

高炉用空気分離装置

Air Separation Plant for Blast Furnace Use

最近の空気分離装置の大きな傾向の一つは大容量化である。昭和49年3月、47,000 Nm³/h 空気分離装置が完成したが、これは世界最大規模のものであるとともに、幾つかの新しい技術的試みが織り込まれ、特に起動から定格送酸までを完全に自動化したワンタッチ起動操作方式の採用は、前例のない画期的なものとして注目されている。この論文はこれらの新しい技術の成果とともに、製品単価低減、装置の安定性、安全性、及び自動化への改善努力の姿を紹介したものである。

齊藤 章* Shô Saitô
岡部道昌* Michimasa Okabe
佐野英高* Hidetaka Sano

1 緒 言

酸素、及び窒素の需要は主として製鉄産業と化学工業の発展に伴って増加し、とりわけ製鉄産業の最近の急激な規模拡大は、そのまま空気分離装置の大形化を促進し、プラントの性能向上と改善に強い拍車をかけている。

空気分離装置の規模は、昭和46年の30,000Nm³/hから昭和49年3月完成の47,000Nm³/hへと記録が更新されてきたが、最近では更に60,000Nm³/hの装置が計画されているという目まぐるしきで大容量化が進んでいる。大容量のプラントを作るという以上は、設備費と運転経費そして製品単価の低減という経済的なメリットを追求していることはもちろんであるが、同時に、大容量化すればするほど事故などによってプラントが停止した場合の影響は極めて大きなものがあるため、装置の信頼性、安定性、及び長期連続運転性が強く要望されることも当然である。

この論文では、世界最大規模といわれている47,000Nm³/hの空気分離装置に織り込まれた、幾つかの新しい技術的な試みを紹介しながら、空気分離装置の最近の動向を展望して見ようと思う。

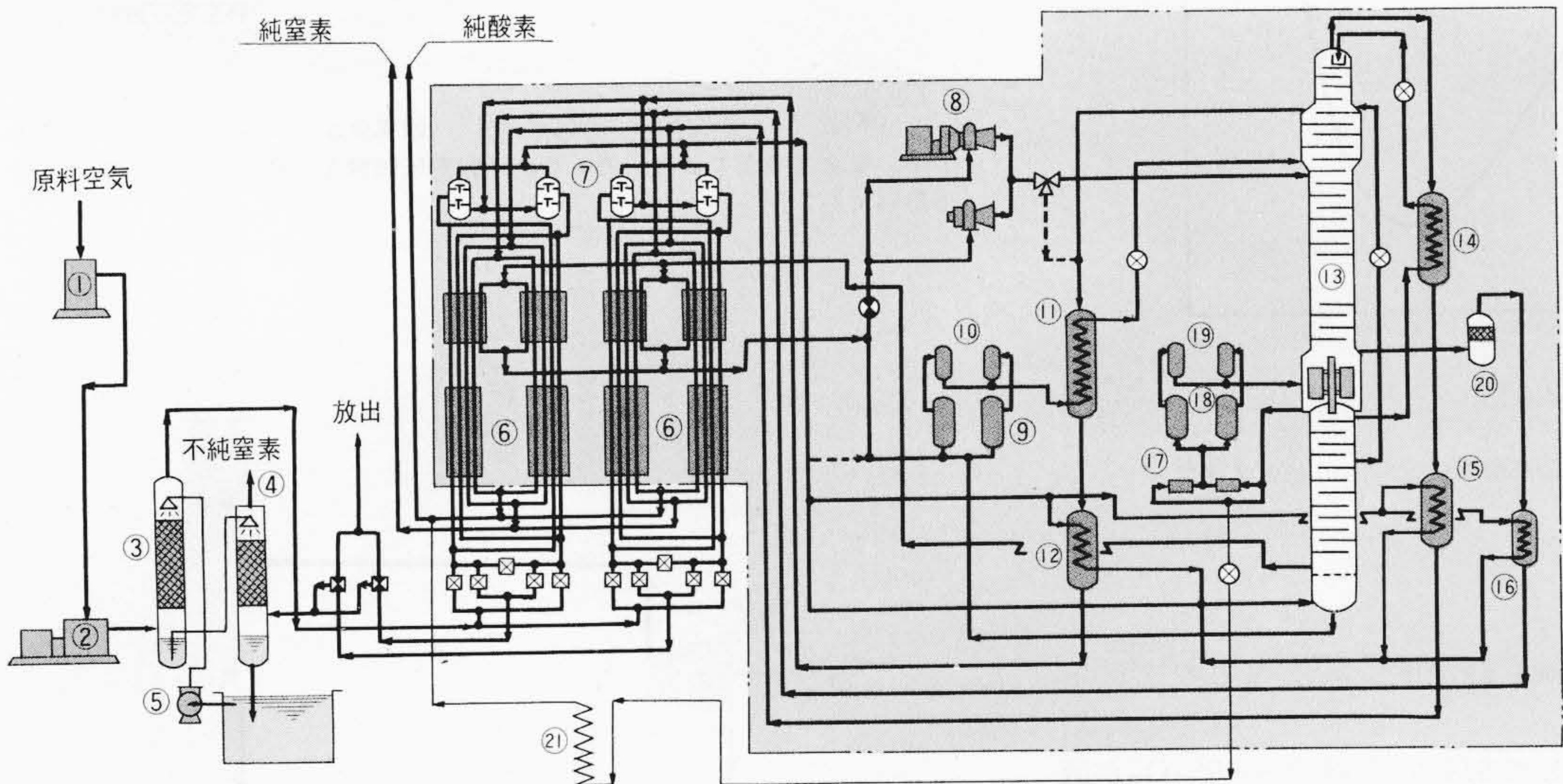
2 47,000Nm³/h空気分離装置

製鉄業界では、最近、高炉に酸素を富化して出鉄量の増大、コークス比の減少、及び操業性の向上を図るようになってきた。昭和49年3月に完成した47,000Nm³/h空気分離装置(図1, 2)は、我が国最初の高炉専用空気分離装置であり、容量的には世界最大の規模で製品酸素単価の低減、あるいは装置の信頼性向上などのために、幾つかの新しい試みを取り入れ、特に装置の起動から定格送酸までを完全に自動化したワンタッチ起動操作方式を初めて採用したユニークなプラントである。

3 最適酸素純度の決定

一般に高炉に吹き込まれる空気中の酸素割合は、高炉の耐熱強度などの制約でだいたい21~30%O₂程度になっているため、高炉専用の空気分離装置としては製品酸素を高純度にする必要はなく、むしろ単価の安い酸素を大量に製造するほうに重点が置かれてよいものである。

高純度の酸素を製造するには大きなエネルギーを必要とするが、酸素純度を下げれば原料空気圧縮機の吐出し圧力を下げて、動力的に安い酸素の製造は可能である。それならば、



No.	機 器 名 称
1	空気ろ過器
2	空気圧縮機
3	水洗冷却塔
4	蒸発冷却塔
5	水ポンプ
6	可逆熱交換器
7	逆止弁
8	膨張タービン
9	炭化水素吸着器
10	液空ろ過器
11	液体空気過冷却器
12	第一液化器
13	精留塔
14	液体窒素過冷却器
15	第二液化器
16	第三液化器
17	液酸ポンプ
18	循環吸着器
19	液酸ろ過器
20	ミストセパレータ
21	液酸ブロー蒸発器

名称	自動三方切換弁	自動切換弁	危急しゃ断弁	三 方 弁	調 整 弁
記号					

図1 空気分離装置系統図 一般的な系統図で、ガス酸素・ガス窒素採取装置を示す。

* 日立製作所笠戸工場

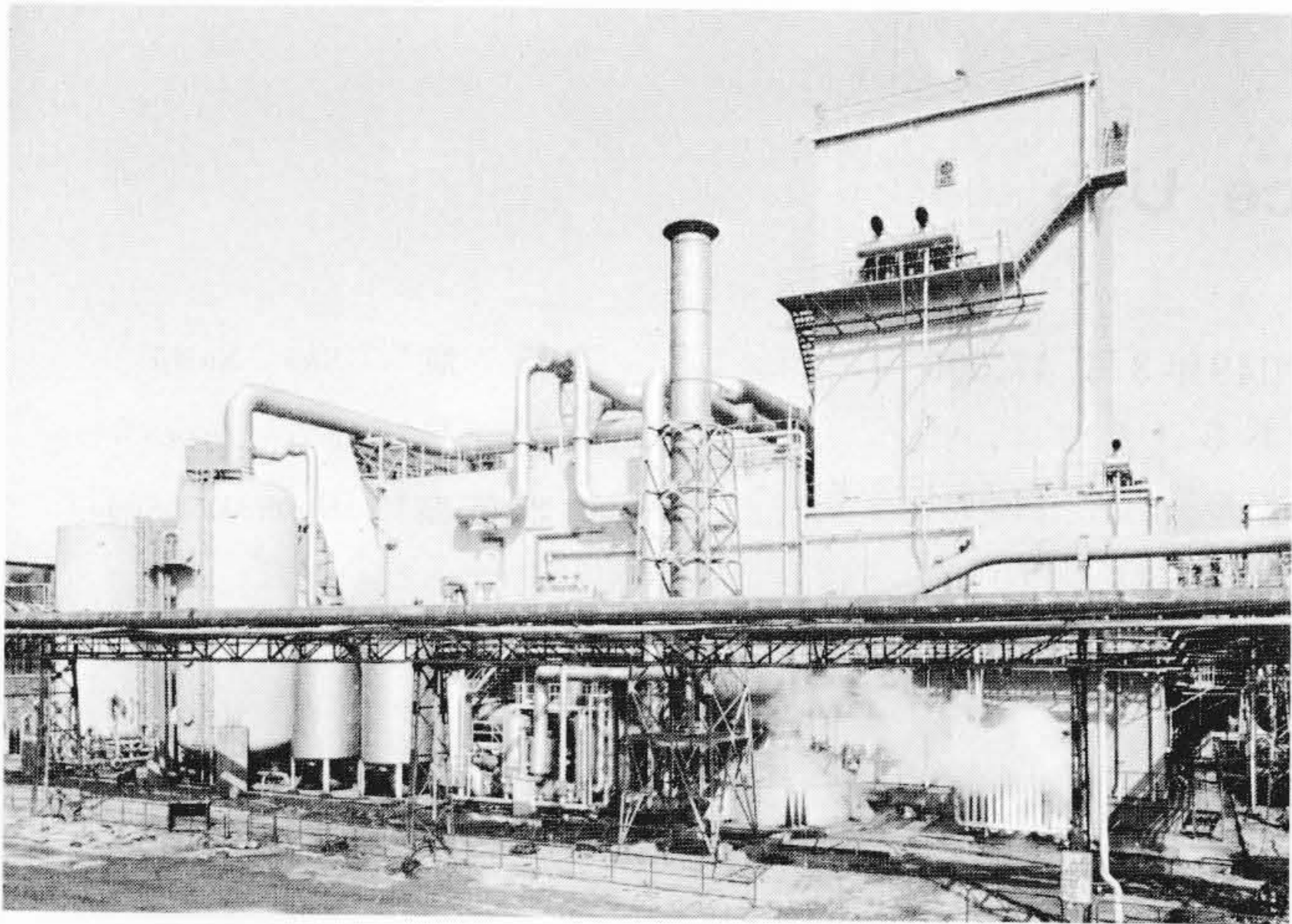


図2 47,000Nm³/h空気分離装置全景 川崎製鉄株式会社水島製鉄所に納入したもので世界最大規模のものである。

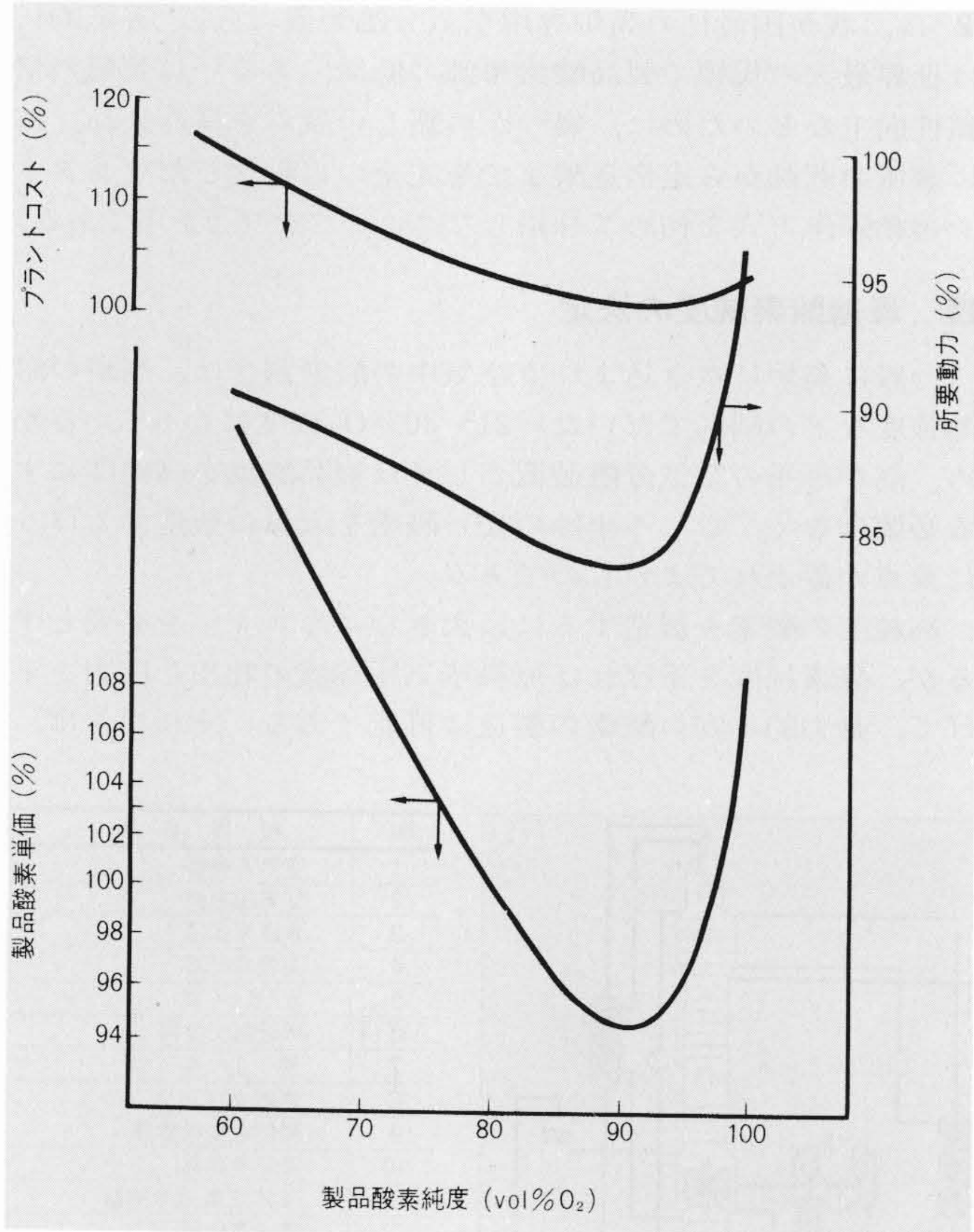


図3 酸素純度単価の関係 製品酸素純度90%のときがプラントとして最も経済的である。

製品酸素純度を幾らにすれば最も経済的な高炉専用のプラントが実現できるであろうか。

高炉専用プラントの実績として製品酸素純度が60%O₂が適当とする報告もあるがしかし、この値をそのまま最適純度と考えるにはあまりにも根拠薄弱であるため、製品酸素純度と飽和温度、製品酸素純度と精留塔圧損、原料空気圧縮機の吐出し圧力などを検討した結果、図3に示す曲線が得られた。これは製品酸素純度に対する製品酸素の単価、装置コスト、及び原料空気圧縮機の消費動力の関係を示すもので、これより高炉専用空気分離装置の最適発生酸素純度は90%O₂である

ということが言える。

我々はこの数字を基にして47,000Nm³/hのプラントを設計・製作し、所期の目標を達成することができた。

4 高炉への酸素富化方法

高炉に酸素を富化する方法として、高炉ブロワの吐出し側に酸素を吹き込む方法と、高炉ブロワの吸入側に酸素を吹き込む方法の二つがある。

(1) 高炉ブロワの吐出し側吹込み (図4)

これは従来から行なわれてきた方法で、酸素圧縮機としては転炉用のものを代用したり、高炉専用の新設したりしている。酸素は高炉ブロワの中を通らないので安全性の面では有利であるが、高価な酸素圧縮機を必要とするのでコスト的には不利である。

(2) 高炉ブロワの吸入側吹込み (図5)

この方法は、プラントで発生した酸素を高炉ブロワの吸入側に吹き込み、空気と一緒に高炉ブロワで圧縮するもので、高価な酸素圧縮機は必要としない。

但し、酸素リッチの空気を圧縮することになるので、高炉ブロワの安全性は十分に検討しておかねばならない。

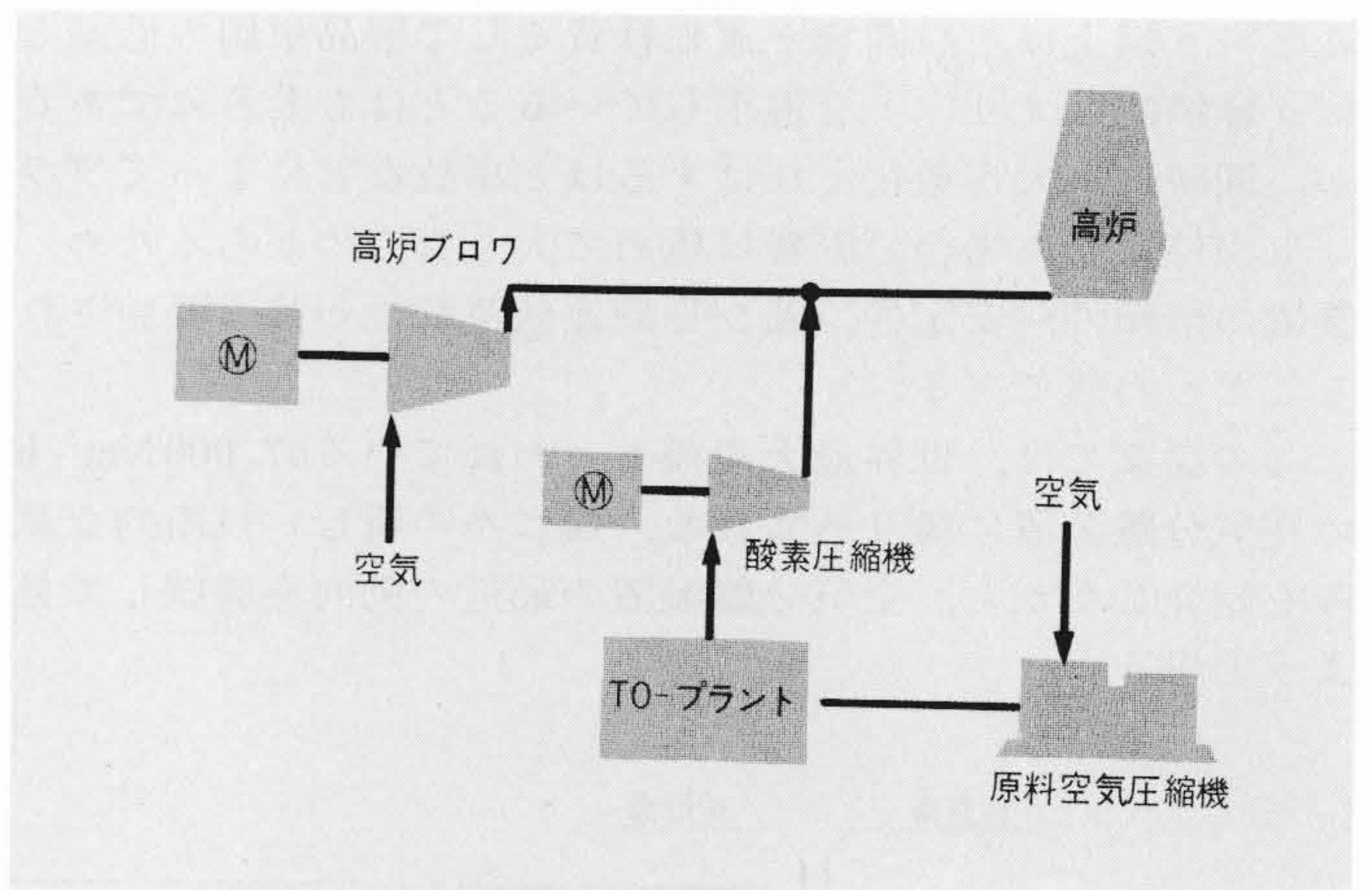


図4 高炉ブロワ吐出し側吹込み 酸素は高炉ブロワの中を通らないので、安全性の面では有利であるが、酸素圧縮機を必要とするのでコスト的には不利である。

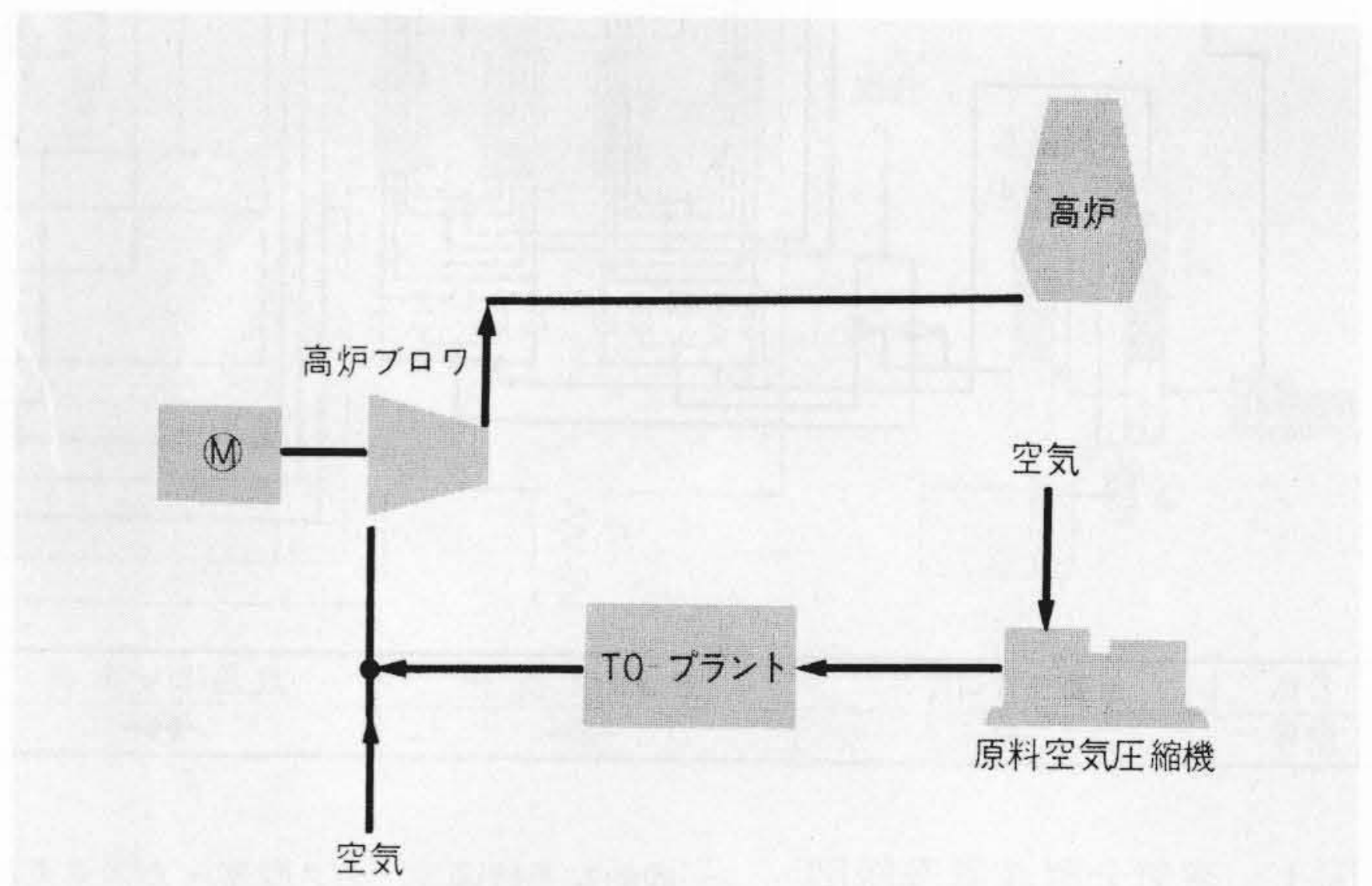


図5 高炉ブロワ吸入側吹込み 酸素圧縮機は必要としないが、酸素リッチの空気を圧縮することになり、高炉ブロワの安全性は十分検討しておく必要がある。

今回の $47,000\text{Nm}^3/\text{h}$ 空気分離装置においては、我が国で初めて、図5に示す吸入側吹込方式を採用したが、採用に先立ち、高炉ブロワの回転体その他の各材質については酸素ふんい気中での燃焼実験を行ない、高炉ブロワの安全性をまづ確認し、更に、ブロワの吸入側における酸素と空気のみキシングについてもモデル実験を重ねて、うず拡散の原理を応用した日立製作所独自の高炉用酸素混合装置を開発し、実機に採用した結果、十分に満足できる結果を得た。

このブロワ吸入側に酸素を吹き込む方式は、全体の設備費を考えると非常に興味深いもので、今後の計画には是非とも考慮すべきものと思う。

5 プラントの連続運転性

空気分離装置の連続運転期間としては1～2年というのが普通であったが、最近では3～4年という要求が出されるようになってきた。すなわち、定期検査の間隔をできるだけ延ばそうという思想から一歩進んで、機器、及び部品の信頼性を高めてその寿命一杯まで運転を続けようとする思想に変わってきたわけである。このためには、各構成機器・部品は十分に信頼性の高いものを選定する必要があり、更に寿命を考慮した適切な予備品の準備などによって長期連続運転を実現させねばならない。

5.1 原料空気圧縮機

構成機器の中では圧縮機が特に連続運転性を左右する。プラントが大容量化し、連続運転性が強く要求されるようになったため、従来の往復動式圧縮機は影をひそめ、代わって遠心式のターボ形圧縮機が登場してきた。最近のターボ形圧縮機の進歩は目覚ましく、処理風量 $250,000\text{Nm}^3/\text{h}$ （吐出し圧力 $5\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ ）まではこの形式が採用され、等温効率75%の圧縮機も製作できるようになっている。図6はターボ形圧縮機の一例を示すもので、ロータ流路部とか、中間冷却器でのドレン分離法の改良、腐食などによる性能低下を防止するための材質検討など、最適な設計が採り入れられていて、3～4年の連続運転にも十分耐えることができるものもできている。

5.2 Uタイプ配列のアルミプレート式可逆熱交換器

従来の石材充填式蓄冷器に代わってアルミプレート式可逆熱交換器を採用しているが、これは、(1)軽量である。(2)熱容量が小さいので装置の起動、及び加温時間が短縮できる。(3)切換え周期が短くできるのでページロスが少ない。(4)温端部を下にした倒立形設置となるので、切換弁の保守点検が容易である。といった諸特長があるため、熱交換器1個の大きさ

に限界があって、大容量プラントの場合には熱交換器の数が多くなるというマイナス面があるにもかかわらず、なお有利であると判定したためである。図7にアルミプレート熱交換器を、図8にその配列法を示す。

可逆熱交換器は原料空気中の水分、及び CO_2 を除去するものであるが、多数配列された熱交換器群の中で温度のアンバランスがあると、氷やドライアイスが生成して通路を閉塞し、プラントの連続運転を阻害することになる。これに対し、我々は図8に示す日立製作所独自のU字形配列の可逆熱交換器の採用と、起動時の低温バイパス回路の使用などによって良好な運転実績を収めている。

6 運転の自動化

プラントが大容量化するとそれだけ運転操作も難しくなってくるので、誤操作をなくすということを目的に運転の自動化が強く要望されてきた。これは当然運転員の削減にもつながるもので、従来から部分的にいろいろと研究が進められていたが、今回の $47,000\text{Nm}^3/\text{h}$ 空気分離装置において初めて起動から定格送酸までの全操作を自動化した。試運転の結果は上々で、現在順調に稼動中である。

6.1 自動化の計画概要

空気分離装置は自己平衡性の大きなプラントであるから、定常運転状態に入れば、炭化水素吸着器、及び循環吸着器などの切換使用機器の再生操作以外にはほとんど人手がかからない。また誤操作によるトラブルの可能性は、理論的にも、実績的にも起動冷却操作の段階に集中しているので、今回は起動冷却から定常運転までと、定常運転から停止までの全自動化、並びに切換使用機器の再生操作の自動化を行なった。なおこの自動化の設計に際しては、運転操作内容の徹底的見

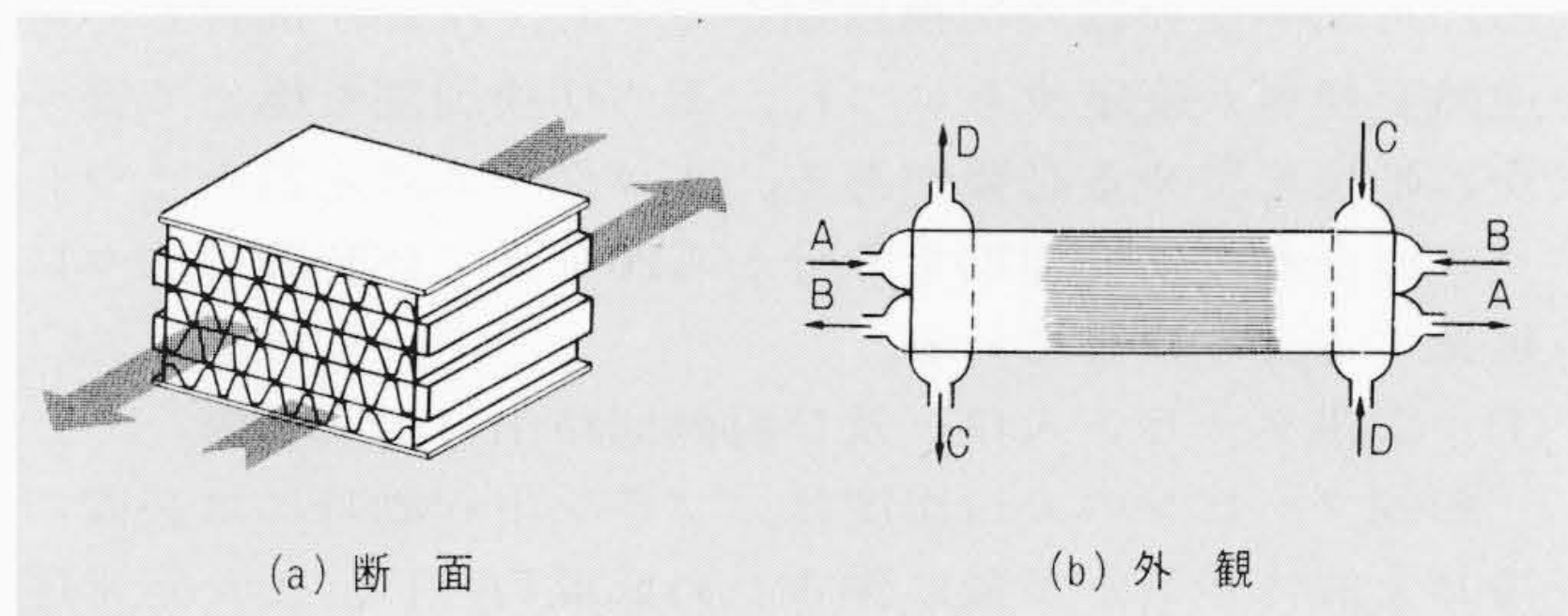


図7 アルミプレート式熱交換器 軽量で、起動及び加温時間が短縮でき、ページロスが少なく、切換弁の保守点検が容易である。

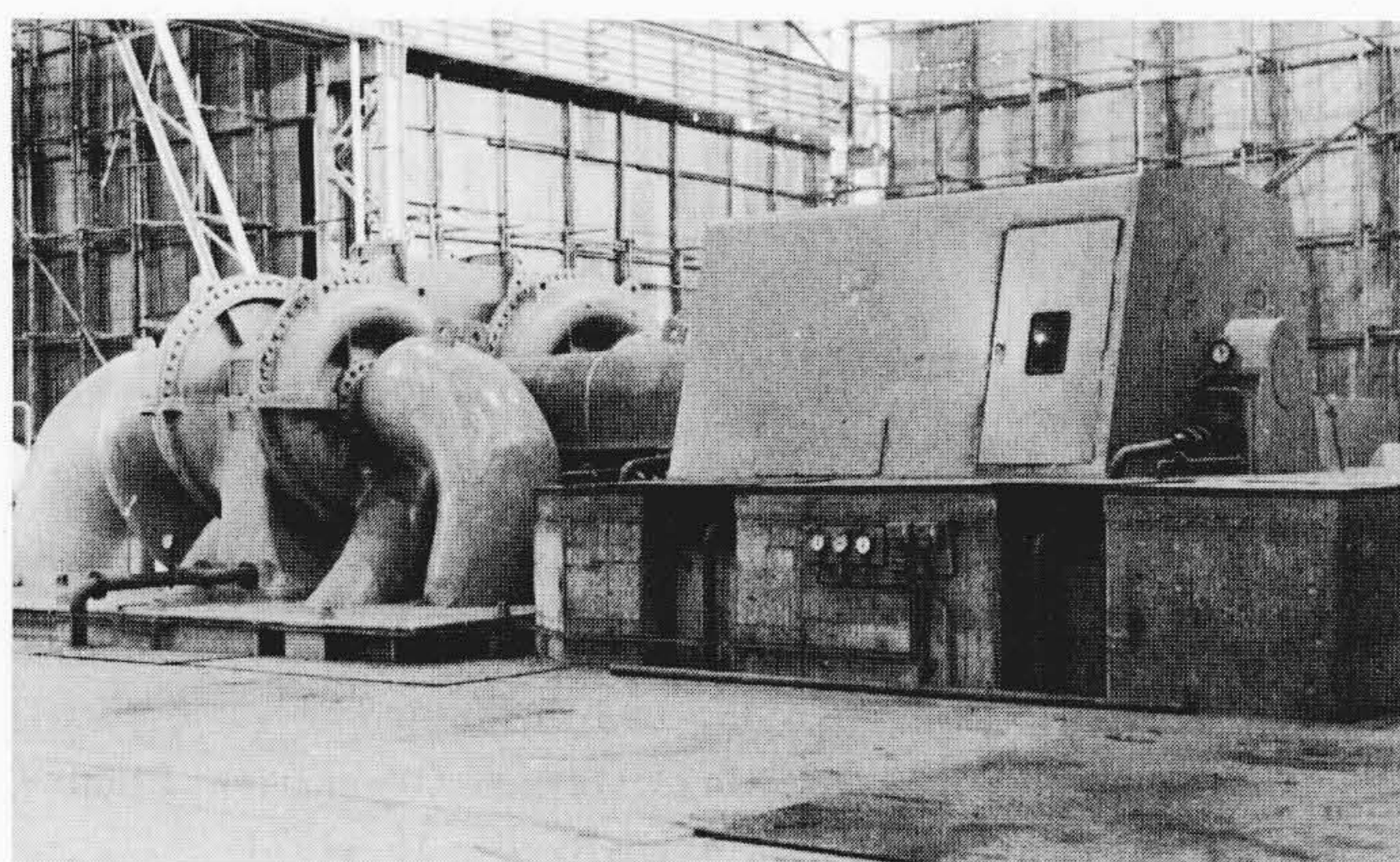


図6 ターボ圧縮機 大形空気分離装置用原料空気圧縮機で、最適な設計が採用され、3～4年の連続運転にも十分耐える。

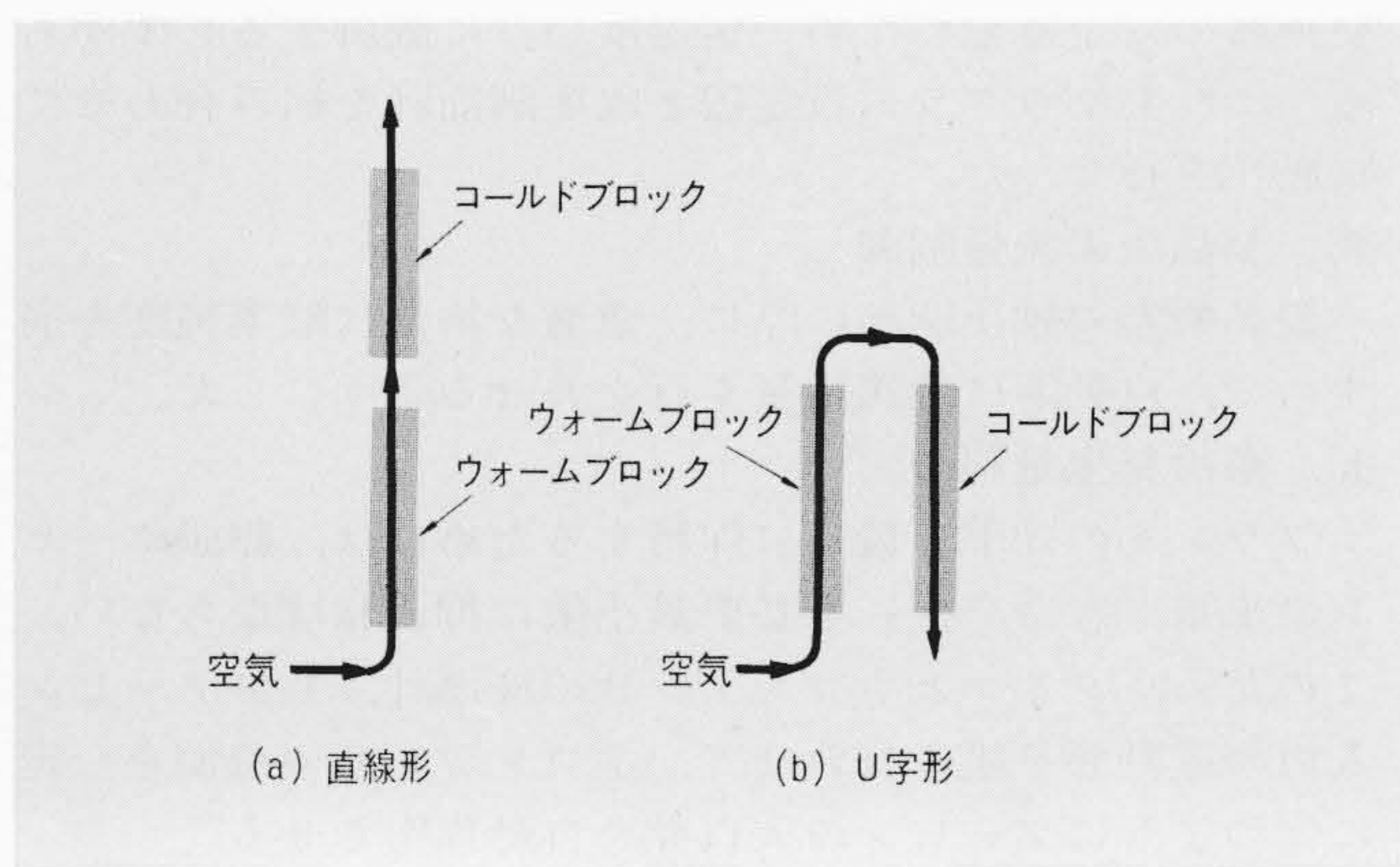


図8 アルミプレート式可逆熱交換器の配列法 低温ガス用熱交換器に適するものであり、配列によって性能が異なる。

直しと分析、整理を行なって合理的な運転方法をまとめ、実機を使ったシミュレーションを繰り返してソフトウェアの信頼性を確認したうえで実施に移した。また自動化のハードウェアとしては、電子計算機を用いる方式も考えられたが、今回は経済的にも有利で運転員も取扱いに慣れているアナログ計器とシーケンス制御の組合せ方式を採用した。

6.2 自動化の主な内容とその特長

(1) 自動起動関係

プラントの原料空気送入開始より定格量の酸素送出までを全自動で行なうもので、その内容は次のとおりである。

(a) 起動・停止工程制御

起動から停止までの工程を24ステップに分解し、あるステップから次のステップへの歩進は、温度、圧力などのプロセス変数、又は弁の開閉状態などをチェックし、これが設定条件を満足していれば指令が出て次へ進むことができるというシステムにしてある。

(b) 原料空気主管圧力の自動上昇

起動時、原料空気圧縮機の吐出し圧力は徐々に昇圧しなければならぬので、原料空気主管の圧力を0から $5\text{kg/cm}^2\text{g}$ まで5分間で自動的に昇圧させることにしている。

(c) 原料空気の自動送入

原料空気主管圧力が指定圧力まで上昇すると、原料主管弁がタイマ操作により徐々に段階的に開き、原料空気がプラント内に緩やかに送入され、膨張タービンがスムーズに起動する。

(d) 動力回収タービン用発電機の負荷自動制御

プラント起動時には、タービン入口温度が高く発生動力が定常時より大きいので、発電機が過負荷になるので、負荷制限器を設けて発電機の負荷を自動調節させる。

(e) 可逆熱交換器の切換周期の自動延長

プラント起動時には水分や CO_2 の掃気を完全に行なうため、可逆熱交換器の切換周期を短くし、冷却が進行して可逆熱交換器が安定するにつれ、その切換周期を極めて緩やかに延長してやる必要がある。プログラム設定器とカウンタの組合せで切換周期を5分から20分まで48時間で徐々に延長するようにしている。

(f) 膨張タービン入口、及び再熱回路出口温度制御

膨張タービンの入口温度は、プラント起動時には装置の冷却と液体空気を多量に作るため低温(t_1)に、また定常運転に入ってからではプラントのヒートバランス上より一定温度(t_2)に保つ必要あり、しかも、 t_1 から t_2 への移行はプラントの運転状態を乱さぬよう徐々に行なわねばならない。また再熱回路出口温度も定常運転に入ってからでは、可逆熱交換器の安定運転のため一定温度(t_3)に制御する必要がある。これもプログラム設定器と温度調節計を組み合わせで自動化を行なった。

(g) 製品酸素流量制御

製品酸素の抽出開始の際に、急激な増量は酸素純度を崩すので、自動的に最適増量を行なわせるようにした。

(h) 寒冷発生量制御

プラントの効率を最良に保持するためには、膨張タービンの風量(寒冷発生)を必要最小限に抑えねばならない。このため、タイマと主コンデンサの液面計、及びタービン入口の電動弁を組み合わせ、主コンデンサの液面を一定に保つようにタービンの入口弁を自動操作させる。

(2) バッチ方式吸着器の自動切換

ステップコントローラを用いて、定められた操作順序に従

って自動的に工程を進めるが、温度などのプロセス変数や、弁の開閉状態などが設定条件を満たさなければ次工程には進めないシステムになっている。

動作内容を第1塔を例にとって説明すれば、

第1塔使用→第2塔本予冷→第2塔使用→第1塔予備再生→第1塔本再生→第1塔予備予冷→第1塔待機→第1塔本予冷→第1塔使用

となり、それぞれ確実に温度を自動的にチェックしているので、完全な予冷と再生ができる。ここで各工程の内容は、

使用：液化ガス中の不純物の吸着動作中をいう。

予備再生：吸着器を常温の乾燥空気により、ほぼ常温まで昇温する操作

本再生：吸着器を高温(約 180°C)の乾燥空気により再生する操作

予備予冷：本再生後の吸着器を常温の乾燥空気により、ほぼ常温まで冷却する操作

待機：吸着器のすべての出入口弁を閉止し、吸着器に流体を流さない状態

本予冷：吸着器を液化ガスにより、液化ガスの飽和温度近くまで冷却する操作

(3) アナログ制御

次の項目についてはそれぞれアナログ制御を行ない、また随所にインターロックを設けて、安全性と信頼性の面において完璧を期している。

(a) 膨張タービン入口温度自動制御

(b) 可逆熱交換器再熱回路出口温度自動制御

(c) 不純窒素低温主管温度自動制御

(d) 原料空気主管圧力自動制御

(e) 製品酸素出口圧力自動制御

(f) 不純窒素低温主管圧力自動制御

(g) 液体酸素循環ポンプ吐出し圧力自動制御

(h) 水洗塔水面自動制御

(i) 蒸発冷却塔水面自動制御

(j) 液酸ポンプシールガス圧力自動制御

(k) 精留塔下塔液体空気液面自動制御

(l) 製品酸素量自動制御

(m) 水洗塔供給水量自動制御

7 結 言

最新の大容量空気分離装置に採用して成果のあった幾つかの試みを紹介したが、このような努力の積み重ねで大容量プラントでの製品酸素の電力単位は $0.42\text{kWh}/\text{O}_2\cdot\text{Nm}^3$ 程度まで下がってきている。しかし、これから先まだまだ、スケールメリットを追求してプラントの大容量化は進むであろうし、また石炭ガス化その他への空気分離装置採用も追い追い具体化してくるであろう。従って、電力原単位の低減、装置の安定性、安全性、及び自動化への改善向上の努力は引き続き進められなければならないし、またその余地もあるものと信じている。

参考文献

- (1) 齊藤、岡部：「高炉専用空気分離装置(TO-プラント)の最適純度の検討」日立評論 55, 683 (昭48-7)
- (2) I. Sakaguchi, S. Saito, "Huge Oxygen Generation Plant for Blast Furnace Use", CEER, 6, 16 (1974)
- (3) 齊藤：「最近の空気分離装置の動向」日本機械学会誌 77, 548 (昭49-5)