

フリーピストンを用いた可変圧縮比システム (スターリングエンジンの出力制御システム)

神奈川工科大学 工学部 機械工学科
教授 佐藤 智明

2025年10月7日

新技術の概要

- ・これまでスターリングエンジンは出力の制御が難しかったが、本技術を用いることで**応答性の高い制御が可能**となる。
- ・シリンダー内ピストンの上部あるいはシリンダー外部部屋を設け**空気を挟む形でフリーピストンを配置する**。パワーピストンが空気を圧縮する方向に移動すると、フリーピストンがその圧力に押されて同方向に移動するため、その間は空気を圧縮することができない。フリーピストンの移動ストロークをアジャスターによって調整することで任意の圧縮比を得ることができる。

従来技術とその問題点

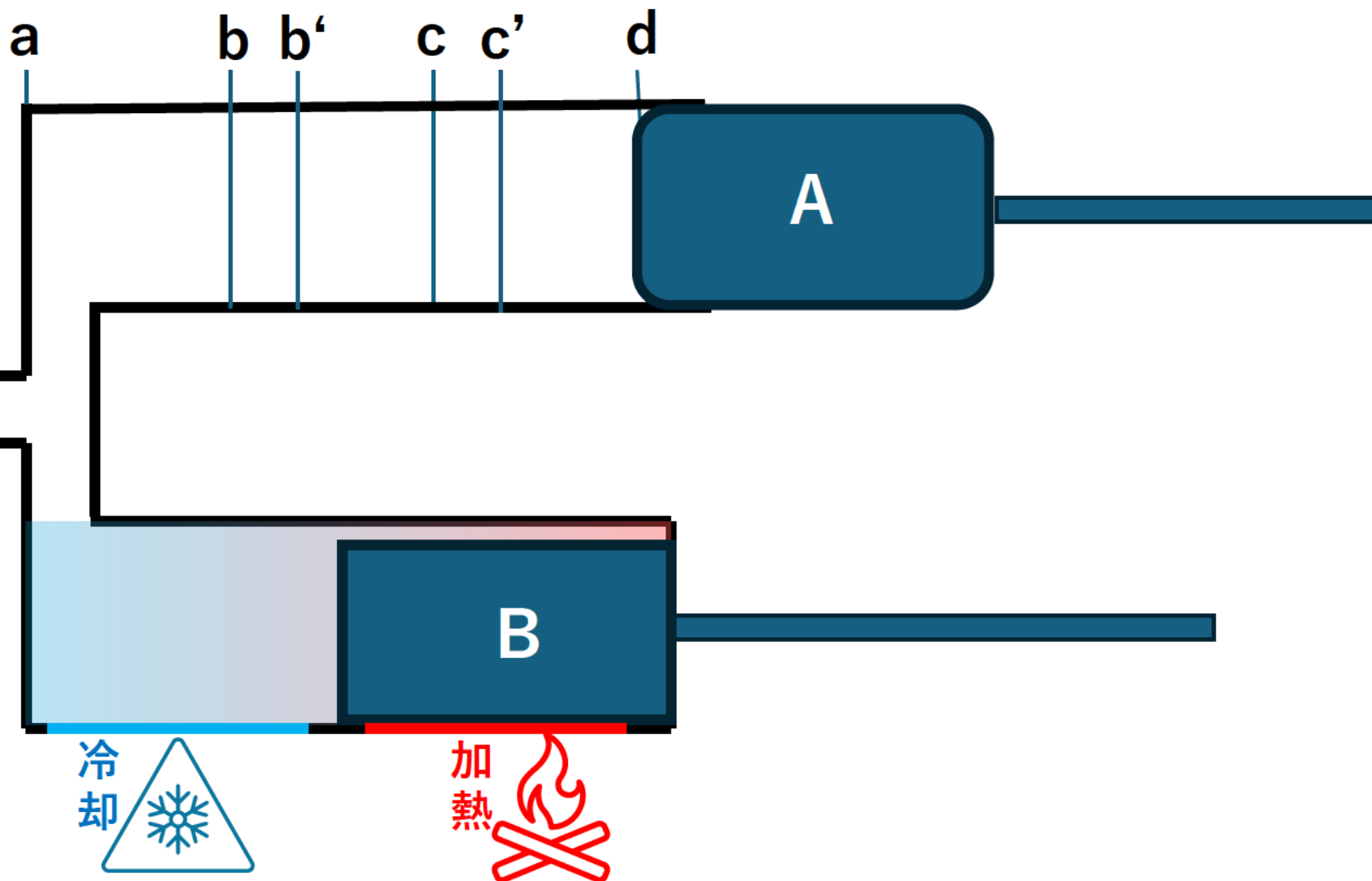
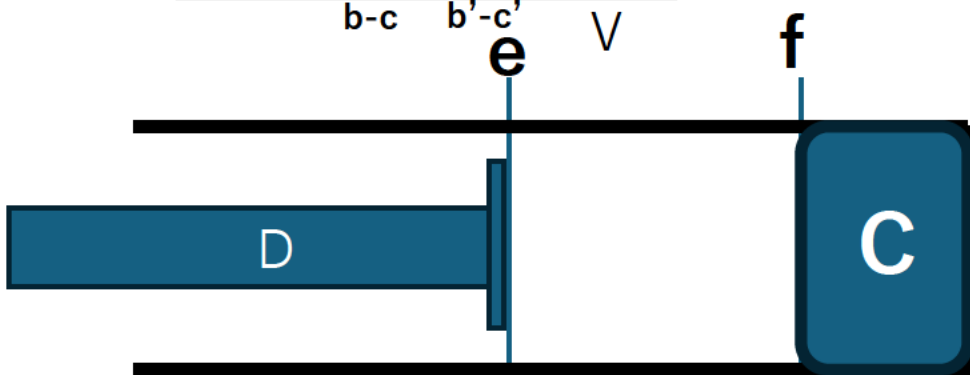
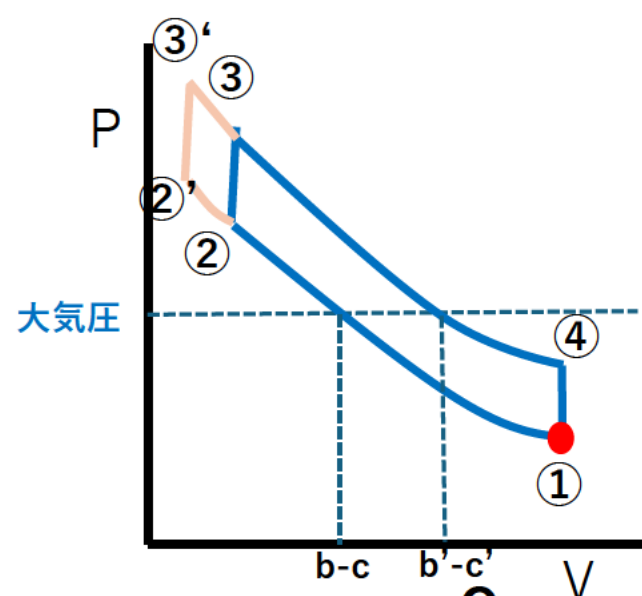
- ・これまでのスターリングエンジンは、外燃機関であるため、瞬時の加熱量の制御が難しく、急加速や急減速など出力のリアルタイムコントロールが難しかった。
- ・既製のエンジンによる制御方法はブレーキによるものやクラッチおよびギア変速を使ったものなどがあるが、いずれも普及には至っていない。
- ・自動車など応答性を要求する用途への適用は非常に難しかった。

新技術の特徴・従来技術との比較

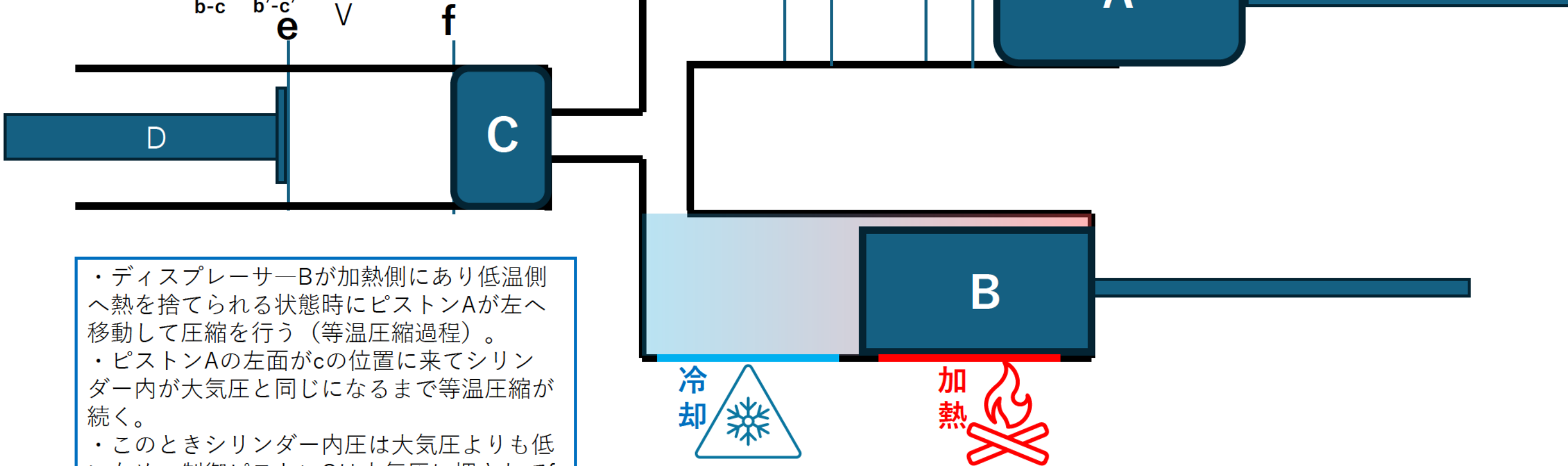
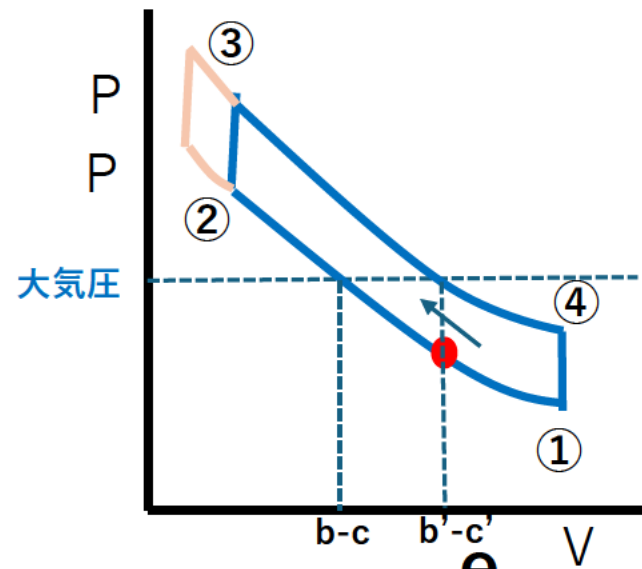
- 本方式の制御はフリーピストンの可動ストロークをアジャスターで調整することで瞬時に圧縮比を変化させることができる。このため出力をリアルタイムにコントロールすることができる。
- 従来の摩擦抵抗で出力低下させたりするような効率を犠牲にせずに出力制御が可能である（制御過程で熱効率は変化しない）。
- フリーピストンに替えてベローズやダイアフラムなど容積可変なものであれば様々適用できる

可変圧縮比システムの原理

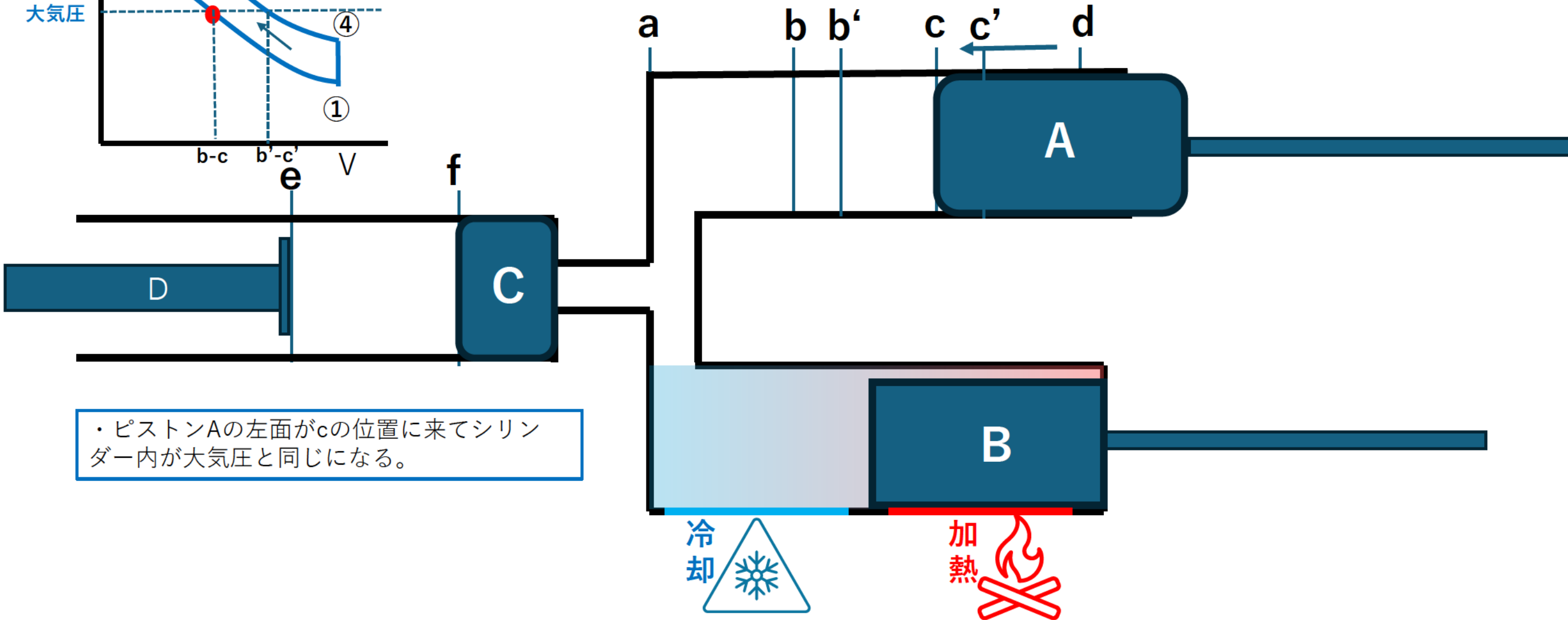
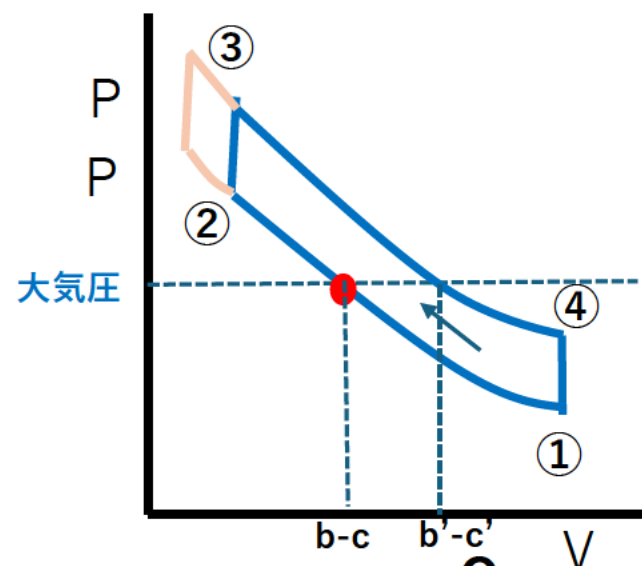
- 以下本エンジン制御システムの原理及び装置概要を説明する。



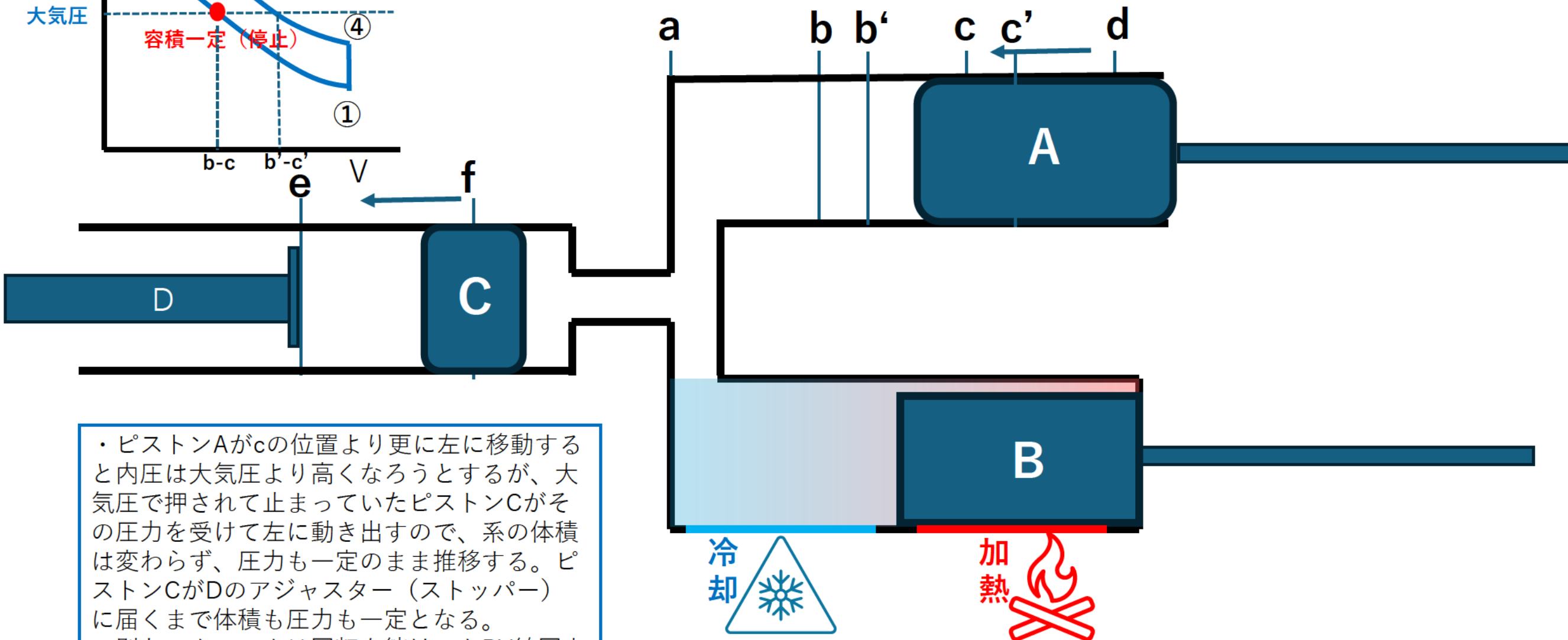
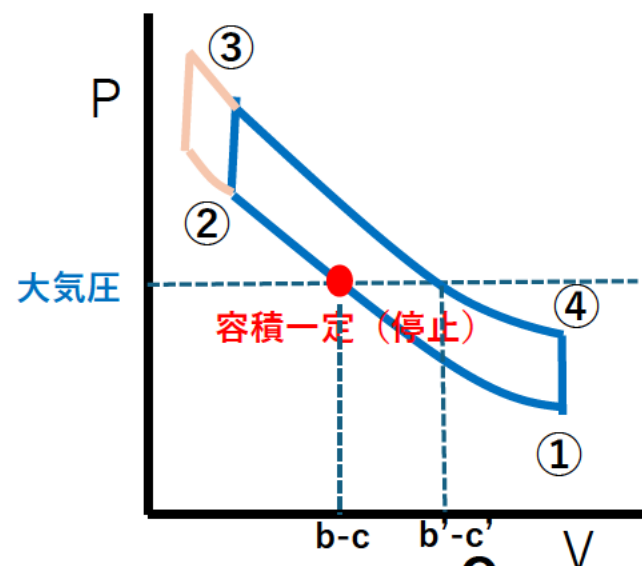
- ・スターリングサイクルの理論サイクル図をPV線図上に示した。
- ・線図上①～②は等温圧縮過程、②～③は定積加熱過程、③～④は等温膨張過程、④～①めは定積冷却過程である。
- ・制御ピストンCが同位置に固定されている場合は、②'と③'を囲むサイクルとなる。
- ・b-cおよびb'-c'はそれぞれ、ピストンCがf～e間を移動することでその間にシステムとしては実質的な体積変化が起こらない状態であることを意味する。



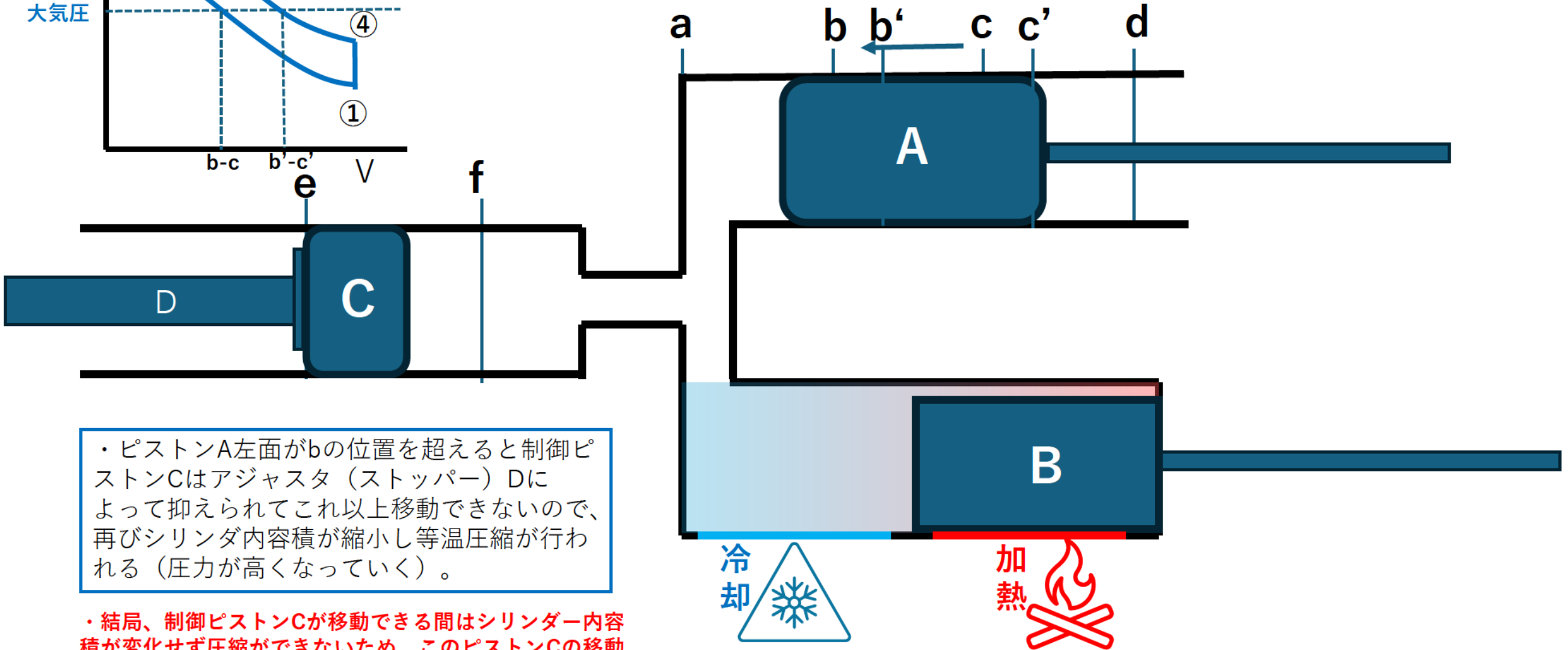
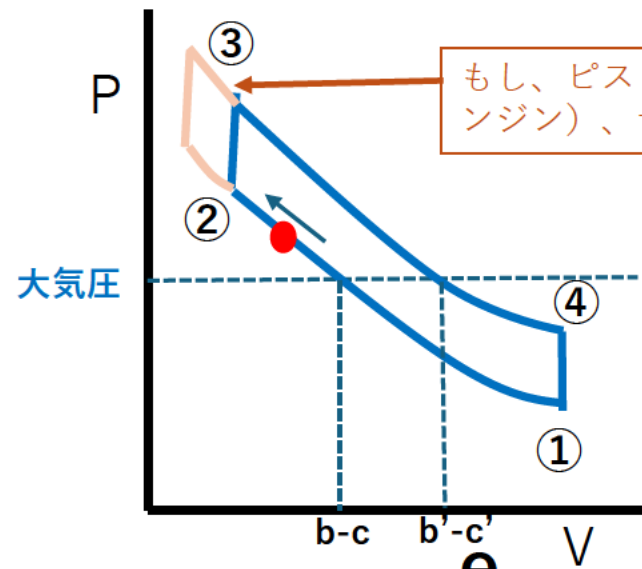
- ・ ディスプレッサーBが加熱側にあり低温側へ熱を捨てられる状態時にピストンAが左へ移動して圧縮を行う（等温圧縮過程）。
- ・ ピストンAの左面がcの位置に来てシリンダー内が大気圧と同じになるまで等温圧縮が続く。
- ・ このときシリンダー内圧は大気圧よりも低いため、制御ピストンCは大気圧に押されてfの位置でとどまっている。
- ・



・ピストンAの左面がcの位置に来てシリンダー内が大気圧と同じになる。

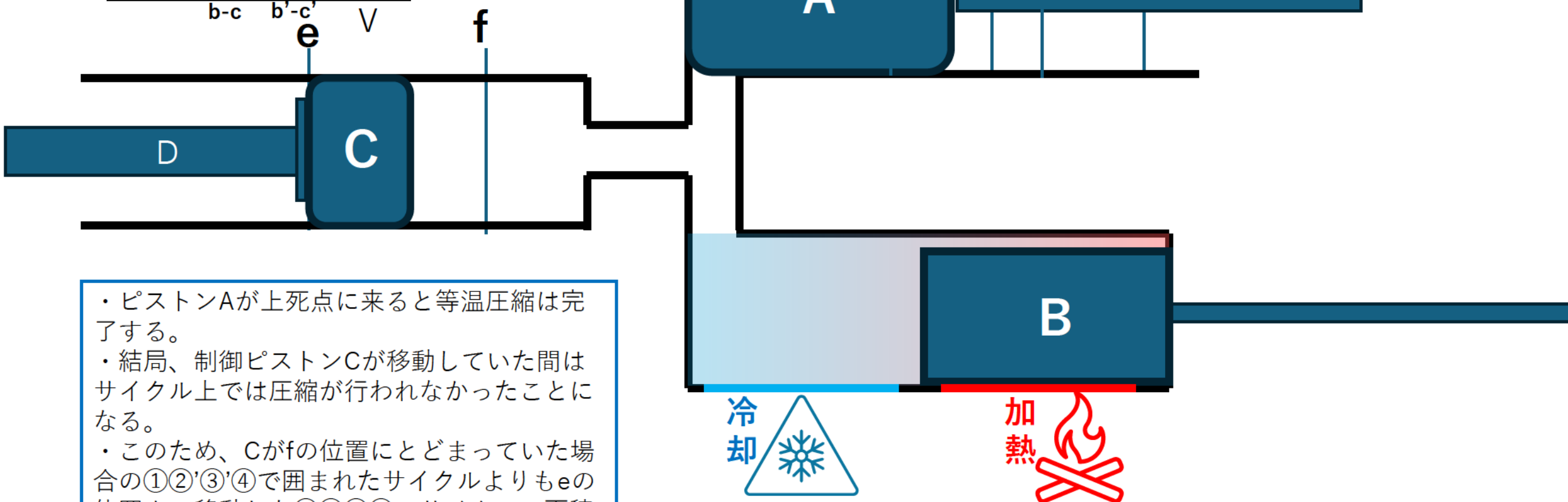
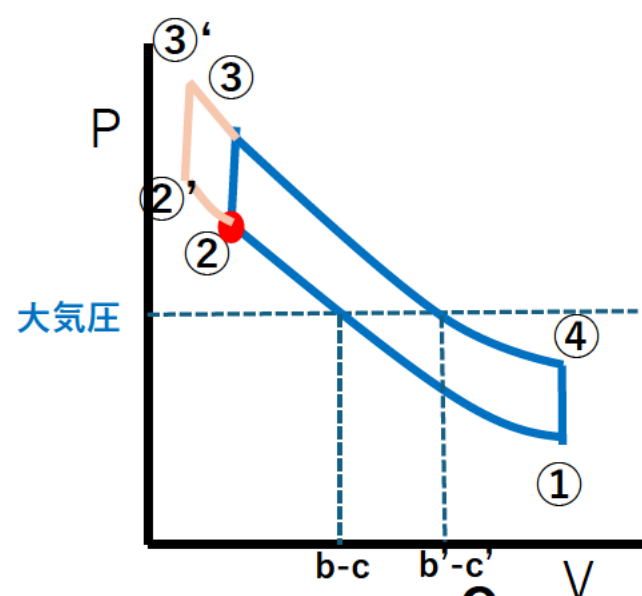


- ・ピストンAがcの位置より更に左に移動すると内圧は大気圧より高くなろうとするが、大気圧で押されて止まっていたピストンCがその圧力を受けて左に動き出すので、系の体積は変わらず、圧力も一定のまま推移する。ピストンCがDのアジャスター（ストッパー）に届くまで体積も圧力も一定となる。
- ・則ち、クランクは回転を続けてもPV線図上の赤ポインターは一定で止まった状態。

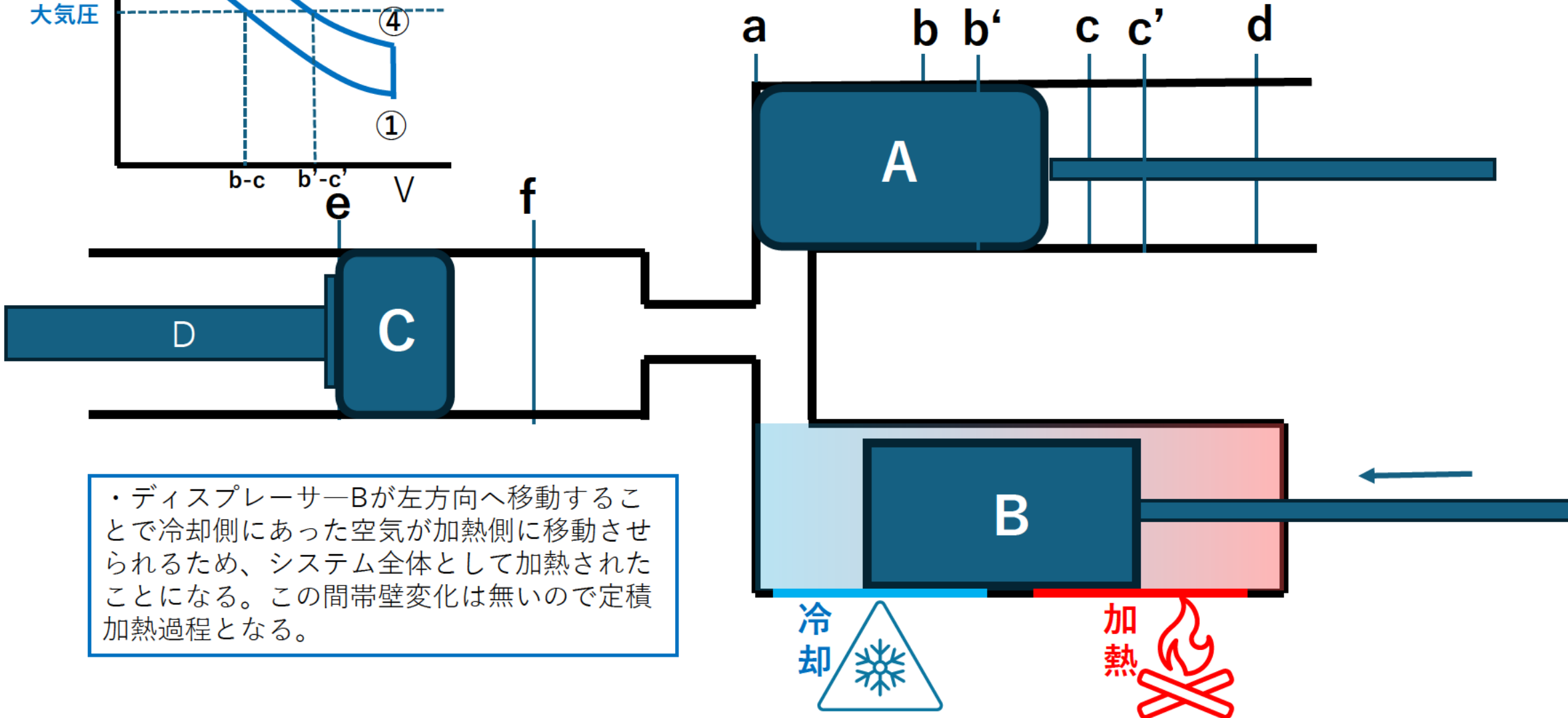
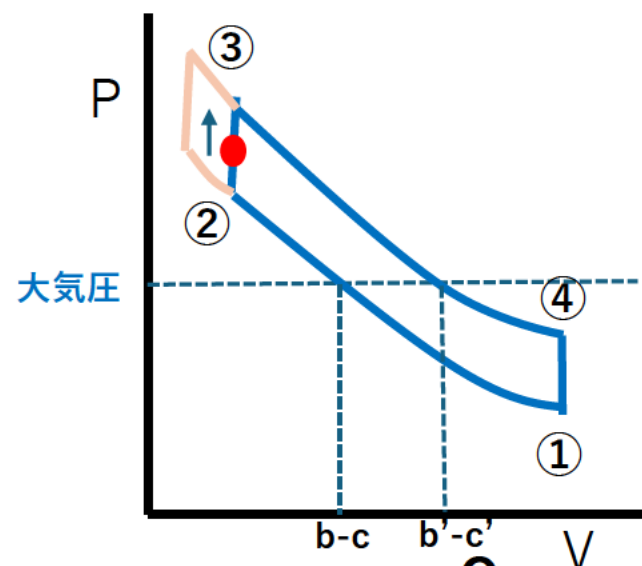


・ピストンA左面がbの位置を超えると制御ピストンCはアジャスタ（ストッパー）Dによって抑えられてこれ以上移動できないので、再びシリンダ内容積が縮小し等温圧縮が行われる（圧力が高くなっていく）。

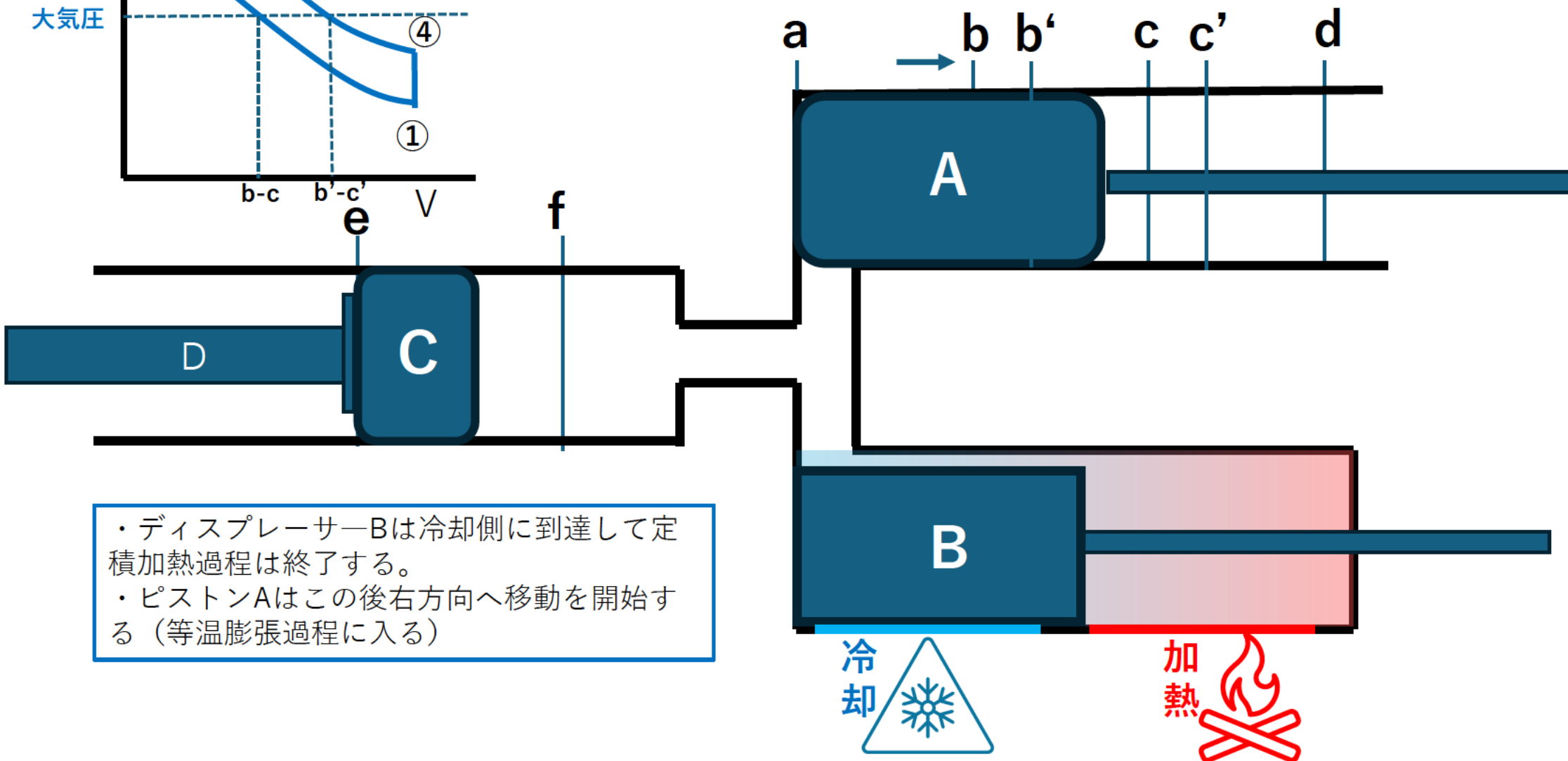
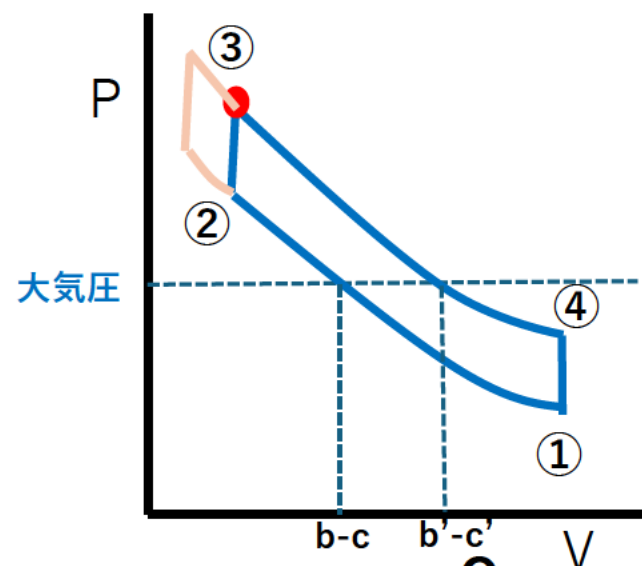
・結局、制御ピストンCが移動できる間はシリンダー内容積が変化せず圧縮ができないため、このピストンCの移動量分圧縮比が少なくなることになる（死容積の増加）。
・したがって、制御ピストンCの移動量をアジャスタDで調整することで圧縮比可変となり、エンジン出力も制御できることになる。



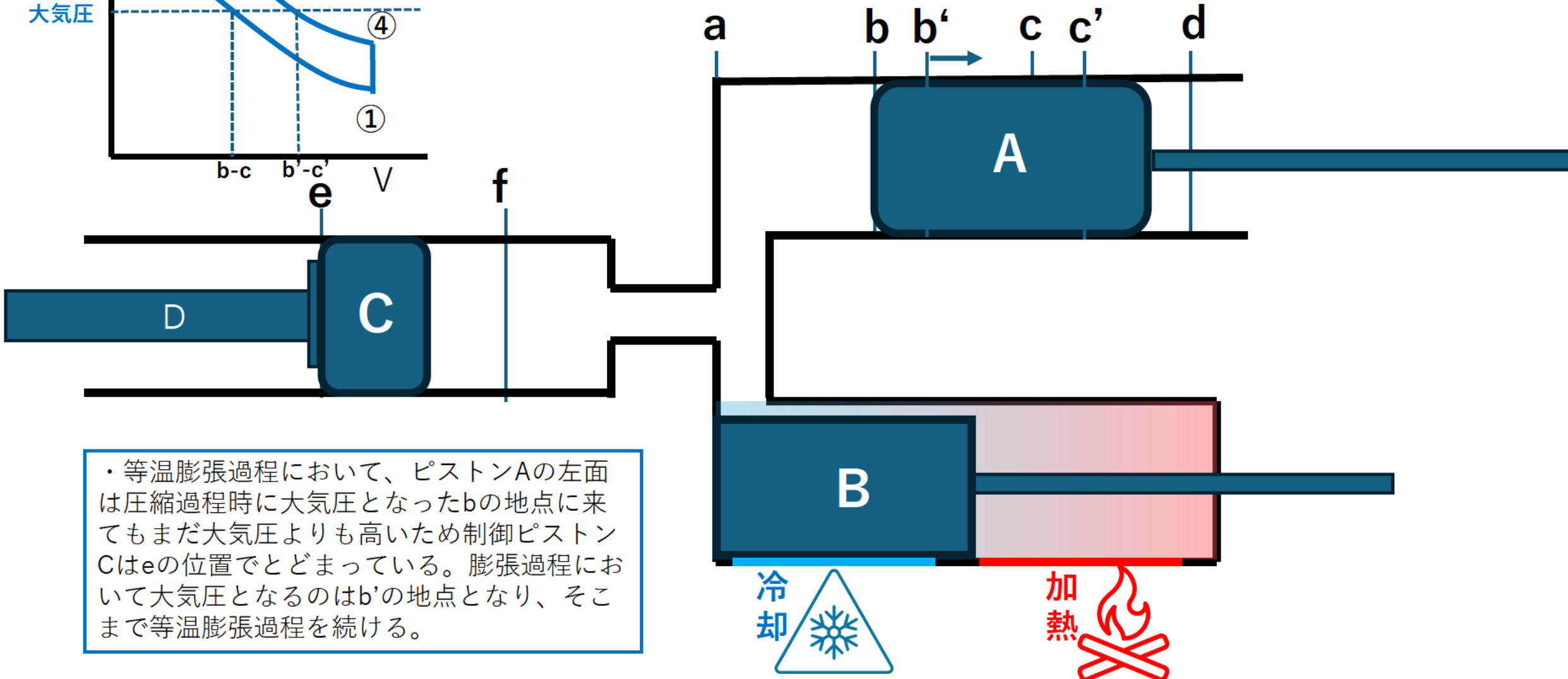
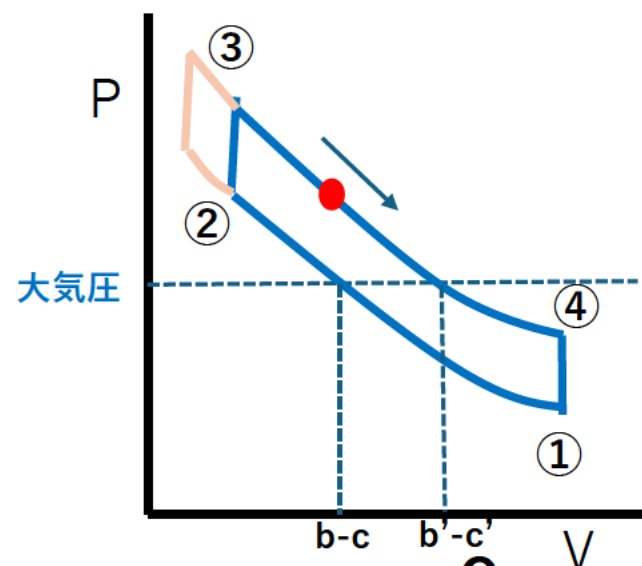
- ・ピストンAが上死点に来ると等温圧縮は完了する。
- ・結局、制御ピストンCが移動していた間はサイクル上では圧縮が行われなかったことになる。
- ・このため、Cがfの位置にとどまっていた場合の①②'③'④で囲まれたサイクルよりもeの位置まで移動した①②③④のサイクルの面積（正味仕事）の方が小さくなるためエンジン出力は低く抑えられることになる。



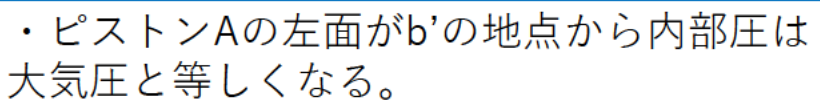
・ディスプレイサーBが左方向へ移動することで冷却側にあった空気が加熱側に移動させられるため、システム全体として加熱されたことになる。この間帯壁変化は無いので定積加熱過程となる。



- ・ ディスプレーサーBは冷却側に到達して定積加熱過程は終了する。
- ・ ピストンAはこの後右方向へ移動を開始する（等温膨張過程に入る）



・等温膨張過程において、ピストンAの左面は圧縮過程時に大気圧となったbの地点に来てもまだ大気圧よりも高いため制御ピストンCはeの位置でとどまっている。膨張過程において大気圧となるのはb'の地点となり、そこまで等温膨張過程を続ける。



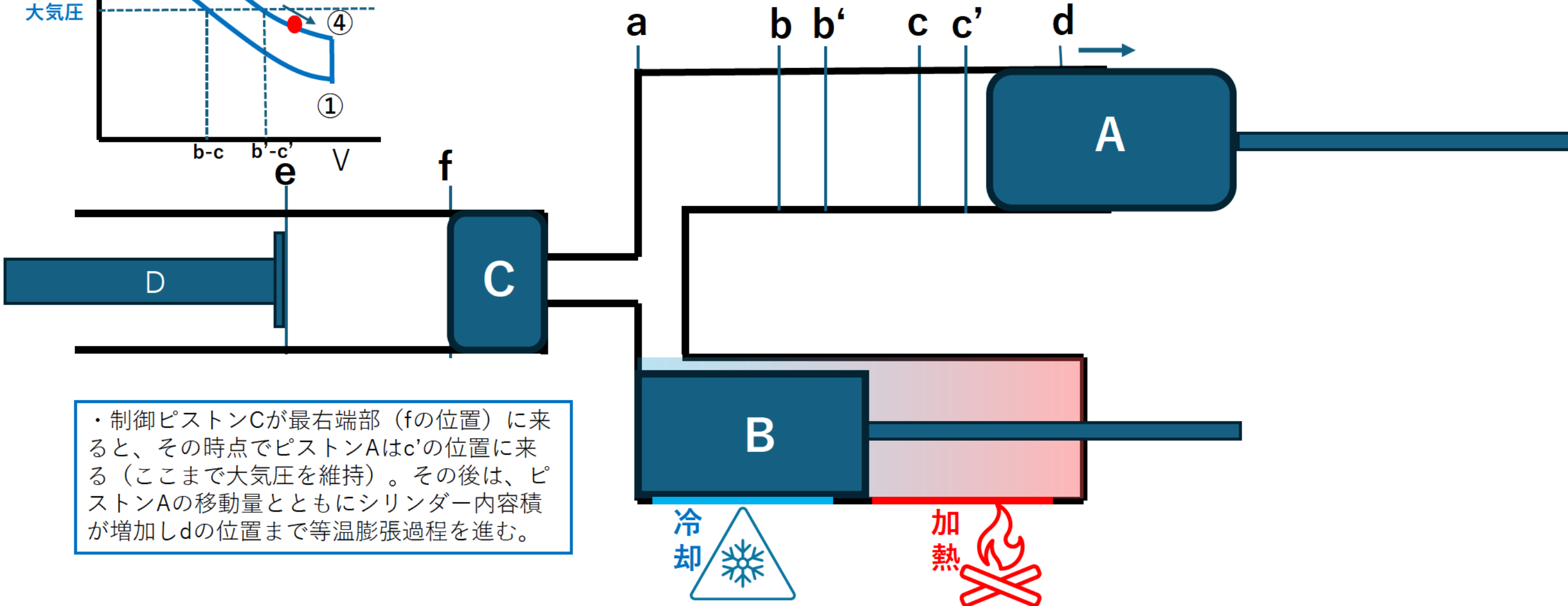
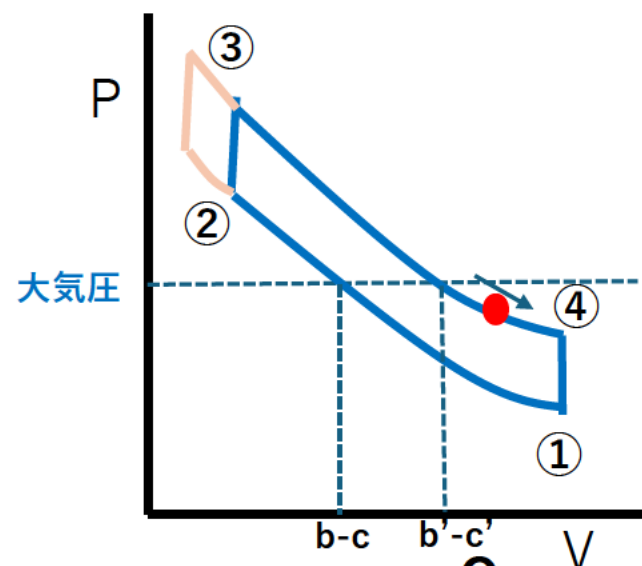
冷却

加熱

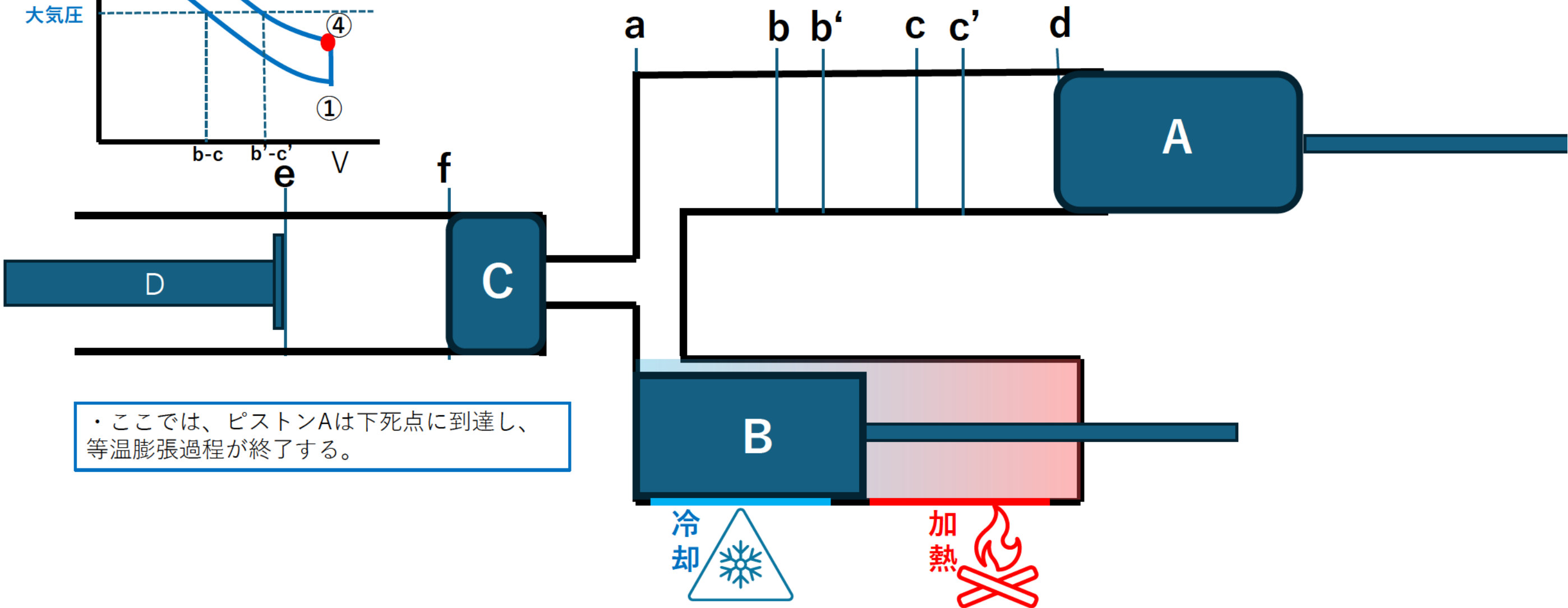
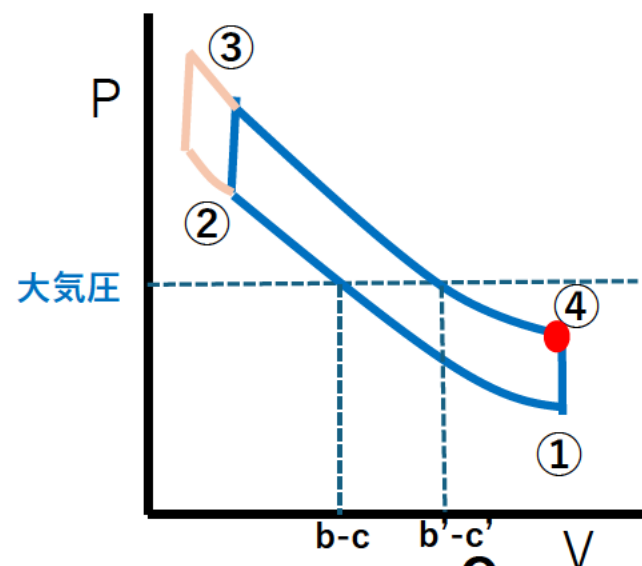


加熱

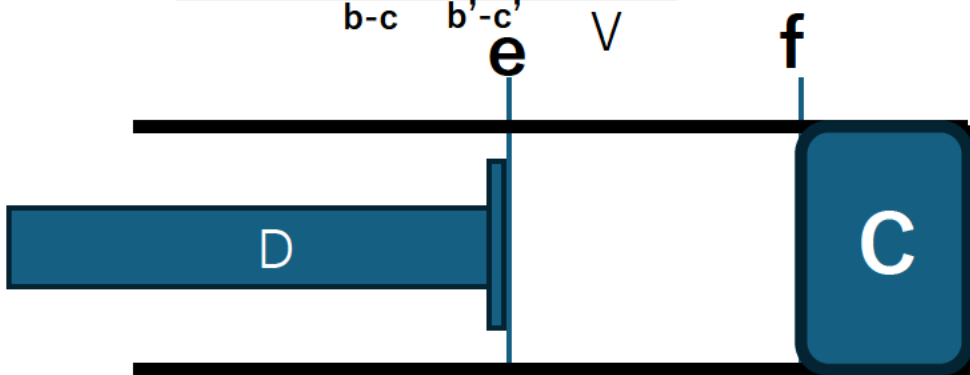
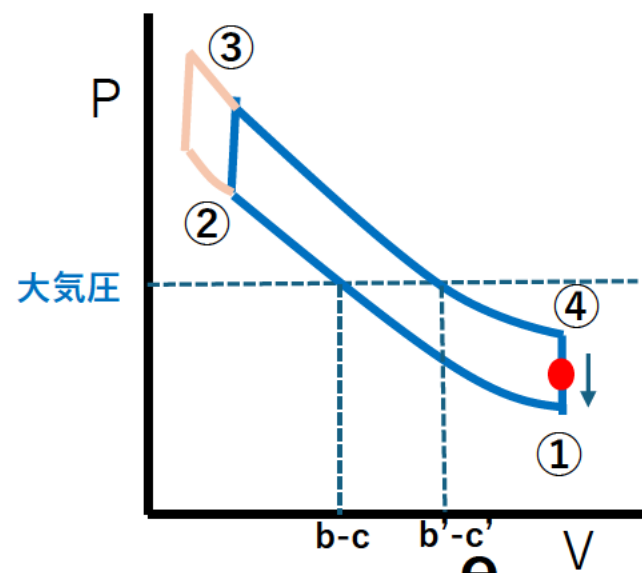
・PV線図上では大気圧地点でVは変化せず一定（グラフ上ではポイント位置で停止）である（クランクは回転していても理論容積Vは変化しない）。



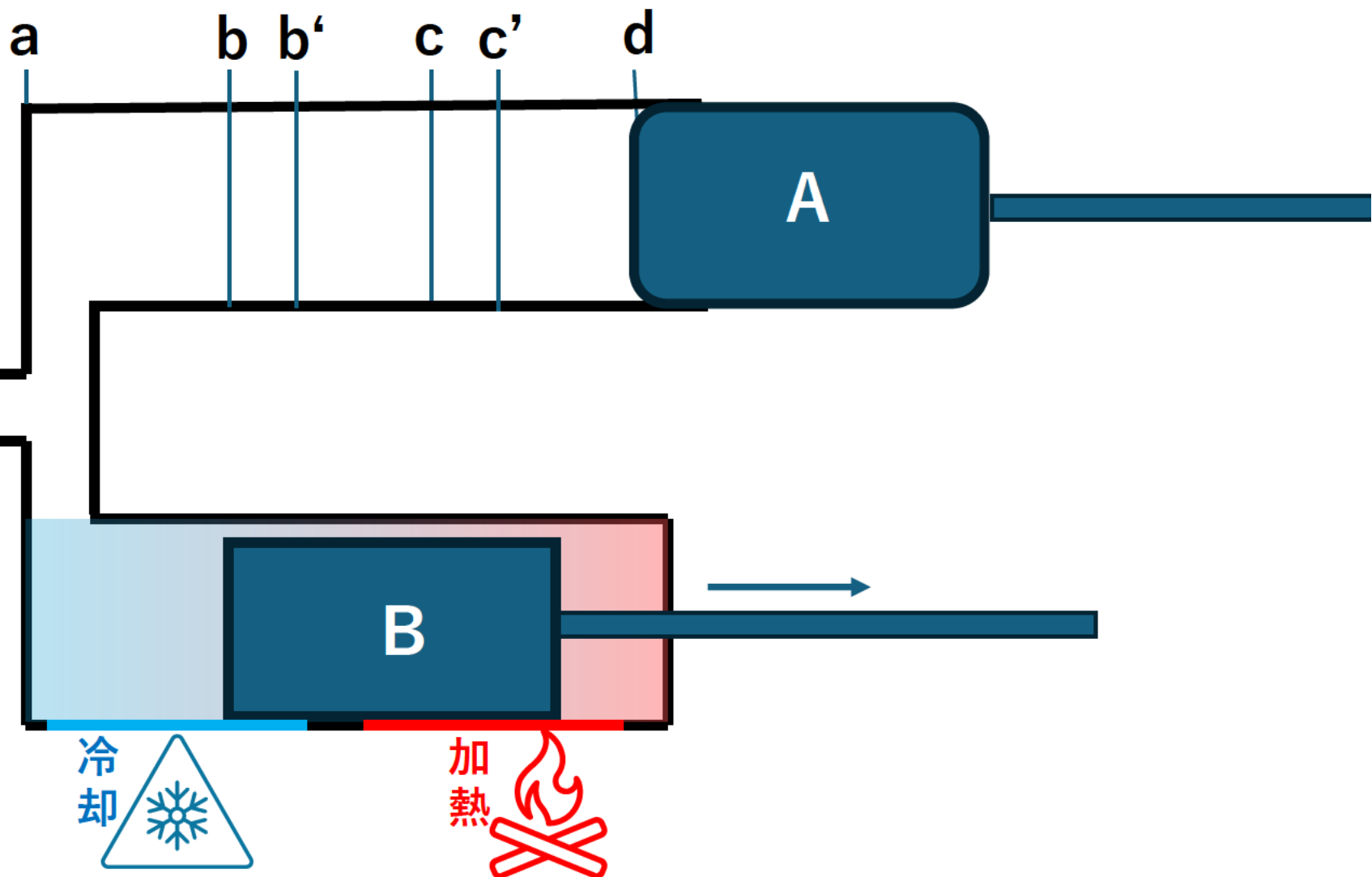
・制御ピストンCが最右端部（fの位置）に来ると、その時点でピストンAはc'の位置に来る（ここまで大気圧を維持）。その後は、ピストンAの移動量とともにシリンダー内容積が増加しdの位置まで等温膨張過程を進む。



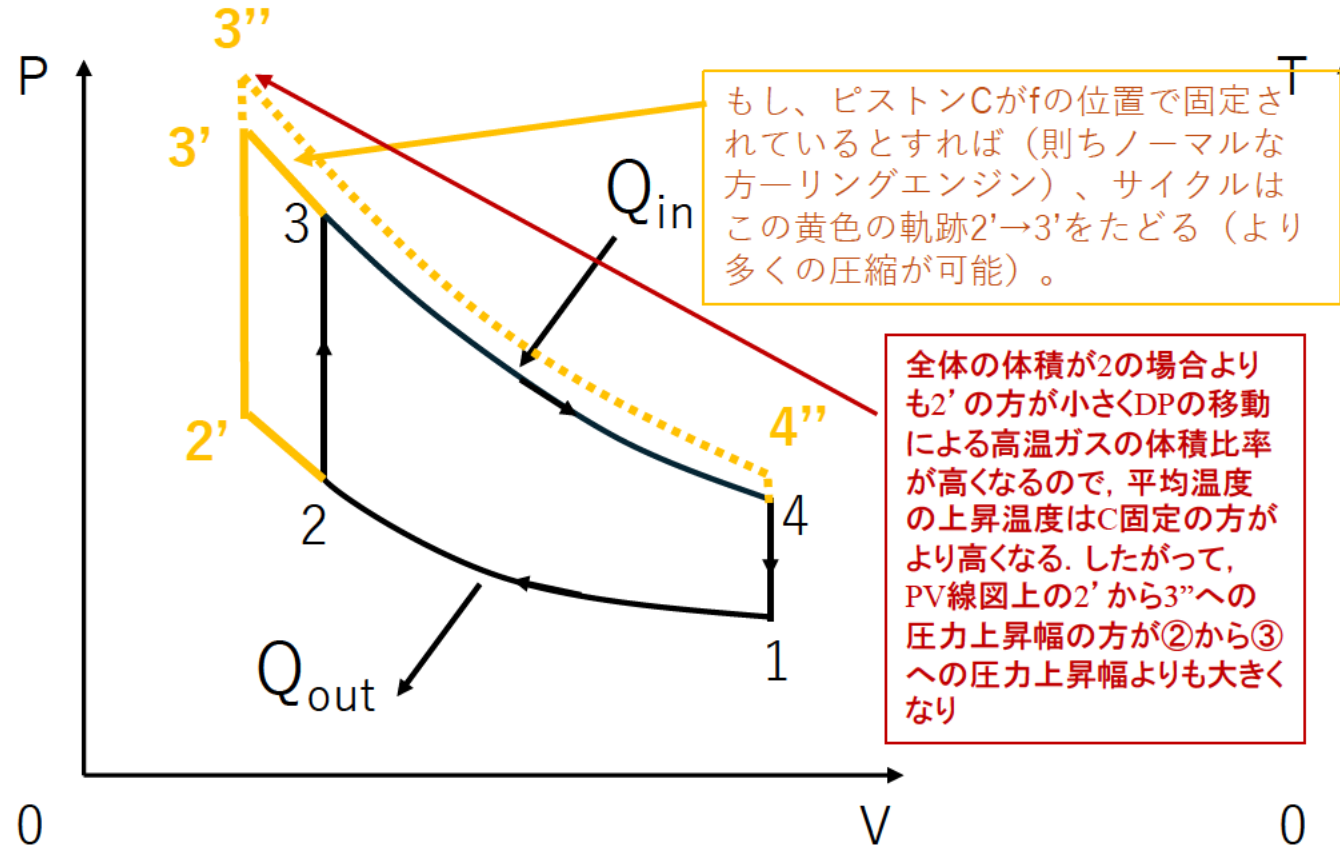
・ここでは、ピストンAは下死点に到達し、等温膨張過程が終了する。



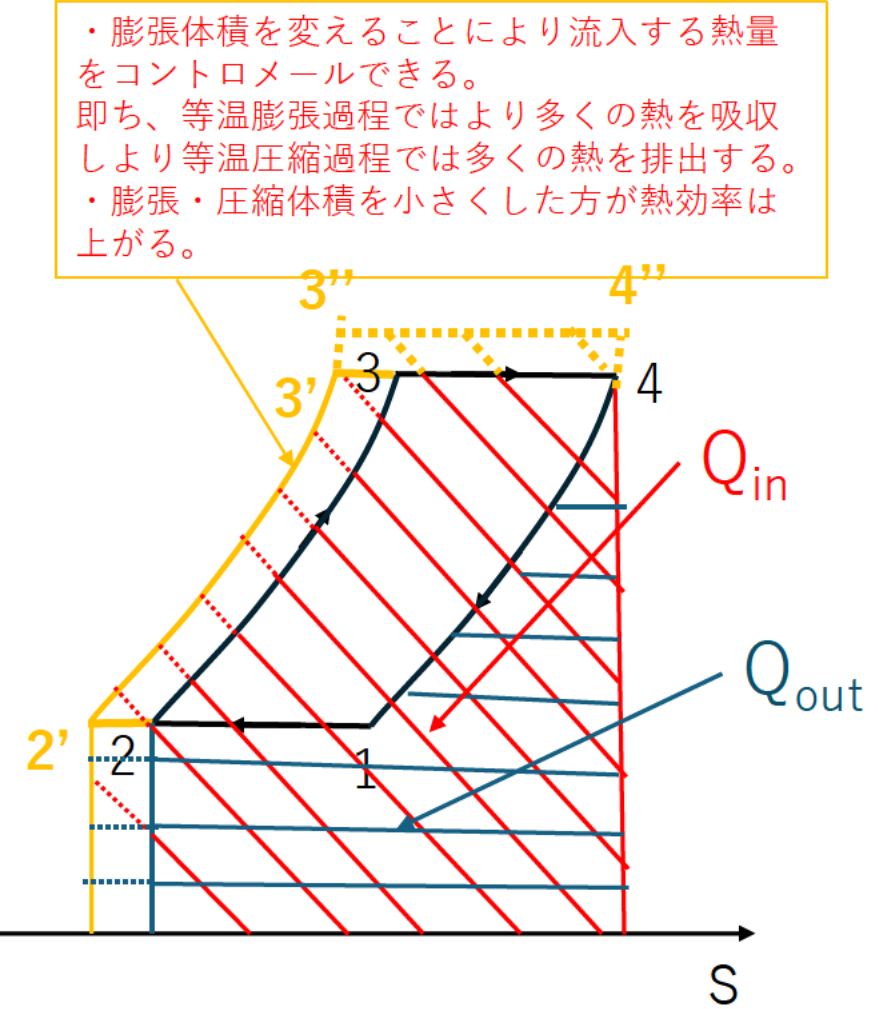
- ・ ディスプレーサーBが左方向へ移動し空気を加熱側へ移動させることで定積冷却過程を進む。
- ・ ディスプレーサーBが再び最初の位置（冷却側）に戻り次のサイクルが始まる。



出力制御機構の理論的効率について



P-V線図



T-S線図

圧縮比: $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$

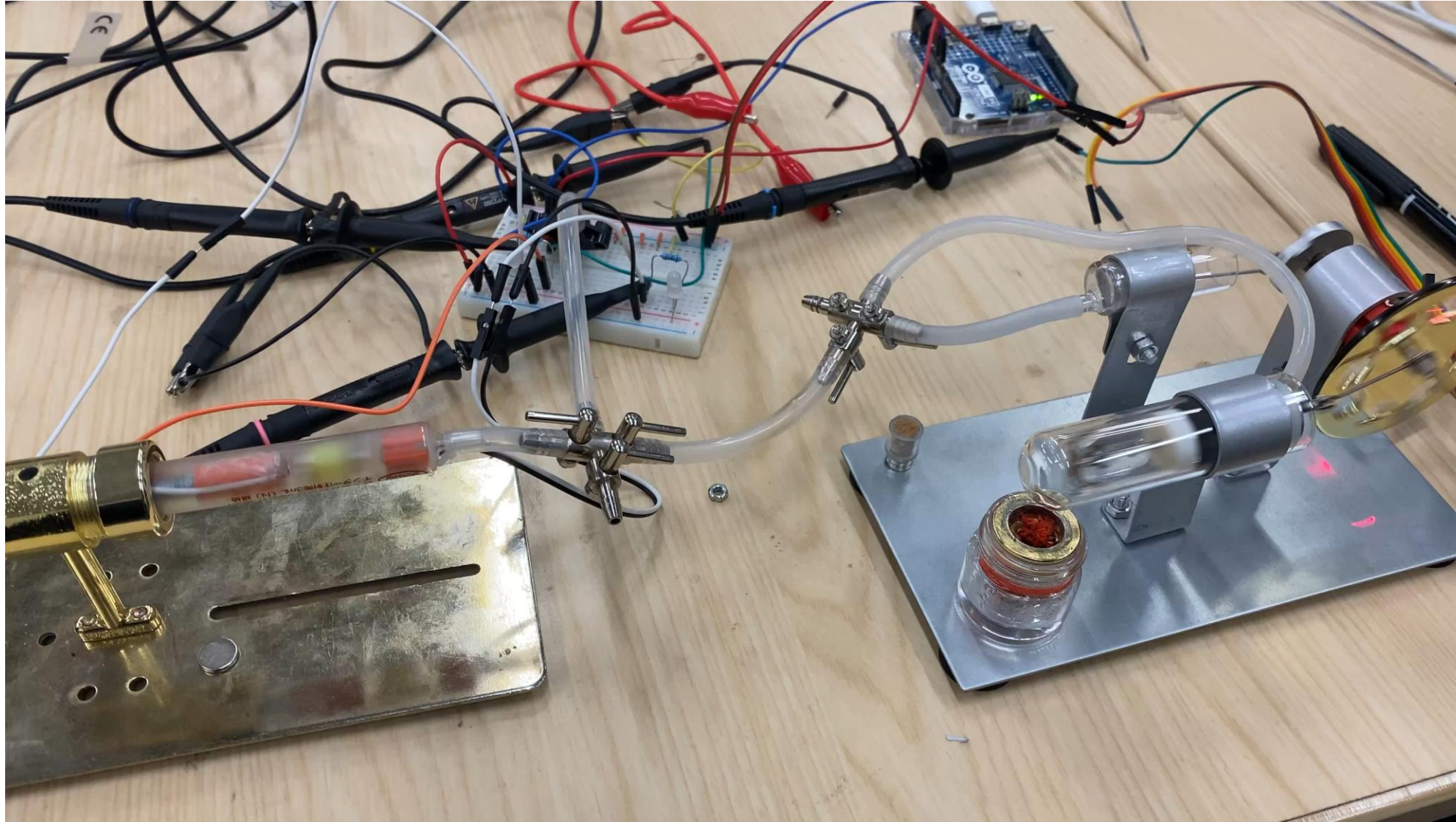
$$\text{理論熱効率: } \eta_{th} = \frac{Q_{24} + Q_{42}}{Q_{24}} = \frac{R(T_3 - T_1) \ln(\epsilon)}{c_v(T_3 - T_2) + RT_3 \ln(\epsilon)} = \frac{(\kappa - 1)(\tau - 1) \ln(\epsilon)}{(\tau - 1) + \tau(\kappa - 1) \ln(\epsilon)}$$

$$\text{再生器利用サイクル理論熱効率: } \eta_{th} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{RT_3 \ln \epsilon - RT_1 \ln \epsilon}{RT_3 \ln \epsilon} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

再生機を使った理論サイクルでは
圧縮比を変えても熱効率は変わらない！

実機を用いた実験

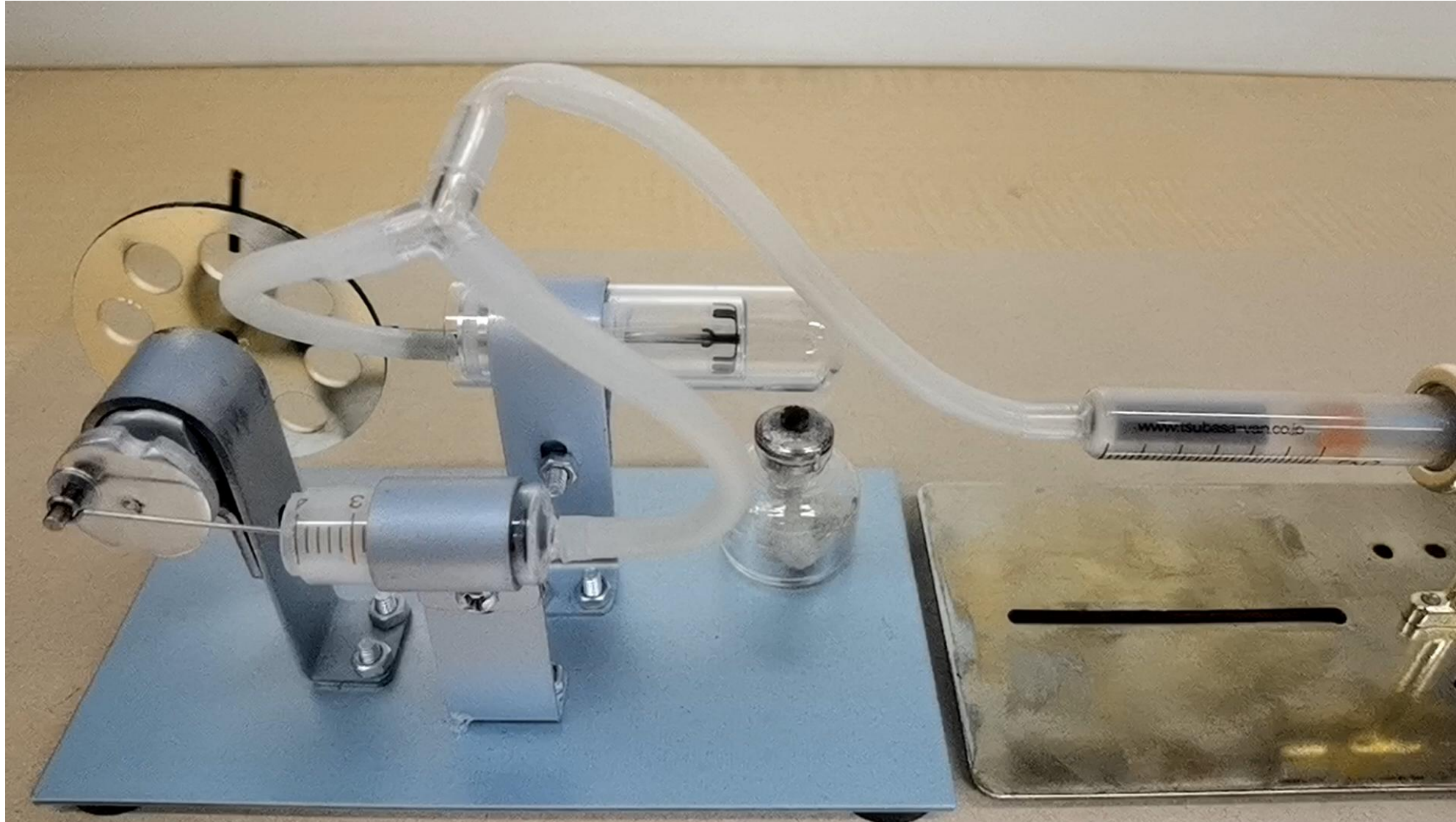
- 本原理に基づいた実験装置を作製し簡単な実験を行った。



- 【制御ピストンセンサ
実験動画】
- 制御ピストンと制御シ
リンダの両端に電極を
つけ、両端に接すると
電流が流れLEDが光る。
- そのタイミングをオシ
ロで取得する。

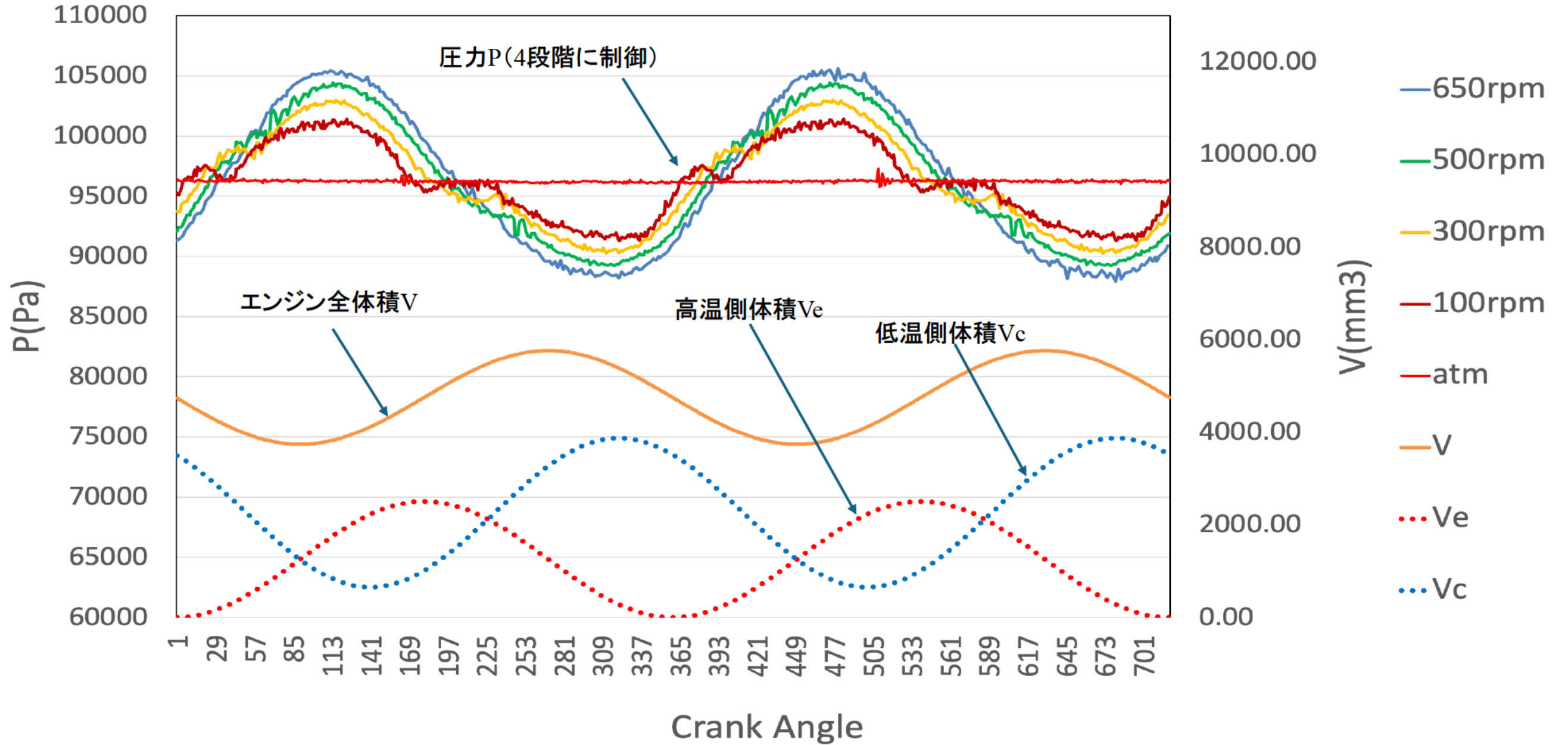
実機を用いた実験

- 高速度カメラによる撮影



- 【スロー再生実験動画】
- 高速度カメラによって実働中の各ピストンの動作を確認した（約600rpm）。

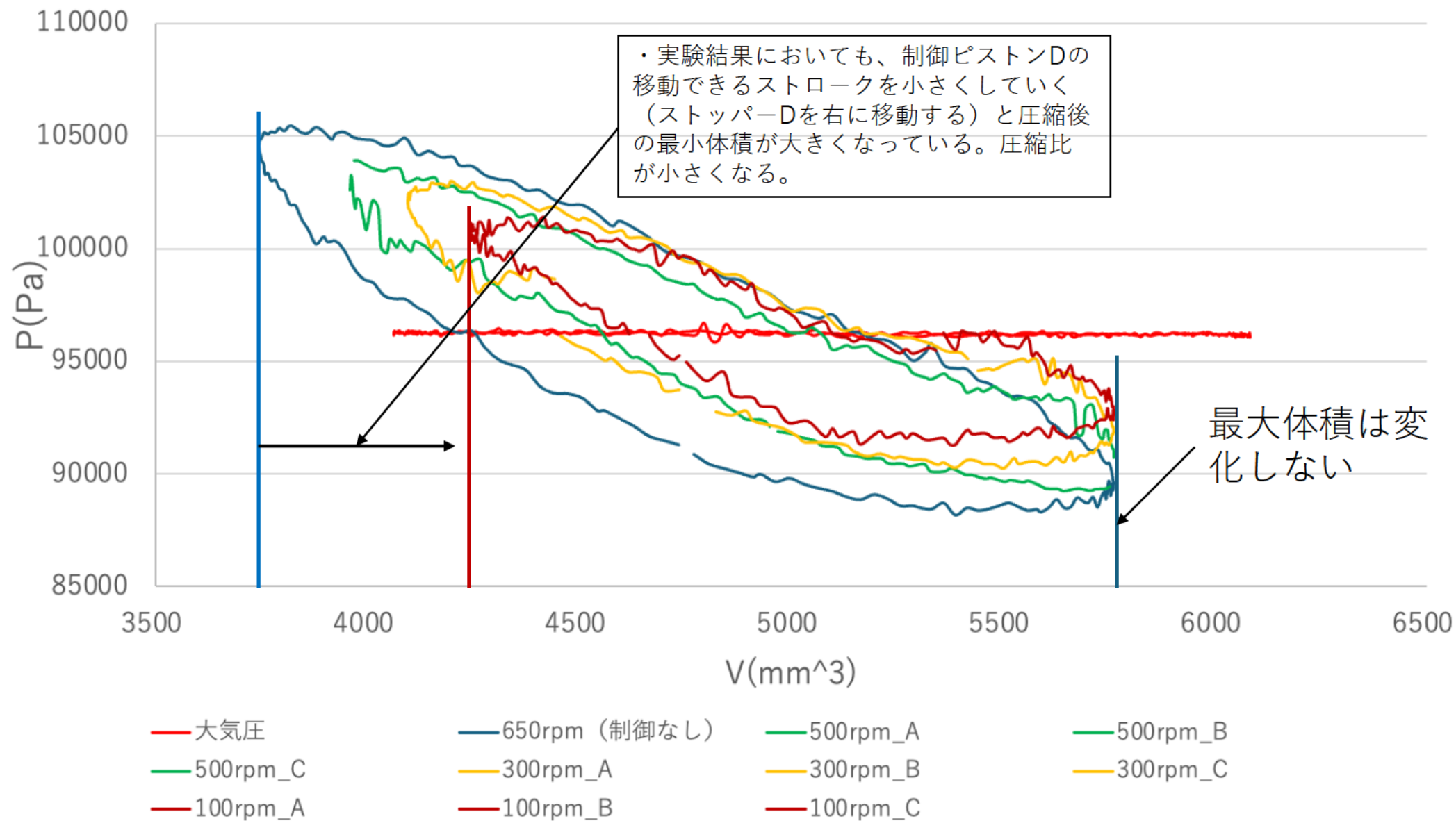
γ 型SE出力制御 P-V- θ



大気圧付近で圧力が水平になっている箇所が制御ピストンと同期している瞬間と思われる。

※ γ 型のため冷却空間の方が大きい

γ 型制御機構P-V線図



大気圧を境に圧縮率が減少。制御ピストン行程容積により最大体積は変わらず最小体積が増加。

想定される用途(1)

- 自動車などの乗り物にスターリングエンジンを用いる場合は外燃機関のため内燃機関に比べると装置の大型化など不利な面があるため実用的ではない。
- 教育用機械としては、動作を可能な限り遅くすることができるため原理の説明時など有効である。

想定される用途(2)

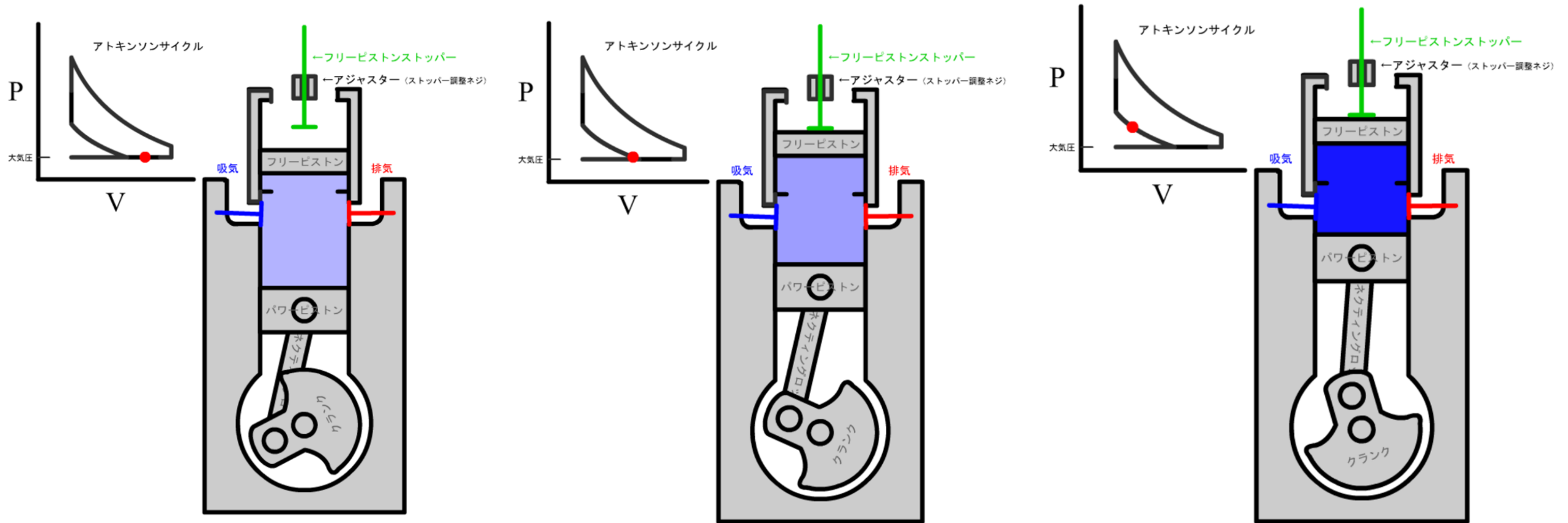
本システムの内燃機関への適用

- 外燃機関であるスターリングエンジンの出力制御のための手法として考案した本出力制御システムは、ガソリンエンジンやディーゼルエンジンなどのレシプロ式の内燃機関にも適用可能だと考える。
- これらの内燃機関は、1サイクルの中に必ず排気と吸気が必要であり、その間に系内は大気圧にリセットされる。
- 本出力制御システムでは、パワーピストンによって押されたことで生じる内部ガス圧と大気圧との差分圧力によって、出力制御ピストンが移動することで、非圧縮あるいは非膨張の行程を生み出すことができる。
- したがって、内部圧力が比較的に高圧な内燃機関であっても、吸気時に系内が一時的に大気圧となる圧縮行程においては、同様な効果が期待できる。
- 一方で、膨張行程においては、排気バルブが作動するまで（全膨張行程）系内圧力は大気圧よりも高いためこの仕組みは働かない。
- このことは、圧縮比よりも膨張比を大きくすることができるということである。そのため、本システムを使えば、これまでオットーサイクルエンジンの熱効率を上げるために開発された、**アトキンソンサイクル**や**ミラーサイクル**と同様の効果を得ることが可能であると考ええる。
- 特に、本出力制御システムは**圧縮比を連続的に調整**できるので、エンジンをより最適な状態にコントロールすることが可能である。したがって、今後は、本出力制御システムを内燃機関に適用させることで、自動車エンジンの燃費向上などにも貢献できるのではないかと考える。

想定される用途(2)

本システムの内燃機関への適用

- アトキンソンサイクルでの構築例とPV線図

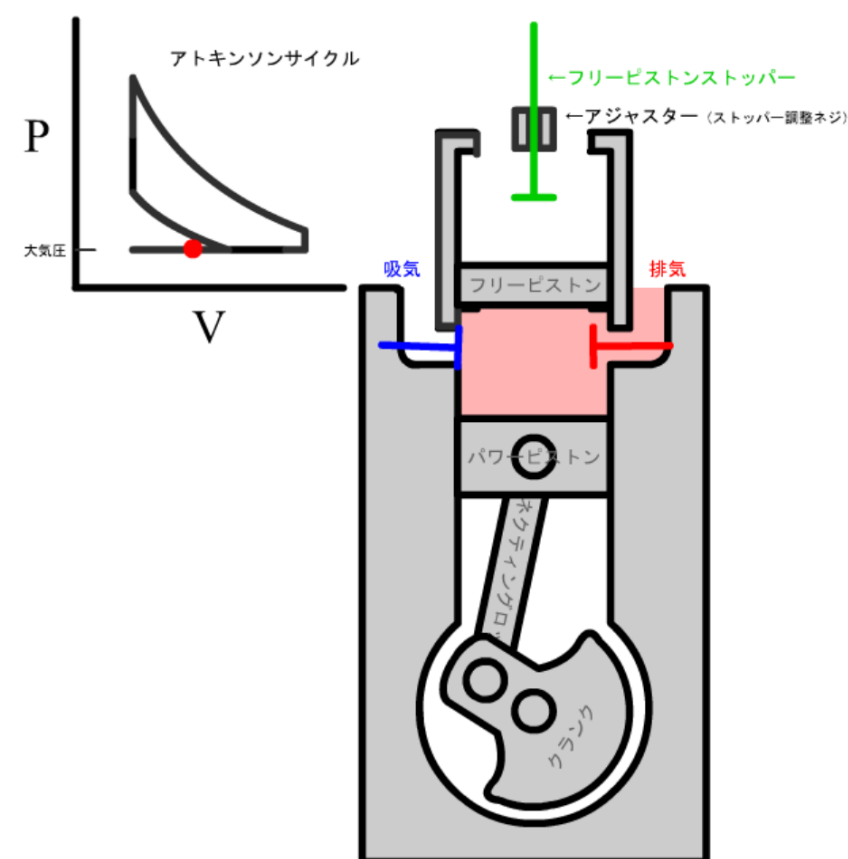
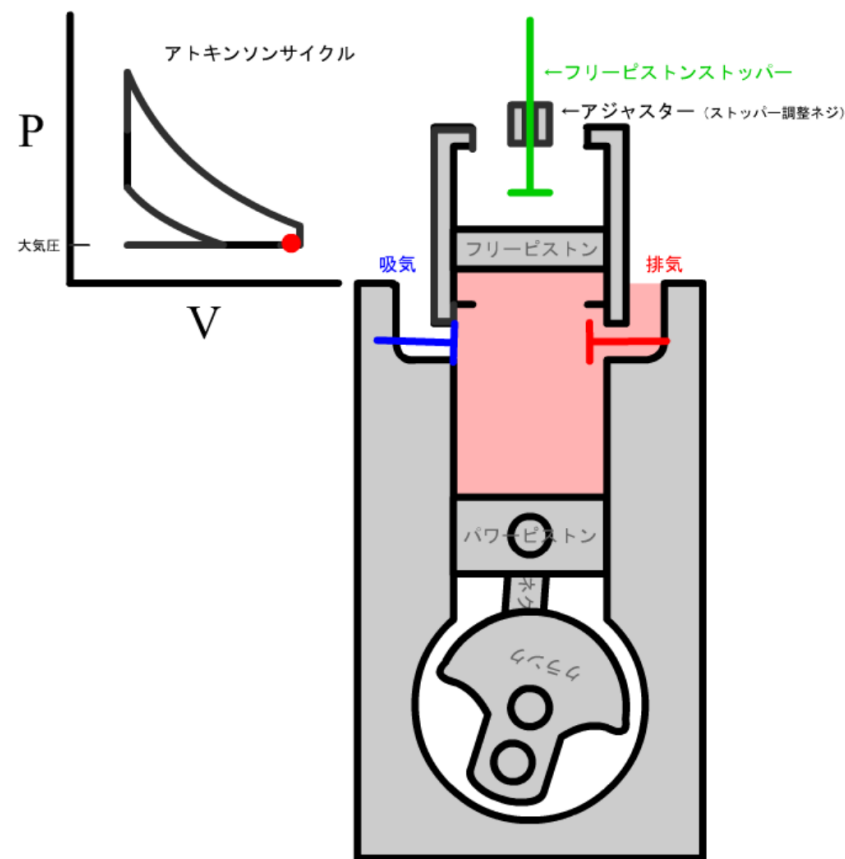
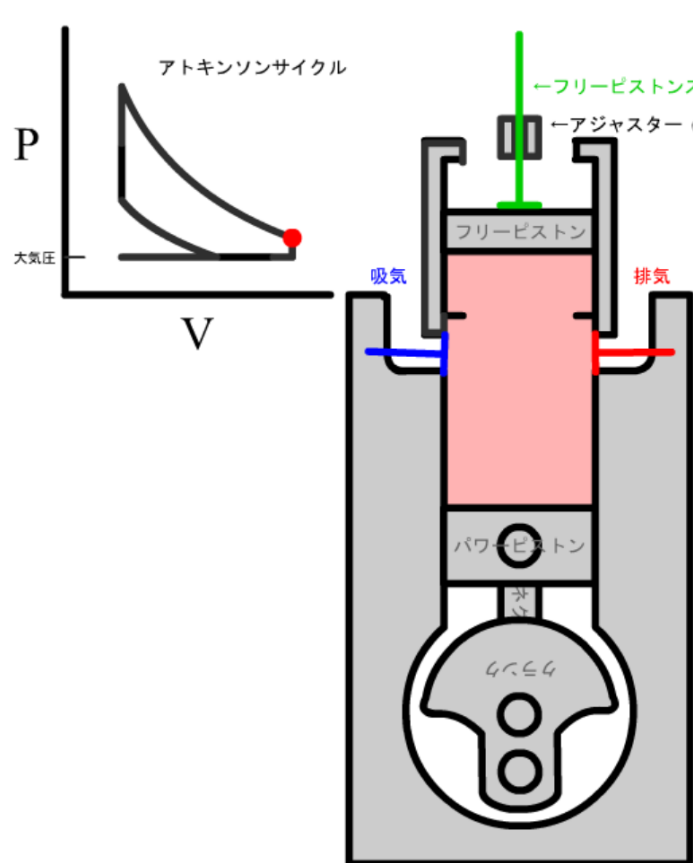


- 28

想定される用途(4)

本システムの内燃機関への適用

- アトキンソンサイクルでの構築例とPV線図

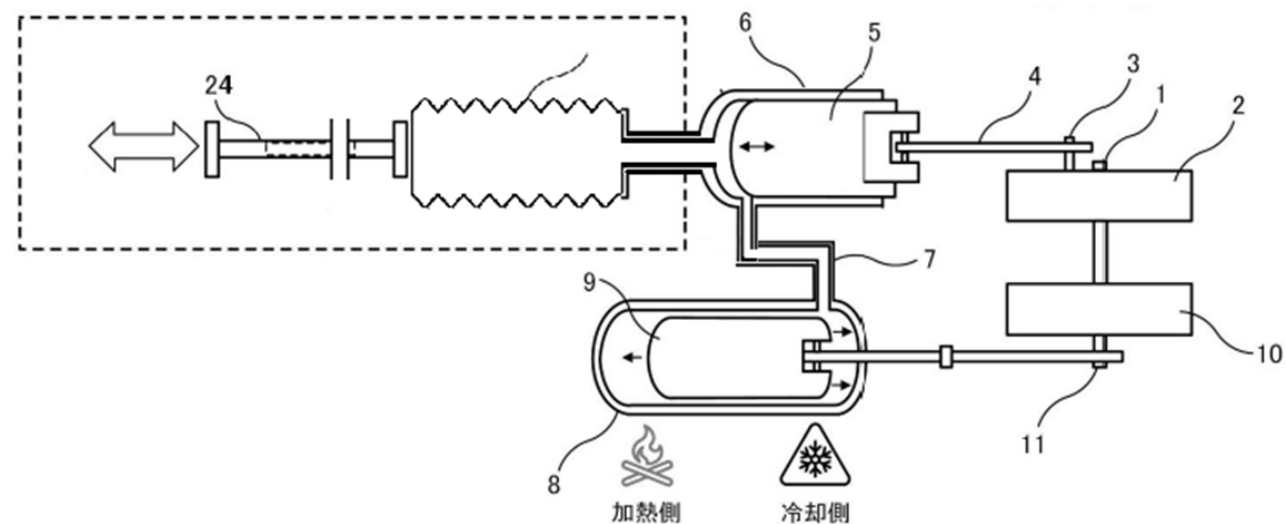
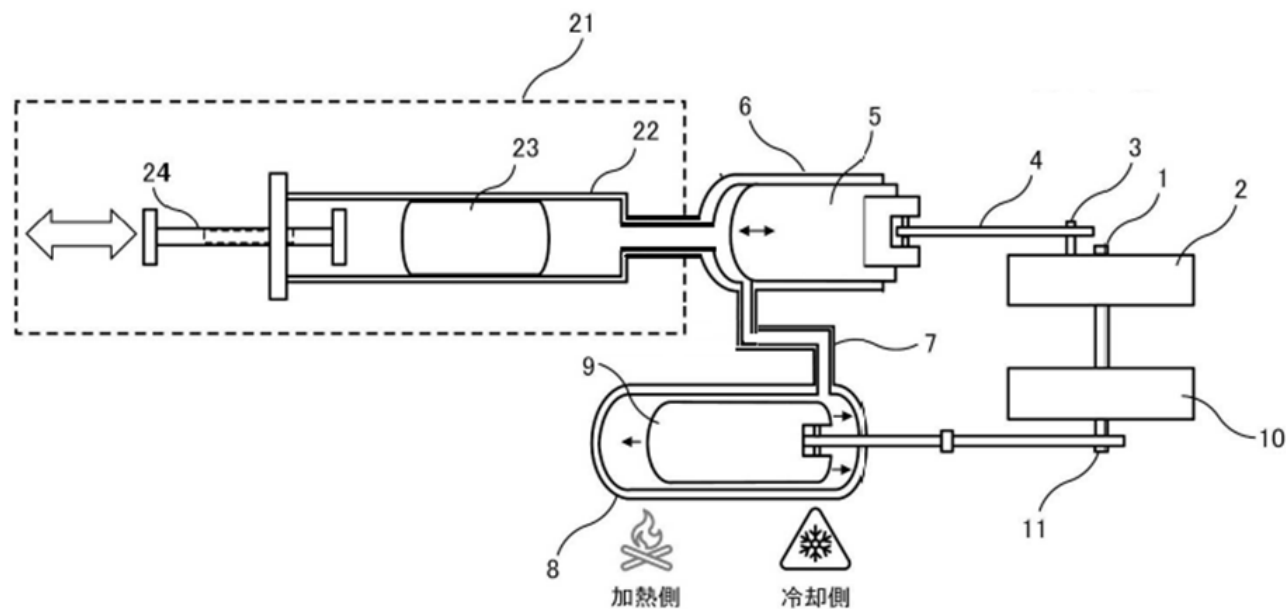


実用化に向けた課題

- 今回の実験で明かになったことは、出力制御ピストンの移動ストローク量をアジャスターによって調整し、無圧縮期間を変化させることで圧縮比をコントロールすることで最終的にエンジンの出力を制御できることである。
- 一方で、本システムの理論サイクルと実験データから得られるサイクルとの差異についての詳細な検討は行っていない。これまで、通常のスターリングエンジンには既にシュミット理論 (Schmidt.G, 1871) というシミュレーション手法があり、その理論から実験値をある程度見積もることが可能である。
- しかし、本システムはクランク角度と圧縮および膨張の行程は非連続関係（無圧縮の期間がある）にある。また、実際のサイクルでは、理想的な等温加熱や定積加熱は行われてはおらず、熱損失を考慮しなくてはならない。
- さらに、出力制御ピストンの慣性力や摩擦係数なども考慮した振動解析も必要となり、正確な体積と圧力および温度との関係を見積もるのは非常に困難である。
- 今後は、こうした各要素を考慮したシミュレーション手法を開発し、実験値との比較検討を行い、より効率の良い制御が可能なシステムとなるように開発を進める予定である。

実用化に向けた課題(様々な形式)

- 実用化に向けては様々な形式が考えられる



社会実装への道筋

時期	取り組む課題や明らかにしたい原理等	社会実装へ取り組みについて記載
基礎研究	・PV線図およびTS線図を用いた理論的な解釈が完了	
現在	・簡単な実験装置によって出力制御可能であることが立証できた。	
1年後	<ul style="list-style-type: none"> ・本システムを用いたスターリングエンジン模型教材を開発し授業などで実践 ・教材メーカーを選定し教材化を提案 ・内燃機関への応用として、アトキンソンサイクルへの応用を目指した実験装置を開発 	・環境エネルギー教育分野の財団からの研究費獲得を目指す
2年後	<ul style="list-style-type: none"> ・アトキンソンサイクル適用の実験を行い、学会で発表 ・自動車メーカーなどにアトキンソンサイクルへの適用を提案 	・学会・技術展示催しなどで自動車メーカー、部品メーカーなどへ本システムの紹介
4年後	<ul style="list-style-type: none"> ・本システムを用いたスターリングエンジン教材の商品化を検討 ・本システムを用いたアトキンソンサイクルエンジンの商品化を検討 	

企業への期待

- スターリングエンジン教材の製造を任せられる企業に期待
- アトキンソンエンジンについては自動車メーカーなどの企業と共同研究を希望

企業への貢献、PRポイント

- スターリングエンジン教材については、社会的要望が高い環境エネルギー教育で使用する教材として多くの教育現場で利用される可能性がある。
- アトキンソンサイクルへの応用では、運転中に圧縮比を変更できることから、出力状態に応じた最適な出力制御が可能となり、これまでにない低燃費および環境負荷の少ないエンジン開発に寄与できる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 出力制御装置、エンジンシステムおよび出力制御方法
- 出願番号 : 特願2025-140223
- 出願人 : 神奈川工科大学
- 発明者 : 佐藤智明、北原立朗

お問い合わせ先

神奈川工科大学

研究推進機構 研究支援部門

T E L 046－291 － 3304

e-mail liaison@kait.jp