

# 压水堆核电站废液处理系统的比较

刘 昱,刘 佩,张明乾

(中广核工程设计有限公司,上海 200030)

**摘 要:**本文从源项、系统主要处理流程及装置和处理结果三方面对 AP1000、EPR 和 CPR1000 三种压水堆核电机组的废液处理系统进行比较,分析了废液处理系统工艺流程及装置的改进和发展趋势。

**关键词:**废液处理系统;CPR1000;EPR;AP1000

**中图法分类号:**TL941<sup>+</sup>.1

**文献标识码:**A

我国《核电中长期发展规划(2005—2020年)》<sup>[1]</sup>已正式发布,核电政策由“适度发展”调整为“积极发展”。规划指出第三代压水堆是未来中国核电站的主力堆型,同时,在三代核电技术消化吸收掌握之前,我国二代改进型(二代加)压水堆 CPR1000 由于其成熟的自主设计、制造、建设和运营经验仍将保持适当规模建设。第三代压水堆是指符合业主要求文件(URD)<sup>[2]</sup>或者欧洲业主要求(EUR)<sup>[3]</sup>的核电技术,提高了核电站的安全性、经济性且对环境更加友好,以 AP1000 和 EPR 为代表,两者都源自二代加技术,但采用不同的理念进行改进。AP1000 引入了非能动理念,使压水堆核电站安全系统发生了革新性的变化,同时引入了模块化技术来缩短施工周期以提高经济性。EPR 通过增加系统冗余的方式提高核电站的安全水平和可用率,同时依靠增加单堆功率和参数来提高经济性。我国开工建设的核电站中,红沿河、阳江等采用 CPR1000 技术,三门、海阳采用 AP1000 技术,台山采用 EPR 技术。

废液处理系统作为核电站的重要组成部分之一,用于分类收集、储存、处理和排放核电站在正常工况和预期运行事件下产生的放射性液

体。相比 CPR1000,AP1000 和 EPR 的废液处理系统进行了相应的改进,或提高净化效率以满足日益严格的排放要求,或简化处理工艺以方便运行和维护。由于同属于第三代机组的 AP1000 和 EPR 采用了不同的设计理念,所以下文将以 CPR1000、AP1000 和 EPR 为代表在源项、处理工艺和流程及处理结果等方面进行比较,分析第三代核电站废液处理系统与二代加机组的异同及其设计改进。

## 1 源项

对于二代加和第三代压水堆核电站,一回路冷却剂中的放射性物质有三个相同的来源:第一是由于燃料组件包壳破损而泄漏的放射性裂变产物;第二是经辐照后活化的一回路系统腐蚀产物;第三是一回路冷却剂受辐照后生成的<sup>3</sup>H和<sup>16</sup>N,但是由于氚只能采用无氚水稀释,而<sup>16</sup>N的半衰期很短,所以两者均不属于废液处理系统处理对象。同时由于蒸汽发生器传热管可能出现破损,事故工况下一回路冷却剂可流入二回路,从而使二回路水也带有放射性,但因为二回路水的放射性与一回路冷却剂放射性水平相差5个数量级以上,因而核电站的放射性

收稿日期:2008-12-05

作者简介:刘昱(1982—),男,2005年毕业于武汉大学热能与动力工程专业,2007年毕业于浙江大学热能工程专业,获硕士学位,助理工程师。E-mail:yu\_liu@cgnpc.com.cn

源项主要由一回路冷却剂系统贡献。因此,废液处理系统的主要处理对象是含有裂变产物和活化腐蚀产物的一回路冷却剂。

反应堆冷却剂中的放射性源项有两种不同的表示方法:第一种是设计基准源项,它通过假定设计燃料破损率计算得到,是废液处理系统设计能力的设计依据,偏于保守。第二种是现实源项,它通过基于大量压水堆核电站运行数据的软件计算得到,代表正常工况下冷却剂中核素的预期平均浓度。在设计阶段,两种源项

的计算通常根据计算程序并结合运行经验得到。由于不同堆型采用不同的计算方法或者具有不同的堆型参数,所以各种堆型设计基准源项和现实源项的计算结果并不尽相同。核电站废液处理系统相关的源项包括卤素(碘)、铯等裂变产物和腐蚀产物。表1给出了AP1000、EPR和CPR1000稳态运行时相关设计基准源项的计算方法和计算结果;表2给出了稳态运行时相关现实源项的计算方法和计算结果<sup>[4-6]</sup>。

表1 废液处理系统设计基准源项

Tab.1 Design basis source terms of liquid radwaste treatment system

堆型	CPR1000		AP1000		EPR	
裂变产物 计算程序	PROFIP		ORIGEN		ORIGEN	
腐蚀和活化产 物计算程序	PACTOLE		压水堆核电站 运行数据		压水堆核电站 运行数据	
	活度浓度 (GBq/t)	活度浓度 百分比(%)	活度浓度 (GBq/t)	活度浓度 百分比(%)	活度浓度 (GBq/t)	活度浓度 百分比(%)
卤素	$1.77 \times 10^2$	86.39	$1.48 \times 10^2$	43.09	$1.31 \times 10^2$	64.01
铯和铷	$3.20 \times 10^{-1}$	0.16	$1.53 \times 10^2$	44.34	$5.93 \times 10^1$	28.96
其他裂变产物	$2.74 \times 10^1$	13.34	$3.68 \times 10^1$	10.69	$1.27 \times 10^1$	6.20
腐蚀产物	$2.36 \times 10^{-1}$	0.12	6.48	1.88	1.71	0.84
合计	$2.05 \times 10^2$	100	$3.45 \times 10^2$	100	$2.05 \times 10^2$	100

表2 废液处理系统现实源项

Tab.2 Realistic source terms of liquid radwaste treatment system

堆型	CPR1000		AP1000		EPR	
计算程序			PWR- GALE		PWR- GALE <sup>[7]</sup>	
	活度浓度 (GBq/t)	活度浓度 百分比(%)	活度浓度 (GBq/t)	活度浓度 百分比(%)	活度浓度 (GBq/t)	活度浓度 百分比(%)
卤素	2.55	83.76	$4.26 \times 10^1$	66.20	9.48	35.38
铯、铷	$4.80 \times 10^{-3}$	0.16	9.42	14.65	8.17	30.46
其他裂变产物	$4.12 \times 10^{-1}$	13.54	$1.02 \times 10^1$	15.86	7.48	27.90
腐蚀产物	$7.76 \times 10^{-2}$	2.55	2.11	3.28	1.68	6.26
合计	3.04	100	$6.43 \times 10^1$	100	$2.68 \times 10^1$	100

由于三者均属于压水堆,其工作原理和源项产生方式和分类基本一致,唯一的例外是<sup>110m</sup>Ag在EPR中被归于裂变产物,而在CPR1000中被归于腐蚀产物,其数值相差4个数量级。究其原因可能是在CPR1000中采用部分含银垫圈,而冷却剂和废液中相差的<sup>110m</sup>Ag的主要来源即为含银垫圈腐蚀产物的活化,而EPR在此项上面做了相应的改进,<sup>110m</sup>Ag只来源于裂变产物,因而数值相当小。AP1000未给出<sup>110m</sup>

Ag的具体分类,其数值和CPR1000相当<sup>[4,6]</sup>。

由于AP1000和EPR采用了相同的计算方法和程序、相同或者相似的输入参数(如燃料破损率等)并且都根据各自核电站的参数修正了ANSI18.1参考电站中相应的数值,所以AP1000和EPR冷却剂中的核素总放射性活度相近,这从表1和表2,特别是设计基准源项的统计结果中可以看出。

在CPR1000机组中铯、铷的放射性远低于

AP1000 和 EPR,这是由于在 CPR1000 机组的放射性源项数据中未考虑核素铷的放射性活度。AP1000 和 EPR 中,铷在该项所占的比例达到 38.00 % (AP1000) 和 65.48 % (EPR)。同样的,对于腐蚀产物贡献的放射性,AP1000 和 EPR 一般高于 CPR1000 1 ~ 2 个数量级,这是因为 AP1000 和 EPR 考虑了核素<sup>24</sup>Na 或者<sup>56</sup>Mn,它们在源项中所占的比例均达到 80 % 以上。因此可以看出 AP1000 和 EPR 考虑的核素比 CPR1000 要多,而其中的一些核素放射性所占的比例是很大的。

从现实源项统计中可以看出 AP1000 和 EPR 的总放射性活度均远大于 CPR1000 堆型。在设计基准源项统计结果中似乎不能得到这个结论,这是因为两表均忽略了对放射性活度贡献最大但是不属于废液处理系统处理的情性气体,如果加上情性气体对放射性废液活度的贡献,AP1000 和 EPR 的总放射性高出 CPR1000 机组 5 倍左右。

从两表的统计结果可以看出,在裂变产物存

在的情况下,腐蚀产物的贡献是不重要的。但在关于 EPR 的文献<sup>[8]</sup>中提到了腐蚀产物的尖峰释放现象,即停堆对管道中的腐蚀产物进行清洗时,冷却剂中的裂变产物放射性浓度基本不变,而腐蚀产物的放射性浓度增加 3 ~ 4 个数量级,导致活化腐蚀产物成为放射性的主要来源。

## 2 废液处理系统

“分类收集、分类处理”是核电站废物处理的基本原则之一,废液处理系统将收集到的不同类型的废液采用不同的工艺方法进行净化处理以满足排放要求。

### 2.1 废液的分类收集

三种机组的废液分类方法基本一致,均是按照放射性水平和化学杂质含量进行分类,只是由于每种废液的来源稍有区别和其预计产生量不同,因而设置了不同的储槽和储存容积,如表 3 所示。同一类废液一般设置两台储槽,一台用于接收,另外一台用于搅拌和取样分析。

表 3 废液类型及储槽

Tab. 3 Type and storage tank of liquid radwaste

机组	废液类型和特点	储槽数	储槽容积(m <sup>3</sup> )
CPR1000 <sup>1)</sup>	工艺废液,化学杂质含量低	2	35
	化学排水,化学杂质含量和放射性浓度均较高	2	20
	地面废液,放射性浓度低	2	20
EPR	类废液,高放射性、低有机物含量和电导率	2	140.1
	类废液,低放射性、高有机物含量和电导率	2	140.1
	类废液,无放射性、高有机物含量和电导率	1	70.0
AP1000	含硼冷却剂级别废液	2	106.0
	地面疏水和其他可能含大量悬浮固体的废液	2	56.8
	淋浴或清洗产生的去污水	1(共用)	33.7
	高放射性和含有大量溶解固体的化学废液		

1) CPR1000 另设两个附加储槽,每个容积为 100 m<sup>3</sup>,可接收各类废液。

### 2.2 净化处理系统

废液处理系统净化处理单元决定了核电站放射性废液处理的效果,每个单元的净化工艺根据废液的类别和特性决定。

#### 2.2.1 CPR1000

CPR1000 废液处理系统根据废液的分类,设置了蒸发、除盐和过滤三个工艺单元。蒸发单元采用强制循环式蒸发器。循环废液流量为

500 m<sup>3</sup>/h,经过加热器加热后仍呈液态,再在蒸发柱中通过孔板降压后闪蒸汽化,蒸汽冷凝液的放射性水平相比进料降低约 3 个数量级,用于处理工艺废液和化学废液,其处理能力为 3.15 m<sup>3</sup>/h。除盐单元由 2 台离子交换器(亦称除盐器)组成,1 台为阳床离子交换器(阳床),1 台为混合床离子交换器(混床),用于处理工艺废液,处理能力为 10 m<sup>3</sup>/h。过滤单元由筒式过

滤器组成,用于处理地面废液,处理能力为  $27.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。三个单元也可以根据需要组成系列来处理放射性废液。处理以后的废液进入监测槽取样、监测、待排放。

### 2.2.2 EPR

EPR 的废液处理系统由蒸发单元、离心单元和除盐单元组成。蒸发单元用于处理高放射性类废液,离心分离单元用于处理有机物含量高和电导率高的 A 类和 B 类废液,如有必要,经过上述单元处理后的废液还可以再经过除盐单元进行离子交换。EPR 蒸发单元不同于 CPR1000,为强制循环蒸汽压缩式,循环废液经过加热器加热后已经汽化,接着蒸汽通过蒸汽压缩机进一步压缩提高比焓以提供蒸发柱内汽化新一批废液所需要的能量。EPR 对蒸发单元进行改进是因为其蒸发单元循环废液增加到  $700 \text{ m}^3/\text{h}$  后,如果仍然只使用换热器提供蒸发装置所需要的热量,那么需要使用大量的辅助蒸汽,导致整个装置的热耗比较大、热效率降低。在蒸发柱内,EPR 增加筛网代替 CPR1000 的外置分离器,起到类似强化整个装置汽液分离效果的作用,同时减少了设备、简化了布置。此外,在 CPR1000 原有的用以改善废液处理效果的酸、碱和除泡剂三种化学添加剂的基础上,EPR 还增加了螯合剂,去除蒸发柱中的结垢固体。

离心处理单元主要包括 4 个设备,即离心分离器、离心机、离心废物桶和污泥槽。A 类和 B 类废液首先送至离心分离器,离心分离器通过惯性分离废液中较大的颗粒。分离后的大颗粒送入离心废物桶,废液被送入离心机,同样依靠惯性分离其中残留的较小颗粒,小颗粒被送入污泥槽,废液则被送往监测槽或者除盐单元。污泥槽不断的进行搅拌以促进污泥结块,之后污泥槽中的液固混合物被重新送至离心分离器分离。因为有机物的分子量与水相比大很多,因而这种处理手段对于含有一定量有机物或固体微粒的废液分离效果比较好。离心分离方法已经在一些核电站中得到应用,例如由俄罗斯设计的田湾核电站便使用了称之为漩流器的分离装置,但是从相关资料<sup>[9]</sup>的反馈来看,因为废液中所含杂质的密度与水的密度接近导致其分离效果不明显,甚至影响到其他系统的运行。

### 2.2.3 AP1000

AP1000 的废液处理系统由脱气单元、除盐单元组成。真空脱气器用于除去含硼冷却剂级废液中的氢气和其他裂变气体,脱气后的废液经过除盐单元处理进入监测槽。由于 AP1000 没有硼回收系统,这里的脱气器承担 CPR1000 中硼回收系统脱气塔的功能。地面疏水和其他可能含大量悬浮固体的废液同样通过除盐单元而得到净化。从上述工艺中可以看出离子交换单元是 AP1000 废液处理系统最关键的装置。AP1000 的除盐单元由 4 个离子交换器组成,相比 CPR1000(阳床和混床)和 EPR(阴床离子交换器、阳床、混床和阳床)的除盐单元,它具有独到之处,特别是整个单元系列的第一个除盐器,其体积比另外三个稍大,顶层填充了活性炭,作为一个深床过滤器来移出废液中的油脂。运行时可以只移出活性炭而不影响下层的沸石床的离子交换以实现固体废物最小化。该除盐器对 Cs 和 Rb 的净化系数达到了 100,而一般的阳床除盐器对 Cs 和 Rb 净化系数只有 10。后面三个过滤器体积相同,其中一个为阳床,用于继续过滤铯和其他放射性核素,另外两个为混床用于除碘和其他放射性核素。

AP1000 废液处理系统的另外一个不同之处是在发生极低概率事件和不适用固定装置处理的废液需要处理时可再引入移动和临时设备,移动和临时设备可以单独使用也可以与其他固定装置组成系列使用。AP1000 按照这种理念处理去污水和化学废液,因为去污水一般情况下放射性活度水平低于排放标准限值,而化学废液定义不同于 CPR1000 和 EPR,其产量被认为非常低,只有  $3.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ ,因而使用移动和临时设备是合理而且经济的。EPR 废液处理系统的原始设计没有与移动设备的接口要求,但它在放射性废物处理厂房提供了空间并且支持与厂址相关的移动设备。应该说移动和临时设备的使用是将来废物处理系统发展的一个方向。

## 2.3 废液处理系统的比较

1) 对于 AP1000 和 EPR 系统,其蒸汽发生器排污系统的废液如果放射性不合格均直接返回到废液处理系统进行处理;而在 CPR1000

中,排污系统的不符合复用规格的液体无论放射性是否合格均暂存到常规岛废液排放系统的储存槽。而这有可能造成其污染整个槽内的液体,最终还是返回废液处理系统进行处理,加大了废液处理系统的处理量,不利于废物最小化原则。

2) EPR 和 CPR1000 同样使用了蒸发单元,但是 EPR 对其做出了较大的改进,这些改进在一定程度上提高了单元的工艺水平和热效率,但是旋转设备的引入增加了处理系列的复杂度,给系统的运行和维护带了不便。

3) 虽然田湾核电站中漩流器的实际运行效果不佳,但是 EPR 离心分离单元由于采用不同的设备和工艺流程,同时田湾核电站的废液是根据硼含量而不是有机物含量进行分类,与 EPR 存在一定差异,所以 EPR 离心单元的实际处理效果还有待验证。

4) AP1000 废液处理系统主要使用除盐单元作为其处理放射性废液的主要手段,除盐器与蒸发装置相比,在实现相同净化效果的前提下,具备系统流程简化,处理设备减少,运行和维护方便、废液处理量大等特点,是未来核电站废液处理系统的主要工艺单元,但是因为其核心部分即沸石、树脂等离子交换介质的技术规格保密,成为制约我国离子交换装置自主制造的瓶颈。

5) 根据我国目前废液处理系统运行的经

验,除盐工艺对于水质较好的废液处理效果比较好,但是对于水质较差的废液,处理效果则不如蒸发单元。如果在 AP1000 中产生高于预期量的品质较差的放射性废液,只依靠除盐单元或者依赖临时加入的移动设备,能否有效对其进行处理,还有待验证。

6) AP1000 直接使用了移动和临时设备,EPR 虽然没有直接与移动设备的接口,但是它为其预留了厂房空间以适应厂址要求,可以在需要时增设。移动设备的采用可以增加非连续运行设备的复用率,以满足核电站各系统相似的工艺流程要求。这样可以简化整个系统的工艺和布置、节约厂房空间并便于维护。

### 3 放射性废液的排放

三种机组放射性废液的排放采用类似的方法,放射性废液在监测槽中循环取样并进行分析,如果分析结果满足排放限制,废液被泵送至排放管线,排放管线上游均设置了传感器和隔离阀,放射性传感器和流量传感器对排放的废液进行连续在线监测和记录。如果放射性活度超过预定限值,系统会报警并自动关闭排放管线的隔离阀,同时停止排放泵输送废液到排放管线。

通过计算程序得到的三种堆型排放废液中核素的年排放量<sup>[4-6]</sup>列于表 4。

表 4 废液年放射性排放量

Tab. 4 Annual releases of liquid radwaste

机组类型	CPR1000		AP1000		EPR	
计算程序	RELIQ		PWR-GALE		PWR-GALE	
	活度浓度 (Bq/t)	活度浓度 百分比 (%)	活度浓度 (Bq/t)	活度浓度 百分比 (%)	活度浓度 (Bq/t)	活度浓度 百分比 (%)
碘	3.00	27.88	$5.31 \times 10^{-1}$	5.63	3.15	44.20
铯	$4.75 \times 10^{-1}$	4.42	$8.84 \times 10^{-1}$	9.36	$2.37 \times 10^{-1}$	3.33
其他裂变产物	$3.27 \times 10^{-1}$	3.03	7.65	81.03	3.37	47.28
腐蚀产物	6.96	64.67	$3.77 \times 10^{-1}$	3.99	$3.70 \times 10^{-1}$	5.19
合计	10.8	100.00	9.44	100.00	7.13	100.00

核电站年放射性排放量最大的核素是氚( $^3\text{H}$ ),但是其导致的公众剂量并非最大。由于目前没有有效手段对 $^3\text{H}$ 进行处理,不能在废液处理系统进行净化,因此一般仍是通过稀释排

放,因而 $^3\text{H}$ 不在本文讨论范围之内。

从表 4 的统计结果可以看出,虽然 AP1000 和 EPR 的设计基准源项和现实源项均大于 CPR1000,但是它们每年排放的放射性却小于

CPR1000,因而证明 EPR 和 AP1000 设计采用的废液处理工艺相对 CPR1000 的改进是有效的。

三种堆型的各种类型核素在放射性的贡献上并不一致,对于 CPR1000,排放废液中主要放射性源项是腐蚀产物,而其中的主要元素是钴。对于 AP1000 和 EPR,两者由于采用相同的程序,其计算结果类似,主要区别在于放射性碘的活度相差约一个数量级。这是因为 EPR 采用了一台混床除盐器除碘,其设定的碘净化因子为 100。而 AP1000 采用两台混床除盐器用于除碘,其设定的碘净化因子为 1000,这与计算结果基本吻合。

#### 4 结论

以 EPR 和 AP1000 为代表的第三代核电机组在废液处理系统对二代加核电机组进行了改进,AP1000 改善现有的处理单元,EPR 增加新的处理工艺。通过三者的排放计算值比较可以看出这些改进是有效的。

包括废液处理系统在内的三废系统在核电站的各系统中具有一定的特殊性,它与核电站堆型是否先进没有直接的联系。可以在选用一种堆型的同时采用另外一套废液处理系统以满足法规和业主要求。因此,这也给 CPR1000 机组废液处理系统的改进创造了一定的条件。特别是在国家标准对核电站废液排放要求日益严格的情况下,使用被证明有效的、先进的废液处理系统改造或替换目前的系统是一条合理可行的提升 CPR1000 堆型竞争力的途径。这也符合我国核电技术引进 - 吸收 - 消化的政策。

虽然系统的改造和替换存在相当大的难度,特别是在不改变土建结构的基础上重新进行系统设计和布置设计,但这对于提高我国核电自主设计能力和促进相关装备制造业的发展具有比较重大的意义。

#### 参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会. 核电中长期发展规划 (2005—2020 年) [R/OL]. <http://nyj.ndrc.gov.cn/zywx/t20071102-170108.htm>. 2007
- [2] EPRI. Advanced light water reactor utility requirements document [R]. Rev 8. 1998.
- [3] EUR Organization. European utility requirements for LWR Nuclear Power Plants [R]. Rev C. 2001.
- [4] 辽宁红沿河核电有限公司. 辽宁红沿河核电厂一、二号机组初步安全分析报告 [R]. 红沿河核电厂工程文件内部资料. 未发表, 2006.
- [5] AREVA. U. S. EPR final safety analysis report [R/OL]. <http://www.nrc.gov/reactors/newlicensing/designcert/epr.html>. 2007.
- [6] Westinghouse. AP1000 Design Control Document [R/OL]. <http://www.nrc.gov/reactors/newlicensing/designcert/ap1000.html>. 2008.
- [7] Chandrasekran T, Lee J Y, Willis CA. Calculation of releases of radioactive materials in gaseous and liquid effluents from pressurized water reactors (PWR- GALE Code) Rev 1 [R/OL]. Nuclear Regulatory Commission. 1985.
- [8] EPR. Safety, Security and Environmental Report [R/OL]. <http://www.epr-reactor.co.uk>. 2008.
- [9] 陈良. 田湾核电站放射性废液处理系统介绍 [J]. 核电 (中广核集团内部期刊), 2008, 2 :45

## Comparison of Liquid Radwaste Treatment Systems at Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant

Liu Yu, Liu Pei, Zhang Minqian

(China Nuclear Power Engineering Company LTD, Shanghai 200030)

**Abstract** Liquid radwaste treatment systems for AP1000, EPR and CPR1000 are introduced and compared in respect of source term, processing methods and discharge result. Conclusion is given on improvement and development of liquid radwaste treatment system at pressurized water reactor nuclear power plant.

**Key words** Liquid Radwaste Treatment System; CPR1000; EPR; AP1000