

熱力学の基礎

東京大学大学院 工学系研究科 機械工学専攻

丸山 茂夫

<http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/~maruyama>
e-mail:maruyama@photon.t.u-tokyo.ac.jp

Current Research Topics

Generation of Carbon Nanotubes

1. Laser Furnace Technique
2. Raman Spectroscopy

FT-ICR Mass Spectroscopy

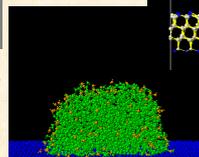
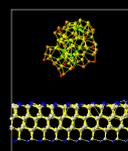
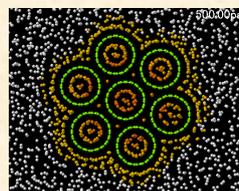
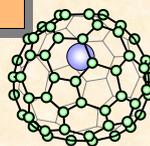
1. Endohedral Metallofullerene
2. Precursor Clusters of SWNTs
3. Silicon Clusters

Hydrogen Storage with SWNTs

Heat Conduction with SWNTs

Molecular Aspects of Phase Interface

1. Liquid Droplet and Vapor Bubble on Surface
2. Nucleation of Liquid Droplet
3. Nucleation of Vapor Bubble



熱力学(Thermodynamics)

熱力学(Thermodynamics)
=巨視的世界のエネルギー収支

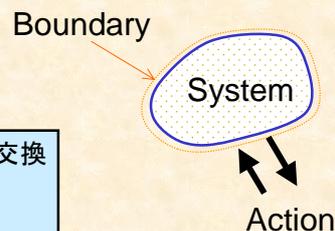
エネルギー(Energy)
運動エネルギー(Kinetic Energy)
ポテンシャルエネルギー(Potential Energy)
力(Force)
仕事(Work) = 力×距離

熱平衡状態(Thermal Equilibrium State)

系(System)と周囲(Surroundings)との
境界(Boundary)を通じた相互作用

力学的作用(Mechanical Action) : 仕事の交換
熱的作用(Thermal Action) : 熱の出入り
質量的作用(Mass Action) : 物質の出入り

閉じた系(Closed System) : 質量的作用無し
開いた系(Open System) : 質量的作用有り
孤立系(Isolated System) : いずれの作用もない系



熱平衡状態(Thermal Equilibrium State) :
孤立系を放置し, 変化が無くなった状態

熱力学第ゼロ法則 (The Zeroth Law of Thermodynamics)

系A, Bが熱平衡
(A~B)

系B, Cが熱平衡
(B~C)

系A, Cは熱平衡
(A~C)

系A, B, Cは, 等しい温度(Temperature)にある

Bを温度計(Thermometer)として
A, Cの温度が等しいか否かを計れる

熱力学的状態(Thermodynamic State)

状態量(Quantity of State):
熱平衡状態での巨視的物理量(温度, 圧力, 体積など)

示強性(Intensive)状態量: 系の質量に比例しない(T, p)

示量性(Extensive)状態量: 系の質量に比例する量(V)

比状態量(Specific Quantity): 単位質量あたりの値
[比容積(Specific Volume)など]

**熱力学的状態 = 拡張された熱平衡状態
局所平衡(系の部分部分が熱平衡状態)**

物質の状態方程式(Equation of State)

熱平衡状態

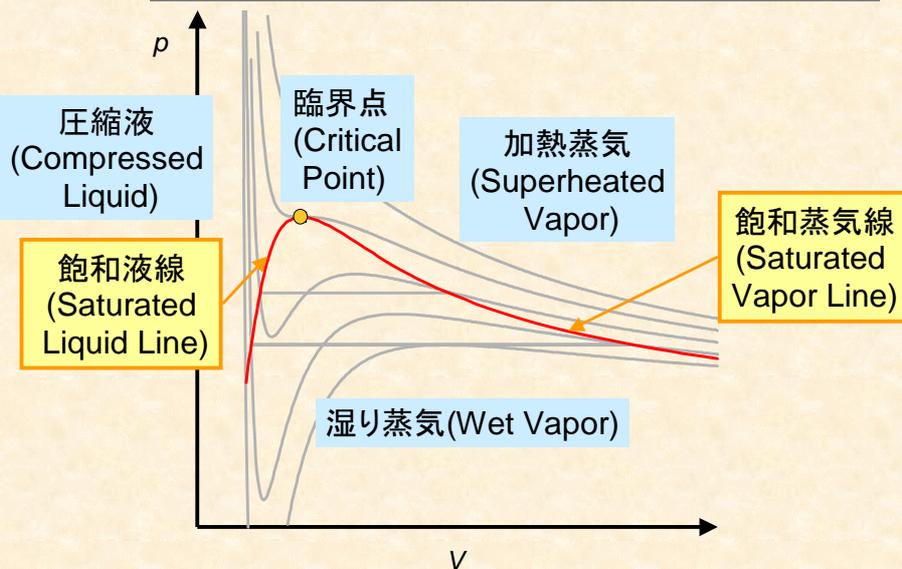
必要最小な状態量(自変状態量)の関数で
すべての状態量が表せる

均質物質(Homogeneous Substance)では
経験的に自変状態量が2個

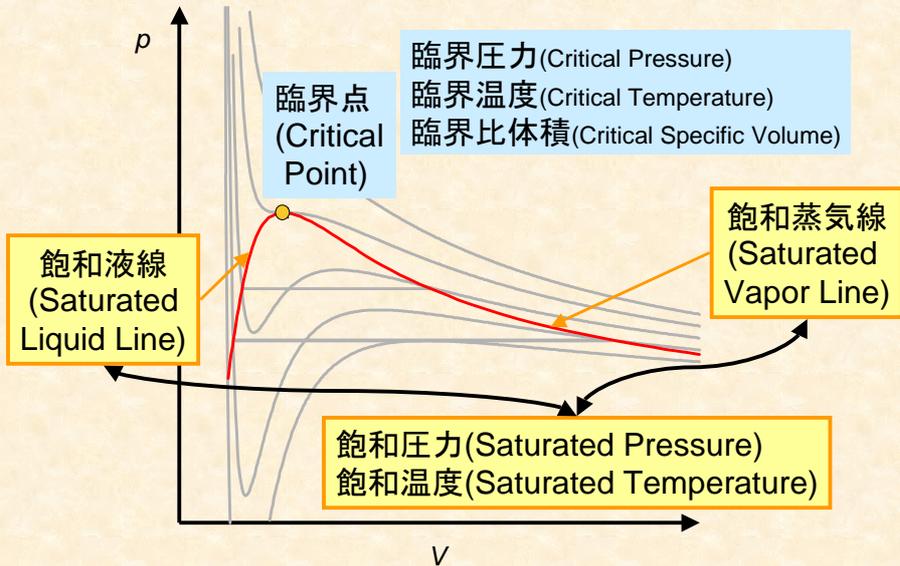
関係式 \Rightarrow 状態方程式(Equation of State)

状態線図の例: p v 線図(p v -Diagram)

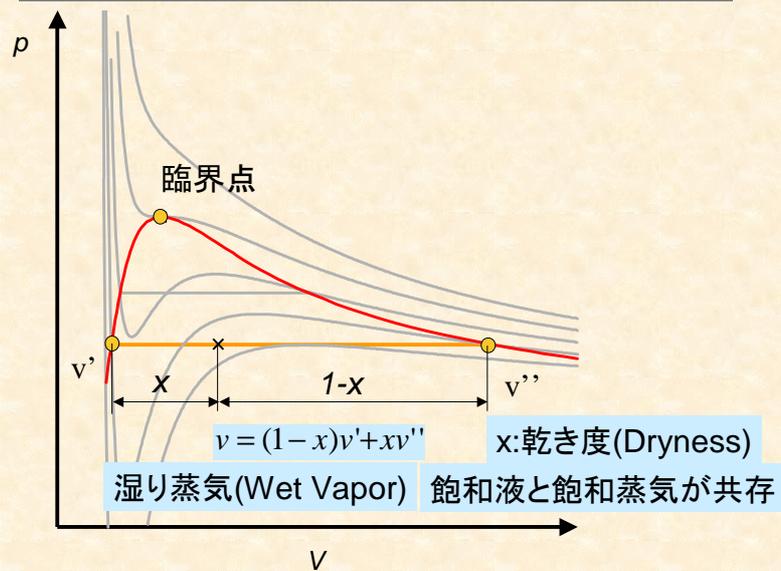
p v 線図(p v -diagram)の例(1)



p v 線図(p v -diagram)の例(2)



p v 線図(p v -diagram)の例(3)



気体の状態方程式 (Equation of State)

理想気体 (Ideal Gas) の状態方程式

$$pv = RT$$

R: 気体定数 (Gas Constant)

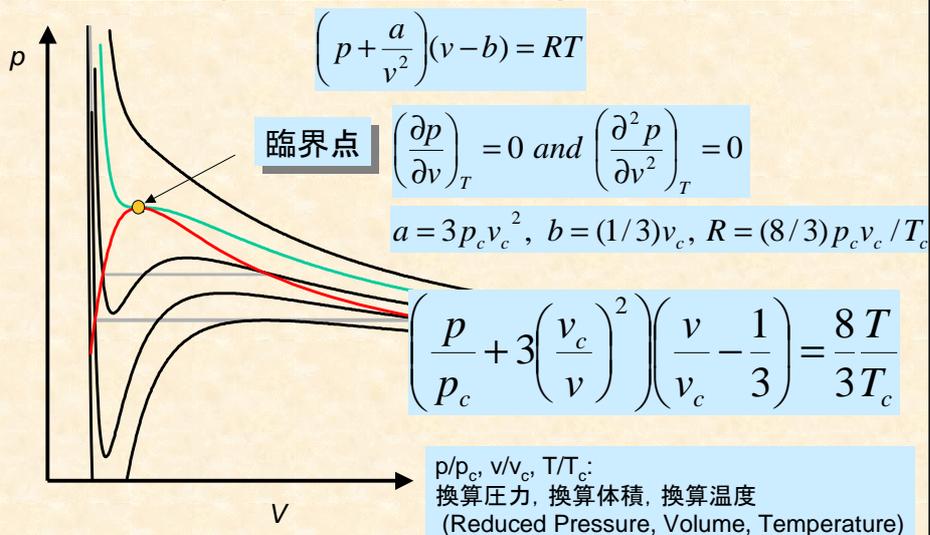
van der Waals の状態方程式

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

a/v^2 : 分子間ポテンシャルによる圧力減少

b: 気体分子体積総和による自由空間体積減少

van der Waals の状態方程式 (van der Waals Equation)



熱力学第一法則(1) (The First Law of Thermodynamics)

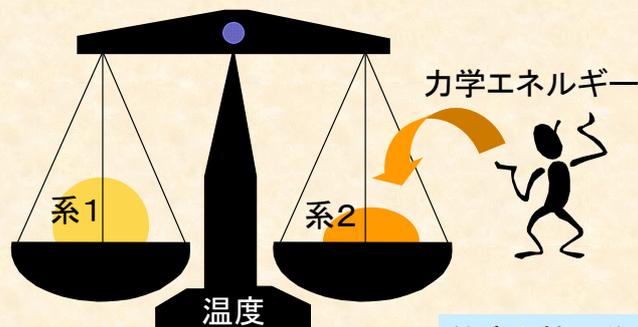
熱力学第一法則: 孤立系の保有する
エネルギーは一定に保たれる

状態変化(Change of State): 熱平衡状態(1)から熱平衡状態(2)

状態変化 \Leftrightarrow 周囲からの作用
(力学的作用, 電気的作用, 熱的作用)

温度の目盛り

力学的(摩擦仕事)で与えられたエネルギーに
比例する形で温度差 $T_2 - T_1$ を決める。



仕事と熱の作用効果の同等性

熱(Heat): 温度の異なる2物体が接触するとき
高温物体から低温物体へと移行する状態のエネルギー

熱力学第一法則(2) (The First Law of Thermodynamics)

熱平衡状態にある系に対して
保有エネルギーを状態量の一つに選べる.

保有エネルギー: 系全体の力学的エネルギーを除いた
残りを取り扱う

内部エネルギー (Internal Energy) internal

微視的分子系のエネルギー

分子の運動エネルギーやポテンシャルエネルギー

$$E_{Total} = E_{Translation} + E_{Rotation} + E_{Vibration} + E_{Electron} + E_{Spin}$$

$$\Psi_{Total} = \Psi_{Translation} \cdot \Psi_{Rotation} \cdot \Psi_{Vibration} \cdot \Psi_{Electron} \cdot \Psi_{Spin}$$

熱力学第一法則(3) (The First Law of Thermodynamics)

熱平衡状態(1)の系が周囲からQの熱を受け,
周囲にLの仕事をして, 別の熱平衡状態(2)に移った場合

→ $U_2 - U_1 = Q - L$ 工学系熱力学: 系が外部にする仕事を正とする!

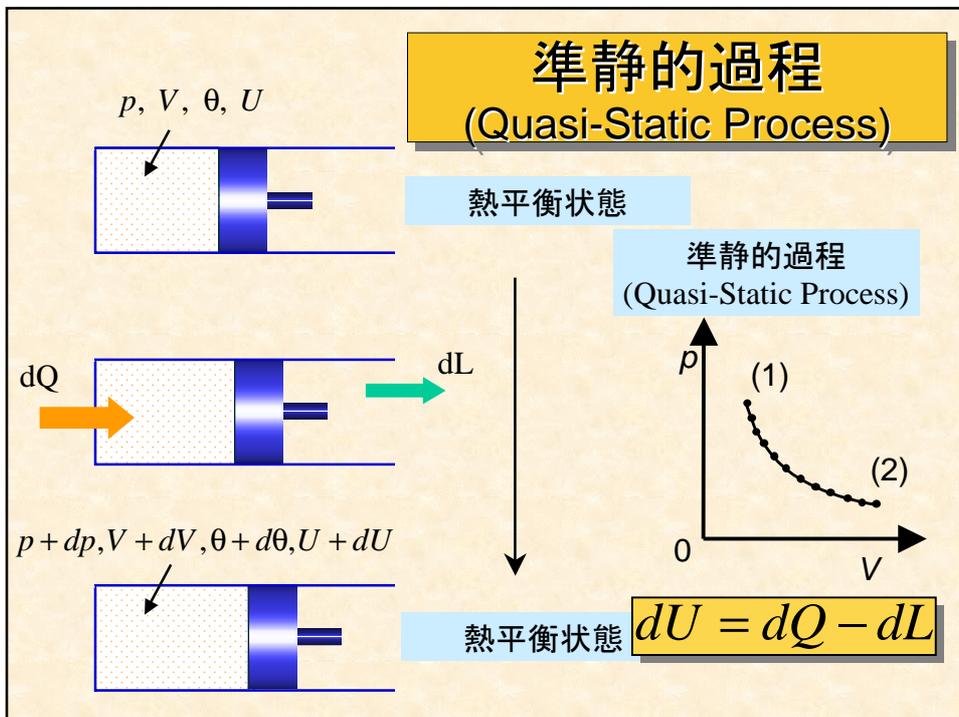
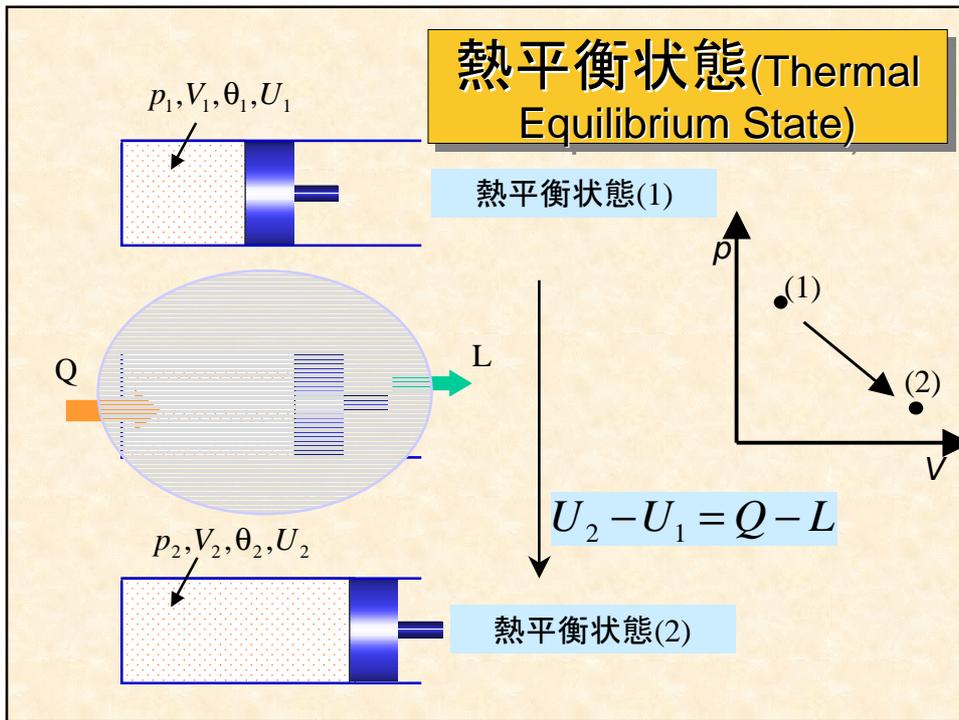
サイクル(Cycle) : 系の状態がある変化の後に
再びもとの状態に戻るとき

熱機関(Heat Engine)など

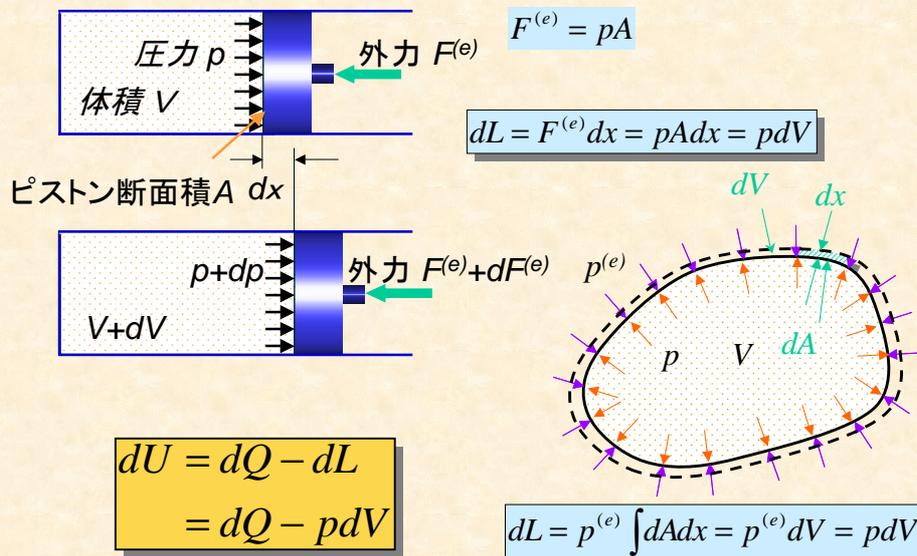
1サイクルでは元に戻るから → $Q = L$

第1種永久機関(Perpetual mobile of the first kind):
1サイクルの間に仕事を発生するだけでそれ以外は何
の変化も残さないような装置

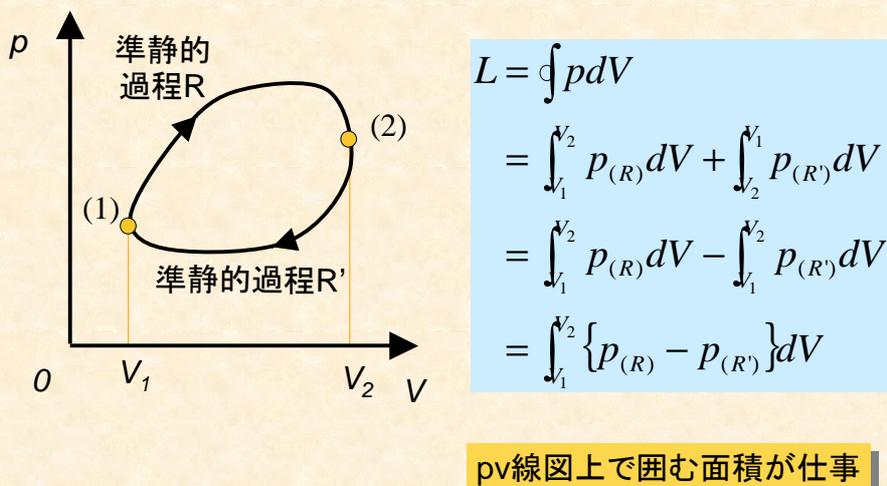
→ $Q = 0 \rightarrow L = 0$: 不可能



準静的過程における力と仕事



準静的サイクル過程の仕事



体積変化以外の仕事(表面張力)

力の釣り合い $\rightarrow p = p^{(e)} + 2\sigma/r$

液滴が体積増加 dV によって周囲になす仕事 dL

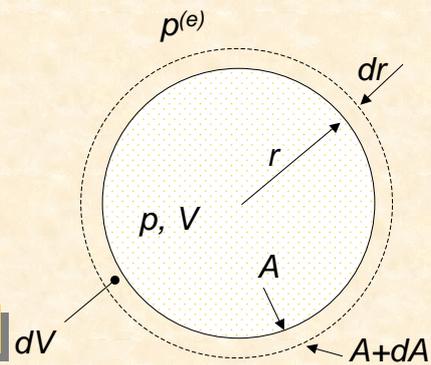
$$dL = p^{(e)}dV = (p - 2\sigma/r)dV$$

$$dA/dV = 2/r, \quad dL = pdV - \sigma dA$$

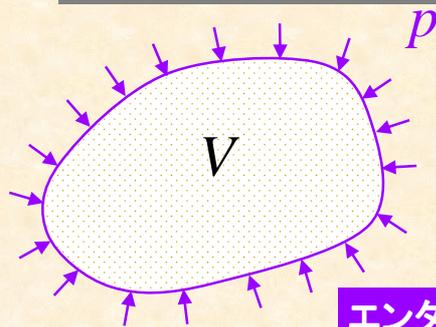
$$dU = dQ - pdV + \sigma dA$$

σdA : 表面積増加に伴う
内部エネルギーの増加

表面エネルギー(Surface Energy) dV



排除仕事とエンタルピー (Displacement Work and Enthalpy)



排除仕事
(Displacement Work)
体積 V の物質が収縮した
とすると周囲から
回収されるエネルギー
 pV

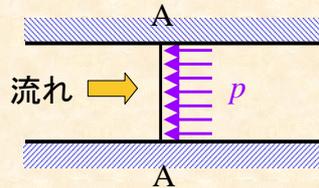
エンタルピー(Enthalpy)

$$H = U + pV$$

$$h = u + pv \quad (\text{単位質量})$$

定圧条件下の変化, 流動系での利用が便利

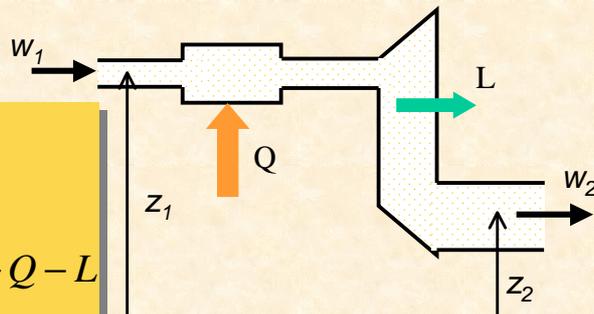
定常流動系 (Steady Flow System)



断面A-Aで単位質量当たりに
移送されるエネルギー

$$h = u + pv$$

$$W\left(h_2 + \frac{w_2^2}{2} + gz_2\right) = W\left(h_1 + \frac{w_1^2}{2} + gz_1\right) + Q - L$$



注意: 摩擦や抵抗があっても成立

比熱, 内部エネルギーとエンタルピー (Specific Heat, Internal Energy & Enthalpy)

$$du = dq - pdv \quad dh = du + pdv + vdp = dq + vdp$$

定積加熱

$$du = dq$$

$$c_v = \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$$

c_v : 定積比熱
(Specific Heat
at Constant Volume)

定圧加熱

$$dh = du + pdv$$

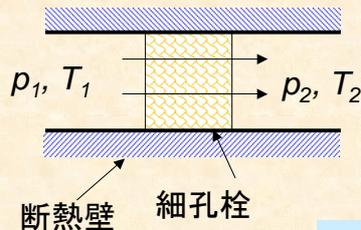
$$dh = dq \quad (p: \text{const})$$

$$c_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$$

c_p : 定圧比熱
(Specific Heat
at Constant Pressure)

理想気体の内部エネルギー

Joule-Thomsonの絞り膨張(Throttle Expansion)



$$h_2 = h_1$$

$$u_2 - u_1 = R(T_2 - T_1) = R\Delta T$$

実在の気体に対する実測の ΔT は, 小さい

$$u = u(T)$$

気体の内部エネルギーは,
分子の並進, 回転, 振動の運動で決まり,
分子間力に関係しない.

理想気体の比熱

$$c_v = c_v(T) = \frac{du}{dT}$$

$$c_p = c_p(T) = \frac{dh}{dT}$$

$$c_p = c_v + R \quad \text{Mayerの関係(Mayer Relation)}$$

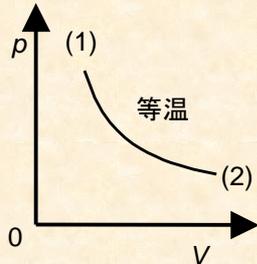
$$c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R, \quad c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R,$$

完全ガスの比熱比
単原子分子: 1.66
2原子分子: 1.40
多原子分子: 1.33

$$\kappa = c_p / c_v \quad \text{比熱比(Specific Heat Ratio)}$$

$$u = u_0 + c_v(T - T_0) \quad h = h_0 + c_p(T - T_0)$$

準静的過程 (等温变化) (Isothermal change)



$$du = dq - pdv$$

$$pv = RT$$

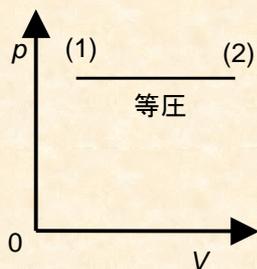
$$pv = \text{const.} = p_1v_1 = p_2v_2$$

$$l_{12} = \int pdv = p_1v_1 \int \frac{1}{v} dv = p_1v_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$du = c_v dT = 0 \quad \therefore dq = pdv$$

$$q_{12} = l_{12}$$

準静的過程 (等压变化) (Isobaric Change)



$$\frac{T}{v} = \text{const.} = \frac{T_1}{v_1} = \frac{T_2}{v_2}$$

$$l_{12} = \int pdv = p \int dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

$$du = c_p dT$$

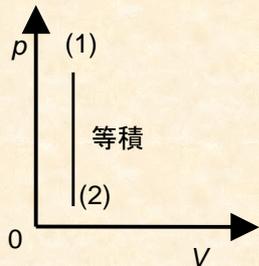
$$q_{12} = \int dq = \int du + p \int dv$$

$$= c_p(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) = c_p(T_2 - T_1)$$

$$l_{12} / q_{12} = (\kappa - 1) / \kappa$$

$$\therefore l_{12} < q_{12}$$

準靜的過程 (等積變化) (Isometric Change)



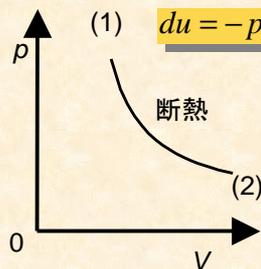
$$\frac{T}{p} = \text{const.} = \frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_2}$$

$$dv = 0 \quad \therefore l_{12} = 0$$

$$\begin{aligned} q_{12} &= \int_1^2 dq = \int_1^2 du \\ &= u_2 - u_1 \\ &= c_v (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

$$l_{12} / q_{12} = 0$$

準靜的過程 (斷熱變化) (Adiabatic Change)



$$du = -pdv$$

$$c_v dT = -\frac{RT}{v} dv \rightarrow \frac{R}{\kappa-1} dT = -\frac{RT}{v} dv$$

$$\therefore \frac{dT}{T} = -(\kappa-1) \frac{dv}{v}$$

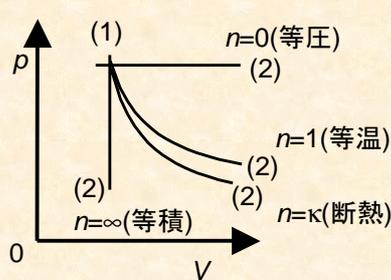
$$Tv^{\kappa-1} = C = T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1}$$

$$\text{or } pv^{\kappa} = C, \quad T/p^{(\kappa-1)/\kappa} = C$$

$$q_{12} = 0$$

$$\begin{aligned} l_{12} &= \int_1^2 pdv = p_1 v_1^{\kappa} \int_1^2 \frac{1}{v^{\kappa}} dv = \frac{p_1 v_1}{\kappa-1} \left\{ 1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} \right\} \\ &= \frac{p_1 v_1}{\kappa-1} \left\{ 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right\} = \frac{R}{\kappa-1} (T_1 - T_2) = u_1 - u_2 \end{aligned}$$

準静的過程 (ポリトロップ変化) (Polytropic Change)



$$pv^n = C = p_1v_1^n = p_2v_2^n$$

n: ポリトロップ指数

$$\begin{aligned} l_{12} &= \frac{p_1v_1}{n-1} \left\{ 1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right\} \\ &= \frac{p_1v_1}{n-1} \left\{ 1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{(n-1)/n} \right\} \\ &= \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{12} &= \int dq = \int du + \int pdv \\ &= c_v(T_2 - T_1) + \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) \\ &= \frac{n-\kappa}{n-1} c_v(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

熱力学第二法則(1)

(The Second Law of Thermodynamics)

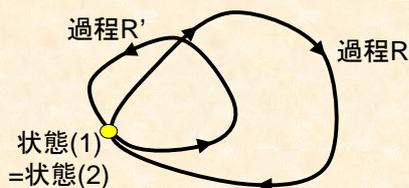
可逆過程(Reversible Process)

不可逆過程(Irreversible Process)

系と周囲の変化を同時に戻せる過程

可逆サイクルと不可逆サイクル

サイクル: 状態が元に戻る過程



熱力学第二法則(2) (The Second Law of Thermodynamics)

仕事側から(Thomsonの原理)

仕事が熱に変わる過程は、
それ以外になにも変化がないなら不可逆

ある温度の一物体から熱を奪い、そのすべてを仕事に変えるのみで
それ以外に何の変化も残さない装置を作ることは不可能

熱側から(Clausiusの原理)

熱が高温物体から低温物体へ移る過程は、
それ以外に何の変化も残らないなら不可逆

低温物体から高温物体へ熱を移すのみで、それ以外に
何の変化も残さないような装置を作ることは不可能

熱力学第二法則(3) (The Second Law of Thermodynamics)

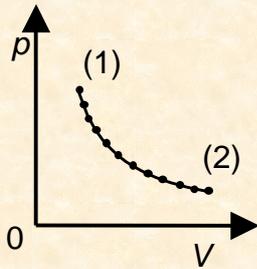
不可逆現象

摩擦, 電気抵抗, 伝熱, 拡散

流体粘性	→Newtonの粘性法則
電気抵抗	→Ohmの法則
熱伝導	→Fourierの法則
物質拡散	→Fickの法則

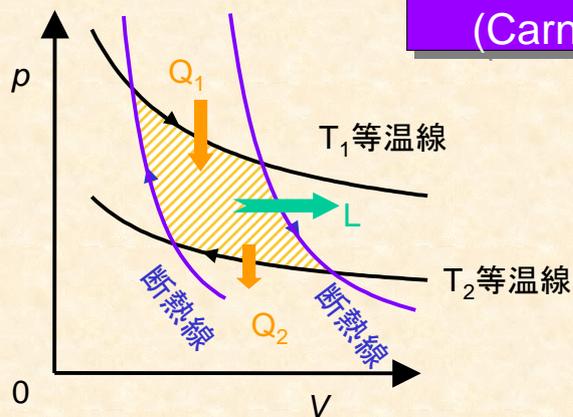
準静的過程と可逆性

準静的過程は逆行可能な可逆過程



経路上の熱平衡点の間隔を無限小
各熱平衡点で系の周りにはそれと同じ圧力、
温度の周囲が接し系と平衡している

カルノーサイクル(1)(Carnot Cycle)

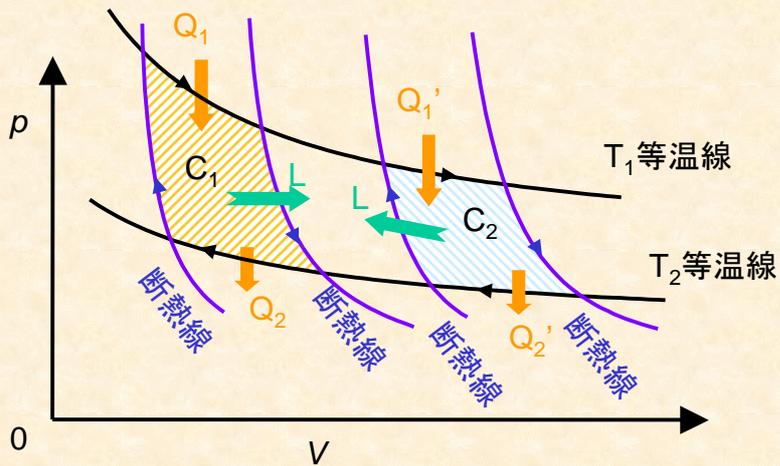


カルノーサイクル
(Carnot Cycle)

$$L = Q_1 - Q_2$$

カルノーサイクル(2)(Carnot Cycle)

2つの独立なCarnot Cycle C_1, C_2

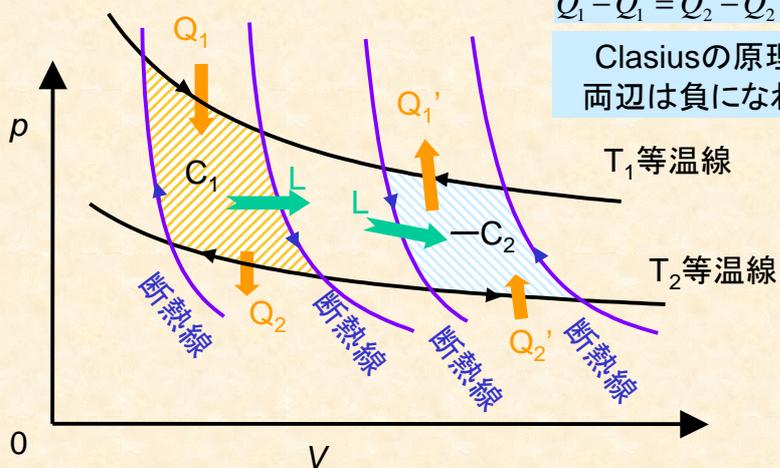


カルノーサイクル(3)(Carnot Cycle)

C_2 を逆転:逆カルノーサイクル(Reverse Carnot Cycle)

$$Q_1 - Q_1' = Q_2 - Q_2'$$

Clasiusの原理より
両辺は負になれない



カルノーサイクル(4)(Carnot Cycle)

さらに両方のサイクルを逆転すると

$$Q_1 - Q_1' = Q_2 - Q_2'$$

Clasiusの原理より
両辺は正になれない

$$\therefore Q_1 - Q_1' = Q_2 - Q_2' = 0$$

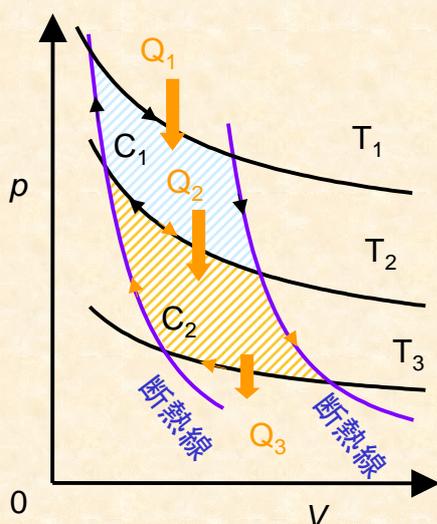
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{Q_1'}{Q_2'} = f(T_1, T_2)$$

カルノーサイクルの熱効率

$$\frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{1}{f(T_1, T_2)}$$

両熱源の温度だけの関数

カルノーサイクル(5)(Carnot Cycle)



カルノーサイクル C_1, C_2

$$Q_1/Q_2 = f(T_1, T_2)$$

$$Q_2/Q_3 = f(T_2, T_3)$$

C_1, C_2 の結合サイクル

$$Q_1/Q_3 = f(T_1, T_3)$$



$$f(T_1, T_2) = g(T_1)/g(T_2)$$

$$\therefore \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{g(T_1)}{g(T_2)}$$

絶対温度(Absolute Temperature)

g(T)を新しい温度Tと定義: 絶対温度
単位はK (Kelvin)

理想気体温度計の温度目盛りとも一致
T=0K : 絶対零度(Absolute Zero Point)

結局Carnotサイクルでは,

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \text{ or } \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$\text{熱効率: } \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

エントロピー(Entropy)

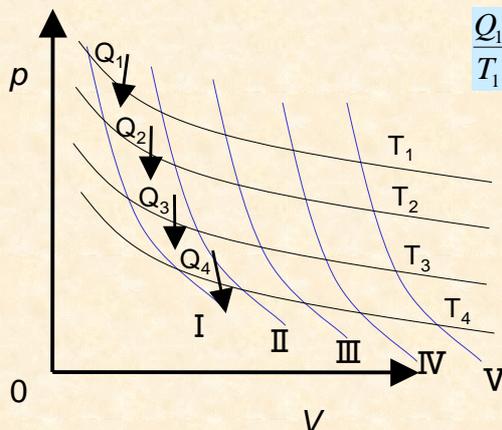
断熱線 I と II の間のカルノーサイクル

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_3}{T_3} = \dots = \text{Const.}$$

断熱線 I に数値 S_I ,
これに上記 Const. を加えて
断熱線 II の数値 S_{II}

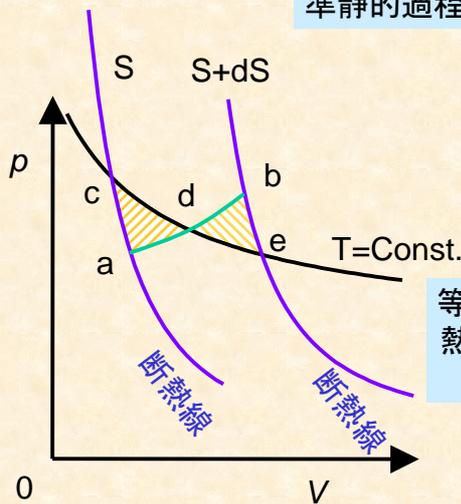
この数値 S を
エントロピー(Entropy)

示量性状態量



物質のエントロピー(Entropy)

準静的過程a→b $dU = dQ - pdv$



Δadc と Δbde が同じ面積となる等温線T

サイクルa→b→e→c→a
仕事=0, 正味熱量=0

等温変化c→eの間に物質が受ける熱量は, 任意の変化a→b間のものdQと等しい

$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dU + pdv}{T}$$

理想気体のエントロピー(Entropy)

$$\begin{aligned} ds &= \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T} \\ &= c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s &= s_0 + c_v \int_{T_0}^T \frac{dT}{T} + R \int_{v_0}^v \frac{dv}{v} \\ &= s_0 + c_v \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + R \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &= u + pv \\ ds &= \frac{dh}{T} - \frac{vdp}{T} \\ &= c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \end{aligned}$$

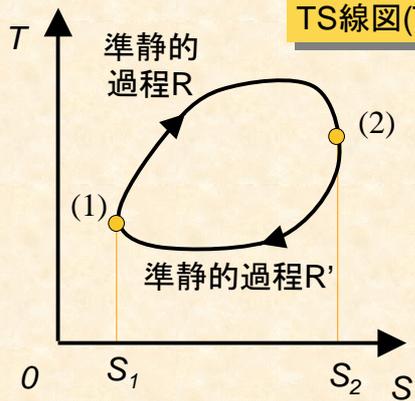
$$s = s_0 + c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

等エントロピー変化 (Isentropic Change)

準静的な断熱変化

状態図上の断熱線に沿う変化

等エントロピー変化 (Isentropic Change)



$$Q = \oint TdS = \int_{S_1}^{S_2} T_{(R)} ds + \int_{S_2}^{S_1} T_{(R')} ds$$

$$= \int_{S_1}^{S_2} T_{(R)} ds - \int_{S_1}^{S_2} T_{(R')} ds$$

$$= \int_{S_1}^{S_2} (T_{(R)} - T_{(R')}) ds$$

1サイクルの間に受ける熱量は、TS線図上でサイクルが囲む面積

不可逆変化を含むサイクル

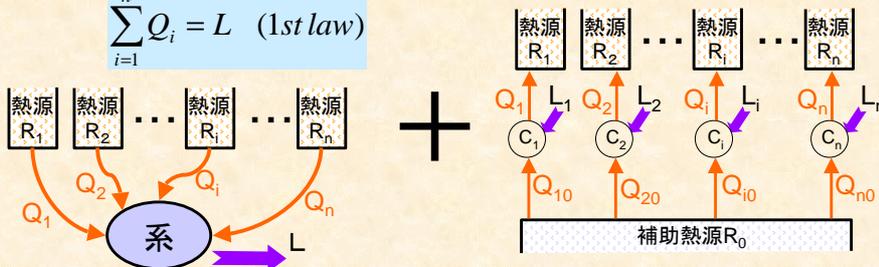
準静的でなく、熱源と平衡でない

各隣接2点は、温度 $T_i^{(e)}$ の熱源 $R_i(T_i^{(e)})$ と作用して熱 Q_i を受ける

逆カルノーサイクル C_i

$$L_i = Q_i - Q_{i0} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i = L \quad (1st\ law)$$



$$R_0(T_0) \text{ から } \sum_i Q_{i0} \text{ の熱 } \rightarrow \text{ 外部への仕事 } : L - \sum_i L_i$$

Clausiusの不等式(Inequality of Clausius)

総合サイクル

熱源 R_1, R_2, \dots, R_n は元に戻る

$R_0(T_0)$ から $\sum_i Q_{i0}$ の熱 \rightarrow 外部への仕事: $L - \sum_i L_i$

Thomsonの原理より

$$L - \sum_i L_i \leq 0$$

逆カルノーサイクル

$$L - \sum_i (Q_i - Q_{i0}) \leq 0$$

$$\frac{Q_i}{T_i} = \frac{Q_{i0}}{T_0}$$

連続変化 $\oint \frac{dQ}{T^{(e)}} \leq 0$

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i^{(e)}} \leq 0$$

Clausiusの不等式

$\because L = \sum_i L_i, \sum_i Q_{i0} = 0$ 可逆過程

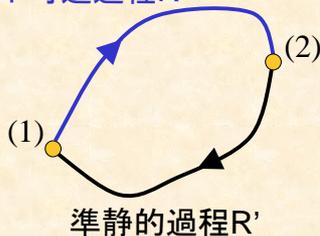
不等号: 外部からの仕事 $|L - \sum_i L_i|$ が

補助熱源 R_0 への熱 $\sum_i Q_{i0}$

不可逆過程

不可逆過程に対する第二法則

不可逆過程R



$$\oint \frac{dQ}{T^{(e)}} < 0 \quad (\text{不可逆})$$

$$\oint \frac{dQ}{T^{(e)}} = \int_{(1)R(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}} + \int_{(2)R'(1)} \frac{dQ}{T^{(e)}}$$

$$= \int_{(1)R(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}} + \int_{(2)R'(1)} dS$$

$$= \int_{(1)R(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}} + (S_1 - S_2)$$

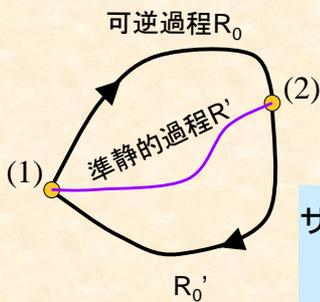
$$\therefore S_2 - S_1 > \int_{(1)R(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}}$$

断熱の場合: $dQ = 0 \quad \therefore S_2 > S_1$

微小変化過程: $dS > \frac{dQ}{T^{(e)}}$

エントロピーの増大

可逆過程に対する第二法則



$$dS = \frac{dQ}{T^{(e)}}$$

$$\oint \frac{dQ}{T^{(e)}} = 0 \quad (\text{可逆 Cycle } R_0 \rightarrow R_0')$$

$$\oint \frac{dQ}{T^{(e)}} = \int_{(1)R_0(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}} + \int_{(2)R_0'(1)} \frac{dQ}{T^{(e)}}$$

$$\text{サイクル}(1)R_0(2)R(1): \int_{(1)R(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}} + (S_1 - S_2) \leq 0$$

$$\text{サイクル}(1)R(2)R_0'(1): \int_{(2)R_0'(1)} \frac{dQ}{T^{(e)}} + (S_2 - S_1) \leq 0$$

$$\int_{(1)R(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}} + \int_{(2)R_0'(1)} \frac{dQ}{T^{(e)}} \leq 0$$

$$S_2 - S_1 = \int_{(1)R(2)} \frac{dQ}{T^{(e)}}$$

第一法則と組み合わせた表現

$$dS \geq \int \frac{dQ}{T^{(e)}}$$

$$dU = dQ - dL \quad (\text{1st Law})$$

$$dU \leq T^{(e)} dS - dL$$

体積変化仕事のみの場合

$$dL = p^{(e)} dV$$

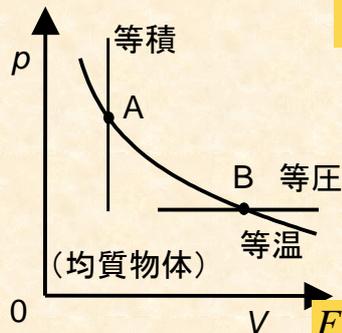
$$dU \leq T^{(e)} dS - p^{(e)} dV$$

一般力のある場合

$$dL = p^{(e)} dV$$

$$dU \leq T^{(e)} dS - p^{(e)} dV + j^{(e)} dX$$

Helmholtz自由エネルギー (Helmholtz Free Energy)



相変化, 化学反応, 混合のある場合

等温等積変化

$$T = T^{(e)} = \text{Const.}, dV = 0$$

$$dU \leq T^{(e)} dS + j^{(e)} dX$$

$$d(U - TS) \leq j^{(e)} dX$$

$F = U - TS$ Helmholtz自由エネルギー

$$-dF \geq -j^{(e)} dX \quad j^{(e)} = 0 \text{ の場合 } dF \leq 0$$

Helmholtz自由エネルギーは, 減少する

系が外部にする仕事 $-j^{(e)} dX$ は, 一般に
Helmholtz自由エネルギーの減少量 $-dF$ より小さい

Gibbs自由エネルギー (Gibbs Free Energy)

等温等圧変化

$$p = p^{(e)} = \text{Const.}, T = T^{(e)} = \text{Const.}$$

$$d(U + pV - TS) \leq j^{(e)} dX$$

$G = U + pV - TS = H - TS$ Gibbs自由エネルギー

$$-dG \geq -j^{(e)} dX$$

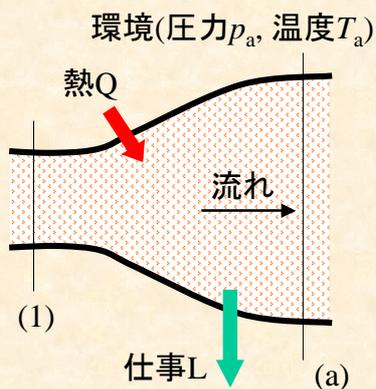
系が外部にする仕事 $-j^{(e)} dX$ は, 一般に
Gibbs自由エネルギーの減少量 $-dG$ より小さい

$$j^{(e)} = 0 \text{ の場合 } dG \leq 0$$

Gibbs自由エネルギーが減少する

環境と有効エネルギー(1) (Atmosphere and Available Energy)

定常流問題



H_a, S_a から環境状態への変化

$$H_a = H_1 + Q - L$$

$$S_a - S_1 \geq \frac{Q}{T_a}$$

$$L \leq (H_1 - H_a) - T_a(S_1 - S_a)$$

等号: 可逆変化

環境と有効エネルギー(2) (Atmosphere and Available Energy)

$$L \leq (H_1 - H_a) - T_a(S_1 - S_a)$$

$$E_1 \equiv (H_1 - H_a) - T_a(S_1 - S_a)$$

保存量 E_1 :
有効エネルギー(Available Energy)
エクセルギー(Exergy)

エネルギー機器や装置は環境(Atmosphere)に囲まれて運転



環境からの不平衡状態が潜在能力