

# 婴儿组居民食入途径辐射环境影响评价模式研究

郑平辉, 王晓亮, 熊章辉, 郑伟

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘要:** 核电厂运行状态下对厂址周围公众的剂量评价中, 由于食谱、生活习性以及剂量转换因子的不同, 一般将公众个人分为成人、青少年、儿童和婴儿四个年龄组。婴儿组居民的膳食组成与食物消费量调查结果存在较大的不确定性, 调查过程存在较大的困难。按两种不同辐射影响评价模式分别估算婴儿组居民食入途径的内照射剂量: 一种是由婴儿组居民食物消费量数据直接估算剂量, 另一种通过母乳途径的母亲摄入量所致婴儿食入剂量转换系数估算。对比两种评价模式的评价结果, 发现两种评价模式下得到的婴儿组食入剂量大小较为接近, 但是具体到各个放射性核素, 其所致的剂量大小有显著差异。实际应用中应根据食谱调查数据和婴儿大小选择适当的评价模式。

**关键词:** 婴儿组; 核电厂; 食入途径; 剂量评价

中图分类号: TL72

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)03-0066-04

## Research on the Assessment Method of Doses to Infants from Ingestion

ZHENG Pinghui, WANG Xiaoliang, XIONG Zhanghui, ZHENG Wei

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** Public individuals are divided into four age groups of adult, youth, child and infant due to the difference in food consumption, living habit and age-dependent dose coefficients in the assessment of doses to public individuals from effluents of nuclear power plant under operational states. There are great uncertainties and difficulties in the investigation of characteristic and amount of infant food. Two assessment methods are applied to calculate the internal exposure dose to infants from ingestion: one is calculated from the investigated food consumption data, the other is calculated by dose coefficients for infants consuming breast-milk after intake by the mother. It can be concluded from the calculation results that doses to infants from ingestion calculated in two methods are close, but doses from different radionuclides vary significantly. Proper assessment method should be chosen in application according to the investigated food consumption data and infant age.

**Key words:** infant; nuclear power plant; ingestion; dose assessment

核电厂在正常运行状态下的气载和液态放射性流出物排放到空气或者接纳水体后将厂址周围的公众造成不同途径的辐射剂量, 如气载流出物的照射途径包括空气浸没外照射、地表沉积外照射、吸入空气内照射、食入农牧产品内照射等。每种途径的受到的剂量按照辐射环境影响评价模式以及对应模式需要的核素排放参数、厂址气象环境数据、厂址人口食谱与生活习性调查数据等进行估算<sup>[1]</sup>。其中对于公众食入途径内照射剂量的计算中需要以核电厂周围居民的食物消费量的调查数据作为输入

参数。

在实际工程应用中, 由于食谱、生活习性以及剂量转换因子的不同, 将公众个人分为四个年龄组, 即成人组(>17岁)、青少年组(7~17岁)、儿童组(1~7岁或2~7岁)和婴儿组(≤1岁或≤2岁), 分别对上述年龄组的公众个人计算他们所受的辐射剂量。目前的评价模式中, 对各个年龄组的剂量分别需要按照针对各自年龄组的食谱调查数据进行剂量估算。但对于婴儿组的评价而言, 由于获取0~1岁(一般认为处于哺乳期的)婴儿食谱调查数据的实际调查过程存在一定困难, 其调查结果具有较大不确定性, 根据食谱调查结果计算的婴儿组食入途径辐射剂量往往也存在很大不确定性。<sup>[2]</sup>

在针对不同核电厂周边公众的辐射环境影响评

收稿日期: 2015-11-11

作者简介: 郑平辉(1989), 男, 浙江奉化人, 助理工程师, 硕士, 主要从事核环境安全研究工作(e-mail) zhengph@cnpe.cc.

价结果中,由于婴儿组的剂量转换系数较大,且部分调查结果中婴儿组的食物消费量很大,导致最终的计算结果给出婴儿组的剂量可能在四个不同年龄组中最大,环境影响评价的审查中将重点关注婴儿组的食入途径剂量估算问题。

ICRP 在第 95 号出版物中给出了对于一般公众的新生儿由于摄入母乳中的放射性核素而受到的辐射照射的剂量转换系数( $Bq/Sv$ ),其含义为母亲摄入单位活度放射性核素而通过母乳喂养途径造成的婴儿的食入内照射剂量<sup>[3]</sup>。由于母亲摄入放射性核素的内照射途径分为吸入和食入内照射两种,因而在 ICRP 第 95 号出版物中分别给出了母亲吸入单位活度放射性核素而通过母乳喂养途径造成的婴儿的食入内照射剂量转化系数和母亲食入单位活度放射性核素而通过母乳喂养途径造成的婴儿的食入内照射剂量转换系数。目前在一般婴儿组食入途径剂量估算中,考虑的都是通过婴儿组食谱现场调查数据直接计算食入剂量,而调查数据中往往不能准确反映较小月龄(如 0~6 月)婴儿以母乳喂养方式为主的膳食特点,更多地反映了 1 岁以内较大月龄(如 7~12 月)婴儿的食物消费量。另外,针对婴儿组通过母乳途径的食入剂量也缺乏有效的评价方法,不能很好地满足辐射环境影响评价审查中对婴儿组食入途径精确评价的要求。

本研究将以 ICRP 给出的母乳途径剂量转换系数为基础,建立对婴儿组居民通过母乳途径进行剂量估算的评价模式,并通过实际工程的应用,与一般情况下直接通过婴儿组食谱调查数据进行剂量估算的结果进行比较。

## 1 评价模式

### 1.1 婴儿组食谱直接估算

一般工程中,对婴儿组食入途径的剂量估算采用婴儿组实际调查的不同种类食物消费量数据直接估算。具体过程包括根据核电厂排放源项和排放参数、气象参数、环境参数等数据计算大气弥散与干湿沉降的结果,进而由浓集因子的方法估算出放射性核素进入不同种类食物的浓度,结合婴儿组居民的食物消费量调查数据以及婴儿组的不同核素食入剂量转换因子,估算出婴儿组食入途径的辐射剂量<sup>[1]</sup>。

### 1.2 婴儿组母乳途径估算

ICRP 在第 95 号出版物中考虑了婴儿对母乳中放射性核素的摄入量以及因此受到的剂量。在此报告中,ICRP 将核素在全身分布和滞留的生物动力学模型进行了扩展,用于估算放射性核素向母乳转移的份额,进而给出了母亲摄入放射性核素所致婴儿食入母乳途径的剂量转换系数( $Sv/Bq$ )。计算这些剂量转换系数采用的方法是<sup>[3]</sup>:(1)考虑母亲通过吸入或食入途径的放射性核素摄入;(2)扩展的成人全身生物动力学模型;(3)假定母乳喂养从出生开始连续 6 个月,第一周婴儿摄入母乳量从 0 增长到 800 ml/d,之后一直保持在这个摄入量水平;(4)整个过程婴儿食入母乳采用 3 个月的婴儿组的食入剂量转换系数(ICRP, 1989、1993、1995b)。

根据 ICRP 给出的母乳途径剂量转换系数,可以建立一种通过母乳途径估算婴儿组居民食入内照射剂量的评价模式。其核心为婴儿组的食谱假定与 ICRP 报告的计算方法中采用的食谱保持一致,经由母亲的内照射核素摄入量以及 ICRP 的母乳途径剂量转换系数估算婴儿组食入途径的辐射剂量。由于对母亲造成内照射剂量的放射性核素摄入需要考虑食入和吸入两个途径,因而该模式下评价婴儿组食入内照射剂量需要对应考虑母亲食入和吸入两个途径。前者先估算出核素在不同种类食物中的浓度,由厂址附近居民成人组的食物消费量调查数据估算母亲的各放射性核素的食入量,乘以母亲食入所致婴儿食入途径剂量转换系数得到母亲的食入内照射导致的婴儿食入途径内照射剂量;后者根据大气弥散估算空气中放射性核素的浓度,由成人组的呼吸率数据估算出母亲各放射性核素的吸入量,乘以母亲吸入所致婴儿食入途径剂量转换系数得到母亲的吸入内照射导致的婴儿食入途径内照射剂量。将这两个途径的估算结果求和就可以得到婴儿食入途径内照射剂量。

## 2 模式应用

以某核电厂现场调查得到的婴儿组和成人组食物消费量数据分别采用两种评价模式计算婴儿组居民食入途径的内照射剂量。表 1 给出了婴儿组和成人组的食物消费量数据。从表中可以看到,现场调查的婴儿组食物消费量与 ICRP 报告中假设的母乳喂养方式差别较大,考虑的食物种类与成人组的一

致。传统方法计算的婴儿组食入途径，没有考虑母乳，计算模式与成人相同；ICRP 第95号出版物中使用的计算方法不考虑0~1岁婴儿期内辅食的添加等可能带来的核素摄入量，其食谱根据模型假设是确定的。

表1 婴儿组与成人组食物消费量现场调查数据

Tab. 1 Food consumption site investigation data of infant and adult  $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$

食物种类	粮食			蔬菜			肉类				奶及奶制品	水果		
	米	面	其它	叶类	根茎类	果实类	水生类	猪肉	羊肉	牛肉			禽肉	
婴儿组	24	3.6	4.8	14.4	6	7.2	2.4	2.4	1.2	1.2	2.4	18	36	6
成人组	180	19.2	25.6	84	36	30	18	54	6	6	18	24	24	42

表2 母乳途径放射性核素的剂量转换系数

Tab. 2 Dose coefficients for infants consuming breast-milk after intake by the mother  $\text{Sv/Bq}$

核素	母亲吸入导致婴儿食入母乳的剂量转换系数	母亲食入导致婴儿食入母乳的剂量转换系数
$^3\text{H}$	$2.00\text{E-}11$	$3.00\text{E-}11$
$^{14}\text{C}$	$2.60\text{E-}10$	$2.60\text{E-}10$
$^{131}\text{I}$	$5.00\text{E-}08$	$5.50\text{E-}08$
$^{133}\text{I}$	$1.00\text{E-}08$	$1.10\text{E-}08$
$^{135}\text{I}$	$1.20\text{E-}09$	$1.40\text{E-}09$
$^{57}\text{Co}$	$2.30\text{E-}10$	$1.10\text{E-}10$
$^{58}\text{Co}$	$5.60\text{E-}10$	$2.50\text{E-}10$
$^{60}\text{Co}$	$4.60\text{E-}09$	$2.00\text{E-}09$
$^{59}\text{Fe}$	$8.80\text{E-}11$	$6.80\text{E-}11$
$^{89}\text{Sr}$	$1.80\text{E-}09$	$2.00\text{E-}09$
$^{90}\text{Sr}$	$1.30\text{E-}08$	$1.50\text{E-}08$
$^{95}\text{Zr}$	$1.00\text{E-}10$	$4.20\text{E-}12$
$^{95}\text{Nb}$	$1.40\text{E-}11$	$5.50\text{E-}13$
$^{103}\text{Ru}$	$1.30\text{E-}10$	$1.20\text{E-}11$
$^{106}\text{Ru}$	$1.90\text{E-}09$	$1.80\text{E-}10$
$^{125}\text{Sb}$	$1.30\text{E-}10$	$5.30\text{E-}11$
$^{134}\text{Cs}$	$1.10\text{E-}09$	$3.10\text{E-}09$
$^{136}\text{Cs}$	$2.30\text{E-}10$	$6.60\text{E-}10$
$^{137}\text{Cs}$	$9.00\text{E-}10$	$2.60\text{E-}09$
$^{140}\text{Ba}$	$2.60\text{E-}10$	$2.00\text{E-}10$
$^{141}\text{Ce}$	$8.00\text{E-}11$	$1.60\text{E-}13$

其他剂量计算输入参数如排放源项、气象环境参数、放射性核素的环境转移参数等数据并不是造成两种评价模式下剂量估算结果差异的因素，故略去。表2给出了本次计算中涉及的放射性核素及其

对应的ICRP第95号出版物中公众的母乳途径的剂量转换系数。婴儿组食入剂量转换系数，成人组吸入和食入剂量转换系数取自《电离辐射防护与辐射安全基本标准》(GB 18871-2002)<sup>[4]</sup>。国标中剂量转换系数按年龄大小分为6组，应用中对应选取，婴儿组选取小于1岁的组别，成人组选取大于17岁的组别。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 估算结果

两种婴儿组居民食入途径辐射剂量评价模式下的剂量估算结果见表3。由表中数据可知，通过婴儿组食谱调查数据直接估算的各核素造成婴儿组食入内照射剂量为 $7.14 \times 10^{-7} \text{ Sv/a}$ ，通过母乳途径估算的各核素造成婴儿组食入内照射剂量为 $7.23 \times 10^{-7} \text{ Sv/a}$ 。

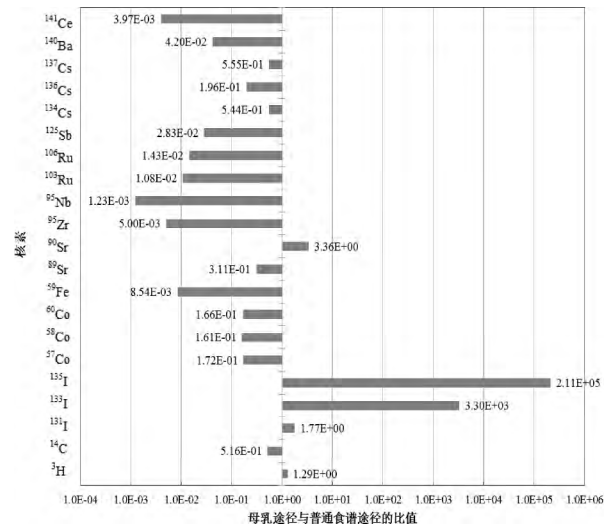


图1 各放射性核素母乳途径与普通食谱途径剂量估算比值

Fig. 1 Dose ratios of results from breast-milk pathway and normal food consumption pathway for different radionuclides

图1给出了估算结果中各核素母乳途径与普通食谱途径的比值。从图1可以看出两种评价模式下各核素的评价结果并不一致 $^3\text{H}$ 、 $^{131}\text{I}$ 等5种核素母乳途径的剂量估算结果比普通食谱途径要大，差异最显著的核素 $^{135}\text{I}$ 其比值达到了 $10^5$ 量级； $^{14}\text{C}$ 、 $^{57}\text{Co}$ 等16种核素普通食谱途径的剂量估算结果比母乳途径要大，差异最大的核素 $^{95}\text{Nb}$ ，其母乳途径估算的婴儿组食入内照射剂量仅为普通食谱途径的0.123%。

#### 3.2 分析讨论

婴儿的喂养方式可分为纯母乳喂养、基本纯母

乳喂养、混合喂养(添加婴儿辅食)和人工喂养(完全由母乳以外食物喂养)<sup>[5]</sup>。谭承军等<sup>[2]</sup>调研指出0~4个月的中国婴儿以母乳喂养的方式为主,6~12个月的婴儿已经不能满足纯母乳喂养,多采用混合喂养或人工喂养;婴儿断奶时间也存在显著的差异性。显然,婴儿组的食物组成随着婴儿月龄的增长而不停地发生变化,刚出生的婴儿大多数以母乳喂养为主,大约从6个月开始添加其他种类的食物,也存在1岁时仍然基本纯母乳喂养的情形。通过现场调查获得婴儿组居民的食物消费量存在较大的困难与不确定性。

表3 两种模式婴儿组居民食入剂量估算结果

Tab. 3 Assessment result of doses to infants from ingestion by two methods

核素	婴儿食谱数据 直接计算 Sv/a	母乳途径计 算 Sv/a	母乳途径与普通 食谱途径的比值
<sup>3</sup> H	8.09E-08	1.04E-07	1.29E+00
<sup>14</sup> C	4.53E-07	2.34E-07	5.16E-01
<sup>131</sup> I	7.41E-08	1.31E-07	1.77E+00
<sup>133</sup> I	2.06E-13	6.80E-10	3.30E+03
<sup>135</sup> I	1.20E-16	2.54E-11	2.11E+05
<sup>57</sup> Co	3.55E-11	6.11E-12	1.72E-01
<sup>58</sup> Co	2.55E-09	4.10E-10	1.61E-01
<sup>60</sup> Co	1.94E-08	3.22E-09	1.66E-01
<sup>59</sup> Fe	3.84E-10	3.28E-12	8.54E-03
<sup>89</sup> Sr	1.02E-09	3.17E-10	3.11E-01
<sup>90</sup> Sr	7.28E-08	2.44E-07	3.36E+00
<sup>95</sup> Zr	9.53E-12	4.77E-14	5.00E-03
<sup>95</sup> Nb	1.73E-11	2.13E-14	1.23E-03
<sup>103</sup> Ru	3.74E-11	4.03E-13	1.08E-02
<sup>106</sup> Ru	6.95E-11	9.95E-13	1.43E-02
<sup>125</sup> Sb	1.68E-12	4.75E-14	2.83E-02
<sup>134</sup> Cs	1.67E-09	9.08E-10	5.44E-01
<sup>136</sup> Cs	2.13E-09	4.18E-10	1.96E-01
<sup>137</sup> Cs	6.13E-09	3.40E-09	5.55E-01
<sup>140</sup> Ba	5.61E-12	2.36E-13	4.20E-02
<sup>141</sup> Ce	9.30E-12	3.69E-14	3.97E-03
合计	7.14E-07	7.23E-07	1.01E+00

本研究中使用的婴儿组食谱现场调查数据与母乳途径假定的婴儿组摄入母乳为主的食谱存在较大的差异。从表1给出的婴儿组食谱现场调查数据可以看出,婴儿组食谱现场调查的食物种类与成人组的食物种类相同,这些调查的数据与混合喂养或人工喂养的婴儿膳食特点一致,可以认为代表了6~

12个月的婴儿或较大月龄婴儿的食物消费量。ICRP第95号出版物中假定母乳喂养从出生开始连续6个月,第一周婴儿摄入母乳量从0增长到800ml/d,之后一直保持在这个摄入量水平,<sup>[3]</sup>该假定下的母乳消费量数据与纯母乳喂养方式的婴儿膳食特点一致,可以认为代表了0~6个月的婴儿或较小月龄婴儿的食物消费量。

从婴儿组食入内照射剂量的估算结果来看,尽管采用的婴儿组食物消费量数据和评价模式都有着显著的差异,它们得到的结果较为接近。可见在婴儿组和成人组食物消费量数据调查合理的情形下,两种模式估算的婴儿组食入内照射剂量具有可比性。从各个核素分析,两种模式下得到的结果没有规律性结果,部分核素母乳途径的剂量估算结果较大,但更多的核素由婴儿组的现场食物消费量调查数据估算结果较大。可能的原因是母乳途径的剂量估算与母亲的消费量数据以及放射性核素在母乳中的转移参数关系较大,而由婴儿组的现场食物消费量调查数据进行剂量估算更多地与婴儿组的消费量调查数据关系较大。

两种不同评价模式下采用的婴儿组食谱数据分别代表了不同大小婴儿的膳食特点,实际工程中可根据需要对婴儿组居民的食入内照射剂量估算进行全面的考虑,选择合适的评价模式应用于核电厂环境影响报告婴儿组公众居民的剂量评价中。

#### 4 结论

本研究根据婴儿组食谱现场调查数据直接估算模式与母乳途径评价模式两种评价方法对实际工程的婴儿组食入内照射剂量进行了估算与比较,结果发现两种评价模式下得到的婴儿组食入剂量大小较为接近,但是具体到各个放射性核素,其所致的剂量大小有显著差异。从食物消费量数据分析可知,使用婴儿组食谱现场调查数据的评价模式更符合1岁以下6~12个月的婴儿或较大月龄婴儿的食物内照射剂量估算,该模式估算结果受到婴儿组食谱调查数据的影响较大;使用母乳途径评价模式更符合1岁以下0~6个月的婴儿或较小月龄婴儿的食物内照射剂量估算,该模式估算结果受到母亲的食谱调查数据影响较大。

(下转第90页 Continued on Page 90)

统的接入必须履行审批授权及责任人制度, 未经批准的外部系统禁止接入 DCS 系统, 做好 DCS 系统防侵入措施。

8) 做好 OPR 操作员站的定期重启的工作, 以避免由于系统长期运行, 操作系统垃圾文件增多, 从而使操作员站死机的情况。

9) 严格执行工程师站、电子间管理制度, 保持工程师站、电子间的良好工作环境。

### 3.2 DCS 系统故障原因分析

DCS 系统故障是指出现 DCS 系统电源失去, 重要过程控制站死机或失电, 通讯网络瘫痪, 所有操作员终端不能监视或操作等情况; 造成 DCS 故障或失灵的可能原因有:

1) 系统软件问题。系统存在 BUG, 导致系统程序冲突; 系统染上病毒, 导致系统瘫痪; 系统时钟不一致, 导致 DPU 故障或系统紊乱。

2) 电源问题。系统电源失去、交换机电源失去、机柜电源失去、操作员站电源失去。

3) 硬件故障。交换机故障, 切换不成功; DPU 故障, 切换不成功; 重要 IO 卡件故障; 网络线缆损坏或通讯接口故障; 系统中 A \ B 冗余设备同时故障。

### 3.3 DCS 系统故障应急处置基本原则

本着“安全第一, 预防为主”的方针和“保人身、保系统、保设备”的原则, 根据“二十五项反措”的要求和机组运行规程进行处理, 最大限度地降低损失, 维护机组的安全稳定运行。

### 3.4 DCS 系统故障应急处置技术措施

针对 DCS 系统发生不同的故障而采取相应的措施, 建立 DCS 系统故障应急处理和长效管理机制, 确保机组在运行过程中发生控制系统故障时, 能够迅速、准确地组织处理故障, 最大限度地降低

故障造成的影响。

## 4 结论

随着国产 DCS 控制技术的不断成熟, 国产 DCS 将以国内核心 DCS 控制技术为基础, 立足国内发电市场, 争取开拓海外市场, 为我国经济建设节约大量外汇资金; 有利于打破发达国家的技术垄断, 对发展中国家的火电厂降低 DCS 项目实施成本及运营成本提供另一种技术选择的可能; 国产 DCS 在超超临界机组成功应用, 对我国火力发电自动化控制行业技术发展将做出重要贡献, 为国产 DCS 发展提供新的思路, 为国产 DCS 在超超临界发电机组的项目实施应用与技术推广, 积累了宝贵的经验, 对整个国产 DCS 技术的应用起到了技术推进作用。

参考文献:

- [1] 朱北恒. 火电厂热工自动化系统试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 电力行业热工自动化技术委员会. 火力发电厂分散控制系统典型故障应急处理预案 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 电力行业热工自动化技术委员会. 火电厂热控系统可靠性配置与事故预控 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 邹斌. 提高电厂热控系统可靠性技术研究 [J]. 电源技术应用, 2013(12): 23-29.
- [5] 北京国电智深控制技术有限公司. 国电智深 EDPF—NT Plus 系统手册 [Z]. 2010.
- [6] 北京国电智深控制技术有限公司. EDPF—NT Plus DPU 及 IO 硬件用户手册 [Z]. 2010.
- [7] 黄焕袍, 潘钢. 国产 EDPF—NT 分散控制系统在 600 MW ~ 1 000 MW 级大型火电机组控制中的应用 [J]. 中国仪器仪表, 2009(3): 42-45.

(责任编辑 高春萌)

(上接第 69 页 Continued from Page 69)

实际工程应用中, 应对婴儿组食物消费量现场调查数据进行全面考虑, 在综合考虑婴儿组食谱特点以及各地食物消费习惯不同的情况下针对婴儿组居民实际月龄大小以及估算的需要选择适当的评价模式。

参考文献:

- [1] 夏益华. 高等电离辐射防护教程 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.

- [2] 谭承军, 商照荣. 核设施评价区婴儿食物消费量估算及参考价值推荐 [C]//核设施环境影响评价研讨会论文集, 2015.
- [3] ICRP. ICRP Doses to infants from ingestion of radionuclides in mothers' milk [M]. Oxford: Pergamon Press, 2004.
- [4] GB 18871 - 2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 [S].
- [5] 王陇德. 中国居民营养与健康状况调查报告之一: 2002 综合报告 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005.

(责任编辑 黄肇和)