

# CARBON CAPTURE, UTILIZATION AND STORAGE (CCUS)

F. Barzagli, M. Peruzzini, A. Sanson - CNR  
P. Deiana - ENEA

## DESCRIZIONE TECNICA

CCS (Carbon Capture and Storage) è il termine generale per indicare un insieme di tecnologie e tecniche che consentono la riduzione delle emissioni in atmosfera di CO<sub>2</sub> provenienti da grandi sorgenti stazionarie, come ad esempio centrali elettriche alimentate a combustibili fossili, per mezzo della sua cattura e il successivo stoccaggio, solitamente in una formazione geologica sotterranea [1][2]. Questa tecnica permette l'uso di combustibili fossili con emissioni di CO<sub>2</sub> significativamente più basse. Per questo motivo CCS può essere visto come un'opzione di mitigazione importante nella transizione globale verso un'economia sostenibile low-carbon, sia nel settore della produzione di energia che nell'industria [3][4]. La "catena" CCS si compone di tre fasi: cattura, trasporto e stoccaggio. Ogni stadio del CCS è tecnicamente disponibile e utilizzato in differenti settori commerciali da anni [2][5]. Tuttavia l'applicazione congiunta di queste tecnologie a sorgenti di emissione di CO<sub>2</sub> è ancora troppo penalizzante in termini energetici ed economici, limitandone quindi l'applicazione su vasta scala [2]. Ad oggi diverse tecnologie, con diversi gradi di maturità, sono in competizione per essere la soluzione a più basso costo per ogni fase all'interno della catena CCS, così da rendere l'intero processo applicabile su vasta scala.

Le tecnologie CCS sono presenti nel Blue Map Scenario 2050 realizzato dall'Agenzia Internazionale per l'Energia (AIE), dove sono riportati i possibili contributi delle diverse strategie di mitigazione per contenere il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2°C in più rispetto alla temperatura media del periodo preindustriale (Figura 1) [6].

Come evidenziato dalla Technology Roadmap on CCS della AIE, CCS dovrebbe contribuire per il quasi 20% alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera, andando a catturarne fino a 10 Gt all'anno (stima per il 2050). Il numero di impianti dovrà quindi passare dai 15 odierni a circa 100 nel 2020 fino a quasi 3500 nel 2050 [7].

Recentemente, un'alternativa correlata a CCS, ovvero il Carbon Capture and Utilization (CCU), ha iniziato a attirare l'attenzione mondiale perché in grado di trasformare le emissioni di CO<sub>2</sub> di scarico in prodotti di valore. CCU combina la cattura di CO<sub>2</sub> col suo riutilizzo sia come fluido tecnologico che come reagente per la produzione di sostanze chimiche, plastiche o combustibili. Il vantaggio principale di questa tecnologia è quello di ottenere alla fine un prodotto di valore commerciale in grado di bilanciare i costi necessari per la cattura di CO<sub>2</sub> [8].

L'applicazione più rilevante per la produzione di combustibili e chemicals è certamente la sintesi dei combustibili direttamente utilizzabili, come la produzione di metano mediante riduzione della CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> prodotto dall'acqua mediante elettrolisi alimentata da fonte rinnovabile o da esuberanti energetici della rete. Altri combustibili significativi sono il metanolo e il dimetil-etero (DME). Sempre nell'ambito della produzione di combustibili gassosi riveste particolare interesse la produzione di Substitute Natural Gas (SNG) da CO e CO<sub>2</sub> contenuti nel syngas proveniente dalla gassificazione di carbone e/o biomasse, mediante un processo catalitico di idrogenazione degli stessi. La produzione di SNG da carbone presenta il vantaggio di ottenere un gas immediatamente collocabile sul mercato della distribuzione verso gli usi finali, senza richiedere ulteriori sezioni di raffinazione, con particolare ricaduta di un impiego massiccio di carboni di basso rango, di scarso valore commerciale.

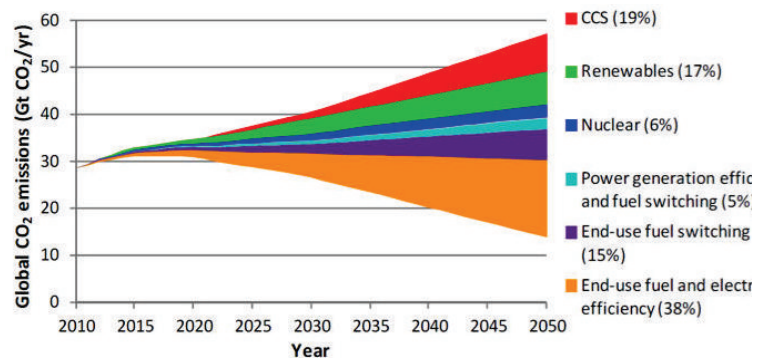


Figura 1 Contributo delle tecnologie alla riduzione di CO<sub>2</sub> nello scenario Blue Map

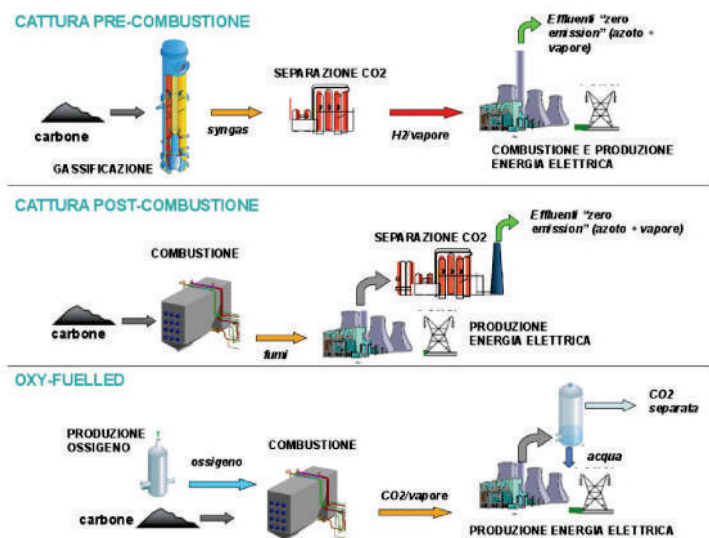


Figura 2 Tecnologie per la cattura di CO<sub>2</sub>

## STATO DI AVANZAMENTO

### Internazionale

A livello mondiale (dati relativi al 2015) gli impianti *large-scale* di cattura e stoccaggio di CO<sub>2</sub> sono [9]:

- 15 impianti (2 europei) in funzione, cattura complessiva 28 Mt/anno
- 7 (0 europei) che diventeranno operativi entro il 2017, cattura stimata complessiva 12 Mt/anno
- 11 progetti (4 europei) in via di definizione che diventeranno operativi presumibilmente entro il 2025, cattura stimata complessiva 15 Mt/anno.

A questi si devono aggiungere numerosi impianti pilota e dimostrativi sparsi nel mondo, per una cattura di CO<sub>2</sub> totale di 0,1 Mt/anno [9].

Vi sono inoltre 12 progetti in fase di studio preliminare, che porteranno il numero di impianti *large-scale* ad un totale di 45, per una capacità di cattura di circa 80 Mt/anno[9].

### Nazionale

Al momento non sono presenti in Italia impianti *large-scale* di cattura e stoccaggio di CO<sub>2</sub>.

Entro il 2015 sarebbe dovuto diventare operativo l'impianto di cattura e stoccaggio di Porto Tolle (Enel, Aker Clean Carbon). Il progetto, che sarebbe stato finanziato anche nell'ambito dell'EEPR (European Energy Programme for Recovery), riguardava la tecnologia di cattura mediante post-combustione verificata su una centrale a co-combustione da 250 MW, con cattura di CO<sub>2</sub> da 1 Mt/anno e stoccaggio off-shore. La realizzazione dell'impianto è stata interrotta nel 2013 su richiesta del promotore a causa di problemi legati alle autorizzazioni e alla mancanza di prospettive in merito al completamento della struttura finanziaria del progetto [10][11].

Anche il progetto CCS Sulcis che prevedeva la realizzazione e messa in opera di una centrale elettrica da 450 MW strettamente integrata con le miniere di carbone del Sulcis è al momento in stand by mentre proseguono le attività di caratterizzazione del sito di stoccaggio [12].

## TRL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL)

La tecnologia è già matura, e la presenza di impianti *large-scale* già funzionanti lo testimonia. TRL 8-9

Le esperienze maturate in questi primi impianti serviranno per migliorare e rendere energeticamente più sostenibili le future installazioni.

Ci sono molti studi e attività di ricerca mirate a sviluppare nuove e più efficienti tecniche di cattura di CO<sub>2</sub> con risultati preliminari promettenti, ma con la necessità di passare da una sperimentazione su impianti pilota. Ciò riguarda anche lo sviluppo di tecnologie CCU di cattura e utilizzo integrati di CO<sub>2</sub>.

## RELAZIONE CON LE FONTI ENERGETICHE

Essendo una tecnologia per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> da grandi sorgenti stazionarie, è strettamente correlata alle centrali elettriche alimentate a combustibile fossile, ma anche geotermoelettriche.

Un'altra opzione allo studio è l'applicazione della CCS agli impianti alimentati a biomassa che potrebbe portare alla riduzione netta del contenuto di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera (con addirittura emissioni negative), anche se tipicamente gli impianti a biomassa hanno taglie contenute (25-50 MW contro i 500-1000 MW degli impianti a carbone). Perciò il costo specifico della cattura della CO<sub>2</sub> per kW in questi impianti risulterebbe praticamente raddoppiato.

Altra possibile applicazione, che vanta oramai più di vent'anni di esperienza, è legata all'upgrading del gas naturale a bocca di pozzo, ove le concentrazioni di CO<sub>2</sub> vengono abbattute con la cattura operata sul raw gas e la CO<sub>2</sub> risultante viene utilizzata come cushion-gas per applicazioni di Enhanced Gas Recovery [22].

## VERSATILITÀ (CAPACITÀ DI IMPATTARE SU PIÙ SETTORI)

Oltre all'applicazione a centrali elettriche alimentate a combustibili fossili e centrali geotermoelettriche, la tecnologia CCS può essere applicata ad ogni sorgente di emissioni stazionaria, quindi ad esempio acciaierie, fonderie, cementifici e industrie per la produzione di sostanze chimiche e/o combustibili come SNG, metanolo e DME.

In maniera dipendente dalla taglia dell'impianto in esame, e quindi dalla quantità di CO<sub>2</sub> emesso e catturabile, è possibile abbinare processi di utilizzo di CO<sub>2</sub> per ottenere sostanze chimiche, plastiche, combustibili (CCU) o, se la posizione geografica lo consente, utilizzare CO<sub>2</sub> per favorire l'estrazione di petrolio (Enhanced Oil Recovery - EOR) o metano (Enhanced Coal-Bed Methane Recovery - ECBM) [8].

## POTENZIALE DI DIFFUSIONE IN AMBITO NAZIONALE

È una tecnologia applicabile alle centrali elettriche già esistenti (attraverso retrofitting) oppure integrabile in eventuali realizzazioni future di centrali capture ready. Considerando le risorse nazionali, è di particolare interesse per applicazioni a centrali elettriche a carbone, a gas naturale e centrali geotermoelettriche.

Particolare attenzione deve essere rivolta all'individuazione dei siti di stoccaggio, siano essi sotterranei o marini.

## IMPATTO E SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

L'impatto dipende fortemente da vari fattori: dalla fonte emissiva, dalla tecnica scelta (pre-combustione, post-combustione, oxyfuel), dalla tecnologia utilizzata per la cattura di CO<sub>2</sub>.

La stessa tecnologia, usata con combustibili differenti, provoca emissioni diverse e conseguentemente anche un impatto ambientale differente. In generale si può affermare che la tecnologia convenzionale, che prevede la cattura con soluzioni acquose di etanolamina (MEA), comporta il rilascio in atmosfera e in acqua di prodotti di degradazione termica e ossidativa di MEA, e quindi un incremento dell'impatto tossicologico sull'uomo e l'ambiente.

Altri impatti derivano dal tipo di combustibile usato, che in alcuni casi può rilasciare in aria e acqua metalli pesanti.

Il trasporto e lo stoccaggio comportano generalmente un impatto inferiore [17].

L'impatto ambientale delle tecnologie CCS è tuttora in fase di studio.

### Emissioni CO<sub>2</sub>/MWh

La produzione di energia da fonti fossili è la più importante fonte di emissione di CO<sub>2</sub>. Si evidenzia, a titolo di riferimento, che i moderni impianti a carbone con efficienza pari a 43-44% su base PCI emettono 740-760 kg CO<sub>2</sub>/MWh (fino a 6 MtCO<sub>2</sub> all'anno per 1000 MW), con una concentrazione in volume pari a 13-14% di CO<sub>2</sub> nei fumi. I cicli combinati a gas naturale con efficienza 55-56% su base PCI emettono 370-380 kg CO<sub>2</sub>/MWh, con una concentrazione in volume di 3-4% di CO<sub>2</sub> nei fumi.

### Emissioni CO<sub>2</sub>/MWh evitate

Le emissioni evitate dipendono dal tipo di impianto CCS che viene realizzato e dal tipo di sorgente stazionaria a cui viene applicato.

Quando tali tecnologie sono applicate a centrali elettriche a combustibile fossile, considerando che il target di cattura è del 90% di CO<sub>2</sub> emesso, si possono ipotizzare almeno [19]:

- 850 kgCO<sub>2</sub>/MWh evitati per centrali alimentate a carbone
- 600 kgCO<sub>2</sub>/MWh evitati per centrali alimentate a olio combustibile
- 360 kgCO<sub>2</sub>/MWh evitati per centrali alimentate a gas naturale.

## EFFICIENZA, TEMPO DI VITA E RENDIMENTO PREVISTI

L'utilizzo di tecnologie CCS può ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> dagli impianti di potenza del 90%, con una riduzione di efficienza energetica pari a circa 8-12 punti percentuali [18]. Secondo la IEA, la CCS applicata alla generazione elettrica e alla produzione industriale può contribuire per circa il 20% alla riduzione delle emissioni globali entro il 2050 [7]. Poiché gli impianti di generazione elettrica hanno una vita abbastanza lunga (30-50 anni), una rapida espansione delle tecnologie CCS implica nel breve periodo l'esecuzione di retrofitting su impianti esistenti, opzione in genere più costosa rispetto al costruire da zero un impianto equipaggiato con CCS. Una soluzione nel breve-medio termine potrebbe essere la costruzione di impianti "capture ready", ossia già predisposti per l'inserimento di sistemi di cattura [18].

## PAYBACK TECNOLOGICO, DI INVESTIMENTO E DI OPERATION AND MAINTENANCE PREVISTO

Data la varietà di tecnologie e possibilità applicative, i costi connessi alla realizzazione e al mantenimento di impianti CCS possono essere molto differenti fra loro e devono essere valutati per ogni singolo caso.

A titolo esemplificativo, si possono riportare i costi di realizzazione di due impianti CCS correlati alla produzione di energia, ovvero il Boundary Dam, operativo dal 2014, e il progetto italiano di Porto Tolle, non realizzato.

- Boundary Dam: il costo totale del progetto è stato di 1,3 miliardi di dollari. Di questi, 800 milioni utilizzati per realizzare il processo CCS, gli altri 500 milioni per il retrofit alla centrale già esistente. Sulla base di questa prima realizzazione, SaskPower

ritiene che sarà possibile ridurre i costi del 20-30% per la prossima unità CCS. Il Boundary Dam project ha ricevuto 240 milioni di dollari dal governo federale, più altri finanziamenti dal governo provinciale. Oltre che dall'elettricità generata, le entrate provengono dalla vendita di CO<sub>2</sub>, acido solforico, e fly ashes [11].

- Porto Tolle: il costo totale del progetto era stato stimato di 2,5 miliardi di euro. ENEL avrebbe dovuto ricevere un totale di circa 400 milioni di euro da parte dell'UE per la realizzazione del progetto. Il progetto Porto Tolle, che faceva parte dell'European CCS Demonstration Project Network, era stato inoltre premiato col finanziamento di 100 milioni di euro dalla comunità europea tramite l'European Energy Program for Recovery (EEPR) [10] [11].

Ad oggi sono in corso numerosi studi per stabilire quale incidenza economica possano avere questi tipi di impianti.

Raccogliendo oltre 100 contributi e con 2 anni di lavoro la European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, più nota come ZEP, ha pubblicato nel 2011 un rapporto estensivo per la valutazione dei costi della cattura, dello stoccaggio e del trasporto della CO<sub>2</sub> [20].

Nella sostanza il rapporto sostiene che la CCS potrà dal 2020 competere sui costi con le altre tecnologie di generazione elettrica a basse emissioni di carbonio. Questo sarà possibile basandosi sui dati ottenuti e validati dagli impianti ad oggi in opera e con l'introduzione di tecnologie di seconda e terza generazione [20].

Molti casi di studio sono riportati anche nel Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation realizzato dall'Agenzia Internazionale per l'Energia (AIE) [21].

## PRINCIPALI OSTACOLI ALLO SVILUPPO

Le maggiori barriere allo sviluppo e alla diffusione delle tecnologie CCS sono rappresentate principalmente dal costo dei progetti dimostrativi (dell'ordine delle centinaia di milioni di euro per impianto), dai costi di gestione, dalla necessità che lo stoccaggio sia permanente e sicuro [2][18]. La ricerca in tale settore, e i risultati derivanti dai primi impianti large scale, concorreranno per rendere queste tecnologie più accessibili e più facilmente implementabili a fonti di emissione di CO<sub>2</sub> stazionarie. Altri ostacoli sono relativi alla mancanza di politiche governative volte alla regolamentazione e all'incentivazione di tali sistemi. L'applicazione di permessi, licenze, diritti è necessaria per favorire gli investimenti privati e l'accettabilità da parte dell'opinione pubblica. I meccanismi di mitigazione delle emissioni come l'emission trading dovrebbero quindi includere l'opzione della CCS [18].

## POTENZIALITÀ DI SVILUPPO TECNOLOGICO IN AMBITO NAZIONALE E IMPATTO SUL PIL

Anche l'Italia partecipa da protagonista agli sforzi internazionali in atto per far sì che la CCS diventi una realtà che sia economicamente percorribile, preservando l'ambiente e la salute.

Le attività di ricerca svolte dai vari enti sopra citati sono all'avanguardia e in linea con quelle realizzate a livello internazionale. È necessario procedere in ambito dimostrativo tramite la realizzazione di piloti e veri e propri impianti *large scale*. Il sopra citato progetto del Sulcis può rappresentare un interessante occasione per sviluppare la tecnologia.

## POSSIBILI RICADUTE PER IL SISTEMA INDUSTRIALE, DEI TRASPORTI, RESIDENZIALE E NEL TERZIARIO

CCS riguarda la cattura di CO<sub>2</sub> da grandi sorgenti stazionarie.

È in grado di impattare il sistema industriale andando a catturare CO<sub>2</sub> da industrie che emettono in grandi quantità e in maniera continuativa. L'applicazione della tecnologia CCS ad un determinato impianto ne comporta la diminuzione del 90% delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera.

## MAGGIORI ATTORI ITALIANI COINVOLTI

### Utilizzo della tecnologia

- Settore energetico: cattura di CO<sub>2</sub> correlata a produzione di energia elettrica da combustibili fossili o fluidi geotermici
  - Settore industriale: cattura di CO<sub>2</sub> correlata a attività industriale di produzione di materie plastiche, composti chimici, acciaierie, cementifici.
- Gli stessi settori sono coinvolti anche nella possibile applicazione di tecnologie CCU.

### Sviluppo della tecnologia

- ENEL
- ENI
- ENEA
- CNR
- Sotacarbo
- Polo Tecnologico del Sulcis
- ITEA (ossicombustione).

## ECCELLENZE IN TERRITORIO NAZIONALE

Oltre alle varie attività di ricerca svolte dagli Enti di Ricerca e dalle Università, una iniziativa significativa di tipo sperimentale-dimostrativo è stata intrapresa da ENEL ed ENI.

ENEL ed ENI hanno sottoscritto nel 2008 un Accordo strategico di collaborazione per lo sviluppo di tecnologie per la cattura, il trasporto e il sequestro geologico di CO<sub>2</sub> e per accelerare lo sviluppo della CCS. Gli obiettivi della collaborazione sono [15]:

- la costruzione del primo progetto pilota integrato in Italia, in grado di unire il progetto pilota di ENEL per la cattura post-combustione di CO<sub>2</sub> a Brindisi e il progetto pilota ENI di iniezione in un giacimento esausto di gas a Cortemaggiore e Besenzone (Piacenza)
- la realizzazione di uno studio dettagliato di fattibilità per la costruzione di un impianto dimostrativo integrato su larga scala relativo alla centrale di Porto Tolle
- la valutazione congiunta del potenziale di stoccaggio della CO<sub>2</sub> in Italia.

ENEA ha firmato nel 2014 un'intesa con il Ministero dello Sviluppo Economico, la Regione Autonoma della Sardegna e Sotacarbo (SpA controllata con quote paritetiche del 50% da ENEA e Regione Sardegna) per la costituzione di un centro di eccellenza sull'energia pulita in Sardegna (Polo Tecnologico del Sulcis). L'intesa prevede lo stanziamento di 30 milioni di euro per un programma decennale di attività di ricerca nell'ambito del polo tecnologico del Sulcis, dove operano Sotacarbo ed ENEA. Gli interventi previsti riguardano quattro linee di attività: tecnologie per l'uso sostenibile di combustibili fossili (di cui l'area del Sulcis è storicamente zona di estrazione), efficienza energetica nell'edilizia, sviluppo delle fonti rinnovabili con sistemi di accumulo e valorizzazione energetica dei rifiuti e degli scarti della chimica verde [16].

ENEA è coinvolta nello sviluppo su scala significativa di un processo di cattura multi-ciclica della CO<sub>2</sub> a emissioni zero, basato sulla de-carbonizzazione del combustibile fossile (solido o gassoso), con cattura della CO<sub>2</sub>, produzione di idrogeno e sua combustione in una turbina a gas per la produzione di energia elettrica, tramite l'esercizio della Piattaforma multipurpose ZECOMIX (Zero Emission of CarbOn with MIXed technologies)[23].

ENEA effettua ricerche sulle tecnologie CCU, in particolare, selezione dei catalizzatori dei sorbenti, individuazione delle condizioni di massima resa di conversione ecc., anche attraverso l'esercizio di piccoli impianti dimostrativi (Impianto FENICE e GESSYCA) volti allo studio dell'integrazione delle tecnologie di cattura della CO<sub>2</sub> con fonti energetiche rinnovabili [23].

## BEST PRACTICES

A livello internazionale l'esempio più significativo dell'applicazione delle tecnologie CCS è rappresentato da "Integrated Carbon Capture and Storage Project at SaskPower's Boundary Dam Power Station", ovvero il primo (e finora unico) impianto di cattura e stoccaggio di CO<sub>2</sub> operativo su scala commerciale collegato direttamente ad una centrale elettrica, quella a carbone di Estevan, Saskatchewan, Canada, al Boundary Dam Power Station. Operativo dall'ottobre 2014 [9][13]. Impianto da 139 MW gross. (110 MW net) cattura di circa 1 MtCO<sub>2</sub>/anno. Tecnologia retrofit post-combustione [11].

Nel 2015 sono diventati operativi due nuovi progetti: Quest in Canada, cattura fino a 1 milione di tonnellate di CO<sub>2</sub>/anno dalla produzione di idrogeno al Scotford Oil Sand Upgrader per iniettarlo in un deposito acquifero salino a 2 km; mentre in Arabia del Sud, il progetto Uthmaniyah è pianificato che dovrebbe catturare circa 800000 t/anno dall'impianto di recupero del gas naturale di Hawiyah da utilizzarsi per l'EOR (Enhanced Oil Recovery) dell'impianto di Ghawar.

Esistono poi alcuni esempi di impianti che utilizzano tecnologie CCS su scala commerciale connessi a attività industriali. Fra questi, da segnalare lo Sleipner project operativo nel Mare del Nord, al largo delle coste occidentali della Norvegia dal 1996 [22]. L'impianto, di proprietà di Statoil, consente di purificare il gas naturale, estratto dal giacimento di Sleipner, dal CO<sub>2</sub> presente (fino al 9%) con tecnologia basata su ammine, in grado di catturare fino a 0,9 Mt all'anno. CO<sub>2</sub> viene poi iniettato in un giacimento esausto. È stato il primo impianto CCS commerciale al mondo, operativo dal 1996 [11][14].

## BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] J. Jared Ciferno, J. Litynski, L. Brickett, J. Murphy, R. Munson, C. Zaremsky, J. Marano, J. Strock. DOE/NETL Advanced Carbon Dioxide Capture R&D Program: Technology Update. May 2008
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2005
- [3] International Energy Agency. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Fifth Assessment Report (AR5). 2014
- [5] International Energy Agency (IEA). Energy Technology Perspectives 2010. Paris, France. 2010
- [6] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook Presentation. London, UK. 2013
- [7] International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap. Carbon capture and storage. OECD/IEA, Paris. 2009
- [8] M.E. Boot-Handford, J.C. Abanades, E.J. Anthony, M.J. Blunt, S. Brandani, N. Mac Dowell, J.R. Fernandez, M.C. Ferrari, R. Gross, J.P. Hallett, R.S. Haszeldine, P. Heptonstall, A. Lyngfelt, Z. Makuch, E. Mangano, R.T.J. Porter, M. Pourkashanian, G.T. Rochelle, N. Shah, J.G. Yao, P.S. Fennell. Carbon capture and storage update. *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 130–189
- [9] The global Status of CCS | 2015. Global CCS Institute
- [10] EEPR CO<sub>2</sub> capture and storage project. European Commission. [http://ec.europa.eu/energy/eepr/projects/files/carbon-capture-and-storage/ccs-eepr-summary\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/eepr/projects/files/carbon-capture-and-storage/ccs-eepr-summary_en.pdf)
- [11] The Carbon Capture and Sequestration Technologies Program at MIT. <https://sequestration.mit.edu/index.html>
- [12] Energy Research Knowledge Centre. European Commission. <https://setis.ec.europa.eu/energy-research/project/integrated-ccs-sulcis-project>
- [13] 'IEAGHG, "Integrated Carbon Capture and Storage Project at SaskPower's Boundary Dam Power Station", 2015/06, August 2015'
- [14] website <http://www.statoil.com/en/OurOperations/ExplorationProd/ncs/sleipner/Pages/default.aspx>
- [15] Osservatorio CCS. <http://www.osservatorioccs.org/initalia.htm>
- [16] ENEA <http://www.enea.it/it/comunicare-la-ricerca/news/piano-sulcis-per-un-centro-d2019eccellenza-sull2019energia-pulita-in-sardegna-enea-firma-intesa-con-ministero-dello-sviluppo-economico-regione-sardegna-e-sotacarbo>
- [17] P. Zapp, A. Schreiber, J. Marx, M.Haines, J.F. Hake, J. Gale. Overall environmental impacts of CCS technologies—A life cycle approach. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Volume 8, May 2012, Pages 12–21
- [18] Analisi e modellazione di impianti di produzione elettrica a carbone equipaggiati con sistemi CCS. Report Ricerca di Sistema Elettrico. Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA. 2010.
- [19] Valori delle emissioni di CO<sub>2</sub> per MWh presi da: International Energy Agency (IEA). CO<sub>2</sub> Emissions From Fuel Combustion: Beyond 2020 Documentation (2012 Edition)
- [20] The Costs of CO<sub>2</sub> Capture, Transport and Storage. Post-demonstration CCS in the EU. European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. 2011
- [21] Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation. International Energy Agency (IEA). 2011
- [22] Sleipner, 20 years of successful storage operations and key learning for future projects, CSLF Workshop in association with the Carbon Capture and Storage Association , Wednesday, 29 June 2016
- [23] Energia, efficienza, innovazione, Una selezione delle eccellenze ENEA, <http://www.enea.it/it/comunicare-la-ricerca/documenti/lenea-e-le-sue-attivita/enea-eccellenze.pdf>