

酸素ガス需要変動吸収装置を有する高効率 酸素プラント*

川崎製鉄技報
25 (1993) 1, 53-58

High-Efficiency Oxygen Plant with the Flexible Oxygen Supply System



菅原 勝幸
Katuyuki Sugawara
千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室



天野 忍
Shinobu Amano
千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(掛長)



清水 益人
Masuto Shimizu
千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(課長)



榎戸 盛一
Moriichi Enokido
千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(課長補)



楠 光裕
Mituhiko Kusunoki
千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査(課
長)



本田 秀幸
Hideyuki Honda
日本酸素(株)プラント製
作所 エンジニアリン
グ部 ASP グループ チ
ーフ

要旨

千葉製鉄所では、酸素・窒素供給の安定化、電力原単位の向上、アルゴンの高効率回収を目指し、また、既設酸素設備のリフレッシュを兼ねて新酸素プラントの建設を実施した。本プラントでは、酸素余剰時に酸素を液化貯蔵し、酸素不足時に液化貯蔵した酸素を気化、供給することが可能な酸素ガス需要変動吸収装置を具備させ、製鋼等の間欠操業に起因する酸素ガス放散のミニマム化を可能とした。同時に、プラントの制御を全面的にデジタル化し、プラントおよび圧縮機の自動運転とワンタッチ起動を可能とすることにより、運転の合理化を図った。本プラントは1992年3月に営業運転を開始し、電力原単位、アルゴンの回収率等の性能およびプラントの自動化について所期の目標を達成し順調に稼動している。

Synopsis:

No. 12 oxygen plant started operations at Chiba Works for the purpose of stabilizing the supply of oxygen, reducing power consumption, producing argon efficiently and renewing old oxygen plants. New techniques such as flexible oxygen supply system and remote computer control system were adopted. Especially, the flexible oxygen supply system was introduced into steel works for the first time in Japan. This system enables the oxygen production rate to change widely by repeating liquefaction and vaporization of oxygen, and it leads to minimizing oxygen venting for many variations of the time-changing oxygen demand. This plant started commercial operation in March 1992, and it achieves 0.391 kW·h/m³-norm-O₂ of power consumption rate of oxygen production and 88.2% of argon recovery efficiency.

1 緒 言

近年、一貫製鉄所における酸素製造設備は、従来からの役割としての高炉・転炉への酸素の供給のみならず、冷延工場における高品質化対応および所内保安用としての窒素供給、自家消費、外販用のアルゴンの供給等、その役割を増しつつある。同時に、酸素・窒素のより一層の安定供給が要求されてきている。

一方、酸素プラント自身は近年の高効率化、自動化の要求に応え、電力原単位の向上、アルゴンの高効率な回収が可能となった。さらに、自動制御装置の進歩による運転監視の合理化が実現している。しかしながら、酸素の使用は、その主な需要先である製鋼工場において複数の転炉が間欠操業を行うので需要変動が激しく、やむなく酸素ガスの放散が生じている。そのため、酸素の実使用量

に対する原単位からみると、必ずしもプラントの効率が改善されていなかった。

今回、千葉製鉄所では、これらの状況を踏まえ、

- (1) 旧式プラントのリプレースにより、酸素・窒素の安定供給およびアルゴンの高効率な回収を実現する
- (2) 酸素プラントの遠隔自動制御を実現し、運転の簡素化を図る
- (3) 酸素需要の日間変動に効率的に対応する設備を設置し、実質的なプラントの低原単位化を図る

等を狙いとして、酸素ガス需要変動吸収装置を有する高効率酸素プラントを導入し、酸素・窒素供給の安定化、電力原単位の低減および運転の合理化を実現した。

本論文では同プラントの設備概要を紹介し、技術の特徴、自動化の内容について述べる。

* 平成4年12月11日原稿受付

2 プラント導入の経緯と背景

2.1 導入の経緯

近年、千葉製鉄所では新規設備の稼動、冷延工程における鋼板の高品質化にともない、酸素・窒素の需要が漸増する傾向にある。これら需要に対しては、その供給の安定化が要求されるようになってきた。一方、既設酸素プラントは稼動以来15年以上を経過していること、さらに、酸素・窒素需要の増加に対しては、将来的にプラントの能力不足が予想される状況となってきた。

本12号酸素プラントは、これらを背景に建設を決定し、1990年7月より建設を開始した。

2.2 導入技術の概要

12号酸素プラントの導入にあたっては従来技術と比較し、次のような項目に着目した。

2.2.1 モレキュラーシーブス吸着器の採用とアルゴンの高収率回収

最近の高効率酸素プラントには不可欠であるモレキュラーシーブス吸着器による原料空気の前処理方法を採用した。この方法は従来の可逆熱交換器方式の酸素プラントに比較し、大量の製品窒素ガスの回収が可能となるとともに、設備の信頼性の向上が期待できる。

さらに、本吸着器の採用によるアルゴン純度の安定化が可能となり、アルゴン製造プロセスでの回収技術とあわせてアルゴン収率を大幅に向上させることができる。

2.2.2 酸素ガス需要変動吸収装置の採用

本プラントのもう一つの大きな特徴は、酸素ガス需要変動吸収装置（以後、変動吸収装置と記述する）の導入である。この変動吸収装置は酸素の液化貯蔵、気化送給を繰り返し、酸素の放散を最小化することにより、プラント消費電力の低減を目標としている。

従来の製鉄所の酸素設備では圧縮機の出側に高圧のガスホルダーが備わっており、酸素使用量の変動をホルダーの圧力変化で吸収していた。ガスホルダーでは数十分オーダーの使用量の変動を吸収することは可能であるが、数時間オーダーの変動には対応できない。そのため、酸素プラントの負荷を変更することで対処してきた。

この負荷変更の際は同時に酸素、窒素、アルゴンの発生量や純度の調整を行わなければならない、負荷変更が多い場合は操業上の安定性を欠くという難点がある。また、酸素プラントの能力はピーク使用量にあわせて決定するため、従来方式のプラントを導入した場合には、供給量が過大になる可能性があった。さらには、プラント自身の低負荷操業にも限界があり、酸素需要が減少した時点で酸素放散が発生せざるを得ない状況があった。

これらの問題点に対して、変動吸収装置はプラントの負荷を一定にしたまま酸素送給量を任意に変更させることができるので、酸素の放散を極力少なくし、実質的な酸素使用電力の低減が可能となる。

2.2.3 CRTオペレーションの導入

本プラントでは小人数による効率的な運転を指向し、プラントの制御を全面的にデジタル化して、CRTオペレーションを導入した。プラント、圧縮機等の機側の起動盤を極力排除して、これらの運転操作を中央のCRTからワンタッチで実施できるようにしている。

3 酸素製造設備

3.1 設備概要

12号酸素プラントの仕様をTable 1に示す。

また、本プラントのレイアウトとプラントの全景をそれぞれFig. 1およびPhoto 1に示す。各圧縮機は建屋内に配置され空気液化分離装置本体（精溜筒）、循環水設備、アルゴン精製設備等は屋外に設置されている。

Table 1 Specifications of main equipment

Item	Specification
Air separation plant including crude and pure argon columns	1 unit
Product	
・ Oxygen gas	26 000 m ³ -norm/h (2 000 mmAq)
・ Nitrogen gas	48 000 m ³ -norm/h (5 000 mmAq)
・ Liquid argon	1 050 m ³ -norm/h
・ Liquid nitrogen	2 000 m ³ -norm/h
Feed air compressor	128 000 m ³ -norm/h (0.51 MPa) × 11 000 kW
Argon purification unit	1 unit
Flexible oxygen supply system	1 unit
・ Liquid nitrogen storage tank	1 unit (135 t)
・ Liquid oxygen storage tank	1 unit (163 t)
・ Low pressure expansion turbine	11 154 m ³ -norm/h (0.57 MPa→0.049 MPa)
・ Middle pressure expansion turbine	11 154 m ³ -norm/h (2.43 MPa→0.59 MPa)
Liquefier unit	1 unit
・ Recycle nitrogen gas compressor	Feed gas 3 330 m ³ -norm/h Recycle gas 21 300 m ³ -norm/h } × 2 350 kW
・ Cold expansion turbine	10 340 m ³ -norm/h (3.86 MPa→0.47 MPa)
・ Warm expansion turbine	7 350 m ³ -norm/h (4.45 MPa→0.43 MPa)
Gas compressor	
・ Oxygen gas compressor	31 000 m ³ -norm/h (2.45 MPa) × 4 700 kW
・ Nitrogen gas compressor	25 000 m ³ -norm/h (2.45 MPa) × 4 100 kW
・ Nitrogen gas compressor	20 000 m ³ -norm/h (0.54 MPa) × 1 850 kW
Argon storage tank	1 unit (200 t)

Fig. 2にプラント系統図を示す。本プラントの原料である空気は原料空気ろ過器で除塵され、原料空気圧縮機で所定の圧力まで昇圧後、水洗冷却塔において再度、除塵・冷却される。処理後の空気はモレキュラーシーブス吸着器で水分と炭酸ガスを除去した後、コールドボックス内に入る。不純物が除去された空気は、主熱交換器で低温の廃ガスおよび製品ガスにより冷却・液化され、精溜筒内へ導入される。精溜筒は上部筒、下部筒の2筒式であり、下部筒では上部筒へ供給する液化空気及び環流用の液化窒素を製造する。上部筒では還流液と上部筒下部からの上昇ガスとの接触・精溜作用により、酸素ガスと窒素ガスを製造すると同時に、アルゴンの原料ガスを粗アルゴン筒へ供給している。

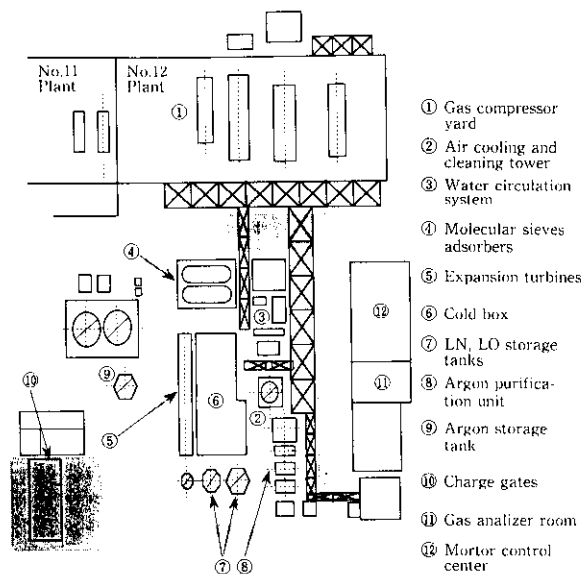


Fig. 1 Plant layout



Photo 1 General view of No. 12 oxygen plant

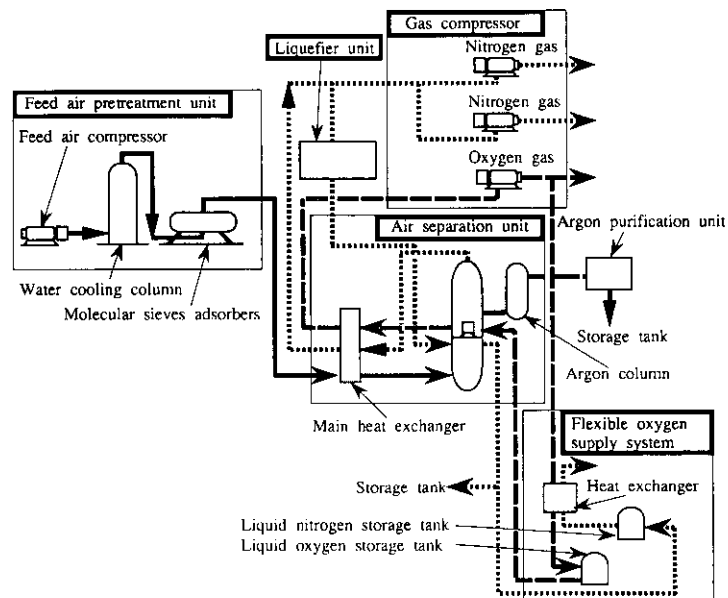


Fig. 2 Flow diagram of No. 12 oxygen generation plant

なお、粗アルゴン筒で精溜したガスは、アルゴン精製設備で精製後、高純アルゴン筒にて高純度化され製品として抽出される。

また、本装置は窒素液化装置を具備し、液化窒素の製造に寄与することができる。

3.2 設備の特徴

12号酸素プラントは製品ガス分離の高効率化、プラントの全自動化を目標とし以下の特徴を備えている。

3.2.1 モレキュラーシーブス吸着器の採用

今回、大型の酸素プラントでは初めてのモレキュラーシーブス吸着器を利用した原料空気の前処理方法を採用した。堅型の吸着器を設置するのが一般的であったが、原料空気の圧損を低減するため、横型に設置した。

原料空気の前処理方法について、Fig. 3 に本方式と従来の可逆熱交換方式との比較を示す。

本吸着器の採用により、操業面では、

(1) 熱交換器再生用の窒素を削減でき、製品窒素の回収率が向上

する。

(2) 熱交換器の切替がなくなることにより、精溜筒内の圧力変動を抑制し製品ガスの収率を安定させることができる。

また、保全面では、

(1) 熱交換器切替時の熱交換器自身にかかる機械的負荷がなくなり、プラント寿命を延長する効果がある。

(2) コールドボックス内部の機器を削減でき、メンテナンスを簡素化できる。

以上のような改善が可能となった。

3.2.2 アルゴンの高収率回収

最近の精溜技術の進歩により、精溜筒本体は準完全分離（廃窒素ガス中の酸素分が100 ppm以下を準完全分離と称する）で設計され精溜筒の上部よりアルゴン分を微量しか含まない高純度窒素を抜きだし、下部より最少限のアルゴン分しか含まない高純度酸素を抜き出すことになるので必然的にアルゴンの成分は高収率で精溜筒の中間部より粗アルゴン筒をへて抜き出されることになる¹⁾。また、アルゴンを高収率で安定的に回収するためには、原料アルゴンの純

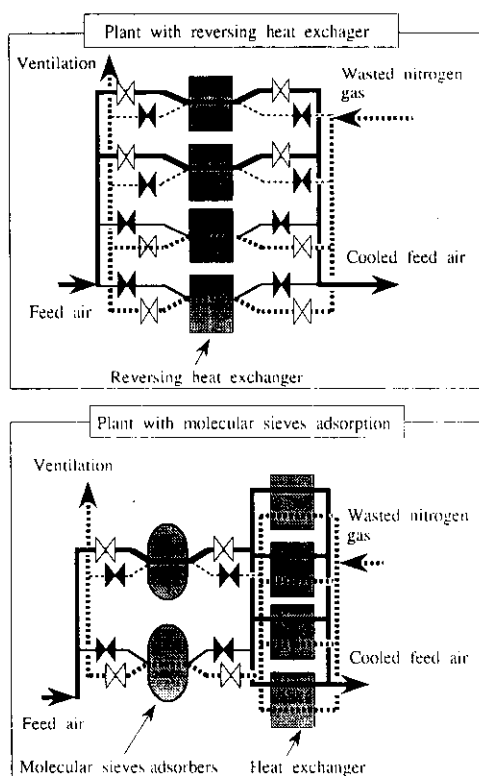


Fig. 3 Pre-treatment of feed air with molecular sieves adsorption

度を安定させることが必要である。本装置では、酸素純度と原料アルゴン純度を製品ガス流量により同時に自動制御させる方法を採用した。この方法は、2つのパラメーターのうち設定値に対して偏差の大きいものが制御の主体となり、酸素純度を乱さずに原料アルゴン純度を規定値内におさめる。

アルゴン収率は88%以上を目標としている。

3.2.3 酸素ガス需要変動吸収装置

酸素ガス需要変動吸収装置の概念を Fig. 4 に示す。酸素余剰時

に酸素ガスを液化貯蔵し、逆に不足時に貯蔵された液化酸素を気化送給するものである。

空気液化分離器は酸素ガス製造 26 000 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ で一定負荷の運転を継続する。液化酸素緩衝貯槽より、この分離器の主凝縮器へ常に一定量 5 000 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ の液化酸素を注入、気化させ、製品酸素ガスとともに器外へ送出する。すなわち、分離器から発生した後、酸素圧縮機で圧送される酸素量は 31 000 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ で一定となる。

一方、液化酸素の注入で主凝縮器にて凝縮された液化窒素 4 800 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ を常時、一定量抽出し、液化窒素緩衝貯槽に貯蔵する。常に、このプロセスを継続することで分離器本体に影響を与えず、大幅に酸素送給量を変更することを可能とした。

酸素需要量がピーク時には、酸素圧縮機で圧送された酸素ガスを需要先に全量供給する。また、酸素需要量がピーク時を下回る場合は、余剰分の酸素ガスを本装置内に導入して液化窒素中間貯槽内の液化窒素と熱交換・液化し、緩衝貯槽内に貯蔵する。本装置は酸素ガスを 0~19 000 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ の範囲で液化吸収できる。

本装置の構成機器の機能について述べる。

(1) 液化酸素・液化窒素緩衝貯槽

変動吸収を実施する際の酸素ガスを液化貯蔵するための緩衝貯槽と、この酸素ガスの液化用の冷熱源を貯蔵し、熱交換時の熱的バランスをとる液化窒素の緩衝貯槽からなる。緩衝貯槽の容量は酸素需要の変動パターンにより決定され、数時間オーダーの需要変化に対応できる。

(2) 液化窒素中間槽

変動吸収装置の稼動時、停止中にかかわらず、常に一定量の液化窒素を確保し熱交換器を予冷する。よって、速やかな装置の起動が可能となると同時に、急激な需要の変化にも対応できる。

(3) 膨張タービン

中圧、低圧膨張タービン2基を備え、液化窒素中間貯槽から気化される窒素ガスの圧力エネルギーを回収することで、冷熱を発生させている。通常、1 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ の酸素ガスを液化するには約 1.1 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ の液化窒素が必要であるが、これらタービンによる冷熱の発生で 0.93 $\text{m}^3\text{-norm/h}$ の液化窒素消費量に抑えること

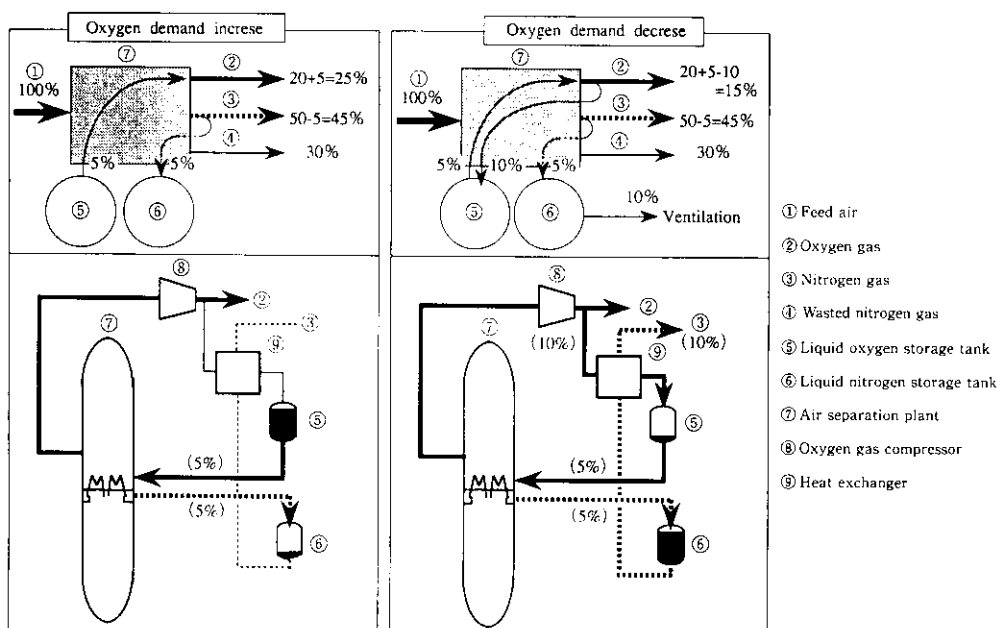


Fig. 4 Concept of flexible oxygen supply system

ができる。

本装置は DCS (distributed control system) からの設定により運用され、酸素送給量は $12\,000 \sim 31\,000 \text{ m}^3\text{-norm/h}$ の範囲で変更できる。

3.2.4 自動化と CRT オペレーションの採用

酸素プラントの遠隔自動化、統合管理を目的とし、監視制御等のシステムは中央からの操作方式を採用した。Fig. 5 に全体システムの構成を示す。

プラントの運転操作部は設定変更ボタンを割り付けた CRT 画面、CRT 附属のオペレーターステーションからなり、プロセスの制御部は制御ステーション、DCS リレー盤、振動モニター盤より構成されている。

制御システムの設計は以下の基本的考え方をもとに行った。

(1) 最少限のオペレーターによる運転

将来の省力化を目指し、既設プラントを含め遠隔で最少の運転員で操業可能なよう基本運転方案を次のように定め自動化を実施した。

(a) 定常運転時のプラントは原則的に無人運転とし、アラーム吹鳴時あるいは設定変更時のみオペレーターが介入する。すなわち、確認作業を主体とする制御システムを構築する。

(b) 低温状態からのプラントの立ち上げは、起動準備の確認から起動完了まで中央の操作室において、1名のオペレーターにて可能とする。常温状態からの立ち上げ・レーティングアップは、機側での起動準備を1名とし、準備完了後は低温状態からの立ち上げと同様に、操作室1名にて可能とする。プラントの起動から粗アルゴンガス発生までの一連の制御シーケンスを全自動化とする。

(2) 酸素送給量の遠隔設定とプラントの自動調整

鉄鋼のプロセスコンピュータとゲートウェイユニットを介して、酸素需要量設定コンピュータに製鋼の稼動状況を通信する。酸素需要量設定コンピュータは常に通信を受け取り、酸素使用量とその変更時刻を演算し、下位の DCS に演算値を設定する。本コンピュータにより予測される酸素使用量に見合った送給量の変更が可能なるよう変動吸収装置を稼動させる。

また、プラント本体の酸素発生量の変更は負荷 $80\% \sim 100\%$ の間を 30 分以内に可能とし、これにともなう空気液化分離装置内の物質バランスも自動調整することができる。

(3) 製品ガス分析の自動化

製品ガス分析には、5 台のガスクロマトグラフィーを採用している。これらの分析の周期管理とデータ処理は専用のパソコンを用いて行う。さらに、処理データを DCS に伝送しプラントの制御と監視に使用する。

(4) 液化ガス出荷設備の自動化

液化酸素、窒素、アルゴンの払出し・受入れ設備は運転準備からタンクローリー車にガスを充填するまでの操作を自動化し、工業用テレビによる出荷の監視も可能となっている。

(5) 操業の効率管理

今回の制御システムは、記録計を一切装備せず、DCS の CRT トレンドによる管理とした。したがって、データの記録が残らないため、操業記録としては日報・月報および性能確認表の 3 種類の帳票を作成した。帳票の作成にはデータをランク付けし、ほとんど変更の生じないプロセスの管理データは DCS で、用役管理、原単位管理はプロセスコンピュータで、経営情報管理はビジネスコンピュータで整理することとした。

保全性向上のため、設備ごとに DCS の制御ステーションを独立

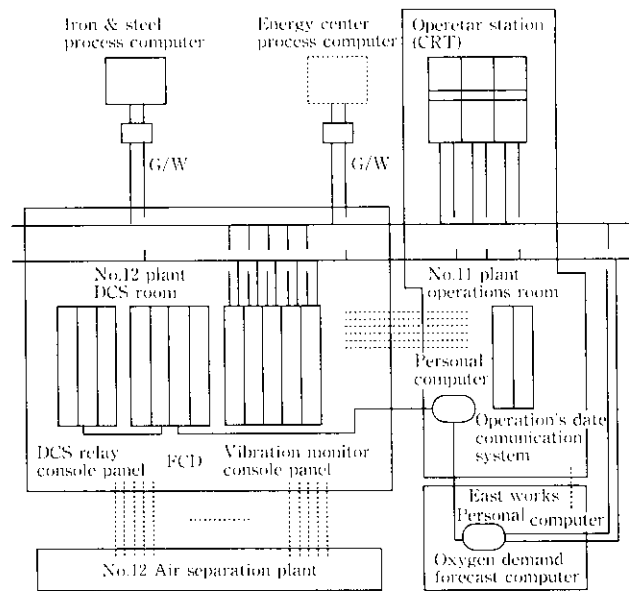


Fig. 5 Configuration of computer system

させ危険の分散化をしている。

電源は無停電電源装置を設置することで 2 重化を図り、保安インタロック機能は DCS 側のソフトで組むことはせず、電気設備側のハード構築を基本とした。

3.2.5 大型電動機への全電圧始動方式の採用

従来、一般的に酸素プラント等の大型圧縮機のモーターは、起動時の突入電力を抑えるため始動装置を有している。この始動装置はモーターとは別装置であるため設置スペースが必要である。さらに、メンテナンスを実施する必要があった。

今回は、大型電動機に低始動電流型同期電動機を採用することで、始動装置のいらぬ全電圧始動方式の導入が可能となった。これにより、省スペース、省メンテナンスを図るとともに、コスト削減を実施している。原料空気圧縮機、高圧窒素圧縮機、酸素圧縮機の電動機に、この技術を導入した。

4 試運転結果

1991 年 10 月より圧縮機の単独試運転を開始し、11 月下旬にプラント本体の立ち上げを行った。1992 年 3 月にはプラント全体の性能確認運転を実施した後、営業運転に入った。

4.1 プラント自動増減運転

Fig. 6 に負荷変更試験の結果を示す。プラント本体への原料空気導入量の減量・増量を行うことにより、製品酸素ガス発生量を 100% 負荷 ($31\,000 \text{ m}^3\text{-norm/h}$) から 80% 負荷 ($24\,800 \text{ m}^3\text{-norm/h}$) へ減量する試験を行い、逆に 80% 負荷から 100% 負荷への復帰試験を実施した。結果、十分な追従性を示している。この間、アルゴンの純度は安定しており、良好な結果を示した。

4.2 変動吸収試験

本プラントの特性および能力を実証することを目的として、変動吸収装置の稼動試験を Fig. 7 に示す日間変動パターンに沿って実施した。Fig. 8 に変動吸収装置稼動試験時の各プロセスの状態を示す。

本装置稼動時は常時 $5\,000 \text{ m}^3\text{-norm/h}$ の液化酸素を精溜筒上部筒

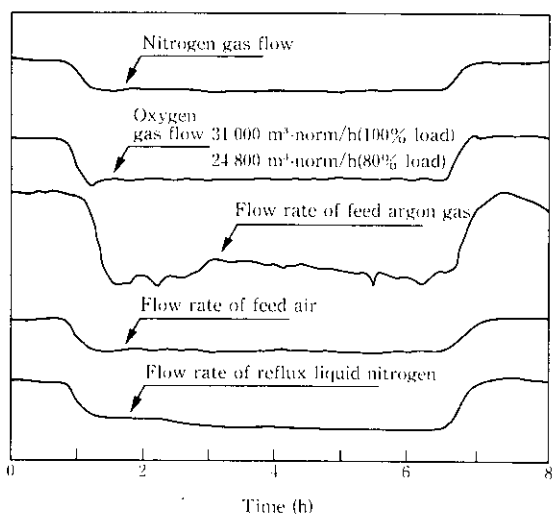


Fig. 6 Load change test results

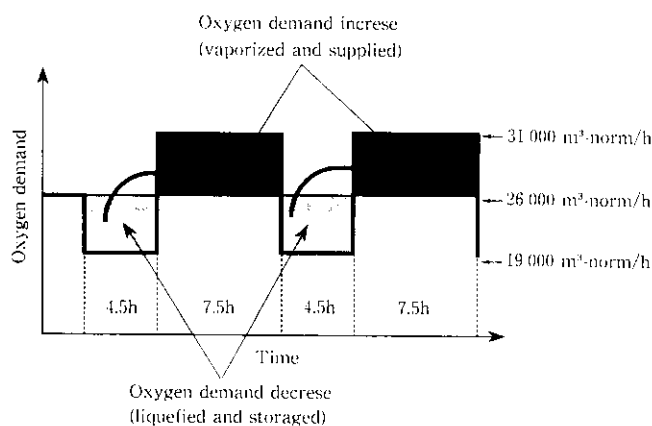


Fig. 7 Daily demand pattern

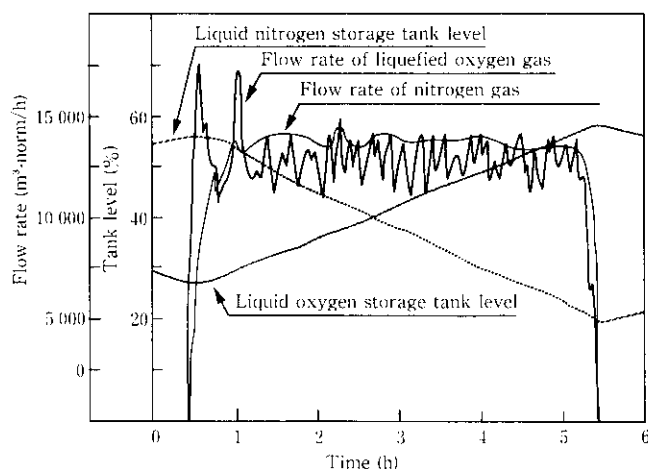


Fig. 8 Process conditions in flexible oxygen supply system drives

Table 2 Air separation unit test results

Item	No. 12 plant		No. 11 plant
	Test result	Design	
Production			
Feed air (m³-norm/h)	128 000	128 000	136 000
Oxygen gas (m³-norm/h)	26 500	26 000	25 000
Nitrogen gas (m³-norm/h)	61 400	48 000	25 000
Purities of oxygen gas (%)	99.92~99.97	99.6	99.8
Impurities of nitrogen gas (ppm O₂)	0.16~0.17	1.0	0.3
Power consumption/O₂ gas (kW·h/m³-norm)	0.391	0.383	0.419
Oxygen gas recovery efficiency (%)	20.7	20.3	18.4
Nitrogen gas recovery efficiency (%)	88.2	88.2	43.5

の外乱はなく、プラントは安定操作を維持できることを実証している。

プラントの負荷変更と本装置を同時に使用することで、広範囲な需要の変動を吸収できる。

4.3 性能確認運転

Table 2 に本プラントと当社、既設酸素プラント（可逆熱交換器方式）との原単位の比較を示す。原料空気中からの製品アルゴンの採取量は試運転時に 88.2% を記録した。

変動吸収試験時および負荷変更試験時においても、粗アルゴン筒へ導入する製品アルゴンの原料ガス純度に変動を与えず、安定して高効率な製品ガスの採取が可能である。これは原料空気前処理方法の改善によって、廃窒素ガスへの製品アルゴン原料ガスの損失を抑制できたこと、さらには、熱交換器の機械的切替がなくなり、精溜筒への変動要因が減少したことなどが大きく寄与している。

5 結 言

所内の需要の安定化、既設プラントのリプレースを目的として 12 号酸素プラントを建設した。以下に新技術導入により達成した効果、有効性について述べる。

- (1) 酸素需要の効率化を目的に導入した酸素ガス需要変動吸収装置を利用し、プラントの最適運転が可能である。
- (2) プラントの運転に各種自動化を取り入れ、オペレーターの負荷軽減を実現した。また、運転技術における運転員の個人差を極力排除できた。
- (3) 本プラントは酸素製造原単位 0.391 kW·h/m³norm, 製品アルゴン収率 88.2% を記録し、計画の性能を達成した。

今後はこれら新技術を活用し、さらなる操業改善を行い、プラントの有効利用を図って行きたい。

参 考 文 献

- 1) 本田秀幸, 榎井義行: 日本酸素技報, 9 (1990), 40-45

に導入し、気化させている。この状態で、酸素ガス最大送給時および 19 000 m³-norm/h の送給時においても上部筒で精溜し発生する酸素ガスの純度は安定しており、当初の機能を満足した。また、この間の緩衝貯槽内の液化酸素と液化窒素のバランスについては、酸素ガスと液化窒素の熱交換比率が約 1:1 で平衡しているので、ほぼ計画どおりとなっている。すなわち、本装置の稼動による精溜筒へ