

第十一冊

# 放射性同位素之工業應用

譯者 李寬宏

# 目 錄

|                        |    |
|------------------------|----|
| 明察秋毫.....              | 1  |
| 同位素淺釋.....             | 2  |
| 從“不愉快原子”到“閃爍原子”.....   | 3  |
| 同位素之製造.....            | 4  |
| 成大器之由.....             | 5  |
| 不入虎穴，焉得虎子.....         | 7  |
| 瑕疵難免.....              | 8  |
| 測    度.....            | 9  |
| 隔空測度.....              | 10 |
| 其他之放射性同位素測度法.....      | 12 |
| 瑕不掩瑜.....              | 17 |
| 放射線照相術.....            | 17 |
| X射線和伽瑪射線.....          | 18 |
| 同位素源、儀器、及應用.....       | 19 |
| 自動放射照相術；貝他射線照相；優點..... | 21 |
| 示踪劑.....               | 22 |
| 活塞環磨損之研究.....          | 22 |
| 優乎？劣乎？.....            | 24 |
| 從油井至汽油桶.....           | 25 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 在“催化熱裂器”中的示踪劑.....     | 27 |
| 同位素稀釋法.....            | 29 |
| 肥皂、溶劑、和飛彈.....         | 30 |
| 輻射線處理法.....            | 31 |
| 同位素之產銷狀況.....          | 34 |
| 明日之展望.....             | 35 |
| 附錄一：放射性同位素之工業應用.....   | 38 |
| 使用同位素之主要工業產品及各種活動..... | 42 |

# 放射性同位素之工業應用

原 著 Philip S. Baker  
Domenk A. Fuocillo, Jr  
Martha W. Gerrard  
Robert H. Lafferty Jr

譯 述 李 寬 宏

## 明察秋毫

依照著名的科學家兼作家，查理士·斯諾爵士的看法，“科學革命”始自三十年前，當原子首次用於工業界之時。而近十五年來，放射性同位素在工業上之應用，已經非常普遍。到今日，它們的用途，並非在於鼓動風潮，促進“革命”——雖然無庸置疑地，它們確實促進了我們科學的進步——而在使各工廠老闆能夠出產價廉物美的產品。

同位素在工業上之應用，主要在於量度，檢驗和加工。至於為何它們能有所用，以及如何使用它們，那就是本書所要討論的主題了。待會兒，我們來看看它們的來源、性質，以及用途。最後，我們還要看它們在未來，能作何貢獻。

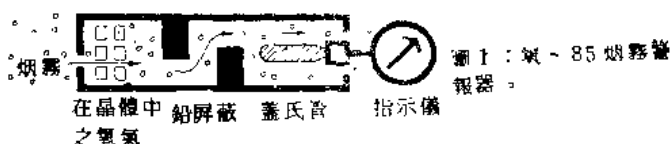
縱使極微量的同位素，也能够被探測出來。此一性質，使得它們身價百倍。關於它們的可探測性，我們要回想到一個有關發展同位素示踪劑的先驅，喬治·哈佛西的故事。（在一九一一年時，哈佛西已在放射線權威之一的拉塞福的英國實驗室工作。）那時哈佛西在宿舍裏搭伙，他老是懷疑他的食物裏是否有昨日的剩菜。爲了查明真相，他把一些同位素放在沒吃過的食物裏。第二天，當他用一個計數器去測量時，赫然發現，有些計數確實是因他自己盤中之食物而起的。

在今日，同位素已經是如此普遍，因此在許多工業界，已經對它們非常熟悉。但是，有時候它們仍舊會使人感到驚奇莫名，嘆爲觀止。比方說，放射性的惰性氣體，氙，可用來偵測空氣中的雜質。有一

## 2 放射性同位素之工業應用

種型式的警鈴，把氮氣“關”在透明的化合物裏。當二氧化硫這種惡劣的空氣污物，進入警報系統時，因為化學作用，便把氮氣放了出來。蓋氏偵測器便能把氮氣偵測出來。由記數的多少，我們就可知道到底有多少二氧化硫取代了氮氣。（圖一）在一個城市幾個要點的上空，擺上幾個這些機器，由這些裝置供給的一連串情報，就可使工業機構或政府機關，曉得是否該下命令，禁止發烟操作，燃燒樹葉，以及其他生烟的行動。

當然，除了可探測性外，還有許多因素，使得同位素在工業上有很大的用途。底下，當我們研究它們如何貢獻於社會人群時，順帶也要看看它們其他的性質。



## 同位素淺釋

### 我們的原子世界

所有的物質都含有很小的粒子，叫做原子。這些原子雖小，可仍有它們的構築材料，名之曰：質子（帶正電）中子（不帶電）和電子（帶負電）。質子和中子乃位於原子之中心，構成原子之原子核，而電子却在離原子核甚遠處，繞核旋轉。

所有的原子都有質子和電子。最簡單的原子該是氫原子，它只帶有一個質子在其核中。只要核中有一質子，在核外就相對的會有一電子繞核作軌道運行。

除了氫以外，所有的原子都帶有中子，這些中子，使得原子的重量因而增加。比方說，惰性氣體氦有兩個質子兩個中子在其核中；而普通的碳有六個質子及六個中子。最重要的一點在於：對於每一固定數目之質子（這個數目決定此元素之性質）可有許多不同數目的中子與其匹配。就是這些中子數目之差異，才產生了所謂的同位素。在同

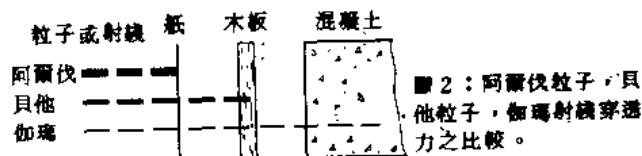
位素之原子間，其差異僅在於中子數目之不同而已。

讓我們來看看最簡單的同位素，氫。普通的氫只有一個質子一個電子；而重氫，或氘，有一個質子一個中子和一個電子；至於超重氫，或氚，却有一個質子兩個中子和一個電子。

### 從“不愉快原子”到“閃爍原子”

每一原子核中之中子數與質子數之比皆為固定。要是這個比數能在某一很窄之範圍內，則此原子稱為“愉快”或“穩定”。要是這比數超出或低於此一限制，則此原子會變得“焦躁”或“不穩定”，因而使其結構發生變化，成為一具有穩定之中子數與質子數比的新原子。在它的結構發生變化的期間，此同位素常會放出輻射線，所以它被稱為放射性同位素，也可稱之為“閃爍原子”。

大部份之原子核，在其結構重新組合時，都會放出阿爾伐粒子，貝他粒子，或伽瑪射線。阿爾伐粒子即氦之原子核（二質子二中子），質量比其他之兩種射線要大得多，但穿透力却很小，故只要用一張紙就可把它擋住。貝他粒子是從原子核中發射出來的電子，比阿爾伐粒子要小得多了。（它的質量只有質子的二千分之一）。雖然它的穿透力比阿爾伐粒子要強得多，但也只要用一塊薄木板就可將其擋住。至於伽瑪射線，它是和普通光線一樣的電磁波，能夠穿透極厚的緻密物質。放射性同位素衰變時，有一極重要的特徵，即半化期。所謂半化期的定義是，一放射性同位素衰變至其半數之原子變為穩定，所需之時間。若我們應用同位素來作為能源，作化學催化劑，或作放射性



照相之材料，則最好能選半化期較長者，如此，我們才不必時時更換同位素。但當作示踪劑時，我們要選半化期較短的同位素，使其在盡完職責後，能儘快衰變消失。

## 4 放射性同位素之工業應用

### 同位素之製造

僅有一些自然元素有不穩定之核組合，也就是說，它們是天然的放射性同位素。比方說，鉀元素中一包括在人體裏面的一僅有一小部分是放射性的鉀四十。大部分之放射性同位素都是由人工作成的。方法有三：(1)加進中子或去掉質子，(2)加進質子或去掉中子，(3)分裂——也就是說，把中子加進至一大原子，使其裂成碎片，這些碎片就是放射性同位素。(圖三)。第(1)和第(3)個方法大都是在反應器內進行，而第(2)個方法，則多由加速器製造。

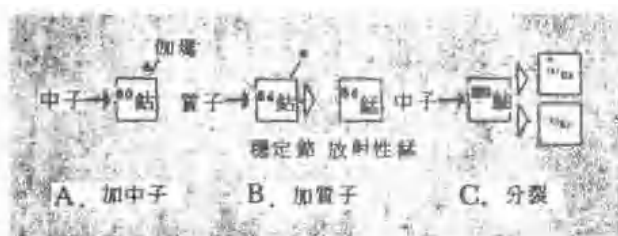


圖3：人工放射性同位素之製造。

圖四列出製造放射性同位素之一些反應，並一一舉例。在目前，約只生產一百種放射性同位素。雖然我們已發現差不多有一千五百種的同位素，但因大部分之半化期實在太短，因此不能有什麼大用。大約有兩百至三百的同位素，具有被應用的潛力，我們所要做的就是，在技術上作種種之發展與改進，使這些同位素的價格能夠減低，以便利利用。

圖四：製造放射性同位素之反應

| 基本反應             | 例                                                  |
|------------------|----------------------------------------------------|
| $(n, \gamma)$    | 鈷 <sup>59</sup> $(n, \gamma)$ 鈷 <sup>60</sup>      |
| $(n, p)$         | 氮 <sup>14</sup> $(n, p)$ 碳 <sup>14</sup>           |
| $(n, \alpha)$    | 鋰 <sup>6</sup> $(n, \alpha)$ 氦 <sup>3</sup>        |
| $(n, \text{分裂})$ | 鈾 <sup>235</sup> $(n, \text{分裂})$ 鈯 <sup>137</sup> |

|               |                                               |
|---------------|-----------------------------------------------|
| $(p, n)$      | 銅 <sup>65</sup> $(p, n)$ 銻 <sup>65</sup>      |
| $(p, 2n)$     | 銻 <sup>69</sup> $(p, 2n)$ 鎳 <sup>67</sup>     |
| $(p, pn)$     | 錳 <sup>55</sup> $(p, pn)$ 錳 <sup>54</sup>     |
| $(p, \alpha)$ | 鎂 <sup>25</sup> $(p, \alpha)$ 鈉 <sup>22</sup> |
| $(p, 2p)$     | 鎳 <sup>58</sup> $(p, 2p)$ 鈷 <sup>57</sup>     |

• 上面所用之一些名稱，乃表示核反應之標準“速寫”。括弧內之字母，表示反應之參與者。在逗點前面之符號，代表撞擊原子核而引發反應的“子彈”而在逗點後面之符號，則代表反應所產生之粒子或射線。故，“ $(n, \gamma)$ ”表示“一個中子撞擊原子核，使核放出一個伽瑪線”。“ $(p, pn)$ ”表示“一個質子撞擊原子核，使核放出一質子及一中子”第一個例子，假如用化學符號將其寫完全應為：鈷五九加中子一鈷六十加伽瑪線。

## 成法器之由

要想使用放射性同位素，我們就該能利用它的放射線。現在，讓我們來看看它的四個重要性質。

### 1. 利用輻射線追蹤物質

當一個不穩定之原子核在衰變時，就會放出可被偵測得到的輻射線。這些輻射線通常包括伽瑪射線或貝他粒子。所以我們用一偵檢儀就可偵檢出這些原子的位置。利用放射性同位素，追蹤正在被處理的物質的方法，就叫示踪劑技巧。

### 2. 物質影響輻射線

既然大部分輻射線的能量比平常的光線要大，所以它能够穿透不透明的物質。雖然如此，也並不是說所有的輻射線都能穿透過去。因輻射線穿透的程度如何，與這個物質的密度、厚度和射線本身之能量有關。這個性質，使我們能用放射性同位素來量厚度，找出金屬鑄型中的洞窟，檢驗焊接情況，照出隱蔽物的影像——比方說，人體中的骨骼，和密封住的物品。



## 6 放射性同位素之工業應用

### 3. 輻射線影響物質

就像我們在陽光底下曝曬過久會日炙一樣，我們要是在放射性同位素的伽瑪射線下暴露過久，也會受到傷害。這種高能的射線可以殺菌和除蟲；因此，放射性同位素可用來消毒食品和物質。這種放射能可用來催化化學反應，也可作為觸發化學反應所需的能量。

### 4. 輻射線具有能量

從不穩定原子核放出來之射線，具有甚高之能量，要想把此能量轉化成電能和熱能並不難。當阿爾伐粒子，貝他粒子，或伽瑪射線被物質所吸收時，它的能量變成熱能，只要用一熱偶器，即可把此熱能轉化成電能。利用此一性質，我們就可將放射性同位素作為照亮警標的能源，且可操縱無人氣象站，以及作其他重要的工作。

### 放射性同位素用途

| 示踪劑：     | 輻射線影響物質：   |
|----------|------------|
| 測流量      | 作催化劑       |
| 測磨擦及磨損度  | 食物保藏       |
| 同位素稀釋    | 加速生長       |
| 作標識劑     | 殺蟲         |
| 物質追蹤     | 聚合         |
| 研究反應過程   | 化學作用       |
|          | 合成         |
|          | 研究新陳代謝     |
|          | 品種改良       |
|          | 醫學及製藥儀器之消毒 |
| 研究物品之分離  | 過濾         |
|          | 電解         |
|          | 熱源         |
| 物質影響輻射線： | 能源         |
|          | 量密度        |
| 測度及控制    | 量液面        |
|          | 量厚度        |
| 輻射線照像    |            |

### 不入虎穴、焉得虎子

使用同位素有時不免會引起傷害，但是，和我們日常在接觸的一些商業產品，所可能引起的災害比起來仍然是小巫見大巫。核子工業一直有十分良好的安全記錄。在核子工業創辦之最初廿年間，所發生的七次輻射線災害，皆非使用同位素所引起。

有些人對放射性同位素心存畏懼，他們之所以如此，乃因見到原子能軍事用途之可怖；同時，輻射線之不可感，不可聽，不可聞，不可見，不可嚐，亦易使人油然而生焦慮之心。但是，我們要知道，有一些極為普遍易得的儀器，很容易就可勝任偵檢放射線的任務，而補我們感官之不足。因此，我們不必害怕不知道輻射線的確實位置，而且，只要有適當的屏蔽，我們就可心安理得地製造，包裝，使用同位素



圖 5：用放射性金樹加利福尼亞州內，測量河流的流量。所用示踪劑量極微，不會對人體上有任何傷害

## 8 放射性同位素之工業應用

### 瑕疵難免

工業上應用同位素，確實有些小缺點。但這些缺點，我們都是可以控制的。

1.雖然在使用極微量的同位素作各種用途時，只要受美國原子能委員會“普通執照法”的管制，可是，當要用大量的同位素時，就需要美國原子能委員會的特別執照了。想得到一張這種特別執照可不簡單，首先，他必須有能够絕對安全處理同位素的才智。（一般民衆，不需特別執照，所能擁有的最高量同位素，如圖六所示。）

圖六一普通執照所許之放射性同位素標準量

| 同位素名                               | 許可量，<br>微居里 | 同位素名                             | 許可量，<br>微居里 |
|------------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|
| 銻 <sup>124</sup>                   | 1           | 鈦 <sup>102</sup>                 | 10          |
| 砷 <sup>77</sup>                    | 10          | 鐵 <sup>55</sup>                  | 50          |
| 鋇 <sup>140</sup> —鐳 <sup>140</sup> | 1           | 鐵 <sup>59</sup>                  | 1           |
| 鐳 <sup>100</sup> —銀 <sup>100</sup> | 10          | 磷 <sup>32</sup>                  | 10          |
| 鈣 <sup>45</sup>                    | 10          | 鉀 <sup>42</sup>                  | 10          |
| 碳 <sup>14</sup>                    | 50          | 鉍 <sup>147</sup>                 | 10          |
| 鎳 <sup>107</sup> —銀 <sup>107</sup> | 1           | 銀 <sup>111</sup>                 | 10          |
| 鉻 <sup>51</sup>                    | 50          | 鈉 <sup>22</sup>                  | 10          |
| 鈷 <sup>60</sup>                    | 1           | 銻 <sup>90</sup> —鉍 <sup>90</sup> | 0.1         |
| 銅 <sup>64</sup>                    | 50          | 硫 <sup>35</sup>                  | 50          |
| 金 <sup>198</sup>                   | 10          | 鎘 <sup>99</sup>                  | 1           |
| 氫 <sup>3</sup> （氚）                 | 50          | 鉍 <sup>90</sup>                  | 1           |
| 碘 <sup>131</sup>                   | 10          | 鋅 <sup>65</sup>                  | 10          |



圖 7：在具有強烈輻射線的小室，處理放射性同位素的方法。操作者必須用遙控的鉗子，把放射性物質（在左方者）倒入到試管中。

## 測 度

### 死海紙捲及太空探險

以科學的知識為理論基礎，一位現代的“預言家”認為，要是靠著放射性同位素的幫忙，我們就能造可保存兩萬年的紙張——十倍於那些直到一九四七年才被人發現的死海紙捲所掩藏於底的時間。我們之能作這個預言，是基於利用放射性同位素，碳十四，所作的研究。當然，它只是個預言罷了，但是底下說的却是事實：你手上拿的這本書——就像你目前購買的一些紙製品一樣——說不定都是經過原子檢驗的。多年來，世界上之大紙業商，已經利用放射性同位素，在紙從機器飛快地滾出時，測量出紙的厚度。人類不斷尋求更精密儀器的結果，已經使他測量的靈敏度，從一吋左右進步到小於百萬分之一吋。（圖八）。在一些現代工業中，用來量產品的儀器所測度的誤差，僅十萬分之一吋——差不多一根人髮之直徑。而在某些工業中，精確度的要求竟達百萬分之一吋——這個長度可打個比方：當一隻蒼蠅站在鐵軌時，橫木所陷下的距離就差不多為百萬分之一吋。

製造商為了要利用精確的測度，使他們的產品能夠均勻而大傷腦筋。在大量製造時，使產品之品質均勻一致是必需的。一支太空探險火箭，包括有三十萬件的部分零件。這些零件是由分散全美國的廠家所分別製造。要把這三十萬個零件拼湊成一支火箭，而且要使其正常

## 10 放射性同位素之工業應用

操作，製造時所要求的精確度，就够瞧的了。這些彼此關聯的零件，縱使其可靠性到達百萬分之九十九萬九千九百九十九，也還是不够的。統計分析的結果，這麼一支火箭，能够成功地飛行的或然率也只有百分之五十。

圖八一測度方法之發展過程

| 單位或方法                                         | 創立之時代  | 精確度    |
|-----------------------------------------------|--------|--------|
| 碼（約一手臂長）                                      | 紀元前三千前 | 一到二吋   |
| 巴立空（Barleycorn）<br>（一顆穀粒長一約三分<br>之一吋）         | 十四世紀   | 十分之一吋  |
| 測微計                                           | 十七世紀   | 千分之一吋  |
| 約翰孫氏測度鋼塊                                      | 十九世紀末  | 十萬分之一吋 |
| 干涉量度學（Interfero-<br>metry）（光束）<br>放射性同位素（輻射線） | 二十世紀   | 百萬分之一吋 |

### 隔空測度

你在造這三十萬個零件時，要怎麼檢查它們的品質是否均勻呢？大家都聽到過，有一個小男孩拆開一個手錶，想看看裏面到底是什麼東西在滴答作響，後來他却沒法把手錶裝回去。這就是一個“破壞性檢驗”的例子，這種方法並非老是有效的。另外的一種法子，就是所謂“非破壞性檢驗”。由醫生所作的身體檢查，就是一對個人健康及肉體健全的“非破壞性檢驗”。同樣的方法，在工業界中，也日漸重要了。

用放射性同位素測度的例子之一，就是測量厚度。這玩意兒雖然本身忙得團團轉，可是它外表一點也不顯眼，說不定你在參觀工廠時，就會把它漏了呢。（圖九）。它通常包括一個裝放射性同位素的箱子（比方說，銨一三七），一個放射線偵檢器，和一個指示器。要測厚度的物質，以片狀通過放射性同位素源及偵檢器之間。這個測度的

作用方法，可拿陽光到達你眼睛的作用來比方：陽光射入你眼睛的多少，與你是否戴了太陽眼鏡有關。如果戴了，又與鏡片顏色的深淺有關。同樣地，輻射線抵達厚度測度之偵測器的多寡，與欲測量之物質的厚度和質量有關。因此物質能擋住從放射性同位素源所發出的輻射線。（圖十）。然後由一個計量表把測量的結果紀錄在一張圖表上。現在商業上用的儀器，能够把以每分鐘數百英尺的速度通過的紙張，或其他片狀物質的厚度變化情形，記錄下來。



圖 9：橡膠工廠中用的放射性同位素厚度測度。

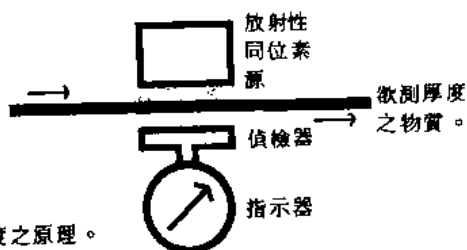


圖 10：厚度測度之原理。

把儀器改良之後，我們可以用伺服機械，把偵檢器之信號回授，使得滾筒系統之情況改變，也因而遙控了薄片的厚度。因此，放射性同位素的儀器，不但能够繼續不斷地測量物質的厚度，而且也可以控制它的厚度。

## 12 放射性同位素之工業應用

我們來考慮一個問題：一位砂紙製造商，要如何才能知道是否有足夠的磨砂附到紙上去呢？當然，他可以像那個男孩子對錶所作的一樣：把機器停住，然後沿著產品線，在各個地方撕下幾片紙條，再拿去檢驗。有時，這不失為一種好方法，但它實在太浪費時間，而且操作起來非常不便。而且，這種隨意抽樣，只能給這個製造商，對整個生產過程一個很有限的了解。同時，這種方法，還浪費了產品。

這個製造商，可藉放射性同位素測度的方法，來解決這個問題。（圖十一）。操作的步驟是這樣的：(1)上橡皮膏，(2)上磨砂，(3)在爐中作部分之硫化，(4)再上橡皮膏，(5)再硫化。只要他在各步驟間測度，他就知道該好何控制橡皮膏和磨砂的數量，他也就能夠造出各種粗細不同的砂紙，而且紙面要均勻得多。

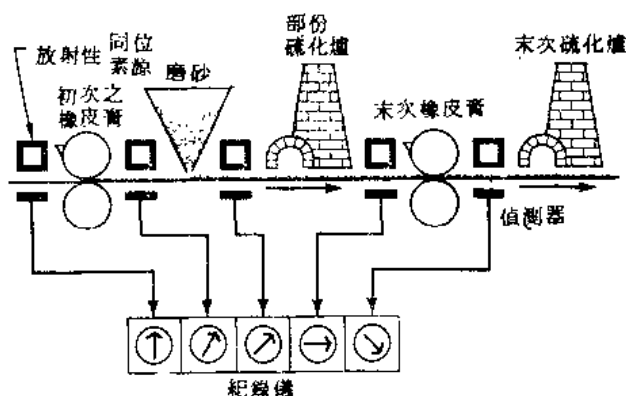


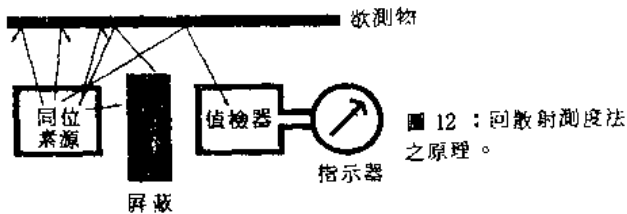
圖 11：多紙放射性同位素測度法及遙控作用。

### 其他之放射性同位素測度法

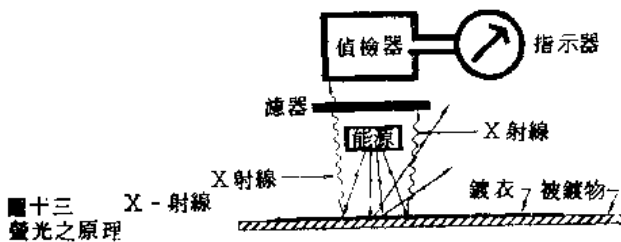
有一個類似於砂紙製造商的問題，就是要測量附著於其他物品上面的薄層的厚度。比方說，對於錫罐製造工廠而言，到底上了多少錫箔到鐵板上面去，是一個很重要的問題。這個製造商便可以用同位素的同散射法，或X光來測出錫箔的厚度。

同散射的測度方法，和前所談之厚度測度之原理很相像。輻射線有一個性質，就是當它打到任何物質時，立刻就被散射。物質越厚，

則輻射線被散射得也愈多，直到某一程度為止。在同散射測度法中，我們要把偵測器遮蔽好，使得它除了散射回來的輻射線外，不會再受到其他輻射線；因此，打入偵檢器的輻射線越多，也就是表示所測的物質越厚。（圖十二）就如在厚度測度時的情形一樣，指示器和紀錄儀能把很微小的厚度變化，連續不斷地記載下來。這種測度方法也用來量諸如鐵管的管壁厚度，或其他不適合在兩旁測度的物質。（即只能在物質之一側測度。——譯者註。）



在X光測度法時，射出的輻射線不但激發了鍍衣（Coating），也激發了被鍍物（Backing），於是產生的X光的特性，就由此二種物品中所含之元素所決定。當鍍衣被激發時，產生的輻射線強度隨鍍衣之厚度增加。而當被鍍物被激發時，它所產生的X光在到達偵測器之前會被鍍衣所吸收，因此，鍍衣的厚度越大，它放射出來的X光就越弱。不管是用同散射測度法，或用X光測度法，偵檢器總是能够經由輻射線強度的變化，而得知厚度變化的情形。





## 14 放射性同位素之工業應用

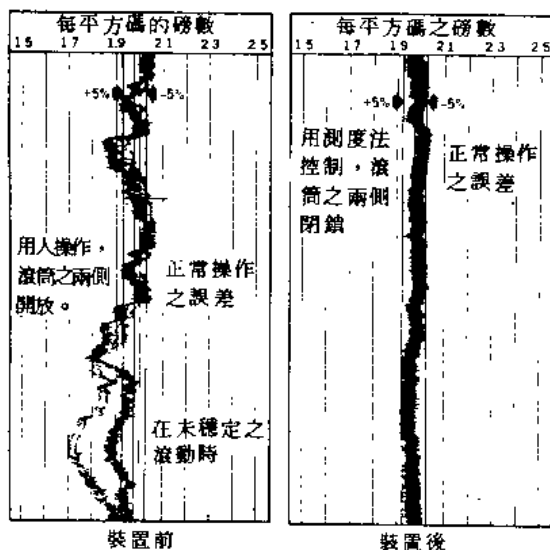


圖 14：一家輪胎工廠裝置放射性同位素測度設備之成果。在裝置前，輪胎之厚度變化極大，而裝置後，則厚度變化極微。

在使用X光測度法和回散射測度法時，所測之輻射線強度，也和被测物之密度及原子序有關。有時在工業應用方面。這些特質也是我們所需要知道的。（圖十五）

回散射法之最大功用在於：當一件欲測物只能從它的一邊去測度時，用此法甚為方便。而用X光之測度法之益處則是：它測度的準確性特高。（圖十六）

另外一種測度儀就是水平面指示器。這種儀器，能够“看見”在一個容器中的物質的水平面。比方說，它可應用於飲料工業中，以很高的速率，找出沒裝滿的罐子。（圖十七）。而在化工廠中，我們用此種測度儀來把剩存的腐蝕性溶液，保留在桶中；在煤礦工業裏，則可用來報告在煤礦區的許多載煤車，那幾輛已經裝滿了。它也可應用於其他的工業裏。

像電燈開關一樣，水平測度法也是利用“開或關”的原理的。當在同位素和偵檢器之間，存在有某種物質時，指示器便是“關”著的