

# 放射学评估：北极海洋中的废物处置

IAEA 支助的关于倾倒在北极海洋中的高放废物的放射学

影响的一个研究项目的成果总结

约 5 年前即 1992 年，国际注意力就被吸引到关于三十多年来前苏联一直在将放射性废物倾入北极海洋浅水域的一些新闻报道上，这些新闻曾引起广泛的担心，尤其是在有北极海岸线的国家中。

在全球一级，IAEA 所做的响应是建议开展一项国际研究，以评估这种倾倒的健康和环境影响。这项建议得到了《防止倾倒废物和其他物质污染海洋公约》（《1972 年伦敦公约》）缔约国第 15 次协商会议的支持。这次会议由设在伦敦的国际海事组织（IMO）主办，会议要求此项研究要考虑可能的补救措施，如取回此类废物作陆地贮存。

此后不久即 1993 年，IAEA 发起了国际北极海洋评估项目（IASAP）。\* 其主要目标是，评估与倾倒在喀拉海和巴伦支海的放射性废物有关的对人体健康和环境的风险；探讨可能采取的与已倾倒废物有关的补救措施，并就其是否必要和合理提出建议。这项研究涉及 14 个国家的 50 多位专家，并在国

际咨询组指导下进行，已于 1996 年下半年结束。该项目部分经费由美国提供的预算外基金支持，并与挪威—俄罗斯调查北部地区放射性污染专家组的工作相协调。本文根据此项研究最终报告的正文摘要，概述 IASAP 的成果和结论。

## 这项研究探讨的内容

通过一个协调研究计划、一些技术合同、磋商和其他机制，这项研究汇集了不同学科的大量专家。所采纳的方案具体侧重于：

- 调查北极水域目前的放射学状况，以评估倾倒的废物有所释放的证据；
- 以含大部分放射性核素存量的固体高放废物物体为重点，预测已倾倒废物的将来潜在释放；
- 模拟已释放核素的环境迁移，并且评估有关的对人和生物群的放射学影响；

本文基于 IASAP 项目咨询组编写的 IASAP 研究报告的正文摘要。IAEA 辐射和废物安全处废物安全科的 K. -L. Sjöblom 女士曾任 IASAP 项目官员。

\* 《国际原子能机构通报》1995 年第 37 卷第 2 期 K. -L. Sjöblom 和 G. S. Linsley 撰写的文章中介绍了 IASAP 研究的背景和早期进展情况。

● 探讨应用于某些高放废物物体的可能补救措施的可行性、费用和益处。

根据载入“俄罗斯总统白皮书”(《与在毗邻俄罗斯联邦领土的海洋中处置放射性废物有关的事实和问题》，1993年)的资料，倾倒在北极海洋中的放射性废物总量据估计在倾倒地时约为 90 PBq ( $90 \times 10^{15}$  Bq)。已倾倒地物项包括 6 个装有乏燃料的核潜艇反应堆；一个装有乏燃料的破冰船反应堆的屏蔽组件；10 个未装燃料的核反应堆；以及固态和液态低放废物。在所估计的总存量中，89 PBq 含在由装有或未装乏燃料的反应堆构成的高放废物中。包含上述反应堆在内的固体废物倾倒在喀拉海中，主要倾倒在地岛的几个浅湾中，那里的倾倒地水深 12—150 米，新地岛海沟中倾倒地水深达 380 米。液态低放废物被释入巴伦支海公海和喀拉海公海中。

有关这些废物的性质的补充资料，是通过与俄罗斯几个研究所签订的技术合同获得的。然而，在可供使用的资料中有某些重要的脱漏。例如，俄罗斯联邦文件中提到的已倾倒地高放废物，有些未被定位或毫不含糊地确认。而且一些资料，例如与已倾倒地潜艇反应堆建造及其燃料类型有关的资料仍是保密的。因此，IASAP 研究的结论，仅在其完成时公开可获得的资料的范围内是正确的。

IASAP 研究的结果将发表在“北极海洋放射性废物倾倒地影响评估——国际北极海洋评估项目报告 (IASAP)”中。此外，还将分别发表载有 3 个不同工作组的研究结果的报告：(i) 北极海洋的环境和放射学描述；(ii) 源项评价；及 (iii) 模拟和剂量评估。此项研究的正文摘要已按第 15 次协商会议上的商定结果，提供给《1972 年伦敦公约》的缔约方。

### 目前的放射学状况

通过分析在对喀拉海的一系列挪威—

俄罗斯联合巡航和其他国际考察期间获得的资料，研究了北极海中目前的放射学状况。此外，海洋学和放射性地球化学测量(其中许多与 IASAP 研究有关)也提供了有关北极海中物理、化学、放射化学和生物学状况和过程的新资料。\* 喀拉海公海与其他一些水域相比，相对来说没有受到污染，其人工放射性核素含量主要来自以下几个方面：核武器试验全球落下灰的直接大气沉积和汇流；西欧后处理厂的排放物，和切尔诺贝利事故落下灰。

对环境材料所作的测量表明，喀拉海和巴伦支海中人工放射性核素造成的年个人剂量仅在 1—20 微希沃特范围内。在倾倒地高放和低放废物的其中两个浅湾中，探测出距离低放废物罐数米之内的沉积物中放射性核素的水平升高，表明这些罐已发生泄漏。不过，这些泄漏并没有导致这两个浅湾出口部分或喀拉海公海中放射性核素的可测量到的增加。因此，目前已倾地物的放射学影响可忽略不计。

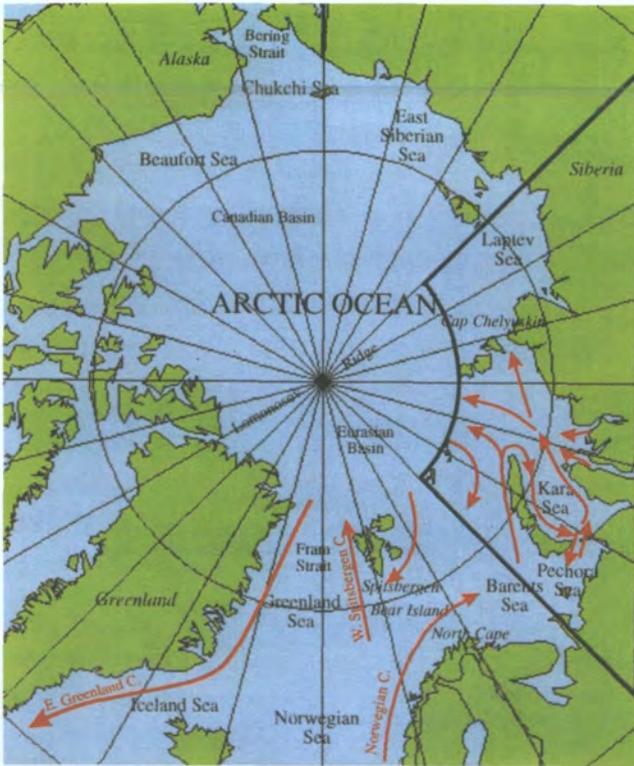
### 将来的放射学状况

对已倾地物的将来可能释放引起的潜在风险的评估，以含大部分放射性废物存量的高放废物物体为重点。使用模拟放射性核素通过环境迁移的数学模型估计这些废物的释放率，和评估其相应的对人和生物群的辐射剂量。

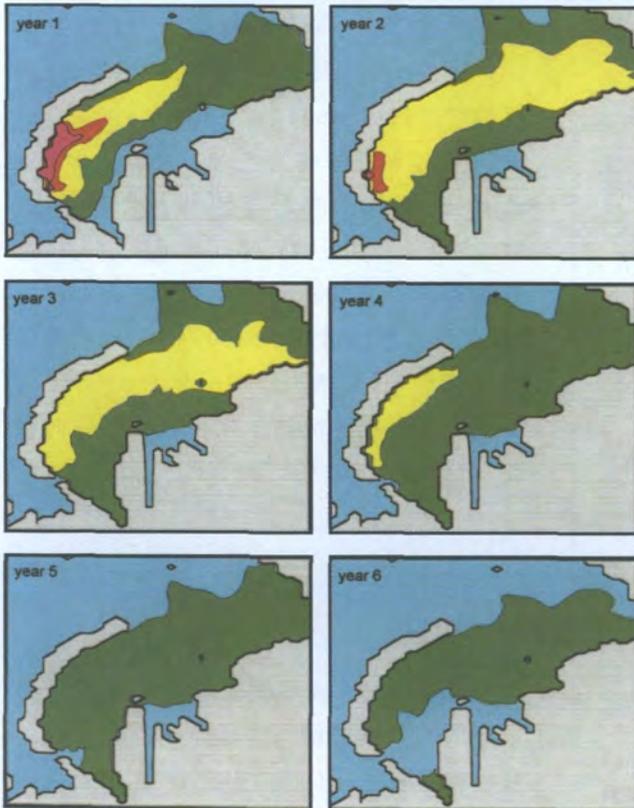
**源存量和释放率。**对倾地的反应堆的特性及其运行历史已作了比较详细的调查。这种调查的目的是提供恰当的释放率情景，以使用作模拟迁移和照射途径的输入项并进而得出人和生物群的照射估计值。根据反应

\* 有关北极环境研究的更详细资料，见《国际原子能机构通报》1995 年第 37 卷第 2 期中 P. Povinec, I. Osvath 和 M. Baxter 的文章。

北冰洋, 喀拉海和巴伦支海



右图示出新地岛东海岸的高放废物倾倒地;左图示出与北极海洋放射学评估有关的主要洋流。(IAEA-MEL)

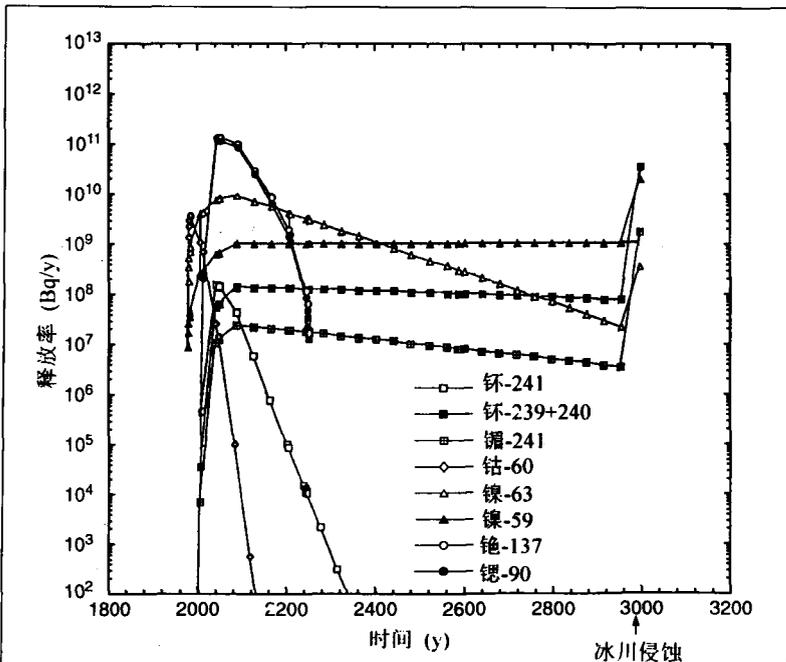


照片:海洋科学家从北极海洋中采取分析用水样。(IAEA-MEL)左图:所有倾倒地瞬时单元释放后第一个6年海水中铯-137浓度预测图。这类预测用于确认潜在受照射人群(Ingo Harms/IAEA-MEL)

堆运行历史和计算出的中子谱得出的此类资料,能提供有关已倾倒反应堆和燃料组件的裂变产物、活化产物和锕系元素存量的估计值。得出的结论是,高放废物物体的总放射性核素存量在倾倒时为 37 PBq。该值与“俄罗斯白皮书”中给出的初始估计值 89 PBq 之间有差别是因为俄罗斯主管部门向 IASAP 提供的此类反应堆实际运行历史的资料更准确。高放倾倒废物的相应存量在 1994 年估计为 4.7 PBq,其中 86% 为裂变产物、12% 为活化产物、2% 为锕系元素。这些类别中的主要放射性核素分别为铯-90、铯-137、镍-63 和钚-241。

放射性核素向环境的释放率将取决于,反应堆结构材料、倾倒前加设的屏障和核燃料本身的完整性。对每件倾倒的高放废物物体,都详细调查了其屏障的结构和组成,找出了弱点,并且在计算释放率中使用了对腐蚀率和屏障寿命的最佳估计值。与船只碰撞或更一般的全球变冷后冰川对这些浅湾的

预测释放率的例子



图示为与应用于倾倒在斯地岛海沟中的单个反应堆的气候变化情景有关的预测释放率的例子。假设在 3000 年前不同放射性核素的释放是由腐蚀引起的,3000 年时假定发生的情况是,由于冰川侵蚀,所有屏障完全被破坏和整个余留存量被释放。(Neil Lynn, 皇家海军学院, 联合王国/Akira Wada, 日本大学, 日本)

侵蚀等外部事件,都可能损坏废物的包容。这将导致放射性核素向环境的更快释放。为了充分体现向环境的释放率的可能范围,考虑了三种释放情景:

- 最佳估计情景——通过屏障、废物罐和燃料本身的渐渐腐蚀产生释放;

- 似乎可能的最坏事件情景——正常的逐渐腐蚀,并于 2050 年在一个倾倒点有两个源(破冰船燃料罐和反应堆舱)受到严重破坏。之后,这些源余留的放射性核素存量加速释放;和

- 气候变化情景——腐蚀持续至 3000 年,之后,由于冰川侵蚀,所有源中余留的放射性核素存量发生瞬时释放。

应当指出,并没有试图给似乎可能的最坏事件和气候变化两种情景描述的事件指定概率,而后果是在此类事件将在指出的年份发生的假设下评估的。

就最佳估计情景而言,所有源的综合释放率将在下个 100 年内峰值达到大约 3000 GBq/a (GBq = 10<sup>9</sup>Bq),在约 300 年时间内次峰值将达到约 2100 GBq/a。在余下的大部分时间里,总释放率将为 2—20 GBq/a。似乎可能的最坏事件情景导致释放“峰值”为 110000 GBq,其后数百年间由于放射性核素从核破冰船燃料罐和反应堆舱中被加速释放,使释放率达到 100—1000 GBq/a。在气候变化情景(假定冰川侵蚀引起的 1000 年时间里所有此类废物的余留存量的瞬时释放)中释出的放射性约为 6600 GBq。

模拟和评估

为评估对人和生物群的辐射剂量,使用了放射性核素环境行为数学模型和计算的释放率。采用了不同的模拟方案,来自若干国家和 IAEA 的专家参与了这一活动。在作为模型开发基础的现有的有关目标区海洋生态学、海洋学和沉积学的资料的综合上,

### 选定人群组最大年个人总剂量

(剂量单位:微希沃特)

情景	海产食品消费者年剂量	军事人员年剂量
	(1组和3组)	(2组)
最佳估计情景	<0.1	700
似乎可能的最坏事件情景	<1	4000
气候变化情景	0.3	3000

注:

1 微希沃特=10<sup>-6</sup> Sv。

为比较起见,海产食品中天然钋-210 对此关键人群组 1 和 3 的年剂量分别为 500 微希沃特和 100 微希沃特。

世界范围的天然本底辐射平均年总剂量为 2400 微希沃特。

倾注了极大的努力。一些为目标区所特有因而对纳入模型有潜在重要性的特别过程被确认。由于需要就极其多样的空间和时间范围提供预测,因此,针对放射性核素在北极海洋内和从北极海洋向外的弥散开发了若干不同的模型。

两个主要的模拟方案被采纳:箱式或盒式模型;以及水动力循环模型。此外,还开发和应用了一个混合式模型(采用箱式结构,但空间刻度分辨细致)。箱式模型通过模拟对流和扩散,提供长时间范围、空间上平均和远场的预测,而水动力模型则提供局部分辨的短时间范围结果。

对量化最差的迁移途径之一——海—冰迁移给予了单独考虑。一项简单的典型计算(或确定范围练习)证明,对此处所考虑的放射性废物源而言,海—冰迁移与放射性核素在水中的迁移相比对个人剂量仅具有小的贡献。

为评估对个人的剂量,考虑了三个人群组。个人剂量的计算是针对涵盖前面确定的三种情景中每一情景的峰值个人剂量率的时间范围进行的。三个人群组的情况如下:

**人群组 1。**这一组人群生活在鄂毕河和叶尼塞河河口以及泰梅尔半岛和亚马尔半

岛,主要以消费当地捕获的喀拉海鱼、海洋哺乳动物、海鸟和鸟蛋为生,每年在海滨的时间为 250 小时。这些习惯也是在毗邻北极海的其他国家中以捕鱼为生的人群的特征。

**人群组 2。**这是一组假想的军事人员,他们沿倾有放射性物质的海湾的海岸巡逻,假定每年巡逻时间为 100 小时。考虑的辐射途径包括外部辐射,以及吸入海浪花和重悬浮沉积物。

**人群组 3。**这是所考虑的一组海产食品消费者。他们代表着居住在科拉半岛,食用捕自巴伦支海的鱼、软体动物和甲壳类动物的俄罗斯北部居民。不考虑消费海草或海洋哺乳动物,也没有考虑外部辐射。

### 选定人群组最大年个人总剂量

在所有三种情景下,每个海产食品消费者关键人群组(1组和3组)中最大年个人剂量都很小,并且远小于天然本底剂量的变化。(见表。)对假想的沿海湾巡逻的军事人员关键人群组(2组)的剂量较高,但仍与天然本底辐射剂量不相上下。

仅就最佳估计释放率情景,估计了集体

## 国际北极海洋评估项目的主要结论

● **监测表明,已确认的倾倒入体的释放量很小并局限于倾倒入点附近。**总的来说,喀拉海和巴伦支海中人工放射性核素的水平低,而且与天然源的辐射剂量相比,其有关的辐射剂量可忽略不计。环境测量表明,喀拉海和巴伦支海中所有人工放射性核素造成的当前的年个人剂量最多为 1—20 微希沃特。主要来源于核武器试验全球落下灰、西欧核燃料后处理厂排放物和切尔诺贝利事故落下灰。

● **倾倒入在喀拉海中的放射性废物对当地典型人群中公众成员的预计的未来剂量非常低,低于 1 微希沃特。**对假设沿已倾倒入废物的海湾的海岸巡逻的军事人员组的预计的未来剂量较高,高达 4000 微希沃特,但仍然与平均天然本底剂量处于同一数量级。

● **对海洋动物群的剂量无足轻重,其数量级低于预计可能对动物群有不利影响的数量级。**而且,这些剂量仅作用于少部分当地动物群。

● **从放射学方面考虑,补救行动是不合理的。**但是,必须保持对海滨居住和利用曾用作倾倒入点的新地岛海湾中海洋陆架资源及娱乐设施的控制。规定这一条件是考虑到与下述问题有关的担忧,即高放废物物体可能偶然的扰动或回取,以及对居住在上述海湾附近海滨的假想个人群组的放射学防护。

## 国际北极海洋评估项目的建议

● 应努力确定所有高放废物物体的位置并作出鉴别。

● 应对进入曾倾倒入废物的新地岛海湾或其周围的海洋和陆地环境以及在那里开展活动施以制度控制。

● 如果将来某个时候,打算终止对这些海湾和周围地区的制度控制,应提前评估可能处于潜在风险中的任何新的个人群组受到的剂量。

● 为了探知已倾倒入的高放废物的状态的任何变化,应考虑制定一个针对倾倒入点的有限的环境监测计划。

人的集体剂量的资料;和(ii)涵盖估计的峰值释放的下一个 1000 年。

由于将来事件、过程和发展预测中的不确定性不断增加,认为把评估扩展到 1000 年以后没有意义。在上述两个时期,估计的集体剂量分别是  $0.01 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$  和  $1 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ 。这些计算结果,使人对这种剂量的时间分布有所了解。

利用适当的全球循环模型,计算了在水、大气和陆地环境中作全球循环的长寿命碳-14 和碘-129 产生的集体剂量。假定倾倒入废物的全部碳-14 存量 2000 年前后释放,并将全球人口的剂量在后 1000 年(即到 3000 年)范围内加以积分,得出集体剂量约为  $8 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ 。相应的碘-129 的值非常低,为  $0.0001 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ 。因此,倾倒入放射性废物中所有放射性核素在下一个 1000 年给全世界人口造成的总集体剂量约为  $10 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ 。相比之下,北极海洋中天然钍-230 对全球人口的年集体剂量,据其他研究报告估计约高出 3 个数量级。将与倾倒入在喀拉海中的废物有关

剂量。世界海洋中放射性核素(碳-14 和碘-129 以外的核素)弥散产生的对全球居民的集体剂量按下述两个时间范围进行计算:  
(i)一直到 2050 年,目的是提供有关对当代

的集体剂量和所估计的倾倒在东北大西洋中的低放废物的集体剂量进行比较也是有益的。后者对全球人口的集体剂量在50年内为1人·Sv,而在1000年内达到3000人·Sv。

对从浮游动物至鲸鱼等的一系列野生生物种群的辐射剂量率,经计算发现是很低的。此评价工作预测出的峰值剂量率约为0.1毫戈瑞每小时。此剂量率被认为不大可能对可能影响健康种群生存的疾病、死亡率、繁殖力、产卵量和突变率产生任何有害的影响。还应指出,当地生态系统中仅有小部分生物种群可能受到此释放的影响。

## 补救方案

**可行性及费用。**针对核破冰船乏燃料罐的5种补救方案,进行了初步工程可行性及费用研究。选择这一源项是因为,它在倾倒入的废物物体中所含的放射性核素存量最大,建造和采用的罐屏障方面的文件最全。

最初选出供评估的5个具体方案如下:

**方案1。**注入材料以减少腐蚀和提供一个增设的释放屏障。

**方案2。**用混凝土或其他适合材料原地覆盖,以密封废物物体。

**方案3。**回取至陆地环境。

**方案4。**处置在新地岛海岸水下洞穴中。

**方案5。**回取并水下运输到海洋深处处置点。

打捞专家对这些方案进一步讨论后,否定了方案1、4、5。方案1被否定是因为乏燃料包中以前曾填充一种特殊聚合物即呋喃甲醛,这可能使注入其他材料很困难。经深入考虑去掉方案4是因为建造一个水下洞穴对于单一的回取源项来说代价过于昂贵,并且必须在较大范围内对此事进行论证。弃掉方案5是因为,首先这是一项涉及在海洋重新倾倒高放废物物体的作业,能否获得

《1972年伦敦公约》的特批尚值得怀疑;其次,在公海上进行水下运输可能涉及在向新处置点运输过程中废物丢失的过大风险。

因此,对补救措施的进一步评估只限于剩下的2种方案,即原地覆盖和回取进行陆地处理或处置。这两种方案都被认为在技术上是可行的。海洋作业的费用据估计在600万—1000万美元范围内。对回取方案来说,除了这里所考虑的费用外,还包括有关随后的陆上运输、处理、贮存和/或处置方面的主要额外费用。从事补救措施的工作人员受到辐射照射的可能性,被认为与临界事故发生的可能性一样。结论是,经采取适当的预防措施和进行所建议的作为着手补救工作的基础的工程调查,从事补救活动的工作人员的辐射风险将微不足道。

**对补救的合理性的放射防护考虑。**与本项目有关的放射防护基本概念为国际放射防护委员会(ICRP)推荐的,并纳入IAEA和其他国际组织的《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》(BSS)中的那些概念。这些文件确认了人类可能受到辐射照射的两类情况——引入辐照源前可以预先规划防护措施的情况;和辐照源已经存在必须回过头考虑防护措施的情况。这两类情况分别称为实践和干预。

IASAP研究中所考虑的情况属于干预范畴。在这种情况下,干预原则上可以应用于源或在放射性核素释放后应用于人类可能从中受到照射的环境照射途径。例如,对源的干预可以包括采用增设的废物物体防护屏障以防止放射性核素释放。应用于环境照射途径的干预,可以包括限制消费受污染的食物和/或限制进入受污染的地区。在两种情况下,都要求在干预利大于弊的基础上证明补救行动是合理的,即包括减少放射学损害在内的干预的好处要大于包括费用和对从事补救措施的人员的损害在内的相应害处。而且,任何干预的形式和规模都应达到最佳化,以产生最大的净好处。

在就采取补救措施的必要性作出决定之前,需要考虑若干因素。从放射防护角度看,最重要的因素是:

- 如果不采取行动,对受照最严重的个人(关键人群组)的剂量和风险;以及通过采取行动,他们的情况能够被改善的程度;和

- 对受照射人群总的健康影响,以及其多大部分可通过采取补救行动加以避免。总的健康影响与集体剂量即受照射人群中个人剂量之和成比例。

喀拉海和毗连的海湾中倾倒的高放废物处于分散的包装物中。预期将来某个时候它们将泄漏。因此,它们构成了一种潜在的长期照射情形。在这种情形下,所担忧的事与由于放射性核素从倾倒的废物中释放导致将来对受照射人群的剂量增加有关。根据这些源的实际状况,最可行的行动办法是在源处进行干预(补救),而不是在后来某个时间在环境照射途径中进行干预。干预的先决条件是,它既要被证明是合理的又要是经过最佳化的。

目前,除公众接触氡(一种天然放射性气体)的情况外(国际导则建议这种情形的行动水平为年增加剂量 3—10 毫希沃特(3000—10000 微希沃特)),在长期照射情形中还没有涉及提出补救要求的任何国际商定的标准。在制定适用于其他类型干预情形的导则方面,ICRP 和 IAEA 做的工作都还不够多。

预计巴伦支海和喀拉海中的放射性废物源对靠近喀拉海和巴伦支海的人群组中个人的将来年剂量小于 1 微希沃特。据估计 1 微希沃特剂量的致命癌诱发风险约为  $5 \times 10^{-8}$ ,是微不足道的。因此,当地居民成员不会遇到来自倾倒的废物的重大风险。假想的沿新地岛海湾海岸巡逻的军事人员组成员的预测将来剂量,比其他公众成员的预测剂量高,而与天然本底辐射产生的剂量差不多。(归因于包括氡照射在内的天然本底照射的年平均辐射剂量为 2400 微希沃特。)考

虑到该假想人群组的剂量必要时可加以控制,计算出的个人剂量没有一个表明需要采取补救措施。

尽管对每个人的风险可能是微不足道的,但就一个群体总和起来,预计由于额外照射的结果可能引起一些健康效应。这些健康效应被认为是与倾倒的放射性废物产生的集体剂量成比例的。倾倒在巴伦支海和喀拉海中的放射性废物今后 1000 年对全球人口的集体剂量约为 10 人·Sv。该计算出的集体剂量尽管很小,但在决定是否需要采取补救行动时值得进一步考虑。在决策框架中考虑集体剂量的一种简化的确定目标的方法是,为实施补救措施将避免的那种健康损害指定一个货币值。如果此方法表明补救措施是合理的,那么有必要进行更详细的分析,以更仔细地研究集体剂量的各组成部分。利用这种确定目标的方法,能够看出施用于最大单一源(核破冰船的乏燃料包)费用超过 200000 美元的补救措施,似乎不能提供足以证明其是合理的好处。由于任何建议的补救措施的实施都要耗费数百万美元,因此根据集体剂量考虑,补救显然是不合理的。

总之,从放射防护角度(包括考虑对生物群的剂量)来看,与倾倒的放射性废物物质有关的补救行动是不合理的。但是,为了避免倾倒的物体可能偶然的扰动或回取,并且由于对沿用作倾倒点的新地岛海湾巡逻的假想的军事人员组的潜在剂量不是微不足道,要维持上述结论必须对这些海湾附近地区的人员进入和活动保持某种形式的制度控制。

最后要指出的是,对 IASAP 研究的讨论限于与补救措施的需要有关的决策的放射学方面。必定构成决策过程重要部分的政治、经济和社会考虑未被考虑在内,它们主要是对倾倒的放射性废物有管辖权和责任的国家政府要处理的问题。 □