

■ 技術報告 ■

クールウォーター石炭ガス化発電実証試験計画

Cool Water Coal Gasification Program

渡 辺 潔*・浅 田 豊 靖**

Kiyoshi Watanabe Toyoyasu Asada

1. はじめに

クール・ウォーター・プログラム (CWP) は、米国の Southern California Edison (SCE) 社のクール・ウォーター火力発電所に隣接して建設する12万KW規模の石炭ガス化複合発電実証試験設備の設計・建設・試験研究を行うもので、1984年6月より実証試験を開始した。噴流床式ガス化炉を用いた石炭ガス化複合発電システムとしては、世界最初の実証試験計画である。

本稿では、CWPの概要及び最近の運転状況を紹介したい。

2. CWPの概要

2.1 発足の経緯と目的

1978年に SCE 社と Texaco 社が石炭ガス化複合発電 (IGCC*) プラントについて予備的な検討を行った結果、IGCCは通常の微粉炭だき火力と発電効率及びコスト的に競合しうることが確認されたため、敷地、用水、石炭供給等の面から、SCE社クール・ウォーター発電所 (ロスアンジェルスとラスベガスのほぼ中間点に所在) 隣接地を選定して、IGCC実証プラントを建設することとした。

* Integrated Coal Gasification Combined Cycle

一方、EPRIはR.M.Parsons社にIGCCのプラントの概念設計を委託し、その成果を実証試験計画の基礎資料とした。

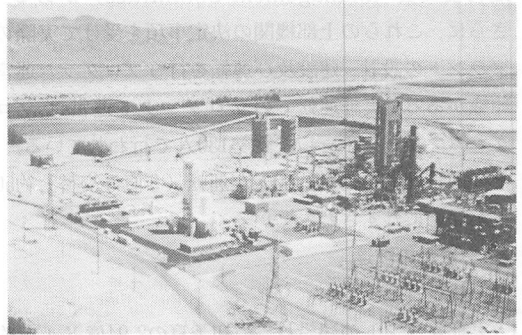
1979年に SCE 社と Texaco 社は、“基本契約”を結び、Texaco式ガス化炉を用いたIGCC実証試験プロジェクトを実施することを発表した。

1980年に、Bechtel Power社が主要設計/建設業

* 東京電力(株)技術開発本部開発研究所石炭ガス化研究室主任研究員

〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3

** 東京電力(株)技術開発本部開発研究所石炭ガス化研究室室長



クールウォータープラント全景

者に選定され、また複合サイクル発電プラント納入及びプラント総合制御メーカーとしては、GE社が選定された。同年、EPRI、Bechtel Power社及びGE社がCWPに参加した。同じく1980年に、酸素プラントの設計、建設及び供給メーカーはAirco社に決定した。1982年2月には、IGCC将来性に着目し、東電、電中研、東芝CGP、及びIHICGPが共同体 (Japan Cool Water Program Partnership, 略称JCWP) を結成してCWPに参加した。CWPは建設資金 (約3億ドル) 調達の見通しを得て、1981年末に建設工事に着工し、1984年4月末にはプラント建設を終了し、6月より実証試験運転に入った。CWPの目的は、下記の通りである。

- a. 商業規模のIGCCシステムの実証
- b. 同システムの環境適合性の確認
- c. 各種運転条件下におけるIGCCプラント制御性の実証
- d. 諸装置及びシステムの信頼性評価
- e. 石炭の性状変化への適合性の実証
- f. 商業プラント設計のためのデータ収集
- g. プラントの運転、補修、安全対策等に関する情報収集

(註) 63/4/22 (金) 第7回研究発表会にて講演

2.2 組織と運営

CWP の参加者は2,500万ドル以上の大口出資者（パーティシパント）と500万ドルの小口出資者（コントリビュータ）とに分けられるが、組織の運営はパーティシパントが共同で行っている。組織の最高意思決定機関としては理事会（Board of Control）があり、1票ずつの投票権を持つ各パーティシパントの代表者で構成されている。この下に理事会決定事項を具体化し、また理事会へ具申事項を取りまとめる機関として、運営委員会（Management Committee）がある。さらに、これらの上部機関の決定事項を受けて実際のプラントの設計、建設及び運転を行うプログラム運営組織がある。実証運転でのプロジェクト運営は、プログラムマネージャー以下総勢130人で行われている。その内管理者を含む約60人が運転（5直3交替）、約50人が保守にたずさわっている。

2.3 資金の調達

(1) 建設資金

実証プラントの建設は、当初予算の2.94億ドルを約10%下回る2.63億ドルで完了したが、この資金は表1に示したようにパーティシパント6者、コントリビュータ2者の分担金、及び銀行ローンによってまかなわれた。

(2) 運転資金

プラント完成後、運転によって発生する電気はSCE社に回避原価（Avoided Cost：同社の燃料種別で最も高い発電原価）で売却しているが、運転経費

表1 CWPの資金調達

・パーティシパント	(単位：百万ドル)
SCE	25 ^{* (1)}
Texaco	45
EPRI	69
GE	30
Bechtel Power	30
JCWP	30 ^{* (2)}
・コントリビュータ	
ESEERCO ^{* (3)}	5
SOHIO ^{* (4)}	5
・その他資金	
銀行ローン	24
合計	263

* (1) 上記の他に6百万ドルの現物資あり

* (2) Japan Cool Water Program Partnership

東電 12 百万ドル

電中研 5 百万ドル

東芝 6.5 百万ドル

IHI 6.5 百万ドル

* (3) Empire State Electric Energy Research Corporation

* (4) Sohio Alternate Energy Development Company

の不足分は、米国政府からの資金援助（価格保証、5年間で最大1.2億ドル）によっている。

3. プラントの概要

実証プラントのプロセスフローを図-1に示す。

3.1 石炭スラリー調製装置

石炭サイロからの石炭を石炭バンカを経由し、ケージミルで4メッシュ以下まで粉碎し、さらに湿式回転ミルで細かく粉碎し、石炭一水スラリーを製造する。

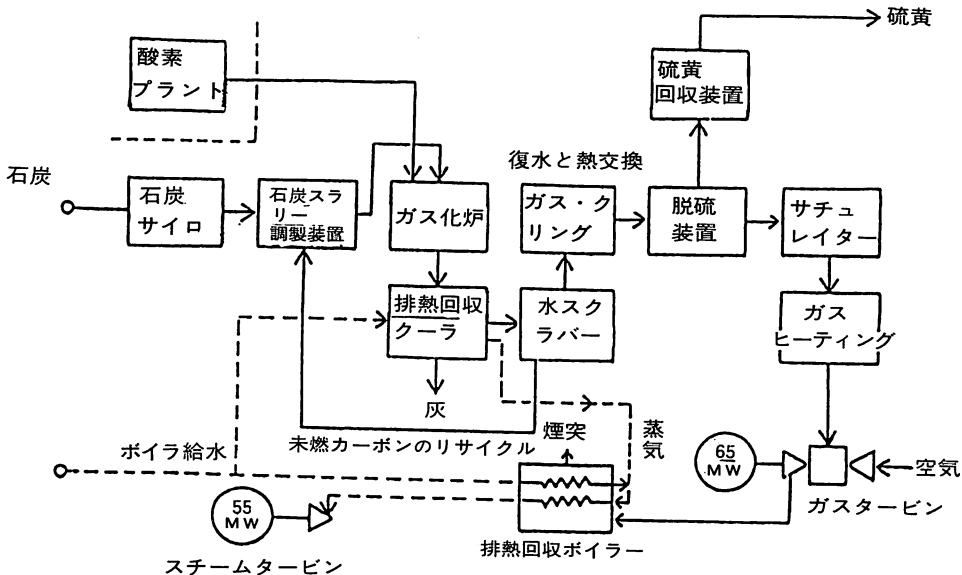


図-1 クール・ウォーター実証プラント

スラリー濃度調整は、石炭供給量、リサイクルカーボンの量に応じ、湿式回転ミルでの水の補給量を変えることにより行われる。さらに湿式回転ミル出口の濃度測定により補正が行われる。スラリー濃度は石炭含有量50～65重量%間の数値で計画されている。

3.2 石炭ガス化装置

石炭スラリーは、単一バーナーにより炉頂からガス化炉に噴射される。ガス化炉は円筒型耐圧構造で、内部は耐火レンガが内張りされている。42Kg/cm²の圧力、1260℃～1540℃の温度で石炭とガス化剤である酸素とを反応させ、表2¹⁾のような一酸化炭素、水素を主成分とする高温の燃料ガスを発生させる。高温の燃料ガスは、水冷壁で構成されたガスクーラー（輻射型クーラー及び対流型クーラー）により熱回収され112Kg/cm²の飽和蒸気を発生させる。石炭中の灰は、ガス化炉内で熔融し、輻射型クーラ下部の水中に落ち、クーラ下部のロックホッパーを通して系外に排出される。

表2 発生ガスの組成

成分	粗製ガス* (%)	精製ガス* (%)
CO	41.34	43.53
H ₂	36.38	38.33
CO ₂	21.42	17.39
CH ₄	0.10	0.11
Ar	0.16	0.17
N ₂	0.44	0.47
H ₂ S	0.15	15ppm
COS	0.01	55ppm
発熱量 (kcal/m ³ N, HHV)		2490

* ドライベース

3.3 酸素プラント

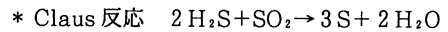
酸素は発電所に隣接している Airco 社所有の酸素プラントから供給される。プラントは空気の高深分離による方式で、99.5%の純度、約1,000ST/日の供給性能を備えている。また、気体として30分、液体として24時間分の酸素貯蔵タンクを備えている。最低負荷は60%でガス化炉側の要求に応じて、負荷追従が可能である。

3.4 ガス精製装置（除じん、脱硫）

ガス冷却器を出たガス中の未燃カーボンを主成分とする微細な粒子は、カーボンスクラバーの中で水と接触することにより、水中に分離回収される。

未燃カーボン等を除去したガスは冷却された後、脱硫装置へ導入され硫化水素を主成分とする硫黄化合物が除去される。本プロジェクトでは物理吸収法である

Selexol 法が採用されており、本システムでは脱硫の効率を高めるために冷却された Selexol 液を用いている。設計では硫黄含有量0.7Wt%～3.5Wt%の石炭を用いたときの脱硫率が97%と高い。硫黄化合物を吸収した Selexol 液は再生塔へ入り吸収した硫黄化合物を放出して再生され、循環使用される。再生塔から排出する高濃度の酸性ガスは Claus 装置* で単体硫黄に転換される。本装置からの排出ガス中には微量の硫黄化合物を含んでいるので、これを SCOT 法によるティルガス処理装置で処理してクリーンな排ガスとして外部へ放出する。



3.5 複合発電装置

精製されたクリーンな燃料ガスは、複合発電装置へ導入される。この部分の構成は

- ・ ガスタービン発電機
- ・ 排熱回収蒸気ボイラ (HRSG)
- ・ スチームタービン発電機

が主要なものである。

ガスタービン発電機は、入口温度1100℃級の GE 社のモデル7000シリーズを石炭ガス用に改造して使用しており、定格出力は65MWである。

NO_x 低減対策として、燃料ガス中への蒸気注入装置 (サチュレーター) の他、燃焼器への蒸気噴射装置を備えている。

ガスタービンを出た高温の排ガスは HRSG で過熱蒸気 (圧力: 102気圧, 温度: 508℃) を発生させ、蒸気タービンに入り発電する。定格出力は55MWである。

複合発電装置全体として発電端出力120MWであり、所内電力 (酸素プラント含む) を差し引いた正味出力は約100MWである。

4. プラント設計・建設・試運転

4.1 設計・建設

1978～1979年の概念設計に次いで、1980年2月に本格的な詳細設計を開始した。

基本計画を進めるにあたり、次のエンジニアリングスタディを実施した。

- a. コンバインドサイクル停止時のガス化炉運転 (既設ボイラでの燃料ガス燃焼)
- b. サチュレーター採用検討
- c. 酸素プラントのエアコンプレッサー駆動の検討
- d. 酸素プラントのバックアップシステムの検討
- e. 酸素プラント酸素純度

- f. ガス化炉耐火レンガの冷却検討
- g. 脱硫システムの選定
- h. 硫黄回収／ティルガス処理システムの選定
- i. ガス化装置最適ユニット数の検討
- j. 最適石炭粒度分布の検討
- k. スラグハンドリングシステムの検討

建設は資金調達の見通しが得られた1981年12月に開始し、約2年4カ月後に、予定より1カ月早く建設を完了した。

プラント設計、建設工事上の特記事項としては、精密なプラントモデル（1/33）の活用、大型重機の集中利用、機器のモジュール化による工期の短縮等がある。特に、重量約600tのガスクーラーは、CE社チャタヌガ工場で作られたのち、バージでミシシッピ川、メキシコ湾、パナマ運河経由でカリフォルニア州ロングビーチ港に運ばれ、陸揚後特殊なシュナーベル車でサイトまで鉄道輸送され、大きな話題となった。

4.2 試運転

1984年1月末にガスタービンのファーストロール、3月に蒸気タービンのファーストロールが行われた後、5月初旬より、総合試運転に入った。5月7日に最初の燃料ガスが発生したが、この時点では後流側（ガス精製、ガスタービン）がまだ生きておらず、ガスはフレアスタックで燃焼させた。5月20日には燃料ガスがガスタービンに初めて導入され部分負荷ながら発電が行われた。この後数回の調整運転を経て、6月13日からの第10次運転によって、“石炭処理量600t/日以上で10日間連続運転”というSFC（米国合成燃料公社）との契約により規定された受取試験を完了し、6月24日から公式に実証運転に入った。

5. 実証運転

5.1 概要

実証試験開始（1984年6月24日）以来、1988年1月末までの運転実績の概要を表3に示す。

表3 CWPの運転実績

ガス化炉運転時間（時間）	20,704
石炭処理量（ST, ドライ）	845,424
総発電量（MWH）	2,074,947
設備利用率（%, 暦日）	56.1

ガス化炉運転時間は、2万7000時間、設備利用率は、56.1%（暦日ベース）であり、ほぼ順調に推移している。実証運転開始直後は、いくつかの初期トラブルにみまわれ、設備利用率は低かったが、運転開始後3年経過した1987年の設備稼働率は82.1%に達している。

5.2 炭種試験

CWPでは、通常、設計炭であるサフコ炭を燃料としているが、CWPの多炭種適合性を実証するため、東部高硫黄炭であるイリノイNo.6炭（S分3.2%）、ピッツバーグNo.8炭（S分2.9%）の炭種試験を1985年12月末より1986年5月まで実施し、さらに最近では、1988年1月に豪州のレミントン炭の試験を実施した。表4²⁾に炭種試験時の性能データを示す。

炭種の平均カーボン転換率は約98%であり、この転換率ではあえて細粒スラグをリサイクルしてガス化炉に戻す必要がない。また、カーボン転換率はガス化温度により影響を受けるが、一連の試験結果より、予想以上に低温で、高カーボン転換率が得られることがわ

表4 炭種試験時性能表

	設計	実 績 値		
		サフコ	イリノイ#6	ピッツバーグ#8
石 炭	サフコ	サフコ	イリノイ#6	ピッツバーグ#8
石炭中S分（Wt %）	0.48	0.4	3.1	2.9
酸素消費量（T/日）	962	908	885	1004
発電出力（発電端 HW）	114	116	120	129
硫黄回収量（T/日）	4.6	3.8	30.0	27.0
カーボン転換効率（%）	98.3	98.3	97.2	97.8
耐火レンガ予想寿命（年）	1	4	2	2
熱 効 率（%）	29.6	29.5	29.2	29.8

表5 大型商用プラントの予想性能

ガスタービン 入口温度(°C)	プラント規模 (MW)	正味熱効率 (%)
1085	500～1000	35.9～37.1
1149	"	38.5～39.4
1427	"	40.4～41.4

かった。低温度でガス化できるということは、酸素消費量を少なくすることができるメリットの他に、ガス化炉耐火レンガの寿命を延ばすメリットも得られることになる。標準炭での設計では1年と予定していたが、実際の寿命は4年と推定されている。最近実施したレミントン炭は灰溶融温度が1,600°C以上の高灰融点炭であり、灰を溶融してガス化する噴流床ガス化炉では難しいとされていたが、融点降下剤を添加することにより、本ガス化炉にも適合することが実証された。

5.3 効率

CWP は高い熱効率をねらった設計とはしておらず、むしろ本格的石炭ガス化複合発電所のシステムの実証と、環境規制への対応に重点を置いているため、プラント熱効率は設計ベースで約30%と比較的低い。同じガスタービン入口温度でも、最適設計された大型商用プラント実現時には、

- ・再熱蒸気サイクルの採用
- ・酸素純度の最適化
- ・スラリー濃度の最適化

等により、36%前後まで上昇する。さらにガスタービン入口温度の上昇等により表5¹⁾に示す通り魅力的な熱効率が得られるものと考えられる。

5.4 負荷追従性

CWP での運転モードには次の3種類がある。

- ・ガスタービンリードモード

プラント出力の変化を、ガスタービンへの燃料流量を変化させることにより行う運転方法。

- ・ガス化炉リードモード

プラント出力の変化を、ガス化炉からのガス発生量を変化させることにより行う運転方法。

- ・協調制御モード

ガスタービンリードモードを基本として、プラント内の圧力変動を最小となるよう制御する運転方法。

負荷追従性試験では、タービンリードモードを用いて20%の負荷上昇変化に対して4%分での負荷追従性能を実証した。

5.5 環境性能

IGCC の特徴の一つは、環境適合性がきわだって優

れていることである。これは燃焼後の大量のガスを処理する排煙脱硫と異なり、燃料ガスの段階で加圧下に処理を行うため、処理ガスの容積が大幅に小さくなって徹底した処理が可能となるためである。

CWP のこれまでの実績を米国共通の新設火力の排出基準値(NSPS)及びCWPに対する米国環境庁(EPA)の許容値と比較した結果を表6³⁾に示す。

また、ガス化炉の底部から排出される水砕スラグは、規制の厳しいカリフォルニア州からも無害であることの認定を受けている。

表6 CWPプラントの環境排出値

	NSPS 基準値	EPA 許容値	契測値
SO ₂	約86ppm ¹⁾	10ppm	9ppm
NO _x	約250ppm ²⁾	50ppm ³⁾	23ppm
ばいじん	約25mg/m ³ N ⁴⁾	—	約0.8mg/m ³ N

注 1) 0.30lbs/10⁶Btuの換算値

2) 0.60lbs/10⁶Btuの換算値

3) 地方条例による規制値は27ppm

4) 0.03lbs/10⁶Btuの換算値

6. あとがき

実証運転開始直後は、多くの初期トラブルを経験したが、最近発電プラントとしての運転信頼性を実証できるまでの状況になってきた。現在まで主なる成果としては、

- ・運転性能・保守内容の把握
- ・炭種適合性・環境適合の実証
- ・石炭ガス化発電特有の問題点把握

などが上げられる。更に、残された期間を通してより一層の運転・信頼性を実証することが期待される。

引用文献

- 1) EPRI Report (AP-2487), Cool Water Coal Gasification Program-First Annual Progress Report July 1982
- 2) Wayne N.Clark, Vernon R.Shorter, Cool Water Coal Gasification Program, Cool Water : Mid-Term Performance Assessment, Sixth Annual EPRI Coal Gasification Contractors Conference, October 1986
- 3) 荒木成光;東京電力株式会社,石炭ガス化複合発電の実証,燃料協会誌,第64巻第12号,1985.10