

第二節 糖解作用 (glycolysis)

一、糖解作用

1. 綜述：1 分子的葡萄糖 (glucose) 分解成 2 分子丙酮酸 (pyruvate) 的過程，產生 2 分子 ATP 及 2 分子的 $\text{NADH} + \text{H}^+$ 。
2. 總反應式：
$$\text{Glucose} + 2 \text{NAD}^+ + 2\text{ADP} + \text{Pi} \rightarrow 2 \text{pyruvate} + 2 \text{NADH} + 2 \text{H}^+ + 2 \text{ATP} + 2 \text{H}_2\text{O}$$
3. 氧氣決定 pyruvate 後續的代謝途徑
 - (1) 有氧環境 (aerobic)：得到 2 pyruvate、2 ATP、2 $\text{NADH} + 2 \text{H}^+$
 - (2) 無氧環境 (anaerobic)：得到 2 乳酸 (lactate)、2 ATP
4. 反應場所：細胞質

◎ Preparatory phase (準備階段)

Glu

↓ hexokinase 接上磷酸根 (耗能)

G6P

↓ phosphohexose isomerase 醛酮糖轉換

F6P

↓ phosphofructokinase-1 再接上磷酸根 (耗能)

F1,6 BP

↓ aldolase 斷裂作用

G3P + DHAP

DHAP

↓ triose phosphate isomerase 醛酮轉換

G3P (2) 【此步驟開始全部乘以 2】

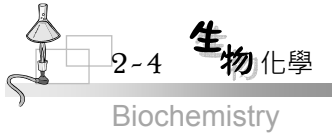
◎ Payoff phase (收益階段)

↓ glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase 去氫

1, 3 BPG (2) + 2 $\text{NADH} + \text{H}^+$

↓ phosphoglycerate kinase 受質階層磷酸化

3-PG (2) + 2ATP



↓ phosphoglycerate mutase 分子內轉移磷酸根

2-PG (2)

↓ enolase 將水去除

PEP (2)

↓ pyruvate kinase 受質階層磷酸化

pyruvate (2) + 2ATP

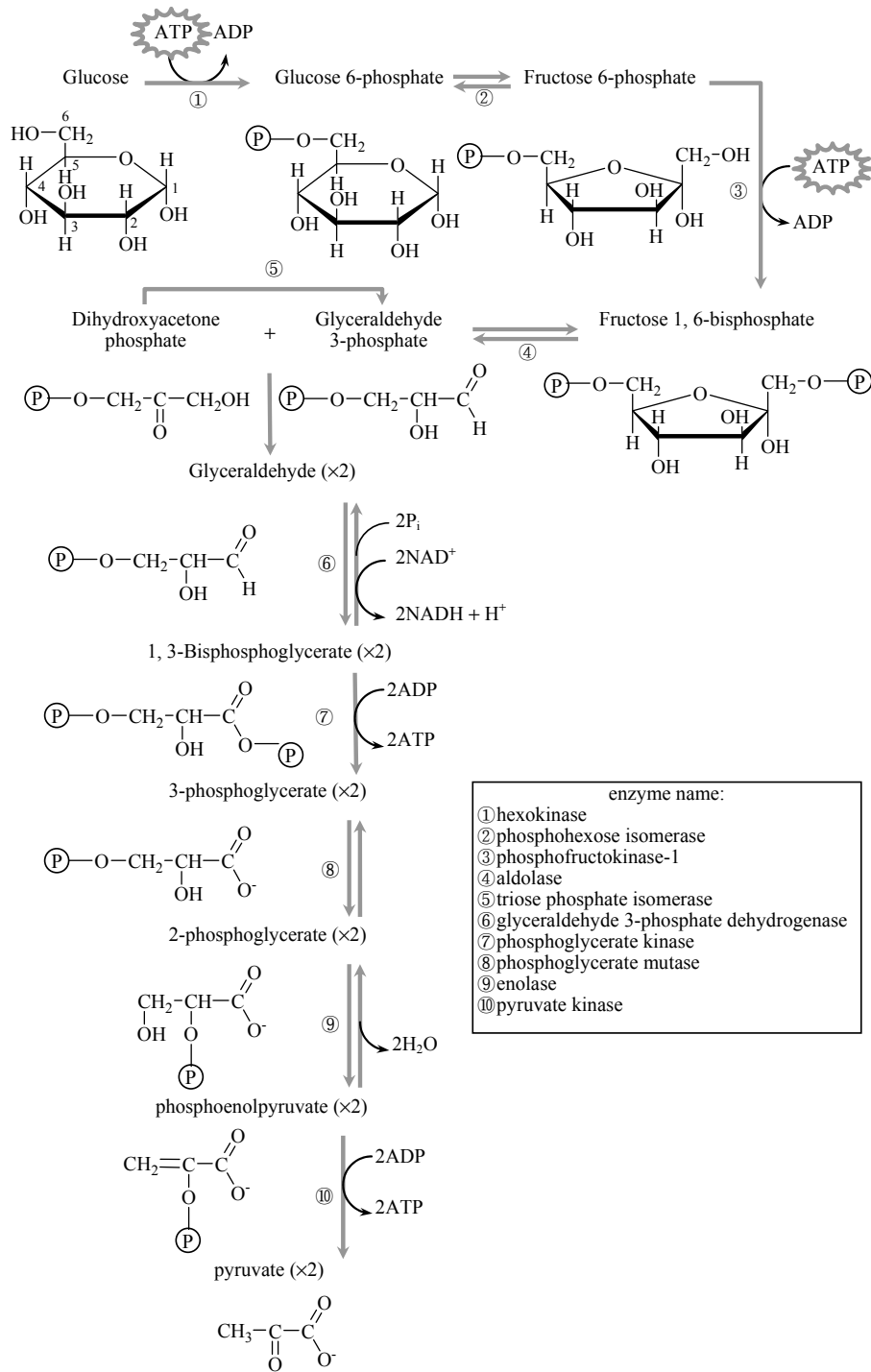
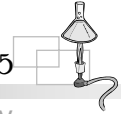
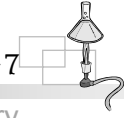


圖2-1 糖解作用

二、糖解作用之各步驟反應

【步驟1→5為準備階段】

1. 葡萄糖的磷酸化 (glucose → glucose 6-phosphate)
 - (1) 酵素：hexokinase (I/IV) (比較見後)
 - (2) 結果：於glucose的六號碳位置上銜磷酸根，產生G6P
 - (3) 調控：hexokinase (I)會被產物 G6P 負向調控
 - 此步驟一般而言不可逆
 - ◎ Kinase：激酶，協助Pi轉移，需要Mg²⁺協助
 2. 磷酸六碳糖的醛酮互變 (glucose 6-phosphate → fructose 6-phosphate)
 - (1) 酵素：phosphohexose isomerase
 - (2) 結果：glucose 6-phosphate (醛糖) 轉變為fructose 6-phosphate (酮糖)
 - ◎ 醛酮互變：均有中間產物enediol產生
 3. 磷酸果糖再次磷酸化 (fructose 6-phosphate → fructose 1,6-bisphosphate)
 - (1) 酵素：phosphofructokinase-1 (PFK-1)
 - (2) 結果：fructose 6-phosphate 在一號碳位置接上磷酸根，產生fructose 1,6-bisphosphate
 - (3) 調控：細胞中存在PFK-2，其產物F26BP會促進PFK-1作用；ATP可抑制PFK-1
 - 此步驟一般而言不可逆
 4. 二磷酸果糖裂解 (fructose 1,6-bisphosphate → DHAP + G3P)
 - (1) 酵素：aldolase (F1,6BP aldolase)
 - (2) 結果：產生dihydroxyacetone phosphate 及 glyceraldehyde 3-phosphate
 - ◎ 此反應為aldol condensation之逆反應
 - ◎ 此反應自由能大，但依然可以快速進行 (原因：G3P快速進入下階段反應使產物變少，反應向右)
 - ◎ F1,6BP的六個碳其分別對應的產物位置重要
 5. 磷酸三碳糖的醛酮互變 (dihydroxyacetone phosphate → glyceraldehyde 3-phosphate)
 - (1) 酵素：triose phosphate isomerase
 - (2) 結果：G3P和DHAP兩同質異構物的轉變，產生2個G3P (醛糖)
- 準備階段小結：共消耗2個ATP，形成2分子的G3P**



【步驟6→10為收益階段，以下步驟全部為兩倍反應】

6. 磷酸甘油醛 (G3P) 的氧化

(1) 酵素：glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase

(2) 結果：G3P (甘油醛) 接上Pi，形成具高能磷酸鍵的1, 3 bisphosphoglycerate (甘油酸)，得到兩個NADH+H⁺

(3) 輔酶參與：NAD⁺ → NADH + H⁺ (*2)

◎ 酵素結構中的Cys以及His，可吸引電子轉移，產生去氫反應(氧化)

◎ 毒性、抑制反應

砷酸 (AsO₄³⁻)中毒：產物變成 1-Arseno-phosphoglycerate，直接產生3-PG 並抑制磷酸代謝

跳過第7步驟，產生3-PG，少2個ATP (iodoacetate、Hg → 酵素失活)

7. 高能化合物 (1, 3 bisphosphoglycerate) 轉移磷酸根 (1, 3 bisphosphoglycerate → 3-PG)

(1) 酵素：phosphoglycerate kinase

(2) 結果：高能磷酸鍵轉移至ADP上，產生3-phosphoglycerate (3-PG) (*2) 及ATP (*2)

◎ Kinase：激酶，協助Pi轉移，需要Mg²⁺協助

8. 磷酸甘油酸的分子內磷酸根轉移 (3-phosphoglycerate → 2-phosphoglycerate)

(1) 酵素：phosphoglycerate mutase

(2) 結果：三號碳上的磷酸根轉移至二號碳上，產生2-PG (*2)

◎ 此步驟需要Mg²⁺的參與

9. 磷酸甘油酸 (2-PG) 的脫水反應 (2-phosphoglycerate → phosphoenolpyruvate)

(1) 酵素：enolase

(2) 結果：脫水形成高能化合物 phosphoenolpyruvate (PEP) (*2)

◎ 烯醇結構

10. 高能化合物 (phosphoenolpyruvate) 轉移磷酸根 (phosphoenolpyruvate → pyruvate)

(1) 酵素：pyruvate kinase

(2) 結果：高能磷酸鍵轉移至ADP上，產生pyruvate (*2) 及ATP (*2)

◎ Kinase：激酶，協助Pi轉移，需要Mg²⁺協助

● 此步驟一般而言不可逆

收益階段小結：共產生4個ATP，形成2分子的NADH + H⁺，及兩分子的pyruvate

整理：

(1) 耗能 (ATP) 步驟：步驟1、3