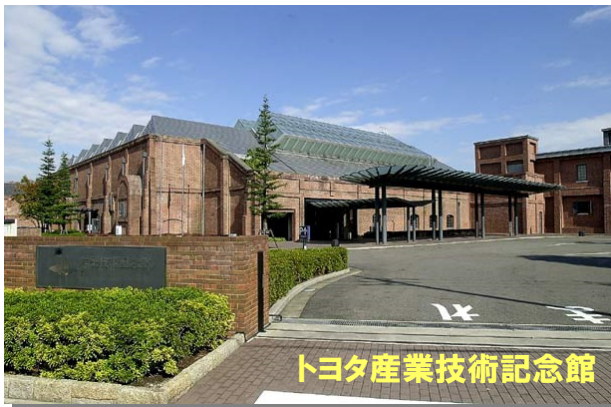


極低温小型冷凍機の基礎 (極低温利用者に向けて)



株式会社コンポン研究所
井上龍夫

■自己紹介

極低温物理学 (@東北大学大学院理学研究科 物理学専攻博士課程)

蓄冷型冷凍機の基礎・応用研究 (@アイシン精機)

- ・スターリング冷凍機
- ・パルス管冷凍機
- ・音波(共鳴管)冷凍機

⇒ 振動流エネルギー変換・熱輸送技術
(熱音響現象の理解と応用)


<現在>

コンポン研究所 …… トヨタグループの研究法人

(GENESIS RESEARCH INSTITUTE)

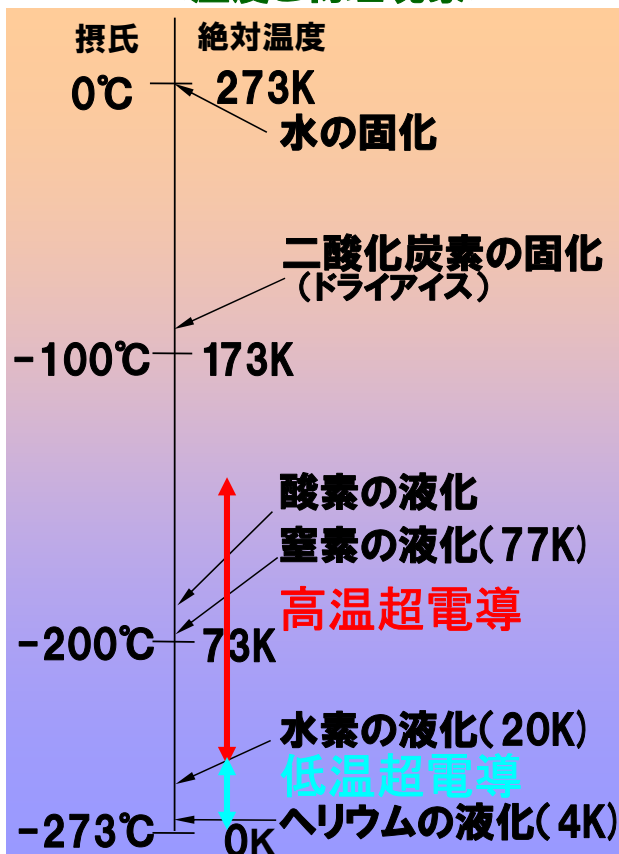
<講演内容>

- 極低温現象の利用と冷却方法
寒剤と冷凍機冷却の特徴
- 極低温冷凍機の利用例
- 極低温冷凍機(蓄冷型小型冷凍機を中心に)
極低温冷凍機の分類
蓄冷型冷凍機の位置づけ
- 蓄冷型冷凍機の寒冷生成原理と種類
スターリング冷凍機
GM冷凍機
パルス管冷凍機
- 極低温冷凍機の効率

 (株)コンポン研究所


冷凍・冷却温度とその利用分野

<温度と物理現象>

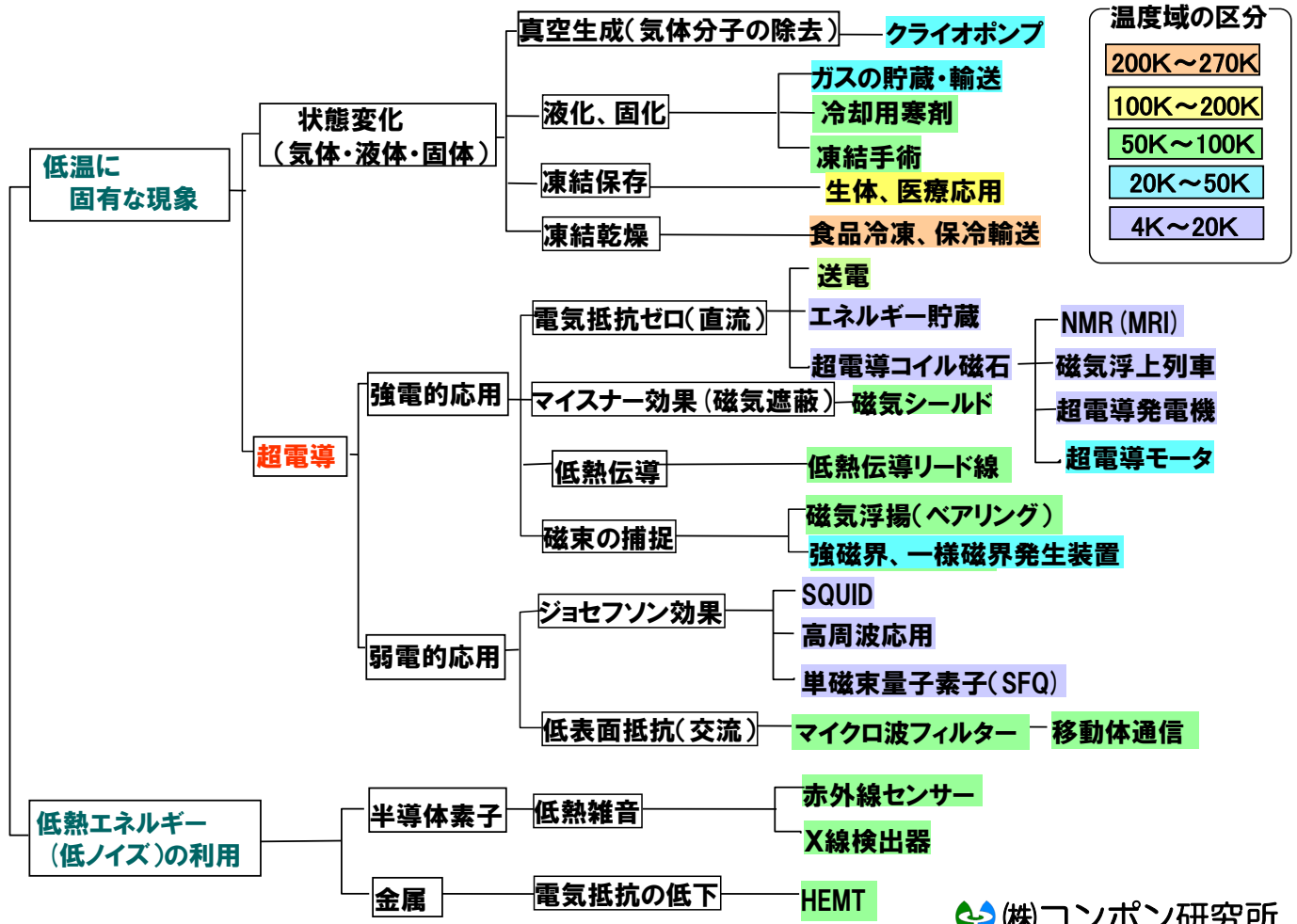


<利用分野・対象>

空調領域
冷凍・冷蔵領域
食品保存(鮮魚など)
生体保存(血液など)
研究・分析機器(センサー類)
真空(クライオ)ポンプ

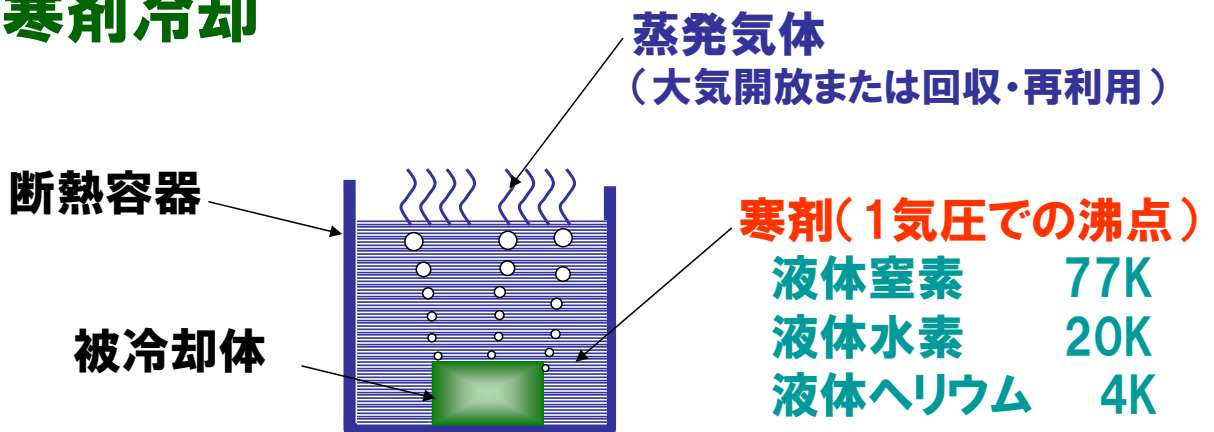
 (株)コンポン研究所

主な極低温利用分野



■ 冷却方法とその特徴

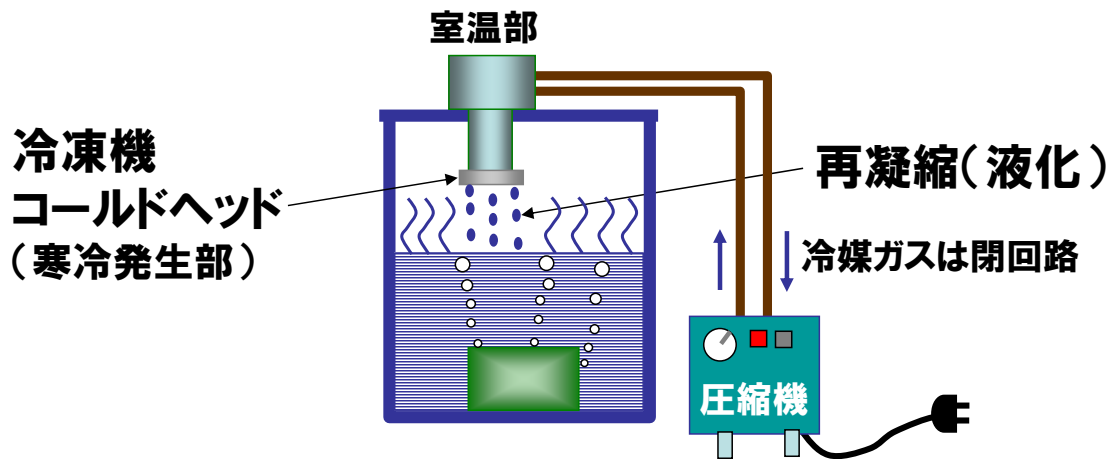
■ 寒剤冷却



特徴

- ・ 冷凍温度の安定性、一様性
- ・ 低振動、低雑音、被冷却体の様々な形状に対応可
- ・ 寒剤の入手の難しさ
- ・ 蒸発分の補給の必要性
- ・ 冷却温度への制約 (沸点利用のため)

■寒剤＋冷凍機冷却

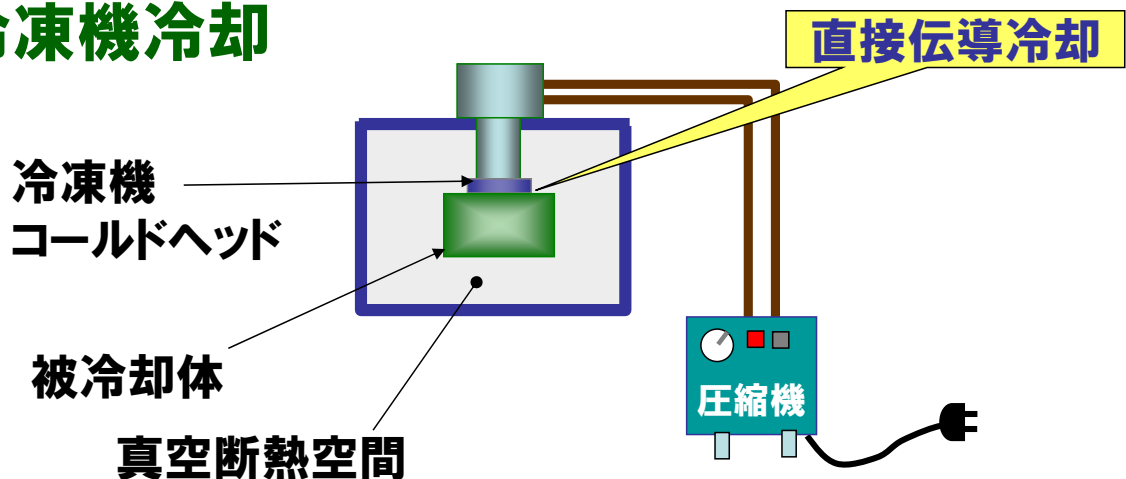


特 徴

- ・初期の寒剤注入は必要
- ・蒸発気体を再凝縮し、長期間補給必要なし
- ・寒剤と冷凍機冷却の両方の特徴を持つ

(株)コンポン研究所

■冷凍機冷却



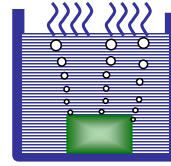
特 徴

- ・電源があればどこでもOK。室温から冷却スタート
- ・冷凍温度の制約は少ないが温度制御が必要
- ・冷却対象の形状、温度分布などを要考慮
- ・冷凍機の信頼・耐久性、温度安定性、重量・サイズ
機械振動、消費電力(効率)、予冷時間など要検討

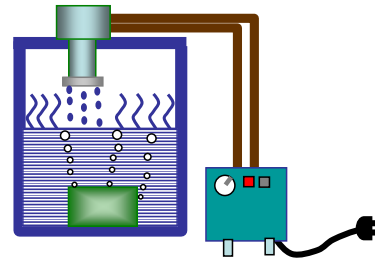
(株)コンポン研究所

■ 極低温利用は寒剤フリー(冷凍機利用)の方向へ

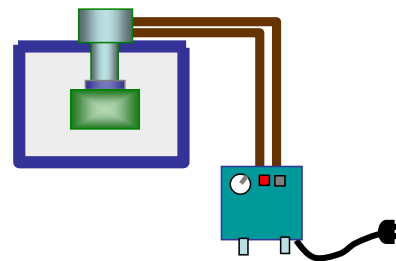
寒剤のみ



寒剤 + 冷凍機



冷凍機のみ

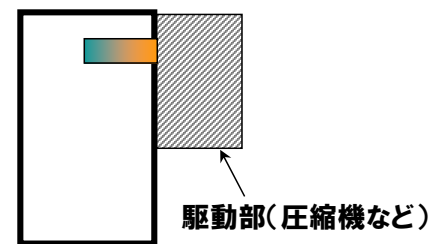


(株)コンポン研究所

■ 冷凍部(コールドヘッド)の基本構成(レイアウト)

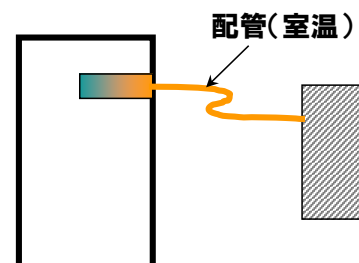
① 駆動部・冷凍部の一体型

- ・効率が低い(無効容積が大きい)



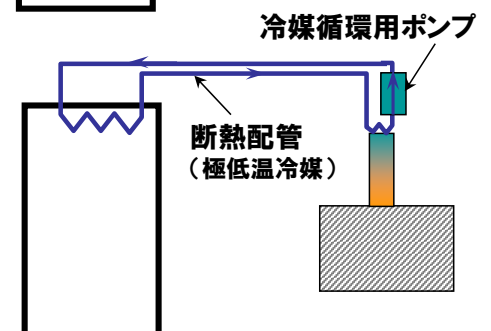
② 駆動部(圧縮部)・冷凍部の分離型

- ・レイアウトの自由度が高い
- ・冷凍部が比較的振動低



③ 冷凍部と冷却対象の分離型

- ・より高いレイアウト自由度
- ・寒冷移送流体(二次冷媒)の使用
- ・被冷却体への低振動環境など



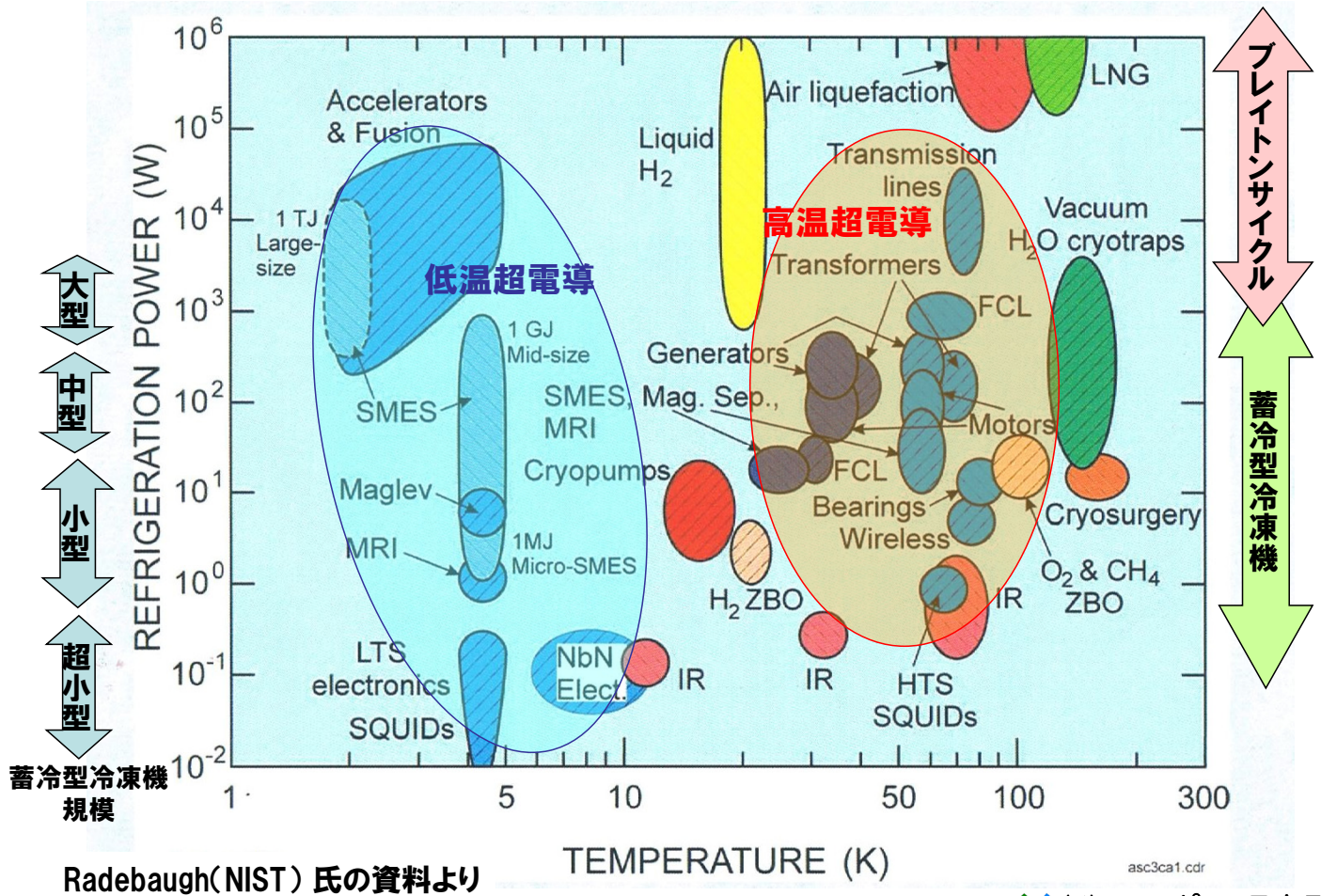
(株)コンポン研究所

具体的な冷凍機とその利用例

■ 冷凍方式の分類と蓄冷型冷凍機的位置付け

作業粒子	示強変数	現象	装置例		作業物質例
分子	圧力	圧縮/膨張	循環流 (直流)	空気圧縮冷凍機 プレートンサイクル冷凍機	空気 ヘリウム
			往復流 蓄冷型 (交流)	スターリング冷凍機 GM冷凍機 パルス管冷凍機 音波冷凍機	ヘリウム
		凝縮/蒸発	蒸気圧縮式冷凍機 吸収式冷凍機		フロン アンモニア ブタン
		吸収/放出	吸着式冷凍機 ケミカルヒートポンプ		水-ゼオライト 水素-MH
電子	電場	電流	ペルチェ素子		BiTe
	磁場	励磁/消磁	磁気冷凍		GGG

極低温冷凍機の適用対象と所要冷凍出力



(株)コンポン研究所

極低温冷凍機

充実の「極低温冷凍機」のラインアップで、お客様の価値創出に貢献する「冷却ソリューション」をグローバルに提供します。

[「極低温冷凍機」に関する詳しい情報はこちら](#)

[精密機器事業部サイト](#)



三 製品・ソリューション

— 極低温冷凍機とは

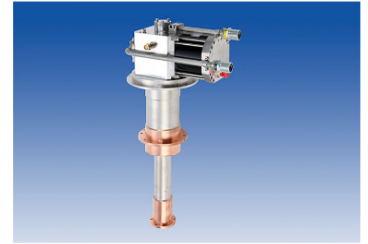
冷媒（ヘリウム）の断熱膨張を用いて対象物の温度を下げる働きをするもので、冷凍サイクルや原理の違いにより幾つかの種類に分かれます。

GM冷凍機

蓄冷材（蓄熱材料）をシリンダー内で往復動させながら冷媒（ヘリウム）の断熱膨張を繰り返すことによって寒冷を発生させる機械式冷凍機です。

当社では、モータの回転運動をクランク機構により往復運動に変換することで蓄冷材を往復動させる方式を採用し、独自のシール構造を併用することによって、世界で初めて4K（-270°C）の温度領域での温度安定性とオリエンテーションフリー（自由な取付方向）を実現しました。

1. 世界ナンバーワンの納入実績
2. オリエンテーションフリー（取付方向に制約なし）
3. 4K領域での温度安定性・長期信頼性

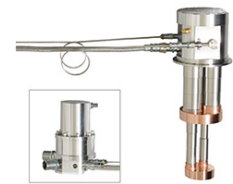


パルスチューブ冷凍機

蓄冷器管、パルス管、バルブユニット等で構成される冷凍機です。

機械駆動式のGM冷凍機と異なり、蓄冷材がシリンダー内を往復しない為に、運転時の振動が少ないという特長があります。また蓄冷材が固定され、低温部分に可動部が無いことから、長寿命です。主として振動を嫌う高感度な分析装置で使用されます。

1. 低振動
2. 長寿命
3. 室温可動部（バルブユニット）の切り離し運転が可能



出典:住友重機械工業株式会社 ホームページ
<https://www.shi.co.jp/products/machinery/cold/index.html>

 (株)コンポン研究所

三 製品・ソリューション

GM-JT冷凍機

2段式GM冷凍機にジュールトムソン（JT）膨張を併用した4K冷凍機です。

冷媒（ヘリウム）をJT膨張させることで冷媒の温度を低下させ、冷凍機内部で液化します。JT膨張では冷凍発生部分での圧力の脈動がなく、得られた冷媒の液相（液体ヘリウム）の潜熱分を冷凍能力として用いるため温度安定性に優れ、またGM冷凍機やパルスチューブ冷凍機と比較して効率が高いという特長もあります。当社はGM-JT冷凍機を手掛ける唯一の冷凍機メーカーです。

1. 4Kでの最大冷凍能力（オンリーワンメーカー）
2. 優れた温度安定性
3. 低消費電力

ソルベイ冷凍機

冷凍発生原理は機械式GM冷凍機と同じですが、モータとクランク機構によって蓄冷材（蓄熱材料）の往復動させるのではなく、ガス圧力により蓄冷器を往復動させるため、室温部分の構造がシンプルで軽量コンパクトとなり、お客様の装置への取付が容易です。

1. 4K以外での幅広い温度ラインナップを保有（6.5K/10K/20K/77K）
2. 豊富な圧縮機ユニットのバリエーション
3. 多様な冷凍能力（小型から大型機種まで）



出典:住友重機械工業株式会社 ホームページ
<https://www.shi.co.jp/products/machinery/cold/index.html>

 (株)コンポン研究所

■極低温冷凍機に求められる検討項目

(ユーザー側で検討する要求仕様)

- ・信頼性、耐久性、耐振性
- ・効率(冷凍温度、冷凍能力、消費電力)
- ・サイズと重量
- ・メンテナンス方法・間隔
- ・機械振動、電磁気ノイズの発生
- ・放熱方法(水冷、空冷)
- ・補機類の所要電力
- ・コスト(価格、維持費など)

 (株)コンボン研究所

■冷凍機(機械による寒冷生成・冷却)の機能・作用

①低温生成機能(冷媒とその制御パラメータ)

作動媒体自らの温度を下げる機構

断熱膨張、自由膨張、断熱消磁など

②吸熱・放熱機能(熱の入口&出口の確保)

外界からの熱の吸込み・吐き出しの要素

熱交換器(温度差による熱の移動)

③熱輸送機能(温度勾配に逆らった熱輸送)

吸入した熱を室温部まで汲み上げる機構

作業媒体の移動、流体振動による熱ポンプ作用

 (株)コンボン研究所

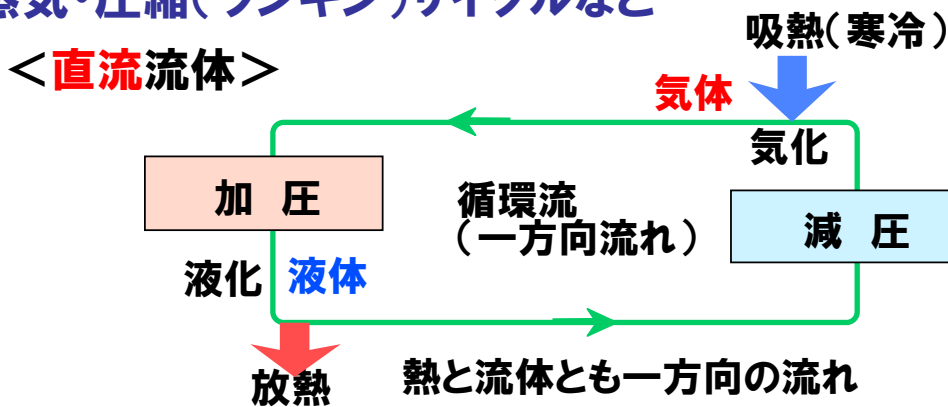
■冷凍方式の分類と蓄冷型冷凍機的位置付け

作業粒子	示強変数	現象	装置例		作業物質例
分子	圧力	圧縮/膨張 (気体)	循環流 (直流)	空気圧縮冷凍機 ブレイトンサイクル冷凍機	空気 ヘリウム
			往復流 蓄冷型 (交流)	スターリング冷凍機 GM冷凍機 パルス管冷凍機 音波冷凍機	ヘリウム
		凝縮/蒸発 (気体・液体の相変化)	蒸気圧縮式冷凍機 吸収式冷凍機		フロン アンモニア ブタン
		吸収/放出	吸着式冷凍機 ケミカルヒートポンプ		水-ゼオライト 水素-MH
電子	電場	電流	ペルチェ素子		BiTe
	磁場	励磁/消磁	磁気冷凍		GGG

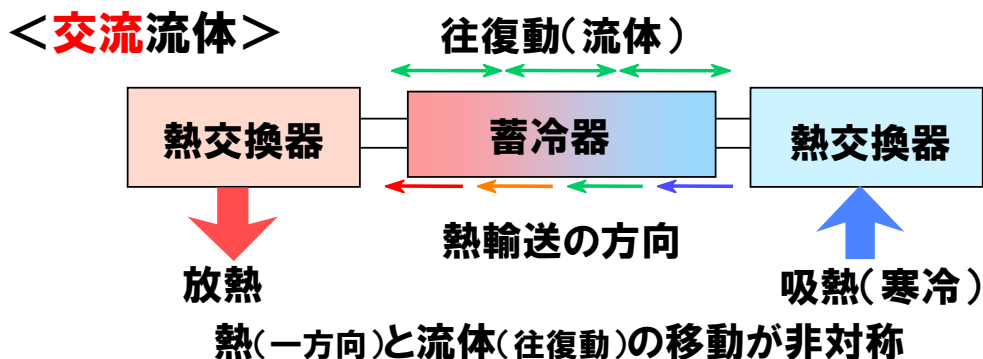
(株)コンポン研究所

低温生成方法(サイクル比較)

■蒸気・圧縮(ランキン)サイクルなど

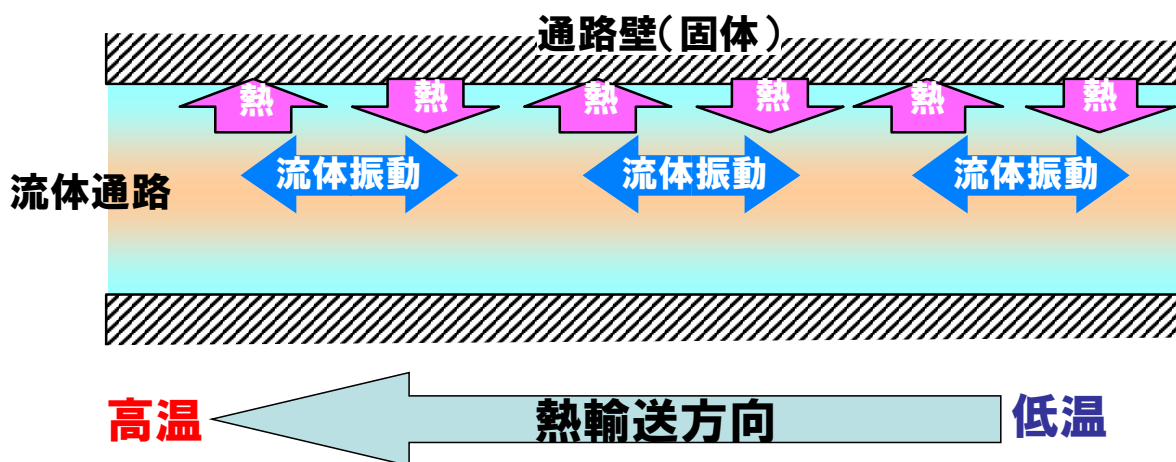


■蓄冷型冷凍サイクル



(株)コンポン研究所

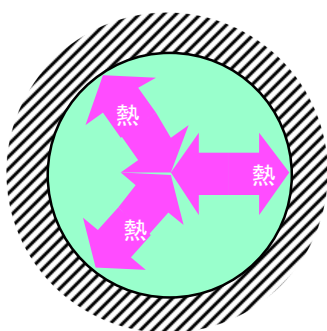
■ 圧力変動および流体振動による蓄冷器(流路)内の熱輸送メカニズム



流体による**熱のバケツリ**を実現！
 (温度勾配に逆らった汲上げが可能)

(株)コンポン研究所

◎ 流路壁との熱授受の容易さ(流路サイズと周波数に依存)

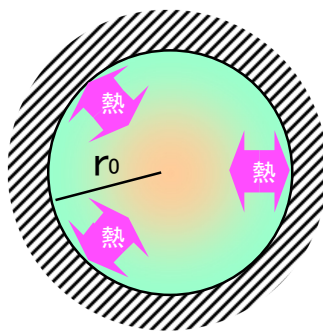


$$\frac{\omega r_0^2}{\alpha} \ll 1$$

流路内のほとんどが

等温可逆変化
 (時間遅れなく熱授受が行われる)

ω : 角周波数
 α : 温度拡散係数

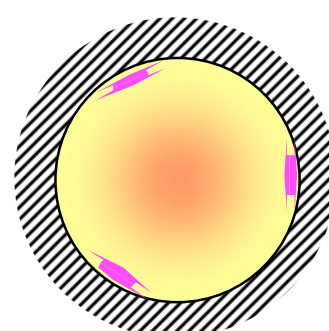


$$\frac{\omega r_0^2}{\alpha} \sim 1$$

流路内の一部が

不可逆変化
 (熱授受に時間がかかる
 → 時間遅れが生じる)

$$\frac{\omega r_0^2}{\alpha} \equiv \omega \tau$$



$$\frac{\omega r_0^2}{\alpha} \gg 1$$

流路内のほとんどが

断熱可逆変化
 (熱授受は行われない)

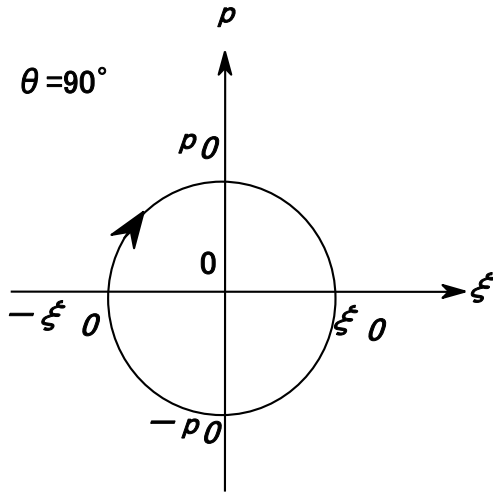
(株)コンポン研究所

◎進行波型・定在波型

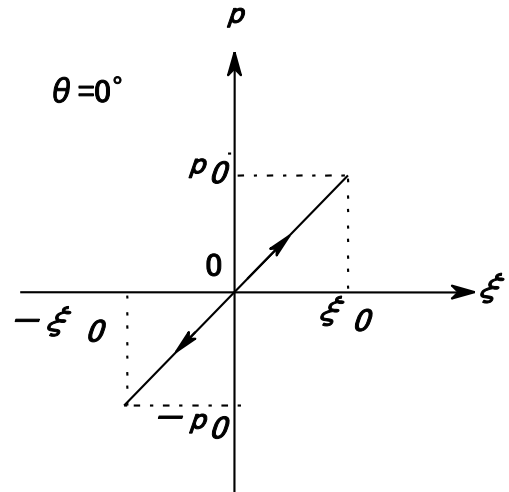
圧力および位置変化のタイミング (位相差) による区分

$$\xi(t) = z_0 + \xi_0 \cos \omega t$$

$$p(t) = p_m + p_0 \cos(\omega t + \theta)$$



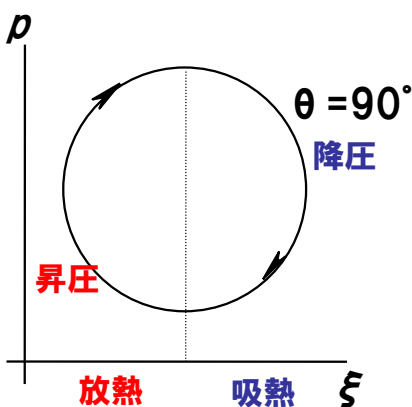
進行波型



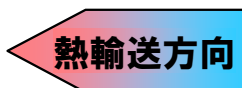
定在波型

(株)コンポン研究所

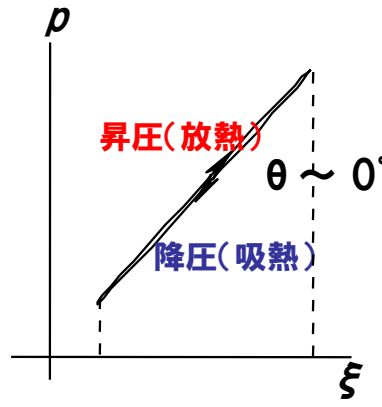
変位と圧力変動の位相関係 (進行波・定在波) と熱輸送方向



進行波的



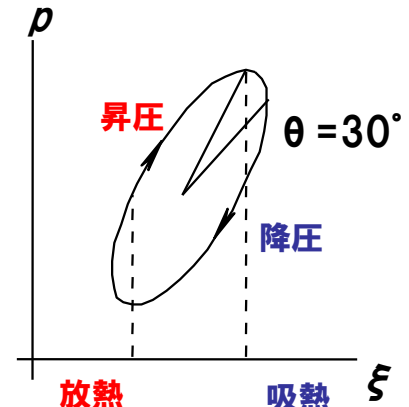
実現されるのは…
等温可逆的環境
 $\omega \cdot \tau \ll 1$



定在波的



実現されるのは…
時間遅れのある
不可逆的環境
 $\omega \cdot \tau \sim 1$



中間的(現実)



実現されるのは…
等温可逆的環境
 $\omega \cdot \tau \ll 1$

(株)コンポン研究所

■流体の往復動での熱輸送実現のために

(効率的な熱(エントロピー)のバケツリレーの実現)

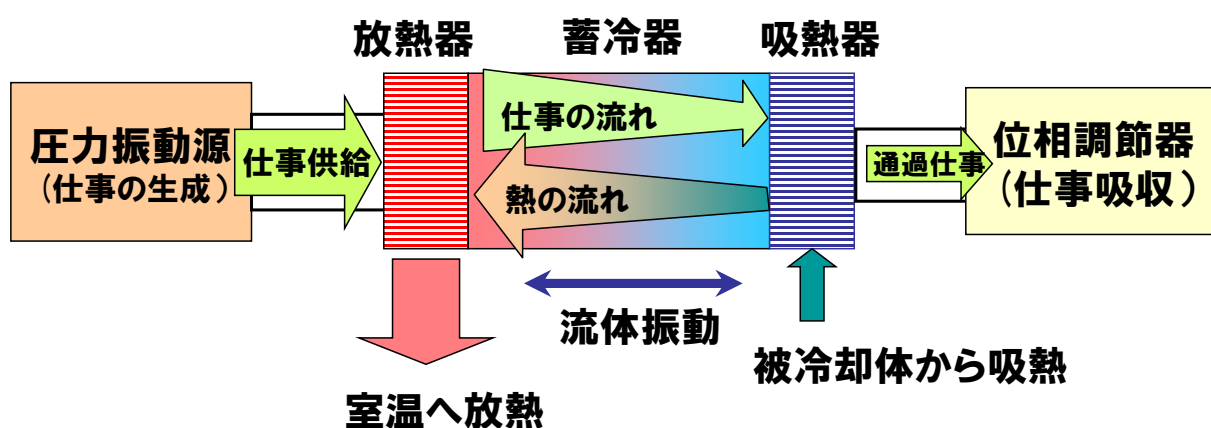
- 流体物性と周波数 (ω) に見合った
適度な半径の流路 (r_0)
- 流体の変位と圧力変化の適当な位相差 (θ)

設計指針

- 蓄冷器内の蓄冷材(流路)のサイズへの要件
- 最適な位相差(タイミング)を実現する機構の構築

(株)コンポン研究所

蓄冷型冷凍機の基本構成要素と機能

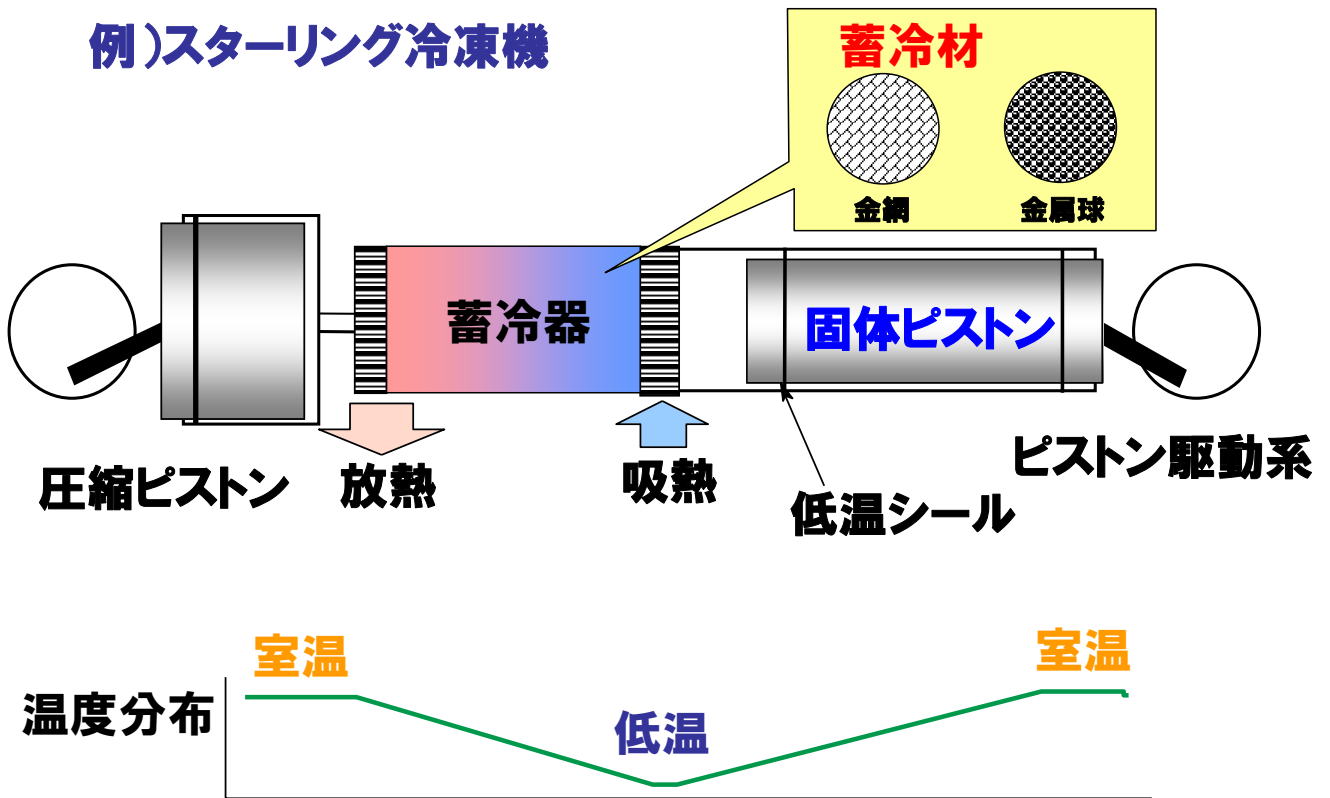


- 圧力振動源: 仕事流供給源
- 位相調節器: 流体の振動と圧力振動の位相差制御(通過仕事の吸収部)
- 蓄冷器: エネルギー流(仕事流 \Rightarrow 熱流)変換器および熱輸送部
- 放熱器・吸熱器(熱交換器): 外界への熱の出入り口

(株)コンポン研究所

蓄冷型冷凍機の基本構成

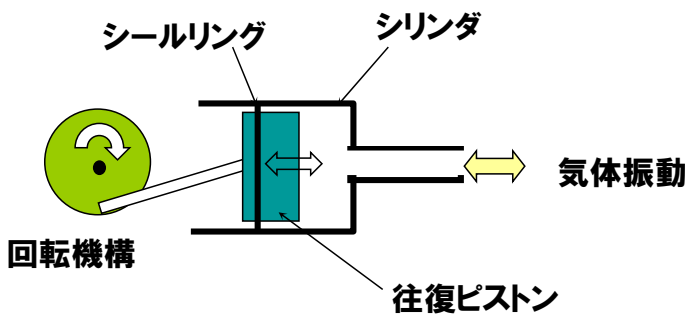
例)スターリング冷凍機



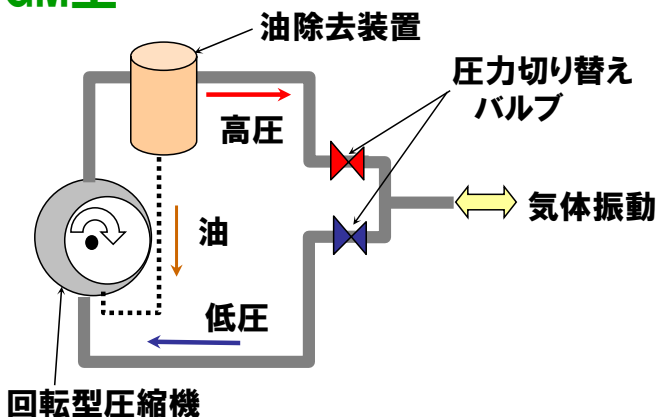
(株)コンポン研究所

■圧力振動源の形式

■スターリング(ST)型



■GM型

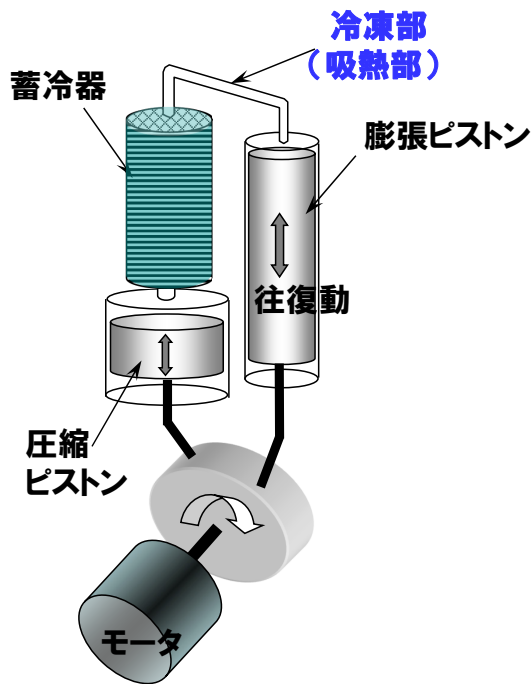


構造的特徴		
	長所	短所
ST型	<ul style="list-style-type: none"> ・作動気体は無潤滑(クリーン) ・圧縮効率が高い ・小型になる 	<ul style="list-style-type: none"> ・回転機構 ⇒往復動への変換 ・無潤滑による磨耗 ⇒メンテ必要性
GM型	<ul style="list-style-type: none"> ・油潤滑による長寿命 ・エアコン用コンプレッサ利用 ⇒低価格 	<ul style="list-style-type: none"> ・油の分離装置が必要 ⇒大型になる ・分離装置の交換が必要

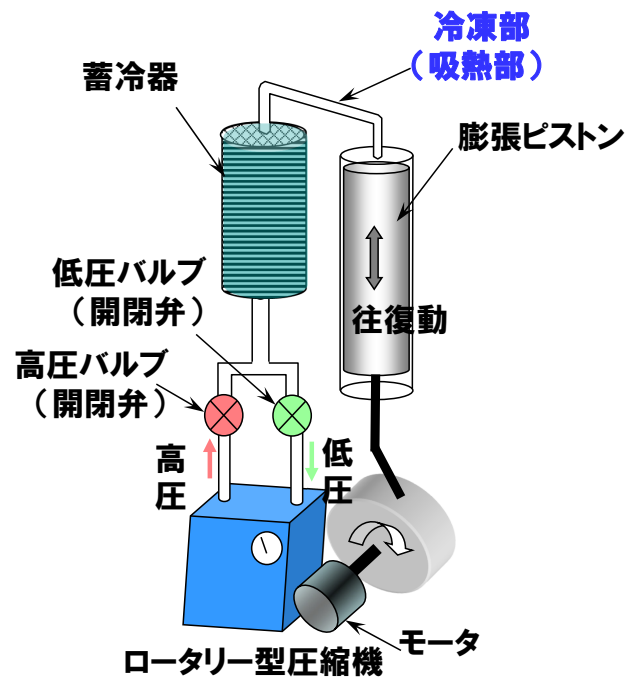
(株)コンポン研究所

蓄冷型冷凍機の形式と構成

(A) スターリング冷凍機



(B) GM冷凍機

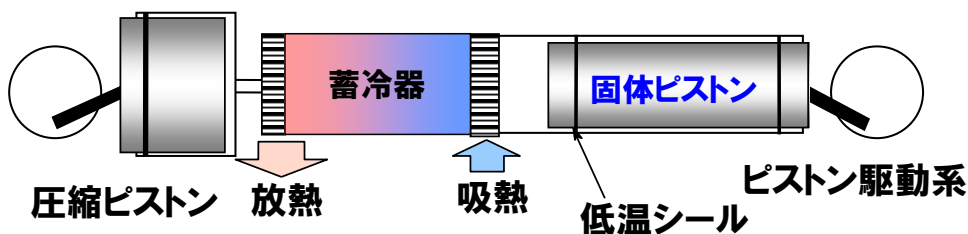


(株)コンポン研究所

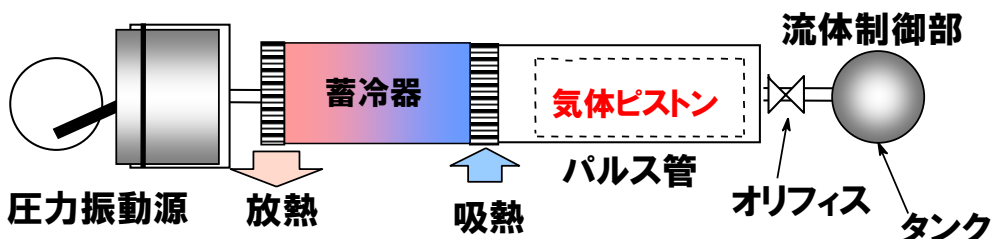
低温ピストンなし冷凍機「パルス管冷凍機」

従来冷凍機(スターリング冷凍機)

(パルスチューブ冷凍機)



パルス管冷凍機



パルス管冷凍機の特徴

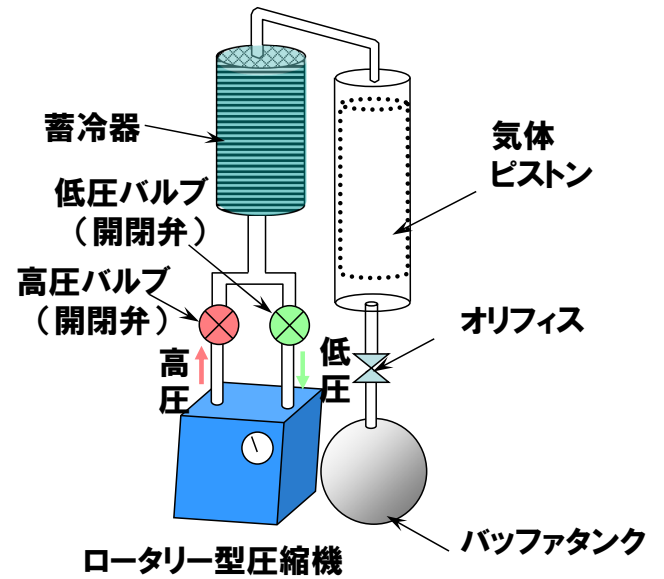
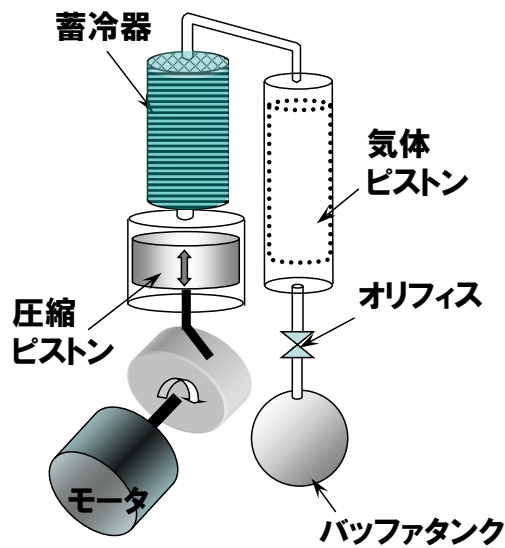
- シールや駆動部が少なく**単純構造**
- 低温部にピストンが無く**低振動**
- 低温部の**メンテナンスが不要**
- 気体ピストンの制御の難しさ**

(株)コンポン研究所

■パルス管冷凍機の形式と構成

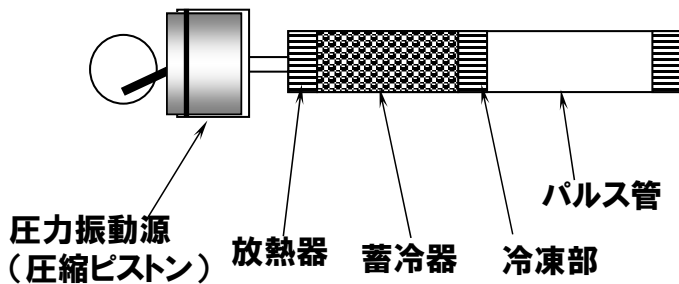
(C-a) スターリング型パルス管冷凍機

(C-b) GM型パルス管冷凍機

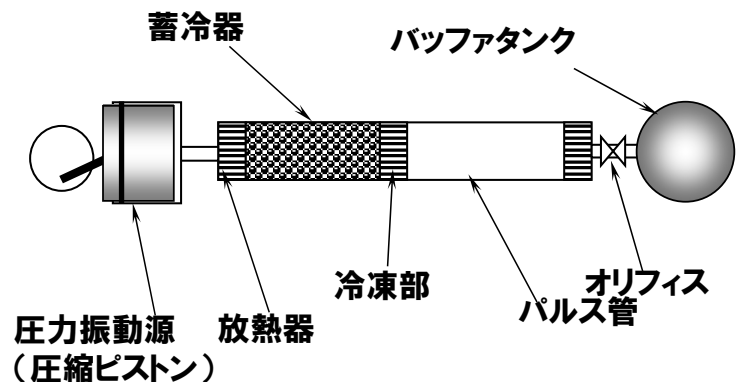


(株)コンポン研究所

■パルス管冷凍機の分類と構造

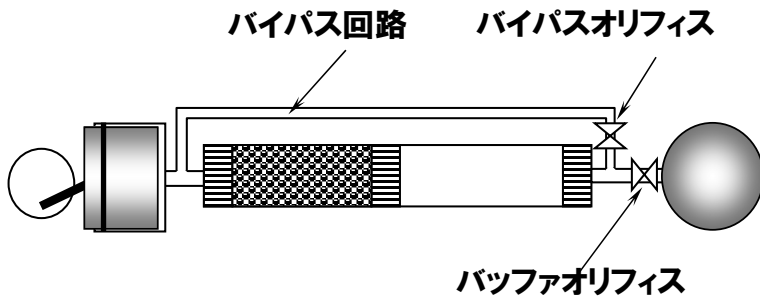


Basic型(第1世代)

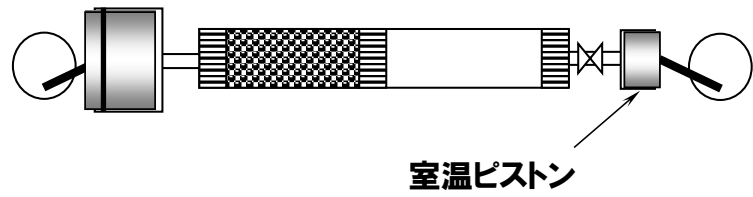


オリフィス型 (第2世代)


(株)コンポン研究所

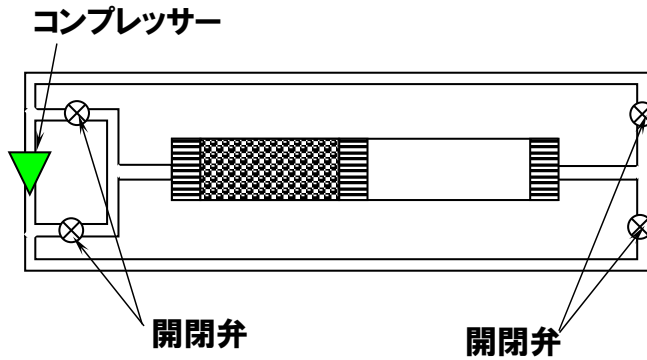


ダブルインレット型 (第3世代)

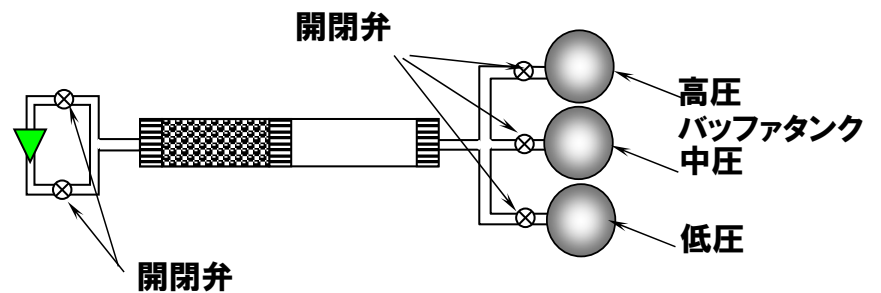


ダブルピストン型 (第3世代)


 (株)コンポン研究所

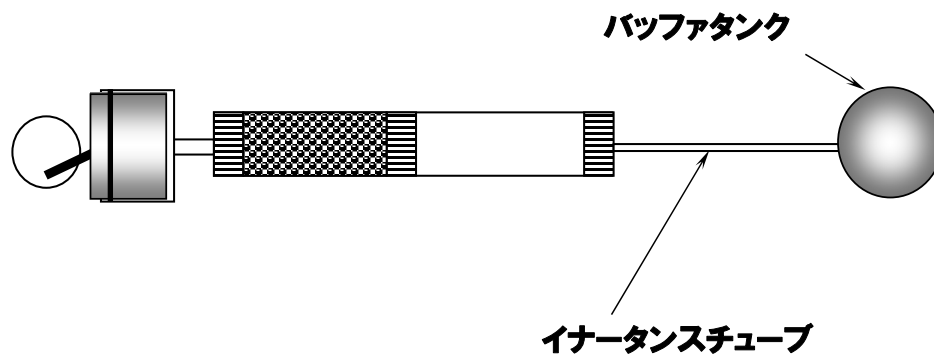


4バルブ型 (第3世代)



アクティブバッファ型 (第3世代)

 (株)コンポン研究所



イナータンスチューブ型 (第3世代)

■蓄冷型冷凍機の形式と特徴

冷凍機形式	圧力振動源 (圧縮部)形式	冷凍部形式	特 徴		
			長 所	短 所	
スターリング 冷凍機	往復動ピストン	往復動 ピストン	<ul style="list-style-type: none"> ・高効率 ・コンパクト 	<ul style="list-style-type: none"> ・低温ピストンシールのメンテが必要 ・振動が比較的大 	
GM冷凍機	回転型圧縮機	往復動 ピストン	<ul style="list-style-type: none"> ・高信頼性 ・メンテ間隔長い ・圧力振動源の分離可 	<ul style="list-style-type: none"> ・低効率 ・大型 	
パルス管 冷凍機	ST 型	往復動ピストン	ピストン無し (気体ピストン)	<ul style="list-style-type: none"> ・低振動 ・冷凍部メンテ不要 ・流体制御方式が多様 ・要素の配置の設計自由度が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・気体ピストンに起因する性能不安定性 ・重力(取り付け方向)の影響を受けやすい
	GM 型	回転型圧縮機			


■冷凍機の効率とその表記

$$\text{COP} = \frac{\text{吸熱量}}{\text{投入仕事}}$$

損失がない時の効率 = $\text{COP}_c = T_c / (T_h - T_c)$
(理想効率:カルノー効率)
Th:放熱温度(室温)
Tc:冷凍温度

実際の冷凍機の効率はカルノー効率との比率で表記

$$\text{比カルノー効率}(\eta\%) \equiv \frac{\text{実際のCOP}}{\text{COP}_c} \times 100 (\%)$$

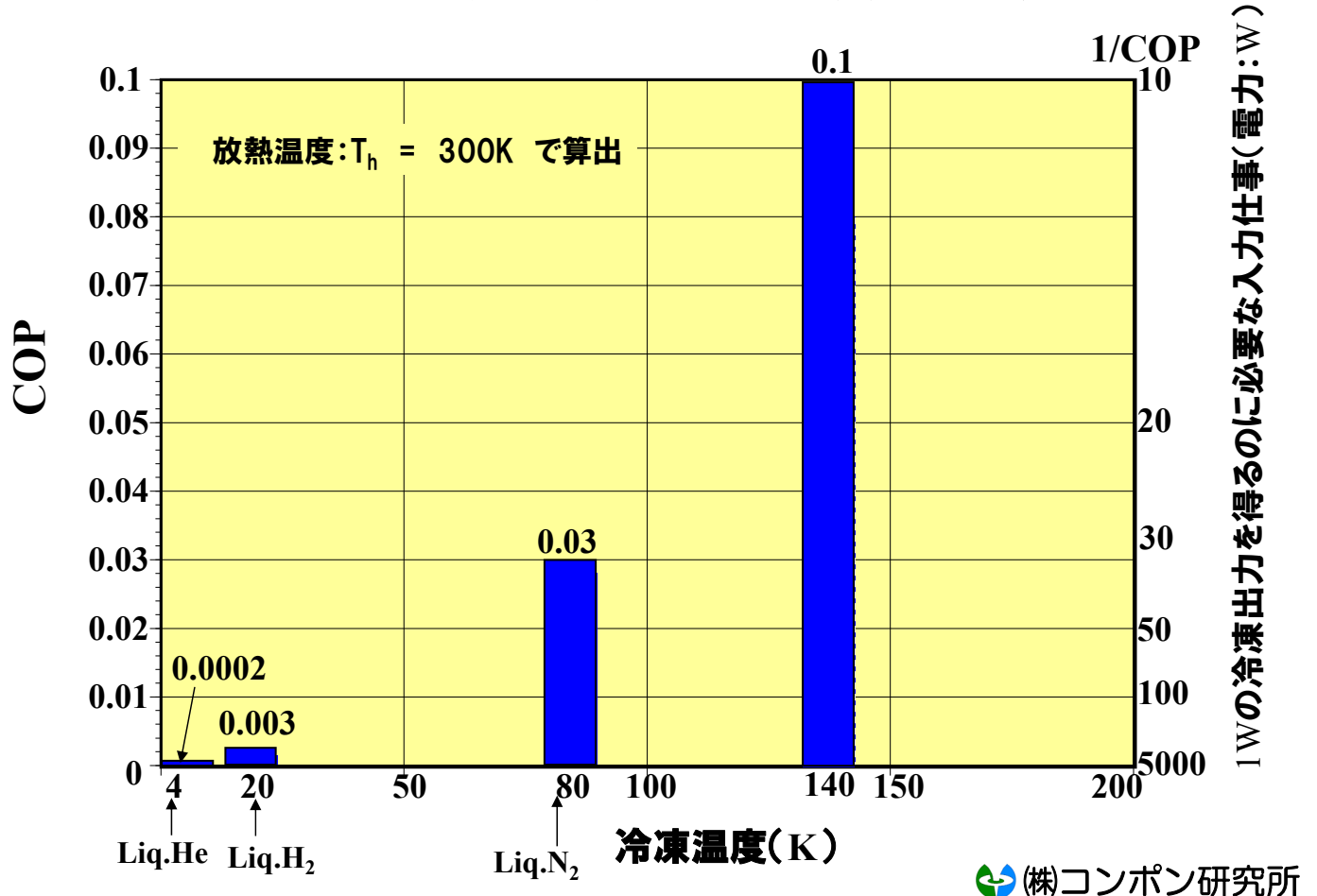
 (株)コンポン研究所

■現実の極低温冷凍機の効率例 (小型冷凍機の場合)

冷凍温度	カルノー効率 COP _c	現実的 カルノー比	現実的 COP
140K	0.875	12 (%)	0.10
80K	0.346	10	0.03
20K	0.071	4	0.003
4K	0.014	2	0.0002

 (株)コンポン研究所

冷凍機の効率(COP)の冷凍温度による違い



まとめ

- 冷凍機の基本的な技術・要素は揃っている
- 冷却対象が求める要求仕様を明確に
- 冷却対象に最適な冷凍方式を選択
- 極低温利用者と冷凍機技術者との
情報共有、コミュニケーションを・・・
- ニーズに対応した課題の抽出、解決へ