

(内部资料)

反应堆运行经验资料汇编

1988

核工业部 安防局 核电局 核燃料局 军工局 科技委 编

前 言

自1958年我国建成第一座反应堆投入运行以来，反应堆运行已有30年历史了。反应堆安全运行是保障科研生产顺利进行、工作人员和公众免受超剂量照射和环境不受污染的重要手段，也是核安全管理的预期目标。

目前世界各有堆国家都非常重视反应堆运行安全，从世界上已发生的反应堆事故中可以清楚看到，绝大部分出自运行管理缺陷，主要是由人为因素造成的。如1979年美国三哩岛核电站事故和1986年苏联切尔诺贝利核电站事故，都是出自上述原因。搞好反应堆运行管理工作，不仅能够使反应堆保持良好的运行状态，还可以及时发现纠正设备缺陷、故障和不利安全运行的因素。

总结反应堆安全运行的经验，加强安全分析工作，是搞好运行管理的重要组成部分。这集汇编编入的文章，是出自1988年核工业总公司组织召开的“反应堆安全运行经验交流会”上提供的论文和工作总结，发表这些文章的目的，是为了促进反应堆运行经验的交流，互相吸取经验和教训，以利于加强反应堆的运行管理工作，保证反应堆运行安全。

由于编辑时间仓促，错误之处请指正。

编辑组

1989.2.4.

目 录

49-2反应堆新保护系统可靠性分析.....	孟繁淑 (1)
反应堆长期停闭期间的保护.....	侯登第 (9)
“小堆”实验与运行.....	刘福钿 (12)
石墨水冷反应堆后期运行采用的主要安全技术措施.....	李祖平 (19)
300 [*] 反应堆在频繁启堆中临界棒位的确定.....	刘在福 (22)
高通量工程试验堆冷却系统改进后的特性研究及其安全分析.....	段光荣 王振东 (29)
高通量工程试验堆的中毒特性及其对运行的影响.....	卜永熙 (31)
用于微型反应堆的微型计算机闭环控制系统.....	王里玉 彭春元 毛冬梅 (38)
HWRR运行中的问题和解决办法.....	负宏志 常 南 (42)
HWRR工艺管断裂分析判断和处理	夏延龄 贾占礼 杨林 (执笔) (46)
用 ¹⁵ N γ 放射性强度作水冷反应堆功率监测的研究及其在HFETR上的应用	杨有成 文碧忠 秦根民 (52)
高通量工程试验堆控制棒间干涉效应及相对效率刻度.....	王振东 段天元 唐清和 (58)
石墨水冷堆的“不死”功率研究.....	王能彬 (62)

摘要报道

高通量工程试验堆冷却系统动态与调节过程初探.....	尤广义 (71)
反应堆退役技术方案的设想.....	罗时买 (71)
反应堆事故应急对策行动方案内容简介.....	(71)
用抽真空法排除堆芯肿胀的石墨箱.....	杨庚辰 李承新 (72)
反应堆可靠电源的改造.....	刘登华 (72)

49-2反应堆 新保护系统可靠性分析

孟繁淑

(中国原子能科学研究院)

摘 要

本文对49-2反应堆新研制的保护系统进行了可靠性分析。该系统由国产高抗干扰(HTL型)集成电路组成。控制保护系统在反应堆控制中占有重要地位,其可靠性要求较高,对单个保护变量来说,其安全故障率(误动率)应不大于1/年,非安全故障率(拒动率)不大于 10^{-6} /年。经可靠性分析,新研制的49-2反应堆控制保护系统的可靠性指标能满足安全要求。

反应堆的控制保护系统是保证反应堆安全运行的重要设备,它的好坏直接影响着反应堆的安全运行,对单个保护变量来说其安全故障率(误动率)应不大于1/年,非安全故障率(拒动率)不大于 10^{-6} /年。为提高49-2反应堆运行的安全性,研制了新的保护系统。它由国产高抗干扰(HTL型)集成电路组成。

新保护系统如何能达到这个指标,我们进行了可靠性分析。

一、新保护系统逻辑结构可靠性设计

系统的逻辑结构是影响整个系统可靠性的重要部分。也是系统逻辑线路、监测仪表设计的依据。因此,必须进行精心设计与预测,确定合理的方案。

1.1 逻辑结构设计

系统逻辑结构的设计过程,实质上是对系统可靠性指标(λ_{ss})进行分配和反复预测与估计的过程。首先把系统分成若干个功能块,按功能要求设计出单通道的线路,然后预测单通道线路的失效率 λ_{ss} 。如果

$$\lambda_{ss} > \lambda_{ss},$$

说明单通道的结构不能满足可靠性指标,需要采用冗余技术及符合技术,把系统设计成多重的表决系统,再对所确定的结构进行可靠性预测,当结果满足条件:

说明所确定的逻辑结构能满足可靠性指标要求。

按上述步骤,把保护系统分为保护、综合及停堆等功能块。单通道系统由这些功能块串联组成。每个保护变量的通道组成不完全相同,新保护系统中以“一次水量低”的通道所含的集成组件最多,由10个逻辑门串联组成。国产集成电路的故障率为 2×10^{-6} /小时。若以月检查为检验周期,则单通道的故障率为 1.4×10^{-2} /年。显然,距可靠度要求的指标相差很大,需要用冗余技术提高系统的可靠性。

综合考虑了设计中的单一故障准则,使用方便及结构的灵活性等要求,设计的保护系统逻辑结构如图1所示。图中保护通道采用了

$\frac{2}{4}$ 符合逻辑,并设有双重表决器,双重综合、停堆通道。

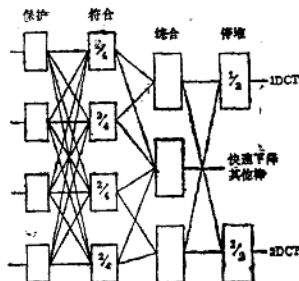


图 1

1.2 逻辑结构可靠性预测

新保护系统的每条保护通道都设有在线检验及监督环节,使 $\frac{2}{4}$ 可维修系统的可靠性预测,需要运用马尔柯夫状态转移理论进行分析,得出以下可靠性参量。

(1) 系统的有效度。 $\frac{2}{4}$ 表决系统有相互转移的4个状态 S_0, S_1, S_2 及 S_3 , 脚码表示失效通道的个数, 状态转移如图2所示。

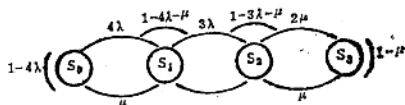


图 2

系统的工作过程为齐次马尔柯夫过程, 稳态状态下的转移概率矩阵为:

$$1A_0 = \begin{matrix} & S_0 & S_1 & S_2 & S_3 \\ \begin{matrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -4\lambda & 4\lambda & 0 & 0 \\ \mu & -(3\lambda + \mu) & 3\lambda & 0 \\ 0 & \mu & -(2\lambda + \mu) & 2\lambda \\ 0 & 0 & \mu & -\mu \end{pmatrix} \end{matrix}$$

设各状态的稳定概率为 p_0 、 p_1 、 p_2 、 p_3 ，因为稳态时

$$\lim_{t \rightarrow \infty} p'_j(t) = 0$$

所以马尔柯夫状态方程稳态时为

$$p_1 1A = 0$$

并且

$$\sum_{j \in S} p_j = 1$$

由此写出下面的线性方程组

$$\begin{cases} -4\lambda p_0 + \mu p_1 = 0 \\ 4\lambda p_0 - (3\lambda + \mu)p_1 + \mu p_2 = 0 \\ 3\lambda p_1 - (2\lambda + \mu)p_2 + \mu p_3 = 0 \\ 2\lambda p_2 - \mu p_3 = 0 \\ p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1 \end{cases}$$

解方程组得：

$$p_0 = \frac{\mu^3}{\mu^3 + 4\lambda\mu^2 + 12\lambda^2 + 24\lambda^3};$$

$$p_1 = \frac{4\lambda}{\mu} p_0, \quad p_2 = \frac{12\lambda^2}{\mu^2} p_0;$$

$$p_3 = \frac{24\lambda^3}{\mu^3} p_0$$

系统的稳态有效度

$$p = p_0 + p_1 + p_2 = \frac{\mu^3 + 4\lambda\mu^2 + 12\lambda^2\mu}{\mu^3 + 4\lambda\mu^2 + 12\lambda^2 + 24\lambda^3}$$

(2) 系统平均工作时间：

将图 2 中的状态 S_3 变为吸收态，用马尔柯夫吸收链来分析，状态转移图为图 3。

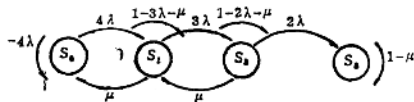


图 3

S_0 、 S_1 、 S_2 的含义同上，这三个状态为系统的工作状态。 S_3 为吸收态，即系统的失效态。在系统正常运行时（失效前），只能在 S_0 、 S_1 、 S_2 状态间转移；一旦进入 S_3 态则

系统失效。设系统从边缘工作态 S_2 启动, 在 S_i 态的平均停留时间为 $T_i (i=0, 1, 2)$, 则由文献[4]可得到:

$$(T_0, T_1, T_2) / B + (0.0 \cdot 1) = 0 \quad (1)$$

其中 B 为矩阵 A 去掉最后一行和最后一列, 得到3阶矩阵。将(1)式展开可得如下方程组:

$$\begin{cases} -4\lambda T_0 + \mu T_1 = 0 & (1) \\ 4\lambda T_0 - (3\lambda + \mu) T_1 + \mu T_2 = 0 & (2) \\ 3\lambda T_1 - (2\lambda + \mu) T_2 + 1 = 0 & (3) \end{cases}$$

方程的物理含义, 以(1)为例, 表示系统稳态运行时由状态 S_0 转向状态 S_1 的次数($4\lambda T_0$)应等于由 S_1 转向 S_0 的次数(μT_1)。

解方程组得到系统稳态运行时, 在各工作态的平均停留时间:

$$T_0 = \frac{\mu^2}{24\lambda^3}, \quad T_1 = \frac{\mu}{6\lambda^2}, \quad T_2 = \frac{1}{2\lambda}$$

系统的平均工作时间:

$$MTBF = T_0 + T_1 + T_2 = \frac{\mu^2 + 4\lambda\mu + 12\lambda^2}{24\lambda^3}$$

(3) 系统平均故障率。系统平均故障率 λ 是平均工作时间MTBF的倒数, 即

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} = \frac{24\lambda^3}{\mu^2 + 4\lambda\mu + 12\lambda^2}$$

根据上面建立的数学模型计算 $\frac{2}{4}$ 表决系统的可靠性指标, 取每个保护通道的故障率为 10^{-5} /小时, 系统的维修率为0.2, 则系统的有效度接近于1。

故障率为:

$$\lambda = \frac{24\lambda^3}{(0.2)^2 + 4\lambda\mu + 12\lambda^2} \approx \frac{24 \times 10^{-15}}{0.04} = 6 \times 10^{-13} / \text{小时}$$

由此可以证明, 我们研制的 $\frac{2}{4}$ 表决系统, 由于能进行在线维修, 稳态可用度接近于1。

表决器后边的双通道部分的失效率与单通道相比较, 下降了4个多数量级(约为 3×10^{-8} /年)。因此, 可以说新设计的保护系统逻辑结构是能够达到所要的可靠性指标的。

另外, 新设计的这套 $\frac{2}{4}$ 逻辑结构也具有自动转换为 $\frac{2}{3}$ 结构的灵活性, 为今后使用和开展试验提供了方便。

二、新保护系统可靠性分析

2.1 新保护系统简介

如图 1 所示, 其逻辑结构设计为 $\frac{2}{4}$ 的局部符合逻辑。设有 4 个保护通道, 2 个符合通道, 3 个综合通道和 2 个停堆通道。

每个保护通道由 9 个停堆变量的逻辑线路组成。每个变量组成的具体线路各有不同, 其中“一次水流量低 (DL)”的逻辑线路内含的集成组件为最多。见图 4、5。第一、

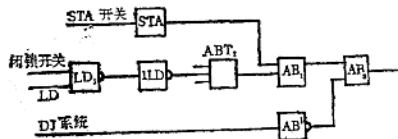


图 4

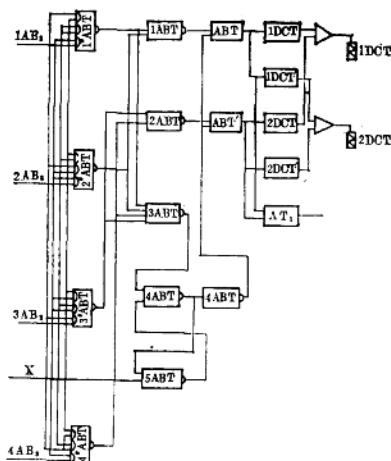


图 5

第二综合通道分别由 $\overline{ABT}$ 、 $\overline{ABT'}$ 组成, 第三个综合通道由 $\overline{4ABT}$ 、 $\overline{4ABT'}$ 、 $\overline{5ABT}$ 及 $\overline{AT_1}$ 门组成; 停堆通道有 $\overline{1DCT}$ 、 $\overline{1DCT'}$ 、 $\overline{2DCT}$ 、 $\overline{2DCT'}$ 及 2 个驱动器。驱动线路见图 6。

出现停堆事故时, 由监测仪表发出停堆信号, 同时送出 4 个保护通道, 经逻辑组合后交叉送至符合通道, 进行 $\frac{2}{4}$ 符合, 经综合后送至停堆通道, 由这里进行 $\frac{1}{2}$ 符合后直接控制安全棒的电磁离合器, 使之断电快速停堆。从第 3 个综合通道发出快速下降其他控

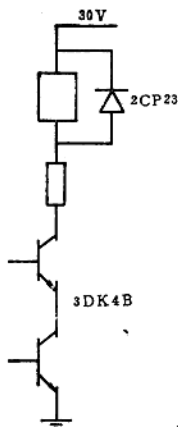


图 6

制棒的指令。

2.2 故障树分析

新保护系统的可靠度有多高，需要对系统进行可靠性计算，用“故障树”方法对系统进行可靠性分析。分析中选取“一次水流量低”的单个保护线路为代表，分析系统的拒动率与误动率，并进行定量的可靠性计算，步骤如下：

1. 建立故障树

(1) 确定顶事件：选取“不希望发生的事件”为故障树的顶事件。当需要急停堆时，由于系统故障使 2 个电磁铁同时都不能断电，从而使 2 根安全棒在紧急情况下都不能插入反应堆中，这是最不安全的一种拒动故障，故把这种故障做为第一棵故障树的顶事件。

选取系统“误动”的顶事件为：因系统故障引起的任意一个磁铁断电而造成误停堆的事件。

(2) 控制元件的故障模式

分析的保护系统由集成组件及三极管两种控制元件组成。

i 集成组故障模式：

“0”故障——由于集成组件内部的损坏，造成组件的输出为“1”（高电位）信号或输出断路，统称为“1”故障。

ii 晶体三极管的故障模式：

① 断路故障——由于三极管内部损坏，不论基极有无输入信号，管子输出都处于断开状态。

② 短路故障——由于三极管内部损坏，不论基极有无输入信号，管子都处于导通状态。

2. 故障树的简化

为迅速地求出最小割集，对故障树进行简化。简化中采取以下两种措施：

(1) 利用布尔代数的吸收律及重复律，对故障树进行逻辑运算，把相应的逻辑门进行合并，并剔除多余的底事件。

(2) 将两个保护通道视为一个模块，即以 $M_1 \rightarrow M_2$ 取代每个保护通道中底事件的集合。

化简后，拒动故障树顶事件的表达式为：

$$G_1 = I \cdot J + I(B+F) \cdot (D+H) + J(A+E) \cdot (C+G) + (K+L+M) \cdot (N+O+P) \cdot (Q+R+S) + (A+E) \cdot (B+F) \cdot (C+G)(D+H) + X + Y。$$

误动故障树的顶事件表达式为

$$G_2 = A+B+C+D+E+F+G+H+I+J+K+Q+R+S+T+LO+MF$$

3. 求最小割集

最小割集也就是系统的故障模式。分析中采用“按阶截断法”，只考虑6阶以下的最小割集，高于6阶的可忽略不计。

以简化的故障树为依据，先从顶事件开始，按门的性质逐步展开。凡是遇到逻辑门，就根据逻辑关系用它的输入元素代替，直到替换成底事件。

采用了Mocus算法求出最小割集。该算法是在一个空的表格上展开，以一个二维数组 $B(X, Y)$ 表示一个空格，其中 X 表示行数， Y 表示列数，表格中各行都相当于一个不同的割集。开始先把顶事件的门号置于表格的左上角，按故障树的简化图，从左到右，从上而下，逐步处理。“与门”使割集容量增加，“或门”使割集数目增加。处理完后，需认真地对原位置上的新元素再进行重复检查，直到它的底事件为止，就转到下一行进行，直到最后一行。

逻辑门的处理方法用两组方程归纳法如下，其中使用的符号为：

W ——逻辑门

S_w —— W 门的输入元素个数

A_w —— W 门的第1个输入元素

$B(x, y)$ —— B 数组中第 x 割集(第 x 行)的第 y 个(第 y 列)元素

Y_{max} ——在第 x 割集中已被使用的 y 的最大值，对不同的 X 、 Y_{max} 可能不同

X_{max} ——已有割集之最大序号(最大行)。

当 W 是“与门”时

$$\begin{cases} B(x, y) = AW \cdot 1 \\ B(x, y_{max+1}) = AW \cdot l, \quad l = 2, 3, \dots, SW \end{cases}$$

当 W 是“或门”时

$$\begin{cases} B(x, y) = AW \cdot 1 \\ B(x_{max+1}, n) = \begin{cases} AW \cdot l & \text{当 } n = y \quad l = 2, 3, \dots, SW \\ B(x, n) & \text{当 } n = 1, 2, \dots, y_{max} \end{cases} \end{cases}$$

当 $n \neq y$ 时

求出的最小割集列于表1。

4. 系统可靠度计算

求出最小割集后，就可以求顶事件发生的概率(FST)。这个概率就是相应的系统的故障率，FST为所有最小割集并的概率，计算中假设底事件是相互独立的。但从表1中看出，有的最小割集之间含有相同的底事件，所以它们是相交的。为了求得精确值，需要采用化事件的并为不交和的办法。而对于最小割集发生的概率 $\ll 0.1$ 时，为简化计算，可以做独立近似。这样得到的概率值是偏高的，即偏保险的，所以在工程上是允许的。

根据最小割集表及已知的元件故障计算FST如下

$$FST_{\text{柜}} = 7\lambda^2 + 47\lambda^3 + 58\lambda^4 + 54\lambda^5 \approx 7\lambda^2 \approx 2.8 \times 10^{-11} / \text{小时}$$

$$FST_{\text{误}} = 15\lambda + 2\lambda^2 + 4\lambda^3 \approx 1.5 \times 10^{-5} / \text{小时}$$

根据不同的检修时间间隔，得出不同的年故障率(表2)。

表 1

IJ	MNR	EGBD	$a_1 a_2$	$c_1 c_2 i_1 d_1 i_2 d_2$
IBG	MNS	ACBD	$c_1 a_2 b_1$	$c_1 c_2 i_1 e_1 i_2 d_2$
KNQ	KOR	ACFD	$a_1 c_2 b_2$	$c_1 c_2 i_1 e_1 i_2 d_2$
JAC	KPR	ECFD	$c_1 a_2 i_1 d_1$	$c_1 c_2 i_1 i_2 f_1 d_2$
IFG	KOS	EGFD	$c_1 a_2 i_1 e_1$	$c_1 c_2 i_1 e_1 i_2 e_2$
IBH	KPS	AGFD	$c_1 a_2 i_1 f_1$	$c_1 c_2 i_1 f_1 i_2 e_2$
IFH	LOR	ABCH	$c_1 c_2 d_1 b_2$	$c_1 c_2 i_1 i_2 d_1 f_2$
LNQ	LOS	EDCH	$a_1 c_2 i_2 d_2$	$c_1 c_2 i_1 e_1 i_2 f_2$
MNQ	LPR	EBGH	$a_1 c_2 i_2 e_2$	$c_1 c_2 i_1 f_1 i_2 f_2$
KOQ	LPS	AGBH	$a_1 c_2 i_2 f_2$	
KPQ	MOR	ACFH		
LOQ	MOS	ECFH	$c_1 c_2 i_1 d_1 b_2$	
MOQ	MPR	EGFH	$c_1 c_2 i_1 e_1 b_2$	
MPQ	MPS	AGFH	$c_1 c_2 i_1 f_1 b_2$	
KNR	JEC	X	$c_1 c_2 b_1 i_2 d_2$	
KNS	JAD	Y	$c_1 c_2 b_1 i_2 e_2$	
LNR	JED		$c_1 c_2 b_1 i_2 f_2$	
LNS	ABCD			
LPQ	BCED			

表 2

检 修 时 间	拒功率(每年)	误功率(每年)
每月检修一次	2.02×10^{-8}	1.08×10^{-2}
每周检修一次	4.70×10^{-9}	2.52×10^{-3}
每日检修一次	6.72×10^{-10}	3.60×10^{-4}

由此可以证明新研制的49-2保护系统的可靠性指标能满足安全要求。

参 考 文 献

- [1] IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Protection Systems.
- [2] Criteria for Protection Systems for Nuclear Power Generating Station ANSIN. 42.7 (1972).
- [3] (日)高木主编, 可靠性数学基础。
- [4] 曹晋华、程侃, 系统可靠性的数学理论。
- [5] R. L. 古德斯坦因, 布尔代数。

反应堆长期停闭期间的保护

侯 登 弟

摘 要

1986年元月,按照国家计划本反应堆进入长期停闭状态。在停堆前,我们制定了《反应堆长期停闭期间的保护方案》,规定了明确的目标及详尽的技术措施和管理措施。一年多的实践充分证明,这套方案是可行的,效果是好的。

一、前 言

本反应堆是一座石墨水冷生产堆,1969年动工兴建,1973年进行物理启动,1974年10月达到设计的额定功率,1979年曾加强功率到设计额定值的135%,十二年来,一直安全运行。1986年元月底,第49次运行周期结束,全堆元件卸空后进入长期停闭状态,进行余热发电工程修建和老系统适应性改造。1987年8月顺利地进行一回路冲洗,随后一回路放空,反应堆处于长期停闭状态。

在无国外资料、国内也无先例的情况下,堆停闭长达一年半之久,工况又多次发生重大变化,还要在主系统上进行大量的改造工作,因此,如何做好停闭期间的维护保养工作,就成为一项新技术课题。

二、保护目标

反应堆是一个十分庞杂的工程,它的保护牵涉到很多方面,但重点是堆本体和一回路系统。为了使反应堆工程在长期停闭期间得到良好的保护。我们明确地规定了反应堆工程各部份的保护目标。

2.1 堆本体的保护目标

- (1)防止堆芯石墨砌体受潮、氧化及沾污;
- (2)防止石墨砌体潜能释放、机械损伤;
- (3)防止反应堆、堆芯承重大构件腐蚀;
- (4)防止异物进入堆芯孔道;
- (5)防止堆本体其它设备和部件的损坏。

2.2 一回路系统的保护目标

- (1)防止一回路管道腐蚀、变形及损伤;
- (2)防止杂物进入一回路管道;
- (3)防止在一回路系统上进行计划外操作;
- (4)防止一回路系统其它设备损坏。

2.3 反应堆其它系统的保护目标

各辅助系统的设备、仪表处于正常运行或备用状态。

三、保护措施

为了达到上述反应堆工程的保护目标，我们制定了详尽的技术措施和管理措施。

3.1 主要技术措施

经过研究和论证，决定将一回路放空，堆芯及一回路系统采取“干式”保护。这样，可从根本上防止堆芯石墨砌体受潮，改善堆下部空间气氛，防止反应堆本体大构件腐蚀，同时可节省一回路水循环的动力费用，防止一回路管道腐蚀。

向堆芯供入足够的氮气，并适当调整堆空间气流走向，维持堆空间正（负）压力在规定范围内，定期对堆各空间气氛进行分析监测，发现异常及时进行调整，确保空气和水份不进入堆芯。

对反应堆的各重要工艺参数，特别是石墨砌体的有关参数，进行严格的监督，控制石墨砌体各点温度 $\leq 50^{\circ}\text{C}$ ，以防止砌体氧化，杜绝潜能释放。当砌体中心点最高温度接近 70°C 时，一回路充水冷却。为此，一回路冷却水补充水水池水位不得低于2米，并保证一台事故泵随时可以启动。

为保护堆芯石墨砌体，防止其机械损伤，在石墨套管更换中，严格控制套管拔力，单根 $< 2.0\text{t}$ ，双根 $< 2.5\text{t}$ 。

新入堆的工艺管，严格按技术标准进行检查和组装，不合格的管子不准入堆。

一回路放空前，对管道进行热冲洗后放空，再用高纯度水浸泡放空，以尽量减少回路管道内的放射性垢物及防止管道腐蚀。

各辅助系统的设备、仪表，凡未停运的继续进行正常维护和计划检修，使之处于正常运行状态；对停运的设备、仪表，进行定期通电防潮和试运；对主泵、水运泵、调泵等重要设备，进行定期盘车，发现异常，及时处理。

3.2 主要管理措施

根据《反应堆长期停闭期间的保护方案》，我们制定了详细的实施细则（《反应堆长期停闭维护规定》），还制定了各工艺系统的运行方式和人员组织，使反应堆保护工作制度化、规范化。

各生产运行岗位，建立详细的设备、材料和仪表的检修或检查记录，实现迅速准确的信息反馈，出现问题及时采取措施加以解决。

为了全面、深入和持久地进行反应堆保护工作，我们把反应堆保护的总任务纳入到科研革新和QC活动中去。

四、实施过程

制定的“反应堆长期停闭期间的保护方案”于1986年元月27日由核工业部批准执行。此后，进行了验证性试验。1986年元月28日0:20'，反应堆长期停闭。2:00'，堆芯

石墨温度降至25℃(室温), 10:00, 反射层石墨温度亦降至25℃(室温)。为验证方案是否可行, 2月3日6:00, 全堆料卸空。14:00'至2月6日11:09', 停止事故泵, 做一回路静水试验; 2月6日11:09'至2月12日17:08', 做一回路放空试验。石墨温度, 除38—29下点温度稍有上升(最高39℃)外, 其余各点温度基本无变化。对22—46、26—15管道静水实测温度和放空实测温度均小于35℃, 防护水箱等处温度均持续下降。反应堆一回路系统于86年2月28日全部放空。

为了随时掌握反应堆内的各种变化和校验反应堆保护方案各种措施的实际效果, 我们采用了以下的监测检查办法。

(1) 每月对堆空间气氛取样3~4次, 分析其氧含量和水汽量。

(2) 对25—15、30—30孔道插入新工艺管, 定期拔出观察其表面腐蚀情况, 以了解堆内气氛有无恶化。

(3) 利用深孔观察仪和工业电视对石墨孔道和堆空间设备、部件定期进行对比观察, 以了解堆芯及金属结构有无变化。

从86年4月份起, 开始更换全堆的工艺管及石墨套管。在成批进行此项工作前, 先选取各区有代表性的管号进行更换试验, 以掌握必要的技术数据。在更换石墨套管和观察孔道过程中发现, 如果将套管拔碎, 不但处理困难, 而且还有可能损坏石墨砌体, 所以要尽量避免。为此, 制定了《更换石墨套管注意事项补充规定》和《铝托回收使用临时规定》。并在实施中严格执行, 这样, 在Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ各区石墨套管的更换过程中, 就再也未出现过拔碎套管的现象。

1987年8月, 对一回路进行了冲洗。为了保证反应堆在一回路冲洗时的安全, 我们制定了详尽的《一回路冲洗实施方案》、《堆芯防潮技术方案》、“防止回路管道超压、振动安全措施”和“防止石墨潜能释放安全措施”。因此, 在整个回路冲洗期间, 未发生安全事故。

五、保护效果

反应堆自86年元月28日长期停闭, 到87年8月进行一回路冲洗, 时间长达一年另七个月。根据各项参数记录和监测结果, 说明了反应堆保护的 effect 是良好的。

5.1 堆空间气氛

从86年3月至87年8月, 根据每月对堆空间气氛取样分析的结果, 均比堆运行时偏低。我们曾多次拔出预先插入的工艺管进行外观检查, 没有发现霉点和水汽凝结, 工艺管表面很干燥。这也说明堆内气氛适当。在此期间, 利用工业电视, 对石墨孔道和堆本体结构进行了多次对比观察, 结果表明: 石墨孔道未出现新的裂纹, 原有裂纹未见发展, 堆外壳及水箱内侧未见明显腐蚀, B空间下部导向管无异常。上述情况表明, 堆芯和本体结构受到了良好的保护。

(下转第18页)

“小堆”实验与运行

刘 福 钊

前 言

根据1985年7月核工业部承德计划调整会议精神,要我厂将1986年8月的周期全堆卸料方案提前至1986年1月的周期卸料时进行全堆卸料,按已安排好的换料方案,当时预计损失达1000万元以上。为了完成调整计划,提出设想:在前一个周期卸完料时,外围不再装新料,反应堆的余料继续运行,即小堆运行。为此,成立了攻关组。通过论证与反复推敲,解决了一个个难题,终于制出了小堆运行方案,报部同意后实现了小堆运行,节约资金达488万元,圆满实现了部的调整计划。

一、小堆实验

小堆运行是前所未有的,理论计算也没有固定的模式,我们在理论估算的基础上主要通过科学实验验证的办法来探求可行性,为此,成立了攻关组,研究订出了小堆实验方案,为确保反应堆的安全,实验前作了充分的准备,决定采取“内插”方式,逐步向小堆逼近的实验方案。首先在大堆状况下,即堆内满载的情况下,测定初始参数的基准实验,为进一步的实验作对比,然后将反应堆外围料从外至里分8批卸料,卸完一批,开一次堆,记录各种实验参数,实际上第8批料卸完就成了“小堆”状况,这种方案是安全、稳妥的。

1.1 小堆实验前的准备

为了确保小堆实验的安全,作了下述各项工作。

1. 调整换料方案

原排换料方案如表1。

如按这个方案进行卸料,从表1可以看出,Ⅲ、Ⅴ、Ⅵ区的燃耗很浅,则损失太大。如果在前一(A_1)周期卸料时,对已卸下料的孔道不再装新料,余下的料再继续运行,这时运行的难度将不可预料,所以必须在Ⅳ区卸完后,装新料,这样损失也很大,为了减少这一损失,根据前一周周期卸料时的燃耗情况,将该周期的卸料分成两次进行,即Ⅲ区提前至额定燃耗时卸,卸完再装料,这样可减少经济损失。于是就出现了48-1、48-2及49的换料方案,调整后的换料方案如表2。

表 1

卸料区 燃耗 周期		I	II	III	IV	V	VI
A ₁	$\bar{B}$ (MWD/根)	29.71	28.41	89.87	61.61	83.16+15.21	79.77
	卸 数			288		156	252
A ₂	$\bar{B}$ (MWD/根)	75.59	72.28	38.46	93.33	26.70-38.71	20.28
	卸 数	648	328			80	
A ₃	$\bar{B}$ (MWD/根)	48.50	46.38	79.11	33.54	54.93-62.55	41.72
	卸 数			288			
A ₄	$\bar{B}$ (MWD/根)	93.96	89.83	38.10	64.97	81.39-86.83	61.81
	卸 数	648	328	288	188	236	252

表 2

	卸 区	燃 耗 (MWD/根)	备 注
A ₁ -1 周期	III 288根	$\bar{B}$ 76.05	卸 完 装 料
A ₁ -2 周期	V VI 395根	$\bar{B}$ V, 90.95 $\bar{B}$ VI 85.01	卸 完 不 装 料
A ₂ 周期	I、II、III、IV、V	$\bar{B}$ I, 85.43 $\bar{B}$ II, 75.14 $\bar{B}$ III, 46.02 $\bar{B}$ IV, 88.82 $\bar{B}$ V 32.64	

2. 小堆物理计算

调整后的“小堆运行”换料方案是装载 I、II、III、IV、V 193区共计1545根。“小堆”物理计算就是在这种装载情况下的反应堆后备反应性、反应堆功率、各区的比功率，进行物理计算。

后备反应性计算。计算条件为堆内装载1545根，V外156根，孔道内装上铝块、湿栅一湿反射层、环积累效应未预考虑，通过计算得出：

$$k_{eff} = 1.01825 \quad \rho_{后} = 17.93 \times 10^{-2}$$

小堆运行功率计算。考虑了堆内钴靶吸收中子的反应性损失、平衡中毒以及调节功率、展平通量所需的反应性等因素。其中，钴靶吸收中子的反应性损失约为 $\Delta\rho_1 = 16.6 \times 10^{-4}$ ，调节功率展平通量所需反应性约为 $\Delta\rho_2 = 16.8 \times 10^{-4}$ ；余下的反应性用以克服平衡中毒，约为 $\rho = 14.6 \times 10^{-2}$ ，这样相应功率水平为75.4% WH (I)，由此计算得出“小堆”各卸料区的比功率列于表3。

3. 功率监测系统改造

从物理计算看，小堆运行是可行的，但堆芯缩小后，堆侧反射层平均厚度由80cm

表 8

卸料区	I	II	III	IV	堆功率
比功率	0.384	0.280	0.200	0.150	70% WH(t)
	0.439	0.320	0.223	0.171	75.4% WH(t)

增加到189cm, 这样将引起电离室处中子通量的降低, 原监测系统能否满足小堆运行的要求, 就成了一道难题, 通过各种估算大致要降低1—2个量级, 因此对监测系统必须作适当改造, 制定了两个方案。第一方案, 若通量降低在一个量级以上则将准备的10套新电离室向堆内移至Ⅵ区孔道内, 但这个方案难度大, 不易实现。第二方案, 当通量降低在一个量级以内就采取提起屏蔽套筒及加长电离室电缆12m来增加电离室处的中子通量, 以弥补因反射层加厚所带来的中子通量降低。这个方案比较简单, 并予采用。

4. 各流量区的额定流量

根据小堆各区的单管平均功率, 考虑了中心区及边区工艺管单管出口水温不要相差太大以及不打乱原流量区的原则, 决定了各区流量值, 见表4。

表 4

流量分区	I	II	III	IV	V	VI VII
小堆额定流量 M ³ /h	5.55	4.00	3.50	3.00	3.00	1.50
原大堆额定流量 M ³ /h	5.55	5.30	4.70	4.30	4.00	2.90

1.2 实验项目

通过理论计算和可行性论证后为验证小堆运行在工程实践上的可能性, 还通过实验来确定小堆运行时的各种参数的变化。

拟定的实验项目有: 热中子通量的测量实验; 石墨砌体轴向温度分布的测量实验; 控制棒效率及后备反应性的测量实验; 反应堆径向功率分布及平坦区大小的测量实验; 热功率和电功率的刻度实验等等。

先将反应堆功率从112% WH(t) 的情况下停堆, 解毒达37小时, 待 $k_{eff} > 1$, 然后在反应堆满载情况下冷态开堆, 最高功率提到20% WH(t), 记录各种实验参数, 观察临界点的变化, 各电离室处的中子水平以及各监测系统的工作情况, 以此作为基准比对数据, 实验完后停堆。

将Ⅵ区外圈卸掉140根料, 反应堆装载1800根。在此情况下开堆, 最高功率提至20% WH(t), 记录、观察各种参数变化, 和反应堆满载时进行比较。

将Ⅵ区内圈再卸掉112根料, 反应堆装载1688根, 在此情况下再进行开堆, 最高功率提到20% WH(t), 同样记录各种参数, 作进一步比较。

将Ⅴ区内圈卸掉143根, 反应堆装载1545根, 即达到“小堆”状况, 进行开堆, 分步将功率等级提至10% WH(t)、20% WH(t)、40% WH(t)、75% WH(t)。记录各种