

総 説

大陽日酸における空気分離装置の開発の歴史

History of air separation unit technologies developed by TNSC

田村 雅洋*

TAMURA Masahiro

当社は、1935年に我が国初の空気分離装置の国産化に成功した。それ以来、これまでの豊富な経験と優れた技術力により、顧客ニーズにマッチしたプロセスを設計するプロセス技術や原料空気中の水分、炭酸ガスなどを除去する前処理設備、空気分離装置の中核部分である精留塔などの低温機器をはじめとする様々な技術開発を行ってきた。100年を超える歴史を持つ空気分離装置であるが、このような技術力を基盤として今も進歩し続けている。当社がこれまで行ってきた空気分離装置の開発を紹介して、今後これらの技術をどのように展開させていくかを述べる。

1. はじめに

産業界における酸素の利用は、鉄鋼をはじめとして化学、造船、非鉄、ガラス、医療など幅広い分野にわたる。特に、1970年代における鉄鋼向け酸素需要の増加に伴い、空気分離装置の大型化が進んだ。1970年代では装置1基あたりの酸素生産量は最大35000 Nm³/hであったが、現在では最大65000 Nm³/hとなっており、装置の自動化など運転操作性も大幅に向上した。また、電力原単位は1970年代と比べ約20%削減されている。

一方、窒素製造装置においても、エレクトロニクス産業の発展に伴い、急速な大型化と省電力化が進んでおり、装置1基あたりの窒素生産量は最大25000 Nm³/hとなっている。また、電力原単位についても1990年代と比べて約30%削減されている。

このようにして、空気分離装置における顧客ニーズに応えるように開発を行ってきた。本稿では、これまでに開発した技術や装置の特徴をいくつか紹介して、今後の展開を述べる。

なお、本総説における空気分離装置とは、深冷分離法により、原料である空気から主に窒素、酸素、アルゴン等を製造する装置である。窒素製造装置は、同法により窒素の製造に特化した装置である。

2. 装置型式および呼称

空気分離装置には、深冷分離部に空気を導入する前に原料空気中に含まれる水分や炭酸ガスなどの不純物を除去する前処理設備がある。1970年代まではリベックス方式 (Revex) 又は蓄冷器方式 (Regenerator) であったが、1980年代以降はMS吸着器方式 (モレキュラーシーブス: Molecular Sieves) が採用されている。当社では、空気圧縮機の出口圧力および前処理設備から装置型式を決めている。空気圧縮機の出口圧力が低圧 (0.5MPaG以下) でリベックス方式又は蓄冷器方式であれば、ドイツ語の低圧という意味のNiederdruckとRevex又はRegeneratorの頭文字からNR型装置となる。これは当初、装置をドイツから輸入していたことに由来する。また、空気圧縮機の出口圧力が中圧 (0.5MPaG以上) でMS吸着器方式であれば、同様にドイツ語の中圧という意味のMitteldruckと吸着剤 (Gel) の頭文字からMG型装置となる。ただし、現在は圧力区分が明確ではなく、低圧でMS吸着器方式においてもMG型装置としている。また、液製品を生産するため、中圧液化サイクルが設置される装置は、中圧のMを付けてそれぞれMNR型およびMMG型となる。製品ガスを液化ガスポンプで圧縮する内部圧縮型装置はMGP型装置となる。例えば、MG型で原料空気量が185000 Nm³/hの場合、MG185000型装置と呼んでいる。NR型の場合

* プラントエンジニアリングセンター技監

は、下3桁の数字を省略してNR185型装置と呼んでいた。

また、窒素製造装置も同様にMG型窒素装置としていたが、主に国内向け標準装置はJN型窒素装置とする。現在、主に海外市場向け標準装置としてGNS型窒素装置およびGND型窒素装置の開発を進めている。これは、それぞれGlobal Nitrogen Single column および Global Nitrogen Dual column の頭文字をとったものである。

3. 技術提携と協業

1962年、当社はLinde（当時Linde本社は西ドイツであったが現在は英国）から空気分離装置の世界最先端技術を導入するため、技術提携契約を締結した。これにより、従来の空気分離装置では低温機器の材料に銅材や真鍮材を使用していたが、これをアルミニウム材に変更することで、コストダウンおよび安全性の向上を図った。また、Lindeの大型空気分離装置の製作技術を導入することで、大型装置の開発、技術力の向上を通じて、当時のオンサイトプラント計画に大きく貢献した²⁾。

技術提携契約の締結以来、装置およびガスの製造に関するアルミ材選定や溶接・加工技術、精留塔など主要機器の設計に必要な基礎データや製作図面を取得することができ、契約が終結するまでの18年間で、当時の最大規模である酸素35000Nm³/h装置を含む、75装置のLinde型空気分離装置を製作した。本契約に基づき製作された装置には、“Licensed by Linde”という銘板が付けられ、現在も残っている。Linde銘板をFig.1に示す。



Fig. 1 Linde 銘板（旧日本酸素製）

1980年、Lindeとの技術提携契約終結後、当社では独自技術の改良・改善のための開発部門が設置・強化され、

空気分離装置の開発が盛んに行われることになる。空気分離装置の開発の歴史を Fig.2（次頁）に示す^{6,10,13,16,22,25-28,38,45,48,52,64}。また、これを機にそれまで制約があった海外市場への空気分離装置の輸出が本格化することになる。

2000年、それまで当社は独自技術で酸素最大35000Nm³/hまでの装置を設計、製作することはできたが、装置の更なる大型化には精留塔やMS吸着器の製作において課題があった。そこで、今後大型化する国内市場のニーズに応えるためLindeと大型装置の製作に関する協業を開始し、現在も継続している。

この協業により、2002年、鋼管サンソセンター（現JFEサンソセンター）福山工場に酸素50000Nm³/h装置が設置され、この装置には初めてDFR式主凝縮器（流下液膜式主凝縮器: Down-Flow Reboiler）が採用された³⁰⁾。また、2005年、JFEサンソセンター京浜工場に設置した酸素65000Nm³/h装置は国内最大規模であり、この装置にはクリプトン/キセノン濃縮筒およびネオン濃縮筒が設置された⁴²⁾。更に、国内最大となる高純度キセノン製造装置を設置した⁵⁶⁾。このLinde協業により、これまでに7装置の国内大型装置が設置された⁶²⁾。酸素65000Nm³/h装置の基本仕様をTable 1に示す。

Table 1 酸素 65000 Nm³/h 装置の基本仕様

製品	流量(Nm ³ /h)	純度(vol)
酸素ガス	61400	O ₂ ≥ 99.6 %
液化酸素	3600	O ₂ ≥ 99.8 %
高純窒素ガス	80000	O ₂ ≤ 0.1 ppm
粗純窒素ガス	20000	O ₂ ≤ 3 %
粗アルゴンガス	1580	O ₂ ≤ 1.5 %
液化粗アルゴン	400	O ₂ ≤ 1.5 %
Kr/Xe濃縮液酸	80	低純度
濃縮Neガス	8.5	低純度
原料空気	320000 Nm ³ /h、456 kPaG	
電力原単位*1	0.364kWh/Nm ³	

*1 電力原単位＝電力消費量／(酸素ガス＋液化酸素)流量

4. プロセス開発

当社は、空気分離装置の多様化する顧客要求に合わせた各種プロセスの開発を行ってきた。次に、当社がこれまでに開発したプロセスおよび装置の一部を紹介する。

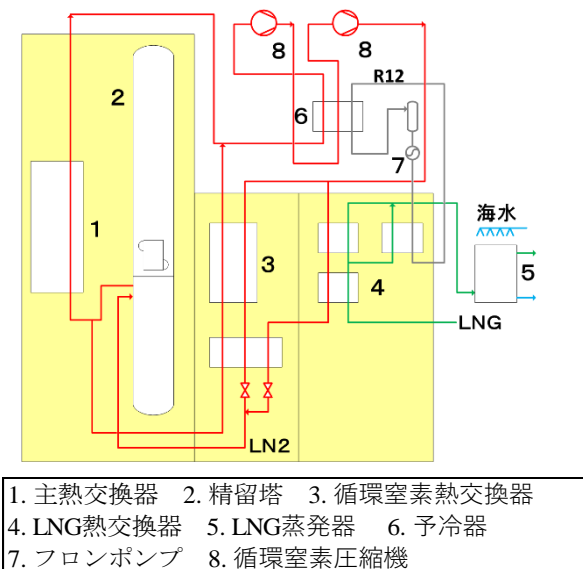
4.1 LNG 冷熱利用型プロセス

本誌技報 No.1 で紹介したとおり、日本へのLNG（液化天然ガス: Liquefied Natural Gas）導入は、1969年にアラスカからLNG専用タンカーが横浜港に入港した

開発テーマ	大陽日酸(2004年～)					
	1970年	1980年	1990年	2000年	2010年	2020年
Linde技術提携と協業	技術提携(～1980年)		協業(2000年～)	★ 酸素65,000Nm ³ /h装置(2005年)		
プロセス開発	★ LNG冷熱利用初号機(1971年) Kr/Xe分離	需要変動対応型 夜間電力利用型初号機(1991年) 低純酸素	Kr/Xe分離	Ne分離 大幅需要変動型 ミキシングカラム ★ 低原単位	高圧LNG利用型 Xe精製 ミキシングカラム	希ガス精製
高純度酸素併産型窒素製造プロセス			低純酸素 内部圧縮型初号機(2002年) 標準液プラント	HIDIC利用 ★	内部圧縮液併産型 酸素併産型初号機(2019年) ★	
標準窒素製造装置	JNシリーズ、GNシリーズ 省電力窒素製造装置 次世代窒素製造装置	JN初号機(1982年) ★ JNS 低圧リボラー式	JNT、JNP、JNC、JNM 2塔式	JNR、JNE JNF	GNS、GNDシリーズ	
前処理設備	MS単層型 MS吸着器 MS吸着器シミュレータ 常温TSA吸着器 常温触媒	積層型初号機(1987年) ★ PTSA型 MS吸着器シミュレータ 常温PTSA型 H ₂ ・CO除去触媒	高性能MS MS吸着器シミュレータ 常温TSA型 H ₂ ・CO除去触媒	高速流化MS MS吸着器シミュレータ改良 適用範囲拡大	次世代(充填塔) 超高純酸素併産型 半後流式 新規MS吸着材 新規常温触媒	
低温機器	精留塔 下部塔 充填材 主凝縮器	充填式精留塔	★ 充填式精留塔初号機(1996年) 4流直立式下部筒 充填材高密度化	DFR式 充填材、ディストリビューターの開発	多段式 カスケード式	
膨張タービン	NET-A型	★ NET-A型初号機(1985年) NET-M型	NET-C型	ハイブリッド軸受、5軸制御	ラインナップ拡大 ラインナップ拡大	
運転制御	気体軸受型膨張タービン 磁気軸受型膨張タービン 低圧圧縮動型膨張タービン	ダイナミックシミュレータ 教育用シミュレータ	NET-C型	教育用シミュレータ 教育用シミュレータ	次世代ダイナミックシミュレータ 教育用新シミュレータ	
		液化装置自動起動 全自動制御	エキスパート	ファジー制御 EzMPICS	フィールドバス 最適化 JN総合監視センター	

Fig. 2 空気分離装置の開発の歴史

のが始まりである³⁾。LNG 導入以前から LNG 冷熱利用に関する検討は既に行われており、技術誌や専門誌などに利用技術の調査結果が発表されていた。当社においても、1968年に「LNG冷熱利用技術委員会」が設置され、基本技術、安全性、経済性および将来性などを検討し、空気分離装置、特に液化酸素・液化窒素の製造設備において LNG 冷熱利用型装置の積極的展開が有望であるとの結論を得た。1969年から設計・製作に着手して、1971年に世界初の LNG 冷熱利用型空気分離装置を東京液化酸素へ納入した。その後、低温圧縮機や高圧熱交換器の採用など新技術を採用し、通常の空気分離装置に比べ、電力原単位が約半分となる装置を完成することができた。当社は、LNG 冷熱利用型装置をこれまでに国内外合わせて9装置を納入した。LNG 冷熱利用型空気分離装置の系統図を Fig.3 に示す。



- 1. 主熱交換器
- 2. 精留塔
- 3. 循環窒素熱交換器
- 4. LNG熱交換器
- 5. LNG蒸発器
- 6. 予冷器
- 7. フロンポンプ
- 8. 循環窒素圧縮機

Fig. 3 LNG 冷熱利用型空気分離装置の系統図

1990年代までに納入した装置は、低圧 LNG (1～3MPaG) を利用した装置であったが、2000年代以降は、高効率発電設備の導入に伴う LNG 高圧化に対応するため、既設装置を高圧 LNG (7MPaG) 利用型への改造工事を行い、これまでに3装置を納入した。改造コストを最小限に抑えるため、LNG 系統のみ更新し、その他は既存設備を流用した。流用部分の運転状態を維持するため、LNG 使用量を増加することで改造前と同じ消費電力、生産量で運転できることを確認した⁵⁾。

4.2 夜間電力利用型プロセス

液化酸素および液化窒素を製造する液化装置では、高圧かつ大容量の圧縮機を使用するため多量の電力を消費する。1980年代当時は、電力需要は昼間に多く、夜間および休日に少なくなる状況であり、電力会社は、夜間・休日電力単価を昼間の半分以下にすることで電力需要の平準化を目指していた。よって、夜間および休日に電力を多く使用する契約にすることにより、安価な電力を使用することができた。

そこで、液化装置を安価な時間帯のみ運転する夜間電力利用型装置を開発した。空気分離部は昼夜連続運転、液化装置部は夜間のみ運転として、昼間時に必要な寒冷は貯槽から液化窒素を注入することにより、空気分離部を一定運転とすることができる。ただし、液化装置部は、夜間および休日のみ運転するため、平均生産量より大流量を処理可能な大型の液化装置が必要となる。また、装置は毎日起動停止する、DSS (Daily Start and Stop) 型液化装置であり、圧縮機や熱交換器などの設備に起動ストレスが多く発生するため、ストレスに耐えられる設計および材料選定が必要であった。更に、装置

は DCS (コンピュータ分散型制御装置: Distributed Control System) により自動制御され、起動停止時間の短縮およびワンタッチ操作による起動停止を可能とした。また、このワンタッチ起動停止操作は、DCS 内のカレンダーによるスケジュール化で省略することができる。1991 年、この夜間電力利用型空気分離装置の初号機を東邦アセチレンへ納入し、これまでに 6 装置を納入した¹⁴⁾。夜間電力利用型空気分離装置の系統図を Fig.4 に示す。

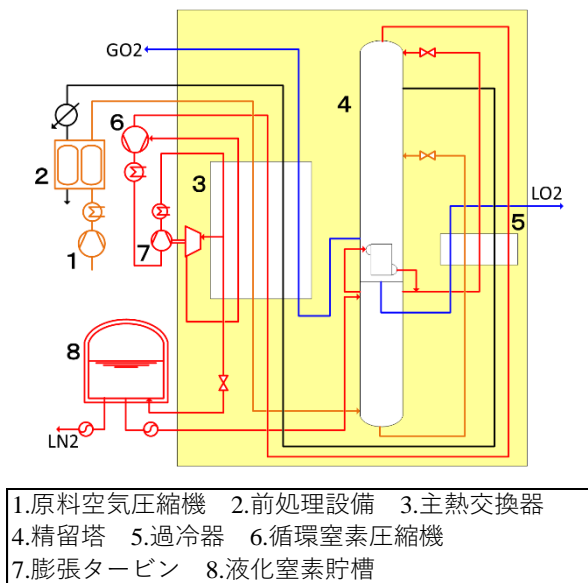


Fig. 4 夜間電力利用型空気分離装置の系統図

4.3 内部圧縮型プロセス

これまで紹介した MG 型装置は、全低圧式プロセスを採用しており、製品酸素ガスは低圧酸素ガスとして発生する。酸素ガスを必要な圧力まで昇圧するためには酸素圧縮機が必要となる。ただし、酸素圧縮機は空気圧縮機と比べて、高価かつメンテナンス周期が短いという欠点がある。そこで、装置の主凝縮器内の液化酸素をポンプで製品圧力まで昇圧し、高圧空気と熱交換することで気化・昇温する内部圧縮型装置を開発した。この方式は、高価な酸素圧縮機の代わりに、より安価な空気昇圧機と液化酸素ポンプを用いることで、従来装置と比べて設備コストを低減できる。

また、内部圧縮型装置では、主凝縮器より製品酸素量に相当する液化酸素を抜き出すため、主凝縮器内の液化酸素中の炭化水素濃度を大幅に低減できるので、装置の安全性が向上する。2002 年、周南酸素に内部圧縮型空気分離装置の初号機を納入した³⁴⁾。更に、高圧の酸素ガスを発生すると同時に液体製品を生産する要求がある場合には、別途液化装置を設置することなく、装置の酸素昇圧部に液体製品採取用の液化プロセスを

組み込んだ液併産可能な内部圧縮型空気分離装置も考案し、完成させた^{47,49,58)}。液併産内部圧縮型空気分離装置の系統図を Fig.5 に示す。

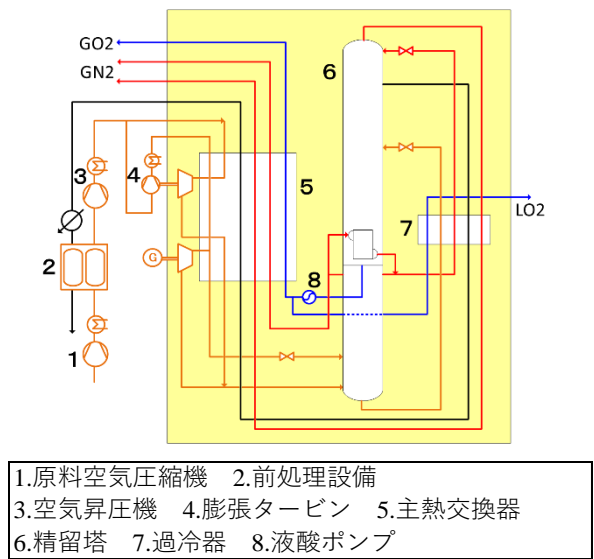


Fig. 5 液併産内部圧縮型空気分離装置の系統図

4.4 高純酸素併産型窒素製造プロセス

2003 年、当社は従来の窒素装置に比べ、約 30%の電力削減(電力原単位 0.195kWh/Nm³)と定格製品量の約 50%までの効率の良い減量運転が可能な 2 塔式窒素製造装置を開発した^{40,44,46,55,60)}。

その後、半導体産業の発展による窒素ガスの需要増加に伴い、少量酸素ガスを同時に使用する要求が増加したため、2015 年には 2 塔式窒素製造装置の改良型として、更に窒素収率を改善するとともに、少量の酸素ガスを併産して、低原単位かつ省スペースを実現した高純酸素併産型窒素製造装置を開発した。この装置は、2 塔式窒素製造装置に、酸素製造のための第 3 精留塔を設置し、内部圧縮型プロセスを組み合わせたものである。窒素ガスは、高圧塔から製品として取り出され、低圧塔から取り出された窒素ガスは、窒素圧縮機で昇圧されて、高圧窒素ガスに合流して製品となる。一方、酸素ガスは第 3 精留塔底部より液化酸素が抜き出され、液化酸素ポンプで昇圧されて、主熱交換器で気化、昇温されて製品となる。この装置では、一般的に内部圧縮型プロセスで使用される空気昇圧機が省略できる。また、原料空気圧縮機と窒素圧縮機のコンバイン機を採用することにより、装置がコンパクトになっている。更に、MS 吸着器には、常温吸着剤と水素(H₂)・一酸化炭素(CO)除去触媒が採用されており、高純度化にも対応可能となっている。2019 年、岩手黒沢尻ガスセンターに高純酸素併産型窒素製造装置の初号機を納入した⁶¹⁾。

高純酸素併産型窒素製造装置の系統図を Fig.6, 装置の基本仕様を Table 2 に示す。

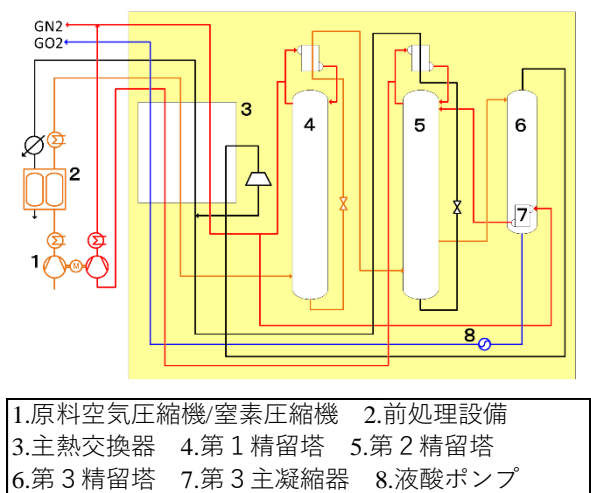


Fig. 6 高純酸素併産型窒素製造装置の系統図

Table 2 高純酸素併産型窒素製造装置の基本仕様

製品	流量(Nm ³ /h)	純度(vol)
窒素ガス	20000	O ₂ ≤ 0.1 ppm CO ₂ , CO, H ₂ ≤ 0.1 ppm H ₂ O ≤ 1 ppm
酸素ガス	1400	O ₂ ≥ 99.5 % CO ₂ ≤ 3 ppm CO ≤ 1 ppm CH ₄ ≤ 25 ppm H ₂ O ≤ 2.5 ppm
製品圧力	800 kPaG (窒素ガス、酸素ガス)	
原料空気	34500 Nm ³ /h, 920 kPaG	
電力原単位*1	0.208 kWh/Nm ³	

*1 電力原単位=電力消費量/(窒素ガス+酸素ガス)流量

5. 標準窒素製造装置

窒素ガスは、半導体産業をはじめとして、石油化学、繊維、ガラスなど幅広い分野で利用されている。当社は、窒素ガスを単独製品とする窒素製造装置の初号機を1936年に製作して以来、国内外の需要に対応してきた。この間、様々な市場要求に対応して、装置の改良・改善を行い、装置コストの低減と電力原単位の向上を図ってきた。1970年代に入ると、窒素製造装置に対する世界的な競争が激化し、より高性能および低コストの装置が求められるようになった。当社は、1982年に、従来装置より約18%の電力原単位低減と約10%の価格低減を実現したJN型窒素製造装置の初号機を完成させ、窒素製造装置のシリーズ化(JNシリーズと命名)を果たした⁴⁾。当時のJN型窒素製造装置は、多様な需要に対応するため、窒素ガス100~1000 Nm³/hまでの9機種を標準装置として設定した。

1984年から半導体産業向けに大幅なガス需要が見込

まれ、全国各地に窒素製造装置を設置するTGC (Total Gas Center) 計画が推進されることになった。JNシリーズは、このTGC計画に大きく貢献することになる。^{8,11)}

更に、1988年、半導体産業向けに、高純度化と装置の各機器をコンテナ内に収めるユニット化、遠隔監視および自動運転を特徴とした、JNS型窒素製造装置をシリーズ化した。

JNS型装置の改良版として、前処理設備に常温PTSA吸着器(圧力温度スイング吸着: Pressure and Thermal Swing Adsorption)を採用してノンフロン化を図った、JNT型窒素製造装置が完成した。その後、更なる改良の結果、前処理設備にノンフロン化に対応する常温TSA吸着器(温度スイング吸着: Thermal Swing Adsorption)を採用した、JNP型窒素製造装置をシリーズ化した。JNP型装置では、製品の高純度化と装置の低騒音化を実現し、JNS型装置で採用したコンテナを廃止して、低騒音ボックスに各機器を収納することにより、外観上の改善も図った。

また、1997年、液供給からのガス化によるオンサイト競争が厳しくなり、小容量および省スペースを目的として、ユニット上部に分離器と貯槽を設置した小型オンサイト装置として、JNC型窒素製造装置が完成した。JNC型装置は、膨張タービンを設置せず、貯槽から液化窒素を注入する液注方式で運転され、空冷式冷却器を採用することにより冷却水を不要とした。徹底した省スペース化を実現して、ユニット設置面積は12m²となった²¹⁾。

これまでJNシリーズとしては、JNP100型装置(窒素ガス1000 Nm³/h)が最大流量であったが、需要増加に対応するためのJNP100型装置の代替および更なる電力原単位を目的として、JNR150型窒素製造装置(窒素ガス1500 Nm³/h)を開発した。JNR150型装置は、膨張タービン制動用圧縮機で低温廃ガスを昇圧し、精留塔へ導入して再蒸留することにより、窒素ガスの製品収率向上を図る、廃ガス循環サイクルを初めて採用した装置である³⁹⁾。

2010年以降は、JNP型装置の後継機となる高純度対応型装置として、JNF型窒素製造装置を開発した。JNF型装置では、各機器を柔軟に配置できるようにボックスを廃止して、価格低減を図った。また、JNF型装置には、窒素装置として初めてとなる充填式精留塔を採用してコールドボックスの軽量化を図った⁵⁰⁾。

現在、主に海外市場向け標準窒素製造装置として、GNS 型窒素製造装置および GND 型窒素製造装置のシリーズ化を計画している。この装置は、徹底したモジュール化による現地工事費用のミニマム化および全体納期の大幅な短縮を目的として、更なる競争力の向上が図られている。GNS 型窒素製造装置のイメージ図を Fig.7 に示す。

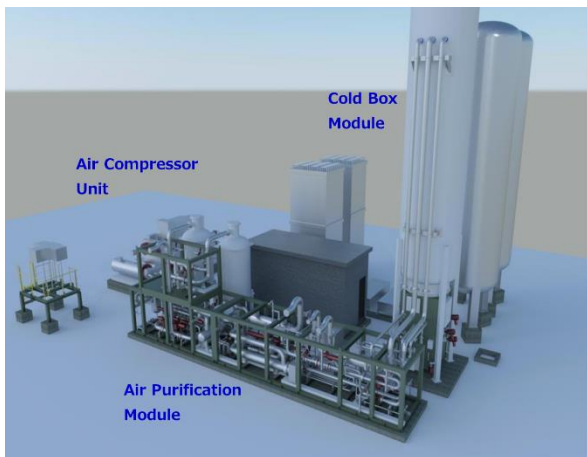


Fig. 7 GNS 型窒素製造装置のイメージ図

6. 前処理設備

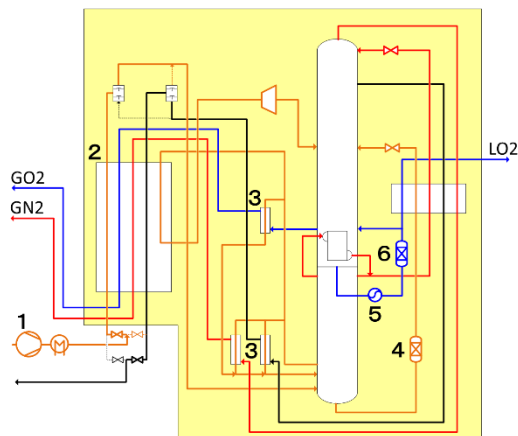
前述の通り、空気分離装置を安全に運転するためには、原料空気中に含まれる水分や二酸化炭素などの不純物を前処理設備にて除去する必要がある。当社では、この前処理設備に加熱再生方式の TSA (Thermal Swing Adsorption) 吸着器を採用している。

6.1 リバーシング熱交換器

TSA 吸着器より以前は、リバーシング熱交換器を用いた前処理設備が使用されていた。リバーシング熱交換器を用いた NR 型空気分離装置の系統図を Fig.8 に示す。

この方式では、空気が熱交換器を通過する際に冷却され、空気中の水分および二酸化炭素は熱交換器内部の低温部でフィン表面に析出する。これにより、熱交換器出口の低温空気中には、水分と二酸化炭素は殆ど含まれない。フィン表面の析出物は、帰還する廃窒素ガスによってパージされ、昇華・蒸発して除去されるが、そのパージに必要な廃窒素ガスは導入される空気量の約 50%相当量が必要となる。したがって、製品窒素として取り出せるガス量が制約される。また、原料空気中に含まれる炭化水素類は除去されないため、分離器内部に

アセチレン吸着器および循環吸着器の設置が必要であった。



- 1.原料空気圧縮機
- 2.リバーシング熱交換器 (リベックス)
- 3.液化器 4.アセチレン吸着器
- 5.液酸ポンプ 6.循環吸着器

Fig. 8 NR 型空気分離装置の系統図

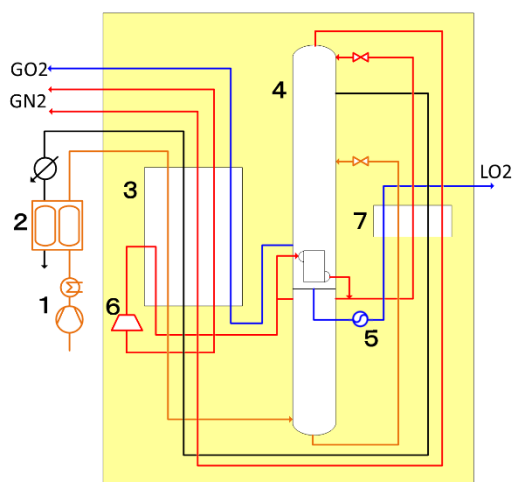
6.2 MS 吸着器

このようなリバーシング熱交換器の欠点を解消するため、当社は吸着式の前処理設備の開発に着手した。1961 年には水分を常温のアルミナゲルで、二酸化炭素を低温のシリカゲルで除去する方式を開発し、1966 年には、Na-X ゼオライトで水分と二酸化炭素を吸着除去する単層型 MS 吸着器を窒素製造装置用として実用化した。ただし、開発当初は、吸着剤の再生エネルギーが大きいなど、リバーシング熱交換器と比較して見劣りする部分があり、前処理設備が吸着式に置き換わるのはもう少し後のこととなる。

その後、当社では 1984 年頃から吸着方式の本格改良に着手し、高性能 MS 吸着剤が開発され、水分をアルミナゲル層で、二酸化炭素をゼオライト層で吸着除去する積層型 MS 吸着器を採用するようになった。再生に必要な廃ガス量は空気量の約 20%、再生温度は 140℃ であり、製品窒素ガス量が大幅に増加すると同時に再生に必要なエネルギーが低減された。1987 年、新南陽サンソ向け MG25500 型装置に積層型 MS 吸着器の初号機が採用された。また、炭化水素類の一部が MS 吸着器で除去されるため、アセチレン吸着器および循環吸着器が不要となり、分離器内部がコンパクトになった。MS 吸着器を用いた MG 型空気分離装置の系統図の一例を Fig.9 (次頁) に示す。

6.3 常温 TSA 吸着器

MS 吸着器には、TSA 吸着器が採用されている。原料



1.原料空気圧縮機 2.前処理設備
3.主熱交換器 4.精留塔
5.液酸ポンプ 6.膨張タービン 7.過冷器

Fig. 9 MG型空気分離装置の系統図

空気は、空気圧縮機で圧縮された後、水冷却器で約 40℃まで冷却され、更にフロンを用いた冷却設備で 5～10℃まで冷却されて前処理吸着器へ導入される。また、前処理吸着器の再生に使用される再生ガスの低減および吸着器の小型化による省エネルギー、コスト低減のためには、吸着器に入る空気をフロン冷却器で冷却することは有効な操作である。しかしながら、1995 年末に特定フロン類が廃止され、代替フロンも 2004 年からの段階的削減が決まった。そこで、当社は環境規制に対応した、フロン冷却器を用いないノンフロン化に対応した常温 TSA 吸着器を開発した²⁰⁾。

この吸着器では、活性アルミナ系吸着剤と合成ゼオライト系吸着剤を充填した積層型 MS 吸着器が用いられる。原料空気をフロン冷却器で冷却することなく吸着器に導入した場合、その温度は約 40℃になる。フロン冷却器を使用して約 10℃まで冷却した場合と比べて、吸着器には約 6 倍の水分が入るとともに、吸着温度の上昇により二酸化炭素の吸着量は約 1/3 に低下する。このため、設備コストの増加を抑えて、常温 TSA 吸着器の吸着・再生条件を成立させるためには、高性能吸着剤の開発、吸着器の小型化、切替時間の短縮、再生ガス量および再生温度の最適化が必要となる。これらの最適な操作条件を実験により検証することで、常温 TSA 吸着器の設計に必要なデータを得ることができ、前述の通り、JNP 型窒素製造装置にノンフロン化に対応した常温 TSA 吸着器を初めて採用した。

その後、当社では、前処理設備の操作条件の最適化検討を可能にしたシミュレータの開発を行った¹⁷⁾

^{19,36,41)}。それまで、空気分離装置の分離部で固化して閉塞を引き起こす成分は水と二酸化炭素とされていたが、亜酸化窒素 (N_2O) も液化酸素中や液化空気中で凝縮固化して、熱交換器等を閉塞させる可能性があることがわかってきた。そこで、このシミュレータにより吸着剤の性能予測をすることで、水分と二酸化炭素および N_2O を効率的に吸着除去する高性能吸着剤の開発を行った⁵⁴⁾。今後も、このシミュレータを活用して、新規吸着剤の開発による更なるコスト低減および省エネルギー化が期待される。

6.4 常温触媒

半導体製造工程におけるデバイスの高密度化に伴って、製品ガスの高純度化が求められるようになった。特に、窒素ガスは使用量も多く、高純度窒素を製造することはとても重要である。そこで、窒素の微量不純物である H_2 および CO を効率的に除去できる触媒を開発した。空気中に含まれる微量の H_2 および CO は、特に処理しなければ製品窒素ガス中に含まれる。一般産業用ガスとしては、これらの不純物は問題視されないが、半導体産業用ガスでは ppb レベルまで下げることが求められる。空気中に含まれる H_2 と CO は、約 190℃で貴金属系の触媒層を通すことで容易に水と二酸化炭素に変換され、生成した水と二酸化炭素は後段の MS 吸着器で吸着除去されることから、従来は $H_2 \cdot CO$ 除去用高温触媒が使用されていた。ただし、高温で機能する触媒では、ガスを事前に加熱するための加熱設備および触媒を充填した触媒塔が必要であり、加えて、高温加熱のためのエネルギーが必要であった。

そこで、空気が TSA 吸着器に導入される約 40℃において酸化反応が進むような触媒活性と、生成した水と二酸化炭素を触媒自身が吸着できる機能を備えた、常温触媒を開発した³³⁾。

開発した常温触媒は、二酸化炭素の吸着剤(ゼオライト層)をベースとして、その表面に 100 μm 程度のアルミナゲル層を被覆し、貴金属を担持させた触媒である。これにより、酸化反応で生成した水と二酸化炭素は、触媒自身のアルミナゲル層とゼオライト層で吸着除去される。

この常温触媒を、前処理設備に吸着剤とともに充填することで、加熱設備および触媒塔が不要となる。また、積層型 MS 吸着器の最上部(ゼオライト層後段)に充填することで酸化反応に対する二酸化炭素の影響を抑えることができるとともに、吸着剤再生用ガスで触媒の再生が可能となり、触媒加熱のためのエネルギーが

低減される。更には、空気中に含まれる触媒毒がアルミナゲル層とゼオライト層で除去されるため、触媒の寿命を延ばすことができる。

この常温触媒は、主に超高純度窒素ガスを必要とする窒素製造装置に設置された。また、既存の窒素製造装置において、窒素ガスを超高純度化したい場合には、高温触媒では大幅な設備改造が必要であったが、常温触媒では吸着塔に触媒を追加するだけで良い。

ただし、常温触媒は、担持される貴金属の市場価格により、その製造費が変動するため、高性能および低価格を維持するためには、触媒の開発を継続し、その性能および価格の維持を図る必要がある。

6.5 高速流化プロセス

空気分離装置の大型化に伴い、設置面積で装置全体の約10%を占めるMS吸着器の小型化が求められるようになった。当社は、原料空気の高速流化によってこれに対応した、吸着塔の切替時間(吸着/再生サイクル)の短縮と、吸着剤の流動化を防ぐ大粒子径のMS吸着剤の開発によって、設置面積のコンパクト化およびそれに伴い現地工事費用を低減することができた⁵³⁾。

7. 膨張タービン

空気分離装置では、低温部の温度維持、侵入熱および液製品の冷熱量を補償するための寒冷を発生される膨張タービンが必要となる。1981年、当社では窒素製造装置用として、自社技術によるブロー制御型静圧気体軸受式膨張タービンの設計、製作技術の確立を目的として、開発を開始した⁵⁾。

開発のステップとしては、静圧気体軸受の設計および製作方法の確立、高効率のタービン動翼の設計と製作方法の確立、性能試験方法の確立および実装置による性能試験と信頼性試験の実施であった。その結果、試作機による性能試験により性能と信頼性を確認することができ、1985年にJN型窒素製造装置に初号機となる膨張タービンを採用した。この装置の試運転の結果、膨張タービンの計画効率78%に対して、85%以上の高い効率が得られた。この膨張タービンは、静圧気体軸受の採用、高速回転による小型化、分解および組立てが容易な構造を採用していることを特長としている⁷⁾。

その後、本膨張タービンは各地のTGCに設置された窒素製造装置に採用され、TGC計画の拡大に大きく貢献し、現在でも窒素製造装置に採用されている。膨張

タービンの型式は、処理流体が窒素ガス又は廃窒素ガスで静圧気体軸受式膨張タービンの場合、NET-A型膨張タービンとなる。通常の窒素製造装置には、処理流量により、NET-A2型とNET-A3型が使用される。

静圧気体軸受式膨張タービンは、プロセスガスを軸受ガスとして利用するため、軸受ガスがプロセス側へリークしてもプロセスを汚染する恐れはなく、高速回転や低温環境に優れている。ただし、軸受ガスとして約30Nm³/hの製品窒素ガスを使用するため、送ガスできる窒素ガス量が少なくなるという欠点がある。

そこで、軸受ガスを使用しない軸受として磁気軸受を使用した、磁気軸受式膨張タービンを開発した。この膨張タービンは、気体軸受の代わりに磁気軸受を使用するため、軸受ガスが不要となり、磁気軸受に供給される電流で発生した磁気力により軸受が浮上され、電流をコントロールすることにより浮上位置を一定に保持する、という特徴がある。また、高速回転時の安定性に優れており、磁気軸受の電流をモニタリングすることで膨張タービンの運転状況を把握できる。磁気軸受式膨張タービンの型式は、NET-M型となる³¹⁾。

前述の通り、JNR型窒素製造装置は膨張タービン制御用圧縮機で廃ガスを循環させる廃ガス循環サイクルを採用することにより、低原単位を実現している。このプロセスを実現するために、NET-A型気体軸受式膨張タービンを改良した、タービン駆動式低温圧縮機を開発した³⁷⁾。

この低温圧縮機を利用したプロセスは、膨張タービンを単に寒冷発生源として使用するのではなく、圧縮機駆動源として使用している。NET-A型タービンは気体軸受を使用しているため軸受損失が小さく、軸受部が低温になっても回転軸の気体膜で支持されているため低温圧縮機に適している、という特徴をいかしたものである。

この低温圧縮制御型膨張タービンをJNR型窒素製造装置に採用することにより、従来型装置に比べて約25%の電力原単位低減を実現した。低温圧縮制御型膨張タービンの型式は、NET-C型となる。これまで開発した膨張タービンは、窒素製造装置用の小型膨張タービンであったが、今後は空気分離装置にも適用可能な中型膨張タービンを開発することにより、膨張タービンのラインナップ拡大を図っていく。

8. 運転制御, 遠隔監視および遠隔操作

窒素製造装置の運転制御は、起動・停止、定常運転、異常時におけるフェイルセーフ機能などトータルシステムとして構築されており、すべて自動制御される。常温状態からの起動、一時停止後の低温状態からの起動のいずれの場合においても起動指令により開始され、空気圧縮機の起動および昇圧、装置の冷却および純度整定、製品純度計測、更に定常運転への移行まで全ての工程が自動運転される。また、定常運転では製品ガスの使用量の変動および大気条件の変化などの外乱要因に対して、常に修正されて高効率な運転となるように自動制御されている⁹⁾。

2001年、汎用パソコンを用い、省電力、低コストのコントローラを搭載した運転制御システム EzMPICS を開発して、窒素製造装置に採用した。EzMPICS の標準システム構成は、制御コントローラ、制御プログラム構築用パソコンおよび運転操作用パソコンから構成され、各機器は Ethernet でつながれている。運転操作用パソコンは、制御コントローラ内のデータ表示および運転操作を行うためのパソコンであり、デジタル回線を使用して、遠隔地での遠隔監視および遠隔操作が可能である³²⁾。

また、全国各地で個別に運転管理されていた、EzMPICS が搭載された JN 型窒素製造装置を一元管理するために、2002年、千葉サンソセンター構内に JN 総合監視センターを設置した⁴³⁾。更に、Web サーバの設置により、社内ネットワーク上で JN 装置の監視が可能となり、警報表示やトレンドデータの解析ができるようになった。

一方、空気分離装置では、自動起動・停止などの自動運転制御の他に、高収率を維持しながら、広い運転範囲で、かつ高速での負荷変化に追従できることが要求される。このような運転制御方法の検討には、ダイナミックシミュレーション技術が不可欠である。当社では、空気分離装置のダイナミックシミュレーションを開発し、シミュレーション結果とプラントデータとの比較を行い、シミュレータの信頼性を確認し、装置計画における運転性・制御性の検討に利用している。また、従来の棚段式精留板に代わって用いられる規則充填物を用いた蒸留塔は、棚段塔に比べて応答速度が速く、応答幅も大きい。また、従来の空気分離装置において、3%/min の速度で 100~70% の増減量運転は達成されていたが、それ以上の操業変更速度を実現で

きなかった。そこで、ダイナミックシミュレーションを用いて、規則充填物を採用した装置の動特性を調査し、制御モデルおよび外乱モデルを固定し、前置補償器を設計し、実プラントに適用することで、5%/min という世界最速レベルを達成した。このようにして、自社開発したダイナミックシミュレーションを活用して、顧客要求に応え、運転性能の向上だけでなく、事前に制御パラメータを調整することで試運転期間の短縮にも貢献している^{12,15,24,29,35)}。

また、空気分離装置を安全かつ効率的に運転するためには、多くの知識と経験が必要とされる。当社では、教育訓練用 ASP (Air Separation Plant) シミュレータを開発し、活用している。この ASP シミュレータは、1990年代に当社プラント製作部門において使用されていた設計用プロセスシミュレータの派生技術として開発されたものである。このシミュレータは、初級オペレータの基礎教育から中級以上のオペレータへの異常時対応訓練などに利用可能な機能を有している。また、遠隔操作方式の採用により、全国約 30 工場の装置関係者に利用されている。このシミュレータには、当社における標準的な 3 種類の ASP モデルを再現するダイナミックシミュレーションモデルが搭載されており、各生産工場の規模や装置に即した教育が可能となっている。各モデルは、装置の設計に使用されるモデルと同等の計算精度を有するプロセス部と制御ループ部で構成され、製品の増減量や純度調整といった運転操作だけでなく、精留塔内の組成分布表示機能などで精留プロセスの理解にも役立っている^{23,57)}。

なお、当社は、近年目覚ましい発展を見せている機械学習 (ML: Machine Learning) や IoT (Internet of Things) を利用した操業改善にも取り組んでいる。複数の空気分離装置を操業している工場においては、顧客の使用量に応じて、最も少ない電力となるようガス発生量を組合せることが望ましい。しかしながら、消費電力の特性は各装置で異なるため、オペレータの経験のみに頼る最適化には限界があった。そこで、操業データに基づき構築した電力推定モデルを利用し、各装置からの製品ガス量の組合せを最適化することで、複数の空気分離装置の消費電力を最小化する手法を活用している生産工場がある⁵⁹⁾。

また、生産工場の液化装置は大量の窒素ガスを RNC で圧縮する液化サイクルであり非常に大きな電力を消費する一方で、その電力消費は 2 つのタービンの調整に密接に関わっておりバランス調整が非常に難しいという課題がある。そこで、タービンの調整にも機械学習

を適用し最適化を行う技術を開発し、国内の生産工場 8 拠点で成果を上げている。

9. 今後の展開

前述の通り、当社は空気分離装置における多様な市場ニーズに対応した技術開発を行ってきた。このような空気分離装置の開発の歴史を振り返ると、装置の大型化および効率化によるプロセス開発、環境問題および安全対策による前処理設備の開発、窒素装置の大型化および高純度化に対応した窒素製造装置の開発および操作性の向上のための自動化、省力化を継続して行っており、種々の新規装置および技術を完成させ、実現してきた。

空気分離装置においては、近年のカーボンニュートラルの観点から多量エネルギーを消費する装置の省エネルギー化は、重要な課題となっている。

空気分離装置の電力原単位は、1970年代は 0.45kWh/Nm^3 であったが、蒸留計算の精度向上による酸素製品収率の改善、充填塔の採用による圧力損失の低減、主凝縮器の温度差低減による下部塔圧力の低減および原料空気圧縮機の性能向上により、2000年代には、 0.35kWh/Nm^3 と約 20%改善されたが、直近の 20 年間では電力原単位の改善は見られない。

窒素製造装置においても同様に、電力原単位は 1990年代では 0.30kWh/Nm^3 であったが、空気分離装置の前述の改善に加えて、高効率プロセスの開発による 2 塔式窒素製造装置の採用により、2000年代には、 0.195kWh/Nm^3 と約 30%改善されたが、その後は改善が見られず、頭打ち状態となっている。

このような背景から、空気分離装置においては本誌技報 No.39 で紹介した通り、基本プロセスの改良、改善による効率化したプロセス開発により、電力原単位を更に 10%改善可能な装置の有効性の確認と適用範囲の拡大によって、新プロセスを採用した装置の実現を目指す⁶³⁾。

窒素製造装置については、半導体市場における多様化する要望に応えるため、更なる大型化および高純度化に対応できるように超高純酸素併産型窒素製造装置の開発、実用化を目指していく。

大型空気分離装置については、海外市場では大型化は期待されるが、国内市場ではバックアップ設備の増大などを考慮すると更なる大型化は見込めない。ただし、今後の大型空気分離装置では、希ガスを精製する設

備を追加するケースの増加が期待されていることから、希ガス精製設備の更なる効率化および低価格化を図りたい。

運転制御装置に関しては、欧米諸国では既に遠隔監視、遠隔操作による装置の無人運転が行われている。国内では、法的規制により無人運転はまだ実現していないが、将来の法的規制緩和に向けて、無人運転が可能となるようにデジタル技術を活用して、安全に遠隔監視、遠隔操作が可能な装置および技術を開発していきたい。

また、近年の材料高騰による装置コストおよび現地工事コストの上昇を抑えるため、更なる標準装置の開発、機器のユニット化およびモジュール化により、装置全体コストの低減および装置完成までの全体納期の短縮を目指す。

今後は、これらの技術開発を維持継続して発展することにより、更なる空気分離装置の効率化による高性能、低原単位および低価格を実現して、顧客要求にマッチした競争力のある装置を市場に展開していく必要がある。

10. おわりに

当社における空気分離装置の開発の歴史を紹介した。最近のカーボンニュートラルや SDGs への取組みに向けて、電力を多量に消費する空気分離装置の効率化は省エネルギーに貢献する重要な役割を占める。高効率な産業ガス製造プロセスの開発やデジタル技術を活用した遠隔監視、遠隔操作による効率化、高度制御技術導入による操業の最適化はカーボンニュートラルおよび生産性向上に貢献できると考える。今後は、当社の持続可能な技術力、開発力およびこれまでの経験を活かして、多様化する市場ニーズに対応した空気分離装置を開発することにより、あらゆる産業の発展と課題の解決に貢献していきたい。

参考文献

- 1)100周年記念誌制作プロジェクト, 創業100年, アジア発のメジャーに向かって一大陽日酸のこれまで, これから一, 2010.10.1
- 2)日酸75年史編集事務局, 日本酸素七十五年史, 1986.3.25
- 3)井上 篤, 倉 登美男, LNG 冷熱利用の展開, 日本酸素技報 No.1 P31-35, 1982.6.1
- 4)本田秀幸, JN シリーズ窒素製造装置, 日本酸素技報 No.1 P63-64, 1982.6.1
- 5)弘川昌樹, 静圧気体軸受の動特性について, 日本酸素技報 No.3 P25-30, 1984.6.30
- 6)倉 登美男, 和光俊幸, 本田秀幸, 低純酸素製造装置, 日本酸素技報 No.5 P15-19, 1986.12.25
- 7)齊須倉人, 弘川昌樹, 塚本郁夫, 気体軸受式膨張タービン, 日本酸素技報 No.5 P28-37, 1986.12.25
- 8)野島俊幸, 半導体産業向け高純度窒素製造装置, 日本酸素技報 No.5 P65-66, 1986.12.25
- 9)中村信尚, 全自動高純度窒素製造装置, 日本酸素技報 No.6 P97-99, 1988.1.29
- 10)宇多田 修, 野島俊幸, 低圧リボイラー式高収率窒素製造装置, 日本酸素技報 No.9 P46-49, 1990.11.30
- 11)高井義昭, 本田秀幸, 半導体産業向け高純度窒素製造装置, 日本酸素技報 No.10 P9-13, 1991.12.10
- 12)石 瑛, 辰巳高司, 空気分離装置のダイナミックシミュレーションーモデリングとシミュレーション, 日本酸素技報 No.11 P1-14, 1992.12.1
- 13)関 英俊, 榊井義行, 需要変動対応型全自動空気分離装置, 日本酸素技報 No.11 P15-22, 1992.12.1
- 14)国見 忠, ワンタッチ運転高効率窒素液化装置, 日本酸素技報 No.11, P63, 1992.12.1
- 15)寺本憲治, 湯澤 茂, 空気分離装置のダイナミックシミュレーションーモデルの検証, 日本酸素技報 No.13 P1-9, 1994.11.28
- 16)谷山征男, 竹内清文, 標準型液採取プラント, 日本酸素技報 No.13 P60, 1994.11.28
- 17)中村守光, 藤田 淳, 池田雅博, 多成分吸着平衡の推算法と吸着器のシミュレーション, 日本酸素技報 No.14, P33-38, 1995.11.30
- 18)青山和弘, 吸着塔内のガス流れの数値シミュレーション, 日本酸素技報 No.14 P39-46, 1995.11.30
- 19)桑田勝美, 加熱再生吸着プロセスのシミュレーション, 日本酸素技報 No.15 P24-29, 1996.11.30
- 20)中村守光, 川井雅人, 空気分離装置のノンフロン化に対応した前処理吸着器, 日本酸素技報 No.15 P58-59, 1996.11.30
- 21)木下暢久, 小型窒素ガス製造装置「JNC シリーズ」, 日本酸素技報 No.16 P50, 1997.12.5
- 22)榊井義行, 遠藤和人, 長島敏光, 青山芳夫, 石 瑛, 日本最大の充填塔式空気分離装置, 日本酸素技報 No.17 P2-10, 1998.12.14
- 23)上本隆之, トレーニングシミュレータを使った空気分離装置の運転員教育, 日本酸素技報 No.17 P70-71, 1998.12.14
- 24)石 瑛, 湯澤 茂, 急激な増減量に対する空気分離装置の制御方法, 日本酸素技報 No.18 P12-22, 1999.12.3
- 25)三浦 淳, JN シリーズ「JNM 型窒素製造装置」, 日本酸素技報 No.18 P44, 1999.12.3
- 26)坂上誠一, 橋本秀之, 流下液膜式主凝縮器の開発, 日本酸素技報 No.19 P2-8, 2000.11.21
- 27)川上 浩, 空気の深冷分離ー蒸留による酸素の製造ー, 日本酸素技報 No.20 P2-11, 2001.12.10
- 28)川井 雅人, 空気液化分離装置のための空気の前処理精製, 日本酸素技報 No.20 P12-16, 2001.12.10
- 29)岡本孝一, 空気分離装置の試運転技術の変遷, 日本酸素技報 No.20 P17-20, 2001.12.10
- 30)田村雅洋, 超大型空気分離装置(鋼管サンソセンター14号装置), 日本酸素技報 No.20 P60-61, 2001.12.10
- 31)平井寛一, 大内信明, 弘川昌樹, 磁気軸受式膨張タービンの開発, 日本酸素技報 No.21 P20-25, 2002
- 32)安藤浩二, 中嶋俊哉, 小型プラント運転制御システム, 日本酸素技報 No.21 P42-43, 2002
- 33)川井雅人, 中村守光, 高純度窒素製造のための水素および一酸化炭素の除去, 日本酸素技報 No.21 P44-45, 2002
- 34)湯澤 茂, 内部圧縮型空気分離装置(周南5号空気分離装置), 日本酸素技報 No.21 P46-47, 2002
- 35)石 瑛, 新井一成, モデル予測制御に基づく空気分離装置の安定化手法, 日本酸素技報 No.21 P26, 2002
- 36)浦上達司, 長坂 徹, 中村守光, 深冷空気分離装置の前処理 TSA 装置のシミュレータ開発, 日本酸素技報 No.22 P13-18, 2003.11.28
- 37)池田 真, 大内信明, 平井寛一, タービン駆動式低温圧縮機の高性能化, 日本酸素技報 No.22 P19-21, 2003.11.28
- 38)橋本秀之, 坂上誠一, 流下液膜式主凝縮器内での N20 の挙動, 日本酸素技報 No.22 P22-23, 2003.11.28
- 39)三浦 淳, JNR150 型窒素製造装置, 日本酸素技報 No.22 P46, 2003.11.28
- 40)入澤 真, MG10600D 型窒素製造装置, 日本酸素技報 No.22 P47, 2003.11.28
- 41)中村守光, シミュレーションによる深冷空気分離装置用前処理吸着器の操作条件の最適化, 大陽日酸技報 No.23

P31-36, 2004. 11. 19

42)岸田泰治, JFE サンソセンター京浜工場 4 号空気分離装置, 大陽日酸技報 No. 24, P64-65, 2005. 12. 2

43)岸田雅俊, 中嶋俊哉, 岸田 太, JN 総合監視センター, 大陽日酸技報 No. 24, P66-67, 2005. 12. 2

44)入澤 真, 最新型省電力窒素製造装置, 大陽日酸技報 No. 24 P75, 2005. 12. 2

45)進藤正弘, 初期コスト低減を重視した窒素製造装置 (JNE 型), 大陽日酸技報 No. 24 P76, 2005. 12. 2

46)入澤 真, 原単位 0.195kWh/Nm³ を達成した高純度窒素製造装置, 大陽日酸技報 No. 25 P64, 2006. 11. 28

47)山本伸一郎, 液を併産する内部圧縮型空気分離装置, 大陽日酸技報 No. 25 P65, 2006. 11. 28

48)橘 博志, 低純度酸素製造プロセスにおける HIDiC 利用技術, 大陽日酸技報 No. 26 P29-31, 2007. 11. 29

49)湯澤 茂, コンパクトで広い運転範囲を持つ内部圧縮型空気分離装置, 大陽日酸技報 No. 26 P47, 2007. 11. 29

50)橋本秀之, 規則充填物を用いた窒素製造装置, 大陽日酸技報 No. 27 P52-53, 2008. 11. 28

51)入澤 真, 高圧 LNG の冷熱を用いた窒素液化装置, 大陽日酸技報 No. 27 P59, 2008. 11. 28

52)渡邊真也, 對馬臣輔, 空気分離装置におけるフィールドバス技術の導入, 大陽日酸技報 No. 28 P38-40, 2009. 11. 30

53)飛弾野龍也, 入澤 真, 高速流化プロセスによる前処理吸着器の小型化, 大陽日酸技報 No. 28 P36-37, 2009. 11. 30

54)中村守光, 空気分離装置前処理吸着器の最近の進歩, 大陽日酸技報 No. 28 P610, 2009. 11. 30

55)湯澤 茂, 最新の省電力窒素製造装置, 大陽日酸技報 No. 29 P41, 2010. 12. 8

56)入澤 真, 国内最大のキセノン製造装置, 大陽日酸技報 No. 29 P38-39, 2010. 12. 8

57)東山泰三, 安藤浩二, 落 猛, 教育訓練用 ASP シミュレータ, 大陽日酸技報 No. 30 P59-60, 2011. 12. 2

58)橋本秀之, 最新の液併産内部圧縮型空気分離装置, 大陽日酸技報 No. 31 P48-49, 2012. 12. 4

59)松島洋輔, 東山泰三, 空気分離装置群のガス発生量最適化による消費電力の削減, 大陽日酸技報 No. 33 P29-30, 2014. 11. 28

60)伊藤健志, 液併産を可能とした省電力型窒素製造装置, 大陽日酸技報 No. 34 P19, 2015. 11. 30

61)林 拓弥, 少量酸素を併産する省電力型窒素製造装置, 大陽日酸技報 No. 38 P40, 2020. 2

62)荒川萌美, JFE サンソセンター倉敷工場 13 号, 14 号空気分離装置, 大陽日酸技報 No. 38 P36, 2020. 2

63)橘 博志, 消費電力を 10%低減可能な深冷空気分離プロセス, 大陽日酸技報 No. 39 P18-20, 2021. 3

64)江越信明, 橘 博志, 木原 均, ミキシングカラムのシミュレーション技術, 大陽日酸技報 No. 40 P22-25, 2022. 3