エジェクターの真空乾燥装置への応用

池 上 達 治*

(昭和38年11月26日受理)

Some Features of Ejectors and their Appliance to Vacuum Dryers

Tatsuji IKEGAMI

(Osaka Vacuum, Ltd. 115, 2-Chōme, Kamame-chō, Naniwa-ku, Osaka, Japan)

1. まえがき

真空乾燥装置の排気系として、機械的真空ポンプのほかにスチーム・エゼクタ、水エゼクタ、マルチゼット・コンデンサ等のエゼクタが実用されている。 10^{-2} Torrの桁まで排気する凍結真空乾燥装置も含めて、食品の乾燥、濃縮、脱臭等の装置にエゼクタが設備されるのは、一般の化学装置の場合と同じ理由による。とくにスチーム・エゼクタは、その設計の正確さ、性能への信頼および経済性についての認識が広まるとともに、真空乾燥のみならず一般に化学装置や脱ガス装置に、ますます数多く設備される情勢になってきている。エゼクタ装置は、排気圧縮作用をする本体が極めて構造簡単で故障少く、しかもその補助装置となるボイラー、減圧弁（駆動蒸気の圧力調整弁）あるいは駆動水のための渦巻ポンプ等は信頼性の高い一般的な機械装置である。

スチーム・エゼクタ等は、ユーザーの要求仕様に応じて、その真空装置の特性および立地条件も考慮して最も適切な性能をもつように設計するものである。したがって一般に標準型あるいは標準性能のエゼクタというものは定めていない。食品用真空装置の場合も勿論同じことがいえる。ただ全く同じ設計のユーザー（真空装置）で立地条件も全く等しい場合には、同じ設計のエゼクタが設備されることになるのはいうまでもないが、われわれの会社において今日まで納入したスチーム・エゼクタ数百基のうち、全く同じ寸法のもは一度もない。したがって短時間内に設計できるように十分な設計資料を整備し、かつ簡便な設計法を確立しておかなければ、個々の仕様に対して常に最も適切な設計をすることができない。現状においても、まずまずこの要求を満足することができ、製作始運転後に設計変更する必要を生ずることは（ユーザーの見込違いや仕様打合せ不十分なことがな

い限り）ない。しかしさらに理想に近い設計をできるように、われわれは実験研究を進める計画であるが、アメリカや西ドイツのスチーム・エゼクタをみても、現状よりもさほど隔段に経済的な設計をできるようになるとも考えていない。

スチーム・エゼクタの場合には、ユーザーの要求仕様に応じて見積設計する際に上記のような特質があるが、このことは高級な流体機械の見積の場合に似ていると思われる。ここでは設計法については触れずに、エゼクタ装置の実際の種々の特色を述べて、真空乾燥装置等に装備を計画される際の参考資料としたい。

2. スチーム・エゼクタ

排気能力は通常抽気量 (kg/h) であらわされ、ユーザー仕様により吸入圧、抽気量、抽気ガスの種類、温度、分子量および成分比、使用できる駆動蒸気の圧力、温度および冷却水の温度等の値が与えられて設計する。そのほかに、蒸気源や水源の事情、初め減圧するのに要する時間の制限、初めに存在するガスの種類、エゼクタを据付ける場所の広さや高さの制限、最終段の放射圧力、中間コンデンサの形式についての要求（表面凝縮器か混合凝縮器か、またその設計時に考慮すべき設計基準がある場合はその設計コード）、アフターコンデンサの要否、排気容量を分割して並列にする必要があるか否か、ノズルやディフューザーやコンデンサ等に特殊材質の指定があるか否か、設備費と運転費と何れに重点をおくべきかななどの点も考慮してそれぞれの場合に最も適切であるように設計する。スチーム・エゼクタの基本的な特性については評述された論文がある¹⁾。

a) 運動する部分がなく極めて構造簡単小形である。寸法が比較的大きくなるプースター（第1中間コンデンサより高真空側で動くエゼクタのことをプースターと称

* 大阪真空機器製作所（堺市鳳東町7丁目775、堺工場）

第1図 5段蒸気エゼクター組立図

第1表 スチームエゼクタ段数と吸入圧

作動吸入圧 (Torr)	>90	100~20	30~5	5~1	1~0.005
段 数	1	2	3	4	5~6

し、単段あるいは直列に4段にもすることがある。第1図は3段ブースター式である)は排気配管を兼ねるようにもできるから、据付容積は非常に小さくてすむ、種々の蒸気やダストを吸入しても障害がなく、蒸気配管内の固形物でノズルがつまることあるほかは故障がない。駆動蒸気や冷却水温に異状がなければ、全く排気特性が変化せず、極めて信頼性の高い堅牢な真空ポンプといえる。

b) 吸入圧が 100 Torr 以下であると通常多段式として中間コンデンサを設ける。吸入圧と段数の関係は第1表に示す。ブースター段で吸入圧の低いものは、噴射蒸気が断熱膨脹して非常に低温になるから、これが丁度当るディフューザー狭まり部には、外面に霜がつく、ディフューザー内部で氷結する恐れがあるから、蒸気ジャケットで加熱するが、これに消費する蒸気量は僅少ですむ。第1図の第1第2ブースターはその例である。

c) 吸入ガスの分子量 (M) が大きい程抽気量 (kg/h) は増大する。その割合は $\sqrt{M}$ に大体比例するといわれる。したがって分子量の小さいガスの場合は抽気量小さくなるが、容積排気速度 (m^3/h) は増大する。

しかし多段式の場合は、吸入ガスの成分が特性に影響する有様は複雑であるから注意を要する。吸入ガスの温度が高ければ抽気は量減少するが、空気の場合は常温で

第2図

第2表 スチームエゼクタの最小容量

作動吸入圧 (Torr)	0.01	0.1	1
最小容量 CFM	10,000	1,000	100
m^3/h	1.7×10^4	1.7×10^3	1.7×10^2

の抽気量に比較して 100°C 当り 5% 程度減少するぐらいであるから大して問題にならない。

d) 抽気量の大きいエゼクタを設計することには技術的な問題はないが、小容量の多段エゼクタを製作するにはある困難がある。吸入圧が低い程、設計製作可能なエゼクタ (ブースター) の最小寸法が大きくなる。これは、ノズルののど径を余り小さくすると、つまる恐れがふえるからである。第2表は最小容量として V.V. Fondrk が示した値である²⁾。この欠点については、今後の研究によって改善される可能性がある。

e) 真空乾燥装置で要求されるような減圧プログラムに適応するように、抽気量と吸入圧の関係をもたせた設計にもできる。しかし通常は連続操作するユーザーの操作点の抽気量と吸入圧一点について設計する。その場合、抽気量の変動に残してうまく対応できて安定に作動する変動範囲があり、その範囲内では吸入圧の変動は比較的小さい。一例として第2図に4段エゼクタの設計性能曲線を示す。この場合、抽気中には空気他に、種々の分子量の蒸気を含む凝縮性蒸気が ~11% 含まれている圧 10atg, 冷却水温 30°C である。表面凝縮器を 2~3 段間と 3~4 段間に設け、蒸気消費量は合計約 4.4 t/h。

第3図

第4図

第5図

ので、全量を空気の分子量に換算した抽気量を横軸にとってある。縦軸は各段の吸入圧および放射圧である。A点が要求仕様つまり設計点で、吸入圧9 Torr、駆動蒸気吸入管の口径700mmのかかなり大型のエゼクタである。製作後厳密に仕様条件で運転し、設計抽気量を吸入させ

たところ、吸入圧測定値は8 Torrであった。

余り小形でない多段エゼクタで、抽気量がかかなり異なるときにも、同じ吸入圧で運転する必要がある場合には、ブースター段を1:1あるいは2:1などに分割した容量のものにして並列に接続する。すると部分負荷の際にも全負荷と同じ蒸気消費量にならなくて済むことになる。

第3図(Atlas社)は食品の凍結真空乾燥装置の排気系に5段スチーム・エゼクタを適用した系統

図で、ブースターを $\frac{2}{3}$ と $\frac{1}{3}$ の容量に分割してある。第4図はその写真で、乾燥器の上方に第1段ブースターが見える。ディフューザーの狭まり部に加熱ジャケットがあるのに注意されたい。第3図では、混合凝縮器から水を抜出すのに大気脚を設けずにポンプを用いている。こうすれば全高5m内にも設置できる。第5図(Vickers-Arms strong社)も同様な凍結真空乾燥装置の写真である。

f) 運転費のうち動力費は駆動蒸気費が大部分を占めるが、機械的真空ポンプを採用した場合の電力費よりも通常高くつく。余り小形でない多段エゼクタの場合は、この蒸気費は上記の電力費に比べて2~3倍におさまる。第6図は、蒸気消費量について大略の目安をつけられるように作成した曲線で、横軸は吸入圧(Torr)、縦軸は抽気量1 kg/hr当りの蒸気消費量(kg/h)を示す。この比(kg/kg)は、同じ吸入圧でも駆動蒸気圧、冷却水温、吸入ガスの成分などによって大幅に相異し、段数の決め方によっても差がある。また小容量の場合にはこの比が大きくなる。第6図の斜線内は、駆動蒸気圧6~10 atg、冷却水温20~27°Cの場合の蒸気消費率のおよその値を示すものである。勿論設計値がこの範囲よりそれることもある。

図では吸入圧0.1 Torrまでしか示していないが、これまでに吸入圧0.01 Torrの真空乾燥用エゼクタも設計製作して実用になっている。10⁻³ Torrの吸入圧のエゼクタを実用に供する機会はまだないが、上記0.01 Torrのものも含めて、これまでに製作した数百基のスチーム・エゼクタの実測性能は、殆んど計画性能と一致している。スチーム・エゼクタは、計画性能を正確に実現できるものを設計できるものである。従来屢々いわれているように、スチーム・エゼクタは(とくに多段式のものは)製作してから性能を実測して、改造を試みてやっと

第 6 図

計画性能に近づけ、結局蒸気消費量が見積りの値からずれてしまうものではない。

スチーム・エゼクタの蒸気消費量を比較する場合は、中間コンデンサの冷却水温度の影響を忘れてはならない。冷却水温が高ければ、蒸気消費量がかかなり多くなる。アメリカや西ドイツの文献で、一見蒸気消費量がかかなり少くて設計がすぐれているように思われるデータが見られるとき、冷却水温度が低い場合が多い。

g) 駆動蒸気の圧力が高い程蒸気消費量は少くなるが、バルブや配管等の附属設備が高くつき、また蒸気の単価も高くなる。ブースターでは駆動蒸気をわざと減圧して用いることが多い。こうするとノズルののど部口径を大きくできて、つまる恐れが減り、また性能の安定が得られ易いからである。大気に放射する最終段エゼクタでは駆動蒸気圧の高いことが有利である。しかし 4 atg の駆動蒸気で十分経済的な設計ができる。なお数年前に駆動蒸気圧 3 atg のエゼクタを設計して実用に成功し、今日では 2 atg の駆動蒸気を用いて大気に放射するエゼクタを製作して安定した性能（ディフューザー内には超音速が流れる本格的エゼクタである）が得られる。

「スチーム・エゼクタには高圧蒸気が必要である」という表現は誤りである。

h) 正常な運転状態では、噴射蒸気が被排気槽側に逆流することはない。しかし抽気量が零になると少し逆流する。吸入室に盲蓋をしてエゼクタを作動させると、吸入室全体が温くなるのはこのためである。そこで抽気量が全く零にならないように少しリークを入れておくことがある。冷却水停止事故によって蒸気が逆流しないように非常対策装置をしておくことが多い。冷却水に関しては、中間コンデンサの水出口の温度が重要であるから、この温度を検出して警報回路に結合するのが普通で

ある。混合式中間コンデンサから凝結水と冷却水を排出するのに、大気脚を設けずに第 3 図のように抽出しポンプを用いると、全体の高さを低くできるが、このポンプは十分信頼できるものでなければならない。この場合には無論上記の警報装置が必要である。

i) 駆動蒸気としては、ドレンを伴わない限り飽和蒸気が好都合である。ドレンを伴うと非常に工合わるく、とくに吸入圧の低いブースターの駆動蒸気には絶対にドレンが含まれてはならない。排気性能に大きなふらつきを起こす。そこで蒸気配管中にドレンセパレーターなどを設けるが、それでも不十分であるから過熱蒸気が望ましい。しかし過熱度の非常に大きな蒸気は、かえって性能に不安定を生ずる。結局少し過熱された蒸気が最もよい。

設計が適切な多段エゼクタを正しい運転をしても性能が不調である場合、その原因として最も多いのはノズルのつまりである。その他の場合は蒸気中にドレンが含まれているためと思われることが屢々ある。駆動蒸気の配管をする場合、溶接後の清掃には十分すぎるほど注意しなければならない。最初蒸気を通すときには十分にブローさせて、溶接カスとともにドレンも吹きとばしておくといよい。

j) スチーム・エゼクタは構造極めて簡単であるから、耐蝕性材料で容易に製作できる。通常吸入室やディフューザーは高級鋳鉄で製作し、バロメトリック・コンデンサーは軟鋼溶接構造とするが、銅合金、不銹鋼、カーボン、ゴムライニング、樹脂ライニング、セラミック等で製作することができる、このことは他の原理形式の真空ポンプには全くみられない長所である。

k) エゼクタは動く部分がないので自由に一基で大型のものを計画できるが、現実には工作上や据付上の問題から大きさに制限がある。吸入圧の低い 4～6 段エゼクタにおいて、1 基当り $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度が最大で、これは吸入口径 1300mm に相当する。これ以上の容量では 2 基以上並列に設けなければならない。かように 1 基で大容量の排気系ができるので、他の原理形式の真空ポンプに比較して、とくに大容量の場合には隔段に設備費が廉くなる。大容量でない場合でも、設備費は機械的真空ポンプの場合よりずっと廉い。保繕費用も同様である。混合凝縮器を用いずに表面凝縮器を採用するとこの分高くつが、蒸気の配管や冷却水ポンプを含めても廉いであらう。最近では完全自動運転のパッケージ・ボイラーが数多く発売されているので、スチーム・エゼクタのためにボイラーを新設することも割合気軽にできるのであるまいか、しかし中間コンデンサー用冷却水（海水

第7図 マルチゼット
コンデンサー

でも使用できる) に関する立地条件には注意しなければならない。

3. 水エゼクタ

スチーム・エゼクタと同様な形で、駆動流体として 1.5 atg 以上の水を用いるものである。駆動水（噴射水）の温度に相当する蒸気圧に近い閉切り吸入圧が得られ、水蒸気は勿論のこと、腐蝕性ガスやダスト等を含んだ気体を吸引しても故障なく常に安定した性能を保つ。構造簡単で安価であるが、駆動水用のポンプを必要とし、油回転真空ポンプに比較すると動力費は高めになる。しかし極めて堅牢な真空ポンプであるから、小形の真空乾燥機のように抽気ガス中の非凝縮ガス成分が少い場合には有利で、屢々実用される。

水以外の流体を駆動流体とすることもできる。たとえば油を駆動流体とすれば到達圧力を低くできるが、実用されることは少い。バロメトリック・コンデンサのない小容量の多段スチーム・エゼクタの最終段として水エゼクタを組合せると、蒸気消費量が減り、大気脚も要らない経済的な排気系となり屢々設備される。

4. マルチゼット・コンデンサ

混合式凝縮器と水エゼクタの働きを一体化した設計のものである。やはり排凝縮性ガスが少い場合は有利で、単一ノズルの水エゼクタよりも多量の凝縮性蒸気を吸引できる。実用される吸入圧は、大気圧から 50 Torr 程度

第8図 アトモスター付水封式真空ポンプ
性能 (22kwモーター付の場合)

第3表 空気エゼクタの性能

(駆動空気圧 4 atg
空気消費量 29 kg/h)

抽気量 kg/h	0	0.1	0.3	1.0	3.0	6.0	10
放射圧 Torr	大 気 放 射						
(1) 吸入圧 "	50	56	68	92	178	330	480
(2) 放射圧 "	245	250	255	265	265	270	290
(2) 吸入圧 "	8	9	11	17	30	73	110

までである。水エゼクタより背圧に弱く、テールパイプを約 3 m以上設けないと作動に不安がある。そうすると駆動水停止の時に水が逆流することになるから、吸入側に逆止弁を設け、また吸入室に大気を自動的に導入する装置を附属させる。第7図に外観写真を示す。今日でも時々実用に新設されている。

5. 空気エゼクタ

空気を駆動流体とするエゼクタで、性能の特質はスチーム・エゼクタと同じ傾向であると考えられる。詳細は省略するが、吸入圧、抽気量、駆動流体圧力の等しいスチーム・エゼクタと比較すると、駆動（流体空気）消費量 (kg/h) は数倍多くなる。第3表に駆動空気圧 4atg、空気消費量 29kg/hの空気エゼクタの吸入圧と抽気量（空気）の実測データを示す。(1)は大気中に放射する場合、(2)はブースターとして働く場合である。表のデータによれば2段式とすると吸入圧 8 Torr に達するが、中間コンデンサを利用できないから、このままでは、2段式として実用になる可能性は少い。しかし駆動空気源として、タンクに貯蔵した圧力空気を利用すると、低廉な設備で短時間だけ大きな排気速度を得られるから、かような場合の真空ポンプとして興味がある。

駆動空気として大気をそのまま使用する空気エゼクタはブースター・ポンプとして作動するはずであるが、噴射空気がそのまま後続する補助真空ポンプの負荷に加わるので問題がある。ところが補助ポンプとして水封式真空ポンプを組合せると興味深い結果が得られる。水封式真空ポンプの到達圧力は、水温により異なるが、通常2段形で20~30 Torr、単段形では30~50 Torrである。しかし、このような到達圧力に近い吸入圧で運転すると、多かれ少かれキャピテーションを起し、長時間後には羽根車を破損する恐れがある。大気の空気を駆動流体とするように適当な設計をした空気エゼクタを、この水封式ポンプ（単段形でよい）と組合せると、到達圧力6 Torr が得られ、キャピテーションを起さない。この時水封式真空ポンプは100~150 Torrの吸入圧で作動している。この範囲での駆動圧力は、水封式真空ポンプとしては低い領域である。適当な組合せをすれば、封水温度が35°Cに上昇しても、この空気エゼクタの性能に変化を示さない。第8図はこの組合せポンプの性能曲線の一例を示す。abcは単段水封式真空ポンプの排気速度、bdeは空気エゼクタ（アトモスターは商品名）1段を組合せたときの排気速度、dfは2段直列に組合せた時の排気速度で、到達圧力1.5 Torr が得られている。

この方式の真空ポンプ系は、如何程水蒸気を吸引しても、封水の温度が35°C以上にならない限り、初期の排気速度性能に影響をうけることがない。極めて堅牢で保守も簡単な排気系として、真空乾燥装置などに用いられている。なおこのポンプ系にメカニカルブースターを1段組合せると、たとえば第8図の点線のような排気性能が得られ、2段組合せると到達圧力10⁻² Torr 以下になるから、凍結真空乾燥装置の排気系として採用できる。

6. おわりに

以上甚だ定性的な記述のみで、設計データなどものせることもできず、不十分な解説に終わりました。エゼクタ装置の特質から御寛容頂きたいと存じます。今後エゼクタ装置を真空ポンプとして考慮に入れられる際に、多少とも御参考資料の足しにもなれば幸甚であります。

〔文 献〕

- (1) 速水恵次：日本機械学会論文集 7巻 28号、p.11 (1941)
- (2) V.V.Fondrk：Forth National Symposium on Vacuum Technology Transactions p.88.

図 書 紹 介

H. A. Steinherz 著

◆ Handbook of High Vacuum Engineering ◆

Reinhold 社、1963年、358頁、約 4500円

なかなかユニークな趣きのある本である。著者も言うように、大型装置の設計、製作に中心が置かれていて、プラントエンジニアリングの臭いが強い。この点、従来書かれてきた物理学者の真空技術の本とは大いに違う肌合いである。真空の分野でも、こういう本がでるようになったかと思わせられる。

読んでみて感ずるもう1つの特色は、非常に新らしい技術に多くのページをさいて、説明と技術データをのせている点である。例えば、クライオポンプに15頁、ガスアナライザ関係に20頁余り、宇宙工学関係に15頁といった類いである。こういうのは最近米国で出版される本の傾向だが、それだけに本の寿命としては4~5年といっ

たものだろう。長年座右におく本ではないとも言える。

著者はNRC社の人である。そのせいか、主たる真空技術の興味を高真空においており、特に超高真空大型装置に対して意欲的にみえる。専門の真空技術者にとっては、世界の流れを知るのに役立つだろう。

装置の設計に重点がおかれたために、真空計や基礎の議論、部品、リークテストなどは極めて簡略になっている。一方、材料やタンク設計のときの寸法のとり方、排気系などについては、具体的で新らしい知識が得られると思う。ユーザーの技術者にもメーカーの技術者にも有用な本。

(中山)