

广东核电与环境

GUANGDONG NUCLEAR POWER AND ENVIRONMENT

李源新等 著



科学出版社

www.sciencep.com

广东核电与环境

李源新等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

我国核电发展起步较晚,核电站对环境的影响受到公众和政府管理部门的关注。本书着重介绍广东省核电发展与环境保护工作,以及在核电环境管理、环境监测和核电站流出物的排放与海洋环境影响等方面取得的研究成果。从实际监测与相关研究进行了较系统的分析,证实了核电站从总体来说清洁、安全的能源,对周围陆地和海洋环境不会产生污染,对周围群众的健康与安全不会带来影响。

本书可供辐射防护、环境保护、核电和放射医学等有关专业人员参考,也可供关心核电发展的各行业工作人员与高校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

广东核电与环境/李源新等著. —北京:科学出版社, 2005. 12
ISBN 7-03-016701-5

I. 广… II. 李… III. ①核电站-工业企业管理-研究-广东省②核电站-环境保护-研究-广东省 IV. ①F426.23②X773
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157334 号

责任编辑:钟如松/封面设计:李源新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

韶关二九〇研究所地图彩印厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 12 月第 1 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 12 月第 1 次印刷 印张:16

印数:1—1000 字数:375000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

从 1942 年费米教授成功实现原子核连锁反应, 1957 年和平利用原子能的第一座核电站成功发电以来, 迄今全世界已有 450 座核反应堆在正常运转, 总发电量超过 3 万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 占世界总发电量的 17.5%。进入 20 世纪 90 年代, 核电站已迅速达到系列化、规范化和商用化, 核电已成为安全、清洁并有一定经济竞争力的能源。选择发展核电成为能源短缺国家和地区的重要途径。

广东省是个能源贫乏同时又是一个能源消费大省, 20 世纪 90 年代虽然广东火电有了很大的发展, 但随着经济的发展, 电力仍供不应求, 而油、气、水电等常规能源在广东省难以有较大发展。面对自身燃煤资源不足, 燃料运输、环境污染等问题长期困扰, 广东省发展核电势在必行。

我国核电工业是以浙江省秦山核电站和广东省大亚湾核电站的建设拉开了发展的序幕, 随着秦山二、三期和岭澳核电站相继投产和田湾核电站建设, 在未来五年内, 我国核电站运行机组将达 11 座, 在来的 10 年内运行机组有望超过 20 座, 其中广东省占 12 座, 核电将成为广东省能源结构的重要组成部分。

核电站在提供强大电力的同时, 每发一兆瓦电通常日产 3—4g 裂变产物, 核电站在正常运行时会向环境释放小量的放射性, 对环境产生一定的影响。核电站发生事故时, 对环境的影响范围会更大。

过去人们对燃煤电站带来的环境影响习以为常, 对核电站的安全和环境影响问题却感到不安。事实上, 核电站不产生大量烟灰, 不产生燃煤电站那样排出大量的二氧化硫、二氧化碳等化学污染物。核电站从烟囱排出的小量放射性要比一个相同装机容量的煤电站排出的天然放射性对厂址周围环境造成的剂量少得多。

到底核电站对环境会产生多大的影响? 核电站运行的安全性和发生事故的可能性究竟如何? 这些问题历来是政府主管部门和社会公众十分关心的问题。

本书试图用我们过去 10 年来对广东大亚湾核电站的环境监测和有关研究结果回答这些问题。

本书作者都参加过广东大亚湾核电站与环境有关研究和环境辐射监测工作。主要内容是以已完成的五项研究工作为主, 另有部分资料取自广东省环境辐射研究监测中心和广东大亚湾核电站已公开发表过的有关监测资料。按

现行章节重新编写而成。因此，本书更像是一本关于核电与环境专题研究报告，尝试在我们认识的范围内，就公众关心的核电与环境安全尽量作出一个较为简单的阐述。

核电与环境内容涉及广泛，过去我们又未曾进行过这方面的研究，缺乏经验，加上我们的水平有限，书中缺点、错误在所难免。恳请读者批评指正。

本书第1、2章由李源新、初志春编写；第3章由牟德海编写；第4章由黄乃明、欧阳俊杰等编写；第5至8章分别由李源新、钟创光、张春彝、陈家军等编写。

本书在编写过程中得到广东省环境保护局科技处和核应急与辐射环境管理处的支持和帮助；胡国辉、张春彝、周治发研究员对书稿提出了许多宝贵修改意见；黄嘉麟、胡国辉研究员协助审阅了书稿，在此我们表示十分感谢。最后我们还要感谢编写人所在各单位领导对该项工作的支持和帮助。

李源新

2004年12月30日

目 录

前 言	(I)
第 1 章 广东省核电工业的崛起	(1)
1 广东省能源状况分析	(1)
2 当前世界核电的发展	(4)
3 核电是清洁的能源	(6)
4 燃煤的环境问题	(9)
5 广东发展核电势在必行	(10)
6 广东核电发展业绩与特色	(11)
参考文献	(18)
第 2 章 核电站与海洋环境	(19)
1 核电站的堆型	(20)
2 压水堆液态流出物的海洋排放	(20)
3 压水堆液态流出物中几种重要的放射性核素	(22)
4 核电站液态流出物对附近海洋生态的影响	(23)
5 大亚湾生态环境简况	(24)
参考文献	(27)
第 3 章 大亚湾海洋环境化学	(28)
1 海水化学组成	(28)
2 放射性核素及其在海洋环境中的行为	(37)
3 大亚湾海洋环境化学	(54)
4 核电站运行前大亚湾海洋环境的放射性本底水平	(82)
参考文献	(89)
第 4 章 广东省核电站外围辐射环境监督性监测	(92)
1 概述	(92)
2 核电站环境简况	(93)
3 核电站运行概况	(93)
4 监测项目、方法及其探测限	(96)
5 质量保证	(97)
6 主要监测结果	(99)
7 广东大亚湾核电站放射性流出物监测	(108)
参考文献	(119)

第 5 章 广东大亚湾核电站液态流出物排放在湾内分布的计算机模拟 和监测数据的统计分析	(120)
1 广东大亚湾核电站液态排放放射性核素在湾内分布的计算机模拟	(120)
2 数值计算方法	(122)
3 广东大亚湾核电站周围海域监测数据的统计分析	(128)
4 结果	(135)
参考文献	(145)
第 6 章 ^{110m}Ag 在海洋生态系统中的行为	(146)
1 银在海洋环境中的行为	(146)
2 ^{110m}Ag 生物浓集和相关参数的实验	(152)
3 ^{110m}Ag 在生物相关实验中的主要结论	(172)
参考文献	(173)
第 7 章 海洋生态系统中放射性核素的迁移转化规律	(178)
1 海洋生态系统库室模型	(178)
2 海洋生态系统库室简化模型参数及边界条件	(180)
3 海洋生态系统库室简化模型的计算方法	(184)
4 计算结果的分析	(187)
5 结语	(193)
第 8 章 大亚湾底质中 ^{137}Cs 预测模拟	(194)
1 ^{137}Cs 在海域环境中的行为特征	(194)
2 海湾 ^{137}Cs 迁移扩散数学模拟分析	(199)
3 海湾底质中 ^{137}Cs 的迁移模拟	(226)
4 底质 ^{137}Cs 环境容量及迁移富集预测	(236)
5 结论与建议	(241)
参考文献	(243)

第 1 章 广东省核电工业的崛起

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础,能源的开发和利用促进了人类社会的发展,同时也对人类自身赖以生存的环境造成了日益严重的破坏,目前的环境问题,特别是大气污染,很大程度是由于化石燃料的开发和利用造成的。如何在发展经济的同时更加合理、有效地开发利用能源,减少环境污染,改善人类的生存环境,已成为世界各国实施可持续发展战略所面临的重大问题。

1 广东省能源状况分析

1.1 概述

广东省位于中国大陆南部,陆域东邻福建,北接江西、湖南,西接广西,南临南海,西南隔琼州海峡与海南省相望。

广东省是中国人口较多且稠密的省份之一,人口增长快,人均占有自然资源量低,人均土地、耕地和森林面积均低于全国人均水平。

改革开放以来,广东经济快速增长。1980 年全省生产总值仅为 249.65 亿元人民币,到了 2004 年全省生产总值已超过 1.6 万亿元人民币。在广东社会经济建设取得辉煌成就的同时,环境质量也在逐年下降,环境污染和生态破坏已成为影响和制约社会经济可持续发展的重要因素。广东省由燃煤、燃油造成的酸雨问题非常突出,全省酸雨控制区面积已达 12.8 万 km^2 , 占全省面积的 71.6%, 占全国酸雨控制区总面积的 16%, 是全国酸雨控制区面积最大省份之一。根据估算,每年因酸雨污染造成的经济损失达 40 亿元人民币左右。

广东也是中国的能源消耗大省,但支持经济发展的能源资源贫乏,自身的煤炭和石油资源不丰富,大部分水电资源也已开发利用,燃煤、燃油发电受环境容量等条件的限制,风能、太阳能等又难以大规模应用,因此必需寻找新的能源出路。

1.2 电源结构

我国的一次能源总贮量约折合为 6525 亿 t 标准煤,其中煤炭占 83.6%,石油占 5%,天然气占 0.1%,水能占 11.3%,这种能源结构从根本上决定了煤炭将在我国能源结构中占主导地位,并在电力构成中占相当大的比重。以广东省近年为例,2003 年广东自有电量为 1436 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,其中统调煤电、油电、地方火电占 70% 左右,而煤电又占全省火电发电量的 75% 以上,水电、抽水蓄能、核电占 30%,可见燃煤、燃油发电起主导作用。

广东省已建成并正常运行的两座核电站,发电能力仅 276.94 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,目前核电对改变全省的电源结构起不了太大作用,为了解决全省能源缺乏和燃煤、燃油发电带来的环境问题,根据广东省的核电发展规划,核电在广东省将得到较大的发展,预估 2010 年全省核电将有望达到 1200 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,火电和核电将成为全省能源的二大支柱,同时,广东省电源结构会得到较大的改变,环境质量也会得到一定的改善。

1.3 火电与核电工业的发展

20 世纪 80 年代以前, 广东省电力供应一直处于紧张状态, 90 年代全省电力生产得到了很大发展。但随着全省经济蓬勃发展, 造成电力供应紧张。为了缓解这种现象, 全省加快火电建设步伐, 相继建成黄埔 (122.5 万 kW)、沙角 A (120 万 kW)、沙角 B (70 万 kW)、湛江 (60 万 kW)、珠江 (60 万 kW)、妈湾 (90 万 kW)、沙角 C (198 万 kW) 等第一批大型骨干电厂, 全省电力供应紧张局面逐渐缓和。根据《广东省火力电厂调查技术报告》显示, 至 1996 年底, 全省装机容量在 5000kW 以上的火电厂共计 149 家, 装机总容量从 1980 年的 117.5 万 kW 增加到 1598 万 kW, 发电量达 587.61 亿 kW·h。全省火电以煤为主, 1996 年燃煤电厂装机容量占火电厂装机容量的 65.03%, 耗煤 2165.05 万 t, 发电 456.52 亿 kW·h, 占全省火电发电量的 77.69%。

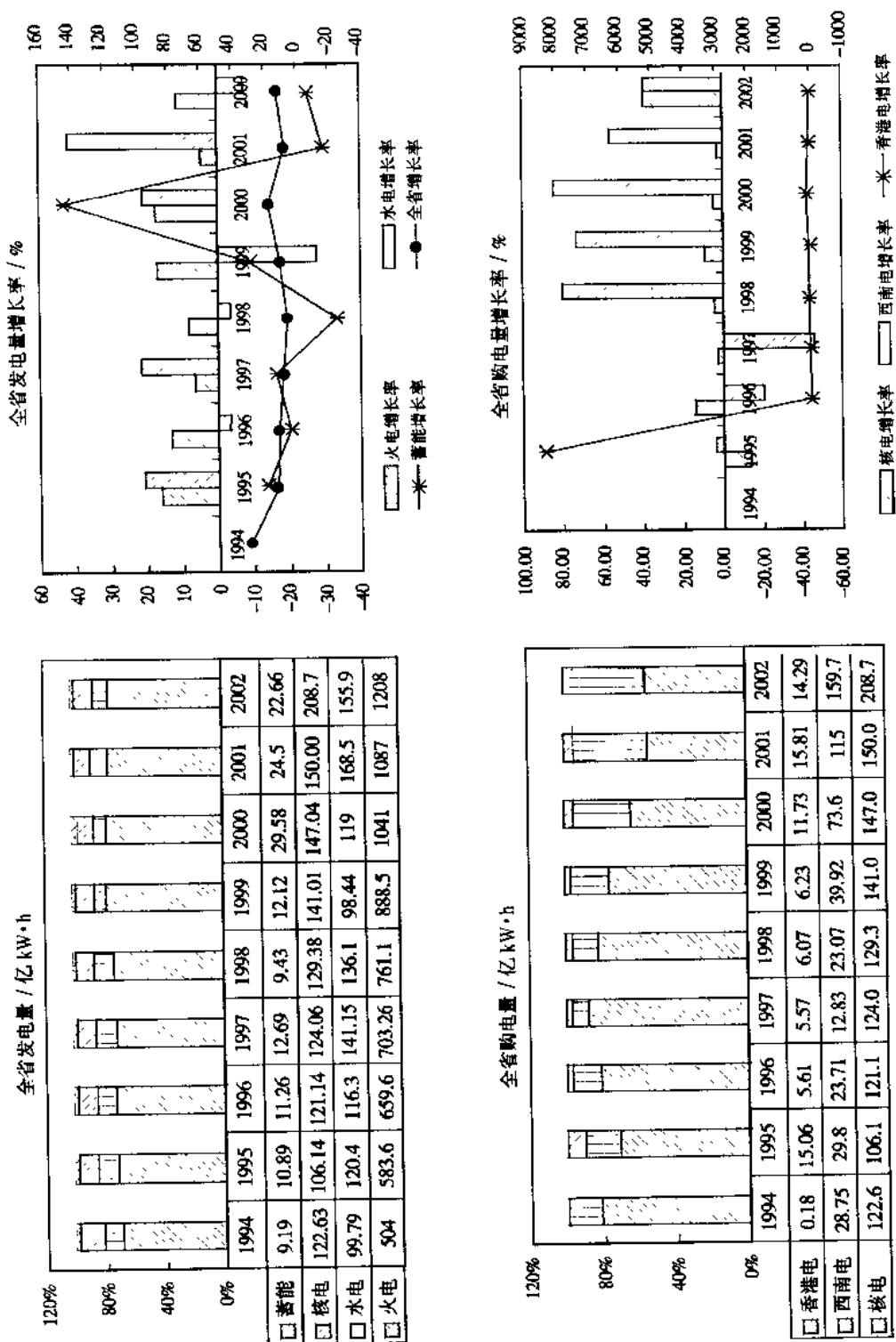
为适应广东省经济发展对电力的需求, “九五”期间全省电力仍保持一定发展速度, 根据表 1.1 及图 1.1 统计数据显示, 到 2002 年火电发电量已达 1207.79 亿 kW·h, 在 1995—2002 年期间火电年平均增长约在 11% 水平, 保持着较高的增长率。

广东省核电发展起步较晚, 从 1994 年大亚湾核电站投入商业运行后, 保持在 122.63 亿—150 亿 kW·h/a 发电水平, 从 2002 年开始, 广东省第二座核电站岭澳核电站正式投入商业运行, 到 2003 年底, 广东大亚湾和岭澳核电站完成了全年发电任务, 实现 276.94 亿 kW·h 的上网电量, 2003 年度广东省电网统调总装机容量达 22370MW, 从发电量来看, 广东省电网统调电厂总发电量为 1369 亿 kW·h, 广东大亚湾核电站为 150.03 亿 kW·h, 岭澳核电站为 138.92 亿 kW·h, 核电发电量仅占总发电量约 4.74%。

预估岭澳核电二期和阳江核电站建成后, 全省核电可望达 1200 亿 kW·h 的发电水平, 核电和火电的比例会有较大的改变。

表 1.1 广东省电力发展情况

		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
发电量 /亿 kW·h	火电	504	583.62	659.62	703.26	761.07	888.46	1040.99	1086.54	1207.79
	火电增长率/%		15.80	13.02	6.62	8.22	16.74	17.17	4.38	11.16
	水电	99.79	120.4	116.3	141.15	136.1	98.44	118.96	168.49	155.93
	水电增长率/%		20.65	-3.41	21.36	-3.58	-27.67	20.85	41.64	-7.45
	核电	122.63	106.14	121.14	124.06	129.38	141.01	147.01	150.00	208.69
	核电增长率/%		-13.14	14.13	2.41	4.29	8.99	4.26	2.03	39.12
	蓄能	9.19	10.89	11.26	12.69	9.43	12.12	29.58	24.5	22.66
	蓄能增长率/%		18.50	3.40	12.68	-25.68	28.53	144.06	-17.17	-7.51
	总计	735.61	821.05	908.32	981.16	1035.98	1140.03	1336.54	1429.53	1595.07
	全省增长率/%	28.43	11.62	10.63	8.02	5.59	10.04	17.24	6.96	11.58
全省发购电量		764.54	865.91	937.64	999.55	1065.98	1186.18	1421.88	1560.31	1776.5
发购电量增长率/%			13.26	8.28	6.60	6.56	11.36	19.87	9.74	13.86
外购电量 /亿 kW·h	西南电	28.75	29.8	23.71	12.83	23.07	39.92	73.6	114.97	159.68
	香港电	0.18	15.06	5.61	5.57	6.07	6.23	11.73	15.81	14.29
	总计	28.93	44.86	29.32	18.40	29.14	46.15	85.33	130.78	173.97
	西南电增长率/%		3.65	-20.43	-45.92	79.91	72.99	84.39	56.21	38.89
	香港电增长率/%		8266.67	-62.75	-0.71	8.98	2.64	88.28	34.78	-9.61



2 当前世界核电的发展

作为当今世界一种重要的能源,核电在世界电源结构中发挥着重要的作用。

目前,世界上有 436 台运行的核电机组,总装机容量为 351718MWe (2000 年 3 月),核电占全球总电力生产的 16.1%。法国是核电占总发电量份额最大的国家,达到 75%,美国是核电净装机容量最多的国家,有 104 台发电机组在运行,装机总容量超过 100000MWe。

按照正在运行的核电机组数目由多到少排列,其顺序为美国(104)、法国(59)、日本(53)、英国(35)、俄罗斯(29)、德国(19)、韩国(16)、加拿大(14)、乌克兰(14)、印度(11)、瑞典(11)。

全世界共有 17 个国家的核电在国家电力生产中的比例超过 25%,其中比例较高的国家是法国(75%)、立陶宛(73%)、比利时(58%)、保加利亚(47%)、斯洛伐克(47%)、瑞典(47%)、乌克兰(44%)、韩国(43%)、日本(35%)、德国(31%)。

中国大陆有 3 台核电机组在运行,核电仅占国内电力生产总量的 1.15%。中国台湾有 6 台核电机组在运行,核电占台湾电力生产总量的 25%。

全世界还有 38 座核电机组正在建造中,主要集中在远东、南亚、东欧和南美。其中,中国 10 座(包括台湾 2 座)、日本 4 座、韩国 4 座、乌克兰 4 座、印度 3 座、俄罗斯 3 座、捷克 2 座、斯洛伐克 2 座、伊朗 2 座、巴基斯坦 1 座、罗马尼亚 1 座、巴西 1 座、阿根廷 1 座。

表 1.2 1999 年世界运行及在建中的核电站统计表

国家和地区	运行中的反应堆		在建中的反应堆		1999 年核发电量		截至 1999 年底 总的运行经验	
	机组	MWe	机组	MWe	TMWe · h	占总发电量%	年	月
阿根廷	2	935	1	692	6.59	9.04	42	7
亚美尼亚	1	376			2.08	36.36	32	3
比利时	7	5712			46.6	57.74	163	7
巴西	1	626	1	1229	3.98	1.32	17	9
保加利亚	6	3538			14.53	47.12	107	2
加拿大	14	9998			70.4 *	12.7 *	419	2
中国	3	2167	7	5420	14.1	1.15	20	5
捷克	4	1648	2	1824	13.36	20.77	54	8
芬兰	4	2656			22.07	33.05	83	4
法国	59	63103			375	75	1110	2
德国	20	22282			160.4	31.21	590	7
匈牙利	4	1729			14.1	38.3	58	2
印度	11	1897	3	606	11.45	2.65	169	2
伊朗			2	2111				
日本	53	43691	4	4515	306.9 *	36 *	909	8
韩国	16	12990	4	3820	97.82	42.84	153	1
立陶宛	2	2370			9.86	73.11	28	6
墨西哥	2	1308			9.56	4.98	15	11
荷兰	1	449			3.4	4.02	55	0
巴基斯坦	1	125	1	300	0.69	1.2	28	6
罗马尼亚	1	650	1	650	4.81	10.69	3	6

续表 1.2

国家和地区	运行中的反应堆		在建中的反应堆		1999 年核发电量		截至 1999 年底总的运行经验	
	机组	MWe	机组	MWe	TMWe · h	占总发电量%	年	月
俄罗斯	29	19843	4	3375	110.91	14.41	642	6
南非	2	1842			13.47	7.41 *	30	3
斯洛伐克	6	2408	2	776	13.12	47.02	79	0
斯洛文尼亚	1	632			4.49	36.23 *	18	3
西班牙	9	7470			56.47	30.99	183	2
瑞典	11	9432			70.1	46.8	267	2
瑞士	5	3079			23.52	36.03	123	10
英国	35	12968			91.19	28.87	1203	4
乌克兰	16	13765	4	3800	67.35	43.77	238	1
美国	104	97145			719.4 *	19.54 *	2455	8
总计	436	351718	38	31718	2394.63		9414	3

注：(1) * 为估计值；(2) 总计中包括台湾地区 6 套已运行和 2 套在建机组；(3) 台湾地区 1999 年核发电量 36.9TW · h，占总发电量的 25.32%。

从表 1.2 数字不难看出，尽管 1986 年 4 月发生了震惊世界的苏联切尔诺贝利核电站事故，但是世界范围的核动力生产仍然保持着增长的势头，从 1988 年初有 417 座核动力堆投入运行，到 1999 年底有 436 座投入运行，还有 38 座在建造中。

IAEA（国际原子能机构）预测，未来核动力生产的发展尽管不会像过去那样迅速，但总体上仍可能以持续增长的态势跨入 21 世纪，尤其不可忽略的是发展中国家的增长会更加显著。

据 IAEA 估计，1987—2005 年间，全世界核动力生产平均每年将增加 3.8%—4.6%。其中，发展中国家（包括东欧）的年平均增长率预期高达 7.2%—8.8%，均为工业化国家年平均增长率（3.4%—4%）的 2 倍。

1987—2005 年世界核动力生产的年平均增长率的预测列于表 1.3，表 1.3 同时列出了这一期间能源和电力消耗的可能增长。从中可以看出，1987—2005 年间多数地区核动力生产的平均增长率既高于能源消耗的增长率，也略高于电力消耗的增长率。

表 1.3 1987—2005 年核动力生产和能源、电力消耗平均增长能估计值 %

地 区	消 耗		生 产
	能 源	电 力	核动力
北美	1.2—1.8	2.2—3.1	2.2—2.8
西欧	1.2—1.8	2.2—2.5	2.3—2.9
太平洋地区工业化国家	1.2—1.9	1.8—3.2	4.7—5.2
东欧	1.7—2.3	3.0—3.7	7.0—7.8
亚洲	2.2—3.2	4.7—5.9	6.2—7.9
拉丁美洲	2.6—4.0	5.6—7.0	11.2—13.8
非洲与中东	2.3—3.5	5.5—7.7	1.5—8.3
全世界平均	1.7—2.4	3.0—4.0	3.8—4.6
工业化国家	1.4—2.0	2.3—3.1	3.4—4.0
发展中国家	2.2—3.3	4.8—6.3	7.2—8.8

3 核电是清洁的能源

核电在世界上发展已有47年的历史,积累了54多堆年的运行经验,核电发展的历史证明,核电是清洁、安全的能源。

中国核电发展起步较晚,公众担心核电的发展是否会带来严重的环境问题,这种担心是有一定理由和历史根源的。因为核电站同其它动力源一样,在提供强大电力的同时也会向环境释放少量的放射性,同时也会向环境排放出大量的废热;放射性可以直接或间接地对人体产生辐射影响,废热则可能影响水生生物的生态环境平衡;核电站也存在发生事故、甚至严重事故的可能,一旦发生事故,它会对周围环境产生较大影响。

事实上,现代核电站在设计、建造、运行过程中都采取极严密的措施及严格的管理制度,足以保证核电站的安全运行。为了阻挡燃料的放射性泄漏至环境中,核电站都设置了三重完整性的屏障,还采取了一些其它辅助性措施以确保避免三重屏障同时失效这类事故的发生,使此类事故发生机率可以忽略。

核电站在正常运行时排入环境并能对人们产生的剂量负担的放射性物质,主要是气态和液态流出物,固体废物通常贮存在受严格控制并与生物圈隔离的场所,在正常情况下对人群产生的剂量是很小的。

20世纪90年代,我国一些专家、学者已系统地比较和分析了核电站和煤电站系统对环境和公众危害的影响^[1,2],同时利用环境危险评价方法^[3]对我国煤电系统和核电系统造成的公众健康危害进行了分析比较(表1.4—1.7)。

表 1.4 我国煤电系统的健康危害

人/GWe·a

名 称		急性健康危害				慢性健康危害		远期影响	
		死亡 人数/人	贡献 /%	受伤 人数/人	贡献 /%	死亡 人数/人	伤病 人数/人	死亡 人数/人	贡献 /%
开矿和加工	职业人员	47.7	93.9	33.5	85.5	—	45.6		
	公众	—	—	—	—	—	—		
运输	职业人员	0.47	0.9	—	—	—	—		
	公众	0.44	0.9	—	—	—	—		
电站正常运行	职业人员	0.2	4.3	5.7	14.5	—	14.8		
	公众	—	—	—	—	11.8	—		
事故	职业人员	—	—	—	—	—	—		
	公众	—	—	—	—	—	—		
灰渣利用	职业人员	—	—	—	—	—	—		
	公众	—	—	—	—	—	5.0		
二次扬尘	职业人员	—	—	—	—	—	—		
	公众	—	—	—	—	—	3.2×10^{-2}		
合计	职业人员	50.4	99.1	39.2	100.0	—	60.4		
	公众	6.44	0.9	—	—	11.8	—		
总计	职业人员	50.8	100.0	39.2	100.0	16.8	60.4		
	公众								
灰场	职业人员							—	—
	公众							13.3	—

表 1.5 核电工业健康危害

人/GWe·a

名 称		急性健康危害		慢性健康危害	
		死亡/人	受伤/人	死亡/人	疾病/人
现期影响 铀矿山与水冶	职业人员	2.5	0.75	6.4×10^{-1}	4.0
	公众			2.6	—
燃料元件制造	职业人员	0.1	1.0	1.2×10^{-1}	—
	公众			2×10^{-3}	—
同位素分离	职业人员	0.1	1.0	1.3×10^{-2}	—
	公众			8×10^{-2}	—
燃料后处理	职业人员	0.1	1.0	7×10^{-2}	—
	公众			6×10^{-3}	—
核燃料运输	职业人员	0.1	1.0	3×10^{-2}	—
	公众			3×10^{-2}	—
反应堆正常运行	职业人员	0.1	1.0	5.8×10^{-2}	—
	公众(秦山)			8.7×10^{-2}	—
	公众(大亚湾)			1.1×10^{-1}	—
	公众(平均)			9.9×10^{-2}	—
合 计	职业人员	2.5	0.75	8.5×10^{-1}	—
	公众	0.1	1.0	2.9	—
反应堆正常运行		3×10^{-5}	2×10^{-3}	2.8×10^{-3}	—
现期影响与反应堆严重事故影响	职业人员	2.5	0.75	8.5×10^{-1}	—
	公众	0.1	1.00	2.9	—
总计	职业人员	2.6	1.75	3.7	—

表 1.6 煤电站气载流出物中三类污染物对公众产生的健康危害

人/GWe·a

	化学致癌污染物	非化学致癌污染物	放射性物质	总计
死亡人数/人	2.2	4.2	8.2×10^{-2}	7.2
比例/%	30.6	58	11.4	100

表 1.7 煤电站、核电站正常运行时对公众的集体剂量

人·Sv/GWe·a

途 径	气态流出物	液态流出物	固态
煤电站	16.3	2.9×10^{-2}	100
核电站(正常运行)	2.0	4×10^{-3}	$< 1 \times 10^{-3}$

从对人体健康危害角度来看,核电比煤电更安全,另外从有关核电站与煤电站对环境的影响分析评价证明^[4-8],核电系统的环境影响可以忽略不计,而煤电系统的SO₂、NO_x和飘尘排放已成为我国环境污染的主要来源。

广东省发展核电起步较晚,但广东大亚湾核电站已经有10年安全运行的记录。在取得良好的经济效益和社会效益的同时,核电站高度注重安全生产、质量第一的管理原则,使得核电站的废气、废液排放量达到国际同类电站水平^[9],废液的排放甚至降低到国家标准限值1%以下。由于广东大亚湾核电站有一个完善的辐射防护体系和先进的环境管理体系,保障了从事辐射工作人员的照射得到有效的控制,10年来,广东大亚湾核电工作人员所受到的外照射量累积剂量为116.6人·Sv^[9],归一化集体剂量为0.879人·Sv/GWa。这说明广东大亚湾核电站辐射工作人员的集体剂量和核电站工作人员的平均个人剂量一直维持在较低的水平。从表1.8和图1.2给出与世界核营运者协会(WANO)公布的全世界压水堆核电站的业绩进行比较,广东大亚湾核电站进入了世界先进水平。

表 1.8 1994—2002 年大亚湾核电站年发电量、上网电量、归一化集体剂量和个人剂量

年 份	发电量 /GW·h	上网电量 /GW·h	集体剂量 /人·Sv	归一化集体剂量 /人·Sv·(GWa) ⁻¹	个人剂量/mSv	
					平均个人剂量	最大个人剂量
1994	12265	11628	0.427	0.305	0.13	4.73
1995	10614	10058	1.987	1.640	0.80	10.34
1996	12114	11530	1.668	1.206	0.82	12.10
1997	12406	11811	1.576	1.113	0.73	20.74
1998	12938	12309	1.338	0.906	0.65	8.30
1999	14100	13463	1.332	0.828	0.59	10.35
2000	14701	14063	1.135	0.676	0.54	8.15
2001	15000	14365	1.366	0.798	0.61	36.30
2002	14748	14130	0.735	0.437	0.38	6.52
平均	13210	12595	1.285	0.879	0.56	

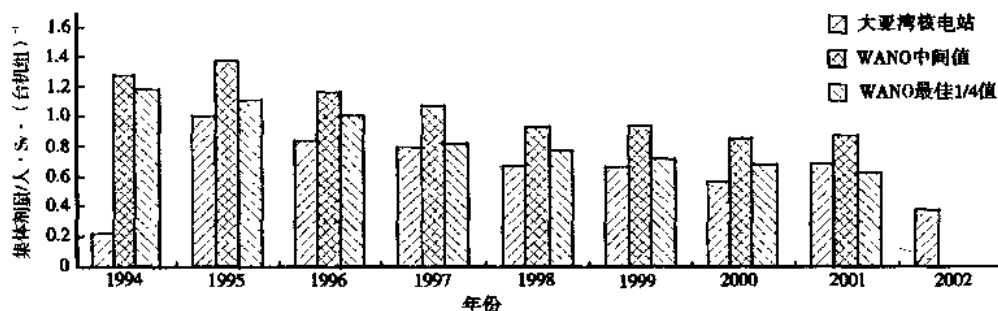


图 1.2 大亚湾核电站集体剂量及其与 WANO 业绩指标的比较

广东大亚湾核电站 1994—2002 年放射性工作人员所受到外照个人剂量当量及其分布列于表 1.9^[10]。从表中数值说明, 年人均剂量仅为 0.56mSv, 年最大个人剂量为 36.30mSv; 没有人员超过当时国家标准规定的 50mSv 的年有效剂量值。

表 1.9 大亚湾核电站 1994—2002 年个人外照射剂量监测站果 (含承包商)

年 份	被监测 人数	年集体 剂量 /人· Sv	年人均 剂量 /mSv	年最大 个人剂 量/mSv	大修集体剂量 (人·Sv) 及占 总集体剂量的 百分比/%	不同个人年剂量区间 (mSv) 的人数分布							
						≤5		> (5—20)		> (20—50)		≥50	
						人数	NR /%	人数	NR /%	人数	NR /%	人数	NR /%
1994	3234	0.427	0.13	4.73	0.181 (42.4)	3234	100.0						
1995	2499	1.987	0.80	10.34	1.628 (81.9)	2411	96.5	88	3.5				
1996	2032	1.668	0.82	12.10	1.560 (93.5)	1961	96.5	71	3.5				
1997	2153	1.576	0.74	20.74	1.401 (88.9)	2101	97.58	51	2.37	1	0.05		
1998	2058	1.338	0.65	8.30	1.131 (84.5)	2022	98.3	36	1.7				
1999	2241	1.332	0.59	10.35	1.181 (88.7)	2212	98.7	29	1.3				
2000	2121	1.134	0.53	8.15	0.919 (86.3)	2098	98.9	23	1.1				
2001	2240	1.366	0.61	36.30	1.225 (89.7)	2202	98.31	35	1.56	3	0.13		
2002	1931	0.736	0.38	6.52	0.592 (80.5)	1930	99.9	1	0.1				
合计	20509	11.564	0.56	36.30	9.878 (85.4)	20171	98.35	334	1.63	4	0.02		

注: NR 为个人剂量人数分布比。

1994—2002 年广东大亚湾核电站每年进行大约 2600 人次的全身计数检查,以估算工作人员体内放射性核素沾污,在每次停堆换料检修结束后,能够发现几例内沾污人员,其体内发现的放射性核素分别有 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co 、 ^{54}Mn 等。但这些核素活度都很低,估算摄入量小于年摄入量限值的 1%。

上述监测数据表明,广东大亚湾核电站在正常运行条件下工作条件是安全的,对从事放射性作业人员受照剂量是低的。

大亚湾核电站自 1994 年投产以来,放射性固体废物产生量连年下降,2002 年每台机组减少到 63.5m^3 ,约为 1995 年 127m^3 的 50%,达到法国同类核电机组的先进水平。从 1994 年至 2002 年的 9 年间两台机组累计的放射性固体废物产生量仅为 1563.51m^3 ,仅为设计值的 18%。这些废物存放在受严密控制并与生物圈隔离的特定场所,人群不会受到剂量的影响。

广东大亚湾核电站运行以来,厂区边界以外的陆地 γ 辐射水平和大气 γ 放射性核素水平仍在年底涨落范围。辐射环境监测表明,核电站运行 10 年来对厂区外的陆地环境没有产生可察觉的影响,对海洋环境没有任何污染。

人们对核电站废物的排放是否可能影响水生生物的生态环境平衡给予关注,事实上,大亚湾为半封闭海湾,一般认为其稀释扩散能力较弱,但核电站循环冷却水带入湾内的热量主要通过海面与大气的热交换散发,且岭澳核电站建成后,排放渠合排后的排水口进一步落入辐散辐合流的东支,同时夏季还有湾外低温高盐的粤东上升流流入并抵达厂址附近海域,这些都非常有利于循环冷却水的稀释扩散。经综合分析核电站建成以来的各项研究及实测,GNPS 和 LNPS 共 4 台机组运行的热影响是有限的,其 4°C 等温线台络面积在 $1-2\text{kW}^2$ 的数量级^[11],可见核电站运行产生的温排水对大亚湾海洋生态平衡的影响,除了温排水口附近局部海域会有些异常外,对整个大亚湾海域不会有明显的不良影响。

广东大亚湾核电站 10 年成功运行实践表明,核电确实是清洁安全的能源。

4 燃煤的环境问题

地球上蕴藏的煤极其丰富,约为 7 万亿到 10 万亿 t,是供给最充足的燃料。现有的煤储量按照当今的能源消费水平还可以使用几百年。然而在煤的开采和燃烧过程中都有棘手的环境问题。深度开采会使附近的溪流呈酸性,对矿工的健康也有危害。表面开采会对土壤造成破坏,即使重新开垦,也很难适于种草以外的其它农业用途。煤含有氮和硫等化合物,特别是国产煤中硫的含量较高,在煤燃烧时会产生二氧化硫(SO_2)和氮氧化物(NO_x)等,这些酸性气体溶解在雨水中就形成了酸雨。由于酸雨会使土壤酸化,毁坏森林和农作物,致使水源酸度上升,水产养殖业受影响,破坏生态环境,是目前全国范围内普通发生的公害之一。此外,煤在燃烧过程中还释放出汞及其它有害金属和放射性等物质,而同等规模的燃煤机组由于煤中含有镭、钍等天然放射性元素,燃烧后通过气态途径对居民产生的辐照剂量是核电站 7 倍之多。

煤的燃烧也是目前世界上人们最为担忧形成温室效应气体排放的主要来源。由于碳是煤的主要成分,在煤燃烧放出热量的同时产生大量 CO_2 并排放到大气中,降低了

地球向外部空间的热量扩散，使大气温度升高，加剧了温室效应。一座百万 kW 级的燃煤电站，CO₂ 的年排放量约为 680 万 t，而一座相同功率的核电站正常运行期间几乎没有 CO₂ 产生。可以说，全球变暖的主要原因是矿物能源在燃烧过程中产生大量二氧化碳气体排入大气所造成的。

当今核工业对全球减少 CO₂ 释放量的作用十分明显，各种能源对释放 CO₂ 量的研究表明，核电与核燃料循环是最少的，CO₂ 仅为 25g/kW·h，相比之下，其它矿石燃料循环释放的 CO₂ 量高达 1250g/kW·h。另外，核电与核燃料循环每 GWe 一年产生约 500m³ 低放废物和几吨高放废物，这个数量比煤电产生的废物体积要小几个数量级。对于核废物我们有可能用当今可接受的价格将其与世隔绝，但是对煤电来说，由于废物数量如此之大，是不可能做到将其与世隔绝的。

5 广东发展核电势在必行

广东是在 20 世纪 70 年代末提出建设核电站构想的。尽管自 1950 至 1978 年广东电力平均每年以 15% 的速度增长，但广东仍然年年缺电，严重影响了工农业生产和人民生活。

在可供选择的几种传统的发电方式中，广东都存在明显的先天不足。广东一次性能源贫乏，煤炭探明储量仅 3 亿 t 左右，而且煤质差，不适宜大规模开采。即使如此，年产煤量也只有 800 万—900 万 t。北方产煤省分虽然大量支援，但当时京广铁路衡阳以南为单线，运力有限，海运还不具有大量运煤的能力。因此用煤发电的成本高、前景有限。

就发展水电而言，广东有东江、西江、北江以及三江汇集的中国第四大河流——珠江，虽然珠江流域雨量充沛，流量较大，但因上述三江在广东境内流程较短，落差小，大部分河段又处在富饶的珠江三角洲，可作水电站的坝址不多。尽管广东对水电的开发不遗余力，建成了容量不等的几座水电站，在丰水季节电站对电网有所帮助，但枯水季节水电也提供不了多少电量。

燃油发电是另一条途径，为此在三水、雷州半岛南端和广州郊区都进行过勘探，但均未找到可供开采的油田；南海海上油气有可观的储量预测，但是用它作为发电资源，受各种因素制约，看来也只能占广东发电能力中的一部分。此外，利用风力、潮汐、油页岩、地热等发电，也曾作过试验，但规模太小，在发电市场中所占份额更微。因此，广东以传统方式发展电力受到很大的限制，为了解决能源短缺和优化现有能源结构，发展核电势在必行。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初，世界上发生了几次石油危机，尤以 1979 年和 1981 年的两次危机最为严重，打击了靠输入石油为主要燃料的国家和地区的经济。1978 年以前，香港地区所有发电厂都是烧油电厂，由于石油供应紧张，油价暴涨，1980 年和 1981 年，香港九龙电网的电价分别比前一年上涨了 45% 和 46%。此时，香港地区正在建设第一批燃煤电厂，但煤价也随石油价格的暴涨而迅速上扬，由于电价上涨，香港市民怨声鼎沸，香港电力部门尤其是占香港地区发电量 70% 的中华电力公司在探索核电方面表现出极大的兴趣。他们委托国际原子能机构作了一个在香港地区发展核电的