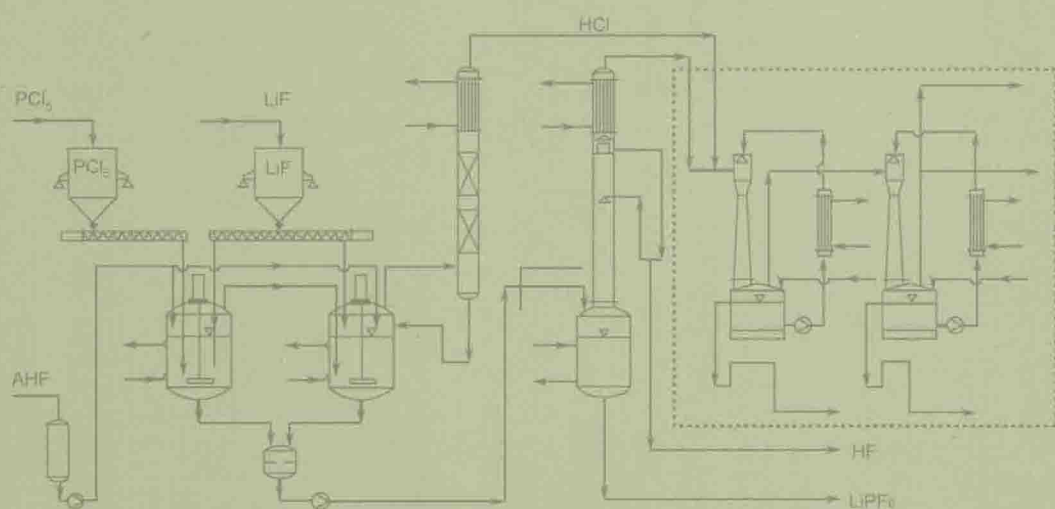


WUJIYAN GONGYIXUE

无机盐工艺学

宁延生 主编



化学工业出版社

无机盐工艺学

宁延生 主编

刘幽若 朱企新 郑学家 龚家竹 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分四篇；总论、基本原料、过程与装备、产品篇。

总论中包括了无机盐产品的命名与分类，对我国无机盐产品的发展史及无机盐工艺发展史作了总结，表述了无机盐在我国国民经济中的地位和作用。基本原料篇介绍了无机盐生产所需原料来源的几种形式。生产过程与装备篇中主要列入无机盐生产中经常涉及的单元过程，如过滤、膜过滤（技术）、结晶、蒸发、干燥、粉碎等。产品篇是本书编写的重点，列入无机盐 18 类 150 余种主要品种的性质、规格、分析方法、生产工艺等内容。

本书适合从事无机盐生产、研究的技术人员参考，也供大专院校无机化工专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

无机盐工艺学/宁延生主编. —北京：化学工业出版社，2013.6

ISBN 978-7-122-17078-1

I. ①无… II. ①宁… III. ①无机盐生产-工艺学
IV. ①TQ115

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 080554 号

责任编辑：靳星瑞 孙绥中

文字编辑：杨欣欣

责任校对：宋 玮

装帧设计：关 飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 81¼ 字数 2166 千字 2013 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：268.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2013—18 号

无机盐工业产品众多，用途广泛，生产方法多样，是化学工业中不可或缺的一个门类。作为从事过无机盐工业研究的一名科研人员，我衷心地希望本书的出版能有助于发展和壮大我国的无机盐工业。

成思危

《无机盐工艺学》编委会名单

名誉顾问 成思危

顾问 李士忠 郑绵平 金涌 俸培宗 王静康 吕秉玲 叶海廷

主任 郑书忠

副主任 宁延生 刘红光 吴明钰 宁桂玲 李世江 朱明松 潘正安

委员 (按姓氏笔画排序)

卫冠亚 王洁 王杏田 王孝峰 宁延生 宁桂玲 朱企新

朱明松 刘红光 刘幽若 纪柱 李刚 李山高 李世江

李永兆 李德强 杨建元 吴林茂 吴明钰 何朝晖 陈长斌

陈嘉甫 范胜华 周新民 郑书忠 郑怀礼 郑学家 胡长诚

钟本和 钟存仁 侯红军 都丽红 徐旺生 徐辑唐 郭西凤

龚家竹 商连弟 廖晓君 潘正安

《无机盐工艺学》各章编写人员名单

- 第一章 李连成 孙树明 张宥偲 许 寒 宁延生
第二章 宁桂玲 叶俊伟
第三章 刘幽若
第四章 汤建良
第五章 李 武
第六章 杨玉梅 葛艳丽
第七章 徐利华
第八章 张国旺
第九章 史小平 魏 峰
第十章 鲍 颖 王静康
第十一章 都丽红 朱企新
第十二章 许 莉
第十三章 于才渊 王喜忠
第十四章 肖平启 尹书成 陈英军 王金生 吴卫东 徐旺生 李绍文
第十五章 胡琳娜 何豫基 杨维强 卫冠亚 宋海燕
第十六章 陈艳君 陈建立 龚家竹 吴宁兰 杨绍利 马 兰 周立山 宁延生
第十七章 钱晓阳 于雪峰 胡柏松 赵景利 张 昱 程芳琴 范胜华
第十八章 焦占忠 何朝晖 何青峰 郑怀礼 晏永祥 宋来峰 潘 文 杨玉梅 商连弟
第十九章 唐漠堂 顾建民 金卫国 王瑞强 董广前 袁方利 杨建广 宁保忠 孟祥艳
蔡建国 王杰明
第二十章 应自卫 李连成 李世江 王杏田
第二十一章 纪 柱 王世君
第二十二章 蔡庆南 张福顺 罗茂祥 吴仁智 李毓飞 章浩龙 李永兆 朱春雨 马慧斌
宁延生 孙树明 王玉城
第二十三章 胡长诚 郑国玉 姚冬龄
第二十四章 杨建元 刘大凡 王 坤 周立山 许 寒 郅晓科 张晓波 张 波 郭西凤
赵庆云
第二十五章 陈嘉甫 贡长生 李耀基 朱德益 资学民 杨亚斌 方晓峰 梁雪松 吴建军
樊 蕾 黄千均 杨建中 古思廉 董 芸 龚家竹 钟本和 朱明松
第二十六章 徐辑唐 刘永迁 刘幽若 唐可平 王 洁
第二十七章 李金秋 张喜荣 王玉萍 苏 棣 吴林茂 时 洁 戴承志
第二十八章 郑学家 宋明志 李 武 余德成 申 政 肖景波 孙新华 王 洁
第二十九章 陈长斌 叶怀安 汪三六 侯文升
第三十章 唐文骞 张晓行 徐旺生
各篇统稿人：
第一篇 宁延生
第二篇 刘幽若
第三篇 都丽红 朱企新
第四篇 徐旺生 李绍文 宁延生 商连弟 唐漠堂 纪 柱 姚冬龄 郭西凤 钟本和
刘幽若 唐可平 戴承志 王 洁 侯文升 蔡庆南 陈英军 焦占忠 龚家竹

序

近 30 年，伴随着国民经济的快速发展，我国无机盐工业通过自主开发与引进技术相结合的道路，发生了极大的变化，从作坊式制作渐渐向现代化靠拢，充分发挥资源优势，生产规模日趋合理，许多品种已列为国际第一。生产工艺日趋完善，部分品种生产技术已达国际先进水平，消耗定额也已接近国际先进水平。可生产的无机盐品种已多达 1300 余种，并开始向精细化发展。同时生产装备也更加适应规模生产。功能性无机材料的开发红红火火，取得很多研究成果。我国已发展成为世界上最大的无机盐产品生产国、消费国和出口国。

前苏联专家波任编写的《无机盐工艺学》最早由天津化工研究院翻译，于 1965 年由化学工业出版社出版，1981 年又翻译出版了该书的修订版。该书的出版，曾为从事无机化工的几代技术人员提供过指导帮助。是一本很受技术人员欢迎的专业参考书。但该书毕竟代表的是 20 世纪 70 年代的无机盐技术、工艺、装备水平，与当今中国的无机盐生产实际有了较大的出入。更不能反映当今国际无机盐的发展现状与水平。

编写一本全新的、具有自主知识产权的《无机盐工艺学》是无机盐行业发展的需要，更是关心无机盐工业发展的行业领导与专家期盼已久的心愿。通过我国几代无机盐工作者几十年的努力，已经开发了一大批新工艺、新技术，积累了许多宝贵的经验，为了传承我们的成果，培养新人，编写这样一本书迫在眉睫。在这种形势下，中海油天津化工研究设计院和化学工业出版社组织百余位行业专家编写这本《无机盐工艺学》，是为无机盐行业做的一件好事。本书在内容上与时俱进，既充分反映无机盐工业的发展过程、总结了最新的技术成果，也展望了无机盐工业今后的发展趋势，兼顾了继承和创新。它的出版发行势必将对行业技术进步产生深远影响。在此，衷心祝愿《无机盐工艺学》的出版发行，能够促进我国无机盐工业更上一层楼！

李士忠

二〇一三年七月

前言

无机盐产品既是重要的化工基础原料，对传统产业制品性能改善和提高性能起着重要的作用；同时又是高新材料的一部分，广泛应用于电子、医药、汽车、环保、军工等高科技产品中。无机盐包括了几十个系列 1300 余种产品。随着时代的发展，无机盐精细化进程必将推出更多的品种，也会带动生产工艺的进一步发展，进而推动单元生产技术的发展，促进整个化学工业的发展。因此无机盐工业在国民经济中必将发挥越来越大的作用。

改革开放 30 年的发展使得我国建成了具有相当规模、实力较强的无机盐工业，形成了门类比较齐全、品种大体配套、基本可满足国民经济发展和人民生活水平提高需要的较完整工业体系，成为世界最大的无机盐生产国、出口国和消费国，行业正处于由大到强的转变时期。2009 年我国无机盐产品总产量突破 5000 万吨，营业收入 1800 亿元，出口量达到 1205 万吨。

我国之所以得以快速发展成为世界无机盐大国，是由于在市场需求推动下我国无机盐行业走出了一条引进技术与自主开发相结合的发展道路。如郑绵平院士开发了一步沉淀法盐湖提锂技术、中信国安开发了煅烧法提锂新工艺，南昌化工原料厂引进了浓酸并流一步法万吨级沉淀法二氧化硅生产工艺，中海油天津化工研究设计院与云天化集团共同开发了利用磷肥副产 H_2SiF_6 生产无水氟化氢氨法工艺，多氟多化工公司开发了黏土-盐卤冰晶石生产技术，黎明化工研究院开发并不断完善了催化剂蒽醌法过氧化氢生产工艺等等。这些技术进步取得的突出成果，使无机盐行业发生了巨大的变化。

进入 21 世纪，随着国内外对节能、减排的要求越来越高，无机盐新技术、新设备层出不穷。如青岛红星集团利用其在碳还原法生产碳酸钡中积累的经验，采用多项先进技术建成了年产 2 万吨碳酸锶生产线，能源消耗、三废排放大大降低；甘肃锦世公司在天津化工研究设计院与黄石合作中试基础上，于 2003 年建成年产万吨规模无钙焙烧工艺装置，其排渣量降为每吨红矾钠 0.8 吨，且铬渣不含致癌物铬酸钙。

无机盐行业近 30 年取得的技术进步成就是非常突出的，但针对无机盐工艺，可供参考借鉴的专业书籍仅仅有 20 世纪六七十年代原苏联波任教授编写、中海油天津化工研究设计院翻译的《无机盐工艺学》一书，我们一直还没有中国自己的无机盐工艺方面的权威专著。为此，无机盐行业的科技人员以及读者们的呼声很高，都热切期盼编写一本中国自己的《无

机盐工艺学》。

经过征求无机盐行业专家们的意见并专门召开座谈会听取业内领导与企业家意见后，我们于 2008 年组织专门力量正式启动了《无机盐工艺学》的编写工作。在化学工业出版社的支持和推动下，由我国知名无机盐专家、中海油天津化工研究设计院宁延生副院长主持，中国化工学会无机酸碱盐专委会秘书处精心组织，130 余位作者经过五年多的艰苦努力，克服了重重困难，最终成功完成了本书的编写工作。本书的编写宗旨是：力争突破原苏联无机盐工艺学的局限，对我国无机盐产品近 30 年的生产现状进行一次全面的总结。希望此书不仅能反映出中国无机盐行业的主流品种（有规模、有影响、工艺技术成熟的品种）发展现状，反映出其工艺水平、技术水平、装备水平，使从事无机盐生产与研究的技术人员、大专院校的师生对中国无机盐工艺现状有一个较为客观的了解；同时，也能反映出当今国际上无机盐产品生产工艺的发展趋势，使从事无机盐生产与研究的技术人员、大专院校的师生有一个努力的目标，在现有基础上继续前行，推动我国无机盐工艺技术向前发展。

参与编写的人员大部分是无机盐行业一线的研发人员和生产的技术人员，有着较丰富的实践经验。他们编写时收集和查阅了国内外大量的文献资料，同时又能够紧紧结合我国无机盐生产实际，把多年积累的东西都体现到本书中来了，坚持了具有自主特色工艺的品种多写、技术进步品种详写、老工艺少写或不写的编写原则，使本书具有很强的可读性和实用性。

本着对读者与行业发展高度负责的态度，编写与审稿专家技术上严格把关，各篇章的稿件均设置了审稿专家，在他们反复多次审查修改后才最终定稿。

本书的结构安排为：全书共分四篇，包括总论、基本原料、过程与装备、产品篇。

总论中包括了无机盐产品的命名与分类，力求通过本书编写，规范命名，形成统一分类方法，对我国无机盐产品及无机盐工艺的发展史做出总结。表述无机盐在我国国民经济中的地位和作用。对无机盐产品的物化性质做总体论述。

通过基本原料篇，读者可以了解无机盐生产所需原料来源的几种形式。本篇对我国拥有优势与产能的化学矿品种、盐湖与地下卤水分布做了较为详细的介绍，对可作为无机盐生产原料的工农业生产中产生的化学废弃物做了介绍，同时介绍了低品位矿的技术与利用现状以及发展趋势。

生产过程与装备篇中主要列入无机盐生产中经常涉及的单元过程，如过滤、膜过滤（技术）、结晶、蒸发、干燥、粉碎等，通过本篇内容能够使读者了解涉及无机盐生产的主要单元操作的基本概念、各单元（过程）操作重要的控制参数、主要操作方式及适用的无机盐品种，尤其是近几年新技术在各单元（过程）操作中的应用情况。通过本篇，读者也能够单元（过程）操作的设计选型方面得到启示。由于无机盐品种较多，各品种生产方法各异，涉及的装备也较多。将通用（常用）的设备在此汇总编写，可以避免具体无机盐品种编写时对装备介绍的重复。

产品篇是本书编写的重点，列入无机盐 17 类 150 余种主要品种。编写内容包括该产品的表征与用途、生产方法、发展综述等。

本书在编写过程中得到原全国人大副委员长、我国无机盐工业的开拓者之一成思危，原化工部副部长李士忠，中国工程院院士郑绵平的鼓励、关心和支持。

本书由宁延生担任主编，刘幽若、朱企新、郑学家、龚家竹任副主编，130 余位专家参与编写。全书最后由宁延生统编完成。

编者期望本书的编写出版能够对我国无机盐工业技术创新活动起到承前启后的作用。如果本书能够对无机盐行业的发展起到一点推动作用，编者为此会感到欣慰和受到鼓舞。在此，我们对大力支持本书出版的云天化集团、多氟多化工公司、邢台矿业集团等单位表示深切的谢意。

由于本书涉及信息量大、品种多，且主编单位是第一次尝试组织编写这样大部头的图书，经验有限，而参与编写的作者众多，大多都是在职管理与技术骨干人员，都有繁忙的本职工作压身，致使本书的出版比原计划时间有所延迟。为此，特向关心本书出版的各界人士表示歉意。另外，由于编者水平有限，本书可能存在一些不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者
2013. 4. 6

目 录

第一篇 总 论

■ 第一章 无机盐概论	2
第一节 无机盐产品的命名和分类	2
第二节 无机盐产品的发展史	7
第三节 无机盐工艺发展史	13
主要参考文献	31
■ 第二章 无机盐物化性质	33
第一节 物质形态	33
第二节 化学结构	39
第三节 物化性质	49
主要参考文献	70
■ 第三章 无机盐在我国国民经济中的地位和作用	72
第一节 无机盐的应用概况	72
第二节 我国无机盐生产规模以及与国外的差距	75
主要参考文献	77

第二篇 基本原料

■ 第四章 化学矿物	80
第一节 化学矿物在无机盐生产中的地位与作用	80
第二节 硼矿	86
第三节 氟矿	88
第四节 天然碱	89
第五节 天青石	90
第六节 硝矿	91
主要参考文献	93
■ 第五章 盐湖与卤水	94
第一节 盐湖、卤水资源概况	94
第二节 国内盐湖开发进展	95

主要参考文献	97
■ 第六章 工业废料和农副产品	98
第一节 工业固体废物	98
第二节 工业废气、工业废液与农副产品	99
主要参考文献	100
■ 第七章 国内外原料高效利用的发展趋势	101
第一节 国外矿物原料高效利用对策与技术开发进展	102
第二节 我国低品位矿利用现状及其无机盐原料加工技术新进展	102
主要参考文献	104

第三篇 过程与装备

■ 第八章 粉碎	106
第一节 粉碎的基础知识	106
第二节 分级的基础知识	114
第三节 粉碎分级工艺	116
第四节 研磨介质及助磨剂	118
第五节 粉碎分级设备的选择	121
第六节 粉碎设备	125
主要参考文献	141
■ 第九章 蒸发	142
第一节 基本概念	142
第二节 主要参数	153
第三节 蒸发技术的发展趋势	163
第四节 蒸发装置工艺设计	163
第五节 通用设备	168
主要参考文献	180
■ 第十章 结晶	183
第一节 基本概念	183
第二节 结晶热力学	190
第三节 结晶动力学	200
第四节 结晶方法与技术	207
第五节 工业结晶设备	213
主要参考文献	236
■ 第十一章 过滤与分离	239
第一节 概述	239
第二节 过滤分离原理	240
第三节 物料性质	244
第四节 絮凝和凝聚技术	247
第五节 助滤剂及助过滤	252
第六节 滤饼过滤中滤饼的洗涤及应用	258

第七节	过滤介质及选用	259
第八节	过滤分离设备选型、试验	267
第九节	分离机械发展及节能型分离机械	274
第十节	过滤与分离机械在无机盐工业上的应用	278
主要参考文献		281
第十二章	膜分离	282
第一节	概述	282
第二节	膜过程	283
第三节	膜组件及设备	284
第四节	膜技术在无机盐行业的应用	298
主要参考文献		301
第十三章	干燥	303
第一节	干燥的基本概念	303
第二节	湿空气的性质和湿度图	304
第三节	干燥器选型原则	308
第四节	主要干燥器形式及操作参数	310
主要参考文献		346

第四篇 产 品 篇

第十四章	钡锶化合物	348
第一节	硫化钡	348
第二节	氯化钡	352
第三节	碳酸钡	362
第四节	硫酸钡	368
第五节	一水氢氧化钡	372
第六节	八水氢氧化钡	373
第七节	碳酸锶	377
第八节	金属锶	385
第九节	氯化锶	391
第十节	硝酸锶	395
第十一节	氢氧化锶	398
主要参考文献		402
第十五章	钙镁化合物	404
第一节	碳酸钙	404
第二节	氯化镁	429
第三节	硫酸镁	440
第四节	碳酸镁	450
第五节	氢氧化镁	465
第六节	氧化镁	478
主要参考文献		500

■ 第十六章 锆、钛、钒化合物	501
第一节 锆化合物	501
第二节 钛化合物	514
第三节 钒化合物	548
主要参考文献	563
■ 第十七章 钾化合物	565
第一节 氯化钾	565
第二节 碳酸钾	575
第三节 硝酸钾	581
第四节 硫酸钾	590
第五节 氢氧化钾 (苛性钾)	598
主要参考文献	608
■ 第十八章 铝化合物	609
第一节 氧化铝、氢氧化铝	609
第二节 铝酸钠	621
第三节 铝酸锶	624
第四节 六铝酸钙	628
第五节 硫酸铝	632
第六节 硫酸铝钾	636
第七节 硫酸铝铵	640
第八节 聚合氯化铝	642
主要参考文献	649
■ 第十九章 锌铅化合物	652
第一节 氧化锌	652
第二节 氯化锌	664
第三节 锌钡白	667
第四节 碳酸锌	672
第五节 磷酸锌	675
第六节 醋酸锌	679
第七节 黄丹	680
第八节 红丹	682
主要参考文献	685
■ 第二十章 氟化合物	686
第一节 氟化物概述	686
第二节 氟化氢	688
第三节 氟化铝	697
第四节 冰晶石	707
第五节 无机氟盐	718
主要参考文献	728
■ 第二十一章 铬化合物	730
第一节 铬及铬化合物的性质与用途	730

第二节	铬酸钠与重铬酸钠	734
第三节	铬酸酐	751
第四节	氧化铬	758
第五节	碱式硫酸铬	765
第六节	铬酸钾和重铬酸钾	770
主要参考文献		773
■ 第二十二章	硅化合物	774
第一节	硅酸钠	774
第二节	偏硅酸钠	791
第三节	硅溶胶	794
第四节	硅胶	803
第五节	白炭黑	820
主要参考文献		834
■ 第二十三章	过氧化氢	836
主要参考文献		858
■ 第二十四章	锂化合物	862
第一节	碳酸锂	862
第二节	单水氢氧化锂	876
第三节	锰酸锂	880
第四节	钴酸锂	889
第五节	六氟磷酸锂	895
第六节	磷酸亚铁锂	900
第七节	镍钴锰酸锂	909
主要参考文献		916
■ 第二十五章	磷酸盐	919
第一节	概述	919
第二节	磷酸盐的原料和基础产品	924
第三节	磷化物	944
第四节	磷酸盐的基础理论	954
第五节	正磷酸钠盐	959
第六节	焦磷酸钠盐	969
第七节	三聚磷酸钠	974
第八节	六偏磷酸钠	984
第九节	三偏磷酸钠、单氟磷酸钠、磷酸铝钠、氯化磷酸三钠	990
第十节	正磷酸钾盐	995
第十一节	焦磷酸钾	1007
第十二节	三聚磷酸钾	1010
第十三节	磷酸钙盐	1014
第十四节	正磷酸铵	1054
第十五节	聚磷酸铵	1074
第十六节	磷酸铝盐	1080

第十七节	次磷酸盐及次磷酸	1091
第十八节	亚磷酸及亚磷酸盐	1095
	主要参考文献	1101
■	第二十六章 氯酸盐	1103
第一节	氯酸钠	1103
第二节	氯酸钾	1112
第三节	高氯酸钾	1116
第四节	高氯酸铵	1119
第五节	高氯酸钠	1122
第六节	亚氯酸钠	1124
	主要参考文献	1132
■	第二十七章 硫化物和硫酸盐	1134
第一节	工业硫化钠	1134
第二节	无水硫酸钠	1143
第三节	硫氢化钠	1153
第四节	工业硫代硫酸钠	1162
第五节	连二亚硫酸钠 (保险粉)	1171
	主要参考文献	1178
■	第二十八章 硼化合物	1180
第一节	硼酸	1180
第二节	硼砂	1189
第三节	氧化硼	1201
第四节	无定形单质硼	1202
第五节	碳化硼	1204
第六节	氮化硼	1206
第七节	硼酸锌	1209
第八节	过硼酸钠	1211
第九节	偏硼酸钙	1212
第十节	硼酸盐晶须	1214
第十一节	硼化钛	1216
第十二节	三氟化硼	1217
第十三节	硼化镧	1219
	主要参考文献	1219
■	第二十九章 氰化合物	1220
第一节	氢氰酸	1220
第二节	氰化钠	1233
第三节	氰化钾	1243
第四节	硫氰酸钠	1246
第五节	氰化亚铜	1250
第六节	氰化银、氰化银钾	1254
第七节	氰化亚金钾	1257

第八节	黄血盐钾、黄血盐钠	1260
■ 第三十章	硝酸盐	1263
第一节	硝酸铵及多孔硝酸铵	1263
第二节	亚硝酸钠和硝酸钠	1277
主要参考文献		1289