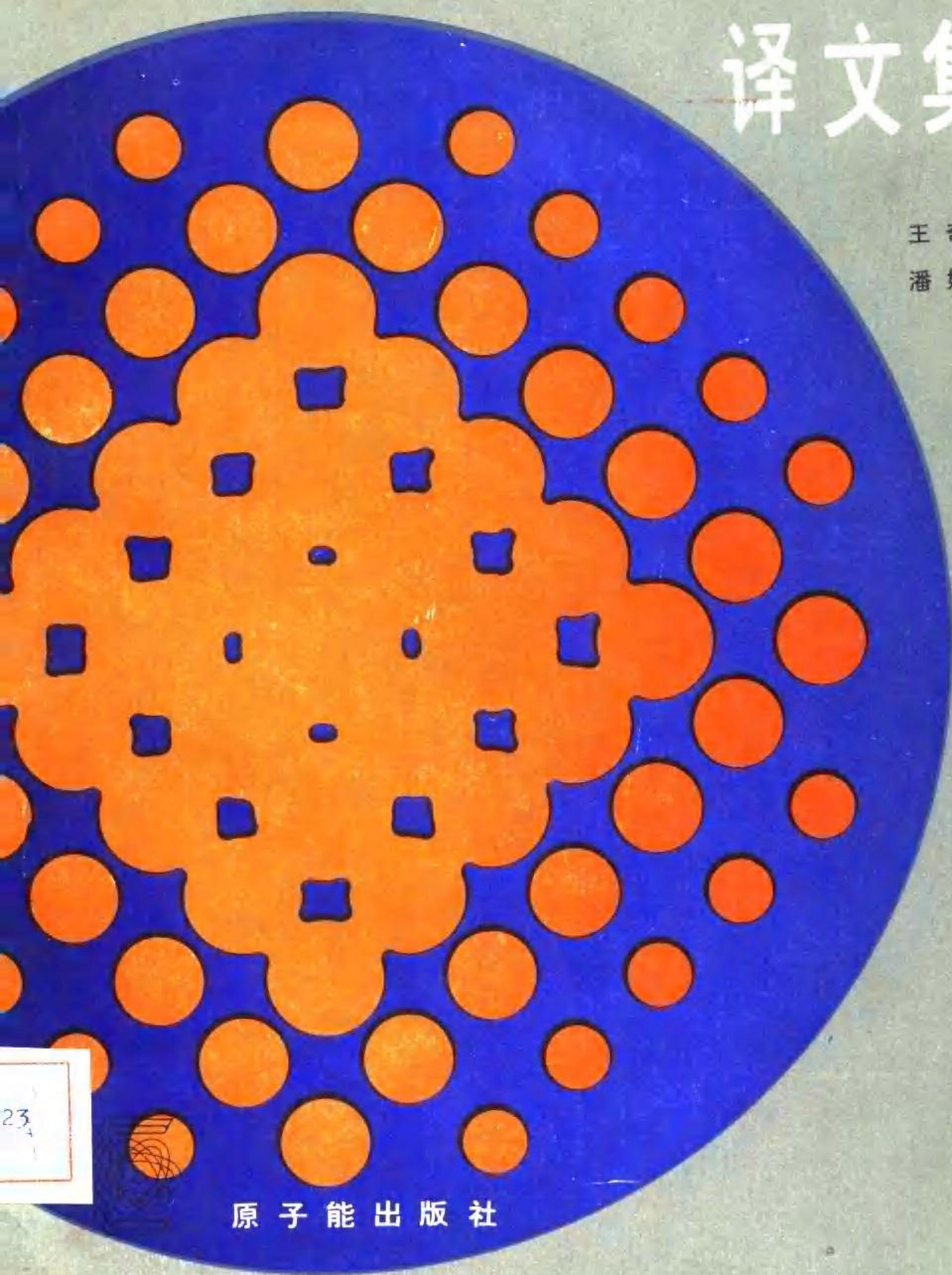


重水堆核电站 译文集

王奇卓
潘婉仪
编译



原子能出版社

23

内 容 简 介

本译文集共收集六篇文章,较详细地介绍了加拿大重水动力堆(CANDU堆)目前发展概况,并就其经济性、安全性等方面同压水堆进行了比较。还详细地阐述了CANDU堆近期存在的问题及把CANDU堆提高为近增殖堆的发展情况和前景。

本译文集还介绍了美国对CANDU型核电站的安全评价,评定了美国核管理委员会(US-NRC)总的设计准则对CANDU-PHW的适用性。

本书可供从事能源研究、核电站研制、设计、教学的人员参考;对于制订我国核能政策、选择堆型以及引进技术设备也是一份很有用的参考资料。

重水堆核电站译文集

王奇卓 等编译
潘婉仪

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 $13^{3/4}$ ·字数322千字

1983年3月第一版·1983年3月第一次印刷

印数001—900·统一书号:15175·465

定价:1.70元

序

重水是热中子反应堆最理想的慢化剂，它很少吸收中子，慢化性能及热物理性能都比较好。但是，重水价格较贵，对重水系统的密封性要求比较高，需要对泄漏的重水进行回收及处理。

加拿大从五十年代起就开始研究重水堆，1962年建成第一座示范性重水堆核电站 NPD，1967年建成第一座原型堆——20万千瓦的道格拉斯角核电站；1971—1973年相继建成四座54万千瓦的皮克林重水堆核电站；1975—1978年又相继建成四座78万千瓦重水堆的布鲁斯核电站。还有一批重水堆电站即将投入运行和正在建造，如标准60万千瓦的勒普罗角核电站、皮克林-B的四座54万千瓦重水堆及布鲁斯-B的四座78万千瓦重水堆等。

重水反应堆的堆型也很多。上面提到的几座核电站都是采用重水慢化、加压重水冷却的卧式压力管型反应堆，简称为 CANDU 型压重水反应堆（CANDU-PHW，是加拿大氘、铀-压重水的缩写）。这种堆型比较成熟，是加拿大目前主要发展的堆型。此外，还有重水慢化、沸腾轻水冷却的反应堆（如根蒂莱-1等）；重水慢化、有机介质冷却（或者用气体冷却）的重水堆；压力壳式重水堆等。这些堆型目前还处于试验研究阶段。

CANDU 堆的主要特点是用天然铀作燃料及把燃料元件放置在堆芯压力管内。重水堆不需要浓缩铀、不需要大型压力壳，这两点对于经济及工业技术比较薄弱的国家来说，是很有吸引力的。与其他堆型相比，重水堆的运行性能比较好，它的年平均负荷因子一直居于首位。重水堆的经济性能也比较好，虽然基建投资大一些（可能比压水堆大10—15%），但发电成本比其他堆型便宜。至于 CANDU 堆核电站的安全性，比压力壳式反应堆好得多，因为在发生大失水事故时慢化剂是一个可靠的、有效的热穴。

重水堆将会是一个性能良好的热中子转换堆（或是热增殖堆）；对于有效利用钍资源（实现钍-铀、钍-钚燃料循环）来说，它也是一种很有前途的堆型。

本译文集收集了六篇文章，简单地介绍了重水堆核电站概貌及主要问题。这本书对于关心能源政策及核能的广大读者、特别是对于关心堆型选择的广大干部及核能工作者来说，是有参考价值的。

籍孝宏

1981年9月

编译者前言

本译文集包括六篇文章，简单地介绍了重水堆核电站的概貌以及物理、控制、运行、安全性能等方面的问题。在本书的编译过程中，籍孝宏同志给予很大支持，并为本书写了序言；连培生、左湖等同志也作了很多有益的指教。参加本书译校的还有谭彬、龙廷芬、刘正明、吴惠芳、柯小宁、骆志伟、杨水泉、田树全、徐及明等同志。编译者感谢所有为本书提出过宝贵意见的同志。由于我们水平有限，欢迎读者指正！

目 录

600 兆瓦 (电) CANDU 型重水堆标准核电站	G.L.布鲁克斯 (1)
勒普罗角 (Point Lepreau) CANDU 型加压重水堆核电站	T.S.汤姆逊 (35)
CANDU 反应堆的物理设计	M.H.M.罗什特 (56)
皮克林核电站的控制及主要经验	T.B.马胡得、E.M.亚莱梅、D.E.安得生 (70)
重水反应堆发展现状及运行特性的研究	R.F.威廉姆斯 (86)
美国对 CANDU 型核电站的安全评价	J.B.范厄伯 (141)
附录: 译名对照表	(201)

600兆瓦(电)CANDU型重水堆标准核电站

G.L.布鲁克斯

一、前言

从50年代初起,加拿大原子能有限公司(AECL)就开始研究重水慢化天然铀动力反应堆,简称为CANDU型反应堆。经历了长期考验后,CANDU型反应堆已成为世界上少数几个比较成熟的堆型之一。它已从原型堆成功地进入商业运行阶段。现今已充分证明,在技术指标和经济性方面,能与CANDU型堆相竞争的只有低浓铀轻水堆(PWR和BWR)。高温气冷石墨慢化反应堆尚待进一步研究,然而,它在早期小尺寸原型堆阶段就显示出了它的发展前景。将来,液态金属冷却快中子增殖反应堆有可能和CANDU型堆相媲美,但是,这种堆型还有许多疑难问题尚待解决。轻水冷却重水慢化反应堆(SGHWR)也属于CANDU系列,英国想发展这种堆型,作为下一代的动力堆。虽然,目前轻水冷却重水慢化反应堆还不如CANDU型加压重水堆成熟,然而,它在商业运行上的成功,大大地提高了CANDU系统在国际市场上的声誉。事实上,加拿大已在魁北克的特罗依斯-里维尔附近建造了一座大尺寸的沸腾轻水冷却重水慢化反应堆(称为CANDU-BLW),并已于1971年投入运行。

CANDU型反应堆突出的优点是可利用天然铀作燃料。这就使得电业部门可以不受加浓铀的限制,直接从国际市场上获得铀的供应。此外,CANDU系统每公斤铀的单位发电量比其它商用反应堆系统高。

加拿大拥有丰富的铀资源,但是没有铀浓缩工厂。从国家利益着眼,利用天然铀作燃料,较易平衡外汇,免受外来的政治和经济压力。这也是加拿大政府长期支持发展CANDU系统的重要因素。单堆容量为600兆瓦(电)的CANDU型堆是够大的了,与火力发电站相比,在经济上也引起了世界上许多电业部门的关注,而且对于中等规模的电力系统,在稳定性方面*也不会出现什么严重问题。由于这种容量的CANDU型反应堆,在国际上可望得到广阔的市场,所以加拿大原子能有限公司决定将它标准化。

二、标准设计

安大略水电公司(Ontario Hydro)、加拿大原子能有限公司和加拿大工业部门,在装有四座反应堆的皮克灵-A电站的设计、建造和初期运行中所取得的经验清楚地表明,利用同一设计建造几座反应堆具有很多优点。安大略水电公司最近决定再建造四座同样设计的反应堆(皮克灵-B电站)。这一决定本身就进一步表明建立多堆电站是有好处的。

很显然,若在同一个厂址安装几个相同设计的反应堆,它们的部件可由一个制造厂家供

* 指电站负荷变化对系统的冲击。——译者

应,又可由同一组人员进行试运行,好处很多。加拿大原子能有限公司还认为,若采用标准化设计,即使在不同的厂址建造反应堆和由不同的人员进行试运行,仍能得到主要好处。标准化设计的优点是显而易见的。还需特别指出以下几点:

(1) 降低设计费用;

(2) 降低工程费用和部件制造的加工费用,特别是当由一个制造厂供应两套或两套以上的同样设备时;

(3) 降低部件研制费和堆型试验费;

(4) 降低执照批准和安全分析的费用;

(5) 通过总结第一座标准化电站的经验教训,可以降低由于制造、安装和试运行的延误所花的费用;

(6) 通过总结第一座标准化电站的经验教训,在运行初期就可以获得较高的利用率。

采用标准化设计并不是什么新鲜的事,也不是什么技术革新,更不是核电站所独有的,而是人们经常提到的经验。然而,实现标准化决非是件轻而易举的事。用户的需要和选择是变化的;设计者有要求革新的强烈愿望,他们总希望下一个设计更好些或达到更高的水平;制造者也在不断寻找改进他们的产品以及降低造价的途径;运行人员也会支持、赞同设计者提出的建议;由于安全要求越来越高,管理机构对设计总是不会完全满意的;工艺也在不断地向前发展,凡此等等,均是实现设计标准化的障碍。

为了说明目前我们在 600 兆瓦(电)反应堆的设计中要达到的标准化程度,下面还将阐述此类反应堆的主要设计特点,特别指出标准化不够完善的地方及其不完善的原因。本文重点讨论核蒸汽供应系统(NSSS)的问题,因为这是较新的课题,而汽轮发电机部分大多数都是常规设备,火力发电站已有多年的实践经验。

三、标准化核电站的设计

3.1 概 述

本节将叙述 600 兆瓦(电)标准设计的各主要系统和部件,并对与标准设计不符的部分所作的修改进行说明。这些修改是为了适应汽轮机厂房蒸汽和给水条件(由于制造厂设计不同而引起的)的差别、冷却水源和补给水源的不同(温度、盐分等)以及电网频率的差异等,而必须进行的。

首先概括地说明一下 CANDU-PHW 设计的主要特点(PHW 指用加压重水作为反应堆冷却剂)。图-1 为简化的系统流程图。反应堆本体是一个大型水平放置的圆筒形容器,通称排管容器。里面盛有低温、低压的重水慢化剂。在容器内贯穿许多根水平管道,称为燃料管道(fuel channel)*,其中装有天然铀燃料棒束和高温、高压重水冷却剂。主泵唧送冷却剂,经燃料管道,将燃料的热量带出来,然后经过蒸汽发生器,利用此热量产生蒸汽,供汽轮机作功。蒸汽发生器和冷却剂泵安装在反应堆的两端,以便使冷却剂自反应堆的一端流进堆芯

* CANDU 型反应堆中的“燃料管道”一般指容器管、压力管、燃料元件棒束等的组合体。——译者

的一半燃料管道,而从另一端以相反的方向,流入另一半燃料管道。冷却剂系统设有稳压器,以维持较高的系统压力。回路压力高就意味着允许提高冷却剂温度,蒸汽压力也随之提高,从而得到较高的汽轮机循环效率。从图-1可以看出,对低温的慢化剂也设有循环冷却系统,它将高温燃料管道传给慢化剂的热能和重水本身与中子及 γ 射线相互作用产生的热能带走。

上述主要部件和系统的布置见图-2。

3.2 反应堆和换料系统

反应堆本体的设计完全是标准化的,但为了适应不同制造厂和通往各现场的不同运输条件,也可以作一些小的改动。

反应堆的总体布置如图-3所示。反应堆本体包括:一个装重水慢化剂的圆柱形不锈钢排管容器、反应性控制机构和 380 根燃料管道组件。燃料管道组件贯穿排管容器,内装燃料和重水冷却剂。每根压力管和容器管间的间隙充满气体,起隔热作用。

排管容器是一个带有端屏蔽的整体结

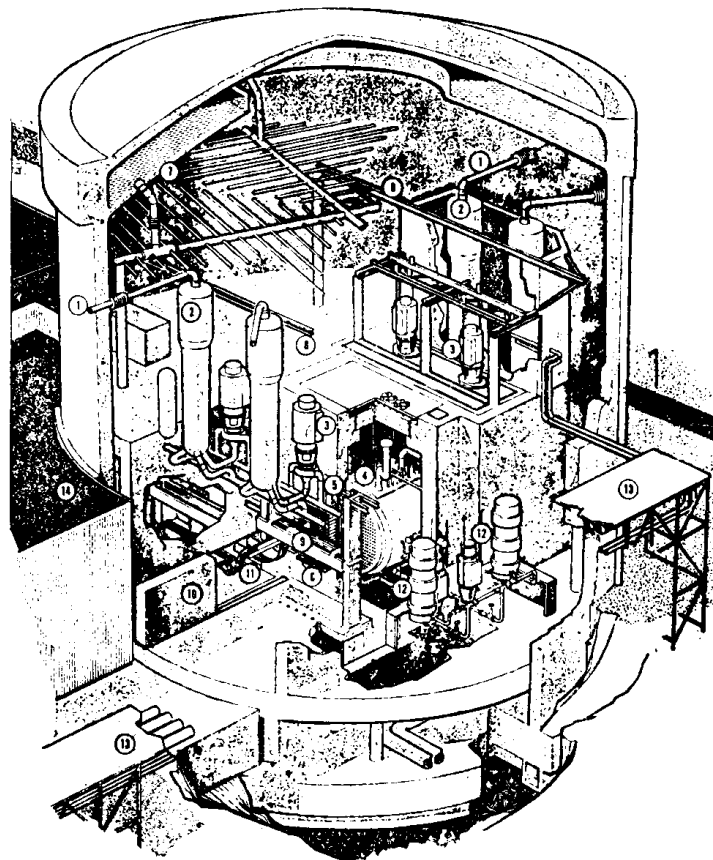
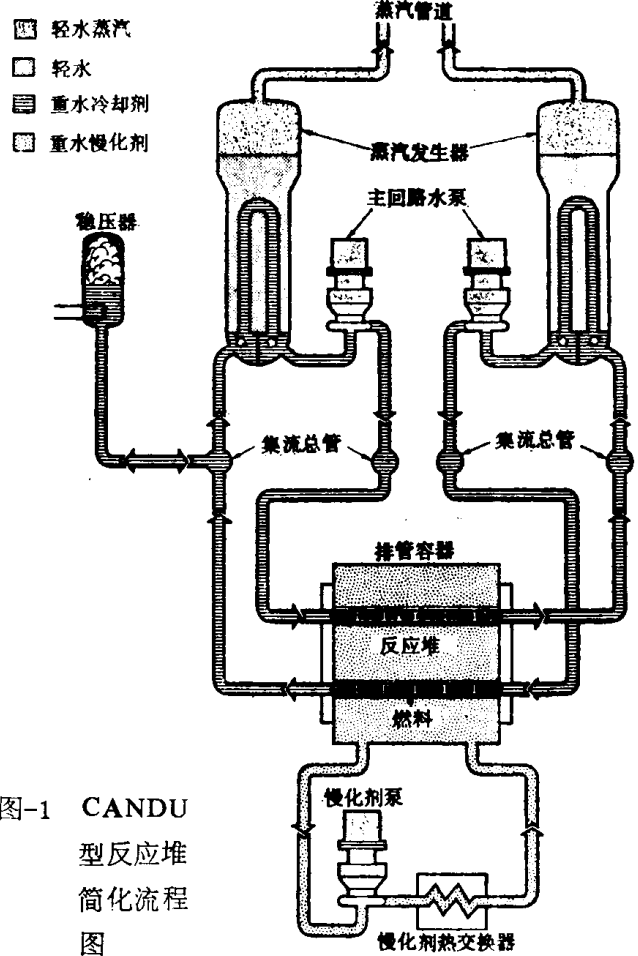


图-2 反应堆厂房

1. 主蒸汽管道
2. 蒸汽发生器
3. 主泵
4. 排管容器
5. 进水管
6. 燃料管道
7. 喷淋水管
8. 吊车轨道
9. 换料机
10. 换料机门
11. 换料机悬链
12. 慢化剂循环系统
13. 管桥
14. 检修厂房

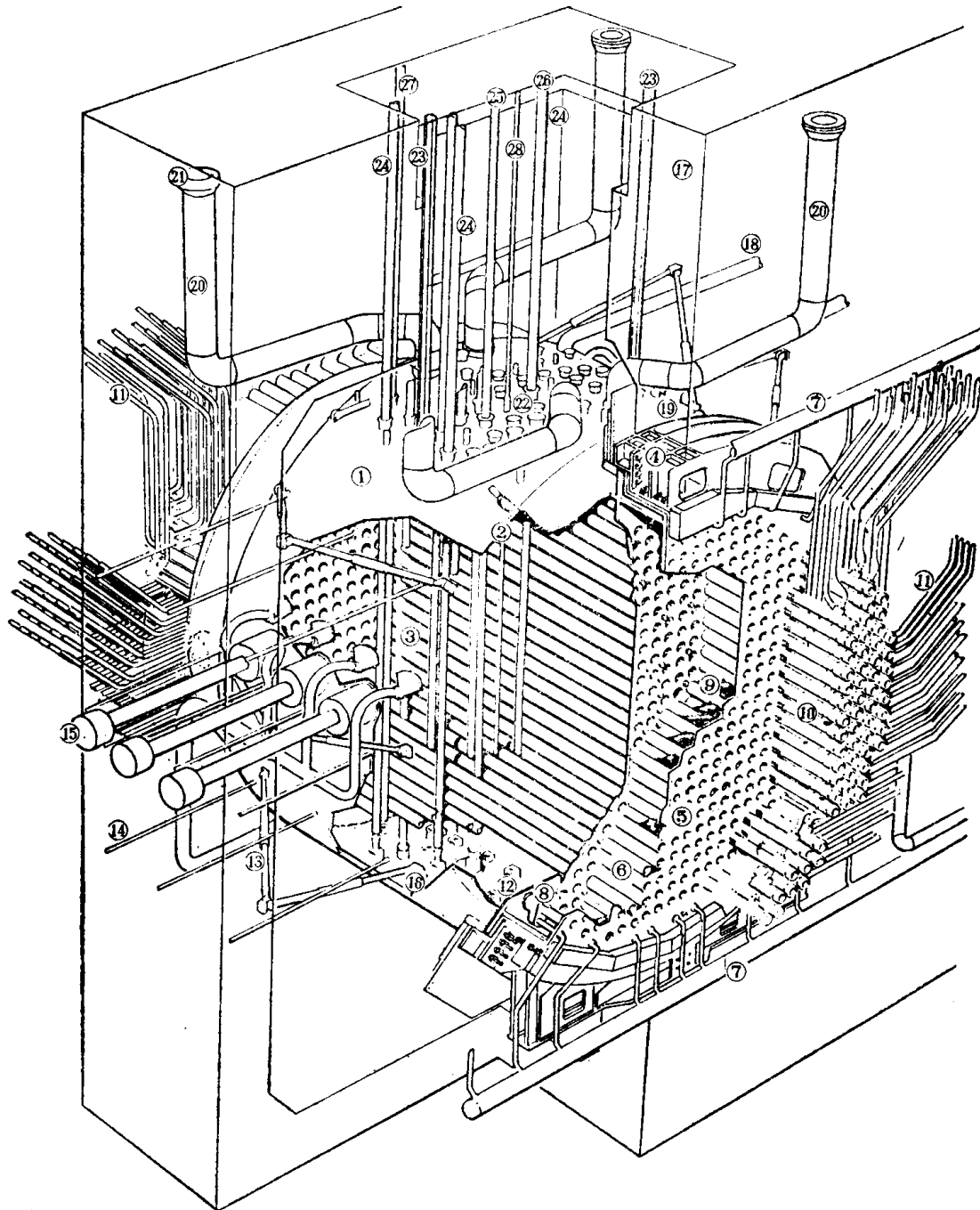


图-3 反应堆部件

1. 排管容器 2. 排管容器外壳 3. 容器管 4. 嵌入环 5. 换料机侧管板 6. 端屏蔽延伸管 7. 端屏蔽冷却管 8. 进出口过滤器 9. 钢球屏蔽 10. 端部件 11. 进水管 12. 慢化剂出口 13. 慢化剂入口 14. 通量监测器和毒物注入 15. 电离室 16. 抗震阻尼器 17. 堆室壁 18. 堆室冷却水管 19. 慢化剂溢流管 20. 泄压管 21. 爆破膜 22. 反应性控制棒管嘴 23. 观察口 24. 停堆棒 25. 调节棒 26. 控制吸收棒 27. 区域控制棒 28. 垂直通量监测器

构。端屏蔽固定在排管容器外壳的两端，起支撑作用，并作为堆芯和换料机操作区之间的屏蔽。它直接支撑在堆室的混凝土结构上(见图-4)。排管容器和端屏蔽都要装在衬有钢覆面并充满轻水的混凝土堆室内。轻水作为混凝土堆室的热屏蔽和冷却介质，也可作为生物屏蔽。

设有固体和液体中子吸收系统，作为反应性的辅助控制。通过停堆棒或往慢化剂中注入液体毒物来实现快速停堆。利用堆内通量探测器和堆外电离室来监测反应堆内的中子通量水平。液体毒物注射喷嘴以及水平通量监测器的导管水平贯穿堆芯，并与容器管相垂直。区

域通量控制组件、反应性控制机构以及垂直通量监测器的导向管从垂直方向贯穿堆芯。垂直通量监测器通过不锈钢管穿过轻水屏蔽层，到达反应性控制机构平台上。

借助于出入口接管的合理布置，慢化剂重水/反射层重水得以循环流动，使排管容器内的温度大体均匀。在排管容器顶部还有泄压装置。

反应堆内有 380 根燃料管道组件，每个组件都有一根锆-铌合金压力管，压力管的两端均伸到 403 号不锈钢端部件的槽形套内（如图-5所示）。装有燃料和重水冷却剂的燃料管道组件，通过滑动轴承支撑在端屏蔽的栅格套管上，部分支撑在容器管和压力管之间的环形垫片上。考虑到热膨胀的需要，端部件的设计应允许燃料管组件与栅格套管之间有相对的轴向移动。

靠近每个端部件的外端有一侧孔，与装有改进的格雷洛克（Grayloc）接头的进出水管联接，管接头的套管焊在进水管上。

燃料管道由装在密封塞体上的弹性密封盘密封。密封塞借助一组可以伸长的爪子锁紧在端部件里面。密封盘上的镀镍层压紧在端部件内的可更换的密封面上，以防泄漏。

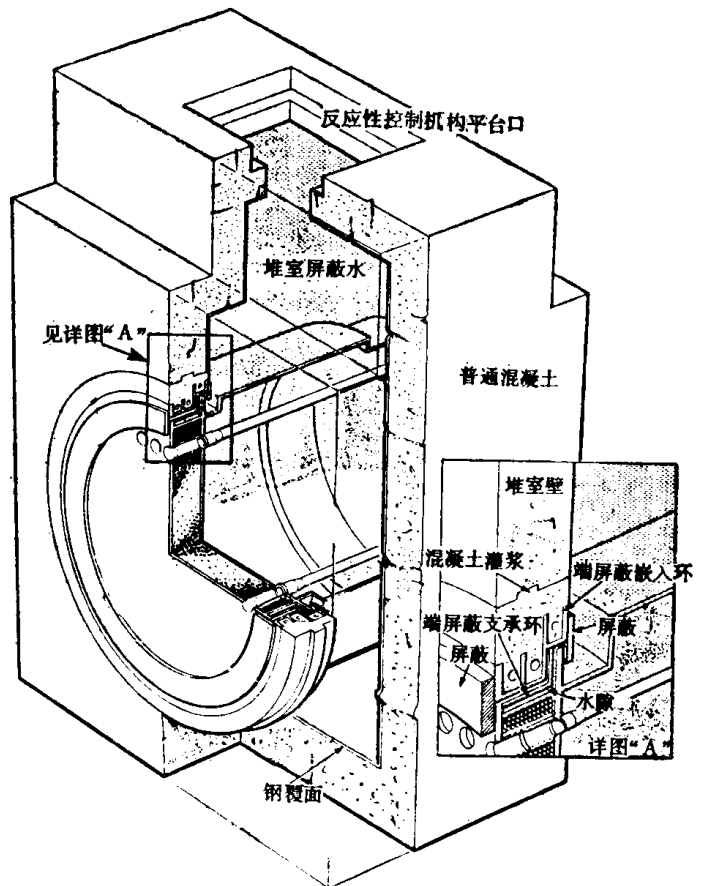


图-4 混凝土堆室

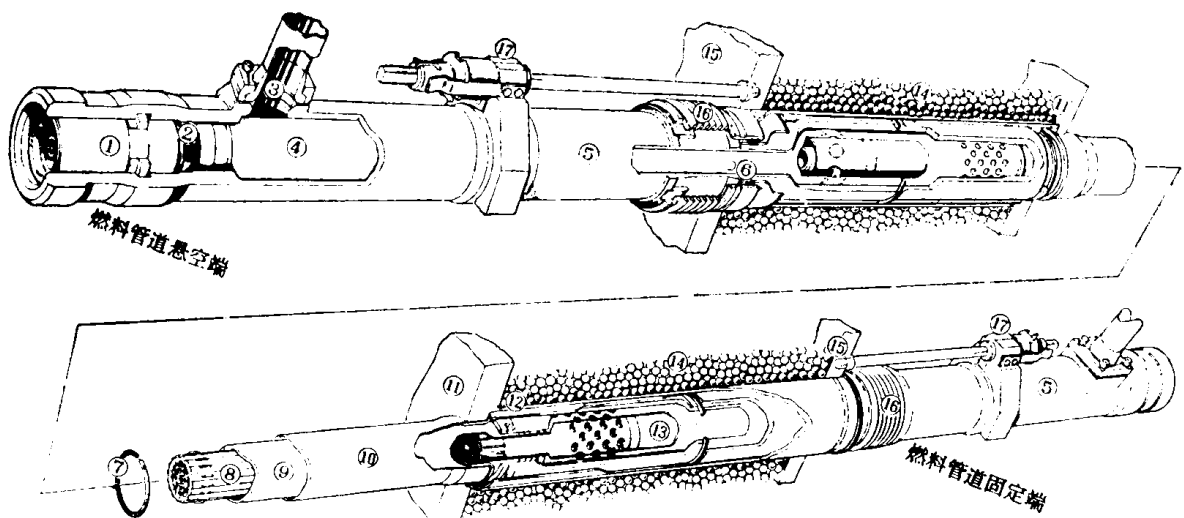


图-5 装有端屏蔽的燃料管组件

- | | | | | | |
|------------|-------------|------------|-----------|-------------|------------|
| 1. 燃料管道密封塞 | 2. 密封盘 | 3. 进水管接头 | 4. 衬管 | 5. 端部件 | 6. 端部件支承 |
| 7. 隔环 | 8. 燃料棒束 | 9. 压力管 | 10. 容器管 | 11. 排管容器侧管板 | 12. 端屏蔽延伸管 |
| 13. 屏蔽塞 | 14. 端屏蔽的屏蔽球 | 15. 换料机侧管板 | 16. 环状波纹管 | 17. 管道定位件 | |

每个端部件内部装有屏蔽塞，端部件在此处穿过端屏蔽。管道密封塞和屏蔽塞在换料期间能用换料机取出和装进。

反应堆用的燃料是二氧化铀压制和烧结成的圆柱形天然铀芯块。锆合金包壳管里约装有29个燃料芯块，密封成燃料元件，再将37根元件焊到两个端部支撑板上，组成柱形燃料棒束（如图-6所示）。元件之间用定位隔块使之相互隔开，在燃料束的中间平面上将隔块焊到燃料元件上。

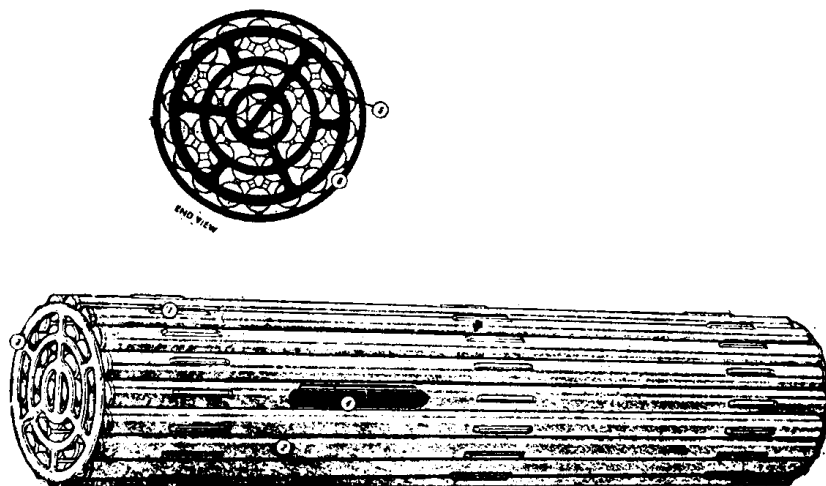


图-6 37根元件棒组成的燃料棒束

1. 锆合金支撑隔块 2. 锆合金燃料包壳 3. 锆合金端部支撑板 4. UO_2 芯块 5. 元件定位隔块 6. 压力管

根据道格拉斯角和皮克林反应堆的成熟经验，反应堆换料采用不停堆双向推进法。遥控操作换料机上的活塞推杆，将燃料束逆冷却剂流动方向推进，同时把废燃料棒束从另一端卸入另一台换料机。换料系统如图-7所示。

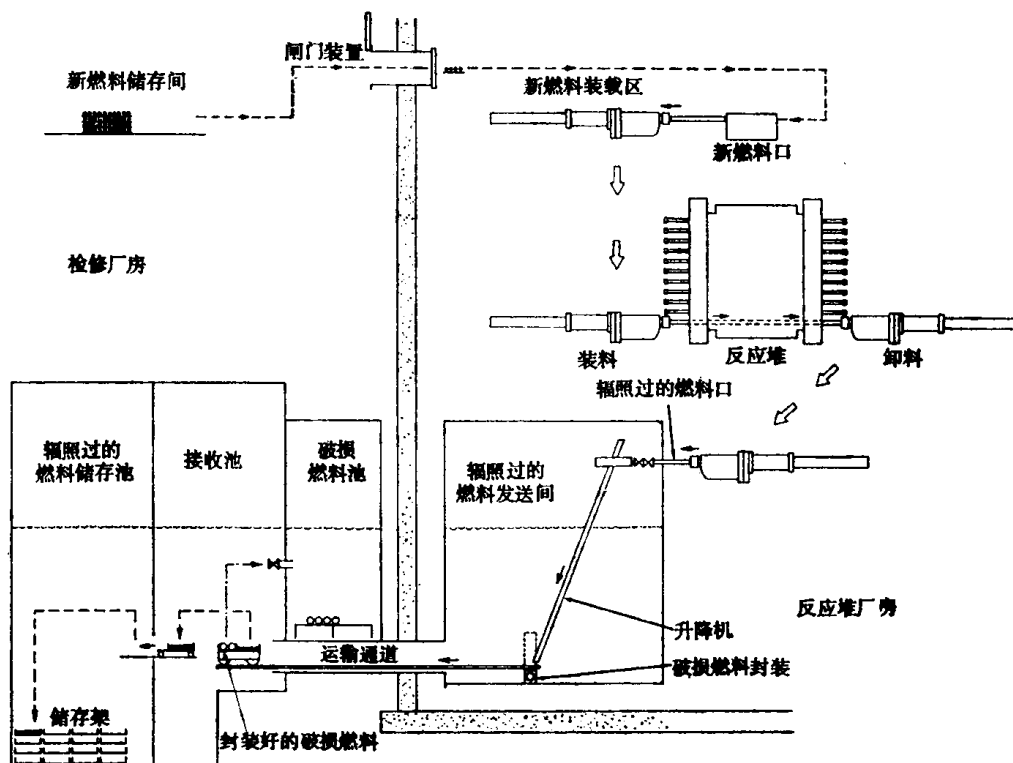


图-7 燃料操作流程

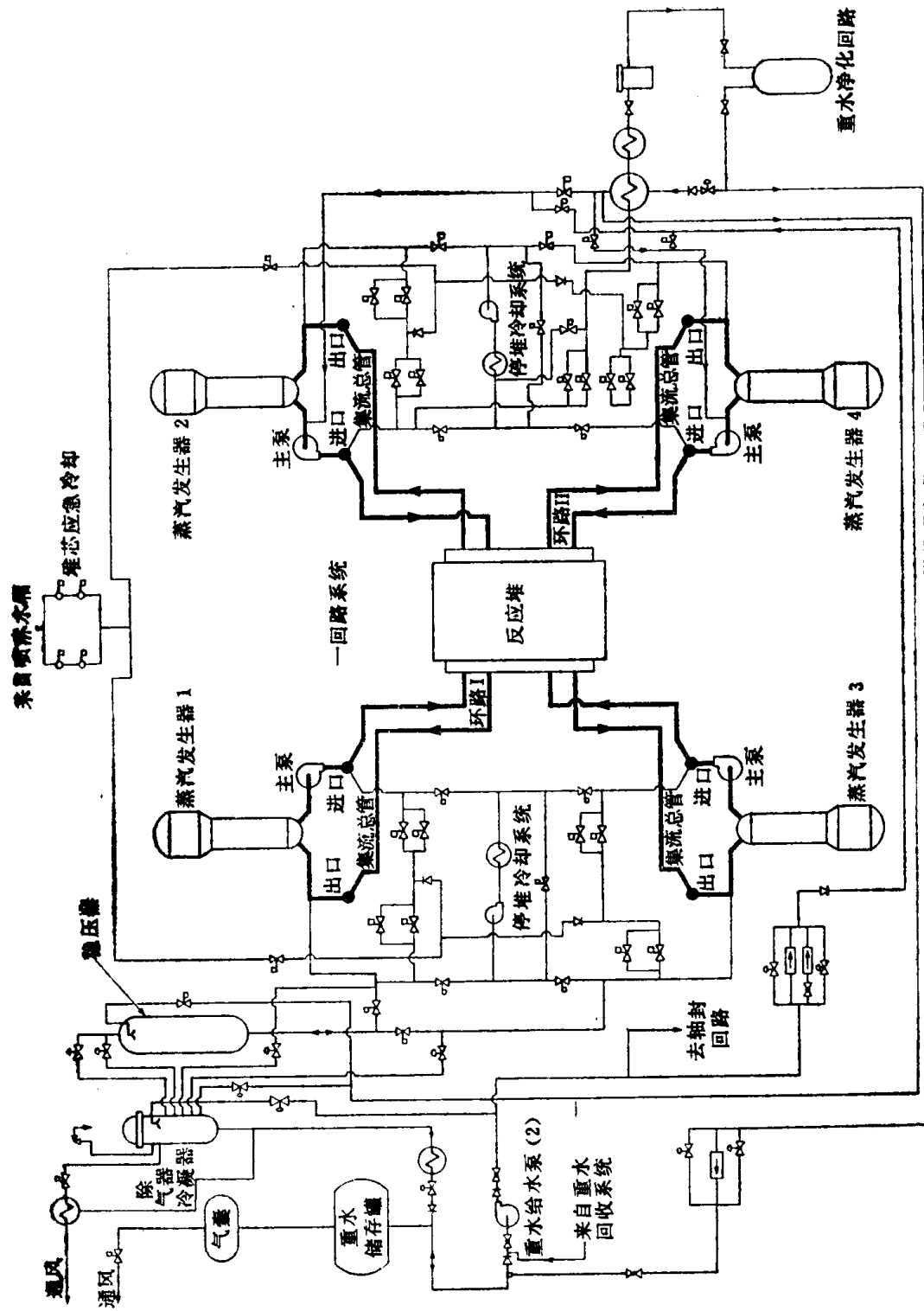


图-8 一回系统综合流程图

废燃料运送到反应堆厂房邻近的水池内贮存。目前所设计的 600 兆瓦（电）的反应堆，其贮存池的容量是按反应堆运行 8—10 年的期限设计的。

3.3 一回路系统

3.3.1 一回路

在一回路系统中，加压重水通过反应堆燃料管道循环，把铀燃料裂变所产生的热量带走。这些热量由反应堆冷却剂带到蒸汽发生器并传给二次侧轻水，再产生蒸汽去驱动汽轮发电机（如图-8所示）。一回路系统有两个主循环环路，每个环路通过堆芯的一半燃料管道。

一回路系统的重要部件有：380 根燃料管道、四台立式蒸汽发生器、四台电动水泵、四根反应堆入口集流总管、四根反应堆出口集流总管、一台电加热的稳压器和互相连接所需的全部管道和阀门。集流总管、蒸汽发生器和泵设置在反应堆的上部。回路设计具有以下特点。

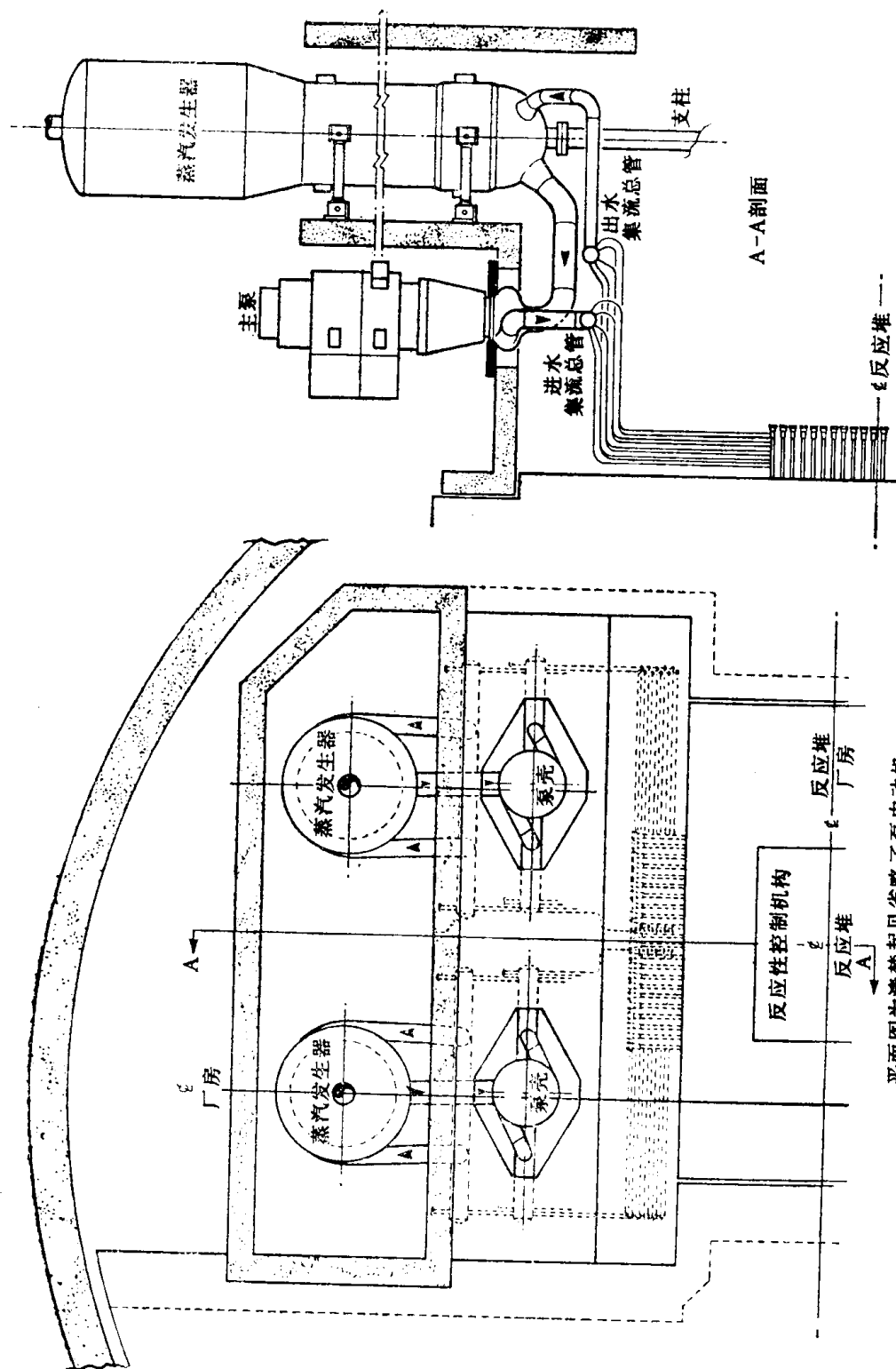
- （1）无论反应堆在运行还是在停堆和维修期间，都要保证冷却剂循环。
- （2）每台主泵都带有飞轮，以便在一旦主泵电动机断电时，减缓流量的突然陡降。
- （3）在水泵惰转后，通过自然对流使一回路系统保持适当的流量，以便导出停堆后的余热。
- （4）一回路系统的压力控制，要适应所有正常运行的条件。
- （5）通过安全阀和相应的反应堆调节系统以及安全系统的作用，防止系统部件超压。
- （6）为了导出反应堆停堆后产生的热量，设有单独的停堆冷却系统。这样就容许在维修时，将一回路系统的主泵和蒸汽发生器内的水排空。
- （7）设有过滤、离子交换和除气等净化装置，以便控制反应堆冷却剂的化学成分。
- （8）应急冷却系统提供足够的冷却水量，在万一由于一回路系统出故障引起反应堆冷却剂流失时，可以防止发生严重的燃料破损。
- （9）在可行的地方，采用焊接结构和波纹管密封阀门，尽量减少可能的重水泄漏点（例如阀门和机械连接处）。在有可能泄漏的地方，应将这些泄漏点接到密闭的重水收集和回收系统。

在发生失冷事故时，为了减少冷却剂正反应性空泡效应的增长速率，在一回路系统中设置了两个环路。每个环路有两台泵、两台蒸汽发生器、两根反应堆入口集流总管、两根反应堆出口集流总管以及进出口支管各 190 根，其布置见图-9。

支管的流量应与燃料管道的功率相匹配，以便在满功率时，反应堆出口集流总管处每根支管的重水蒸汽质量含量基本相同，平均为 4.0%。压力降低会引起蒸汽含量增加，由燃料出口处的 3% 左右提高到反应堆出口集流管总管处的 4.0% 和蒸汽发生器入口处的 4.8% 左右。功率最大的燃料管道内流量为 86000 公斤/小时（190000 磅/小时）。

两个“8”字形一回路系统循环环路，使冷却剂从反应堆两端双向流经堆芯，相邻燃料管道中的水反向流动。

每根出口集流总管处的重水温度为 310℃（590°F），其蒸汽质量含量为 4.0%。由稳压器将反应堆出口集流总管的压力维持在 9.99 兆帕斯卡（绝对）[1449 磅/英寸²（绝对）]。稳压器与反应堆一端的出口集流总管相接。在发生失冷事故时，管线上的阀门可将两个环路相互隔开。



平面图为清楚起见省略了泵电动机

图-9 一回路系统布置图

两根公称直径为 18 英寸的管子,把反应堆的每根出口集流总管接至一台蒸汽发生器。重水流过四台蒸汽发生器,将热量导出。在满功率时,蒸汽发生器出口处的重水温度为 267℃。

用一根公称直径为 24 英寸的管子,将每台蒸汽发生器与一台主泵的吸入口联接。每台主泵将重水(经两根公称直径为 16 英寸的管子)唧送到反应堆的一个进口集流总管。

液体卸压阀和反应堆安全系统共同作为一回路系统的超压保护。每个环路中用一对由仪表控制的阀门作为液体卸压阀。反应堆调节系统对严重的瞬变过程也能起缓冲作用。

3.3.2 蒸汽发生器

四台带有预热段的蒸汽发生器是完全一样的。蒸汽发生器将一次侧的重水冷却剂热量传给二次侧的轻水,使轻水温度上升并沸腾。蒸汽发生器内装有倒置的“U”形立式管束。汽水分离器放在壳内上端(见图-10)。

蒸汽发生器的一次侧包括蒸汽发生器封头、管板和管束的一次侧。挡板把蒸汽发生器封头分隔成两半,一半为入口,另一半为出口。U型管与管板胀接,并在一次侧与碳钢管板堆焊层进行密封焊,蒸汽发生器的封头由碳钢制成并开有两个人孔。

蒸汽发生器二次侧包括壳体、汽水分离器、管束套筒、管板和管束的二次侧、预热段隔板以及管子的支承等。碳钢是主要的结构材料。壳上有人孔以及添加化学药剂和排污的接管。

泵将给水打入有隔板的预热段,并流经U型管束的重水出口部分(冷端)。给水在预热段达饱和温度,然后与U型管束重水入口部分(热端)蒸发段内的再循环饱和水混合。

从汽水分离器出来的饱和水经管束套筒和壳体内表面之间的环形流道,再经过套筒底部的孔流到U型管束的重水入口段(热端)。

升至U型管束上端的“汽-水”混合物经汽水分离器,被分离出来的水再回到管束循环。湿度低于0.25%(按重量)的蒸汽经出口管嘴流出蒸汽发生器。汽水分离器内的水位通过水位、蒸汽流量和给水流量等综合测量来控制。

每座 600 兆瓦(电)电站的蒸汽发生器,其设计基本相同,而管束的传热面积可以改变,以适应每座电站所选定的汽轮机所需的二次侧蒸汽压力。传热计算的基本公式为:

$$Q = UA\Delta t$$

式中

Q ——反应堆传给冷却剂的热功率,由于反应堆功率是标准的,所以此值是已知的;

U ——总的传热系数,对于基本上是标准的蒸汽发生器设计,此系数也是已知的;

A ——传热面积;

Δt ——一回路冷却剂(标准条件)和二次侧流体之间的有效对数温差;

如果 A 增加,则二次侧温度及蒸汽压力可以提高(即 Δt 减少)。二次侧蒸汽压力一般在 600 和 800 磅/英寸² (42—56 公斤/厘米²) 之间。较高的蒸汽压力可以改善热循环效率和提高电站总输出功率,但是这会加大蒸汽发生器的尺寸,并使 U 型管束中的重水量增多,致使蒸汽发生器成本增加。因此,每座反应堆需参照上述因素和其它有关因素来选择最佳方案,以确定二回路的蒸汽压力。

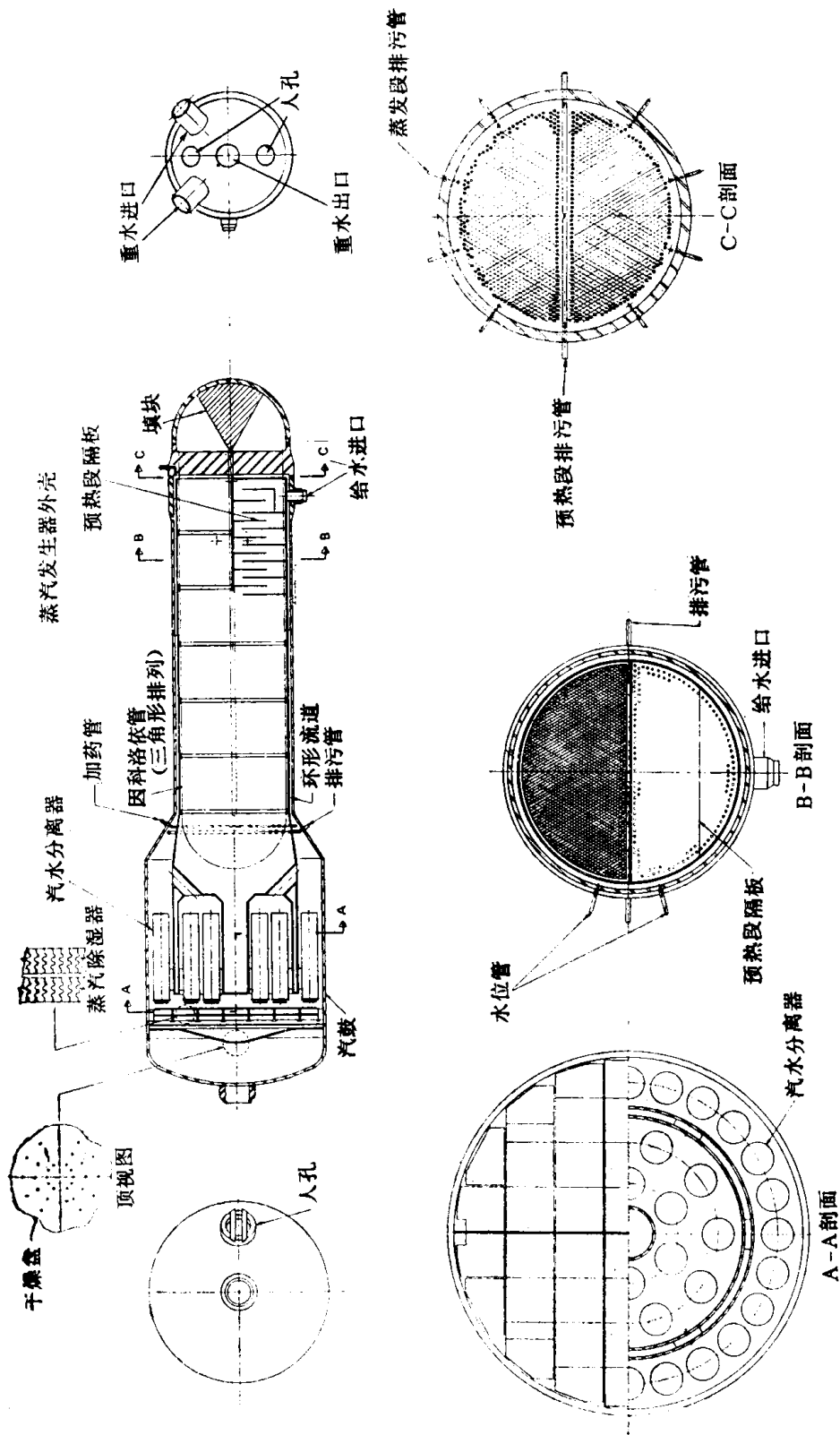


图-10 蒸汽发生器示意图

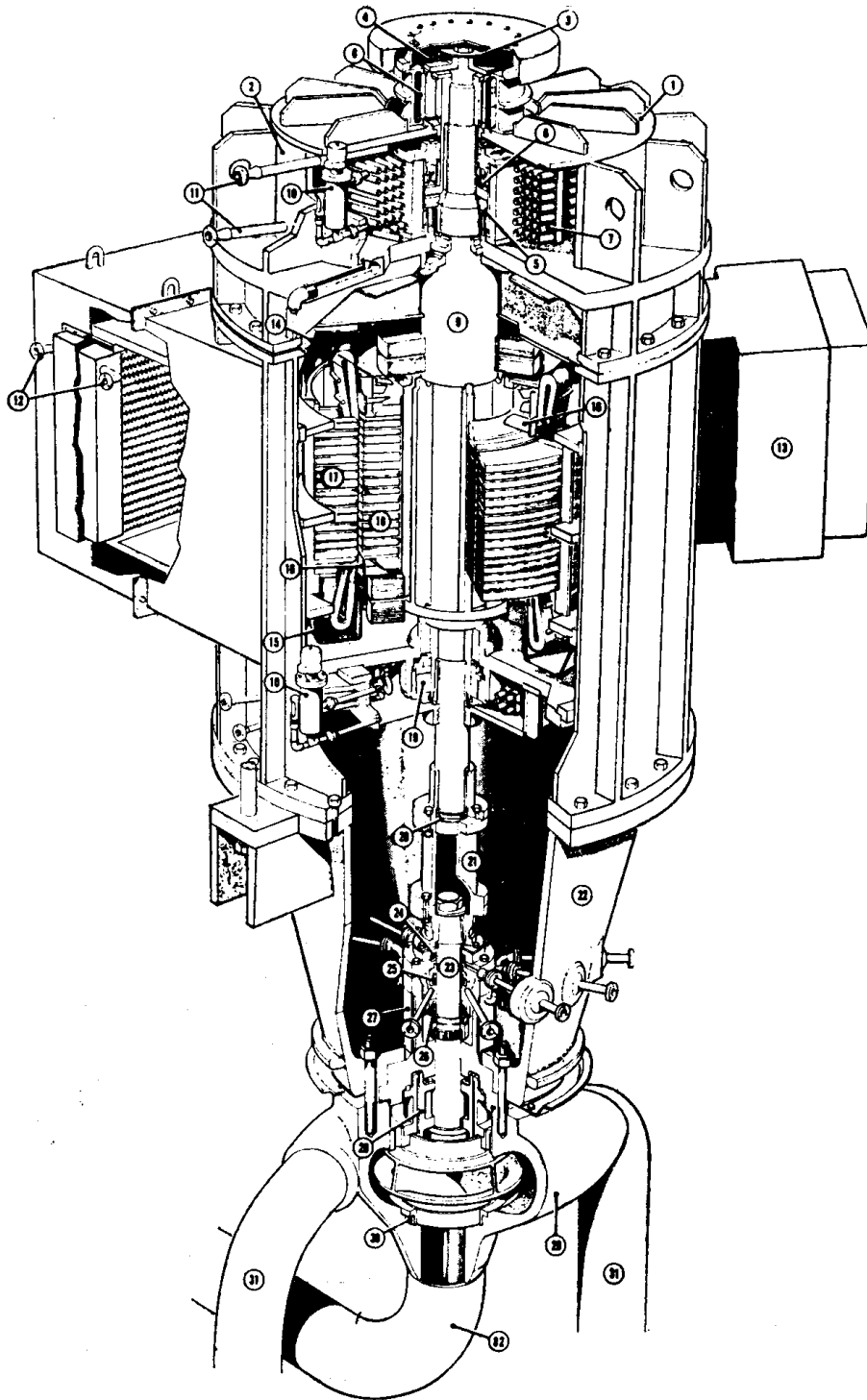


图-11 主泵

1. 上部油槽盖 2. 提升油泵 3. 推力轴承油槽 4. 推力轴承回转盘 5. 推力轴承组件 6. 下向推力轴承 7. 上向推力轴承 8. 推力轴承冷却盘管 9. 飞轮 10. 制动环 11. 电机轴 12. 起吊环 13. 油位控制器 14. 轴承冷却水管 15. 空气冷却器水管 16. 调压箱 17. 空气导板 18. 上部导向轴承装置 19. 空气导板 20. 风扇 21. 快速切断连接器 22. 定子组件 23. 转子组件 24. 轴定心装置 25. 下部导向轴承组件 26. 推力盘 27. 中间联轴节 28. 电机座检查口盖 29. 电机座 30. 泵轴 31. 气密封 32. 第二道机械密封 33. 第一道机械密封 34. 泵盖 35. 泵轴承 36. 泵壳 37. 口环 38. 泵出口 39. 泵吸入管