

流動接触分解装置における動力回収システムの開発

Development of FCC Power Recovery System

石油精製業界でも装置の省エネルギー化が指向され、種々の改善やプロセスの見直しが進められている。

日本鉱業株式会社と日立製作所は共同して、重質軽油からガソリンを製造するFCCの再生塔からの排出ガスのエネルギーを、膨張タービンにより動力として回収する我が国で初めての装置を開発し、完成した。回収された動力は、再生塔へ空気を送り込む圧縮機の駆動用に使われ、従来の駆動源であった蒸気タービンの蒸気消費量を大幅に削減することができた。

開発項目の中で、安定かつ安全なシステムの開発という課題に関し、シミュレーション手法を用いて、最適制御方式、適切なインターロックシステムを確立し、装置完成後の順調な稼動により安定性、安全性を確認した。

瀬野幸一* *Koichi Seno*
高橋紀行** *Noriyuki Takahashi*
丹羽 淳** *Jun Niwa*
森 忠夫*** *Tadao Mori*
三河広治**** *Hiroji Mikawa*

1 緒 言

石油危機を契機に省資源、省エネルギーの必要性が提起されて以来、石油精製業界でも装置の省エネルギーのための全般的な改善、プロセスの見直しがなされつつある。特にユーティリティ原単位は製品のコストに直接影響するため、いかにその使用量を削減するかということが石油精製業界の重要な課題である。

石油精製での分解ガソリン製造装置〔FCC(Fluid Catalytic Cracker: 流動接触分解装置)〕の触媒再生塔から排出される高温ガスの圧力エネルギーを、膨張タービンにより動力として回収することを試み、このたびFCC動力回収装置を完成した(図1)。

この動力回収装置は国産1号機であり、技術的に開発項目が多く、日本鉱業株式会社と日立製作所が共同で開発を進め昭和54年7月完成に至ったものである^{1),2)}。主な開発項目は、次の4項目である。

- (1) 動的に安定かつ安全なシステムの開発
- (2) 耐摩耗性の膨張タービンのノズル、ブレード材料及び耐腐食材料の選定
- (3) 膨張タービン本体構造の開発
- (4) 高効率サイクロンセパレータの開発

この論文では上記(1)の動的に安定かつ安全なシステムの開発に関する内容につき述べる。上記(2)~(4)の材料と構造については、本号掲載別論文「流動接触分解装置における動力回収設備の開発」で報告する。

2 FCC動力回収システム

2.1 FCC動力回収装置の概要

FCCは、軽油相当の原料油を触媒の存在下で分解し、ガソリン、LPG(液化石油ガス)など軽質炭化水素を製品として得るための装置で、触媒流動床式の反応塔、その触媒を再生する再生塔及び反応塔で分解されたガスを分留、精製する部門から成る。従来のFCCでは、再生塔からの排出ガス(温度620~690°C、ゲージ圧力1.5~2.0kg/cm²)はほぼ大気圧に減圧され、ガスのもつ顕熱とガス中のCOの燃焼熱だけがCOボイラで蒸気発生させることによりエネルギーの回収が行なわれて

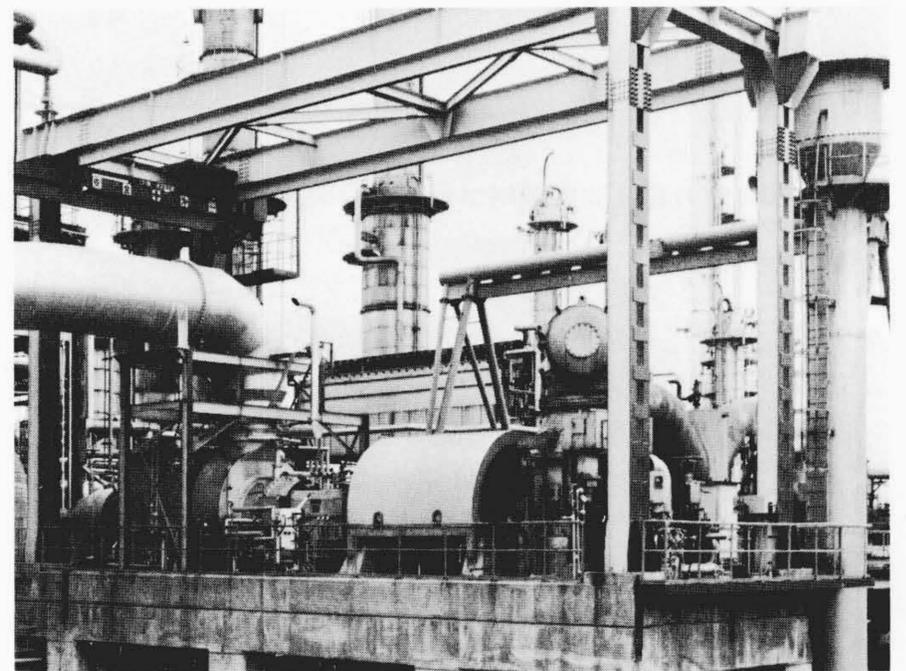


図1 FCC動力回収装置の概観 基礎架台上タンデムの左から膨張タービン、流体クラッチ、空気圧縮機及び蒸気タービンを示す。

いた。図2に示すように、既設のFCCの再生塔排出ガスラインに動力回収装置の増設を行ない、排出ガスの圧力エネルギーをも有効に膨張タービンにより動力として回収し、触媒再生用の空気を供給する空気圧縮機の駆動に用いる。この設備を増設することにより、空気圧縮機駆動に用いられていた蒸気タービンの蒸気消費量を大幅に削減することができる。

2.2 基本システムと運転方式

開発の対象となっている基本システムの構成について述べる。再生塔から排出される燃焼ガスは、微粒径の触媒ダストを含む。この触媒ダストがそのまま膨張タービンへ通されると、タービンノズル、ブレードに摩耗が生じてタービンの効率が低下するため、ガス中の触媒微粒子の大部分を除去する高効率のサイクロンセパレータを開発し設置した。サイクロンセパレータを出たガスは膨張タービンに導かれ、ロータを回転させて動力を回収する。この回収動力は種々の目的に利用できるが、今回は流体クラッチを介して空気圧縮機を駆動する。

* 日本鉱業株式会社石油技術部 ** 日立製作所機電事業本部 *** 日立製作所システム事業部 **** 日立製作所エネルギー研究所

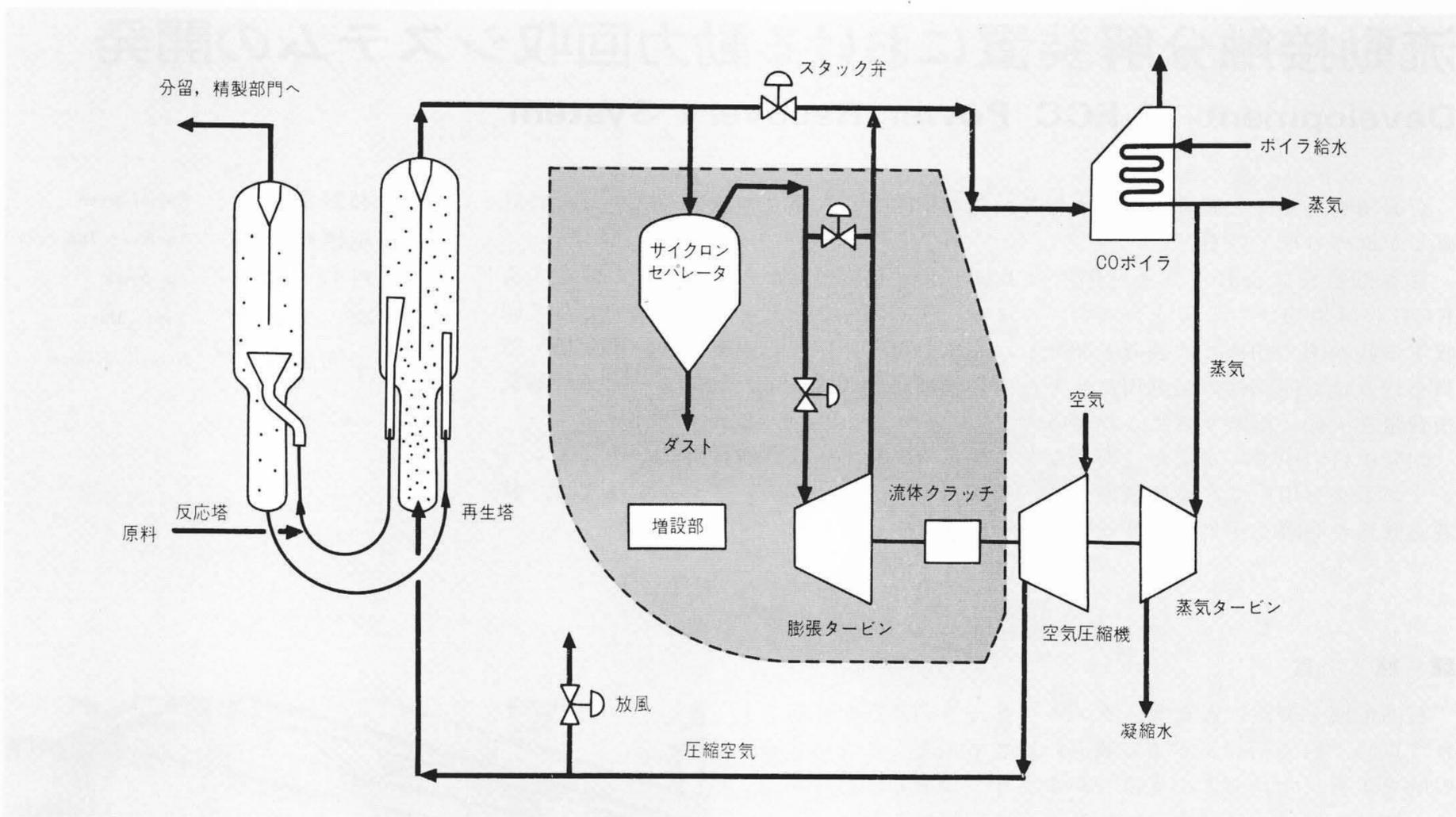


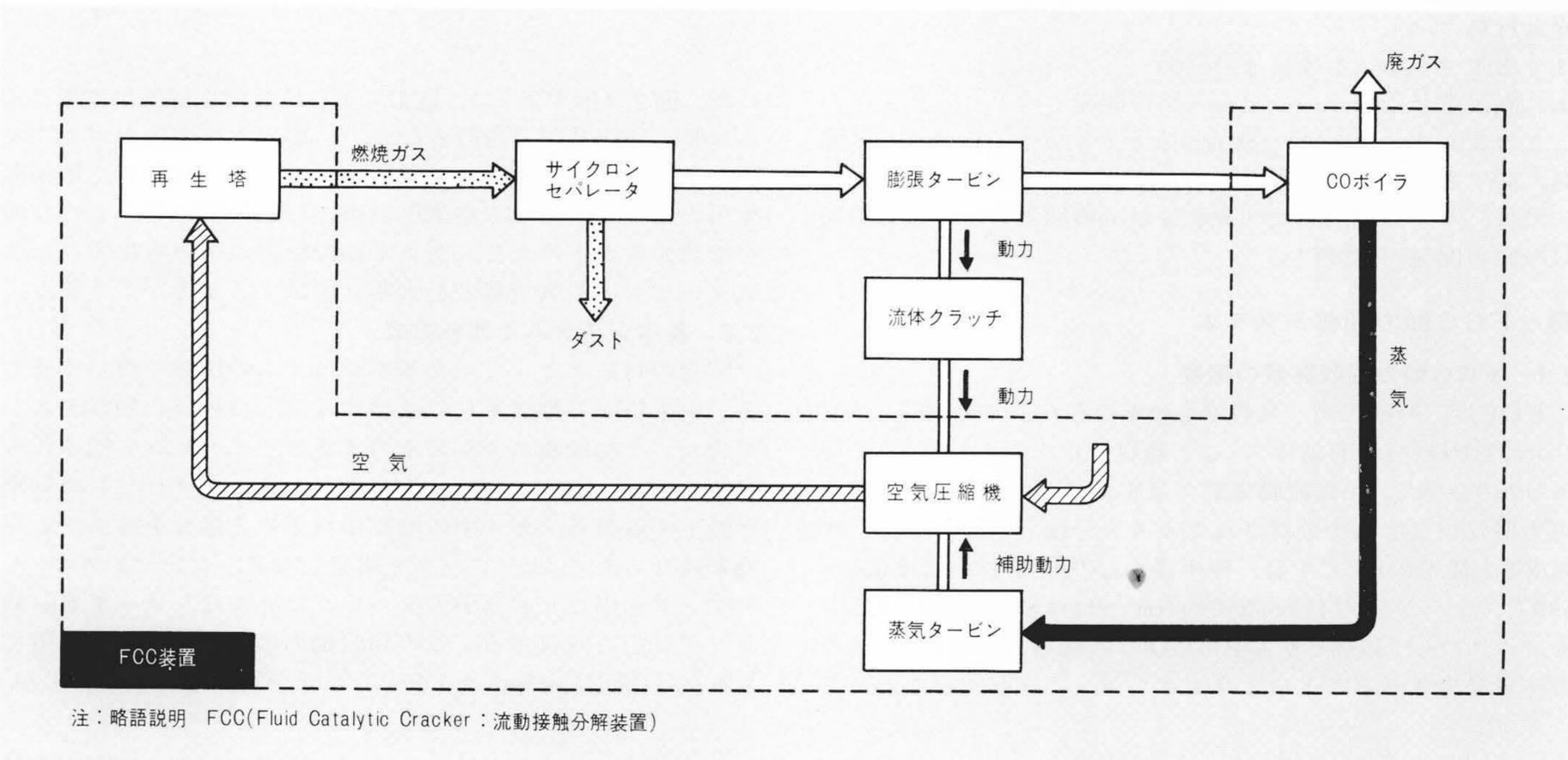
図2 FCC動力回収装置概略フロー 増設部のシステム設計と、増設部と既設装置のシステム上の関連性の解析が開発の対象である。

空気圧縮機は従来蒸気タービンで駆動されており、この装置設置後は主駆動機として膨張タービンを使用し、蒸気タービンは制御用補助駆動機として使用する方式となっている。

一方、膨張タービンを出た排ガスは、COボイラに導かれ蒸気として残エネルギーを回収した後、系外へ出される。COボイラで発生した蒸気は、蒸気タービンの駆動、その他に使用される。以上述べた動力回収装置の基本システムを、図3に示す。

この装置は、動力回収を必要としない場合、又は万一動力回収装置の運転に支障が生じて運転を停止せざるを得ない場合でも、FCCの運転が継続できることをシステム計画の基本とした。このためにFCCの運転を継続させながら、すなわち空気圧縮機の運転を止めることなく膨張タービンを起動したり停止できるように、流体クラッチを膨張タービンと空気圧縮機の間で設けた。

現在、国外で稼動しているFCC動力回収装置は十数基ある



注：略語説明 FCC(Fluid Catalytic Cracker：流動接触分解装置)

図3 動力回収装置基本システム 従来のFCCプラントにサイクロンセパレータ、膨張タービン及び流体クラッチを組み込んだ基本システムを示す。

が、流体クラッチを設置した例は見当たらない。流体クラッチを取り付けたことによる長所としては、

- (1) FCC本体に影響を与えることなく膨張タービンの起動、停止が可能である。
- (2) 軸系のねじり振動発生を防止できる。
- (3) 既設の空気圧縮機につなぐ場合、アライメントが容易になる。

などが挙げられる。一方短所としては動力回収率が低下（3%程度）するといった問題がある。しかし、既設のFCCに動力回収装置を設置する場合、既設蒸気タービンの下限出力を維持する必要上、膨張タービンの出力を最大可能出力まで上げることができないため実質的な短所にはならない。また流体クラッチは、信頼性の点で十分確立された技術であるが、今回は更にバックアップシステムを考慮して信頼性を増し、流体クラッチ自身の故障の懸念を排除した。

FCC装置の運転開始は、まず蒸気タービンで空気圧縮機を駆動して再生塔へ空気を送り込むことにより行なう。FCCが定常運転状態となった後、膨張タービンの入口にある流量制御弁を徐々に開き、通ガスすることにより膨張タービンの回転数を高めてゆき、空気圧縮機側の回転数とほぼ同調したところで流体クラッチをつなぎ込み、更に流量制御弁を開いて膨張タービンの出力を増加する。この間、圧縮機側の回転数は蒸気タービンのガバナにより制御されているため一定に保たれ、膨張タービンから流体クラッチを通して空気圧縮機に伝えられる動力分だけ蒸気タービンへの供給蒸気量が絞られる（膨張タービンへの通気から流体クラッチのつなぎ込みまで30分程度）。FCC本体が完全に安定してから膨張タービンの起動が可能のため、FCCの運転開始時に起こりやすいアフターバーニングによるタービンブレードの損傷を回避することができる。

動力回収装置の停止は次の手順で行なう。空気圧縮機の回転数が蒸気タービンガバナにより一定制御されている状態で、流量制御弁を徐々に絞ってゆくことにより膨張タービンの出力を落としてゆき、空気圧縮機が蒸気タービンだけで駆動される状態となったとき、すなわち膨張タービン側の回転数が空気圧縮機側の回転数以下の値となったとき、流体クラッチを切り最終的に流量制御弁を完全に閉止する。

膨張タービンの回転数が設計値を超えたり、軸受部給油圧力が異常に低下した場合など、膨張タービンを緊急に停止する必要がある。このときは膨張タービン本体にあるシャッター式の緊急しゃ断弁を瞬時に閉止することにより流入ガスをしゃ断し、流体クラッチを切ると同時に蒸気タービンの出力を増して圧縮機回転数の低下を防ぐ。

このように流体クラッチを設置することにより、従来どおりのFCCの起動ができ、FCCが操業に入ってからでも任意の時期に膨張タービンのつなぎ込み、切離しが可能となり、動力回収装置の起動、停止が非常に簡単になる。

2.3 設計基本条件と計画条件

膨張タービンによる動力回収システムを計画するに当たり、基本となる再生塔からの排出ガス条件とCOボイラ入口ガス条件を表1に示す。

膨張タービンの出力計画条件は、再生塔排出ガス条件から配管、弁などの圧力損失による圧力降下と配管表面からの放熱による温度降下を考慮して膨張タービン入口条件とし、また出口条件としては、COボイラ入口ガス圧力に至るまでの配管内圧力降下を考慮した値となる³⁾。

膨張タービンは既設の空気圧縮機、蒸気タービンと一軸に

表1 再生塔排出ガス条件及びCOボイラ入口ガス条件 膨張タービン出力値の計画を行なうに当たり、排出ガス量については動力回収率を年間通して高く保てるような条件を選定した。

1. 再生塔排出ガス条件	
ガス温度	635 ± 5 °C
ガス圧力	1.6 ± 0.03ゲージ圧力 kg/cm ²
ガス組成	N ₂ 62 vol. % CO 10 CO ₂ 7 O ₂ 0.1以下 H ₂ O 20
ガス中の触媒ダスト濃度	0.5 ~ 1.3 g/Nm ³
ガス量	74,000 ± 500 Nm ³ /h
2. COボイラ入口ガス条件	
ガス圧力	100 mmH ₂ O

表2 一連の回転機入出力計画値 蒸気タービンの蒸気最小流量を確保するため、膨張タービン出力は若干抑えてある。

項	目	定常運転時	膨張タービン停止時
膨張タービン	出力	3,343 kW	—
	回転数	4,708 rpm	—
流体クラッチ	伝達出力	3,175 kW	—
	回転数	4,600 rpm	—
空気圧縮機	必要動力	4,009 kW	4,009 kW
	回転数	4,600 rpm	4,600 rpm
蒸気タービン	出力	834 kW	4,009 kW
	回転数	4,600 rpm	4,600 rpm

つなぐ。この一連のタンデム状の各回転機の入出力値の計画に際しては、プロセス側の条件から要求される空気圧縮機の運転必要動力と回転数を基準にする必要がある。表2にこれらの回転機の入出力の計画値を示す。蒸気タービンはその機構上の制約から、蒸気量のある下限値以上で常時使用する必要があるため、それに相当する出力は計画値として見込まなくてはならない。

3 開発上の問題点

FCC動力回収システムを開発する上での基本的要求は、動力回収装置を設置したことではいかなる場合にもFCC本体の運転に悪影響を生じさせないことである。また、定常時は動的に安定であり、緊急時に安全な状態が保てるようなシステムの選定を主眼とした。系の安定性、安全性を追究するに当たり、具体的な問題点として次の項目が挙げられる。

(1) 再生塔の圧力制御方式

従来、FCCの再生塔の圧力は反応塔との差圧を一定に保つよう図2に示すスタック弁で制御されていた。反応塔と再生塔の間では、各塔底を連絡するベンド管で触媒循環を行なっ

ているが、この循環は両塔間の微妙な圧力バランスの上に成り立っている。したがって、動力回収装置を設置する場合には、FCCの安定運転を保つために、両塔間の差圧制御性を損わず、かつ回収動力を最大とするような制御システムの選定が重要な問題である。

(2) 膨張タービン緊急停止時の対策

膨張タービンが緊急停止した場合、再生塔圧力の大幅な変動、急激な入力減少により空気圧縮機の回転数が低下し、吐出し風量に変動するといった問題がある。このような変動を安全な範囲に抑えるインターロックシステムを組むこと、また適切な制御定数の選定が必要である。

その他、動力回収装置では高温で比較的大容量のガスを処理するため、圧力制御弁も必然的に大口径となり、開閉時間も長く、また追従性も悪くなる。このような制御弁の系内圧力変動に対する追従性も、制御システムを追究していく上で大きな問題となる。

4 シミュレーションによる検討

以上述べてきたシステム開発上の問題点を定性的、定量的に把握するために、シミュレーションモデルを作り系に実際

に近い定常時の変動や膨張タービンの緊急停止などの外乱を与えることにより再生塔圧力、空気流入量、空気圧縮機回転数などの過渡応答性を求め、システムの安定性と安全性を判定した。

シミュレータは、過渡現象解析プログラム、DDS (Digital Dynamic Simulator) を用い、構成要素である各機器の特性や制御方式といったサブシステムごとにモデル化し、シミュレーションモデル内で制御方式の切り換えを容易なものとした。

図4にシミュレーションモデルの構成を示す。

4.1 シミュレーションによる最適制御方式の開発過程

シミュレーションを用いた最適システムの開発を、次のステップを踏まえて行なった。

(1) 既設FCCの再生塔圧力制御系のモデル化とそのモデルの検証

シミュレーションにより系の安定性、安全性を論ずる場合、シミュレートしたものが実際とよく一致した挙動を示していることが必要である。そのため、動力回収装置の設置前の再生塔圧力制御系のシミュレーションモデルを作り、これに外乱を与えて過渡応答を求めた。また一方、安定運転を続けているFCCに、シミュレーションと同じ外乱を与え実際の過渡

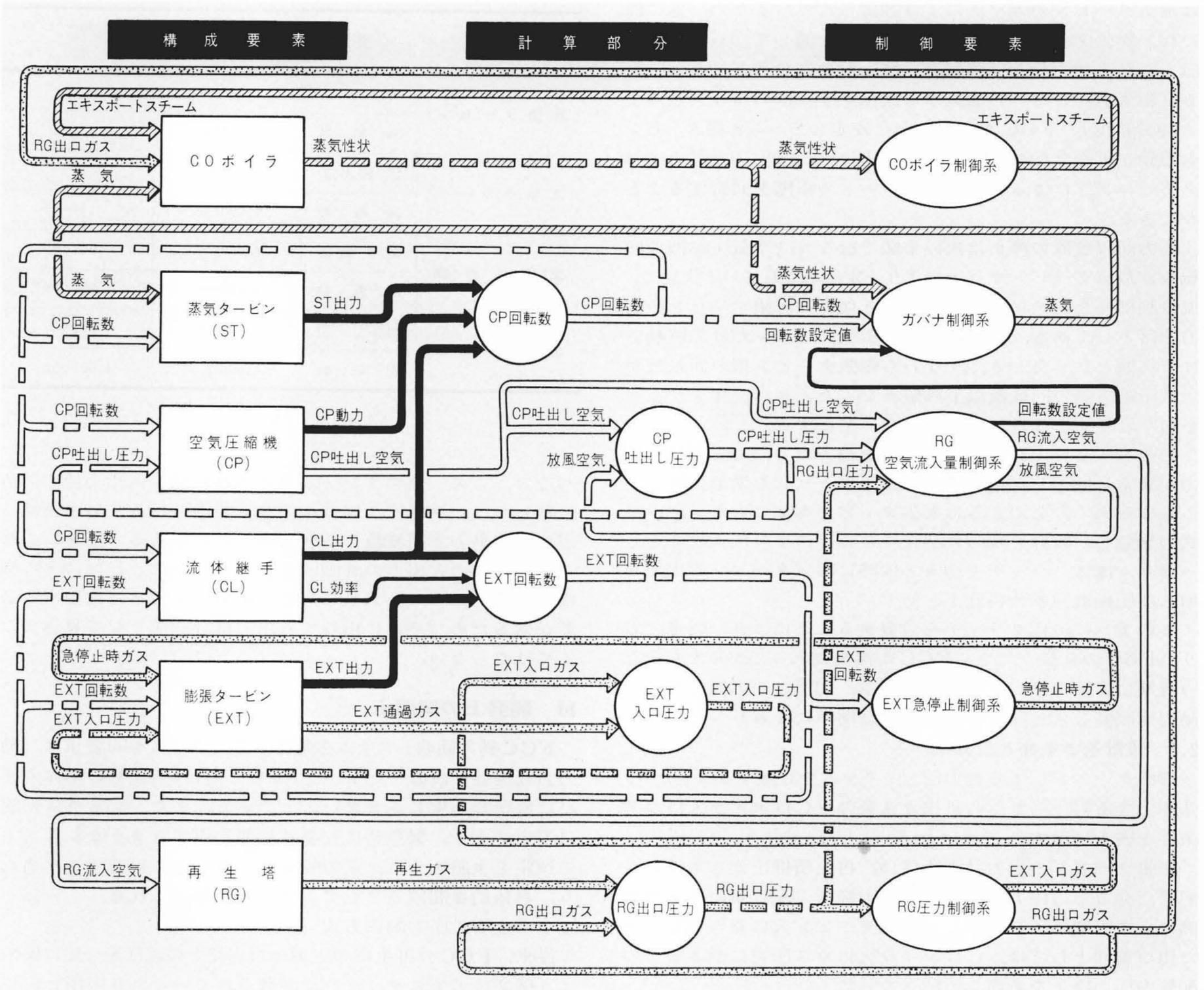


図4 シミュレーションモデル構成 モデルの全体構成のうち、主要部分をピックアップしたものである。

応答を測定し、同じ応答を示すことを確認した。

(2) 最適基本制御方式の決定

前記(1)で作成したモデルに、膨張タービン、流体クラッチなどの機器の特性をモデル化して加え、動力回収系のシミュレーションモデルを作製した。これにシステムの安定、安全な制御を図るため、再生塔圧力制御、再生塔流入空気量制御、圧縮機回転数制御について各々数方式ずつをサブシステムとしてモデル化し組み込んだ。この数ケースの全体モデルに定常時の変動や膨張タービン緊急停止などの外乱を与えることにより、安定性、安全性の面で最適な動力回収システムを選定し実装置の制御系を決定した。

(3) 制御定数の決定

選定したモデルを用いて制御パラメータとなる比例定数、積分定数などの制御定数の最適値を求めた。最終的には、実プラントに採用されているDDC (Direct Digital Control) による先行制御方式を組み込んだ制御機能をモデル化し、シミュレートして高精度の制御が実施できることを確認した。

4.2 シミュレーション結果

再生塔圧力制御、空気流入量制御及び回転数制御については、各制御方式の組合せのうち、外乱に対して最も変動の少ないものを今回のシステムでの最適な制御方式として選んだ。

またこの装置で用いる制御弁は、取扱いガスが大容量であるため、一般の化学プラントと比較すればかなり大口径のものとなり、複数の制御弁を組み入れた制御方式ではハンチングの有無、追従性の良否が問題となる。より安定なシステムを得るため、シミュレーションでは関連する制御弁の特性(弁口径、弁開閉速度など)と制御定数をパラメータとして解析を行ない、ハンチングを起こさない最良の制御条件を求めた。

シミュレーション解析結果の一例として、再生塔排出ガス量にステップ状に約10%増加する外乱を与えた場合の過渡応答結果を図5に、また膨張タービンを緊急停止させたときの過渡応答結果を図6に示す。

図5では、再生塔排出ガス量が増加すると再生塔出入りの流量バランスが一時的に崩れ、再生塔内圧力が上昇し、再生塔への空気流入量は減少する。また、膨張タービンの通過ガス量も増加するために膨張タービン出力も大きくなり、空気圧縮機回転数も上昇するが、制御システムが働くことによりハンチングを起こすことなく短時間で定常復帰する。また図6に示す膨張タービン緊急停止時には、膨張タービン通過ガス量が急激に減少し、瞬間的に系内にガスが滞留するため再生塔圧力は上昇する。膨張タービンの出力低下により空気圧縮機回転数は減少し、これとともに再生塔空気流入量も急激に低下する。しかし、緊急停止システムの作動によって滞留したガスが放出されるため、再生塔内圧力は短時間で減少し定常時の値に復帰する。空気圧縮機回転数も蒸気タービンのバックアップにより数秒で復帰し、再生塔空気流量も同様に元の状態となる。

図5からは、定常時の変動に対しては安定なシステムであることが分かり、また、図6から緊急時にも安全にプラントの対処ができることが分かる。

5 実プラントの制御方式

5.1 DDCによる制御

シミュレーションスタディにより確立された結果を基にして、実プラントの基本制御システムを決定した。

この装置では大口径の弁による制御を行なうため、弁の形式、大きさからくる機械構造的な制約から制御性に不感帯が

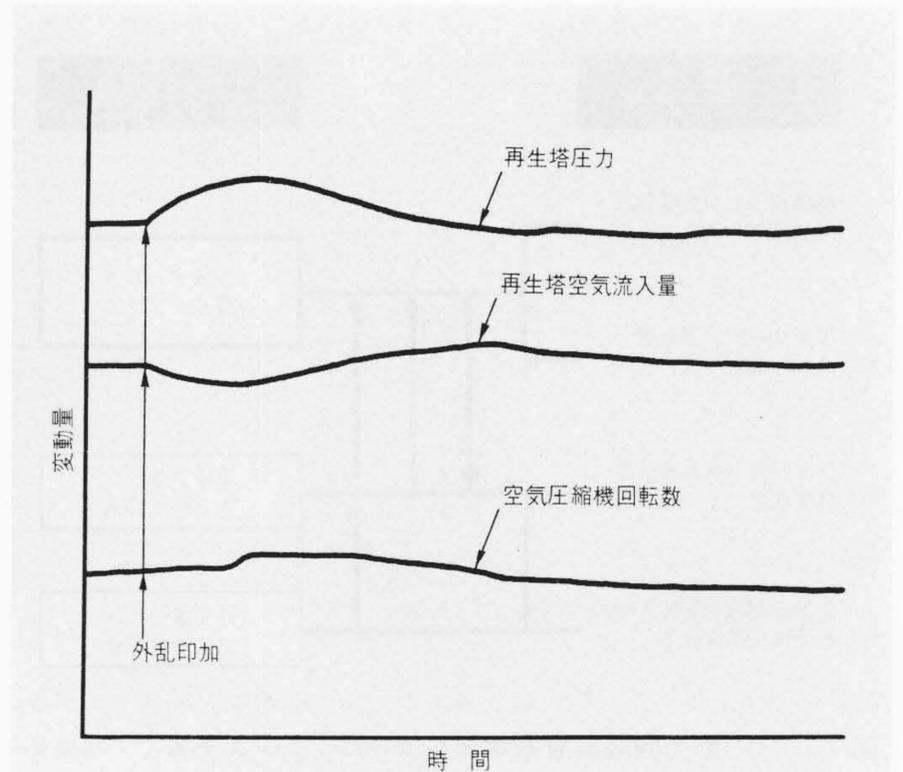


図5 再生塔排出ガス量の約10%増加時の動特性 排出ガス量にステップ的に約10%の外乱を与えた場合の各応答を示すが、変動幅は系の安定性を崩すものではない。

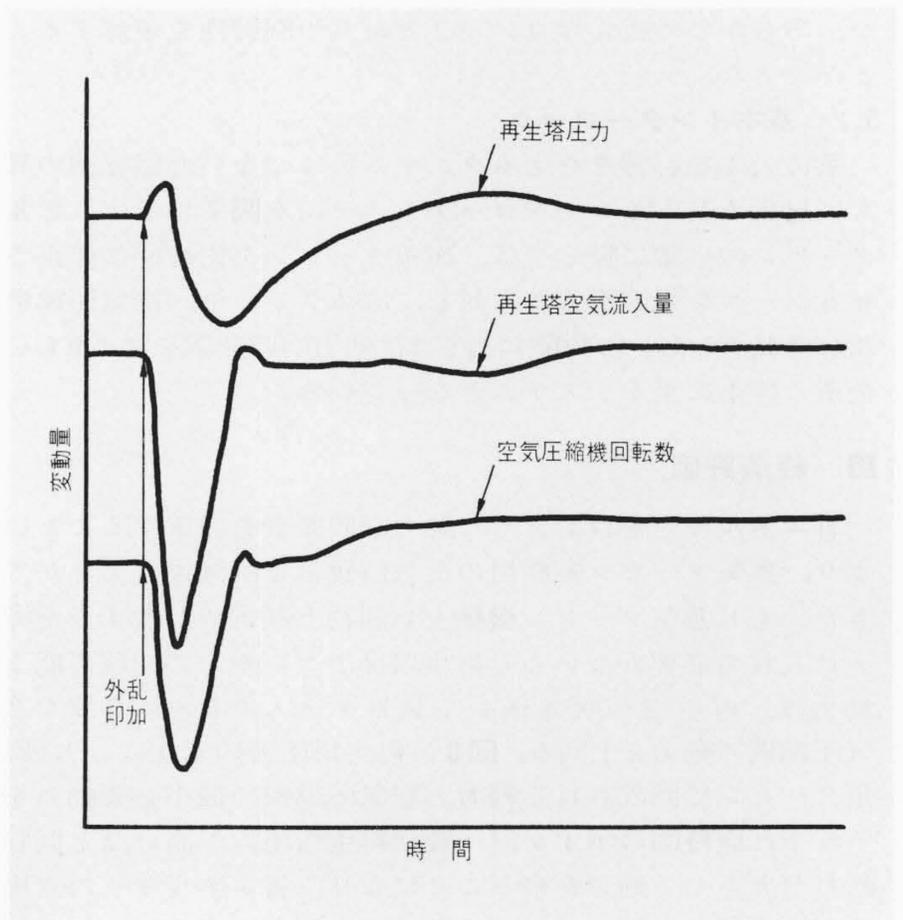


図6 膨張タービン緊急停止時の動特性 膨張タービンを0.6秒で停止したときの各応答を示す。いったん系は大幅に変動するが、すぐ元に復帰している。

生じ、精度の良い制御ができないという問題がある。これを補うため日立電子計算機(HIDIC)を用い、DDCによる制御方式を採用した。すなわち、制御する弁の動きに関しロジックを組み、そのロジックどおりの各弁の関連した動きをプログラム化して、DDCを用いて系をAdvance Control(先行的に制御)しようとするものである。この方式は再生塔圧力制御、再生塔空気流量制御などに適用された。

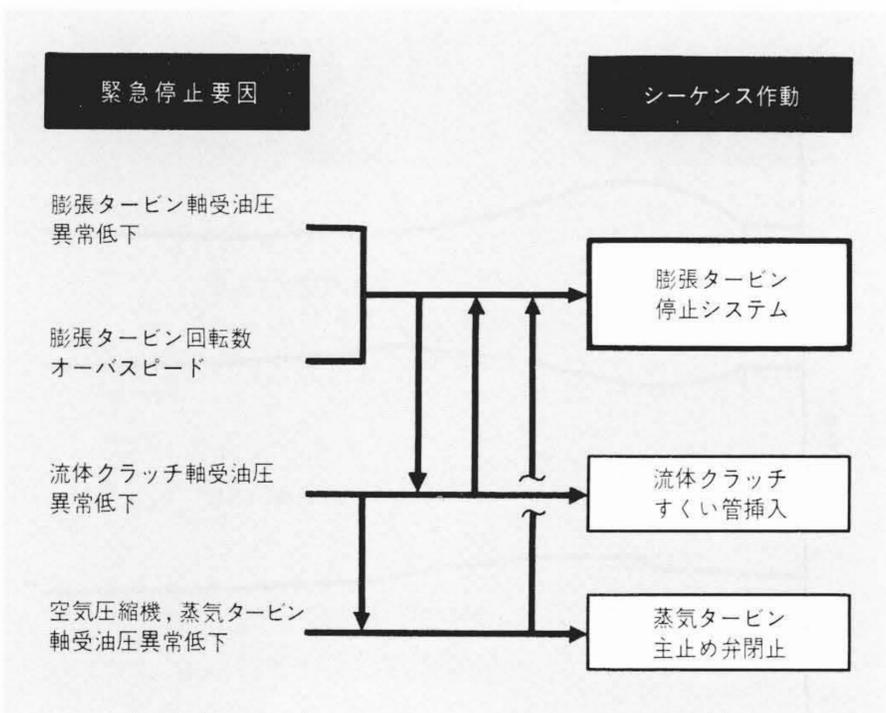


図7 FCC動力回収装置基本インターロックシステム 膨張タービンの異常時には、膨張タービンを停止するシーケンスが働くが、状況に応じてFCC全系を停止することもできるシーケンスとなっている。

プラントの運転に先立ち、動力回収装置を空気循環することにより、シミュレーションで求めた制御定数を基にDDCを調整して、最終的に膨張タービンの緊急停止試験を行なったが、あらかじめ組んだロジックどおりの制御性を確認することができた。

5.2 基本インターロック

系に大きな影響を与えるタンDEM状につないだ回転機の異常に対する基本インターロックシステムを図7に示す。膨張タービンの異常に際しては、膨張タービンを先行的に停止させるシーケンスが働くのに対し、流体クラッチ、空気圧縮機及び蒸気タービンの故障に対しては動力回収装置を含めFCC全系の停止に至るシステムとなっている。

6 経済評価

省エネルギーを目的とした動力回収装置を設置することにより、蒸気タービン駆動用の蒸気消費量を削減することができた。もし蒸気タービン機構上の制約と制御のしやすさを考えに入れる必要がないなら再生塔排出ガスからの回収可能な動力は、再生塔へ吹き込む空気量を送入するのに必要な空気圧縮機の動力を上回る。図8に再生塔圧力の変化により、膨張タービンで回収される動力と空気圧縮機の最小必要動力をそれぞれ概略的に示すが、一般に再生塔圧力が高いほど回収動力が大きくて動力が余ることになり、省エネルギーの立場からは有利である。

このFCC動力回収装置設置建設費は、おおむね3年前後で回収が可能であると考えてよい。この装置では膨張タービンにより空気圧縮機を駆動させたが、発電機と直結させて電力回収も可能である。また、膨張タービンに空気圧縮機と誘導発電機をタンDEM状につなぎ、空気圧縮機を駆動する方法もある⁴⁾。この場合、膨張タービンの回転数制御は誘導発電機によって行なわれる。すなわち、膨張タービン出力が空気圧縮機必要動力を上回る場合、誘導発電機は、回転数の上昇に与えられる機械的エネルギーを電気的エネルギーとして取り出す発電機の役割を果たし、逆に膨張タービンの出力が足りないときは外部から電気エネルギーを誘引して電動機として働き、回転数の低下を補う。この方式では、FCC起動時も

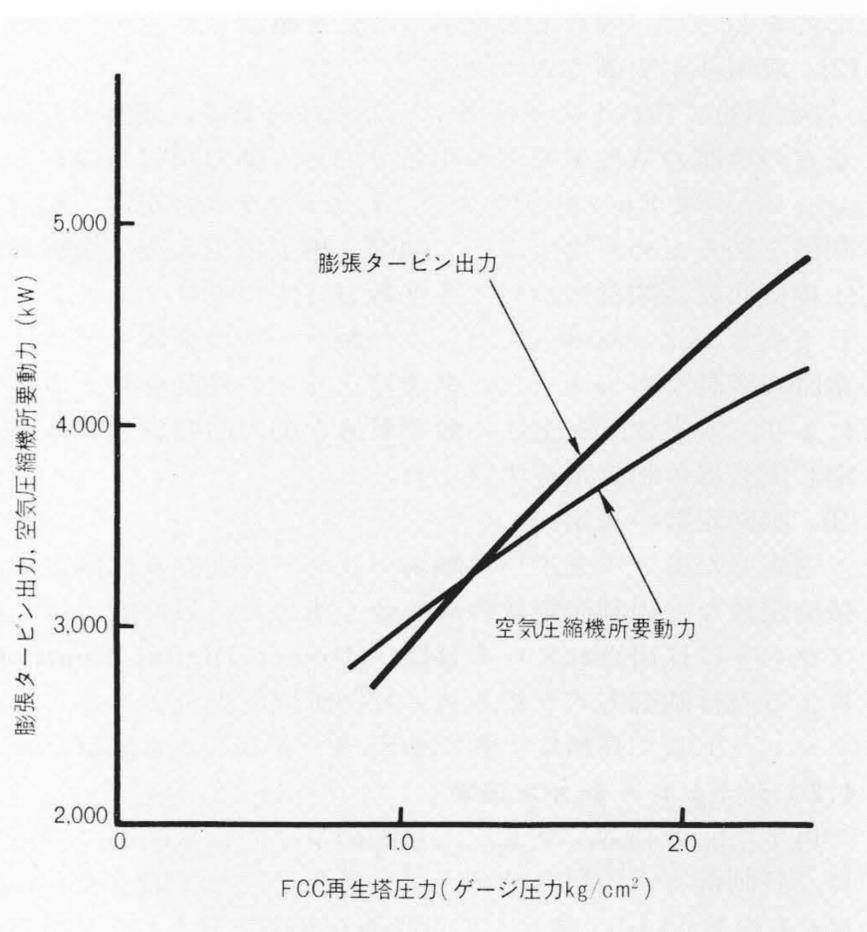


図8 再生塔圧力に対する膨張タービン、空気圧縮機の入出力バランス 再生塔排出ガスから回収可能な動力を膨張タービン出力とし、再生塔に必要な空気量だけを送風するための動力を空気圧縮機所要動力とした。

誘導発電機を電動機として用いることが可能で、システムとしても大幅に簡素化される。

膨張タービンによる回収エネルギーを蒸気として得るか、電力として得るかはそれぞれの製油所のニーズによるもので、経済評価もいろいろと異なってくる。

7 結 言

国産1号機として開発されたFCC動力回収装置は、昭和54年7月から運転に入り、その後も順調な稼働を続けている。商用運転に入る前のシーケンス確認試験結果、また稼働中の弁の動きや系の安定度から、開発したシステムが優れたものであるという確信を得た。また、この論文の中では特に触れなかったが、既設商用装置の一部改造、増設という点からの工期的な制約や施工上の制約に対し、関係者の多大な努力でこれを乗り切れたことは何にも増して大きな成功であったと言える。

今後、我が国の省エネルギー指向はますます強まると考えられるが、この動力回収装置の成功を礎に他のFCCへの適用を積極的に進めていくとともに、膨張タービンとそのシステムのFCC以外への応用についてもこれからの課題としてゆきたい。

参考文献

- 1) 湯川、外：FCCにおける動力回収用ガスエキスパンダーの開発について、石油学会、エネルギー活用のための設備の改善に関する研究討論会、前刷集(昭53-11)
- 2) 斎藤：FCCタービン、産業機械、No. 346、41~43(昭54-7)
- 3) H. Malys：FCC turbine performance linked to flue-gas variables, The Oil and Gas J., Sept. 11, 70~72(1978)
- 4) G. Millar：Use of turboexpanders with FCC, Hydrocarbon Processing, July 111~118(1978)