



# 二氧化碳捕集与利用技术研究及工程示范

许世森

煤基清洁能源国家实验室

中国华能集团有限公司

2021.12.15





# CONTENTS

**01** 背景  
Background

**02** 工程示范  
Engineering Demonstration

**03** 基础研究  
Basic Research

**04** 国际合作  
International Cooperation

**05** 在实施项目  
On The Way



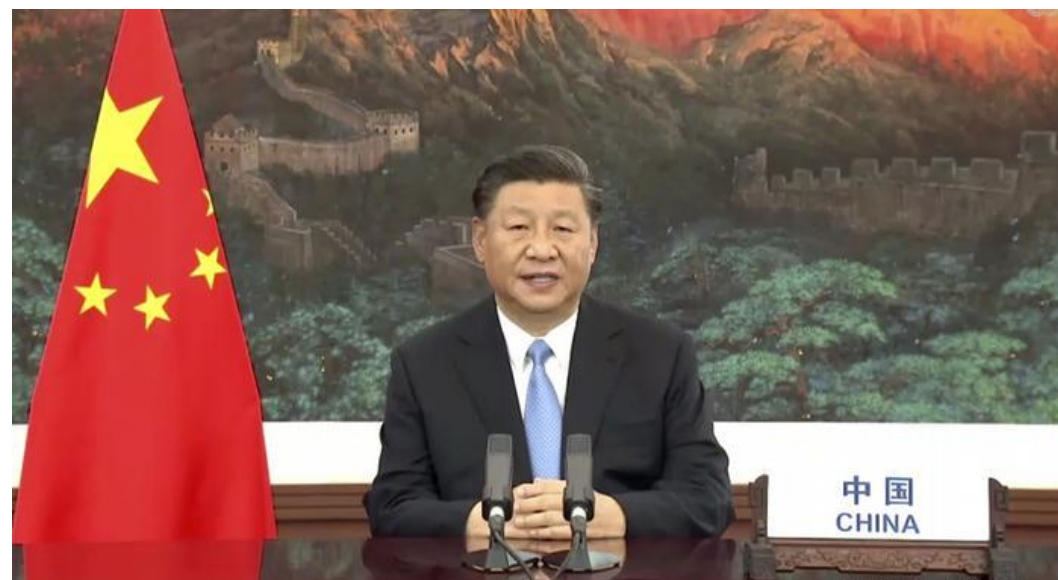


# 01 背景 Background



中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

中共中央、国务院适时印发了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，国务院发布了《2030年前碳达峰行动方案》，



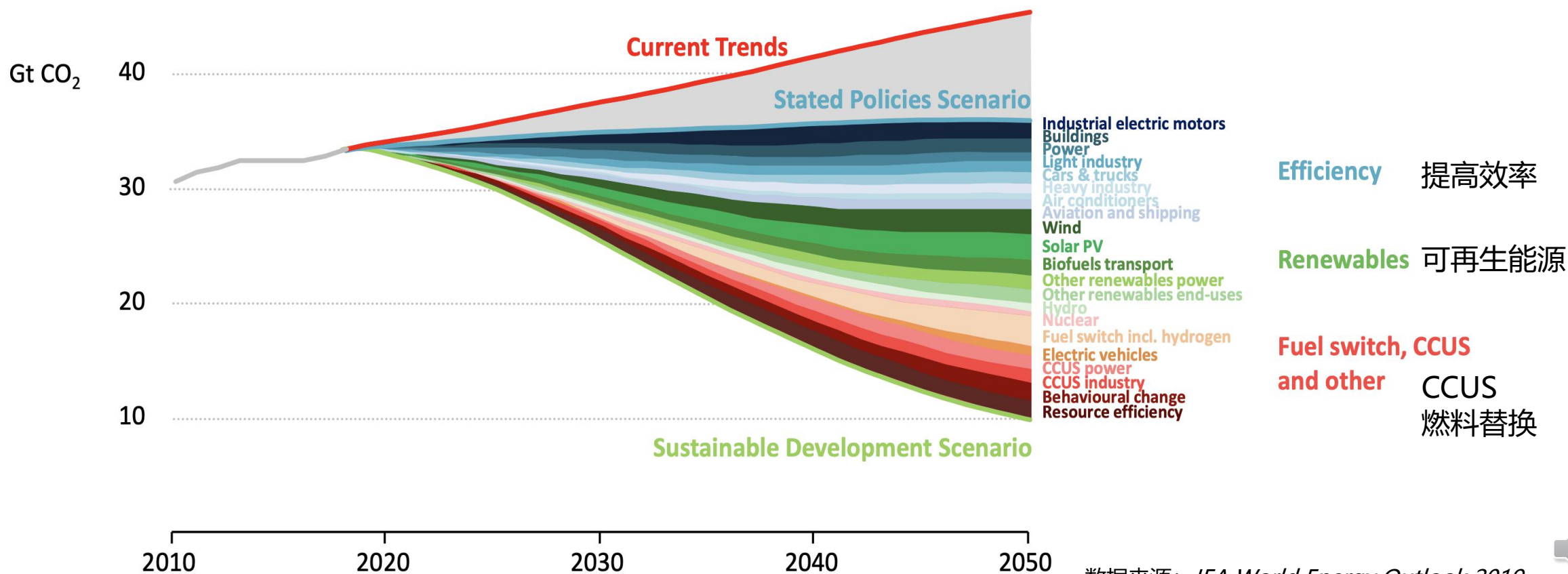
- 事关中华民族永续发展和构建人类命运共同体
- 广泛而深刻的经济社会系统性变革
- 纳入生态文明建设整体布局



# IEA碳减排路径预测

- 需要采用政策和技术复合、协同控制等手段以达成减排的目标
- 技术手段包括提高效率、提高可再生能源占比、燃料种类切换, CCUS等

Energy-related CO<sub>2</sub> emissions and reductions in the Sustainable Development Scenario by source



数据来源: IEA World Energy Outlook 2019





作为一项有望实现化石能源大规模低碳利用的新兴技术，CCUS是我国未来实现碳中和、保障能源安全和促进可持续发展的重要手段。

### 能源结构

**需要实现化石能源利用零排放。**

CCUS技术是煤炭等化石能源大规模低碳化利用的**唯一途径**。

### 电力系统

**需要同时满足灵活性、零排放双重任务与功能。**

配备了CCUS的火电是未来保障电网灵活性的**重要手段**。

### 难减行业

**需要电力系统等发展负排放技术。**

CCUS技术是我国2060年实现碳中和的**托底技术选择**。



- 预计到2050年，CCUS技术可提供减排贡献为**11亿~27亿吨**二氧化碳。

## 电力系统

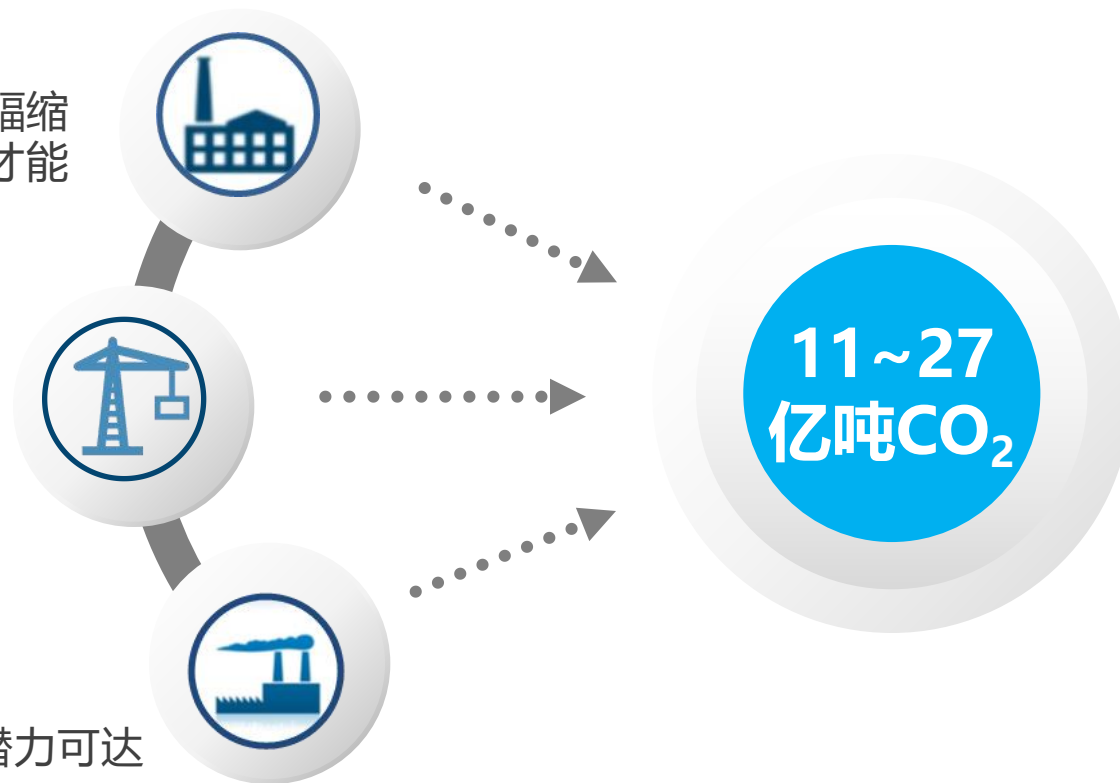
- 2050年，预计我国电力需求12万亿~15万亿度，即使火电占比大幅缩减至10%左右，仍有**4.3亿~16.4亿吨**CO<sub>2</sub>需通过CCUS技术减排才能实现电力系统的净零排放。

## 钢铁及水泥等难以减排行业

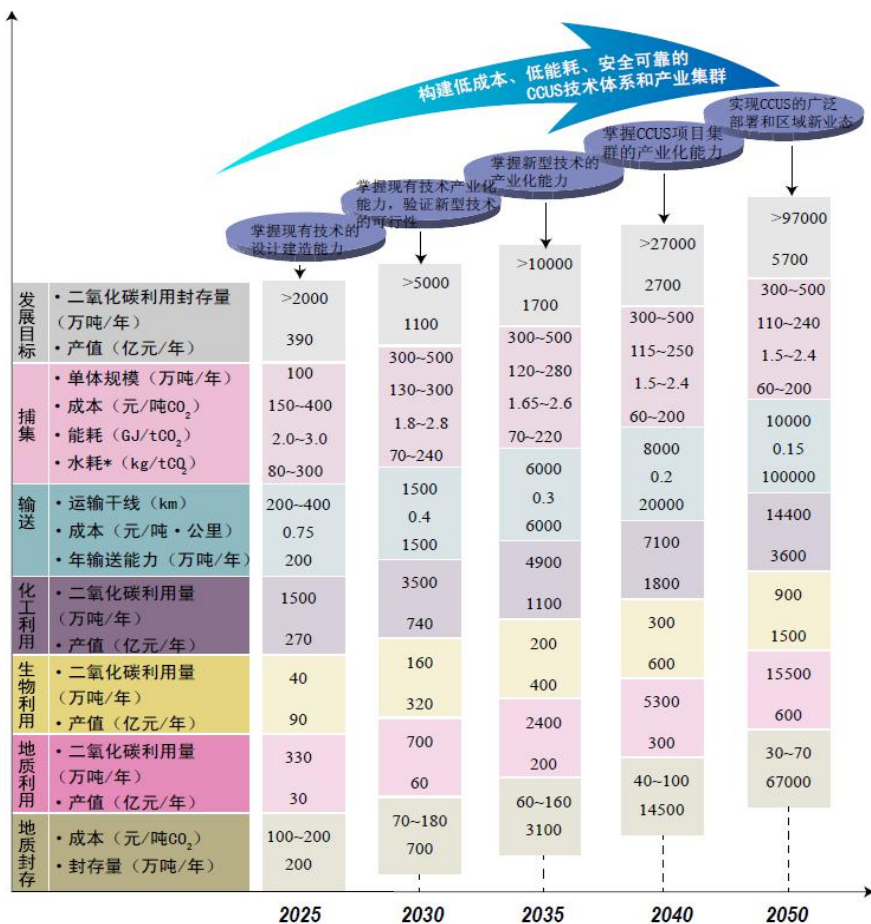
- 2050年，预计我国钢铁产量为4.75亿吨，即使考虑了其他各项减排措施后，要实现净零排放，还有**0.5亿~2.1亿吨**CO<sub>2</sub>需要通过CCUS进行减排。
- 2050年，预计我国水泥产量8亿吨，在采用了其他减排技术后，仍有约**2.6亿吨**CO<sub>2</sub>的减排需依靠CCUS技术。

## 负碳排放技术

- 2050年，我国生物质资源潜力可达6亿吨标煤，对应CO<sub>2</sub>负排放潜力可达**3.6亿~5.9亿吨**。



# 中国CCUS技术路线图



**2025年:**建成多个基于现有CCUS技术的工业示范项目并具备工程化能力;

**2030年:**现有技术开始进入商业应用并具备产业化能力;

**2035年:**新型技术实现大规模商业化运行;

**2040年:**CCUS系统集成与风险管控技术得到突破, CCUS集群建成, CCUS的综合成本大幅降低。

**2050年:**CCUS技术实现广泛部署, 多个CCUS产业集群建成。

注: **现有技术**是指当前已具备条件开展工业示范的技术, 包括第一代捕集技术及部分利用、封存技术。**新型技术**是指当前尚不具备条件开展工业示范的技术, 包括第二代捕集技术及部分利用、封存技术。



# CCUS技术创新联盟



国家CCUS产业技术创新联盟的发起单位和理事  
长单位（国家科技部）



CCUS产业技术创新战略联盟成立于2013年，联盟旨在整合及协调各方科研力量和产业资源，大力推动我国CCUS领域的技术创新和工程示范。**中国华能**作为联盟首位理事长单位，并在今年组织召开了第六届碳捕集、利用与封存国际论坛和多次青年学者沙龙。



2021年4月，舒印彪董事长在“第六届碳捕集、利用与封存国际论坛”上致辞





02

# 工程示范 Engineering Demonstration



## □ 全球约51个大型一体化CCS项目

✓ 商运阶段：18个，CO<sub>2</sub>捕集规模4500万吨（0.1%全球排放量）

✓ 建设阶段：5个，CO<sub>2</sub>捕集潜力1030-1140万吨



- CCUS涵盖各领域，电力行业占据主流，集中在燃煤电厂。
- 燃气烟气CO<sub>2</sub>捕集成为CCUS技术重要的增长点 and 新的应用场景
  - ✓ 全球燃气发电装机比重逐年增高
  - ✓ 国内煤改气供热趋势，各类新区“近零排放” / “碳中和”设想需CCUS支撑

世界记录保持5年



2009年，中国华能上海石洞口  
燃煤电厂10万吨/年CO<sub>2</sub>捕集工程

世界记录保持2年半



2014年，加拿大Boundary Dam  
燃煤电厂100万吨/年CO<sub>2</sub>捕集工程

目前的世界记录



2017年1月，美国Petra Nova  
燃煤电厂140万吨/年CO<sub>2</sub>捕集工程



## □ 各国出台CCUS鼓励政策，美国45Q法案，欧盟能源计划

- ✓ 45Q法案，应用CCUS的企业可享受减税35-50美元/tCO<sub>2</sub>
- ✓ 《“十四五”规划和2035年远景目标纲要》

## □ 已验证的封存项目

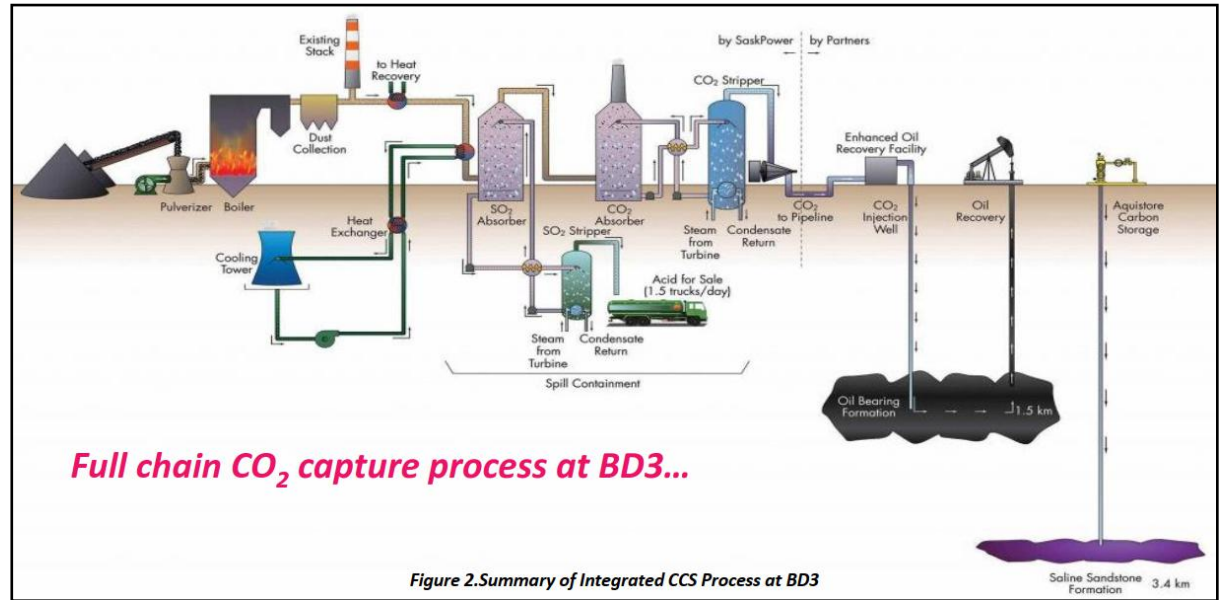
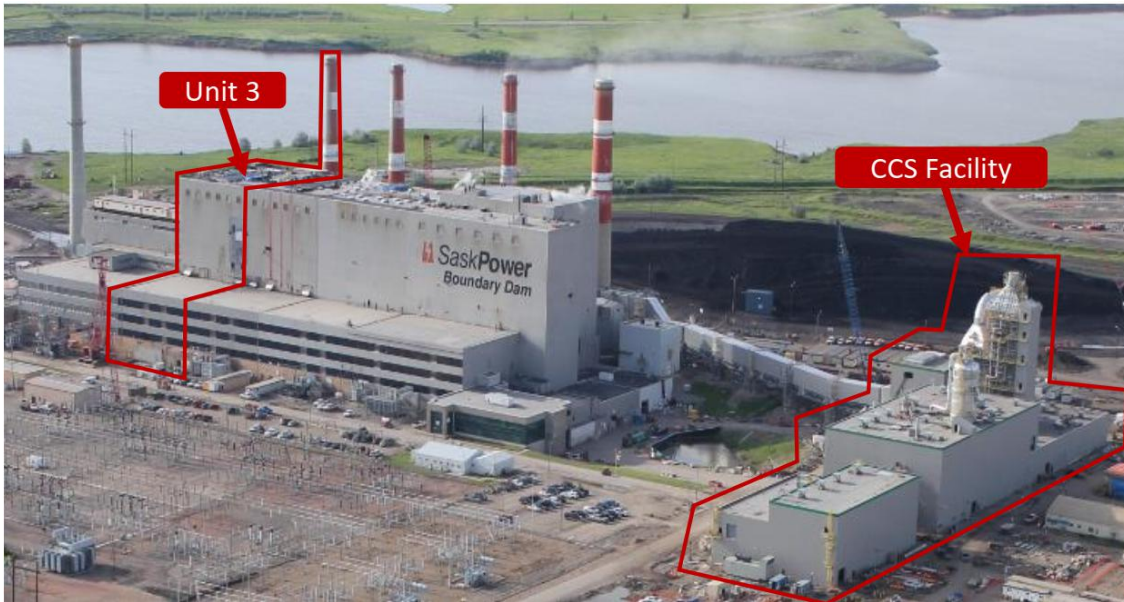
- ✓ Sleipner (挪威): 20年安全封存1650万吨CO<sub>2</sub>
- ✓ Snohvit (挪威): 10年安全封存400万吨CO<sub>2</sub>
- ✓ Quest (加拿大): 6年安全封存600万吨CO<sub>2</sub>
- ✓ Boundary Dam (加拿大): 4年安全封存200万吨CO<sub>2</sub>

## □ 海外CCUS项目

- ✓ 美国Starwood、Kiewit等新的百万吨CO<sub>2</sub>捕集项目计划
- ✓ 澳大利亚苏拉特盆地十万吨/百万吨CO<sub>2</sub>捕集与封存旗舰项目（采用华能碳捕集技术）



## 加拿大边界大坝 (Boundary Dam) 项目-全球首个燃煤电厂百万吨级燃烧后二氧化碳捕集与封存项目



- ✓ 2011年4月，正式开工建设；
- ✓ 2014年6月，3号机组改造完成，开始发电；
- ✓ 2014年10月，正式建成，开始捕集CO<sub>2</sub>；
- ✓ 总体投资约**14.67亿加元**，联邦政府拨款2.4亿加元。
- ✓ SO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>联合捕集工艺，由壳牌CANSOLV公司提供；
- ✓ 自2014年底运行以来，已累计捕集CO<sub>2</sub>**415万吨**；
- ✓ CO<sub>2</sub>纯度99%，CO<sub>2</sub>利用：强化采油EOR和地质封存。



## □ 美国佩特拉诺瓦 (Petra Nova) 项目-全球最大的燃煤电厂烟气二氧化碳捕集与封存商业项目

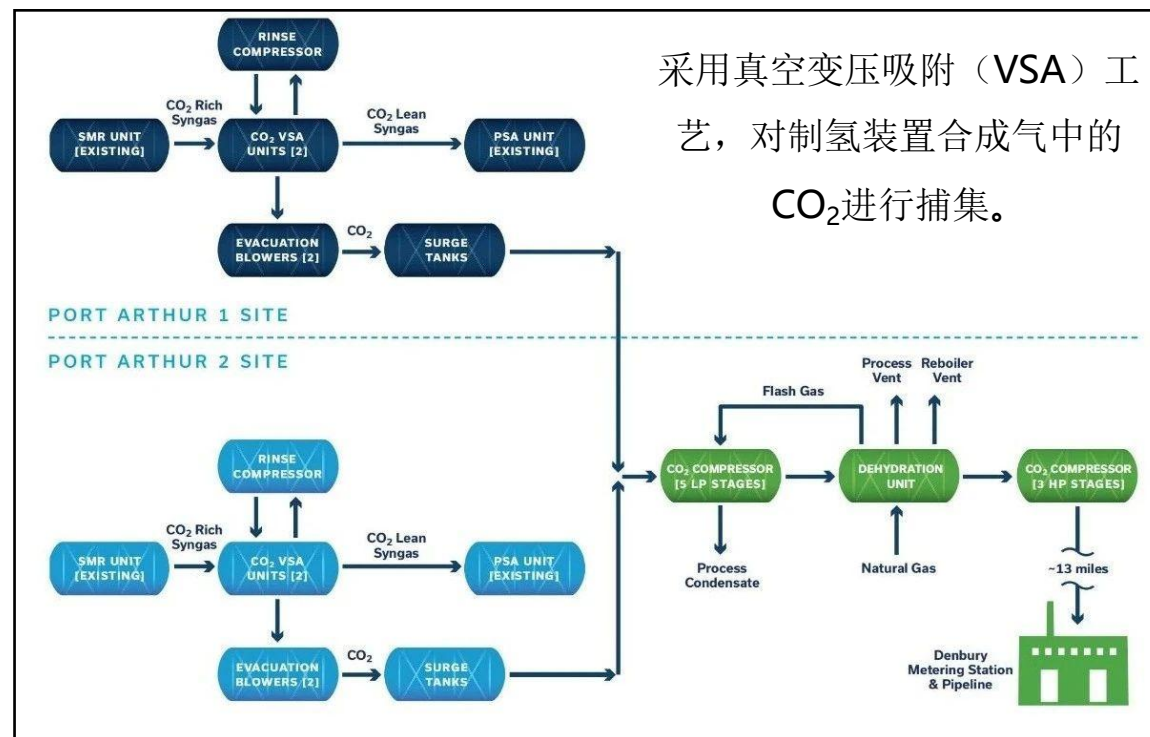


- ✓ 2014年9月，正式开工建设；
- ✓ 2016年12月29日，佩特拉诺瓦CCS装置正式启动商业运行，开始捕集CO<sub>2</sub>；
- ✓ 总体投资约**10.4亿美元**，美国能源部提供经费1.9亿美元；
- ✓ 2017年10月，项目在启动运行10个月后，实现了累计捕集CO<sub>2</sub> **100万吨**；
- ✓ CO<sub>2</sub>利用：通过管道输送至西部牧场油田，通过EOR工艺增加油田产量。
- ✓ 单位捕集热耗约为**2.4GJ/tCO<sub>2</sub>**，CO<sub>2</sub>捕集综合成本为**\$55-60/tCO<sub>2</sub>**。

受疫情和油价的影响，该项目于2020年5月起停运至今



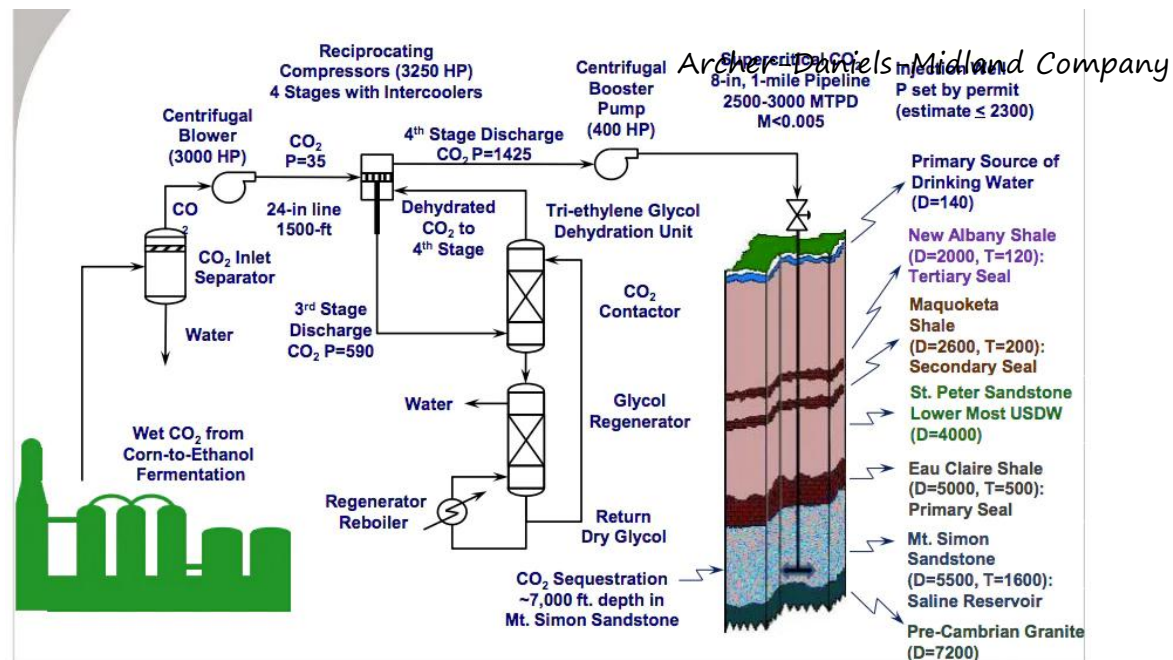
## 美国阿瑟港 (Port Arthur) 项目-全球首个百万吨级吸附法二氧化碳捕集与封存商业项目



- ✓ 2011年8月，正式开工建设；
- ✓ 2013年5月，完成满负荷性能测试；
- ✓ 2017年8月，CO<sub>2</sub>捕集量超过370万吨；

- ✓ 设计CO<sub>2</sub>捕集量为113.9 t/h，总预算为4.31亿美元，其中DOE资助经费2.84亿美元；
- ✓ EOR利用，单位捕集热耗约为**2.5GJ/tCO<sub>2</sub>**。

## 美国伊利诺斯乙醇厂项目 - 全球首个百万吨BECCS二氧化碳捕集与封存商业项目



- ✓ 2011年11月，启动30万吨每年示范项目；
- ✓ 2017年3月，启动百万吨商业运行；
- ✓ 至2020年12月，CO<sub>2</sub>封存量超过300万吨；

- ✓ 项目CAPEX总资本支出约2.08亿美元，美国能源部提供经费1.41亿美元；
- ✓ 1.6公里管道运输二氧化碳到附近地质封存。



## □ 挪威富腾垃圾发电厂项目- 全球首个垃圾发电BECCS二氧化碳捕集与封存商业项目



- ✓ 设计年捕集40万吨CO<sub>2</sub>，95%捕集率；
- ✓ 2016年7月，完成可研；
- ✓ 2020年5月，完成前端工程设计；



- ✓ 现在正在申请展望2020 (Horizon 2020) 经费
- ✓ 预计碳捕集CAPEX资本支出约3.59亿美元，OPEX运营支出2千5百万美元每年；
- ✓ 船运至Northern Lights项目进行离岸地质封存。



## □ 冰岛Climeworks空气碳捕集和封存项目- 全球首个运行的DACCS项目



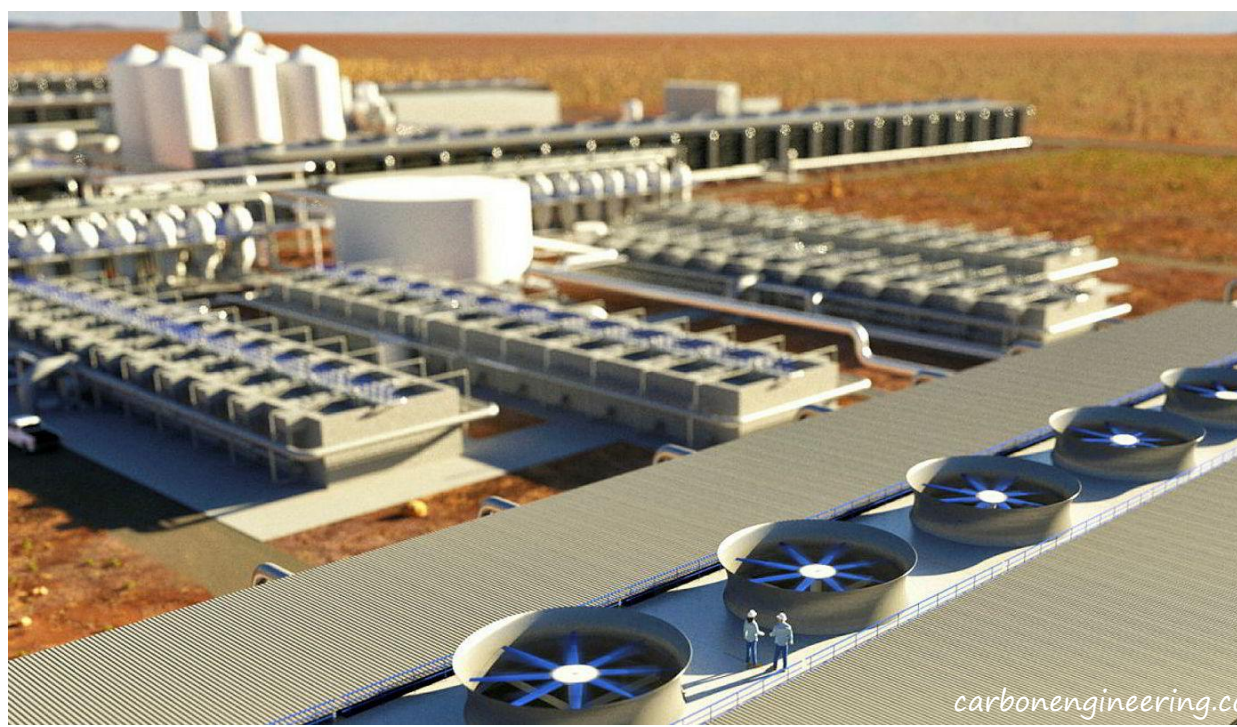
- ✓ 年捕集4,000吨CO<sub>2</sub>;
- ✓ 2020年8月, 正式开工建设;
- ✓ 2021年9月, 开始运行;



- ✓ 附近Hellisheiði地热电厂提供可再生能源
- ✓ 捕集的CO<sub>2</sub>通过管道运输到Carbfix项目地质封存。



## Carbon Engineering空气碳捕集和封存项目- 全球首个设计百万吨DACCS商业项目



- ✓ 与Oxy Low Carbon Ventures 开展OXY油田附近1百万吨空气碳捕集和封存项目;
- ✓ 与Storegga开展英国Acorn商业空气碳捕集和封存项目可行性研究;

- ✓ 利用氢氧化钾水溶液吸附剂与钙碱回收回路相连空气捕集空气中的CO<sub>2</sub>;
- ✓ 设计单位捕集热耗约为8.81GJ/tCO<sub>2</sub> (纯天然气) 或者5.25GJ/tCO<sub>2</sub> + 366 kWhr (天然气+电)

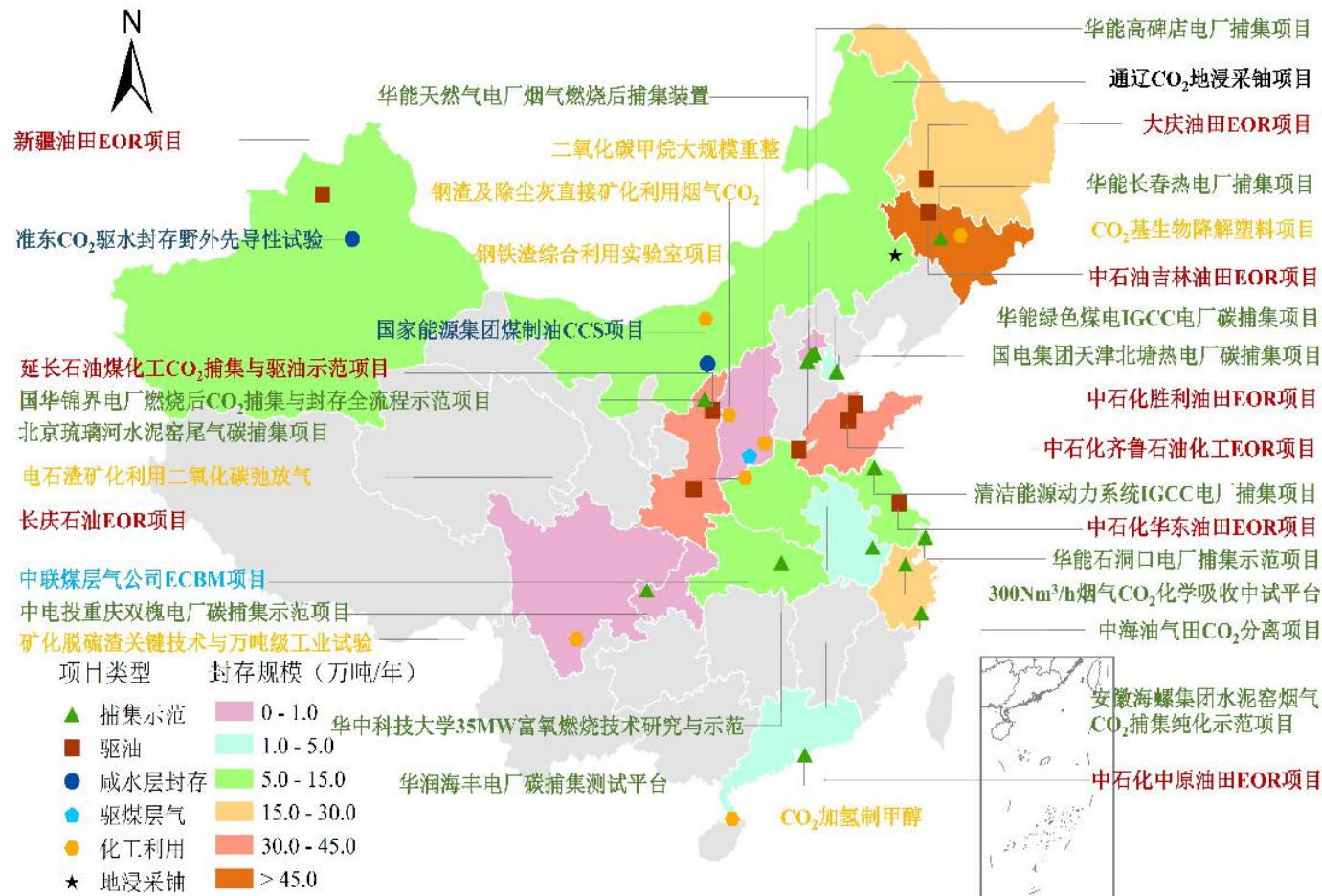


# 我国CCUS产业现状



已建成约35个CCUS示范项目，捕集能力超过300万吨/年。  
2007-2019年，累积CO<sub>2</sub>封存量约为200万吨。

- CO<sub>2</sub>捕集源主要集中在**煤化工、化肥生产、电力和水泥生产等行业**。
- 运输方式以**罐车**为主，地质封存以**咸水层**封存为主。
- CO<sub>2</sub>利用涉及EOR、ECBM、EUL等**地质利用、矿化利用、合成可降解聚合物等化工利用**以及**微藻固定等生物利用方式**。



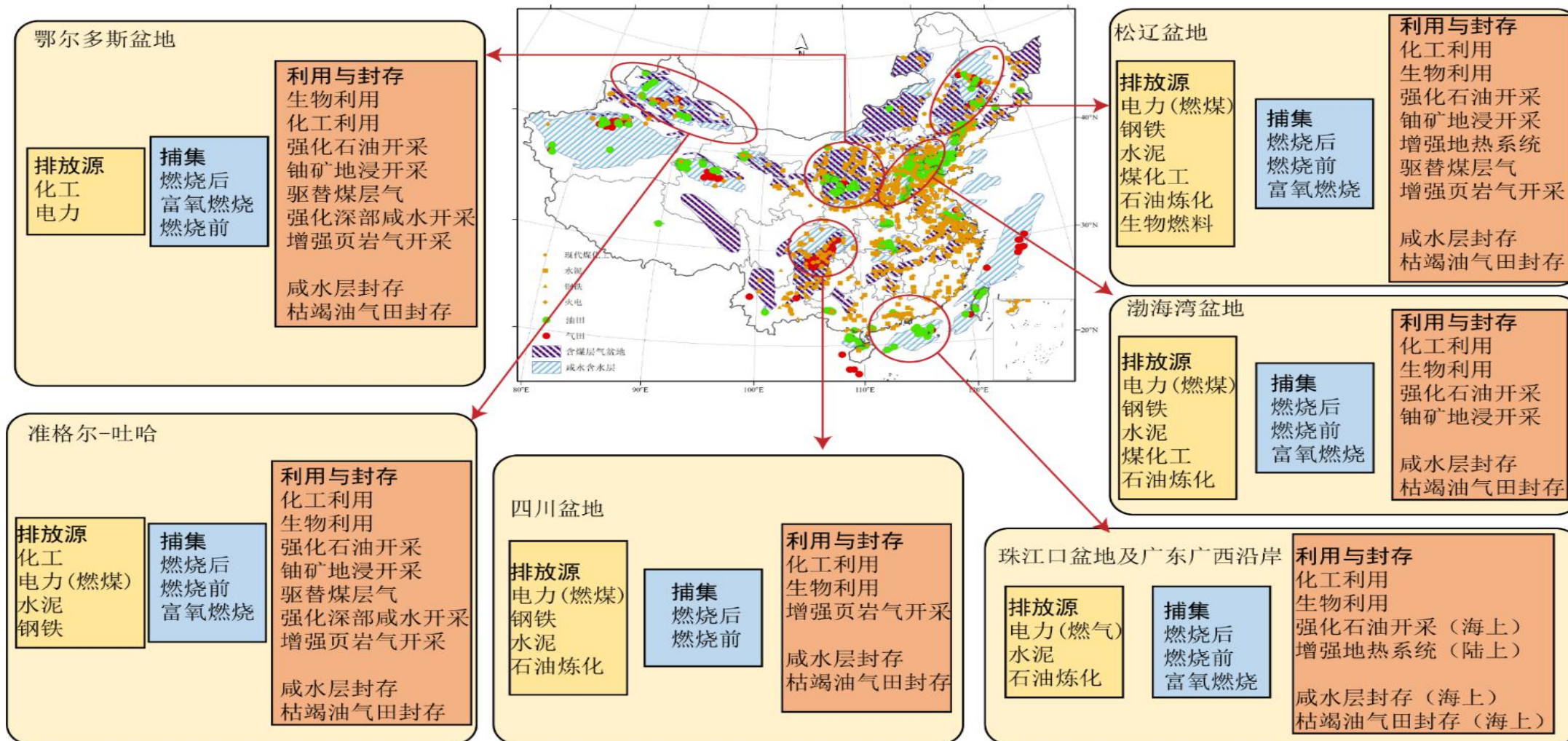
我国CCUS示范项目



# 我国未来CCUS产业潜力



■ 我国CCUS产业集群优势区域。根据分析研究我国地质封存潜力在1~2万亿吨。





**2008年7月，中国首个CO<sub>2</sub>捕集装置(3000吨/年)在华能北京热电厂投入运行，该装置由华能独立设计和建造，捕集的CO<sub>2</sub>实现了资源化利用。** In July 2008, China's first CO<sub>2</sub> capturing facility, with capturing capacity of 3000 tons/year, was put into operation in CHNG Beijing Cogeneration Power Plant. The facility is independently designed and constructed by CHNG. The captured CO<sub>2</sub> is utilized as follows.





Items	Features
Capture Process	Post combustion
Feature	PC power station, CO <sub>2</sub> 12-15% in flue gas
Scale	120,000tpa CO <sub>2</sub>
Energy consumption	<2.7GJ/t CO <sub>2</sub>
Capture Ratio	>85%
CO <sub>2</sub> Purity	Food Grade, >99.997%
Others	Largest PCC unit then, have been operating 10 years continually.
	Capture cost 300-400RMB/t CO <sub>2</sub>

华能世界首套12万吨/年烟气CO<sub>2</sub>捕集装置，于2009年底在上海石洞口二厂投入运行，已累计运行十年，是国际上运行时间最长的CO<sub>2</sub>捕集装置。CHNG constructed another CO<sub>2</sub> capturing facility in Shanghai Shidongkou NO.2 Power Plant, with capacity of 120,000t/a, which has been operational by the end of 2009. The project is one of the largest CO<sub>2</sub> capture facility at the time in the world.



- First CO<sub>2</sub> capture pilot plant both for natural gas and coal based power station in China, built by CERl in 2012 (1000 tons CO<sub>2</sub> per year)
- 中国首套燃气电厂二氧化碳捕集测试系统（规模1000吨CO<sub>2</sub>/年）
- This plant (named CCM Verification Plant here) is served as a verification plant for Norway CO<sub>2</sub> Capture Mongstad (CCM) project
- 挪威CCM碳捕集工程的验证项目及大型PCC可行性研究技术验证
- Verification plant has been running stably for 4000 hours with capture efficiency >85% (85%~92%) in 2013
- 连续稳定运行4000小时（捕集率85%~92%）
- Very low solvent consumption and NDMA emission
- 溶液消耗低（<0.5kg/tCO<sub>2</sub>），亚硝酸胺等二次污染排放达欧洲标准



中国首个1000吨/年相变碳捕集装置  
China's first 1000 tons/year phase change  
carbon capture test unit

2020年，华能研制出我国首台1000吨/年“相变”碳捕集工业装置在华能长春热电厂成功实现连续稳定运行。两相碳捕获技术属于新一代的碳捕捉技术，有效地解决传统方法中加热所有的CO<sub>2</sub>吸收液所引起的高能耗问题，并可以大大减少CO<sub>2</sub>的捕集成本，能耗≤2.3 GJ/tCO<sub>2</sub>。

In 2020, China's first 1,000 tons/year “phase-changing” carbon capture industrial device, developed by CHNG, successfully realized continuous and stable operation in Huaneng Changchun Thermal Power Plant. Biphasic carbon capture technology belongs to a new generation of transformational carbon capture technology, which effectively solves the problem of high energy consumption caused by the heating of all the carbon dioxide absorption liquid in the traditional method, and can greatly reduce the cost of carbon dioxide capture, with huge social and economic benefits. **Energy consumption ≤2.3GJ/tCO<sub>2</sub>.**





**世界首套基于IGCC的燃烧前捕集装置（2016年）**

First Pre-combustion capture unit in the world started operation in 2016

	说明/Introduction
捕集技术类型 Capture Process	燃烧前CO <sub>2</sub> 捕集 Precombustion
技术特点 Feature	基于IGCC的全流程CCS系统 IGCC based full chain CCS
捕集规模 Scale	6-10万吨/年CO <sub>2</sub> (30MW <sub>th</sub> ) 60,000-100,000tpa CO <sub>2</sub> (30MW <sub>th</sub> )
捕集能耗 Energy consumption	<2.5GJ/t CO <sub>2</sub>
CO <sub>2</sub> 运输方式 CO <sub>2</sub> Transportation	罐车运输 Tanks
CO <sub>2</sub> 封存方式 CO <sub>2</sub> Storage	≥40,000t/a EOR+ ≥40,000t/a 咸水层封存 Storage



03

## 基础研究 Basic Research



# ◆ CO<sub>2</sub>捕集研发历程 CO<sub>2</sub> Capture R&D Process



在国家863计划、科技支撑计划等课题的支持下，历经15年艰苦攻关，华能建立了完全具有我国自主知识产权的烟气CO<sub>2</sub>捕集理论和成套技术体系。With the support of the National 863 Program as well as the Science and Technology Support Program, after 15 years of hard work, Huaneng have established the flue gas CO<sub>2</sub> capture theory and completed set of technology system with China's independent intellectual property rights.

编号HNKJ06-H02

中国华能集团公司重大科技项目

燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>捕集  
关键技术开发和装置研制

编号NY20111101

国家能源应用技术研究  
及工程示范项目

煤基发电和转化过程CO<sub>2</sub>捕集、  
利用和封存关键技术和装备  
研发及应用示范

编号2014BAC18B00

国家科技支撑计  
划项目

燃煤电厂CO<sub>2</sub>捕集、驱  
替煤层气利用和封存技  
术研究与试验示范

编号2018YFE0116800

国家重点研发计划

新一代燃烧后二氧化碳  
捕集吸收剂开发与应用  
示范

编号2008AA062301

国家“十一五”资  
源环境领域863计  
划课题

CO<sub>2</sub>的吸收法捕集技术

编号2013DFB60140

国家国际科技合  
作重点专项

中美二氧化碳捕集与封  
存技术的联合研究

编号2016YFE0102500

国家重点研发计划

碳捕集系统示范、优化及  
新一代发电技术研发

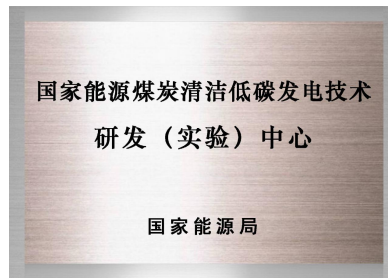
编号2019YFE0100100

国家重点研发计划

碳捕集及先进发电产业技  
术能力提升与创新



# ◆ 国家级/省部级研发平台 National/Provincial R&D Platform

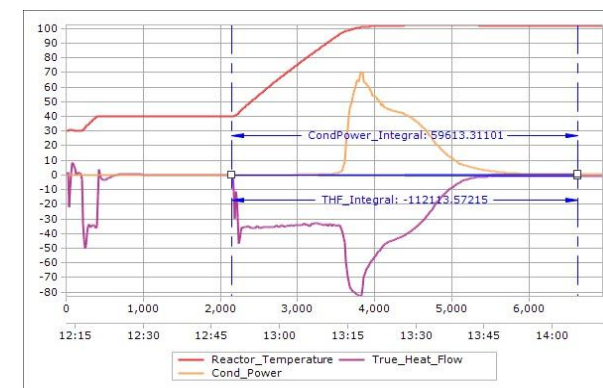
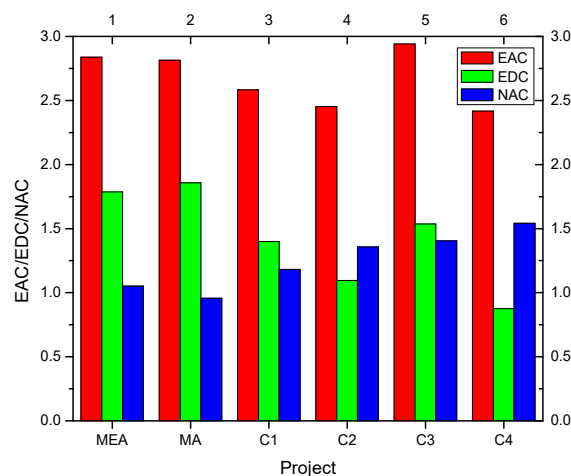
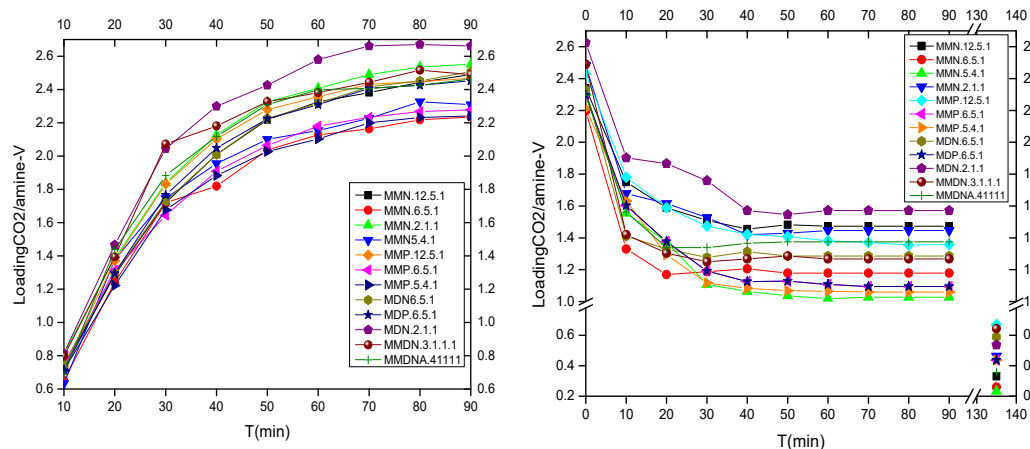


- 煤基清洁能源国家重点实验室 State Key Laboratory of Coal-based Clean Energy
- 国家能源煤清洁低碳发电技术研发(实验)中心 National Energy Technology R&D Center of Clean and Low-carbon Coal-fired Power Generation Technology
- 中美清洁能源联合研究中心-清洁煤技术中心 China-US Clean Energy Joint Research Center-Clean Coal Technology Center
- 二氧化碳捕集与处理北京市重点实验室 Beijing Key Laboratory of CO<sub>2</sub> Capture and treatment
- 北京市低质燃料提质与清洁高效利用工程中心 Beijing Engineering Research Center of Qualify and Clean Efficient Utilization of Poor Fuel
- 北京市国际科技合作基地 Beijing International Science and Technology Cooperation Base



## 复配型醇胺吸收剂（Blended Amines）

✓ 吸收、解吸性能及热效应测试



## 开发出具有自主知识产权的商业化HNC1~HNC5系列溶剂

✓ 2015年新型HNC5吸收剂在上海石洞口二厂12万吨/年捕集装置完成了超过3000小时的连续运行验证。

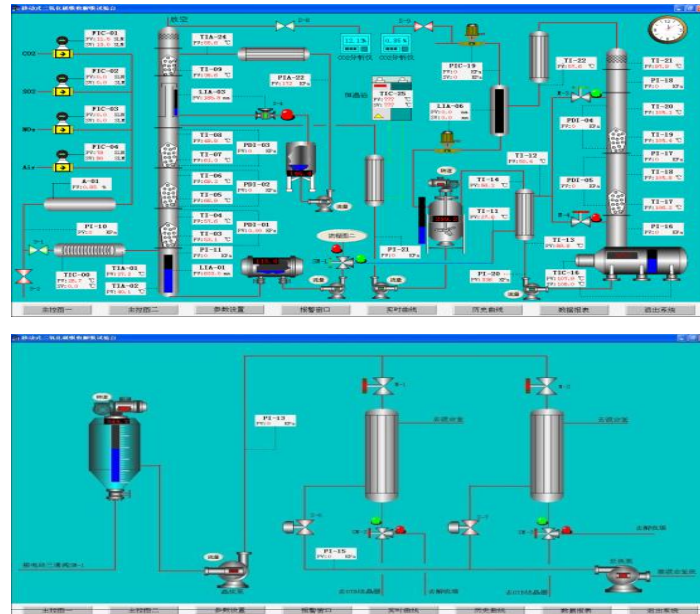
✓ 溶液有效成分浓度下降速度为MEA的40%，再生热耗为2.8GJ/tCO<sub>2</sub>，损耗小于0.5kg /tCO<sub>2</sub>，可减少捕集成本约20%。

- ✓ 完成实验室规模稠浆型CO<sub>2</sub>捕集试验台的建造、测试和运行。

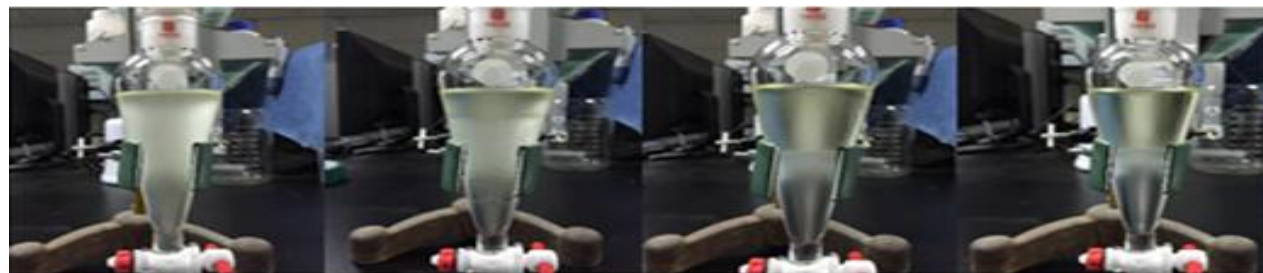
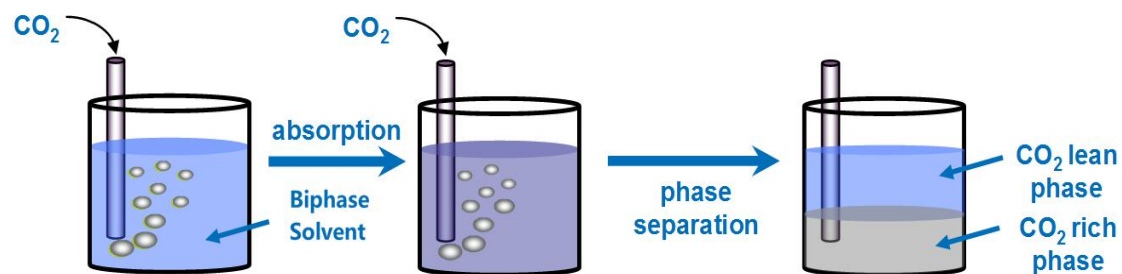
Lab-scale pilot plant was built, tested and run for slurry-based CO<sub>2</sub> capture.

- ✓ 稠浆型CO<sub>2</sub>捕集工艺再生能耗达2.6GJ/吨CO<sub>2</sub>，稠浆型吸收剂的成本相比MEA吸收剂下降20%，损耗成本下降22%~50%。

Regeneration energy is 2.6GJ/tCO<sub>2</sub>; absorbent cost is 20% that of MEA. Solvent loss cost is 22%~50% that of MEA.



- ✓ 吸收剂负载CO<sub>2</sub>后可自动分层为液-液两相，实现CO<sub>2</sub>在两相中的再分配，其中几乎所有的CO<sub>2</sub>（超过95%）集中于富相层，仅CO<sub>2</sub>富相层送去再生塔再生。 After absorbing CO<sub>2</sub>, the absorbent can split into two liquid/liquid phase by itself, and almost all absorbed CO<sub>2</sub> transfer into the rich phase (more than 95%). Only the rich phase is sent to the regeneration tower for regeneration.



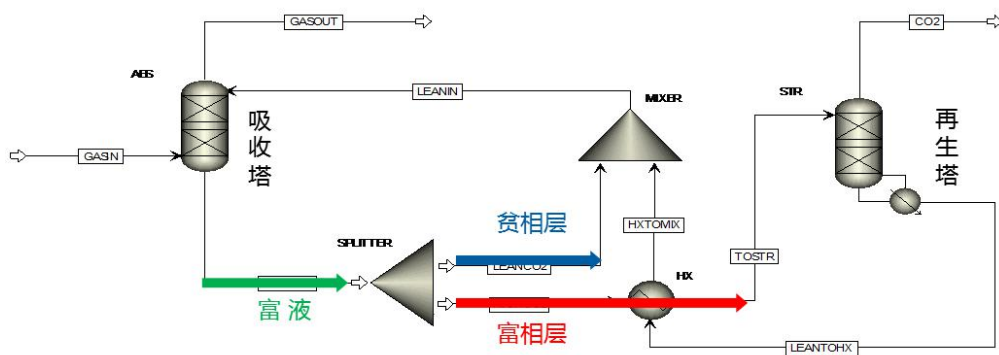
- ✓ 吸收速率和平衡负载高于MEA溶液。 Absorption rate and CO<sub>2</sub> loading are higher than those of MEA solutions.
- ✓ 量热实验表明：分层后的CO<sub>2</sub>富相解吸可进一步降低20%~30%的再生能耗。 Calorimeter experiments show that the desorption of CO<sub>2</sub> rich phase can reduce 20%~30% regeneration energy.

# 自浓缩相变型CO<sub>2</sub>吸收剂



✓2020年9月，华能清洁能源研究院在华能长春热电厂建成我国第一套燃煤电厂1000吨/年相变型CO<sub>2</sub>捕集工业中试装置，实现连续稳定运行，再生热耗 $\leq 2.3\text{GJ/tCO}_2$ 。

✓ In September 2020, Huaneng CERI built China's first 1000t/year phase-changing CO<sub>2</sub> capture industrial pilot plant in Huaneng Changchun Thermal Power Plant, which realized continuous and stable operation for 72 hours and the regenerated heat consumption  $\leq 2.3\text{GJ/tCO}_2$ .



自浓缩相变型CO<sub>2</sub>捕集工艺

Designed capture process for biphasic CO<sub>2</sub> absorbent



1000吨/年相变型CO<sub>2</sub>捕集装置

Huaneng Changchun Thermal Power Plant 1000t/year phase-changing CO<sub>2</sub> capture industrial pilot plant



连续运行历史记录曲线

continuous running history curve

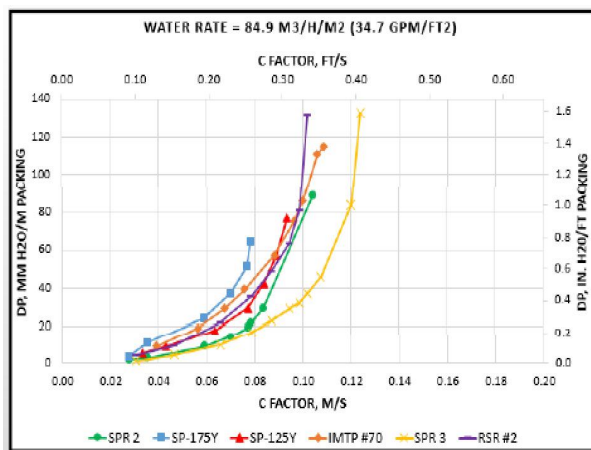


# 高通量、低压降关键塔内件

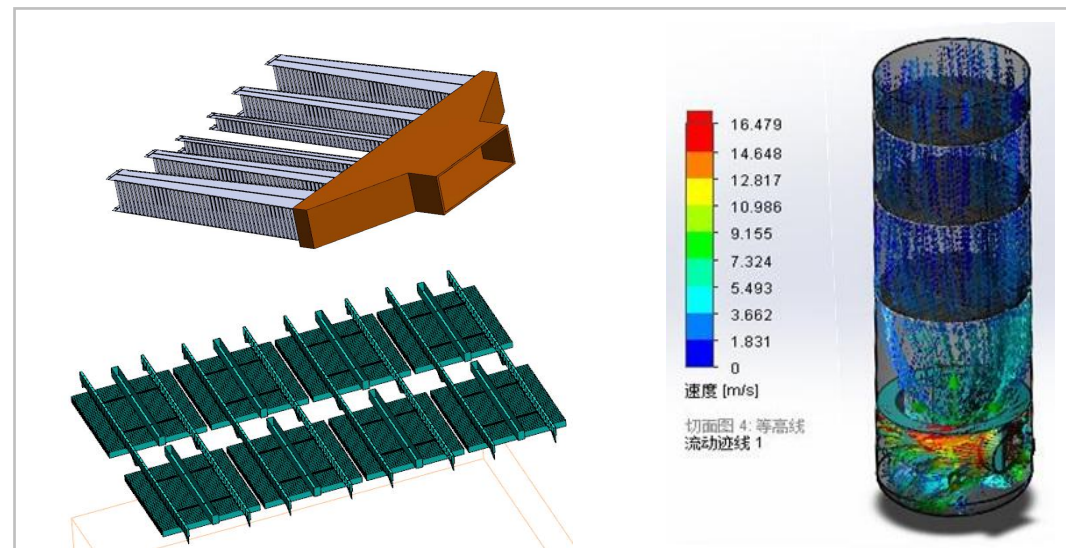


- ✓ 规整化散堆填料，叠加散堆填料与规整填料优势，能够切割、分散液体，较常规散堆填料处理效率提升50%以上、压降降低50%以上，较规整填料物性与工况适用性广且无壁流效应。
- ✓ 双列叶片气体分布器，有效改善气体初始分布质量；窄槽式液体分布器，对称设计免漏液，削弱液流在烟气中的湍动，降低湍动动能和能量耗散。

## 填 料



## 分 布 器



在石洞口二厂12万吨/年碳捕集示范工程上应用测试，综合性能优异，整体填料高度降低20%



CO<sub>2</sub>矿化：电厂粉煤灰循环流化床半干法CO<sub>2</sub>矿化工艺

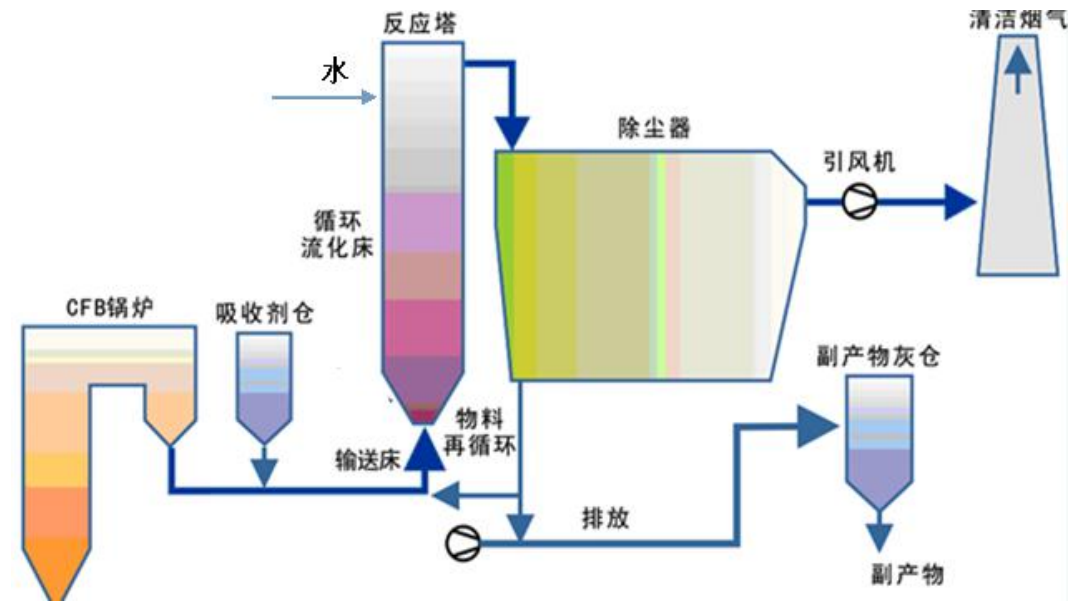
CO<sub>2</sub> mineralization: Semi-dry CO<sub>2</sub> mineralization process of fly ash in power plant by circulating fluidized bed.



粉煤灰气相矿化法冷态试验研究  
Study on cold state test of gas phase mineralization of fly ash



百吨级流化床半干法矿化脱碳中试平台  
Hundred tons fluidized bed semi - dry mineralization decarbonization pilot platform



5万吨/年流化床半干法矿化脱碳工艺方案设计  
Design of 50 thousand tons/year fluidized bed semi-dry mineralization decarbonization process

矿化能力：260 g CO<sub>2</sub>/kg 粉煤灰

Mineralization capacity: 260 g CO<sub>2</sub>/kg fly ash

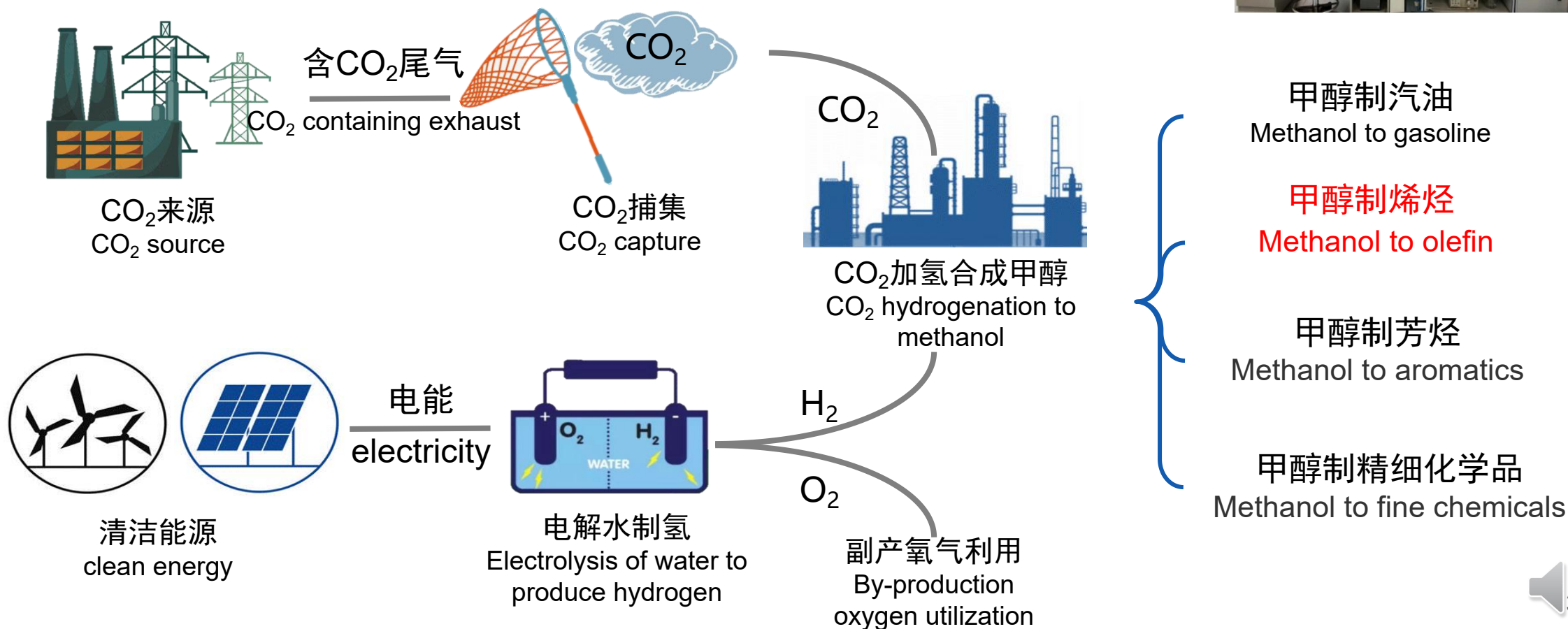
总固定资产投资：6400 万元；固碳成本（15年折旧计）：283.7 元/吨CO<sub>2</sub>；  
Total fixed investment: 64 million RMB. Carbon sequestration cost (15 years depreciation) : 283.7 yuan/ton of CO<sub>2</sub>.

# CO<sub>2</sub>利用技术-CO<sub>2</sub>加氢制甲醇



CO<sub>2</sub>加氢制甲醇：CO<sub>2</sub>加氢制甲醇双金属纳米催化剂及工艺

CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol: Bimetallic nano-catalyst for CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol and its process.



1

## CO<sub>2</sub>激活 机制及路径

分子模拟计算  
在线表征方法  
反应路径  
表面物种

2

## 新催化剂 体系

氧缺位构建  
晶面修饰  
助剂调控

3

## 表界面 构效关系

纳米活性中心  
表界面调控  
可控制备  
耦合成型

4

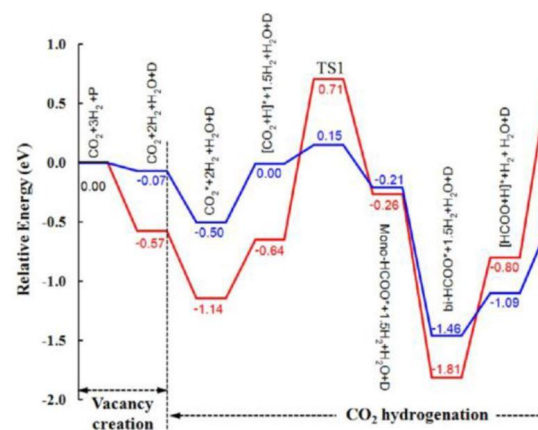
## 催化剂 规模化制备

建立公斤级催  
化剂制备流程  
示范线

5

## 性能评价与 工艺模拟

实验室性能评价  
流程模拟优化  
千吨级工艺包



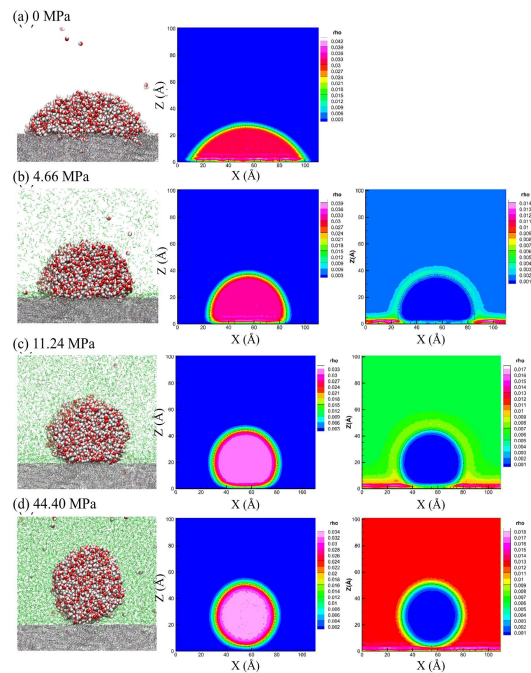
1 氢 H 1.0079																	2 氦 He 4.0026										
3 锂 Li 6.941	4 铍 Be 9.012											5 硼 B 10.811	6 碳 C 12.011	7 氮 N 14.007	8 氧 O 15.999	9 氟 F 18.998	10 氖 Ne 20.17										
11 钠 Na 22.989	12 镁 Mg 24.305	碱金属		碱土金属		过渡金属		过渡金属		过渡金属		13 铝 Al 26.982	14 硅 Si 28.085	15 磷 P 30.974	16 硫 S 32.06	17 氯 Cl 35.453	18 氩 Ar 39.94										
19 钾 K 39.098	20 钙 Ca 40.08	碱金属		碱土金属		过渡金属		过渡金属		过渡金属		21 钪 Sc 44.956	22 钛 Ti 47.9	23 钒 V 50.9415	24 铬 Cr 51.996	25 锰 Mn 54.938	26 铁 Fe 55.84	27 钴 Co 58.9332	28 镍 Ni 58.69	29 铜 Cu 63.546	30 锌 Zn 65.38	31 镓 Ga 69.72	32 锗 Ge 72.5	33 砷 As 74.922	34 硒 Se 78.9	35 溴 Br 79.904	36 氪 Kr 83.8
37 铷 Rb 85.467	38 锶 Sr 87.62	碱金属		碱土金属		过渡金属		过渡金属		过渡金属		39 钇 Y 88.906	40 锆 Zr 91.224	41 铌 Nb 92.9064	42 钼 Mo 95.94	43 锝 Tc 99	44 钌 Ru 101.07	45 铑 Rh 102.906	46 钯 Pd 106.42	47 银 Ag 107.868	48 镉 Cd 112.411	49 铟 In 114.818	50 锡 Sn 118.6	51 锑 Sb 121.7	52 碲 Te 127.6	53 碘 I 126.905	54 氙 Xe 131.3
55 铯 Cs 132.905	56 钡 Ba 137.33	碱金属		碱土金属		过渡金属		过渡金属		过渡金属		71 镧 La 174.96	72 铈 Ce 175.4	73 镨 Pr 180.947	74 钕 Nd 183.8	75 钐 Sm 186.207	76 铕 Eu 190.2	77 铈 Gd 192.2	78 铽 Tb 195.08	79 镱 Yb 196.967	80 镱 Lu 200.5	81 铊 Tl 204.3	82 铅 Pb 207.2	83 铋 Bi 208.98	84 钋 Po (209)	85 砹 At (210)	86 氡 Rn (222)



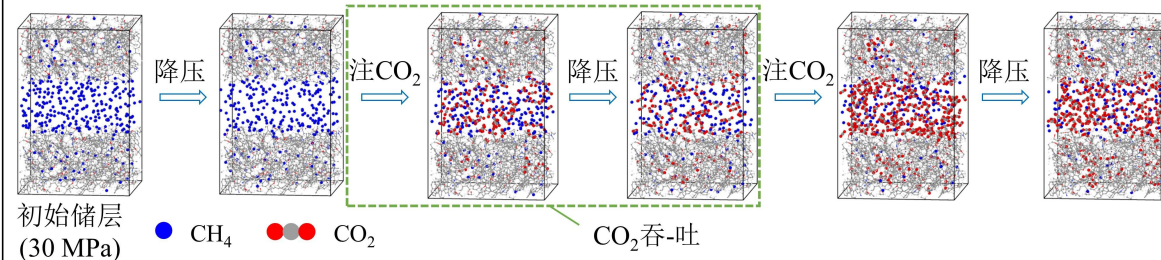
见材料固碳



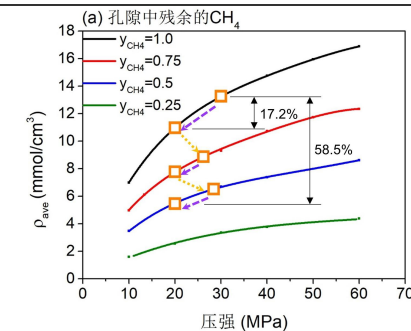
- 国家科技支撑计划项目、国家重点研发计划项目
- 开发了国内**首套**带独立监测系统的**千吨级CO<sub>2</sub>驱替示范系统**。
- 开发了CO<sub>2</sub>地质压裂驱页岩气的**无水压裂液及实验系统**。
- 揭示了CO<sub>2</sub>咸水层溶解封存**机理**，提出注CO<sub>2</sub>驱计算**模型**，发展了关键参数的定量化和开采路径优化的方法。



CO<sub>2</sub>在岩石孔隙中的溶解封存机理研究



CO<sub>2</sub>驱替单组分页岩气的模拟过程



吸附CO<sub>2</sub>平均密度演化过程研究



CO<sub>2</sub>压裂液性能研究



无水压裂液及实验系统



澳大利亚捕集与地质封存全流程验证





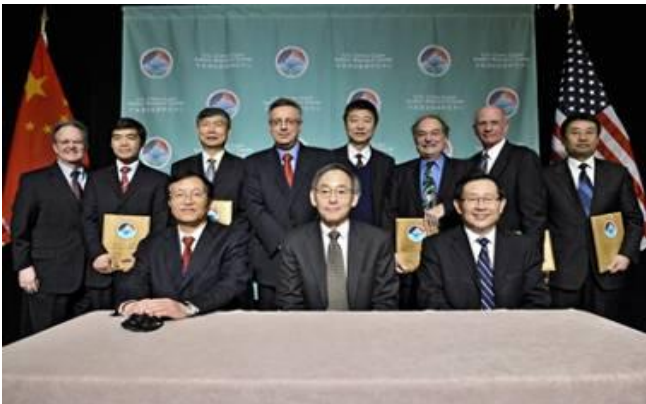
# 04 国际合作 International Cooperation





2009年11月，胡锦涛主席和奥巴马总统宣布成立清洁能源研究中心(CERC)。中国国家科技部和能源局与美国能源部共同领导该中心。

In Nov. 2009, President Hu Jintao and President Barack Obama announced the establishment of the Clean Energy Research Center (CERC).



# 中美碳捕集与封存技术联合研究 Cooperation on CCS

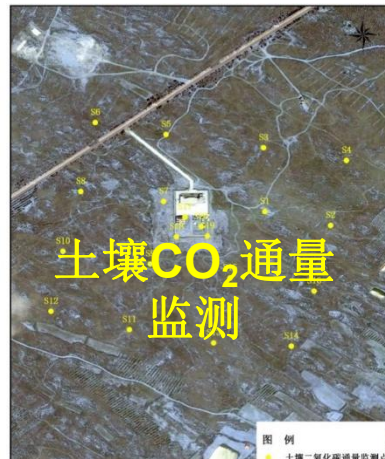
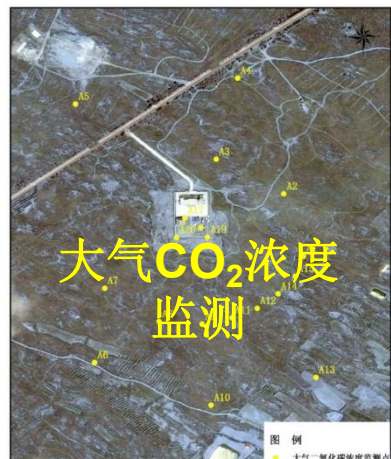
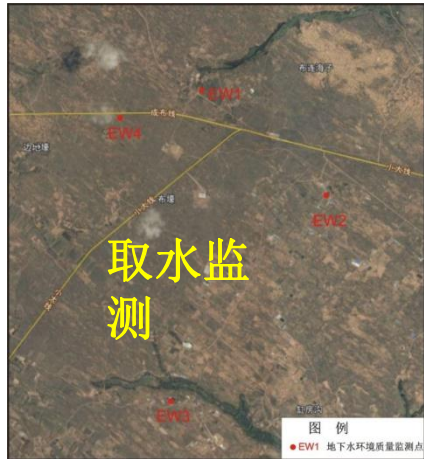


Figure 7. Pipeline network for two CO<sub>2</sub> emissions tax rates (a) 50\$/ton and (b) 65\$/ton.

## 中美二氧化碳捕集与封存技术的联合研究

地址：延长石油靖边油田乔家洼区块

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect  
Energy Procedia 134 (2018) 102–110

Applied Energy Symposium and Forum, Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS 2018, 21–29 June 2018, Perth, Australia

Process and Integration Optimization of Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture System in a Coal Power Plant

Lianbo Liu<sup>a</sup>, Shiqiang Wang<sup>a</sup>, Hongwei Niu<sup>a</sup>, Shiqiang Gao<sup>b</sup>

<sup>a</sup> China Huaying Clean Coal Energy Research Institute, Changqing District, Beijing 102208  
<sup>b</sup> State Key Laboratory of Clean Coal-based Energy, Changqing District, Beijing 102208  
<sup>c</sup> Beijing Key Laboratory of CO<sub>2</sub> Capture and Treatment, Changqing District, Beijing 102208

**Abstract**

Post-combustion CO<sub>2</sub> capture (PCC) is currently believed to be one of the major strategies to reduce the CO<sub>2</sub> emissions in coal power plant. However, the variation of PCC system will cause substantial changes of operation cost due to the energy consumption for regeneration of the capture solvent. The optimal integration solution of large-scale PCC system with thermal power plant are studied in this work, based on a flexibility study of 1.1 million ton PCC system conducted for a thermal power plant in southeast China. A process plant would include only PCC system or energy by Thermoflex STAM PRO. Based on the global process simulation platform and heat transfer on the steam turbine performance are studied. The impact of large-scale PCC system on power plant performance under various loads (30%, 75%, 90%) is investigated, and the impact of PCC operation on heating steam being water is studied. An environmental assessment is also conducted by investigating the total PCC operation on the emissions of SO<sub>2</sub> and pollutants in SO<sub>2</sub>. The results show that, in general, process optimization of PCC operation will reduce the steam consumption of boiler. The impact of mechanical vapor compression (MVC) system on the operation cost of absorber is studied. The application of MVC can reduce the regeneration duty from 1.85 to 1.1 GJ/CO<sub>2</sub> if the flash pressure is 50 kPa. The impact of flash pressure of MVC system on the regeneration duty and electricity consumption is also studied. It is found that the regeneration duty decreases with increasing flash pressure, but the electricity consumption increases with flash pressure simultaneously. The optimal flash pressure is between 50–60 kPa.

© 2018 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>). Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the Applied Energy Symposium and Forum, Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS 2018.

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Energy Procedia 134 (2018) 102–110

Applied Energy Symposium and Forum, Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS 2018, 21–29 June 2018, Perth, Australia

Process and Integration Optimization of Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture System in a Coal Power Plant

Lianbo Liu<sup>a</sup>, Shiqiang Wang<sup>a</sup>, Hongwei Niu<sup>a</sup>, Shiqiang Gao<sup>b</sup>

<sup>a</sup> China Huaying Clean Coal Energy Research Institute, Changqing District, Beijing 102208  
<sup>b</sup> State Key Laboratory of Clean Coal-based Energy, Changqing District, Beijing 102208  
<sup>c</sup> Beijing Key Laboratory of CO<sub>2</sub> Capture and Treatment, Changqing District, Beijing 102208

**Abstract**

Post-combustion CO<sub>2</sub> capture (PCC) is currently believed to be one of the major strategies to reduce the CO<sub>2</sub> emissions in coal power plant. However, the variation of PCC system will cause substantial changes of operation cost due to the energy consumption for regeneration of the capture solvent. The optimal integration solution of large-scale PCC system with thermal power plant are studied in this work, based on a flexibility study of 1.1 million ton PCC system conducted for a thermal power plant in southeast China. A process plant would include only PCC system or energy by Thermoflex STAM PRO. Based on the global process simulation platform and heat transfer on the steam turbine performance are studied. The impact of large-scale PCC system on power plant performance under various loads (30%, 75%, 90%) is investigated, and the impact of PCC operation on heating steam being water is studied. An environmental assessment is also conducted by investigating the total PCC operation on the emissions of SO<sub>2</sub> and pollutants in SO<sub>2</sub>. The results show that, in general, process optimization of PCC operation will reduce the steam consumption of boiler. The impact of mechanical vapor compression (MVC) system on the operation cost of absorber is studied. The application of MVC can reduce the regeneration duty from 1.85 to 1.1 GJ/CO<sub>2</sub> if the flash pressure is 50 kPa. The impact of flash pressure of MVC system on the regeneration duty and electricity consumption is also studied. It is found that the regeneration duty decreases with increasing flash pressure, but the electricity consumption increases with flash pressure simultaneously. The optimal flash pressure is between 50–60 kPa.

Original Research Article

99

**CO<sub>2</sub> capture and mineralization using carbide slag doped fly ash**

Binling Li<sup>a</sup>, China Huaying Clean Energy Research Institute, Beijing, China  
Xiaodong Wang, China Huaying Clean Energy Research Institute, Beijing, China and State Key Laboratory of Clean Coal-based Energy, Beijing, China  
Shiqiang Gao, Beijing Key Laboratory of CO<sub>2</sub> Capture and Treatment, Beijing, China

**Abstract**

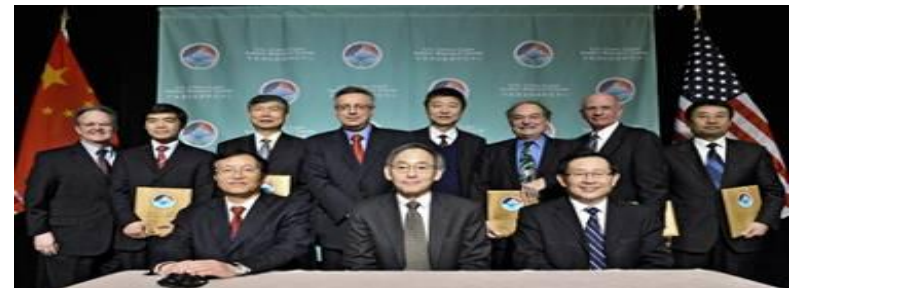
A novel direct gas-solid mineral carbonation process using carbide slag doped fly ash to capture and mineralize CO<sub>2</sub> from flue gas was developed to overcome the barriers of long reaction time and large reactor size from aqueous processes. A laboratory scale fixed bed reactor with a thermogravimetric analyzer and a pilot scale circulating activated flow bed (CEB) reactor system were constructed to investigate the mineralization method and reaction parameters. The carbonation efficiency (CE) (90) was improved four times by carbide slag doped fly ash in a sandy atmosphere. Thus, the active carbon hydroxide from carbide slag and fly ash can react with CO<sub>2</sub> in a fixed fly through an active reaction route. The key reaction parameters, such as temperature, steam addition and water quantity, were studied to promote CO<sub>2</sub> capture efficiency. As a result of the pilot scale experiment, carbonation efficiency achieved a maximum value of 50% with 10% steam addition in the fixed bed fly ash reactor system into CEGB at 500 °C. © 2019 Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons, Ltd.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> mineralization; fly ash; carbide slag; circulating activated flow bed reactor

**Introduction**

Nowadays, coal is the largest energy source for power generation and for its still growing. As reported by the International Energy Agency, coal will be the world's most primary energy demand in all the world's power plants. This main environmental problem are associated with the use of coal as an energy source. The first is the release of high amount of greenhouse gases and the second is the management of the solid residue. During coal combustion, a high amount of greenhouse gases, mainly CO<sub>2</sub>, is produced and released to the atmosphere, thereby contributing to global warming. Carbon capture, utilization and storage (CCU) captures and utilizes, with efficiency over 90%. However, the absorption is recognized as the most promising technology for the capture process at different plants. According to the capture process at different plants, there are generally three main methods to capture CO<sub>2</sub>: pre-combustion, post-combustion, and pre-oxidation. Many studies have demonstrated the technical advantages and disadvantages of the three pathways. It is believed that pre-combustion capture is applicable to gasification plants and may be combined with CO<sub>2</sub> capture and utilization. Post-combustion capture technique with high CO<sub>2</sub> capture efficiency along the nearest aqueous absorption, such as methanolamine (MEA) and Dimethylaminoethanol (DMEA) is in the next step of use for CO<sub>2</sub> absorption, with efficiency over 90%. However, the absorption

© 2019 Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons, Ltd. | [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) | <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.009>



# CO<sub>2</sub>捕集领域的国际合作International Cooperation on CCS

## COACH (Cooperation Action within CCS China-EU)

- Systematic study and design based on 250MW and 400MW IGCC;

## NZEC (China-EU Cooperation on Near Zero Emissions Coal)

- Case study program and pre-combustion CO<sub>2</sub> capture of 400MW power plant;

## ENEL

- CCS demonstration project experience sharing and exchange;
- 1M tons capture pre-feasibility study.

## CHNG-Duke Energy / AEP

- Signed Memorandum of Cooperation;
- Pre-feasibility study of 1 million tons-class full-flow CO<sub>2</sub> capture and storage project;

## CHNG-LLNL

- Signed Memorandum of Cooperation;
- Partnership in CCS and IGCC;
- Technical exchange and cooperation.



# CO<sub>2</sub>捕集领域的国际合作International Cooperation on CCS



## CERI-SaskPower

- 100t CO<sub>2</sub> capture technology assessment and feasibility study;
- Engineering stage technical review of BD3 unit large-scale demonstration project.

## CERI-CSIRO

- Cooperation in 100kg/hCO<sub>2</sub> capture mobile platform design and test;
- large-scale CCUS research and feasibility studies.

## CERI-EmberClear

- 2300t/d gasifier;
- CERI has completed the whole plant and gasification island PDP design.

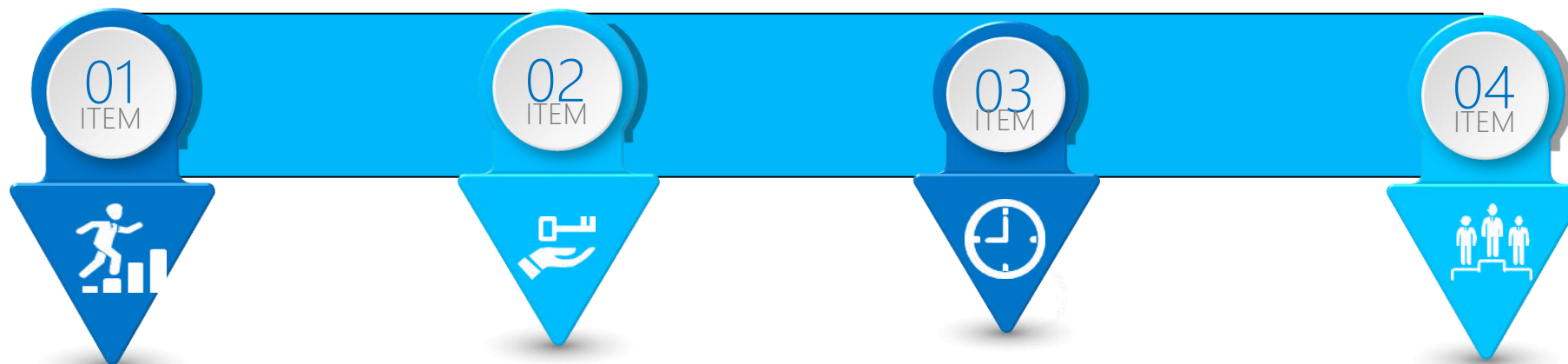
## CERI-PowerSpan

- Technical cooperation in the project assessment and project bidding.



# 澳大利亚Millmerran 电厂11万吨/年CO<sub>2</sub>捕集项目

Australia Millmerran Power Plant 110,000 tons/year CO<sub>2</sub> Capture Project



√: 2016-2017年

完成项目的概念设计和预  
可行性研究

Completed the concept  
design and pre-feasibility  
study of the project.

√: 2018-2020年

完成项目的可行性研究与前  
端工程设计

Completed the feasibility study  
and front-end engineering  
design (FEED) of the project.

→: 2021-2023 年

清能院将完成合同签订, 并  
完成项目的设备供货工作

CERI will complete the contract  
signing and equipment supply  
for the project.

→: 2023-2029 年

清能院将完成该项目的调试  
和性能测试工作

CERI will complete the  
commissioning and performance  
testing of the project.



中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司  
CHINA HUANENG CLEAN ENERGY RESEARCH INSTITUTE



MILLMERRAN  
POWER STATION

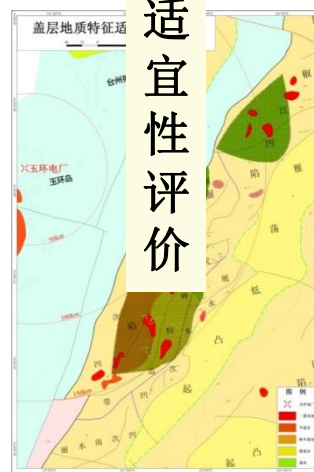
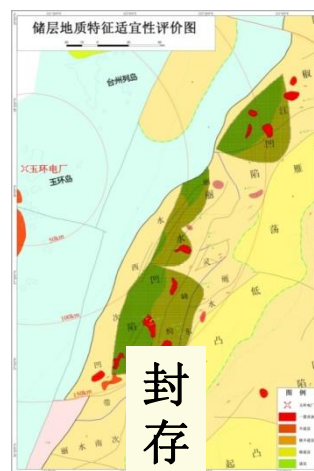
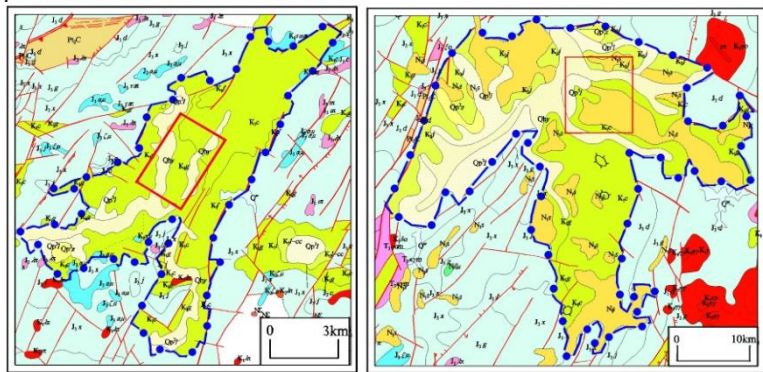
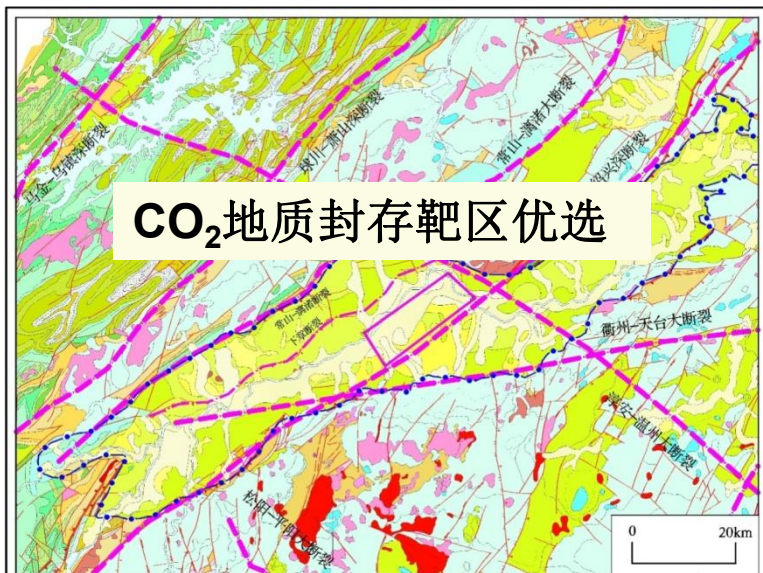




# 中韩CO<sub>2</sub>捕集技术合作

- ✓ 2017年1月12日，华能清能院与韩电研究院、韩国中部电力公司签署开展燃烧后CO<sub>2</sub>捕集技术联合研究的合作协议。 Jan-12, 2017, CERI signed joint-research agreement of CO<sub>2</sub> capture technology with KEPRI and KOMIPO..
- ✓ 主要合作内容 Main contents of research
  - CO<sub>2</sub>吸收溶剂开发 Development of absorbents
  - CO<sub>2</sub>捕集工艺升级 Analysis and upgrade of CO<sub>2</sub> capture system
  - CO<sub>2</sub>捕集中试测试 Operation of CO<sub>2</sub> capture pilot plant
  - 降解产物分析测试 Analysis of degradation substance
  - 亚硝酸胺脱除方法 method for removing nitrosamine

# 中欧煤炭利用近零排放合作 China-Europe Cooperation on CCS



地址：浙江玉环

规模：50万吨/年

进展情况：完成了CO<sub>2</sub>地质封存靶区优选，发展了CO<sub>2</sub>地质封存储盖层地质特征适宜性评价方法。



我国首个全流程大规模CCUS海上封存示范项目可研



05

在实施项目 On the way



## 组建任务型体系化CCUS技术创新联合体，CCUS原创技术CYD



2021年6月25日，召开CCUS技术创新联合体成立大会

CCUS 技术创新联合体协议

二〇二一年四月

本协议由以下各方在平等协商基础上，共同订立：

序号	联合体成员名称	住所地	法定代表人
1	中国华能集团有限公司	北京市朝阳区亮马桥路6号	舒印彪
2	中国科学院大连化学物理研究所	辽宁省大连市旅顺口区	高翔
3	中国科学院天津工业生物技术研究所	天津市滨海新区泰达大街5号	魏 伟
4	中国科学院南京地质古生物研究所	江苏省南京市栖霞区尧化门大街18号	俞福根
5	华能电气集团有限公司	华能南京综合技术控制新楼第一层1305室	俞福根
6	中国能源建设集团内蒙古电力集团	北京中轴线北大街路甲26号院	宋海良
7	清华大学	北京市海淀区双清路30号	邱 勇
8	浙江大学	浙江省杭州市西湖区浙大路388号	吴朝晖
9	中国科学院大学(北京)	北京市海淀区学院路19号	吕永林
10	中国地质大学(北京)	北京市海淀区学院路29号	余文宏
11	中国科学院大连物理化学研究所	辽宁省大连市沙河口区中山路457号	刘中民
12	中国科学院工程热物理研究所	北京中轴线北二环路西路11号	朱俊强
13	中国科学院上海高等研究院	上海市浦东新区高东科技园区汇江路100号	李建新
14	中国科学院武汉岩土力学研究所	湖北省武汉市武昌区东湖南路158号	薛 峰
15	中国科学院南京地质古生物研究所	江苏省南京市栖霞区尧化门大街18号	文永光
16	中国科学院工程热物理研究所	北京中轴线北二环路西路11号	曹洪强
17	中国科学院理化所	北京市海淀区和泰路4号	刘洪生

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

王强  
中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

孙启祥  
中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

樊启祥  
中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

中国科学院工程热物理研究所

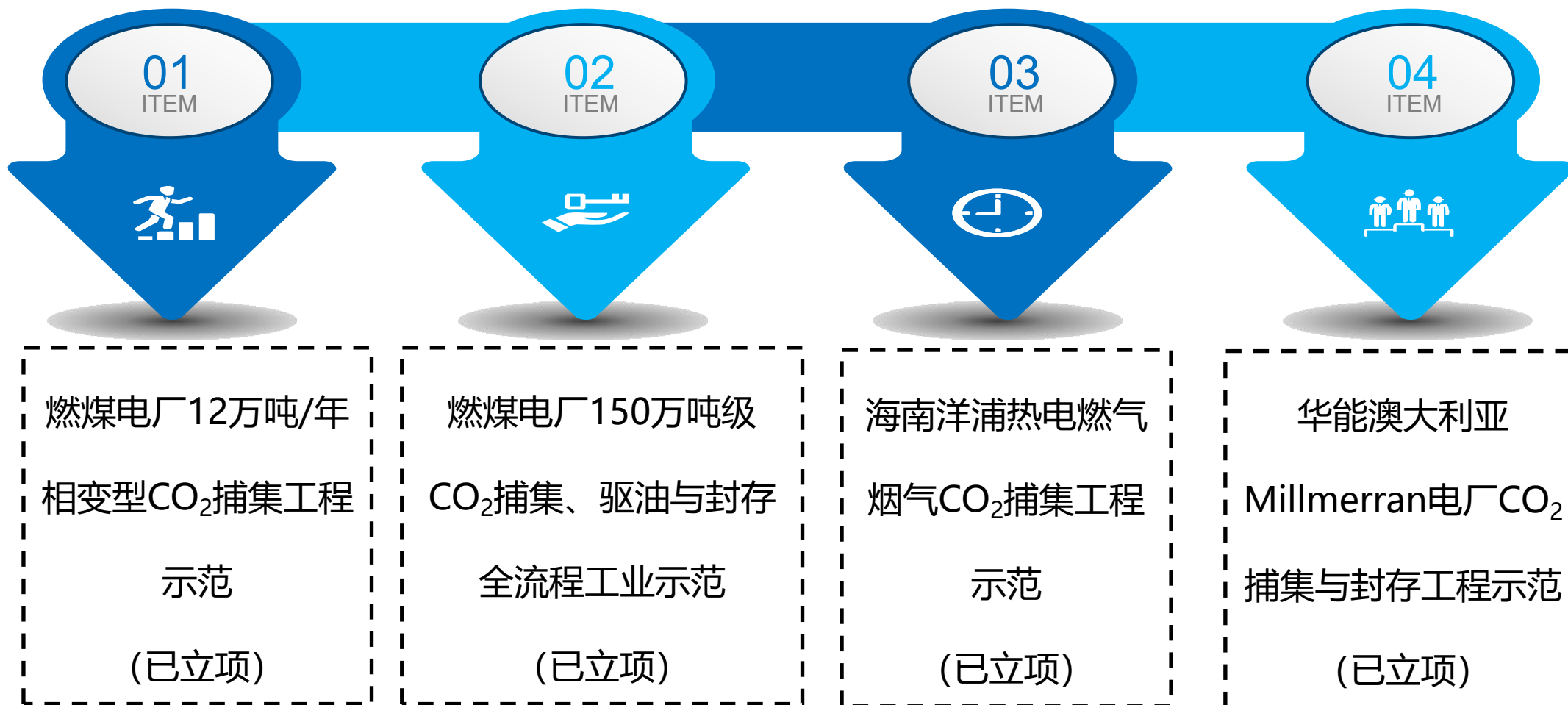
《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

中国科学院工程热物理研究所

《协议》已签署，理解本协议履行协议所规定的义务。

中国科学院工程热物理研究所

## ■ 华能CCUS科技专项



## ■ 01. 燃煤电厂12万吨/年相变型CO<sub>2</sub>捕集工业示范:



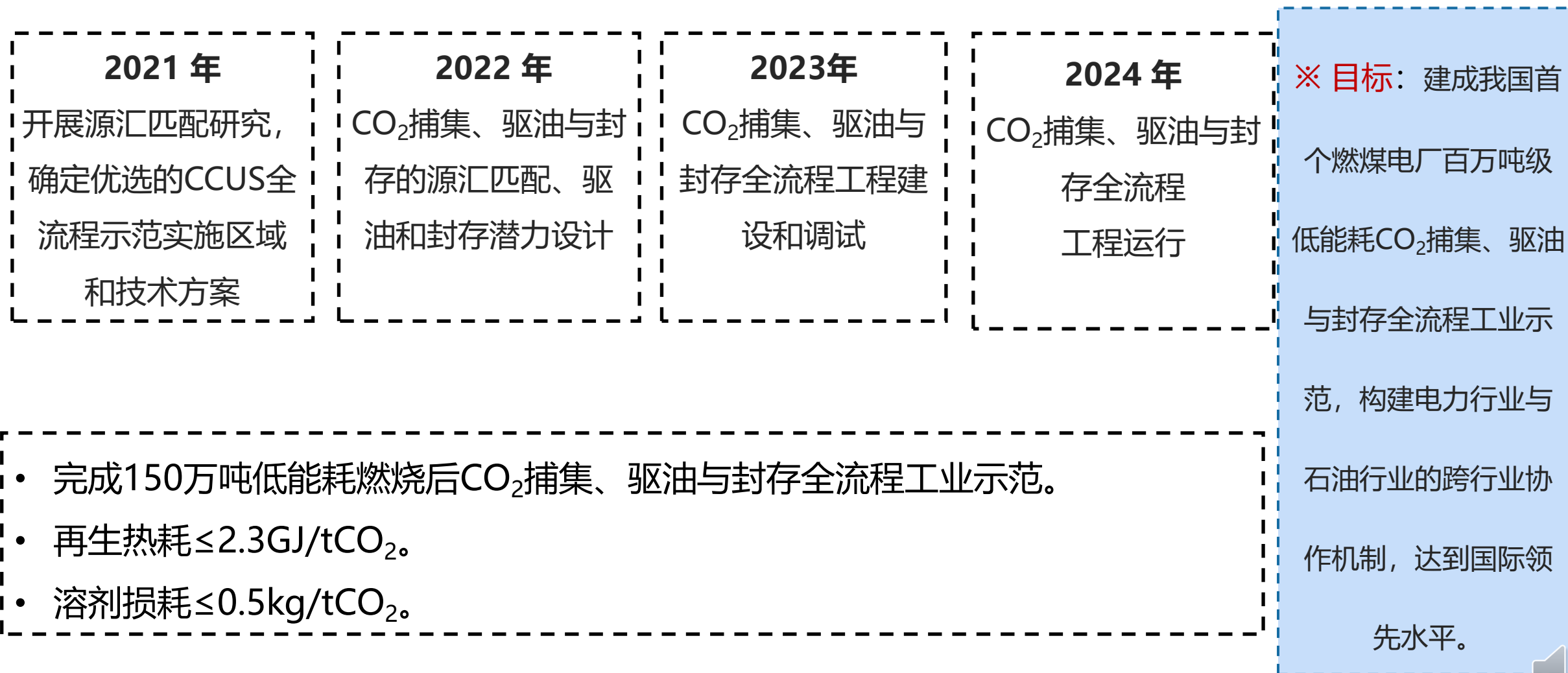
参加调试的单位	分工
华东分公司	组织协调指导
清能院	工艺、设计、调试
上海石洞口二厂	建设、调试、运行
华能（上海）检修公司	工程施工
山东中达联工程咨询公司	工程监理

截止 2021年12月10日，上海石洞口12万吨/年CO<sub>2</sub>捕集装置的相变改造工作基本完成：

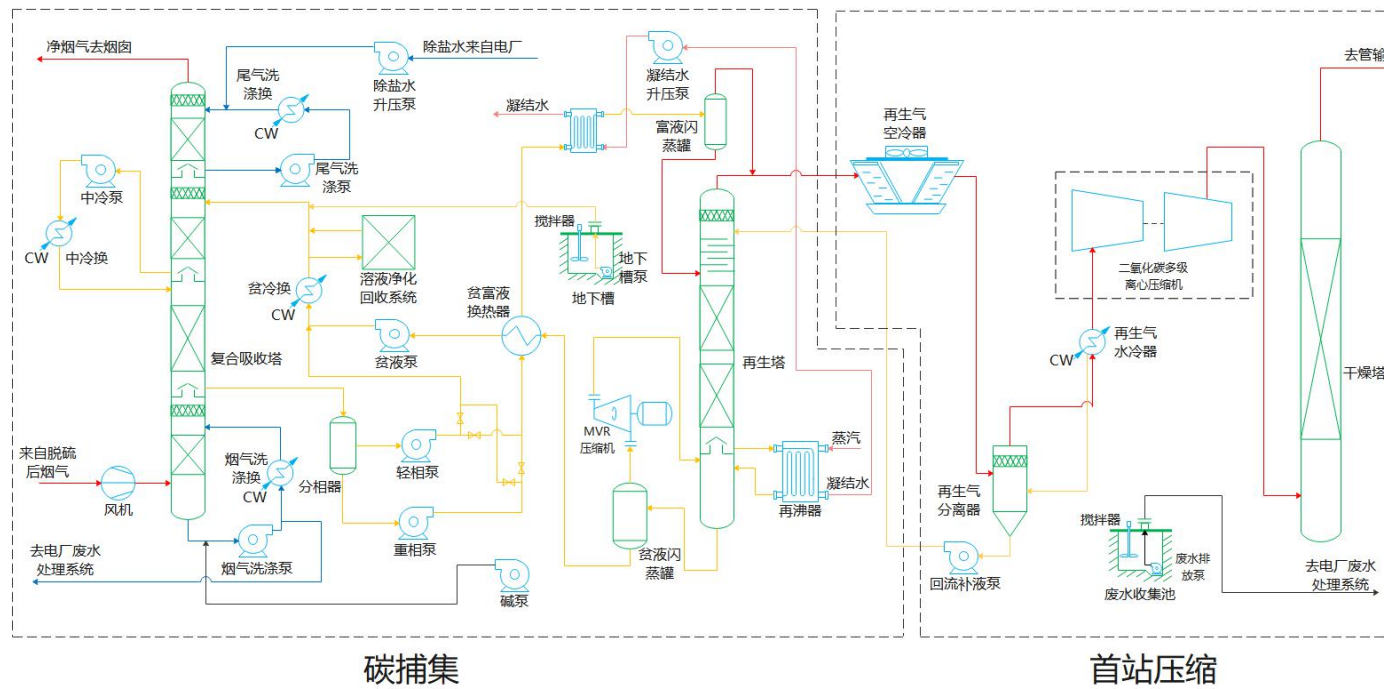
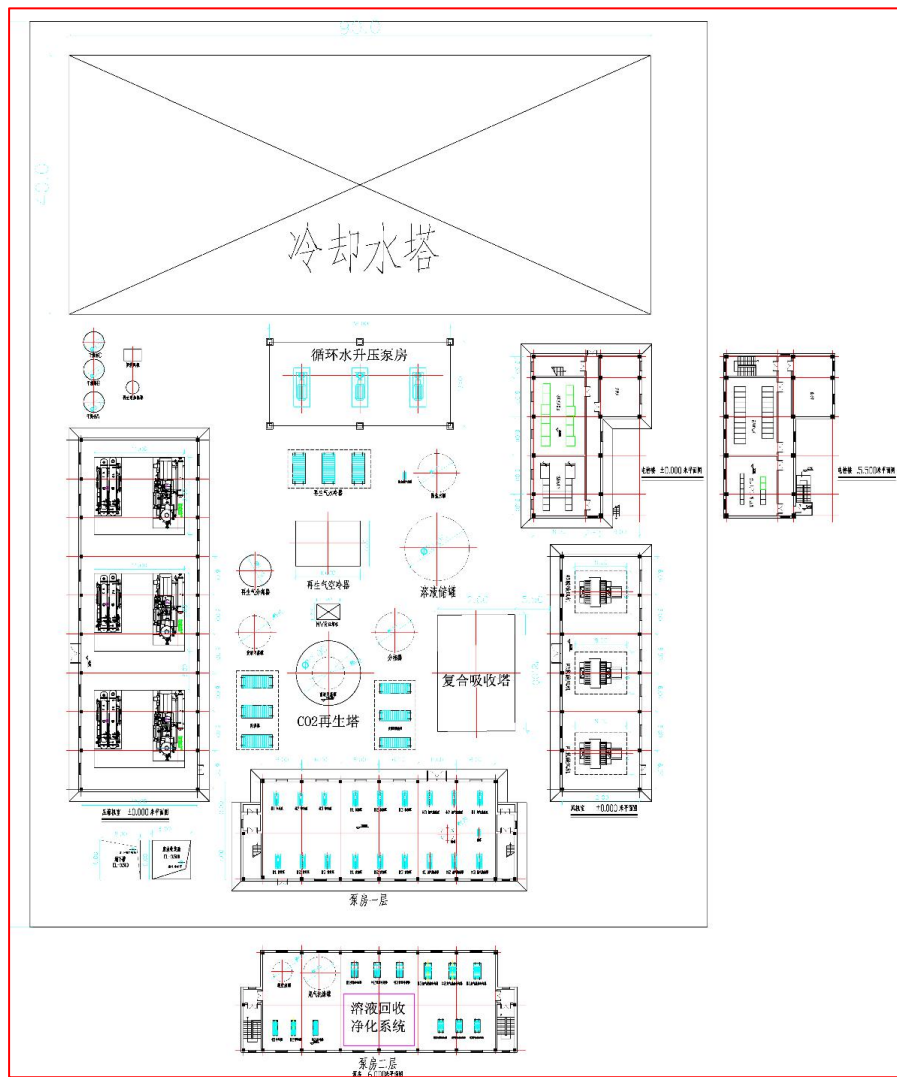
- ✓ 完成吸收系统改造
- ✓ 完成再沸器系统改造
- ✓ 完成换热器清洗工作
- ✓ 完成电气系统和热控系统改造

- ✓ 2021年12月11日，进入调试阶段，系统注水、冲洗，调试动设备、控制系统等，建立全系统循环；
- ✓ 2021年12月15日：完成系统清洗和联动调试；
- ✓ 2021年12月16日：系统灌注溶剂，带溶液调试；
- ✓ 2021年底：建成我国第一套12万吨/年相变型CO<sub>2</sub>捕集示范装置并投入运行。

## ■ 02. 燃煤电厂150万吨/年级低能耗CO<sub>2</sub>捕集、驱油与封存全流程工业示范：

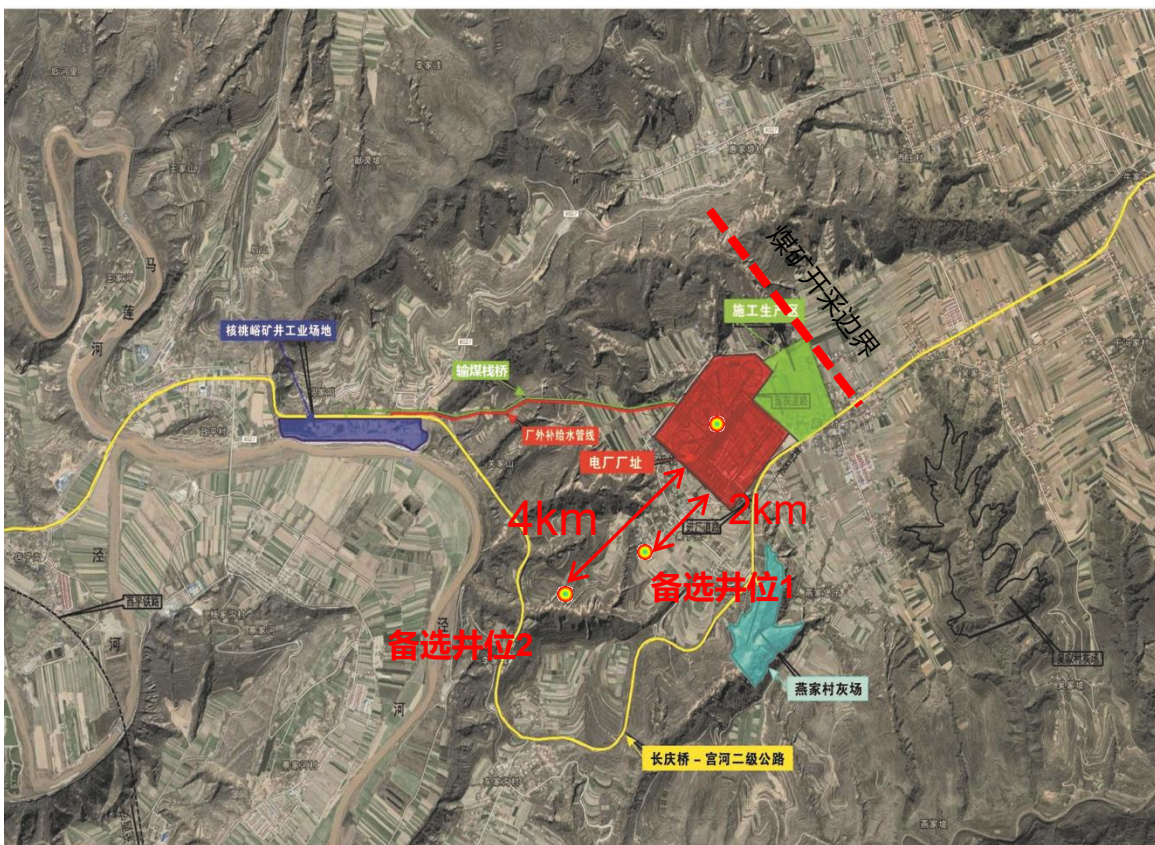


## 02. 燃煤电厂150万吨/年级低能耗CO<sub>2</sub>捕集、驱油与封存全流程工业示范:



- ✓ 论证确定了工艺流程优化设计方案：基于两相吸收溶剂，烟气洗涤与吸收塔结合，富液高位闪蒸，贫液闪蒸与MVR压缩；
- ✓ 论证确定压缩机电驱与中压缸排汽用于吸收溶剂再生方案；
- ✓ 论证确定采用自然通风间冷塔的循环冷却水提供方案。

# 华能CCUS行动方案



正宁电厂碳咸水层封存注入井位分布图



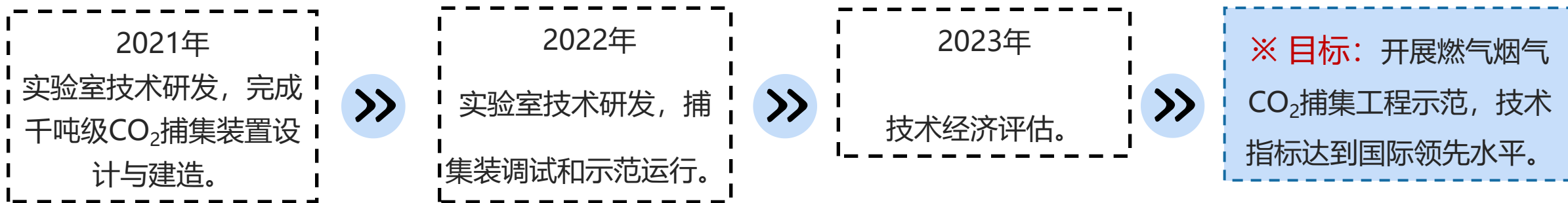
超临界管输规划

地层	底深/m
延长组	1521
纸坊组	2221
和尚沟组	2411
刘家沟组	2661
石干峰组	3278
上石盒子组	3401
下石盒子组	3413
山西组	3431
太原组	3452
平凉组	3828
马家沟组	4065
冶里-亮甲山组	4621
三山组	4768
张夏组	4939
徐庄组	5020

地层底深预测图

鄂尔多斯南部石干峰组和刘家沟组是适宜的CO<sub>2</sub>封存层位，储盖组合好，扇三角洲沉积，具有地层砂岩厚度大（100-200m），物性好，平面上分布稳定，埋深为2600-3200m

## ■ 03. 洋浦热电燃气烟气CO<sub>2</sub>捕集工程示范:



### 示范项目研究内容

- 燃气烟气CO<sub>2</sub>捕集吸收剂开发;
- 燃气烟气千吨级CO<sub>2</sub>捕集工艺和装置研制;
- 燃气烟气CO<sub>2</sub>捕集技术测试验证。

### 示范项目考核指标

- 完成燃气烟气千吨级CO<sub>2</sub>捕集工程示范;
- 再生热耗 $\leq 3.0\text{GJ/tCO}_2$ ;
- 溶剂损耗 $\leq 0.5\text{kg/tCO}_2$ 。



## ■ 04. 华能澳大利亚Millmerran电厂CO<sub>2</sub>捕集与封存工程示范：

### 示范项目研究内容

- 华能澳大利亚Millmerran电厂11万吨/年CO<sub>2</sub>捕集技术开发；
- 基于国际标准的工程设计合设备设计技术；
- CO<sub>2</sub>地质封存与监测技术。



### 示范项目考核指标

- 完成澳大利亚华能Millmerran电厂CO<sub>2</sub>捕集与封存全流程工程示范；
- 再生热耗 $\leq 2.8\text{GJ/tCO}_2$ ；
- 溶剂损耗 $\leq 0.5\text{kg/tCO}_2$ 。

2021年

完成捕集装置的详细设计，启动关键设备采购。



2022年

完成捕集装置的建造、国内的预组装和与调试。



2023年

完成捕集装置建造并投运，捕集的CO<sub>2</sub>地质注入封存。

※ **目标：**开展华能海外燃煤电厂CO<sub>2</sub>捕集与封存全流程示范，打造我国首个国际合作的捕集与封存全流程示范，达到国际领先水平。



## 05. 直接空气捕集CO<sub>2</sub>技术开发及工业示范:

### 示范项目研究内容

- 高性能DAC吸附/吸收材料开发;
- DAC过程强化技术研究;
- DAC技术工程示范验证;
- DAC工艺技术经济性分析。



### 示范项目考核指标

- 开发出适用于空气中直接捕集CO<sub>2</sub>的碳捕集技术;
- 建成我国第一套空气中直接捕集CO<sub>2</sub>工业示范装置;
- CO<sub>2</sub>再生热耗 $\leq 9.0\text{GJ/tCO}_2$ 。
- 对DAC与可再生能源系统耦合的技术经济性和碳减排潜力进行分析, 并形成相应的负排放方法和理论。

2022年

开发出适用于DAC技术的高性能吸收/吸附材料体系, 开展实验室规模技术验证



2023年

研发能够快速装载和卸载吸附剂的DAC相关设备, 掌握适用于DAC工艺的过程强化规律



2024年

建成我国第一套DAC工业示范装置, 对DAC吸收剂性能和工艺性能进行验证

※ **目标:** 实现空气中直接捕集CO<sub>2</sub>技术关键指标的突破, 建成我国第一套空气直接捕集CO<sub>2</sub>工业示范装置, 填补我国在DAC工程示范领域的空白。



- CCUS是化石能源大规模减排CO<sub>2</sub>的主要技术途径，是实现碳中和的托底技术。
- CO<sub>2</sub>捕集技术已进入第二代技术研发与验证，EOR等CO<sub>2</sub>地质利用技术在北美已进入商业化，CO<sub>2</sub>地质封存技术已有多个大型验证项目，降低能耗、降低成本仍然是CCUS技术研究的重点。
- CCUS在国际上已进入百万吨以上大规模全流程工程化阶段，我国已完成了多套十万吨CCUS的示范，正向百万吨级大规模全流程工程示范迈进。
- 中国华能在CCUS领域创造了多个第一，组建了体系化、任务型的技术创新联合体，开发新一代的低能耗、低成本关键技术，加快推进国家百万吨级CCUS全流程示范工程，为实现双碳目标、构建新型电力系统提供技术支撑。





谢 谢 关 注 ！

shs\_xu@chng.com.cn

