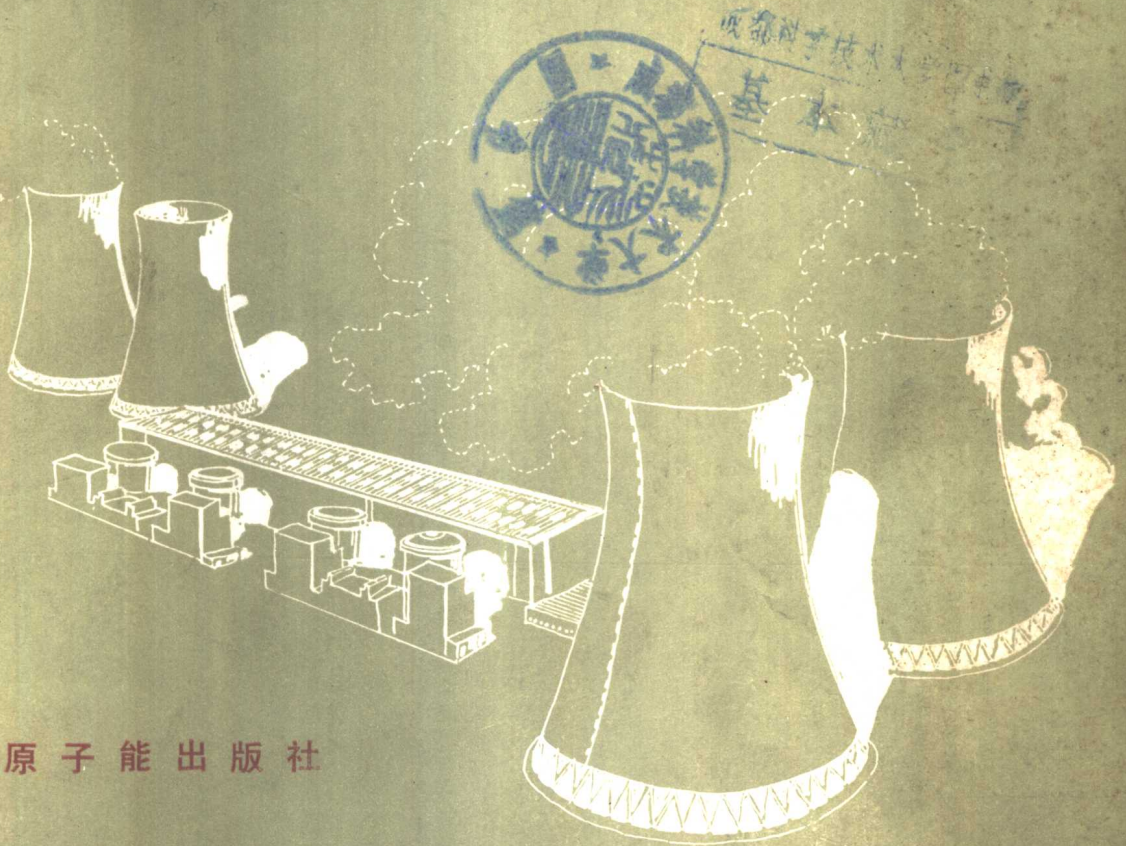


773136

50313

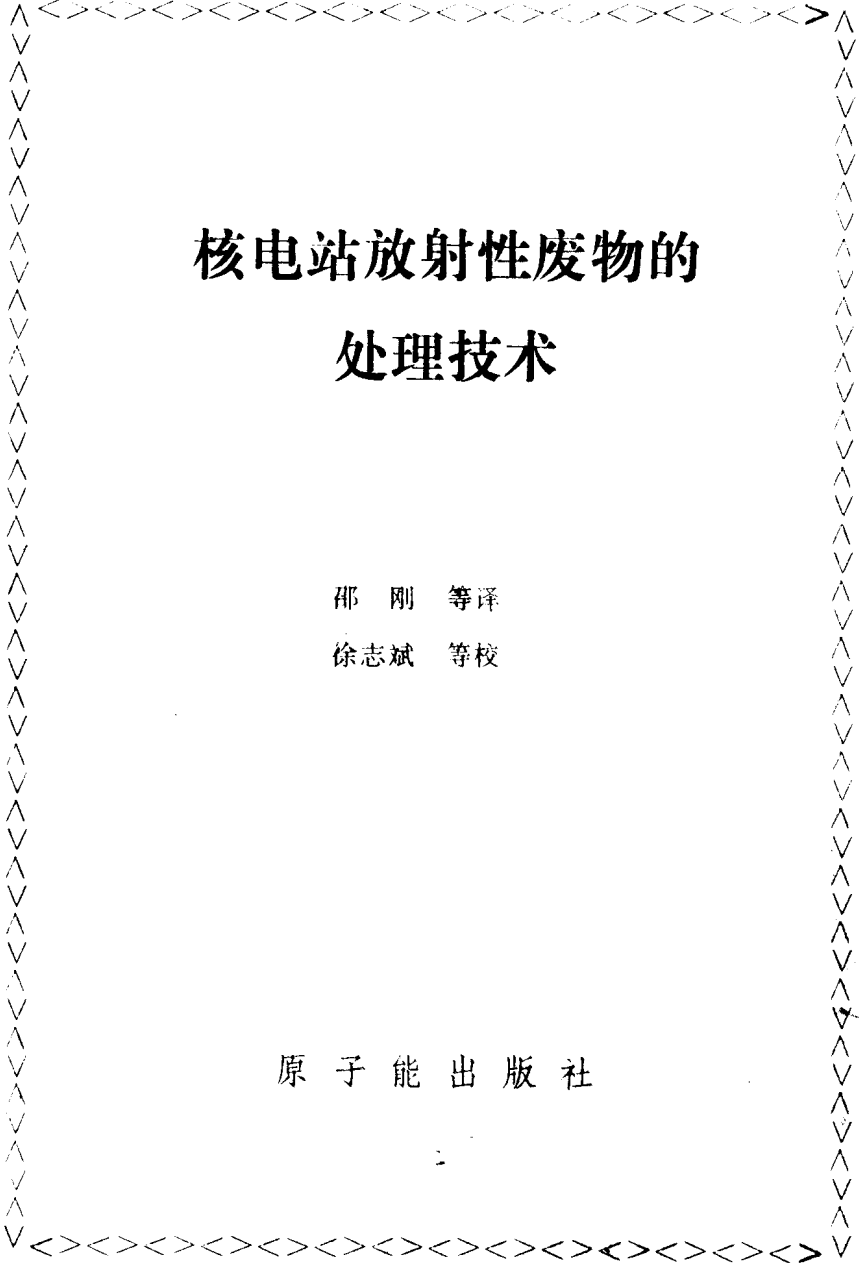
177

核电站 放射性废物的 处理技术



原子能出版社

13



核电站放射性废物的 处理技术

邵 刚 等译

徐志斌 等校

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本译文集选入了美国、日本、西德、比利时、加拿大、瑞典、捷克斯洛伐克关于核电站放射性废物处理的文章共二十三篇。内容包括核电站的放射性废气、废液、固体废物的处理和处置,介绍了处理轻水堆类型的废物的经验和一些国家处理核电站废物的经验,尤其着重介绍了核电站产生的非高放废物的处理和处置。

本译文集可供从事核工业、核电站、三废处理、环境保护、给水排水等专业的工人、科技人员、管理人员参考,也可供大专院校有关专业的师生参考。

核电站放射性废物的处理技术

邵 刚 等译

徐志斌 等校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787\times 1092^{1/16}$ ·印张 $17^{1/2}$ ·字数420千字

1985年4月第一版·1985年4月第一次印刷

印数1—2000·统一书号: 15175·573

定价: 3.20元

译 序

二十多年来，许多国家先后建造了核电站，核电作为新型的能源正在迅速地发展。据联合国国际原子能机构公布的年度报告，到1982年年底，世界上二十四个国家和地区正在运行的核电站共298座，发电总能力为17599.3万千瓦（已停堆的核电站未计算在内）；目前还有216座核电站正在建造，发电总能力为20507.8万千瓦。在我国，核能目前正处于开发阶段，随着工业、农业、国防和科学技术的发展，对能源的要求会迅速增长，核能利用必然会引起人们的更大兴趣和重视。

随着核能的发展，放射性废物的数量必然会急剧增加。对它们如果不能妥善地处理和处置，就会给人类和环境带来严重威胁，也会使核能的发展受到严重影响。因此，核电站放射性废物处理问题是核能发展中必须解决的一个重要课题。

许多国家对核电站放射性废物处理进行了大量的研究，取得了不少经验，有些已付诸于生产实践。近年来，国外发表了许多有关核电站放射性废物处理的文章，国际原子能机构及一些国家也召开了核动力及其核燃料循环的国际会议，交流了核电站放射性废物处理的经验。本译文集的出版，对解决我国核电站建设和运行中所面临的三废处理问题，具有一定的参考价值。

由于译者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

1983年6月

目 录

译序

放射性废物的处置.....	(1)
美国非高放废物的处理技术.....	(36)
加拿大核燃料和核电站的放射性废物的管理.....	(69)
瑞典核电站废物的处理.....	(80)
敦贺核电站废物处理新设备的设计、建造和运行.....	(88)
贡德雷明根核电站放射性废物的处理.....	(98)
压水堆放射性废物处理站的发展趋势 展望.....	(110)
轻水堆废液的运输和 固 化.....	(117)
核电站湿固体废物的 固 定.....	(120)
放射性废物处理 系 统.....	(126)
核电站放射性废物的 管 理.....	(136)
推荐用于核电站放射性废物的固化材料的 评 价.....	(145)
核电站低放废物的固化 处 理.....	(152)
中放废物处理的 研 究.....	(164)
核电站离子交换树脂再生废液的处理 装 置.....	(172)
用电渗析法从核废液中去除放射性 离 子.....	(176)
用沸石离析和除去核电站废液中长寿命铯的初步 研 究.....	(183)
核废液中 ^{137}Cs 的 分 离.....	(191)
超铀元素的回收和非高放废物的固化 技 术.....	(200)
轻水堆放射性废物的来源及其物理、化学 性 质.....	(221)
两个核电站的液体流出物和气载流出物的排 放 量.....	(227)
用于轻水堆废气体积减少和放射性水平降低的处理 技 术.....	(242)
处理核电站工艺用水和 (或) 废水所用的单元 操 作.....	(258)

放射性废物的处置

Erik S. Peclersen*

一、引言

为了获得建造核电站的许可，申请书应包括按照联邦法规全书10CFR20中的要求，防止放射性废水、废气污染环境的厂内措施，以使排于环境中的放射性物质保持到理应能够达到的最低水平。对于废气来说，这些防范措施可能包括对从第一回路冷却剂中排出的惰性气体进行衰变贮存，以及用活性炭吸附器或HEPA过滤器去除从建筑物通风系统中排出的放射性碘和放射性颗粒。对于废液来说，这些措施可能包括衰变贮存、脱除矿质、反渗透和蒸发。

放射性废物管理系统的作用是减少放射性物质释放至环境中的数量。本文将介绍为了有效、安全而且经济地处理与处置核电站运行时产生的放射性工艺废物而设计的系统。因此，放射性废液系统是为了减少要排放于环境的废液的体积而设计的，其措施是对废液进行处理以便在核电站内最大程度地加以重复使用。

通过排放前的间歇处理以及（或者）连续监测，这些系统保证计划中的往环境的允许排放不超过放射性的某一低水平。这一水平通常不超过10CFR50的附录I中的“实际上能够达到的低水平”的准则，它通常比在联邦法规全书10CFR20中由美国核管理委员会（NRC）制定的标准低几个数量级或与美国以外的国际辐射防护委员会（ICRP）的限额相当。对核动力设施的环境进行监测，对排出废物的管理起着检查作用，并且提供可估算出公众所受到的辐照剂量的数据。

以气溶胶、蒸汽或气体形式从核电站释放至大气的放射性物质的迁移和稀释，与排烟途径中大气的状态、当地的地形和废气本身的特性有关。对于日常的空中排放，在核电站周围地区的放射性浓度取决于：排放废物的数量；排放高度；排烟的动量和浮力；当地的风速、大气的稳定性和气流型式；以及排放物的各种去除机理。地理特征，如山丘、山谷和大的水体，对分散作用和气流型式都有很大影响。地面凹凸不平，包括植物植被在内，影响紊流混合的程度。具有相似的地形和气象特征的场所可能有相似的分散和空气流动形式，但是每一场所的详细分散流谱通常是各有独特之处的。核电站排放废气，大都通过高烟囱或靠近建筑物顶部的排气孔排出。

某些核电站的设计可能导致废物由其它途径排出。例如，辅助设备和主要设备如汽轮机可能安装在建筑物之外；废物可能在地面附近从这些设备中释出。

10CFR50附录I中的第II.D节，“符合轻水冷却核动力反应堆排出物中的放射性物质能达到切实可行的最低水平的准则的设计项目和运行极限条件的数据指南”中，“对核生产和应用设施的批准”要求，轻水冷却核动力反应堆的放射性废水和废气系统包括所有被证明合理的技术项目，当把它们依次加入系统中，并且为了减少费用与收益的比例而选一适宜的

* 美国纽约州长岛东梅多斯核动力咨询处。

费用/收益比,它们能使预计处于反应堆50英里之内的居民的辐射剂量有效地减少。取1000美元/人·雷姆和1000美元/人·甲状腺·雷姆作为临时标准,随后将研究和制定更好的标准。如要遵照10CFR50附录I中的II. D节(它专门提到对公众的剂量)以及第II. A、II. B和II. C节(它专门提到核设施附近的个人的剂量),就需要符合“理应能够达到的最低水平”(ALARA)的准则。

为了履行附录I的要求,美国核管理委员会(NRC)的工作人员补充制定了一系列标准,它们提供一些方法用来计算废物往大气和不同的水体中排放和分散对人产生的辐射剂量,以及关于处理放射性废物的费用/收益比率的一些看法,还提供了对放射性废液和废气系统设备进行费用/收益分析的方法。这些题目将在本章内与一些实际的设计数据一同论述。

上面的一些标准列于参考文献和书目中^[1-5]。

二、放射性废物的来源

(一)废 水

1. 沸水堆和压水堆的废水

水和蒸汽中的放射性来源于反应堆冷却剂的活化,腐蚀产物的活化和由于燃料元件破损而产生的裂变产物。放射性物质既可能以溶解的形式也可能以不溶解的形式存在。在废物收集设施中积累的放射性废液,主要来自核电站中的各种特种排水沟、过滤器-脱矿质器(如果存在的话)的反冲洗,以及主回路系统设备的多种部件的偶尔的化学去污染。放射性废液的其它来源有核电站设备的泄漏,实验室和洗衣房废水和地面排水。

净化废液的工艺是为人们所熟悉的,而且颗粒状和低浓溶解的离子是用相当标准的方法去除的。但是,在浓度低至0.1ppm或更低的条件下从废水中去除杂质往往是不实际的或证明是不合理的,因为在这样低浓度下大部分杂质是在取水中存在的那些溶解离子和悬浮物质,或是加入核电站供水中用以防止腐蚀或防止腐臭的化学试剂。从核电站排出的废水,除了含有一些氚以外,往往相当清洁并且不含菌类物质,不过它比供水热些。

为了使读者对从典型核电站排出的废水有一个印象,现把从沸水堆和压水堆核电站排出的废水按来源与水量归纳于表1中。

对于沸水反应堆,大部分放射性废水来自干井设备排水沟和地面集水坑,以及汽轮机建筑物内设备排水沟和地面排水沟,树脂的超声清洗产生的废水流量最大,但是放射性浓度较低。

对于压水反应堆,大部分放射性废水来自安全壳建筑物集水坑和取样排水沟,但是,汽轮机建筑物地面排水沟排出的废水量最大,通常放射性浓度低得多。

表1中所列的流量将由于各厂所应用的设备的构造和类型不同而互不相同。由一回路设备产生的特排废水一般是电导率低而放射性高(清洁废水),而地面排水,洗衣房和热淋浴的废水则电导率高而放射性低(脏废水)。

因为压水反应堆是闭合系统,所以第一回路冷却剂和第一回路的泄漏水被认为是脱除了气体的。蒸气发生器通过打开阀门进行排污,使其压力能除去在其内部形成的沉积物或结垢

表1 沸水堆和压水堆电站 (3500兆瓦热功率) 的废水来源^{1,6}

来 源	流 量, 加仑/天	放射性主回路冷却 剂放射性的分数
沸水反应堆废水		
建筑物内设备排水	2,000	0.01
干井设备排水	5,800	1
放射性废水建筑物中设备排水	1,000	0.01
汽轮机建筑物内设备排水	5,700	0.01
反应堆建筑物内地面集水坑	2,000	0.01
干井地面集水坑	2,900	1
放射性废水建筑物地面排水沟	1,000	0.01
汽轮机建筑物内地面排水沟	2,000	0.01
实验室排水	400	0.002
冷凝水脱矿质器再生	1,800 ^a	— ^b
脱矿质器反冲和树脂输送	4,200	0.002
洗涤剂废水 (洗衣、淋浴、去污剂等废水)	450	10 ⁻⁴ 微居里/毫升
树脂超声清洗	15,000	0.02
压水反应堆废水		
安全壳建筑物集水坑	40	1
辅助建筑物地面排水	200	0.1
实验室排水和废水	400	0.002
取样排水 ^c	35	1
汽轮机建筑物地面排水 ^d	7,200	主蒸汽放射性
其它来源	700	10 ⁻⁴
洗涤剂废水 (洗衣房、去污淋浴废水)	450	—

a. 按每一个脱矿质器每5天再生一次计算。

b. 放射性水平是以树脂上负载放射性核素 (用冷凝水脱矿质器的去污因子 DF 求出) 和恒定的再生效率为依据的。

c. 对连续清洗循环为15加仑/天。

d. 反直流蒸汽发生器系统为3200加仑/天。

物。淡水加入蒸汽发生器中,可以减少溶解固体的总量。这一过程或频繁地间歇进行,或连续进行以减少蒸汽夹带水量并改善热传导。许多废液可以经去污后再循环使用。

2. 高温气冷石墨慢化反应堆 (HTGR) 和液态金属快中子增殖堆 (LMFBR) 的废水

HTGR用气体 (氦) 作冷却剂。HTGR中的废液是由于燃料装卸机和控制棒传动装置进行年度的换装燃料之后进行去污而产生的。在换料期间,由淋浴和实验室也产生可能污染的水。在正常运行中只产生很少量的放射性废水。估计排出的废水量列于表2。对于这种少量的废水在其排于环境之前对其净化并除去其中的放射性是不存在什么问题的。

表2 HTGR 电站 (3000兆瓦热功率) 的废水来源

来 源	数量, 升/年	放射性浓度, 微居/毫升
换装燃料时去污染	15,000	5
换装燃料时淋浴	95,000	10 ⁻⁴
其它每年排水 (淋浴)	190,000	10 ⁻⁴

【注】 LMFBR (400兆瓦电功率) 每年可能产生大约60,000加仑的设备清洗和去污废水, 以及大约30,000加仑的其它来源的废水 (排水、淋浴等)。

(二) 废 气

1. 沸水堆和压水堆的废气

在轻水堆核电站中产生两种不同的放射性废气，一种称为“活化”气体，这些气体就是那些经反应堆堆芯辐照变成放射性同位素的元素，其中最重要的有 ^{13}N 、 ^{16}N 、 ^{17}N 、 ^{18}O 、 ^{19}O 和 ^{18}F 。另一种是裂变产物气体，如惰性气体氦和氙的放射性同位素，它们是由核燃料损坏产生的。当燃料元件的破损率变得显著时，在排入大气的废气中，这些裂变产物气体比活化气体更多些。

废气处理最直接和最简单的设计和运行方法，就是采用贮存和过滤以使废气发生显著的衰变以及（或者）从其中除去放射性，最后从高处排放使其分散。在施工期间对现场的气象研究，将成为规定完全符合当地和联邦法令中放射性气体排放标准的放射性排放极限的基础。

在沸水堆核电站中可能有几条途径来排放放射性废气，诸如：1) 蒸汽喷射空气喷射器（在沸水堆正常运行中的放射性废气的主要排放点；估计沸水堆排出的99%的总放射性是从这里排出的。在设有延迟贮存和活性炭过滤器的新核电站中不再是这种情况）；2) 机械真空泵；3) 干井和弛压室的吹净；4) 汽轮机填料密封排气；5) 反应堆厂房排气。

由于工厂设计的不同，压水堆废气排放的主要途径与沸水堆稍有不同。压水堆废气产生于：1) 反应堆装置泄漏；2) 反应堆冷却剂由于启动时受热膨胀；3) 如果使用化学补偿剂，为保持适当的硼浓度而需要的排泄水；4) 主回路冷却剂的气体脱除；5) 反应堆厂房排气。

2. 高温气冷反应堆 (HTGR) 和液态金属快中子增殖堆 (LMFBR) 的废气

高温气冷反应堆的放射性气体排出途径以及相应的体积和排放的放射性数量列于表3。氦净化系统排出的废气，主要来自于系统吸附器预定的再生。分析装置排出的废气主要来自于监测主回路冷却剂放射性的分析仪器，燃料装卸废气主要来自于燃料装卸设备内部-氦气的排放。

表3 高温气冷堆电站 (3000兆瓦热功率) 的废气来源^[8]

来 源	数 量	频 率	放 射 性	备 注
氦气净化系统再生的废气	1450标准英尺 ³ (41米 ³)	一次/6月	3.49×10^3 居里	放射性基本上是 ^3H
氦净化系统装置的再生	800标准英尺 ³ (23米 ³)	一次/月	630居里	
分析装置排气	0.014标准英尺 ³ /分 (0.024米 ³ /秒)	连续排放	4×10^2 微居里/分	—
燃料装卸吹净系统真空泵	3390标准英尺 ³ (96米 ³)	一次/年	100居里	—
堆芯支承台	21标准英尺 ³ /分 (36米 ³ /秒)	连续排放	0.58居里/分	主要是惰性气体放射性

在液态金属快中子增殖堆中，将从覆盖气体净化系统中排出的高放射性气体压缩和贮存。估计400兆瓦电功率的电站在10天之内可能产生50标准英尺³的废气，其放射性浓度为0.26居里/毫升。

(三) 固 体 废 物

在核电站中可能产生的有代表性的固体放射性废物有以下几种：

1) 滤渣和树脂泥浆；

- 2) 从废水处理浓缩器中排出的浓缩废物;
- 3) 废气和通风系统中的空气过滤器;
- 4) 实验室的固体废物;
- 5) 污染的而且不能采取经济实惠的办法来去污的衣服、工具和小的设备部件;
- 6) 从污染区排出的各种各样的纸屑等废物;
- 7) 废弃的反应堆设备, 诸如废控制棒叶片, 临时控制屏障, 燃料管道和堆芯电离室。

固体放射性废物在装运送往最后处置之前按放射性水平分类。从一座有代表性的沸水反应堆或压水反应堆电站(1100兆瓦电功率)收集装运的放射性固体废物量列出如下。每年的废物桶(容积55加仑)总数约为:

高放射性树脂	160桶/年
低放射性树脂	30桶/年
过滤器	90桶/年
压缩固体物	55桶/年
共约有 335桶/年	

三、美国核管理委员会的设计标准

美国核管理委员会的下述设计准则影响放射性废物处置系统。

(一)第60项标准——往环境释放放射性物质的控制

核动力装置的设计将包括反应堆正常运行中(包括预料的运行事故在内)为适当地控制放射性废气和废液的释放而采取的措施,以及处理放射性固体废物的方法。为存留放射性废气和废液应有足够的贮存容量,特别是在可以预料到有不利的现场环境条件的地方,一些不平常的运行限制将对这些废物向环境释放发生影响。

(二)第61项标准——燃料贮存和装卸及其放射性的控制

对燃料贮存和装卸系统以及放射性废物系统和可能含有放射性的其它系统将予以妥善设计,以保证在正常的和假定的事故条件下具有充分的安全性。这些系统将设计成:1)对安全有重要作用的部件能够进行适当的定期检查和试验;2)设有适当的辐射防护屏蔽;3)具有适当的包容、封闭和过滤系统;4)能够可靠地排除余热并且能够进行检查,这对衰变热和其它余热排除的安全性来说是重要的;5)在事故条件下能防止燃料贮存池冷却剂贮量显著减少。

(三)第64项标准——放射性逸出的监测

该项标准将提出一些措施来监测反应堆安全壳中的气体,容纳冷却剂流失事故(LOCA)液体再循环部件的空间,在正常运行(包括预计的运行事件和假定的事故)中可能逸出放射性的废水排泄途径以及核电站附近的状况。

四、BWR/6 (通用电气公司) 核电站废物管理介绍

对BWR/6核电站设计了放射性废物管理系统来收集所有的放射性废物,降低核电站排出物中放射性元素的浓度,以及准备最后处置符合公众安全要求的低水平放射性废物。放射废物系统由三个基本分系统组成,即废气处理系统,废液处理系统和固体废物处理系统。下面将扼要叙述这些处理系统^[9]。

(一) 废气处理系统

因为沸水堆核电站采用直接循环,所以它有这样的固有特征:即主回路冷却剂中的溶解气体能够释放到沸腾过程产生的蒸汽中。这些不能冷凝的气体,用冷凝器的空气喷射系统可连续把它从蒸汽中除去。与压水反应堆不同,沸水反应堆主回路的冷却剂和蒸汽不会发生放射性积累。在该系统中的气体包括汽轮机冷凝器中漏入的空气,反应堆水的辐照分解而产生的氢和氧,活化气体和裂变气体。活化和裂变气体的相对体积比空气和氢-氧体积小。

从主冷凝器排出的不能冷凝的裂变气体,在排至环境之前经空气喷射器的废气处理系统来降低其放射性水平。该系统用活性炭对放射性惰性气体进行动态吸附。低温废气系统的基本特征如图1所示。在气体处理方面,准备有多余的设备,只有排气冷凝器和活性炭吸附器除外,因为这两种设备在出现机械事故时仍能继续工作。

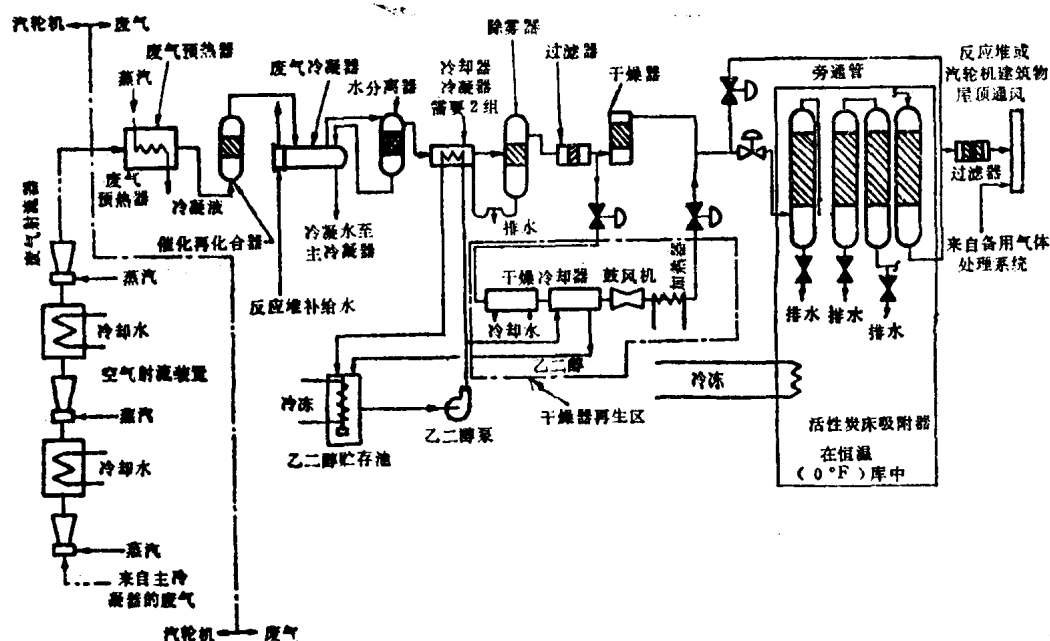


图1 低温废气处理系统 (经通用电气公司同意)

从主冷凝器排出的不凝结气体,包括漏入的空气在内,用蒸汽稀释以使空气喷射器装置最后阶段的不凝结射流气体中的氢小于4% (体积)。将稀释的废气加热到过热,然后使其通过催化复合器将氧和氢化合成水以除去它们。从催化复合器排出的废气仅含有微量的氢,

使其通过由设备冷凝水冷却的冷凝器。剩余的气体，其体积大为缩小，因而也就减小了活性炭吸附设备。扩大管道的容积，以使 ^{13}N 、 ^{16}N 、 ^{18}O 以及氦和氙同位素滞留衰变10分钟。在衰变期间，子体产物在管壁上凝结而被除去。然后将气体通过冷却器-冷凝器处理，以除去附加的水分，再通过除雾沫器和脱水干燥器以降低相对湿度，在进入活性炭吸附器之前通过高效过滤器。活性炭过滤器使放射性废气在其中作最后滞留，将排放率降低到规定的水平。使用平行的活性炭吸附系统以使反压减小到最小值。要将吸附器屏蔽间的热量排出，以使活性炭床保持在 0°F 的工作温度。从吸附器排出的废气，在排放前通过另一台高效过滤器。

为了使那些能够产生生物效应的重要子体（即 ^{88}Sr 、 ^{90}Sr 、 ^{140}Ba 和 ^{137}Cs ）的惰性气体衰变，空气喷射器废气系统被设计成具有足够的逗留时间，这些惰性气体的子体产物被阻留在高效颗粒过滤器和活性炭吸附器中，因而不逸出。活性炭吸附器中大量的活性炭还阻留存在于空气喷射器废气中的所有碘，因此通过这条途径实质上没有逸出碘。标准的低温废气系统可除去放射性气体同位素，而 ^{86}Kr 以及某些 ^{135}Xe 和 ^{136}Xe 却例外，它们少量地排出，但远低于10CFR50中附录1的标准。

从汽轮机轴密封填料中排出的蒸汽，通常在密封蒸汽冷凝之后被抽入建筑物的通风道中。因此，被密封蒸汽挟带的不凝结放射性气体与被抽吸入密封填料的空气一同被排出。因为大约只有0.1%的主蒸汽流用作轴密封，所以这种气流的放射性含量比空气喷射器废气系统里的小。但是空气流的量是大的，所以把密封填料泄漏的蒸汽与废气流混合在经济上是不可取的。

为了减少密封填料泄漏废气对最邻近位置的剂量，加大排气管道可提供几分钟的停留时间，以便使活化气体 ^{16}N 和 ^{18}O 衰变掉。这一滞留时间足以使通过这一途径逸出至大气中的放射性物质降到低的程度。对于最邻近的人的辐射剂量率通常约为0.7毫雷姆/年，具体值取决于现场的条件。假如需要将辐射剂量率降至接近于零，可使用无放射性的汽轮机密封蒸汽源。这一系统用凝结水产生蒸汽，因为凝结水中放射性气体含量最低。在核电站启动期间和蒸汽喷射空气喷射器开始使用之前，使用机械真空泵对主冷凝器抽真空。

最初真空泵以高流量（取决于燃料的来历）排出放射性惰性气体，但是形成真空以后便迅速下降。在启动期间从冷凝器抽出的剩余气体（主要是在停堆中由碘衰变产生的氙）对邻近的工作人员产生的剂量率很小，约为0.2毫雷姆/年或者更小。

（二）废液处理

废液处理系统的作用是有效地除去常规的工艺废水，对液体进行处理以使它能在核电站系统中重复使用并除去控制排放液体的放射性。这可以通过对废水进行收集、处理、贮存，以及为确定废水处置或进一步处理的质量而进行测量等来实现。采用的流程和仪表装置可以始终对过程进行严格控制。放射性废物系统工艺流程示意图示于图2。核电站要单独建一座废物处理厂以使能经济地收集、处理、处置放射性废液和潜在放射性的废水或放射性固体废物，而且不影响核电站的运行和效能，同时也完全保持在环境排放的标准之内。

废液处理系统设计成能够在核电站的普通运行条件下达到“液体的零排放”，因此它能在选择核电站厂址时出现的环境条件和水稀释效能的变化。在核电站的正常运行条件下废液处理系统应具有“液体的零排放”的能力，附加洗涤剂处理和附加的多余水分系统提供了这种能力。分批地收集排出的各种工艺废水，并且根据需要进行处理，以达到所要求的处

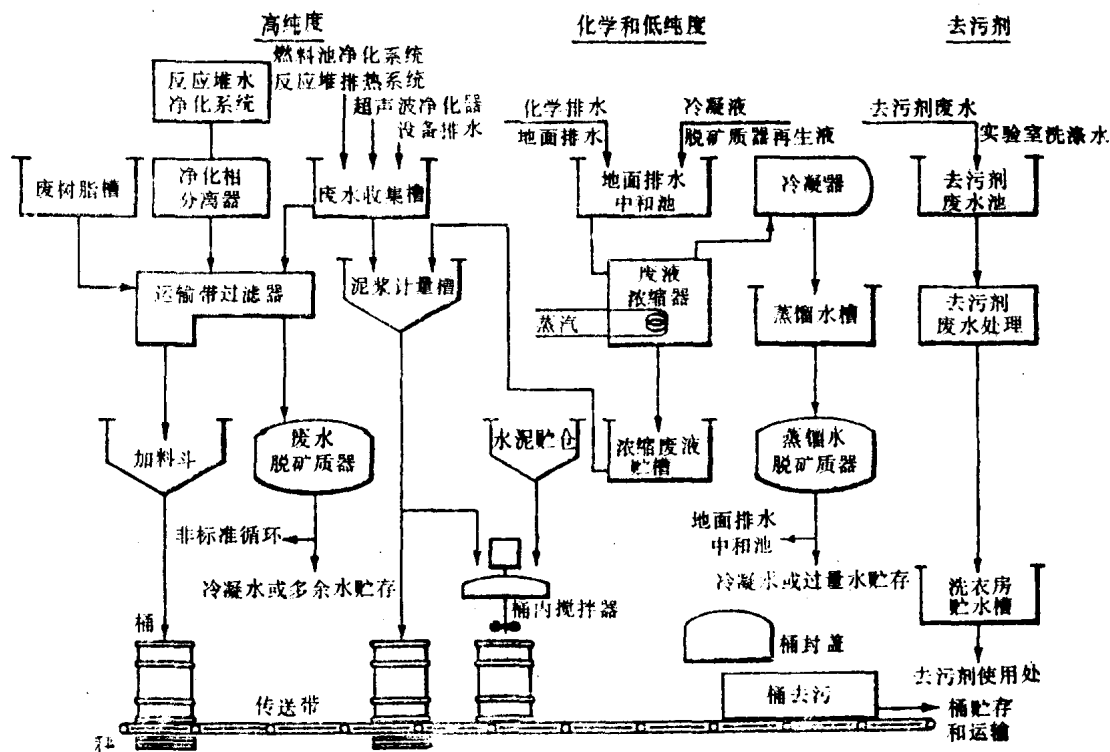


图2 简化的放射性废物处理流程图 (经通用电气公司同意)

理条件。然而，处理过的废液有多重的流线仪表进行监测，一般直接排于厂内集水池，无需进一步分批收集和取样。对任何将排出厂外的处理过的废水，可在其排放前作为一批进行收集、取样和分析。排出厂外的废水将符合10CFR50的附录I的规定标准。为了验证其适应性，在核电站附近对泥和水生物进行有计划的环境取样和分析，由此提供出放射性在环境中浓集的数据。

在本节中讨论的凝结水处理系统可使用再生的深床装置或不再生其树脂的过滤-脱矿质器。两种凝结水处理系统都能有效地去除从汽轮机、冷凝器、抽水和凝结水系统中释出的腐蚀产物。另外，由于冷凝器管破损而进入供水中的杂质也能除去。

主冷却器用盐水或苦咸水冷却的核电站，必须使用再生的高流速深床脱矿质器的凝结水处理系统，以防止在冷凝器破损时盐水进入反应堆中。该系统使用树脂超声清洁剂来冲洗树脂，以使树脂化学再生而产生的废液减少到最小量。

有三种放射性废水，即高纯、低纯和化学废水以及洗涤剂或洗衣房废水。通过把核电站的各种建筑物中的排水设备、管道、水槽或集水坑适当地连接起来，通到放射性废物处理建筑物中的集水池中，把这些废水收集起来。高纯废水通常进行过滤和脱矿质处理，并且经监测后返回凝结水贮存池中以供重复使用。低纯和化学废水经蒸发浓缩后盛装于桶中，在浓缩器中蒸发出的水通过脱矿质器进行处理、监测，然后回到冷凝水贮存池中。

返回凝结水贮存池的水必须具有补充水的水质。对洗衣房和洗涤剂废水进行过滤和进一步的处理，以除去放射性和非放射性杂质，然后送往贮存池，以重复用于洗衣房和洗涤剂去污。为了使超过核电站的贮水量的水得到贮存，设有多余水的分系统。往往由于主冷凝器或

生活用水的热交换器管的漏失而产生大量的进水。在空间允许的情况下,这种分系统包括一个过量水贮存池,以接受超过凝结水贮存池容积的那些水。可将该池中的水送至凝结水贮存池代替补充水供重复使用,以适应正常的蒸发损失。这些水也可被蒸发并随同核电站的通风空气排至大气中。由此排出的放射性蒸汽只占通过通风系统排放的放射性物质的一小部分。

把这一分系统,洗涤剂废水处理分系统以及高纯废水和地面排泄化学废水的处理和重复使用三者结合起来,就能达到放射性废水的“零排放”。

处理过的废水只是在间歇取样和分析后才从核电站排出。这些分批处理的废水按一定的流量比率流入冷却水排放渠,控制的比率使未鉴别的混合放射性核素不超过最大允许浓度。年排放量必须符合10CFR50的附录1的标准。实际经验发现,使用未鉴别的放射性核素混合物的限制值,同测得的实际排出的放射性同位素的限制值相比是保守的。

(三) 固体 废 物 处 理

污泥产生于反应堆水净化系统、冷凝水处理系统(如果使用过滤器-脱矿质器型的处理设备)、燃料池冷却和净化系统以及放射性废物系统中的过滤器和过滤器-脱矿质器。反应堆清洗出的泥浆通常因为形成固体废物具有较高的辐射水平而予以单独处理和处置。这就使其它固体废物的厂外运输所需要的屏蔽减少到最低限度。

反应堆净化用的过滤器-脱矿质器的反冲洗水收集于过滤器-脱矿质器下方的反冲洗水接受槽中。用泵将反冲洗泥浆送入位于放射性废水处理设施中的两个清洗水固液分离器中的一个。水在固液分离器中沉淀后从其中流出而送入废水收集池。将剩下的污泥存积起来使之进行放射性衰变,然后进一步作固体废物处理。污泥在一个固液分离器中积存到预定的时间以后,反冲洗水通过转换开关流入另一个固液分离器中。污泥在第一个固液分离器中发生衰变直到第二个固液分离器即将停止积存时为止。此时,衰变的泥浆通过运输带式过滤器(TBF)过滤,滤出水流入废水脱矿质器和凝结水贮存池中。脱水污泥被送到料斗中,然后作为固体废物包装起来以便处置。

当用过滤器-脱矿质器处理凝结水时,它们的反冲洗水流入邻近这些设备的反冲洗水接受槽中。然后将每一批反冲洗水送至设置于放射性废物处理设施中的一对凝结水固液分离器之一。将沉淀物上面的清液定期送入废液收集槽中。污泥如同反应堆净化系统的污泥那样,在固液分离器中积累以进行放射性衰变,然后作为固体废物予以进一步处理。

对燃料冷却池净化系统中使用的过滤器-脱矿质器进行反冲,将反冲水送到该设备附近的燃料冷却池反冲洗水接受槽中,并且定期地用泵将这些泥浆送到废水收集槽中以供处理。放射性废物过滤器是输送带式预涂层过滤器,它们把固体滤饼直接排于料斗以将其作为固体废物装桶。由过滤器-脱矿质器反冲洗产生的泥浆,通常按制定的程序定期地送到如前所述的输送带式过滤器(TBF)中。TBF将泥浆脱水,从而产生不含游离水的湿固体,将这种固体送入TBF附近的料斗中并且以遥控方式装入55加仑的桶中。这些桶是由遥控传送带系统载运的,并且放置在带阀门的装料管下。桶装满后送到压盖机中以遥控方式加盖密封,然后将这些传送带上的桶送到贮存场集中起来以待运出厂外。

将废脱矿质器(以及凝结水脱矿质器,如果凝结水处理是深床型的话)里的废树脂以废树脂-水浆液的形式间断地送往废树脂槽中。然后将树脂泥浆送到输送带式过滤器进行脱水,再将树脂送到料斗中,而对滤出水进行脱矿质处理并返回凝结水贮存槽中将废物浓缩器排出

的浓缩废液收集于浓缩废液槽中。这些废液定期地用泵送入具有预定容积的计量槽中。

可用下述方法来处理浓缩废液：把装桶运输机（装有护壁的车）的一个空桶放在桶内搅拌器的位置上。把桶内搅拌器下降到桶中，然后在搅拌器工作的同时往桶中定量地注入浓缩废液和水泥，在自动注入-混合结束时，将搅拌器提起，把桶送到加盖站，然后送到贮存场往厂外运出。在桶与搅拌器分离之后，把搅拌器浸入冲洗槽中进行自动冲洗。然后移回最初的位置，以供下一工作周期之用。

如果愿意的话，废树脂和过滤器污泥也可用水泥固化。在这种情况下，在料斗加料站往桶中投入一定量的固体废物，然后将其移送到混合站，在这里将搅拌器插入桶中并缓慢转动，浓缩废液或冷凝液同水泥一起计量加入。在这一自动操作周期结束后，将搅拌器提起以便随后冲洗，而把桶送至加盖站。

所有固体废物的一般处置方法就是在厂内把它们临时贮存于纤维板箱或钢桶中（按需要加设屏蔽）。最后处置就是装送往厂外贮存。太大而不适于以这种方式处置的设备，则按特殊情况处理。因为需要处置大设备的次数很少，所以根据需要研究对这些物件适宜的去污、屏蔽、装运和贮存方法。

1. 其它固体废物

当反应堆设备需要处置时，首先将它放在燃料贮存池中贮存足够的时间以便在取出运往厂外之前使短寿命放射性同位素衰变掉。从燃料贮存池取出这些设备时，通常需要屏蔽。

多数其它种类的干固体废物，具有相当低的放射性，可以直接接触包装和装卸，根据运行和维修时产生废物的体积，将这些废物收集于核电站附近适当区域里的贮槽中。在充装废物的过程中要定期监测容器（纸箱、钢桶等），为的是盛装物在处置前不超过实际的最大允许剂量（在其表面50—100毫雷姆/小时为通常的最大值）。然后将容器密封并移送到对出人有控制的围起来的贮存区进行临时贮存。可压缩的废物用水压机压缩于桶中以减小其体积，然后供临时贮存。当操作包装设备时，使用通风和过滤装置以防止污染颗粒扩散。最后将压缩废物和非压缩废物包装品装运到美国核管理委员会批准的厂外贮存设施中。

（四）控制与仪表装置

放射性废物处理设施中的控制室用于控制各种放射性废物系统的运行。在该室中的主要仪表盘上装有放射性废水处理厂运行的仪表、控制和报警装置。在仪表盘上还装有指示灯以显示把废水从核电站的其它建筑物中输送到放射性废水处理厂的各种污水泵是否在工作。核电站的主控制室也接受放射性废水系统的报警信号作为普通事故报警。

1. 取样

设置取样管以便从各个废液收集槽取样，并且监测和控制废液处理过程。可把取得的样品送到核电站化验室中进行分析。还可对核电站进水口的循环水及其排放口的排出水取样以检查放射性的本底和排放水平。

通风系统向反应堆安全壳的各部分、汽轮机和辅助建筑物提供新鲜空气，并且通过建筑物排风孔和（或）烟囱将污染空气排于大气。据估计，通过这一途径排出的气体的放射性小于50微居里/秒，而释出的 ^{131}I 为0.001—0.01微居里/秒。估计这种低的排放水平对最邻近的人员所产生的全身照射剂量小于0.1毫雷姆/年，如果在邻近的厂外环境中牛奶场的话，这时甲状腺照射剂量为几个毫雷姆/年。预计这些通风排放使风不需要处理即可符合

10CFR50中附录 I 的指标。

2. 废气排放监测

空气喷射器的废气放射性排出量是这样控制的：在空气喷射器的废气系统上设置双套连续监测器来记录大约延迟衰变 2 分钟后的放射性。放射性气体的总放射性释出率由设在废气排放口附近的双套连续监测器进行测量。还有颗粒和碘的取样器以便能够监测它们的排出量，并且可以取气体样品进行同位素分析。

五、压水反应堆（韦斯汀豪斯电气公司）

核电站废物管理系统

压水反应堆（韦斯汀豪斯电气公司）核电站的典型的废物管理系统简述如下。废物管理系统处理在电站运行或停堆时产生的废气和废水。这一系统，如同BWR/6那样，由三部分组成，即废水处理系统、气体处理系统和固体废物处理系统。该系统的示意图示于图 3 和图 4 [10]。

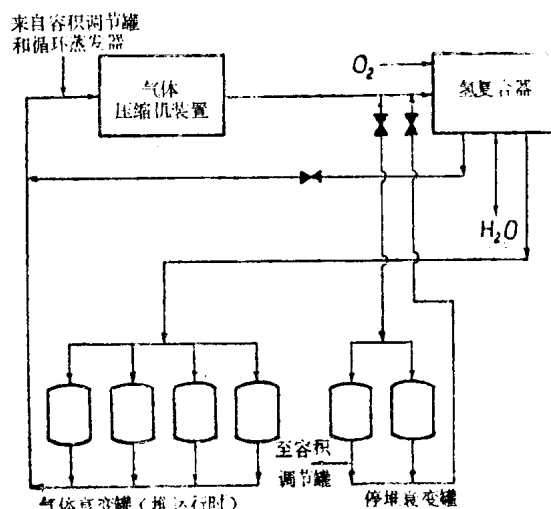


图3 废气处理系统（经韦斯汀豪斯电气公司同意）

废气处理系统是这样设计的：在整个核电站寿期中，将放射性废气贮存在稍大于气压的气体衰变罐中，并且接受从容积调节罐排出的氢-裂变产物混合物。然后把氢与裂变产物气体分离（或复合），剩下体积不大的气态放射性同位素由氮稀释贮存于气体衰变罐中。

废水处理系统可以处理含氚和不含氚的两种废水。含氚废水在核电站内的封闭系统中再循环；不含氚废水经收集、处理、监测而排放至环境中。

除了在换装燃料时清洗安全壳以外，在正常运行条件下不需要有意排放含氚废水或气态裂变产物。压水堆主冷却剂中的氚量很少，完全可以使氚在核电站的系统之内长时期地贮存，不必对运行加以不适当的限制。废液蒸发器的最终浓缩废物，被污染的树脂和滤料，以及各种各样的纸和玻璃器皿等固体废物，装桶运出厂外。

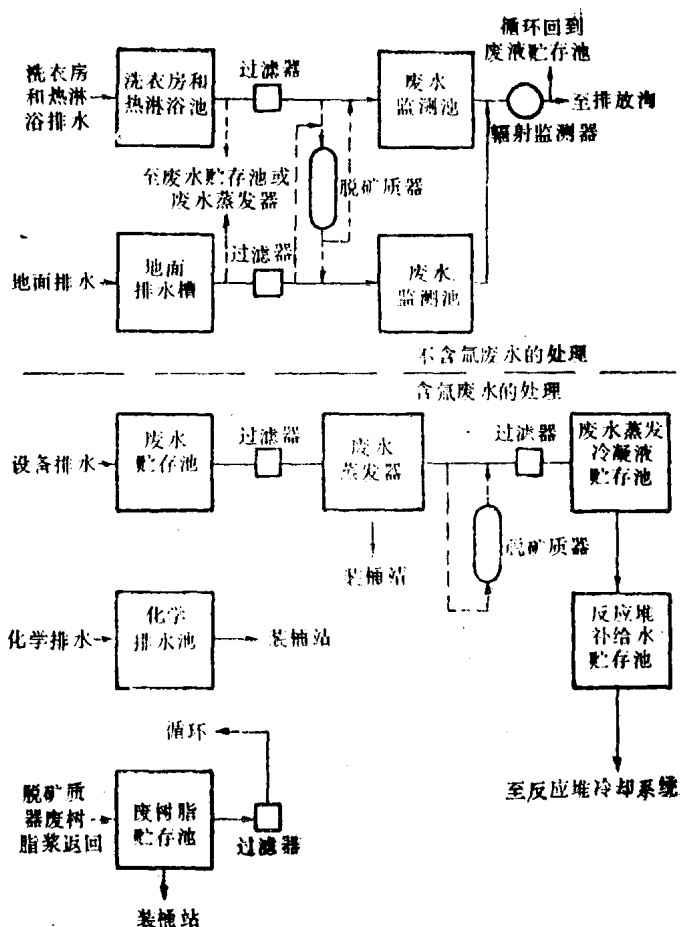


图4 废水处理系统 (经韦斯汀豪斯电气公司同意)

→ 正常的流动路线; --- 备用流动路线。

F. 过滤器; D. 脱矿质器; RM. 辐射监测器。

(一) 废 气 处 理

废气处理系统接受从污染液流中排出的裂变产物气体并且无限期地容纳它们,以便在除了安全壳清洗时以外不必排出放射性气体。废气处理系统既可连续运行、也可间歇运行,也可仅仅在换装燃料停堆以前运行。

1. 正常运行

在正常功率下运行时,用两个气体压缩机之一使氮气在气体系统中连续循环。将新鲜氢气充入容积调节罐中,在罐的气体空间中,氢气与从反应堆冷却剂中汽提出来的裂变产物气体混合。然后,被污染的氢气从罐中排入循环的氮气流,以便输送裂变气体通过废气处理系统。形成的氮-氢-裂变气体混合物用气体压缩机压送到复合器中,然后往复合器加入氧,通过在催化剂表面上氧化成水蒸汽来减少氢的含量。将水蒸汽除去,并把形成的气流从复合器中转移到气体衰变罐中,在罐中容纳积累的放射性。气体从衰变罐流回气体压缩机,以形成闭路循环。含氢混合气体通过回路循环一直达到剩余的氢浓度很低为止。

2. 核电站换装燃料停堆