

地下核武器试验的放射性残留物:穆鲁罗瓦评估

放射性核素通过地圈的迁移

ROBERT FRY, DES LEVINS 和 ERNST WARNECKE

1974年法国政府停止大气层核试验以后,于1975至1996年期间,又在穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁的地下进行了147次地下核试验,其中,10次是无核当量或低当量的安全试验(用于模拟各种事故工况)。

在穆鲁罗瓦和方阿陶法的地下,没有爆炸过很高当量的装置。据法国政府报道,没有一次核试验当量超过15万吨,所有地下核试验释放的总能量为3.2兆吨。(见第32页表。)。全世界已经进行过1800多次地下核试验,总爆炸当量为90兆吨,是报道的法国地下核试验当量的30倍。

大气层核试验中,大部分放射性物质扩散到大气层的上部,并最后以落下灰沉积于全球。与此相反,地下核试验释放出的残留放射性物质,虽然存在进入局部环境的可能,但是大部分被限制在主岩中。在评估地下核试验的放射学后果时,需要估

计在未来的10000年或更长时间内,放射性核素从地圈向可接近环境的释放。

在对穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁进行的放射学状况整个研究中,估计放射性核素从地圈的释放率是最复杂和最困难的任务之一。虽然环礁的地质环境在许多方面具有特殊性,但是本研究中使用的方法学还是可用来评估其他地下试验场的放射性核素迁移。

环礁地质

从空中看,这两个环礁似乎是仅高出海面几米的薄薄的珊瑚圈;实际上,它们都是从海底耸起的高约4000米的巨大火山海山,其上覆盖着几百米厚的碳酸盐岩石(由珊瑚堆积而成)。

导致形成环礁的火山喷发发生于约1100万年前。如陆地火山一样,地壳中的热点使这里的火山规模在一段时间内不断扩大,达到海洋

表面并继续升高。当火山活动停止时,结构物由于自身的巨大重量和下面的太平洋板块的均衡条件而慢慢下沉。在冰川期,海面下降多达120米,珊瑚虫死亡,裸露的碳酸盐受到风化和雨水的侵蚀。非常可能的是,碳酸盐岩石中的喀斯特区(互连接的高渗透率区)产生于这些冰川期。

今天,火山岩上覆盖着厚达450米的碳酸盐岩石,其最低部分由于与周围海水的成岩交换过程已蚀变为白云岩。

环礁的火山岩基底含有纵横交错的大量规模不等的

Fry先生是IAEA有关穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁放射学状况研究技术项目负责人。Levins先生来自澳大利亚核科学技术组织,在本项研究中担任任务B组组长。Warnecke先生是IAEA辐射和废物安全处的职员,在本项研究中参加第3工作组的工作。

线性裂缝。引发的途径源于各种机理,例如,大规模的岩浆侵入、冷却收缩过程和初始火山岩体冷却后发生的岩浆注入产生的更为广泛的裂隙(岩墙和岩床)。这些裂隙是水(和放射性核素)迁移的主要通道。

玄武岩中的初始大型通道表面,由于水流的作用,已发生化学蚀变,长此以往可能已部分地被诸如粘土和方解石等蚀变产物所封闭。这些蚀变产物一般具有大的表面积和对某些放射性核素(特别是铀系元素)的良好滞留性能,所以在阻止放射性核素通过地圈迁移方面起重要作用。

核试验和地点

地下核爆炸使爆炸点近旁的环礁火山岩熔融和汽化,从而形成一个大致球形的洞穴,并在该洞穴的底部形成熔融火山岩透镜体。熔融岩石冷却形成类似玻璃的熔岩。

核爆炸汽化的岩石重量约为 80 吨每千吨当量,所形成的熔岩量,取决于岩石的性质和它的水分含量,在 500—1000 吨每千吨当量之间。

法国主管部门并没有向研究组提供 147 次核试验每次的准确位置,不过他们提

供了每个环礁平面图,上面标有试验区、试验次数、最大试验当量和每个试验区的总试验当量。

所有核试验均在火山岩中进行,深度介于 500—1000 米之间。10 次安全试验均在穆鲁罗瓦的一个试验区进行,其中 7 次在碳酸盐岩层中,深度在 280 米以下。在碳酸盐岩石中进行的 3 次安全试验核当量很小。

在保留核爆炸产生的放射性核素方面,不是所有的试验都一样有效。为了计算方便,将分散源项组合起来分为 7 类:

1 类 总数为 121 次的正常试验,每次试验竖井的顶上有足够厚的基本上未遭破坏的火山岩,达到了良好的封闭。

2 类 4 次试验,虽然表面上盖层足够厚,但火山岩中盖层的厚度不够。

3 类 12 次试验,洞穴-竖井达到火山岩的顶部。

4 类 3 次安全试验,有(很小的)裂变当量,爆炸在碳酸盐岩石中进行,深度至少 280 米。

5 类 4 次安全试验,爆炸在碳酸盐岩石中进行,深度至少 280 米,无裂变当量。

6 类 3 次安全试验,在火山岩中进行的,无裂变当量。

7 类 2 个废物竖井,钻

至火山岩深部,每口井中各处置含了 3.7 千克铀的废物。

实际上,已发现放射性物质向生物圈释放大部分可归因于上述 2、3、4 和 5 这 4 类试验。

放射性核素存量

估计放射性核素迁移率的第一步,是确定地下放射性核素存量。法国科学家提供了每个试验区的当量上限。已利用从库克群岛上的拉罗汤加地震站得到的每次试验的相应地震数据对这些当量数据分别进行了核对。法国提供的数据和 IAEA 的估计值非常一致,这有力地说明,法国提供的上限实际上非常接近实际值。

通过对铀-239、铀-235 和铀-238 释放的裂变能和氢同位素释放的聚变能所占份额作出一些合理假设,根据爆炸当量估算了放射性核素存量。这些估算值也与法国主管部门提供的资料极为一致。(见第 32 页表。)

环礁的水文地质

环礁的火山岩区和碳酸盐区都是水饱和的。由于地热通量从下部对系统进行加热,所以环礁中的地下水循环基本上受浮力控制。冷且

密度较大的海水从环礁外侧渗入深处,流向中央较暖区,并逐步变热,变轻,向流入环礁湖。碳酸盐岩层内的高渗透性使冷水几乎水平地大量流向中心区。

核爆炸后,由于渗透性增加以及水和岩石变热,洞穴-竖井附近的水文学较试验前的天然条件有所改变。这引起地下水更多地从洞穴-竖井向上流入可接近环境。

一旦热平衡建立起来,洞穴-竖井中的温度较周围高 25—50℃。这一温度的升高基本上与试验的当量无关。通过对流和传导的联合效应,洞穴-竖井内的温度在几百年间将慢慢降低。

关于穆鲁罗瓦的地下水流动,在每个试验点的附近和渗透性较大的碳酸盐岩层中,流速是最大的。碳酸盐岩石中的水流还受潮水涨落的影响。潮水的涨落可以有效地混合碳酸盐区(特别是喀斯特区)中的水,从而影响放射性核素释放入环礁湖和直接释放到海水的速率。

放射性核素的迁移

放射性核素可以通过地圈迁移之前,它们必须以水相存在。由于深处压力高,最初以气相存在的挥发性放射性核素或气体放射性核素(诸如氙,惰性气体和碘)将

穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁的部分长寿命放射性核素存量

放射性核素	研究数据(TBq)		
	穆鲁罗瓦	方阿陶法	总计
氙	232 000	48 000	280 000
碳-14	25	2.6	2.8
氯-36	1.3	0.4	17
钙-41	1.0	0.3	1.3
镍-59	2.9	0.9	3.8
镍-63	340	110	450
硒-79	0.008	0.003	0.011
氩-85	670	380	1000
铯-90	7300	3500	10 800
铊-93	0.23	0.09	0.32
铊-99	1.9	0.6	2.5
钫-107	0.18	0.03	0.21
碘-129	0.0047	0.0014	0.0061
铯-135	0.20	0.07	0.27
铯-137	10 700	4100	14 800
铊-152	230	100	330
铊-237	0.22	0.03	0.25
钚-238	185	15	200
钚-239	1030	70	1100
钚-240	280	20	300
钚-241	6200	620	6800
镅-241	350	30	380

地下核试验当量估计值的比较

地点	试验次数	总能量(千吨 TNT 当量)	
		研究估计值	法国报道值
穆鲁罗瓦边缘	83	970	<1060
穆鲁罗瓦环礁湖	54	1443	<1450
方阿陶法边缘	2	39	<20
方阿陶法环礁湖	8	731	<75
总计	147	3183	<3280

溶解于水。

然而,大部分放射性核素或被熔岩截留或吸附于碎石上。实验证据表明,放射性核素可通过不同的机理从熔岩和碎石中释放出来。从熔岩中浸出是一个缓慢的、速率有限的过程,而从碎石中释放被认为是地下水与吸附在固体表面的放射性核素

之间的一个受平衡控制的过程。

在本项研究中,利用双重多孔结构模型估计了放射性核素从试验洞穴向碳酸盐岩层的迁移速率。对 32 种放射性核素进行了计算,并且特别集中注意力于 4 个关键放射性核素——钚-239、铯-137、铯-90 和氙。

作为分析的一部分,开展了独立的地下水取样计划,以此核实法国科学家所做的范围更广的测量结果,并将本研究工作组的预测值与测定的放射性核素浓度作比较。从两次试验的洞穴-竖井内和碳酸盐岩层内的其他9个地点采取了水样。

法国数据和本研究结果之间非常一致。分析发现即使在洞穴-“竖井”内,钚浓度或接近探测限值或探测不出来。得出的结论是,虽然本研究保守地坚持最初的假设,即5%的钚沉积在碎石上,但是钚有效地保留在核爆炸形成的玻璃状熔岩中。

根据地下取样结果,估计了碳酸盐岩层特定区域的放射性核素存量。碳酸盐岩层中的放射性核素可以通过下述途径释放到生物圈,即地下水向上流入环礁湖或沿喀斯特层流动并在约300米深处进入海洋。

虽然碳酸盐岩层的渗透性很大,但它们也是大型的蓄水体。水在碳酸盐岩层中的平均停留时间较诸如钚、锶-90和铯-137等一些放射性核素的半衰期长得多。

为了描述放射性核素向生物圈的释放,评价了两种模型,即单一多孔结构模型和混合模型。

就混合模型来说,放射性核素向环礁湖或海洋的释

放率与碳酸盐岩层中的存量成正比。对于向环礁湖迁移的情况,比例常数可根据碳酸盐岩层中钚的现有存量估计值和环礁湖中钚增加的测定值加以计算。这相当于存量释放率每年约为0.12%。对于向海洋释放的情况,根据钚在碳酸盐中横向扩散的有限数据,估计释放率每年约为5%。

通过利用混合模型分析放射性核素从碳酸盐的释放情况和利用双重多孔结构模型分析通过火山岩层的迁移,估算了碳酸盐中的存量和向生物圈的释放率,对于钚、锶-90和铯-137的估算期为几百年,对于钚-239,估算期超过100 000年。

从这些预测值中可得出的最重要结论是,钚、锶-90和铯-137将来向环礁湖的释放率不大可能超过现在的释放率。预测的向海洋深处的最大释放率已经发生。

对于钚-239,地下源的峰释放率预计在未来5000—10000年间发生,但预期低于因含钚沉积物的浸出而向环礁湖释放的现有速率。

用上述模型预测的向环礁湖和海洋的释放率为模拟放射性核素的海洋扩散,并最终估算这些放射性核素的照射剂量提供了输入。(见第34和38页的有关文章。)

结论

下面是这次评价放射性核素从穆鲁罗瓦和方阿陶法环礁地下源迁移情况的主要结论:

- 本项研究对地下核试验的能量释放和放射性核素存量的独立估计值与法国报道的数值非常一致。

- 核试验引起其周围岩石的可渗透性增大。

- 在火山岩和碳酸盐岩中,存在地下水的自然向上流动,在紧邻核试验的区域,流量最大。

- 对两个试验洞穴-竖井中的地下水取样和分析表明,钚的浓度很低。大部分钚(99%以上)有效地保留在核爆炸后形成的固化玻璃状熔岩内。

- 碳酸盐区存在潮汐效应,它能使一些放射性核素直接释放到海洋深处。

- 短期内释放的放射性核素大部分来自少数几次试验,这几次试验的情况是洞穴-竖井之上无火山岩覆盖或覆盖遭到破坏。

- 只有非常少的一部分放射性核素存量从地圈进入可接近的环境。就放射性活度来说钚的释放率最高,但是没有放射学意义。其他放射性核素的释放率一般在环境中是不易探测出来,因为它们已被环礁湖和海洋大大稀释。 □

