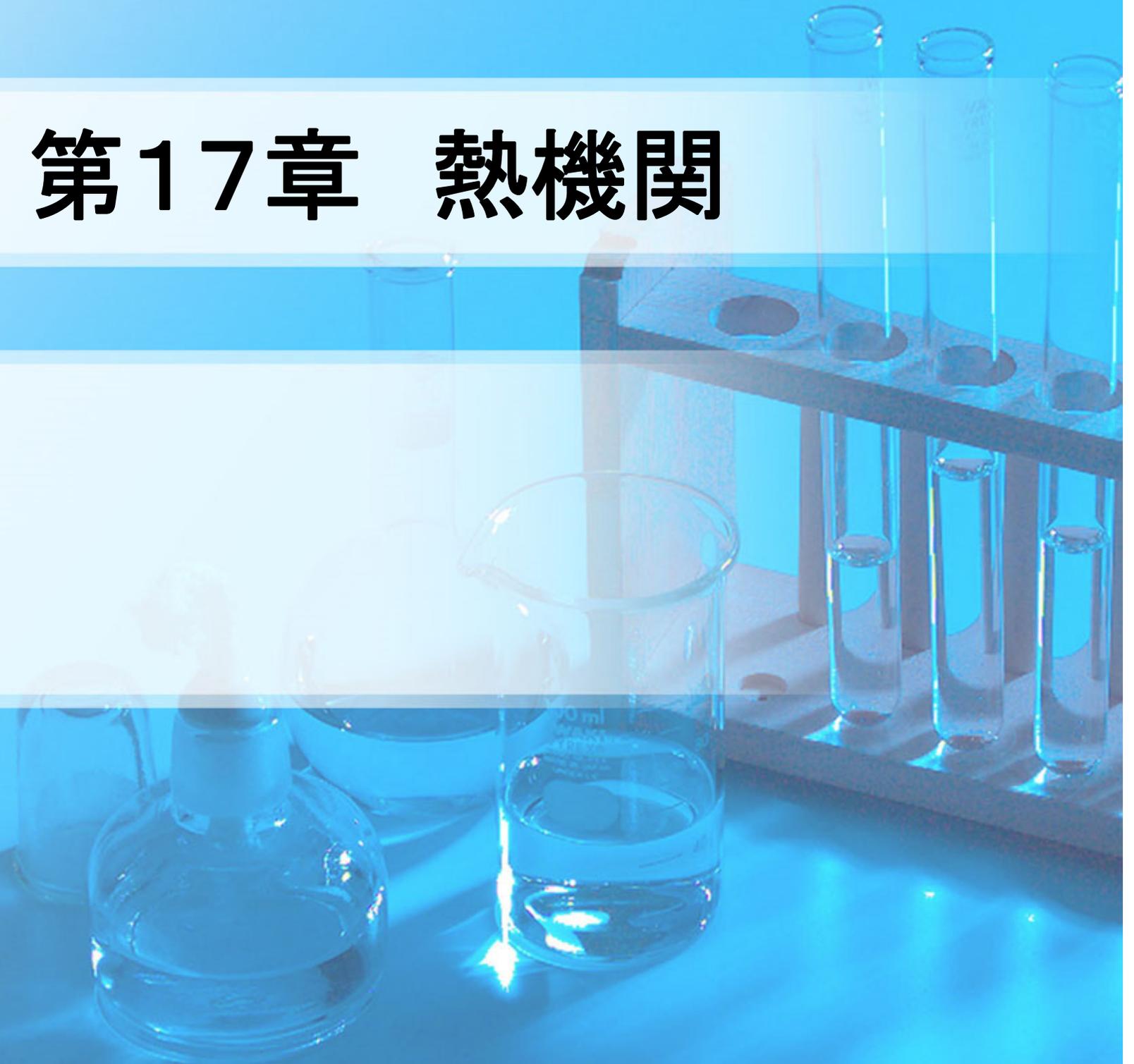


第17章 熱機関



熱と仕事

Jouleの実験

仕事(重りの落下)

↓ (ファンの回転)

熱(水の温度上昇)

・・・では、水の温度を上げると
仕事をすることができるか？

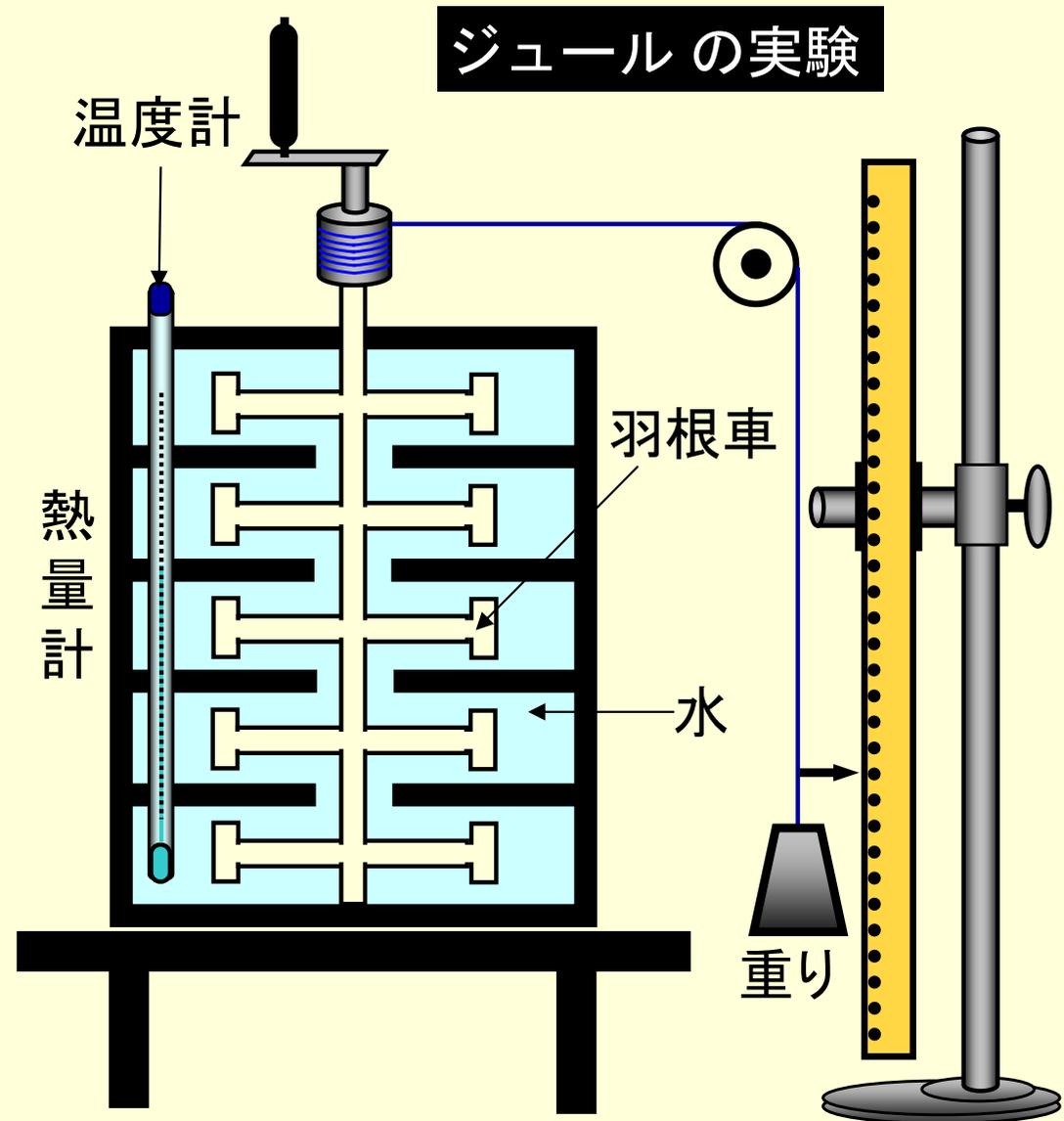
これは・・・

仕事: 規則的な分子運動

熱: 不規則的な分子運動

不規則な分子運動が、自然に
規則的な分子運動に戻ることは
確率的にあり得ないため。す
なわち、熱現象には方向性が
ある。

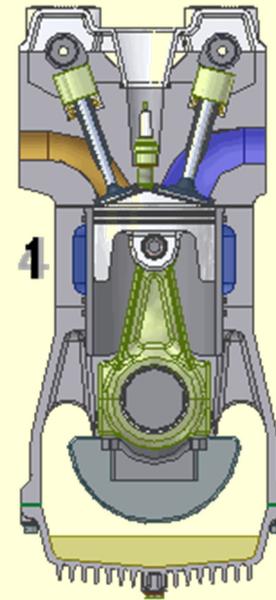
熱力学の第二法則は、このよう
な熱と仕事の転換の可能性に
ついて制限を述べたものである。



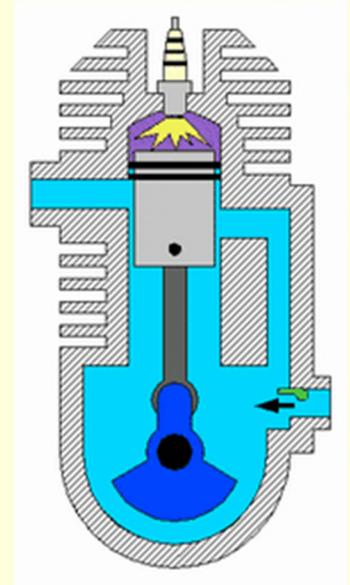
熱機関

熱の形式でエネルギーが供給される原動機を熱機関という。

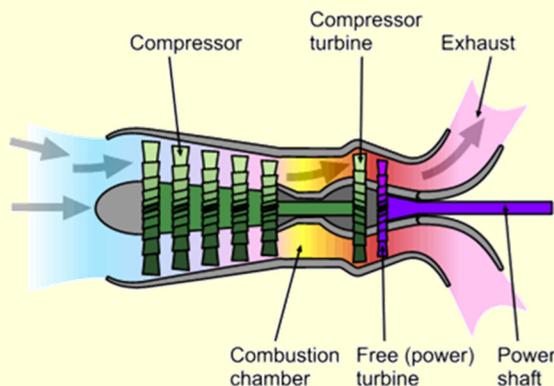
- **内燃機関** ～機関内部で燃料を燃焼させる機関（ピストンエンジン・ガスタービンエンジン）
- **外燃機関** ～機関内部にある気体を機関外部の熱源で加熱・冷却する機関（例、蒸気機関・蒸気タービン・スターリングエンジン・原子力発電）
- **火力発電** ～物質を燃焼させることでファンを回し、エネルギーを得る。



4ストローク
エンジン

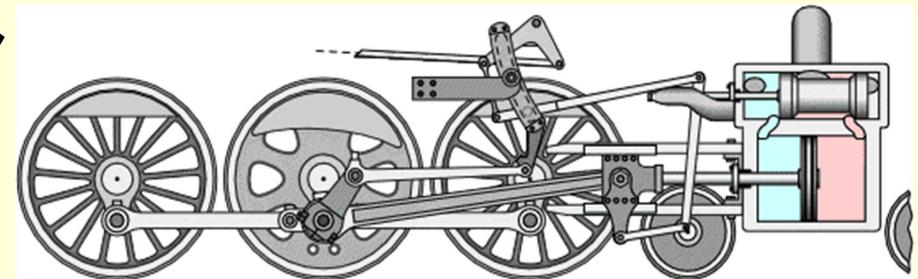


2ストローク
エンジン



ジェットエンジン

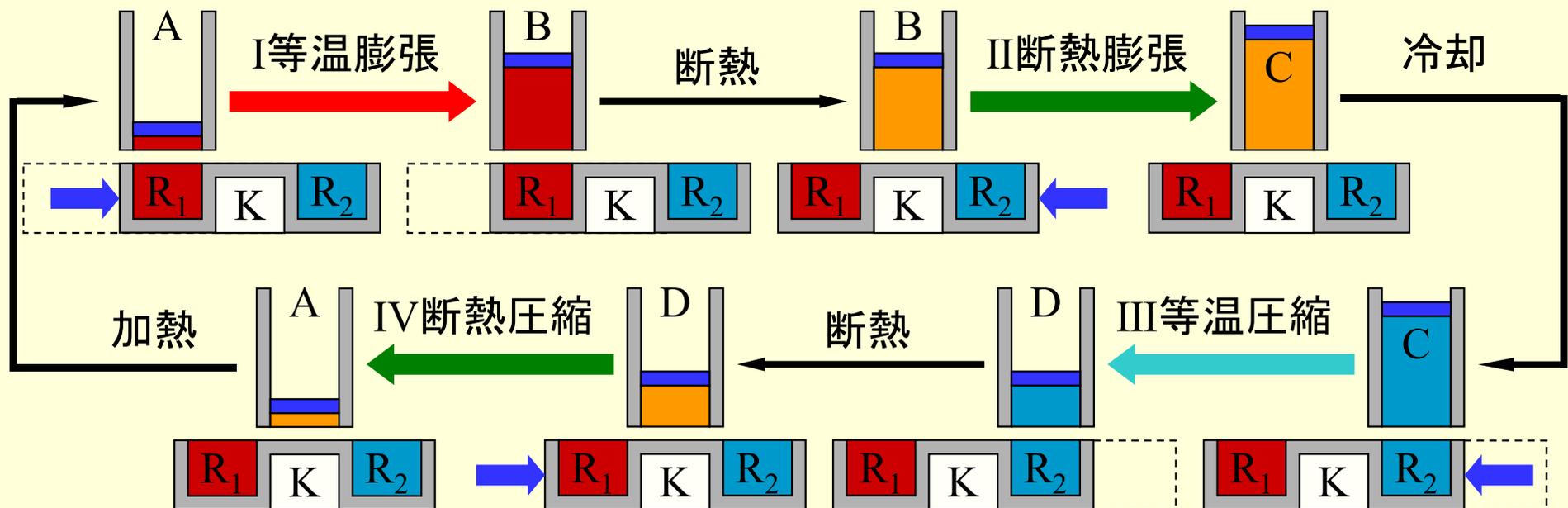
蒸気機関



Carnotサイクル

カルノサイクルは、熱機関効率の限界を探り出すためにCarnotによって考案された仮想的(理想的)な熱機関であり、4つの行程を繰り返すことで運転される。4つの行程は、それぞれI**等温膨張**、II**断熱膨張**、III**等温圧縮**、IV**断熱圧縮**であり、**理想気体**を作業物質とする。

作業物質を入れるシリンダZは壁面およびピストンが完全な熱の不導体で、底面だけが完全に熱を伝えるものとする。また、熱を伝えない台K、一定の温度の高温の熱源 R_1 (絶対温度 T_1 [K])と低温の熱源 R_2 (絶対温度 T_2 [K])を用意する。熱源は熱容量が大きく、少しぐらいの熱の出入りがあっても、温度が変わらないものとする。また、それぞれの変化は準静的とする。



Carnotサイクル

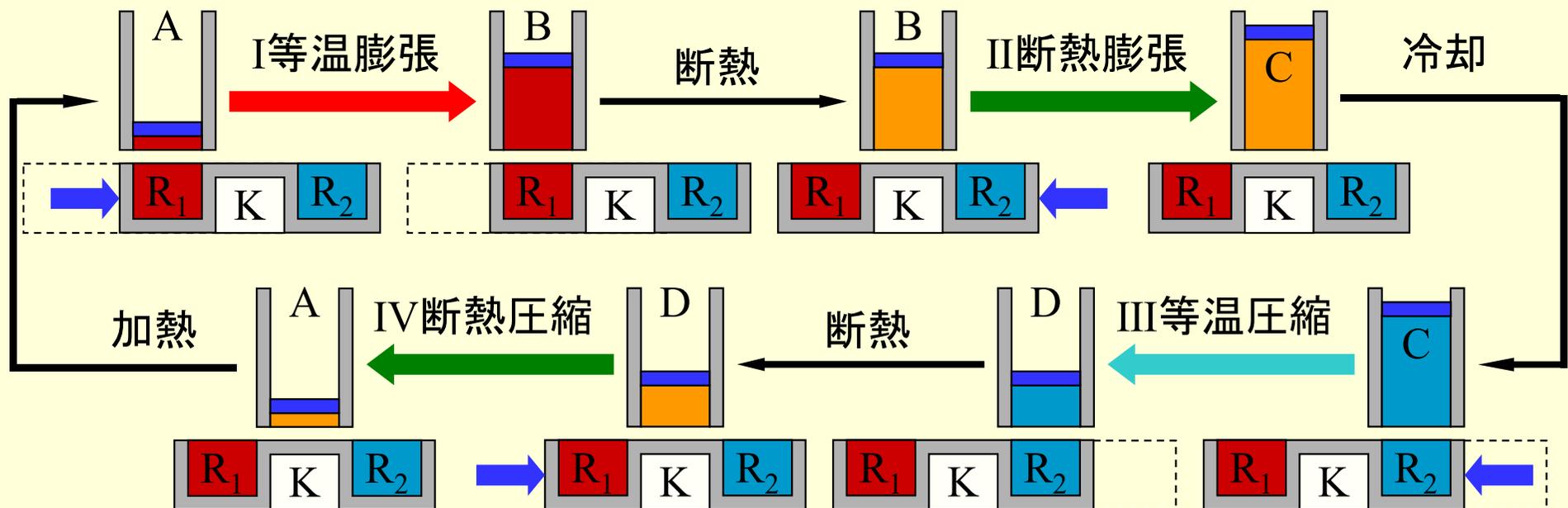
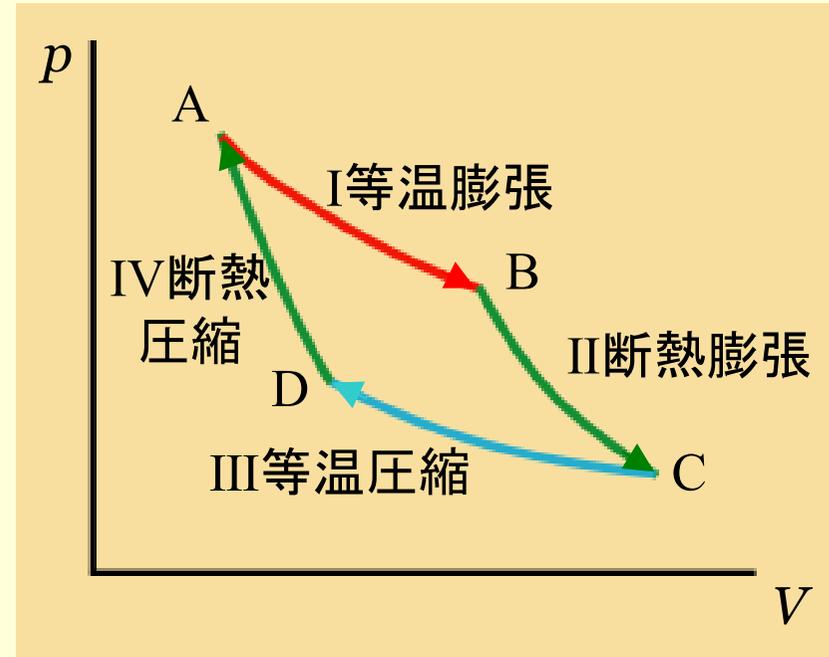
I等温膨張とIII等温圧縮はそれぞれ、 T_1 、 T_2 での等温線で、

$$pV = \text{一定}$$

である。II断熱膨張とIV断熱圧縮は断熱線で、

$$pV^\gamma = \text{一定}$$

である。



Carnotサイクル

作業物質は理想気体なので、それぞれの過程における、作業物質の受ける熱と仕事は、

I等温膨張

$$A(p_1, V_1, T_1) \rightarrow B(p_2, V_2, T_1)$$
$$W_1 = nRT_1 \ln(V_1/V_2) < 0 \quad (\because V_1 < V_2)$$

$$Q_1 = -W_1 = nRT_1 \ln(V_2/V_1) > 0$$

II断熱膨張

$$B(p_2, V_2, T_1) \rightarrow C(p_3, V_3, T_2)$$
$$W_2 = nC_v(T_2 - T_1) < 0 \quad Q_2 = 0$$

III等温圧縮

$$C(p_3, V_3, T_2) \rightarrow D(p_4, V_4, T_2)$$
$$W_3 = nRT_2 \ln(V_3/V_4) > 0$$

ここで、I・IIIは等温線、II・IVは断熱線なので、

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad p_3 V_3 = p_4 V_4$$

$$p_2 V_2^\gamma = p_3 V_3^\gamma \quad p_4 V_4^\gamma = p_1 V_1^\gamma$$
$$\therefore V_2/V_1 = V_3/V_4$$

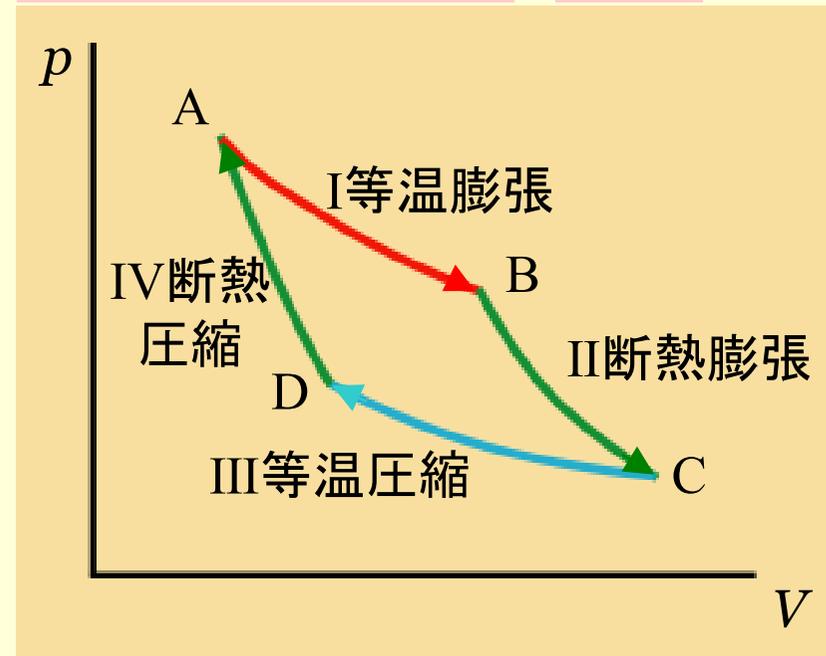
よって、

$$W_3 = nRT_2 \ln(V_2/V_1) > 0$$

$$Q_3 = -W_3 = nRT_2 \ln(V_1/V_2) < 0$$

IV断熱圧縮

$$D(p_4, V_4, T_2) \rightarrow A(p_1, V_1, T_1)$$
$$W_4 = nC_v(T_1 - T_2) > 0 \quad Q_4 = 0$$



熱力学の第二法則

Carnotサイクルの熱効率は、理論上最高となるが、そのサイクルが準静的な過程を組み合わせた非現実的なものである。これと実際の機関との関係を論ずる根拠となるのが、**熱力学の第二法則**となる。この法則は研究した学者によって、様々な表現で表されてる。

1) Carnotの表現 (1850)

「熱が移動したという現象のほかは、他に何の変化も残さないで、熱を低温の物体から高温の物体に移す方法はない。」

2) Thomson (Kelvin) の表現 (1851)

「熱源から得た熱を仕事にかえるだけで、他に何の変化も残さないで操作する熱機関は存在しない。」

3) Planckの表現 (1879)

「重いものをもち上げ、これに対して熱源を冷却すること以外に、何の作用もしないで、周期的に働く機械を作ることは不可能である。」

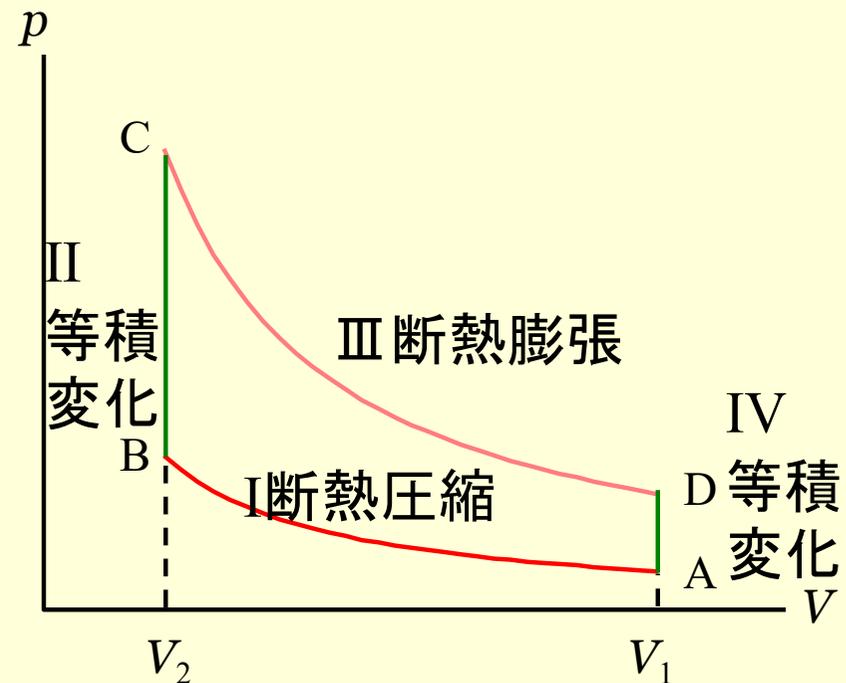
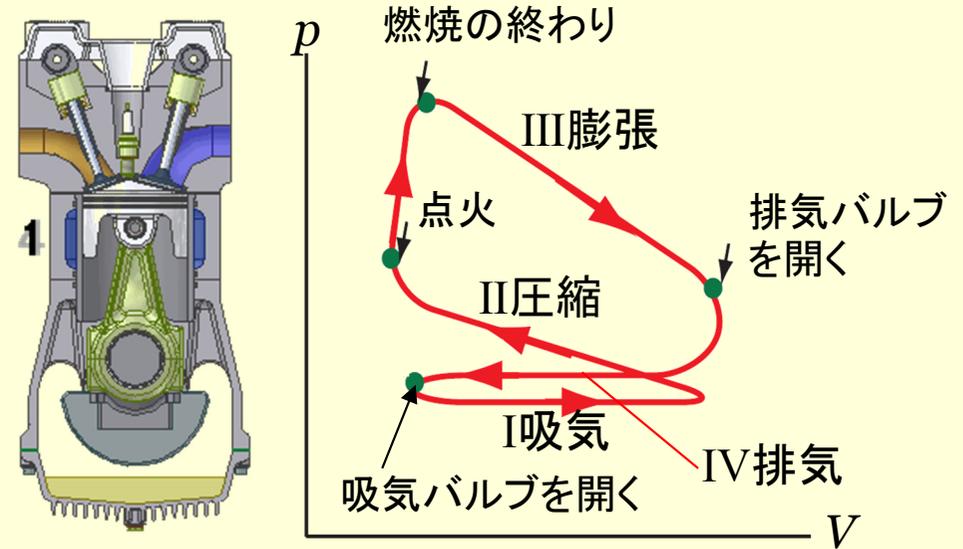
4) Ostwaldの表現

ThomsonやPlanckの表現を否定する機関を第二種の永久機関と名づけ、「第二種の永久機関を作ることは、不可能である。」と、述べた。

4ストロークガソリンエンジン

実際の4ストロークエンジンのサイクルを例に考える。I吸気行程は、吸気バルブから空気とガソリンの混合気を吸入する。II圧縮行程は、吸気された混合気をクランクの慣性力で圧縮する。III膨張行程は、上死点付近で点火を行い、ガソリンの燃焼により内部の空気を膨張させる。IV排気行程は、下死点付近で排気バルブを開き、ピストンの上昇により内部のガスを排気する。

I吸気、IV排気行程はバルブが開いているため等圧変化、II圧縮行程は断熱変化、点火から最高圧力点までと排気過程の前半は等積変化と見ることができ、等圧変化部分を除いた理想サイクルをottoサイクルという。



Ottoサイクル

I断熱圧縮

$$A(p_1, V_1, T_1) \rightarrow B(p_2, V_2, T_2)$$

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

II等積変化

$$B(p_2, V_2, T_2) \rightarrow C(p_3, V_2, T_3)$$

$$Q_h = nC_v(T_3 - T_2)$$

III断熱膨張

$$C(p_3, V_2, T_3) \rightarrow D(p_4, V_1, T_4)$$

$$p_3 V_2^\gamma = p_4 V_1^\gamma$$

IV等積変化

$$D(p_4, V_1, T_4) \rightarrow A(p_1, V_1, T_1)$$

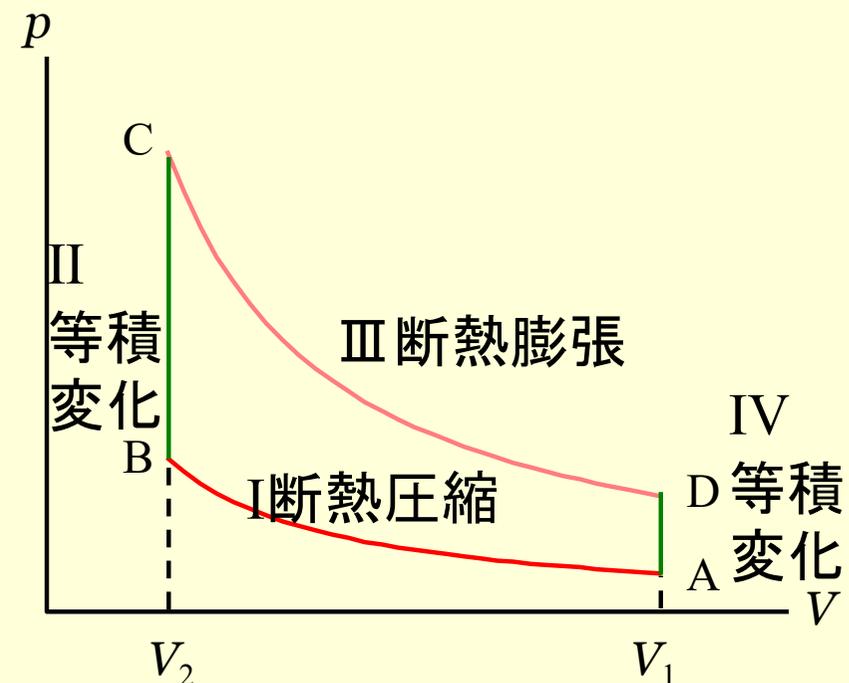
$$Q_c = nC_v(T_1 - T_4)$$

となる。熱効率は、

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

$$\therefore \eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \quad (\text{圧縮比 } \varepsilon = \frac{V_1}{V_2})$$

希薄な混合気体だと、 γ が大きくなるため、効率を上げることができる。圧縮比 ε を上げて効率を上げることができるが、ノック(圧力が上がり過ぎガソリンが自己着火すること)を起こす。一般的なガソリンエンジンは $\varepsilon = 10$ 前後で、 $\eta = 60\%$ となるが、実際は25%~35%程度となる。



ディーゼルエンジン

高温高圧になった空気にディーゼル燃料(軽油や重油)を吹き込んだときに起きる自己着火(発火)をもちいるのがディーゼルエンジンである。圧縮比を12~24程度まで上げることができ、熱効率が35~40%と高い。

理想サイクルとしては、低速のものはDieselサイクル、高速のものはSabatheサイクルと呼ばれる。

メリット

- 圧縮比が高く、熱効率が低い。
- 部分負荷時の燃料消費率が高く、CO₂の排出量が少ない。
- ガソリンエンジンは炎の伝播速度の問題で、シリンダ直径に限界があるが、ディーゼルエンジンには限界がないため、大型化に向いている。

デメリット

- 圧縮比が高いため、強度と剛性が必要で、質量が大きくなりやすい。また、振動も大きい。
- 燃焼室内の空気過剰のため、NO_xが出やすい。また、不完全燃焼による黒煙も出やすい。

Dieselサイクル

I断熱圧縮

$$A(p_1, V_1, T_1) \rightarrow B(p_2, V_2, T_2)$$

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

II等圧変化

$$B(p_2, V_2, T_2) \rightarrow C(p_2, V_3, T_3)$$

$$Q_h = nC_p(T_3 - T_2)$$

III断熱膨張

$$C(p_2, V_3, T_3) \rightarrow D(p_4, V_1, T_4)$$

$$p_2 V_3^\gamma = p_4 V_4^\gamma$$

IV等積変化

$$D(p_4, V_1, T_4) \rightarrow A(p_1, V_1, T_1)$$

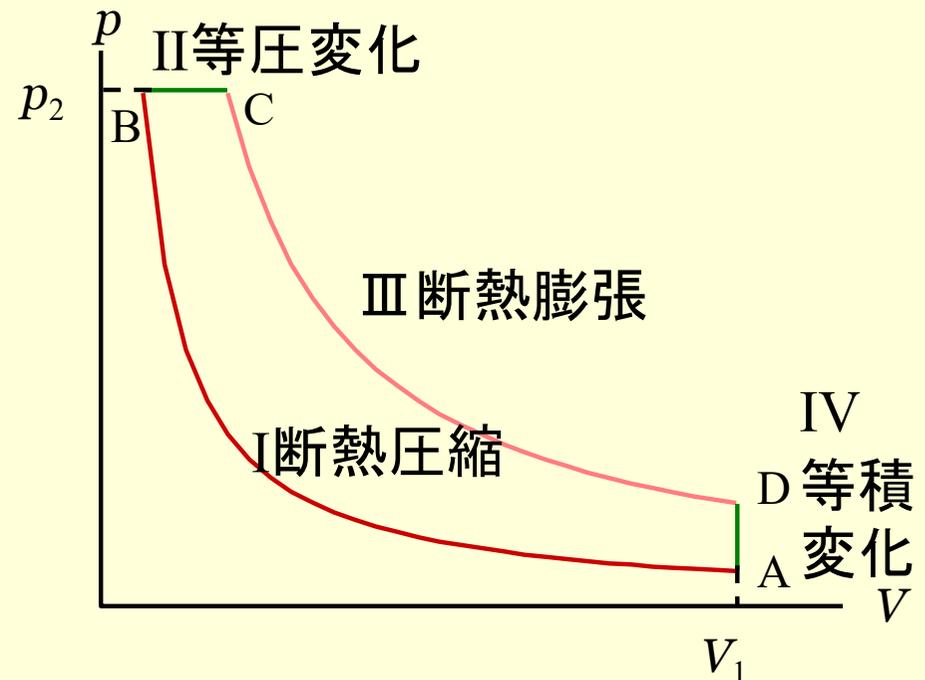
$$Q_c = nC_v(T_1 - T_4)$$

となる。熱効率は、

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\varepsilon^\gamma} \cdot \frac{\sigma^\gamma - 1}{\sigma - 1}$$

$$\left(\text{締め切り比 } \sigma = \frac{T_3}{T_2}\right) \left(\text{圧縮比 } \varepsilon = \frac{V_1}{V_2}\right)$$

圧縮比 ε を大きくし、締め切り比 σ を1に近づけると効率が上がる。本来はオットーサイクルよりも効率が低いですがノックしないので、圧縮比 ε を大きくでき、効率を高くできる。



Sabatheサイクル

I断熱圧縮

$$A(p_1, V_1, T_1) \rightarrow B'(p_2', V_2, T_2')$$

$$p_1 V_1^\gamma = p_2' V_2^\gamma$$

II'等積変化

$$B'(p_2', V_2, T_2') \rightarrow B(p_2, V_2, T_2)$$

$$Q_v = nC_v(T_2 - T_2')$$

II等圧変化

$$B(p_2, V_2, T_2) \rightarrow C(p_2, V_3, T_3)$$

$$Q_p = nC_p(T_3 - T_2)$$

III断熱膨張

$$C(p_2, V_3, T_3) \rightarrow D(p_4, V_1, T_4)$$

$$p_2 V_3^\gamma = p_4 V_4^\gamma$$

IV等積変化

$$D(p_4, V_1, T_4) \rightarrow A(p_1, V_1, T_1)$$

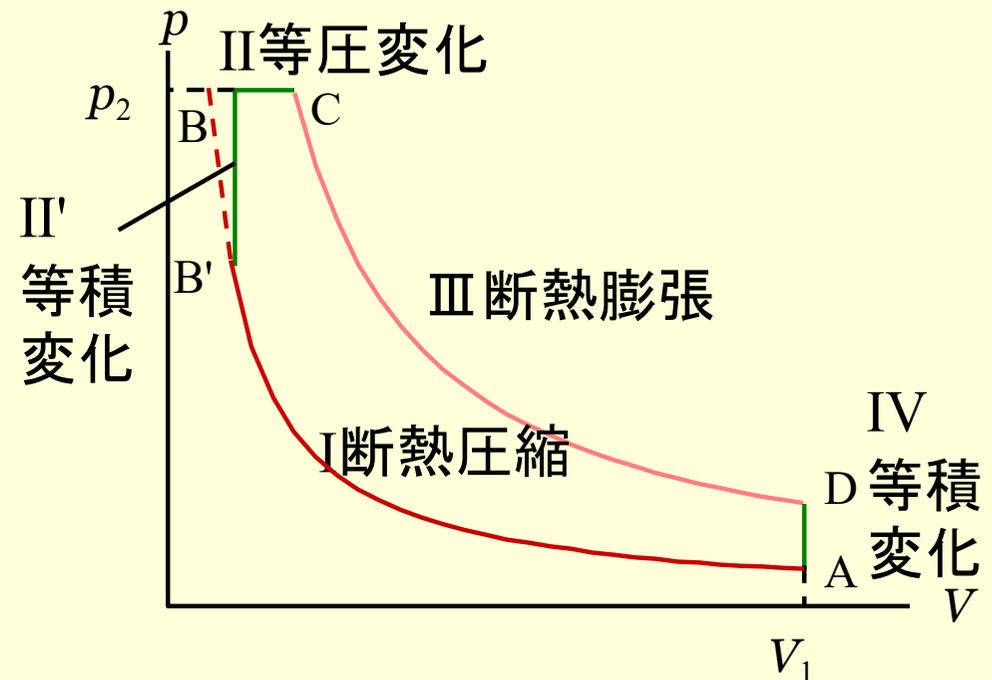
$$Q_c = nC_v(T_1 - T_4)$$

となる。熱効率は、

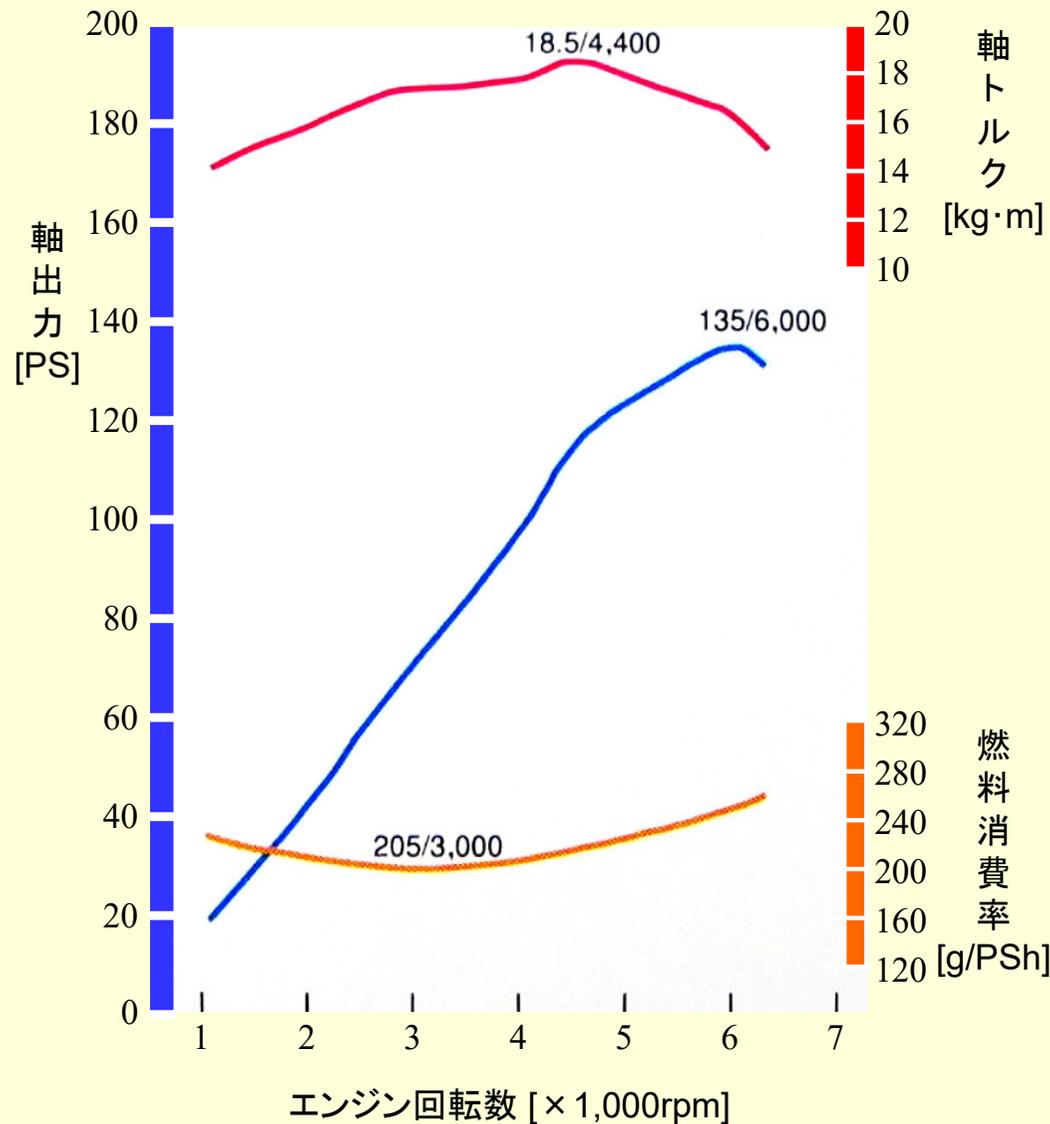
$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_v + Q_p}$$

$$= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \frac{\sigma^\gamma \alpha - 1}{(\alpha - 1) + \gamma \alpha (\sigma - 1)}$$

(有効仕事 $\alpha = p_2' / p_2 = T_2' / T_2$)



ガソリンエンジンの性能曲線



最高軸トルク、最高出力、最高燃料消費率の回転数は必ずしも一致しない。一般的な乗用車の場合、トルクは加減速に影響し、軸出力は高回転時の伸びに影響を及ぼす。図のエンジンの場合、3,000rpmでの走行は燃費が一番良くなるが、出力を得るためには6,000rpmで走行する必要がある。

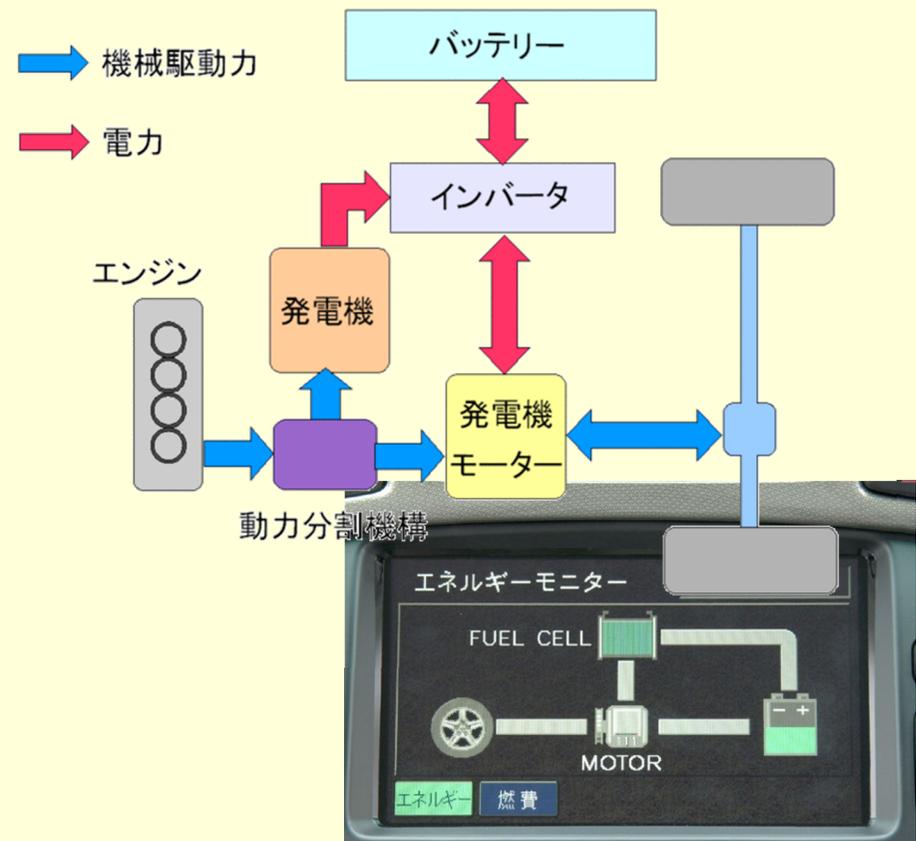
ハイブリッドカー

走行時の環境負荷の低い自動車としては、電気自動車、水素自動車、燃料電池自動車が排気がクリーンである。しかし、製造コストや燃料の保存方法に問題がある。一方、内燃機関にバッテリーとモーターを組み合わせたハイブリッドカーの場合、それぞれの歴史が長いこと信頼性が高いが、複雑さに問題があった。しかし、近年の環境負荷低減の流れから、急速に普及している。

エンジンは低回転時には十分な出力を得られないばかりか、アイドリングも含めて効率が悪く、排出ガスの浄化能力も落ちる。そこで、エンジン動作時には、効率の良いエンジン回転数で動作させ、余力として得られる出力を発電機にまわすことで、蓄

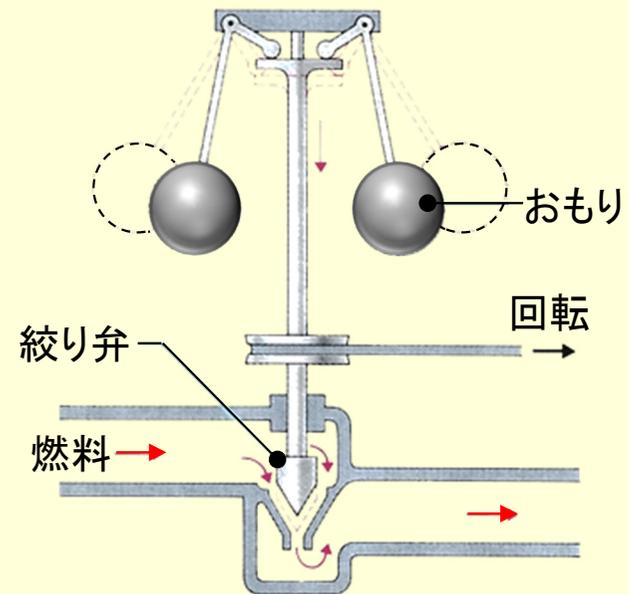
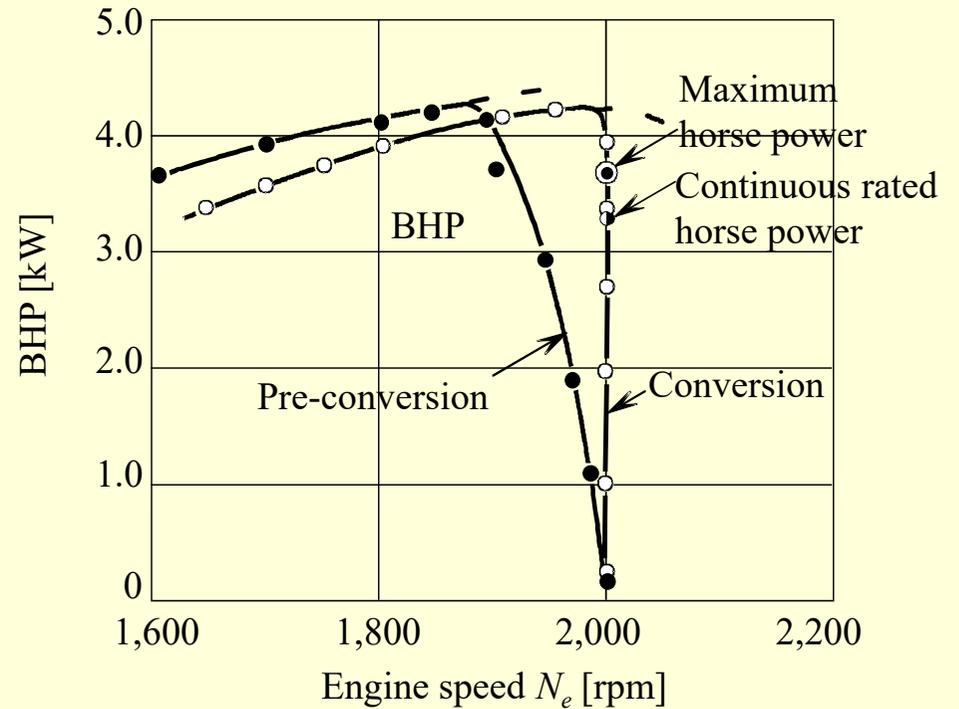
電を行うのが、スプリット方式のハイブリッドシステムである。

実用には、蓄放電のスケジューリングが重要で、カーナビ等と組み合わせたハイブリッドシステムが開発されている。



トラクタのエンジン

普通乗用車は、アクセル開度を調整して、走行速度を変更するのが一般的である。また、走行負荷はほぼ一定であり、変化があった場合にはこれに応じてアクセル開度を変更する。これに対し、トラクタは後に作業機械を装着して作業を行うことが前提となるため、速度をあまり変更することがなく、そのためアクセルの調整はほとんどない。逆に土壌に対して作業を行いながら走行するため、作業負荷の変動が大きく、このような変動に対しても出力を維持できるようにオールスピードガバナという装置が装着されている。作業は通常、最大出力を用いて行われる。



ホンダのエンジン燃焼システム

エンジン燃焼制御システム