

实践出真知：

降低燃煤电厂CCUS项目成本前瞻

2019年11月



实践出真知：

降低燃煤电厂 CCUS 项目成本前瞻

煤炭工业咨询委员会向国际能源署递交的报告

2019 年 11 月

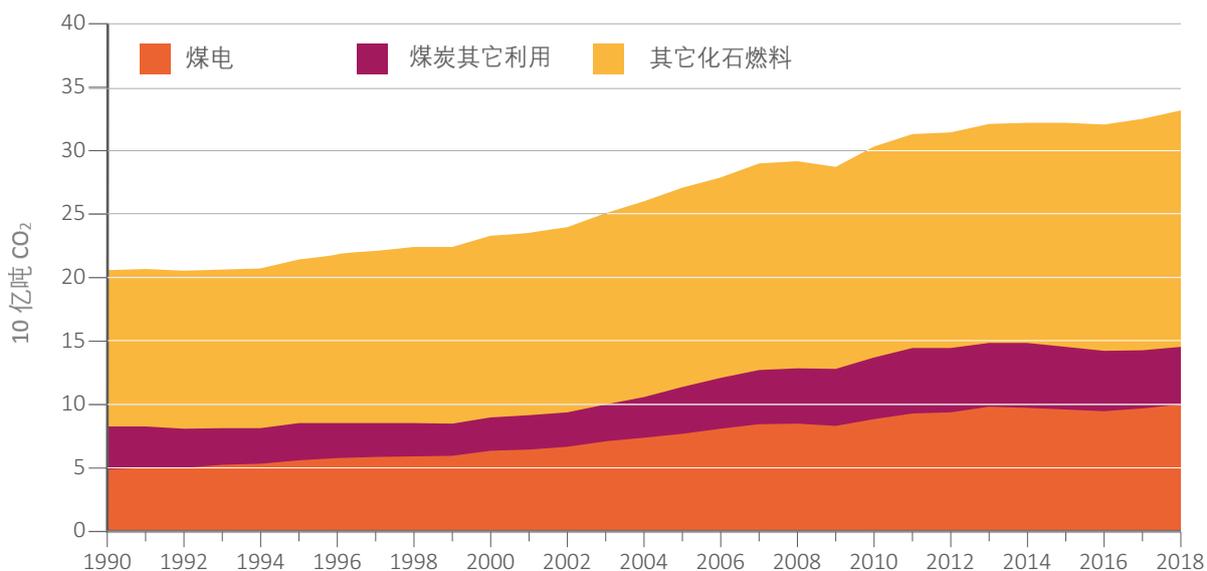
本文所表达的仅为国际能源署（IEA）煤炭工业咨询委员会（CIAB）的观点。本文的唯一目的是根据煤炭工业咨询委员会的角色，为国际能源署秘书处提供建议。本文体现了煤炭工业咨询委员会成员基于参与全球范围内 CCUS 项目和能源基础设施项目的设计，融资，建设和运营的经验。这些观点未必反映国际能源署秘书处及其成员国的观点或政策。

执行摘要

2015 年《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）巴黎协议，将全球平均温度上升幅度限制在较工业化前不超过 2°C 的水平。为了实现这一目标，大规模的排放密集型工业和发电过程必须大幅脱碳。在煤炭和天然气发电行业，以及钢铁和水泥制造等工业过程，化石燃料制氢，以及生物能源生产等领域，如果不加快推进各行业范围内碳捕集，利用与封存（CCUS）的商业规模部署，就无法实现如此大规模的减排。按照《2018 年世界能源展望（WEO）》的最低成本情景，国际能源署（IEA）估计，CCUS 可以贡献 2060 年以前所需的累计减排量的 13%。政府间气候变化专家委员会（IPCC）第五次评估报告得出的结论是，没有 CCUS，实现温度上升不过 2°C 的上限目标将付出双倍以上开支，相当于 2100 年以前全球 GDP 累计增量的 3%。如果 CCUS 未能在全球范围内广泛应用于所有行业，则不太可能实现将温度升限控制在 2°C 以内。

根据 IEA 的《2018 年世界能源展望（WEO）》新政策情景，煤炭的贡献占全球二氧化碳排放量的很大一部分（见图解 1），预计到 2040 年煤炭将占一次能源总需求量的 22%。全球现役燃煤发电资产中三分之一以上服役不到 10 年，且至今仍在继续建造新的燃煤电厂。对投资经济回报的渴望将阻碍这些设施的过早淘汰。

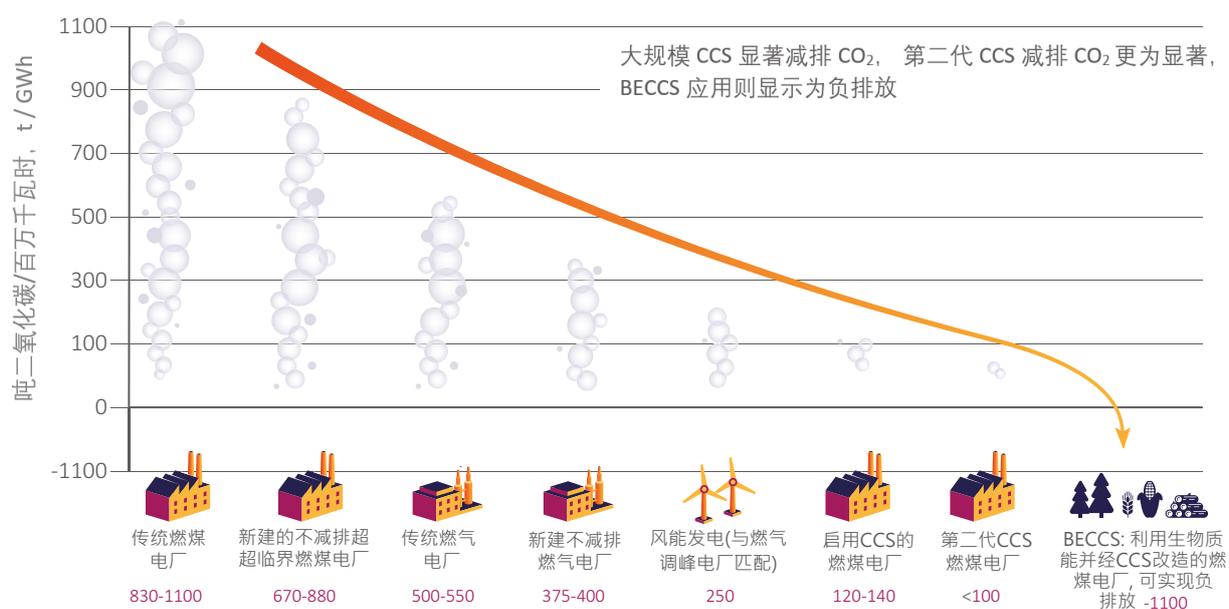
图解 1：1990-2018 年全球能源二氧化碳排放源划分



资料来源：国际能源署

近来，可再生能源技术（尤其是太阳能和风力发电）的成本和性能有了显著改善。使用可再生能源和替代能源的低排放或零排放发电，对于实现 2°C 温度增长限值至关重要。但是，我们简直无法弃用 CCUS。发展中国家人口和经济迅速增长，随之而来的难以缓解但必不可少的钢铁和水泥制造等工业发展，以及令人震惊的毁林面积和日益增加的农业生产活动，拉大了全球温室气体（GHG）减排的努力与实现 2°C 增温限值途径之间的差距。2060 年以前，整个能源行业总共需要减排约 7,600 亿吨二氧化碳，这相当于以 2017 年能源相关的排放为基准水平，持续 20 多年的排放量总和。因此，每项减排技术对于加快国际努力以减少大气中的二氧化碳水平都不可忽略。此外，研究表明，通过与生物质混烧结合 CCUS（BECCS）的负排放策略，燃煤热电厂可以降低二氧化碳大气排放（见图解 2）。

图解 2：电厂大规模部署应用 CCUS 可减排二氧化碳



资料来源：碳捕集利用与封存知识国际中心

煤炭工业咨询委员会 (CIAB) 于 2016 年向国际能源署 (IEA) 递交的题为《CCS 的国际承诺：实现能源低碳未来的政策与激励措施》的报告中，鼓励各国政府推行政策，支持鼓励提高工业和电力行业 CCUS 部署应用进度，以实现 2°C 温度上限控制的目标。本文报告中再次强调这些建议，可以分为四个层面：

- 落实让资金投入能够获得市场回报率的政策，**刺激市场化采纳 CCUS。**
- **扶持项目开发**，以弥补早期项目的商业化短板并加快 CCUS 的采纳。
- **启用项目专用资金**，克服 CCUS 早期项目的财务风险。
- 提供资金扶持具备竞争优势潜力的技术与知识开发，**推进下一代 CCUS 技术。**

此外，在煤炭工业咨询委员会 2017 年度题为《CCS 的国际承诺：促进 CCS 部署应用的优先行动》的报告中，详细研究了美国，英国，澳大利亚和中华人民共和国的案例，为其它政府提供政策方面的经验教训，并充实了煤炭工业咨询委员会 2016 年度报告中的建议。

降低 CCUS 成本的机遇就在当下。本报告探讨了减少资本成本和运营成本的途径。尤其是对燃煤发电而言，降低成本将提高利用 CCUS 减排的经济可行性。迄今为止，在燃煤电站的第一代 CCUS 装置上所取得的卓越的工业化经验，已产生显著降低成本的成果。

事实上，与其它减排路径相比，燃煤电力行业的 CCUS 越来越具有成本比较优势。这里列举的若干实际范例，有助于制定适当的政策并形成其它驱动力，这对于按照必要的步骤推进 CCUS 的发展至关重要。范例主要有：

- **位于加拿大的萨斯喀电力集团边界坝电站碳捕集利用与封存 (CCUS) 一体化设施**，是首例燃煤电站大规模燃烧后 CCUS 设施，于 2014 年开始运行。当时，据估计，根据该项目调试和早期运行的经验把握，建设并运营下一例规模类似的 CCUS 设施，可以至少节省成本 30%。
- 位于美国得克萨斯州的**佩特拉·诺瓦 (Petra Nova) 设施**，为工业化规模燃煤电站 CCUS 装置，于 2017 年开始运行。它使得人们对改善成本效益的驱动要素，有了更深入的掌握和更强的信心。
- **2018 年度尚德电厂碳捕集与封存 (CCS) 可行性研究**，依托位于边界坝设施附近的萨斯喀电力集团的 30 万千瓦单机燃煤电站，对实施燃烧后 CCUS 改造进行评价。据估计，该项目下一代 CCUS 运营，每吨二氧化碳的捕集成本可节省 60% 以上。在此，将一一介绍这些成本优化源头的一系列考量，涉及节约项目资本成本，节约运营成本，优化商业论证，以及财务/政策选项。

迄今为止，大型 CCUS 设施大多数都在燃煤发电以外其它行业领域内。最为迫切的是必须将这些大型 CCUS 设施开发的机会扩展到燃煤发电行业领域。现已建成的项目为未来的 CCUS 项目设计和开发提供了重要的经验教训，且许多经验教训将势必大幅降低项目的资本性成本和运营成本。迄今为止的工作，已经成功地证明了规模经济性等有利因素能够降低二氧化碳捕集成本。技术的进步势必将进一步降低成本。因此，本文也突出列举了前景看好的新兴技术，包括膜捕集，富氧燃烧以及生物质能碳捕集与封存 (BECCS) 等。CCUS 部署应用持续不断的进展将取决于以下几个方面：

- **加深理解并掌握相关专业知**识。必须继续融汇贯通专业技术知识，以更深入地理解降低二氧化碳捕集成本并改进设计的要素，促进技术进步。
- **降低共享运输和封存的不确定性**。为必要的投资提供便利，开发运输和封存系统等重大基础设施，包括制定更完备的物流规划。
- **强化政策和财政扶持**。国际社会必须做出承诺，制定扶持性政策和支持创新的融资机制，以促使 CCUS 成长为稳固成熟的产业。
- **伴随投资 CCUS 商业化部署应用，继续投资于新技术的研究和试点项目**。在过去的几十年中，大量投入于研究，试点和示范的投资水平，不仅必须继续保持，恰恰必须增加，这有助于降低伴随煤电低排技术的投资风险，势必将加快技术开发周期。为了加快新型燃煤电厂的设计，许可和运营，因地制宜地利用特有的黑煤和褐煤资源，进行研究工作也是必不可少的，以获得独立和客观的分析，构建数据库并开发专业知识。

发电行业的 CCUS 技术应用是本报告的首要重点。到 2020 年，全球将有 20 多个商业化规模的 CCUS 项目投入运营，每年捕集并封存于地质构造内的工业源二氧化碳超过 3700 万吨。CCUS 并不是一项新生事物，但在煤电行业中仍数罕见，迄今为止只有两个 CCUS 商业化装置在运行。为了兑现《巴黎协定》中的承诺，二十国集团成员国必须高度重视向 CCUS 大量投资，以实现全球能源相关的减排。鉴于缺乏可用的替代技术，许多基于化石燃料的排放密集型工业过程将需要应用 CCUS，来实现升温上限 2°C 的目标。CCUS 是促进向可再生能源和替代能源过渡的关键因素，而且在仍必需继续使用化石能源以保障经济运行的行业内，CCUS 亦绝对是关键组成部分。即使在全世界限碳的未来，CCUS 也将有利于在石油化工生产等那些我们别无选择的领域，继续使用现有的基于化石能源的基础设施和工业化操作。

最近，令人欢欣鼓舞的是，煤电与以能源为基础的相关产业联手开发 CCUS 商业化项目，加快了进步的步伐。率先实施的项目所获得的经验教训为后续项目节省了成本。

以可避免二氧化碳排放的每吨成本来衡量，煤电行业的CCUS较其它减排形式在成本上已经具备竞争力。

显然，需要明确而积极的担当，来扩展知识，深化理解和掌握关键性专业技术。这必将促进煤电行业环境绩效的持续改善。保持，或更理想的情况是，加强 CCUS 商业化应用的发展势头，定将为实现《巴黎协定》的 2 度升温上限目标做出有意义的贡献。

碳捕集与封存一览

加速实现二氧化碳减排

- 1 工业设施或能源设施的二氧化碳排放源。通过碳捕集与封存 (CCS)，将捕集、回收并永久封存大量的二氧化碳。
- 2 以可能超过90%的捕集率捕集烟道气中二氧化碳，再压缩成浓相液态以便于运输。
- 3 二氧化碳经管道运输。二氧化碳也可以通过槽车，铁路或船舶运输，具体取决于CCS项目所在地的特定需求。
- 4 二氧化碳被送入地下深处的用途：
 - a 增加石油采收率 (EOR)—二氧化碳经回收再注，终将安全地永久封存在枯竭的油藏/天然气藏储层中。
 - b 永久封存在多孔岩石层*的颗粒缝隙构造的微观空间内—深度超过1 千米，其上面质密而不渗透的“盖层”岩层，确保CO₂无限期地留存在那里。
- 5 监控，测量与验证 (MMV)—部署严格而灵敏的MMV设备与程序，可以检测地下二氧化碳压力和浓度的变化，以确保其羽流的增长在可接受的合规范围内并在注入的储层内永久留存。同样，定期完成地表面监测，以确保注入操作或地面CO₂操作过程中不会有CO₂泄漏到大气中，地下水系或土壤中。

* 深层砂岩在其岩石颗粒构造之间具有微观空间，即孔隙度，可容纳高盐度水份—其咸度是海水的10倍。由于存在这种非常咸的盐水，地质学家将这种类型的地层称为咸水层。

实践出真知： 降低燃煤电厂 CCUS 项目成本前瞻

领衔撰稿人

考文·布鲁斯，碳捕集利用与封存知识国际中心

供稿人

布伦特·雅各布斯，碳捕集利用与封存知识国际中心

丝塔芙茹拉·吉安纳里斯，碳捕集利用与封存知识国际中心

贝斯·哈迪，碳捕集利用与封存知识国际中心

煤炭工业咨询委员会工作组

米克·巴菲尔，嘉能可集团

格雷厄姆·温克尔曼，必和必拓集团

彼得·莫里斯，澳大利亚矿业委员会

萨曼莎·麦库洛奇，国际能源署

霍利·科鲁特卡，皮博迪能源公司

迈克尔·弗兰尼根，皮博迪能源公司

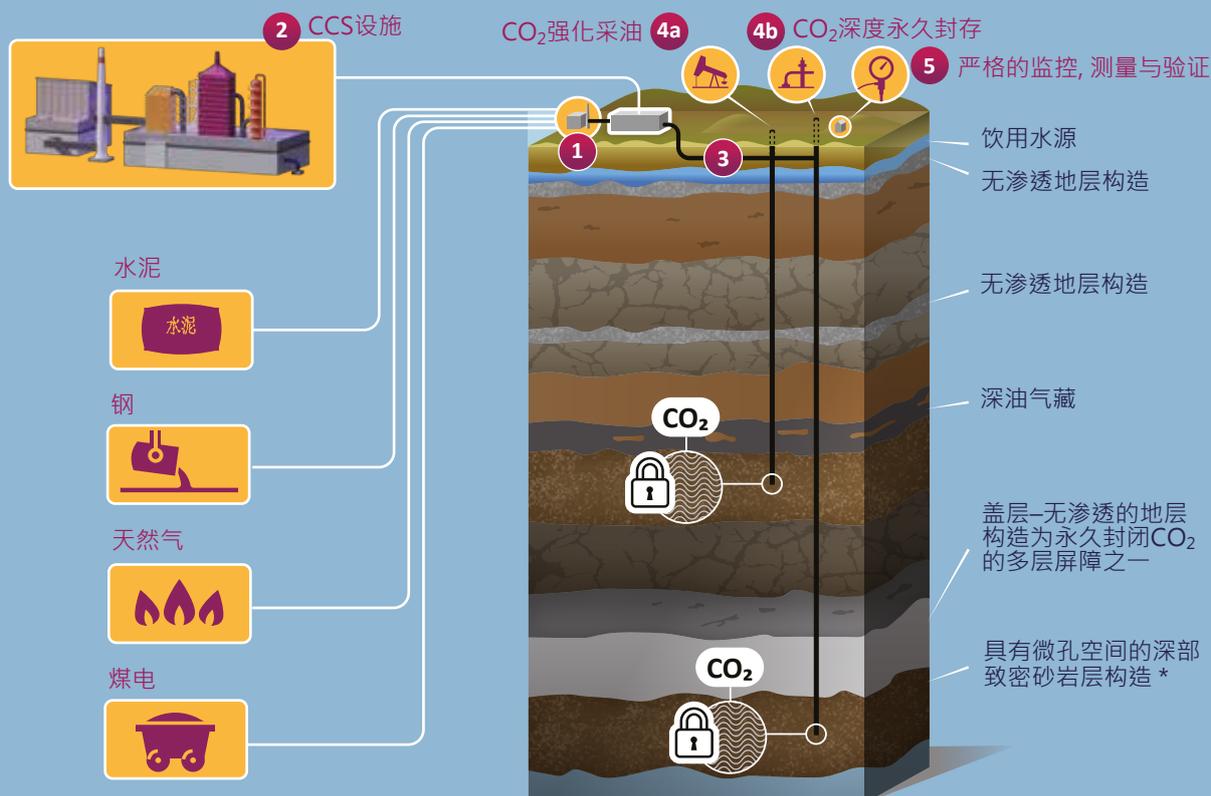
尼基·费希尔，英美资源集团

汉斯·惠勒姆·施菲尔，莱茵集团

卡尔·宾德曼，煤炭工业咨询委员会

翻译

于泽伟，碳捕集利用与封存知识国际中心



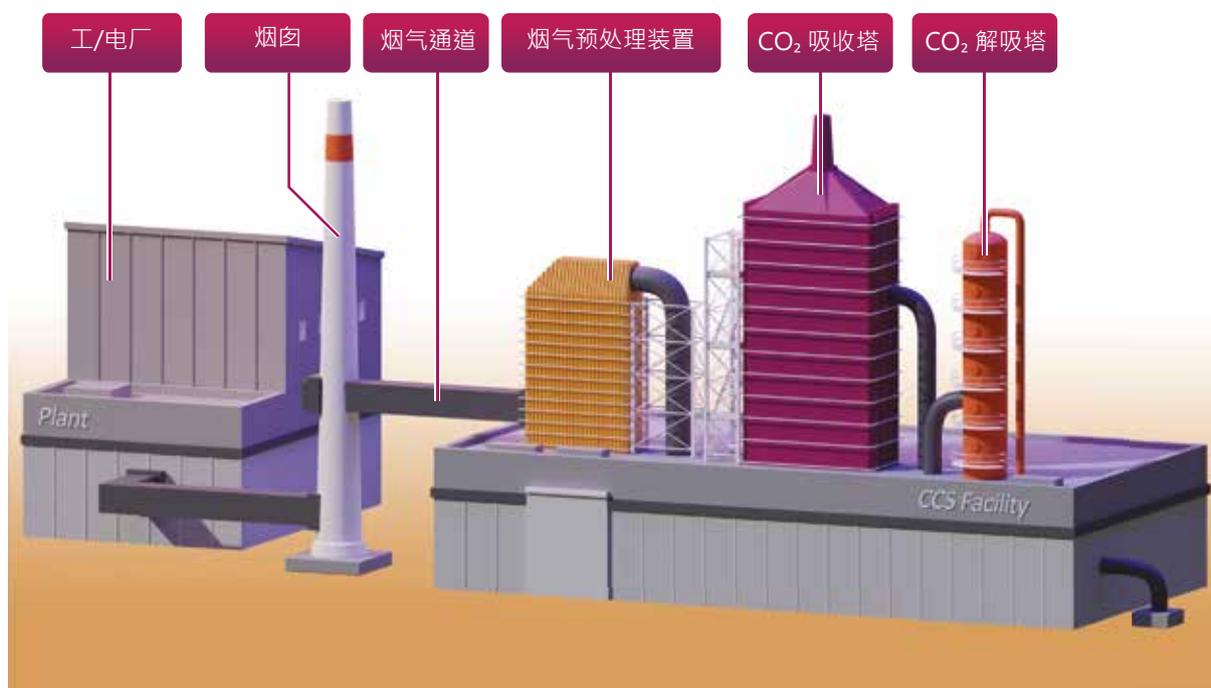
鸣谢与免责声明

在煤炭行业咨询委员会（CIAB）主席兼执行委员会特许的碳捕集与封存特别工作组的指导下，本文由碳捕集利用与封存知识国际中心代表撰写。除了上述作者和工作组作者之外，本文还反映了许多其他供稿人的意见，煤炭工业咨询委员会谨此非常感谢。

煤炭工业咨询委员会的企业成员和独立组织成员旗下的众多专家，给予本文以技术性充实并予以审阅。

煤炭工业咨询委员会（CIAB）是由若干煤炭相关企业的高管组成的团体，由国际能源署理事会成立于 1979 年 7 月，旨在从本行业角度就与煤炭有关的问题向国际能源署提供建议，其所表达的观点仅代表煤炭工业咨询委员会。本文的唯一目的是根据煤炭工业咨询委员会的角色，为国际能源署秘书处提供建议。本文集中体现了煤炭工业咨询委员会成员参与全球范围内 CCUS 项目和能源基础设施项目的设计，融资，建设和运营的经验。本文不一定代表国际能源署或已知的供稿人的观点。

工业设施或电厂的碳捕集设施构成



目录

执行摘要.....	3
鸣谢与免责声明.....	8
应对全球气候CCUS势在必行.....	11
巴黎协定.....	11
国际能源署的启示: CCUS的必要性.....	11
第一代燃煤电站CCUS项目的经验.....	12
走向成功.....	14
燃煤发电设施CCUS工业化示范.....	14
萨斯喀电力的边界坝3号机组碳捕集与封存(CCS)设施.....	14
NRG的佩特拉·诺瓦CCS设施.....	16
降低CCUS项目成本.....	18
降低项目资本成本.....	19
扩大CCUS设施规模.....	19
场地布局与撬装化.....	19
提高捕集率.....	20
提高主电厂的效率.....	22
优化CCUS操作环境.....	22
培育CCUS供应链.....	22
降低运营成本.....	23
胺降解成本.....	23
维护成本.....	25
热能优化.....	25
水耗.....	26
压缩机效率.....	27
数字化.....	27
降低二氧化碳运输与封存成本.....	28
完善商业论证.....	29
承担电网支撑以及辅助服务.....	30
与可再生能源整合.....	30
二氧化碳利用的收入与封存枢纽.....	31
技术进步对CCUS项目成本和性能的影响.....	32
燃烧后捕集技术.....	33
负排放: 生物质与燃煤混烧发电.....	33
燃煤电厂新技术.....	35
卡利德富氧燃烧项目.....	36
阿拉姆循环试点项目.....	37
加强公共政策扶持与融资力度.....	38
结束语.....	41

图解

图解 1: 1990-2018 年全球能源二氧化碳排放源划分	3
图解 2: 电厂大规模部署应用 CCUS 可减排二氧化碳	4
图解 3: “清洁能源部长级会议 CCUS 倡议”专题边会活动的主要信息, “共同加速 CCUS: 为解开清洁能源谜底的关键环节融资” (2019)	12
图解 4: 边界坝 3 项目碳捕集设施性能: 2014 年 10 月启动至 2019 年 7 月依据年度利用时效的捕集设施可靠性	15
图解 5: 边界坝 3 项目碳捕集设施的性能: 2014 年 10 月投运至 2019 年累计捕集 CO ₂	16
图解 6: 与第一代 CCUS (边界坝 3 项目设施) 对比, 第二代 CCUS (尚德电站可行性研究) 捕集装置的资本成本降低 67%	18
图解 7: 安装碳捕集设施的尚德电站示意图	20
图解 8: 生物质能与煤电一体化	34
图解 9: 改善 CCUS 经济可行性的激励政策	39
图解 10: 燃煤电厂 CCUS 降低成本的潜力要点	42

全球气候离不开碳捕集利用与封存

巴黎协定

2015 年 12 月，在联合国气候变化大会（COP21）2015 年度会议上，197 个政府通过了《巴黎气候变化协定》¹。《巴黎协定》的签署各方共同承诺：“将全球平均温度的上升幅度保持在比工业化前水平升高 2°C 以下，并努力将温度上升幅度限制在 1.5°C 以内……”。该协议旨在在本世纪下半叶的温室气体（GHG）源与汇之间达到平衡，有效地实现温室气体净零排放。没有针对碳捕集、利用与封存（CCUS）的国际承诺，要实现该目标将面临巨大风险²。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的估算，如果弃用 CCUS，则达到升温上限 2°C 目标的代价成本要高出一倍以上³。达到 1.5°C 上限期望值则需要大比例的净负排放，而这只能通过生物质能 CCUS（BECCS），直接空气捕集（DAC）以及生物化封存（例如造林）来实现。

在实现如此大幅度温室气体减排的作为方面，国际上尚未取得重大进展。必须以提供可靠便宜的能源的一定形式进行大量的碳减排，与此同时，特别是在发展中国家，必须支撑为维持和改善生活水平所必需的经济的发展。加速努力，以实施提高能效并部署应用一揽子低排放能源技术与工业技术，也是必不可少的。

国际能源署的启示：CCUS 需求

为了实现《巴黎协定》的目标，CCUS 项目实施的步伐和频率，必须随着煤电领域的 CCUS 应用等清洁能源技术的商业化部署应用一起迅速加快。国际能源署（IEA）在 2017 年和 2018 年发布的《世界能源展望》（WEO）报告中对此予以充分阐述^{4,5}。该报告模型清楚表明，到 2040 年，煤炭将继续满足全球能源需求的 12% 至 22%。

特别是在发展中国家，对来自燃煤电厂的低成本且可靠的能源需求量将仍然很高。这些国家不断增长的能源需求，势必敦促继续使用现役的发电设施，并可能需要建设新一代的发电设施。全球现役煤电设施中，有三分之一以上的服役期不到 10 年。考虑到已经投入的金融资本规模，期望提前关停这些设施是不现实的。

那么，在现役的和新建的煤电设施大量增加 CCUS 系统装配，对于实现 2°C 升温上限目标将至关重要，这也是本报告的焦点。

1 United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris Agreement. COP 21 Meeting. December, 2015. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

2 For the purposes of this paper, CCUS is used to collectively refer to projects that utilize CO₂ to generate revenue, such as enhanced oil recovery (EOR), as well as projects that utilize dedicated geological storage of CO₂.

3 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press, 2014. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_frontmatter.pdf.

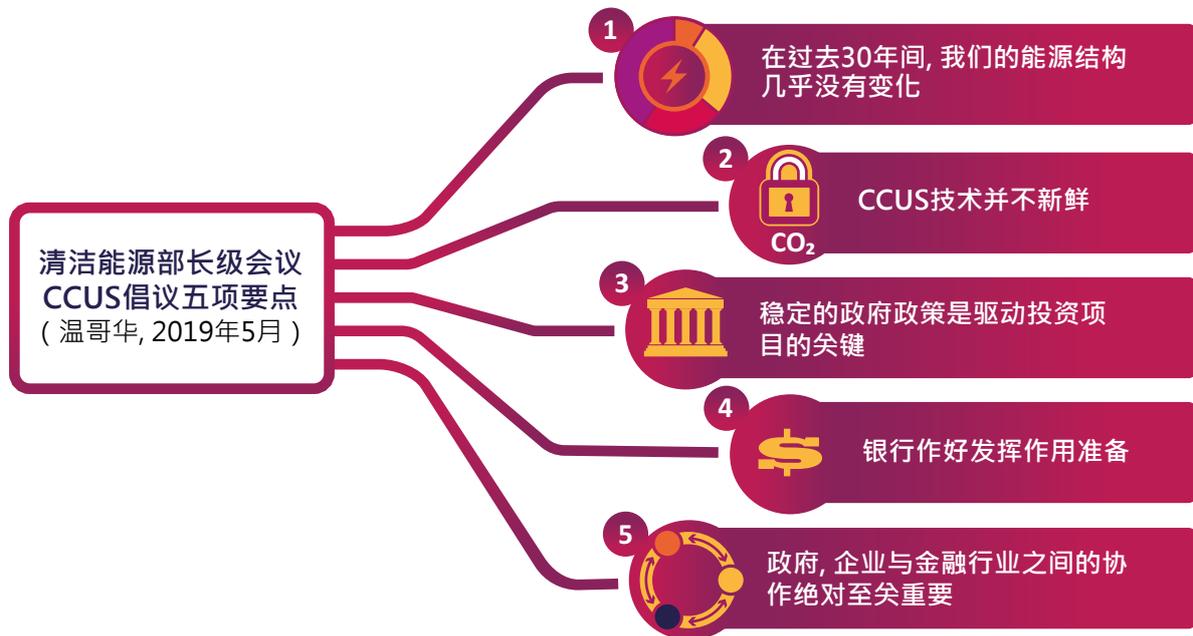
4 International Energy Agency. World Energy Outlook 2017 (WEO-2017). Paris: IEA, 2017. <https://www.iea.org/weo2017/>. 5 International Energy Agency. World Energy Outlook 2018 (WEO-2018). Paris: IEA, 2018. <https://www.iea.org/weo2018/>.

据国际能源署 2012 年估计，要实现 2°C 升温上限目标，配备 CCUS 系统的电厂装机容量，到 2020 年需要达到 1,200 万千瓦，到 2030 年需要达到 2.15 亿千瓦，到 2050 年需要达到 6.64 亿千瓦⁶。但是，由于只有很少的项目进入规划阶段，到 2019 年为止还没有一个在建启用 CCUS 的电厂新项目，仅北美有两座已采用 CCUS 系统的在运行电厂。因此，甚至到 2024 年都不可能实现第一阶段目标。这样，在燃煤电厂部署 CCUS 改造项目的需求变得更加迫切。此外，要实现将气候升温限制在远低于 2°C 的更宏伟目标，将需要加大力度，更快加速 CCUS 部署应用步伐以及可再生能源和替代能源电力的装备使用。生物质能 CCUS (BECCS) 等技术应用的快速增长，对于帮助实现该 CO₂ 减排目标也一定必不可少。

CCUS 的国际承诺

目前，国际上对 CCUS 的承诺尚不协调。一些政府根据新的“清洁能源部长级会议 (CEM) CCUS 倡议”⁷ (参见图解 3) 或借存在已久的“碳封存领导人论坛”⁸ 聚会，而与此同时若干大公司和组织协作组成了诸如“石油和天然气产业气候倡议”⁹，在美国组成了“碳捕集联盟”¹⁰ 和“碳利用研究委员会”¹¹ 等组织。这些努力的核心是促进 CCUS 发展这一共同使命。美国最近对 45Q 税收抵免规定进行了积极的调整，改善了实施 CCUS 的经济可行性，从而致使两党一致对 CCUS 大力支持。但是，国际上尚缺乏齐心协力启动激励措施和资金，来支持该技术更迅速地得以采用推广。

图解 3：“清洁能源部长级会议 CCUS 倡议”专题边会活动的主要信息，共同加速 CCUS：为解开清洁能源谜底的关键环节融资 (2019 年)



6 International Energy Agency. Technology Roadmap: High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation. Paris: IEA, 2012. <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-high-efficiency-low-emissions-coal-fired-power-generation>.

7 Clean Energy Ministerial CCUS Initiative. 2019. <http://www.cleanenergyministerial.org/initiative-clean-energy-ministerial/carbon-captureutilization-and-storage-ccus-initiative>

8 Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF). 2019. <https://www.csforum.org/csrf/>

9 Oil and Gas Climate Initiative. 2019. <https://oilandgasclimateinitiative.com/>

10 Carbon Capture Coalition. 2019. <http://carboncapturecoalition.org/>

11 Carbon Utilization Research Council. 2019. <http://curc.net/>

以适当的速率和规模部署应用 CCUS 技术是可行的，有助于实现《巴黎协定》的既定目标。这将需要有意义的公共政策提供激励和扶持，使部署应用轨迹与 2°C 升温上限目标接轨。必须迫切实施强有力的，精心设计的政策，以驱动有实际意义的行动步骤。

CCUS 没有其它低碳能源技术所享有的公共政策扶持与政治承诺。

政府与工业界之间的协调，以及启动精心设计的政策，将扫除阻碍公有银行与私有银行为精心设计的 CCUS 项目提供融资的障碍，从而使 CCUS 项目能够以必要的步调部署到位，以实现意义深远的全球温室气体减排。

第一代燃煤电厂 CCUS 项目积累的经验

走向成功

CCUS 已经成为一种具有成本效益的减排技术，同时煤电行业的具体 CCUS 项目成本能够下降到远低于以前预期的水平。对与 CCUS 相关的各类成本以及促使成本降低的伴随因素的更深入掌握，定将使决策者和金融界更加充满信心，认识到 CCUS 可实现必要的温室气体减排的潜力。

如今的碳捕集技术基于波托姆斯 (R.R. Bottoms) 于 20 世纪 30 年代开发的天然气脱硫工艺¹²。近年来才开发出对该基本工艺的创造性革新，并在全球范围内部署应用到工业设施和煤电设施。

除用于天然气加工以外，CCUS 往往是首创或高附加值的小众技术应用，但碳捕集技术的技术可行性已得到明确示范验证。此外，CO₂ 强化采油 (EOR) 经过数十年工业化规模操作并取得丰富经验，CO₂ 运输产业已经成熟。在具备适当地质条件的地方，业已证明了能够将 CO₂ 安全地封存在地下，并且进行了必要的操作以及监控实践。这些关键要素验证了第一代 CCUS 技术是可靠的技术。不过，与任何新技术一样，在未来若干年内，由于 CCUS 商业化规模部署应用而产生的进一步创新，必将推动重大技术进步并相应地降低资本成本和运营成本。

两个工业化规模的燃煤电厂第一代燃烧后 CCUS 装置，提供了实践经验，积累了知识与感悟，进而从中得出了关系到降低资金成本和运营成本的结论。这两个在运行设施是：

- 萨斯喀电力集团（加拿大）的边界坝 3 号电力机组碳捕集与封存设施（边界坝 3 项目），为燃煤火力发电厂 CCUS 商业化规模装置，于 2014 年 10 月开始运行；
- NRG 能源公司的佩特拉·诺瓦碳捕集与封存设施（美国），为一个更大规模的燃煤电站 CCUS 装置，2017 年开始商业运营。

燃煤电力设施 CCUS 工业化示范

萨斯喀电力的边界坝 3 号电力机组碳捕集与封存设施

位于加拿大萨斯喀彻温省的边界坝 3 项目，是电厂大规模应用二氧化碳捕集技术的先驱，为世界上首例燃煤电厂全规模一体化 CCUS 设施¹³。该设施的额定设计捕集容量为每年 100 万吨二氧化碳。边界坝 3 项目设施包括二氧化碳捕集、压缩和运输等工序。边界坝 3 项目捕集设施与主电厂全容量集成，并从主电厂获取蒸汽和电力。边界坝 3 项目设施运行产生的二氧化碳就近用于强化采油 (EOR) 作业，同时还为 Aquistore 项目提供二氧化碳，注入地质构造并永久封存。该项目现场对深咸水层中二氧化碳在 3,400 米深度运移进行实时监控、监测和验证(MMV)。

12 Kohl, A. and Nielsen, R. Gas Purification (5th Edition). USA: Gulf Professional Publishing, 1997.

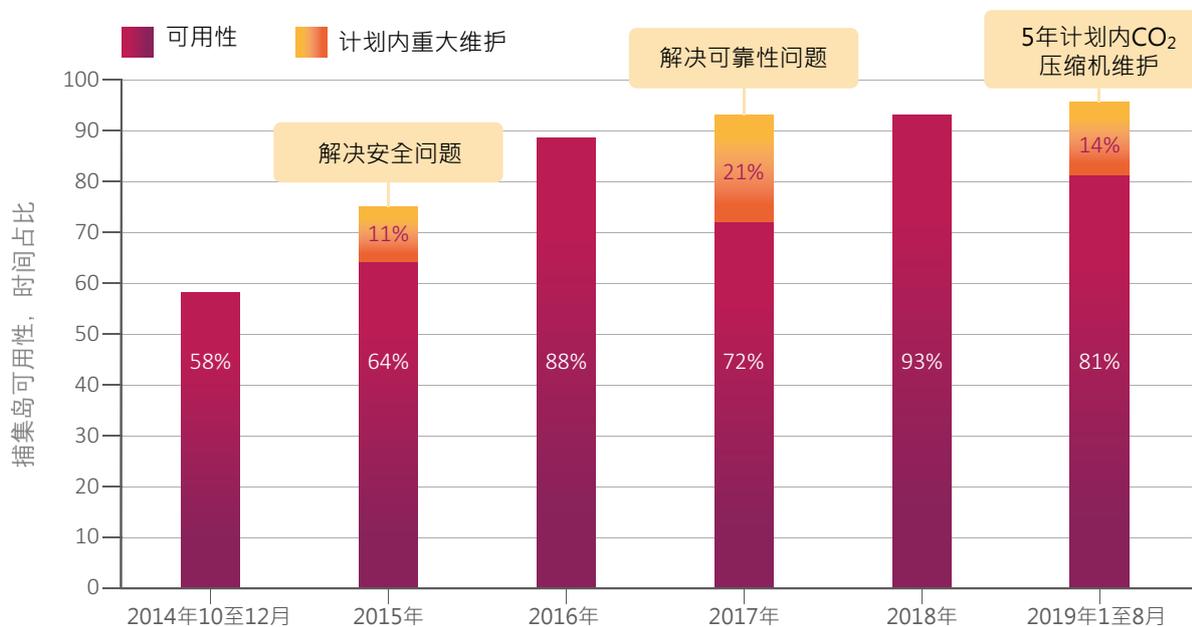
13 Preston, C.K. The Integrated Carbon Capture and Storage Project at SaskPower's Boundary Dam Power Station. IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG) Technical Report 2015-06. UK: IEAGHG, 2015. <https://ieaghg.org/publications/technical-reports>.



图片说明：位于萨斯喀彻温省埃斯特湾市附近的萨斯喀电力边界坝电站 3 号机组碳捕集设施鸟瞰（碳捕集利用与封存知识国际中心供稿）。

边界坝 3 项目 CCUS 的经历是推动未来 CCUS 项目重大进步并呼唤灵感的一段佳话。这一成功运行的设施在提高效率的同时，为大幅降低资本成本和运营成本以及进一步改进下一代 CCUS 设施铺平了道路。此外，该设施在 2019 年跨越了一个重要的里程碑——自投运以来累计捕集和注入地下 300 万吨二氧化碳。随着实现稳定运行（见图解 4 和 5），边界坝 3 项目的下一个重点已锁定为提高运行效率和降低成本。

图解 4： 边界坝 3 项目碳捕集设施的性能：2014 年 10 月启动至 2019 年 7 月依据年度利用时效的捕集设施可靠性

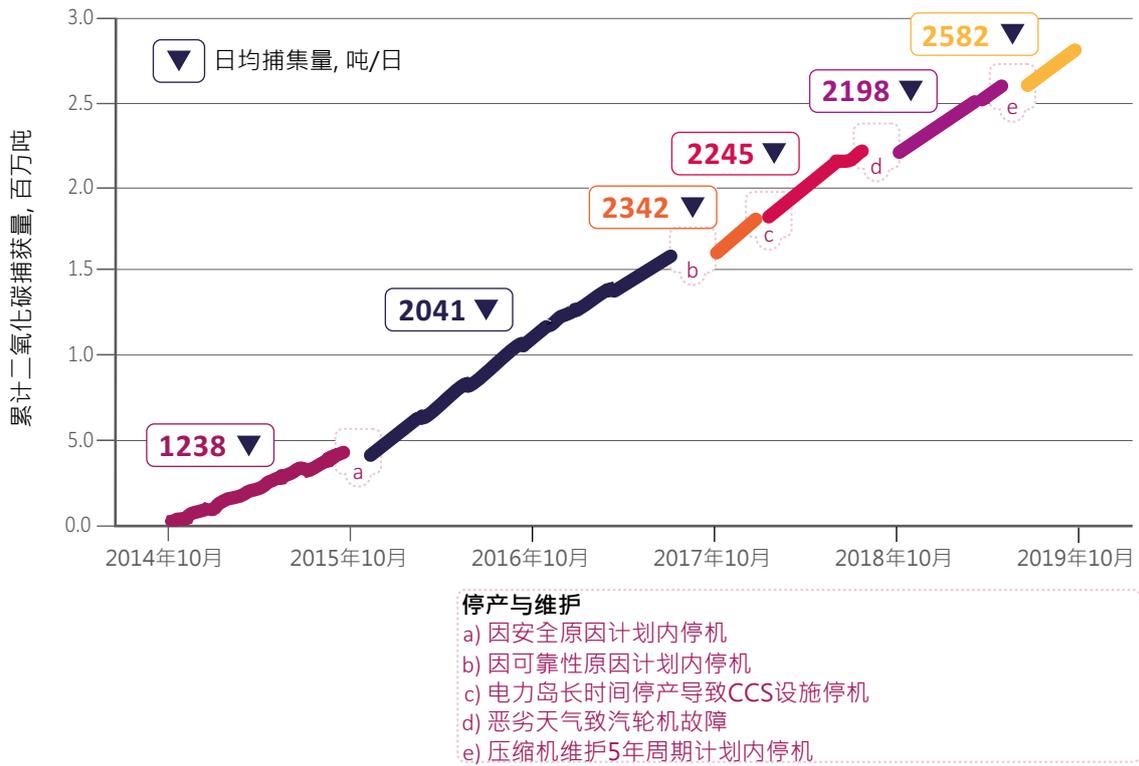


捕集岛的可用时效，是指在电厂至少以 50% 负荷运行时，捕集设施捕集二氧化碳的运行时间百分比。电厂 50% 的负荷水平，为捕集系统运行的原设计最小预期负荷工况。

计算包括了计划内维护期以及任何计划外的延期。

资料来源：碳捕集利用与封存知识国际中心

图解 5：边界坝 3 项目碳捕集设施的性能：2014 年 10 月投运至 2019 年累计捕集 CO₂



资料来源：碳捕集利用与封存知识国际中心

碳捕集利用与封存知识国际中心继续分享从边界坝 3 项目的实践经验中获得的知识感悟。中心的主要角色是基于经验体会提供导向，有助于未来 CCUS 设施项目显著地降低风险和成本¹⁴。

NRG 能源公司的佩特拉.诺瓦设施



图片说明：位于 WA 帕里什电站的佩特拉.诺瓦碳捕集设施 (NRG 能源供稿)。

14 International CCUS Knowledge Centre. 2019. <https://www.CCUSknowledge.com>

2017 年初，位于美国德克萨斯州的佩特拉·诺瓦碳捕集与封存设施全面投运。它的设计捕集容量为 140 万吨 CO₂/年，通过管线将 CO₂ 从位于帕里什县境内的燃煤电站输送到 130 公里外的油田，用于强化采油并封存¹⁵。

与边界坝 3 项目相似，佩特拉·诺瓦捕集装置使用专利胺溶剂，从燃煤主电厂的烟气中脱除 CO₂。但是，佩特拉·诺瓦设施仅从以往排放到大气中的烟道气中部分地而不是全规模捕集二氧化碳，并且利用专用的燃气轮机电厂为捕集过程提供所需的蒸汽和电力，而不像边界坝 3 项目那样由主电厂供应能耗¹⁶。

该项目采取了跨行业合资企业的途径，即直接将二氧化碳用于驱油生产并销售石油，而不是将二氧化碳出售给石油运营商。这样做既增加了项目风险成分，也增加了潜在收益。佩特拉·诺瓦项目捕集的所有二氧化碳全部用于强化采油作业

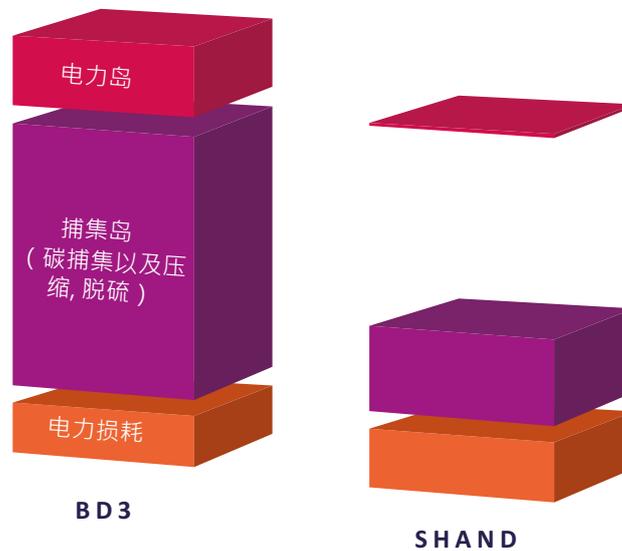
15 US Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). W.A. Parish Post-Combustion CO₂ Capture and Sequestration Project Final Public Design Report. Report No. DOE-PNPH-0003311-2. February 2017. www.osti.gov/servlets/purl/1344080.

16 Patel, S. Capturing Carbon and Seizing Innovation: Petra Nova is POWER's Plant of the Year. Power Magazine. August 2017. www.powermag.com/capturing-carbon-and-seizing-innovation-petra-nova-is-powers-plant-of-the-year/?pagenum=5.

降低 CCUS 成本

近年来，许多相关研究已经考虑到，基于迄今为止进行的 CCUS 项目积累了大量专业知识，CCUS 的成本下降指日可待^{17,18}。例如，人们普遍认为，实现成本显著降低的首要驱动因素在于 CCUS 规模化部署应用¹⁹。尽管降低成本的早期策略是基于试点和研究项目所实现的渐进式技术改进，但如今，在商业规模部署应用实践基础上对于 CCUS 的理解把握越来越深入，可以更好地评价未来 CCUS 设施降低成本的潜力，并提高其性能效益。尽管如此，持续的试点和研究项目，对现有技术创新和新技术进一步开发所具有的潜力仍在增进了解。

图解 6：与第一代 CCUS（边界坝 3 项目设施）相比，第二代 CCUS（尚德电站可行性研究）捕集装置的资本成本降低了 67%



资料来源：尚德电站 CCS 可行性研究²⁰

工业化技术进步的特点是，基于技术在早期运行中获得的经验教训，进而应用于改进下一代设备的设计和运行实践，从而提高效率，降低资本成本和运营成本。运用从第一代技术项目早期运行中获得的专业知识和从经验教训中感悟的后见之明，如果重复建设第一代设计项目，通常可望节约成本 20-30%。碳捕集利用与封存知识国际中心针对萨斯喀电力集团尚德电站近期进行的 CCUS 改造可行性研究表明，若将边界坝 3 项目的知识经验应用于更大规模的项目，捕集 CO₂ 按每吨计算的资本成本最多可降低 67%²⁰（请参见图解 6）。那么，随着未来一代代技术的部署应用，CCUS 的成本可能还要下降。

17 UK CCS Cost Reduction Task Force. Final report. The potential for reducing the costs of CCS in the UK. May 2013. <https://www.gov.uk/government/publications/ccs-cost-reduction-task-force-final-report>.

18 UK CCUS Cost Challenge Taskforce. Delivering clean growth: CCUS Cost Challenge Taskforce report. July 2018. <https://www.gov.uk/government/publications/delivering-clean-growth-ccus-cost-challenge-taskforce-report>.

19 MacDowell N., Fennell, P.S., Shah, N., and Maitland, G.C. The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change. Nature Climate Change. 2017. 7, 243-249. <https://www.nature.com/articles/nclimate3231>.

20 International CCUS Knowledge Centre. The Shand CCS Feasibility Study Public Report. November, 2018. https://CCUSknowledge.com/pub/documents/publications/.Shand%20CCUS%20Feasibility%20Study%20Public%20Report_NOV2018.pdf

即使经过 CCUS 改造的设施无法精确复制，但深入了解与先前部署的 CCUS 设施所具有的共性，可能会为开发考量提供导向。尚德电站可行性研究中的主要考虑因素包括，项目设施的选址定位，空间的可用性以及蒸汽循环设计。另外，诸如工程规模，撬装化，工程简化以及从边界坝 3 项目汲取的其它经验教训等因素，都将直接有助于降低估算成本。

CCUS 项目只有在具备足够的资金和政策扶持的情况下才会进行。令人信服的商业论证会助项目一臂之力，商业论证中列举的利好，可以包括现有和通用基础设施的充分利用，恰当评价可灵活调度的电力对电力系统的贡献，以及资本成本和运营成本的降低等。本报告的其余部分则概括总结有可能扩大煤电行业内 CCUS 项目部署的关键驱动因素。

降低资本成本

碳捕集设施的资本成本，占燃煤电厂第一代 CCUS 改造项目捕集总成本的一半以上。运用从这一代设施的设计与运营中获得的经验，定将有助于直接提高煤电行业推广未来 CCUS 设施的经济可行性。

扩大 CCUS 设施的规模

规模经济是推动公用事业电力产业发展的根本动力。大型设施通常比小型设施更具经济效益。边界坝 3 号燃煤发电机组在进行改造之前本来的额定功率为 15 万千瓦（毛容量），其容量适应局部电网需求。可是，按照全球通用规格，该机组很小。最大的现役燃煤发电机组通常额定功率达到 110 万千瓦或更高，具有更高的 CO₂ 减排潜力。针对尚德电站的可行性研究，旨在以 30 万千瓦燃煤机组为依托设计第二代 CCUS 设施，其设计的年捕集能力为每年 200 万吨以上，为边界坝 3 项目捕集设施容量的两倍。尚德电站可行性研究表明，由于电厂的规模更大，其二氧化碳捕集的单位成本可以显著降低。

发电厂的排放水平取决于其发电装机容量和效率，并直接影响与其匹配的捕集设施规模。大容量电力机组通常排放量更高。由于规模经济性，捕集能力翻一番未必导致捕集设施成本加倍。尚德电站可行性研究表明，总体捕集能力增加，捕集设施的成本相应地略有增加，可以降低捕集成本。

场地布局与撬装化

新建 CCUS 设施的布局和可用空间是重要的设计考量要素，因为最低限占用面积可降低资本成本。捕集设施定位远离发电机组会增加连接的距离，增加材料成本和设备集成复杂性，也相应地会降低运营效率。尚德电站现址原设计中还容纳了未曾建设的二号电力机组，这就为厂址预留了较宽松的空间（请参见图解 7）。采用这种定位策略可以在设计构思初期，就将高耗能工艺过程定位在发电机组旁边的最佳位置。将 CO₂ 吸收塔安置于锅炉房侧面，或锅炉房/涡轮发电机房隔壁，CO₂ 压缩机置于发电机侧面等理想位置，都成为可能。这种排列使烟道气管道，蒸汽管道和电气连接的长度最短化，从而大大降低了材料成本。此外，电力岛与捕集岛共享的电梯和楼梯天井，可以减少人员进出设施的成本。边界坝 3 项目和佩特拉·诺瓦项目的开发场地较为紧凑，使得捕集设施的定位变得复杂，从而导致成本增加，却减少设施性能升级的机会。

图解 7：安装碳捕集设施的尚德电站示意图



资料来源：尚德电站 CCS 可行性研究²⁰

大型基础设施项目的建设撬装化，已被业界广泛接受为可控制劳动成本和材料成本的有效手段。尽管未必总能撬装化施工，但事实证明，在施工现场外进行钢结构，设备，管道，电气和仪表的组装，可以显著提高生产率，降低差旅成本并缩短现场施工时间。通过这条途径，还有可能在全球范围内使用低成本的劳务资源，同时保证以低成本达标，并减少发电厂建设现场受到的干扰。

提高捕集率

CCUS 设施的 CO₂ 捕集率，是指在捕集过程中从烟道气流的 CO₂ 全部含量中分离或脱除的部分 CO₂。燃烧后捕集通常以 90% 的捕集率为目标。但是，仅为了满足法规或其它要求，某些设施可能选择较低的捕集率。当边界坝 3 项目设施被批准动工兴建时，适用燃煤电厂的温室气体排放管控法规预计即将出台，但尚不确定。决定边界坝 3 项目选择 90% 的设计捕集率，是基于技术上可实现的最佳的减排率，并相信该捕集率应符合即将出台的法规要求。



图片说明：边界坝 3 项目碳捕集设施位于萨斯喀彻温省埃斯特湾市附近的萨斯喀电力集团边界坝电站 (碳捕集利用与封存知识国际中心供稿)。

最近的一项研究表明，即使采用最先进的技术，从烟气流中以低于 90% 的比率捕集二氧化碳，可能会增加每吨捕集成本²¹。还有，对拟议中的尚德电站 CCUS 设计进行的敏感性研究表明，与 90% 的捕集率相比，95% 的捕集率提高了成本效益。对燃烧后捕集的研究也显示，超过 90% 以上的捕集率具有成本效益，有助于降低成本²²。当烟气上升经过吸收塔时，吸收剂会从烟气中将二氧化碳分子脱除。吸收塔身的顶部为烟气中 CO₂ 浓度最低点。那里有个临界点，超过该临界点则吸收剂越来越难与烟气中的低浓度 CO₂ 产生反应，捕集那里残留的 CO₂ 会产生过分的额外成本（即，塔高增加和/或塔内表面积增加相应增加成本），捕集设施的整体经济性将下降。为具体捕集设施更准确地找到特定捕集率的相应临界点，正在进行研究。

21 International CCUS Knowledge Centre. "Summary for Decision Makers on Second Generation CCUS Based on The Shand CCS Feasibility Study". 2018. <https://CCUSknowledge.com/pub/documents/publications/Summary%20for%20Decision%20Makers%20on%20Second%20Generation.pdf>

22 Ferron, P., Cousins, A., Jiang, K., Zhai, R., Hia, S.S., Thiruvankatachari, R., and Burnard, K. Towards Zero Emissions from Fossil Fuel Power Stations. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2019. 87, 188-202.

提高主电厂的发电效率

火力发电厂的排放强度与电厂类型、寿命以及效率密切相关。例如，装备技术陈旧的燃煤电厂通常运行的主蒸汽压力和温度较低，受到其初始设计时经济可用的材料与技术的局限性所制约。这些老式机组的典型排放强度可能超过 1,200 吨 CO₂/百万千瓦时。尚德电站是以褐煤为燃料的亚临界机组，排放强度约为 1,100 吨 CO₂/百万千瓦时。现代先进的超超临界电厂，即通常所谓高效低排或所谓 HELE 电厂，其排放强度可能低至 670 吨 CO₂/百万千瓦时²³。新旧燃煤电厂之间的排放强度落差约三分之一，直接影响捕集设施规模要求，这一低排落差可降低电厂装配 CCUS 设施所产生的电力寄生性损耗以及资本性成本。

优化 CCUS 运行范围

火力发电厂对运行范围的可靠性和容量要求，较之与其匹配的碳捕集设施运行范围的要求迥然不同。火力发电厂必须在极端天气，燃料质量不稳定和设备出现问题等各种运行条件下，以高度可靠性和高容量保持供电的能力。

尽管以设备可用率高点水平进行长时间捕集是捕集设施的工作目标，但理想的工况是，具备在任何特定时间结点都能够完全或部分缩减 CO₂ 捕集的能力，则可能有助于大幅度降低运营成本。确定捕集设施冷却系统的大小是一个值得考虑的实用例子²⁹。不以满足一年内最热到最冷的天数要求来设计冷却系统，而按照较窄的环境温度范围要求来设计，则可能会看好较小规模的冷却系统设计并相应节省开支。运用这种设计策略，可以通过限制二氧化碳的捕集量，以度过冷却能力不足的时间段。鉴于节省资本成本所带来的好处，这样做对年度捕集量的实际影响则可以忽略不计。

根据局域电网供需情况，具备能力以可变负荷供电的热电厂，具有很高的系统价值。捕集设施有能力跟踪火力发电厂负荷的变化波动，继续以最大容量捕集二氧化碳，是电厂全规模减排的关键。随着火力发电厂的负载降低，其效率降低，结果二氧化碳排放强度增加。在这种情况下，在烟气量降低的同时，保持捕集设施运行的能力，能够降低电厂负荷起伏对排放强度的影响。通常根据满负荷的烟气量来设计捕集设施，因此，在电厂负荷低下的情况下，捕集设施能够以更高的速率捕集二氧化碳。

培育 CCUS 供应链

成熟完善的供应链可增强竞争力，激励创新并降低技术成本，最终对资本成本产生积极影响。CCUS 供应链的发展将取决于建立有利于 CO₂ 市场的格局，在这种格局下，项目供应商会对未来许多 CCUS 项目建设充满信心，促进供应链的发育成长。

23 Minerals Council of Australia, New Generation Coal Technology – Why HELE coal-fired power generation is a part of Australia's energy Solution. February 2017. <http://www.newhopegroup.com.au/files/files/Why%20HELE%20is%20part%20of%20Australia%20s%20energy%20solution%20-%207%20February%202017.pdf>

发育良好的供应链特征包括：

- 供应填料，热交换器，压缩机以及相关原材料等所有设备，在合理的时间范围内满足需求；
- 设备供应商之间存在适当的竞争，以提高效率，促进创新并最终降低成本；
- 供应商订单标准化并保持大批量，使制造商能够扩大生产以达到生产规模效益。



图片说明：WA 帕里什电站的佩特拉·诺瓦碳捕集设施 (NRG 能源供稿)。

降低运营成本

配备了 CCUS 的燃煤电厂的运营成本通常高于传统的热电厂，这有几个原因。首先，以边界坝 3 项目的全规模一体化集成设计为例，其捕集和压缩系统操作需要额外耗能，会降低电厂自身的电力净输出。而如果像佩特拉·诺瓦项目那样加装独立的外接能源，则会产生额外的运营成本。其次，吸收溶剂，化学制剂，催化剂的消耗与废物处理，都会增加运营性开支。再者，需要额外的人手来操作和维护捕集设备。通过第一代 CCUS 设施已经深入理解掌握了真实运营的要素。这些设施早期所面临的挑战，恰恰突显了那些可以最大程度地降低运营成本的方方面面。

胺降解成本

现有的燃烧后捕集装置通常使用的是胺基溶剂，在低温下与 CO₂ 选择性结合，并在加热时释放出纯的 CO₂。溶剂不断循环，反复捕集和释放 CO₂。胺溶剂分子在长时间使用过程中往往会分解或降解，从而降低捕集效率，并需要将其排出并用新鲜溶剂替代。更换降解胺溶剂的成本对运营成本有重大影响²⁴，并且反应了胺基捕集系统的基本运营风险特征。在起草制定 CCUS 项目的商务论证时，使用相同的烟道气和溶剂组合进行大量试点规模实验以量化胺降解的风险，被认为是恰当设计 CCUS 设施的标准实践^{25,26,27,28}，以确定胺溶剂维护的预期成本。不幸的是，这种降低风险的策略增加了 CCUS 部署应用的开发成本并延长开发时间表，从而迫使产业界启动大量研究，旨在确定胺降解加速的根源并探索潜在的减缓降解的策略²⁹。技术供应商已在重点关注降低胺降解的不利影响以及降低胺质量控制的相关成本。然而，工业化规模的设施项目方也必须进行额外的工作，以确保降低有关的成本。



图片说明：碳捕集技术验证设施位于萨斯喀彻温省埃斯特湾市附近的萨斯喀电力集团尚德电站
(萨斯喀电力公司供稿)

- 24 Langenegger, S. "SaskPower spending more to capture carbon than expected". CBC News. December 14, 2016. <https://www.cbc.ca/news/canada/saskatchewan/saskpower-carbon-capture-1.3896487>
- 25 Gorset, O., Knudsen, J.N., Bade, O.M. and Askestad, I. Results from testing of Aker Solutions advanced amine solvents at CO₂ Technology Centre Mongstad. Energy Procedia. 2014. 63, 6267 – 6280.
- 26 Wilson, M., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A., Idem, R., Veawab, A., Aroonwilas, A., Gelowitz D., Barrie, J. and Mariz, C. Test results from a CO₂ extraction pilot plant at Boundary Dam coal-fired power station. Energy. 2004. 29, 1259-1267.
- 27 Hirata, T., Nagayasu, H., Yonekawa, T., Inui, M., Kamijo, T., Kubota, Y., Tsujiuchi, T., and Shimada, D. Current Status of MHI CO₂ Capture Plant technology, 500 TPD CCUS Demonstration of Test Results and Reliable Technologies Applied to Coal Fired Flue Gas. Energy Procedia. 2014. 63, 6120 – 6128.
- 28 Wilson, M., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A., Idem, R., Veawab, A., Aroonwilas, A., Gelowitz D., Barrie, J. and Mariz, C. Test results from a CO₂ extraction pilot plant at Boundary Dam Coal-fired Power Station. Energy. 2004. 29, 1259-1267.
- 29 Knudsen, J.N., Wærnes, O., Svendsen, H.F. and Graff, O. Highlights and main findings from the 8-year SOLVIT R&D programme – Bringing solvents and technology from laboratory to industry. 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14-18 November 2016, Lausanne, Switzerland.

维护成本

第一代 CCUS 设施在建设前没有操作经验可以借鉴。因此，对设施的维护要求未曾纳入设计。在实际操作基础上结合设备操作优化的有效策略，已经更深入地理解掌握了维护对于新设施的设计和运营成本产生的影响。

维护成本往往通过预先规划而受到严格控制。应急维护工作的费用可能比计划内维护的成本高很多倍。计划外的工作量通常会导致必需关停 CCUS 设施并相应降低总捕集率。为了避免这种情况，可以在热交换器等关键设备上布置冗余，以提高设施的运行可靠性。这一途径可以通过启用备份设备继续进行常规操作，在日常工作时间内，由工厂值班的员工而不是由紧急特遣小组，对受影响的设备进行现场维护，从而大大降低 CCUS 设施的运营成本。



说明：定期维护期间边界坝 3 号发电机内部（碳捕集利用与封存知识国际中心供稿）。

热能优化

操作 CO₂ 捕集过程必需的能耗有：1) 溶剂再生以释放 CO₂ 的热能耗，2) 压缩 CO₂ 的电耗。以边界坝 3 项目为例，全规模一体化集成的捕集设施从主电厂获取所需能源。或者，也可以建造一个专用的辅助发电厂为捕集设施提供服务，佩特拉·诺瓦捕集设施就是这样部署的。

一体化集成的燃烧后捕集操作所面临的主要挑战之一，是最大限度地减少捕集设备的能耗对发电主机设备的影响。从发电主机获取捕集所需能量，会产生电力损耗或所谓“寄生负荷”，从而降低发电机组的净发电量。所需热能及其来源对电厂的运营效率以及灵活性至关重要。大量的研究和技术开发已将 CO₂ 捕集过程的能耗需求降至最低，致使具有专利的商业化溶剂——例如边界坝 3 项目和佩特拉·诺瓦项目所用的溶剂——具有较常规胺能耗低 30% 的性能优势。

热能来源会影响捕集总成本。边界坝 3 项目和佩特拉·诺瓦项目之间的对比值得斟酌。如果像边界坝 3 项目一样从主热电厂抽取蒸汽，则主电厂的发电能力会降低。不过除此之外，更换汽轮机某些部件，可以优化蒸汽提取压力，而不会增加节流损失，从而仍能够在满负荷工况下提供最高效率。另外，可用的蒸汽量，通常将取决于 CO₂ 捕集设施的需求，两者间没有线性关系。



图片说明：萨斯喀电力尚德电站碳捕集测试设施内的釜式再沸器（萨斯喀电力供稿）

佩特拉·诺瓦项目的情况有别，伺服的热电联产燃气轮机为 CO₂ 捕集提供蒸汽，这样同时调度两个相互独立的发电厂可能不大容易。此外，燃煤电厂需要应对日常电力调度波动而降低负荷，却不能保证新建燃气轮机在不影响效率的情况下满足电网的同样需求。这种安排的好处是，主电厂无需改造，因而缩短了主电厂设施的停运时间，也不太可能需要主电厂更新环境许可证。

从两者对比中可以断定，从现役主电厂抽取蒸汽产生的影响较低，并为新建 CCUS 设施提供了最灵活，最经济的选择²⁰，但是要虑及对主电厂环境许可证可能有影响。

水耗

大多数商业化运营都考虑水供应及其使用对环境和运营成本的影响，并据此为火力发电厂选址。缺乏适量的水供应可能会限制或阻碍厂址的扩展，且大多数发电厂所在地的开发都已到了没有额外的水源可用于冷却的地步。CCUS 系统设计，可以无需额外的水量来满足设施的冷却要求，而是利用风冷却和水冷却相结合的方式，以及从烟气冷凝过程中取水²⁰。水经过这样有目的再利用，减少发电厂所在地的工业废水排放，从而降低相关的处理成本。在利用高水分燃料的发电厂，这样节省成本的机会更大。



图片说明：萨斯喀电力集团尚德电站的蒸发冷却塔（萨斯喀电力供稿）。

压缩过程效率

二氧化碳压缩纯化需要的能耗给电厂增加不小的负荷。边界坝 3 项目的压缩过程功率占 CCUS 设施能耗造成的电力生产损耗的三分之一以上。边界坝 3 项目和佩特拉·诺瓦项目的 CO₂ 捕集设施针对满负荷运行进行了优化，分别都使用单个整体齿轮式 CO₂ 压缩机，该压缩机在满负荷时达到最佳效率，并且具备一定能力，在不显著损失功率的同时，承受较低 CO₂ 流量。为保持压缩机效率与操作灵活性，以提高 CCUS 设施随负荷调节的能力，对压缩机进行设计改进是必要的。

数字化

数字化可以提高安全性，提高生产率并降低煤炭和电力行业的成本。进行数字化改造的潜在影响及其改造所面临的障碍，差别很大。但是，数字化所节约的成本总量，可能占年度发电总成本的 5%。

通过以下几种方式，数据数字化以及建模分析，可以有助于提高效率并降低电力系统的运营与维护成本：

- 通过更好地监控以及预防性维护，并快速识别故障点来限制停机时间，从而完善计划，
- 提高发电厂的燃烧效率，降低电网的损耗率，
- 改进整个电力系统的项目设计，
- 延长资产的使用寿命，
- 提高供电的灵活性和可靠性。



降低二氧化碳运输与封存成本

开发新的二氧化碳封存点会产生大量成本支出。即使在已建立的封存点增加二氧化碳注入量，由于监测需求增加，也难免会产生较低的额外成本。

英国 CCS 降成本工作组³⁰估计，通过投资建设 CO₂ 转运枢纽或具有容量高达 5 百万吨二氧化碳/年的共享封存点，装备了 CCUS 的电厂的封存成本，可以从早期 CCUS 项目的 25 英镑/千千瓦时降低到 5-10 英镑/千千瓦时。如果开发一个封存集群以利用多种类型封存以及地质条件，CO₂ 封存的可靠性将提高，从而降低开发风险。这条路径至关重要，保证启用具有规模经济效益的 CCUS 系统的化石燃料火电项目，能够以符合产业规范的成本进行融资并交付使用。

随着二氧化碳运输容量扩大，而管道建设和安装成本增加的比率会降低。这是由于随着气体运输量的增长实现了规模经济效益的缘故。因此，通过对过剩容量进行适当的超前规划，大容量运输二氧化碳有巨大的成本降低潜力。运输成本的其它基本驱动因素有，管线的输送距离，陆上的地形，尤其是沿海区域穿越，以及规划成本。考虑到这些变量，成本最低的运输网络系统将：

- 运输大量二氧化碳的管道尺寸大小适当；
- 考量干线段和馈线段的尺寸大小，以确保资产在尽可能长的寿限内实现高利用率；
- 充分考虑陆上地形和沿海穿越条件，以及规划制约条件，尽量降低二氧化碳的运输成本；
- 压缩额外建设管道的需求至最低限，以避免规划成本过大。

该工作组预计，启用 CCUS 的发电厂的二氧化碳运输成本，可能从每年承运 100-200 万吨的早期管道项目的 21 英镑/千千瓦时，降至承运能力达 500-1000 万吨/年的晚期管道项目的 5-10 英镑/千千瓦时。

30 UK CCS Cost Reduction Taskforce. CCS Cost Reduction Task Force: Final Report. May 2013. <https://www.gov.uk/government/publications/ccs-cost-reduction-task-force-final-report>. [Costs quoted in 2012 British Pounds Sterling (£)].

启用了 CCUS 的燃煤电厂为工业化 CCUS 枢纽提供了理想的依托，因为如果规模合适，其每年可捕集数百万吨的二氧化碳。通常，其它工业运营每年只能供应数十万吨二氧化碳，成为补充不断发展的工业 CCUS 枢纽的理想伙伴。

建立一个互连的，规模适当的网络化枢纽，汇集来自多个大型捕集设施的大量二氧化碳，从长远来看，其每千千瓦时发电量的二氧化碳运输成本甚至可能低于该工作组的估计。随着运输量的增加，管道直径扩大以及管道延长都会相应地增加运输成本，这将有利于封存枢纽或集群的发展。无论如何，随着强化采油（EOR）以及增值化学制品等 CO₂ 用途增加，或者可以在碳抵消机制支撑的专用设施所在地大量增加封存量，这样做所带来的好处大大超过上述增加的成本。



图片说明：安装过程中的 Aquistore 深度地质封存项目注入井 (资料来源：石油技术研究中心)

完善商业论证

CCUS 产业尚处于起步阶段。构建关键商业驱动力以实施 CCUS 项目的潜力很大。目前，CCUS 部署应用的努力已在燃煤热电行业催生了两个工业化规模的设施，还有另外 17 个设施将 CCUS 应用于一系列工业过程。CCUS 改造数量有限的情况表明，与煤电一体的 CCUS 项目要制定出有说服力的商业论证，颇具挑战性。边界坝 3 项目和佩特拉·诺瓦项目各自均有赖于 CO₂ 增加石油采收率作为其可观的收入来源。为了使 CCUS 被广泛采纳，价值链中所有具有挑战性的方方面面都必须加以解决并完善。

承担电网支撑与辅助服务

大型火力发电厂在电网整体反应能力方面扮演着重要角色，要应对频率中断，功率因子修正，能源多样化以及产能可调度性等情况。可再生能源的种类数量日益增长，并将在未来几十年内继续攀升。以快速调度备用电力产能的形式提供辅助服务，对于管控可再生能源固有的间歇性至关重要。在发电容量不稳定时段，放松管制的电力市场上电力储备容量较低，可能会经历电价飙升，溢价有可能高出市场正常水平很多倍^{31,32}。因此，进入开放市场的电力公用事业公司，利用配备 CCUS 的燃煤电厂等提供备用电力产能，可能会获得额外的补偿。

因此，重要的是，捕集设施与其主电厂的一体化集成，对可靠稳定的电力供应不会产生不利影响。有趣的是，伴随电力设施启用 CCUS 而来的寄生负荷的容量，也可成为加强其商业论证的机会，即有可能在短时间内关闭捕集操作以满足电力需求峰值的情况下，电厂向电网的负载输出能够最大化。在这方面，第一代捕集设施的能力有限。因此，在未来的捕集设施设计中，必须考虑到限制或关闭 CCUS 运行的灵活性。



整合可再生能源

低排放电力最大化对于降低全球排放至关重要，可再生能源是这一战略的关键。可靠的备用电力供应，则对于管控可再生能源断电的特性至关重要。

尚德电站可行性研究确定，利用改装 CCUS 的燃煤电厂而非燃气电厂，作为间歇性可再生能源的备用电源，具有出人意料的潜在环境效益。如果以燃气电厂为备用产能，则该电厂将需要低负载运行，将可再生能源的最大可用容量整合入网。但是，如果未加装 CCUS，燃气电厂的效率会随着输出功率降低而降低，同时其排放强度曲线反而会相应升高。结果，降低燃气电厂的负荷以实现间歇性可再生能源发电，由于备用电源的排放强度增高，结果反而抵消了间歇性可再生能源的无排放效应。

31 Siddiqui, A.S. Price-Elastic Demand in Deregulated Electricity Markets. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-51533. 2003. <https://eta.lbl.gov/publications/price-elastic-demand-deregulated>.

32 Trebing, H.M. A Critical Assessment of Electricity and Natural Gas Deregulation. Journal of Economic Issues. 2008. 42, 469-477.



相比之下，配备 CCUS 的燃煤电厂在低负荷运行时，却可以提高其 CO₂ 捕集率，从而通过进一步减少系统整体排放，来提高可再生能源的环境效益。对于 CCUS 设施而言，无需增加任何可观的资本成本，就可以实现这一改进。

尚德电站可行性研究估计，捕集率从满负载时的 90%，到电厂最低负载系数降低至 62% 时捕集率则可以高达 97%，以支持间歇性可再生能源入网，几乎无需额外增加资本成本。因此，配备 CCUS 的燃煤发电与可再生能源的整合，是 CCUS 改造项目商业论证的改进版。

二氧化碳利用的收入与封存枢纽

边界坝 3 项目和佩特拉·诺瓦项目获得批准的关键，是将捕集的二氧化碳用于强化采油实现其价值。然而，从单一碳捕集设施输出二氧化碳以满足油田的需求并非没有风险。强化采油操作需要可靠的 CO₂ 供应，以避免石油生产中断。单一捕集设施容易受到捕集过程或相联电力设施关停和跳闸的影响，从而无法保障可靠的 CO₂ 定量供应。将两个或多个 CO₂ 来源汇集到强化采油操作区，提高 CO₂ 供应的稳定性，会降低 CO₂ 输送出现困难带来的潜在运营成本。如上所述，在恰当的 CO₂ 价值体系下，建立 CO₂ 枢纽，将使 CCUS 的商业论证得到强化改善，其资本成本和运营成本可能会降低，同时未来运输和封存项目的增量成本也会降低。



说明: Aquistore CO₂ 封存点的地面监测设备。边界坝 3 项目碳捕集设施（远景）通过管道将 CO₂ 注入地下深处（3.4 公里）并永久封存（资料来源：石油技术研究中心（PTRC））。

二氧化碳枢纽概念的实例是阿尔伯塔省碳集输干线（ACTL），将于 2019 年底在加拿大投入运营³³。ACTL 的规模为每年输送 1,460 万吨二氧化碳，管线长达 240 公里，该管线预期从不断发展的二氧化碳枢纽所链接的各类工业设施配备的捕集装置，汇集碳源。输出的二氧化碳将用于强化采油生产和咸水层深度地质封存。目前，Wolf 能源公司已签订合同，将从位于埃德蒙顿东北“西北红河联合体 Sturgeon 炼化厂”（120 万吨 CO₂ / 年）和 Nutrien 集团旗下的化肥生产设施（30 万吨 CO₂ / 年），每天输送 4,400 吨捕集二氧化碳。这些二氧化碳将由 Enhance 能源公司用于其 Clive 油田强化采油作业。

类似的二氧化碳枢纽项目正在北海亮相，涉及英国，挪威两国以及鹿特丹港，拟开发专用的地质封存点。鹿特丹港可能会建立二氧化碳转运枢纽，以服务于荷兰的工业设施。它还可以扩大容量，为比利时，德国或英国等服务³⁴。但是，拟议中的枢纽要开发建设，尚需要合适的碳价或大量的补贴。

技术进步对 CCUS 成本和性能的影响

由于新技术的发展以及伴随而来的创新，CCUS 的经济可行性正在稳步提高。数十年来的研究，试点，现场示范和商业化规模的项目实施，已经推动了 CCUS 在各个方面的进步，从而大大降低了成本。目前，在 9 个国家/地区有近 20 个商业化 CCUS 装置在运行，并且在全球范围内无数涉及二氧化碳捕集，利用与封存各个方面的研究和试点项目仍在进行。

33 Enhance Energy Inc. The ACTL Project. September 2019. <https://actl.ca>

34 Simon, F. Meet Europe's two 'most exciting' CO₂ capture and storage projects. Euractiv. April 3, 2018. [https://www.euractiv.com/section/energy/news/meet-europes-two-most-exciting-CO₂-storage-projects/](https://www.euractiv.com/section/energy/news/meet-europes-two-most-exciting-CO2-storage-projects/)

通过从 CCUS 商业化运营中积累知识，资本成本和运营成本会继续降低。但是，技术进步表明，通过旨在以先行的第一代技术为基础来降低未来几代技术成本的研究与开发，令资本成本和运营成本发生阶段性变革。降低捕集成本可带来效益最大，因为它们占捕集与封存资本成本及运营成本的比例最大。尽管如此，通过部署应用来自运营经验和研究产生的技术创新，在降低运输和封存成本方面持续取得进展，而这些运营经验和研究往往伴随着大规模测试和验证研究，特别是进行这些大规模测试和验证研究则离不开数量日益增加的 CCUS 商业化运营项目。碳利用技术的开发还处于早期阶段，代表着不断成长的 CCUS 产业的一个优先领域与机遇。

许多捕集技术仍处于成熟过程中的不同阶段。本文中考虑的少数几项技术，不仅表明了当前研究思路的广度，而且强调了有必要对研究和中试规模技术开发持续投资，同时迈出坚实的步伐，促进商业化部署应用最有希望的若干技术。

燃烧后捕集技术

以煤粉为燃料的燃煤电厂必须采用燃烧后捕集工艺，例如在佩特拉·诺瓦项目安装的胺液洗系统。随着更多部署应用，在降低胺捕集系统成本方面将继续取得进步。不过，显示出有未来商业化运行希望的其它类型的若干技术也处于不同的开发阶段，其中包括使用膜技术捕集 CO₂。已经有人测试了适用的膜材料，能够以 30-90% 的速率捕集 CO₂，成本低至每吨 30-40 美元，但是，目前在该捕集率范围的高端其捕集成本相当高³⁵。2018 年 2 月，美国能源部宣布资助七项工程化规模项目³⁶，测试先进的碳捕集技术。其中两个项目将评估膜捕集系统，包括挪威芒斯塔德技术中心的一个 1 兆瓦电力容量规模的项目。获得资助的其它工程化规模不等的捕集技术研发项目，有的利用水基溶剂和非水基溶剂，也有的用复合盐以及膜与吸附剂混合材料的。正在开展的这些工作的首要目标之一，是优化能耗和耗材消耗，以降低捕集成本与资本成本。

负排放：生物质与煤混烧发电

政府间气候变化专家委员会的第五次报告指出，要使全球升温显著低于 2°C 的四个途径中的三个，都要求大气减排 CO₂。这可以通过配备 CCUS 的生物质能碳捕集与封存（BECCS）来实现，该技术需要燃用可持续生产的生物质燃料进行能源生产，然后实现二氧化碳捕集与永久性地质封存。经过对现役燃煤电厂进行生物质能碳捕集与封存（BECCS）改造，由于在生物质生长过程中去除的 CO₂ 不会再次排放到大气中，能够令电厂实现与燃煤发电的排放强度相当的负排放。经过 BECCS 改造的褐煤发电厂，其潜在排放强度，可能低至负 1100 吨/百万千瓦时。部署应用 BECCS 的最大障碍在于可持续生物质的可用量。在已装备 CCUS 的现役燃煤电厂中，将煤与生物质混烧³⁷（见图解 8）可对生物质燃料资源开发产生积极影响。

35 Kniep, J. et al., Integrated Testing of a Membrane CO₂ Capture Process with a Coal-Fired Boiler. Presentation at the NETL CO₂ Capture Technology Review Meeting. August 8, 2016. www.netl.doe.gov/File%20Library/Events/2016/c02%20cap%20review/1-Monday/T-Merkel-MTR-Integrated-Membrane-Testing.pdf

36 United States Department of Energy. News Release. February 2018. <https://www.energy.gov/articles/energy-department-invests-44m-advanced-carbon-capture-technologies-projects>

37 CSIRO, Australia. Towards Zero Emissions CCS in Power Plants Using Higher Capture Rates or Biomass. IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG) Technical Report 2019-02. UK: IEAGHG, 2019. <https://ieaghg.org/publications/technical-reports>

图解 8: 生物质能与煤电一体化



资料来源: 碳捕集利用与封存知识国际中心

生物质能源通常包括木材, 木质废料和木屑, 农作物废弃物以及专门种植的生物质, 包括适合地边和为废水处理而种植的高产含二氧化碳作物。这些燃料通常被压缩成颗粒, 可以在燃煤锅炉等锅炉中燃烧。根据成本和生物质的可利用量, 混烧过程将不等量生物质与煤混合使用。对于某些生物质类型, 与煤混烧会吸收生物质释放的氯等其它化合物, 这些物质否则会对排放和空气质量, 乃至锅炉组件以及碳捕集设备的可靠性产生负面影响。正如英国德拉克斯 (Drax) 电站已成功部署应用的那样, 现役电力设施经改造能有效利用某些生物质能, 接受 100% 的生物质燃料, 而不用煤。

目前, BECCS 的实践经验仍有限, 在美国伊利诺伊州的一家玉米制乙醇工厂, 仅有一个商业规模的装置可以捕集并地质封存 100 万吨 CO₂/年^{38,39}。相对于现役设施改造, 新建项目与否取决于行业特点。据估计, BECCS 避免 CO₂ 排放的成本范围为每吨 15-400 美元之间, 应用于生物乙醇工艺是最便宜的选择⁴⁰。但是, 有几个因素可能会鼓励开发 BECCS 应用于电力生产:

- 与建设新的专用生物质能设施相比, 大量现役燃煤火力发电厂都有可能以低成本改造改烧生物质。要保证电厂在预期退役并拆除之前进行改造, 恰当的时机把握十分关键, 通过再利用现有的基础设施, 可避免新建 BECCS 系统或生物质发电设施带来的大量资金成本。例如, 加拿大最新的燃煤电厂 Kepphills #3, 装机容量为 45 万千瓦, 于 2011 年投入运行, 初始资本预算为 20 亿加元。若非对现有设施进行改造, 新建类似的生物质能热电设施, 装配或不装配 CCUS 系统, 其成本规模都势必推迟其开发。

38 Archer Daniels Midland. ADM Begins Operations for Second Carbon Capture and Storage Project. 2017. <https://www.adm.com/news/news-releases/adm-begins-operations-for-second-carbon-capture-and-storage-project-1>.

39 McDonald, S. Illinois. Industrial Carbon Capture & Storage Project. Presentation. Bioeconomy 2017. July 11, 2017. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/10/f38/mcdonald_bioeconomy_2017.pdf

40 Consoli, C. Bioenergy and Carbon Capture and Storage. Global CCS Institute e. 2019. https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_18-March.pdf.

- 现役燃煤电厂，以相当于每 25-30 年更新换代成本的 10-15% 的资本性投资规模，就可以几乎无限期地延寿。
- 电站生物质能利用的经验，将为其开发建设奠定恰如其分的基础。已有几个地方进行了燃煤电厂的部分改造。德拉克斯发电厂已实现 100% 的生物质燃烧发电。该经验可以应用于后续燃煤电厂的生物质能改造。
- 第二代 CCUS 装置的改进是使得 BECCS 经济可行的关键。尚德电厂碳捕集与封存可行性研究中凸显了降低资本成本和运营成本，直接适用于 BECCS 设施。
- 生物质通常不含硫，因此降低了减排 SO₂ 所消耗的石灰石成本，并减轻了 SO₂ 进入 CO₂ 吸收塔对胺的质量产生负面作用的不良影响。
- BECCS 改造可实现能源供应的灵活性。电厂的改造可以保持其混烧不定量煤炭和生物质的能力，同时与季节性和年度性生物质的可用量匹配，并顾及供应中断的状况。
- 分阶段启动生物质能发电将扶持原料供应的增长。随着生物质的供应在生长条件适宜并靠近燃煤发电站的地区逐步成熟，生物质与煤混烧将逐步过渡到更大量增加生物质燃料利用。
- 除了新作物以外，通过秸秆和树皮等废弃物供应提供新的经济价值来源，可以为符合条件的燃煤电厂附近的农林业经营提供机遇。
- 在有些地区，BECCS 项目的碳汇可能具有市场价值。BECCS 产生的负排放，可能为那些实行碳汇制度的地区创造现金流，以抵销其它地区的排放。

富氧燃烧发电技术

未来，燃煤电厂的碳捕集，可能会以燃烧前或富氧燃烧工艺与发电过程集成⁴¹。富氧燃烧是一种燃煤发电技术，在过去的二十年间已经过研究和试验规模广泛地探索。在富氧燃烧过程中，煤利用纯氧而不是空气燃烧。由于去除了空气中的其它气体成分（含约 78% 的氮），从而降低了燃料消耗。纯氧在烟气中稀释，避免温度过高超过商业规模锅炉结构材料可耐受的规格限度。与常规燃煤热电相比，富氧燃烧过程中产生的烟气量为前者的四分之一。与燃烧后工艺的烟道气相比，富氧燃烧过程由于烟气量减少，使烟道气中二氧化碳的浓度大幅度提高（> 60% 相对于 12-15%）。因此，可以大大降低伴随二氧化碳纯化和压缩过程的资金成本与运营成本。寄生能耗是伴随着电厂二氧化碳燃烧后捕集改造的普遍特征，富氧燃烧则有可能以更低的能耗，更高的煤炭利用效率，实现电厂效率的提升。

41 United States Department of Energy. Pre-Combustion Capture. 2019. <https://www.energy.gov/fe/science-innovation/carbon-capture-and-storage-research/carbon-capture-rd/pre-combustion-carbon>

卡利德富氧燃烧项目

一个值得参考的有用范例，是在 2012-2015 年期间，澳大利亚-日本联合实施的卡利德（Callide）富氧燃烧 CCUS 项目⁴²。该项目主要有如下特点^{43,44}：

- 项目使用的燃料包括卡利德煤，一种澳大利亚的中灰半烟煤，掺入占 25% 的其它三种低灰至中灰烟煤和无烟煤。
- 在发电容量为 3 万千瓦的富氧燃烧锅炉内，耗煤 20,000 公斤标煤/小时。
- 锅炉可靠性在运行一个月内达到 90%。
- 烟气 CO₂ 含量 68-70%，经过苛性工艺过滤和洗涤，再低温分离，CO₂ 产量为 75 吨/日，纯度达 99.9%。
- 捕集了 95% 以上的 SO_x, NO_x, 颗粒物以及微量金属。

倘若配套类似设备，对一个 42 万千瓦超临界锅炉实施全规模富氧燃烧改造，年捕集 280 万吨 CO₂，其包含运输和封存成本的资本成本估计为 2000-2300 澳元/千瓦⁴⁵。与中试规模的投资相比，其资本成本降低了大约三分之一。42 万千瓦富氧燃烧碳捕集电力设施的运营和维护总成本，确定为超超临界燃煤电厂运营和维护总成本的 1.5 到 2.0 倍；对该两类电力设施运营与维护预计成本的评估均未将碳捕集利用与封存（CCUS）计算在内。这些观察结果清楚地表明了，规模对资本成本和运营成本的影响，以及部署应用先进的第一代技术往往所产生的额外成本。



图片说明：位于澳大利亚昆士兰州中部的卡利德 A 电站，为卡利德富氧燃烧项目的所在地（CS 能源有限公司供稿）

42 Spero, C. and Yamada, T. Callide Oxyfuel Project – Final Results. Oxyfuel Technologies Pty Ltd. March 2018. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/callide-oxyfuel-project-final-results/>

43 Spero, C. Callide Oxyfuel Project – Lessons Learned. Global CCS Institute. May 2014.

44 Spero, C. Callide Oxyfuel Project. Presentation to the IEAGHG Oxyfuel Combustion Network. October 27-30, 2015. [https://ieaghg.org/docs/General_Docs/5oxy%20presentations/Keynote%20Address/K03%20-%20C.%20Spero%20\(CS%20Energy\).pdf](https://ieaghg.org/docs/General_Docs/5oxy%20presentations/Keynote%20Address/K03%20-%20C.%20Spero%20(CS%20Energy).pdf)

45 Costs quoted in 2017 Australian Dollars (AU\$).

阿拉姆循环试点项目

阿拉姆循环是一种新颖的发电厂设计，基于富氧加压燃烧技术，以超临界 CO₂ 代替常规火力发电厂推动涡轮机发电的蒸汽。阿拉姆循环将燃料与发电整合集成。像所有富氧燃烧过程一样，阿拉姆循环使用富氧燃烧，因此需要上游空分装置。其循环过程中所产生烟气的二氧化碳含量，远高于传统燃烧产生的烟气⁴²。

阿拉姆循环特别有希望，因为它既产生 CO₂，同时又可以高效发电，从而有可能在发电效率上与不具备 CO₂ 捕集能力的常规电厂一比高下。如果可以出售二氧化碳，或采取诸如美国公司法 45Q 规定的抵税优惠措施，那么阿拉姆循环发电厂则可能以相对于不减排的常规电厂更低的成本提供电力。换言之，该系统有望开发出新一类电厂，其二氧化碳捕集成本可忽略不计。阿拉姆循环的运行可以使用天然气，煤气或生物质等燃料。该循环系统 5 万千瓦（热能量）规模燃气示范项目位于美国德克萨斯州的拉波特⁴⁶。北达科他州大学能源与环境研究中心，也正在对利用褐煤的 5 万千瓦阿拉姆循环进行中试规模研究^{47,48}。

46 NETPower. 2019. <https://www.netpower.com>

47 North Dakota Senate. News release. February 2018. <https://www.hoeven.senate.gov/news/news-releases/hoeven-announces-700000-in-doe-funding-for-energy-and-environmental-research-center-at-und-to-develop-allam-cycle>

48 Laumb, J. Advanced Coal-Fired Power Cycles. Presentation. 5th Annual Minnesota Power Systems Conference. November 2018. <https://www.ccaps.umn.edu/documents/CPE-Conferences/MIPSYCON-PowerPoints/2018/AdvancedCoalFiredPowerCycles.pdf>

加强公共政策扶持并加大融资力度

为实现《巴黎协定》的目标，需要国际社会作出承诺，将 CCUS 部署应用作为实施减缓气候变化的关键战略。各国政府和金融机构认为 CCUS 成本高昂，并寻求其它低成本的减排项目加以鼓励或资助，反而阻碍了扶持 CCUS 部署应用的有效政策的制定以及融资机制的形成。



说明：参观团在边界坝 3 项目碳捕集设施现场 (碳捕集利用与封存知识国际中心供稿)。

反过来，恰恰这些有效政策的制定和融资机制的形成，会降低 CCUS 的成本，从而保证必要的成本降低将激励新项目部署推广。

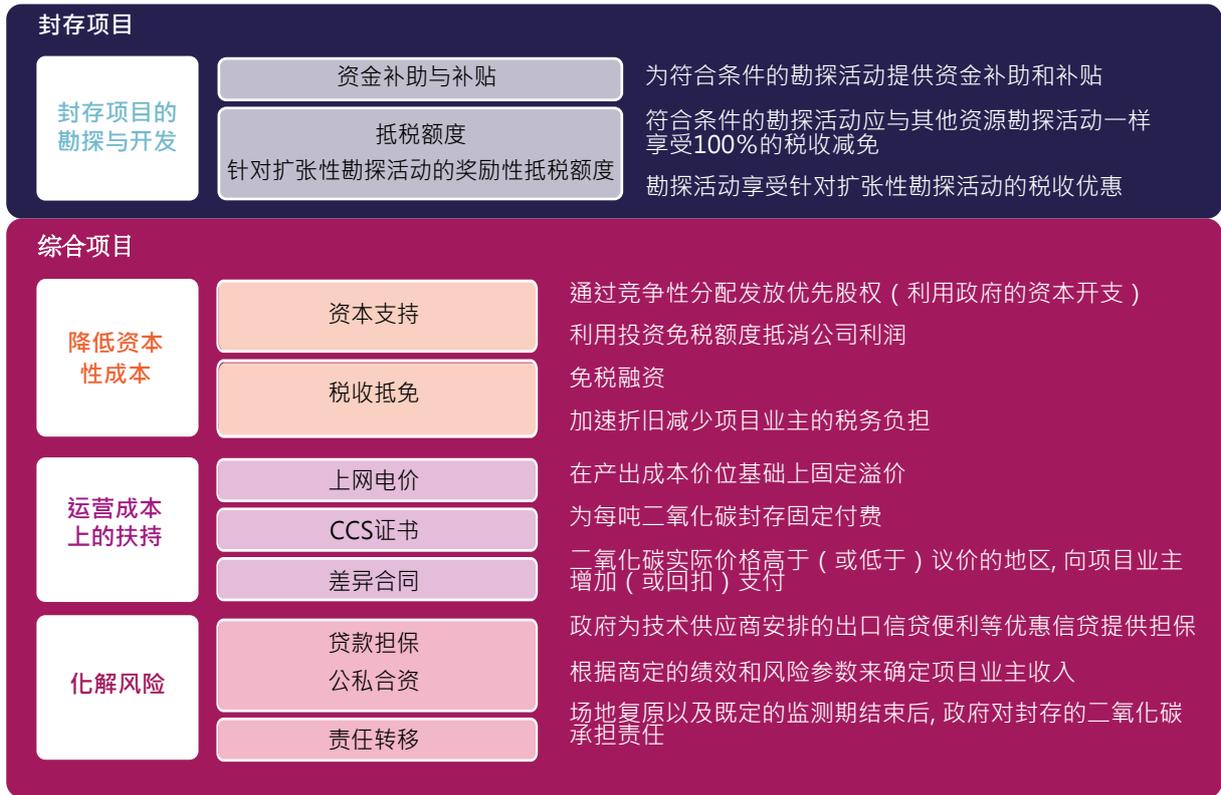
尽管必须根据国家/地区具体情况来制定政府的政策，但可以将政府政策划分为 2016 年煤炭工业咨询委员会报告中概述的四大类别，即：

- **刺激市场接纳 CCUS**，以大幅度提高 CCUS 的部署应用水平和资本投入水平。政策必须使资本投入能够获得基于市场的回报率，并在 CCUS 技术成熟情况下，便利其在全球能源与工业等领域市场化部署应用。
- **支持项目开发**。商业规模 CCUS 项目的社会效益，减排量以及经济效益巨大。既需要应用从现运行项目中领悟的经验教训，也需要制定政策以降低项目财务风险，要加快 CCUS 项目开发过程，这两者缺一不可。
- **启用项目专用资金**。许多国家直接为 CCUS 项目提供补助资金。这种途径对于降低 CCUS 项目财务风险并改善项目的经济性，便利投入资本的获取，仍然很重要。但是，仅有资金支持和投资还不够，必须制定扶持性的公共政策。恰恰由于类似的政策，全球低碳可再生能源的市场渗透猛增。对于 CCUS 来说，双轨并行的途径至关重要。

- **部署推广 CCUS 项目并推进下一代 CCUS 技术进步。**政府对研发活动的传统性重视很重要。但是，大规模部署推广经过验证的 CCUS 技术，对于降低成本和扩展推广应用面至关重要。为确保未来的技术进步，即使下一代 CCUS 技术尚有待于具备比较优势或者在市场上其财务回报有待明朗，各国政府亦必须继续推进下一代 CCUS 技术以及知识开发。

实施此类政策，将使政府能够以较低的成本实现对《巴黎协定》的承诺（见图解 9）。

图解 9：改善 CCUS 经济可行性的激励政策



资料来源：格雷格，C.等，澳大利亚的能源安全与繁荣-碳捕集与封存路线图⁴⁹

这里供参考的一个有用例子，是最近美国对现行的 45Q 税收抵免条例进行了改革，以激励 CCUS 的部署推广，尤其是针对乙醇生产，天然气加工处理和氨水生产等行业领域，以期收获“低悬果实”。由于该《未来法案》对现行的 45Q 税收抵免机制进行了改革获得通过，目的是刺激 CCUS 的部署推广，CCUS 倡导者再次感受到了美国的气势。改革后的 45Q 税收抵免额度为：

- 35 美元/吨二氧化碳利用于强化采油等有益用途
- 50 美元/每吨二氧化碳咸水层封存
- 抵税窗口期 12 年
- 在 2024 年 1 月 1 日之前必须开始施工
- 最低捕集率：电厂 50 万吨/年，其它工业 10 万吨/年
- 抵免额度可转让，意味着合作联合体等非营利组织也可以使用抵税额度。

49 Reprinted by the International Energy Agency. Five Keys to Unlock CCS Investment. Paris: IEA, 2017. <https://webstore.iea.org/five-keys-to-unlock-ccs-investment>.

不过，45Q 机制可能需要进一步的政策性延伸，以刺激 CCUS 在电力行业的部署推广⁵⁰。虽然税收抵免是激励美国能源技术项目的可行路径，但抵税额度不同于现金，这可能会给某些试图利用税收抵免的电力公司带来一些重大难题，包括：

- 公司纳税基数不足以利用 45Q 抵免额。
- 美国的税率降低了，因此 CCUS 抵免信用额度也随之降低。
- 在转让给项目合作伙伴或兑现的情况下，由于其抵税价值有可能至少降低 20%，税收抵免的现值可能会低于预期。
- 由于税收抵免不能在项目开始时使用，仅在项目封存二氧化碳之后才可以每年度使用，抵税不能为项目支付资本性开支。项目资本性开支仍可能需要融资。

为了解美国煤炭工业仍然面临的挑战，可以借鉴从 NRG 能源公司佩特拉·诺瓦项目中汲取的经验教训。虽然该项目通过建设燃气轮机来满足碳捕集设施的蒸汽和能源需求，从而增加了项目的成本和复杂性，但 NRG 得以避免了美国新资源审查（NSR）环境法规许可过程。该法规对 CCUS 项目并非没有风险，因为该法规要求使用“最佳技术”来减少工业排放。即使针对现役设施进行的最有效 CCUS 集成实施 NSR 法规下的许可审查，结果仍有可能触发发电厂改造，因此影响经济效益或降低预期的减排目标。

据 NRG 说，汲取从该项目中获得的经验教训，将使如今类似项目的成本降低 10-20%⁵¹。相比之下，尽管佩特拉·诺瓦项目经常被援引为耗资约 10 亿美元，但其中包括了管道和一项基建项目，使油田为接收二氧化碳做好准备，并非所有项目都一定需要这些开支。相比之下，佩特拉·诺瓦项目的碳捕集设施的投资额约为 6.35 亿美元⁵²。而新建一个类似于佩特拉·诺瓦项目的 24 万千瓦电厂碳捕集项目，年捕集约 140 万吨 CO₂ 用于强化采油，则可以享受为期 12 年的 45Q 条例下税收抵免，价值约 5.88 亿美元，从而提高了投资回报率并降低了融资风险。

除了 45Q 税收抵免改革的积极性质外，目前正在制定或正在考虑其它许多公共政策建议，这些建议将促进电力行业，特别是煤炭工业的 CCUS 新项目。尽管煤电行业在 CCUS 部署应用方面面临种种挑战，在当今美国正在酝酿着煤电行业 CCUS 新项目。当然，本文自始至终讨论非常实际的降低成本，在短期内也很有可能在美国成为现实，并且在每个后续项目中汲取的经验教训，都将降低未来的部署推广成本。

50 Energy Futures Initiative. Advancing Large Scale Carbon Management: Expansion of the 45Q Tax Credit. May 2018.

www.energyfuturesinitiative.org/news/2018/5/22/efi-policy-paper-how-the-45q-credit-may-spur-carbon-capture-innovation.

51 Richards, H. Carbon Dioxide from Coal Plants Has an Interested Buyer from Oil and Gas. If the Costs Come Down. Casper Star Tribune: October 2017. www.trib.com/business/energy/carbon-dioxide-from-coal-plants-has-an-interested-buyer-from/article_db13a06a-af61-52b5-858d-ff0330dc1e54.html.

52 Petra Nova Parish Holdings, LLC, W.A. Parish Post-Combustion CO₂ Capture and Sequestration Project, www.osti.gov/servlets/purl/1344080

结束语

本报告的目的，在于概括应用 CCUS 技术来捕集并封存燃煤电厂 CO₂ 排放成本降低的长远前景。图解 10 总结了本报告中阐述的要点。现运行的项目为 CCUS 的未来设计和开发提供了重要的经验教训；许多经验教训将引导资本成本以及运营成本的大幅降低。迄今为止的工作已经成功地证明了，经济规模等其它有利因素，可以降低二氧化碳捕集的成本。技术的进步将进一步改善成本效益，膜捕集，富氧燃烧和 BECCS 等有希望的新技术路径，理所当然地引人注目。

截至 2020 年，全球将有 20 多个商业规模的 CCUS 项目投入运营，每年捕集并地质封存的人为排放的二氧化碳超过 3700 万吨^{53,54}。这些项目仍有助于实现 2008 年八国集团在北海道设定的 2010 年目标⁵⁵，尽管已经晚了十年。其中只有两个项目为启用了 CCUS 的燃煤电厂。在过去的几年中，工业化规模利用二氧化碳项目的部署推广有了积极进展，这大大增加了可行的商业化技术的现有数量以及技术供应商的数量，可供未来的项目斟酌选用。此外，除了实施了大规模 CCUS 项目的少数几个国家以外，在其它地方已经启动或正在开发新的 CCUS 试点项目和方案。

为了提高或者保持 CCUS 的部署应用速度，G20 国家必须做出新的承诺，大幅增加 CCUS 的安装数量。为了履行《巴黎协定》中关于在 2030 年前后增加 CCUS 部署应用的现有承诺，下一步至关重要。持续的进展将取决于以下方面：

- **加深理解掌握，扩展技术知识。** 必须继续融汇专业技术知识，更好地掌握二氧化碳捕集的成本节约和设计改进要素，以便利技术进步。
- **降低共享运输与封存设施的不确定性。** 为必要的投资提供便利，来发展运输和封存环节的大型基础设施，包括制定更好的流通管理规划。
- **强化政策和财政扶持。** 必须做出国际承诺，以制定扶持性政策和创新的融资机制，使 CCUS 成长为健全的产业。
- **与投资于 CCUS 商业化部署应用同步，继续投资于新技术的研发和试点项目。** 在过去的几十年间，大量的研究，试点和示范的投资水平，必须持续并提高，以降低燃煤发电低排技术相关的投资风险。这样一定会加快技术开发周期。为了加快新型燃煤电厂的设计，许可和运营，因地制宜地利用特有的黑煤和褐煤资源，进行研究工作也是必不可少的，以获得独立并客观的分析，构建数据库并开发专业知识。

53 Zakkour, P. and Heidug, W. A Mechanism for CCS in the Post-Paris Era: Piloting Results-Based Finance and Supply Side Policy Under Article 6. Saudi Arabia: KAPSARC, 2019. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=24&ved=2ahUKewjN84_9vPTkAhUTNn0KHefvBtA4FBAWMAN6BAgBEAI&url=https%3A%2F%2Fwww.kapsarc.org%2Ffile-download.php%3Fi%3D28368&usg=AOvVaw0QLVGqasyzuYweROMf3Dxp

54 IEAGHG. Paris Climate Change Targets Cannot be Met Without CCS. Greenhouse News. Issue 128. December 2017. https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Publications/December_2017_LR.pdf

55 Munk School of Global Affairs & Public Policy, University of Toronto. G8 Summits. Hokkaido Official Documents: Environment and Climate Change. Article 31. July 8, 2008. <http://www.g8.utoronto.ca/summit/2008hokkaido/2008-climate.html>

图解 10: 燃煤电厂 CCUS 降低成本的潜力要点



CCUS 与燃煤发电配套已成为全球性现实。CCUS 在发电行业的应用推广是本报告的重点，但正如本文所述，从 CCUS 在燃煤电厂的部署推广中汲取的经验教训，作为二氧化碳减排策略，可以扩大应用到其它能源密集型行业，反之亦然——能源密集型行业 CCUS 的部署推广经验亦可应用于电力行业。鉴于缺乏可用的技术替代方案，许多基于化石燃料的排放密集型工业过程，都将需要 CCUS 以实现限制升温 2°C 的目标。从发电厂的 CCUS 商业化设施项目不断领悟并积累知识，将可直接转移到能源密集型工业行业；而为扶持燃煤电厂迅速采用 CCUS 技术得以健全的任何政策和金融工具，也一定要随之直接转移。

独立的大型燃煤电厂排放 CO₂ 捕集设施，以其捕集规模而提供独特的机遇，使其成为 CCUS 转运枢纽设施的依托，兼容其它小规模工业排放 CO₂ 源，以补充枢纽设施 CO₂ 利用与封存的供应来源。CCUS 运输和封存基础设施的发展，对于以化石能源为基础的产业越来越多地部署推广 CCUS 至关重要，并且必须与所有新的 CO₂ 捕集项目的开发协调推进。自然，要具备快速增加二氧化碳供应的能力，二氧化碳利用与封存的终端用户数量也必须增长，这就要求恰当的政府和融资杠杆来予以激励。在仍处于发展中的世界上，全流程 CCUS 对于减少全球的排放至关重要。

最近，令人欢欣鼓舞的是，煤电与以能源为基础的相关产业联手开发的 CCUS 商业化项目，加快了前进的步伐，证明诸工业行业为扩展技术知识，加深了解以及掌握关键技术而展现出明确和积极的担当，这必将引导煤电行业的环境绩效持续改善。保持，或更理想的情况是，加强 CCUS 商业化推广应用的发展势头，定将对实现《巴黎协定》的升温上限 2°C 目标做出有意义的贡献。