

核反应堆 制造工艺

〔苏〕 В.С. 科尔萨科夫
В.Ф. 维戈夫斯基
В.И. 朱哈恩

原子能出版社

В.С.Корсаков, В.Ф.Выговский, В.И.Михан

Технология. Реакторостроения

Москва Атомиздат 1977

核反应堆制造工艺

〔苏〕 В.С.科尔萨科夫

В.Ф.维戈夫斯基

В.И.朱哈恩

肖隆水、赵兆颐 译

吕允文 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

沈阳新华印刷厂印刷

(沈阳兴顺街二段10号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张8 · 字数 210千字

1981年12月第一版·1981年12月第一次印刷

印数001—750·统一书号:15175·293

定价:1.20元

内 容 简 介

本书是苏联一九七七年出版的高等学校教学参考书。书中介绍了反应堆制造中的主要工艺问题，反映了苏联和其它国家反应堆制造工业的成就和发展前景；并对核反应堆释热元件、控制棒及其传动机构、高压容器、蒸汽发生器等部件的制造、装配和检验以及反应堆的总装等作了较全面的叙述。书后还附有反应堆制造过程中所用的机床设备的详细说明。

本书可作为高等学校反应堆工程、反应堆材料等专业的教学参考书，并可供有关部门的工程技术人员参考。

本书在翻译过程中，部分章节得到清华大学工程物理系张效忠、精密仪器系徐世璞等的帮助，在此谨致谢意。

目 录

第一章	反应堆制造的特点和反应堆装置的基本概念	1
§1.1	反应堆制造的特点	1
§1.2	反应堆的概念	3
§1.3	反应堆装置与反应堆的主要类型	7
§1.4	释热元件和燃料组件的结构	23
第二章	释热元件燃料芯体和包壳的制造工艺	34
§2.1	燃料芯体的制造工艺	34
§2.2	释热元件包壳的制造工艺	63
第三章	释热元件的装配和检验工艺	68
§3.1	燃料芯体与包壳的装配	68
§3.2	活性区和再生区释热元件的检验	92
§3.3	将释热元件组装成释热组件的装配方法	116
第四章	活性区其它部件的制造工艺	122
§4.1	工艺管的制造工艺	122
§4.2	调节棒的制造工艺	125
§4.3	固体慢化剂的制造工艺	139
第五章	控制系统伺服传动机构的装配和调整工艺	145
§5.1	传动机构的结构分类	145
§5.2	传动机构的装配	146
§5.3	传动机构的试验和调整	150
第六章	高压容器的制造工艺	152
§6.1	容器的概况和材料	152
§6.2	高压容器的制造工艺	154
§6.3	预应力钢筋混凝土高压容器的制造工艺	180
第七章	核动力装置用蒸汽发生器的制造工艺	188
§7.1	环形联箱的制造工艺	188
§7.2	螺旋管束的制造工艺	189
§7.3	管板的制造工艺	191

§7.4 管与管板的装配	194
§7.5 蒸汽发生器的试验	202
第八章 反应堆总装	203
§8.1 安装的准备工作	203
§8.2 反应堆的总装和试验	204
§8.3 反应堆组装用的工艺装备和设备	225
附录 核反应堆大型零件机械加工用的重型机床及数字程 序控制机床	236
参考文献	250

第一章 反应堆制造的特点和反应堆装置的基本概念

§1.1 反应堆制造的特点

反应堆制造工业是一门新兴的工业，从世界上第一个原子能发电站和第一个原子能破冰船“列宁”号建成时算起到现在只有二十多年的时间。尽管从创立到现在时间还很短促，但它现今已和许多科学研究机构、结构设计部门、生产制造部门以及建筑安装部门密切相关。这是因为反应堆制造在科学和技术面前提出了大量的崭新的、极其复杂的任务。如果这些任务不解决，反应堆技术就不可能有今天这样的水平。

核动力装置的主要特点是在反应堆内具有放射性。而放射线会与制造反应堆部件及其他设备的材料起作用，如果不采取相应的安全措施，对人体也会有伤害作用。各种材料由于辐射作用的结果，通常会变硬并失去塑性，热导率也会下降，有些材料的蠕变速度还会变大。辐射对铀的影响特别厉害，它使铀发生超蠕变、辐照生长和变形。根据上述情况，在反应堆制造中，选择材料及研制具有给定性质的新材料是很重要的。为此，必须编制所选择材料的合适的零部件制造工艺（其中包括热处理规范），使得产品保证具有所要求的工作能力。

当选择堆内部件的材料时，还要考虑到不同材料具有不同的中子有害吸收能力，即对反应堆内核能释放过程具有不同的影响。对于堆内设备，希望选用中子吸收能力小的材料。这就更增加了材料选择的困难。

设备和管道的材料与载热剂作用所形成的腐蚀产物，落到载热剂中并经过反应堆后，在不同程度上将产生活化，即它们自

身变成放射源。为了避免管道和设备具有很高的活性，必须保证所选材料在给定的参数下在载热剂中具有很高的抗腐蚀和抗侵蚀的稳定性。

对反应堆装置的密封性提出了很高的要求。这是因为载热剂从装置的部件中泄漏到工艺房间后，将呈现出活性；活性给工作带来麻烦并使工作人员在这些工艺房间停留的时间受到限制。为了保证所要求的密封性，反应堆装置基本上采用焊接连接；由于这种或那种原因不能焊接的地方，则采用可拆卸的连接，但它们的设计和加工，都要保证所要求的密封性。

反应堆制造业十分注意产品的清洁度。这一点在反应堆装置建造的下述所有阶段必须予以保证：在工厂制造过程，运输过程，安装过程，启动准备过程以及在停放和检修期间。这是因为设备的沾污会引起腐蚀的加剧、活性的提高、堆内流通截面堵塞的危险以及释热元件的烧毁等等。受载热剂冲刷的表面，加工时要求很高的光洁度，常常进行电抛光。

反应堆制造工艺可分成两类。核燃料元件以及其他堆内部件的制造工艺属于第一类。这类工艺是反应堆制造特有的。它是随着反应堆制造业的形成而建立和发展起来的，并具有它本身所固有的独特的性质。不过在这方面也采用了许多其他工业部门所应用的工艺过程和设备。

第二类是有关反应堆装置的各种设备和管道的制造工艺，包括反应堆压力容器的制造工艺。这类工艺和其他工业部门的工艺基本上相类似，其区别在于对材料以及它们的检验提出了更高的要求；对加工质量、对半成品和成品的检验提出了更高的要求；还要求更严格地遵守工艺规范。由于在运行过程中检修反应堆装置的设备比检修其他类型的装置要困难得多，因而对反应堆装置可靠性的要求也高得多。

当今，在反应堆装置的整个建造周期中，安装工作占的比重很大，因此它使建造工期拖长。为了加快速度，应把很大部分安装工作量转移到设备制造厂去做，并应扩大反应堆的部件和设备

的标准化。这些措施将进一步改善反应堆的技术经济指标。但它要求提高工厂的工艺水平。

从整个上述情况可看出，反应堆制造本身具有许多非常独特之点。为了保证反应堆装置的可靠性，对它们的加工和安装均要求很高的质量。与此相关的是，对于从事反应堆装置的加工、安装以及其他有关工作人员，要求具有很高的文化水平和专业知识。

§1.2 反应堆的概念

为实现原子核裂变自持链式反应的装置称作核反应堆。由于裂变的结果在反应堆内释放出热能。含有可裂变同位素 ^{235}U ， ^{233}U 和 ^{239}Pu 的物质称作核燃料。反应堆功率取决于单位时间内的核裂变次数。功率1瓦相应于 3.2×10^{10} 裂变/秒。1公斤 ^{235}U 内含有 2.563×10^{24} 个原子核。当1公斤 ^{235}U 全部裂变时，能释放出 22.2×10^6 千瓦-小时的能量。当中子与原子核相互作用时产生核裂变，而每次裂变又产生2个或3个新的中子（平均为2.5个中子）。当反应堆的功率水平维持不变时，新产生的2.5个中子中有1个用来作为下次裂变用，剩下的1.5个被活性区的材料所吸收或逸出活性区。这两种过程可以用来调节裂变过程，并靠核和中子相互作用以及逐次核反应而从一种物质变为另一种物质的生产。

反应堆（见图1.1）一般是由下列部分所组成：核燃料、慢化剂、反射层、载热剂（冷却剂）、调节棒和安全棒、调节棒的传动机构、监测系统的探测器、热屏、压力容器和外部的生物屏蔽。燃料、慢化剂、调节棒和安全棒、部分监测探测器组成活性区，载热剂流过活性区。

根据核燃料在活性区的分布方式，反应堆可分成均匀堆和非均匀堆。在非均匀反应堆内，燃料集中在称作释热元件的部件内，并在活性区内断续地分布着。非均匀堆活性区内的中子分布是不均匀的。在均匀反应堆内，燃料与慢化剂或燃料与载热剂（或

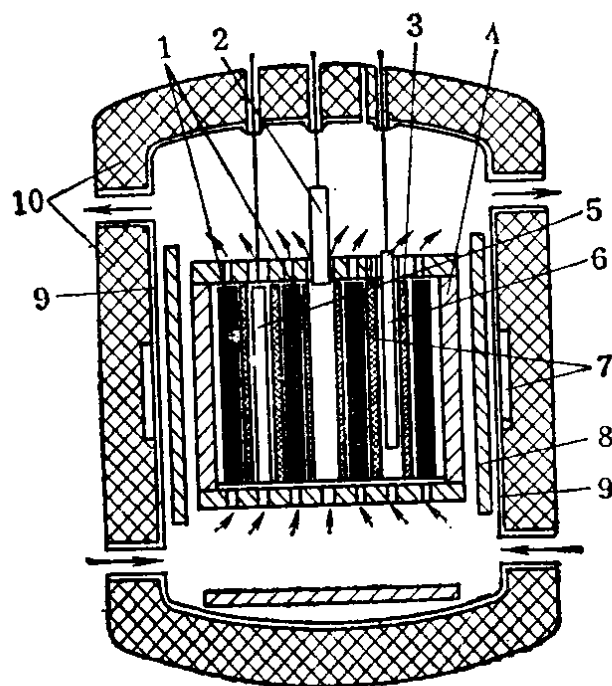


图1.1 压力壳式核反应堆示意图

1—释热元件（核燃料）； 2—安全棒； 3—慢化剂； 4—反射层；
5、6—调节棒； 7—监测反应堆参数的探测器； 8—热屏； 9—压力容器； 10—生物屏蔽。（箭头表示载热剂的流向。）

燃料与慢化剂以及载热剂）是均匀混合的，它们的形态可能是溶液、合金、化合物或悬浮体。均匀堆活性区内的中子分布也是均匀的。

在实践中，最常见的是非均匀反应堆。非均匀反应堆的释热元件，用来将活性区的核燃料布置成所要求的排列方式。堆内的大部分热量是由元件内核的裂变所产生的。产生的热量传给载热剂。核的裂变是由于各种能量的中子与核相互作用的结果。根据能量的不同，中子又分成快中子、中能中子和慢中子即热中子。当核裂变时产生出快中子，它们和原子量轻的物质的原子核相碰撞而慢化下来。这些在活性区内放置的为降低中子能量用的物质称作慢化剂。为减少从活性区泄漏中子，在它周围包上反射层。它是采用与慢化剂相同的材料制成的。用吸收中子强的材料制成的调节棒在活性区内不同的位置上移动，使中子通量按要求进行变化，这样就可调节单位时间内核的裂变数。安全棒也是用吸收中子的材料制成的，在正常工作时，放在活性区的外面，如果一旦需要，即可快速进入活性区，使裂变过程很快地停止。为了监督反应堆的工作，在活性区和它的周围安放了各种探测器，以便

获得中子通量、载热剂的温度和压力以及其他参数的信号。为了减少辐射对活性区外围结构的损伤作用，紧靠活性区的外面设有热屏。反应堆的所有结构安置在起支承作用的容器内，并在它的周围设置了生物屏蔽。生物屏蔽使堆外的辐照水平降低到安全值范围。

中子束或热能可成为反应堆的有用产品。在第一种情况下，热能是反应堆的副产品，一般用低参数的载热剂把它导出来并用各种方法将它散发到周围介质中去。这种反应堆可用来获得各种有用的核素，以及用来实现放射-化学过程等等；这种反应堆被称作工艺反应堆*。另外的一些反应堆则相反，有益的产品是热能而不是中子；这种反应堆被称作动力反应堆。由这种堆内导出热能的载热剂参数应尽可能高。动力反应堆中还包括热化反应堆，它只生产供给热力用户的热能。这种反应堆的载热剂参数取决于热力用户的种类：供暖，低温、中温或高温生产过程。

动力反应堆可作为热源用于原子能发电站、船舶推进器和飞行装置的推进器上。根据它们使用的领域不同，把它们称作电站用反应堆、船用反应堆和宇宙反应堆。有效地利用中子又利用热能的反应堆称作两用堆。

还有一类反应堆，在实际辐照条件下用来进行反应堆部件和材料的研究。这类反应堆称作实验堆。在这种堆上，如同在工艺堆上一样中子是其有用产品。

除了根据使用范围和用途分类外，反应堆还可按产生核裂变的中子能量、按慢化剂和载热剂的种类而分类。按产生裂变的中子能量分成慢（热）中子堆和快中子堆。作为慢化剂可采用普通水、重水、有机液体、石墨、铍、氧化铍和某些金属的氢化物。用作反应堆载热剂的有不沸腾的或沸腾的普通水和重水、水蒸汽、有机液体、液态金属以及气体。

* 即生产反应堆。——译者注

反应堆按结构可分为压力壳式、压力管式和游泳池式。在压力壳式堆中（见图1.1），载热剂经过一个或几个接管进入压力容器内的入口联箱，流过活性区后到出口联箱，再经过一个或几个接管流出压力容器。这种反应堆的压力容器承受载热剂的内压，载热剂从一个共同联箱引进活性区的所有释热元件中。

在压力管式反应堆内（图1.2），载热剂分别引进分布在活性区内装有释热元件的每一个管道中，载热剂流过管道后，同样从每个管道单独地引出堆外。在压力管式反应堆内，容器仅起支承结构作用，而每个管道本身承受载热剂的内压。

在游泳池式反应堆内（图1.3），大尺寸的容器中充满水而形成“游泳池”。活性区安放在水层下面池子的底部。它的冷却或者用池内的循环水，或用在专门回路中循环的载热剂。

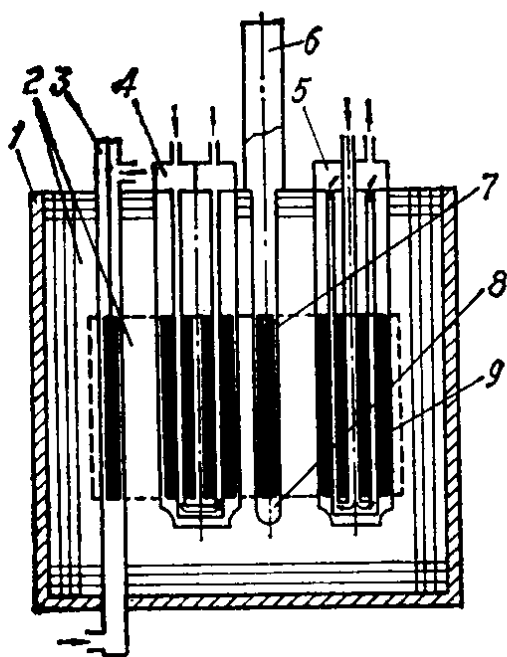


图1.2 压力管式反应堆示意图

1—容器； 2—砌体（慢化剂与反射层）； 3—装释热组件的单独燃料管道； 4—装释热组件的U形联合燃料管道； 5—装释热组件的带中心管的联合燃料管道； 6—棒的传动机构； 7—调节棒； 8—调节棒套管； 9—释热元件。

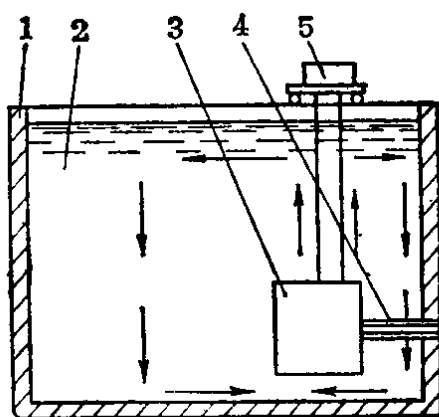


图1.3 水自然循环的游泳池式反应堆示意图

1—容器； 2—水池；
3—活性区； 4—实验孔道； 5—装有调节棒传动机构的小车。
(箭头表示水的流向。)

不同特征的组合决定了可能出现的大量的不同类型的反应堆。对于不同的装置选择哪一种类型的反应堆取决于很多因素。

§1.3 反应堆装置与反应堆的主要类型

反应堆发出的热量必须不断地导出来。从动力反应堆中导出的热量有效地为热能用户所利用，这些用户就是蒸汽轮机或燃气轮机、采暖或生产装置。从工艺堆或实验堆导出的热量则排放到周围介质中。为了把热量传递给用户或排放到周围介质中，建立了反应堆装置。任何反应堆装置的主要组成部分为热源、热能用户以及循环器等。热源和热能用户的类型以及结构取决于反应堆装置的用途和特性。循环器用来把载热剂从反应堆啣送到热能用户并返回反应堆。根据反应堆装置的用途和类型还包括其他的设备。反应堆装置可按用途、反应堆的类型、载热剂的类别和参数进行分类。

根据这些特征，反应堆装置分为单回路、双回路和三回路三种类型（图1.4）。在单回路装置上，从反应堆流出的载热剂具有热能用户可以直接利用的状态和参数。在双回路装置上，堆的载热剂按照它的状态不能被热能用户直接运用。在这种情况下，热量是经过专门的换热装置（热交换器、蒸汽发生器）从一回路传给二回路。当一回路的具有活性的载热剂与二回路的工质必须排除任何可能的接触以避免它们之间发生强烈的化学反应时，则采用三回路装置。为此，在载热剂与工质之间设有中间回路。按单回路系统建立的装置中有沸水反应堆、蒸汽过热反应堆、气冷反应堆。按双回路系统可建立任何类型的反应堆装置；按三回路系统建立的是液态金属反应堆装置。

反应堆装置的最重要部分除了带有控制保护系统的反应堆本身外，还有蒸汽发生器、汽水分离器、循环泵和给水泵、压气机、风机、容积补偿器、载热剂净化过滤器、各种热交换设备、各种类型的阀门、生物屏蔽等等。这些设备的绝大部分已用于国

民经济的其他部门。但是核技术的特点是对这些设备的加工质量和安装质量要求特别高。蒸汽发生器、生物屏蔽以及其他某些特殊设备的制造工艺将在后面研究。

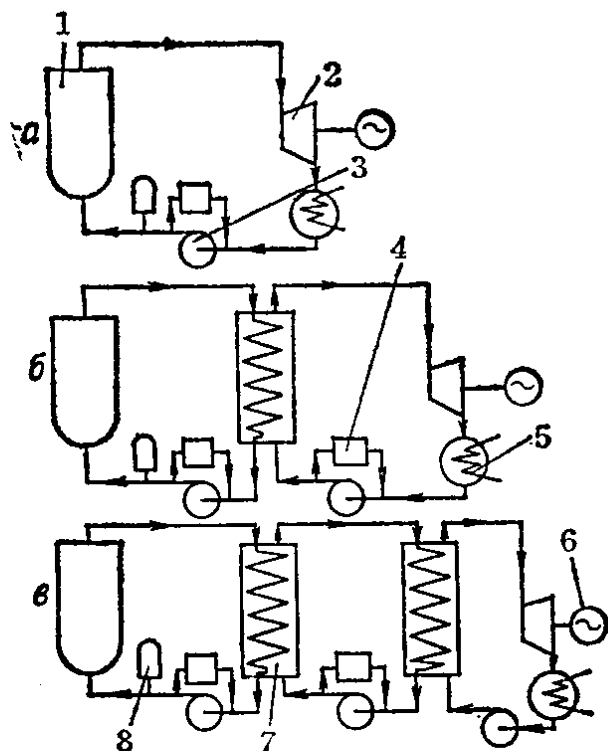


图1.4 单回路 (a)、双回路 (b) 和三回路 (c) 的反应堆装置原则性系统图

1—反应堆； 2—燃气轮机； 3—循环器； 4—净化系统； 5—凝汽器（冷却器）； 6—发电机； 7—蒸汽发生器（热交换器）； 8—容积补偿器。

世界上采用最广的有几种类型的反应堆，这就是压力管式石墨沸水堆和蒸汽过热堆、压力壳式沸腾型和非沸腾型水堆、二氧化碳石墨低温气冷堆、石墨氦高温气冷堆、钠冷快中子堆和游泳池式水堆。除游泳池堆外，所有这些类型的反应堆都可应用于原子能电站。而非沸腾型水堆还可用在船用装置上。游泳池堆绝大部分是实验堆。在苏联已成功地运行了很长时间的反应堆有别洛雅尔斯克原子能电站БАЭС的石墨水冷蒸汽过热堆、新沃罗涅什和科拉原子能电站以及“列宁”号破冰船的压水堆，还有季米特洛夫格勒城核反应堆研究所内的沸水堆。列宁格勒原子能电站ЛАЭС的两个压力管式石墨沸水堆正在运行，它的饱和蒸汽直接送进蒸汽轮机。每个堆的电功率为1000兆瓦。这种类型的反应堆将建造在库尔斯克、切尔诺贝尔斯克和斯摩林斯克原子能电站。正在建造的伊格纳林原子能电站也是这种类型的反应堆，但单堆功率增加到1500兆瓦。反应堆的结构和尺寸并没有改变，而是靠改装释热组件使功率增大。电功率440和1000兆瓦的压水

反应堆将要建在科拉、亚美尼亚、新沃罗涅什以及其他原子能电站中。此外，在别洛雅尔斯克原子能电站正在建造电功率为 600 兆瓦的钠冷快中子堆 БН-600。下面将用具体的例子简要地研究一下各种类型反应堆的结构。

压力管式石墨水冷蒸汽核过热反应堆（图1.5） 高效率是这种反应堆的特点。包在外壳内的作为慢化剂和反射层的石墨砌体是这种反应堆活性区的结构基础。石墨砌体堆放在底板上并在

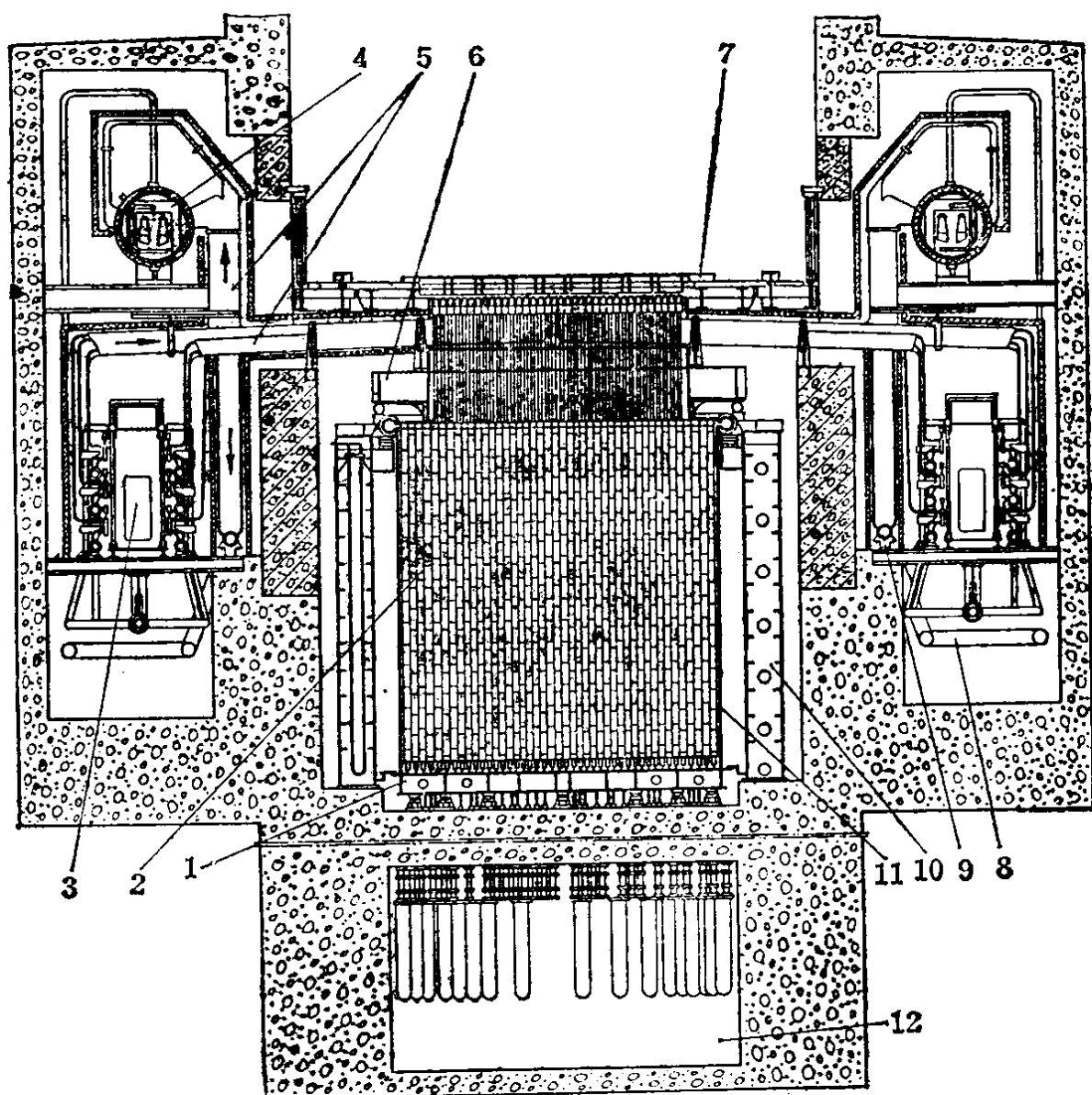


图1.5 别洛雅尔斯克原子能电站 I 号和 II 号反应堆纵剖面图

1—下底板；2—石墨砌体；3—阀门巡视走廊；4—汽水分离器；5—管道；6—上盖板；7—上顶盖；8—主蒸汽管道；9—过热蒸汽联箱；10—屏蔽水箱；11—外壳；12—控制保护系统小室。

上面盖上盖板。外壳直接与下底板焊接并经过线性膨胀补偿节与上盖板焊接。上盖板和下底板是具有顶部承荷板的框形金属构件，承荷板厚42毫米，并用垂直筋进行加固。上盖板的高度为1.5米，下底板的高度为0.6米。钢板焊到下底板的垂直筋上而形成一个密闭的空腔，并在其中充满水。为了导出热量，在盖板的顶板下面设有蛇形管，冷却水在其中循环着。外壳的外围设有侧生物屏蔽——充满水的厚1米的环形水槽及厚3米的混凝土防护层。上盖板支承在水槽上。石墨砌体堆积在下底板上并由中央带孔的垂直石墨柱组成，石墨柱又是由截面为 200×200 毫米的单个石墨块所组成。在石墨柱的中心孔内布置了998个燃料管道和6个自动调节棒管道。另有78个手动调节棒管道和16个安全棒管道都布置在石墨块之间。所有控制棒的传动机构都放在反应堆下面的小室内。

反应堆燃料管道（图1.6）是释热元件和载热剂流道的联合结构，它们分成两种类型：蒸发管道ИК和蒸汽过热管道 ППК，它们是直径75毫米、长约13.0米的圆柱体，由管子、石墨套、金属包壳和释热元件所组成。

蒸发管道内的载热剂经过入口接管进入管道的上端头，沿中心管下注到底部集流小室，然后通过6个孔向上流进螺旋管式温差补偿器，再流入释热元件的内管。温差补偿器用来补偿上升管与下降管热膨胀的不一致。释热元件是由两个同心管所组成，在两管之间的环缝内填满核燃料。流经释热元件以后，载热剂就变成汽水混合物沿大直径管进入上端头并由出口接管引出管道。

蒸汽过热管道内的载热剂沿三根下降管流入底部集流小室，然后沿三根上升管向上流动，在每根管的流道上装有释热元件。温差补偿器放在下降管上。

从反应堆两侧的分配联箱把循环水引入蒸发管道，把饱和蒸汽引入蒸汽过热管道，从蒸发管道来的汽水混合物通过管道进入汽水分离器，而从蒸汽过热管道来的过热蒸汽进入布置在反应堆两侧的过热蒸汽收集联箱。

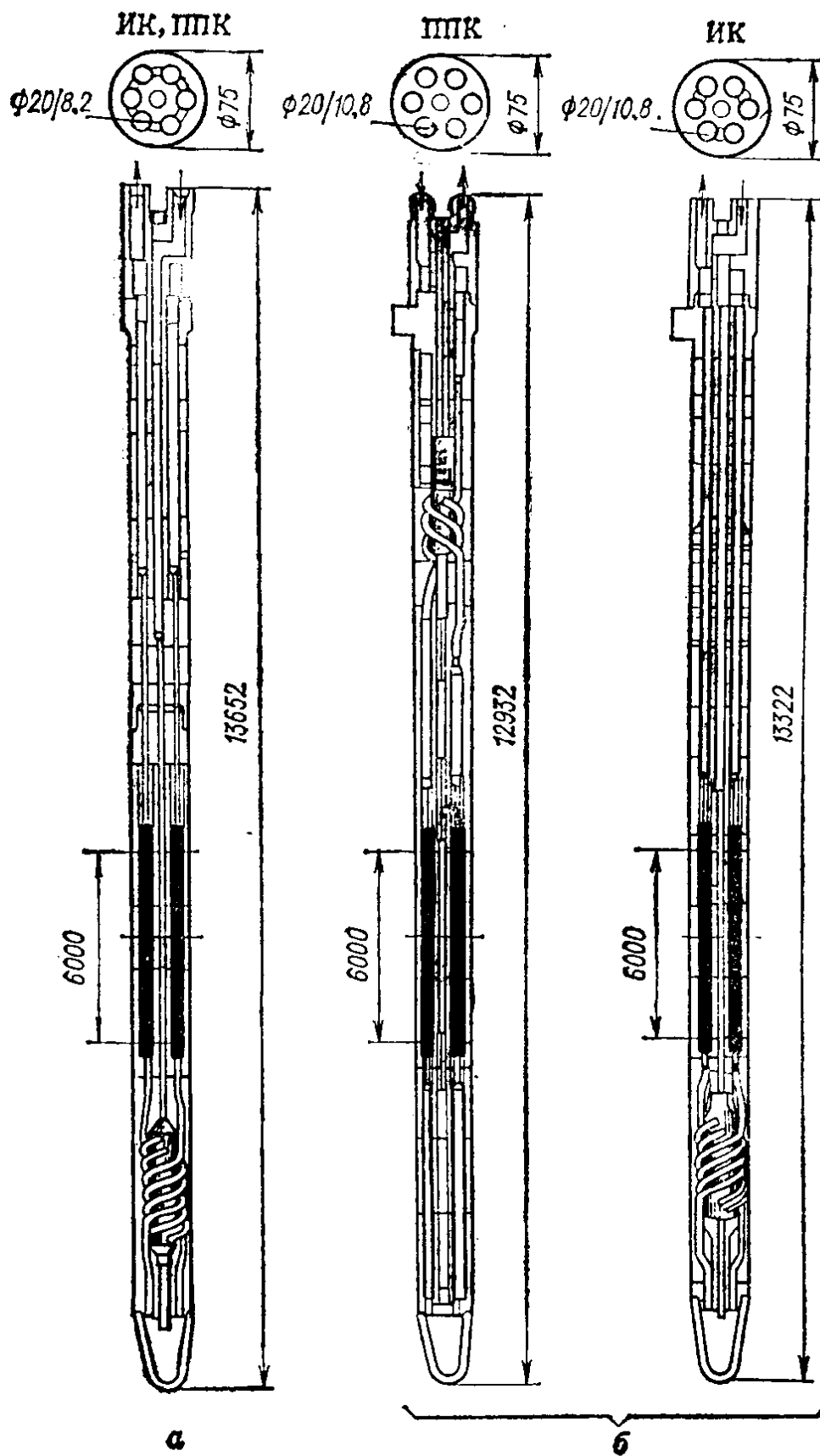


图1.6 燃料管道
 a—别洛雅尔斯克原子能电站I号反应堆的燃料元件;
 6—电站I号反应堆的释热元件。

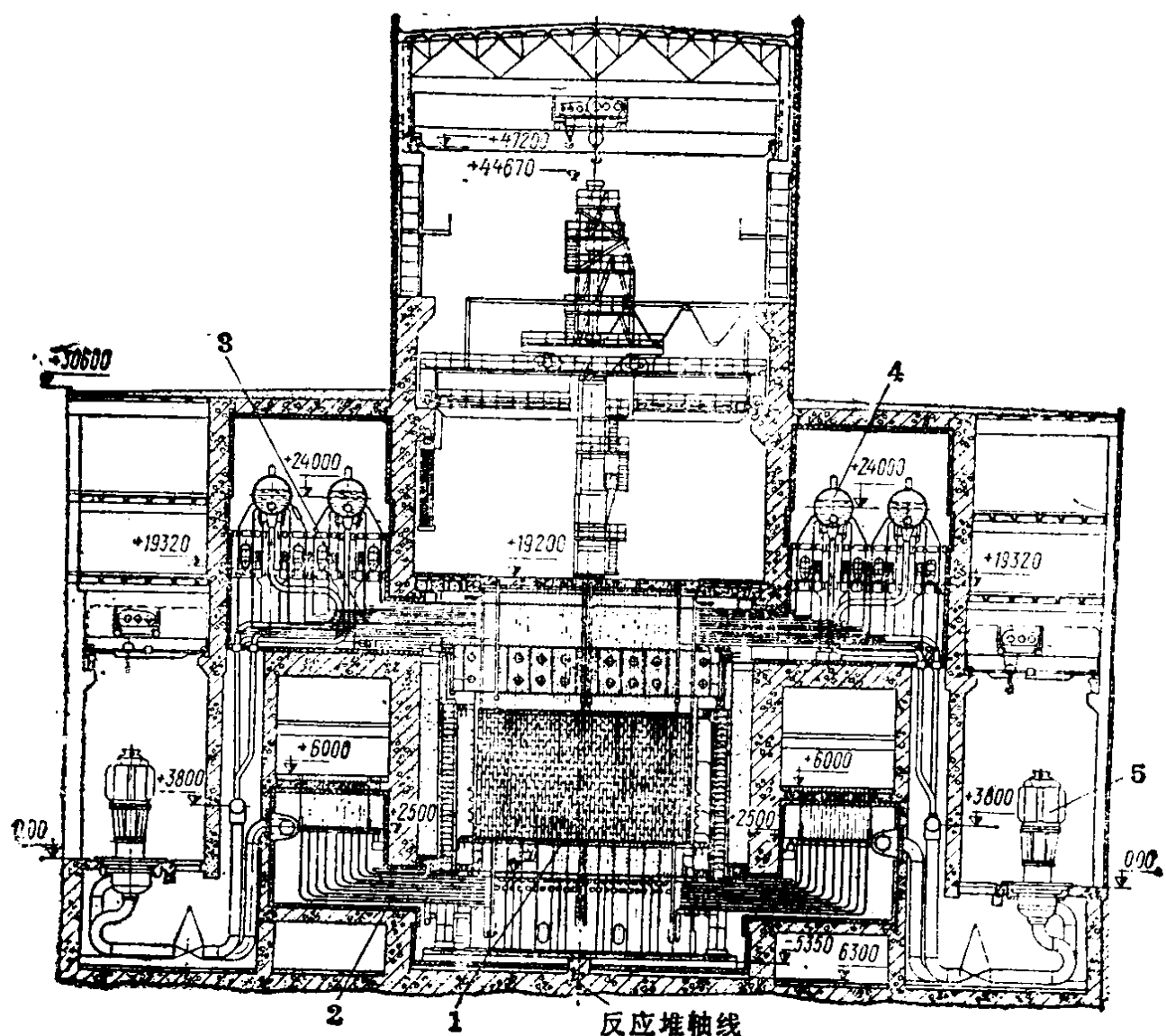


图1.7 沸腾型石墨水冷反应堆的纵剖面图

1—活性区；2—燃料管道进水管；3—燃料管道的汽水混合物出口管；
4—汽水分离器；5—循环泵。

预料将建立超临界蒸汽参数的石墨水冷反应堆。在和上述反应堆活性区尺寸相同的情况下，这种反应堆可将电功率提高到800—1000兆瓦。这种反应堆的结构与在别洛雅尔斯克原子能电站中运行的反应堆结构相类似。

压力管式沸腾型石墨水冷反应堆（图1.7） 石墨沸水堆所产生的饱和蒸汽直接送往汽轮机。反应堆是一个包在外壳内并堆放在金属焊接构件上的石墨砌体。金属构件与外壳一起组成一个