

# 核电站水化学 控制工况

李宇春 朱志平 杨道武 李敬业 等编著



化学工业出版社

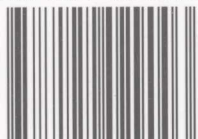
# 核电站水化学 控制工况



[www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

读科技图书 上化工社网

ISBN 978-7-122-02900-3



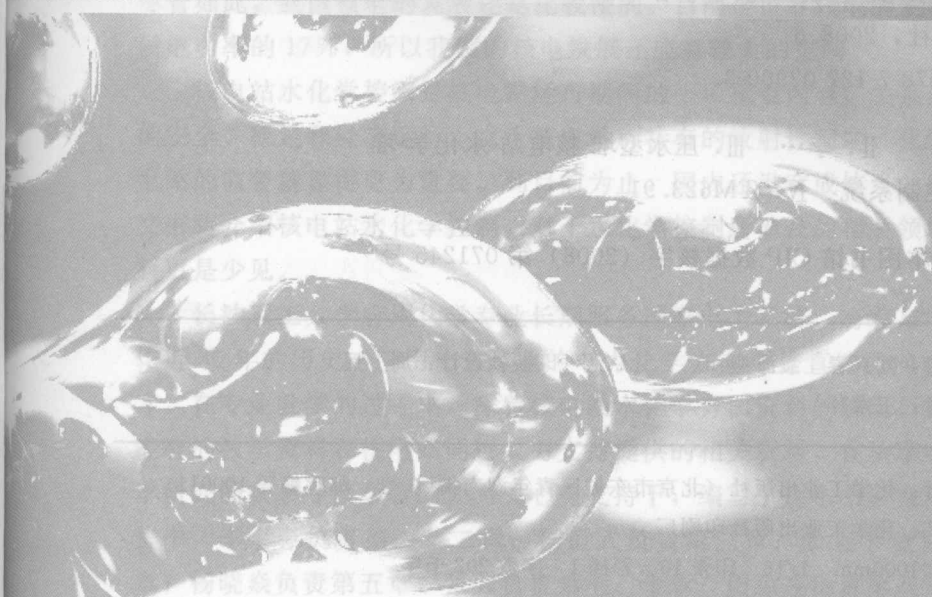
9 787122 029003 >

销售分类建议：能源/化学

定价：30.00元

# 核电站水化学 控制工况

李宇春 朱志平 杨道武 李敬业 等编著



化学工业出版社

·北京·



核电站水化学控制是核电站运行期间的一项重要内容，关系到整个核电厂的安全、稳定和经济运行。本书概括讲述了核电站的组成，重点介绍了压水堆核电站一回路和二回路的化学控制与监督，同时对先进型沸水堆及其水化学工况、国外核电厂设备防腐及水化学控制的发展进行了简要阐述。

本书适合核电站化学运行人员、电厂化学人员及管理人员参考；也可供高等院校相关专业师生参阅。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

核电站水化学控制工况/李宇春等编著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-122-02900-3

I. 核… II. 李… III. 压水型堆-核电站-水化学-堆内回路-控制系统 IV. TM623. 91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 071245 号

---

责任编辑: 刘兴春 袁海燕  
责任校对: 王素芹

装帧设计: 周 遥

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张 10 彩插 1 字数 202 千字

2008 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

核能民用是一件节能减排、利国利民的事情，核电在中国的发展还是20世纪80年代以后的事情，而在世界范围内核电已经有半个多世纪的历史。近年来，核电在我国发展迅猛，到2020年核电运行装机容量争取达到4000万千瓦，核电的发电容量达到国家总发电功率的4%；同时保持在建核电容量1800万千瓦，形势非常令人振奋，核电在我国具有广阔的发展前景。尽管如此，我国核电的发展还是比较慢的。目前全世界核电的发电容量占总发电功率的17%，所以我国的核电发展还应有较大的空间。

核电站水化学控制是核电站运行期间的一项重要内容，关系到整个电厂的安全、稳定和经济运行，由于核电站所特有的放射性问题，化工工况在核电站的监督就显得更为重要。到目前为止，国内还没有成体系的、专门的中文书籍介绍核电站水化学控制，对于水化学控制所涉及的相关领域的中文资料更是少见。

长沙理工大学应用化学专业长期服务国家电力系统，有着与电力行业合作近30年的历史，应用化学专业的电力化学方向更是直接面向电厂培养人才，在专业教学的过程中，深感核电站水化学方面资料的匮乏。我们结合已有的教学资料和核电站同行大力支持提供的相关资料，在从事电力行业科学研究的众多专家学者的大力关心与支持下，编写了这本书。在本书编著过程中，李宇春负责第一、二章；杨道武负责第三章；朱志平负责第四、六章；杨晓焱负责第五章；张芳负责第七、十章；周琼花负责第八章；李敬业负责第九章。

在本书的编写过程中，得到很多单位的大力支持，他们是广东大亚湾核电站、江苏田湾核电站、广东阳江核电站、中广核苏州热工研究院、中广核深圳设计公司、华能西安热工研究院、广东电力科学研究院、武汉大学、东北电力大学、湖南电力科学研究院等，在此表示衷心感谢。

本书的出版得到了长沙理工大学校级规划教材的经费资助、长沙理工大



# 目 录

第一章 核电基础	1
第一节 热力学及辐射化学基础	1
第二节 放射性及来源	6
第三节 核反应堆原理	8
阅读材料	12
思考题	13
第二章 核电站概况	14
第一节 压水堆核电厂	14
第二节 沸水堆核电厂	18
第三节 快中子增殖堆核电厂	19
第四节 核电厂的安全措施	20
第五节 大亚湾核电厂的构成	22
阅读材料	27
思考题	31
第三章 压水堆一回路系统	32
第一节 反应堆冷却剂系统	32
第二节 反应堆本体系统	35
第三节 稳压器	41
第四节 化学和容积控制系统	44
第五节 反应堆硼和水的补给系统	51
第六节 其他核岛辅助系统	54
思考题	63
第四章 核电厂一回路系统材料的腐蚀	64
第一节 核电厂一回路系统的材料	64
第二节 燃料包壳材料的腐蚀	68

第三节	蒸汽发生器材料的腐蚀	72
思考题		77
<b>第五章</b>	<b>核电厂一回路的水化学控制</b>	<b>78</b>
第一节	核电厂一回路系统的化学功能	78
第二节	功率运行条件下的化学控制	80
第三节	核电厂化学控制的优化	85
思考题		89
<b>第六章</b>	<b>压水堆二回路系统</b>	<b>90</b>
第一节	压水堆二回路系统的设备	91
第二节	二回路水工况的要求	99
第三节	二回路水质控制方法	102
第四节	常规岛辅助厂房建筑 (CI/BOP)	106
阅读材料		108
思考题		108
<b>第七章</b>	<b>蒸汽发生器的水质处理与控制</b>	<b>109</b>
第一节	蒸汽发生器的组成与结构特点	109
第二节	蒸汽发生器的水化学控制标准	112
第三节	二回路的水质要求与控制	115
思考题		118
<b>第八章</b>	<b>二回路水质控制的优化方法</b>	<b>119</b>
第一节	局部浓缩过程的影响作用	119
第二节	调节水质、降低水的侵蚀性、防止流动闭塞条件形成的方法	122
第三节	高浓度联氨控制法	124
第四节	pH 值和 ORP 优化控制铁腐蚀产物传递法	125
第五节	蒸汽发生器沉积物控制法	127
思考题		128
<b>第九章</b>	<b>先进型沸水堆及其水化学工况</b>	<b>129</b>
第一节	先进型沸水堆概况	129
第二节	核蒸汽供应系统的主要设备与材料	130
第三节	ABWR 水化学策略	136
第四节	ABWR 的水质控制	139



思考题.....	142
第十章 国外核电厂设备防腐及水化学控制的发展.....	143
第一节 新型沸水堆冷却剂高温净化处理技术.....	143
第二节 燃料包壳腐蚀产物的新认识.....	143
第三节 辐射对 RPV 不锈钢表面电化学腐蚀电位 (ECP) 的影响 ..	144
第四节 核电厂水化学工况技术的发展.....	145
附录 1 英语缩写词及词汇 .....	147
附录 2 核电厂常用材料示意 .....	150
参考文献.....	151

在核电厂,核能转变为机械功是通过热力循环来完成的。核燃料的链式裂变反应产生的高温热源将热能传递给工质水,水受热产生蒸汽并送至汽轮机做功,完成热功转换;做功后的乏汽排入凝汽器向冷源放热并凝结成水,水经过升压后送往高温热源,恢复其初始状态,然后再重新获得热能,从而构成热力循环,如此周而复始,使热功转换过程连续进行。

### 一、理想循环的分析

对热力循环的研究是建立在热力学第一定律及第二定律的基础上,对实际热力循环的研究一般分为两个步骤:首先将实际循环而化为理想的可逆循环,即暂时忽略不可逆因素的影响,研究影响热力循环热效率的主要因素以及为提高热效率而采取的措施;然后,在研究理想可逆循环的基础上,进一步研究实际循环中存在的不可逆损失,研究减少不可逆损失的方法,分析可能提高热经济性的程度。

对于所有的热功转换过程,热效率定义如下

$$\eta = \frac{\text{输出功}}{\text{从热源获得的热量}} = \frac{W}{Q_1} \quad (1-1)$$

对于理想循环,有

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (1-2)$$

式中:  $Q_1$ ——自高温热源获得的热量;  
 $Q_2$ ——向低温热源放出的热量。

热力学第二定律指出,在相同温度界限内的任何热力循环,其效率不可能高于卡诺循环的效率。

卡诺循环是由两个定温过程及两个绝热过程组成的理想循环。工质在同温度的  $T_1$  下,自高温热源吸入热量  $Q_1$ ,在可逆绝热膨胀过程中,工质温度

# 第一章 核电基础

## 第一节 热力学及辐射化学基础

在核电厂，核能转变为机械功是通过热力循环来完成的。核燃料的链式裂变反应产生的高温热源将热能传递给工质水，水受热产生蒸汽并送至汽轮机做功，完成热功转换。做功后的乏汽排入凝汽器向冷源放热并凝结成水，水经过升压后送往高温热源，恢复其初始状态，然后再重新获得热能，从而构成热力循环。如此周而复始，使热功转换过程连续进行。

### 一、理想循环的分析

对热力循环的研究是建立在热力学第一定律及第二定律的基础上。对实际热力循环的研究一般分为两个步骤：首先将实际循环简化为理想的可逆循环，即暂时忽略不可逆因素的影响，研究影响热力循环热效率的主要因素以及为提高热效率而采取的措施；然后，在研究理想可逆循环的基础上，进一步研究实际循环中存在的不可逆损失，研究减少不可逆损失的方法，分析可能提高热经济性的程度。

对于所有的热功转换过程，热效率定义如下

$$\eta = \frac{\text{输出功}}{\text{从热源获得的热量}} = \frac{W}{Q_1} \quad (1-1)$$

对于理想循环，有

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (1-2)$$

式中  $Q_1$ ——自高温热源获得的热量；

$Q_2$ ——向低温热源放出的热量。

热力学第二定律指出，在相同温度界限内的任何热力循环，其效率不可能高于卡诺循环的效率。

卡诺循环是由两个定温过程及两个绝热过程组成的理想循环。工质在同温度的  $T_1$  下，自高温热源吸入热量  $Q_1$ ，在可逆绝热膨胀过程中，工质温度

自  $T_1$  降低到  $T_2$ 。然后，工质在温度  $T_2$  下向同温度的低温热源放出热量  $Q_2$ 。最后，经过可逆的绝热压缩过程，工质温度由  $T_2$  升高到  $T_1$ ，完成一个可逆循环。卡诺循环的热效率公式如下

$$\eta_c = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \quad (1-3)$$

卡诺循环奠定了热力学第二定律的基础。它指出，从高温热源获得的热量，只有一部分可以转化成为机械功，而另一部分热量转移到低温热源。

从卡诺循环的分析可以得到三条重要结论：

① 卡诺循环确定了实际热力循环的热效率可以接近的极限数值，从而可以度量实际热力循环的热力学完善程度；

② 卡诺循环对如何提高热力循环的热效率指出了方向，即尽可能提高工质吸热时的温度，以及使工质膨胀至尽可能低的温度，在接近自然环境温度下对外放热；

③ 对于任意复杂循环，提出了广义卡诺循环的概念，即以平均吸热温度  $T_1$  及平均放热温度  $T_2$  来代替  $T_1$ 、 $T_2$  的概念，两者具有相同的热效率。

## 二、核电厂的实际循环

核电厂大多数使用饱和蒸汽，但不采用卡诺循环。主要原因是在绝热膨胀末期，蒸汽湿度很高，汽轮机不能安全运行，同时不可逆损失增大。其次，在低温放热结束时，蒸汽-水混合物的比体积很大，湿蒸汽压缩会给泵的设计与制造带来难以克服的困难。

鉴于以上原因，采用饱和蒸汽的蒸汽动力装置不能实现卡诺循环。核电厂蒸汽动力装置的热功转换过程，是在朗肯循环加以改进的基础上完成的。理想朗肯循环是研究各种复杂的蒸汽动力装置的基本循环。

## 三、辐射化学

### 1. 辐射化学的概念

辐射化学是研究电离辐射与物质相互作用时产生的化学效应的化学分支学科。电离辐射包括放射性核素衰变放出的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线，高能带电粒子（电子、质子，氦核等）和短波长的电磁辐射。由于裂变碎片和快中子能引起重要的化学效应，它们也可用作电离辐射源。

电离辐射作用于物质，导致原子或分子的电离和激发，产生的离子和激发分子在化学上是不稳定的，会迅速转变为自由基和中性分子并引起复杂的

化学变化。已知的辐射化学变化主要有辐射分解、辐射合成、辐射氧化还原、辐射聚合、辐射交联、辐射接枝、辐射降解以及辐射改性等。

## 2. 辐射化学的研究领域

辐射化学的形成和发展，促进了人们对化学基本规律的研究，从而建立了新的快速反应研究方法，使研究深入到微观反应领域；同时也促进了生物化学的研究，如测定酶的单电子氧化还原电位、模拟细胞膜上物质的还原过程等。

辐射化学的研究领域可细分为气体辐射化学、水和水溶液辐射化学、有机物辐射化学、固体辐射化学、剂量学、有机化合物的辐射合成、高分子辐射化学和辐射加工工艺学。

## 3. 辐射化学的特点

辐射化学反应与普通化学反应相比，具有一些比较明显的特点：由电离辐射引起的原初激发态、离子态常具有极高的能量和活性，用光化学的方法一般难于产生；在射线通过介质产生的径迹周围，活性粒种形成一种特殊的分布，一组组紧挨在一起的激发分子和离子的群团不均匀地分布于空间；电离辐射与介质相互作用时，介质吸收能量是无选择性的，而光子只有在光量子值等于介质分子或原子中某一定能级差时，才能被吸收而引起原子和分子的跃迁。

电离辐射可在低温下使物质产生活性粒种，而这些活性粒种在通常的化学反应中常需在高温条件下产生。因此，利用辐射化学反应常可在低温、常温下进行工业生产，避免易爆的高温高压反应。

## 4. 辐射化学效应

电子射线经散射、电离致辐射等作用后，消耗了大部分能量，速度大为减慢，有的被所经过的原子所俘获，使原子或原子所在的分子变成负离子，有的与阳离子相碰发生阴、阳离子湮灭，放出两个光子，其光子对被照射物的作用与上述的光子一样。

为了防止被照射物诱发产生放射性，电子射线的能量不得超过 10MeV，大多数采用 5MeV。辐射化学效应的强弱用  $G$  值表示，所谓  $G$  值就是介质中每吸收 100eV 能量时发生变化的分子数。

例如，麦芽糖溶液经过辐射发生降解的  $G$  值为 4.0，则表示麦芽糖溶液每吸收 100eV 的辐射能，就有 4 个麦芽糖分子发生降解。不同介质的  $G$  值可能相差很大， $G$  值大的，辐射引起的化学效应较强烈； $G$  值相同者，吸收



剂量大者所引起的化学效应较强烈。例如 G 值等于 3, 吸收剂量为 1Mrad 时, 每千克介质发生变化的物质的量为  $3.1 \times 10^{-6}$  mol, 剂量提高到 6Mrad 时, 则每千克发生变化的物质的量达  $1.9 \times 10^{-2}$  mol。

#### 5. 辐射化学的发展趋势

目前, 辐射化学发展的趋势大致分为三个方面。

(1) 强化基础研究 加强辐射化学的基础研究, 特别是对短寿命中间产物的研究。这方面的研究在于探索辐解产物的形成过程及其规律并发展为基础化学的一部分, 后者尤为其他化学家所重视, 例如溶剂化电子不仅为辐射化学的研究对象, 在光化学、电化学中也必须加以考虑。使用辐射化学的方法可以获得较其他方法更纯的正负离子。20 世纪 70 年代以来, 由于实验技术的突飞猛进, 如脉冲辐射技术和快速响应技术, 以及低温技术在辐射化学中的应用, 短寿命中间产物的研究获得迅速的发展。

(2) 与生物学结合紧密 近 40% 的辐射化学研究与生物学有关, 研究的对象从糖到酶, 几乎涉及整个生物物质领域。由于放射生物学的研究达到放射分子生物学水平, 必然要求辐射化学与其相结合, 而辐射化学的基础研究如辐射敏化和保护的研究, 直接与阐明辐射损伤机理、肿瘤放射治疗有关。此外, 脉冲辐解和  $\gamma$  辐解是研究生物化学过程的一种新方法。出现了一些有希望的研究课题, 如辐射引起的生命物质合成、模拟细胞膜的胶束分界面, 辐射水溶液化学和化学与辐射相结合的生物效应。

(3) 应用研究日益广泛 加速辐射化学应用的研究, 其中高分子辐射化学仍为主要方向, 又开辟了一些新的应用研究领域, 如辐射在食品保藏、环境保护、生物医学工程中的应用, 辐射能的化学储存和辐射在考古学中的应用等。

#### 四、辐射的计量单位

放射性标准以单位时间内发生的核衰变数来计量, 单位为贝可 (Bq)。20 世纪初, M. 居里用铀矿石的放射性引起电离电流的大小来比较其含铀量。1910 年辐射学和电学大会决定成立一个委员会来建立镭的国际标准样品并由 M. 居里和 O. 赫尼希施密德分别承制。

1911 年镭标准开始问世, 该镭标准是用称重法标定的, 实属质量标准。但当测定了它们的衰变率之后, 镭标准也就同时成为放射性活度标准, 其单位为居里 (Ci)。1Ci 定义为相当于 1 克镭 (与子体平衡) 的衰变率, 其数值

约为每秒  $3.7 \times 10^{10}$  次衰变。实际上此值较 1 克镭衰变率高，故 1950 年第六届国际辐射学大会正式规定了以每秒  $3.700 \times 10^{10}$  次衰变为 1Ci，从此放射性标准便与镭标准脱离而成为一种新的标准。

1975 年国际辐射单位与测量委员会为了将放射性标准统一于国际单位制 (SI) 体系，规定放射性活度单位为贝可 (Bq)。四种放射性计量单位的对比关系见表 1-1。

表 1-1 放射性计量单位的对比

项 目	名称	单位	内 容	说 明	
放射性物质的量	放射性强度 (A)	居里 (Ci)	1Ci 相当于 1s 内有 $3.7 \times 10^{10}$ 个原子衰变	$1\text{Bq} = 1 \text{ 衰变/秒} \approx 2.073 \times 10^{-11}\text{Ci}$	
对物质所吸收的辐射能量的量度	吸收剂量 (D)	拉德 (rad)	1rad 相当于每 kg 物质吸收 $10^{-2}\text{J}$ 的能量	1 戈瑞 (Gy) = $1\text{J/kg} = 100\text{rad}$	
剂 量	用 X 或 $\gamma$ 射线使空气产生电离的程度来衡量照射的强度	照射量 (X)	伦琴 (R)	1R 相当于光子在 1kg 空气中因电离而产生总电荷为 $2.58 \times 10^{-4}$ 的正负电子对	
	从生物效应来度量辐射的作用	剂量当量 (H)	雷姆 (rem)	剂量当量在数值上等于吸收剂量乘以射线的品质因数和其他修正因子	1 希沃特 (Sv) = 100 雷姆

### 1. 放射性强度的单位

放射性强度是度量放射性强弱的物理量，常用的单位有居里 (Ci)、贝克 (Bq) 和克镭当量。

### 2. 照射量及其单位

照射量 (exposure) 是用来度量放射性同位素放射出的射线，即度量 X 射线或  $\gamma$  射线在空气中电离能力的物理量，其单位为伦琴 (R)。

### 3. 吸收剂量、剂量率及其单位

吸收剂量是用来度量被辐射物体吸收量，即被照射物质所吸收射线的能量称为吸收量，其单位为拉德 (rad) 或戈瑞 (Gy)。

### 4. 剂量当量、剂量当量率及其单位

剂量当量就是用来度量不同类型的辐射所引起的不同生物学效应，其单位为雷姆 (rem) 或希沃特 (Sv)。单位时间内的剂量当量称为剂量当量率，其单位用  $\text{rem} \cdot \text{s}^{-1}$  或  $\text{rem} \cdot \text{h}^{-1}$  等表示。

## 五、最大容许剂量当量值

为了保障从事放射性工作人员的健康和居民的安全，世界各国都对辐射

的量进行了严格的指标控制。最大容许剂量当量的定义为：任何一个工作人员在长期从事放射性工作的过程中，只要不超过这个量，那么从现有的经验来看，不会给人体健康造成有害的影响（包括器官损伤和后代遗传）。我国的相关标准规定：职业放射性工作人员，其全身照射的终身累积剂量不超过 250rem，即 2.5Sv。

核电站的运行经验表明：放射性物质进入人体的主要原因是由于空气或者公用水中出现了放射性物质的结果。因此，首先必须对可能被污染区域实行严格管理，为此，在核电站的相关规定中，明确指出了放射性同位素在空气和水中的最大容许浓度，参见表 1-2。

表 1-2 重要放射性同位素的最大容许浓度和限制浓度

放射性同位素			露天水源中的	放射性工作场所空气中的
名称	符号	半衰期/年	限制浓度(Ci/L)	最大容许浓度/(Ci/L)
氚	$^3\text{H}$	12.26	$3 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-9}$
碳	$^{14}\text{C}$	5.730	$1 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-9}$
钴	$^{60}\text{Co}$	5.26	$1 \times 10^{-8}$	$9 \times 10^{-12}$
氪	$^{85}\text{Kr}$	10.6		$1 \times 10^{-8}$
锶	$^{90}\text{Sr}$	28	$7 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-12}$
碘	$^{131}\text{I}$	8.05	$6 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-12}$
氙	$^{133}\text{Xe}$	5.27		$1 \times 10^{-8}$
铯	$^{137}\text{Cs}$	30	$1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-11}$
天然铀	U	$4.51 \times 10^9$	0.05mg/L	0.02mg/m <sup>3</sup>
铀	$^{235}\text{U}$	165000	$1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-13}$
钚	$^{239}\text{Pu}$	24400	$1 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-5}$

## 第二节 放射性及来源

### 一、放射性

放射性是自然界存在的一种自然现象。世界上一切物质都是由一种叫“原子”的微小粒子构成的，每个原子的中心有一个“原子核”。

大多数物质的原子核是稳定不变的，但有些物质的原子核不稳定，会自发地发生某些变化，这些不稳定原子核在发生变化的同时会发射各种各样的射线，这种现象就是人们常说的“放射性”。有的放射性物质在地球诞生时就存在，如铀、钍、镭等，它们被叫做天然放射性物质。天然放射性元素储于地球上一切物质中，包括岩石、水、土壤、动植物、人体本身。天然放

放射性元素在自然界有几十种，分属于三个系列：铀 238 系（铀系）、铀 235 系（钍系）、钍 232 系（钍系）。

另一方面，人类出于不同的目的制造了一些具有放射性的物质，这种物质叫人工放射性物质。还有许多天然放射性同位素和人工放射性同位素和人工合成新元素。

## 二、放射性的危害

放射性元素发出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三种射线。 $\alpha$  射线是  $\alpha$  粒子（氦原子核）流， $\beta$  射线是  $\beta$  粒子（电子）流，统称粒子辐射。类似的还有中子射线、宇宙射线等。 $\gamma$  射线是波长很短的电磁波，称为电磁辐射。类似的还有 X 射线等。

这些射线的共同特点是：有一定穿透物质的能力；人的五官不能感知，但能使照相底片感光；照射到某些特殊物质上能发出可见的荧光；通过物质时有产生电离作用。放射性对人体的损伤主要是体内照射。主要由  $\alpha$  射线造成。

放射源发射出来的射线具有一定的能量，它可以破坏细胞组织，从而对人体造成伤害。当人受到大量射线照射时，可能会产生诸如头昏乏力、恶心、呕吐等症状，严重时会导致肌体损伤，甚至可能导致死亡；但当人只受到少量射线照射（例如来自天然本地辐射的照射）时，一般不会有不适症状发生，也不会危害身体。

此外还有体外照射，主要由  $\gamma$  射线造成。体外照射需要有足够量的经人工浓缩后的放射性物质（如人工提纯的镭元素），在没有防护的人体身上停留足够长的时间，或战争中的核武器爆发产生大量  $\gamma$  射线辐射才能引起人体相应程度的损伤。

## 三、核电站的辐射来源

核电站的辐射来源可以分为两个主要区域来介绍：安全壳内区域和安全壳外区域。

### 1. 安全壳内的辐射源

当压水堆核电站带功率运行时，安全壳内主要有三种辐射源，即中子、 $\gamma$  射线和辐照产物。

中子是由堆芯的裂变过程直接产生的，其中高能中子（即快中子，能量大于 1MeV）约占总发射中子的 2/3；其余的为热中子（能量小于或等于



0.625eV)，主要依靠快中子慢化而产生。

$\gamma$ 射线是在活性区和结构材料内产生的。活性区内的 $\gamma$ 射线包括裂变、中子俘获和中子非弹性散射过程的 $\gamma$ 射线源；结构材料俘获中子将产生 $\gamma$ 射线，成为活性区附近区域内的次级 $\gamma$ 射线源。另外，冷却剂内的氧俘获中子会产生 $^{16}\text{N}$ ， $^{16}\text{N}$ 的半衰期为7.11s，衰变时放出能量高达6.13MeV和7.12MeV的 $\gamma$ 射线。

压水反应堆停闭后，活性区内或其附近材料的感生放射性成为安全壳内的重要辐射源。在一回路系统中，腐蚀产物或其他杂质在冷却剂流动时被带到堆内，经中子辐照成为放射性物质。由于一回路系统材料主要采用不锈钢，所感生的放射性物质主要是 $^{56}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 和 $^{65}\text{Ni}$ 等。

## 2. 安全壳外的辐射源

安全壳外有辐射源的设备或系统主要有：化学和容积控制系统、硼回收系统、三废处理系统及其相应管道。

由于冷却剂和腐蚀产物被活化，以及含有裂变产物（如元件破损）而带有放射性。从冷却剂系统排放出的冷却剂通过下泄管道和再生热交换器降温，再通过混合床离子交换器去除放射性。所以，离子交换器和过滤器成为最强的辐射来源。

# 第三节 核反应堆原理

## 一、能源与核能利用

### 1. 能量资源分类

能（即能量）是物质运动的量度。能量资源按来源可分为：来自地球以外的太阳能，包括太阳辐射能、化石资源（煤、石油、天然气等）、生物质能、水能、风能、海洋能等；地球本身蕴藏的能力资源，储藏于地球内部的地热能，地球上的铀、钍等核裂变能资源和氘、氚、锂等核聚变能资源；地球、月亮和太阳等天体之间有规律的运动所形成的能，如潮汐能。煤、石油及天然气、水电、核能称为“四大能源”。能源有不同的分类方法：如按可否再生分为可再生能源（如水力）与非再生能源（如石油、天然气等）；按能源来源可分为常规能源（如煤、石油、天然气等）与新能源（如核聚变能）。从能源系统的各个环节来看，能源形式可以分为：一次能源、二次能