

核电厂放射性固体废物管理系统的研究与开发

李 超, 潘跃龙, 邓先宽, 张发源, 严 勇, 罗 倩

深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518026

摘要: 目前我国在运核电厂和其他所有堆型(CPR1000、EPR 和 AP1000)的在建核电厂均缺少一套统一的放射性固体废物管理系统, 缺乏对放射性固体废物从产生到最终处置的全周期跟踪管理。根据核电厂的放射性废物管理需求, 研制了一套适合于各核电机型的核电厂放射性固体废物管理系统, 对废物源项、处理、暂存、运输、处置全过程进行跟踪, 使放射性废物管理安全、可控; 研发了废物管理跟踪单和数据库, 分析了废物管理工艺流程的逻辑关系, 根据废树脂、浓缩液、废滤芯、检修废物等处理工艺分别设计了核素计算模型, 可推算指定时刻的放射性水平, 实现放射性废物数据的深度分析、应用以及对放射性废物安全管理的全过程追踪。研究成果已经在国内部分核电厂使用, 有助于提高核电厂的放射性废物管理水平, 具有较大的安全和社会意义。同时, 该系统记录的数据有助于核电厂实现辐射防护优化设计和放射性废物最小化管理。

关键词: 放射性固体废物管理系统; 放射性废物源项; 放射性废物整备; 暂存; 运输; 处置

中图分类号: TL941.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)S0-0103-08

doi: 10.7538/hhx.2014.36.S0.0103

Research and Development of Radioactive Solid Waste Management System for Nuclear Power Plants

LI Chao, PAN Yue-long, DENG Xian-kuan, ZHANG Fa-yuan, YAN Yong, LUO Qian

China Nuclear Power Design Company, Shenzhen 518026, China

Abstract: At present, the nuclear power plants including operation units and constructing units at home almost don't have a unified radioactive solid waste management system, which can manage the radioactive solid wastes from produce to final dispose process. According to the requirements of radioactive waste management from the nuclear power plants, this paper is devoted to develop a general radioactive solid waste management system, which is suitable for various waste management activities, including the waste source term, collecting, treatment, storage, and transportation and final disposal management of the whole process of solid waste. This paper analyzed the regulations and the logic relationship of the whole waste management activities such as the radioactive waste source term, treatment, storage, transport and disposal requirements, system safety design are also analyzed and planned, and developed the radioactive solid waste management system for the nuclear power plants

(RSWI). The RSWI is the first whole process radioactive waste management system in China nuclear power plants, which can trace the whole process of the waste management activities, and develop the waste management tracking tickets and database. According to the different solid waste source term (such as filter cartridges and spent resins or concentrates) and treatment process, different radioactivity modelings have been researched, the radionuclide decay calculation model is designed, which can evaluate the solid waste radioactivity level. RSWI has been used in the nuclear power plants of China. This software can be used in CPR1000, EPR and AP1000 nuclear power plants by system configuration. The results of this paper were applied in some NPP at home, and it is proved to improve the level of nuclear power plants of waste management, which has greater security and social significance. The recorded data will help the nuclear power plants realize the radiation protection optimization design and the radioactive waste minimization management.

Key words: radioactive solid waste management system; radioactive waste source term; radioactive waste conditioning; interim storage; transport; disposal

随着我国核工业的发展,已经积累贮存了相当数量的放射性废物,这些废物亟需处置。随着我国核设施运行得越来越多,对放射性废物的安全管理要求越来越高。放射性废物的安全管理是核安全的重要方面,是影响公共安全的重要方面,也是决定能否实现国家核能可持续利用的部分关键因素。放射性废物接收质量保证大纲要求应对放射性废物包产生的全过程实施质量监查。根据 IAEA 安全导则《Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Reactors》DRAFT SAFETY GUIDE (DS448)的要求,在放射性废物处置前的所有步骤和元素都应该进行管理。

据文献[1—4]以及核电厂调研,目前国内正在运行的核电厂(大亚湾、岭澳一期和岭澳二期)和其他所有堆型(CPR1000、EPR 和 AP1000)的在建核电厂均缺少一套统一的放射性固体废物管理系统,缺乏对放射性固体废物从产生到最终处置的全周期跟踪管理。国内在建的红沿河、宁德、阳江、防城港、台山、海阳、三门等核电厂,现有的设计,源项、放射性废物处理、暂存、运输、处置各自独立,未建立联系,电厂需一套平台将各数据进行比较、分析、共享,实现对放射性废物的一体化管理。国内部分核电厂已经提出了放射性废物管理系统的研发需求,要求该系统尽快在核电厂投用。

本系统从放射性废物全周期管理的角度出发,根据国家法规和处理、暂存等设计工艺,结合放射性固体废物在核电厂的处理要求和在处置场的处置要求,研究建立完整的放射性废物跟踪单和数据库,研制了一套放射性固体废物管理系统。该系统实现了

对放射性废物货包从放射性废物源项、整备、暂存、运输、到处置的全过程管理,可确保放射性废物管理安全、可控,具有较大的安全和社会意义。

1 国内外放射性固体废物管理研究现状

1.1 国外放射性固体废物管理系统研究现状

国外有部分核电厂开发了放射性固体废物管理系统,但系统功能仅限于源项管理、放射性废物处理和暂存,没有实现与处置场处置相结合的一体化管理。目前,国际上著名的放射性废物管理设计公司,如美国 ES 公司,在海阳核电厂(AP1000 机组)对废物分拣压缩打包线设计了测量桶的表面剂量率、质量装置,可以记录桶的编号,开展了部分放射性废物管理信息的记录。西屋公司对三门核电厂(AP1000)、红沿河、宁德、阳江核电厂(CPR1000)放射性废物处理相关的水泥固化、分拣压缩工艺记录了桶编号、处理工艺、桶的质量和核素等信息。德国 NUKEM 为田湾核电厂的放射性废物处理相关信息进行了记录管理。法国 AREVA 公司对台山核电厂(EPR)放射性湿废物水泥固化、干废物分拣压缩、废物暂存设计了管理系统。上述企业均将放射性废物管理与生产流程管理系统相集成,均只做了放射性废物处理的信息管理,缺乏对放射性废物从产生、处理、暂存、运输、到处置的全过程管理和数据深度二次开发。

分析核电厂未能提供一套全流程、供相关核设施共享经验的管理系统的原因,主要在于放射性废物管理涉及的工艺流程面较广,难有一家核电厂业务全方位的涉及放射性废物收集、处理、暂

存、运输、处置的全流程,开发该套软件需要较强的专业知识和内部资料,部分资料涉及保密,同时各个部门可能有一些特殊要求,因此多以单个机构为单位研究的针对放射性废物管理某一个局部流程的管理系统,这类系统针对性较强,多数与设备管理、原材料管理或者其他的信息管理相结合,不是一个纯粹的放射性废物管理系统,更类似于核设施运营单位的生产信息管理系统。

1.2 国内放射性固体废物管理系统研究现状

国内大亚湾核电厂开发了一套放射性固体废物管理系统,北龙处置场开发了一套放射性废物处置系统,这两个系统不能实现无缝对接,存在功能不完善的缺点,系统智能化程度有待提高^[5]。该软件的数据报表,与 CPR1000、EPR、AP1000 等核电厂放射性废物管理的实际需求符合度有偏差,需要进行适应性调整后才在这些机组上投用。

西北处置场开发了一套放射性固体废物处置管理系统,已经正式投入使用^[6]。该系统主要侧重于放射性废物处置管理,缺乏对核电厂所产生放射性废物的管理,不能从处置数据直接追溯到放射性废物产生的详细数据。另外,该系统采用 Access 作为数据库,其数据存贮管理的安全性与大规 模数据交互访问的性能较专用数据库软件如 SQL server 和 ORACLE 相差甚远。该系统的数 据录入绝大部分为手动录入,自动化程度有待提 高。另外,该系统对岭澳二期、田湾以及阳江等核 电厂新采用的放射性废物处理、暂存工艺数据的 兼容性需进行适应性调整。

基于上述需求,本系统从放射性固体废物全 周期管理的角度出发,结合放射性固体废物在核 电厂的处理要求和在处置场的处置要求,建立了 完整的放射性废物跟踪单和数据库,研发出一套 放射性固体废物管理系统。该系统实现了对放射 性废物从源项、整备、暂存、运输到处置的全过 程管理。

2 放射性固体废物管理工艺流程和内部逻辑

核电厂放射性固体废物管理流程简图示于 图 1。来自核电厂的放射性废树脂、浓缩液、检修 废物等固体废物,通过水泥固化、装高整体容器或 超级压缩等处理工艺,将放射性废物整备成稳定 的货包。放射性废物货包形式主要有 200 L、 400 L 金属桶(分不锈钢和碳钢两种)、高整体容器 等,放射性废物货包通过测量表面剂量率和核素

成分后,将运至放射性废物暂存库暂存一段时间, 然后根据处置场的放射性废物接收条件,筛选符 合条件的放射性废物包,通过放射性废物运输车 辆,由核电厂运输至最终处置场,通过放射性废物 接收检测后,将放射性废物货包转运至处置场指 定的单元格位置进行填埋处置。

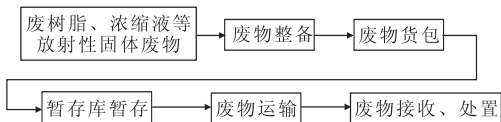


图 1 核电厂放射性固体废物管理流程简图

Fig. 1 Process for nuclear radioactive solid waste management

3 系统设计与实现

3.1 软件架构图

核电厂放射性固体废物管理系统软件架构图 详见图 2,包含个人工作台、文件管理、放射性废物 源项管理、放射性废物处理、放射性废物暂存、放射 性废物运输、放射性废物处置、货包管理、材料管 理、工业废物、危险废物管理和系统管理。本章重 点对放射性废物源项、处理、暂存、运输、处置模 块进行分析。说明:(1) 源项管理、放射性废物处理、 暂存、运输、处置模块为递进关系,通过放射性废物 桶编码、货包档案编号以及源项管理跟踪单号进行 联系。用户可通过放射性废物桶编码执行单独模 块的操作。在源项管理、放射性废物处理、暂存、运 输、处置模块中各模块都有紧密的关系,上一步没 有处理下一步无法操作。在后一步处理时需对前 一步的数据进行校验,检查数据是否生效。当录入 数据时需要有流程进行校核以确保数据的准确性。(2) 本系统内嵌计算程序,实现核素活度计算和处 置校核、处置堆码方案优化,并用图形化界面展示 放射性废物暂存库中桶的堆码分布。

3.2 软件详细组成

适用于核电厂部分的软件架构图示于图 3。

本系统规划的页面结构关系示于图 4。

3.3 核心功能模块的实现

1) 放射性废物源项管理

放射性废物源项管理主要针对核电厂运行产 生的废树脂、废滤芯、浓缩液、检修废物、废油等放 射性固体废物进行管理。主要记录放射性废物产生 的原因、数量、主要核素、活度,并生成相关的统

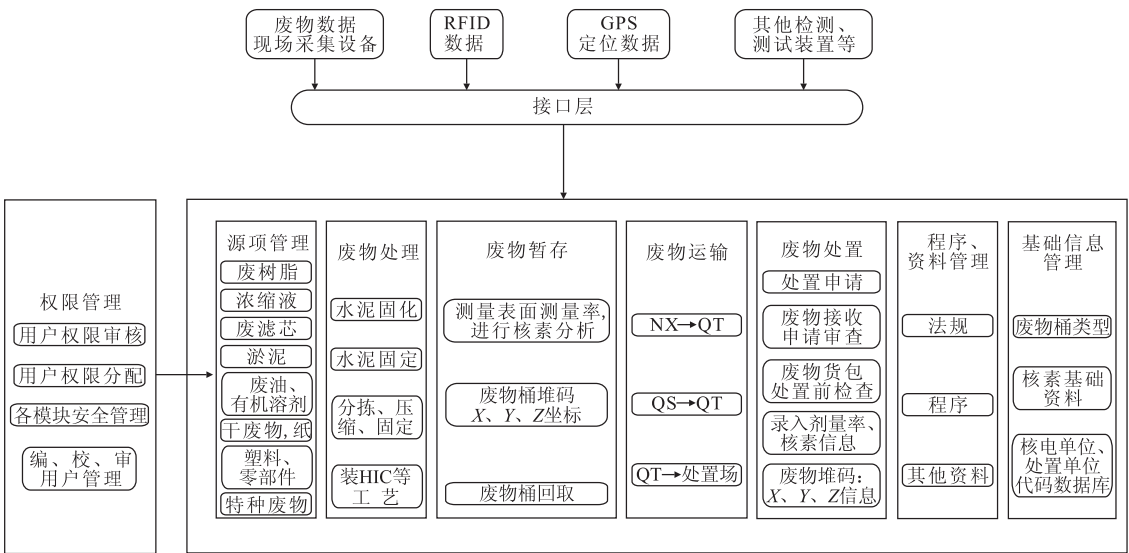


图 2 软件架构图

Fig. 2 Radioactive solid waste management system framework

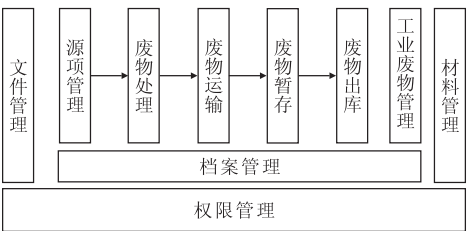


图 3 核电厂放射性固体废物管理软件架构图

Fig. 3 Framework for nuclear power plant solid waste management system

计报表。源项管理操作员将废树脂、浓缩液、废滤芯等放射性废物的跟踪单信息录入本管理系统，并记录相关的核素和活度信息、开展相关的放射性废物统计和核素分析工作。可根据时间、系统和产生原因等生成折线图、饼状图等统计报表。每类源项具有增、删、改、查和统计列表功能。

2) 放射性废物处理

核电厂产生的低、中水平放射性固体废物常见的处理工艺包括水泥固化、水泥固定、分拣压缩和焚烧、高整体容器(HIC)处理工艺等。放射性废物处理模块主要对核电厂产生的各类废物源项,通过特定的废物处理工艺,将废物整备后,装入废物桶中。记录采用的废物处理工艺参数、废物数量、主要核素、活度和废物桶表面剂量率。本模块实现的功能如下:针对 AP1000、EPR、CPR1000 核电厂采用的固体废物处理工艺,分析建立高整体性容器、水泥固化、分拣压缩等处理工艺的关键参数报表,对每一桶放射性废物中实际

装载的物质配比等参数进行记录。

研发放射性废物处理软件模块。针对每个废物包,可查询具体的放射性废物处理工艺及参数,放射性废物包中的主要核素、活度水平。对每类放射性废物包建立计算模型,实现任意时刻核素活度计算和推算放射性废物包表面剂量率,自动校核是否符合处置场的接收准则。为放射性废物暂存、处置堆码方案优化提供支持。以 CPR1000 核电厂采用的对废树脂、浓缩液进行水泥固化、废滤芯水泥固定、干固体废物进行分拣、压缩、灌浆固定为例,CPR1000 机组放射性废物处理工艺流程见图 5。

3) 放射性废物暂存

核电厂产生的放射性固体废物经过处理后,将通过厂内运输车辆将废物桶转运至放射性废物暂存库进行暂存。CPR1000 机组核电厂放射性废物货包暂存的工艺流程示于图 6。本模块实现的功能主要有:(1) 记录放射性废物暂存的位置坐标(分区、行、列、层),放射性废物桶的回取、移动情况;(2) 对放射性废物桶的表面剂量率、主要核素、活度等进行记录;(3) 对不同种类的放射性废物包建立核素计算模型,分为计算谱、测量谱等;根据计算模型推算任意时刻的表面剂量率和核素衰变情况,推测适合出库的时间;(4) 所有模块均具有增、删、改、查功能;(5) 能根据放射性废物暂存库的坐标,对暂存的放射性废物桶进行标记,根据坐标选择金属桶;同时,显示该桶放射性废物的桶编号、表面剂量率、主要核素等信息。

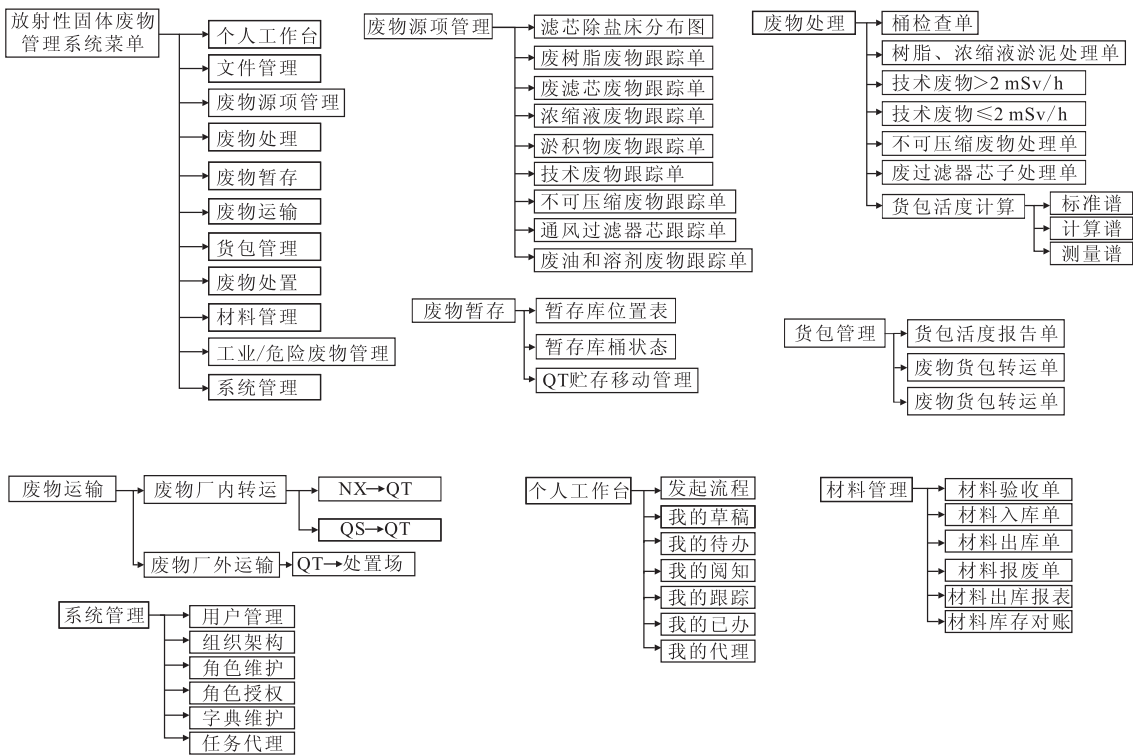


图 4 系统页面规划

Fig. 4 Layout for radioactive solid waste management system

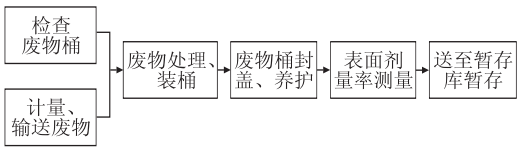


图 5 CPR1000 核电厂放射性固体废物处理工艺流程简图

Fig. 5 Radioactive wet solid waste treatment process for CPR1000 nuclear power plants

4) 放射性废物运输

放射性固体废物运输分为核电厂厂内运输和从核电厂放射性废物暂存库到处置场的场外运输。本模块主要对放射性废物从核岛厂房(NX)运输到放射性废物暂存库(QT)和放射性废物辅

助厂房(QS)到放射性废物暂存库(QT)的厂内运输过程、从放射性废物暂存库(QT)到处置场的厂外运输过程进行管理,放射性废物运输的工艺流程简图示于图 7。主要包括对运输过程中运输人员、运输车辆、运输路径、采取的辐射防护措施、安全措施、废物运输应急方案等进行管理。要求相关信息具有增加、删除、修改、查询功能。对录入的数据具有两级审核机制。

5) 放射性废物处置模块

核电厂产生的放射性固体废物经处理和暂存后,将运至处置场进行最终处置,处置工艺流程见图 8。核电厂将需要处置的放射性废物包相关源项、处理、暂存、运输档案均需要提交给处置场进

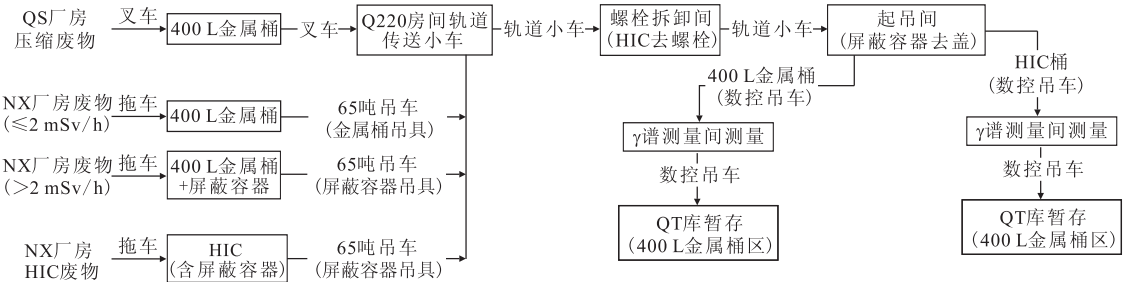


图 6 某 CPR1000 机组核电厂放射性废物货包暂存工艺流程简图

Fig. 6 Interim storage process for radioactive waste drums

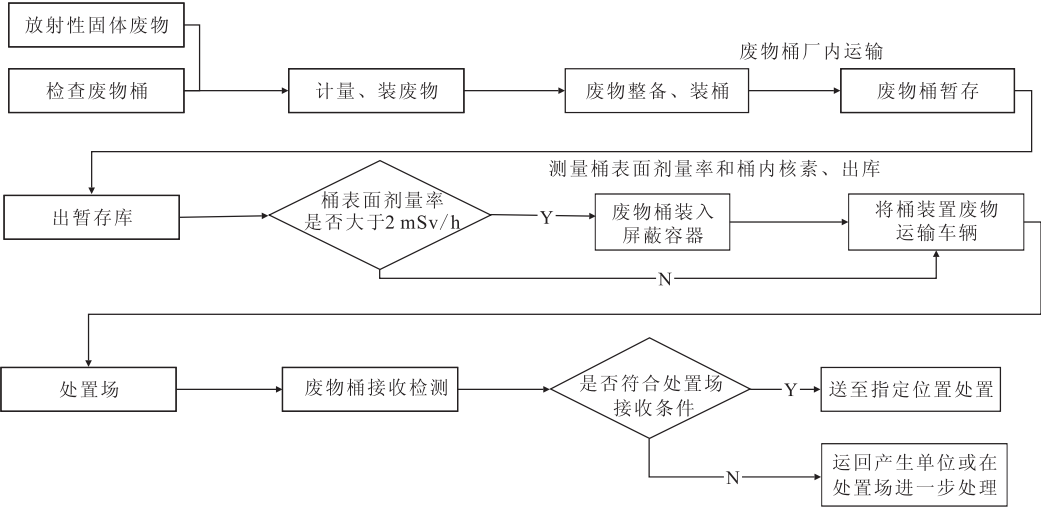


图 7 放射性废物运输工艺流程简图

Fig. 7 Transport process for radioactive waste drums

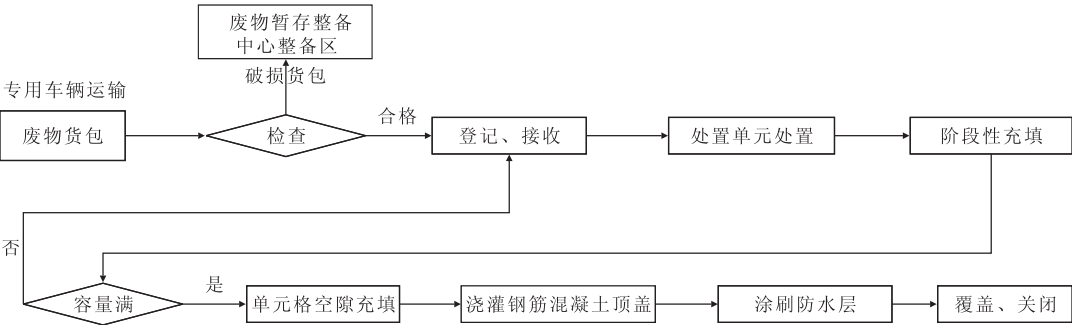


图 8 放射性固体废物处置工艺流程图

Fig. 8 Final dispose process for radioactive solid waste drums

行审查,只有符合处置场接收准则的货包才予以接收。不符合处置要求的放射性废物货包将送回核电厂或处置场放射性废物整备中心进一步处理。我国目前对放射性废物主要采用近地表处置方案,废物桶在单元格内一层堆码满后,远程浇筑水泥砂浆填充废物桶与单元格之间的空隙以提高结构强度。待水泥浆硬化后,在第二层继续堆码废物桶,直至将单元格堆满并充分实现处置容积的优化利用,然后对单元格进行封盖,最后对一批单元格进行集中覆盖以实现防排水。本模块的功能如下:

(1) 将核电厂需要处置的放射性废物包相关信息进行收集,结合核电厂放射性废物包跟踪单,实现自动提取相关数据,以供处置场审核;(2) 具备放射性废物处置的申请单数据审查、批准管理功能;(3) 对放射性废物包接收检查数据管理报表和数据库进行管理;(4) 实现放射性废物包检测报表和核电厂放射性废物处置申请单的自动校核,针对不

符合处置场接收准则的货包提出报警以供审查;

(5) 根据放射性废物包核素活度和表面剂量率计算模型,提出适合处置堆码的位置,进行处置优化,降低放射性废物处置过程对单元格周边环境的影响;(6) 根据放射性废物包计算模型,在放射性废物处置后,推算指定时刻的剂量率、核素衰变情况,推测达到环境剂量率水平的。

3.4 核心功能模块间的逻辑关系和关键设计考虑

1) 功能子模块内部逻辑联系

本软件需要实现的功能:根据放射性废物桶编号,查询该桶放射性废物源项、采用的处理工艺、暂存、运输、处置信息,查询该桶放射性废物任何时刻的剂量率、核素活度水平,是否符合出暂存库,符合处置场接收条件,查询该桶放射性废物的跟踪单。根据图 2 系统软件架构图的规划,放射性废物源项、处理、暂存、运输、处置模块间的内部逻辑关系分析示于图 9。核电现场产生的废树

脂、浓缩液等放射性固体废物,通过源项管理废物跟踪单要求的相关操作后,进入放射性废物处理流程。放射性废物通过水泥固化或固定或分拣压缩等工艺流程处理后,通过厂内运输转运至核电厂放射性废物暂存库暂存。当放射性废物桶暂存一段时间后,通过场外运输至国家低、中放射性废物处置场最终处置。

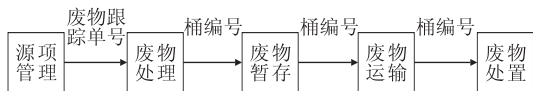


图9 废物管理子模块逻辑关系

Fig.9 Relationship for RSWI components

放射性废物处理、暂存、运输、处置模块间通过放射性废物桶编号将放射性废物管理的相关信息进行关联。因为核电厂产生的放射性固体废物种类多,对不同的放射性废物采用的处理工艺可能不同,放射性废物源项和桶的对应关系复杂,为了将放射性废物和对应的最终放射性废物桶相关联,实现放射性固体废物全周期管理,以CPR1000机组常见的废滤芯、废树脂、浓缩液和检修废物为例,分析放射性废物源项和放射性废物桶的关联关系如下。

(1) 废滤芯

CPR1000核电厂针对表面剂量率大于2 mSv/h的滤芯,一般一个滤芯装入一个400 L金属桶进行灌浆固定。将废滤芯编号、废滤芯放射性废物跟踪单号与放射性废物桶编号相关联,即可实现一个滤芯对应一个放射性废物桶。

(2) 废树脂

可多个除盐床树脂排入TES002/003BA, TES002/003BA的树脂再排入多个400 L金属桶。多个跟踪单对应多个放射性废物桶。故需要将放射性废物跟踪单编号、工作申请票号(多个)和放射性废物桶编码相关联。查询该桶放射性废物,则可知该桶树脂来自的除盐床及对应的跟踪单。

(3) 浓缩液

废液处理系统(TEU)、放射性废水回收系统(SRE)、硼回收系统(TEP)的浓缩液先排入TES001BA装满5 m³后,再排入多个放射性废物桶进行水泥固化。利用传递浓缩液的工作单号、系统号、工作申请票号与放射性废物桶编码相连接,则可通过放射性废物桶编码查询来自系统的

浓缩液以及对应的放射性废物跟踪单。

(4) 检修放射性废物

因检修放射性废物装入塑料袋后,运到放射性废物辅助厂房暂存区暂存;待放射性废物积累一定量后,将袋装放射性废物倒入分拣箱,然后将塑料袋内的放射性废物分拣入200 L金属桶,进行初级压缩,再装入放射性废物,反复进行,直到一个200 L金属桶被填满。之后将200 L桶连桶一起压成桶饼,每三个桶饼装入一个400 L金属桶。故检修放射性废物与400 L金属桶无法直接对应。针对检修放射性废物,仅管理在收集点产生的放射性废物数量、产生原因、产生量,以方便后续大修或废物管理时根据本系统产量进行管理优化。

2) 提高放射性废物管理安全性的相关设计

设计了安全、可靠的软件、硬件平台,即通过核电厂内部现场管理的专网读取数据,设置多个服务器备份与同步数据,可提高放射性废物管理数据的准确性和安全性。对系统使用人员进行了角色区分和严格的授权管理,细致授权到对于每个页面的增、删、改、查操作;系统授权通过电子申请和纸质签字两条线同步确保只有授权的人才能访问本系统。为了确保数据录入的正确性,对录入的数据需要上传原始的纸质工作记录单作为校核依据,数据需要通过两级校核通过后才正式生效。

3) 提高系统适应性的设计

因为不同的核电厂、不同的放射性废物处理、暂存工艺,需要管理的放射性废物数据可能不同,本系统通过系统配置功能,通过对该类型核电厂的放射性废物包装容器、处理工艺等特性参数进行设置,即可将本系统应用在该核电厂放射性废物管理领域。本管理系统适用于各CPR、EPR、AP1000等堆型核电厂放射性废物的管理。该系统实现了跨核电堆型、跨区域的放射性废物群堆管理,对各个核电厂共享运行经验,为辐射防护最优化、放射性废物最小化管理提供技术支持。

4 结 论

核电厂放射性固体废物管理系统从放射性废物安全管理角度出发,对国家标准要求进行了分析,结合放射性固体废物在核电厂的处理要求和在处置场的处置要求,以及CPR1000、EPR、AP1000堆型核电厂现有的放射性废物处理、暂存工艺设计方案,分析、研制了完整的放射性废物管理跟踪单和数据库,在国内首次研发了一套适

合于各个核电厂通用的全周期放射性固体废物管理系统。

4.1 系统优点

核电厂放射性固体废物管理系统的优点如下。

1) 本系统适用于 CPR、EPR、AP1000 等堆型核电厂放射性废物管理。通过系统配置功能,通过对该类型核电厂的放射性废物包装容器、处理工艺等特性参数进行设置,即可将本系统应用在该核电厂放射性废物管理领域。该系统实现了跨核电堆型、跨区域的放射性废物群堆管理,对各个核电厂共享运行经验,为辐射防护最优化、放射性废物最小化管理提供技术支持。

2) 实现了信息安全与信息共享,可应用于放射性废物的群堆管理,有助于提高我国核电厂的放射性废物管理水平。

3) 该系统加强了放射性废物管理的安全性和过程质量控制,符合我国现阶段关于放射性废物安全监管的要求,有利于协助推动我国核电事业长远、健康发展。

本系统根据用户的不同,开发了强大的数据统计和分析功能,有助于放射性废物管理数据的深层次开发和利用,有利于后续核电厂实现辐射防护最优化设计和放射性废物最小化管理。尤其是针对核电厂内部人员展示的数据分析,可以根据废物产生量、地点、原因、放射性水平等进行统计、分析,方便核电厂提出优化改进措施,实现对人员的辐射防护和降低放射性废物量,提高核电厂的运行管理水平。本系统可以根据放射性废物桶编码查询废物货包所处的生命周期状态,实现

放射性废物管理的过程跟踪。在核电厂管理的数据可以自动根据处置场的需要,通过软件计算推荐适合出库的放射性废物包,生成处置申请报表,并根据处置场的放射性废物接收准则进行内部校核,提高了软件的智能化水平。

4.2 系统应用情况及意义

该系统已经在国内部分百万千瓦级核电厂使用。经过核电厂现场真实放射性废物管理操作测试和完善,本工作研制的放射性固体废物管理系统符合现场放射性废物管理流程和需求,系统已经正式运行。该系统的投入使用将有助于我国核电厂进行安全、高效、深层次的放射性废物管理,加强过程质量控制,使放射性废物管理全过程可控,具有较大的安全和社会意义。

参考文献:

- [1] 王金明,荣峰,王鑫.放射性废物的安全管理及最小化[J].核动力工程,2010,31(1):131-135.
- [2] 深圳中广核工程设计有限公司.固体废物管理相关安全分析报告、系统手册、设计说明书[R].深圳:深圳中广核工程设计有限公司,2013.
- [3] 柏磊,刘富国,甘霖.放射性废物信息化管理系统[M]//中国原子能科学研究院年报.北京:原子能出版社,2006:286-287.
- [4] 叶奇蓁,张志银.我国核电厂放射性废物管理进展与挑战[J].中国核电:核电专访,2010:194-199.
- [5] 邓才远,高歌.群堆模式下核电站放射性废物最少化的实践和探索[J].辐射防护,2008,28(2):65-71.
- [6] 韩国胜,鲜文平,朱万宁.西北处置场废物处置信息管理系统的建立[J].辐射防护通讯,2008,28(2):20-23.