

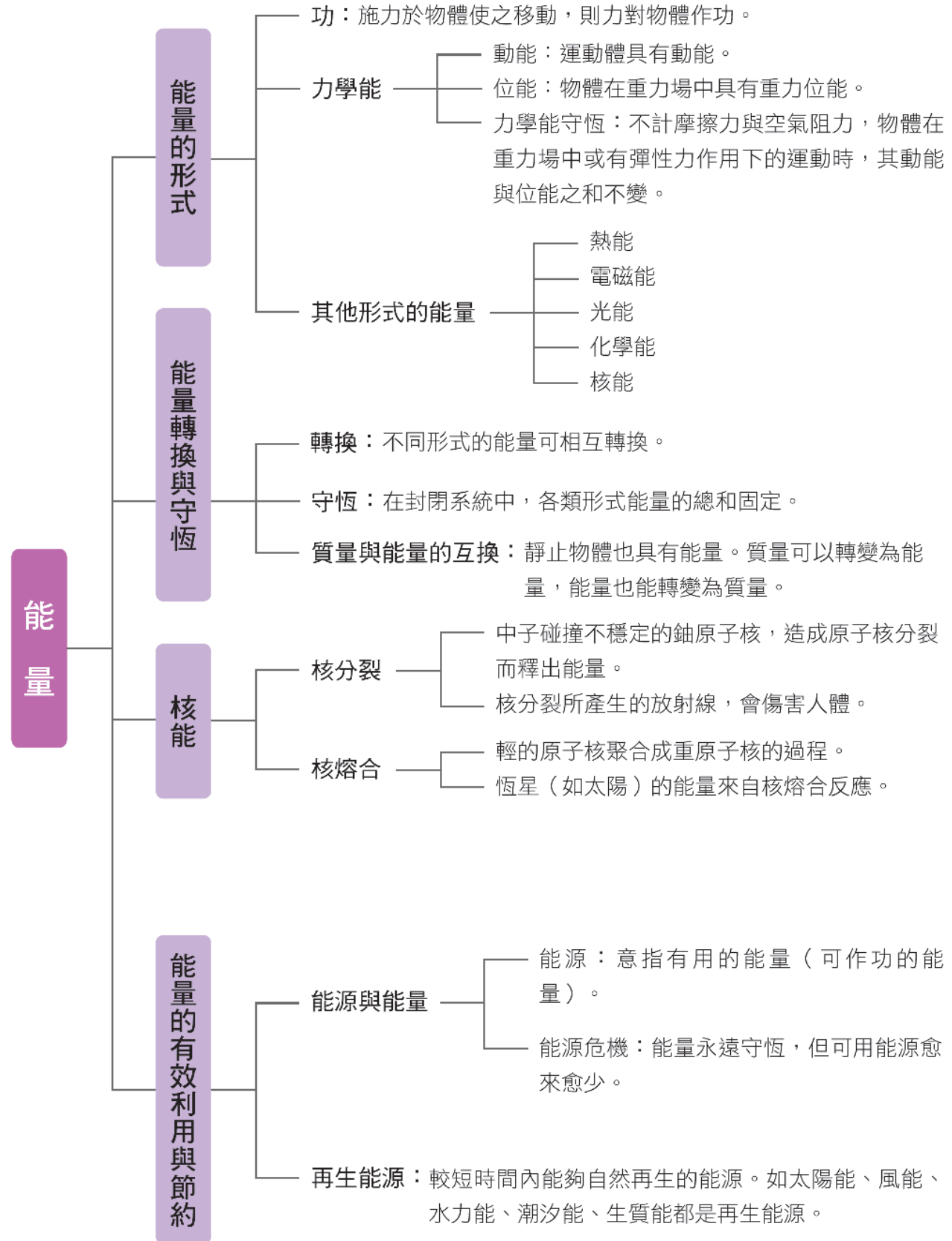
7 能量

- ◆ 第一節 能量的形式
- ◆ 第二節 能量的轉換與守恆
- ◆ 第三節 核能
- ◆ 第四節 能量的有效利用與節約
- ◆ 習題

任何物理系統都具有能量，例如：運動中的物體帶有動能、電磁場具有電磁能、汽油具有化學能等。自然界裡，不同形式的能量在所有現象的變化中可以相互轉換，但對於一封閉系統來說，其各種能量的總和是守恆（維持不變）的。



重點概念圖



一、能量是什麼

1. 雲霄飛車運動的聯想

我們先以一個簡單的例子來說明**能量** (energy)的觀念是如何來的。遊樂場中雲霄飛車(圖 7-1)以極低的速率從最高處 *A* 往下衝，速率會漸增，滑至最低點 *B* 時，其速率最快；當它繼續衝回最高點 *C* 時，又回到原來的低速率狀態(由於雲霄飛車的輪子與軌道之間有摩擦，以及空氣阻力等因素，所以飛車其實不會再爬升到原來的高度。不過我們在此先假設摩擦力與空氣阻力很小、可忽略，那麼在這種理想情況下，雲霄飛車就能回升到原來的高度)。當雲霄飛車在最高與最低兩位置之間上上下下滑行時，我們注意到只要飛車位置較高，其速率就一定比較低，而如果位置較低，則速率就必然較大，這種情況似乎表示雲霄飛車的高度與速率有一種固定的相互消長關係。

度與速率的消長關係可以用**精確的數學**來呈現；為了表達這個數學規律，我們引入了能量的概念。例如：我們將定義一種僅與物體速率有關的量，稱為動能，速率愈大，動能就愈大；另外也將定義一種僅與物體位置有關的量，稱為位能，位置愈高，位能就愈大。當上述雲霄飛車在上下起伏時，其動能與位能儘管會各自起起落落，但我們會發現雲霄飛車的總能量是守恆的，即動能與位能兩個量值的和——也稱力學能，總是固定不變的（能量守恆這個規律的好處之一是可以讓我們很快推算出雲霄飛車在運動時於任何高度的速率）。



▲ 圖 7-1 雲霄飛車移動過程的動能與位能轉換。

2. 能量觀念的引入

但是一旦我們把雲霄飛車輪子與軌道之間的摩擦考慮進來，飛車在上上下下運動之後終究會停止下來，這樣不就意味著動能加位能終究不是守恆的，而是愈變愈小嗎？那麼動能與位能的概念不就沒用了嗎？其實不然，因為摩擦會讓車輪與鐵軌發熱，所以儘管動能與位能的和變小了，我們只要引入熱能的概念，就會發現還是可以保有能量守恆這個規律：動能、位能與熱能三者的和是固定不變的。事實上在動能、位能、熱能之外，能量還有其他形式：每當我們以為能量守恆出錯了，就會發現其實是某些形式的能量被忽略了，只要將那些能量包括進來，能量的總和仍會維持不變，這就是能量這個概念最重要的特性。能量守恆定律是物理最奇妙、基本的定律之一。以下我們就要更詳細地介紹各種形式的能量。

二、能量的形式

能量的形式主要有力學能、熱能、電磁能、

光能、化學能、核能等。由於力學能是取中的能量觀念，而且從微觀的角度看，熱能基本上也是力學能，所以我們將以較多篇幅介紹力學能。

1. 力學能

(1) 動能的定義

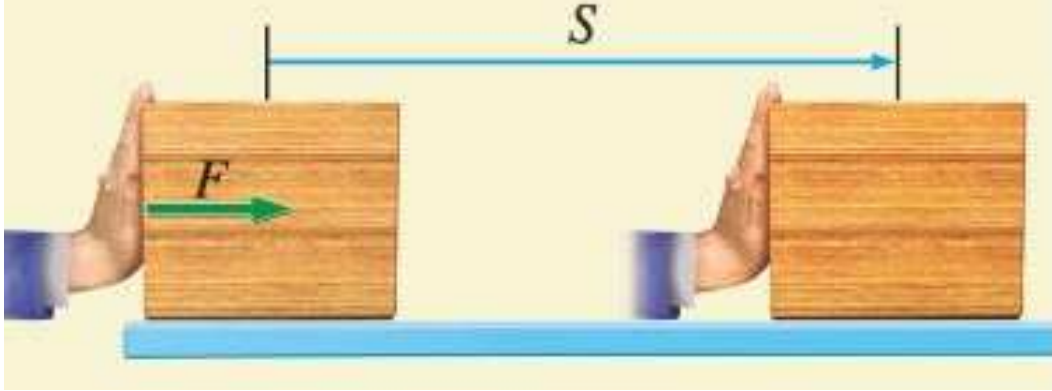
動能(kinetic energy)的數學定義與另一個概念—功(work)，有密切的關係，所以我們從功的定義講起。在光滑平面上對一靜止物體施加一固定的外力 F ，如果物體因此在施力的方向上有了位移 S ，如圖 7-2 所示，則我們稱外力對此物體作功 W ，其大小為

7.1 式

功=力×施力方向上的位移

$$W = F \times S$$

功的 SI 單位是牛頓·公尺，又叫做**焦耳** (J)。



▲圖 7-2 力作用在木塊上對木塊作功。

因此它在受力一段時間之後，會從靜止狀態變成具有某速度 v 。若我們定義速度為 v 的物體具有動能 K 為

7.2 式

$$K = \frac{mv^2}{2}$$

則我們可說在前述的狀況下，外力改變了物體的動能。事實上，物體從靜止開始，前進 S 距離後固定外力 F 所作的功恰等於(7.2)式所定義的動能。

由於功的單位是焦耳，所以動能的單位也是焦耳。我們將在以下對於位能的討論中看到，由(7.2)式所定義的動能有很好的性質，符合前一小節對於能量守恆的說法。我們在前面僅提到速率愈大，動能就愈大，現在則更清楚看到動能其實和速率的平方成正比，而且也與質量有正比關係。

一個運動中的物體撞擊另一個靜止的物體，會使得靜止的物體動起來而具有動能，例

如：在撞球檯上以白球撞擊靜止的紅球，將使得紅球從靜止轉而運動，如圖 7-3 所示。原先運動的白球具有動能，碰撞後白球速率減低，動能減少，但紅球卻從靜止轉為具有動能，這意味著白球的動能移轉了一部分甚至可能全部給紅球。我們先前說外力可對靜止的物體作功，讓它帶有動能，現在我們了解具有動能的物體也可對另一靜止的物體施力而作功，即具有動能的物體具備作功的能力。（傳統上，「作功的能力」常被當成是能量的定義。）

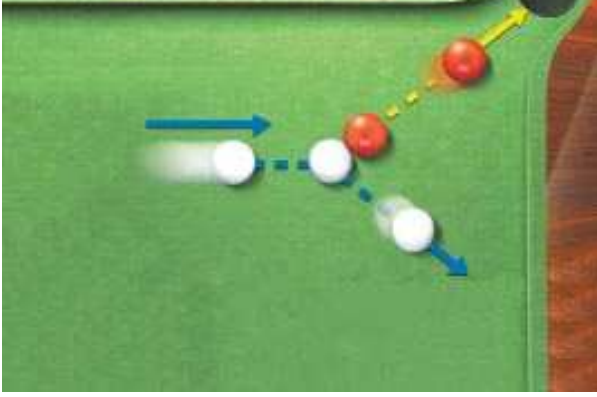
Key Point

動能與速率的平方成正比。



是非題

() 汽車的車速加倍，其動能也加倍。



◀圖 7-3 運動的白球對靜止的紅球作功。

能量是指作功的能力。

在地表附近，重力位能與離地高度成正比。

(2)位能的定義

我們現在討論一種只和物體位置有關，而和速度無關的能量，稱為**位能** (potential energy)。如果質量為 m 的物體距離地面的高度為 h ，地表重力加速度為 g ，則我們定義物體在地表附近（即 h 比地球半徑小很多）的位能 U 為

7.3 式

$$U = mgh$$

因此物體在不同的高度就有不同的位能（圖 7-4）。其實，我們可以對上式的 U 加上不為零的常數，而不改變 U 的用途。我們在此選擇讓地面的位能為零，才有(7.3)式的定義。既然這項位能是由重力所引起的，故也稱**重力位**

能。位能的單位和功一樣是焦耳。請注意 U 的大小等於物體自由掉落時，重力 mg 將它從高度 h 拉至地面所作的功；也就是說，物體如果往下掉，這個功將轉換成物體落至地面時所具有的動能

► 圖 7-4 蘋果的位能與高度有關，高度愈高則位能愈大。



7.4 式

$$W = F \times S = (mg)(h) = U = (mg)\left(\frac{v^2}{2g}\right) = \frac{mv^2}{2}$$

上式中，用到了 $v^2 = 2gh$ 這個關係（因為根據(3.6)、(3.7)式， $v = at = gt$ ， $x = h = \frac{1}{2}gt^2$ ）。所以物體靜止於高處時，雖沒有動能但具有位

能，一旦它落在地面上，位能雖然消失了，但動能卻出現了，此即動能與位能的消長關係（圖 7-5）。具有位能的物體也具備作功的能力，例



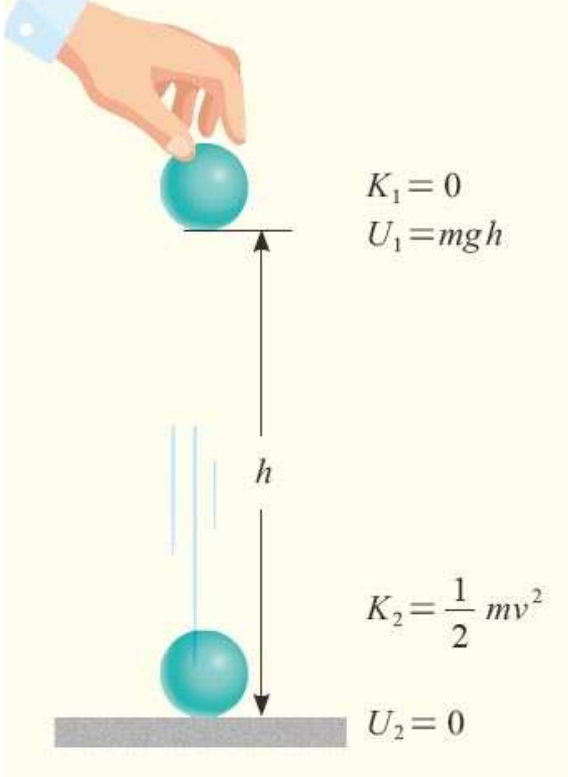
是非題

如：位於高處的重錘掉落在地面上可以將地面上的樁釘入地面，也就是說，重錘對樁作功（圖 7-6）。

() 蘋果的重量比乒乓球大，所以蘋果的重力位能必定大於乒乓球。

Key Point

力學能守恆時，動能與位能彼此完全轉換。



▲圖 7-5 忽略阻力時，小球下落過程 $K_1 + U_1 = K_2 + U_2$ 。



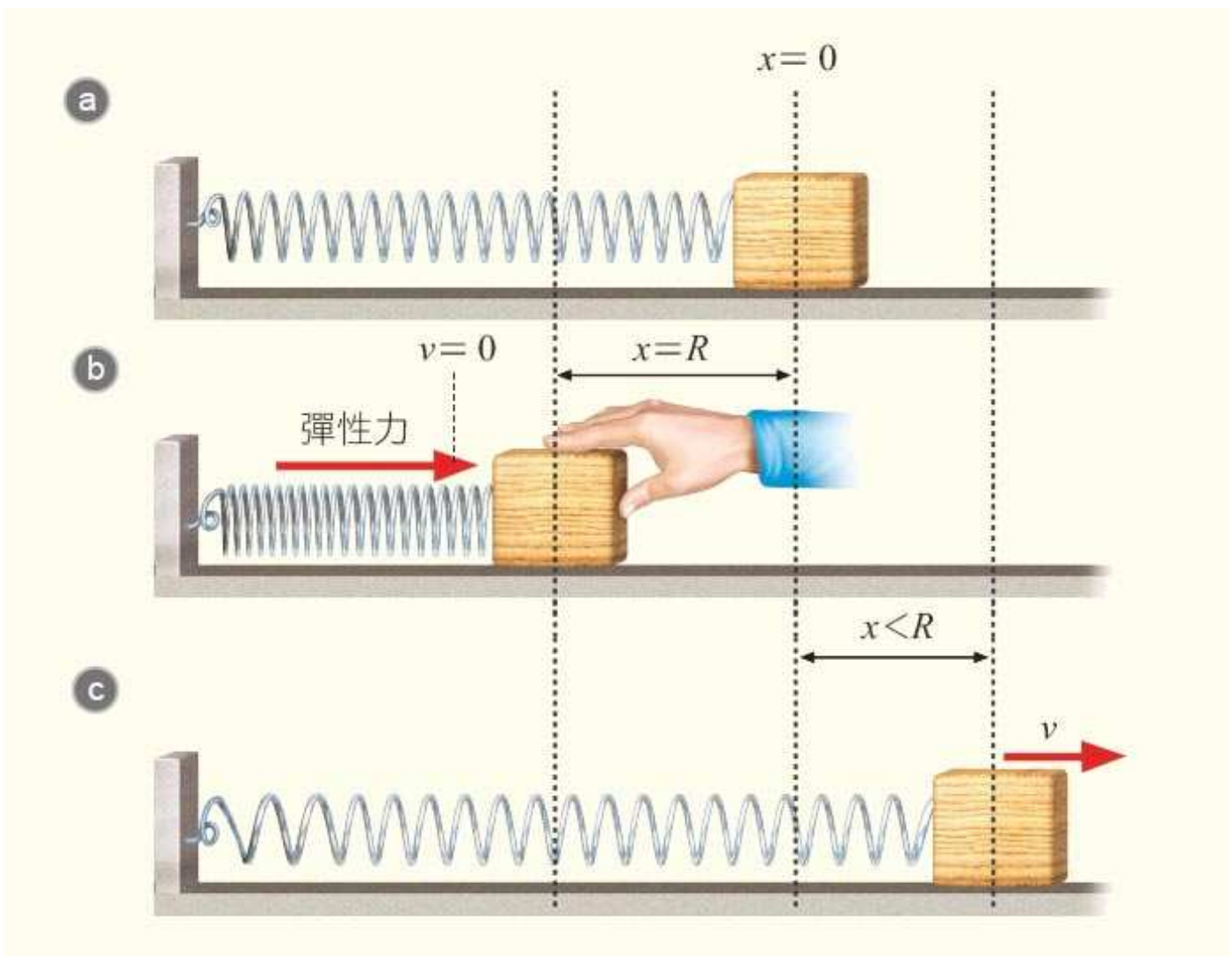
▲圖 7-6 重錘下落，將位能轉換成動能，把樁釘入地面。

前面提過在忽略摩擦力及空氣阻力的情況下，雲霄飛車的力學能（動能加位能）在運動時是守恆的，這個**力學能守恆定律**以數學式表示就是

7.5 式

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{常數}$$

其他力學系統也有類似的力學能守恆定律。例如：將彈簧一端固定於牆上，另一端綁上木塊。若將木塊推向牆壁一段距離 R 後，將手放開，則木塊會在光滑平面上開始來回運動，如圖 7-7 所示。假設木塊在某時刻偏離平衡點的距離為 x ，我們可以看到當 x 愈大（即彈簧壓縮或拉長的程度愈大），木塊的速率 v 就愈小；反之，當 x 愈小，木塊的速率 v 就愈大。對於這一個系統來說，我們可以定義一種僅與 x 有關的（彈性力）位能，使得此位能與木塊動能的和為不隨時間變化的固定值。



▲圖 7-7 彈簧運動的力學能守恆：(a)彈簧未形變時，木塊位於原點；(b)彈簧被壓縮 R 距離，木塊速率為零；(c)木塊釋放後，與原點之距離為 x ，速率為 v 。

總之，在力學系統中，我們有兩種形式的能量，統稱為力學能。一種是動能，它是物體因為**運動**而具有的能量。另一種是位能，它是物體因為**位置**或**形狀**的變化而具有的能量。



是非題

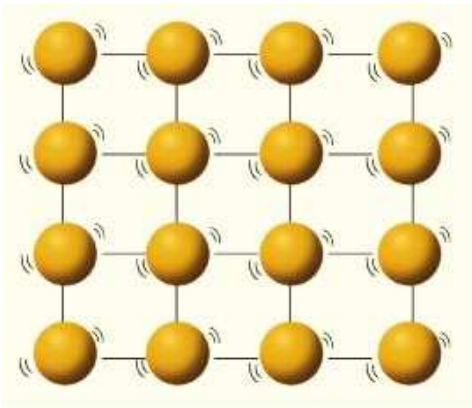
() 樹葉飄落地面的過程，遵守力學能守恆。

2. 熱能

我們之前介紹過所有的物體都是由微小的粒子—原子或分子所組成的。這些小粒子會不停地運動，即便它們所組成的物體是靜止不動的。以一塊靜止的銅為例，儘管它沒有在運動，但其內部的銅原子卻是永不休止地在搖擺振動（圖 7-8）；又以密閉屋內靜止的空氣來說，儘管整體而言，空氣沒有在流動，但個別的空氣分子會四處亂飛。這些組成物體的原子或分子在運動時，會具有動能，也會具有位能（因為原子或分子間可能有引力或斥力），這種能量的總和就是物體的**熱能**(thermal energy)。一個物體的熱能和其整體的運動狀態（即物體的位置與速度）無關，僅和物體的內部狀態有關，因

此人們有時也稱熱能為**內能**(internal energy)。

我們可以用溫度計(thermometer)來探知物體的溫度，而物體的溫度所反應的是物體內分子擾動的情況：溫度愈高，物體分子運動得愈快，其分子平均動能就愈大。我們知道高溫物體若與低溫物體接觸，就有**熱**(heat)從高溫物體流向低溫物體，使得高溫物體降溫，內能減少，而低溫物體升溫，內能增加，因此所謂熱的傳遞即是熱能的轉移。



◀圖 7-8 銅塊內的原子不停的振動。

Key Point

熱能 (或內能) 指物體內部分子的動能與位能總和。

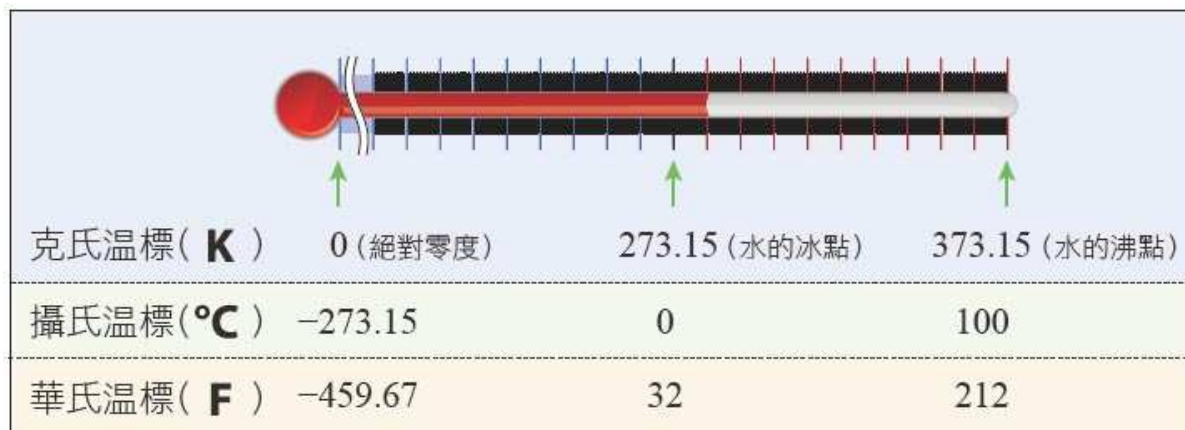
在日常生活中，我們常用攝氏溫標或華氏

溫標，但是科學上在測量溫度時卻常用**克氏溫標**(Kelvin's scale of temperature)，也稱**絕對溫標**。若 T 代表物體的克氏溫度， t 代表物體的攝氏溫度，則

7.6 式

$$T = t + 273.15$$

例如：水的冰點為 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，就等於 273.15 K (kelvin，絕對溫度單位) (圖 7-9)。



▲圖 7-9 克氏溫標與攝氏溫標、華氏溫標對照圖。

3. 電磁能

電磁能包括電能與磁能。電能可以看成是儲存於電場中的能量。當帶電粒子受到電場的推動而形成電流，**電能**便可經由電流被人們使

或燈泡，導線中的電荷受到電場驅動產生電流，電流從正極（電位較高的一端）流至負極（電位較低的一端），將電池提供的電能轉換成力學能或熱能。電能是最方便使用的一種能量，人們日常生活中所使用的電能主要來自於各式發電廠。至於**磁能**則是儲存於磁場中的能量。電能與磁能可以互相轉換。



◀圖 7-10 電池驅動小電扇。

4. 光能

電磁輻射即是電磁波，是電場與磁場的振盪，所以可以推動帶電粒子，當然帶有能量，即為**輻射能**。例如：光是一種電磁波，其所帶的電磁能就稱為**光能**。光能可以經由光電池轉換成電能（圖 7-11），也可經由光合作用為植

陽所發射之太陽光即是提供植物取最要的能量來源之一。

圖 7-11 能量的形式



■ 電磁能

玩具遙控飛機的動力來自於機上的電池。

■ 力學能

雲霄飛車運動的過程有動能與位能轉換。



■ 熱能

利用溫泉水的熱能來煮蛋。

5. 化學能

化學能是儲存於化學鍵中的能量。當分子進行化學反應，化學能即可被釋放或儲存。例如：蠟燭（或汽油等化石燃料）燃燒釋放了化學能，產生光與熱（圖 7-11）；又如化學電池可讓內部的化學物質進行反應，將化學能轉化成電能。

6. 核能

原子核的分裂及熔合可以產生巨大的能量，這種能量稱做**核能**。核能是現代社會最重要的能源之一（圖 7-11）。我們將在第三節更仔細說明核能的基本原理及應用。



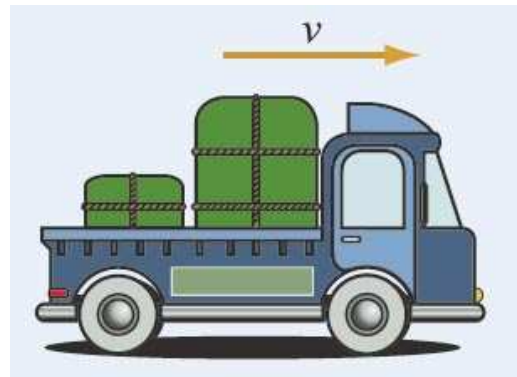
例題 7-1

一輛卡車含載重共 5000 公斤重，在公路上以每小時 54 公里的速度行駛，請問

(1) 卡車的動能為多少焦耳？

(2) 若卡車的速度增為兩倍，則其動能增為幾倍？

分析



(1) 動能 $K = \frac{1}{2}mv^2$ 。

(2) 質量不變時，動能與速率的平方成正比。

解

(1) 卡車速度 $v = 54 \text{ km/h} = 54 \times \left(\frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}\right) = 15 \text{ m/s}$

$$\text{動能 } K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$= \frac{1}{2} \times (5000 \text{ kg}) \times (15 \text{ m/s})^2 = 5.6 \times 10^5 \text{ J}。$$

(2) 增為 4 倍。

一、能量的轉換

1. 焦耳的實驗—力學能和熱能間的轉換

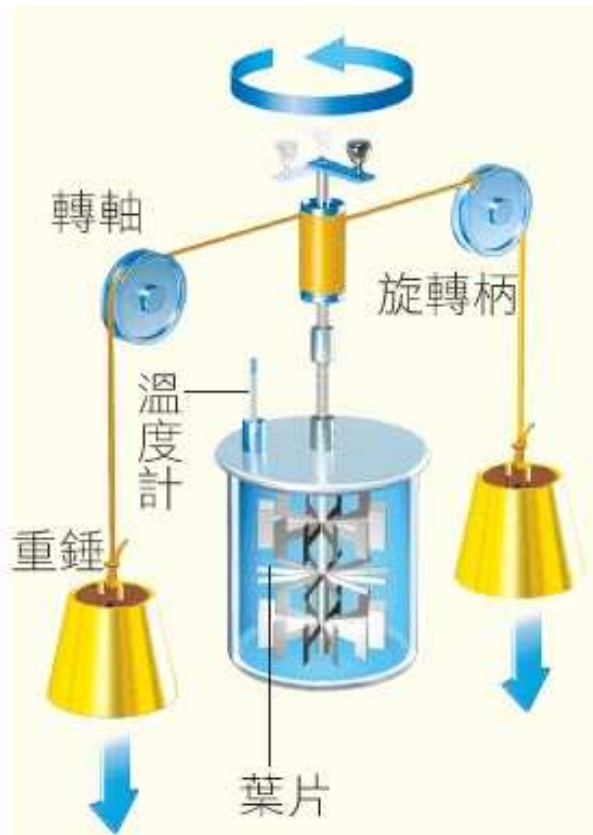
我們之前以雲霄飛車的運動來介紹能量概念，提及由於飛車輪子與軌道之間的摩擦，飛車終究會停止下來，而且車輪與鐵軌會發熱，這表示飛車的動能與位能轉換成了熱能。既然如此我們便想追問，這種轉換的定量關係是什麼？我們知道力學能的單位是焦耳，熱量的單位是卡(cal)。1 卡是讓 1 公克的水，從溫度 14.5°C 升至 15.5°C 所需的熱量。那麼焦耳與卡的關係為何？

歷史上最早從實驗找出熱能與力學能轉換關係的人即是焦耳，他在 1845 年做了以下的實驗（圖 7-12）：在絕熱容器內裝水，容器內置有葉片，讓兩個重物往下掉，帶動葉片旋轉而攪動水，水溫因此升高。在此過程中，重物的重力位能先轉變成葉片的動能，再轉變成讓水

溫上升的熱能。溫度測量了重物下降的高度
以及水溫的變化，配合已知水的比熱，即得到

1 卡的熱量= 4.186 焦耳的能量

上式所列的是目前所採用的數值，也是 1 卡的定義。焦耳當年所得的結果與上述值相比，誤差只在 1% 之內。



◀圖 7-12 焦耳實驗裝置示意圖。

Key Point

不同形式的能量可以互相轉換。

2. 其他形式能量互相轉換的例子

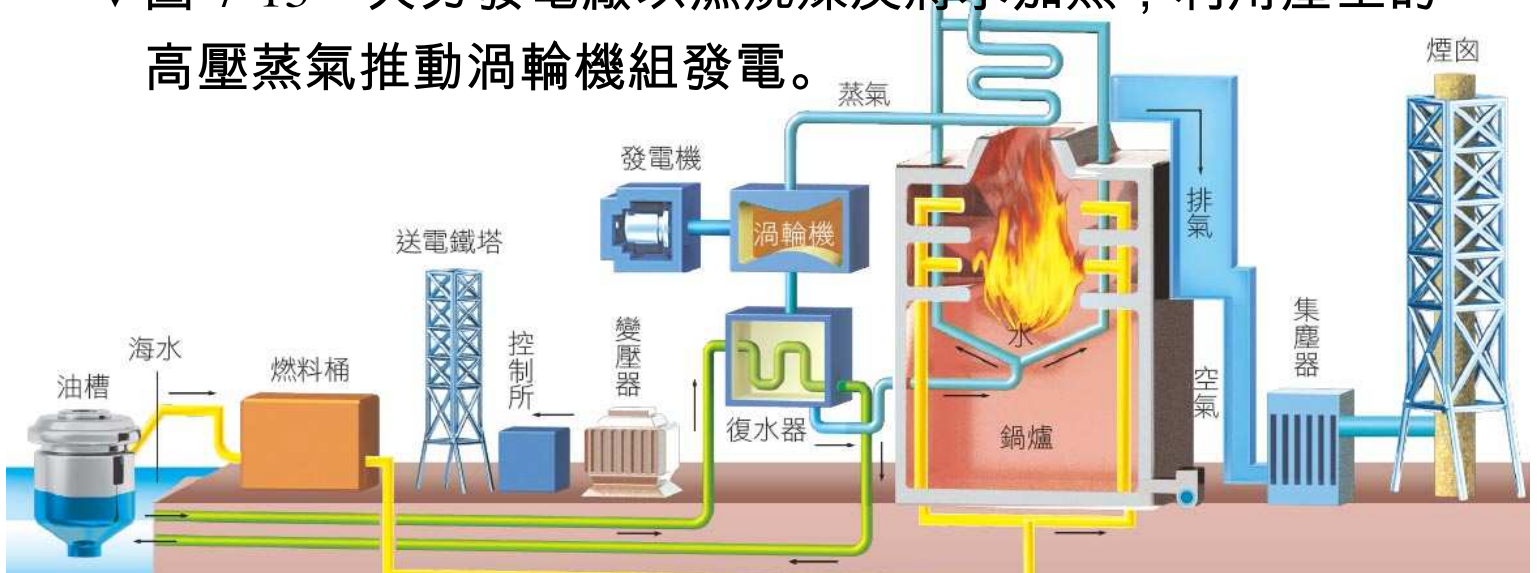
除了力學能與熱能可以相互轉換之外，各種不同形式的能量其實也一樣可以相互轉換。例如：火力發電廠燃燒煤炭，將化學能轉為熱能。加熱鍋爐中的水，產生高壓水蒸氣，推動渦輪葉片，轉為力學能，最後帶動發電機產生電能（圖 7-13）。又如人造衛星利用光電池將太陽光能轉換成電能來維持運作。



是非題 () 100 卡與 100 焦耳代表相等數值的能量。

() 汽車煞車時，力學能會轉換為熱能。

▼圖 7-13 火力發電廠以燃燒煤炭將水加熱，利用產生的高壓蒸氣推動渦輪機組發電。



一、能量的守恆

1. 能量守恆律

由於力學能可轉換成熱能，之前提過力學能守恆律便不能成立，而必須擴充為力學能與熱能之和的守恆律。但是這樣還是會出問題，因為熱能與力學能還可轉換成電磁能等其他形式的能量。最終物理學家發現對於一封閉系統來說，只有將力學能、熱能、化學能、電磁能及核能等各形式的能量全部加起來才是個不隨時間而變的固定值。這個規律是物理學最重要的定律之一，稱為**能量守恆律** (law of conservation of energy)。

由於能量守恆律從來沒出錯過，所以如果我們發現在某種反應之中，能量似乎不守恆了，就馬上想到應該有某個能量被忽略了。讓我們以中子的 β 衰變為例：原先人們看到中子 β 衰變後的產物除了質子就是電子，但如果能量守恆律是正確的，我們可推論射出的電子必須具有固定的能量，可是實驗卻顯示來自 β 衰

變的電子並沒有固定的能量：為了使弱相互作用守恆律出錯了。但另有物理學家卻不願意放棄能量守恆律，而推測中子衰變後除了出現質子與電子之外，還另會出現一個質量極小的中性粒子，可以帶走一些能量。這個中性粒子即是在第四章討論弱相互作用時已介紹過的反微中子（微中子的意思是「微小的中性粒子」）。由於後來這個中性粒子果然在實驗中被找到了，使得能量守恆律的地位更為穩固。

2. 愛因斯坦提出質量與能量互相轉換的概念

既然提到中子 β 衰變過程中的能量守恆，有一件事必須強調，即質量與能量是等效的，兩者可以互相轉換，就如同熱能與力學能。這是愛因斯坦在 1905 年所提出的。他當時在發展狹義相對論，發現一個質量為 m 的物體，即便它是靜止的，也具有**靜能量**（rest energy） E ， E 與 m 的關係為

7.8 式

$$E = mc^2$$

式中的 c 為光速。這個關係式可以說是二十世紀最著名的科學公式，我們用靜止中子的 β 衰變來說明其意義：由於中子的質量大於衰變後產物質子、電子、反微中子三者質量之和，因此質量在 β 衰變過程中不是守恆的，但是物理學家發現若採用(7·8)式，則中子的靜能量會等於質子、電子、反微中子三者的靜能量與三者的動能之總和，也就是說只有當我們把靜能量考慮進來，能量才可能是守恆的。

除了 β 衰變，我們現在已經知道還有很多物理反應，質量在反應過後變小了。我們可以根據(7·8)式計算出減少的質量究竟轉換成了多少能量；由於光速極大，一點點的質量即可轉化成非常大的能量（圖7-14）。



是非題

()質能轉換公式只適用於微觀世界，在宏觀世界並不成立。



a 核能發電廠。

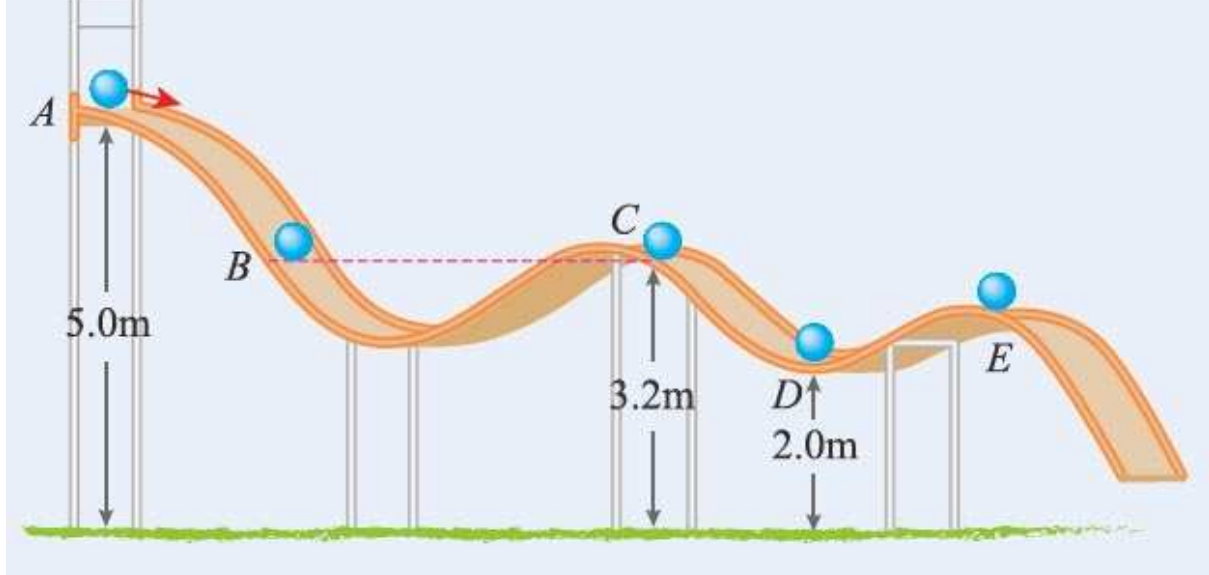


b 核武(原子彈)。

▲圖 7-14 質能互換的實例。

例題 7-2

一顆小球由光滑曲道的最高點 A 處靜止下滑，如圖所示，已知曲道上的 B 、 C 兩點等高，且以地面處的重力位能為零，考慮小球在 A 、 B 、 C 、 D 、 E 處的情況時，則



- (1) 小球在哪一點的重力位能最小？
- (2) 小球在哪一點時的動能最大？
- (3) 小球在哪兩點的動能相等？

分析

因曲道光滑時，小球運動過程的力學能守恆。

解

- (1) 圖中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 五點， D 點的位置最低，所以該處重力位能最小。
- (2) 小球在光滑曲道上滑行，力學能守恆，因此重力位能最低處，其動能為最大，所以 D 處

動能最大。

(3) B 、 C 兩點等高，這兩處的重力位能相等，
故由力學能守恆知，這兩點的動能也相等。

一、核分裂

1. 核分裂的發現

自然界中有一種很重要的元素叫做鈾(uranium)，元素符號為 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 。元素符號左下角的數字是**原子序**(atomic number)，即元素原子核所含的質子數目，左上角的數字為**質量數**；所以鈾原子核有 92 個質子與 143 個中子（即 235 減 92）。1938 年，哈恩（Otto Hahn，1879—1968，德國人，圖 7-15）和史特拉斯曼（Fritz Strassman，1902—1980，德國人）以中子撞擊鈾 ${}_{92}^{235}\text{U}$ ，發現反應後會出現鋇 ${}_{56}^{138}\text{Ba}$ 、氙 ${}_{36}^{95}\text{Kr}$ 等原子核。很快地，麥特納（Lise Meitner，1878—1968，奧地利人，圖 7-16）與夫芮許（Otto Frisch，1904—1979，德國人）就將哈恩及史特拉斯曼的發現正確地解釋成**核分裂**(nuclear

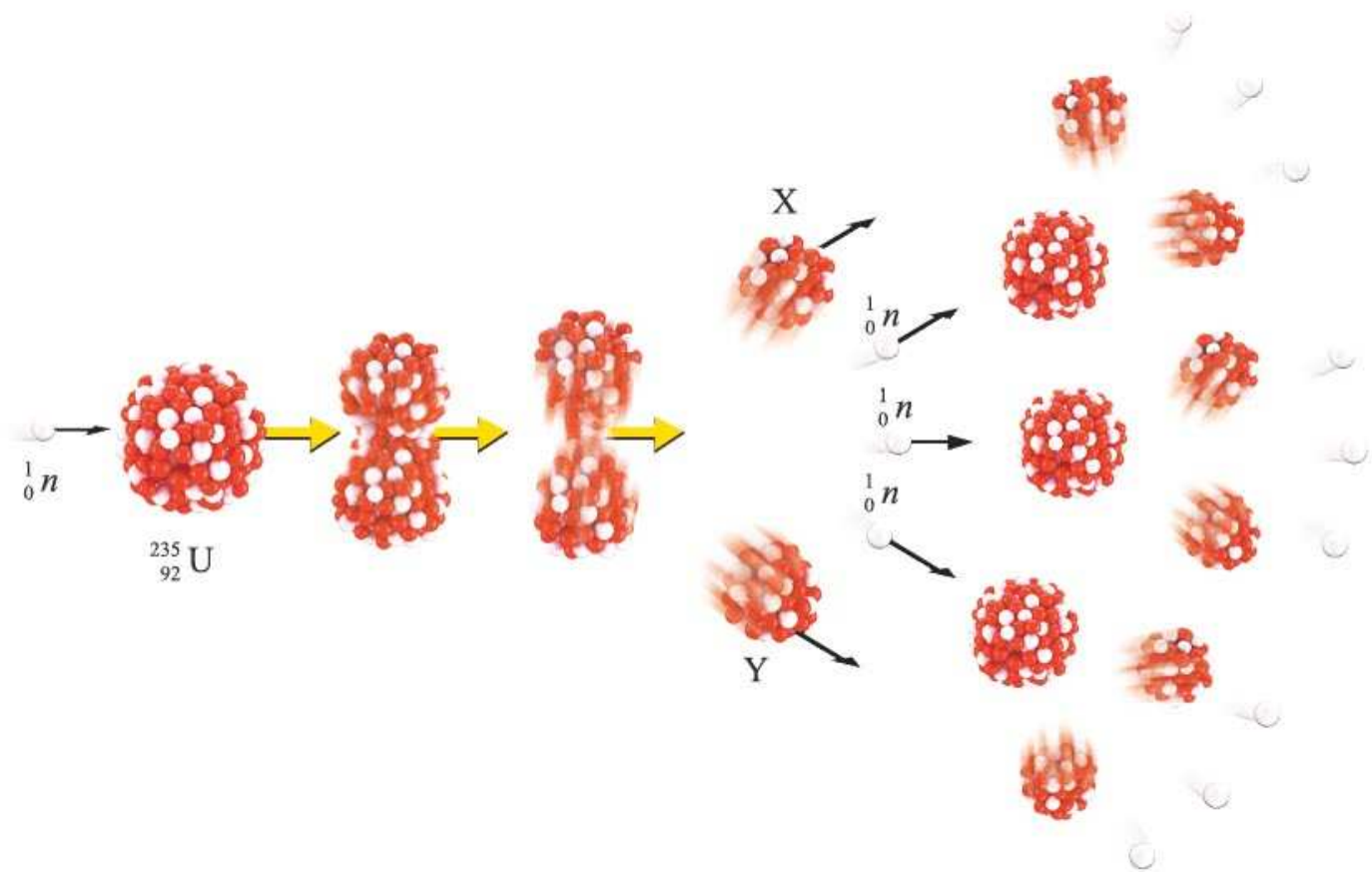
fission), 亦即中子撞擊 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 後產生以下的反應
(圖 7-17)



▲圖 7-15 哈恩。



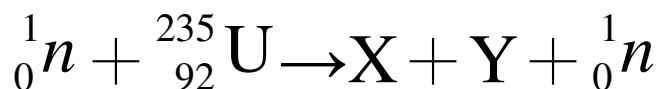
▲圖 7-16 麥特納



▲圖 7-17 中子撞擊鈾原子核產生核分裂，反應後產生的中子可再撞擊其他鈾原子形成連鎖反應。

7.9 式

中子 + 鈾 → 子核 X + 子核 Y + 中子



鈾原子核（母核）吸收中子後會像水滴一般地變形及振盪（圖 7-17），然後分裂；X 及 Y 為分裂後產生的子核，這些子核只要滿足能量守恆及核子數、電荷守恆即可，因此可以有很多種組合，像 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 就可以產生數十種子核。鈾原子核分裂後的產物除了子核之外還有一些中子，大部分的情形是每一次分裂產生 2 個或 3 個中子，平均來說約有 2.5 個中子產生。哈恩 及 史特拉斯曼 所發現的反應即為核分裂(7.9) 式的一個例子：

7.10 式

中子 + 鈾 → 鋇 + 氪 + 3 中子



2. 核分裂產生的能量

為衰後的子核與中子的總質量比為衰前的母核及中子的總質量小，這些減少的質量大部分轉換成了子核與中子的動能，小部分轉換成了分裂時所產生的 γ 射線。一個鈾原子核的分裂可產生約 3.2×10^{-11} 焦耳的能量，這個能量比一般化學反應所產生的能量大很多。

Key Point

核分裂釋放的能量大於一般的化學反應。

3. 連鎖反應

由於一個鈾原子被一個中子撞擊後會產生 2 到 3 個中子，這些中子可再撞擊其他的鈾原子，再次產生核分裂，這樣持續下去就形成核分裂的**連鎖反應**(chain reaction) (圖 7-17)。如果我們透過連鎖反應來「燃燒」鈾，1 公克的鈾（約有 2.56×10^{21} 個鈾原子核）就可提供約 8.19×10^{10} 焦耳的能量。這麼大的能量如果在短時間內釋放出來，即有強大的破壞力。原子彈

煤油燈所產生的工人能量即是透過煤油燈所產生的。

一、核能發電

核能發電就是利用核分裂反應所產生的能量，將水加熱使其變成蒸氣，再推動汽輪機與發電機來發電。雖然核能發電基本的概念很單純，可是我們還得先解決一些問題才能利用核分裂反應來發電。首先，核分裂時所產生的中子動能很大，但由於能量較低的**熱中子**（也稱慢中子）比較容易誘發核分裂，所以我們必須想辦法讓中子的速度減緩下來變成熱中子去執行連鎖反應。一個有效的方法就是讓中子去撞擊與它的質量相當的粒子，這樣中子很容易將動能轉移給被撞的粒子。由於水中的氫原子核（質子）與中子質量相當，因此核能發電廠中常用的緩速劑就是水。

Key Point



是非題

熱中子容易造成鈾核的連鎖反應。

()核能發電是利用化學能產生電能。

加上產生的中子可能洩漏到核反應器外面，或被反應器中一些容易吸收中子的物品吸收，便可能造成中子的數目太少，無法讓連鎖反應順利進行。但如果核燃料體積過大，分裂時產生的中子數目太多，遠大於中子的漏失，則核分裂的連鎖反應快速進行，便可能在短時間內產生太多的能量而燒毀反應器。因此控制中子產生的速度是很重要的。反應器能夠穩定運轉的條件之一便是中子產生的速率與中子漏失的速率大致相等。維持中子數目平衡的方法之一，就是在核燃料中插入可吸收中子的鎳或硼所做成的控制棒。中子太多時就插入多一點的控制棒，中子太少時就拔出一些控制棒。

圖7-18是一座典型核能電廠裝置示意圖，最左邊是核反應器，內部有核燃料（如 $^{235}_{92}\text{U}$ ）、水、控制棒等。反應器內的熱能可用以產生高壓水蒸氣，繼而驅動發電機。

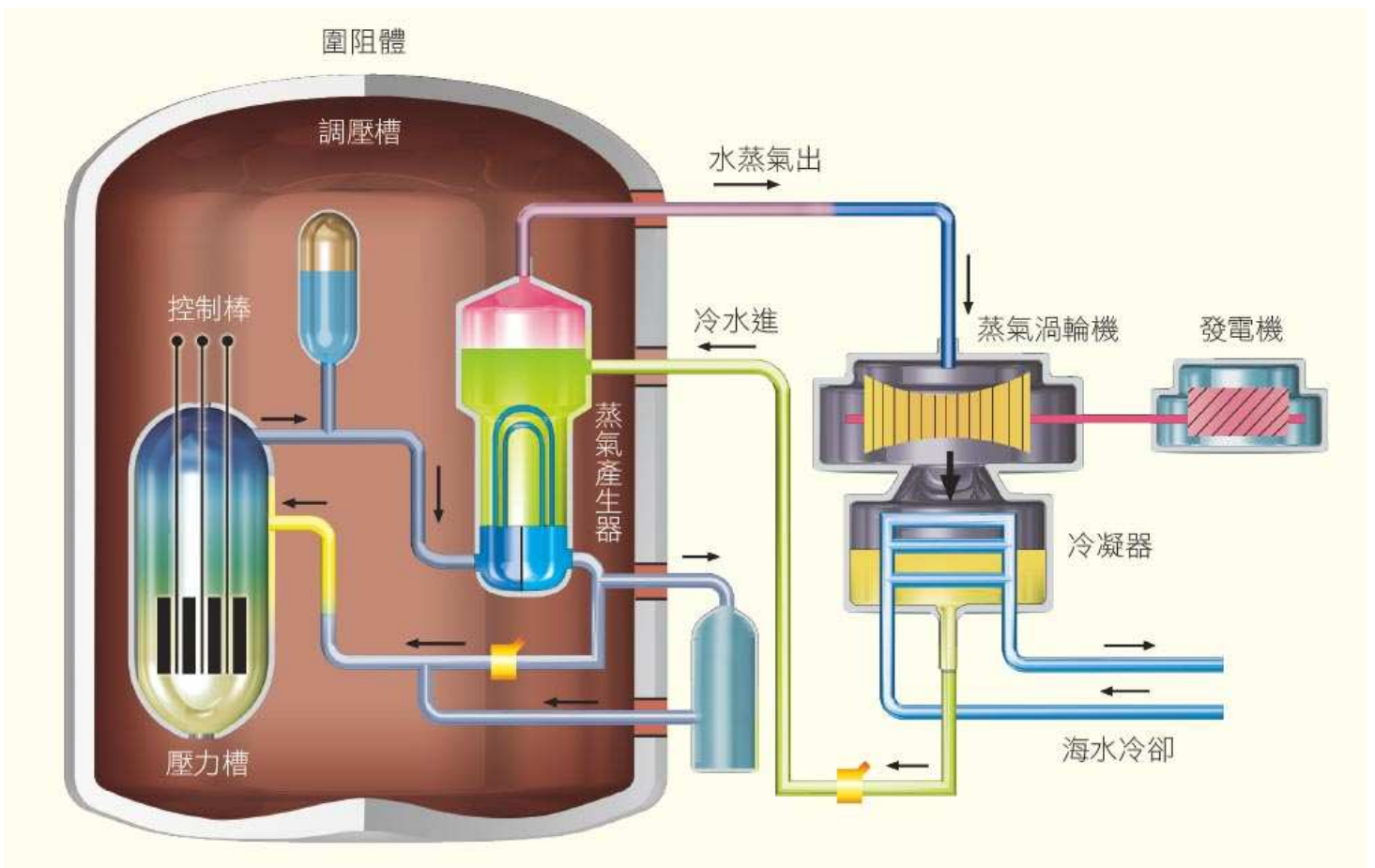
Key Point



是非題

控制棒可以吸收中子。

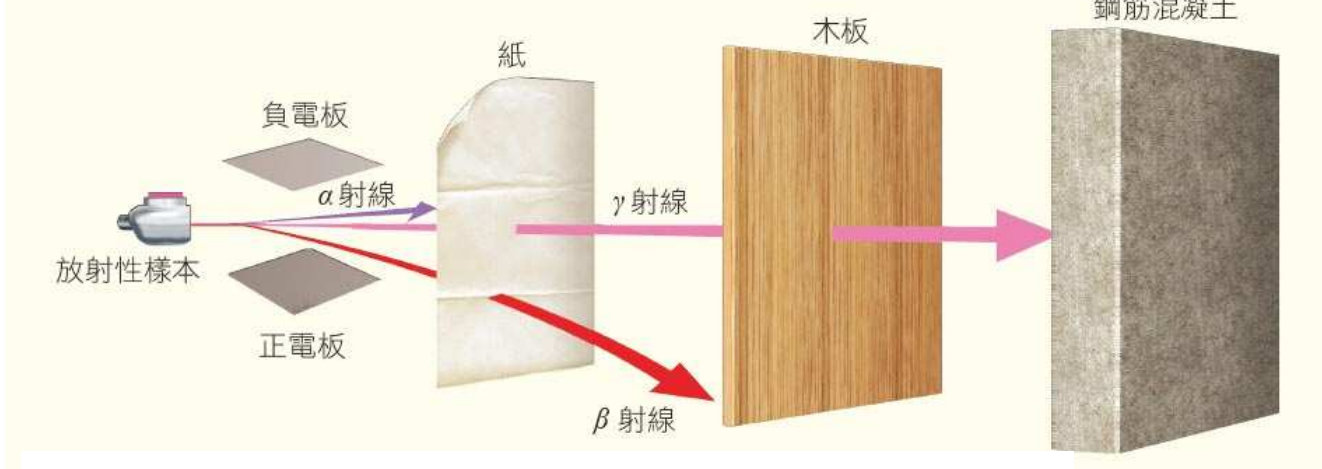
()將反應器中的控制棒抽出，產生能量的速率會增加。



▲圖 7-18 核能發電示意圖：壓力槽內鈾燃料進行核分裂，釋出的能量加熱周圍的水，使之氣化而推動渦輪機組發電。

1. 放射線與其性質

${}_{92}^{235}\text{U}$ 分裂後會產生兩個質量大約相等的子核，有些子核具有放射性，會因衰變而放出 α 射線（氦原子核）或 β 射線（電子）。這些射線加上核分裂時產生的 γ 射線與中子，有些會留在燃料中，有些會逸出燃料之外，有些則會形成氣體擴散出來。在這些射線中， γ 射線與中子的穿透性最強。 γ 射線不帶電，在電場中不偏轉。在空氣中， γ 射線可以穿透的距離大約是 100 公尺，而 β 射線與 α 射線分別是 5 公尺及 5 公分。一般約 15 公分厚的鋼筋混凝土牆可以阻擋 γ 射線，木板或 5 公釐的鋁板可以阻隔 β 射線，一張紙就可以阻隔 α 射線（圖 7-19）。



▲圖 7-19 α 、 β 、 γ 三種射線的穿透性質。

Key Point

γ 射線與中子的穿透力最強。



是非題

() γ 射線可以用一張衛生紙擋住。

2. 放射線對生物的影響

這些射線如果照射在人類或其他生物時，會破壞生物的細胞，產生病變，造成傷害。1979年美國賓州三哩島及1986年烏克蘭車諾比曾發生核電廠災變，造成放射性物質外洩。車諾比事件更導致重大傷亡。

人體所受的輻射劑量的國際單位為西弗 (sievert, 記為 Sv)，常用單位為毫西弗 (mSv)。圖 7-20 是輻射劑量對於人體的影響與日常生活中所接受的輻射劑量。

除非有人為疏失，核能電廠的放射性物質一般不可能擴逸到核反應器之外。為了防範放射性物質外逸，核能電廠從設計、施工到運轉，甚至於意外事故的處置，都必須非常慎重，尤其是核電廠的設計必須將一切可能出現意外的

▼圖 7-20 輻射劑量對於人體的影響與日常生活中所接受的輻射劑量。

1 小時以內嘔吐，嚴重血液異常，出血、感染及脫髮，80~100% 的患者在 2 個月內死亡，生存者需要很長時間才能復原。

2 小時以內嘔吐，嚴重血液異常以及出血、感染，2 週後脫髮。約 80~100% 在 1 個月至 1 年間復原。

5~50% 的患者在 3 小時內嘔吐，普遍會有倦怠和失去胃口的現象，中度的血液異常，所有患者數週內均可復原。

輕微的血液異常。

低劑量輻射在人體上沒有顯著的效應。

10000

6000

2000

1000

500

50

10

5

2.5

2

0.5

0.1

0.01

毫西弗(mSv)

鈷 60 治療一次 (局部照射)



職業人員年劑量 (法規限值)



巴西的喀拉哈利地區的自然放射線年劑量



一般民眾年劑量 (法規限值)



胃部 X 光透視一次



每人每年平均接受大自然放射線劑量



我國核電廠界外年劑量 (法規限值)



胸部 X 光透視一次



電視機 (每天看一小時的年劑量)



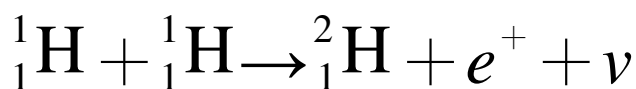
四、核熔合

1. 核熔合

核熔合(nuclear fusion)所指的是幾個輕原子核聚合在一起，形成一個重原子核的過程。由於最後熔合而成的原子核的質量會比最初原子核的總質量小，因此核熔合和核分裂一樣，也會將質量轉換成能量。一個核熔合的例子(圖 7-21(a))就是質子與質子相撞，熔合成氘原子核 (${}^2_1\text{H}$ ，含有一個質子與一個中子)，然後放射出正電子(其質量和電子一樣，但其電荷卻和質子一樣)與微中子 ν 。

7.11 式

質子 + 質子 → 氘原子核 + 正電子 + 微中子



這個反應很不容易發生，因為一來兩個質子必須克服庫侖排斥力才能靠近在一起，二來這個反應涉及弱交互作用，發生的機率本來就

反應。但是在太陽內部，由於溫度與粒子密度皆很高，所以(7·11)式的反應方得以發生。

2. 太陽的能量來自於核熔合反應

事實上，在太陽內部，氘原子核產生出來之後，還可以繼續和質子熔合成 ${}^3_2\text{He}$ 原子核，然後兩個 ${}^3_2\text{He}$ 原子核可以進一步熔合成 ${}^4_2\text{He}$ 原子核。每一次的核熔合都會將部分質量轉換成能量，這就是太陽能夠發光的原因。

Key Point

太陽的能量來自核熔合。

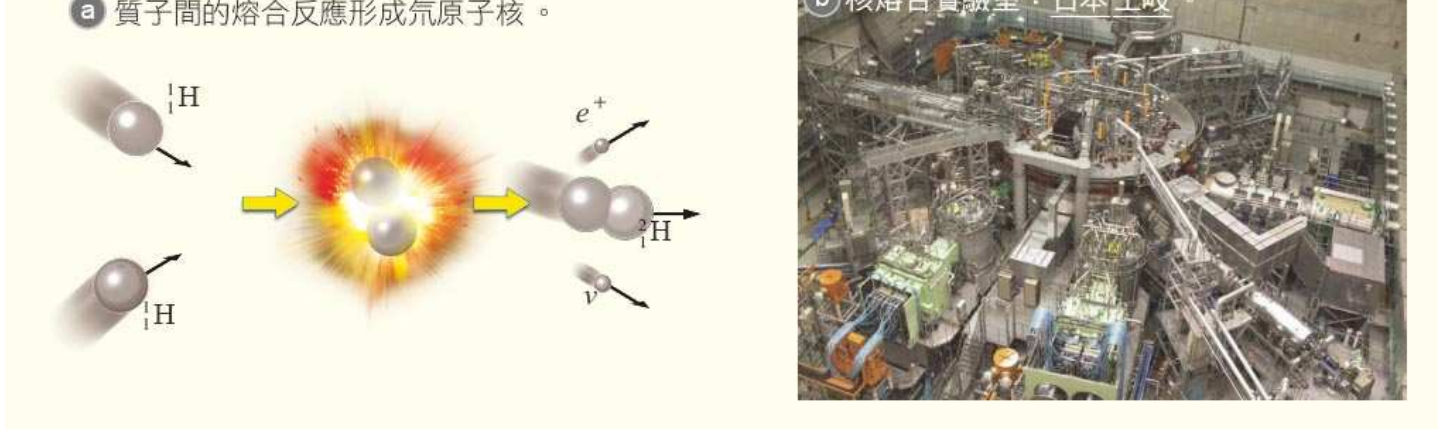
在極高溫度下，核熔合有可能發生。

前面提過核熔合反應之所以能發生於太陽內，是因為太陽內部的質子密度及溫度都非常高，但這些反應在地球自然環境中是不會發生的。不過我們可以建造特殊實驗室（圖7-21(b)），模擬太陽內部的環境，用氘及氘的核熔合來產生能量。

()地心的龐大地熱來自核融合。



是非題



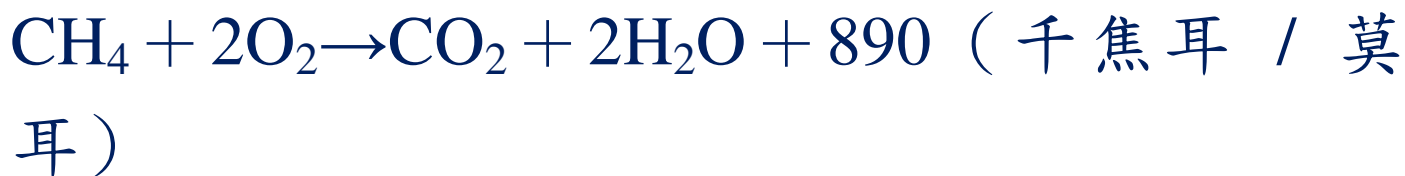
▲圖 7-21 核熔合。

3. 未來理想的能量來源——核熔合

氘可以從海水中取得，氦可從氘熔合而來。與目前所知的能源相比，由氘與氘核熔合而來的能源是最理想的：不僅燃料充足，又不產生溫室氣體及高放射性核廢料，可大幅降低對環境的汙染。可惜目前控制核熔合的技術仍未成熟，故我們尚無法利用核熔合來發電。

例題 7-3

已知天然氣的主要成分為甲烷，天然氣燃燒時其主要的化學反應式如下：



試比較 1.0 公克天然氣燃燒與 1.0 公克鈾分裂時所產生的能量。

分 析

由甲烷的燃燒化學反應式可知 1.0 mol 的甲烷可以產生 890 kJ 的熱能，甲烷的分子量 = 12.0

+ 4.0 = 16.0 g/mol，1.0 g 甲烷 = $\frac{1}{16.0}$ mol。一個

鈾原子核的分裂可以產生 3.2×10^{-11} J 的能量，1

g 鈾原子 = $\frac{1}{235}$ mol

解

1.0 g 天然氣燃燒產生的能量

$$=890 \times \frac{1}{16.0} = 55.6 \text{ kJ}$$

1.0 g 鈾分裂時所產生的能量

$$= 3.2 \times 10^{-11} \times \frac{1}{235} \times 6.02 \times 10^{23} = 8.2 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$\frac{8.2 \times 10^{10}}{5.56 \times 10^4} \approx 1.5 \times 10^6 \text{ 倍}$$

鈾分裂所產生的能量約為燃燒天然氣的 150 萬倍。

第四節

能量的有效利用與節約

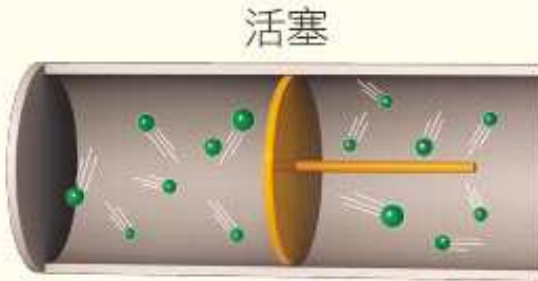
一、能源與能量

我們常聽到人類面臨能源匱乏問題，這究竟是什麼意思？能源這兩個字，在一般人的認知裡，所代表的意義可能和能量差不多，因為能源可以為我們作功，譬如我們需要汽油（一種能源）才能將車子從高雄開到臺北。但是既

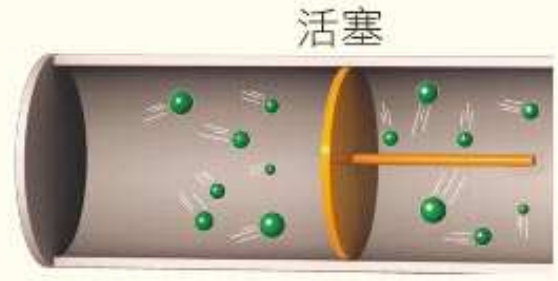
熱能源與能區之已顯熱不足個守位重所以能源的意義應該和能量不一樣，但是兩者究竟如何不一樣？

大致上講，能源是「品質」較高（即作功能力較高）的能量。為什麼能量有品質可言？因為含有相同能量的兩個系統，它們對外作功的能力不見得一樣。讓我們用以下的例子來說明：如圖 7-22 所示，考慮兩個完全相同的容器，裡頭裝有同樣多的空氣，且容器內外的空氣密度與溫度相同；假設其中一個容器內的空氣和容器外的空氣一樣，兩者的空氣分子都是以各種速度，朝四面八方運動（圖 7-22(a)）；至於第二個容器，我們則假想其中的空氣分子大多是朝著活塞方向前進（圖 7-22(b)），這是一種在真實世界中不可能自然發生的狀況。兩個容器內的氣體分子有相同的總動能，但兩組氣體分子作功的能力一樣嗎？顯然不是的。全朝著活塞方向運動的空氣分子對活塞的推力較大，它們可以推動活塞，因此作功能力較強，但另一組空氣分子卻不行。所以能量相同的兩

a 容器內分子朝四面八方運動。



b 容器內分子大多朝向活塞運動。



▲圖 7-22 兩組總動能相同的氣體分子有不同的作功能力。

在這些例子中，兩組氣體分子的差別在於它們有不同的「秩序」：四處亂竄的氣體分子比較沒有秩序，朝同一方向前進的氣體分子比較有秩序，較有秩序的能量作功能力較高。而大自然的規律之一就是系統會朝沒有秩序的狀態演化，所以能量的品質只有降低，不會升高。例如：汽車引擎燃燒汽油讓車子能在馬路上前進，由於煞車、車輪與地面的摩擦、空氣阻力、熱廢氣等因素，汽油所釋放的能量最後大多轉換成了無秩序、很難再使用的熱能。因此好用、作功能力高的能源（如汽油）是寶貴的東西，一旦用掉，就轉為品質較低的能量；地球上石油、天然氣等能源的蘊藏量是有限的，這些能源長期使用下來，必然出現匱乏的問題。

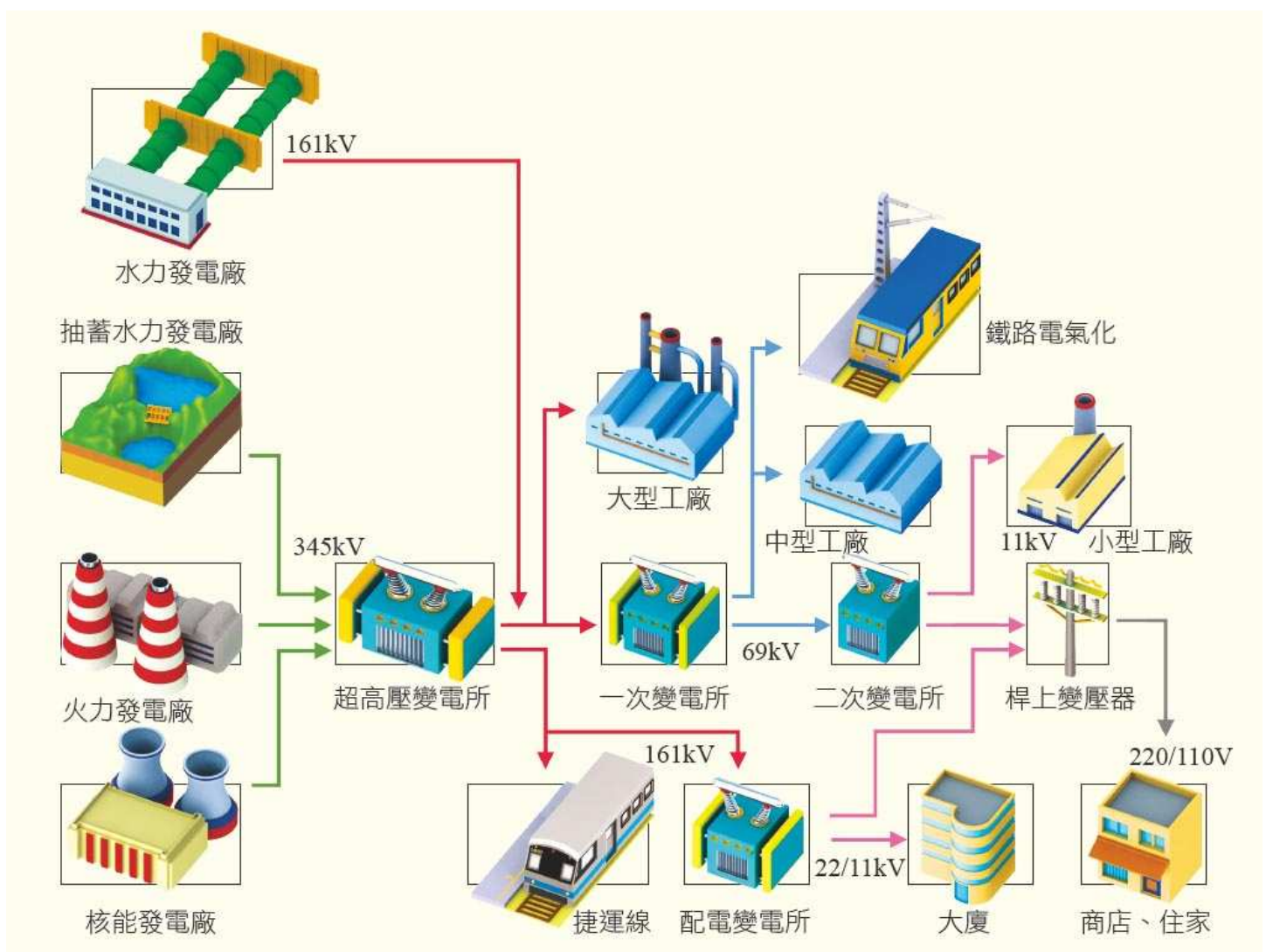
二、能源的有效利用與節約

能源是寶貴的，所以應該有效利用。以下是幾個提高能源效率的例子：

1. 電能是我們日常生活中最常見的一種能量。因為電能的傳輸十分方便，而且電能又很容易轉變成其他各種好用的能量。發電廠

產生的高壓電需經過電力網路輸送到各用戶。為了降低在傳輸過程中損失電能，就需利用變壓器將電壓提升到約三十五萬伏特。因為這樣一來，即可以用較低的電流來傳送電能，來達到降低熱耗損，提高電能傳輸效率的目的。經過數次降壓，這些高電壓的電能降至 110 伏特或是 220 伏特供一般用戶使用（圖 7-23）。

▼圖 7-23 電能由發電廠至用戶端的傳輸過程。



極注重引擎效率之提升、減低空氣阻力、減低汽車重量（在不影響安全情況下），來有效利用汽油。此外油電混合使用的設計也是當前車輛發展的新趨勢（圖 7-24）。

3. 汽電共生系統不但具有較高的環保功能，也能有效節能。目前的汽電共生系統可以再利用回收廢熱來發電，不但節能而且具有較高的環保功能。

圖7-24 油電混和車的運作原理



們可以著力之處。例如：建築物在設計時就應注意通風、採光，以便減少冷氣及電燈的使用。又如以省電燈泡來取代愛迪生（Thomas Edison，1847—1931，美國人）在1879年發明的白熾燈泡，像LED燈具，其耗電量只有白熾燈泡的八分之一。當然隨手關燈、少乘電梯等也是輕易就可以節約能源的方法。

三、再生能源

再生能源所指的是那些在**較短時間內能夠自然再生**的能源，如：**太陽能、風能、水力能、潮汐能、生質能**等。化石燃料（如煤、天然氣、石油）以及核燃料（如鈾）皆需長時間才能產生，所以不是再生能源。**地熱**雖然不符合上述定義，但平常也被看待成一種再生能源。目前人們已積極地設法利用各種再生能源，例如：太陽能熱水器已是技術成熟且商業化的產品，而風力發電、太陽能發電、潮汐發

電、地熱發電等也是可行的發電技術(圖 7-25)。和化石燃料與核燃料相比，再生能源是較乾淨、低汙染的能源，就生態與人類永續發展的角度而言，是必須重視的能源。



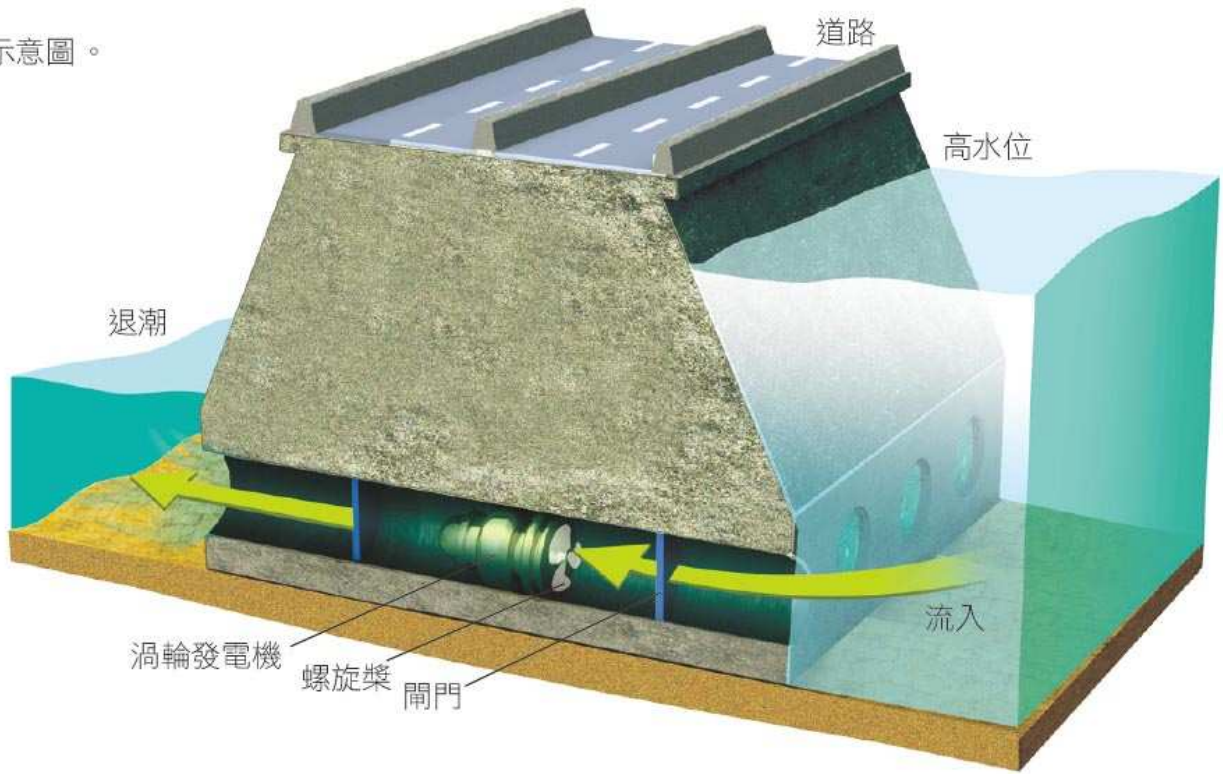
是非題

()核能是一種再生能源。

▼圖 7-25 不同類型的再生能源的發電裝置。



d 潮汐發電示意圖。



第一節

能量的形式

1. 能量的形式主要有力學能、熱能、電磁能、光能、化學能、核能等。
2. 對一物體施加一固定的外力 F ，且在施力的方向上有了位移 S ，則外力對此物體作功 $W = F \times S$ ，功的 SI 單位是牛頓·公尺，又叫做焦耳(J)。
3. 一個質量為 m 、速度為 v 的物體，具有動能
$$K = \frac{1}{2}mv^2。$$
4. 質量 m 的物體，距地面高度 h ，地表重力加速度 g ，則其重力位能 $U = mgh$ 。
5. 物體的熱能是其內原子或分子之動能與位能的總和。
6. 電磁能包括電能與磁能。電能可以看成是儲存於電場中的能量。磁能則是儲存於磁場中的能量。

1. 各種形式的能量彼此之間可以互相轉換。
2. 焦耳最早找出熱能與力學能的轉換關係：1 卡的熱量 = 4.186 焦耳的能量。
3. 對於一封閉系統來說，各種形式能量的總和是守恆的，稱為能量守恆律。
4. 質量與能量是等效的，在核反應中要把靜能量考慮進來，能量才是守恆的。
5. 原子核內儲存的能量即是核能。當核分裂或熔合時，若減少的質量為 m ， c 為光速 3×10^8 公尺/秒，則依愛因斯坦質能轉換關係式會釋放出核能 $E = mc^2$ 。

第三節

核能

1. 一個鈾原子被一個中子撞擊後會產生 2 到 3 個中子，這些中子可再撞擊其他的鈾原子，再次產生核分裂，這樣持續下去就形成核分裂的連鎖反應。
2. 核衰變可放出 α 射線（氦原子核）、 β 射線

- (電子) / 射線 (高頻電磁波)
3. 幾個輕原子核聚在一起，形成一個重原子核的過程，稱為核融合。

第四節

能量的有效利用與節約

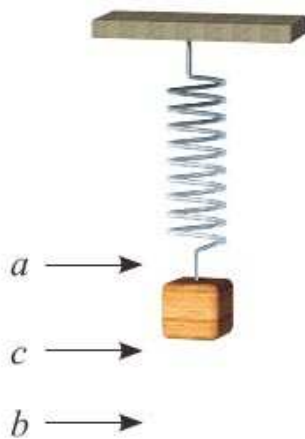
1. 地球上石油、天然氣等能源的蘊藏量是有限的，長期使用下來，必然出現匱乏的問題。
2. 要減緩能源匱乏的問題，必須發展再生能源，同時不浪費各種能源，資源也要盡量回收再利用。

一、基本題

第一節

能量的形式

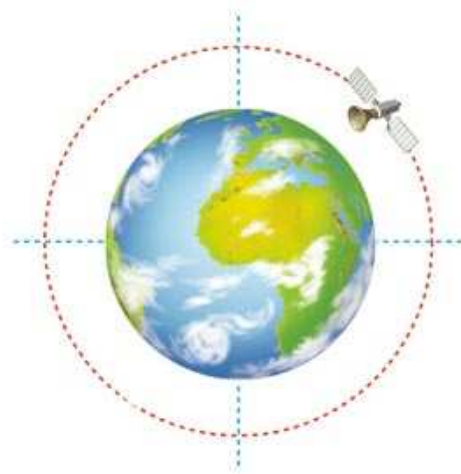
1. 如圖所示，一鉛直懸掛的彈簧下端繫一物體，由彈簧原長度釋放。在彈簧的彈性力和地球引力的作用下，物體鉛直上下振盪。 a 、 b 二點分別為物體運動時的最高和最低位置，而 c 為 a 、 b 的中點。
- (1) 當物體由 a 往 b 運動時，彈性力與重力對物體作正功或負功？
- (2) 當物體由 a 往 b 運動時，系統的重力位能和彈性位能如何變化？



2. 中華二號衛星於 2004 年 4 月發射升空，它

的質量約為 3000 公斤，高度約為 390 公里。在繞地球軌道上運行的速率約為 7.4×10^3 公尺 / 秒，如圖。試問

- (1) 中華二號衛星在地球軌道上的動能為多少？
- (2) 中華二號衛星在發射升空的過程中，萬有引力對衛星有作功嗎？
- (3) 中華二號衛星繞地球作圓周運動的過程中，萬有引力對衛星有作功嗎？



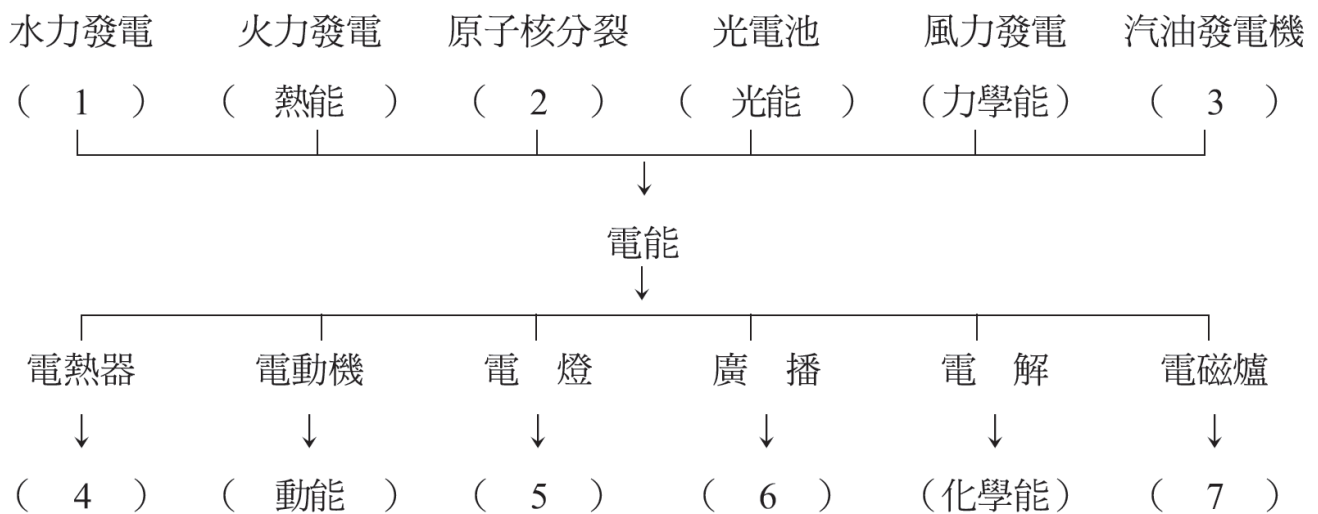
3. 下列何種物質的溫度最高？ (A) 溫度為 0°C 的冰 (B) 溫度為 300 K 的水 (C) 溫度為 100°C 的水蒸氣 (D) 溫度為 200 K 的氫氣 (E) 溫度為 200°C 的鍋子。

第二節

能量的轉換與守恆

上。假設落差之間水流連續，且落差上下的水域寬廣，水流近似靜止。若鮭魚最大游速為 2.8 公尺 / 秒，且不計阻力，則鮭魚能夠逆流而上的最大落差高度為何？（設重力加速度 g 為 9.8 公尺 / 秒²）

5. 下列是電能的各種轉換情況，請在括號內填入適當的答案。



6. 如圖所示，水上遊樂區的水池上面，架設有高度相等的甲和乙兩個斜面滑梯水道。小明和小華分別自甲、乙水道的頂端自由下滑入池，所花的時間分別為 $t_{甲}$ 和 $t_{乙}$ ，剛入池時的速率分別為 $v_{甲}$ 和 $v_{乙}$ 。若摩擦力可忽略，試問

(1) 兩人入池的速率大小關係為何？此速率

和兩人的體重為關係？

(2)兩人所花的時間大小關係為何？



7. 高空彈跳者一躍而下，繩索伸長到最大長度時將彈跳者往上拉回，接著彈跳者又落下，然後再被繩索拉回，接連重複數次。在這彈跳過程中，下列何種能量轉換最不可能發生？ (A)彈性位能轉換為重力位能 (B)彈性位能轉換為動能 (C)重力位能轉換為動能 (D)動能轉換為重力位能 (E)阻力產生的熱能轉換為動能。〔101年學測〕

第三節

核能

8. 參考(圖 7-20)日常生活中所接受的輻射劑量，根據此圖，
- (1)照一次胸部 X 光的輻射劑量為何？

量，約相當於照幾次 X 光的輻射劑量？

9. 如圖為全世界共同使用的輻射示警標誌，不論是工廠、醫院、研究室、儀器室、倉庫等，任何有人為輻射的場所，其外圍及大門或會產生輻射的儀器設備，都需張貼這個標誌，以提醒所有的人要注意輻射的存在與自身的安全。請問下列哪些器材或物品應張貼這個標誌？（多選） (A)X 光檢查室 (B)鈷 60 癌症治療室 (C)核廢料的儲存桶 (D)工廠內 γ 射線產品檢測室 (E)食品工廠食物保存的輻射照射室。



10. 若核熔合能用來發電，則它和核分裂比較具有哪些優點？（多選） (A)一般核熔合所釋放的核能大於核分裂 (B)核熔合可以直接產生光能 (C)核熔合不產生高放射性核廢料 (D)核熔合比核分裂容易發生 (E)核

充足。

11. 利用核能發電時，假定核反應過程中減少了 1 公克的質量，且產生的能量全部轉換成電能，則可以產生多少度電能？（已知光速為 3×10^8 公尺 / 秒，1 度電能 = 1 千瓦·小時）

第四節

能量的有效利用與節約

12. 下列何種能源屬於再生能源？（多選） (A) 太陽能 (B) 風能 (C) 水力能 (D) 生質能 (E) 煤炭與石油。
13. 關於能源的有效利用與節約，我們應該如何開源與節能？
14. 「再生能源」是指在較短時間內能夠自然再生的能源，如：太陽能、風能、水力能、潮汐能、生質能等，它大約占了全球總耗用能量的五分之一。下列與可再生能源有關的敘述，何者錯誤？ (A) 太陽輻射的能量是由其內部的核能轉換而來 (B) 再生能源如：日光，具有不會提高 CO_2 排放量的優點 (C)

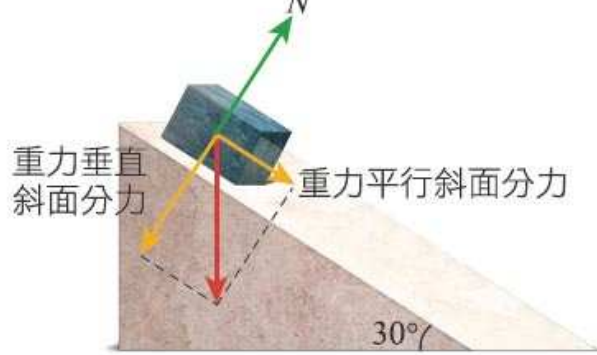
太陽能電池是一種直流電源，可將太陽光能直接轉換為電能。(D)潮汐所以能提供能量，完全源自地球對海水的重力作用，與其他星球無關。〔98年學測修改〕

二、進階題

第一節

能量的形式

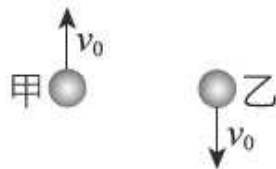
15. 如圖所示，一光滑斜面 and 水平面成 30° 角，今有質量為 1 公斤的物體，由靜止開始，沿著斜面下滑 2 公尺的距離，就整個運動過程而言（設重力加速度 g 為 9.8 公尺 / 秒²），試問
- (1) 重力垂直於斜面的分力，共作了多少焦耳的功？
 - (2) 重力平行於斜面的分力，共作了多少焦耳的功？
 - (3) 正向力 N （垂直斜面之作用力）共作了多少焦耳的功？



第二節

能量的轉換與守恆

16. 質量相等的甲、乙兩顆鐵球，由相同高度以相同速率拋出，但甲球向上，而乙球向下，如圖所示。若不計空氣阻力，則
- (1) 甲、乙兩球落地過程的加速度比為何？
 - (2) 甲、乙兩球落地時，減少的重力位能之比為何？
 - (3) 甲、乙兩球落地時的動能比為何？



17. 溫度與質量均相等的兩個相同金屬塊，以相同速率對撞後靜止，假定這個過程損失的動

溫度會上升 ΔT 。已知 $\Delta T \propto \frac{\text{熱能}}{\text{總質量}}$ ，現在考慮下面兩種情況

(1) 若金屬塊質量同時加倍，而其他條件不變

(2) 若金屬塊碰撞速率同時加倍，而其他條件不變

在上述兩種情況中，金屬塊溫度上升量為何？

第三節

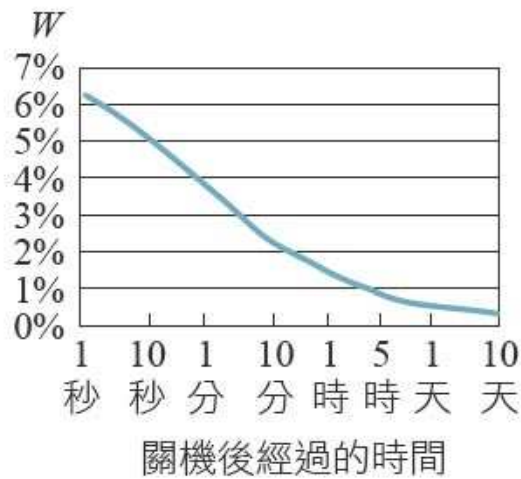
核能

18. 鈾 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 受到慢中子的撞擊而產生分裂，有一種可能反應如下式：

${}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{38}^a\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{Xe} + 2{}_0^1n + \text{能量}$ 。假設此反應滿足質量數與電荷數守恆，則式中的 a 、 b 所代表的數字為多少？

19. 核能發電反應機組停機後，核分裂連鎖反應會停止，但是反應後的產物仍具有放射性，也會持續產生餘熱而造成高溫。若停機後的

為 P ，以 $\frac{P_r}{P} = W$ 為縱軸，則其隨時間改變的曲線如圖所示。假設核電廠某一機組正常發電功率為每小時 64 萬度，而某用戶每個月用電度數為 320 度，則停機經過一天後，該時的餘熱用來發電一小時的電能，與該用戶用電約多久時間的電能相等？ (A)3 小時 (B)3 天 (C)30 天 (D)300 天 (E)3000 天。〔102 年學測〕



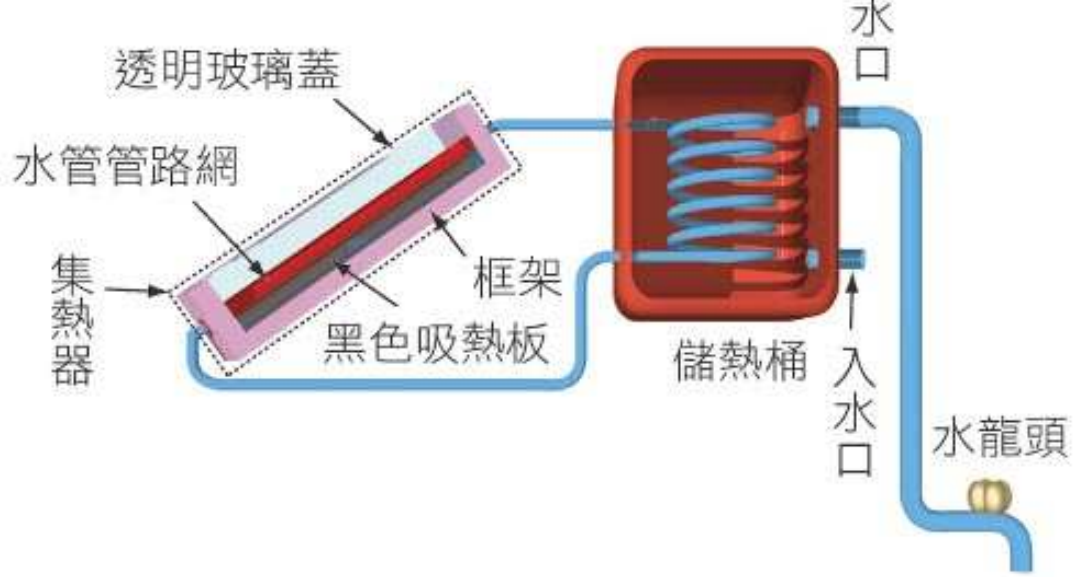
第四節

能量的有效利用與節約

20. 在日照充足的地方，有些房子的屋頂裝置有太陽能熱水器，如圖為其側視圖。其主要構造有集熱器和儲熱桶兩部分。陽光穿過集熱

品的邊界及增益。對上黑色的金屬吸熱板，吸熱板吸收了太陽輻射熱能，經由板上水管管路內的水，將熱傳輸至儲熱桶，加熱桶內的水。儲熱桶的熱水出水口，有水管接至屋內的水龍頭，打開水龍頭就可以用桶內的熱水。根據上述，試問

- (1)若此集熱器的吸熱板面積為 2.0 平方公尺，日照充足時，平均每 1.0 平方公尺接收到的太陽能為每秒 1000 焦耳，則此集熱器接收到的太陽能功率為多少千瓦特？
- (2)若此太陽能熱水器的效率為 60% ，儲水桶的容量為 300 公升，則日照 2.0 小時後可使桶中的水溫上升多少？（水的比熱為 4.2 千焦耳 / 千克·攝氏度）



21. 科技的進步，大幅改善人類的的生活，但也過度耗費了物質和能量，造成空氣汙染，嚴重危害環境。由於地球的資源是有限的，因此人類如何生活才能永續發展，成為大家必須面對的課題。其中維護環境、開發能源與能源的有效利用，各國努力尋找再生能源，我國也不例外。國內的地理條件，使潮汐發電、洋流發電與太陽能發電的使用受限，但其他再生能源技術則頗有效益，例如抽蓄水力發電，就是利用離峰時間的多餘電力，將水抽蓄至較高處的方式，以儲存能量，再供尖峰時間使用。位於南投縣的明潭抽蓄水力發電廠以日月潭為上池，以水里溪河谷為下池，利用兩池之間約 400 公尺的水面落差，進行抽蓄水力發電，供應臺灣尖峰電力需求，由於下池蓄水量極為豐沛，上下池水面落差可視為定值。水力發電機組的總容量為 2×10^9 瓦特，是世界上巨型抽蓄水力發電廠之一。〔100 年學測修改〕

- (1)下列哪三項為目前台灣已經作為高峯使用的再生能源？（應選 2 項） (A)核能發電 (B)潮汐發電 (C)風力發電 (D)海流發電 (E)水力發電
- (2)在抽蓄水力發電過程，涉及三種能量的轉換：電能，動能，位能。請寫出這三種間的轉換順序？
- (3)以明潭抽蓄水力發電廠為例，假設每天的離峰時間為 5 小時，離峰時的多餘電力功率為 1×10^8 瓦特，且該電力可完全用於作功將水抽蓄，則此電廠每天可將多少立方公尺的水從下池抽到上池？（重力加速度的量值為 $10 \text{ 公尺} / \text{秒}^2$ ，水的密度為 $1000 \text{ 公斤} / \text{公尺}^3$ ）

解答

- (1)彈性力對物體作負功、重力對物體作正功；(2)彈性位能增加、重力位能減少。
- (1) 2.2×10^{10} 焦耳；(2)有；(3)沒有。
- (E)。4. 0.40 公尺。

5. (1)化學能，(2)核能，(3)化學能，(4)熱能，
(5)光能、熱能；(6)輻射能；
(7)磁能、電能、熱能。
6. (1) $v_{甲} = v_{乙}$ ，無關；(2) $t_{甲} < t_{乙}$ 。
7. (E)。 8. (1)0.1 毫西弗；(2)100 次。
9. (A)(B)(C)(D)(E)。 10. (A)(C)(E)。
11. 2.5×10^7 。 12. (A)(B)(C)(D)。 13. 略。
14. (D)。 15. (1)0；(2)9.8；(3)0。
16. (1)1 : 1；(2)1 : 1；(3)1 : 1。
17. (1) ΔT ；(2) $4\Delta T$ 。 18. $a = 94$ 、 $b = 54$ 。
19. (D)。 20. (1)2.0；(2)6.9 °C。
21. (1)(C)(E)；(2)電能→位能→動能→電能；
(3) 4.5×10^5 。