

2Kヘリウム冷凍システム

高エネルギー加速器研究機構
加速器研究施設

仲井 浩孝

概要

⊕ヘリウム冷凍機

- ⊕ 液化の熱力学

- ⊕ ヘリウムの液化

- ⊕ 冷凍機と液化機

- ⊕ ヘリウム冷凍システム

⊕超流動ヘリウムと2K冷凍システム

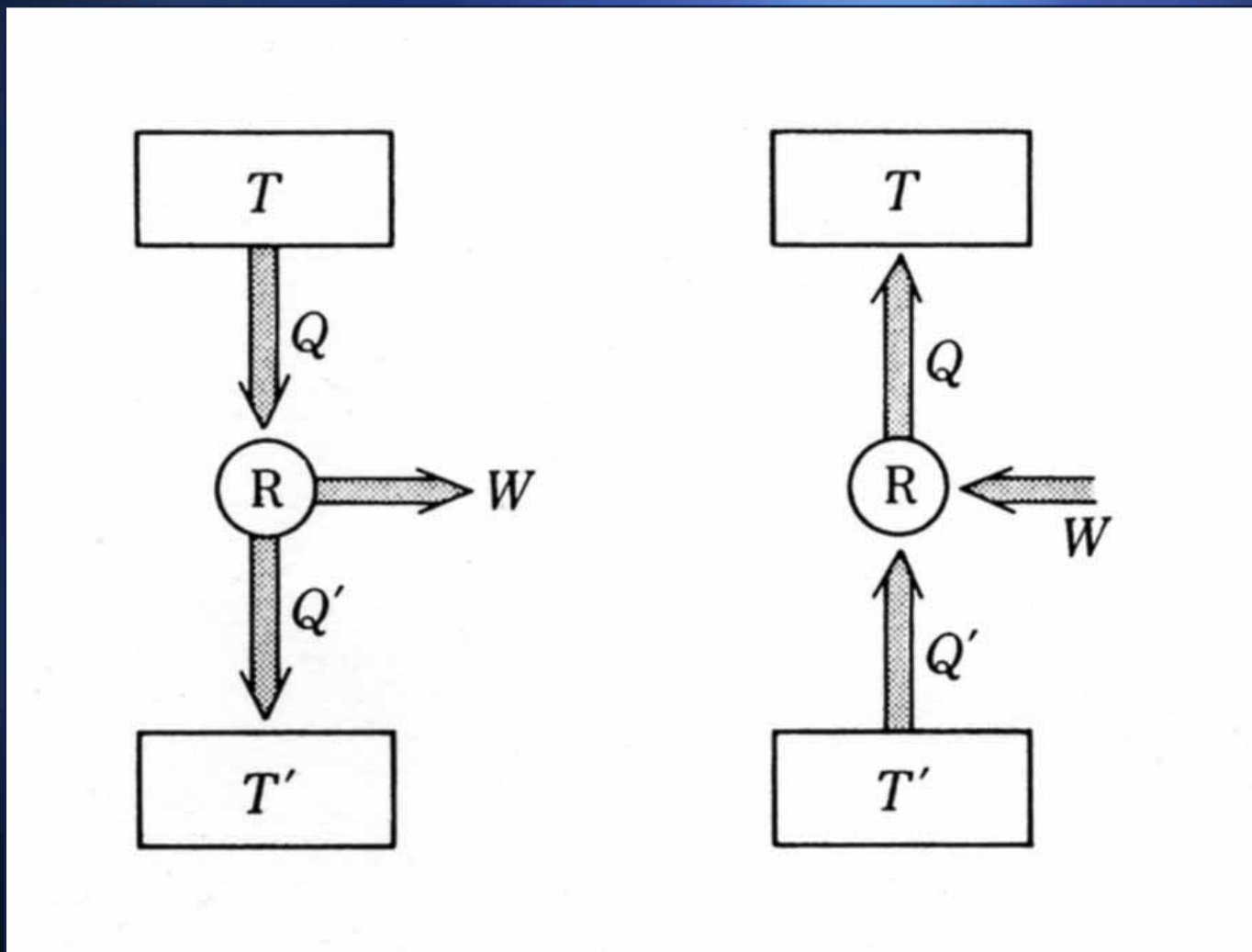
- ⊕ 超流動ヘリウム

- ⊕ 超流動ヘリウム冷凍システム

- ⊕ ERL用2K冷凍システム

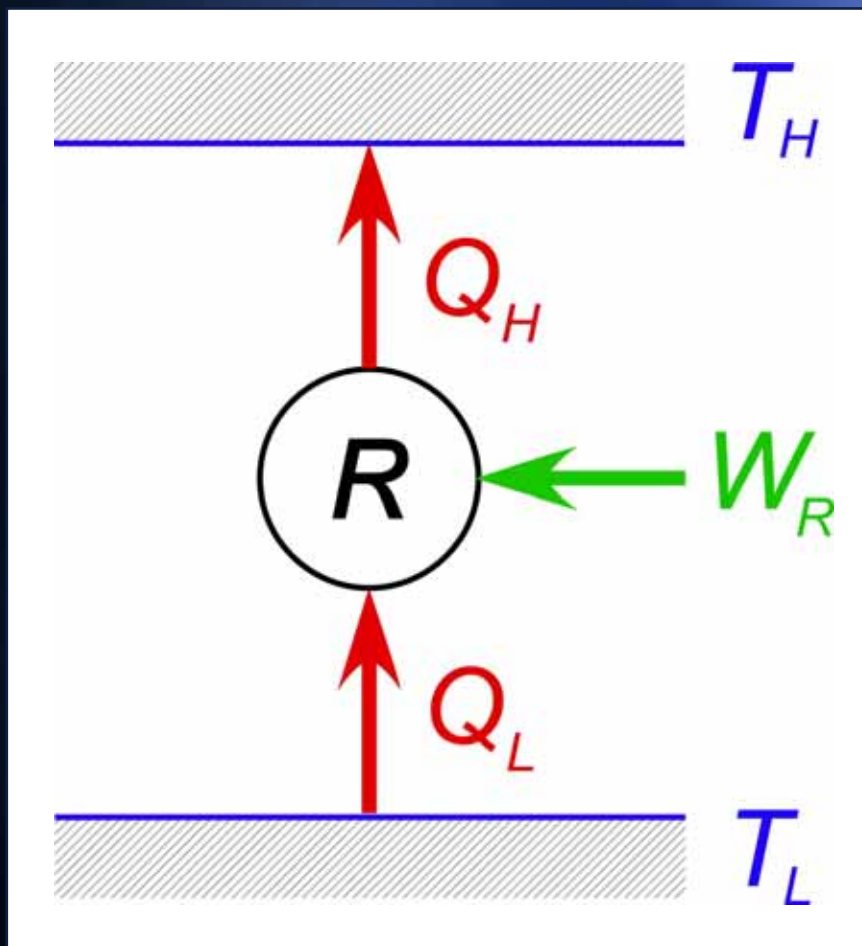
ヘリウム冷凍機

可逆機関



参考文献 [19]

冷凍サイクル



参考文献 [16]

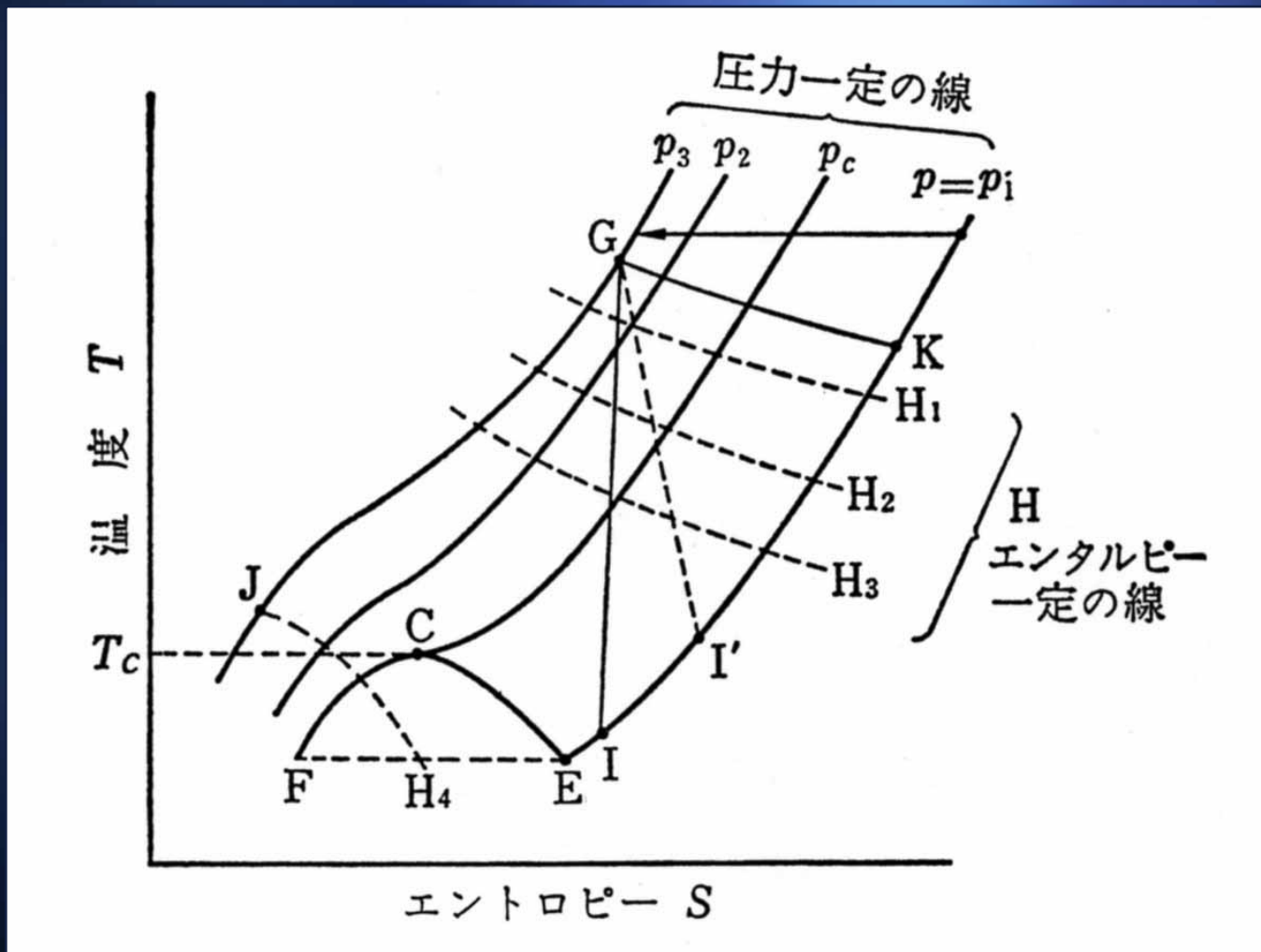
$$Q_H = Q_L + W_R$$

$$\frac{Q_H}{T_H} \geq \frac{Q_L}{T_L}$$

$$W_R \geq Q_L \left(\frac{T_H}{T_L} - 1 \right)$$

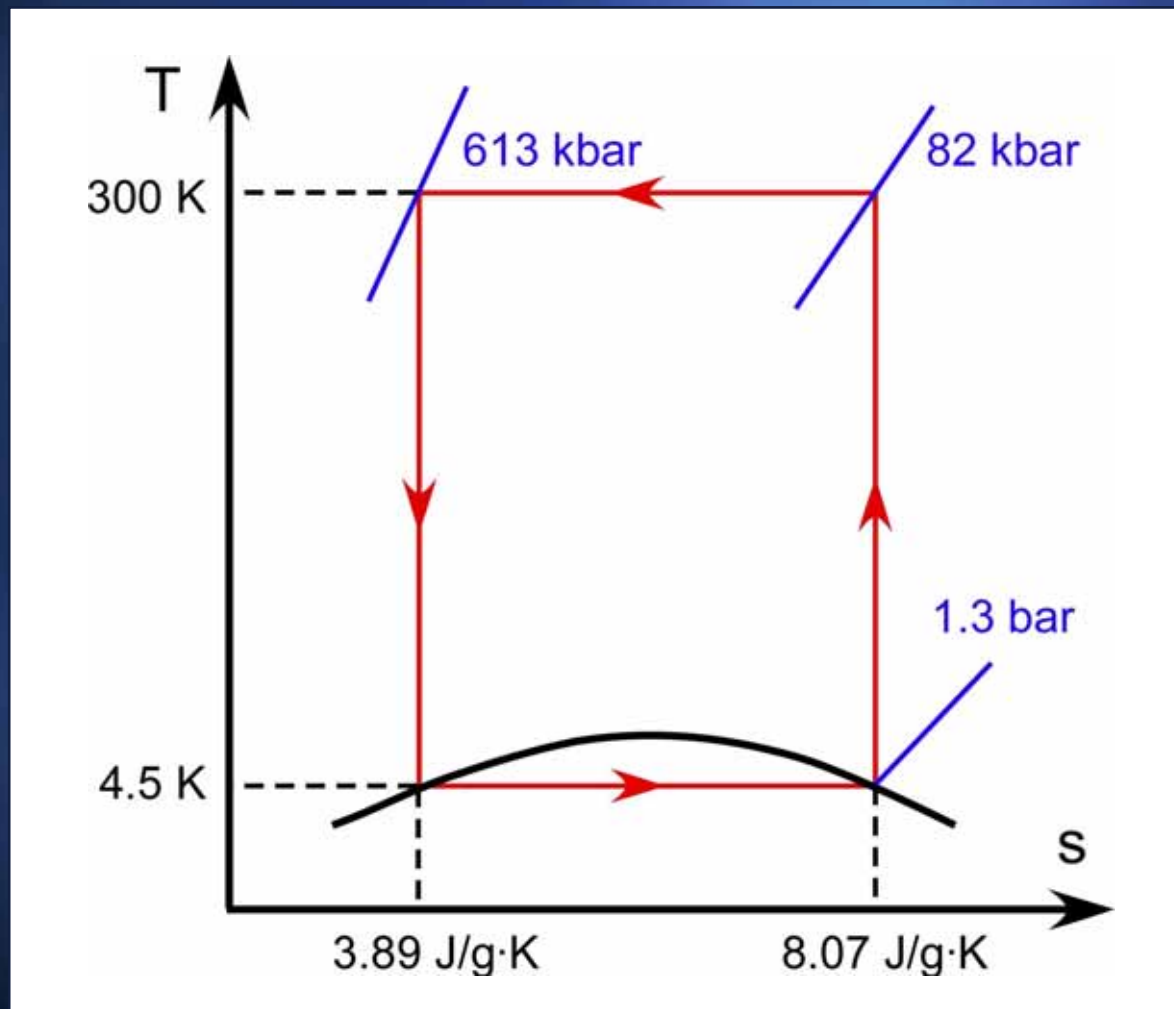
$$\begin{aligned} COP &= \frac{Q_L}{W_R} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \\ &= \frac{T_L}{T_H - T_L} \end{aligned}$$

温度-エントロピー線図



参考文献 [2]

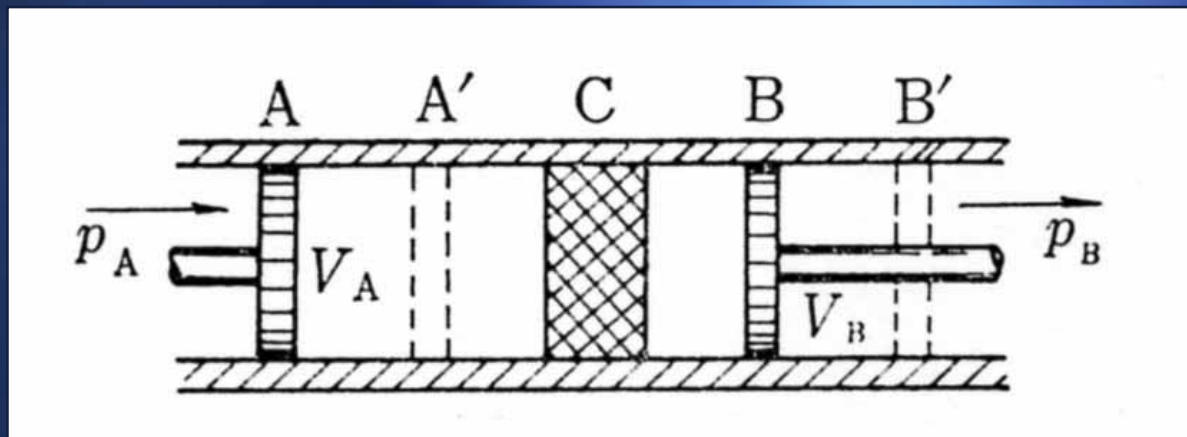
カルノーサイクルによるヘリウムの液化



参考文献 [16]

エンタルピー

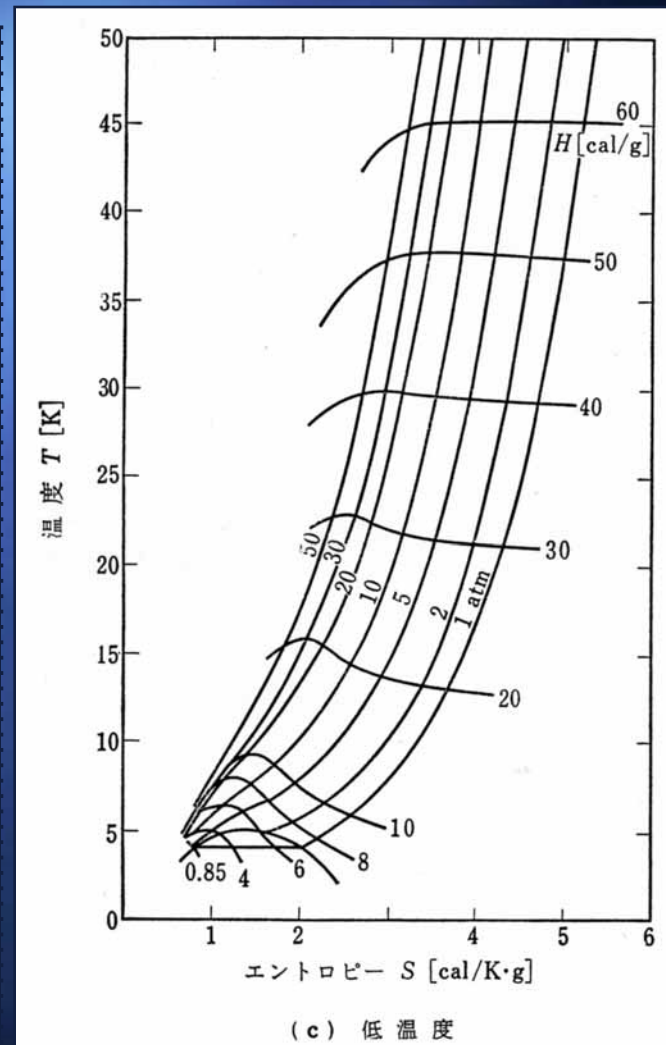
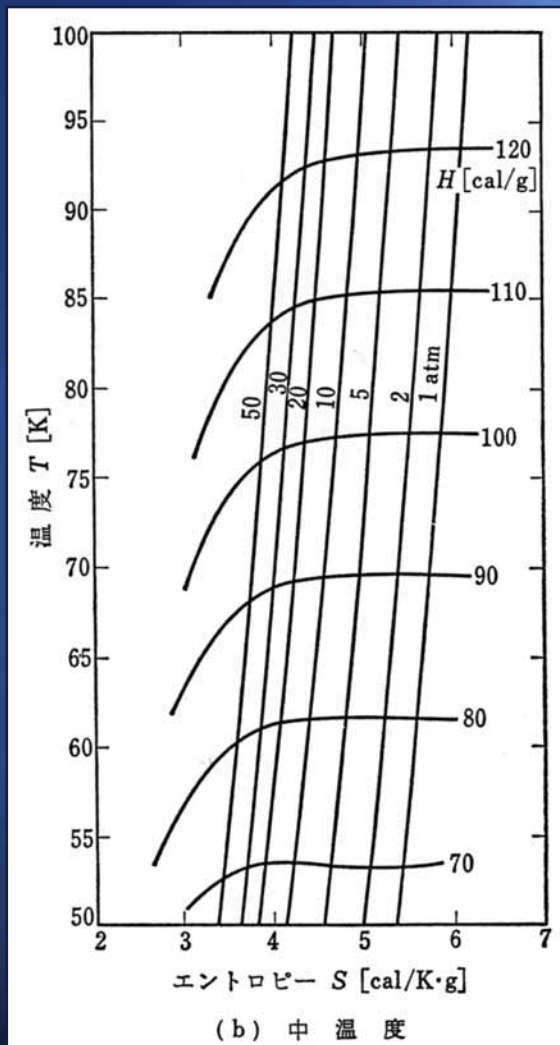
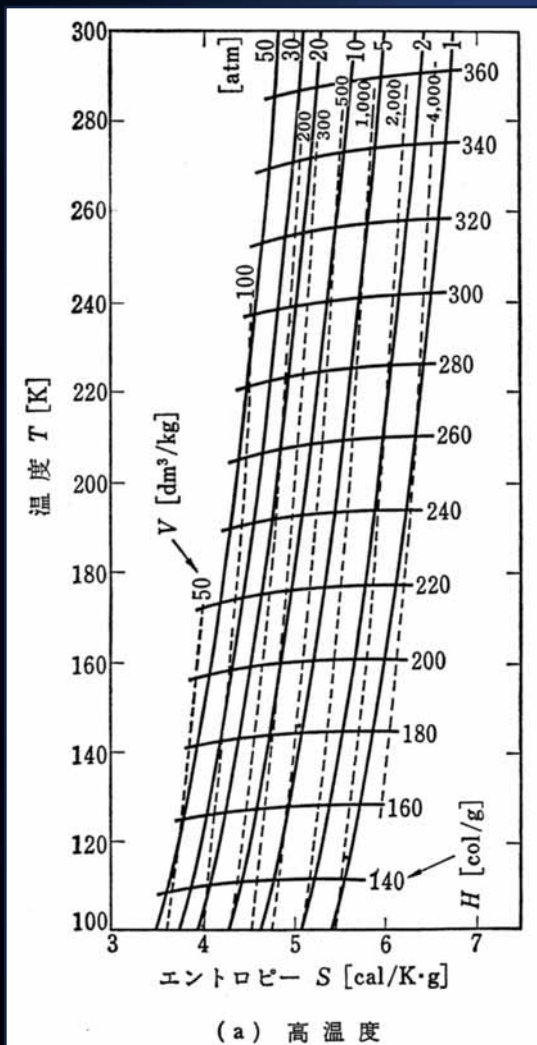
ジュール-トムソンの細孔栓の実験



参考文献 [14]

- 外部からなされた仕事: $W = p_A V_A - p_B V_B$
- 熱力学第一法則: $Q = (U_B - U_A) - W$
- 断熱条件: $Q = 0$
- 内部エネルギーの増加: $U_B - U_A = p_A V_A - p_B V_B$
- エンタルピー: $U + pV = \text{const.} = H$

ヘリウムのT-S線図



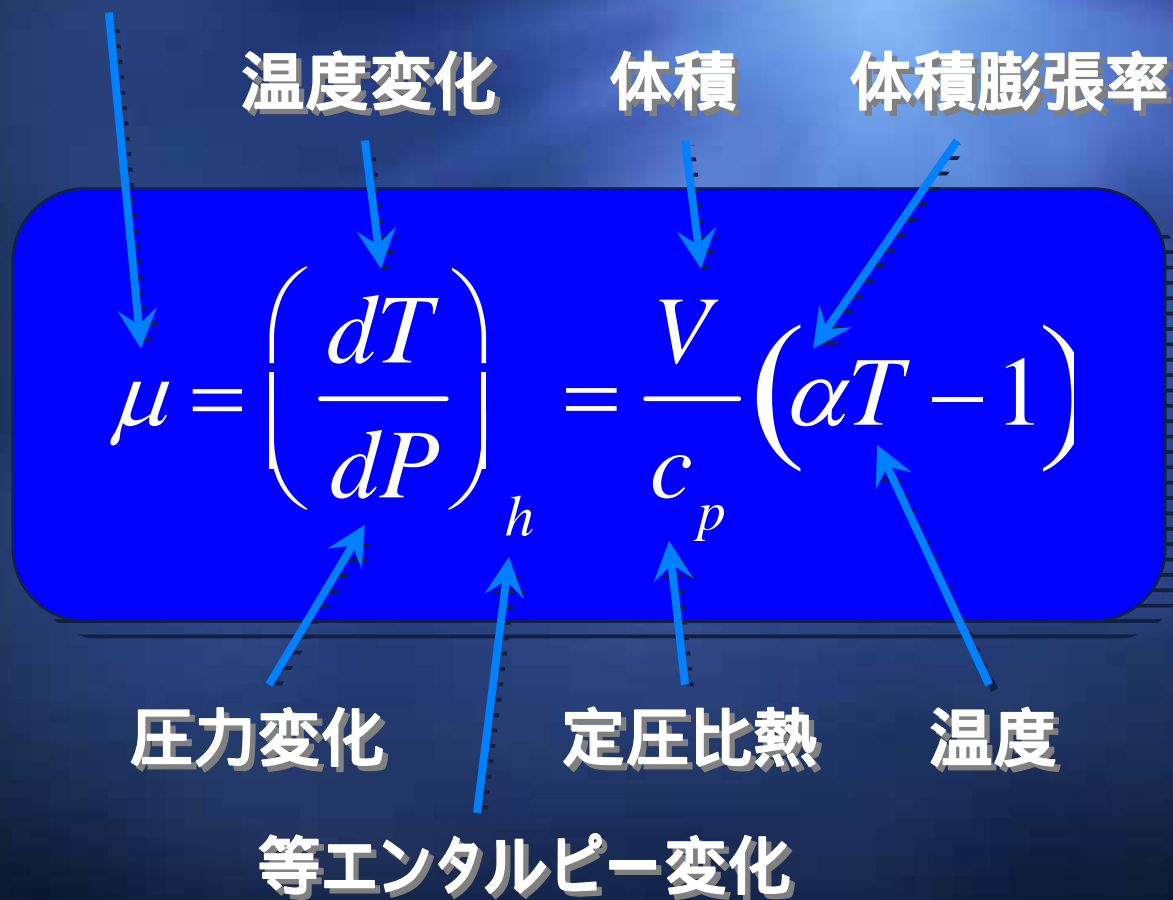
参考文献 [2]

ジュール-トムソン効果

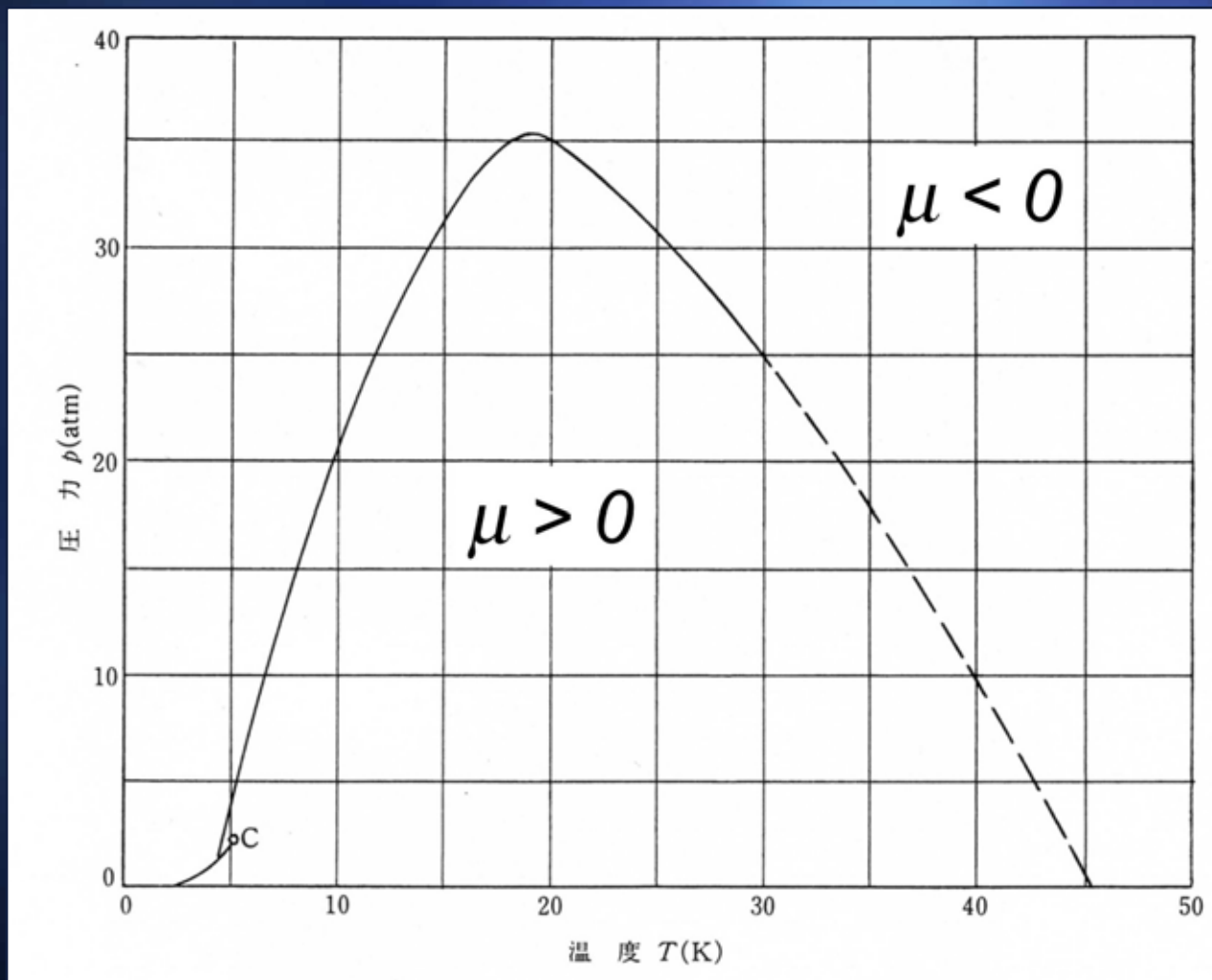
ジュール-トムソン係数

$$\mu = \left(\frac{dT}{dP} \right)_h = \frac{V}{c_p} (\alpha T - 1)$$

温度変化 体積 体積膨張率
 圧力変化 定圧比熱 温度
 等エンタルピー変化

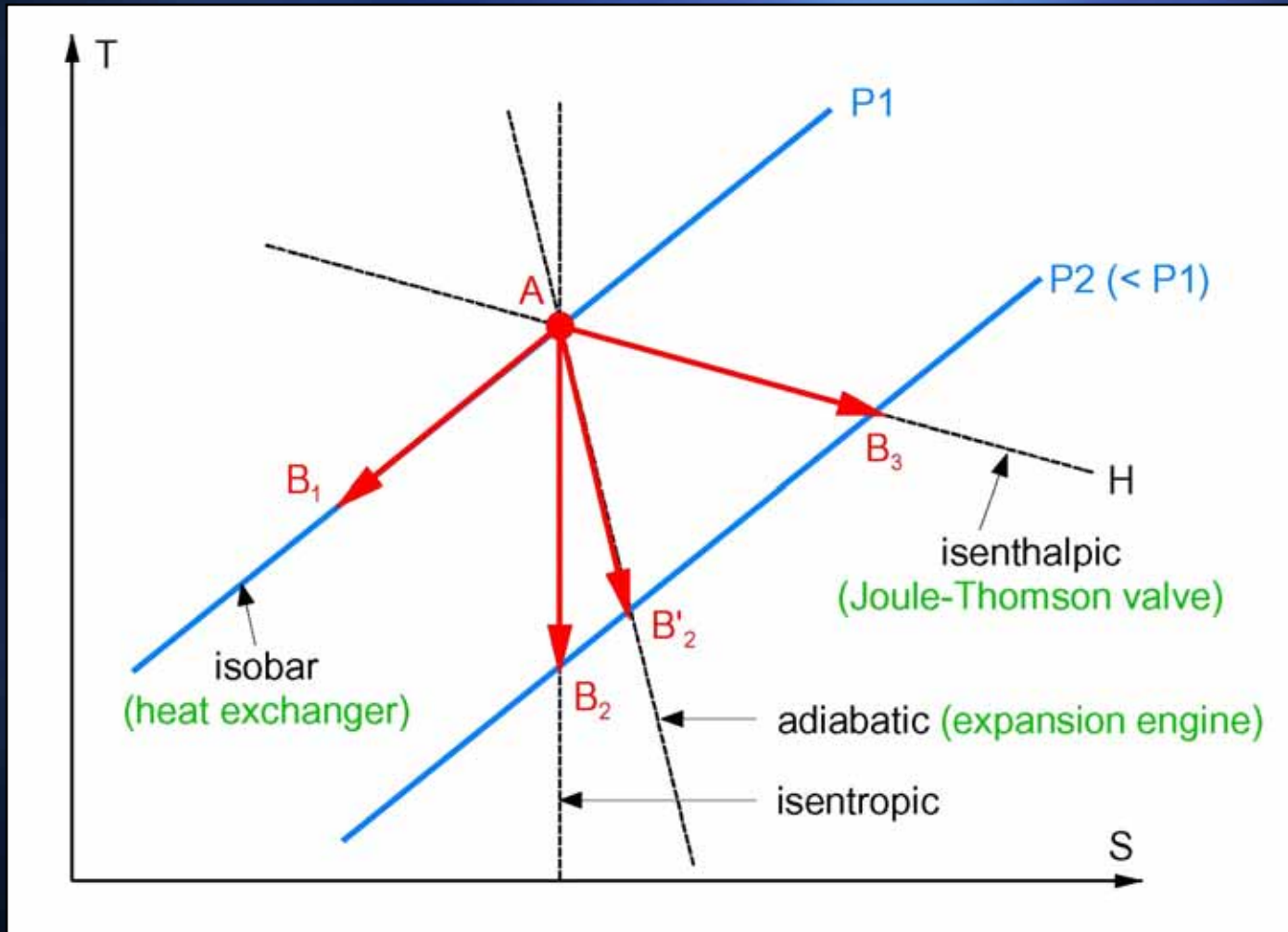


ヘリウムの逆転曲線



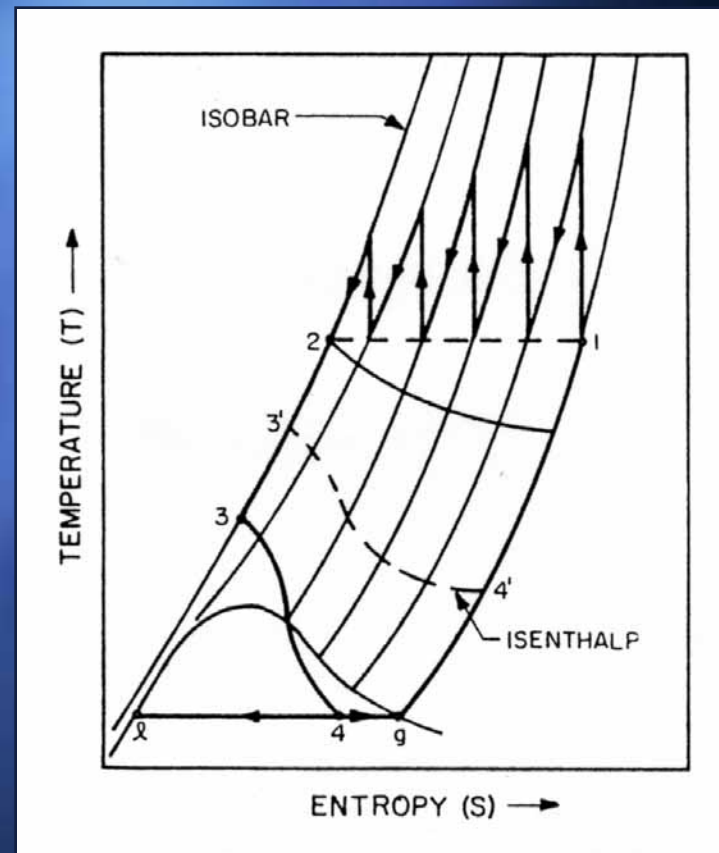
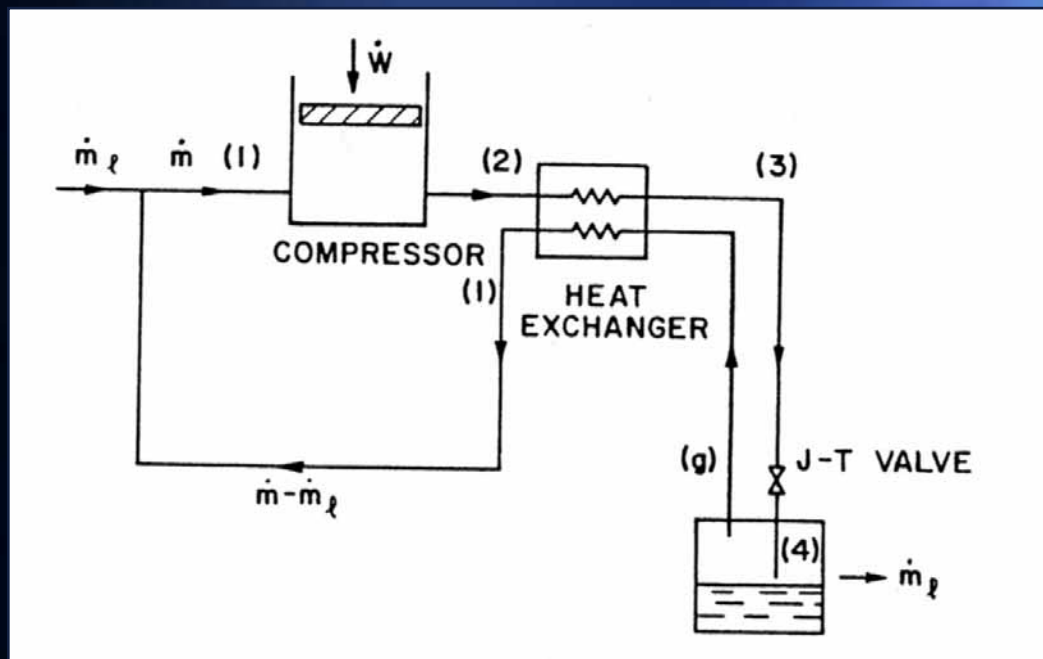
参考文献 [3]

種々の熱力学過程



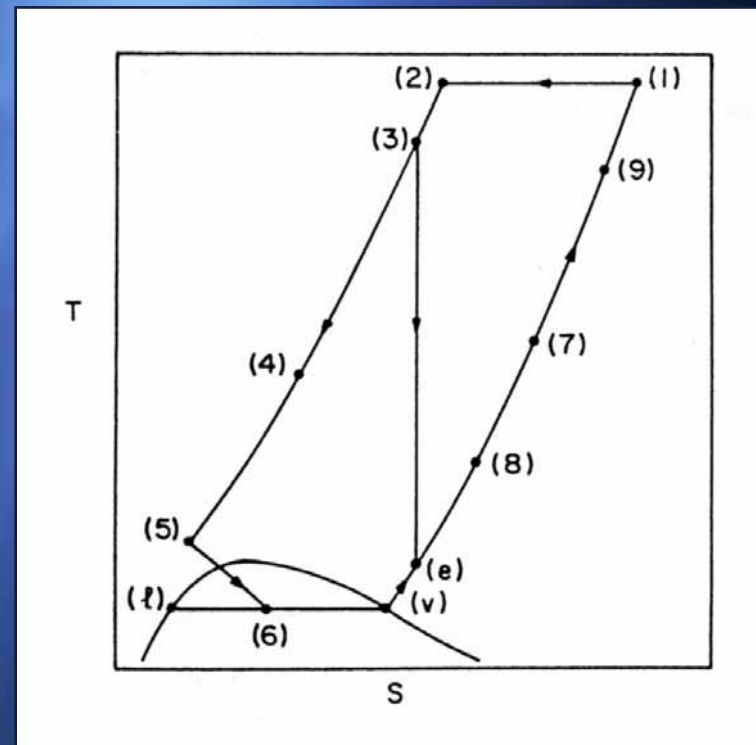
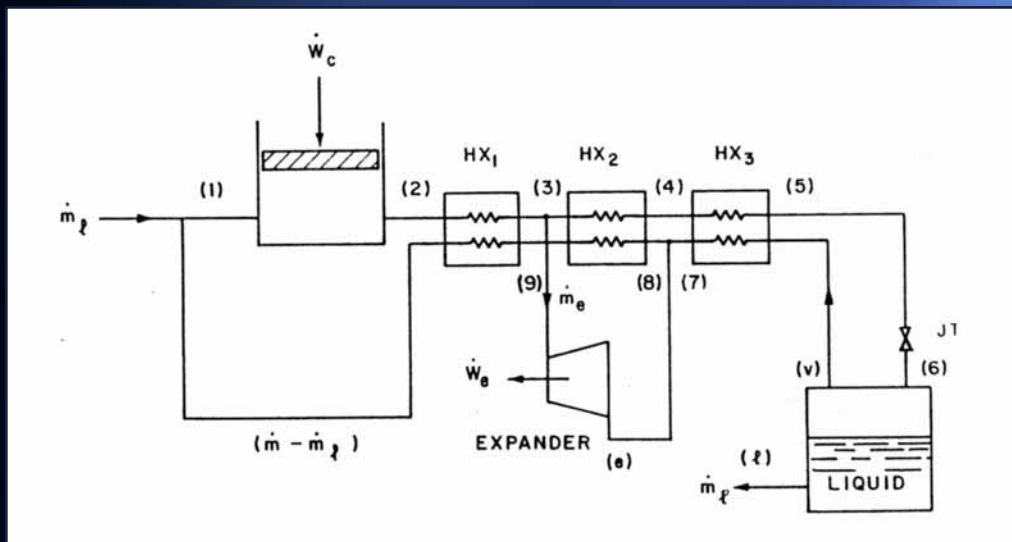
参考文献 [16]

ジュール-トムソン液化機



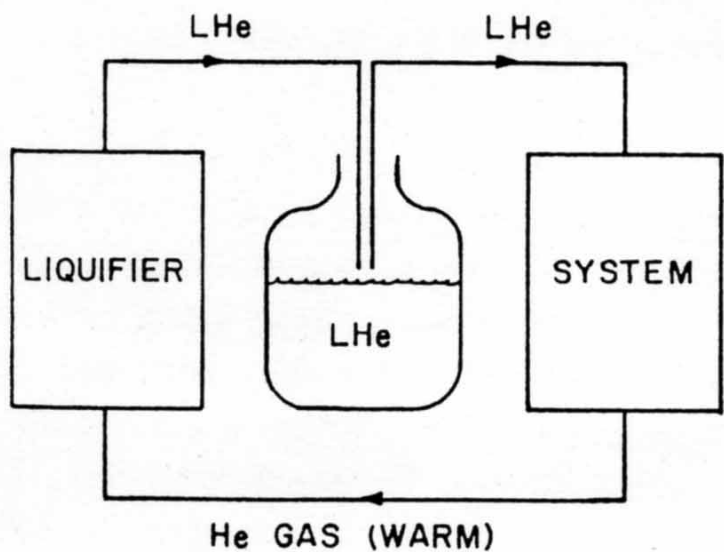
参考文献 [6]

クロード液化機

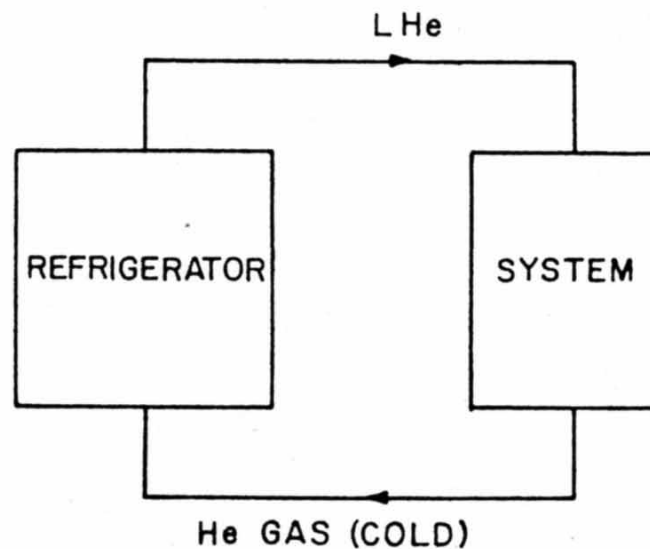


参考文献 [6]

液化機と冷凍機



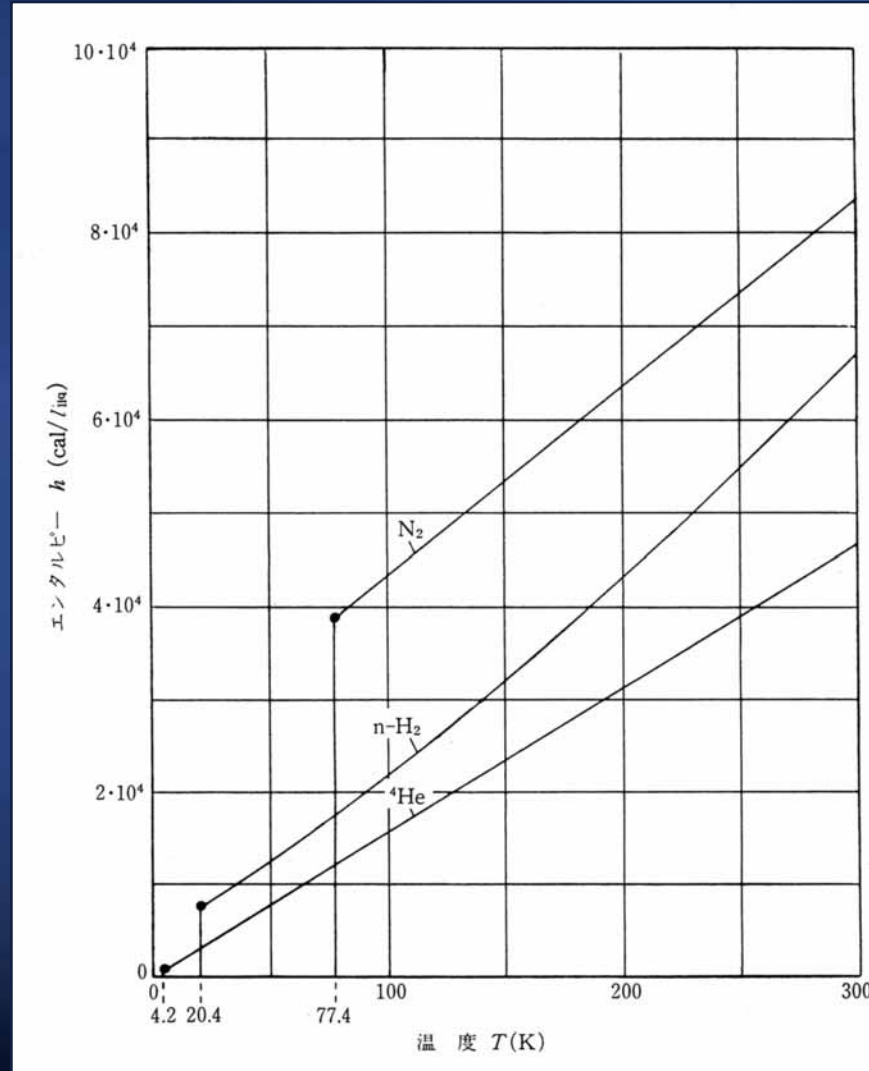
OPEN CYCLE REFRIGERATOR



CLOSED CYCLE REFRIGERATOR

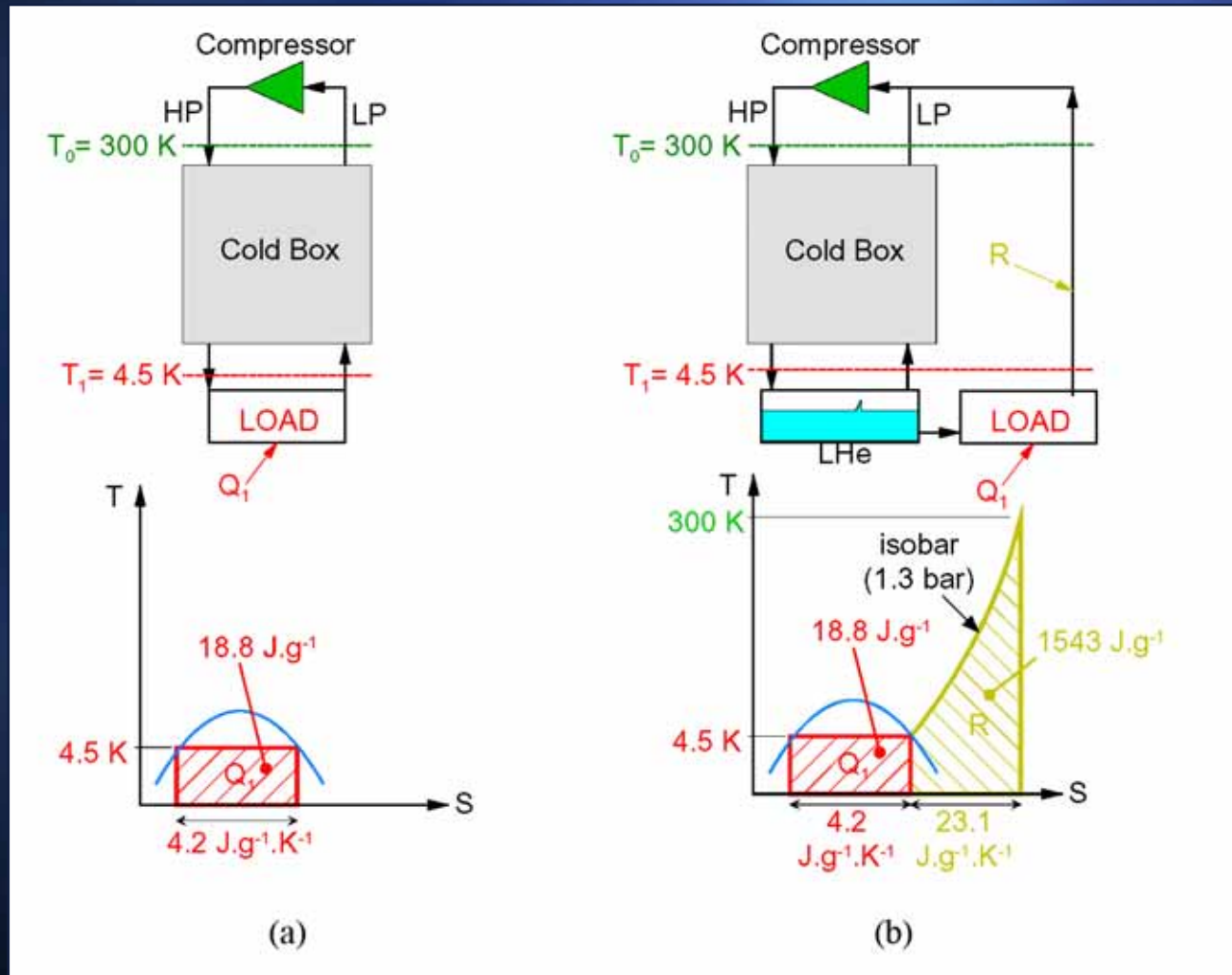
参考文献 [6]

蒸発潜熱と顕熱



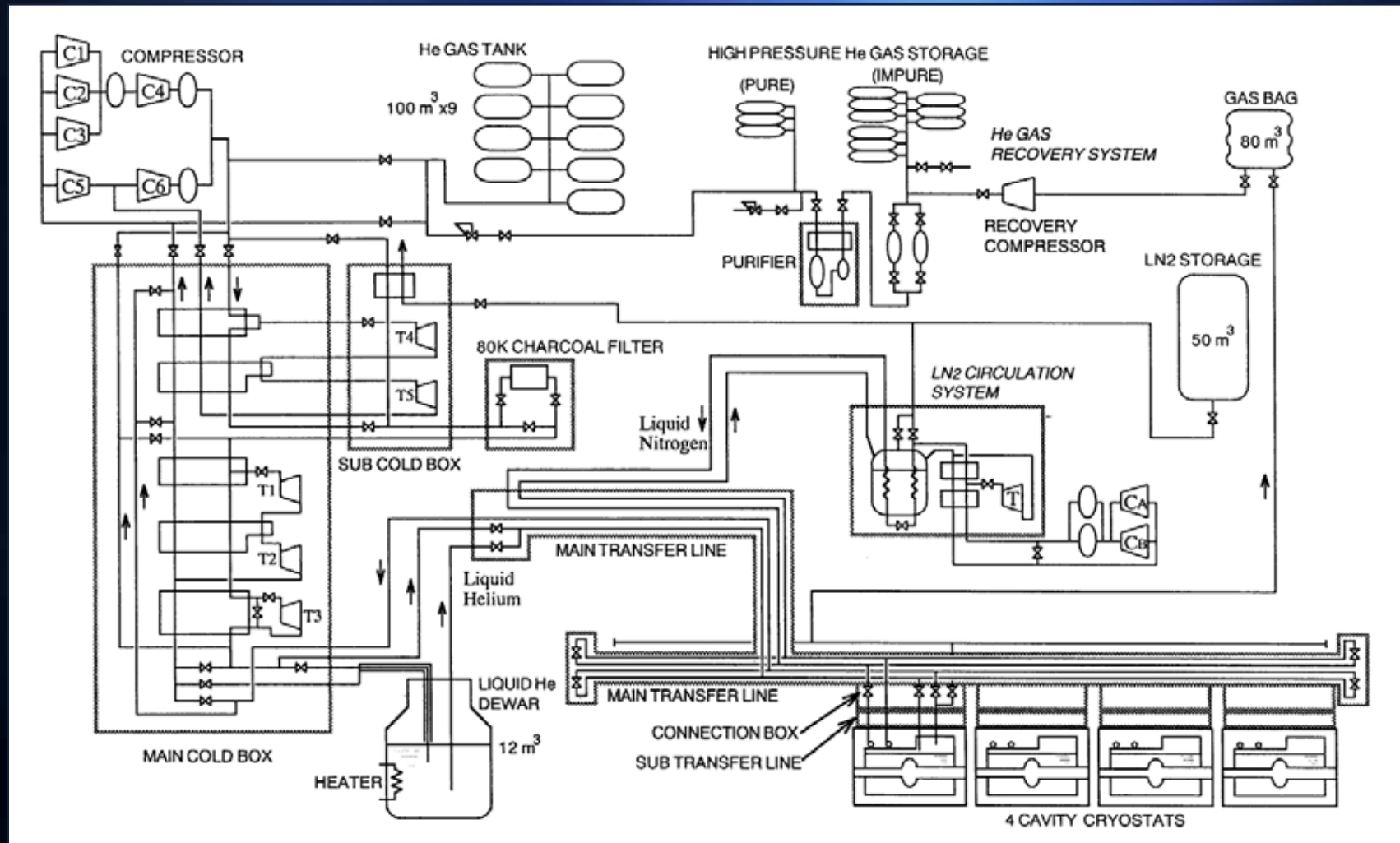
参考文献 [3]

液化機と冷凍機の熱収支



参考文献 [16]

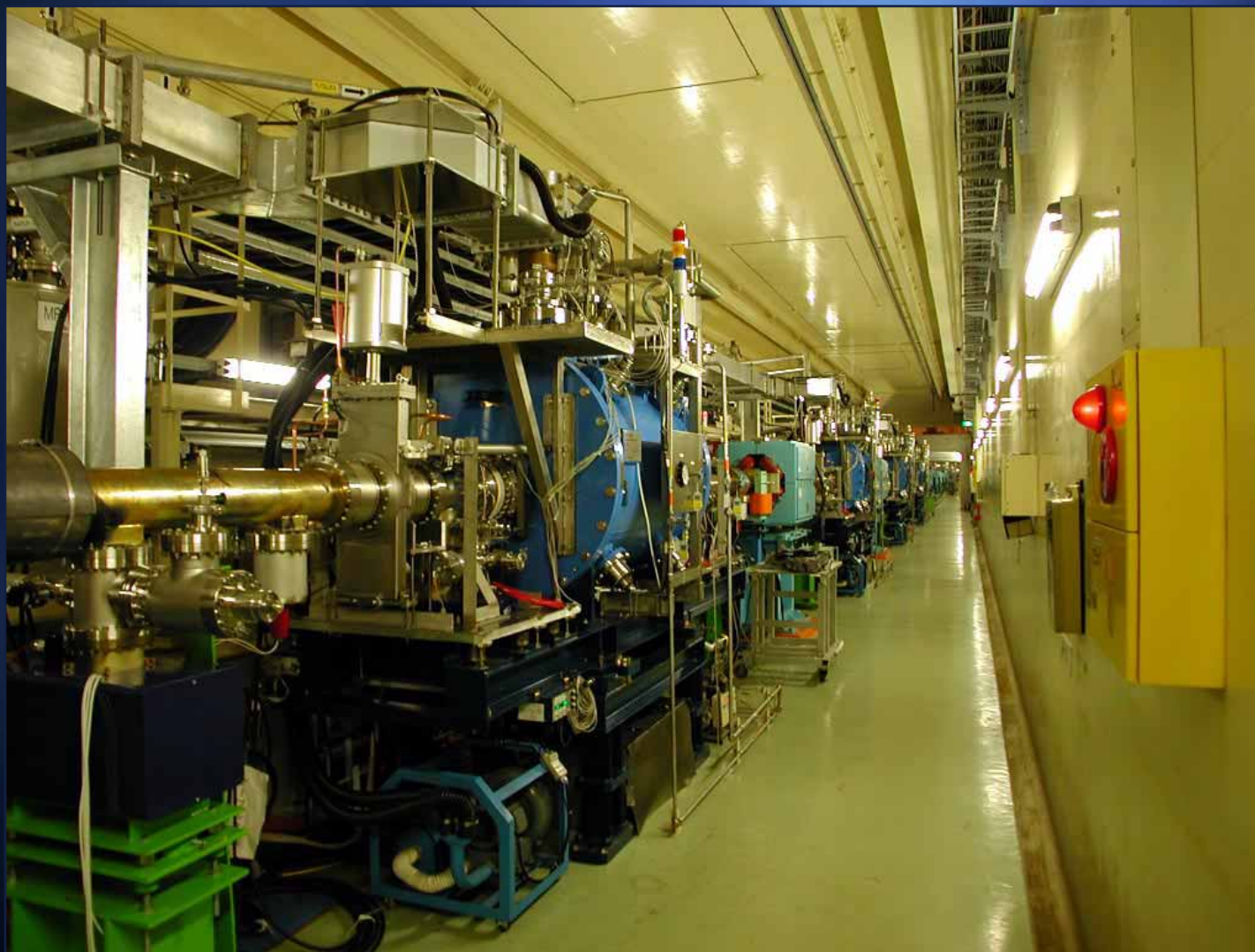
KEKB 6.5kWヘリウム冷凍システム (1)



KEKB 6.5kWヘリウム冷凍システム (2)



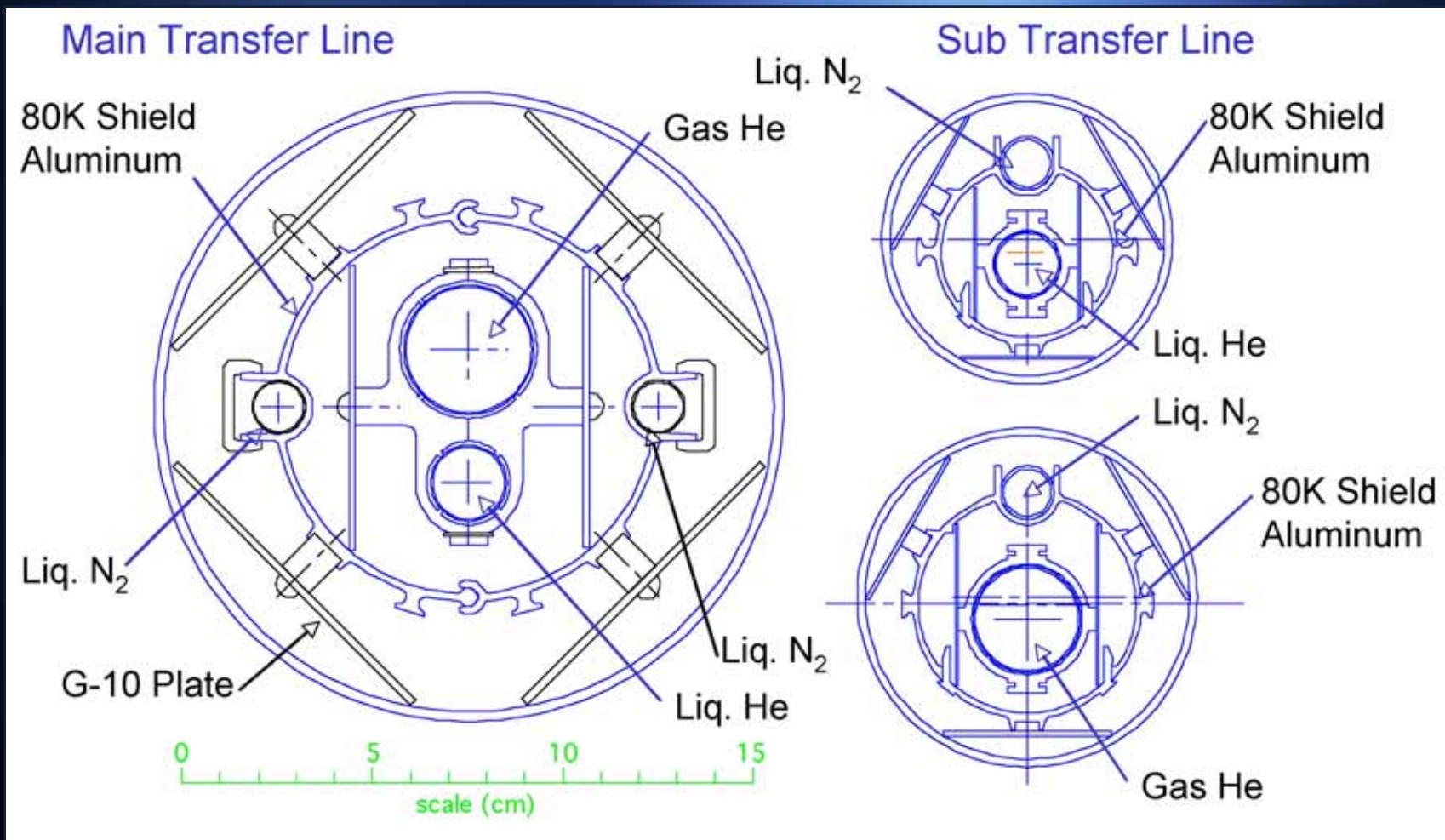
KEKB超伝導加速空洞



KEKB超伝導クラブ空洞



高性能トランスファーライン (1)



高性能トランスファーライン (2)



ヘリウム戻り

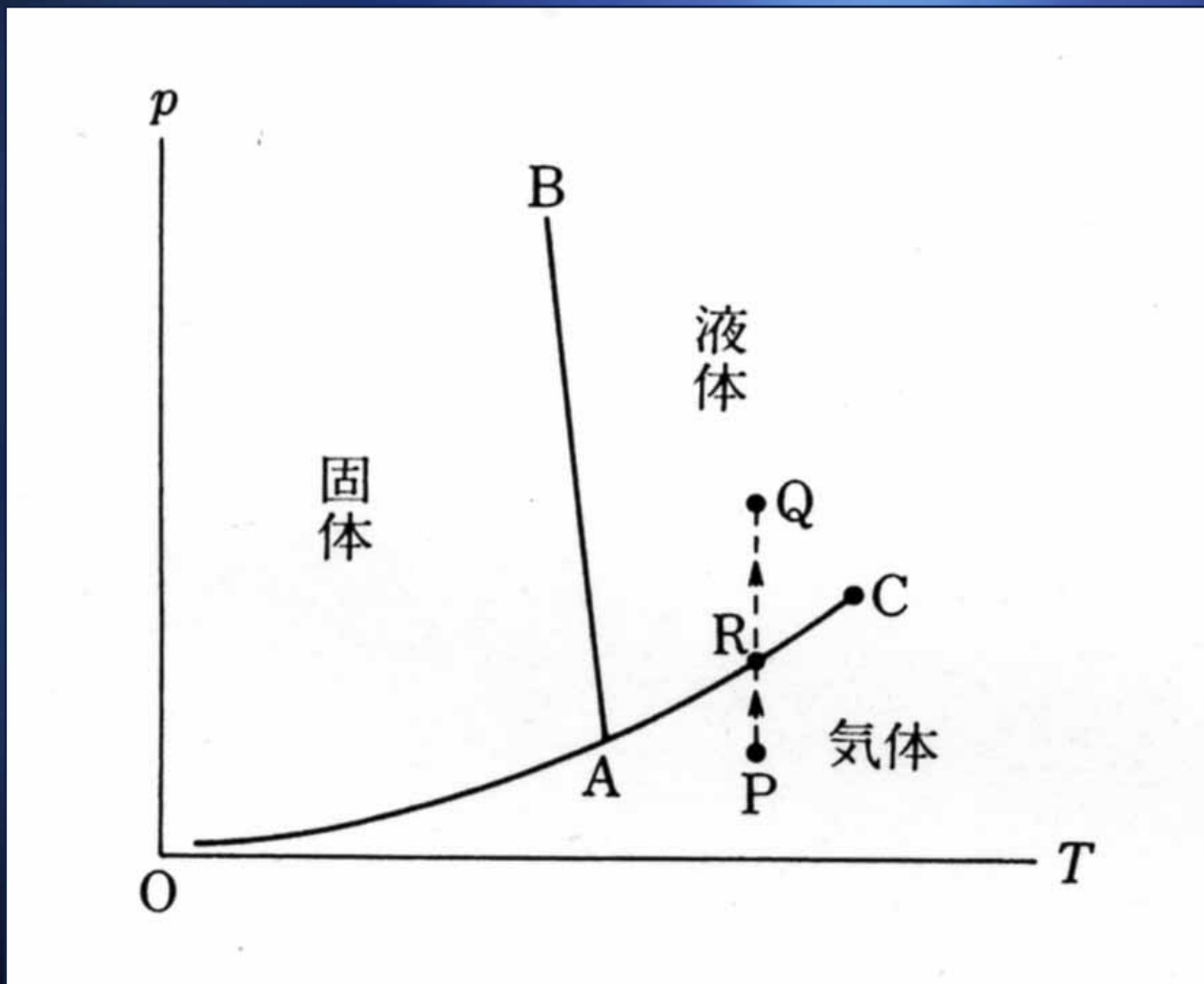
窒素戻り

ヘリウム行き

窒素行き

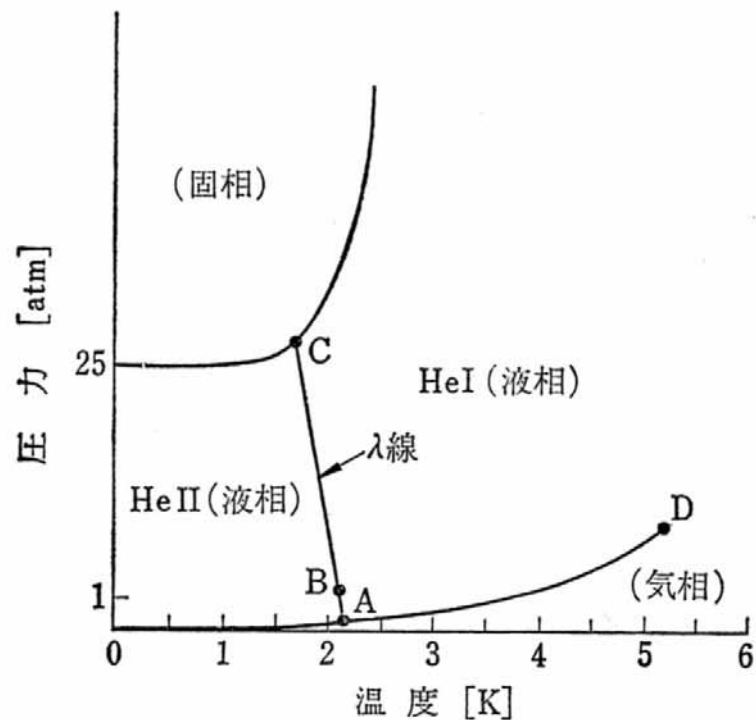
超流動ヘリウムと2K冷凍システム

通常の物質の状態図(相図)



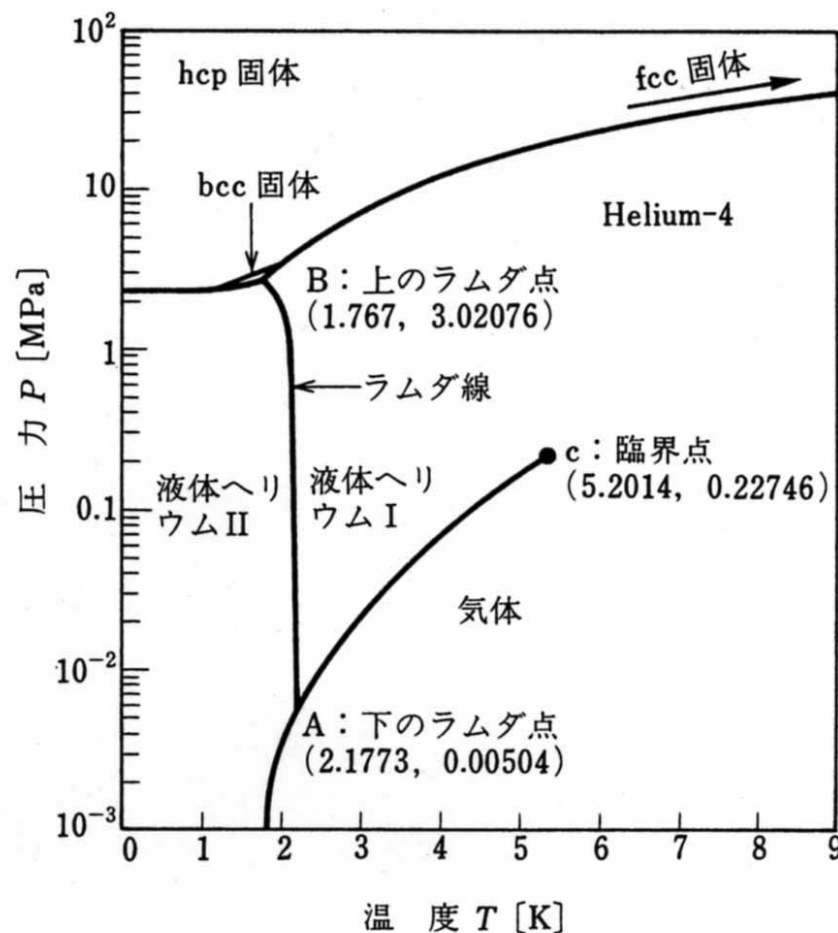
参考文献 [19]

ヘリウムの状態図



A : 2.19 K, 38.65 mmHg
 B : 2.19 K, 1 atm
 C : 1.75 K, 29.9 atm
 D : 5.1 K, 2.3 atm
 AC : λ線
 D : 臨界点

参考文献 [2]



参考文献 [4]

超流動ヘリウム

⊕ 超流動

⊕ 毛細管中を抵抗なしに流れる

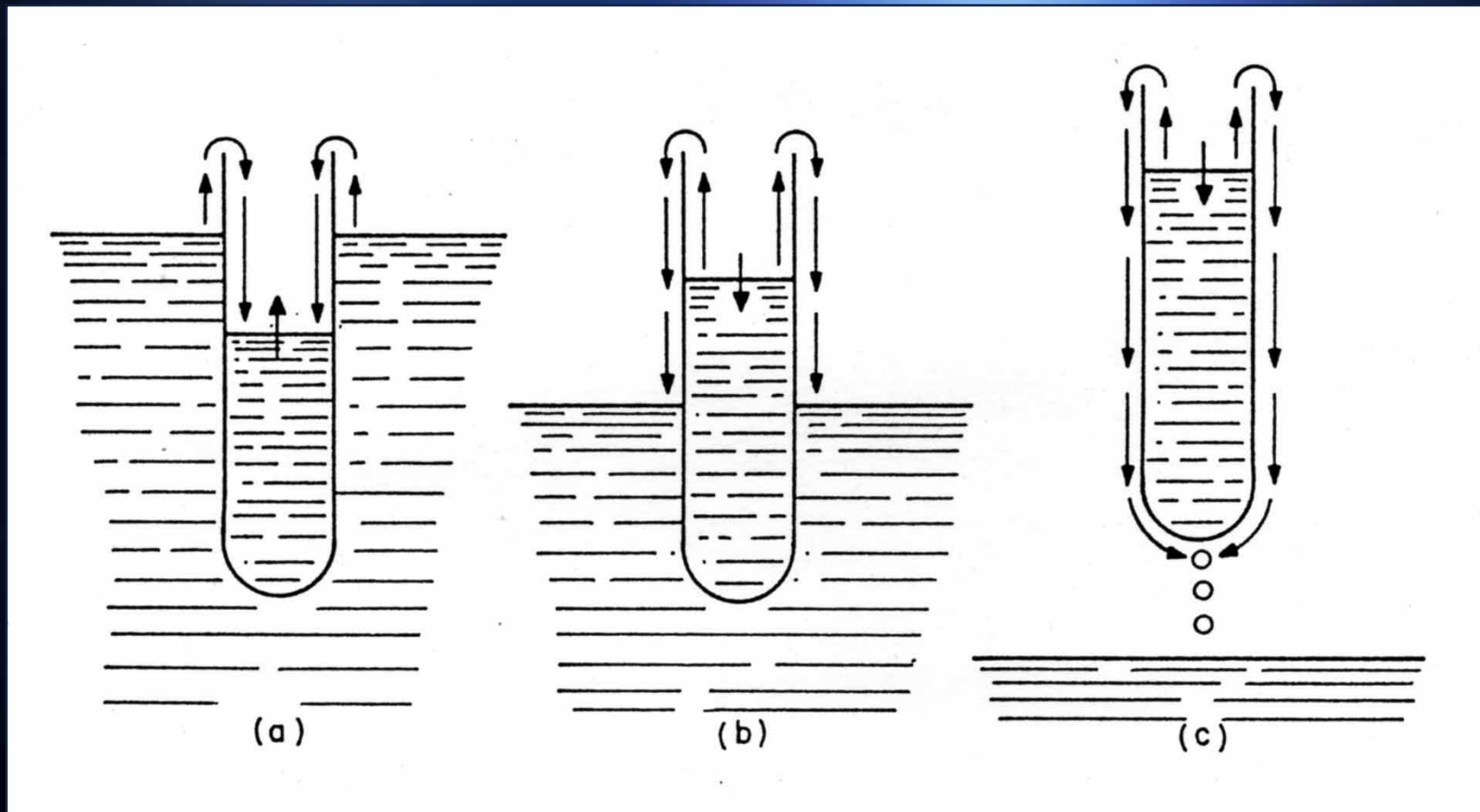
⊕ 超熱伝導

⊕ 見かけの熱伝導率は高純度銅の約100倍

⊕ 薄膜流

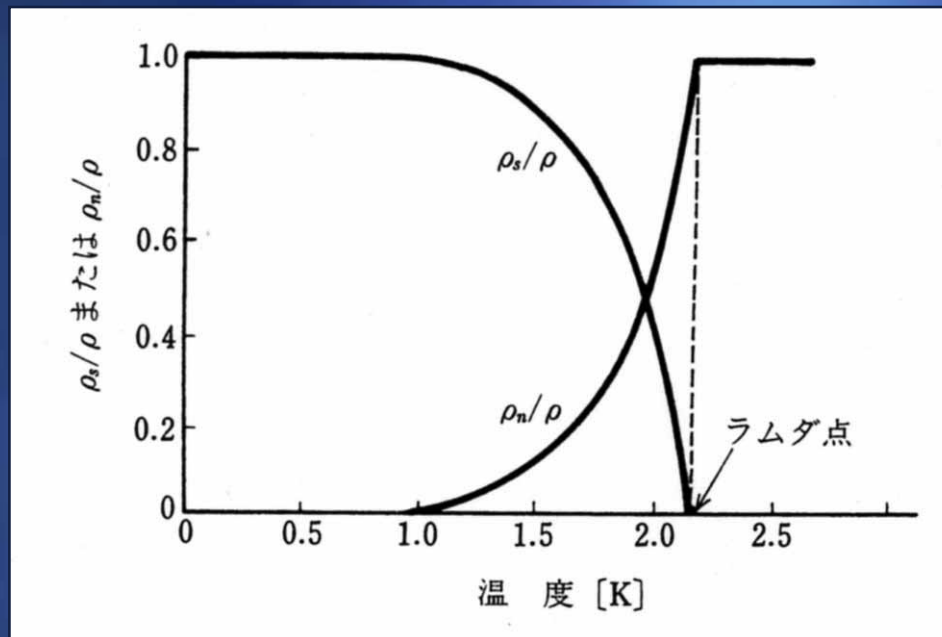
⊕ 吸着膜中を流れる

薄膜流



参考文献 [9]

二流体モデル (1)



参考文献 [4]

- ⊕ 超流動成分 (超流体) と常流動成分 (常流体)
- ⊕ 2成分の密度の和が全体の密度: $\rho = \rho_s + \rho_n$
- ⊕ 2成分の割合は温度の関数
- ⊕ お互いに独立した流れ場

二流体モデル (2)

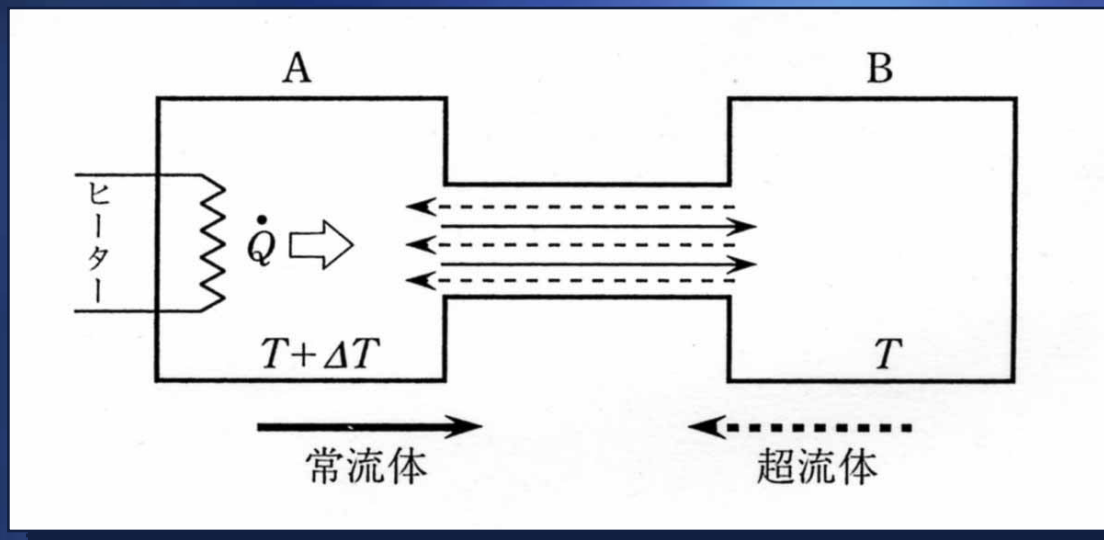
⊕ 常流動成分 (常流体)

- ⊕ 密度 ρ_n
- ⊕ 粘性 μ
- ⊕ エントロピー S を輸送する
- ⊕ 圧力差で駆動

⊕ 超流動成分 (超流体)

- ⊕ 密度 ρ_s
- ⊕ 粘性なし
- ⊕ エントロピーを輸送しない
- ⊕ 温度差 (密度差) で駆動

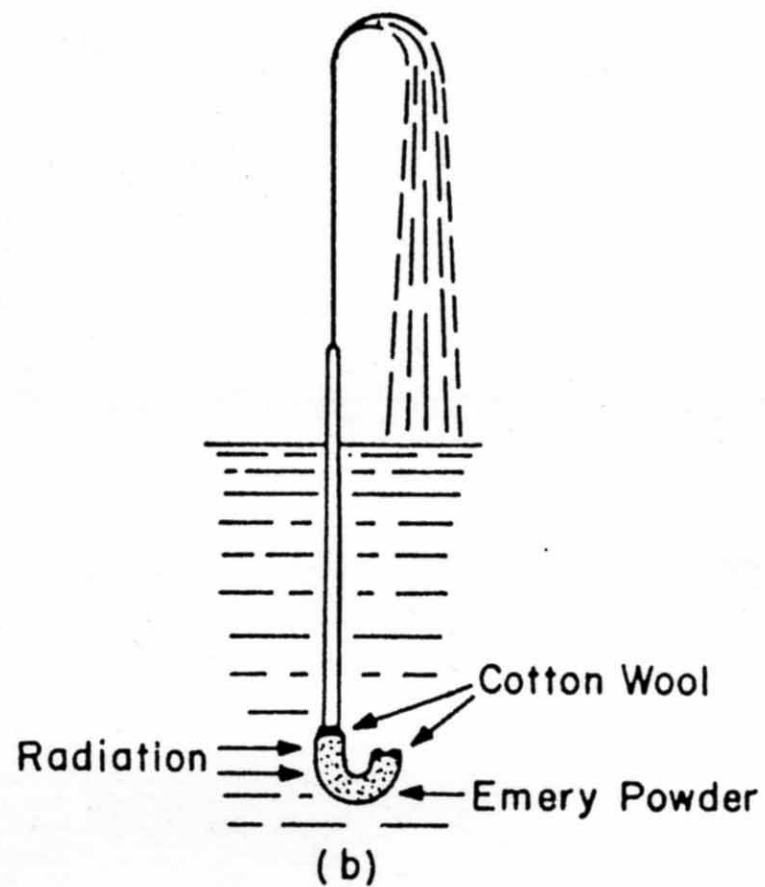
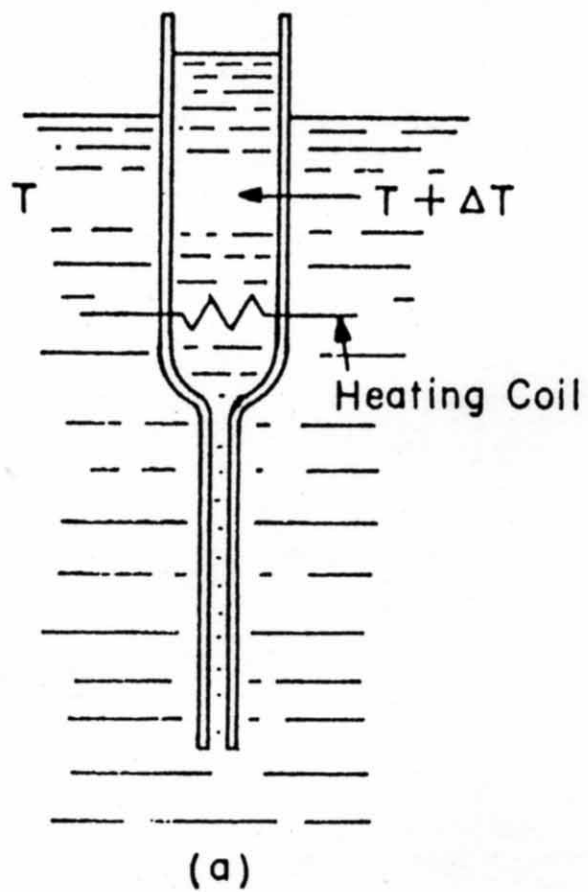
超流動ヘリウムの熱輸送



参考文献 [13]

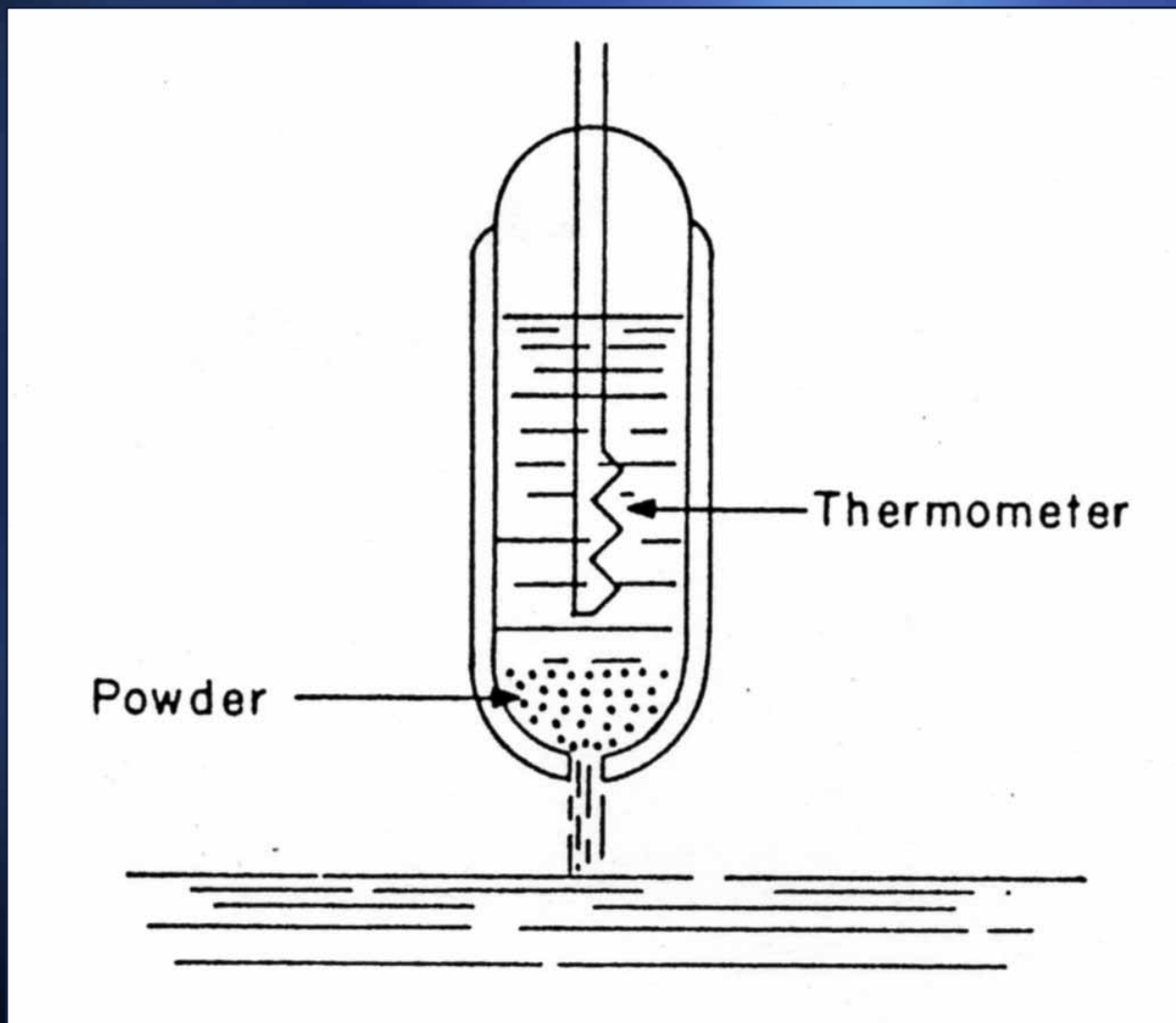
- ⊕ 超流動成分 (超流体) は高温側へ流れる
- ⊕ 正味の流れはない
- ⊕ 常流動成分 (常流体) の流れは超流動成分の流れと反対方向 (対向流)
- ⊕ 常流動成分によるエントロピー (熱) の移動
- ⊕ 見かけ上の大きな熱伝導 (内部対流)

熱機械効果



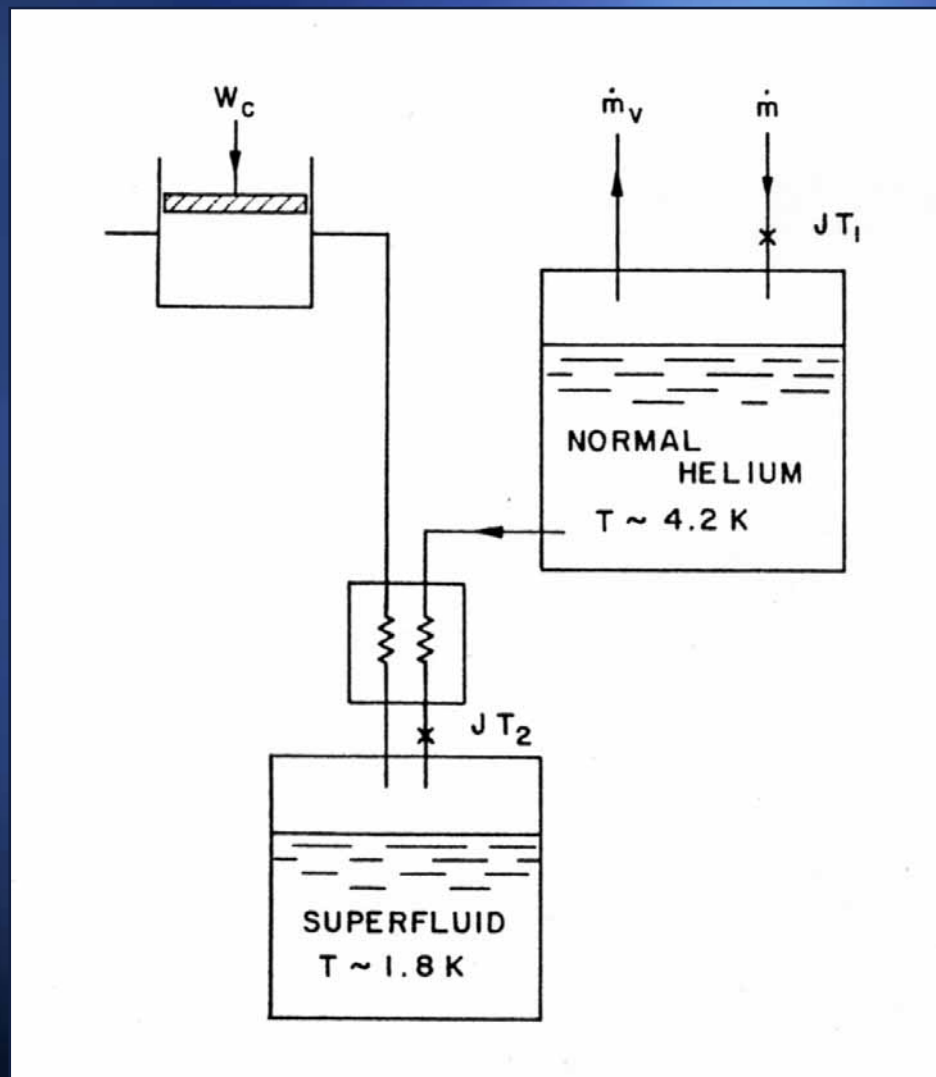
参考文献 [9]

機械熱効果



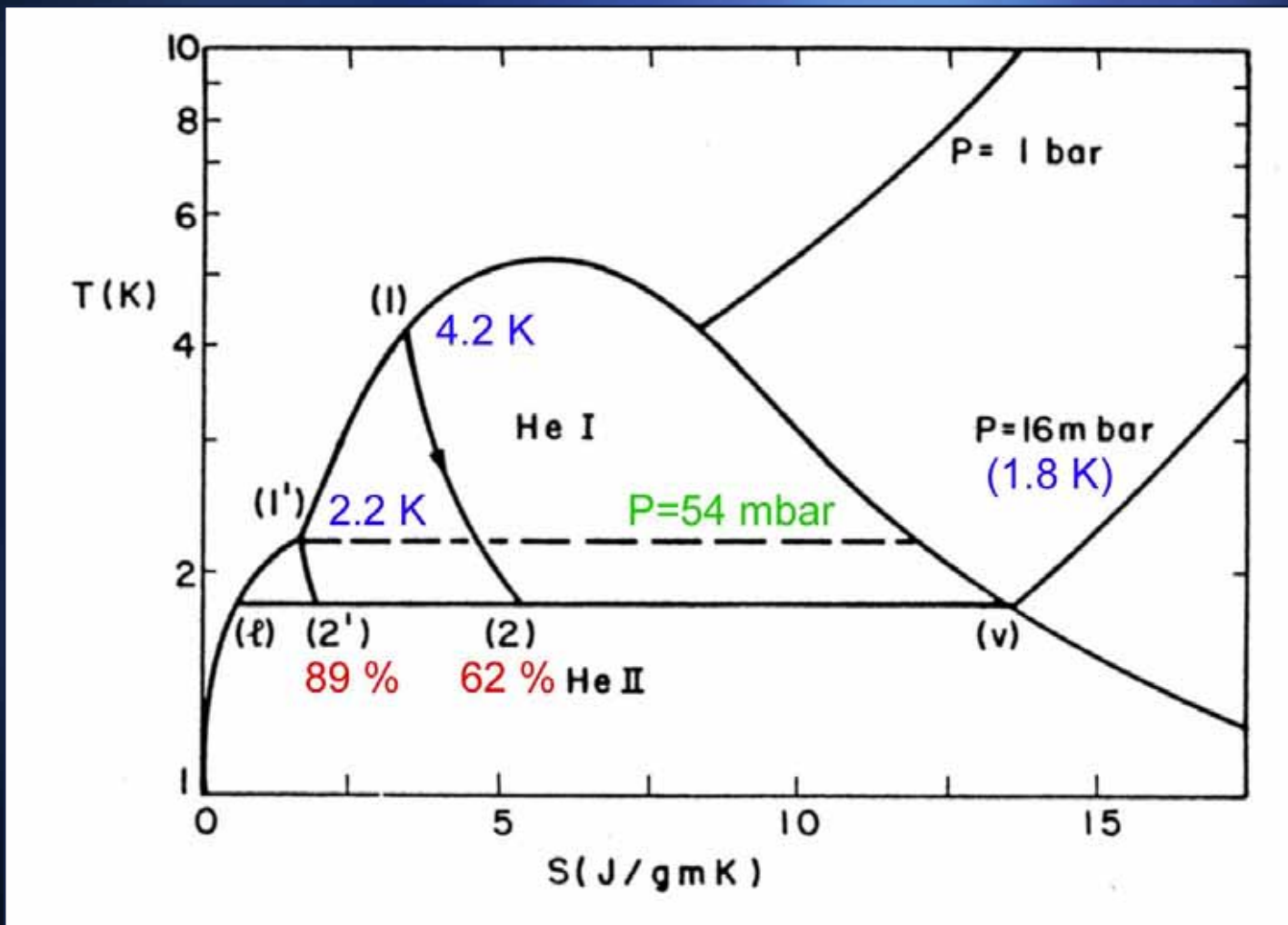
参考文献 [13]

超流動ヘリウム冷凍機



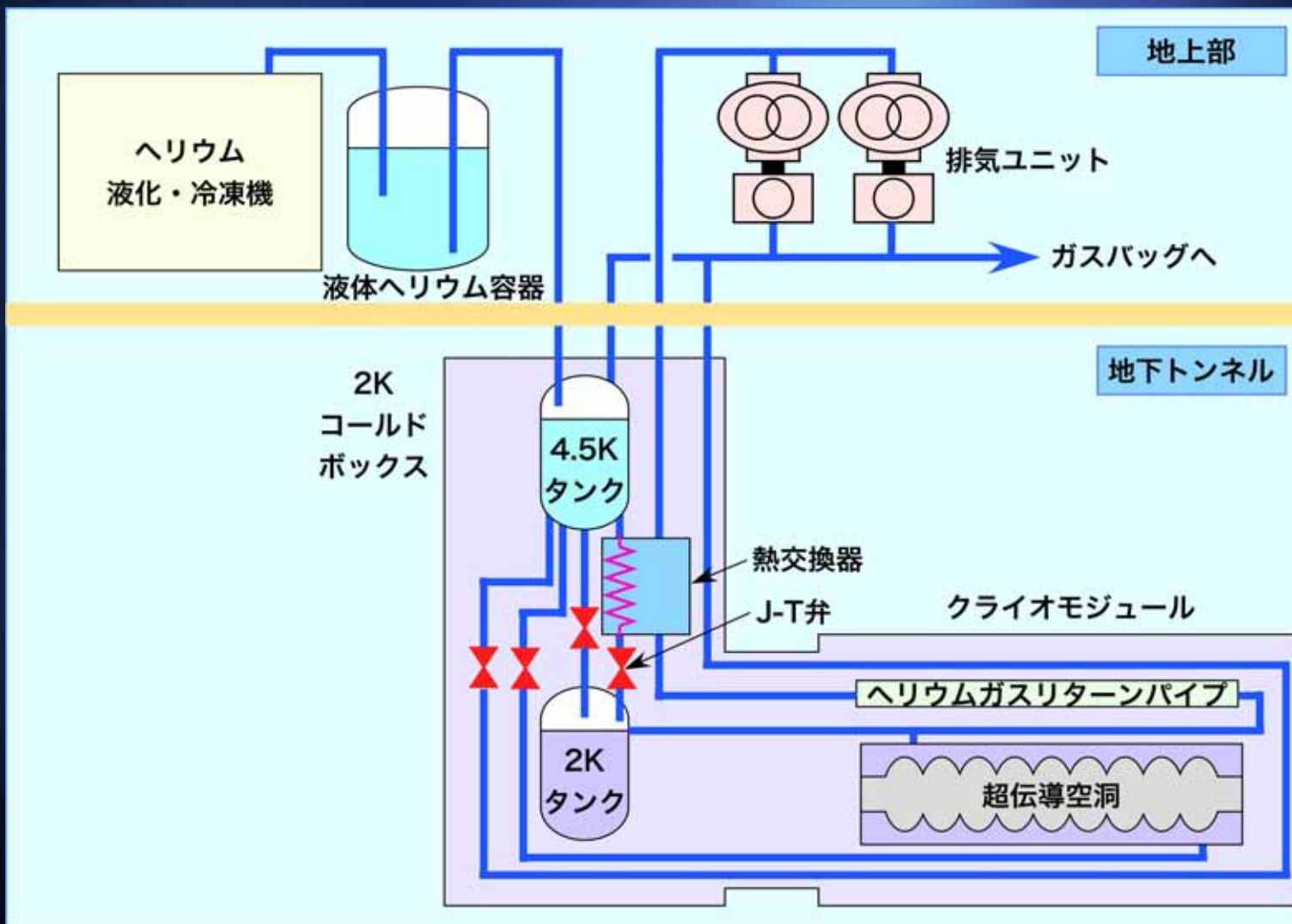
参考文献 [6]

J-T弁入口温度と液化率



参考文献 [6]

2K冷凍システム



ヘリウム液化・冷凍機



2Kコールドボックス



4.5Kタンク

熱交換器

J-T弁

2Kタンク

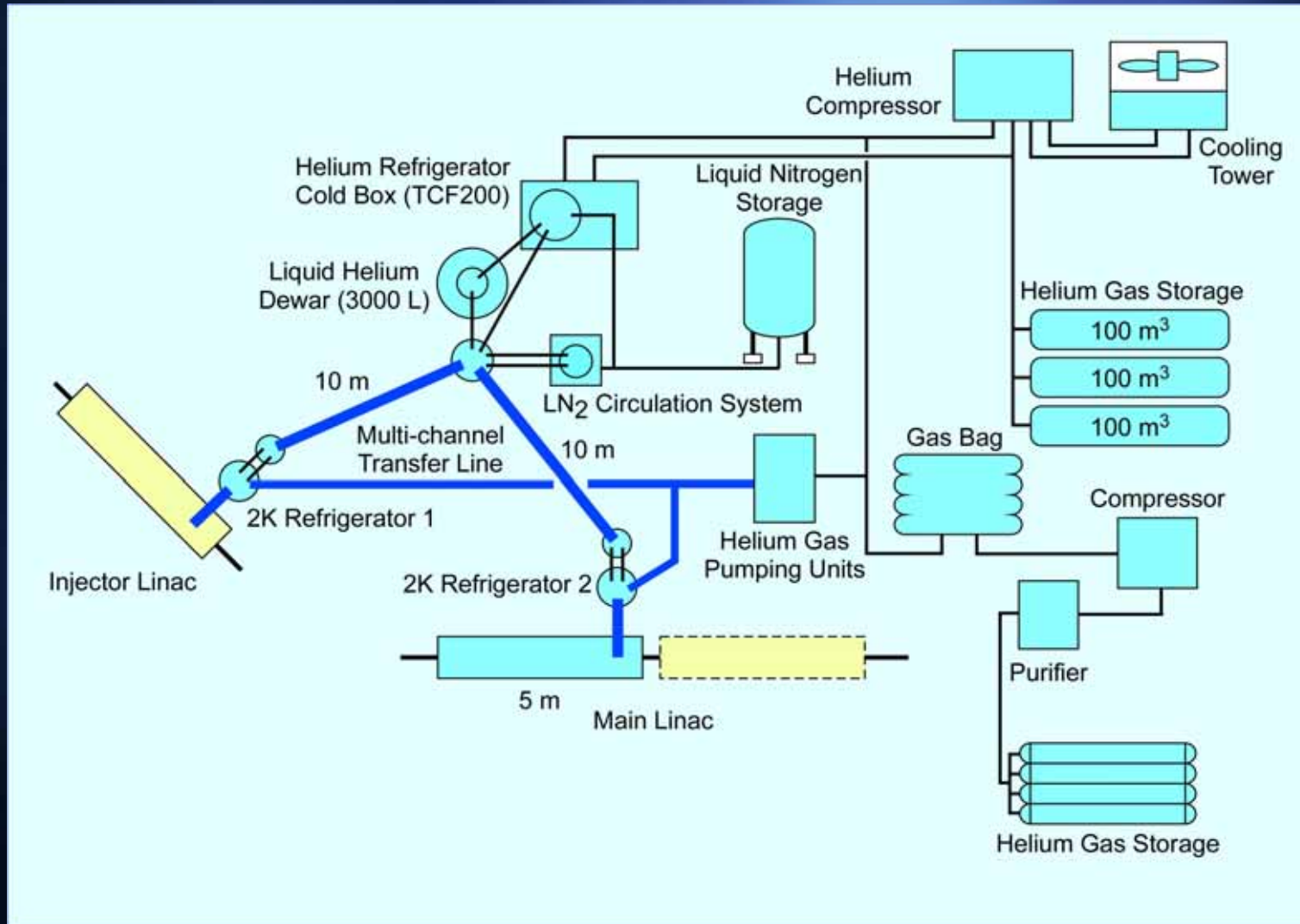
排気ユニット



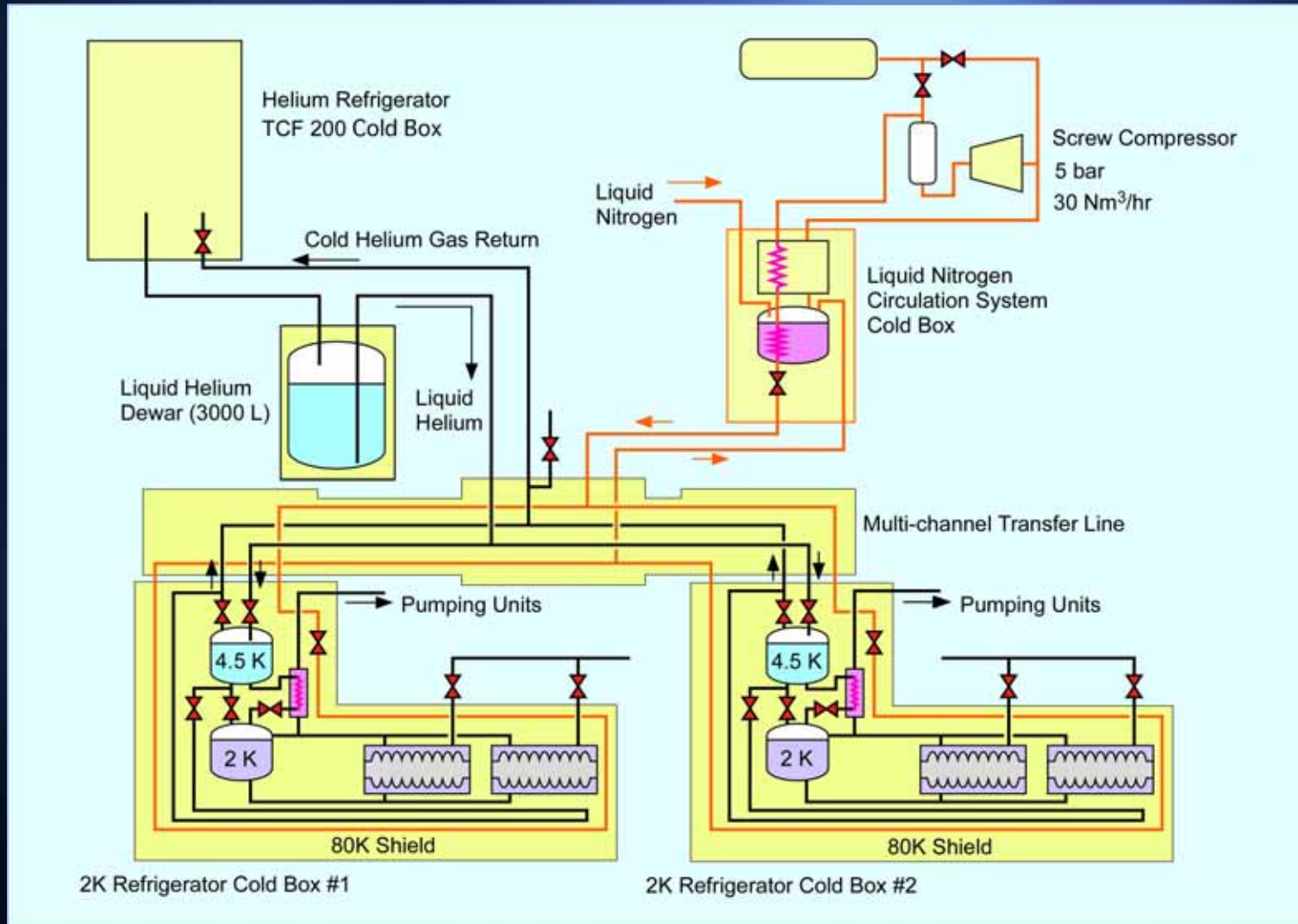
メカニカルブースター
ポンプ
(1195 m³/hr)

油回転
ポンプ

コンパクトERL 2K ヘリウム冷凍システム機器配置図



コンパクトERL 2K ヘリウム冷凍システムフロー図



まとめ

- ⊕ヘリウムの液化
 - ⊕ジュール-トムソン効果
 - ⊕逆転温度
- ⊕超流動ヘリウム
 - ⊕二流体モデル
 - ⊕J-T弁と熱交換器
- ⊕2Kヘリウム冷凍機
 - ⊕ERL用2Kヘリウム冷凍システム