

化工技术資料

HUAGONG JISHU ZILIAO

化学工業編輯部編



化学工業出版社出版

放射性同位素在化学工艺中的应用

M. B. 涅依芒

在使用放射性同位素进行許多工作时，必須首先制备分子中含有放射性原子的物質。其中某些物質是用工業方法制备的，而另外的一些物質是用普通化学方法或微量化学方法在實驗室中从工業上所供給的原始物質加以合成的。此等物質的許多合成方法，在苏联者和外国学者們的著作中已有論述^[1-3]。

应用放射性同位素的工作中的重要步驟之一，是为了測量放射制备試样。在应用輻射照相法 (Радиография) 的情況下，制备就是研磨以及磨光有放射性同位素分布的表面。在要求測量某位素的放射性，而这种同位素处在溶液中的时候，則常常把这种同位素轉变成难溶的化合物。把所生成的沉淀定量地收集在濾紙上，尽可能地使沉淀在濾紙表面上分佈均匀。

在阿伊瓦卓夫 (Айвазов)、涅依芒 (Нейман) 和塔里洛澤 (Тал-ьрозе)^[5]的論文中，闡述了在測量放射低能量 β 粒子的放射性同位

素时所需試样的制备方法。

实验室的装备和安全技术

在为了使用放射性同位素进行工作而建立实验室时，必须保证工作人员对射线有良好的防护，并要保证清洁，能够清除放射性沾染物。对于使用少量放射性（10毫居里以下）的工作，通常把实验室建成一个大房间和三个小房间。在大房间中进行全部化学操作；小房间之一用于具有較高的放射性的工作，另一个用于試样的計数測量，而第三个用于閱讀和处理实验数据。从进行放射性較高的工作的小房间中出来时，必须仔细地用特殊的計数器測量鞋子、手和衣服上的放射性，以避免極微量的一些放射性同位素偶然地沾污了化学容器和門的把手、椅子和工作台的表面。这种物质能够落到計数器中而使得計数器長期地不能进行工作。实验室的地板应该鋪上沒有縫的或者接补得很好的漆布；牆壁和天花板都应塗上油漆。必须完全沒有裂縫或难于进行打扫洗刷的地方。工作台和其他木器家具应当塗上可以用稀酸溶液洗刷的油漆。关于油漆种类和用于放射化学实验室中的材料的詳細說明，可在專門論文中找到^[6-8]。

通風厨的设备必须予以特別的注意。厨壁应该用金屬制成，其厚度应当保证能够吸收所用同位素的放射性射线。在工作期間最好用濾紙遮盖通風厨的内壁，而濾紙可定期地除去。

对于使用揮發性的放射性同位素化合物的工作，以及在可能产生飞沫和塵埃的情况下，应当使用密閉的干燥箱。这种箱子安裝着具有特殊縮口的橡皮手套。把手伸入橡皮手套中，可以在小室的内部进行一切使用放射性同位素的必要操作，例如打开安瓿、研碎、溶解、過濾、蒸餾等等。箱子用特殊的帶反射鏡的灯照明。通过用無机玻璃或有机玻璃制成的小窗观察操作。如果有必要，則箱子內的空气用惰性气体代替。电流和真空泵的管子也要引入箱子內，要把箱子联到單独的通風系統上。

如果試样含有放射軟射綫（能量較弱的射綫——譯者註）的同位素，而且其射綫易被擋住，則把这种試样保存在薄鉄片制成的容器中，而含有放射硬射綫（能量較強的射綫——譯者註）的同位素的样品則保存在鉛制厚壁容器中。

在放射化学實驗室中應該有后備的鉛制容器，以便存放和運轉放射性物質，并且要有一套特殊的加長的鉗子，以便在使用放射性物質和放射性溶液時進行各種操作。在實驗室中進行工作時，要穿戴罩衫和橡皮手套，當發現它們上邊已有放射性沾染物時，必須更換。

放射性同位素在桌面、牆壁或地板表面上是否存在，可用以下的方法檢查，即用大小一定的一塊標準濾紙擦拭物體，然後在計數器上測定濾紙的放射性。測量液體和溶液的放射性時，先在濾紙上蒸發一定容積的液體，然後測量（關於放射性沾污的測量問題，可查閱一般的放射性防護書籍——譯者）。某些放射性同位素在空氣中、溶液中和人體內的最高允許量列於表 1。

放射性同位素的最高允許濃度

表 1

同位素	空氣中 (毫居里/毫升)	溶 液 中 毫居里/毫升	體 內 (毫居里)	體內積蓄 毫居里/晝夜
Ra ²²⁶	8×10^{-2}	4×10^{-8}	0.1	10^{-5}
Sr ⁹⁰	2×10^{-16}	3×10^{-7}	1.0	2×10^{-4}
Na ²⁴	10^{-6}	8×10^{-3}	15	20
P ³²	—	2×10^{-4}	10	0.5
CO ⁶⁰	—	1×10^{-5}	1	0.05
J ¹³¹	3×10^{-9}	3×10^{-5}	0.3	0.015

人體實際吸收的放射性射綫允許劑量的確定和測量，在安全技術中起着很大的作用。放射性射綫的測量單位是倫(рентген)，1 倫相當在標準條件下在 1 毫升空氣中產生 1 CGS 單位的電荷，即 2.08×10^9 對帶一個電荷的離子，或者是相當於 0.11 爾格/毫升空氣 = 83

尔格/1克空气。倫以符号 P 表示（英文文献中以 γ 代表倫——譯者）。

在1个工作日内，人体所吸收的放射性不超过 $0.05 \sim 0.1 P$ ，或一週內不超过 $0.3 P$ ，在这种情况下进行工作是允許的。要保証有这样的条件：即衣服和 150 平方厘米工作台表面的輻射，每小时不得超过 0.1 毫倫，而身体表面的輻射每小时不得超过 0.05 毫倫。

在使用放射 γ 射綫的放射性同位素进行工作时，必須用鉛屏保护，或者与 γ 射綫离开一个安全距离。如果放射性同位素所放射的 γ 射綫的能量等于 1.5 百万电子伏特，而在放射源放射性为 10 毫居里时，必須离开放射源 1.1 米，以使放射性射綫不超过每小时 2.5 毫倫的水平。

在阿格林切夫 (Аглинцев) 的專著中有防护放射性射綫和剂量学方面的有益的知識^[9]。

放射性同位素的应用

放射性同位素能够在化学工業中用作标记原子，或用作放射穿透射綫的輕便放射源。在第一种情况下放射性同位素的化学性質起着主要的作用，其化学性質与相应的稳定元素的化学性質实际上沒有区别。放射性同位素所放出的射綫，用以作为探测同位素存在处的标志。在第二种情况下，是利用放射性同位素在蜕变时所放出而被所研究的物質吸收或散射的射綫。在这种情况下，放射性同位素的化学性質無关重要。

放射性射綫

所有利用放射性射綫的測量裝置，都是由三个基本部分組成的：射綫放射源、吸收这些射綫的物質和記錄仪器。測量的結果是与这三个部分的狀況有关的。在一般工業中特别是在化学工業中，放射性射綫的应用，可以根据这三个部分的狀況进行分类。

放射性同位素放出的穿透性射線的应用，可以分为三类：仅仅是放射源有变化的情况属于第一类；吸收物有变化者属于第二类；记录仪器有变化者属于第三类。

第一类（射線放射源的变化）

这一类分成三个分类：（1）射線源作为定性的信号；（2）放射性在放射源中的分佈；（3）放射性的放射源在空間移动。

（1）射線放射源用作信号 在許多情况下，同一条管道必須連續依次輸送各种不同的液体，例如煤油、苯及潤滑油。为此目的，在临結束某种液体的輸送时，將数桶这种液体通入管道，但其中加入少量可以溶解在这种液体并含有放射 γ 射線的放射性同位素的物質，例如三苯基銻。靠近管道，在有上述物質流动的地方放置一个 γ 計数管，这个計数管根据射線可發現結束輸送某种液体的时刻和开始輸送另一种液体的时刻。在得到信号以后，可以轉換活門，使新种类的液体流向另一容器。为此目的而应用放射性同位素，就可以不必消耗大量資金敷設許多管路以輸送各种液体。

在化学工業中常常采用管式热交換器。找出一种檢查其漏洞的簡單方法是个重要問題。采用放射性同位素可以極簡單地解决这个問題。將含有放射性同位素（例如 Na^{24}Cl ）的物質的溶液放入冷却液体中，使这液体在热交換器中流过。把兩個計数管放在交換器出口管及冷水流出管的旁边。根据計数管所显示出来的放射性可以看出有漏洞存在^[10]。

污水在流入河流之前，应当使其經過适当的過濾裝置，以进行清潔处理。为了探測物質流經過濾器的狀況，可在污水中加入少量的含有放射 γ 射線的放射性同位素的物質。在過濾裝置后面流淨化水的管道旁，放置一个計数管。当計数管指出有放射性物質流过时（放射性物質的流出表示過濾裝置已經失效——譯者），則特殊的繼电器即接通轉換开关体系的伺服电动机，以使污水改变方向，流經新的過濾器，而用过的過濾器停用，以便洗滌。

屬於這一分类的还有其他一些放射性同位素在工業上应用的例子。

(2)放射性的分佈特征 在許多生产上需要混合粉末。所获得的混合物的均匀性，在相当大的程度上会影响最后产物的質量。在組份之一中加入極少量的含有放射性同位素的物質（例如食鹽 Na^{24}Cl ）。混合物落在傳送裝置上，而安裝在混合物上边的計数器記錄 γ 射綫。在混合物是均匀的情形下，計数器記錄的放射性强度不变，但如果混合物是非均匀的，則計数器的讀数就会随时改变。

同样的問題發生在以下的情況，即在生产上常采用兩種組份的溶液。例如在染布車間里（例如要用混合数种染料的方法以配制顏色），或者在利用混合溶液的化工生产中，都会有这类問題。原料溶液分別放在兩個貯槽中。在一个貯槽中的物質內加入放射性同位素。用計数器記錄最后溶液的成份。当特殊裝置發現溶液的濃度已經不合标准时，就会自动地調节兩種溶液的相对流量。

(3)放射源的移动 測量封閉貯槽中液体液面高度的方法之一，是采用浮标为基础，浮标中放入少量的放射 γ 射綫的放射性同位素，例如 Co^{60} 。置在貯槽上部的計数器的讀数决定于液面的位置。当液体水位升高而浮标向上漂起时，計数器記錄的脉冲数較多；而当液体水位下降时，計数器記錄的放射性强度較小。計数器的信号能够傳給自动調节器，或者利用繼电器开动伺服电动机而自动地打开或关闭液体流入貯槽所經過的开关。儲存毒物或儲存火險物質的貯槽，其液体水位用这种类型的裝置来調节是很合宜的^[11]。

属于这个分类的还有許多仪器，这些仪器有的用来測量封閉貯槽或管道中的液体流动速度，有的用来測量催化剂在流动体系中的运动速度。用于測定液体在管道中流动速度的裝置是这样的：在液体中注入少量含有放射性同位素（放射 γ 射綫）的物質。在管道（液体沿此管道流动）上的兩個已知距离的地方分別放置兩個計数管。由計数管得到的信号用示波器或其他仪器記錄。兩個計数管的

信号记录的时间不同，設其時間差为 t 。记录中的時間間隔与計数管間的距离 a 的大小有关系。如果測出 a 和 t 的值，則液体在管道中的流动速度 V 可以按下式算出：

$$V = \frac{a}{t} \quad (1)$$

如果在催化剂中加入一些小顆粒或小球，其中含有放射 γ 射綫的同位素，則可以觀察催化剂在流动体系中的运动。在管道（催化剂沿此管道循环）的外表面放置两个計数管。这些計数管發出的信号可使人們在裝置进行工作的全部时期內觀察催化剂在封閉体系中的运动。

利用放射性同位素观察气体的运动情况，也属于这一分类。这种测量的实例之一，是放射性同位素在檢查通風設備的工作方面的应用。如果在所考察的房間里的空气中，加入少量的气体或蒸汽，其組份中含有放射性同位素，例如氫或被放射性溴标记的溴甲烷，則由于自然通風而房間中的放射性强度将会逐渐降低。測量時間內的放射性强度利用計数器測定，此裝置放置在所考察的房間中。如果把測量結果繪在 $\lg I$ 和 t 的坐标上（ I 是放射性强度，脉冲/分鐘； t 是時間，分鐘——譯者註），則通过实验点，能够划出直綫，根据其斜率就可以很容易地求出空气交換倍数。

属于这一分类的放射性同位素的应用應該指出的尚有气流速度的測定，蒸餾过程的檢查，分餾时重餾份携帶量的測定。

第二类（吸收体的变化）

这一类同样也可分为三个分类：（1）測量吸收体的非均匀性；（2）測量吸收体的密度和比重；（3）与生物体有关的工作。

（1）吸收体的非均匀性 由于許多放射 γ 射綫的放射性同位素很易得到，所以在近年来广泛的采用了用 γ 射綫探测制件的方法。这个方法称为 γ 射綫照像法。对于探测薄的制件，例如玻璃或塑料做的制件，可采用 γ 射綫能量为 0.084 百万电子伏特的銦同位素，而对于較厚的制件用 γ 射綫能量为 0.6 百万电子伏特的釷放射性同

位素。对于探测十分厚的制件（厚度为 50~100 厘米），例如混凝土制件，则采用 γ 射线能量为 1.3 百万电子伏特的钴放射性同位素。

将这些放射性同位素保存在厚壁铅桶中，以保证使用此等放射性同位素的工作安全。把放射性同位素放在所检查的制件的一面，而装有爱克斯光感光胶片的盒子放在另一面。“露光”（露光时间的长短依据放射源的放射性强度而决定）以后，把放射性同位素都放回铅桶中，而胶片则进行显影。根据爱克斯光感光胶片上的变黑状况，能够判断所探测的制件的不均匀性，特别是能够发现其内部的气孔、裂纹及各种外来夹杂物^[12]。

在生产上常常代替 γ 射线照像法而采用较方便的 γ 射线透视法（Гаммаскопия），即探测所研究的制件时，不使用照像胶片感光的方法观测 γ 射线，而是用计数器来进行记录。

利用 γ 射线照像法，易于查出焊接的各种缺陷，所以这一方法宜于用以进行大量的焊接检验工作。在焊接工作中采用 γ 射线照像术能够大大地提高劳动水平，并使废品减低到最小程度。应用放射性同位素测量形状不规则物体的面积也属于这一分类。

（2）吸收体的密度和厚度 如果吸收体是均匀的，则根据 γ 射线在其中的吸收和散射可以测定其密度和厚度，在某些情况下还可以测定其化学成分。在封闭管道中流动的溶液密度的测定是一个实例。

用于这一目的的仪器利用了 γ 射线的散射现象，它是与液体密度成比例的。用厚壁的铅保护器使 γ 射线的放射源（例如同位素 Co^{60} ）与计数器隔离开。 γ 射线能够射到计数管上，仅是由于在管道内流动的液体中散射的结果，管道旁边放置一个测量仪器。根据计数器指出的放射性强度可以判断沿管道流动的液体的密度。

如果研究对象可以从两面进行测量，则根据 γ 射线或 β 粒子的吸收很容易测定其厚度。为这个目的而设计的仪器可以用来测量橡

片帶、無機玻璃、有機玻璃、厚紙板和紙張的厚度。這樣的儀器可以測量制件的厚度而不必接觸其表面。因此對於測量在生產過程中移動着的制件的厚度很為適宜。

在蘇聯製造的這種類型的儀器，主要是用來測量冷軋鋼材和熱軋鋼材的厚度^[13]。

如果制件只能從一面進行測量，則只好根據 γ 射綫（在厚制件的情況下）及 β 粒子（在薄制件的情況下）的反射來進行測量。根據 β 粒子的反射甚至也能够測量塗層的厚度，條件是製成這個塗層的物質在門捷列夫週期表中的原子序數與底層物質的原子序數要有顯著的差別。 β 粒子的反射近似地與反射物質的原子序數成比例。因此如果用薄錫層塗在厚的鐵制的載體上，由於錫的原子序數(50)比鐵的原子序數(26)大得多，則由這種塗上錫層的鐵反射 β 粒子將要比沒有塗錫層的鐵強得多。測量反射 β 粒子束可以求出錫層的厚度，其準確度為0.25微米。這種儀器是包加切夫、維爾赫夫斯基和馬卡洛夫創制的^[14]。

如果反射物體是均勻的，並且有很大的厚度，在許多情況下可以根據由這種物質發生的電子反射來判斷其化學成分。例如利用這種儀器可以測定鐵中的鎢或鈮的含量，因為這兩種元素的原子序數要比鐵的原子序數高得多。茹霍維茨基和其同事曾經利用了根據 β 粒子的反射以分析合金成份的儀器測定了鋼的鎢含量和其它許多元素的含量^[15]。

類似的儀器能夠用於重元素溶液的快速分析。

(3)生物體 與射綫被生物體吸收有關的問題都屬於這一類。這類問題可以分成兩個類型：（甲）人、畜和植物對射綫的防護。（乙）利用這類射綫使化學藥劑消毒。

解決第一個問題時，要確定在使用放射性制劑進行工作時射綫的允許劑量。顯然，放射性制劑的允許劑量與距離的平方成反比，與放射源的放射性強度 I 及照射時間 t 成正比。這個關係可以下式

表示:

$$D = \frac{kIt}{r^2} \quad (2)$$

比例系数 k 与放射性射綫的性質有关。最常用的同位素的 k 值列于表2。

某些同位素的放射性射綫特征

表 2

同 位 素	半 衰 期	γ 射 綫 譜 (百万电子伏特)	k , 倫·厘米 ² /小时·毫居里
Na ²⁴	14.97小时	1.37; 2.75	18
K ⁴²	12.44小时	1.51	2.4
Se ⁴⁶	85天	0.89; 1.12	11
Fe ⁵⁹	47.1天	1.1; 1.28	6.5
Co ⁶⁰	5年	1.17; 1.33	13.5
Ag ¹¹⁰	270天	射綫复杂	—
Sb ¹²⁴	60天	射綫复杂	(12)
I ¹³⁰	12.6小时	射綫复杂	(13)
I ¹³¹	8.1天	射綫复杂	(2.6)
Cs ¹³⁴	2.3年	射綫复杂	(11.5)
Eu ^{152, 154}	15年	射綫复杂	(5.5)
Ir ¹⁹²	74.4天	射綫复杂	(2.7)
Au ¹⁹⁸	2.7天	0.411; 0.68(弱) 1.09(弱)	(2.5)

根据公式(2)可以大概地計算出使用某种同位素工作时, 在一个工作日内实验者所得到的剂量。如果这个剂量超过允許量, 則必須設法防护。在实验者与放射性同位素之間放置防护屏, 防护屏能局部吸收放射性射綫, 把剂量降低到允許量。在使用放射 β 射綫的放射性同位素工作时, 采用聚甲基丙烯酸树脂制的防护屏, 厚度为5~10毫米就足够安全了。在使用放射 γ 射綫的同位素时(例如鈷的同位素), 則采用厚的混凝土壁或厚約5厘米的鉛磚。关于安全技术的詳細介紹在許多專著和專門論文中有所闡述^[9, 10]。應該指出, 放射性射綫能够用来防治微生物和孢子, 制止它們在各种环境

中的發育。在这一方面曾經有人进行了許多研究工作，由这些研究工作可以看出广泛应用放射性射綫的可能性^[17]。

第三类（记录仪器的变化）

这一类方法包括的分类有：（1）移动记录仪器的方法。（2）根据改变电离室内气体成分作为基础的方法。

（1）测量仪器的移动 为了清潔管道，常常采用特殊的金屬刮刀，用繩索通过管道拉住这个刮刀。現在当清潔管道时可以在刮刀上固定一塊放射 γ 射綫的放射性鈷。当刮刀的繩索断了的时候，利用計数器，根据經过管壁穿透过来的 γ 射綫，能很容易地找到刮刀落在何处，即使管子敷設的較深，射綫也可穿过地層。

这类方法可以用来檢查气体管道和暖气裝置系統的漏洞。在这种情况下，在管道內流动的气体或液体中加入少量的放射性物質。利用特殊的可以移动的計数管寻查漏洞。为了使仪器簡便起見，不采用机械計数器，而采用耳机。在計数管中产生的电流脉冲的影响下，借助不很复杂的放大器就可以在耳机中發出声音，这样就可以很容易地發現漏气的地方。

类似的一些方法可以用来解决化学工業中的一些其他問題^[82]。

（2）气体成份的改变 不同的气体离子的迁移率及电离势彼此不同，因此电离室的視在电阻（кажущееся сопротивление）和其中所产生的电离电流强度都与电离室中充滿的气体成分有关系。应用放射性同位素的气体分析方法就是以此作为基础的。为此目的，采用两个电离室，一个是开口的，另一个是封閉的，在两个电离室中都放入少量放射性物質。在放射性射綫的影响下，在电离室中产生电离电流。电离室按照示差綫路連接，当兩者的电流一样时，记录仪器指針將停在零点上。因为室内空气可以自由地通过开口的电离室，那么空气的成分如有改变时，則开口的电离室的电流强度也会發生改变。由于两个电离室的相互抵消作用遭到破坏，則记录仪器的指針會發生偏轉。这样一来，就可以測定落入大气中的少量的

气体杂质。这种气体分析計可以用在許多化工生产中。

不久以前，类似的原理已經应用于火險信号器的裝置上，这种信号器可用来發現空气中有干餾产物或煙霧顆粒出現时会發生的火險。

仪器的基本部分是兩個电离室，其中放有少量的鎘。一个电离室是密閉不漏气的，而另一个却与周圍空气相通連。两个电离室串聯，从城市电路对电离室加上約 220 伏特的电压。当兩個电离室处在清潔空气中时，它們的电阻一样，而电压在兩者之間平均分配。电压从电离室之間的一点降落到帶冷陰極的閘流管上。这个电压（110 伏特）不足以使閘流管“触火”，因而它可以在 隨意長的时间內維持这种状态。如果在空气中出現了干餾产物或煙，則由于这类产物落入开口电离室，从而使它的电阻增大了一些，因而兩個电离室的电压不能平均分配了。因此加在閘流管上的电压增大到 160~170 伏特。在这样大的电压下，閘流管会“触火”并有电流通过，这电流足可开动特殊的繼电器，繼电器連通信号系統，并能够自动地开动防火器。

除了应用放射性射綫的簡單情况以外，尚有使用兩個甚至三个測量裝置基本部分的复杂情况。但是，現在这类放射性射綫的应用，在实际中遇到的極少。

标记原子的应用

标记原子(即示踪原子)在化学工業中对于控制生产、分析原料和半成品以及在进行研究工作方面，都有广泛的用途。

标记原子在分析化学中的应用 有很多論文討論了标记原子在分析化学中的应用^[21, 22]。

放射化分析是最有前途的方法之一。这种分析是用中子、加速的質子、氘核和氦核照射所研究的試样，轟击粒子与被照射的物質中的某些組份發生核子反应，同时获得放射性同位素，这种同位素

較快或較慢地發生蛻變，并在這種情況下放射出 β 粒子或 γ 射綫。照射以後，經過不同的時間間隔測量其放射性，而在許多情況下能夠斷定物質的定性組成和某些個別組份的含量。

格林別爾格採用的最早的放射化分析方法之一，是用中子照射法測定鉑的銥含量^[23]。在這個方法中，正如格林別爾格所指出，由於銥的反應截面大（在核子反應中用反應截面表示發生反應的機率——譯者），所以能夠很容易地測出其數量級為0.1%的含量。銥的定量測定是根據所形成的同位素 Ir^{194} 進行的。

近年來放射化分析獲得了很大的推廣，並且已有某些方式上的改變。應用最廣的方法是用慢中子照射分析物質的方法。在這種情況下，反應截面大的同位素在極其微小的濃度下都能夠測定。布洛翁和郭里德別爾格^[24]用這個方法測定了隕石中的氦、鈾和釷的含量（ $10^{-5} \sim 10^{-6}\%$ ）。其他的作者測定了稀土混合物（一般指稀土元素氧化物的混合物——譯者註）中的釷、鐳和鈾^[25]。這個方法常常用來測定鋳中的砷，鋳中的鉛，錫中的銻，銲中的鉍，以及用來分析金、銀、鎳和銻的鍍層。

阿里馬林、亞柯甫列夫和軋津用放射化分析法測定了鋳中某些雜質的含量^[26]。放射化分析的應用，阿里馬林在和平利用原子能國際科學技術會議上的報告中有所闡述^[27]。

利用各種同位素對慢中子的吸收截面不同，利用所生成的放射性同位素的半衰期和射綫能量的不同，在許多情況下可以用放射化分析測定物質的同位素成分。可以舉出氯的同位素分析作為例子。大家都知道氯是由 Cl^{35} 和 Cl^{37} 同位素的混合物形成的。此等同位素的截面分別等於0.17和0.56巴恩[1巴恩(Барн) = 10^{-24} 厘米²，用來表示反應截面的單位——譯者]。在吸收中子以後，形成同位素 Cl^{36} 和 Cl^{38} ，其半衰期分別為 4.4×10^5 年和37.3分鐘，其 β 粒子的最大能量分別為0.7和4.8百萬電子伏特。道節爾(Додел)制定的用中子放射化法來測定氯的方法，是以計數同位素 Cl^{38} 所放出的

β 粒子作为基础的，因为同位素 Cl^{36} 的放射性太小。显然，放射化分析能够成功地应用在控制氯的重同位素富集方面。

在应用慢中子照射法进行放射化分析时，是把试样放在某种核子反应堆内加以照射；照射的时间决定于所形成的同位素的半衰期。放射化分析的灵敏度决定于中子照射的强度。在许多情况下放射化分析可以测定数量级为 $10^{-6}\%$ 的杂质。

另一种形式的放射化分析也常常采用。在运用这种方法时，是用快速原子核轰击试样，快速原子核是利用回旋加速器或其他类型的加速器获得的。阿尔节涅制定的铁的碳含量测定法可以作为这种分析方法的一个实例^[23]。用氦核或质子轰击碳时所获得的短寿命的同位素 N^{13} ，在蜕变时放出能量为 1.24 百万电子伏特的正电子。所得到的放射性在计数器上进行测量，并且与照射过的标准试样（其中碳含量已知）的放射性加以比较。阿尔节涅（Арденне）是在王格拉弗（Ванграф）装置上进行照射的。试样从生产处的传送是利用空气压力传送法（Пневматическая почта）实现的。在保证准确度完全满意的情况下，分析和照射一共只需 15 分钟。

放射化分析的真正优点是可以分析已制好的制件和零件，而对它们并无损伤。

分析化学中的另一个方法是同位素稀释法（参看苏联杂志“化学和化学工业”1956 年第 1 期 74 页——译者）。

当组分定量地分离很困难但能够把每个组分较容易地分离出纯态的一小部分的时候，则在这种情况下可以采用所谓同位素稀释法。这种方法应用得最广的一种方案，是在混合物中加入 a 克用某种放射性同位素标记过的欲测定的组分，它有已知的放射性比度 P （脉冲/分，毫克）。把这种组分从混合物中仔细地分离出 b 克以后，利用计数器测定其放射性比度 q 。显然，新的放射性比度 q 比所加入的物质的放射性比度 P 要小，而有一个稀释的关系 $q = \frac{Pa}{a+x}$ ，式中 x 是混合物中该物质的原来含量。这个数量 x 可以根据下式

化 求出:

$$x = a \left(\frac{p}{q} - 1 \right) \quad (3)$$

如果需要測定數種物質，則在混合物中加入一定重量的、放射性比度已知的各種待測物質的放射性同位素。分離出少量的、純態的此等物質，並測量它們的放射性比度，而根據上式計算出這些物質的含量。

用同位素稀釋法可以測定已被標記的丁烷在氧化時所獲得的最簡單的醇和醛（甲醛、乙醛和丙醛）。醇類混合物以不溶的三硝基苯甲酸酯的形式從冷凝液中分離出來，而醛類混合物以不溶的二硝基苯腙的形式分離出來。這些混合物可以用色譜法分離成個別的組分^[23]。

標記原子法能夠用來檢驗沉淀的純度。利用放射性同位素，費極小的勞動就能測定沉淀的完全程度，就能檢驗重量分析法中的各種元素的沉淀情況和測定分析化學中有意義的物理化學常數。涅斯米揚諾夫（這裡所指的不是現任蘇聯科學院院長而是莫斯科大学化學系的一位放射化學家；——譯者）、斯必岑（В. И. Спицын）和其他一些研究者的許多工作，是關於應用標記原子法測定溶解度方面的研究。許多蘇聯科學家和外國科學家研究過沉淀作用、吸附現象和共沉淀。這個科學分支的現代發展，在相當大的程度上應該歸功於赫洛平院士的經典著作，他從理論上和從實驗上研究了物質在溶液間、在熔體和晶體間的分佈問題以及微量組份的吸附問題^[31]。在國外，法揚斯（Фаянс）和柯爾錯夫（Кольцгофф）從事過很多共沉淀歷程的研究。

在制取分析純的沉淀的情況下，研究共沉淀的工作具有很大的意義。在蘇聯，阿里馬林^[33]、柯倫芒（Коренман）和其他一些研究者完成了許多這方面的工作。

利用鉻酸鹽法研究鎢和鎢的分离工作^[33]，是應用放射性同位素來詳細研究分析化學中共沉淀規律的一個例子。在這種研究中，是

用鉍酸来沉淀含有少量 Sr 放射性同位素的鉍鉍混合物 (BaCl_2 和 SrCl_2)。把鉍的鉍酸鹽沉淀洗淨、烘干并称量。根据这个沉淀的放射性，可以測定其中鉍的含量。在另外的实验中，在所研究的混合物中加入少量的放射性鉍。在以鉍酸鹽形式把鉍沉淀了以后，以碳酸鹽的形式沉淀鉍，然后使之轉变为硫酸鹽。測量后一个沉淀的重量及其放射性。这些数据可以用来計算出鉍在硫酸鹽沉淀中的含量。实验表明：鉍的鉍酸鹽沉淀含有 6~8% 的 Sr，而 Sr 的硫酸鹽沉淀含鉍到 13%。因此，在重量分析法中所常常获得的“良好”結果，可用鉍的共沉淀补偿了鉍的不完全沉淀来解釋。这一工作指出，溶液的 pH 值对 Sr 的共沉淀影响很大。

上述方法使得作者能够提出分离 Ba 和 Sr 的改进方法，这个方法能够在实际上消除 Sr 的共沉淀。

标记原子在生产檢驗中的应用

在文献中記載了許多在化工生产檢驗方面应用标记原子的方法。

例如在制造合成剛玉时，鉍是否燒尽，是利用放射性同位素来进行檢驗的。这个方法使得能够找到过程的最适宜的進行条件，从而可以保证制得优质的剛玉。

在粘液纖維生产过程中，二硫化碳中加入标记的 CS_2^{35} ，則使用計数器就能够相当容易地进行洗淨的檢驗工作。利用計数器也可檢驗空气中的硫化物的含量。

在某种沾污杂质落到成品中的情况下，杂质的測定是很困难的。按照生产过程的进行在生产设备的不同地方放入用放射性同位素标记过的、我們所关心的杂质，則能够很容易地确定它們是否会轉入产品中去，从而也就可以找出沾污的根源^[34]。

在生产中常常用分餾法或色層分离法提純产品。为了檢驗各种沸点相近而用化学方法难以分开的物質在用此等方法分离后的純

度，可以利用标记原子法。为了这个目的，在欲分离的混合物中加入我们关心的组份，这个组份已用放射性同位素标记过。利用计数器测量个别组份的放射性，就可以判断这个组份的分离纯度^[35]。

标记原子在研究工作中的应用

聚合作用的催化历程 利用放射性同位素能够研究应用在化学工业中的许多催化过程的历程^[36-37]。例如，在最近 30 年来，广泛地使用了加有助催化剂的铁催化剂并用氢和一氧化碳为原料制造合成燃料。某些科学家认为一氧化碳同铁催化剂形成碳化铁，然后再与氢起作用，结果得到碳氢化合物。埃伊杜斯(Эйдус)则在自己的工作基础上提出了另一种反应历程。

不久以前美国学者进行了实验，在实验中使放射性的一氧化碳在铁催化剂上通过。在这种情况下，的确有放射性的碳化铁在催化剂的表面上形成。但是然后在铁催化剂上通过普通的一氧化碳和氢的混合物时，所形成的碳氢化合物却几乎没有放射性。这就证明了反应的进行基本上不是通过碳化铁，而是通过氢和一氧化碳在催化剂表面上直接作用的途径^[38]。在最近的工作中，作者在氢和一氧化碳的混合物中加入少量的用放射性碳标记了的各种醇类。这些实验表明所生成的碳氢化合物具有放射性，也就证明了醇在这个过程的进行中起着很大的作用^[39]。

洛金斯基和其同事完成了一系列对于阐明催化过程的历程具有重要意义的研究工作^[40]。

为了研究聚合作用的历程，曾完成了许多应用标记原子的工作。例如为了激发苯乙烯的聚合过程而采用了以放射性硫标记过的过硫酸铵，成功地测定了聚合物分子链的长度。为了这个目的，利用计数器测量原来的过硫酸铵的放射性和所形成的聚合物的放射性。因为在每一个聚合物的分子中只含有一个过硫酸铵分子的“碎片”，则测定放射性比度后，能够计算出聚合物分子链的长度。