

第 6 章

6

プラントシステム技術

第6章 プラントシステム技術 目次

横須賀研究所 エネルギー機 械 部 幸田 栄一
 横須賀研究所 エネルギー機 械 部 高橋 徹
 横須賀研究所 エネルギー機 械 部 長 三巻 利夫

6 - 1 研究の背景	85
6 - 2 システム性能解析評価ツールの開発	85
6 - 3 今後の展開	89
コラム : DME併産型石炭ガス化複合発電	91

横須賀研究所 エネルギー機 械 部 船山 保男



幸田 栄一（平成2年入所）
 当研究所に入所した当初は熔融炭酸塩型燃料電池の研究開発に従事し、その後IGCCやCAES、水素燃焼タービンなどの各種新型発電システムの解析・評価を行ってきました。現在は、これらの解析・評価と同時に、発電システムを解析するための手法およびプログラムの開発も行なっています。
 今後は、IGCCの実用化に向けソフト面からの研究を進めるとともに、新型のみならず既設も含め、火力発電の高効率化に寄与していきたい。



高橋 徹（1997年入所）
 これまでに発電システムのシステム解析に関する研究に携わってきました。現在は、それに加え、分散型エネルギーシステムについても研究を行っています。今後は、ガス化複合発電の実用化に向けて、ガス化複合発電の高効率化の研究を行っていきたく考えています。



三巻 利夫（1978入所）
 これまでガス/蒸気複合発電、石炭ガス化複合発電等の熱効率解析、動特性シミュレーションに関する研究に携わり、新型火力発電プラントの性能解析・評価結果を踏まえた研究計画の立案・推進に従事してきました。今後引き続き石炭ガス化複合発電の実用化に向けたシステム評価研究を進めるとともに、サイクルの改良による新たな高効率ガスタービン利用システムの研究や需要家サイドを含むトータルなエネルギーシステムの省エネ性の評価研究に取り組んでいきます。



船山 保男（昭和42年東京電力(株)（鶴見火力発電所）入社）
 昭和52年、東電学園大学部卒業
 昭和66年、火力部火力設計課
 昭和60年、開発研究所石炭ガス化研究室
 平成2年、石炭ガス化複合発電技術研究組合 出向
 平成8年、エネルギー・環境研究所石炭研究室主任研究員
 平成9年、横須賀火力発電所保修部課長
 平成11年、電力中央研究所派遣 横須賀研究所プラント熱工学部 上席研究員、現在に至る

6 - 1 研究の背景

6-1-1 はじめに

IGCCシステムと一口に言っても、第一章で紹介したように様々なガス化炉形式、ガス精製方式があり、また、使用するガスタービンの形式や蒸気系の構成方法にも多くの選択肢がある。さらに、将来的には燃料電池と組み合わせたシステムも考えられている。このように多数の選択肢が考えられる中から目標とするシステムを明確にして開発を進めるためには、多くのシステムを同一条件で解析し、比較評価する必要がある。

また、システムを評価するための指標としても、熱効率、経済性、信頼性、運用性、環境性など、様々なものが考えられる。中でも熱効率解析はシステム全体の熱物質収支計算を行なうものであり、システム全体の熱効率を求めるだけでなく、各機器の設計条件を明らかにするものであり、プラントの計画や設計、運用など様々な検討のベースとなるものである。

当研究所では、これまでに個々のシステム毎に熱物質収支計算プログラムを開発し、様々な発電システムの解析評価を行なって、その開発計画の策定などに資してきたが、ここでは、IGCC発電システムの熱効率解析・評価研究に関する近年の取り組みを紹介する。

6-1-2 汎用熱効率解析ツール開発の重要性

IGCCシステムは、通常の発電システムと較べ多くの

機器から構成されている上に、作動媒体も気体だけでなく、液体や固体、あるいは二相流までも含まれる、非常に複雑な系である。このため、従来は様々なシステム構成毎に専用の熱効率解析プログラムを開発して性能解析を行っていた。ところが、このように個々に専用プログラムを用いて計算することには次のような問題点がある。まず、新たな工夫を加えたシステム構成を考案したとき、その性能を解析するために、新たにそのシステム用の計算プログラムを開発しなければならず、時間も労力もコストもかかる。また、複数のシステムの計算結果が得られていても、全て別々の計算プログラムで計算されたものでは計算の前提条件や計算方法が統一されていないため、それらの結果を横並びで比較することができない。さらに、IGCCシステムの成立性を評価するためには、IGCCシステムのみでなく微粉炭火力やPFBCなどの競合技術についても同一条件のもとで性能解析を行なって、比較評価する必要がある。

そこで、当研究所では、平成10年度より様々な発電システムの熱効率を解析することのできる汎用プログラムの開発を進めてきた⁽¹⁾。本章では、このプログラムについて、その概要とIGCCシステムの熱物質収支計算に基づく熱効率解析・評価のための諸機能、および今後の展開について述べる。

6 - 2 システム性能解析評価ツールの開発

6-2-1 発電システム熱効率解析汎用プログラムの概要

図6-2-1に当研究所で開発した発電システム熱効率解

析汎用プログラムの実行画面例を示す。図を見れば分かるように本プログラムはWindowsアプリケーションとして作成されているため、基本的な操作を簡単に行なうことができる。

システムの設計から計算に至る操作は、図に示すよう

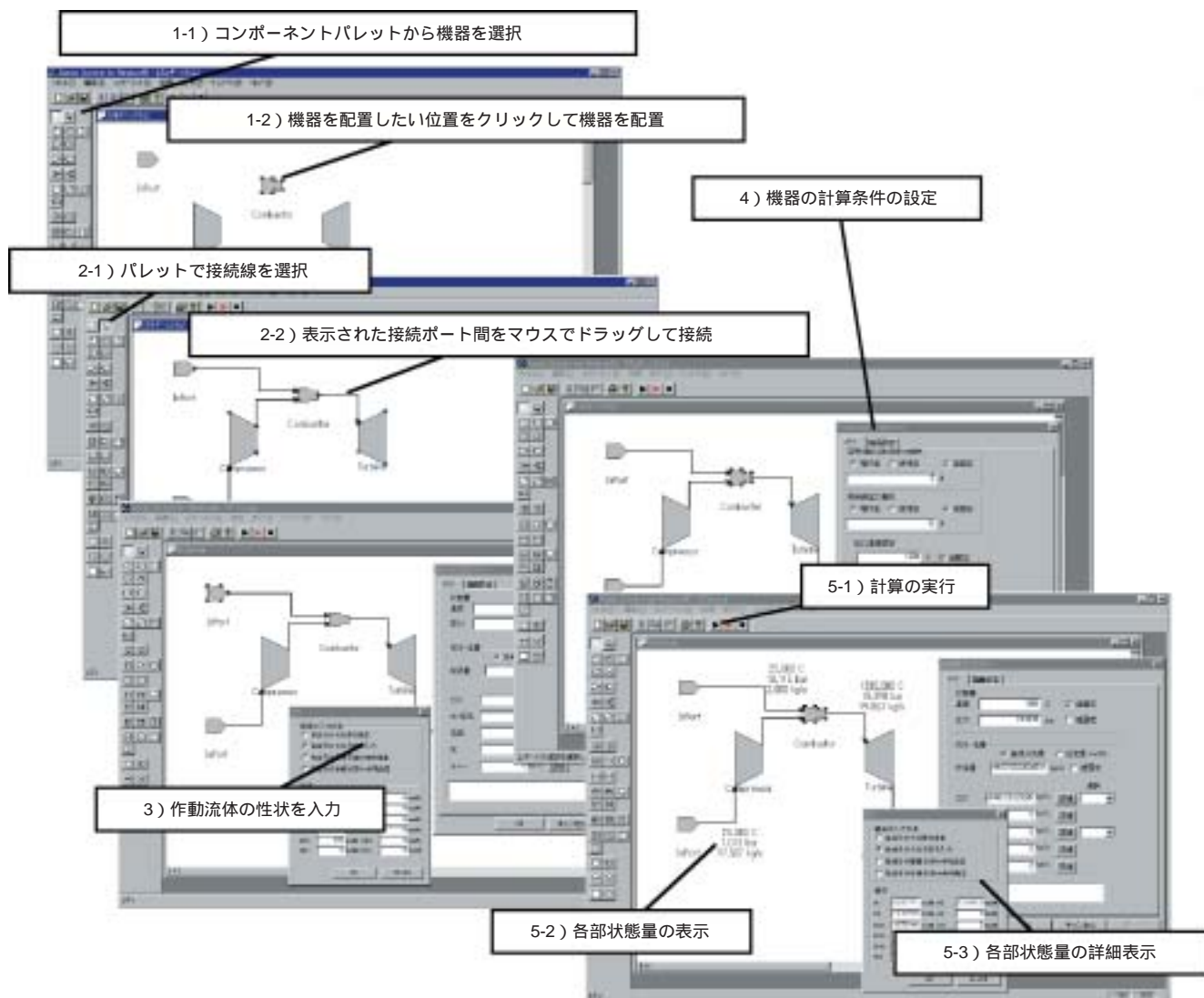


図6-2-1 発電システム熱効率解析汎用プログラム

に、必要な機器を配置してそれらを接続し、様々な計算条件を設定して、計算実行ボタンを押すという流れであり、マウス操作を中心として直感的且つ簡便に行なえるものとなっている。

システム全体の熱物質収支の計算には当研究所で独自に開発した高速計算アルゴリズムを用いているので、様々な計算条件のもとで高速に計算を行なうことが可能である。

6-2-2 IGCC システム性能解析のための機能

(1) 機器モデル

各種 IGCC システムの熱物質収支計算を行うため、下記の機器モデルを開発している。

a. 石炭ガス化炉

石炭ガス化炉として、実証機計画の事前検討で取り上げられた、図6-2-2に示す4種類のガス化炉のモデルを組み込んでいる。図中、赤い三角印が機器への作動流体の流入を、青い三角が機器からの流出を示している。例として、図中一番左の電中研 - 三菱炉について、各ポートに接続するラインの種類を示す。

次に、モデル内の計算式について簡単に触れる。石炭ガス化炉内は、固体粒子を含む複雑な流れ場の中で様々な反応が同時進行する、非常に複雑な系である。したがって、ガス化炉内の伝熱・流動・反応などのモデリングは、第3章で示したように別途実施している。本システムでは、シフト反応など反応速度の速い反応は化学平衡の状態にあるものとして、また、石炭粒子のガス化など

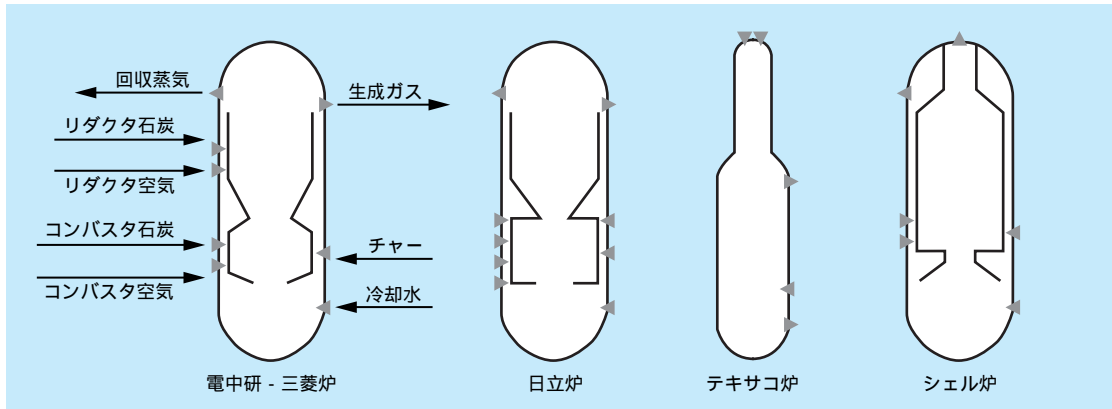


図6-2-2 ガス化炉モデル

反応時間の遅いものに関しては炭素転換率等を設定値として与えて計算するものとなっている。また、水冷壁への伝熱量に関しても、ガス化炉への総入熱に対する炉壁への伝熱割合を設定値として与えて計算するものとなっている。

例として、電中研 - 三菱炉について計算するために設定しなければならない値を示すと、

- ・ 炉内炭素転換率
- ・ コンバスタ炭素転換率
- ・ 放熱ロス割合
- ・ スラッグ捕集効率
- ・ コンバスタ空気比又はコンバスタ温度
- ・ リダクタ空気比又はリダクタ温度
- ・ 給炭量比（コンバスタ投入石炭流量/リダクタ投入石炭流量）
- ・ 炉壁への伝熱割合（コンバスタ及びリダクタ）
- ・ 各部圧力損失

となっている。これらをもとにガス化炉出入り口の熱物質収支計算を行ない、生成ガスの組成や空気比、ガス化効率などを算出する。

b. ガス精製設備

ガス精製用の機器モデルとしては、表6-2-1に示す各種機器モデルが組み込まれている。

これらの機器モデル内部の計算式は、それぞれ次のようになっている。まず、乾式の各種脱流設備に関しては各種の触媒を用いた場合の平衡定数などのデータが揃っているため、触媒の種類を選択することで自動的に除去効率を計算するものとなっている。現時点では亜鉛フェライト、チタン酸亜鉛及び酸化鉄の中から選択可能とな

表6-2-1 ガス精製設備機器モデル

集じん設備		サイクロン
		フィルタ
		ボアースフィルタ
		移動床集じん設備
脱硫設備	乾式	固定床脱硫設備
		移動床脱硫設備
	湿式	流動床脱硫設備
その他		化学吸収塔
		COSコンバータ
		脱硝設備
		水洗塔

っている。一方、湿式脱硫設備に関しては脱硫剤に関する詳細データの入手が困難であるため、脱硫効率を設定値として与えて計算するものとなっている。また、集じん設備に関しても、集じん効率を設定値として与えて計算するものとしている。

c. その他

上記の機器モデルの他に、他の発電システムでも用いられる機器モデルとして、表6-2-2に示す各種機器のモデルが組み込まれており、石炭ガス化燃料電池複合発電も含む様々なシステムの性能解析が可能である。

(2) 作動媒体の物性値計算式

a. 石炭

石炭の物性としては実証機設計候補炭を中心に、現在

表6-2-2 その他機器モデル

回転機器	膨張タービン
	ガスタービン
	蒸気タービン
	圧縮機
	ポンプ
熱交換器	熱交換器
	復水器
	水分離装置
	冷却器
	加熱器
燃料電池	MCFC
	SOFC
その他	燃焼器
	増湿塔

4 炭種について、灰性状も含めた石炭性状をデータベースとして持っている。さらに、任意の石炭性状を設定して計算することも可能である。

b. 水・蒸気

発電システムの作動流体として最も多く使われている水・蒸気の物性計算には、最新の蒸気表である、

IAPWS (国際水・蒸気表会議) の IF-97⁽²⁾ を採用しており、従来の蒸気表の適用範囲である 800 、100MPa までの領域に加え、圧力が 10MPa 以下であれば、2000 まで信頼性の高い計算結果を得ることが出来る。

c. その他気体成分

その他のガス成分については、文献(3)の式を基本とし、ここに含まれていない成分については NIST (National Institute of Standard and Technology, 米国) が WEB 上 (<http://webbook.nist.gov/chemistry/>) で公開している式を用いている。

6-2-3 熱物質収支計算例

図6-2-3 に簡単なシステムの熱物質収支計算例を示す。ここでは設定した値を赤丸で囲っているが、このように燃焼器出口温度を設定値として与え、燃料流量を設定せずに計算を実行すれば、必要な燃料流量が計算される。逆に、燃料流量を設定して、燃焼器出口温度を計算結果として得ることもできる。このように、合理的な条件が設定されていれば任意の計算条件下で熱物質収支計算を行なうことが可能である。図6-2-4 に本プログラムを用いて計算した IGCC システムの熱物質収支計算例を示す。このように複雑なシステムでも、パソコン上で短時間で

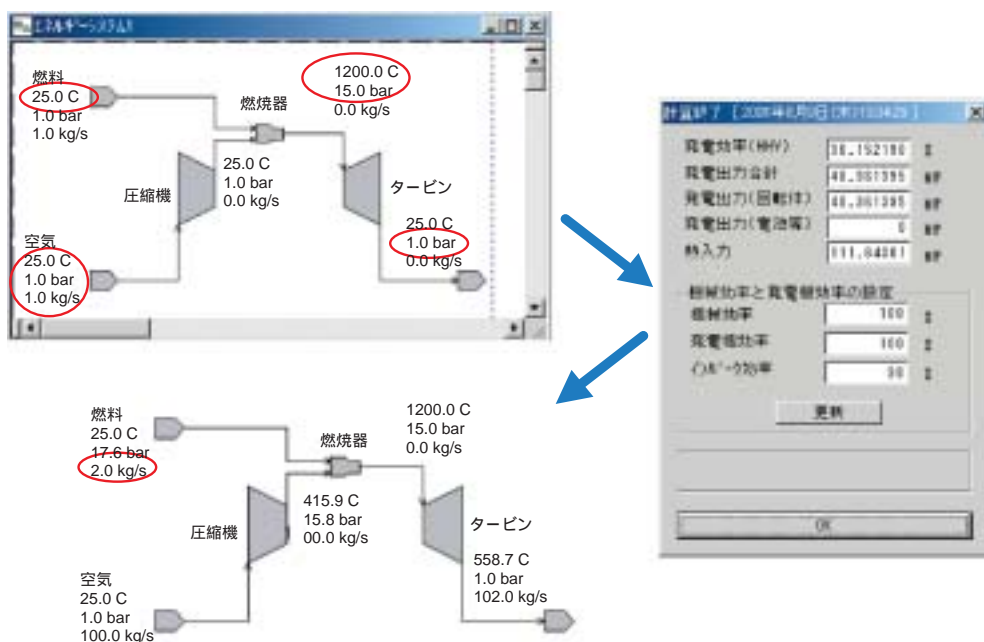


図6-2-3 計算例 (単純ガスタービンサイクル)

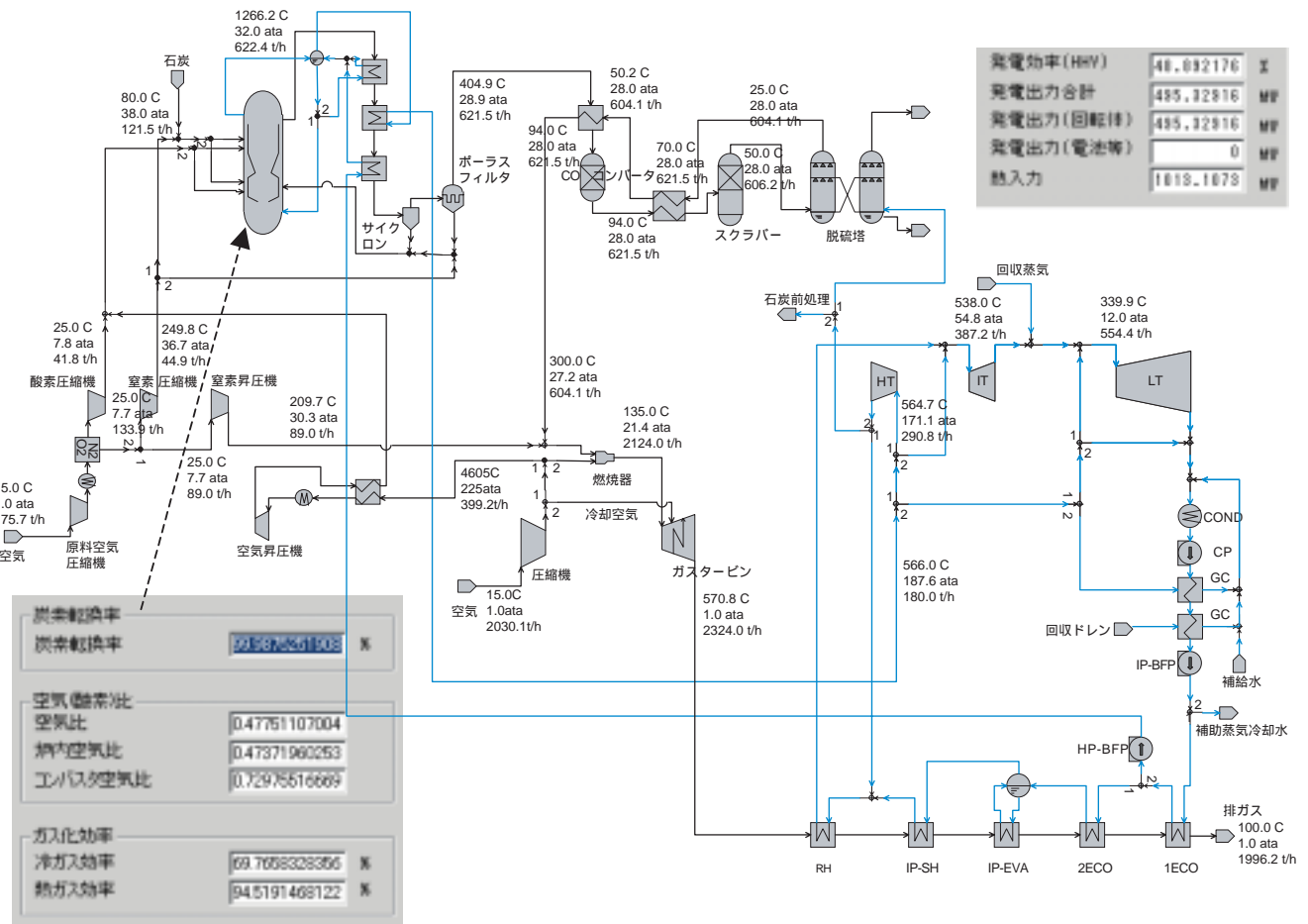


図6-2-4 IGCCシステムの熱物質収支計算

熱効率解析を行うことが可能であり、炭種や大気条件、あるいは各機器の効率等が変わった場合の影響なども即座に計算することが出来る。さらに、ガス化炉やガス精

製設備等の機器の変更や、蒸気系の組み換えなどを行なってシステムの最適化の検討を行なうことも容易である。

6 - 3 今後の展開

以上述べたように、既に4種類のガス化炉を含む様々な機器モデルを開発しており、多様なIGCCシステムの熱効率解析が可能であるが、今後、より一層の実プラントに即した機器のモデル化と操作性の向上などを目指して、以下に示すようなプログラムの機能増強を行なう計画している。

さらに、本プログラムを用いて実証プラントの性能解析・評価、将来的には商用プラントの一層の高効率化を目指して種々のIGCCシステムの解析・評価研究を進めていく計画である。

(1) 計算精度の向上

作動流体に含むことのできる成分数の追加や、化学反応及び気液平衡計算式の拡充など、物性値計算用関数群を増強し、より詳細な解析を可能とする。

また、将来的には第3章で述べたガス化炉内シミュレーション技術など、個々の機器に関する研究の成果を反映させて、より一層の計算精度の向上を目指す。

(2) 操作性の向上

本プログラムは、設定された条件が合理的でありさえ

すればどの値を設定しても計算することが可能である。しかし、このように柔軟な条件設定が可能であるため、IGCCシステムのような複雑なシステムの解析を行なう場合には、計算条件の設定が難しくなっている。そこで、条件設定を支援する機能の追加を考えている。

(3) 計算機能の増強

現時点では定格負荷時の熱物質収支計算を行う機能しか持っていないが、部分負荷特性解析や、さらには動特性解析を行う機能の追加を進めている。

(4) 実証プラントの性能解析・評価

実証プラントを詳細にモデル化し、以下に示すような解析・評価を行ないたいと考えている。

- ・ 空気比、給炭量比などの各種操作パラメータがプラント全体性能に与える影響の検討。
- ・ 設計条件（炭素転換率、放熱ロス割合、スラグ捕集効率、炉壁への伝熱割合など）の相違が全体性能に与える影響についての検討。
- ・ 炭種の違いがプラント全体性能などに与える影響の検討。
- ・ プラント運転状態の解析による、設計性能との相違に関する要因分析。

(5) 商用プラントのシステム解析・評価研究

さらに、以上述べたプログラムの機能増強などと並行して様々なIGCC 発電システムの検討を進め、より高性能なシステムを提案して行きたいと考えている。

コラム：DME 併産型石炭ガス化複合発電

1. はじめに

現在、石炭はLNGや石油と比較して熱量単価が約1/3と安く、原子力に次ぐベース電源若しくはミドル電源用燃料と位置付けられ、高効率発電が可能なIGCCの開発が行われている。IGCCでの石炭ガス化ガスは、発電用燃料以外に合成燃料（メタノール、F-T油、DME等）用の原料ガスとしても活用可能である。IGCCと合成燃料製造とを組み合わせ、重複設備を統合した合成燃料併産型IGCCシステムが提案されており、このシステムでは、発電側と合成燃料製造側の負荷を調整することにより、IGCCをピーク対応用として運用しながら合成燃料を安価に製造できる可能性がある。当研究所では、合成燃料として、物性がLPGに近く環境性にも優れているDMEを取り上げ、DME併産型IGCCシステムについて、技術的・経済的観点から、その実現性の検討を実施した。

2. 設備構成と運用方法

図1に基本システム構成を、表1に検討ケースを示す。本検討では既に商業化されている酸素吹きスラリーフィード・クエンチ型ガス化炉と湿式ガス精製（MDEA）をベースとし、DME製造設備は、NKKが開発を行っているプロセスを想定した。運用方法については、ガス化炉・ガス精製は常時定格運転とし、昼間は発電を主に、夜間はDME製造を主に行うパターンとした（表2）。

3. 検討結果

3.1 熱効率

本システムでは、DME製造設備からのオフガス

$$(\text{注}) \text{エネルギー利用効率} = \frac{\text{送電電力 (kW)} \times 860 \text{kcal/kWh} + \text{DME製造量 (kg/h)} \times \text{DME発熱量 (kcal/kg)} \times 100}{\text{石炭投入量 (kg/h)} \times \text{石炭発熱量 (kcal/kg)}}$$

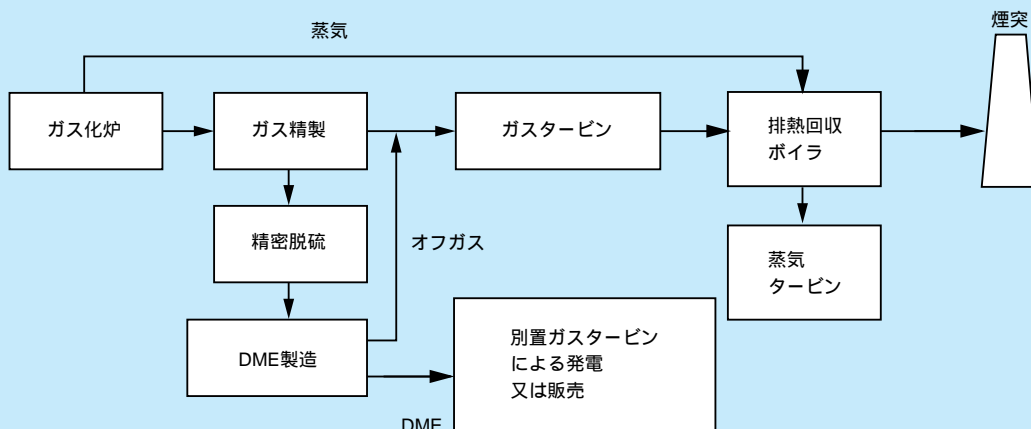


図1 DME併産型IGCC基本システム構成

をガスタービンに供給することにより、システム全体としての効率向上を図っている。発電とDME製造を併せたエネルギー利用効率^(注)は、表3に示す通り、夜間（主にDME製造）は52%、昼間（主に発電）は42～43%であった。クエンチ型IGCCは約36%であるから、約6%（絶対値）向上することになる。

3.2 経済性

(1) 発電原価

発電設備は表2に示すパターンで運転するため、設備利用率は約20%である。その結果、発電原価は、ケース1で16.0円/kWh、ケース2で10.6円/kWh、ケース3で9.9円/kWhとなり（表4）、ケース2及び3は、ピーク用電源として採算に乗る可能性があることがわかった。

(2) DME製造原価

DME製造原価を表5に示す。本検討では、ガス化炉、ガス精製及び共通設備建設費をIGCC側で負担させ、DME側の固定費を小さくするようにしている。その結果、DME製造原価はケース1及び2で2.0円/Mcal、ケース3で1.2円/Mcalとなり、輸入LPG（1.9～3.6円/Mcal）やLNG（1.7～2.2円/Mcal）と比較して十分の競争力を持つことがわかった。

(3) プラント建設費

IGCC、DME設備の推定建設費を表6に示す。

3.3 実用化にむけた技術課題

各構成設備の開発段階や技術課題を表7に示す。

表1 検討ケース

設 備	方 式	ケース1 (基本ケース)	ケース2 (スケールアップによる経済性向上)	ケース3 (参考ケース)
ガス化炉	酸素吹き・スラリー フィード・クエンチ型	118 t/h 1系列	130 t/h 2系列	92 t/h 2系列
ガス精製	湿式ガス精製	同 上	同 上	同 上
ガスタービン (石炭量相当)	GE F型	F7FA 1台 (78 t/h × 1)	F9FA 2台 (118 t/h × 2)	F9FA 2台
DME製造	直接製造方式(NKK)	51 t/h 1系列	111 t/h 1系列	111 t/h 1系列
燃料種別		石 炭	石 炭	重質残渣油

表2 設備運用パターン

	発 電 設 備	D M E 設 備
平日の昼間 (8:00~17:00)	定格出力運転(燃料は石炭ガス化ガスとDME製造装置からのオフガス)	運転維持の為に必要な最低量製造運転
土日祭日の終日 及び平日の夜間 (17:00~8:00)	部分負荷運転(燃料はDME製造装置からのオフガス。この電力で所内動力を賄い、若干の送電が可能)	定格量製造運転

表3 エネルギー利用率

		ケース1		ケース2		ケース3	
		昼 間	夜 間	昼 間	夜 間	昼 間	夜 間
発電電力	MW	306	120	880	286	880	286
ガスタービン	MW	197	80	572	186	572	186
蒸気タービン	MW	109	40	308	100	308	100
所内電力	MW	47	54	123	146	123	146
IGCC設備	MW	38	38	106	106	106	106
DME設備	MW	9	16	16	40	16	40
送電電力	MW	259	66	757	140	757	140
送電端熱効率	%	40	-	41	-	41	-
DME製造量	t/h	19	51	17	111	17	111
エネルギー利用率	%	43	52	42	52	42	52

表4 発電原価

		ケース1		ケース2		ケース3	
		昼 間	夜 間	昼 間	夜 間	昼 間	夜 間
固定費分	円/kWh	14.5	0	9.1	0	9.1	0
燃料費分	円/kWh	1.5	0	1.5	0	0.8	0
合 計	円/kWh	16.0	0	10.6	0	9.9	0

表5 DME製造原価

	ケース1		ケース2		ケース3	
	円/トン	円/Mcal	円/トン	円/Mcal	円/トン	円/mcal
固定費分	4,163	0.60	3,591	0.52	3,591	0.52
燃料費分	11,518	1.67	11,732	1.70	6,621	0.96
夜間電力売電補正 ^(注)	1,732	0.25	1,797	0.26	1,797	0.26
合計	11,062	2.02	10,530	1.96	5,419	1.22

(注) 夜間電力売電補正：夜間発電電力を1.5円/kWhで売電した収入

表6 プラント建設費

		ケース1	ケース2	ケース3
プラント建設費	億円	605	1,108	1,108
IGCC設備	億円	518	955	955
DME製造設備	億円	87	153	153

表7 各構成設備の技術レベル

設 備		開発段階	技 術 課 題
ガス化炉	酸素吹きスラリーフィード・クエンチ型		ガス化炉で熱回収をしないので熱効率が低く、通常36%（送電端HHV）程度
	同上（重質残渣油）		同 上
	空気吹きドライフィード・排熱回収型		高効率（46～48%）が可能であり、実証プラント計画を推進中
湿式ガス精製（MDEA）			顕熱損失が大きく、乾式より熱効率が約1～2%下がる。
精密脱硫装置（亜鉛吸着方式）			吸着後は廃棄物となり、処理が難しい
複合発電設備			特になし
DME製造設備			触媒の寿命、製造コストの低減、DME転換率の向上、スケールアップ技術の確認、長時間連続運転の確認

：商業レベル ：実証レベル ：パイロットレベル ：ベンチレベル

クエンチ型ガス化炉はアンモニア製造用として、LNGコンバインドは発電プラントとして既に商業運転されている技術である。IGCCは欧米で実証試験が進行中であり、日本でも(株)クリーンコールパワー研究所が発足して実証機計画が進行している段階である。

精密脱硫装置については亜鉛吸着法が実用化されているが、再生利用できないので大量使用した場合の廃棄処理の方法に課題が残されている。

DME製造の技術的課題は、①エネルギー転換効率の更なる向上（現状は約80%）②触媒の長寿命化と製造コストの低減、③プラントとしての長期安定運転の検証などが想定される。

4. 今後の展開

本検討は既存の資料⁽¹⁾⁽²⁾をベースに概略の試算を行ったものである。今後は、設備構成、機器容量及び運転方法などの最適化検討が必要である。DME設備から発生する中圧蒸気も取り込んだ蒸気系の最適化、ガス系の顕熱回収による損失低減及び、ガス・空気系圧力の動力回収など最適化検討を行えば、更に効率の向上が期待できる。

参考文献

- (1) 石炭利用総合センターDME研究会提出資料、NKK
- (2) IGCC発電プラント - EPRIの設計とコストの研究（EPRIガス化会議資料、1998年）