F207 世界の CCS の現状と三菱重工業の CO₂ 回収技術Current Status of CCS in the World and MHI's CO₂ Recovery Technology

○ 岸本 真也 (三菱重工)
正 川崎 晋平 (三菱重工)

飯嶋 正樹 (三菱重工)

Shinya KISHIMOTO, Masaki IJIMA and Shinpei KAWASAKI,
Environmental & Chemical Plant Division, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,
3-3-1, Minatomirai, Nishiku, Yokohama, Kanagawa

CO₂ Capture and Sequestration (CCS) is an essential global warming solution as long as we continue to use fossil fuels. This report includes the features and latest experiences of the CO₂ recovery technologies of Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI). We outline our approaches to the mitigation of global warming through the development of CO₂ recovery technology for coal-fired power plants, which are large sources of CO₂ emissions. Our proposed direction in the development of future technologies is also highlighted.

Key Words: CO₂ capture, CCS(Carbon dioxide Capture and Sequestration), CO₂ recovery technology, Global warming

1. はじめに

石油や石炭等の化石燃料を使い続ける限り、CO₂ の発生は免れる事は出来ず、温暖化は徐々に進行している。1990 年以降には CO₂ 削減技術の研究開発が活発となり、省エネルギー技術の導入や自然エネルギーの有効利用、植林による CO₂ 吸収など多くの技術が検討されてきた。しかしながら、大気中の CO₂ は増加し続けており、低炭素社会への転換を求められようとしているが、産業革命以降化石燃料に依存してきた人類にとってこの転換は容易ではない。

このような状況から 2000 年頃より地球温暖化対策としての CO₂ 回収・貯留（以下 CCS(Carbon dioxide Capture and Sequestration)）への取組みが加速している。

現在世界中には年間 10 万トン以上の CO₂ を排出する大型 CO₂ 固定排出源が 7,500 ヶ所以上存在し、大型 CO₂ 固定排出源の数としては北米が 37% と最大で、次にアジア（主に中国と日本及びインド）が 24%、欧州が 14% を占めている。また CO₂ 排出量としてはアジアが 5.6 GtCO₂/年で 41% を占めており、次に北米の 2.69 GtCO₂/年で 20%、欧州で 1.75 GtCO₂/年で 13% を占めている。CO₂ 固定排出源からの CO₂ 年間排出量とその発生源毎の内訳を表 1 に示す。

固定排出源からの CO₂ 排出量の内、78% を発電部門（石炭、ガス、石油他）が占めている。発電部門からの CO₂ 排出量の内、76% を石炭火力発電所が占めており、また発電部門以外の産業も含めた全世界 CO₂ 固定排出源からの排出量の内、約 6 割が石炭火力発電所から排出されているということになる。石炭は埋蔵量が豊富な事、石油や天然ガスと比べ安価な事などから今後は更に使用量が増加し、よって CO₂ 排出量に占める石炭の割合も増加するものと予想される。このことから石炭火力発電所からの CO₂ 排出量を下げることが温暖化対策として最も重要であり、三菱重工業は石炭火力発電所からの CO₂ 回収技術の実用化に向けての取組みを進めている。

2. 世界の CCS の現状

2008 年に開催された洞爺湖サミットでは「CCS を早期に実用化する為に世界中で 2009 年中に 20 ヶ所の大規模 CCS 実証に着手する」との宣言が行われた。以下に CCS 技術開発が活発な欧州及び北米の状況について紹介する。

(1) 欧州

・英国政府は石炭火力からの大規模 CO₂ 回収貯留プロジェクトにおいて 2 コンソーシアムを採用し、基本計画をスタートした。2014 年には CO₂ の貯留開始を計画している。

・EU では 10-12 ヶ所の大規模 CO₂ 回収・貯留を計画し、電力各社はこれらプロジェクトの参画に名乗りを挙げている。また、EU 経済復興プランにおいても、ドイツ、オランダ、イギリス、イタリア、ポーランド、スペイン 6 カ国の CCS プロジェクトが動き出している。2020 年以降の新設石炭火力発電所には CO₂ 回収貯留の設備が義務付けられる模様である。

(2) 北米

・米国 DOE は 7 地域のパートナーシップにより CO₂ 貯留場所の調査と小規模圧入実験を開始している。

・カナダ アルバータ州政府は 4-5 箇所の CO₂ 回収大型実証プロジェクト実施を宣言している。

なお、CO₂ を地中貯留する技術は新しい技術ではなく、ノルウェーでは 1996 年から天然ガスから回収した CO₂ による地中貯留が実施されている。但し、フルスケールでの石炭火力発電所からの CO₂ 回収貯留は未だ実施されておらず、温暖化対策として CO₂ 回収・貯留を行う場合、貯留する CO₂ 量が莫大となり、現在、膨大に存在する帯水層への貯留が検討されている。

3. 三菱重工業の CO₂ 回収技術

3.1 商用機実績

当社商用機の実績を表 2 に示す。

当社は 1999 年に排ガスからの CO₂ 回収の初号機を納入して以降、現在までに天然ガス焚き用に現状 7 基の商用機が稼働中である。さらにパキスタン、ベトナムにおいて現在 2 基が建設中で 2010 年または 2011 年にスタートアップを予定している。

マレーシア向け商用機は 1999 年に当社技術として最初に納めたもので回収した CO₂ は尿素的増産に利用されている。尿素的の製造工程は、アンモニア製造と尿素製造からなるが、アンモニア製造の一次改質炉から放出される排ガス中に含まれる CO₂ を分離・回収し、アンモニアと合成して尿素を生産する。また 1999 年から 10 年間順調に運転を続けており、その信頼性が確認されている。また、国内向け商用機は一般用途として用いられている。この商用機は天然ガス焚き

表1 世界の大型CO₂固定排出源⁽¹⁾

プロセス	施設数	排出量(Mt CO ₂ /年)
化石燃料		
発電部門 (石炭, ガス, 石油他)	4,942	10,539
セメント製造	1,175	932
石油精製	638	798
鉄鋼	269	646
石油化学	470	379
石油およびガス処理	N/A	50
その他の排出源	90	33
バイオマス		
バイオエタノール及びバイオエネルギー	303	91
合計	7,887	13,466

出典; IPCC 2005 Special Report - Carbon Dioxide Capture and Storage

表2 当社商用機実績

場所	マレーシア	日本	インド	インド	UAE	バーレーン
会社名	Petronas社	化学会社	IFFCO社	NFCL社	FERTIL社	GPIC社
運転開始	1999	2005	2006	2009	2009	2009
回収量	160 T/D	283 T/D	450 T/D × 2	450 T/D	400 T/D	450 T/D
排ガス源	天然ガス焼き スチームリフォーマ排ガス	天然ガス/重油焼き ボイラ排ガス	天然ガス焼き スチームリフォーマ排ガス	天然ガス焼き スチームリフォーマ排ガス	天然ガス焼き スチームリフォーマ排ガス	天然ガス焼き スチームリフォーマ排ガス
製品	尿素	一般利用	尿素	尿素	尿素	尿素・メタノール

一部重油焼きボイラ排ガスから CO₂ を回収している。インドに納めた 3 基は全て尿素増産用途の商用機である。これらのプラントは CO₂ 回収量 450 T/D であり、排ガスからの CO₂ 回収プラントとして世界最大級の CO₂ 回収力を有している。当社ではこの CO₂ 回収量 450 T/D 規模を尿素製造用に標準ユニットとして 4 基納入している。さらに、アブダビ向けの CO₂ 回収量 400 T/D 商用機では省エネ再生システムを商用機として初めて採用している。このように 1999 年以降、当社の CO₂ 回収装置は世界の化学用 CO₂ 回収市場において圧倒的シェアを有しており、納入場所はマレーシア、日本、インド、UAE、バーレーンと世界各国に至る。

一方、当社は地球温暖化問題の解決に向け、石炭火力を対象とした CO₂ 回収の商用化を目指している。現在、米国の大手電力会社サザンカンパニーと共同で 500 T/D 規模の石炭焼き排ガスからの CO₂ 回収貯留実証機の建設を開始している。当社実績 (表 2) に示すように、天然ガス焼きからの CO₂ 回収技術はすでに商用化されているが、排ガス中に不純物の多い石炭焼きを対象に、500T/D 規模で実証試験を行うのは世界初である。場所はアラバマ州にある Barry 発電所 (図 1) である。

プロジェクトは排出ガスに含まれる CO₂ を分離・回収・圧縮する実証プラントを建設し、回収した CO₂ を帯水層へ貯留するもので、2011 年から実証運転と技術・性能の検証を行っていく予定。このうち、当社は基本計画からエンジ

ニアリング、さらに実証運転時の技術サポートと技術・性能の検証までを担当する。CO₂ の帯水層への貯留は米エネルギー省 (DOE) の温室効果ガス対策プロジェクト SECARB (South East Regional Carbon Sequestration Partnership Phase III program) が担当し、CO₂ 回収から貯留までの一貫実証プロジェクトである。

3.2 KM CDR Process[®]の特徴

当社は 1990 年から関西電力 (株) と共同で発電所などの排ガス中の CO₂ 回収技術の研究開発を開始し、主なテーマとして、まず CO₂ 回収エネルギーの削減に取り組んできた。この研究開発の成果として、省エネルギー吸収液 (KS-ITM 吸収液) の実用化、省エネ再生システムの実用化及び発電設備と CO₂ 回収設備とのスチームシステムの最適なインテグレーションを確立している。

化学吸収法による CO₂ 回収技術のポイントは吸収液であり、吸収液の性能によりプロセスの効率が大きく左右される。アミン吸収液による CO₂ 吸収反応は次のように表すことができる。

CO₂ との反応において MEA 吸収液はモル比がアミン:CO₂

図1 Barry発電所所在地

= 2 : 1 で反応する反応 (1) であるが、KS-1TM 吸収液はモル比がアミン : CO₂ = 1 : 1 で反応する反応 (2) が主体である。KS-1TM 吸収液は従来のモノエタノールアミン (MEA) 吸収液に比べ少ない吸収液モル量で CO₂ を回収することができる。また安定な副生成物カーバメート (R-NH-COO⁻) が生成しないため、KS-1TM 吸収液は MEA 吸収液に比べ再生エネルギーを抑えることができる。さらに、KS-1TM 吸収液は常温の吸収域で従来の MEA 吸収液よりアミンモル CO₂ ローディングが優れており、かつ、120℃前後の再生域においてアミンモル CO₂ ローディングが少ない。MEA 吸収液に比べ、腐食が少なく、防食剤を必要としないという特徴を有する。

図2に燃焼排ガスからの CO₂ 回収プロセスフローを示す。CO₂ を含む排ガスは冷却塔にて冷却された後、吸収塔の下部から塔内に導かれ、上部から落下してくる吸収液と接触し CO₂ を吸収されながら塔内を上昇する。そして CO₂ の約 90% を除かれた排ガスは塔頂から大気放出される。一方、CO₂ を吸収した吸収液は吸収塔の下部から再生塔上部へ送られ、蒸気により加熱されることで CO₂ が放出される。そして放出された CO₂ は 99.9vol.% (dry) 以上という高純度で回収される。再生された吸収液は再び吸収塔へ返送され循環再利用される。このプロセスでは再生済み吸収液の廃熱を吸収液の再生に利用する独自の省エネルギー再生システムが採用されている。

技術開発促進事業

3.3 石炭 CO₂ 回収試験実績

石炭焚き火力発電所から排出される CO₂ を回収する場合、排ガス中に含まれる不純物が吸収液や回収設備全体に与える影響について検証する必要がある。そこで当社は温暖化対策を目的とした石炭焚きボイラ排ガスからの CO₂ 回収技術開発の一環として、(財)地球環境産業技術研究機構 (RITE) の補助金と J-POWER (電源開発 (株)) のご協力を得て、J-POWER 松島火力発電所内に 10 T/D 規模実証試験設備を建設した。この実証試験設備を用いて、実際の微粉炭焚きボイラ排ガスを用いた試験を 2006~2007 年に 4000 時間の試験を実施し、吸収液や回収設備に与える影響について実証し、データを蓄積してきた。

石炭火力からの CO₂ 回収商用機の規模は 1 ユニット当たり

CO₂ 回収量数千 T/D であり、石炭焚きボイラ排ガス中に含まれる不純物に対する経験をさらに大きな規模で検証する必要がある。そこで、500 T/D 規模の石炭焚き排ガスから CO₂ を回収し、同時に回収した CO₂ を地中貯留するプロジェクトを米国サザンカンパニー及び米国 EPRI の協力を得て実施する事となった。

J-POWER 松島石炭火力の排ガスは比較的クリーンな排ガス性状であったため、平成 20 年度には欧米を対象とした不純物の多い石炭からの排ガス性状への対応、つまり高煤塵、高 SO_x 条件での実証試験を行なった。煤塵濃度と SO_x 濃度の上昇に伴う影響の確認を行うために、これまでの脱硫後排ガスに加え、脱硫前排ガスを最大 25% 引き込むダクトのバイパスを行った。さらに、松島発電所で電気集塵機 (EP) により採取された EP 灰を吸収液に予め添加して、その影響を把握する試験を行った。試験の結果では、高 SO_x 濃度でも SO_x は前処理で除かれ、高煤塵濃度条件により吸収液中に煤塵蓄積しても、プラント性能に低下は認められず、1000 時間の連続安定運転をトラブルなく達成した。

平成 20 年度までの試験により計 5842 時間連続で運転した結果、性能低下は見られず、当 CO₂ 回収技術が石炭焚き排ガスからの CO₂ 回収に十分適応する技術である事を実証し、更に石炭焚き排ガスから CO₂ を効率的に回収する為の多くの知見を当試験より得た。これをもって CO₂ 回収量 500 T/D のサザンカンパニー社との CO₂ 回収・貯留の一貫プロジェクトへ繋げていく。

3.4 大型化

これまでの納入実績はその使用目的から CO₂ 回収量は最大でも数百 T/D 程度であったが、商用規模の石炭焚き火力発電所から排出される CO₂ は 500 MW 火力発電所で約 1 万 T/D 規模となる為、実用化には回収設備全体の大型化に向けた技術開発が不可欠となる。そこで、当社では大型化する上で一つの重要な技術となる吸収液の吸収塔内での分散性能について当社所有の大型試験装置を用いて実証試験を行い、大型吸収液分散器のデータを取得している。一方、当社で取り扱っている 200 件以上の納入実績の有る燃焼排ガスから硫酸化物を取り除く排煙脱硫装置で培われた大型化に関する知見を活用する事で 3,000 T/D 規模 (発電所

図2 排ガスからのCO₂回収プロセスフロー

規模として 15 万 kW 程度) を 1 系列で処理する CO₂ 回収装置の設計を可能とした。

現在は 6,000 T/D 規模を 1 系列で処理する CO₂ 回収装置の設計に向けて技術開発を目指している。

3.5 省エネ技術

石炭焚き火力発電所から排出される CO₂ を回収・貯留する設備を設置した場合、その運転に必要なエネルギーがその発電所の発電エネルギーに占める割合は依然高く、商用化に至っては更なる省エネ技術の開発が不可欠である。そこで当社では新たな吸収液と省エネシステムの改良の両面から更なる省エネ技術を開発し続けている。

1) 新吸収液の開発状況

KS-1TM 吸収液より CO₂ の回収エネルギーの少ない吸収液の開発を継続して行っており、平成 21 年度においても当パイロット試験装置を用いた吸収液の検証試験を実施した。当社が開発している最新の吸収液は吸収スピードが従来の KS-1TM 吸収液の 1.4 倍あり、新吸収液の再生エネルギー評価試験結果では、CO₂ 回収に必要なエネルギーが従来の KS-1TM 吸収液と比較し、約 10% 低減出来た。

2) 運転条件の最適化

当社では CO₂ 回収設備システムフロー改良の観点からも省エネ CO₂ 回収プロセスの開発を進めている。その中の一つとして吸収液と CO₂ の吸収反応が発熱反応で有ることに着目し、その特性を利用して吸収塔内での運転条件を最適化する事で単位体積当りの吸収液中により多くの CO₂ を吸収させる技術を開発しており、これにより CO₂ 回収に必要なエネルギーの大幅な削減が可能となる事が確認されている。

以上、当社は新吸収液の開発や運転条件の最適化により、CO₂ 回収に必要なエネルギーを商業機で約 600 kcal/kg-CO₂ まで低減することを目指している。

4. 今後の取組み

石炭焚き火力発電所向け CO₂ 回収設備の商用化に向け当社は J-POWER 松島火力発電所での 10 T/D 規模実証機で

得た知見を基に現在は米国の大手電力会社サザンカンパニーと共同で 500 T/D 規模の石炭焚き火力発電所排ガスからの CO₂ 回収・貯留実証機の建設を進めている。この規模での実証試験は世界初であり、得られる知見を基に 3,000 T/D 規模の大型 CO₂ 回収・貯留の実証に移行する予定。

加えて、CO₂ 回収設備で必要とされる大量の運転エネルギー(蒸気/電力)を削減する為に発電所全体のエネルギーフローを対象とした効率的なエネルギーシステムを検討し、発電と CO₂ 回収全系における省エネルギー化を計り、商用機への適用を計る予定。

5. まとめ

化石燃料を使い続ける限り、CO₂ 回収・貯留(CCS)は不可欠であり、中でも大量の CO₂ 排出源である石炭焚き火力発電所から排出される CO₂ を回収・貯留する事は地球温暖化対策として有効であるが、石炭焚き排ガスに含まれる不純物の影響評価や回収設備の大型化等、これから実証を必要とする事が多い。当社は実機規模の試験装置を使用しての吸収液分散試験及び石炭火力からの実排ガスを用いた 10 T/D 規模による実証試験、そしてこの度の米国での石炭焚き排ガスによる 500 T/D 規模の中規模実証試験は今後の商用機対応への技術の確立を計るものであり、2015 年を目標に石炭焚き排ガス CO₂ 回収・貯留技術の商用化を目指す。

参考文献

- (1) IPCC 2005 Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage