

(技術資料)

# 燃料電池用石炭ガス化製造パイロットプラントにおける 空気分離制御システム

## The IGFC System Air Separation Control System



佐藤達郎\*  
Tatsuro Sato



大山隆司\*  
Takashi Oyama



橋本 保\*  
Tamotsu Hashimoto



森本智志\*  
Satoshi Morimoto



富阪 泰\*(工博)  
Dr. Yasushi Tomisaka

A new air separation unit for the IGFC system was developed by Kobe Steel. The unit has an automatic control system to vary the unit load with product demand and to adjust to air feed pressure changes from the IGFC system. The unit could be operated with an acceleration rate of 8%/min. of the rated capacity while maintaining overall output purity. Also, the unit maintained excellent pressure response in relation to air pressure feed fluctuations.

まえがき = 当社が日立製作所より受注し電源開発若松研究所（北九州市）内に建設した、燃料電池用石炭ガス製造技術開発（以下、「EAGLE」: Coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity）パイロットプラント試験設備用空気分離設備は、2003年3月末まで所定の試験を成功裏に実施している。

この空気分離設備には、わが国では初めてといえる、いわゆる高圧精溜システムが採用され、また、発電設備側の負荷変動に対応する高速負荷追従性や、原料空気の供給圧力変動に対する追従性など、これまでの空気分離プロセスには見られない高度の制御性が求められた。試験結果は、これらの要求を十分に満足することを実証した。ここでは、これらの試験結果の概要を報告する。

### 1. 石炭ガス化燃料電池複合発電技術の概要

石炭ガス化燃料電池複合発電（以下、「IGFC」: Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle）システムの全体システムフローを図1に示す。空気分離設備において、精溜分離された酸素ガスは、ガス化剤として石炭ガス化設備に供給され、ここで同時に供給された石炭と反応しガス化され、不純物を除去されたのち、燃料電池に供給されて発電に用いられる。燃料電池から排出されるオフガスは、一酸化炭素および水素を含有しており、このガスはガスタービンに供給され、圧縮空気と混合、燃焼され、タービンを通して減圧され、発電する。ガスタービンから排出される排ガスは、まだ蒸気を発生させる

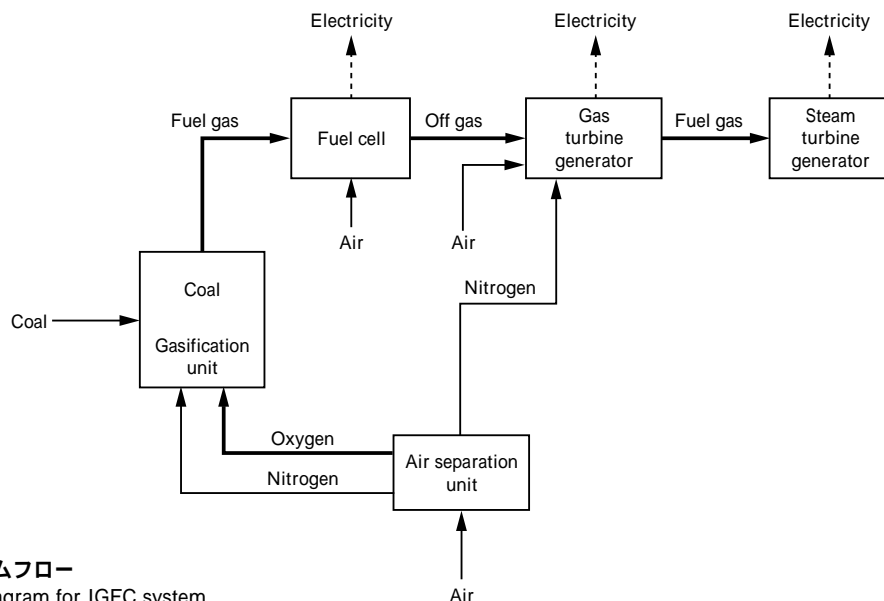


図1 IGFCシステムフロー

Fig. 1 Block flow diagram for IGFC system

\*都市環境・エンジニアリングカンパニー エネルギーエンジニアリングセンター 技術部

に十分な高温を有しており、この廃熱を利用して高圧蒸気を発生させ、蒸気タービンを駆動して発電する。このように三重に複合された発電システムの最終的な目標発電端発電効率は、60%に達すると試算されている。また、既存の石炭火力発電と比較して、炭酸ガス排出量も約30%の低減が見込まれており、環境に優しい発電システムでもある。

## 2. EAGLE プロジェクトの概要

EAGLE プロジェクトは、  
 燃料電池に適用するに最適な石炭ガス化炉の開発  
 燃料電池に供給可能なガス組成までガス精製するシステムの確立

を目的に、酸素吹き石炭ガス化設備（石炭処理量：150t/日、生成ガス量：約15 000Nm<sup>3</sup>/時）、ガス精製設備およびガスタービン発電設備（8 000kW）を設置し技術

開発を進めている。本技術開発は、経済産業省の直接補助事業および新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究事業として、電源開発㈱により進められている大規模プロジェクトである。当社が納入した空気分離設備は、石炭のガス化剤としてガス化設備に酸素を、また、石炭搬送およびシールガスとして窒素ガスを供給し、残部の窒素ガスも発電用ガスタービンに供給して、ガスタービン出口排ガス中NO<sub>x</sub>低減、および作動流体として利用される。この設備では、設備に供給された原料空気の75%以上のガスが製品として有効に利用されている。

## 3. EAGLE 用空気分離設備

図2にEAGLE用空気分離設備のプロセスフローダイヤグラム、図3に周辺設備との連係をブロックフローダイヤグラムで示す。

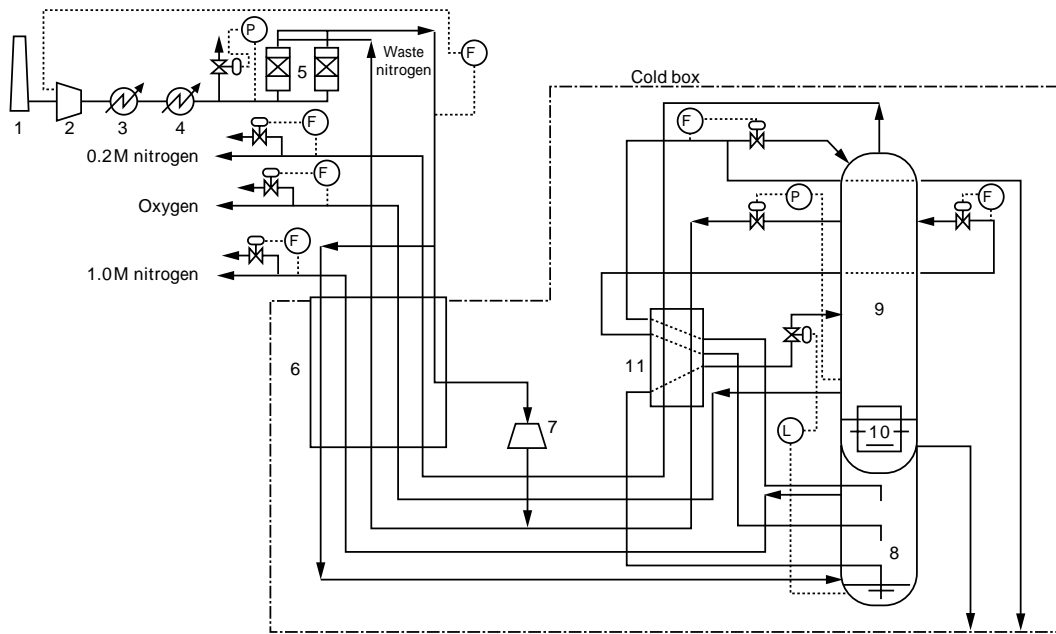


図2 空気分離プロセスフロー  
 Fig. 2 Process flow diagram for air separation unit

- |                       |                          |                          |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 Air intake stack    | 5 M/S absorber           | 9 Rectifier upper column |
| 2 Feed air compressor | 6 Main heat exchanger    | 10 Condenser-reboiler    |
| 3 After cooler        | 7 Expander               | 11 Super cooler          |
| 4 Refrigerator        | 8 Rectifier lower column |                          |

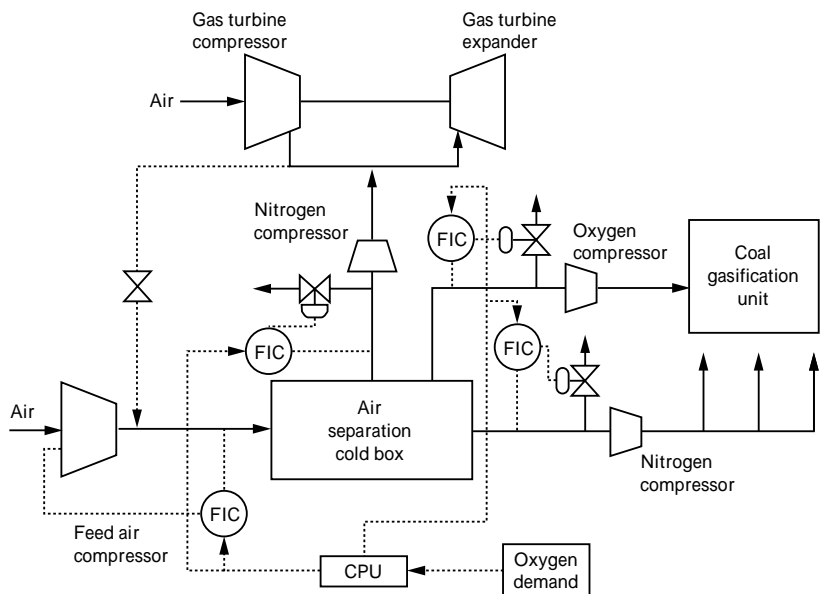


図3 周辺設備との連係  
 Fig. 3 Connection between air separation unit and surrounding equipment

### 3.1 空気分離プロセスのフローおよびその制御

#### 3.1.1 プロセスフロー

原料空気圧縮機 2 に吸入された空気は、ここで約 1.1MPa まで圧縮され、アフタクーラ 3、冷凍機 4 を通って約 25℃ まで冷却され、ついで M/S (Molecular Sieves) 吸着器 5 を通るあいだに、空気中の水分、CO<sub>2</sub> などの不純物が除去される。精製された空気は二つに別れ、その大部分は主熱交換器 6 を通って、その液化温度近傍まで冷却される。残部の空気も主熱交換器温端に供給され、約 -100℃ まで冷却されたのち、主熱交換器から膨張タービン 7 へ導かれ、ここで断熱膨張し、廃窒素ラインに合流する。この減圧によって生成する冷熱によって、装置全体が冷却され、低温が維持される。

主熱交換器の低温端を出た空気は、精溜塔下塔 8 底部にガス状で供給される。供給された空気は、精溜塔内を上昇するあいだに、流下してくる液体と接触して、次第に窒素リッチになり、下塔頂部では酸素含有量 5 000ppm 以下の高純度窒素となる。下塔頂部からは、この窒素の一部が抽出され、主熱交換器を通して常温まで加熱され、1.0M 窒素として送出される。残部の窒素ガスは、主凝縮器 10 に導かれここで液化され、下塔頂部に還流する。下塔頂部からは、還流した液体窒素の一部が抽出され、過冷却器 11 を通って過冷却されたのち、減圧弁により所定の圧力まで減圧されて、精溜塔上塔 9 頂部に還流液として供給される。残部の液体窒素は、下塔内を流下するあいだに次第に酸素リッチになり、塔底では約 38% の酸素を含む液体空気として抽出される。下塔の中部からは、酸素を約 17% 含む少量の液が抽出され、過冷却器、減圧弁を通して上塔 9 の上部に供給される。

下塔底部から抽出された液体空気は、過冷却器 11 を通って過冷却後、減圧されて上塔中部に原料として供給する。この液体空気は、塔内を流下するあいだに次第に酸素リッチになり、塔底では酸素濃度 95% 以上の高純度酸素となって、上塔底部に貯留される。上塔底部には主凝縮器 10 を設置しており、ここで、液体酸素は下塔頂部からの窒素ガスによって加熱、蒸発する。蒸発した酸素ガスの一部は、上塔下部より抽出され、主熱交換器を通り、常温の製品酸素として送出される。残部の酸素ガスは、塔内を上昇するあいだに次第に窒素リッチになり、塔頂からは酸素含有量 5 000 ppm 以下の高純度窒素ガスとして抽出され、過冷却器、主熱交換器を通して常温の 0.2M 窒素として送出される。上塔 9 上部からは低純度の窒素ガスを抽出し、減圧されたあと、過冷却器を経て膨張タービン出口ガスと合流し、主熱交換器を通して常温まで加熱される。そして M/S 吸着器の再生ガスとして使用し、大気へ放出される。

表 1 に空気分離設備の主要な仕様を示す。

#### 3.1.2 プロセス制御

本空気分離設備の通常の操業状態におけるプロセス制御はつぎのように行われる。

##### 1) 保冷箱入口空気

定格運転に近い流量における流量制御は、保冷箱に入る空気流量を計測し、原料空気圧縮機のインレットガイ

表 1 製品仕様

Table 1 Product specification

Name of flow	Flow rate (Nm <sup>3</sup> /h)	Pressure (MPa)	Purity (%O <sub>2</sub> )
Feed air	27 150	-	-
Oxygen	4 700	0.25	95
1.0M nitrogen	4 300	1.0	0.5
0.2M nitrogen	12 500	0.2	0.5

ドベーンを操作して行う。圧力は、精溜塔上塔圧力、製品酸素濃度、空気流量によって物理化学的に定まる。

定格流量の 85% 以下の流量領域においては、原料空気圧縮機出口側に設けられた空気の大気放出弁の圧力設定値を下げて、圧縮空気の一部を大気中に放出しながら、保冷箱入口空気流量を所定の値に制御する。

##### 2) 精溜塔下塔底部液面

下塔底部から抽出す液量を調整して行う。

##### 3) 下塔から上塔への還流液

流量を計測し、各ラインに設けられた減圧弁を制御して所定の流量に保つ。

##### 4) 1.0M 窒素

保冷箱出口流量を計測、大気放出量を調整して所定の値に保つ。

##### 5) 0.2M 窒素

保冷箱出口流量を計測、大気放出量を調整して所定の値に保つ。

##### 6) 製品酸素

保冷箱出口流量を計測、大気放出量を調整して所定の値に保つ。

##### 7) 精溜塔上塔圧力

上塔下部の圧力を計測し、廃窒素ガス流量を調整して、上塔圧力を所定の値に制御する。

### 3.2 周辺設備との関係と特殊制御

本空気分離設備と周辺設備との関係を図 3 に示す。

#### 3.2.1 製品負荷調整

製品酸素は、石炭ガス化設備に供給される。ガス化設備によって製造された生成ガスは、ガスタービン発電設備の燃料として供給される。したがって、ガスタービン発電設備の負荷が減少すれば、要求される燃料ガスも減少し、酸素要求量も減少する。また、0.2M 窒素は、ガスタービン発電設備のガスタービン出口排ガス NO<sub>x</sub> 低減、および作動流体の一部として供給され、その要求量は同様に変化する。

この発電設備側の負荷変化に対して、空気分離設備側も追従して、製品送出量を変化させることを求められた。もちろん、発電側の急速な負荷変化には、製品の一部を大気中に放出し、ガス化設備側やガスタービン側への製品供給量を調整する制御機構が設けられているが、トータル発電効率向上の観点から、空気分離設備の操業負荷そのものを変化させることが必要とされた。

制御の方法は、ガス化設備側からの酸素要求量から、保冷箱入口空気量、酸素流量、1.0M 窒素、0.2M 窒素、還流窒素流量などの所定量を演算により求め、制御器の設定値を徐々に変えて、所定値に到達させる。各部流量

は、この設定値の変化に追従して変化し、所定の値に達する。

### 3.2.2 精溜塔上塔圧力調整

本システム開発における最終的な開発ターゲットは、ガスタービン圧縮機により圧縮された空気の一部を空気分離設備の原料空気として使用する、いわゆる、抽気連係システムの確立である。

ガスタービン圧縮機の吐出圧は、ガスタービン発電設備の負荷に依存する。したがって、抽気連係に際しては、空気分離設備側の供給空気圧力を、ガスタービン圧縮機の空気圧に合致させて運転する必要がある。また、その圧力は、精溜塔上塔を調整することによってのみ可能である。図4に、精溜塔上塔圧をパラメータとした、下塔圧力と空気負荷の相関を示す。これによれば、下塔圧力のわずかな変化でも、空気負荷は大きく変化することがわかる。このことは、保冷箱入口空気圧をガスタービン圧縮機側の圧力に合致させるために、上塔圧力を調整するに際して、わずかな調整ミスによっても保冷箱入

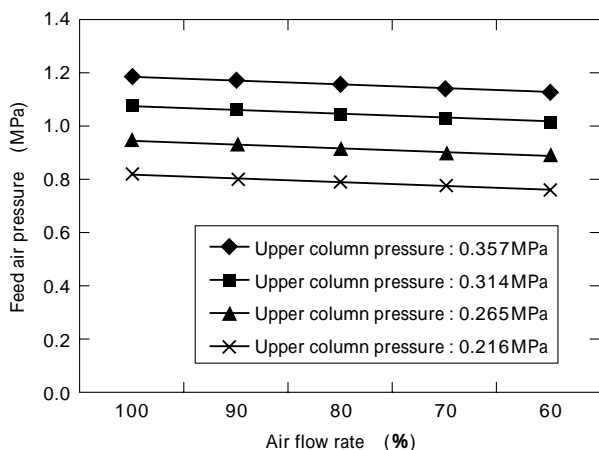


図4 空気負荷 VS. 原料空気圧  
Fig. 4 Air flow rate vs. feed air pressure

口空気流量は大きく変わり、精溜塔内にフラッディング現象などの重大なトラブルが発生する可能性があることを示唆しており、この問題をクリアする制御方法の確立が求められた。

図5に試験に用いられた精溜塔上塔圧力調整システムを示した。

## 4. 試験方法と結果

### 4.1 製品負荷調整試験

保冷箱入口空気流量を3%/分、5%/分、8%/分の速度で変化させ、これに伴う製品酸素流量、1.0M窒素流量、0.2M窒素流量、各還流液流量の変化速度、流量の安定性、精溜塔差圧の変動、各製品純度変化を観察した。図6に、8%/分の空気流量変化速度で100%負荷から85%負荷まで減少させた場合、および85%負荷から100%まで増加させた場合の、空気流量、各製品流量および製品純度の変化のトレンドグラフを示す。これによれば、各流量ともに大きな変動もなく所定の値まで変化していき、製品純度への影響も見られなかった。また、精溜塔差圧の変動の観察結果でも、フラッディングなどの異常な現象は見られなかった。

### 4.2 精溜塔上塔圧力調整試験

原料空気圧縮機吐出放風弁を開き、少量の空気を大気中に放出しながら、原料空気圧力を制御状態に保ち、保冷箱入口空気流量を安定させる。原料空気圧力を  $P_s$  だけ変化させ、同時に上塔圧力を  $P_u = P_s$  変化させる。上塔圧力変化量の  $P_u$  は原料空気の圧力変化量  $P_s$  に対応する理論計算値である。この操作によって、原料空気圧力、上塔圧力ともにわずかに変化する。圧力の変化とともに、保冷箱入口空気量も変化し、その結果、保冷箱入口流量設定値から偏差を生じる。この変化に対して、上塔圧力設定値をわずかに調整してその偏差を解消し、

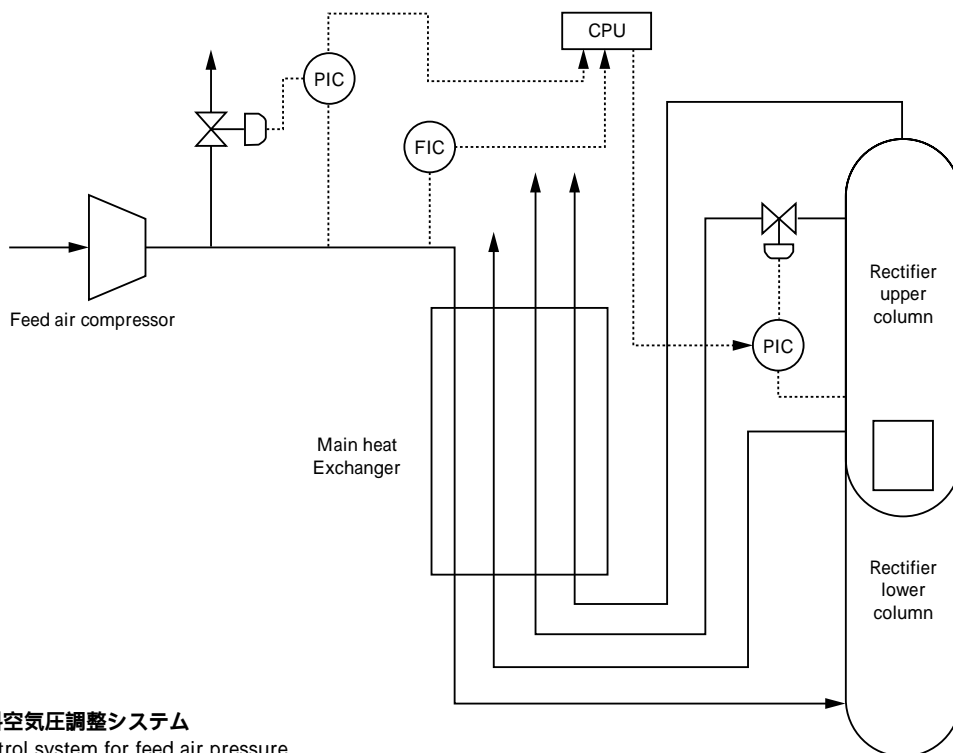


図5 原料空気圧調整システム  
Fig. 5 Control system for feed air pressure

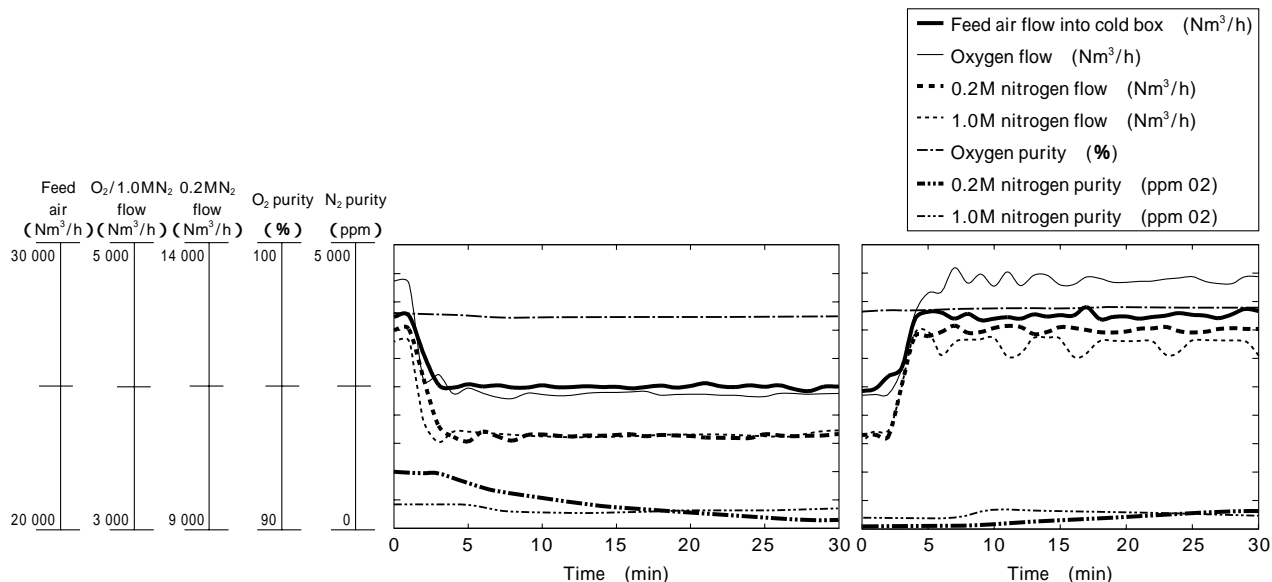


図6 製品負荷調整と製品純度  
 Fig. 6 Load change and products purity

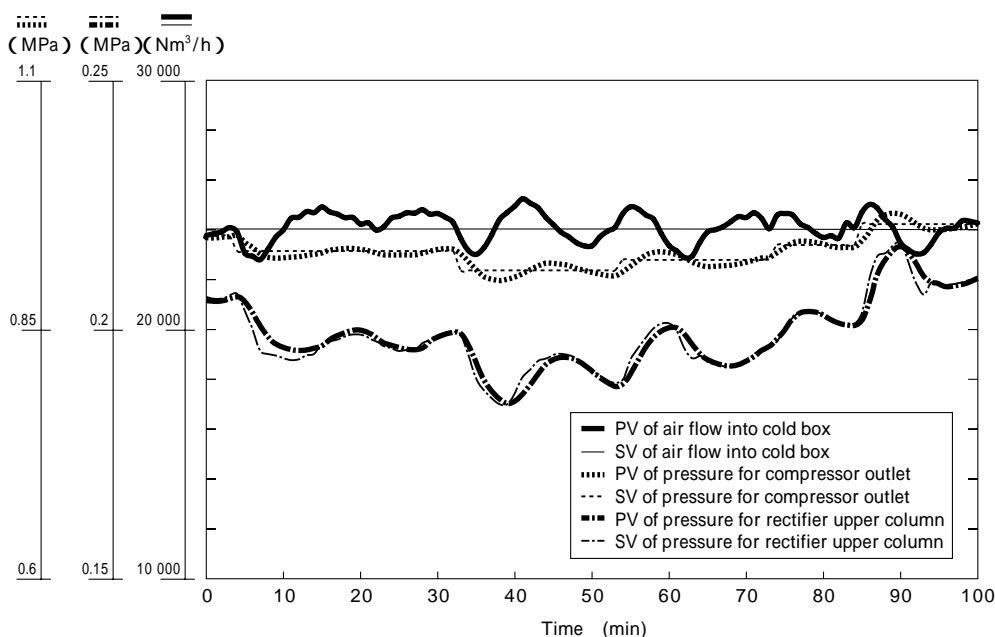


図7 空気圧変化に伴う上塔圧調整による空気流量制御

Fig. 7 Feed air flow control by rectifier upper column pressure

保冷箱入口空気流量を所定の流量に制御する。本ロジックをもとに手動操作による事前確認試験を実施し、原料空気圧力 1.09MPa から 0.84MPa の範囲において良好な結果が得られることを確認した。さらに、自動制御による原料空気圧力に 30kPa のステップ変化を与え、製品純度に影響を与えない良好な追従性が得られることを確認した。

図7に、原料空気圧力にステップ状の変化を与えた場合の上塔圧力調整による空気流量制御のトレンドグラフを示す。

むすび = EAGLE パイロットプラント用空気分離設備において迅速負荷追従性および精溜塔上塔圧力調整の試験を行い、IGFC システム用空気分離設備に要求される性能をすべて満足する結果を得た。すなわち、負荷追従性においては、8% / 分という高速追従性能を実証し、また、

精溜塔上塔圧力調整試験においては、原料空気圧力 1.09MPa から 0.84MPa という広い圧力範囲において、製品純度に悪影響を与えることなく原料空気圧力を自由に調整できること、および圧力の突然の変化に対する良好な追従性が実証された。これらの成果によって、空気分離設備が、IGFC システムの一翼を担うに十分な操作性を有することが実証され、抽気連係システム実現に向けて大きく前進したものと考えられる。

本試験実施に際して、(株)日立製作所関係各位、電源開発関係各位のご厚意と、絶大なご協力をいただいた。深甚の謝意を表す。