2-2 細胞呼吸作用

細胞呼吸作用

一、定義：生物體分解有機物產生能量，以維持生命現象。

→為一種異化代謝

二、類型：依據氧氣需要與否分為

1. 有氧呼吸：反應過程中包含電子傳遞鏈，其電子接受者為氧氣。
2. 無氧呼吸：反應過程中包含電子傳遞鏈，其電子接受者非氧氣。
3. 發酵作用：反應過程不包含電子傳遞鏈，依反應產物可分酒精發酵與乳酸發酵。

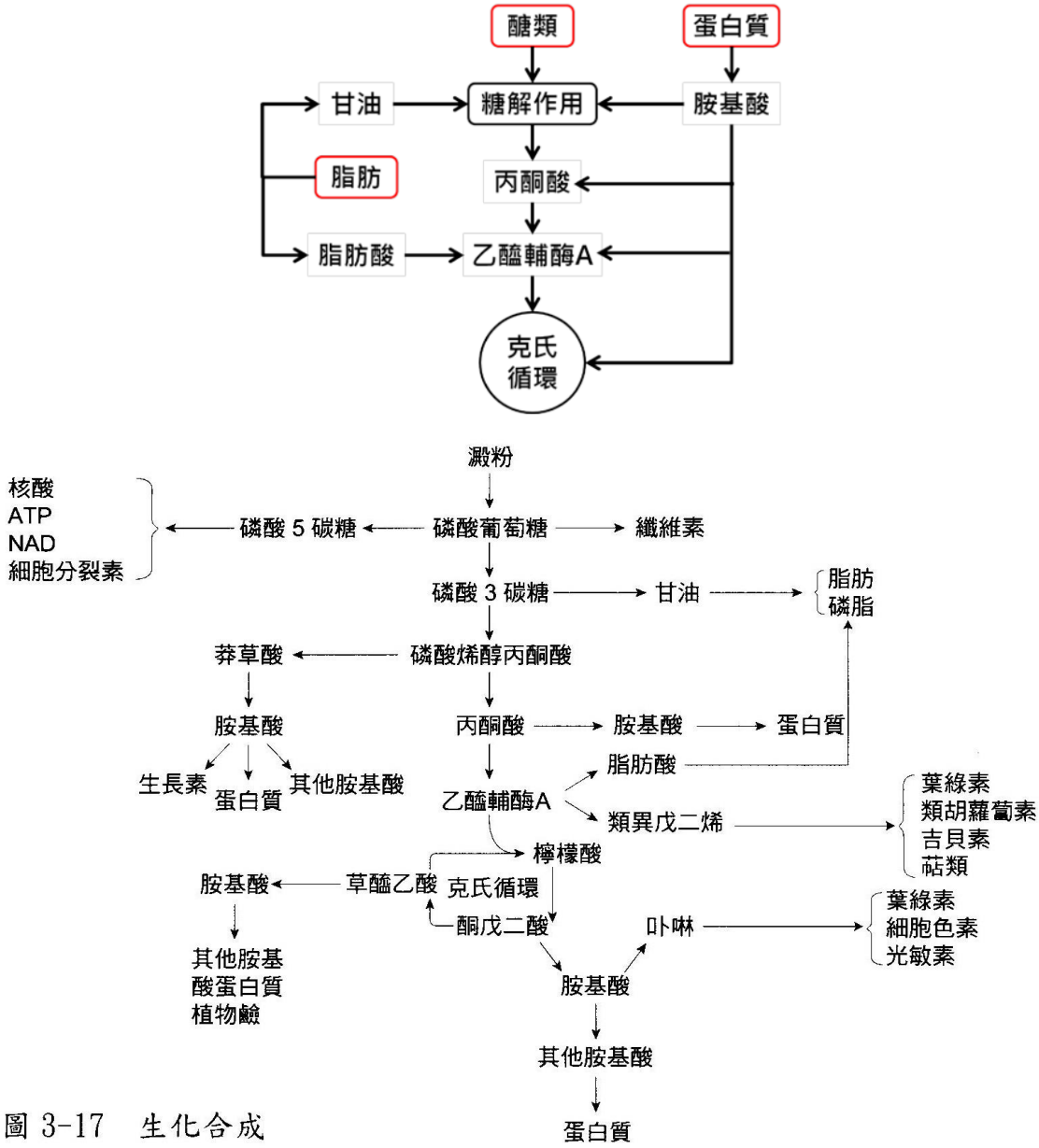
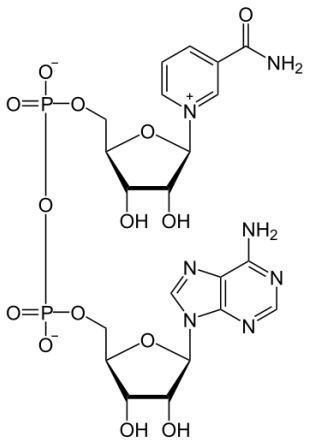
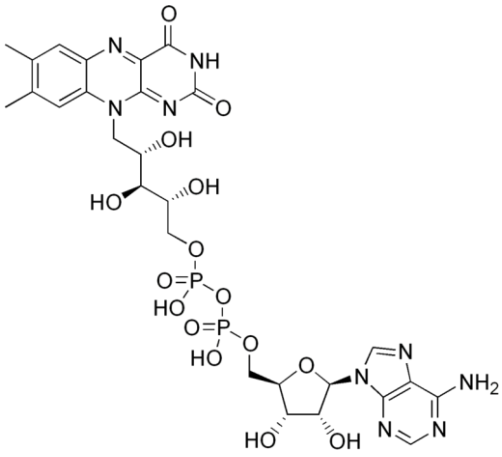


圖 3-17 生化合成

有氧呼吸

一、總反應式：$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 12H_2O + 36$ 或 38ATP

二、參與反應的輔酶：可作為質子及電子的載體

菸鹼醯胺腺嘌呤二核苷酸	黃素腺嘌呤二核苷酸
NAD^+（氧化態）$+H^+ + 2e^- \rightarrow$ NADH（還原態）	FAD（氧化態）$+2H^+ + 2e^- \rightarrow FADH_2$（還原態）
	

三、反應步驟：

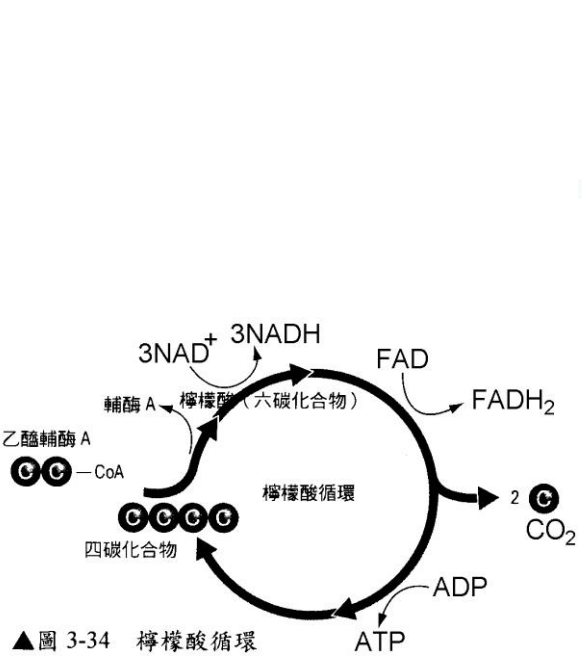
1. 糖解作用（Glycolysis）
   a. 發生處：細胞質
   b. 步驟：葡萄糖磷酸化後分解為三碳的丙酮酸鹽，形成 ATP 與 NADH。

$$\text{葡萄糖（6C）} \xrightarrow{\rightarrow 2ADP} \text{磷酸葡萄糖（6C）} \xrightarrow{\rightarrow 4ATP + 2NADH} 2\ CH_3COCOOH\text{（丙酮酸鹽/pyruvate/3C）}$$

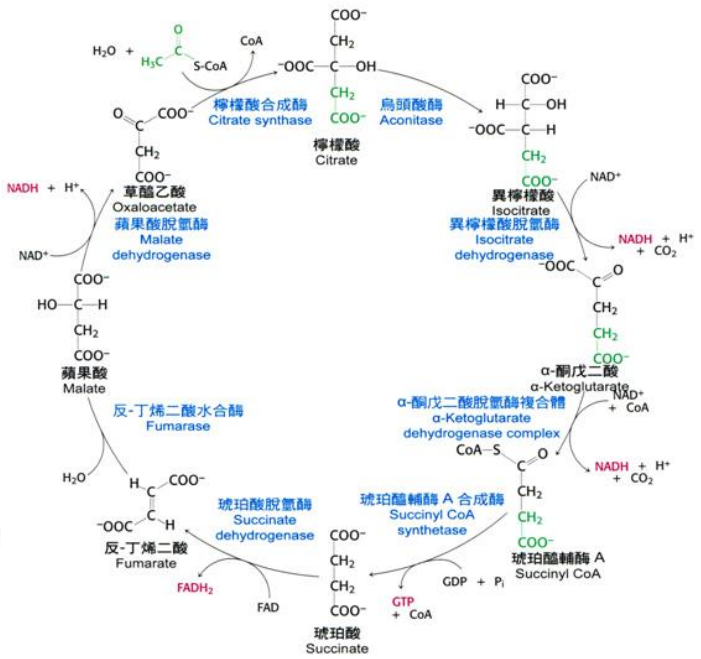
2. 乙醯輔酶 A 的形成
   a. 發生處：粒線體基質
   b. 步驟：當細胞中有足夠的氧氣時，丙酮酸會進入粒線體，在基質中與輔酶 A 反應，產生二碳的乙醯輔酶 A、二氧化碳及 NADH。

$$2CH_3COCOOH + 2CoA\text{（輔酶 A）} \xrightarrow{\rightarrow 2NADH} 2\text{Acetyl CoA（乙醯輔酶 A/2C）} + 2CO_2$$

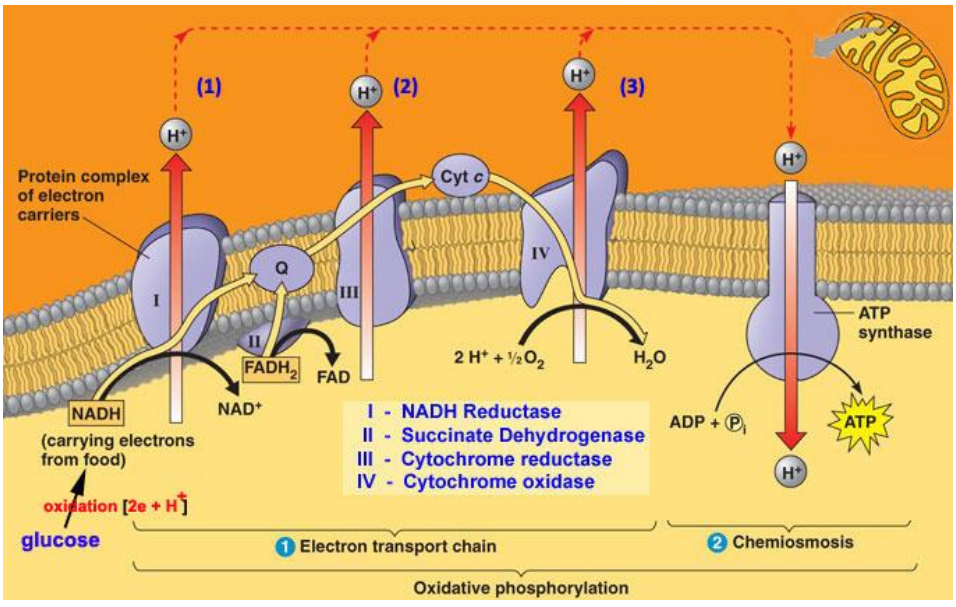
3. 檸檬酸循環（Citric Acid Cycle）
   a. 發現者：1937 年英國生化學家克瑞布斯（Hans Adolf Krebs）發現，於 1953 年獲得諾貝爾生理醫學獎。
      →故檸檬酸循環又稱克氏循環（Krebs cycle）
   b. 發生處：粒線體基質
   c. 步驟：乙醯輔酶 A 與四碳的草醋酸化合形成六碳的檸檬酸，經一系列的反應後產生 ATP、NADH、$FADH_2$ 及二氧化碳，並再生草醋酸。
   d. 因檸檬酸含三個羧基，故此循環又稱三羧酸循環（Tricarboxylic acid cycle，TCA cycle）。

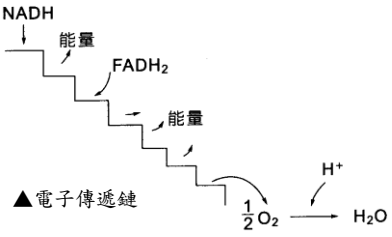


▲圖 3-34 檸檬酸循環



4. 電子傳遞鏈與化學滲透作用
   a. 發生處：粒線體內膜、膜間隙、基質
   b. 步驟：前面步驟所產生的 NADH 及 $FADH_2$ 釋出高能電子，藉由內膜上電子受體傳遞的同時將 H^+ 運輸到膜間隙中，造成膜兩側產生 H^+ 濃度梯度。H^+ 可藉 H^+ 通道擴散至基質中，合成 ATP。最終電子由氧氣接受並與 H^+ 結合產生 H_2O。
   →化學滲透磷酸化由 1961 年英國生化學家米契爾（Peter Mitchell）提出，並因此獲得 1978 年諾貝爾化學獎
   →若最終電子接受者非氧氣（如 SO_4^{2-}）則稱為無氧呼吸





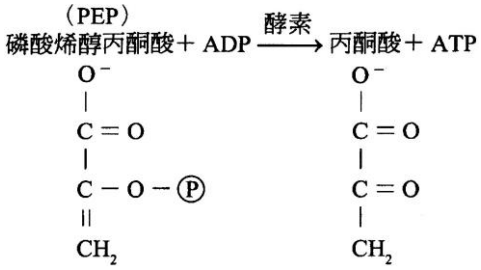
▲電子傳遞鏈

c. 一個 NADH 釋出的電子經過電子傳遞鏈約可合成 3ATP。
一個 $FADH_2$ 釋出的電子經過電子傳遞鏈約可合成 2ATP。

※ 一分子葡萄糖經過有氧呼吸後產生的 ATP 數量差異來自於糖解作用的 NADH 無法通過粒線體內膜，需要藉由特殊的運輸系統（shuttle）進入。
1. 大部分細胞：NADH 藉由 G3P shuttle 進入，此時 NADH 轉換為 $FADH_2$。
→如骨骼肌、腦細胞
2. 少部份細胞（腎臟、心肌、肝臟細胞）：NADH 藉由 malate-aspartate shuttle 進入，NADH 仍轉換為 NADH。
→如心臟、肝臟、腎臟細胞
※ 細菌因缺乏粒線體，故一葡萄糖經有氧呼吸可產生 38ATP。

四、ATP 形成方式

1. 受質層次磷酸化（Substrate-level Phosphorylation）
a. 利用酵素將受質的磷酸根轉移到 ADP 而合成 ATP。
b. 例如：糖解作用及克氏循環中產生的 ATP
PEP＋ADP→丙酮酸＋ATP



2. 化學滲透磷酸化
a. 利用電子傳遞鏈產生 H^+ 濃度梯度，H^+ 藉由通道擴散時帶動 ATP 合成酶，產生 ATP。
b. 種類：

	氧化磷酸化	光合磷酸化
發生反應	有氧呼吸	光合作用光反應
發生處	粒線體膜間隙→基質	葉綠體類囊體腔→基質

五、總結：共產生 $6CO_2$、$12H_2O$、36 或 38ATP

	發生處	氧氣需求	反應過程	產物			
				ATP	NADH	$FADH_2$	其他
糖解作用	細胞質液	X	葡萄糖→丙酮酸	2	2		
乙醯輔酶 A 形成	粒線體基質	X	丙酮酸→乙醯輔酶 A		2		$2CO_2$
克氏循環	粒線體基質	X	乙醯輔酶 A＋OAA→檸檬酸→3NADH＋$FADH_2$＋$2CO_2$＋ATP＋OAA	2	6	2	$4CO_2$
電子傳遞鏈	粒線體內膜	0	（糖解）2NADH→ 8NADH→ $2FADH_2$→	4 或 6 24 4	-10	-2	$12H_2O$

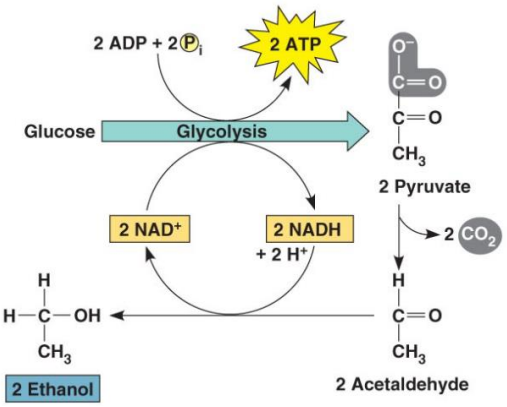
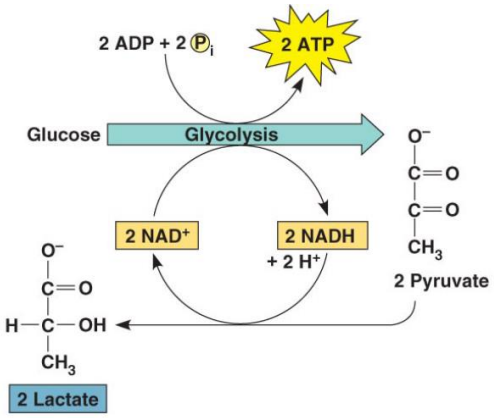
發酵作用（Fermentation）

一、 定義：缺乏氧氣的情況下，葡萄糖不完全分解而形成酒精或乳酸的反應。
→過程中不經過電子傳遞鏈，故產生的能量較少

二、 發生處：細胞質液

三、 步驟：

1. 糖解作用：葡萄糖磷酸化後分解為三碳的丙酮酸鹽，形成 ATP 與 NADH。
2. 氧化 NADH：利用 NADH 將丙酮酸還原為酒精或乳酸。
→可消耗 NADH 使 NAD^+再生，使糖解作用可持續進行

	酒精發酵	乳酸發酵
反應式	$2CH_3COCOOH \rightarrow 2CH_3CHO$（乙醛）$+ 2CO_2 \rightarrow 2C_2H_5OH$（乙醇）$+ 2CO_2$	$2CH_3COCOOH \rightarrow 2C_2H_4OHCOOH$（乳酸）
發生生物	植物的根或種子缺氧時 酵母菌在無氧環境時	動物骨骼肌細胞缺氧時 乳酸菌
反應		

3. 淨產能：2ATP（來自糖解作用）。

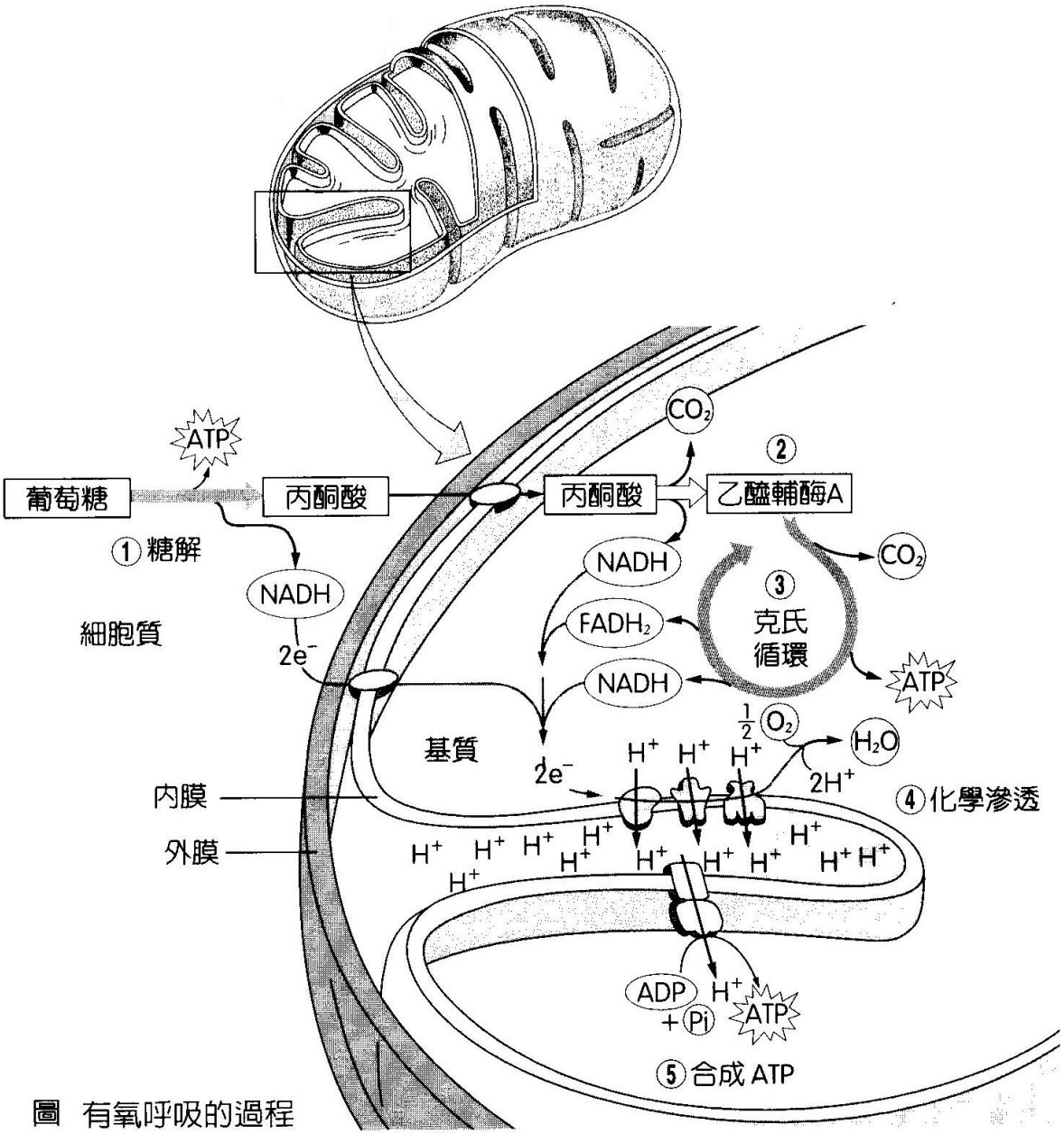

ATP
葡萄糖
丙酮酸
丙酮酸
乙醯輔酶A
CO2
①糖解
NADH
細胞質
2e⁻
NADH
FADH2
③
克氏
循環
CO2
ATP
NADH
基質
2e⁻
H+ H+ H+
1/2 O2
H2O
2H+
④化學滲透
內膜
外膜
H+ H+ H+ H+ H+ H+ H+ H+ H+ H+ H+
ADP
+Pi
H+
ATP
⑤合成 ATP

圖 有氧呼吸的過程