

第二届和平利用原子能国际会议文献

反应堆物理学与 研究用反应堆

4

中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编

科学出版社出版

原子与研究用反应堆(4)

委员会編輯委员会編

科学出版社

(北京市朝陽門大街117号)

北京市书刊出版

登记证字第061号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1961年4月第一版

书号:2334 字数:99,000

1961年4月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

(京)0001—6,000

印张:4 1/4

定价:0.54元

目 录

P/2185 几个新的及经过改装的研究性热中子反应堆	(1)
PФТ 反应堆中子通量的增加及实验可能性的扩大	(3)
试验性轻水浓缩铀反应堆 (BBP-2) 的改装	(15)
重水反应堆 (TP) 的改装	(22)
功率为 2000 旺的沉入型试验反应堆 (ИРТ)	(28)
热中子通量 10^{14} 中子/厘米 ² ·秒的研究性反应堆 (BBP-M)	(46)
辐射化学研究专用反应堆 (BBP-Ц)	(54)

几个新的及经过改装的研究性热中子反应堆*

岡恰洛夫(B. B. Гончаров)等

研究性反应堆在进行对许多科学技术部门有重要意义的实验工作中用作中子源。这些反应堆广泛地被利用在下列一些研究工作中:原子核物理,反应堆工艺,新的动力反应堆或实验性反应堆释热元件的各种样品在设计参数下进行试验,各种材料在射线作用下的辐射损害,同位素生产,中子衍射照相,辐射化学,生物,医学及其他方面的研究。

各种研究性反应堆具有不同的类型和结构。反应堆的功率视其用途之不同而从几十瓩到几万瓩。

为进行广泛范围的物理研究、同位素生产、生物及医学研究用的反应堆,功率约在一、二千瓩,中子通量约 10^{13} 中子/厘米²·秒,即已足够了。这样的反应堆比较简单,造价也不高。

为试验材料、释热元件及进行其他一系列研究用的反应堆,必须具有大得多的功率。为满足这个要求,就要建造结构复杂的高功率反应堆。在建造这类反应堆时,都应力求提高单位重量裂变物质的比功率及反应堆活性区单位体积的比功率,以得到较高的热中子和快中子通量强度。这就是说,反应堆的尺寸应该是不大的。但是反应堆尺寸只能减小到一定限度,否则就会限制释热元件样品在反应堆活性区工作管道内进行试验的可能性,因为元件样品与实物大小差不多,而工作管道占反应堆活性区很大的体积。

在现代的这种类型的反应堆中,热中子通量差不多达到 10^{14} 中子/厘米²·秒,但是对于某些研究而言,甚至于这样的通量也还是不够,所以在个别情况下,就要建造中子通量为 10^{15} 中子/厘米²·秒的反应堆。

苏联建造了几种类型的研究性反应堆:

1) 物理与技术研究用反应堆,功率 10,000 瓩,活性区中心最大热中子通量 8×10^{13} 中子/厘米²·秒(PФТ)。

2) 实验性轻水、浓缩铀反应堆,功率 300 瓩,平均热中子通量 2×10^{12} 中子/厘米²·秒(BBP-2)。

3) 研究性原子核反应堆,功率 2,000 瓩,最大热中子通量 2.5×10^{13} 中子/厘米²·秒(BBP-C)。

4) 物理试验性重水反应堆,功率 500 瓩,活性区中心热中子通量 2.2×10^{12} 中子/厘米²·秒(ТР)。

在 1955 年第一次和平利用原子能国际会议上已作过关于这些反应堆的报告。

由于新的任务的产生,要求大大地扩展研究工作的面。许多准备进行的试验,只能在强中子通量的反应堆中才能实现。为了解决这些问题,就对部分已经运行的反应堆进行改装,同时建造一些新的反应堆。

* “第二届和平利用原子能国际会议文献”编号 A/CONF/15/P2185, 苏联,原文为俄文。

下面是反应堆改装后的一些主要结果:

1) PФТ 型反应堆改装后,最大热中子通量增加到 $1.8 \cdot 10^{14}$ 中子/厘米²·秒;根据不同的活性区形状,功率可能达到一万五至二万瓩。为改装的反应堆曾制造了新结构的、带有 90% 浓缩燃料的释热元件。由于后备反应性的增加,使反应堆能在 25 个释热元件而不是 37 个释热元件的情况下工作,这样在活性区就空出 12 个管道,可供试验用。

2) BBP-2 型反应堆改装后,在不更换燃料,增加装载量仅 30% (由中毒决定) 的情况下,保证功率可以提高十倍,即达到 3,000 瓩,最大热中子通量达 4×10^{13} 中子/厘米²·秒。

3) 试验性重水反应堆(TP)的功率提高到 2,500 瓩,活性区中心热中子通量达 $2.5 \cdot 10^{12}$ 中子/厘米²·秒。反应堆负荷采用 2% 浓缩燃料的环形的释热元件。

在改装现有反应堆的同时,建造了几种新型的研究性反应堆:

1) 浸入型反应堆:功率 2,000 瓩,最大热中子通量 $3.2 \cdot 10^{13}$ 中子/厘米²·秒(ИРТ)。反应堆具有结构简单的特色。反应堆活性区放置在水池底部,水是慢化剂,也是反射层与上部防护屏蔽。反应堆冷却系统水的循环,用喷射器来保证。侧面防护屏蔽由 0.5 米水及 1.8 米重混凝土组成。设有 11 个水平管道及一系列垂直管道供研究用。

2) 研究性反应堆(BBP—M),功率 10,000 瓩,热中子通量 $1 \cdot 10^{14}$ 中子/厘米²·秒。反应堆的功用是:生产比放射性的同位素,取得超铀元素,进行中子物理学方面的研究,研究中子流与 γ 射线对材料的作用,进行中子衍射照相实验及其他研究。

反应堆活性区周围有金属铍的反射层。在反射层中有 9 个水平管道可引出中子束,11 个垂直管道为照射样品用。

3) 辐射化学研究专用反应堆(BBP—II),功率 10,000 瓩,最大热中子通量 $1 \cdot 10^{14}$ 中子/厘米²·秒。

反应堆有可能进行如下工作:①研究各种系统在射线作用下的物理化学过程;②研究新的方法及已知化学过程在射线作用下的强化;③半工业规模的辐射化学过程;④研究射线对固体,半导体材料的影响;⑤活化分析;⑥研究射线作用下金属与合金的腐蚀及电化学。

为进行试验工作,反应堆设有 12 个迴路,10 个水平与 20 个垂直管道,石墨热柱。改装的与新建的研究性反应堆的主要指标,列于表 1。

表 1

反应堆	堆内 铀-235量 (公斤)	活性区高度 (毫米)	燃料浓缩度 (%)	慢化剂	功率 (瓩)	比功率 (瓩/公斤铀-235)	最大热中子通量 (中子/厘米 ² ·秒)
PФТ	5.5	1020	90	石墨,水	至20000	3640	$1.8 \cdot 10^{14}$
BBP-2	4.5	500	10	水	3000	650	$4 \cdot 10^{13}$
TP	5.0	1200	2	重水	2500	500	$2.5 \cdot 10^{12}$
ИРТ	4.0	500	10	水	2000	500	$3.2 \cdot 10^{13}$
BBP—M	4.0	500	20	水	10000	2500	$\sim 1 \cdot 10^{14}$
BBP—II	5.0	500	20	水	10000	2000	$\sim 1 \cdot 10^{14}$

本报导中并不涉及研究性快中子和中能中子反应堆以及各种专门性的反应堆。

下面就是关于改装后的 PФТ, BBP-2 及 TP 反应堆以及新建的 ИРТ, BBP—M 及 BBP—II 反应堆的叙述。

РФТ反应堆中子通量的增加及实验可能性的扩大

岡恰洛夫(В. В. Гончаров) 尼古拉耶夫(Ю. Г. Николаев)
阿姆巴尔楚姆扬(Р. С. Амбарцумян) 格魯荷夫(А. М. Глухов)
巴布連維奇(Е. Н. Бабулевич)

引 言

自从功率为 10,000 瓩的物理与技术研究用反应堆(РФТ)投入生产后(1952年4月),在反应堆上进行的试验工作量不断增加。特别是技术研究,首先是对新型结构的释热元件在堆回路中的试验,它的工作量增加得特别快。同时对中子通量值的要求也增长了。因此开始感到反应堆后备反应性的不足。很清楚,在最近将来,对某些释热元件要进行试验时,对中子通量值的要求将会超出反应堆的可能,即使在活性区中心部试验,也无济于事。由于这些原因,就决定根据已拟定的局部改装计划,来改进反应堆。

计划规定尽可能地增加后备反应性,提高反应堆功率到 20,000 瓩,提高中子通量,以满足试验释热元件的要求。计划是这样制订的,即是利用更换释热元件或计划检修时正常停堆的时间,来实现计划,而力求停堆时间减至最低限度,即是说,实际上反应堆的正常运行不停止。

已完成的反应堆改装工作,以及达到的新的物理的和技术的性能,叙述如下*。

反应堆改装计划

1) 增加活性区水的容积含量,同时增加铀-235 的浓度,以得到反应堆后备反应性的很大增长。反应堆中用来冷却释热元件的水是处于工作管道内部的,要增加水的容积含量,必须加大工作管道的直径。反应堆的结构允许管道直径自 54 毫米增加到 75 毫米。在这样尺寸的管道里,决定放置新结构的释热元件。释热元件应该尽可能少地排挤管道内的水量,为了补偿水对中子吸收的增加,新结构释热元件应该比旧结构元件含有更多的铀-235。

2) 要增加中子通量,需要提高反应堆功率。这就必须使新释热元件具有尽可能大的热交换面。可以指望,实现了使反应堆反应性增加的措施,会导致临界质量与工作装载量的减小,结果中子通量应该比功率增长得更多。

3) 由于使用了具有极度发展的热交换面的释热元件,为保证反应堆功率到 20,000 瓩的工作,不考虑冷却系统第一回路(包括热交换器)结构的改变,认为只要改变回路的工作状况就足够了。但是在这种情况下,为了避免因冷却水温度增加而引起的热交换器内盐类的沉积,有必要使第二回路密闭,而补充装置一个热交换器,使第二回路水的热量传给

* 在进行这些工作中,下列同志作了重要贡献:弗罗洛夫(И. П. Фролов),日格乔夫(В. М. Жигачев),夏夫洛夫(П. И. Шавров),且尼西柯夫(А. И. Дениськов),切尔伐促夫(А. А. Червяцов),普希宁(Б. Т. Пушкин)等。

第三迴路的水。

4) 增加反应堆的反应性,促使活性区临界体积减小,以空出相当数量的工作管道供实验用。

新的释热元件

制造新的释热元件成为反应堆改装计划实现的基础。根据物理、热工计算,对释热元件提出了下列一些要求:

- 1) 新元件热交换面应该比旧元件的结构大 7 倍。
- 2) 使用新元件时,活性区水的含量应该增加 3.5 倍。
- 3) 新元件铀含量应该比旧元件多 1.5 倍。
- 4) 新元件应该用浓缩度为 90% 的铀。

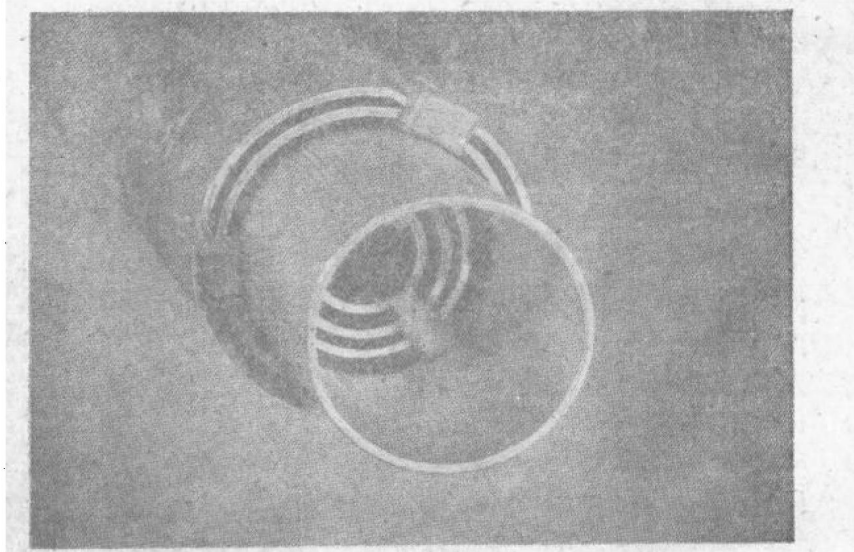


图 1 释热元件全貌

根据这些要求设计了释热元件,其结构见图 1、2。元件由六个同心薄壁管组成。管壁的释热层由二氧化铀和铝(稀释剂)制成,用铝复盖。壁厚总共为 2 毫米,铝复盖层每边厚 0.65 毫米。释热元件活性部分长 1020 毫米。元件的第三个管使载热剂在工作管道内分流,成为“费利达”管的形式。释热元件的外部薄壁管中,冷却水由上往下流,而内部则由下往上流。

薄壁管由上部及下部齿块沿三条互成 120° 角的母线固定距离。薄壁管与上部齿块是固定住的,在下部齿块处,留有相互位移的自由度。齿块上的凸缘保证释热元件在工作管道内的间隔。

在每一释热元件中都含有 340 克铀-235,每一立方米热交换表面平均分得 200 克铀-235。

沿新元件的轴线可以放置样品,样品是盛在外径 16 毫米的铝管内。部分地也使用五管的释热元件,沿着这种释热元件的轴线,可以放置盛于外径 25 毫米的铝管内的样品。

如果试验样品要在反应堆工作过程中取出,那么在释热元件内部放置封闭的铝管。

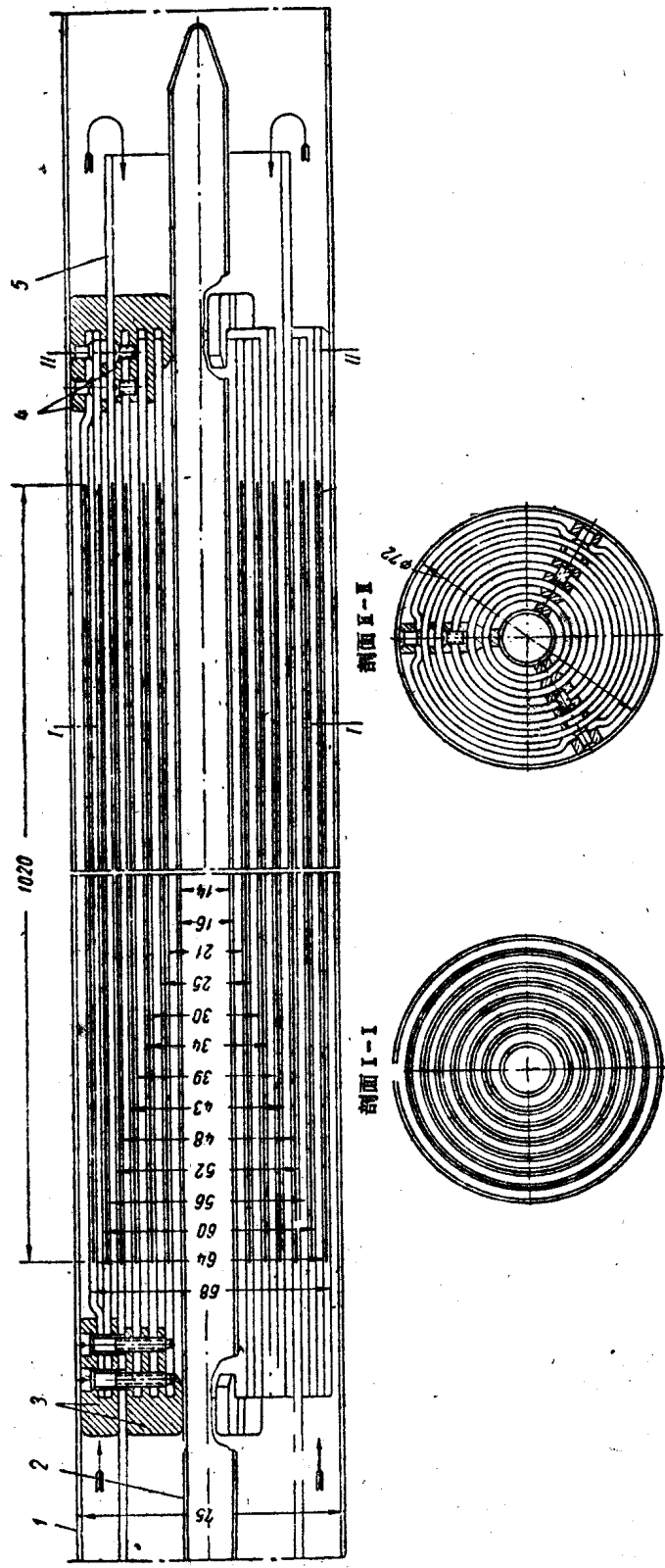


图 2 释热元件图
 1. 工作管道的管子, 2. 放置受照射样品的管子, 3. 上部定位齿块, 4. 下部定位齿块, 5. 释热元件的侧载热剂分流的管子, 载热剂流动方向见箭头所示

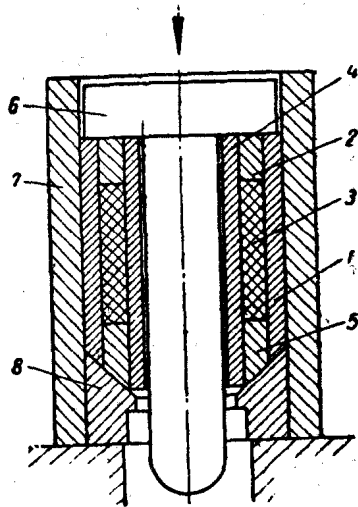


图 3 压制释热元件用的小包
1. 外壳, 2 及 5. 塞子, 3. 金属陶瓷芯部,
4. 内壳, 6. 针, 7. 容器, 8. 模子。

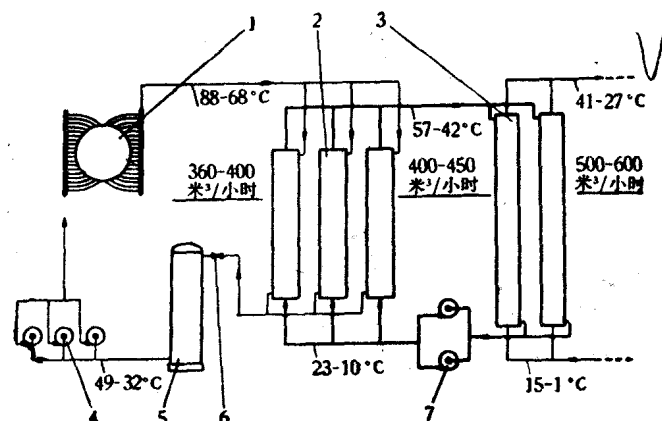


图 4 反应堆三回路冷却系统

1. 反应堆, 2. 第一回路与第二回路间的热交换器,
3. 第二回路与第三回路间的热交换器, 4. 第一回路水泵,
5. 除气器, 6. 水节流阀, 7. 第二回路水泵。

不装载试验样品时, 沿释热元件轴线放置外径为 16 或 25 毫米的铝管, 即挤水器, 部分冷却释热元件的水以很小的速度在管内流通(图 5)。

拟定了两种制造新元件的工艺。

根据最初工艺方案, 首先制成铺盖铝层的释热板, 然后由板制成有缝的管子。

根据初始工艺, 制造元件的主要操作如下:

由铝粉及 90% 浓缩铀的二氧化铀粉用热压办法制成金属陶瓷饼, 然后挤压成条——进一步压辗的胚料, 而后装配为热压用的小包, 小包由二个铝板组成。在一个铝板上专门开了凹穴, 凹穴内很紧地装入金属陶瓷条, 盖上第二层铝板, 这样制得的小包在前后两边缘用铝铆钉铆接, 而后进行热压, 然后是几次冷压, 直到给定大小。

压辗的工况是这样选择的, 即足以保证小包各组成零件接触面之间良好的全面的焊接。在确定活性部分的位置界限后, 剪切薄板的边, 到制管所需的尺寸。薄板捲成管子, 用氩弧焊接纵向焊缝。焊接后的管子进行拉伸, 对它的尺寸和形状进行不大的修正, 以达到图的要求的尺寸。由制成的管子装配释热元件。管子彼此间的位置固定是通过定位齿块用铝螺钉实现的。

第二种工艺方案在于热挤压三层无缝管*。

用铝粉及二氧化铀粉的混合物用热压方法制成压管所需的胚料。由这胚料用热挤压方法制得金属陶瓷厚壁管, 厚壁管切成所需尺寸的胚料。

用纯铝制造金属陶瓷管外面和內面的盖层的胚料。进一步装配压制用的小包。小包的示意图见图 3。装配好的小包热压成三层管。压制工况及条件是这样选择的, 即足以保证陶瓷芯在铝壳内的全面密封。压成的三层管进行拉伸, 修正其尺寸到给定大小。确定活性部分的界限后, 切去管子的端部。经过检验后管子就送去装配, 装配的方法和第一

* 这个工艺方案由高尔尼洛夫 (Д. Д. Корнилов), 涅日汝哥 (Л. В. Нежевенко), 赛明甲也夫 (Д. С. Семендяев), 柯伐辽夫 (А. И. Ковалев) 等与索哥洛夫 (Д. Д. Соколов) 共同研究出来的。

方案的一样。

用同样的工艺制造了研究性反应堆 BBP—M 及 BBP—II 的六角形的释热元件。

反应堆冷却

为了保证反应堆在 20,000 瓩功率工作，设计并建造了三回路的冷却系统（图 4）。这样就可以改变第一回路的工作状况，而不必要改装第一回路，从而避免了有辐射危险性的工作，不间断反应堆正常运行。

当第二、第三回路的建造完成后，新的冷却系统就在一次反应堆正常停堆的时候，投入了运行。

反应堆功率的提高要求通过活性区载热剂流量的增加。第一回路设备中有三台循环泵，在以前的工况下，只有两台工作，在新的工况下，所以三台泵都投入工作。

从前差不多水泵压头的三分之二是在通过节流阀 6 时（图 4）损失的，这是为在活性区形成 11 大气压的水压所必须的，因为旧结构释热元件表面温度达到 160℃。

新释热元件是这样计算的，即它的表面温度不超过 140℃，所以活性区水压可以减至 6 个大气压。在这个压力下，水的沸点比释热元件壁温高 18℃。

新释热元件允许活性区水压降低，所以就没有必要节流，回路水阻也减小得很多。除此之外，带有新释热元件的管道（图 5）比旧的具有较小的水阻，因为载热剂流通截面无论在活性区部分或活性区以外都加大了。

回路水阻的大大减小以及新管道内水阻的减小，就可以通过第三个泵的投入运转，而使第一回路的水量增加到如图 4 所示之值 360—400 米³/小时。

由于物理参数的改变，活性区临界体积大为减小。

反应堆在 20—25 个释热元件的情况下工作，根据试验的性质，功率为 15,000—20,000 瓩；而从前，反应堆的装载为 35—37 个旧结构元件，功率为 10,000 瓩。

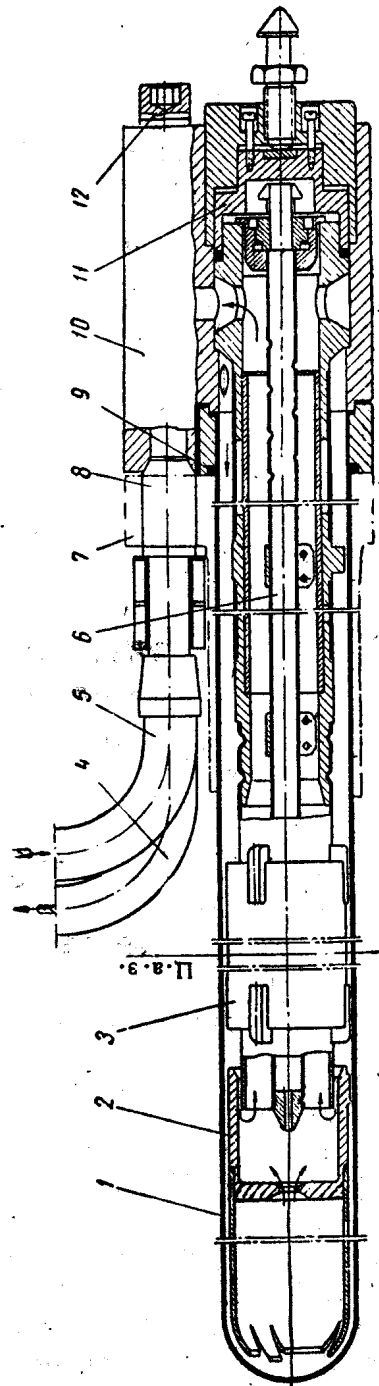


图 5 带释热元件的工作管道
1. 管道的管子，2. 把部分载热剂引向管道底部的插块，3. 释热元件，4—5. 引入和排出冷却水的管，6. 拆水器，7. 支承管，8. 引水及排水管球-锥型密封，9. 保证反应堆充满氦气的外壳密封性的密封，10. 管道上部密封，11. 管道上部密封，12. 固定引水及排水管于管道头部的螺栓。

工作管道数量减少使分到每个释热元件的水流量增加,这比之于仅仅因第一回路总流量提高而得到的增加要大得多。

采取了所有措施的结果,使通过一个带有释热元件的工作管道的最大水流量,跟以前相比增加到2.4倍,达到14.5米³/小时。因此从每个新结构释热元件取得的功率可达1,000瓩。而最大热通量只有 0.85×10^6 千卡/米²·小时。

在三个并联的热交换器中第一回路水把热传给第二回路水。每个热交换器由六段串联而成。热交换器工作状态改变后,可以使传热量增加一倍。

热交换器没有热膨胀补偿器,制造时采用了管子在管板内最简单型的压轧,在压轧处的允许负荷为每毫米管子周边4公斤。

虽然由于废除了水的节流,水压产生的应力减小了,但仍因为热应力的缘故,当管子与边缘间温差为25℃时,即达到允许负荷。因此当第一回路水流量为360—400米³/小时,第二回路水流量为400—450米³/小时,在热交换器一段的范围内,介质间的温差不应该超过32℃。在热交换器内第一回路水在管间空间流动,第二回路水在管内流动。

当反应堆功率为10,000瓩时,热交换器是在平均对数温差为17℃的情况下运行的,因为在第一回路的两个水泵都工作的情况下,第一回路与第二回路的水流量差别很大,各为250米³/小时与400米³/小时。在新的工作状况下,第一回路与第二回路中水的流量都增加了,而它们之间的差别减小了。流量差别减小就可以在热交换器一段范围内介质间平均温差不超过32℃的条件下,大大地提高平均对数温差。

同时由于水的流量及温度在第一、第二回路中均有增加,热交换器内的传热系数也有些提高。

在释热最强的管道出口处水温超过100℃被认为是不期望的,所以在夏季,进入反应堆活性区水的温度增加,反应堆只可能在低于18,000瓩的功率下工作。这段时期不超过日曆时间的30%。在70%的日曆时间内反应堆以20,000瓩功率工作的可能性是保证的。

图4表明冷却系统在不同季节及不同反应堆功率(15,000及20,000瓩范围内)情况下,流量及温度变化的范围。

甚至在夏天,第三回路进口水温不会超过15℃。是这样得到的:对流水(其温度有时达到25℃)混合一部分温度8至10℃的井水。

反应堆钢壳工作状态

反应堆密封钢壳(图6)内容纳石墨砌体,砌体充满氮气,以改善石墨散热。自从1953年发生事故后,钢壳底部冷却蛇形管损坏,尽管采取了措施,钢壳工作状态变得很吃力。

发生事故后,为了冷却底部,反应堆工作管道加长了,从前它并不穿入下部石墨反射层。尽管如此,底部中心温度仍然比钢壳圆柱套筒和底部焊接处的温度高出几十度。结果套筒内的应力略高于屈服点。这在反应堆以10,000瓩功率工作时是允许的,但是阻碍了功率的提高。

为了检查底部温度,两个反射层冷却管道及一个靠近活性区、从前放调节棒(图7)的管道内装置了热电偶。

为了减少底部的释热,反应堆活性区向上移动了200毫米,是把悬挂释热元件的管子

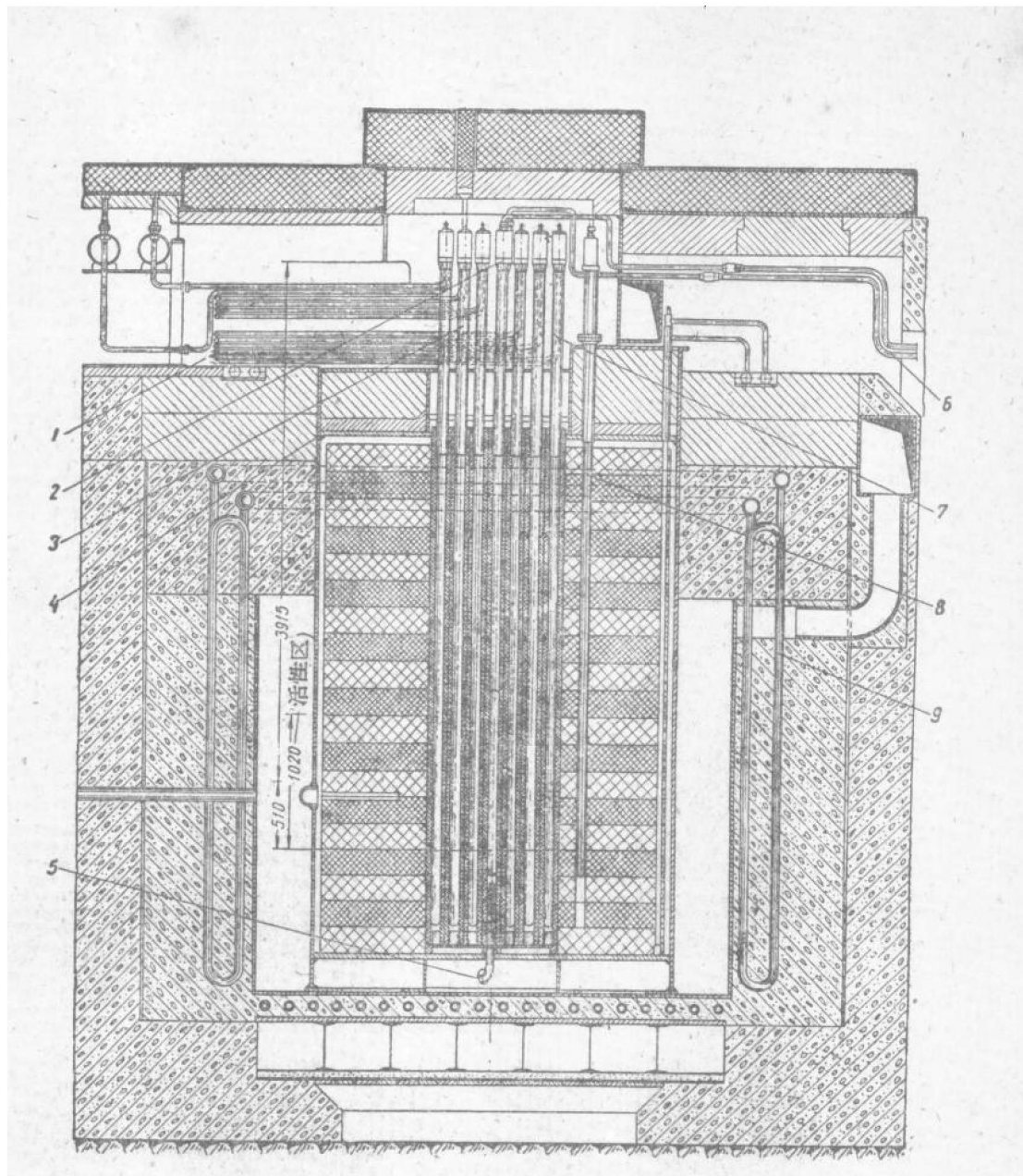


图 6 物理与技术研究用反应堆纵截面

1. 工作管道的进水及出水, 2. 迴路的中心管道, 3. 反应堆工作时卸照射样品的工作管道,
4. 钢壳, 5. 氮气循环管, 6. 迴路管道的载热剂引入与排出管, 7. 支承管, 8. 反射层内迴路管道, 9. 反射层冷却管道

缩短了些。这样反应堆功率虽提高, 而钢壳套筒内的应力减小了。

功率增加时沿套筒高度温度梯度的增加曾经引起不安, 但计算结果表明, 由此产生的补加热应力, 其值不大。

反应堆新的物理性能

向新释热元件的过渡是逐步实现的: 开始往活性区装一个新结构元件, 在这个元件中铀-235 按高度平均燃耗达到 45%, 而在元件中心燃耗为 55%。以后反应堆中心区管道

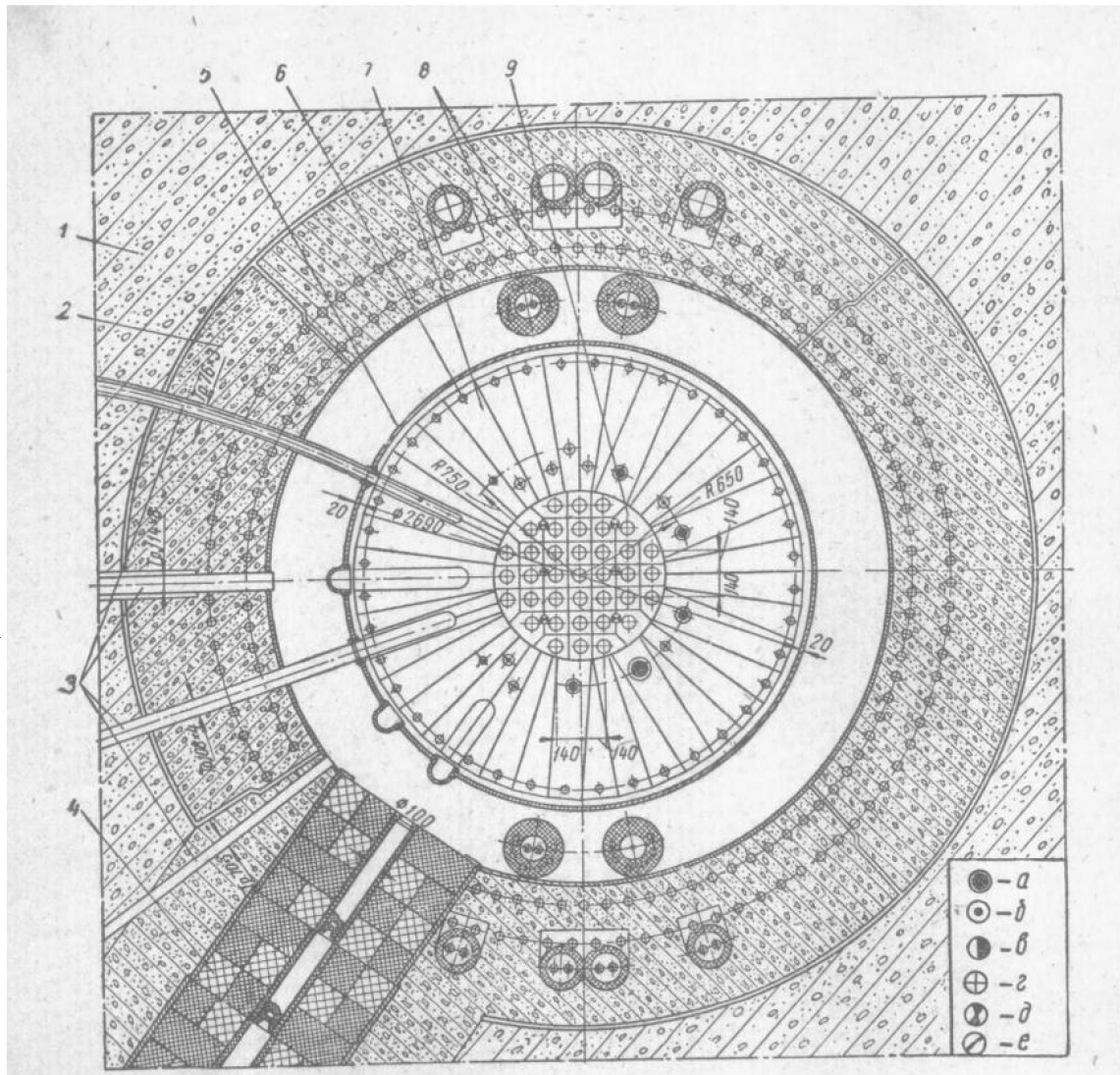


图 7 物理与技术研究用反应堆水平截面

a. 反射层内迴路管道, *b.* 垂直试验管道, *c.* 自动调节棒, *d.* 事故保护棒, *e.* 温度测量及测量反应堆外壳底部的热电偶管道, 1. 普通混凝土屏蔽, 2. 重混凝土屏蔽, 3. 水平试验管道, 4. 热柱, 5. 反应堆钢壳, 6. 反射层冷却管道, 7. 反射层石墨块, 8. 屏蔽冷却蛇形管, 9. 活性区石墨块

内装入第一组新释热元件一共 10 个, 在新旧释热元件混合装载的情况下, 反应堆功率提升到 13,000 瓩。由于反应堆径向中子场不均匀度的加剧, 每个新释热元件上取得的功率达到 1,000 瓩。用这样的办法, 在反应堆没有完成改装前, 新的释热元件已经在当反应堆功率为 2,000 瓩时他们将工作的这种状况下进行了试验。

在第一批释热元件的几个元件中铀-235 按高度平均燃耗深度达 45% 以后, 所有旧结构的释热元件从反应堆取出, 补装了新元件, 而反应堆功率逐渐增加到 15,000 至 20,000 瓩。

反应堆中有 37 个装释热元件的垂直管道, 在改装前, 35 个以上的管道是被释热元件占了。当第一次全用新结构释热元件组成的活性区时, 18 个具有不同程度燃耗的释热元件即达到了临界。这个装载量为 4.7 公斤铀-235, 因为装载燃料中的平均燃耗已经是 23%。18 个释热元件具有从零到 45% 等不同的平均燃耗深度, 而燃耗大的元件处于堆的中心区。

反应堆改装前的计算表明,反应堆临界质量相当于 12 至 16 个新释热元件的装载量。前已提到,第一次装载量为 18 个平均燃耗为 23% 的元件,根据这个试验数据估算,临界质量为 4 至 4.4 公斤铀-235 (即 12 至 13 个释热元件)。

装载时释热元件先装在活性区边缘区的管道,经过燃烧而后移装中心区。

当功率为 20,000 瓩时,装载 23 至 25 个释热元件,在释热元件中达到最大热中子通量。这时按释热元件的平均燃耗在 30 至 35% 范围内,而活性区的中心区元件按高度的平均燃耗约为 45%。在这些条件下,工作装载量为 5.5 公斤铀-235。

当中心管道功率为 1,000 瓩时燃料最大负荷为 5.5 瓩/克铀-235。这个最大负荷相当于释热元件上的热中子通量 1.85×10^{14} 中子/厘米²·秒(中子气体温度 500°K)。

反应堆最大可能热中子通量为 4×10^{14} 中子/厘米²·秒,这是在不装释热元件而是灌满水的中心管道内(图 8)。

释热元件功率为 1000 瓩时,在它的中心(那里进行样品照射)能量大于 0.5 百万电子伏的快中子通量达到 6×10^{13} 中子/厘米²·秒。

根据所进行试验的性质的不同,反应堆工作装载量也有变化,其最大值为 6.5 公斤铀-235。

下面是改装后活性区的特性:

- | | |
|---------------------------|---------------------|
| 1) 活性区体积水占部分 | 0.117 |
| 2) 活性区体积石墨占部分 | 0.76 |
| 3) 活性区物质总慢化能力中水的慢化能力所占百分比 | 77% |
| 4) 中子年龄 | 140 厘米 ² |
| 5) 热中子扩散长度平方 | 27 厘米 ² |
| 6) 增殖系数 | 1.68 |
| 7) 活性区高 | 102 厘米 |
| 8) 活性区临界体积 | 250 立升 |
| 9) 临界质量 | 约 4.2 公斤铀-235 |

虽然活性区工作体积减小了 30%,但释热元件中燃料燃耗增加了很多。在以前,用 10% 浓缩铀制成的旧结构的释热元件,当按高度平均燃耗量达 33 至 35% 时就应该从活性区取出,而现在,新释热元件是在按高度平均燃耗量达 45 至 50% 时才卸走。

反应堆新的试验能力

根据设计,在建造 PΦT 反应堆时,除了石墨反射层中的水平试验管道外,考虑了为

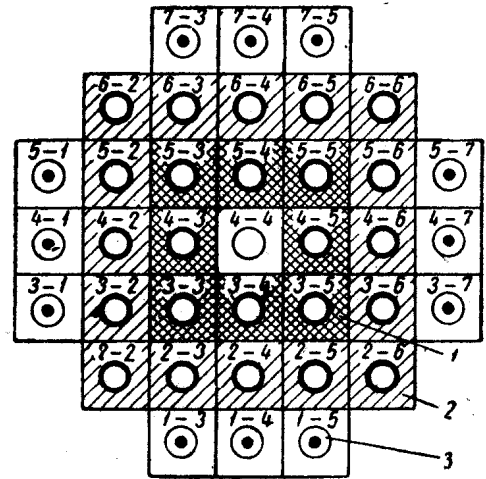


图 8 保证在充水的中心管道内达到热中子通量 4×10^{14} 中子/厘米²·秒的装载
1. 燃料燃耗为 40—50% 的区域, 2. 燃耗不超过 40% 的区域, 3. 试验管道

試驗目的及布置反应堆操纵設備用的垂直管道。在半径 650 毫米圓周上开有 11 个垂直管道。其中 5 个直径为 130 至 70 毫米,是为反应堆迴路中試驗释热元件用。在其他 4 个直径为 75 至 50 毫米管道中,进行各种样品的照射。这些管道用反应堆冷却迴路水冷却。其余两个管道为事故保护棒所占。

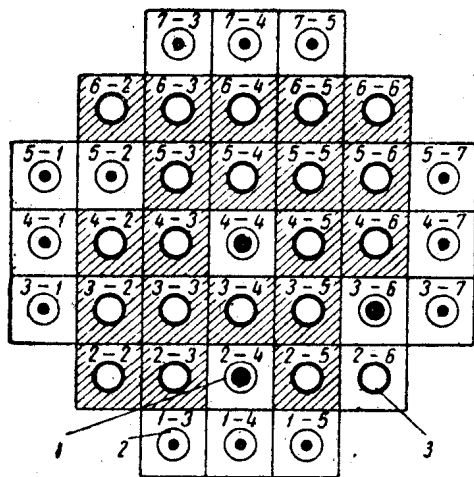


图 9 活性区内有三个迴路管道的反应堆装載
1.迴路管道, 2.試驗管道, 3.带有释热元件的管道

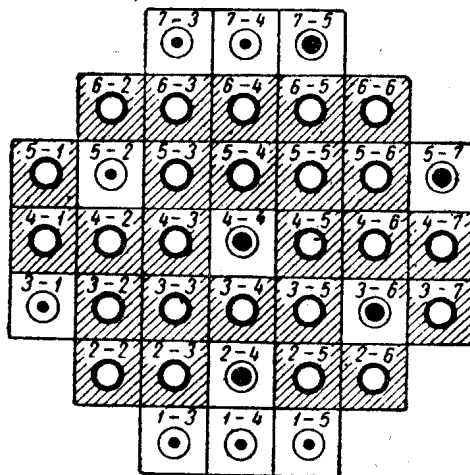


图 10 具有 5 个迴路管道的反应堆装載

在半径 750 毫米圓周上有 4 个垂直管道,为布置反应堆操纵設備用。两个管道直径 63 毫米,放置启动游离室;其余两个直径 32 毫米,放置自动調节棒。

反应堆本身及某些試驗迴路的改装結果,不論在量的方面还是質的方面,都大大提高了試驗能力。現在,在試驗释热元件时,不但可以利用反射层中的垂直管道,而且可以利用活性区内包括中心管道在內的 5 个管道(图 7, 9, 10)。同时,有些試驗迴路可以把三个管道平行地包括到一个迴路中来。

由于对反应堆操纵的改进,空出了三个管道以滿足試驗需要:二个在反射层,一个在反射层与混凝土屏蔽之間的低中子通量区。这些管道从前为游离室所占用。

除了反应堆試驗迴路中試驗用的管道外,許多从前为反应堆本身的释热元件所占的管道現在也用来考驗释热元件的样品及照射各种材料(图 11)。

这些管道大部分是用反应堆冷却迴路水冷却的。

除此之外,还利用了释热元件中心部分,来制造比放射性的同位素及在強快中子通量下照射材料。需要照射的样品在特制的管子內沿释热元件的軸綫放置。

这样,反应堆新的試驗能力綜述如下:

- 1) 11 个垂直管道可以用来进行迴路实验。
- 2) 15 个垂直管道可以用来考驗释热元件样品及照射各种材料。
- 3) 反应堆 15 至 20 个释热元件的中心部分,可以制造同位素及在強快中子通量下照射材料。

在試驗性反应堆上可以考驗新建反应堆的释热元件。甚至于当元件的每克鈾-235 的单位热負荷大大地超过反应堆本身释热元件的最大单位热負荷时,也可以进行考驗。只要增加受考驗的释热元件模型的鈾-235 的容积浓度,包括提高鈾的浓度,即可达到这一

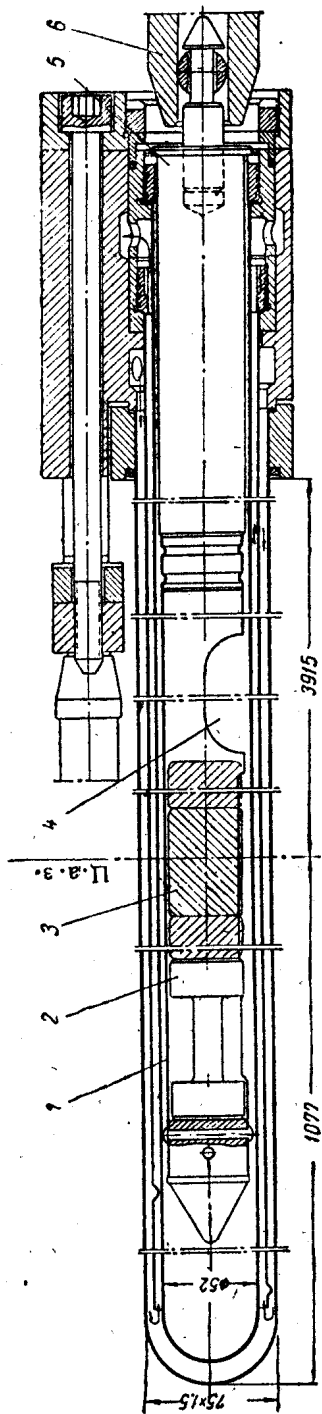


图 11 照射材料用的垂直试验管道
 1. 装有受照射样品的管子, 2. 为在“热”室内卸样品用的推棒, 3. 受照射的样品, 4. 卸样品用的槽, 5. 管道屏蔽塞, 6. 上部屏蔽塞

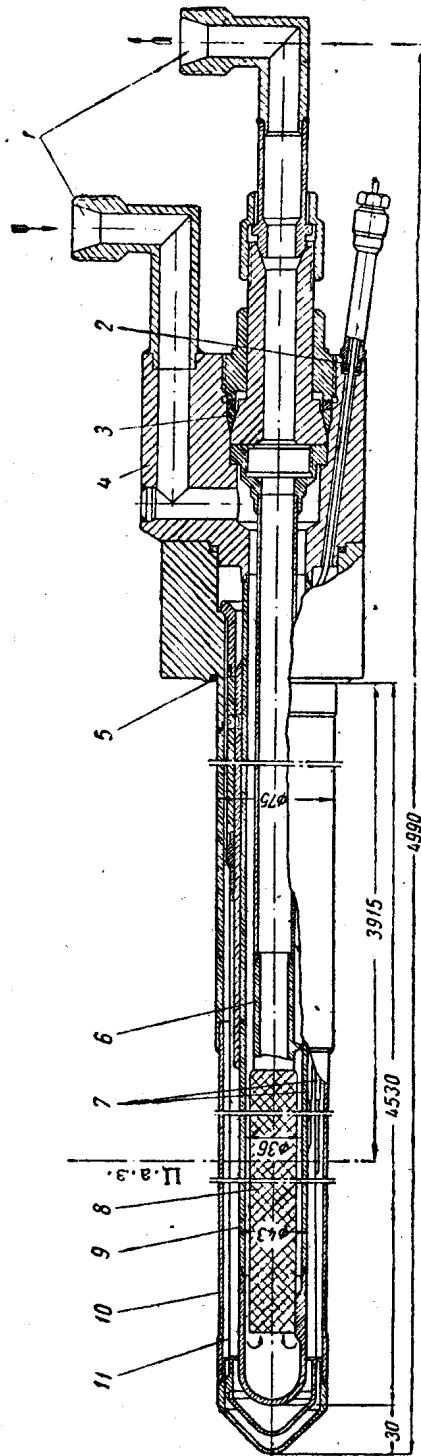


图 12 通路管道
 1. 载热剂引入与排出, 2. 热电偶出口, 3. 密封, 4. 通路管道头部的, 5. 保证反应堆壳内充满氮气的密封, 6. 悬挂受试验的释热元件的管子, 7. 热电偶, 8. 释热元件, 9. 通路管道的管子, 10. 外部屏蔽热屏, 11. 内部热屏

点。估计这个因素,改装以后的 PΦT 型反应堆可以试验在工作条件下单位热负荷达到 12 瓦/克铀-235 的释热元件。

在 PΦT 型反应堆中亦进行中能中子和快中子反应堆的释热元件的试验。当然,在这种情况下仅仅模拟了单位面积热负荷及元件的温度应力。

例如在充滿水的中心管道內就进行了研究性反应堆的片状释热元件的考驗，这个研究性反应堆是用作強的快中子通量源，而它的中央水腔用作高的热中子通量源。它的释热元件热交換面的热負荷，达到 5×10^6 千卡/米²·小时。

这样大的热負荷，由于释热元件片单位热交換面的鈾-235 含量很高，才模拟成功。

放置待試驗的释热元件的迴路管道是不銹鋼或鋳合金制成的。当待試驗的释热元件要求极高的中子通量，或是因考驗条件的关系不銹鋼管道机械強度不够时，采用鋳管道。

这种在有些情况下因机械強度的关系，不銹鋼管的利用受到某种难以相信的限制，是由于反应堆石墨砌体温度大大升高的結果。比如在堆芯中心考驗释热元件，冷却水温度达 300℃，受考驗的元件热功率很高时，周围石墨温度达到 1000℃。

当管道直径与石墨孔道直径很近时，通过輻射和充滿氦气縫隙的热传导，产生很大的从石墨往管道的热通量，这就在管壁引起热应力，补加于靜应力之上。为减少热应力，采用了薄壁鋼屏，而它与管道之間的縫隙充以氦气(图 12)。有时这些措施也不够，于是就采用鋳管道，因为从产生热应力观点看来，鋳具有較好的机械性能。

活性区石墨中产生的热量通过氦气縫隙传向反应堆管道。在每个管道功率为 1 千瓩时，通过面向管道的石墨表面的热通量，达到 $0.25 \cdot 10^6$ 千卡/米²·小时。

反应堆操纵的改进

因試驗工作量增加，采取了措施，使反应堆反射层中放置調节棒和游离室的垂直管道空出几个来。这方面工作的結果，給反应堆操纵带来下列改进和改变：

1) 拆卸了位在离活性区中心 650 毫米的反射层中两个管道內的事故保护棒。空出来的管道为試驗目的用。位于活性区中心区的两个調节棒替代拆卸的棒作事故保护用，它們同时起着自己原来的作用。这是利用电磁解开器来实现的，它能保証棒从工作行程內的任何位置自由落入活性区。

2) 启动游离室从反射层管道移置反射层与混凝土屏蔽間的管道。因此在离活性区中心 750 毫米处反射层中的两个管道空出来了，可为試驗目的用。利用高度补偿 γ 輻射本底流游离室*作为启动用。尽管从活性区移走了启动游离室，当向临界状况趋近时，次临界反应堆功率的必要控制是保証的。

3) 采用了直径比从前小的游离室，这样就可以把它們成对地放在一个管道內。結果在反射层和混凝土屏蔽間的低中子通量区，空出了一个管道，可以为实验之用。启动游离室轉移到另一个类似的管道去了。

結 論

物理与技术研究用反应堆(PΦT)改装后，取得下列結果：

- 1) 反应堆功率增至 15,000 到 20,000 瓩。
- 2) 单位热負荷提高到 5.5 瓩/克鈾-235，由此释热元件中热中子通量增加到 1.85×10^{14} 中子/厘米²·秒。
- 3) 在充滿水的中心管道內，取得 $3-4 \cdot 10^{14}$ 中子/厘米²·秒的热中子通量。
- 4) 迴路中考驗释热元件、照射材料及其他目的用的垂直試驗管道的数量增加了几倍，这些再加上已取得的指标，就大大地扩大了反应堆的試驗能力。

* 詳細地关于这些游离室見功率为 2,000 瓩的浸入型研究性反应堆(ИРТ)的报告。