建设项目环境影响报告表

项 目 名 称：辽宁红沿河核电厂1、2号机组18个月换料改造项目

建设单位(盖章)：辽宁红沿河核电有限公司

编制日期：2015年5月

环境保护部制

《建设项目环境影响报告表》编制说明

《建设项目环境影响报告表》由具有从事环境影响评价资质的单位编制。

1．项目名称——指项目立项批复时的名称，应不超过30个字（两个英文字段作一个汉字）。

2．建设地点——指项目所在地详细地址，公路、铁路应填写起止地点。

3．行业类别——按国标填写。

4．总投资——指项目投资总额。

5．主要环境保护目标——指项目周围一定范围内集中居民住宅区、学校、医院、保护文物、风景名胜区、水源地和生态敏感点等，应尽可能给出保护目标、性质、规模和距厂界距离等。

6、结论与建议——给出本项目清洁生产、达标排放和总量控制的分析结果，确定污染防治措施的有效性，说明本项目对环境造成的影响，给出建设项目环境可行性的明确结论，同时提出减少环境影响的其他建议。

7．预审意见——由行业主管部门填写答复意见，无主管部门项目，可不填。

8．审批意见——由负责审批该项目的环境保护行政主管部门批复。



建设项目环境影响评价资质证书

机构名称：苏州热工研究院有限公司
住　　所：江苏省苏州市金阊区西环路 1788 号
法定代表人：王安
证书等级：甲级
证书编号：国环评证甲　字第　1904　　号
有效期：至 2019 年 1 月 23 日
评价范围：环境影响报告书类别——甲级：输变电及广电通讯：核工业***
环境影响报告表类别——一般项目环境影响报告表；特殊项目环境影响报告表***

中华人民共和国环境保护部
二〇一五年三月六日

项目名称： 辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目

评价单位： 苏州热工研究院有限公司 （公章）

法人代表： 王　安 （盖章）

项目负责人： 赵　锋

主要评价人员情况				
姓名	职称	证书编号	职责	签名
赵　锋	高工	A19040011300	项目负责人	赵锋
张晓峰	高工	A19040151300	环境质量现状	张晓峰
郝睿	工程师	A19040171200	工程分析	郝睿
朱荣旭	工程师	A19040050	影响预测及分析	朱荣旭
陈　洋	工程师	A19040181300	校核	陈洋
陶云良	高工	A19040121200	审核	陶云良
上官志洪	高工	A19040031300	批准	上官志洪

经环境保护部环境影响评价工程师职业资格登记管理办公室审查，赵锋具备从事环境影响评价及相关业务的能力，准予登记。

职业资格证书编号：0001692

登记证编号：A19040011300

有效期限：2008 年 05 月 25 日至 2009 年 12 月 14 日

所在单位：苏州热工研究院有限公司

登记类别：核工业类环境影响评价

中华人民共和国环境保护部

2008 年05 月25 日



再 次 登 记 记 录

时间	有效期限	签章
2009.09.28	延至 2012 年 12 月 14 日	环评工程师再次登记专用章
2012.11.05	延至 2015 年 12 月 14 日	
	延至 年 月 日	
	延至 年 月 日	



持证人签名：
Signature of the Bearer

赵锋

管理号：05353243505320195
File No.：

姓名：
Full Name 赵锋

性别：
Sex

出生年月：
Date of Birth 330724770326255

专业类别：
Professional Type 环境评价四科

批准日期：
Approval Date 200505

签发单位盖章：
Issued by

签发日期：2005 年 07 月 22 日
Issued on

一、建设项目基本情况

项目名称	辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目				
建设单位	辽宁红沿河核电有限公司				
法人代表	卢长申		联 系 人	杨峰	
通讯地址	辽宁省大连市中山区南山路 127 号核电大厦				
联系电话	0411-82340700	传 真	0411-82348008	邮政编码	116001
建设地点	辽宁省瓦房店市红沿河核电厂内				
立项审批部门	/		批准文号	/	
建设性质	新建□ 扩建□ 技改☑		行业类别及代码	行业类别：核力发电 行业代码：D4413	
占地面积 (平方米)	/		绿化面积 (平方米)	/	
总投资 (万人民币)	/	其中环保投资 （万人民币）	/	环保投资占 总投资比例	/
评价经费（万人民币）		/	预期投产日期	2016 年	

工程内容及规模

1、项目基本情况

辽宁红沿河核电厂规划建设六台百万千万级压水堆核电机组。辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组已分别于 2013 年 6 月、2014 年 5 月投入商业运行，由辽宁红沿河核电有限公司（以下简称建设单位）负责运营，3 号机组已并网发电，4 号机组目前正在开展各种调试工作，5、6 号机组目前正在有序的推进设计、建设工作。

目前辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用传统年度换料方案。为了进一步提高辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组运行的经济性、安全性和环境效益，建设单位决定实施技术改造，将目前的年度换料方案换成 18 个月换料方案。

2、建设地点

辽宁红沿河核电厂厂址位于辽宁省瓦房店市红沿河镇红沿河村。1 号反应堆地理位置为东经 121° 28′ 19″，北纬 39° 48′ 09″。厂址地处渤海辽东湾东海岸，北、西、南三面临海，东侧与陆地接壤。厂址 ESE 方位距红沿河镇 7km，距复州城 22km，距瓦房店市 49km；南距大连市 100km，北距沈阳市 270km。

3、技改内容、规模

18 个月换料是国际上先进的燃料管理模式，且已有较长时间的成熟运行经验。国际上，压水堆核电站自 1978 年首次开始实施 18 个月换料以来，已经有 30 多年的成熟经验，目前美国有 75 座、法国有近 30 座反应堆实现了 18 个月长周期的换料；在我国，大亚湾核电站已于 2002 年成功实施了由年度换料向 18 个月换料的转换，已安全运行十余年，也有其他核电厂已实施或正在实施 18 个月换料方式。此外，EPR 和 AP1000 核电机组设计上也均采用 18 个月换料。相比于传统年度换料而言，实施 18 个月换料可以减少大修次数，减少核电厂的集体辐照剂量，提高机组的能力因子，提高燃料组件的卸料燃耗，降低压力容器的中子注量率。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目将实现下述目标：

- 平均三年二次换料，并且整个燃料管理拥有 18 个月换料的能力；
- U-235 富集度为 4.45%，使用 8%（重量百分比）的钆可燃毒物；
- 灵活性循环：L1、L2 和 S3、S4 共四类循环的新组件数目分别为 68、76 和 60、68 组；
- 过渡循环：根据发电规划要求，两台机组分别采用不同的过渡循环方案；
- 延伸运行：30 EFPD；
- 全 M5 AFA3GAA 燃料组件的燃耗限值：组件燃耗不超过 52GWd/tU，燃料棒燃耗不超过 57GWd/tU；
- $F_{\Delta H}$：≦1.65（包括不确定性：1.03×1.04×1.04）；
- 反应堆在功率运行时慢化剂温度系数必须为负值或零，使反应堆具有负反馈特性；
- 停堆裕量：不低于 2300 pcm。

针对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料项目，建设单位委托相关单位开展了包括堆芯设计、源项与屏蔽设计、安全分析、系统论证、周期性论证等各专项论证工作。论证结果表明，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组原先设计的相关系统绝大多数能够满足 18 个月换料的要求，不需要做设计变更，剩余的少部分系统的设计满足 18 个月换料要求，但相关定值需要修改。总体而言，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，核电厂原有的相关系统在工程设计方面没有变化。

本项目不新增任何系统、厂房，不涉及土建施工工作。

本项目不新增已由环境保护部批复的辽宁红沿河核电厂放射性流出物年排放量（环审[2014]224 号）。

与本项目有关的原有污染情况及主要环境问题：

本项目为针对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组堆芯燃料循环方案的技术改进项目。本项目的实施仅涉及堆芯布置和燃料组件铀浓度的变化，并会对红沿河核电厂 1、2 号机组设计堆芯积存量、一回路冷却剂活度谱以及放射性流出物排放源项产生影响。与本项目有关的放射性物质排放主要为核电厂运行期间产生的气态和液态放射性流出物及放射性固体废物。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组运行期间，向环境排放的气载和液态放射性流出物处于严格受控状况，并严格遵守国家相关法规标准的要求。辽宁红沿河核电厂已开展的辐射环境监测结果表明，核电厂的放射性流出物排放没有给厂区附近地区产生可觉察到的影响，辽宁红沿河核电厂的辐射环境水平相对于运行前的本底值而言变化不大。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组运行期间产生的中低放固体废物在厂内暂存一段时间后，按照国家相关法规标准的要求送往指定的中低放废物处置场处置。

除此之外，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组运行期间以温排水形式向海域释放大量热量。辽宁红沿河核电有限公司委托环境保护部卫星环境应用中心针对核电厂温排水开展了海水水温监测。从监测结果来看尚未发现大面积明显人为热污染现象。

辽宁红沿河核电厂在 1、2 号机组运行期间定期对非放射性污染物及厂址区域环境现状进行了监测，监测结果显示，企业废水排放、锅炉大气排放及生活区饮食油烟排放均满足相关标准限值要求，厂址区域环境空气质量及声环境质量亦满足相关标准限值要求。

二、建设项目所在地的自然环境和社会环境简况

自然环境简况

1、地理位置

辽宁红沿河核电厂厂址位于辽宁省瓦房店市红沿河镇红沿河村，1 号反应堆地理位置为东经 121°28′19″，北纬 39°48′09″。厂址地处渤海辽东湾东海岸，北、西、南三面临海，东侧与陆地接壤。厂址 ESE 方位距红沿河镇 7km，距复州城 22km，距瓦房店市 49km；南距大连市 100km，北距沈阳市 270km。厂址区域位置见附图 1。

2、地形、地貌、地质

厂址区内地势平坦开阔，起伏不大，总体东高西低、北高南略低，自然标高在 10~37m，场地自然坡度一般为 2~3%，呈三面临海的半岛形态。

厂址地区地形地貌条件较好，地质构造比较简单，没有发现岩溶、滑坡、崩塌、泥石流、采空区、地面不均匀沉降、温泉等影响场地稳定性评价的不利因素。

3、气候和气象

（1）气候

厂址所在辽东半岛位于极地高压和副热带高压之间的相对低压带内，属温带气候区，全年盛行西风环流，低压带中槽脊活动频繁，冷空气活跃。冬季，常有冷空气入侵形成偏北大风，气温低，降水少。夏季西风急流北退，辽东半岛大部分时间为热低压所控制，盛行偏南风。春季的气温回升较内陆地区缓慢，降水较冬季虽有所增加，但仍然偏少。秋季的大气环流形势为夏冬两季之间的过渡型。

根据厂址附近熊岳气象站累年的气象观测资料统计分析，熊岳站历年平均气温为 9.4℃，一份平均气温最低，为-8.6℃，七月份平均气温最高，为 24.5℃，历年极端最高气温为 36.6℃，出现在 1961 年 6 月 10 日，历年极端最低气温为-31.6℃，出现在 2001 年 1 月 14 日。熊岳站相对湿度的多年平均值为 66%，8 月平均相对湿度最大，为 82%，4 月最小，为 53%。

厂址区域熊岳站多年平均降水量为 614.4mm，年降水最大值为 970.5mm，出现在 1975 年；年降水最小值为 383.5mm，出现在 1983 年。一年中 7 月份降水量最大，多年平均月降水量为 157.4mm；1 月份最少，多年月平均降水量仅为 5.4mm。年平均降水日数为 75.8 天。雨日的季节分布为夏季最多，春季次之，秋冬季最少。

（2）当地气象条件

选取 2011 年 1 月~2011 年 12 月一整年的厂址气象观测资料进行厂址当地气象的统

计分析。结果表明：

辽宁红沿河核电厂气象塔 10m 高度主导风向为 SE，频率为 15.3%，次主导风向为 SSE，频率为 12.8%；气象塔 80m 高度主导风向为 NNE，频率为 14.6%，次主导风向为 N，频率为 13.9%。

辽宁红沿河核电厂气象塔 10m 高度上的年平均风速为 5.5m/s，年平均静风频率为 0.2%；80m 高度上的年平均风速为 8.0m/s，年平均静风频率为 0.1%。

总体而言，大气弥散条件相对较好。

4、海域概况及水弥散条件

厂址位于辽东湾东海岸，水深变化较大，等深线大体与海岸线平行，5m 等深线靠近岸边。厂址海区属不正规半日潮，多年平均潮差为 1.33m，平均大潮潮差 1.53m，平均小潮潮差 1.08m。潮流运动形式以往复流为主，涨、落潮主流向分别为东北向和西南向，潮流的最大流速达 167cm/s。余流流向大体偏北，余流流速为 10~20cm/s。厂址附近海域水弥散条件好。

根据国务院 2012 年批复的辽宁省人民政府《辽宁省海洋功能区划（2011-2020）》，瓦房店海域主要功能为农渔业、工业与城镇用海、旅游休闲娱乐、海洋保护等，其中辽宁红沿河核电厂附近海域为红沿河工业与城镇用海区，保证了辽宁红沿河核电厂用海需求。

根据辽宁省环境保护厅于 2014 年 11 月发布的“关于大连市调整部分近岸海域环境功能区划请示的复函”（辽环函[2014]374 号），划定辽宁红沿河核电厂排水渠口混合环境功能区，功能区包含了辽宁红沿河核电厂码头及排放口附近海域，主要功能为排污口。辽宁红沿河核电厂正常运行期间温排水排放的影响符合相应近岸海域环境功能区水质标准的要求。

社会环境简况

1、人口分布

截至 2012 年年底，厂址半径 80km 范围内的总人口数为 2343272 人，其中 ESE 方位人口最多，达到 631083 人，这主要是由于瓦房店市市区位于该扇形区域内。

通过环评单位于 2013 年的现场调查工作收集到的相关数据，截止 2012 年底，厂址半径 5km 范围内户籍人口共 1979 人。

厂址半径 10km 范围内没有超过 10 万人的重要居民点。

厂址半径 15km 范围涉及红沿河镇、仙浴湾镇和驼山乡三个乡镇，主要以农业、沿海养殖和旅游为主，其中红沿河镇 2013 年流动人口约 5800 人，流入人口主要聚集地为红沿河镇域，主要为核电施工人员及服务人员。仙浴湾镇建有大连仙浴湾旅游度假区，位于厂址 SSE 方位 11km 处，年接待游客 20~30 万人，主要集中在 6~9 月。驼山乡流动人口相对较少。

2、土地利用

厂址半径 5km 范围包括红沿河镇的红沿河村和前大地村，厂址半径 5km 范围内除了瓦房店市东岗盐场和大连瓦房店风力发电厂外没有其他工矿企业，瓦房店市东岗盐场位于厂址 SSE 方位约 4km 处，大连瓦房店风力发电厂的红沿河镇风场区位于厂址 SSE 方位约 5km 处。

瓦房店市境内公路交通较发达，厂址半径 15km 范围内没有铁路，距厂址约 30km 处有老虎屯铁路支线，长大铁路线从距厂址约 49km 处的瓦房店市通过。此外，距厂址约 35km 有哈大客运铁路专线。厂址半径 15km 范围内没有大的港口和码头。

厂址半径 15km 范围内无民用机场和民用飞机航线。大连至锦州航线和大连至沈阳航线经过厂址附近上空。两条航线投影线距厂址的最近距离分别为 16km 和 29km，均大于《核电厂厂址选择的外部人为事件》（HAD101/04）附录Ⅰ中规定的筛选距离值。

厂址半径 15km 范围内涉及一个海洋自然保护区，即大连斑海豹自然保护区，其中核心区东侧距厂址最近约 5km。

厂址地区粮食作物以玉米、谷物为主，油料作物主要为花生，水果主要为苹果、梨、桃和葡萄等，蔬菜以白菜、菠菜、芹菜、大葱、黄瓜、萝卜为主。

厂址半径 15km 范围内无大型牧场。猪一般为农户圈养，牛羊为农户在附近林地放牧饲养。家禽则以饲养场养殖为主。当地奶牛饲养极少，仅仙浴湾镇有少量牛奶生产。

三、环境质量状况

建设项目所在地的区域环境质量现状及主要环境问题

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组自 2013 年投运以来，机组三道安全屏障的完整性保持良好。

在三废处理系统运行方面，核电厂工作人员严格按程序对其加强管理和控制，三废处理设施的性能指标保持在良好状态。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组的气载放射性流出物和液态流出物排放满足环境保护部批复的排放量申请值要求，并处于较低的水平。

辽宁红沿河核电厂连续的辐射环境监测结果表明，核电厂及周围环境 γ 剂量率水平与投产前相比无明显差异，通过气态和液态途径释放的放射性物质未对周围环境产生明显的影响。

主要环境保护目标

本项目为针对堆芯换料方案的技术改进项目，不涉及土建施工工程，根据本项目仅涉及放射性物质排放的特点，评价主要考虑核电厂运行期间放射性释放对环境的影响。

本项目的主要环境保护目标为：

- 辽宁红沿河核电厂厂址附近的一般公众；
- 辽宁红沿河核电厂液态流出物受纳海域中的海洋生物。

四、评价适用标准

1．运行状态下的剂量约束值

按《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）的规定，任何厂址的所有核动力堆向环境释放的放射性物质对公众中任何个人造成的有效剂量，每年必须小于 0.25mSv 的剂量约束值。针对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组进行评价时确定 1、2 号机组向环境释放的放射性流出物对公众所造成剂量约束值不超过 0.08mSv/a。考虑到最新批复的辽宁红沿河核电厂放射性流出物排放量申请值适用于一期工程四台核电机组，参照已批复环境影响报告书的要求，针对 1~4 号机组的辐射影响评价时考虑向环境释放的放射性流出物对公众所造成剂量约束值不超过 0.16mSv/a。

2．事故工况下的剂量控制值

依据国家标准《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）针对设计基准事故的剂量控制要求：

- 在发生一次稀有事故时，非居住区边界上公众在事故后 2h 内以及规划限制区外边界上公众在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 5mSv 以下，甲状腺当量剂量应控制在 50mSv 以下。
- 在发生一次极限事故时，非居住区边界上公众在事故后 2h 内以及规划限制区外边界上公众在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 0.1Sv 以下，甲状腺当量剂量应控制在 1Sv 以下。

3．海水中的放射性核素浓度

根据《海水水质标准》（GB3097-1997）的要求，辽宁红沿河核电厂运行期间受纳水体中的放射性核素浓度控制值为：

- ^{60}Co： 0.03Bq/L；
- ^{90}Sr： 4.0Bq/L；
- ^{106}Ru： 0.2Bq/L；
- ^{134}Cs： 0.6Bq/L；
- ^{137}Cs： 0.7Bq/L。

4．年排放量控制值

《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）6.2 款的规定，核动力厂必须按每堆实施放射性流出物年排放总量的控制。辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用的 CPR1000 压水堆核电机组。GB6249-2011 规定，对于 3000MW 热功率的轻水反应堆，其单堆控制值如下：

气态放射性流出物：

— 惰性气体：6×10^{14}Bq/a；

— 碘：2×10^{10}Bq/a；

— 粒子（半衰期≥8d）：5×10^{10}Bq/a；

— C-14：7×10^{11}Bq/a；

— 氚：1.5×10^{13}Bq/a。

液态放射性流出物：

— 氚：7.5×10^{13}Bq/a；

— C-14：1.5×10^{11}Bq/a；

— 其它核素：5.0×10^{10}Bq/a；

此外，辽宁红沿河核电厂为滨海厂址，遵循 GB6249-2011 第 6.8 款规定，对于滨海厂址，槽式排放出口处的放射性流出物中除氚和 C-14 外其他放射性核素浓度不应超过 1000Bq/L。如果浓度超过上述规定，营运单位在排放前必须得到审管部门的批准。

五、建设项目工程分析

施工期工艺流程

本项目不新增任何系统、厂房，不涉及土建及工程施工作业。

营运期工艺流程

一、主要生产工艺流程

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组为百万千瓦级 CPR1000 压水堆核电机组，每台机组由核岛（NI）、常规岛（CI）和全厂配套设备（BOP）三大部分组成。NI 包括反应堆厂房、核辅助厂房、核燃料厂房、电气和连接厂房、柴油发电机厂房和辅助给水箱厂房及其厂房内的系统设备；CI 主要指汽轮机厂房及其厂房内的系统设备；而 BOP 则是指 NI、CI 以外的系统设备。核电厂运行期间，装载在堆芯内的核燃料发生链式裂变反应，放出大量的热量。一回路水同时充当慢化剂和冷却剂的角色，在反应堆主泵的作用下，一回路冷却剂流经堆芯并将其产生的热量带走，随后一回路冷却剂在蒸汽发生器内将热量传递给二回路侧的流体，冷却后的一回路冷却剂随后再返回堆芯形成循环。二回路侧的流体在蒸汽发生器中被加热成蒸汽后，推动汽轮机做功，在实现热能向机械能的转化后，二回路侧的流体进入冷凝器，在冷凝器中被海水进一步冷却后再返回蒸汽发生器形成循环。汽轮机驱动发电机转动，实现由机械能向电能的转化，电能通过电网向外界输出。辽宁红沿河核电厂营运期间的工艺流程简图可参见图 5-1。

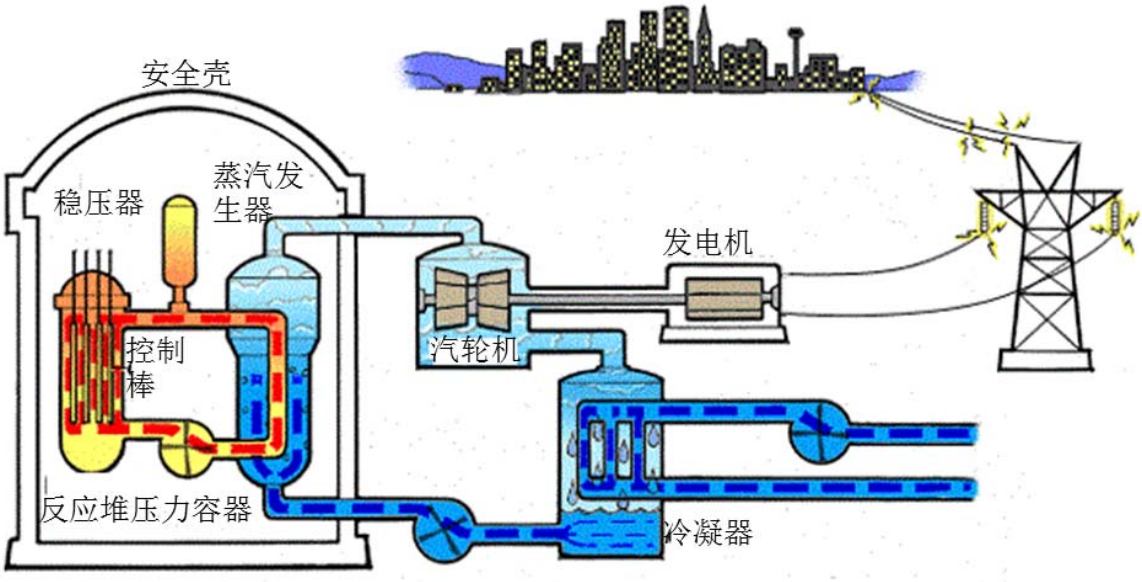


图 5-1　压水堆核电厂营运工艺流程示意图

二、技改前后工程简介

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组均为百万千瓦级 CPR1000 压水堆，反应堆热功率为2895MW，堆芯由燃料组件及其它相关组件、围板、堆芯上下支撑板、堆芯吊篮和堆芯测量装置组成。堆芯装载 157 个燃料组件。本次技术改造不涉及工程设计的变化，主要为换料管理方式的变化。

1、技改前的燃料管理

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组技改前采用的年度换料的燃料管理策略，从第 1 循环开始，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组即装载 AFA 3GAA 燃料组件，初始堆芯中，富集度为 1.8%的 AFA 3GAA 燃料组件 53 个，富集度为 2.4%的 AFA 3GAA 燃料组件 52 个，富集度为 3.1%的 AFA 3GAA 燃料组件 52 个。换料燃料组件的富集度为 3.2%。反应堆经过四次换料，到第五循环达到平衡年换料。根据燃料管理的分析，确认设计达到了下列燃耗：对于最高燃耗的燃料组件达到 39.7GWd/tU，对于最高燃耗的燃料棒达到 44GWd/tU。

2、技改后的燃料管理

本项目针对堆芯内的燃料组件布置方案进行技术改造，将其由原来的传统年度换料变更为 18 个月。辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料示意图见图 5-2。

（1）过渡循环

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料的过渡循环接在传统年度换料第三循环之后。根据发电规划，1、2 号机组共设计了两套过渡循环：a 方案和 b 方案，每套过渡循环方案又都包括两个过渡循环 a 方案分别为 tr1_a 循环和 tr2_a 循环，分别使用 64 组、72 组新燃料组件；b 方案分别为 tr1_b 循环和 tr2_b 循环，分别使用 60 组、68 组新燃料组件。

（2）平衡循环

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料的平衡循环采用长短交替式的长（L0）、短（S0）循环。

（3）灵活循环和延伸运行

通用燃料管理具有一定的灵活性，以使整个燃料管理策略能尽可能包络各种现实情况。在辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料的燃料管理策略里，基于平衡循环方案，对灵活循环进行了一定程度的灵活性研究：灵活性循环在平衡循环提前 30EFPD 停堆或采用延伸运行（Stretch-out）方式延长燃耗运行 30EFPD 后的基础上考虑了±4 组燃料组件的情形。灵活性循环包括 L1、L2 和 S1、S2 共 4 个循环。

L1 循环是在平衡循环 S0 提早 30EFPD 停堆的基础上，使用了 68（72-4）组新组件的

长循环。L2 循环是在平衡循环 S0 提早 30EFPD 停堆的基础上，使用了 76（72+4）组新组件的长循环。S1 循环是在平衡循环 L0 采用延伸运行（Stretch-out）方式延长燃耗运行 30EFPD 停堆的基础上，使用了 60（64-4）组新组件的短循环。S2 循环是在平衡循环 L0 提早 30EFPD 停堆的基础上，使用了 68（64+4）组新组件的短循环。

堆芯在寿期末时，一回路的硼浓度接近零，通过降低一回路温度和降低堆芯功率引入正的反应性，以使反应堆继续保持在较高的功率水平上运行。在过渡循环和平衡循环自然循环的寿期末，考虑了 30EFPD 的延伸运行，以满足电网对循环长度灵活性的要求。

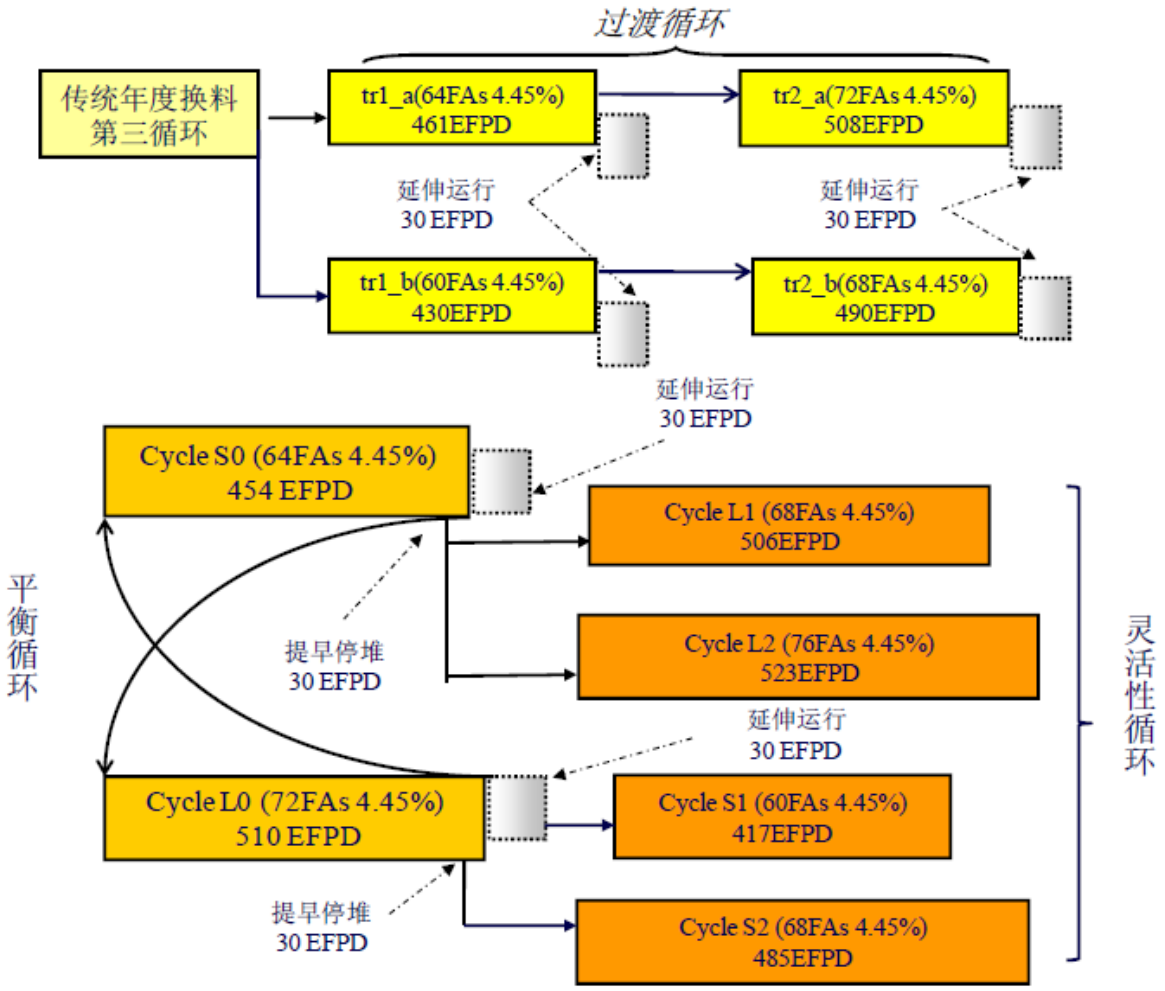


图 5-2　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组的 18 月换料燃料循环管理策略示意图

主要污染工序

核电厂放射性物质最根本的来源是反应堆燃料芯块内的链式裂变反应，正常工况下裂变产生的放射性裂变产物基本上都包容在燃料元件的包壳内，只有极少量的裂变产物通过包壳缺陷泄漏到一回路冷却剂中；同时裂变产生的中子使一回路冷却剂、控制棒、硼酸和其它结构材料受到激活而产生中子活化产物。这些裂变产物和活化产物形成反应堆冷却剂中的放射性源。它们通过冷却剂的净化、蒸汽发生器传热管束的泄漏等过程造成对核辅助系统和二回路的污染。

放射性废气管理系统的泄漏、定期排放、各厂房通风系统的持续通风和定期扫气等都会向环境排放气载放射性物质，硼回收系统调硼下泄以及各厂房潜在的跑冒滴漏将通过放射性废液处理系统处理后以槽式排放方式向环境排放液态放射性物质，核电厂在正常运行和检修过程中还将产生一定量的中低放射性固体废物。

污染物的产生、排放情况及处理措施

由于本项目几乎不增加核电厂排放的废热、化学物质、生活污水和生活垃圾，因此本表仅简要分析放射性污染物的产生、排放情况及处理措施。

放射性源项涉及反应堆堆芯积存量、一回路和二回路冷却剂中的放射性核素的比活度以及气态、液态放射性物质的排放量和固体放射性废物的产生量。放射性废物的排放量主要取决于一回路冷却剂的放射性活度以及三废处理系统的设计处理能力及运行效能。作为技术改造项目，本项目仅改变了核电厂的换料方式，对系统设计几乎未作变更（仅少部分系统的阈值进行了调整）。由于换料方式发生了变化，反应堆的堆芯积存量会相应地发生变化，进而导致冷却剂活度谱乃至设计排放源项也会发生变化，但本项目不改变已核定的放射性流出物排放申请值。

1．放射性废液

放射性废液由放射性废液管理系统控制、收集、处理、输送、贮存和处置。放射性废液管理系统的设计目的是为了收集和处理电厂运行期间产生的放射性废液，并将其放射性活度和化学浓度降低到可排放或核电厂可重复利用的水平，排放的液态流出物中的放射性活度水平必须符合国家标准的相关要求。放射性废液管理系统主要包括硼回收系统（TEP）、废液处理系统（TEU）、核岛废液排放系统（TER）和常规岛废液排放系统（SEL）等组成。

硼回收系统为两台机组共用，它收集化学容积控制系统（RCV）与核岛排气和疏水系统（RPE）来的含氢反应堆冷却剂，为反应堆冷却剂排水提供足够的贮存容积；此外对

含氢冷却剂进行净化，通过蒸发制取反应堆补给水和 4%（重量百分比）硼酸溶液，返回反应堆硼和水补给系统（REA）重复使用；直接对化学容积控制系统（RCV）含低浓度硼酸的反应堆冷却剂的下泄流除硼。硼回收系统产生的蒸馏液经过取样分析后视情况回用、返回 TEP 继续处理、排放至 TER（即作为放射性废液处理）；TEP 系统产生的浓缩液经取样分析后视情况回用、返回 TEP 继续处理、送往 TEU 处理（即作为放射性废液处理）或送往 TES 固化（即作为放射性固体废物）。

废液处理系统收集和监测核电厂正常运行工况和预期运行事件时产生的含有放射性的废液，根据要求对各类废液进行分类和处理，处理过的废液经监测合格后通过废液排放系统（TER）向环境排放。TEU 系统处理三类放射性废液：工艺排水、化学排水和地面排水。上述废液由核岛疏水排气系统和放射性废水回收系统收集。工艺排水进入工艺排水接收槽（TEU001/002BA），地面排水进入地面排水接收槽（TEU003/004BA），化学排水由化学排水接收槽（TEU005/006BA）接收。每类贮槽中总有一个贮槽处于接收状态。贮槽装满后要进行搅拌、取样分析、添加化学试剂等，之后进行处理。此外，TEU 系统还有两台废水接收槽(TEU016/017BA)，以便在异常情况下收集 TEU 系统各类排水接收槽内无法及时处理的废液和 TER 系统返回处理的废液。为了满足废液排放浓度的要求，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 TEU 系统通过除盐单元的循环处理进一步提高去污效果以满足排放要求。三台除盐床串联，除盐单元中任一除盐床均可根据需要被旁路。经过处理后的废液进入监测槽 TEU009/010BA。对监测槽 TEU009/010BA 中的废液进行取样分析，如果其放射性和化学特性符合排放要求，则排往废液排放系统（TER）。否则，可由蒸发设备重新处理，也可通过除盐床、过滤器进行循环除盐处理。

废液排放系统（TER）收集、贮存和监测电厂核岛产生的废液，以及异常情况下蒸汽发生器排污系统（APG）产生的废液，提供排放通道。TER 系统位于 QA 厂房，由两台机组共用。TER 系统排放的废液包括：硼回收系统（TEP）来的废液，包括中间贮槽排放的含氚量高的反应堆冷却剂疏水和蒸发器蒸馏液；废液处理系统（TEU）的废液，包括蒸发器蒸馏液、经除盐器处理的废水和经过滤器处理的废液；放射性废水回收系统（SRE）的洗衣房和放射性化学车间的废水；核岛排气和疏水系统（RPE）的疏水和 TER 地坑疏排水；从核辅助厂房来的固体废物处理系统（TES）的疏水；异常情况下蒸汽发生器排污系统（APG）的蒸汽发生器排污液。TER 设有三个 500m^3 的贮槽，已充满的一个槽可以取样监测，符合流出物排放标准后可以排放；同时另一个槽可以收集废液；第三个槽与常规岛废液排放系统的第三个贮槽互为备用。排放管线为所有贮槽共用。当废液的放射性浓

度超过排放限值时，安装在排放管线上的监测器会发出警报并自动关闭隔离阀。

常规岛废液排放系统（SEL）为两台机组共用，位于 QB 厂房内，其功能为：将常规岛的排放废液收集、混匀、取样分析、监测后有控制地排放；当环境稀释能力不足而要求延迟排放，或当取样分析或辐射监测系统（KRT）监测到废液的放射性浓度超过允许排放限值时，可暂存废液；将超过允许排放限值的废液输送至废液处理系统（TEU）处理；为 TER 系统提供备用贮存罐。SEL 系统设置三个废液排放贮槽，正常运行时，三个 SEL 贮槽中的一个接收废液，一个混合、取样分析和监测排放废液，另一个备用。废液在贮槽内经充分混合使其成分均匀，取样分析后根据废液放射性浓度及环境稀释能力确定废液的排放流量。排放管上的 KRT 监测系统对贮槽废液有辅助监测作用，如果排放废液的放射性浓度超过预定值，监测系统会发出警报并自动关闭隔离阀。若贮槽废液放射性浓度超过排放限值，废液将被送回 TEU 系统化学排水接收槽再作处理。

2．放射性废气

两座反应堆处于正常运行工况和预计运行事件时，产生的放射性废气由放射性废气管理系统收集、贮存并处理。处理后的放射性废气经监测满足排放要求后通过电厂烟囱排入大气。放射性废气管理系统主要包括：废气处理系统（TEG）、厂房通风系统（HVAC）和冷凝器真空系统（CVI）。

废气处理系统（TEG）的作用是收集和处理放射性惰性气体、卤素和微粒，以便将预期的年排放量降至尽可能低的水平。TEG 由两个独立的子系统组成：含氢废气子系统和含氧废气子系统。裂变过程产生的放射性气体主要是氪和氙的各种同位素。由于少量的燃料包壳破损，燃料包壳内存积的裂变气体进入反应堆冷却剂。高压下裂变气体溶解于冷却剂中，但当系统内存在气相空间时（特别是在冷却剂除气处理时），裂变气体就会挥发出来，随溶解的氢气或氮气一起释出，从而被收集到缓冲罐中成为含氢废气。含氧废气（含空气废气）主要来自核辅助系统特别是三废处理系统可能进入空气的各种设备等有关系统容器的呼排气、吹扫气、鼓泡排气或抽气（保持负压）等，由核岛排气和疏水系统集中在一条管路上，通过系统排气风机吸入本系统，经除碘后排至通风系统 DVN。空气废气所含的放射性核素主要以气溶胶的形式存在，含有元素碘和有机碘等。

厂房通风系统的作用是用各种加热、冷却、通风和空调系统对每一个可能污染的厂房进行采暖、空调和降温以提供一个温暖的和空气质量良好的环境，确保操作人员的舒适、安全、健康以及设备的完整性和有效运行，并对通风排气进行过滤和除碘处理，以减少气载放射性物质向大气环境的排放。该系统的主要设备有进气预过滤器、排气预过滤器、高

效过滤器、高效颗粒过滤器和碘吸附器等。进气预过滤器用于除去进气中的大气浮尘，这些过滤器效率相对较低，但效率至少为 85%。排气预过滤器用于高效颗粒过滤器前的排气过滤，捕集气流中的粗颗粒，以延长高效颗粒过滤器的寿命，这类过滤器的效率至少为85%。高效过滤器用以捕集气流中的细颗粒，这些过滤器的效率至少为 95%。高效颗粒过滤器（绝对过滤器）用以捕集气流中极细的颗粒，这些过滤器的净化系数至少为 3000。碘吸附器用于不同的供热、通风与空调系统（HVAC），在气流中吸附气载放射性碘，这些吸附器在湿度为 40%的条件下，吸附甲基碘的净化系数至少为 1000。

CVI 系统主要功能是保持冷凝器真空度在正常运行所要求的水平，同时把抽出的气体输送至 DVN 系统或在起动时抽出气体直接排入大气。该系统本身不具备放射性废气的贮存、处理功能。当蒸汽发生器传热管破损时，一回路冷却剂从蒸汽发生器一次侧向二次侧泄漏，从而造成 CVI 系统抽出的气体带有放射性。系统为此设置了放射性气体监测系统。

3．放射性固体废物

两台机组运行及检修时产生的放射性干、湿固体废物由固体废物系统（TES）收集、暂存、处理和包装。辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组的 TES 系统包括两大部分：放射性废物处理站（在核辅助厂房 NX 内）和废物辅助厂房（QS 厂房）。

TES 系统处理四类废物：蒸发浓缩液和化学废液、废离子交换树脂、废过滤器芯子和各种干废物。根据废物的放射性水平和类型，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组设计中采用了容量为 400L 的钢桶进行处理：对于废树脂，将废树脂、水和添加剂一起传送至金属桶，装桶完毕后传送至搅拌站位，根据配方要求加水相应的石灰和水搅拌形成均匀的固化体；对于浓缩液，将浓缩液和添加剂传送至 400L 钢桶；装桶完毕后，将 400L 钢桶传送搅拌站位，进行加水泥、石灰搅拌混合形成均匀的固化体；对于废过滤芯子的固定，将芯子放入 400L 钢桶内，通过搅拌水泥浆装置进行水泥浆灌浆，再用振动台将 400L 钢桶内的湿混料震动均匀、密实；对于干废物，将可压缩的干废物预压装入 200L 钢桶内，随后对 200L 钢桶进行超压，超压后的桶饼装入 400L 钢桶中进行灌浆固定；对于不可压缩的小型固体部分直接装入 400L 钢桶内灌浆固定。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组的废物处理辅助厂房（QS）设备处理能力可处理辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组产生的放射性干固体废物。

QT 厂房暂存红沿河核电厂产生的 400L 桶装废物。QT 厂房的贮存容量根据运行值按照六台机组运行五年产生的废物量加适当裕量进行设计。

清洁生产

清洁生产是指不断采取改进设计，使用清洁的能源和原料，采用先进的工艺技术和设备，改善管理，综合利用，从源头削减污染，提高资源利用率，减少或避免生产、服务和产品使用过程中污染物的产生和排放，以减轻或者消除对人类健康和环境的危害，促进经济与社会可持续发展。清洁生产的核心是从源头做起，预防为主，通过全过程控制，实现经济效益和环境效益的统一。

清洁生产是通过对生产资源的综合利用，实现“节能、降耗、减污”的目标；通过削减污染物的产生和排放，从而减少对环境的污染。辽宁红沿河核电厂的清洁生产措施主要体现在以下几个方面：

A）进一步建立、完善有关减少放射性废物产生量的管理程序和机制；

B）进一步加强对电厂工作人员的宣传，以减少放射性固体废物的产生量；

C）注意从源头控制放射性固体废物的产生；

D）持续探索固体废物系统处理工艺的改进，尽量将固体废物最小化。

环保投资估算

本项目放射性废气、废液和固体废物均利用电厂已建设完成的放射性废气、废液和固体废物管理系统处理、暂存和排放，本项目无额外新增环保处理设施。

六、项目主要污染物产生及核定排放情况

内容 类型	排放源 (编号)	污染物 名称	处理前产生浓度和产生量（年）	处理方式	处理后排放浓度和排放量（年）	排放去向
营运期（本技改项目不涉及施工期）						
大气污染物	TEG 排放、各厂房通风系统排放	气载放射性流出物	具体参见专题报告。	由电厂已建成的放射性废气管理系统处理，最后集中引至电厂烟囱排放。	本技改项目不改变已核定的气载放射性流出物排放申请值。	大气
水污染物	TEP 下泄、各厂房疏水	液态放射性流出物	具体参见专题报告。	由电厂已建成的放射性废液管理系统处理，最后通过放射性废液排放系统经监测满足要求后与循环冷却水一起排放入海。	本技改项目不改变已核定的液态放射性流出物排放申请值。	海洋
	中低放固体废物	—	—	由电厂已建成的放射性固体废物系统相关设施处理	—	电厂 QT 厂房中期贮存，一段时间后送中低放废物处置场处置。

主要生态影响

本项目不涉及施工作业，不涉及施工期对生态的影响。

本项目实施后可能会对核电厂受纳海域中的海洋生物有轻微的辐射影响。

七、环境影响分析

施工期环境影响分析

本项目不新增任何系统、厂房，不涉及施工作业。

营运期环境影响分析

1．环境影响分析

本项目的主要环境影响为对海水水质、公众和生物的辐射影响。有关辐射环境影响评价所使用的模式、参数、相关假设与详细的计算结果请详见附件。

辽宁红沿河核电厂为“一址多堆”电厂，电厂一期工程共四台机组。考虑到一期工程四台机组的共同影响，在分析辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后的环境辐射影响时，将叠加 3、4 号机组运行的辐射影响。

（1）海水水质影响

辽宁红沿河核电厂液态放射性流出物经监测满足排放要求后随电厂温排水一起排入附近海域。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组正常运行工况下的液态流出物中 ^{60}Co、^{90}Sr、^{106}Ru、^{134}Cs 和 ^{137}Cs 等五种核素年设计排放量分别为：6.90×10^{8}Bq、7.46×10^{5}Bq、2.48×10^{5}Bq、5.63×10^{9}Bq 和 6.01×10^{9}Bq。辽宁红沿河一期工程四台机组废液年排放量约为 40000m^3，废液排放泵设计最大流量 150m^3/h。

辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组共用排水口，循环冷却水流量夏季 197.72m^3/s，冬季 158.52 m^3/s（排回流 39.2 m^3/s）。根据计算结果显示，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组 ^{60}Co、^{90}Sr、^{106}Ru、^{134}Cs 和 ^{137}Cs 等五个液态放射性核素在排水构筑物完全混合的浓度贡献预计将达到 6.30×10^{-3}Bq/L、6.81×10^{-6}Bq/L、2.26×10^{-6}Bq/L、5.14×10^{-2}Bq/L 和 5.48×10^{-2}Bq/L，能够满足《海水水质标准》（GB3097-1997）中相应核素低于 0.03Bq/L、4.0Bq/L、0.2Bq/L、0.6Bq/L 和 0.7Bq/L 的浓度要求。

（2）生物辐射影响

根据 IAEA 422 号技术报告推荐的浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物七类海洋生物体对核素的生物浓集系数以及海水中悬浮物对核素的吸附分配因子，采用 ERICA 项目中生物辐射剂量率的计算方法，结合各种核素对以上海洋生物体辐射的剂量转换因子，对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后以及

辽宁红沿河核电厂一期工程四机组正常运行工况下，液体放射性流出物排放造成的海洋生物辐射剂量率进行计算。

计算时鱼类、海藻类、浮游类暴露在水体中的居留因子取 1.0，软体类和甲壳类暴露在水体和底泥中的居留因子各为 0.5。

计算结果表明，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，一期工程四台机组运行排放液态放射性流出物对排放口附近海域中浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物七类海洋生物造成的附加辐射剂量率分别为 6.45×10^{-3}μGy/h、6.71×10^{-3}μGy/h、7.47×10^{-3}μGy/h、1.55×10^{-2}μGy/h、9.78×10^{-3}μGy/h、1.50×10^{-5}μGy/h、7.82×10^{-3}μGy/h，其中 1、2 号机组排放的液态放射性流出物对七类海洋生物造成的辐射剂量率贡献分别为 3.25×10^{-3}μGy/h、3.40×10^{-3}μGy/h、3.81×10^{-3}μGy/h、8.13×10^{-3}μGy/h、4.92×10^{-3}μGy/h、5.94×10^{-6}μGy/h、3.93×10^{-3}μGy/h。

从计算结果可以看出，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，一期工程四台机组运行状态下，液态放射性流出物对排放口附近海域水体中浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物七类海洋生物的辐射剂量率均远小于 ERICA 程序推荐的 10μGy/h 剂量率筛选值。因此，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，一期工程四台机组的液态放射性流出物对附近海域内的海洋生物不会造成明显的损伤，对海洋生物总体上影响很小。

（3）公众辐射影响

气载放射性流出物对厂址评价区内公众造成的辐射影响考虑以下照射途径：

— 空气浸没外照射；

— 地面沉积物外照射；

— 吸入空气内照射；

— 陆生动植物食品食入内照射。

图7-1给出了气载放射性流出物对公众造成辐射的照射途径。

液体放射性流出物对厂址评价区内公众造成的辐射影响考虑以下照射途径：

— 海上活动外照射；

— 海水浸没外照射；

— 岸边沉积物外照射；

— 食入海产品内照射。

图7-2给出了液体放射性流出物对公众造成辐射的照射途径。

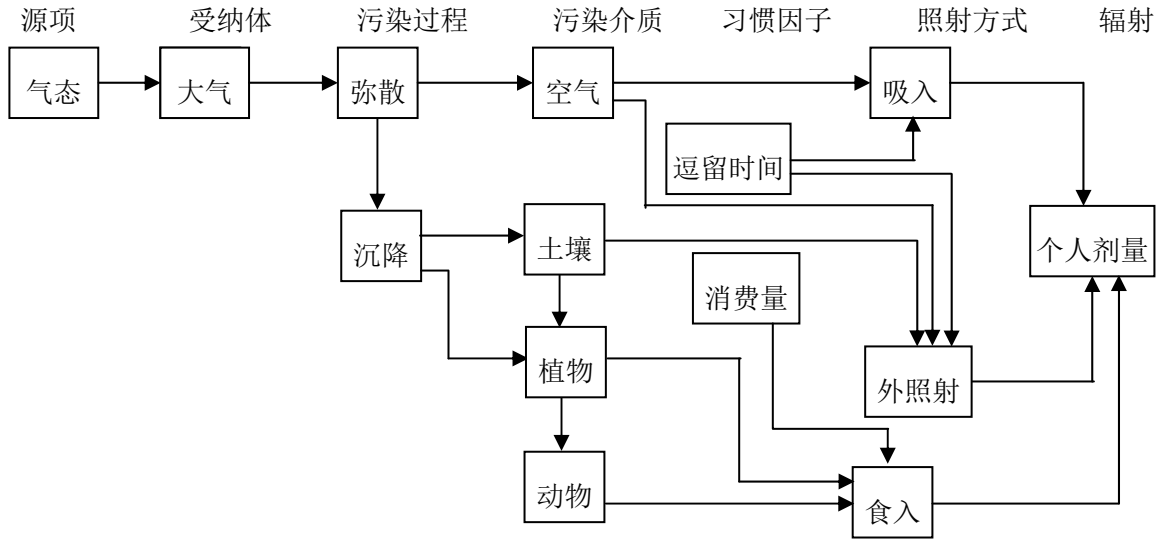


图 7-1　气载放射性照射途径示意图

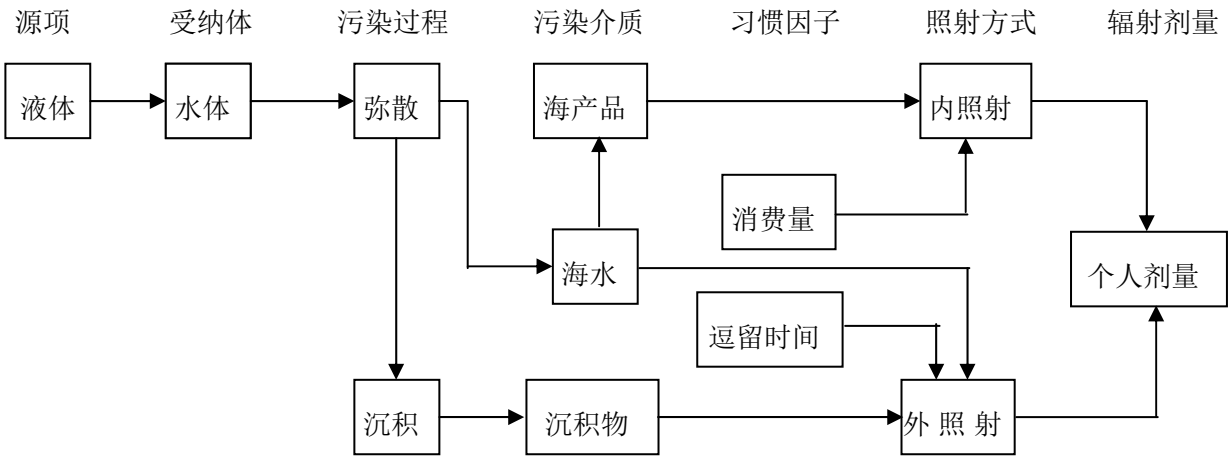


图 7-2　液态放射性照射途径示意图

计算结果表明，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组的设计排放量放射性流出物排放对厂址 ENE 方位 2~3km 子区内的成人组公众个人造成的年有效剂量最大，年有效剂量为 8.27×10^{-7}Sv/a，占 GB6249-2011 中 0.25mSv/a 公众剂量约束值的 0.33%，占核电厂一期工程 0.16mSv/a 公众剂量约束值的 0.52%，满足国家标准的剂量约束要求。辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，放射性废物处理设施性能仍满足设计要求。

本项目核定排放量同年度换料相比没有发生改变，由于核定排放源项被设计排放源项所包络，根据设计排放量辐射剂量计算结果表明，本项目核定排放量所造成的公众辐射剂量满足国家标准的剂量约束要求。

2．环境风险分析

根据 GB6249-2011 的相关要求，稀有事故和极限事故用于核电厂事故工况下的环境影响评价。本报告针对以下九类设计基准事故进行事故评价。

— 大破口失水事故（LOCA）

— 控制棒弹出事故（CREA）

— 燃料操作事故（FHA）

— 蒸汽发生器传热管破裂事故（SGTR）

— 蒸汽发生器传热管破裂并安全阀卡开事故（SVSO）

— 安全壳外主蒸汽管道破裂事故（MSLB）

— 容积控制箱破损事故（RCVA）

— 废气衰变罐破损事故（TEGA）

— 卡轴事故（LRA）

计算上述事故放射性后果时所用的模式、参数与主要假设请参见本报告表的附件。

表 7-2 给出了九类设计基准事故在非居住区边界（2 小时）和规划限制区边界（整个事故期间）上造成的个人最大有效剂量和甲状腺当量剂量与国家标准相应控制值的比较。

表 7-2　事故后果与国家标准的比较

事故	事故类别	非居住区边界			
		有效剂量		甲状腺当量剂量	
		最大剂量（Sv）	与 GB6249-2011 控制值之比(%)	最大剂量（Sv）	与 GB6249-2011 控制值之比(%)
LOCA	Ⅳ	2.20E-03	2.20%	3.47E-02	3.47%
CREA	Ⅳ	4.68E-03	4.68%	8.16E-02	8.16%
FHA	Ⅳ	2.02E-04	0.20%	4.56E-03	0.46%
MSLB	Ⅳ	9.89E-05	0.10%	1.91E-03	0.19%
SVSO	**Ⅳ**	**8.83E-03**	**8.83%**	**1.60E-01**	**16.00%**
LRA	Ⅳ	1.21E-03	1.21%	3.22E-03	0.32%
SGTR	**Ⅲ**	**7.85E-04**	**15.70%**	**1.42E-02**	**28.40%**
RCVA	Ⅲ	4.16E-04	8.32%	4.69E-04	0.94%
TEGA	Ⅲ	2.99E-04	5.98%	1.68E-05	0.03%

续表 7-2　事故后果与国家标准的比较

事故	事故类别	规划限制区边界（陆域 5km）			
		有效剂量		甲状腺当量剂量	
		最大剂量（Sv）	与 GB6249-2011 控制值之比(%)	最大剂量（Sv）	与 GB6249-2011 控制值之比(%)
LOCA	Ⅳ	9.89E-04	0.99%	1.86E-02	1.86%
CREA	**Ⅳ**	**1.06E-03**	**1.06%**	**1.94E-02**	**1.94%**
FHA	Ⅳ	2.11E-05	0.02%	4.34E-05	0.01%
MSLB	Ⅳ	9.12E-06	0.01%	1.76E-04	0.02%
SVSO	Ⅳ	1.02E-03	1.02%	1.84E-02	1.84%
LRA	Ⅳ	4.57E-04	0.46%	3.91E-03	0.39%
SGTR	**Ⅲ**	**6.86E-05**	**1.37%**	**1.24E-03**	**2.48%**
RCVA	Ⅲ	3.63E-05	0.73%	4.09E-05	0.08%
TEGA	Ⅲ	2.61E-05	0.52%	1.47E-06	0.01%

由上述分析可知：

— 在Ⅳ类事故中，蒸汽发生器传热管断裂并安全阀卡开事故（SVSO）对非居住区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量最大，弹棒事故（CREA）对规划限制区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量最大。

— 在Ⅲ类事故中，蒸汽发生器传热管破裂事故对非居住区边界、规划限制区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量均最大。

这些事故的放射性后果都满足国家标准 GB6249-2011 的相关要求。从各类设计基准事故的放射性后果分析可以看出，实施 18 个月燃料管理策略后，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组专设安全设施的设计性能仍然可靠，厂址周围各类边界的设置合理，电厂设计基准事故造成的潜在环境放射性后果满足 GB6249-2011 的相应要求。

3．总量控制和浓度控制分析

从设计源项的角度考虑，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，单台机组以及一期工程四台机组实际运行所排放的各类放射性流出物的年排放量均可以满足国家标准 GB6249-2011 的总量控制要求。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，放射性废物处理措施性能仍满足要求。

辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组液态放射性流出物排放期间对排水渠中 ^{60}Co、^{90}Sr、^{106}Ru、^{134}Cs 和 ^{137}Cs 五种核素造成的浓度贡献可满足《海水水质标准》（GB3097-1997）中相应的浓度要求。

本项目核定排放量同年度换料相比没有发生改变，由于核定排放源项被设计排放源项所包络，根据设计排放量辐射剂量计算结果表明，本项目核定排放量可以满足国家标准 GB6249-2011 的总量控制要求，液态放射性流出物不会对海水水质造成影响。

八、建设项目拟采取的防治措施及预期治理效果

内容 类型	排放源 (编号)	污染物 名称	防治措施	预期治理效果
运营期				
大气污染物	TEG 排放、各厂房通风系统排放	气载放射性流出物	电厂现有放射性废气管理系统进行防治。均引至电厂烟囱向环境排放，TEG 设置由衰变箱对放射性废气进行贮存衰变，各厂房通风系统设有各式过滤器。	有效减少向环境的排放量，满足国家标准 GB6249-2011 有关的总量排放限制要求，显著减少对公众造成的辐射影响。
水污染物	TEP 下泄、各厂房疏水	液态放射性流出物	电厂现有放射性废液管理系统进行防治。采用 TEU 系统（蒸发、除盐、过滤）对各厂房疏水进行处理，各放射性液态流出物在排放前将在 TER 中暂存衰变一段时间后再排入环境。	有效减少向环境的排放量，满足国家标准 GB6249-2011 有关的总量排放限制和浓度限制要求，显著减少对公众造成的辐射影响。
固体废弃物	放射性固体废物处理系统等	中低放射性固体废物	在厂内暂存一段时间后，运往国家指定的中低放废物处置场处置。	对当地环境不产生影响

生态保护措施及预期效果

本项目不涉及厂房、系统的增加，不涉及施工期作业。

本项目实施后可能会对核电厂受纳海域中的海洋生物有轻微的辐射影响，评价表明该影响在可接受的范围内，无需采取额外的生态保护措施。

流出物监测和环境监测

为确保辽宁红沿河核电厂的流出物排放得到有效的监测、管理和控制，根据环境保护部对多堆厂址环境管理“四个统一”的要求，辽宁红沿河核电厂的流出物监测与环境监测均由辽宁红沿河核电厂化学环保处负责。本项目不改变核电厂原有流出物监测和环境监测的具体实施方案，本部分进行简要描述。

1．流出物监测

（1）流出物监测系统

运行期间的流出物监测包括放射性流出物监测和非放射性流出物监测，主要监测对象是核电厂向环境排放的气载和液态放射性流出物。

流出物监测系统是电厂辐射监测系统（KRT）的重要组成部分，负责放射性流出物排放的监测与控制。

气载放射性流出物监测子系统位于核辅助厂房的烟囱内，每台机组各有一套，两套气载流出物监测系统共同对烟囱排放的气载流出物进行连续在线监测和采样。气载放射性流出物监测系统包括 KRT016MA、KRT017MA、KRT020MA 与 KRT021MA 四个监测通道以及 KRT050MA 取样通道。

液态流出物监测子系统由 2 个在线监测通道组成，即 KRT901MA 与 KRT902MA，分别在线监测 TER 与 SEL 排放管线上的放射性，这两个监测通道都是两台机组共用。KRT901MA 安装在 TER 系统的废液排放管线上，该监测通道的功能是确认 TER 系统废液排放前流出物样品的实验室测量结果，或者用来证实测量过的贮存罐已经排空。该监测通道能提供高放射性报警信号并能自动停止排放。KRT902MA 安装在 SEL 系统的废液排放管线上，具有对 SEL 系统槽式排放在线监测的功能。

流出物监测系统的性能详见表 8-1。

表 8-1　放射性流出物监测通道的性能

监测项目	监测通道	数量	探测类型	测量范围	报警阈值 Th1　Th2	功　能	高水平信号引起的信息处理动作
气载放射性流出物	KRT016MA	2	总 β	1~3.7×10^6 Bq/m^3	5.0×10^1，2.5×10^2 Bq/m^3	气溶胶的 β 放射性测量和连续取样。	记录、报警。
	KRT020MA		总 γ(碘)	3.7~3.7×10^6Bq/m^3	2.0×10^1，1.0×10^2 Bq/m^3	碘放射性测量和连续取样。	记录、报警。
	KRT017MA	2	低活度气体，总 β	3.7×10^3~3.7×10^9 Bq/m^3	4.0×10^5，4.0×10^6 Bq/m^3	低活度惰性气体总 β 放射性连续测量，氚鼓泡器连续取样。	记录、报警、自动关闭 ETY 和 TEG 的阀门。PAMS 监测道。
	KRT021MA	2	高活度气体，总 β	3.7×10^8~3.7×10^{15} Bq/m^3	5.0×10^8，2.0×10^9 Bq/m^3	烟囱空气中，高活度惰性气体总 β 放射性连续测量。	记录、报警、PAMS 监测道。
	KRT050MA	2	-	-	-	连续采集气载放射性流出物中的 3H 与 14C	定期采样送实验室分析
液态放射性流出物	8KRT901MA	1	总 γ	3.7×10^3~3.7×10^9 Bq/m^3	2.5×10^6，5.0×10^6 Bq/m^3	监测核岛废液排放系统 TER 的排放。	记录、报警、自动关闭排放阀、终止排放。
	8KRT902MA	1			8.0×10^4，4.0×10^5 Bq/m^3	监测常规岛废液排放系统 SEL 的排放	记录、报警、自动关闭排放阀、终止排放。

注：① PAMS ——事故后监测系统。

② Th1　——第一报警阈值，Th2　——第二报警阈值。

（2）流出物监测计划

开展流出物监测的目的是：证明释放到环境中的气载和液态放射性物质的数量遵守国家批准的排放限值和核电厂规定的管理限值；为判明核电厂的运行以及放射性废物的处理和控制装置的工作是否正常有效，提供数据和资料；为应用适当的环境模式评价环境质量、估算公众所受的剂量提供源项数据和资料；使公众确信核电厂的放射性排放确实受到严格的控制；迅速发现和鉴别计划外排放的性质、种类及其程度，以便及时采取措施；给出报警和必要的执行动作，控制不合理排放，提供有关应急响应信息。

放射性流出物分析项目见表 8-2。

表 8-2 放射性流出物分析测量项目

种类	取样点	介质	分析	方法	分析核素
液态	TER（废液排放系统）	水	pH	直接测量	——
			总 γ	1 升样品，测量 1000s	——
			^{3}H	1ml 样品+10ml 闪烁液，20min	^{3}H
			^{14}C	6ml 吸收液+14ml 闪烁液	^{14}C
			γ 能谱	1L 样品，测量 20000s	^{110m}Ag，^{58}Co，^{60}Co，^{137}Cs，^{131}I，^{134}Cs，^{54}Mn，^{124}Sb，^{106}Ru 等
			^{90}Sr	萃取色层法	^{90}Sr
	SEL（常规岛废液排放系统）	水	pH	直接测量	——
			总 γ	1 升样品，测量 1000s	——
			^{3}H	5ml 样品+15ml 闪烁液，20min	^{3}H
	SEL 月度混合样	水	pH	直接测量	——
			总 γ	1 升样品，测量 1000s	——
			^{3}H	5ml 样品+15ml 闪烁液，20min	^{3}H
			γ 能谱	1L 样品，测量 20000s	^{110m}Ag，^{58}Co，^{60}Co，^{137}Cs，^{131}I，^{134}Cs，^{54}Mn，^{124}Sb，^{106}Ru 等
气态	TEG（废气处理系统）	气体	γ 能谱	3L 专用取样瓶，测量 5000s	^{85}Kr，^{88}Kr，^{131m}Xe，^{133}Xe，^{135}Xe 等
		滤膜	γ 能谱	直接测量，测量 5000s	^{58}Co，^{60}Co，^{134}Cs，^{137}Cs
		碘盒	总 γ	直接测量，测量 1000s	——
			γ 能谱	直接测量，测量 5000s	^{131}I，^{133}I
		氚水	^{3}H	5ml 样品+15ml 闪烁液，20min	^{3}H
	ETY（安全壳大气检测系统）	气体	γ 能谱	3L 专用取样品，测量 5000s	^{41}Ar，^{85}Kr，^{88}Kr，^{133}Xe，^{135}Xe 等
		碘盒	总 γ	直接测量，测量 1000s	——
			γ 能谱	直接测量，测量 5000s	^{131}I，^{133}I
		氚水	^{3}H	5ml 样品+15ml 闪烁液，20min	^{3}H
	连续排放样品	气体	γ 能谱	3L 专用取样瓶，测量 5000s	^{85}Kr，^{88}Kr，^{133}Xe，^{135}Xe 等
		滤膜	γ 能谱	直接测量，测量 5000s	^{58}Co，^{60}Co，^{134}Cs，^{137}Cs
		双碘盒	总 γ	直接测量，测量 1000s	——
			γ 能谱	直接测量，测量 5000s	^{131}I，^{133}I
		氚水	^{3}H	5ml 样品+15ml 闪烁液，20min	^{3}H
		碱溶液	^{14}C	3ml 水+3ml 样品+14ml 闪烁液，60min	^{14}C

2．环境监测

运行期间的环境监测目的是：为评价环境辐射安全和估算公众剂量提供依据；测定核电厂周围环境介质中的核素浓度和环境γ剂量率水平，结合流出物排放的情况评估核电厂运行对周围环境的影响和对公众产生的辐射剂量；发现核电厂周围地区放射性及核电厂排放的非放射性物质变化异常现象，及时查找原因，鉴别污染来源，追踪污染趋势并修正监测方案；监测海洋环境介质是否符合国家环境标准。

表 8-3 给出了辽宁红沿河核电厂的环境监测方案。

表 8-3　辽宁红沿河核电厂环境监测方案

监测介质		监测频度	采样点数	采样数/年	分析样品数/年	采样点	监测分析项目
连续γ辐射监测		连续	7	--	--	AS1~AS7	正常以及事故运行工况下，γ辐射连续监测和报警
			5	--	--	BS1~BS5	
环境γ吸收剂量率		季	40	160	160	电站周围 20km	空气瞬时γ剂量率
环境γ累计剂量率		季	40	160	160	电站周围 20km	累计γ剂量率
环境γ吸收剂量率巡测		季	30	120	120	核电站内确定点位及应急路线点位测量	环境监测车瞬时γ剂量率
空气	气溶胶	日	7	2555	10220	AS1~AS7	总α、总β(总β偏高时,测γ谱)
		月	7	84	84	AS1~AS7	月度样品测γ谱
	气碘	周	1	40	40	AS3	γ谱
	氚	季	2	8	8	AS3、BS1	^{3}H
	碳 14	季	2	8	8	AS3、BS1	^{14}C
	沉降灰	季	5	20	80	AS1~AS3、BS1、BS5	总α、总β、^{90}Sr、γ谱
水	雨水	降水期	3	12	36	AS1、AS3、BS5	总β、^{3}H、pH
	地表水	半年	3	6	18	双龙水库、达营水库、大连金州（对照点）	总β、^{3}H、γ谱
	饮用水	半年	1	2	6	红沿河镇	总β、^{3}H、γ谱
	地下水	月	4	48	96	DS1、DS2、DS3、DS4	总β、^{3}H
		季度	4	16	16	DS1、DS2、DS3、DS4	^{40}K
		半年	4	8	8	DS1、DS2、DS3、DS4	γ谱
		半年	2	4	8	大衣屯、赫屯	^{3}H、γ谱
土壤	土壤	年	10	10	10	老渔窝、小周屯、大衣屯、赫屯、红沿河镇、李家屯、黄泥洞、大嘴村、生活区、大连金州（对照点）	γ谱
			2	2	2	老渔窝、生活区	^{90}Sr
	沉积物	年	2	2	2	双龙水库、达营水库	γ谱、^{90}Sr
植物	白菜	年	2	2	2	大衣屯、赫屯	γ谱
	苹果	年	3	3	3	大衣屯、赫屯、大连金州	γ谱
	土豆	年	2	2	2	大衣屯、赫屯	γ谱
	玉米	年	2	2	2	大衣屯、赫屯	γ谱
	现场草	年	1	1	1	生活区	γ谱
动物	鸡	年	3	3	3	大衣屯、赫屯、大连金州	γ谱
指示生物	松针	年	2	2	8	东门外、南门外	γ谱、总β、^{90}Sr、有机氚

续表 8-3　辽宁红沿河核电厂环境监测方案

监测介质		频度	点数	采样数/年	分析样品数/年	采样点位	监测分析项目
海水		年	3	3	3	一期排水口、老渔窝、红沿河村	^{90}Sr、^{106}Ru
		4 次/年	8	32	128	一期排水口、重件码头、取水口、温坨子西、老渔窝、大连金州（对照点）、黄泥洞、仙浴湾	^{40}K、总 β、^{3}H、γ 谱
海洋沉积物	潮间带	年	2	2	4	老渔窝、红沿河村	γ 谱、^{90}Sr、^{110m}Ag
	潮下带	年	2	2	2	一期排水口、老渔窝	^{90}Sr、^{110m}Ag
			7	7	7	一期排水口、重件码头、取水口、温坨子西、老渔窝、黄泥洞、仙浴湾	γ 谱
海鱼	黄花鱼	年	3	3	3	老渔窝、黄泥洞、大连金州（对照点）	γ 谱
软体类	海兔	年	2	2	2	老渔窝、黄泥洞	γ 谱
甲壳类	虾姑	年	2	2	2	老渔窝、黄泥洞	γ 谱
指示生物	牡蛎	年	2	2	8	老渔窝、黄泥洞	γ 谱、总 β、^{90}Sr、有机氚、^{110m}Ag
	海藻	年	2	2	8	老渔窝、黄泥洞	γ 谱、总 β、^{90}Sr、有机氚

九、结论

1．项目基本情况

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组自 2013 年投入商业运行以来，至今安全稳定运行，创造了良好的经济效益和社会效益。目前，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用传统年度换料方式，为了兼顾堆芯设计的先进性、燃料经济性和控制工程风险，核电厂运营单位决定对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造。

2．区域环境现状

辽宁红沿河核电厂的辐射环境监测结果表明，辽宁红沿河核电厂周围的辐射环境水平相对于运行前的本底值无明显变化。

3．污染物治理及排放

本技术改造项目不新增系统、厂房，不涉及施工期作业。

本项目不新增温排水排放量。

本项目产生的主要污染物为放射性废液、废气和固体废物，通过原有的三废处理系统处理和排放，不增加放射性流出物排放量，符合环境保护相关要求。

4．辐射环境影响评价

公众的放射性后果分析表明，电厂运行状态下对环境的辐射影响很小，是可以接受的，满足 GB6249-2011 的相应要求。

5．环境风险分析

对各类设计基准事故放射性后果的分析表明，实施 18 个月换料后，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组专设安全设施的设计性能仍然可靠，厂址周围各类边界的设置合理，电厂设计基准事故导致的环境放射性后果满足 GB6249-2011 的相应要求。

6．环境监测及流出物监测

辽宁红沿河核电厂已经设立了统一的环境监测和流出物监测方案，设立了统一的环境辐射监测机构以执行核电厂运行期间的环境监测和流出物监测工作。辽宁红沿河核电厂统一的环境监测系统和环境监测方案运行良好，满足电站安全运行对环境监测的要求。

7．环境可行性结论

分析评价表明，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，核电厂不增加已核定的放射性流出物排放量申请值，正常运行和事故工况下对环境的辐射影响是可以接受的，非居住区和规划限制区的设置仍然合适，三废处理系统和专设安全设施仍然有效，就环境保护的角度而言，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料是可行的。

注　释

本报告表附以下附图、附件：

一、附图：

附图 1　辽宁红沿河核电厂地理位置示意图

附图 2　辽宁红沿河核电厂总平面布置示意图

二、附件：

《辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目辐射环境影响评价专题报告》

建设项目环境保护审批登记表

填表单位（盖章）：辽宁红沿河核电有限公司　　填表人（签字）：　　项目经办人（签字）：

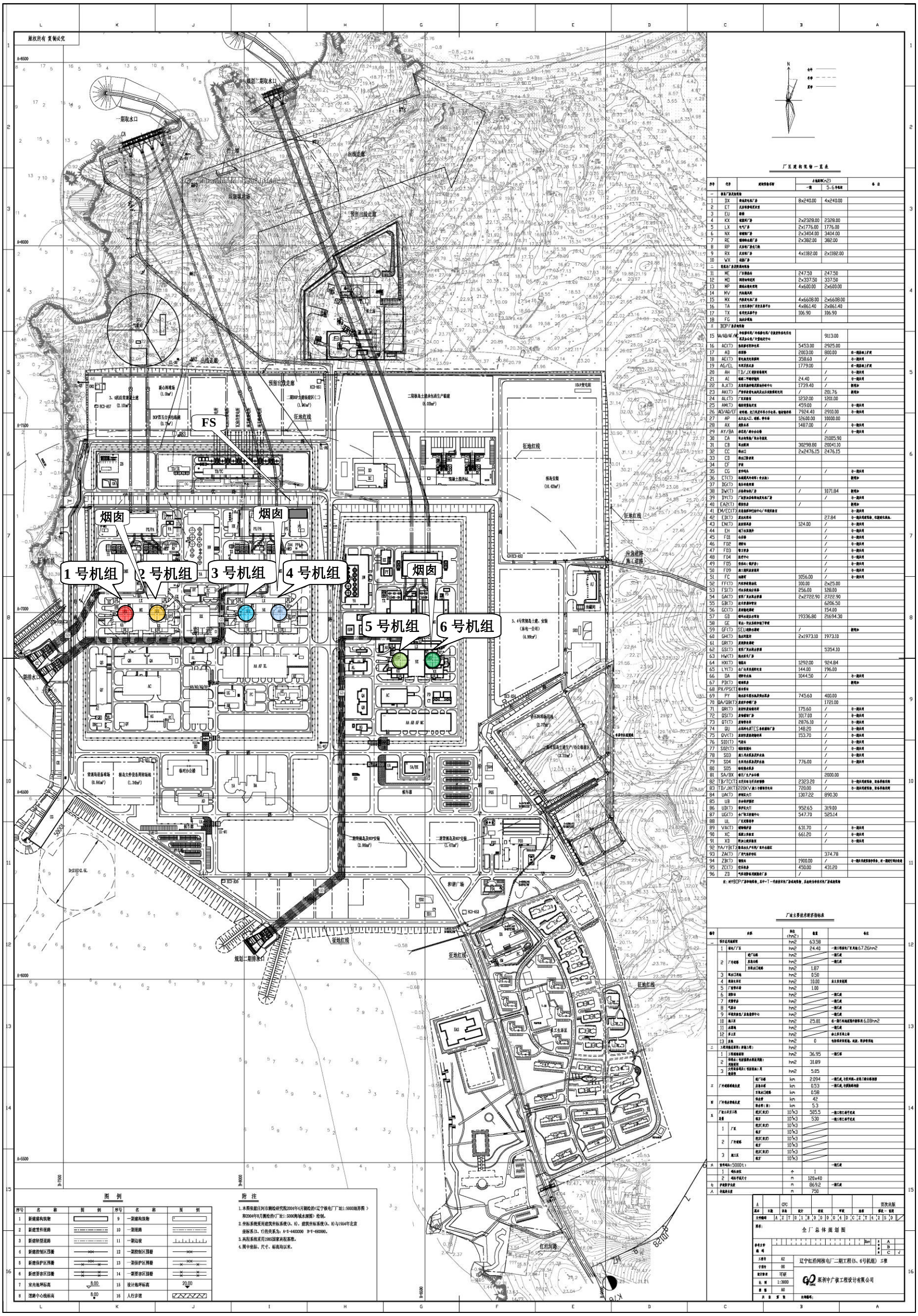
建设项目	项目名称	辽宁红沿河核电厂一、二号机组18个月换料改造项目			建设地点	辽宁省瓦房店市红沿河核电厂内			
	建设内容及规模	将目前的传统年度换料更换为18个月换料方案			建设性质	□新 建 □改 扩 建 ■技 术 改 造			
	行业类别	核力发电			环境影响评价管理类别	□编制报告书 ■编制报告表 □填报登记表			
	总投资（万元）	/			环保投资（万元）	/	所占比例（%）		/
建设单位	单位名称	辽宁红沿河核电有限公司	联系电话	0411-82340700	评价单位	单位名称	苏州热工研究院有限公司	联系电话	0512-68702205
	通讯地址	辽宁省大连市中山区南山路127号核电大厦	邮政编码	116001		通讯地址	江苏省苏州市西环路1788号	邮政编码	215004
	法人代表	卢长申	联系人	杨峰		证书编号	国环评证甲字第1904号	评价经费（万元）	—
建设项目所处区域环境现状	环境质量等级	环境空气：二级	地表水：		地下水：	环境噪声：1类	海水：	土壤：	其它：
	环境敏感特征	□饮用水水源保护区 □自然保护区 □风景名胜区 □森林公园 □基本农田保护区 □生态功能保护区 □水土流失重点防治区 □生态敏感与脆弱区 □人口密集区 □重点文物保护单位 □三河、三湖、两控区 □三峡库区							

污染物排放达标与总量控制（工业建设项目详填）	排放量及主要污染物	现有工程（已建+在建）				本工程（拟建或调整变更）						总体工程（已建+在建+拟建或调整变更）				
		实际排放浓度（1）	允许排放浓度（2）	实际排放总量（3）	核定排放总量（4）	预测排放浓度（5）	允许排放浓度（6）	产生量（7）	自身削减量（8）	预测排放总量（9）	核定排放总量（10）	“以新带老”削减量（11）	区域平衡替代本工程削减量（12）	预测排放总量（13）	核定排放总量（14）	排放增减量（15）
	废水															
	化学需氧量															
	氨氮															
	石油类															
	废气															
	二氧化硫															
	烟尘															
	工业粉尘															
	氮氧化物															
	工业固体废物															
与项目有关的特征污染物	惰性气体 (Bq)	—	—	—	7.06E+14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7.06E+14	0
	气态碘(Bq)	—	—	—	1.01E+10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.01E+10	0
	粒子(Bq)	—	—	—	6.12E+09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.12E+09	0
	气态氚(Bq)	—	—	—	1.40E+13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.40E+13	0
	液态氚(Bq)	—	—	—	1.26E+14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.26E+14	0
	液态其它核素(Bq)	—	—	—	8.00E+10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8.00E+10	0
	中低放固体废物 (m^3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：1、排放增减量：（+）表示增加，（-）表示减少；
2、（15）=（10）—（4）；
3、计量单位：废水排放量——万吨/年；废气排放量——万标立方米/年；工业固体废物排放量——万吨/年；　水污染物排放浓度——毫克/升；大气污染物排放浓度——毫克/立方米；水污染物排放量——吨/年；大气污染物排放量——吨/年；
4、核定排放总量为环境保护部批复的辽宁红沿河核电厂一期工程四台机排放量申请值（环审[2014]224号）。



附图 1　辽宁红沿河核电厂地理位置图



附图 2　辽宁红沿河核电厂总平面布置图

附件：辽宁红沿河厂1、2号机组18个月换料改造项目辐射环境影响评价专题报告

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组

18 个月换料改造项目

辐射环境影响评价专题报告

辽宁红沿河核电有限公司

二〇一五年五月

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组

18 个月换料改造项目

辐射环境影响评价专题报告

辽宁红沿河核电有限公司

法定代表人：卢长申

通讯地址：辽宁省大连市中山区南山路 127 号核电大厦

邮政编码：116001

辽宁红沿河核电厂1、2号机组

18个月换料改造项目

辐射环境影响评价专题报告

批准	上官志洪		
审核	赵　锋		
校核	陈　洋		
编制	张晓峰	陶云良	朱荣旭

苏州热工研究院有限公司　编制

目 录

1 概述 1
1.1 辽宁红沿河核电厂概况 1
1.2 18 个月换料项目背景 5
1.3 编制依据 6
1.4 评价范围和评价标准 7
2 18 个月换料技术改造工程分析 9
2.1 18 个月换料改造项目概况 9
2.2 18 个月换料方案实施对相关系统的影响 20
2.3 堆芯积存量 21
2.4 冷却剂活度谱 22
2.5 放射性液态和气载排放源项 32
2.6 18 个换料与年度换料放射性流出物设计排放量比较 43
3 正常运行工况下的辐射环境影响 45
3.1 放射性物质排放源项 45
3.2 放射性流出物在大气和水体中的输运 47
3.3 海水水质和海洋生物的辐射剂量分析 59
3.4 公众辐射剂量分析 61
3.5 环境辐射影响评价 74
3.6 18 个换料与年度换料放射性流出物辐射剂量影响比较 75
3.7 排放量申请值 75
4 核电厂事故风险评价 77
4.1 非居住区边界和规划限制区边界的复核 77
4.2 设计基准事故的辐射后果 82
4.3 S3 事故源项的环境影响 102
5 评价结论 104
5.1 概述 104
5.2 正常运行期间的环境辐射影响 104

5.3 事故环境风险评价 105
5.4 结论 105
附录 A 运行状态下的辐射影响的计算模式 107
A.1 大气弥散计算模式 109
A.2 陆上环境介质中放射性核素浓度计算模式 114
A.3 气载放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式 117
A.4 水环境介质中放射性浓度计算模式 123
A.5 液体放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式 124
A.6 放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式 126
A.7 生物辐射剂量计算模式 127
附录 B 事故剂量估算模式 129
B.1 短期大气弥散计算模式 130
B.2 事故剂量计算模式 130

表：

表 2-1 实施 18 个月换料时各过渡循环方案的燃料组件数 13
表 2-2 18 个月换料方案平衡循环各批燃料组件数 15
表 2-3 18 个月换料方案灵活循环各批燃料组件数 17
表 2-4 辽宁红沿河核电厂 18 个换料方案下的堆芯积存量 22
表 2-5 PROFIP 计算循环模拟策略 23
表 2-6 一回路冷却剂活度谱计算主要参数 24
表 2-7 一回路冷却剂裂变产物活度谱（3 张） 26
表 2-8 一回路冷却剂腐蚀产物活度谱 29
表 2-9 二回路水和蒸汽中放射性核素的最大放射性浓度 31
表 2-10 气态排放源项的计算参数 33
表 2-11 每台机组年气态排放源项 34
表 2-12 TEU 系统处理水的当量 36
表 2-13 液态排放源项的计算参数 37
表 2-14 每台机组液态放射性排放量 38

表 2-15　大亚湾核电站 2004 年至 2013 年间液态放射性物质排放情况.....42
表 2-16　大亚湾核电站 2004 年至 2013 年间气载放射性物质排放情况.....42
表 2-17　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组放射性流出物年排放量.....42
表 2-18　18 个月换料与年度换料液态放射性流出物设计排放量对比.....43
表 2-19　18 个月换料与年度换料气态放射性流出物设计排放量对比.....44
表 3-1　放射性流出物设计排放量（Bq/a）与 GB6249-2011 控制值比较.....46
表 3-2　红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子.49
表 3-3　红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期地面沉积因子.52
表 3-4　红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子.54
表 3-5　红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期地面沉积因子.57
表 3-6　液态放射性流出物排放在受纳海域中的平均稀释倍数.....59
表 3-7　陆域环境介质浓度计算参数.....63
表 3-8　放射性核素在食物链中转移的特征参数.....64
表 3-9　气态途径辐射剂量计算相关参数.....64
表 3-10　海产品可食部份生物浓集因子 Bp 和悬浮物吸附分配因子 Kd.....64
表 3-11　液态照射途径辐射剂量计算参数.....65
表 3-12　惰性气体空气浸没外照射有效剂量转换因子.....65
表 3-13　空气浸没外照射和空气吸入内照射剂量转换因子.....65
表 3-14　地面沉积和水体浸没外照射以及食入内照射剂量转换因子.....66
表 3-15　红沿河核电 1、2 号机组对各子区公众个人（成人）造成有效剂量.....68
表 3-16　红沿河核电一期四台机组对各子区公众个人（成人）造成有效剂量.....69
表 3-17　红沿河核电 1、2 号机组对各子区公众个人（青少年）造成有效剂量...70
表 3-18　红沿河核电一期四台机组对各子区公众个人（青少年）造成有效剂量.71
表 3-19　红沿河核电 1、2 号机组对各子区公众个人（儿童）造成有效剂量.....72
表 3-20　红沿河核电一期四台机组对各子区公众个人（儿童）造成有效剂量.....73
表 3-21　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料与年度换料辐射剂量对比.75
表 3-22　辽宁红沿核电厂一期工程四台机组排放量申请值与设计值对比.....76
表 4-1　选址假想事故源项（GBq）.....78
表 4-2　非居住区边界上的大气弥散因子（s/m^3）.....79

表 4-3　厂址规划限制区外边界上的大气弥散因子（s/m^3） 80
表 4-4　选址假想事故辐射后果计算采用的剂量转换因子 81
表 4-5　选址假想事故辐射结果与国家标准的比较 82
表 4-6　大破口失水事故源项（GBq） 88
表 4-7　弹棒事故源项（GBq） 89
表 4-8　燃料操作事故源项（GBq） 90
表 4-9　SGTR 事故源项（GBq） 90
表 4-10　SVSO 事故源项（GBq） 91
表 4-11　安全壳外蒸汽系统管道破裂事故事故源项（GBq） 91
表 4-12　容控箱破损事故源项（GBq） 92
表 4-13　废气储存罐破损事故释放源项（GBq） 92
表 4-14　反应堆冷却剂主泵转子卡死事故事故源项（GBq） 93
表 4-15　设计基准事故辐射后果计算用剂量转换因子 94
表 4-16　各类设计基准事故放射性后果与国家标准的比较 98
表 4-17　年度换料模式与十八月换料模式设计基准事故源项比较 100
表 4-18　年度换料模式与十八月换料模式下设计基准事故后果比较 101
表 4-19　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料 S3 事故源项 102
表 4-20　S3 源项事故场外剂量 103

图：

图 1-1　辽宁红沿河核电厂地理位置图 2
图 1-2　辽宁红沿河核电厂地产界线和非居住区边界示意图 3
图 1-3　辽宁红沿河核电厂规划限制区边界示意图 4
图 2-1　堆芯控制棒束布置示意图 10
图 2-2　燃料组件中钆棒布置示意图 11
图 2-3　红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料的燃料循环管理策略示意图 12
图 2-4　18 个月换料方案过渡循环堆芯装载方案图 14
图 2-5　18 个月换料方案平衡循环的堆芯装载方案图 16
图 2-6　18 个月换料方案灵活循环的堆芯装载方案图 19
图 3-1　气载放射性流出物照射途径示意图 62

图 3-2　液态放射性流出物照射途径示意图.....62

前　言

《辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目辐射环境影响评价专题报告》是《辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目环境影响评价报告表》的附件之一，是辽宁红沿河核电有限公司向环境保护部申请 18 个月换料项目许可的支持性文件。

经辽宁红沿河核电有限公司同意，受中科华核电技术研究院有限公司的委托，苏州热工研究院有限公司承担本专题报告的编制工作。

目前，辽宁红沿河核电厂一期工程中的 1、2、3 号机组已建成发电，4 号机组正在开展各种调试工作。辽宁红沿河核电有限公司曾先后针对 1、2 号机组和一期工程四台机组，分别向环境保护部提出了放射性流出物年排放量申请值，并分获批复（环审[2012]296 号和环审[2014]224 号）。辽宁红沿河核电厂一期工程运行期间将执行环审[2014]224 号中批复的排放量申请值，1、2 号机组实施 18 个月换料前后将不涉及放射性流出物年排放量申请值的调整。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，主要更改了核燃料装载方式、提高了燃料组件铀浓度，并相应修改了燃料循环策略，从设计的角度会对堆芯积存量、一回路冷却剂活度、二回路冷却剂活度以及放射性排放源项带来一定的变化，而电厂原设计的专设安全设施、废物处理设施、取排水设施以及流出物监测和环境监测设施等与环境相关的设施的工艺流程和设计性能未发生设计变化（仅涉及少量整定值的修改），也不涉及土建等工程施工。为突出本工程改造项目的评价特点，本专题报告对未发生变化的相关系统不再描述，重点介绍辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料方案，并在对放射性设计源项进行分析的基础上，结合核电厂不新增放射性流出物排放总量的承诺，计算了核电厂正常运行状态下和事故情况下辐射环境影响，并与年度换料方案的辐射环境后果及相应的国家标准进行了比较，已从辐射环境影响的角度说明本改造项目的可接受性，同时给出了与计算相关的基础资料、计算模型和参数等。

本专题报告依据我国有关法律、法规和标准的要求编制，属于辽宁红沿河核电有限公司、中科华核电技术研究院有限公司和苏州热工研究院有限公司的共同财产，未经允许，任何单位和个人不得复制或直接引用。

1 概述

1.1 辽宁红沿河核电厂概况

1.1.1 业主和建设性质

辽宁红沿河核电厂的业主为辽宁红沿河核电有限公司，于 2006 年 8 月在大连市注册成立，由三家投资单位——中国广核集团有限公司、中电投核电有限公司和大连市建设投资公司以 45%、45%、10%的出资比例共同投资设立，负责辽宁红沿河核电厂的建设和运营。

辽宁红沿河核电厂是国家批准“十一五”期间在辽宁省大连市瓦房店辽宁红沿河核电厂址上新开工建设的重大核电建设工程，规划建设六台百万千瓦级压水堆核电机组，一次规划，分期建设。一期工程为一、二、三、四号机组，四台机组在厂区从西向东依次布置，核电厂主厂房建筑群南北向平行布置（核岛在南、常规岛在北）。一、二号反应堆为双堆布置，反应堆厂房中心间距为 88.8m。

辽宁红沿河核电厂一、二号机组已分别于 2013 年 6 月、2014 年 5 月投入商业运行，由辽宁红沿河核电有限公司负责运营，三号机组已并网发电，四号机组目前正在开展各种调试工作，五、六号机组正在有序的推进设计、建设工作。

1.1.2 地理位置

辽宁红沿河核电厂位于辽宁省瓦房店市红沿河镇红沿河村，地理位置为东经 121°28′19″，北纬 39°48′09″。厂址地处渤海辽东湾东海岸，北、西、南三面临海，东侧与陆地接壤。厂址 ESE 方位距红沿河镇 7km，距复州城 22km，距瓦房店市 49km；南距大连市 100km，北距沈阳 270km。核电厂地理位置示意图见图 1-1。

1.1.3 核电厂边界

根据我国核电厂环境保护相关要求，辽宁红沿河核电厂设置了以下区域：

— 核电厂地产边界：核电厂征地红线范围；

— 非居住区：各方位非居住区边界与厂址地产界线保持一致，超出地产界线的海域部分以反应堆半径 500m 为界的区域；（见图 1-2）

— 规划限制区：辽宁红沿河核电厂设置的规划限制区为以各反应堆为中心、半径

5km 范围的包络区域（见图 1-3）。



图 1-1　辽宁红沿河核电厂地理位置图

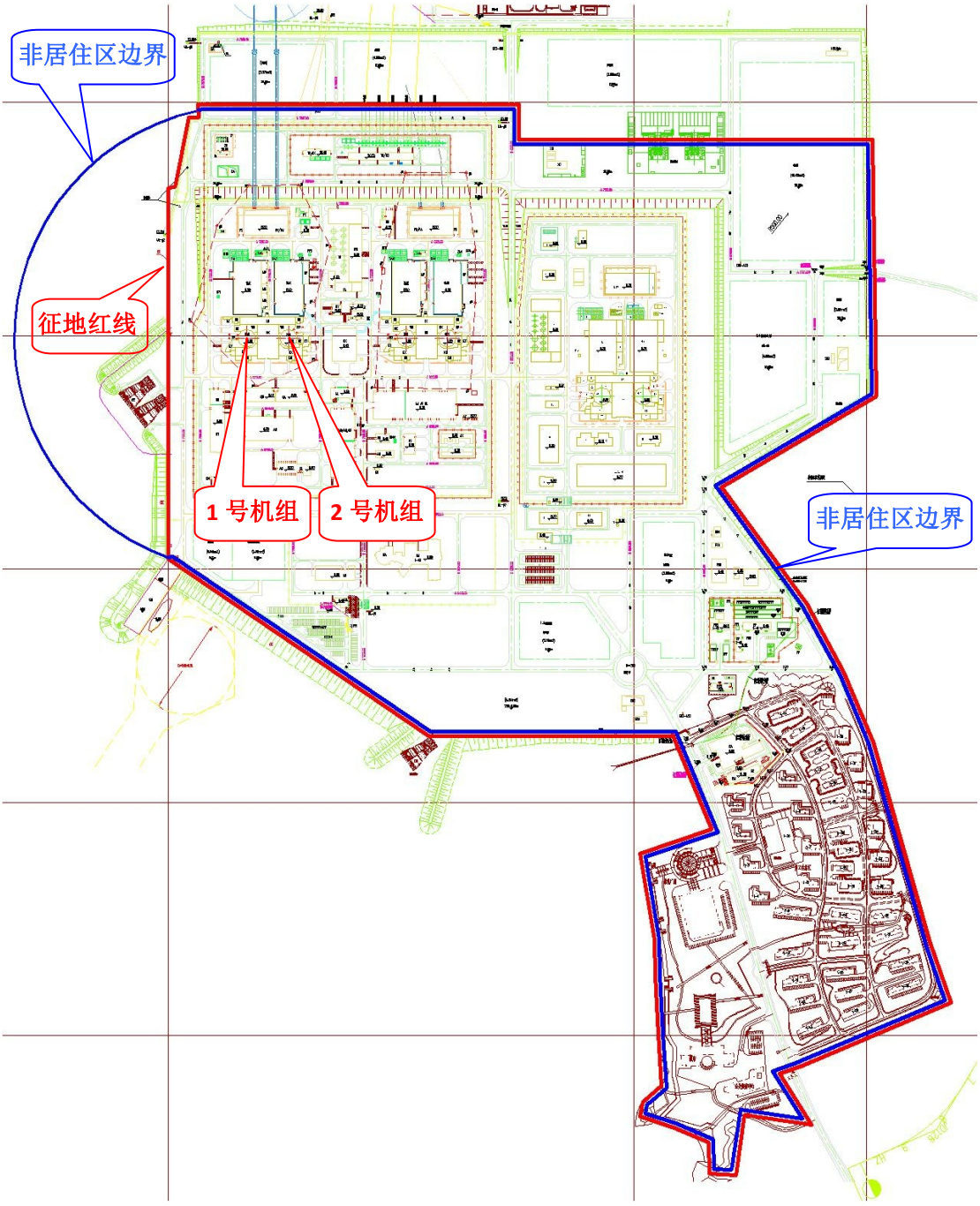


图 1-2　辽宁红沿河核电厂地产界线和非居住区边界示意图

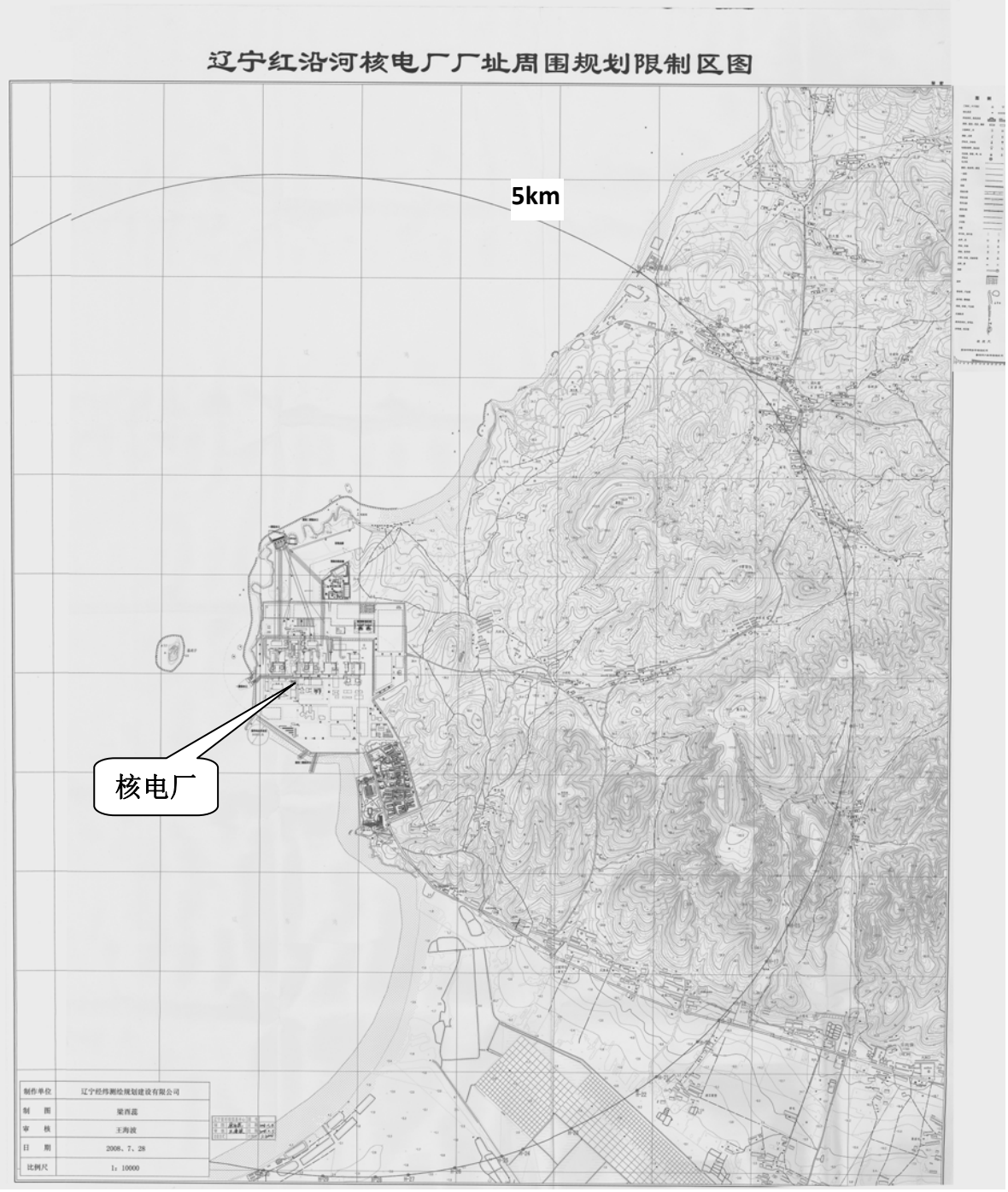


图 1-3　辽宁红沿河核电厂规划限制区边界示意图

1.1.4 辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组设计采用岭澳二期翻版加改进的标准化百万千瓦压水堆核电技术路线（CPR1000 技术方案）。每台机组核蒸汽供应系统的额定热功率为 2905MWt，堆芯额定热功率为 2895MWt，发电机额定电功率为 1118.79MWe。反应堆堆芯由 157 个 AFA 3GAA 燃料组件构成。采用年度（12 个月）燃料循环方式，并具备向 18 个月换料过渡的条件。

根据辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组各阶段环境影响报告书的评价结论和环境保护部的批复结果表明，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组各环境保护相关系统和措施及专设安全设施等的有效运行可有效保障核电厂在正常运行和设计基准事故下对环境的影响是可接受的。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组已分别于 2013 年 6 月、2014 年 5 月投入商业运行，总体而言保持了良好的运行状态：

— 机组三道安全屏障的完整性始终保持良好状态。

— 在三废处理系统运行方面，核电厂工作人员严格按程序对其加强管理和控制，三废处理设施的性能指标保持良好，气态和液态放射性流出物排放满足批复的排放量申请值要求并处于较低的水平。

— 辐射环境监测结果表明核电厂周边辐射环境水平与运行前本底水平相比未出现明显变化。

— 正常运行期间排放的非放射性污染物（化学物质、生活废水）也得到了有效的控制，它们对环境的影响在可接受范围内。

— 辽宁红沿河核电厂于 2013 年 9 月委托环境保护部卫星环境应用中心针对核电站温排水开展了海水水温监测。专题单位利用环境卫星红外相机对核电厂正式商运发电后开展的温度场调查来看，尚未发现大面积明显人为热污染现象。

1.2 18 个月换料项目背景

18 个月换料是国际上先进的燃料管理模式，且已有较长时间的运行成熟经验。国际上，压水堆核电厂自 1978 年首次开始实施 18 个月换料以来，已经有 30 多年的成熟经验，目前美国有 75 座、法国有近 30 座反应堆实现了 18 个月长周期换料；在我国国

内，大亚湾核电厂已于 2002 年成功实施了由年度换料向 18 个月换料的转换，已安全运行十余年。此外，EPR 和 AP1000 核电机组设计上也均采用 18 个月换料方案。与传统的年度换料相比，实施 18 个月换料可以减少大修次数，减少核电厂的集体辐照剂量，提高机组的能力因子，提高燃料组件的卸料燃耗，降低压力容器的中子注量率。通过节约燃料成本和降低乏燃料处置量使电站取得不受外界因素影响的经济效益和环境效益。大亚湾核电厂实施 18 个月换料后，机组安全稳定运行，各项安全性能指标良好，同时积累了丰富的运行经验，取得了良好的社会效益、环境效益和经济效益。

目前辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用传统年度换料方案。为了进一步提高辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组运行的经济性、安全性和环境效益，辽宁红沿河核电有限公司决定拟将 1、2 号机组由目前的年度换料方式变更为 18 个月换料方式。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组拟实施的 18 个月换料改造项目的主要技术服务方为中科华核电技术研究院有限公司

1.3 编制依据

（1）主要法律法规

— 中华人民共和国环境保护法（2015 年 1 月）；

— 中华人民共和国环境影响评价法（2003 年 9 月 1 日）；

— 中华人民共和国放射性污染防治法（2003 年 10 月 1 日）；

— 中华人民共和国固体废物污染防治法（2004 年 12 月 29 日修订）；

— 中华人民共和国海洋环境保护法（2013 年 12 月 28 日修订）。

（2）技术标准和导则

— 电离辐射防护与辐射源安全基本标准（GB18871-2002）；

— 核动力厂环境辐射防护规定（GB6249-2011）；

— 放射性废物管理规定（GB14500-2002）；

— 核电厂放射性液态流出物排放技术要求（GB14587-2011）

— 核电厂低、中水平放射性固体废物暂时贮存技术规定（GB14589-93）；

— 海水水质标准（GB3097-1997）；

— 法国 90 万千瓦压水堆核电站系统设计和建造规则 RCC-P（1991 年版，1995 年修订）。

（3）相关管理和技术文件

— 环境保护部（原国家环保总局）对辽宁红沿河核电厂各阶段环境影响报告书的批复文件；

— 辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组相关设计文件及在该厂址上开展相关研究专题的成果报告；

— 辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料方案专项设计文件；

— 《辽宁红沿河核电厂一期 18 个月换料项目环境影响评价报告技术规范书》；

— 《辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月燃料循环项目环境影响评价工作大纲》和《辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月燃料循环项目环境影响评价质量保证大纲》。

1.4 评价范围和评价标准

1.4.1 评价范围

本专题报告的辐射环境影响评价范围为以辽宁红沿河核电厂 1 号机组反应堆为中心，半径 80km 范围内的区域。

1.4.2 评价标准

（1）正常运行工况下的剂量约束值

按《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）的规定，任何厂址的所有核动力堆向环境释放的放射性物质对公众中任何个人造成的有效剂量，每年必须小于 0.25mSv 的剂量约束值。

针对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组进行评价时确定 1、2 号机组向环境释放的放射性流出物对公众所造成剂量约束值不超过 0.08mSv/a。针对 1~4 号机组的辐射影响，评价时参照已批复环境影响报告书的要求考虑向环境释放的放射性流出物对公众所造成剂量约束值不超过 0.16mSv/a。

（2）事故工况下的剂量控制值

依据国家标准《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）针对设计基准事故的剂量控制要求：

— 在发生一次稀有事故时，非居住区边界上公众在事故后 2h 内以及规划限制区

外边界上公众在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 5mSv 以下，甲状腺当量剂量应控制在 50mSv 以下。

— 在发生一次极限事故时，非居住区边界上公众在事故后 2h 内以及规划限制区外边界上公众在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 0.1Sv 以下，甲状腺当量剂量应控制在 1Sv 以下。

（3）海水中的放射性核素浓度

根据《海水水质标准》（GB3097-1997）的要求，辽宁红沿河核电厂运行期间受纳水体中的放射性核素浓度控制值为：

— ^{60}Co： 0.03Bq/L；

— ^{90}Sr： 4.0Bq/L；

— ^{106}Ru： 0.2Bq/L；

— ^{134}Cs： 0.6Bq/L；

— ^{137}Cs： 0.7Bq/L。

（4）年排放量控制值

《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）6.2 款的规定，核动力厂必须按每堆实施放射性流出物年排放总量的控制。GB6249-2011 规定，对于 3000MW 热功率的轻水反应堆，其单堆控制值如下：

气态放射性流出物：

— 惰性气体： 6×10^{14}Bq/a；

— 碘： 2×10^{10}Bq/a；

— 粒子（半衰期≥8d）： 5×10^{10}Bq/a；

— C-14： 7×10^{11}Bq/a；

— 氚： 1.5×10^{13}Bq/a。

液态放射性流出物：

— 氚： 7.5×10^{13}Bq/a；

— C-14： 1.5×10^{11}Bq/a；

— 其它核素： 5.0×10^{10}Bq/a；

此外，辽宁红沿河核电厂为滨海厂址。GB6249-2011 第 6.8 款规定，对于滨海厂址，槽式排放出口处的放射性流出物中除氚和 C-14 外其他放射性核素浓度不应超过 1000Bq/L。如果浓度超过上述规定，营运单位在排放前必须得到审管部门的批准。

2 18 个月换料技术改造工程分析

2.1 18 个月换料改造项目概况

为了兼顾堆芯设计的先进性、燃料经济性和控制工程风险，辽宁红沿河核电有限公司决定将辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组从目前的传统年度换料变更为 18 个月换料方案。本节对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目做简要描述。

2.1.1 18 个月换料改造项目的主要设计依据和设计准则

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料项目的堆芯燃料管理要求如下：

（1） 循环长度

在确保满足安全性的基础上，燃料管理方案的设计应尽可能的满足电厂对总体经济性和运行灵活性的需求。根据电厂的实际需求，本燃料管理除了需要避免在冬季最冷时刻安排大修，同时还需要统筹考虑四台机组的大修安排，避免大修重叠。

平均三年两次换料，并且整个燃料管理拥有 18 个月换料的能力。

（2） 慢化剂温度系数

反应堆在各种功率水平运行时，慢化剂温度系数必须为负值，使反应堆具有负反馈特性。要求确保各循环在燃料循环寿期初（BOL）、热态零功率（HZP）、控制棒组件全部提出堆芯（ARO）状态下的慢化剂温度系数为负值。

（3） 停堆裕量

堆芯的装载和反应性控制要确保反应性价值最大的一束控制棒卡住堆芯外、反应堆在任一功率水平时，仅用控制棒仍能实现热停堆，并有足够的停堆裕量，以防止出现主蒸汽管道断裂或不可控硼稀释事故导致反应堆重返临界。要求在各循环寿期末的停堆裕量大于 2300pcm。

（4） 堆芯功率分布

为了满足反应堆热工水力设计和事故分析的要求，要求堆芯功率分布满足如下要求：$F_{\Delta H} \leq 1.65$（包括不确定性：1.03×1.04×1.04）。

（5） 燃耗

采用全 M5 AFA3GAA 燃料组件，组件和燃料棒的燃耗限值分别不超过 52GWd/tU 和 57GWd/tU。

2.1.2 堆芯

反应堆堆芯由燃料组件及其它相关组件、围板、堆芯上下支撑板、堆芯吊篮和堆芯测量装置组成。18 个月换料改造不涉及燃料组件和相关部件的机械结构变化，但在堆芯的热工水力设计参数、燃料组件中燃料棒的 U-235 富集度（3.2%提升为 4.45%）、棒束控制和可燃毒物使用等方面进行了设计变更。

（1） 控制棒束

控制棒束组件分为控制棒组和停堆棒组（SA、SB、SC、SD），其中控制棒组又分为功率补偿棒组（G1、G2、N1、N2）和温度调节棒组（R）。

堆芯共布置 61 束控制棒束组件，布置如图 2-1 所示。

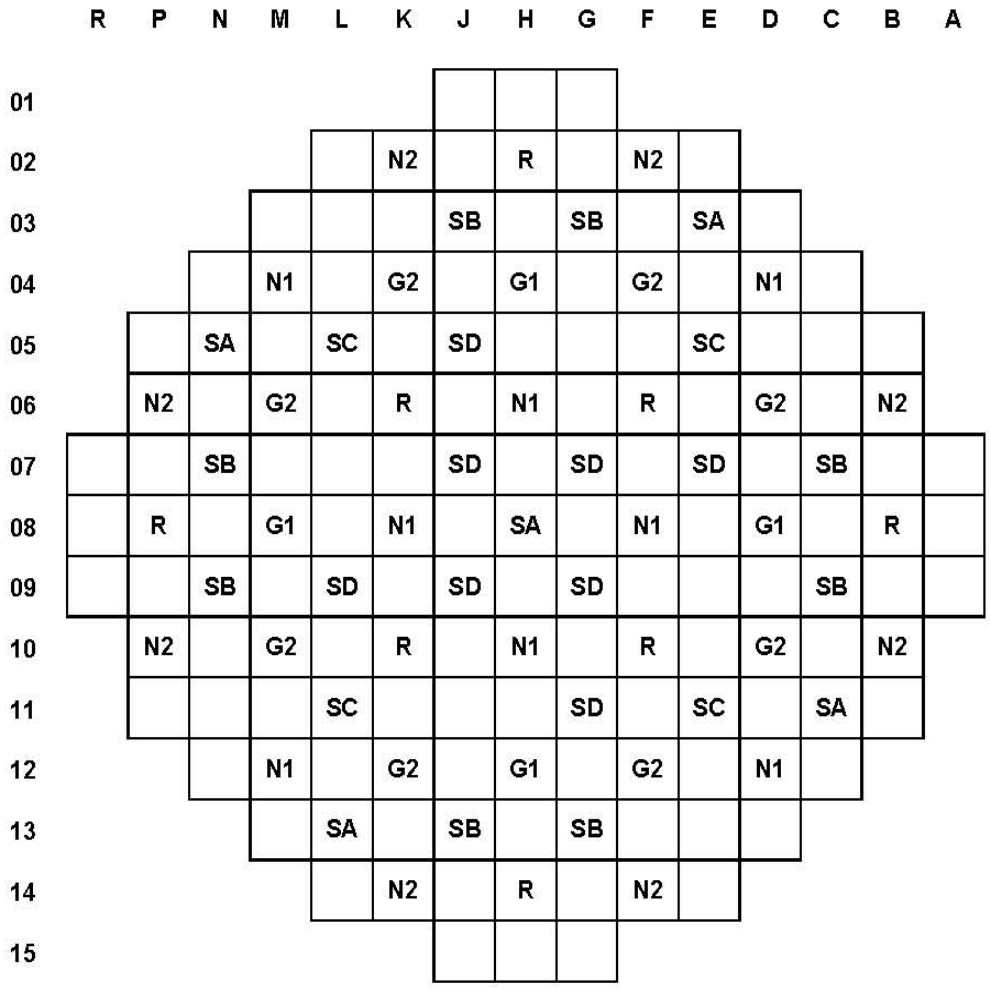


图 2-1 堆芯控制棒束布置示意图

（2） 固体可燃毒物

可燃毒物钆以 UO_2-Gd_2O_3 混合氧化物芯块的形式装到 M5 合金包壳中形成载钆燃料棒（简称钆棒）。除了芯块材料不同，钆棒与燃料棒结构设计相同，其 U-235 富集度为 2.5%，Gd_2O_3 质量分数为 8%。辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目共使用 5 种类型的燃料组件，分别含有 0 根、8 根、16 根、20 根和 24 根钆棒。钆棒的在燃料组件中的布置见图 2-2。

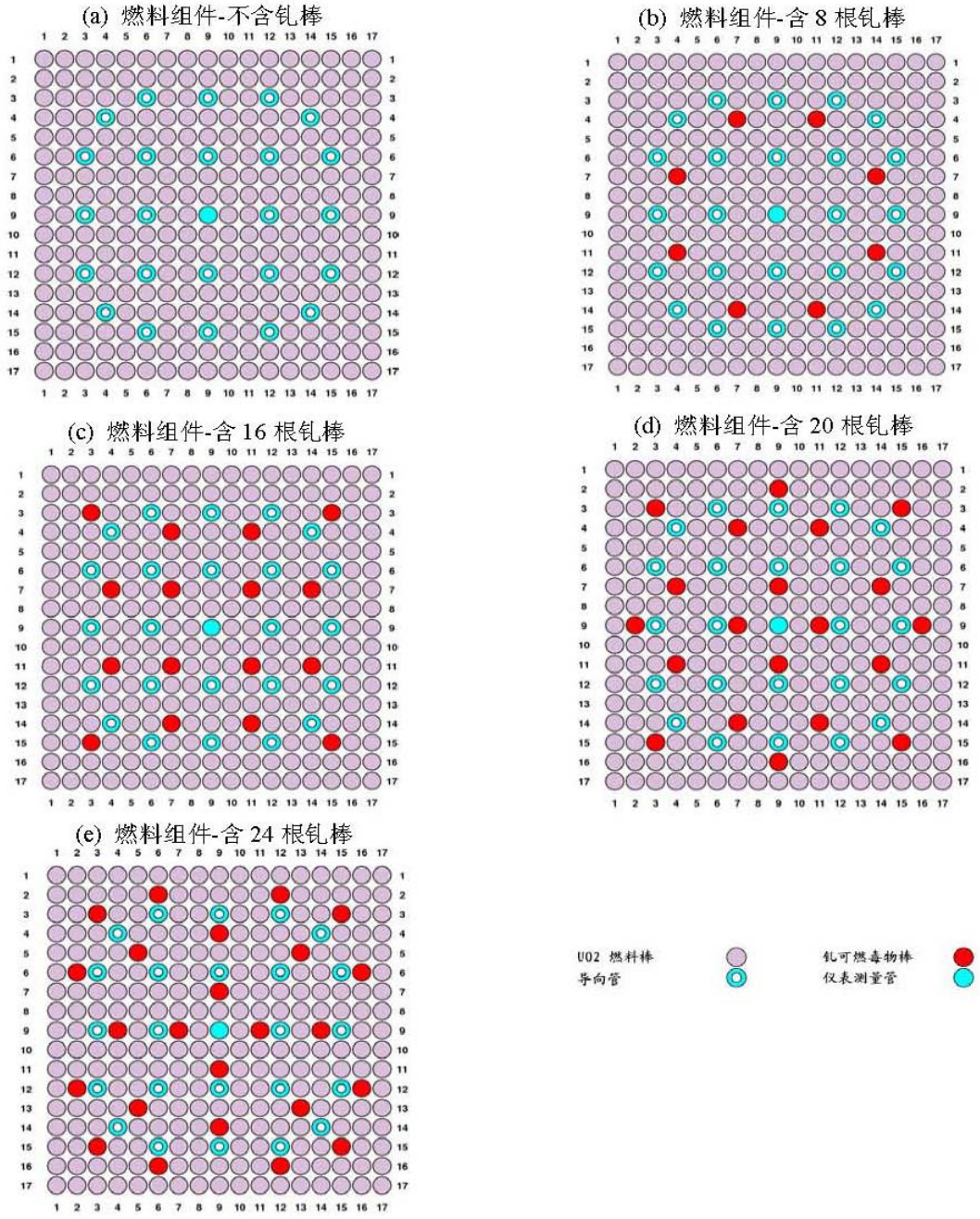


图 2-2　燃料组件中钆棒布置示意图

2.1.3 燃料循环管理策略

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组拟实施的 18 个月换料方案的燃料循环管理策略示意图见图 2-3。

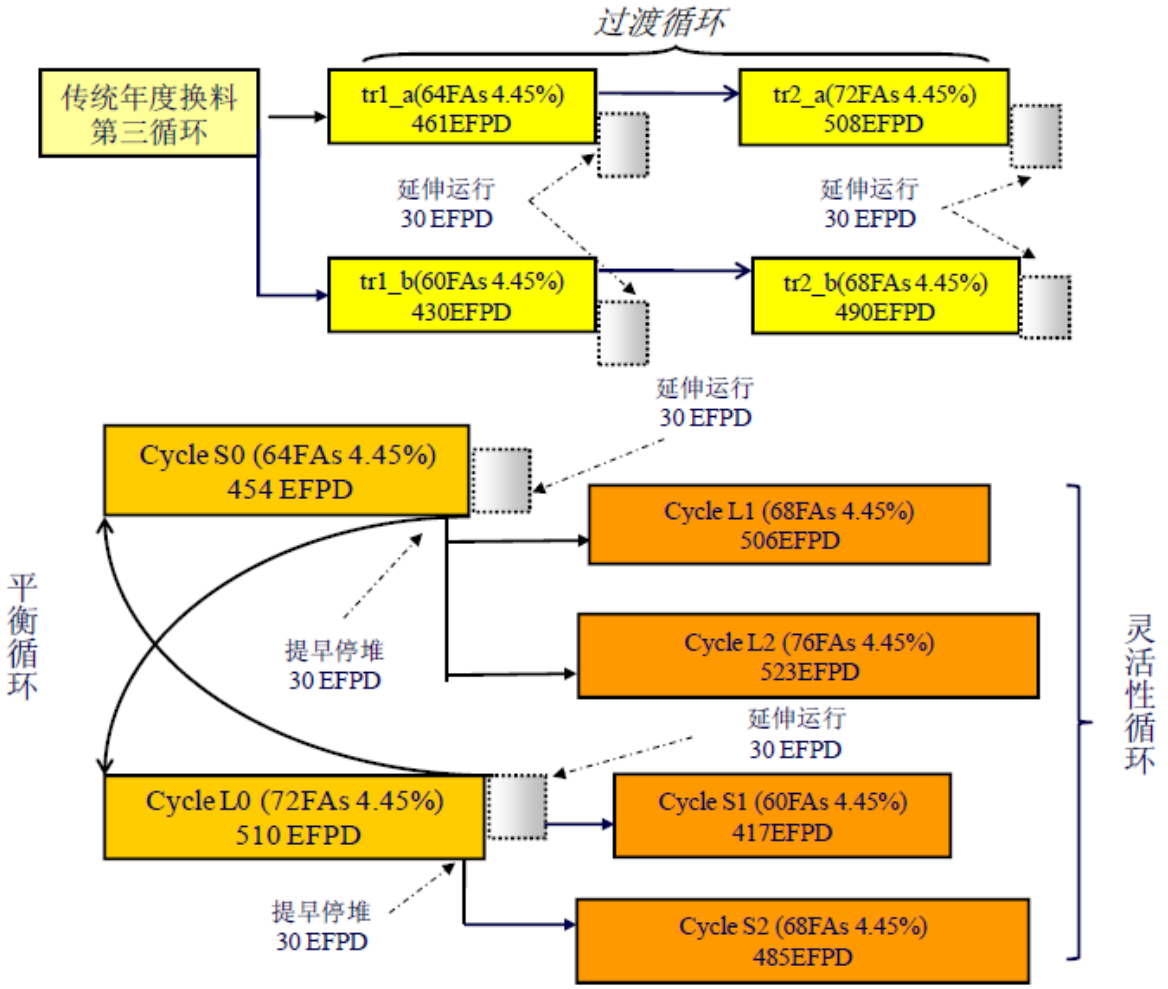


图 2-3 红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料的燃料循环管理策略示意图

（1） 过渡循环

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 月换料的过渡循环接传统年度换料第三循环之后。根据发电规划，1、2 号机组共设计了两套过渡循环：a 方案和 b 方案，每套过渡循环方案又都包括两个过渡循环 a 方案分别为 tr1_a 循环和 tr2_a 循环，b 方案分别为 tr1_b 循环和 tr2_b 循环。

a 方案的第一个过渡循环使用 64 组新燃料组件，第二个过渡循环使用 72 组新燃料组件；b 方案的第一个过渡循环使用 60 组新燃料组件，第二个过渡循环使用 68 组新燃

料组件。过渡循环各批燃料组件数如表 2-1 所示。过渡循环 a 方案的两个过渡循环的堆芯装载图分别如图 2-4（a），b 方案两个过渡循环的堆芯装载图分别如图 2-4（b）。

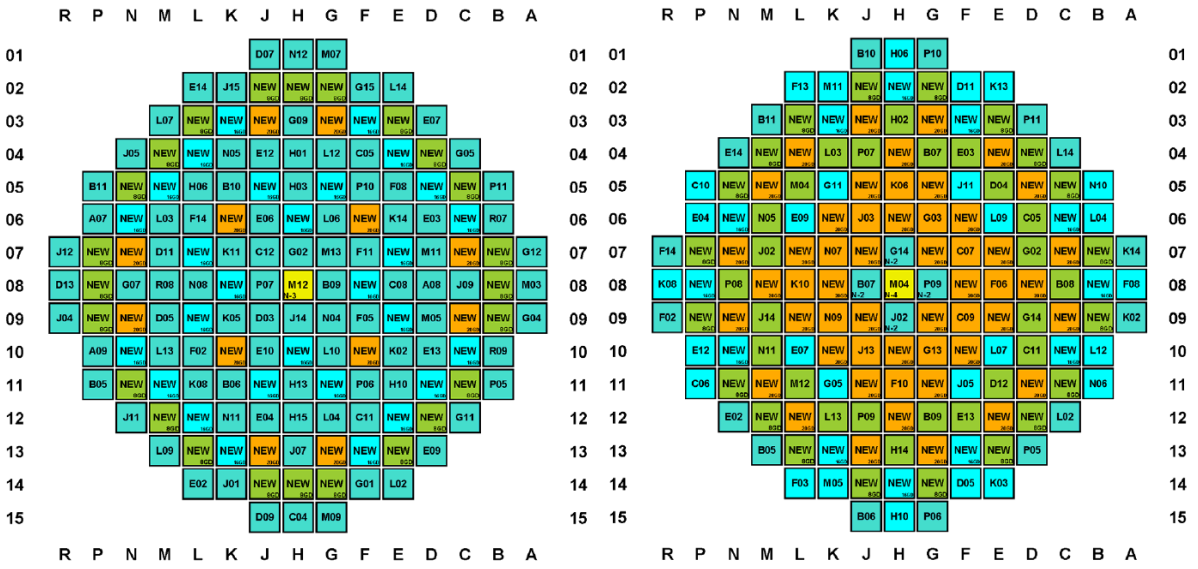
表 2-1　实施 18 个月换料时各过渡循环方案的燃料组件数

批次	组件类型	燃料组件数					
		a 方案			b 方案		
		C3	tr1_a	tr2_a	C3	tr1_b	tr2_b
N	1.8%	1			1		
			1			1	
				1			1
	3.1%	36			36		
	3.1%-12bp	8			8		
	3.1%-16bp	8			8		
N+1	3.2%	52	44		52	52	12
N+2	3.2%	52	48	16	52	44	16
				4			8
N+3	4.45%-8GD		24	24		20	12
	4.45%-16GD		28	28		32	32
	4.45%-20GD		12	12		8	8
N+4	4.45%-8GD			20			24
	4.45%-16GD			12			16
	4.45%-20GD			40			28

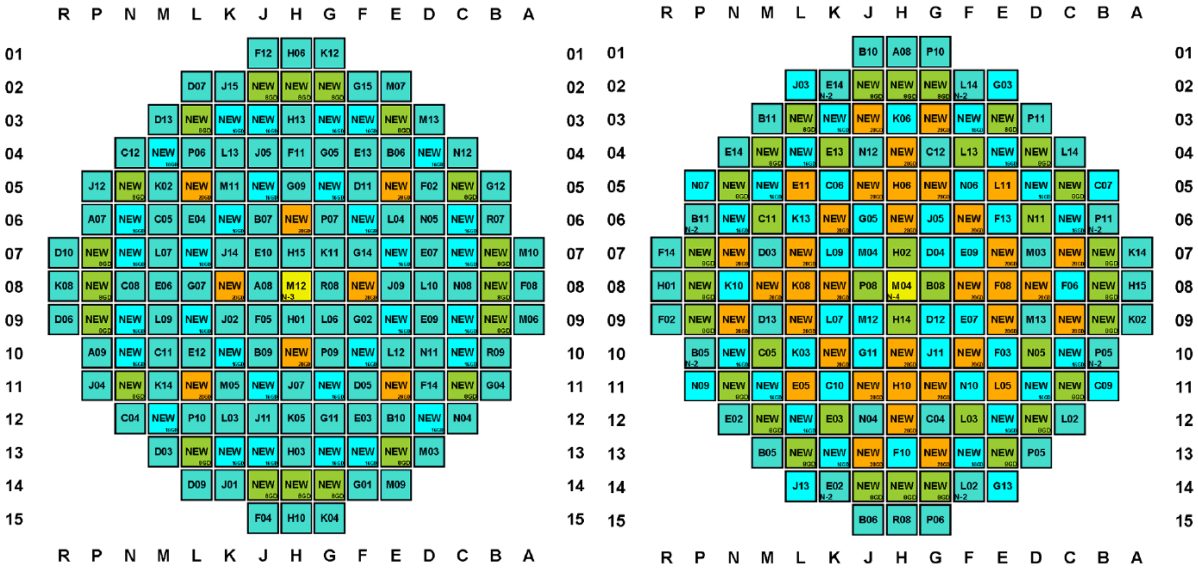
（2） 平衡循环

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料的平衡循环采用长短交替式的长（L0）、短（S0）循环。

新组件中 UO_2 燃料棒中 U-235 的富集度均为 4.45%。平衡循环各批燃料组件数见表 2-2 所示。平衡循环的堆芯装载图见图 2-5 所示。



（a）a 方案堆芯装载图（左：tr1_a，右：tr2_a）

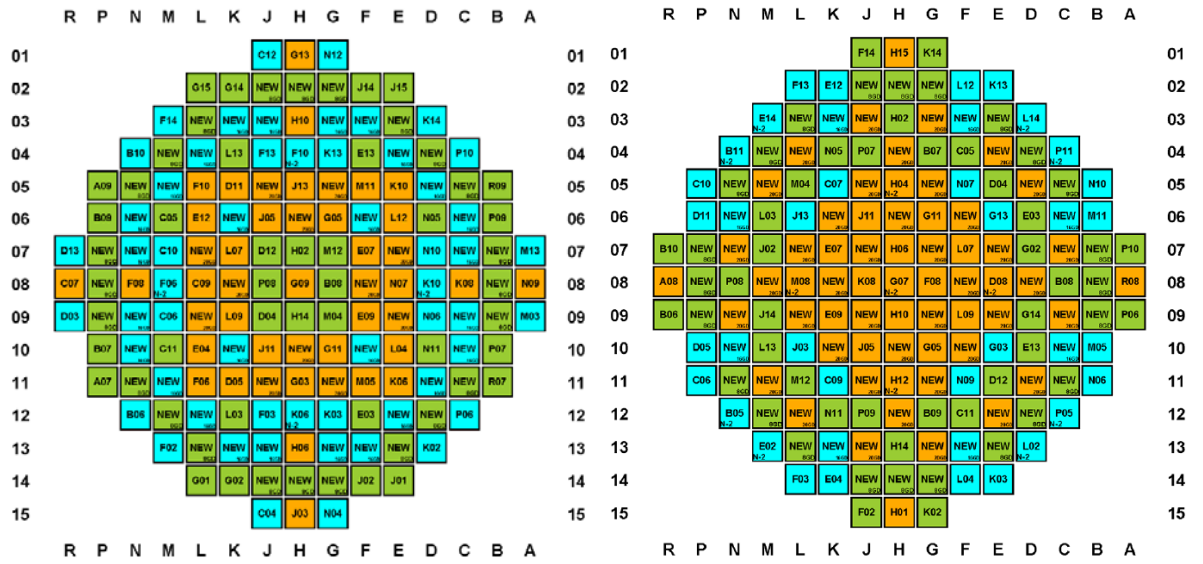


（b）b 方案堆芯装载图（左：tr1_b，右：tr2_b）

图 2-4　18 个月换料方案过渡循环堆芯装载方案图

表 2-2　18 个月换料方案平衡循环各批燃料组件数

批次	组件类型	燃料组件数目			
		平衡循环 S0	平衡循环 L0	平衡循环 S0	平衡循环 L0
N	4.45%-8GD				
	4.45%-16GD	8			
	4.45%-20GD				
N+1	4.45%-8GD	8			
	4.45%-16GD				
	4.45%-20GD				
N+2	4.45%-8GD				
	4.45%-16GD	8			
			8	8	
		4			
	4.45%-20GD				
N+3	4.45%-8GD	24	8	8	
	4.45%-16GD	8			
	4.45%-20GD	33	4		
			5		
N+4	4.45%-8GD	24	24		
	4.45%-16GD	28	24	8	
					8
				4	
	4.45%-20GD	20	20		
N+5	4.45%-8GD		24	24	8
	4.45%-16GD		8	8	
	4.45%-20GD		40	33	4
					5
N+6	4.45%-8GD			24	24
	4.45%-16GD			28	24
	4.45%-20GD			12	12
N+7	4.45%-8GD				24
	4.45%-16GD				8
	4.45%-20GD				40



（a）（S0）　　（b）（L0）

图 2-4　18 个月换料方案平衡循环的堆芯装载方案图

（3） 灵活循环

通用燃料管理具有一定的灵活性，以使整个燃料管理策略能尽可能包络各种现实情况。在辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组拟实施的 18 个月换料的燃料管理策略里，基于平衡循环方案，对灵活循环进行了一定程度的灵活性研究：灵活性循环在平衡循环提前 30EFPD 停堆或采用延伸运行方式延长燃耗运行 30EFPD 后的基础上考虑了±4 组燃料组件的情形。灵活性循环包括 L1、L2 和 S1、S2 共 4 个循环。

— L1 循环是在平衡循环 S0 提早 30EFPD 停堆的基础上，使用了 68（72-4）组新组件的长循环。

— L2 循环是在平衡循环 S0 提早 30EFPD 停堆的基础上，使用了 76（72+4）组新组件的长循环。

— S1 循环是在平衡循环 L0 采用延伸运行（Stretch-out）方式延长燃耗运行 30EFPD 停堆的基础上，使用了 60（64-4）组新组件的短循环。

— S2 循环是在平衡循环 L0 提早 30EFPD 停堆的基础上，使用了 68（64+4）组新组件的短循环。

灵活循环各批燃料组件数见表 2-3 所示，灵活循环 L1、L2 和 S1、S2 的堆芯装载图如图 2-6 所示。

表 2-3　18 个月换料方案灵活循环各批燃料组件数

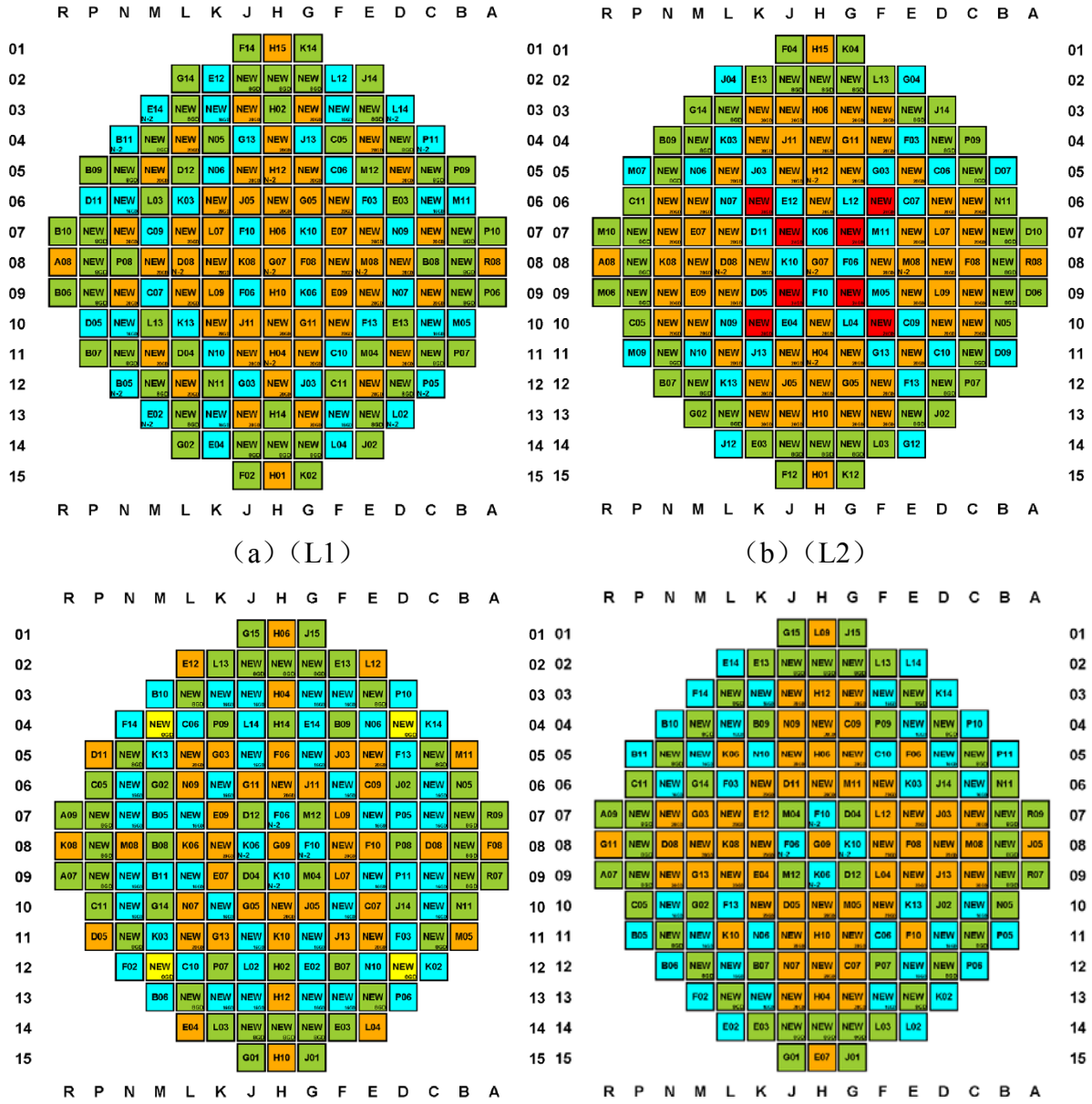
（L1、L2）

批次	组件类型	燃料组件数目					
		平衡循环 L0	平衡循环 S0	灵活循环 L1	平衡循环 L0	平衡循环 S0	灵活循环 L2
N	4.45%-8GD						
	4.45%-16GD						
		8	8		8	8	
	4.45%-20GD						
N+1	4.45%-8GD	8	8		8	8	
	4.45%-16GD						
	4.45%-20GD	4			4		
		5			5		
N+2	4.45%-8GD	24			24	8	
	4.45%-16GD	24	8		24		
				8		4	
			4				
	4.45%-20GD	12			12		
N+3	4.45%-8GD	24	24	8	24	24	8
	4.45%-16GD	8	8		8	8	8
	4.45%-20GD	40	33	4	40	33	4
				5			5
N+4	4.45%-8GD		24	24		24	16
	4.45%-16GD		28	28		28	28
	4.45%-20GD		12	12		12	12
N+5	4.45%-8GD			24			24
	4.45%-16GD			8			
	4.45%-20GD			36			44
	4.45%-24GD						8

表 2-3　18 个月换料方案灵活循环各批燃料组件数

（S1、S2）

批次	组件类型	燃料组件数目					
		平衡循环 S0	平衡循环 L0	灵活循环 S1	平衡循环 S0	平衡循环 L0	灵活循环 S2
N	4.45%-8GD						
	4.45%-16GD						
		8			8		
	4.45%-20GD						
N+1	4.45%-8GD	8			8		
	4.45%-16GD						
	4.45%-20GD						
N+2	4.45%-8GD						
	4.45%-16GD	8			8		
			8			8	
		4			4		
	4.45%-20GD						
N+3	4.45%-8GD	24	8	8	24	8	8
	4.45%-16GD	8			8		
	4.45%-20GD	33	4		33	4	
			5			5	
N+4	4.45%-8GD	24	24		24	24	
	4.45%-16GD	28	24	16	28	24	16
					28		
				4	28		4
	4.45%-20GD	12	12		12	12	
N+5	4.45%-8GD		24	24		24	20
	4.45%-16GD		8	8		8	8
	4.45%-20GD		40	37		40	33
N+6	4.45%-0GD			4			
	4.45%-8GD			20			24
	4.45%-16GD			28			16
	4.45%-20GD			8			28



（a）（L1）　（b）（L2）

（c）（S1）　（d）（S2）

图 2-5　18 个月换料方案灵活循环的堆芯装载方案图

（4） 延伸运行

堆芯在寿期末时，一回路的硼浓度接近零，通过降低一回路温度和降低堆芯功率引入正的反应性，以使反应堆继续保持在较高的功率水平上运行。在过渡循环和平衡循环自然循环的寿期末，考虑了 30EFPD 的延伸运行，以满足电网对循环长度灵活性的要求。

2.2 18 个月换料方案实施对相关系统的影响

本项目设计单位在辽宁红沿河一期 1、2 号机组年度换料初始设计基础上，采用 18 月换料的一回路参数来对核电厂系统进行了分析和论证，以判断受影响的系统在新的燃料管理模式下是否仍然满足相关的功能和容量要求，下面根据《红沿河一期 18 月换料（1、2 号机组）系统论证》的专题研究成果，简要描述论证结论如下：

（1） RCV系统容量能够满足18个月换料的要求；

（2） 关于REA系统：

a） 硼酸溶液贮存箱的硼浓度和容积可满足18个月换料的要求。2个专用硼酸溶液贮存箱（1-2R004BA）的液位整定值需要进行修改；

b） 从设计基准角度来看，贮存水箱（9REA001BA，9REA002BA）的容量不足；当一个水箱处于运行时，补给水应能从ASG系统或TEP系统供给另一水箱。由于REA系统除盐水部分不具有安全功能，机组安全不会受到影响；

c） 硼酸输送泵能力满足18个月换料的要求；

d） 硼酸溶液配料箱（9REA005BA）的容量可满足18个月换料的要求

e） 证明防硼稀释T1design和T2design取6小时和60小时可满足18个月换料的要求。

（3） RRA系统容量可以满足18个月换料的要求；

（4） ASG系统容量满足18个月换料的要求；

（5） 根据事故分析结果，EAS系统容量可以满足18个月换料的要求；

（6） 对于ETY系统，经分析氢气复合器投入时间为LOCA后7天（保守估计），大气含氢浓度达到3%以前，有必要将氢气复合器投入使用；

（7） 对于PTR系统，正常运行工况下一台热交换器和泵运行时，乏燃料水池温度低于限值50℃。异常运行工况下一台热交换器和泵运行时，乏燃料水池温度低于限值80℃；两台泵和热交换器同时运行时，乏燃料水池温度低于限值60℃。因此，PTR系统容量满足18个月换料的要求；

（8） RRI和SEC系统的容量都能满足18个月换料的要求；

（9） RIS系统的容量能够满足18个月换料的要求，失水事故后冷热同时注入的切换时间为5~8.2小时；

（10） REN系统中硼计量仪的测量量程满足18个月换料的要求；

（11） 对于TEP系统，分析得到正常运行期间一天中产生的最大废液量为163.1m^3/d（对应于两台机组在燃料循环的85%的时间内，以12-3-6-3功率台阶为50%FP的日负荷跟踪运行，两台机组换料周期错开4个月），其废液量低于设计值168m^3/d。TEP系统的容量能够满足18个月换料的要求；

（12） TEG系统在基本负荷运行工况和负荷跟踪运行工况时，衰变箱的容量可满足设计要求。因此，TEG系统的容量足以满足18个月换料的要求；

（13） DVN系统能保持核辅助厂房相关“硼”房间处于要求温度，防止硼酸溶液结晶；

（14） APD系统满足18个月换料的要求；

（15） RGL系统满足18个月换料的要求；

（16） RPN系统满足18个月换料的要求；

（17） RIC系统满足18个月换料的要求，系统的相关定值需要调整；

（18） RPR系统满足18个月换料的要求，系统的相关定值需要调整。

2.3 堆芯积存量

采用 ORIGN-S 程序计算了辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目的堆芯积存量。

ORIGEN-S 计算所需的输入主要包括：

— 裂变核素衰变数据、反应截面（包括裂变份额）和光子数据库；

— 新燃料组件成分（富集度）；

— 燃料组件辐照的时间和比功率；

— 乏燃料衰变时间（燃料卸出堆芯后，可以放置和衰变一段时间（通常为停堆大修时间）后再入堆辐照）。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料燃料管理策略中包含有平衡循环和灵活性循环，为了保证燃耗的包络性，平衡循环考虑了延伸运行（加 30EFPD）的情形。通过追溯每个组件的燃耗历史，得到平衡循环和灵活性循环中经历不同循环次数的组件在寿期初和寿期末的燃耗。

计算时采用了如下主要假定：

— 反应堆热功率 2895MW；

— 堆芯燃料组件数量为 157，每个组件所含铀质量为 461kg；

— 新燃料组件富集度为 4.45%；

— 堆芯根据燃耗分为三个燃料区；

— 三个区的燃耗用包络燃耗值代替，其中经历 1 个循环的组件：0<批燃耗<29000MWd/tU；对于经过 2 个循环的组件，18000MWd/tU<批燃耗<51000MWd/tU；对于经历 3 个或 4 个循环的组件：31000MWd/tU<批燃耗<52000MWd/tU。对于每个包络燃耗区间，每种裂变产物核素取最大放射性活度用于计算结果；

— 计算时不考虑不确定性。

计算得到的堆芯积存量见表 2-4。

表 2-4　辽宁红沿河核电厂 18 个换料方案下的堆芯积存量

核素	堆芯积存量（GBq）	核素	堆芯积存量（GBq）
I-131	2.86E+09	Rb-89	4.30E+09
I-132	4.19E+09	Xe-131m	4.11E+07
I-133	6.09E+09	Xe-133	6.04E+09
I-134	7.04E+09	Xe-133m	1.87E+08
I-135	5.76E+09	Xe-135	1.93E+09
Kr-83m	4.82E+08	Xe-135m	1.25E+09
Kr-85	3.61E+07	Xe-138	5.75E+09
Kr-85m	1.08E+09	Cs-134	7.77E+08
Kr-87	2.23E+09	Cs-136	2.25E+08
Kr-88	3.16E+09	Cs-137	4.51E+08
Rb-88	3.23E+09	Cs-138	6.01E+09

2.4 冷却剂活度谱

2.4.1　一回路冷却剂活度谱

反应堆运行时核燃料中产生的气态和固态放射性裂变产物在元件中迁移并积存，

当发生包壳破损情况后以一定的几率释放到冷却剂中，构成冷却剂中裂变产物源项，包括惰性气体和卤素等。

此外，一方面由于堆内构件因受到中子照射而具有放射性，在发生腐蚀后释放到冷却剂中；另一方面一回路管道和设备的材料由于氧化和腐蚀进入到冷却剂中，随冷却剂流经堆芯受到堆芯及其相邻区域的中子照射后具有放射性，主要有 Cr-51、Mn-54、Fe-59、Co-58 和 Co-60 等核素。这些构成了冷却剂中的腐蚀产物源项。

（1） 裂变产物

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后的一回路裂变产物活度谱由 PROFIP5.1 计算。该软件建立在法国 PWR 燃料组件实验和电站功率运行经验的反馈基础上，由法国 CEA 开发并验证。在 PROFIP 的计算模型中，裂变产物在燃料中产生并随后进入反应堆冷却剂的模型分为四个连续的过程：

— 通过裂变、放射性衰变或中子俘获而实际产生的裂变产物；

— 由各种机理，例如晶间扩散和俘获、反冲和击出等造成的裂变产物从燃料中的释放；

— 裂变产物扩散到燃料组件包壳，并通过包壳缺损释入反应堆冷却剂；

— 考虑了反应堆运行参数（净化率、在 RCV 系统和稳压器中的分配、泄漏率等）后的反应堆冷却剂系统中裂变产物的总估算。

根据辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月燃料循环管理策略的燃料管理方案，平衡循环为 S0（54EFPD）和 L0（510EFPD）交替。在源项计算中将使用 PROFIP5.1 模拟共 8 个循环，并将第 3 至第 11 循环寿期末核素比活度的最大值将提取作为源项值。循环模拟策略见表 2-5。计算一回路冷却剂活度谱所采用的主要参数见表 2-6。

表 2-5 PROFIP 计算循环模拟策略

循环		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
EFPD		510	454	510	454	510	454	510	454
批次	**I**	new	i	ii	new	i	ii	new	i
	II	new	i	new	i	ii	new	i	ii
	III	new	new	i	ii	new	i	ii	new

注：根据组件燃耗将堆芯组件分成 3 批：
（1）“new”对应第一批；（2）“i” 对应第二批；（3）“ii” 对应第三批。

表 2-6　一回路冷却剂活度谱计算主要参数

反应堆参数			
回路数目	3	稳压器气相容积（m^3）	16.0
每环路最佳估算流量（m^3/h）	24254	RCV 容控箱气相容积（m^3）	5.3
热段表面积（m^2）	42.80	稳压器液相容积（m^3）	25.0
U 型支路和冷段表面积（m^2）	104.04	RCV 容控箱液相容积（m^3）	3.6
蒸汽发生器一次侧表面积（m^2）	15344.7	一回路容积（不包括稳压器）（m^3）	247
主冷却剂在堆入口处的温度（°C）	293.3	主冷却剂压力（bar）	155
燃料参数（冷态）			
轴向分段	7	包壳内径（cm）	0.836
堆芯径向分区	3	芯块高度（cm）	1.346
堆芯总燃料棒数	41448	芯块直径（cm）	0.8192
铀装量（t）	71.7	燃料密度（g/cm^3）	10.41
活性区高度（cm）	365.76	燃料中 U-235 初始富集度（%）	4.45
包壳外径（cm）	0.95	包壳表面铀沾污量（g）	1 / 3
运行参数			
RCV 下泄流量（正常运行）（t/h）	13.6	主冷却剂寿期初硼浓度（ppm）	1918.7（L0循环）
RCV 阳床除盐器流量（t/h）	1.36		1835.5（S0循环）
平均线功率密度（W/cm）	186		
混床树脂效率	0.90	主冷却剂寿期末硼浓度（ppm）	10.5（L0循环）
阳床树脂效率	0.90		10.3（S0循环）
包壳破口尺寸（μm）	34		

PROFIP 计算时采用 34μm 的破口尺寸假设。

计算一回路冷却剂活度谱时仍考虑 0.55、4.44 和 37GBq/t I-131 当量三种情况。

分别按照如下方法对一回路裂变产物谱进行了计算：

— 正常运行工况：0.55GBq/t I-131 当量比活度

对于裂变产物稳态值，在 1 根燃料棒包壳破损、34μm 破口尺寸的假设下，使用 PROFIP 5.1 计算并归一化、再考虑 1g 包壳表面铀沾污的假设条件下使得 I-131 当量比活度为 0.55GBq/t。瞬态值参考岭澳核电站 3、4 号机组 18 个月换料方案设计的峰值因子。

— 异常运行工况：4.44GBq/t I-131 当量比活度

对于裂变产物稳态值，在 10 根燃料棒包壳破损、34μm 破口尺寸的假设下，使用 PROFIP 5.1 计算并归一化、再考虑 3g 包壳表面铀沾污的假设条件下使得 I-131 当量比活度为 4.44GBq/t I-131。瞬态值参考岭澳核电站 3、4 号机组 18 个月换料方案设计的峰值因子。

— 异常运行工况：37GBq/t I-131 当量比活度

对于裂变产物稳态值，在 0.25%包壳破损率（相当于 104 根燃料棒破损）、34μm 破口尺寸的假设下，使用 PROFIP 5.1 计算并归一化、再考虑 3g 包壳表面铀沾污的假设条件下使得 I-131 当量比活度为 37GBq/t。瞬态值参考岭澳核电站 3、4 号机组 18 个月换料方案设计的峰值因子。

计算得到的一回路冷却剂裂变产物活度谱见表 2-7。

表 2-7　一回路冷却剂裂变产物活度谱（3 张）

（0.55GBq/t I-131 当量比活度）

惰性气体、碘和铯的活度谱

核素	稳态运行比活度（GBq/t）	瞬态比活度（GBq/t）
Kr-85m	4.92E-01	1.12E+00
Kr-85	6.14E-03	6.14E-03
Kr-87	5.83E-01	1.27E+00
Kr-88	1.11E+00	2.71E+00
Xe-133m	2.54E-01	5.48E-01
Xe-133	7.88E+00	1.53E+01
Xe-135	3.77E+00	4.96E+00
Xe-138	8.31E-01	2.37E+00
总惰性气体	1.49E+01	2.83E+01
I-131	3.77E-01	9.64E+00
I-132	3.04E-01	3.51E+00
I-133	5.27E-01	4.18E+00
I-134	1.75E-01	2.25E+00
I-135	2.74E-01	2.24E+00
总碘	1.66E+00	2.18E+01
I-131 当量	5.50E-01	1.11E+01
Cs-134	1.59E-02	7.97E+00
Cs-136	7.89E-03	4.68E-01
Cs-137	1.86E-02	7.73E+00
Cs-138	8.32E-01	2.45E+00

其他裂变产物活度谱

核素	比活度（GBq/t）	核素	比活度（GBq/t）
Sr-89	4.76E-04	Te-131 m	2.25E-04
Sr-90	6.76E-06	Te-131	2.72E-02
Y-90	3.91E-07	Te-132	9.16E-04
Y-91	1.26E-05	Te-134	3.75E-02
Sr-91	5.76E-03	Ba-140	1.55E-03
Sr-92	1.31E-02	La-140	3.80E-05
Zr-95	3.54E-05	Ce-141	5.97E-05
Nb-95	1.49E-05	Ce-143	9.36E-04
Mo-99	2.11E-02	Pr-143	1.48E-05
Tc-99 m	7.73E-04	Ce-144	1.37E-05
Ru-103	5.87E-05	Pr-144	1.16E-05
Rh-106	7.65E-06		

表 2-7　一回路裂变产物活度谱（3 张）

（4.44GBq/t I-131 当量比活度）

惰性气体、碘和铯的活度谱

核素	稳态运行比活度（GBq/t）	瞬态比活度（GBq/t）
Kr-85m	4.08E+00	9.09E+00
Kr-85	5.17E-02	6.08E-02
Kr-87	4.77E+00	1.14E+01
Kr-88	9.19E+00	2.08E+01
Xe-133m	2.12E+00	4.41E+00
Xe-133	6.61E+01	1.25E+02
Xe-135	3.12E+01	4.21E+01
Xe-138	6.18E+00	1.77E+01
总惰性气体	1.24E+02	2.31E+02
I-131	3.15E+00	7.95E+01
I-132	1.99E+00	2.21E+01
I-133	4.13E+00	3.14E+01
I-134	6.29E-01	8.19E+00
I-135	1.76E+00	1.32E+01
总碘	1.17E+01	1.54E+02
I-131 当量	4.44E+00	8.96E+01
Cs-134	1.34E-01	6.42E+01
Cs-136	6.52E-02	3.87E+00
Cs-137	1.56E-01	6.29E+01
Cs-138	6.14E+00	1.80E+01

其他裂变产物活度谱

核素	比活度（GBq/t）	核素	比活度（GBq/t）
Sr-89	3.73E-03	Te-131 m	9.32E-04
Sr-90	5.52E-05	Te-131	8.19E-02
Y-90	3.21E-06	Te-132	5.48E-03
Y-91	9.89E-05	Te-134	1.13E-01
Sr-91	1.93E-02	Ba-140	9.78E-03
Sr-92	4.04E-02	La-140	2.77E-04
Zr-95	1.87E-04	Ce-141	2.59E-04
Nb-95	1.24E-04	Ce-143	2.88E-03
Mo-99	6.63E-02	Pr-143	1.20E-04
Tc-99 m	2.51E-03	Ce-144	9.29E-05
Ru-103	2.50E-04	Pr-144	8.72E-05
Rh-106	4.60E-05		

表 2-7　一回路裂变产物活度谱（3 张）

（37GBq/t I-131 当量比活度）

惰性气体、碘和铯的活度谱

核素	稳态运行比活度（GBq/t）	瞬态比活度（GBq/t）
Kr-85m	3.45E+01	7.67E+01
Kr-85	4.40E-01	5.17E-01
Kr-87	4.00E+01	9.59E+01
Kr-88	7.75E+01	1.76E+02
Xe-133m	1.80E+01	3.75E+01
Xe-133	5.61E+02	1.06E+03
Xe-135	2.63E+02	3.55E+02
Xe-138	4.92E+01	1.41E+02
总惰性气体	1.04E+03	1.94E+03
I-131	2.67E+01	6.74E+02
I-132	1.45E+01	1.62E+02
I-133	3.39E+01	2.58E+02
I-134	1.83E+00	2.39E+01
I-135	1.26E+01	9.50E+01
总碘	8.96E+01	1.21E+03
I-131 当量	3.70E+01	7.54E+02
Cs-134	1.14E+00	5.46E+02
Cs-136	5.50E-01	3.26E+01
Cs-137	1.33E+00	5.35E+02
Cs-138	4.86E+01	1.43E+02

其他裂变产物活度谱

核素	比活度（GBq/t）	核素	比活度（GBq/t）
Sr-89	3.05E-02	Te-131 m	3.92E-03
Sr-90	4.63E-04	Te-131	8.53E-02
Y-90	2.70E-05	Te-132	3.74E-02
Y-91	8.11E-04	Te-134	1.21E-01
Sr-91	4.31E-02	Ba-140	6.98E-02
Sr-92	5.35E-02	La-140	2.18E-03
Zr-95	1.13E-03	Ce-141	1.20E-03
Nb-95	1.05E-03	Ce-143	3.77E-03
Mo-99	1.02E-01	Pr-143	9.98E-04
Tc-99m	4.70E-03	Ce-144	6.97E-04
Ru-103	1.11E-03	Pr-144	6.98E-04
Rh-106	3.15E-04		

（2） 腐蚀产物

反应堆冷却剂系统中腐蚀产物主要由于堆芯及一回路冷却剂中的材料受中子照射因活化而产生放射性，受燃料管理方案影响不是很大。本项目腐蚀产物源项参考岭澳核电站 3、4 号机组 18 个月换料方案设计。腐蚀产物活度谱见表 2-8。

表 2-8 一回路冷却剂腐蚀产物活度谱

正常运行工况（0.55GBq/t I-131 当量）			
核素	比活度 （GBq/t）		
	稳态运行	瞬态运行	冷停堆
Cr-51	5.9E-3	1.9E-1	3.7
Mn-54	6.1E-4	5.1E-1	3.7
Fe-59	1.0E-4	1.9E-2	1.9
Co-58	2.6E-2	1.5	230
Co-60	3.9E-2	1.5E-1	11
Ag-110m	6.0E-3	1.2E-1	2.0E-1
Sb-122	1.2E-3	1.2E-1	7.1
Sb-124	1.0E-2	2.0E-1	37
异常运行工况（4.44 及 37GBq/t I-131 当量）			
核素	比活度 （GBq/t）		
	稳态运行	瞬态运行	冷停堆
Cr-51	1.8E-2	1.9E-1	3.7
Mn-54	1.8E-3	5.1E-1	3.7
Fe-59	3.0E-4	1.9E-2	1.9
Co-58	7.7E-2	1.5	400
Co-60	1.2E-1	1.5E-1	25
Ag-110m	1.8E-2	1.2E-1	8.0E-1
Sb-122	1.1E-1	1.1	10
Sb-124	3.0E-2	2.0E-1	55

2.4.2 二回路冷却剂活度谱

二回路系统的污染是由蒸汽发生器传热管束处一回路冷却剂向二回路系统的泄漏

造成的。二回路中发生泄漏的蒸汽发生器中的带放射性蒸汽和惰性气体与另外两台蒸汽发生器中的蒸汽均匀混合，经汽轮机膨胀做功后进入冷凝器。在冷凝器中，蒸汽中所有惰性气体和小部分的碘（碘的份额与汽水分配因子有关）从冷凝器抽真空系统向大气排放。其他的放射性蒸汽全部被冷凝成液体后经过凝结水除盐器回到给水系统。但二回路中的凝结水除盐器只用来处理化学水质，不减少水中的放射性活度。二回路的泄漏主要发生在冷凝器后端的给水系统中。

二回路系统产生的放射性废液主要由不回收的蒸汽发生器排污和二回路系统泄漏产生。二回路系统泄漏是连续发生的，而蒸汽发生器排污的不回收废液则间断产生。设计时为了假设一种更不利的工况，假定蒸汽发生器排污有 2 次（于出现泄漏后的 1 个月末和 2 个月末时），在这两次排污期间，蒸汽发生器水中所包含的总活度未经处理即通过蒸汽发生器排污系统（APG）向核岛废液排放系统（TER）排放。

在计算二回路源项时保守地假设其中的三台蒸汽发生器均存在初始泄漏。在计算二回路源项时，取单台蒸汽发生器中一次侧冷却剂向二次侧的初始泄漏率为 0.5kg/h。假设蒸汽发生器的泄漏率在整个燃料循环周期末 2 个月内线性变化，反应堆冷却剂在该期间向二回路的泄漏率从 1.5kg/h 增加到 73.5kg/h，其他时间泄漏率恒定为 1.5kg/h。

对于 Case A，考虑燃料循环周期中一回路冷却剂放射性浓度为 0.55GBq/t I-131 当量，对于 Case B，认为一回路冷却剂放射性浓度在前 1/4 燃料循环周期内为 0.55GBq/tI-131 当量，在中间的 1/2 燃料循环周期内为 4.44GBq/t I-131 当量，在最后的 1/4 燃料循环周期内为 37GBq/t I-131 当量。

二回路冷却剂活度谱计算的主要参数包括：

— 三台蒸汽发生器内水装量：48.1t×3 t；

— 一回路的初始泄漏率：第一次排污前：1.5E-03 t/h；

— 第二次排污前：3.75E-02 t/h；

— 一回路泄漏率的变化系数：4.8E-05 t/h^2；

— 衰变常数：1/h；

— 三台蒸汽发生器的排污率：16.6×3 t/h；

— 二回路水泄漏率：22 t/h；

— 蒸汽发生器中蒸汽的质量流量：1936.6×3 t/h；

— 蒸汽发生器中的蒸汽携带因子：惰性气体：100%；碘：1%；其他裂变产物及

腐蚀产物：0.25%；

— 冷凝器中碘的汽水分配因子：10^{-4}。

二回路冷却剂活度谱计算结果见表 2-9。

表 2-9　二回路水和蒸汽中放射性核素的最大放射性浓度

单位：GBq/t

核素	Case A		Case B		核素	Case A		Case B	
	水相	气相	水相	气相		水相	气相	水相	气相
Kr-85m	—	6.22E-06	—	4.36E-04	Nb-95	2.43E-08	6.07E-11	1.71E-06	4.28E-09
Kr-85	—	7.77E-08	—	5.57E-06	Mo-99	3.34E-05	8.34E-08	1.61E-04	4.03E-07
Kr-87	—	7.38E-06	—	5.06E-04	Tc-99m	9.23E-07	2.31E-09	5.61E-06	1.40E-08
Kr-88	—	1.40E-05	—	9.80E-04	Ru-103	9.57E-08	2.39E-10	1.81E-06	4.52E-09
Xe-133m	—	3.21E-06	—	2.28E-04	Rh-106	1.25E-08	3.13E-11	5.15E-07	1.29E-09
Xe-133	—	9.97E-05	—	7.10E-03	Te-131m	3.42E-07	8.56E-10	5.96E-06	1.49E-08
Xe-135	—	4.77E-05	—	3.33E-03	Te-131	7.02E-06	1.75E-08	2.20E-05	5.50E-08
Xe-138	—	1.05E-05	—	6.22E-04	Te-132	1.46E-06	3.64E-09	5.94E-05	1.49E-07
I-131	6.07E-04	6.07E-06	4.30E-02	4.30E-04	Te-134	1.46E-05	3.66E-08	4.72E-05	1.18E-07
I-132	2.51E-04	2.51E-06	1.20E-02	1.20E-04	Ba-140	2.52E-06	6.29E-09	1.13E-04	2.83E-07
I-133	7.76E-04	7.76E-06	4.99E-02	4.99E-04	La-140	5.89E-08	1.47E-10	3.38E-06	8.44E-09
I-134	8.14E-05	8.14E-07	8.52E-04	8.52E-06	Ce-141	9.73E-08	2.43E-10	1.96E-06	4.89E-09
I-135	3.35E-04	3.35E-06	1.54E-02	1.54E-04	Ce-143	1.43E-06	3.58E-09	5.77E-06	1.44E-08
Cs-134	2.60E-05	6.50E-08	1.86E-03	4.66E-06	Ce-144	2.24E-08	5.60E-11	1.14E-06	2.85E-09
Cs-136	1.28E-05	3.20E-08	8.93E-04	2.23E-06	Pr-143	2.40E-08	6.01E-11	1.62E-06	4.05E-09
Cs-137	3.04E-05	7.60E-08	2.17E-03	5.43E-06	Pr-144	2.18E-09	5.44E-12	1.31E-07	3.27E-10
Cs-138	2.72E-04	6.81E-07	1.59E-02	3.98E-05	Cr-51	9.61E-06	2.40E-08	2.93E-05	7.33E-08
Sr-89	7.77E-07	1.94E-09	4.98E-05	1.24E-07	Mn-54	9.97E-07	2.49E-09	2.94E-06	7.35E-09
Sr-90	1.10E-08	2.76E-11	7.57E-07	1.89E-09	Fe-59	1.63E-07	4.08E-10	4.89E-07	1.22E-09
Sr-91	7.67E-06	1.92E-08	5.74E-05	1.43E-07	Co-58	4.24E-05	1.06E-07	1.26E-04	3.14E-07
Sr-92	1.18E-05	2.94E-08	4.80E-05	1.20E-07	Co-60	6.37E-05	1.59E-07	1.96E-04	4.90E-07
Y-90	6.18E-10	1.54E-12	4.26E-08	1.07E-10	Ag-110m	9.80E-06	2.45E-08	2.94E-05	7.35E-08
Y-91	2.06E-08	5.14E-11	1.32E-06	3.31E-09	Sb-122	1.90E-06	4.74E-09	1.74E-04	4.35E-07
Zr-95	5.78E-08	1.44E-10	1.84E-06	4.61E-09	Sb-124	1.63E-05	4.08E-08	4.90E-05	1.22E-07

2.5 放射性液态和气载排放源项

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料时的放射性废液和废气排放源项按照 Case A 及 Case B 两种工况给出：

— Case A，整个燃料循环周期内的反应堆冷却剂放射性浓度相应于 0.55GBq/t I-131 当量。

— Case B 对应于运行技术规格书的限制条件并考虑了异常事件中较多的包壳破损情况下的一回路冷却剂放射性浓度的设计值，对一回路冷却剂活度考虑如下：a） 0.55GBq/t I-131 当量，在最初的 1/4 燃料循环周期内；b） 4.44GBq/t I-131 当量，在中间的 1/2 燃料循环周期内；c） 37GBq/t I-131 当量，在最后的 1/4 燃料循环周期内。

2.5.1 除氚、C-14 外其余核素的排放源项

2.5.1.1 气态放射性排放源项

除氚、C-14 以外的气态排放源项分两类核素组考虑。

（1） 惰性气体和碘

这些核素排放源项计算时考虑了三条释放途径：TEG 释放、一回路泄漏的排放和二回路排放。

TEG 排放途径主要考虑含氢废气的排放。TEG 系统排放又具体可分为三条途径：反应堆冷却剂系统（RCP）的稳压器卸压箱、化学和容积控制系统（RCV）容控箱扫气，核岛排气和疏水系统（RPE）的反应堆冷却剂疏水箱的氮扫气，硼回收系统（TEP）处理反应堆冷却剂时的除气以及在贮存罐中贮存期间的泄漏。

反应堆一回路冷却剂泄漏一部分在反应堆厂房内，另一部分在核辅助厂房内。反应堆厂房空气中放射性泄漏通过以下两个途径：

— 安全壳在功率运行时通过安全壳内大气监测系统（ETY）持续不断的通风净化安全壳内放射性气体，ETY 系统排放气体通过核燃料厂房通风系统（DVK）后再经核辅助厂房通风系统（DVN）烟囱排放到大气中；

— 在冷停堆时通过安全壳换气通风系统（EBA）扫除安全壳内放射性气体，扫除的放射性气体经过 DVN 系统排至烟囱后向大气排放。

二回路系统的放射性气体排放主要是通过冷凝器真空系统。在存在一回路冷却剂

向二回路泄漏的情况下，二回路冷却剂中惰性气体在凝汽器真空系统中以一定的分配因子被抽出，抽出的气体通过核辅助厂房通风系统（DVN）经辐射监测后排放。

计算气态排放源项的输入参数见表 2-10。气态排放源项见表 2-11。

表 2-10　气态排放源项的计算参数

序号	设计参数	数值
1	化容系统的流量	13.6 t/h
2	一回路冷却剂的质量	177t
3	正常运行时输送到硼回收系统的年处理量	30088t
4	硼回收系统除盐器和化容系统对惰性气体和碘的去污因子	惰性气体：1；碘：10
5	硼回收系统除气塔中惰性气体和碘的汽水分配因子	惰性气体：1；碘：0.001
6	反应堆厂房中一回路冷却剂的泄漏率	6.60E-02 t/h
7	机组一个换料周期内等效满功率运行时间	7896h
8	一回路至二回路的泄漏率变化系数	4.8E-05 t/h^2
9	一回路至二回路的初始泄漏率	1.5E-03 t/h
10	蒸汽发生器的蒸汽总流量	5809.8t/h
11	三台蒸汽发生器的排污流量	50 t/h
12	三台蒸汽发生器中水的质量	3×48.1t
13	一回路完全脱气的冷停堆次数	2
序号	**运行经验数据**	**数值**
1	废气处理系统压缩机的泄漏率（泄漏量与总流量之比）	0.001
2	进行反应堆厂房清扫的时间间隔	1600h
3	核辅助厂房通风系统对碘或惰性气体核素的去污因子	惰性气体：1 碘：1
4	安全壳内大气监测系统时间常数（带碘吸附器）	0.03 /h
5	废气处理系统衰变箱的充满时间	240h
6	气态流出物排放前在衰变箱中的贮存时间	Case A:1080h；Case B:1500h
7	废气处理系统衰变箱的泄漏率（与日贮量成正比）	0.0001 /d
8	反应堆厂房中惰性气体和碘的汽水分配因子	惰性气体：1 碘：0.001
9	反应堆厂房通风系统中惰性气体和碘的去污因子	惰性气体：1 碘：10
10	核辅助厂房中冷的一回路冷却剂的泄漏率	0.031 t/h
11	核辅助厂房中热的一回路冷却剂的泄漏率	2.0E-03 t/h
12	冷的一回路冷却剂泄漏中惰性气体和碘的汽水分配因子	惰性气体：1；碘：1.0E-04
13	热的一回路冷却剂泄漏中惰性气体和碘的汽水分配因子	惰性气体：1；碘：1.0E-03
14	冷凝器中碘的汽水分配因子	1.0E-04
15	蒸汽携带因子	碘：0.01其他核素：0.0025

表 2-11　每台机组年气态排放源项

Case A（GBq/a）

核素	途径 1	途径 2	途径 3	途径 4	总量
^{85m}Kr	1.56E+01	4.24E+01	1.28E+02	3.30E+01	2.19E+02
^{85}Kr	1.85E+02	3.20E+00	1.60E+00	4.12E-01	1.90E+02
^{87}Kr	1.81E+01	1.62E+01	1.52E+02	3.91E+01	2.25E+02
^{88}Kr	3.49E+01	6.49E+01	2.89E+02	7.45E+01	4.64E+02
^{133m}Xe	1.03E+01	9.26E+01	6.62E+01	1.71E+01	1.86E+02
^{133}Xe	7.97E+02	3.49E+03	2.05E+03	5.29E+02	6.86E+03
^{135}Xe	1.22E+02	5.67E+02	9.82E+02	2.53E+02	1.92E+03
^{138}Xe	2.59E+01	5.36E+00	2.17E+02	5.58E+01	3.04E+02
惰性气体总量	1.21E+03	4.28E+03	3.89E+03	1.00E+03	1.04E+04
^{131}I	7.24E-02	2.09E-02	1.52E-02	3.32E-03	1.12E-01
^{132}I	2.19E-03	1.72E-03	1.22E-02	1.37E-03	1.75E-02
^{133}I	3.45E-03	1.57E-02	2.12E-02	4.25E-03	4.46E-02
^{134}I	1.33E-03	4.07E-04	7.05E-03	4.46E-04	9.23E-03
^{135}I	1.68E-03	3.86E-03	1.10E-02	1.83E-03	1.84E-02
总碘	8.10E-02	4.25E-02	6.67E-02	1.12E-02	2.02E-01
总气溶胶	1.00E-01				

Case B（GBq/a）

核素	途径 1	途径 2	途径 3	途径 4	总量
^{85m}Kr	3.42E+02	9.29E+02	2.81E+03	2.00E+03	6.09E+03
^{85}Kr	4.14E+03	7.16E+01	3.58E+01	2.56E+01	4.27E+03
^{87}Kr	3.91E+02	3.48E+02	3.27E+03	2.32E+03	6.33E+03
^{88}Kr	7.62E+02	1.42E+03	6.32E+03	4.50E+03	1.30E+04
^{133m}Xe	2.28E+02	2.05E+03	1.47E+03	1.05E+03	4.79E+03
^{133}Xe	1.03E+04	7.75E+04	4.57E+04	3.26E+04	1.66E+05
^{135}Xe	2.65E+03	1.24E+04	2.14E+04	1.53E+04	5.17E+04
^{138}Xe	4.86E+02	1.01E+02	4.06E+03	2.86E+03	7.51E+03
惰性气体总量	1.93E+04	9.48E+04	8.51E+04	6.06E+04	2.60E+05
^{131}I	5.18E-01	4.62E-01	3.36E-01	2.04E-01	1.52E+00
^{132}I	3.31E-02	2.65E-02	1.89E-01	5.68E-02	3.06E-01
^{133}I	6.85E-02	3.17E-01	4.30E-01	2.36E-01	1.05E+00
^{134}I	6.25E-03	1.90E-03	3.28E-02	4.15E-03	4.52E-02
^{135}I	2.42E-02	5.78E-02	1.65E-01	7.32E-02	3.20E-01
总碘	6.50E-01	8.66E-01	1.15E+00	5.74E-01	3.24E+00
总气溶胶	1.70E+00				

注：途径 1 表示废气处理系统的排放；途径 2 表示反应堆厂房通风系统的排放；
途径 3 表示核辅助厂房通风系统的排放；途径 4 表示二回路系统的排放。

由上表可知：

— 每台机组气态放射性流出物年释放量为：

- Case A：惰性气体为 1.04×10^{4}GBq/a，总碘为 0.202GBq/a；
- Case B：惰性气体为 2.60×10^{5}GBq/a，总碘为 3.24GBq/a。

— 对惰性气体排放量影响最大的途径为：

- Case A，反应堆厂房通风系统和核辅助厂房通风系统的排放。
- Case B，反应堆厂房通风系统、核辅助厂房通风系统和二回路系统。

— 在两种工况下，对碘的排放量影响较大的途径均是废气处理系统、反应堆厂房和核辅助厂房通风系统的排放；

— 在两种工况下，对惰性气体排放量影响最大的核素均是 Xe-133；

— 对碘的排放量影响较大的核素为 I-131 和 I-133。

（2） 气溶胶、Ar-41

核电厂经由气态途径释放的放射性物质还需考虑气溶胶贡献。设计方考虑到目前尚无一种合适的物理模式用来描述和计算气溶胶的产生和释放，根据同类型电站的运行经验，参考大亚湾和岭澳核电厂的已有测量数据，气溶胶的释放主要包括如下核素：Co-58、Co-60、Cs-134、Cs-137 和 Cr-51，辽宁红沿河核电厂 1、2 号单台机组每年的气溶胶排放总量为 Case A 工况下为 0.1GBq/a，Case B 工况下为 1.7GBq/a，详见表 2-11。

空气中的 Ar-40 受到中子照射而产生 Ar-41，因此它是在反应堆容器周围空气中产生的。由于 Ar-41 的半衰期短，只有当反应堆安全壳的空气进行换气，而且是反应堆功率运行期间，这种核素才会排放到环境中。由于这种扫气时间很短，因此 Ar-41 的排放量很低，经验反馈数据表明，Ar-41 的排放量小于 20GBq/a。

2.5.1.2 液态放射性排放源项

液态源项计算时考虑了三种释放途径：含 ^{3}H 废液、TEU 释放和二回路释放。

对于含 ^{3}H 废液，反应堆冷却剂排出物经化学和容积控制系统（RCV）除盐器去污后由 TEP 系统处理，在 TEP 系统进一步净化后被分离（由蒸发）为除硼水和硼酸溶液。合格的蒸馏液和浓缩液分别送往反应堆硼和水补给系统（REA）除盐除氧水贮存箱和硼酸贮存箱循环利用。不合格的浓缩液送往固体废物处理系统（TES）装桶固化处理，不合格的蒸馏液将返回中间贮存箱再处理，但在反应堆冷却剂中 ^{3}H 浓度过高的情况下，

TEP 系统蒸馏液监测槽 TEP005/006BA 中含 ^{3}H 蒸馏液会直接通过 TEU 母管排往 TER 系统，TEP 系统最终排入环境的就是这部分含 ^{3}H 放射性液体，计算中考虑了稳态及瞬态释放。

对于 TEU 释放，做了如下考虑：TEU 处理的废水主要包括：

a）工艺排水：主要来自各系统的废树脂冲洗水、不再复用的主冷却剂泄漏和排水、不复用的 TEP 系统废液等，这些废水一般化学杂质少，采用除盐方式处理，每台机组的工艺排水量 2250m^3/a；

b）地面排水：主要来自不回收的设备泄漏水、核岛厂房地面冲洗水、设备冷却水系统的排水等。这些排水一般带有各种杂质，采用过滤方式处理，每台机组的地面排水量 5000m^3/a；

c）化学排水：主要来自放射性机修和去污车间、放射性试验室、取样系统的取样间等的废液，这些排水一般化学杂质含量高，采用蒸发方式处理，每台机组的化学排水量 1500m^3/a；

d）服务排水的放射性水平极低，一般可以不经处理排放。然而当放射性浓度高于排放限值时，这些废水送入（TEU）地面排水槽，每台机组的服务排水量 1250m^3/a。

两种工况下（Case A 和 Case B）TEU 系统处理水的当量（表示等效的除气一回路冷却剂体积）见表 2-12。

表 2-12　TEU 系统处理水的当量

工况		化学排水的当量质量（QCH）	地面排水的当量质量（QFL）	工艺排水的当量质量（QPR）
Case A		1000+20*t	55 t	500 t
CaseB	0.55GBq I-131当量	250t	15 t	125 t
	4.44GBq I-131当量	600 t	5 t	170 t
	37GBq I-131当量	290+50*t	0 t	100 t

注：*表示设备排水

对于二回路释放，计算时所考虑的假设和计算二回路冷却剂源项时相同。

对于 Case A 工况，考虑了 TER 系统 5 天的衰变时间，对于 Case B 工况则考虑 3h 的最小混合循环时间。计算液态源项的其他输入参数见表 2-13。

表 2-13　液态排放源项的计算参数

序号	设计参数	取值
1	稳态运行时输送到硼回收系统处理后的年排放量	3815 t
2	8小时热停堆时输送到硼回收系统处理后的年排放量	1540 t
3	90小时的热停堆时输送到硼回收系统处理后的年排放量	1029 t
4	冷停堆时输送到硼回收系统处理后的年排放量	708 t
5	8小时热停堆、90小时热停堆及冷停堆期间化容系统的流量	13.6 t/h
6	一回路冷却剂的质量	177 t
7	化容系统的去污因子	10
8	硼回收系统的去污因子	10000
9	废液处理系统蒸发器去污因子	1000
10	废液处理系统除盐器去污因子（单台）	10
11	蒸汽发生器排污系统去污因子	10
12	三台蒸汽发生器的排污率	50t/h
13	二回路系统的泄漏率	22 t/h
14	三台蒸汽发生器内水的质量	3×48.1t
15	一回路至二回路泄漏率变化系数	4.8E-05 t/h^2
16	一回路至二回路泄漏率（初始时刻）	1.5E-03 t/h
17	蒸汽发生器排污次数	2
序号	**运行经验数据**	**取值**
1	稳态运行时TEP系统排^{3}H废液在系统内处理和存储时间	Case A:120h+120 h Case B:120h+3h
2	8h热停堆时TEP系统排^{3}H废液在系统内处理和存储时间	Case A:120h+120 h Case B:120h+3h
3	90h热停堆时TEP系统排^{3}H废液在系统内处理和存储时间	Case A:120h+120 h Case B:120h+3h
4	冷停堆时TEP系统排^{3}H废液在系统内处理和存储时间	Case A:120h+120 h Case B:120h+3h
5	由于8h热停堆引起的一回路冷却剂中放射性峰值时刻与输送到硼回收系统所相隔的时间	6 h
6	由于90h热停堆引起的一回路冷却剂中放射性峰值时刻与输送到硼回收系统所相隔的时间	90 h
7	由于冷停堆产生的裂变产物放射性峰值时刻与输送到硼回收系统所间隔的时间	139 h
8	由于冷停堆产生的腐蚀产物放射性峰值时刻与输送到硼回收系统所间隔的时间	214 h
9	化学排水在废液处理系统中的存储和TER系统里存储总时间	Case A:120h+120 h Case B:120h+3h
10	地面排水在废液处理系统中的存储和TER系统里存储总时间	Case A:120h+120 h Case B:120h+3h
11	工艺排水在废液处理系统中的存储和TER系统里存储总时间	Case A:120h+120 h Case B:120h+3h
12	蒸汽携带因子	碘：0.01 其他核素：0.0025

需要说明的是，核素 Ag-110m 在主冷却剂中的状态为胶体，根据大亚湾的测量表明，过滤器和除盐器对其净化效率要低得多，但确切得数据尚不清楚，计算时去污因子取低一个量级。由此计算出的液态排放源项见表 2-14。

表 2-14　每台机组液态放射性排放量

（Case A，单位：GBq/a）

序号	核素	TEP 释放	TEU 释放	二回路释放	总量
1	^{89}Sr	2.00E-05	2.53E-03	5.31E-05	2.61E-03
2	^{90}Sr	3.27E-07	4.12E-05	8.10E-07	4.24E-05
3	^{90}Y	0	1.37E-09	1.05E-07	1.06E-07
4	^{91}Y	0	0	0	0
5	^{91}Sr	1.47E-09	1.87E-07	1.22E-08	2.01E-07
6	^{92}Sr	6.28E-05	8.56E-03	1.42E-06	8.62E-03
7	^{95}Zr	1.53E-06	1.94E-04	4.01E-06	1.99E-04
8	^{95}Nb	7.50E-07	9.47E-05	1.61E-06	9.71E-05
9	^{99}Mo	8.11E-05	1.04E-02	6.87E-04	1.11E-02
10	^{99m}Tc	7.40E-06	9.47E-04	0	9.54E-04
11	^{103}Ru	2.38E-06	3.00E-04	6.42E-06	3.09E-04
12	^{106}Rh	3.63E-07	4.58E-05	9.08E-07	4.71E-05
13	^{131m}Te	4.14E-08	5.37E-06	1.54E-06	6.95E-06
14	^{131}Te	1.05E-10	1.36E-08	0	1.37E-08
15	^{132}Te	5.19E-06	6.63E-04	3.64E-05	7.04E-04
16	^{134}Te	0	0	0	0
17	^{131}I	4.67E-02	9.72E-01	8.81E-02	1.11E+00
18	^{132}I	0	0	0	0
19	^{133}I	2.00E-05	1.17E-03	3.28E-03	4.47E-03
20	^{134}I	0	0	0	0
21	^{135}I	0	0	2.97E-07	2.97E-07
22	^{134}Cs	8.11E-02	9.61E-02	1.90E-03	1.79E-01
23	^{136}Cs	2.94E-03	2.83E-02	7.18E-04	3.19E-02
24	^{137}Cs	7.94E-02	1.13E-01	2.23E-03	1.95E-01
25	^{138}Cs	0	0	0	0
26	^{140}Ba	4.35E-05	5.50E-03	1.40E-04	5.69E-03
27	^{140}La	6.40E-06	8.10E-04	5.37E-07	8.17E-04
28	^{141}Ce	2.33E-06	2.94E-04	6.40E-06	3.03E-04
29	^{143}Ce	2.86E-07	3.70E-05	8.29E-06	4.55E-05
30	^{143}Pr	6.46E-07	8.16E-05	1.62E-06	8.39E-05
31	^{144}Ce	2.96E-05	3.83E-03	1.36E-06	3.86E-03
32	^{144}Pr	0	0	0	0
33	^{51}Cr	1.67E-03	2.80E-02	6.21E-04	3.03E-02
34	^{54}Mn	5.10E-03	3.64E-03	7.23E-05	8.82E-03
35	^{59}Fe	1.69E-04	5.23E-04	1.11E-05	7.03E-04
36	^{58}Co	1.47E-02	1.44E-01	2.96E-03	1.62E-01
37	^{60}Co	3.01E-03	2.37E-01	4.66E-03	2.45E-01
38	^{110m}Ag	4.56E-01	3.56E-01	7.09E-04	8.13E-01
39	^{122}Sb	9.14E-05	5.62E-04	3.81E-05	6.92E-04
40	^{124}Sb	2.15E-03	5.44E-02	1.13E-03	5.77E-02
总计		6.94E-01	2.07E+00	1.07E-01	2.87E+00

（Case B，单位：GBq/a）

序号	核素	TEP 释放	TEU 释放	二回路释放	总量
1	^{89}Sr	4.33E-04	7.08E-03	3.23E-03	1.07E-02
2	^{90}Sr	7.01E-06	1.13E-04	4.91E-05	1.70E-04
3	^{90}Y	1.56E-07	4.69E-06	3.10E-03	3.11E-03
4	^{91}Y	0	0	1.53E-03	1.53E-03
5	^{91}Sr	1.08E-07	1.77E-06	2.68E-06	4.55E-06
6	^{92}Sr	2.62E-04	7.70E-03	8.58E-05	8.05E-03
7	^{95}Zr	1.76E-05	3.28E-04	1.20E-04	4.65E-04
8	^{95}Nb	1.53E-05	2.49E-04	1.11E-04	3.75E-04
9	^{99}Mo	8.39E-04	2.66E-02	1.06E-02	3.81E-02
10	^{99m}Tc	7.66E-05	2.43E-03	2.68E-04	2.78E-03
11	^{103}Ru	1.84E-05	3.91E-04	1.18E-04	5.28E-04
12	^{106}Rh	4.96E-06	8.76E-05	3.35E-05	1.26E-04
13	^{131m}Te	4.12E-06	9.20E-05	3.65E-04	4.61E-04
14	^{131}Te	1.04E-08	8.35E-08	1.05E-05	1.06E-05
15	^{132}Te	1.97E-04	3.53E-03	3.77E-03	7.49E-03
16	^{134}Te	0	0	1.67E-04	1.67E-04
17	^{131}I	1.55E+00	4.18E+00	8.27E+00	1.40E+01
18	^{132}I	0	0	9.41E-01	9.41E-01
19	^{133}I	1.87E-02	1.46E-01	8.81E+00	8.97E+00
20	^{134}I	0	0	1.64E-02	1.64E-02
21	^{135}I	9.71E-07	1.02E-05	2.21E+00	2.21E+00
22	^{134}Cs	1.74E+00	2.76E-01	1.21E-01	2.14E+00
23	^{136}Cs	8.30E-02	1.02E-01	5.76E-02	2.43E-01
24	^{137}Cs	1.72E+00	3.23E-01	1.41E-01	2.18E+00
25	^{138}Cs	0	0	2.48E-02	2.48E-02
26	^{140}Ba	8.30E-04	1.44E-02	7.32E-03	2.26E-02
27	^{140}La	1.09E-04	1.90E-03	2.08E-04	2.22E-03
28	^{141}Ce	1.92E-05	4.02E-04	1.28E-04	5.49E-04
29	^{143}Ce	9.31E-06	3.14E-04	3.72E-04	6.95E-04
30	^{143}Pr	1.07E-05	1.82E-04	7.40E-05	2.66E-04
31	^{144}Ce	1.07E-04	3.40E-03	1.05E-04	3.61E-03
32	^{144}Pr	0	0	6.32E-09	6.32E-09
33	^{51}Cr	2.20E-03	2.22E-02	2.05E-03	2.65E-02
34	^{54}Mn	5.19E-03	2.53E-03	2.06E-04	7.93E-03
35	^{59}Fe	1.87E-04	3.92E-04	3.42E-05	6.13E-04
36	^{58}Co	1.68E-02	1.04E-01	8.79E-03	1.30E-01
37	^{60}Co	5.32E-03	1.68E-01	1.37E-02	1.87E-01
38	^{110m}Ag	8.05E-01	2.51E-01	2.06E-03	1.06E+00
39	^{122}Sb	3.04E-03	2.60E-02	1.17E-02	4.07E-02
40	^{124}Sb	2.81E-03	4.00E-02	3.42E-03	4.62E-02
总计		5.96E+00	5.71E+00	2.07E+01	3.23E+01

由上表可知：

— Case A 工况下，对液态放射性排放量影响最大的途径为经由废液处理系统的排放；Case B 工况下二回路系统释放所占的比重较大；

— Case A 和 Case B 工况下，对液态放射性排放量影响最大的核素均是 ^{131}I。

2.5.2 氚源项

氚主要是由反应堆运行时燃料的裂变反应及硼、锂、氘和二次源中铍的中子活化反应产生。

燃料元件、二次源中产生的氚有一部分会扩散到主回路中，主回路中还会因为硼、锂和氘的中子活化反应产生氚，由于氚易溶于水，而且不能被三废系统有效去除，因此氚会在回路中滞留，运行时一般将冷却剂中的氚浓度控制在一定范围内。由于氚的半衰期比较长，同时核电厂产生的氚会定期排放，因此可以假设年初和年末一回路中氚浓度保持不变。

一回路主冷却剂中的氚产生途径主要有：

— 燃料中三元裂变产生的氚通过包壳扩散到一回路冷却剂中；

— 反应性控制中在一回路主冷却剂中加入硼酸，硼活化产生；

— 在一回路水中为调节 pH 值加入 LiOH，锂活化产生；

— 由冷却剂中天然存在的氚反应产生；

— 二次源中的铍活化产生的氚。

辽宁红沿河核电厂1、2号机组实施18个月燃料循环管理策略后，单台机组氚的排放量为：

— Case A：气态 3.9TBq；液态 35.2TBq；

— Case B：气态 5.0TBq；液态 45.2TBq。

2.5.3 C-14 源项

对于辽宁红沿河核电厂1、2号机组，C-14的主要来源包括：

— 燃料中的杂质 ^{14}N 与中子发生（n，p）反应以生成；

— 氧化物燃料和慢化剂里的 ^{17}O 与与中子发生（n，α）反应；

— 三元裂变产生。

目前国际上对于C-14释放量的计算主要还是基于统计数据进行估算，由于估算C-14排放源项所基于的电厂统计数据没有发生明显的变化，因此，对于辽宁红沿河核电厂1、2号机组18个月换料时的C-14排放源项，仍然沿用了参考电厂的相关结果，即单台机组每年排放的C-14源项为：

— Case A：气态途径：200GBq，液态途径 5GBq；

— Case B：气态途径：370GBq，液态途径 50GBq。

2.5.4 源项计算结果与运行经验的比较分析

实施18个月燃料循环管理策略后，大亚湾核电站每年排放的惰性气体在9.70E+11Bq至1.26E+13Bq之间变动，卤素在4.00E+06Bq至1.24E+08Bq之间变动，气溶胶在1.18E+06Bq至6.61E+06Bq之间变动，气态氚在7.67E+11Bq至1.55E+12Bq之间，废气排放体积在2.67E+09m^3至2.87E+09m^3之间，排放的废液总体积在2.06E+04m^3至2.72E+04m^3之间，除氚以外的其他核素平均浓度在7.28~50.8kBq/m^3范围内。表2-15和表2-16给出了大亚湾核电站2004~2013年的放射性流出物排放量运行经验数据。

辽宁红沿河核电厂1、2号机组与大亚湾核电站为同类型机组，两电站放射性废液、废气系统的收集、处理和排放设计基本相同，相对于大亚湾核电站而言，辽宁红沿河核电厂1、2号机组TEU系统除盐单元增设一台除盐床，通过除盐单元的循环处理进一步提高去污效果以满足排放要求。考虑到大亚湾核电站和辽宁红沿河核电厂之间存在上述相似之处，对比大亚湾核电站的实际运行经验反馈值，可以认为本节提出的正常运行期间放射性流出物设计值和预期值具有一定的包络性，对辽宁红沿河核电厂1、2号机组18个月换料改造项目是适用的。辽宁红沿河核电厂1、2号机组放射性流出物年排放量情况见表2-17。

表 2-15　大亚湾核电站 2004 年至 2013 年间液态放射性物质排放情况

年份	TER 排放（罐次）	废液总体积（km^3）	除氚以外的其他核素		液态氚（TBq）
			排放量（GBq）	平均浓度（kBq/m^3）	
2004	68	-	-	50.8	48.1
2005	62	25.5	1.27	50	62.4
2006	66	27.7	0.896	32.4	57.1
2007	66	27.4	1.085	39.5	47.2
2008	56	23.6	0.559	23.7	50.7
2009	52	21.7	0.5	23.1	59.8
2010	58	24.1	0.21	8.53	60.1
2011	49	20.6	0.15	7.28	47.5
2012	55	23	0.218	9.57	-
2013	54	22.9	0.181	7.86	-

表 2-16　大亚湾核电站 2004 年至 2013 年间气载放射性物质排放情况

年份	惰性气体（Bq）	卤素（Bq）	气溶胶（Bq）	气态氚（Bq）	废气排放总体积（m^3）
2004	1.26E+13	1.24E+08	1.18E+06	1.55E+12	2.87E+09
2005	2.29E+12	1.25E+07	5.48E+06	7.67E+11	2.76E+09
2006	2.34E+12	1.69E+07	5.11E+06	8.28E+11	2.70E+09
2007	1.55E+12	6.98E+06	3.94E+06	8.89E+11	2.70E+09
2008	1.27E+12	4.00E+06	2.46E+06	8.42E+11	2.67E+09
2009	1.09E+12	4.30E+06	2.61E+06	1.21E+12	2.71E+09
2010	9.44E+11	4.31E+06	2.49E+06	1.26E+12	2.74E+09
2011	1.71E+12	4.84E+07	2.72E+06	9.79E+11	2.79E+09
2012	1.23E+12	9.42E+06	6.61E+06	-	2.83E+09
2013	9.70E+11	6.93E+06	4.87E+06	-	2.81E+09

表 2-17　　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组放射性流出物年排放量

项目		预期值（Case A）	设计值（Case B）
气载放射性物质排放量	惰性气体（GBq/a）	2.08E+04	5.20E+05
	碘（GBq/a）	4.04E-01	6.48E+00
	气溶胶（GBq/a）	2.00E-01	3.40E+00
	^{3}H（GBq/a）	7.80E+03	1.00E+04
	^{14}C（GBq/a）	4.00E+02	7.40E+02
液态放射性物质排放量	除^{3}H，^{14}C外其他核素（GBq/a）	5.74E+00	6.46E+01
	^{3}H（TBq/a）	7.04E+01	9.04E+01
	^{14}C（GBq/a）	1.00E+01	1.00E+02

2.6 18 个月换料与年度换料放射性流出物设计排放量比较

表 2-18 和表 2-19 分别列出了辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造方案后，每台机组的年气、液态放射性流出量设计排放量（Case B）相比年度换料方案的变化情况。由表可以看出，相比年度换料方案 ^{14}C 排放量不变，液态总释放有所增加。气态放射性流出量排放中，相比年度换料方案，18 个月换料方案的惰性气体总预期释放有所增加，而设计排放则略有降低，设计的气态碘总释放则有所增加，气态 ^{14}C 排放量则维持不变。

表 2-18　18 个月换料与年度换料液态放射性流出物设计排放量对比

核素	case B, GBq/a			核素	case B, GBq/a		
	年度换料	18 个月换料	变化情况		年度换料	18 个月换料	变化情况
Sr-89	1.45E-02	1.07E-02	↓	Cs-134	8.52E-01	2.14E+00	↑
Sr-90	2.04E-04	1.70E-04	↓	Cs-136	2.38E-01	2.43E-01	↑
Sr-91	3.82E-03	3.11E-03	↓	Cs-137	1.02E+00	2.18E+00	↑
Sr-92	1.39E-03	1.53E-03	↑	Cs-138	0.00E+00	2.48E-02	↑
Y-90	6.41E-06	4.55E-06	↓	Ba-140	2.74E-02	2.26E-02	↓
Y-91	9.31E-03	8.05E-03	↓	La-140	2.73E-03	2.22E-03	↓
Zr-95	6.64E-04	4.65E-04	↓	Ce-141	7.40E-04	5.49E-04	↓
Nb-95	5.58E-04	3.75E-04	↓	Ce-143	6.47E-04	6.95E-04	↑
Mo-99	3.71E-02	3.81E-02	↑	Ce-144	3.42E-04	2.66E-04	↓
Tc-99m	2.76E-03	2.78E-03	↑	Pr-143	3.77E-03	3.61E-03	↓
Ru-103	6.60E-04	5.28E-04	↓	Pr-144	8.19E-09	6.32E-09	↓
Ru-106	1.24E-04	0.00E+00	↓	Cr-51	9.32E-02	2.65E-02	↓
Rh-106	0.00E+00	1.26E-04	↑	Mn-54	1.17E-02	7.93E-03	↓
Te-131m	4.56E-04	4.61E-04	↑	Fe-59	2.91E-03	6.13E-04	↓
Te-131	7.21E-06	1.06E-05	↑	Co-58	2.02E-01	1.30E-01	↓
Te-132	7.31E-03	7.49E-03	↑	Co-60	1.59E-01	1.87E-01	↑
Te-134	1.18E-04	1.67E-04	↑	Ag-110m	9.09E-01	1.06E+00	↑
I-131	1.44E+01	1.40E+01	↓	Sb-122	0.00E+00	4.07E-02	↑
I-132	9.21E-01	9.41E-01	↑	Sb-124	4.61E-02	4.62E-02	↑
I-133	8.79E+00	8.97E+00	↑	总释放	3.01E+01	3.23E+01	↑
I-134	1.73E-02	1.64E-02	↓	H-3	3.16E+04	4.52E+04	↑
I-135	2.28E+00	2.21E+00	↓	C-14	5.00E+01	5.00E+01	—

表 2-19　18 个月换料与年度换料气态放射性流出物设计排放量对比

核素	case B，GBq/a			核素	Case B，GBq/a		
	年度换料	18 个月换料	变化情况		年度换料	18 个月换料	变化情况
Kr-85m	8.55E+03	6.09E+03	↓	I-131	1.37E+00	1.52E+00	↑
Kr-85	4.95E+03	4.27E+03	↓	I-132	2.57E-01	3.06E-01	↑
Kr-87	1.05E+04	6.33E+03	↓	I-133	8.87E-01	1.05E+00	↑
Kr-88	1.94E+04	1.30E+04	↓	I-134	3.89E-02	4.52E-02	↑
Xe-133m	4.57E+03	4.79E+03	↑	I-135	2.82E-01	3.20E-01	↑
Xe-133	1.44E+05	1.66E+05	↑	碘总释放	2.84E+00	3.24E+00	↑
Xe-135	6.68E+04	5.17E+04	↓	总气溶胶	1.70E+00	1.70E+00	—
Xe-138	1.43E+04	7.51E+03	↓	H-3	3.51E+03	5.00E+03	↑
惰性气体总释放	2.73E+05	2.60E+05	↓	C-14	370	370	—

3 正常运行工况下的辐射环境影响

本章将根据辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后的设计排放量（Case B）分析放射性流出物排放对公众造成的辐射剂量，进而分析现有废物处理设施的可用性。同时本章还将分析一期工程四台机组核定放射性流出物年排放量所造成辐射剂量影响的可接受性。

3.1 放射性物质排放源项

核电厂运行状态下，放射性流出物的排放方式分别为：

— 气载放射性流出物通过烟囱（每两台机组共用一个烟囱）排入大气环境；

— 液态放射性流出物通过排水渠随温排水一起排入辽东湾海域。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，气载和液态放射性流出物的设计排放量分别见本专题报告表 2-11 和表 2-14。

3.1.1 放射性流出物的排放总量控制要求

《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）要求核动力厂必须按每堆实施放射性流出物的年排放总量控制，对于同一堆型的多堆厂址，全厂所有机组的年总排放量应控制在单堆排放控制值的 4 倍以内。

根据国家标准 GB6249-2011 的有关要求，表 3-1 给出了辽宁红沿河核电厂 1、2 号实施 18 个月换料后各类放射性流出物的年设计排放值与国家标准 GB6249-2011 相应总量控制值的比较。可以预计，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，1、2 号单台机组以及一期工程四台机组的各类放射性流出物的年排放量均可以满足国家标准 GB6249-2011 的总量控制要求。

表 3-1　放射性流出物设计排放量（Bq/a）与 GB6249-2011 控制值比较

单堆机组	气载放射性流出物	气载流出物	GB6249-2011 控制值	排放量设计值	占控制值的百分比
		^{3}H	1.5×10^{13}	5.00×10^{12}	33.33
		^{14}C	7.0×10^{11}	3.70×10^{11}	52.86
		惰性气体	6.0×10^{14}	2.60×10^{14}	43.33
		碘	2.0×10^{10}	3.24×10^{9}	16.2
		粒子（$T_{1/2}\geq8d$）	5.0×10^{10}	1.70×10^{9}	3.4
	液态放射性流出物	液态流出物	GB6249-2011 控制值	排放量设计值	占控制值的百分比
		^{3}H	7.5×10^{13}	4.52×10^{13}	60.27
		^{14}C	1.5×10^{11}	5.00×10^{10}	33.33
		其余核素	5.0×10^{10}	3.23×10^{10}	64.6
四台机组	气载放射性流出物	气载流出物	GB6249-2011 控制值	排放量设计值	占控制值的百分比
		^{3}H	6.0×10^{13}	1.74×10^{13}	29.0
		^{14}C	2.8×10^{12}	1.48×10^{12}	52.86
		惰性气体	2.4×10^{15}	9.12×10^{14}	38.0
		碘	8.0×10^{10}	1.21×10^{10}	15.13
		粒子（$T_{1/2}\geq8d$）	2.0×10^{11}	6.80×10^{9}	3.4
	液态放射性流出物	液态流出物	GB6249-2011 控制值	排放量设计值	占控制值的百分比
		^{3}H	3.0×10^{14}	1.54×10^{14}	51.33
		^{14}C	6.0×10^{11}	2.00×10^{11}	33.33
		其余核素	2.0×10^{11}	1.23×10^{11}	61.5

3.1.2　液态放射性流出物排放的浓度控制要求

国家标准《核动力厂环境辐射防护规定》（GB6249-2011）对核动力厂放射性流出物排放除规定了总量控制要求外，对于滨海厂址，还要求槽式排放口处的放射性流出物中除氚和 C-14 外其它放射性核素的浓度不超过 1000Bq/L。

辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组的低放废液实施统一的排放运行管理，并按要求采用槽式排放方式。在 TER 排放放射性废液之前，需要对 TER 排放罐中的放射性

废液进行取样监测，当确定 TER 内的放射性废液的活度低于排放管理限值时，才允许向环境排放。此外，TER 系统排放口处设置了在线监测系统，在排放过程中若探测到排放的放射性废液活度超过设定的阈值，TER 系统可以自动关闭放射性废液的排放。

大亚湾核电站实施 18 个月换料改造项目后的运行经验表明，每年经由 TER 排放的放射性废液平均浓度均未超过 100Bq/L，且随着电厂运行管理经验的积累，该平均值还呈现逐年递减的趋势。辽宁红沿河核电厂与大亚湾核电站的废液处理和排放系统并无实质性差异，在加强运行管理的情况下，可以预计辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，其液态放射性流出物的排放浓度也将低于国家标准的相关要求。

3.1.3 用于辐射影响分析的源项

核电厂运行后放射性流出物的实际排放除与电厂废物处理系统的设计性能和效能相关，还与电厂运行管理水平密切相关。在分析辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目的辐射影响中将同时考虑辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组同时运行状态下的放射性流出物排放对环境的辐射影响。分析用源项时考虑：辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组计划实施十八月换料改造方案，3、4 号机组采用年度换料方案，均采用 Case B（设计值）估算一般公众辐射剂量。

核电厂运行期间因核反应而在核燃料和冷却剂中产生一定数量的 ^{14}C，其气态化合物通过烟囱向环境排放。相关研究表明，向大气环境排放的 ^{14}C 主要有碳氢化合物和二氧化碳两种形态，而只有以二氧化碳形态存在的 ^{14}C 才能通过光合作用被植物吸收，并以食物食入形式进入人体，造成食入内照射。根据 IAEA 第 421 号技术报告，压水堆核电站以二氧化碳形态向环境排放的 ^{14}C 占 ^{14}C 总排放量的 5~25%。因此，本报告在对核电厂气态 ^{14}C 排放造成的放射性环境影响进行评价时，假定核电厂以二氧化碳形态排放的 ^{14}C 占气态 ^{14}C 总排放量的 25%。

3.2 放射性流出物在大气和水体中的输运

3.2.1 大气弥散和地面沉积

核电厂气载放射性流出物从核电厂排出后，通过气流作用在大气环境中输送扩散，部分气溶胶和碘粒子在重力和降水的作用下沉积到地面。

大气弥散因子和地面沉积因子计算采用的气象数据为 2011 年 1 月至 2011 年 12 月一个整年的逐时气象观测数据，包括辽宁红沿河核电厂气象铁塔 80m 高度的逐时风向、风速和温度，10m 高度的逐时风向、风速和温度，以及地面站的逐时雨量。

根据核电厂的相关设计参数，核电机组气载放射性流出物的排放烟囱高度为 62.3m，邻近建筑物的高度为 56.4m，由于烟囱的排放高度低于邻近建筑物的 2 倍高度，电厂气载放射性流出物排放按混合排放模式进行考虑。

程序计算采用核安全导则（HAD101/02）推荐的高斯直线烟羽模型，同时考虑建筑物尾流和大气混合层的影响，并对弥散过程中由于雨水冲洗、核素的重力沉降以及核素衰变引起的烟羽损耗进行修正。大气扩散过程中采用的相关计算模式见附录 A。

气载放射性流出物排放按照辽宁红沿河核电厂一期工程 1、2 号机组以及 3、4 号机组，每两台共用一个烟囱进行多点源排放。考虑到本报告对于电厂评价子区的划分是以辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组烟囱为中心，因此，各机组大气弥散因子的子区计算均以辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组的烟囱为中心点。

表 3-2 和表 3-3 分别给出了辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子（^{85}Kr、^{131}I、^{137}Cs）和地面沉积因子（^{131}I、^{137}Cs）。

表 3-4 和表 3-5 分别给出了辽宁红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子（^{85}Kr、^{131}I、^{137}Cs）和地面沉积因子（^{131}I、^{137}Cs）。

表 3-2　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子

（1/3）：^{85}Kr　　单位：s/m^3

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	3.34E-07	1.51E-07	9.39E-08	6.00E-08	3.07E-08	1.38E-08	7.37E-09	4.85E-09	3.53E-09	2.74E-09	2.16E-09	1.80E-09
NNE	2.63E-07	1.26E-07	8.48E-08	5.68E-08	3.03E-08	1.40E-08	7.62E-09	5.04E-09	3.69E-09	2.86E-09	2.26E-09	1.89E-09
NE	1.52E-07	8.10E-08	5.96E-08	4.26E-08	2.46E-08	1.23E-08	7.09E-09	4.83E-09	3.60E-09	2.83E-09	2.28E-09	1.92E-09
ENE	1.18E-07	5.64E-08	3.71E-08	2.53E-08	1.43E-08	7.26E-09	4.23E-09	2.91E-09	2.17E-09	1.72E-09	1.39E-09	1.18E-09
E	7.89E-08	3.54E-08	2.26E-08	1.55E-08	9.04E-09	4.74E-09	2.83E-09	1.97E-09	1.49E-09	1.18E-09	9.66E-10	8.24E-10
ESE	9.87E-08	4.07E-08	2.42E-08	1.59E-08	9.15E-09	4.78E-09	2.85E-09	1.99E-09	1.50E-09	1.19E-09	9.73E-10	8.31E-10
SE	9.74E-08	4.19E-08	2.60E-08	1.73E-08	9.80E-09	5.01E-09	2.96E-09	2.05E-09	1.55E-09	1.23E-09	1.00E-09	8.53E-10
SSE	1.70E-07	7.18E-08	4.11E-08	2.54E-08	1.33E-08	6.37E-09	3.66E-09	2.52E-09	1.91E-09	1.51E-09	1.23E-09	1.05E-09
S	6.22E-07	2.69E-07	1.50E-07	8.80E-08	4.28E-08	1.92E-08	1.05E-08	7.10E-09	5.28E-09	4.15E-09	3.36E-09	2.85E-09
SSW	7.49E-07	3.13E-07	1.69E-07	9.75E-08	4.64E-08	2.07E-08	1.14E-08	7.61E-09	5.63E-09	4.43E-09	3.59E-09	3.03E-09
SW	2.72E-07	1.30E-07	8.41E-08	5.49E-08	2.91E-08	1.37E-08	7.69E-09	5.19E-09	3.85E-09	3.03E-09	2.43E-09	2.05E-09
WSW	1.12E-07	4.67E-08	2.92E-08	2.06E-08	1.25E-08	6.66E-09	3.99E-09	2.79E-09	2.11E-09	1.68E-09	1.37E-09	1.17E-09
W	4.49E-08	1.85E-08	1.22E-08	9.44E-09	6.55E-09	3.94E-09	2.52E-09	1.82E-09	1.40E-09	1.12E-09	9.32E-10	8.01E-10
WNW	5.84E-08	2.57E-08	1.75E-08	1.28E-08	7.76E-09	4.03E-09	2.35E-09	1.61E-09	1.21E-09	9.47E-10	7.64E-10	6.50E-10
NW	5.15E-07	2.09E-07	1.12E-07	6.36E-08	2.90E-08	1.18E-08	5.98E-09	3.82E-09	2.72E-09	2.08E-09	1.62E-09	1.34E-09
NNW	4.32E-07	1.93E-07	1.15E-07	6.95E-08	3.33E-08	1.41E-08	7.32E-09	4.73E-09	3.41E-09	2.62E-09	2.04E-09	1.69E-09

表 3-2　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子

（2/3）：^{131}I　　单位：s/m^3

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	3.03E-07	1.29E-07	7.82E-08	4.85E-08	2.27E-08	8.11E-09	3.12E-09	1.54E-09	8.88E-10	5.72E-10	3.79E-10	2.77E-10
NNE	2.37E-07	1.08E-07	7.14E-08	4.67E-08	2.29E-08	8.45E-09	3.31E-09	1.63E-09	9.32E-10	5.92E-10	3.88E-10	2.79E-10
NE	1.36E-07	6.98E-08	5.13E-08	3.60E-08	1.92E-08	7.57E-09	3.01E-09	1.46E-09	8.19E-10	5.12E-10	3.33E-10	2.39E-10
ENE	1.05E-07	4.74E-08	3.06E-08	2.04E-08	1.07E-08	4.34E-09	1.78E-09	8.77E-10	5.05E-10	3.25E-10	2.22E-10	1.66E-10
E	7.07E-08	2.97E-08	1.85E-08	1.24E-08	6.64E-09	2.66E-09	1.02E-09	4.64E-10	2.49E-10	1.50E-10	9.66E-11	6.89E-11
ESE	8.38E-08	3.13E-08	1.78E-08	1.15E-08	6.12E-09	2.47E-09	9.47E-10	4.32E-10	2.33E-10	1.43E-10	9.47E-11	6.95E-11
SE	8.32E-08	3.27E-08	1.96E-08	1.28E-08	6.66E-09	2.61E-09	1.00E-09	4.63E-10	2.54E-10	1.58E-10	1.05E-10	7.79E-11
SSE	1.57E-07	6.25E-08	3.45E-08	2.06E-08	9.91E-09	3.76E-09	1.52E-09	7.82E-10	4.81E-10	3.30E-10	2.41E-10	1.89E-10
S	5.90E-07	2.45E-07	1.31E-07	7.46E-08	3.35E-08	1.26E-08	5.51E-09	3.10E-09	2.04E-09	1.48E-09	1.14E-09	9.19E-10
SSW	7.06E-07	2.81E-07	1.46E-07	8.13E-08	3.60E-08	1.36E-08	5.99E-09	3.38E-09	2.22E-09	1.61E-09	1.23E-09	9.88E-10
SW	2.44E-07	1.11E-07	7.00E-08	4.45E-08	2.18E-08	8.43E-09	3.54E-09	1.86E-09	1.14E-09	7.81E-10	5.60E-10	4.35E-10
WSW	9.17E-08	3.35E-08	2.02E-08	1.42E-08	8.04E-09	3.20E-09	1.18E-09	5.15E-10	2.62E-10	1.51E-10	9.21E-11	6.30E-11
W	3.51E-08	1.24E-08	8.09E-09	6.57E-09	4.30E-09	1.81E-09	6.09E-10	2.24E-10	9.60E-11	4.71E-11	2.51E-11	1.55E-11
WNW	4.98E-08	2.03E-08	1.38E-08	1.00E-08	5.48E-09	2.06E-09	7.17E-10	3.00E-10	1.47E-10	8.00E-11	4.55E-11	2.97E-11
NW	4.78E-07	1.82E-07	9.31E-08	5.02E-08	2.07E-08	6.84E-09	2.57E-09	1.26E-09	7.27E-10	4.66E-10	3.07E-10	2.21E-10
NNW	3.93E-07	1.65E-07	9.53E-08	5.52E-08	2.41E-08	8.25E-09	3.14E-09	1.54E-09	8.79E-10	5.60E-10	3.59E-10	2.57E-10

表 3-2　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子

（3/3）：^{137}Cs　　单位：s/m^3

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	3.32E-07	1.49E-07	9.26E-08	5.89E-08	2.99E-08	1.32E-08	6.85E-09	4.37E-09	3.09E-09	2.32E-09	1.77E-09	1.43E-09
NNE	2.61E-07	1.25E-07	8.37E-08	5.59E-08	2.96E-08	1.34E-08	7.08E-09	4.55E-09	3.23E-09	2.43E-09	1.86E-09	1.51E-09
NE	1.51E-07	8.00E-08	5.88E-08	4.20E-08	2.41E-08	1.18E-08	6.59E-09	4.34E-09	3.12E-09	2.36E-09	1.83E-09	1.49E-09
ENE	1.17E-07	5.56E-08	3.64E-08	2.48E-08	1.39E-08	6.92E-09	3.92E-09	2.60E-09	1.88E-09	1.43E-09	1.12E-09	9.21E-10
E	7.81E-08	3.48E-08	2.21E-08	1.51E-08	8.71E-09	4.45E-09	2.56E-09	1.71E-09	1.24E-09	9.39E-10	7.30E-10	5.95E-10
ESE	9.75E-08	3.99E-08	2.36E-08	1.54E-08	8.75E-09	4.44E-09	2.54E-09	1.69E-09	1.22E-09	9.18E-10	7.18E-10	5.87E-10
SE	9.62E-08	4.10E-08	2.53E-08	1.67E-08	9.39E-09	4.68E-09	2.66E-09	1.77E-09	1.28E-09	9.66E-10	7.50E-10	6.11E-10
SSE	1.69E-07	7.09E-08	4.04E-08	2.50E-08	1.30E-08	6.07E-09	3.37E-09	2.23E-09	1.62E-09	1.22E-09	9.52E-10	7.78E-10
S	6.19E-07	2.67E-07	1.48E-07	8.66E-08	4.17E-08	1.84E-08	9.87E-09	6.49E-09	4.71E-09	3.62E-09	2.86E-09	2.37E-09
SSW	7.46E-07	3.10E-07	1.67E-07	9.60E-08	4.54E-08	1.99E-08	1.07E-08	6.99E-09	5.06E-09	3.88E-09	3.08E-09	2.54E-09
SW	2.69E-07	1.28E-07	8.25E-08	5.37E-08	2.82E-08	1.30E-08	7.09E-09	4.64E-09	3.34E-09	2.55E-09	1.99E-09	1.63E-09
WSW	1.10E-07	4.55E-08	2.82E-08	1.97E-08	1.18E-08	6.05E-09	3.47E-09	2.31E-09	1.66E-09	1.26E-09	9.76E-10	7.92E-10
W	4.41E-08	1.79E-08	1.17E-08	9.05E-09	6.22E-09	3.62E-09	2.20E-09	1.49E-09	1.07E-09	8.06E-10	6.25E-10	5.03E-10
WNW	5.74E-08	2.50E-08	1.69E-08	1.23E-08	7.37E-09	3.71E-09	2.07E-09	1.35E-09	9.61E-10	7.14E-10	5.45E-10	4.41E-10
NW	5.12E-07	2.06E-07	1.10E-07	6.21E-08	2.80E-08	1.12E-08	5.47E-09	3.39E-09	2.35E-09	1.75E-09	1.32E-09	1.06E-09
NNW	4.29E-07	1.91E-07	1.13E-07	6.81E-08	3.24E-08	1.35E-08	6.79E-09	4.27E-09	2.99E-09	2.23E-09	1.68E-09	1.35E-09

表 3-3　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期地面沉积因子

（1/2）：^{131}I　　单位：$1/m^2$

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	9.76E-09	4.15E-09	2.52E-09	1.56E-09	7.32E-10	2.63E-10	1.02E-10	5.05E-11	2.94E-11	1.91E-11	1.28E-11	9.48E-12
NNE	7.68E-09	3.50E-09	2.31E-09	1.51E-09	7.41E-10	2.75E-10	1.09E-10	5.41E-11	3.14E-11	2.03E-11	1.35E-11	9.88E-12
NE	4.45E-09	2.28E-09	1.67E-09	1.17E-09	6.23E-10	2.47E-10	9.91E-11	4.87E-11	2.78E-11	1.77E-11	1.17E-11	8.59E-12
ENE	3.47E-09	1.57E-09	1.01E-09	6.71E-10	3.52E-10	1.44E-10	5.97E-11	3.01E-11	1.77E-11	1.17E-11	8.18E-12	6.25E-12
E	2.48E-09	1.06E-09	6.56E-10	4.36E-10	2.34E-10	9.57E-11	3.90E-11	1.94E-11	1.15E-11	7.73E-12	5.56E-12	4.35E-12
ESE	2.74E-09	1.03E-09	5.89E-10	3.79E-10	2.02E-10	8.21E-11	3.22E-11	1.52E-11	8.49E-12	5.41E-12	3.75E-12	2.84E-12
SE	2.72E-09	1.07E-09	6.44E-10	4.19E-10	2.19E-10	8.64E-11	3.37E-11	1.60E-11	9.07E-12	5.83E-12	4.02E-12	3.06E-12
SSE	5.10E-09	2.04E-09	1.13E-09	6.75E-10	3.25E-10	1.24E-10	5.09E-11	2.67E-11	1.67E-11	1.17E-11	8.63E-12	6.84E-12
S	1.94E-08	8.13E-09	4.38E-09	2.49E-09	1.13E-09	4.32E-10	1.94E-10	1.12E-10	7.50E-11	5.54E-11	4.30E-11	3.52E-11
SSW	2.28E-08	9.11E-09	4.75E-09	2.65E-09	1.17E-09	4.46E-10	1.98E-10	1.13E-10	7.48E-11	5.45E-11	4.18E-11	3.39E-11
SW	8.20E-09	3.73E-09	2.36E-09	1.50E-09	7.37E-10	2.89E-10	1.25E-10	6.78E-11	4.30E-11	3.03E-11	2.24E-11	1.78E-11
WSW	3.34E-09	1.27E-09	7.67E-10	5.30E-10	2.98E-10	1.23E-10	4.98E-11	2.51E-11	1.51E-11	1.03E-11	7.60E-12	6.05E-12
W	1.18E-09	4.22E-10	2.75E-10	2.20E-10	1.43E-10	6.06E-11	2.10E-11	8.30E-12	3.94E-12	2.22E-12	1.41E-12	1.02E-12
WNW	1.82E-09	7.61E-10	5.08E-10	3.63E-10	1.98E-10	7.70E-11	2.96E-11	1.44E-11	8.40E-12	5.60E-12	4.02E-12	3.18E-12
NW	1.57E-08	6.04E-09	3.11E-09	1.69E-09	7.08E-10	2.41E-10	9.58E-11	5.01E-11	3.08E-11	2.10E-11	1.50E-11	1.16E-11
NNW	1.28E-08	5.39E-09	3.11E-09	1.81E-09	7.93E-10	2.75E-10	1.07E-10	5.39E-11	3.18E-11	2.10E-11	1.41E-11	1.04E-11

表 3-3　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组气载放射性流出物排放的长期地面沉积因子

（2/2）：^{137}Cs　　单位：$1/m^2$

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	7.52E-10	3.42E-10	2.12E-10	1.35E-10	6.88E-11	3.08E-11	1.64E-11	1.06E-11	7.66E-12	5.85E-12	4.57E-12	3.76E-12
NNE	6.62E-10	3.20E-10	2.10E-10	1.38E-10	7.32E-11	3.38E-11	1.84E-11	1.21E-11	8.80E-12	6.78E-12	5.35E-12	4.44E-12
NE	4.39E-10	2.29E-10	1.59E-10	1.10E-10	6.19E-11	3.06E-11	1.73E-11	1.16E-11	8.52E-12	6.60E-12	5.24E-12	4.35E-12
ENE	3.71E-10	1.80E-10	1.14E-10	7.53E-11	4.16E-11	2.07E-11	1.19E-11	8.13E-12	6.04E-12	4.73E-12	3.82E-12	3.21E-12
E	4.68E-10	2.25E-10	1.38E-10	8.86E-11	4.86E-11	2.45E-11	1.45E-11	1.01E-11	7.67E-12	6.13E-12	5.06E-12	4.31E-12
ESE	2.85E-10	1.25E-10	7.43E-11	4.78E-11	2.65E-11	1.34E-11	7.78E-12	5.31E-12	3.94E-12	3.07E-12	2.48E-12	2.08E-12
SE	2.75E-10	1.24E-10	7.54E-11	4.90E-11	2.71E-11	1.35E-11	7.80E-12	5.31E-12	3.94E-12	3.06E-12	2.46E-12	2.05E-12
SSE	4.55E-10	2.00E-10	1.16E-10	7.18E-11	3.76E-11	1.80E-11	1.03E-11	6.97E-12	5.18E-12	4.04E-12	3.25E-12	2.73E-12
S	2.08E-09	9.55E-10	5.48E-10	3.31E-10	1.67E-10	7.87E-11	4.49E-11	3.10E-11	2.34E-11	1.87E-11	1.54E-11	1.31E-11
SSW	1.82E-09	7.85E-10	4.32E-10	2.54E-10	1.24E-10	5.63E-11	3.12E-11	2.10E-11	1.56E-11	1.22E-11	9.94E-12	8.37E-12
SW	1.10E-09	5.39E-10	3.34E-10	2.13E-10	1.13E-10	5.43E-11	3.11E-11	2.14E-11	1.61E-11	1.28E-11	1.05E-11	8.91E-12
WSW	8.07E-10	3.84E-10	2.32E-10	1.49E-10	8.23E-11	4.14E-11	2.45E-11	1.72E-11	1.31E-11	1.05E-11	8.72E-12	7.45E-12
W	1.64E-10	7.39E-11	4.63E-11	3.24E-11	2.01E-11	1.11E-11	6.68E-12	4.61E-12	3.42E-12	2.65E-12	2.13E-12	1.77E-12
WNW	4.39E-10	2.12E-10	1.31E-10	8.54E-11	4.71E-11	2.36E-11	1.39E-11	9.65E-12	7.32E-12	5.85E-12	4.83E-12	4.12E-12
NW	1.68E-09	7.40E-10	4.17E-10	2.47E-10	1.21E-10	5.51E-11	3.06E-11	2.08E-11	1.56E-11	1.24E-11	1.02E-11	8.68E-12
NNW	1.18E-09	5.43E-10	3.24E-10	1.97E-10	9.72E-11	4.31E-11	2.33E-11	1.55E-11	1.14E-11	8.89E-12	7.10E-12	5.95E-12

表 3-4　辽宁红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子

（1/3）：^{85}Kr　　单位：s/m^3

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	4.03E-07	1.71E-07	1.00E-07	6.16E-08	3.10E-08	1.38E-08	7.37E-09	4.84E-09	3.53E-09	2.73E-09	2.16E-09	1.80E-09
NNE	3.65E-07	1.50E-07	9.19E-08	5.87E-08	3.08E-08	1.41E-08	7.68E-09	5.07E-09	3.70E-09	2.87E-09	2.27E-09	1.90E-09
NE	2.89E-07	1.20E-07	7.20E-08	4.69E-08	2.58E-08	1.26E-08	7.20E-09	4.88E-09	3.63E-09	2.85E-09	2.29E-09	1.93E-09
ENE	1.81E-07	7.95E-08	4.66E-08	2.89E-08	1.55E-08	7.57E-09	4.37E-09	2.97E-09	2.21E-09	1.74E-09	1.41E-09	1.19E-09
E	1.05E-07	5.11E-08	2.77E-08	1.69E-08	9.47E-09	4.87E-09	2.89E-09	2.00E-09	1.51E-09	1.20E-09	9.74E-10	8.30E-10
ESE	1.59E-07	5.44E-08	2.89E-08	1.71E-08	9.48E-09	4.88E-09	2.90E-09	2.01E-09	1.51E-09	1.20E-09	9.79E-10	8.36E-10
SE	3.21E-07	6.89E-08	3.42E-08	1.97E-08	1.04E-08	5.16E-09	3.02E-09	2.08E-09	1.57E-09	1.24E-09	1.01E-09	8.58E-10
SSE	6.02E-07	2.00E-07	8.27E-08	3.97E-08	1.69E-08	7.16E-09	3.92E-09	2.65E-09	1.98E-09	1.56E-09	1.26E-09	1.07E-09
S	5.51E-07	2.88E-07	1.54E-07	8.95E-08	4.31E-08	1.92E-08	1.06E-08	7.11E-09	5.28E-09	4.15E-09	3.37E-09	2.84E-09
SSW	2.22E-07	2.05E-07	1.35E-07	8.59E-08	4.39E-08	2.02E-08	1.12E-08	7.53E-09	5.59E-09	4.40E-09	3.56E-09	2.98E-09
SW	1.08E-07	9.13E-08	6.63E-08	4.72E-08	2.71E-08	1.33E-08	7.55E-09	5.12E-09	3.81E-09	3.00E-09	2.41E-09	1.99E-09
WSW	6.02E-08	3.71E-08	2.51E-08	1.86E-08	1.19E-08	6.52E-09	3.94E-09	2.76E-09	2.09E-09	1.67E-09	1.37E-09	1.13E-09
W	3.00E-08	1.59E-08	1.11E-08	8.85E-09	6.32E-09	3.88E-09	2.50E-09	1.80E-09	1.39E-09	1.12E-09	9.28E-10	7.72E-10
WNW	3.73E-08	2.18E-08	1.55E-08	1.17E-08	7.43E-09	3.96E-09	2.32E-09	1.60E-09	1.20E-09	9.42E-10	7.61E-10	6.29E-10
NW	1.10E-07	1.27E-07	8.25E-08	5.28E-08	2.66E-08	1.14E-08	5.85E-09	3.76E-09	2.69E-09	2.06E-09	1.61E-09	1.30E-09
NNW	3.54E-07	1.84E-07	1.06E-07	6.54E-08	3.22E-08	1.39E-08	7.24E-09	4.69E-09	3.39E-09	2.61E-09	2.03E-09	1.67E-09

表 3-4　辽宁红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子

（2/3）：^{131}I　　单位：s/m^3

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	3.67E-07	1.46E-07	8.31E-08	4.96E-08	2.28E-08	8.12E-09	3.13E-09	1.54E-09	8.88E-10	5.72E-10	3.79E-10	2.76E-10
NNE	3.32E-07	1.29E-07	7.72E-08	4.82E-08	2.32E-08	8.56E-09	3.35E-09	1.64E-09	9.39E-10	5.96E-10	3.90E-10	2.80E-10
NE	2.62E-07	1.04E-07	6.16E-08	3.95E-08	2.01E-08	7.80E-09	3.10E-09	1.49E-09	8.34E-10	5.20E-10	3.38E-10	2.41E-10
ENE	1.63E-07	6.89E-08	3.91E-08	2.36E-08	1.17E-08	4.58E-09	1.87E-09	9.10E-10	5.18E-10	3.32E-10	2.26E-10	1.68E-10
E	9.27E-08	4.37E-08	2.27E-08	1.35E-08	7.00E-09	2.77E-09	1.07E-09	4.82E-10	2.56E-10	1.54E-10	9.86E-11	7.00E-11
ESE	1.42E-07	4.38E-08	2.17E-08	1.24E-08	6.39E-09	2.55E-09	9.87E-10	4.46E-10	2.39E-10	1.45E-10	9.61E-11	7.03E-11
SE	3.00E-07	5.89E-08	2.72E-08	1.49E-08	7.18E-09	2.73E-09	1.05E-09	4.80E-10	2.62E-10	1.62E-10	1.08E-10	7.96E-11
SSE	5.68E-07	1.81E-07	7.19E-08	3.30E-08	1.28E-08	4.32E-09	1.68E-09	8.47E-10	5.14E-10	3.50E-10	2.54E-10	1.98E-10
S	5.14E-07	2.60E-07	1.35E-07	7.56E-08	3.38E-08	1.27E-08	5.53E-09	3.11E-09	2.05E-09	1.49E-09	1.14E-09	9.18E-10
SSW	1.98E-07	1.81E-07	1.15E-07	7.12E-08	3.38E-08	1.32E-08	5.88E-09	3.33E-09	2.19E-09	1.59E-09	1.21E-09	9.69E-10
SW	8.94E-08	7.54E-08	5.42E-08	3.78E-08	2.01E-08	8.10E-09	3.45E-09	1.82E-09	1.12E-09	7.70E-10	5.54E-10	4.21E-10
WSW	4.67E-08	2.63E-08	1.73E-08	1.27E-08	7.56E-09	3.10E-09	1.15E-09	5.04E-10	2.58E-10	1.48E-10	9.10E-11	6.08E-11
W	2.23E-08	1.06E-08	7.51E-09	6.10E-09	4.08E-09	1.76E-09	5.93E-10	2.19E-10	9.41E-11	4.63E-11	2.47E-11	1.49E-11
WNW	3.01E-08	1.70E-08	1.21E-08	9.04E-09	5.17E-09	2.00E-09	7.01E-10	2.94E-10	1.44E-10	7.87E-11	4.49E-11	2.87E-11
NW	9.71E-08	1.09E-07	6.77E-08	4.14E-08	1.89E-08	6.56E-09	2.50E-09	1.23E-09	7.14E-10	4.58E-10	3.03E-10	2.14E-10
NNW	3.24E-07	1.58E-07	8.76E-08	5.17E-08	2.32E-08	8.10E-09	3.10E-09	1.52E-09	8.72E-10	5.56E-10	3.57E-10	2.53E-10

表 3-4　辽宁红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期大气弥散因子

（3/3）：^{137}Cs　　单位：s/m^3

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	4.00E-07	1.69E-07	9.86E-08	6.05E-08	3.02E-08	1.32E-08	6.85E-09	4.37E-09	3.09E-09	2.32E-09	1.77E-09	1.43E-09
NNE	3.62E-07	1.48E-07	9.06E-08	5.78E-08	3.01E-08	1.35E-08	7.14E-09	4.57E-09	3.24E-09	2.44E-09	1.87E-09	1.52E-09
NE	2.87E-07	1.19E-07	7.11E-08	4.62E-08	2.52E-08	1.21E-08	6.70E-09	4.39E-09	3.14E-09	2.38E-09	1.84E-09	1.49E-09
ENE	1.79E-07	7.87E-08	4.60E-08	2.84E-08	1.51E-08	7.23E-09	4.04E-09	2.66E-09	1.91E-09	1.45E-09	1.13E-09	9.31E-10
E	1.04E-07	5.03E-08	2.71E-08	1.65E-08	9.13E-09	4.58E-09	2.62E-09	1.74E-09	1.25E-09	9.49E-10	7.38E-10	6.00E-10
ESE	1.57E-07	5.35E-08	2.82E-08	1.66E-08	9.08E-09	4.54E-09	2.59E-09	1.71E-09	1.23E-09	9.27E-10	7.24E-10	5.91E-10
SE	3.19E-07	6.80E-08	3.34E-08	1.91E-08	9.98E-09	4.83E-09	2.72E-09	1.79E-09	1.29E-09	9.76E-10	7.57E-10	6.16E-10
SSE	5.99E-07	1.98E-07	8.17E-08	3.91E-08	1.65E-08	6.83E-09	3.62E-09	2.35E-09	1.68E-09	1.26E-09	9.80E-10	7.98E-10
S	5.48E-07	2.86E-07	1.53E-07	8.81E-08	4.21E-08	1.85E-08	9.90E-09	6.50E-09	4.72E-09	3.62E-09	2.87E-09	2.37E-09
SSW	2.20E-07	2.03E-07	1.33E-07	8.45E-08	4.28E-08	1.94E-08	1.05E-08	6.91E-09	5.01E-09	3.86E-09	3.06E-09	2.50E-09
SW	1.06E-07	8.97E-08	6.49E-08	4.61E-08	2.62E-08	1.26E-08	6.95E-09	4.57E-09	3.30E-09	2.53E-09	1.97E-09	1.58E-09
WSW	5.91E-08	3.61E-08	2.42E-08	1.78E-08	1.12E-08	5.92E-09	3.41E-09	2.28E-09	1.65E-09	1.25E-09	9.69E-10	7.65E-10
W	2.93E-08	1.53E-08	1.07E-08	8.47E-09	5.99E-09	3.56E-09	2.17E-09	1.47E-09	1.06E-09	7.99E-10	6.21E-10	4.85E-10
WNW	3.65E-08	2.11E-08	1.50E-08	1.13E-08	7.05E-09	3.64E-09	2.04E-09	1.34E-09	9.53E-10	7.09E-10	5.42E-10	4.26E-10
NW	1.09E-07	1.26E-07	8.09E-08	5.15E-08	2.56E-08	1.07E-08	5.34E-09	3.33E-09	2.32E-09	1.73E-09	1.31E-09	1.03E-09
NNW	3.52E-07	1.81E-07	1.05E-07	6.40E-08	3.13E-08	1.32E-08	6.72E-09	4.23E-09	2.97E-09	2.22E-09	1.67E-09	1.33E-09

表 3-5　辽宁红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期地面沉积因子

（1/2）：^{131}I　　单位：$1/m^2$

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	1.20E-08	4.76E-09	2.69E-09	1.60E-09	7.37E-10	2.63E-10	1.02E-10	5.06E-11	2.95E-11	1.92E-11	1.29E-11	9.47E-12
NNE	1.08E-08	4.16E-09	2.50E-09	1.56E-09	7.53E-10	2.79E-10	1.10E-10	5.47E-11	3.17E-11	2.04E-11	1.36E-11	9.92E-12
NE	8.51E-09	3.39E-09	2.00E-09	1.28E-09	6.52E-10	2.54E-10	1.02E-10	4.98E-11	2.83E-11	1.79E-11	1.19E-11	8.67E-12
ENE	5.32E-09	2.26E-09	1.29E-09	7.75E-10	3.84E-10	1.51E-10	6.26E-11	3.12E-11	1.82E-11	1.19E-11	8.31E-12	6.32E-12
E	3.12E-09	1.51E-09	7.97E-10	4.74E-10	2.46E-10	9.93E-11	4.06E-11	2.00E-11	1.18E-11	7.85E-12	5.63E-12	4.39E-12
ESE	4.66E-09	1.44E-09	7.16E-10	4.09E-10	2.11E-10	8.48E-11	3.35E-11	1.56E-11	8.68E-12	5.50E-12	3.80E-12	2.87E-12
SE	9.82E-09	1.93E-09	8.92E-10	4.89E-10	2.36E-10	9.04E-11	3.52E-11	1.66E-11	9.34E-12	5.98E-12	4.12E-12	3.12E-12
SSE	1.86E-08	6.00E-09	2.38E-09	1.09E-09	4.24E-10	1.44E-10	5.66E-11	2.91E-11	1.79E-11	1.24E-11	9.12E-12	7.19E-12
S	1.67E-08	8.50E-09	4.45E-09	2.51E-09	1.13E-09	4.33E-10	1.94E-10	1.12E-10	7.50E-11	5.54E-11	4.30E-11	3.51E-11
SSW	6.64E-09	5.92E-09	3.77E-09	2.32E-09	1.11E-09	4.34E-10	1.95E-10	1.11E-10	7.40E-11	5.40E-11	4.15E-11	3.32E-11
SW	3.16E-09	2.59E-09	1.84E-09	1.28E-09	6.81E-10	2.79E-10	1.22E-10	6.66E-11	4.24E-11	2.99E-11	2.22E-11	1.73E-11
WSW	1.70E-09	9.94E-10	6.53E-10	4.74E-10	2.80E-10	1.19E-10	4.87E-11	2.47E-11	1.49E-11	1.02E-11	7.53E-12	5.84E-12
W	7.52E-10	3.61E-10	2.54E-10	2.04E-10	1.35E-10	5.88E-11	2.05E-11	8.13E-12	3.88E-12	2.19E-12	1.39E-12	9.83E-13
WNW	1.08E-09	6.28E-10	4.42E-10	3.26E-10	1.87E-10	7.49E-11	2.90E-11	1.41E-11	8.29E-12	5.53E-12	3.99E-12	3.07E-12
NW	3.31E-09	3.66E-09	2.27E-09	1.40E-09	6.47E-10	2.32E-10	9.32E-11	4.90E-11	3.03E-11	2.07E-11	1.49E-11	1.12E-11
NNW	1.07E-08	5.20E-09	2.89E-09	1.70E-09	7.67E-10	2.71E-10	1.06E-10	5.35E-11	3.17E-11	2.09E-11	1.40E-11	1.03E-11

表 3-5　辽宁红沿河核电厂 3、4 号机组气载放射性流出物排放的长期地面沉积因子

（1/2）：^{137}Cs　　单位：$1/m^2$

距离（km） 方位	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	1.18E-09	4.48E-10	2.47E-10	1.47E-10	7.19E-11	3.15E-11	1.66E-11	1.08E-11	7.73E-12	5.90E-12	4.60E-12	3.77E-12
NNE	9.34E-10	3.54E-10	2.20E-10	1.40E-10	7.38E-11	3.40E-11	1.85E-11	1.21E-11	8.82E-12	6.79E-12	5.36E-12	4.44E-12
NE	7.47E-10	3.17E-10	1.89E-10	1.20E-10	6.46E-11	3.12E-11	1.76E-11	1.17E-11	8.60E-12	6.64E-12	5.27E-12	4.37E-12
ENE	5.23E-10	2.42E-10	1.40E-10	8.43E-11	4.44E-11	2.14E-11	1.23E-11	8.28E-12	6.12E-12	4.79E-12	3.86E-12	3.24E-12
E	4.28E-10	2.68E-10	1.56E-10	9.26E-11	4.97E-11	2.49E-11	1.47E-11	1.02E-11	7.72E-12	6.16E-12	5.08E-12	4.32E-12
ESE	4.83E-10	1.61E-10	8.78E-11	5.12E-11	2.75E-11	1.37E-11	7.93E-12	5.38E-12	3.98E-12	3.09E-12	2.49E-12	2.09E-12
SE	9.75E-10	1.94E-10	9.82E-11	5.58E-11	2.88E-11	1.39E-11	7.98E-12	5.39E-12	3.99E-12	3.09E-12	2.48E-12	2.07E-12
SSE	1.85E-09	6.78E-10	2.78E-10	1.30E-10	5.31E-11	2.16E-11	1.15E-11	7.59E-12	5.54E-12	4.28E-12	3.42E-12	2.85E-12
S	1.48E-09	8.42E-10	5.04E-10	3.13E-10	1.62E-10	7.74E-11	4.45E-11	3.07E-11	2.33E-11	1.86E-11	1.53E-11	1.31E-11
SSW	9.02E-10	6.10E-10	3.77E-10	2.36E-10	1.20E-10	5.57E-11	3.11E-11	2.09E-11	1.55E-11	1.22E-11	9.92E-12	8.26E-12
SW	6.51E-10	4.29E-10	2.82E-10	1.91E-10	1.07E-10	5.31E-11	3.07E-11	2.12E-11	1.60E-11	1.27E-11	1.04E-11	8.67E-12
WSW	4.17E-10	2.95E-10	1.92E-10	1.32E-10	7.75E-11	4.04E-11	2.41E-11	1.70E-11	1.30E-11	1.04E-11	8.66E-12	7.19E-12
W	1.14E-10	6.25E-11	4.10E-11	2.99E-11	1.93E-11	1.09E-11	6.60E-12	4.56E-12	3.39E-12	2.63E-12	2.12E-12	1.70E-12
WNW	2.47E-10	1.67E-10	1.10E-10	7.61E-11	4.46E-11	2.31E-11	1.36E-11	9.54E-12	7.26E-12	5.80E-12	4.80E-12	3.98E-12
NW	5.18E-10	4.90E-10	3.20E-10	2.10E-10	1.13E-10	5.33E-11	3.00E-11	2.05E-11	1.54E-11	1.23E-11	1.01E-11	8.43E-12
NNW	1.19E-09	5.86E-10	3.27E-10	1.97E-10	9.75E-11	4.34E-11	2.34E-11	1.55E-11	1.14E-11	8.91E-12	7.12E-12	5.89E-12

3.2.2 海水稀释和岸边沉积

辽宁红沿河核电厂运行期间液态放射性流出物经处理后采用槽式排放方式，在满足排放要求后，随温排水一起排入辽东湾海域，并在海水潮流作用下进一步稀释扩散。表 3-6 给出了辽宁红沿河核电厂一期工程（四台机组）排放的不同半衰期核素在各海域的海水稀释因子。

表 3-6 液态放射性流出物排放在受纳海域中的平均稀释倍数

离排水口距离（km）	放射性核素半衰期			
	8 天	70 天	250 天	5 年
0~1	6.95	6.37	6.3	6.28
1~5	31.2	23.9	23.1	22.9
5~10	102	67.9	64.9	63.9
10~20	304	181	172	168
20~30	1031	554	519	507

3.3 海水水质和海洋生物的辐射剂量分析

（1） 海水水质影响分析

辽宁红沿河核电厂液态放射性流出物经监测合格，达到排放标准后随电厂温排水排入附近海域。

《海水水质标准》（GB3097-1997）中规定了海水中部分放射性核素的浓度限值，其中与陆丰核电厂液态放射性流出物排放相关的有 ^{60}Co、^{90}Sr、^{106}Ru、^{134}Cs 和 ^{137}Cs 五个核素，其水质指标限值分别为 0.03Bq/L、4.0Bq/L、0.2Bq/L、0.6Bq/L 和 0.7Bq/L。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组正常运行工况下的液态流出物中 ^{60}Co、^{90}Sr、^{106}Ru、^{134}Cs 和 ^{137}Cs 等五种核素年设计排放量分别为：6.90×10^{8}Bq、7.46×10^{5}Bq、2.48×10^{5}Bq、5.63×10^{9}Bq 和 6.01×10^{9}Bq。辽宁红沿河一期工程四台机组年废液年排放量约为 40000m^3，废液排放泵设计最大流量 150m^3/h。

辽宁红沿河核电厂液态放射性流出物经处理达标后，随电厂温排水排入电厂附件海域。辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组共用排水口，循环冷却水流量夏季 197.72m^3/s，冬季 158.52 m^3/s（排回流 39.2 m^3/s），则电厂排放五种核素在排水口处与

海水完全混合的浓度计算公式如下所示：

$$c=\frac{Q/\left(\frac{V}{d}\right)}{v}\cdot\frac{1}{1-\lambda_{取}}\cdot\frac{1}{1-\lambda_{排}}$$

式中： Q——核素设计排放量，Bq；

V——废液产生量，m^3；

d——废液排放泵最大流量，m^3/h；

v——循环冷却水流量，m^3/s，此处按冬季较小循环冷却水流量保守估算；

$\lambda_{取}$、$\lambda_{排}$——取，排水回归参数，分别为 0.247（39.2/158.52）和 0.0437；

计算结果显示，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组 ^{60}Co、^{90}Sr、^{106}Ru、^{134}Cs 和 ^{137}Cs 等五个液态放射性核素在排水构筑物完全混合的浓度贡献预计将达到 6.30×10^{-3}Bq/L、6.81×10^{-6}Bq/L、2.26×10^{-6}Bq/L、5.14×10^{-2}Bq/L 和 5.48×10^{-2}Bq/L，能够满足《海水水质标准》（GB3097-1997）中相应核素低于 0.03Bq/L、4.0Bq/L、0.2Bq/L、0.6Bq/L 和 0.7Bq/L 的浓度要求。

因此，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状态下，由于液态放射性流出物排放所致海水的放射性浓度可以满足《海水水质标准》（GB3097-1997）中关于海水水质的放射性浓度要求。

（2） 海洋生物的辐射剂量分析

海洋生物受到的辐射照射主要来自宇宙射线、天然放射性物质以及核设施排放的液态放射性流出物，这些照射导致了海洋生物的外照射剂量和内照射剂量。其中外照射剂量来源于水体照射和底泥照射，内照射剂量来源于生物直接摄入放射性核素并通过代谢过程在生物体内浓集。

由于生物种类的庞大和生存环境的广阔，目前国际上普遍使用特征生物（包括参考生物，参考动植物，代表物种，特征物种和受体的名称）的概念对生物进行辐射影响评价。

根据 IAEA422 号技术报告推荐的海鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物等海洋生物体对核素的生物浓集系数以及海水中悬浮物对核素的吸附分配因子，采用 ERICA 项目提出的生物辐射剂量率计算方法和各种核素对浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物等海洋生物体辐射的剂量转换因

子（见表 5.3-2），对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组运行状态下液态放射性流出物排放造成的海洋生物的辐射剂量率进行计算，计算中海鱼类和藻类在海水中的居留因子取 1，甲壳类和软体类在海水中以及底泥中的居留因子取 0.5。

从表可以看出：辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行排放液态放射性流出物对排放口附近海域中浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物七类海洋生物造成的附加辐射剂量率分别为 6.45×10^{-3}μGy/h、6.71×10^{-3}μGy/h、7.47×10^{-3}μGy/h、1.55×10^{-2}μGy/h、9.78×10^{-3}μGy/h、1.50×10^{-5}μGy/h、7.82×10^{-3}μGy/h，其中辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组排放的液态放射性流出物对七类海洋生物造成的辐射剂量率贡献分别为 3.25×10^{-3}μGy/h、3.40×10^{-3}μGy/h、3.81×10^{-3}μGy/h、8.13×10^{-3}μGy/h、4.92×10^{-3}μGy/h、5.94×10^{-6}μGy/h、3.93×10^{-3}μGy/h。

因此，从计算结果可以看出，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状态下，液态放射性流出物对排放口附近海域水体中浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物七类海洋生物的辐射剂量率均远小于 ERICA 程序推荐的 10μGy/h 剂量率筛选值。因此，可以预计，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组排放的液态放射性流出物对受纳海域水体中浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物七类参考海洋生物不会造成明显的损伤，对核电厂周围海域中的海洋生物总体上影响很小。

3.4 公众辐射剂量分析

3.4.1 照射途径

（1） 气态途径

气载放射性流出物对厂址评价区内公众造成的辐射影响考虑以下照射途径：

— 空气浸没外照射；

— 地面沉积物外照射；

— 吸入空气内照射；

— 食入陆生动植物食品内照射。

图 3-1 给出了气载放射性流出物对公众的照射途径示意图。

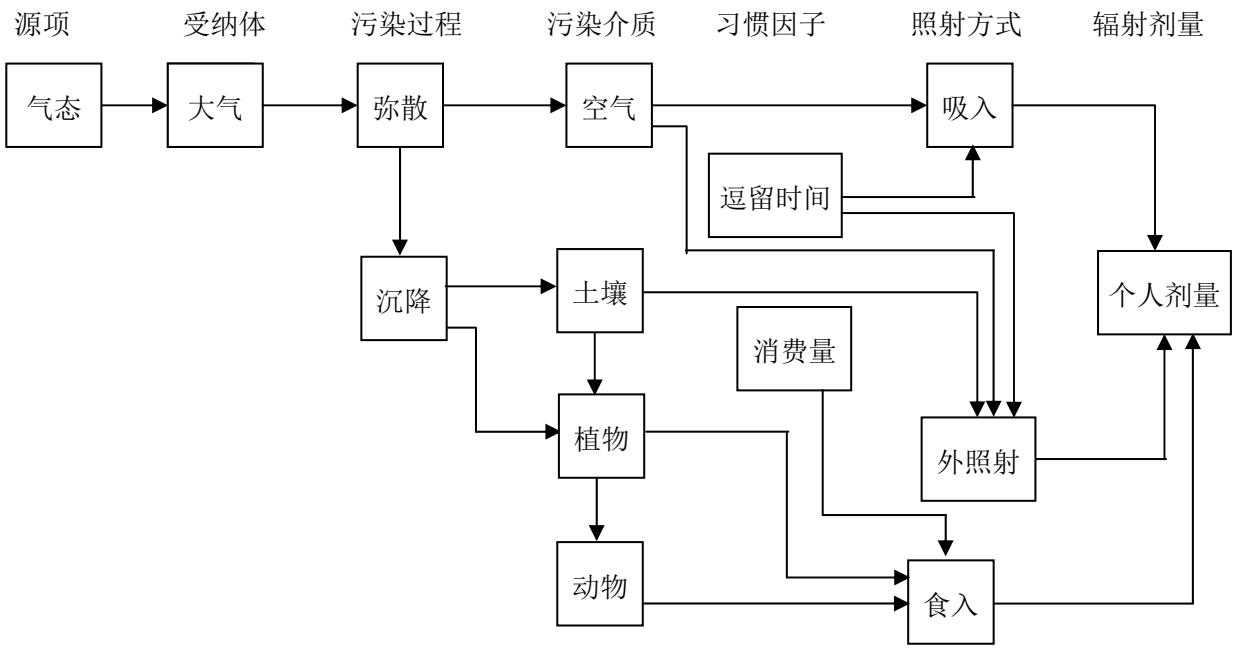


图 3-1　气载放射性流出物照射途径示意图

（2） 液态途径

液态放射性流出物对厂址评价区内公众造成的辐射影响考虑以下照射途径：

— 海上活动外照射；

— 岸边沉积物外照射；

— 食入海产品内照射。

图 3-2 给出了液态放射性流出物对公众的照射途径示意图。

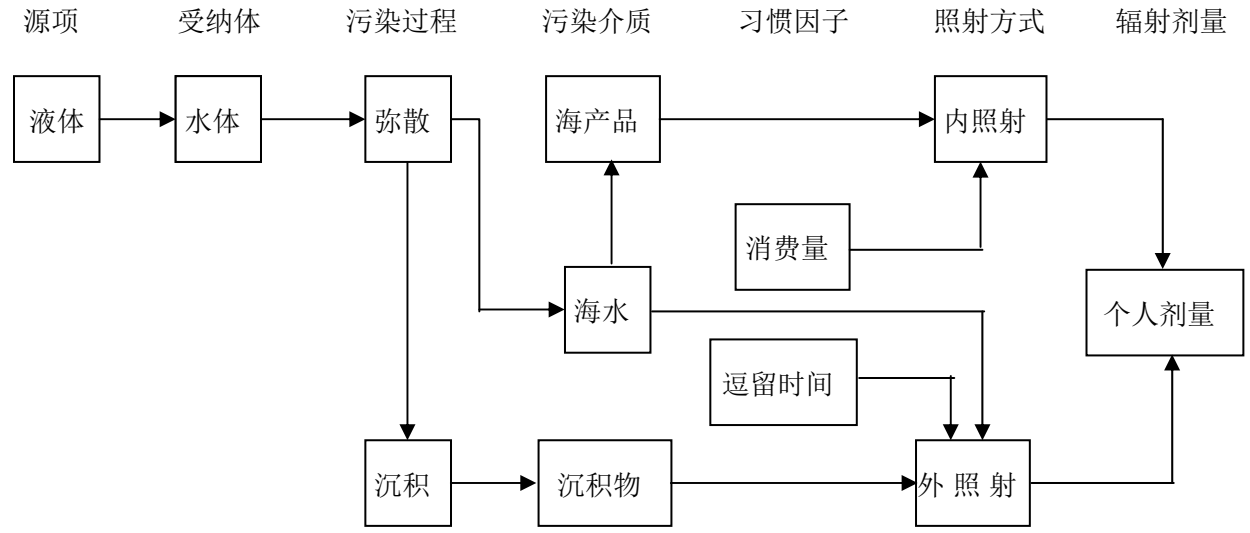


图 3-2　液态放射性流出物照射途径示意图

3.4.2 计算模型和参数

电厂运行状态下，气载和液态放射性流出物通过各照射途径对公众造成的剂量估算模式见附录A。相关的计算参数如下：

（1） 环境相关参数

— 表3-7给出了辐射剂量计算中涉及的陆域环境介质参数；

— 表3-8给出了放射性核素在食物链中转移的特征参数；

— 表3-9给出了用于气态途径辐射剂量计算的相关参数。

— 表3-10给出了海鱼类、软体类、甲壳类以及藻类等四类海产品可食部分的生物浓集因子和海水中悬浮物对元素的吸附分配K_d因子；

— 表3-11给出了液态照射途径辐射剂量计算参数。

表 3-7 陆域环境介质浓度计算参数

物理意义	单位	数值
奶牛每天消费的饲料量	kg/d	50
产肉动物每天消费的饲料量	kg/d	5
作物在生长季节中的曝污时间	h	2880
叶类蔬菜在生长季节中的曝污时间	h	1080
作物从收获到被消费的时间间隔	h	1800
从挤奶到牛奶被消费的时间间隔	h	24
从产肉动物被屠宰到被消费的时间间隔	h	24
叶类蔬菜从收获到被消费的时间间隔	h	24
海产品从捕捞到被消费的时间间隔	h	24
单位体积空气中的含水率	g 水/m^3 空气	12.8
作物中的平均含水率	无量纲	0.160
牛奶中的平均含水率	无量纲	0.881
肉类中的平均含水率	无量纲	0.750
叶类蔬菜中的平均含水率	无量纲	0.928
空气中碳元素的平均浓度	g/m^3	0.18
植物产品和叶类蔬菜碳元素的含量	g/kg	0.18

表 3-8　放射性核素在食物链中转移的特征参数

元素	f_v	f_L	f_M（Bq/kg 牛奶）/（Bq/d）	f_F（Bq/kg 肉）/（Bq/d）	B_v（Bq/kg 作物）/（Bq/kg 干土）	B_L（Bq/kg 蔬菜）/（Bq/kg 干土）	λ_G（1/h）	λ_v（1/h）	λ_L（1/h）
$_{27}$Co	0.2	0.2	1.00×10^{-2}	7.00×10^{-2}	2.00	8.00×10^{-2}	0	2.06×10^{-3}	2.06×10^{-3}
$_{53}$I	0.2	0.2	1.00×10^{-2}	5.00×10^{-2}	1.00×10^{-1}	2.00×10^{-2}	5.83×10^{-5}	2.06×10^{-3}	2.06×10^{-3}
$_{55}$Cs	0.5	0.2	1.00×10^{-2}	5.00×10^{-2}	1.00	4.00×10^{-2}	5.83×10^{-6}	2.06×10^{-3}	2.06×10^{-3}

表 3-9　气态途径辐射剂量计算相关参数

物理意义	单　位	数值
气载放射性流出物在地面上的积累时间	h	350400
土壤中放射性积累时间	h	350400
15cm 深度内土壤的有效面密度	kg 干土/m^2	200
人的呼吸率 • 成人 • 青年 • 儿童	m^3 空气/h	 0.96 0.96 0.61
考虑公众在室外滞留时间及建筑物屏蔽作用等因素确定的空气浸没和地面沉积外照射修正因子	无量纲	0.75
清洗因子	无量纲	0.5

表 3-10　海产品可食部份生物浓集因子 Bp 和悬浮物吸附分配因子 Kd

元素	K_d (L/kg)	海产品浓集因子 B_p（Bq/kg）/（Bq/L）				元素	K_d (L/kg)	海产品浓集因子 B_p（Bq/kg）/（Bq/L）			
		鱼类	甲壳类	软体类	藻类			鱼类	甲壳类	软体类	藻类
$_{24}$Cr	5×10^4	2×10^2	8×10^2	5×10^2	3×10^4	$_{44}$Ru	3×10^2	2	2×10^3	2×10^3	2×10^3
$_{25}$Mn	2×10^5	4×10^2	5×10^3	1×10^4	1×10^4	$_{47}$Ag	1×10^3	5×10^2	1×10^4	1×10^5	1×10^3
$_{26}$Fe	5×10^4	3×10^3	3×10^4	1×10^3	1×10^4	$_{51}$Sb	1×10^3	4×10^2	4×10^2	1×10^2	1×10^2
$_{27}$Co	2×10^5	1×10^3	5×10^3	1×10^3	1×10^3	$_{52}$Te	1×10^3	1×10^3	1×10^3	1×10^4	1×10^4
$_{38}$Sr	1×10^3	2	2	10	10	$_{53}$I	2×10^1	10	10	1×10^2	1×10^3
$_{39}$Y	1×10^7	20	1×10^3	1×10^3	1×10^3	$_{55}$Cs	3×10^3	1×10^2	30	10	10
$_{40}$Zr	1×10^6	20	5×10^3	1×10^3	5×10^2	$_{56}$Ba	5×10^3	10	1	1×10^2	5×10^2
$_{41}$Nb	5×10^5	30	1×10^3	1×10^3	5×10^2	$_{57}$La	3×10^6	30^*	$1\times10^{3*}$	1×10^3	5×10^3
$_{42}$Mo	1×10^2	10	1×10^2	1×10^2	1×10^2	$_{58}$Ce	2×10^6	50	5×10^3	10	10
$_{43}$Tc	1×10^2	30	1×10^3	1×10^2	1×10^4	$_{59}$Pr	5×10^6	25	1×10^3	—	—

表 3-11　液态照射途径辐射剂量计算参数

物理意义	单位	数值
悬浮物有效沉积密度	kg/m^2	60
海水中悬浮物的浓度	kg/m^3	0.01
岸边沉积物中放射性积累时间	h	8760

（2） 剂量转换因子

表 3-12~表 3-14 给出了公众受各照射途径造成辐射剂量的各类剂量转换因子，其中惰性气体的空气浸没外照射剂量转换因子以及其它各类放射性核素的吸入和食入内照射剂量转换因子取自《电离辐射防护和辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），除惰性气体外其它核素的空气浸没以及地面沉积外照射剂量转换因子取自 IAEA 19 号安全报告，水体浸没外照射剂量转换因子取自美国联邦导则 12 号报告。

（3） 食物消费和生活习惯

厂址半径 80km 范围内各子区陆上环境介质（如粮食、蔬菜等）的面积、产量，公众的食物消费量以及生活习惯因子等由现场调查获取的结果确定。

表 3-12　惰性气体空气浸没外照射有效剂量转换因子

核素	物理半衰期	空气浸没转换因子（Sv/h）/（Bq/m^3）	核素	物理半衰期	空气浸没转换因子（Sv/h）/（Bq/m^3）
^{85}Kr	10.7 y	9.17E-13	^{133}Xe	5.24 d	5.00E-12
^{85m}Kr	4.48 h	2.46E-11	^{133m}Xe	2.19 d	4.58E-12
^{87}Kr	1.27 h	1.42E-10	^{135}Xe	9.10 h	4.00E-11
^{88}Kr	2.84 h	3.50E-10	^{138}Xe	14.2 min	1.96E-10

表 3-13　空气浸没外照射和空气吸入内照射剂量转换因子

核素	物理半衰期	空气浸没（Sv/h）/（Bq/m^3）	吸入（Sv/Bq）		
			儿童	青少年	成人
^{58}Co	70.8d	1.71E-10	3.50E-09	2.40E-09	1.60E-09
^{60}Co	5.27y	4.57E-10	2.10E-08	1.50E-08	1.00E-08
^{131}I	8.04d	6.62E-11	8.20E-09	4.70E-09	2.40E-09
^{132}I	2.30h	4.11E-10	3.60E-10	2.20E-10	1.10E-10
^{133}I	20.8h	1.08E-10	2.10E-09	1.20E-09	5.50E-10
^{134}I	52.6min	4.78E-10	1.70E-10	1.00E-10	5.40E-11
^{135}I	6.61h	2.97E-10	7.80E-10	4.70E-10	2.40E-10
^{134}Cs	2.062y	2.74E-10	1.60E-08	1.20E-08	9.10E-09
^{137}Cs	30.0y	9.93E-11	1.80E-08	1.30E-08	9.70E-09

表 3-14　地面沉积和水体浸没外照射以及食入内照射剂量转换因子

核素	半衰期	地面沉积外照射	水体浸没外照射	食入内照射			核素	半衰期	地面沉积外照射	水体浸没外照射	食入内照射		
				儿童	青少年	成人					儿童	青少年	成人
^{3}H	12.35 y	—	—	4.80E-11	2.30E-11	1.80E-11	^{132}Te	78.2h	9.02E-12	8.21E-14	3.00E-08	8.30E-09	3.80E-09
^{14}C	5730 y	—	—	1.60E-09	8.00E-10	5.80E-10	^{110m}Ag	250 d	9.70E-12	1.06E-12	1.40E-08	5.20E-09	2.80E-09
^{51}Cr	27.7 d	1.12E-13	1.19E-14	2.30E-10	7.80E-11	3.80E-11	^{124}Sb	60.2d	6.39E-12	7.13E-13	1.60E-08	5.20E-09	2.50E-09
^{54}Mn	312 d	2.97E-12	3.20E-13	3.10E-09	1.30E-09	7.10E-10	^{131}I	8.04 d	1.37E-12	1.43E-13	1.80E-07	5.20E-08	2.20E-08
^{59}Fe	44.5 d	4.11E-12	4.64E-13	1.30E-08	4.70E-09	1.80E-09	^{132}I	2.30 h	8.22E-12	8.75E-13	2.40E-09	6.20E-10	2.90E-10
^{58}Co	70.8 d	3.42E-12	3.71E-13	4.40E-09	1.70E-09	7.40E-10	^{133}I	20.8 h	2.28E-12	2.30E-13	4.40E-08	1.00E-08	4.30E-09
^{60}Co	5.27 y	8.56E-12	9.86E-13	2.70E-08	1.10E-08	3.40E-09	^{134}I	52.6min	9.47E-12	1.02E-12	7.50E-10	2.10E-10	1.10E-10
^{89}Sr	50.5 d	2.51E-13	5.36E-16	1.80E-08	5.80E-09	2.60E-09	^{135}I	6.61 h	5.48E-12	6.23E-13	8.90E-09	2.20E-09	9.30E-10
^{90}Sr	29.12 y	4.00E-13	5.26E-17	7.30E-08	6.00E-08	2.80E-08	^{134}Cs	2.062 y	5.59E-12	5.90E-13	1.60E-08	1.90E-08	1.90E-08
^{91}Sr	9.5h	2.08E-12	2.69E-13	4.00E-09	1.2E-09	6.50E-10	^{136}Cs	13.1 d	7.65E-12	8.32E-13	9.50E-09	4.40E-09	3.00E-09
^{90}Y	64.0h	4.00E-13	1.31E-15	2.00E-08	5.90E-09	2.70E-09	^{137}Cs	30.0 y	2.05E-12	5.36E-17	1.20E-08	1.30E-08	1.30E-08
^{91}Y	58.5d	2.74E-13	1.96E-15	1.80E-08	5.20E-09	2.40E-09	^{140}Ba	12.74 d	6.25E-13	6.73E-14	1.80E-08	5.80E-09	2.60E-09
^{95}Zr	63.98 d	5.37E-12	2.82E-13	5.60E-09	1.90E-09	9.50E-10	^{140}La	40.27 h	6.67E-12	9.14E-13	1.30E-08	4.20E-09	2.00E-09
^{95}Nb	35.15 d	2.74E-12	2.92E-13	3.20E-09	1.10E-09	5.80E-10	^{141}Ce	32.5d	2.74E-13	2.74E-14	5.10E-09	1.50E-09	7.10E-10
^{99}Mo	66.0 h	1.05E-12	5.69E-14	3.50E-09	1.10E-09	6.00E-10	^{143}Ce	1.38d	1.00E-12	1.02E-13	8.00E-09	2.40E-09	1.10E-09
^{99m}Tc	6.02 h	4.45E-13	4.72E-14	1.30E-10	4.30E-11	2.20E-11	^{144}Ce	284.3 d	6.51E-13	6.88E-15	3.90E-08	1.10E-08	5.20E-09
^{103}Ru	39.28 d	1.71E-12	1.76E-13	4.60E-09	1.50E-09	7.30E-10	^{143}Pr	13.56d	2.79E-20	1.45E-16	8.70E-09	2.60E-09	1.20E-09
^{106}Ru	368.2d	1.26E-12	1.40E-13	4.90E-08	1.50E-08	7.00E-09	^{144}Pr	17.28min	9.17E-14	1.49E-14	3.50E-10	9.50E-11	5.00E-11
^{131m}Te	30h	5.59E-12	5.47E-13	1.40E-08	4.30E-09	1.90E-09							

注：食入内照射剂量转换因子（Sv/Bq）取自国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）。

地面沉积外照射途径有效剂量转换因子（Sv/h）/（Bq/m^2）取自 IAEA Safety Report Series No.19。

水体浸没外照射途径有效剂量转换因子（Sv/h）/（Bq/m^3）取自 Federal Guidance Report NO.12。

3.4.3 一般公众辐射剂量

对辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状态下排放的放射性流出物所致的公众剂量进行了计算。有关成人、青少年和儿童的剂量计算结果分别见表 3-15 表 3-20。

（1）公众（成人组）个人剂量

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，以及辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状况下，放射性流出物排放对成人组公众造成辐射剂量最大的子区为厂址 ENE 方位 2~3km 子区，其中由一期工程 1、2 号机组造成的年有效剂量为 3.77×10^{-7}Sv/a，一期工程四台机组造成的总年有效剂量为 8.27×10^{-7}Sv/a。

（2）公众（青少年组）个人剂量

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，以及辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状况下，放射性流出物排放对青少年公众造成辐射剂量最大的子区均为厂址 ENE 方位 2~3km 子区，其中由一期工程 1、2 号机组造成的年有效剂量为 3.62×10^{-7}Sv/a，一期工程四台机组造成的总年有效剂量为 7.92×10^{-7}Sv/a。

（3）公众（儿童组）个人剂量

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，以及辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状况下，放射性流出物排放对儿童组公众造成辐射剂量最大的子区均为厂址 ENE 方位 2~3km 子区，其中由一期工程 1、2 号机组造成的年有效剂量为 3.43×10^{-7}Sv/a，一期工程四台机组造成的总年有效剂量为 7.48×10^{-7}Sv/a。

（4）最大受照年龄组

比较上述结果发现，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，以及辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状况下，放射性流出物排放对厂址 ENE 方位 2~3km 子区的各年龄组公众个人造成的有效剂量均大于其它各子区，对该子区而言，成人组公众个人年有效剂量最大，青少年组其次，儿童组公众最低。因此，厂址 ENE 方位 2~3km 子区成人组公众为受辽宁红沿河核电厂放射性流出物排放造成辐射影响最大的年龄组，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目运行后，以及辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状况下对该年龄组公众造成的年有效剂量分别为 3.77×10^{-7}Sv/a 和 8.27×10^{-7}Sv/a。

表 3-15　红沿河核电 1、2 号机组对各子区公众个人（成人）造成有效剂量

单位：Sv/a

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NE	—	—	—	—	2.12E-07	9.54E-08	—	—	2.54E-08	1.91E-08	1.70E-08	1.54E-08
ENE	—	—	3.77E-07	—	1.33E-07	6.29E-08	3.31E-08	2.14E-08	1.66E-08	1.26E-08	1.27E-08	1.22E-08
E	—	—	3.29E-07	2.22E-07	1.12E-07	5.51E-08	3.06E-08	2.16E-08	1.62E-08	1.27E-08	1.07E-08	9.28E-09
ESE	—	—	—	—	8.58E-08	4.03E-08	2.14E-08	1.43E-08	1.14E-08	9.30E-09	6.87E-09	5.94E-09
SE	—	—	2.64E-07	1.79E-07	8.99E-08	4.14E-08	2.19E-08	1.48E-08	1.10E-08	9.09E-09	7.47E-09	5.98E-09
SSE	—	—	—	—	1.21E-07	5.30E-08	2.77E-08	1.90E-08	1.38E-08	1.37E-08	9.01E-09	8.19E-09
S	—	—	—	—	4.32E-07	1.92E-07	1.03E-07	6.91E-08	5.29E-08	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—	8.72E-08	5.63E-08	4.46E-08	3.35E-08	—	—
SW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WSW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3-16　红沿河核电一期四台机组对各子区公众个人（成人）造成有效剂量

单位：Sv/a

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NE	—	—	—	—	4.24E-07	1.89E-07	—	—	5.00E-08	3.75E-08	3.34E-08	3.04E-08
ENE	—	—	8.27E-07	—	2.70E-07	1.26E-07	6.59E-08	4.23E-08	3.28E-08	2.48E-08	2.52E-08	2.42E-08
E	—	—	7.00E-07	4.50E-07	2.24E-07	1.10E-07	6.08E-08	4.29E-08	3.21E-08	2.51E-08	2.11E-08	1.83E-08
ESE	—	—	—	—	1.71E-07	7.98E-08	4.23E-08	2.82E-08	2.23E-08	1.82E-08	1.35E-08	1.16E-08
SE	—	—	5.92E-07	3.72E-07	1.82E-07	8.23E-08	4.33E-08	2.91E-08	2.17E-08	1.78E-08	1.46E-08	1.17E-08
SSE	—	—	—	—	2.74E-07	1.12E-07	5.69E-08	3.85E-08	2.77E-08	2.73E-08	1.79E-08	1.62E-08
S	—	—	—	—	8.46E-07	3.76E-07	2.02E-07	1.36E-07	1.04E-07	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—	1.70E-07	1.10E-07	8.72E-08	6.56E-08	—	—
SW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WSW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3-17　红沿河核电 1、2 号机组对各子区公众个人（青少年）造成有效剂量

单位：Sv/a

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NE	—	—	—	—	2.03E-07	8.56E-08	—	—	2.24E-08	1.70E-08	1.54E-08	1.41E-08
ENE	—	—	3.62E-07	—	1.28E-07	5.66E-08	2.95E-08	1.92E-08	1.47E-08	1.12E-08	1.08E-08	1.01E-08
E	—	—	3.13E-07	2.13E-07	1.08E-07	4.89E-08	2.67E-08	1.85E-08	1.39E-08	1.10E-08	9.30E-09	8.14E-09
ESE	—	—	—	—	8.39E-08	3.74E-08	1.92E-08	1.29E-08	1.11E-08	8.90E-09	6.50E-09	5.61E-09
SE	—	—	2.55E-07	1.74E-07	8.79E-08	3.81E-08	1.98E-08	1.33E-08	9.93E-09	9.01E-09	7.51E-09	5.79E-09
SSE	—	—	—	—	1.17E-07	4.92E-08	2.50E-08	1.69E-08	1.24E-08	1.20E-08	8.62E-09	8.25E-09
S	—	—	—	—	4.12E-07	1.68E-07	8.97E-08	5.96E-08	4.49E-08	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—	7.72E-08	4.97E-08	3.84E-08	2.84E-08	—	—
SW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WSW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3-18　红沿河核电一期四台机组对各子区公众个人（青少年）造成有效剂量

单位：Sv/a

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NE	—	—	—	—	4.06E-07	1.69E-07	—	—	4.38E-08	3.32E-08	3.02E-08	2.76E-08
ENE	—	—	7.92E-07	—	2.59E-07	1.13E-07	5.84E-08	3.78E-08	2.89E-08	2.20E-08	2.13E-08	1.99E-08
E	—	—	6.65E-07	4.31E-07	2.16E-07	9.70E-08	5.29E-08	3.66E-08	2.75E-08	2.17E-08	1.83E-08	1.60E-08
ESE	—	—	—	—	1.67E-07	7.37E-08	3.78E-08	2.53E-08	2.17E-08	1.74E-08	1.27E-08	1.10E-08
SE	—	—	5.71E-07	3.61E-07	1.77E-07	7.53E-08	3.90E-08	2.61E-08	1.95E-08	1.76E-08	1.47E-08	1.13E-08
SSE	—	—	—	—	2.63E-07	1.03E-07	5.10E-08	3.41E-08	2.48E-08	2.39E-08	1.71E-08	1.63E-08
S	—	—	—	—	8.05E-07	3.28E-07	1.76E-07	1.17E-07	8.80E-08	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—	1.50E-07	9.65E-08	7.47E-08	5.53E-08	—	—
SW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WSW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3-19　红沿河核电 1、2 号机组对各子区公众个人（儿童）造成有效剂量

单位：Sv/a

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NE	—	—	—	—	1.90E-07	7.99E-08	—	—	2.08E-08	1.59E-08	1.50E-08	1.37E-08
ENE	—	—	3.43E-07	—	1.21E-07	5.38E-08	2.76E-08	1.81E-08	1.38E-08	1.06E-08	1.01E-08	9.28E-09
E	—	—	2.95E-07	2.04E-07	1.02E-07	4.65E-08	2.51E-08	1.73E-08	1.31E-08	1.04E-08	8.89E-09	7.84E-09
ESE	—	—	—	—	8.00E-08	3.61E-08	1.81E-08	1.23E-08	1.13E-08	8.97E-09	6.32E-09	5.57E-09
SE	—	—	2.45E-07	1.70E-07	8.38E-08	3.65E-08	1.87E-08	1.26E-08	9.44E-09	9.25E-09	7.79E-09	5.84E-09
SSE	—	—	—	—	1.11E-07	4.73E-08	2.35E-08	1.59E-08	1.17E-08	1.14E-08	8.64E-09	8.61E-09
S	—	—	—	—	3.82E-07	1.58E-07	8.36E-08	5.52E-08	4.14E-08	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—	7.24E-08	4.65E-08	3.55E-08	2.58E-08	—	—
SW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WSW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3-20　红沿河核电一期四台机组对各子区公众个人（儿童）造成有效剂量

单位：Sv/a

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNE	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NE	—	—	—	—	3.79E-07	1.57E-07	—	—	4.06E-08	3.09E-08	2.93E-08	2.68E-08
ENE	—	—	7.48E-07	—	2.44E-07	1.07E-07	5.46E-08	3.55E-08	2.70E-08	2.08E-08	1.99E-08	1.83E-08
E	—	—	6.26E-07	4.12E-07	2.03E-07	9.21E-08	4.96E-08	3.41E-08	2.58E-08	2.05E-08	1.75E-08	1.54E-08
ESE	—	—	—	—	1.59E-07	7.10E-08	3.56E-08	2.40E-08	2.21E-08	1.75E-08	1.23E-08	1.09E-08
SE	—	—	5.45E-07	3.51E-07	1.68E-07	7.21E-08	3.67E-08	2.47E-08	1.85E-08	1.81E-08	1.52E-08	1.14E-08
SSE	—	—	—	—	2.49E-07	9.88E-08	4.78E-08	3.20E-08	2.33E-08	2.27E-08	1.71E-08	1.69E-08
S	—	—	—	—	7.45E-07	3.08E-07	1.63E-07	1.08E-07	8.10E-08	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—	1.40E-07	9.00E-08	6.88E-08	5.01E-08	—	—
SW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WSW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NNW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

3.5 环境辐射影响评价

3.5.1 总量控制和浓度控制评价

从设计源项的角度考虑，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，单台机组以及一期工程四台机组实际运行所排放的各类放射性流出物的年排放量均可以满足国家标准 GB6249-2011 的总量控制要求。

辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组液态放射性流出物排放期间对排水渠中 ^{60}Co、^{90}Sr、^{106}Ru、^{134}Cs 和 ^{137}Cs 五种核素造成的浓度贡献可满足《海水水质标准》（GB3097-1997）中相应的浓度要求，此外，液态放射性流出物排入环境后将被迅速稀释扩散，因此，可以预计，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状态下，液态放射性流出物不会对海水水质造成影响。

3.5.2 生物辐射剂量率评价

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组排放的液态放射性流出物对受纳海域水体中浮游鱼类、低栖鱼类、软体类、甲壳类、海藻类、浮游植物和浮游动物七类参考海洋生物不会造成明显的损伤，对核电厂周围海域中的海洋生物总体上影响很小。

因此，可以预计辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，液态放射性流出物不会对受纳海域内的海洋生物在种群上造成损伤。

3.5.3 公众辐射剂量评价

对于一般公众而言，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组的放射性流出物在 Case B 工况下对厂址厂址 ENE 方位 2~3km 子区成人组造成的有效剂量最大，为 8.27×10^{-7}Sv/a，占四台机组剂量约束值 0.16mSv/a 的 0.52%，其中由 1、2 号机组造成的年有效剂量为 3.77×10^{-7}Sv/a，占 1、2 号机组剂量约束值 0.08mSv/a 的 0.47%，这说明在 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，辽宁红沿河核电厂现有的放射性废物处理设施性能仍能确保流出物辐射影响满足相关标准要求。

3.6 18 个月换料与年度换料放射性流出物辐射剂量影响比较

表 3-21 给出了辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组改造前后对一般公众剂量对比结果。

表 3-21　辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料与年度换料辐射剂量对比

比较项	年度换料	18 个月换料
最大受照子区及年龄组	厂址 ENE 方位 2~3km 子区成人组	厂址 ENE 方位 2~3km 子区，成人组
最大公众气态剂量	4.12E-07 Sv/a	3.52E-07 Sv/a
最大公众液态剂量	2.23E-08 Sv/a	2.50E-08 Sv/a
最大公众总剂量	4.34E-07 Sv/a	3.77E-07 Sv/a

由上表可以看出，相比年度换料方案，实施 18 个月换料后辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组对一般公众中最大受照子区仍为厂址 ENE 方位 2~3km 子组，公众最大受照年龄组仍为成人组。实施 18 个月换料后，1、2 号机组设计排放惰性气体排放量下降，因此最大公众气态剂量有所减小，而液态排放中占主要剂量组成部分的 Ag-110m 和 Co-60 排放量增加，因此最大公众液态剂量有所增加。由于一般公众所受总剂量中气态剂量占据主要部分，因此，实施 18 个月换料后，1、2 号机组对最大公众总剂量有所降低。

3.7 排放量申请值

根据“四统一”管理要求，辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组在运行前对放射性流出物年排放量进行了统一申请，放射性流出物年排放量申请作为核电厂年核定排放量进行管理，以满足辐射防护最优化的要求，遵循“可合理达到尽量低”的原则。辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料方案改造后，其放射性流出物年排放量拟按已核定的量实施。

表 3-22 给出了辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料方案改造后，一期工程四台机组设计排放量与一期工程四台机组年核定排放量对比。

可以看出，1、2 号机组实施 18 个月改造后，一期工程四台机组各类放射性流出物均小于四台机组的排放量设计值（Case B），结合本节前述使用 Case B 进行的计算评价内容，可知核电厂一期工程按照不高于排放量申请值所排放的流出物所造成剂量应可满足相关标准要求。

表 3-22　辽宁红沿核电厂一期工程四台机组排放量申请值与设计值对比

四台机组	气载放射性流出物	气载流出物	排放量申请值，Bq/a	排放量设计值，Bq/a
		^{3}H	1.4×10^{13}	1.74×10^{13}
		^{14}C	1.48×10^{12}	1.48×10^{12}
		惰性气体	7.06×10^{14}	9.12×10^{14}
		碘	1.01×10^{10}	1.21×10^{10}
		粒子（$T_{1/2}\geq8d$）	6.12×10^{9}	6.80×10^{9}
	液态放射性流出物	液态流出物	排放量申请值，Bq/a	排放量设计值，Bq/a
		^{3}H	1.26×10^{14}	1.54×10^{14}
		^{14}C	2.00×10^{11}	2.00×10^{11}
		其余核素	8.00×10^{10}	1.23×10^{11}

4 核电厂事故风险评价

辽宁红沿河核电厂1、2号机组实施18个月燃料循环管理策略后，由于堆芯积存量、一回路冷却剂源项和二回路冷却剂源项的设计值发生了一定的变换，将导致选址假想事故源项和设计基准事故源项也发生相应变化。为此，本章将分两方面论述辽宁红沿河核电厂1、2号机组事故工况下的环境影响，首先结合18个月燃料循环管理策略下的堆芯积存量推导出新的选址假想事故释放源项，并在此基础上论述电厂现有非居住区边界和规划限制区边界的适宜性；然后采用18个月燃料循环管理策略下得到的新的设计基准事故释放源项，分析电厂事故工况下对电厂周边公众的辐射后果。

环境风险评价是指对建设项目建设和运行期间发生的可预测突发性事件或事故（一般不包括人为破坏及自然灾害）引起有毒有害、易燃易爆等物质泄漏，或突发事件产生的新的有毒有害物质，所造成的对人身安全与环境的影响和损害，进行评估，提出防范、应急与减缓措施。

本工程环境风险主要来自于核电厂运行期间潜在放射性事故造成的放射性物质的释放，此外还包括运行期间非放化学物质贮存、运输和使用所造成的风险。

4.1 非居住区边界和规划限制区边界的复核

根据辽宁红沿河核电厂已批复的环境影响报告书结论，辽宁红沿河核电厂以厂址征地边界作为核电厂周围非居住区边界，厂址周围半径 5km 范围内为辽宁红沿河核电厂的规划限制区（辽宁省人民政府对关于划定辽宁红沿河核电厂厂址周围规划限制区的相关批复（辽政[2008]192））。

鉴于辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月燃料循环管理策略后，堆芯积存量较年度燃料循环管理策略已有所变化，相应的选址假想事故的释放源项也必然有所不同，因此有必要重新评估分析 18 个月燃料循环管理策略下选址假想事故的放射性后果，以说明辽宁红沿河核电厂的非居住区边界和规划限制区边界的设置在实施 10 个月换料改造后仍是合适的。

4.1.1 选址假想事故源项

本节根据辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料改造后的堆芯积存量，

采用与辽宁红沿河核电厂选址阶段环境影响报告书相同的选址假想事故源项计算方法和参数，计算得到的选址假想事故源项见表 4-1。

表 4-1　选址假想事故源项（GBq）

核素 \ 释放时间		0~2h	2~8h	8~24h	24~96h	96~720h
Kr-83m		8.45E+04	6.68E+04	7.64E+03	8.88E+00	0.00E+00
Kr-85m		2.32E+05	3.87E+05	2.31E+05	1.05E+04	1.49E-01
Kr-85		9.05E+03	2.71E+04	7.22E+04	1.62E+05	1.37E+06
Kr-87		3.39E+05	1.64E+05	6.40E+03	5.05E-01	0.00E+00
Kr-88		6.25E+05	7.63E+05	2.25E+05	2.31E+03	0.00E+00
Xe-131m		1.04E+04	3.10E+04	8.04E+04	1.62E+05	6.51E+05
Xe-133m		4.59E+04	1.31E+05	3.01E+05	3.92E+05	2.45E+05
Xe-133		1.50E+06	4.39E+06	1.10E+07	1.95E+07	3.83E+07
Xe-135m		5.72E+04	2.49E+02	0.00E+00	1.28E-24	0.00E+00
Xe-135		4.47E+05	9.96E+05	1.21E+06	2.51E+05	1.03E+03
Xe-138		2.45E+05	6.99E+02	0.00E+00	3.53E-26	0.00E+00
I-131	有机碘	7.15E+03	2.11E+04	5.41E+04	1.04E+05	3.10E+05
	粒子碘	8.94E+03	2.64E+04	6.76E+04	1.30E+05	3.87E+05
	元素碘	8.26E+03	4.84E+02	1.24E+03	2.38E+03	7.11E+03
	总量	2.43E+04	4.80E+04	1.23E+05	2.36E+05	7.05E+05
I-132	有机碘	7.87E+03	7.96E+03	1.55E+03	6.32E+00	0.00E+00
	粒子碘	9.84E+03	9.95E+03	1.94E+03	7.90E+00	0.00E+00
	元素碘	1.17E+04	1.83E+02	3.56E+01	1.45E-01	0.00E+00
	总量	2.94E+04	1.81E+04	3.53E+03	1.44E+01	0.00E+00
I-133	有机碘	1.47E+04	3.87E+04	7.22E+04	4.65E+04	4.63E+03
	粒子碘	1.84E+04	4.84E+04	9.03E+04	5.81E+04	5.79E+03
	元素碘	1.75E+04	8.88E+02	1.66E+03	1.07E+03	1.06E+02
	总量	5.06E+04	8.80E+04	1.64E+05	1.06E+05	1.05E+04
I-134	有机碘	8.83E+03	2.26E+03	1.97E+01	3.08E-05	0.00E+00
	粒子碘	1.10E+04	2.82E+03	2.46E+01	3.85E-05	0.00E+00
	元素碘	1.86E+04	5.18E+01	4.51E-01	7.06E-07	0.00E+00
	总量	3.85E+04	5.13E+03	4.47E+01	7.00E-05	0.00E+00
I-135	有机碘	1.30E+04	2.59E+04	2.40E+04	2.74E+03	1.42E+00
	粒子碘	1.62E+04	3.24E+04	3.00E+04	3.43E+03	1.78E+00
	元素碘	1.64E+04	5.94E+02	5.50E+02	6.29E+01	3.26E-02
	总量	4.55E+04	5.89E+04	5.46E+04	6.23E+03	3.23E+00

4.1.2 大气弥散因子

根据辽宁红沿河核电厂厂址气象观测系统 2011 年 1 月~2011 年 12 月连续一整年的逐时气象观测数据，采用苏州热工研究院有限公司研发的 CEIRA 程序系统计算事故短期大气弥散因子。计算模式详见附录 B。

事故工况下公众个人辐射剂量计算中的小时大气弥散因子采用高斯烟羽模式的轴线浓度公式进行计算。对每一小时的气象数据均计算相应的小时大气弥散因子，取各方位 99.5%概率水平的小时大气弥散因子作为 0~2h 的小时大气弥散因子。不同时段的大气弥散因子通过 0~2 小时大气弥散因子与年平均大气弥散因子之间的双对数内插获得，各个方位年平均大气弥散因子为该方位按高斯烟羽模式的扇形区平均浓度公式计算的小时大气弥散因子的年平均值。

表 4-2 和表 4-3 分别给出了厂址非居住区边界上的事故短期大气弥散因子和厂址规划限制区外边界上的事故大气弥散因子。

表 4-2 非居住区边界上的大气弥散因子（s/m^3）

方位	距离	非居住区边界处大气弥散因子（0~2h）
N	500m	1.79E-04
NNE	500m	1.80E-04
NE	700m	9.12E-05
ENE	1100m	4.60E-05
E	1300m	3.19E-05
ESE	1100m	5.18E-05
SE	1200m	5.18E-05
SSE	800m	5.78E-05
S	500m	1.30E-04
SSW~NNW	海域	
全厂址（SSW~NNW 按 500m）		5.78E-05
最大值		1.80E-04

表 4-3　厂址规划限制区外边界上的大气弥散因子（s/m^3）

方位/距离	0-2h	2-8h	8-24h	24-96h	96-720h
N~NNE	海域				
NE（5000m）	9.76E-06	5.15E-06	2.91E-06	1.21E-06	3.44E-07
ENE（5000m）	7.87E-06	4.15E-06	2.35E-06	9.78E-07	2.79E-07
E（5000m）	5.96E-06	3.17E-06	1.80E-06	7.59E-07	2.19E-07
ESE（5000m）	9.84E-06	5.01E-06	2.74E-06	1.09E-06	2.89E-07
SE（5000m）	1.17E-05	5.96E-06	3.27E-06	1.31E-06	3.49E-07
SSE（5000m）	6.14E-06	3.38E-06	1.98E-06	8.73E-07	2.70E-07
S（5000m）	6.29E-06	3.64E-06	2.24E-06	1.06E-06	3.62E-07
SSW~NNW（5000m）	海域				
全厂址	1.57E-05	9.00E-06	5.48E-06	2.56E-06	8.56E-07
最大值	1.57E-05	9.00E-06	5.48E-06	2.56E-06	8.56E-07

4.1.3　事故剂量估算模式

评价选址假想事故释放后果时，考虑的以下辐射照射途径：

— 烟云浸没外照射；

— 空气吸入内照射。

这两种照射途径的个人剂量计算公式详见附录 B。

4.1.4　计算参数的选择

（1）剂量转换因子（DCF）

表 4-4 给出了事故后果剂量计算中所采用的剂量转换因子，主要取自《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）、国际辐射防护委员会（ICRP）71 号出版物和国际原子能机构（IAEA）19 号安全报告（2001）。

（2）呼吸率（Br）

呼吸率取自美国核管理委员会管理导则 RG1.195：

— 0 ~ 8h：$B_r=3.5\times10^{-4}\ m^3/s$；

— 8 ~ 24h：$Br=1.8\times10^{-4}\ m^3/s$；

— 24 ~ 720h：$Br=2.3\times10^{-4}\ m^3/s$。

表 4-4　选址假想事故辐射后果计算采用的剂量转换因子

核素	衰变常数（1/s）	烟云浸没照射（Sv/s）/（Bq/m^3）	吸入内照射（Sv/Bq）
Kr-83m	1.05E-04	2.43E-18	—
Kr-85m	4.30E-05	6.83E-15	—
Kr-85	2.05E-09	2.55E-16	—
Kr-87	1.52E-04	3.94E-14	—
Kr-88	6.78E-05	9.72E-14	—
Xe-131m	6.74E-07	3.70E-16	—
Xe-133m	3.66E-06	1.27E-15	—
Xe-133	1.53E-06	1.39E-15	—
Xe-135m	7.42E-04	1.85E-14	—
Xe-135	2.12E-05	1.11E-14	—
Xe-138	8.15E-04	5.44E-14	—
I-131（有机碘）	9.98E-07	1.84E-14	1.50E-08
I-131（粒子碘）			7.40E-09
I-131（元素碘）			2.00E-08
I-132（有机碘）	8.37E-05	1.14E-13	1.90E-10
I-132（粒子碘）			9.40E-11
I-132（元素碘）			3.10E-10
I-133（有机碘）	9.26E-06	3.01E-14	3.10E-09
I-133（粒子碘）			1.50E-09
I-133（元素碘）			4.00E-09
I-134（有机碘）	2.20E-04	1.33E-13	5.00E-11
I-134（粒子碘）			4.50E-11
I-134（元素碘）			1.50E-10
I-135（有机碘）	2.91E-05	8.24E-14	6.80E-10
I-135（粒子碘）			3.20E-10
I-135（元素碘）			9.20E-10

注：

— 惰性气体空气浸没外照射剂量转换因子采用 GB18871-2002 附录表 B10 中的推荐值；

— 放射性碘的空气浸没外照射和地面沉积外照射剂量转换因子采用 IAEA 第 19 号报告推荐值；

— 放射性碘的吸入内照射剂量转换因子取自 ICRP 71 号报告。

4.1.5　事故剂量计算结果及评价

GB6249-2011 规定：在发生选址假想事故条件下，考虑保守大气弥散条件，非居

住区边界上的任何个人，在事故发生后的任意 2h 内通过空气浸没外照射和吸入内照射途径所接受的有效剂量不得大于 0.25Sv；规划限制区边界上的任何个人在事故的整个持续时间内（可取 30d）通过上述两条照射途径所接受的有效剂量小于 0.25Sv。

表 4-5 给出了辽宁红沿河核电厂选址假想事故的事故剂量与国家标准的比较。

表 4-4　选址假想事故辐射结果与国家标准的比较

项　目	剂量结果	GB6249-2011 限值	占限值比例
非居住区边界上公众可能受照的最大有效剂量（Sv）	5.26E-02	0.25	21.04%
规划限制区边界（5km）公众可能受照的最大有效剂量（Sv）	1.33E-02	0.25	5.32%

由表可知，选址假想事故发生后 2h 内，辽宁红沿河核电厂非居住区边界上的公众个人（成人）受照最大有效剂量为 5.26×10^{-2}Sv，占国家标准限值的 21.04%；选址假想事故期间，规划限制区边界上的公众个人（成人）受照最大有效剂量为 1.33×10^{-2}Sv，占国家标准限值的 5.32%。

由此可见，选址假想事故期间非居住区边界上和规划限制区外公众个人可能受到的最大有效剂量可满足国家标准 GB6249-2011 的相关要求，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料对现有核电厂非居住区边界和规划限制区边界的设置没有影响。

4.2 设计基准事故的辐射后果

4.2.1　事故分类

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用 CPR1000 核电机组，根据机组运行期间事件/事故的预计发生频率和对公众的潜在放射性影响程度，参考法国 900MWe 系列压水堆核电站设计和建造准则（RCC-P，1991 年版，1995 年修订）中有关电站工况的分类方法，将辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组的运行工况分为如下四类：

— 工况Ⅰ：正常运行和正常运行瞬态，指在核电站正常运行、换料和维修过程中预期会经常或有规律地发生的事件。

— 工况Ⅱ：中等频率事件，这些事件中任一个在电站的运行日历年中都可能发生。

— 工况Ⅲ：稀有事故，这些事故在电站寿期内可能发生。

— 工况Ⅳ：极限事故，被认为是非常不可能的事故，但因为它们的后果包含向环境释放大量放射性物质的潜在危险，这些事故代表极限的设计情况。

对照 GB6249-2011 中关于事故分类的定义，工况Ⅲ相当于稀有事故，工况Ⅳ相当于极限事故。稀有事故和极限事故均属于设计基准事故范畴，在核电厂设计时，针对每一类设计基准事故，均考虑了针对性的预防和缓解措施，其考虑的基本设计原则是：最可能发生的事故，对公众产生的放射性风险应最小，而那些对公众有最大潜在风险的极端事故，发生的可能性应最小。在满足上述原则时，设计基准事故（DBA）条件下紧急停堆系统和专设安全设施的保护功能应符合单一故障准则的要求。根据 GB6249-2011 的相关要求，稀有事故和极限事故用于核电厂事故工况下的环境影响评价。本报告针对工况Ⅲ和工况Ⅳ中可能有较大放射性物质释放的九类设计基准事故进行事故评价。

— 大破口失水事故（LOCA）；

— 控制棒弹出事故（CREA）；

— 燃料操作事故（FHA）；

— 蒸汽发生器传热管破裂事故（SGTR）；

— 蒸汽发生器传热管破裂并安全阀卡开事故（SVSO）；

— 安全壳外主蒸汽管道破裂事故（MSLB）；

— 容积控制箱破损事故（RCVA）；

— 废气衰变罐破损事故（TEGA）；

— 反应堆冷却剂泵轴卡住事故（LRA）。

4.2.2 事故描述

（1） 失水事故（LOCA）

失水事故是在一回路压力边界有较大破口时，反应堆冷却剂从破口流失，当一回路水的补充能力不足以弥补破口流量时，使堆芯逐渐丧失冷却能力，最终导致燃料棒烧毁的事故。这种破口可能是由于一回路主管道、或者与它相连的辅助系统管道在隔离阀前一段上发生破裂，也可能是由于安装在高压系统上的设备（如阀门）故障而引起的。

事故开始后发生的序列取决于破口的大小，LOCA 的破口根据物理特征可分为以

下五类：

— 大破口：等效直径大于 34.5cm（工况Ⅳ）；

— 等效直径在 25~34.5cm 之间的破口（工况Ⅳ）；

— 中破口：等效直径在 2.5~25cm 之间（工况Ⅳ）；

— 小破口：等效直径在 9.5~25mm 之间（工况Ⅲ）；

— 极小破口：等效直径小于 9.5mm（工况Ⅱ）。

在上述各类破口事故中，以大破口 LOCA 可能造成的放射性后果最严重，属于 RCC-P 工况Ⅳ。

（2） 弹棒事故（CREA）

该事故假定为控制棒驱动机构压力罩发生机械故障而导致控制棒组件弹出，引起堆芯反应性增长，局部功率增加，部分燃料棒因超功率而破损和融化。因此控制棒组件弹出事故可能同时具有两个特征：它是一个反应性事故，因为在瞬间内向堆芯引入正反应性，也是一起失水事故，因为在控制棒组件弹出是在控制棒传动机构压力罩破裂时发生，一回路压力边界的完整性必遭到破坏。事故属于 RCC-P 工况Ⅳ。

事故分析计算结果表明，热点处的最大燃料平均焓远低于验收准则值，事故过程中稳压器压力未达到安全阀开启压力整定值。即使在最保守的情况下，有关燃料和包壳的安全准则都能得到满足。

（3） 燃料操作事故（FHA）

燃料装卸期间可能发生的燃料操作事故有如下几种类型：

— 燃料组件掉落在反应堆换料水池内：由于安全壳换气通风系统的自动关闭和装卸料停堆期间为确保反应堆厂房的密封所采取的预防措施，使得事故对反应堆厂房外造成的受照剂量可以忽略不计。在运行人员向反应堆厂房外撤离期间，人员闸门打开，期间没有空气从反应堆厂房通过气闸向核辅助厂房的转移，而气闸在撤离完毕后关上。

— 燃料组件掉落在乏燃料水池内：燃料组件在移动到乏燃料水池过程中可能会因为各种原因造成跌落，该事故可能会引起包壳破损，从而导致燃料厂房内出现高放射性水平。

— 乏燃料罐掉落在燃料厂房内或外：在用燃料罐装卸吊车运输或装卸燃料期间，可能会发生掉罐事故，但由于乏燃料罐装卸吊车是按照核安全设备要求设计并

且达到安全级要求，因此可以将事故发生概率降到很低的程度。另外，由于乏燃料组件在装卸时已在乏燃料水池里储存了 6 个月以上，其主要放射性同位素（I 和 Xe）的活度已衰变至很低，其放射性后果基本可以忽略。

本报告评价的燃料操作事故主要指燃料组件掉落在乏燃料水池内，该事故的放射性物质释放量较大，属于 RCC-P 工况Ⅳ。

（4） 蒸汽发生器传热管破裂事故（SGTR）

该事故假定为一台蒸汽发生器的一根传热管完全破裂。

假定事故发生在功率运行时，反应堆冷却剂被裂变产物污染的程度相当于具有有限数量破损燃料棒连续运行的情况。由于该事故使放射性冷却剂从一回路向二回路泄漏，导致二回路系统放射性增加。如果在发生该事故的同时又失去厂外电源或蒸汽向凝气器的排放系统失效，则放射性活度将通过蒸汽发生器的安全阀和电动卸压阀向大气排放。本事故属于 RCC-P 工况Ⅲ。

初始功率为 5%额定功率下 SGTR 的事件序列如下：

— 事故后 0s：蒸汽发生器传热管开始破裂；

— 事故后 425s：蒸汽发生器高高水位；

— 事故后 559s：安注；

— 事故后 561s：反应堆停堆

— 事故后 1158s：开始操作规程，HHSI 关闭（第一个泵）；

— 事故后 2059s：受影响蒸汽发生器辅助给水隔离；

— 事故后 2943s：泄漏终止（泄露率<1kg/s）。

（5） 一根蒸汽发生器传热管破裂并安全阀卡开事故（SVSO）

蒸汽发生器传热管破裂事故的定义在第（4）部分进行了描述。

蒸汽发生器传热管破裂并安全阀卡开事故属于 RCC-P 工况Ⅳ，其瞬态分析基于下列假设：

— 在一次侧向二次侧泄漏量减小到零之前，破损蒸汽发生器满水，该蒸汽发生器的大气释放阀或安全阀存在过水而失效的可能；

— 假设破损的蒸汽发生器释放阀打开失效，这台蒸汽发生器的安全阀就存在过水而失效的可能性；

— 假设该安全阀过水而失效，并处于完全卡开状态。

以下给出了初始功率为 5%额定功率的 SVSO 事故进程：

— 事故后 0s：SG 传热管断裂，事故发生；

— 事故后 424s，SG 水位达到“高高”，主给水隔离阀关闭，ASG 电动泵启动；

— 事故后 678s：安注启动；

— 事故后 680s：反应堆停堆；

— 事故后 1297s：蒸汽发生器满溢，安全阀卡开；

— 事故后 1880s：操纵员开始动作：隔离受损的 SG，停止一台高压安注泵，RCP 开始泄压和冷却（56℃/h）；

— 事故后 12016s：RRA 运行准备结束，RRA 投入运行；

— 事故后 12705s，LHSI 关闭；

— 事故后 18638s：泄露终止。

（6） 安全壳外主蒸汽管道破裂事故（MSLB）

本事故分析的是蒸汽管道双端剪切破裂的情况，当量的破口面积对应于蒸汽发生器流量限制器总的流通截面面积，因为所有蒸汽发生器都装有喉部面积为 0.13m^2 的一体化限流器，因此任何破口面积大于 0.13m^2 的管道破口对核蒸汽供应系统的影响都与所分析的工况相同。

研究结果表明，任何蒸汽系统管道破裂都不会发生偏离泡核沸腾（DNB）。

当蒸汽发生器传热管出现泄漏使相应的二次侧蒸汽受到反应堆冷却剂污染时，安全壳外主蒸汽管道破损会造成受污染的二回路蒸汽释放入环境；如果二回路冷却系统没有受到一回路的放射性污染，则即使蒸汽管道破裂也不会有放射性后果。

（7） 化学和容积控制箱破损事故（RCVA）

化学和容积控制箱的完全破损导致箱内所有的液相和气相放射性物质释入其所在的房间。同时，在运行人员采取措施隔离化学和容积控制系统下泄管路以前，该管路中一定数量的放射性物质也会释放出来。

该事故属于 RCC-P 工况Ⅲ。

（8） 废气衰变罐破损事故（TEGA）

操作员差错或阀门失效等起因都可能导致废气衰变罐的破损，事故发生时罐内所含的全部气体和碘将和持续从进气管线进入衰变罐的放射性废气一起通过破口向外释放，直至运行人员将进气管线隔离为止。事故发生后，DVN 的活性炭过滤器投入运行。

该事故属于 RCC-P 工况Ⅲ。

（9） 反应堆冷却剂主泵转子卡死事故（LRA）

该假想事故假设反应堆冷却剂泵转子瞬间卡住，受影响的反应堆冷却剂环路的流量快速降低，导致反应堆在流量低信号下触发紧急停堆。

如果事故发生时反应堆正在功率运行状态，堆芯流量降低会导致冷却剂温度快速升高。这种温度升高可能使燃料棒发生 DNB，此时如果反应堆没有紧急停堆，就可能导致燃料损伤。

反应堆冷却剂泵发生转子卡住事故后，反应堆由低流量信号触发停堆。采用确定论方法计算得到的发生 DNB 的燃料棒占总燃料棒的百分比为 16.43%，高于验收准则“发生 DNB 的燃料棒数量少于总数的 10%”。

该事故属于 RCC-P 工况Ⅳ。

4.2.3 设计基准事故源项

根据辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料相关专题论证成果，在设计基准事故源项计算中，除涉及的堆芯积存量、一回路冷却剂活度谱和二回路冷却剂活度谱发生变化外，其他假设与年度换料下的假设保持一致。

表 4-6~表 4-14 给出了各种设计基准事故源项。

表 4-5　大破口失水事故源项（GBq）

核素	0-1h	1-2h	2-6h	6-12h	12-24h	24-96h	96h-240h	240h-720h
Kr-83m	1.00E+03	5.99E+02	9.34E+02	2.02E+02	2.07E+01	2.07E-01	2.95E-13	0.00E+00
Kr-85m	2.50E+03	1.87E+03	4.75E+03	2.87E+03	1.42E+03	2.46E+02	3.55E-03	0.00E+00
Kr-85	1.60E+03	1.39E+03	5.12E+03	6.58E+03	1.19E+04	6.62E+04	1.32E+05	4.27E+05
Kr-87	4.35E+03	2.20E+03	2.48E+03	2.60E+02	9.22E+00	1.24E-02	0.00E+00	0.00E+00
Kr-88	7.01E+03	4.79E+03	9.95E+03	3.96E+03	1.01E+03	5.35E+01	1.24E-06	0.00E+00
Xe-131m	1.03E+02	8.94E+01	3.27E+02	4.15E+02	7.30E+02	3.69E+03	5.66E+03	9.12E+03
Xe-133m	4.65E+02	4.01E+02	1.43E+03	1.72E+03	2.74E+03	9.14E+03	4.87E+03	8.44E+02
Xe-133	1.50E+04	1.30E+04	4.76E+04	5.93E+04	1.01E+05	4.55E+05	5.07E+05	3.83E+05
Xe-135	4.65E+03	3.76E+03	1.15E+04	1.01E+04	9.41E+03	5.84E+03	2.41E+01	4.06E-04
Xe-135m	1.07E+03	6.17E+01	4.00E+00	6.45E-05	4.74E-12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Xe-138	5.11E+03	2.37E+02	1.22E+01	8.34E-05	1.69E-12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
元素 I-131	1.44E+02	4.28E+00	1.57E+01	1.97E+01	3.43E+01	1.66E+02	2.25E+02	2.67E+02
元素 I-132	2.06E+02	3.94E+00	7.22E+00	2.21E+00	3.80E-01	9.79E-03	0.00E+00	0.00E+00
元素 I-133	3.03E+02	8.53E+00	2.89E+01	3.15E+01	4.21E+01	7.27E+01	7.16E+00	5.89E-02
元素 I-134	3.53E+02	3.36E+00	2.46E+00	9.22E-02	7.28E-04	5.15E-08	0.00E+00	0.00E+00
元素 I-135	2.84E+02	7.25E+00	2.06E+01	1.58E+01	1.16E+01	4.32E+00	2.26E-03	6.19E-10
有机 I-131	5.47E+02	4.76E+02	1.74E+03	2.19E+03	3.81E+03	1.84E+04	2.49E+04	2.97E+04
有机 I-132	6.78E+02	4.38E+02	8.03E+02	2.46E+02	4.22E+01	1.09E+00	4.08E-10	0.00E+00
有机 I-133	1.12E+03	9.48E+02	3.21E+03	3.49E+03	4.68E+03	8.08E+03	7.95E+02	6.54E+00
有机 I-134	9.44E+02	3.74E+02	2.73E+02	1.02E+01	8.09E-02	5.73E-06	0.00E+00	0.00E+00
有机 I-135	1.02E+03	8.05E+02	2.29E+03	1.76E+03	1.29E+03	4.80E+02	2.51E-01	6.88E-08

表 4-6　弹棒事故源项（GBq）

安全壳途径

核素	0 至 1h	1 至 2h	2 至 6h	6 至 12h	12h 至 1d	1 至 4d	4 至 10d	10 至 30d
Kr85m	1.18E+03	1.00E+03	2.78E+03	1.18E+03	6.48E+02	1.20E+02	1.73E-03	0.00E+00
Kr85	1.65E+02	1.65E+02	6.56E+02	5.90E+02	1.18E+03	7.05E+03	1.40E+04	4.57E+04
Kr87	2.13E+03	1.24E+03	1.52E+03	1.11E+02	4.40E+00	6.35E-03	0.00E+00	0.00E+00
Kr88	3.37E+03	2.64E+03	5.95E+03	1.66E+03	4.72E+02	2.67E+01	6.20E-07	0.00E+00
Xe133m	2.27E+02	2.24E+02	8.68E+02	7.31E+02	1.30E+03	4.63E+03	2.46E+03	4.28E+02
Xe133	7.62E+03	7.57E+03	2.98E+04	2.61E+04	4.97E+04	2.38E+05	2.66E+05	2.01E+05
Xe135	2.23E+03	2.07E+03	6.87E+03	4.24E+03	4.38E+03	2.91E+03	1.20E+01	2.03E-04
Xe138	2.51E+03	1.33E+02	7.49E+00	3.58E-05	8.05E-13	4.06E-28	0.00E+00	0.00E+00
元素 I-131	1.06E+03	1.06E+03	4.18E+03	6.54E+01	7.15E+00	3.69E+01	5.01E+01	5.99E+01
元素 I-132	1.20E+03	8.85E+02	1.77E+03	1.35E+01	7.21E-02	1.99E-03	7.47E-13	0.00E+00
元素 I-133	2.07E+03	2.00E+03	7.39E+03	1.08E+02	8.39E+00	1.55E+01	1.52E+00	1.26E-02
元素 I-134	1.82E+03	8.24E+02	6.55E+02	1.28E+00	1.51E-04	1.15E-08	0.00E+00	0.00E+00
元素 I-135	1.93E+03	1.73E+03	5.38E+03	6.66E+01	2.36E+00	9.35E-01	4.90E-04	1.34E-10
有机 I-131	1.18E+02	1.17E+02	4.64E+02	4.10E+02	7.93E+02	4.10E+03	5.56E+03	6.65E+03
有机 I-132	1.33E+02	9.79E+01	1.96E+02	4.20E+01	8.01E+00	2.21E-01	8.30E-11	0.00E+00
有机 I-133	2.30E+02	2.23E+02	8.21E+02	6.26E+02	9.31E+02	1.72E+03	1.70E+02	1.39E+00
有机 I-134	2.02E+02	9.16E+01	7.27E+01	1.91E+00	1.68E-02	1.27E-06	0.00E+00	0.00E+00
有机 I-135	2.14E+02	1.93E+02	5.97E+02	3.21E+02	2.62E+02	1.04E+02	5.44E-02	1.50E-08

二回路途径

核素	释放量（30min）	核素	释放量（30min）
Kr85m	9.42E+01	元素 I-131	4.75E-01
Kr85	1.26E+01	元素 I-132	1.67E-01
Kr87	1.87E+02	元素 I-133	3.19E-01
Kr88	2.76E+02	元素 I-134	2.17E-01
Xe133m	1.76E+01	元素 I-135	2.17E-01
Xe133	5.88E+02	有机 I-131	5.28E-02
Xe135	1.76E+02	有机 I-132	1.87E-02
Xe138	3.14E+02	有机 I-133	3.55E-02
—		有机 I-134	2.41E-02
		有机 I-135	2.41E-02

表 4-7　燃料操作事故源项（GBq）

核素	0-2h	2-8h	8-12h	0-12h
Kr-83m	5.20E-08	7.69E-09	1.65E-11	5.97E-08
Kr-85	8.62E+03	3.21E+03	6.40E+01	1.18E+04
Kr-85m	1.78E-02	4.49E-03	3.62E-05	2.24E-02
Kr-87	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Kr-88	5.88E-06	1.19E-06	5.67E-09	7.08E-06
Xe-131m	6.63E+03	2.46E+03	4.82E+01	9.14E+03
Xe-133	6.89E+05	2.53E+05	4.89E+03	9.46E+05
Xe-133m	1.29E+04	4.64E+03	8.57E+01	1.77E+04
Xe-135	1.20E+03	3.69E+02	4.72E+00	1.58E+03
Xe-135m	1.09E+00	1.29E-03	2.23E-12	1.09E+00
Xe-138	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
元素 I-131	7.75E+00	4.19E-01	8.19E-03	8.18E+00
元素 I-132	3.96E+00	8.48E-02	2.88E-04	4.05E+00
元素 I-133	4.96E-01	2.43E-02	3.99E-04	5.19E-01
元素 I-134	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
元素 I-135	3.36E-04	1.31E-05	1.42E-07	3.48E-04
有机 I-131	1.34E+01	3.15E+00	6.15E-02	1.67E+01
有机 I-132	6.20E+00	6.37E-01	2.16E-03	6.84E+00
有机 I-133	8.50E-01	1.82E-01	3.00E-03	1.03E+00
有机 I-134	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
有机 I-135	5.61E-04	9.83E-05	1.06E-06	6.60E-04

表 4-8　SGTR 事故源项（GBq）

核素	0-2h	2-8h	0~8h	核素	0-2h	2-8h	0~8h
Kr-85m	5.40E+02	2.62E+00	5.43E+02	元素 I-131	5.26E+02	9.83E-01	5.27E+02
Kr-85	3.62E+00	1.75E-02	3.63E+00	元素 I-132	1.34E+02	7.30E-02	1.34E+02
Kr-87	6.77E+02	3.28E+00	6.80E+02	元素 I-133	2.05E+02	3.35E-01	2.06E+02
Kr-88	1.23E+03	5.99E+00	1.24E+03	元素 I-134	4.33E+01	9.58E-03	4.33E+01
Xe-133m	2.62E+02	1.27E+00	2.63E+02	元素 I-135	8.47E+01	9.55E-02	8.48E+01
Xe-133	7.43E+03	3.60E+01	7.46E+03	有机 I-131	1.62E+01	3.05E-02	1.63E+01
Xe-135	2.50E+03	1.21E+01	2.51E+03	有机 I-132	4.14E+00	2.26E-03	4.14E+00
Xe-138	1.05E+03	5.10E+00	1.06E+03	有机 I-133	6.37E+00	1.04E-02	6.38E+00
—				有机 I-134	1.34E+00	2.96E-04	1.34E+00
				有机 I-135	2.62E+00	2.96E-03	2.62E+00

表 4-9　SVSO 事故源项（GBq）

核素	0-2h	2-8h	0~8h	核素	0-2h	2-8h	0~8h
Kr-85m	1.14E+04	8.04E+03	1.95E+04	元素 I-131	2.28E+02	1.26E+02	3.55E+02
Kr-85	7.70E+01	5.42E+01	1.32E+02	元素 I-132	4.74E+01	1.85E+01	6.59E+01
Kr-87	1.42E+04	1.01E+04	2.44E+04	元素 I-133	8.59E+01	4.58E+01	1.31E+02
Kr-88	2.62E+04	1.85E+04	4.47E+04	元素 I-134	5.69E+00	1.48E+00	7.17E+00
Xe-133m	5.59E+03	3.93E+03	9.51E+03	元素 I-135	3.05E+01	1.49E+01	4.54E+01
Xe-133	1.57E+05	1.11E+05	2.69E+05	有机 I-131	7.37E+03	4.09E+03	1.15E+04
Xe-135	5.29E+04	3.73E+04	9.01E+04	有机 I-132	1.54E+03	5.99E+02	2.13E+03
Xe-138	2.10E+04	1.48E+04	3.58E+04	有机 I-133	2.78E+03	1.49E+03	4.26E+03
—				有机 I-134	1.84E+02	4.79E+01	2.32E+02
				有机 I-135	9.87E+02	4.81E+02	1.47E+03

表 4-10　安全壳外蒸汽系统管道破裂事故事故源项（GBq）

核素	0-2h	2-8h	0~8h	核素	0-2h	2-8h	0~8h
Kr-85m	4.60E-01	1.38E+00	1.84E+00	元素 I-131	7.11E+01	7.14E+00	7.82E+01
Kr-85	3.10E-03	9.31E-03	1.25E-02	元素 I-132	9.79E+00	1.10E+00	1.09E+01
Kr-87	5.75E-01	1.73E+00	2.30E+00	元素 I-133	2.55E+01	2.50E+00	2.80E+01
Kr-88	1.06E+00	3.17E+00	4.22E+00	元素 I-134	8.41E-01	1.44E-01	9.85E-01
Xe-133m	2.25E-01	6.75E-01	9.00E-01	元素 I-135	8.06E+00	7.88E-01	8.85E+00
Xe-133	6.36E+00	1.90E+01	2.54E+01	有机 I-131	2.20E+00	2.21E-01	2.42E+00
Xe-135	2.13E+00	6.39E+00	8.52E+00	有机 I-132	3.03E-01	3.39E-02	3.37E-01
Xe-138	8.46E-01	2.53E+00	3.38E+00	有机 I-133	7.89E-01	7.75E-02	8.67E-01
—				有机 I-134	2.61E-02	4.45E-03	3.05E-02
				有机 I-135	2.49E-01	2.43E-02	2.74E-01

表 4-11　容控箱破损事故源项（GBq）

核素	RCV 气相	RCV 液相	下泄量	合计
Kr-85m	5.85E+03	1.44E+02	1.04E+03	7.04E+03
Kr-85	7.11E+01	1.76E+00	7.03E+00	7.99E+01
Kr-87	3.45E+03	8.53E+01	1.30E+03	4.84E+03
Kr-88	1.07E+04	2.64E+02	2.40E+03	1.33E+04
Xe-133m	2.97E+03	1.23E+02	5.10E+02	3.60E+03
Xe-133	8.59E+04	3.54E+03	1.44E+04	1.04E+05
Xe-135	2.36E+04	9.72E+02	4.83E+03	2.94E+04
Xe-138	1.13E+03	4.67E+01	1.92E+03	3.10E+03
I-131	3.70E-02	3.55E+00	1.42E+01	1.78E+01
I-132	8.59E-03	8.23E-01	3.41E+00	4.25E+00
I-133	1.41E-02	1.35E+00	5.44E+00	6.81E+00
I-134	1.20E-03	1.15E-01	5.04E-01	6.20E-01
I-135	5.16E-03	4.95E-01	2.00E+00	2.50E+00

表 4-12　废气储存罐破损事故释放源项（GBq）

核素名称	TEG 罐体破损	RCV 气相	停堆后 TEP 除气器	TEP 中间槽脱气	隔离前 TEG 的排放	合计
Kr-85m	1.02E+02	1.82E+03	3.06E+03	0.00E+00	1.49E+03	6.47E+03
Kr-85	3.72E+04	6.04E+01	2.81E+01	0.00E+00	1.47E+01	3.74E+04
Kr-87	1.54E+01	8.26E+02	1.76E+03	0.00E+00	7.16E+02	3.31E+03
Kr-88	1.22E+02	3.03E+03	5.88E+03	0.00E+00	2.74E+03	1.17E+04
Xe-133m	8.33E+02	1.38E+03	1.98E+03	0.00E+00	1.04E+03	5.23E+03
Xe-133	6.30E+04	4.48E+04	5.70E+04	0.00E+00	2.97E+04	1.95E+05
Xe-135	1.85E+03	1.46E+04	1.66E+04	0.00E+00	8.36E+03	4.14E+03
Xe-138	2.96E-02	2.08E+02	2.17E+01	0.00E+00	3.99E+00	2.34E+02
I-131	4.62E-02	1.47E-04	3.64E-01	4.28E-02	1.90E-01	6.44E-01
I-132	1.65E-04	7.44E-05	4.82E-02	6.74E-03	2.20E-02	7.72E-02
I-133	5.94E-03	1.85E-04	1.31E-01	2.07E-02	6.76E-02	2.25E-01
I-134	2.98E-06	8.41E-06	2.67E-03	3.58E-04	9.86E-04	4.02E-03
I-135	6.09E-04	6.75E-05	4.19E-02	6.65E-03	2.08E-02	7.01E-02

表 4-13　反应堆冷却剂主泵转子卡死事故事故源项（GBq）

核素	0-2h	2-8h	0~8h	核素	0-2h	2-8h	0~8h
Kr-85m	8.33E+03	2.55E+04	3.38E+04	元素 I-131	9.89E+01	2.28E+03	2.38E+03
Kr-85	5.58E+02	1.70E+03	2.26E+03	元素 I-132	7.67E+01	1.02E+03	1.09E+03
Kr-87	1.71E+04	5.24E+04	6.95E+04	元素 I-133	1.28E+02	2.77E+03	2.90E+03
Kr-88	2.44E+04	7.44E+04	9.88E+04	元素 I-134	1.02E+02	8.37E+02	9.39E+02
Xe-133m	1.44E+03	4.39E+03	5.83E+03	元素 I-135	1.16E+02	2.16E+03	2.27E+03
Xe-133	4.56E+04	1.39E+05	1.85E+05	有机 I-131	3.05E+00	7.03E+01	7.34E+01
Xe-135	1.49E+04	4.57E+04	6.06E+04	有机 I-132	2.37E+00	3.14E+01	3.38E+01
Xe-138	4.44E+04	1.36E+05	1.80E+05	有机 I-133	3.95E+00	8.57E+01	8.96E+01
—				有机 I-134	3.17E+00	2.60E+01	2.91E+01
				有机 I-135	3.59E+00	6.68E+01	7.04E+01

4.2.4　事故辐射后果计算

（1）大气弥散因子

进行设计基准事故放射性后果分析所用的气象数据和大气弥散因子的计算方法和 4.1.2 节相同。

设计基准事故放射性后果估算模式与选址假想事故放射性后果估算模式相比，除放射性烟云浸没外照射、烟云吸入放射性物质内照射，增加了地面沉积外照射途径，有关地面沉积外照射的剂量计算模式见附录 B。

（2）剂量转换因子

设计基准事故放射性后果评价中所采用的剂量转换因子见表 4-15。

（3）干沉积速率

干沉积速率取自联邦德国辐射防护委员会第十七卷出版物（SSK No.17）：

— 气溶胶：$V_d=1.5\times10^{-3}$ m/s；

— 分子碘：$V_d=1\times10^{-2}$ m/s；

— 有机碘：$V_d=1\times10^{-4}$ m/s。

（4）呼吸率

呼吸率取自美国核管理委员会管理导则 RG1.195：

— 0～8h：$B_r=3.5\times10^{-4}$ m^3/s；

— 8～24h：$Br=1.8\times10^{-4}\ m^3/s$；

— 24～720h：$Br=2.3\times10^{-4}\ m^3/s$。

表 4-14　设计基准事故辐射后果计算用剂量转换因子

核素		衰变常数（1/s）	烟云浸没照射（Sv/s）/（Bq/m³）	地面沉积外照射（Sv/s）/（Bq/m²）	吸入内照射（Sv/Bq）	甲状腺吸入（Sv/Bq）
Kr-83m		1.05E-04	2.43E-18	-	-	-
Kr-85m		4.30E-05	6.83E-15	-	-	-
Kr-85		2.05E-09	2.55E-16	-	-	-
Kr-87		1.52E-04	3.94E-14	-	-	-
Kr-88		6.78E-05	9.72E-14	-	-	-
Xe-131m		6.74E-07	3.70E-16	-	-	-
Xe-133m		3.66E-06	1.27E-15	-	-	-
Xe-133		1.53E-06	1.39E-15	-	-	-
Xe-135m		7.42E-04	1.85E-14	-	-	-
Xe-135		2.12E-05	1.11E-14	-	-	-
Xe-138		8.15E-04	5.44E-14	-	-	-
I-131	有机碘	9.98E-07	1.84E-14	3.81E-16	1.50E-08	3.10E-07
	粒子碘				7.40E-09	1.50E-07
	元素碘				2.00E-08	3.90E-07
I-132	有机碘	8.37E-05	1.14E-13	2.28E-15	1.90E-10	3.20E-09
	粒子碘				9.40E-11	1.40E-09
	元素碘				3.10E-10	3.60E-09
I-133	有机碘	9.26E-06	3.00E-14	6.33E-16	3.10E-09	6.00E-08
	粒子碘				1.50E-09	2.80E-08
	元素碘				4.00E-09	7.60E-08
I-134	有机碘	2.20E-04	1.33E-13	2.63E-15	5.00E-11	7.00E-10
	粒子碘				4.50E-11	2.60E-10
	元素碘				1.50E-10	7.00E-10
I-135	有机碘	2.91E-05	8.25E-14	1.52E-15	6.80E-10	1.30E-08
	粒子碘				3.20E-10	5.70E-09
	元素碘				9.20E-10	1.50E-08

注：

— 惰性气体空气浸没外照射剂量转换因子采用 GB18871-2002 附录表 B10 中的推荐值；

— 放射性碘的空气浸没外照射剂量转换因子采用 IAEA 第 19 号报告的推荐值；

— 放射性碘的吸入内照射剂量转换因子取自 ICRP71 号报告。

4.2.5 事故放射性后果及评价

GB6249-2011 规定，在发生一次稀有事故时，非居住区边界上公众在事故后 2h 内以及规划限制区外边界上公众在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 5mSv 以下，甲状腺当量剂量应控制在 50mSv 以下。在发生一次极限事故时，非居住区边界上公众在事故后 2h 内以及规划限制区外边界上公众在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应控制在 0.1Sv 以下，甲状腺当量剂量应控制在 1Sv 以下。

表 4-16 给出了各设计基准事故的放射性后果与国家标准相应限值的比较。

（1） 大破口失水事故（LOCA）

大破口失水事故属于极限事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 2.20E-03Sv，甲状腺当量剂量最大值为 3.47E-02Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 2.20%和 3.47%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 9.89E-03Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.86E-02Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.99%和 1.86%。

（2） 弹棒事故（CREA）

弹棒事故属于极限事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 4.68E-03Sv，甲状腺当量剂量最大值为 8.16E-02Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 4.68%和 8.16%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 1.06E-03Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.94E-02Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 1.06%和 1.94%。

（3） 主蒸汽管道破裂事故（MSLB）

主蒸汽管道破裂事故属于极限事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 9.89E-05Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.91E-03Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.10%和 0.19%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 9.12E-06Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.76E-04Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.01%和 0.02%。

（4） 蒸汽发生器传热管破裂事故（SGTR）

蒸汽发生器传热管破裂事故属于稀有事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 7.85E-04Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.42E-02Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 15.70%和 28.40%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 6.86E-05Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.24E-03Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 1.37%和 2.48%。

（5） 蒸汽发生器传热管破裂事故并安全阀卡开事故（SVSO）

蒸汽发生器传热管破裂事故并安全阀卡开事故属于极限事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 8.83E-03Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.60E-01Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 8.83%和 16.00%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 1.02E-03Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.84E-02Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 1.02%和 1.84%。

（6） 废液系统破损事故（RCVA）

废液系统破损事故属于稀有事故。

— 非居住区边界公众上 0-2h 的个人有效剂量最大值为 4.16E-04Sv，甲状腺当量剂量最大值为 4.69E-04Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 8.32%和 0.94%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 3.63E-05Sv，甲状腺当量剂量最大值为 4.09E-05Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.73%和 0.08%。

（7） 废气系统破损事故（TEGA）

废气系统破损事故属于稀有事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 2.99E-04Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.68E-05Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 5.98%和 0.03%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 2.61E-05Sv，甲状腺当量剂量最大值为 1.47E-06Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.52%和 0.01%。

（8） 燃料操作事故（FHA）

燃料操作事故属于极限事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 2.02E-04Sv，甲状腺当量剂量最大值为 4.56E-03Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.20%和 0.46%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 2.11E-05Sv，甲状腺剂量最大值为 4.34E-05Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.02%和 0.01%。

（9） 反应堆冷却剂主泵转子卡死事故（LRA）

反应堆冷却剂主泵转子卡死属于极限事故。

— 非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 1.21E-03Sv，甲状腺当量剂量最大值为 3.22E-03Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 1.21%和 0.32%；

— 规划限制区外边界上事故期间公众的个人有效剂量最大值为 4.75E-04Sv，甲状腺剂量最大值为 3.91E-03Sv，分别占 GB6249-2011 相应限值的 0.46%和 0.39%。

由上述分析可知，在Ⅳ类事故中，蒸汽发生器传热管断裂并安全阀卡开事故（SVSO）对非居住区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量最大，弹棒事故（CREA）对规划限制区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量最大。在Ⅲ类事故中，蒸汽发生器传热管破裂事故对非居住区边界、规划限制区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量均最大。这些事故的放射性后果都满足国家标准 GB6249-2011 的相关要求。从各类设计基准事故的放射性后果分析可以看出，实施 18 个月燃料管理策略后，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组专设安全设施的设计性能仍然可靠，厂址周围各类边界的设置合理，电厂设计基准事故导致的环境放射性后果满足 GB6249-2011 的相应要求。

表 4-15　各类设计基准事故放射性后果与国家标准的比较

事故	事故类别	非居住区边界				规划限制区边界			
		有效剂量（Sv）		甲状腺当量剂量（Sv）		有效剂量（Sv）		甲状腺当量剂量（Sv）	
		最大剂量	占 GB6249-2011 限值百分比	最大剂量	占 GB6249-2011 限值百分比	最大剂量	占 GB6249-2011 限值百分比	最大剂量	占 GB6249-2011 限值百分比
LOCA	Ⅳ	2.20E-03	2.20%	3.47E-02	3.47%	9.89E-04	0.99%	1.86E-02	1.86%
CREA	Ⅳ	4.68E-03	4.68%	8.16E-02	8.16%	**1.06E-03**	**1.06%**	**1.94E-02**	**1.94%**
FHA	Ⅳ	2.02E-04	0.20%	4.56E-03	0.46%	2.11E-05	0.02%	4.34E-05	0.01%
MSLB	Ⅳ	9.89E-05	0.10%	1.91E-03	0.19%	9.12E-06	0.01%	1.76E-04	0.02%
SVSO	**Ⅳ**	**8.83E-03**	**8.83%**	**1.60E-01**	**16.00%**	1.02E-03	1.02%	1.84E-02	1.84%
LRA	Ⅳ	1.21E-03	1.21%	3.22E-03	0.32%	4.57E-04	0.46%	3.91E-03	0.39%
SGTR	**Ⅲ**	**7.85E-04**	**15.70%**	**1.42E-02**	**28.40%**	**6.86E-05**	**1.37%**	**1.24E-03**	**2.48%**
RCVA	Ⅲ	4.16E-04	8.32%	4.69E-04	0.94%	3.63E-05	0.73%	4.09E-05	0.08%
TEGA	Ⅲ	2.99E-04	5.98%	1.68E-05	0.03%	2.61E-05	0.52%	1.47E-06	0.01%

4.2.6 实施 18 个月燃料循环管理策略前后事故源项及放射性后果的比较

（1）事故源项比较

根据《辽宁红沿河核电厂一、二号机组环境影响报告书（运行阶段）》在年度换料方式下各设计基准事故源项，表 4-17 给出了辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用年度燃料循环与 18 个月燃料循环管理策略下设计基准事故下源项的对比：

— LOCA 事故中，安全壳途径是 LOCA 的唯一释放途径，因此事故的释放源项大小仅与堆芯积存量有关。CREA 事故的释放源项与堆芯积存量也有密切关系。与年度换料模式相比，18 个月换料的 LOCA、CREA 事故源项变化不大；

— 对于 SVSO 事故，通过满水溢出途径向环境释放占据了事故释放源项的大部分份额，因此一回路活度谱是影响环境释放源项的关键因素。与年度换料模式相比，18 个月换料模式管理策略下的 SVSO 事故源项，核素都有大幅增加；

— 对于 MSLB 事故，由于不发生满溢，其释放源项受多方面因素影响，包括一回路和二回路冷却剂活度谱、事故进程和具体计算时所用的假设。在计算燃料循环管理策略变更后的事故源项时，与年度换料模式相比，对事故发生前的二回路活度谱做了更为保守的假设，导致 MSLB 事故源项增加；

— 与年度换料模式相比，18 个月换料模式管理策略下的 FUHA 事故源项，事故源项增加，RCVA 源项变化不大，SGTR、TEGA 事故源项有所减少。

（2）放射性后果比较

本报告根据辽宁红沿河核电厂厂址气象观测系统 2011 年 1 月~2011 年 12 月连续一整年的逐时气象观测数据，采用苏州热工研究院有限公司研发的 CEIRA 程序系统计算事故短期大气弥散因子，重新计算了年度换料模式下的设计基准事故放射性后果。

表 4-18 给出了辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月燃料循环管理策略前后，设计基准事故期间非居住区边界和规划限制区边界上公众个人可能受到的最大有效剂量和甲状腺剂量的比较。

由表 4-18 可以看出，实施 18 个月燃料循环管理策略后，电厂发生 LOCA、CREA 和 RCVA 事故对非居住区边界和规划限制区外边界上公众的个人有效剂量和甲状腺剂量基本不变，FUHA、MSLB 和 SVSO 事故对非居住区边界和规划限制区外边界公众的个人有效剂量和甲状腺量增大，SGTR、TEGA 事故对非居住区边界和规划限制区外边界上公众的个人有效剂量和甲状腺剂量减少。

表 4-16　年度换料模式与十八月换料模式设计基准事故源项比较

核素	年度换料（A）/ 十八月换料（B）							
	LOCA	CREA	FUHA	SGTR	SVSO	MSLB	RCVA	TEGA
Kr-83m	90.35%	87.87%	70.69%	-	-	-	-	-
Kr-85m	83.48%	194.23%	66.52%	30.39%	6.87%	25.60%	112.36%	199.38%
Kr-85	77.48%	85.71%	577.97%	45.45%	12.65%	57.04%	163.95%	13.74%
Kr-87	84.63%	84.29%	-	29.71%	4.47%	14.39%	115.91%	275.83%
Kr-88	81.80%	-	64.69%	29.68%	5.97%	20.66%	110.53%	200.00%
Xe-131m	94.86%	114.10%	83.70%	-	-	-	-	-
Xe-133m	113.37%	108.62%	80.23%	-	-	-	87.78%	422.56%
Xe-133	111.96%	-	77.38%	21.45%	5.95%	26.73%	77.02%	417.95%
Xe-135m	103.90%	186.69%	79.08%	-	-	-	-	-
Xe-135	158.78%	104.13%	78.48%	27.65%	6.96%	29.81%	100.68%	3019.32%
Xe-138	101.88%	101.09%	-	24.34%	1.45%	6.51%	134.52%	3427.35%
I-131	101.28%	113.45%	64.71%	170.26%	55.08%	2.21%	103.37%	170.81%
I-132	93.08%	106.65%	84.85%	150.57%	35.02%	6.84%	112.00%	186.53%
I-133	100.77%	97.04%	99.42%	162.92%	51.47%	4.50%	102.35%	217.33%
I-134	77.03%	105.55%	-	88.49%	36.79%	16.64%	182.26%	626.87%
I-135	98.64%	87.87%	95.24%	157.86%	49.56%	5.56%	114.40%	179.74%

表 4-17　年度换料模式与十八月换料模式下设计基准事故后果比较

事故	事故类别	非居住区边界						规划限制区边界					
		有效剂量（Sv）		（A）/（B）（%）	甲状腺当量剂量（Sv）		（A）/（B）（%）	有效剂量（Sv）		（A）/（B）	甲状腺当量剂量（Sv）		（A）/（B）（%）
		年度换料（A）	18 月换料（B）		年度换料（A）	18 月换料（B）		年度换料（A）	18 月换料（B）		年度换料（A）	18 月换料（B）	
LOCA	Ⅳ	1.85E-03	2.20E-03	**84.09**	2.94E-02	3.47E-02	**84.73**	9.64E-04	9.89E-04	**97.47**	1.82E-02	1.86E-02	**97.85**
CREA	Ⅳ	4.90E-03	4.68E-03	**104.70**	8.55E-02	8.16E-02	**104.78**	1.15E-03	1.06E-03	**108.49**	2.09E-02	1.94E-02	**107.73**
FUHA	Ⅳ	1.55E-04	2.02E-04	**76.73**	2.92E-04	4.56E-03	**6.40**	1.65E-05	2.11E-05	**78.2**	3.09E-05	4.34E-05	**71.20**
MSLB	Ⅳ	2.33E-06	9.89E-05	**2.36**	4.39E-05	1.91E-03	**2.30**	2.20E-07	9.12E-06	**2.41**	4.14E-06	1.76E-04	**2.35**
SVSO	Ⅳ	2.90E-03	8.83E-03	**32.84**	5.47E-02	1.60E-01	**34.19**	5.53E-04	1.02E-03	**54.22**	1.06E-02	1.84E-02	**57.61**
SGTR	Ⅲ	1.28E-03	7.85E-04	**163.06**	2.44E-02	1.42E-02	**171.83**	1.12E-04	6.86E-05	**163.27**	2.12E-03	1.24E-03	**170.97**
RCVA	Ⅲ	4.53E-04	4.16E-04	**108.89**	4.85E-04	4.69E-04	**103.41**	3.95E-05	3.63E-05	**108.82**	4.23E-05	4.09E-05	**103.42**
TEGA	Ⅲ	1.03E-03	2.99E-04	**344.48**	2.93E-05	1.68E-05	**174.40**	8.98E-05	2.61E-05	**344.06**	2.55E-06	1.47E-06	**173.47**

4.3 S3 事故源项的环境影响

4.3.1 事故源项

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料方案阶段，采用平衡循环（长循环 L1、短循环 S1）停堆后 24h 堆芯裂变产物积存量包络值（L1、S1 循环停堆后 24h 各个核素的最大值）作为计算输入，计算得出 S3 源项见表 4-19。

表 4-18 辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料 S3 事故源项

核素	释放量（GBq）	释放速率（GBq/s）
Kr-83m	1.06E+06	2.45E+01
Kr-85	2.12E+07	4.91E+02
Kr-85m	1.34E+07	3.09E+02
Kr-87	2.29E+03	5.30E-02
Kr-88	4.30E+06	9.95E+01
Xe-131m	2.82E+07	6.53E+02
Xe-133	4.22E+09	9.77E+04
Xe-133m	1.25E+08	2.90E+03
Xe-135	1.10E+09	2.53E+04
Xe-135m	5.48E+07	1.27E+03
I-131	2.26E+07	5.23E+02
I-132	2.91E+07	6.73E+02
I-133	2.32E+07	5.37E+02
I-134	1.30E+00	3.01E-05
I-135	3.81E+06	8.81E+01
Cs-134	1.58E+06	3.65E+01
Cs-136	5.08E+05	1.17E+01
Cs-137	1.14E+06	2.63E+01
Te-131	2.55E+05	5.90E+00
Te-131m	1.13E+06	2.62E+01
Te-132	1.16E+07	2.69E+02
Sr-89	1.11E+06	2.56E+01
Sr-90	9.72E+04	2.25E+00
Sr-91	2.45E+05	5.68E+00
Ru-103	1.32E+06	3.06E+01
Ru-106	4.47E+05	1.03E+01
Ce-141	2.36E+05	5.45E+00
Ce-143	1.36E+05	3.14E+00
Ce-144	1.86E+05	4.29E+00

4.3.2 放射性后果

放射性后果计算所采用的模型和参数与设计基准事故放射性后果计算相同。

表 4-20 给出了 S3 事故在非居住边界及规划限制区边界上公众可能受照的最大有效剂量和甲状腺剂量。

表 4-19 S3 源项事故场外剂量

项 目	放射性后果
非居住区边界上公众可能受照的最大有效剂量（Sv）	6.87E+00
非居住区边界上公众可能受照的最大甲状腺当量剂量（Sv）	1.12E+02
规划限制区边界（5km）公众可能受照的最大有效剂量（Sv）	1.86E+00
规划限制区边界（5km）公众可能受照的最大甲状腺当量剂量（Sv）	3.00E+01

5 评价结论

5.1 概述

辽宁红沿河核电厂厂址位于辽宁省瓦房店市红沿河镇红沿河村，厂址地处渤海辽东湾东海岸，北、西、南三面临海，东侧与陆地接壤。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组已分别于 2013 年 6 月、2014 年 5 月投入商业运行，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组运行期间三道安全屏障的完整性始终保持良好状态，三废处理设施的性能指标保持良好状态，气载和液态流出物排放量均处于较低的水平。环境监测结果表明，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组对周围环境的影响是可接受的。

目前，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用传统的年度换料方式，为了提高机组运行效率，兼顾堆芯设计的先进性、燃料经济性和控制工程风险，辽宁红沿河核电有限公司决定辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月燃料循环管理策略。在辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组采用 18 个月换料方式后，电厂与环境保护相关的设施在设计上没有发生变化。

5.2 正常运行期间的环境辐射影响

（1）正常运行期间放射性流出物的环境辐射影响

核电厂运行后放射性流出物的实际排放除与电厂废物处理系统的设计性能和效能相关，还与电厂运行管理水平密切相关。在分析辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组 18 个月换料改造项目的辐射影响中将同时考虑辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组运行状态下的液态放射性流出物对环境的影响。

辽宁红沿河核电厂一期工程四台机组放射性流出物排放对厂址周围一般公众造成的最大年有效剂量为 8.27×10^{-7}Sv/a，占四台机组剂量约束值 0.16mSv/a 的 0.52%，说明在 1、2 号机组实施 18 个月换料改造项目后，辽宁红沿河核电厂现有的放射性废物处理设施性能仍能确保流出物辐射影响满足相关标准要求。

本项目核定排放量同年度换料相比没有发生改变，由于核定排放源项被设计排放源项所包络，故辽宁红沿河核电厂核电厂一期工程按照不高于排放量申请值所排放的流出物所造成剂量应可满足相关标准要求。

（2）换料方案不同条件下的环境辐射影响比较

相比年度换料方案，实施 18 个月换料后辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组对一般公众中最大受照子区仍为厂址 ENE 方位 2~3km 子组，公众最大受照年龄组仍为成人组。实施 18 个月换料后，1、2 号机组设计排放惰性气体排放量下降，因此最大公众气态剂量有所减小，而液态排放中占主要剂量组成部分的 Ag-110m 和 Co-60 排放量增加，因此最大公众液态剂量有所增加。

5.3 事故环境风险评价

核电厂环境风险主要来自于运行期间潜在放射性事故造成的放射性物质的释放。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料方式后，在设计基准Ⅳ类事故中，蒸汽发生器传热管断裂并安全阀卡开事故对非居住区边界所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量均最大、弹棒事故对规划限制区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺当量剂量均最大。非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 8.83E-02Sv，甲状腺剂量最大值为 1.60E-01Sv，分别占国家标准 GB6249-2011 相应限值的 8.83%和 16.00%；事故期间规划限制区外边界公众上的个人有效剂量最大值为 1.06E-03Sv，甲状腺剂量最大值为 1.94E-02Sv，分别占国家标准 GB6249-2011 相应限值的 1.06%和 1.94%。

在设计基准III类事故中，蒸汽发生器传热管破裂事故对规划限制区边界上、非居住区边界上公众所造成的有效剂量和甲状腺剂量均最大，非居住区边界上 0-2h 公众的个人有效剂量最大值为 7.85E-04Sv，甲状腺剂量最大值为 1.42E-02Sv，分别占国家标准 GB6249-2011 相应限值的 15.70%和 28.40%；事故期间规划限制区外边界上公众的个人有效剂量最大值为 6.86E-05Sv，甲状腺剂量最大值为 1.24E-03Sv，分别占国家标准 GB6249-2011 相应限值的 1.37%和 2.48%。

辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料后，各类设计基准事故的放射性后果都能够满足国家标准 GB6249-2011 的相关要求，专设安全设施的设计性能仍然可靠，厂址周围各类边界的设置合理，电厂设计基准事故导致的环境放射性后果满足 GB6249-2011 的相应要求。

5.4 结论

分析和评价表明，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料方式后，运行状态和事故工况下对环境的辐射影响是可以接受的，非居住区和规划限制区的设置仍

然合适，三废处理系统和专设安全设施仍然有效。就环境保护的角度而言，辽宁红沿河核电厂 1、2 号机组实施 18 个月换料方案是可行的。

附录 A 运行状态下的辐射影响的计算模式

A.1 大气弥散计算模式

A.1.1 长期大气弥散因子

A.1.1.1 高架释放情况下大气弥散因子的计算

A.1.1.2 地面释放情况下大气弥散因子的计算

A.1.2 长期地面沉积因子

A.2 陆上环境介质中放射性核素浓度计算模式

A.2.1 空气中放射性核素的浓度

A.2.2 作物中放射性核素的浓度

A.2.3 蔬菜中放射性核素的浓度

A.2.4 肉类中放射性核素的浓度

A.2.5 牛奶中放射性核素的浓度

A.3 气载放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式

A.3.1 空气浸没外照射剂量

A.3.2 地面沉积外照射剂量

A.3.3 吸入内照射剂量

A.3.4 食入陆生食品造成的内照射剂量

A.3.5 ^{14}C 造成环境辐射剂量的计算模式与参数

A.4 水环境介质中放射性浓度计算模式

A.4.1 海水中放射性核素浓度

A.4.2 放射性物质岸边沉积量

A.4.3 海产品中放射性核素浓度

A.5 液态放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式

A.5.1 岸边沉积外照射剂量
A.5.2 游泳和海上作业外照射剂量
A.5.3 食入海产品造成的内照射剂量

A.6 放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式
A.6.1 气载放射性流出物造成的总的辐射剂量
A.6.2 液态放射性流出物造成的总的辐射剂量
A.6.3 放射性流出物造成的总的辐射剂量

A.7 生物辐射剂量计算模式
A.7.1 内照射剂量
A.7.2 外照射剂量
A.7.3 总剂量

附录 A 运行状态下的辐射影响的计算模式

A.1 大气弥散计算模式

A.1.1 长期大气弥散因子

混合释放情况下的长期大气弥散因子按如下公式进行计算：

$$(\chi/Q) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^{N}[(1-E_{tm})\cdot(\chi/Q)_{Hm} + E_{tm}(\chi/Q)_{Gm}] \qquad (A.1\text{-}1)$$

式中：

(χ/Q) — 混合释放情况下计算点处的长期大气弥散因子，s/m^3；

N — 全年中总的有效测量小时数，无量纲；

E_{tm} — 第m小时地面释放的时间份额，无量纲，见（A.1-1-1a）~（A.1-1-1d）式；

$(\chi/Q)_{Hm}$ — 高架释放情况下计算点处第m小时的大气弥散因子，s/m^3，见（A.1-1-2）式；

$(\chi/Q)_{Gm}$ — 地面释放情况下计算点处第m小时的大气弥散因子，s/m^3，见（A.1-1-3）式。

地面释放时间份额的计算公式为：

当 $W_0/Us<1$ 时， Et=1 （A.1-1-1a）

当 $1\leqslant W_0/Us\leqslant 1.5$ 时， Et=2.58-1.58（W_0/Us） （A.1-1.1b）

当 $1.5<W_0/Us\leqslant 5$ 时， Et=0.3-0.06（W_0/Us） （A.1-1.1c）

当 $W_0/Us>5$ 时， Et=0 （A.1-1-1d）

上述公式中：

W_0 — 烟流出口速度，m/s；

U_s — 烟囱高度处的风速，m/s。

A.1.1.1 高架释放情况下大气弥散因子的计算

对于高架释放，根据公式 $He+2.15\sigma_z$（x）=Hm 确定考虑混合层的影响起始距离

Xb，其中 He=Hs+ΔH 为烟流的有效高度，Hm 为混合层高度。

当 X＜Xb 时，不考虑混合层的影响：

$$(\chi / Q)_{Hm} = \frac{2.032}{X \cdot U_H \sigma_Z} \cdot f_{Hm} \cdot R_m \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_{Hm}}) \cdot \exp[-\frac{1}{2}(\frac{He}{\sigma_Z})^2] \quad \text{（A.1-1-2a）}$$

当 Xb≤X＜2Xb 时，假定烟流在地面和混合层之间的多次反射：

$$(\chi / Q)_{Hm} = \frac{2.032}{X \cdot U_{Hm} \sigma_Z} \cdot f_{Hm} \cdot R_m \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_{Hm}}) \cdot \sum_{n=-2}^{2} \exp[-\frac{1}{2}(\frac{2nHm - He}{\sigma_Z})^2] \quad \text{（A.1-1-2b）}$$

当 X≥2Xb 时，假定烟流在地面和混合层之间的均匀混合：

$$(\chi / Q)_{Hm} = \frac{2.032}{X \cdot U_{Hm}(0.79788Hm)} \cdot f_{Hm} \cdot R_m \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_{Hm}}) \quad \text{（A.1-1-2c）}$$

式中：

X — 计算点到释放点的距离，m；

U_{Hm} — 第m小时烟流有效高度处的风速，m/s；

σ_z — 计算点处烟流的垂直标准偏差，m；

f_{Hm} — 高架释放情况下第m小时干沉降和湿沉降引起的烟流耗减校正因子，无量纲，见（A.1-1-2-1）式；

$$f_{Hm} = f_{Hdm} \cdot f_{Hwm} \quad \text{（A.1-1-2-1）}$$

式中：

f_{Hdm} — 高架释放情况下第m小时干沉降引起的烟流耗减校正因子，无量纲，见（A.1-1-2-1-1）式；

f_{HWm} — 高架释放情况下第m小时湿沉降引起的烟流耗减校正因子，无量纲；见（A.1-1-2-1-2）式。

$$f_{Hdm} = \exp\{-(\frac{2}{\pi})^{0.5} \cdot \frac{V_d}{U_{Hm}} \cdot \int_0^X \frac{1}{\sigma_Z} \cdot \exp[-\frac{1}{2}(\frac{H_S + \Delta H}{\sigma_Z})^2] \cdot dx\}$$

（A.1-1-2-1-1）

$$f_{HWm} = \exp(-\frac{\alpha \cdot I_m \cdot X}{U_{Hm}}) \qquad \text{（A.1-1-2-1-2）}$$

上两式中：

V_d — 放射性物质的干沉降速度，m/s；

α — 降水对放射性物质的冲洗比例常数，h/（mm·s）；

Im — 第m小时的降水强度，mm/h。

R_m — 计算点处第m小时的沿海熏烟较正因子，无量纲；

λ_i — 核素i的放射性衰变常数，s^{-1}；

Hs — 烟流释放高度（即烟囱高度），m；

2.032— $(2/\pi)^{0.5}/(\pi/8)$的值；

ΔH — 烟流抬升高度，m，见（A.1-1-2-2）式～（A.1-1-2-4）式。

当烟囱高度为邻近建筑物2～2.5倍（或烟囱高度低于邻近建筑物2～2.5倍但烟流出口速度大于烟流出口处水平风速5倍）时，在中性或不稳定条件下：

$$\Delta H = 1.44 D_i \left(\frac{W_0}{U_s}\right)^{2/3} \cdot \left(\frac{X}{D_i}\right)^{1/3} - C \qquad \text{（A.1-1-2-2）}$$

式中：

W_0 — 烟流出口速度，m/s；

U_s — 烟囱高度处的风速，m/s；

D_i — 烟囱出口的内径，m；

C — 当$W_0<1.5U_s$时的下冲修正因子，m，见（A.1-1-2-2-1）式。

$$C = 3 \cdot \left(1.5 - \frac{W_0}{U_s}\right) \cdot D_e \qquad \text{（A.1-1-2-2-1）}$$

式中：

D_e — 烟囱外径，m。

在用（A.1-1-2-2）式估算时，用下式进行估算并取较小值作为烟流抬升高度：

$$\Delta H = 3\frac{W_0}{U_s} D_i \qquad \text{（A.1-1-2-3）}$$

在稳定条件下，（A.1-1-2-2）式的计算结果要与下面两个公式计算值作比较，并以最小值作为烟流抬升高度：

$$\Delta H = 4 \cdot \left(\frac{F_m}{S} \right)^{1/4} \qquad \text{（A.1-1-2-4a）}$$

$$\Delta H = 1.5 S^{-1/6} \left(\frac{F_m}{U_s} \right)^{1/3} \qquad \text{（A.1-1-2-4b）}$$

上两式中：

F_m — 动量通量参数，见（A.1-1-2-4-1）式；

S — 稳定度参数，见（A.1-1-2-4-2）式。

$$F_m = W_0^2 \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \qquad \text{（A.1-1-2-4-1）}$$

$$S \approx \frac{g}{T} \left(-\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \qquad \text{（A.1-1-2-4-2）}$$

式中：

g — 重力加速度，m/s^2；

T — 周围空气温度，K；

$-\frac{\partial \theta}{\partial Z}$ — 位温递减率，K/m。

对于E类稳定度， $S=8.7\times 10^{-4}$；

对于F类稳定度， $S=1.75\times 10^{-3}$。

A.1.1.2 地面释放情况下大气弥散因子的计算

（A.1-1-3）

式中：

X — 计算点到释放点的距离，m；

U_{Gm} — 第m小时的地面风速，m/s；

$\sum_z$ —经建筑物尾流校正后的垂直标准偏差，m，见（A.1-1-3-1a）式和（A.1-1-3-1b）

式，并择其中计算结果较小者；

$$\sum_Z = (\sigma_Z^2 + \frac{0.5}{\pi} D_Z^2)^{0.5} \qquad \text{（A.1-1-3-1a）或}$$

$$\sum_Z = \sqrt{3} \cdot \sigma_Z \qquad \text{（A.1-1-3-1b）}$$

上两式中：

σ_Z — 计算点处烟流的垂直标准偏差，m；

D_Z — 释放点邻近建筑物的高度，m。

f_{Gm} —地面释放情况下第m小时干沉降和湿沉降引起的烟流耗减校因子，无量纲，见（A.1-1-3-2）式；

$$f_{Gm} = f_{Gdm} \cdot f_{Gwm} \qquad \text{（A.1-1-3-2）}$$

式中：

f_{Gdm} — 地面释放情况下第m小时干沉降引起的烟流耗减校正因子，无量纲，见（A.1-1-3-2-1）式；

f_{Gwm} — 地面释放情况下第m小时湿沉降引起的烟流耗减校正因子，无量纲，见（A.1-1-3-2-2）式。

$$f_{Gdm} = \exp[-(\frac{2}{\pi})^{0.5} \cdot \frac{V_d}{U_{Gm}} \cdot \int_0^x \frac{1}{\sum_Z} \cdot dX] \qquad \text{（A.1-1-3-2-1）}$$

$$f_{GWm} = \exp(-\frac{\alpha \cdot I_m \cdot X}{U_{Gm}}) \qquad \text{（A.1-1-3-2-2）}$$

上两式中：

V_d — 放射性物质的干沉降速度， m/s；

α — 降水对放射性物质的冲洗比例常数，h/（mm • s）；

I_m — 第m小时的降水强度，mm/h。

λ_i — 核素i的放射性衰变常数，s^{-1}；

2.32 — （2/π）$^{0.5}$/（π/8）的值。

A.1.2 长期地面沉积因子

$$(D/Q) = \frac{1}{N}\cdot\sum_{m=1}^{N}\{(1-E_{tm})\cdot[(\chi/Q)_{Hm}\cdot V_d + \frac{8\alpha\cdot I_m}{\pi\cdot X\cdot U_{Hm}}] + E_{tm}[(\chi/Q)_{Gm}\cdot V_d + \frac{8\alpha\cdot I_m}{\pi\cdot X\cdot U_{Gm}}]\} \quad (A.1\text{-}2)$$

式中：

(D/Q) — 混合释放情况下计算点处的长期地面沉积因子，m^{-2}；

N — 全年中总的有效测量小时数，无量纲；

E_{tm} — 第m小时高架释放与地面释放的分配系数，无量纲，见（A.1-1-1a）~（A.1-1-1d）式；

$(\chi/Q)_{Hm}$ — 高架释放情况下计算点处第m小时的大气弥散因子，s/m^3，见（A.1-1-2）式；

V_d — 放射性物质的干沉降速度，m/s；

α — 降水对放射性物质的冲洗比例常数，h/（mm • s）；

I_m — 第m小时的降水强度，mm/h；

X — 计算点到释放点的距离，m；

U_{Hm} — 第m小时烟流有效高度处的风速，m/s；

$(\chi/Q)_{Gm}$ — 地面释放情况下计算点处第m小时的大气弥散因子，s/m^3，见（A.1-1-3）式；

U_{Gm} — 第m小时的地面风速，m/s。

A.2 陆上环境介质中放射性核素浓度计算模式

A.2.1 空气中放射性核素的浓度

（A.2-1）

式中：

χ_i — 计算点处地面空气中放射性核素i的浓度，Bq/m^3；

Q_{Gi} — 气体流出物中放射性核素i的年平均释放率，Bq/a；

$(\chi/Q)_i$ — 计算点处放射性核素i的年平均大气弥散因子，s/m^3；

3.17×10^{-8} — a/s的换算系数。

A.2.2 作物中放射性核素的浓度

$$C_{vi}=\gamma_i\left\{f_{vi}\cdot\left[1-\exp\left(-\lambda_{vi}\cdot t_v\right)\right]\cdot Y_v^{-1}\cdot\lambda_{vi}^{-1}\cdot DDI+B_{vi}\cdot\left[1-\exp\left(-\lambda_{Gi}\cdot t_b\right)\right]\cdot\rho^{-1}\cdot\lambda_{Gi}^{-1}\right\}$$ （A.2-2）

式中：

C_{vi} —计算点处作物中放射性核素i的浓度，B_q/kg；

γ_i —计算点处放射性核素i的表面沉积率，B_q/（m^2·d）；见（A.2-2-1）式；

$$\gamma_i=\frac{1}{365}Q_{Gi}\cdot\left(D/Q\right)_i$$ （A.2-2-1）

式中：

Q_{Gi} — 气体流出物中放射性核素i的年平均释放率，Bq/a；

$(D/Q)_i$— 计算点处放射性核素i的年平均地面沉积因子，$1/m^2$；

f_{vi} —沉积在作物茎叶上的放射性核素i转移到可食部分的份额，无量纲；

λ_{vi} —放射性核素i在作物中的有效去除常数，d^{-1}，见（A.2-2-2）式；

$$\lambda_{vi}=\lambda_v+\lambda_i$$ （A.2-2-2）

式中：λ_v为放射性核素i在作物中的物理去除常数，d^{-1}；

t_v —作物在生长季节中的曝污时间，d；

Y_v —作物可食部分的单位面积产量，kg/m^2；

DDI —清洗因子，无量纲；

B_{vi} —作物可食部分从土壤中摄取放射性核素i的浓度因子，

（Bq/kg）/[Bq/kg（干土）]；

λ_{Gi} —放射性核素i在土壤中的有效去除常数，d^{-1}，见（A.2-2-3）式；

（A.2-2-3）

式中：

λ_G — 放射性核素i在土壤中的物理去除常数，d^{-1}。

t_b —土壤中放射性累积时间，d；

ρ —15cm深度内土壤的有效面密度，kg（干土）/m^2；

1/365 — a/d的换算系数。

A.2.3 蔬菜中放射性核素的浓度

$$C_{Li}=\gamma_i\left\{f_{Li}\cdot\left[1-\exp\left(-\lambda_{Li}\cdot t_L\right)\right]\cdot Y_L^{-1}\cdot\lambda_{Li}^{-1}\cdot DDI+B_{Li}\cdot\left[1-\exp\left(-\lambda_{Gi}\cdot t_b\right)\right]\cdot\rho^{-1}\cdot\lambda_{Gi}^{-1}\right\} \quad (A.2\text{-}3)$$

式中：

C_{Li} — 计算点处蔬菜中放射性核素i的浓度，B_q/kg；

γ_i — 计算点放射性核素i的表面沉积率，B_q/（m^2 • d）；见（A.2-3-1）式；

$$\lambda_{Li}=\lambda_L+\lambda_i \quad (A.2\text{-}3\text{-}1)$$

式中：

λ_L—放射性核素i在蔬菜中的物理去除常数，d^{-1}。

f_{Li} — 沉积在蔬菜茎叶上的放射性核素i转移到可食部分的份额，无量纲；

λ_{Li} — 放射性核素i在蔬菜中的有效去除常数，d^{-1}，见（A.2-3-1）式；

t_L — 蔬菜在生长季节中的曝污时间，d；

Y_L — 蔬菜可食部分的单位面积产量，kg/m^2；

DDI — 清洗因子，无量纲；

B_{Li} — 蔬菜可食部分从土壤中摄取放射性核素i的浓度因子，

（Bq/kg）/[Bq/kg（干土）]；

λ_{Gi} — 核素i的放射性衰变常数，d^{-1}，见（A.2-2-3）式；

t_b — 土壤中放射性累积时间，d；

ρ — 15cm深度内土壤的有效面密度，kg（干土）/m^2；

A.2.4 肉类中放射性核素的浓度

（A.2-4）

式中：

C_{Fi} — 计算点处肉类中放射性核素i的浓度，B_q/kg；

f_{Fi} — 产肉动物每天摄入放射性核素i转移到肉中的份额，（Bq/kg）/（Bq/d）；

f_{FP} — 一年中产肉动物在牧场上放牧的时间份额，无量纲；

f_{FF} — 产肉动物在牧场上放牧时每天食入鲜饲料的份额，无量纲；

C_{Pi} — 鲜饲料中放射性核素i的浓度，按（A.2-2）式计算，Bq/kg；

C_{Si} — 贮存饲料中放射性核素i的浓度，按（A.2-2）式计算，并考虑收获至消费时间内放射性衰变的修正，Bq/kg；

U_F — 产肉动物每天消费的饲料量，kg/d。

A.2.5 牛奶中放射性核素的浓度

（A.2-5）

式中：

C_{Mi} — 计算点处牛奶中放射性核素i的浓度，B_q/kg；

f_{Mi} — 奶牛每天摄入放射性核素i转移到牛奶中的份额，（Bq/kg）/（Bq/d）；

f_{MP} — 一年中奶牛在牧场上放牧的时间份额，无量纲；

f_{MF} — 奶牛在牧场上放牧时每天食入鲜饲料的份额，无量纲；

C_{Pi} — 鲜饲料中放射性核素i的浓度，按（A.2-2）式计算，Bq/kg；

C_{Si} — 贮存饲料中放射性核素i的浓度，按（A.2-2）式计算，并考虑收获至消费时间内放射性衰变的修正，Bq/kg；

U_C — 奶牛每天消费的饲料量，kg/d。

A.3 气载放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式

A.3.1 空气浸没外照射剂量

$$D_{EA} = 8760 \cdot \left(\sum_i \chi_i \cdot DF_{EAi} \cdot F \right) \qquad \text{（A.3-1）}$$

式中：

D_{EA} — 计算点处公众个人浸没于污染的半无限烟云中受到的有效剂量，Sv/a；

χ_I — 计算点处地面空气中放射性核素i的浓度，Bq/m^3，见（A.2-1）；

DF_{EAi} — 浸没于半无限烟云中放射性核素i对人体的有效剂量转换因子，

（Sv/h）/（Bq/m^3）；

F — 建筑物的屏蔽因子，无量纲；

8760 — h/a的换算系数。

A.3.2 地面沉积外照射剂量

$$D_{EG}=8760\cdot\left\{\sum_i \gamma_i\cdot\left[1-\exp\left(-\lambda_{Gi}\cdot t_G\right)\right]\cdot\lambda_{Gi}^{-1}\cdot DF_{ESi}\right\} \qquad \text{（A.3-2）}$$

式中：

D_{EG} — 计算点处公众个人逗留在污染的地面上受到的有效剂量，Sv/a；

γ_I — 计算点处放射性核素i的表面沉积率，Bq/（m^2.d），见（A.2-2-1式）；

λ_{Gi} — 放射性核素i在陆地环境中的有效衰变常数，d^{-1}，见（A.3-2-1）式；

$$\lambda_{Gi}=\lambda_G+\lambda_i \qquad \text{（A.3-2-1）}$$

式中：

λ_G — 放射性核素i在陆地环境中的物理去除常数，d^{-1}；

λ_i — 放射性核素i的衰变常数，d^{-1}。

t_G — 放射性核素在地面上的积累时间，d；

DF_{ESi}— 沉积物中放射性核素i对人体的有效剂量转换因子，（Sv/h）/（Bq/m^2）；

8760 — h/a的换算系数。

A.3.3 吸入内照射剂量

$$D_{EI}=8760\cdot\left\{\sum_i \chi_i\cdot B_r\cdot DF_{EIi}\right\} \qquad \text{（A.3-3）}$$

式中：

D_{EI} — 计算点处公众个人吸入污染空气造成的有效剂量，Sv/a；

χ_i — 计算点处地面空气中放射性核素i的浓度，Bq/m^3，见（A.2-1）式；

B_r — 人的呼吸率，m^3/h；

DF_{EIi} — 吸入放射性核素i对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

8760 — h/a的换算系数。

A.3.4 食入陆生食品造成的内照射剂量

$$D_{EE}=D_{EE1}+D_{EE2} \quad (A.3\text{-}4)$$

式中：

D_{EE} — 公众个人食入陆生植物食品造成的有效剂量，Sv/a；

D_{EE1} — 公众个人食入除^{3}H以外的放射性核素造成的有效剂量，Sv/a，见（A.3-4-1）式；

D_{EE2} — 公众个人食入^{3}H造成的有效剂量，Sv/a，见（A.3-4-2）式。

$$D_{EE1}=\sum_i U_{Ei}\cdot DF_{EEi} \quad (A.3\text{-}4\text{-}1)$$

式中：

DF_{EEi} — 食入放射性核素i对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

U_{Ei} — 公众个人通过陆生动植食品食入除^{3}H以外的放射性核素i的量，Bq/a，见（A.3-4-1-1）式。

$$\begin{aligned}U_{Ei}&=U_V\cdot\left(F_{Vi}\cdot C_{V1i}+F_{V2}\cdot C_{V2i}\right)\cdot\exp\left(-\lambda_i\cdot T_V\right)\\&+U_L\cdot\left(F_{Li}\cdot C_{L1i}+F_{L2}\cdot C_{L2i}\right)\cdot\exp\left(-\lambda_i\cdot T_L\right)\\&+U_F\cdot\left(F_{Vi}\cdot C_{F1i}+F_{F2}\cdot C_{F2i}\right)\cdot\exp\left(-\lambda_i\cdot T_F\right)\\&+U_M\cdot\left(F_{Mi}\cdot C_{M1i}+F_{M2}\cdot C_{M2i}\right)\cdot\exp\left(-\lambda_i\cdot T_M\right)\end{aligned} \quad (A.3\text{-}4\text{-}1\text{-}1)$$

式中：

U_V — 公众个人的作物消费量，kg/a；

U_L — 公众个人的蔬菜消费量，kg/a；

U_F — 公众个人的肉类消费量，kg/a；

U_M — 公众个人的牛奶消费量，kg/a；

F_{V1} — 公众个人食入其所在子区生产的作物的份额，无量纲；

F_{L1} — 公众个人食入其所在子区生产的蔬菜的份额，无量纲；

F_{F1} — 公众个人食入其所在子区生产的肉类的份额，无量纲；

F_{M1} — 公众个人食入其所在子区生产的牛奶的份额，无量纲；

F_{V2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的作物的份额，无量纲；

F_{L2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的蔬菜的份额，无量纲；

F_{F2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的肉类的份额，无量纲；

F_{M2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的牛奶的份额，无量纲；

C_{V1i} — 公众个人所在子区作物中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-2）式；

C_{L1i} — 公众个人所在子区蔬菜中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-3）式；

C_{F1i} — 公众个人所在子区肉类中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-4）式；

C_{M1i} — 公众个人所在子区牛奶中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-5）式；

C_{V2i} — 公众个人所在子区以外的评价区作物中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-2）式；

C_{L2i} — 公众个人所在子区以外的评价区蔬菜中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-3）式；

C_{F2i} — 公众个人所在子区以外的评价区肉类中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-4）式；

C_{M2i} — 公众个人所在子区以外的评价区牛奶中放射性核素i的浓度，Bq/kg，见（A.2-5）式；

T_V — 作物从收获到被消费的时间间隔，d；

T_L — 蔬菜从收获到被消费的时间间隔，d；

T_F — 从产肉动物被屠宰到被消费的时间间隔，d；

T_M — 从挤牛奶到牛奶被消费的时间间隔，d；

λ_i — 核素i的放射性衰变常数，d^{-1}。

$$D_{EE2} = 10^3 \cdot \chi_T \cdot H^{-1} \cdot U_W \cdot DF_{ET} \qquad \text{（A.3-4-2）}$$

式中：

χ_T — 计算点处地面空气中H^3的浓度，Bq/m^3，见（A.2-1）式；

H — 空气中的平均湿度，g（水）/m^3（空气）；

U_W — 公众个人食入陆生动植物食品摄取的水量，kg/a，见（A.3-4-2-1）式；

DF_{ET} — 食入^3H对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

10^3 — g/kg的换算系数。

$$U_W = U_V \cdot (F_{V1} + F_{V2}) \cdot f_{WV} + U_L \cdot (F_{L1} + F_{L2}) \cdot f_{WL} + U_F \cdot (F_{F1} + F_{F2}) \cdot f_{WF} + U_M \cdot (F_{M1} + F_{M2}) \cdot f_{WM} \quad \text{（A.3-4-2-1）}$$

式中：

U_V — 公众个人的作物消费量，kg/a；

U_L — 公众个人的蔬菜消费量，kg/a；

U_L — 公众个人的肉类消费量，kg/a；

U_M — 公众个人的牛奶消费量，kg/a；

F_{V1} — 公众个人食入其所在子区生产的作物的份额，无量纲；

F_{L1} — 公众个人食入其所在子区生产的蔬菜的份额，无量纲；

F_{F1} — 公众个人食入其所在子区生产的肉类的份额，无量纲；

F_{M1} — 公众个人食入其所在子区生产的牛奶的份额，无量纲；

F_{V2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的作物的份额，无量纲；

F_{L2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的蔬菜的份额，无量纲；

F_{F2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的肉类的份额，无量纲；

F_{M2} — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的牛奶的份额，无量纲；

f_{WV} — 作物中的含水率，无量纲；

f_{WL} — 蔬菜中的含水率，无量纲；

f_{WF} — 肉类中的含水率，无量纲；

f_{WM} — 牛奶中的含水率，无量纲。

A.3.5 ^{14}C 造成环境辐射剂量的计算模式与参数

放射性核素 ^{14}C 对公众造成的辐射剂量计算模式，主要考虑放射性核素 ^{14}C 从空气介质转移到陆生动植物食品中的平衡过程，公众因食用该类陆生动植物食品而受到内照射剂量。

在模式的建立过程中，假定：

— 只有以 CO_2 形式释放的 ^{14}C，才能通过光合作用转移并固定到植物组织中去，并通过食物链最终转移到人体中；

— 植物中 ^{14}C 与 ^{12}C 的比值与植物周围大气中 ^{14}C 与 ^{12}C 的比值相同；

— ^{14}C 对公众造成的辐射剂量主要来自于食入受污染的陆生动植物食品，^{14}C 通过其它途径造成的剂量贡献都很少（＜1%），均不予考虑。

其计算公式为：

$$D_{C14}=3.17\times10^{-8}\cdot Q_{14}\cdot\frac{F}{C}\cdot\{[F_{1,\nu}\cdot(x/Q_{14})_1+F_{2,\nu}\cdot\frac{\sum_K(x/Q_{14})_K\cdot T_{\nu,K}}{\sum_K T_{\nu,K}}]\cdot U_\nu\cdot f_\nu$$

$$+[F_{1,F}\cdot(x/Q_{14})_1+F_{2,F}\cdot\frac{\sum_K(x/Q_{14})_K\cdot T_{F\cdot K}}{\sum_K T_{F,K}}]\cdot W_F\cdot T_F\cdot U_F\cdot f_F+$$

$$[F_{1,M}\cdot(x/Q_{14})_1+F_{2,M}\cdot\frac{\sum_K(x/Q_{14})_K\cdot T_{M,K}}{\sum_K T_{M,K}}]\cdot W_M\cdot T_M\cdot U_M\cdot f_F\}\cdot DF_{14,A}$$

式中：

D_{C14} — 公众个人通过食入陆生食品摄入 ^{14}C 造成的有效剂量，Sv/a；

Q_{14} — 核电厂正常运行工况下 ^{14}C 向环境的释放率，Bq/a；

F — 一年中 ^{14}C 从核电厂向大气排放的总时间与一年中植物发生光合作用的总时间（定为 4400h）之比，无量纲，如果 ^{14}C 连续排放，F=1；

f — 粮食作物和蔬菜中稳定碳的质量份额，无量纲，对于食品植物 f_v 取 0.18，对饲料植物 f_F 取 0.09；

C — 空气中稳定碳的浓度，kg/m^3，取 1.8×10^{-4}；

F_{1V} — 公众个人食入其所在子区生产的陆生植物食品（粮食，蔬菜）占其食入陆生植物食品总量的份额；

F_{1F} — 公众个人食入其所在子区生产的肉类食品占其食入肉类食品总量的份额；

F_{1M} — 公众个人食入其所在子区生产的奶类食品占其食入奶类食品总量的份额；

F_{2V} — 公众个人食入除其所在子区以外的评价区生产的陆生植物食品（粮食，蔬菜）占其食入陆生植物食品总量的份额；

F_{2F} — 公众个人食入除其所在子区以外的评价区生产的肉类食品占其食入肉类食品总量的份额；

F_{2M} — 公众个人食入除其所在子区以外的评价区生产的奶类食品占其食入奶类食品总量的份额；

T_{VK} — 第 K 子区生产的陆生植物食品（粮食，蔬菜）的总产量，kg/a；

T_{FK} — 第 K 子区生产的肉类食品的总产量，kg/a；

T_{MK} — 第 K 子区生产的奶类食品的总产量，kg/a；

$(\chi/Q_{14})_1$ — 公众个人所在子区 ^{14}C 的长期大气弥散因子，s/m^3；

$(\chi/Q_{14})_K$ — 第 K 子区 ^{14}C 的长期大气弥散因子，s/m^3；

U_V — 公众个人食入陆生植物食品（粮食，蔬菜）的数量，kg/a；

UF — 公众个人食入肉类食品的数量，kg/a；

U_M — 公众个人食入奶类食品的数量，kg/a；

W_F — 产肉动物食入饲料的数量，kg/d，取 5kg/d；

W_M — 产奶动物食入饲料的数量，kg/d，取 50kg/d；

T_F — 产肉动物通过食入饲料而摄入的 ^{14}C 转移到肉中的份额，（Bq/kg）/（Bq/d），取 3.1×10^{-2}（Bq/kg）/（Bq/d）；

T_M — 产奶动物通过食入饲料而摄入的 ^{14}C 转移到奶中的份额，（Bq/kg）/（Bq/d），取 1.2×10^{-2}（Bq/kg）/（Bq/d）；

$DF_{14.A}$— 公众 ^{14}C 的食入内照射有效剂量转换因子，Sv/Bq，取 5.8×10^{-10} Sv/Bq；3.17×10^{-8} — a/s 的换算系数。

A.4 水环境介质中放射性浓度计算模式

A.4.1 海水中放射性核素浓度

$$C_{WKi} = 3.17\times10^{-8}\cdot Q_{Li}\cdot q^{-1}\cdot C_{RK} \qquad (A.4\text{-}1)$$

式中：

C_{WKi} — K水域海水中放射性核素 i 的浓度，Bq/m^3；

Q_{Li} — 液态放射性核素 i 的年平排放量，Bq/a；

q — 同液态放射性核素一起排放的循环冷却水流量，m^3/s；

C_{RK} — K水域海水的稀释因子，无量纲；

3.17×10^{-8}—a/s的换算系数。

A.4.2 放射性物质岸边沉积量

$$C_{Bi}=\frac{(0.1)\cdot Kd_i\cdot DS\cdot Cw_i}{1+Ss\cdot Kd_i}\cdot\frac{1-e^{-\lambda_i\cdot Te}}{\lambda_i\cdot Te} \qquad (A.4\text{-}2)$$

式中：

C_{Bi} — 岸边放射性核素 i 的沉积量，Bq/m^2；

Cw_i — 岸边海水中放射性核素的浓度，Bq/m^3；

DS — 悬浮物有效沉积密度，kg/m^2；

Ss — 海水中悬浮物的浓度，kg/m^3；

Kd_i — 海水中悬浮物对核素 i 的吸附分配系数，m^3/kg；

λ_i — 核素 i 的放射性衰变常数，1/hr；

Te — 岸边沉积物中放射性积累时间，缺省值 8760hr；

0.1 — 底部沉积物 Kd 因子与海水中悬浮物 Kd 因子的比值。

A.4.3 海产品中放射性核素浓度

$$C_{PKi}=C_{WKi}\cdot B_{Pi} \qquad (A.4\text{-}3)$$

式中：

C_{PKi} — K水域海产品P中放射性核素i的浓度，Bq/kg；

C_{WKi} — K水域海水中放射核素i的浓度，Bq/m^3，见（A.4-1）式；

B_{Pi} — 海产品P对放射性核素i的浓集因子，（Bq/kg）/（Bq/m^3）。

A.5 液体放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式

A.5.1 岸边沉积外照射剂量

$$D_{ES}=\sum_i C_{Bi}\cdot W\cdot DF_{ESi}\cdot Ts \qquad (A.5\text{-}1)$$

式中：

D_{ES} — 岸边沉积物对公众个人所致的有效剂量，Sv/a；

C_{Bi} — 岸边放射性核素 i 的沉积量，Bq/m^2，见（A.4-2）式；

W — 岸宽因子，无量纲；

Ts — 公众一年中在岸边活动的时间，hr/a；

DF_{ESi}— 岸边沉积物中核素 i 对人体的有效剂量转换因子，（Sv/h）/（Bq/m^2）。

A.5.2 游泳和海上作业外照射剂量

$$D_{EW} = 8760 \cdot \sum_i C_{WKi} \cdot g \cdot F_T \cdot [1 - \exp(-\lambda_{wi} \cdot t_W)] \cdot DF_{EWi} \qquad (A.5\text{-}2)$$

式中：

D_{EW} — 在 K 水域海上作业时海水中放射性核素对公众个人产生的有效剂量，Sv/a；

C_{WKi} — K 水域海水中放射性核素 i 的浓度，见（A.5-1）式；

F_T — 公众个人一年中在海上作业的时间份额，无量纲；

λ_{Wi} — 放射性核素 i 在水环境中的有效去除常数，d^{-1}，见（A.5-2-1）；

t_W — 海水中放射性积累时间，d；

DF_{Ewi} — 浸没于无限大水体中放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，（Sv/h）/（Bq/m^3）；

g — 照射几何因子，无量纲；游泳取 1，海上作业取 0.5；

8760 — h/a 的换算系数。

$$\lambda_{Wi} = \lambda_W + \lambda_i \qquad (A.5\text{-}2\text{-}1)$$

式中：

λ_W — 放射性核素 i 在水环境中的物理去除常数，d^{-1}；

λ_i — 核素 i 的放射性衰变常数，d^{-1}。

A.5.3 食入海产品造成的内照射剂量

$$D_{EP} = \sum_i C_{PKi} \cdot U_P \cdot \exp(-\lambda \cdot t_P) \cdot DF_{EEi} \qquad (A.5\text{-}3)$$

式中：

D_{EP} — 公众个人食入 K 水域的海产品 P 造成的有效剂量，Sv/a；

C_{PKi} — K 水域海产品 P 中放射性核素 i 的浓度，见（A.5-1）式；

U_p — 公众个人的海产品 P 消费量，kg/a；

λ_i — 核素 i 的放射性衰变常数，d^{-1}；

t_P — 海产品 P 从捕捞到被消费的时间间隔，d；

DF_{EEi}— 食入放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq。

A.6 放射性流出物对公众造成的辐射剂量计算模式

A.6.1 气载放射性流出物造成的总的辐射剂量

$$D_{EQ} = D_{EA} + D_{EG} + D_{EI} + D_{EE} \quad \text{（A.6-1）}$$

式中：

D_{EQ} — 气载放射性流出物对公众个人造成的有效剂量，Sv/a；

D_{EA} — 计算点处公众个人浸没于污染的半无限烟云中受到的剂量，Sv/a，见（A.3-1）式；

D_{EG} — 计算点处公众个人逗留在污染的地面上受到的有效剂量，Sv/a，见（A.3-2）式；

D_{EI} — 计算点处公众个人吸入污染空气造成的有效剂量，Sv/a，见（A.3-3）式；

D_{EE} — 公众个人食入陆生动植物食品造成的有效剂量，Sv/a，见（A.3-4）式。

A.6.2 液态放射性流出物造成的总的辐射剂量

$$D_{EL} = D_{ES} + D_{EW} + D_{EP} \quad \text{（A.6-2）}$$

式中：

D_{EL} — 液态放射性流出物对公众个人造成的有效剂量，Sv/a；

D_{ES} — 公众个人逗留在海岸边受到的有效剂量，Sv/a，见（A.5-1）式；

D_{EW} — 公众个人在海上作业或游泳时受到的有效剂量，Sv/a，见（A.5-2）式；

D_{EP} — 公众个人食入海产品造成的有效剂量，Sv/a，见（A.5-3）式。

A.6.3 放射性流出物造成的总的辐射剂量

$$D_E = D_{EQ} + D_{EL} \quad \text{（A.6-3）}$$

式中：

D_E — 气态和液态两条途径对公众个人造成的总的有效剂量，Sv/a；

D_{EQ} — 气载放射性流出物对公众个人造成的有效剂量，Sv/a，见（A.6-1）式。

D_{EL} — 液态放射性流出物对公众个人造成的有效剂量，Sv/a，见（A.6-2）式。

A.7 生物辐射剂量计算模式

A.7.1 内照射剂量

$$D_{\text{int}} = C_b \cdot F_{\text{int}} \quad \text{（A.7-1）}$$

$$C_b = C_w \cdot B_p \quad \text{（A.7-2）}$$

式中：

D_{int} — 放射性核素对海洋生物的内照射辐射剂量，Gy/d；

C_b — 海洋生物体内的放射性浓度，Bq/kg；

C_w — 海水中放射性的浓度，Bq/kg；

F_{int} — 生物内照射剂量转换因子，（Gy/d）/（Bq/kg）；

B_p — 平衡状态下放射性核素在生物体内的浓集系数，L/kg。

A.7.2 外照射剂量

$$D_{ext} = C_w \cdot F_{ext} \quad \text{（浮游生物和鱼类）} \quad \text{（A.7-3）}$$

$$D_{ext} = 0.5 \cdot (C_w + C_s) \cdot F_{ext} \quad \text{（软体类与甲壳类）} \quad \text{（A.7-4）}$$

式中：

D_{ext} — 核素对海洋生物的外照射剂量率，Gy/d；

C_s — 底泥中的放射性浓度，Bq/kg；

C_w — 海水中的放射性浓度，Bq/L；

F_{ext} — 生物外照射剂量转换因子，（Gy/d）/（Bq/kg）。

A.7.3 总剂量

$$D_{total} = D_{\text{int}} + D_{ext} \qquad \text{（A.7-5）}$$

式中：

D_{total} — 放射性流出物对海洋生物的总辐射剂量，Gy/a。

附录 B　事故剂量估算模式

B.1　短期大气弥散计算模式

B.2　个人剂量计算

附录 B　事故剂量估算模式

B.1　短期大气弥散计算模式

假设事故工况下放射性以地面源方式释入环境，采用高斯烟流轴浓度公式计算小时大气弥散因子。计算中考虑建筑物尾流效应。

计算过程如下：

$$(\chi/Q)_1=\frac{1}{u\cdot\left(\pi\sigma_y\sigma_z+C_WA\right)} \quad \text{（式 1）}$$

$$(\chi/Q)_2=\frac{1}{u(3\pi\sigma_y\sigma_z)} \quad \text{（式 2）}$$

$$(\chi/Q)_3=\frac{1}{u\cdot(\pi\cdot\Sigma_y\cdot\sigma_z)} \quad \text{（式 3）}$$

$$\chi/Q=\min(\max((\chi/Q)_1,(\chi/Q)_2)),(\chi/Q)_3)) \quad \text{（式 4）}$$

上述式中：

χ/Q　— 小时大气弥散因子，s/m^3；

x　— 下风向距离，m；

u　— 地面风速，m/s；

A　— 建筑物最小横截面积，m^2；

C_w　— 建筑物尾流效应使烟流弥散占面积 A 的份额，取 C_w=0.5；

σ_y，σ_z — 分别为横向和垂向的大气扩散参数；

Σ_y　— 考虑烟云弯曲和建筑物尾流效应的水平大气扩散参数，根据地面风速、稳定度和释放距离确定（具体参见美国管理导则 RG1.145，下式中的 M 取值参见该导则的图 3）：

- $\Sigma_y=M\cdot\sigma_y$，当下风向距离 x≤800m；
- $\Sigma_y=(M-1)\cdot\sigma_{y800m}+\sigma_y$，当下风向距离 x＞800m。

B.2　事故剂量计算模式

在事故释放期间，公众可能受到的辐射照射途径有烟云浸没外照射、空气吸入内照射和地面沉积外照射三种途径，各种途径的剂量计算模式如下：

（1）烟云浸没剂量 D_a

$$D_a = \sum_n \left[\sum_e Q_n(e) \cdot \left(\frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e \right] \cdot DF_a(n) \qquad （式 5）$$

（2）空气吸入剂量 D_{inh}

$$D_{inh} = \sum_n \left[\sum_e Q_n(e) \cdot \left(\frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e \cdot B_r(e) \right] \cdot DF_{inh}(n) \qquad （式 6）$$

（3）地面沉积剂量 D_g

$$D_g = \sum_n \left[\sum_e Q_n(e) \cdot \left(\frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e \cdot V_d \cdot S_n(e) \right] \cdot \frac{DF_g(n)}{\lambda_n} \qquad （式 7）$$

式中 $S_n(e) = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_n T_e}}{\lambda_n T_e} e^{-\lambda_n (t_r - T_e - t_e)}$

上述（式 5）、（式 6）和（式 7）中，各参数的含义为：

D_a、D_{inh}、D_g：剂量，S_v；

Q_n（e） —e 时段核素 n 的释放总活度，Bq；

$\left(\frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e$ —e 时段的事故（短期）大气扩散因子，$s \cdot m^{-3}$；

B_r（e） — 成人在 e 时段的呼吸率，$m^3 \cdot s^{-1}$；

λ_n — 核素 n 的衰变常数，s^{-1}；

V_d — 核素的干沉积速度，$m \cdot s^{-1}$；

DF_a（n） — 核素 n 的浸没剂量转换因子，$Sv \cdot (s \cdot Bq \cdot m^{-3})^{-1}$；

DF_{inh} — 核素 n 的吸入剂量转换因子，$Sv \cdot Bq^{-1}$；

DF_g（n） — 核素 n 的沉积剂量转换因子，$Sv \cdot (s \cdot Bq \cdot m^{-2})^{-1}$；

S_n（e） —e 时段沉积剂量修正因子；

t_e —e 时段的起始时间，s；

T_e —e 时段的释放时间，s；

t_r — 沉积剂量的评价时间，s。