電力電子學圖鑑

電的原理、運作機制、生活應用……
從零開始看懂推動世界的科技！

森本雅之 著
UNSUI WORKS＋YTI 製作
陳朕疆・譯

THE VISUAL ENCYCLOPEDIA
of POWER ELECTRONICS



前言

2007年，有志之士在「Cool Earth 50」計畫中提出，為了對抗地球暖化，必須開發21種革命性的技術。這些技術中，不僅許多與太陽能發電、電動車等電力電子學領域有關，甚至「電力電子學」本身就被列為其中一項技術。這可以說是宣告了電力電子學時代的到來。

在那之後過了十多年，電力電子學的產品在我們的周遭環境已隨處可見。另一方面，AI與IoT已成為了這個世界的關鍵字，是驅動社會進步的重要技術。這些技術投入市場時，軟體是不可或缺的工具，但光靠軟體並不夠，還需要提供電力，產品才動得起來。而在提供電力時，就會用到電力電子學。譬如要有馬達才能讓機器運轉，而在控制馬達的運轉情況時，電力電子學是不可或缺的知識。由此可見，電力電子學可以說是維持現代生活與社會運轉的必要技術。

雖然電力電子學如此重要，但就連電學專家也常覺得「電力電子學很難，根本看不懂」。我認為這是因為，從以前開始，電力電子學就沒有建立起一套完整的技術或學問體系。隨著整體社會的發展，為了製造出更好的產品，技術也會一直革新。所以即使學生們閱讀過去的專業書籍或教科書，也很難跟得上現實中的電力電子產品。

在這樣的背景下，我以「讓不是電學專家的人們，也能理解電力電子學」為目標，寫下了這本說明電力電子學的書籍。為了讓覺得「不知道電學在講什麼」、「電又看不到，根本沒興趣」的人們理解電力電子學，我會從與電力電子有關的電學基礎開始，一直到實際的應用，盡可能地仔細說明一切相關學問。

如果本書能讓更多人瞭解電力電子學是什麼，並進一步喜歡上電子電力學，那會是我至高的榮幸。

2020年10月

森本　雅之

目　次

第 0 章　電力電子學究竟是什麼？

0-1　電力電子學與電子學有什麼差別？
電力電子學的核心在於電力的控制 2

0-2　電力控制與能量控制
將電力轉換成熱能、化學能、動能 4

0-3　電力電子學有什麼用途？ 日常生活中的電力電子學 6

0-4　與電力電子學有關的人們 從一般人到專家 8

第 1 章　直流與交流、電壓與電流（電力的基礎）

1-1　電流 電子的移動會形成電流 12

1-2　電動勢與電壓 電流由電動勢驅動 18

1-3　電流與電壓的關係 歐姆定律就是如此美妙 20

1-4　電阻與電阻率 電阻表示電流流過的難度！ 22

1-5　電流的三大效應 電能應用的基礎 24

1-6　神奇的磁力 介紹磁場、磁通量、永久磁石的基礎 26

1-7　直流與交流的差異 兩種不同的電流流動方式 30

第 2 章　線圈與電容（電路的基礎）

2-1　線圈內的電流 累積能量 36

2-2　電磁感應 以磁力催發出的電力 38

2-3　電感 表示感應電動勢的大小 40

2-4 操控線圈的能量
以 ON／OFF 使線圈累積／釋出能量 44
2-5 電容 運用絕緣體製作巧妙的機關 46
2-6 於線圈與電容上施加交流電壓
重點在電壓與電流方向的差異 50
2-7 電抗與阻抗
以頻率改變電流流過的難度 52
2-8 以阻抗表示交流電路 用虛數表示會方便許多！ 54
2-9 交流電的功率 想知道真正的功率 56

第 3 章　電力電子的基礎

3-1 開關模式電源 快速切換調整電壓 60
3-2 線圈的功能 製造出平滑電路以防止電流中斷 62
3-3 電容的功能 降低電流的漣波 66
3-4 降壓截波器 降低電壓的基本電路 70
3-5 升壓截波器 提升電壓的基本電路 74
3-6 DC-DC 變換器 改變直流電電壓 80
3-7 逆變器 將直流電轉換成交流電 86

第 4 章　功率元件的運作機制

4-1 理想開關與半導體開關 理想與現實的差異 94
4-2 功率元件是什麼 以小控制大 96
4-3 二極體與閘流體 使電流單向通行的方法 98
4-4 雙極性電晶體 關鍵在三層結構與基極 100

4-5 功率 MOSFET 以電壓控制電路 102
4-6 IGBT 最常看到的功率元件的運作機制 104
4-7 不同功率元件的用途
分別用於控制電壓、電流、動作速度 106
4-8 功率元件的冷卻 若不冷卻就無法繼續使用 108

第 5 章　電力電子學的主角「逆變器」

5-1 二極體與電容 瞭解逆變器的電路 112
5-2 三相逆變器 星形或三角形 116
5-3 交流電的頻率與相位 再次說明交流電的基礎 122
5-4 PWM 控制 把方形變成圓形 126

第 6 章　逆變器的使用方式

6-1 用電分項 哪個東西用了多少電 132
6-2 以逆變器驅動馬達 節能與逆變器間的密切關係 134
6-3 各種馬達 交流馬達、直流馬達 138
6-4 直流馬達 首先複習一下馬達的基礎知識 140
6-5 交流馬達 使用三相交流電的馬達 144
6-6 感應馬達 使用旋轉磁場的馬達 146
6-7 同步馬達 低轉速高效率的馬達 150
6-8 無刷馬達 以電力電子學控制的無刷馬達！ 152
6-9 向量控制 活用弗萊明左手定則 154
6-10 電力調節器 把逆變器當作交流電源 156

6-11 PWM 變換器 把逆變器當作整流電路 158

第 7 章　家庭中的電力電子

7-1 冷氣 最貼近我們的電力電子學 162
7-2 冰箱 運用電力電子學來智慧節能 164
7-3 洗衣機 用逆變器降低音量並維持高轉速 166
7-4 吸塵器 用逆變器製造氣旋 168
7-5 微波爐 用電力電子學任意改變加熱輸出 170
7-6 IH 用渦電流做料理！ 172
7-7 照明 運用電力電子學點燈 174
7-8 AC 配接器與充電器 看起來很像其實大有不同 176
7-9 資訊傳輸裝置、影像播放裝置 支撐著敏感複雜的 ICT、IoT 178
7-10 家用太陽能發電與能量農場
沒有電力電子學就無法成立 180
7-11 HEMS 與智慧電網 管理家庭內的能源 184

第 8 章　交通工具與電力電子學

8-1 鐵道車輛 鐵道是電力電子學的優等生 190
8-2 新幹線 走在電力電子學的尖端 194
8-3 線性馬達車 把轉子變成定子！ 196
8-4 電動車 運用電力電子原理開發出的電動車 200
8-5 油電混合車 減少能量浪費的運作機制 206
8-6 引擎車的電力電子學 汽車可以說是功率元件的結晶 212

8-7 船與飛機 未來將改以電力驅動 214
8-8 其他交通工具 現今各種採用電力驅動的工具 216

第 9 章　電力系統的電力電子學

9-1 頻率變換設備 從 60 到 50、從 50 到 60 220
9-2 無效電力調整 支撐供電的機制 222
9-3 諧波 畸變波的原因 224
9-4 直流供電 海底電纜是直流供電 226
9-5 風力發電 蒐集風力 228
9-6 調整電力需求 為了蓄積電力而下的工夫 230
9-7 蓄電系統 調整需求的王牌 232

第 10 章　製造業的電力電子學

10-1 加熱的電力電子學 有效率地運用熱能 236
10-2 「創造」與「削減」的電力電子學 細微調整就交給它 240
10-3 工廠自動化的電力電子學 自動化的機制 244
10-4 工廠設備的電力電子學 現在幾乎都是電動 246

第 11 章　社會生活的電力電子學

11-1 日常生活與電力電子學 沒有電力的話就無法生活 250
11-2 自來水 以電力電子學實現節能 256
11-3 天然氣、焚燒垃圾 壓縮機與鼓風機 258
11-4 區域供熱供冷系統 實現熱電共生 260

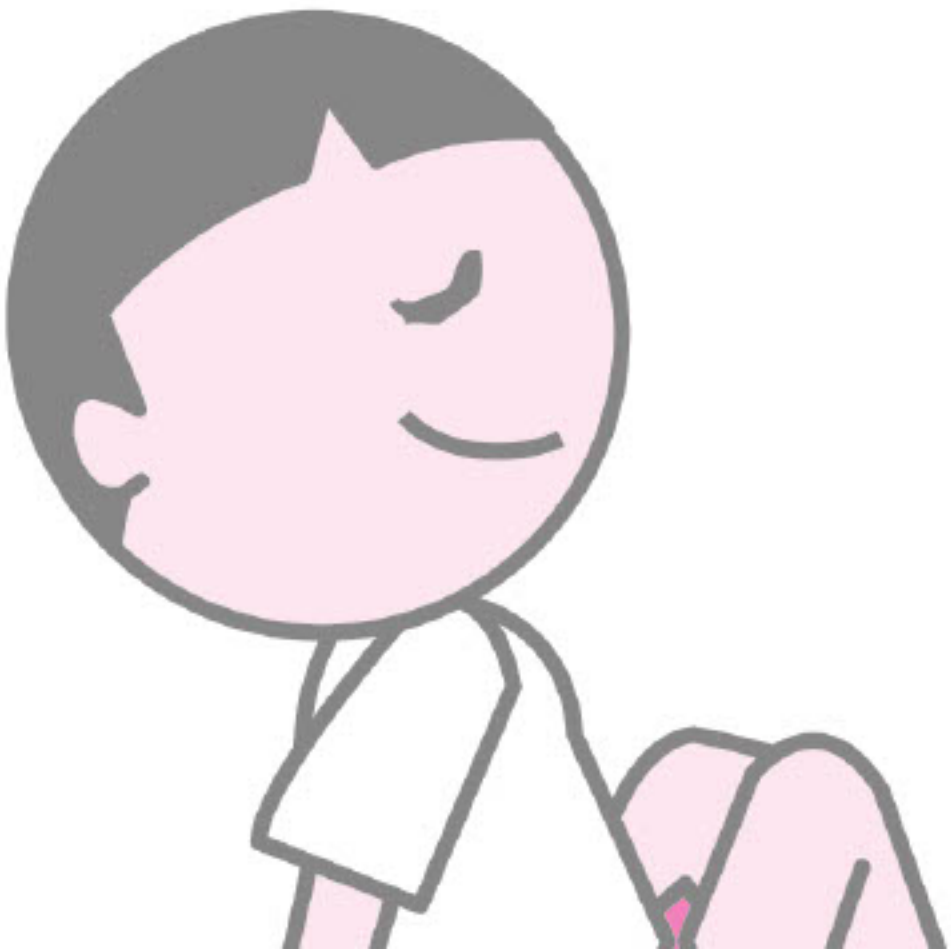
11-5　通訊、資訊處理 需要穩定供電 262
11-6　寬能隙半導體
　　備受期待的非矽半導體 264
11-7　智慧社會 透過電力電子實現的「智慧」社會 266

索　引 268

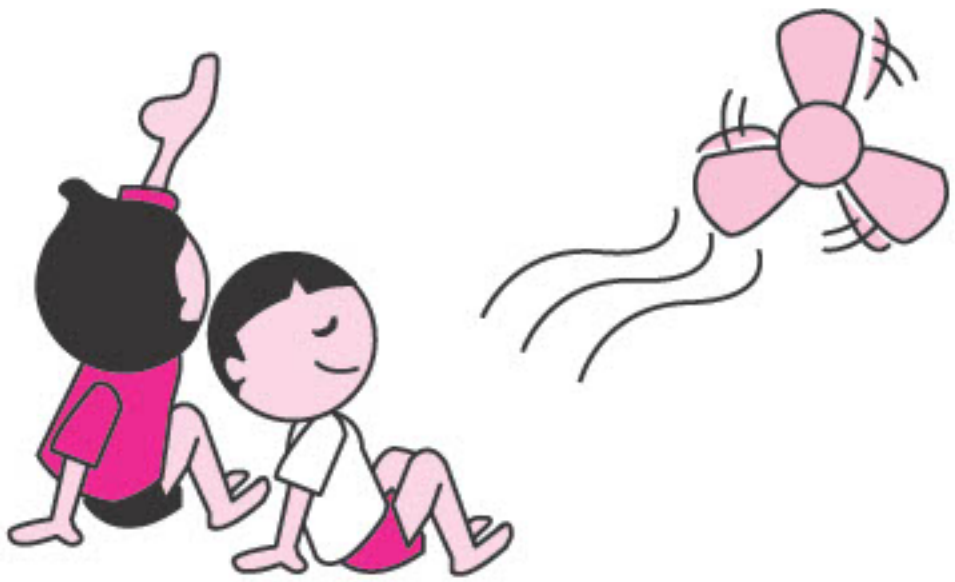
【Power Up!!】

RL 串聯電路的暫態現象 45
電力變換 65
開關切換頻率與耳朵 85
半導體是什麼 103
單相三線制交流電 115
瞭解什麼是相位 125
黑與白 186
停電以外的電源異常 187
電車搭載的電力電子學機器 193
交流／直流競爭 211
再生～以馬達運轉的機器之特徵～ 243

Cool Technology !



第0章　電力電子學究竟是什麼？



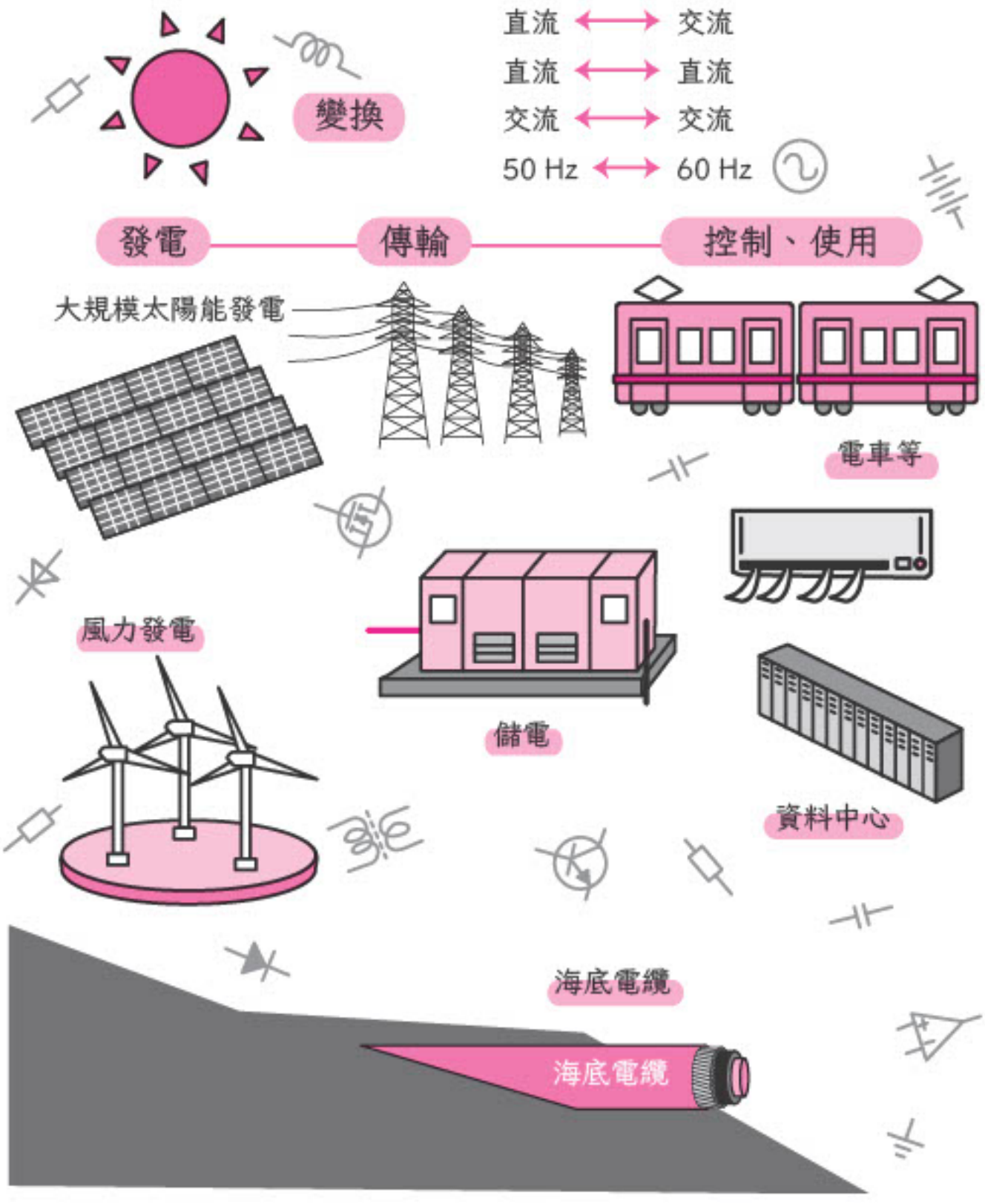
0-1

電力電子學與電子學有什麼差別？



～電力電子學的核心在於電力的控制～

用英文來解說的話，電力電子學的英文為power electronics。electronics指的是「電子學」，power則是指「電力」，所以power electronics就是「與電力有關的電子學」。



電力電子學是什麼

電子學（electronics）…以電子進行通訊、訊號處理、資訊處理、控制機械的學問。主要用於處理資訊。

電力電子學的定義

- **電力電子學**是處理高電壓、大電流（**強電**）的電子學。
- 處理強電時，常需進行電力的變換與控制。



變換與控制電力的「技術」

電力電子學與電子學的差異

	電力電子學 power electronics	電子學 electronics
領域、分類	電力工程學 **強電**※ 電能傳輸 將電能轉換成 其他形式的能量 進一步利用	電子學 **弱電**※ 將電訊號用於 通訊、控制、資訊處理 等領域
電壓	高電壓	低電壓 （多在 30V 以下）
電流	大電流	微小電流 （mA 以下，通常為 μA）
用途	改變龐大電力的 形式、以電力驅 動物體、加熱、冷卻等， 著重在電能的應用技術	以電訊號進行 觀察、收聽、計算、 顯示、處理、傳輸、測量， 著重在電訊號的運用技術

※強電、弱電為俗稱

電力電子學／電子學的差異

0-2

電力控制與能量控制

～將電力轉換成熱能、化學能、動能～

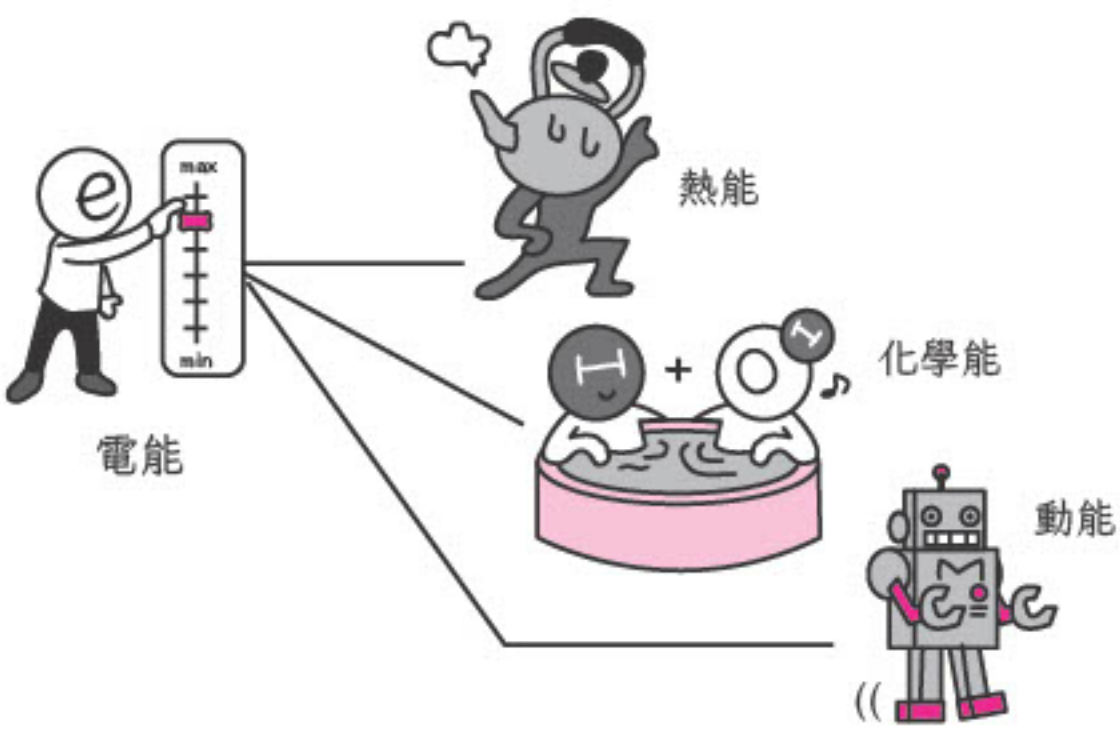


許多人對電力電子學的印象是「電力變換」。**電力變換**意思是改變電力的形式。確實，電力電子學會以變換電力的方式來控制電力（參考第65頁）。而受到控制的電力，會被轉換成電能或其他型態的能量，再進一步利用。

由電力轉變成三種型態的能量！

- 我們會在第1章中詳細介紹電流的三種效應，並以此說明電能如何轉換成以下三種型態的能量。

  而在將電能轉變成其他能量時，控制電力型態（交流或直流）、電流、電壓的過程，也叫做「控制電能」。



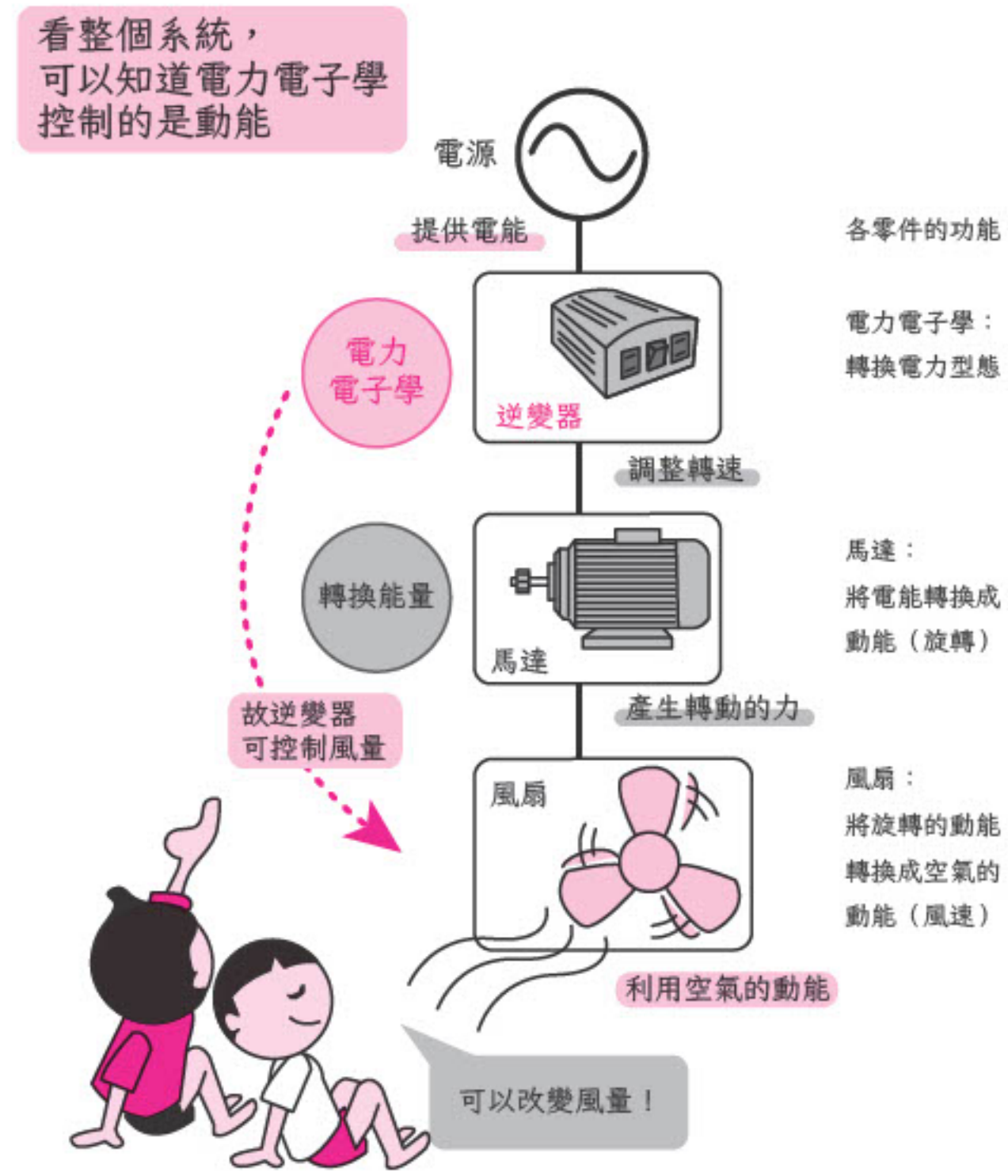
將電能轉換成三種能量

電能（electric energy）…以電力作的功。電流或電荷所擁有的能量。日語中也叫做**電力量**。

熱能（thermal energy）…原子或分子的熱運動造成的物質內部能量。

控制著各種能量的電力電子學

■舉例來說，調節風扇的風量時，我們可以說電力電子學是在控制馬達的轉速。但如果看整個系統，可以說電力電子學控制的是電能，再藉此「控制動能」，也就是風扇的風速。



以電力電子學控制風量

化學能（chemical energy）…儲存在物質化學鍵中的能量。化學反應時可釋出或吸收化學能。
動能（kinetic energy）…伴隨著物體的運動而出現的能量。是**力學能**的一種。

0-3

電力電子學有什麼用途？



～日常生活中的電力電子學～

電力電子學是使用電能時會用到的學問。雖然我們只要把插頭插進插座，就能使用電能，但這些電能並非從天而降。電力公司發電後，需經過各種電力電子元件的調控再送到各個家庭，才能穩定提供這些電能。
所以說，電力電子元件可以說是在暗處「默默地」工作著。

將電力轉變成方便使用的形式！

- 電力公司的各種設施、太陽能發電、電池等蓄電裝置，都需要電力電子機器的調控。
- 工廠的機械設備、機器人、搬運車也需要電力電子元件才能運作。
- 包括住宅區的天然氣、自來水水泵在內的各種「基礎建設」設備，都會用到電力電子元件。電氣化火車、電梯、電動車也需要電力電子元件才能運轉。
- 另外，家中照明、冷氣、洗衣機、PC……各種會用到電的機器也都需要電力電子元件控制。AC配接器與手機充電器等，也都會用到電力電子元件。



各式各樣的電力電子元件

蓄電（storage）…儲存電力備用的行為。增加蓄電的過程叫做充電，釋放蓄電的過程叫做放電。

基礎建設（infrastructure）…生活或工業上必須的建設，是社會的基礎。政府為了提升公共利益，會建造各種基礎建設供人民使用。

－電力電子元件的24小時－



24 小時都會用到電力電子元件

0-4

與電力電子學有關的人們

～從一般人到專家～



就像「有人坐轎，也有人扛轎」一樣，電子電力學的相關人士非常多。換言之，電力電子學是範圍相當廣的技術。

所有人都與電力電子學有關

- 在電力已被視為理所當然的現代，電力電子元件也與每個人息息相關，甚至可以說「用電＝使用電力電子元件」。
- 與電力電子元件有關的人們之中，最多的是間接使用者。即使我們平常不會特別注意，但幾乎所有人每天都會用到電力電子元件。

使用電力電子元件的人們

- 直接操作電力電子機器的人，可以說是最接近電力電子學的使用者。
- 操作釣魚竿捲線器、操控電動車等，也是在操作電力電子機器。
- 這些人多半不會覺得自己在「利用電力電子元件」，而是覺得自己在「操作機器」。



操作電力電子元件的人們

直接使用電力電子元件本身的人們

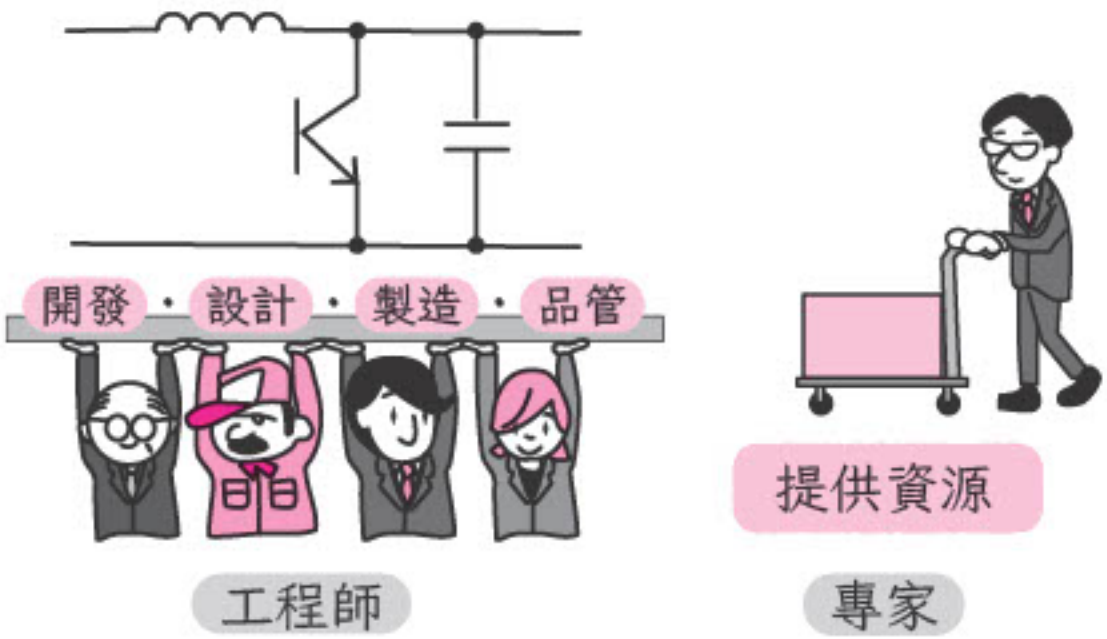
- 工程師們會自覺到自己正在使用電力電子元件，也能將各種產品組合成電力電子機器。
- 舉例來說，建置工廠設備時，會購入許多電力電子元件，組裝成需要的設備。
- 一般的工程師就算不曉得電力電子機器的內部結構，至少也知道「電力電子元件有什麼功用」。
- 編寫電力電子機器用的系統軟體的工程師，也是電力電子元件的使用者之一。

製造業的工程師

- 製造業的工程師也常間接接觸到「電力電子元件」。也就是說，除了電力電子工程師以外的其他工程師，也會接觸到電力電子學。
- 如果沒有半導體，電力電子產品就不會動。
- 半導體領域中的**功率元件**，指的就是「與電力電子學有關的半導體」。
- 除了半導體之外，我們也可以用線圈等電子零件、各種機械零件與材料，製造出電力電子機器。

電力電子學的專家

- 與電力電子機器的開發、設計、製造、品管等領域直接接觸，或提供相關技術的人，可以被稱為「電力電子學的專家」。



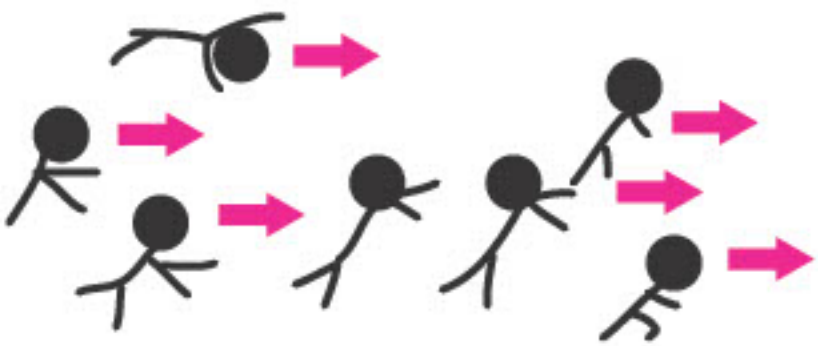
電力電子學的專家

功率元件（power device）…處理高電壓大電流的電力用半導體元件。

Free and Radical.



第1章　直流與交流、（電力的基礎）電壓與電流



1-1

電流

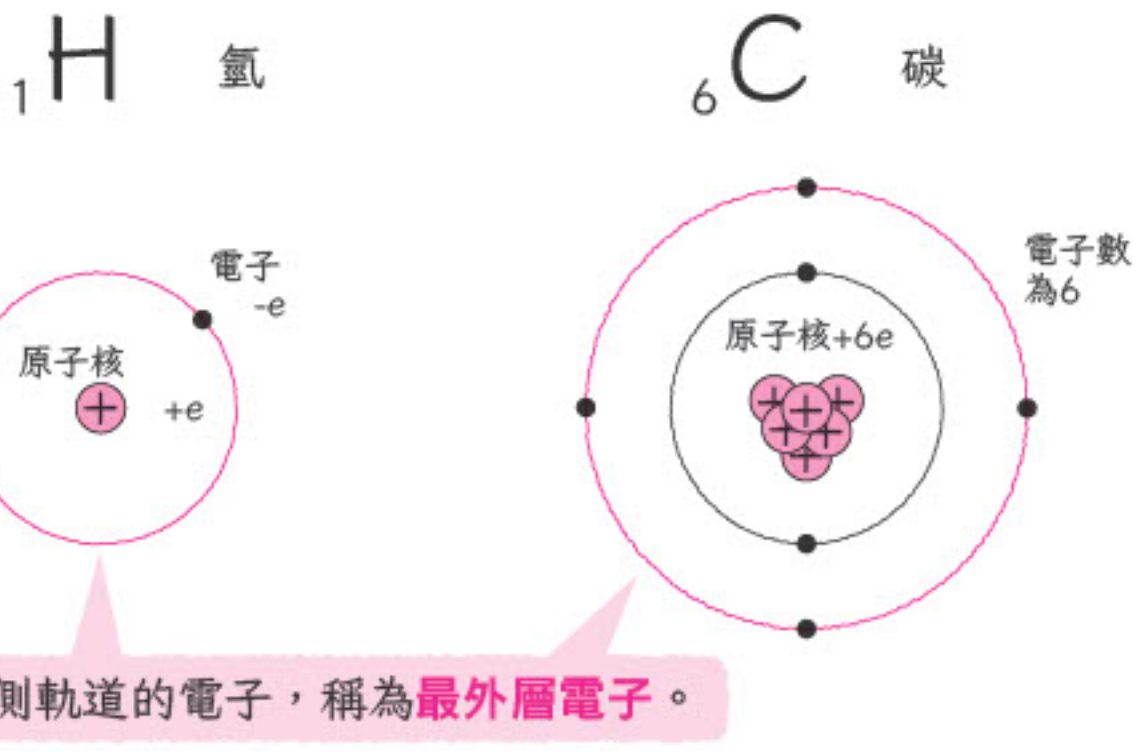
～電子的移動會形成電流～



電子是什麼？

- 要瞭解什麼是電流，必須先知道什麼是電子。
- 所有物質都是原子的集合體。原子的結構由位於中心的原子核，與繞著原子核**公轉**的電子構成。
- 原子核帶正電荷，電子帶負電荷。
- 不同種類的原子，原子核的電荷數就不一樣，繞著原子核公轉的電子數也不一樣。

原子內有許多電子依照既定軌道繞著原子核公轉。



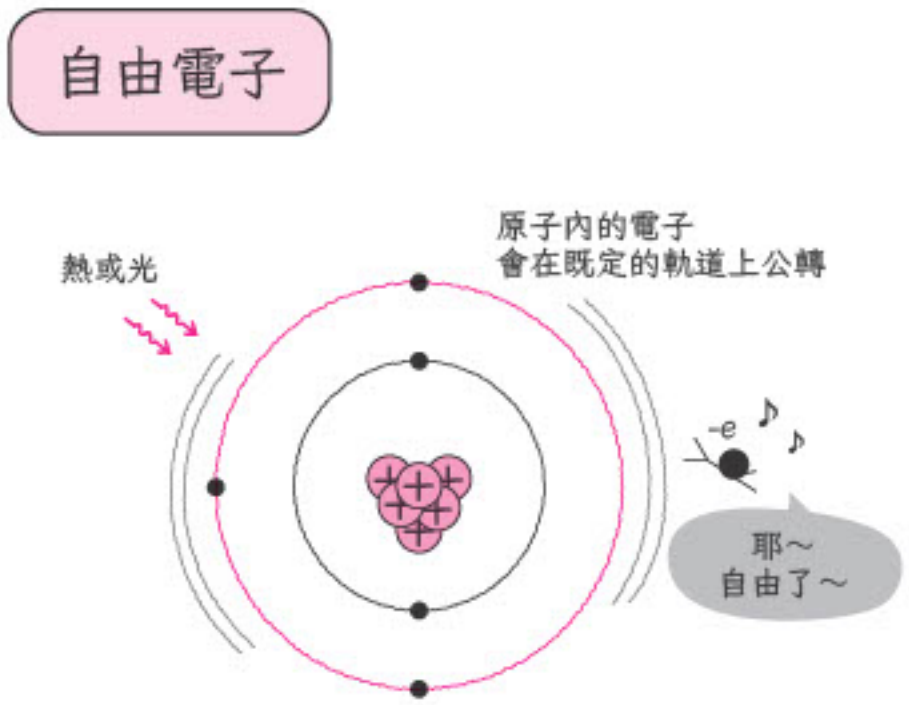
原子核與電子

原子核（atomic nucleus）…位於原子中心，帶有正電荷。由質子與中子構成。

電子（electron）…屬於基本粒子（沒有大小的粒子），帶有電荷。電子攜帶的電量（電荷）為電量的最小單位，稱為基本電量 e。$e = 1.602 \times 10^{-19}$ (C)。

金屬結晶內的自由電子

- 於最外側軌道公轉的電子（**最外層電子**）受原子核吸引的引力最弱。
- 因此，最外層電子獲得些微能量（熱、光）時，就會脫離原本的原子軌道，在金屬結晶內自由移動，稱為**自由電子**。



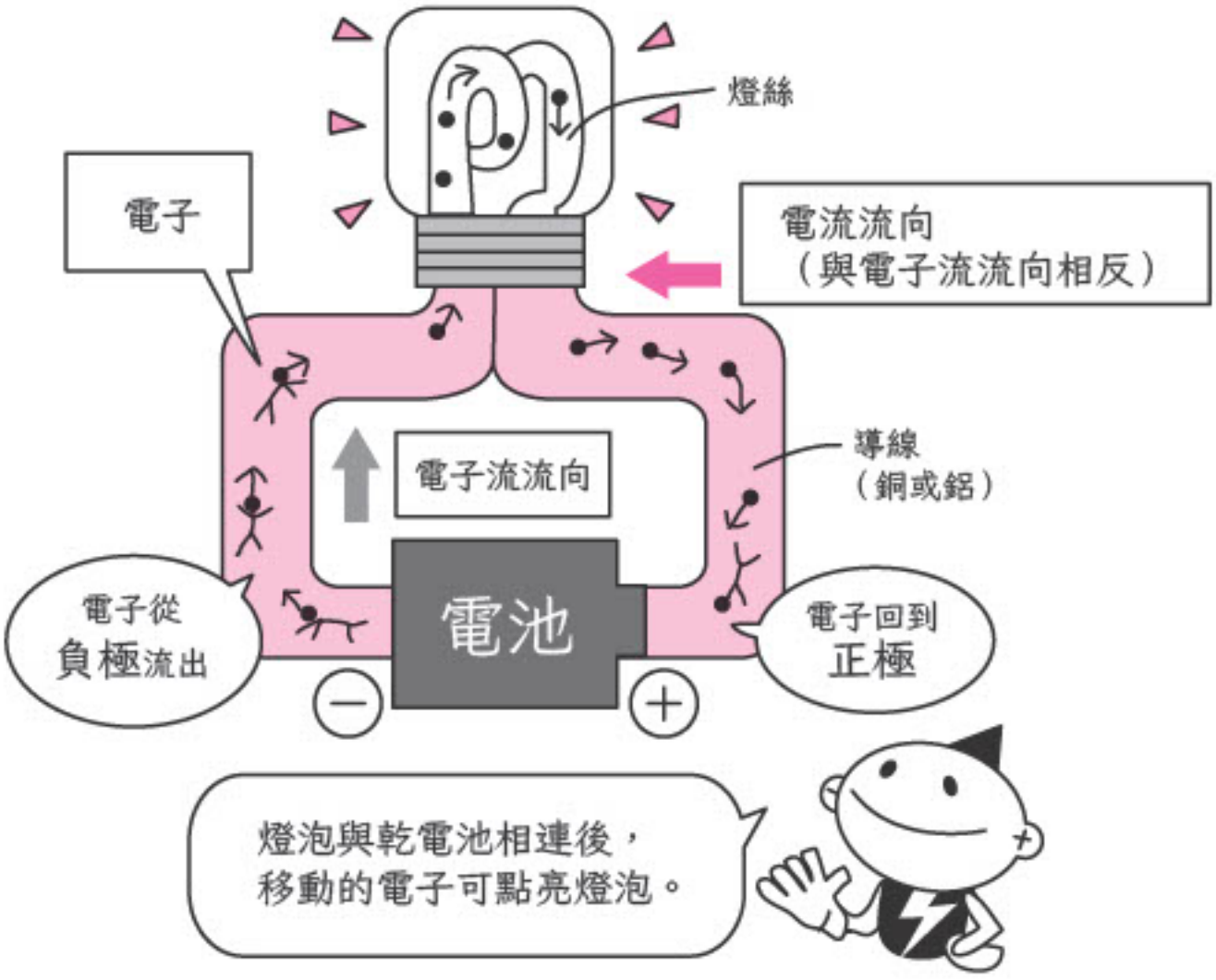
自由電子與金屬結晶

金屬結晶（metal crystal）…自由電子與陽離子的鍵結，稱為**金屬鍵**。金屬結晶內的原子透過金屬鍵連結。

最外層電子（outermost electron）…在距離原子核最遠的軌道公轉的電子。電子只能在原子核周圍的既定軌道上公轉，這些軌道稱為**殼層**。

關閉開關後，自由電子還能自由運動嗎？

- 金屬內部存在自由電子。
- 連接用導線（銅或鋁）為金屬，故內部的自由電子可自由運動。
- 燈泡內部的燈絲（發光部分）是由鎢這種金屬構成，內部的自由電子可自由運動。
- 因此，即使關閉開關，切斷電路，導線或燈絲內部的自由電子仍可「自由」運動。



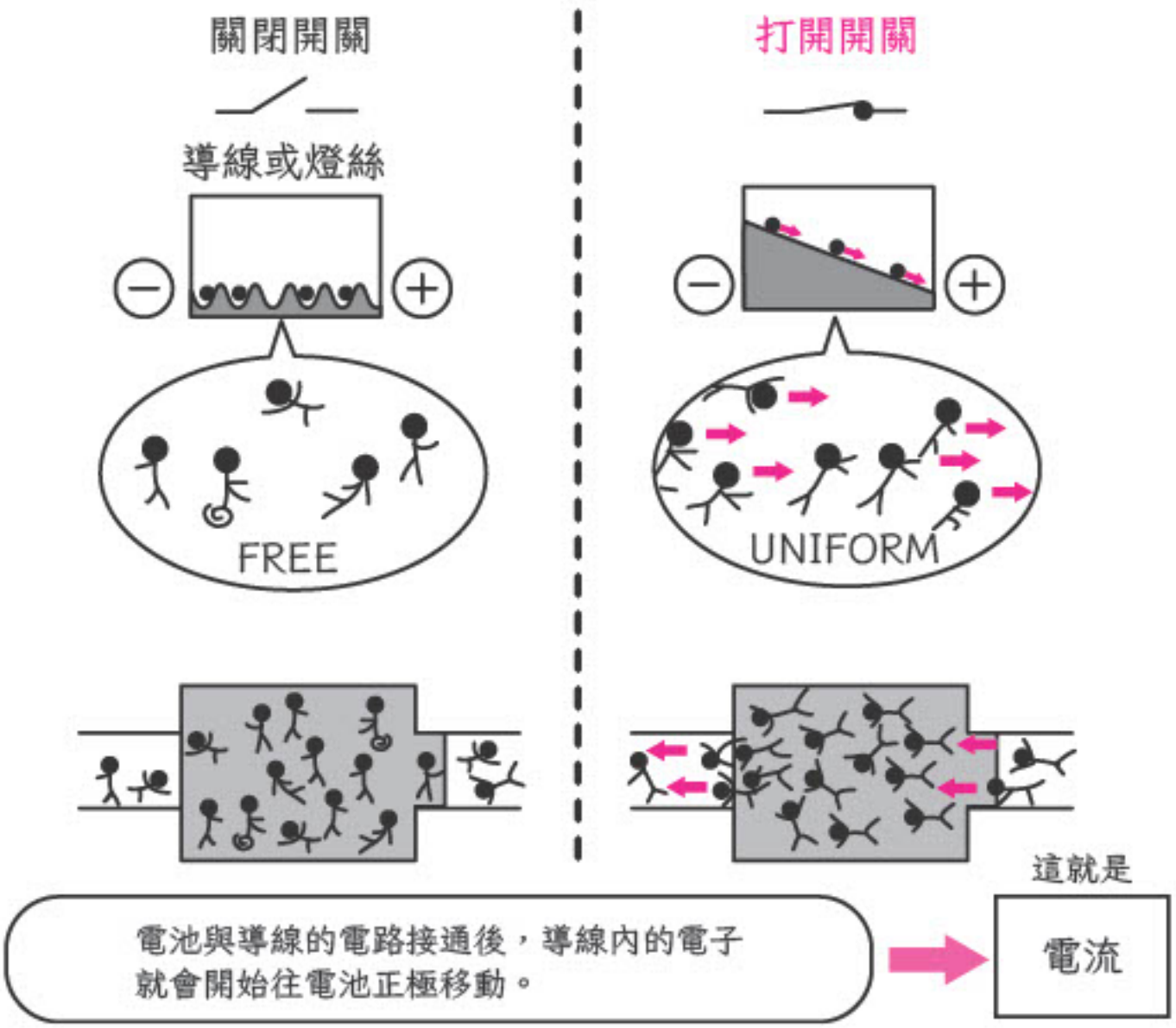
流過燈泡的自由電子

導線（conducting wire）…連接各端子使電流通過，由金屬等導體製成的線。**電線**。

燈絲（filament）…由金屬製成的細絲。電流流過燈泡燈絲後，可使燈絲發光。

「電流流過」是什麼意思？

- 導線或燈絲內部的自由電子帶有負電荷，所以在開關打開（電路接通）的瞬間，電子會被拉向電池的正極。
- 所以，原本就能自由運動的自由電子，全都會開始往正極移動。
- 此外，電池負極會持續提供電子給導線，原本存在導線上的自由電子會被推向燈泡。
- 負極將電子推向導線，導線再將電子推向正極。這些電子的移動，就是所謂的**電流**。



自由電子的運動

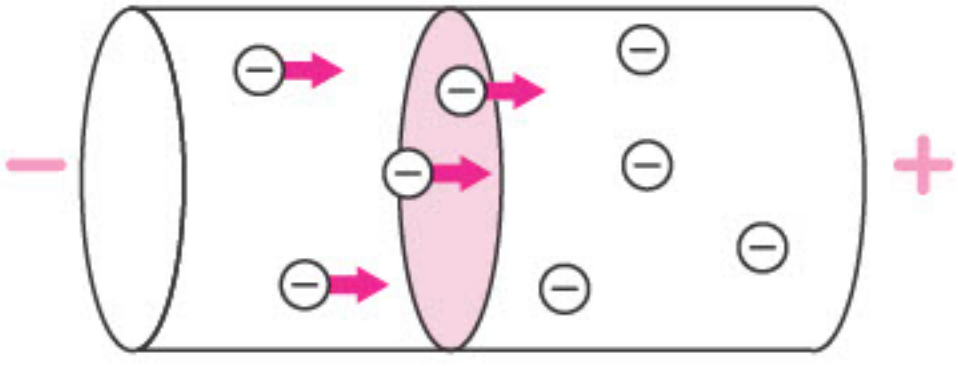
電路（electrical circuit）…為了使用電力，將電路元件（電源、負載等）以導體接通後得到的電流通路。

「電流」是什麼？

- 從電池出發的電子會經由導線通過電燈泡，再回到電池。也就是電子會繞電路一圈。
- 這種「所有電子朝著同一方向移動的狀態」就叫做「電流正在流動」（要注意的是，電流的方向與電子流的方向剛好相反）。
- 關閉開關時，自由電子會回復到「可自由活動，但不會朝同一方向移動」的狀態，此時「電流不再流動」。
- 電流符號為 I，單位為安培（A）。

電流的定義

「1秒內通過某個截面的電荷量」



符號為 I，單位為安培

$$\text{電流 } I\text{（A）} = \frac{\text{通過的電荷量 } Q\text{（C）}}{\text{時間 } t\text{（s）}}$$



電流的大小



0.1602

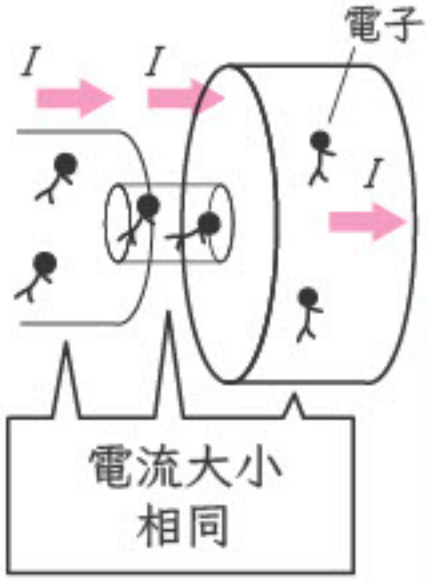
電荷 e 為 1.602×10^{-19}（C）

$1\,\text{A} = \frac{1\,\text{C}}{1\,\text{s}}$ ⇨ 1秒內通過6.24×10^{18}個（約600京個）電子的電流，約為1 A（0.999 A）

電流的定義

電荷（electric charge）…電子或質子等帶電粒子本身，或是這些粒子所帶的電荷量。

安培（ampere）…電流單位，源自「安培定律」的發現者，法國人安培André-Marie Ampère（1775～1836）的名字。



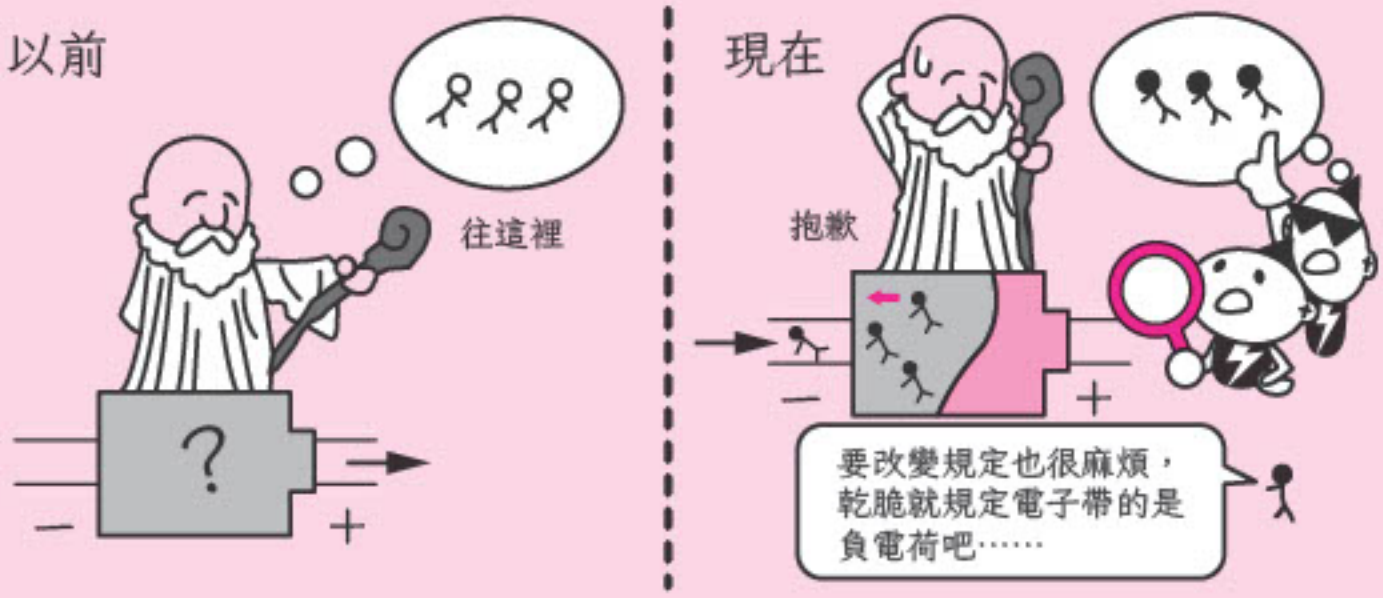
電流的基本性質



- 要是不存在環繞一圈的通路，電流就不會流動
- 電流為連續的流動。
  電路中各處的電流大小皆相同
- 即使電線粗細改變，電流大小仍不變
- 電流不能突然湧出，也不能儲存

為什麼電流的方向與電子流的方向相反？

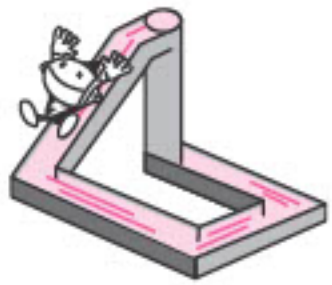
在發現電子以前，科學家就發明了電池，並在那時決定了電流的正負向。
隨著時代演進，在科學家們仔細研究過電子之後，才瞭解到電子的流動方向與電流方向相反，便規定電子帶有的是負電荷。



電流與電子流的方向差異

1-2

電動勢與電壓

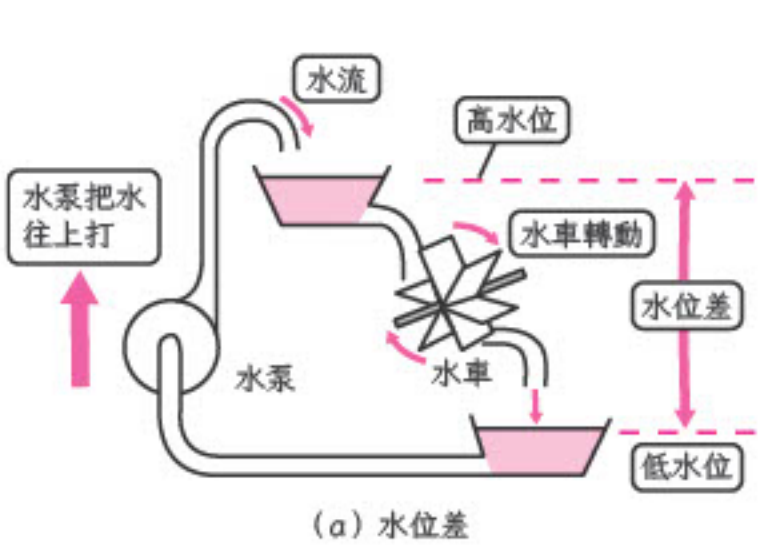


～電流由電動勢驅動～

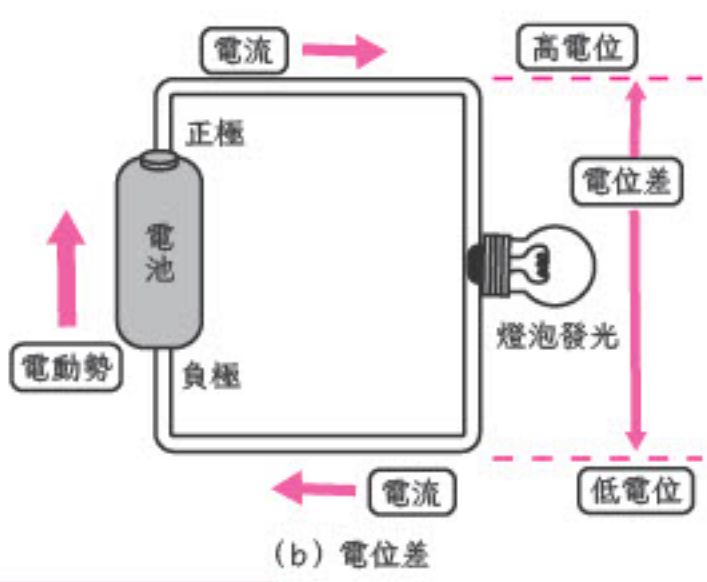
電路常被比喻成水道。電池就像把水往上打的水泵，電池的**電動勢**就相當於水泵把水往上打的力。這裡就讓我們整理一下「電動勢」、「電位」、「電壓」等用語分別是什麼意思吧。

電動勢、電位、電壓

- 我們可以將電路內的**電流**比喻成水道的水流，以方便理解。此時，電池就像水泵，燈泡就像水車。兩者都在進行能量轉換。
- 水道內的水流會被水泵往上打，再沖下來使水車持續轉動。這就像電路中的電池提供能量給電流，電流再使燈泡持續發光一樣。



（a）水位差



（b）電位差

兩者可對應如下

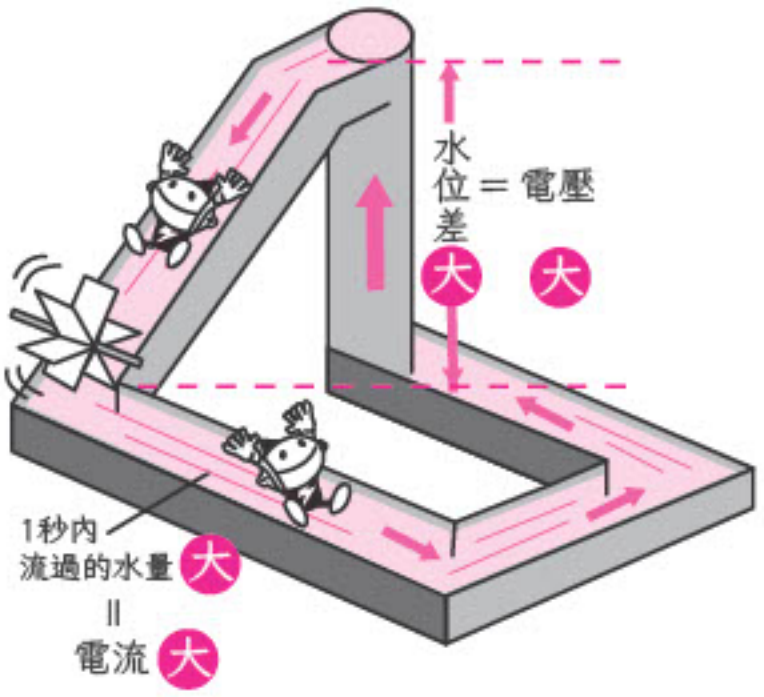
往上打的力 → 電動勢
水流 → 電流
水位 → 電位
水位差 → 電位差（電壓）

水位與電位

電動勢（electromotive force）…參考正文。

可以提升電位的電池

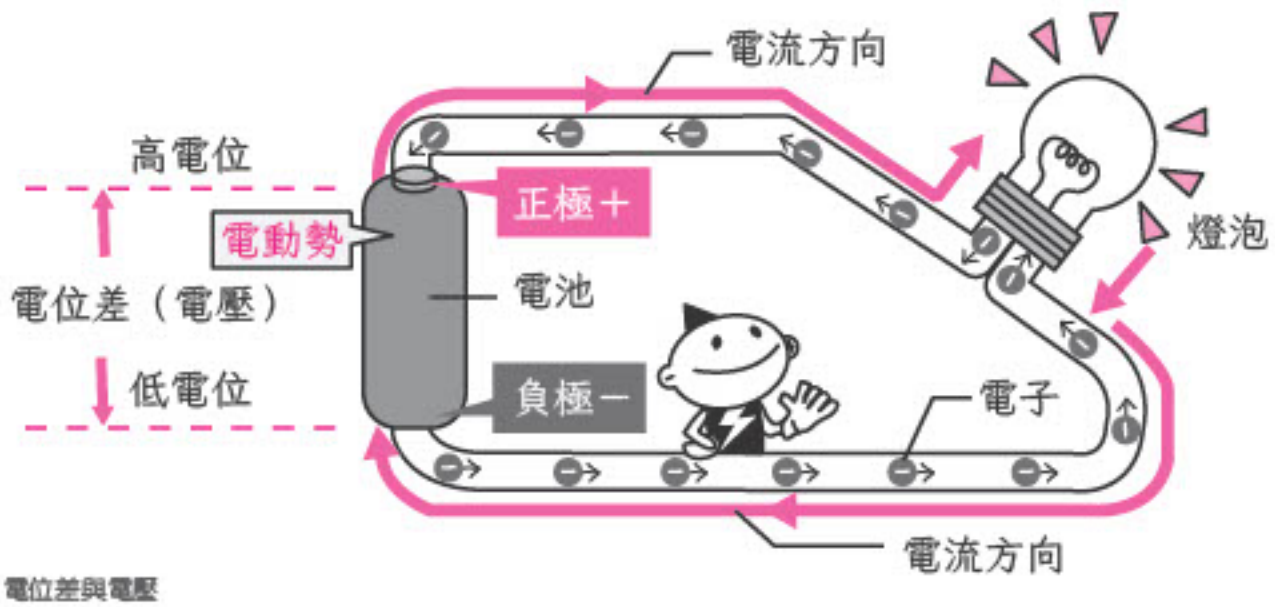
- 相對於水道的水位，電路中也有**電位**。
- 電池的電動勢，可使正極的電位高於負極。
- 這種電池提高電位的能力，就叫做**電動勢**。



電池的電動勢

電池的外部電路

- 電位差又叫做**電壓**。
- 若兩點間存在電位差（電壓），兩點間就會產生電流。
- 在電池的外部電路中，電池正極的電位較高，負極的電位較低。
- 電池與電路接通後，因為正極與負極之間有電位差，所以電路中會產生電流。
- 電壓符號為 V，單位為伏特（V）。



電位差與電壓

電位（electric potential）…參考正文。
電壓（voltage）…參考正文。

1-3

電流與電壓的關係

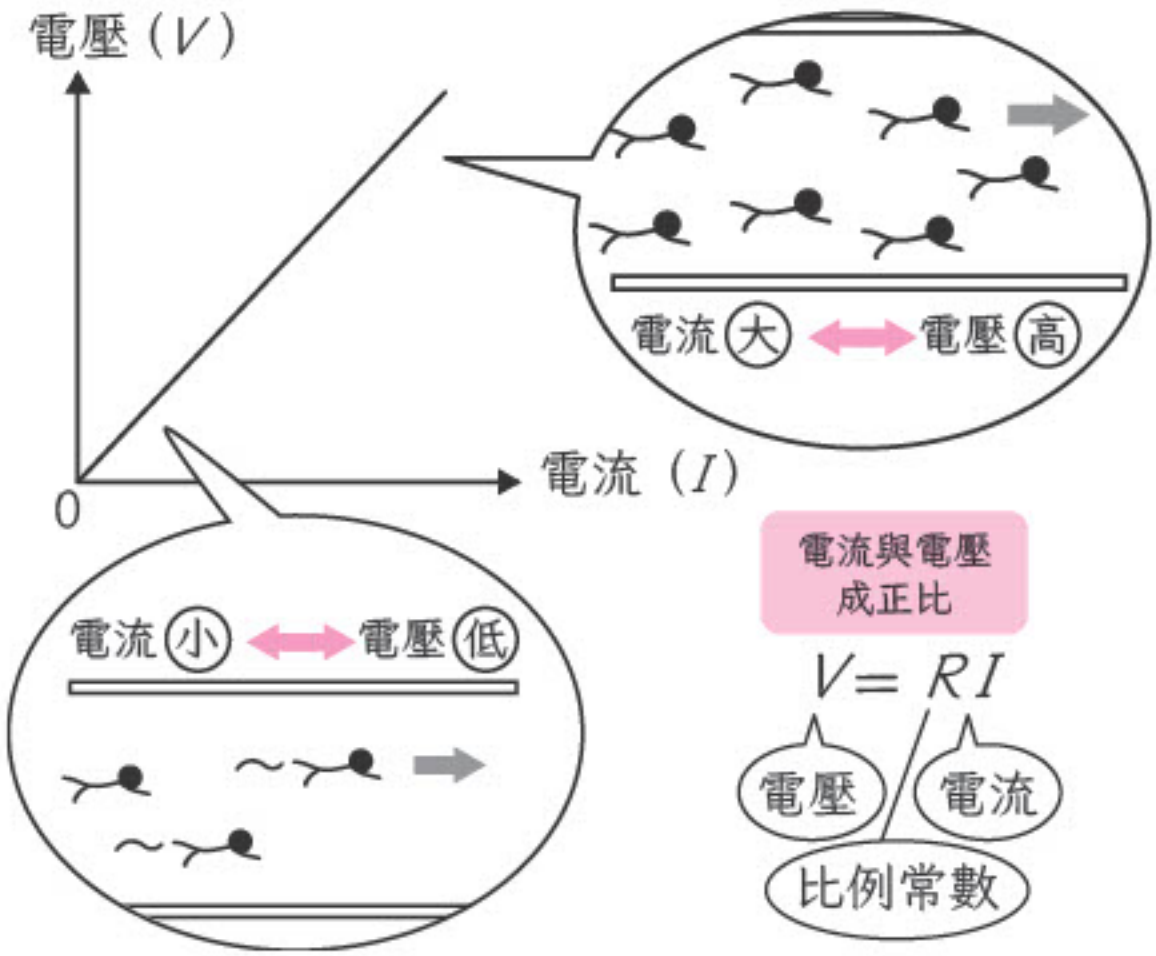
～歐姆定律就是如此美妙～



電路中的電流與電壓成正比，而這個規則就叫做**歐姆定律**。不論是直流電／交流電，所有電流都會符合歐姆定律，可以說是基本中的基本，是相當重要的定律。

電流與電壓成正比

- 電流越大，電壓越高。
- 電壓越高，電流越大。

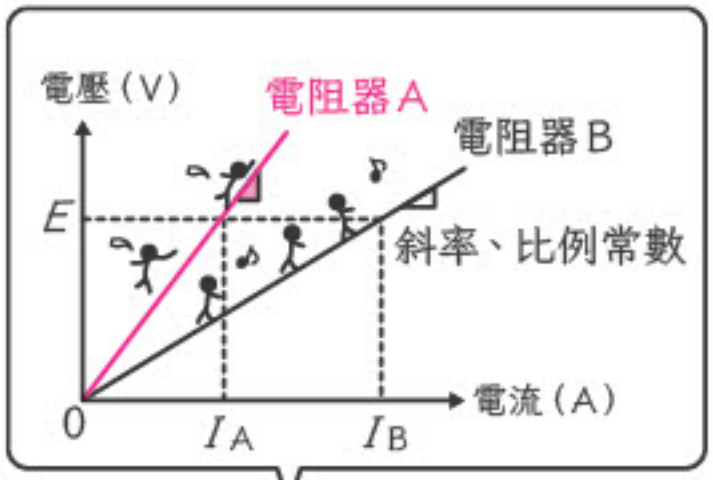


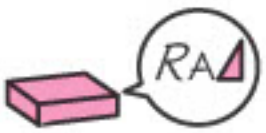
電流與電壓

歐姆定律（Ohm's law）…電路兩點間的電位差，與兩點間的電流成正比，是電學中的重要規則。

歐姆定律

- 「在電路中流動的電流與電壓成正比」，這個規則叫做**歐姆定律**。
- 電壓與電流間的比例常數，稱為**電阻**。
  電阻符號為 R ，單位為歐姆（Ω）。

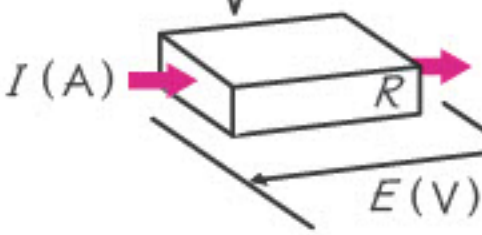




A的電阻較大，
所以電流較難以通過



B的電阻較小，
所以電流較易通過

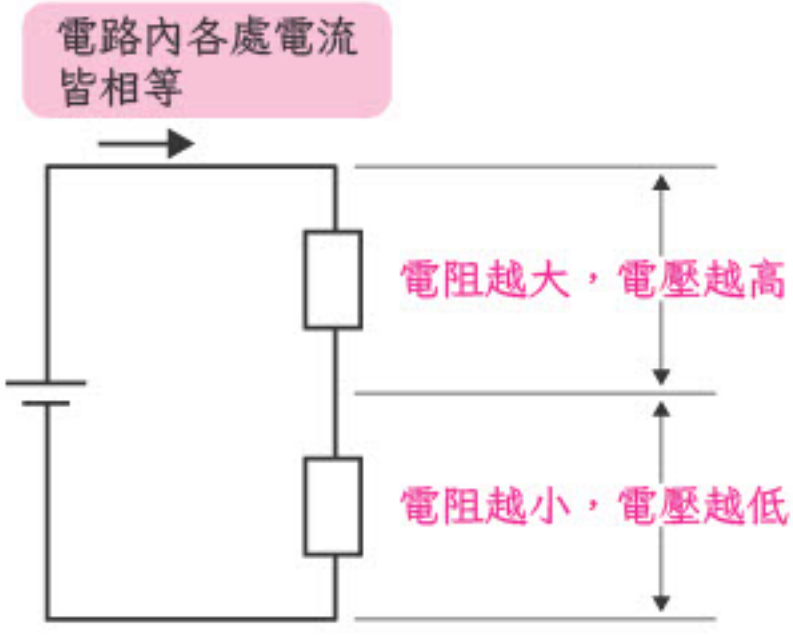


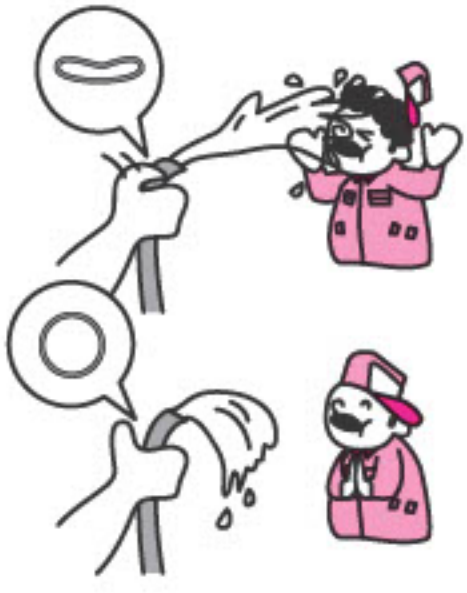
電阻器
（材料或大小不同時，
電流通過的容易度［電阻］也不一樣）

歐姆定律

電阻與電壓成正比

- **電阻**可表示電流「通過的難度」。
- 若要讓相同電流通過，越大的電阻需要越高的電壓。





電阻與電壓

歐姆（ohm）…源自發現歐姆定律的德國物理學家，蓋歐格．西蒙．歐姆 Georg Simon Ohm（1789～1854）。單位符號為（Ω）。

電阻器（resistor）…為了它的電阻值而加入至電路內的電子零件，也可簡稱為**電阻**。