

# 核电厂放射性流出物监测工作探讨

李锦, 张艳霞, 陆巍巍, 黄东辉, 袁之伦

(环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

**摘要:** 简述了放射性流出物监测的重要性, 分析了我国核电厂放射性流出物监测中存在问题, 探讨了借鉴国际原子能机构安全及相关标准开展我国核电厂放射性流出物监测的管理机制、监测方案、监测报告和质量保证等具体要求与方法, 并提出提升技术基础能力、完善法规标准、加强监管力度的建议。

**关键词:** 核电厂; 放射性流出物监测; 国际原子能机构

中图分类号: X837 文献标识码: C 文章编号: 1006-2009(2013)01-0059-05

## Investigations and Discussions on the Radioactive Effluent Monitoring of Nuclear Power Plants

LI Jin, ZHANG Yan-xia, LU Wei-wei, HUANG Dong-hui, YUAN Zhi-lun

(Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100082, China)

**Abstract:** Radioactive effluent monitoring is the most direct mean to identify a significant incident or event in nuclear power plants. This paper analyzes the problems in the radioactive effluent monitoring of national nuclear power plants, and discusses the requirements and methods for the radioactive effluent monitoring of nuclear power plants in IAEA Safety Standards Series, including management mechanism of radioactive effluent, emission limits, sampling/monitoring frequency, analysis methods of radionuclide, monitoring report, and quality assurance, etc. Finally, some suggestions including lifting basic technology ability, perfecting laws and regulations and strengthening supervision are put forward to improve national monitoring works on the radioactive effluent of nuclear power plants.

**Key words:** Nuclear power plant; Radioactive effluent monitoring; IAEA

核安全是核电发展的生命线, 放射性流出物监测是核电站发现重大事故或事件的最直接的手段, 是核电厂安全分析报告和环境影响评价报告审评的重点之一。2011年3月日本福岛核事故造成大量放射性物质释放, 对环境安全和公众健康影响重大, 世界各国对核安全重视程度提高到一个历史性高度。

### 1 我国核电厂放射性流出物监测存在问题

我国核电厂放射性流出物监测工作起步较晚, 从上世纪80年代后期开始, 陆续制定和修订了核设施流出物与环境监测的相关法律法规、标准。根据相关规定, 核电厂营运单位必须制定流出物监测计划, 对流出物进行有效监测, 并定期向有关部门

提交流出物监测报告。依据近年来秦山、田湾和大亚湾核电基地的流出物监测报告, 在监测项目方面, 3个核基地的流出物监测项目相差较大, 田湾和大亚湾未开展液态流出物碳-14的测量。在监测报告内容方面, 流出物监测年报中均缺少监测方案, 大亚湾核电基地的月报仅有数据报表, 缺少对数据评估、质量保证、电站运行等与监测有关条件的表述, 田湾核电基地的流出物监测年报没有评价相关内容。在质量保证体系方面, 流出物监测月报和年报中均缺少必要的质量保证体系的表述。这反映了目前我国核电厂流出物监测工作还存在以

收稿日期: 2012-07-18; 修订日期: 2012-11-13

作者简介: 李锦(1981—), 女, 江苏徐州人, 工程师, 博士, 从事核应急与辐射环境监测工作。

下不足<sup>[1]</sup>: ①监测能力普遍滞后监管要求; ②一些监测项目缺少依据标准, 尤其在气态放射性流出物方面, 国际新标准尚未向我国国内标准转化<sup>[2-3]</sup>; ③审管部门及其委托机构对核电厂放射性流出物的监督性监测和监测报告的核查都还有待加强。

## 2 核电厂放射性流出物监测的管理机制

国际原子能机构(IAEA)是国际原子能领域的政府间科技合作组织, 同时兼管地区原子安全及测量检查。IAEA没有自身管辖的核电厂, 但在其“安全及相关标准”中对核电厂放射性流出物监测提出了一系列要求。这些要求就国际原子能机构本身的工作具有约束力, 就国际原子能机构的援助工作而言对当事国具有约束力, 并被推荐给各国及其他国际组织在各自的活动中采用。我国作为IAEA成员国之一, 可以借鉴IAEA的相关要求, 对核电厂流出物监测工作进行指导。

IAEA《辐射防护环境和资源控制安全导则》(No. RS-G-1.8)和第64号安全报告明确指出, 核设施放射性监测分为三类: 流出物监测(源监测)、环境监测和个人监测。核电厂属于持照运行的核设施, 应进行流出物监测和环境监测, 并结合监测数据进行剂量评价<sup>[4-5]</sup>。放射性流出物监测涉及部门有核电厂运营者、审管部门及委托机构。其中核电厂运营者是监测工作的主要承担者, 接受审管部门的监督, 政府或审管部门还可以将某些特定工作委托给其他机构。

### 2.1 核电厂运营者

核电厂运营者在放射性流出物监测方面的职责可以分为两方面: ①提高放射性流出物监测能力, 实施核电厂各阶段(包括运行阶段、退役阶段和应急期间)的流出物监测计划; ②给出流出物对公众的相关剂量, 并在对流出物进行剂量评价之前, 定期对剂量中采用的各种假设条件进行验证。

### 2.2 审管部门

审管部门的职责包括: ①制定包括应急监测和质量保证在内的流出物监测技术要求; ②审查核电厂运营者提供的流出物监测数据, 必要时开展或者组织开展对核电厂放射性流出物的独立性测量; ③向公众提供可以证明核电厂放射性流出物处于有效监测和控制下的文件。对于受多堆厂址放射性影响的地区和人群, 为评估不同核电厂对公众的累积剂量, 其放射性流出物监测工作需要由审管部门

进行安排和协调。

### 2.3 政府或审管部门的委托机构

对于核电厂流出物监测的某些特定相关工作, 政府或审管部门可以委托给其他机构, 职责包括: ①监测仪器的审查、调试和校准; ②质量保证程序的审查; ③制定并定期考核有关流出物测量的验证方案, 以检验核电厂运营者给出的监测结果; ④验证放射性流出物对公众的评估剂量低于核电厂运营者建立的剂量限值; ⑤应急准备。

此外, 委托机构还可以负责收集和整理由核电厂运营者、政府部门和国际机构提供的放射性流出物监测数据, 建立放射性流出物监测标准。核电厂放射性流出物监测审管部门和其委托机构应独立于负责促进和开发受监管实践的任何政府部门和机构, 同时还应独立于核电厂运营者、设计者和建造者。

## 3 核电厂放射性流出物监测方案

核电厂运营者需要制定和实施放射性流出物监测方案<sup>[6-7]</sup>。监测方案的目的是要保证流出物排放批准中的要求得到满足, 特别要保证在推导批准排放限值时所用条件的假定继续有效, 并应当能使要评价的关键组剂量具有适当的置信度。流出物监测方案的规模和范围, 以及所采用的测量方法应当符合防护最优化原则, 并征得审管部门的认同。

### 3.1 放射性流出物排放浓度限值

核电厂放射性流出物的排放限值(可能包括单个放射性核素的限值, 以及短时期的限值)由审管部门批准, 其数值应当接近于, 但一般稍高于根据防护优化计算得到的排放率和排放量, 以便为运行的灵活性留出余地。

IAEA没有给出核电厂放射性流出物浓度限值的具体参考水平, 建议依据核电厂设计中的考虑和计划中的运行特性来估计放射性流出物的排放, 视情况把年限值的50%确定为每个日历季度限制水平, 年限值的20%确定为每个日历月的限制水平, 或年限值的10%为每周的限制水平<sup>[7]</sup>。

### 3.2 放射性流出物监测内容

根据监测方式的不同, 核电厂放射性流出物监测可分为在线监测和离线监测, 监测数据通常是对排放点处剂量率、活度浓度或总活度的在线测量得到的, 但如果流出物排放量较低, 在线测量就可能

因仪器灵敏性不足而无法得到数据,需要考虑采样和随后的实验室分析。根据核电厂放射性流出物监测对象,又可以分为气态放射性流出物、液态放射性流出物和直接辐射监测。

### 3.2.1 气态放射性流出物

核电厂正常运行状态下,气态放射性流出物主要有惰性气体、碘同位素、氙和碳-14的挥发性化合物以及颗粒状的裂变和活化产物。其中,碘同位素和惰性气体也是核电厂事故排放中的重要监测项目。通常气态放射性流出物排放限值由审管部门以惰性气体、气溶胶和碘同位素年活度限值的形式给出,根据反应堆的不同类型,有时还可能还需要给出核素、碳-14和氙的年排放限值。

(1) 惰性气体。利用监测设备连续在线监测或对流出物进行取样测量,获得惰性气体中放射性同位素的活度数据,以验证惰性气体排放符合审管部门所批准的排放限值要求。在核电厂气态放射性流出物监测中,IAEA建议需要考虑的惰性气体有 $^{41}\text{Ar}$ 、 $\text{Kr}$ 同位素( $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{85\text{m}}\text{Kr}$ 、 $^{87}\text{Kr}$ 、 $^{88}\text{Kr}$ 、 $^{89}\text{Kr}$ )和 $\text{Xe}$ 同位素( $^{131\text{m}}\text{Xe}$ 、 $^{133}\text{Xe}$ 、 $^{133\text{m}}\text{Xe}$ 、 $^{135}\text{Xe}$ 、 $^{135\text{m}}\text{Xe}$ 、 $^{137}\text{Xe}$ 、 $^{138}\text{Xe}$ )。

(2) 颗粒物。核电厂气态放射性流出物监测中,需要考虑的气溶胶核素有: $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{95}\text{Zr}$ 、 $^{95}\text{Nb}$ 、 $^{103}\text{Ru}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{110}\text{mAg}$ 、 $^{124}\text{Sb}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{140}\text{La}$ 、 $^{141}\text{Ce}$ 和 $^{144}\text{Ce}$ ;放射性核素: $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 和 $^{63}\text{Ni}$ ;核素: $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{242}\text{Cm}$ 和 $^{244}\text{Cm}$ 。其中,气溶胶核素的取样应采用过滤器,并定期对滤膜进行更换,采样结束后利用HPGe谱仪进行放射性分析。放射性核素(例如Pu的同位素)年排放量通常很低,但必须定期监测。此外,还可能需要进行对气溶胶的在线监测,采用过滤器进行连续采样,并在采样过程中进行总放射性测量。

(3) 碘-131。碘-131是碘同位素中对公众照射剂量贡献最大的放射性核素。为了能在放射性气态流出物偏离正常水平的情况下给出预警信号,核电厂应对碘-131进行在线监测。空气中的碘-131按其形态可分为元素碘、有机碘和碘微粒三种。不同形态的碘-131在环境中的表现行为不同,特别在沉积速度方面,元素碘的沉积速度比碘微粒高一个数量级,比有机碘高两个数量级。一般,只有在需要对3种形态的碘-131剂量贡献分别考虑,或者审管部门对3种形态的碘-131分别

给出排放限值的情况下,放射性流出物监测方案中才需要对碘-131的形态进行区分。

(4) 氙和碳-14。对于重水堆,气态氙的监测十分重要,沸水堆和压水堆中气态氙排放量较少。反应堆类型确定,气态流出物中碳-14的年排放量基本恒定。一般,重水堆碳-14排放率显著高于沸水堆和压水堆。核电厂应开展对气态流出物中氙和碳-14的监测,如果在环境监测方案中已包含了氙和碳-14监测项目,那么流出物中的氙和碳-14每季度进行取样/监测即可。

### 3.2.2 液态放射性流出物

核电厂液态流出物中含有大量裂变和活化产物,主要有锶、铯、钴、碘和氙的放射性同位素。

在液态流出物排入环境之前,应设置贮存装置对流出物收集和取样,进行放射性核素浓度测量。其中,对于放射性测量,应在排水管线上设置在线连续监测装置,需要关注的核素与气态放射性流出物相同;对于 $\beta$ 放射性核素,如锶-89、锶-90、铁-55和镍-63,如果不能做到对 $\beta$ 放射性在线连续监测,应每季度对混合样品进行测量和分析。对于沸水堆,至少核电厂在运行的第一年,应每月对液态流出物中的磷-32进行监测。对于放射性核素,如钷、镅和钆的同位素,应每季度对混合样品进行分析。首先对总活度进行测量,如果测量值超出预定值,再对样品进行具体的放射性核素分析。

氙是核电厂液态流出物中的重要放射性核素。对于重水堆核电厂而言,氙的测量尤为重要,混合水样中的氙应至少每周测量一次,实际上许多核电运营者的监测频率往往更为频繁。其他堆型的核电厂氙排放量较少,混合水样中的氙应每月进行测量。

碳-14的排放量只在重水堆液态流出物中较大,混合样中的碳-14可以每月进行一次测量,其他堆型的核电厂,如果碳-14排放量很小或可以通过其他方法进行估量,液态流出物中的碳-14则不是必要的监测项目。

### 3.2.3 不同堆型核电厂放射性流出物监测项目的通用要求

对于不同堆型的核电厂,放射性流出物监测项目会有一定的差异,IAEA对核电厂正常运行状态下放射性流出物监测项目的通用要求见表1。

表 1 核电厂放射性流出物监测项目<sup>①</sup>  
Table 1 Items of radioactive effluent monitoring in  
nuclear power plants<sup>①</sup>

监测方式		在线监测	离线监测	
气态流出物	惰性气体	+	(+)	
	气溶胶	$\beta/\gamma$	+	-
		$\beta$	-	(+)
		$\alpha$	-	(+)
	其他气体和 易挥发物	$^{131}\text{I}$	(+)	(+)
		$^{129}\text{I}$	-	(+)
		$^3\text{H}$	-	(+)
	$^{14}\text{C}$	-	(+)	
液态流出物	$\beta/\gamma$	(+)	+	
	$\beta$	-	+	
	$\alpha$	-	+	
	$^3\text{H}$	-	+	
直接辐射	$\gamma$	(+)	+	
	n	-	(+)	

① + : 必要性; (+) : 推荐性; - : 不推荐、不必要或不具操作性

流出物取样/监测应参考以往特定或类似堆型核电厂的情况而定,对于气态流出物,应考虑到取样代表性(取样位置、样品萃取方法、样品损失)、样品收集以及单个放射性核素的取样和测量方法。对于液态流出物,要求取样位置处液态流出物的流速必须足够大,能够使得样品充分混合。

#### 4 流出物监测报告

IAEA 规定核电厂的流出物监测数据,应至少每年向审管部门报告一次。流出物监测报告应包括来源于直接辐射的剂量率、流出物组成、排放速率和年排放量,应包括对监测结果的解释和说明(如参考模型、标准、监测结果的不确定性),特别对发生显著变化的流出物监测数据,需要予以说明。此外,一些详细的流出物取样/监测信息(排放点位置、取样频率、放射性分析方法)、测量仪器的基本参数和校准信息也应随监测结果一起上报审管部门。监测报告还应包括其他的有用信息,如监测报告期间的天气条件和核电厂净发电量。

公众个人年受照剂量的计算应包含在流出物监测报告中。IAEA 给出了关于核电厂放射性流出物剂量评价的 3 种模式<sup>[8]</sup>:“稀释”剂量评价模式、通用环境剂量评价模式和场址特有剂量评价模式。

根据流出物监测数据,选取合适的计算模型,将剂量结果与相应的剂量约束值比较,拒绝剂量高于剂量约束值的放射性流出物排放方案,并考虑替代方案。

#### 5 质量保证

质量保证是核电厂放射性流出物监测活动的重要组成部分,必须贯穿于监测方案制定到剂量评价整个过程。核电厂放射性流出物监测质量保证,应包括满足以下具体条件的措施:①与流出物监测有关的取样代表性要求;②流出物取样频度应当是合适的;③测量设备的刻度和效能检验程序应当满足要求;④测量的比对计划应当到位;⑤测量应当可追溯到国际标准;⑥放射性分析实验室应当是公认合格的;⑦记录保持体系应当是充分有效的;⑧流出物监测报告程序应当是经审管部门认可的。

#### 6 建议

(1) 提升技术基础能力。为此,需要着重加强核电厂在放射性流出物连续在线监测系统和惰性气体连续监测系统方面的建设,增加和完善航空监测与快速移动监测等先进监测手段,同时做好监测人员队伍建设,全面提高我国核电厂放射性流出物监测工作实力。

(2) 完善法规标准。《中华人民共和国放射性污染防治法》是核电厂放射性流出物监测的法律基础,规定了监测实行双轨制制度,但对监测工作的具体组织和审查形式没有涉及。目前,我国核电厂流出物监测工作的法律缺位问题十分突出,需要一部专门的核安全法对此进行定位。此外,反应堆堆型不同,流出物的核素种类和排放量会有一定差异,核电厂放射性流出物取样/监测的项目和频次也应有所区别,需要对相关标准进行修订,同时需要制定一系列新的技术标准及其实施细则。

(3) 加强监管力度。鉴于管理和技术原因,我国核电厂审管部门或委托机构对核电厂放射性流出物的监督性监测工作尚未全面开展;另一方面,目前国内各核电厂监测报告的内容和格式差别很大,且缺少数据评估、质量保证和电站运行工况等与监测相关的必要信息。为此,急需制定一套切实可行的方案,全面落实核电厂审管部门或其委托机构对放射性流出物的监督性监测工作和对流出物监测报告的审查工作。

## [参考文献]

- [1] 袁之伦, 赵善桂. 关于核设施流出物监测和环境中存在问题的探讨[J]. 核安全, 2010(3): 42-45.
- [2] Health Physics Society (HPS). ANSI/HPS N13.1-1999, Sampling and Monitoring Releases of Airborne Radioactive Substances from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities [S]. McLean: HPS, 1999.
- [3] International Organization for Standardization (ISO). ISO2889-2010, Sampling Airborne Radioactive Materials from the Stacks and Ducts of Nuclear Facilities [S]. Geneva: ISO, 2010.
- [4] International Atomic Energy Agency (IAEA). Safety Standards Series No. RS-G-1.8, Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection [R]. Vienna: IAEA, 2005.
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA). Safety Reports Series No. 64, Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring [R]. Vienna: IAEA, 2010: 105-111.
- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA). Safety Standards Series No. SSR-2/2, Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation [R]. Vienna: IAEA, 2011: 30-35.
- [7] International Atomic Energy Agency (IAEA). Standards Series No. WS-G-2.3, Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment [R]. Vienna: IAEA, 2000: 23-26.
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA). Safety Reports Series No. 19, Generic Models for use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment [R]. Vienna: IAEA, 2001: 32-59.

本栏目责任编辑 李文峻 陈宝琳

## • 简讯 •

## 雾霾天气引反思 扫描国外空气污染治理办法

据中国之声《全球华语广播网》报道,近期横扫大江南北的雾霾天气令人震惊,世界卫生组织认为,PM<sub>2.5</sub> < 10 是安全值,而北京最近几天 PM<sub>2.5</sub> 竟然突破 900,不少人调侃——这天气就像被放了毒气弹。一些“PM<sub>2.5</sub> 口罩”应运而生,曾经拥挤的车流也在下班后显得比往日畅通。国外媒体形容:上周六北京“整个城市看上去就像机场里的吸烟区……人们不借助工具,就能在空气中嗅出尾气与煤尘”。

这场据称是北京有记录以来最严重的雾霾如同去年那场大雨,让人们在“狰狞”的自然面前手足无措,扼腕叹息。

在国家的经济发展与城市化进程中,似乎都有一根指挥棒,一端是发展,一端是环保,看似矛盾,又必须统一。

伦敦: 烟雾事件引反思 治理五十余年来效果显著

20 世纪初,“雾都”是伦敦的别名。伦敦人大部分用煤做燃料,煤烟再加上伦敦气候,造成了著名的伦敦大雾。4 d 时间就死亡 4 000 多人。但是现在的伦敦已经焕然一新,伦敦是怎么做到的?《全球华语广播网》英国观察员侯颖介绍到:

侯颖: 在 20 世纪初,由于燃烧煤炭排放的烟雾再加上伦敦的气候,空气流动不畅使伦敦成了远近驰名的雾都,特别是在 1952 年 12 月 5 号到 8 号著名的伦敦烟雾事件,让英国人开始反思空气污染造成的苦果,也逐渐明白治理环境污染的重要性。首先,英国政府在民众的压力下,在 1956 年通过了世界上第一部大气污染防治法案,之后包括清洁空气法案,空气污染控制法案的出台让伦敦的雾霾天气在 1975 年,由之前每年几十天减少到了 15 d,这个数字在 1980 年进一步降到了 5 d。其次,80 年代之后交通污染逐渐取代工业污染,成为伦敦空气质量的首要威胁,为此,政府出台了一系列措施来遏制交通污染。从 2011 年起英国政府决定尝试在街道使用一种钙基黏合剂治理空气污染,这种黏合剂类似胶水,可以吸附空气中的尘埃,街道清扫工已经将这种新产品用于人口嘈杂,污染严重的城区,而目前监测结果称这些区域的微粒已经下降了 14%。

澳大利亚: 政治结构导致治理不力

除了工业发展带来的烟雾污染,一些沙化严重的地区也会出现沙尘暴的特殊天气。比如:澳大利亚西部海岸就曾经遭到罕见的红色沙尘暴袭击,整个天空都被染成红色。《全球华语广播网》澳大利亚观察员胡方说,澳大利亚的沙化治理不力,除了自然原因,人为因素也脱不了干系。

胡方: 2009 年 9 月,澳大利亚悉尼在毫无准备的情况之下遭受了一场超强红色沙尘暴的袭击,整个城市为此停摆,交通堵塞,城铁延误,人们的出行陷入了一片混乱。澳大利亚著名的跨州河流墨累-达令河是澳大利亚最重要的河流,但是近几年来在河的下游,干旱断流土地沙化等现象非常严重。澳大利亚作为全球第二大干旱的大陆,虽然极端天气很大程度上是自然现象,但是过渡取用水源和开发也的确加剧了红色沙尘暴这类气候现象产生。每一年,澳大利亚政府都会进行各州自然资源取用的协调会议,但由于澳大利亚政府结构,每一个州的独立性都非常的强,在这种需要全国一盘棋进行协调时,每个州总是会像一个充满怨气的小媳妇一样在大会诉苦扯皮,最后很多能切实改善全国环境却需要某一些州做出牺牲的政策往往付之东流。

摘自 www.jshb.gov.cn 2013-01-06