

300576 (3)

核堆—3010

比利时BR-3核电站 的启动和运行經驗

中国科学院原子核科学委员会編輯委员会
文 献 編 輯 室 編 輯

內 容 簡 介

这篇文章介绍了比利时 BR-3 反应堆的启动和运行經驗。BR-3 反应堆是額定热功率为 40.9 兆瓦的压水堆。堆芯由不銹鋼包壳的 UO_2 燃料元件組成。

本文主要內容譯自“Operating Experience with Power Reactors”, vol.I p283—305 (1963)。由于忠良編譯，張單甫校。

目 录

一、BR-3 核电站概 貌.....	1
二、BR-3 反应堆的技 术特性.....	5
(一) 反应堆和主迴路.....	5
(二) 附属的“主”迴路.....	6
(三) 测量和控制系统.....	7
(四) 蒸汽发生器和汽轮机.....	7
(五) 发电机.....	8
三、BR-3 核电站运行 經驗.....	8
(一) 人員和培訓.....	9
(二) 电站特性的实际测定.....	10
1. 反应堆的物理特性的测定.....	10
2. 負荷轉換試驗.....	20
(三) 电站功率运行实践.....	26
1. 工厂的輻射水平.....	26
2. 建筑物中的空气放射性.....	28
3. 水化学.....	28
4. 主迴路水的洩漏.....	30
5. 各部件的性能和主要問題.....	31
6. 紧急停堆的分析.....	31
結束語.....	32
参考文献.....	32

一、BR-3 核电站概貌

比利时第一个原子能发电站的BR-3反应堆是一个电功率为11.5兆瓦的压力水冷却和慢化的动力堆。1957年11月开始建造，1962年8月29日首次临界，10月10日并入电网，到63年2月底电站向比利时电网输送的总电量达10126000千瓦时。该电站位于距布鲁塞尔40公里的莫尔顿克(Mol Dook)。图1为电站的全貌。电站的主要技术特性列于表I。



图1 BR-3 核电站全貌

活性区 BR-3是压力壳式反应堆，活性区装在高5.5米，内径为1.53米的压力壳内。32个燃料组件组成一个高1.42米，直径0.86米的圆柱形活性区。活性区的结构见图

表 I BR-3核电站的主要特性

堆型：压力壳式压水堆	控制棒
地址：莫尔顿克	形状：十字形
热功率（兆瓦）：40.9	数量：12
总电功率（兆瓦）：11.5	吸收剂 Ag-In-Cd
净电功率（兆瓦）：10.7	压力壳
始建日期：1957年11月	内直径（米）：1.53
临界日期：1962年8月29日	高度（米）：5.5
发电日期：1962年10月10日	壁厚（厘米）：12.1
活性区	设计压力（公斤/厘米 ² ）：176
直径（米）：0.86	复面材料：304不锈钢
高度（米）：1.42	主回路数：1
燃料装量（公斤）：2400	冷却剂：水
平均功率密度（瓩/升）：50.5	进口温度（℃）：255
平均能耗（兆瓦日/吨）：5940	出口温度（℃）：268
过剩反应性（冷态）17%	压力（公斤/厘米 ² ）：140
燃料组件	流量（吨/小时）：2250
形状：正方形	流速（米/秒）：2.35
组件数：32	平均热通量（卡/厘米 ² ·秒）：7
每个组件内的元件数：110/111	蒸汽
燃料：UO ₂	温度（℃）：244
浓缩度（%，重量）：3.7/4.43	压力（公斤/厘米 ² ）：35.8
包壳：不锈钢	流量（吨/小时）：69.8

2和图3。

燃料组件 活性区由32个方形的燃料组件组成（参看图2和图4）。中心区16个燃料组件的UO₂浓缩度为3.7%（重量），边区的16个燃料组件的UO₂浓缩度为4.43%（重

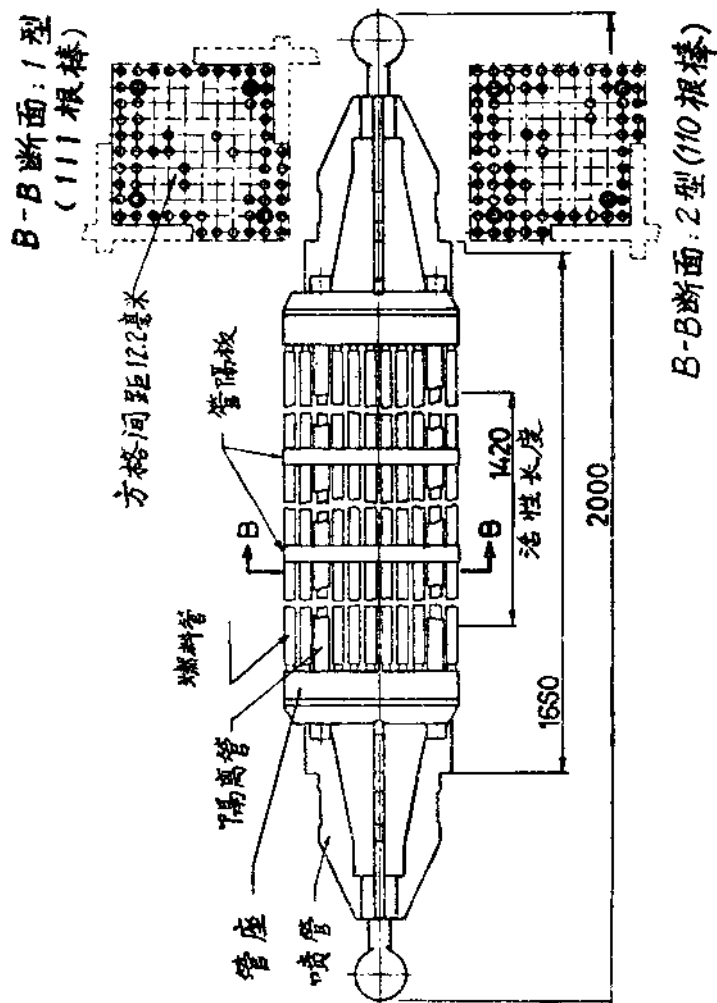


图 4 BR-3 反应堆的燃料元件

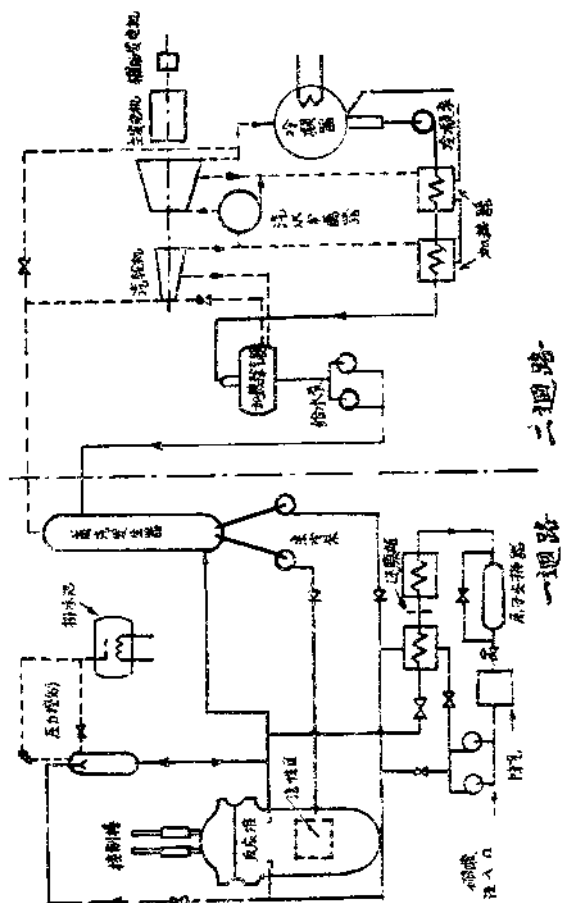


图 5 BR-3 核电站工艺流程图

量)。燃料組件是由 110 或 111 根 UO_2 芯棒，不銹鋼包壳的燃料元件組成。燃料元件的外徑為 8.7 毫米，長 142 厘米。

自动控制 反应堆設有 12 根十字形的 Ag-In-Cd 控制棒，控制棒的传动机构采用磁性联鎖。当反应堆处于冷态时，把硼酸注入冷却剂中，控制剩余反应性。

工艺迴路 从堆內出来的冷却剂通过一条管路进入蒸汽发生器，再由这里經過两条管路用两台泵打入堆內。蒸汽发生器把溫度為 244°C ，压力為 35.8 公斤/厘米² 的蒸汽送到汽輪机。蒸汽发生器的名义蒸汽生产能力為 70 吨/小时。汽輪机是双級的，三段抽气，名义功率為 11.7 兆瓦。工艺流程參看圖 5。

二、BR-3 反应堆的技术特性

(一) 反应堆和主迴路

反应堆的活性区(圖 6)由 32 个 UO_2 的燃料組件組成，其中 16 个燃料組件組成中心区，其濃縮度為 3.7% (重量)，另外 16 个燃料組件組成边区，其濃縮度為 4.43% (重量)。另有 12 根由 80% $\text{Ag} + 15\% \text{In} + 5\% \text{Cd}$ 制成的控制棒。总热功率輸出是 40.9 兆瓦，活性区的預計寿期是 7000 等效滿功率小时。

主迴路冷却剂的平均溫度是 262°C ，冷却剂的流率是 2250 吨/小时。在滿功率情況下，反应堆进口和出口之間的溫差為 14°C 。系統的名义压力是 140 公斤/厘米²，由容积补偿器(最大的热功率為 153 瓩)來維持。

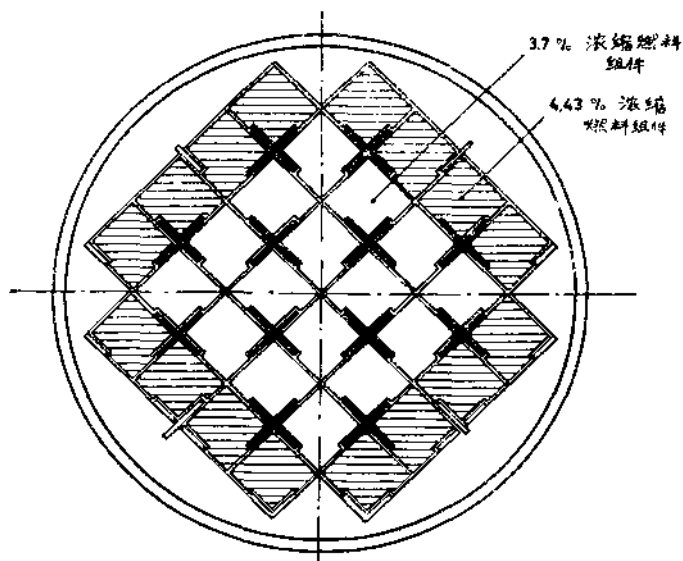


图 6 BR-3 活性区的剖面图

(二) 附属的“主”迴路

带有两个脱矿质器 (H_3BO_3 和混合填充物的负离子) 的纯化迴路 (流量从 $1 \text{ 米}^3/\text{小时}$ 到 $7 \text{ 米}^3/\text{小时}$)，在低压下 ($7 \text{ 公斤}/\text{厘米}^2$) 工作，起主迴路旁通支路的作用。另设有平衡罐，通过它把补给水和氢加入主迴路。

补给水迴路用的软水 (脱矿质水) 来自 BR-2/BR-3 的公用水处理站，该水贮存在一次水贮水池中。补给水经过真空除气器除气，然后用两台泵输送到加水系统中。

停堆冷却迴路由两台泵和一个热交换器组成。它把次临界活性区 (裂变产物) 的热量排出来，使之恢复到低温和低压的状态。

在正常的运行温度和压力下以及在万一发生事故的时候，还有一个用来排除次临界活性区（裂变产物）热量的事故停堆（冷却）回路。另外还有一个安全注水回路，用来补偿因洩漏而引起的冷却水的大量损失，并随时避免活性区处于“裸露”状态。

由泵、热交换器和脱矿质器组成了储藏坑回路，其作用是排除贮存在储藏坑内的废活性区所产生的热量。

元件冷却回路由两台泵和在密闭回路中的两个热交换器组成，其作用是排除来自其它热交换器和主冷却水泵的热量。这个回路中的两个热交换器是用来自咸水湖的水进行冷却的。

最后，还有通气和排水回路、液体废物回路（放射性、沾污），通风及气体废物回路（放射性、沾污）。

（三）测量和控制系统

温度、压力、流量和水位是用常规方法测量的。还有一个核仪器系统。其作用是观察中子通量变化情况，因而也就能观察反应堆功率的变化情况。

反应堆的控制系统，既可能是手动的也可能是自动的。尚有一个保护工作人员和设备安全的放射性控制系统。

（四）蒸汽发生器和汽轮机

蒸汽发生器是立式的，由 1400 根 U 形管构成。在满负荷运行的条件下，发生器的蒸汽流量等于 70 吨/小时，蒸汽压力是 36.9 绝对大气压；在无负荷时，压力增至 50 个绝对大气压。主蒸汽回路设有汽轮机旁通支路。供给三段抽汽、双级汽轮机的蒸汽的总发电量为 11.7 兆瓦。安装在两级汽

輪機之間的汽水分离器，把进入汽輪機低壓部份的蒸汽的湿度，从 10% 下降到低于 1%。冷凝器和預热設備都是通用設備。

(五) 发电机

主发电机的輸出电压是 10.5 千伏，額定輸出功率为 11.2 兆瓦。輔助发电机由汽輪发电机借助一个減速齒輪來驅動，所发出的电能供給一台主泵。万一汽輪機发生故障时，輔助发电机将靠整个机組的慣性力繼續供給这台泵一段时间（7 分钟）电能。在这段时间里可以启动柴油机，并使反应堆紧急停閉（最多 2 分钟）。

三、BR-3 核电站的运行经验

該电站的运行由工业部門承担，运行人員是从常規电站有經驗的人員当中选拔出来的，并在原子能单位和一般的工作场所进行了严格的訓練。

下面各节中給出了电站参数的实测結果，包括控制棒的补偿能力和硼的补偿能力、控制棒的刻度結果、溫度和压力系数、控制棒下降時間等等。

对无毒的（清洁的）活性区的过剩反应性作过計算。这些試驗是在零功率的情况下和在 441 等效滿功率小时（燃料为 750 兆瓦日/吨）之后进行的。下面也給出了負荷过渡試驗和功率系数的測量結果。

运行过程中所遇到的各种問題是：

（1）在电站內的輻射放射性：从規定区域內的平日工作的結果我們可以得出結論，这些工作並沒有受到存在的强

烈辐照的影响。

(2) 在建筑物内空气中的放射性：到目前为止发现的唯一问题是在反应堆建筑物和某些辅助的建筑物里有氢存在。氢是从混凝土中跑出来的。

(3) 主回路水的洩漏率：約 100 升/小时。

(4) 机械方面的困难：例如供水泵、閥門不紧等等。

(一) 人員和培訓

在普通电站中选拔出在这方面有扎实基础并且有經驗的人作为运行人員。在BR-3反应堆建厂末期和各种迴路的許多性能及功能試驗期間，他們获得了完整而正确的經驗。

在这以前，在大学或技术学校里對他們进行了原子能知識的培訓。然后原子能工程师要對他們进行补充訓練，對他們詳細地說明BR-3反应堆的各种特性，并且特別強調了安全問題、仪器的使用和安全联鎖裝置。除此之外，負責反应堆及其迴路运行的第一批 操纵人員，都在BR-2反应堆（高通量材料試驗堆）上受过訓練。

与应用数学部門合作，利用模拟計算机模拟了反应堆的几个核物理方程式和热力学方程式。这个模拟裝置包括控制和仪表部份。BR-3反应堆的运行人員可以利用該 裝置进行起动作，即操纵控制棒組使反应堆达到临界和提升功率，以及观察反应堆在扰动（例如在控制棒动作和不动作情况下的二次負荷改变，一組控制棒位置的突然变化等）下的情况。

运行人員也参加了反应堆的装料、低功率临界試驗和短期負荷試驗。

实际上，电站的运行完全是在运行工程师的全面监督下

进行的，而起动和試驗还要受原子能工程师的监督。

应当強調指出的重要問題是有关輻照危险性方面的知識，尤其是涉及沾污的一些問題。原子能研究中心輻射安全物理专家小組制定了严格的規則和操作系统，这些規則和程序正被严格地执行着。

(二) 电站特性的实际測定

1. 反应堆物理特性的測定

反应堆运行的安全取决于它的动力学状态和对其动力学特性的了解。用这些知識就可以确定电站运行的安全規程。下面給出各种参数对反应性的影响。很明显，正反应性意味着反应堆輸出功率的增加，負反应性則意味着反应堆輸出功率的减少。当然，各参数起作用的方式仅对BR-3反应堆的活性区才是适用的。

(1) 水溫，具有負反应性效应；如果溫度增加則 ρ 减少；

(2) 燃料溫度，具有負反应性效应；如果溫度增加， ρ 减少；

(3) 压力，具有正反应性效应；如果压力增加， ρ 也增加；

(4) 控制棒，当控制棒上升时具有正反应性效应；下降时，具有負反应性效应；

(5) 中子吸收体，如裂变产物（或故意加入的化学毒物），具有負反应性效应；

(6) 燃料燃耗，具有負反应性效应。

了解这些参数对活性区反应性的定量影响是非常重要的。业已进行了下述工作：

(1) 新活性区 (燃耗为 0)

1962 年 8 月 9—10 日: 燃料组件装入压力容器, 插入所有的控制棒, 并且用硼酸 (硼的浓度为 1000ppm) 来保证主回路水的中毒。

普通活性区仪器在装料期间的灵敏度很低, 因为它们装在活性区外围的中子屏蔽水箱里。在装料期间, 为了观察热中子通量的变化, 还在压力容器中装了三个辅助中子探测器系统 (BF_3 计数管)。

1962 年 8 月 11—21 日: 封闭压力容器并使堆小室的所有设备 (通风管道, 防护板等) 复位。

1962 年 8 月 29 日: 在冷态 (70°C) 低压 (21 公斤/厘米²) 并在含有 960ppm 硼毒的情况下首次临界。当所有的控制棒停在 83 厘米高度上时, 反应堆刚好临界。

1962 年 8 月 31 日—9 月 1 日: 测定控制棒和硼对反应性的补偿能力 (条件同上)。在表 I 中给出了对硼进行这些测量的结果, 图 7 上曲线 a 表示控制棒补偿能力。

因为硼浓度的改变, 而控制棒的反应性补偿能力不受浓度的影响, 所以测定控制棒在不同临界高度时的反应性补偿能力是可能的。

表 II 硼的补偿能力

C_B (ppm)	Q ($^\circ\text{C}$)	P (公斤/厘米 ²)	$\partial\rho/\partial C_B$	所有棒的高度 H (厘米)
876	71	21	0.9×10^{-4}	72
685	74	26	1.0×10^{-4}	55
813	259	142	0.8×10^{-4}	120
519	261	142	0.9×10^{-4}	73
184	261	141	1.0×10^{-4}	52

1962年9月2—6日：在硼的浓度为465ppm的情况下，测定压力和水温的反应性系数（压力和温度从上述给定值到额定工况，即140公斤/厘米²和262°C）。

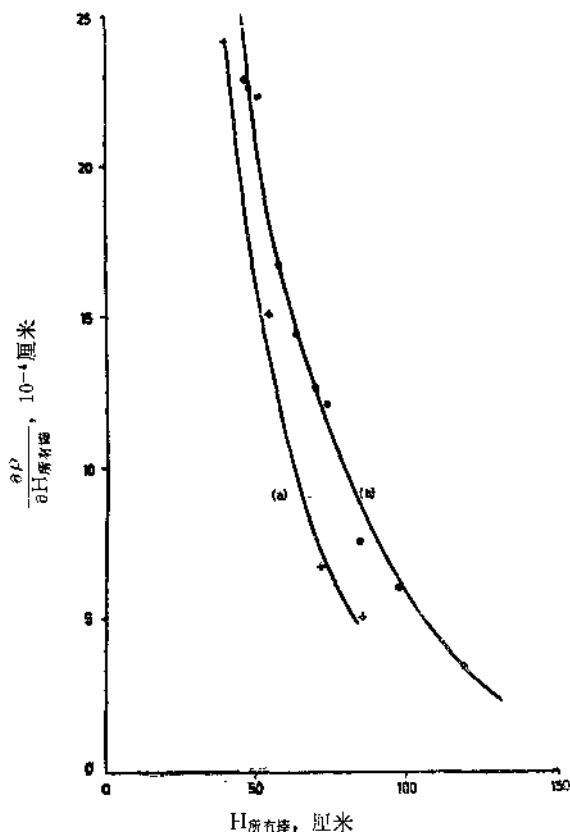


图 7 $\frac{\partial \rho}{\partial H_{\text{所有硼}}}$ 与 $H_{\text{所有硼}}$ 的关系

$\bullet \theta = 261^\circ\text{C} \begin{cases} p = 140 \text{ 公斤/厘米}^2 H > 37 \text{ 厘米} \\ p = 35 \text{ 公斤/厘米}^2 H < 39 \text{ 厘米} \end{cases}$
 $+ \theta = 70^\circ\text{C} \quad p = 30 \text{ 公斤/厘米}^2$

在表Ⅲ中給出压力系数的結果，图 4 中的曲綫 a 为溫度系数的結果。

表 Ⅲ 压 力 系 数

C_B (ppm)	θ (°C)	p 公斤/厘米	$\frac{\partial \rho}{\partial p}$ (公斤/厘米 ²) ⁻¹
456	70	40	1.0×10^{-5}
	214	45—133	2.0×10^{-5}
	263	140—95	3.1×10^{-5}
		140—168	3.1×10^{-5}
8.6—5.2	260	140—168	4.6×10^{-5}
		140—115	4.4×10^{-5}
		115—90	4.5×10^{-5}
1.7	213	140—115	3.0×10^{-5}
		91—65	3.3×10^{-5}
		70—40	3.0×10^{-5}
0	40	42—120	1.6×10^{-5}
	209	38—140	2.6×10^{-5}

1962 年 9 月 10—13 日：測定在額定工作压力和溫度下控制棒和硼对反应性的补偿能力，以及在不同硼浓度下控制棒的临界高度。在各种不同的棒配置情况下进行有关控制棒的測定（如除了中心一組的两根棒之外将所有棒全部抽出来測定；将所有棒組合起来进行測定等等）。測量的結果列于表Ⅱ（硼）以及图 7 曲綫 b、图 9 和图 10（控制棒）。

1962 年 9 月 14—15 日：測量压力和水溫在沒有硼时的反应性系数。压力系数列于表Ⅲ，溫度系数參看图 8 曲綫 b。

1962年9月22日：測量控制棒的下落時間。在活性区的压力、溫度和冷却剂流量等处于額定工况的条件下，对每根棒进行了五次測量。其結果是在 840 ± 5 毫秒和 895 ± 5 毫秒之間，平均值为 870 毫秒。

(2) 在 441 等效滿功率小时期間（燃耗为 750 兆瓦日）

1963年1月11日—15日：在額定工作溫度附近，在硼浓度为 475ppm 的情况下，測量压力和水溫的反应性系数。在不同硼的浓度情况下，測量中心区控制棒組的临界高度和反应性补偿能力。

其結果見 IV（压力系数）、图 8 曲綫 a 和 b（溫度系数）和图 9 及图 10（控制棒）。

表 IV 压力系数

C_B (ppm)	θ (°C)	P (公斤/厘米 ²)	$\frac{\partial \rho}{\partial p}$ (公斤/厘米 ²) ⁻¹
0	260	136—110	4.54×10^{-5}
0	260	110—136	4.7×10^{-5}
485	260	110—132	2.7×10^{-5}
485	260	132—105	3.04×10^{-5}

(3) 在 1135 个等效滿功率小时期間（燃耗为 1935 兆瓦日）

1963年3月11日—13日：在額定工作溫度附近，对于不同硼的浓度（400, 200 和 100ppm），測量水溫和压力的反应性系数。在正常的工作溫度下，硼的浓度为 100ppm 时，測定硼的反应性系数。結果是 $1.3 \times 10^{-4} \Delta k/kppm$ 。

(4) 結論