

# 放射性实验室设计和装备 安全手册

国际原子能机构安全丛书第30号



原子能出版社

safety series

No. 30



ISBN 7-5022-1592-1



9 787502 215927 >

ISBN 7-5022-1592-1/TL-33

定价:9.60元

TL-62/13

国际原子能机构安全丛书第 30 号

放射性实验室设计和装备  
安全手册

周正和 戴长年 译

袁禄田 谢 滋 校

原子能出版社  
北 京

图字：01-96-882号

**图书在版编目(CIP)数据**

放射性实验室设计和装备安全手册/国际原子能机构编  
北京：原子能出版社，1996.10

(核安全丛书；第30号)

书名原文：Manual on Safety Aspects of the Design and Equip-  
ment of Hot Laboratories

ISBN 7-5022-1592-1

I. 放… I. 国… III. ①放射性实验室-安全设计-装备手册②实  
验室设备 IV. TL-33

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第13939号

Manual on Safety Aspects of the  
Design and Equipment of Hot Laboratories

© IAEA, 1981

(中译本的出版得到国际原子能机构的许可，  
但国际原子能机构声明不对该中译本承担责任)

**放射性实验室设计和装备安全手册**

© 原子能出版社，1996

原子能出版社出版发行

责任编辑：赵守林

社址：北京市海淀区阜成路43号 邮政编码：100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本：850×1168mm 1/32 印张5.00 字数160千字  
1996年10月北京第1版 1996年10月北京第1次印刷

印数：1—500

定价：9.60元

## 内 容 简 介

本书介绍了放射性实验室的规划和设计，包容设备的类型，窥视、照明和处理系统，传送和运输系统，通风和空气净化系统，放射性废物排放系统，临界控制系统，辐射防护系统和控制仪表系统等。

## 致 谢

本书在翻译出版过程中得到了中国中原对外工程公司的曹宜铮、薛兆群、韩燕和中国原子能科学研究院的董柳灿等专家的大力支持和帮助,在此致以感谢!在文字整理阶段,张蕾、曹伯君等同志做了大量工作,在此一并致以谢意!

译 者

1996年9月

## 原 版 前 言

放射性同位素在科学研究和技术工艺领域的广泛应用以及核电工业的快速发展，迫切需要专门的实验室来处理高活度的放射性物质。

核工业的未来发展也许会涉及钚燃料的使用和再循环，从而导致像 $^{241}\text{Am}$ ， $^{243}\text{Am}$ ， $^{242}\text{Cm}$ ， $^{244}\text{Cm}$ 核素的大量积累。钚及超钚元素的处理由于其高的比活度和毒性而带来特殊的辐射防护和安全问题。因而包容设备和空气净化系统的设计必须采取严格的规程。对中子辐射需要使用特殊的屏蔽材料。

本手册的最早版本由国际原子能机构于1969年出版。从那以后，在放射性实验室领域，特别是实验室的技术和设计方面，有了很大的发展，因而机构认为有必要出版一本最新的手册。为此，机构于1979年3月在印度孟买召开了一次顾问小组会议。

高放物质的安全处理是放射性实验室设计和装备的核心。出版本手册的目的在于帮助那些计划设计和建造一个新的放射性实验室或者是计划改建现有放射性实验室的人们，尤其是发展中国家的人们。本书不涉及防护和处理设备的更多工程设计细节，因为这些细节在有关参考资料清单列出的出版物中已经给予了论述。本手册仅论及设计实验室建筑物、热室、屏蔽工作箱和手套箱、通风柜以及处理和窥视设备的基本概念和不同的方法，也讨论了物料传送系统及主要服务设施。

本版本是由顾问小组修改完成的。最终编辑由机构核安全处的J. U. Ahmed负责完成。

# 目 录

1. 引言 .....	(1)
2. 本手册的目的 .....	(3)
3. 本手册的范围 .....	(3)
4. 放射性实验室的规划和设计 .....	(4)
4.1 安全分析要求 .....	(4)
4.2 工作区的分类 .....	(6)
5. 包容设备类型 .....	(10)
5.1 通风柜 .....	(10)
5.2 手套箱 .....	(13)
5.2.1 概述 .....	(13)
5.2.2 平面图 .....	(14)
5.2.3 结构材料 .....	(14)
5.2.4 手套和手套孔 .....	(14)
5.2.5 窥视屏 .....	(19)
5.3 屏蔽箱 .....	(22)
5.4 热室 .....	(28)
5.4.1 生物防护 .....	(29)
5.4.2 $\alpha$ 密封 .....	(30)
5.4.3 热室出入口 .....	(30)
5.4.4 热室辅助设备 .....	(30)
5.4.5 维修和去污 .....	(31)
6. 窥视、照明和处理系统 .....	(38)
6.1 窥视系统 .....	(38)
6.1.1 反射镜 .....	(38)
6.1.2 窥视窗 .....	(38)
6.1.3 潜望镜 .....	(43)
6.1.4 工业电视 .....	(43)

6.2	照明系统	(43)
6.3	远距离操作处理设备	(45)
6.3.1	主从机械手	(46)
6.3.1.1	套袖	(53)
6.3.1.2	密封机械手	(56)
6.3.2	动力机械手	(57)
6.3.3	未来的发展	(66)
6.4	热室尺寸、机械手和窥视窗的关系	(67)
7.	传送和运输系统	(68)
7.1	密封的传送系统 ( $\alpha$ 传送)	(68)
7.1.1	容器传送系统	(68)
7.1.2	袋式传送系统	(68)
7.1.3	密封的直接传送系统	(71)
7.1.4	双门传送系统	(71)
7.1.5	气动传送系统	(71)
7.2	屏蔽传送系统 (传送 $\beta$ , $\gamma$ 物质)	(71)
7.2.1	直接屏蔽传送系统	(71)
7.2.2	间接屏蔽传送系统	(76)
7.2.2.1	包容设备区内的容器传送	(76)
7.2.2.2	包容设备区外的容器传送	(77)
7.2.2.3	屏蔽容器	(77)
7.3	密封加屏蔽的传送系统 ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ 传送)	(85)
7.3.1	密封屏蔽的直接传送系统	(85)
7.3.2	密封屏蔽的间接传送系统	(85)
7.4	放射性液体的传送和运输	(89)
7.4.1	直接传送系统	(89)
7.4.2	间接传送系统	(94)
8.	通风和空气净化系统	(95)
8.1	通风系统	(95)

8.1.1	通风柜通风	(97)
8.1.2	手套箱通风	(97)
8.1.3	屏蔽箱通风	(99)
8.1.4	热室通风	(99)
8.2	空气净化系统	(99)
8.2.1	吸收过滤	(103)
9.	放射性废物排放系统	(105)
9.1	液体放射性废物	(105)
9.1.1	液体废物的收集和排放系统	(106)
9.1.2	液体废物收集罐	(108)
9.2	固体废物	(110)
10.	临界控制	(111)
11.	防火	(112)
11.1	火灾预防	(112)
11.2	火灾报警	(112)
11.3	灭火	(113)
12.	放射防护	(114)
12.1	防护服	(114)
12.2	更衣室	(122)
12.3	监测	(122)
12.3.1	人员监测	(122)
12.3.2	区域监测	(124)
13.	标准化和自动化	(126)
14.	控制仪表	(127)
15.	管理控制	(128)
15.1	常规工况	(128)
15.2	应急状态	(128)
	参考文献	(129)
	与会者名单	(141)

# 1. 引言

随着原子能工业的出现，要求有能够处理日益增加的放射性材料以及高毒性放射性物质的实验室。特别是核电工业的发展涉及到铀燃料的使用和再循环，导致超铀核素如 $^{241}\text{Am}$ ， $^{243}\text{Am}$ ， $^{242}\text{Cm}$ ， $^{244}\text{Cm}$ 和 $^{252}\text{Cf}$ 的大量积累。铀和超铀元素的处理由于它们的高比活度和高毒性而提出一些特别的辐射防护问题。因此，设计一些安全处理这些材料的方法就成为头等重要的大事<sup>[1-31]</sup>。

这些方法的主要目标是：确保操作人员和环境的安全；提供进行放射性物料工作的条件，使所获得的结果具有可重复性和可靠性；实验室有最大的操作效率；以及实验室的流出物和废物能安全排放等。

使用放射性物质的工作必须在保护操作人员、公众和环境免受有害影响的条件下进行。这就放射性实验室及其提供这种条件的设备的功能。

必须针对外照射、内照射和临界事故以及放射性实验室内常规火灾、爆炸危险等来考虑防护。

放射性物质对人是有害的，因为它们发射光子或某种粒子，并且有些材料如铀和钚也是化学毒物。这些光子或粒子把它们的能量传递给人体组织内的原子和分子，由此破坏或改变其结构的重要部分而导致其损坏。

对于放射性材料的穿透性发射（也就是 $\gamma$ 光子，X射线和中子）的防护要用很厚的屏蔽。发射大量这类辐射的材料必须在屏蔽设施内远距离处理。 $\beta$ 辐射体可以在轻屏蔽层内处理，当 $\beta$ 射线被阻挡时，有软X射线（穿透能力较小）或“韧致”辐射发生，可能需要屏蔽。 $\alpha$ 粒子可以被一层很薄的材料挡住，因为它们在很短的射程内就失去了能量。然而，其能量沉积率很高，当 $\alpha$ 发射体进入人体组织

时这种沉积使 $\alpha$ 发射体成为最毒的放射性物质。对引起体内危害的辐射最有效的防护方法是将放射性物质与操作人员所在环境进行隔离，可以采用通风柜、手套箱、屏蔽工作箱或热室等方式。将放射性物料容纳在一个包容设备内也能实现这种隔离。包容设备的密封性和对操作人员安全所需的通风标准主要取决于下列因素：材料的毒性、数量、比活度、物理和化学形态及操作类型。

隔离的包容设备或密封设备应设计成在可能达到的最佳控制条件下保证工艺流程的完成以便合乎各个工艺流程和放射性物料要求。

然而，放射性物料不得不运进运出包容设备，因此需要采用一些安全方法贮存和运输放射性物料，并且必须监测操作环境以探测任何污染的存在。

实践证明，把作用各不相同的独立区域（即引起相同或类似程度放射性危害的一些工段或操作）放在一起，对提高实验室的操作效率是有益的。操作员可以通过更衣室在两个分开的区域走动，为了操作员的安全及防止两个区域之间污染的扩散，应在更衣室更换衣服或防护服。必须仔细设计一个整体的通风系统，以防止气载污染在这些区域之间扩散。

当设计热室设施时，应该考虑采用自动化系统和使用标准化系统。

## 2. 本手册的目的

本手册的主要目的是为那些负责设计和建造新的放射性实验室设施的人们或官员（特别是在发展中国家）提供一个指南。手册阐述了在实验室厂房、设备和主要服务设施设计中的基本概念和选择途径。

## 3. 本手册的范围

本手册包括按照不同潜在的辐射和污染危害程度来规划和设计实验室内各个区域的一般原理；包容放射性材料的包容设备；窥视和照明系统以及各种类型机械手；放射性材料在实验室内部的传送和运输；空气净化和通风系统（细节部分参见《国际原子能机构安全丛书第 17 号》）；控制核设施操作区空气污染的技术；各种放射性废物排放系统；临界控制；防火；包括更衣室和防护服监测在内的人员监测；标准化和自动化；以及管理控制等。

虽然， $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  工艺是分别开发的，但用于放射性工作的设备在很多操作中是通用的。在进行含铀和钚的工作之间与在进行含钚和其它超铀元素的工作之间，从工艺方面而言有阶梯性的变化。钚的处理使人们进入了  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  工艺学领域。

本手册报告了基本需要并给出了可得到更高级技术的参考资料，但它不涉及到商业规模的工作。其它与本书有关的出版物，例如《国际原子能机构安全丛书第 39 号》，是更详细的参考资料。

## 4. 放射性实验室的规划和设计

### 4.1 安全分析要求

在进行一套装置的概念设计之前，实验室的地址应该按选址标准进行评估，以便按照其潜在的危險水平（由其放射性物质投料量，拟议中的放射性物质常规释放率和当地环境条件三者决定）确定所提议的操作项目的可接受性。拟议中的放射性实验室与其它核装置的接近度和安全作业的相互影响，也必须在选址的评估中加以考虑。评估应向本实验室设计者指明较佳的选址和影响设计的环境条件。

所有放射性设施的设计需要详细考虑操作人员和公众两者在正常操作和一定范围意外条件下将受到的辐射剂量。在大量处理放射性物料的地方，大部分评价工作，都与放射性物料所用包容设备意外释放的可能性有关。安全评价的目的如下：

(a) 审评拟议中操作任务的目的并确立该放射性实验室的设计原理。

(b) 量化放射性释放机制发生事故的频率。

(c) 量化由于这些机制而产生的释放的放射性材料数量和操作人员与一般公众受到的剂量率。

(d) 衡量上述 (a) 与 (b) 项后果的可接受性；如果是不可接受的，则向设计人员指出需要重新设计和（或）增加安全系统。

危害分析要考虑自然现象的影响如：地震、风暴等，以及火灾、洪水和飞射物等。

Farmer<sup>[32]</sup>已经开发出了核工业与公众辐射照射风险概率的相关分析技术。这一技术可以应用在放射性实验室安全分析上。只有当单个工程部件的可靠性数据可以得到时，才允许对因实验室发生

故障引起辐射照射的概率同公众危险的可接受性做定量比较。如果没有好的可靠性数据可以采用，则对实验室进行系统的数字可靠性分析是不可能的；在必须有高度可靠性数据的场合，推荐使用以故障模型和其影响为基础的分析系统。

特种工业的工业安全要求和国家规章要求与辐射安全分析应该同时考虑。

从操作放射性设备一开始就必须进行详细的安全评价<sup>[33]</sup>。除正常操作要求之外，设计还应考虑意外事故后设备的恢复、实验室工作寿命结束时设施的最后退役等。

像这样的初始评价工作最好分阶段进行，有操作人员和设计人员双方代表参加，并与适当数量的技术上有一定资格的成员一起组成评价小组。最主要的是在下述每一阶段要形成正式文件：

第1阶段：在设计评估过程中，建议设计者系统地阐明安全原理及其在详细设计阶段的应用。

第2阶段：对详细设计和建议的操作程序形成正式的安全评价。

第3阶段：(a) 开展运行安全评价，保证实验室遵守第2阶段制定的技术规定，并开展运行前的辐射巡测，以建立放射性本底水平。

(b) 制定实验室使用期间定期安全检查的管理程序。该程序应保证装置按已得到安全审批认可的技术条件运行。对装置的增加或修改还应该保证有正式记录记入相关的安全文件中，使这一文献资料永远记载下现有情况。

第4阶段：在设计阶段预先应采取一定措施，以便允许该装置得到安全而经济的退役。

在第1, 2阶段下述各点是重要的：

- (a) 对全部值得注意的危险作出正确的鉴别和估计，
- (b) 按必要的安全标准进行的鉴定，
- (c) 有关设计安全原理的详细说明，
- (d) 设计安全原理的有效执行，
- (e) 制定一份完好的安全文件。

## 4.2 工作区的分类

在不同的工作区(例如那些供核燃料后处理、分析和辐照后检验的工作区)将产生必须要进行排放处置的气体和液体废物,并且这些放射性物质或许须从一个设备移向另一设备。这些功能的实现随着危险程度不同而异。实际上是按照放射性物料在工作区内产生的辐射危险严重性划分工作区域<sup>[34-60]</sup>,一般划分为四个区。不同国家工作区的分类系统不尽相同。参考文献[60]给出了一个典型的例子,也给出了各个区域的详细说明。本手册中分区如下(见图1-4)。

**I区(白色):**这一区内没有辐射和沾污危险存在(办公室,更衣室清洁侧,主要入口),进入该区不受限制。

**II区(绿色):**通常可以预计,在该区内按其局部安全规程对工作人员没有超过某种程度的辐射和沾污危险。进入该区应该进行最低限度更衣(实验室大褂和鞋套)。建议对该区存在的放射性物料进行局部巡测(走廊,控制室,车间)。

**III区(橙色):**在本区内的污染和辐射危险概率比II区大,因为放射性材料的实际处理和操作发生在这里。在该区需要进行辐射和污染监测。应该特别注意空气监测。人员在III区和II区之间的移动通常需要更衣和监测。

**IV区(红色):**该区是设计成为一个实体密封设备或包容设备区(手套箱,热室,去污区),放射性物料在这里保存、暴露和加工;辐射和沾污的危险概率最大。在正常操作中禁止进入该区,并且通常是在移走放射源并经必要的去污之后才允许进入该区。作为保健物理控制的专门规定是必须穿戴专用防护眼和呼吸设备。在该区内的停留时间也要加以限制。

I区是实验室内的一般操作区。II区通常是维修、辅助去污、放射性物料传送和其它导致放射性沾污的操作的区域。在放射性实验室内,III区和IV区界限明确。然而,由于放射性物料的数量和性质以及采取某种预先防范措施,则在某些实验室内进行正常操作时可

