

元素的故事(一)

什麼是元素？

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

1-1 前言

學習化學時，首先遇到的便是「元素」這名詞。「元素是當做物質根源的基本東西」，這種說明不能令人容易理解其意義。元素究竟是什麼？本文將從歷史的發展來考察「元素」這名詞，以便正確理解近代科學上的「元素」。

1-2 過去的物质觀

1 東方的物質觀

(1) 中國的物質觀

各種證據顯示，中國人很早就以冷靜的態度來觀察各種自然現象，建立其固有的哲學思想。例如，紀元前11~4世紀繁榮一時的周朝所完成的「周易」，舉出天、流水、火、雷、風、水、山、地等八項為自然現象的基礎。古人認為一切自然現象均由這八項中的任何幾項組合而成，並且指出各項的基本是陰陽二性。宇宙中的現象與物質，都是陰陽二性的組合。陰陽二性不可以隨便扯到今天的正電荷與負電荷，因為它是更加普遍的想法。例如，光明是陽而黑暗是陰，暑熱是陽而寒冷是陰，強壯是陽而軟弱是陰，單數是陽而偶數是陰，凡是相對的，各屬陰陽的一方。

另一方面，古人又以木、火、土、金、水這五種（稱為五行）作為東西的根源——「元素」。換言之，五行這基本物質加上陰陽，便出現宇宙中的一切現象。根據這種想法來預測未來的事情——「易法」，也發達起來了。將東西當概念來處理，中國道教的這種想法，後來傳到日本，而所謂「陰陽道」的占卦，在奈良與平安時代相當風行。然而，日本人在這方面雖然獨自發展，可是這種元素物

質觀的跡象完全沒有。

(2) 印度的物質觀

佛教對物質觀，往往與抽象的想法混淆，不容易明白。雖然如此，就基本上而言，古代印度人把地、水、火、風稱為「四大」或「四大種」，認為它們就是一切物質的根源，並可用形狀與顏色來象徵，且有各自的獨特作用（見表 1-1）。四大不啻是「物質的根源，且具物質界各種現象（古代梵語稱為 rupa, 中譯佛

表 1-1 佛教思想的四種基本物質（四大）

四 大	形 狀	象 徵	顏 色	機 能
地	四 方	堅 硬	黃	支 持 東 西
水	圓	溼 潤	白	容 納 東 西
火	三 角	暑 熱	紅	使東西成熟
風	半 月	運 動	黑	使東西成長

典作為「色」) 的根本這種抽象意義。物質方面的這種看法與哲學上的想法，其混淆隨着時代的進步而愈來愈顯著。一部分佛典在四大之上加以「空」，稱為五大，甚至再加上「識」而成為六大，因而以四大為物質根源的思想，頗有衰微的傾向。

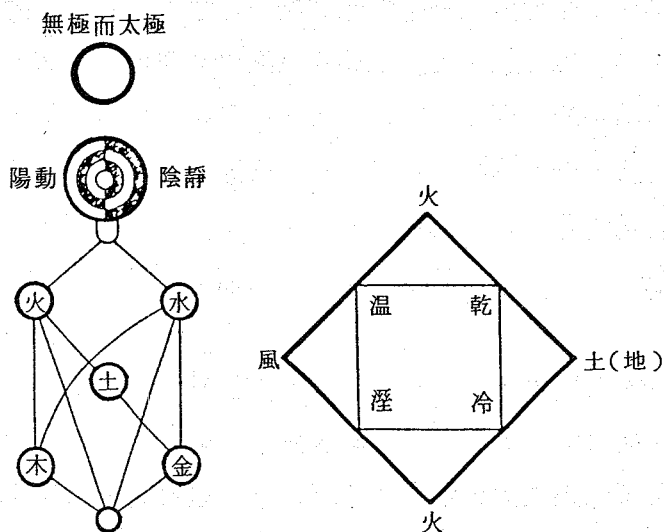


圖 1-1

東方的物質觀，其特色是以直觀的想法為基礎，毫無實驗根據，而物質本身與有關物質的現象，未能區別清楚。此外，以抽象的想法來象徵各種現象，這種傾向非常強烈，故與近代科學不容易發生關係（見圖 1-1）。

古代中國的五行，木、火、土、金、水，加上日與月，就是一星期裏各日的名稱，這委實是值得深深玩味的事實。這七名稱都是來自天體。古代中國人認為，支配五行的行星是木星、火星、土星、金星與水星。它們是古代已知的全部行星。

西方一星期裏各日的名稱，也與行星名有關。在現代語文中，其對應最清楚的，首推法文。

月曜日 lundi	來自 lune （月）
火曜日 mardi	來自 mars （火星）
水曜日 mercredi	來自 mercure （水星）
木曜日 jeudi	來自 jupiter （木星）
金曜日 vendredi	來自 venus （金星）
土曜日 samedi	來自 saturne （土星）

東西方的這種交流，究竟始於何事？這是饒有趣味的問題。例如，古代印度的四大，地、水、火、風，與希臘的四元素，火、風、水、土，其內容完全一致，卻與中國的五行，木、火、土、金、水，迥然不同。對西方人或東方人來說，自然現象大致相同，因此，想法的一致，幾乎可以說是理所當然。雖然如此，由於氣候風土的差異，比較關心的自然現象，可能不盡相同。

2 希臘的物質觀

包括西亞細亞在內的西方文明，其起源一般認為在於埃及與美索不達米亞（現在的伊拉克），但物質觀方面的思想有文字記載的是希臘文明。古代希臘在西亞細亞（現在的土耳其、阿拉伯各國）擁有殖民都市，與埃及和美索不達米亞等古代東方文明有密切關係。關於東西的根源之想法，留下清晰記載的是希臘人（見表 1-2），其想法長久支配了西歐文明。

台利斯根據觀察得知，冰、雪、與霜溶化成水，而水又蒸發成為空氣（氣體）。此外，由於水的作用，岩石也會消失（用今天的措詞是，發生風化）。於是，他認為水是萬物的根源，後來，在希臘各地求學的人們，發表許多看法（見表 1-2）

表 1-2 希臘人的物質觀

人 名	時 代	思 想
台 利 斯 (Thales)	— 624 ～— 546	萬物的根源是水。這「物質的根源」之追求，引起了實體的探討。
亞諾芝明尼斯 (Anaximenes)	— 585 ～— 528	空氣是物質的根源。因其濃淡而產生火與風，進而形成雲、水、土、石等。
赫拉克賴脫 (Herakleitos)	— 535 ～— 475	火是萬物的根源，萬物變遷不已。
巴曼尼狄思 (Parmenides)	～— 515	世界不變不動。
恩貝多克利 (Empedokles)	— 493 ～— 433	統合上列二人的想法，萬物的根源是土、水、空氣（風）、火這四元素的結合產生各種變化。
德謨克里脫 (Democritos)	— 460 ～— 370	世界由空虛與無數的原子而成，各種事物均基於運動在空虛中的原子之結合與分離。
劉開布斯 (Leucippus)	～— 440	德謨克里脫的老師，一般認為他是原子說的首位提倡者，卻有人懷疑原子的實際存在。
亞里斯多德 (Aristotle)	— 384 ～— 322	主張「我們必須從已知事實開始」來反對 <u>德謨克里脫</u> 。萬物的具體根源，其「質料」是水、土、空氣、火。

。特別是活躍在紀元前 5 世紀的恩貝多克利，他認為土、水、風、火才是萬物的根源，這四元素的結合引起宇宙中的各種變化。這想法在紀元前 4 世紀遂由亞里斯多德來完成。

亞里斯多德認為，「我們必須從已知事實開始」特別強調，必須根據實際觀察的事實來思考。從今天的眼光來看，這是當然的事，但在當時並不是如此。

比亞里斯多德早一時代，德謨克里脫已經想到原子的存在。他認為「宇宙是由空虛與無數的原子而成的，種種現象均皆基於運動在空虛中的原子之結合與分離。」這可以說是類似今天的分子運動論之想法，可是當時無法觀測小於可見體的物體，因此，只能說是普通空想的產物。這種想法，終被亞里斯多德來否定掉。

亞里斯多德的水、土、風、火四元素，用今天的名詞來說，分別相當於液體、

固體、氣體，與能量。這樣想來，四元素說也可以說是正確掌握了事物的一面。

3. 煉金術的開發

希臘哲學家憑空想像事物的另外一方面，古代人們也不斷累積了有關物質方面的片斷知識。例如，埃及人把各種金屬分爲各種等級，進而適用於四元素。

土：鉛、銅

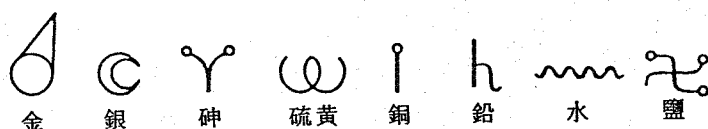
水：錫、水銀

風（空氣）：金、銀

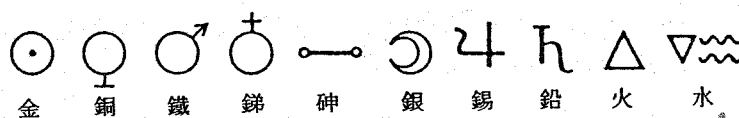
火：紫色的金

如此，使低等級的金屬（賤金屬 base metal）變成高等級的金屬（貴金屬 noble metal）的技術——煉金術，逐漸被開發了。

後來，煉金術流傳到阿拉伯，而埃及與希臘的各種經驗性技術，多以阿拉伯文記錄下來。然而，其表達故意採取艱深難懂的方法。煉金術士認爲，煉金術的秘密不宜隨便傳授給別人（見圖 1-2）。



(a) 希臘



(b) 煉金術

圖 1-2

阿拉伯人對「元素」的想法，究竟如何變遷，不得而知。煉金術士所想的元素，可能與希臘哲學完全不同。例如，有的煉金術士把硫磺、水銀、鹽稱爲三元素。

有時人們認爲歐洲文明的源流在於希臘，後來傳到羅馬，接着成爲今天的西歐文明。然而，根據最近的研究，就物質文明而言，一般認爲繼承希臘傳統的是阿拉伯文明。在這方面，中世歐洲是真正的黑暗時代。希臘古典由阿拉伯文譯成拉丁文而被引進西歐，是到了 14 ~ 15 世紀的事。今天的化學所用的很多字，都是來自阿拉伯文（具有冠詞 Al），例如 alkali（鹼），alcohol（酒精），aldehyde（醛），alkyl（烷基）等，便可證實這件事。

1-3 近代科學與元素

1 新科學的萌芽

無論東方或西方，凡是建立古代文明的人，均皆想到 4 ~ 5 種「元素」，當做物質的根源，這事饒有趣味，因為雖然希臘文明與中華民族的文明迥然不同，卻是同樣想到少數「元素」當做許多物質的根源。

雖然如此，這種思想對往後物質文明的進步並沒有具體的貢獻。根據中國陰陽五行說的物質觀，詳細說明具有神秘能力的萬能藥物「丹藥」的製法，這種書籍為數不少，卻是不能導致今天的化學。

另一方面，阿拉伯與歐洲的煉金術士，根據經驗來累積各種知識，並且改良所需的技術與手段。今天的化學實驗所使用的蒸餾、熱解、沉澱，再結晶等技術，就本質而言，與煉金術士所使用的，沒有多大差別。此外，又得到相當純粹的單質與化合物，包括現在一般工廠常用的硝石 KNO_3 、硫磺 S_8 、硼砂 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ，明礬 $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、膽礬 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、水銀 Hg 、昇汞 HgCl_2 等。

煉金術士中，有人認為某些物質是比較基本的，所謂「基本物質（prima）」雖然如此，煉金術未能發展成為近代科學，其原因可能是由於目的在於賺錢——求得「黃金」。為了順利賺錢，自己想出來的方法必須保密，不能讓別人知道。因此，煉金術士的著作，普遍使用囉哩囉唆的譬喻與極其難懂的表達方式。如此，個人知識與經驗的累積不能由後人來繼承，因而妨礙整個體系的發展。

至於煉金術的三元素硫磺、水銀、與鹽，用今天的眼光來看，其中硫磺與水銀是單質（僅由一種元素而成），而鹽是化合物氯化鈉（ NaCl ）。因此，表面上今天這「三元素」好像沒有重要意義。但從別的觀點來看，水銀是金屬，同種元素的原子很多聚集起來，用金屬鍵來結合，具有導電的特色。固態硫磺是八個硫磺原子形成具有凹凸的八角形分子而聚集起來的，稱為分子結晶。硫磺原子之間的結合是共價鍵，是典型的化學鍵之一。反之，鹽是鈉原子 Na 失去一個電子的陽離子 Na^+ ，與氯原子 Cl 多得一個電子的陰離子 Cl^- 靠靜電力互相吸引所結合的，稱為離子鍵。換言之，這「三元素」可以說代表三種化學鍵。

關於物質的知識，首先嘗試其體系化的人是英國化學家及物理學家波以耳（Robert Boyle, 1627 ~ 1691）。1627 年，他出生於愛爾蘭的富豪家庭，一輩子以自費不斷從事研究。他支持希臘人德謨克里脫的原子論，但他主張必須根據實驗

來討論。他的成果之一是1662年與其助手虎克 (Robert Hooke, 1635 ~ 1703) (後來發現關於彈性的「虎克定律」) 共同利用自製的泵來做實驗，發現氣體體積與壓力成反比的所謂「波以耳定律」。

波以耳從今天所謂的化學之立場(當時物理學與化學之間沒有明確的區別)來撰寫「懷疑的化學家」一書，發表其新觀念。首先，僅僅依據思考來主張的希臘四元素說，他極力批評，認為必須根據實驗來對「基本的物質——元素」下定義。同時，他預言這種元素不只四種，應該還有更多。他也主張正確實驗的重要性，並且指出各種物質必須經過化學分析來闡明其成分。「再也不能分為更單純的物質」，他定義為元素。如果把這句話中的元素換成單質，則從今天的知識來看，這定義是完全正確的。

2 新原子說

波以耳強調實驗的重要性以及根據實驗來思考的必要性之後，各方面開始出現根據實驗觀察的新想法。英國數學家、物理學家及天文學家牛頓 (Sir Isaac Newton, 1643 ~ 1727) 發現著名的萬有引力定律及有關光學的基本定律的是17世紀後半葉，而哈貝發表血液循環原理的是1628年。在化學的領域，準確的實驗也累積起來，到了18世紀，對「再也不能分為更單純的物質」的物質——單質，化學家已有各種知識。

1789年，法國化學家拉瓦錫 (Antoine Laurent Lavoisier, 1743 ~ 1794) 指出33種「元素」。其中包括熱與光，顯然是錯誤的。同時還包括氧化鎂 MgO ，氧化鋁 Al_2O_3 等，與氧的化合物。然而，當時這些物質不能「分為更單純的物質」，所以一般視作「元素」。因為技術尚未發達而發生這種錯誤，事實上其想法並沒有矛盾之處。〔註一〕

根據實驗事實來主張「物質是由所謂原子的小粒子而組成」，且將元素的概念與原子連結起來的是英國化學家及物理學家道耳吞 (John Dalton, 1766 ~ 1844)。他在1803 ~ 1808年發表的這種想法並不完整，但是後來由義大利物理學家及化學家亞佛加厥 (Conte Amedeo Avogadro, 1776 ~ 1856) 的假設(現在叫做定律)來修正(1811年)，關於物質的構成之基礎終得奠定。

(1)道耳吞的原子說——道耳吞與英國化學家亨利 (William Henry, 1774 ~ 1836) 共同研究氣體的溶解度與「氣體分壓定律」時〔註二〕，開始想到「原子——再也不

能分割的粒子」之存在。其要點如下，叫做道耳吞的原子說。

- ①物質均由原子所組成。
- ②各種元素均有其所對應的各種原子。
- ③同種原子的質量、形狀、大小均皆相同，異種原子則不同。
- ④單質由一種原子所構成。
- ⑤化合物是異種原子的聚集。
- ⑥化學變化是原子彼此之間的結合斷掉或發生其他組合的現象。

道耳吞原子說的依據是 1799 年法國化學家蒲魯斯特（ Joseph Louis Proust, 1754 ~ 1826 ）所確立的「定比定律（ law of fixed proportion ）」〔註三〕。

例如，氫與氧化合生成水時，二成分的質量比是 1 : 8 。由於氫原子（依照道耳吞，其符號是 $\odot$ ）與氧原子（ O ）的質量比是 1 : 8 ，縱使是大量的水，所構成的氫原子與氧原子，其質量比應該是 1 : 8 ，這樣想就可以理解。如此，道耳吞根據化合物中所含元素的質量比，來求出許多原子的相對質量（亦即原子量），給原子說提供具體的形象。根據原子說，下列幾點立刻成為問題。

- ① A , B 兩種原子造成複數的他種化合物時，與一定量的 A 所結合的 B ，其量應該成為簡單的整數比才對。

這件事實道耳吞早已指出，如表 1-3 所示，就氮與氧所成的 5 種化合物而言，完全成立。

表 1-3 氮化合物所含兩種元素的質量比

化 合 物 名 稱	與 1 個氮結合的氧之量	各氧之間的質量比
一氧化二氮 N_2O	0.57	1
氧化氮 NO	1.14	2
三氧化二氮 N_2O_3	1.71	3
二氧化氮 NO_2	2.29	4
五氧化二氮 N_2O_5	2.86	5

這件事實當然成為有力的證據來支持原子說。

- ②化合物所含的元素，其質量比假設已由分析得知，但據這些數據來求出各個原

子的質量比時，必須已知構成該化合物的原子之數目比。當時這方面的資料完全闕如。道耳吞毅然假定「兩種原子僅僅造成一種化合物時，兩種原子各結合一個。」其實這種假設並不正確。因此，道耳吞的原子說必須加以修正，如下(2)項所述。然而，只要採用①的假設，許多原子的原子量即可求出。如此，針對 20 種原子，道耳吞能夠指出其元素符號與原子量（見表 1-4）。

雖然道耳吞的原子說含有錯誤，但他把「造成各種物質的基本東西」這種

表 1-4 道耳吞的原子符號與原子量

符 號	<u>道耳吞</u> 的原子名稱與原子量		今日的原子名稱與原子量	
⊙	hydrogen	1	氫	1.0
①	azote	5	氮	14.0
●	carbon	5.4	碳	12.0
○	oxygen	7	氧	16.0
⊕	phosphorus	9	磷	31.0
⊕	sulphur	13	硫	32.1
③	magenesia	20	鎂	24.3
⊙	lime	24	鈣	40.1
⊕	soda	28	鈉	23.0
⊕	potash	41	鉀	39.1
⊕	strontian	46	鋇	87.6
⊕	barytes	68	鋇	137.3
①	iron	50	鐵	55.6
②	zinc	56	鋅	65.4
③	copper	56	銅	63.5
④	lead	90	鉛	207.2
⑤	silver	190	銀	107.9
⊕	gold	190	金	197.0
⑥	platina	190	鉑	195.1
⊕	mercury	167	汞	200.6

元素的概念連接到具有某種質量的小粒子——原子——這種具體的東西，這一點確實是劃時代的創舉。此外，由於實驗本身不夠精密，又因①的假設不正確，所以道耳吞指出的原子量，有些數值與今日的比較起來，頗多出入。雖然如此，他指出質量在原子基本特性上的重要性，並且舉出具體的原子量，這一點委實受到相當高的評價。在考慮「元素週期律」時，「原子量的順序」所扮演的重要角色，可以證實上列事實。道耳吞的想法，後來遭到修正，但是可以說他確立了基本概念，以便理解物質的科學性質。

(2) 道耳吞原子說的修正

道耳吞發表原子說後不久，法國物理學家及化學家給呂薩克（Joseph Louis Gay-Lussac, 1778 ~ 1850）研究氣體的化學反應而發表其氣體反應定律：「兩種氣體反應時，參與反應的氣體體積及反應生成物的氣體體積，在同溫同壓下測定，則成為簡單的整數比。」化學家公認，這定律在實驗上是正確的，卻與道耳吞的原子說互相矛盾。

氫與氧反應而生成水蒸氣時，在 100°C 1大氣壓下測定，則得體積比為 2:1:2

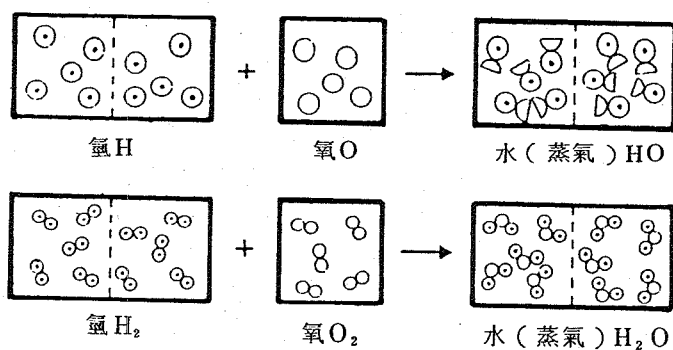


圖 1-3

。這是簡單的整數比，故氣體反應定律成立了。然而，果真誠如道耳吞在①中所假設，1個氫原子與1個氧原子造成水，則如圖1-3所示，氧原子必須裂開成為一半來與氫原子結合。這是與原子的定義——「不能再分割的粒子」——互相矛盾。就道耳吞的原子說而言，這是嚴重的矛盾。

1811年，義大利人亞佛加厥指出，如果假設下列兩點，氣體反應定律與原子說之間的矛盾就可以解決。這叫做分子說。

(A)單質的氣體粒子，由同種的兩個原子所結合的分子而組成。氣體化合物則由異

種原子所結合的分子而組成。

(B)一切氣體在同溫同壓下，同體積中含有相同數目的分子。

根據這假設，氣體反應定律得以說明清楚，如圖 1-3 下半部所示。同時，因為氣態氫是 $\odot\odot$ ，所以基本單位是 $\odot$ ，而氣態氧是 $\bigcirc\bigcirc$ ，其基本單位也是 $\bigcirc$ 原子。

如此，如果以亞佛加厥假設(A)(B)來取代道耳吞的假設①，則大家可以接受修正過的道耳吞原子說。其實，亞佛加厥假設並不是立刻受到化學家的普遍接受。同時，也有人要否定道耳吞的原子說，因為原子說與氣體反應定律互相矛盾。

另一方面，爲了測定原子量而做的元素組成之分析，因為技術的進步而可以得到相當準確的數值。然而，原子說的解釋方法，可使原子量的數值產生頗大的差異。例如，依照道耳吞的假設①，以氫當做 1 時，氧的原子量就等於 8 左右。（在道耳吞的表上，這數值是 7，但後來更進步的分析技術使它改爲 7.9。）可是，如果遵循亞佛加厥假設，則氧的原子量是 16。

爲了解決這種問題，1860 年歐洲的化學家聚集在德國卡路斯路赫（Karlsruhe）開會。這是國際學術聚會的起源。這時，義大利化學家坎尼扎羅（Stanislao Cannizzaro, 1826 ~ 1910）極力主張他的前輩亞佛加厥在 60 年前提出來而一直被遺忘的假設之重要性，同時將原子量與分子量的概念加以區別，又指出其求法。他的演講使聽衆深爲銘感，亞佛加厥假設的正確性終於受到承認。

後來，各種獨立實驗證明亞佛加厥假設(B)的正確性，而以公克爲單位的氣體分子量那麼多的氣體 [1 莫耳 (mole)] 所含的分子數，經過測定而得到 6.02×10^{23} 個這種一定的數值。如此，亞佛加厥假設成爲最重要的基本定律之一。

今天，1 莫耳氣體中所含的分子數，叫做亞佛加厥數（Avogadro's number），這是爲了紀念他的功績。

1-4 原子與元素

道耳吞的原子說經過修正後，科學家已知，組成物質的基本單元，有數十種原子。這種具體的「原子」與人類從往昔一直想來的「元素」之間，怎樣連貫起來？

在近代化學中，如果有人問，元素是什麼？則正確的答案是「元素不是具體的實體

，而是同種原子的總括性名稱。」

現在我們來打一個大膽的比喻。據說世界上有四十幾億人口。這些人中的任何人都屬於某種「民族」。所謂民族是具有獨特語言與文化的一羣人之總稱。民族中的各個個人都是別的存在。同時，他們擁有國籍，是某一國家的國民。可是，民族與國民不一樣。中華民國這國家的國民，包括漢族、蒙族、藏族等不同的民族。同時，漢族不一定都是中華民國的國民。有人成為美國公民，也有人成為馬來西亞國民。但是，他們都講漢語，篤信道教等，都是漢族文化的負責人。然而，漢族這種具體的集團是沒有的，只是在固有的語言與文化方面來綜觀各個個人時，才能形成漢族這種形象（見圖1-4）。

將原子與元素分別比喻成為個人與民族，是不是比較容易理解？氫原子這種具體的粒子，在宇宙中其數目繁多，有的是以氫分子 H_2 ，有的是以水 H_2O 或甲烷 CH_4 等的形態來存在。然而，雖然其狀態不一樣，但都具有氫原子的共同特性。將這些氫原子予以總括性掌握，就可以得到氫這種元素的概念。不僅是氫，就是金（Au）或鐵（Fe）也一樣。像金那樣不大造成化合物，多半是同種原子聚集成為金屬狀單質，這恰好相當於組成單民族國家的日本民族。反之，像氟（F）那樣不容易成為單質，幾乎都是以化合

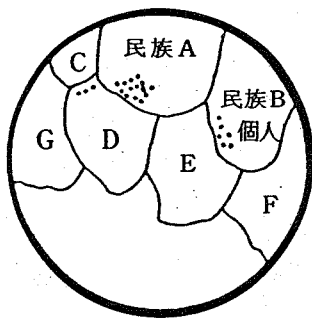


圖 1-4

物的形態來存在，這就相當於克耳德族，不組成民族國家，而以少數民族的形態分散在伊朗、伊拉克、土耳其等國家來生活的人們。

民族一詞是集合名詞，同理，元素一詞也當同種原子的集合名詞來看，這樣才是正確的。換言之，元素的種類與原子的種類，互相對應。宇宙中的東西，可以說「一切都是由某種原子所組成的」，也可以說「一切由元素而成」，並且也可以說「元素是造成一切東西的基本單元。」如此，往昔以來以「萬物的根源」這種含糊的形態傳下來的元素之意義，終於在近代科學中取得明確的形象。

1-5 物質的根源

1 物質的不連續性

根據修正過的道耳吞原子說，科學家已知造成宇宙中一切物質的東西是原子。原子是具有個性的微小粒子，半徑只有數埃（1 埃 = 10^{-10} m）。這種原子很多個聚集起來造成各種物質。灑落在餐桌上的食鹽，1 粒大約 0.02 mg，可是其中含有大約 1.8×10^{17} 個鈉離子（ Na^+ ）與氯離子（ Cl^- ）。這數目大約等於日本每年收成的米粒數。可見我們的身邊有多麼多的原子。

另一方面，爲了利用我們的感覺或各種測定器來探知原子的存在，必須有很多原子始能察覺出來。假定菜湯的味道太淡，難道放進一粒食鹽就可以認爲味道令人滿意嗎？就普通一般的人來說，要放進數十粒食鹽才能感覺出味道改變了。這可以換算成 Na^+ 與 Cl^- 的原子數來說，要有 10^{19} 個以上始能感覺出來。此外，即使利用現在最敏銳的化學分析手段，鈉原子數要有 10^{13} 個才能測出其存在。因此，縱然原子數減少 1 億個或 10 億個，我們也完全不知道。在這觀點來說，如果認爲物質的量是可以作「連續」變化，這也不是錯誤。

「物質的量只能以原子爲單位來變化」，這種想法在理論上可以理解，但在實際上卻不能感覺，而且除非採用特別的裝置，否則實驗上也不能簡單證明。在日常生活與一般化學實驗中，即使認爲「物質的量可以連續變化」，這樣也沒有關係。

2 物質世界的構成

現在，讓我們從實際存在的東西這方面來看看物質。用玻璃杯來裝自來水時，看起來是無色透明，水好像非常純粹。可是，放置一會兒之後，小氣泡就出現在杯壁。這是因爲溶解在水中的氣體——氧與氮——分解出來的緣故。溫度愈低，氣體愈容易溶於水中，故在溫度較自來水爲高的室內，不能溶解的氣體遂成氣泡而出現。將玻璃杯中的水在室內放置好幾天，水就會蒸發掉，而在杯底留下某種白色東西。這是溶解在自來水中的食鹽等固態物，因爲水的消失而以固體的形態來出現的。

如此，外觀上乾淨的自來水，也含有各種東西。如果是泥水，則杯底將積存泥巴，而海水則除了溶有鹽外，還含有各種微生物。如此，實際存在的物質，都是很多東西混在一起而存在的。其中的各成分都是由很多種類的很多原子所組成。欲知泥水中的「東西」而立即去調查其成分原子，這樣做未免太不合適了。

實際存在的東西——無論是自然的抑或是人工的——欲知其構成時，不要一下

子與原子連結起來，要考慮中間的階段，分成幾個段落來想。例如，要在信封上寫收件人的地址姓名時，總不能寫成「中華民國李四先生」，一定要分段寫成「○○縣△△市××路」才行。然則，爲了明瞭物質世界，必須考慮那些中間階段呢？

(1)相

要考慮東西的性質時，首先必須區別混合物與均勻物。土壤由砂、黏土、水，以及動植物的屍體或其分解物（有機物質）所組成。要理解土壤的性質時，與其直接研究土壤本身，不如先瞭解土壤的成分（砂、黏土、水等）之比率，再調查各成分的性質，然後再度回去研究混合物，這樣比較順利。

一如土壤中所含的砂或水，以清晰的境界而與其他物質保持區別的均質部分叫做相（phase）。鹽水是一種相，而空氣也是一種相。僅有一種相時，叫做「物質成均相（homogeneous phase）」。像土壤或泥水那樣含有兩種以上的相之物質，其聚合叫做多相體系或非均勻體系（heterogeneous system）。相因其狀態而有氣相（gas phase）、液相（liquid phase）、固相（solid phase）的種類。任何氣體都很容易混合起來，所以除非境界有壁，兩種氣相不可能同時存在。至於液相，例如水與油，互相不混合的兩種以上的相可以共存，固相也是一樣。

即使物質成均相，該相不一定由純物質而成。衆已熟知，空氣是各種氣體分子的聚合。海水是含有微生物或黏土粒子的多相體系，但把那種東西濾過，就成爲均相。然而，其中溶有各種成分，所以不是純物質。

(2)單質與化合物

將濾過的海水予以加熱，使其變成水蒸氣，再將其導往別處來冷卻，即得蒸餾水。溶解在海水中的食鹽等成分已經不在其中，所以蒸餾水是幾近純粹的水。蒸餾這操作很早以前就盛行，鍊金術士頗多記錄。1600年代的船員也已知，飲用水用完便實施蒸餾，從海水中取得飲用水（見圖1-5）。當時的航海日誌上，常有這種記載。

經過這種操作，使成再也不能更加純粹的物質，叫做純物質，遵循定比定律，無論由何人在何處測定，其性質恒爲一定。原子聚合所成的「東西」，而成爲我們討論的對象的是這種純物質。

純物質有由一種原子所成的情形與由兩種以上原子所成的情形，前者叫做單質，而後者叫做化合物。

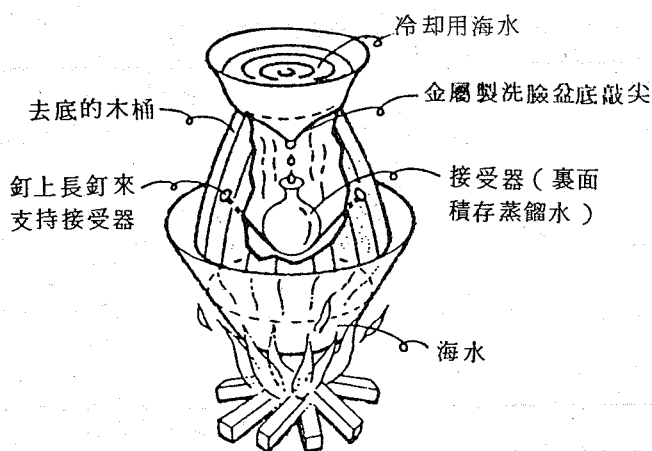


圖 1-5

雖然是均相，卻不是純物質的，叫做「溶液 (solution)」。食鹽水，砂糖水等是液相溶液的代表性例子。此外，合金是固相溶液。相的任何部分，其成分都是均勻，這一點是純物質與溶液的共有性質。然而，溶液的成分比可以作連續性微小變化，而隨着其變化，溶液的性質也作連續性變化，這一點與純物質不同。

純物質的組成比是原子數比，通常成為簡單的整數比。

(3)物質的階段性構成

如上所述，我們從原子討論到實際存在的物質之聚合時，不是直接一躍完成，而是在途中考慮了兩個中間階段。這樣一來，從原子發展到複雜的多相體系，需要三個階段。

一個是原子聚合造成單質或化合物的階段，其次是它們聚合造成均相的階段，最後是各種相聚合生成複雜的多相體系之階段（見表 1-5）。

爲了理解各種物質與其聚合，首先我們想明白純粹單質與化合物的性質。因爲單質與化合物都是由原子所組成的，所以會造成怎樣的單質，或容易造成怎樣的化合物，這將由成分原子的性質來決定。因此，只要明白原子性質的決定方法，應該比較容易理解單質與化合物的性質才對。起初，科學家以爲原子是「再也不能分割的小粒子」，可是隨着研究的進展，已知原子的內部也有結構。因爲原子的性質由其內部結構來決定，所以以後我們也將簡單討論這件事。

道耳吞指出 20 種原子的原子符號，但是後來的科學家陸續發現新原子，現在自然界大約有 90 種原子，另外還有人工製造的大約 10 種原子。這些原子並不

表 1-5 物質的構成

原 子	單 質 或 化 合 物	均 相	多 相 體 系
碳 C 氧 O	二氧化碳（分子） CO_2	乾 冰	混合成糊狀的冷卻劑（能冷卻到 -90°C 左右）
碳 C 氧 O 氫 H	乙醇（分子） $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	乙 醇 （液體）	
氫 H 氧 O	水（蒸氣） H_2O	水 或 冰	海冰（含有少量其他不純物）
鈉 Na 氯 Cl	氯化鈉（蒸氣） （僅在高溫時）	食鹽結晶	
金 Au 碳 C	金（蒸氣）（高溫時） 碳蒸氣（高溫時）	金屬狀金 金 剛 石	戒指

是各自具有不同的性質，而是可以分類成為彼此擁有相似性質的幾羣。下次將探討元素的種類與週期律。（未完待續）

【註一】 單質與元素

元素（element）的意義是「成為根源的東西」，而這英文字不僅用在化學中的元素，並且用在電路的構成要素。（這時中文另有譯字「元件」。）在波以耳的觀念中，「元素」與「單質」的概念沒有區別。現在的英文中也有兩者不予區別的傾向。

單質是法文 corps simple 與德文 einfacher körper（單純的物質）的翻譯。英文也把它直接譯成 simple substance。單質是具體的物質，金屬鐵或銅、氣體氧、黃色固體硫磺等，都是單質。波以耳的所謂 element 是相當於今天的「單質」。對單質下正確定義，具體表示的是法國化學家拉瓦錫（Antoine Laurent Lavoisier, 1743～1794）（18世紀末葉）。

【註二】 氣體的分壓與溶解度

設兩種氣體 A 與 B 在同一容器內，而 A 或 B 單獨占該體積時的壓力分別為 P_A 與 P_B ，則容器內的總壓力為 $P_A + P_B$ ，這叫做道耳吞的分壓定律， P_A 與 P_B 分別叫做

氣體A與B的分壓。

一般而言，溫度愈低壓力愈高，氣體愈容易溶解。「溶解度不很大，又不與溶劑發生反應的氣體，其在一定體積的溶劑中所溶解的質量，與該氣體的分壓成正比」，這叫做亨利定律。亨利的著作 *The Elements of Experimental Chemistry* (2卷，1799) 是透過荷蘭文譯本而介紹到日本的第一本化學書，由宇田川榕菴 (1798~1846) 譯成「舍密開宗」(共21卷，1837~47)。舍密是化學的荷蘭文 *Chemie* 之音譯。

【註三】 定比定律

1799年，蒲魯斯特根據許多實驗事實來提倡，「參與化學反應的物質，其質量程度並不作連續變化。特定化合物的成分元素，其質量比恒為一定。」關於這定律的成立與否，蒲魯斯特與法國化學家貝陀立 (Claude Louis Berthollet, 1748~1822) 不斷地爭論。蒲魯斯特支持道耳吞的原子說，主張這定律可以普遍適用。反之，貝陀立認為有時候化學組成會逐漸作小幅度的變化。

今天，化學家已知貝陀立所說的那種固態化合物為數不少，多半是屬於離子價可變的過渡元素 (transition elements) 離子的化合物。例如，就氧化鎳 NiO 而言，精確分析顯示，鎳的成分稍微不足，其組成式是 Ni_{1-x}O ，這是因為 Ni^{2+} 離子的一部分變成3價離子 Ni^{3+} 的緣故， x 隨3價離子的比率而改變。這種化合物叫做不定比化合物 (non-stoichiometric compounds) 或貝陀立式化合物 (berthollide compound)。因其物性非常獨特，故化學家由實用上的觀點來不斷加以研究。反之，組成比為一定的化合物，有時候叫做道耳吞式化合物 (daltonide compounds)。

不定比化合物的組成比，也因氧的分壓而改變，因為 Ni^{2+} 氧化成為 Ni^{3+} 時，氧有關係。不定比化合物的存在，表示電荷中和的原則是較定比定律更為基本的定律。

雖然如此，不定比化合物也並不是隨便擁有任何比率。成分的精密分析顯示，只不過是與定比有些微的出入而已。