

# 海洋与原子时代

李培泉

(中国科学院海洋研究所)

## 一、富饶的海洋面临着 污染的威胁

海洋占整个地球总面积的71%，约为三亿六千一百多万平方公里，约等于陆地面积的二点五倍，和地球全部体积相比，海水体积为地球的八分之一。

浩瀚的海洋，为人类提供和储备着极其丰富的物质资源，故有“蓝色宝库”之称。

海洋中的物质资源可分为两大类：非再生资源（系指各种矿物资源）和再生资源（生物资源）。在大陆上发现的100多种元素，在海水中就有近80种。海水中含铜42亿吨，银4亿吨，金1,400万吨，铀40亿吨，比大陆上铀的储量高了数千倍。

海底矿物资源也很丰富，最引人注目的是石油，它在大陆周围浅海区储量为2,400亿吨。1972年80余国进行海底石油勘探工作。30多个国家进行了开采，年产量为四亿七千万吨，占世界石油产量的19%。目前又有很大增加。

海洋中还有极其丰富的生物资源，其量最大的是鱼类，其次是虾、蟹、贝类及海洋哺乳动物（鲸鱼、海豹等）。目前世界海洋生物的总生产量是7,000万吨，其中绝大部分为经济鱼类，据调查，经济鱼类的潜存量是一亿吨以上，它们的饵料、及其食用无脊椎动物和藻类的种类更多，实际产量更大，为鱼类产量的几十倍，甚至几百倍。

大陆沿岸的浅水区是海洋鱼虾类产卵，索

饵的重要场所，全世界80%以上的海洋产品都是从这里获得的。

自从十七、十八世纪工业革命以来，资本主义制度逐步取代了落后的封建主义制度，工业和科学获得了高度发展，海洋成为帝国主义者搞扩张主义、殖民主义的交通线。

近年来，由于社会帝国主义的出现，苏美两霸争夺海洋控制权的斗争愈来愈激烈，与此同时，第三世界反对控制的斗争也风起云涌。

海洋是人类物质资源的天然宝库，又是国际交往的要道，海洋在人类进步和社会发展的过程中具有极其重要的作用。

然而，由于资本主义的恶性膨胀，海洋却成了核子武器的试验场地，大量的放射性微粒落入蓝色的海体之中。巨量的带有毒性的工业污水无限制的向大海排放。由于海上石油的开发和在石油运输中不断发生大量石油漂流海面的严重事件，每年大约有400—3,000万吨石油流入大海。

海洋的面貌正在改变，某些海域海水的蔚蓝色正在消失，健壮的海体正在腐蚀、污染、患病，许多人类喜爱的海洋生物成了浓缩毒品的载体。

常此下去，海洋的巨大资源就会受到难以想像的损害——有的生物个体将会造成发育不良，甚至畸形发展。严重地影响收获生物的质量，甚至会造成大量的鱼、蟹、藻类的死亡，正常的回游路线将会改变，由于饵料减少，渔业也必然会减产。进而影响了海洋的开发。

象日本的濑户，东京湾，美国的纽约湾，

墨西哥湾沿岸，苏联的亚速海，欧洲的波罗的海，地中海，海洋生物都已经大量减少，沿海居民的健康正在受到很大的威胁。

与过去不同，海洋污染已成为人们注意的重大问题了，不少国家已列入国策。我们是发展中的国家，由于社会制度的优越性，党和政府及早地提出了这一问题，1973年召开了全国环境保护会议，对海洋污染问题也提出了要求，1971年到1976年，卫生部门及科研机关又先后召开了四次会议，研究海洋放射性污染的有关问题。可以想象，只要抓得早，工作得力，海洋的污染是可以控制在一定限度之内的。

## 二、人类已进入原子时代

二十世纪四十年代，制造了原子弹，并应用于战争。原子能作为一种新能源，已引起了人们的深刻注意。经过短暂的30余年，原子能的利用获得了迅速的发展，不少国家建造了原子舰艇，原子商船和原子能发电站。核反应堆的数量有了大幅度增加。可控制热核反应的研究也正在逐渐深入。

在美国，除有相当数量的原子弹、氢弹之外，还建造了100多艘核潜艇，1974年，美国舰艇总数为523艘，其中导弹核潜艇41艘，鱼雷核潜艇64艘，到1981年，鱼雷核潜艇的数量将增加到88艘。1977年美国的656艘潜艇导弹将可发射5120个核弹头。这些核潜艇的建造和换料、维修牵扯到9个船厂，11个附属船厂和2个潜艇基地。

在苏联也有与美国类似的核武器和核潜艇，苏修为了争霸海洋，极力发展核舰艇，目前有5个潜艇工厂，其中3个是核动力厂，造船能力每年20艘，目前有核舰艇100多艘。优先于美国。

法国从1945年开始，经过30余年的发展，已建立了4个核研究中心，6个军事研究中心，3个铀水冶厂，2个金属铀冶炼厂（其中1个已关闭），4个燃料元件制造厂，1个气体扩散厂，2个产氦堆，10座核电站（其中1

个已关闭），3艘核潜艇，16个研究和试验反应堆，2个后处理厂，截至1974年底，法国共进行了59次核试验，其中地下核试验13次。

根据最近报道，由于资本主义世界能源危机的影响，不少国家，尤其是资本主义国家积极地考虑和发展原子能事业，并把它看作是摆脱石油束缚的最可靠办法。截至1976年6月末，其规模业已达到：179座反应堆正在运转，发电量为8,735万千瓦；523座反应堆正在建设或计划建设，发电量为5.0175亿万千瓦；合计共为702座反应堆，5.8910亿万千瓦。在这些反应堆中，轻水型反应堆占设备容量的80%。

在1976年上半年，决定向原子能发电领域迈进的国家又增加了印度尼西亚、利比亚和古巴。正在以某种形式发展原子能事业的国家业已达到了47个。其中进行原子能发电的国家已达到19个。

至1975年末，原子能发电占总发电量10%以上的有：瑞士（18%）；西德（15%）；瑞典（13%）；英、法和美国各占（10%）。

原子能发电稳步增加的情况，不仅是石油消费量大的国家和西方国家，象捷克、东德、保加利亚等国也都在发展原子能发电；发展中的一些产油国，如伊朗也已制定了大约1,100万千瓦的原子能发电计划，目前已正式建设两座发电厂，其发电能力为250万千瓦。

资源缺乏的日本，在1976年6月之前已有12座原子能发电站，发电量为660万千瓦，正在建设和计划建设中的有18座，发电量为1,468万千瓦，1990年达到10,000万千瓦，比1970年的132万千瓦增加75倍以上。世界原子能发电厂的状况如表1所示。

从以上情况看出：原子能事业发展的速度是非常惊人的，可以想象，以原子能取代其它燃料的动力革命必将到来。

目前，几百艘原子舰船在海上航行，不久的将来，数量还要大大增加，而且功率也会明显的提高，万吨级的核舰艇已是比较普遍的事了。核动力航空母舰的数量也增加很快，如美国除原在1961年服役的“企业号”，1973年服

表1 1976年6月前世界原子能发电厂的状况

国别	运转中		建设、计划中		合计	
	功率 (万千瓦)	座	功率 (万千瓦)	座	功率 (万千瓦)	座
美国	4,245	60	18,350	162	22,595	222
英国	748	31	1,062	15	1,810	46
苏联	718	20	1,092	13	1,810	33
日本	660	12	1,468	18	2,128	30
西德	561	9	4,030	34	4,591	43
法国	301	10	4,497	45	4,798	55
加拿大	264	6	1,486	21	1,750	27
意大利	154	4	2,011	22	2,165	26
西班牙	112	3	3,404	34	3,516	37
其他	972	24	12,775	159	13,747	183
合计	8,735	179	50,175	523	58,910	702

役的“尼米兹号”之外，（尼米兹号吨位9.5万吨，由两个反应堆推动），1975年“艾森豪威尔号”服役，1980年“CVN-70号”也要下水。

苏联今后十年中，打算建造七万吨级的核动力航空母舰一艘，同能级的核动力攻击母舰两艘。

超级大国争夺海洋的斗争，将会导致大量的核装置进入海洋。

海洋是核子武器的实验场地，美国、英国和法国多次在海洋上空和水面进行核试验，大量的放射性核素进入海洋。

直到目前，美、苏、英、法等几个国家已分别在內华达实验场、安尼维托克环礁、比基尼环礁、约翰岛、圣诞岛、约翰斯顿岛、巴罗岛、澳大利亚实验场、北极实验场、西伯利亚实验场、南澳大利亚的屋米拉（Woomera）实验场、阿尔及利亚实验场，进行了数百次核试验。

发展原子能事业已被许多国家列为头等重点。当前两个超级大国为了进行核垄断，百般阻挠和限制其它国家发展核事业，他们高喊裁军，实际上在积极扩军，核子武器的贮备量愈来愈大。

战争武器的原子化，各种核装置的大力建

造，电力工业的燃料革命，都显示人类已进入了原子时代。

### 三、原子时代与海洋放射性

原子能的利用，一方面给人们提供了巨大的能源，另一方面，也给环境带来严重的污染。由于同位素的放射性不受外力（如温度、压力等）的影响，所以，对它的处理只能采用稀释扩散或固化包装埋藏两种方法。

不少国家的原子设施大都建在江河附近或

表2. 1966年哥伦比亚河几种放射性核素的年平均浓度

放射性核素	在Riehland, (微微居里/升)
铯土+钷	270
Na <sup>24</sup>	2,600
P <sup>32</sup>	140
Cr <sup>51</sup>	3,600
Cu <sup>64</sup>	1,400
Zn <sup>65</sup>	200
As <sup>76</sup>	420
Sr <sup>90</sup>	1
I <sup>131</sup>	18
Np <sup>239</sup>	770

沿海地区，排出的部分废物可以直接或间接的进入大海。

美国汉福特原子能中心的放射性废液一部分就直接流入哥伦比亚河，然后再流入大海，表2是1966年哥伦比亚河几种放射性核素的年平均浓度。

许多核素随河水进入太平洋沿岸水域。据统计美国在1958年由哥伦比亚河和密西西比河等主要河流流入大海的放射性为152,000居里，所有河流共流入163,500居里，平均每月一万居里以上。表3列出了汉福特原子中心向太平洋抛放废物的情况。

最为典型的是英国温茨凯尔原子能研究中心，它直接通过2海里的管子在水深20米的海底向爱尔兰海排放大量的废液，表4是这个中心排放废物的情况。

日本得莱斯顿发电所(194,000千瓦)一年放出2居里的放射性物质。洋基发电厂(155,000千瓦)一年放出8毫居里。这个数值可能是保守的。

除陆地上的固体储藏之外，在海洋中也正在投放大量的用固体包装的放射性废物。在美国东海岸和大西洋某些水域已经有组织的投放固体放射性废物近50,000居里。

欧洲原子能机构在1967年、1969年、1971年搞了几次固体投放实验，第一次在距西班牙

表3 汉福特原子中心向太平洋抛放的放射性废物

年	$\beta$ 辐射	$P^{32}$	$Cr^{51}$	$Zn^{65}$	$Np^{239}$
1950	2,500	—	—	—	—
1951	3,600	—	—	—	—
1952	7,100	—	—	—	—
1955	13,000	—	—	—	—
1956	17,000	—	—	—	—
1957	37,000	—	—	—	—
1958	44,000	—	—	—	—
1959	110,000	—	—	—	—
1960	93,000	6,200	310,000	14,000	26,000
1961	—	11,000	310,000	16,000	24,000
1962	—	4,700	240,000	11,000	11,000
1963	—	4,400	320,000	10,000	18,000
1964	—	4,400	320,000	16,000	—
1965	—	4,000	290,000	18,000	—
1966	—	3,300	160,000	8,000	—
1967	—	4,400	224,000	15,000	—

500公里水深5,000米的海域中投放了35,790个容器。总放射性7,636居里，第二次在爱尔兰西部600公里水深5,000米的海域中投放了23,205个容器，总放射性为22,000居里。1971年几个国家又投放了11,000居里。有人还主张把固体废物沉入到海沟和海渊中，以达到与人长期隔离的目的。由此可见，利用海洋处理放

表4 1957—1967年温茨凯尔化学再处理工厂向爱尔兰海排放放射性废物的速率(千居里/月)

放射性核素	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967
$Ru^{106}$	2,218	3,522	2,956	3,302	2,095	1,916	2,781	1,924	1,752	2,077	1,436
$Ru^{103}$	300	492	746	964	265	153	800	100	150	205	186
$Sr^{90}$	137	210	129	43	41	85	46	81	97	76	116
$Sr^{89}$	248	72	170	82	114	42	14	16	14	7	12
$Ce^{144}$	215	497	583	74	180	200	116	267	288	571	1,142
$Y^{91}$ + 稀土元素	300	567	506	83	201	125	90	90	73	75	203
$Cs^{137}$	310	516	165	76	91	92	31	111	97	100	132
$Zr^{95}$	59	210	415	196	140	78	47	1,797	1,479	1,172	1,566
$Nb^{95}$	535	510	845	523	658	356	272	1,735	2,803	1,947	2,143
总 $\beta$	5,366	6,846	7,659	6,461	3,981	3,742	4,020	5,055	4,560	5,464	6,022
总 $\alpha$	4.8	5.2	5.6	6.8	11.1	15.5	19.0	23.5	33.8	48.8	79.6

射性废物已经为人们所重视。

由于冷却用水以海水为宜，所以未来的原子设施相当部分将设在沿海地区。日本还设计了海上核电站。所以，沿岸水域的污染可能比其它水域更为严重。

原子能事业的发展迫使人们研究根治长半衰期的有毒放射性废物的方法。目前已提出的有两种：一是用蜕变反应堆，通过核反应将长寿命同位素变成短寿命的同位素。这样处理后，便可使用暂时贮存的方法。一种是将它们送往太空，使其与人长期隔离。这种方法恐怕主要困难是成本太高。目前比较实用的仍是深海或深土沟永久性贮存。象日本这样国土较小，工业发达的国家对使用海洋作为废物储藏所，当然是最有兴趣的。1977年准备在海上进行抛放实验。

只要有帝国主义存在，就有战争的可能性。大量的战略原子武器和战术核弹头，以及核动力舰艇一旦用于战争，则释放的裂变物质将是极其巨大的。仅仅研制过程中的核武器实验就已经给海洋增加了几万万居里的放射性物质。

海洋中的钾-40含量最高，总放射性为  $4.6 \times 10^{11}$  居里，目前，海洋中的核爆炸产生的人工放射性物质约  $4 \times 10^8$  居里，如果没有原子战争的发生，核试验以1968—1970年的速度进行的话，估计到二十一世纪初海洋的放射性则将提高一个数量级，即  $10^9$  居里。目前在海洋中各种核装置的裂变产品为  $3 \times 10^5$  居里，到二十一世纪初期将提高到  $10^7$ ，即提高二个数量级。氡从  $3 \times 10^5$  居里提高到  $10^8$  居里。

Craig 曾估计：到公元2000年，一年约有1,000吨  $U^{235}$  裂变的产物进入海洋。如果这些裂变产品分配在100米以上的混合层，则  $\beta$  放射性为 12.1 脉冲数/升，这个数字与现在天然水中的钾-40和铯-87的含量是一样的。

裂变产品的放射性将随着原子能的利用而迅速增加。这一点可以用美国今后二、三十年中核动力装置所积累的放射性来说明。1980年裂变产品的总  $\beta$  放射性约为 15,000 兆居里，

其中  $Sr^{90}$ 、 $Cs^{137}$  约为 2,500 兆居里和 5,000 兆居里。1990年总  $\beta$  为 70,000 兆居里， $Sr^{90}$  约为 5,000 兆居里， $Cs^{137}$  约为 10,000 兆居里，到公元2000年总  $\beta$  约为 145,000 兆居里， $Sr^{90}$  为 15,000 兆居里， $Cs^{137}$  约为 30,000 兆居里。这个估计是美国原子能委员会按照1967年的核动力增长情况作出的。在这个估计中，所以单独指出  $Sr^{90}$  和  $Cs^{137}$  是因为它们有较长的半衰期。在总  $\beta$  放射性中包括 Zr、Nb、Ce、Pm 和 Ru 等同位素。

从这个估计看出：到2000年，在美国裂变产品总储量的  $\beta$  放射性将比1980年提高近10倍， $Sr^{90}$  和  $Cs^{137}$  分别提高6倍。

从美国核动力发展计划中所积累的裂变产品的体积，重量和热量就更加明显地看出原子能事业的飞快发展，整个情况如表5所示：

表5 从美国核动力计划积累的裂变产品的体积，重量和热量

年 代	1970	1980	1990	2000
估计 $10^3$ MWe 之装置 <sup>(1)</sup>	12	128	335	675
溶液体积, $10^8$ 加仑 <sup>(2)</sup>	0.2	3.5	20.5	55
固体体积, 1000 立方英尺 <sup>(3)</sup>	2	35	205	550
重量, 吨	8	485	2,990	7,950
热量, $10^6$ Btu/小时 <sup>(4)</sup>	11	152	640	1,350

注 (1) MWe 是兆瓦

(2) 1 加仑 = 4.546 公升

(3) 立方英尺 = 0.3048 立方米

(4) 1 Btu = 252 卡

从表5看出：从1970年到2000年，其液体和固体废物都分别增加了275倍。动力装置的能力增加了57倍。

有人估计：如果每年全世界裂变产品为80吨，则冷却100天之后，其  $\beta$  辐射为  $3.9 \times 10^4$  兆居里， $\gamma$  辐射为  $2.5 \times 10^4$  兆居里，相当于整个海洋天然放射的1/10以上，其中  $Sr^{90}$  将是200兆居里，即  $2.0 \times 10^8$  居里。

到2000年，核电站生产所产生的  $U^{235}$  裂变产物可能达1,000吨，这个数值相当于  $7.7 \times 10^{11}$  居里或1.6倍于天然海洋本底，其中

$Sr^{90} + Y^{90}$ 将是 $2.2 \times 10^{11}$ 居里。预计到二十一世纪,如果没有新能源的话,核能生产的裂变产物将可达到4,000吨,其放射性为 $3.0 \times 10^{12}$ 居里,比海洋本底要高一个数量级了。当然不是所有废物都抛入海洋中。

从这些数值可以很清楚的看出,原子时代给海洋带来的污染威胁是不可忽视的。

## 四、海洋放射性污染

### (一) 海洋污染的简况

由于核武器试验的影响,整个地球表面,包括所有水域都受到了放射性同位素的污染。

1954年美国在比基尼进行核试验之后,放射性散落物污染了附近海域,污染的海水由于北赤道流,赤道流,南赤道流的作用而移动扩散,大部分放射性物质乘黑潮北上日本列岛,污染了西太平洋一带。1957年太平洋西部海面 $Sr^{90}$ 为2.3微微居里/升, $Cs^{137}$ 为4.8微微居里/升,尔后逐步减少。1959年, $Sr^{90}$ 是2.3微微居里/升, $Cs^{137}$ 是2.6微微居里/升,1961年 $Sr^{90}$ 和 $Cs^{137}$ 都降为0.5微微居里/升。为了说明整个大洋污染的水平,可以应用1960—1961年几大洋表面海水的 $Sr^{90}$ 浓度资料。如表6所示。

表6 1960—1961年表层海水的 $Sr^{90}$ 浓度

地点	平均浓度 (微微居里/升)	地点	平均浓度 (微微居里/升)
太平洋		南中国海	0.26
北半球	0.23	日本海	0.20
南半球	0.11	黑海	0.26
大西洋		波罗地海	0.30
北半球	0.07	红海	0.11
南半球	0.04	苏绿群岛	0.20
印度洋	0.11		

从表6可以看出,海洋污染的一个特点是北半球高于南半球,特别是太平洋赤道南北更

为明显,北半球比南半球污染高一倍。同样看出。太平洋 $Sr^{90}$ 最高,依次为印度洋和大西洋,这是由于大部分核试验是在太平洋进行所造成的。南中国海所以高是与在太平洋进行的大量试验所形成的放射性微粒随北赤道流的分支——黑潮进入南中国海有关。

由于黑潮的影响,太平洋西部广大海区放射性污染最为严重,这可以从1963—1971年日本近海 $Sr^{90}$ ,  $Cs^{137}$ , 浓度变化看出,具体情况如表7所示。

表7 1963—1971年日本近海和海湾内海水的几种核素逐年平均浓度(微微居里/升)

年份	$Sr^{90}$	$Cs^{137}$
1963	0.53	—
1964	0.41	0.49
1965	0.42	0.45
1966	0.35	0.38
1967	0.29	0.41
1968	0.24	0.60
1969	0.19	0.24
1970	0.20	0.25
1971(上半年)	0.19	0.22

### (二) 几个污染高峰的出现

调查证明:从核武器试验以来,整个地球除遭到不同程度的污染以外,还曾发现过几次污染高峰,比较突出的是1959年高峰和1963年高峰,就 $Sr^{90}$ 的沉降率而言,1959年北半球达到11万居里/月,1963年曾达到12万居里/月,其余正常情况下多为2万居里/月,而南半球在1959年最高为6万居里/月,1963年为3万居里/月,在正常情况下约为6,000—15,000居里/月,1959年出现的高峰是由于1957年,1958年和1959年的连续核实验造成的。1963年的高峰是由于1961年、1962年和1963年的连续实验造成的。1963年的高峰开始于1961年持续到1965年,严重污染达四年之久。1959年的高峰开始于1957年,结束于1959年底。严重污染

约二年多。这一点证明：从1961年开始的核试验其威力显然有了提高。

1965年之后，直到现在其污染值都波动在正常数值范围之内，这证明核武器试验已显著减少了。

如前所述，在世界大洋中，也曾在核试验最多的北太平洋某些水域观察到上述两个峰值；如1957—1959年在南中国海发现了1.7微微居里/升的 $\text{Sr}^{90}$ 放射性，比南半球高15倍，而这种高值并非在整个北太平洋中都发现过。1963年日本近海和海湾内海水的 $\text{Sr}^{90}$ 为0.53微微居里/升，这个值比1963—1971年的其他任何一年的数值都高。

应当说明：海洋中的这种峰值是海流、大气下降等几个因素造成的，而前者可能是主要的。

由于放射性同位素在海洋中的运动受许多因子影响，表现的比较复杂，因此，不能简单的把大陆污染值完全应用到海上去。而只能寻求它们之间的共同规律。

### (三) 关于海洋中的氚

海水中的氚( $\text{H}^3$ )是宇宙射线和大气中的化学元素发生核反应而生成的，由这种作用而进入海水中的自然氚浓度约为0.6—3.2微微居里/升。然而，在许多海域内测定的结果，氚的浓度却要大的多。这种现象主要是由核武器试验造成的。

1960年—1962年之间，在加利福尼亚沿岸，大西洋城沿岸，波罗的海等处，测得氚的含量波动在3.8—113.6微微居里/升之间，一般都在10—70微微居里/升之间。

1960年在太平洋之约翰斯顿，飞枝群岛、圣诞岛、萨摩亚群岛等处，测得的氚浓度为1.8—146.2微微居里/升，一般多在20—70微微居里/升之间。

1960—1961年在北太平洋几个地区测得的氚浓度波动在20.8—36.8微微居里/升之间。

从这些数值可以看出：核武器实验产生的氚已进入水圈并污染了海洋。

上面已提到：人工氚对海洋的污染从二十世纪七〇年代到二十一世纪初将提高三个数量级，即从30万居里增加到几亿居里。

由于核能设施迅速地应用于海洋事业，目前氚的浓度增长是较快的。

需要说明一点：如果聚变型的反应堆能够成功的话，则 $\text{H}^3$ 的污染将是很严重的问题。据估计，一个100万瓩电容量的聚变反应堆，在正常操作情况下，每天产生的 $\text{H}^3$ 达 $1.1 \times 10^9$ 居里，比同等电容量的裂变反应堆所产生的 $\text{H}^3$ 要大 $2 \times 10^4$ 倍。假若把目前所有的反应堆都改为聚变型的反应堆，则到公元2000年时， $\text{H}^3$ 的污染即可超过人们所能容许的程度。

### (四) 海水中的 $\text{Ce}^{144}$ 浓度

$\text{Ce}^{144}$ ，半衰期282天，核爆炸后的产量约占6.4%，在慢中子作用下，一千克 $\text{U}^{235}$ 裂变时，一年后形成的 $\text{Ce}^{144}$ — $\text{Pr}^{144}$ 占52.8%。

1959年，苏联曾测定了北半球和南半球空气中的 $\text{Ce}^{144}$ 浓度，其结果分别为10居里/米<sup>3</sup>  $\times 10^{-15}$ 和5居里/米<sup>3</sup>  $\times 10^{-15}$ ，说明北半球比南半球高一倍。

1963—1968年，日本佐伯，大桃等人测定了日本近海湾内的 $\text{Ce}^{144}$ 平均浓度。如表8所示：

表8 1963—1968年日本近海及海湾内海水的 $\text{Ce}^{144}$ 浓度

年份	$\text{Ce}^{144}$ 浓度(微微居里/升)
1963	0.40
1964	0.26
1965	0.09
1966	0.02
1967	0.01
1968	0.05

从表8看出：除在1963年1964年有比较高的 $\text{Ce}^{144}$ 浓度以外，其余的年份则逐步降低。

目前，海水中 $\text{Ce}^{144}$ 的浓度是很低的，一方面因为 $\text{Ce}^{144}$ 半衰期短，原有的 $\text{Ce}^{144}$ 已大

部分衰变了,另一方面,新的大气和海上核实验次数已显著降低,新的  $Ce^{144}$  来源已大大减少。

赛莱巴 (Г. А. Сеpeба) 于1960年测定了下降的长寿命人工放射性组成,其中  $Ce^{144}$ — $Pr^{144}$  占全部混合物组成的 45%,其余的放射性同位素是:  $Sr^{90}$ — $Y^{90}$  占 15%,  $Pm^{147}$  占 19%。

$Cs^{137}$  占 15%,  $Ru^{106}$ — $Rh^{106}$  占 6%,

可见  $Ce^{144}$ — $Pr^{144}$  是大量的。然而  $Ce^{144}$  容易凝集下沉。这也可能是他们在表面海水中含量较低的原因。

1954年,日本“俊鹤丸”调查船在比基尼和安尼维托克核爆炸后,对比基尼附近海水的放射性核素作了分析,结果如表 9 所示。其中  $Ce^{141}$ — $Ce^{144}$  占 55%,是几种同位素中含量最高的一个。

表 9 比基尼附近海水放射分析结果

核种类	I*			II**			$U^{235}$ 在慢中子作用下的裂变产品,210天时的放射性%
	放射性		测量日期	放射性		测量日期	
	CPm	%		CPm	%		
Y-91	750	37	1954.12.22	850	90	3.29	10
Ce-141, 144	1100	55	12.22				15
Ru-103, 106							
Rh-106	75	3.8	12.1	34	3.7	3.28	8.2
Zr-95 (Nb-95)	45	2.2	12.3	30.5	3.3	3.28	39
Sr-89 (90)	40	2.0	12.20	—	—	3.29	7.5

\*海水

\*\*粘附在原始容器玻璃壁上的沉淀

1961年,鲍温 (Bowen) 等人报导了1957—1959年大西洋水的  $Ce^{144}$  浓度大约在 0.08—0.63微微居里/升之间。1959年3月测到的唯一  $Ce^{144}$  浓度是 0.27微微居里/升,这个值接近于大西洋北部海水的  $Ce^{144}$  平均浓度,按照这个浓度估计1960—1961年应当降低到 0.05微微居里/升。

1961年(恢复核试验之前)在美国克利夫斯海洋研究所栈桥附近记录的  $Ce^{144}$  浓度为 0.01微微居里/升。

### (五) 海洋生物对同位素的浓缩问题

核爆炸产生的人工放射性物质是海产鱼、贝藻类的污染源,道奈尔什 (Donaldson) 首先报导了安尼维托克环形礁附近的鱼的污染,确定了在鱼肠和其他脏器存在  $Ce^{144}$ — $Pr^{144}$ 。1951年克奈夫研究了放射性原子废

液对湖鱼的污染,阐明在骨和鳞的硬组织中  $Sr^{89}$ 、 $Sr^{90}$ — $Y^{90}$  较多,  $P^{32}$  较少,  $Cs^{137}$ 、 $Ru^{106}$  少量。内脏、肉等软组织中  $Cs^{137}$  多。此外,还有少量的  $Ru^{106}$ 、 $Ce^{144}$ — $Pr^{144}$ 、 $Zr^{95}$ — $Nb^{95}$ 。在英国,顿斯特 (Dunster) 和佛峨 (Fair) 曾就温茨凯尔原子中心所排废液对爱尔兰海的鱼的放射性污染作了推断,认为可能是由  $Ru$ 、 $Pu$ 、 $Ce$ 、 $Cs$ 、 $Y$ 、 $Sr$  等所致。

1955年日本许多学者分析了比基尼试验对鱼的污染,其放射性核种主要是  $Zn^{65}$ 、 $Fe^{55}$ 、和  $Fe^{59}$ , 这几种同位素不是核爆炸的产物,而是感生元素。除上述元素外,还有少量的  $Cd^{113}$  和  $Cd^{115}$ 。  $Sr^{90}$ 、 $Y^{90}$ 、 $Mn^{54}$  含量也较少。此外,还发现了痕迹量的  $Ba^{140}$ — $La^{140}$ 。

这时,三宅确认了海水中的核素主要是各种稀土类和  $Ce^{144}$ 。而  $Fe^{55}$ 、 $Fe^{59}$  和  $Zn^{65}$  极微。由此可以推断,鱼类对于放射性核种的



浓缩是有选择性的。佐伯等用同位素进行了实验，也证明 $Zn^{65}$ 、 $Fe^{55}$ 在鱼体软组织中的浓缩比稀土元素更显著。

在1954年日本“俊鹤丸”号的调查中，发现鱼的污染，最高的放射性是在胃肠内容物、幽门或肝中，其次是脾脏或肾，而胃壁或肠壁则放射性很低。在腮和血液中，仅仅检出了微量的放射性。在生殖器官也发现有污染。骨骼和皮包括鳞的放射性也很低，然而，曾在某一海域内捕获的飞鱼的肌肉中检出了160—180脉冲/克的放射性。

在大鱼的暗肉中，存在着较高的放射性，比白色肌肉大几倍到十倍，在鱼的尾部肌肉和腹部肌肉之间的放射性差别不大。而在这些鱼的肝中放射性是不同的。

在东经 $155^{\circ}$ — $173^{\circ}$ 和北纬 $15^{\circ}$ 到南纬 $2^{\circ}$ 的北赤道流区域所捕捉的大部分金枪鱼和乌贼，放射性都多于1,000脉冲。在总捕获量中，其放射性少于1,000脉冲的占17%，在这个区域，

放射性污染是不同的，甚至在同一流区也不一样。

在反赤道流区所捕获的鱼之放射性比北赤道流区鱼的放射性要少很多，少于100脉冲的占93%。17%的地区没有检出放射性。在南赤道流区少于100脉冲的为85%，没有检出放射性的地区占69%。

以上主要是介绍了海洋生物的污染问题。当前，为了更好的认识生物富集放射性同位素的能力，往往采用测定浓缩因子的方法。浓缩因子(CF)是由海洋生物的器官和组织中放射性核素浓度 $C_{mf}$ (或稳定元素浓度 $C'_{mf}$ )与生物生活的海水中放射性核素浓度 $C_{sw}$ (或稳定元素浓度 $C'_{sw}$ )的比求得的。

$$CF = \frac{C_{mf}}{C_{sw}} \text{ 或 } CF' = \frac{C'_{mf}}{C'_{sw}}$$

浓缩因子的测定方法有三个：

(1) 分析海水中和生物体中的稳定元素浓度。

表10 用三种不同方法测得的不同生物的浓缩因子

生物体	放射性核素方法	锶			铯			钶, 铈	铀
		(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(3)	(3)
浮游植物		—	—	4—1,600	—	—	1.2—30	—	340—4,500
藻类	绿藻	1.5	0.9—3.2	1—7	240	—	1—7	30—400	100—900
	褐藻	18—100	8—60	2—41	16—50	32—74	2—30	170—360	200—350
	红藻	0.3—8.3	0.2—5.8	0.1—6.3	16—28	—	1—50	60—1,000	100—1,100
浮游动物		0.3—0.7	1—10	0.1—0.9	17	0.1—1	1—26	0.5—100	1.4—661
甲壳动物	肌肉内脏壳	0.1	—	0.2	—	—	8—9	3—5.5	5—25
		—	—	1.3	—	—	8—9	1.2—30	3—200
		180	—	1.5—15	—	—	0.1—15	11—193	2—400
软体动物	肌肉内脏壳	0.1—1.4	—	0.2—0.5	15—24	3.2—8.2	6.8—72	1—5	4—25
		—	—	1.0—1.3	—	—	—	2.5—30	40—200
		86—181	68—135	6—15	—	—	0.01—14	10—53	2—50
鱼类	肌肉内脏骨骼	0.1—1.5	0.3—0.6	0.02—0.2	15—44	24—100	6—37	0.1	0.3—12
		—	—	0.1—1.7	19—50	—	3—35	0.01—20	4—720
		8.5—36.6	12—50	0.5—3.7	64—244	26	3—5	0.02—0.4	4

(2) 测定海水的放射性沉降和海区中海洋生物的放射性污染。

(3) 用放射性同位素作生物试验, 当海水中与生物体内放射性核素浓度达到平衡时, 测量生物体和海水中的放射性。

方法(1) 通常是为了得到关于自然平衡状态的资料。而方法(2) 对测量在自然条件下的影响是有价值的。方法(3) 可以明显地说明生物体中放射性物质的积累和排除与时间的关系, 目前我国进行此类实验多采用方法(3)。而(1)、(2) 两种方法从未采用, 尤其是(1) 法更无人研究, 主要是测试海水和生物体中稳定元素的方法还有很多困难, 产生误差较大。

表10列出了用三个方法得到的浓缩因子。

需要指出: 三个方法得到的浓缩因子, 有的相同, 有的不同, 其原因之一是, 在某些情况下进入海水中的放射性核素(沉降物和放射性废物) 和它在天然海水中的稳定同位素之间处于不平衡状态。任何化学形式的差别都将对CF 值产生强烈的影响。在一般的示踪实验中, 由于不能控制鱼的短饲养期等实验条

件, 生物和海水之间就会处于不平衡状态。这就产生了一个在安全估计值中应该采用哪一个浓度值的问题。目前, 沿岸污染比整个海洋污染更重要。因此, 在安全估计值中, 应当避免只根据稳定元素的分析结果而作过分勉强的决定。

## 五、人工放射性在海水中的移动

### (1) 同位素的来源

进入海洋中的放射性同位素的来源主要有三个: 核武器爆炸、陆上原子设施运转和海上原子舰艇活动。它们产生的同位素经过一系列循环, 一部分转入人体, 一部分沉入大海。进入海洋的放射性物质有的是离子状态, 有的是胶体状态或颗粒状态。不管以什么形式存在, 都有可能通过吸附, 离子交换和消化等方式进入生物体, 最后进入人体。其可能的路线如图1 所示。

### (2) 水平运动

放射性核素在海水中的运动形式主要有两

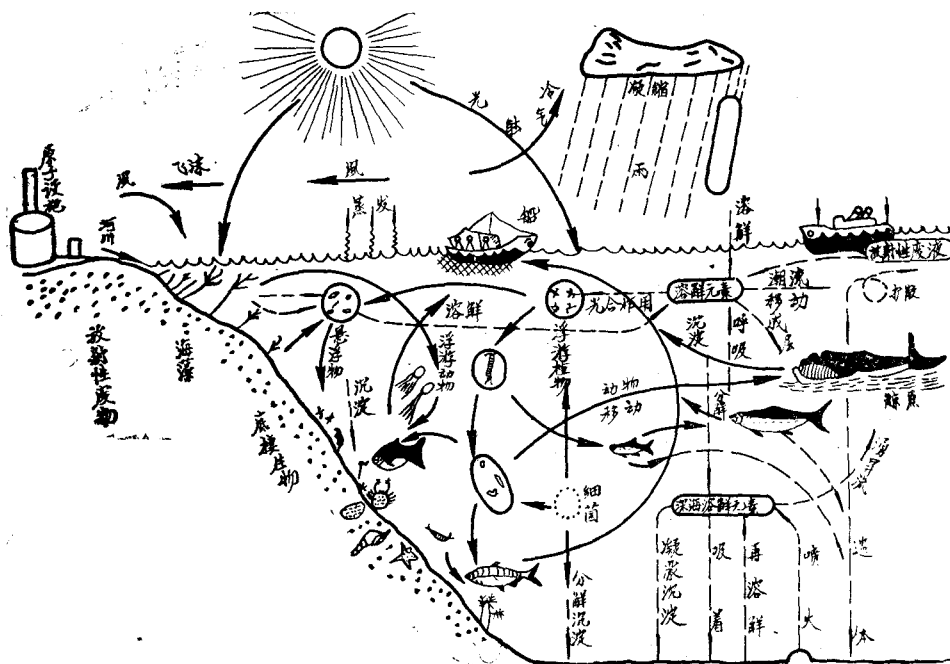


图1 放射性物质在海洋中的移动

种，一种是水平运动；一种是垂直运动。

表面海水中的核素，由于受海流、潮流以及涡动扩散的影响而不断的运动。在大洋中，海流的影响是很重要的。1954年，美国在比基尼和安尼维托克岛进行试验之后，日本“俊鹤丸”号的调查发现：放射性物质是沿着北赤道流的方向运动的，在海流大的北赤道流主方向上，即比基尼西北西方向，放射性为100脉冲数/升的海水流动了2,000公里，而海流较小的西南西方向才流动了1,000公里。

在反赤道流方向上，只有痕迹量放射性物质，而在南赤道流则没有放射性。

世界大洋中，在信风作用区内，有一种从东向西的赤道海流，即北赤道海流和南赤道海流（只有印度洋北部例外，那里的北赤道海流仅在冬季才出现），在北赤道海流和南赤道海流之间有一种从西向东的补偿反赤道流。

除了处在季风作用下的印度洋北部以外，在大洋的北部，海流主要是顺时针方向回转，南半球则主要是逆时针方向回转。

三宅等人在核试验4个月后，发现放射性水团向西移动了1,200公里，相当每天漂流9哩多。哈利(Harley)也报导了放射性从比基尼向西漂流远达4,300公里，速度也是每天9哩多。都是沿北赤道流运动。

在比基尼核实验后，进行的浮游生物调查也证明了放射性物质的水平运动与海流有密切关系。在北赤道流方向上，用拖网法收集的样品都是几百个脉冲/克，在反赤道流为40—150脉冲/克，而在南赤道流则无放射性。

海水和浮游生物的这种污染情况证明：放射性物质是紧紧地随海流而动的，它不容易越过反赤道流而进入南赤道流，因此，南赤道流海水基本上无放射性。

1958年夏季，在比基尼、安尼维托克环形礁附近又进行了核试验。1959年5—6月，在黑潮流域的污染达到了高峰，总 $\beta$ 达13脉冲/升这正好说明放射性物质沿着北赤道海流进入黑潮流域。由于这个海流是作顺时针方向运动，放射性水团还要沿着北太平洋海流到达美国西

岸，所以1960年底—1961年在美国加利福尼亚州沿岸  $C_s^{137}$  浓度上升。这个浓度变化距1959年6月在黑潮中发现  $S_r^{90}$ 、 $C_s^{137}$  放射性高峰是一年半，距1958年夏季比基尼核实验是两年半。

三宅等人从外洋表面海水中的  $S_r^{90}$ 、 $C_s^{137}$  浓度变化，推定北太平洋表面流水的完全混合约需10年，水平扩散系数为  $1.4 \times 10^9$  厘米<sup>2</sup>/秒。

Mo、Ru、Ce、Zr等以胶状和粒子状形式存在于海水中，它本身能凝聚下沉和由于重力作用而下沉，或由于吸附在无机和有机悬浮物上而下沉。因此，它们的水平扩散与离子状的  $S_r^{90}$ 、 $C_s^{137}$  等核种不同。

长屋、佐伯等人研究了核种在悬浮物多的沿岸水中的消除和堆积情况。

### (3) 垂直运动

与水平运动的同时，也进行着垂直方向的扩散，从宏观上来看，海水在极地受冷，密度增大而下沉，至低纬度区上升，再流向极地，以此进行垂直运动。

海水是分层的，从表面到50—100米处，通称为混合层。这一水层内，密度差小，垂直混合非常容易也非常频繁。100米以下，称为跃层，这里海水的密度随深度而急剧增加，形成稳定层。

放射性核素在混合层含量高，而且比较均匀，在跃层内，含量急剧下降，因为密度较小的混合层水体不易进入其间。在深层，浓度分布大致均匀，而含量更低。但是也发现：海底附近的水体，放射性也有回升的现象。这可能由于海底沉积中放射性物质的再溶解造成的。

在跃层以下的  $S_r^{90}$ 、 $C_s^{137}$  之垂直扩散，主要是水的涡动扩散。三宅等人用公式

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{z^2}{2Dt}}$$

计算了从200米到海底(4,000米平均值)的涡动扩散系数  $D$ ， $C_0$  为投到200米深的核素量， $C$  为  $t$  时间后在深度  $Z$  的核素浓度。计算指出西

太平洋平均涡动扩散系数为  $D=200$  厘米<sup>2</sup>/秒, 这意味着海洋表面的核素扩散到 4,000 米的深度达到均匀浓度需要数百年。

德方特 (Defant) 测得的赤道海洋混合层上边垂直涡动扩散系数是 310 厘米<sup>2</sup>/秒。莫克 (W. H. Munk) 等人证明它的数值为 200—300 厘米<sup>2</sup>/秒, 日本学者认为在比基尼碱水湖是 5 厘米<sup>2</sup>/秒或 5 厘米<sup>2</sup>/秒左右。所利用的公式如下:

$$S = \frac{1}{2\sqrt{A_z\pi t}} \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot \left[ e^{-\frac{(z-\lambda)^2}{4A_z t}} + e^{-\frac{(z+\lambda)^2}{4A_z t}} \right] d\lambda$$

$$f(z) = \begin{cases} S_0/3000 & 0 < Z < 3000 \\ 0 & Z > 3000 \end{cases}$$

在利用这个公式时, 用  $A_z=100; 10; 5$  厘米<sup>2</sup>/秒进行计算所得结果  $A_z=5$  厘米<sup>2</sup>/秒最合适。

长屋等根据从表面至 500 米深的水中, 不同深度的  $S, ^{90}\text{Sr}, ^{137}\text{Cs}$  的含量推算了这些核素的停留时间。 $S, ^{90}\text{Sr}$  在三陆外海为 11 年, 在日本海为 7.5 年, 在房总外海为 4 年, 相模湾为 1.2 年。

在海洋中, 假定水柱的截面为 1 千平方米, 高度为 500 米深, 已知在某一时间, 经过水柱的某一点交界面的上层和下层存在  $N_0$  和  $N_0'$  以及过一段时间后的存在量  $N_t$  和  $N_t'$ , 在此期间放射性落下灰的平均沉降率为  $dlf$ ,  $t=0$  及  $t=t$  时, 观察点的水深为  $D_0$  和  $D_t$ , 蜕变常数为  $\lambda$ , 则垂直扩散的平均速度常数  $K$  用下面二式求得:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} + dN \cdot \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda}}$$

$$dN = K \cdot \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{500}{D_0 - 500} \cdot N_0' - N_0 \right) + \left( \frac{500}{D_t - 500} \cdot N_t' - N_t \right) \right] + dlf$$

平均停留时间用  $T_r = 1/k$  可以推出。

日本近海 0—500 米深水层的平均停留时

间,  $S, ^{90}\text{Sr}$  为 4.5 年;  $C, ^{137}\text{Cs}$  为 3 年。

对于胶体状和粒子状的核素, 其垂直移动, 由于吸附凝聚直到下沉而不能应用以上公式。

Sugihara 和 Bown 推算了大西洋中稀土族的沉降速度为 100 米/月, Osterbery 等推算的沉降速度为 43 米/天。长屋等报导了日本近海的  $\text{Ce}^{144}$  沉降速度为 400 米/月。

## 六、面临的研究任务

由于原子能的利用与海洋环境保护、资源开发利用、人类健康有着极为密切的关系, 所以, 应当大力进行放射性同位素的广泛研究, 其中最重要的有以下几个方面:

1. 海洋放射性污染的调查研究, 通过这一工作可以摸清我国和世界几大洋污染的现状, 为提供海洋食品放射性标准和进行必要的科学研究提供重要的资料。

2. 了解各主要放射性同位素的地球化学过程, 搞清他们的运动规律, ——水平运动、垂直运动、海底沉积、悬浮物吸附下沉引起的核素变化, 生物对核素的搬运, 多种同位素向海底移动的行为。

3. 放射性同位素在食物链中的移动, 生物吸收, 富集和排洩规律, 为防止同位素进入人体和研究核设施海上排污提供基本参数。

4. 利用海洋处理放射性废物的可能性与现实性。

5. 研究各种核素的分析方法与高灵敏度综合物理测试仪器; 提供快速, 准确而有效的监视敌人活动和从事放射化学研究的手段。

我们是发展中的国家, 原子能事业正在迅速发展, 我们要打破两个超级大国的核垄断, 不仅在军事上争取核能优势, 而且也要在核能的和平利用上走在世界前头。随着核能事业的发展海洋放射性工作的研究任务愈来愈繁重, 我们应当积极承担任务, 主动开展工作, 争取在较短时间内, 熟悉和掌握有关问题的规律性, 并采取必要措施, 以使我们伟大的社会主义祖国和人民防患于未然。