

三重熱交トラップシステムについて

共和真空技術株式会社

はじめに

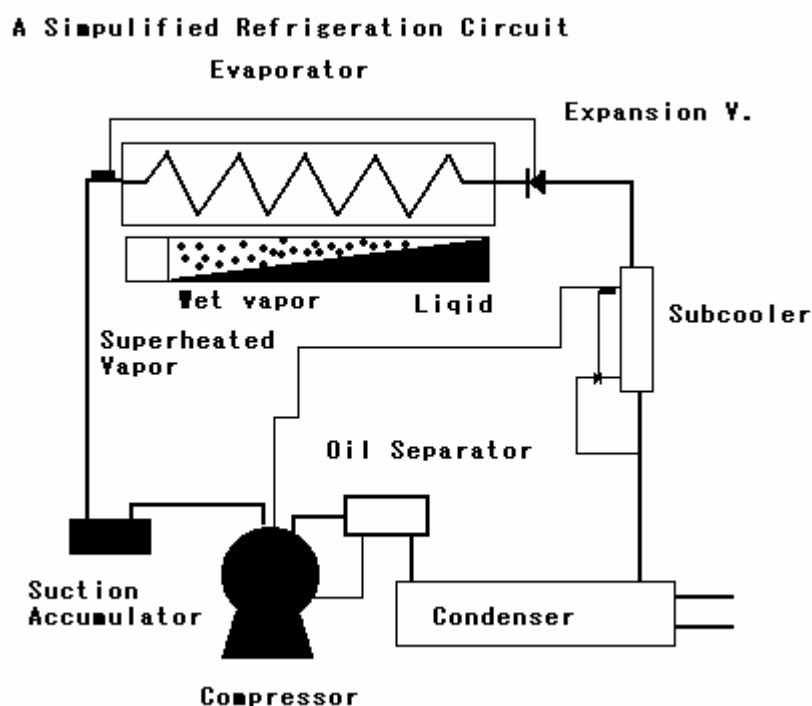
凍結乾燥装置技術の中で、広くみとめられている、その心臓部は「冷凍システムとトラップ」です。制御精度、安定性、運転と保守の難易等の主要問題がこの「冷凍システムとトラップ」の適否に係っています。1976年のワシントンで開催された「生物材料等の凍結乾燥に関する国際シンポジウム」で、この重要性にも関わらず、装置の他の系統に比べ、冷凍システムとトラップが立ち遅れており、メーカー間のコンセンサスが形成されていないことが指摘されました。

共和真空はこの議論を踏まえ、1976年に「三重熱交トラップシステム」を開発し'80年の生産開始から日本国内のユーザーから圧倒的支持を受け、それ以降日本国内の生産装置の大半がこの方式になりました。今日までに330台の納入実績により、その評価は定まっています。

1. 冷却システムこそ凍結乾燥機の心臓である by H.R.Powell

1. "The selection of refrigeration components of a freeze-dryer is an area where a great deal of effort has been concentrated."
2. Unfortunately, in the opinion of some, including the writer, the development of two-stage refrigeration equipment in the sizes required for freeze-dryers has not kept pace with advances in other component areas.
3. In addition at least two other techniques have been utilized. These are:
 - 1) redundant-refrigeration system;
 - 2) large, central ref. sys. brine-strage system

2.冷凍機システム系統図



これは標準的な冷凍システムの回路を表しています。コンデンサーで凝縮された冷媒液はサブクーラーで冷却され、膨張弁にて冷媒流量を制御させ、蒸発器へ送られます。蒸発器内で冷媒が気化され、蒸発潜熱により、熱媒体を冷却したり、水蒸気を捕まえるコンデンサー(トラップ)の機能を働かせています。蒸発した冷媒ガスは冷凍機へ回収され、圧縮しています。

この冷凍システムには重要な補器類があります。第一に冷媒流量を制御する膨張弁です。蒸発器出口の過熱度を一定に制御したり、蒸発器の圧力を一定に保持したりし、冷凍機的能力制御をしています。第二に冷凍機のサクションラインの冷凍機の直近に設置していますサクションアキュムレーターがあります。この機器の役割は冷媒ガスに変換しなかった冷媒液をつかまえ、冷凍機にはガスのみを送る役割をしています。冷凍機は液圧縮すると故障の原因となります。

3. 凍結乾燥機用冷凍機の特的问题点

1. 温度領域 -5 ~ -70 の広い範囲を利用
棚系:-5 ~ -60 、トラップ系:-50 ~ -70
2. 激しい負荷変動
棚系: 予備凍結時冷却、昇温、再冷却
トラップ系: 不連続切替、初期ピーク負荷
3. 長時間低、無負荷運転(冷凍機は真空運転)
冷凍機メーカー保証範囲外運転
4. トラップコイル全域冷却と膨張弁調整

多くの関係者が指摘する、凍結乾燥機における冷凍システムの弱点は第一に使用温度範囲が広範囲であります。予備凍結時には棚系を通常+20 から-40 まで1時間から1.5時間で冷却し、到達温度は-50 以下に致します。この為には二段圧縮冷凍機の上限-30 (R22)以上を一定時間経過いたします。又乾燥時トラップ系では-50 以下にコイルを冷却いたします。無負荷では-70 (R22)以下となり、冷凍機メーカーの温度保証範囲を超えた運転となります。

第二に負荷変動への追従問題です。棚系からトラップ系切り替えにはじまり、トラップ系の負荷は一次乾燥の初期の大負荷から変動しつづけます。この間冷凍機を止めたり、インバーター制御は不可能です。止めとたんに真空度が劣化してきます。膨張弁の制御範囲を超える事態となります。

第三に二次乾燥にはいりますと負荷の無い状態下で高真空を維持する必要となります。冷凍機はバキューム運転を強いられ、冷凍機メーカーの保証外運転となります。圧縮比の増大、吐出温度の増大、オイルの劣化等を生じる危険性が発生致します。

第四に乾式蒸発器の膨張弁調節の原則は蒸発管出口で冷媒はガス化し、適度の加熱ガスであること。トラップコイルの全域を凝結面積として利用しよういたしますと冷凍機への液バックの可能性が増加します。

4. 直膨式冷凍トラップ

方式:コイルに冷媒を直接膨張させ、ガスを冷凍機へ

対策:1.アキュムレーターの設置

2.ホットガスバイパス

無負荷時、疑似負荷とて、ホットガスを冷凍機サクシオンに与える

世界の多くの凍結乾燥機の製造メーカーはこのような乾式直膨トラップを使用しています。冷凍サイクルの安定化の為にアキュムレーターの設置やホットガスバイパスによる冷凍機無負荷時の冷凍機への疑似負荷を与える等の対策にて対応しています。この方法は既に 20 年前にパウエルが指摘している事項で、電子膨張弁等の技術進歩は一部ありますが、基本的には今日も同様な事はいかに技術進歩が遅れているがを示しています。

5. 凍結乾燥機の能力性能(Performance) by H.R.Powell

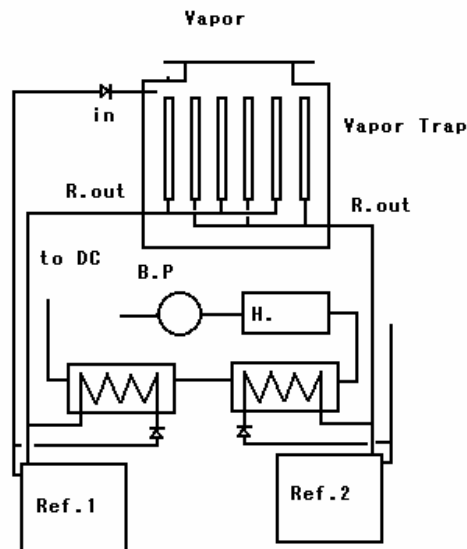
	Normal	Special
Chamber Pressure (Torr) Peak Load	0.1 ~ 0.2	0.05
Final Pressure	0.02 ~ 0.05	0.005 ~ 0.01
Shelf temperature() Lowest temp.	-40	-50
Highest temp.	70	80
Shelf cool-down rate(min) 25 -40	90	60
Shelf heat-up rate(min) lowest to highest	90	60
Evacuation rate(min) to 0.1Torr	15 ~ 30	5 ~ 10
Vapor handling capacity (H ₂ Okg/m ² h)	1	1.5

この表は上で述べましたアメリカストークス社の技術者の提起しています、国際的コンセンサスになっている凍結乾燥機の性能であります。通常のパフォーマンスでは予備凍結時の冷却速度は -40 まで 90min が一般的であり、日本でも大多数の装置で実施されています。製品の特長により Special (特殊) で対応する場合があります。

6. Redundant-refrigeration system(重複冷凍システム)

方式:冷凍機、トラップ系を2系統以上の複数回路を構成

問題点: 直膨方式の根本的解決をせず、事故発生に対し対症療法である



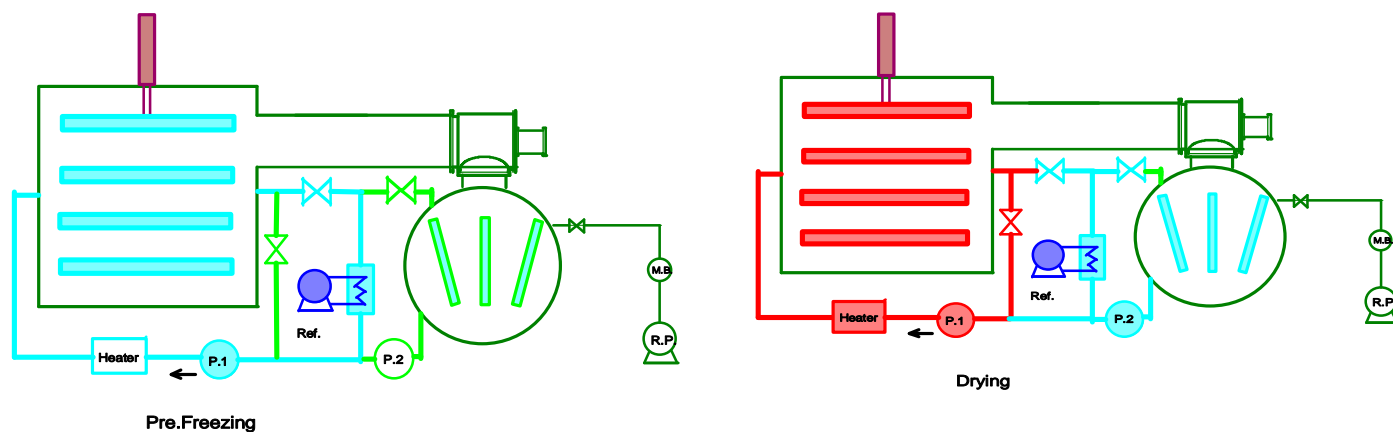
直膨方式の欠点を解決する一つの方法として、パウエルも提唱していますように、重複システムがあります。エドワーズ、ステリス、ユシフロイド等多くのメーカーが採用しています。事故が発生する事を想定し、スタンバイ機として切り替え利用する方式です。複数エンジン搭載の飛行機と同じ考え方であります。

この方式は第一に事故が発生する前提での対症療法であり、冷凍システムの安定性に対し根本的解決をしていない事であります。

第二に負荷時2台の冷凍機が運転時に1台止まった場合、コイル氷着面積と冷凍機停止の二重の負担が加わる事です。飛行機の場合にはエンジン停止しても翼はあり、単に推力が半減するだけです。トラップ冷却系の場合には4倍以上の負担が残冷凍機、コイル系に加わる事になります。

第三に過剰仕様となり設備コストが増加しています。2倍の冷凍機により予備凍結時+25から 40 まで30minと極端な性能表示をしています。

7. ブラインクーラーシステム



方式: 棚系と同様にトラップ系もブライン循環とする

解決: 冷凍システムは安定化

問題点:

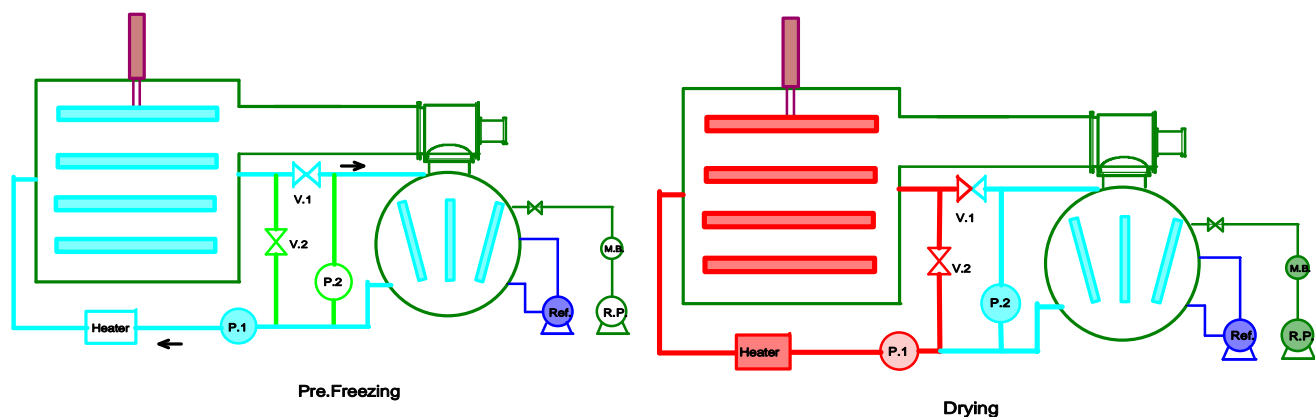
1. 2回の熱交換ロス
2. ブライン循環による冷熱損失
3. ブライン顕熱による凝結
4. トラップ用循環ポンプの故障によるトラップ機能の停止

ブライン方式によることにより、負荷の調整は容易となり、ブラインの混合により広い温度範囲の各種温度を実現する事が可能となり、冷凍機は安定的に使用することが出来ます。しかし次の負担を背負い込むこととなります。

1. 間接トラップ冷却に伴う冷媒/ブラインの熱交換とブライン/水蒸気の二回の熱交換に伴う冷熱
2. 熱交換能力を上げるためと大きな循環ポンプの選定、それに伴うポンプ動力の冷熱損失
3. トラップはブラインの顕熱利用の為に循環流量の増大に伴う冷熱損失
4. トラップ循環ポンプの故障に伴うトラップ機能の停止

日本国内に於いて、一時ブライン方式が採用されたましたが、以上の損失の為に三重熱交システムと比較し過剰の設備と電力消費の負担のために、普及していません。

8. 三重熱交システム



- 1.冷媒回路は予備凍結から乾燥まで**単一ループ**構成
- 2.熱交換器がトラップ内に配置
- 3.直膨システムの欠点を、ブライン循環により解決
- 4.ブライン循環の2回の熱損失を回避
- 5.予備凍結のまま真空排気をすることが可能

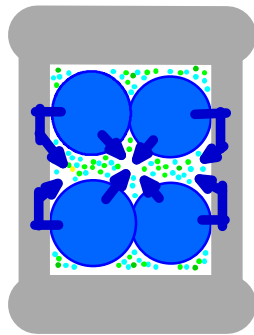
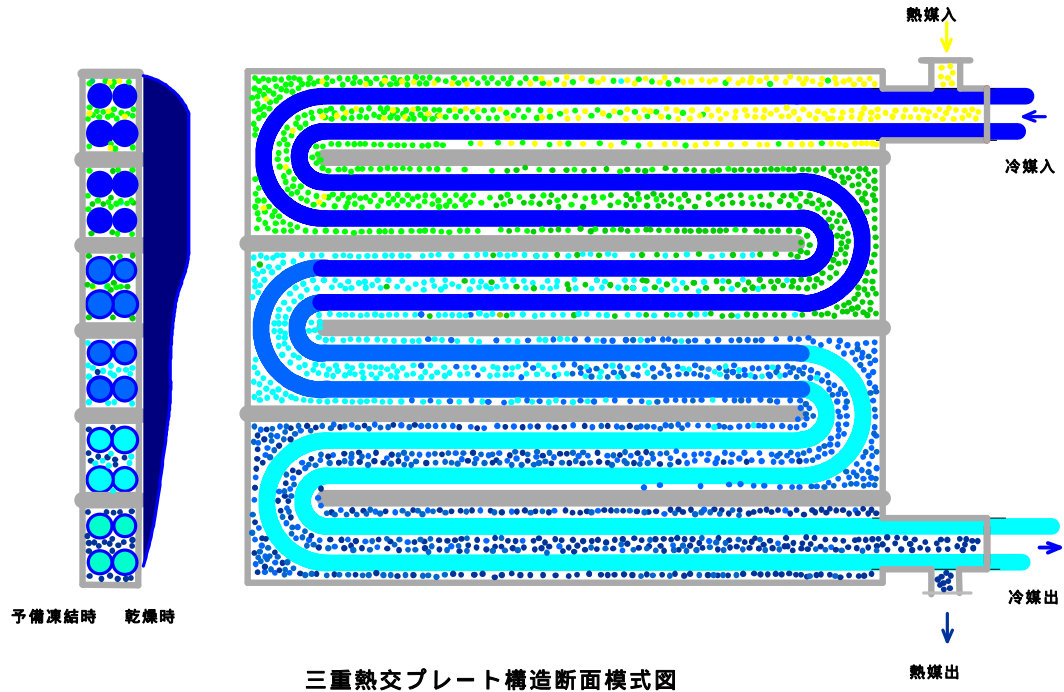
共和真空は凍結乾燥機の技術進歩の遅れているこの重要課題を冷凍機メーカー任せにせず、凍結乾燥機の製造メーカーとして解決の為に取り組み、'79年に特許を申請し、1号機を製作し現在までに330台以上製作しています。

この技術の核心部分はブラインクーラーの熱交換器をトラップ内に組み込み、この熱交換器の外表面を氷着面とした単純な構想から始まりました。

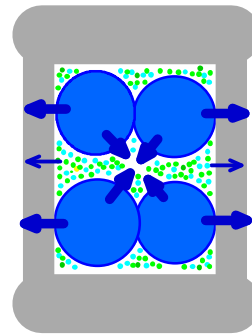
冷媒回路は予備凍結から乾燥まで切り替え等せず単一ループで構成されます。外部熱交換器がなくなり設置スペースの低減と真空断熱されリークロードの低減も実現しています。

ブラインクーラー式の二回の熱交換を、1回に低減し、ブライン循環の欠点の除去とトラップの安定性、運転保守の平意性の長所を取り入れています。

9. 三重熱交プレート

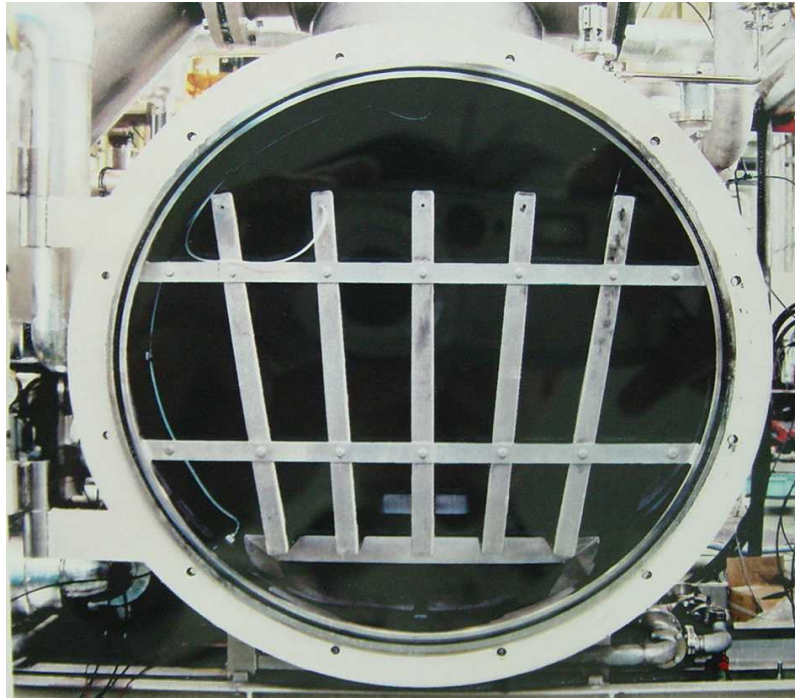


Pre.Freezing



Drying

- 1.冷媒と熱媒、冷媒と水蒸気、熱媒と水蒸気の三媒体が有効に機能
 - 2.冷凍機限界外運転の解決
 - 3.トラップ温度制御
- 水蒸気圧制御可能**



プレートはSUS製外壁で覆われ、氷着面は平滑で洗浄性に優れています。内面は冷媒配管とブライン循環回路が設定されています。冷媒と熱媒、冷媒と水蒸気、熱媒と水蒸気と三媒体が有機的に機能しています。

図で明瞭のように冷媒管内を流れる冷媒は管路の2/3程度で気化するように膨張弁は調整し、低負荷時には熱媒側にて疑似負荷を加える事が可能です。冷凍機への液バックは充分回避できます。

‘00年には改良型(特許申請 公開NO.1272616)を導入し更に熱交換率を向上させました。

近年製品の再現性、恒常性を実現必要から工程でバリデートする事が要求されています。共和真空の三重熱交システムは棚温度、真空度につikaして水蒸気圧の制御を可能とするトラップ温度制御を実施している特徴ある凍結乾燥機を提供しています。

10. 冷凍機系の安定性比較

直膨式/三重熱交システムに於ける冷凍機の故障比較

共和真空技術(株)

製造NO.	83027	製造NO.	78023
客先	協和発酵工業		千葉県血清研究所
型式	RL-2411BS	型式	R2L-1000KPS
棚面積(m ²)	11.12	棚面積(m ²)	11.9
性能	+25 -50 1.5H以内 到達 -60 以下	性能	+20 -40 2H以内 到達 -50 以下
冷凍機	H92C-307W×2	冷凍機	H92C-307W+S7W-55U
電動機(KW)	19×2	電動機(KW)	19+5.5
納入日	'84年	納入日	'79年
'87/3/4	弁回り分解整備	'94/5/9	主冷凍機乗せ替え
		'94/6/23	EXP.交換調整
'88/12/27	弁回り分解整備	'94/8/5	液面計ガス漏れ交換
'90/1/31	サイトグラス、SV交換	'94/9/5	制御冷凍機過負荷停止
			圧縮機交換
'90/2/2	SV,EXP,オイルセパレーターに逆止弁取り付け工事	'95/5/19	CT冷却不良
'90/2/8	吸入配管交換工事	'95/9/13	CT用EXP.交換調整
'91/12/25	弁回り分解整備	'95/11/29	CT用EXP.交換調整
'95/5/10	弁回り分解整備	'95/12/3	冷媒配管気密試験
96/12/23	NO.2冷凍機高圧異常停止	'96/9/2	冷凍機分解整備
	エアージェット、ガス漏れ点検	'97/9/3	冷凍機分解整備
'98/12/22	弁回り分解整備	'98/9/14	主冷凍機乗せ替え、制御系分解点検
		'99/2/15	主冷凍機起動不良、油圧SW交換
		'99/10/14	棚冷却不良、冷媒不足
		'00/2/3	ガス漏れ点検

定期分解点検整備を実施し、三重熱交の場合には冷凍機高圧異常による停止のみである。

上記表は同一面積程度の凍結乾燥機で、三重熱交開発直前の従来型直膨式システムと三重熱交の冷凍機関係のメンテナンス比較を調べた比較表であります。冷凍機は三菱重工の二段圧縮レシプロ冷凍機(19KW)であります。弊社に要望されたメンテナンスファイルから冷凍機関係の事故、定期点検等の記録を取りまとめいたしました。直膨システムの装置では、膨張弁(EXP)調整、冷凍機起動不良等多数のトラブルが発生しています。それに比較し、三重熱交システムでは、過去10年間で冷凍機高圧以上停止が一回しか発生しておりません。当然定期点検、分解整備等を実施しています。

このために日本国内では、最初に導入して頂きましたユーザー様からのレポートが多数を占め、20年間で80%以上の市場支配率まで到達しました。

まとめますと以下ようになります。

- 1.冷凍機の安定性による事故、故障の低減
- 2.棚温度、庫真空度にトラップ温度制御を追加し、
製品の恒常性、再現性を実現
- 3.開度制御と併用し、耐停電特性の向上
- 4.CT 制御により庫内空気漏れ量の正確な測定
- 5.多数の納入実績('80 ~ '06.6) 357 台以上

C,SIP 付き:83 台

SIP 付き:127 台