

正确对待放射性与核安全

朱炳泉^{1,2}

1. 中国科学院 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

摘要:通过天然放射性的变化,放射性安全标准体系知识介绍,以及日本 3.11 大地震及引发的海啸和核泄漏对环境影响范围的分析,说明福岛第一核电站核泄漏对中国领域没有任何影响;以 WHO 安全标准衡量,在本洲岛的影响范围小于 1 万 km²。同时通过实例讨论,强调了加强对核电站周边环境的日常监测,重视核电站周边放射性环境微小变化,是保障核安全的重要环节之一。最后介绍了大亚湾核电站周边水库水质重金属元素分析结果,并评价了核电站环境的安全性,指出具有好的安全保障体系的核能利用是清洁、环保的能源。

关键词:放射性;核安全;核泄漏

中图分类号:P598 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2012)02-0184-05

The Right Way of Facing Radioactivity and Nuclear Safety

ZHU Bing-quan^{1,2}

1. The state key laboratory of deposit geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;
2. The state key laboratory of isotope geochemistry, CAS, Guanzhou 510640, China

Abstract: On the basis of environmental influence evaluation for the nuclear leakage of the first nuclear power plant Fukushima (Japan) in the 3.11 large earthquake and tsunami, this paper concludes that this nuclear leakage, whose influence dimension in the Honshu Island is lower than 10000 km² according to WHO radioactive safety standards, has no influence to the territory of China. One of the important links for ensuring nuclear security is to enhance daily environmental monitoring and to pay attention to subtle changes of radioactive environments in the circums of nuclear power plants. In the later part, this paper reviews the analytical results of heavy metals concentrations and U/La ratios in the water reservoirs near the DaYaWang nuclear power station, evaluates the environmental safety, and points out that nuclear energy with a good safety guarantee system is a clean and environmental-friendly energy source.

Key words: radioactivity; nuclear safety; nuclear leakage

日本“3·11”大地震及引发的海啸和核泄漏使许多人产生了对放射性的不安和对核能利用的疑虑。为了确保核能利用的安全性,认真总结核泄漏的经验教训是十分必要的。然而产生恐慌心理,甚至出现抢购碘盐的愚昧事件主要是由于人们对放射性缺少全面正确的认识,以及媒体报道缺少严格的定量数据。本文力图较全面地介绍有关放射性的知识,并对福岛第一核电站核泄漏对环境影响作定量分析,同时还分析了大亚湾核电站环境监测数据。

1 自然界的天然放射性

地球上的放射性物质主要为²³⁸U(半衰期 $t_{1/2} = 4.468 \times 10^9$ a)、²³⁵U($t_{1/2} = 7.03 \times 10^8$ a)、²³²Th($t_{1/2} = 1.405 \times 10^{10}$ a)、⁴⁰K(占总 K 的 0.0118%, $t_{1/2} = 1.260 \times 10^9$ a),以及 U、Th 系衰变的中间子体 Po、R、Fr、Ra、Ac 和 Pn 等。天然放射性物质衰变产生 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变、电子捕获、自发裂变等,其放出的能量称为衰变能量。以平均地壳组成看,每立方米岩石将产生 2×10^6 Bq 放射性(其中一半来自⁴⁰K

收稿日期:2011-05-11 收到,06-13 改回

基金项目:中国科学院矿床地球化学国家重点实验室开放基金资助项目

第一作者简介:朱炳泉(1940—),男,博导,研究方向:同位素地球化学在资源环境评价中的应用。E-mail: bqzhu@gig.ac.cn.

衰变,一半来自 U、Th 系衰变)。花岗岩出露地区, U-Th-K 含量更高,如粤北地区花岗岩 U-Th 含量是平均地壳的 9 倍左右, K 是 3 倍左右。因此粤北地区花岗岩放射性可达 3.5×10^6 Bq/m³。天然放射性物质还包括宇宙射线,一种从宇宙空间射到地球上的高能粒子流(质子、 α 粒子、原子核、电子等)和 γ 射线。宇宙射线强度与高度、纬度呈正相关,也与气候因素有关。地球表面大气中放射性辐射剂量是地表岩石放射性与宇宙射线叠加的结果。低海拔地区放射性辐射剂量主要来自地表岩石放射性(约占 85%),地表花岗岩出露越多,辐射剂量越高,如广州地区,达到 0.11 μ Sv/h,比中国北方许多城市高出约 1/3。海拔 5000 m 以上,辐射剂量明显随高度的增加而增加,来自宇宙射线的比例也愈来愈高,如拉萨地区达 0.19 μ Sv/h。乘飞机高空飞行,受到来自宇宙射线的辐射剂量当量率达 2.3~2.7 μ Sv/h。

2 放射性辐射剂量的安全标准体系

国际上对从事放射性工作的人员确定了一个安全标准体系,称 DCG 标准(derived concentration guideline),根据在固定环境生活工作一年产生 1 mSv 辐射剂量推算的特定放射性物质在饮用水、食品和空气中的浓度。以 ¹³¹I 为例,日本对自来水的 DCG 标准为 300 Bq/L。而美国和世界卫生组织(WHO)的饮用水 DCG 标准为 110 Bq/L,空气为 14.8 Bq/m³[1,2]。对空气环境的辐射剂量还常用 DAG 安全标准(derived concentration guideline),即在放射性工作环境工作一年(2000 工作时)累积剂量为 50 mSv,因此空气环境辐射剂量应小于 25 μ Sv/h。但对于发生核泄漏的情况下,一年不是 2000 工作时,而是应考虑 365 d \times 24 h 在那里生活,因此空气环境辐射剂量应小于 5.7 μ Sv/h。

然而上述安全标准体系只是考虑到放射性对人体的直接危害,在低于 DCG 或 DAG 安全标准时,对不同体质的人群仍然存在着增加如癌症或其他疾病发病率的潜在危机。因此国际上还建立了一个环保标准体系。环保标准建立要考虑不同地区的自然环境背景,对产生癌症等疾病的潜在危机的医学评估,国情与政策等三方面因素。如饮用水的环保标准,WHO 和我国规定为总 α 射线 0.5 Bq/L;总 β 射线 1 Bq/L。WHO(2004)和许多发达国家还规定了个别放射性核素环保标准。以 ¹³¹I 为例,WHO 为 5 Bq/L,美国为 1.5 Bq/L,加拿大为 6 Bq/L。在没有具体规定时,常采用 DCG 标准 \times 0.04%作为环保标准,如日本饮用水按环保标准计算应是 12 Bq/L,

同理大气环境环保标准应为 0.23 μ Sv/h。我国各地区大气环境辐射剂量均小于此值。

3 福岛第一核电站核泄漏对环境影响的定量评估

福岛第一核电站核泄漏定为最高级别 7 级(¹³¹I 泄漏量达到 10^{16} Bq),约含重量仅为 2.18 g。核泄漏放射性最强的核素是 ¹³¹I,极微量的 I 与水蒸汽中的少量 K、Na 结合,极容易溶于水,通过降雨和降尘污染地表水,同时也减少了大气中 ¹³¹I 的浓度。根据日本文部省和各地环保机构网上每日发布的放射性环境监测资料综合整理,对福岛第一核电站核泄漏对环境影响作出以下评价分析,相关图表也是根据这些资料作出。

3 月 20 日以前,日本离福岛核电站 100 km 以外的地方几乎没有 ¹³¹I 的异常。3 月 20~23 日的降雨使东京金町至日立方向地表水和饮用水 ¹³¹I 急剧增加和波动(200~300 Bq/kg);而东京-横滨地区 ¹³¹I 有少量增加(9~30 Bq/kg)。25 日后由于稀释和衰变各地水中 ¹³¹I 出现平稳下降(东京以东)或扩散平衡上升(东京以西)。因此 25 日将出现 ¹³¹I 分布影响最大的趋势面。25 日水中 ¹³¹I 量在日立-茨城-金町-东京新宿-横滨小雀一线分布具有好的线性相关性。根据这一相关性回归计算可确定西南向的最大影响范围为 369 km(图 1)。在福岛核泄漏区的西北方向上,新潟-长岗一带 20~23 日水中 ¹³¹I 略有上升,但 26 日以后就下降到检出限水平,距福岛核泄漏区 136 km 的阿贺町 ¹³¹I 在 21 日高达 48 Bq/kg,其后出现平稳下降。根据阿贺町-新潟-长岗的数据,得到西北向的最大影响范围为 197 km(图 1)。中国东南沿海距核泄漏中心(西南向)2000 km 以上,东北地区在西北向相距 1000 km 以上,均在影响范围距离的 5 倍以上。因此福岛第一核电站核泄漏对中国领域没有任何影响。

东京新宿地区自来水 ¹³¹I 在 3 月 18 日为 1.47 Bq/L,19~20 日为 2.85~2.93 Bq/L,已检测出放射性物质;21 日达到 5.25 Bq/L,已超 WHO 环保标准;22 日升至 18.7 Bq/L,超标了 3 倍。从大范围数据分析看放射性污染出现最大值、影响范围最大应在 3 月 25 日左右出现,其后会下降。3 月 27 日后出现了快速下降,29 日后降至 WHO 标准 5 Bq/L 以下。位于福岛核电站西北 136 km 的阿贺町 21 日水中 ¹³¹I 量就出现下降,29 日也已降到日本环保标准以下。福岛市自来水从 3 月 18 日高至大于 100 Bq/L,其后也出现快速下降,4 月 9 日后降至

WHO 标准以下(图 2)。同时这次降雨,在核泄漏区 100 km 以外地方并没有观察到水中¹³⁷Cs 超过环保标准的数据。东京地区水中¹³⁷Cs 量最高值不到 1.5 Bq/L。

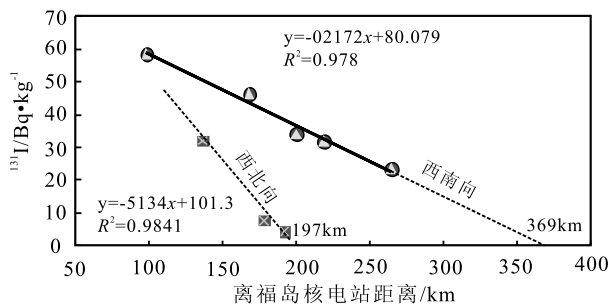


图 1 3 月 25 日在西南向和西北向相距福岛第一核电站核不同距离自来水含¹³¹I 放射性

与距离的相关图解与线性回归处理
Fig. 1 A correlation diagram with regression lines between iodine ¹³¹I radioactivity in tap water and distance far from the first nuclear power plant Fukushima in March 25, 2011

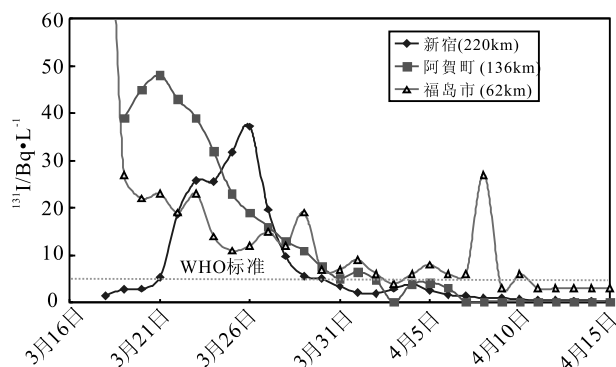


图 2 三个观测点自来水含¹³¹I 放射性随时间的变化

Fig. 2 ¹³¹I radioactivity in tap water varies with the date at three observation points(Tokyo Shinjuku, O parking and Fukushima City) with different distances from the first nuclear power plant Fukushima

东京地区大气环境放射性剂量当量率虽在 3 月 21 日出现急剧上升,但最高值(0.146 μ Sv/h)仍然低于拉萨等高原地区的自然背景值,也只有 7 天时间超过广州地区。4 月 25 日后已降到 0.07 μ Sv/h 以下。因此东京地区是安全的(图 3)。

3 月底至 4 月中旬,以 WHO 环保标准衡量核泄漏影响范围已不断趋于缩小。尽管福岛第一核电站核泄漏级别被提升至最高级别 7 级,在离福岛第一核电站西北方向 40 km 的饭馆村土壤中检测到¹³⁷Cs 达到 163000 Bq/kg,但监测数据表明 4 月下旬核泄漏影响范围趋于相对稳定。

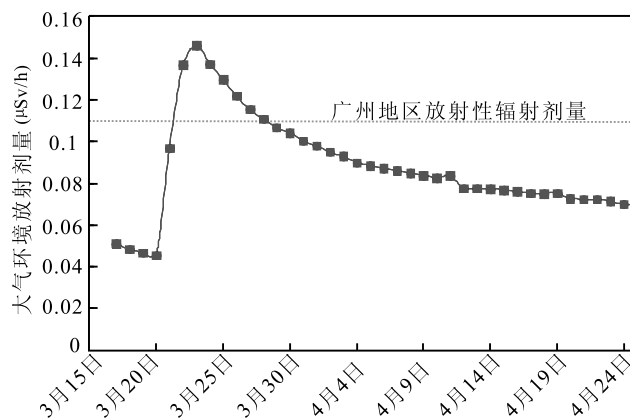


图 3 东京地区大气环境放射性剂量随时间的变化

Fig. 3 Air radiation doses in Tokyo area

DCG 标准(饮用水与食品)和 DAG 标准(大气环境,5.7 μ Sv/h)衡量,超标范围被限定在离福岛第一核电站西北方向长 45 km 左右,宽小于 15 km 的狭长范围内,面积达 600 km^2 左右(图 4)。此范围对环境的严重影响将会持续到 10 年以上。以 WHO 环保标准衡量(饮用水¹³¹I 和¹³⁷Cs 小于 5 Bq/L;大气环境放射性辐射剂量当量率小于 5.7 μ Sv/h \times 0.04% = 0.23 μ Sv/h,也相当于地表自然环境背景值的上限),不达标的范围在 10000 km^2 左右(图 5)。离福岛第一核电站 60~80 km 的福岛市、群山市、白河市一线虽大气环境放射性辐射剂量在 0.6~1.6 μ Sv/h 左右(图 6),但饮用水¹³¹I 和¹³⁷Cs 已降至 WHO 环保标准以下(图 2)。因此这一带在数月后也会达到 WHO 环保标准要求,以 WHO 环保标准衡量不达标的范围将会缩小到 5000 km^2 以内。与切尔诺贝利泄漏影响范围(6 万 km^2)相比,第一核电站核泄漏影响范围要小得多。从切尔诺贝利到福岛核泄漏事件,是人类和平利用核能的又一次经验和教训,应当说也是一次不小的进步。

4 应重视对核电站周边环境的监测

加强对核电站周边环境的日常监测,并重视核电站周边放射性环境微小变化,是保障核安全的重要环节之一。福岛第一核电站核泄漏虽主要与大地震及引发海啸的自然因素有关,但东电没有重视周边放射性环境微小变化和及时采取安全措施是难于逃避责任的。东电、日本原子能协会、渔业协会、东京大学等在 2005 年以来曾对日本沿海的海藻进行了¹³¹I 监测,发现仙台海域(介于福岛与宫城核电站之间)的湿海藻¹³¹I 最高达 0.47 Bq/kg,其它核电站海域达 0.18~0.37 Bq/kg,明显高出北海道等无核

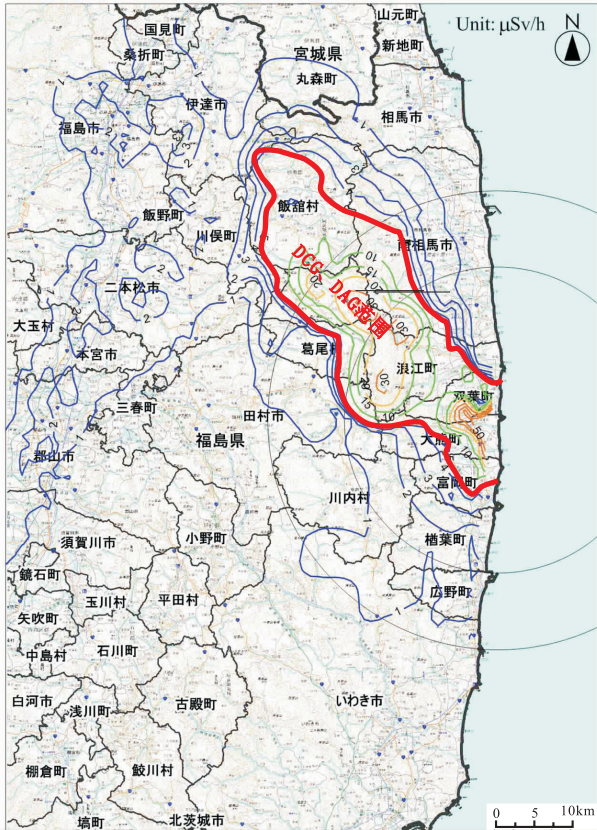


图 4 福岛地区受核泄漏影响超 DOG、DAG 标准的严重污染区

Fig. 4 The area with radiation dose higher than DOC and DAC standards after the nuclear leakage

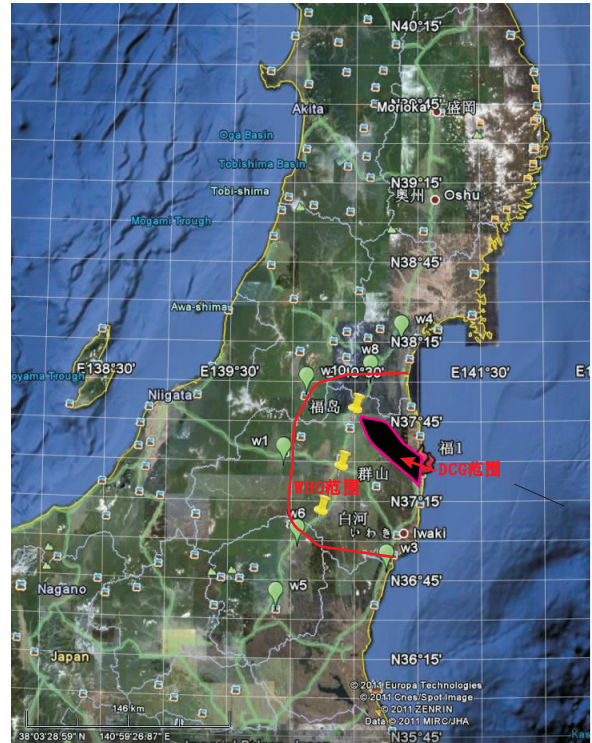


图 5 福岛地区受核泄漏影响超 WHO 环保标准的污染区

Fig. 5 The pollution area with radiation dose higher than WHO environmental protection standards after nuclear leakage

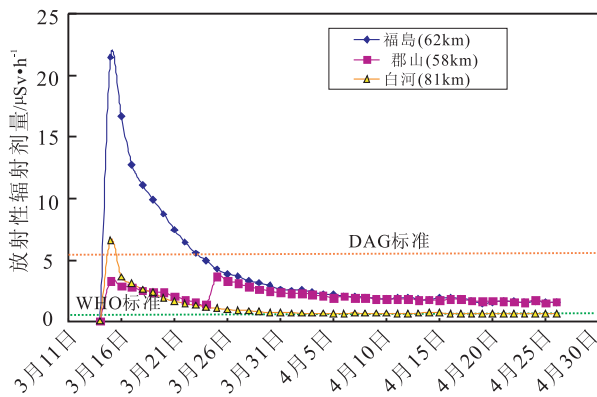


图 6 三个市大气环境放射性剂量随时间的变化
Fig. 6 Radiation doses vary with date in three cities of the different distances from the first nuclear power plant Fukushima

电站海域的湿海藻 ($< 0.036 \text{ Bq/kg}$, 小于检出限) 5~13 倍。相当于海水浓度高达 $1.2 \sim 1.5 \text{ Bq/m}^3$, 淡水浓度大于 7.8 Bq/m^3 。但他们没有认为这一异常与核电站微泄漏有关, 而是认为来自医药用 ^{131}I [3]。相反法国在塞纳河河口地区检测河水与海水的 ^{131}I 量(河流水为 $1.2 \sim 11.9 \text{ Bq/m}^3$, 海水为 $0.4 \sim 1.3 \text{ Bq/m}^3$)后, 认为是与核电站有关的[4]。因此

法国在考虑核安全方面比日本更为重视。为了保障监测的客观性, 建立独立于核电和地方行政管理系统的监测机构是十分必要的。同时应在 WHO 对放射性环保标准要求的基础上, 建立和完善不同国家和地区放射性环保标准体系。

5 从大亚湾地区水库水质评价核电站的安全性

大亚湾地区已建成大亚湾核电站, 并正在建设岭澳核电站。该区主要地层单元为泥盆纪石英砂岩(位于东北部, 占大部分地段)和中生代火山岩(位于西南角), 两个地层单元之间有火山杂岩产出(包括安山玢岩、石英闪长岩、石英岩等)。两个用于核电站备用冷却水系统的水库; 岭澳水库(相距核电站 2.5 km)水补给区均为石英砂岩; 大亚湾水库(相距核电站 1.8 km)水补给区为石英砂岩+火山杂岩[5]。

两个水库水以泥盆系石英砂岩为补给区, 因此重金属背景含量要比平均自然背景低得多[6], 极微量的污染也能被检测出来。我们分析了两个水库水和一处河道水的放射性和重金属元素含量从表 1 可知, 这三个水体均具有明显的 U、Ce 正异常。大坑

(相距核电站 1 km)、大亚湾与北澳水库的标准化 $[U/La]_N$ 分别达到 201、135 和 66.7, 大大高于地壳正常岩石与自然水体 (≤ 5); 如浙江地区同类石补给区中的水体 $[U/La]_N < 2.57$, 中国南方泥盆系石英砂岩平均值为 2.86 (地壳平均值为 1.14)。标准化 $[Ce/La]_N$ 大亚湾与岭澳水库分别达到 2.35 和 1.91, 明显高于地壳正常岩石 (≤ 1); 如浙江地区同类岩石中的水体为 0.233, 中国南方泥盆系石英砂岩平均值为 0.74 (相近于地壳平均值 0.77)。Ce、La、U 的地球化学性质很接近, 自然过程不可能产

表 1 大亚湾核电站周边水体元素含量测定及其与相同地质环境水体比较

Table 1 The concentration data of metal elements in water bodies around Dayawang nuclear power station $\mu\text{g/L}$

	浙江古 生界砂 岩区水 库	浙江泥 盆系石 英砂岩 区水库	浙江泥 盆系石 英砂岩 区泉水	大坑 水系 (1 km)	大亚湾 水库 (1.8 km)	岭澳 水库 (2.5 km)
B	11.64	23.86	21.16		5.917	6.205
Na	1085	1894	1754	306.3	2424	1946
Mg	1045	2147	2175	356.9	353.3	465.4
Al	769.2	15.77	396.3	16.09	13.76	2.104
K	439.5	343.2	233.1	850.6	643.3	364.6
Ca	503.5	3638.8	3961.3	466.2	124.4	200.9
Sc	0.96	1.767	1.737	2.435	1.846	1.15
V	0.041	0.183	0.185	0.179	0.155	0.114
Cr	0.677	0.951	0.654	0.954	0.583	0.562
Fe	74.64	45.65	41.26	17.95	18.5	12.77
Mn	292.0	90.31	172.9	0.513	0.431	0.209
Co	7.191	0.215	5.688	0.008	0.007	0.007
Ni	4.823	3.737	7.907	0.074	0.505	0.422
Cu	0.677	0.132	0.259	0.183	0.156	0.165
Zn	59.47	4.998	22.74	0.702	0.461	0.344
Ga	1.621	1.584	1.796	0.106	0.069	0.085
As	0.218	0.243	0.198	0.039	0.225	0.316
Se	0.797	0.614	0.719	0.355	0.74	0.864
Rb	1.226	1.283	0.73	6.023	4.733	2.499
Sr	22.89	29.46	33.52	5.508	5.807	12.18
Y	1.897	0.059	0.891	0.05	0.02	0.003
Cd	0.702	0.126	0.539	0.004	0.001	0.002
Cs	0.078	0.031	0.046	0.113	0.068	0.089
Ba	59.47	71.76	87.71	3.328	2.352	3.211
La	1.293	0.051	1.41	0.014	0.008	0.001
Ce	1.474	0.031	1.32	0.051	0.049	0.005
Hg	0.5	0.414	0.473	0.061	0.69	0.276
Tl	0.014	0.016	0.018	0.027	0.017	0.01
Pb	1.216	0.008	0.289	0.029	0.033	0.006
Bi	0.009	0.005	0.002	0.001	0.01	0.006
Th	0.008	0.002	0.005	0.034	0.024	0.002
U	0.025	0.004	0.016	0.086	0.033	0.002
U*	—	—	—	0.083	0.032	0.0019
$[Ce/La]_N$	0.437	0.233	0.359	1.38	2.35	1.92
$[U/La]_N$	0.633	2.57	0.371	201	135	65.4

注: U* 为污染 U 输入量

生如此高的异常值, 因此核燃料与废料明显有扩散的迹象。Ce 是裂变产物高峰值, 而 U 是核燃料。以泥盆系石英砂岩平均值为基准, 大坑、大亚湾与岭澳水体可能分别存在 0.083、0.032 与 0.0019 $\mu\text{g/L}$ 的 U 污染。从极微的 U 污染随距离下降率来计算, 影响范围小于 3.2 km。天然海水的平均 U 含量在 3 $\mu\text{g/L}$ 。花岗岩区水体 U 含量 $> 10 \mu\text{g/L}$ [7]。贵州喀斯特地区饮用水 U 含量在 0.4~0.5 $\mu\text{g/L}$ 左右。因此如果是在花岗岩区, 这一水平的污染则远被自然背景值涨落所覆盖, 也难于被检测出, 并且远低于 WHO 最新公布的饮用水 U 含量健康安全标准为 2 $\mu\text{g/L}$ 。大亚湾核电站已运行 14 年, 按目前污染递增速率看, 800 年内不会对环境安全产生影响, 具有好的安全保障体系核能是清洁、环保的能源。

参考文献 (References):

- [1] World Health Organization. Derived intervention levels for radionuclides in food; Guidelines for application after widespread radioactive contamination resulting from a major radiation accident[R]. Geneva, 1988.
- [2] World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality[R]. Geneva, 2004.
- [3] Morita T, Niwa K, Fujimoto K, Kasai H, Yamada H, Nishiuchi K, Sakamoto T, Godo W, Taino S, Hayashi Y, Takeno K, Nishigaki T, Fujiwara K, Aratake H, Kamonoshita S, Hashimoto H, Kobayashi T, Otosaka S, Imanaka T. Detection and activity of iodine-131 in brown algae collected in the Japanese coastal areas[J]. Sci. Total Environ., 2010, 408: 3443-3447.
- [4] Connan O, Tessier E, Maro D, Amouroux D, Hebert D, Rozet M, Voiseux C, Solier L. Water to atmosphere fluxes of ^{131}I in relation with alkyl-iodide compounds from the Seine Estuary (France)[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99: 1102-1110.
- [5] 朱炳泉, 涂湘林, 崔学军, 郭丽芳, 李中兰. 泥盆系石英砂岩补给区水资源地球化学及其人文与环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(增刊): 508. Zhu Bingquan, Tu Xianglin, Cui Xuejun, Guo Lifang, Li Zhonglan. Water resource geochemistry from recharge areas of the Devonian quartz sand stones and their significances in humanity and environment[J]. Bull. Miner. Petrol. Geochem., 2009, 28(suppl.): 508. (in Chinese)
- [6] Yan M, Chi Q. The chemical compositions of the continental crust and rocks in the eastern part of China[J]. Beijing: Science Press, 2005: 171.
- [7] Babu M N S, Somashekar R K, Kumar S A, Shivanna K, Krishnamurthy V, Eappen K P. Concentration of uranium levels in groundwater[J]. Int. J. Environ. Sci. Tech., 2008, 5(2): 263-266.