

BEST PRACTICE FOR THE STORAGE OF CO₂ IN SALINE AQUIFERS



地下咸水层 CO₂封存实践

[英] Andy Chadwick, Rob Arts, Christian Bernstone,
Franz May, Sylvain Thibeau, Peter Zweigel 编
曾荣树 陈代钊 刘大安 等译

(感谢欧洲委员会与国际能源署温室气体研究发展计划对
SACS 与 CO₂STORE 项目的资助)



石油工业出版社

地下咸水层 CO₂ 封存实践

[英] Andy Chadwick, Rob Arts, Christian Bernstone,
Franz May, Sylvain Thibeau, Peter Zweigel 编

曾荣树 陈代钊 刘大安 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书内容来自欧洲 SACS 与 CO2STORE 项目的成功实践与工作指南,主要把 SACS 与 CO2STORE 项目的许多研究成果汇总成一本与地下咸水层封存 CO₂ 有关的手册,目的是在技术上对一定地质条件下安全有效封存 CO₂ 进行全面指导。主要内容包括封存目的与效益,封存位置的筛分、排序与选择,场址描述,场址设计与规划许可,场地建设,实施操作,以及项目验收与交接。

本书可供从事温室气体减排、CO₂ 地质封存的技术人员及管理人员使用,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下咸水层 CO₂ 封存实践/(英)查德威克等编;曾荣树等译.
北京:石油工业出版社,2013.9

书名原文: BEST PRACTICE FOR THE STORAGE OF CO₂ IN
SALINE AQUIFERS

ISBN 978-7-5021-9508-3

I. 地…

II. ①查…②曾…

III. 地下水-咸水-含水层-二氧化碳-保藏-研究

IV. ①P641.139

②X701.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 036957 号

English edition © NERC 2008. Chinese edition © Petroleum Industry Press 2012.

Reproduced with the permission of the CO2STORE Consortium.

著作权合同登记号图字:01-2013-0833

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523535 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:13

字数:326 千字 印数:1—1700 册

定价:96.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

中文版序

2008年“Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers”出版以来,该书就成为一本CO₂地下咸水层封存的权威性参考书。在收集了近年来欧洲领先研究机构研究发现的基础上,该书考察了CO₂封存的所有阶段,包括从项目立项、资金筹措和计划制订,场址选择运营、监测到项目结束。它涵盖了欧洲从陆地到海洋之间CO₂封存的广阔范围,更重要的是,它介绍了当今世界上运营时间最长的CCS项目——挪威Sleipner CO₂封存的权威经验。

本书中文版的首次出版发行具有很大意义。中国可能有很好的条件在世界CCS领域处于领先地位,所以把书中丰富的知识和经验与重要的为数众多的新读者共享,是一件值得称赞的事。

Andy Chadwick

英国地质调查局CO₂封存研究部 主任

译者的话

从2006年11月起,我们开始执行由科技部与欧盟第六合作框架资助的CCS合作项目,项目名称为“Cooperation Action within CCS China – EU”,简称COACH(中欧碳捕集与封存合作项目,2006.11—2009.10)。2008年7月英国地质调查局的同行把刚刚出版的新书《Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers》送给我们。我们仔细阅读后,认为书中所介绍的内容对于我国开展碳捕集、封存与监测等研究有借鉴作用,值得把这些经验介绍给我国的广大读者。在石油工业出版社的各级领导与编辑部门的大力支持下,本书终于得以翻译出版。译者希望本书能对于我国温室气体的减排,CO₂的地质封存有一定的参考价值。

这是一个共同努力协作的成果,主要由中国科学院地质与地球物理研究所的科技人员、博士研究生及博士后集体翻译而成。各部分的分工为:第1章、第2章王舒;第3章3.1—3.4许志刚、刘浪涛,3.5—3.7徐文东;第4章4.1崔振东,4.2—4.3段忠丰,4.4—4.5黎明,4.5—4.7与第5章、第6章崔振东;第7章7.1—7.2金超,7.3—7.4黎明;第8章张巍;全书最后由曾荣树、田兴有、陈代钊与刘大安研究员校订。我们特别感谢英国地质调查局(BGS)的Geri Jayne Vincent博士对书中各种外文名称的仔细校对。尽管全体人员已付出最大努力,但难免存在错误与不足,CO₂封存领域的词汇比较新颖,目前对词释义存在不同的观点,希望广大读者不吝指教,请专家学者多提宝贵意见。

衷心感谢科技部“973”项目对本书翻译出版的经费资助。

2012年12月于北京

前 言

由欧盟及其各成员国政府与工业界支持的 SACS、SACS2 与 CO2STORE 三个项目,运行周期从 1998 年延续至 2006 年,其目的在于推动 CO₂ 地下咸水层封存可能性的理论研究。前期项目 SACS、SACS2,专门针对 Sleipner CO₂ 地下封存的科学问题,CO2STORE 继承了对 Sleipner 的研究工作,同时扩展了研究范围,在欧洲海上及陆上选择了四个新的备选封存场址并进行了场址描述(图 1.1)。该项目除了建立常用的地质学、地球化学与地球物理的场址描述和监测方案,还着重开展了备选场址的风险评估。

虽然 SACS 与 CO2STORE 项目的许多研究成果已经通过科学论文发表,但多是为了达到一定宣传普及的目的。本书旨在把一些主要的发现汇总成一本与地下咸水层封存 CO₂ 有关的手册,以在技术上对一定地质条件下安全有效封存 CO₂ 进行全面指导。这将在评价欧洲或其他地区规划封存 CO₂ 新项目时,为公司、管理机构、非政府组织(NGOs),乃至对此感兴趣的公众提供一个平台。

本书围绕封存场址选择的进展共分七个部分进行阐述,从项目开始到最后结束阶段,略述如下:封存目的与效益,封存位置的筛分、排序与选择,场址描述,场址设计与规划许可,场地建设,实施操作,项目验收与交接。

项目的每一阶段分别用书中的一章进行阐述。全书主要根据已有的经验以及一部分实际案例写成,如果考虑要把这些经验应用到其他封存地区时,务必要认识到整个地球的地下是一个差异很大的天然系统,不同地区的性质千差万别。所以,本书强调的某些事项和程序的重要性在不同地区会有一些的差异性。当研究新的封存场址和封存理念时,本书没有论及的新问题就可能产生。尽管如此,书中对有关的地质、环境与规划问题的阐述力求广泛详细。可以说,本书中的内容为在规划和提出可能的 CO₂ 封存作业时提供可行的运作程序打下了坚实的基础。

SACS 和 CO2STORE 的合作伙伴包括: Statoil 公司、BP 公司、ExxonMobil 公司、Hydro 公司(原 Norsk Hydro 公司)、Total 公司、Energi - E2 公司、Vattenfall 公司、英国贸易与工业部、德国联邦地球科学与自然资源研究院(BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe)、英国地质调查局(BGS, British Geological Survey)、法国地质调查局(BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières)、丹麦与格陵兰地质调查局(GEUS, Geological Survey of Denmark)、法国石油天然气研究中心(IFP, Institut Français du Pétrole)、PEL 公司(Progressive Energy Ltd)、荷兰应用地质研究所—荷兰地质调查局(TNO - NITG, Netherlands Institute of Applied Geoscience - National Geological Survey)、挪威地质调查局(NGU, Norwegian Geological Survey)、斯伦贝谢 Stavanger 研究中心(SSR, Schlumberger Stavanger Research)、SINTEF 石油研究中心(SINTEF, SINTEF Petroleum Research)和 IEAGHG 组织。

我们对提供资助的欧盟、工业界合作伙伴和各成员国政府表示衷心感谢,对提供合作和数据支持的 Sleipner 项目许可的作业方、Statoil 公司、Exxonmobil 公司和 Total 公司一并表示感谢。

本书撰写人

德国联邦地球科学与自然资源研究院

Franz May
Robert Meyer
Peer Hoth
Paul Krull
Christian Müller

英国与格陵兰地质调查局

Keith Bateman
Andy Chadwick
Dave Evans
Jon Harrington
Sam Holloway
Steve Horseman
Gary Kirby
Xiang – Yang Li
Enru Liu
Tony Milodowski
Jonathan Pearce
Simon Kemp
Chris Rochelle
Gareth Williams
Paul Williamson

BP 公司

Shelagh Baines
John Williams

法国地质调查局

Pascal Audigane
Isabelle Czernichowski – Lauriol
Pierre Durst
Hubert Fabriol
Irina Gaus
Christophe Kervevan
Bernard Sanjuan

DONG 能源公司(原 Energie E2 公司)

Jørgen Nørklit Jensen

ExxonMobil 公司

Mark Northam

Dave Slater

Dave Taylor

丹麦地质调查局

Niels Bech

Torben Bidstrup

Niels Peter Christiansen

Ulrik Gregersen

Peter Johannessen

Lars Kristensen

Michael Larson

Niels Springer

Thomas Vangkilde – Pedersen

Hydro 公司

Lars Ingolf Eide

国际能源署温室气体研发机构

John Gale

Angela Manancourt

法国石油天然气研究中心

Yann Le Gallo

Pierre Le Thiez

Bernard Zinszner

挪威 Industrikraft Midt – Norge

挪威地质调查局

Reidulv Bøe

PEL 公司

David Hanstock

斯伦贝谢 Stavanger 研究中心

Hilde Grude Borgos

Geir Vaaland Dahl

Kristine Arland Halvorsen

Magne Lygren

Trygve Randen

Lars Sonneland
Thorleif Skov

SINTEF 石油研究中心

Per Bergmo
Emmanuel Cause
Erik Lindeberg
Anne – Elisabeth Lothe
Severine Pannetier – Lescoffit
Svend Østmo
Peter Zweigel

Statoil 公司

Bjorn Berger
Ola Eiken
Hans Aksel Haugen
Christian Hermanrud
Tore Torp
Peter Zweigel (原供职于 SINTEF 石油研究中心)

TNO 建筑环境与地球科学公司

Rob Arts
Bert Van der Meer
Eric Kreft

Total 公司

Sylvain Thibeau
Johann Frangeul
Rodolphe Bouchard

英国贸易与工业部

Richard Archer
Pete Edwards
Tim Dixon

Vattenfall 公司

Christian Bernstone
Clas Ekstrom
Ole Biede (原供职于 Energie E2 公司)
Sara Eriksson
Rickard Svensson

目 录

第1章 绪论	(1)
第2章 封存目的与效益	(7)
2.1 减排目标	(7)
2.2 区域环境影响	(10)
第3章 封存位置的筛分、排序与选择	(12)
3.1 封存能力	(12)
3.1.1 封存原理	(12)
3.1.2 封存量计算	(13)
3.1.3 封存系数	(16)
3.1.4 CO ₂ STORE 实例观测研究	(16)
3.1.5 小结	(22)
3.2 储层的基本特性	(23)
3.2.1 CO ₂ STORE 实例剖析	(23)
3.2.2 小结	(37)
3.3 上覆盖层的基本特征	(37)
3.4 基本的储层流动模拟	(40)
3.4.1 CO ₂ STORE 实例剖析	(40)
3.4.2 小结	(47)
3.5 候选场址的安全评估	(48)
3.5.1 风险及风险判据	(48)
3.5.2 HSE 风险	(48)
3.5.3 区域 HSE 风险	(49)
3.5.4 全球 HSE 风险	(49)
3.5.5 海上和陆上风险	(49)
3.5.6 CO ₂ STORE 实例剖析	(50)
3.6 应用冲突	(51)
3.6.1 污染其他资源	(51)
3.6.2 地表设施与管线	(52)
3.6.3 CO ₂ STORE 实例剖析	(52)
3.7 费用	(55)
3.7.1 CO ₂ STORE 个案研究报告	(55)
3.7.2 小结	(57)
第4章 场址描述	(58)
4.1 场址地质描述	(58)
4.1.1 储层结构	(59)

4.1.2	储层性质	(64)
4.1.3	覆盖层与盖层特征	(76)
4.2	水流模拟预测	(86)
4.2.1	CO ₂ STORE 实例剖析	(86)
4.2.2	小结	(96)
4.3	地球化学评价	(97)
4.3.1	储存场地初始地球化学特征描述	(98)
4.3.2	储层反应	(99)
4.3.3	盖层反应性	(103)
4.3.4	断层和裂缝内的化学反应	(105)
4.3.5	小结	(107)
4.4	地质力学评估	(107)
4.5	描述阶段风险评估	(107)
4.5.1	FEP 方法工作步骤	(108)
4.5.2	环境影响评估与环境风险判据	(108)
4.5.3	CO ₂ STORE 实例剖析	(109)
4.5.4	小结	(119)
4.6	监测规划设计	(119)
4.6.1	深层监测方法	(122)
4.6.2	浅层监测方法	(125)
4.7	运输	(126)
4.7.1	管道	(126)
4.7.2	船舶运输	(129)
第5章	场址设计与规划许可	(130)
5.1	设计	(130)
5.2	规划许可	(130)
5.2.1	国内许可	(130)
5.2.2	国际许可	(132)
第6章	场地建设	(134)
第7章	实施操作	(135)
7.1	管线及注入设备的运行和维护	(135)
7.2	监测	(136)
7.2.1	地表时移地震监测	(136)
7.2.2	海底时移重力测量法	(154)
7.2.3	小结	(157)
7.3	基于监测数据拟合的流动模拟	(158)
7.3.1	Sleipner 使用的模拟软件	(158)
7.3.2	流体和运移特征	(159)
7.3.3	流动模拟	(160)
7.3.4	CO ₂ 长期状态的大尺度模型模拟	(161)

- 7.3.5 小结 (168)
- 7.4 井筒材料的室内实验 (169)
- 第8章 验收与交接** (171)
 - 8.1 验收申请 (171)
 - 8.2 验收安全标准 (172)
 - 8.2.1 注入后与交接后的监测要求 (172)
 - 8.2.2 修复预案 (174)
 - 8.3 责任交接 (174)
 - 8.4 后续问题 (175)
- 参考文献** (177)
- 参考资料** (185)

第1章 绪 论

由欧盟及其各成员国政府与工业界支持的 SACS、SACS2 与 CO2STORE 三个项目,从 1998 年开始运行至 2006 年,其目的在于推动 CO₂ 在地下咸水层大规模封存可能性的理论研究。前期项目 SACS 和 SACS2,专门针对 Sleipner CO₂ 注入过程的科学问题,CO2STORE 继承了对 Sleipner 的研究工作,同时扩展了研究范围,在欧洲海上及陆地选择了四个新的备选封存场址并进行了场址描述(图 1.1)。该项目除了建立常用的地质学、地球化学与地球物理学的场址描述和监测方案外,还着重开展了备选场址的风险评估。

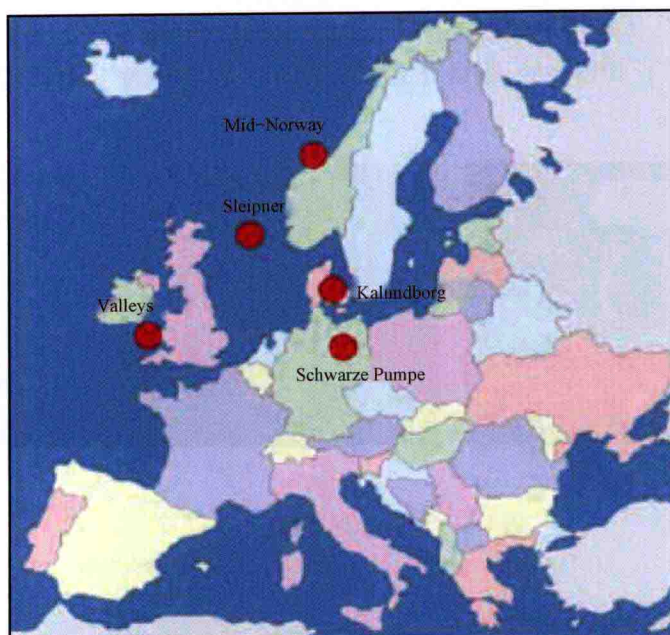


图 1.1 CO2STORE 项目的研究实例

SACS 与 CO2STORE 项目的许多研究成果虽然已经通过科学论文发表,但多是为了达到一定宣传普及的目的。本书旨在于把一些主要的发现汇总成一本与地下咸水层封存 CO₂ 有关的手册,以供参考。它根据较早时期从 SACS/SACS2 项目与 GEO - SEQ 项目(SACS,2003; GEO - SEQ,2004)实践中获得成功经验写就并加以完善与补充,目的是在技术上对一定地质条件下安全有效封存 CO₂ 提供一个有力的指南。这将在评价欧洲或其他地区规划封存 CO₂ 新项目时,为公司、管理机构、非政府组织(NGOs),乃至对此感兴趣的公众提供一个平台。

全书主要根据我们的经验以及一部分实际案例写成,如果考虑要把这些经验应用到其他封存地区时,务必要认识到整个地球的地下是一个差异很大的天然系统,不同地区的性质差别很大。所以,本书强调的某些事项和程序的重要性在不同地区会有一些的差异性。当研究新的封存场址和封存理念时,本书没有论及的新问题就可能产生。尽管如此,书中对有关的地质、环境与规划问题的阐述力求广泛详细。可以说,本书中的内容为在规划和提出可能的 CO₂ 封存作业时提供可行的运作程序打下了坚实的基础。

本书围绕封存场址选择的进展共分七个部分进行阐述,从项目开始到最后结束阶段,略述如下:封存目的与效益,封存位置的筛分、排序与选择,场址描述,场址设计与规划许可,场地建设,实施操作,项目验收与交接。

项目的每一阶段分别用书中的一章进行阐述。某些章节,如场址描述一章,包含了从所有研究实例中收集到的数据资料;而其他章节,例如项目运行一章,就只有从 Sleipner 油田得到的资料。封存场址的建设已经超出本书的主要研究讨论范围,因此不做任何表述。

试验研究项目具体介绍如下:

(1) Sleipner(挪威 海上)。

北海 Sleipner 气田 CO₂ 注入工程由 Statoil 公司与 Sleipner 项目的成员单位合作开展,是世界上第一个工业规模的 CO₂ 注入项目,其设计主旨在于减少温室气体排放。

从天然气分离出来的 CO₂ 被回注到 Utsira 砂岩(图 1.2)——Utsira 砂岩是新生代晚期形成的主要咸水层。气体通过一口轨迹近于水平的斜井注入到注入点处(图 1.3)。该注入点离平台约 3km、海平面下 1012m 处,距储层顶部约 200m。从 1996 年开始到 2006 年中期,注入的 CO₂ 超过 $800 \times 10^4 \text{t}$ 。

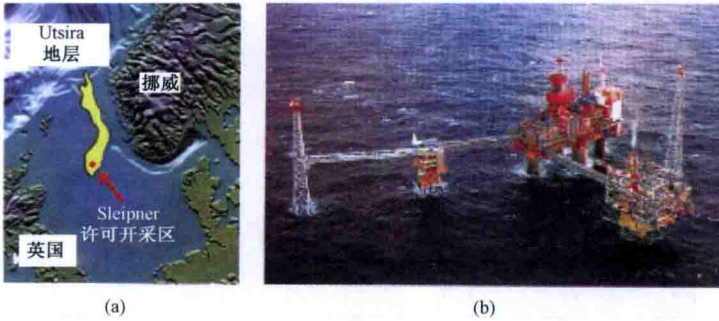


图 1.2 Sleipner 气田 CO₂ 注入工程

(a) Utsira 砂岩储层(黄色);(b) 钻井与注入井平台分布图

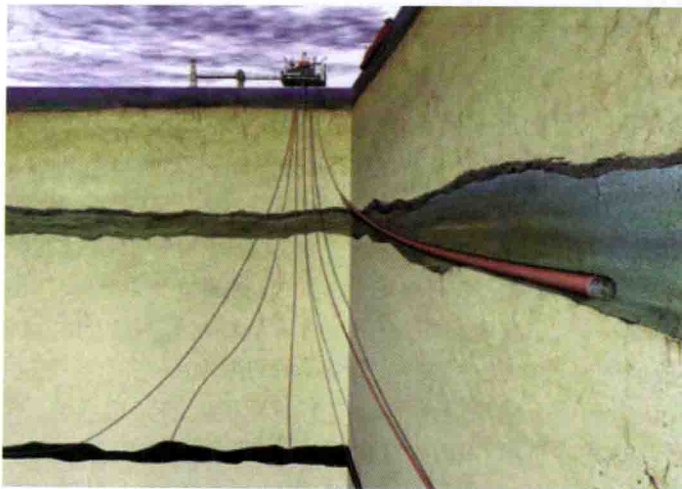


图 1.3 Sleipner 气田 CO₂ 注入井动画图显示斜井平台至储层的井眼轨迹

(2) Kalundborg(丹麦 陆地/海上)。

这一丹麦项目的研究方向主要针对将来可能进行 CO₂ 捕集与地下封存的两个排放源上: Energie - E2 公司所属的 Asnaesvaerket 燃煤电厂与 Statoil 炼油厂,两者都位于 Kalundborg(图 1.4)。



图 1.4 Kalundborg 燃煤电厂(背景图)与 Statoil 炼油厂(前景图)

该备选封存场址是一个大型背斜构造,覆盖面积达 160km²,在 Kalundborg 东北方向约 15km 处。CO₂ 的目的储层 Gassum 地层是三叠系砂岩,埋深约 1500m。

(3) Mid - Norway(挪威 海上)。

位于 Trondheimsfjorden 峡湾内 Skogn 地区的联合热电厂,计划每年从烟气中捕集大约 200×10^4 t CO₂。而位于挪威中部 Tjeldbergodden 地区的甲醇厂现在每年排放 45×10^4 t CO₂。目前计划再建一个 CO₂ 排放量相近的甲醇厂和一个 CO₂ 年排放量约为 210×10^4 t 燃气发电厂。

目前通过调查研究已经选定三个位于海上的 CO₂ 备选封存场址:位于 Trondheimfjord 的 Beitstadfjord 盆地、Frohavet 盆地以及 Trøndelag 台地的 Froan 盆地,其中 Beitstadfjord 盆地相对较小(图 1.5)。

(4) Schwarze Pumpe(德国 陆地)。

Schwarze Pumpe 发电厂(图 1.6)位于柏林东南的 Niederauslitz 区。

该电厂由 Vattenfall 公司管理,拥有两个装机容量 900MW 的机组,以褐煤为燃料,每年排放约 1000×10^4 t CO₂,该发电厂是 Vattenfall 公司在德国东北部运营的中等规模的燃烧褐煤发电厂(图 1.7)。

该项目研究已经在德国东北盆地的深部咸水层中确定了若干个封存场址并进行了场址描述。经证实,Schweinrich 构造最有希望把工厂所排放的 CO₂ 封存起来。该构造是个细长的背斜构造,覆盖面积达 100km²,为三叠系与侏罗系储层,位于地下约 1500m。

Vattenfall 公司正在 Schwarze Pumpe 建立一座 30MW 的示范电厂(图 1.8),拟在 2008 年投入运营。虽然在示范工厂捕集的 CO₂ 具有适合运输与封存的性质,但是示范工程的主要目的还是要验证和改进 CO₂ 捕集技术。Schwarze Pumpe 目前的电厂每年产出 1000×10^4 t CO₂,而

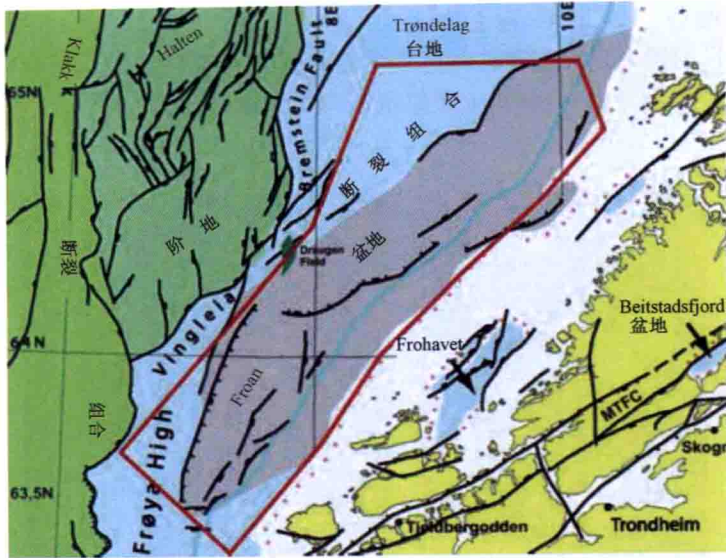


图 1.5 挪威中部三个可能的封存 CO₂ 地点的地质构造略图
(据 Blystad 等 1995 年资料修改)



图 1.6 Schwarze Pumpe 发电厂

这个示范工程全负荷运转所产出的 CO₂ 量每年只有约 60×10^4 t。大规模排放源需要处理的 CO₂ 数量是非常巨大的,其项目规模比现在世界上正在进行的任何一个 CO₂ 封存项目都大得多。例如,Sleipner,In Salah(阿尔及利亚)以及 Weyburn(加拿大)项目每年 CO₂ 封存量也都只在 $100 \times 10^4 \sim 200 \times 10^4$ t 左右。

(5) Valleys(英国 海上)。

Progressive 能源有限公司是一个专业的能源项目公司,目前正计划在南威尔士建立一个 450MW 煤气化联合循环发电厂(CGCC/IGCC)(图 1.9)。该电厂将采用当地的无烟煤与焦油的混合物作燃料。Progressive 能源有限公司计划产出富 CO₂ 与氢气的合成气,该气体中的 CO₂ 可在燃烧前去除,而且费用低廉。

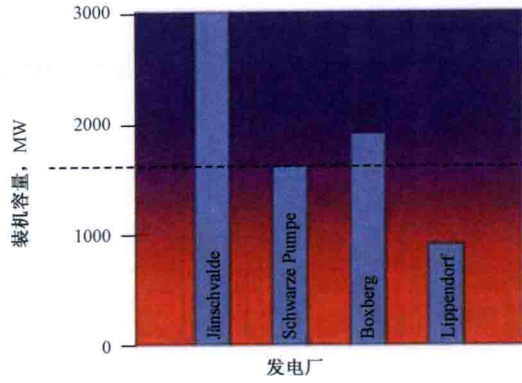
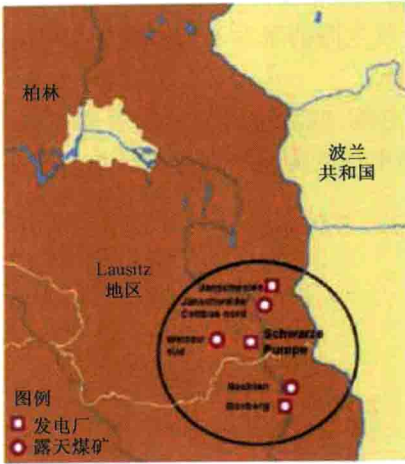


图 1.7 Schwarze Pumpe 电厂位置以及它与邻区电厂发电量

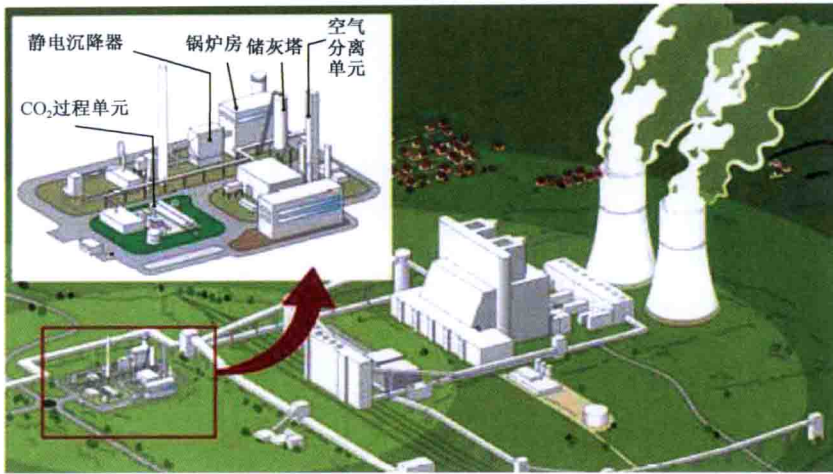


图 1.8 Schwarze Pumpe 工业区内规划中的 30MW 富氧燃烧发电厂工程示意图



图 1.9 南威尔士 Valleys(IGCC)发电厂效果图