特集：石炭火力発電とCCS技術

タイムスリップしてモンゴルの石炭火力発電所から
シニア・エンジニア のひとりごと

安元　昭寛*1
YASUMOTO Akihiro

昨年始め，未だお屠蘇気分のさめやらぬ東京から，マイナス38度Cのチンギスハーン国際空港に降りたって，初めて発電所でご挨拶をしたとき「私の名字，「安元：Ясүмото」は，漢字で，Энх тайван Чингисхааны улс（エンフタイファン　チンギスハーヌイ　ウルス：平和なチンギスハーンの國）という意味です。よろしく！」 集まっていた180人ほどのエンジニアが一瞬どよめいたことを覚えている。あれから１年半，街路樹の白樺の木々が淡い緑の葉っぱをつけて，さわやかに揺れている初夏を迎えた今，齢71にして異国の地で，この國のエネルギー供給に，いくらかでもお役に立っていることの喜びを，静かにかみしめている。

九州大学で熱力学を学び，大学院で超臨界圧ボイラーの熱伝達技術を研究し，その後，日立製作所にはいり，蒸気タービンの設計を皮切りに，海外の火力発電所の契約，建設を経験した。齢70歳になったとき，「これまでに培った電力技術を海外で役立てたい」と，JICAのシニア海外ボランテイアとして ウランバートル（以下，UBと称す）に赴き，現在，第４火力発電所の技術・経営をサポートする業務についている。

蒸気タービン と若きエンジニア

原稿受付　2010年７月21日

＊1　JICA シニア海外ボランテイア　ウランバートル・第４火力発電所

この発電所は，ボイラー８台，タービン６台，発電能力 580MW，モンゴル全電力の70％とUB市の暖房用温水の65％を供給する，この国最大の熱併給発電所である。1983年にソ連の技術で運転を始めて，91年にソ連が崩壊した時，彼らがいきなり帰国してしまって，ロシア製の設備をメンテナンスすることができなくなり，ボイラー，タービンとも数台しか運転できない最悪の状態であったという。「途方に暮れていたとき，友人・日本国とJICAが手を差し伸べてくれた。メンテナンスのための工具と機材を無償で提供してくれた。」と，発電所所長（社長）は当時を忍んで熱く語る。

その後，日本からの技術援助は５回におよび，ボイラーの補機と計測・制御システムなどが更新されていった。その結果，運転状態はめきめき良くなり，働く人々にもヤル気と団結の意識がよみがえった。熱力学の基本から，熱効率の改善方法など，実際の機械を前にして指導すると，賢く，すぐに理解する若きエンジニアも，順調に育っている。UBの街では，第４発電所は「日本プロジェクト」と呼ばれていて，そこで働いている日本人であることを告げると，「停電がなくなってありがとう！ モンゴルのために，ありがとう！」と言ってくれる。４年前，中越沖地震の直後，職場1,300人の休日出勤手当（130万円）をそっくり，義援金として送って戴いただいたことからも，この地での感謝の気持ちが，よく伺える。

しかし，実際に経営の中枢に足を踏み入れてみると，まだまだ，深刻な問題を抱えている。かっての社会主義国家の通念と国家の財政事情から，電気と温水の料金は政策的に低く抑えられ，その生産原価に比べて極端に低く，石炭鉱山からの値上げ要求もあり，経営は採算ぎりぎりの，「自転車操業」の状態にある。ここには，減価償却の考えはない。詳しくは，参考文献(1)を参照いただきたい。この年の初めに JICA始まって以来，モンゴル国・バトボルト首相との懇談の機会があり，シニア・ボランテイア代表として，この窮状を藁をも掴む思いで訴えた。さらに，「このような過酷な国家環境の中で，エネルギーを必死に守っている人々の努力と忍耐は，尊敬に値する。」と締め，首相閣下にも，日本大使閣下にも，共感を持って受け入れていただいた。

発電所では，毎日予想のつかないことが起こる。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

バトボルト首相と筆者

80MW蒸気タービンの出力を，100MWに増やす改造を，中国の哈爾浜タービンと共に済ませたが，最終給水温度がボイラーの設計温度を超えている！　どうしよう，とか，４月末にUB市西方で大地震が起こるという噂があった。エネルギー省から，大地震の防災計画を造るよう，きつい達示が来た。モンゴル人は経験がないから，経験ある日本人の助けを借りて，大至急作成してくれ！・・・・など。これらのSOSには，熱システムの理論と現場での経験，さらに，資機材が満足にない現実に立って，満足度60％でもよいから，なんらかの方法を編み出すことが求められる。力学とエネルギー分野の設備に通じ，工学上の（一応の）バランスを広く身につけていると思われる機械技術者だからこそ，何とかこなせることと思う。

さて，この第４火力発電所の事情を紹介しよう。モンゴル国の虎の子発電所であることは，前に述べたが，何しろ，築26年の老旧発電所であり，石炭火力の揺籃時代を彷彿とさせる存在である。ちなみに，発電所諸元を，我が国における最新鋭火力の場合と比較してみる。（次ページ）

発電所の設備に関しては，我が国の発電所が電力供給のみであるのに対し，UB市に暖房用の温水と近隣の工場に蒸気を供給している熱併給発電所であることが大きな違いである。一方，築26年の旧型設備であることも関連して，発電容量が１ユニット，100MWクラスであることは，電力ネットワークの規模からしてうなずけるが，発電容量の580MWに対して，常時は，50-60 ％負荷の発電しかできていないことは，我が国の負荷率と稼働率を考えるとき，異常としか言えない現状である。これは，全機器設備を輸入に頼っており，メンテナンスにも十分な経費がかけられないことから，定期検査の時発見されるダメージを，十分に修理・保守ができないまま，運転に入れる事情から，ボイラー，タービン設備それぞれ，毎週３－４回の事故停止を余儀なくされ，そのための予備機の待機も必要である。２年に一度の定検の時，ダメージは徹底的に修理して，新品同様の状態で運転再開し，その後の二年間は一度の事故停止もなく，フルロードで運転できる我が国の発電設備とは，雲泥の差を感じ，この國の置かれている経済状態と現場の環境の厳しさには，改めて唖然とする次第である。

また，燃料の石炭には，UB近郊の炭田から，毎日おびただしい量の列車で運ばれてくる褐炭が当てられており，南ゴビや内モンゴルに近い炭田から出る最高級の瀝青炭は，中国やロシアに輸出するために使われ，ここでの売値がどうかは不明だが，付加価値をつけぬまま売られてゆく「原料輸出」が，この国の財政にあまり貢献していないことを想像するに難くないことを物語っている。

UB市の大気汚染は，自動車の排気ガスと，市内のゲル地区から出る石炭ストーブの不燃ガスのため，特に冬場のスモッグと異臭が激しいが，発電所の煙突と，灰処理設備にも，注目が集まっている。冷却等の水蒸気が，一般市民から取りざたされることは，論外として，今後，NOx，SOx 除去設備の追加が必要となろう。

かっての社会主義国の例にもれず，従業員の数が桁違いに多いことも特徴の一つである。学校や託児所，本格的な病院こそないが，通勤輸送のための「第4火力・バス」や発電所が独立会社であるための「本社機能」の人が必要だとは言え，我が国の20倍近い人を抱えていることは異様である。

自由主義・資本主義の社会になったと人は言うが，人々の働きぶりと管理・運営の方法にも，旧態依然としており，改善する余地がたくさんある。社会主義の頃から，厳しく責任を追及したり，競争をさせたりする風習はなく，ノルマ（計画）を拡大せず，無事に乗り切ることが大切であると考えられている。予算と実算の報告データは，きわめてビューテイフルである。将来の電力需要に応じて近い将来のビジョン（たとえば，第５発電所の計画と入札・・・）をどうするか，そのために何を目標に運営するかなど，このあたりは，どうも，政府が決めるという。そのためか，幹部会議に出席して様

夏は来ぬ，第４火力

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

ウランバートル　第４火力発電所・諸元（参考：我が国の新鋭火力の一例）

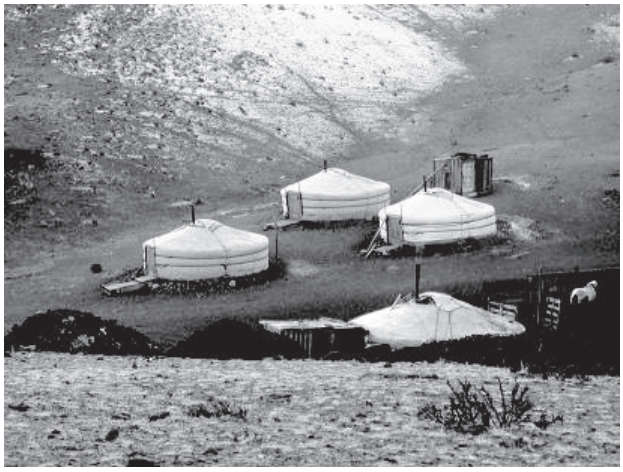
No.	発 電 所	ДЦС－4	我が国の新鋭火力(例)	備考
1	発電所/会社	第4火力発電(株)	○○電力(株)	
2	所在地	ﾓﾝｺﾞﾙ・ｳﾗﾝﾊﾞｰﾄﾙ	日　　本	
3	敷地面積	74.2ha	約141ha	
4	発電設備	No.1 ﾕﾆｯﾄ 80MW （運転開始，1983） No.2-6 ﾕﾆｯﾄ 100MW （運開，1984-2009）	No.1 ﾕﾆｯﾄ 1,000MW （運転開始：2003－12）	
5	総発電容量 （2010年現在：実稼動）	580 MW （350MW）	1，000 MW （1,000MW）	
6	温水供給	8,000T/h （1.4MPa-140°C）	－	
7	事業概要	・電力供給 ・暖房用温水供給 ・工場用蒸気供給 ・（含）本社機能	・電力供給 ・（不含）本社機能	
8	ボイラー	ロシア製・ドラムボイラー　8基	日本製・貫流ボイラー　1基	
9	石炭・仕様	褐　炭 ﾊﾞｶﾞﾉｰﾙ炭：3,360kcal/kg ｼﾍﾞｰｵﾎﾞｰ炭：3,000kcal/kg	瀝青炭 ｵｰｽﾄﾗﾘｱ炭：6,000kcal/kg	
10	石炭使用量	app. 2,600 kT/Y　（1-8基）	：　app. 2,300 kT/Y （No.1 unit）	
11	蒸気条件	主蒸気圧力　140 ata	主蒸気圧力 ：　248 ata	
12		主蒸気温度：555°C （非　再熱）	主蒸気温度　：　600°C, 再熱温度　：　600°C	
13	発電所熱効率	38% （低位発熱量、発電端、温水供給、工場蒸気供給 ﾍﾞｰｽ）	45% （低位発熱量、発電端ﾍﾞｰｽ）	
14	煙　突	高さ　：250m	高さ　：230m	
15	排煙・処理設備	・電気集塵器	・NOx 除去装置 ・電気集塵器 ・SOx 除去装置	
16	従業員数	1412 人 （内）ｴﾝｼﾞﾆｱ　221人 運転員　60人	75　人 （内）ｴﾝｼﾞﾆｱ　40人 運転員　20人	

子を伺っていると，たとえば，緊急事故停止の原因を追求したり，今後の対策と再発防止について，議論がなされることは殆んどない。なぜ起きたか，責任は誰にあるか，とかは，関心がないような風情である。また，よくよく聞きただしてみても，職制の業務と責任範囲とを明記した文書がない。そうであっても，「運転部」「保修部」「調達部」「経理部」「企画部」とが業務を微妙に分け合って動いている。

さて，テーマに「モンゴルからの通信」としながら，この地のことをあんまり書けなかったことのお詫びに!

また，大自然の中でサバイバル・ライフを送ることも，技術者には求められることをお伝えしたい。

09年厳冬の２月始め，世にも不思議な体験をした。UBから離れること，西の草原（夏には）へ走って80kmほど，「アルタンポラク」とか言う何もない山麓で，牧民と一緒にゲル生活を３日間ほど，実習した。冬枯れの



ゲルのある風景

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

モンゴルの馬

山合いに，ひっそりとたたずむ，６個ほどのゲル（Гэр），真っ白な綿帽子のゲルは，見た目にもロマンチックであった。日が暮れる頃，傍らの丘に登って眺めていると，てっぺんの明かり取りからつきだした煙突から，夕餉の白い煙が立ち上っている。すてきな光景である。パラボラ・アンテナと，太陽光パネルまである。

直径が，８mほどのゲルの内部は，ちっぽけな仏壇を中心に，黒白テレビ，衛星放送受信機，蓄電池，写真を貼った掲示板，夜具の収納庫，食器戸棚，水瓶，ちっちゃな洗面台，これらがきれいな原色の模様で覆われていて，おっと，それよりおおきいのが，２等寝台車ほどのベッド２つ。炊事の時，ジャガイモの皮むきや，まな板も，この上で使い，普段は客が来るとソファー代わりになる。中央にはゲル全体を支える支柱を真ん中に，小さなちゃぶ台と，牛や馬の糞が燃料の大きめのかまど（ストーブ），燃料の貯蔵篭，といった具合に，思ったより広く感じる。この中に，夜は，客人３人と，若夫婦，５歳の坊や，計６人がベッドとカーペットを敷いた床に，ごろ寝するが，それほど窮屈ではない。

燃料の，牛の糞などは，そこいらに無限に散らばっていて，カロリーは相当なモノである。この国のエネルギー資源は，無限である。くだんのかまどに放り込むと，ゴーゴーと音を立てて燃える。マイナス何十度の寒気に，こちんこちん。蹴とばすと遠くへ飛んでゆく。つまり，カラカラに乾いていて，すぐ火がつく状態ゆえ，臭いの心配などない，全くの無臭である。

それより，一番戸惑ったのが，トイレがどこにも見あたらないことである。噂には聞いていたが，それとて，体内に保ったまま，３日間の辛抱など，出来るはずはない。あまりにも生々しい記述になるので，添付した「JICAへの公式報告書」（下記・添付）に譲って，お伝えしたい。

参考文献

⑴　電気新聞（2009-10-13～15）モンゴルの発電所事情

【添付】現地生活訓練報告書

20－3　SV　経営管理改善
安元　昭寛

１．現　地　：アルタンボラク
２．日　時　：2009-2-4～6
３．受け入れ家族：Мягмарсүх 一家
４．家族構成：

ご主人：	Мягмарсүх	25歳
奥　様：	Отгонтуяа	23歳
坊　や：	Цэрэнлунцаг	５歳
奥様の母：	Төмөрээж	75歳
〃　妹：	Саижуд	19歳
主人の父：	Лувсан	50歳
〃　母：	Шинэхүү	49歳

５．以上を，我が家族の写真を見せて，モンゴル語で，聞き出した。これで，身元調査完了とともに，両方の顔がほころび始めた。とにかく，ご主人とそれを支える奥様の連携作業は抜群。坊やも元気はつらつで，ともに，モンゴル馬に乗り，乗せられて，若いモンゴルの家族を目の当たりにした体験であった。

若い家族

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

サンバイ　ノー！

６．特記事項：これが，マイナス30度のゲル生活の現実！

トイレには戸惑った。どこを探しても，存在しない！

小さい方は，ご幼少の頃からよく経験済みなるも，大きい方は，近年とんと経験がない。思い切って，山かげの岩のあたりで，済ませた。こっそり出て来たはずだったが，番犬に気付かれた。付いてきて，どうしても離れない。仕方なく，自然のまにまに・・・，後始末もよろしくお願いして，ゲルに戻った。

２度目は，すっかり余裕もできて，満天の星空の下，気分爽快に済ませた。久しぶりに見る満月と北斗七星，オリオン座の三つ星，宵の明星もチカチカと輝いていた。マイナス30度の長い時間も，短く感じた。

おしりの寒さも，бодсоноос хүйтэнбиш байсан!

（思ったより，寒くなかった！）

一生で，このような経験は，もうあまり，あるまい！

了

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

特集：石炭火力発電とCCS技術

J-POWERの石炭火力の現状と展望

村山　　均*1
MURAYAMA Hitoshi

キーワード：高効率化，USC（Ultra Super Critical），バイオマス燃料，石炭ガス化複合発電（IGCC），石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC），A−USC（Advanced Ultra Super Critical），CO_2回収・貯留技術

1．はじめに

国内では，1970年代初めは石油火力に多くを依存していたが，1970年代に経験した２度の石油危機を契機に，脱石油によるエネルギーの安定供給を国のエネルギー政策の基本としてきた。具体的には，石油代替電源として，原子力，石炭火力，天然ガス（LNG）の開発を推進してきた。

その中で石炭火力については，電源開発（J-POWER）の松島火力発電所が海外からの輸入炭を燃料とした最初の大規模石炭火力として1981年に運転を開始し，これ以降，多くの輸入炭による石炭火力の開発が進められてきている。エネルギー自給率が小さい日本において，今後とも石炭は必要不可欠なエネルギー資源であり，石炭火力からのCO_2排出を削減するための取り組みが必要である。

本稿では，J-POWERの石炭火力のCO_2排出量削減に対する現在までの取り組みとCCS等の新技術への取り組みについて述べる。

2．現在までの取り組み

2.1　発電効率，蒸気条件の推移

1960年代後半の国内炭火力（旧磯子，竹原，高砂）から現在の最新鋭海外炭石炭火力（橘湾，新磯子）に至るまで，数々の石炭火力の開発を行ってきた。（図１）

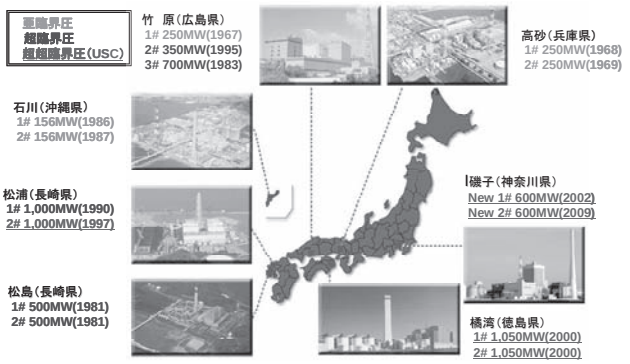


図１　J-POWERの石炭火力発電所

原稿受付　2010年８月４日
＊１　電源開発㈱　火力エンジニアリング部
〒104-8165　中央区銀座６-15-１

石炭火力の開発において，発電効率を向上することにより，kWhあたりのCO_2発生量の削減を実現してきた。（図２）

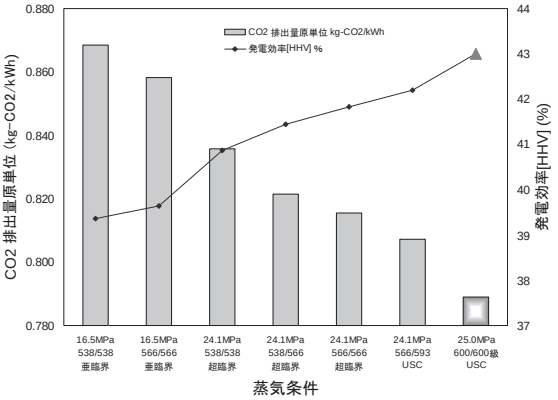


図２　蒸気条件と発電効率及び排出原単位

現在までの発電効率の向上は，主に蒸気タービンの蒸気条件の向上，つまり蒸気温度と蒸気圧力の向上と，発電ユニット容量の大型化という二つの技術進歩によって実現されている。図３に，石炭火力発電所の設計熱効率の推移を示す。

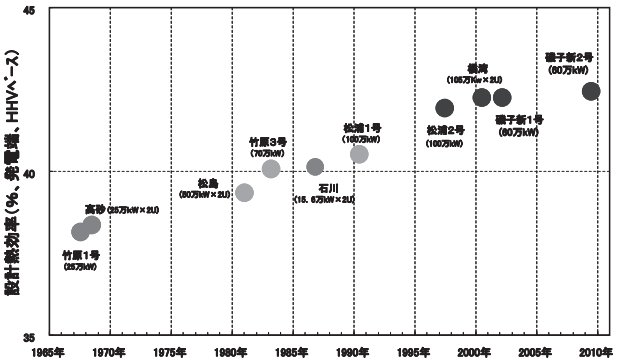


図３　設計発電効率の推移

蒸気条件については，1960年代の亜臨界圧（Sub-Critical）プラントから1980年代には超臨界圧（Super Critical）プラントへ，そして，1997年に運転を開始した松浦火力２号機において石炭火力では最初のUSC

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

（Ultra Super Critical：超々臨界圧）プラントが採用され，その後も蒸気条件の向上が図られてきた。（図４）

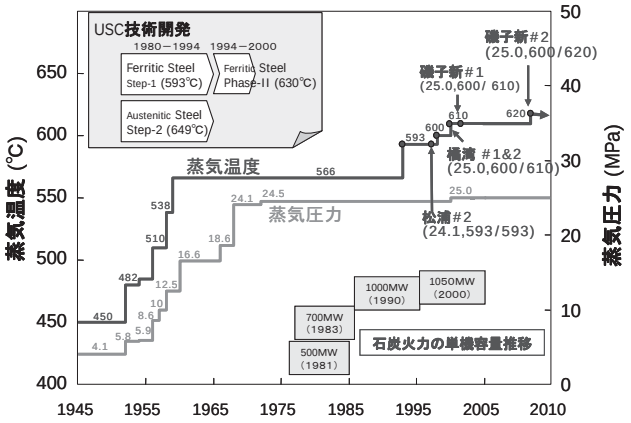


図４　蒸気条件の推移

2009年７月に運転を開始した最新の磯子火力新２号機では再熱蒸気温度620℃という世界最高水準の蒸気条件が採用されている。

なお，現在，わが国の石炭火力発電容量の約２分の１がUSCプラントである。

また，CO_2削減効果を継続的なものとするためには，設計発電効率の向上とともに発電効率を維持する必要があり，このためには，適正な運転・保守管理が重要であると言える。定期的なプラント性能の把握と設備点検，それらの結果に沿った適切な運転・保守管理が効率維持の要件となる。発電プラントは40年程度と長期に亘って運転されるため，高効率プラントを建設するのみならず，そのプラントを長期に亘って適正に運転・保守することも発電効率の向上と同様に重要である。

2.2　環境対策

図５は，先進国における火力発電所からの硫黄酸化物（SOx），窒素酸化物（NOx）の排出量を比較したものである。日本は，欧米の先進国に比べてこれらの対策が格段に進んでいる。日本における一般的な環境対策技術としては，SOxは排煙脱硫装置が，NOxは燃焼改善と排煙脱硝装置が採用されている。

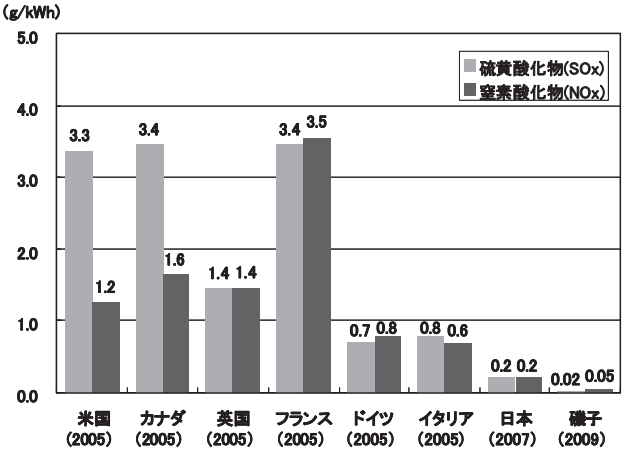


図５　火力発電所からのSOx及びNOxの排出量

SOx，NOxは人への健康被害のほかに酸性雨等の原因物質である。酸性雨は森林被害を助長するため，これら大気汚染物質対策はCO_2吸収源である森林保全にも貢献する。

2.3　老朽石炭火力のリプレースの効果

旧磯子火力は1960年代の後半に建設された亜臨界圧プラントであったが，新磯子火力は最新のUSC技術を採用し，発電効率が大幅に向上した。更には，技術進展による所内動力の低減ともあいまって，リプレース前後の送電端でのCO_2排出原単位は15％程度もの大幅な削減が達成されている。また，乾式排煙脱硫装置をはじめ，高度な環境対策が施され，従来型の大気汚染物質（SOx，NOx，ばいじん）については，ゼロエミッションに近いレベルが実現されている。

図６　旧磯子火力発電所（左）と新磯子火力発電所（右）

表１　リプレース前後の諸元比較

	旧磯子火力	新磯子火力
出力（万kW）	53 （26.5万kW×2基）	120 （60万kW×2基）
SOx（ppm）	60	20/10*1
NOx（ppm）	159	20/13*1
ばいじん（mg/m3（Normal））	50	10/5*1
蒸気条件	亜臨界圧	超々臨界圧
効率（発電端％ HHV）	38	43

*1 新1号機/新2号機の値

３．CO_2削減に向けた新技術への取り組み

3.1　石炭火力のCO_2削減ロードマップ

地球温暖化問題の解決のためには，技術と国際協調の二つが鍵になる。今，利用できる技術を世界に普及させること，同時に更なる技術の開発と商用化を促進すること，このようなクリーンコール技術の開発・商用・移転・普及のサイクルをグローバルに展開していくことで世界のCO_2排出を削減していくことが重要である。

図７は，石炭火力におけるCO_2排出の削減イメージを示したものである。

① 短期的（現在～2020年頃）には，石炭火力の新設またはリプレースにおけるUSC等の高効率プラント

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

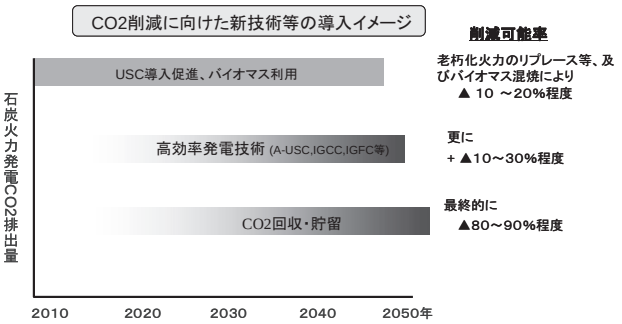


図７　石炭火力におけるCO_2排出の削減イメージ

の導入と木質バイオマス燃料（カーボンフリー燃料）の利用

② 中期的（2020 ～ 2030年頃）には，石炭火力の新設またはリプレースにおけるIGCC（Integrated coal Gasification Combined Cycle：石炭ガス化複合発電），A-USC（Advanced Ultra Super Critical：先進型超々臨界圧）等の更なる高効率プラントの導入とバイオマス燃料の利用ならびにCCS（Carbon dioxide Capture and Sequestration：CO_2回収・貯留）の商用ベースでの導入

③ 長期的（2030 ～ 2050年頃）には，IGFC（Integrated coal Gasification Fuel Cell combined cycle：石炭ガス化燃料電池複合発電）等の最上位の高効率プラントの導入とバイオマス燃料等利用ならびにCCSの本格導入

日本政府は，2010年６月にエネルギー基本計画を策定している。このなかで，石炭火力発電については単位発電量あたりのCO_2を低減させるため，現在運転中の石炭火力における効率改善やバイオマス混焼および老朽石炭火力のリプレース等による最新設備の導入，IGCC・A-USC等について，更なる高効率化や早期の実用化を目指して，官民協力しての開発・実証の推進，またこれらの高効率石炭火力の開発・実証・導入を進めつつ，将来に向けてゼロ・エミッション石炭火力発電の実現のため，2020年頃のCCSの商用化を目指した技術開発の加速化を図ることなどを具体的な取組として挙げている。

3.2　石炭火力でのバイオマス燃料の利用

バイオマス系の燃料は，カーボンフリーと見做すことができる固体燃料である。石炭も固体燃料のため，石炭火力ではバイオマス系燃料の混合利用が容易である。バイオマス系燃料としては，下水汚泥を脱水，あるいは炭化したものや木質バイオマスなど様々のバイオマス燃料が対象となる。日本では，これら様々なバイオマス系燃料の導入に向けた試みがなされている。

バイオマス系燃料の混合利用は，CO_2対策として即効性があり，廃棄物についてはそのリサイクルに役立ち，また，森林の間伐材利用は森林保全とCO_2の吸収源確保のためにも有効である。

木質バイオマス燃料については，松浦火力において林地残材等の木質ペレットの石炭混焼実証試験を2010年より実施する予定であり，３重量％程度の混焼試験を計画している。導入量の拡大については，別置きの燃料供給系統を追加することにより，技術的には10％程度までの混焼は可能と言われている。ただし，バイオマス資源の活用にあたっては，経済性と安定的な調達に課題がある。

3.3　石炭火力の高効率技術の開発

図８に，次世代の高効率石炭火力発電技術について示す。石炭火力の更なる高効率化技術については，二つの路線での技術開発がある。

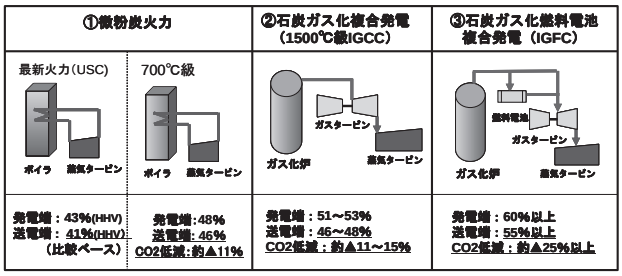


図８　石炭火力の高効率の技術開発

一つ目は，石炭ガス化発電技術である。石炭ガス化複合発電（IGCC）は，石炭をガス化し，ガス燃料とすることによってガスタービンと蒸気タービンの二段階での発電を可能とするものである。天然ガスで採用されている1500℃級のガスタービンが適用できれば，現在の最高効率の石炭火力より相対値で約13％のCO_2削減が期待できる。石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）は，IGCCの更に先の技術で，H_2とCOなど石炭ガスの一部を燃料電池の燃料として活用することにより，さらに高効率のトリプルサイクル発電を目指すものである。これが実現すれば，現状と比較して，相対値で25％以上のCO_2排出削減が可能になる。

日本国内では，空気吹きと酸素吹きの両方式の噴流床石炭ガス化技術が開発されている。空気吹き方式はIGCC開発を目的に開発され，一方，酸素吹き方式は多目的用途を目的として，発電用途としてはIGCCとともにIGFCの開発を目指している。

J-POWERは酸素吹方式の噴流床石炭ガス化技術を採用したパイロットプラントであるEAGLE試験設備（Coal Energy Application for Gas,Liquid & Electricity：多目的石炭ガス製造技術開発）にて新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究によりStep Ⅰおよび Step Ⅱの試験を実施した。

Step Ⅰ（2002年～ 2006年）においては，IGCC試験プラントの基本性能や長期信頼性を検証し，スケールアップに必要な試験データを取得した。基本性能としては，石炭中の炭素がガスに転換された割合を示すカーボンガ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

ス化率で99%以上，石炭の持つエネルギーが生成ガスのエネルギーに転換された割合を示す冷ガス効率で82%を達成した。また，設備信頼性については1015時間の連続運転を実施し，ほぼ全期間にわたり定格負荷を維持することができ，プラントとしての総合的な信頼性を確認した。

StepⅡ（2007年～2009年）においては，後述するCO_2分離回収技術（燃焼前回収法：化学吸収法）の確立とともに，ガス化炉の改造により，高い灰溶融温度を持つ石炭にも対応できるようにすることにより石炭の適用範囲を拡げることを目標とし，達成することができた。

今後は2010年～2013年の4ヵ年をかけて物理吸収法によるCO_2分離回収試験装置を追設し，物理吸収法，化学吸収法の特性を比較しながら研究開発を進めていく。

図9　若松研究所（EAGLE試験設備）

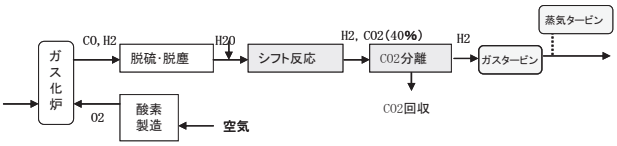


図10　概念系統図（石炭ガス化発電・燃焼前回収法）

このパイロット試験成果を基にした次期実証プロジェクトを推進するため，J-POWERと中国電力は共同で大崎クールジェン㈱を設立した。同社は，電気出力17万kW級の酸素吹IGCC大型実証試験とCO_2回収試験を実施するにあたり，2010年度から2年間の予定で，燃料電池対応型石炭ガス化複合発電最適化調査をNEDOと共同研究することとしている。

表2　実証試験概要

規模	石炭量1100t/日級（電気出力17万kW級）
場所	中国電力　大崎発電所
試験運転開始	2016年度開始予定
試験内容	IGCCのスケールアップ検証 CO2回収技術の検証

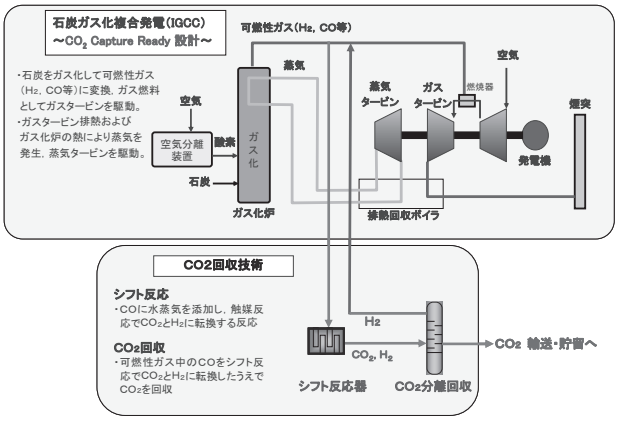


図11　系統図

二つ目は，微粉炭火力の蒸気条件を700℃レベルまで上げることを目指すもので，A-USCと呼ばれている。現在，日本では，主に高温・高圧材料の技術開発が進められており，今後，実缶での要素試験が実施される計画である。

3.4　CO_2回収・貯留技術の開発

CCSは化石燃料利用に伴い排出されるCO_2を回収し，貯留するもので，大幅なCO_2削減が可能な技術ポートフォリオの代表格として世界的に関心が高まっている。CO_2排出源である火力発電所などからCO_2を回収し，パイプライン，あるいは船舶でこれを輸送し，地中，あるいは海中にCO_2を貯留するもので，CO_2の「回収」「輸送」「貯留」の一貫システムによって初めて成立する技術である。

CCSは決定的なCO_2排出量削減対策ではあるものの，まだ技術開発の段階であり，解決すべき課題が多くあることに留意しておく必要がある。また，CO_2回収には大きなエネルギーが必要で大幅な効率低下をもたらすため，発電プラントの効率を極力高めておくことが望ましい。

CO_2回収法には，主に三つの方法がある。現在の石炭火力の主流である微粉炭火力でのCO_2回収法としては，「燃焼後回収法」，「酸素燃焼法」の二つがある。また，石炭ガス化発電からのCO_2回収法に「燃焼前回収法」がある。これらのCO_2回収法について，現在，日本では幾つかのパイロット規模でのCO_2回収試験が進んでいる。下記に，CO_2回収技術の開発への取り組み状況を示す。

表3　CO_2回収試験の取り組み状況

発電方式	微粉炭火力発電		石炭ガス化発電
CO2回収法	燃焼後回収法	酸素燃焼法*1	燃焼前回収法
実施機関	MHI/RITE、MHI/J-POWER	日本(J-POWER、IHI等)/豪州	J-POWER/NEDO
実施箇所	J-POWER松島火力発電所	豪州カライド発電所	J-POWER若松研究所
対象	微粉炭火力排ガス	微粉炭火力	酸素吹き石炭ガス化ガス
回収CO2量	10t-CO_2/日	20000t-CO_2/年程度	20t-CO_2/日程度
試験期間	2006年～2009年3月	2011年～2014年予定	2008年11月～2010年3月

*1：CO_2輸送・貯留も実施

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

微粉炭火力発電における燃焼後回収法については，三菱重工業㈱が地球環境産業技術研究機構（RITE）の補助を受け，J-POWERの協力のもと松島火力にて実証研究を実施した。長期信頼性（3000時間以上）の確保と排ガス不純物の影響評価を目標とし，所期の目標を達成した。

表４　試験概要

項目	諸元（計画値）
排ガス源	石炭燃焼排ガス（脱硫出口）
処理ガス量	1750m3（Normal）/h
回収CO2量	10t-CO_2/日
排ガス性状	CO_2　14%,SOx,NOx,ばいじん等
吸収液	KS-1（アミン系）
試験目標	長期信頼性：3000時間以上 排ガス不純物の影響評価

さらに，2007年度からはJ-POWERと三菱重工業㈱の共同で，より高い煤塵濃度とSOx濃度の排ガス条件（脱硫入口排ガスを導入）による試験等を実施し，試験期間中におけるCO_2回収装置の性能低下がないことを確認した。

今後，更なる高性能吸収液の開発，発電プロセスからの吸収液再生用蒸気供給の最適化などによるCO_2回収エネルギーの低減が期待される。

図12　松島火力発電所試験設備

微粉炭火力における酸素燃焼法については，J-POWER，㈱IHI，三井物産㈱など日豪７社の共同プロジェクトとして，世界初の既存発電所付加型CCS一貫システムの実証試験を豪州にて行っている。

Stage１では酸素燃焼技術の検証，Stage２ではCO_2地中貯留の検証を行う計画である。なお，CO_2貯留の候補地としては，カライド発電所から西に約300km離れた地点で検討を進めている。

表５　試験概要

目的	酸素燃焼技術とCO_2回収・貯留を含むCCS一貫システムの実証
実証プラント	豪州CS Energy社/カライドA発電所30MW
CO_2回収量	最大75t/日
CO_2貯留	候補地：発電所西約300kmの地点

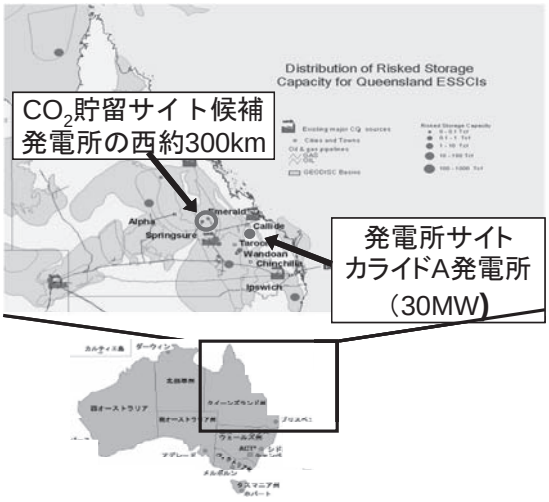


図13　位置図

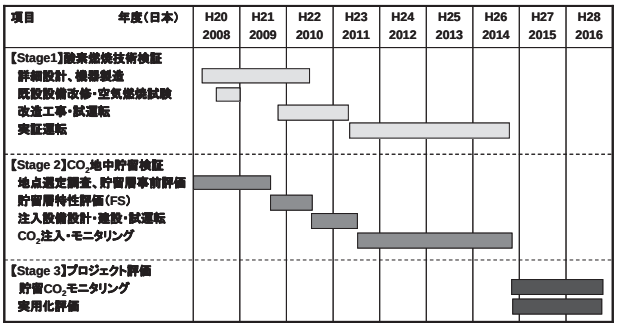


図14　概略スケジュール

図15　豪州カライド発電所

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

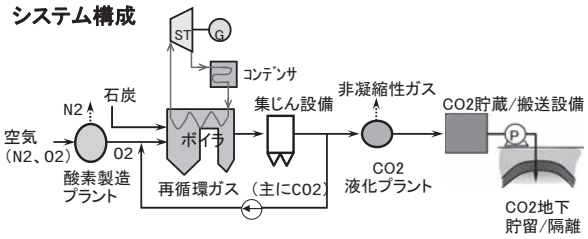


図16　システム構成

CCSの実用化には，技術面，経済面，あるいは環境面など解決すべき多くの課題がある。今後，官民が協力して，技術開発と貯留サイトの調査の促進，CCS実証を通じてのCCSの知見と経験の蓄積を急ぐことが重要である。技術開発としては，CO_2回収エネルギーと回収コストの低減を図っていくことや貯留ポテンシャルの拡大に向けた有望サイトの詳細な調査が必要となる。

なお，CCSには大きなエネルギーとコストがかかる。その商用化実現には，技術的なハード面に加えて，国による政策的・財政的な支援，法整備などソフト面での条件整備が不可欠になってくる。

4．まとめ

エネルギー自給率が小さい日本のような国々にとって，バランスのとれた柔軟で強靭なエネルギー供給ポートフォリオを作り出すには石炭が不可欠である。その中でCO_2排出を削減するためには，クリーンコール技術を発展・普及させていくことが重要である。

また，世界全体，特に主要新興国のエネルギー需要が今後とも増加していく中で，石炭資源は引き続きおよそ３割を占める見通しで，石炭の活用なしにはこの需要を充足することはできない。また，世界のCO_2排出量のおよそ３割は石炭火力から排出されている。よって，石炭火力からの排出を削減することなくしては地球温暖化問題を解決することもできない。

現在，実証研究に着手している高効率発電技術やCCS等の新技術を国内において実証・運転まで実現し，この新技術を国内のみならず海外まで展開することにより，日本国内，ひいては世界のCO_2削減に貢献できれば幸いである。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

論説◆解説

特集：石炭火力発電とCCS技術

石炭火力発電の現状と展望

石丸　豊彦*1
ISHIMARU Toyohiko

キーワード：石炭火力発電，高効率，汽力発電，超々臨界圧，空気吹き石炭ガス化複合発電，実証機，

1．はじめに

近年，地球温暖化防止の観点から，原子力発電ならびに風力発電や太陽光発電等の再生可能エネルギーへの注目が集まっている。しかし，発電電力量に占める火力発電の割合は依然として大きく，我が国では約6割が火力発電によるものである。したがってCO_2排出量削減のためには，火力発電の高効率化が必要不可欠である。また，エネルギー資源に乏しく，その多くを輸入に頼っている我が国にとって，昨今の燃料費高騰の影響は極めて大きく，環境面のみならず経済面においても，化石燃料を有効に活用するための火力発電高効率化技術が，ますます重要となっている。

このような状況の中，東京電力㈱では1980年代半ばより，従来のボイラ・タービンによる汽力発電に比べ，飛躍的な効率向上を実現するに至ったガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたLNG焚きコンバインドサイクル発電を積極的に導入することによって，世界トップクラスの発電効率を達成している。一方で，エネルギー資源の乏しい我が国においては，エネルギーセキュリティー確保の観点から，火力発電の全てをLNG焚きコンバインドサイクル発電によるわけにはいかず，他の化石燃料に比べて埋蔵量が豊富で比較的安価な石炭を使用した発電は，今後も火力発電の主流の一つであり続けることに変わりはなく，発電効率のさらなる向上に向けた技術開発と，その積極的な導入が望まれている。また，地球温暖化対策の一環として，自然エネルギー・再生可能エネルギーの利用拡大と，RPS法（電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法）で電力会社に義務付けされた新エネルギー利用義務量の達成に向け，バイオマス混焼技術が導入されているのも石炭火力発電である。

本稿では，石炭火力発電の現状と今後の展望について紹介する。

2．石炭火力発電の現状

2.1　火力発電の歴史と環境対策

我が国の初期の火力発電は，国内炭を使用した石炭汽力発電が主力であったが，1950年代に中東やアフリカに相次いで大油田が発見されると，エネルギーの主役は石炭から石油へと急速に移行した。1960年代になると経済の高度成長に伴って急速に電力需要が増大し，発電所建設が活発に行われたが，1960年代後半には硫黄酸化物，ばいじん等による大気汚染が重大な社会問題となった。東京電力㈱では環境保全に対する社会的要請に応えるため，石油全盛の時代に硫黄酸化物，ばいじんの発生がほとんどない火力発電用燃料としてLNGに着目し，1970年に世界で初めて南横浜火力発電所に導入した。その後，1973年と79年の二度にわたるオイルショックを経験し，石油資源のほとんどを中東地域に依存している我が国のエネルギー基盤の脆弱さが現実の問題となった。エネルギーセキュリティーの観点から，電源や燃料のベストミックスを構築するために，原子力やLNG火力，石炭火力等石油代替電源の導入が進められた。

当時，石炭火力は環境汚染防止に関する法令化が進み，厳しい環境規制等を克服しなければならない問題に直面していた。しかし，石炭は埋蔵量が豊富で特定地域に偏在することなく世界各国に分布し，特に政治的に安定している環太平洋地域に多くの供給地があることから，その重要性が再度見直された。このため，環境対策技術の開発が積極的に進められ，石炭は火力発電用燃料として導入が進み，発電用燃料に占める割合は着実に増加している。東京電力㈱におけるエネルギー別発電電力量構成比の推移（他社受電分を含む）を図1に示す。

効率だけでなく，環境対策技術についても我が国は世界をリードしており，図2に示す通り我が国の窒素酸化物（NOx）や硫黄酸化物（SOx）の排出原単位は世界でトップクラスの低さである。

SOx対策としては低硫黄重原油，良質炭等の使用による燃料での対策のほか，石炭火力では湿式石灰・石膏法を用いた高性能な排煙脱硫装置が導入された。

NOxについては，燃料起因のフューエルNOxの他，ボイラでの燃焼過程に空気中の窒素が酸化して発生するサーマルNOxがある。NOx対策としては，低NOx燃焼法の改良や低NOxバーナの採用による抑制，触媒を用いた排煙脱硝装置による除去と設備対策が進んだ。

油，石炭の燃焼で発生する灰や未燃分によるばいじん

原稿受付　2010年7月20日
＊1　東京電力㈱　火力エンジニアリングセンター
〒100-8560　千代田区内幸町1－1－3

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

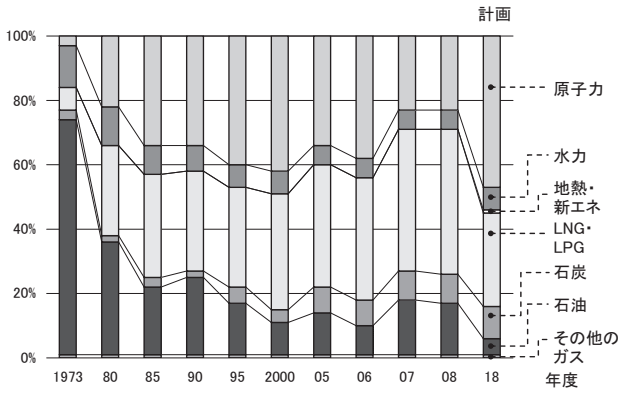


図１　東京電力㈱のエネルギー別発電電力量構成比

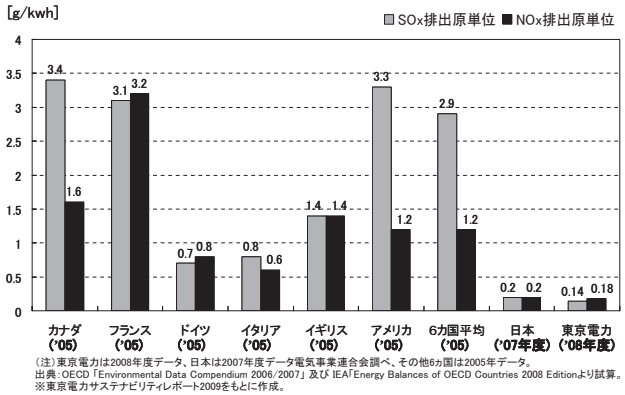


図２　SOx，NOx排出原単位の国際比較

は，乾式電気集じん装置（EP）を導入することにより除去している。これらの環境対策設備を設置した石炭汽力発電の一例を図３に示す。

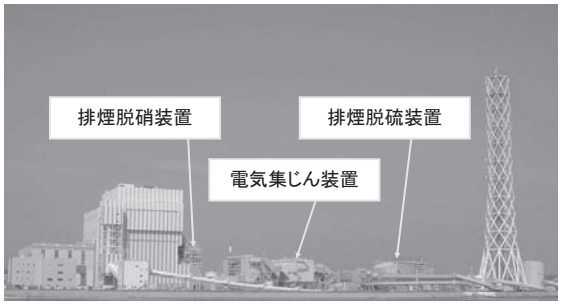


図３　環境対策設備設置例

2.2　汽力発電の効率向上の変遷

汽力発電の効率向上の変遷は，発電設備の大容量化と蒸気条件の高温・高圧化の二つに集約される。

発電設備の大容量化による効率向上とは，機器の大型化により，ボイラ表面からの放熱損失が相対的に低減されると共に，タービン内部で回転している翼外側のすき間を蒸気が仕事をしないで通過する漏れ損失の減少等により，効率が向上するものである。1960年代に350MW程度であった定格出力は，1970年代には600MW機を経て，1,000MW機までの大容量化が図られ，現在に至っている。

蒸気条件は，亜臨界圧，超臨界圧（SC：Super Critical Steam Condition），超々臨界圧（USC：Ultra Super Critical Steam Condition）の順に向上していく。水をある圧力・温度以上で加熱し温度を上昇させると，沸騰を伴わず連続的に過熱蒸気に変化する。この圧力・温度を水の臨界点（圧力 22.12MPa，温度 374.15℃）という。この臨界点を超える蒸気条件を超臨界圧（SC）といい，超々臨界圧（USC）は，SCのうち蒸気温度が566℃を超えるものとして分類している。ボイラは，亜臨界圧条件ではドラム式循環ボイラであったが，超臨界圧以上の蒸気条件向上に合わせ，多数の長いチューブ群だけで構成される貫流ボイラが開発された。

1970年代以降，しばらく蒸気条件に変化はないが，大容量化による効率向上や高効率タービン翼の開発等，熱効率向上の努力は継続されていた。1980年代以降，埋蔵量が豊富で経済性に優れている石炭火力建設が進められていくが，石炭火力はLNG火力や石油火力に比べ，環境対策設備の運転に必要な所内動力が大きいことや，CO_2排出原単位が大きいことから，蒸気条件を向上させて熱効率の改善を図ることが強く望まれた。そして高温に耐えられる材料が開発されたことにより，超々臨界圧汽力発電技術が実用化された。

これらの開発により汽力発電の発電端効率は，1950年代後半には39%（LHV）程度だったものが，45%（LHV）にまで向上している。東京電力㈱における火力発電プラントの出力，蒸気条件，発電端熱効率の推移を図４に示す。

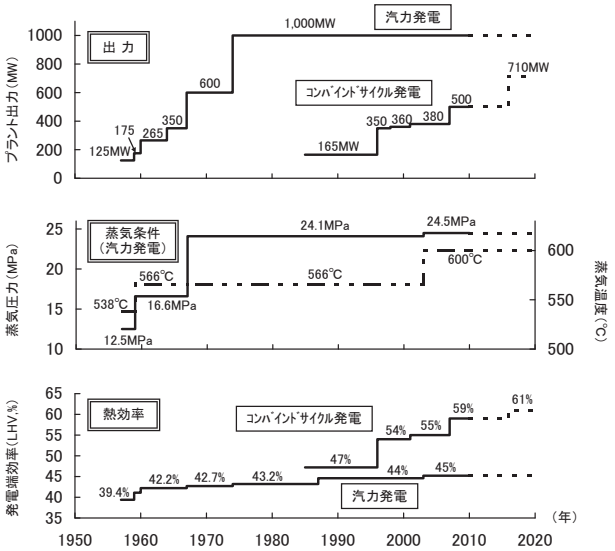


図４　火力発電プラントの出力，蒸気条件，熱効率の推移（東京電力㈱の場合）

2.3　USC石炭汽力発電

1990年代から我が国の各地においてUSC石炭汽力発電の建設が進み，現在では石炭火力総出力の約半分がUSC発電となった。我が国のUSC石炭汽力発電設備を表１に示す。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

表１　我が国のUSC石炭汽力発電設備

		発電機出力 MW	蒸気圧力 MPa	蒸気温度 ℃	運転開始年月
碧南3号	中部電力	700	24.1	538/593	1993年４月
能代2号	東北電力	600	24.1	566/593	1994年12月
七尾大田1号	北陸電力	500	24.1	566/593	1995年３月
原町1号	東北電力	1,000	24.5	566/593	1997年７月
松浦2号	電源開発	1,000	24.1	593/593	1997年７月
三隅1号	中国電力	1,000	24.5	600/600	1998年６月
原町2号	東北電力	1,000	24.5	600/600	1998年７月
七尾大田2号	北陸電力	700	24.1	593/593	1998年７月
橘湾1号	四国電力	700	24.1	566/593	2000年６月
橘湾1号	電源開発	1,050	25.0	600/610	2000年７月
敦賀2号	北陸電力	700	24.1	593/593	2000年９月
橘湾2号	電源開発	1,050	25.0	600/610	2000年12月
碧南4号	中部電力	1,000	24.1	566/593	2001年11月
磯子1号	電源開発	600	25.0	600/610	2002年４月
苫東厚真4号	北海道電力	700	25.0	600/600	2002年６月
碧南5号	中部電力	1,000	24.1	566/593	2002年11月
苓北2号	九州電力	700	24.1	593/593	2003年６月
常陸那珂1号	東京電力	1,000	24.5	600/600	2003年12月
広野5号	東京電力	600	24.5	600/600	2004年７月
舞鶴1号	関西電力	900	24.5	595/595	2004年８月
磯子2号	電源開発	600	25.0	600/620	2009年７月
舞鶴2号	関西電力	900	24.5	595/595	2010年８月
常陸那珂2号	東京電力	1,000	24.5	600/600	2013年12月㈜
広野6号	東京電力	600	24.5	600/600	2013年12月㈜

東京電力㈱における初のUSC石炭汽力発電は，2003年に営業運転を開始した常陸那珂１号機である。さらに，2004年には広野５号機が営業運転を開始した。現在も常陸那珂２号機と広野火力６号機が建設工事中である。これら２地点の最新鋭石炭火力について紹介する。

１）常陸那珂火力発電所

常陸那珂火力1号機（出力1,000MW）はエネルギーセキュリティーの確保，発電コストの低減等の観点から東京電力㈱単独では30年ぶりとなる大容量石炭専焼火力として，2003年12月，茨城県の常陸那珂港北ふ頭地区に建設され運転開始した。効率向上およびCO_2排出量抑制の要求に応えるべく，主蒸気圧力24.5MPa，主蒸気温度600℃ /再熱蒸気温度600℃の蒸気条件を採用したUSC汽力発電であり，石炭火力として世界最高水準の発電端効率45％（LHV）を達成している。排煙処理対策には高い性能と信頼性を有する脱硝装置，電気式集塵装置および脱硫装置を設置し，最大限の環境保全対策をしている。また自然エネルギー，再生可能エネルギーである木質バイオマス燃料を１号機で2012年度に導入する計画である。導入されるとCO_2削減効果は年間約11万tとなる見込みである。このように，東京電力㈱は低炭素社会の実現に向け，木質バイオマス燃料の導入をはじめとした再生可能エネルギーの開発・促進を進めている。

2013年12月に営業運転開始を予定している２号機（出力1,000MW）が2009年10月に工事を開始した。２号機の蒸気条件は１号機と同様であるが，さらなる運用性の向上と発電コストの低減を図るため，低品位炭を含め１号機よりも多炭種に対応した設備としている。常陸那珂１・２号機の完成予想図を図５に示す。

図５　常陸那珂火力完成予想図

２）広野火力発電所

広野火力は福島県沿岸の浜通りに位置する重原油汽力発電所で，5・6号機は石炭火力としては非常に狭隘な，発電所構内の約14万m^2の増設ヤードに建設される。600MWユニット2基の増設により発電所総出力は4,400MWとなり，弊社の火力発電所のなかでは２番目の出力規模となる。5・6号機ともに常陸那珂火力と同様に世界最高水準の熱効率・蒸気条件・環境設備を採用しているが，基本計画がIPP（独立系発電事業者）との競争が始まった1990年代から行われたため，建設費削減と発電原価の低減を目指して下記のような徹底的な設備の合理化を図っている。

・設計炭種数抑制によるボイラ火炉等のコンパクト化
・通風系統の1系列化
・ボイラ循環ポンプを不設置とする起動系統の合理化
・タンデムコンパウンドタービン採用
・高中圧一体２車室構成採用
・48インチISB（Integral Shrouded Blade）最終翼（3,000rpmでは最長）採用

５号機は2004年7月に営業運転を開始し，現在６号機が2008年12月に工事を開始し建設中である。

また，敷地が狭隘なことと周辺海域の水深が浅く外航船を着岸させることが困難であることから，発電所から南に約30km離れた地点に石炭中継基地として小名浜コールセンターを設置した。ここで外航船の石炭を一旦受け入れ貯蔵した後，専用内航船にて順次２次輸送することとし，５号機の運転開始に合わせて運用を開始している。広野火力５号機全景を図６に示す。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

図６　広野火力５号機全景

３．今後の展望

今年６月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では，石炭について「化石燃料の中でCO_2 排出は大きいものの，コスト・供給安定性の面で優れたエネルギー源である。CCS（CO_2 回収・貯留）やIGCC（石炭ガス化複合発電）等地球環境と調和した石炭利用技術を確立し，今後も適切に活用していく。また，世界最高水準にある我が国の石炭利用技術の競争力を維持し，世界各国に普及させていく。」と言及されている。そこで，我が国で技術開発が進んでいる，主な石炭高効率利用技術について紹介する。

3.1　石炭高効率利用技術

１）IGCC（石炭ガス化複合発電）

現在開発が進んでいる石炭高効率利用技術のなかで，最も商用化に近いと考えられているのがIGCCである。IGCCとはIntegrated Coal Gasification Combined Cycleの略で，石炭ガス化複合発電を表す。石炭IGCCは石炭をガス化炉でガス化し，LNGコンバインドサイクル発電で開発の進んでいるガスタービンコンバインドサイクル発電と組み合わせることにより，現在の汽力発電に比べて送電端効率が約20％（相対値）と飛躍的に向上する次世代火力発電設備である。ガス化炉は石炭中の灰分を溶融して排出する機能も有しているため，微粉炭火力発電で利用が困難な低灰融点炭にも適した技術であり，利用可能炭種の拡大を通じて，エネルギーセキュリティーの確保にも貢献することが出来る。海外では，現在，ブフナム（蘭），プエルトリヤーノ（スペイン），ワバッシュ・リバー（米）及びタンパ（米）の４基のIGCCプラントが商用運転中である。これらのプラントは，発電端出力が約300MWで，1990年代後半に運転を開始しているが，いずれも酸素吹きガス化炉を採用している。酸素吹きIGCCは石炭をガス化する際に酸素を使用するが，この酸素を製造するのに多くの動力を必要とするため所内動力が大きくなり，送電端効率が低くなる。

我が国では，より高い送電端効率の実現を目指した空気吹きIGCC技術が既に実証試験段階にある。

２）A-USC（先進的超々臨界圧発電）

A-USCは，Advanced Ultra-Supercriticalの略で，現在の石炭焚き汽力発電の蒸気温度600℃を700℃以上まで高温・高圧化することによって発電効率を向上させる技術である。既存の石炭火力発電と同様のシステム構成，運用性を有することから，新規の電源開発に加え，今後見込まれる石炭火力のリプレース需要に対しても有効な技術と考えられている。2008年度から経済産業省の補助事業として，発電システムに必要な要素技術開発が開始されている。

３）IGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電）

IGFCはガス化炉で石炭をガス化して得られる水素と一酸化炭素を燃料電池に供給して直接発電を行うと同時に，ガスタービンにも石炭ガスを供給して発電を行い，さらにそれらの廃熱を回収して蒸気タービン発電を行うトリプル複合発電のことで，IGCCよりもさらに発電効率を向上させる技術である。現在，パイロットプラントによる基盤技術開発が行われている段階にある。

これらの最新技術のうち，国の補助を受け東京電力㈱をはじめとする電力会社９社，電源開発㈱および㈶電力中央研究所が共同で開発している空気吹きIGCC実証機について概要を紹介する。

3.2　IGCC実証機

我が国独自の空気吹きIGCCの開発の歴史は1983年にスタートしている。その後1986年から1996年にかけて石炭処理量200t ／日のパイロットプラント試験を実施し，現在は250MW，1,700t ／日の設備で実証試験を実施中である。実証試験は，東京電力㈱をはじめとする９電力会社と電源開発㈱の出資により設立された㈱クリーンコールパワー研究所（CCP）を事業主体として，福島県いわき市にて実施している。CCPは2001年６月に設立され，実証機の設計・環境影響評価３年，建設３年の後，2007年９月から運転試験を開始した。実証機の設備仕様を表２に示す。

実証機は出力規模を商用機の約半分に抑えるために，1200℃級のガスタービンを採用しているため，送電端効率は大容量USC火力と同等程度に留まっているが，現在LNGコンバインドサイクル発電で採用されている

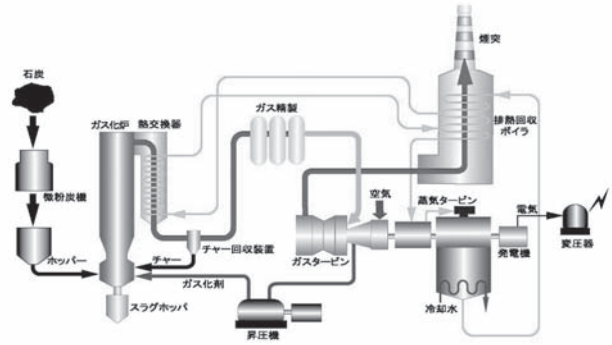
表２　IGCC実証機設備仕様

出　　力		250MW	
石炭処理量		約1,700t／日	
方　式	ガス化炉	乾式給炭空気吹き加圧二段噴流床	
	ガス精製	湿式ガス精製＋石膏回収	
	ガスタービン	1,200℃級	
目標熱効率	発電端	48％	(LHV)
	送電端	42％	(LHV)
環境特性（目標値）	SOx排出濃度	8ppm	($O_2$16％換算)
	NOx排出濃度	5ppm	($O_2$16％換算)
	はいじん排出濃度	4mg/m^3(Normal)	($O_2$16％換算)

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

1,500℃級ガスタービンを使用した商用機段階では，48～50％（LHV）の送電端効率が見込まれている。

IGCCはガスタービン燃料である石炭ガスを製造する「ガス化炉」，石炭ガス中の不純物を取り除く「ガス精製」，ガスタービン・蒸気タービン・排熱回収ボイラ（HRSG）といった「複合発電」から構成される。図７に実証機の基本システム構成を示す。



©2008　Clean Coal Power R&D Co.,Ltd

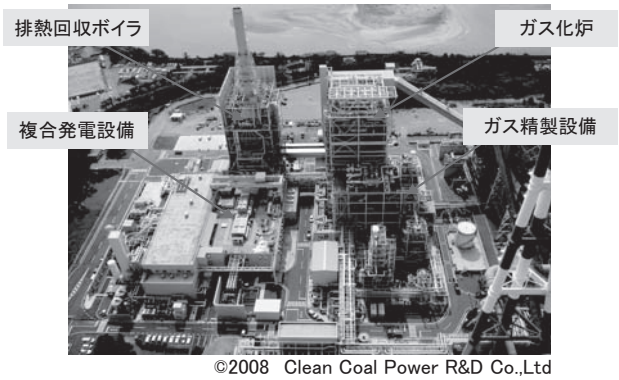
図７　IGCC実証機基本システム構造図

ガス化炉では石炭をガスタービンの空気圧縮機から抽気した空気でガス化し，生成したガスは湿式のガス精製設備で硫黄化合物やアンモニア等を除去した後，ガスタービンに燃料ガスとして供給される。ガスタービンはLNGコンバインドサイクル発電で実績のある1,200℃級のガスタービンをベースに，製鉄所の高炉ガスをはじめとする低カロリー焚の技術を適用した石炭ガス化ガス用燃焼器を採用している。ガスタービン排気は顕熱をHRSGで蒸気として熱回収され，HRSG直上の煙突から排出される。HRSGで発生した蒸気はガス化炉後流の熱交換器で発生した蒸気と共に蒸気タービンに供給される。石炭中の灰分は全量ガス化炉内で溶融して溶融スラグとなりガス化炉下部より排出される。図８にIGCC実証機の鳥瞰写真を示す。

運転試験は2007年９月に開始し，2008年３月に定格負荷に到達，性能試験では最新鋭USC石炭汽力発電と同等レベルで設定した環境特性目標値をクリアした上，送電端効率42.9％（LHV）を達成した。2008年には目標としていた2,000時間超の長時間運転に成功し，さらに2010年には長期耐久運転試験を実施し，一年間で当初目標の累積5,000時間に到達している。現在３年目の運転試験を実施中で，多くのデータ・ノウハウを蓄積中であり，近い将来，送電端効率48～50％（LHV）の商用機誕生が期待される。

４．おわりに

電力会社のCO_2排出量削減の取組として2020年度までに原子力を中心とする非化石エネルギー比率を50％まで高めることを目指しているが，これは逆に残り50％は化石エネルギー，つまり火力発電が担うということである。



©2008　Clean Coal Power R&D Co.,Ltd

図８　IGCC実証機全景

さらに，今後大量導入されていく太陽光や風力発電といった自然エネルギーの天候による大幅な出力変動に対する調整能力として，火力発電の役割は一層重要度を増していく。安定供給を維持しつつ，環境面や経済面からのさらに厳しい要求に対応するため，火力発電のさらなる熱効率向上が望まれている。

2008年３月に経済産業省資源エネルギー庁がまとめた「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」では，重点的に取り組むべき技術のうち，「高効率天然ガス火力発電」として1,700℃級コンバインドサイクル発電，「高効率石炭火力発電」として石炭ガス化複合発電（IGCC）や先進超々臨界圧発電（A－USC）が取り上げられている。1,700℃級ガスタービンの実用化はLNG焚きコンバインドサイクル発電への適用に限らず，石炭ガス化複合発電（IGCC）への適用も期待されている。

また，最近では更なるCO_2排出量削減の切り札として，CO_2回収・貯留（CCS）する技術の開発も進められている。IGCCでCO_2回収する場合を「燃焼前回収」と言い，ガスタービンで燃焼して体積が増加する前の燃料ガスの段階で処理するため，汽力発電で回収する場合の「燃焼後回収」に比べて回収設備が小さくなり，効率的・経済的にCO_2回収が可能となると考えられている。現在，東京電力㈱をはじめとする電力会社，石油元売り会社等が出資して設立されたCCS事業化調査の新会社「日本CCS調査㈱」が，IGCC実証機から排出されるCO_2を，沖合にある枯渇した海洋ガス田に貯留するためのフィジビリティー・スタディー（事業化事前検討）をNEDOから受託して実施している段階である。

これらの技術開発課題をクリアし，さらなる熱効率向上・CO_2排出量削減と積極的な導入が着実に進められることを強く期待している。

参考文献

(1)　東京電力㈱，サステナビリティレポート2009
(2)　長井輝雄，日本ガスタービン学会誌，Vol.37，No.2，(2009)，P72－77
(3)　橋本貴雄，坂本康一，北川雄一郎，百武慎徳，瀬谷典繁，三菱重工技報　Vol.46，No.2，(2009)，P2－6

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

特集：石炭火力発電とCCS技術

CO_2分離回収型IGCC技術

中尾　吉伸[*1]　NAKAO Yoshinobu
犬丸　淳[*1]　INUMARU Jun
原　三郎[*1]　HARA Saburo

キーワード：CCS，CO_2分離，高効率，IGCC，酸素-CO_2吹き石炭ガス化，CO_2 capture, high efficient, IGCC, O_2-CO_2 blown coal gasifier

1．はじめに

電気事業では，地球温暖化防止の観点から二酸化炭素（CO_2）の排出抑制に取り組んでおり，発電プラントの高効率化，バイオマス燃料の導入など，化石燃料の消費量削減に向けた様々な対策を進めている。一方で，発電プラントより排出されるCO_2を分離回収して地中に貯留するCCS（Carbon Dioxide Capture and Storage）技術については，CO_2回収技術の課題克服，コスト低減などに向け，国プロへの協力を行っている。

現在開発が進められているCO_2回収型発電システムでは，CO_2を回収するために大量の動力及び熱エネルギーが必要であり，大幅な発電効率の低下および発電コストの上昇は避けられず，CO_2の分離回収に当たっては革新的な発電システムの開発が必要不可欠である。

本稿では，CCSに関わる最近の動向，ならびに現在考えられているCO_2回収型火力発電プラントの概要を述べるとともに，新たな将来オプションとして電力中央研究所が提案している「CO_2回収型高効率IGCCシステム」について紹介する。

2．CCSに関わる最近の動向[(1),(2)]

国際エネルギー機関（IEA）が実施したエネルギー情勢分析（図１）によれば，世界全体のCO_2排出量を，2050年までに2005年比で50%削減する目標を立てた場合，全削減量（48Gt-CO_2）の約4割（19Gt-CO_2）を発電分野において達成しなければならず，そのうちの約２割（4Gt-CO_2）をCCS導入によって削減するシナリオ（ETP2008 BLUE Map scenario）となっている。同時に示されたロードマップには，研究開発，実証，普及，商用化の進展予測，及び，それら必要投資額が記載されており，ラクイラサミットの首脳宣言で言及された大規模実証プロジェクト数と同様に，20基の実用規模CCSプラントの実証が明記されている。このように中長期的にCO_2排出量を大規模に削減するためには，CCSは必要不可欠な技術オプションとして位置付けられており，技術面，法制面，財政面など各種取り組みが世界各国で行われている。

欧州では，2007年1月に欧州委員会が，BLUEシナリオ達成のためには，先進国において2020年までに30%，2050年までに60-80%のCO_2排出量の削減努力が必要であるとの見解を示し，気候変動とエネルギーに関する総括的法案が2008年12月に欧州議会で合意された。この法案の中にCCSの開発推進と普及に関連したEU指令が盛り込まれ，10-12のCCS実証プロジェクトに対して2015年まで排出枠0.3Gt-CO_2分の財政支援を行うこと，大容量発電プラントについてはCCR（Carbon Capture Ready）を条件付きで要求すること，などが含まれている。

EU指令は発行後２年以内に各加盟国が国内施行することになっているが，発電出力量の約３割を石炭に依存する英国では世界に先駆け，2008年10月，GHG（温室効果ガス）排出量を2050年までに1990年比で80%削減するという法的拘束力のある目標を気候変動法（Climate Change Act 2008）により定め，2009年11月には「クリーンコール開発に関する枠組み」を発表した。これらの中で，2009年４月に公布されたCCS指令（CCSの法規制枠組みに関するEU指令）に準じて，300MW級以上の新設火力発電所の許可申請者へのCCRの義務化を決定しており，具体的な要件として，①適切なCO_2

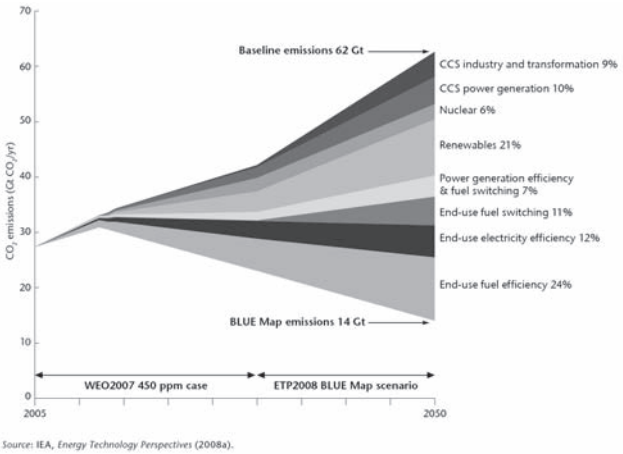


図１　IEAによるエネルギー情勢分析結果

原稿受付　2010年７月21日
＊１　㈶電力中央研究所 エネルギー技術研究所
〒249-0006　横須賀市長坂２-６-１

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

貯留地点が存在すること，②CO_2輸送が技術的且つ経済的に可能なこと，③将来のCO_2回収・圧縮設備の建設が技術的かつ経済的に可能であること，についての調査を要求している。調査の結果，実行可能であると判断された場合には，許可申請者はCO_2回収及び圧縮に必要な施設のためのスペースを確保する必要がある。また，英国では，CCSによる中長期的なCO_2排出削減目標の達成と関連産業の国際社会での競争力確保を目的として，2007年11月に商用規模のCCS実証プロジェクト公募（UK CCS Competition）を立ち上げており，2010年３月，Scottish powerによるLongannet及び E.ON UK によるKingsnorthの２つのプロジェクトが採択された。

表１，２に欧州及び世界におけるCCS実証プラントを示す。欧州ではCCSに係わるプロジェクトが数多く計画されており，発電，CO_2分離，輸送，貯留に関する様々な技術開発が国・メーカを中心として進んでいる。しかしながら，特にCO_2のパイプライン等による輸送や地下貯留に対する住民の反対運動が表面化してきており，多くのプロジェクトが当初の計画の見直しを余儀なくされている。表には現時点で公表されている情報をそのまま記載した。

一方，我が国では，2008年３月にCool Earth－エネルギー革新技術計画（経産省）が策定され，2008年５月には電力11社を含む29社により運営される日本CCS調査株式会社が設立されて，具体的な地点を対象としたCO_2回収型発電に関するフィージビリティースタディ（FS）が実施されている。2010年６月にはエネルギー基本計画が閣議決定され，その中で，現在運転中の石炭火力における効率改善やバイオマス混焼及び老朽石炭火力のリプレースによる最新設備の導入などにより，高効率化・低炭素化を推進し，当面新増設又は更新される石炭火力発電については，原則としてCO_2排出量をIGCC並みに抑制すること，などが盛り込まれた。また，今後計画される石炭火力の新増設に当たっては，CCRの導入を検討することとし，具体的な要件についてはEU指令も参考にしつつ今後検討することとなった。

３．CO_2回収型火力発電の概要[3]

発電システムより化石燃料に由来するCO_2を大気に放出することなく分離回収するための技術として，図２に示すように，燃焼後回収方式，酸素燃焼方式，燃焼前回収方式などが検討されている。

(a) 燃焼後回収方式 : Post combustion

燃焼後回収方式では，通常の火力発電システムの排煙処理装置後流にCO_2回収設備が設置され，CO_2分離システムとしては，アミン系吸収液等により，主に化学吸収法を用いた検討が国内外で行われている。化学吸収法によりCO_2を分離する場合，吸収液の再生（吸収液中CO_2の回収）には熱源として蒸気が必要となるが，プラント内蒸気系からの抽気もしくは補助ボイラによりまかなわねばならず，この所要量がプラントの発電効率に大きく影響する。また，燃焼後回収方式では，CO_2分離時に取り扱うガスの体積流量が多い，CO_2分圧が低い，ほぼ大気圧で取り扱われる，などの理由から，他の方式に比べてCO_2分離設備が大きくなると考えられる。

技術的には，他の二方式は実証段階にあるのに対し，本方式は実用化の域に達している。

(b) 酸素燃焼方式 : Oxy-fuel combustion

火力発電システムにおいて燃料の酸化剤に酸素を用いると，排ガスの主成分をCO_2と水蒸気に限定することが

表１　欧州におけるCCS実証プラント

Project	Power plant	Transport	Storage
Aberthaw(RWE, 英) Brindisi(ENEL,伊) Karlshamn(E.ONTP, SWE) Longannet(Scottish power, 英) Maasvlakte(E.ON, 蘭) *Niederaussen（RWE, 独） Staudinger（E.ON, 独）	Post		
*Renfrew （Doosan babcock, E.ON, 英）	Oxy		
*Buggenum(Nuon, 蘭) *Fusina(ENEL, 伊)	Pre		
Ketzin(独)			Saline aquifer
*Schwarze Pumpe / Altmark(Vattenfall, 独)	Oxy	Truck	Onshore depleted gas field
*Lacq(Total-Alslom, 仏)	Oxy	Pipeline	Onshore depleted gas field
K12-B(蘭)	NG Processing		Onshore depleted gas field
*Sleipner, *Snohvit (statoil, NOR)	NG Processing		Saline Aquifer

* 実証開始が確認されているもの

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

表２　主要な燃焼前回収方式によるCCS実証火力発電プラント

プロジェクト名	RWE Rhenish	Zero Gen	GreenGen
国名	ドイツ	オーストラリア	中国
場所	Goldenbergwerk site	Queenzland（TBD）	Tianjin
実施主体	RWE	ZeroGen Pty Ltd	China Huaneng Gr TPRI
燃料種	褐炭	石炭	石炭
設備		新設	新設
規模	実証	実証	実証
実施規模	450MW（Gross) 360MW（Net)	530MW（Gross） 400MW（Net）	400MW IGCC +CCS+FC+H2製造
適用技術	プレ（IGCC）	プレ（IGCC：MHI)	プレ（IGCC：TPRI）
運転開始	2014	2015	PhaseⅡ2010-2013 PhaseⅢ 2014-2017
貯留量	2.6Mtpa	2 0Mtpa（65%回収相当）	6,100m3/h(Normal)
貯留先	Schieswlg-Holstein近郊 （Pipeline:530km）	塩帯水層 (Pipeline:≦100km)	EOR、地下貯留
備考	2010年に実施判断	2012年に実施判断	-

できる。従って，排ガス中の水蒸気を凝縮させることで，純度はやや低下するものの，CO_2を容易に分離することできるため，酸素燃焼方式では，燃焼後回収方式のようなCO_2分離設備が不要となる。しかしながら，ボイラ供給酸素を製造するための空気分離装置（ASU）や燃焼温度制御用に不活性ガスである排ガスを循環するためのブロワが必要となり，所内動力が増加する。

地中貯留などを前提とする場合，排ガス中のSOx，NOxはCO_2とともに液化されることから，脱硫設備，脱硝設備を設置しないシステムも検討されている

(c)　燃焼前回収方式：Pre combustion

燃焼前回収方式では，燃料と酸化剤とを混合する前にCO_2を分離するので，基本的に取り扱うガス量が少なくなり，特に燃料を高圧下で利用する場合には，分離装置の小型化，及び，CO_2吸収液の再生エネルギーの低減が期待できる。ただし，石炭ガス化炉を用いる場合には，CO_2分離を行う前に，ガス化ガス中のCOを水性シフト反応（$CO+H_2O \Leftrightarrow CO_2+H_2$）により，あらかじめ$CO_2$に転換するシフト反応器を設置する必要がある。この水性シフト反応では，所定の濃度の水蒸気が不可欠であり，燃料の組成によっては，別途シフト反応器に水蒸気を供給する必要があるため，プラント内蒸気系からの抽気もしくは補助ボイラによりまかなわねばならず，この所要量がプラントの発電効率に大きく影響する。

このように，現在開発が進められている上記の方式では大幅な発電効率の低下は避けられず，発電システムとCO_2回収設備とのシステムインテグレーション，或いは，CO_2回収を前提とした革新的な発電システムの構築が必要である。

４．CO_2回収型高効率IGCCシステムについて

図３に当研究所にて提案するCO_2回収型高効率IGCCシステムの概念図を示す。本システムは，微粉炭火力発電システムとして高い発電効率が狙えるIGCCシステムに，CO_2分離が容易な酸素燃焼方式のコンセプトを適用したシステムである。回収CO_2を有効に利用する酸素-CO_2吹き石炭ガス化炉と，リサイクルした排ガスに酸素を混合して燃焼させるクローズド型のガスタービンコンバインドサイクルシステムとを組み合わせることによ

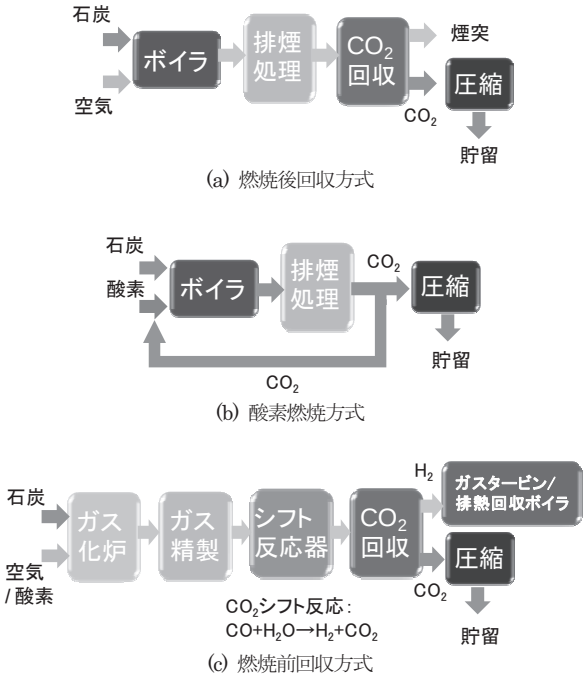


図２　各種CO_2回収型火力発電プラントの構成

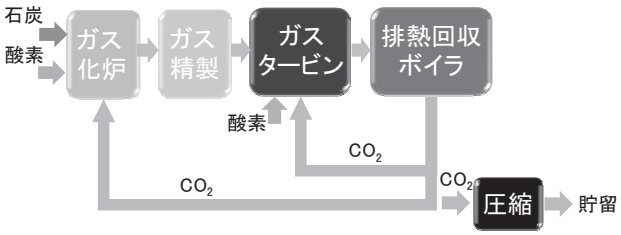


図３　CO_2回収型高効率IGCCシステムの概念図

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

り，シフト反応器及びCO_2分離設備を不要とするとともに，システムの高効率化を狙う。

提案システムの構成概略を図４に示す。微粉炭搬送等に，回収CO_2を用いる酸素-CO_2吹きガス化炉で生成したガス化ガスは，金属フィルタ，乾式脱硫を経てガスタービン燃焼器に供給される。ガスタービン燃焼器では，リサイクル排ガスと酸素の混合ガスにより燃焼を行う。主成分がCO_2と水蒸気となるガスタービン排ガスは，排熱回収ボイラで蒸気系に熱回収された後，必要量だけガスタービン燃焼器に圧縮･リサイクルされる。残りの排ガスは，水分，ハロゲン，水銀を除去されることにより高CO_2濃度排ガスとなり，ガス化炉に必要な量を抽気･リサイクルした後，回収される。また，排熱回収ボイラ及び石炭ガス化設備で熱回収した蒸気で蒸気タービンを駆動する。

本システムでは，所要エネルギーの大きいCO_2分離回収装置が不要になることに加え，以下の要因により大幅な熱効率向上が期待できる。

・酸素及びCO_2で石炭をガス化することにより，従来の酸素-N_2吹きガス化に比べて，ガス化性能が向上する。
・ガスタービンの作動ガス中のCO_2分圧が非常に高く，比熱比が小さいことから，タービン側，圧縮機側ともに出入口温度差が小さく，再生熱交換器を設置できる。
・ガスタービン燃焼器に入るまでのガス精製設備に金属フィルタと乾式脱硫を用いることで，ガス精製設備が簡素化できるとともに熱交換に伴う有効エネルギーのロスが無い。
・排熱回収ボイラで十分に熱回収した後の排ガスを水洗塔にて脱ハロゲンするため，ここでも有効エネルギーのロスが非常に小さい。

4.1　酸素-CO_2吹き石炭ガス化炉のガス化性能

従来の石炭ガス化技術では，安全性の観点から石炭やリサイクルチャーの搬送ガスとして窒素を用いる。更に酸素吹きガス化の場合には，運転信頼性確保（炉内での灰付着防止）の観点から生成ガスの一部をクエンチガスとして炉内にリサイクルしているため，生成ガス中の窒素濃度は約20%となる。また，空気吹きガス化の場合には，当然のことながら空気中の窒素が多量に炉内に投入されることから，生成ガス中の窒素濃度は約50%となり，ガス化剤分圧を大幅に低下させてしまう。

一方，酸素-CO_2吹きガス化では，ガス化剤として酸素を，搬送ガスやクエンチガスとして回収CO_2を用いることにより，安全性や運転信頼性を確保しつつ，炉内への窒素混入を極力小さくすることを特徴としている。さらに，搬送ガスやクエンチガスとしてCO_2を用いた場合，このCO_2がガス化剤（$C+CO_2 \rightarrow 2CO$）として作用することにより，ガス化反応性が大きく向上することが期待される。この結果，冷ガス効率などの向上とともに，ガス化炉本体のコンパクト化やチャーリサイクル系の簡略化が図れ，設備費のコストダウンが期待できる。

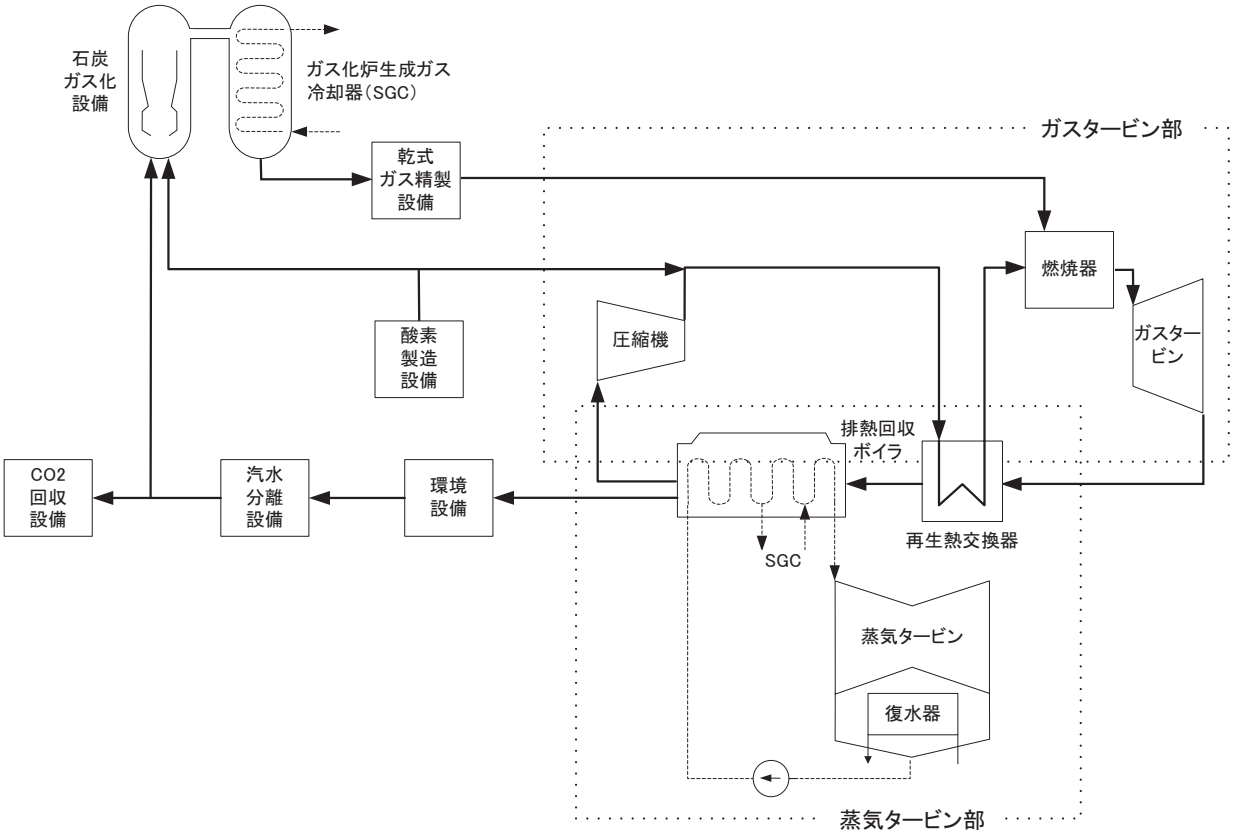


図４　CO_2回収型高効率IGCCシステムのシステム構成図

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

4.2 実機開発に向けたシステム検討

当研究所ではこれまでに，提案システムにF型（1,300℃級）ガスタービンを採用した場合，CO_2回収率99％のもとで40%HHVを超える送電端効率を達成可能であることを示しており[4]，現在も，本システムを構成する要素機器の詳細なFSを実施中である。本稿では，当初の基本システムに対して，以下に記述するFS結果を反映させ，全体システムの見直しを行った結果について紹介する。

・石炭粉砕・乾燥用熱源，及び石炭ガス化炉用CO_2からの残存酸素除去用熱源を確保する
・CO_2リッチであるリサイクル排ガスを希釈剤とするクローズド型ガスタービンシステムのFS結果（圧縮比，断熱効率，冷却空気流量比，酸素濃度など）を反映する
・再生熱交換器の圧力損失が大きいことから，同器を排熱回収ボイラの上流に配置する
・ガスタービンリサイクル排ガスが酸露点温度を下回らない熱交換器配列とする
・蒸気タービンの主／再熱蒸気条件，及び排熱回収ボイラの熱交換器ピンチポイント温度差を修正する
・低動力で高信頼度の低圧型／液体酸素圧縮技術を採用する（動力原単位= 0.4kWh/ kg-O_2）[5]

表３に提案システムの熱効率解析結果を示す。F型ガスタービンシステムを採用した場合，主要機器の実機適用性を考慮した実現可能なシステムの送電端効率（HHV基準）は，CO_2最大限回収（ほぼ全量回収）時において約39%となった。また，ガス化炉冷ガス効率の向上，G型（1,500℃級）ガスタービンシステムの採用，及び空気分離装置（ASU）最適化による酸素製造動力原単位の改善[6]など，提案システムの熱効率向上施策による効果と試算したところ，送電端効率約42%を達成する可能性があることが分かった。

本システムの実現に向けては，設備簡素化，低コスト化，効率向上の観点から，特に，再生熱交換器とASUの技術開発が重要である。再生熱交換器については，現時点では大型プラントへの適用実績がなく，小型ブロックを集積せざるを得ないため，コスト及びプラント面積の面で課題がある。ASUについては，本システムは従来型IGCCに比べて多くの酸素を使用するため，性能改善及び設備コストの低減が極めて効果的であり，酸素製造動力原単位が0.1kWh/kg-O_2向上するごとに，システムの送電端効率は２％強向上するとの試算が得られている。

表３　提案システムの熱効率解析結果

システム	送電端効率効率 (HHV基準)	酸素製造動力原単位
F型GT ＋再生熱交換器	≒ 39%	0.4 kWh/kg-O_2[5]
G型GT ＋再生熱交換器	≒ 40%	0.4 kWh/kg-O_2[5]
G型GT ＋再生熱交換器 ＋将来型ASU	≒ 42%	0.33 kWh/kg-O_2[6]

５．まとめ

当研究所で提案しているCO_2回収型高効率IGCCシステムの実機開発に向けたシステム検討を行った結果，送電端効率約42%を達成する可能性があることが分かった。本システムと既報告システムとを比較評価する際には，CO_2回収方式や設備仕様などにより，送電端効率をはじめ，CO_2の回収率や純度などが異なるため，総合的な判断が必要となる。本システムでは，従来型IGCC＋燃焼前回収（化学吸収）方式による最大限回収時のCO_2回収率が通常80%前後であるのに対して，CO_2をほぼ全量回収することができ，且つ，高い送電端効率が得られることから，本システムは非常に有望な将来型発電システムであると考える。今後も，①システムの最適化，②ガス化炉のコンパクト化，③脱硫技術における高CO_2濃度ガス雰囲気下での脱硫剤中への炭素析出対策，④クローズドガスタービンの最適設計と最適な制御方法，などの課題を踏まえた上で，さらに詳細な検討評価を進めていく所存である。

参考文献

(1) IEA，Energy Technology Perspectives（2008a）
(2) 下田昭郎ら，電力中央研究所報告「英国におけるCCSの普及政策について－CO_2キャプチャーレディーの義務化－」，V09010，(2010-4)
(3) 白井裕三ら，電力中央研究所報告「CO_2回収型高効率石炭ガス化複合発電システムの提案とその課題」，M07003，(2007-10)
(4) 中尾吉伸，電力中央研究所報告「CO_2回収型IGCCシステムの開発 －高効率化に向けたシステム構成及び運転条件に関する検討－」，M08006，(2009-2)
(5) NEDO成果報告書「石炭ガス化における大型酸素製造技術に関する調査」，(2007)
(6) NEDO成果報告書「二酸化炭素回収対応クローズド型ガスタービン技術－第Ｉ期研究開発－」，(2000)

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

特集：石炭火力発電とCCS技術

海洋貯留と二酸化炭素ハイドレート

阿部　豊*1
ABE Yutaka

キーワード：温暖化，二酸化炭素，CCS，海洋貯留，ハイドレート

1．はじめに

現在，地球温暖化が深刻な問題となっている。人為起源の温室効果ガスである二酸化炭素（CO_2）が，この地球温暖化の主たる原因物質とされている[1]。発生したCO_2を大気中より隔離する方法として，火力発電所などの人為的なCO_2大規模排出源からCO_2を分離・回収し，地中や海洋に隔離する方法（CCS；Carbone dioxide Captured and Storage）が提案されている。CCSは，温室効果ガス削減に大きく寄与できる技術オプションの一つであると位置付けられており，今後2030年までに商業化が予測される主要な地球温暖化緩和技術の一つとして期待されている[2]。CCSの技術確立のために，日米欧やオーストラリアなど約15の国・地域と約50の企業が参加する国際組織（グローバルCCSインスティチュート）が豪政府の主導で立ち上げられ，2010年までに世界で20の実証試験に着手，2020年までに実用化の目処をつけるという目標が打ち出されている[3]。

CCSは，大きく地中隔離と海洋隔離の二つに分けられる。地中隔離に関しては，大規模実証試験が，ノルウェーのスライプナー（1996年）やカナダのワイバーン（2000年）などで行われるなど，数々のプロジェクトが進行しており，今後も多数の実施が予定されている[4]。また，日本においても，新潟県の長岡において2000年から実証プロジェクトが行われるなど，国内外で多数のプロジェクトが実施・計画され，商業化に向けた研究開発が進められている。このように，石油・石炭の採掘地を利用できるなど既に実績のある技術を背景に，現状においては，地中隔離の方が，世界的に先行して検討が進められている。

一方，海洋隔離に関しては，海洋環境や生態系への影響評価の難しさや後述する二酸化炭素ハイドレートについての知見の乏しさなどから，いまだ実証レベルでのプロジェクトは実施されていない。しかしながら，海洋隔離では，地中隔離と比較したCO_2処理能力が１万倍以上[5]あるとされており，極めて多量のCO_2を処理できる可能性がある。特に，我が国のように，地質学的に不安定であり四方を深い海に囲まれているなどの条件下においては，海洋隔離も温暖化対策技術として有力なオプションであると考えられている[6]。

2．CO_2海洋隔離の現状

CO_2海洋隔離は，1980年に米国のSteinbergら[7]が提案したものである。火力発電所などのCO_2大量排出施設の排出ガス中から，CO_2を液化・回収し海洋に隔離するもので，自然に行なわれている大気から海洋への炭素循環を人工的に促進することを目指したものである。我が国では，1990年に世界に先駆けて実験を伴うCO_2隔離研究が始まり，1998年には，地球温暖化対策推進大綱にCO_2海洋隔離が「今後推進すべき革新的技術の一つ」とされている[8]。

一方で，CO_2海洋隔離については海洋環境への影響が懸念されている。1972年に，主に陸上で発生した廃棄物等を海洋に投棄することを防止した「ロンドン条約」が採択され，1975年に発効している。日本は1980年に批准しており，法制上CO_2の海洋隔離を行うことができない状況にあった。しかしながら，近年の地球温暖化への対策として，二酸化炭素海底下地層貯留の重要性に対する認識の国際的な高まりを受けて，特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄を例外とする「ロンドン条約96年議定書」が新たに採択され，2006年に３月に発効された[9],[10]。日本では，2007年５月にロンドン条約の国内法として，海底下地中貯留を可能とする改正海洋汚染防止法が公布され，CO_2海洋隔離の実現に向けての法整備が進みつつある。2006年には，Inagakiらにより沖縄県与那国島沖の水深1380mの海底で，液化したCO_2が閉じ込められたプールが発見されている[11]。これは海洋隔離において危惧されている深海生物への影響を調べる上で重要な発見である。

3．CO_2海洋隔離の種類とCO_2貯留テクノロジー

海洋隔離は，図１に示すように大きく三つに分けることが出来る。水深500m以深の海底下の地層に貯留する「海底下貯留法」，水深500m以深の海水にCO_2を溶解させる「溶解法」，水深3000m以深の海底に貯留する「深海貯留法」である。

原稿受付　2010年８月12日
＊１　国立大学法人筑波大学大学院システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻
〒305-8573　茨城県つくば市天王台１－１－１

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

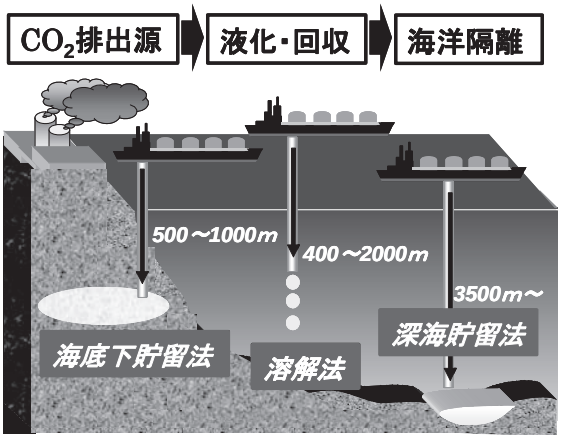


図１　CO_2海洋隔離の概念図

3.1　海底下貯留法

提案されている海底下貯留法では，水深500～1000m程度の低温・高圧条件下にある海底堆積層にCO_2を圧入する。図２に海底下貯留法の概念の一例を示す[12]。提案されている海底下貯留法では，圧入されたCO_2と層内の間隙水を反応させて，後述するCO_2ハイドレートを生成させ，生成したハイドレートを利用して海底堆積層に長期間安定にCO_2を貯留しようとするものである。この際，砂層では浸透率が高く気液接触面積ならびに間隙体積が大きいことから，効率よく大量のCO_2ハイドレートが生成すると考えられている。生成したCO_2ハイドレートにより層内が閉塞され浸透率が大きく低下する。これによって，CO_2ハイドレート生成により浸透率が大きく低下した貯留層自体がキャップロックとして機能するため，CO_2漏洩の危険性を低減することが可能であると考えられている[12],[13],[14]。

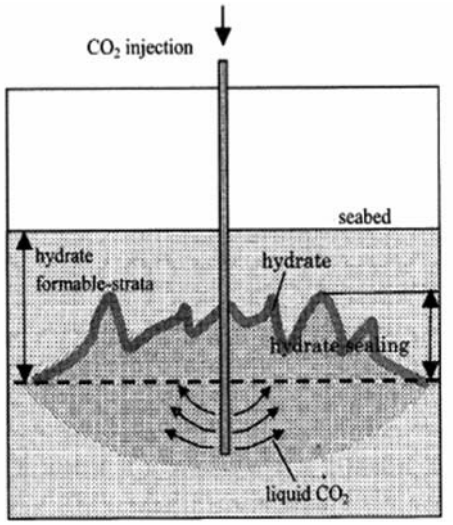


図２　海底下貯留の概念[12]

海底下堆積層中には，図３に示されるようにメタン（CH_4）ハイドレート鉱床が世界中に分布している[13]。そこにCO_2を注入し，メタンハイドレート内のゲスト分子であるCH_4とCO_2を置換する方法が提案されている[14]。図４にその概念図を示す。この方法は，新エネルギーの確保と海洋隔離が同時にできるという利点がある。

上記のように，法整備も進みつつあり，海洋環境への影響が少ないことや長期・安定的にCO_2の貯留が可能であるという点から，海底下貯留法は，３つの海洋隔離方法の中では，最も実現に近いと考えられている。

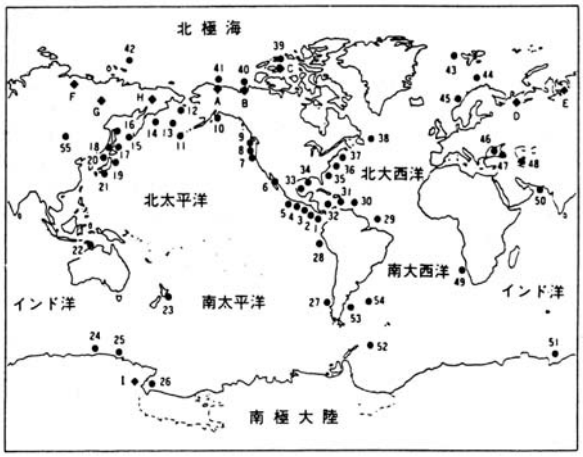


図３　世界のメタンハイドレート鉱床[14]

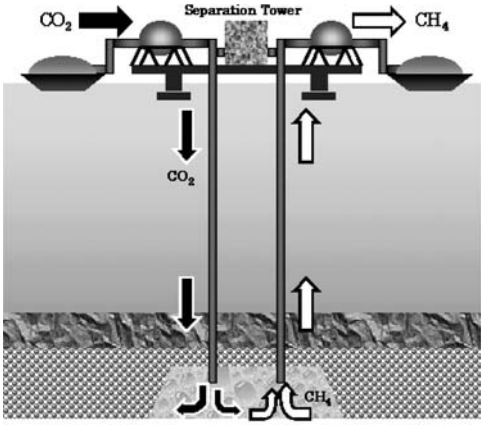


図４　CH_4-CO_2ハイドレート置換法[14]

3.2　溶解法

溶解法は，陸上からパイプで，気体や液体のCO_2を直接海へ溶解希釈する方法やMoving Ship方式で液体CO_2を海洋の中深層へ溶解する方法である[15]。これにより，自然のプロセスで行われている海洋表層を通した大気から海洋への緩やかなCO_2吸収を人工的に促進にようとするものである。CO_2の隔離期間は処理深度と海域に依存するが，50-200年と考えられている[6]。また，処理深度が2000m以浅であるため技術的な可能性は高いものの，広範囲にCO_2が拡散していくため，環境評価が難しいという欠点がある。

気体溶解法は，深度400～500mの比較的浅い海に気体を溶解させるもので，他の海洋隔離法に比べて経済的に有利と考えられており，日本やノルウェーなどで基礎的[16],[17]及び開発的[18]な研究が行われている。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

液体溶解法は，液体CO_2を深度500m以深に放出する方法である。主に1000～3000mの海域に放出することから，中層放出とも言われている。これまでに，放出CO_2液泡径や上昇速度についての実験的[19]そして解析的[20]な検討が行われている。溶解法の中で，船舶を利用するMoving Ship方式の特色は，航走しながら広範囲にCO_2を放出することにより，海水中のCO_2濃度増加を制御できることである[21]。国内ではRITEが中心となりプロジェクトが進められている[22,23]。その際，海洋へのCO_2溶解はハイドレート膜を介して行われるため，詳細な環境評価を行うためには，ハイドレートの特性解明が重要である。

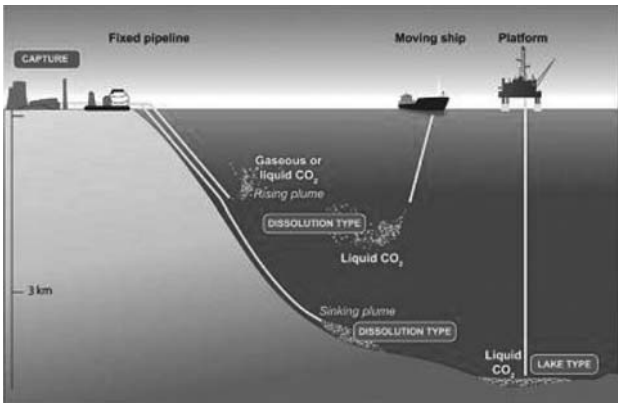


図５　溶解法と深海貯留法[15]

3.3　深海貯留法

深海貯留法は，図５に示すように，液体CO_2を海底窪地の一定場所に隔離する手段である。そのため，貯留されたCO_2の比重が周囲の海水よりも重くなる必要がある。その条件を満たす深度は2750m程度であり，従来は3000m前後での貯留法が適当であると考えられていた。しかし，深海底に湖のように貯められた液体CO_2と海水との界面の上層は海水のCO_2溶解濃度が飽和状態に達している。そこで，液体CO_2がこのCO_2飽和溶解海水よりも重くなる条件が必要であり，その限界深度は3500m程度になる。また，CO_2の隔離期間は処理深度や隔離方法に依存するが，2000年以上とも考えられている[8]。処理深度が3500m以深であるため技術的な難しさはあるものの，一定場所に貯留することから，環境への評価は可能であるとされている。

海洋底の窪地に液体CO_2を貯留する窪地貯留法[24]では，貯留されたCO_2と海水との界面にはCO_2ハイドレート膜が形成され，ハイドレート膜により安定的な貯留効果が期待される。また，海底の窪地地形やハイドレート膜の影響から，液体CO_2が海洋へ拡散することを防ぐため，CO_2溶解海水が海洋環境に与える影響を限定する効果も期待される。

４．海洋隔離条件下におけるCO_2の性質

4.1　CO_2の物性

CO_2の分子量は44.01kg/kmolであり，水蒸気（H_2O），オゾン（O_3），メタン（CH_4），亜酸化窒素（N_2O）等と同じく赤外線を吸収する性質を持つため，温室効果ガスに分類されている。このCO_2の海洋隔離は，地上の大気圧条件下の温度・圧力条件とは異なる，海洋の低温・高圧条件下の特殊な環境で行われる。この特殊な条件下では，上述のように，CO_2は気体・液体・固体の三相だけでなくハイドレートという四番目の相となりうる。

図６にCO_2相図[25]を示す。臨界点（Critical Point）は温度31.1℃，圧力7.38MPaであり，３重点（Triple Point）は温度－56.6℃，圧力0.51MPaである。CO_2は常温大気圧において気体であるが，温度15℃以下，圧力5.07MPa以上の条件下で液体となる。つまり深度500mに相当する圧力条件下においてCO_2を注入した場合には，CO_2は液体状態であると考えられる。

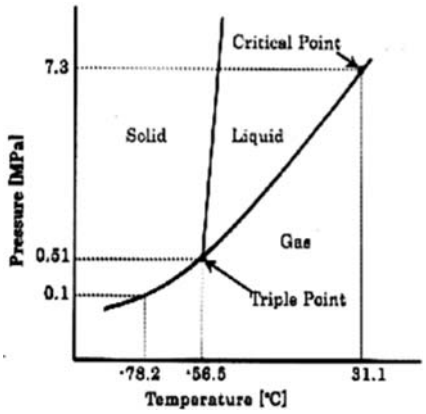


図６　CO_2相図[25]

図７に海洋隔離において重要となる高圧水中でのCO_2と水の相平衡図[26]を示す。ここで，低温・高圧条件下においては，CO_2と水が反応してCO_2ハイドレートと呼ばれる包接水和物が生成される。また，水，液体CO_2，気体CO_2，ハイドレートの４相が共存できる４重点（Quadruple Point）は温度10.5℃，圧力4.46MPaである。また，実際の海洋では，CO_2と海水との相平衡図が重要となってくる。そこで，海水成分による４重点の移動やそこから出る平衡線の移動を考慮し，さらに圧力を深度と見立てて相図を描きなおした結果を図８に示す[27]。この鉛直分布は，我が国の太平洋と大西洋の南北断面等温図[28]から代表的な二地点を選び曲線として描かれたものである。これより，北太平洋では500m以深で，北大西洋では900m以深でハイドレートが生成可能となることが分かる。

図９に海洋隔離方法を分類する上で重要となってくる圧力に対するCO_2ハイドレート，CO_2飽和水溶液，海水およびCO_2の密度の関係を示す[29]。また，圧力を深度に換算した際の海水とCO_2の密度変化[27]を図10に示す。こ

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

れより，深度2700m付近で海水とCO_2の比重が逆転している。よって，ここが溶解法と深海貯留法の境になる深度と考えられる。

図11に純水中へのCO_2溶解度を示す[30]。溶解度は，50 atm（5 MPa）程度まではヘンリーの法則（Henry's Law）に従って圧力に比例して大きくなる。しかし，それ以上では飽和に近づく。また，溶解度は温度が低くなるほど大きくなる。これより，水温2－3℃の深海においては8－9 wt%の溶解度が期待できる。

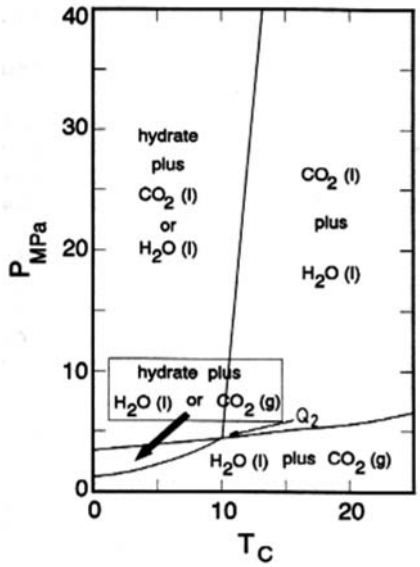


図7　CO_2-H_2O相図[26]

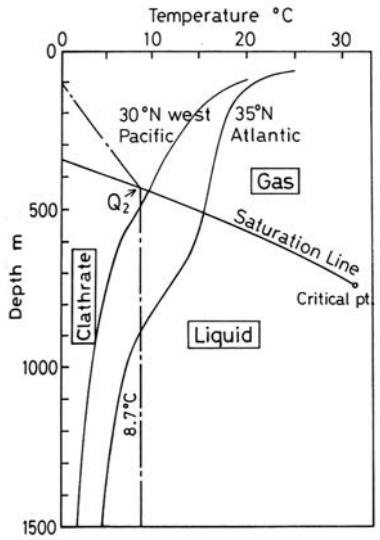


図8　水深による海洋水温度とCO_2の状態変化[27]

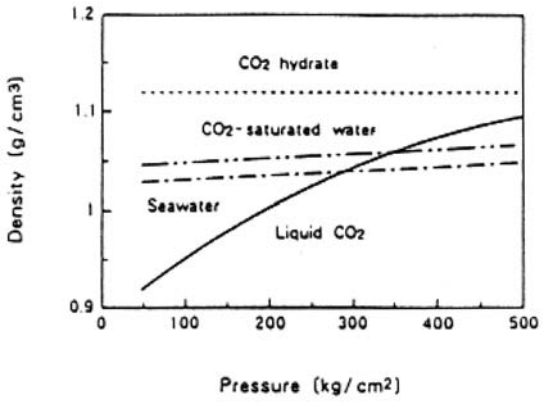


図9　海水とCO_2密度[29]

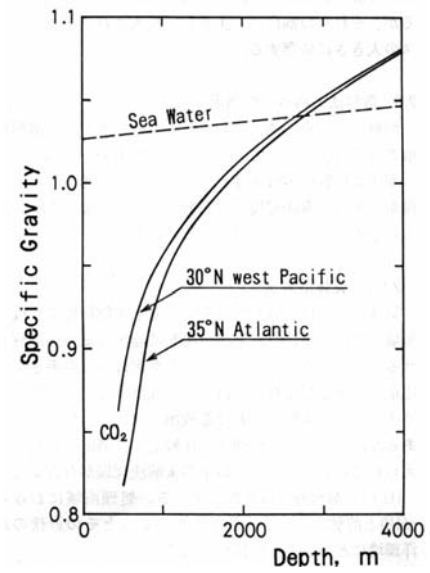


図10　CO_2と海水密度の深度依存性[27]

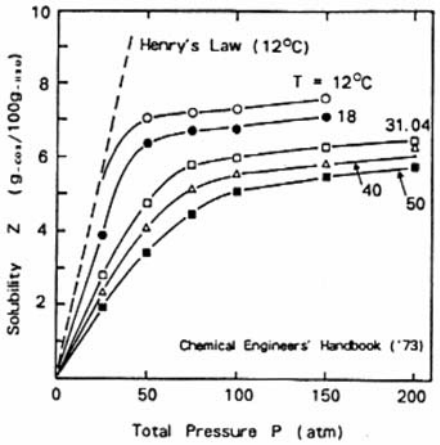


図11　純水中へのCO_2溶解度[30]

4.2　CO_2ハイドレートの物性

温度10.25℃以下，圧力4.45MPa以上の条件下においては，水と液体CO_2が反応しCO_2ハイドレートが形成される。CO_2ハイドレートとは，ゲスト分子であるCO_2分子の周りに幾つかのホスト分子であるH_2O分子が集まり，それぞれのH_2O分子が水素結合によって籠型の多面体（キャビティ）を形成した水和物のことである。

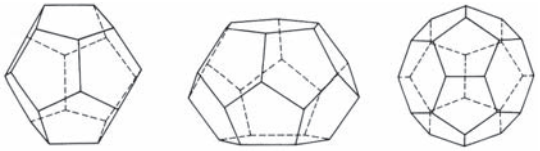
図12にハイドレート結晶構造を構成する代表的な3種類のキャビティを示す[26]。これらの多面体は「5角形12面から成る12面体：5^{12}」，「5角形12面と6角形2面から成る14面体：$5^{12}6^2$」，「5角形12面と6角形4面から成る16面体：$5^{12}6^4$」があり，幾何学的形状に基づいて，各々5^{12}，$5^{12}6^2$，$5^{12}6^4$と表記される。各々20，24，28個

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

のH_2O分子が水素結合して形成されており，そのH_2O分子の籠状構造のキャビティの中心に不活性分子が拘束され，Van der Waals力により結合されている。このCO_2ハイドレートの生成反応式は以下で示される。

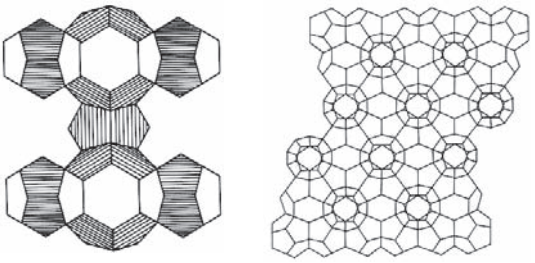
$$CO_2 + nH_2O \Leftrightarrow CO_2 \cdot nH_2O$$

実際のハイドレート結晶構造は，これらのキャビティがいくつか組み合わされて形成される。現在，３種類の結晶構造（StructureⅠ，StructureⅡ，Structure H）が確認されている。図13に単一種のゲスト物質によって形成されるStructureⅠとStructureⅡの結晶構造を示す。ゲスト分子とキャビティの寸法比により，ゲスト分子の入ることができる構造とキャビティは決まる。CO_2の場合，CO_2分子直径は約0.512 nmであるため，キャビティ内径が0.586 nmの図13(a)のStructureⅠ（$5^{12}6^2$）に入ることができる[31]。図14にStructureⅠの結晶格子配置を示す。StructureⅠの単位格子において，H_2O分子の数は46であり，ゲスト分子であるCO_2分子が入ることのできるキャビティ数は８である。ただし，5^{12}にゲスト分子であるCO_2が入るかどうかに関しては，現在も議論が続いている[32,33,34]。また，各ゲスト分子が入ることができるキャビティは全て埋まっているわけではなく，その充填率はハイドレート結晶が出来た際の圧力また温度に依存すると考えられている。なお，充填率を示す指標としては，しばし水和数nが用いられる。水和数とは，ハイドレートを構成する水分子の数とゲスト分子の数の比である。CO_2ハイドレートの場合，すべてのキャビティにCO_2分子が入った場合の理論水和数nは5.75である。現実にはすべてのキャビティにゲスト分子が入ることはないため，実際には６－７前後と考えられている[32,34,35,36,37]。CO_2ハイドレートの比重は，ハイドレートが生成した時の水和数によるものの，海水よりも大きく1.1前後といわれている。



(a)　5^{12}(12面体)　　(b)　$5^{12}6^2$(14面体)　　(c)　$5^{12}6^4$(16面体)

図12　ハイドレートを構成する基本籠状構造[26]



(a)　StructureⅠ(5^{12}と$5^{12}6^2$[1:3])　　(b)　StructureⅡ(5^{12}と$5^{12}6^4$[2:1])

図13　ハイドレート結晶単位構造[26]

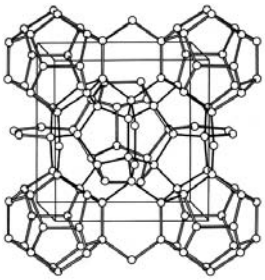


図14　ハイドレート（StructureⅠ）の結晶格子配[31]

５．おわりに

図12に示した水分子の籠状分子構造の中に，ゲスト分子が入って作られる固体結晶は，学術的には「クラスレート水和物」（Clathrate hydrate，包接水和物）と呼ばれる。「ハイドレート」（gas hydrate）という呼称は，結晶内に取り込まれる前のゲスト分子が気体状態のものに対する慣用表現である。ハイドレートが工業上知られるようになったのは，天然ガスのパイプラインの閉塞がハイドレートによるものと認識された1934年以降のことである[38]。それ以降，ハイドレートは，パイプラインによるガス輸送の阻害要因として研究されてきた。今年2010年４月20日，メキシコ湾岸で発生した原油流出事故においても，事故の復旧がハイドレートによって阻害されたとの指摘がある。

海洋隔離を行う上で，CO_2ハイドレートが重要な役割を果たすことは，既に述べた通りである。深海貯留においては，CO_2ハイドレート生成が強く推定され，貯留したCO_2と深海水とがハイドレート膜によって隔離されることで長期安定貯留が期待されている。海底下貯留においても，堆積層上部にハイドレートの天蓋が生成されることによる漏洩防止が期待される一方，液体CO_2の導入配管内でのハイドレート生成が注入を阻害する要因となる可能性についての懸念もある。① 水和数に関連するCO_2ハイドレートの密度やゲスト物質であるCO_2の水への溶解度などの熱力学的特性，② CO_2ハイドレートの生成を支配する核形成が始まるまでのいわゆる誘導時間，③ 核形成の容易さがそれまでの水の履歴に強く依存する記憶効果，④ 生成されたCO_2ハイドレートの力学的な特性や周囲流体からの影響など，海洋貯留の実現のためには，CO_2ハイドレートに関連して解決すべき様々な課題が残されている[26,39]。これは，CO_2ハイドレートの生成条件が数百気圧の高圧で低温の極めて特殊な環境下で実現するため，実験室での研究が困難であることに起因している。今後，海洋隔離を実現するためには，CO_2ハイドレートの挙動についての科学的知見を蓄積することが不可欠である。

参考文献

(1)　気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第四次報告書（2007）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

(2) 気候変動に関する政府間パネル「第4次報告書に対する第3作業部会の報告」政策決定者向け要約（2007）

(3) 「日本経済新聞」2009年4月16日

(4) 地球環境産業技術開発機構:「図解CO_2貯留テクノロジー」，工業調査会（2006）

(5) P. Bergman, Riemer. Eds, P. Eliasson. and A. Wokaun, "Geological sequestration of CO_2 : A status report", Green Gas Control Technologies, (2000),169-173

(6) 綾威雄，山根健次，中島康晴:「CO_2海洋隔離技術開発の現状」，海上技術安全研究所ホームページ http://www.nmri.go.jp/

(7) A.S.Albanese and M.Steinberg, "Environmental Control Technology for Atmospheric Carbon Dioxide", Energy, 5 (1980), 641-664

(8) 綾威雄:「CO_2を深海底の窪地に溜めよう」，海洋政策研究財団ニューズレター，34 (2002)

(9) 「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律の一部を改正する法律案の閣議決定について」，環境省報道発表資料，2007年

(10) 「CCS2020 二酸化炭素の分離回収・地中貯留技術の現状と実用化の方向について」，経済産業省産業技術環境局，2006年

(11) 「朝日新聞」2006年8月29日

(12) 李小春，矢島達也，「ハイドレート生成に伴う液体CO_2の流動性変化」，日本機械学会熱工学コンファレンス2004講演論文集.

(13) 乾正幸，佐藤徹:「ガスハイドレートを利用した海底下二酸化炭素貯留の経済性評価」熱工学コンファレンス，C133 (2006), 93-94

(14) 松本良，奥田義久，青木豊:「メタンハイドレート」，日経サイエンス (1994), 106

(15) 環境省ホームページ http://www.env.go.jp/

(16) T, Saito., T. Kajishima. and R.Nagaosa., "A Gas Lift Advanced Dissolution System for CO_2 Sequestration into the Ocean by Shallow Injection", MARIENV' 95, (1995) 875-881

(17) 斉藤隆之，梶島岳夫，土屋活美:「ガスリフト効果を利用した二酸化炭素の深海送り込み技術（GLADシステム）」，動力エネルギーシンポジウム講演論文集, D208 (2009), 399-402

(18) Haugan, P.M. and Drange, H., "Sequestration of CO_2 in the Deep Ocean by Shallow Injection" Nature, (1991), 357-28

(19) 綾威雄，山根健次:「二酸化炭素の深海投棄に関する研究」，機会学会九州支部第44会総会講演論文集，918-1 (1991)

(20) S, Hirai., et al., "Measurement of CO_2 Diffusion Coefficient and Application of LIF in Pressurized Water", Abstracts of 2nd int. Symposium on CO_2 Fixation and Efficient Utilization of Energy, Tokyo (1995)

(21) RITE CO_2貯留プロジェクトホームページhttp://www.rite.or.jp/

(22) NEDO海洋隔離プロジェクト成果報告書http://www.nedo.go.jp/

(23) RITE海洋隔離プロジェクト成果報告書http://www.rite.or.jp/

(24) 綾威雄，山根健次:「CO_2深海貯留-地球温暖化に向けて」，日本船用機関学会，34-11 (1999)

(25) 吉岡甲子郎:「相律と状態図」，共立出版（1984）

(26) E, Dendy Sloan. and C, Koh., "Clathrate Hydrates of Natural Gases Third Edition" CRC Press (2007)

(27) 山根健次:「深海条件下におけるCO_2とCO_2ハイドレートの溶解特性に関する実験的研究」，筑波大学工学研究科工学博士論文（1999）

(28) 西山勝暢:「太平洋と大西洋」，海と安全，87-9 (1987), 9-11

(29) Y, Shindo., Y, Fujioka., K, Takeuchi., T, Hakuta. and H, Komiyama., "Deep Sea CO_2 Sequestration", Carbon Dioxide Chemistry, The Royal Society of Chemistry (1994)

(30) 小宮山宏:「地球温暖化ハンドブック」アイピーシー (1990)

(31) J, P. Lederhow., R, L.Christiansen. and E.D.Sloan Jr., "A First Order Method of Hydrate Equilibrium and its Use with New Structure", Fluid Phase Equilibria, 83 (1993)

(32) A, K.Sum., R, C.Burrus. and E.D.Sloan Jr., "Measurement of Clathrate Hydrates via Raman Spectroscopy", J.Phs.Chem.B, 101 (1997), 7371-7377

(33) C, I.Ratcliffe. and A.J.Ripmeester., "1H and 13C NMR Studies on Carbon Dioxide Hydrate", J.Phys.Chem, 92 (1986), 1259-1263

(34) I, Aya., K,Yamane. and H, Nariai., "Solubility of CO_2 and Density of CO_2 Hydrate at 30MPa", Energy, 22 (1997), 263-271

(35) J, A.Ripmeester. and C, I.Ratcliffe., "The Diverse Nature of Dodecahedral Cages in Clathrate Hydrates as Revealed by 129Xe and 13C NMR Spectroscopy: CO_2 as a Small-Cage Guest", Energy Fuels, 12 (1998), 197-200

(36) T, Uchida., A, Takagi., J, Kawabata., S, Mae. and T, Honda., "Raman Spectroscopic Analysis on the Growth Process of CO_2 Hydrate", Energy Convers.Mgmt, 36 (1995), 547-550

(37) Udachin, K., Ratcliffe, C. and Ripmeester, J., "Structure, composition, and thermal expansion of CO_2 hydrate from single crystal X-ray diffraction measurements", J. Phys. Chem. B, 105 (2001), 4200-4204

(38) E. G. Hammershcmit, "Formatiotion of Gas Hydrates in Natural Gas Transmission Line", Ind. Eng. Chem. 26, (1934), 851-855

(39) 大村亮，森康彦，「クラスレート水和物の物理化学—エネルギー・環境関連技術のための概論と研究動向レビュー」，Thermal Science & Engineering, 2 (1999), 35-58

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

論説◆解説

特集：石炭火力発電とCCS技術

地域分散型CO_2回収および貯留技術

古宇田亮一*1
KOUDA Ryoichi

キーワード：CO_2回収及び貯留（CCS），地域分散，地層，輸送コスト，安全性，漏洩リスク，誘発地震，carbon-dioxide capture and storage（CCS），regionally distributed, formation, transportation cost, safety, leakage risk, induced earthquake

1．はじめに

京都議定書が2005年２月に正式発効して以来，気候変動と地球温暖化問題の解決に向け，欧州を中心とした各国がチャンス到来とばかりに，地球温暖化ガス対策のための地中貯留について，しのぎを削ってきた。既に半ばに達している第一約束期間（2008年－2012年）に，我が国は1990年比で６％削減を求められている。また，2009年の国連総会では，2020年までに25%削減という目標も掲げた。既に，省エネルギーやエネルギー源転換の他，CDM（クリーン開発メカニズム）など海外に依存する京都議定書の手法の様々な組み合わせが実施された。中でも，火力発電所の燃焼によるCO_2を排出する生産活動を落とさずにCO_2を削減する究極の方法として期待されているのが，CCS技術，即ち，CO_2回収および地中貯留である。火力発電所の需要は新興国（ブラジル，ロシア，インド，インドネシア，中国，南アフリカ等）において急増しており，そのCO_2排出対策として，特に注目されている。

ここでは，最近のCCS手法として有望視され始めた地域分散型CCSの可能性と取り組みについて解説する。工場などで価値のあるものを製造する場合は，一般に大規模化によりコストダウンが期待できるが，価値の無い排出CO_2のようなものを生産でなく貯留する場合は，規模の大きさが必ずしもメリットにならず，コストダウンにもつながりにくいことから，地域分散型が注目されている。

2．地球温暖化ガス削減とCO_2地中貯留

CO_2排出量の国際取引制度が欧州構成諸国や米国の州で実施されてきた。これは，電力・石油・ガス・鉄鋼・紙・パルプ・セメント・窯業等の企業に排出上限を割り当て規制するものだ。目標達成ができなければ罰金を課し，目標以上に達成したら余剰分を他企業に販売できる。ロンドン国際石油取引所など６取引所で市場形成が行われて，様々な企業・トレーダがビジネスを展開している。その価格はかなり下落しており，現在，CO_2トンあたり数千円の下の方を推移している。排出量取引価格はCCSのコストを考える時，非常に大きな数値目標の参考になると考えられている。わが国も排出量取引市場として国内市場はまだ本格的には立ち上がっていないが，既に国際取引は活発化している。第一約束期間とそれ以降の排出削減は，エネルギー多消費型産業の一部に特定されるだけの問題ではなく，全産業と全国民が共同してあたるべきことと考えられるに至っている。

エネルギー多消費型産業の中でも，石炭や石油のような化石燃料を多量に燃焼する工場や発電所にとっては，排出権取引だけで削減量の全てをまかなうことは限界がある。将来的には水素エネルギーなどへの転換をはかると共に，排出されたCO_2を，合理的なコストにより，環境負荷を軽減する形で削減することが急務である。そのためには，生物圏への危険な影響を無くすなど安全性が優先されなければならないが，一方，そのためだけに膨大なコストをかけ続けることも避けるべき課題である。

コスト面だけ考えれば，大量にCO_2を排出する施設の近傍でCO_2を分離回収し地中貯留する分散処理が本格的な削減対策となる。このような地域分散型CO_2回収および貯留は，CCS技術の中でも初期の段階から注目されてきた。環境負荷の低減に向けたリスク評価も重要である。地域における環境対策と産業振興の両立，雇用の確保などの側面から，できるだけ県境などを越えずに近傍で処分することで，工場立地などに寄与することもできる。様々な観点から，CO_2削減の切り札としての地中貯留，及び，そのコストとリスク評価から，地域分散型CO_2回収及び貯留の考え方が注目されている。そこで，次章で地中貯留技術を概観する。

3．CO_2地中貯留の可能性と課題

IPCC（気候変動に関する政府間パネル：Intergovermental Panel on Climate Change）が構想した４種類の地中貯留手法を図１に示す[1]。いずれも堆積層を対象としており，CO_2の入れ物となる地層の容量と透水性の大

原稿受付　2010年７月20日
＊１　（独）産業技術総合研究所
〒305-8568　つくば市梅園１－１－１

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

きさ，及び，蓋になる地層（キャップ・ロック）がCO_2漏出リスクを遮る性質が重要となる。

更に，地層内で炭酸塩鉱物化して確実に固定することで数万年以上の安定的固定を得ることも地中貯留の有力なソリューションとなる。上記の貯留手法の１と２（図１）は既存油田（及び天然ガス）の地層を使う方法で，既にある孔を使う，キャップロックの遮蔽性に期待されている点はあるが，逆に，既存油田の生産に対する悪影響や，枯渇油田のキャップロックの健全性の保証に課題が残り，主な研究対象となっている。石油・天然ガスに比べてCO_2は地層を通過しやすいので，既存油田・ガス田のデータだけで遺漏の問題を避けられるかどうか疑問も多い。

実は，油田・ガス田自体もCO_2の大規模排出源であり，東南アジアの石油・ガス田では石油・ガス量の８割以上にCO_2が達するものもあるくらいである。一般には，CO_2は抜けやすいが，油・ガス田の場合は，CO_2トラップの上位に石油・天然ガスが存在する場合は，混合された状態で存在すると考えられている。その分離は容易ではなくコストもかかる。欧州・北海のスライプナープロジェクトでは，石油生産から高いコストで分離回収したCO_2を地下の地層に封じ込めている。

通常，大規模排出源の近くに油田・ガス田が存在する事は期待できない。例えば，東京湾に大規模油田があろうとは期待できない。油田・ガス田など数少ない対象ではなく，図１に示す３にあるような，より多くかつ広く分布する一般帯水層を対象にしたCO_2地中貯留が注目を集めている。

図１に示す４にある炭田を利用する方法も，有効活用できるメタンガスの回収が期待できるのでコスト的には有望と考えられてきたが，必ずしも事例が多くなく，石油・ガス田同様，大規模排出源の近傍に期待できる対象は少ない。しかし，石炭層は油田・ガス田より数が多く，世界的にも広く分布し，特に新興国において重要なエネルギー源でもあるので，その活用技術は影響が大きいと考えられている。

図１は，地層そのものの性質を示さない。注入されたCO_2を貯留する地層を構成する鉱物群が，ケイ酸分が多いかどうか，塩基性の鉄・マグネシウムを多く含むか，あるいは，炭酸塩などを主とするかなどによっても，地下に封入されたCO_2のその後の挙動や鉱物化に大きく影響する。特に，塩基性の鉄・マグネシウムを多く含む岩石の場合は，pHが上昇する事で，炭酸塩鉱物を沈殿しやすく，CO_2固定にはよい環境であることが知られているが，その研究は必ずしも進んでいない。

図２に，CO_2の地中貯留が可能な堆積岩の世界的な分布を示す。この図は経済的な可能性を考慮せずに作成されており，必ずしも，最適な場所を示すものではない。図２のようなデータを用いると，世界のCO_2地中貯留可能容量は，少なく見積もって，油田・ガス田で6750億トン，一般帯水層で１兆トン，石炭層で300（以上，1500）億トン程度と見積もられている[1]。あたかも，世界のCO_2問題が解決してしまいそうな数字であるが，大規模排出源近傍か，コスト的に可能か，リスク評価等については考慮されていない。

一般帯水層は大規模排出源に近いことが多いので，この中でも特に重視されてよく，地域分散型も一般帯水層を主とすることが多いと想定されている。地域分散型の場合は，排出源近傍の地層を使うため，多様な地層に貯留することを想定している。

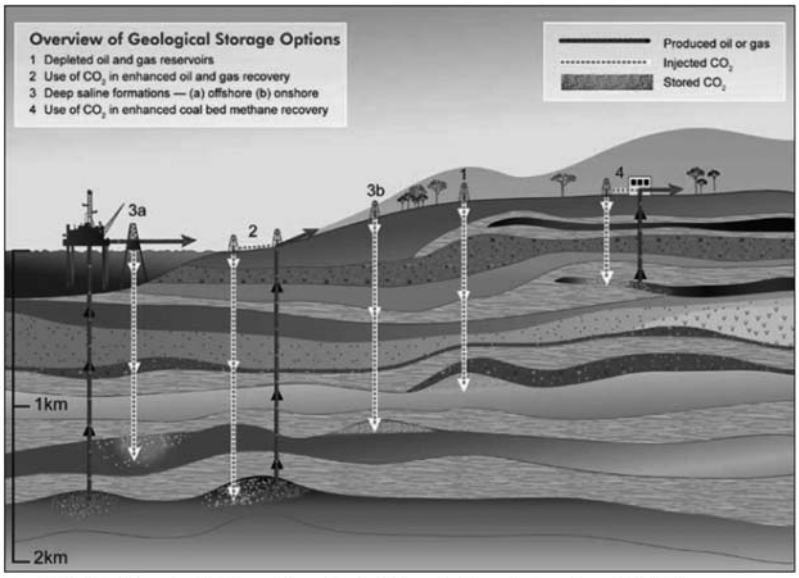


Figure TS.7. Methods for storing CO_2 in deep underground geological formations. Two methods may be combined with the recovery of hydrocarbons: EOR (2) and ECBM (4). See text for explanation of these methods (Courtesy CO2CRC).

図１　地中貯留の４種類の手法（IPCC, 2005, p.44）
１：枯渇した油田に注入，２：油田に注入して石油採掘を増加，３：沿岸域の一般帯水層に注入，
４：石炭層に注入してメタンガスを回収

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

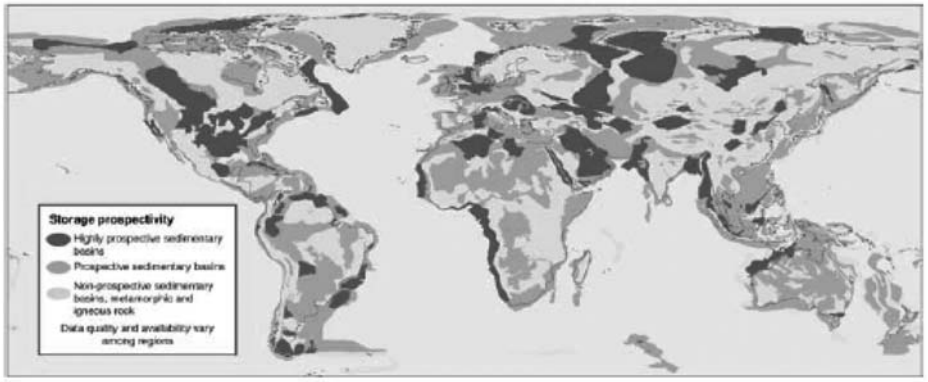


Figure SPM.6b. Prospective areas in sedimentary basins where suitable saline formations, oil or gas fields or coal beds may be found. Locations for storage in coal beds are only partly included. Prospectivity is a qualitative assessment of the likelihood that a suitable storage location is present in a given area based on the available information. This figure should be taken as a guide only because it is based on partial data, the quality of which may vary from region to region and which may change over time and with new information (Figure 2.4) (Courtesy of Geoscience Australia).

図２　地中貯留可能な世界の堆積層分布（IPCC, 2005, p.9）
コストの問題は別として，色の濃い所ほど，貯留容量が大きいと考えられている。

CO_2を地中に貯留し鉱物として固定するため，石油・天然ガス・石炭層や地熱貯留層などの存在する地域における計測・実験と，計算機モデルによる地中貯留プロセスの研究，地質学的な貯留サイトの選定条件などが主に研究されてきた。カナダのウェイバーン石油層，米国のティーポット・ドーム帯水層，米国ワイオミングの石炭層での貯留実験や，ロシア・セルビア・ドイツでのナチュラルアナログ，日本（長岡）の帯水層貯留の流体力学モデル，地熱系の二酸化炭素隔離，炭酸塩鉱物化実験等が代表的研究事例である[2]。

近年話題になったCO_2地中貯留サイトを表１にあげる[1]。ここには油田・ガス田関連が３例（EOR, Gas field, Enhanced gas recovery），一般帯水層が４例（saline formation），石炭層が4例（ECBM）掲載されている。

近年のCO_2地中貯留研究動向では，地層中への完全な封じ込めは不可能で，石油などが封じ込められたはずのドーム構造でも漏出は起こりうるとされ，リスク評価が重要となっていることが強調されている[1]。CO_2地中貯留が行われ，現在もCO_2圧入が継続されている北海のスライプナープロジェクトでも，実は地下構造が比較的平坦な帯水層に貯留している。モニター実験期間中の５年間に，重大な海底漏出は生じてはいなかったというが，数年間に地層間で漏出したことは明らかであった。

CO_2は大気にも存在し，動物の呼吸でも排出されるので，必ずしも危険物質ではないが，多量に短期間に生物圏に漏出すれば，重大な環境問題を引き起こす。2010年に発生したメキシコ湾における海底油田からの大規模石油漏出は記憶に新しく，その後長期にわたってメキシコ湾沿岸のみならず，大西洋北半部域に影響を拡大する可能性がある。貯留に使われる井戸の故障と劣化や，貯留する地層の断裂・断層によるリスクは事前に見積もる必要がある。

CO_2を封入すべき地層とその上位の帽岩については，詳細な微視的・地球科学的検討と地中貯留時の継続的なモニタリングが必要性とされている。漏出するCO_2をシミュレーションでリスク評価することや，主要なモニタリング手法である反射法地震探査，電磁探査，リモートセンシング（DINSAR）等の技術も含めて，漏出リスク問題に関心が高まり，議論が集中していているところである。

地中からCO_2が漏出するメカニズムについて，図３で

表１　CO_2地中貯留が現在実験中ないし計画中の地域（IPCC, 2005, p.45）

Table TS.5. Sites where CO_2 storage has been done, is currently in progress or is planned, varying from small pilots to large-scale commercial applications.

Project name	Country	Injection start (year)	Approximate average daily injection rate (tCO_2 day^{-1})	Total (planned) storage (tCO_2)	Storage reservoir type
Weyburn	Canada	2000	3,000-5,000	20,000,000	EOR
In Salah	Algeria	2004	3,000-4,000	17,000,000	Gas field
Sleipner	Norway	1996	3,000	20,000,000	Saline formation
K12B	Netherlands	2004	100 (1,000 planned for 2006+)	8,000,000	Enhanced gas recovery
Frio	U.S.A	2004	177	1600	Saline formation
Fenn Big Valley	Canada	1998	50	200	ECBM
Qinshui Basin	China	2003	30	150	ECBM
Yubari	Japan	2004	10	200	ECBM
Recopol	Poland	2003	1	10	ECBM
Gorgon (planned)	Australia	~2009	10,000	unknown	Saline formation
Snøhvit (planned)	Norway	2006	2,000	unknown	Saline formation

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

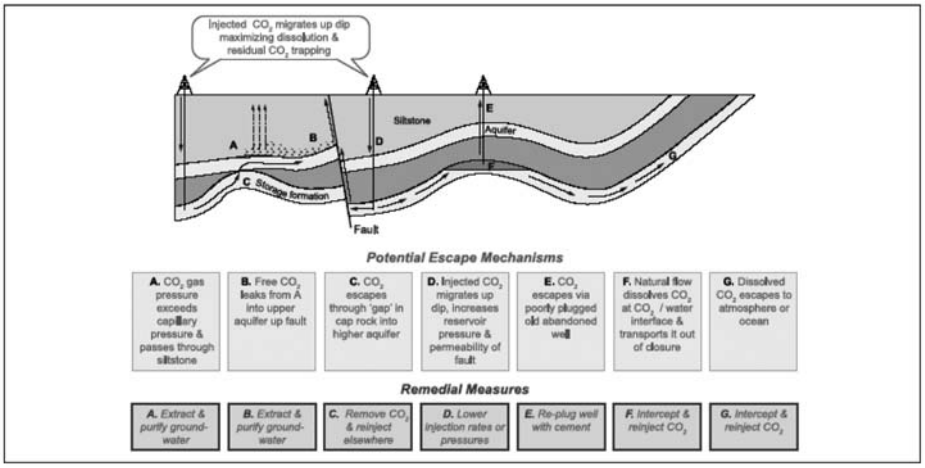


Figure 5.25 Some potential escape routes for CO_2 injected into saline formations.

図 3　CO_2地中貯留における漏出リスクの種類（IPCC, 2005, p.255）

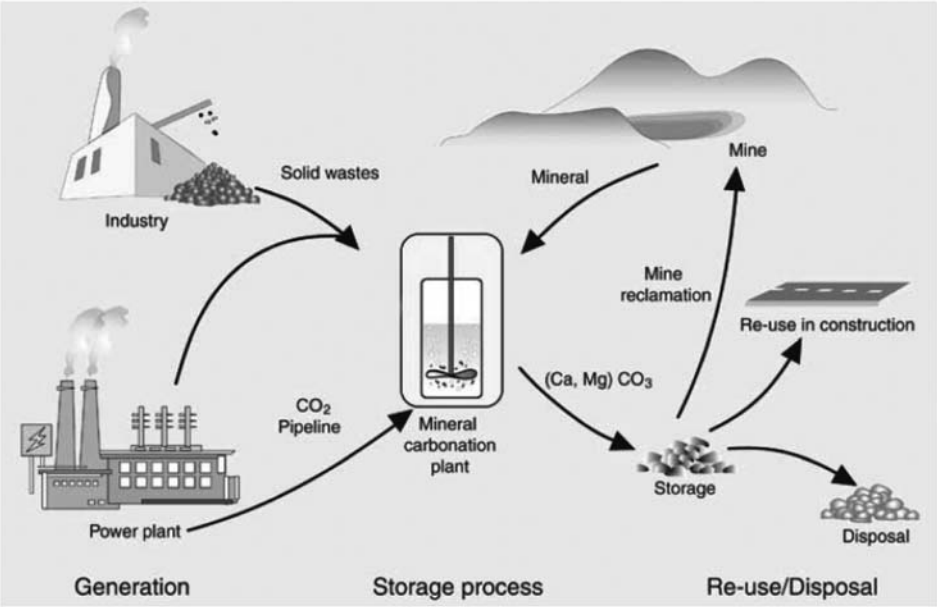


Figure TS.10. Material fluxes and process steps associated with the mineral carbonation of silicate rocks or industrial residues (Courtesy ECN).

図 4　鉱山から排出された岩石と工場のCO_2をプラントで混合して再利用可能な沈殿物とするリサイクル（IPCC, 2005, p.52）

は，地層内を透過するケースや，断層沿いに漏出するケースなどをいくつかに分類している[1]。このうち，最も懸念される事は，断層沿いの漏出ケースといわれている。地域分散型CO_2の地中貯留が対象とする大規模排出源の多い沿岸域においても，既存油田・ガス田同様，断層の存在確認が難しく，そのための探査が必要である。

地下については不明なことが多いため，多様なデータを有する専門家，特に地球科学の専門家が責任を持って調査・判断することが重要である。このためには，総合的な地下情報を保有して利活用できる機関による全面的な連携協力を必要としており，CO_2を削減する企業にとっても必要な存在となるだろう。国際的には，そのような機関が前面に出て調査することが普通である。

他に，地下の漏出リスクを避け，地上で岩石とCO_2を混ぜて固定化し，リサイクル処理する方法も紹介しておく必要がある。図 4 は，鉱山から出て来るズリ（廃岩石）や，産業的な固形廃棄物をCO_2と混合して炭酸塩鉱物として固定し，再利用する案である。現在のところ処理コストが高く，まだ実用的とは考えられていないが，地下には影響せず，リサイクルで処理する考え方は，何か別目的で実用可能になることも期待されている。

4．地域分散型における安全性とコスト

CO_2回収及び地中貯留一般についての安全性とコストの評価は実施されているものの，欧米諸国も含めて実験的な段階でも実コストはどうしても高いものにつき，合理的なコスト見積りは公表された事例が少ない。

地域分散型に対抗すると考えられる大規模集中型CCS

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

は，パイプラインないしは海上輸送が主な運搬手段となり，必ずしも，大規模排出源近傍に設置されるわけではない。しかし，大規模集中型CCSの原型と考えられる実験事業では，例えば，イタリアのアドリア海の例などのように，石炭火力発電所に近い沿岸域の海底下地層中に設定されたり，長年の実績のある北海油田のスライプナープロジェクトのような海底下，あるいは，アルジェリアのインサラーやカナダのウエイバーンのように内陸の石油層を対象としたシステムで実施され，輸送手段はパイプラインが多い。排出場所と貯留場所が極めて近い時には，大した問題にならない輸送コストであるが，大規模集中貯留を構想して遠方まで運ぶような場合は，輸送コストが過半以上に達する可能性がある。一方，地域分散型は，輸送コストを低く抑えるシステムのため，輸送コスト的には優位性がある。

大規模集中型では，漏洩リスクを押さえるため，ある程度深い深度が必要となるため掘削コストが高くなる。ところが，地域分散型では，やや浅いところもリスクの低い貯留対象となるため，掘削コストを下げる他，垂直的にも貯留容量を拡大できるので，規模的にも有利である。

地中貯留の実験段階では，せいぜい年間数百万トン以下であり，しかも短期間のモニタリング実績しか知られていないため，安全性の問題はそれほど大きくなってはいない。しかし，石油・天然ガスと異なる性質のCO_2を大規模に地下に圧入するということは，実は，リスクを高めることになる。

一般に，超臨界CO_2は石油貯留層などの頂部に集積すると考えられているが，そのような地層が，もし活褶曲の背斜構造の頂部であるなら，力学的に発生する細かい破断等によりCO_2の漏洩ルートが存在する確率が高くなる。小規模なら目立たなかったものが，大規模になると大きな漏洩リスクに高まることがある。また，断層は，一般的には流体にとって透水性が非常に高くなる場合と，難透水性により石油・天然ガスの遮蔽層として構造的な貯留層を構成する場合とがある。ところが，活断層からそれほど離れていない場合は，CO_2などの流体圧入による誘発地震の危険性が高まることが観測されている[3]。小規模であれば，そのような場所を避けることで，リスクを低くできる。

地域分散型が注目されているのは，輸送等のコスト的な優位性が注目されているためでもあるが，大きな理由として規模を抑えるほどリスクを著しく低減できることがある。

また，例えば，日本の沿岸域の堆積層のように，必ずしも一つ一つの対象となる貯留層が大きくない場合であっても，地域分散型で地域の排出のみを引き受けるには十分な貯留容量のある地域が想定されている。

地域分散型での大きな課題は，排出源近傍に貯留するため，近傍住民のPA（Public Acceptance）が最優先されることである。そのためには，データを秘匿することが多く専門家も限られている資源地域より，データが公開されることが多く専門家も多い公共事業系の地下情報を活用することが，今後のソリューションとしても重要であろう。PAが成功してきた事例は，対象とする事業が地域住民の関心が高く，公共的な利益につながることが明らかな場合であった。地球温暖化対策としてのCO_2地中貯留は，地域の産業としての排出源生産活動が生き残りをかけて必要とすることであろう。安全性が高く，コスト的にも合理的であるなら，地域分散型CO_2回収及び貯留は，地域住民にも必須で新たな公共設備として受容されやすいと考えられる。そのためには，地下の安全性データやコスト見積もりなどの情報公開が前提になるだろう。

5．今後に向けて

地下についての地質学的要素を重視することが国際的にも強まっている。これに応えられる国際級の研究が伴わなければ，日本での地中貯留も困難化しかねないことが懸念されてきたが，わが国でも，CO_2の回収と地中貯留の研究例は蓄積されつつある。実際，欧米を中心とする各国とも，地下の安全性とその活用については，強力な国家的サポートなしには進められていない。

地中貯留の今後のビジネス展開を考えると，日本のように活動的な大地を抱えて大きな地震や火山噴火が頻発する国は，国際的には地中貯留に不利と考えられている。しかし，そのことで国際競争面での遅れをとりかねないことになるとは考え難い。日本は確かに地震や火山噴火が多く，津波の被害リスクも懸念されるが，地中貯留の対象とする長い年月で考えるなら，それを避けるだけの研究上の蓄積も多い。地震と火山の研究に関しては，国家的なプロジェクトにより，世界でもトップレベルを維持している事は，貯留のリスクを避ける知恵においても期待できる。

一方的に欧米諸国等が提供する排出権ビジネスを購入するだけにならないため，何をなすべきか，早急な対策を必要とする。京都議定書は，排出源取引によるCO_2の削減割合を低く設定しているため，また，将来の国際合意で削減量が増した場合に，主要な削減が工場の休停止に至るという不測の事態に陥りかねないことも懸念される。海外での操業にも影響が懸念される。

このような問題を避けるには，欧米諸国と同じ土俵で，国家的支援の下に，日本でも地中貯留が可能なことを納得させる場を提供することであり，工場立地と帯水層が交差する沿岸域（陸域と海域の双方を含む地域）の詳細な調査が必須である。

筆者らは，地中貯留や沿岸域の工場立地，パイプライン立地，環境調査などに，地質構造と地下水流動に関する調査成果を応用して，地下の合理的な設計と様々なリスク対策を可能とするべく検討し（図５），情報公開の

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

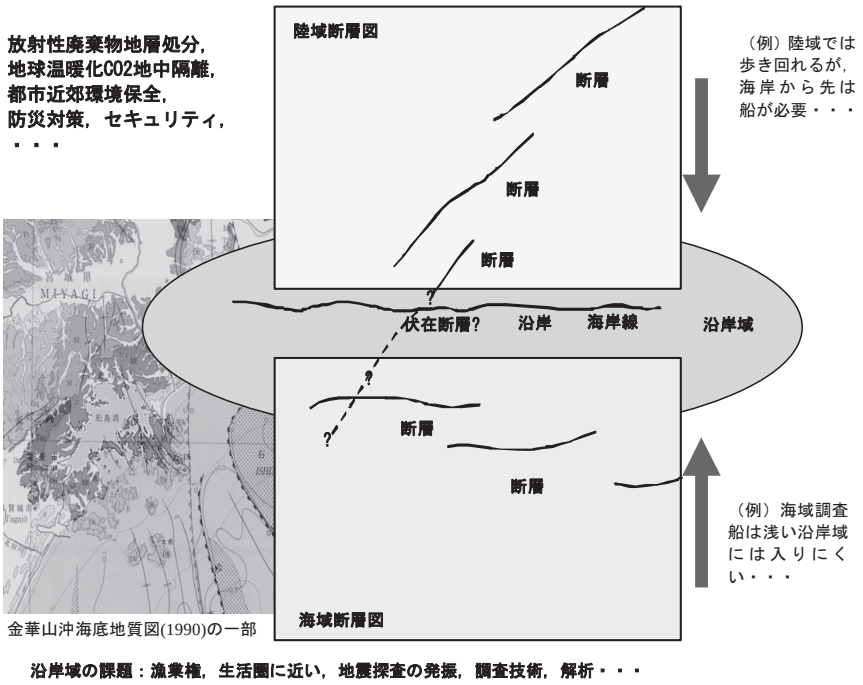


図５　沿岸域の伏在断層に関する研究を取り巻く要素（産業技術総合研究所，2007）

手法の一つとして，空間データベースを多様な組織間で連携して統合化し，元データへのトレーサビリティを確保して信頼性を高めることを提唱してきた[4]。実際に継続的に沿岸域の地下データを公刊している機関が保有するメタデータとデータベースを構築してきたが，地下を包含する基本法が成立することで追い風を受けたためか，最近，国土交通省のKunijibanデータベース[6]や文部科学省を中心としたGeo-stationデータベース等が全国の地下の公開情報として一般に無償で活用できるに至っている。同様に自治体等でも公開情報が増大しつつある。このような連携型の公的公開統合データベースは，地域分散型の地中貯留を推進する公開情報基盤を提供でき，地中貯留ビジネスにも新たな道を開くものと期待される。何よりもPAに必須な情報公開が担保されやすい。

更に，国際的な競争の中で日本のビジネスチャンスを増やすには，前提となる様々な成果を国際的に発信することもますます必要になる。国際的学会でのわが国の主導的活動を促進することは，地球温暖化ガス削減に向けた新たなビジネスモデルの構築と産業活動の発展に戦略的に必要な鍵になるといえるだろう。そのためには，国際的に主導できる立場での活動を支える国家的レベルでの連携型研究プログラムが優先される必要がある。

国家的なレベルのサポートを強化し，産業界，大学・研究機関，公共的機関の横断的な連携により，地域住民の理解を深めた地域分散型CO_2回収及び貯留の新たな展開と，経済合理性を伴う地球温暖化対策への貢献が期待できるだろう。

参考文献

(1) IPCC（2005）Special Report on Carbon dioxide capture and storage. 443p.（Metz et. al. ed.） Cambridge University Press
(2) 産業技術総合研究所（2007）平成18年度塩淡境界面形状把握調査成果報告書（318p.）産業技術総合研究所，所収「沿岸域伏在断層評価手法の開発に関する研究調査」
(3) Xinglin Lei, Guozheng Yu, Shengli Ma, Xueze Wen, and Qiang Wang（2008）Earthquakes induced by water injection at _3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 113, B10310, doi:10.1029/2008JB005604
(4) 古宇田亮一・麻植久史・岸本清行・楠瀬勤一郎・丸井敦尚（2007）沿岸域調査におけるデータ統合化の効用とメタデータ。情報地質，Vol.18, No.2, pp.68-69.
(5) http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/
(6) http://www.geo-stn.bosai.go.jp/jps/phtmls/gui6034567frame.php?GUI=603

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

特集：石炭火力発電とCCS技術

環境調和型石炭火力発電システム実現に向けて —燃焼後CO_2分離回収システムの開発—

宮池　　潔*1
MIYAIKE Kiyoshi

キーワード：二酸化炭素回収・貯留，燃焼後回収，化学吸収法，先進超々臨界圧発電，carbon dioxide capture and storage，post combustion CO_2 capture，chemical absorption method，advanced ultra super critical power plant

1．はじめに

現在，世界の電力需要は年間20兆Whを超え，更に2030年まで年間2.4％の伸びが予想されている。昨今世界経済の低迷により先進国の電力需要は控えめにあるものの，開発途上国の経済成長がこの伸びの大半を支えると見られている。

この電力の電源構成を見てみると，図１に示すように石炭火力は2007年で42％と最も大きな割合を示している[1]。また，2030年の予測では44％に増加しており更に石炭火力の貢献が期待されている。これは他の化石燃料に比べ可採年数が最も長く，また産出地域，国も広範囲であるため，供給の安定性があり，価格面でも比較的安定していることにある。

一方で，石炭は他の燃料に比べて燃焼時のCO_2排出量が大きいことが，地球温暖化防止の観点から大きな問題となっており,先進国では新たな石炭火力発電所の建設は環境上の制約を受けている。

こうした背景から，石炭火力の燃焼排ガスからCO_2を分離回収し，地中等に隔離するCCS（二酸化炭素回収･貯留）の実現が期待されている。

ここでは，当社が開発した石炭ボイラ燃焼排ガスから

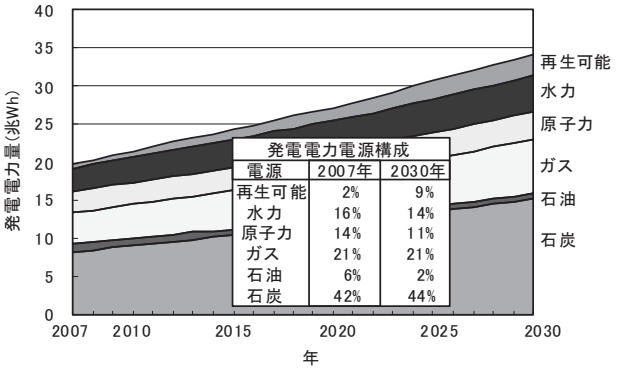


図１　発電電力量予測と電源構成

原稿受付　2010年７月21日
＊１　㈱東芝　電力システム社　火力・水力事業部
〒105-8001　東京都港区芝浦１丁目1－1

のCO_2分離回収技術について紹介すると共に，この技術とプラント効率向上技術を組み合わせた，将来の環境調和型石炭火力発電について紹介する。

2．燃焼後回収方式

CO_2分離回収方式には，図２に示すように３つの方式がある。ボイラ排ガスからCO_2を分離する燃焼後回収方式，ボイラを酸素燃焼させ排ガスそのものを高濃度CO_2とする酸素燃焼方式，そして石炭ガス化コンバインドサイクル発電（IGCC）においてガスタービンで燃焼させる前のガスからCO_2を分離する燃焼前分離方式である。

いずれの技術もCO_2を分離回収するために，大きなエネルギーを必要とするため，消費エネルギーの低減，すなわち経済性の改善が共通の課題となっている。

当社では，新設機だけでなく冒頭に述べたように現在も増えつづけている既設の石炭火力発電所にも容易に適用できる，燃焼後回収方式に焦点を当てて開発を進めてきた。燃焼後回収方式では，CO_2を吸収しやすい溶液としてアミン水溶液を用いた化学吸収法を使用する。図３に化学吸収法の基本構成を示す。

図３において，ボイラ排ガスは吸収塔の下部より導入し，吸収塔上部から供給された吸収液に直接接触させることにより，排ガス中のCO_2を吸収液に吸収させる。CO_2除去後の排ガスは吸収塔頂部から凝縮器を経て排出

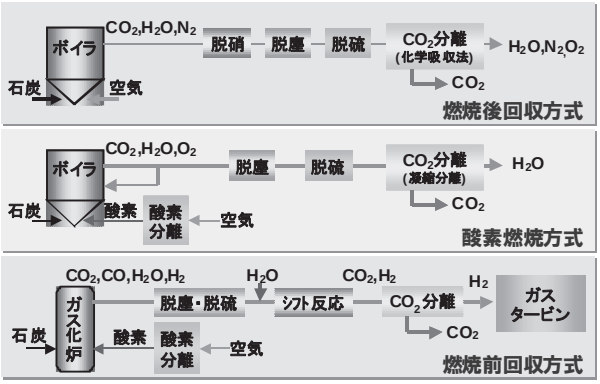


図２　CO_2分離回収技術

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

される。CO_2を吸収した吸収液（リッチ吸収液）は熱交換器を介して，再生塔上部に供給される。再生搭下部ではリボイラで吸収液を加熱し水蒸気を発生させており，この水蒸気は再生搭内を上昇する間に上部から落下するリッチ吸収液に熱エネルギーを与え吸収液からCO_2を解離させる。解離したCO_2は再生塔頂部より凝縮器を経て回収される。また，CO_2を乖離した吸収液（リーン吸収液）は再生塔下部より熱交換器，冷却器を介して再び吸収塔へ供給される。吸収液はこの構成の中でCO_2の吸収と解離を繰り返し循環している。

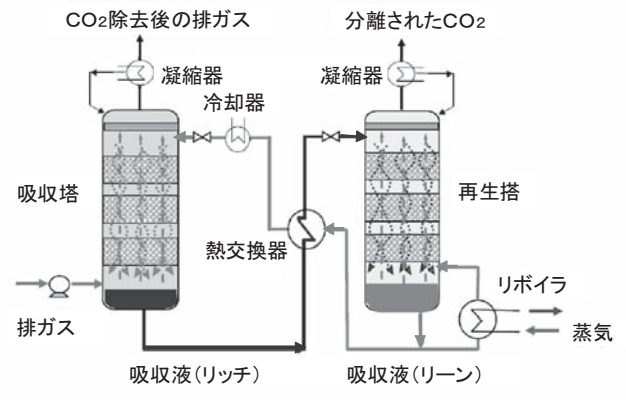


図３　化学吸収法の基本構成

３．化学吸収法の開発

3.1　開発課題

化学吸収法においては，吸収液からCO_2を乖離させるために吸収液を加熱する必要があり，そのためにリボイラで与える熱エネルギーを低減することが課題となる。そして，このエネルギー低減には，吸収液の開発とプロセスの開発が必要である。

3.2　吸収液の開発

吸収液に要求される主な特性を表１に示す。吸収液の候補としては，CO_2の吸収性能の優れるアミン水溶液を対象とした。アミンには多種多様の種類があるが，当社では熱力学シミュレーションによるスクリーニングと，CO_2吸収能力を示す気液平衡特性等の基礎物性測定，および吸収液劣化加速試験等を併用して候補吸収液を絞り込んだ[2]。図４に吸収液基本特性試験装置を示す。

表１　吸収液に要求される主な特性

要求特性	影響
高CO_2吸収量	装置小型化，エネルギー低減
高CO_2吸収，放出速度	装置小型化
低CO_2吸収乖離反応熱	エネルギー低減
低比熱	エネルギー低減
高沸点／低揮発性	環境影響低減
低粘性	ポンプ動力低減
低腐食性	装置材料選定
低酸素劣化性	吸収液寿命
高温安定性	吸収液寿命

図４　吸収液基本特性試験装置

3.3　プロセス開発

化学吸収法の基本プロセスは既に化学工業の分野では多くの実績があるが，エネルギー効率を最大化するという観点では開発要素があった。開発のポイントの一つは，選定した吸収液の性能を十分に引き出せるようにプロセスを最適化することであり，他のポイントはプロセス内のエネルギー損失を最少化することである。

当社ではこのプロセス開発を要素試験と図５に示すベンチスケールループ試験装置を用いた試験，およびプロセスシミュレーションを駆使して進めてきた[3]。

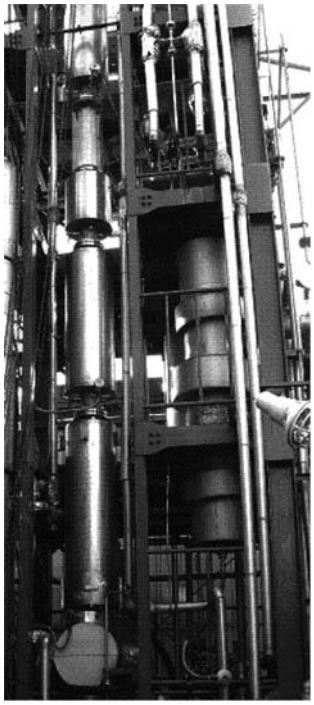


図５　ベンチスケールループ試験装置（0.3t･CO_2/日）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

4．パイロットプラント検証

4.1　目的

吸収液の開発とプロセス開発の結果を検証するためにパイロットプラントを建設した。その目的は，

・ボイラ実排ガス下でのシステム性能検証
・システムの運用性，長期信頼性の検証
・実機，商用機に向けた課題抽出と対策

である。

4.2　プラント概要

パイロットプラントは福岡県大牟田市にある㈱シグマパワー有明三川発電所（47.5MW石炭火力）内に建設され，2009年９月に完成した。図６にパイロットプラントの全景写真を，図７にシステム構成図を示す。

CO_2回収パイロットプラントでは，三川発電所のボイラ排ガスの一部を脱硫装置と煙突を結ぶ煙道の途中から引き込んでいる。吸収塔上部から排出されるCO_2を分離した後の排ガスは再び煙道に戻される。リボイラの熱源は三川発電所から引き込んだ蒸気で賄われる。なお，再生搭上部から回収されたCO_2は再び煙道に戻している。

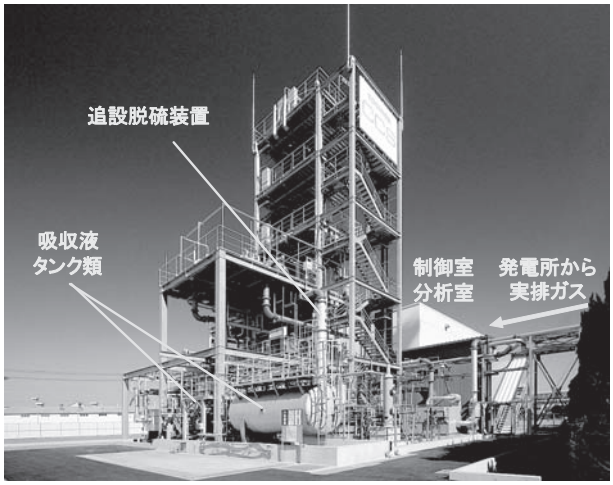


図６　パイロットプラント全景

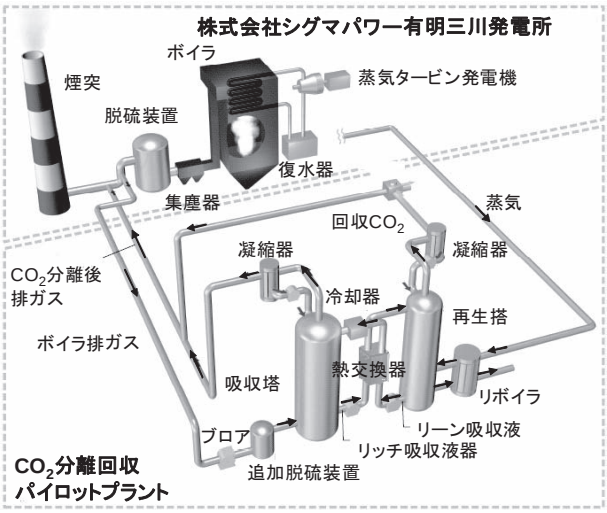


図７　パイロットプラントシステム構成

三川発電所の煙道から得られる排ガスの主要成分およびパイロットプラントの基本仕様をそれぞれ表２，表３に示す。

計測に関しては温度，圧力，液やガスの流量，塔やタンクの液面，特定ガスの濃度センサーを各部に設置し，また，ガスや吸収液の分析が可能なように，適所にサンプリングポートを設けた。

表２　排ガス成分

成分	濃度／含有量
CO_2	約12％
酸素	約7％
N_2	約81％
NO_X	約100ppm
SO_X	＜50ppm 追加脱硫後 ＜10ppm
粉塵	＜10mg/Nm^3

表３　パイロットプラント基本仕様

項目	仕様
排ガス処理量	2100Nm^3/h
CO_2回収率	90%
CO_2回収量	10t- CO_2 ／日

4.3　試験実績

2009年９月に竣工して以来，累積運転時間は図８に示すように3500時間を越えた。（６月末現在）この間に機器単体性能確認試験，各種パラメータ試験，過渡応答試験，連続運転試験等の各種試験を実施してきた。

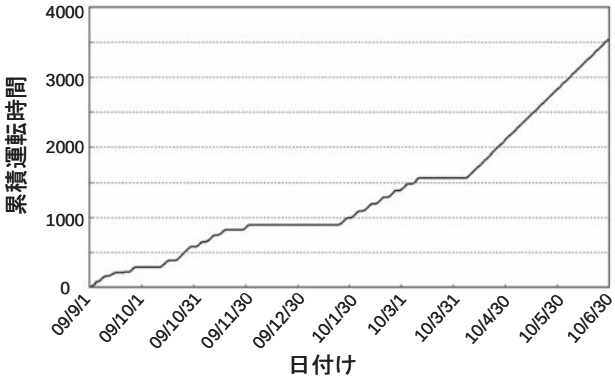


図８　パイロットプラント運転履歴

4.4　試験結果

これまで得た試験結果の一部を以下に紹介する。

⑴CO_2分離回収エネルギー　CO_2分離回収に要するリボイラ蒸気エネルギーは，CO_2回収率90％（CO_2回収量10t/日）において3.2GJ/t･CO_2を確認した。ただし，

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

各部諸量の測定データからプロセス改善の余地があり，CO_2分離回収エネルギーは更に15％～20％改善できる見通しである。

⑵回収CO_2の純度　回収されたCO_2の純度は99%以上であった。

⑶吸収液のCO_2吸収能力の劣化特性　長時間運転による吸収液のCO_2回収能力劣化特性を把握するために，種々試験の合間に排ガス流量，吸収液流量，リボイラ蒸気流量等の運転条件を一定値に固定した運転を行い，CO_2回収能力を確認した。図９はCO_2回収率とCO_2回収量の経時変化を示しているが，2500時間以上経過後もほとんど性能劣化が無いことを確認した。

⑷吸収液の成分分析　吸収液のアミン成分の濃度変化や吸収液の劣化生成物（蟻酸，酢酸，しゅう酸）の増加率，さらに硫酸イオンや硝酸イオンの増加率についても把握した。

⑸起動・停止特性　起動停止の運転状況について把握し，手順の確立と時間短縮を図ることができた。図10に起動時の運転パターンの一例を示す。

⑹プロセス過渡時定数　排ガスや吸収液流量を急激に変化させた場合の各部状態量の応答を測定し，プロセスへの影響を把握すると共に，プロセス動特性シミュレーションに反映した。

4.5　パイロット試験の今後

最大の課題であるCO_2分離回収エネルギーの低減について，考え方を図11に示す。分離回収エネルギーは大別して吸収液がCO_2を乖離するための反応熱，吸収液を加熱する際の温度上昇にかかわる顕熱（再生熱交換器で回収しきれない分），リボイラにおける水蒸気発生にかかわる潜熱，に分類される。この内反応熱は吸収液の改良によってのみ低減できるが，顕熱と潜熱分は吸収液の特性のみならず，プロセスの改善によっても低減可能である。

図11ではMEAと比較した時の当社吸収液の現状，4.4⑴項で触れたプロセス改善を施した場合，そして更に新たな吸収液を想定した目標値を示しており，順次これを実証していく考えである。

その他，耐SOX性や耐NOX性に関する検証や，凝縮器周りの構造による環境影響の評価など，システムやプロセスの最適化を図るために，継続して種々試験を行っていく計画である。

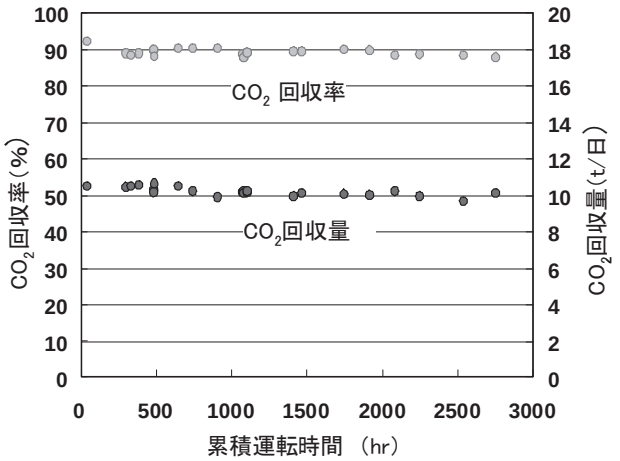


図９　吸収液の長時間運転時CO_2回収能力

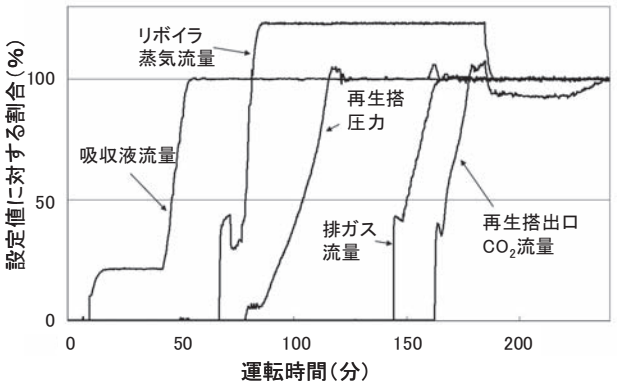


図10　起動運転パターン例

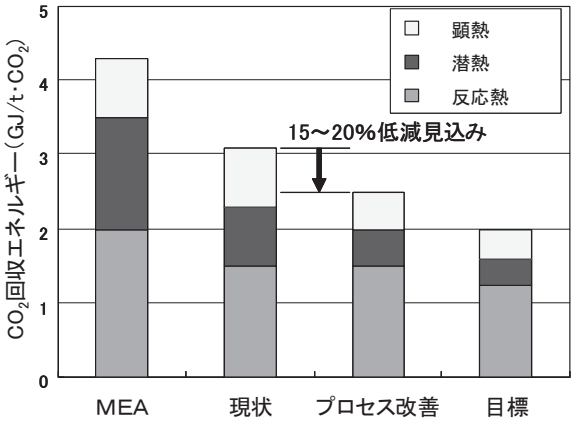


図11　CO_2分離回収エネルギー低減の考え方

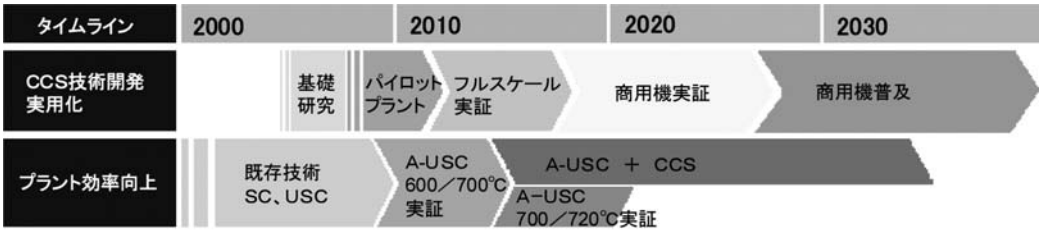


図12　環境調和型火力発電実用化ロードマップ

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

5．CCS実用化に向けた取り組み

5.1　実用化ロードマップ

図12にCCSの実用化とプラント効率向上を含めた環境調和型火力発電のロードマップを示す。CCSの商用化は2020年以降と目されているが，これを達成するためには，その前にある程度の規模の実証プラントでCCS技術全体を検証しておくことが必要である。

5.2　CCS大型実証プラントの目的

CCS大型実証プラントの目的を以下に示す。

・大型CO_2分離回収システムの検証
・CO_2分離回収システム，CO_2圧縮システムおよび発電プラントの統合最適化，運用性，経済性の検証。
・CO_2の輸送，注入，監視を含めた貯留技術の信頼性や経済性の総合検証

5.3　大型実証プラントの設計

パイロットプラントの設計，建設，試験の経験を生かし，当社では次ステップとなる大型実証プラント用システムの検討を進めている。図13に示すように既に500～1000t･CO_2/日規模のCO_2回収システムの基本設計を完了している。

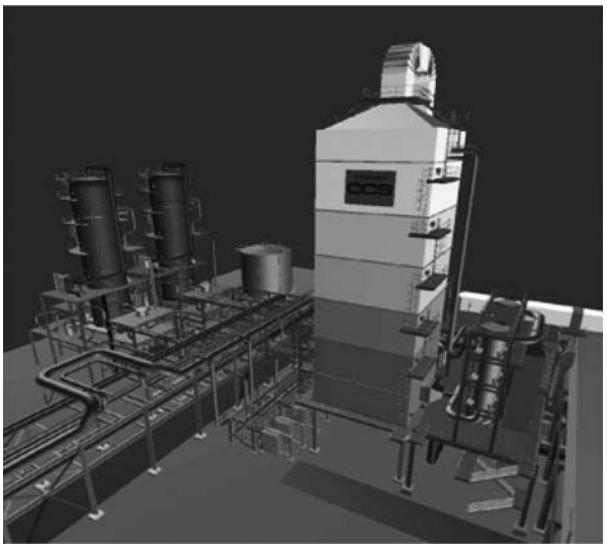


図13　大型CO_2回収プラントの設計

6．CCS付き火力プラント

6.1　プラントシステムインテグレーション

CO_2回収システムを火力プラントに設置すると，リボイラの熱エネルギー源として大量の蒸気を消費する。この蒸気は，本来タービンで仕事をさせるべき蒸気の一部を抽気することによって得る。また，分離回収したCO_2は輸送のために圧縮液化する必要があり，圧縮機などのシステムも組み込まれる。

図14にCO_2回収システムを組み込んだプラントシステム例を示す。この全体システムにおいては，CO_2回収システム，CO_2圧縮システム，発電システム間で総合的にエネルギー損失を最少化し，CO_2分離回収を行うことによるプラント効率の低下を，最小限に食い止める工夫が必要である。

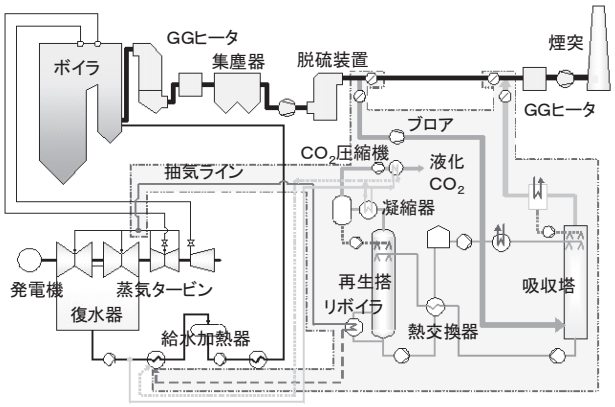


図14　CCS付き火力プラントシステム構成例

6.2　火力プラントの効率向上

上記のようにCCS付き火力プラントは，CO_2分離回収プロセスおよび圧縮プロセスで大きなエネルギーを消費するため，プラント効率の低下が生じる。この効率低下を少しでも補うべく，蒸気条件の向上によりプラント熱サイクルを改善できる先進超々臨界圧発電システム（A-USC）との組み合わせが期待されている。

図15に現在国プロとして開発中のA-USCのシステム構成を示す[4]。また，このシステムの特徴を表4に現状最新のUSCと比較して示す。A-USCは現状USCに比べ，10％以上の効率向上が期待できる。A-USCの実現には高強度の高温部材の開発や冷却を含めた構造開発が主要な課題であるが，基本構成的には実績あるUSCと同等であり，早期実現が望まれている。

図16に単位出力当たりのCO_2排出量で見たプラント効率向上施策とCCSの効果を示す。A-USCとUSCの効率差はCCS付きプラントとしても大きな差異を示していることが分かる。

図16では天然ガスコンバインドサイクルプラントの状況も併記した。コンバインドサイクル発電の単位出力当

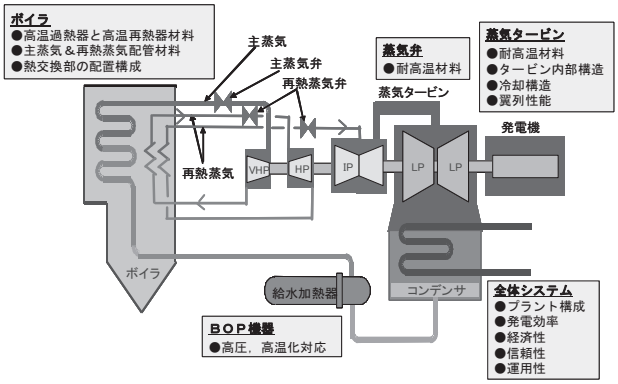


図15　A-USCシステム基本構成と技術課題

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

表４　A-USCの特徴比較

項目	A-USC	USC
主蒸気温度	700℃	600℃
主蒸気圧力	35MPa	25MPa
再熱蒸気温度	720℃	610℃
再熱段数	2段	1段
主要高温部材料（ロータ，ケーシング）	Ni基合金	フェライト鋼
送電端プラント効率	＞46％	約42％

プラント効率は高位発熱基準（HHV）

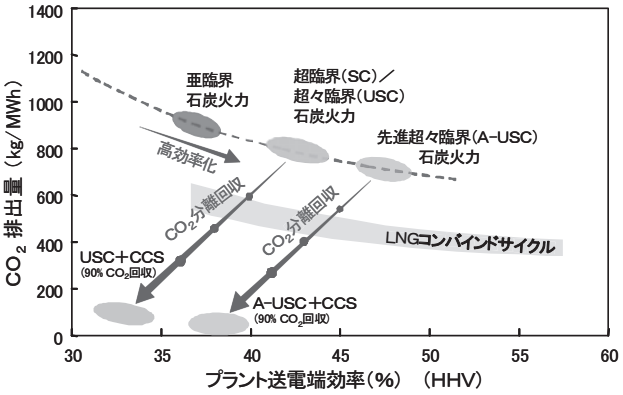


図16　プラント効率とCO_2回収排出量

たりのCO_2排出量は，燃料固有の炭素含有量の差異とプラント熱サイクル効率の差から，石炭火力に比べて約半分である。しかしながら，石炭火力のCO_2排出量をコンバインドサイクル並とするならば，CCS付き石炭火力のプラント効率低下も少なくて済み，経済性は大幅に改善される。石炭火力発電のCO_2回収率は総合的な経済性と社会的ニーズを勘案して選択されていくものと推測する。

７．あとがき

今後も高い需要が予測される石炭火力において，CCSは環境改善の切り札である。このCCS実現に向けたキー技術の一つである，燃焼後CO_2分離回収技術の開発状況を紹介した。

図17　CCS付き火力発電所予想図

パイロットプラントの検証により，種々技術の確立も進み，エネルギー効率改善も進展した。パイロットプラントの規模は商用規模に比べ小さいが，大型化への技術基盤は整い，大型実証プロジェクトへの準備を進めているところである。

今後，実用化に向けた大型実証プロジェクトでの検証を経て，図17に示すようなCCS付き火力発電所を早期に実現させたいと考えている。

こうした活動を通じて，将来に亘る世界の電力の安定供給と地球環境保護の両立に貢献していく所存である。

参考文献

(1)　International Energy Agency："World Energy Outlook 2009 Edition"，623
(2)　大橋幸夫，小川斗，山中矢："火力発電所の燃焼排ガスからのCO2分離回収技術"，東芝レビュー Vol.63 No.9（2008）
(3)　藤田己思人，小川斗，大橋幸夫，山中矢："化学吸収法におけるCO_2回収エネルギーの低減"，化学工学会第75年会予稿集G313
(4)　宮池潔："先進超々臨界圧発電（A-USC）の開発"，エネルギー・資源Vol.31 No.2（2010）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

特集：石炭火力発電とCCS技術

最新のクリーンコール発電技術およびCO_2回収技術

橋本　貴雄[*1]　HASHIMOTO Takao
坂本　康一[*2]　SAKAMOTO Koichi
石井　弘実[*2]　ISHII Hiromi

キーワード：石炭ガス化複合発電，空気吹きガス化，CO_2回収貯留，Integrated coal Gasification Combined Cycle：IGCC，Air-blown coal gasification，Carbon Dioxide Capture and Storage：CCS

1．はじめに

現代の社会は，主要なエネルギー源として石炭・原油・天然ガス等の化石燃料に大きく依存しており，その結果として資源の枯渇及び地球温暖化を初めとする環境問題を引き起こしている。この現状を改善し，環境負荷の低減及び経済の持続的発展を実現するためには，新しい高効率発電システムの開発が不可欠である。さらに昨今の原油価格の変動に見られる様に，エネルギーの安定供給も重要な課題となっており，今後も安定した供給が見込まれる石炭を利用した低二酸化炭素（CO_2）排出型発電システムの開発が喫緊の課題となっている。

本稿ではまず，CO_2排出量削減に向けた各国の取組を概観し，CO_2排出量削減にむけた当社の取組状況を紹介する。

石炭を利用した高効率発電技術開発については，従来型微粉炭火力よりも高い効率が得られる，IGCC（石炭ガス化複合発電）の商用化を目指しており，さらにCO_2を回収・分離するPre-Combustion CO_2回収技術を利用した世界初のIGCCプラントの計画中である。また今後，従来以上に効率的な利用に対する期待が高まる褐炭等低品位炭の利用についても検討中であり，これらの現状について紹介する。

2．CO_2削減に向けた世界の動向

現在，各国政府が2020年に向けて示しているCO_2排出削減目標を表１に示す。中国もCOP15に合わせて，GDP 当たりのCO_2排出量を2005 年比で40 ～ 45％削減するとの自主目標を掲げている。

米国オバマ政権のグリーンニューディール構想に代表される様に，各国共にエネルギー・環境分野への社会投資を新たな景気刺激策の柱として位置づける傾向にあり，IEA（International Energy Agency）[(1)]によれば世

表１　各国のCO_2削減中期目標

米国	2020年までに2005年比で17%（1990年比で４%）削減
EU	2020年までに1990年比20%削減．またほかの先進工業国が続くなら，30%に引き上げるとしている。
ロシア	2020年までに排出量を1990年比で20 ～ 25%削減。
日本	2020年までに1990年比で25%削減．ただし「全ての主要国が高度に意欲的な協定に参加すること」が条件。
カナダ	2020年までに2005年比で17%削減．これは1990年比で３%削減に相当。
豪州	2020年までに2000年比で５%削減。他の主要排出国が削減に合意した場合25%削減に引上げる。
ノルウェー	2020年までに1990年比で30%削減。
ニュージーランド	各国の削減動向の前提で2020年までに1990年比で10 ～ 20%削減。
中国	国内総生産（GDP）当たりの排出量で2020年までに2005年比で40 ～ 45%の削減を目指す。
ブラジル	何も対策をとらなかった場合の2020年の推定排出量から36 ～ 39%削減。
インドネシア	2020年までに推定されている排出量から26%削減．国際支援が得られれば，41%に引き上げる事も可能。
韓国	2020年までに，特別な対策をとらなかった場合の推計値から30%程度削減。
メキシコ	2012年までに，年間排出量を5000万トン削減。

原稿受付　2010年７月23日
＊１　三菱重工業㈱　原動機事業本部プラント事業部
〒220-8401　横浜市西区みなとみらい３－３－１
＊２　三菱重工業㈱　原動機事業本部プラント事業部火力プラント計画部

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

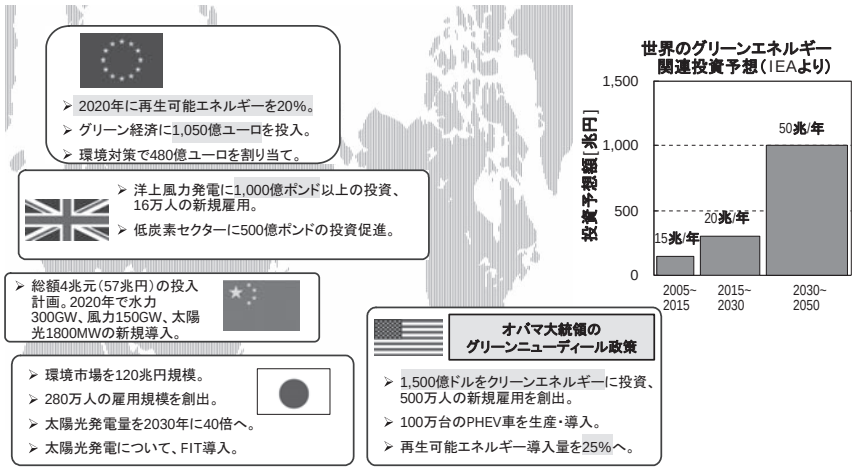


図１　各国におけるエネルギー環境問題への投資目的と効果

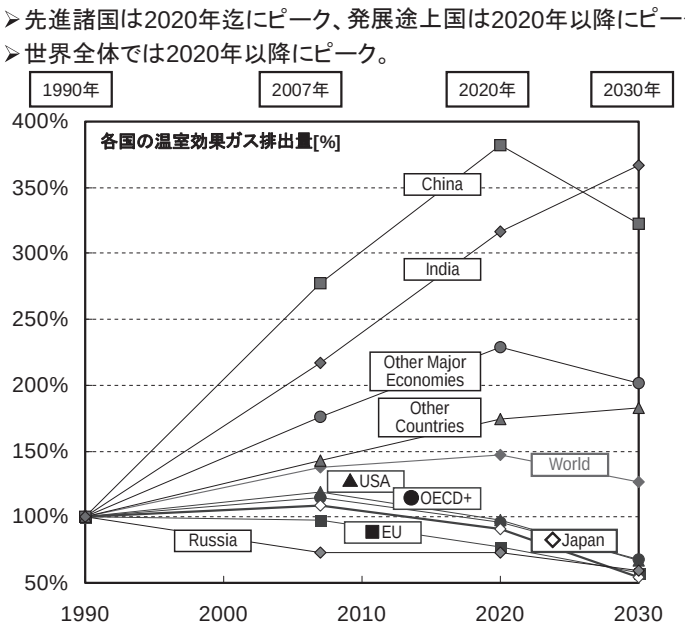
界全体のグリーンエネルギー投資は，2015年から2030年にかけて毎年20兆円，2030年から2050年にかけて毎年50兆円規模になると予想している。中でも，中国が打ち出している新規再生可能エネルギーの計画は，桁違いに大きく，2020 年までに水力300GW，風力150GW，太陽光1800MW を達成するため，総額４兆元（約57兆円）をつぎ込むとしている（図１）。

世界的な温暖化防止対策の指針としては，2009年11月にIEAが発表したWorld Energy Outlook[(2)]がある。産業革命以降の気温上昇を２℃に抑えることを目安とし，大気中のCO_2 濃度450ppm に抑える指針（450 Scenario）を達成するため，各国のCO_2 削減目標を各々の実情に則して割り振り，実現するためのエネルギーポートフォリオも示している。

世界に大体共通して言えることは，この10年での打ち手は，主としてエネルギー消費側での高効率化であり，その後エネルギー変換側での抜本的な削減に手をつけ，2030年までには，全世界の総排出量を減少に転じさせるシナリオである。CO_2の排出量の絶対値としては，中国が米国を抜き2007年には年間60億トン排出し，これが2020年までは上昇し続けて84億トンまで上昇した後減少に転じるとしている。日本を含めた先進国は，今後緩やかに排出量が低下し，2020年からの10年間は，大きく低下するシナリオとしている（図２）。

３．CO_2削減に向けた当社の取組

この様な地球温暖化問題に対応してエネルギー変換側でのCO_2削減のため，石炭火力においては更なる効率改



億Ton	1990	2007	2020	2030
World	209	288	307	264
OECD+	114	131	109	77
USA	48	57	47	32
EU	40	39	31	23
Japan	11	12	10	6
Other Major Economies	55	97	126	111
Russia	22	16	16	13
China	22	61	84	71
Other Countries	35	50	61	64
India	6	13	19	22

OECD+　：OECD諸国と、EUのうちOECD未加盟国
Other Major Economies　：ブラジル、中国、中東、ロシア、南アフリカ（“OECD+”以外で、2020年に人口当りGDPが13,000$/人を超える国々）
Other Countries　：その他全て

http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/climate_change_excerpt.pdf

図２　各国のCO_2排出量見通し

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

表２　我が国の石炭火力の技術開発

Step	CO_2削減技術の内容および状況
STEP 1 CO_2低減 （発電効率向上）	⑴　超々臨界圧（USC） 成熟技術，国内多数実績に裏づけされた火力発電設備 中国・インドメーカへのライセンス供与実施済 ⑵　石炭ガス化複合発電（IGCC） 実証段階～商用化直前段階（空気吹きIGCC） 次世代1700℃級GTとの組み合わせで効率50%目標 ガス化炉は既存技術を利用 ⑶　次世代超々臨界圧（A-USC） 700℃超級，Fe-Ni基管・配管/ Ni基ロータなど材料開発 平成20年度より国プロ（各メーカ参加）開始
STEP 2 CO_2回収	⑴　ボイラ燃焼排ガス（Post Combustion） （化学プラントの実績あり）・・・Step1⑴，⑶との組み合わせ ⑵　IGCCガス化燃料ガス（Pre Combustion） （化学プラントの大容量実績）・・・Step1⑵との組み合わせ ⑶　ボイラ酸素燃焼（Oxy-Fuel Combustion） （パイロット規模で建設中）

善やCO_2の低減が求められている。

表２に我が国の石炭火力の技術開発によるCO_2削減の取組みを示す。

STEP１として今後発電効率を改善する技術はIGCCや次世代超々臨界圧発電（A-USC）等が挙げられる。更なるCO_2削減には，STEP２としてCO_2回収が必要になる。これらの技術を石炭火力発電技術のCO_2削減ロードマップとして図３に示す。

効率向上の三技術の中で，超々臨界圧発電（USC）については材料開発や実機での実証試験に長期間取組み，技術を確立した上で既に実用化されている。1990年代から蒸気温度が600℃級の石炭火力発電所が稼動している。また，A-USCは蒸気温度を600℃級から700℃超級に上げ，更に蒸気圧力を上げるとともに１段再熱から２段再熱方式として，従来火力システムでの最高効率を目指すものである。欧州での取組みが先行しているが，我が国ではボイラ・タービン・大型弁の材料開発，検証試験や構造・製造性の検証に着手したところである。

これらに対し，IGCC については，㈱クリーンコールパワー（CCP）研究所殿が福島県いわき市に建設した空気吹きIGCC 実証機において実証試験が進んでいる。本プロジェクトは，CCP研究所殿より当社が，石炭ガス化炉・ガスタービン・ガス精製等，主機を含む全設備を据付・土建工事とともにフルターンキーで一括受注し完成

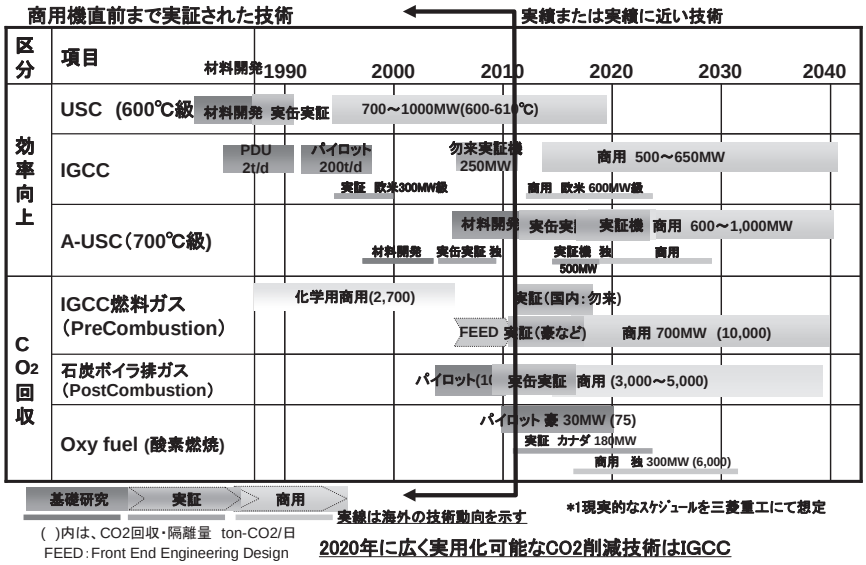


図３　石炭火力発電技術のCO_2削減ロードマップ

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

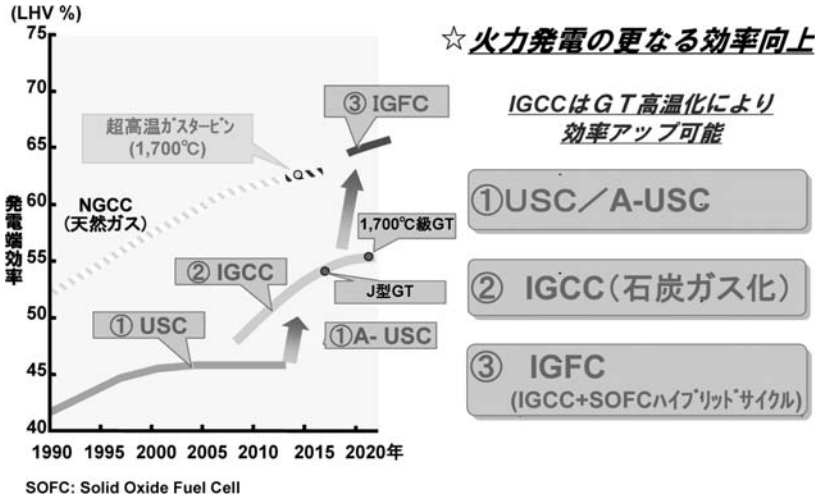


図４　クリーンコール技術による効率の飛躍的向上

したものである。2008年夏に電力需要の高い３ヶ月連続運転を達成，2010年６月には5,000時間の長期耐久性試験を完了した。

このことから，2020年までに広く実用化が可能な最新技術はIGCCであるとして，国内外で商用機が普及しCO_2削減に貢献することが期待されている。

石炭火力での効率向上に関する経緯及び目論見を図４に示す。当社ではIGCCを始めとするクリーンコール技術による今後の効率改善を次のように見通している。

・天然ガス焚きガスタービンはタービン入口温度1,500℃級が実用化し，現在順調に商業運転されている。また，1,600℃級ガスタービンについては既に国内電力会社殿における採用が決定した。更に高効率を目指して1700℃級超高温ガスタービンの開発が国家プロジェクトとして進められており，これが完成すると天然ガス複合発電の発電端におけるプラント総合効率（LHV）は62～65％となることが予想される。
・この1700℃級超高温ガスタービンの技術をIGCCに適用することで，効率は55％を超える見通しである。
・さらに，IGCCにSOFC（固体酸化物燃料電池）を組合せたIGFC（石炭ガス化燃料電池複合発電）を実現することにより，65％を超える効率が期待出来る。

1700℃級のガスタービンは国家プロジェクトとして，2004年より要素開発を進めており，現在は実用化技術開発段階である。2015年以降に実証機の開発設計，実証運転を行う予定であり，天然ガス複合発電への適用後にIGCCにも適用可能である。なお，IGCCの石炭ガス化ガス発熱量は天然ガスに比べて低カロリーであるものの，IGCC実証機において実証された運転実績から，高温ガスタービンでの使用が十分に可能であることを確認している。

次にSTEP２のCO_2回収に関して述べる。IGCCの石炭ガス化ガスからCO_2回収するPre-Combustion方式については50万kW級のIGCC商用機に組み込んだプラントが，2010年代後半に稼動する予定である。Pre-Combustion方式に採用されるCO_2回収技術として，最も代表的な物理吸収法CO_2回収システムは，肥料合成用等の化学プラント向けの大型機が商用化を完了しており，順調に稼動している。従って，CO_2回収機能を備えた高効率クリーンコール発電技術として，IGCC + Pre-Combustion は最も商用化の実現性が高い技術の一つと目されている。ボイラ燃焼排ガスからCO_2を回収するPost-Combustionは，天然ガス燃焼排ガスで小規模での商用機は稼動しているが，石炭燃焼排ガスについては今後実缶実証を計画している段階にあり，商用化は2015年以降となる見通しにある。Oxy-Fuel（酸素燃焼）は，現在豪州等でパイロットプラントの建設段階にある。

４．IGCC + Pre-Combustion CO_2回収技術の概要

(1)　Pre-Combustion と組合せたIGCCシステム

IGCCではPost-Combustion回収に比べ，高圧下でガスの体積が小さく，かつ高い濃度でCO_2を回収でき，プラント効率が優れるPre-Combustion 回収を採用している。

図５にPre-Combustion CO_2回収設備を組合せた空気吹きIGCCシステムの概略系統を示す。ガス化炉で生成された石炭ガス化ガス中の一酸化炭素（CO）は，COシフト反応器にて，水（H_2O）との化学反応により，CO_2と水素（H_2）に転換され，CO_2はAGR（Acid Gas Removal :脱硫・CO_2回収設備）にて，石炭ガス化ガスから分離・回収される。CO_2が回収された高H_2濃度の燃料ガスは，ガスタービン燃料として利用される。当社のガスタービンは高H_2濃度の燃料ガス向けに数多くの幅広い実績を有している。図６に当社ガスタービンの高H_2燃料ガス焚き実績を示す。回収されたCO_2は圧縮機にて昇圧後，貯留先に輸送される。CO_2回収型IGCCでは，必要とされるCO_2回収率や回収CO_2の純度により，COシフト反応器及びCO_2回収システム全体の最適化を図っている。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

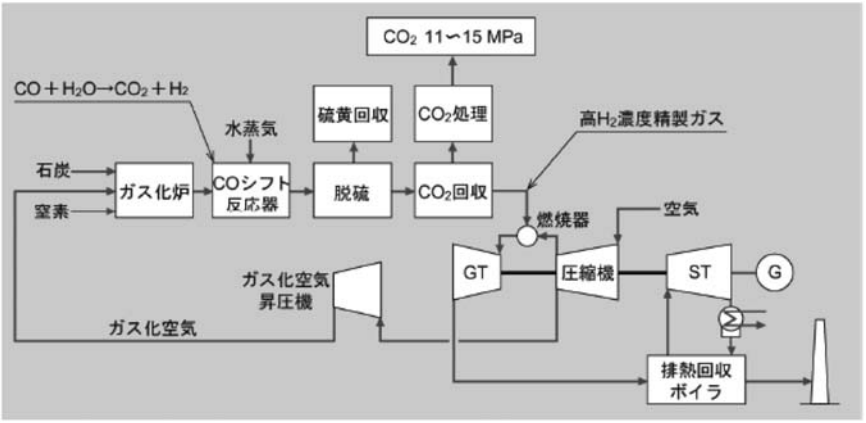


図５　CO_2回収型IGCCシステム

⑵　CO_2回収がプラント全体性能に与える影響

CO_2回収システムを組合せることにより，CO_2排出量の削減には大きな効果が得られるが，その一方で，CO_2回収のために必要なエネルギー消費が存在する事を認識する必要がある。

一般にボイラ燃焼排ガスを取り扱うPost-Combustion方式では，排ガスの圧力が大気圧に近いことから処理するガスの体積が大きくなり，より多くのエネルギーが消費されると言われている。これに対し，IGCC においてガス化ガスを取扱うPre-Combustion 方式では，ガスの圧力が20気圧を優に超えるレベルに達するため，エネルギー消費が少なくて済み，相対的ながら発電効率を高く維持できる。

Pre-Combustion 方式において消費される主要なエネルギーを列記・解説すると次の通りである。

①　COシフト反応

CO シフト反応は反応器に充填した触媒を介しての発熱反応であり，CO シフト転換（CO→CO_2転換）の進行に応じ，石炭ガス化ガス温度が上昇する。触媒には作動可能な温度範囲があり，ガス温度をその温度範囲とするため，通常，反応器を多段構成とし，各反応器間に熱交換器（クーラー）を設置する。また触媒反応のために正味COシフト反応に必要な量に比べて過剰に蒸気を供給している。

②　AGR動力

図７のとおり，空気吹きIGCCでは精製ガス中のN_2比率が高いため処理ガス量が多く，酸素吹きIGCCに比べると吸収液循環動力が若干増加する。

③　CO_2圧縮動力

回収したCO_2を輸送・貯留する為に必要な圧力まで昇圧するための動力であり，回収されたCO_2量により一意に定まることから，空気吹き/酸素吹きで同等となる。

⑶　空気吹きIGCCの優位性（酸素吹きとの比較）

当社においては徹底した効率改善の実現を目指し，IGCCに空気吹き方式の石炭ガス化システムを採用している。図８に当社にて検討したCO_2回収率と送電端効率の関係を示す。いずれの回収率においても，空気吹きIGCCは酸素吹きIGCCを上回る高い性能を示す。こ

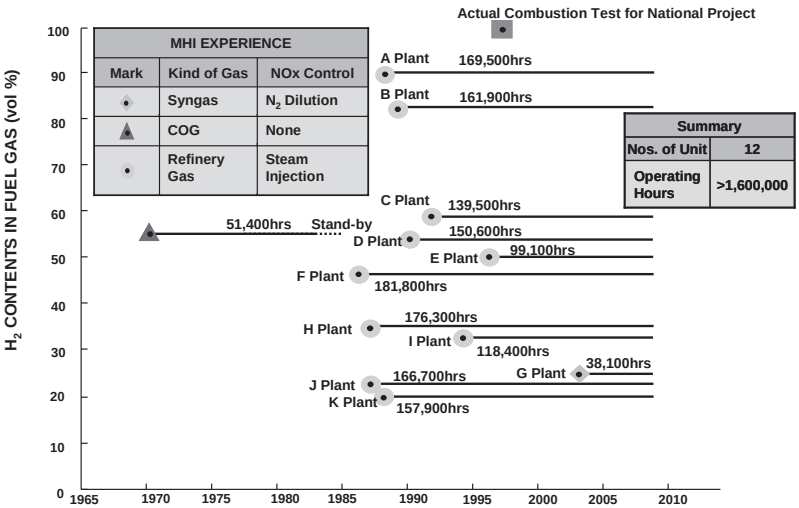


図６　水素リッチガス（20vol％以上）焚きガスタービンの運転実績

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

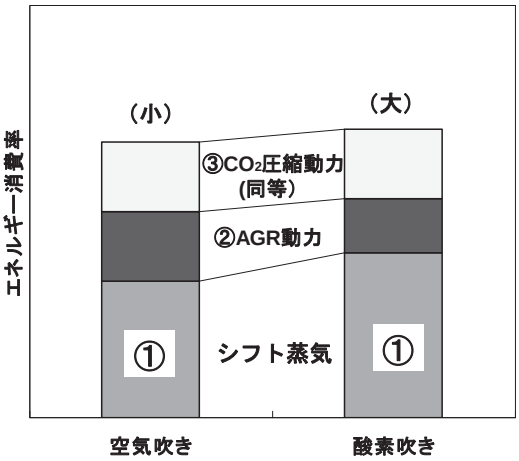


図７　CO_2回収型IGCCの効率低下の内訳

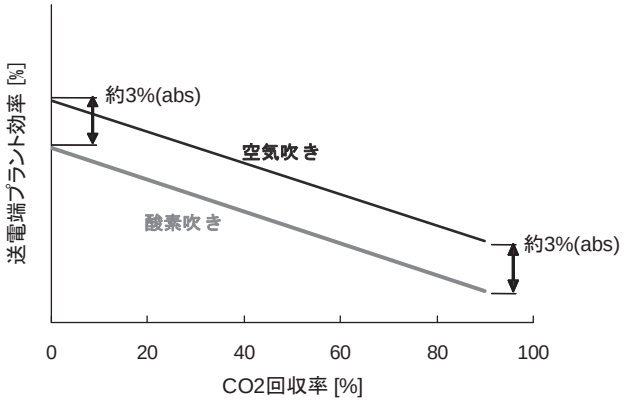


図８　CO_2回収時の空気吹きと酸素吹きIGCCにおける送電端効率の比較

れは空気吹き，酸素吹き共に，発電端効率はほぼ同等となるものの，酸素吹きでは空気分離装置（ASU：Air Separation Unit）にて大きな酸素製造動力を必要とするため，送電端効率が大きく低下することによる。また，空気吹き，酸素吹き共に，CO_2回収率が高くなるに従って送電端効率が低下するのは，先述の通りAGRやCO_2圧縮機による補機動力の増加などが原因であるが，酸素吹きに対する空気吹きの優位性は不変である。

この結果，CO_2回収により，空気吹き/酸素吹きともにプラント効率が低下するものの，CO_2回収無しでの空気吹きIGCCの有利性が逆転されことはなく，CO_2回収率90％においてもプラント送電端効率は空気吹きIGCCが優位となる。

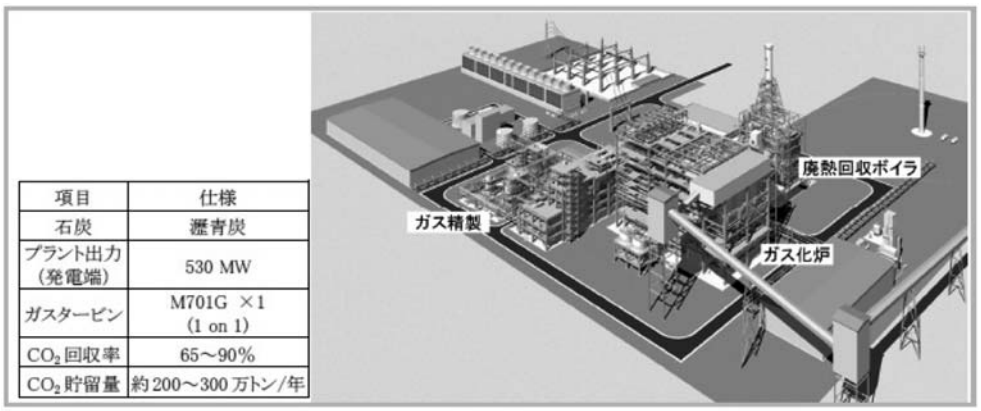
一般に空気吹きの場合，精製ガス中N_2比率が高く機器体格の増大に繋がり，IGCC の経済性を損ねるとの議論が為されることがある。しかしながらこれは，一部表面的なものであり，一概に論ずることは出来ず，技術の詳細を突き詰めるとともにプロセス全体としての性能・経済性を考える必要がある。

⑷　Pre-Combustion IGCC商用機への取組

当社はガス化炉，ガス精製，ガスタービン複合発電設備等の機器の単なるサプライヤとしての個別最適ではなく，CO_2回収型IGCCプラントとしての性能・経済性の全体最適を推し進めている。豪州ZeroGenプロジェクトは当社の取組みを具現化する事例であり，以下に紹介する。

本プロジェクトは，2015年運転開始を目標に豪州ZeroGen社が計画している発電端出力530MWのCO_2回収型IGCCプラントである。石炭から生成されるガス化ガスよりCO_2を回収したH_2リッチの燃料ガスを，ガスタービンで燃焼し複合発電を行う一方，回収したCO_2はパイプラインで輸送，地中帯水層への貯留までを行う。当社はガス化炉・ガス精製・CO_2回収・発電設備・CO_2圧縮機を供給範囲とするIGCC全設備のFSを実施・完了した。図９にZeroGenプロジェクトのプラント外観と概略仕様を示す。

本プロジェクトは昨年12月に豪州連邦政府のCCSフラグシッププロジェクト（先進的なCCS実証への補助）の候補に選定されており，本年６月にはFS結果が連邦政府に提出された。本年末までには最終的なフラグシッププロジェクトが選定され，連邦政府のプロジェクトとしてスタートする予定であり，本プロジェクトは，その最有力候補として目されている。



項目	仕様
石炭	瀝青炭
プラント出力（発電端）	530 MW
ガスタービン	M701G ×1 (1 on 1)
CO_2 回収率	65～90%
CO_2 貯留量	約200～300万トン/年

図９　豪州ZeroGenプロジェクトのプラント外観と概略仕様

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

5．褐炭等低品位炭への取組み

図10に示す様に，石炭の可採埋蔵量のうち，約50%は褐炭，亜瀝青炭などの低品位炭で，豪州，インドネシア，米国，欧州，中国等に多く存在している。この低品位炭が有効活用できれば世界的規模でエネルギー供給に大きな安定をもたらすと期待される。

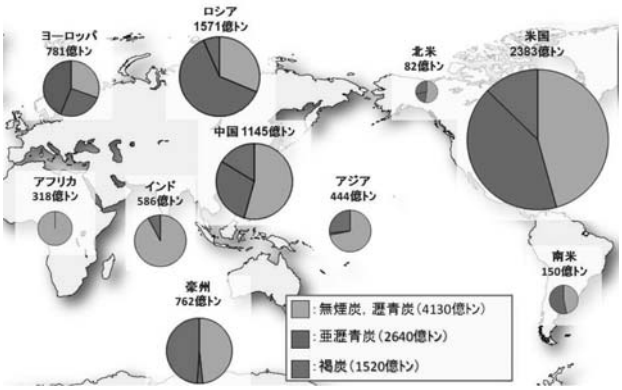


図10　世界の石炭資源分布[3]

しかしながら，低品位炭は褐炭で水分が50%超と水分含有量が多く，その潜熱損失により発電プラントとしての効率は30%程度と低く，CO_2発生量も排出原単位1.2～1.6kg-CO_2/kWh（瀝青炭焚の約1.5～2倍相当）と高い状況にあり，有効活用に際して克服すべき大きな課題となっている。

このため当社では，石炭中の水分が蒸発するときの潜熱を有効に回収することにより，高水分炭を高効率で乾燥できる乾燥装置について，国の補助事業として，新規に本年度より開発を開始している。

本事業にて開発する褐炭乾燥装置は，従来の褐炭焚き微粉炭焚火力発電プラントの，ボイラ上流側に設置することにより，発電効率を大きく向上させることが可能になる。また，より有効に活用するためには，IGCCに適用することが望ましい。

従来型火力においては，高品位炭に比べ，褐炭等低品炭を利用した場合，一般に灰融点が低くなることからスラッギングが発生しやすく，トラブル等を避けるために，石炭焚きボイラの体格が大きくなり，経済性の面で不利となる。一方，石炭ガス化炉の場合には，そもそも灰を溶融して排出することから，図11に示すように，低品位炭でも体格はほぼ同等となり，高品位炭利用時と同等の経済性が確保できる。

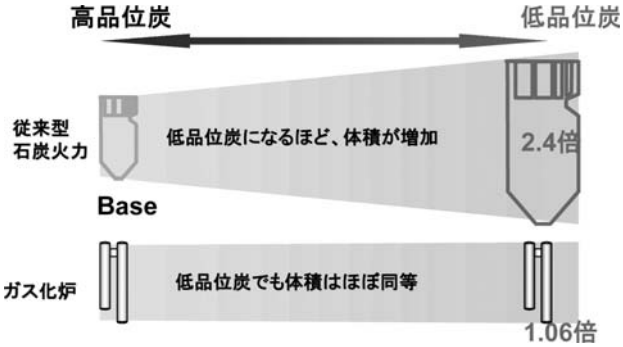


図11　褐炭焚きボイラとガス化炉の比較

6．まとめ

(1)CO_2排出削減のためには，発電効率の向上が重要であり，IGCC がクリーンコール技術として実現の最新・最有力候補と目されている。

(2)更なるCO_2の削減のため，CO_2回収技術として，IGCCと組合せたPre-Combustion 技術が適用可能である。

(3)クリーンコール技術／高効率発電技術の本命であるIGCCは，空気吹きIGCC実証機の実績を評価され，豪州ZeroGenでIGCCとCCSを組合せた発電出力530MWプラントの2015年運転開始に向けてFSを完了した。現在は，豪州連邦政府のフラグシッププロジェクト最有力候補として評価中である。

(4)エネルギーセキュリティの観点から褐炭の有効活用についても取組を始めている。

参考文献

(1) IEA, How The Energy Sector Can Deliver on a Climate Agreement in Copenhagen, Special early excerpt of the World Energy Outlook 2009 for the Bangkok UNFCCC meeting（http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/climate_change_excerpt.pdf）

(2) IEA, World Energy Outlook 2009

(3) WEC, Survey of Energy Resources 2009

(4) Ishibashi et al, Second Year Operation Results of CCP's Nakoso 250MW Air-blown IGCC Demonstration Plant, Gasification Technologies Conference（2009）

(5) 橋本ほか，世界初の空気吹きIGCC 連続運転の成功と商用機計画，三菱重工技報 Vol.46 No.1（2009）p6

(6) 橋本ほか，空気吹きガス化炉を用いたIGCC 商用機の計画状況，三菱重工技報 Vol.46 No.2（2009）p17

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

論説◆解説

特集：石炭火力発電とCCS技術

CO_2回収型石炭利用技術

須田　俊之*1　SUDA Toshiyuki
山田　敏彦*2　YAMADA Toshihiko

キーワード：石炭，CO_2，CCS，酸素燃焼

1．はじめに

近年，地球温暖化問題の高まりから，温暖化ガスの一つであるCO_2の大気中への放出削減に向けた様々な動きが世界で広がっている。昨年７月に開催されたラクイラサミットにおいては，2050年までに先進国全体で1990年比で80％もの温暖化ガス排出量を削減する目標が示された。昨年12月に開催されたCOP15においては，途上国も含めた排出削減目標の設定が目指されたが，先進国と途上国間の意見対立から残念ながら協定の採択には至らなかった。国内においては，2020年までに1990年レベルから25%温暖化ガスを削減する目標が昨年９月に示されている。これらいずれの目標値も，CO_2排出を削減するための技術によって始めて成立するものであり，各種の技術開発が世界各国で進められている。

広く知られているように，世界の一次エネルギー源の大部分は化石燃料の燃焼に依存しており，大気中のCO_2濃度も化石燃料の急激な利用によって増加していると考えられている。従って，化石燃料の燃焼から発生するCO_2の放出を抑制することが，地球温暖化に対する量的寄与から考えると最優先の課題となる。化石燃料の中でも特に石炭は，単位エネルギーあたりのCO_2発生量が石油の1.26倍，天然ガスの1.46倍と多く，その使用量から考えるとCO_2発生に対する寄与は他の化石燃料に比較して非常に大きい。単純に考えれば，石炭の燃焼利用を無くすことが化石燃料起因のCO_2発生抑制対策として最も効果が大きいと考えられるが，現状の一次エネルギーに対する石炭の寄与率やその埋蔵量から考えると，石炭をバイオマス等の新エネルギーで全て代替することは不可能である。従って，埋蔵量が多く地域偏在性の少ない石炭を高効率に利用し，かつCO_2の放出を抑制する技術が今後重要となると考えられる。

石炭燃焼からのCO_2発生を抑制するためには，本質的には利用効率を高め燃料使用量を抑えることが，エネルギーの有効利用という面からも最も効果が大きい。例えば，現状の石炭焚火力発電所の送電端効率は40%程度であるが，蒸気条件を向上させることで効率を42～46%程度まで向上させることが計画されている（A-USC：次世代超々臨界圧ボイラ）。また，石炭をガス化しガスタービンと蒸気タービンをコンバインドさせ発電する石炭ガス化複合発電（IGCC）技術では，発電効率を48%以上まで高めることを目指している。これら技術をできるだけ早く実用化することが重要であるが，一方で既に稼働している発電所からのCO_2放出を抑制することも考えなければならない。

A-USCやIGCCなどの技術が実用化・普及するまでの技術として注目されているのがCCS（Carbon Dioxide Capture and Storage：二酸化炭素回収貯留）技術である。CCSとは，火力発電所等などの大規模な発生源からCO_2を大気に放出される前に分離・回収し，地中や海中などに貯留する技術である。大規模CO_2放出源にCCSを適用したシステムの模式図を図１に示す。本手法を用いることで原理的には大気へのCO_2放出量を０にすることも可能である。CCSにより化石燃料からのCO_2発生量が０となるわけではないが，大気への放出を抑制することで大気中のCO_2濃度の急上昇を抑え，地球環境への影響を最小限とすることができる。

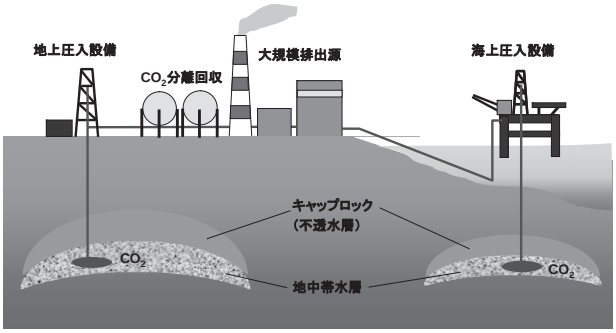


図１　CCSの概念図

CCSの技術は，①化石燃料の燃焼から発生するCO_2を分離・回収する技術と，②回収したCO_2を貯留する技術に大別できる。②のCO_2を貯留する技術については別紙に譲り，本報では主に石炭焚火力発電所を対象としたCO_2分離回収技術について紹介する。

原稿受付　2010年７月23日
＊１　㈱ＩＨＩ　基盤技術研究所　熱・流体研究部
〒235-8501　横浜市磯子区新中原町１
＊２　㈱ＩＨＩ　電力事業部　開発部

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

2．CO_2回収型石炭利用技術の概要

石炭燃焼施設からCO_2を回収する手法としては，大きく分けて以下の３つの手法がある。

①燃焼後の排気ガスからCO_2を分離回収する手法（Post-combustion）

②燃焼前にCO_2を分離する手法（Pre-combustion）

③新燃焼技術：酸素燃焼法，ケミカルループなど

①の燃焼後排気ガスからCO_2を分離する手法としては，化学的・物理的手法で排気ガス中の低濃度のCO_2（一般的な微粉炭焚ボイラで13%程度）を吸収材で吸収し，排気ガスから分離回収する手法である。アミン系の液体吸収材や，セラミック系の固体吸収剤を用いる技術が開発されている。②の燃焼前にCO_2を分離する手法としては，ガス化炉などにより石炭をCO_2とH_2の混合ガスに変換し，CO_2を分離回収した後，H_2は発電用の燃料とする手法である。①の手法よりもガス中のCO_2分圧が高くなるため，分離回収の効率を高めることが可能である。現在IGCCへの適用が検討されている。③の新燃焼技術としては，酸素燃焼法やケミカルループが注目されている。酸素燃焼法は，酸化剤を空気ではなく純酸素，もしくは純酸素と排気ガスの混合ガスとすることで，排気ガス中のCO_2濃度を高めCO_2分離装置無しで直接回収する手法である。ケミカルループとは従来の燃焼方法とは全く異なり，金属粒子等を酸素のキャリアーとして利用し，空気中からの酸素の分離と燃料の酸化反応を別の反応器で行わせることで，燃焼排ガス中へのN_2のコンタミを無くしCO_2を高濃度で回収する手法である。

これら手法について以下に詳細を述べる。

2.1　燃焼後CO_2分離回収技術（化学吸収法）

燃焼後の排気ガスからCO_2を分離回収する手法としては，一般的には大規模施設への適用が容易な化学吸収法が用いられる。石炭焚火力発電所に化学吸収法によるCO_2分離回収技術を適用した場合のプロセス模式図を図２に示す。まず，ボイラ出口において脱塵・脱硝・脱硫などの排ガス処理プロセスを経た排気ガスは，吸収塔の下部に導入され，対向して導入されたCO_2吸収材と接触し反応する。吸収材としてはCO_2吸収率が大きいアミン系吸収液が用いられることが多く，代表的なものとしてはモノエタノールアミン（MEA）などがある。アミン系吸収液においてCO_2との化学反応は以下となる。

$$CO_2+2RNH_2 \rightarrow RNHCOO^- + RNH_3^+$$

吸収塔において排気ガス中のCO_2の90%以上は吸収材に移行し，従って排気ガス中のCO_2濃度は１%程度となる。一方，CO_2を吸収した吸収剤は再生塔に導入され，リボイラにより加熱されることでCO_2が解離し，吸収液は再生され高純度のCO_2が回収される。

本手法は，既設の石炭焚ボイラなどの大規模発生源に対して，ボイラ本体の改造無く適用できるところに大きなメリットがある。その一方で，下記の課題がある。

①吸収液の再生に大きなエネルギーが必要

②排気ガス中の酸素，NOx，SOxによる吸収液の劣化

吸収液の加熱再生にはボイラで発生させた蒸気の一部を用いるが，その必要熱量はボイラ発熱量の20%にもなるため，発電効率の大幅な低下につながる。現在，再生熱量を減らすことが可能な各種吸収液の開発が進められている[1]。

2.2　燃焼前CO_2回収技術

燃焼前CO_2回収技術は，基本的には石炭ガス化技術を利用し，石炭をCO，H_2，炭化水素などのガスにガス化し，その後シフト反応等を利用しCOを全てCO_2とH_2に変換，ガス中に含まれるCO_2を分離回収する技術である。IGCCのガスタービンなどで燃焼利用する前にCO_2を分離回収するため，燃焼前CO_2回収技術と言われる。図３に石炭ガス化技術を利用したCO_2分離回収プロセスの概略図を示す。ガス化技術としては，1500℃以上の高温，2MPa以上の加圧下において石炭とガス化剤である酸素や水蒸気と反応させる噴流床ガス化炉が主流であるが，より低温で安定して反応が可能な流動床を利用した流動床ガス化炉なども開発されている。石炭と反応させるガス化剤としては，ASU（Air Separation Unit：空気分離装置）によって発生させた純酸素を利用した酸素吹き方式，空気を利用する空気吹き方式，水蒸気を利用する水蒸気ガス化方式などがある。石炭ガス化ガス中に含まれるCOは，水性ガスシフト反応（$CO+H_2O \rightarrow CO_2+H_2$）により$H_2$と$CO_2$に変換する。これにより，基本的にはガス化ガスは$H_2$と$CO_2$となるため，炭素分を全て$CO_2$として回収することが可能となる。ガス化ガスからの$CO_2$回収手法としては，物理吸収溶媒としてエタノールに吸収させるレクチゾール法，2.1と同様に化学吸収溶媒とし

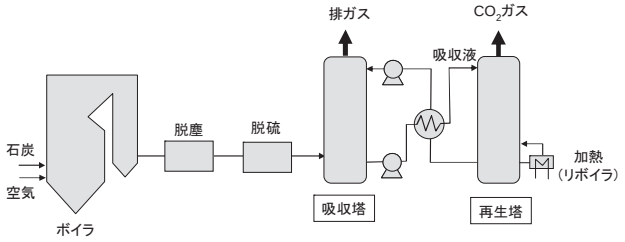


図２　化学吸収法によるCO_2分離回収

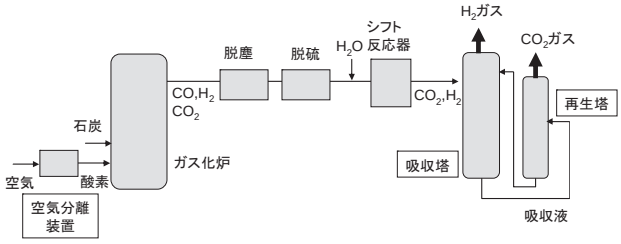


図３　石炭ガス化によるCO_2分離回収

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

てアミンを用いた方法などが用いられる。

海外では，米国ノースダコタの石炭ガス化プラント（合成燃料製造）から物理吸収法によりCO_2を分離回収し，カナダWeyburn油田に輸送，EOR（Enhanced Oil Recovery）に利用しているプロジェクトがある。国内においては，酸素噴き噴流床ガス化炉（EAGLEプロジェクト）においてCO_2回収と組み合わせた試験が実施されている。

課題としては，2.1と同様にCO_2回収を行うことでプラント効率が低下すること，石炭ガス化プラントのコストが従来型微粉炭火力に比較し高くなること，石炭ガス化炉の信頼性等であろう。

2.3 酸素燃焼

酸素燃焼とは，その名前のとおり石炭を空気ではなく酸素で燃焼させる方法である。図4に純酸素で石炭を燃焼するシステムの模式図を示す。深冷分離法などの空気分離装置（ASU）により空気から酸素を製造し，ボイラに導入し石炭を燃焼させる。石炭等の化石燃料はCとHの化合物であり，燃焼した排気ガスはほぼ全量がCO_2とH_2Oとなり空気中の窒素は含まれない。従って，蒸気を凝縮分離することのみでほぼ全量のCO_2を回収することができる。

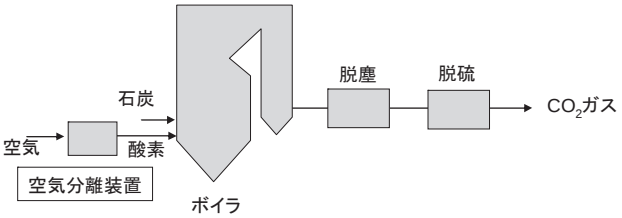


図4 酸素燃焼によるCO_2分離回収

本手法は下記のメリットがある。

①CO_2分離装置無しでほぼ全量のCO_2が回収できる

②窒素が無くなることにより排気ガス量が減少するため，排気ガスによる顕熱損失が減少する

③空気中の窒素起因のNOx（Thermal-NOx）生成が無い

一方，課題としては下記がある

①空気分離装置の必要動力が大きく，化学吸収法と同様，システム全体としては発電効率が低下する

②炉内が高温となるため炉体・バーナ焼損等の問題がある。また純酸素の取り扱いなど安全面の配慮が必要。

③排気ガスからCO_2を分離回収する手法と異なりボイラ本体の改造が必要

純酸素燃焼法の実用化にはまだ時間が必要であるが，近年酸素と排気ガスを混合したO_2/CO_2ガスを燃焼ガスとして利用する手法（微粉炭酸素燃焼技術：Oxy-fuel combustion）が開発されており，実証段階に進んでいる[2]。

2.4 ケミカルループ燃焼・ガス化

ケミカルループは従来の燃焼手法とは全く異なる技術であり，金属酸化物等の化学反応を利用することでCO_2を分離しつつ石炭を燃焼もしくはガス化させる手法である。図5に金属酸化物を利用したケミカルループ燃焼方式を示す。本方式では反応炉が二つあり，それぞれの炉で以下の反応を行わせる。

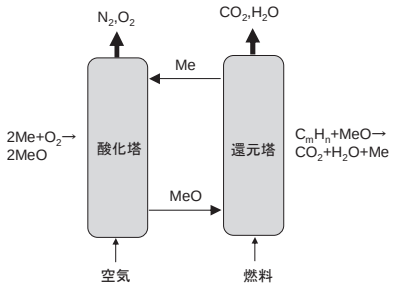


図5 ケミカルループ燃焼方式

酸化炉 ： $2Me+O_2$（空気）→$2MeO$

還元炉 ： CmHn（燃料）+MeO→CO_2+H_2O+Me

ここでMeは金属を表す。還元炉では燃料と金属酸化物中の酸素が反応しMeOはMeに還元され，燃料はCO_2とH_2Oになる。従って，H_2Oを凝縮させれば排気ガスは全てCO_2になる。酸化炉ではMeと空気を反応させることでMeOに酸化させる。金属を二つの反応炉間で循環させることで，CO_2を分離しながら燃料を燃焼させることが可能となる。発生した排ガスの熱をガスタービンやボイラで利用することにより発電を行う。

ケミカルループガス化方式の例としては，CaO/$CaCO_3$を利用した方式がある（HyPr-RINGプロジェクト[3]）。本方式は図5と同様に2つの反応炉を用い，CaOにCO_2を吸収させつつ，$CaCO_3$のカルシネーション（カ焼）によって得られる熱を石炭のガス化反応に利用し，CO_2を分離しながらH_2を製造するプロセスである。それぞれの炉での反応は以下のとおりとなる。

ガス化炉 ： C（石炭）$+2H_2O+CaO \rightarrow CaCO_3+H_2$

カ焼炉 ： $CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$

CaO/$CaCO_3$が炉内を循環しつつ，ガス化炉からH_2，カ焼炉からCO_2が発生することで，CO_2を回収しつつ石炭からH_2を製造することが可能となる。

ケミカルループ方式は近年研究開発が盛んに行われているが，現状は研究開発段階であり，実用化にはまだ時間が必要である。課題としては，Me/MeOやCaO/$CaCO_3$など固体粒子を循環させることが必要となるため循環流動層の技術が必要となること，反応媒体の寿命や摩耗が課題となっている。

以上，CO_2分離回収手法の概要を述べたが，以下に2.3に述べたOxy-fuel Combustionについての詳細を述べる。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

3．微粉炭酸素燃焼技術（Oxy-fuel Combustion）

3.1 原理と課題

微粉炭酸素燃焼技術は，事業用ボイラで多く用いられている微粉炭燃焼に酸素燃焼技術を適用したものであり，CO_2回収の他にもNOxの低減など多くのメリットがあり注目されている技術である。

微粉炭燃焼とは，石炭を微粉砕しバーナにて燃焼させる手法であり発電用ボイラの主流となっている。微粉炭ボイラは，粉砕器（ミル），微粉炭バーナ，ボイラ，空気予熱器，脱硝・脱硫装置からなっている。供給された石炭は粉砕器により粒径74μm（200メッシュ）以下が85wt%以上となるように粉砕され，空気とともにバーナに搬送・燃焼される。高温となったガスは水管により水と熱交換することで蒸気を発生させ，蒸気タービンにより電気を発生させる。燃焼後の排気ガスは，空気予熱器等の熱交換器を通過した後，脱硝・脱硫装置を通すことでNOx，SOxを低減させ，煙突から排出させる。

微粉炭酸素燃焼技術は，微粉炭を酸素及び再循環させた燃焼排気ガス中（O_2/CO_2混合気）で燃焼させることにより，燃焼排気ガスから分離することなく高濃度でCO_2を回収する技術である[4]。システムの概略図を図6の(b)に示す。本手法により，排気ガス中のCO_2濃度は95％以上になり，脱硝・脱硫特性も改善される。また，従来型空気燃焼ボイラ＋アミン吸収法によるCO_2回収型石炭燃焼システム（図6の(a)）に比較して，微粉炭酸素燃焼ではプラント効率が数％向上することが試算されており，その優位性が確認されている[5]。

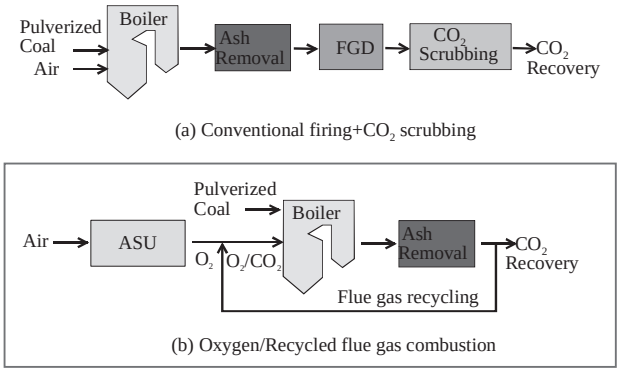


図6 微粉炭酸素燃焼技術とアミン吸収法によるCO_2回収分離手法の比較

微粉炭酸素燃焼においては，微粉炭を今までに無いO_2/CO_2雰囲気下で燃焼させるため，従来の空気燃焼場に比較し各種の燃焼挙動が異なる。特に微粉炭焚ボイラにおいて重要となる項目について以下に記す。

- 微粉炭バーナでの着火，保炎特性
- 燃え切り特性
- NOx，SOx排出特性
- 伝熱特性
- 設備の運用性

基本的には空気中のN_2をCO_2に置換した場で微粉炭を燃焼させる形となるため，CO_2が上記に示した各種挙動にどのように影響するかを把握することが重要である。また，微粉炭酸素燃焼では排気ガス中に含まれるNOx，SOxがCO_2とともに炉内に再循環されるため，これらガスが火炉内でどのように変化するかについても調べる必要がある。

3.2 燃焼性に対するCO_2の影響

CO_2の影響としては主に下記がある。

- 熱特性への影響：CO_2は熱容量がN_2に比較し大きい
- 輻射特性への影響：CO_2は赤外域の光を吸収する
- 化学反応への影響：CO_2はCと反応しCOを発生する

表1 各種ガスの熱物性

	比熱Cp [kJ/kg・K]	熱伝導率λ [W/m・K]	密度ρ [kg/m³]	温度伝導率a [m²/s]
O_2	1.09	7.31×10^{-2}	0.39	1.72×10^{-4}
Ar	0.52	4.35×10^{-2}	0.49	1.72×10^{-4}
N_2	1.17	6.31×10^{-2}	0.34	1.59×10^{-4}
CO_2	1.23	6.81×10^{-2}	0.54	1.03×10^{-4}

at 1000K, 1atm

Ar，N_2，CO_2とO_2について熱特性の差を表1に示す。CO_2はN_2に比較して熱容量ρCpは1.7倍，温度伝導率は0.6倍となるため，O_2/CO_2雰囲気中ではO_2/N_2雰囲気に比較し温度が上昇しにくい。輻射特性の影響と合わせ，O_2/CO_2雰囲気下では微粉炭の燃焼特性やボイラ収熱特性が大きく変化することが予想される。化学反応に関しては，$C+CO_2\rightarrow2CO$（ガス化反応）の影響が考えられるが，ガス化速度は燃焼反応速度に比較して数桁低いため，その影響は小さいと予想される。

ここでは，微粉炭バーナの安定性を評価する上で重要な微粉炭粒子群中の火炎伝播特性，またNOx排出特性について以下に詳細を記す。

(1)微粉炭粒子群中の火炎伝播特性

微粉炭バーナ火炎内における石炭の燃焼挙動を考える。炉内に投入された微粉炭粒子は，火炎や炉壁からの輻射を受けて加熱される。加熱を受けた粒子は熱分解し，揮発分を放出する。揮発分は周囲の酸化剤と混合され着火し，火炎を形成する。この火炎の形成過程においては，微粉炭粒子群中の火炎伝播機構が重要な役割を果たしていると考えられる。バーナ出口流速を増加させると火炎が吹き飛ぶ現象が発生することから考えると，バーナ出口流速と火炎伝播速度がバランスすることにより，火炎が形成されていると考えることができる。

微小重力場を用いて均一な球形の微粉炭粒子群を形成し，中心点火することで火炎伝播速度を測定した。高速度カメラによる火炎の観察結果を図7に示す。O_2/N_2雰囲気に比較し，O_2/CO_2雰囲気下では火炎伝播速度，火

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

炎輝度とも著しく減少することが分かった[6]。図８に火炎伝播速度の測定結果を記す。O_2/N_2雰囲気に比較し，O_2/CO_2雰囲気下では火炎伝播速度は1/2以下まで低下することが分かった。

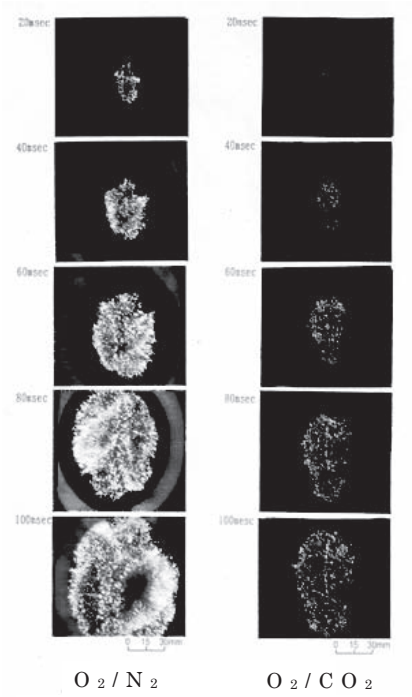


図７　火炎伝播挙動観察結果

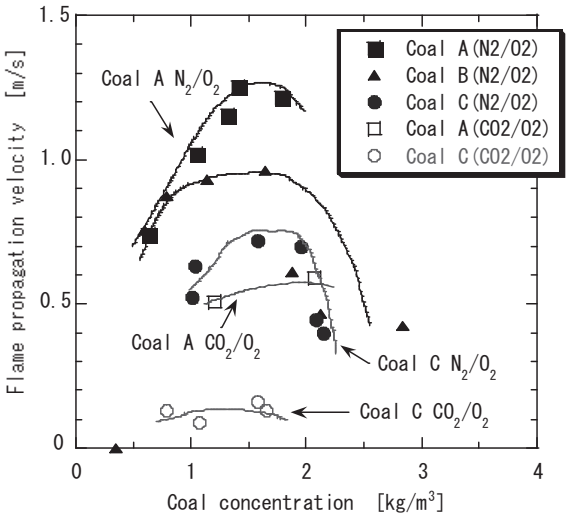


図８　火炎伝播速度測定結果

O_2/CO_2雰囲気での火炎伝播速度の低下は，先に述べたように熱特性・輻射特性の影響と考えられるが，本結果を簡単な1次元火炎伝播モデルによる数値解析によって考察した。本手法によって求めた火炎伝播速度に対する微粉炭粒子群濃度およびCO_2の影響を図９に示す。本計算によってもO_2/CO_2雰囲気ではN_2/O_2雰囲気に比較して火炎伝播速度が低下することが分かったが，CO_2の吸収係数を計算上０としても火炎伝播速度に変化は無かった。図10に火炎伝播速度に対するガスの吸収係数の影響を示す。吸収係数を０としたままでもCO_2の熱容量の影響により伝播速度は大幅に低下し，吸収係数を増やしていくと伝播速度はさらに低下するが，その影響は熱容量による影響よりは小さいことが分かった。本結果より，O_2/CO_2雰囲気下での火炎伝播速度の低下は，CO_2の熱容量が大きいことが主因であることが明らかとなった。

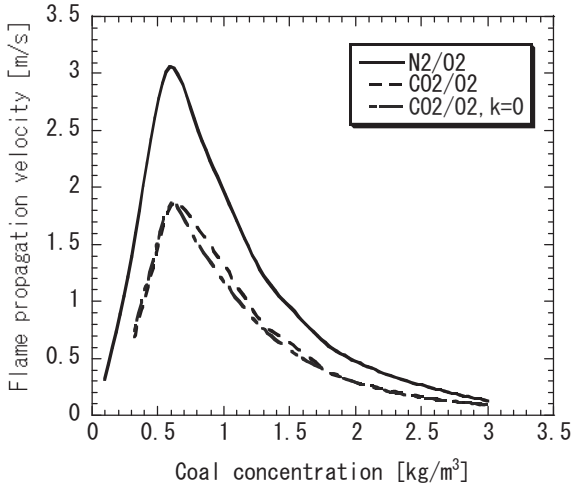


図９　数値解析による火炎伝播速度計算結果

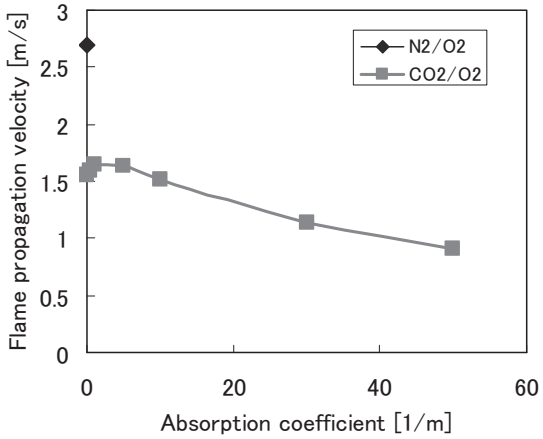


図10　火炎伝播速度に対する吸収係数の影響

(2)NOx

図６(b)に示したように，微粉炭酸素燃焼技術においては排気ガスを再循環させるため，CO_2だけでなく排気ガス中のNOxも火炎に再度流入するという特殊な条件となる。一般に微粉炭燃焼から発生するNOxは石炭中の窒素分（Fuel-N）の火炎帯での酸化によるものがほとんどとされているが，微粉炭酸素燃焼場においては，このFuel-NのNOxへの転換に対するCO_2の影響の他に，再循環されたNOxが火炎帯で還元される効果やFuel-Nと相互作用する効果が重なるという複雑な場になる。従って，微粉炭酸素燃焼場でのNOx排出特性は空気燃焼場とは大幅に異なるものとなり，下記特性について把握する必要がある。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

①Fuel-NのNOx転換率に対するCO_2の影響
②排気ガス中のNOxが火炎に再度流入することによる還元効果
③再循環されたNOxとFuel-Nとの相互作用

予混合１次元燃焼炉を用いた試験と，排気ガスの再循環量を考慮したマテリアルバランスの検討結果からNOx低減作用の効果について検討すると，微粉炭酸素燃焼場においては，Fuel-NのNOxへの転換率は空気燃焼場に比較して1/4 ～ 1/6まで低下するという大きな効果があることが分かった。また，NOx低減に対して最も寄与が大きいのは，再循環されたNOxが火炎帯に再流入されることで還元される効果であり，全NOx低減効果の50 ～ 80%に達することが分かった[(7),(8)]。

3.3　微粉炭バーナ試験

実際の酸素燃焼システムを模擬した試験設備を使用し，排ガスからのCO_2回収，火炎状態，燃焼特性，伝熱状態などを確認するため燃焼試験[(9)]を実施した。燃焼試験設備の系統図を図11に示す。

(1)試験装置および方法

試験炉は，容量1.2MWt，内径1.3m，長さ7.5mの円筒

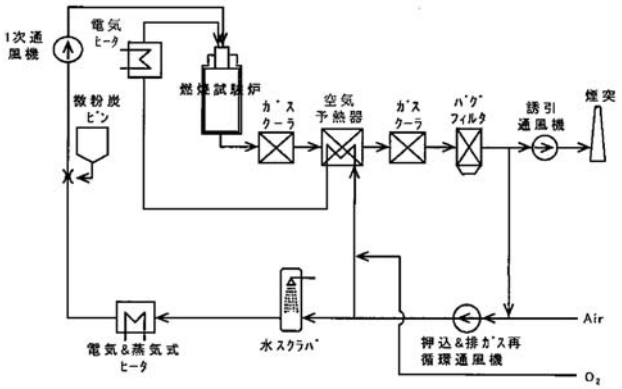


図11　燃焼試験設備系統図

炉で，バーナ１本を備えたものである。酸素燃焼では，脱塵後のバグフィルタ（BF）後流から取り出された排ガスが，排ガス再循環ファン（GRF）にて微粉炭搬送用ガス，燃焼用ガスとに分岐されバーナ部へ供給される。燃焼用ガスは，酸素と混合され，燃焼炉（バーナウィンドボックス）入口酸素濃度が任意に調整される。

(2)CO_2の回収

CO_2回収を目的とした酸素燃焼であるからには，CO_2が回収されなければならない。そこで実際に，酸素燃焼を行い，酸素燃焼時排ガス中で90%以上の高濃度CO_2を得ることができ，図11の燃焼試験設備に排ガス圧縮冷却設備を付加し，CO_2の液化回収試験を実施した。その結果，図12のとおり容器内０℃ /7MPaの条件でCO_2液化回収が確認でき，CO_2回収型の酸素燃焼システムとして十分適用できることを確認している。

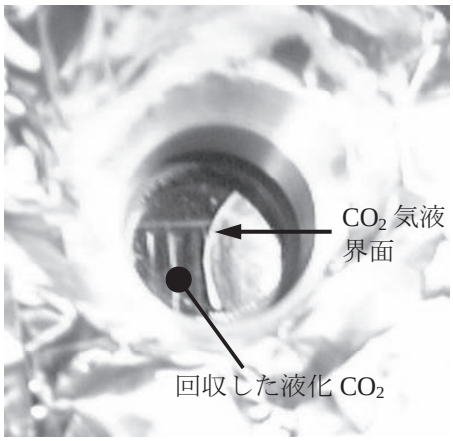


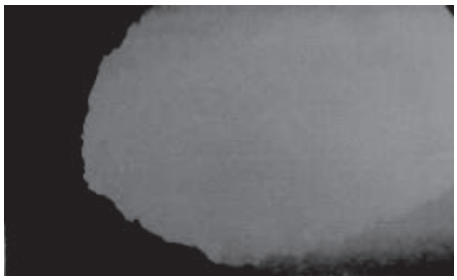
図12　覗窓からの液化回収CO_2の様子

(3)火炎状態および燃焼特性

酸素燃焼状態では，燃焼雰囲気ガスが窒素ではなく，高濃度CO_2ガス下での燃焼となり，空気と同じ21%の酸素濃度では，火炎が赤く火炎の存在感が薄いものとなる（図13）。そこで，酸素燃焼システムでは，通常の空気燃焼と同等の輻射伝熱特性を示す酸素濃度まで適正に上昇させ，燃焼することとしている。

図14では，３種類の豪州瀝青炭を用い，空気燃焼と酸素燃焼でのNOxおよび灰中未燃分を確認した。NOxの

(a)　通常燃焼時の火炎



(b)　微粉炭酸素燃焼の火炎

図13　微粉炭火炎観察結果

場合の比較は系外へ排出されるNOx排出量で実施した。その結果，酸素燃焼時のNOx排出量は空気燃焼時と比較して60 ～ 70%減少することが確認できた。これは3.2で述べたように，酸素燃焼において，再循環排ガスに含まれるNOxがバーナ部で還元されたことが主要因である。また，灰中未燃分については，酸素燃焼で減少傾向

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

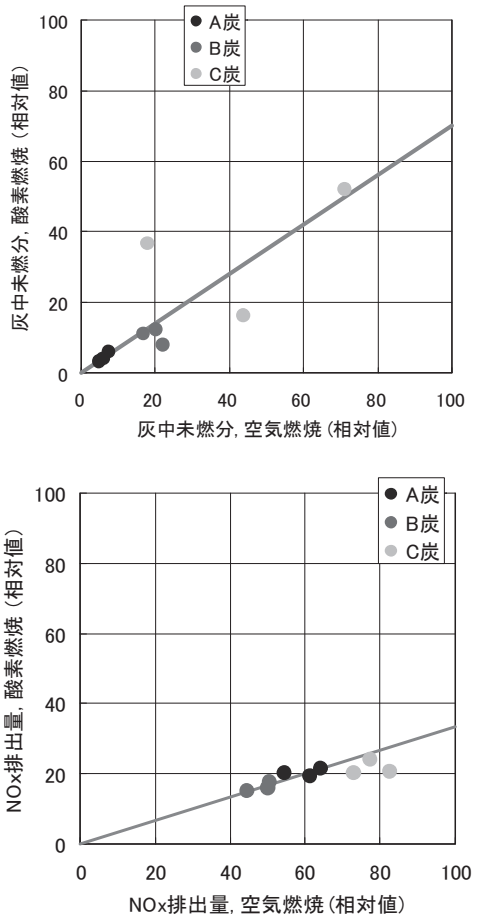


図14　NOxおよび灰中未燃分

にあることが確認された。これは，酸素燃焼では持込酸素濃度が高いことから，全排ガス量が空気燃焼に比べ減少し炉内での滞留時間が増加したこと，また，微粉炭を搬送しない燃焼用ガス中酸素濃度が空気中の酸素濃度21%より高く，局所的に高濃度酸素下での燃焼が起こっていることに起因しているものと考えられる。

⑷伝熱特性

酸素燃焼における輻射伝熱状態を確認するため，炉内の輻射伝熱部に模擬伝熱管を設置し，空気燃焼と酸素燃焼における収熱量の確認を行った，その結果，酸素燃焼において，ある持込酸素濃度で，空気燃焼とほぼ同等の特性を示すことが確認できている。

⑸設備の運用性

本システムの運用において，起動時は空気燃焼で行われ，各設備安定運転確認後，酸素燃焼に切り替え，CO_2を回収することが考えられている。燃焼試験における空気⇔酸素燃焼の運転切替時（炉内圧を負圧設定）の各所のO_2およびCO_2濃度のトレンドを確認した結果，燃焼状態の切替に応じ，排ガス中CO_2濃度が変化していることと，切替動作時においても安定して燃焼が継続していることが確認できた。

4．微粉炭酸素燃焼技術の国内外プロジェクト現状

⑴世界のプロジェクト動向

本酸素燃焼システムは，石炭火力発電所からのCO_2回収のための重要なオプション技術として現在世界的に注目を集めており，各国で研究および実証開発が行われている。その動向を表２にまとめた[10),11)]。本技術の大容量化および実用化に向けたステップとして，現在比較的小規模（～50MWe）の実証が進められており，また，2015年を一つのターゲットとして更なる取組みが為されているのが確認できる。本表内Callideプロジェクトが日本企業が参加し実施している日豪共同の実証プロジェクトであり，初めて発電プラントにおけるCO_2回収，そしてCO_2貯留を実証するものである。

⑶豪州カライド酸素燃焼プロジェクト

本プロジェクトは，酸素燃焼技術を適用し，実際の石炭火力発電プラントから，CO_2を回収，そして，その地下貯留まで実施することを目的としたものである。

日本と豪州の両政府の支援のもと，日豪の参加各社にて，2008年３月にプロジェクト実施母体であるJV（Joint Venture）が組織された。日本からは，電源開発㈱，三井物産㈱，㈱ＩＨＩの３社が参加メンバーとなっており，さらに財団法人石炭エネルギーセンターが技術的支援を行う体制となっている。現在2011年初頭のプラント完成

表２　海外における石炭酸素燃焼CO_2回収プロジェクト[11)12)]

ﾌﾟﾛｼﾞｪｸﾄ名	実証ｻｲﾄ	設備容量	ﾀｲﾌﾟ	運転開始時期	備考
Oxy-coal	英	40MWt	ﾊﾟｲﾛｯﾄ	2008	
Vattenfall	独	30MWt	ﾊﾟｲﾛｯﾄ	2008	CCS 付
Pearl Plant	米	22MWe	PCF	2009	
Cuiden	ｽﾍﾟｲﾝ	20MWt	ﾊﾟｲﾛｯﾄ (PCF)	2010	?
Cuiden	ｽﾍﾟｲﾝ	30MWt	ﾊﾟｲﾛｯﾄ (CFB)	2010	?
Callide	豪	30MWe	PCF	2011	CCS 付
Jamestown	米	50MWe	CFB	2013	CCS 付
Vattenfall	独	~250MWe	PCF	2015	?
Youngdong	韓	~100MWe	PCF	2016(?)	?

注）ＭＷｔ：熱入力、ＭＷｅ：発電機出力

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

を目指しており，その後酸素燃焼実証運転を行うこととなっている。CO_2貯留については，これからのサイト選定および試掘を経て，2011年中を目処に，実際に発電所から回収されたCO_2をローリーにて貯留サイトまで輸送し注入することとなっている。そして，計約３年間CO_2貯留を実証し，CO_2挙動のモニタリングを行う計画となっている。

対象となる発電所は，豪州クイーンズランド州東岸に位置するCS Energy社保有のカライドA発電所No.４ユニットである。本ユニットは実証プラントとして適正な容量（30MWe）であること，現在休止プラントであり改造することが可能であることから選定されたものである。発電所内における改造内容としては，酸素製造装置の追設，ボイラシステムの改造，排ガス圧縮・冷却によるCO_2回収設備が備えられる予定である。

貯留サイトは発電所の西約250kmに位置するエリアを候補として計画している。本候補サイトは，発電所により近く，CO_2貯留容量を確保できること，また，浸透率，空隙率など貯留層に関する特性が適していることから選定されるものである。

５．まとめ

本報ではCO_2回収型石炭利用技術として，近年注目されているCCS技術について概説した。特に，微粉炭酸素燃焼技術については，基礎的な研究から大型試験炉での燃焼試験，実証プロジェクトの現況などについて詳細に説明した。石炭はダーティな燃料とされているが，他のエネルギー源で全量代替することは不可能であり，であるなら如何にクリーンに利用するかについて継続的に技術開発を行うことが必要である。また，技術開発・実用化には時間が必要であり，CCSのような繋ぎ役的な技術もタイムリーに実用化していく必要がある。図15に，本年６月に経済産業省が発表したエネルギー政策見直し方針[12]のうち，火力発電の高度化としてあげられている施策を示す。今後，これら技術の開発・実証が成功し，微粉炭酸素燃焼技術のように日本がリードしている技術が世界的に導入されていくことで，地球温暖化問題解決に対して日本が大きく貢献できることを期待する。

参考文献

(1) 三村富雄ら：「反応速度測定によるCO_2回収時のアルカノールアミン化学吸収材の評価について」，化学工学論文集，第32巻（2006），pp.236-241

(2) 山田敏彦ら：「酸素燃焼技術を利用した石炭火力発電所におけるCO_2排出削減－カライド酸素燃焼プロジェクト－」，日本ガスタービン学会誌，Vol.37，pp.67-71（2009）

(3) 林石英：「ケミカルルーピングを利用するクリーンコール技術」，JCOAL Journal,Vol.16,pp.19-25（2010）

(4) Y.Noguchi：“Pulverized Coal Combustion in O_2/CO_2 mixtures for CO_2 Recovery,” Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, 97（1994）, pp.22-24

(5)「環境調和型石炭燃焼技術（酸素燃焼技術）」報告書，財団法人石炭利用総合センター，（1995～2000）

(6) T.Suda, K.Masuko, J.Sato, A. Yamamoto and K.Okazaki：” Effect of carbon dioxide on flame propagation of pulverized coal clouds in CO_2/O_2 combustion”, Fuel, Volume 86（2007）, pp.2008-2015

(7) K.Okazaki,T.Ando:” NOx Reduction Mechanism in Coal Combustion with Recycled CO_2”, Energy, The International Journal, Vol.22（1997）, pp.207-215

(8) 日本学術会議エネルギー・資源工学研究連絡委員会主催，「シンポジウム CO_2排出削減のための技術革新」テキスト（2000），pp.39-58

(9) T.Yamada et al.：“Characteristics of Pulverized-Coal Combustion in CO_2-recovery Power Plant Applied O_2/CO_2 Combustion”, JSME Int. J. Ser. B, vol 41, No. 4（1998）

(10) Sho Kobayashi, Presentation of 3rd Meeting of the Oxy-Fuel Combustion Network, Mar. 2008, Yokohama.

(11) Terry Wall et al., Proc. of CCSD Annual Conference 2008, April, 2008, Gold Coast

(12) 経済産業省ホームページ

図15　火力発電高度化に向けたアクション

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

論説◆解説

特集：石炭火力発電とCCS技術

高効率石炭火力発電でのCO_2回収技術

伊藤　修[*1] ITO Osamu
河﨑　照文[*2] KAWASAKI Terufumi
勝部　利夫[*4] KATSUBE Toshio
木山　研滋[*4] KIYAMA Kenji
長崎　伸男[*3] NAGASAKI Nobuo
百々　聡[*1] DODO Satoshi

キーワード：CO_2化学吸収，酸素燃焼，石炭ガス化複合発電，酸素吹きガス化炉，H_2リッチガスタービン燃焼

1．はじめに

石炭火力発電は，燃料である石炭の資源量が豊富で地域的偏りが少なくかつ安価であるため，主要エネルギ供給源として各国で重要な役割を担っている。しかし，CO_2排出原単位が大きいことが課題で，低炭素社会へ向けた取組みとして発電効率のさらなる向上，CCS（Carbon Capture and Storage）技術の確立が強く求められている。日立グループはこれまでに培った火力発電技術を基にCO_2回収型の石炭火力，石炭ガス化発電の実用化に取り組んでいる。

2．日立グループの開発ビジョン

欧米では，石炭火力発電に対してCO_2排出規制の動きが具体化し，2015年を目安に複数のCCS技術を実証することが現実のものとなっている[(1),(2)]。これをふまえ，日立は日米欧の３拠点からなるグローバルな連携体制を構築し，現地の研究機関と連携して石炭火力の高効率化とCCS技術の開発に取り組んでいる（図１）。

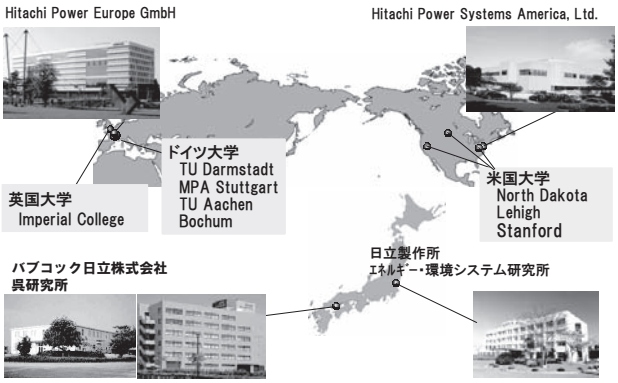


図１　日立グループのCCS開発連携

具体的には４つの技術を開発している。700℃級A-USC（Advanced-Ultra Super Critical），化学吸収法，酸素燃焼法，それにIGCC（Integrated Coal Gasification Combined Cycle）である。これらの技術を融合することで，CO_2回収に伴う効率低下も補うことができ，環境にやさしく経済的にも成り立つ次世代石炭火力が完成する。以下では，CO_2回収に関わる化学吸収法，酸素燃焼法，CCS対応IGCCについて紹介する。

3．化学吸収法の開発

3.1　概　要

化学吸収法によるCO_2除去技術は，天然ガス精製工程や化学プラントで実績がある。しかし，石炭火力発電プラントに適用するに当たっては，熱損失から発電効率が大幅に低下することや，排ガス中に含まれるSOxなどの酸性ガスが吸収液を劣化させることなどを解決する必要がある。

日立では1990年代初めから開発を開始し，基礎試験，実ガスパイロット試験での実証試験により，石炭焚ボイラ排ガスに適した吸収液と装置を開発している。

3.2　吸収液の開発

吸収液の開発には，基礎実験装置と合わせて図２に示すベンチスケール実験装置を用いた[(3)]。この装置は吸収塔，再生塔および液循環装置から構成され，ボイラ排ガスを模擬した混合ガスを用い，種々の条件で吸収液性能の評価ができる。従来の吸収液は主に天然ガス採掘時のCO_2除去工程で使われており，石炭焚ボイラの排ガス中の酸性ガスやO_2に弱い。また，処理ガス量が格段に多くなるため，装置設計上，吸収液の熱特性や流動特性などの基礎物性も十分に考慮しなければならない。そこで，種々のアミンの吸収液サンプルについてスクリーニング試験を行い，石炭焚ボイラ排ガスに適したアミン吸収液「H3」を開発した。さらに添加剤などを加えて改良を図った。

原稿受付　2010年７月６日
＊１　㈱日立製作所 電力システム社 エネルギ・環境システム研究所
〒312-8507　茨城県ひたちなか市堀口832-2
＊２　㈱日立製作所 電力システム社 ボイラ事業部
＊３　㈱日立製作所 電力システム社 火力事業部
＊４　バブコック日立㈱ 呉事業所

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

図２　ベンチスケール実験装置

3.3　実ガス実証試験

日立グループで開発したアミン吸収液を用いて，東京電力㈱殿との共同研究として，東京電力㈱殿横須賀火力発電所に排ガス処理量1,000m^3_N/hのパイロット装置を設置して，実ガス実証試験を実施した[(4),(5)]。種々の特性試験により性能を確認した後2000時間の長期連続運転試験を実施した。その試験結果の一例を図３に示す。30ppmのSO_2を含む排ガスの試験においても安定した高いCO_2

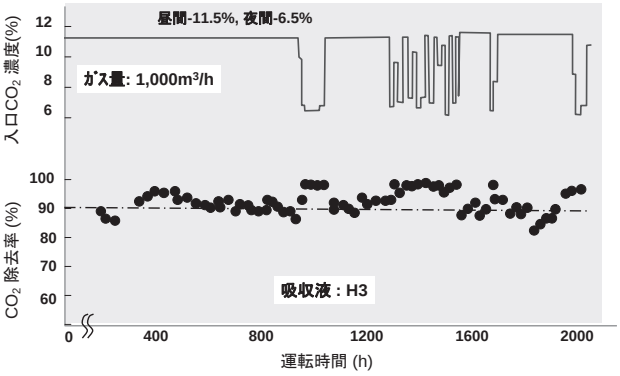


図３　長期連続運転試験の結果

除去性能を確認した。除去率は平均で90％を超えており，回収したCO_2の純度は99%以上の高い値であった。また，CO_2回収に要したエネルギは，標準となるMEA（Mono Ethanol Amine）に比べ20～30％改善できた。

また，世界では種々の石炭が使われており，排ガス中の酸性ガス濃度や灰分などが異なる。そこで，日立では欧州での実機排ガスを使った試験も予定している。図４は処理ガス量が5,000 m^3_N/hのパイロット装置で，日立パワーヨーロッパ社が中心となり，欧州の電力会社との共同研究で，2010年７月から既設発電所で評価試験を実施する。改良した吸収液試験も実施する。

3.4　最適システムの構築

CO_2回収プラントを石炭焚火力発電プラントに組み込むためには相互のインタフェースを考慮し最適システムを構築する必要がある。主検討項目を概説する。

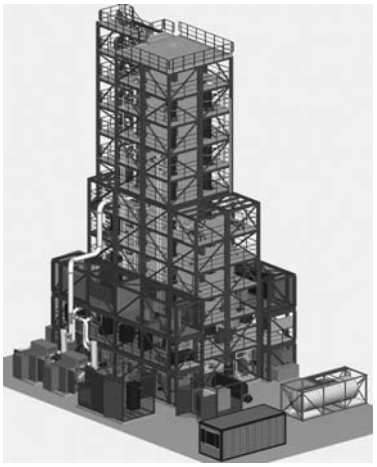


図４　5,000m^3_N/hのパイロット装置概観

(1)　吸収塔入口での脱硫

石炭焚ボイラ排ガスに含まれるSOxは吸収液を劣化させるため，CO_2回収装置入口では少なくとも10ppm以下にする必要があると言われている。そこで，多くの場合，吸収塔の上流に新たにスクラバを設置する構成が検討されている。しかし，日立グループでは，既存の脱硫装置において99％以上の高い除去実績を多数有しており，特段のスクラバを設けない設計も可能である。

(2)　再生塔への蒸気供給（蒸気タービン抽気）

蒸気タービンの実績も多く，抽気による効率低下を最小限に抑える蒸気系統を開発している。また，排ガスの排熱を回収して，タービン側からの供給蒸気量の低減等を行うシステムの開発も進めている。

(3)　CO_2圧縮機の排熱利用

回収したCO_2ガスは貯留のため圧縮・輸送あるいは圧縮・液化される。回収したCO_2ガスには水分が多く含まれており，この工程で生じる水分や圧縮熱の回収はシステム効率を高めるために重要な因子である。また，大量のガスを処理することから圧縮動力の低減も不可欠である。日立グループでは尿素合成などの各種プラントにおけるCO_2の遠心圧縮機を製造しており，多くの実績を持っている[(6)]（図５）。現在，これら技術を利用したシステム効率向上などの開発を進めている。

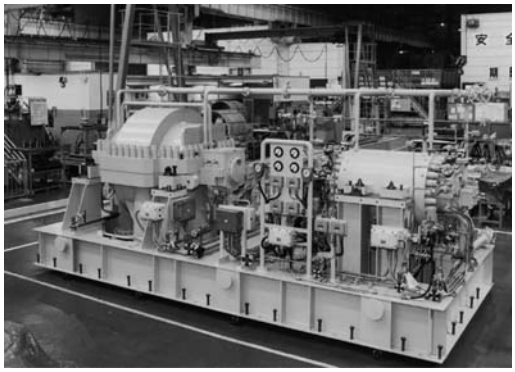


図５　CO_2液化用遠心圧縮機

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

4．酸素燃焼法の開発

4.1　概　要

酸素燃焼法は，燃焼用空気の代わりに再循環排ガスで純酸素を希釈して石炭を燃焼させる方法である。排ガスの成分の殆どがCO_2と水分となるため，水分を除去するのみでCO_2を圧縮・液化できる。化学吸収装置のような大掛かりの回収装置は要らない。また，燃焼ガス量は空気燃焼の場合より少なくできるため，ボイラや煙道がコンパクトになる。しかし，実用化に当たっては，ガス成分の変更に伴う燃焼安定性や伝熱特性の変化及び排ガス再循環によって濃縮されたSO_3による腐食などの課題がある。

日立グループでは，長年，石炭焚ボイラの開発を推進しており，世界トップレベルの試験評価設備（基礎試験設備，パイロット試験設備，数値解析技術）を有し，これらを駆使した開発を進めている。さらに，海外の電力会社と連携してスケールアップなどの実用化開発に取り組んでいる。

4.2　酸素燃焼バーナの開発

酸素燃焼では排ガスの主成分がN_2からCO_2に替わる。CO_2はN_2に比べ，消炎効果が高く，火炎の安定性が低下する。そこで，酸素燃焼条件でも火炎安定性の高いバーナを新たに開発した。このバーナの開発には図６に示す燃焼試験炉を用いた。この装置は，バーナの基本構造を模擬でき，排ガスの再循環によるCO_2や水分の濃度を変化させて燃焼特性，伝熱特性を評価できる。図７に示すように，本装置にて，空気燃焼から酸素燃焼に切り替えても，安定燃焼できることを確認した。

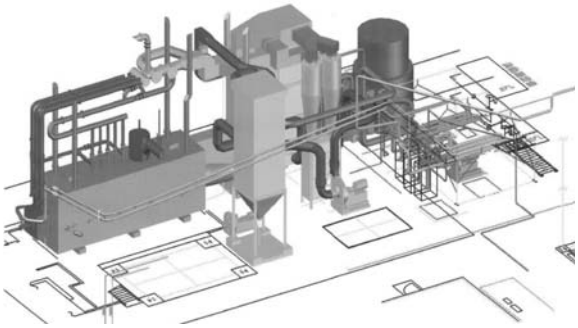


図６　4MWth燃焼試験炉の概要

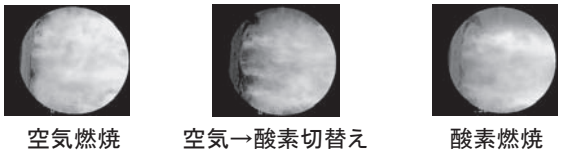


図７　空気燃焼/酸素燃焼でのバーナ火炎

また，ドイツのアーヘン工科大学とは，共同研究として大学所有の酸素燃焼試験炉を共用し，基礎的な酸素燃焼データを取得している（図８）。

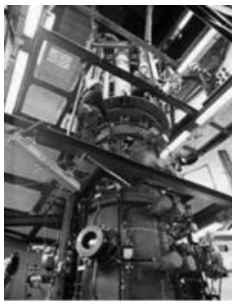


図８　アーヘン工科大学酸素燃焼試験装置（出所：RWTH-Aachen University, Courtesy of (c) Peter Winandy.）

この結果は，図９に示す日立が独自に開発したボイラ火炉内の乱流燃焼現象を解析できるシミュレーションコード[7]に組み込み，酸素燃焼プラント実証機の信頼性向上にむけた解析技術の高精度化を図っている。

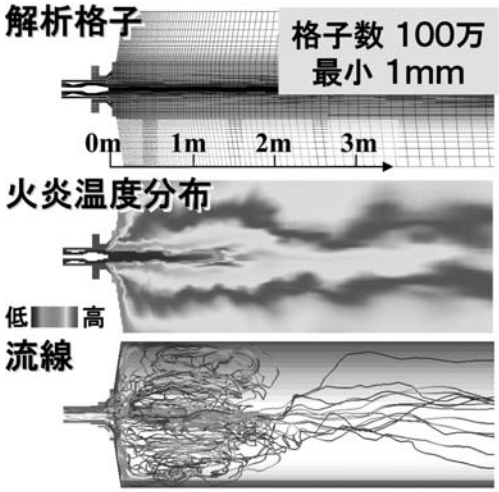


図９　石炭バーナの乱流燃焼解析結果例

さらに，酸素燃焼プラント実用化に向けた取り組みとして，欧州の電力会社と連携し，日立パワーヨーロッパを拠点として欧州プロジェクトに参加している。2010年６月からは，図10のSchwarze Pumpe石炭火力発電所にて30MWthクラスの酸素燃焼バーナ燃焼試験を行い，開発バーナのスケールアップに伴う信頼性を評価し，安定燃焼が実現できることを確認した。

図10　Schwarze Pumpe 30MWthデモプラント（出所：Vattenfall）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

5．酸素吹きIGCCの開発

5.1　概　要

酸素吹きガス化は，CO_2分離回収時の効率低下が低く，燃料電池との組合せにより送電端効率50%を越える効率が期待でき，CCS対応IGCCへ適用可能である。日立は，30年以上石炭ガス化複合サイクル発電技術開発を継続して実施してきた。（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）とHYCOL（Hydrogen from Coal）組合納50t/日パイロットプランの1000時間以上の連続運転実績により，酸素吹き一室二段旋回型ガス化炉の基本コンセプトを確立すると共に，灰に関わるトラブルを実証試験により解決した[8]。ガスタービン燃焼器では20年以上の豊富な開発経験に基づき，酸素吹き込みガス化に適した燃焼器開発を推進中である。

5.2　EAGLEにおける酸素吹きガス化炉技術開発

日立は，（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）と電源開発㈱が共同で進めている多目的石炭ガス化製造技術開発（EAGLE：Coal Energy Application for Gas, Liquid and Electricity）に参画し[9]，電源開発㈱からの発注により，設備一式を納入すると共に，電源開発㈱の試験運転支援を行っている。（図11）

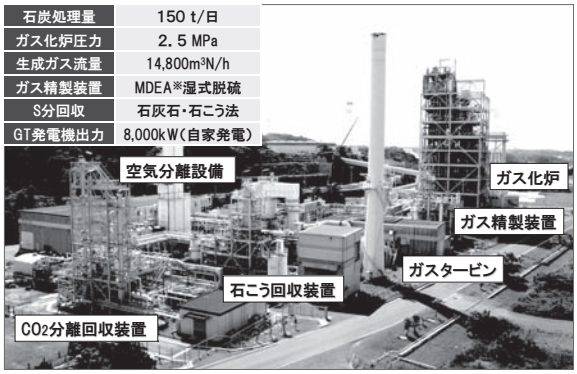


図11　EAGLEパイロットプラント

EAGLE-step1は，所期の開発目標の全てを達成して2007年３月に試験運転を終了した[10],[11]。炭種適合性を拡大するため，ガス化炉を改造し，EAGLE-step2として2010年３月まで試験運転を行った。主に一般の微粉炭火力で用いられている高灰融点炭３炭種についてガス化性能を取得すると共に，特性を把握した。石炭ガス化技術への高灰融点炭適用が可能であることを確認し，適合炭種拡大を検証すると共に，EAGLEガス化炉の優位性を確認出来た。（図12）

5.3　石炭ガス化ガスからのCO_2回収

石炭ガス化ガスからのCO_2回収は，石炭ガス（COリッチガス）に水蒸気を添加し，COをCO_2とH_2に転化する。CO_2を吸収された吸収液を再生し，CO_2を分離回収する。

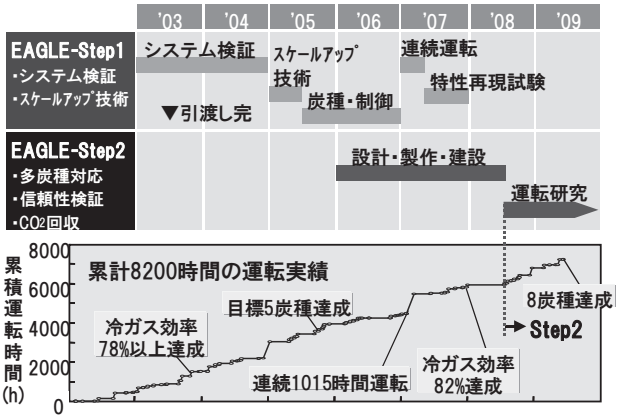


図12　EAGLE試験運転実績

CO_2を回収した後のH_2リッチガスは，ガスタービン燃料として使用される。火力発電プラントへの適用に当たっては，CO_2回収装置設置時の送電端効率低下抑制が重要である。このためには，①シフト反応用蒸気供給流量の低減による蒸気タービン出力減少抑制，②CO_2吸収再生系統での吸収液循環用動力低減および再生用加熱熱量低減，③熱回収システム適正化による蒸気タービン出力低下抑制が必要になる。

5.4　EAGLEにおけるCO_2回収実証試験

EAGLE-step2では，既設設備の一部を分岐し，世界に先駆けCO_2回収実証試験を行った。CO_2分離回収パイロットプラントの原料ガス処理量は1000m^3_N/h，CO_2回収量は約24t/日である。プラントは，シフト反応系統と吸収再生系統から成る。吸収系統は，MDEA（Methyl di-Ethanol Amine）による化学吸収を採用した。再生方式は，天然ガスからのCO_2回収において実績の多い再生塔再生に加え，再生用熱量低減を目指した加熱フラッシュ再生の試験を可能とした（図13，14）。

本試験設備では，CO_2分離回収技術の石炭ガス化ガスへの適用性を確認すると共に，CO_2回収率，ユーティリティ使用量等を把握し，CCSの経済性検討のための基礎データを取得することを目的としている。さらに，火力発電プラント適用に当たっての送電端効率低下抑制を検討する。

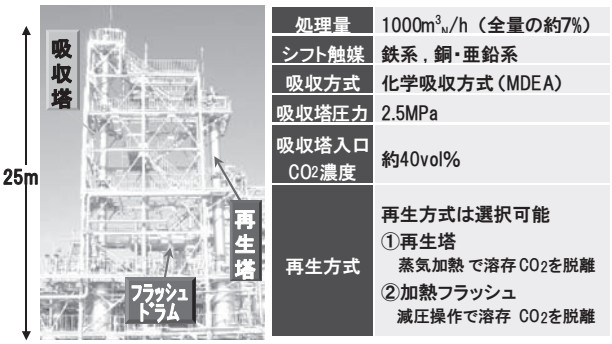


図13　CO_2回収パイロット試験設備概要

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

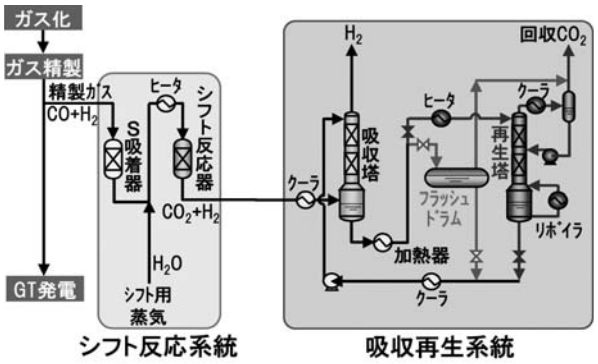


図14　CO_2回収パイロット試験設備系統構成

5.5　EAGLEにおけるCO_2回収実証試験結果と評価

実証試験では，再生塔再生および加熱フラッシュ再生のいずれの方式においても，CO_2回収率90%以上を確認した。再生塔再生では，吸収液が十分に再生できることから，低い吸収塔L/G（吸収液循環流量/吸収塔入口ガス流量）でも高いCO_2回収率を達成した。加熱フラッシュ再生では，再生塔再生に比べて吸収液再生の程度が十分でないことから，吸収塔L/Gを増加させることが必要となり，再生塔再生に比べてCO_2回収率が低いが，CO_2回収率90%以上を確認できた。（図15）

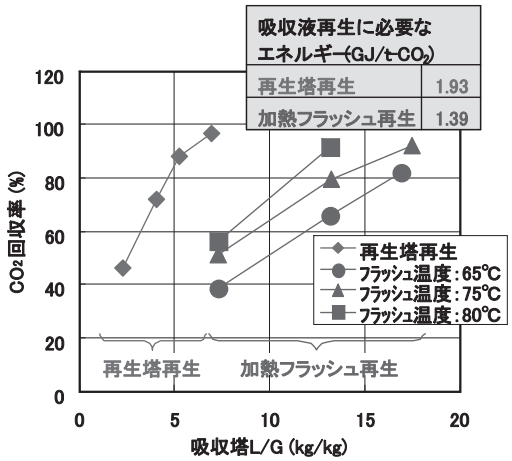


図15　CO_2回収パイロット試験結果

加熱フラッシュ再生は，吸収液再生用の熱量が小さいことに加え，吸収液を加熱再生する際にシフト反応器出口ガス中水分の潜熱を多く利用可能なことから，蒸気タービン抽気からの吸収液加熱用蒸気供給流量を再生塔再生の1/10以下に出来る。この結果，加熱フラッシュ再生方式は，再生塔再生方式に比べて，CO_2回収90%時の送電端効率を約４％（絶対値）向上可能であることがわかった。

加熱フラッシュ再生による運転条件適性化と熱回収システム適性化による蒸気タービン出力低下抑制により，CO_2回収率90%，CO_2純度99%を確保した上で，石炭ガス化ガスからのCO_2回収時の送電端効率低下を大幅に抑制できることを検証した。

5.6　CCS対応IGCC向けガスタービン

図16に示すCCS対応IGCCで発生する燃料はCO_2回収率の増加に伴いH_2濃度が高くなり，表1に示すように回収率90％の場合，H_2濃度は84vol.％に達する。H_2は燃焼速度が速いため，予混合燃焼方式の燃焼器では予混合器流路内に火炎が逆流する可能性が高くなる課題がある。一方，拡散燃焼方式の燃焼器ではNOx排出量が高く，規制値を満足するためにはプラントで発生する窒素に加え水または蒸気を燃焼器に噴射する必要がある。この場合，発電効率の低下と噴射設備の初期コストおよびプラントランニングコストが上昇する。このため，NOx排出量が少なくN_2や水，蒸気噴射設備の不要な燃焼器構造を提案することが重要であり，CO_2回収設備の運転によってガス組成が変化しても同一燃焼器構造で対応可能なドライ低NOx燃焼技術の開発が望まれている。

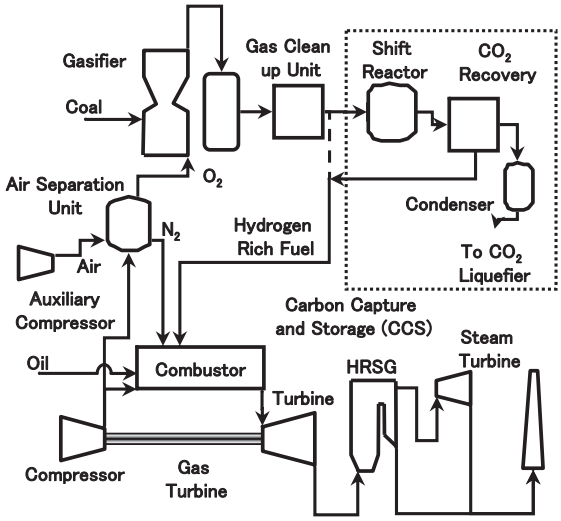


図16　CCS対応IGCCプラントの概要

表１　CCS対応IGCCプラントの燃料組成

		LNG	CCS-IGCC		
			CCS 0%	CCS 50%	CCS 90%
H_2	Vol%	0.0	26.5	58.0	83.5
CO	Vol%	0.0	60.0	30.5	5.0
CH_4	Vol%	88.4	1.0	1.0	1.0
CmHn	Vol%	11.6	0.0	0.0	0.0
Inert Gas	Vol%	0.0	12.5	10.5	10.5
Lower Heating Value	MJ/m^3N	40.9	10.8	10.5	10.0
	MJ/kg	49.6	11.3	18.3	36.2

日立は，大気圧下での要素燃焼試験を経て2008年から（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託を受けCCS対応IGCCプラントを想定した高水素濃度燃料むけのドライ低NOx燃焼技術開発に注力している。この技術はDME，LNGなどに対応して日立が培ってきた多孔同軸噴流バーナ（クラスタバーナ）[12],[13],[14]による急速混合技術と希薄燃焼技術を核としている。図17に示すクラスタバーナは多数の小口径の空気孔を設けた空気孔プレートと，空気孔と同軸に配置された多数のペンシル状燃料ノズルから構成されている。

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

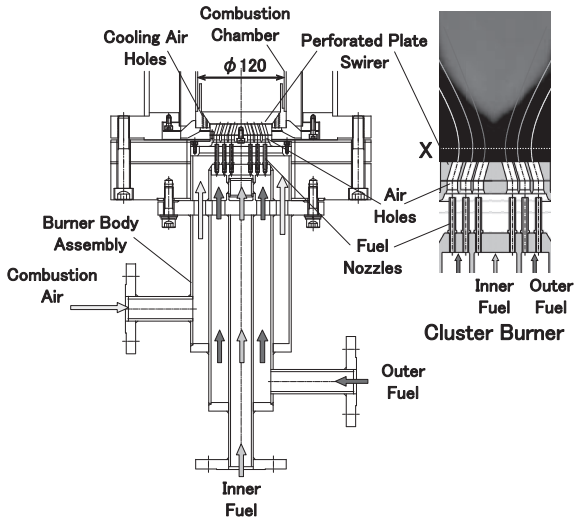


図17　クラスタバーナの概略構造

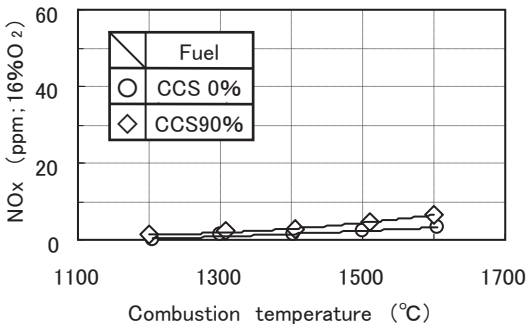


図18　NOx排出特性（大気圧）

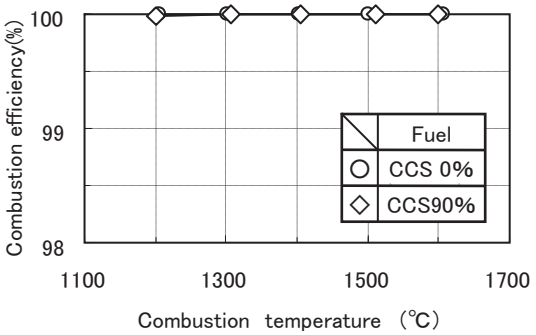


図19　燃焼効率（大気圧）

クラスタバーナでは燃料を分散させるとともに，空気孔入口での縮流と空気孔出口での急拡大により燃料と空気が急速に混合されるので，短い混合長さで希薄な混合気が形成でき，低NOx燃焼が可能である。

図18にCCS対応IGCCプラントの燃料に対するクラスタバーナの大気圧下での燃焼特性の一例を示す。CO_2回収率０％，90％のいずれの燃料組成に対しても，火炎の逆流や吹き消えなどの不安定燃焼を起こすことなく，低NOx燃焼を実現した。また，図19に示すようにバーナ出口平均ガス温度1200～1600℃の広い範囲にわたってCO_2回収率０，90％のいずれの燃料についても，99.99％以上の燃焼効率を得た。クラスタバーナはCO_2回収により燃料が変化しても，同一バーナで水蒸気や窒素などの不活性媒体を用いることなく低NOx燃焼が可能であり，CCS対応IGCCプラント用ドライ低NOx燃焼器として適用可能なことを確認した[15]。

６．おわりに

2009年10月，国際エネルギ機関はCCSテクノロジーロードマップを公表した[16]。それによると，2050年にCO_2排出レベルを半減するには，2020年時点で全世界で100件のCCSプラントが，2050年時点では3400件ものプラントが必要である。これは，地球環境の保全のためにCCS技術が必須であることを示している。 日立は今後も技術開発を進め，温暖化防止に貢献する。

参考文献

(1) 下院米国クリーンエネルギおよび安全保障法案, American Clean Energy and Security Act of 2009
(2) 上院クリーンエネルギ雇用および米国発電法案Clean Energy Jobs and American Power Act
(3) 山田睦夫，他：SO_2を含有する石炭火力発電所排ガスからのCO_2の除去技術，日本エネルギー学会誌，Vol.75, No.8（1996）
(4) 吉川博文，他：火力発電用排煙処理装置（脱硝･脱硫･CO_2除去技術）日立評論Vol.90，No.5（2008）
(5) H. Oota et al：CO_2 Removal Tech. from the Thermal Power Plant Flue Gas，The 4th Japan-Korea Sympo. on Separation Tech.（1996）
(6) 福島康雄，他：遠心圧縮機の流体関連振動事例の紹介，ターボ機械Vol.36，No.2（2008）
(7) 山本研二，他：LESによる微粉炭燃焼解析，日本伝熱学会論文集Vol.15，No.4（2007）
(8) 宮寺博，他：石炭利用水素製造技術（HYCOL）の開発，日本エネルギー学会誌, Vol.74，No.8（1995）
(9) F. Kiso et al.：EAGLE Project for IGFC in JAPAN, 25th Int. Conf. on Coal Utilization & Fuel Systems（2000）
(10) 穐山徹：旋回気流層石炭ガス化炉内でのスラグ飛散高さの推算, 化学工学論文集, Vol.34，No.4（2008）
(11) 伊藤修，他：火力発電におけるCO_2削減技術，日立評論Vol.90，No.5（2008）
(12) 小泉浩美，他：DME用ガスタービン燃焼器の開発，第30回ガスタービン定期講演会講演論文集，（2002.10）
(13) 三浦圭祐，他：LNG焚ガスタービン燃焼器の要素技術開発，第37回ガスタービン定期講演会講演論文集，（2009.10）
(14) 小泉浩美，他：同軸噴流クラスタバーナを用いた水素含有燃料のNOx排出特性に関する検討，日本機械学会年次大会講演論文集Vol.7，（2008）
(15) 小泉浩美，他：水素リッチ燃料焚多孔同軸噴流バーナの大気圧燃焼特性，第37回ガスタービン定期講演会講演論文集，（2009.10）
(16) テクノロジーロードマップ CCS：IEA Technology Roadmap Carbon Capture and Storage（2009 October）

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

技術論文

高反動度化と負荷分布の最適化による遠心圧縮機の段性能向上

Performance Improvement of a Centrifugal Compressor Stage by Increasing Degree of Reaction and Optimizing Blade Loading of a Shrouded 3D Impeller

柴田　貴範*1　SHIBATA Takanori
八木　　学*1　YAGI Manabu
西田　秀夫*2　NISHIDA Hideo
小林　博美*2　KOBAYASHI Hiromi
田中　征将*2　TANAKA Masanori

ABSTRACT

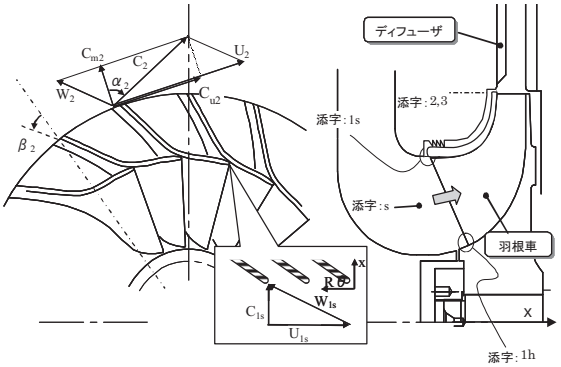
Performance improvement of 3D impellers in a high specific speed range was investigated using computational fluid dynamics (CFD) analyses and experimental tests. Four types of fully-shrouded impellers were designed, manufactured and tested to evaluate the effects of blade loading, backsweep angle and relative velocity diffusion ratio on compressor performance. The design suction flow coefficient was 0.125 and the machine Mach number was 0.87. Test results showed that high degree of reaction stage (large inlet-to-exit relative velocity diffusion ratio and large backsweep angle) achieved 3.8 % higher stage efficiency and larger surge margin without reducing the pressure coefficient and choke margin. It was concluded that high reaction stage coupled with an aft blade loading distribution was a very effective way to improve stage efficiency and surge margin.

Key words：Centrifugal compressor, Efficiency, Surge margin, Ribbed diffusers

主な記号

C：絶対速度［m/s］
g：重力加速度［m/s^2］
H_{ad}：断熱ヘッド［m］
Q_s：吸込流量［m^3/min］
R：半径［m］
s：キャンバー線長さ［m］
U_2：周速［m/s］
W：相対速度［m/s］
α：流れ角度［°］
β：羽根角度［°］
ϕ_s：吸込流量係数（$=Q_s/(60\cdot\pi\cdot R_2^2\cdot U_2)$）［-］
η_{imp}：羽根車効率［-］
η_{ad}：段断熱効率［-］
Λ：反動度［-］
λ：負荷係数（$=d(R\cdot C_u)/ds$）［-］
Ψ：圧力係数（$=g\cdot H_{ad}/U_2^2$）［-］

下添字
1：羽根車入口
1s：羽根車入口シュラウド側
2：羽根車出口
3：ディフューザ入口
4：ディフューザ出口
d：設計点
m：子午面成分
s：吸込部
spec：仕様点
t：よどみ条件
u：周方向成分



参考図　記号説明および添字位置

原稿受付　2009年11月20日
校閲完了　2010年8月23日
＊1　㈱日立製作所　エネルギー・環境システム研究所
〒319-1221　日立市大みか町7－2－1
＊2　㈱日立プラントテクノロジー　土浦研究所

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

1．はじめに

Oil & Gas関連の分野で利用されるプロセス用の遠心圧縮機では，ライフサイクルコストの削減が重要視されており，高効率であることはもちろん，使用期間中の運用条件変化にも対応可能な広い作動範囲を有することが求められている。

近年，３次元羽根車の性能を改善するための手段として，最適化アルゴリズムと，CADベースの翼形創成法，および流れ解析を組み合せた最適化手法[1]が利用されつつある。そのような手法は，設計案の究極的な絞込みのためには有効であるが，日常的な設計業務で使用するには，解析時間が掛かるため適さない。また，その最適化過程を通じて複数の流れ解析を実施する割には，その結果から一般的な設計ルールを抽出することにも不向きである。

それらの問題に対処する方法として，Bonaiutiら[2]は逆解法の活用を推奨している。逆解法は，設計変数を大きく削減できるとともに，その入力が負荷分布などの流体指標となっているため，結果をより一般的な設計ルールへ落とし込み易い。そのような逆解法に関する論文は数多く存在するものの，その入力としての流体指標のあるべき姿を議論した論文は少ない。また，議論していたとしても，速度三角形を固定した状態での考察が多く，逆解法の入力と速度三角形の理想的な組み合せについて論じた論文はほとんどない。

著者らは，日常業務に使うことを前提として，逆解法に基づく設計システムの構築を目指している。本研究に先立ち，オープン羽根車を試作し，羽根車の出入口減速比や出口翼角，翼の負荷分布の影響などについて検討してきた。本研究では，その試作で得られた知見を活用し，高効率で作動範囲の広いフルシュラウド羽根車を開発することを目的としている。本報告では，前報[3]の内容をフォローするとともに，サージマージンをさらに拡大するために採った方策とその結果について報告する。

2．設計手法

具体的な設計内容に移る前に，本研究で用いた圧縮機の設計手法の概要について述べる。設計手順としては，①主要諸元の選定，②翼形状の設計，③流れ解析による性能評価，の大きく分けて３段階から構成される。

まず，主要諸元の選定として，社内開発の一次元性能予測ツールPRECENTを使い，羽根車軸長，入口翼高さ，出口幅などの主要諸元を決定する。PRECENTは，オイラーの法則による理論ヘッドに対し，摩擦損失や減速損失などの損失モデルや滑り係数などの経験則による補正を加え，性能を予測するツールである。1980年代にその原形が開発され[4]，それ以降，社内で継続的な改良が施されてきた。

次に，与えられた諸元に対して，羽根車のハブ・シュラウド形状や翼角度など，具体的な翼形状を選定する。その翼形状設計には，BLADEと呼ばれる翼面創生ツールを用いた。BLADEは，子午面流れを流線曲率法で，翼間流れを滑り補正された１次元流れで近似して解く逆解法ツールで，入力としての子午面形状，負荷分布，翼厚み分布などから，翼角度分布を算出することができる。設計者は，BLADEの簡易流れ解析の結果としての相対速度分布から，得られた翼形状が適切かどうかを判断する。

遠心圧縮機では，相対速度の高いシュラウド側の翼形状が，ハブ側よりも流体性能に与える影響が大きいことが知られている。よって，本研究では，シュラウド側の負荷分布のみに着目した。BLADEでは，逆解法の入力としてシュラウド側の負荷分布のみを与え，ハブ側の翼形状は，強度成立性の観点から，適切な翼の傾き角を維持するように算出される。

最後に，得られた３次元翼形状に対して流れ解析を実施し，効率，作動範囲などの流体性能を評価する。今回，使用した流れ解析は，市販のCFX-11.0™である。流れ解析の結果，性能指標が目標値を満足していれば設計完了となる。

3．改良設計方針

3.1　従来技術の分析

設計の改良方針を検討するため，PRECENTにより，従来設計における効率改善余地を評価した。図１は，従来設計の全損失により規格化した，単段遠心圧縮機の損失の内訳である。図中の理想状態とは，翼の表面粗さが０で，減速損失や混合損失等の摩擦損失以外の損失が無視できる状態を指す。羽根車の出口翼角β_2は半径方向から30°を仮定した。翼の表面粗さが０といっても，流体の粘性効果は存在するため，摩擦損失が０にはならないことに注意されたい。

図１を見て分かるように，圧縮機全体としては40%近くの改善余地が見込まれるものの，羽根車単体としては，内部と外部の損失を合わせても９%しか効率改善余地が見込めない。これに対し，ディフューザやリターンなどの静止流路については31%の効率改善の余地があり，羽根車の３倍以上である。段性能の改善には，羽根車の性能改善と併せ，静止流路の損失を低減することが重要である。

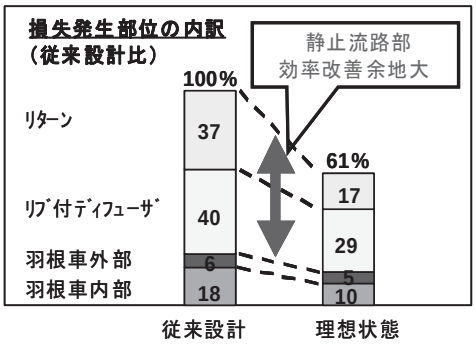


図１　損失発生部位の比較[3]

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

静止流路の損失を低減する方法として，羽根車の出口翼角を大きくし，反動度を増加させる方法が考えられる。だが，周速や減速比を一定にして高反動度化したのでは，圧力係数が下がってしまう。そのような圧力係数の低下を避けるため，出入口減速比W_{1s}/W_2を大きくした場合，従来羽根車の実測データ（図２参照）によると，サージマージンの低下を招く。よって，サージマージンの低下を伴わずに，いかに大減速比化できるかが争点となる。

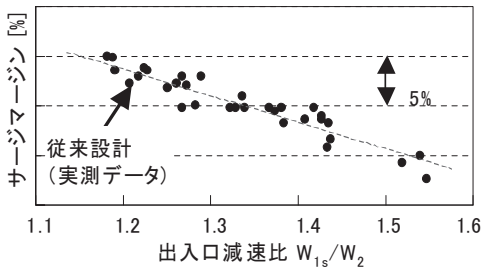


図２　サージマージンと減速比の関係[3]

３.２　１次元解析による諸元最適化

開発の対象とした遠心圧縮機の仕様を表１に示す。吸込流量係数ϕ_sは0.125で，吸気圧101.3kPa，吸気温度293.15Kとしたとき質量流量は3.064kg/sである。作動媒体は空気を想定した。定格回転数は19,100rpmで，このとき周速マッハ数は0.87に相当する。圧力係数Ψは，従来設計並みの0.5以上を目標とした。これは全圧比1.7程度に相当する。

この条件のもとPRECENTを使い，減速比や出口翼角が各種流体性能指標に与える影響を評価した（図３）。ディフューザはベーンレスとし，ベンドおよびリターンはディフューザ出口の吐出損失として評価した。ディフューザの出口位置はR_4/R_2=1.55に設定し，吐出損失係数は0.5を仮定した。

表１　設計仕様[3]

項目	記号	単位	値
入口全圧	P_{ts}	kPa	101.3
入口全温	T_{ts}	K	293.15
吸込流量係数	$\phi_{s,spec}$	–	0.125
質量流量	m	kg/s	3.064
圧力係数 （全圧比）	Ψ	– –	0.5 (1.7)
羽根枚数	Zb	–	15
羽根車外半径	R_2	m	0.15
設計回転数	N	rpm	19100
周速マッハ数	Mu_2	–	0.87
無次元比速度	Ns	–	1.0
作動流体	–	–	空気

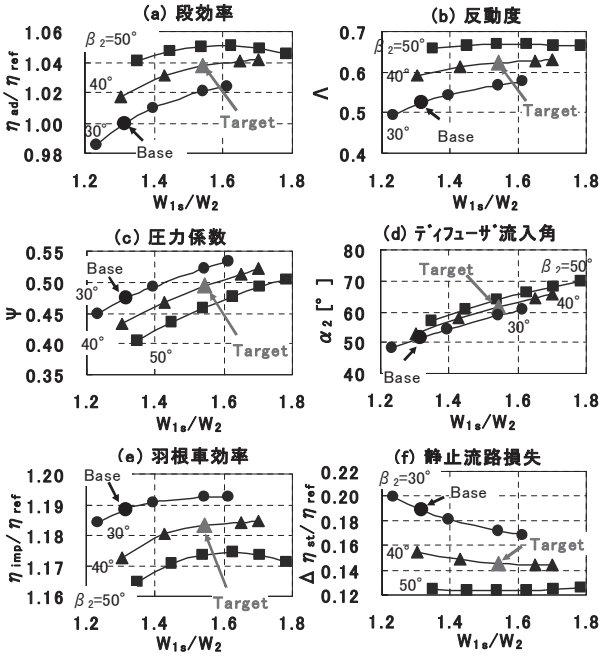


図３　圧縮機諸元と性能指標の関係[3]

比較の基準とした従来設計では，広いサージマージンと高い圧力係数を維持するため，β_2=30°，W_{1s}/W_2=1.3を設計条件としていた。図３(a) から分かるように，W_{1s}/W_2を1.3から1.55程度にまで高めると同時に，β_2を30°から40°に変更することで，3.5%以上の効率改善が見込まれる。これは，主として反動度が増加した効果である（図３(b) 参照）。より正確に言うと，大減速比・高反動度化によりインペラ効率としては0.5%低下したが（図３(e)），静止流路の損失$\Delta\eta$（$=\eta_{imp}-\eta_{ad}$）としては4.0%以上の改善となり，トータルの段効率として3.5%の向上となった。

出口翼角の修正による高反動度化は，通常，圧力係数の低下を伴うが，今回はβ_2の変更と同時に減速比も増大させているため，圧力係数についても現状値以上を維持していることが特徴的である（図３(c)）。

また，半径方向から計測した流れ角を図３(d)に示す。高反動度化に伴い，ディフューザ入口の流れ角が大きくなることが分かる。一般に，羽根付ディフューザは，周方向へ向いた流れを径方向に転向させることで高効率化を実現することができる。ベース条件では，流れ角が十分に径方向を向いており，羽根付ディフューザによる効率改善効果が得られにくい条件にあった。ベースよりも大減速比化することで，ディフューザ流入角が大きくなるため，ディフューザをリブから羽根付へ変更することによっても更なる効率向上を期待できることになる。

以上のことから，減速比1.55，出口翼角40°を改良案の基本条件と選定し，羽根車の設計を行った。

３.３　負荷分布の影響

前報[3]による結果から，羽根車の前縁からスロート近

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

傍までの減速を抑えることが，広いサージマージンを実現する上で有効であることが分かってきた。これは，Kosugeら[5]の知見と一致する。ゆえに本研究では，羽根車の前縁からスロート近傍までの負荷を積極的に抑えることが可能な４区分関数を中心として，最適な負荷分布の与え方を調査した。ここで４区分関数とは，シュラウド側の負荷分布を，前縁から順に直線，二次曲線，直線，二次曲線の４区分の関数で表現した関数を指す。

設計初期段階の検討により，負荷分布を大きく後半負荷化しないと，十分なサージマージン拡大が難しいことが明らかとなった。反面，そのような後半負荷化は，羽根車内部の流速を上昇させることにつながるため，羽根車効率を低下させる要因にもなり得る。そこで本研究では，負荷分布を後半負荷にするだけでなく，羽根車の設計点を小流量側にずらすことで，本来の仕様点からのサージマージンを確保することも考えた。その場合，減速比は，小流量化された設計点で目標値に達するため，本来の仕様点では目標値よりも小さい値であることになる。

これらのことを考慮して設計した羽根車の諸元を表２に示す。減速比W_{1s}/W_2や反動度ΛはPRECENTによる予測値である。負荷分布としては，従来負荷BL以外に，負荷の最大値を翼弦方向に移動させた３案（前半負荷FL，中間負荷ML，後半負荷AL）を採用した。先述の設計点の小流量化を併用したのは中間負荷MLの場合で，$\phi_{s,d}$=0.118を羽根車の設計点とした。それ以外の羽根車は，本来の仕様点$\phi_{s,d}$=0.125で目標減速比になるように設計した。前半負荷のFLは，前報[3]で最も効率の高かったFL_B案をそのままフルシュラウド化した設計案で，高効率を達成する確度が高い設計案として採用した。

表２　羽根車の代表諸元

名称	負荷分布	β_2	W_{1s}/W_2	$\phi_{s,d}$	Λ
BL	Base	30	1.30	0.125	0.52
FL	Front	40	1.54	0.125	0.62
ML	Mid	40	1.47	0.118	0.62
AL	Aft	40	1.53	0.125	0.62

今回の開発に採用した具体的な負荷分布λおよび翼角分布を図４に示す。従来負荷BLは，ミッドコード付近に最大負荷を有し，前後縁に向かって単調に減少する分布である。他方，新開発のFL，ML，ALには，前述の４区分負荷を用いた。新負荷分布の場合，最大負荷の位置が翼の前半側から後半側へ移動するにつれ，シュラウド側の翼角分布が極小値を持つ分布から単調減少な分布へ変化することが分かる。

子午面形状の比較を図５に示す。減速比や出口翼角が異なるBLは，他の３案に比べ出口幅が大幅に狭くなっている。またBLは，他案に比べて入口ハブ径が大きい分，入口シュラウド径も大きくなっている。今回の設計

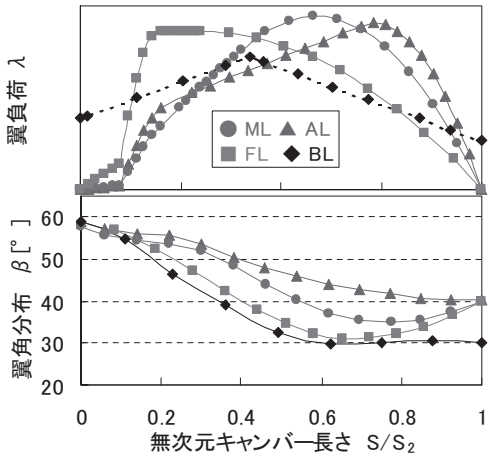


図４　負荷分布および翼角分布の比較

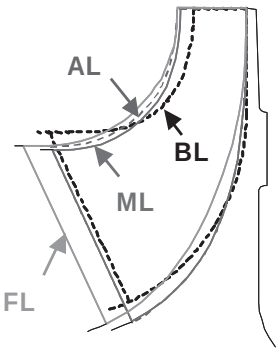


図５　子午面形状の比較

では，どの入口ハブ径に対しても入射損失が最小になるように入口シュラウド径および入口翼角を選定したため，このハブ径が大きいことによる段効率低下は0.1%程度（PRECENT予測値）であった。

また，子午面形状を新設計同士で比較した場合，MLは設計点を小流量化させた分，子午面流路幅が全体的に狭くなっていることが分かる。さらにFLは，もともと高効率を重視した設計となっており，シュラウド側の曲率を抑えるため，やや長めの軸長となっている。流れ解析によると，この軸長延長による効率改善効果は，せいぜい+0.3%程度であった。このように新設計の３案は，厳密な意味で負荷分布のみが異なる比較にはなっていないが，子午面形状の違いが段効率へ与える影響は，負荷分布の違いに比べ二次的であると考えている。

これら羽根車に対して，CFX-11.0™による流れ解析を実施した。半径方向流入を模擬した吸気部入口からベーンレスディフューザ出口（半径比R_4/R_2=1.55）までを解析対象とした。ベンドやリターン部を含まないため，本来の段効率よりも高めの予測となるが，設計案の相対評価は可能であると判断した。

解析により得られた圧縮機特性を図６に示す。改良設計案のMLやALでは，BLやFLで見られた小流量側での圧力係数の頭打ちが解消され，圧力係数の強い右下がり特性が小流量側まで維持されていることが分かる。また，

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

断熱効率が従来設計よりも3.5%以上高く，十分な効率向上を達成できる見込みである。MLよりもALの方が，設計点の効率が0.6%高く，解析上の最良案であった。

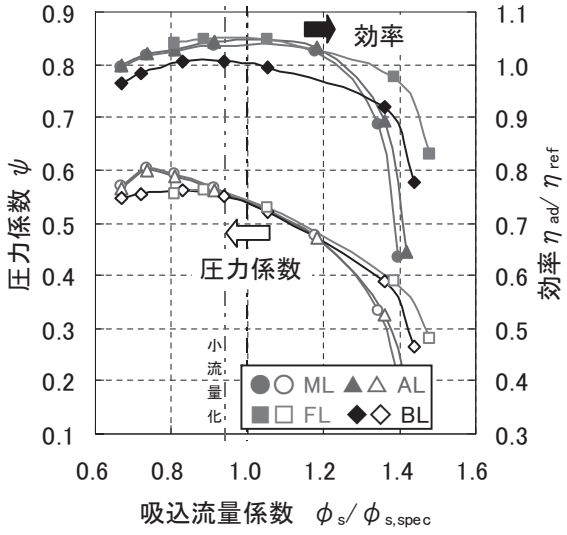


図６　流れ解析による圧縮機特性の予測

４．試験装置および試験方法

４.１　試験装置

今回使用した試験装置の概要を図７に示す。装置全体が閉ループ系をなしており，圧縮機で圧縮された作動媒体は，クーリングタワーの水を冷熱源とした冷却器により冷却され，制御弁により圧力調整された後，再び圧縮機へ供給される。軸封部にはメカニカルシールを採用しており，試験ループ全体が機密性を重視した設計となっている。このため，空気以外の作動媒体を用いた試験も可能であるが，今回は，試験条件と媒体の取り扱い易さを考慮し，空気を作動媒体とした。

循環する空気は，冷却器を使って，吸気温度が一定値（本試験では約20℃）になるよう自動制御し，吸気圧は，大気圧を維持した。流量は，JIS規格に準拠したコーナタップオリフィスで計測し，配管途中に設けた流量制御弁で調整した。

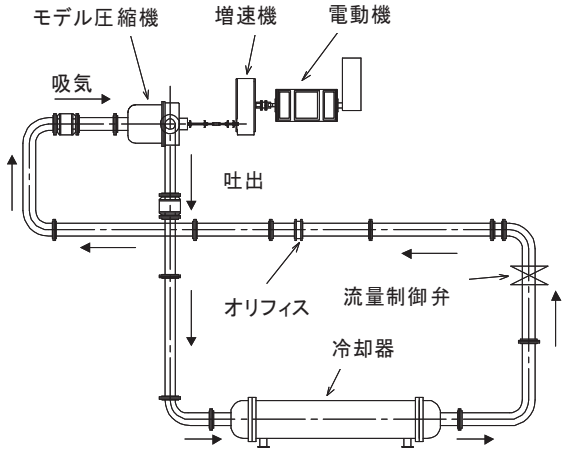


図７　遠心圧縮機試験装置

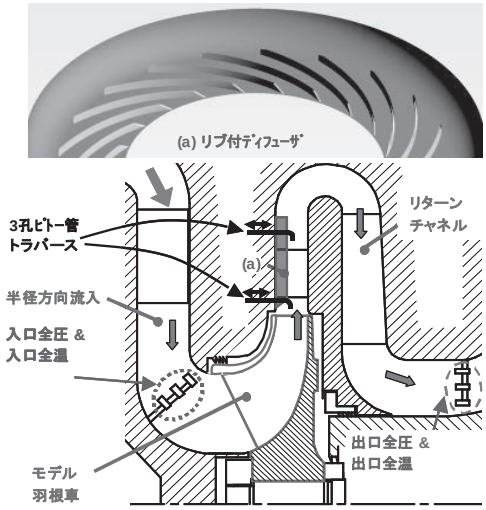


図８　モデル圧縮機断面図

４.２　試験方法

モデル圧縮機の断面図を図８に示す。径方向に吸込まれた空気は，羽根車，ディフューザ，リターンチャネルを通過した後，下流のコレクタケーシングへ導かれる。ディフューザとしては，リブ付ディフューザを採用し，高効率のみならず広い作動範囲の達成も重視した。

圧縮機の段性能は，羽根車入口およびリターンチャネル出口における全温・全圧の実測値と，オリフィス流量値から算出した。羽根車入口では，全温・全圧をそれぞれ周方向２ヶ所，リターンチャネル出口では，全温を周方向６ヶ所，全圧を周方向８ヶ所，計測した。

また，羽根車，ディフューザ，リターンチャネルのそれぞれの性能を分離するため，ディフューザの入口と出口において，３孔ピトー管によるトラバース計測を行い，全圧や流れ角分布等の測定も行った。

これらの計測には，十分実績を積んだ社内技術を利用しており，比較試験でかつ繰り返し試験を行ったときの計測の不確かさは，効率値：±0.08%，圧力係数：±0.12%，流量：±0.53%である。

今回の試験では，圧力係数Ψが流量係数ϕ_sに対して正勾配となる点，もしくは変曲する点をサージ点と判断した。これら運転点は，厳密な意味としては失速点であり，間欠的な流体音を伴う本来のサージではない。しかし，本試験では，安全サイドの評価として上記判定を採用した。

５．試験結果および考察

試験で得られた圧縮機特性の代表例として，後半負荷ALと従来負荷BLの比較を図９に示す。本図から分かるように，新設計のALは，従来設計のBLよりも段効率η_{ad}が3.8%向上し，サージマージンも11%拡大した。チョークマージンはほぼ同等であり，チョークマージンとサージマージンを合わせたトータルの作動範囲としても，ALの方が広い。しかも，ALは，β_2が大きいのに

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

も関わらず，圧力係数がBLと同等以上であった。これは，大減速比化の効果である。このように，減速比，出口翼角，負荷分布の適切な組み合せにより，大幅な効率向上と作動範囲の拡大が可能である。

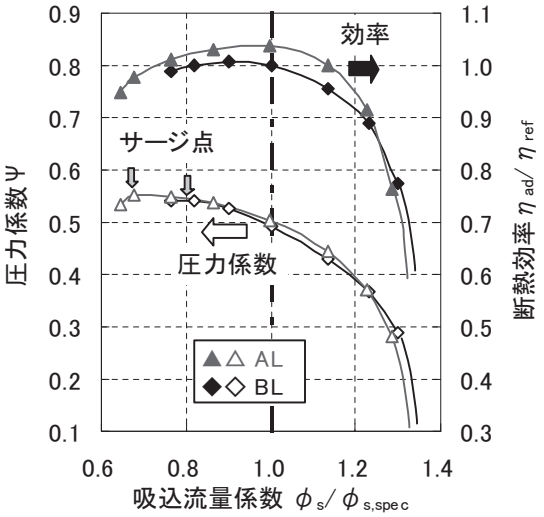


図９　圧縮機特性の比較（ALとBL）

今回採用した負荷分布による圧縮機特性の違いを図10に示す。どの負荷分布であっても，段効率 η_{ad} に大きな違いはなく，効率差はせいぜい0.1%であった。しかし，サージマージンについては，最大と最小で10%の開きがあり，サージマージンが小さいものほど，チョークマージンが大きくなる傾向にあった。このように今回採用した負荷分布は，負荷の最大値を翼弦方向に移動させることによって，仕様点の段効率を維持したまま，サージマージンとチョークマージンの大小関係を調整することが可能である。

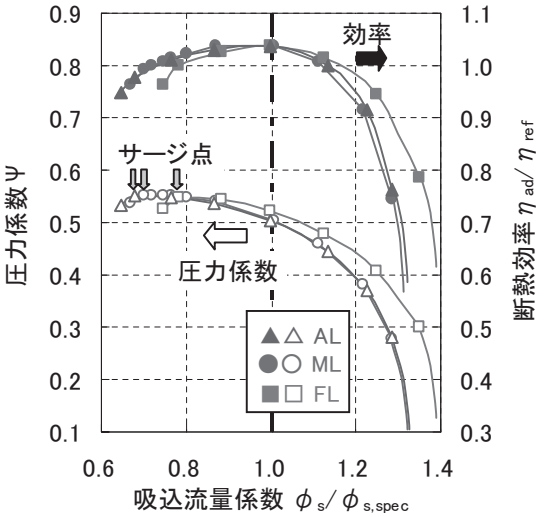


図10　圧縮機特性の比較（FL，ML，AL）

仕様点流量における効率と減速比の関係を図11に示す。本章では，減速比として，実測からの推定値を用いた。大減速比化することにより，羽根車単体の効率 η_{imp} は低下するが，段全体の効率 η_{ad} としては向上することが分かる。これは，大減速比化により，羽根車の減速損失は増加するが，反面，反動度が増えたことにより，ディフューザやリターンなどの静止流路の損失が低下することを意味している。負荷分布の違いによる η_{imp} の差は小さいため，今回の段効率向上には，主として高反動度化が貢献したものと考えている。

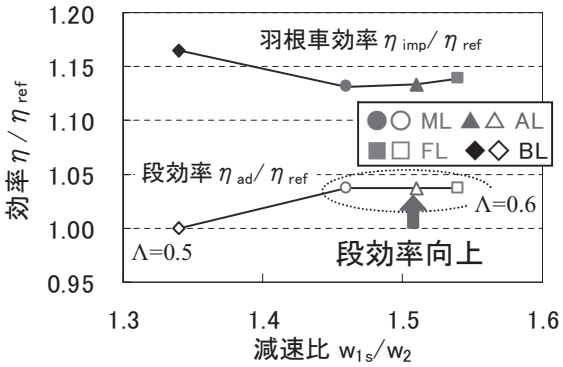


図11　効率と減速比の関係

図12に，サージマージンと減速比の関係を示す。従来の社内試験の実績から判断し，W_{1s}/W_2 が増えると，それに比例してサージマージンが減少すると考えられてきた。しかし，本開発のように，羽根車の負荷分布を適切に制御しつつ大減速比化すれば，サージマージンを従来実績以上に拡大できることが判明した。しかも，それと同時に，段効率を向上させることも可能である。このように，大減速比化と組み合せた後半負荷化は，高効率・広作動範囲化にとって有効な手段となり得る。

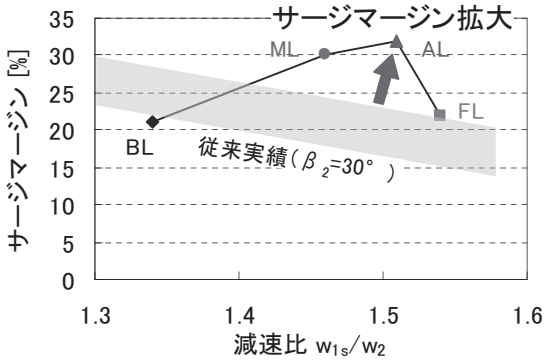


図12　サージマージンと減速比の関係

6．結論

プロセス圧縮機の高比速度段（吸込流量係数0.125）を対象に，高効率化と広作動範囲化を両立させたフルシュラウド羽根車を開発，モデル試験により試験し，以下の結論を得た。

(a) 高反動度化（大減速比＋β_2変更）と翼負荷分布の最適化により，ベースよりも3.8%の効率向上と11%のサー

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.

ジマージン拡大を実現した。大減速比・高反動度化は，高効率・広作動範囲化にとって有効な手段である。

(b) 後半負荷化はサージマージンの拡大に，前半負荷化はチョークマージン拡大に寄与するが，効率への影響は僅かである。負荷分布の変更により，仕様点の効率を維持しつつ，サージとチョークのバランスを調整することが可能である。

参考文献

(1) Cosentino, R., Alsalihi, Z., Van Den Braembussche, R., 2001, "Expert System for Radial Impeller Optimisation, Proceedings of the 4th European Conference on Turbomachinery," ATI-CST-039/01.

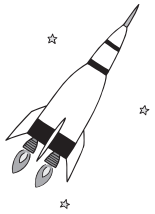
(2) Bonaiuti, D. and Zangeneh, M., 2006, "On the Coupling of Inverse Design and Optimization Techniques for Turbomachinery Blade Design," ASME Paper GT2006-90897

(3) Shibata, T., Yagi, M., Nishida, H., Kobayashi, H., Tanaka, M., 2009, "Performance Improvement of a Centrifugal Compressor Stage by Increasing Degree of Reaction Optimizing Blade Loading of a 3D-Impeller," ASME Paper GT2009-59588

(4) 三階，西田，1983,"遠心圧縮機の性能予測（第1報，予測法と計算例）," 機論B, Vol.49, No.441, pp.1000-1008.

(5) Kosuge, H., Ito, T., and Nakanishi, K., 1982, "A Consideration Concerning Stall and Surge Limitations within Centrifugal Compressors," Transactions of the ASME：J. of Eng. for Power, Vol.104, pp.782-787.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.



研究開発の5W1Hとバックキャスト/フォアキャスト

坂田　公夫*1
SAKATA Kimio

皆さんは，もちろん5W1Hを知っているでしょう。新聞記者が記事を書く原則としてたたきこまれる基本である。しかし，研究開発にもこの5W1Hで考えることが必要だと言ったら驚くだろうか。

When（いつ），Where（どこで），Who（誰が），What（何を），Why（なぜ），How（どうした），が5W1Hであり，これにWhom（誰に）を加えて6W1Hとする方が整理しやすい場合がある。これを研究開発の計画あるいは報告書の項目に対応させると，①研究開発の背景と目的＝Why，②研究開発内容・目標あるいは成果＝What，③実施者・計画者＝Who，④研究開発期間・期限＝When，⑤研究開発成果の享受者・成果応用先＝Whom，⑥研究開発場所・組織＝Where，⑦研究開発手法・経費＝How　となろう。多少のこじつけもご容赦頂くとしたい。もちろん研究開発の内容や目的あるいはやり方などで，これらの組み合わせは異なるであろうし，さらにファクターが増えることもある。また，実際の成果報告などには，残された課題や考察が必要であり，これをWhyやWhat，Howに加えることも出来る。この手法で自分の研究を整理すると，その曖昧であるところや，目標への到達度が理解でき，不足を発見したりすることにつながる。研究の目指すところを他者に理解してもらうことも容易になる。それがこの手法の狙いである。

実はこの手法に重要な別の効果があることに気付く。それは，行っている研究開発が，挑戦型なのか，そうでないのか，あるいは，ビジョン・プル型なのか，計画推進型なのか，と言う研究開発のタイプを明確に分離することが出来る点である。特に目的のWhyと成果享受者のWhomを見ると，その違いが端的に表れる。挑戦的（ビジョン・プル）とした前者をBackcast（バックキャスト）型と言い，後者をForecast（フォアキャスト）型計画と言う。はじめに得たい目標あるいは欲する未来世界を定め，その実現をもたらすスケジュールを決めて行くと言う逆解法的な計画がバックキャストであり，目標の実現を，現時点から予測できるステップで順次積み重ねてクリアして行くと言う，演繹型の計画がフォアキャストである。私は，バックキャストを逆計画，フォアキャストを順計画と名付けたい。言い方をかえれば，順計画（Forecast）は現在のポテンシャルや能力から”予測”できる実現目標を定め，これを実行する計画を立てることで，ジャンプは含むが予測不能な大障害は基本的に含まない。一方逆計画（Backcast）は，現有する能力から考えるのではなく，そうありたいと欲する未来世界を描いて，その実現に向けて頑張ろうと言う計画である。「私の赤ちゃんを末は総理大臣にする。」と親が考えることが逆計画バックキャストであり，「次の試験には良い点を取るぞ。」と学生が立てる勉強計画が順計画フォアキャストである。

私は，我が国に逆計画型の計画が大変少ないと思う。かのケネディ大統領が出した，人を月に送るアポロ計画は逆計画の代表例だが，緻密に出来上がっている我が国の政府組織や多くの企業では，これ程に挑戦的な計画は提案できそうにない。挑戦のゲインとリスクの判断に迷うのである。しかしこれからは，アジアや南米の新興国の追い上げで，多かれ少なかれ逆計画型の目標設定が求められると考えられる。日本人が得意ではない計画手法である。しかし，日本人は積み重ね型の計画は得意である。実は逆計画（バックキャスト）も，その細部の実行計画は小さな順計画（フォアキャスト）の集まりである。さもなければ夢の実現はおぼつかない。

これからの研究開発計画には，大きな目標を逆計画（バックキャスト）型に定め，細部の計画を，予測と効果的な道筋の組み立てによる順計画（フォアキャスト）の小骨から出来ているようなものが必要である。我が国の研究開発に求められる将来プランは，この様な複合形態の計画である。

「オープンロータの世界を日本のものにしよう！」などと勇ましい夢に突き進む技術者，あるいは前向きな経営者が出て来ると，その周囲で，革新的な計算空力設計，複合材構造，巧妙で耐久性のある可変ピッチ機構，強力なコアエンジン，全体を的確に制御管理するシステムなどの分野で，国際競争に打ち勝つ技術ジャンプを適切に含みながら，多くの順計画による先端要素開発をプランし，実行する人々がしっかりと囲んでいる，と言った構造が必要だと言うことだ。その計画の管理とビジュアル化に是非とも，6W1Hの手法を使うことを勧めたい。

原稿受付　2010年8月30日
＊1　㈱ＩＨＩ顧問
㈳日本ガスタービン学会　正会員
〒196-8686　東京都昭島市拝島町3975-18　ＩＨＩ昭島ビル

Download service for the GTSJ　member of ID , via 216.73.216.151, 2025/07/15.