

放射化学专题报告

中国科学院原子能研究所供稿

目 录

1. (n, γ) 反应制备放射性同位素
2. 放射源的制备方法及其应用
3. 放射性同位素的强度测量
4. 标记化合物的制备与应用
5. 放射性同位素的应用
6. 中子源的制备与应用
7. 放射性三废及其处理概况介绍
8. 高水平放射性废液的处理与处置
9. 应用 (n, p) 反应制备放射性同位素

(n, r) 反应制备放射性同位素

利用反应堆制备放射性同位素时，最主要的是利用(n, r)反应。现在我国实际应用的重要同位素中，大部分是通过(n, r)反应制得的。其中，大致包括以下几类：

1. 通过(n, r)反应直接制得所需同位素，如 ^{198}Au ，制备时只是经过化学处理制成适当的化学形态。

2. 通过(n, r)反应，再经核蜕变而生成所需同位素，如 ^{131}I 。

3. 通过(n, r)反应过程中的“热原子效应”，分离制得所需的同位素。如 ^{51}Cr 、 ^{82}Br 、 ^{32}P 、 ^{59}Fe 等许多同位素可用这种方法制得高比度的制剂。

4. 通过(n, r)反应，先制得“母体同位素”，然后再用快速方法不断地从母体中分出其蜕变生成的“子体”同位素。如 $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 $^{113}\text{Sn} \rightarrow ^{113\text{m}}\text{In}$ 等。

5. 通过两次或多次连续的(n, r)反应，(其中也可能还经过一些核蜕变)如利用 $^{186}\text{W}(n, r)^{187}\text{W}(n, r)^{188}\text{W}$ 来制备 ^{188}W (或 ^{188}Re)。

由于入射粒子是中子，复核的多余能量以 γ 光子形式放出，因而没有库仑位垒的作用，所以，一般(n, r)反应所需入射粒子能量低，截面比较大，对靶子的技术要求较低。加上反应堆的中子通量越来越高，照射容量又远较带电粒子加速器大，故容易大量生产，制得产品价格较低。因此可以说，(n, r)反应是实际制备生产放射性同位素最重要、最基本也是最优先考虑采用的核反应。

下面介绍一下制备 ^{198}Au 、 ^{125}I 的两个例子，在介绍制备方法

以前，先复习一下有关截面的概念及反应产额的计算公式。

一、反应截面：

反应“截面”是用来衡量一个核反应的发生几率的量，具有面积的量纲。这是一个经典概念，可以这样理解：对于某一个核反应，可把靶核看作一个具有一定截面积的球体，当入射粒子的质心穿过这个截面时，即发生核反应。

要说明的几点是：1. 这个概念是沿用下来的经典概念，不能当作核反应的真实模型写照。2. 一个“截面”是该种原子核对应于一特定核反应或核过程而言的，运用时必须十分注意。

3. “截面”与原子核的取向没有关系，至少在 (n, r) 反应中可这样认为。4. 对于有方向性的入射粒子流，如果靶子有一定“厚度”，即入射粒子通量在靶子内的变化不可忽略时，则总反应事件数不仅与总靶核数有关，还与靶体的几何形状及取向等有关。

如何由反应截面、入射粒子通量及靶子数据求发生的核反应数呢？

先看“无限薄”的靶子。设入射粒子通量为 I ，靶子面积为 A ，厚度为 ΔX ，单位体积内的靶核数为 n ，反应截面为 σ ， R 为单位时间内发生的核反应数，则根据定义，

$$R = I \cdot N \cdot \sigma = I \cdot A \cdot \Delta X \cdot n \cdot \sigma$$

其中 $N = A \cdot \Delta X \cdot n$ 为该“无限薄靶”的总核数。

如果靶子有一定厚度， I 在靶子内的变化不可忽略时，就必须把 I 作为 x 的函数，然后对 z 微分。 I 的求法如下：

$$dI = -I \cdot n \cdot \sigma_{\text{总}} \cdot dz$$

其中 $\sigma_{\text{总}}$ 是损耗入射粒子的总截面 (应考虑进入靶子中的各种原子), n 是对应于 $\sigma_{\text{总}}$ 的单位体积的靶核数

积分得:

$$I = I_0 e^{-n\sigma_{\text{总}} \cdot z}$$

I_0 为入射粒子流的边值。

顺便说一下, 一种元素的总吸收截面由下式计算:

$$\sigma_{\text{吸收}} = \sum f_i \cdot \sigma_i$$

其中: f_i 是第 i 种同位素的原子丰度;

σ_i 是第 i 种同位素的吸收截面,

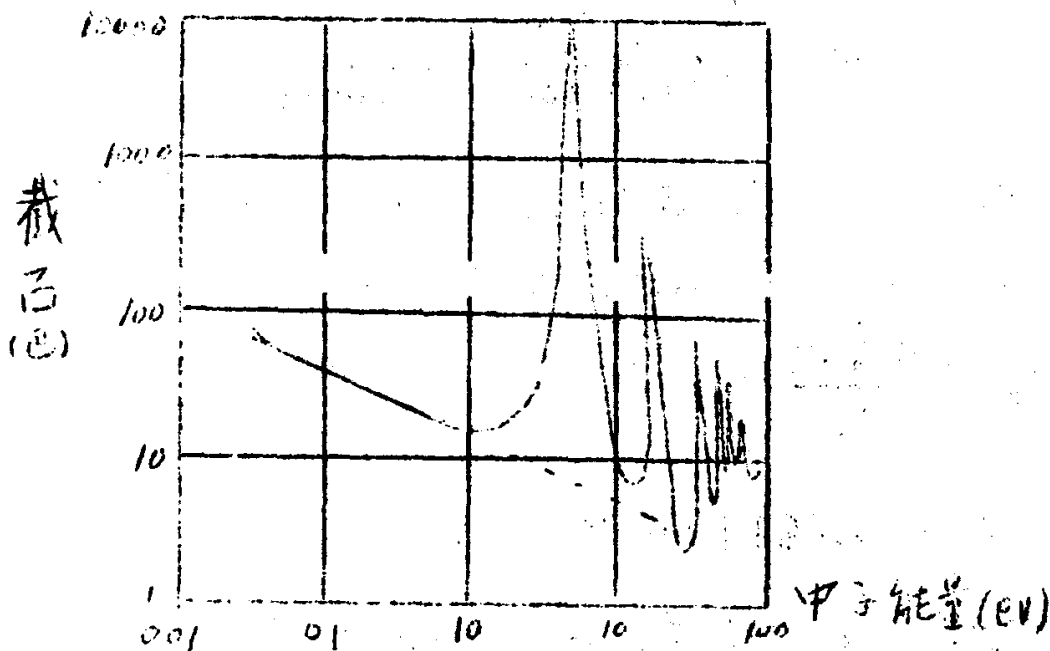
化合物靶子的吸收截面可类似计算得出。

实际应用上, 很少这样去计算, 总是约略地取一个平均通量 $\bar{I}$, 根据

$$R = \bar{I} \cdot N \cdot \sigma$$

来估算反应速率。

σ 通常是入射粒子能量的函数 (称为激发函数)。下图所示



Ag 的中子截面与中子能量的关系

是正常同位素组成的 Ag 的中子截面与中子能量的关系。

5.12 eV 处的第一个共振峰是 ^{109}Ag 的。

一般资料给出的“热中子截面”均指中子速度为 2200 米/秒 (相当于中子动能 0.025 eV) 时的截面。

二、(n, r) 反应的产额计算

(n, r) 反应中, 入射中子的通量可认为是各向同性的, 通常以 ϕ 表示, 单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

设靶原子数为 N_1 , 俘获一个中子后生成另一种核, 其数目设为 N_2 , 蜕变常数为 λ_2 , 用上述近似方法, 列出微分方程式:

$$\frac{dN_1}{dt} = -R = -\phi N_1 \sigma_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \phi N_1 \sigma_1 - \lambda_2 N_2$$

解此微分方程组, 可得:

$$N_1 = N_1^0 e^{-\phi \sigma_1 t}$$

$$N_2 = N_1^0 \phi \sigma_1 \left(\frac{e^{-\phi \sigma_1 t}}{\lambda_2 - \phi \sigma_1} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\phi \sigma_1 - \lambda_2} \right)$$

N_1 的形式是大家熟悉的指数衰减形式。当 $\phi \sigma_1 \ll \lambda_2$, $\phi \sigma_1 t \ll 1$ 时, N_2 也具有大家熟悉的简单形式:

$$N_2 = \frac{\phi \sigma_1 N_1^0}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

$$\text{即 } A_2 = \phi \sigma_1 N_1^0 (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

实际使用时要注意对 ϕ 、 σ_1 进行必要的校正。

如果碰到更复杂的情况, 微分方程的解就更复杂些。有人已

从数学上解决了这个问题，给出了一个通解形式：

$$N_m = c_1 e^{-\Lambda_1 t} + c_2 e^{-\Lambda_2 t} + \dots + c_m e^{-\Lambda_m t}$$

其中：

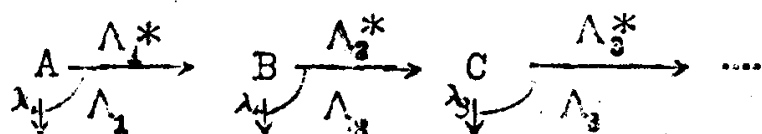
$$c_1 = \frac{\Lambda_1^* \Lambda_2^* \dots \Lambda_{m-1}^*}{(\Lambda_2 - \Lambda_1)(\Lambda_3 - \Lambda_1) \dots (\Lambda_m - \Lambda_1)} N_1^0$$

$$c_2 = \frac{\Lambda_1^* \Lambda_2^* \dots \Lambda_{m-1}^*}{(\Lambda_1 - \Lambda_2)(\Lambda_3 - \Lambda_2) \dots (\Lambda_m - \Lambda_2)} N_2^0$$

依次类推。

这个通解适用于反应、蜕变混合链，其起始条件是 $N_1(0) = N_1^0$ ， $N_2(0) = N_3(0) = \dots = N_m(0) = 0$ 。

这个通解中各类变量的含义如下：



N_j 表示链中第 j 个核素的原子数 (t 的函数)，如 $N_3(t)$ 表示核素 C 在时刻 t 的原子数。

Λ_j 表示第 j 个元素的总损失常数 (包括蜕变常数、核反应消耗系数等的总和)。

Λ_j^* 表示所考察的链中，由第 j 个核素形成第 $(j+1)$ 个核素的“转变”常数，这可以指某一种核反应，也可以是某一分支蜕变。

Λ_j 及 Λ_j^* 将在下节的例中说明

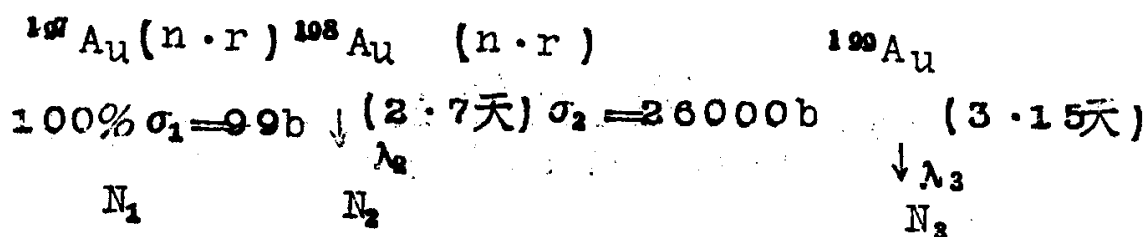
由这个公式可以导出任一蜕变链、核反应链或其混合链中任一核素的长衰公式，十分有用，需要通过反复练习，牢固掌握。

底下我们用这个公式来讨论 ^{198}Au 、 ^{125}I 生产中产额计算及

照射条件的选择问题。

三、生产 ^{198}Au 时照射条件的选择

先写出核反应简式



这里, $\Lambda_1 = \Lambda_1^* = \phi \sigma_1$;

$$\Lambda_2 = \lambda_2 + \phi \sigma_2, \quad \Lambda_2^* = \phi \sigma_2;$$

$$\Lambda_3 = \lambda_3;$$

根据上面的通式, 写出 ^{198}Au 、 ^{199}Au 的原子数的解

$$N_2 = \Lambda_1^* N_1 \left(\frac{e^{-\Lambda_2 t}}{\Lambda_2 - \Lambda_1} + \frac{e^{-\Lambda_1 t}}{\Lambda_1 - \Lambda_2} \right)$$

$$= \phi \sigma_1 N_1 \left(\frac{e^{-\phi \sigma_1 t}}{\Lambda_2 - \phi \sigma_1} - \frac{e^{-\Lambda_2 t}}{\Lambda_2 - \phi \sigma_1} \right);$$

$$N_3 = \Lambda_1^* \Lambda_2^* N_1 \left(\frac{e^{-\Lambda_1 t}}{(\Lambda_2 - \Lambda_1)(\Lambda_3 - \Lambda_1)} + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{-\Lambda_2 t}}{(\Lambda_1 - \Lambda_2)(\Lambda_3 - \Lambda_2)} + \frac{e^{-\Lambda_3 t}}{(\Lambda_1 - \Lambda_3)(\Lambda_2 - \Lambda_3)} \right)$$

$$= \phi^2 \sigma_1 \sigma_2 N_1 \left(\frac{e^{-\phi \sigma_1 t}}{(\Lambda_2 - \phi \sigma_1)(\lambda_3 - \phi \sigma_1)} + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{-\Lambda_2 t}}{(\phi \sigma_1 - \Lambda_2)(\lambda_3 - \Lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\phi \sigma_1 - \lambda_3)(\Lambda_2 - \lambda_3)} \right)$$

在这个反应中, ^{198}Au 是所要的核素, ^{199}Au 是付反应产物, 由于 ^{198}Au 的俘获截面很大, 它总是伴随 ^{198}Au 产生, 应使它

限制在适当数值以下，因此就要注意选择适当的照射条件。

先初步看一下可能的趋向。根据具体情况将上述表达式适当化简：

在 $\phi < 1 \times 10^{14}$ ， $\phi \sigma_1 t \ll 1$ 的情况下，有 $\phi \sigma_1 \ll \lambda_2$
 $= \lambda_2 + \phi \sigma_2$ ， $\phi \sigma_2 \ll \lambda_3$ ， $e^{-\phi \sigma_1 t} \approx 1$ ，则上两式可化简为：

$$A_2 = \lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_2 \phi \sigma_1 N_1}{\lambda_2 + \phi \sigma_2} (1 - e^{-(\lambda_2 + \phi \sigma_2)t}),$$

$$A_3 = \lambda_3 N_3 = \frac{\phi^2 \sigma_1 \sigma_2 N_1}{\lambda_2} \left(1 - \frac{\lambda_3 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} - \frac{\lambda_2 e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_2 - \lambda_3} \right),$$

当 $t \rightarrow 0$ （照射时间较短），即 $\lambda_2 t$ ， $\lambda_3 t$ 均 $\ll 1$ 时，则有：

$$P = \frac{A_3}{A_2} \approx \frac{\lambda_3 \sigma_2}{2\lambda_2} \cdot \phi \cdot t;$$

即：在短时间照射时， P 随 t 、 ϕ 的增加而线性增加。就是说，要使 ^{198}Au 含量小，就要采用尽量低的通量，同时照射尽可能短的时间。换句话说，就是要控制 ^{198}Au 的比放射性尽量低些。

当 $t \rightarrow \infty$ ，则有：

$$P = \frac{\phi \sigma_2}{\lambda_{198}};$$

即：照射时间达 5—10 个半衰期以上时， P 趋向一常数，此数与 ϕ 成正比。

计算机计算的曲线表明，以上近似估计的结论在所指明的范围内，是正确的。

不过，值得指出的是，以上这样的讨论只是粗糙的。要进行

准确的、细致的讨论，最好是用计算机计算，绘出曲线。要过细粗枝大叶往往搞错。

例如，很容易产生如下的印象：因为 A_2 的表达式中有 ϕ^2 项，而 A_1 表达式中只有 ϕ 的一次方项，所以，为了使 ^{199}Au 尽量少，生产 ^{198}Au 时应该选用尽量低的通量照射。事实上，到国际原子能局汇编的“放射性同位素生产和质量控制”一书（1971年出版）集稿时止，16个国家、地区（我国不在内）中，绝大部分国家，包括美国和匈、保（通常抄袭苏联资料）等国内的有关人员，也正是这样认为，这样做的。

让我们把计算出的详细结果拿出来分析一下。生产中，为了达到某一予定的比度，如果采用较低的通量，照射时间就要延长。如果采用的通量高些，照射时间就可缩短。数据图表表明，为了得到一定比度的 ^{198}Au ，采用高通量短时间照射得到的产品 ^{198}Au 中 ^{199}Au 含量更小。就是说，对于生产实践来讲，在可能的范围内，总是应该采用尽量高的通量，并准确控制需要的照射时间。

英国、丹麦两个国家就是这样做的，与其他国家截然相反，他们制备 ^{198}Au 时，采用 $1.5 - 2 \times 10^{14}$ 的通量，照射 2—8 小时，说明他们从理论上认识了这一点。如英国放化中心在 1966 年出版的放化手册中已曾提到了照射制备 ^{198}Au 时这一容易造成错觉。但也未进一步讨论。因为许多人都还未曾注意。甚至有人想当然地断言道：“ ^{199}Au ”这个金同位素在比 10^3 高相当多的通量下产生”。因此他们采用的通量只有 $2 - 5 \times 10^{12}$ 。通量为 5×10^{12} 时，照射时间 7 天， ^{198}Au 的比度约 33ci/g ，（未加校正）， ^{199}Au 含量为 2.62%。而若采用 1×10^{14} 的通量照射

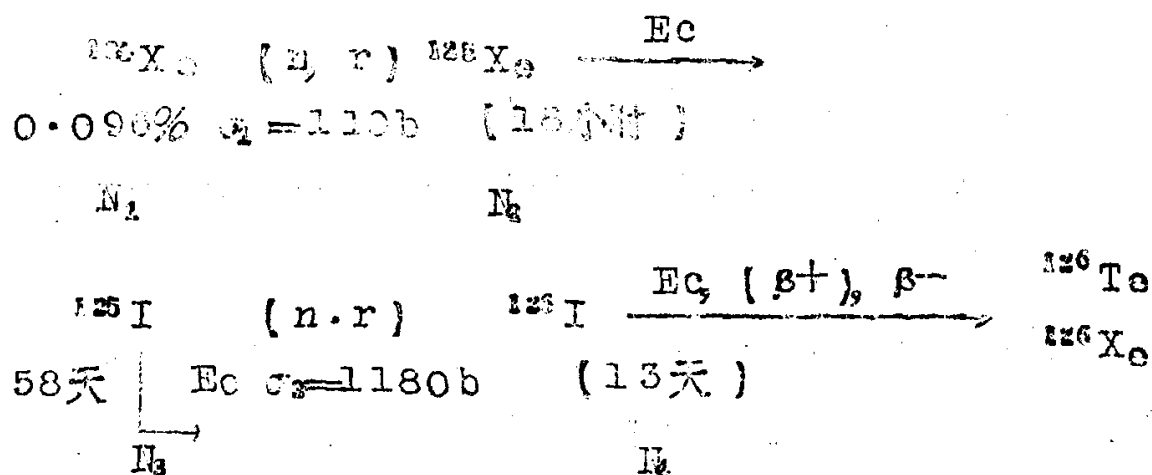
4 小时，则得到的 ^{198}Au 比度为 33.5Ci/g ， ^{199}Au 含量为 1.61%，比前者约低 40%。

这个例子，充分说明了基础理论工作的重要性。同时，也充分说明了，不能迷信洋人，对外国的资料，要通过去粗取精，去伪存真，进行认真的分析鉴别。

下面我们还将进一步讨论到这个问题。

四、生产 ^{125}I 照射条件的选择

以 Xe 为靶子生产 ^{125}I 时，也有一个二次俘获，生产 β 放射体 ^{125}I 的问题，医用上不希望其存在，但又不能用一般化学方法分离，这就也要靠选择合适的照射条件来限制其含量。反应式如下。



按照通用公式写出照射中 ^{125}I 、 ^{126}I 放射性的表达式，这有，

$$\Lambda_1 = \Lambda_1^* = \phi \sigma_1 ;$$

$$\Lambda_2 = \Lambda_2^* = \lambda_2 ;$$

$$\Lambda_3 = \lambda_2 + \phi \sigma_2 , \quad \Lambda_3^* = \phi \sigma_3 ;$$

$$\Lambda_4 = \lambda_4 ;$$

$$\text{所以 } A_3 = \lambda_2 N_3 = \lambda_2 \phi \sigma_2 \lambda_2^{-1} N_2^0 \left[\frac{e^{-\Lambda_1 t}}{(\Lambda_2 - \Lambda_1)(\Lambda_3 - \Lambda_1)} + \dots \right]$$

$$+ \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \Big]$$

$$A_4 = \lambda_4 N_4 = \phi^2 \sigma_1 \sigma_3 \lambda_2 \lambda_4 N_1^0 \left\{ \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} \right. \\ + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} + \\ + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3)} \\ \left. + \frac{e^{-\lambda_4 t}}{(\lambda_1 - \lambda_4)(\lambda_2 - \lambda_4)(\lambda_3 - \lambda_4)} \right\};$$

这两个表达式比较复杂。用计算机计算出的结果，进行比较讨论。这时，因为 ^{126}I 半衰期比 ^{125}I 短，所以冷却时间也是可供选择的因素之一。数据表明：

(1) 如果一定量的靶子，要求一定的 ^{125}I 产额，则用较低的通量照射较长的时间比用高通量短时间得到的 ^{125}I 中含 ^{126}I 较少。这与 ^{192}Au 的情况正相反。

(2) 在同一通量下，如果最后达到相同的 ^{126}I 含量，则用长时间照射。长时间冷却的方法比用短时间照射短时间冷却得到的 ^{125}I 多。因此，如果一定量的靶子，要求得到尽可能高的 ^{125}I 产额，则应选择尽可能高的通量，照射较长时间（直到 ^{125}I 产额曲线接近最大值点附近如在 1×10^{14} 通量下可照到120天， 1×10^{15} 通量下可照到14天），然后长时间冷却，直至 ^{126}I 含量达到一定限度以下。

关于这一点，上面提到的资料中提出的控制 ^{126}I 含量的办法又是不切实际的。它提出的办法是短时间照射大量的 X_0 。要知道 X_0 的价格很贵，同时又往往使用气体作靶（ X_0 的固体化合物

更贵)。

^{125}Xo 的半衰期18小时,当照射时间超过5天时,就可以把它略去。 ^{125}I 、 ^{126}I 的表达式实际上就跟 ^{198}Au 、 ^{199}Au 的表达式相似,只是参数的数值不同。这里最明显的是 ^{126}I 半衰期比 ^{125}I 短,与 ^{199}Au 、 ^{198}Au 的情况相反。结果结论也不同。

顺便提一提,在 ^{198}Au 的例子中,假设不同的“ ^{199}Au ”的寿命,我们计算的结果表明,当这“ ^{199}Au ”的蜕变常数 $\lambda_3 = 7.50 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,即 $T_3 = 1.07$ 天时,则结论与 ^{125}I 例子相同。当 $\lambda_3 = 4.00 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,即 $T_3 = 2.0$ 天时,结论仍与 ^{198}Au 真实例子一样。就是说,这两种情况的转变并不是简单地在 $T_3 = T_2$ 处发生。因此,在存在不可忽视的二次俘获导致杂质产生时,照射条件的选择要经过仔细的计算,比较得出,要对具体问题作具体分析。最后,还要通过实践加以检验。(因为有时可能有更复杂的情况发生,如一次俘获与二次俘获的激发函数可能很不相同,照射通量改变可能引起中子能谱很大变化等等)。

五、胶体金(^{198}Au)的生产、检定:

(一)生产流程

1. 靶子的分析、制靶、照射:

^{198}Au 的流程中没有很多纯化过程,所以靶子要求很纯,特别是对可能存在的高活化截面的杂质。我们使用的靶子规格是5个“9”的 $\phi 0.2\text{mm}$ 的金丝,预先分析包括发射光谱法、活化分析法。制靶时要防止表面被杂质沾污。

照射条件的选择已在前面详细讨论了。

2. 金晶种的制备:

在明胶保护下，以水解葡萄糖来还原 AuCl_3 的溶液，即能制得颗粒为几十埃的金晶种溶液（非放射性的）。也可用此法来制备细颗粒的放射性胶体金。

3. 靶子的溶解、蒸发、中和：

照射过的靶子用新配制的稀王水加热溶解，减压蒸发至近干。然后以 H_2O 溶解得到 HAuCl_4 溶液，并加入适量 NaOH 溶液中和。

4. 还原：

中和后的 NaAuCl_4 溶液经过滤纯化，滴入还原瓶。还原瓶中已加好明胶、抗坏血酸。金晶种结成的还原混合物，并保持一定温度和搅拌。滴完后，在补加入一定量抗坏血酸以后保温半小时，经过滤、测调 PH ，调整明胶浓度，测放射性浓度，就可分装。消毒后就得最后产品——胶体金 (^{198}Au) 注射剂。

(二) 质量检定：

主要包括以下几方面：

1. 外观：樱红色胶体溶液，无沉淀杂物；
2. PH ：应为 6—8；
3. 放射性浓度：常规用电离室测量，校正可用 $4\pi\beta$ 法或 $\beta-\gamma$ 符合法。
4. 化学纯度：有害元素应符合注射剂规格。
5. 放射性核纯：（以前也称“放射性纯度”）即产品中指名同位素的放射性在总放射性（均按蜕变速率）中所占百分数。

主要用 γ 谱仪来检查，必要时可结合采用纸上色层等化学方法。对于 ^{198}Au 来说，检查重点是长寿命 γ 杂质，如 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ，

^{192}Ir 等。我国产品中它们在最初产品中含量均 $< 10^{-6}$ 。

6. 放化纯度:

这个名称现在专指一种放射性制剂中, 以指明的化学形态存在的放射性占总放射性的百分数。按此定义, 放化纯度不可能超过放射性核纯。

此外, 也常使用放化纯度项中的主要杂质形式所占的放射性百分数来表示, 如胶体金 (^{198}Au) 的放化纯度常以游离金离子的放射性百分数来表示。

胶体金 (^{198}Au) 的放化纯度用纸上色层法来测定, 常用展开剂是丙酮+水+HCl (70:20:10), 离子金在前沿附近, 胶体金停留在原点。我国产品游离金含量通常 $\leq 0.5\%$ 。

7. 颗粒度:

一般用电子显微镜来观察、摄片、测量颗粒分布。用作肝扫描的胶体金要求颗粒均匀, 平均直径一般控制在200—300埃, 不应有小于30埃的细颗粒。

8. 生物试验:

包括细菌培养, 热源检查, 生物毒性试验, 在动物体内的分布, 动物脏器扫描等。

六、 ^{125}I 的生产:

^{125}I 生产所用的靶子是 X_0 气, 在氮气冷却下封在厚壁的照射筒内。(也有用 X_0F_2 , X_0F_4 等固体靶的)。照射筒可以是只用一次的铝筒, 也可为能重复使用的锆合金筒。

照射时除了有 ^{125}I 生成外, 还有大量 X_0 的放射性同位素生成。最好应能回收利用。在液氮冷却下开靶, 稍稍升温待 X_0 挥发逸出后立即加入稀 NaOH 溶液溶解附于器壁的 ^{125}I (^{126}I), 然后将

此溶液转入蒸馏瓶内，以 H_2SO_4 酸化到 6—12N，用适当的氧化剂把 $^{125}\text{I}^-$ 氧化到零价，在 H_2 气载带下随水蒸汽蒸馏出来，吸收于含还原剂的碱性溶液内，即得到 Na^{125}I 的溶液。

它的质量控制中，除比放射性测量 I^{126} 含量外其余无特殊处。测定 ^{125}I 产品的比放射性 ($\text{mCi}/\text{mg I}$)，要求采用灵敏而不受强放射性干扰的方法，其中较理想的是用离子选择电极来测量 I^- 的浓度。例如， $100\text{mCi}/\text{ml}$ 的纯 ^{125}I 的克分子浓度约 $4 \times 10^{-5} \text{ M}$ ，比放射性约 $17\text{Ci}/\text{mg}$ ，实际上由试剂带入痕量稳定碘等原因，比度总是会略小些。

放射源的制备方法及其应用

一、前言

从 1943 年发现人工放射性同位素以来，随着生产实践和科学实验的不断发展，大批反应堆和加速器的建成和运行，使人们得到放射性同位素的产品越来越多，产量越来越大，成本越来越低，为放射性同位素在工业，农业，医学和科学研究等各领域中的应用提供了雄厚的物质基础。到目前为止，人们已知的同位素达 1500 种，可利用的放射性同位素也多达 200 种。

目前，放射性同位素的生产主要依赖于核反应堆和后处理工厂，加速器，天然同位素分离以及核爆炸等。放射性同位素的产品可归纳成三种主要的类型：

1. 活化后不经过加工的放射性物质，即活化后分装，发送

的产品。

2. 放射化学剂品，是经过化学加工的放射性剂品，並附产品证书，这类产品大量地使用于医学，生物研究，工业示踪等。

3. 放射源 主要是利用其放射性辐射，而不是放射性物质本身，按照放射源产生的辐射类型可分成 α -源， β -源， γ -源和中子源。按照测量的准确程度可分成：①标准源和参考源；②工作源和辐射源。

二、放射源的制备

放射源的制备方法随着放射性的类型，强度和用途的不同而不同，现介绍几种主要的制备方法如下。

1. 利用核反应堆生产，其特点是靶材料的加工和封装是非放射性操作，设备简单方便，可用来大量地生产各种用途的 γ 放射源，如 Co^{60} ， Tm^{170} ， Ir^{192} ， Sb^{125} ， Au^{198} 等。但亦必须做到以下几点：

①放射源装配的形状和大小必须与反应堆的辐照设备相适应。

②放射源的封装材料必须经受照射时的腐蚀

③靶材料最好是金属材料，如金属 Co ；也可以用稳定的固体化合物如 Tm_2O_3 。

④包壳材料和靶材料在活化时所产生的放射性杂质必须足够地小，或其半衰期是很短的。

⑤必须准确知道反应堆中子通量和照射时间，因为通量会受活性区周围的猛烈吸收，燃料燃烧完毕和控制棒的位置等影响。

2. 溶液蒸发 此法是将放射性同位素的液体制剂滴在或吸附在衬托物上烘干使用，或烘干后再密封后使用。方法简便，