

CN8801025

CNIC-00085

IAE-0025

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

切尔诺贝利核电站事故释放量及其对中国
公众造成放射学后果的初步估计



中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00085

IAE-0025

**切尔诺贝利核电站事故释放量
及其对中国公众造成放射
学后果的初步估计**

张 永 兴

(中国原子能科学研究院, 北京)

中国核情报中心

北京 · 1987

摘 要

本文用三种方法估算了Chernobyl核电站RBMK-1000堆的事故释放量。1.与 Windscale 反应堆的类比推算；2.按堆芯贮量估算；3.按波兰、芬兰等国的测量结果推算。估算结果： ^{131}I 释放量为(0.1~1.5) EBq, 约占其堆芯贮量的4%~50%, ^{103}Ru 的释放量与 ^{137}Cs 的相近, 均约为 ^{131}I 释放量的5%~10%; 较易挥发核素 ^{90}Mo 、 ^{103}Ru 、 ^{132}Te 、 ^{137}Cs 的总释放量约为0.4EBq, 其它难挥发核素的释放量约为0.2EBq, 惰性气体及其它裂变产物的释放量约为10EBq, 总释放量约为20EBq, 占堆芯贮量的8%。放射性云团于5月初掠过我国, 大气中 ^{131}I 总量约为1.6PBq, ^{137}Cs 约为0.3PBq, ^{103}Ru 约为0.2PBq。在国境内的沉积量: ^{131}I 约为3PBq, ^{137}Cs 约为0.1PBq, ^{103}Ru 约为0.3PBq。关键居民组个人所受有效剂量当量负担约为60 μSv , 群体有效剂量当量负担为 $1 \times 10^4 \cdot \text{人} \cdot \text{Sv}$ 。

关键词 切尔诺贝利核事故 裂变产物 释放量 沉降 集体剂量当量

EVALUATION OF RELEASE AMOUNT FROM CHERNOBYL ACCIDENT AND OF RESULTING RADIOLOGICAL CONSEQUENCE IN CHINA

Zhang Yongxing

(Institute of Atomic Energy, Beijing)

ABSTRACT

Three kinds of methods are used to evaluate the release amount from Chernobyl RBMK-1000 reactor accident, i.e. (1) estimation by comparison with Windscale accident. (2) estimation in terms of the stock in the core and (3) estimation according to the available monitoring data from adjacent countries such as Poland and Finland. The results obtained are as follows, the release of I-131 was (0.1~1.5) EBq, approximate 4%~50% of the stock in the core, the release amount of Ru-103 was comparable to that of Cs-137, both approximate 5%~10% of that of I-131, the volatile nuclides such as Mo-99, Ru-103, Te-132, Cs-137 etc., were in the order of 0.4EBq involatile nuclides were 0.2EBq, noble gases and other fission products 10EBq, and the total amount released was about 20EBq, which taken together 8% of the stock in the core. The radioactive cloud cluster passed through that over area of China in the beginning of May. It was estimated that the total amount of I-131 in air over China area was about 1.6PBq, Cs-137 about 0.3PBq, Ru-103 about 0.2PBq, the total fallout in the area of China was about I-131 3PBq, Cs-137 about 0.1PBq, Ru-103 about 0.3PBq. The resulting effective dose equivalent commitment to critical group individual was about 60 μ Sv, collective effective dose equivalent commitment received by the population of China was about 1×10^4 man·Sv.

一、说 明

1986年4月26日苏联切尔诺贝利核电站发生了迄今为止最严重的一次灾难性核事故。5月初放射性云团掠过我国。这次事故对我国公众和对全世界公众的放射学影响成为辐射防护学界极为关切的课题。

源项、环境条件和环境监测结果是定量评价某事件环境影响的三项重要资料，其中源项资料是最重要的。本文用三种方法估算了苏联切尔诺贝利核电站RBMK-1000反应堆的事故释放量，即：（1）与温斯凯尔（Windscale）反应堆的类比推算；（2）按堆芯放射性贮量估算；（3）根据波兰、芬兰等国测量的结果推算。

由于该电站释放的放射性烟云到达我国时沿途沉积（干沉积和降雨淋洗），烟羽中放射性量已降低了2~3个数量级。因此，由我国的测量数据很难准确地推算其事故的释放量。作为一种粗略估计，本文用烟团模式和中国原子能科学研究所的单点测量结果估算了我国公众由于这次事故所受的照射。

二、源项估算结果*

1. 由1957年10月10日英国温斯凯尔生产堆事故释放量来类比推算。

表1列出推算时的修正因子取值及结果。

表1 由温斯凯尔事故释放量来推算切尔诺贝利事故释放量

核电站	有关的参数				释放量, Ci			
	功率, MW	溶化份额, %	捕集因子*	修正因子	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	⁹⁰ Sr	⁹⁴ Sr
温斯凯尔	250	10	1	1	20000	600	80	9
切尔诺贝利	3200	70	0.5	1.8×10 ²	1.8×10 ⁶	1.1×10 ⁵	1.4×10 ⁴	1.6×10 ²

* 捕集因子即核设施对放射性核素的吸附、滞留份额。

由于这两座反应堆都是用石墨作慢化剂，而且都造成堆芯熔化和石墨着火，因此有一定的可比性。

2. 由堆芯贮量估算事故释放量

按RBMK-1000堆设计参数估算，其平均燃耗（设计值）为1850MWd/tU，相当于每吨元件满功率照射580天，由于该反应堆开始运行仅1年多故取照射累积时间 $T=360d$ ，相当于平均燃耗为11500MWd/tU。

表2列出几种主要核素的堆芯贮量及释放量。

由表2可见，这次事故可能释放出 $3 \times 10^8 Ci$ ($1.1 \times 10^{13} Bq$ 或11EBq)的惰性气体， $3.8 \times 10^7 Ci$ (1.4EBq)的¹³¹I和总量为 $3 \times 10^8 Ci$ (11EBq)的其它裂变产物(含短寿命成分的)。总释放量约占堆芯贮量的8%。表2中的“估计的释放份额”有的(较易挥发性核

* 单位换算为1Ci=3.7×10¹⁰Bq。

表 2 Chernobyl 电站堆芯贮量及估算的释放量

核素	贮量, Ci	估计的释放份额, %	释放量, Ci	核素	贮量, Ci	估计的释放份额, %	释放量, Ci
Kr: Xe	3×10^8	100	3×10^8	^{137}Cs	3.5×10^6	25	8.8×10^5
^{86}Sr	1.2×10^8	1	1.2×10^8	^{138}Ba	1.7×10^6	1	1.7×10^6
^{90}Sr	4.5×10^6	1	4.5×10^6	^{140}La	1.7×10^6	1	1.7×10^6
^{91}Y	1.5×10^8	1	1.5×10^8				
^{92}Zr	1.6×10^8	1	1.6×10^8	^{141}Ce	1.5×10^6	1	1.5×10^6
^{93}Nb	1.5×10^8	1	1.6×10^8	^{142}Ce	1.4×10^6	1	1.4×10^6
^{99}Mo	1.7×10^8	25	4.3×10^7	^{143}Pr	1.4×10^6	1	1.4×10^6
^{103}Ru	1.0×10^8	50	5.0×10^7	^{144}Ce	8.3×10^5	1	8.3×10^5
$^{106}(\text{Ru}+\text{Rh})$	6.7×10^6	50	3.4×10^6	^{144}Pr	8.3×10^7	1	3.3×10^5
^{129}Te	5.1×10^6	50	2.6×10^6	^{147}Nd	7.0×10^7	1	7.0×10^5
^{131}I	7.5×10^7	50	3.8×10^7	^{147}Pm	1.5×10^7	1	1.5×10^5
^{132}Te	1.2×10^8	50	6.0×10^7	总活度	7.1×10^9		$\sim 6 \times 10^8$
^{132}I	1.2×10^8	50	6.0×10^7				
^{137}Cs	1.7×10^8	25	4.3×10^7				

素)取值偏高,因为考虑到事故后失冷,温度可能很高,元件熔融,而且由于石墨体着火,一切过滤净化设施失效。

3. 根据波兰、芬兰、瑞典等国监测数据推算

切尔诺贝利事故释放,就其对西欧等国影响来看,可视为连续源释放,烟羽的有效高度 Δh 估算如下:

$$\Delta h = \frac{3 \times 10^{-4} Q_H}{U} \quad (\text{ft}) \quad (\text{Holland公式}) \quad (1)$$

式中, Q_H 是热量释放速率, cal/s, U 为地面风速, mile/h。取 $Q_H = 3200\text{MW} \times 0.07 = 224\text{MW} = 5.4 \times 10^7 \text{cal/s}$, U (建筑物高度处的风速) 取为 3.4 mile/h (相当于 1.5 m/s, 因系凌晨风弱)。

由此得 $\Delta h = 4.76 \times 10^3 \text{ft} \approx 1.45 \times 10^3 \text{m}$ 。即约 850 mbar 处。因而,可以利用 850 mbar 的天气图来推算烟羽的轨迹。考虑到事故后引起石墨体着火,释放能量的速率随之增大,但随之而来的却伴有地面风速的增大,因而估计烟羽抬升高度大约在 1000~1500 m 之间。取烟羽的轴心高度为 1500 m。当远距离输送时,由于垂直速度切变效应,使烟团纵向扩展很大。

图 1~图 8 是芬兰气象台按 850 mbar 天气图推算出切尔诺贝利核电站放出的放射性烟云的轨迹。由图 1~图 5 可看出,4 月 30 日以前,烟云主要向北欧、西欧输送,由图 6~图 8 可知,由 5 月 1 日开始向东方和东南方输送。

(1) 由波兰监测结果推算 (数据摘自 IAEA 通报, 86/4)。

该通报称“初步分析全部监测点的空气样品测量结果表明,全国空气中 ^{131}I 含量约为 100Bq/m^3 ”,由此可得沿波兰方位 (W 方位) ^{131}I 的总量为

$$Q_1 = \int c \, dx \, dy \, dz \quad (2)$$

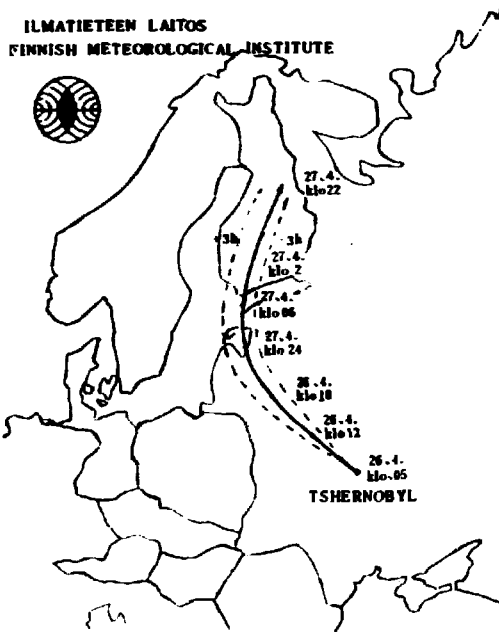


图1 根据天气图推算的切尔诺贝利放射性烟云轨迹, 1986年4月26日05时
(芬兰时间) (02GMT)

$$\begin{aligned} &\approx 100 \text{ Bq/m}^3 \times 1 \times 10^6 \text{ m} \times 8 \times 10^6 \text{ m} > 1.5 \times 10^{13} \text{ m} \times f \\ &= 1.2 \times 10^{17} \text{ (Bq)} \\ &= 2.4 \times 10^{17} \text{ Bq} \end{aligned}$$

式中, f 是沉积修正系数, 取 $f=2$ 。考虑到混合层高度一般低于 2000m, 烟羽向高空扩散很弱, 抵达波兰时, 基本上形成混合层内的均匀混合。

由波兰监测结果可知, 空气中 ^{131}I 与 ^{137}Cs 含量之比约为 9:1, 考虑到碘的沉积速度大于铯的沉积速度, 因此由核电站释放出的 ^{131}I 与 ^{137}Cs 的总量的比值将大于 9:1。

(2) 由芬兰监测结果推算 (STUK-B-VALO 44, 45)

由当时的气象资料 (见图1、图2) 和监测结果看, 芬兰境内的放射性水平升高是由 4月26日05 (GMT) 到 4月27日06时期间切尔诺贝利电站释放的放射性烟羽造成的。4月27日12时后烟羽改向向波兰境内吹去。4月29日12时后切尔诺贝利电站的放射性烟羽又转向, 初向东继又转向南 (见图4)。

由上述气象资料及芬兰境内监测数据, 按拖长释放源估算, 得源强 Q_2 为

$$Q_2 \approx C_{max} \times \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot f$$

式中, C_{max} 是烟羽区内最大浓度 (轴浓度) 值, Bq/m^3 ; Δx 是烟羽的纵向扩展距离, m, $\Delta x = 0.2L + V\Delta t$, 这里 L 为烟羽由释放点 (切尔诺贝利) 到监测点 (芬兰 NurmiJarvi) 的路程 (轨迹长), m, V 为烟云迁移速度, 取为 40km/h; Δt 为向该方位释放烟羽的持续时间, 由当时气象资料 (见图1) 取 $\Delta t = 10\text{h}$; 则 $\Delta x = 0.2 \times 2 \times 10^6 + 4 \times 10^4 \times 10 = 8 \times 10^6 \text{ m}$, Δy

ILMATIETEEN LAITOS
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

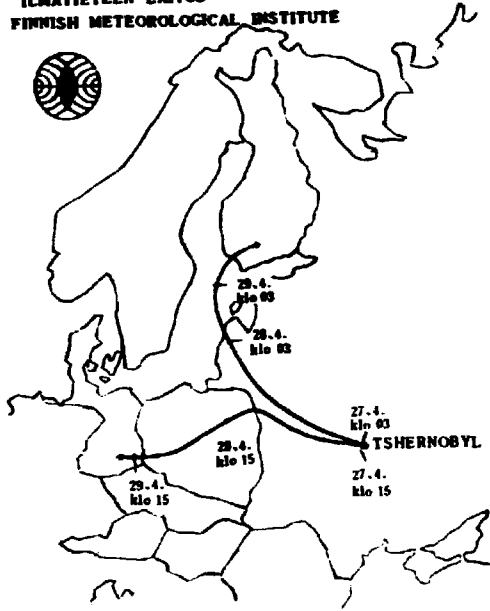


图2 4月27日03时和15时(芬兰时间),由切尔诺贝利释放烟云的轨迹

ILMATIETEEN LAITOS
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

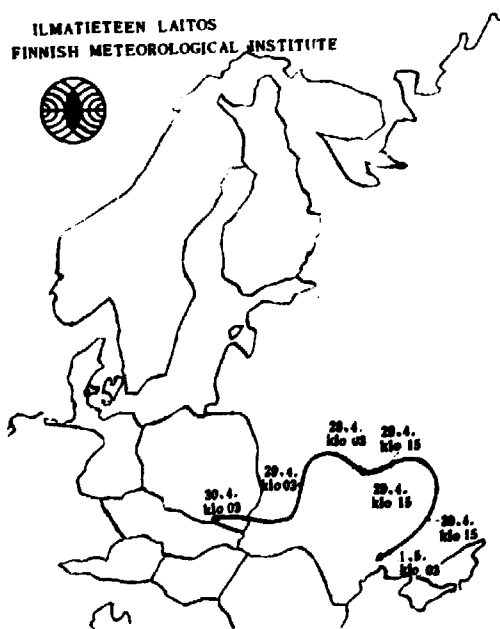


图3 4月28日03时和15时(芬兰时间),由切尔诺贝利释放烟云的轨迹

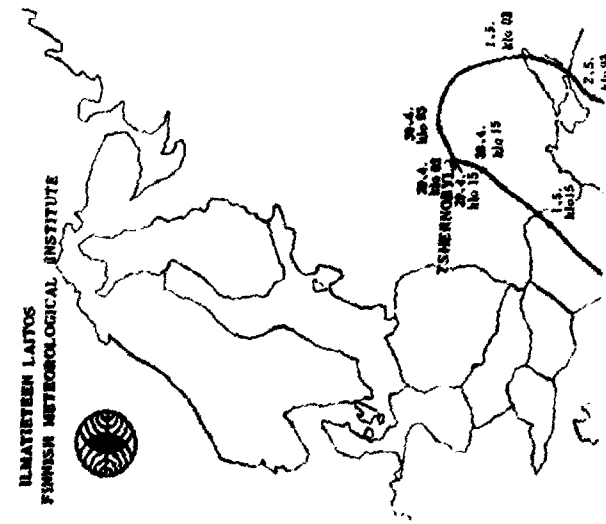
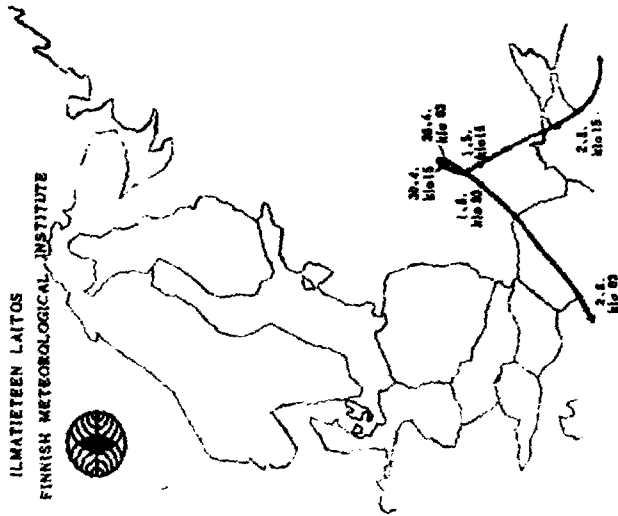


图4 4月29日03时和15时(芬兰时间),由切尔诺贝利释放烟云的轨迹 图5 4月30日03时和15时(芬兰时间),由切尔诺贝利释放烟云的轨迹

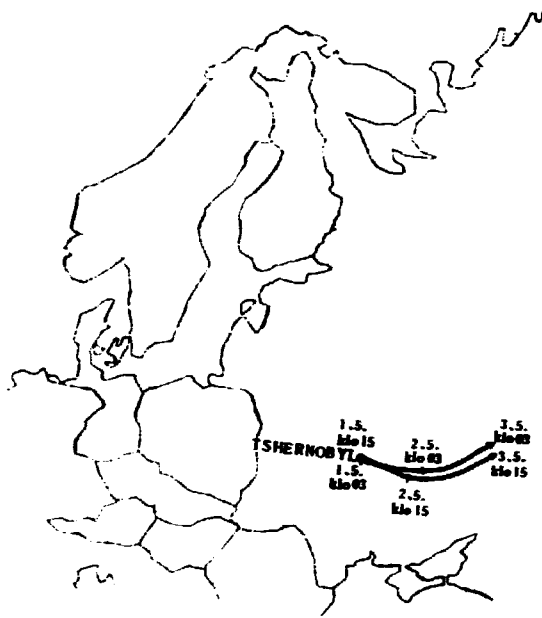


图6 5月1日03时和15时(芬兰时间),由切尔诺贝利释放烟云的轨迹

为烟羽侧向扩展距离, m , 取 $\Delta y \approx 0.09L = 1.8 \times 10^5 m$; Δz 为烟羽垂向扩展距离, m , 取 $\Delta z = 1.5 \times 10^3 m$; f 为沉积修正因子, 对碘取为 $f = 3$ 。由此得:

$$Q_2 = 2 \times 10^2 \times 1.8 \times 10^5 \times 8 \times 10^6 \times 1.5 \times 10^3 \times 3 = 1.3 \times 10^{17} Bq$$

由瑞典监测结果来看, 该境内污染亦是这一段时间内的烟羽边缘掠过所致。因此可知, 截止于4月29日12时(GMT), 由切尔诺贝利电站释出的 ^{131}I 量为 $Q_1 + Q_2 = (2.4 \times 10^{17} + 1.3 \times 10^{17}) Bq = 370 PBq$ 。

芬兰境内测到的空气中 ^{131}I 浓度与 ^{137}Cs 浓度之比约为20。考虑到碘与铯沉积速度的差别, 可以推出切尔诺贝利电站在事故释放初期释出的 ^{131}I 量与 ^{137}Cs 量之比为20以上。

由图1、图2可知, 放射性烟羽先向芬兰输送, 后才转向波兰, 且波兰距切尔诺贝利电站较芬兰与切尔诺贝利之距离近, 由此, 由以上 $^{131}I/^{137}Cs$ 比值的测量结果, 似乎事故初期释出大量的碘, 而随后石墨着火, 元件温度继续上升, 致使铯的释放比例增大。

三、关于释出量的讨论

1) 切尔诺贝利核电站 ^{131}I 释放量约为 $3 \times 10^6 \sim 4 \times 10^7 Ci$ ($1 \times 10^{17} Bq \sim 1.5 \times 10^{18} Bq$)。由欧洲及斯堪的那维亚测得的空气浓度估计释放总量为 $1 \times 10^7 Ci$ 以上, 大约占堆芯贮量的13%以上。显然这是一次全堆芯熔化事故。

2) 估计 ^{106}Ru 的释放量与 ^{137}Cs 相近, 大约为 ^{131}I 释放量的5%~10%。

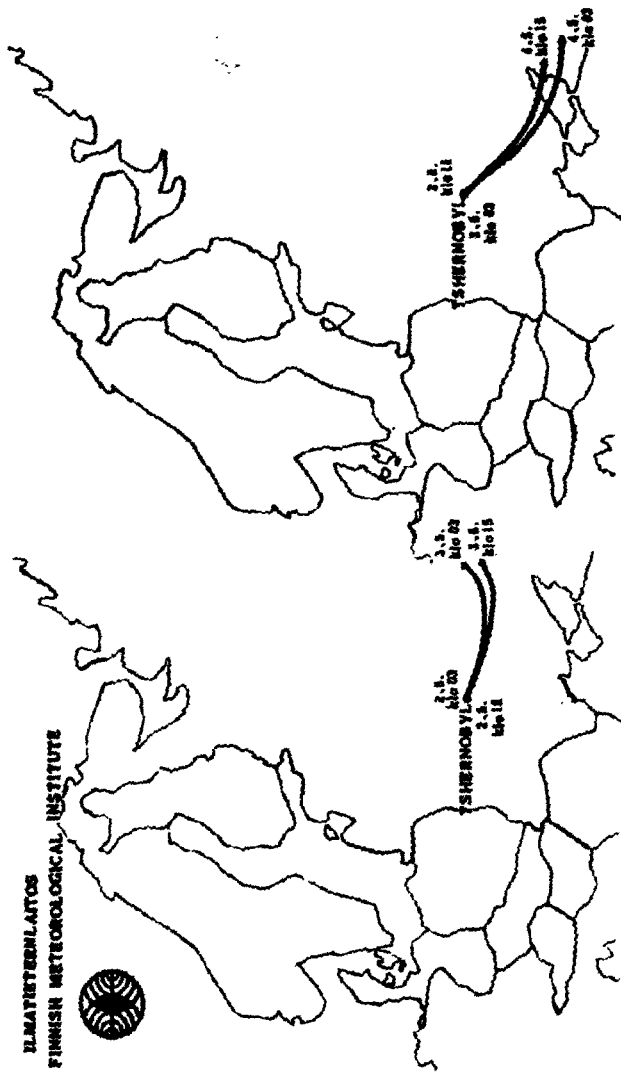


图7 5月6日03时和15时(芬兰时间),由切尔诺贝利释放烟云的轨迹 图8 5月7日03时和15时(芬兰时间),由切尔诺贝利释放烟云的轨迹

3) 较易挥发核素⁹⁰Mo、¹⁰³Ru、¹⁰³Te、¹³⁷Cs的总释放量估计约为 3.7×10^{17} Bq (1×10^7 Ci)，其它难挥发核素的释放量约为 2.2×10^{17} Bq (6×10^6 Ci)。

4) 上述估计方法是数量级估算用的，所给结果在数量级上是可信的。

四、对我国公众放射学影响估计

切尔诺贝利核电站释放的放射性烟云由5月1日起进入我国。下面根据原子能科学研究所的监测数据来估计这次事故对我国的放射学影响。

表3列出在原子能科学研究所(北京西南郊)监测的空气中放射性核素的浓度。按照850mbar天气图的风场看，北京位于切尔诺贝利放射性烟云轨迹的轴线附近。

表3 空气中放射性核素浓度 (Bq/m³)

取样时间	¹³¹ I	¹³⁷ Cs	¹³⁴ Cs	¹⁰³ Ru	¹⁰³ Te	¹³² I	⁹⁰ Mo	⁹⁹ Tc
5.2晚	3.0×10^{-2}	1.6×10^{-3}	7.4×10^{-4}		1.7×10^{-3}			
3白	6.2×10^{-2}	4.8×10^{-3}		2.1×10^{-3}	4.1×10^{-3}			
3晚	1.1×10^{-1}	4.4×10^{-3}	3.5×10^{-3}	1.7×10^{-3}	4.2×10^{-3}	5.6×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
4白	7.2×10^{-2}	5.2×10^{-3}	1.9×10^{-3}	4.3×10^{-3}	7.0×10^{-3}		3.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}
4晚	1.2×10^{-1}	9.6×10^{-3}	5.6×10^{-3}	7.0×10^{-3}	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-2}	√ ^a	
5白	2.0×10^{-1}	9.6×10^{-3}	8.1×10^{-3}	9.1×10^{-3}	1.4×10^{-2}	1.3×10^{-2}	√	
5晚	2.4×10^{-1}	1.4×10^{-2}	8.5×10^{-3}	2.5×10^{-2}	3.4×10^{-2}	3.0×10^{-2}	4.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}
8	2.9×10^{-1}	1.5×10^{-2}	8.1×10^{-3}	1.5×10^{-2}	1.7×10^{-2}	1.4×10^{-2}	√	
13	2.7×10^{-1}	1.1×10^{-2}	5.9×10^{-3}	1.5×10^{-2}	4.4×10^{-2}	4.2×10^{-1}		
15	1.3×10^{-1}	8.8×10^{-3}	4.1×10^{-3}	1.2×10^{-2}	2.6×10^{-2}	3.0×10^{-2}		
19	8.7×10^{-2}	6.0×10^{-3}	1.3×10^{-3}	9.0×10^{-3}				
27	4.4×10^{-2}	2.7×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.5×10^{-3}				
30		4.0×10^{-3}		9.8×10^{-3}				

中国原子能研究院

• √: 定性检出。

(续) 表3

⁹² Zr	⁹⁵ Nb	¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	¹⁴⁰ Ce	¹³⁶ Cs	¹⁴⁴ Ce	⁹³ Sr ^a
							1.2×10^{-4}
							1.9×10^{-4}
	3.2×10^{-3}		3.7×10^{-3}				3.4×10^{-4}
	7.8×10^{-3}		9.3×10^{-3}	3.3×10^{-3}		3.3×10^{-3}	
3.0×10^{-3}	1.1×10^{-2}		5.6×10^{-3}	√			
	2.5×10^{-3}			2.8×10^{-3}			
	7.0×10^{-3}	5.9×10^{-3}	6.1×10^{-3}		3.2×10^{-3}		
			8.5×10^{-3}				
			3.7×10^{-3}	√			
		2.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}	√			
		3.0×10^{-3}	2.8×10^{-3}	1.3×10^{-3}			

• 放射分析测量结果。

表4 沉积速度实测平均值* (86.5.2~5.6)

核素	¹³¹ I	¹³⁷ Cs	¹⁰³ Ru	⁹⁵ Zr	⁹⁹ Mo
v _d , m/s	2.4×10 ⁻³	1.0×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³	1.5×10 ⁻³	4.3×10 ⁻³

1. 放射性烟云在中国境内的通过量

通过量计算公式为：
$$Q = \bar{u} \int \int \int c \, dt \, dy \, dz$$

$$= h \cdot \Delta y \cdot \bar{u} \int c \, dt \quad (3)$$

式中， h 是混合层高度，m，取 $h=2000$ m； Δy 是烟羽的平均宽度，m，取 $\Delta y=0.09L$ ； L 是烟云输送距离， $L=1.4 \times 10^7$ m； \bar{u} 是地面风速，m/s，取 $\bar{u}=2$ m/s。 c 是空气中浓度，Bq/m³。 t 是时间。

利用表3数据由上式算得几个重要核素（从放射学观点看，¹³¹I和¹³⁷Cs是重要核素）的结果为：

¹³¹I通过量为 1.6×10^{16} Bq

¹³⁷Cs通过量为 2.5×10^{14} Bq

¹⁰³Ru通过量为 1.5×10^{14} Bq

2. 放射性烟云在中国境内的沉积量

中国境内各主要核素沉积总量 W (Bq)按下式估计：

$$W = \int \left(\int \int \dot{w} \, dx \, dy \right) dt$$

$$= \int \left(\int \int c v_d \, dx \, dy \right) dt$$

$$= v_d \left(\int c \cdot dt \right) \Delta y \Delta x \quad (4)$$

式中， c 是空气中浓度，Bq/m³； v_d 是干沉积速度，m/s，表4列出在原子能院该期间的实测值； Δy 是烟羽平均宽度，m，取 $\Delta y=0.09L$ ； Δx 是烟云掠过我国国境的轨迹长度，m，取 $\Delta x=3500$ km；由此算得中国境内的沉积量为：

¹³¹I沉积总量为 3.4×10^{16} Bq

¹³⁷Cs沉积总量为 1×10^{14} Bq

¹⁰³Ru沉积总量为 2.5×10^{14} Bq

3. 公众个人可能受到的照射

从放射学来看，最重要的裂变产物核素是¹³¹I和¹³⁷Cs。下面估计关键居民组（为方便计，取为成年人，由于所选食谱偏于保守，这组人群所受照射可以认为是公众可能受到的上限值）所受的有效剂量当量。

(1) 吸入途径（空气→人）

$$\text{由 } H = I_a \cdot (DF)_a \quad (5)$$

$$I_a = V \int c \, dt \quad (6)$$

式中 H 是由吸入放射性核素造成的有效剂量当量，Sv； I_a 是吸入的放射性核素量，Bq；

$(DF)_a$ 是吸入途径的剂量转换因子, Sv/Bq; V 是呼吸速率, m^3/s ; c 是空气浓度, Bq/ m^3 ; t 是时间, 秒。 V 与 $(DF)_a$ 均采用ICRP pub.30推荐值, C 用表3数据, 算得由吸入造成的有效剂量当量为:

$$\begin{aligned} {}^{131}\text{I}_2 & I_a = 85\text{Bq} & H = 6.8 \times 10^{-7}\text{Sv} \\ {}^{137}\text{Cs}_2 & I_a = 6\text{Bq} & H = 5.2 \times 10^{-8}\text{Sv} \\ {}^{103}\text{Ru}_2 & I_a = 8.3\text{Bq} & H = 1.7 \times 10^{-8}\text{Sv}. \end{aligned}$$

(2) 由食入蔬菜 (空气→蔬菜→人)

按叶菜 (如菠菜等) 计

$$H = I_0 \cdot (DF)_a \quad (7)$$

$$I_0 = \int C_v \cdot U \cdot dt \quad (8)$$

$$C_v = \frac{w}{Y} f_1 \cdot f_2 \quad (9)$$

$$w = \int c v_a dt \quad (10)$$

式中, I_0 为由食入途径的摄入量, Bq; $(DF)_a$ 是食入途径的剂量转换因子, Sv/Bq; C_v 是叶菜食入前的放射性含量, Bq/kg; U 是食用量, kg/d, 取为 $U_v = 1\text{kg/d}$; w 是放射性核素单位面积沉积量, Bq/ m^2 ; Y 是叶菜产量, kg/ m^2 ; f_1 是沉积下来的核素在叶菜上的捕集份额, 取为 $f_1 = 0.7$; f_2 是食入前由洗涤后剩余的份额, 取 $f_2 = 0.7$; C 和 v_a 如前述同。

(8)式积分时, 考虑了由天气所致的风化去除率常数 λ_a , $\lambda_a = 0.0021(\text{h}^{-1})$ 。由此得:

$$\begin{aligned} {}^{131}\text{I}_2 & I_0 = 2.8 \times 10^3\text{Bq} & H = 3.6 \times 10^{-6}\text{Sv} \\ {}^{137}\text{Cs}_2 & I_0 = 2.4 \times 10^2\text{Bq} & H = 3.1 \times 10^{-6}\text{Sv} \\ {}^{103}\text{Ru}_2 & I_0 = 6 \times 10^3\text{Bq} & H = 4.4 \times 10^{-7}\text{Sv}. \end{aligned}$$

(3) 由牛奶途径 (空气→牧草→牛奶→人)

$$H = I_0 \cdot (DF)_a \quad (7)$$

$$I_0 = \int C_m U_m dt \quad (11)$$

$$C_m = \frac{U_c}{Y} \cdot w \cdot F_m \quad (12)$$

$$w = v_a \int c dt \quad (10)$$

式中, C_m 是牛奶放射性核素含量, Bq/L; U_m 是关键公众组个人牛奶消费量, L/d, 取 $U_m = 0.43\text{L/d}$; U_c 是奶牛放牧时每日饲料量, kg/d, 取 $U_c = 50\text{kg/d}$; Y 是牧草产量, kg/ m^2 取 $Y = 0.7\text{kg}/m^2$; F_m 是核素由牛食入后转入奶中的系数, 即(牛奶中浓度/每日食入量), 对碘 $F_m = 6 \times 10^{-2}\text{d/L}$, 对铯 $F_m = 1.2 \times 10^{-2}\text{d/L}$, 对钚 $F_m = 1.0 \times 10^{-5}$ 。其余符号意义同前。

由此算得的有效剂量当量为:

$$\begin{aligned} \text{对} {}^{131}\text{I} & I_0 = 1 \times 10^3\text{Bq} & H = 1.3 \times 10^{-6}\text{Sv} \\ \text{对} {}^{137}\text{Cs} & I_0 = 1.7 \times 10^2\text{Bq} & H = 2.3 \times 10^{-6}\text{Sv} \end{aligned}$$

$$\text{对 } ^{106}\text{Ru} \quad I_0 = 4 \times 10^{-3} \text{Bq} \quad H = 3 \times 10^{-11} \text{Sv}$$

(4) 由谷物途径 (空气→地面土←谷物→人)

此途径只对¹³⁷Cs有意义。

$$\text{由} \quad H = I_0 \cdot (DF)_g \quad (7)$$

$$I_0 = \int C_g U_g dt \quad (13)$$

$$C_g = \frac{w e^{-\lambda t}}{p} B_{1,1} \quad (14)$$

$$w = v_s \int c dt \quad (10)$$

式中, C_g 是谷物中放射性核素含量 Bq/kg; U_g 是公众个人消费量, kg/d, 取 $U_g = 0.5 \text{kg/d}$, p 是耕作层土壤厚度, 取 $p = 240 \text{kg/m}^2$, $B_{1,1}$ 是核素由土壤向植物中的转移系数, (Bq/kg谷)/(Bq/kg土), $B_{1,1}$ 对 Cs 为 $B_{1,1} = 1 \times 10^{-2}$, λ 是¹³⁷Cs 的蜕变常数。其余符号意义同前。由此得

$$I_0 = 7.4 \text{Bq} \quad H = 9.6 \times 10^{-8} \text{Sv}$$

(5) 由土壤→牧草→牛奶→人途径

此途径也只对¹³⁷Cs有意义。

此时,

$$C_m = C_g U_m f_m \quad (15)$$

$$C_g = \frac{w}{p} B_{1,1} e^{-\lambda t} \quad (14)$$

$$I_0 = \int C_m U_m dt \quad (16)$$

式中 C_m 是牛奶中浓度, Bq/L; C_g 是牧草中浓度 Bq/kg, U_m 是牧牛饲料量, kg/d, 其余各量意义同前。

由此得:

$$^{137}\text{Cs}, \quad I_0 = 3.8 \text{Bq} \quad H = 5 \times 10^{-8} \text{Sv}.$$

(6) 由沉积引起的外照射剂量当量负担

$$H = w_0 (DF)_n \quad (17)$$

式中 $(DF)_n$ 是地面沉积的剂量因子 (与其后的时间有关, 我们取 $t \rightarrow \infty$), Sv/(Bq/m²), 由此算得

$$^{131}\text{I} \quad H = 2.8 \times 10^{-7} \text{Sv}$$

$$^{137}\text{Cs} \quad H = 3.4 \times 10^{-6} \text{Sv}$$

$$^{106}\text{Ru} \quad H = 1.1 \times 10^{-7} \text{Sv}$$

(7) 空气中放射性核素的浸没照射

浸没照射为

$$H = \left(\int c dt \right) \times (DF)_a \quad (18)$$

式中, $(DF)_a$ 是浸没照射的剂量因子, (Sv/s)/(Bq/m³), 由此算得

$$^{131}\text{I} \quad H = 7 \times 10^{-8} \text{Sv}$$

$$^{137}\text{Cs} \quad H = 8.5 \times 10^{-10} \text{Sv}$$

$$^{132}\text{Ru} \quad H = 8.5 \times 10^{-10} \text{Sv}$$

与上述各量相比，可以忽略不计。

表 5 汇总了上述结果。由表 5 可知，关键居民组个人所受有效剂量当量负担约为 $6 \times 10^{-5} \text{Sv}$ ，其中主要途径是蔬菜，约占总剂量的 70%，其次是牛奶和沉积外照射。但是由于计算时牛奶消费量取为 0.43L/d ，而沉积照射未考虑风化半减期，故这两部分都比普通公众所受的偏高。上述剂量中，吸入、蔬菜、浸没照射与牛奶（空气→牧草→牛奶→人途径）是当年授予的，其余三项即沉积照射、谷物（空气→土壤→谷物→人）和牛奶（空气→土壤→牧草→牛奶→人）都是之后一生中 所受照射的总和。

表 5 我国公众关键组所受剂量汇总 (Sv)

核素	吸入 (空气→人)	浸没 照射	沉积 照射	蔬 菜	牛 奶 (空气→草→ 牛→人)	谷 物 (空气→土 →谷→人)	牛 奶 (空气→土 →草→牛→ 人)	小 计
^{132}I	6.8×10^{-7}	7×10^{-9}	2.8×10^{-7}	3.6×10^{-5}	1.3×10^{-5}			5.0×10^{-5}
^{137}Cs	5.2×10^{-8}	8.5×10^{-10}	3.4×10^{-6}	3.1×10^{-5}	2.3×10^{-5}	9.6×10^{-8}	5×10^{-8}	9.0×10^{-6}
^{132}Ru	1.7×10^{-8}	8.5×10^{-10}	1.1×10^{-7}	4.4×10^{-7}	3×10^{-12}			5.7×10^{-7}
小计	7.5×10^{-7}	9×10^{-9}	3.8×10^{-6}	4.0×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1×10^{-7}	5×10^{-8}	6.0×10^{-5}

按照烟云轨迹，估计我国受影响人数约有 5 亿人，考虑到食品消费量的差别（公众平均蔬菜消费量在夏季约为 0.5kg/d ），且蔬菜品种有差别（因而 f_1 、 f_2 和 V 值都不同），以及牛奶消费量低（约为关键居民组 0.43L/d 的百分之一左右），作为概量估算，由切尔诺贝利核电站事故释放的放射性烟云对我国公众群体造成的集体有效剂量当量负担可取为 $\sim 5 \times 10^8 \times 4 \times 10^{-5} \times 0.5 = 1 \times 10^4 \text{人} \cdot \text{Sv}$ 。

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



P.O. Box 2103
Beijing, China

China Nuclear Information Centre