



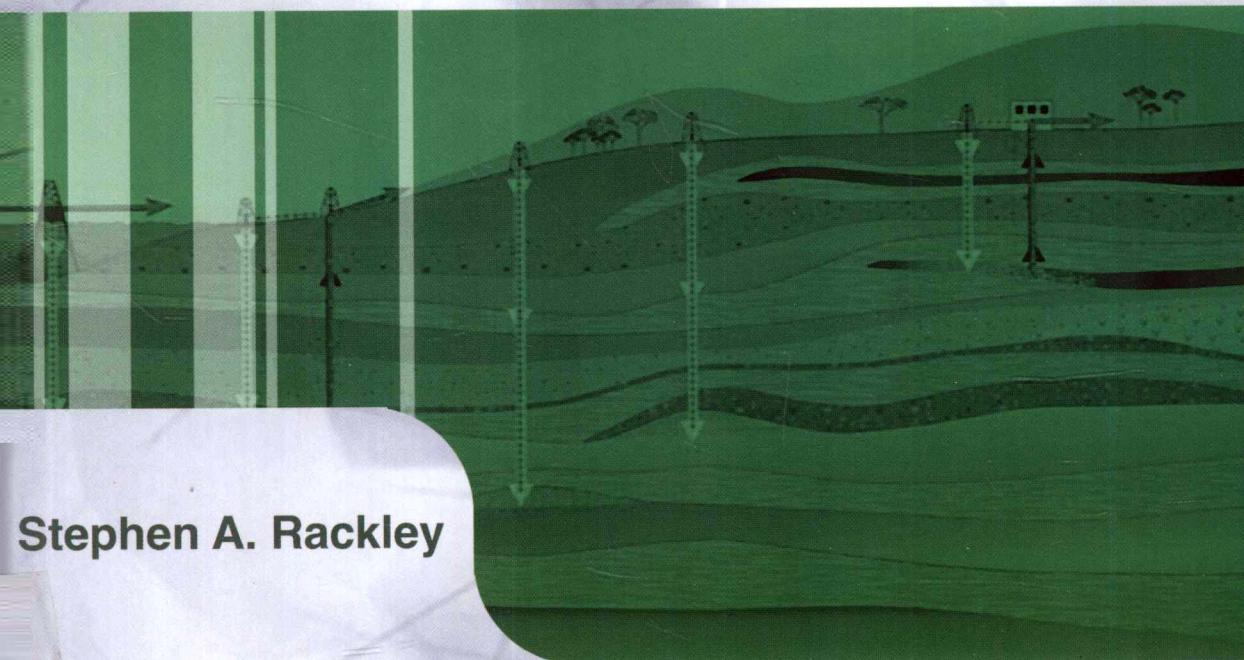
科爱传播
KEAI COMMUNICATIONS

新能源技术应用系列

· 导读版 ·

碳捕集与封存

Carbon Capture and Storage



Stephen A. Rackley



原版引进



科学出版社

新能源技术应用系列

Carbon Capture and Storage

碳捕集与封存

Stephen A. Rackley

科学出版社

北京

图字:01-2011-8098 号

This is an annotated version of

Carbon Capture and Storage

by Stephen A. Rackley

Copyright 2010, Elsevier Inc.

ISBN: 9781856176361

Authorized English language reprint edition published by the proprietor.

Printed in China by Science Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书英文影印版由 Elsevier(Singapore) Pte Ltd. 授权科学出版社在中国大陆境内独家发行。本版权在中国境内(不包括香港特别行政区以及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

图书在版编目(CIP)数据

碳捕集与封存=Carbon Capture and Storage;英文/(美)罗克利(Rackley, S. A.)
著. —北京:科学出版社, 2012
(新能源技术应用系列)
ISBN 978-7-03-033247-9

I. ①碳… II. ①罗… III. ①碳-捕获-英文②碳-保藏-英文 IV. ①TQ127.1
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 280752 号

责任编辑:霍志国/责任印制:钱玉芬

封面设计:耕者设计工作室

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

*

2012 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 1 月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 511 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



导 读

碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 技术是一项新兴的、具有大规模减排温室气体 CO₂ 的技术, 在利用化石能源的同时可以实现 CO₂ 近零排放, 有可能成为未来控制温室气体排放的重要途径之一。对于我国这样以煤炭为主要能源的国家, 发展 CCS 的重要性显而易见。近年来我国政府、企业、高校和科研院所对 CCS 技术的开发日益重视, 国内已实施了若干个 CCS 研发及示范项目。然而, CCS 技术目前总体上处在研发和示范阶段, 还存在不少制约其发展的突出问题, 如捕集使能耗增加、成本过高, 长期封存的安全性和可靠性等不确定因素, 导致可持续发展效益并不显著。因此, 掌握 CCS 技术的基础知识, 了解其开发现状, 特别是深入了解各类正在研发和示范阶段的 CCS 技术, 迫切需要借鉴具有参考价值的书籍。科学出版社引进一本由 Stephen A. Rackley 撰写的 *Carbon Capture and Storage* 专著, 可以起到这方面的作用。

全书分为五大部分, 分别是引言与综述、碳捕集技术、封存与监测技术, 二氧化碳的运输, 以及与 CCS 有关的信息资源。

第 I 部分引言与综述共有 3 章。

第 1 章从大气圈、生物圈、土壤与岩石圈、海洋圈的碳存量, 以及大气圈与其他三者之间的碳通量来介绍碳循环, 从人为排放和自然界 CO₂ 稳定排放两种情景分析大气中碳存量的增加趋势。这一章中还特别介绍了技术创新的过程需要经历研究、开发、示范和推广 (Research, Deployment, Demonstration and Deployment, RDD&D) 4 个阶段, 阐述了这 4 个阶段的特点。

第 2 章对碳捕集与封存进行综述, 简要介绍 CO₂ 捕集的 3 种途径, 即从发电厂捕集 (燃烧后、燃烧前以及富氧燃烧等); 从其他工业过程如水泥生产、钢铁生产中捕集; 以及如何直接从空气中捕集。针对碳封存, 概要叙述地质封存、海洋封存、在陆地生态系统中封存、通过矿物碳化封存, 以及其他封存和使用的途径。

考虑到从发电厂捕集是早期实施 CCS 的重点, 第 3 章介绍了关于发电的基础知识。首先简要叙述了化石燃料的性质及其利用的主要几种方式, 如燃烧、部分氧化、富氧燃烧、气化等; 从热力学循环角度着重介绍了郎肯蒸汽循环和布雷顿燃气轮机循环, 指出了为提高郎肯蒸汽循环效率而采用高蒸汽参数时对钢材的要求, 如钢材的抗腐蚀、碳化物、蠕变、硬化与脆变等。然后较为详细地介绍了化石燃料发电厂, 包括煤炭、天然气和生物质的直燃、混燃及气化等技术; 在锅炉部分, 介绍了给水处理、汽包及水冷壁、过热器、再热器、冷凝器、省煤器、空气预热器及蒸汽温度控制; 介绍了煤粉炉燃烧室和燃烧器、流化床燃烧以及超

临界和超超临界蒸汽发电，以及蒸汽轮机技术；在烟气净化方面，介绍了除尘、脱硫（湿法、电子束法）、脱硝（燃烧中脱除 NO_x 、选择性还原脱除 NO_x 、电子束处理 NO_x ），最后分析了常规电厂的热效率。从余热蒸汽生产、联合循环热效率、整体煤气化联合循环发电方面介绍了联合循环发电。本章最后从超临界和超超临界锅炉用钢，以及其他材料的开发方面，探讨了有可能在 CCS 技术成熟后得到推广的发电技术的未来发展。

第 II 部分碳捕集技术篇幅最大，共有 7 个章节。

第 4 章首先讨论从发电厂中捕集 CO_2 ，分别介绍燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧捕集技术的研究开发与示范项目；从化学链燃烧、重整和制氢方面叙述化学链捕集系统；讨论了电厂预置捕集或通过改造的技术因素与风险。介绍几种零排放发电的概念，如 Norsk Hydro/Alstom 提出的 AZEP（先进零排放电厂）、Los Alamos 国家实验室的 ZEC（零排放煤炭）、FutureGen 联盟的 FutureGen（未来发电）概念等。

第 5 章讨论从工业生产过程捕集 CO_2 ，如采用燃烧后或富氧燃烧捕集水泥生产中的 CO_2 ，还有在钢铁生产、石油精炼，以及天然气处理等工业过程中捕集 CO_2 。

第 6~10 章则从不同工艺角度介绍各种捕集技术。其中，第 6 章介绍吸收法捕集系统，分别叙述如采用胺基、碳酸基、液氨基，以及氢氧化钠基等吸收剂与 CO_2 产生化学反应的化学吸收法，和采用物理溶剂的物理吸收法的物理化学基础；介绍了胺基、液氨基化学吸收和 Selexol、Rectisol、Fluor 等物理吸收工艺在燃烧后捕集中的应用；分别从改进的胺基系统、干法吸收剂基工艺的研发、离子液体吸收剂、低聚吸收剂，以及采用氢氧化钠的烟气或空气中 CO_2 捕集等方面，介绍各种吸收技术的研发与示范现状，讨论其优缺点及研发与示范重点领域。

第 7 章介绍吸附捕集系统，首先介绍有关吸附的物理化学基础知识，如吸附热力学、化学吸附剂、物理吸附剂以及吸附工艺模式等；然后介绍吸附工艺的应用，如变温吸附、变压吸附、变压吸附等。最后从先进的变压吸附循环、吸收增强式水气变换和蒸汽重整反应、新型吸附剂材料、高频压力循环以及化学链循环等方面介绍吸附技术的研发与示范现状。

第 8 章叙述膜分离系统，首先介绍膜分离过程基础知识，如粘性毛细流动、Knudsen 扩散、表面扩散与毛细凝结、分子筛等多孔膜输运过程；以及介绍溶解-扩散输运过程、促进传递膜、离子输运膜等基础概念。然后讨论了与膜结构、制备与膜模块的制造相关的膜的种类、膜模块的物理结构（如螺旋缠绕、中空纤维、陶瓷晶片堆等）；并叙述了膜技术的研发与示范现状，分析其优缺点及研发与示范重点领域；本章也分别介绍了膜分离技术在燃烧前捕集的应用（氧离子输运膜生产合成气和应用钯膜分离提纯氢气）、在 O_2/CO_2 燃烧中的应用（氧气分离用分子筛和离子输运膜制氧）、在燃烧后捕集中的应用（高温熔融碳酸盐膜、促进传递

膜和碳分子筛膜)以及应用于天然气处理工艺(聚合物膜和气-液膜接触器)。

第9章简要介绍深冷与精馏系统,包括物理基础知识,精馏塔的构造和运行,富氧燃烧用深冷制氧,CO₂-CH₄分离的Ryan-Holmes工艺,以及深冷与精馏技术的研发与示范。

第10章讨论矿物碳酸化,介绍通过气-液、水合路径的直接碳酸化,通过酸、熔融盐、氢氧化钠提取的间接碳酸化等物理化学基础知识;讨论该技术的发展现状,包括确定首选矿物原料,其他原料与工业集成,含矿物预处理与活化的反应优化,碳酸化产物的处置与再利用,给出了一个示范规模碳酸化反应器的设计与开发示例。最后对矿物碳酸化与钢厂、煤气化发电厂的集成示范和推广进行了展望。

第Ⅲ部分封存和监测技术共4章,分别涉及地质封存、海洋封存、在陆地生态系统中封存,以及其他的封存和利用途径。

第11章地质封存介绍了地质与工程基础,如沉积过程、孔隙度与渗透率、盖层、异质性等沉积储层岩石性质;结构与地层圈封存;地震勘探;流体在多孔介质中流动的达西定律、润湿性和相对渗透率;烃类流体相行为;库藏建模和监控;钻井建设、数据采集、控制等油气井钻探与生产技术等。在讨论提高石油采收率时(Enhanced Oil Recovery, EOR),以Weyburn油田EOR为案例,从地质特点, O₂ 迁移的预测、监测与验证,封存容量的技术与经济限制的预测,以及长期风险评估进行了分析,同时介绍了已规划的EOR封存项目。关于盐水层封存,从结构与地层圈、残余、溶解度、矿物封存几方面讨论了CO₂封存机制;在封存地点选择方面,介绍采用时间推移地震监测、重力与电磁调查、表面取样与海底监测等几方面进行盐水层封存监测;以Sleipner盐水层封存为案例,对封存地特性与选择、注入操作与监测等进行了分析,并介绍了其他规划中的盐水层封存项目,讨论了盐水层封存的研究开发与示范。最后介绍了其他地质封存途径,如在荷兰北海K12-B气井进行的EGR(强化天然气回收)项目,已规划的英国北海Hewett库藏的EGR封存项目,以及在美国北达科塔州PCOR进行的ECBM(强化煤层气回收)项目。

第12章海洋封存首先介绍CO₂在海水中的物理特性(饱和压力、浮力、水合物的形成)和海洋碳循环(可溶性碳循环、生物碳循环、大气与海洋之间的长期CO₂平衡)等物理、化学与生物基础;然后讨论了将CO₂直接注入深海所涉及的一些问题,如CO₂的溶解、CO₂的浓缩、液态CO₂隔离,以及对大规模现场试验的展望等。同时叙述了化学封存和生物封存。

第13章讲解陆地生态系统封存,先介绍生物化学基础,如C3、C4与CAM(景天酸代谢)的光合作用、植物地上组织和地下组织间的碳分配,土壤中的生物化学过程(腐殖、土壤结构、气候与生态系统之间相互作用的模拟);然后介绍各种陆地碳封存的途径,如保护性耕作,作物选择、轮换与密集种植,管理土

壤生物地球化学、控制微生物种群等农业中的碳封存，湿地管理与恢复，林业管理、造林与再造林等改变土地使用等；以及如何计算陆地封存的全部温室气体量等。同时介绍了目前陆地封存的研发重点，包括空气中 CO₂ 浓缩实验，美国能源部资助的强化陆地生态系统封存（CSiTE）研究开发计划。

第 14 章介绍其他封存和利用途径，如在钢厂采用钢渣直接捕集空气的 CO₂ 并生产沉淀碳酸钙和其他生产沉淀碳酸钙的方案；在水泥工业中利用混凝土制品和镁硅酸盐水泥水合过程来固化 CO₂；介绍了藻类生长过程光转换效率与饱和度及闭式藻类生产系统的开发与示范，从藻类生物质制取燃料，藻类与生物柴油生产的研究重点。

第 IV 部分只有一个章节，第 15 章二氧化碳的运输，包含管线运输和船舶运输两种方式。关于管线运输先介绍管线工程基础，包括流动、管线与设备材料问题、管线腐蚀、管线断裂失效及其他材料问题，以及如何抑制水合物形成来确保流动稳定等内容；管线运行需要考虑的问题；然后介绍目前运行与计划建设的管线运输系统，以美国得克萨斯州墨西哥湾沿岸的 CO₂ 管网，以及 COOT 公司跨越英国、挪威和荷兰的北海 CO₂ 管网进行管线运输系统案例分析，讨论 CCS 项目中管线运输的研究开发与示范。关于船舶运输，讨论船舶运输的最佳物理条件，装载 CO₂ 的船舶设计、开发及未来推广，以及船舶运输的运行等。

第 V 部分介绍碳捕集与封存的信息资源，第 16 章给出了更多的信息资源，有国家级和国际性的组织及项目介绍，按技术领域分类的资源，分别为洁净燃煤发电、吸附、膜与分子筛、深冷与精馏系统、矿物碳酸化、地质封存、海洋封存、陆地生态系统封存等技术领域；还提供了与 CCS 相关的在线期刊与实时通讯信息。第 17 章提供了 CCS 单位与转换系数、与 CCS 相关的缩写，以及 CCS 技术词汇。

该书附有便于检索的索引。

本书的作者 Rackley 曾在著名的剑桥大学卡文迪什实验室获得实验物理博士学位，而后在能源工业工作了 26 年多，对 CO₂ 封存的一些主要关键技术如地圈中定点、监测，以及浅层地表的验证等积累了丰富经验。近年来，他致力于先进的、发展中的技术在学生、工程和项目管理界中的传播。该书的特点是每一章都先介绍相关基础知识，内容中有项目实例，最后附有主要参考文献、相关的研发机构和互联网资源。因此，该书既可以是一本从事 CCS 技术开发的专业人员的专业用书，也可以是一本适合非专业读者了解关于 CCS 技术的基础知识与现状的参考用书。我相信科学出版社将此书以导读版的形式出版，对我国读者了解和促进 CCS 技术的发展大有裨益。

蔡宁生

清华大学热能工程系

前 言

本书的撰写念头源自理查德·布兰森爵士和美国前副总统阿尔·戈尔于2007年2月9日发起的维珍地球挑战行动，该行动之目的是鼓励开发商业化的新技术、新工艺和新方法，藉此减排大气中大量人类活动所引起的温室气体，从而对地球气候的稳定做出实质性的贡献。

目前化石燃料燃烧每年产生60~65亿吨碳排放量，所谓实质性的贡献则意味这些新技术、新工艺和新方法的推广每年需减排10亿吨量级的碳，这比目前任何一个已经运作的项目要大千倍。这一减排数量看起来巨大，但与由人类活动产生的碳排放量与天然的碳通量——如每年1200亿吨的陆地光合作用碳通量，以及每年900亿吨的海洋吸收释放碳通量相比，微不足道。

目前，各类碳捕集与封存（CCS）技术仍处在研究、开发和示范阶段。尽管其中一些技术已经接近推广阶段，大多数仍需要进一步开发以改进技术水平和降低成本。尽管早已出现领跑者，但CCS仍有赖于通过不同技术的广泛应用实现其长期潜力，这些技术涉及从燃煤电厂采用吸收剂捕集和地质封存到在燃料燃烧前的脱碳，以及通过调控如微生物种群和海洋培育等生态因素来增加土壤和海洋的碳汇等。

本书旨在提供对以上处在不同成熟阶段技术的综合的、技术的但是非专家性的综述，为CCS进步做一些微薄贡献，也期望为决策者提供技术背景，并激励未来一代的学生和年轻工程师应对21世纪最重要的技术挑战。

本书分为5个部分，依次介绍基础知识、捕集、封存与监测、运输和信息资源。

第I部分的3个章节介绍相关基础知识。第1章描述全球碳循环和人类活动产生的二氧化碳排放对碳源及碳汇的影响。第2章以主要工业碳排放源为出发点，简要给出CCS技术的初步综述。鉴于从发电厂捕集将是早期实施CCS的重点，第3章对发电技术给予较为详细的介绍，重点介绍当前常规技术和正在开发的、有可能在CCS技术成熟期内得到推广的系统。

在基础知识之后，第II部分更为详细地描述了碳捕集技术。前两章侧重于工业方面，第4章针对发电工业，第5章针对其他工业。接下来的5章则从技术方面来写，分别涉及吸收、吸附、膜、深冷和矿物碳化技术。

然后，第III部分针对CO₂的封存和与之相关的监测要求，分别涉及地质封存（第11章）、海洋封存（第12章）和陆地生态系统中的封存（第13章）。第III部分的最后一章讲述推广CO₂工业应用，如低碳水泥和生物燃料生产等，这

些可能的应用将对全球 CCS 减排目标做出显著贡献。

第Ⅳ部分涉及在捕集点与封存点之间的 CO₂ 的运输，或者采用管线运输，或者采用舰船运输。

本书第Ⅴ部分是一个信息资源汇总，包括单位和转换系数、主要的缩写表和某些关键技术词汇表。

尽管本书的重点在 CCS 技术，但其他一些因素，最主要的是成本，也会在 CCS 技术推广中起到决定性作用。但除了目前对某些 CCS 方案的成本预估或目标成本的一般性介绍之外，本书避免对各类技术的实施成本做详细分析，因为 CCS 项目的投资、运行成本和经济性将与具体实施情况高度相关，汇率的浮动也将进一步使分析变得复杂。可以预计，未来 CCS 技术的成本和能耗需求取决于技术研发的努力结果和从早期示范项目的经验吸取，并会进一步降低，但改进程度和时间以及它们对整个捕集成本的影响是高度不确定的，套用当前成本来评估未来的 CCS 的实施或成本可能会形成误导。

本书各章节受益于大量从事相关技术研发的科学家和其他专业人士的评述。我特别要感谢 Benemann Associates 的 John Benemann 博士，University of Calgary 的 Somayeh Goodarzi 博士，Calpetra Research & Consulting 的 Rob 和 Karin Lavoie，Ohio State University 的 Klaus Lorenz 博士，Research Foundation Polytec 的 Antonier Oosterkamp，Monterey Bay Aquarium Research Institute 的 Edward Peltzer 博士，University of South Carolina 的 James Ritter 教授，Universität Stuttgart 的 Anja Schuster 教授，Central Research Institute of Electric Power Industry [CRIEPI] 的 Takahisa Yokoyaka 博士，以及 Åbo Akademi University 的 Ron Zevenhoven。他们至关重要的投入、热情洋溢的奉献，在本书中都有体现。作者对遗留的不足、错误以及忽略之处负责。欢迎读者提出任何评述、建议或其他反馈，并请发至 ccs2010@gmail.com。

很高兴与 Elsevier 的团队工作，使得本书顺利出版。我感谢 Ken McCombs 和 Irene Hosey，带领和支持本书从概念到完成，也感谢出版团队——特别是在 Maria Alonso 能干的领导下，MPS Content Service 的 Donald Whitehead 和 Anne McGee。

最后的感谢话语要献给 Serge, Brin 和 Jimmy，没有他们的眼力，完成本书将会是相当大的挑战。

自从 1990 年联合国政府间气候变化组织 (IPCC) 首次公布评估报告的 20 多年来，随着证据和理解的增加，IPCC 的不确定性的谨慎语言已经逐渐强化到第四次报告中的要点，能够高度自信地声明：“自从 1750 年以来，人类活动的净效应是变暖原因之一。从 20 世纪中叶大多数观察到的全球平均温度的上升很可能是由于观察到的人类活动所产生的温室气体 (GHG) 浓度的增加” (IPCC

AR4, 2007)。

期望将在 2014 公布的 AR5，随着新的证据日益增加，人类的活动对气候的影响到达预测的最高点，我们目前面临的任务是，确保在我们有限的改变机会的窗口前，我们不会得出这样一个结论。

就像 2007 年 Frey, T. 在 Greenzo, 30Rock, 2 (5) 中所述：“地球在毁灭！我们必须要有一个新的地球”。

Stephen A. Rackley

2009 年 8 月

(蔡宁生 译)

Preface

The seed from which this book has grown was planted by the launch of the Virgin Earth Challenge by Sir Richard Branson and former U.S. Vice President Al Gore on Feb. 9, 2007. The aim of the Challenge is to encourage the development of commercially viable new technology, processes, and methods that can remove significant volumes of anthropogenic greenhouse gases from the atmosphere and contribute materially to the stability of the earth's climate.

With emissions from fossil fuel combustion running at 6.0–6.5 Gt-C per year (Gt-C = 10^9 metric tonnes of carbon), a material contribution to climate stability implies the potential for deployment on a scale of 1 Gt-C per year, roughly a thousand times larger than any currently operating project. While these volumes seem prodigious, anthropogenic emissions pale into insignificance beside the natural fluxes such as terrestrial photosynthesis, at ~ 120 Gt-C year, and oceanic uptake and release at ~ 90 Gt-C per year.

A diverse range of carbon capture and storage (CCS) technologies are currently at various stages of research, development, and demonstration. While a few of these technologies have reached the deployment stage, many still require significant further development work to improve technical capabilities and reduce costs. Although front-runners are already emerging, it is likely that the long-term potential of CCS will be achieved through the application of a broad portfolio of different technologies. These could range from the current favorite—solvent-based capture from coal-fired power plants with geological storage—to the decarbonation of fuels ahead of combustion, the manipulation of ecological factors such as microbial populations or ocean fertility to increase carbon inventories in soils and in the oceans, and many others.

The aim of this book is to contribute in small part to the progress of this endeavor by providing a comprehensive, technical, but nonspecialist overview of technologies at various stages of maturity that, it is hoped, will provide technical background for decision makers and encourage a coming generation of students and young engineers to tackle the 21st century's most important technological challenge.

The book is presented in five parts, dealing in turn with fundamentals, capture, storage and monitoring, transportation, and information resources.

The three chapters of Part I establish some fundamentals. Chapter 1 describes the global carbon cycle and outlines the perturbing impact of anthropogenic carbon dioxide emissions on carbon fluxes and sinks. In Chapter 2, a brief initial overview of CCS technologies is given, taking each of the main industrial sources of carbon emissions as the starting point. Since capture from

power generation plants will be a major focus of early CCS implementation, Chapter 3 provides a fairly comprehensive introduction to power generation technologies. The emphasis here is on the current state of the art and on systems under development that are likely to be deployed during the period in which CCS technologies mature.

With these foundations established, Part II provides a more detailed description of carbon capture technologies. The first two chapters are written from an industry perspective, for the power industry (Chapter 4) and other industries (Chapter 5), and the next five chapters from a technology perspective, covering absorption, adsorption, membrane, cryogenic, and mineral carbonation technologies.

Part III then addresses the storage of captured CO₂ and related monitoring requirements, covering geological storage (Chapter 11), ocean storage (Chapter 12), and storage in terrestrial ecosystems (Chapter 13). The final chapter in Part III describes opportunities to increase industrial usage of CO₂ in ways that can significantly contribute to global CCS objectives, such as low-carbon cement and biofuel production.

The transportation of CO₂ between capture and storage sites, either by pipeline infrastructure or by marine transport, is covered in Part IV.

The book concludes in Part V with a compendium of information resources, including units and conversion factors, a list of key abbreviations, and a glossary of some of the key technical terms encountered.

While the focus of this book is on the technical aspects of CCS, many other factors will play a part in determining the extent to which CCS technologies are eventually deployed—chief among them being costs. Apart from some general indications of currently estimated or target costs of some CCS options, this book avoids any analysis of the cost of implementation of the various technologies discussed. The capital and operating costs and the economics of individual CCS projects will be highly case-dependent, with exchange rate volatility further complicating any general analysis. Future reductions in the costs and energy requirements of CCS technologies can also be expected, pending the outcome of further R&D efforts and the learning from early demonstration projects. The extent and timing of these improvements and their impact on overall capture costs are highly uncertain, so that current costs are a poor guide to either actual or relative future CCS implementation prospects or costs.

Various chapters of the book have benefited from review by a number of scientists and other professionals who are engaged in the broad range of technologies described here. My special thanks are due to Dr. John Benemann (Benemann Associates), Dr. Somayeh Goodarzi (University of Calgary), Rob and Karin Lavoie (Calpetra Research & Consulting), Dr. Klaus Lorenz (Ohio State University), Dr. Antonie Oosterkamp (Research Foundation Polytec), Dr. Edward Peltzer (Monterey Bay Aquarium Research Institute), Prof. James Ritter (University of South Carolina), Prof. Anja Schuster (Universität Stuttgart), Dr. Takahisa Yokoyaka (Central Research Institute of Electric Power Industry [CRIEPI]), and Prof. Ron Zevenhoven (Åbo Akademi University).

Their critical input, generously provided, is reflected in these pages; the responsibility for the remaining shortcomings, errors, and omissions remains with the author. Any comments, suggestions, or other feedback from readers will be most welcome; please send them to ccst2010@gmail.com.

It has been a pleasure to work with the team at Elsevier in bringing this book to fruition, and my thanks are due to Ken McCombs and Irene Hosey, who shepherded and supported it from concept to completion, and to the production team—notably Donald Whitehead of MPS Content Services and Anne McGee—ably led by Maria Alonso.

A final word of thanks is due to Serge, Brin, and Jimmy, without whose vision this project would have been a far greater challenge.

In the two decades since the 1990 publication by the UN Intergovernmental Panel on Climate Change of its First Assessment Report, in the face of an increasing body of evidence and understanding, the Panel's careful language of uncertainty has been progressively strengthened to the point where the Fourth Assessment Report was able to state with very high confidence that “the net effect of human activities since 1750 has been one of warming. Most of the observed increase in global average temperatures since the mid-20th century is very likely due to the observed increase in anthropogenic GHG concentrations” (IPCC AR4, 2007).

Looking beyond AR5, due in 2014, with new evidence mounting daily that the climatic impact of our activities is at the upper end of the range of predictions, the task before us is to ensure that, at the end of our finite window of opportunity for change, we do not conclude ...

“This earth is ruined! We gotta get a new one.” (Fey, T. (2007). *Greenzo*, *30Rock*, 2 (5)).

Stephen A. Rackley
August 2009

Acknowledgements

ECO₂® is a registered trademark of Powerspan Corp.

Econamine™ is a registered trademark of Fluor Corp.

Generon® is a registered trademark of the Dow Chemical Company.

Inconel® is a registered trademark of Special Metals Corp.

Prism® is a registered trademark of the Monsanto Company.

Selexol® is a registered trademark of Union Carbide Corp.

Separex™ is a registered trademark of UOP-Honeywell Inc.

Skymin® is a registered trademark of Skyonic Inc.

Teflon® is a registered trademark of E. I. du Pont de Nemours and Company.

Every effort has been made to acknowledge registered names and trademarks. Any omissions should be advised to the publisher and will be corrected in a future edition.

目 录

前言	xi
致谢	xv
第 I 部分 引言与综述	1
1 引言	3
1.1 碳循环	5
1.2 大气中碳存量的增加	11
1.3 技术创新的过程	13
1.4 参考文献及资源	18
2 碳捕集与封存综述	19
2.1 碳捕集	19
2.2 碳封存	24
2.3 参考文献及资源	28
3 关于发电的基础知识	29
3.1 物理化学基础	29
3.2 化石燃料电厂	43
3.3 联合循环发电	56
3.4 发电技术的未来发展	61
3.5 参考文献及资源	63
第 II 部分 碳捕集技术	65
4 从发电厂中捕集碳	67
4.1 引言	67
4.2 燃烧前捕集	68
4.3 燃烧后捕集	71
4.4 富氧燃烧捕集	75
4.5 化学链捕集系统	78
4.6 预置捕集的和通过改造的电厂	84
4.7 零排放发电的途径	86
4.8 参考文献及资源	92
5 从工业过程中捕集碳	95
5.1 水泥生产	95
5.2 钢铁生产	97

5.3	石油精炼	99
5.4	天然气处理	101
5.5	参考文献及资源	101
6	吸收捕集系统	103
6.1	物理化学基础	103
6.2	吸收在燃烧后捕集中的应用	111
6.3	吸收技术的研发与示范现状	117
6.4	参考文献及资源	130
7	吸附捕集系统	133
7.1	物理化学基础	133
7.2	吸附工艺的应用	143
7.3	吸附技术的研发与示范现状	148
7.4	参考文献及资源	157
8	膜分离系统	159
8.1	物理化学基础	159
8.2	膜的构造、制备与膜的制造	174
8.3	膜技术的研发与示范现状	179
8.4	膜在燃烧前捕集中的应用	182
8.5	膜和分子筛在富氧燃烧中的应用	187
8.6	膜在燃烧后 CO ₂ 分离中的应用	189
8.7	膜在天然气处理中的应用	190
8.8	参考文献及资源	194
9	深冷与精馏系统	195
9.1	物理基础	195
9.2	精馏塔的构造和运行	197
9.3	富氧燃烧用深冷制氧	199
9.4	CO ₂ -CH ₄ 分离的 Ryan-Holmes 工艺	201
9.5	深冷与精馏技术中的研发与示范	204
9.6	参考文献及资源	205
10	矿物碳酸化	207
10.1	物理化学基础	207
10.2	技术发展现状	213
10.3	示范和推广展望	221
10.4	参考文献及资源	224

第Ⅲ部分 封存和监测技术	227
11 地质封存	229
11.1 引言.....	229
11.2 地质与工程基础.....	229
11.3 提高石油采收率.....	243
11.4 盐水层封存.....	250
11.5 其他地质封存途径.....	261
11.6 参考文献及资源.....	265
12 海洋封存	267
12.1 引言.....	267
12.2 物理、化学与生物基础.....	267
12.3 直接 CO ₂ 注入	275
12.4 化学封存.....	280
12.5 生物封存.....	281
12.6 参考文献及资源.....	285
13 在陆地生态系统中封存	287
13.1 引言.....	287
13.2 生物化学基础.....	288
13.3 陆地碳封存的途径.....	298
13.4 陆地封存容量计算.....	307
13.5 目前陆地封存的研发重点.....	308
13.6 参考文献及资源.....	315
14 其他封存和利用途径	317
14.1 强化工业利用.....	317
14.2 藻类生物燃料生产.....	320
14.3 参考文献及资源.....	326
第Ⅳ部分 二氧化碳的运输	329
15 二氧化碳的运输	331
15.1 管线运输.....	332
15.2 船舶运输.....	340
15.3 参考文献及资源.....	343
第Ⅴ部分 碳捕集与封存的信息资源	345
16 更多的信息资源	347
16.1 国家和国际性的组织及项目.....	347
16.2 按技术领域分类的资源.....	350
16.3 与 CCS 相关的在线期刊与实时通讯	352