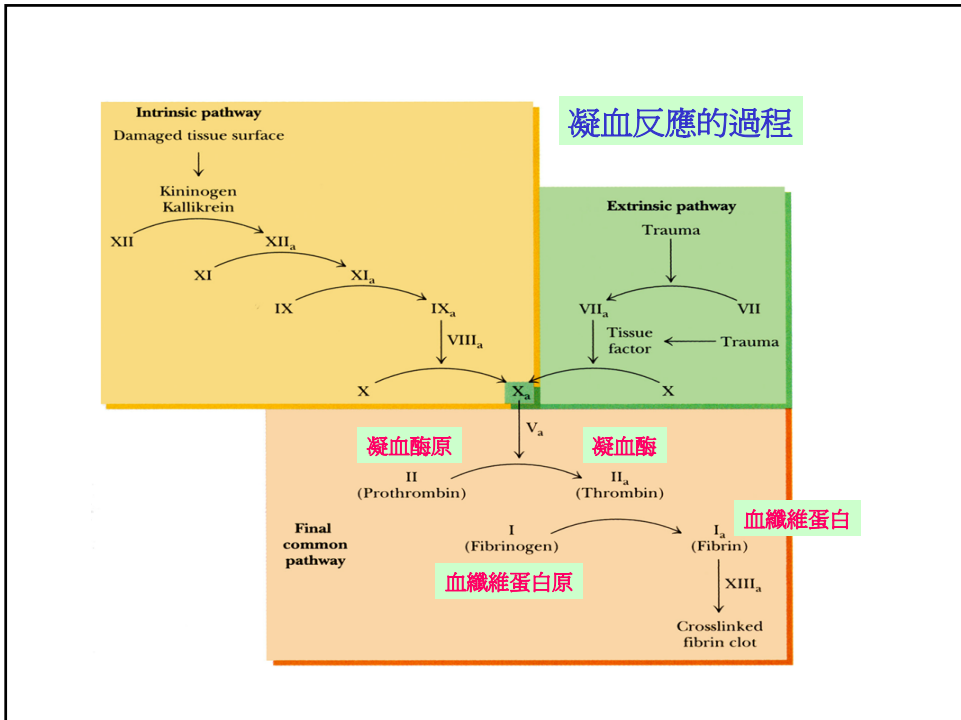
細胞程式死亡

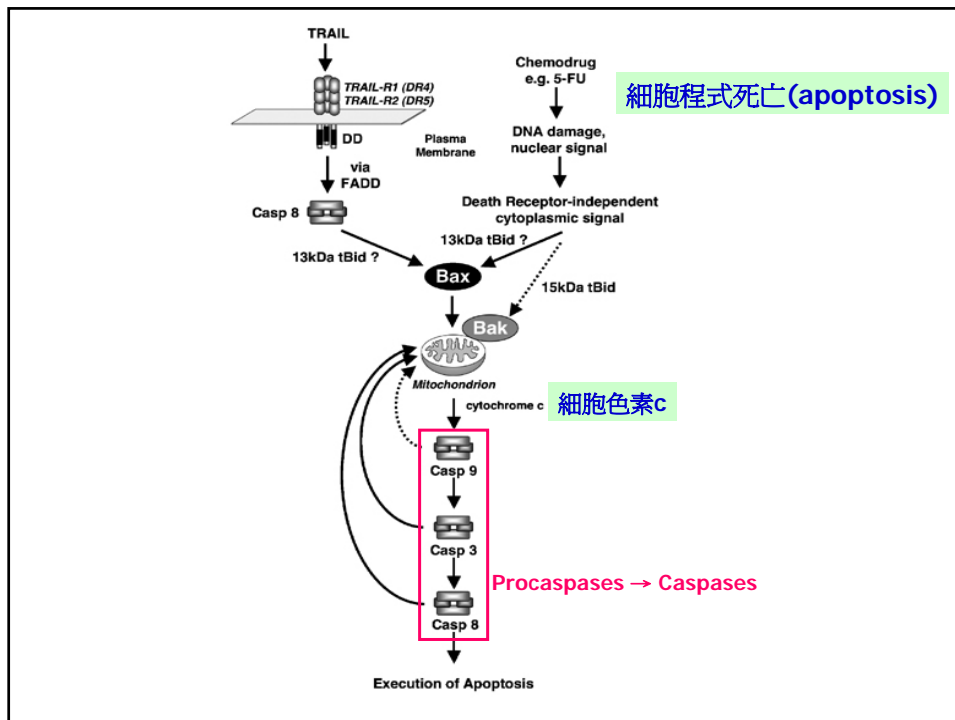
Pancreatic and Gastric Zymogens		
Origin	Zymogen	Active Protease
Pancreas	Trypsinogen	Trypsin
Pancreas	Chymotrypsinogen	Chymotrypsin
Pancreas	Procarboxypeptidase	Carboxypeptidase
Pancreas	Proelastase	Elastase
Stomach	Pepsinogen	Pepsin

消化酵素多以不具活性的先質形式存在



消化酵素胰凝乳蛋白酶的切除活化





3. 可逆的異位調節作用

此機制適用於具有四級構造的酵素

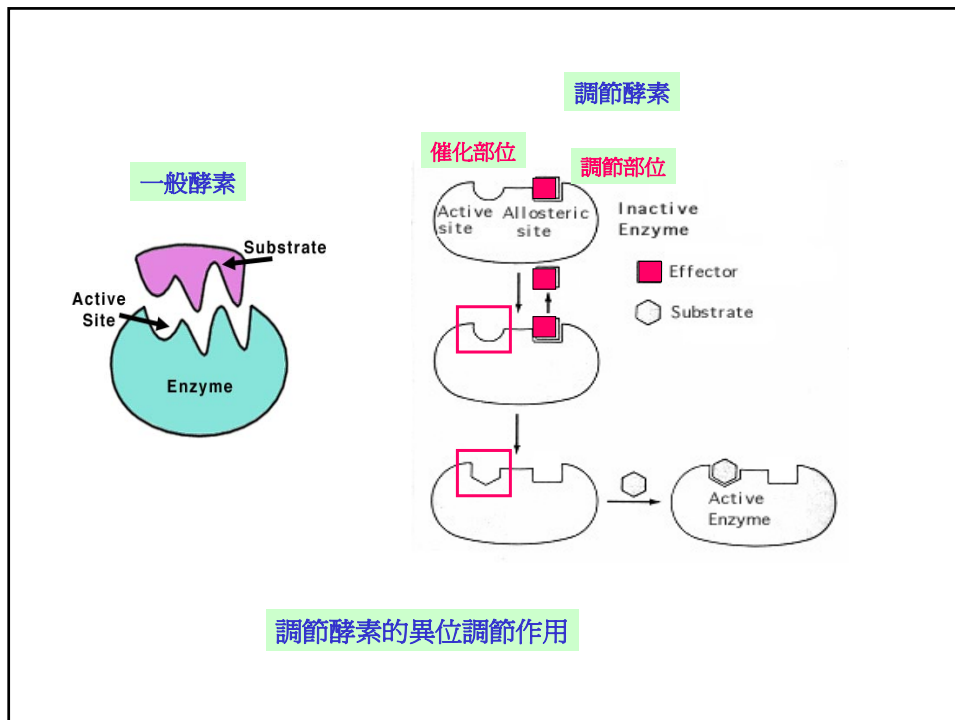
- 催化部位，活性部位
- 調節部位

當酵素的調節劑(活化劑或阻害劑)與酵素的調節部位接合

- 引發調節部位發生構形改變
- 此改變因四級構造中不同次單元間的相互作用而傳達至催化部位，進而改變催化部位的特性

如改變酵素對受質的接合能力或酵素催化的效率等

- 最後使酵素活性改變



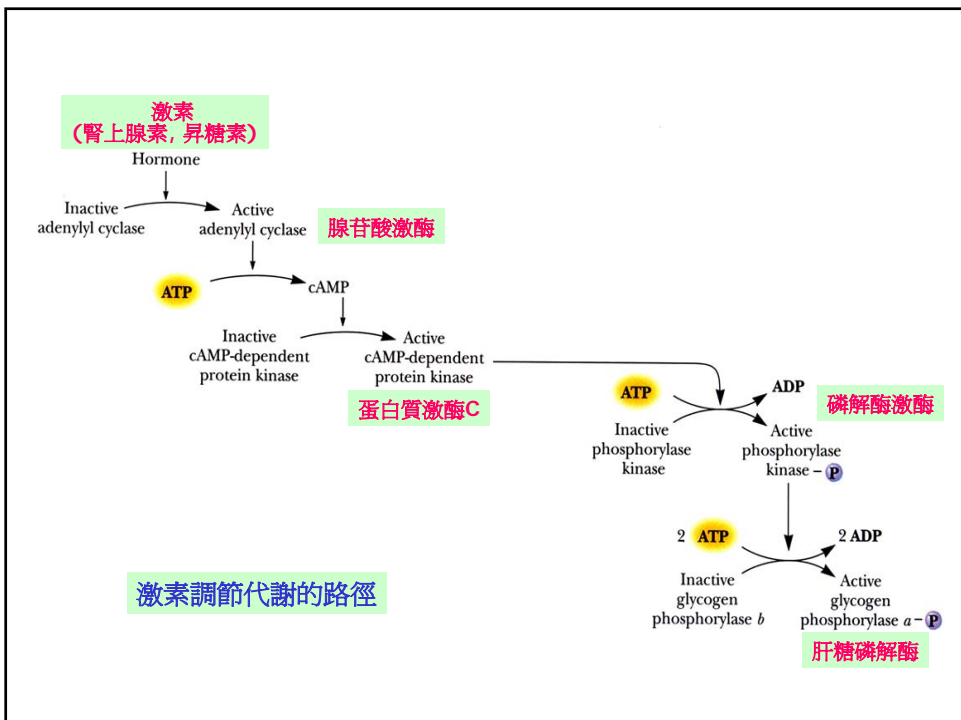
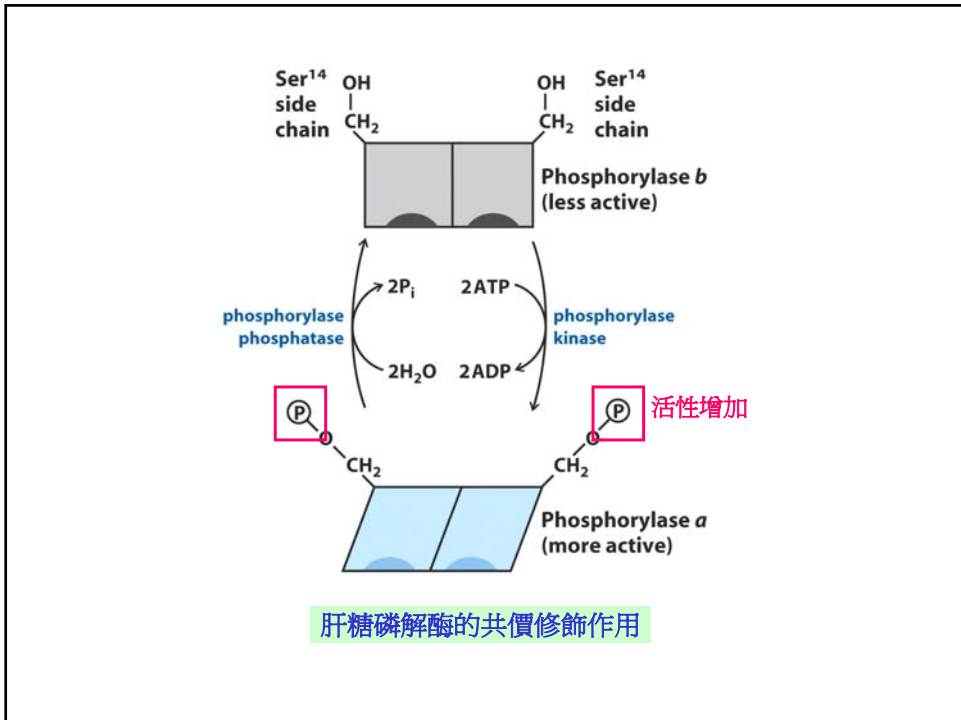
4. 可逆的共價修飾作用

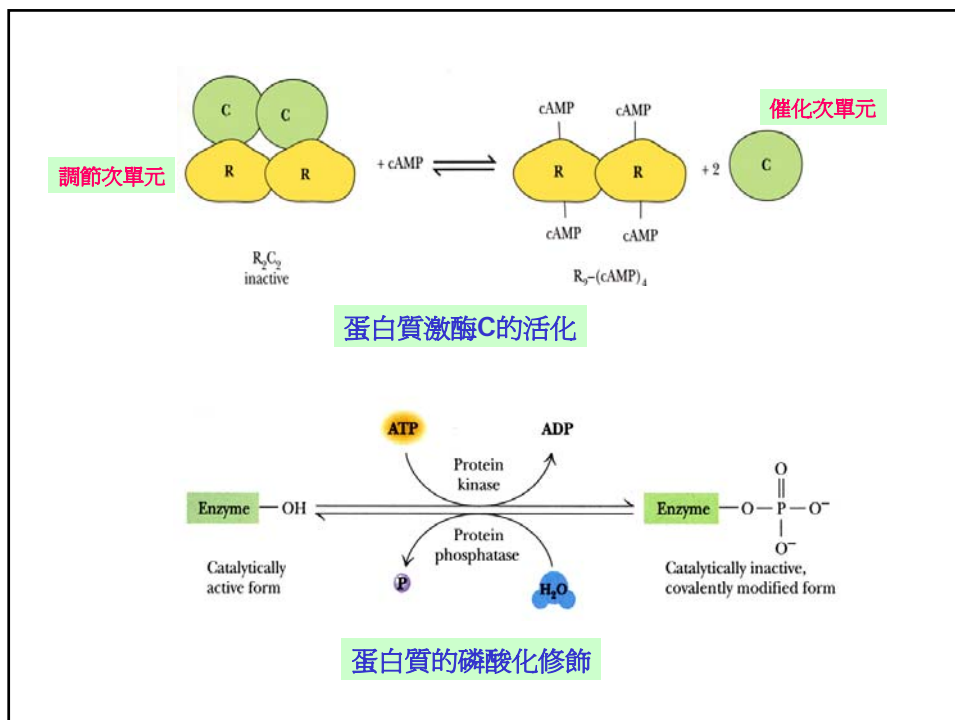
代謝肝糖的肝糖磷解酶是研究最多的例子

肝糖磷解酶(或特定酵素)因特定胺基酸(如絲胺酸)接上磷酸基(或其他特定化學基)而改變其活性，此修飾作用(磷酸化)屬共價鍵結，因此需其他酵素的參與
此機制通常是細胞代謝中激素調節作用的結果

5. 其他

在長期的代謝調適過程中，亦可透過激素的作用而使特定種類的酵素表現量增加或減少





酵素的應用

1. 隨著對酵素的了解與現代科技的進步，酵素已被廣泛應用於臨床醫學、工業及生物科技上
2. 酵素在臨床醫學上的應用
 - 利用酵素的高專一性、高靈敏性與反應快速等優點
 - 以酵素為試劑進行血糖或膽固醇等含量的常規檢查
 - 如葡萄糖氧化酵素可用來定量血中及尿中的葡萄糖量
 - 利用酵素做為疾病診斷的輔助工具或治療效果的評估指標
 - 肝功能檢查時分析血液中轉胺酵素GPT與GOT的含量
 - 分析酸性磷酸根水解酵素以篩檢前列腺癌等

肝功能檢查

SGOT	或稱OT轉氨、AST，參考值為5~40U/L，若增加則懷疑心臟、肝臟方面疾病，或肌肉損傷或其他因素引起。
SGTP	或稱PT轉氨、ALT，參考值為5~40U/L，若升高為肝臟、腎臟方面疾病引起。
總膽色素	分直接膽色素及間接膽色素，直接膽色素參考值為0~0.4mg/dL，若增加為黃疸性的肝膽疾病等引起。間接膽色素參考值為0.2~0.8mg/dL，若增加為溶血性疾病或紅血球的破壞增加等引起。
鹼性磷酸	肝膽方面的疾病、骨骼方面的受損及其他因素引起，成長發育中的青少年也會有偏高現象。

血糖機



以酵素為治療疾病的藥劑

- 天門冬醯胺酸的水解酵素可治療白血病(血癌)
- 尿激酶可治療血栓症
- 清理傷口，預防蛀牙

利用酵素抑制的原理治療疾病

- 痛風，高膽固醇，消炎

生理生化的研究

- 新生兒先天性代謝異常中的苯酮尿症即是缺乏代謝苯丙胺酸的羥化酶所致

Transaminase
Phenylalanine → Phenylpyruvate (Phenylketone)

Phenylalanine Hydroxylase
↓
Deficient in Phenylketonuria

Tyrosine → Melanins (黑色素)

Multiple Reactions
↓
Fumarate + Acetoacetate

供苯酮尿症患者使用



L-Tyrosine Plus Powder

治療白血病



Elspar® is a brand name of Asparaginase.

傷口清理



Collagenase Santyl® Ointment

治療血栓症(尿激酶)



治療乳糖不耐症

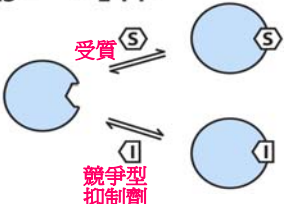


Lactase Enzyme

酵素的抑制作用

- 可逆抑制作用
 - 競爭型抑制劑(為酵素受質的類似物)
 - 臨床用藥
- 不可逆抑制作用
 - 盤尼西林
 - 含有機磷農藥

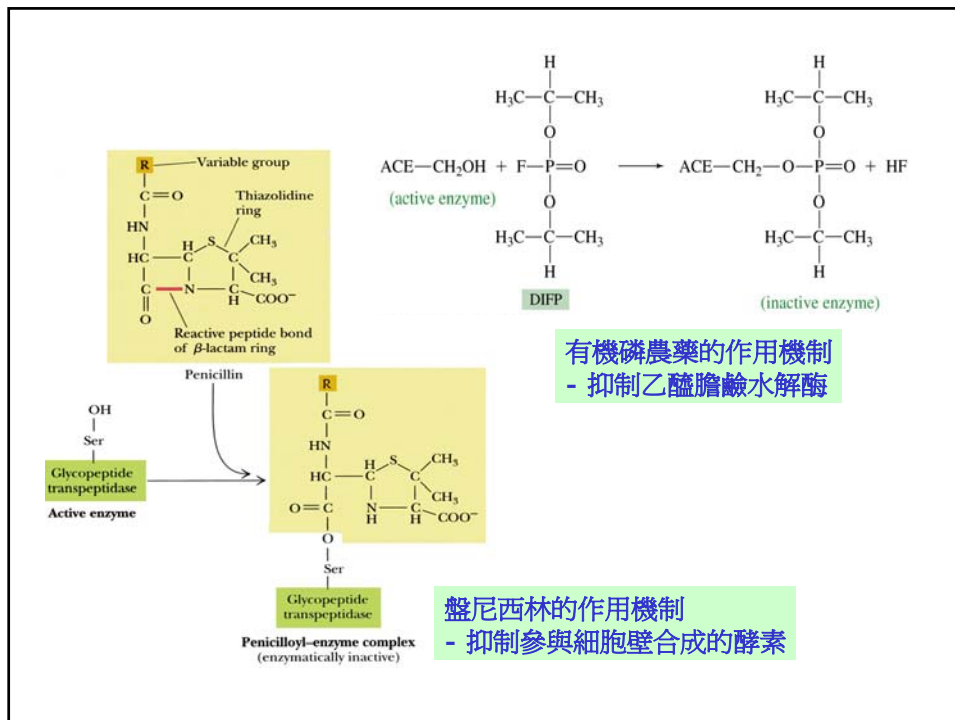
$E + S \rightleftharpoons ES \rightarrow E + P$
 $E + I \rightleftharpoons EI$



受質 (S)
競爭型抑制劑 (I)

Substrate	Product	Competitive inhibitor
$\begin{array}{c} \text{COO}^- \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COO}^- \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{COO}^- \\ \\ \text{CH} \\ \\ \text{HC} \\ \\ \text{COO}^- \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{COO}^- \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COO}^- \end{array}$
Succinate	Fumarate	Malonate

受質 (Succinate) 競爭型抑制劑 (Malonate)



3. 酵素在工業上的應用

食品工業上原料的新鮮度、純度及品質的檢測

- 分析原料的還原酶活性可判定原料是否遭受細菌污染
- 分析牛奶中轉化酶的活性可確認牛奶低溫滅菌過程是否完全

- 以酵素免疫分析法檢驗牛肉產品中有否有馬肉攙假

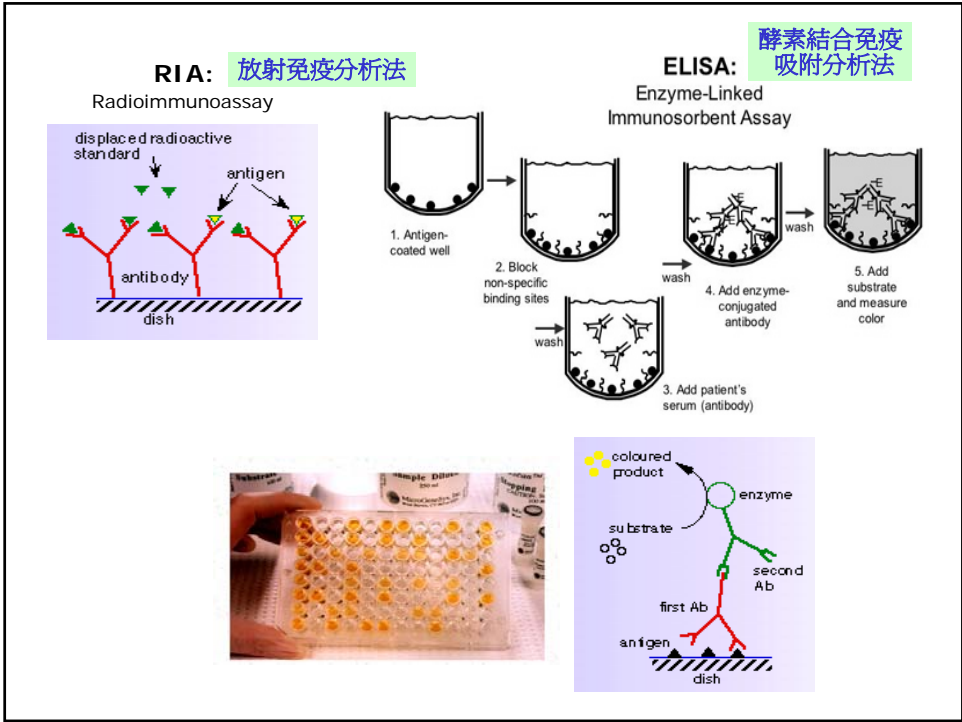
食品加工

- 果糖的製造
- 不含乳糖的奶粉等特殊配方食品的製造

乳糖不耐症

製藥工業

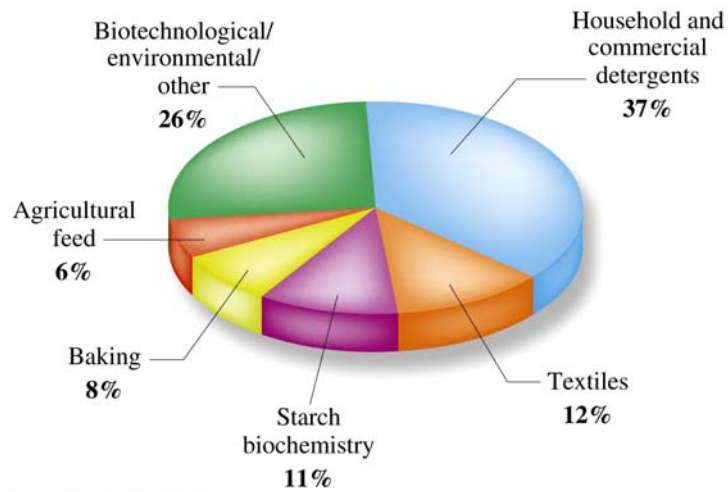
- 廣效性抗生素的製造



Glucose isomerase | Sweetzyme®

高果糖糖漿的製造

Sweetzyme is a ready-immobilised glucose isomerase which converts D-glucose to D-fructose. Immobilised glucose isomerase is used on a massive scale throughout the world in the production of high-fructose syrups for the confectionery and soft drink industries.



商業上的酵素應用

4. 酵素在其它工業上的應用

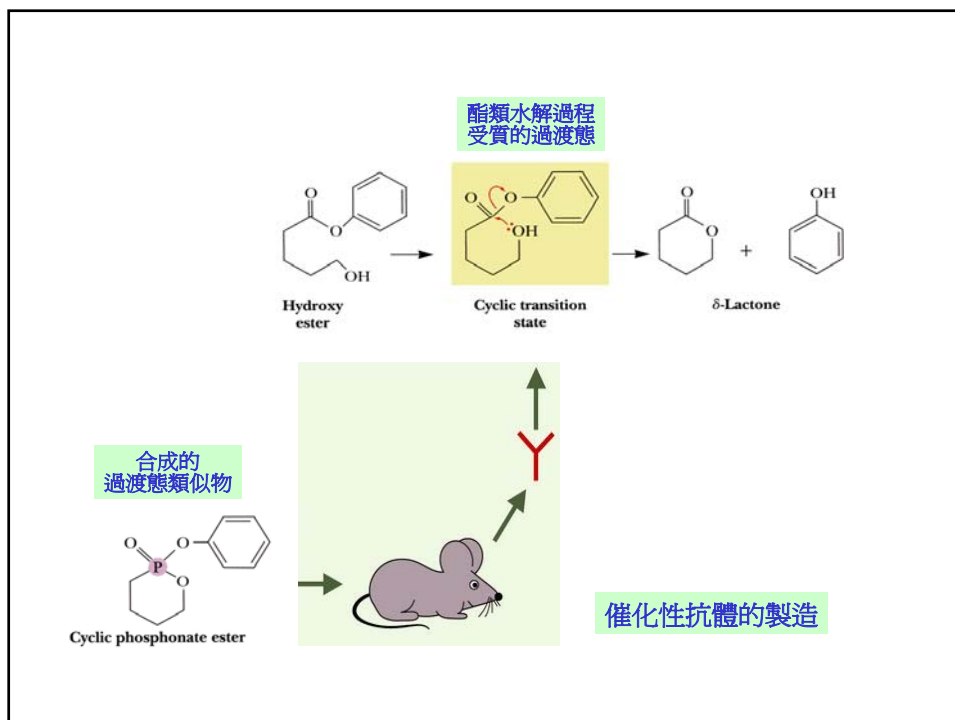
皮革工業與紡織工業中原料的酵素處理
洗衣粉中添加的耐熱性蛋白質水解酵素

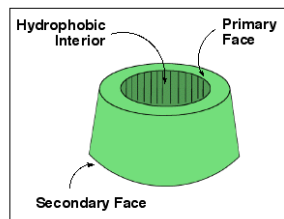
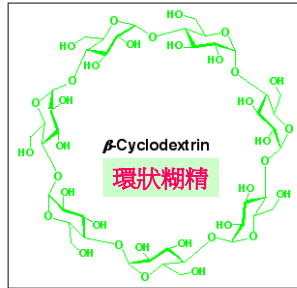
5. 近年來更有酵素應用在生物科技方面

如遺傳工程、蛋白質工程與基因療法

未來展望

1. 核糖酶(ribozyme, catalytic RNA)
RNA可攜帶遺傳訊息，可催化反應
- 演化初期扮演重要功能
2. 催化性抗體(abzyme, catalytic antibody)
酵素反應過程中受質的過渡態類似物
3. 人工酵素(synzyme, artificial enzyme)
環狀糊精
- 非蛋白質成分
4. 蛋白質水解酵素的抑制劑
AIDS, 阿茲海默症的治療





人工酵素的製造