

工业辐照装置的防护与安全

清华大学核能与新能源技术研究院

何仕均

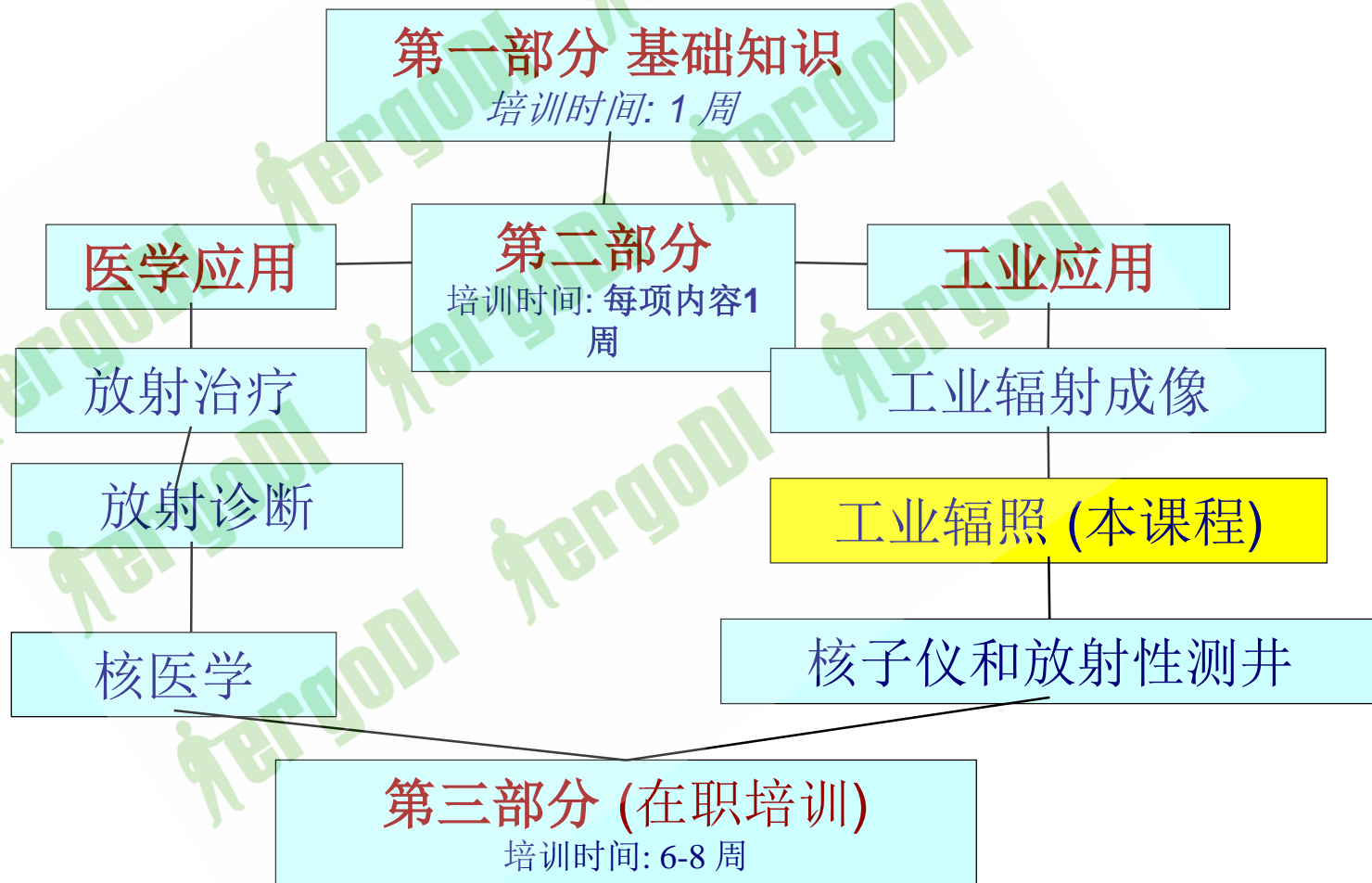
电话：010—62796427 62771863

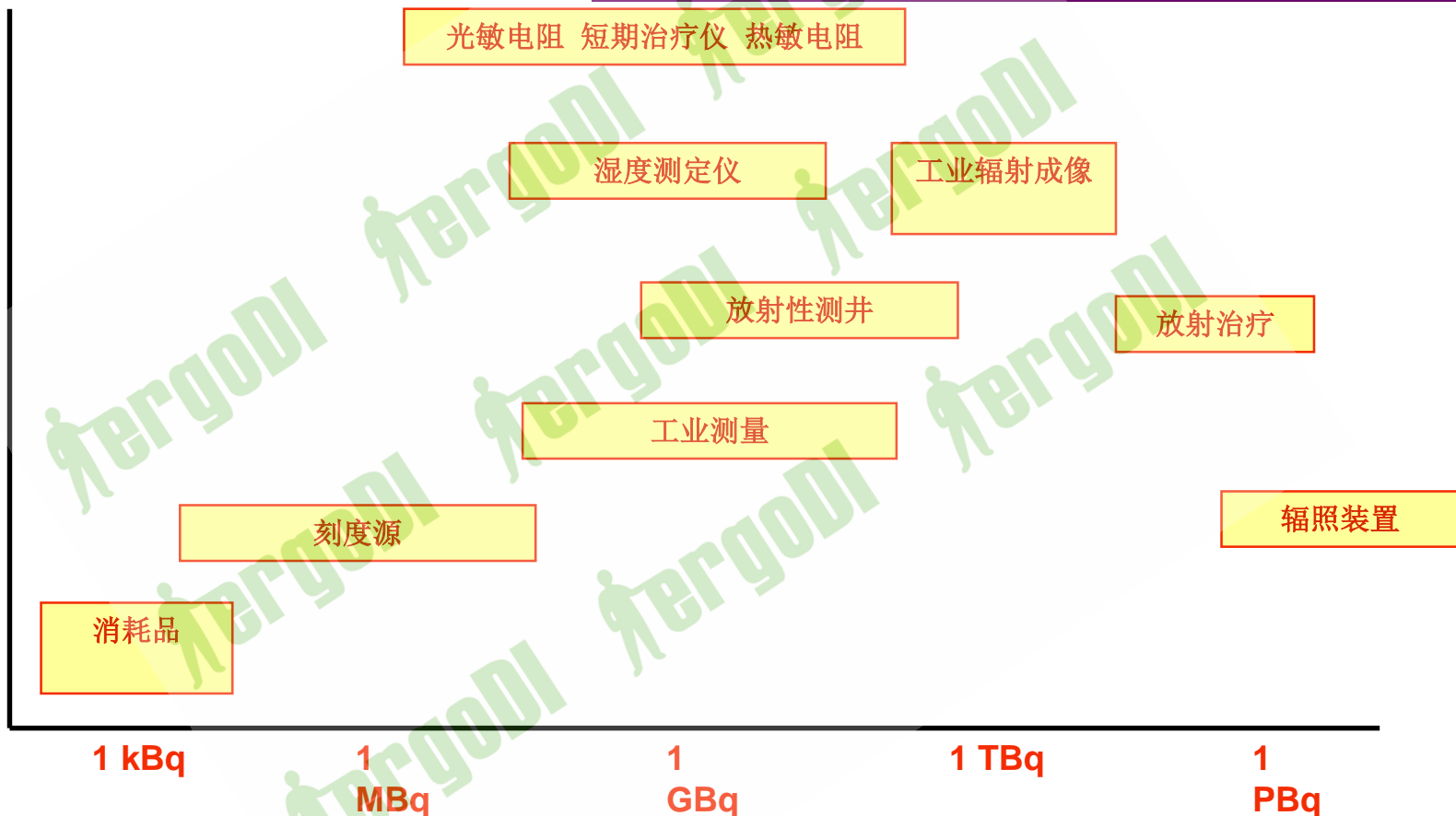
E-mail: heshj@mail.tsinghua.edu.cn

2008年6月



IAEA辐射安全与防护培训课程





各类实践使用的放射源活度

我国放射源使用情况

2001 年统计结果

领域	用户数(千户)	设备数(百台)	总活度 (PBq)
核医学	1.5		
放疗	0.7	9.7	58.2
辐照应用	0.1	1.2	407
工业探伤	0.3	4.7	1.1
密封源用户	6.7	315.6	7.0

2004 年：放射源用户 1.2 万家，源总数：10 万，在用：7.7 万



我国辐照装置方面的事故，不仅发生率高，而且后果严重。仅1985-1993年间，辐照装置事故达20起，受照人数达100多人，6人死亡。2004年10月山东省金乡一个辐照装置发生辐照事故，死亡2人。2008年4月11日在山西省太原一个辐照装置发生辐照事故，5人受照，至少2人具有生命危险。



事故发生时间和地点	事故经过和原因	事故造成的后果
1990.06 上海	操作人员违反操作规定，未进行安全检查，未携带个人剂量报警仪，直接用钥匙进入源室搬运物品。40分钟后，在操纵室核对记录时发现源仍在工作位置，立即将源降入水井内。	7人受照，其中2人死亡。事故处理费、医药费约500万元，间接损失20万元。
1992.11	联锁装置失灵，工作人员疏忽大意并违规操作，致使4人误入辐照室，造成4人分别受到0.5~3.6Gy的误照射。	病人抢救治疗、事故处理等费用达167万元，造成重大的经济损失和不良的社会影响。
1992.11.	辐照装置废旧放射源的收贮违反规定，在缺乏放射源有关资料的情况下，组织附近的民工挖掘地基，拆除存放钴-60源井的工作，导致放射源丢失被民工误拾。	4人引发急性放射病，其中3人死亡。受照剂量在5mGy以上的有141人。
1998.01	辐照室长期超负荷运转，经常发生悬挂链卡车故障；工作人员未按规定携带个人剂量报警仪。值班人员未注意辐照室外红灯和控制台上辐射仪表的指示，源在工作位置便开门进入辐照室内。	人员受照剂量达5Gy，并造成极坏的社会影响；直接和间接经济损失达60余万元
2004.10 山东，金乡	安全装置失灵，人员违反操作规程，辐照源未降回井内，未携带监测报警仪，进入辐照室	2人死亡
2008.4 山西，太原	辐照装置未达到国家标准《γ辐照装置设计建造和使用规范》（GB17568-1998）的安全要求，安全联锁装置失效，操作人员缺乏必要的安全防护知识。	5人受照。



事故的主要原因：

- 设计上存在缺陷，安全措施不完善
- 没有进行经常有效维护，设备带故障运行
- 操作者未严格执行规章制度，安全系统失效
- 人员培训不能满足安全规定的要求

内容

- 一、工业辐照概述
- 二、 γ 辐射装置的安全与防护
- 三、电子加速器装置的安全与防护
- 四、职业照射和公众照射
- 五、事故案例与教训



一、工业辐照概述

1、辐射源

2、工业辐照的应用现状



概 述

工业辐照的辐射源

工业辐照的辐射源可以分为两大类：

- (1) γ 辐射源，包括钴—60和铯—137。
- (2) 加速器辐射源，包括电子束和X射线。



工业辐照的辐射源

表 1.2 两种辐射源主要特性的比较

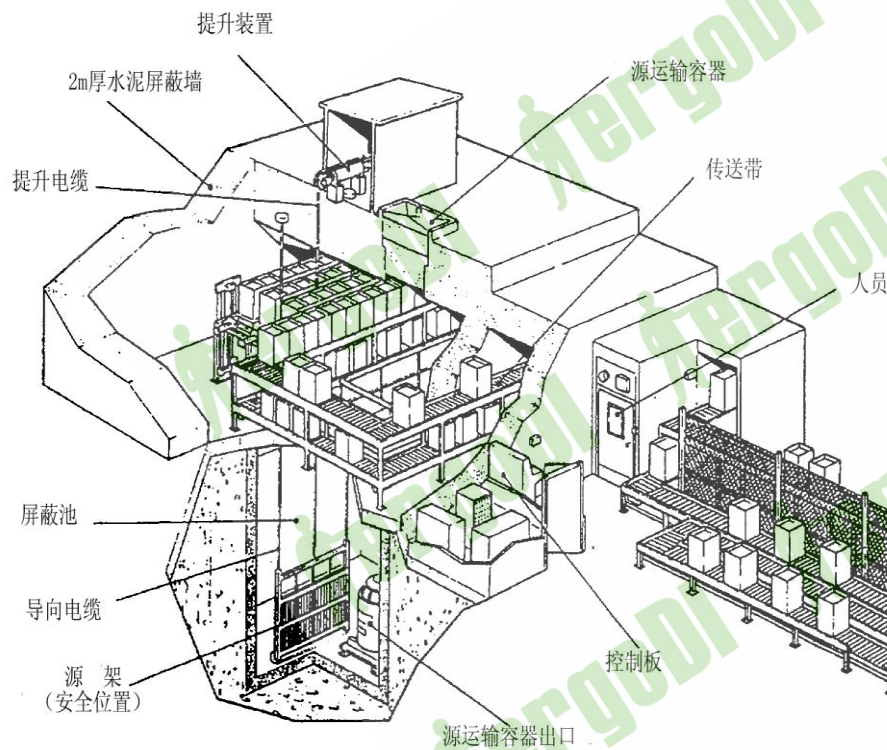
辐射源	电 子	γ
作用形式	非弹性级联碰撞	康普顿效应, 光电效应, 电子对效应
源的类型	电子加速器	钴-60
束流形式	稳定, 脉冲	恒定
能量, MeV	单能	1.17/1.33
深度分布	平, 均衡	积累, 指数下降
穿透能力(水), cm	若电子能量 10MeV, 3-6 (单面照), 9.5 (双面照)	强, 30
辐射方式	单能, 定向	单能, 全方位
衰减		每年活度下降 12.6%
功率	10-200kW	1 MCi 相当于 14.8kW
效率	50%-80%	20%-40%
产品产量	10MeV/15kW, 3.1 t/h(10kGy)	1MCi, 1.3t/h(10kGy)
环境问题	无	废源需要处理
主要用途	辐射化工, 环保, 医疗用品的辐射 消毒, 食品保藏,	食品保藏, 医疗用品的辐射消毒
优点分析	机器关掉辐射停止; 环境保护好; 单向辐射; 传输简单; 有高的产额	可靠; 辐射源无需修理; 穿透力大; 产品适 应性好;
缺点分析	包装尺寸及密度有严格要求;	辐射连续发射, 源必须定期补充; 辐射各向 同性, 能量利用率低; 源的运输, 废源需要 回收处理

工业辐照的应用现状

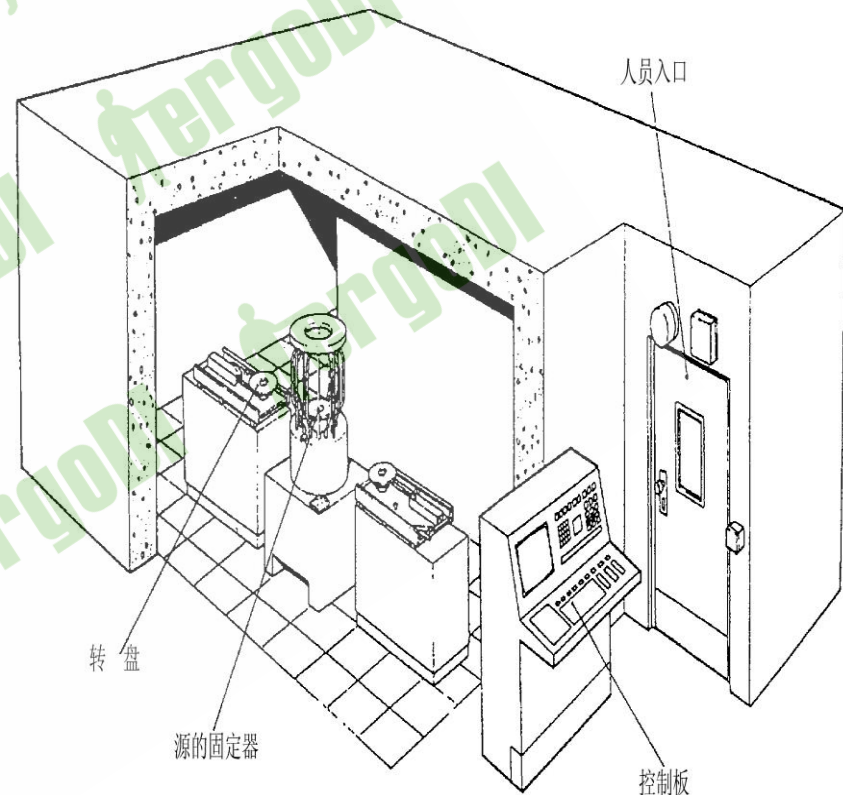
据不完全统计，全世界现有大型 γ 辐照装置210多座，总装源量超过 7.4×10^{18} Bq(2亿Ci)。其中，我国自主设计装源能力 1.11×10^{16} Bq(30万Ci)以上的工业 γ 辐照装置约56座，总设计装源能力 1.48×10^{18} Bq。其他各类 γ 辐照装置（包括研究用钴源）130余座。

正在使用的电子束设施超过 1300 台。

伽马辐照装置



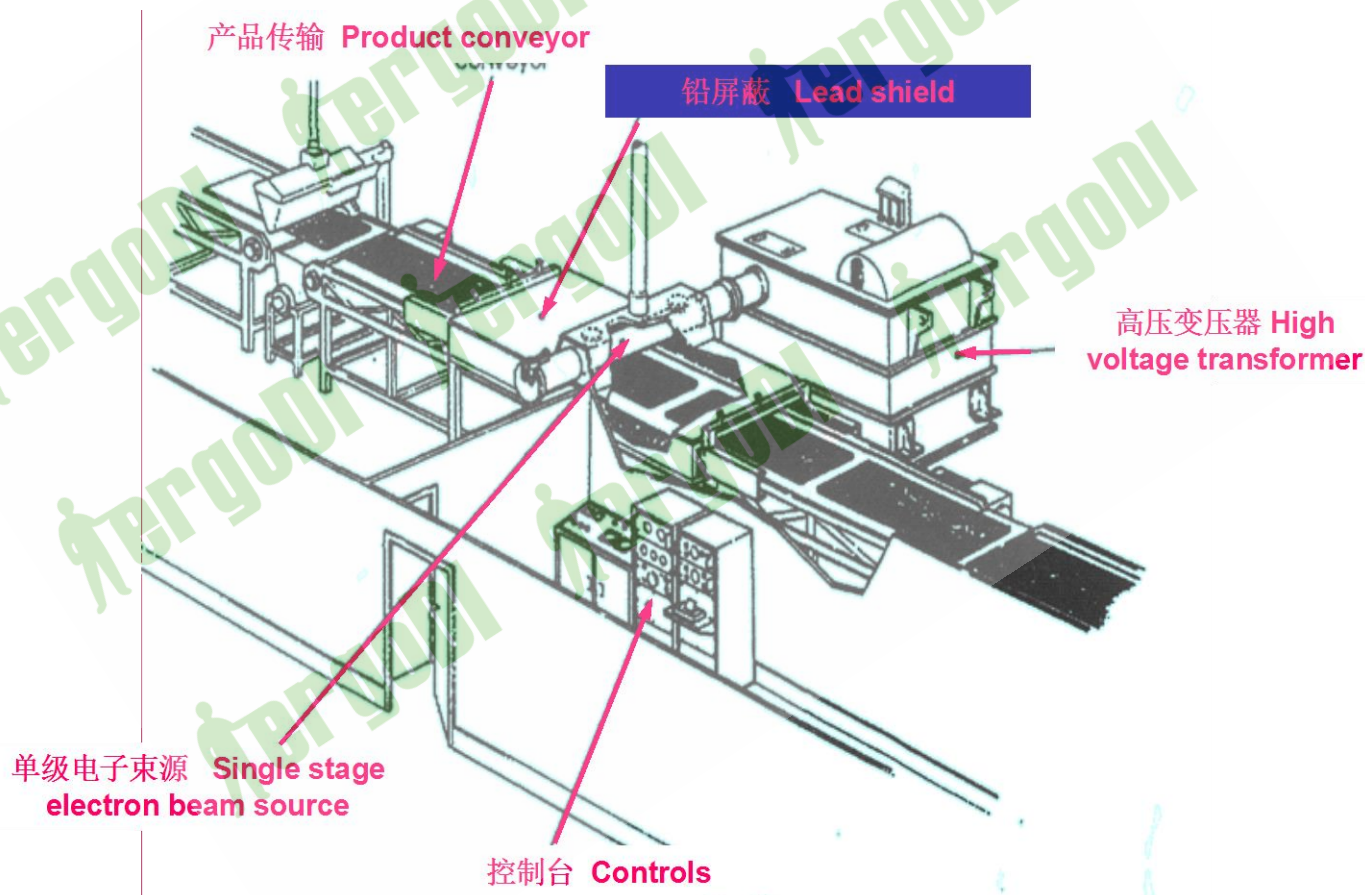
湿式贮源辐照装置全景图



干式贮源辐照装置全景图



电子束辐照装置





概述

工业辐照的应用现状（续）

- 医疗器械的灭菌消毒
- 材料辐照改性
- 食品保鲜
- 环境治理
- 其他

二、 γ 辐照装置的防护与安全

- 1、 γ 辐照装置的分类
- 2、 γ 辐照装置的组成
- 3、 γ 辐照装置的防护与安全



1、 γ 辐照装置的分类

国际原子能机构安全丛书No.107

“ γ 射线和电子束辐照装置的辐射安全”
(2006版) 以及国家强制性标准《 γ 辐照装置设计建造和使用规范》(GB17568-1998)的修订稿, 根据辐照装置的设计, 尤其是放射源的出入口控制和屏蔽, 将 γ 辐照装置分成以下四类:



第 I 类 自屏蔽干法贮源辐照装置

- 完全密封于由固体材料制造的干式容器中；
- 在任何时间都被屏蔽；
- 结构设计使得人身体不可能进入密封源和正在进行辐照的空间。

[国际原子能机构安全丛书 107]



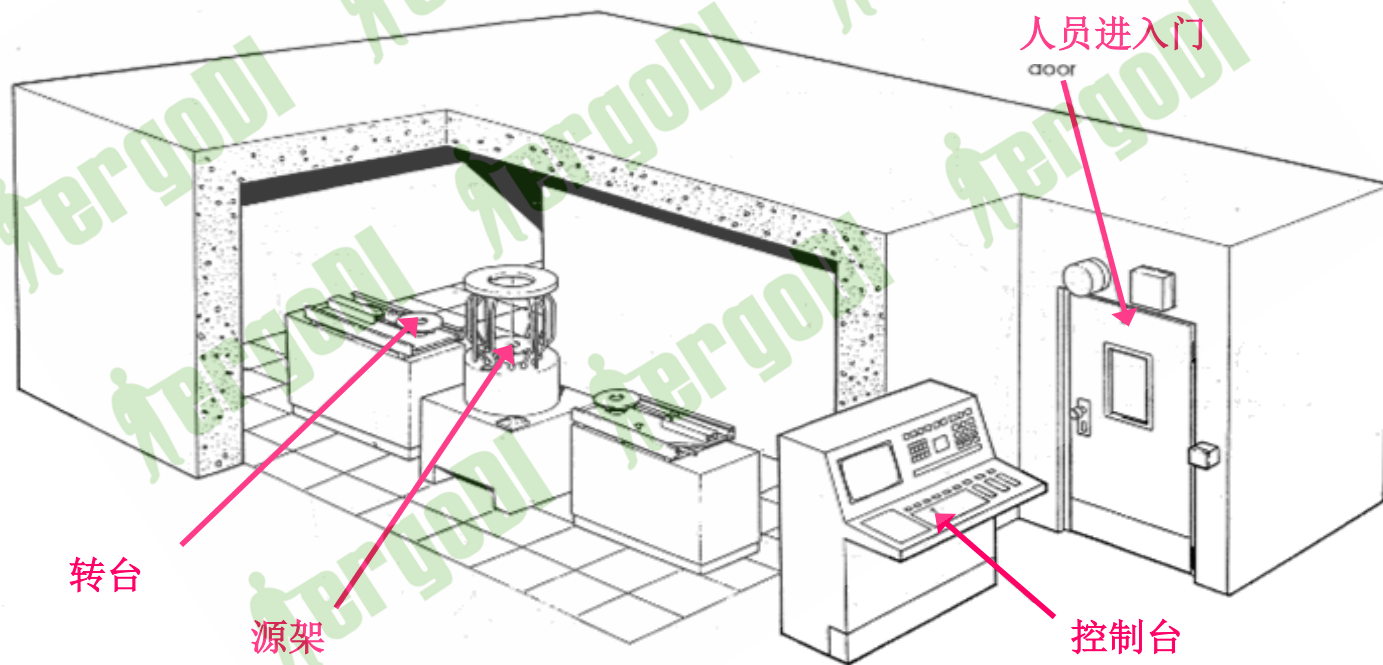
第 II 类 固定源室干法贮源 γ 辐照装置

受控人员可进入的辐照设施，其中的密封源是：

- 密封于由固体材料制造的干式容器中；
- 不使用时是完全屏蔽的；
- 照射是在辐照室中进行的，而辐照室通过入口控制系统保证在照射时人员不能进入。

[国际原子能机构 安全丛书 107]

固定源室干法贮源辐照装置



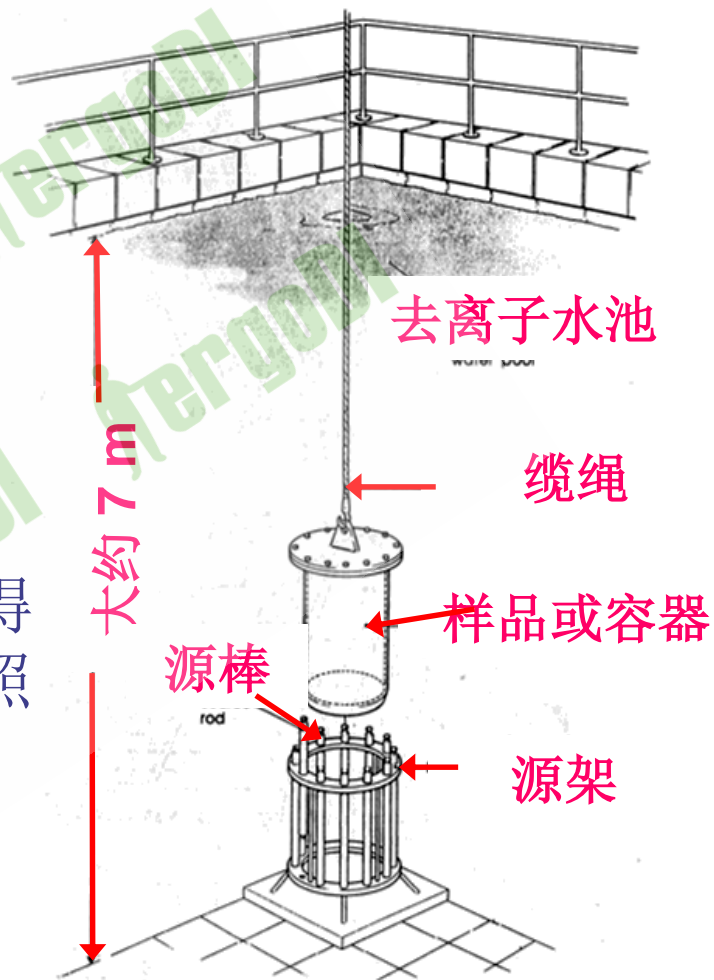


第 III 类 湿法贮源水下辐照装置

一种辐照装置，其中的密封源是：

- 放在一个注满水的存放池中，
- 在任何时候都是密封的，
- 结构设计和正确的使用方式使得人员进入密封源和正在进行辐照的空间受到限制

[国际原子能机构安全丛书 107]





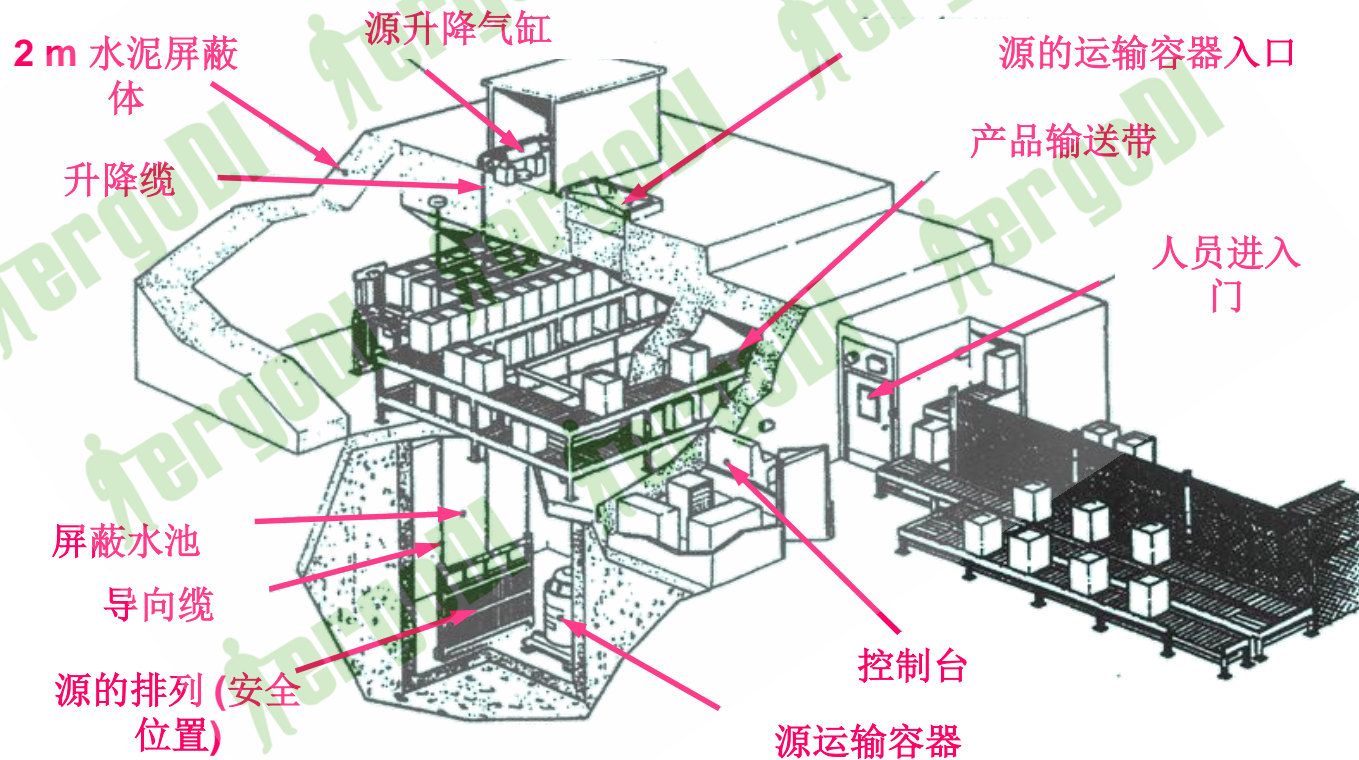
第 IV 类 固定源室湿法贮源 γ 辐照装置

人员进入受到控制的辐照设施，其中的密封源是：

- 放在一个 **注满水** 的存放池中；
- **不使用时**是完全屏蔽的；
- 照射是在辐照室中进行的，辐照室通过一个入口控制系统**保证在照射时**人员不能进入。

[国际原子能机构安全丛书 107]

固定源室湿法贮源 γ 辐照装置





2、 γ 辐照装置的组成



- 辐射源
- 源架及其操作系统
- 屏蔽防护系统
- 辐照货物运输系统（此处不讲）
- 控制系统
- 剂量系统
- 安全联锁系统
- 通风系统
- 水处理系统



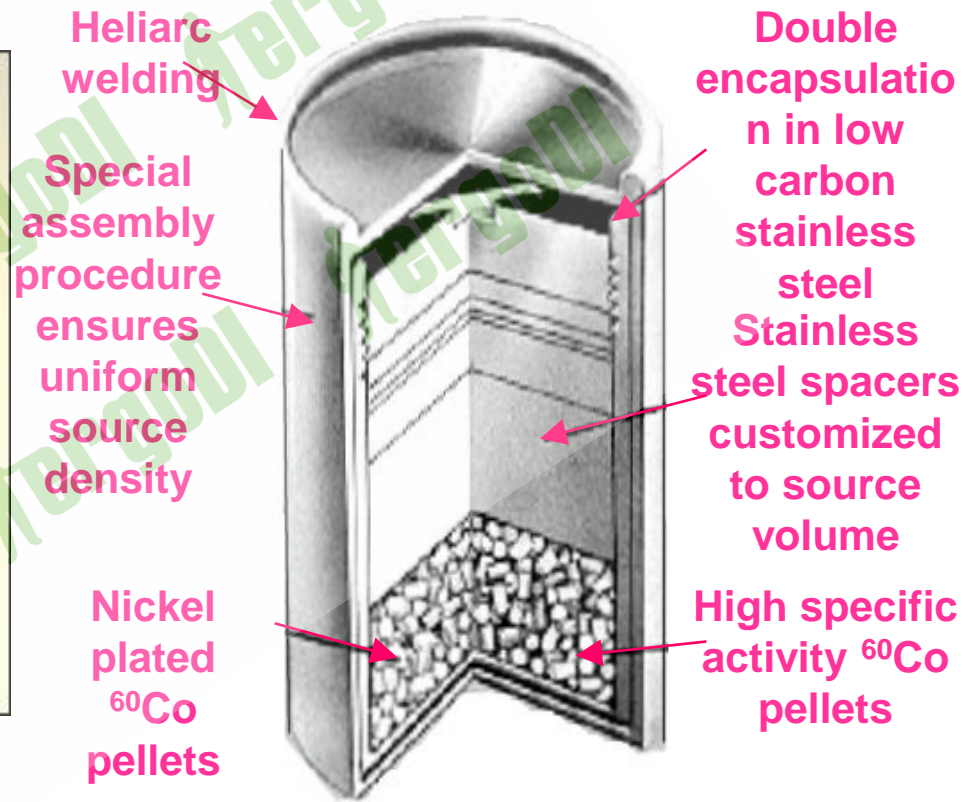
γ辐照装置的组成

➤ 辐射源

表1 γ辐射源特性表

放射源	射线种类	能量 /MeV	半衰期 /年	比活度 /PBq kg ⁻¹	自吸收	每千瓦能量所需强度/PBq
钴-60	γ	1.17/ 1.33	5.27	11.1~4.44	10%	2.48
铯-137	γ	0.66	30.2	0.89	30~50%	11.1

辐射源



γ辐照装置的组成

➤ 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)
Co-60	$\geq 3 \times 10^{13}$	$\geq 3 \times 10^{11}$	$\geq 3 \times 10^{10}$	$\geq 3 \times 10^8$	$\geq 1 \times 10^5$
Cs-137	$\geq 1 \times 10^{14}$	$\geq 1 \times 10^{12}$	$\geq 1 \times 10^{11}$	$\geq 1 \times 10^9$	$\geq 1 \times 10^4$



➤ 源架及其操作系统

源架是为盛载和布置放射源以形成特定辐射场的专用设备,一般由不锈钢材料制造。

对源架的基本要求:(1)放射源能安全可靠地装载在源架上;(2)放射源的装卸方便;(3)保证放射源不受机械损伤;(4)提出水面后能迅速排空积水;(5)源架的容量应该按装置最大装源能力设计,并要适当的考虑每年的补充量;(6)为了保护源架的安全,应设有防止辐照物碰撞的保护装置。



➤ 源架及其操作系统（续）

常用的源架类型：

- (1) 线源
- (2) 筒状源
- (3) 单板源
- (4) 双板源



源架



筒心源架



单板源架



➤ 源架升降系统

源架的升降通常是用钢丝绳通过滑轮引出辐照室，由升降操作系统在辐照室外完成的。源升降机具有以下功能：（1）源架在井下存放位置和井上工作位置的定位；（2）给出源架位置的指示；（3）驱动系统的过力矩保护；（4）断电自动降源；（5）源架迫降；（6）建立以升降源为中心的安全联锁。

源架升降系统按驱动方式分为电动、液压和气动三种类型。目前采用气动及液压驱动较多。



➤ 屏蔽防护系统

- 辐照室主防护墙的屏蔽设计
- 辐照室迷道的屏蔽设计
- 辐照室屋顶的屏蔽设计
- 贮源水井深度
- 屏蔽防护门的厚度

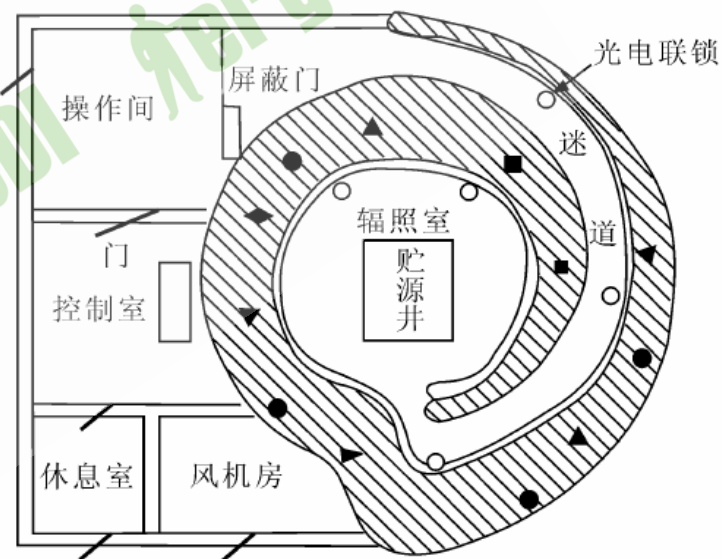


图 1 ^{60}Co 辐照站平面示意图

控制系统

- (1) 放射源升降的控制
- (2) 产品传输系统的控制
- (3) 辐照室门的控制
- (4) 进、排风机的远距离控制
- (5) 信号系统和智能语音报警系统
- (6) 数据管理和监控系统

控制系统



状态指示器

条件	颜色
紧急情况 (停止按钮 或 光)	红色
警告 - 危险	或红色
紧急信息 (辐照装置故障)	红色
注意 (非紧急情况, 需要知道一些功能在启动)	 黄色或橙色
正常 (辐照装置没用使用, 或者功能安全)	绿色
信息	蓝色

安全联锁系统

γ 辐照装置必须设有功能齐全、性能可靠的安全联锁系统，特别对人员和货物出入口、源架操作系统、货物传输系统等进行有效的监控和联锁。安全联锁系统由物理器件、机械或电器设施组成，并依赖自动控制系统的联锁设计实现。



剂量系统

剂量系统

➤ 辐射安全剂量监测

① 辐照工作场所的剂量监测

② 工作人员的个人剂量监测

③ 贮源井水和钴源运输容器放射性污染的监测

➤ 辐照室内剂量场的测定

➤ 辐照产品吸收剂量的测量



通风系统

通风系统- 有毒气体的控制

- 辐解过程会产生臭氧、氮氧化物以及其它的有毒气体。需要采取措施防止人员暴露于超过相关审管部门规定的浓度限值的有毒气体中。
- 通常采用能使辐照室中产生负压的通风系统。
- 连续地测量空气流，一旦该系统失效，则将自动终止辐射。通常应用时间延迟联锁装置。

水处理系统

水处理系统

现在绝大多数 γ 辐照装置采用湿法贮源系统。贮源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。水质要求：

电导率：1~10 μ S/cm

pH值：5.5~8.5

氯（Cl⁻）离子： \leq 1ppm。

水处理系统

去离子水的常见制备流程：

贮源井→微孔过滤器→阳离子交换柱→
阴离子交换柱→混床→纯水箱→贮源井



3、 γ 辐照装置的防护与安全

γ 辐照装置辐射安全相关标准

- γ 辐照装置设计建造和使用规范
GB—17568—1998（目前正在修订）
- 钴—60辐照装置的辐射防护与安全标准
GB—110252-1996
- 水池贮源型 γ 辐照装置设计安全准则
GB—17279—1998

辐射安全原则:

- (1) 纵深防御原则
- (2) 冗余性
- (3) 多元性
- (4) 独立性



辐射源的安全

许可证持有者应当考虑火灾、爆炸、腐蚀和任何其它与密封辐射源的连续使用有关的任何事项。它受到下述因素影响：

- 密封源中放射性物质的活度
- 材料的辐射毒性、浸出性和溶解性
- 化学性质和物理形态
- 源的使用环境



辐射源安全（续）

对湿式存储条件的特殊要求

- 应该保证密封源在正常的水池存储条件下不被明显腐蚀。
- 还必须考虑限制源密封材料的热疲劳的要求。
- 源在水中应该是完全不溶解的，这样可以将容器破裂的后果控制在最小化。

辐射源的安全（续）

许可证持有者应该保存与密封源有关的纪录。特别是：

- 型号和标志/ 源的序列号；
- 核素、活度和日期；
- 特殊形态证书；
- ISO 分类；
- 泄漏测试证书；
- 污染测试证书



Reference GB/373-85
Certificate Issue 4

Certificate of Approval
of
Design for Special Form Radioactive Material

Title	
Capsule R 6160 (C - 3001) (X 2165)	
Drawing List: QS 6160 Issue 2 Dated 20 January 1999 Specification: MPW/373/0293 Issue 2 Dated 3 March 1993 R 6160 SFA Issue 2 Dated 23 February 1999	
Q.A. Programme Ref: Revis Services Quality Manual	
Radioactive Material	Maximum Activity
Cesium - 137	60 TBq

THIS IS TO CERTIFY that the Secretary of State for the Environment, Transport and the Regions bring, for the purposes of the Regulations of the International Atomic Energy Agency, the Competent Authority of Great Britain in respect of inland surface transport and of the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland in respect of sea and air transport and the Department of the Environment for Northern Ireland being the Competent Authority of Northern Ireland in respect of inland surface transport, have approved the above mentioned Special Form Design. Radioactive material manufactured to the



源架的安全

- 密封源应该被牢固定在源架上，不能轻易被移动。
- 用于源的定位与移动目的的装置，应该能够在辐射屏蔽物外采用源的升降系统控制。
- 源支持物或源架发生故障，若不能把源移入指定位置，可能导致辐射事故。



源架的安全（续）

- 应该为辐射源提供有效的机械保护，以防止其受到诸如产品包装箱或运输容器等物项的干扰和损害。
- 不管是直接还是间接，产品定位系统不能与辐射源发生接触。这可以通过在产品定位系统中采用保护性隔板、导向杆或地板导向来实现。

屏蔽防护系统设计

- 辐照室主防护墙的屏蔽设计
- 辐照室迷道的设计
- 辐照室屋顶的屏蔽设计
- 贮源水井深度
- 防护门的厚度
- 辐照室内臭氧排除计算

屏蔽防护系统设计

主要参考强制性国家标准《水池贮源型 γ 辐照装置设计安全准则》（GB17279-1998）中采用的简化计算。

举例：辐照室主防护墙的屏蔽设计

剂量当量率减弱倍数 K 为

$$K = \frac{\dot{H}_0}{\dot{H}}$$

式中： \dot{H} ——辐照室有防护墙时距源 $R(cm)$ 处室外某一点的剂量当量率，Sv/h；根据

GB18871-2002 取 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

\dot{H}_0 ——辐照室无防护墙时距源 $R(cm)$ 处室外某一点的剂量当量率，Sv/h。

辐照室主防护墙的屏蔽设计

利用关系式

$$\dot{H}_0 = \frac{S_0}{4\pi R^2} \eta Q$$

就可确定防护墙厚度。

式中： S_0 ——点源活度， S^{-1} ；

η —— γ 射线通量密度与空气吸收剂量率之间的转换系数；

Q ——品质因子，对于 γ 射线 $Q=1$ 。

R ——点源与探测点之间的距离，cm。

辐照室主防护墙的屏蔽设计

表 混凝土K-厚度 t (cm) 对应关系数值

K	1.5	2.0	5.0	8.0	10	20	30	40	50	60	80	1×10^2	2×10^2	5×10^2	1×10^3
t	8.8	13.2	24.7	29.9	32.3	39.6	43.7	46.6	48.8	50.6	53.4	55.6	62.2	70.8	77.1
K	2×10^3	5×10^3	1×10^4	2×10^4	5×10^4	1×10^5	2×10^5	5×10^5	1×10^6	2×10^6	5×10^6	1×10^7	2×10^7	5×10^7	
t	83.5	91.7	97.9	104.1	112.2	118.3	124.3	132.3	138.2	144.2	152.1	158.0	163.9	171.7	



对于大型板源辐照装置，简单的点源、面源积分法计算是不合适的，由ICRP推荐并已在全世界通用的是”蒙特卡罗法”，它由专用的计算机程序MCNP计算，再根据不同的屏蔽材料，可得出一个具体辐照室各墙体的屏蔽厚度。



贮源水井





贮源水井

- 将安装一个自动的水位控制器，以使水位保持在预定的水位以上。
- 水池必须不渗透水，并且设计使得在所有可预知状况下都能保留水。
- 它必须能承受运输中使用的辐射源容器的重量，并且不会影响水池的完整性。



贮源水井（续）

- 因为腐蚀产物可能会影响密封源的完整性，所有的永久性水池部件将由不锈钢制成。

水位控制-正常情况

- 提供自动补充水池中失去的水的方法。这个系统能够将池中水位保持在辐射屏蔽所需的充分的水位。水位将会被测量。正常的水分丧失主要是由于汽化。



贮源水井（续）

水位控制 – 不正常情况(低水位)

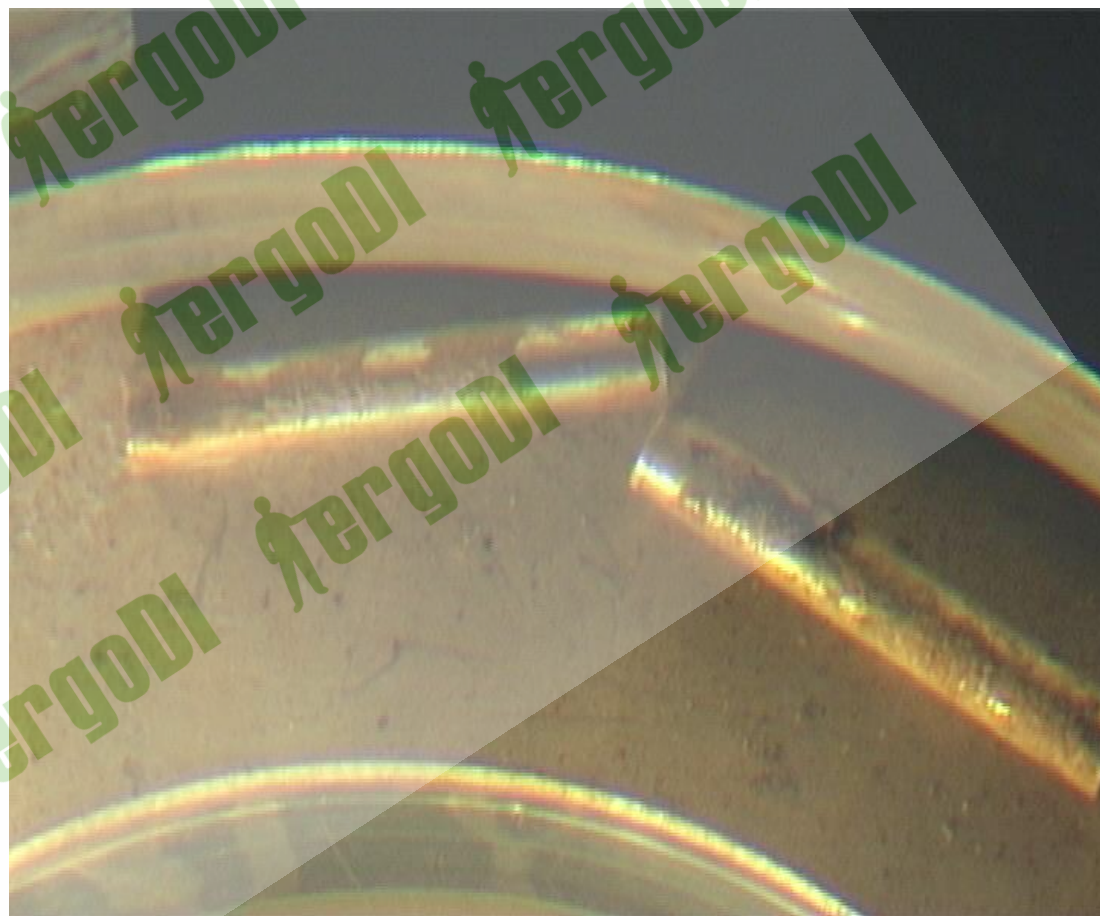
- 如果池中水位降到多于30厘米而低于正常补给水位时，将采取措施激活控制室内的可视可听报警信号。

水质的调节

- 为了减少源被腐蚀的可能性，水池将配备有水处理系统，使的水电导率不超过 $1000 \mu\text{S m}^{-2}$ ，正常情况下低于 $10 \mu\text{S m}^{-2}$.



贮源水井 (续)





贮源水井（续）

水的冷却

- 在湿式存储辐照装置中，将配备池水冷却系统来除去伽玛辐射源产生的热量。

管道系统

- 由于源存储池中的水位和水质量控制系统中使用了管道，所以将安装有效的虹吸开关，以防止池中水降到超过30cm而低于正常补给水位的可能性。





贮源水井（续）

水池的防护和盖子

- 将安装物理屏障如围栏和/或金属盖子，以防止人员偶然地掉入源存储池中。

水处理系统监测器

- 在去离子柱上安装一个发声报警的固定的辐射监测器，以探测由于源的泄漏导致的污染。这个监测器将与辐射控制系统联锁，如果污染达到预设的报警水平，源会回到其屏蔽位置并且水循环停止。





安全联锁系统



安全联锁

1、 钥匙控制

放射源的升降开关、辐照室人员通道门和货物通道门的开关必须采用同一把钥匙，或多把钥匙牢固串结一起，这一把钥匙或一串钥匙还必须与一台有效的便携式辐射检测报警仪牢固连在一起。必须保证该钥匙只有值班人员或安全员才能使用。

安全联锁

2、便携式辐射检测报警仪

进入辐照室的操作人员必须携带与多用途钥匙（串）连接在一起的可携式辐射检测报警仪，在辐照室人员入口处应设置校验源（如 $10\mu\text{Ci}$ 的 ^{137}Cs 放射源），操作人员进入辐照室之前应用校验源检查辐射检测报警仪是否工作正常。



安全联锁

3、固定式辐射监测仪

辐照装置的控制区内（辐照室迷道入口以内的区域）必须设置固定式辐射监测仪，探测辐照室内的剂量水平和确定源是在贮存位（安全位），还是在照射位（工作位），或是在升降途中。该辐射监测仪必须与人员通道门的联锁装置形成一体，以防止源未降至安全位置或辐照室内辐射水平较高时人员误入。

在货物出口处应安装固定式辐射监测仪，用于探测货物出口处的辐射水平。该辐射监测仪应与辐照装置控制台联锁，当出口处辐射水平超过预定值时，从辐照室携带货物通道出口处的传送装置将被停止运行，并且源将自动降至安全位。



安全联锁

4、警告标志

在通往辐照室的人员通道门上和货物进、出口上应设置明显可见的电离辐射警告标志，和显示源状态的指示器（灯），源状态批示应包括源在安全位、工作位和源在升降过程中。



安全联锁

5、辐照室人员通道门联锁装置

辐照室人员通道门应设置安全联锁装置，并与源的升降联锁，只有当源在安全位时，才能将门打开；人员通道门未锁闭，源不能被得升；升源后此门被打开，源应自动降至安全位。

人员通道门的内侧应设有开门按钮，误留在辐照室内的人员可以随时通过此按钮将门打开，从辐照室中撤离出来。

安全联锁

6、迷道内防人误入联锁装置

辐照室为（包括人员通道和货物进、出通道）内应设置2~3道防人误入安全联锁装置（一般可采用光电装置），并与声光报警装置或降源联锁。源在工作位时有人误入，可以发出声光报警或使源降至安全位。



安全联锁

7、辐照室内紧急止动装置

在辐照室内必须安装紧急止动装置（一般为拉线开关），并与控制台联锁，当源被提升或源在工作位时，误留在辐照室内的人员可以阻止、迅速中断或终止辐照装置的操作，并将源降至安全位。

安全联锁

8、控制台上紧急止动装置

在控制台上应安装紧急止动装置，可在任何时刻阻止、迅速中断或终止辐照装置的操作，并将源降到安全位。

安全联锁

其他要求

以下安全要求是针对货物自动传输、水池贮源型 γ 辐照装置而言，对小型静态辐照装置，适用于动态辐照的相关安全要求可以适当放宽。

安全联锁

9、货物进出口门的控制

货物进、出口处应设置联动门，通过货物启动门的打开和关闭。货物到达时该门自动打开，货物通过后，门应迅速关闭，以防止人员经货物进出口通道误入辐照室。



安全联锁

10、辐照室屋顶屏蔽塞联锁装置

在辐照室屋顶设有进源孔的辐照装置，其屏蔽塞应与控制台联锁，当移出屏蔽塞时，源不能被提升或使源降至安全位。

安全联锁

11、贮源井水处理和自动补水系统

贮源水井应采用去离子水和设有井水处理系统，确保水质达到标准要求。

贮源水井还应设有自动补水系统和水位联锁装置，当水位降至最小屏蔽层高度以下时，应自动补充井水，并将源降至安全位。

安全联锁

12、通风系统

应根据设计装源量和辐照室空间大小设置通风系统，确保辐照室内臭氧及氮氧化物浓度低于标准要求。通风系统还应与控制台联锁，通风系统故障时，不能升源或源自动降至安全位。

安全联锁

13、辐照室内无人复位开关按钮

在辐照室内应设置2~4个无人复位按钮，并与控制台联锁。每次升源前，操作人员必须进入辐照室内完整巡视检查一周，依次按动无人复位按钮后方可升源。



安全联锁

14、断电降源

辐照装置在运行时出现断电超过10秒时，源应自动降至安全位。

15、烟雾报警

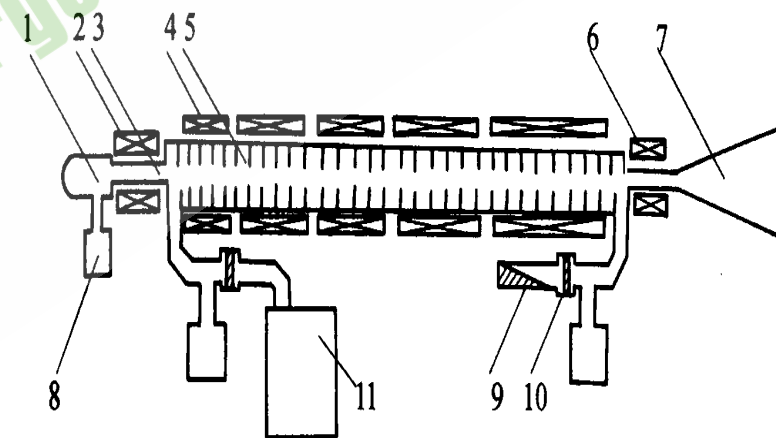
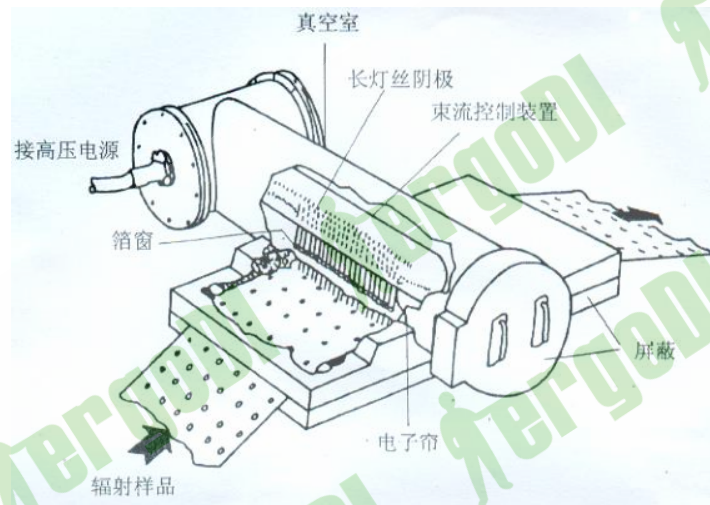
辐照室内应安装烟雾报警装置，并与降源联锁，遇有火灾险情时，源应自动降至安全位。



三、电子加速器辐照装置的防护与安全

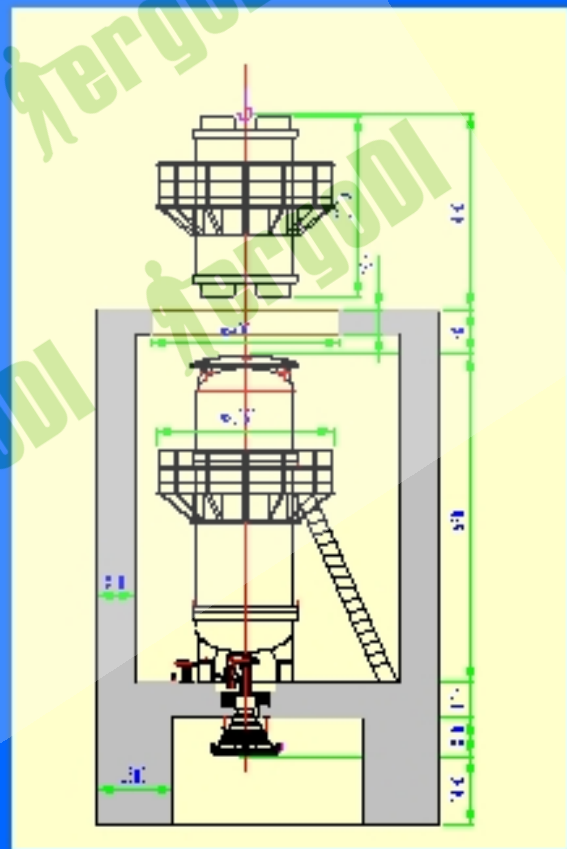
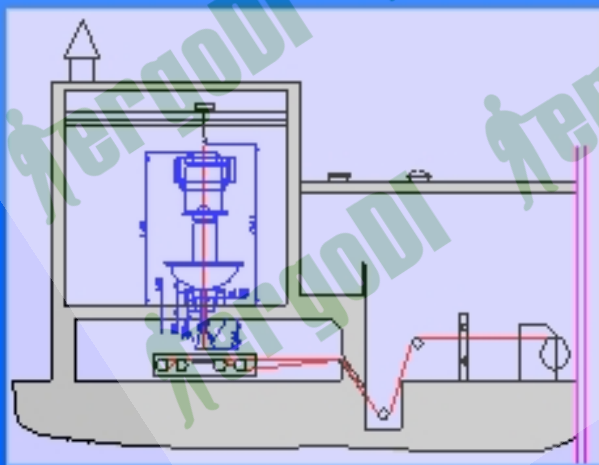
- 1、电子加速器辐照装置的分类
- 2、电子加速器辐照装置的组成
- 3、电子加速器辐照装置的防护与安全

常用的电子辐照加速器



常用的电子辐照加速器

典型的辐照车间
立面图





电子束辐照设施的分类

国际原子能机构 安全丛书107 将电子束辐照设施分为两类。

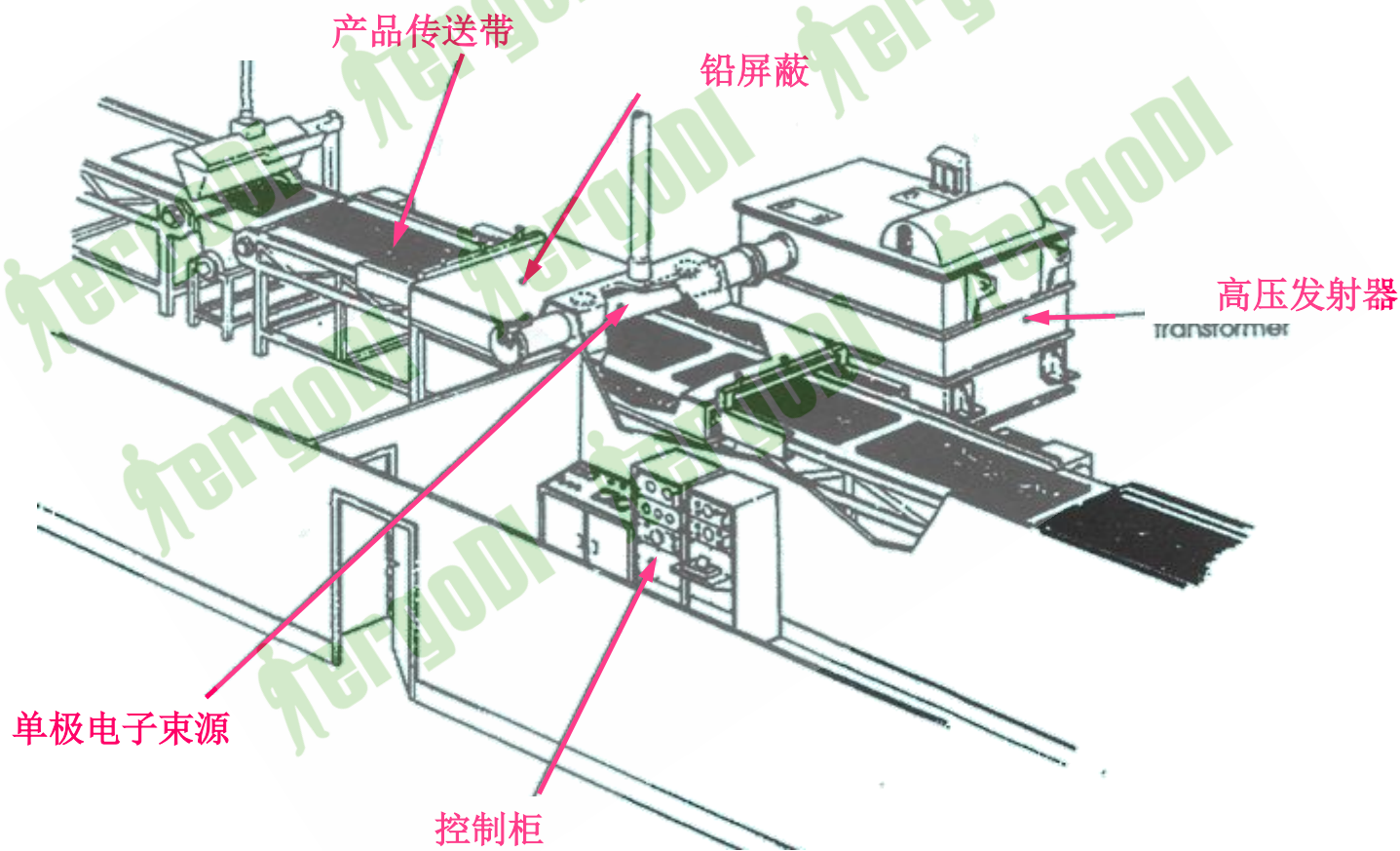
第 I 类

有一种具有联动装置的整体屏蔽单元，由于屏蔽体的构造，使得人员在运行时的进入在身体上是不可能的。

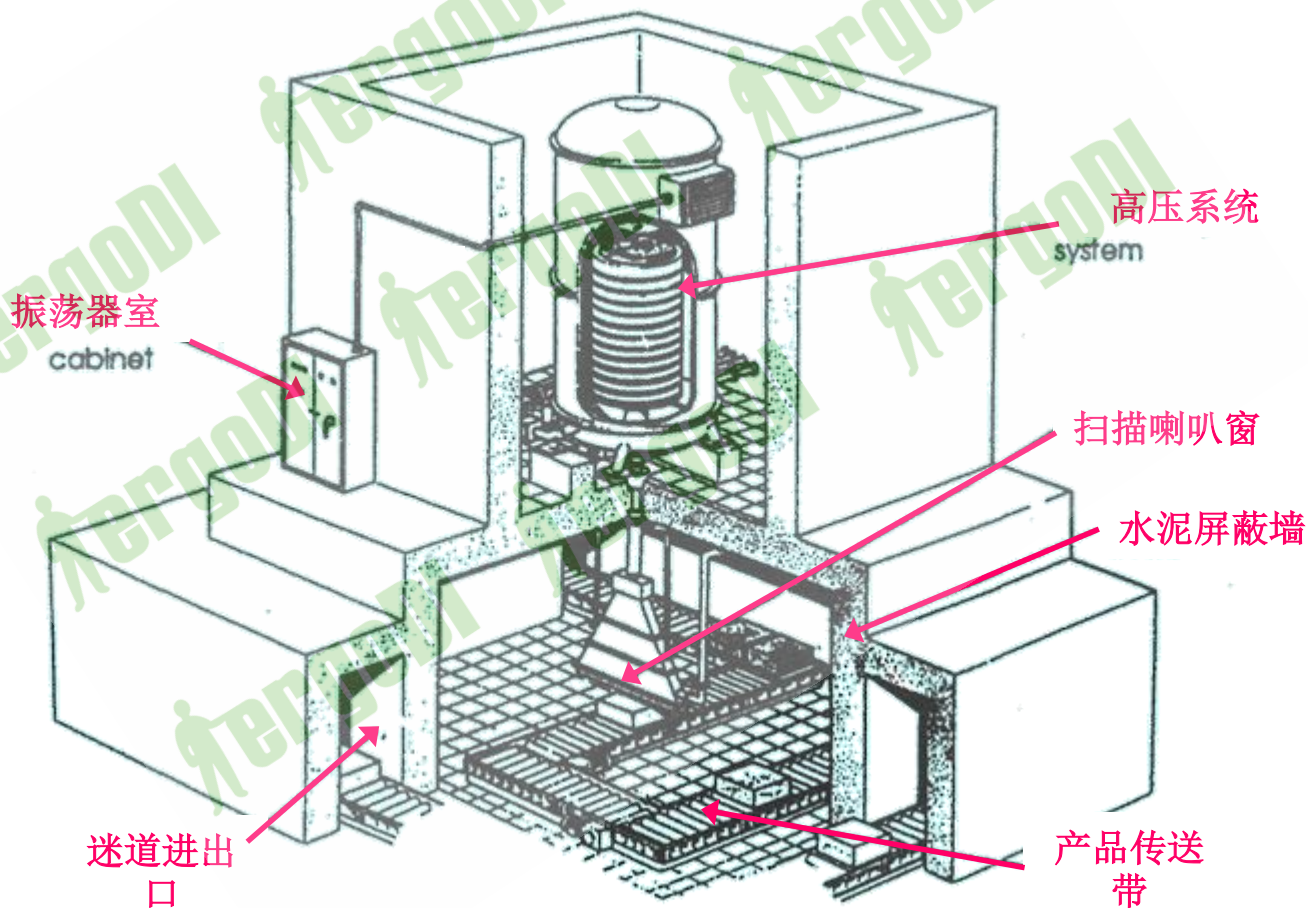
第 II 类

其单元在屏蔽室内，屏蔽室通过入口控制系统保证在运行时人员不可进入。

电子束设施（第 I 类）



电子束设施 (第II类)



电子加速器的组成

- 加速器主体系统（电子枪、加速管等）
- 高压系统
- 电子束流引出系统
- 控制系统
- 安全联锁系统
- 辅助系统（束下装置、冷却系统、真空系统、绝缘气体）

控制系统

- 1). 加速器自动操作控制。操作加速器必须按先后次序操作，若发生误操作，联锁保护系统就立即起作用。
- 2). 在加速器运行中连续诊断、测试和随时调整加速管内的真空度、加速器高压、引出窗膜温度等加速器运行参数，自动控制在设定值。
- 3). 稳定地自动控制和调节电子束流、电子能量、束流斑点尺寸、扫描在窗膜上的位置等加速器性能参数。
- 4). 加速器的运行状态与束下装置的运行状态自动同步。
- 5). 对加速器运行状态远程诊断和巡检。



安全联锁系统

电子加速器的安全联锁系统基本类似 γ 辐照装置：

- ✓ 加速器和靶厅的门必须装安全联锁装置，只有门关闭后才能产生辐射。
- ✓ 产生辐射的控制系统应该用开关钥匙控制。
- ✓ 在加速器厅、靶厅内工作人员易达到的地点，应设置紧急停机或断束开关。这种开关应有醒目的标志。
- ✓ 在通经辐射区的通路上，出入口和控制台上须安装工作状态指示灯。而在加速器厅和靶厅内醒目的地方装闪光式或旋转式红色警告灯及音响装置。
- ✓ 在辐射区应安装遥控辐射监测系统，当辐射超过预定的水平时，该系统可发出音响或（和）灯光信号。
- ✓ 加速器必须配备适当的辐射监测装置，如可携式监测仪，气体监测仪，个人剂量计。



电子加速器辐照装置的防护与安全



电子辐照设施的设计安全

- 主加速系统失效的机理。
- 内置加速器参数监控。
- 内置远距离加速器诊断。
- 加速器的运行参数（电压和电流）应与产品运输机构联锁。
- 调试与检验应当在其最大运行参数（电压与电流）下，且产品处置设备尽可能接近实际运行条件的电子束下，进行调试和检验。

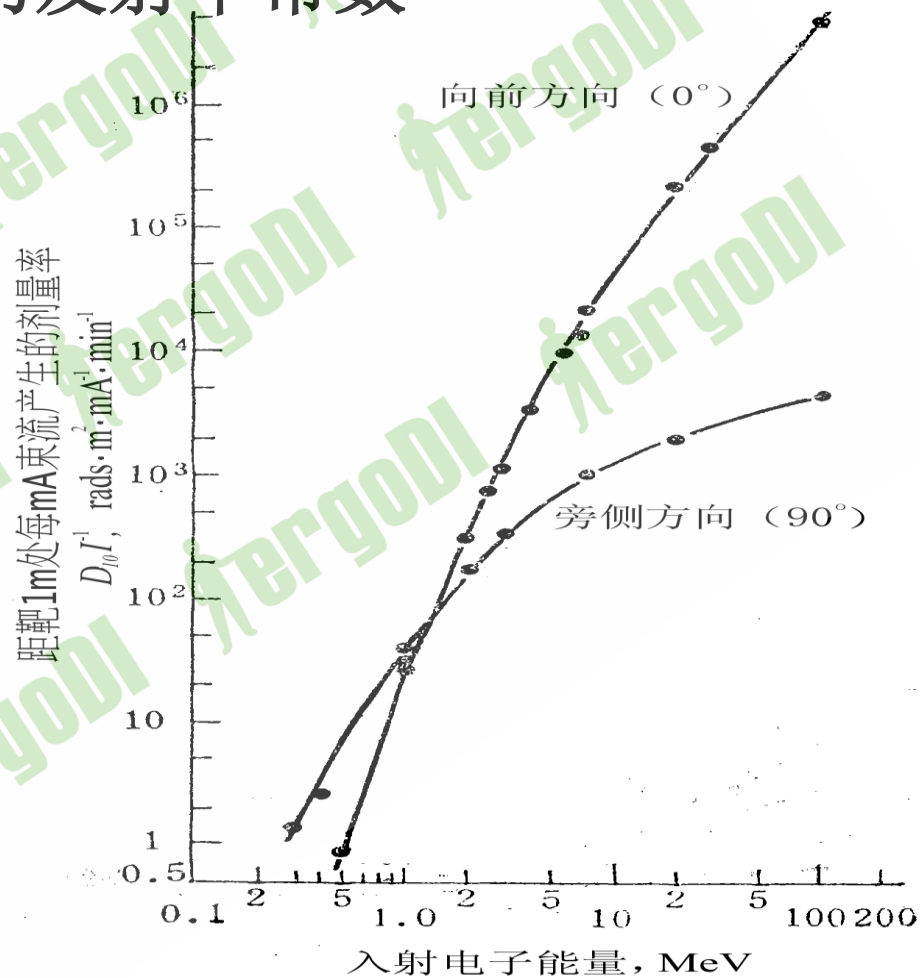


电子辐照设施的设计安全（续）

- 暴露于电子束的材料应该是低原子序数的以便使韧致辐射最小化。
- 应该根据最大能量、最大电流和最大原子序数的被照物质来进行计算，同时也要考虑受照产品的特点。应该考虑感生的 **x-射线**，特别是当加速管在辐照室外时更要如此。
- **迷道**应该用铅或不锈钢屏蔽。

电子辐照设施的屏蔽设计

加速器X射线的发射率常数



电子辐照设施的屏蔽设计

加速器 X 射线的剂量计算

加速器 X 射线在离靶 $r(\text{m})$ 处产生的吸收剂量率 \dot{D} ($\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1}$) 可用下式计算:

$$\dot{D} = \frac{I\delta_a}{r^2}$$

式中, I 是电子束流强度 (mA); δ_a 是 X 射线的发射率常数。

[例] 假定能量为 3MeV 、流强为 2mA 、直径为 1cm 的电子束轰击高 Z (钨) 厚靶。计算与靶距离 0° 方向, 5m 和 90° 方向, 4m 处的吸收剂量率。若换成铁靶, 上述两点处的吸收剂量率又为多少?

解: 由图 3.20 查得, 能量为 3MeV 的电子束在 0° 和 90° 方向上的发射率常数分别为:

$$\delta_{a,0^\circ} = 11 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\delta_{a,90^\circ} = 3 \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

由(3.1)式, 可得 0° 方向的吸收剂量率为:

$$0^\circ \text{ 方向: } \dot{D}(\text{W}, 0^\circ) = 11 \times 2 \times 5^2 = 0.88 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$90^\circ \text{ 方向: } \dot{D}(\text{W}, 90^\circ) = 3 \times 2 \times 4^2 = 0.38 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$$

电子辐照设施的屏蔽设计

屏蔽中某些特殊问题

① 孔道

为了防止辐射泄露，加速器的通风管道、水管、电缆管道、辐照材料的传输管道等应取“S”形或“U”形，在地沟的入口或出口应有一定厚度的屏蔽盖板。

为了搬运大型设备，有时需要在屏蔽墙上留出足够大的孔洞，这些孔洞的位置也要尽可能避开束流方向或辐射发射率峰值方向。填塞孔洞时，混凝土块之间的垂直缝隙最好都用灰浆填充。

电子辐照设施的屏蔽设计

屏蔽中某些特殊问题

② 迷宫

迷宫的设计与建筑物的布局有关，但迷宫口位置应尽可能避开来自靶上的直接辐射，或应避开辐射发射率峰值的方向，并且在满足使用的条件下，迷宫的截面应尽可能小一些，有时为了节省建筑费用或空间，或为了补偿由于通道造成的屏蔽墙总体减弱效果的降低，在迷宫口设置附加屏蔽。

电子辐照设施的屏蔽设计

屏蔽中某些特殊问题

③ 防护门

防护门的厚度应和相邻的屏蔽墙具有同等的屏蔽效果。门和墙之间应有足够的搭接，以减小散射辐射的泄漏，通常门的两侧和顶部，门和墙的搭接至少为缝隙的10倍。为了减小通过门底部的辐射反射，应采用其他密闭缝隙的方法，常用的防护门有水门、混凝土门、铁门，或铁板与铅板组合门。



四、职业照射与公众照射



职业照射剂量限值

有效剂量限值

连续5年的年平均有效剂量不超过20mSv

任何一年中的有效剂量不超过50mSv

当量剂量限值

眼晶体

每年 150mSv

皮肤

每年 500mSv

辐射工作场所的分区

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，应在辐照射室的入口处设置明显的电离辐射标志，需要运用行政管理程序和实体屏障(包括门锁和联锁装置)限制人员进出控制区。



辐射工作场所的分区

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安全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。





工作场所监测

■ 要求制定工作场所监测计划

- 许可证持有者**必须**拥有适当数量的便携式辐射监测仪器，包括一些**备用**的以便替换那些正在检定或修理的（对于能量 ≥ 10 MeV的电子束设施 还需要考虑中子的监测）。
- 监测仪器**必须**具有适宜的能量响应，处于良好的工作条件；能够测量正常和事故条件下的剂量率且不会饱和或**扭曲**；有直接可用的电池并且要对内装电池进行检查。





工作场所监测（续）

- 监测仪器**必须**在首次使用前、修理后马上、或者按审管部门规定的时间间隔由被审管部门认可的组织进行检定。



- 即使相信环境辐射水平是正常的，不携带正在工作的监测仪表，任何人也不能进入辐照室。



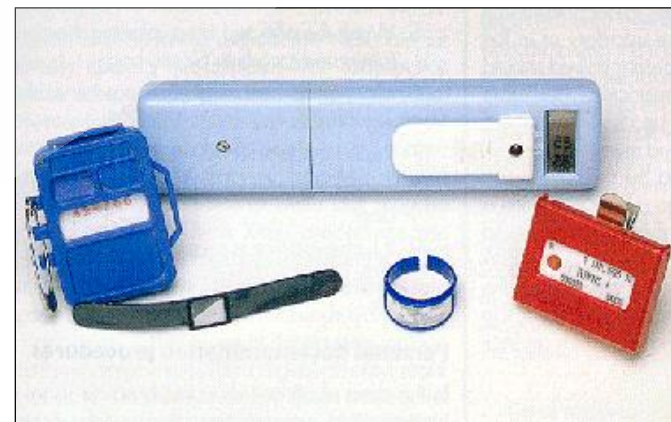
个人监测

- 要求对在控制区工作的所有工人进行个人监测。



- 对于监督区的工人的监测不作要求，但是必须对其职业照射进行评估。

- 监测频度由审管部门规定；
- 监测服务的提供商必须经审管部门批准。





调查和跟踪

下述情况要求进行调查和跟踪:

- 年度有效剂量 超过规定的调查水平;
- 任何运行参数超出正常范围;
- 发生设备故障、一次事故或犯了一个导致剂量上升可能超过规定限值的错误;
- 任何其它事件或发生了不正常的可能具有使剂量超过规定限值的潜在事件;

对于任何有疑问的过剂量照射, 这个人的剂量计必须被立即送去测量。



公众照射

“公众成员所受的辐射源的照射,包括获准的辐射源和实践产生的照射和干预情况下受到的照射,但不包括职业照射、医疗照射和当地正常天然本底辐射的照射” [BSS]





公众剂量限值

有效剂量限值	
每年1 mSv	
在任何12个月间5 mSv	
当量剂量限值	
眼晶体	每年15 mSv
皮肤	每年50 mSv



公众照射（续）

公众可能包括:

- 在一个辐照设施附近居住和工作的人群;
- 参观设施的人员;
- 其它部门的职员 (安全许可运行人员之外的人)
- 合同人员 (安全许可服务机构之外的人) 比如电工、油漆工、管子工等。



五、事故案例与经验教训



事故案例与经验

表 4.1 工业辐照装置辐射事故简况与后果^[1~3]

年份/地点	简况	后果
1975/意大利	一名工人意外进入辐照室（Co-60源）。	个人剂量8~24Gy, 13天后死亡。
1982/挪威	一名维修技师违反安全工作程序进入辐照室。	高剂量照射, 13天后死亡。
1989/萨尔瓦多	一名运行人员和两名工人进入辐照室。	运行人员死亡, 工人受到严重辐射损伤。
1990/以色列	一名值班员违反操作规程进入辐照室。	受照射36天后死亡。
1990/中国	安全防护门失效, 工作人员进入辐照室。	7人受到2~12Gy的辐射剂量, 2人死亡。
1991/白俄罗斯	一名运行人员违反操作规程进入辐照室（Co-60源）。	受照射113天后死亡。
1991/美国	一名运行人员在工业辐照加速器装置上事故受辐射照射。	受到严重辐射损伤。
1991/越南	一名研究人员在电子加速器辐照室受辐射照射。	受到严重辐射损伤。
2004/中国	安全装置及拉线开关全部失灵, 放射源未正常回落到井下安全位置, 两名工人在未采取任何辐射监测措施的情况下进入辐照室工作	2人受到致死辐射剂量, 2人死亡。

事故案例与经验

1、挪威切勒辐射事故，1982年9月

装置简介

切勒 γ 辐照装置有一个干法贮存的 ^{60}Co 源，事故时，辐射源的活度是 2.43PBq (65700Ci)。辐照室位于一退役研究堆下面的地下室内，辐照室四周有混凝土屏蔽，控制室与辐照室相邻。从控制室进到辐照室要经过一个迷宫通道，并穿过一扇钢门，当辐射源不在地板中的“屏蔽”位置时，这个钢门不能打开。该装置原来是作为一个实验装置而建的，但后来安装了一套辐照材料自动输送系统，改作香料、包装材料、医疗用品的工业辐照。该装置每天24小时连续运行，正常上班后就无人到场。假若由于某种原因材料通过装置的输送中断，辐射源就自动下落到“屏蔽”位置，同时该控制间和研究所主报警控制台的报警信号灯点亮。

事故案例与经验

1、挪威切勒辐射事故，1982年9月 事故起因和过程

1982年9月2日3点30分，输送辐照样品的传送机停运，触发了控制间和研究所主报警控制台的报警器。保卫人员打电话给在家值班的运行工程师，他决定推迟到早晨上班再行检查。当天早上7点，维修技师到达研究所并掉控制屏上的报警器。控制屏上的辐射源指示器显示绿灯（“源屏蔽”），于是技师就打开门进到辐照室，关掉了输送系统的压缩空气，并检查运装箱的位置。他在辐照室停留了大概有几分钟。7点30分，有人发现他坐在装置外面的楼梯上，显得病得很重。因为他过去有冠心病的历史，就被送进医院。在医院被诊断为可能是心脏病发作。

事故案例与经验

1、挪威切勒辐射事故，1982年9月 事故起因和过程（续）

但是，到了8点，其他运行人员到达后，确认辐射源并不在“屏蔽”位置，而是处在几乎完全“非屏蔽”状态的位置，而本应能使门锁定的电气联锁系统没有起作用。显然，自从早先发生报警以来一直有辐射，包括技师在辐照室期间。从胶片剂量计的读数不可能估计技师所受到的剂量。几星期后，从该技师所穿过的衣服中发现一些药片，经电子自旋共振谱分析，估计其余全身剂量大约为22Gy，这技师受照后13天因辐射损伤而死亡。



事故案例与经验

1、挪威切勒辐射事故，1982年9月 经验教训

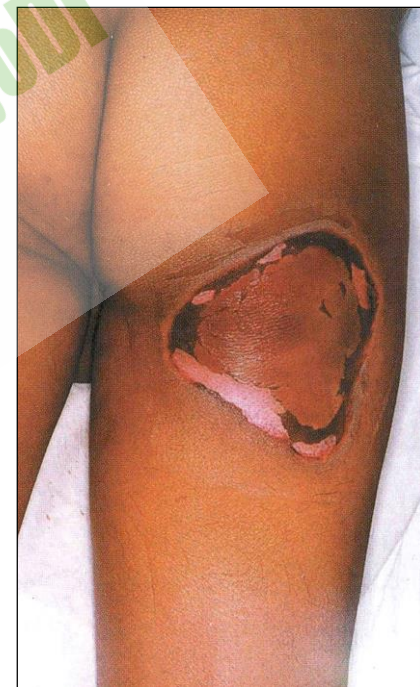
(1) 该辐照装置在设计上有隐患。第一，与辐照室门联锁相连接的辐射源位置指示系统以若干微型开关的信号为依据。当源事实上处在“非屏蔽”状态时，一个失效的微型开关可能给出“源屏蔽”的错误指示；第二个隐患是，“完全进坑”信号和来自监测仪的信号两者触发联锁系统共同作用于门上同一个锁栓，使系统只处于部分冗余状态。

(2) 维修技师没有观察控制室显示的辐射水平，最重要的是他进入辐照室没有使用便携式监测仪。运行管理部门决定在监测仪关闭状态下继续运行该装置，实质上降低了联锁系统的可靠性。

(3) 作为仪表系统组成部分的那个微型开关失效（“绿灯”亮并释放联锁），是导致事故发生的技术方面的原因。



放射性事故后果





放射性事故后果（续）





2、 San Salvador 事故

- 1989年2月5日，在 El Salvador共和国首都 San Salvador附近的一个工业辐照设施发生了一起放射事故。该设施中有正在用可移动源架的 ^{60}Co 源进行照射灭菌的预包装医用产品。
- 当源架在照射位置卡住时发生了事故。
- 运行人员和两名其他工人绕过该辐照装置的已经降级的安全系统一起进入了辐照室去手动放开源架。



2、 San Salvador 事故（续）

- 这三名工人受到高剂量辐照并引发急性辐射综合症。虽然进行了治疗，但三名男性中的两人的腿被严重损害，需要截肢。
- 受到最高照射剂量的工人在事故发生6个半月后死亡；它的死是因为辐射导致的肺部损伤，治疗过程中持续的伤害使病情恶化。



2、 San Salvador 事故（续）

这一事故包括两个截然不同但有联系的事件。

事件 1

- 1989年2月5日，星期日，三人在手工处理源架时受到照射。
- 在之后的整个一周，管理部门始终不清楚该事故的严重性并且让该设施继续正常运行。



2、 San Salvador 事故（续）

事件 2

- 源架在第一次事件中已经被损坏。这导致在该周中稍后一段时间发生了第二次事件，这次事件中，上面的源组件的所有 ^{60}Co 源棒被撞掉。稍后在辐照室中发现一根活性源棒，其它的掉入水池中。
- 2月10日 (5 天后)，探测到辐照室中辐照水平升高并向供应商请求帮助。



2、 San Salvador 事故（续）

获得的教训

许可证持有者

- 已经允许辐照设施，特别是相关安全部件，在经过一段较长时期后**明显降级**。
- **没有注意**供应商关于升级安全系统的建议。



2、 San Salvador 事故（续）

获得的教训（续）

- 在他们的习惯中安全程序和培训已经恶化到无效的程度。
- 这不但导致了事故的发生，而且意味着没有认识到初期的事故，事故中源架损坏导致了进一步的过剂量照射。
- 管理部门没能对设施未经安全许可或不正确运行所存在的严重危险保持一致认识。



2、 San Salvador 事故（续）

获得的教训（续）

- 生产比任何安全考虑都重要，以至于只有一个运行人员值班的事可能已经发生。
- 如果供应商早期的建议被注意到，这个直接的事故原因 (货包卡住和变形，随后阻碍了源架的下降) 本来可以防止的。



2、 San Salvador 事故（续）

获得的教训（续）

审管部门和国家基础机构

- 缺少一个国家基础机构来监督放射安全，是没能鉴别和补救设施中放射安全缺陷，并对事故进行更为积极有效的响应的主要原因。
- 虽然认识到需要更有经验的医学方面的职员和更好的设施，但在实施将病人转移到其它适合的医院方面还是有明显的延迟。



2、 San Salvador 事故（续）

获得的教训（续）

- 一旦事故已经引起注意和关注，应该迅速采取行动通知媒体代表，并通过他们告诉公众。
- 如果El Salvador 政府是“通告和援助公约”成员的话，向国际原子能机构报告事故本来也会得到有效地帮助。



2、 San Salvador 事故（续）

获得的教训（续）

辐射装置供应商

- 供应商提供的英文指导手册没有当地语言的版本。
- 该手册在该工厂已经被翻译，但是该西班牙语文本是不准确的和不完整的。
- 该指导手册包括生产方面的安全事项，但是没有单独论及这种重要事件。



2、 San Salvador 事故（续）

获得的教训（续）

- 出于人员安全的原因，供应商没有派人到该工厂因而没能发觉严重的安全缺陷并采取正确的措施。
- 在确认水池中 ^{60}Co 源棒的初始清单时有明显的延迟，而这本来能够保证除了那些本底以外不导致进一步的照射。
- 该设施有绕过防护系统的事件的长期历史，虽然这使得对该设施的评估很困难，但没有基本的设计缺陷被鉴别出来。



2、 San Salvador 事故（续）

合作

- 由于遵循正常的管理程序而不是适合于应急的特别程序，几个政府和政府间组织合作进行的向El Salvador提供的专家帮助被阻碍，帮助主要在医疗治理、物理剂量和事故调查等方面。



辐照室



控制和其他设备



未标记的控制台

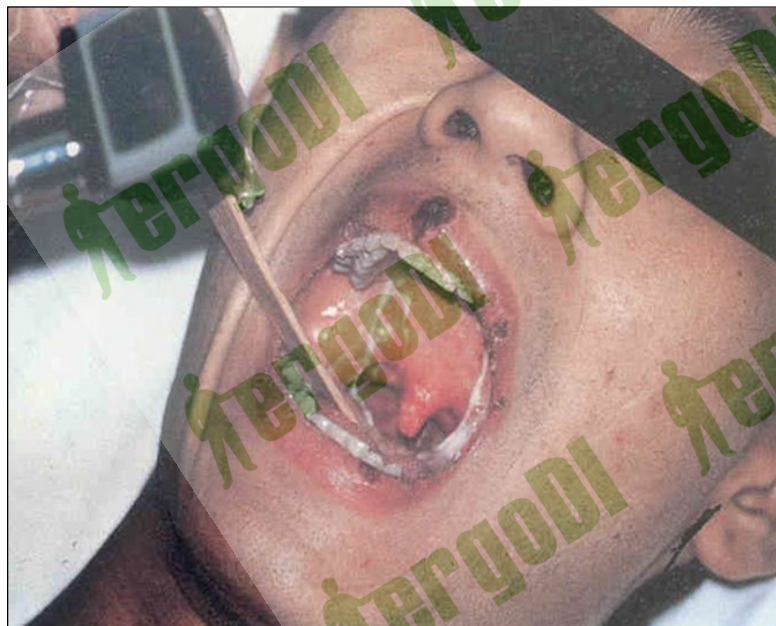


水处理工厂



病人 A (26 天)





病人 B (26天)



事故案例与经验

3、山东济宁事故，2004年10月21日

装置简介

山东济宁华光辐照厂位于山东省济宁市金乡县高河乡，是一家私营企业，始建于1994年。为自行建造的静态堆码式辐照装置，辐照源为Co-60，1994年加源7.2万Ci，1999年又加源4.4万Ci。

事故案例与经验

3、山东济宁事故，2004年10月21日 事故起因和过程

2004年10月21日，由于辐照装置的铁网门安全联锁、降源限位开关、踏板降源装置、三道防止人员误入辐照室的光电联锁等六个安全装置及拉线开关全部失灵，放射源未正常回落到井下安全位置，两名工人在未采取任何辐射监测措施的情况下，进入辐照室工作，在距离放射源约0.8~1.7m处受到照射，造成超剂量照射事故。其中1人受照约9min（估计受照剂量为10~13Gy），当即出现呕吐症状；另一人受照约5min（估计受照剂量为8~10Gy）。

事故案例与经验

3、山东济宁事故，2004年10月21日 经验教训

事故后，国家核安全局对辐照装置进行了全面的安全检查，初步查明事故主要原因如下：

- (1) 辐照装置未达到《 γ 辐照装置设计建造和使用规范》的安全要求，在安全联锁装置失效、人员误入等意外情况发生时，放射源不能回落到井下安全位置；
- (2) 运营单位管理不严，规章制度和操作规程不健全；
- (3) 操作人员缺乏必要的安全防护知识，进入辐照室前未进行剂量监测，违章操作。



放射事故的主要原因

- 最初设计上的**缺陷**。有冗余的和多样的安全系统本来能够防止多数事故。
- 基于辐射启动的安全联锁“**进入屏障**”或者没有安装、或者被拆掉、或者很容易失效。
- 当试图解决问题时, 如果通过梯子、弯腰或爬行、或通过控制开关等**能轻易绕过屏障**, 人们就试图绕过。在几个设施中, 已经有人使用花招绕过安全系统。



放射事故的主要原因（续）

- 当报警指示源没有处在安全的“屏蔽”位置时，卷入事故的人通常不能按指示警报辐射安全监督人员。
- 当进入辐照室时，人们通常不能使用可靠的、便携式辐射监测计。这些事件表明，不用这一明显而且简单的安全预防措施是常事。（大部分卷入事故的运行人员没有佩带个人监测装置。）



放射事故的主要原因（续）

- 在一些事件中，管理部门容忍辐射启动安全联锁的拆除和故障。

在至少一次事件中，管理部门明显地准许了安装一个开关以旁路安全联锁，并且拆除了唯一的一个不能轻易地以弯腰或爬行方式绕过去的通过探测系统。

- 有几个事件是在管理部门已经收到生产人员的安装保护挡板以防止事故的建议之后发生的，但是，他们根本没有做这事。



放射事故的主要原因（续）

- 许多事故发生在换班过程，因为此时只有一名受过培训的工人值班或随叫随到。雇员的行为表现反映出让一个人承担尽可能多的任务和责任这样的管理政策。
- 工人和运行人员根据所给的可用信息和指示采取了不适宜的行动。 在一些案例中，发生事故的人员没有经过了解其危害的有效的培训， 或者受过培训的人作了错误判断。



从放射事故中获得的教训

- 各自独立的、冗余的安全系统应能防止多数事故。
- 如果设备没有被仔细检查以鉴别出与安全相关的重要条件，安全将会打折扣。
 - 这要求考虑冗余度、单一方法失效的避免以及人力因素。
 - 任何没有将这些考虑有效地纳入思考的地方，就会导致不安全情况。



从放射事故中获得的教训（续）

- 如果不进行系统的检查和提供经常的培训，运行机构的经理会很快失去对雇员知识水平和表现的控制。
- 经理的习惯或态度导致安全系统和运行程序的降级。有时似乎产量和生产成本比安全更重要。

这种现象在审管部门的监督不存在或弱化时表现得相当明显。

从放射事故中获得的教训（续）

- 卷入事故的人员有时对其工作所用装备的基本原理缺乏了解。比如电子加速器的暗电流，或者臭氧的强烈味道和电离辐射与空气间相互作用的联系。



谢谢!