

(解説)

空気分離装置の歩みと将来

三浦真一*・森本智志*・浅原一彦**

*都市環境・エンジニアリングカンパニー・プロセスプラント部 **技術開発本部・化学環境研究所

Past and Future Developments in Air Separation Units at KOBELCO

Shinichi Miura・Satoshi Morimoto・Kazuhiko Asahara

Kobe Steel developed its first air separation unit in 1934. Since then more than 350 air separation and gas separation units have been developed. Over the past 66 years, numerous new technologies have been developed in relation to air separation units, such as screw and turbo compressors, ALEX, He refrigerators, and LNG facilities. This paper introduces the past and present developments in air separation units at Kobe Steel.

まえがき = 当社では 1934 年(昭和 9 年)に国産装置としてはじめて空気分離装置を製作した。この第一号装置以来すでに 66 年を経ていることになるが、納入プラント数は 350 基に達している。このメニューを源としてスクリュウ圧縮機、ターボ圧縮機、アルミニウムろう付け熱交換器、He 冷凍機、LNG 関連メニューなど様々なメニューが産み出されてきた。第 1 表に当社における空気分離装置の変遷を示す。

本稿では文字どおり 20 世紀の当社を支えてきた技術であるこの空気分離装置を中心に、草創期の諸先輩の先進的な技術姿勢と、その結果産み出された独自技術とともに今日に至るまでの系譜を紹介し、そして今後の展望について述べる。

1. 草創期

商業的規模における空気の液化は 1895 年、カール・フォン・リンデがはじめてこれをおこなったとされている。当社では早くから(大正 13 年以前)英国ピーター・ブラザー・フード社の空気圧縮機、英国シーガー社の複効炭酸ガス式冷凍機ならびに当社独自の一般アンモニア冷凍機を製氷・冷蔵向けに製作していた。

1932 年には 40,20 万 kcal/h, 1933 年には 40,40 万 kcal/h のアンモニア二段圧縮式冷凍機の注文を受け、いずれも無事納入した。その実績を基にこれら冷凍機の技術を化学工業方面、とくに超低温用途へ応用することを意図し調査、文献による検討をおこなっていた。そこへ 1933 年暮れ、陸軍技術本部が野戦用空気液化分離装置を国産化することを企図し、当社へ試作を打診してきたのである。

当社は当時冷凍機メーカーであるだけでなく、高压空気およびガス圧縮機やディーゼル機関も製作していた。元来材料メーカーとして、研究部あり鑄造部ありそして門司に伸銅部を持っているために加工にも材料にも自給自足の強みがあったことが国産化装置製作依頼の理由であったであろうと記されている¹⁾。ちなみにこの時期は自動車、飛行機など日本の製造業が様々な形で国産化を果たしていった工業的勃興期と時期的に合致している。

日本ではこのころまでに酸素が溶接溶断機用をはじめとした産業用途に重用されるようになっており、50~60 m³/h の装置を中心にしたドイツ・ハイラント社製などの複式精溜塔が酸素製造会社によって輸入され需要をまかなっていた²⁾。しかし陸軍技術本部から依頼の野戦用空気液化分離装置は、5 liter/h の液体酸素装置と小型ではあるが、装置一式を六輪自動車に搭載することを意図したものであった。

製品の用途は工兵作業における爆薬用の液体酸素、溶接溶断用途の酸素ガス、火焰放射機の燃料圧出用気体としての窒素ガスであり、いずれにも純度の要求があった。

第 1 表 当社における空気分離装置の変遷
Table 1 The history of KOBELCO's Air Separation Unit (ASU)

1916	Air compressor prototype completed at Kobe Steel
1934	AUS production started (5l/h liquid oxygen and gaseous nitrogen generator double-column fractionator) First AUS exported (Large unit with the capacity of 2 000Nm ³ /h) First expansion turbine manufactured
1940	Number of the separator units manufactured since 1934 until 1945: Air 28 units Hydrogen and others 25 units
1945	After war, the first 120Nm ³ /h oxygen generator was manufactured for in-plant use by utilizing the unit finished during war
1950	First argon separator unit produced Oxygen steel-making process first employed in Japan by Kobe Works 2 000Nm ³ /h oxygen generator manufactured for oxygen steel-making by Kobe Works
1955	First KOBELCO-SRM screw compressor manufactured Nation's first low pressure large size high purity ASU manufactured (improved) World's first oxygen screw compressor manufactured
1960	ALEX development completed First aluminum regenerative heat exchanger type ASU manufactured (with existing unit modified)
1965	First MS type ASU produced Turbo compressor production started First all aluminum ASU 21 000Nm ³ /h oxygen generator
1970	30 000Nm ³ /h oxygen generator Computer-controlled automation system
1975	Technical development for large size ASU
1980	MS type ASU employed in large quantity Computerized development for process design V1 type cold box was supplied The equipment in the box was changed into the one made of SUS
1985	Kr/Xe generator
1990	First ASU that utilizes off-peak power 50 000Nm ³ /h oxygen generator
1995	Oxygen generator for IGCC plant
2000	

また自動貨車の停車状態で運転することを前提として、動力は自動車エンジンを転用するのでエネルギー消費をエンジン出力 40 馬力に見合うことが求められていた。さらに自動車上に装備するため、運行停止に対しバランスのとれた配置、総重量が求められしかも汽車輸送の際トンネルを通過できる外形寸法を持つこと、運転中の車体振動に耐えて液酸素製造が可能であることなど多くの設計上の制限が加えられていた¹⁾。単純な据え置き式の装置よりはるかに難しいものであったと想像され、なるほど輸入した装置による技術導入では解決できない独創性を要求されるものであったであろうと想像する。

1934 年（昭和 9 年）10 月、この装置によりはじめて液体酸素を抜きだしたと記録されている。写真 1 は装置一式の地上配列の写真であり、写真 2 は液化分離器の絶縁管内構造を示したものである¹⁾。当時この設計陣を率いていた牧田正幸氏はその回顧録³⁾のなかで以下のように述べている。

「このような動機と振り出しで始めたこの仕事に対する私の行き方は、時局の影響もあって一に『拙速主義』であった。したがってこれに関係ある文献も渉猟はしたが、即座に間に合うものがないまま、大部分は本邦酸素会社や肥料会社に輸入された外国製装置の見学（ただしこの装置は零下 200 近くで働くためすっかり防熱材で包まれていて、工場に入って見ただけでは内部のからくりは判らないが）とその工場の先輩諸兄の説明で知識の概念を作り、あとは体験から審理を掴み、理論よりも実際に主点を置いて、実験的に解決して行く建前をとった。（中略）試作しながら考案をする暗中模索的なやり方ではあったが、今日設計上または工作上比較的良好な成績を挙げうる段階にこぎつけたことは本懐の至りだと考えている。」

牧田氏は外国製装置を見学したと回顧しているが、見学によって詳細を調査できたものでもなく、製作した装置は独創的であり当時としてはまさに画期的な国産装置であったのではないだろうか。

このまさに同じ時期、当社と同様にこの分野に古い歴史をもつ日本酸素株式会社も海軍艦政本部の要請により国産酸素装置を製作している⁴⁾。酸素装置の国産化の図られた時期といえるであろう。

当社ではさらに 1936 年に日本窒素肥料会社の朝鮮・阿吾地工場における石炭液化工場用として 2 000m³/h、純度 98% の大型酸素製造装置を 2 基受注した。当時としてはかなりの大型装置であったはずである⁵⁾。戦後の 1954 年当社技報でもこの当時完成した 3 000m³/h の装置をわが国最大の酸素装置として紹介している⁶⁾ほどである。輸入装置が中心であった戦前にあってどれほどの大型装置への挑戦であったかをうかがい知ることができる。

この装置も第 1 号の当社製膨張タービン（写真 3）の採用や全低圧式の採用の試みなど様々な試みをおこなっている。性能運転において多くの苦労があり改造も要したようであるが、紆余曲折のすえ解決して高圧の補助系統付きの装置とし、1938 年暮れには改造を反映した同

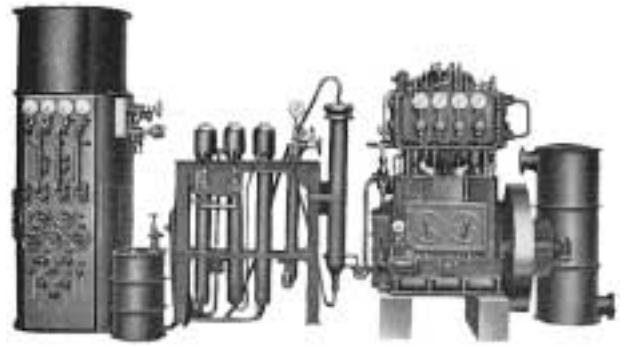


写真 1 毎時 5l 液体酸素製造装置
Photo 1 Liquid oxygen generator (5l/h)



写真 2 絶縁管内構造
Photo 2 Structure, insulation materials removed



写真 3 最初の膨張タービン
Photo 3 Our first turbo-expander delivered in 1936

規模の第 3 号機を性能どおりに製作して納入している。この大型装置の製作が我が国における空気分離装置の設計製作技術の進歩に大きく貢献した。この後、当社では陸海軍の依頼を中心として酸素装置、水素分離装置、あるいはメタン、プロパン、エチレンなどの分離装置や液化装置など 50 基以上を手掛けることになる。

2. 空気分離装置の技術の進展

戦前に陸海軍の需要を中心に関連してきた当社も戦後

の厳しい状況のなかで様々な形で復興への道を歩みはじめた。

終戦直後の1946年頃は、終戦によって納入引き渡し途中で休止していた装置の運転再開や資材不足のなかでわずかな新製作の需要に応えつつ体制を整えていった。

戦後の新しい酸素需要として、1947年秋より酸素製鋼法が国内で検討されるようになった。1949年になると、製鉄各社は一斉に酸素製鋼に関心を持ちはじめ、大型空気分離装置の国内唯一のメーカーである当社に問い合わせが集中してくる状況であった。

このようななかで、当社では250m³/hの酸素装置を神戸製鉄所臨浜工場に据付け1950年2月、平炉、ガス発生炉においてパイロット装置による酸素製鋼の各種試験がおこなわれるようになった。ここに日本ではじめての本格的酸素製鋼が始まったのである⁸⁾。

1951年年頭には2000m³/hの酸素装置により全平炉でこれを実施して、鋼材の3割増産と粗悪炭によるガスの発生、小型高炉による銑鉄の自給が可能になった。これにより大型高純度酸素装置への道が開かれ、その後85基に及ぶ製鋼用酸素装置(写真4)が国内および海外各地に納入されている。この神戸製鉄所の最新鋭工場では、1500kWのターボ圧縮機および揚水ポンプを除くほかはすべて当社の設計製作にかかるものであったという⁹⁾。この頃に戦前の揺籃期からの努力が実を結び、大型装置にも改良が加えられ性能の充実をみているようである。1954年の当社技報⁶⁾では、自社製窒素膨張タービンの効率が80%まで上昇してきたこと、自社製2段式アンモニア冷凍機の高性能を誇りつつ周辺機器をはじめとした技術蓄積が大型酸素装置に結実したことを示唆している。

この頃、酸素装置の電力原単位を低減するため、スウェーデンのSvenska Rotor Maskiner社との技術提携によりSRMスクリュウ圧縮機が技術導入された。第1号機は1956年に製作されその高効率から空気分離装置用空気圧縮機(写真5)として採用されたほか、酸素圧縮機、炭化水素ガス、合成ガス用など様々な用途にもちいられた。1960年までの4年間でその製作台数は163台のほり^{10),11)}、その後冷凍機用などにももちいられることによりその実績は2000年現在では20万台に達している。

同様に1966年米国アリス・チャーマーズ社との技術提携により製作を開始したターボ圧縮機も、空気分離装置用として実績を積んだものである。2000年の今日、すでに840台の実績を有している。

1936年より空気分離装置とともに歩んできた膨張タービンは、現在までに280台を数えている。このように当社の機械系の多くのメニューが自社プロセスである空気分離装置を源として育まれてきた。

いっぽう、空気分離装置として特筆すべき開発はアルミニウムろう付け熱交換器(ALEX)の開発^{12),13)}である(写真6,写真7)。空気分離装置の最大の懸案であるCO₂・水分の除去のためにアルミニウムリボン式の蓄冷器がもちいられていたが、このアルミニウムリボンに似た波板構造の熱交換器を作ること、低温用のコンパクトで効率の良い低価格の熱交換器の製作を企図したので



写真4 製鋼用酸素製造装置
Photo 4 Oxygen plant for steel making

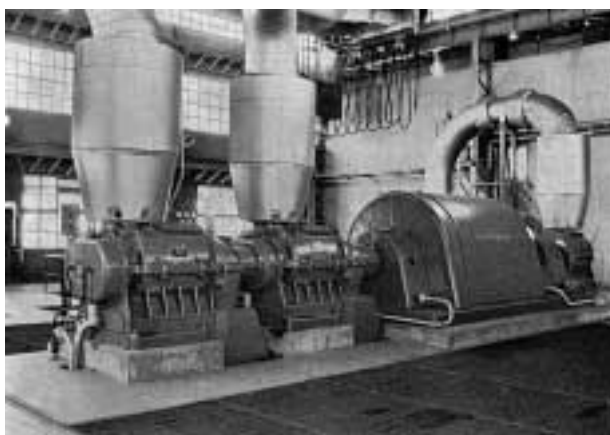


写真5 KOBE-SRM 空気圧縮機
Photo 5 KOBE-SRM air compressor



写真6 ALEX リバーシング熱交換器
Photo 6 Reversing heat exchanger "ALEX"

ある。アルミニウム材料の研究、工作法、接合法、構造、空気分離装置のプロセス・酸素工場における地道な実験が実を結び開発に成功した。その製作には高度の製作管理技術を必要とするものであったが、当時の全社的な品質管理運動の盛り上がりにより結実した。

1965年に設置された第一号機では、ALEXにより単位容積あたりの伝熱面積が2.5倍と増大することにより、装置が小型化したのみならず寒冷損失がいちじるしく小さくなった。装置の軽量化、低コスト化、熱容量が小さくなったことによる初期冷却運転時間の短縮など空気分離装置の中心機器として装置の高性能化に貢献した。また、このころまでにガス採り装置で原料空気の圧力は現在と同様の5~6kg/cm²Gとなっていたが、液採り装置では150~200kg/cm²Gであった。ALEXを使用することにより循環系統プロセスが確立し、液採り装置でもガス採り装置と同様の圧力の精溜セクションを持つことが



写真7 性能テスト中の ALEX
Photo 7 Heat exchanger "ALEX" under performance test

でき、液製造の循環系統セクションが $25 \sim 30 \text{kg/cm}^2 \text{G}$ 程度と運転圧力レベルが劇的に低下した。これにより、従来、高圧のため往復動式にしか使用できなかった圧縮機部分でスクリュ式をもちいて大容量化することが可能となり、1966年のターボ圧縮機導入によってさらに装置の大型化が可能になった。この時点でほぼ今日のプロセスの形が完成し、安価で大量な液体酸素・窒素の生産が可能となった。

また、ALEXはそのコンパクトな構造とアルミニウム製による伝熱性能の良さから、低温工業を中心として幅広くもちいられるようになった。

機器・プラント系においては、空気分離装置で培った低温技術の延長として、LNG 気化器である ORV (オープンラックペーパライザ) の開発、冷熱発電などの受け入れ基地関係のプラント機器・プラント業務、He 冷凍機などへつながってきている。

また、自社プロセスである空気分離装置はこの頃までに長い歴史と多くの実績を誇ってきた。海外へも1960年頃からブラジル、ソ連、南アフリカなどへ大型装置輸出の機会もえていた。当社が1961年頃から手掛けた石油化学プラント、海外プラントも広い意味では空気分離装置プラントの製作・建設での経験をもとに展開していったものといえる。当時の技術者の多くが空気分離装置、ガス分離装置によって経験を積み技術力を蓄えてそのほかの幅広い化学系プラントメニューを展開していったのである。

3. 空気分離装置の今そして未来

高度成長と呼ばれる時期となると当社の化学系プラントの主軸は石油化学分野へと移っていったが、空気分離装置は自社プロセスメニューとして歩みを続けてきた。

競合メーカーとして酸素会社が酸素センターという形で自社プラントを建設しガス供給をおこなう形態が主流となりつつあるなかで、当社は空気分離装置をエンジニアリングのメニューの一つとして客先所有となるオンサイト

プラントの設計・建設をおこなってきた。

1970年代に入って、計算機技術の進展にともない計算機制御による全自動化システムを採用し、同時に設計にも計算機を取入れるが、物性そのほかの基礎知見は大学との共同研究によって独自に開発してきたものであった。

また、高い溶接技術を必要とするアルミニウム材で製作されていた低温部分の箱内機器および配管を、高い熱伝達を必要とする特別な機器である ALEX を除いて、より汎用的なステンレス製としたことは大きな転換であった。これにより装置製作上の信頼性が大幅に向上した。同時に、空気分離装置が特殊な装置ではなくなり、製造コストを低減し調達先の多様化をはかることができるようになった。1980年代に顧客でもある大同酸素㈱とともに開発した V1 装置は、空気分離装置に必要な・190 レベルの低温の熱口を、高速回転機器である膨張タービンで発生させるのではなく単に系外から液体窒素を注入して補うというものである。汎用機器である空気圧縮機以外の回転機が必要なくなるという意味で斬新なものであり、その後の小型窒素装置の中心のプロセスとなった。

1990年代に入って省エネルギーが求められる時代となり、夜間電力利用型の装置を開発し顧客に好評をえるなど多くの新型装置に取り組んできた。これまで安定した運転しかおこなわれなかった空気分離装置で安価な夜間電力を積極的に利用し、冷凍機を運転して寒冷(液)を発生させ、昼間はその寒冷を利用して運転するという装置は新しい概念であり、時代の要請に応えたとともに高い顧客の評価をえた。

近年でもっとも大きなトピックは、1994年に $50,000 \text{m}^3/\text{h}$ の大型酸素装置を3基受注したことである(写真8)。大型空気分離装置の製作・プロジェクトの展開に、当社の化学系大型プロジェクトで培われた高いエンジニ

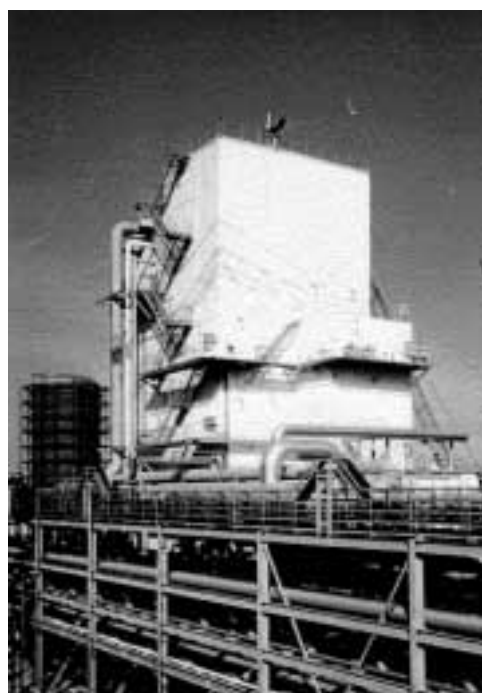


写真8 $50,000 \text{Nm}^3/\text{h}$ 大型酸素装置
Photo 8 $50,000 \text{Nm}^3/\text{h}$ oxygen generation

アリング能力が発揮されたのである。

また半導体製造用として不純物が ppb レベルの超高純度の窒素装置も開発された。前述の V1 を含めこれら窒素装置の実績は 40 基を越える。

最近の新しい動きでは、資源問題、環境問題から強い要請のある石炭や残さ油をガス化し発電するガス化複合発電 (IGCC) がある。IGCC では大量の酸素を使用するとともに、発電プロセスとリンクした高圧プロセスが必要となってきた。現在通産省が主導し開発を推進しているナショナルプロジェクトに参画し、石炭ガス化用の新しい空気分離装置の建設を進めるとともに、さらに残さ油や石炭のガス化の多様なプロセスに対応する研究・開発を並行して進めている。

高圧酸素を必要とする残さ油ガス化のため、液体酸素中への炭化水素の濃縮による危険性を評価して設計指針を確立し、また高圧液体酸素のガス化のために、高圧用の ALEX を開発した。この開発では、136kg/cm²G という世界最高圧を達成しただけでなく、有限要素法をもちいた応力解析手法と実機サイズの試験コアを実際に応力テストに供することにより、負荷変動に対する応力強度を定量的に把握できるものとした。より安全なプラントを実現するために、キーワードである ALEX の信頼性を高めていくことは重要であると考えている。

高圧の精留装置への対応のためにパイロットプラントを製作し、実際の N₂-O₂-Ar 系で精留系のデータを採取したり精留塔内の挙動を可視化装置により確認することもおこなっている (写真 9)。これら要素技術を大切にしていくと同時にエンジニアリングとしてのコストダウン、短納期化、操作性の良さを追求し顧客に満足いただける装置を製作していくことを目指している。

むすび = 本稿では、草創期からの歴史を振り返って当社機械系の一つの流れを紹介した。空気分離装置メニューは、黎明期には社会的要求もあり旺盛なチャレンジ精神によって大型装置・ガス分離装置など様々な経験を積んできたものである。当時の多くの日本の技術と同じように海外の先行技術のある意味で模倣することによって出発したが、そのまま導入しコピーするのではなくその本質を吸収し独自技術として昇華させていった成果である。そのことが戦後日本が復興し成長する時期に大きな花を咲かせ、当社の多くの機械系メニューの萌芽となった。周辺技術への関心と専門家を活用した技術の深耕はいかにも当社らしいもののように思えた。文章で振り返るにはあまりにも短い、多くの諸先輩の努力や着想のきらめきを感じていただければ幸いである。

最後に 1941 年 (昭和 16 年) 9 月号の神鋼技報の「ガ

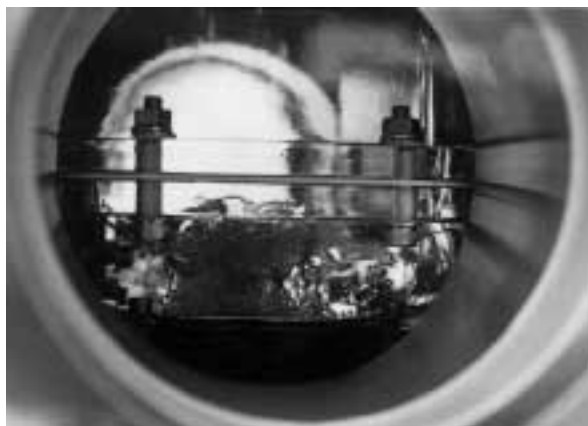


写真 9 高圧低温精留可視化装置

Photo 9 High pressure air visible distillation apparatus

ス分離装置の製作について」¹⁴⁾における終章〈需要家に対する希望〉の項の結びをご紹介したい。今の時代でも変わらない黎明期のこの言葉がまさに当社の今を築きあげたものであろう。

「～納入した装置についても忌憚なきご批評を承りたく (中略) われわれがもっとも知りたいのは長い目で見た装置の性能であって、些少なる故障であっても、否些少なればこそわれわれが改良を気付かないこともあるであろうし、是非機会あるごとにお教え願いたいと望んでいるのである。われわれは御需用者の御教示、御鞭撻を受け、また各方面の権威者達のご協力をお願いして益々研究を重ね、国産の材料で、国産の技術で真に日本的なガス分離装置を育て上げてゆきたいと念願して居る次第である。」

参 考 文 献

- 1) 牧田正幸：神戸製鋼，Vol.3, No.4 (1953) p.185.
- 2) 日本酸素(株)：日本酸素七十五年史，(1986)
- 3) 牧田正幸：日本発明家五十傑選，(1952) p.218.
- 4) 酸素協会：酸素産業史，(1998)
- 5) 牧田正幸：神戸製鋼技報，Vol.16, No.2 (1966) p.83.
- 6) 牧田正幸：神戸製鋼，Vol.4, No.1 (1954) p.45.
- 7) 亀岡敏雄：神戸製鋼，Vol.7, No.2 (1957) p.75.
- 8) 岡野重雄：神戸製鋼技報，Vol.16, No.3 (1966) p.171.
- 9) 市川賢六：神戸製鋼，Vol.1, No.3 (1951) p.17.
- 10) 片岡晋一：神戸製鋼技報，Vol.10, No.3 (1960) p.217.
- 11) 左右田純一：R&D 神戸製鋼技報，Vol.19, No.1 (1969) p.77.
- 12) 元永謙二郎：神戸製鋼技報，Vol.14, No.4 (1964) p.331.
- 13) 富阪泰：神戸製鋼技報，Vol.16, No.3 (1966) p.211.
- 14) 当社瓦斯工業機係：神戸製鋼，Vol.5, No.17 (1941) p.1.