
电离辐射安全与防护专业实务

伽马辐照装置应知应会

生态环境部辐射源安全监管司

清华大学

编制人员：何仕均 王建龙

目录

γ 辐照装置的辐射安全与防护	1
第一节 γ 辐照装置的概述	1
1.1 医疗用品的灭菌消毒	1
1.2 食品保鲜	1
1.3 辐射化工	2
1.4 农业应用	2
1.5 环境治理	2
第二节 辐照装置的组成和原理	4
2.1 辐射源	4
2.2 源架及升降系统	6
2.3 屏蔽防护系统	7
2.4 安全联锁系统	8
2.5 辐照产品运输系统	10
2.6 控制系统	11
2.7 剂量系统	11
2.8 通风系统	12
2.9 贮源系统及水处理系统	12
第三节 γ 辐照装置的安全与防护	14
3.1 辐射安全原则与防护准则	14
3.2 外照射危害的防护	15
3.3 γ 辐照装置工作场所的分区	16
3.4 辐射安全管理	17
3.5 γ 辐照装置的倒、装源	21
3.6 γ 辐照装置的退役	21
3.7 应急响应计划与事故处理	22
第四节 γ 辐照装置的事故分析与预防	24
4.1 辐射事故概况	24
4.2 辐射事故的预防	27
参考文献	30

γ 辐照装置的辐射安全与防护

第一节 γ 辐照装置的概述

γ 辐照装置由辐照室、辐射源、传输设备、安全设施和控制系统等组成，是用来实现安全可靠辐射加工工艺的装置。截止 2016 年底，我国共有 130 座钴源辐照装置，总设计装源能力超过 1.7 亿居里，实际装源活度约为 7000 万居里。2010 之前我国工业钴源基本依赖进口，2010 年国产钴源的研发成功，现年生产能力约为 500 万-600 万居里，基本满足国内需求，同时部分出口巴基斯坦。辐照装置正在向专业化、大型化、标准化方向发展，生产过程自动化有很大提高，系统配套能力加强，安全与质量监控体系更加完善。γ 辐照装置的设计与建设能力也已达到国际先进水平，越来越向大规模、多用途、综合利用的商用固定辐照装置发展，应用领域主要包括工业、农业、医学、环境等各个方面。

1.1 医疗用品的灭菌消毒

辐射灭菌消毒的医疗用品种类很多，包括金属制品、塑料制品，主要是一次性使用的医疗用品，也可以是重复使用的物品。此外，中药与化妆品也都可以用辐射灭菌。辐射灭菌与化学灭菌法相比，辐射消毒灭菌要比传统的高压蒸汽、常规的环氧乙烷（EO）化学消毒法具有更多的优点。辐射灭菌的处理是在常温下进行，适用于对热敏感的塑料制品、生物制品和药物。辐射穿透力强，杀菌均匀彻底，能够辐照密封包装物，杀灭内部的微生物，能耗低，无毒物残留，不污染环境；辐射灭菌速度快，可连续作业，适合于大规模加工。受 1989 年保护环境的“蒙特利尔议定书”规定的制约：常规的化学 EO 灭菌法因具有强的致癌效应并污染环境将被禁用，辐射灭菌消毒必将成为主流。

1.2 食品保鲜

粮食、果蔬、肉食等在制作、运输、储存与销售过程中，常常因病虫害侵蚀、腐败霉烂、高温发芽等而变质。据不完全统计，由此引起的损失可高达 20%~30%。长期以来，人类采用干燥、腌制、冷藏与冷冻、高温蒸煮、真空、熏制以及化学防腐剂等多种方法保存食品。上述保存方法的共同缺点是能耗大，且不易保鲜。因此，食品辐照保鲜已成为一个相当有吸引力的食物储藏技术。食物辐照保鲜技术与非核技术相比，具有节约能源、有保鲜能力、穿透力强、安全卫生、改善食品品质、操作简便，易于实现自动化等特点。截至 2014 年，我国已批准了 8 个大类的食品

可辐照加工，加工品种和数量在国际上处于领先水平。全国已建成商业性食品辐照装置 200 余座，具有较大规模的产业化生产和较高的加工服务能力；农产品及食品直接加工量近 20 万吨/年，接近全球辐照食品总加工量的四分之一，对国民经济的贡献超过 180 亿元。

1.3 辐射化工

20 世纪 50 年代初，Charlesby 首先观察到辐射能使聚乙烯交联。之后 Doll 证实了聚乙烯在 高能射线作用下能发生交联反应，改变了传统认为高能射线对高分子材料只能起破坏作用 的观点，开辟了辐射高分子化学和高分子辐射改性新领域。辐射交联后的聚合物，除了 呈现出显著的化学稳定性和热稳定性外，还可获得许多新的性能，在耐温性、耐老化、 抗腐蚀、阻热、阻燃以及力学强度方面，都得到明显的改善。辐射化工技术在实际 中广泛应用，诸如辐射交联热收缩材料的辐照与应用、电线电缆的辐射交联改性、 辐射交联聚烯炷泡沫材料、水凝胶辐射合成与应用、涂层辐射固化、橡胶的辐射硫 化及其应用、新型功能材料（如 PTC）的制作等。高分子辐照产品已涉及国民经济 建设和生活的各个方面，创造了巨大的经济效益和社会效益。

1.4 农业应用

“农业的根本出路在科技进步”，这既是西方发达国家已走过的道路，也符合我国 人多、地少、科技落后的国情。核辐射技术在建立高效优质农业方面具有不容低估的 作用。核辐射技术与农业的结合形成了一门独立的新学科—核农学。核农学为促进 农业科学技术的发展，改进农业生产技术，加速农业现代化提供了科学基础，是农业 现代化的重要标志之一。辐照技术在农业的应用主要有：辐照育种、抑制发芽、病虫 害的防治、低剂量辐照增产等。

1.5 环境治理

环境问题已成为当今世界各国关注的焦点。1992 年在巴西举行的联合国环境与 发展大会提出了在可持续发展的同时，必须高度重视环境保护。核辐射技术作为治理 环境污染、评价环境质量的高新技术，近年来已取得长足进展。国际原子能机构（IAEA）、世界卫生组织（WHO）、联合国环境发展计划署（UNEP）等组织了众多全球合作项 目，旨在环境研究中利用各种核辐射技术。利用辐射处理污泥、废水、废气的技术， 可以有效地防治酸雨等环境污染。环境“三废”的综合治理也是实现变废为宝的一 条有效途径。

思考题：

1. γ 辐照装置是什么？与电子加速器相比有何优缺点？
2. γ 辐照装置的主要应用？
3. 辐照灭菌与传统灭菌方法相比有何优点？
4. 核辐照技术在农业的应用有哪些？
5. 列举一些实际生活中用到的辐照产品。

第二节 辐照装置的组成和原理

2.1 辐射源

1. γ 辐照装置的主要放射源

目前,世界上 γ 辐照装置采用最多的放射源是 ^{60}Co ,其次是 ^{137}Cs 。选用 ^{60}Co 或是 ^{137}Cs 作为 γ 辐照装置的辐射源,从技术上看是等效的。它们之间的选择除了考虑可获得性的难易之外,主要取决于成本。因为 γ 辐照装置的投资主要包括放射源、土建和设备三部分的费用,而源费一般占总投资的 $1/2\sim 1/3$ 。同时还要考虑在同样的剂量场条件下,源的射线能量利用率和剂量均匀度,这与放射源的能量和源的比活度有关。目前世界上的 γ 辐照装置大多用 ^{60}Co 源。

从表 2-1 看出, ^{60}Co 的 γ 射线能量较高,穿透力较强,同时源的自吸收小,有较高的比活度。此外,钴的熔点高,不易溶解于水,所以使用 ^{60}Co 源较为经济、安全,制造较为简单。自然界存在的是稳定状态的 ^{59}Co ,把它们制备成粒状或柱状,置于核反应堆中接受中子辐照,得到放射性同位素 ^{60}Co 。将 ^{60}Co 小源串列成棒状柱体,用不锈钢筒双层严密焊封,制成棒状标准元件(图 2-1)。然后根据使用需要组装成各种形状,例如排成筒状源和平板状源等。

表 2-1 γ 辐射源特性表

放射源	射线种类	能量 /MeV	半衰期 /a	比活度 /(PBq·kg ⁻¹)	自吸收 /%	每千瓦所需放射 性活度/PBq
^{60}Co	γ	1.17, 1.33	5.27	11.1~4.44	10	2.48
^{137}Cs	γ	0.66	30.2	0.89	30~50	11.1

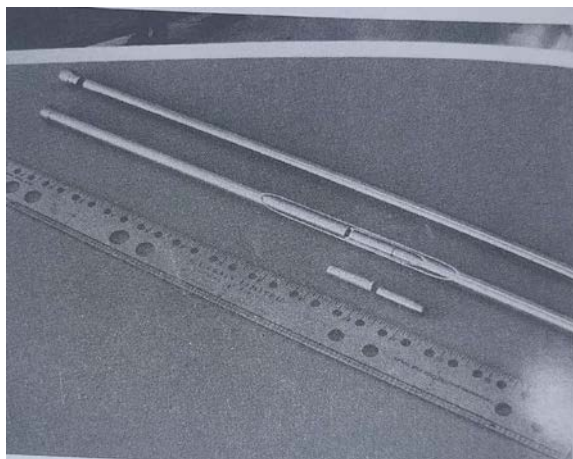


图 2-1 钴-60 放射源实物图

使用 ^{137}Cs 源作为辐射源的商业 γ 辐照装置在世界上不多，美国和德国的污泥污水辐射消毒装置采用了 ^{137}Cs 源。我国浙江省农科院原子能所曾经有一座研究型的铯源装置，当时装源 $1.85 \times 10^{15} \text{Bq}$ 。目前美国是 ^{137}Cs 源的主要生产国，其次是俄罗斯。由于 ^{137}Cs 源的 γ 射线能量较低，比较容易屏蔽。但是， ^{137}Cs 源形态是氯化铯盐，极易溶于水，因此在湿法贮源的 γ 辐照装置中很少使用 ^{137}Cs 源。

放射性是原子核的特性，它有自己的规律和特点，其衰变规律、半衰期几乎不受外界条件的影响。所谓原子核衰变，是指原子核自发地放射出 α 、 β 、 γ 等粒子而发生的转变。 ^{60}Co 是一种不稳定的放射性核素，它会自发地发生衰变，放出 β 射线（电子），变成另外一种核素 ^{60}Ni 。处于激发态的 $^{60}\text{Ni}^*$ 放出 2 个能量相近的 γ 射线（光子）跃迁到基态，变为稳定的 ^{60}Ni 。 ^{60}Co 每次衰变的同时发射的 2 个光子，能量分别为 1.17 MeV 和 1.33 MeV。 ^{60}Co 的衰变过程如图 2-2 所示。

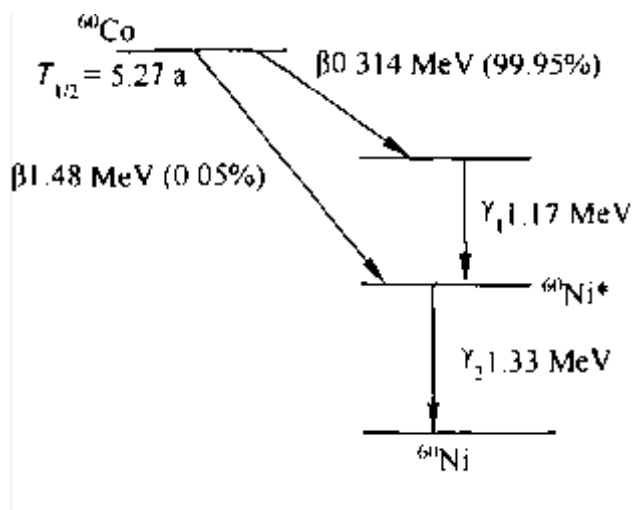


图 2-2 ^{60}Co 衰变图

假设 N_0 是初始的放射性原子数， N_t 是经过时间 t 后衰变剩下的原子数，则 N_t 和 N_0 的关系可用如下方程式表示：

$$N_t = N_0 * e^{-\lambda t}$$

式中： λ —衰变常数，它的物理意义是单位时间内每个原子核的衰变概率；

T —半衰期，它是放射性原子数衰变掉原来的一半所需的时间。

$$\lambda \text{ 与 } T_{1/2} \text{ 的关系为: } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

不同的同位素有不同的半衰期，有的半衰期可长达若千万年，有的则短至远小于 1s。常用的放射源 ^{60}Co 的半衰期 $T_{1/2}$ 为 5.27a，放射性活度每年下降约 12.6%。

放射性活度的 SI 单位名称“贝可勒尔”，简称“贝可”，符号“Bq”表示。

1Bq=1 次核衰变/s

1 居里 (Ci) = $3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$

1 贝可 (Bq) = 2.703 × 10⁻¹¹ Ci

2. 放射源的分类

根据国务院第 449 号令《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》规定，并参照国际原子能机构的有关规定，制定了放射源分类办法。放射源分类办法按照放射源对人体健康和环境的潜在危害程度，从高到低将放射源分为 I，II，III，IV 和 V 类，V 类源的下限活度值为该种核素的豁免活度。

I 类放射源为极高危险源。没有防护情况下，接触这类源几分钟到 1 小时就可致人死亡。

II 类放射源为高危险源。没有防护情况下，接触这类源几小时至几天可致人死亡。

III 类放射源为危险源。没有防护情况下，接触这类源几小时就可对人造成永久性损伤，接触几天至几周也可致人死亡。

IV 类放射源为低危险源。基本不会对人造成永久性损伤，但对长时间、近距离接触这些放射源的人可能造成可恢复的临时性损伤。

V 类放射源为极低危险源。不会对人造成永久性损伤。

表 1-2 列举了 ⁶⁰Co 和 ¹³⁷Cs 源按照危险进行的分类。其中，工业辐照所用的放射源属于 I 类放射源，应该引起特别的重视。

表 2-2 ⁶⁰Co 和 ¹³⁷Cs 放射源的分类

核素名称	I 类源/Bq	II 类源/Bq	III 类源/Bq	IV 类源/Bq	V 类源/Bq
⁶⁰ Co	≥ 3 × 10 ¹³	≥ 3 × 10 ¹¹	≥ 3 × 10 ¹⁰	≥ 3 × 10 ⁸	≥ 1 × 10 ⁵
¹³⁷ Cs	≥ 1 × 10 ¹⁴	≥ 1 × 10 ¹²	≥ 1 × 10 ¹¹	≥ 1 × 10 ⁹	≥ 1 × 10 ⁴

2.2 源架及升降系统

源架是为承载和排布放射源棒以形成特定辐射场的专用设备，一般采用不锈钢材料制造，源架分为线源、筒状源（花篮状）、单板源和双板源等。小型、研究用 γ 辐照装置，要求吸收剂量准确并要有较好的剂量均匀度和重复性，因此均采用点源、线源及筒状源。中试或生产型 γ 辐照装置的放射源组装均采用板源形式，有单板源和双板源，可根据各自的特点选择。单板源可以获得较高的射线利用率和生产能力，并使剂量场分布均匀。双板源的结构和源架升降装置较复杂，且源的射线利用率和生产能力较单板源低，产品吸收剂量的均匀度较差。设计源架的容量应该按装置的最大装源能力设计，并要适当的考虑每年的补充量。

源架的升降通常是依靠通过滑轮组引出辐照室的钢丝绳，由升降操作系统在辐照室外完成的，目前国内辐照装置源升降系统多采用的是液压升降系统。源升降操作系统有的位于辐照室的顶部，提升钢丝绳穿过预埋于辐照室顶部的不锈钢管，通过滑轮导向与操作系统相连，完成升降

源架的工作。也有的位于辐照室旁的设备间内，提升钢丝绳穿过预埋于辐照室墙体的不锈钢管同样也是借助于滑轮组与操作系统相连。

源升降系统主要包括以下功能：

- (1)承担源架的提升与下降的驱动功能；
- (2)源架在工作位置和安全位置的准确定位；
- (3)源架的位置正确指示；
- (4)驱动系统的过力矩保护；
- (5)断电能自动降源；
- (6)能使源架迫降；
- (7)能与电气建立以升降源为中心的安全连锁。

为保证升降源的安全可靠，在机械、气动和液压元件的设计及电气控制等方面都采取了必要的安全措施。它的操纵控制均在控制室按程序自动进行。

2.3 屏蔽防护系统

γ 射线不带电、能量高，所以它的穿透能力特别强，即使远离放射源的地方，也可能使人或物体受到照射。为了保证工作人员以及附近居民的安全，避免受到过剂量的照射，必须有效地设置屏蔽防护系统。 γ 辐照装置的屏蔽系统主要由辐照室屏蔽系统、迷道和放射源屏蔽系统组成。屏蔽 γ 射线常用的材料是混凝土或铅，也可用铸铁和钢。

建造辐照室屏蔽体的目的是为了保证在最大设计装源量时，屏蔽体外表面的剂量水平满足辐照工作人员个人年有效剂量值不超过 5mSv，公众成员个人年有效剂量值为 0.1mSv 的要求。一般使用具有相当厚度的钢筋混凝土做屏蔽墙，其厚度与射线能量和装源量有关。辐照室的屏蔽体并不能给放射源在工作位置进行辐照时逗留在辐照室内的人员提供任何保护，也就是说工作人员必须在放射源进入工作位置之前撤离辐照室。辐照室屏蔽体是辐照装置建筑的主体部分，它的内部空间是辐照产品接受照射的场所。小型装置多为圆形结构，大型的装置则为矩形结构。屏蔽的设计应保证辐照室的完整性和安全性。对于辐射屏蔽薄弱的部位（如排风和穿墙孔道等），应有防止漏束的补偿措施，辐照室屋顶厚度设计应同时考虑贯穿辅射和天空散射；屏蔽体的空间大小视需要而定，在设计最大装源量的前提下，屏蔽体外表面剂量率不应超过 2.5 μ Sv/h。

为了有效地减少辐照室出入口处的辐射水平，一般采用迷宫式曲折通道进出辐照室，称之为迷道。在设计最大装源量的前提下，迷道口处的剂量率不应超过 2.5 μ Sv/h。

贮源水井位于辐照室内，放射源在非工作状态下上贮存在水底，由足够深的水层屏蔽射线，保证人进入辐照室（在井上）是安全的。确保在最大设计装源能力时，水井上方进行任何操作，其水表面的剂量率均低于放射性工作人员年剂量限值。贮源水井的深度和大小，是由装源量以及源架的尺寸决定的。水井的设计应保证辐射屏蔽的完整性和安全性。井内设备和井覆面应选用耐

腐蚀性好的不锈钢材料，并保证好的密封性能和一定的承重能力；水井底部不应有贯穿件（如管道、管塞）。通过水井壁的任何贯穿件都应低于正常水位不少于 30cm。要求水井绝对不准渗漏，钢筋混凝土作为井体必须是防水的。

为了检修的需要，在贮源水井的底部可设有副井。当需要抽干贮源井水检修井或源架时，须事先将钴源转移到副井内，用它做贮源容器。副井上方的设计剂量当量率按偶尔需要短时检修考虑，不超过 1mSv/h（检修剂量）。为了防止射线穿透造成副井上方过大剂量，一般做成不锈钢井体并在侧壁部分加铸铁块，以保证贮源井底部剂量率不超过检修剂量。如果副井紧靠贮源井侧壁，铸铁块厚度可相应减薄。副井井盖为防止射线漏则设计成多台阶式，材料采用不锈钢包铅。由于设计副井井盖和侧壁的防护厚度时，均计入了副井中水的屏蔽作用，所以在把放射源装入副井中时，一定要保证副井内充满水。

2.4 安全联锁系统

γ 辐照装置要设置完善的安全联锁系统，以防止运行人员和其他人员受到伤害和照射。防止或限制对设施的损坏，并对被辐照的产品剂量控制在规定的范围内。在安全联锁系统中，有些是属于设施正常运行所必需的；另一些是给出警报或警告指示，以引起对不正常的但并不是事故状态的注意；还有一些是故障指示，警告运行人员，系统已有严重问题存在同时必须执行预先规定的程序，如将放射源返回屏蔽位置、防止人员进入辐照室等。

安全联锁系统主要是物理器件、机械或电器设施，并依赖自动控制系统的联锁设计实现的。因此，安全联锁系统设施和器件在设计时应满足下列准则：

1. 系统的设施和器件应很好地组合，具有联锁保护功能，使其在一个系统中出现故障时，第二或第三个系统能可靠地提供所要求的保护。

2. 每一个系统都应有足够的冗余度和形式的多样化，以减少故障的概率。也就是使每个主要部件要有双重性，并由不同类型的备用件组成，以减少发生多重事故的概率。

3. 各个系统和部件必须是独立的，使之不会因出现任一故障而引起其他系统的毁坏。

4. 安全联锁系统应始终能可靠地工作，使之不使用专用工具则难以干预。即使有了故障，系统要仍然处于安全状态。

下面列出辐照装置应安装的主要安全联锁系统。

(1) 源升降装置、辐照室人员通道门和货物通道门应由同一把独立钥匙或多个串在一起的钥匙进行控制，这一把或一串钥匙还应与一台有效的便携式辐射检测报警仪相连，如从控制台上取出钥匙，放射源则自动降到安全位置。只有获得资格且经运营单位授权运行人员才能使用该钥匙；

(2) 在辐照室所有门口醒目的地点设灯光音响信号装置，用于对辐照室外人员的警示；

(3) 在辐照室内应设置无人检查按钮，并与控制台联锁，升源前操作人员应进入辐照室内

巡视检查，无人检查按钮设置位置应避免巡视检查盲区；

(4) 在辐照室内设紧急降源（一般为拉线开关）和开门按钮，紧急降源（一般为拉线开关）按钮应覆盖整个辐照室和迷道区域；

(5) 在控制台上应安装紧急停止按钮，可在任何时刻终止辐照装置的运行并将放射源降至安全位；

(6) 设置人员通道门与源升降系统联锁。如果门未关闭，不能升源；当源架在非安全位时，打不开人员通道门，如果强行打开人员通道门，则自动降源；当停电时，按正常操作程序打不开人员通道门；

(7) 设置门安全链与源升降系统联锁。安全链安装在辐照室人员通道门内，是有人在辐照室维修时，用来将源升降机构液压系统断路的装置，以使维修工作能在不会由于人员疏忽而提升源的危险威胁下完成。也就是说为了确保安全，必须在切断动力源，放射源不能被提起的状态下进行维修工作。

(8) 设置固定式辐射水平监测仪，分别在辐照室的迷道、货物出口及水处理装置设置探头，并与控制系统联锁。分别设定剂量报警阈值。当辐照室迷道的探头探测到的辐射水平超过阈值时，人员通道门打不开；当货物出口处探头探测到的辐射水平超过阈值时，自动停止货物输送系统，同时降源，并发出声光报警；当水处理的探头探测到的辐射水平超过阈值时，自动停止水处理系统，同时降源，并发出声光报警。

(9) 在货物进出口处设置安全门（或者设置辐照容器堵门功能），与辐照容器输送配合开闭防止人员进入，并与控制系统联锁。当源架在非安全位及停电时，按照正常操作程序无法开门或无法移动辐照容器。

(10) 在人员通道入口内及货物出入口内设置防人光电，并与控制系统联锁。当源架在非安全位时，如触发光电报警，则自动降源；当源架在安全位时，如光电开关未投入，则无法升源。

(11) 在辐照室人员入口处应设校验源，例如 0.37MBq 的铯-137 源，操作人员进入辐照室之前应用校验源检查剂量仪表是否正常。

(12) 设置停电自动降源系统，避免因停电导致各监控仪表失灵而引发人员受照事故。

(13) 设置源架迫降系统，以便在升降源发生某种故障时，使源架得以解脱。

(14) 设置贮源井水位监测报警与补水系统，避免因贮源井水位下降引起辐照室内辐射剂量水平上升。当出现超低水位报警时，按正常操作程序打不开人员通道门。

(15) 辐照室应设置通风系统，并与控制系统联锁。通风系统故障时，自动降源或者无法升源。

(16) 辐照室应设置烟雾报警装置并与控制系统联锁，遇有烟雾报警时，自动停止通风系统，自动降源，货物传输系统停止运行。

(17) 辐照室各可拆式屏蔽塞包括装源用屏蔽塞应与控制系统联锁，以便在装、卸源过程中屏蔽塞被卸下的情况下，自动降源或者无法升源。

(18) 源架应设有护罩或防撞杆，并与辐照室构筑物牢固连接，其强度和结构应能有效防止货物倒塌、货物冒出、货箱倾斜、吊具脱钩等意外情况致使护罩或防撞杆变形或倾斜而卡阻源架。对于动态辐照装置，货物输送系统过源段应设有导向定位机构，并在入口设置防碰撞报警装置，该装置应与货物输送系统和源架的升降系统联锁。辐照箱门锁的结构应具有防止意外开启功能，并设置开门检测装置。源升降滑轮系统应设有防止钢丝绳脱槽的设施。

(19) 应设移动电视监控系统并自带照明功能，保证辐射状态下能清楚监视辐照室内和源架情况，并具有图象储存功能。

(20) 辐照室内应设喷洒装置。喷洒装置在屏蔽体内的管道应采用不锈钢材料；在屏蔽体外采取双阀门人工控制方式；应预留与消防车的接口。

2.5 辐照产品运输系统

研究型或小型辐照装置由于装源量小，生产率低，一般不设置自动的辐照物输送系统，辐照产品进出辐照室均由人工搬运。大型工业化商用装置生产量大、效率高，辐照物的输送均采用机械化自动化设备。辐照产品输送系统分三大部分：

1. 过源机械系统

在辐照室内运载产品围绕源架运行或停留，使之接受辐照的传输机械系统。通常采用辊道输送系统、气动单轨悬挂输送系统及积放式悬挂链输送系统等，见图 2-3。

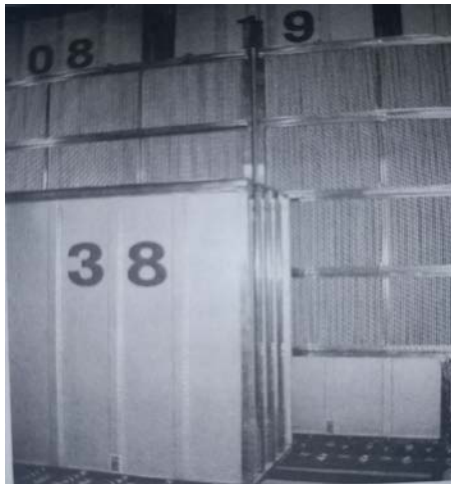


图 2-3 过源机械系统示意图

2. 迷道输送系统

在操作大厅与辐照室之间，经过迷道运载产品的输送机械系统。通常采用电动辊道输送系统、气动单轨悬挂输送系统及积放式悬挂链输送系统等。

3. 装卸料操作机械

在操作大厅的装卸料段，将未辐照产品装入辐照箱和将已辐照产品从辐照箱中卸出的机械设备。通常采用倾斜式装卸机、升降式装卸机或堆码式装卸机等，见图 2-4。



图 2-4 装卸料区示意图

2.6 控制系统

控制系统主要任务是保证在辐照过程中按工艺要求完成各种工况下生产过程中的控制，并确保操作人员的人身安全。控制系统主要包括对各个系统如放射源升降系统、产品输送系统、安全联锁系统、辐照室门、通风系统以及水处理系统等进行远距离自动程序控制，还包括信号系统和语音报警系统以及监控系统 and 数据管理系统等。

2.7 剂量系统

剂量系统的主要任务是：辐照安全剂量监测、辐照室内剂量场和辐照产品吸收剂量的测量。

1. 辐射安全剂量监测

(1) 辐照室内及工作场所的辐射剂量监测。辐照室及周围的工作场所可选择固定式多道 γ 射线监测仪，作为升源监测报警和周围区域的常规监测，该仪器的探头安装在辐照室的迷道内和有关的工作场所，显示仪表安装在控制台上。作为工作场所和附近公众环境的辐照剂量监测，常用仪表有 FJ-817AX.7 (X 和 γ 剂量仪) 和 FD-3013 数字式 γ 辐射仪等。

(2) 工作人员的个人剂量监测。工作人员的日常个人剂量监测分为两个部分：一是选择袖珍辐射仪作为进出辐照室的安全剂量监测仪表；二是选择个人佩戴的剂量计作为日常工作人员累积剂量的监测，由各相关部门进行统一管理，定期发放和测量登记。

(3) 贮源井水和钴源运输容器放射性污染的监测。贮源井水和钴源运输容器放射性表面污染一般选择 FT-603 井型 γ 闪烁探头与配套的定标器和铅室，作为监测仪表。

2. 剂量场的测定

γ 辐照装置启用前必须领进行剂量场的测定工作，以掌握装源后场内的剂量分布情况。测量工作包括放射源工作位置的重复性、辐照场的剂量分布、不同堆积密度的产品在各个工位处的剂量

率和剂量不均匀度，以及他们的准确性和重复性。一般要进行动态和静态测量，以适应不同的辐照方式。在补充新源或间一定时间后都要按上述方法再进行测量。剂量场分布及吸收剂量的测量系统一般由国家计量院进行测定，根据鉴定结果，各单位可应用自己的测量手段作为日常辐照产品的检测，作为生产运行的基本依据。

3.辐照产品吸收剂量的测量

辐照装置启用前应该按照 JJG591 的要求测定“启用剂量”。其主要目的是比较实际测定剂量与设计的计算值，并调整辐照物在辐照室的停留时间。以使实际的吸收剂量能达到要求；二是测定各辐照产品箱中的最低和最高吸收剂量点，求出实际的不均匀系数，以验证设计中计算的不均匀系数是否正确。

2.8 通风系统

根据设计装源量和辐照室空间大小，确定排风量。应设置两台排风机，以保证当放射源降至井内贮存位置 5min 后，辐照室内臭氧的浓度和 NO_2 浓度（包括 NO 、 N_2O 、 NO_2 等各种氮氧化物均换算为 NO_2 的浓度）的限值满足 GB 中规定的限值，即：臭氧最高容许浓度不应超过 $0.30\text{mg}/\text{m}^3$ 。 NO_2 的时间加权平均容许浓度（包括 NO 、 N_2O 、 NO_2 等各种氮氧化物换算出的 NO_2 浓度）不应超过 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 。装源量大于 37PBq （100 万居里）的湿法贮源 γ 辐照装置，当放射源持续存放在贮源井内不工作时，应定期启动通风系统换气，以防止辐照室内贮源井水因电离辐解产生的氢气积累至爆炸限值。设计单位应根据装源活度和辐照室的尺寸等具体参数计算出启动通风系统的时间间隔及每次通风的最小时间，并在设计文件中明确说明。

2.9 贮源系统及水处理系统

现在绝大多数 γ 辐照装置采用水井贮存放射源，用水作为放射源屏蔽介质。水井基础用防水混凝土制造，内衬不锈钢覆面。为了避免水中的杂质腐蚀放射源，贮源井水要使用去离子水或蒸馏水。装置中一般应设计有水处理系统，井水需循环处理，能不断地去除水中杂质，保证井水的电导率不大于 $10\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ，总氯离子（ Cl^- ）含量不大于 $1\ \text{mg}/\text{L}$ ；pH 值为 $5.5\sim 8.5$ 。

正常的井水损失主要是由于水的蒸发引起的。井水水位和井水补水装置是由控制台操纵的。当水井水位下降到正常水位线的低液位线时，液位计向控制室报警，控制台发出补水指令进行自动或人工补水。此外，对于装源量超过 37PBq 的 γ 辐射装置，还应设置冷却水系统，减少井水的蒸发。

我国前几年建设的 γ 辐照装置一般没有专门设置水处理系统。初装源时加入的去离子水或蒸馏水，几年甚至几十年不更换；有的大量使用自来水，水质很差。这些都可能导致放射源被腐蚀。因此，国家规范和监管部门目前规定辐照装置一定要设置水处理系统。

思考题：

- 1.辐照装置常用的放射源？
2. ^{60}Co 半衰期？发出射线的类型？射线能量？
- 3.按照放射源对人体健康和环境的潜在危害程度，放射源分类？工业辐照所用的放射源？
4. γ 辐照装置贮源水井水质标准？
5. γ 辐照装置主要的安全联锁系统？

第三节 γ 辐照装置的安全与防护

3.1 辐射安全原则与防护准则

1. 辐射安全原则

γ 辐照装置设计建造应该遵循以下原则：

(1) 纵深防御原则。第一级防御的目的是防止偏离正常运行工况，第二级防御的目的是探测及控制对正常工况的偏离，以防止预计运行事件升级为事故；第三级防御的目的是减轻事故的后果。

(2) 冗余性。每个系统的设施和器件都应有足够的冗余度（多重性），以便在运行过程中万一某物项失效或不起作用的情况下使其整体不丧失功能。例如，一般联锁要设 2 道，重要的地方要设 3~4 道。

(3) 多元性。多元性能够提高装置的安全可靠性，包括系统的多元性和多重剂量监测可以采用不同的运行原理、不同的物理变量、不同的运行工况、不同的元器件等。例如：人员出入口的安全联锁可以采用机械的、电气的、剂量的、电子的。

(4) 独立性。独立性是指某个安全部件发生故障时，不会造成其他安全部件的功能出现故障或失去作用。通过功能分离和实体隔离的方法使安全机构获得独立性。采取以下措施：

- ① 保证冗余性（多道联锁）各部件之间的独立性；
- ② 保证多级防御各部件之间的独立性；
- ③ 保证多元性各部件之间的独立性；
- ④ 保证重要安全物项和非重要安全物项之间的独立性。

2. 辐射防护准则

(1) 辐射实践的正当性

γ 辐照装置的建设立项，必须进行正当性分析，以确定其该项目的正当性。在正常情况下，辐照装置的设计、建造、运行和维护对工作人员和公众引起的剂量几乎是可以忽略的。但是，在辐照装置的偶然事故中会导致工作人员受到超过剂量限值的照射。此外，辐照装置的运行还伴随着其他辐射安全风险，包括放射源保安、放射源的运输以及最后放射源的处置。所以，确定所使用的辐照装置是否正当应由监管部门根据具体情况来判断，并权衡辐照装置使用所带来的利益和风险，以确定该具体实践是正当的。

(2) 辐射防护与安全最优化

γ 辐照装置的设计和建造要求所有照射剂量都保持在规定限值以内，并在考虑社会和经济因素之后，个人受照剂量的大小、受照射的人数以及受照射的可能性均保持在可合理达到的尽量低

水平，即 ALARA (As Low As Reasonably Achievable) 原则。

(3) 个人剂量控制

①个人剂量限值

个人剂量限制是辐射防护体系的一部分，是最优化过程中的约束条件。下列剂量限值不包括天然本底照射和医疗照射：

a.职业照射

由监管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量（但不可作任何追溯性平均），20mSv；任何一年中的有效剂量，50mSv。

b.公众照射

年有效剂量，1mSv；年有效剂量在特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv/a，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

②剂量约束值

在 γ 辐照装置设计时，辐射防护的剂量约束值规定为：

a.辐射防护工作人员个人年有效剂量值 5mSv；

b.公众成员个人年有效剂量值 0.1mSv。

3.2 外照射危害的防护

为了实现辐射防护的最优化以及个人所受剂量不超过相应限值，外照射防护有三种基本方法：一是控制照射时间；二是延长与源的距离；三是屏蔽。运用这三种方法可以降低受到外照射时所受到的辐照剂量。

1.时间防护

因为累积剂量和受照时间有关，受照时间越长与所受累积剂量成正比，这种关系可以用方程式（式 3-1）表示。因此，常常通过受照时间的控制，来限制个人所接受的剂量。在一切接触致电离辐射的操作中，应以尽量缩短受照时间为原则。

$$D = RT \quad (\text{式 3-1})$$

式中：D——所受到的辐射剂量；

R——剂量率；

T——受照时间。

时间的概念对导致外照射的工作安排同样重要。在没有真实放射源的情况下练习某种技术是很有用的，这有助于减少受照时间从而降低总剂量。

2.距离防护

操作时尽量增大操作者与辐射源的距离，因为点源的剂量率的大小与离辐射源的距离平方成

反比，即距离增加 1 倍，剂量率减小到原来的 1/4，如方程式（式 3-2）所示。

$$R = \frac{k}{d^2} \quad (\text{式 3-2})$$

式中：R——剂量率；

d——距源的距离；

k——对于特定的放射源是一个常数。

对于特定的放射源而言，k 是一个常数，假如放射源不改变，可以得到方程式（式 3-3）：

$$R_1 d_1^2 = R_2 d_2^2 \quad (\text{式 3-3})$$

式中：R₁——距离点源 d₁ 距离处的剂量率；

R₂——距离点源 d₂ 距离处的剂量率。

事实上，只要离放射源的距离至少在源的线性尺寸 10 倍以上，就可以假设为点源。

在辐射防护中，距离通常用来降低电离辐射的危害，在实际工作中，禁止靠近放射源并常用远距离操作工具，如长柄钳子、机械手、远距离自动控制装置等，增大人体与辐射源之间的距离。

3.屏蔽防护

在实际工作中，由于条件所限，往往单靠缩短接触时间和增大距离并不能达到安全操作的目的。例如大型的 Co-60 辐照源，离工作人员的最大距离也只有几米。在工作人员处的当量剂量率可能达 1Sv/s 以上，这时即使在那里停留一秒钟也是很危险的。因此上述两种方法都不适用，而必须采用屏蔽防护。

屏蔽防护就是根据辐射通过物质时会被减弱的原理，在人与辐射源之间加一层足够厚的屏蔽物，把外照射剂量减少到容许水平以下。对辐射源进行屏蔽的方法是一个降低辐射受照的更加有效的方法。

屏蔽防护设计的内容包括：选择合适的屏蔽材料，确定屏蔽的结构形式，计算屏蔽层的厚度，妥善处理散射和孔道泄露等问题。屏蔽防护的方法根据防护要求的不同，屏蔽物可以是固定式的，也可以是移动式的。屏蔽材料的数量和种类的选择依赖于辐射的类型和能量、辐射源的活度（或发生器产生的辐射强度）和屏蔽体外面所允许的辐射剂量率等三方面因素，屏蔽材料的选择通常还与成本、空间和便利等因素有关。铅有毒，不容易进行操作，大块的铅在没有很好支撑时会下垂。另外，混凝土价格便宜，易于处理，但需要较厚的混凝土以达到有效屏蔽。

3.3 γ 辐射装置工作场所的分区

1.控制区

在辐射工作场所划分的一种区域，在这种区域内要求或可能要求采取专门的防护手段和安全

措施，以便：

- (1) 在正常工作条件下控制正常照射或防止污染扩展；
- (2) 防止潜在照射或限制其程度。

对于 γ 辐照装置来说，辐照室、迷道为控制区。因此，应在辐照室的入口处设置明显的电离辐射标志，运用行政管理程序和实体屏障（包括门锁和联锁装置）限制进出控制区。

2.监督区

未被确定为控制区、通常不需要采取专门防护手段和措施但要不断检查其职业照射条件的任何区域。操作区域、控制室、通风间、设备间、倒源间、水处理间等区域皆为监督区。此区内也应设置电离辐射标志。

3.4 辐射安全管理

1.辐照装置监管

(1) 辐照装置的选址、设计、建造、运行和退役均应按照相关法规要求，向监管部门提出申请,经认可或批准后方可实施。

(2) 辐照装置设计最大装源量增加或涉及装置辐射安全的设施有变化时，业主应向监管部门提出申请，经对其辐射防护和安全认证后方可实施。

2.业主、辐射防护负责人、合格专家的职责

(1) 业主的辐射安全职责

业主对辐照装置的辐射安全负有全部责任，应制定辐射防护与安全大纲，指定辐射防护负责人，配备或聘用合格专家。

(2) 辐射防护负责人

业主应设置辐射防护与安全机构，并指定辐射防护负责人，且赋予其相应权利，如果运行需要和辐射安全之间存在潜在冲突时，优先考虑辐射安全的需要。

辐射防护负责人职责包括：

- a.向所有操作人员、维修人员和其他相关的人员提供操作说明书，进行培训；
- b.考核并确认他们已经掌握、遵守这些操作说明；
- c.控制区入口通道的管理；
- d.保证辐射工作人员受照剂量满足 3.1.2 要求；
- e.安排辐射监测仪器的检定；
- f.检查加速器开机运行记录及其设备的维修记录；
- g.制定辐射安全检测方案并组织实施；
- h.监督个人剂量计的分发和回收，评价剂量监测结果；
- i.组织并实施定期安全检查程序；

-
- j.出现辐射安全问题及时上报；
 - k.制定应急预案，安排周期性演练，确保其适宜性和有效性；
 - l.编写辐照装置安全和防护状况的年度评估报告。

(3) 合格专家

业主应聘请具有 5 年以上辐射安全管理经历，且有专业背景和高级职称的人员担任合格专家。合格专家就辐射安全有关范围内的审管问题提出建议，不承担应属于业主的责任。合格专家应在业主需要时提供下列建议和帮助：

- a.辐射防护的最优化；
- b.剂量测量和辐射监测；
- c.超剂量照射事件的调查；
- d.人员培训；
- e.辐射安全评价和应急预案；
- f.新建、改建、扩建的辐照装置计划；
- i.质量管理；
- j.紧急事故处理。

3.操作人员与运行管理

γ 辐照装置建成后，必须经国家有关部门验收合格，取得辐射安全许可证，方可运行。运营单位必须设有安全与防护管理机构，并制定安全操作规程或手册，以确保装置安全运行。运营单位必须配备具有专业技术资格的人员，负责辐照装置在使用和运行过程中的安全。这些人员必须具备以下技能：

- (1) 受过理论培训，对所从事工作的电离辐射特性具有必要的知识；
- (2) 熟悉设备结构性能并对处理事故的应急措施有比较透彻的了解；
- (3) 了解并掌握国家既有关部门颁布的有关规定和装置的操作规程；
- (4) 能够操作和运用计算机及其软件系统。

(1) 运行人员资格

①运行人员应由身体健康，并经国家监管部门授权单位的培训，取得培训合格证的人员才能上岗。

②运行人员必须熟悉： γ 辐照装置的基本结构、运行和保养，辐射防护的原则和实际操作；正常运行的操作规程；管理和监督机构的管理条例等。

③运行人员必须了解辐照室周围地区的辐射水平，必须熟悉本装置的安全设施，例如：联锁系统的联锁机构、各类信号的位置、警示灯光、声响信号和可见标志等。

- ④运行人员应熟悉所用的放射性监测仪表及管理部门对个人剂量监测的要求。
- ⑤运行人员必须具备操作放射源和相关设备的能力，并具有运行日志记录能力。
- ⑥运行人员还应了解应急联络渠道和方式。

(2) 人员培训

①所有从事电离辐射工作的人员都应经过国家监管部门授权单位的培训，以便他们能按照国家有关规定和标准的要求进行工作。操作辐照装置的人员必须接受下列教育：

- a.辐射防护基础知识；
- b.国家有关法规、章规；
- c.辐射加工基本知识；
- d.辐射剂量学的基本知识；
- e.辐照装置的辐射防护与安全。

②运行人员经过培训，具备操作及事故（故障）处理能力后才能允许其在控制台独立操作。

③单位主管定期对运行人员的安全表现进行检查和评议，以保证法规、许可证条件、操作及事故处理程序的遵守，并进行安全教育。检查内容包括：

- a.应用于辐照装置的辐射防护基础知识；
- b.国家法规中的有关规定；
- c.运行人员个人应完成的操作与事故处理程序；
- d.运行人员有关安全方面的表现；

④根据监管部门要求或装置的改进，应定期进行再培训。

(3) 操作规程

升源前的检查操作人员在进入辐照室前必须携带个人剂量报警仪和剂量巡检仪表及佩带个人剂量计，用与升源钥匙连在一起的开门钥匙打开辐照室的人员通道门，进入辐照室巡视一遍，检查室内有无逗留人员，经过防人光电（共设有三道）顺序投入监督，安全门链就位，关闭辐照室人员出、入通道门，同时在门的上方有灯光显示，并伴有铃声报警。

降源和进入辐照室的步骤：

- ①按动降源按钮降源至安全为，观察固定式辐射剂量仪读数，确认正常；
- ②取下剂量巡检仪；
- ③取下升源钥匙插入辐照室门开关锁孔，打开辐照室迷道入口门；
- ④取下安全门链；
- ⑤打开剂量巡检仪，在入口处校验源进行仪器校验，确认仪器工作正常；
- ⑥手执剂量巡检仪，佩带个人剂量剂，携带个人剂量报警仪，逐步经过迷道，经过防人光电系统进入辐照室；
- ⑦确认剂量巡检仪、个人剂量报警仪均正常且未发现其它异常情况后进行工作。

(4) 运行记录

每个运行人员在值班时，应按照规定完成运行日志的记录。日志应详细记录辐照装置的重要活动事项，一般包括下列内容：

- ①运行工况；

-
- ②发生的故障及排除方法；
 - ③辐照产品的情况；
 - ④外来人员进入辐照室佩带的个人剂量计的读数；
 - ⑤维修；
 - ⑥其他。

4.日常管理和监督

为保证装置的安全运行，应建立强有力的管理体制，对操作人员进行严格的日常管理和监督，要做到“有章可循，有令必行”。

①要建立强有力的管理体制，明确规定各岗位职责、机构管理程序和适合各级人员的培训制度。在运行程序中要列出有关工种人员的姓名和职责。健全规章制度（制定各种制度）如岗位责任制；进出辐照室管理规定；装置不运行时，控制台主控钥匙的保管等等诸如此类的制度。

②建立严格的持证上岗制度和相应的培训制度。避免人员变动频繁，无证上岗。

③操作人员必须佩带适用的个人剂量计，并建立工作人员的个人剂量档案。个人剂量计应定期送有资质的单位测读。

④做好装置运行日志的记录。记录应包括所完成的辐照产品的有关情况，装置的运行状况，对故障和维修的细节应按专项进行记录，并妥善保管。

⑤未经领导部门许可，外来人员不应进入辐照室和控制室。确有必要进入的一定要逐个登记，佩带个人剂量计并有专人带领，按照进出辐照室的有关规定办理。

⑥对装置进行改造或对影响安全性能的参数进行修改，应征求设计部门意见并须经专家论证上报主管部门批准后才能进行。对所有改动必须详细准确地加以记录，并对记录作永久性保存。

⑦接受有关部门依法对 γ 辐照装置进行日常监督。

运营单位应做好以下安全检测，采用规范化表格记录，并进行年度评估。记录应保存至辐照装置退役。

（1）常规日检查应至少包括下列内容：

- ①工作状态指示灯；
- ②辐照室安全联锁控制显示状况；
- ③升降源和输送系统状况；
- ④个人报警剂量仪和便携式剂量监测仪；
- ⑤贮源井水位；
- ⑤通风系统。

（2）常规月检查应至少包括下列内容：

- ①辐照室内固定式辐射监测仪；
- ②紧急降源系统。
- ③升降源和导向钢丝绳、输送系统。如果绳缆出现使用过度现象，应进行更换。

④补水时应检查补水量是否正常。如异常，应检查水井是否泄漏，并检查补水供给系统的运行状况。

(3) 常规半年检查应至少包括下列内容：

- ①配合年检修的检测；
- ②水质及污染检测；
- ③环境辐射水平；
- ④全部设备和自控系统。

3.5 γ 辐照装置的倒、装源

由于现代大型辐照装置基本都实行了货物自动传输系统，所有人员均在控制区以外，在正常情况下，潜在照射的危害较小。倒装源操作时的潜在照射是构成辐照工作人员受照剂量的主要因素，为此必须十分关注倒装源的安全。倒装源是一项危险、复杂的工作，倒装源计划必须先得到环保部门的批准。一旦方案确定，应该严格按照预定的方案进行。在实施过程中，应严格采取分区控制和挂牌上岗制度，从而有效控制操作人员的受照剂量。整个操作过程有保卫人员值勤，杜绝闲杂人员出入。另外，倒装源之前的准备工作非常重要，只有这样才能保证倒装源工作进行顺利。

长柄工具是用于在源井内进行水下工作放射源的长杆手动工具，一般包括，长杆夹钳、长杆钩、长杆水下照明灯等。用于制造长杆工具的材料，其密度要大于 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 。长杆工具的首段和末端均设有不小于 10mm 的进水孔和排气孔，以便在水中使用时水能充满长杆，防止射线穿透，使工作人员不至受到过量照射，长杆工具实物图如图 3-3 所示。



图 3-3 长杆工具实物图

3.6 γ 辐照装置的退役

《 γ 辐照装置的辐射防护与安全规范》(GB 10252-2009) 规定， γ 辐照装置的使用寿命为 40

年。若达到寿期但业主要求延期的，必须向监管部门提交延期使用的安全评估报告和其他支持性材料，经评审批准后可延期运行。由于各种原因，不符合国家有关全规定且无法改造的 γ 辐照装置应强制其退役。 γ 辐照装置退役，须业主向环保、卫生、公安等主管部门申请，提出退役计划和措施，得到批准后方可实施此项实践。在有关部门的监督下做好放射源的转移和回收；作好设备、井水、水井的去污等工作。经测定达到安全水平后方可封存或拆除，并记录存档。具体可按照国家核安全局 2013 年发布的核安全导则《 γ 辐照装置退役》HAD 401/07-2013 做参考指导文件。

3.7 应急响应计划与事故处理

1. 应急响应计划

为保证所有人员了解事故危害并熟悉应急响应的各项要求，要预先编制事故处理的应急响应计划，一旦发生事故，能立即按应急规程进行操作，以避免事故进一步扩大。

(1) 报告

任何事故都必须如实记录，按照规定向监管部门报告，以便对事故进行调查和评价。

(2) 事故处理原则

事故发生后，必须立即消除事故源，防止事故蔓延和扩大；尽量减少个人和集体的受照剂量；对伤员及超剂量受照人员分别进行处理和救治。

2. 事故处理

(1) 源损坏和泄漏的处理

确认放射源已发生泄漏，应立即停止使用辐照装置，并关闭水循环系统，以防止污染扩散。同时要尽快上报有关管理和监督部门，并与放射源的供应商和制造厂取得联系，迅速采取处理措施。破损源及污染物应经有关管理和监督部门的批准，才能进行处理。

(2) 放射源提升系统及产品箱卡阻源架等事故的处理

应按下列方式进行处理：

①保持辐照室的出入口门处于受控状态。

②通过分析、检查其外部指示器和剂量率的测量值，确定放射源的位置。

③应根据辐照的产品情况，采取相应的措施，如加大通风量，防止因照射时间过长而导致产品过热燃烧。

④制定补救行动计划时要根据收集到的有关事故原因，制定采用放射源源架迫降机构、采用特殊工具、使用遥控装置或采用附加移动式屏蔽组件等措施进行处理的各种方案，并提出对处理事故的工作人员进行剂量监督的方案。

⑤应当按照规定报告上级监管部门，必要时通知设计单位和制造厂。补救措施要经有关部门批准，方可行动。

(3) 井水污染的处理

确认井水被污染后，装置立即停止运行。对受污染的井水进行处理，使其污染水平降低到10Bq/L以下。处理过程中产生的放射性废弃物应按国家规定处理。

思考题：

- 1.辐射安全防护的安全准则？
- 2.外照射防护的三种基本方法？
- 3.职业照射和公众照射的个人剂量限值？
- 4.γ 辐射装置工作场所分区？主要包括？
- 5.γ 辐射装置应急计划要求？

第四节 γ 辐照装置的事故分析与预防

4.1 辐射事故概况

1. 山东济宁某辐照厂人员受超剂量照射事故

(1) 事故经过

山东省济宁市某辐照厂是一家民营企业，其静态堆码式钴-60 辐照装置(设计装源活度 30 万 Ci，事故时活度约 3.8 万 Ci，建于上世纪 90 年代，用于辐射加工大蒜、圆葱、中药和医疗器具等。辐照室规模较小，主屏蔽材料为石材及土砖等，设备设施十分简陋，后来自行改造加装了货物自动输送系统。

2004 年 10 月 21 日 17 时，由于该辐照装置的铁网门安全联锁、降源限位开关、踏板降源装置、三道防人误入光电联锁、拉线开关等安全联锁系统全部失灵，放射源未能正常回落到井下安全位置，该辐照厂两名工作人员在未携带辐射监测仪器及个人剂量报警仪的情况下，通过迷道(与货物输送同一通道)进入辐照室，查看装有脱水蔬菜的货架是否到位。两人在辐照室距放射源约 0.8~1.7m 距离内整理和摆放货物，10 分钟左右感觉有些不舒服，便跑出辐照室，进控制室观察发现放射源在升起位置，随即降源到安全位置，之后不久出现呕吐症状。该单位立即将两人送往县医院救治，于 22 日 6 时 30 分将两人送往山东省疾病预防控制中心，之后转入省立医院诊治，23 日下午又将两人送往北京 307 医院接受治疗，最终治疗无效身亡。

事故发生后，省辐射环境管理站对辐照室外传送轨道附近、控制室内、仓库、辐照室及周围环境进行 γ 剂量水平监测，监测结果为本底水平，未对辐照室和周围环境造成辐射污染。山东省环保局在全省范围内对此次事故责任单位及其负责人进行了通报；责成当地政府对事故责任单位下达停产整顿的决定，并在其停产期间加强放射源管理，防止放射源的转移和丢失。要求事故单位恢复生产时，须向国家环保总局重新申请许可证；当地环保部门对事故责任单位给予 10 万元的罚款。国家环境保护总局要求该辐照厂在 2007 年 12 月 31 日前完成辐照装置的退役工作，在放射源送贮前不得擅自启动辐照装置。

(2) 事故原因分析

本起事故的直接原因是：

①工作人员违反安全操作规程，在辐照装置未降源、未携带辐射监测仪器和个人剂量报警仪的情况下进入辐照室。

②辐照室的铁网门安全联锁、降源限位开关、踏板降源装置、三道防人误入光电联锁、拉线开关等安全联锁系统失灵，放射源未能正常回落至井下安全位置，辐照装置处于“带病”工作状态。

本起事故的根本原因：

①该辐照装置建于上世纪 90 年代初，后又自行改造，设计不规范，设备简陋，没有达到国家标准的相关安全要求。

②该单位管理混乱，规章制度和操作规程不健全；辐照装置控制室门锁破损，无专人管理，人员可以随意进出；辐照装置安全设施未进行必要的维修维护工作，必要的安全设施失效，致使人员受照。

③辐照装置操作人员缺乏必要的防护知识和安全意识，进入辐照室未携带辐射监测仪器及个人剂量报警仪，违规操作。

④辐照装置运营单位应加强安全文化建设，做好辐射工作人员安全和防护培训工作，增强安全和防护意识和能力，严禁未经相关培训的无资质人员上岗操作。

2. 山西忻州辐射事故

(1) 事故经过

1973 年，当时的忻县地区行署科技局即现在的忻州地区科委，为了培育良种，就在上海医疗器械厂的帮助下筹建了钴 60 辐照装置。后来，这几个钴源的剂量当量弱化，钴源装置不再需要。1981 年忻州科委迁往新址，原址由地区划归忻州地区环境监测站，但是，钴-60 辐照室和两间附属操作室仍归科委占用。1991 年环境监测站急于用地，就打报告请示省环保局。省环保局便安排省放射环境管理站负责放射源的收储工作。1991 年 5~6 月间，忻州地区环境监测站白某与省放射环境管理站陈某、李某双方口头商定由省放射环境管理站对钴源进行倒装、储藏和运输。决定之后，省放射环境管理站找到中国辐射防护研究院的专家韩某和卜某，请他们到忻州帮助工作。6 月 20 日，陈某、卜某、韩某、李某 4 人来到忻州，参加忻州地区环境监测站主持召开“迁源论证会”。环境监测站未通知科委领导，只通知了钴源室的管理人员贺某。会上当有人问到钴源数量时，贺某回答：“4 个”。此外，到会专家也没有收集这些钴源的其他相关资料。6 月 26 日，陈某、李某负责现场检测，韩某、卜某负责倒装技术操作，贺某等人协助倒装。操作中，韩某发现，钴源数量与贺某提供的情况有差别，其中之一颜色发暗，便向贺某问原因，贺某的解释是其中有一个是防止核泄漏的“堵头”。陈某和李某也未对钴源进行监测，遂将钴源倒装封存。民工张某昌在钴-60 放射源井外东北侧拾到一圆柱形钢体装入身穿的皮夹克口袋内。大约 11 时感到头晕、恶心、呕吐，不能继续劳动，由同事董某将其送回南关家中。下午，其兄张某双等人陪同张某昌到地区医院就诊。张某双在陪侍张某昌的第四天也发病住院，两兄弟的症状体征基本相同。11 月 26 日，张某昌，张某双病情进一步恶化，下午转入山西医学院第一附属医院(山医一院)继续治疗，医治无效，张某昌于 12 月 2 日出院回到家中死亡。陪侍的张某双于 12 月 7 日也在家中死亡。其父张某亮一直陪侍两个儿子看病也相继发病，于 12 月 10 日死亡。张某昌之妻张某于 12 月 17 日到北京医科大学第二人民医院(北医大人民医院)就诊，诊断为放射病。经中辐院根据受照条件，对张某昌、张某双、张某亮估算了受照剂量，张某昌为 44Gy，张某双为 8.9Gy，张某亮为 8.1Gy。

(2) 事故原因分析

本起事故的直接原因是：

①工作人员违反安全操作规程，在辐照装置未降源、未携带辐射监测仪器和个人剂量报警仪的情况下进入辐照室。

②辐照室的铁网门安全联锁、降源限位开关、踏板降源装置、三道防人误入光电联锁、拉线开关等安全联锁系统失灵，放射源未能正常回落至井下安全位置，辐照装置处于“带病”工作状态。

本起事故的根本原因：

①该辐照装置建于上世纪 90 年代初，后又自行改造，设计不规范，设备简陋，没有达到国家标准的相关安全要求。

②该单位管理混乱，规章制度和操作规程不健全；辐照装置控制室门锁破损，无专人管理，人员可以随意进出；辐照装置安全设施未进行必要的维修维护工作，必要的安全设施失效，致使人员受照。

③辐照装置操作人员缺乏必要的防护知识和安全意识，进入辐照室未携带辐射监测仪器及个人剂量报警仪，违规操作。

3. 河南省杞县某辐照装置卡源事件

(1) 事故经过

河南省杞县某辐照厂有静态堆码式辐照装置 1 座，始建于 1997 年，设计装源量为 30 万居里，卡源事件发生时的放射源活度约 14 万居里。该厂主要从事辐射消毒灭菌和辐射加工工作。2009 年 6 月 7 日，该辐照厂在环境保护部华北核与辐射安全监督站要求限期整改的情况下，为追求经济利益，突击作业。因被辐照的货物(辣椒粉)堆放不合理，堆码过高，发生大面积倒塌，造成放射源护源罩倾斜，致使放射源不能降入源井内，发生了卡源故障。

6 月 14 日，由于放射源的长时间照射，辐照室内的辣椒粉温度过高，发生冒烟自燃现象。在消防及环保部门采取灌注水等措施后，引燃物于当晚 24 时得到控制。

7 月 10 日以后，国内外一些网站开始传播虚假报道和不实消息，引起当地部分不明真相公众的恐慌。7 月 15 日以后，针对当地部分群众出现恐慌问题，环保部门与当地政府启动了突发公共事件处理程序。环境保护部于 7 月 15 日在多家媒体发布“答记者问”，引导舆论和公众，澄清事实。7 月 17 日，由于谣传钴-60 将于 15:00 爆炸，当地一些群众因缺乏辐射安全知识、听信谣传而恐慌外逃。环保部派出的专家组以及当地党委、政府及时开展多种方式的宣传劝服工作，使外出群众短时间内平安返回。

公众恐慌事件发生后，党中央、国务院领导对此高度重视，并对事件处理做出重要批示。为安全稳妥处置卡源事件，环保部周生贤部长、李干杰副部长直接指挥，并要求科学决策，精心组织，确保社会稳定，务求圆满解决。李干杰副部长亲临现场视察指导，核安全司刘华司长多次赴现场指导工作。环保部一方面协调、督促“机器人”降源方案加快实施进度，另一方面组织制定了备用方案，力争一次性处置成功。地方政府制定了公共宣传和信息发布计划。环境保护部门定期

开展环境辐射监测。

8月19日，经周密计划、积极推进，卡源处置工作正式启动。核安全司叶民副司长担任卡源处置前方组总指挥，环保部专家组和监管人员驻现场指导督促处置工作。开封市政府成立了由环保部派出的专家参与的公众宣传工作组，开展多种形式的宣传和科普工作，为降源处置工作提供了宽松的社会环境。由西南科技大学、广西柳工机械股份有限公司、中国工程物理研究院组成的“机器人”降源处置组，首先利用“机器人”清理迷道和辐照室内的障碍物，再由“机器人”将迫降钢丝绳传入辐照室，将特制挂钩与迫降钢丝绳连接在一起，挂至护源罩顶部。8月24日晚，在专家组的指导下，处置组缓慢拉动钢丝绳，逐步减小护源罩倾斜角度，被卡的放射源安全降落至贮存井内。至此，历时79天的卡源事件得到根本解决。

（2）事件原因分析

事件的直接原因：

①业主在监管部门要求限期整改的情况下，为片面追求经济利益，不顾安全隐患，突击进行辐照加工。

②业主单位违规操作，忽视了安全管理，码放货物过高，且堆放方式不合理、不稳，加之护源罩的固定铆钉已松动，导致货物倒塌后压倒护源罩，致使放射源无法正常回到贮源水井中，加上接受辐照的辣椒粉由于放射源的长时间照射，温度过高容易发生自燃现象。

③卡源事件演变导致为一个公众恐慌事件，直接原因是由于一些网络谣言和不实信息的传播，引发了一些不明真相群众的恐慌，导致人员大量外逃。

事件的根本原因：

①该辐照装置是早期业主委托个人设计，装置设计、建造不规范，运行时间较长，设备老化、护源罩固定措施不牢固，检修更新不及时。

②企业管理人员文化素质较低，安全知识匮乏，安全观念淡漠：企业缺乏专业技术人员，没有能力应对运营中出现的各类技术问题。卡源故障发生后，业主单位束手无策，不知道怎样排除故障，也不知道该找谁来处理。

③卡源事件演变成一个公众恐慌事件，直接原因虽是由于一些网站的虚假报道和不实信息传播，引起了一些不明真相群众的恐慌外逃，但根本原因却是我国长期以来缺乏对核与辐射安全文化的培植，公众核与辐射知识匮乏，对核与辐射的极度敏感，导致恐慌情绪蔓延；另外，相关部门早期未能及时公开有关信息，针对网络谣言和媒体的不科学言论没有采取及时的关注和引导，给不实言论的传播和公众恐慌情绪的滋长留下了时间，这也是造成此次公众性事件的原因之一。

4.2 辐射事故的预防

防止辐射事故(事件)发生，最根本的还是从核技术利用单位自身出发。核技术利用单位必须始终贯彻执行各项法律法规，牢记安全责任，重视辐射安全与防护，建立完善的辐射安全管理体

系，警钟长鸣，才能实现企业的健康、可持续发展。通过对辐射事故(事件)的分析，可以发现辐射事故(事件)大多发生在工业应用领域。辐射事故(事件)大多数是人为因素造成的，有操作人员的问题，也有事故单位管理层面的问题，但大部分事故的直接原因都体现了辐射事故单位存在辐射安全意识薄弱、安全管理不善、核安全文化缺失等深层次的问题。为解决这些问题，降低辐射事故风险，提出以下建议：

1. 要始终高度重视辐照装置运营单位辐射安全管理

鉴于辐照装置运营单位使用的放射源活度大，发生事故的危害大，因此辐照装置运营单位应始终高度重视辐射安全管理，严格遵守各项规章和操作规程，保持安全联锁可靠有效，妥善处理运行事件，确保不发生任何事故。

2. 要加强易拆卸、可移动含源设备的安全保卫措施

放射源使用单位应进一步加强此类设备的安全保卫措施，从建立健全各项安全保卫制度出发，安排专人负责，定期对使用的含源设备进行安全自查，及时排除安全隐患。要确保警示标识、警示语句等清晰可见，含源设备不用时应送至专用的放射源暂存场所安全贮存，保持良好的台账管理制度和记录，定期盘查。要加强停产、维修、放假等特殊时期的放射源安全管理。

3. 加强闲置、废弃放射源的管理

加强相关辐射工作单位对闲置、废弃放射源的管理，避免其脱离监管范围流入社会，形成安全隐患，是降低辐射事故发生率、保障社会稳定、降低社会危害的重要手段。放射源使用单位应及时将闲置、废弃的放射源送贮，送贮前应妥善保管。监管部门应关注关停并转类放射源使用单位的辐射安全管理，督促其依法处置闲置、废弃放射源，消除安全隐患。

4. 要加强对公众的辐射安全知识的宣传教育

加强对公众的正面宣传教育，使其在了解放射源用途的同时，也了解放射源的危害。另外，废旧金属回收人员虽然不属于辐射工作人员，但也应给予适当的宣传教育，使之熟悉基本的辐射安全知识。从事废旧金属回收和熔炼的企业，应建立监测措施，防止流入废旧金属回收渠道的放射源被熔炼。

5. 要增强事故应急管理 with 响应能力

事故发生后，事故单位和相关部门应急响应的及时性、有效性关系到辐射事故后的危害和影响。部分单位辐射安全管理混乱，辐射事故应急机制未建立或不健全，事故发生后不及时上报甚至瞒报，这些都给事故处理增加了难度，错过了最佳时机造成更大的事故后果和社会影响。

核技术利用的快速发展，在带来经济利益和社会效益的同时，也带来了一定的事故风险。前车之鉴，后事之师。让我们共同努力，确保核技术的安全利用、造福社会，保护环境，保护辐射工作人员和人民群众的身体健康和生命安全。

思考题：

- 1.上述 γ 辐照装置发生事故的原因？事故的教训？
2. γ 辐照装置的设计原则？必备的仪器设施？
3. γ 辐照装置的安全操作规程？突发事故应急预案？
4. 降低辐射事故风险的建议与措施？
5. γ 辐照装置辐照货物的注意事项？发生卡源事故后的处理方式？

参考文献

- [1] 何仕均 主编.电离辐射工业应用的防护与安全[M],北京:原子能出版社,2009.
- [2] 王传祯, 刘戈, 周启甫, 唐在民, 等.GB 17568-2008, γ 辐照装置设计建造和使用规范[S]//中国国家标准化管理委员会.北京:中国标准出版社,2008
- [3] 王传祯, 周启甫, 刘怡刚, 刘秋蓉, 范深根, 张赫瑚, 陈坚, 彭伟, 付杰. GB 10252-2009, γ 辐照装置的辐射防护与安全规范[S]//中国国家标准化管理委员会.北京:中国标准出版社,2010.
- [4] 潘自强, 叶常青, 张延生, 吴德强, 郑钧正, 金家齐, 夏益华, 嵇凤官. GB 18871-2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]//中华人民共和国卫生部.北京:法律出版社,2002.
- [5] 王传祯 主编. γ 辐照装置及其应用[M].北京:原子能出版社,2013.
- [6] 王建龙, 何仕均 主编.辐射防护基础教程[M],北京:清华大学出版社,2012.