

新能源技术

Technology
实用技术

太阳能光伏电池 及其应用

〔日〕滨川圭弘 编著
张红梅 崔晓华 译

 科学出版社
www.sciencep.com

号 01-5007-2418 : 字图

新能源技术

编著太阳光伏电池及太阳能电池应用(日)滨川圭弘 著, 张红梅, 崔晓华 译

太阳能光伏电池及其应用

〔日〕 滨川圭弘 编著

张红梅 崔晓华 译

图字在版编目(CIP)数据

太阳能光伏电池及其应用(日)滨川圭弘编著, 张红梅, 崔晓华译. —北京: 科学出版社, 2008
(新能源技术)
ISBN 958-7-03-033488-0

1. 太… II. ①滨… ②张… ③崔… III. 太阳能发电 IV. TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第093070号

责任编辑: 孙永强 封面设计: 陈 颖
责任印制: 陈 颖 印刷: 北京印刷厂

北京印刷厂承印

<http://www.ckbook.com.cn>

科学出版社出版

北京印刷厂承印

北京印刷厂承印

<http://www.sciencep.com>

科学出版社发行

科学出版社发行

2008年9月第1版 15(730×1000)

科学出版社

北京

(北京印刷厂承印)

图字: 01-2007-5416 号

内 容 简 介

本书是“新能源技术”丛书之一。本书主要介绍了太阳能电池及太阳能发电系统的基本原理、系统构成和实际应用,包括太阳能发电的特点、太阳能电池的原理及装置物性、单晶硅太阳能电池和太阳能电池模板、多晶硅太阳能电池、非晶硅及微晶硅薄膜太阳能电池、CIS 以及 CIGS 系太阳能电池、Ⅲ-V 族太阳能电池、色素增感型太阳能电池、太阳能在日常生活中的应用、住宅用太阳光发电系统、楼房用太阳光发电模板及其系统、空间太阳能发电所,等等。

本书可供从事太阳能光伏电池及光伏发电系统研究、设计、运行和管理等工作的专业科技人员、技术管理人员使用,也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏电池及其应用/(日)滨川圭弘编著;张红梅,崔晓华译. —北京:科学出版社,2008
(新能源技术)

ISBN 978-7-03-022488-0

I. 太… II. ①滨… ②张… ③崔… III. 太阳能电池 IV. TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 097070 号

责任编辑:孙力维 杨 凯/责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静/封面制作:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 9 月第一次印刷 印张: 16 1/4

印数: 1—4 000 字数: 282 000

定 价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

编辑委员

东京大学名誉教授 理学博士	伊藤良一
东京大学名誉教授 工学博士	神谷武志
东京工业大学名誉教授 工学博士	柊元宏

执笔者

滨川圭弘	立命馆大学	1章,2章,12章,13.4节
中野昭一	大阪大学	3章
八木启吏	三洋电机(株)	3章
冬木 隆	奈良先端科学技术大学院大学	4章
冈木博明	大阪大学	5.1~5.2节
太和田善久	钟渊化学工业(株)	5.3~5.5节
小长井 诚	东京工业大学	6章
山口真史	丰田工业大学	7章
荒川裕则	东京理科大学	8章
田中 诚	三洋电机(株)	9.1~9.4节
酒井総一	三洋电机(株)	9.1~9.4节
本多润一	KYOCERA(株)	9.5~9.7节
西田圭一	夏普(株)	10章
竹原徹雄	旭硝子(株)	11章
篠 清志	新能源・产业技术综合开发机构	13.1~13.3节

序

光子学是指以光子作为介质的信息传递和处理技术。预计 21 世纪光子学和电子学将成为两个重要的技术领域。今天,光纤通信、光盘、液晶显示器等已经成为人们身边随处可见的科技产品,也成为支撑 IT 产业的重要技术。今后光子学将会在更多的领域中得到进一步的应用。

从设计的角度看,随着激光半导体光源(发光二极管、激光)实用化进程的加快,光子学的研究在不断得到更为广泛地应用的同时,基于新原理之上的新产品应用设计也有望得到新的发展,例如基于纳米技术而产生的新的量子光设计及光子学结晶等技术的灵活运用。作为新的应用领域,尤其是最近伴随着生物机器人及信息技术的进步,与这些技术相交叉的科学也会逐渐取得新的进展。

本书的作者都是在各领域中起主要作用的研究人员,所以本书与所有的教科书的讲述完全不同。我们坚信,本书应该是充满实践经验内容之魅力的书,我们希望本书在光子学方面能起到理科和工科、基础和应用之间的桥梁作用。

伊藤良一

编委 神谷武志

柊元 宏

2004 年 5 月

前言

从以塑料的发明为代表的高分子化学、以晶体管的诞生为始端的固体电子学到微电子学的进步、计算机的普及、宇宙开发、原子能的利用等,随着科学技术的不断进步,20 世纪我们不断地创造着丰富的物质文明,然而支撑着这种物质文明的根基却是廉价而丰富的化石能源的大量浪费以及仅仅为了经济效益而为所欲为的开采方式。这样做的结果推进了仅以经济效益为中心的社会规范的形成与发展。地球资源的如此浪费,不仅仅只表现在石油等化石燃料的浪费,作为纸张来源的森林的破坏、由冷冻技术的进步引起的海洋资源的肆意掠夺也是同样的。这样做的结果是自天地被创造以来,经过漫长的岁月储存在地球上的化石能源,再经过 100 年就会被使用殆尽。地球经济的循环就会被 20 世纪文明所带来的人工物质的大量生产和大量消费慢慢打乱。也就是说,由于化石燃料的枯竭、环境的破坏所引起的全球变暖、农林水产资源的减少等,若再进一步恶化,人类就会听到来自大自然的“警钟”。

在地球上所能利用的能量的 98.98% 最初都来自太阳能。辐射到地球上的太阳光被大气和地表面吸收,在转换成热能、保持大气温度的同时,通过各种各样的气象活动,维护着动植物的生态活动,保持着所谓的生态循环。受太阳恩惠而生存的我们,作为长久的生活习惯,一提到光,就会本能地想到“光明”,并且认识到,是太阳为地球上所有生物带来了幸福。为了维持和发展 21 世纪的人类文明,必须开发可无限得到的太阳能资源以及与此清洁能源相关的利用技术。

在以清洁能源的开发为目标而发展起来的若干日本国家计划中,围绕太阳能发电的各种技术,由于受到产业界、官方及学术界多方的重视及协助,所以各种太阳能电池转换效率一直保持着世界领先水平,另一方面,1998 年日本太阳能电池的产量超过美国,占据了世界第一的宝座。

鉴于这一状况,本书对有关太阳能电池及太阳能发电系统的世界最新技术进行了综述。随着近十年来此技术的迅速发展,此领域逐渐被细分化。本书各章各节的执笔者都选自日本的杰出专家,由他们介绍尖端技术的现状。这些专家主要由如下一些人员组成:21 世纪大力发展起来的各新兴产业的业内尖端项目经理、从太阳能电池片的制造到系统的开发等各个领域的现场技术工作者、研究开发各

领域的科技工作者、大学研究人员以及研究生院的博士和硕士等。

日本作为石油输入依存度高达 99% 的无资源的经济大国,为了能在 21 世纪继续生存,首要的任务就是要确保能源的安全。关于这一点,回顾一下不久前围绕中东问题的世界形势就可以明白。另外,有人估计到 21 世纪中叶石油资源将会枯竭,从这一现状来看,作者认为,利用现在处于世界顶端位置的清洁能源技术,进入世界市场,开创日本的未来,应该是一种新的策略。若果真如此,一直是世界能源输入国的日本,在 21 世纪的中叶,反而可能成为清洁能源技术的输出国,从而摆脱目前日本经济的困境。

最后,在本书交稿之际,衷心地感谢经济产业省资源能源厅的新能源部、新能源·产业技术综合开发机构(NEDO)的新能源部及太阳能发电技术研究协会同意将作为国家项目实施得到的研究成果引入本书! 另外,对尽心尽力出版本书的 CORONA 出版社表示深深的谢意!

目 录

1 总 论

1.1 引 言	1
1.2 能源革命与文明的进步	1
1.3 能量的需求预测与能源资源	3
1.4 3E 的三重矛盾与解决策略	6
1.5 太阳能的质和量	11
1.6 太阳能发电的独特特点	14
引用·参考文献	16

2 太阳能电池的原理及装置物性

2.1 引 言	17
2.2 半导体的光吸收和光传导效率	17
2.3 半导体的光电效应	21
2.4 太阳能电池的原理及能量转换效率	24
2.5 理论极限效率和太阳能电池的损失	28
2.6 高效率化技术及其装置物性	31
引用·参考文献	39

3 单晶硅太阳能电池和太阳能电池模板

3.1 引 言	41
3.2 单晶硅太阳能硅片的制造方法	43
3.2.1 单晶硅太阳能电池的特点	43
3.2.2 单晶硅铸模的制造	43
3.2.3 单晶硅硅片的制造	44

3.2.4 电池片的形成	44
3.2.5 电池片高效率化的技术	45
3.3 HIT 太阳能电池片及其制造方法	46
3.3.1 HIT 太阳能电池的结构	46
3.3.2 HIT 太阳能电池片的特点	47
3.4 大面积太阳能电池模板	50
3.4.1 太阳能电池模板的种类	51
3.4.2 太阳能电池模板的制造过程	51
3.4.3 太阳能电池模板的评价	53
3.5 采光型太阳能电池模板	54
3.6 超高效率太阳能电池	55
3.6.1 高效率太阳能电池的结构	56
3.6.2 电池片制造方法的进展	57
引用·参考文献	58

4 多晶硅太阳能电池

4.1 引 言	59
4.2 多晶硅铸模的制造技术	60
4.3 多晶硅太阳能电池的高效率化技术	61
4.4 多晶硅薄膜太阳能电池的开发	65
4.5 结束语	68
引用·参考文献	69

5 非晶硅及微晶硅薄膜太阳能电池

5.1 引 言	71
5.2 Si 系薄膜的制作、基础物性和太阳能电池的装置	71
5.2.1 Si 系薄膜的制作	71
5.2.2 Si 系薄膜的基础物性	73
5.2.3 Si 系薄膜太阳能电池的装置	79
5.3 无晶硅太阳能电池及其性能	85
5.3.1 a-SiC/a-Si 异质结太阳能电池	87

5.3.2	a-Si 太阳能电池大面积模板的制造及其高效率化	91
5.3.3	a-Si 太阳能电池的可靠性	94
5.4	薄膜微晶硅($\mu\text{c-Si}$)太阳能电池及其性能	96
5.5	非晶硅/微晶硅型串联太阳能电池	102
	引用·参考文献	106
6	CIS 以及 CIGS 系太阳能电池	
6.1	引 言	111
6.2	CIS 以及 CIGS 系半导体的基础物性及其特性	111
6.2.1	CIGS 系半导体的特点	111
6.2.2	禁带宽度控制	112
6.2.3	多样的结晶相和固有缺陷	112
6.3	CIS 以及 CIGS 系太阳能电池的结合形式与制法	113
6.3.1	CIGS 系太阳能电池的基本结构	113
6.3.2	组成比和电池片特性	114
6.3.3	Na 的添加效果	115
6.3.4	蒸镀法	115
6.3.5	硒化法	116
6.4	模板制造法及其规模生产技术	117
6.4.1	集成化技术	117
6.4.2	提高效率的技术	118
6.4.3	可靠性评价	118
6.5	R&D 领域的新进展	119
6.5.1	Cd 自由缓冲层	119
6.5.2	柔性基片	120
6.5.3	S 系、Al 系等新材料	121
6.5.4	聚光电池片	121
6.5.5	宇宙空间应用	121
6.5.6	4 端子串联的高效率化	122
6.6	结束语	122
	引用·参考文献	123

7	III-V 族太阳能电池	
7.1	引 言	125
7.2	III-V 族半导体太阳能电池所用材料的特点	126
7.2.1	III-V 族化合物半导体的基础物性和光电特性	126
7.2.2	III-V 族系半导体太阳能电池的特点	128
7.3	GaAs 系太阳能电池片的结构及其制法	129
7.3.1	GaAs 系太阳能电池	129
7.3.2	InP 系太阳能电池	130
7.3.3	新型太阳能电池——量子阱结构太阳能电池	132
7.3.4	薄膜太阳能电池	132
7.3.5	太阳能电池的制造方法	134
7.4	超高效率多结太阳能电池及其构成	134
7.5	聚光型太阳能电池技术及其现状	137
7.6	R&D 领域的新进展	138
	引用·参考文献	139
8	色素增感型太阳能电池	
8.1	引 言	141
8.2	色素增感型太阳能电池的特征	141
8.3	基本原理和理论可达到的效率	143
8.3.1	基本原理和已报道的太阳能电池性能	143
8.3.2	理论可达到的效率	145
8.4	色素增感型太阳能电池的结构和制造方法	146
8.4.1	色素增感型太阳能电池的结构	146
8.4.2	Graetzel Cell 的制作方法	149
8.5	色素增感型太阳能电池技术的现状和性能	151
8.5.1	色素增感型太阳能电池技术的性能发展	151
8.5.2	色素增感型太阳能电池的稳定性	152
8.6	R&D 领域的新进展	153
8.6.1	新型高性能增感色素的开发	153
8.6.2	新型氧化物半导体薄膜光电极	154

8.6.3 电解质溶液的固体化·拟固体化	154
8.6.4 塑料太阳能电池	155
引用·参考文献	156

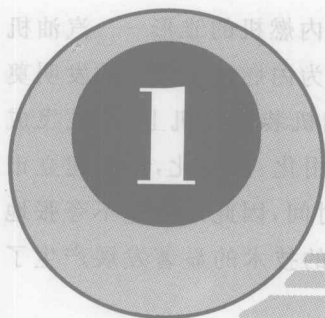
9 太阳能电池在日常生活中的应用

9.1 引 言	159
9.2 太阳能计算器	160
9.3 太阳能手表	162
9.4 其他应用	163
9.5 交通系统的应用	164
9.6 受灾、求助体系的应用	167
9.7 日常生活应用的新展望	169

10 住宅用太阳光发电系统

10.1 引 言	171
10.2 住宅用太阳光发电系统设置方法的种类	174
10.3 独立型系统和联系型系统	178
10.4 动力调节器	179
10.4.1 系统联系技术	179
10.4.2 与屋顶形状对应的设置多样化的组合技术	180
10.5 导入实例	182
10.6 今后的努力	183
10.6.1 原材料价格的下降	183
10.6.2 通过商品开发扩大市场	184
10.6.3 具备集体联系的课题的解决	184
10.6.4 由于再循环和再利用产生的长寿命化	185
10.6.5 可靠性和认证制度 ^[12]	186
10.7 结束语	188
引用·参考文献	189

11	楼房用太阳光发电模板及其系统	
11.1	引 言	191
11.2	楼房用建材一体型太阳光发电系统的特点	192
11.3	实用例子介绍	195
11.4	进一步提高采光型模板价值的方法	199
11.5	楼房用建材一体化型太阳能电池	203
11.6	今后的展望	204
12	空间太阳光发电所	
12.1	引 言	205
12.2	空间开发的历史	205
12.3	宇宙空间的特征和魅力	206
12.4	宇宙太阳光发电所 SPS 和其关键技术	209
12.5	SPS 用太阳能电池及其特殊性	212
12.6	微波发送接受系统及其关键技术	214
12.7	太阳能繁殖器的设想	217
	引用·参考文献	223
13	太阳光发电的展望	
13.1	日本的能源政策和新阳光计划	225
13.2	太阳光发电技术开发项目及其现状	230
13.2.1	太阳光发电技术的开发	230
13.2.2	集中联系统型太阳光发电系统的实证研究	233
13.3	21 世纪太阳光发电技术的展望	237
13.3.1	能源政策和太阳光发电	237
13.3.2	太阳光普及与扩大的课题	237
13.3.3	21 世纪的太阳光发电技术	239
13.3.4	21 世纪的太阳光发电技术的研究开发	239
13.4	太阳光发电的新作用和将来的展望	239
	引用·参考文献	244



总论

1.1 引言

自 19 世纪产业革命以来,人类文明的进步与人类社会工业化、近代化的变迁,都与被称为动力来源的一次能源的形态和变迁有着很大的关系。首先应该指出的是,从煤炭文明到石油文明,再到天然气文明的能源革命有两种值得一提的方式,即能源的大量生产、大量贮藏及大量输送和以减轻环境负荷为出发点的方式。其次,在人们讨论有关 21 世纪文明的宏伟构想时,被称为最大课题的“3E”(三重矛盾)问题占据了重要地位,为此本章对解决此问题的关键技术——清洁能源开发中的太阳光发电技术的特点及其对解决地球环境问题所做的贡献进行介绍。

1.2 能源革命与文明的进步

人们生活所必需的能源可以分为维持个人生命的生理能源和日常生活、社会活动及生产活动中使用的生活能源两部分。我们从水和粮食中摄取的生理能源,全世界平均约为每人 2200kcal/日(9.2MJ/日)。而生活能源则会因人们生活水平的不同而有很大的差异,根据最近的统计,世界平均水平为每人 45 000kcal/日,是生理能源的 20 倍以上,且生活能源会因地域的文明程度不同有较大幅度的差别,例如美国生活能源的消耗是世界平均值的数倍之多。

从支撑人类文明活动的产业发展的高度来看,点燃近代产业革命之火的是发明蒸汽机(1769 年)的詹姆斯·瓦特(James Watt,1736-1819)。最初以木材作为燃料的蒸汽机,改用煤炭作为燃料后,大大促进了铁路、大型蒸汽船的海洋交通业以及纺织机的机械化,并促进了纤维产业的发展,这就是煤炭文明的开始。此后固体的煤炭变迁为液体的石油、气体的天然气。图 1.1 描述了由产业革命引起的不同能源形态的变迁及随之产生的工业制品的种类。19 世纪中叶由埃

特尼·勒努瓦(Etienne Lenoir, 1822-1900)发明的现代内燃机的雏形——汽油机是瓦特发明蒸汽机 100 年之后的事了。不久这一技术为内燃机及汽车的发明奠定了基础。1903 年,作为汽车司机的莱特兄弟把汽油机装在飞机上,并试飞成功。从这些事例可以看出,从研究开发到实现技术实用化、产业化,最后建立市场直到普及(market penetration)需要约 20~50 年的时间,因此可以毫不夸张地说,不局限于内燃机,还包括电、天然气等与能源相关的技术的显著发展产生了 20 世纪的文明。

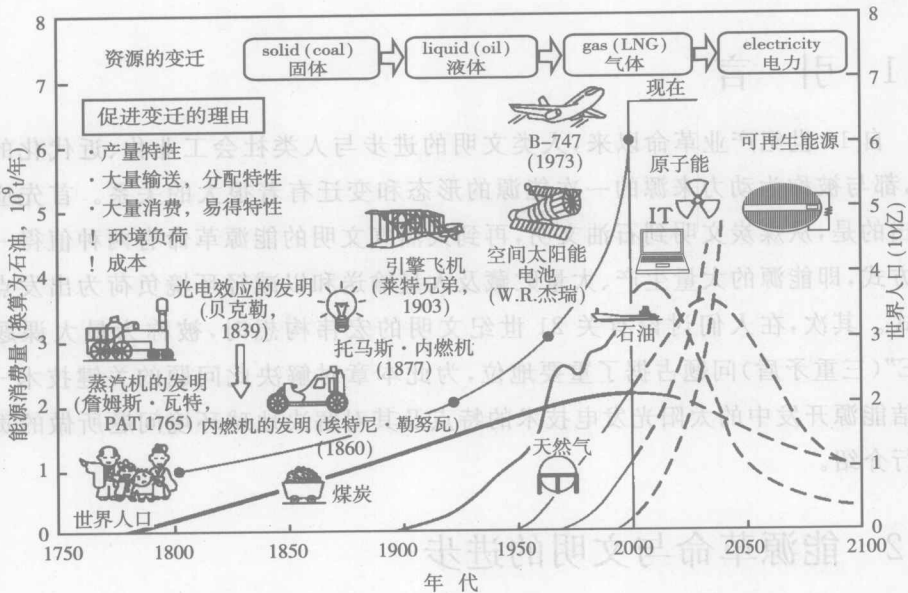


图 1.1 近代文明随着化石能源形态固体→液体→气体利用技术的变化飞速进步

(摘自濱川圭弘, JSAP-International-, No. 5, p. 30(2002)图 5)

随着化石燃料从固体→液体→气体利用技术的变迁,伴随能源工业化的进展,由大量消费引起的需求促进了能源的大量生产、大量贮藏和大量运输,迫使人们选择更方便、更具有经济性的能源形态。也就是说,这一技术革新也是基于“经济大原理”而产生的。另外,目前不可忽视的一个重要观点就是,伴随着化石能源的大量消费而引起的有害气体的产生和对环境的影响。众所周知,1950~1970 年间从煤炭文明到石油文明的能源革命的曲折也有这一方面的原因。

可以认为,近 20 年来,从以汽油为燃料的汽车,到以天然气(LNG)及液化气(LPG)为燃料的汽车以及不久的将来会大量普及的电动汽车,都是因为环境问题

而引起的能源革命。以上讨论的是关于一次能源的问题,如果注意到发达国家的二次能源中约 40%~50%是电力能源这一事实的话,不同于化石能源消费的原子能发电,称之为生态发电(ecological electric power generation)的太阳能发电、风力发电的普及和应用,就具有非常重要的意义。电能可以在瞬间大量输送,一旦有了电,就可以超高效率地转换成光、热和动力,因此电不仅作为文明生活中枢的信息通信、产业活动和交通运输等能源的利用,也是我们的生活及家庭活动所必需的能源形态。本书首先介绍不可枯竭的电力能源——太阳能,然后介绍利用太阳能这一清洁能源发电的新技术。

1.3 能量的需求预测与能源资源

世界人口如图 1.2 所示,1960 年为 30 亿,而 2000 年翻了一番,达到了 61 亿,40 年增长了一倍。世界各国的人均国民生产总值(GNP)和该国的人均能量消费如图 1.3 所示^[2]。在此图中,原点附近的国家是发展中国家,离原点越远的国家是越发达的国家;对角线左上方的国家是节能比较先进的国家。总而言之,从图 1.3 中可以看出,文明的进步和能量的消费是成比例的。

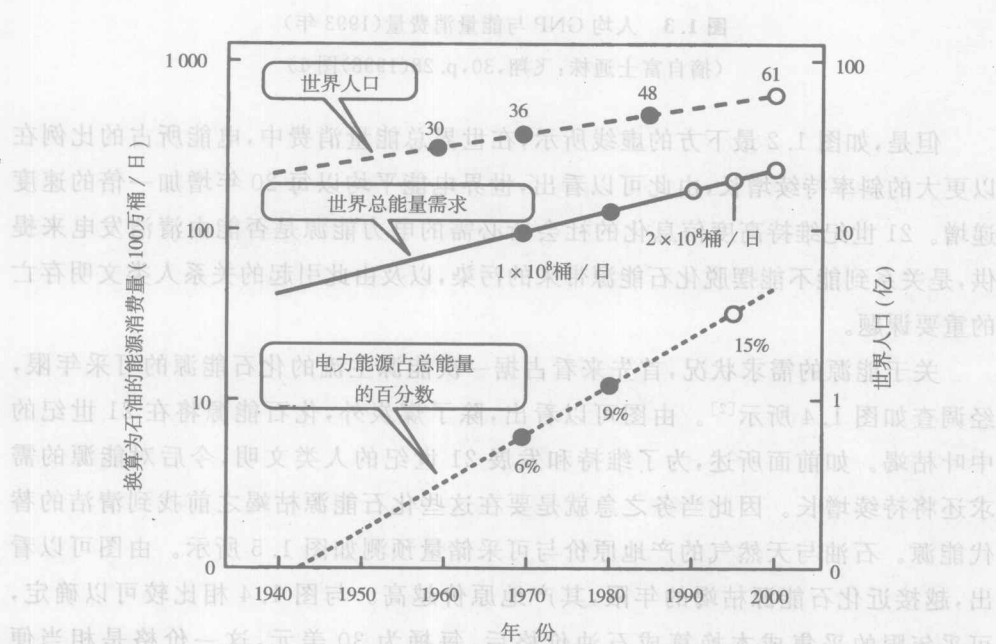


图 1.2 世界人口、总能源需求及电力能源随年代的变迁

(摘自濱川圭弘:应用物理,67,9,p.1024(1998)图2)

由此可见,全世界总能量消费,与人口的增加、时间以及与此共同进步的文明程度密切相关,其结果如图 1.2 所示。从图 1.2 中可以看出,世界人口 40 年增加了一倍,而能量消费 30 年增加了一倍,也就是说,全世界的文明随时间进步的同时,平均能量消费也在随时间增加。

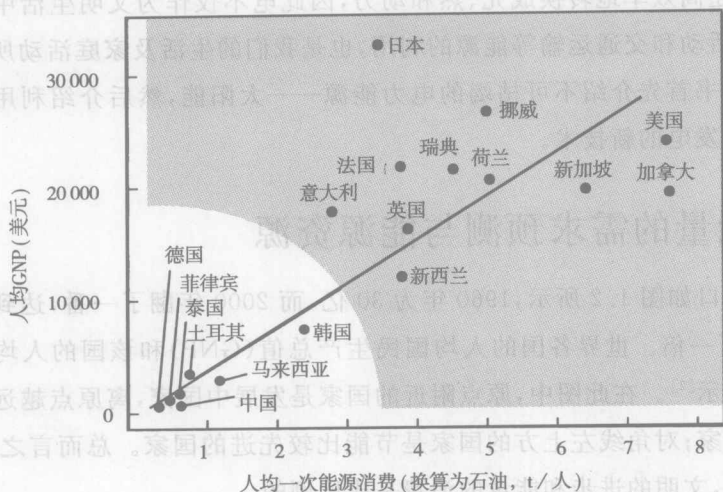


图 1.3 人均 GNP 与能量消费量(1993 年)

(摘自富士通株:飞翔,30,p.28(1998)图1)

但是,如图 1.2 最下方的虚线所示,在世界总能量消费中,电能所占的比例在以更大的斜率持续增长,由此可以看出,世界电能平均以每 20 年增加一倍的速度递增。21 世纪维持高度信息化的社会所必需的电力能源是否能由清洁发电来提供,是关系到能不能摆脱化石能源带来的污染,以及由此引起的关系人类文明存亡的重要课题。

关于能源的需求状况,首先来看占据一次能源主流的化石能源的可采年限,经调查如图 1.4 所示^[2]。由图可以看出,除了煤炭外,化石能源将在 21 世纪的中叶枯竭。如前面所述,为了维持和发展 21 世纪的人类文明,今后对能源的需求还将持续增长。因此当务之急就是要在这些化石能源枯竭之前找到清洁的替代能源。石油与天然气的产地原价与可采储量预测如图 1.5 所示。由图可以看出,越接近化石能源枯竭的年限,其产地原价越高。与图 1.4 相比较可以确定,可采年限的采集成本换算成石油价格后,每桶为 30 美元,这一价格是相当便宜的。

图 1.4 是一次能源从产地输送到消费地所需要的运输费用。另外,一次能源