全球海洋放射性研究

评估放射性污染情况

PAVEL P. POVINEC 和 ORIHIKO TOGAWA

海洋环境中，因人类活动产生的放射源越来越多。人们知道的有大气层核武器试验后的全球性放射性落下灰、切尔诺贝利事故、核设施的放射性核素排放、过去倾倒的放射性废物、核潜艇事故、核试验场地的影响、放射源的丢失，以及使用放射性同位素作为动力源的人造卫星的烧毁。

总的来说，世界海洋环境所含的放射性核素因地区而异。差异可归因于海洋环境的种种动力学过程，以及一个地区特定的放射性核素来源。因此，科学地评估海洋放射性，需要有关源项和海洋过程的知识。

当前全世界海洋放射性沉积并不均匀。众所周知，全球放射性落下灰主要归因于60年代进行的核武器试验。另一方面，核燃料后处理厂的放射性排放，或者过去倾倒的液态和固态放射性废物，一般限于比较局部的区域。即使是这样，可溶性放射性核素也已被盛行洋流输运了很长距离。

为评估来自局部源的放射性核素输入，科学家们需要更好地了解放射性核素在世界海洋的分布。这种了解对于分析局部地区（例如过去的倾倒场所）的科学调查结果是重要的，并且有助于更全面地评述这些结果。

为更全面地了解海洋环境，国际原子能机构海洋环境实验室（MEL）1996年开始实施一个5年期项目，题目为“全球海洋放射性研究”（MARS）。这项研究工作得到日本科技厅（STA）支持。本文简要评述这个项目，并介绍MEL及其全球合作伙伴开展的相关研究活动和科学调查工作。

研究活动

MARS谋求提供有关公海现有放射性的新数据，并增进对当前放射性核素分布的了解。这样，能对国家和国际放射性调查中取得的一套套数据进行比较研究。本项目有助于科学地了解影响放射性核素分布的过程，以及将放射性引入公海的来源。

1996年于摩纳哥组织召开的专家会议，有助于指导本项研究工作。会上专家们建议，在北太平洋和大西洋进行研究，并在印度洋作补充取样。他们还主张，因为缺乏新数据，北太平洋的研究工作应给予优先考虑，并建议应努力将取样点定在有全面的和良好质量的历史数据的场所。例如，70年代中期地球化学海洋区域研究

Povinec先生是IAEA摩纳哥海洋环境实验室辐射测量实验室主任，Togawa先生是该实验室的专家。

(GEOSECS)计划中使用过的场所，或满足下述条件的场所：一套测量数据能提供将结果外推到当代全海洋范围调查所需的联系。

本项目的具体目标是：

■ 考察关键放射性核素(氚、碳-14、锶-90、铯-137和钚同位素)当前在世界海洋的海水、沉积物和生物群中的分布；

■ 外推当代全海洋范围的调查的结果，例如全世界海洋环流实验水文计划(WOCE)示踪剂部分的结果。这些调查中有大量的氚数据可以利用，并可用于预测同一地区锶-90和铯-137的浓度；

■ 用高质量历史数据和最近收集的新数据，研究海水中放射性核素浓度随时间的发展情况；

■ 确认世界海洋中人为放射性核素的主要来源；

■ 将所有可得的关于放射性核素在海水、沉积物和生物群中分布的数据，加入全球海洋放射性数据库，以便研究关键放射性核素随时间及空间的变化。

协调研究计划(CRP)。1998年开始实施关于"全球海洋放射性研究"的协调研究计划，以支持本项目的研究活动。参与者包括来自丹麦、德国、印度、意大利、日本、大韩民国和美国的专家。他们的工作将有助于理解当前公海的水柱和沉积物中放射性核素的分布，并预测放射学影响。这项得到日本预算外经费资助的协调研究计划，将通过方法学方面的援助和分析质量的管理，鼓励和支持各成员国的海洋放射性研究。通过该协调研究计划获得的所有关于放射性核素在水、沉积物及生物群中的浓度的数据，将以电子形式(CD-ROM和通过因特网)提供给IAEA成员国使用。

科学考察

MARS项目还得到了若干公海科学考察的支持。

IAEA 1997年太平洋考察。这次考察是由MEL同机构5个成员国的9个组织合作进行的*。(见第13页方框。)这是第一次完全由机构组织并完成的公海海洋学考察。

这次考察是从1997年10月21日至11月20日在西北太平洋进行的。其主要目的是采集不同深度的海水样品、沉积物岩芯样品和生物群样品，并进行海洋学测量(盐度、温度等)。采集样品的分析，以及这次巡航期间进行的海洋学测量，使调查海洋环境中人为放射性核素及天然放射性核素的分布成为可能。此外，这项工作将有助于研究"厄尔尼诺"效应可能引入的同位素信号。再则，这类调查将查找天然放射性核素在海水、浮游生物和鱼类中分布的可能的纬度效应。

这次考察是利用日本东海大学的海洋研究船"望星丸"进行的。巡航沿一三角形路线进行，从日本的清水往东到密尔沃基海底山脉，然后向南到马绍尔群岛，停泊于密克罗尼西亚联邦的波纳佩并返回清水。在20个取样点进行了取样，包括4个GEOSECS取样点和7个接近比基尼和埃尼威托克环礁的取样点。

海水样品是用大容积海水取样器、潜水泵和一个有圆形排列的多瓶取样器的CTD传导率、温度和深度系统(CTD/RMS)，在几个不同深度和不同取样点采集的。沉积物和生物群是分别用箱式岩芯取样器和钓竿/渔网取样的。在考察期间，还进行了CTD和一般化学测量。总的来说，共收集5组大容积水样、12组小容积水样、15个沉积物岩芯样品、3个不同种类的45个鱼样品，以及一些浮游生物样品。

对选定的几种放射性核素(锶-90、铯-137、钚-239和钚-240、镅-241)在船上进行预浓缩化学处理，将大容积

（右图）国际原子能机构1997年太平洋考察期间，考察人员从日本研究船“望星丸”上采集海水样品。来自5个国家和9个组织的科学家参加了考察。它们包括德国联邦海洋和水文机构；大韩民国韩国海洋研究开发研究所；印度物理研究实验室；瑞典林彻平的林彻平大学；和5个日本组织：日本原子力研究所陆奥研究中心；日本化学分析中心；日本海洋科学基金会——陆奥海洋实验室；气象研究所；和东海大学。共22人（包括来自MEL的6个机构职员）参加考察。（上图）是部分考察人员和船员合影（来源：MEL）

水样的体积减至二十分之一。这使样品能通过水路、陆路从日本清水装运到摩纳哥和各参加成员国的实验室，用于随后的分析。

将使用CTD/RMS系统测定所采集的海水样品中的氚、碳-14、锝-99、碘-129和钚（ICP-MS）的浓度。另一方面，对于沉积物和生物群样品，不仅要测量那些人为放射性核素，还要测量天然

放射性核素（钋-210、镭-226、钍-230、铀-234 和铀-238）。

考察后不久，MEL 发表的巡航报告介绍了 CTD 和一般化学测量的初步结果。采集样品的全分析，正在由 MEL、各参加组织和 IAEA 成员国（加拿大、德国、印度、日本、新西兰和美国）的其他实验室的研究人员进行。所有分析工作的最终结果计划于 1999 年出版。

日、韩、俄联合考察。在日本、大韩民国和俄罗斯联邦的一项政府间协议的框架内，MEL 应邀参加对西北太平洋以前的放射性废物倾倒区域及其附近海域的联合考察。目的是调查前苏联、俄罗斯联邦、大韩民国和日本过去倾倒的放射性废物对海洋环境造成的放射学污染。

考察是在俄国研究船“海洋号”上分两阶段进行的：第一阶段从 1994 年 3 月 22 日到 4 月 11 日，考察日本海/东海中的倾倒场所；第二阶段从 1995 年 8 月 15 日到 9 月 15 日，考察鄂霍次克海、西北太平洋和日本海/东海中的倾倒场所。

考察人员在已经倾倒超过 700 TBq 放射性废物的那些区域的 14 个取样点，以及这些区域以外的另外 6 个取样点，采集了表面水和底部水的海水样品和海床沉积物样品。在已经倾倒更大量放射性废物的两个区域中，还收集了不同深度的中间层水样。此外，还在鄂霍次克海萨哈林（库页）岛附近一个区域的两个取样点取样，该地区曾因事故丢失过一个 13 PBq 锶-90 源。

MEL 科学家测量了收集样品中的氚、碳-14、锶-90、碘-129、铯-137、钚-238、钚-239 和钚-240，以及镅-241。结果表明，倾倒区海水和沉积物中氚、锶-90、铯-137、钚-238、钚-239 和钚-240 的浓度是低的，同相应的本底区域中发现的浓度没有明显差别。其水平也同西北太平洋及其临近海域发现的完全相当。

从海水和沉积物中的垂直分布图估算的锶-90、铯-127 和钚-239、钚-240 的存量，同全球放射性落下灰的累积沉积密度相比，有一个增量。但是，估算的存量同以前在这些地区中的观测值一致。放射性核素存量及同位素活度比的结果，支持在这些取样区域中全球放射性落下灰占支配地位的结论。

印度洋考察。MEL 科学家参加了两次印度洋科学考察。

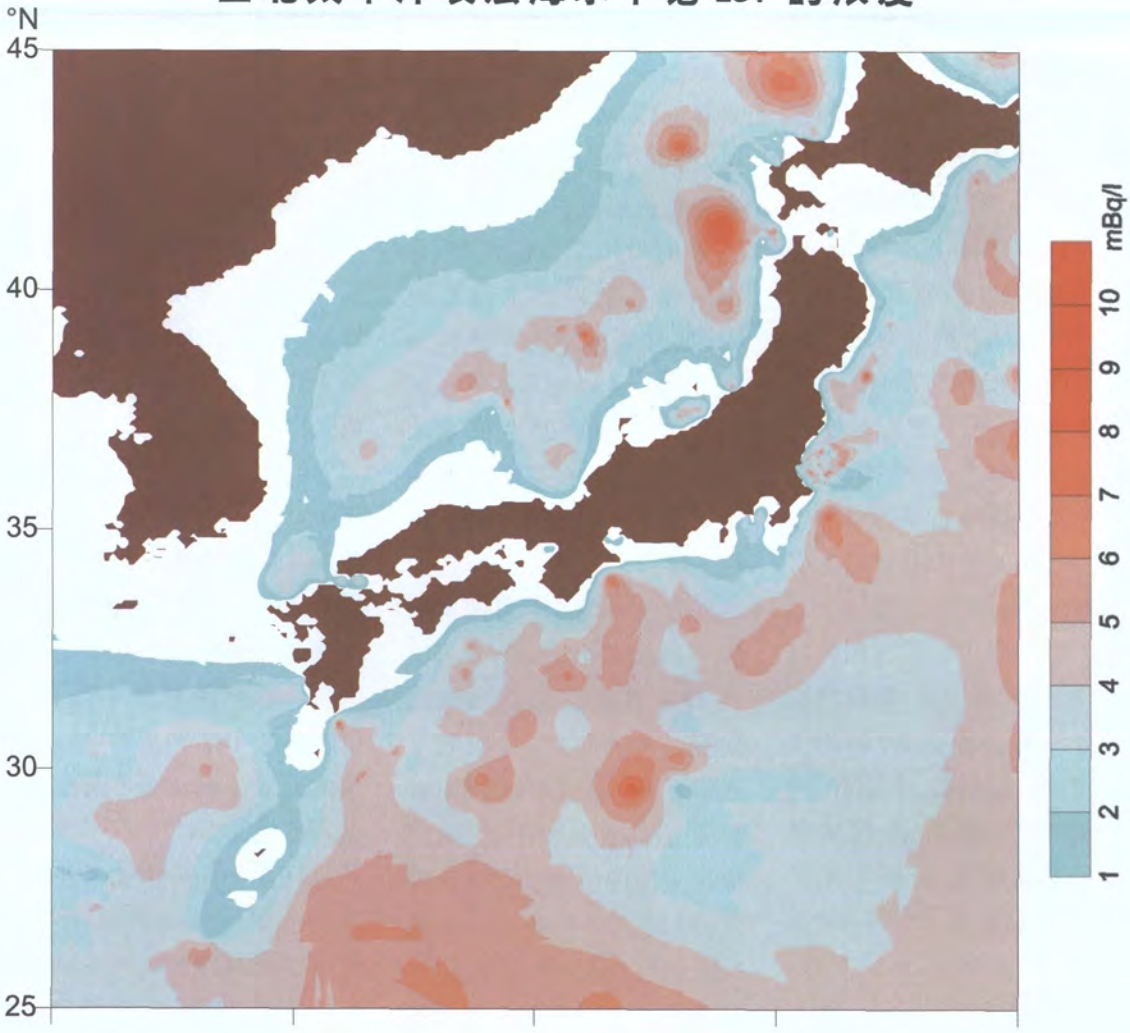
第一次考察是同意大利拉斯佩齐亚的海洋环境研究中心国家新技术、能源和环境机构（ENEA）合作进行的。目的是研究人为放射性核素在印度洋表层海水中的分布情况。考察工作是从 1998 年 3 月 8 日到 4 月 9 日在意大利研究船“意大利号”上，利用其从南极洲返回意大利的途中进行的。

考察船在 41 个取样点采集了水样，每个取样点在经度上相隔约 5 度。取样带从新西兰东南的利特尔顿延伸到意大利的拉文纳，穿过库克海峡、塔斯曼海、巴斯海峡、大澳大利亚湾、印度洋、亚丁湾、红海、苏伊士运河和地中海。用装在研究船上的抽水系统，提取平均深度 4 米处的海水样品。对几种选定的放射性核素（锶-90、铯-137、钚-239 和钚-240 和镅-241），用机构 1997 年太平洋考察期间采用的相同方法在船上进行预浓缩化学处理。

另外还采集了以后要在 MEL 处理的小体积海水样品，用于氚和碘-129 分析以及留档。这些样品的分析工作将在 MEL 和 ENEA 进行，1999 年可得分析结果。

第二次印度洋考察是应印度海洋和发展部（DOD）邀请进行的。位于艾哈迈达巴德的物理研究实验室（PRL）组织了这次考察。考察是从 1998 年 3 月 19 日到 4 月 20 日，利用海洋和发展部的研究船“Sagar Sampada 号”进

西北太平洋表层海水中铯-137 的浓度



行的。主要目的是测定人为放射性核素在海水和沉积物中的浓度和分布(水平分布和垂直分布)。

取样工作涉及 6 个取样点,包括 5 个 GEOSECS 取样点。在每个取样点上,利用 CTD/RMS 系统采集了 6 个不同海水层的海水样品。在船上对几种选定的放射性核素(锶-90、铯-137、钚-239 及钚-240 和镅-241)进行了预浓缩。还采集了另外一些海水样品,用于在 MEL 测定氚、锝-99、碘-129和钚(ICP-MS)以及留档。在一些取样点,还采集了沉积物岩芯和生物群样品。

所有采集到的样品,将在 MEL 和 PRL 进行分析,1999 年可得到分析结果。对大西洋和南印度洋的进一步取样考察,计划于 1998 年和 1999 年进行。

海洋放射性数据库

在这个研究项目框架内,MEL 已建立全球海洋放射性数据库(GLOMARD),

地图:摩纳哥 MEL 的机构海洋科学家参加多次科学考察,获得关于世界海洋放射性水平的珍贵的资料。(来源:MEL)

向各成员国提供海洋环境中放射性核素浓度的数据。这种信息将有助于各成员国进行有关放射性废物倾倒和核试验的放射学评估，并对海上放射学事故作出应急响应。计划于不久的将来，将GLOMARD迁移到机构的因特网网址上供人使用。

该数据库含约40兆字节数据，包括了对取自全世界海洋的海水、沉积物、生物群和悬浮物样品中的放射性进行的100000次测量的所有结果。

数据库含有下述相关信息：数据来源；进行放射性核素分析的实验室；样品的类型（海水、沉积物、生物群）和有关细节（诸如体积和重量）；样品处理、分析方法和测量仪器；和分析结果（诸如放射性核素浓度、不确定性、温度、盐度等）。

GLOMARD的当前版本允许输入、维护和提取数据，以便用外部计算机程序编制各类地图。提取的数据用这些程序处理，可编制表示所研究地区放射性核素分布的等值线图。

新版GLOMARD将与地理信息系统相联。这样就能编制更精密的二维和三维地图。在这些地图上，放射性数据将同水深、温度、盐度等数据相关联。也将有可能编制时间序列污染地图。

放射性核素分布

应用这种作图能力，用装在GLOMARD中的数据组，研究了西北太平洋表层海水和表层沉积物中放射性核素的分布。（见第15页图。）数据来自日本研究机构，主要是日本化学分析中心（JCAC）。对海水水柱和沉积物岩芯中放射性核素浓度、放射性核素存量及其同位素活度比的垂直分布图进行了评价。

总的来说，环绕日本采集到的海洋样品中，锶-90、铯-137、钚-239和钚-240的浓度是非常低的，并倾向于逐年下降。海水水柱中锶-90和铯-137的分布图表明，其浓度随深度的增加而逐渐降低，但钚-239和钚-240的情况却相反。钚的分布图显示，海面下最大值在700米深度附近，这反映海水水柱中有特殊的清除过程。

沉积物岩芯中放射性核素的浓度倾向于随深度增加而降低。科学家们对从80年代初到现在的几个时期海水和沉积物中锶-90、铯-137、钚-239和钚-240的存量作了估计。沉积物岩芯中同位素活度比同海水水柱中的活度比十分不同，反映了从海水到底部沉积物排除放射性核素的差异。

日本海/东海核废物倾倒场所的水柱中，锶-90、铯-137、钚-239和钚-240的存量，分别是3.0、5.8和0.10 kBq/m²。与此相比，西北太平洋的水柱中相应的存量分别为1.0、2.0和0.11 kBq/m²。可以看出，日本海/东海倾倒场所的海水中锶-90和铯-137的存量明显高于西北太平洋中观测到的值。

海水和沉积物中总的锶-90和铯-137存量，同预计的全球放射性落下灰沉积密度十分一致。另一方面，西北太平洋中钚-239、钚-240和镅-241的存量有一个增量，可能是从中部太平洋输运过来的近区放射性落下灰额外输入造成的。

日本海/东海和西北太平洋的调查结果表明，不存在倾倒放射性废物的影响的明确证据。但是，发现放射性核素行为方面的独特海洋学特性。

对日本人通过海洋食物途径从倾倒在日本海/东海中的液态放射性废物受到的集体有效剂量当量（CEDE）作了评估。在海参崴沿海倾倒了总计443 TBq的液态废物。

至于这些液态废物的放射性核素组成，认为钴-60、锶-90和铯-134对铯-137的比率分别是0.01、0.3和0.01。由长寿命放射性核素

引起的剂量，在处置后 4—5 年达到最大值。

所有放射性核素造成的总的集体有效剂量当量在 1990 年曾达到 0.8 人·Sv 的最大值。约 90%的剂量来自铯-137，其中大部分是由于食入鱼而导致的。待积集体有效剂量当量估计为 11 人·Sv。

展望

为与液态放射性废物造成的剂量作比较，研究人员还估算了全球放射性落下灰（锶-90、铯-137、钚-239、钚-240）及天然放射性核素引起的剂量。CEDE 值是根据 1990 年捕捞的海洋产品的年摄取量估算的。

同锶-90、铯-137、钚-239 和钚-240 的造成的集体剂量 16 人·Sv 相比，钋-210 造成的集体剂量17000人·Sv 占主导地位。液态放射性废物造成的总的集体有效剂量当量约为全球放射性落下灰的 5%。

要更充分地评估海洋环境中的放射性还需做进一步的研究。MEL 的研究和分析工作将集中在下述方面：导致放射性核素进入世界海洋中的来源；人为的和天然的放射性核素在海洋环境中的分布；以及人为的和天然的放射性核素对世界居民通过摄取海产品接受海洋放射性剂量的影响。这些研究将有助于弄清不同放射源的各自贡献，其成果将支持各领域的决策过程。

一个将于 1998 年 10 月在摩纳哥举行的国际海洋污染学术会议是一次重要的论坛。它由国际原子能机构同一些团体共同举办。（会议目的和课题介绍，请见第 4 和 5 页方框。）该领域主要国家和国际科学家将对范围广泛的问题进行研讨，并帮助确定今后几年的研究重点。 □

照片：海洋科学家使用箱式岩芯取样器，收集海床沉积物样品。（来源：MEL）