

高等学校教学参考书

电离辐射防护

—核技术装置辐射防护—

第二卷

Н.Г.古雪夫 主编

Н.Г.古雪夫

[苏]

В.П.马什科维奇 编

А.П.苏沃罗夫

原子能出版社

高等学校教学参考书

电 离 辐 射 防 护

第 二 卷

——核技术装置辐射防护——

主编 [苏] H. Γ. 古雪夫

编者 [苏] H. Γ. 古雪夫

B. Π. 马什科维奇

A. Π. 苏沃罗夫

译者 华明川 鲍世宽

校者 华明川

6609/23

原 子 能 出 版 社



B

527050

内 容 简 介

本书是苏联大学教科书《电离辐射防护》的第二卷。它详细地阐述了核电站及核燃料循环各个环节、加速器、辐照装置、宇宙飞船以及其它核技术应用领域里所涉及的辐射防护和辐射安全问题。

此书可供高等院校有关专业的师生参考,对从事核技术和放射性同位素应用的各个领域里的科研、生产和设计工作者及其他有关人员也有实用参考价值。

ЗАЩИТА
ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ
Том 2
ЗАЩИТА
ОТ ИЗЛУЧЕНИЙ
ЯДЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК

Издание второе, переработанное

и дополненное

Под редакцией

доктора технических наук,

профессора Н. Г. Гусева

高等学校教学参考书

电离辐射防护

第二卷

——核技术装置辐射防护——

主编[苏] Н. Г. 古雪夫

编者[苏] Н. Г. 古雪夫

В. П. 马什科维奇

А. П. 苏沃罗夫

译者 华明川 鲍世宽

校者 华明川

责任编辑 崔朝晖

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京市通县电子外文印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 14.25 · 字数 355 千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数: 1—1000

ISBN 7-5022-0093-2

TL·35(课) 定价: 2.90 元

译 者 的 话

本书是苏联大学教科书《电离辐射防护》的第二卷。它侧重阐明了各个核技术应用领域里的辐射源特性和辐射防护特点。所涉及的应用领域包括：核电站及核燃料循环各环节、加速器、辐照装置、宇宙航行以及其它核辐射技术等。书中还介绍了苏联核电站的辐射安全标准和周围居民辐照剂量计算方法。

本卷的序言及第十四至第十七章由鲍世宽译；第十八至第二十七章由华明川译。

译文不当之处，敬请读者指正。

1987. 6. 15

序 言

本书是大学教科书《电离辐射防护》的第二卷。在1980年由苏联原子能出版社出版的第一卷包括两部分：辐射防护的理论基础和辐射防护的工程-物理基础。在第一部分给出了不涉及特定源和核技术装置的防护物理知识：放射性和剂量的单位，电离辐射同物质的基本相互作用过程，计算辐射穿透辐射屏蔽的数值方法、解析方法和半经验方法。在第一卷的第二部分介绍了初级和多次散射的 γ 辐射和中子辐射场特性，辐射源的基本辐射特性，电离辐射的容许限值水平， γ 辐射和中子辐射及 α 粒子和 β 粒子屏蔽计算的工程物理方法， γ 辐射和中子的反照率。

第二卷也由两部分组成：核技术装置的屏蔽；核燃料循环中的居民防护和周围环境的保护。侧重研究包罗多种辐射的装置——核反应堆的屏蔽。也研究核燃料循环其它环节——从铀矿到辐照过的核燃料后处理厂的辐射防护的要素，以及在国民经济中应用辐射源时的防护。叙述基本粒子加速器屏蔽和宇宙飞行辐射屏蔽计算的基本原理。在屏蔽内辐射释能和温度分布计算方法，辐射通过屏蔽的不均匀性，以及对屏蔽物理来说是通用的材料的屏蔽特性。

核动力的发展不可能避开有效地解决居民的防护和周围环境的保护问题。在本书中叙述了对原子能工厂安全布置的要求，其在环境中作为放射性物质污染源的特性，以及基本的和派生的辐射危险因子标准定额问题。介绍了原子能工厂气溶胶排出物通过各种相互作用途径造成的个人剂量和群体剂量的独创的数学计算模型。

本书两卷彼此是有机联系的。在第一卷中叙述的一般的屏蔽计算方法，在这里不再重复而是用来解决核技术装置具体的屏蔽问题，(在公式、表格和插图上具有起始数字1~13的所有引证属于第一卷相应的各章)。

这两卷教科书同B. И. 依万诺夫和B. П. 马什科维奇的《电离辐射剂量学和屏蔽问题集》，(苏联原子能出版社，1980)、B. П. 马什科维奇的手册《电离辐射屏蔽》(苏联原子能出版社，1982)以及H. Г. 古雪夫的《裂变产物 γ 辐射屏蔽》(苏联原子能出版社，1968)一起，包括了对工程物理和技术物理大学学生的电离辐射防护物理的全部教学大纲。

第二卷的作者是：H. Г. 古雪夫——第十四、十七、十八、二十(除П. Д. 萨蒂科夫写的§20.2和§20.3)、二十一、二十六和二十七章(除B. A. 别利亚耶夫编写的§27.6和§27.8)；B. П. 马什科维奇——第十八、二十四和二十五章；A. П. 苏沃罗夫——第十五、十六章；E. E. 科瓦列夫——第二十三章；B. H. 列别杰夫——第二十二章。

在本书的第一版，“加速器屏蔽”一章曾由П. P. 基米尔撰写。可惜，我们这位同事和朋友过早地去世使他不可能参加本章第二版的编写。

按照苏联国家标准ГОСТ 8.417—81的要求，所有单位和量用国际单位制(SI)表示，而在括号内(或用脚注)引证这些特征量的早先采用的单位制。

$N \pm n$ 书写形式表示 $N \times 10^{\pm n}$ 。

作者感谢三十年来参与课程研讨和教材编写的劳动红旗勋章莫斯科工程物理学院的教师和同事。对科学技术博士Ю. А. 耶戈罗夫教授审阅原稿并提出宝贵意见所付出的劳动深表感激。

作者预先感谢那些对该著作提出批评意见的所有读者。

目 录

序 言	
第Ⅲ部分 核技术装置辐射屏蔽	1
第十四章 核技术装置屏蔽设计的基本原则	1
§ 14.1 辐射水平的标准定额	1
§ 14.2 屏蔽设计的基本要素	2
第十五章 核反应堆活性区的屏蔽	4
§ 15.1 核反应堆的基本类型	4
§ 15.2 反应堆辐射屏蔽设计原则和阶段	5
§ 15.3 反应堆活性区辐射源	16
§ 15.4 反应堆活性区内中子和 γ 光子源的分布	26
§ 15.5 活性区辐射减弱计算	32
§ 15.6 反应堆容器屏蔽	52
§ 15.7 不同类型核电站反应堆的屏蔽特点	56
第十六章 屏蔽的热计算	63
§ 16.1 屏蔽内的辐射释能	63
§ 16.2 屏蔽内温度分布计算	65
第十七章 载热剂系统的屏蔽	70
§ 17.1 关于载热剂的一般知识	70
§ 17.2 载热剂的固有放射性	71
§ 17.3 腐蚀产物放射性	74
§ 17.4 载热剂裂变产物放射性计算	78
§ 17.5 载热剂 γ 辐射屏蔽	81
第十八章 辐射在屏蔽内的不均匀性穿透	83
§ 18.1 不均匀性分类	83
§ 18.2 辐射通量密度分量分解法	90
§ 18.3 不均匀性屏蔽的辐射场计算方法	91
§ 18.4 直孔道	93
§ 18.5 弯曲孔道	101
§ 18.6 梯级孔道	105
§ 18.7 复杂的不均匀性	106
第十九章 中、低放射性水平生产中的辐射安全	108
§ 19.1 关于核燃料循环的一般概念	108
§ 19.2 镭制备时的防护	111
§ 19.3 燃料元件生产中的防护	113
第二十章 铀矿场的辐射安全	117
§ 20.1 辐射危险因素	117
§ 20.2 氡射出量的确定	118
§ 20.3 空气流量的确定	119

§ 20.4 外照辐射水平	123
第二十一章 核乏燃料处理时的 γ 辐射防护	125
§ 21.1 概述	125
§ 21.2 锕系核素的辐射特征量	128
§ 21.3 裂变产物辐射特征量	130
§ 21.4 裂变产物混合物 γ 辐射防护	137
第二十二章 粒子加速器屏蔽	140
§ 22.1 加速器——致电离辐射源	140
§ 22.2 电子加速器	143
§ 22.3 质子加速器	147
第二十三章 宇宙飞行时的辐射防护	157
§ 23.1 宇宙中辐射防护特点	157
§ 23.2 宇宙空间主要的辐射危险源	158
§ 23.3 宇宙飞行的辐射安全准则	163
§ 23.4 宇宙飞行辐射屏蔽计算基础	166
第二十四章 电离辐射源在国民经济中应用时的防护	171
§ 24.1 外照辐射屏蔽计算方法	171
§ 24.2 辐射探伤时的防护	173
§ 24.3 辐射技术装置的屏蔽	177
§ 24.4 放射治疗时的屏蔽	183
第二十五章 屏蔽材料	185
§ 25.1 屏蔽材料选择标准	185
§ 25.2 固定装置的屏蔽材料	187
§ 25.3 运输装置的屏蔽材料	190
第IV部分 居民辐射安全和环境保护	192
第二十六章 核燃料循环工矿企业选址安全要求	192
§ 26.1 核燃料循环工矿企业——放射性物质对外环境的污染源	192
§ 26.2 核电站正常运行下辐射量标准定额	196
§ 26.3 核电站事故情况下辐射量标准定额	198
第二十七章 气体排放剂量计算方法	200
§ 27.1 一般原则 术语	200
§ 27.2 气体排放剂量计算的气象学问题	205
§ 27.3 放射性气体云引起的外照剂量	208
§ 27.4 放射性核素在土壤沉积引起的外照剂量	211
§ 27.5 吸入放射性气体和气溶胶引起的内照射剂量	213
§ 27.6 地面食物链引起的内照剂量	214
§ 27.7 外环境的导出放射性特征量	217
§ 27.8 放射性排放引起的群体剂量	218
参考文献	220

第Ⅲ部分 核技术装置辐射屏蔽

第十四章 核技术装置屏蔽设计的基本原则

§ 14.1 辐射水平的标准定额

《辐射安全规范 (HP Б—76)》、《伴有放射性物质和其它电离辐射源工作的基本卫生规则》(ОСН—72/80) 及《核电站设计和运行的卫生规则 СН—АЭС—79》是核技术装置屏蔽设计时规定容许辐射水平的主要标准文件。它们包括了保障职业人员和居民辐射安全的要求：职业人员的容许剂量限值 (ПДП) 和居民中个人的剂量限值 (ПД), 在设计原子能工厂时容许的剂量当量率, 空气和水中放射性核素的容许浓度 (ДК), 工作表面、工作服和工作物体被放射性物质污染的容许水平。在这些文件中也列出了对放射性物质随气态、液态和固体废物向外环境容许排放的要求, 以及对剂量监督和各种卫生安全问题的要求。

对职业人员和居民的电离辐射防护标准要求中有三个辐射安全准则：不超过规定的剂量限值；排除任何无正当理由的照射；在考虑经济和社会方面的条件下，使照射剂量降低到尽可能低的水平 (ALARA*原则)。

在 HP Б—76 中规定了以下剂量限值 (表 14.1)。

表 14.1 内外电离辐射的总容许年剂量当量

类 别	关 键 器 官					
	I		II		III	
	mSv	rem	mSv	rem	mSv	rem
A 类	50	5	150	15	300	30
B 类	5	0.5	15	1.5	30	3

注：居民受照 (B 类) 的规定和监督属于苏联卫生部的权限。

在 ОСН—72/80 中规定了屏蔽设计时的剂量率，如表 14.2 所示。

在设计核电站 (АЭС) 时，应预先考虑进行技术操作和修理作业的组织措施，以使个人剂量小于表 14.1 和 14.2 中所列的值。为了考虑内照射可能的贡献和在事故情况下的高辐照，这种后备量是必须的。在这些表中所列的受限制的部分居民 (B 类) 的容许照射限额相当于广泛应用于人类活动的各种形式的电离辐射源的总和 (医疗照射和天然本底产生的剂量除外)。

* 来自英文 As Low As Reasonably Achievable.

表 14.2 外电离辐射屏蔽设计时应用的剂量当量率 $\dot{H}$ 值

受照人员的分类	房屋和场地的用途	$\dot{H}$	
		mSv/h	mrem/h
A 类 ($t=36$ h/周, 50周/年)	A类职业人员经常停留的房间	14	1.4
	职业人员在其中停留不超过一半工作时间的房间	28	2.8
B 类 $t=41$ h/周, 52周/年 $t=168$ h/周, 52周/年	属于B类的人可以停留的卫生防护带 ^① 的任何房间、设施和地区	1.2	0.12
	观察带 ^② 范围内的任何房间(包括住人的)和地区	0.3	0.03

① 卫生防护带——设施或放射性排放源周围的地区, 在这些地区照射水平有可能超过剂量限值(ΠД). 在卫生防护带内建立限制制度并进行辐射监督。

② 观察带——设施的放射性排放可能影响的地区, 其居住的居民接受的照射可能达到规定的剂量限值。在观察带地区进行辐射监督。

考虑到电离辐射源在国民经济中逐渐全面推广和上述ALARA原则(该原则是根据照射的随机性效应无剂量阈这一认识而制订的), 最近几年, 已对核燃料循环的各个环节分别制定了所谓剂量限额。例如, 在CΠ-AЭC-79中对B类人员规定, 由核电站放射性废物引起的剂量限值(ΠД)仅为HPБ-76规定的相应限值的5%(见下面表26.4)。同时, 在CΠ-AЭC-79中, 对于工厂厂区(而不是在观察带地区, 如表14.2所示)房屋的设计剂量当量率取 $\dot{H}=0.3\mu\text{Sv/h}(0.03\text{mrem/h})$ 。

上面提到的标准文件中还列出了另外一些关于辐射安全问题的重要规定, 在此不予叙述。

§ 14.2 屏蔽设计的基本要素

除了设计项目的一般特点和工艺特征外, 应有专门文件《辐射安全性》论述职业人员和居民的防护问题。例如, 对于核电站, 关于贯穿辐射屏蔽方面的辐射安全文件应包括:

作为设计依据的辐射安全基本规定(容许照射水平, 安全准则和标准, 各种服务房间的分区和类别); 核电站以及邻近的其它辐射源的辐射类型表;

辐射源的特性: 视源和屏蔽目的而定, 可供选择的有, 比活度(单位体积质量的), γ 当量, 光子或中子强度或通量密度, 辐射的有效能谱;

源的物理化学性质: 化学成分, 密度;

有关高辐射和高热力负荷条件下屏蔽材料性能及其吸附作用性质的资料;

关于源内活度分布特性的资料;

源的几何参数(大小和形状), 可能存在的屏蔽辐射的金属壁或别的覆盖物, 源至受体的距离, 防护屏障相对于源的位置(垂直的, 倾斜的);

屏蔽材料的特性, 它的结构形式(平板状, 环状、仿形式、可拆卸式、阴影式), 关于可能的屏蔽覆面的资料;

在设计中所采用的屏蔽计算方法和计算程序及其输入的原始数据(或者关于它们的文献索引);

考虑相邻房间有可能布置源和存在其它类型贯穿辐射的工作地点的设计辐射水平的计算结果。

对各个房间(隔离间)内活化设备的布置要求也属于屏蔽设计的一般原则, 要按活化水平和在检修期间接近设备的方式以及利用源本身的结构和材料作防护屏障的程度进行分类设

计。

列举的屏蔽设计要素，对大多数电离辐射源或多或少都是共同的。但是在设计具体辐射源（例如，核电站，核燃料后处理工厂，加速器，宇航装置等等）的屏蔽时，也有表征某种核物理装置屏蔽设计的特殊要求。这些将在相应的各章里介绍。在§15.2足够详细地叙述核反应堆屏蔽设计的原则和阶段。这些要求也可以推广到具有高电离辐射水平的大多数其它核物理装置。

第十五章 核反应堆活性区的屏蔽

§ 15.1 核反应堆的基本类型

核反应堆可按物理和结构上的不同特征、按核燃料的成分和布置、按中子慢化剂和载热剂的类型、按用途等等加以分类。

根据主要引起燃料核裂变的中子能量，将反应堆分为快中子反应堆、中能中子反应堆和热中子反应堆。反应堆的类型取决于其活性区内慢化剂、燃料及其它材料的数量关系，它们的几何布置和反应堆的大小。在热中子反应堆内对裂变起主要作用的中子能量通常不大于0.2 eV。在中能中子反应堆内，引起裂变的大量中子的能量为0.2 eV ~ 100 keV。在快中子反应堆内，引起裂变的中子的平均能量大于100 keV。

热中子核反应堆的活性区(A3)包含大量的中子慢化剂。例如，在铀-石墨反应堆内，碳核的浓度比 ^{235}U 核的浓度大6,000~10,000倍。在中能中子反应堆活性区内含有非常少的慢化剂，而在快中子反应堆内，一般不存在慢化剂。

就反应堆屏蔽计算而言，对不同类型反应堆的活性区或反射层射出的辐射通量强度进行比较是有意义的。该强度取决于反应堆的功率、结构和用途。但是可以援引某些平均数字。例如，在铀-石墨反应堆内，从活性区射出的中子通量密度达到 $(2\sim 5)\times 10^{13}\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ， γ 光子能通量密度 $(2\sim 5)\times 10^{13}\text{ MeV}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ，慢中子和热中子占中子通量密度的95%。在水-水反应堆内，中子通量密度通常不超过 $(1\sim 2)\times 10^{13}\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ， γ 光子能通量密度约为 $10^{14}\text{ MeV}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ，而且在中子谱内快中子和中能中子约占50%。在快中子反应堆内，从增殖区出来的中子通量密度为 $10^{14}\text{ n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ ， γ 光子能通量密度约为 $10^{13}\text{ MeV}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 。射入屏蔽的中子谱的最大值通常对应于能量为50~100 keV的中子。

按核燃料成分可区分为铀反应堆、钚反应堆和钍反应堆。这种燃料可以是固体、液体和气体。按照燃料在反应堆内的布置方式分为均匀反应堆和非均匀反应堆。均匀反应堆的活性区对于中子来说是由核燃料和慢化剂组成的均匀混合物。例如，均匀分布在石墨慢化剂里的小碳化铀颗粒，或以燃料原子为基础的熔盐，或是气体核燃料。在非均匀反应堆内，可裂变物质以单个元件或组件形式布置在慢化剂中并构成规则几何的栅格。

按中子慢化剂类型分为石墨慢化剂反应堆、水慢化剂反应堆、重水慢化剂反应堆、有机慢化剂反应堆和氢化物慢化剂反应堆。

为了从活性区导出热量将载热剂输送经过反应堆。载热剂将热量从反应堆带到蒸汽发生器或气体加热器，在那里将热量传给水或气体。

按载热剂类型分为水载热剂反应堆、有机载热剂反应堆、液态金属载热剂反应堆、气体载热剂反应堆和等离子体载热剂反应堆。

在用水作慢化剂的反应堆内，通常也用水导出热量，即水还起载热剂的作用。这样的反应堆称为水-水堆。用水作载热剂的反应堆分为压水堆和沸水堆。

按结构特征将反应堆分成容器式、管道式和核燃料循环流经的腔室式（由于等离子密度之故这样的反应堆活性区几乎是空的，所以称为等离子反应堆）等等。

在反应堆内用铀做燃料时，主要是 ^{235}U 原子核发生裂变。这种原子核裂变时产生的中子可以被 ^{238}U 原子核俘获继而形成放射性核素 ^{239}Pu ，后者也是裂变物质。类似地，当中子被 ^{232}Th 原子核俘获时形成新的裂变物质 ^{233}U 。

在反应堆工作时重新形成的核燃料原子数与燃耗的核燃料原子数之比称为燃料的转换比 K_B 。在现代的热中子反应堆内，这个系数总是小于1。对于 K_B 近似为1的反应堆，通常称为转换堆。在 K_B 大于1的情况下工作的快中子反应堆称为增殖反应堆。

按用途将反应堆分为：1)研究堆；2)人工同位素生产堆；3)生产电能的核电站(AEC)、生产热能的核供热站(ACT)以及供电供热的核热电站(ATЭИ)（供热系统用于海水淡化等）的动力堆；4)用于冶金和化学加工的反应堆；5)作运输发动机——船、飞机、宇航装置的反应堆；6)用于医疗目的反应堆，等等。

§ 15.2 反应堆辐射屏蔽设计原则和阶段

反应堆的屏蔽要求。反应堆辐射屏蔽设计由几个相关的阶段组成，包括屏蔽材料选择、屏蔽布置及其结构设计等几个综合的过程。同时，必须对安全、经济和操作的要求进行综合考虑。对反应堆屏蔽内的辐射场进行某种程度的详细而精确的分析是所有设计阶段不可缺少的组成部分。

反应堆屏蔽的设计原则显然取决于反应堆的类型及其用途。例如，对于动力堆和研究性反应堆，这些原则可能大大不同。因此，为了具体起见，下面将侧重分析动力堆的屏蔽设计，虽然部分原则对于任何用途的反应堆是一样的。我们试图概括一下反应堆屏蔽应当满足的要求。必须指出，这些要求并非对于所有情况都是通用而适宜的。设置屏蔽在于有条件地保证：1)人员可进入的房间的容许辐射强度水平（考虑工作人员在这些房间里必须停留的平均时间和反应堆功率水平），即执行生物屏蔽功能（对人的防护）；2)结构和屏蔽材料的容许辐射损伤水平，即执行防辐射的屏蔽功能；3)在结构和屏蔽材料中辐射释能、温度和热应力的容许水平，即执行热屏蔽功能；4)结构材料、设备和载热剂受中子照射引起的容许活化水平，即执行防活化的屏蔽功能；5)当活化部件从反应堆卸出时，按现有的辐射安全标准达到可接受的辐射状况。

制造和结构方面的要求在于保证必需的清洁度、公差、密度、均匀性、屏蔽材料的亲和性及其在整个反应堆服役期间的工作性能；在于保证屏蔽结构制造和安装时检查的可能性，以及保证这些结构的可维修性。

现研究反应堆装置屏蔽设计的某些通用原则。

1. 反应堆及其屏蔽、载热剂回路和辅助系统在各个阶段要协调设计。
2. 保证屏蔽的完整性，即尽可能保证屏蔽外表面辐射状况的等剂量性*（但是，要考虑构成方式和人员在各个地方的停留时间）。
3. 考虑耐久性和热物理学计算结果的要求。

* 美国的反应堆运行经验表明，在面积不大于屏蔽总面积1%的小部分的局部辐射强度允许比正常水平高6倍。

4. 在屏蔽结构上考虑整个反应堆安全的要求。

5. 保证核动力装置的经济性：获得的能量（电能或热能）成本最低。屏蔽是反应堆装置非常昂贵的部分。据估计，附加10倍的辐射减弱使屏蔽费用平均增加大约15%。同时，屏蔽费用不少于整个核动力装置造价*的30%。此外，屏蔽和构筑物的协调布置通常在很大程度上决定着构筑物的成本。在很多情况下必须保证最低的屏蔽成本（包括屏蔽材料、制造和安装），而有时则保证最小的屏蔽外形尺寸或最小的屏蔽质量。

6. 屏蔽结构简单可靠，不妨碍反应堆的正常运行和超负荷。

7. 监督屏蔽结构的建造和安装，在建造之后检查和考验屏蔽的有效性。

反应堆屏蔽设计是复杂的过程，许多技术因素对其有影响。例如，对各个隔间实行远距离监控和完成某些操作，一方面可以大大简化对屏蔽的要求，从而提高核动力装置的经济性，而另一方面则有可能降低整个核动力装置的运行可靠性，从而间接地使它的经济性降低。因此，在每一种情况下，必须考虑某个核动力装置的特点方可具体地解决反应堆辐射屏蔽工程设计的大量问题。完成的屏蔽设计是对质量、成本和操作方便诸因素综合权衡的结果。

反应堆屏蔽布置。反应堆屏蔽布置有下列几种类型：

1) 整个围绕反应堆及其所有组成部件的整体屏蔽。

2) 分别屏蔽。单独地把反应堆屏蔽起来，而将载热剂回路设备布置在同反应堆隔开的专用房间内，在停堆期间可对设备进行维护（即这种房间是限制进入的）。在许多情况下，希望在反应堆低功率运行时，能有限制地接近反应堆附近的特定地段。

3) “阴影”屏蔽。在这种情况下，靠近反应堆的某些特定地段用防护屏加以屏蔽，从而使它们处于屏蔽的“阴影”之中。例如，这有可能是走廊、操纵台或者专用的维修房间。在某些情况下，屏蔽可从各个方面把其中每个局部包围起来。

在分别布置情况下，将所有屏蔽分为初级屏蔽和次级屏蔽。初级屏蔽（或者反应堆本身的屏蔽）使反应堆的辐射强度下降到与活化了的载热剂的辐射强度相比拟的数值。反应堆的所有冷却系统被次级屏蔽包围，使人可进入房间内的辐射强度减小到规定的容许水平。在初级屏蔽与次级屏蔽之间屏蔽功能的最佳分配是一个复杂的技术问题，解决它需要进行详细研究，要考虑设备结构特点和接近它的要求。

反应堆初级屏蔽应完成如下减弱功能：

1) 把反应堆射出的中子通量减小到不使二回路载热剂（在核动力装置双回路情况下）达到强烈活化的程度；

2) 中子通量减小到这样的程度，使得载热剂屏蔽内中子俘获伴随的 γ 辐射最少；

3) 在停堆后人员必须停留的地方，从活性区射出的剩余 γ 辐射通量减弱到容许接受的水平；

4) 从反应堆射出的中子通量减小到这样的程度，使得因中子辐照而在结构件和设备中引起的放射性活度小于容许水平。这是初级屏蔽最重要的功能。

次级屏蔽的功能是：

a) 使载热剂 γ 辐射通量和入射到载热剂的中子通量减弱到容许水平；

b) 防止从初级屏蔽的薄弱之处（例如蒸汽管道）过多透射出的辐射；

* 系指土建费。——译者注

c) 有时作为被放射性气溶胶污染的空气的阻挡层(这种空气污染发生在反应堆附近)。

这样, 初级屏蔽和次级屏蔽结合在一起可完成反应堆运行时生物屏蔽的功能。

在次级屏蔽包围的空间内, 常常必须对辐射最强的设备部件设置附加阴影屏蔽。在设计合理的情况下, 这样的阴影屏蔽能够保证人短时间地进入次级屏蔽所包围的部分房间。

初级屏蔽的厚度及其对反应堆辐射的减弱效能通常大于次级屏蔽的相应指标。然而, 初级屏蔽在生物屏蔽总重量中所占的份额却可能较小, 因为次级屏蔽的表面积远远大于初级屏蔽的表面积。

在选择初级屏蔽的材料和结构时, 应注意它的冷却要求, 因为在反应堆运行时它遭受强的中子通量和 γ 光子通量的照射并受到相当大的热通量的作用。还需要考虑某些屏蔽材料辐射损伤的可能性, 例如, 即使是大家知道的在化学上足够稳定的水也易受强辐射分解, 特别是存在某些杂质物的情况下。在水辐照分解时形成放射性的和爆炸性的气体混合物(必须在专用的接触器中将其燃烧)。

在设计反应堆屏蔽时应考虑到, 安置在次级屏蔽包围的房间内的载热剂回路设备部件的合理布置对整个屏蔽重量、造价和外形尺寸有重要的影响(详见第十七章)。本身为弱辐射源的某些设备可以作为反应堆屏蔽的组成部分。这时应考虑由于反应堆辐射使这种设备活化导致它的可维修性变坏的可能性, 以及在该设备各个部件的辐射稳定性和热稳定性方面的限制。

影响屏蔽重量、外形尺寸和经济指标的重要因素还包括有: 屏蔽材料的正确选择、屏蔽各组成部分的最佳比例和相互配置, 在可能的情况下屏蔽按厚度仿形和正确选择屏蔽构形(见下文)。

反应堆屏蔽的设计和计算阶段 计算屏蔽内的辐射场是反应堆屏蔽设计的最重要组成部分。现从其在屏蔽设计中的重要性简单叙述反应堆各种辐射的特性(关于活性区的辐射特性已在§ 15.3中较详细地阐明了)。

1. 快中子会引起反应堆容器、反应堆结构件及屏蔽辐射脆化; 在含氢屏蔽内快中子决定着慢化中子的空间分布特性。

2. 中能中子对非含氢屏蔽外的辐射剂量率有重要的贡献。

3. 热中子会引起反应堆容器、顶盖和结构材料活化; 热中子形成俘获 γ 辐射源。

4. 瞬发 γ 辐射、裂变产物 γ 辐射以及来自活性区和屏蔽的俘获 γ 辐射的低能部分($E_\gamma < 3 \text{ MeV}$)对屏蔽内层的发热起主要作用。

5. 中子辐射俘获时主要产生的 γ 辐射的高能部分在大多数情况下对屏蔽外的辐射剂量率有重要的贡献。

在反应堆辐射屏蔽设计的第一阶段初步选择屏蔽材料, 为了计算辐射减弱, 必须知道其性质。其次, 根据屏蔽的基本要求, 必须规定反应堆不同房间(区域)内的容许辐射水平。按照辐射通量密度的大小和特性以及接近反应堆及其周围的可能性, 可有条件地划分出下列区域:

a) 辐射能通量密度大于 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的区域。在该区域内受照射的部件必须冷却, 而且会发生辐射损伤。

b) 中子能通量密度大于 $10^7 \sim 10^9 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的区域。此处活化 γ 辐射很强, 因此即便在停堆之后也往往不容许接近该区做维修工作。

c) 中子通量密度小于 $10^6 \sim 10^7 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的区域, 中子在结构材料中引起感生放射性, 其 γ 辐射通量产生的剂量比为在整个工作日工作所规定的容许限值水平高 $10 \sim 100$ 倍。在停堆

几昼夜后, 如果对前两区的辐射采取屏蔽措施, 并按要求清除载热剂回路有关部分设备的放射性沉淀物, 那么可短时间进入该区域 (作为例外)。

d) 具有这样辐射通量密度的区域, 其对应的剂量不超过为在整个工作班期间工作条件规定的容许限值水平的10~100倍。容许在该区内短时间停留 (1小时以内)。

e) 具有相当于容许限值水平辐射通量密度的区域——正常维护的区域。

确定不同区域内的容许辐射水平时, 要考虑人员到各房间的平均频度和进入时反应堆的平均功率水平。在很少进入的地方, 例如为了预防性检查和修理才进入的地方, 可以容许稍微提高辐射水平 (按现有的卫生规则和辐射安全标准)。在确定容许水平和最简单地估计反应堆辐射强度之后, 近似地确定屏蔽应当保证的减弱倍数 (对不同方向)。

其次, 借助适用于理想化几何条件的最简单的近似计算方法 (在许多情况下, 甚至不做很繁琐的次级 γ 辐射强度计算和减弱计算) 粗略估计 (即使作单群估计) 主要方向的屏蔽厚度。同时根据核动力装置 (也可以是另一类) 屏蔽设计和计算的经验和对忽略的次级 γ 辐射及屏蔽内存在管道和空洞的可能性采取某些余量。按照选定的构成类型, 并考虑本节开始所述的原则, 载热剂回路的大略形式、反应堆超负荷的必要性和装置的各种特点, 得到的结果可用来配置屏蔽。在屏蔽设计的初始阶段, 必须查明给定装置的所有特性: 是否存在受残余放射性制约的任何限制; 是否有局部拆卸屏蔽任何部分的必要性; 远距操纵系统是否对屏蔽有特殊要求等等。

当然, 在设计第一阶段所确定的屏蔽布置将随着进一步的设计而改变, 但这种布置有助于确定必须计算的参数, 有助于选择各个部分屏蔽的安放位置。在以后阶段可以用其它材料替代初选的屏蔽材料, 而这种替代可能是由于完成的计算的辐射水平所制约的。

然后, 按照下述方式对所研究的屏蔽方案的辐射场 (初级辐射场, 次级辐射场及其泛函数) 进行较严格的计算。

研究几个初级屏蔽结构方案之后, 便进行载热剂回路屏蔽的布置和计算。同时应设法使设备作这样的布置: 使它本身成为活性区屏蔽的一部分。载热剂放射性强度最大的回路区段最好如此布置, 使得其余的设备成为它的屏蔽。对于这些区段, 有可能需要局部屏蔽。

确定若干屏蔽方案的所有特征参数之后, 根据上述标准 (满足设计和运行要求, 经济性, 安全性等等) 选择最终的结构方案。对所选的屏蔽方案, 进行更为严格的精确计算。

反应堆屏蔽设计的实际过程可能比这种理想化的步骤更为复杂。首先, 按研究深度和详细程度分几个阶段综合地完成反应堆和所有核动力装置的设计。这时, 结构 (有时甚至装置方案) 有可能改变和复杂化。这些变化有可能引起设备和屏蔽的布置改变, 从而必须增加多次的屏蔽计算。其次, 在设计的最初阶段, 对计算精详程度的要求较高。作为估计, 可以说, 屏蔽外辐射场的计算精度提高50%、取消过多的安全系数并相应地减小屏蔽厚度, 可使屏蔽质量减少2%。

反应堆屏蔽计算的典型问题 不同类型反应堆 [石墨堆 (PBMK型等), 水-水堆 (BBΘP型), 以钠作载热剂的快中子堆 (BH型), 气冷堆等等] 的屏蔽结构, 除了各自的特点之外, 均服从某些一般的原则和规律。包括这些一般特征的核反应堆屏蔽的简化图示于图15.1。

在热中子反应堆侧反射层 (Отр) 外面或快中子反应堆活性区 (A3) 周围的侧增殖区*

* 在快中子反应堆内新裂变材料 (^{239}Pu 或 ^{233}U) 主要是在这个基本上含有 ^{238}U 或 ^{232}Th 的区内形成的。由活性区逸出的中子大部分在此区内被吸收。

(3B)外面,安置着由载热剂冲洗的容器内侧屏蔽(ББКЗ)。随后是反应堆容器壁(外壳),而在某些反应堆内(例如大功率压管式石墨堆РБМК)将它直接布置在反射层外面。在钠冷快中子反应堆内,在增殖区3B与容器内侧屏蔽(ББКЗ)之间(有时在ББКЗ中)配置乏燃料组件的内部贮存井(ВХ),而在ББКЗ与反应堆容器外壳(1)之间布置工艺设备:一回路泵,一、二回路载热剂之间的热交换器。在反应堆容器外面是堆腔(9)(反应堆竖井)和侧生物屏蔽(ББЗ),在其内层或在竖井(9)内(有时在ББКЗ内)通常安置电离室(ИК)。混凝土墙通常是生物屏蔽的主要部分。为了降低该混凝土的辐射和热载荷强度,用水箱(厚度60~120cm)或耐热混凝土层(“干”屏蔽)作为生物屏蔽的内层。在水箱与混凝土之间的空间有时用沙填充。

在上屏蔽,常常设置上屏蔽盖板(4),它不仅屏蔽活性区的辐射,而且屏蔽载热剂连接管的辐射以及金属结构的活化辐射。在反应堆竖井上面设置局部屏蔽(6)。

下面介绍上述系统组成部分的主要特点及反应堆设计和运行时对辐射场计算的要求。

活性区——初级辐射源(在§15.3详细叙述了这种源的辐射特性)。在大多数情况下,活性区由六面体形状的燃料组件(元件盒)*构成,其中每个组件包含大量的释热元件——薄壁(0.5~0.8mm)金属(在水-水反应堆内是锆)管内填满燃料(U,Pu),载热剂(水——在热中子反应堆中,钠——在快中子反应堆内,气体等等)流经其表面。在热中子反应堆内载热剂把释热元件隔开。

在结构上每个燃料组件都是活性区的基本栅元。在热中子反应堆内,这些栅元具有极为不均匀的结构。例如,在РБМК型反应堆内,栅元——正方形截面(尺寸20~25cm)的石墨块,在其中安置有工艺管(ТК),而在管内放置释热元件和流经载热剂。

活性区的形状近似于圆柱,有时是平行六面体。不同类型反应堆的活性区大小是不同的,但主要取决于反应堆功率。对于水-水反应堆:它的高度和直径约为几米;石墨反应堆:直径可达10m左右,高度从3m到7m,或更大些;快中子反应堆:高度约1m,直径达几米。

热中子反应堆的活性区由反射层包围。对于水-水反应堆,水反射层厚度为20~30cm,对于石墨反应堆,石墨反射层厚度为50~80cm。

快中子反应堆增殖层(3B)厚度约为30~50cm,中子通量密度大约被减弱到1/100。

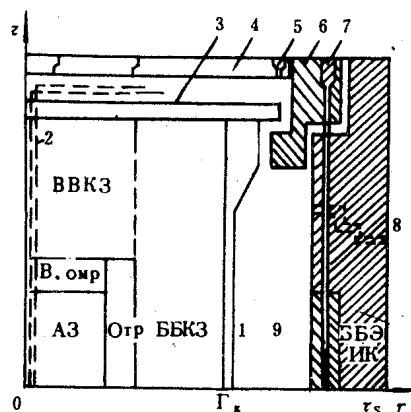


图 15.1 动力反应堆屏蔽上半部有效区段的布置简图

A3——活性区; Отр——侧反射层(或者3B——增殖区); ББКЗ——容器内侧屏蔽; Оомр——上反射层(或者增殖区); ББКЗ——容器内上屏蔽; ББЗ——侧生物屏蔽; ИК——电离室; 1——反应堆容器(外壳); 2——金属构件(工艺管道,控制保护系统的管道等等); 3——反应堆顶盖(顶板); 4——上屏蔽盖板重叠塔接; 5——入孔; 6——局部屏蔽; 7——电离室管道的屏蔽塞; 8——屏蔽内的管线通道; 9——反应堆竖井。

* 苏联核燃料组件的特点。——译者注

约1%的中子由此逸出。虽然如此,增殖层的中子泄漏绝对值还是非常大的,从增殖层逸出的中子通量密度大约为 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

活性区内裂变密度的计算(参阅§15.3)给出为随后确定反应堆屏蔽内辐射场用的辐射源分布。在大多数情况下,在这种计算中可以忽略释热元件内中子场的不均匀性,可以利用活性区二维 (r, z) [或有时用 (x, y)]均匀模型。然而,对整个活性区内的过程不重要的外围增殖区(如同A3)内的裂变密度分布,对于屏蔽内辐射场的计算可能是非常重要的。

活性区燃耗的不均匀性,控制棒的位置等等对精确描述屏蔽内辐射场的分布有影响。

反应堆物理计算结果能确定活性区内的 γ 辐射源:裂变 γ 光子,辐射俘获裂变产物及中子非弹性散射(参阅§15.3)的 γ 光子。

侧屏蔽。在反应堆侧辐射屏蔽延展体内辐射贯穿计算是最典型的屏蔽计算问题。在侧屏蔽内中子和 γ 光子通量的减弱倍数大约是 10^{10} 。屏蔽外辐射剂量当量率计算值 $(4.105)H(r_s)$ 的容许误差与提出的要求有关,一般要求计算值与实际值的差别不大于1倍。一般情况下,这些问题是三维的,然而广泛使用的是二维和一维模型。反应堆容器及靠近它安置的有关试件的辐照积分(辐射损伤积分或损伤剂量)是表征反应堆侧屏蔽的另一泛函数(参阅§15.6)

$$R(r_k) = \int \Sigma_R(E) \varphi(r_k) dE$$

(式中 Σ_R ——辐射损伤截面)这个积分量决定反应堆容器的服役期限,因此对其计算精度的要求相当苛刻:误差不大于10~15%。从活性区(或者增殖区)表面到反应堆容器,快中子通量密度的减弱倍数大约是 $10^3 \sim 10^4$ 。

在屏蔽设计时,也要求确定安置在反应堆容器外面空间的电离室受中子通量和 γ 光子通量(在反应堆各种功率水平下的)辐照的强度(从而,确定其布置位置)。这种中子通量和 γ 光子通量,在此情况下是有害的本底。当中子通量减弱倍数为 $10^4 \sim 10^5$ 时计算误差不大于20~30%。在反应堆低功率水平运行时(例如,在开堆时),由裂变产物的剩余辐射及活性区结构和反应堆屏蔽的活化辐射引起的这种本底的作用很大,它能决定控制和事故保护系统(CV3)的设计要求。这种本底的大小取决于先前的反应堆功率水平,在此功率水平上的运行时间,以及从停堆到关注时刻的时间间隔。

为了分析开堆条件,非常重要的是要知道在活性区和屏蔽内形成的光激中子入射到电离室的中子通量密度。这种光激中子是铍、氘原子核的 (γ, n) 反应产生的。在活性区的一个栅元内安置专用的启动中子源情况下分析反应堆首次启动(物理启动)条件时,这样的资料也是必需的。对于这种情况,需解决具有局部源的次临界系统内的中子分布计算问题。

表征反应堆屏蔽的泛函数还包括有:1)各层屏蔽和各区内的辐射释能(见第十六章),它对于屏蔽(反应堆容器内屏蔽,混凝土的热屏蔽和辐射屏蔽,混凝土)冷却方式的研究是必需的;2)相应冷却剂的活度;3)金属结构的活度(为了分析修理时接近它的可能性和为研究分析拆卸它时采取屏蔽措施,等等)和给定时效所对应的辐射剂量率。释能的计算误差,在活性区附近不应大于20~30%;在离活性区远的地方,不应大于50%,而活度计算误差同样不应大于50%。

辐射在反应堆屏蔽内的贯穿计算工作量取决于核动力装置的结构特点及其设计阶段。每一阶段的计算方法的选择由要求的计算精度决定。本节上面所列出的对不同泛函数的计算精度的要求,是反应堆屏蔽设计最后阶段的要求。在早期阶段,特别是作多方案屏蔽比较时,可以降低对精度的要求和利用较粗糙的计算方法(忽略活性区内辐射源分布细节的适用于均