
ガス深冷分離装置

大容量空気分離装置	89
富士製鉄株式会社室蘭製鉄所納 10,000 Nm ³ /h 空気分離装置運転実績について	98
TO-Hプラントについて	107
最近の窒素洗浄装置	113
エチレン分離装置について	117
コークス炉ガス分離装置	122
極低温における気液平衡測定	126

大 容 量 空 気 分 離 装 置

Tonage Oxygen Plant

松 本 嘉 雄*
Yoshio Matsumoto

内 容 梗 概

最近の6年間における酸素の使用量はわが国においても爆発的な増加を示し、そのほとんどが大容量空気分離装置により生産されている。本文ではこの大容量化した装置の

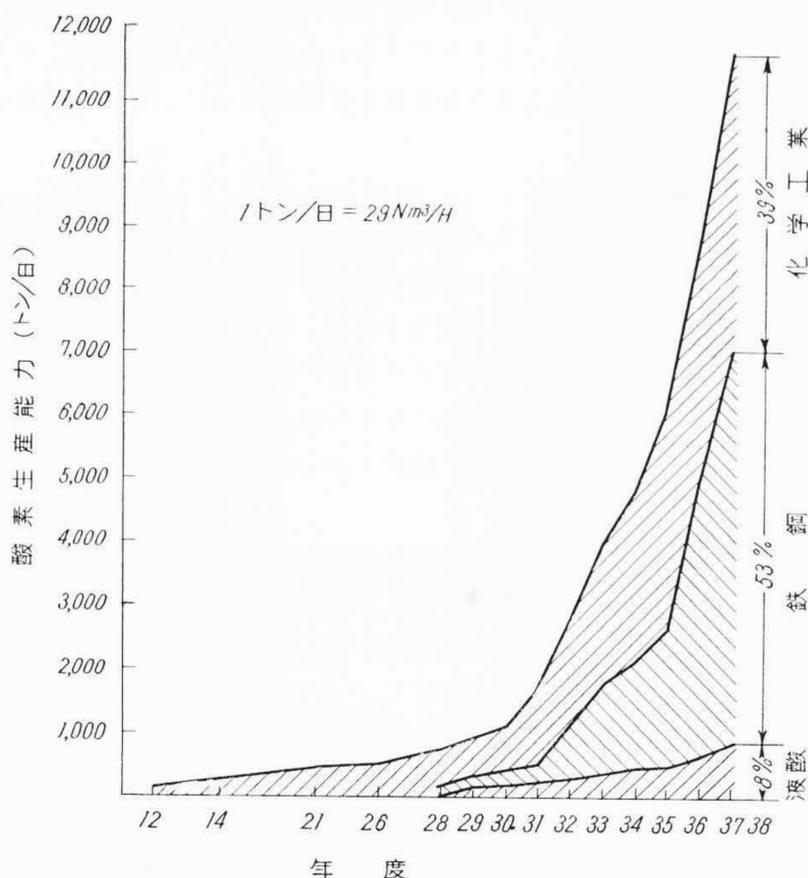
- (1) 具備すべき条件
- (2) 構成機器の説明と運転保守上の問題点
- (3) 最近の大形装置の性能
- (4) 装置の今後の問題点

についてその概要を述べている。

1. 結 言

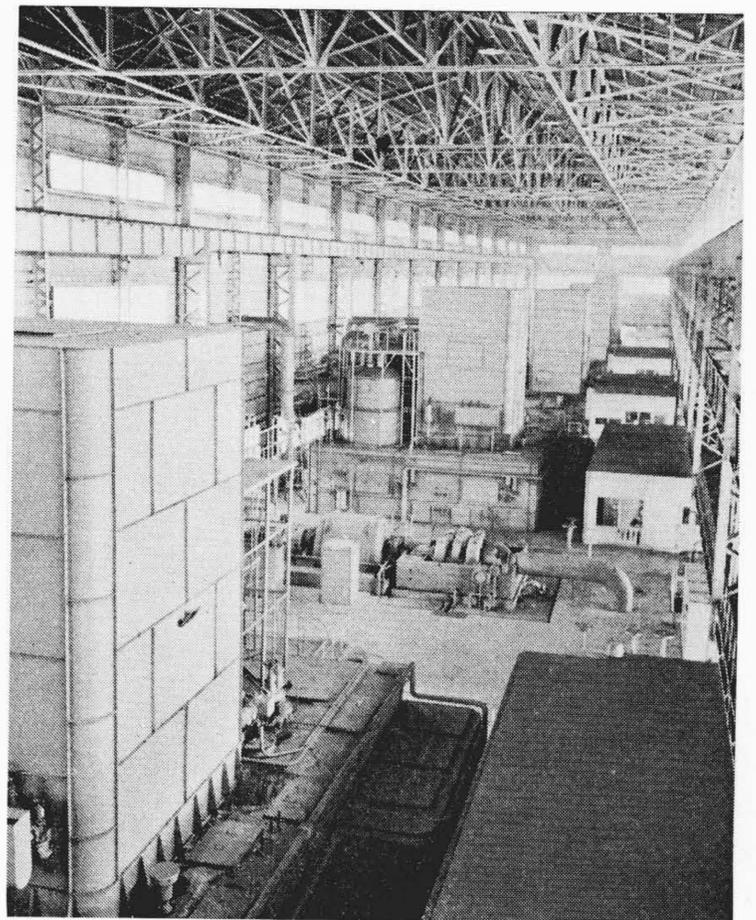
日本における酸素の使用量の推移を用途別に示すと第1図のようになる。これによればわが国の酸素は昭和31年頃より急速に発展したことを示している。またこれ以前の装置は酸素能力100Nm³/h以下が多数を占め、1,000 Nm³/hを越える大形装置は6~7基⁽¹⁾にすぎず、それも旧リンデ・フレンケル形で酸素1Nm³当たりの電力原単位の高いものであった。高効率の膨張タービンの出現により空気の冷却液化技術が改善され、純然たる全低圧方式の空気分離装置第1号が実動を開始したのは昭和31年3月当時の別府化学株式会社においてである⁽²⁾。以後主として酸素製鋼の本格化と化学肥料の水素源転換による合理化、天然ガス化学の台頭などにささえられて酸素の需要は急伸した。昭和37年末における日本の酸素生産能力は、実に11,700トン/日(約340,000 Nm³/h)に達し、その用途も製鋼用53%、化学用39%、液体酸素8%の割合となっている。すなわちこの液体酸素を除いた90%の酸素が大形空気分離装置によって生産されているという状況である。

なおこの表には含ませなかったが、100 Nm³/h以下の小形装置に



第1図 日本の酸素生産能力すう勢

* 日立製作所日立工場



6,000 Nm³/h TO×2基(手前)
4,500 Nm³/h TO×3基
総生産量 酸素 900 トン/日
純酸素 800 トン/日

第2図 製鉄用TOプラント(八幡製鉄所戸畑酸素工場)

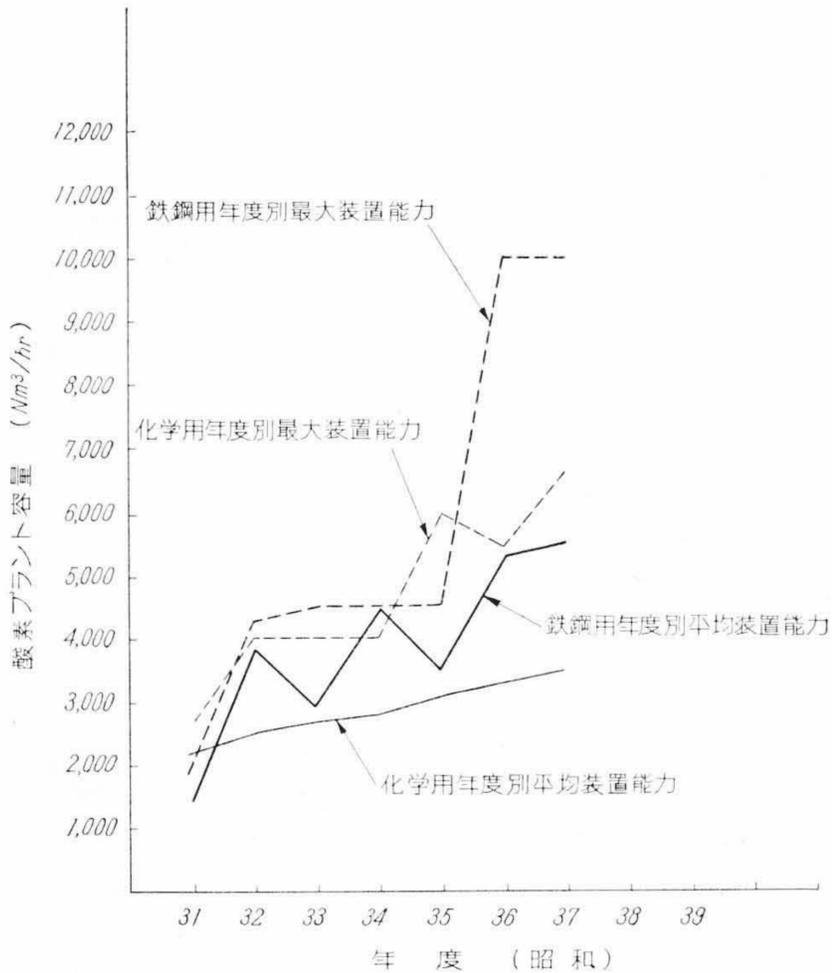
による酸素量は200トン/日(約6,000 Nm³/h)で国内全酸素量の1.7%程度にすぎない。

第3図は年度別の大形装置の平均容量と最大容量のすう勢を示したものである。

わが国の総酸素量11,700トン/日は全世界総酸素量の15%と想定され、アメリカ、ソ連に次いで西ドイツと3位を争う酸素生産能力と考えられる。しかもこの大形空気分離装置で輸入されたものは約3%⁽³⁾にすぎずほとんど国産技術で開発し得ている。したがって過去6箇年におけるこの装置の開発過程は目まぐるしいものがあり、日立製作所の開発経過をとってみても、そのまま日本の大形空気分離装置のあしどりとなるであろう。すなわち、

- (1) 全低圧式空気分離装置の完成(TOプラント) 昭31⁽²⁾
- (2) 石材蓄冷器開発による大量酸素の高純度化 昭32
- (3) 再熱回路方式蓄冷器の実用化による操作の簡易化 昭32
- (4) シリカゲルによる空气中炭酸ガス吸着除去技術の確立

昭32



第3図 国内酸素プラント容量すう勢

- (5) アンモニア合成における窒素洗浄装置と低圧式空気分離装置との組合せ装置の完成 昭33⁽⁴⁾
- (6) 多段タービン形液酸ポンプ開発による加圧形酸素ガス発生式大形空気分離装置の完成 (TO-Hプラント) 昭35
- (7) 二重保冷槽形式採用による屋外化 昭35
- (8) 10,000 Nm³/hの高純酸素と、等量の高純窒素を併産する大形空気分離装置の完成 昭36

上記のうち(1), (2), (4)は現在すでに常識化され大形装置といえこの方式が組み込まれている。このように装置の効率, 操作性および実動率の向上に改善が加えられる一方, 装置の効率, 信頼性を大きく左右する空気圧縮機も高度の要求に刺激され長足の進歩をとげた。

圧縮機および分離器の進歩を酸素 1 m³ 発生に要する電力量を尺度として示すと,

旧形リンデフレンケル	0.75 kWh/Nm ³	昭31以前
TO プラント	0.60 kWh/Nm ³	昭31
TO プラント	0.48 kWh/Nm ³	昭36

ただし上記 O₂ 純度 98%, 装置容量 2,000 Nm³/h (酸素)

なお 10,000 Nm³/h (酸素) プラントにおいては 99.6% の高純酸素として 0.47 kWh/Nm³ に達しており, 大形分離装置の酸素原単位は 0.4 kWh/Nm³ の時代にはいったものと考えられる。

2. 大容量空気分離装置の条件

装置の大形化に伴い装置の効率のみでなく信頼度および安定性, 実動率に対する比重が大きくなって来る。ここで大容量装置として具備すべき条件を整理すると,

2.1 効 率

大量酸素の生命は酸素の安いコストにある。この条件により酸素の需要面が拡大されてきた。幸い原料は大気であるため酸素原価の半分は装置が消費する電力の多少により大きく支配される。

(1) 電 力

原料空気圧縮機の消費電力および補機電力で前者は全体の98%

以上を占有するのが低圧式空気分離装置の特徴である。補機を巧妙に省略し, 分離効率を上げて処理空気量を少なくし, さらに圧力は空気を液化分離する最少限度に押えたとともに圧縮機自体の効率も高度であるよう要求される。

(2) 水

圧縮機の冷却水がほとんどであり, これを節約するために乾燥した廃窒素ガスの冷却作用を利用している。

(3) スチーム

装置の加温および加温用空気の脱水剤 (シリカゲルなど) の再生熱源に用いられる。量は微少である。

(4) 薬 品

旧小形の装置では空気中の炭酸ガスの吸収除去にカ性ソーダが多量に用いられた。しかし大形装置にあっては空気が大量化することによりその消費量は膨大となり不経済であるので, この点蓄冷器を主熱交換器に採用することにより, カ性ソーダを不要としている。このことは大形装置を今日あらしめた大きな要因と考えられる。したがって大容量装置では薬品, 冷媒などを全然使用しない全低圧法式がほかの方式を圧して大きく伸びている。

(5) 油 脂 類

機械類の潤滑油であるが, 高圧の往復動空気圧縮機, 補助冷凍機を全然必要としない全低圧法式であるが, これは運転および保守の容易性に直結している。

2.2 運転操作の簡易化

(a) 起 動 操 作

空気分離装置の中でも大形装置では, 起動能力を大きくすることは定常運転時の効率の低下と設備費の増大の原因となり, 大形装置としてのたいせつな条件が失われる。起動能力を最小必要限度に押え, 整定運転時に高効率を維持できるように計画すべきである。したがって起動操作は比較的手数と技術を要するのが現実である。したがってこの欠点を補う意味で起動操作を十分考慮したフローダイヤグラムの選定と適当な計装により小人数で確実に起動のできるくふうが必要となる。

(b) 整 定 運 転

空気分離装置は大形化するほど, その安定度は高いものである。したがって整定運転のために特に自動化を行なう配慮は起動時に比較して価値の少ないものと考えられる。むしろ運転者がこまごまと神経を使わず起こりうる異常を早期に知らせる警報に配慮を置くべきである。

2.3 広域な運転性

効率や安定性の低下なく広範囲な増減運転のできる必要がある。また大気を原料とする装置だけに夏冬または昼夜の気温変動により圧縮機の風量が著しく変化する。このような場合でも必要な酸素量を最低の動力費で生産する圧縮機の選定とくふうがなされねばならない。広域な運転性は単に与えられた仕様に大きな裕度をとることのみでは解決のできない問題である。

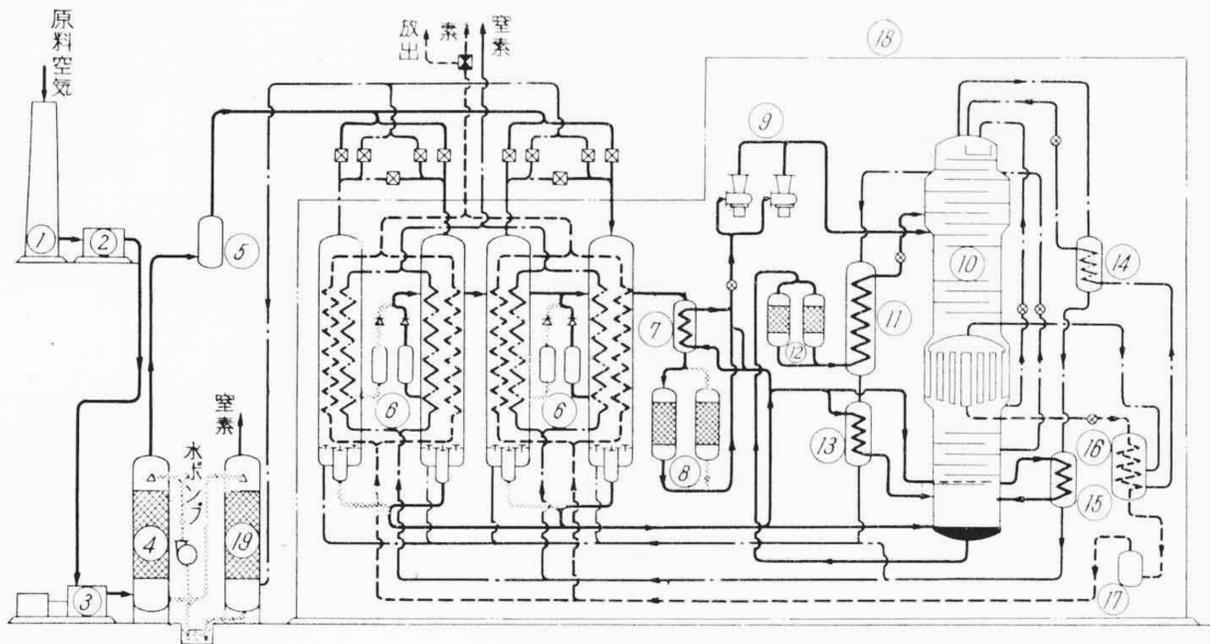
2.4 保守の容易さ

長期間の運転にも性能低下なく定期的な修理も手軽に短期間で行なえる構造にする必要がある。厚い保冷材に埋め込まれた装置ではいちいち保冷材を点検の度に長期間を費して出し入れすること自体も改善を要する点である。

以上の条件は一般の装置にもいえることではあるが一応ここに列挙した。以下, 本条項を念頭に置きながら装置の説明を進めたい。

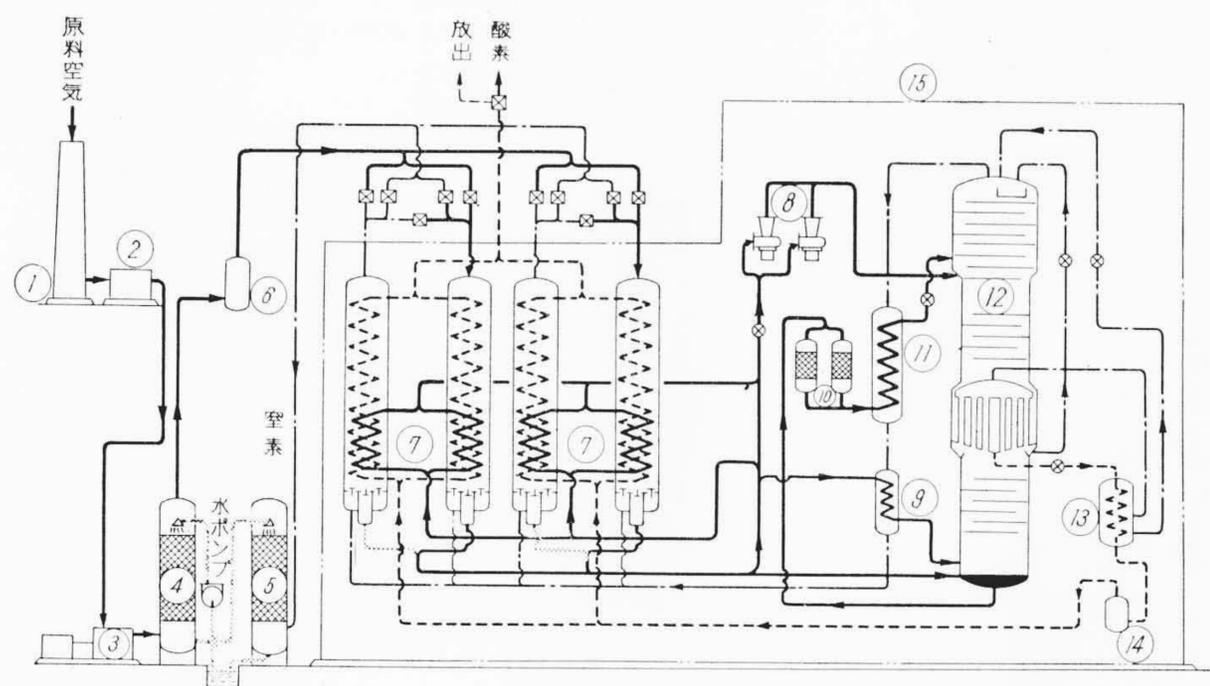
3. 装置構成機器の機能および運転保守上の問題点

全低圧空気分離装置の代表的なフローシートを第4図と第5図に示す。第4図は中間抽気蓄冷器方式で高純度窒素を併産するもので



- ① 空気取入口
- ② フィルタ
- ③ 圧縮機
- ④ 水洗塔冷却器
- ⑤ 水滴分離器
- ⑥ 蓄冷器
- ⑦ タービン熱交換器
- ⑧ 炭酸ガス吸着器
- ⑨ 膨張タービン
- ⑩ 精留塔
- ⑪ 液空過冷却器
- ⑫ アセチレン吸着器
- ⑬ 液化器
- ⑭ 液空過冷却器
- ⑮ 液化器
- ⑯ 副凝縮器
- ⑰ アセチレン除去器
- ⑱ 保冷槽
- ⑲ 空気蒸発冷却器

第4図
中間抽気蓄冷器方式による高純酸素窒素同時採取の系統図



- ① 空気取入口
- ② フィルタ
- ③ 圧縮機
- ④ 水洗冷却器
- ⑤ 窒素蒸発冷却器
- ⑥ 水滴分離器
- ⑦ 再熱方式蓄冷器
- ⑧ 膨張タービン
- ⑨ 液化器
- ⑩ アセチレン吸着器
- ⑪ 液空過冷却器
- ⑫ 精留塔
- ⑬ 副凝縮器
- ⑭ アセチレン除去器
- ⑮ 保冷槽

第5図
再熱蓄冷器方式による高純酸素採取の系統図

あり、第5図は再熱蓄冷器方式の装置のフローシートである。以下フローの流れに沿って説明を進める。

3.1 空気取入口

装置の設置される場所は空気のごれた重工業地帯が普通である。したがって次のような注意をはらって場所および高さを決定することが必要である。

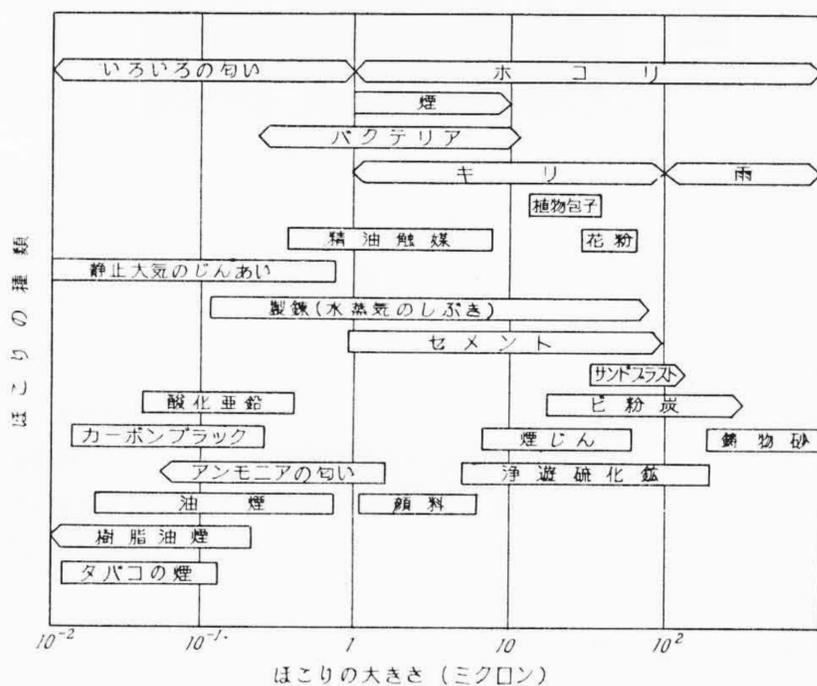
(i) アセチレンガスその他の低沸点炭化水素ガスの発生する場所は特に注意を要する。これはきわめて微量が空气中に存在していても装置の液酸中に蓄積して爆発の原因となるためである。最近の装置は皆低温部にゲル吸着器を設けて液酸中に流入する以前に吸着除去する方法を採っているが、この方法のみに依存することは危険である。場合によっては取入口を2箇所設け風向によって切り換え使用する配慮も必要となろう。

(ii) 圧縮機などに腐食を起こさせるガスの有無を検討し、環境に応じて取入口を配慮すべきである。空気をあらかじめ水洗することが有効と思われる場合もあるが、このような単純な場合はむしろ少ないであろう。

通説として大気中のダストは地上 60 m が最も少ないとされているが、あくまでも付近地の地形環境に応じて科学的に決定すべきものと考えられる。取入塔の高さは 15~80 m の範囲で使用されている。

3.2 空気ろ過器

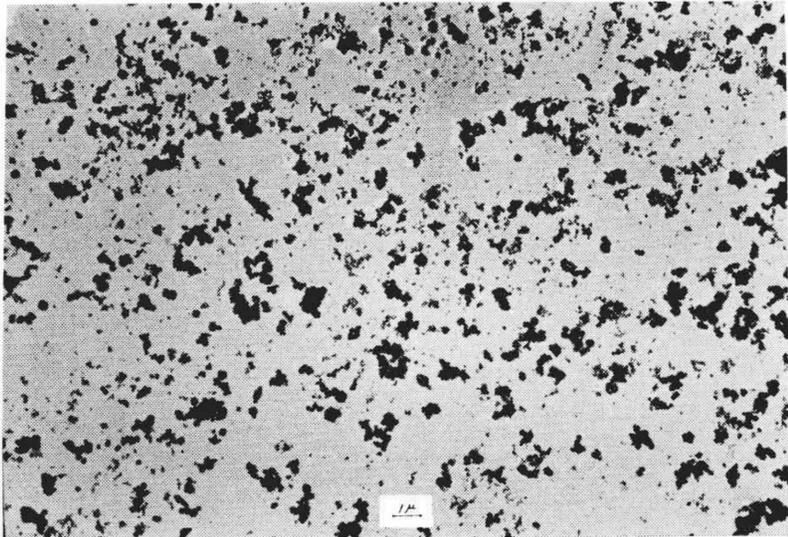
次に原料空気は空気ろ過器で除じんされる。長期高性能を維持して酸素を生産するためにはこの除じんがきわめて重要な補機であ



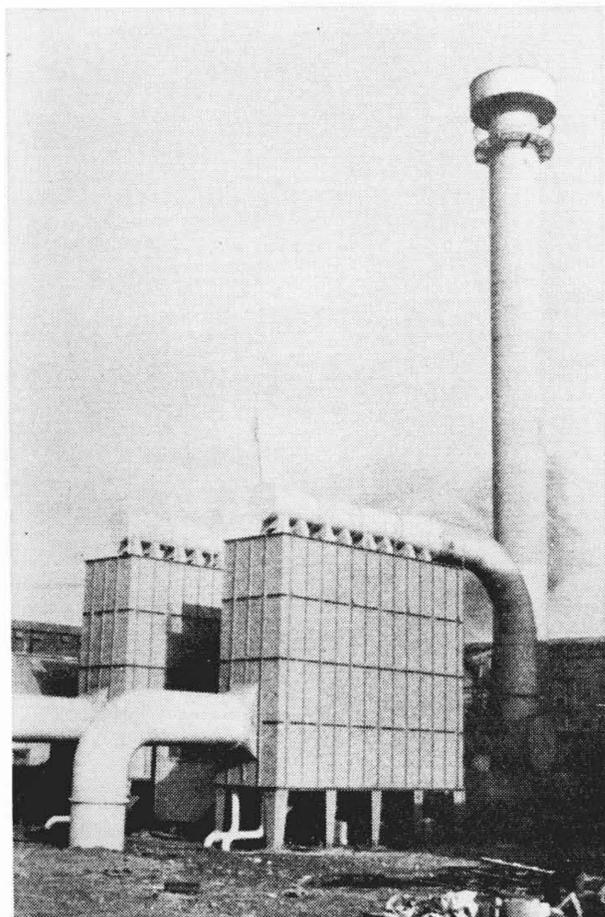
第6図 空気中のほこりの種類と大きさ

る。高性能の圧縮機はダストの付着により著しい性能低下を起し、はなはだしい場合は振動あるいはサージングを起し停止のやむなきに至る。

空気中の浮遊ダストは第6図に示す粒度であるとされている。油煙類を除き大部分のダストは1μ以上であるが、実際には製鉄所などのダストは第7図の電子顕微鏡写真に示すように0.5μ程度のものが数においてかなりな量を示している。したがってろ過器の性能



第7図 製鉄所内ダストの顕微鏡写真



第8図 バブフィルタと空気取入口

としては 0.5μ のダストまで相当の効率でろ過しうるものが必要である。われわれの装置では標準として第8図に示すような大形のバブフィルタを使用している。このろ過器は集じんによりろ過抵抗が増加すれば自動的にろ過体を再生し、長期運転を可能ならしめるので便利である。さらに高性能のものとしてコットレルがあるが、オゾンが発生するため爆発の原因をつくる本質的な欠点があるので採用できない。また水洗形の湿式フィルタも特殊なケースとして採用しているが、詳細は前に発表してあるのでその論文を参照されたい⁽⁵⁾。

3.3 原料空気圧縮機

ろ過器で除じんされた原料空気はここで $4.5 \sim 5.0 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ に圧縮される。この場合圧力が低いほうが動力は少なくよいわけであるが、精留理論上圧力に下限があり、これを低くせんとして精留塔、熱交換器を大きくすることは効果少なく、建設費がいたずらに増加し好ましくない。上記圧力に幅を持たせたのは発生酸素純度に応じて変わるため、その関係の概略を示した(第9図)。

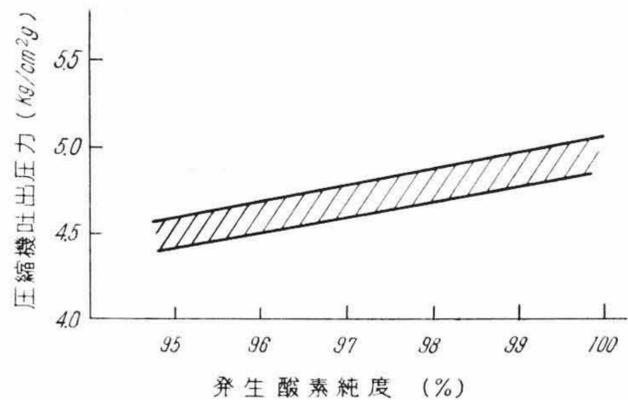
また吐出圧力は酸素純度一定とした場合には装置の負荷によっても第10図のように変化する。

使用しうる圧縮機についてその適性を第1表にまとめた。大形装置用としてはターボおよび軸流圧縮機が適している。

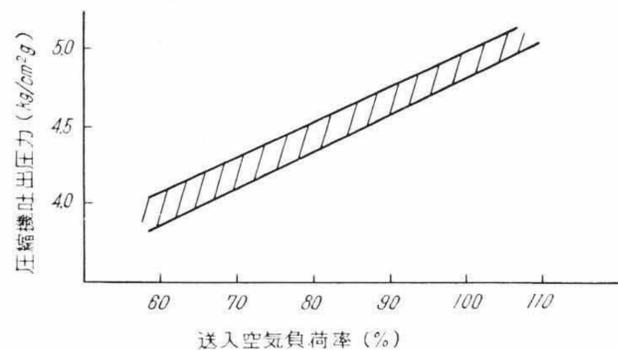
第1表 空気圧縮機比較表

	往復動形	ターボ形	軸流形
空気 1m^3 を圧縮するに要する動力 (モーター入力)	0.085~0.090 kWh (2 stage) 1 intercooler	0.086~0.11 kWh 3-2 intercooler	0.081~0.09 kWh 2 cylinder 1 intercooler
容量調整による効率の低下	段階調整により効率の低下はない	減量運転により低下するが Vane Control 方式によれば効率の低下はきわめて小さい	静翼ピッチを変えて調整すれば効率低下はきわめて小さい
信頼度 (連続運転性)	可	可	可
運転性 (容量調整) 減量運転範囲	段階調整 0→100%	連続調整 * 約 70% まで	連続調整 * 約 70% まで
Space	やや大	小	小
保守	約3箇月に1回は停止して弁などの点検を要す	約1箇年停止点検の要なし	約1箇年停止点検の要なし
基礎	やや大	小	小
使用範囲	8,000 Nm^3/h まで	8,000~50,000 Nm^3/h	45,000 Nm^3/h 以上

* サージングにより限界がある



第9図 酸素純度と圧縮機吐出圧力

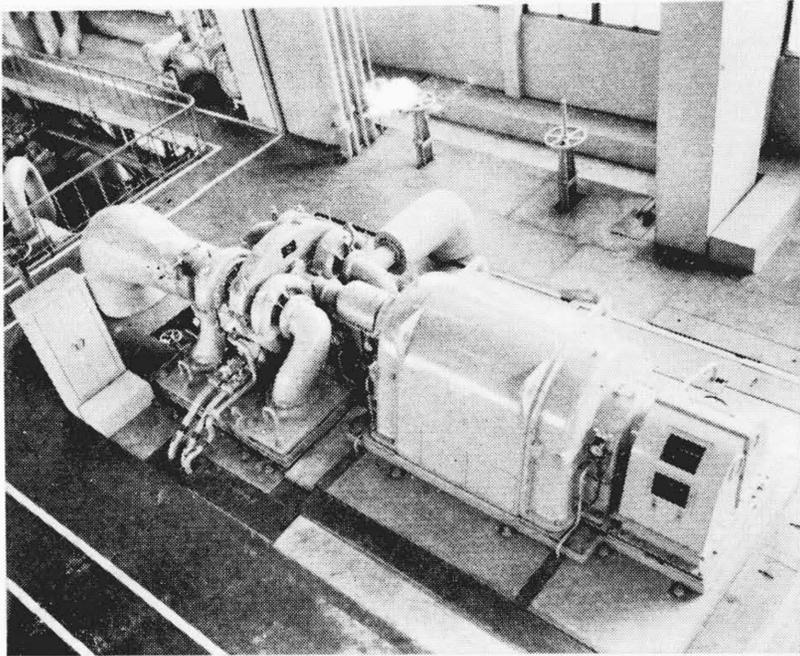


第10図 装置の負荷率と圧縮機吐出圧力

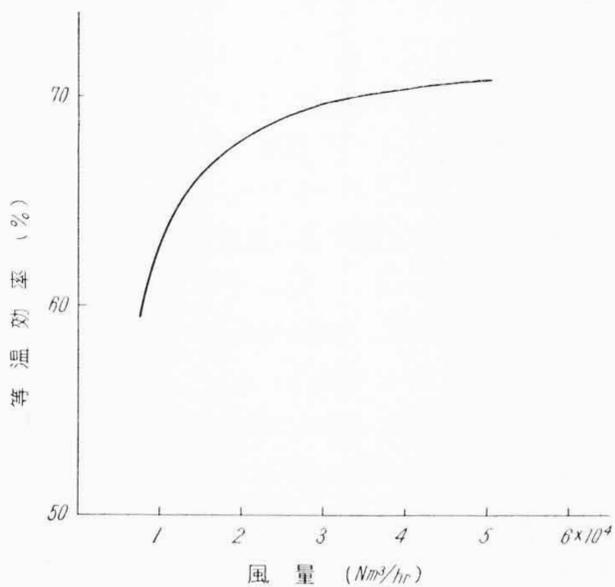
日立製作所においては特に空気分離装置に適した特性を持つDH形ターボ圧縮機の開発を行ない、最近軸流圧縮機と同程度の性能にまで到達している⁽⁶⁾(第11図)。すなわち、

- (1) 4段のランナを有し、各段間ごとに3個の中間冷却器を置き、等温圧縮に近い圧縮を行なわせることにより等温効率をあげている。99.6%の酸素純度で原単位が 0.5 kWh/Nm^3 を割った性能を出しているのもこの圧縮機に負うところが大きい。
- (2) また低圧段2段と高圧段2段の回転数を変えて効率の向上を図っている。
- (3) ランナ吸入口にベーンコントロール機構を合理的に配しやすい単独ランナケーシング構造であるため、この機構により風量調節を行なわしめ、効率およびサージング圧力の急激な低下なく運転幅を広げている。大形空気分離装置用圧縮機としての条件を満足すべきものである。

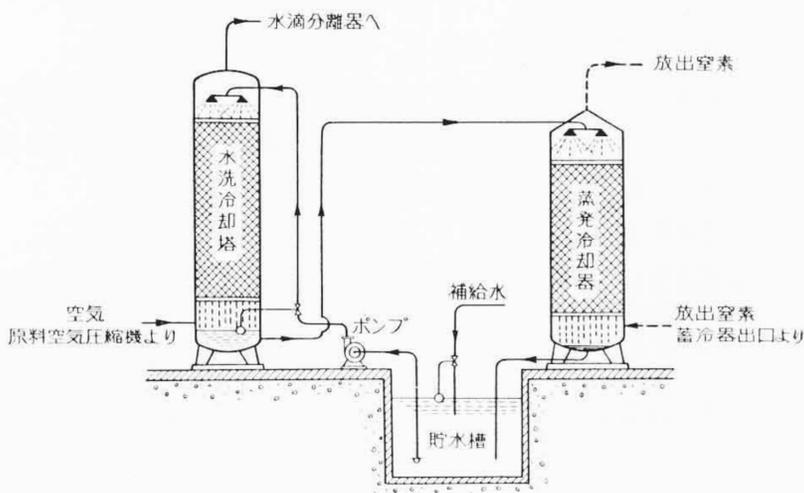
軸流圧縮機もすでに $10,000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の酸素能力を持つ大形装置に昭和36年完成している⁽⁷⁾。性能的にはDH形ターボ圧縮機と同様の



第11図 DH形ターボ圧縮機



第12図 ターボ圧縮機の等温効率



第13図 冷却水系統図

適性を有していることがわかった。すなわち使用点付近において安定した高い等温効率を示しており、大気温度および装置の負荷に応じて装置の必要とする風量および風圧で供給している。

第12図はターボ圧縮機の等温効率実績を示す。

3.4 水洗冷却塔と蒸発冷却器 (第13図)

圧縮機で加圧された90~100℃の空気はここで冷却され、分離器本体に送入される。分離器に送入する空気温度は普通30℃以下が望ましい。通常のアフター・クーラでは水温は夏季30℃近くまで上昇するため40℃まで冷却がやっとである。水洗冷却塔は直接空気と冷却水を充てん層において直接接触させ冷却する方式のものである。塔底では冷却水は50℃まで上昇し、この温水を再冷却するた

めに、ほかの充てん塔である蒸発冷却器頂部水を送り、分離器本体より出てくる乾燥した(相対湿度約20~25%)窒素ガスと接触させ再冷却する。この水をポンプにより再びくみ上げ水洗塔に送る循環形式をとっている。

利 点

- (1) 夏季気温上昇時でも20~30℃まで空気を冷却できる。
- (2) 循環水量は普通のアフタークーラの1/2ですむ。

補給水は循環水量のさらに0.5%程度の量でほとんど無視できる量である。

以上の利点のため、水条件の悪い所でも経済的なしかも有利な冷却効果が得られる。

欠 点

- (1) 水質は十分良好なものを選ぶ必要がある。硬質の工業用水では時として水洗塔底部の充てん物に析出物を付着させ、性能低下を起こすので注意を要する。
- (2) 極端な圧力低下で水洗塔を使用するとフラッディングを起こし、装置内に水を侵入させ事故を起こす。
- (3) 適当な保護装置、自動化およびポンプの自吸化を行わないと起動時手数がかかる。

これらは適当なくふうをすれば防げるもので、大形装置に採用されている。

3.5 蓄 冷 器

水洗塔を出た空気は次に分離器本体に自動切換弁において流路の制御を受けながら蓄冷器にはいる。蓄冷器の構造と作用についてはすでに数多く発表されている⁽²⁾⁽⁸⁾ので詳細には述べないが、装置の性能および長期運転性能のかぎを握る重要な機器であるので、その性格および運転上の問題について触れたい。

(1) 蓄冷器の目的

蓄冷器の目的には二つある。

(a) 流入する原料空気を発生する低温低圧分離ガスと熱交換を行なわせ、-171℃まで(空気液化温度直前)冷却するとともに分離ガスを温端温度差2~3℃まで温度回復させる。熱交換効率は98%以上であり、この高度の寒冷回収により装置の効率を上げている。

(b) 流入する空気中に含まれている水蒸気および炭酸ガスを蓄冷器充てん石材表面に凝結させ、ほとんど完全に除去する。この凝結物は次の低温サイクルで低温低圧分離ガス(多くは廃窒素ガス)中に昇華により装置外に排出される。すなわち原料空気中の凝結性物質のろ過作用を行なう。

以上のように、かなり複雑な機能になっていることが問題なのである。しかしながらこの複雑さにもかかわらず蓄冷器を採用している理由は下記二点にある。

(a) 大形装置になればなるほど空気中の凝結性物質の除去は冷凍機、またはゲルによる脱水およびカ性ソーダ溶液による脱炭などの方法では設備費の増加、運転操作の複雑化をまねくからである。これに比較すれば蓄冷器操作の複雑さは物の数ではない。

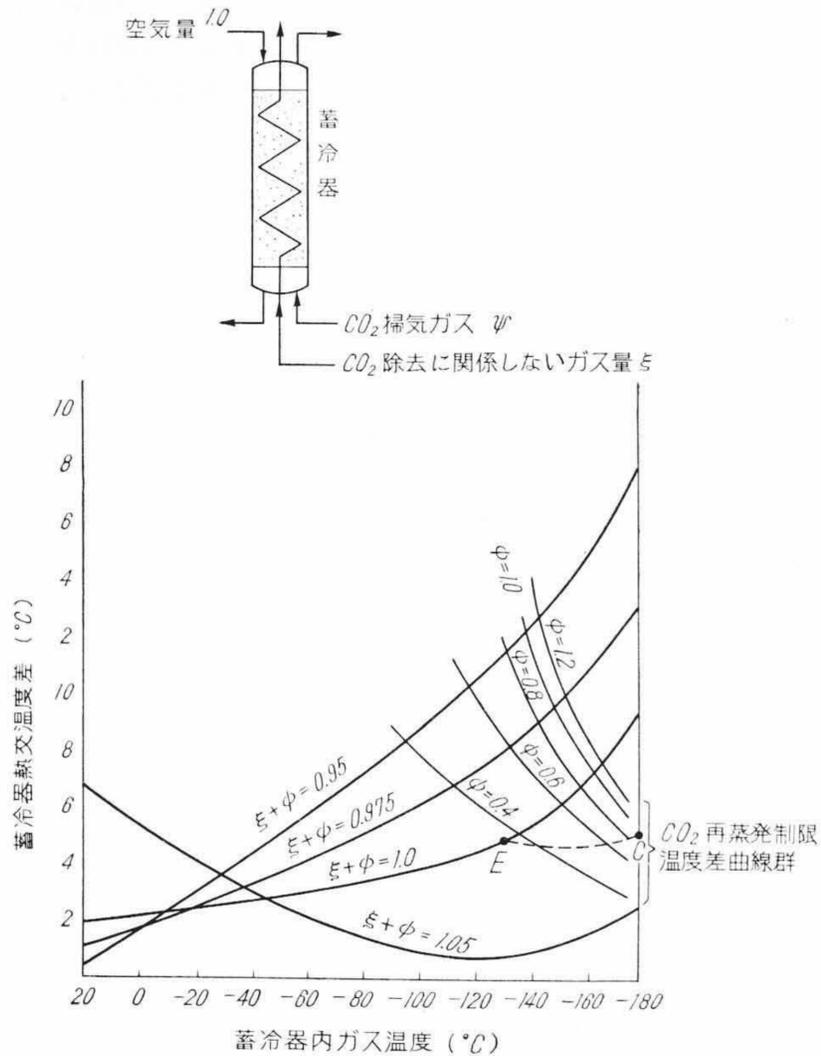
(b) 石材蓄冷器の出現により水分はもちろん、炭酸ガスの除去性能はきわめて完全に近い域に達し得たからである。1年以上の運転長期化も期待できる。

(2) 問 題 点

本機器の問題点は、

(a) 低圧低温分離ガスで石材表面に凝結した炭酸ガスを昇華して完全に掃気し、炭酸ガスを内部に蓄積させないためには、炭酸ガス凝結部における空気と分離ガスとの温度差に許容制限がある。

(b) きわめて微小温度差で熱交換しているために、空気とガ

第14図 CO₂掃気ガス量とCO₂蒸発限界温度差

スの微小な風量差によってもすぐに上記制限温度差を越えた熱交換状態にはいる。

(c) この許容温度差は空気量に対してガス量が少なくなればなるほど小さくなり、運転管理に注意を要する。

以上の傾向を理論計算により示すと第14図のようになる。蓄冷器内を流れる寒冷ガスの各温度においてこれと向流する空気との温度差分布を示すのが $\xi+\phi$ 線群である。 ξ は寒冷ガスのうち蓄冷器石材中に埋め込まれた伝熱管内を流れるガス量であって、熱交換するが直接石材と接触しないガス流量である。 ϕ は石材間げきを空気と交互に向流し、熱交換と同時に石材表面に付着した炭酸ガスを掃気する作用もするガス流量である。したがって $\xi+\phi$ は空気と熱交換するガス総量になる。空気量1.0に対し数%でもガス量が不足すれば冷端温度差が大きくなる。また逆にガス量が空気より5%でも多くなれば冷端温度差は小さくなるが、温端温度差は極端に開き装置の寒冷損失が大きくなることと理解される。

次に右方細線の曲線群は炭酸ガスを完全に掃気できる許容温度差限界線であり、この曲線より低い温度で熱交換できれば炭酸ガスの蓄積は起こらない。 ϕ ガス量が空気量に対し小さければ許容温度差はこのように小さくなることとわかる。

(3) 炭酸ガス掃気対策

対策として現在三つの方法が考えられる。すなわち

(a) $\xi+\phi$ を空気より多く流す方法により冷端温度差を小さくする方法(旧リンデフレネルおよびTO-H形式)

(b) 蓄冷器の中間温度E点において空気を一部抽気することによりEC線のような温度差分布にする中間抽気法(中間抽気TO形式)

(c) 蓄冷器より一たん脱炭されて出た寒冷空気を一部蓄冷器の冷端部に巻き込んだ伝熱管にふたたび逆流させて、強制的に空気を冷却しEC線のような温度差分布にする方法(再熱形TO形式)

(a)は蓄冷器の熱交換率を著しく低下させるのでTO-H形のようにほかにこれを補うだけの利点がなければ価値のない方法である。

(b)は最も普通に用いられている方法であるが、前にフローシートに示すように中間抽気した空気にはまだ炭酸ガスが含まれているので、これをシリカゲルなどを用いて脱炭吸着を行なわせる面倒な操作および機構が必要となる。

(c)再熱方式は最も理想的な方法であって、われわれはすでに10装置の実績を持ち良好な成績を得ており、その適用範囲をますます拡大しつつある。

(4) 蓄冷器運転管理の要点

装置の長期運転を決定づけるものは、凝結性物質の蓄冷器などへの蓄積以外にないといっても過言ではない。したがって蓄冷器の特性特にその欠点を知ってこれを良好に管理すれば2年連続運転も可能となるであろう。この意味でここに要点をまとめてみると、

(a) 第14図に示すように空気-ガスの量的バランスを一つ一つの蓄冷器に正確にとること、これには各蓄冷器の温端温度を等しく保つことも一法である。これは $\xi+\phi$ 量の微量の増減が著しく温度差分布を変えることから理解できることである。

(b) (a)項を正確に合わせたのち、初めて中間抽気量あるいは再熱量を調整して第14図C点の温度差を許容温度差内に入れ、しかも各蓄冷器のC点が等しくなっているかを点検すべきである。(a)項を無視して単に中間抽気あるいは再熱量のみの調節によりC点を管理することは危険である。

(c) 蓄冷器風量調節に過激な調節は危険で蓄熱形熱交換器である点より時間をかけた調節が好ましい。

(d) 停止時、起動時に風量バランスが一時くずれ、意外な低温部石材表面まで多量の炭酸ガスが付着し、そののち急速に低温にもどるため炭酸ガス分圧が微小となり、除去できずそのまま残留する。したがってひん繁な停止起動、あるいは急激な増減量は極力避けるようにすることが好ましい。

3.6 タービン熱交換器の目的

蓄冷器冷端から逆止弁を経て出た大部分の空気は精留塔下部塔底にそのまま送入させられる。中間抽気形蓄冷器方式にあっては一部空気はタービン熱交を通り蓄冷器抽気と合流し、膨張タービンへ、別の一部は液化器を通り液化して下塔底部へと分岐する。

中間抽気空気は -120°C 前後の温度であるが、炭酸ガスを含むため2個切替使用のシリカゲル吸着器により脱炭されて膨張タービンにはいる。この脱炭吸着は -135°C が最適であり、この温度においてシリカゲルは最も大きな吸着容量を持つ。この最適温度より高くなればなるほど吸着容量は急速に低下する。この事情はシリカゲルの気中の水分吸着特性と相似であり、空気中の相対湿度が低ければ低いほど、水分の吸着容量が低下することでも理解できる。蓄冷器が再生式熱交換を行なうため中間抽気空気温度は切替サイクルに応じて規則的な変動を行なうためこれを減衰させると同時に最適の -135°C まで冷却調整の目的でわれわれが設置しているもので、この熱交のない一般の装置に比べて2~3倍の吸着容量を持たせている。もちろんわれわれはこの -135°C を自動制御によっている。

3.7 再熱回路方式の利点

再熱回路方式は第4図と第5図を比較すれば理解できるようにフローがかなり単純化される。抽気回路方式よりも一歩進んだ方式であって、

(a) 脱炭はすべて蓄冷器の特性を利用して蓄冷器で行なわれるため、シリカゲルによる吸着設備が不要であり、したがってゲルの加温再生操作およびこの操作による寒冷損失がない。

(b) 起動操作時のシリカゲル吸着器への通気時点の選定および操作のようなむずかしい技術的な判断を要せず、起動の比較的初期より再熱回路に自由に多量に空気を流すことができるため蓄冷器下部の冷却を急速化し、蓄冷器の脱炭作用を早期に完全ならしめ膨張タービン噴口の閉さくが簡単に避けられるなど有利な点が多い。

3.8 膨張タービン

本機の構造性能などについてはすでに数多く発表されてきているのでここでは省略する。運転管理上の参考となる事項を二、三あげたい。

(1) タービン入口温度

空気分離装置としての画一的な最適温度というものはない。定性的には保冷損失比(処理空気量 1 m^3 当たりの保冷損失量)の小さいほど温度は高いところにある。またタービンの効率のよいほど高い。

したがって保冷効率とタービン効率のよい大形装置ほどタービン入口温度は高くなる。大体 $-150\sim-140^\circ\text{C}$ の間にはいるが、入口温度が -140°C よりも高く十分熱平衡を保った装置も少なからず経験している。

タービンノズルが摩耗して効率が低下した際は温度を下げないと熱平衡しない。

(2) タービンノズルの摩耗

ノズルはある期間使用すると起動時の氷粒、ドライアイスまたは蓄冷器石材ダストにより摩耗する。常に予備ノズルを持ち定修時点検交換をする。また起動操作のモタツキ、起動停止とか急激な増減量運転操作くり返しにあうとこの消耗ははげしい。

3.9 精 留 塔

精留塔は分離装置の主器で下部精留塔、主凝縮および上部精留塔により構成されている。この機能については多くの文献において説明がくり返されているので詳細は省略する。精留皿は回転流形の多孔板精留皿を多く用いている。

(1) 空気分離装置の精留の特徴

(a) 酸素の収率を上げるためまず下部精留塔で高純度の液体窒素を作る。

(b) 下部精留塔の凝縮器は上部精留塔の蒸化器を兼用している。したがって上部塔の塔底液である液体酸素を蒸発させるため下部塔頂の窒素ガスの沸点を上げるため下部塔圧力は $4.5\sim 4.7\text{ kg/cm}^2\text{g}$ の圧力が必要であり、この圧力を加えるための動力が低圧方式のほとんどのエネルギーを食っている。

(c) 上部精留塔は酸素、アルゴン(空気中に 0.93% 含まれている)および窒素の三成分の精留になる。したがって上部塔下部精留段のほとんどは酸素とアルゴンの二成分の分離に費やされる。

(d) したがって製品である酸素は 95% 以上純度の場合不純物はほとんどアルゴンであり、窒素は含まれていない。

(2) 大形精留塔の問題点

精留塔が大形化すると種々新しい問題が起きてくる。このうちでも最も大きな問題は、

(a) 大形化により精留塔上昇ガス流速には変化はないが、環流液の流動は精留皿上の流路幅が精留塔断面積の平方根でしか増加しないので、いきおい液深および流路長さが増大するため、同一皿上で液深の差が上流と下流で著しく変化する。ために根本的な検討を必要とする。

(b) 分離装置の精留塔は、コンパクトに、しかも軽量にすることが冷却時間の節約、寒冷損失の減少に重要なことであるが、剛性はあくまでも十分に保たねばならないことに設計上の問題が

ある。

(3) 精留塔操作

精留塔の操作は下部精留塔でできた液体窒素と液体空気(約 40% の酸素を含む)を上部塔へ供給する各調整弁の開度調整にある。したがって下部精留塔を十分これら弁によって調整することがすべてとよい。

(a) 弁開度を過大にしてガスを混入させると間々上部塔にあふれ現象を起こさせるので十分注意を要する。

(b) 窒素膨張弁を絞りすぎると下塔にあふれ現象を起こしやすい。

(c) 液酸液面のみの上下により装置の寒冷過不足を判断してはならない。各精留差圧および下部精留塔液容液面および蓄冷器下部温度などにより総合判断する必要がある。

(d) 再起動の場合急激に下部精留塔に空気を送入し、下塔底液の吹き上げ、主凝縮器の突沸を起こさせ精留皿を破壊することのないよう注意する必要がある。

(e) 主凝縮器の加温は特に加温空気の脱湿に注意し、水分の凍結による伝熱管の破裂をさせぬようにしなければならない。

われわれは大形装置に対しては液空膨張弁を自動化し、液窒素膨張弁を遠隔操作化して弁調整の単純化を図っている。

なおフローシート(第4図)は純酸素のほか純窒素を分離する精留塔を示している。また第15図は $10,000\text{ Nm}^3/\text{h}$ の大形精留塔上の据付中のものを示している。

3.10 精留塔付属機器

付属機器は精留塔への寒冷回収を目的とする熱交換器類と液酸防爆対策としての機器に分類される。

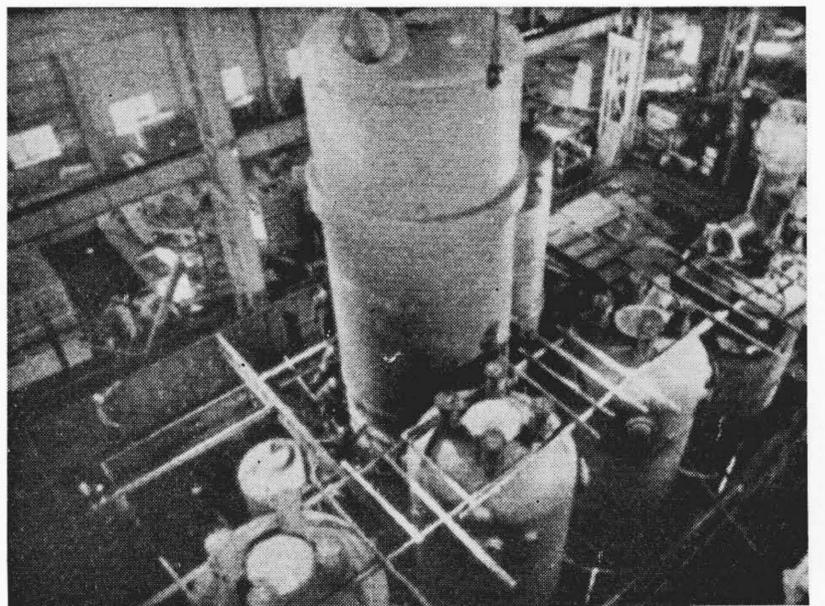
(1) 寒冷回収機器

(a) 液空過冷却器

下部塔底よりの液体空気(-174°C)と上塔頂より出る窒素ガス(-195°C)とを向流熱交換をさせ窒素の持つ低温を液空の過冷却に利用回収し、精留効果を上げる目的で設けたものである。

(b) 液 化 器

液空過冷却器を出た窒素ガスを蓄冷器にそのまま流すことは低温にしすぎて蓄冷器中で液化を起こす恐れがあるので、さらにここで蓄冷器より出る原料空気の一部と熱交換させ、空気を液化して精留塔に供給する。この液化器は特に平行流をとっていることがわれわれの装置の特長である。こうすることにより液化器を出る窒素ガスは空気の液化温度より $2\sim 3^\circ\text{C}$ 低温に必ず保たれ安定した一定温度で蓄冷器にはいることになり、蓄冷器下端温度を安定させ温度管理を容易ならしめている。



第15図 工場仮組中の精留塔上塔(10,000 $\text{ m}^3/\text{h}$ 酸素発生能力)

(2) 防爆対策機器

(a) アセチレン吸着器

工業地帯の大気中には微量ではあるが、アセチレンその他炭化水素を含有し、これが精留塔主凝縮器の液酸中に濃縮されると爆発の危険がある。本器は未然に液体空気をこの吸着器に通すことにより内部に充てんされたシリカゲルあるいはアルミナゲルにより吸着除去することを目的としている。きわめて効果のある方法でわれわれの経験ではこれを取り付けたことにより液酸中のアセチレン量が 0.3 mg/l 液酸のものがトレース程度に落ちた。数日を週りに切換再生する。

(b) 副凝縮器

主凝縮器液酸中にアセチレンなどの爆発物の蓄積を防止するため、製品酸素は主凝縮器底部より液のまま抜き取り新陳代謝を図るのを普通としている。この液酸は副凝縮器管内で下塔頂部の加压窒素ガスの凝縮により蒸発させることを目的とする。

この副凝縮器管内ではアセチレンなどが析出蓄積する可能性もあるので1箇月に1回はいかなる理由があっても加温再生を行ない析出物を蒸発除去する必要がある。

(c) アセチレン除去器

副凝縮器を出た酸素蒸気はアセチレンを多量に含んだミストを同伴するのでここでミストを分離し、液酸のまま外部にブロー弁を通じて排出する。この機器も副凝縮器と同時に加温しなければならない。

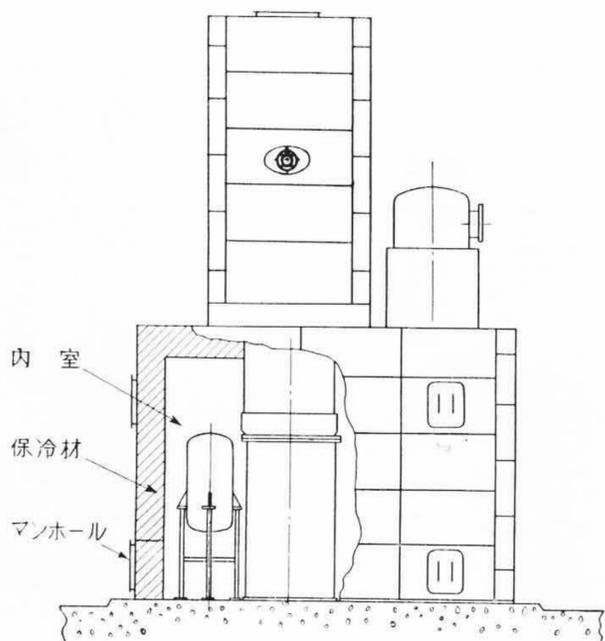
アセチレン除去器を出た酸素ガスは -181°C の飽和温度で蓄冷器に巻き込まれた伝熱蛇管を通して空気と熱交換し、常温まで温度回復して製品酸素となって取り出される。なお液化器を出た窒素は逆止弁を経て蓄冷器石材中を流れ炭酸ガスおよび水分を再蒸発させ、石材と熱交換して常温まで回復し、切替弁を経て窒素蒸発冷却器にはいり冷却水を冷却し、45°C 程度の温度で水蒸気で飽和した状態で大気に排出される。

3.11 保 冷 槽

この種低温装置は低温部機器配管などが大きな鋼製の槽内にまとめて入れられ、さらに断熱材 (mineral wool など) を槽と機器の空間に充てんし保冷されるのが一般である。

しかしながら第 16 図のような二重保冷槽を昭和 35 年に開発し、多数製作してきた。このねらいは次の点にある。

(1) 従来の一重保冷槽では定期修理の際保冷材をそのつど掘り出し、また充てんしなければ十分な点検修理ができない。また保冷材はそのつど劣化する。



第 16 図 二重保冷槽略図

(2) 大形装置では最近安全な屋外化が行なわれつつあるが、雨期の多いわが国においては保冷材をぬらすことになりがちで危険である。

以上の問題点を解決する方法としてこの形式を開発した。構造は簡単に言えば冷蔵庫形で寒冷機器は厚い保冷壁に囲まれた室に収納され、マンホール部の保冷材を取り出すだけで内部に人がはいることができる構造である。

この効果の一例をあげれば第 17 図のように定修期間が約半減することができる。保冷材の劣化はない。安心して屋外プラントとすることができる。

第 18 図は屋外に設置された大形空気分離装置の外観図である。

3.12 計 測 盤

最近の大形空気分離装置の計測盤の一例としてここに昭和 36 年完成した富士製鉄株式会社室蘭製鉄所納 10,000 Nm³/h の酸素製造装置の管理盤をあげることができる。第 19 図はこの管理室である。ここでは装置の起動停止まで全部遠隔操作により one man control することができるように計画され、起動操作の大部分は自動化されている。

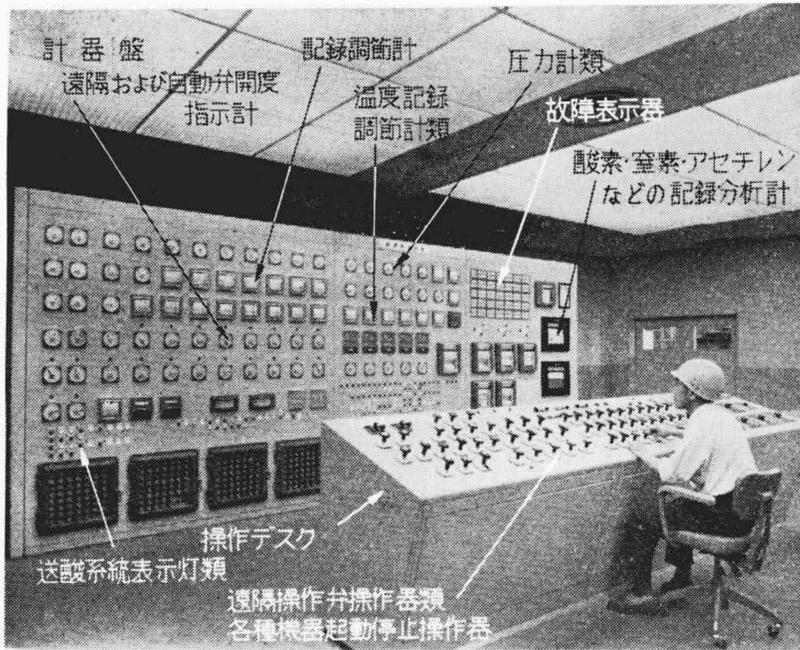
操作は運転者の前の操作机において機器の起動停止弁の開閉がなされる。また前面計器盤には自動計器、ガス分析計、故障標示器および警報および運転表示灯が取り付けられている。またデータロガーによる運転データの自動記録も行なっている。

項目	日数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
加 温																					
保冷材掘出																					
修 理																					
気 密																					
保冷材充てん																					
加 温																					
起 動																					

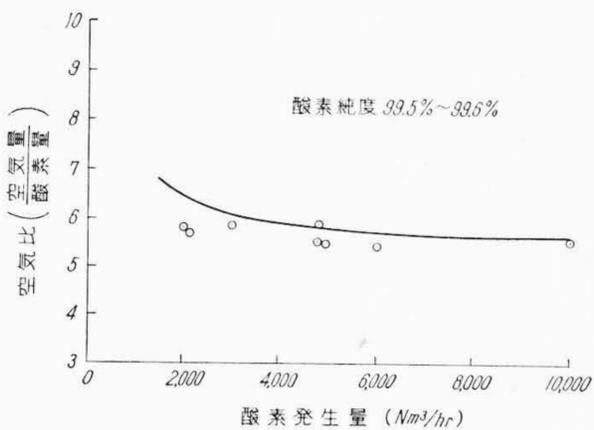
第 17 図 二重保冷槽の定修期間に及ぼす効果の一例



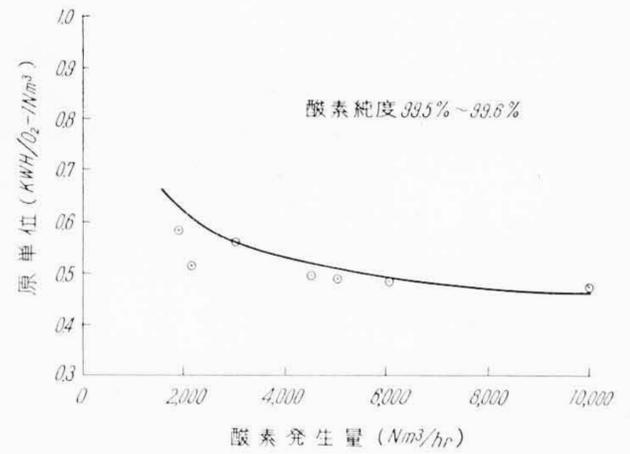
第 18 図 屋外化された TO プラント



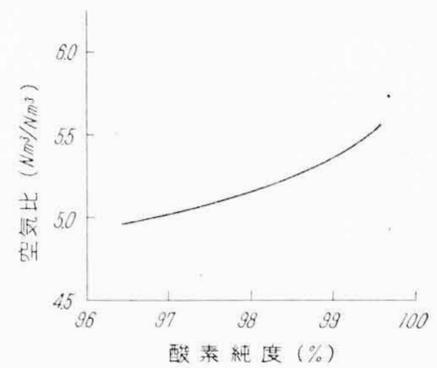
第19図 自動化された空気分離装置運転管理室



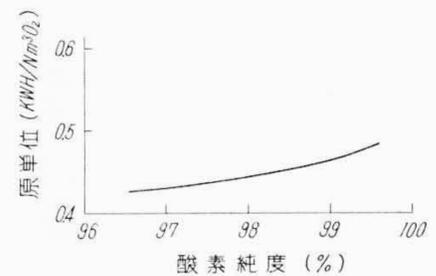
第20図 プラントの分離性能



第21図 原単位曲線



第22図 酸素純度と空気比



第23図 酸素純度と原単位

4. 最近の大形装置の実績

4.1 分離性能

大形精留塔の改良および石材蓄冷器の開発によって装置の分離性能は急速に改善された。第20図は昭和35年度以降の製品についての成績を示している。装置の容量を酸素発生量として横軸にとり、分離性能として原料空気と発生した酸素量との比を以て示した。なお条件をそろえる意味で酸素純度は99.5~99.6%の高純度の場合を選んだ。したがって空気比は小さいほど分離効率がよいことになる。空気比は大体5.5前後にそろっている。参考までに西ドイツ製品の発表数値を曲線でそえた。

4.2 電力原単位 (第21図)

これも高効率のターボ圧縮機、軸流圧縮機の開発により著しく改善せられ、大形装置においては0.4 kWh/Nm³O₂の時代に入れたことを示している。曲線は西ドイツ製品の発表値である。また酸素純度の変化に伴う空気比および原単位の変化を第21図と第22図に示す。

4.3 減量運転

装置の原単位をそれほど落すことなく減量できるかという問題についてはベーンコントロール方式の採用により従来の80%を70%に延長することも可能になった。

5. 今後の課題

今後大形装置としてわれわれが考えねばならないものとしては

- (1) 連続運転期間の長期化を目標として2年の連続運転
- (2) 20,000 Nm³/hの酸素能力程度までの大形化
- (3) 特殊目的の大形装置特に高圧酸素方式空気分離装置、すなわちTO-Hプラント(別項記載)の液酸能力の付与。

本件はすでに液酸ポンプの開発を完了し数基稼動にはいっているTO-Hプラントの高圧系統に膨張エンジンサイクルを加え、高圧酸素のほかに液体酸素をも併産する装置への展開

- (4) 大形装置よりの大量アルゴンの抽出
- (5) 大容量液体窒素製造プラントの開発

など数多く存在するので手近なものより逐次開発してゆきたいと考えている。

参 考 文 献

- (1)(3) 高圧ガス協会誌 Vol. 25 No. 10, 1961, p. 169
- (2) 松本ほか: 日立評論, 39, 751 (昭32-7)
- (4) 松本ほか: 日立評論, 42, 961 (昭35-9)
- (5) 諫早ほか: 日立評論, 43, 1215 (昭36-10)
- (6) 西松: 日立評論, 44, 931 (昭37-6)
- (7) 伊地知ほか: 日立評論, 44, 723 (昭37-5)
- (8) 三木ほか: 日立評論, 43, 810 (昭36-6)