



CHAPTER 2

細胞的能量

2-1 能量流轉與生命維持的關係

2-3 細胞的能量來源與呼吸作用

2-2 酵素的功能與作用機制

細胞的能量來源與呼吸作用

2-3

細胞的能量

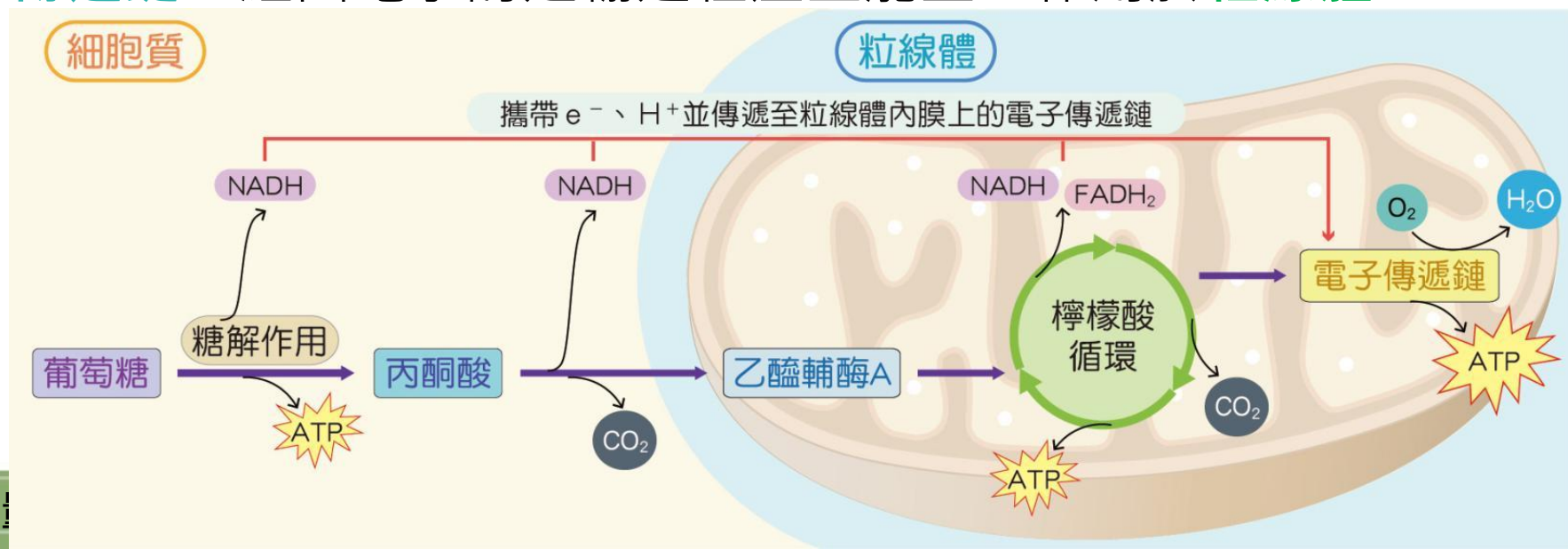
細胞的能量來源與呼吸作用

- 細胞透過特定的**異化代謝**過程，將有機養分蘊含的能量釋放出來，其中部分的能量便可用來合成ATP，使用在各種需能活動中
- 釋出能量合成 ATP 的方式包括
 - 1. 有氧呼吸 2. 無氧呼吸 3. 發酵作用
 - 有氧呼吸與無氧呼吸進行過程皆牽涉到電子傳遞鏈，發酵作用則否
- ATP 產能效率
 - 有氧呼吸 > 無氧呼吸 > 發酵作用

有氧呼吸

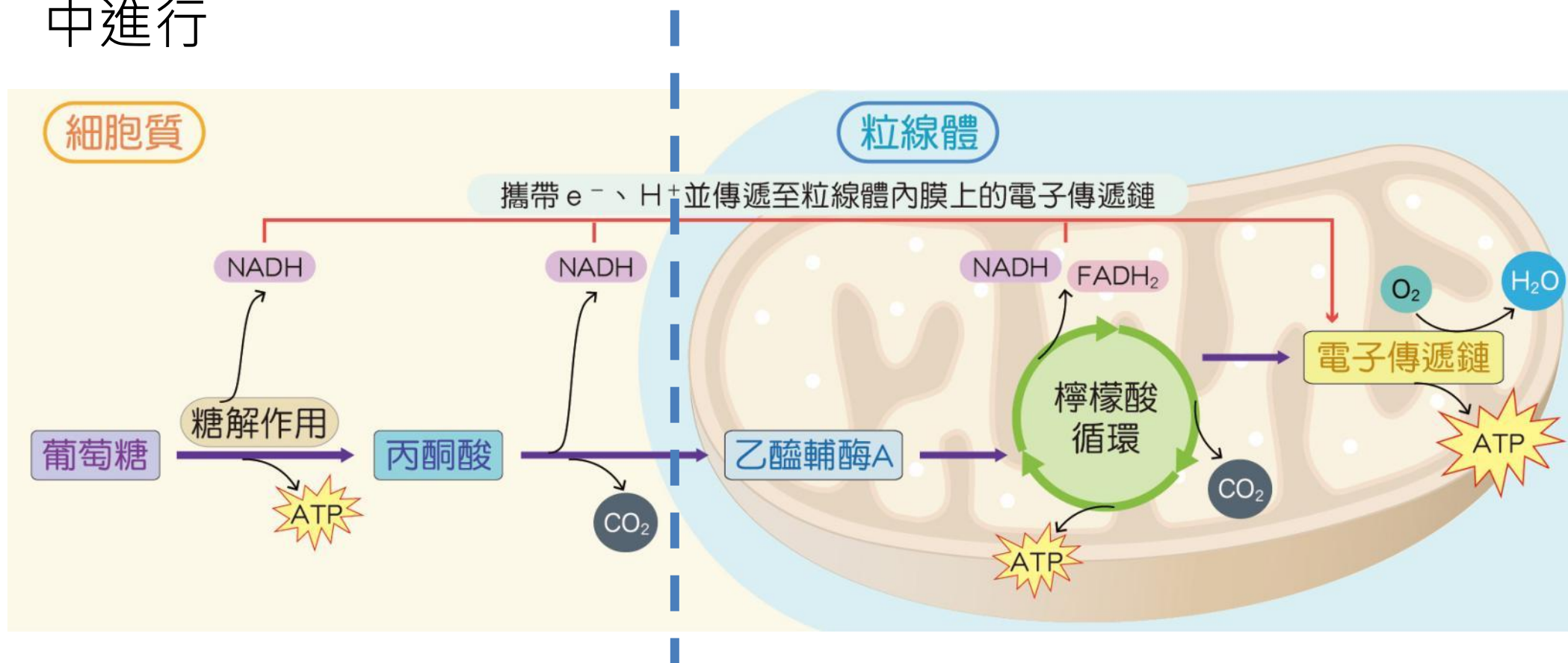
- 有氧呼吸的四個步驟

1. 糖解作用，葡萄糖經由糖解作用轉變為丙酮酸，作用於細胞質
2. 丙酮酸氧化反應，丙酮酸氧化為乙醯輔酶A，作用於粒線體
3. 檸檬酸循環，乙醯輔酶A氧化，過程中產生高能物質，作用於粒線體
4. 電子傳遞鏈，經由電子的運輸過程產生能量，作用於粒線體



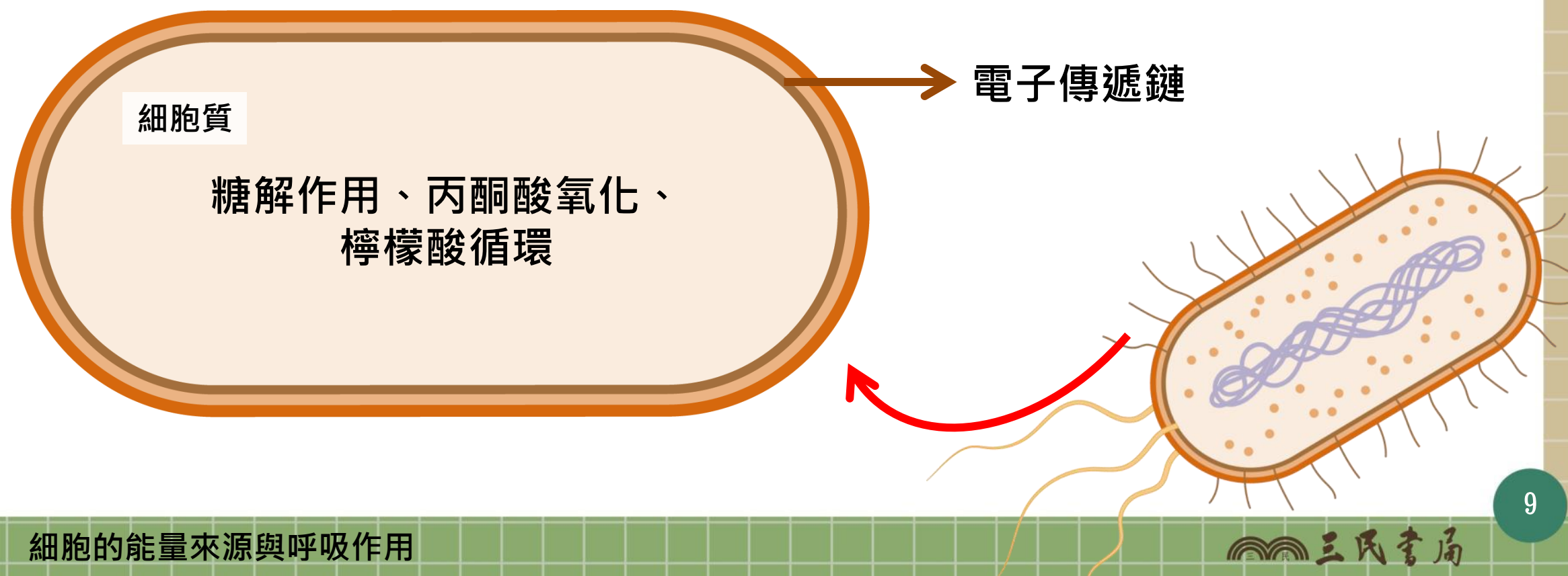
有氧呼吸

- 真核生物除了糖解作用是發生在細胞質，其他3個步驟都在粒線體中進行



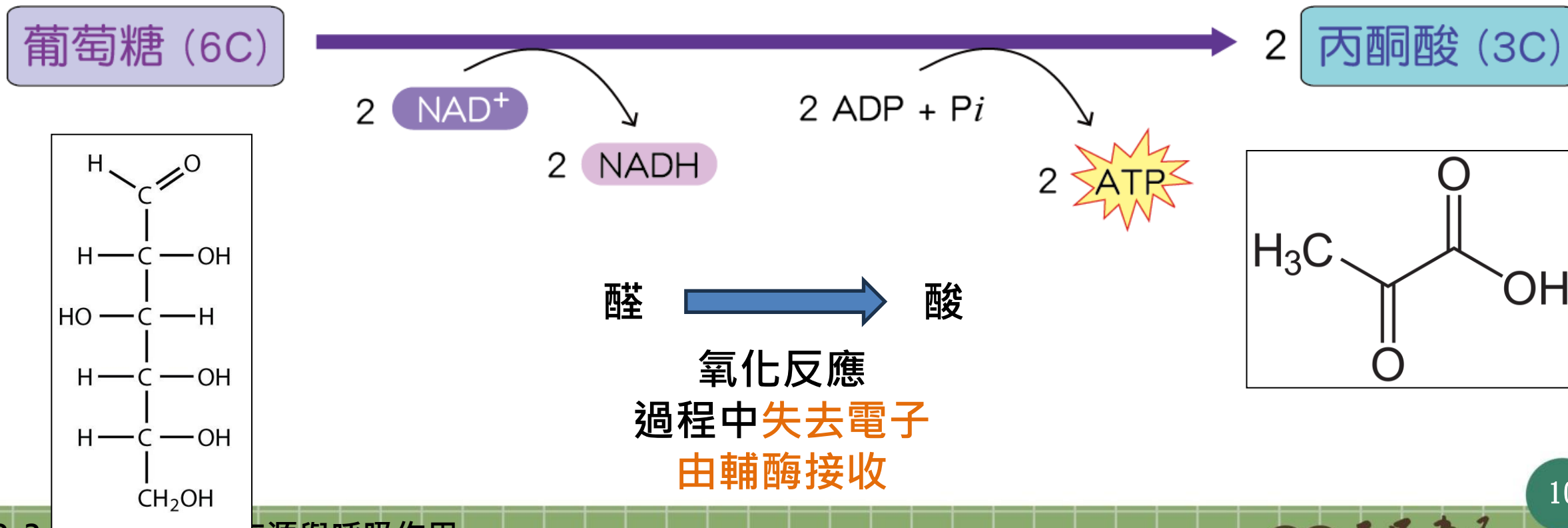
有氧呼吸

- 原核生物**沒有粒線體**，丙酮酸氧化與檸檬酸循環也皆在細胞質中進行
- 電子傳遞鏈則是在細胞膜上完成

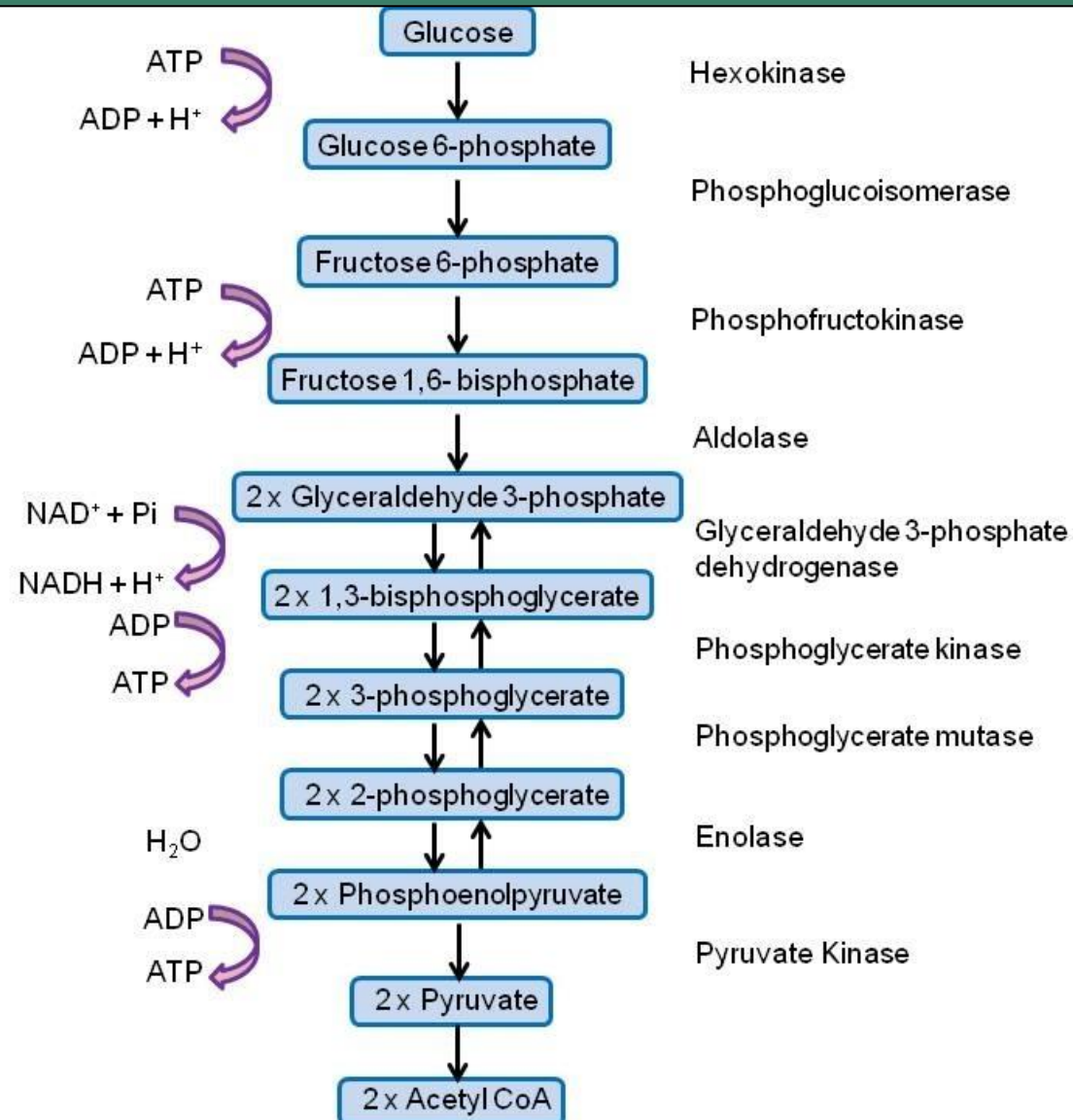


糖解作用

- 葡萄糖會經一系列酵素的作用被分解為2個丙酮酸，作用於細胞質
- 糖解作用過程中產生2ATP及2NADH
- 這個過程並不需要 O_2 參與

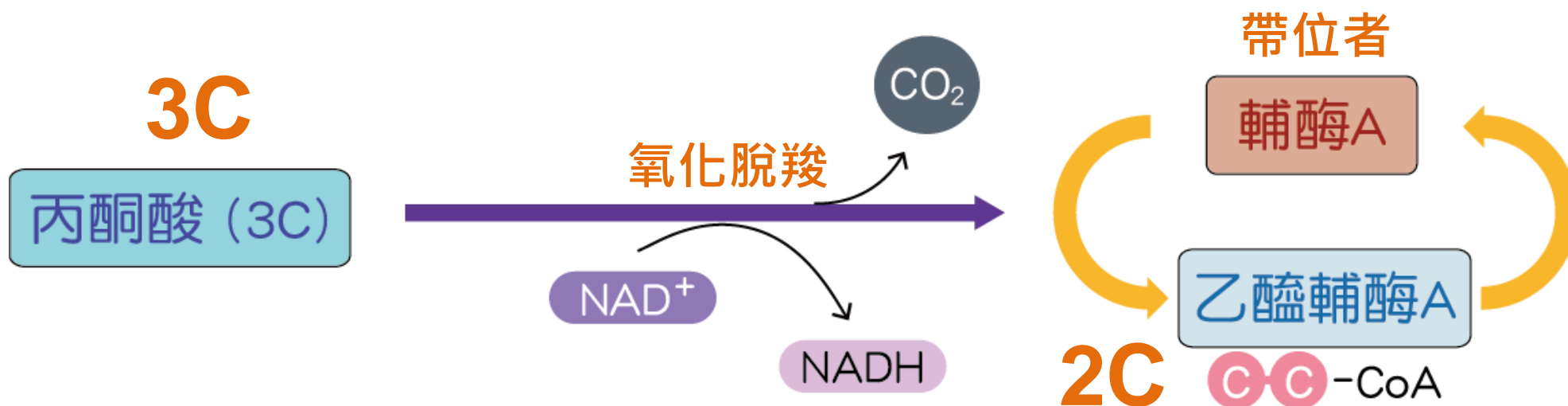


糖解作用



丙酮酸氧化反應

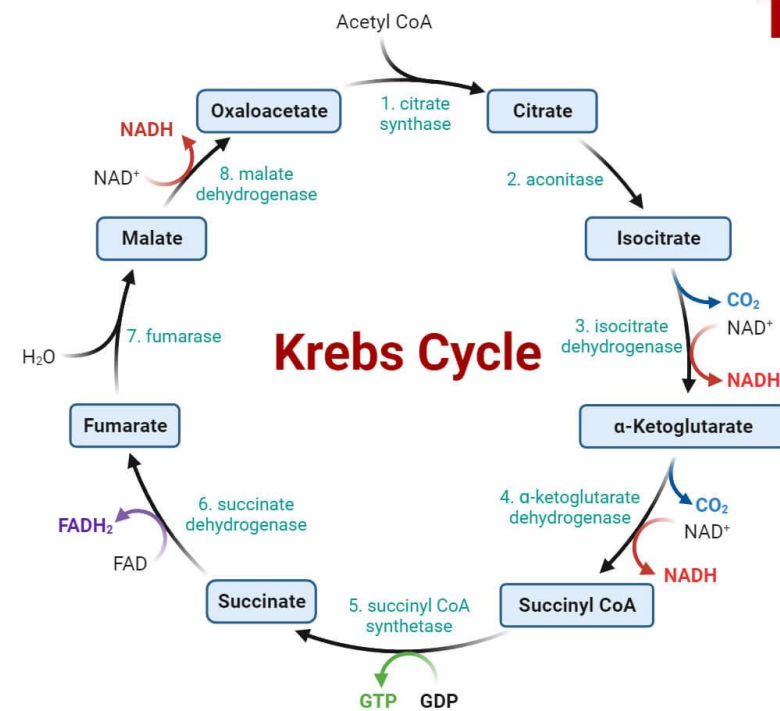
- 丙酮酸在有 O_2 的情況從細胞質進入**粒線體基質**，與粒線體基質中的輔酶A及 NAD^+ 作用
- 生成**乙醯輔酶A** (acetyl-CoA)以及 **$NADH$** ，並產生 CO_2
- 丙酮酸氧化反應的過程中**沒有ATP的生成**



檸檬酸循環

- 檸檬酸循環又稱克氏循環(Krebs cycle)
- 作用於**粒線體基質**

TCA Cycle



**Products
(Each Cycle)**

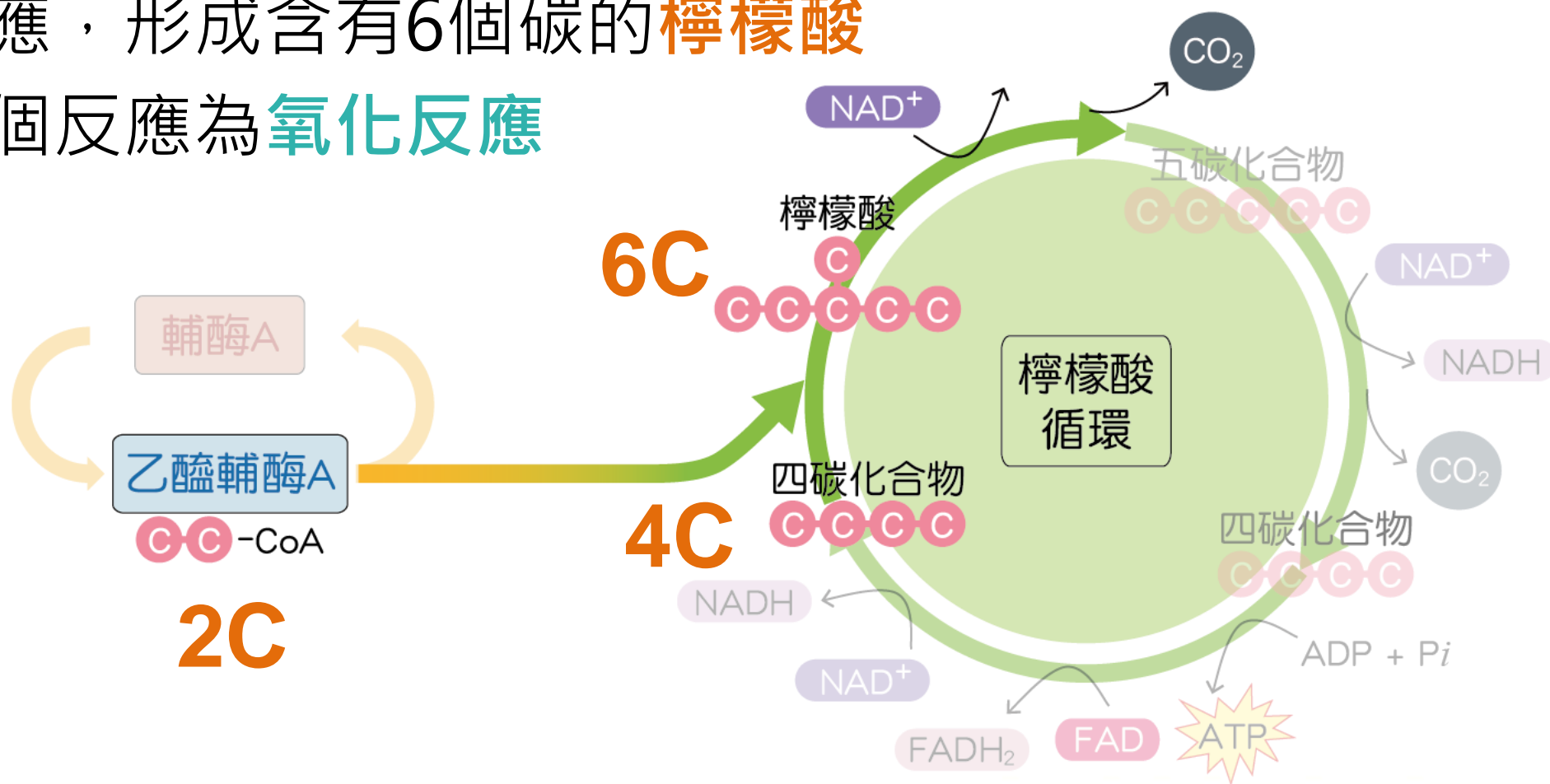
- 1 ATP (GTP)
- 3 NADH
- 1 FADH₂
- 2 CO₂



Krebs Cycle

檸檬酸循環

- 乙醯輔酶A進入檸檬酸循環後和4個碳的草醯乙酸反應，形成含有6個碳的**檸檬酸**
- 整個反應為**氧化反應**



電子傳遞鏈

- 1個葡萄糖透過上述步驟目前能夠產生：

糖解作用	丙酮酸氧化	檸檬酸循環
2ATP	0ATP	2ATP
2NADH	2NADH	6NADH 2FADH ₂

- 算下來三個步驟一個葡萄糖才產生總共 4 ATP
 - 是不是覺得能量有點少？這樣真的足夠身體所需嗎？

• NADH 和 FADH₂

- 屬於輔酶，為維生素的衍生物
- 氧化態 **NAD⁺ / FAD⁺**
- 可在氧化還原反應過程中**接受電子**，兩者會將攜帶的電子攜帶至電子傳遞鏈

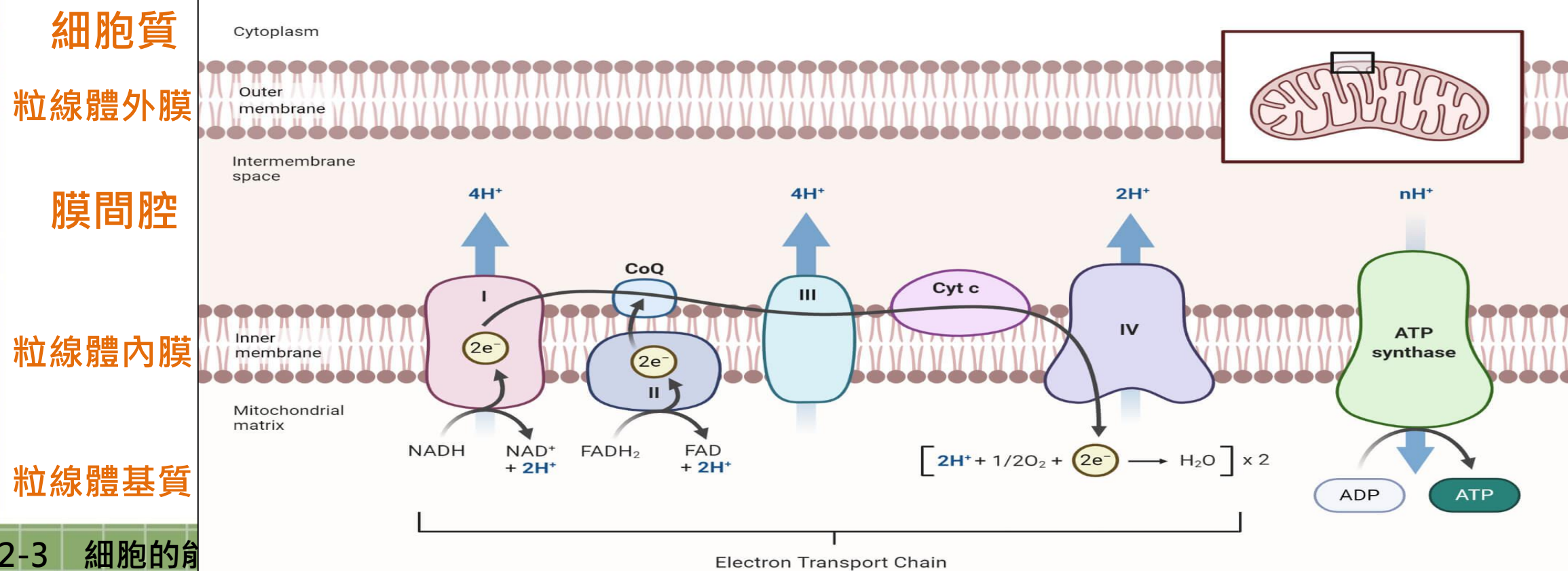


低能階

高能階

電子傳遞鏈

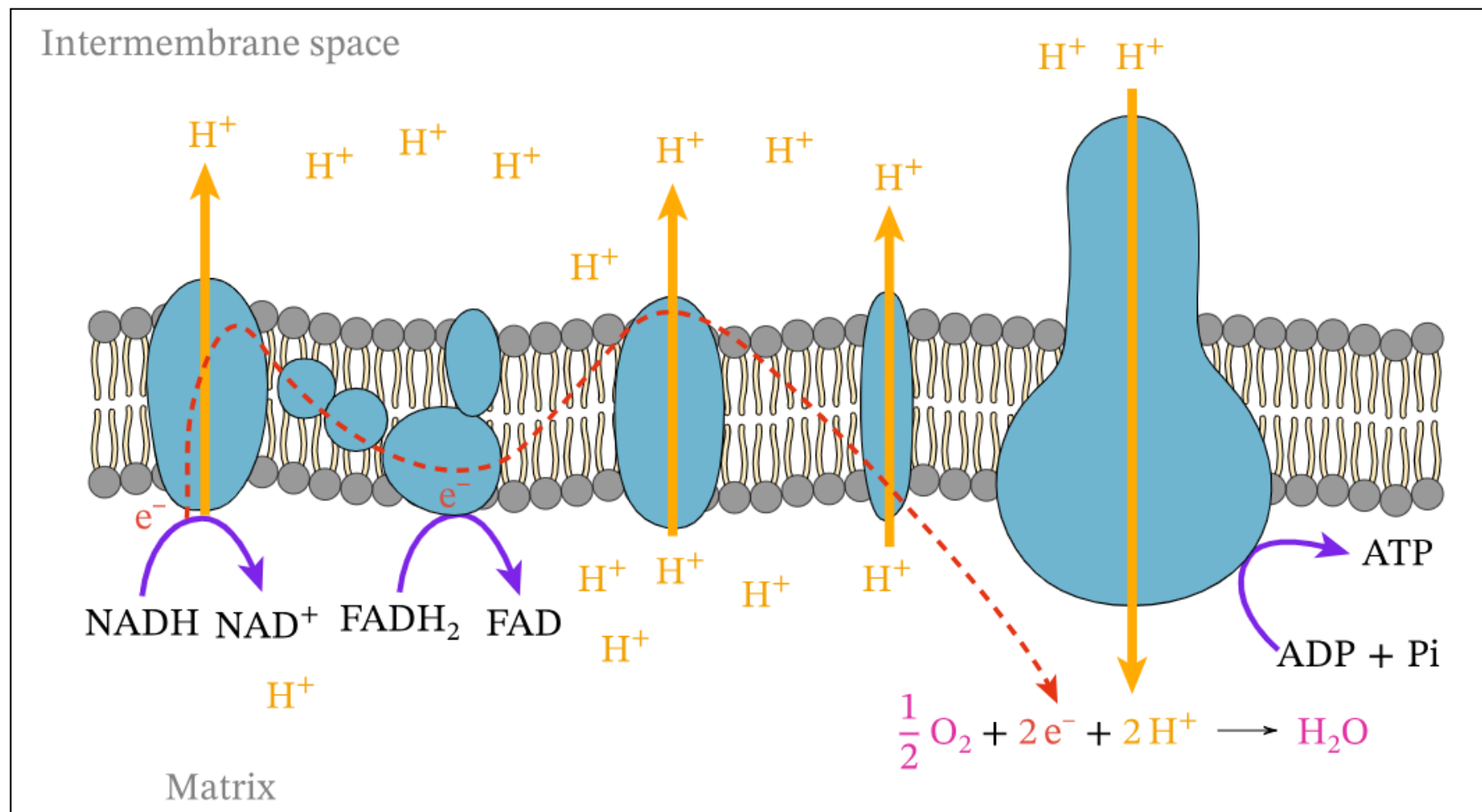
- 由一系列**電子載體**構成，這些電子載體鑲嵌在**粒腺體內膜**的脂雙層內
- 愈接近傳遞鏈末端的電子載體**接受電子的能力愈強**，因此電子會沿著這些電子載體一路往下傳，最後由 O_2 接收，將 O_2 還原成 H_2O



電子傳遞鏈

- 電子轉移過程會建立氫離子濃度梯度(依靠**主動運輸**)
 - 電子從較低還原電位轉移到較高還原電位的分子過程中釋放能量
 - 此能量能夠推動粒線體基質內的**氫離子**經過氫離子幫浦**主動運輸**到膜間腔，建立氫離子濃度梯度
- 高濃度氫離子累積在膜間腔產生化學滲透壓力，氫離子通過具有氫離子通道功能的**ATP合成酶**回到粒線體基質(依靠**促進性擴散**)
 - **ATP合成酶**能夠將粒線體基質的**ADP和磷酸基合成ATP**

電子傳遞鏈

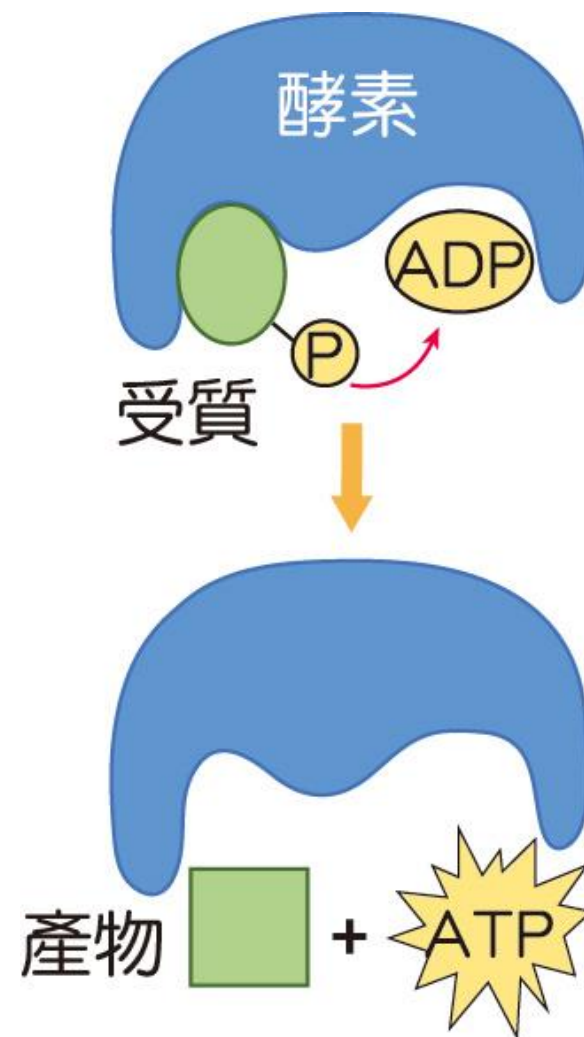




有氧呼吸ATP 的合成方式

• 受質階層磷酸化

- 發生在**糖解作用**與**檸檬酸循環**
- 高能分子分解成低能分子
- 是酵素把反應中受質所攜帶的磷酸基轉移至ADP上，使ADP磷酸化





有氧呼吸ATP 的合成方式

- 氧化磷酸化

- 發生在**電子傳遞鏈**
- 電子傳遞時所釋放的能量用於把氫離子運輸到膜間腔，形成氫離子濃度梯度
- 再使氫離子能經過ATP合成酶擴散回到基質，進而能把基質的ADP和磷酸基合成ATP

- 大多數ATP是以氧化磷酸化的方式產生

- 一個NADH經由氧化磷酸化能夠產生**2.5個ATP**
- 一個FADH₂經由氧化磷酸化能夠產生**1.5個ATP**

有氧呼吸總共能產生的ATP

過程	反應位置	產物	產生的ATP
糖解作用	細胞質	2ATP 2NADH	2 3 or 5
丙酮酸氧化	粒線體基質	2NADH	5
檸檬酸循環	粒線體基質	2ATP 6NADH 2FADH ₂	2 15 3
每一分子葡萄糖總共能產生之ATP			30 or 32

- 一個葡萄糖經由有氧呼吸總共能產生 30 or 32 個ATP

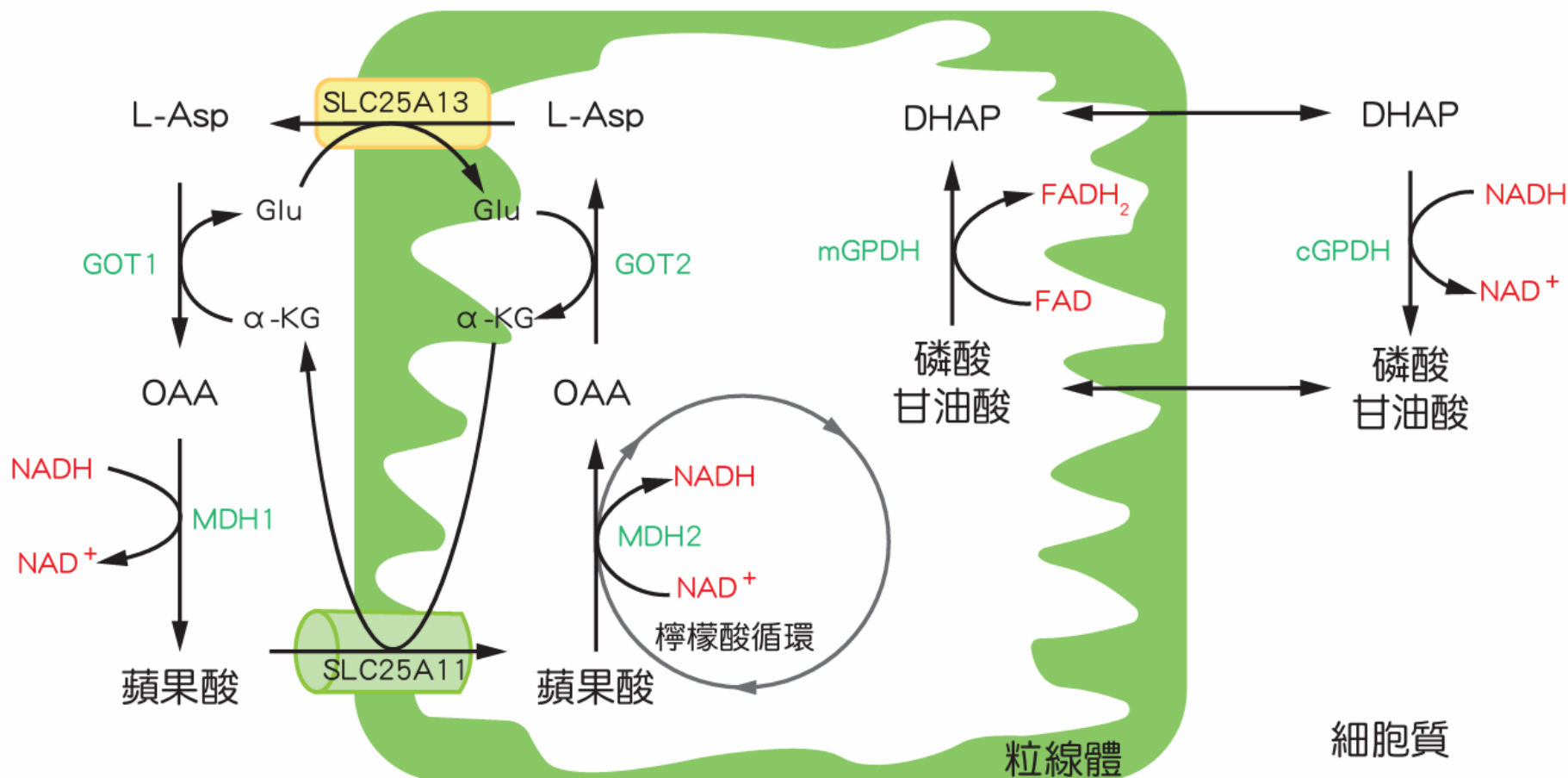
補充---產生30跟32個ATP的差異

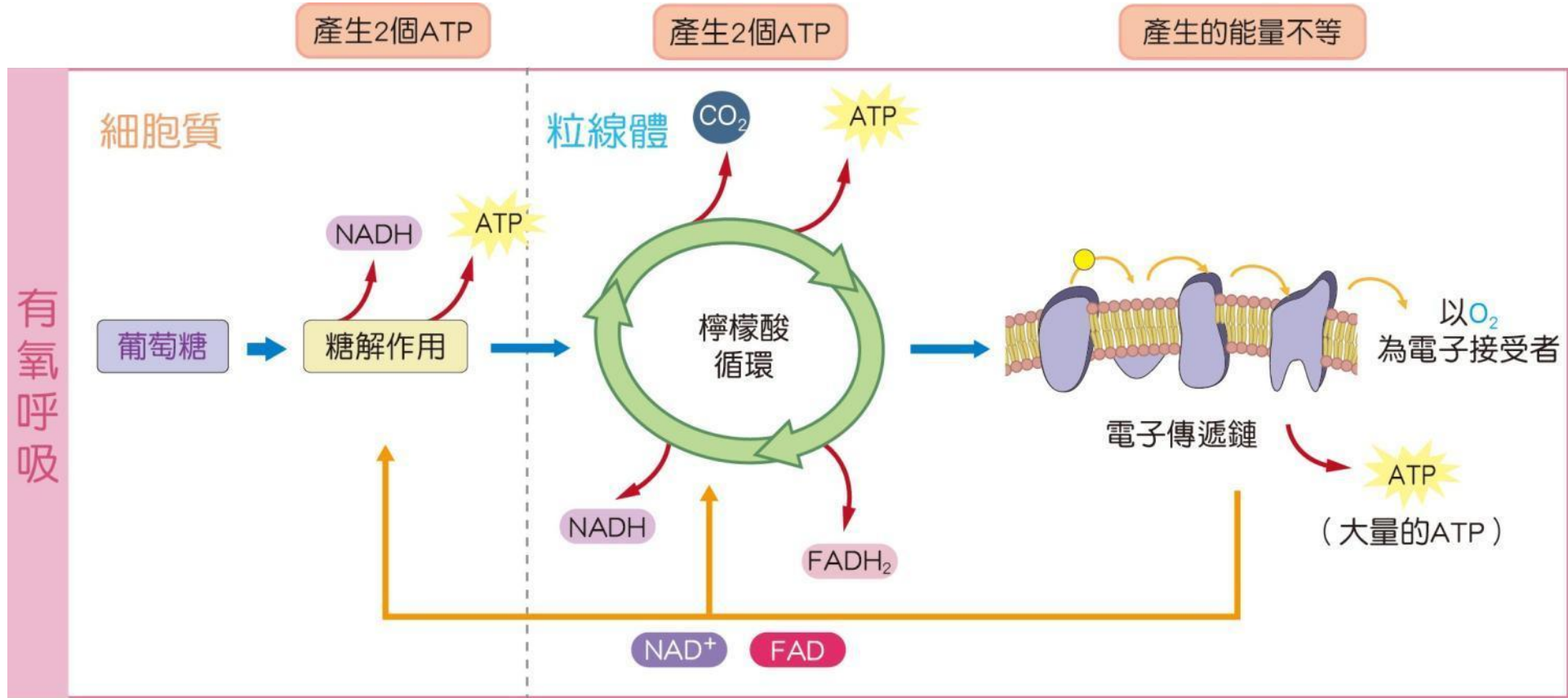
心肌
肝臟
腎臟

蘋果酸—天門冬胺酸交換

磷酸甘油酸交換

腦
骨骼肌





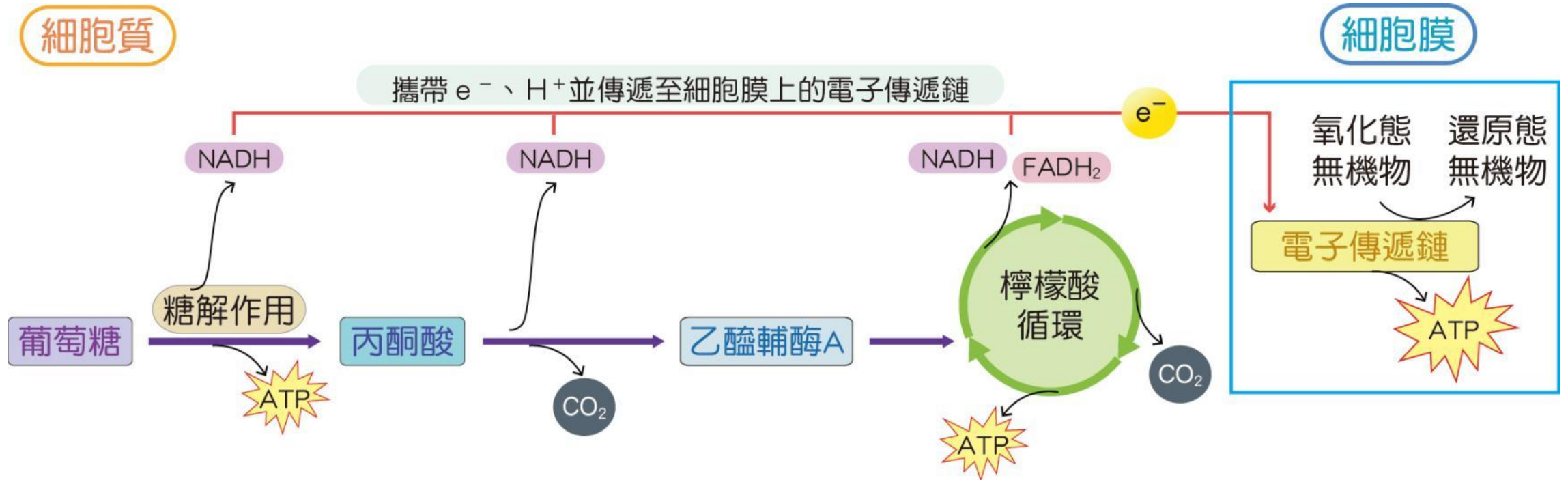
無氧呼吸

- 某些極度缺氧的環境中生活的原核生物，其呼吸作用的電子傳遞鏈採用其他無機分子取代氧氣作為電子的接受者，稱為無氧呼吸
 - 所謂的有氧呼吸在於最後是由 O_2 作為電子接收者
 - 不是用 O_2 作為最後的電子接收者則稱為無氧呼吸

無氧呼吸

- 硫酸鹽還原菌以硫酸鹽 (SO_4^{2-}) 與元素硫 (S) 作為最終電子接受者，產生**硫化氫** (H_2S) 而非水 (H_2O)
- 脫氮菌以硝酸鹽 (NO_3^-) 作為電子接受者，把硝酸鹽轉變為氮氣 (N_2)，使氮元素回到大氣中
- 甲烷生成古菌，則以 CO_2 作為電子接受者，產生甲烷 (CH_4)

無氧呼吸



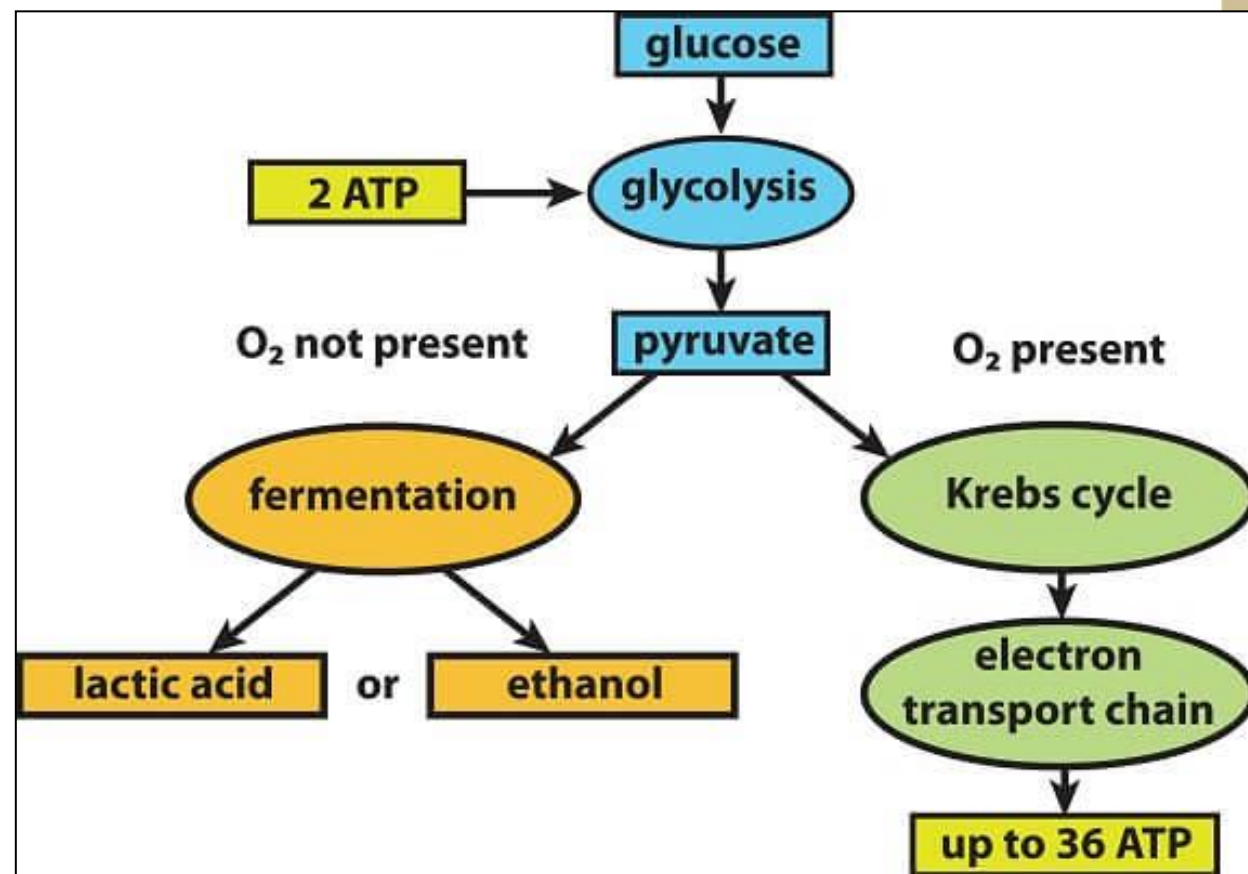
發酵作用

- 氧是有氧呼吸時電子傳遞鏈的最終電子接受者
- 在**缺氧**的情況下
 - 電子傳遞鏈將會停擺
 - 檸檬酸循環無法進行
 - NADH和FADH₂不能回復到氧化狀態的NAD⁺和FAD以接受新產生的電子
 - 糖解作用停頓
 - 因NADH也會累積起來而不能回復到NAD⁺的狀態

發酵作用

• 發酵作用

- 有些細胞在缺氧狀態下，會將糖解作用生成的丙酮酸還原成其他有機物，
- 還原過程釋放的電子使NADH回復到氧化態的 NAD^+ ，讓糖解作用能持續進行
- 發酵作用類似補救措施，至少要維持最低的能量產出，以免細胞死亡

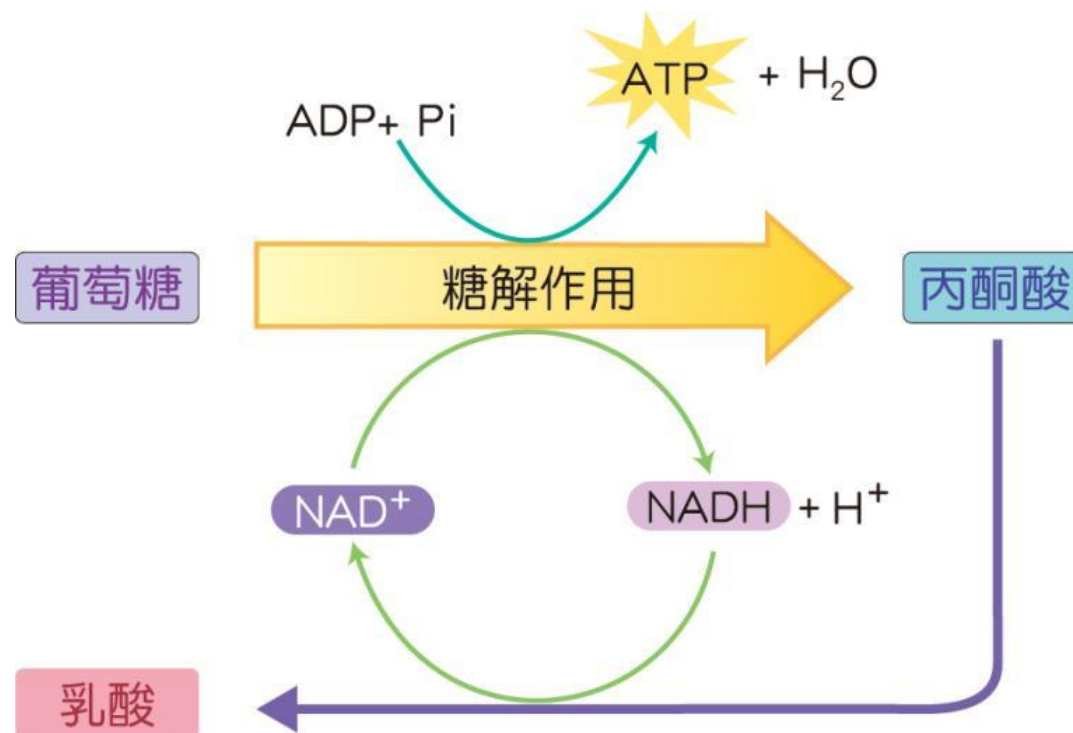


發酵作用

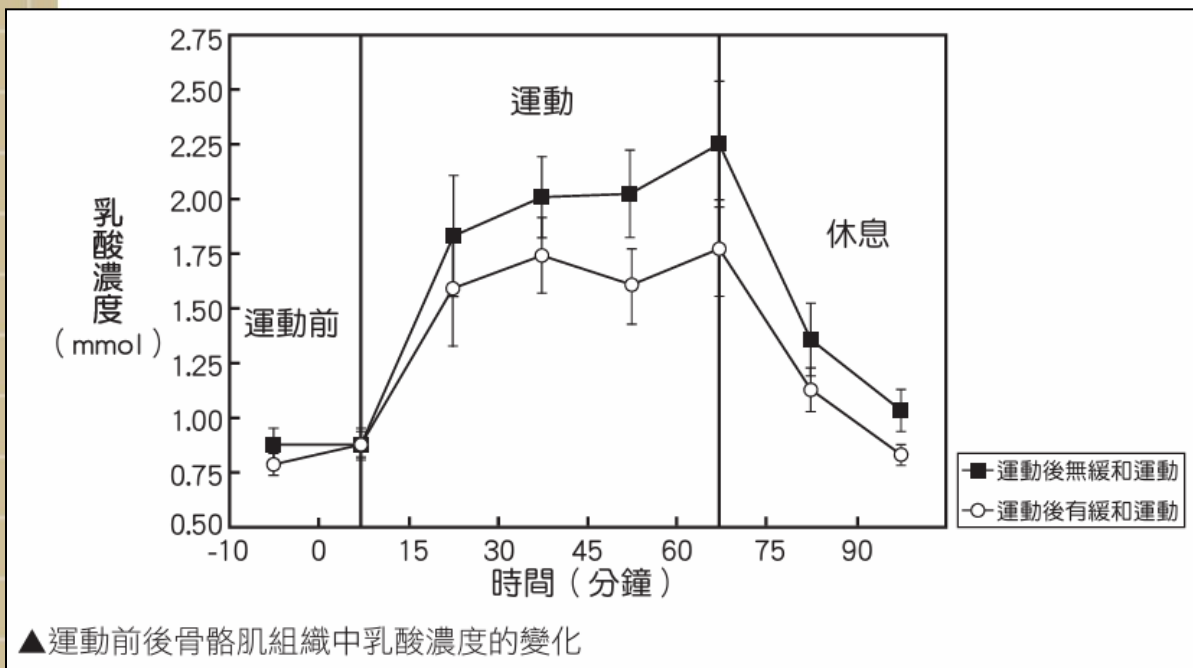
- 乳酸發酵

- 將丙酮酸還原為**乳酸**
- 利用乳酸菌的發酵作用來製造優格
- 人體的紅血球細胞
- 劇烈運動時的肌肉細胞

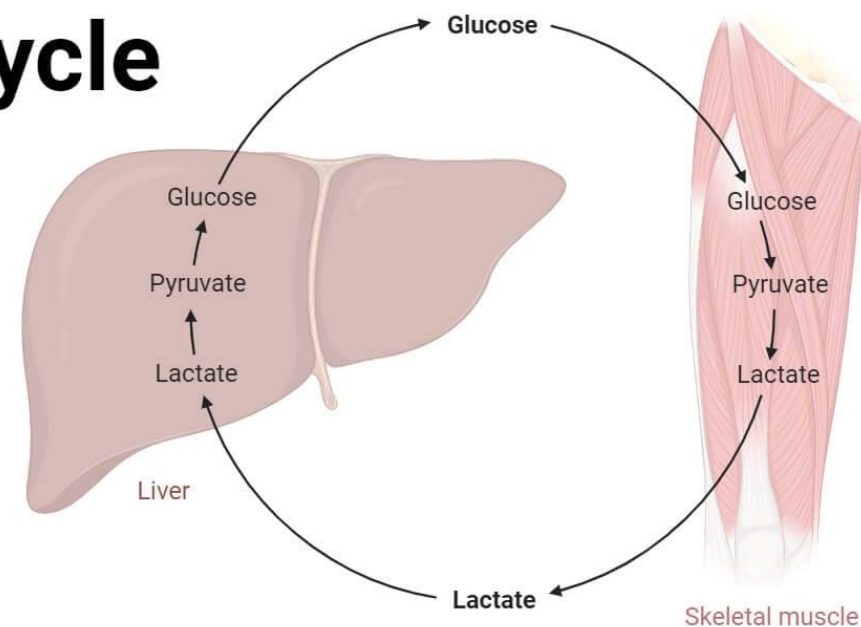
- 產物：乳酸



發酵作用



Cori Cycle

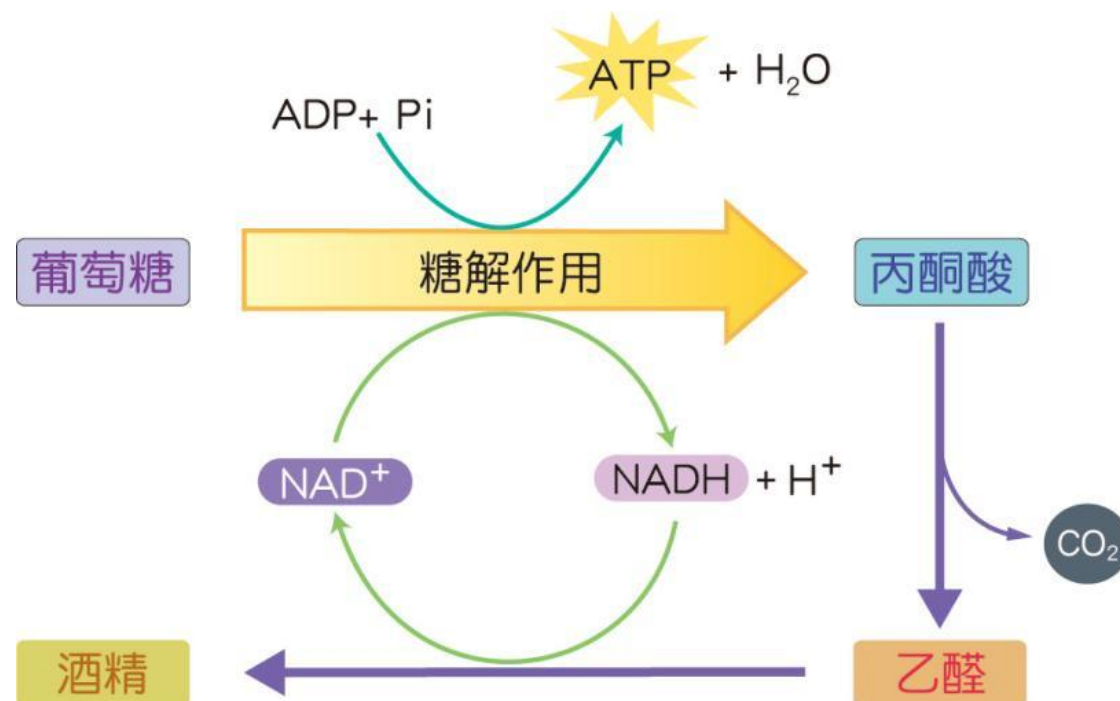


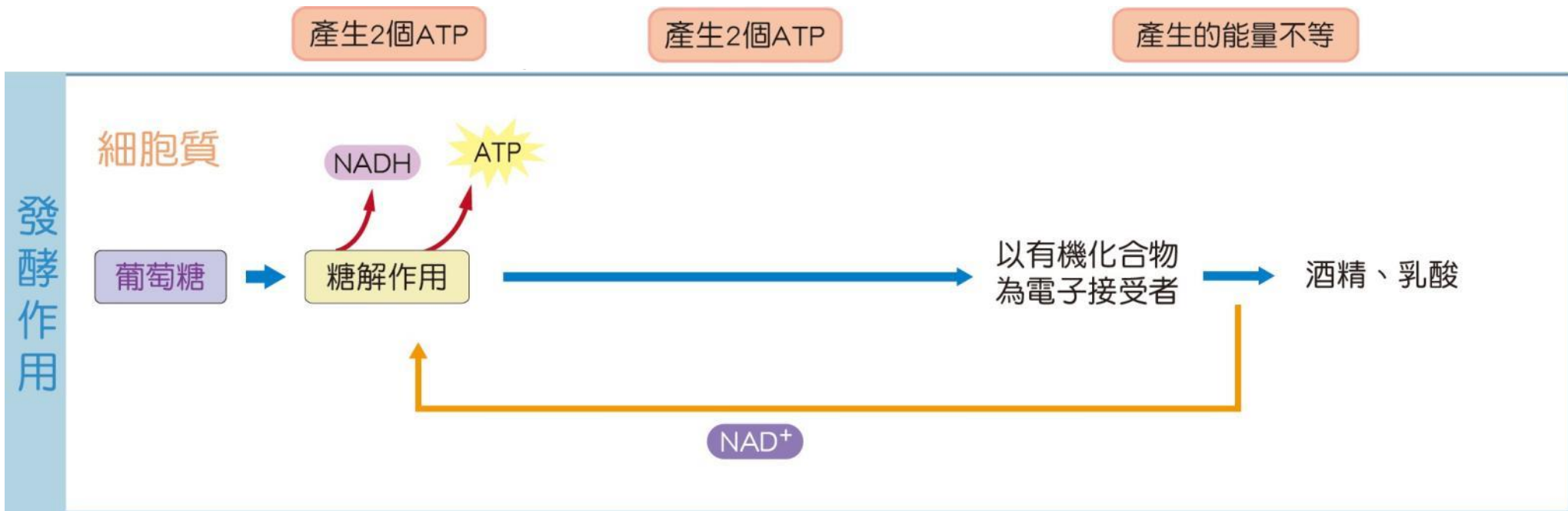
發酵作用

• 酒精發酵

- 丙酮酸先轉變成乙醛並產生 CO_2
- 乙醛還原成乙醇(酒精)，同時釋放電子將 NADH 氧化成 NAD^+
- 人類利用酵母菌行酒精發酵製造食品，如釀酒、發酵麵包等

• 產物：酒精、 CO_2





有氧呼吸、無氧呼吸與發酵作用的比較

	進行步驟	產生ATP的步驟	電子接受者	是否產生二氧化碳
有氧呼吸	糖解作用 丙酮酸氧化反應 檸檬酸循環 電子傳遞鏈	糖解作用 檸檬酸循環 電子傳遞鏈	氧氣	是
無氧呼吸	糖解作用 丙酮酸氧化反應 檸檬酸循環 電子傳遞鏈	糖解作用 檸檬酸循環 電子傳遞鏈	非以O ₂ 為電子接受者	是
發酵作用	糖解作用 丙酮酸還原成其他有機物	糖解作用	以有機化合物為電子接受者	酒精發酵