

■

機械系コアテキストシリーズ C-3

エネルギー変換工学

鹿園 直毅

著



■

コロナ社

機械系コアテキストシリーズ 編集委員会

編集委員長

工学博士 金子 成彦 (東京大学)

[B: 運動と振動分野 担当]

編集委員

博士 (工学) 渋谷 陽二 (大阪大学)

[A: 材料と構造分野 担当]

博士 (工学) 鹿園 直毅 (東京大学)

[C: エネルギーと流れ分野 担当]

工学博士 大森 浩充 (慶應義塾大学)

[D: 情報と計測・制御分野 担当]

工学博士 村上 存 (東京大学)

[E: 設計と生産・管理 (設計) 分野 担当]

工学博士 新野 秀憲 (東京工業大学)

[E: 設計と生産・管理 (生産・管理) 分野 担当]

このたび、新たに機械系の教科書シリーズを刊行することになった。

シリーズ名称は、機械系の学生にとって必要不可欠な内容を含む標準的な大学の教科書作りを目指すとの編集方針を表現する意図で「機械系コアテキストシリーズ」とした。本シリーズの読者対象は我が国の大学の学部生レベルを想定しているが、高等専門学校における機械系の専門教育にも使用していただけるものとなっている。

機械工学は、技術立国を目指してきた明治から昭和初期にかけては力学を中心とした知識体系であったが、高度成長期以降は、コンピュータや情報にも範囲を広げた知識体系となった。その後、地球温暖化対策に代表される環境保全やサステナビリティに関連する分野が加わることになった。

今日、機械工学には、個別領域における知識基盤の充実に加えて、個別領域をつなぎ、領域融合型イノベーションを生むことが強く求められている。本シリーズは、このような社会からの要請に応えられるような人材育成に資する企画である。

本シリーズは、以下の5分野で構成され、学部教育カリキュラムを構成している科目をほぼ網羅できるように刊行を予定している。

- A：「材料と構造」分野
- B：「運動と振動」分野
- C：「エネルギーと流れ」分野
- D：「情報と計測・制御」分野
- E：「設計と生産・管理」分野

また、各教科書の構成内容および分量は、半期2単位、15週間の90分授業を想定し、自己学習支援のための演習問題も各章に配置している。

工学分野の学問内容は、時代とともにつねに深化と拡大を遂げる。その深化と拡大する内容を、社会からの要請を反映しつつ高等教育機関において一定期間内で効率的に教授するには、周期的に教育項目の取捨選択と教育順序の再構成が必要であり、それを反映した教科書作りが必要である。そこで本シリーズでは、各巻の基本となる内容はしっかりと押さえたうえで、将来的な方向性も見据えることを執筆・編集方針とし、時代の流れを反映させるため、目下、教育・研究の第一線で活躍しておられる先生方を執筆者に選び、執筆をお願いしている。

「機械系コアテキストシリーズ」が、多くの機械系の学科で採用され、将来のものづくりやシステム開発にかかわる有為な人材育成に貢献できることを編集委員一同願っている。

2017年3月

編集委員長 金子 成彦

地球温暖化防止や、燃料や素材といった天然資源の安定供給は、わが国だけでなく全世界的にもますます重要な社会課題となっている。産業革命以降発展してきたこれまでのエネルギー技術は、化石燃料や資源が安価で大量に安定に供給されることを前提にしたものであり、今後はエネルギー供給、転換、需要、循環など、あらゆる場面で技術の大幅な見直しが必要となってくる。技術開発においても、これまでは開発の方向性は所与のものでなにをすべきか明確だったものが、今後はなにをすべきかという出発点から考え直さなければならない時代となった。この大きなパラダイムシフトを乗り越えるためには、原理原則に立ち返ってゼロベースでなにが最善なのかを考える力が不可欠である。熱力学はそのための最強の知識体系であり、基礎基盤を与えるものである。ただ、熱力学に苦手意識を感じ、実用的に使いこなすことに不安を感じる人も多いと思われる。

本書は、大学の学部などで熱力学を一度学んでエンタルピーやエントロピーなどはもちろん知っているものの、その意味や使い方について、いま一つ自信がもてない大学院の学生や、熱力学についての知識をさらに深めて実際の機器設計に生かすために改めて勉強し直したい社会人などを主な対象としている。そのため、大学の学部教育で学ぶ熱力学について最低限の知識はすでにもっていることを前提として、熱力学第一法則や熱力学第二法則、状態量などの熱力学の基本的な内容の解説については最小限なものにとどめている。このような基礎的な内容は他の一般的な熱力学の教科書に譲り、本書は高効率なエネルギー変換機器の設計やエネルギー利用を目指す上で、熱力学を使いこなす

ための基本的な考え方や実用的な意味を学ぶことについて焦点を絞ったものとなっている。したがって、すでに所有している通常の熱力学の教科書も本書の横に携えてセットで読んでいただきたい。

熱力学は工学の中心をなす学問の一つであるが、実はとても実用的で便利な知識体系でもある。エネルギー資源の有効利用や地球温暖化防止も、その解決のためには熱力学を理解することが不可欠であり、熱力学を知らずしてエネルギー・環境問題は語れないといっても過言ではない。いきなり抽象的な概念や状態量などが天下りのに数多く出てきたり、難しい数式が展開されていたりすることが、多くの人に熱力学が難解だと感じさせる主な理由ではないかと思う。

エンタルピーやエントロピーなど、一体なんの役に立つのだろうと思う人も多いかもしれない。しかしながら、これらが導入されたのはそれなりの背景や理由があり、その動機や視点は非常にシンプルなものである。なぜ、エンタルピー、エントロピー、ギブス自由エネルギーという状態量が導入されたのか、そしてそれらがいかに便利なのか、といったことを認識することが理解の近道だといえる。一言でいえば、エネルギー利用においては「仕事」および「熱」を知ることが主たる目的であって、「状態量」はどちらかといえば結果として系内で変化するものであり、また「仕事」と「熱」を利用するという目的を実現するために必要となる単なる手段だということである。外界（周囲）にいるわれわれにとっては、系とやり取りする「仕事」と「熱」（そのうち特に仕事）こそが重要であって、「仕事」と「熱」がどれだけ取り出せるのか（あるいはどれだけ投入する必要があるのか）を議論するために、それに対応して系の内部で変化する状態量を考えるのである。

このように便利に定義された状態量のおかげで、やり取りする「仕事」と「熱」がどれだけの総量なのか（第一法則）、そしてそのうち特に重要な「仕事」が最大どれだけ取り出せるのか、そしてどれだけ目減りするのか（第二法則）、といったことを簡単に知ることができる。本書では、このように他の熱力学の教科書とはやや異なった表現で熱力学を記述するが、この見方に立つと、熱力学がいかに便利でありがたい知識体系であるかがよく理解できると思う。

本書では、エネルギー利用の目的である「仕事」や「熱」から見たときに、熱力学がどのように体系づけられているのか、そしてそれをエネルギー機器の設計や利用にどのように活用できるのかについて学ぶ。なお、太陽光や風力といった再生可能エネルギーの変動型電力が将来にわたって大きく増加することが期待される。このような変動型再生可能エネルギーを貯蔵・備蓄する意味でも、電池や電気化学による電力と化学エネルギーの高効率変換は今後とも非常に重要であり、本書ではこれまで機械工学の分野ではあまり扱われてこなかった電気仕事についても扱う。また、本書では機械工学、化学、電気化学など、これまでそれぞれが独自に発展してきた分野の内容を扱っているため、圧力の単位に bar や atm が混在していたり、kg や mol 基準であったり、その都度慣例に従ったものを使用している。読まれる際には、ご注意願いたい。

最後に、本書が将来のエネルギー問題を解決してくれるであろう若い方々に少しでもお役に立てば幸甚である。

2023年2月

鹿園 直毅

1章 「仕事」と「熱」の総量

- 1.1 概 要 2
- 1.2 定圧の閉じた系 2
- 1.3 定常流動系 7
- 1.4 膨張仕事（絶対仕事）と工業仕事 9
- 1.5 非膨張仕事 12
- 演習問題 15

2章 「仕事」と「熱」の内訳

- 2.1 概 要 18
- 2.2 可逆プロセスにおける仕事と熱の識別 18
- 2.3 不可逆プロセスの仕事と熱 24
- 2.4 定温・定圧プロセスの最大非膨張仕事 30
- 2.5 定温・定圧プロセスにおける自発変化 33
- 演習問題 34

3章 「状態量」の求め方

- 3.1 概 要 37
- 3.2 標準生成エンタルピー 37
- 3.3 標準生成ギブス自由エネルギー 40

3.4	ギブス自由エネルギーの圧力依存性	44
3.5	化学ポテンシャル	45
3.6	フガシティーと活量	47
3.7	化学平衡	50
3.8	相平衡	53
	演習問題	56

4章 エクセルギー（有効エネルギー）

4.1	概要	59
4.2	エクセルギーとギブス自由エネルギー	60
4.3	エクセルギー率 100% のエネルギー	61
4.4	温度が一定の熱源のエクセルギー	61
4.5	閉じた系のエクセルギー	63
4.6	定常流動系のエクセルギー	63
4.7	燃料のエクセルギー	68
4.8	熱交換のエクセルギー損失	70
4.9	タービンとコンプレッサーのエクセルギー損失	76
4.10	ランキンサイクルとブレイトンサイクルのエクセルギー	80
4.11	冷凍サイクルのエクセルギー	86
4.12	エクセルギーから見た火力発電の効率の変遷	91
	演習問題	94

5章 電池

5.1	概要	97
5.2	電池の電位差	98
5.3	標準電極電位	99
5.4	ネルンストの式	101
	演習問題	107

6章 エネルギー問題と熱力学

演習問題 111

引用・参考文献 112

演習問題解答 113

あとがき 127

索引 129

1 章

「仕事」と「熱」の総量

◆本章のテーマ

エネルギー利用においてわれわれが実際に使う仕事と熱が主たる目的であり、本書でも基本的に熱力学を仕事と熱を中心とした視点からとらえる。すなわち、われわれが仕事や熱を使った結果として系内で増減する状態量（エネルギー）を考える。本章では、われわれがよく遭遇する定圧の閉じた系と定常流動系を例に、系から取り出したり加えたりする「仕事」と「熱」の総量、およびその結果として系内で増減する状態量である「エンタルピー」の関係について学ぶ。なお、本章では、損失のない可逆的なプロセスを対象とする。

◆本章の構成（キーワード）

- 1.1 概要
- 1.2 定圧の閉じた系
熱力学第一法則，熱，エンタルピー
- 1.3 定常流動系
流動仕事，工業仕事
- 1.4 膨張仕事（絶対仕事）と工業仕事
膨張仕事，運動エネルギー，位置エネルギー
- 1.5 非膨張仕事
電気仕事

◆本章を学ぶと以下の内容をマスターできます

- ☞ 仕事・熱と状態量の違い
- ☞ 定圧の閉じた系と定常流動系におけるエンタルピーの意味
- ☞ 膨張仕事，工業仕事，流動仕事，非膨張仕事の違い

1.1 概要

われわれはガソリンや都市ガスといったエネルギーを使っているが、ガソリンやガスがほしくてこれらを買っているわけではない。本当に必要なのは、車の動力やお風呂の暖かさといった仕事や熱である。仕事や熱が必要だからエネルギーキャリアであるガソリンや都市ガスを買ったのであって、ガソリンや都市ガス自体は目的ではない。座学用の熱力学はさておき、実用的なエネルギー利用を目的とした熱力学では、この視点が特に重要である。われわれが直接使う仕事や熱があくまでも主役であり、仕事や熱を使った結果として系内で増減する状態量（エネルギー）は、ここではどちらかといえば脇役である。

このような理由で、本書では、われわれが系とやり取り（変換）する仕事および熱と、その結果として系内で変化する状態量（内部エネルギー、エンタルピー、エントロピー、ギブス自由エネルギーなど）とを明確に区別する。以下では、われわれが日常よく遭遇する定圧の閉じた系と定常流動系を例に、われわれが実際に使ったり投入したりする「仕事」と「熱」、およびその結果として系内で増減する状態量である「エンタルピー」の関係について考えてみる。なお1章では、損失のない可逆プロセス（reversible process）を対象とする。

1.2 定圧の閉じた系

物質の流入や流出はないが、仕事や熱のやり取りはある系を、**閉じた系**という。本節では、圧力が一定の閉じた系を加熱あるいは冷却する場合を考えてみよう。定圧では体積は変化し得るので ($dV \neq 0$)、閉じた系の損失のない場合に成り立つ**熱力学第一法則** (the first law of thermodynamics) $\delta Q = dU + p dV$ から明らかのように、加熱量 δQ と**内部エネルギー** (internal energy) の変化 dU とは等しくならない[†]。つまり、**状態量** (quantity of state, state quantity,

[†] ここで、 d は微小な差分量を、 δ は単に小さい量であることを表す。つまり、 dU は状態量 U の微小変化量であり、 δQ は単に小さい Q のことである。同様に δL は微小な仕事 L である。熱や仕事は状態量ではないので、差分とか変化量という概念はない。

state variable) である内部エネルギーの変化量 dU がわかっているとしても、**膨張仕事** (expansion work, pressure–volume work, displacement work) $p dV$ を計算しないかぎり、やり取りした熱の量 δQ を求めることはできない。どれだけ熱を加えなければならないか、あるいはどれだけ熱が取り出せるのかを知りたい人にとって、これはたいへん不便である。そこで、定圧 ($dp = 0$) の場合について、熱力学第一法則を以下のように書き換える。

$$\delta Q = dU + p dV = dU + p dV + V dp = d(U + pV) \quad (1.1)$$

なお、上式は暗黙的に相対座標系で定義されているため、位置エネルギーや運動エネルギーが明示的に現れない。また、繰返しになるが式 (1.1) では損失も無視されている。

損失が無視されていることは、以下のような事例を考えれば明らかである。例えば、固定された閉じた系の一端にピストンが取り付けられていて、そのピストンが外向きに動いている場合を考えてみよう。可逆過程では系内の圧力は一様で、ピストン表面も系の圧力 p で準静的に押されて外界に仕事をする。ただ、実際にはピストンに接している気体分子はピストンと同じ速度で動いており、他の固定境界に接した分子は静止している。このピストン近くの気体がピストンと同じ速度で動くためには、シリンダ内にこの気体を動かすための圧力勾配が必要である。つまり、不可逆な過程ではピストン近くの局所圧力は系の平均圧力 p よりも低くなっていて、これはすなわち不可逆過程における仕事は $p dV$ とは表記できず、系が外界になす仕事は可逆の場合の $p dV$ よりも小さいことを意味している。**運動量保存則** (law of conservation of momentum) から導かれる運動エネルギーの式を全エネルギーの保存式から減じると、結果として粘性散逸項 (≥ 0) が現れるのであるが、 $\delta Q = dU + p dV$ ではそれが無視されている。

式 (1.1) において、 $U + pV$ を改めて**エンタルピー** (enthalpy) $H \equiv U + pV$ として定義すると

$$\delta Q = dH \quad (\text{定圧}) \quad (1.2)$$

と表され、熱の出入りとエンタルピー変化量とが 1 対 1 に対応する。つまり、

定圧の閉じた系では、膨張仕事 $p dV$ を計算して内部エネルギー変化に足すという面倒な計算をしなくても、系の状態量であるエンタルピーの変化量さえわかれば、やり取りされる熱量をただちに知ることができる。なお、 U も p も V もすべて状態量なので、当然エンタルピー H も状態量である。

われわれが系とやり取りする熱と等しくなるように、エンタルピーという状態量を定義したのだと考えるとわかりやすい。例えば、やかんでお湯を沸かすとき、どれだけ加熱すればよいのか（＝どれだけ燃料を買えばよいのか）がわれわれの関心事である。このことをやかんとその中の水および発生する水蒸気を取り囲む**検査体積**（control volume）をとって考えてみる。加熱すると、水の内部エネルギーが増加（温度が上昇）して、やがてやかんから水蒸気が噴き出し、部屋の中の空気を押しつけて広がる。この空気を押しつける膨張仕事 $p dV$ の分だけ、内部エネルギーの増加 dU よりも余計に加熱する必要があるのである。すなわち、加熱量は最初の水と蒸発した水蒸気の内部エネルギー差ではなく、これに膨張仕事を加えたエンタルピー差に等しい。

他の例として、例えばプロパンを燃焼させたとき（ $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$ ）にわれわれが使える熱を考えてみる。この反応では、プロパン 1 モルと酸素 5 モルの計 6 モルから、二酸化炭素 3 モルと水蒸気 4 モルの計 7 モルが発生するので、圧力一定では体積が増加して周囲の空気を押しつける。その仕事の分だけ、われわれが利用できる熱は内部エネルギー変化よりも少ない。この場合も実際に使える熱の量は、反応物と生成物の内部エネルギー差ではなく、エンタルピー差である。

化学反応や相変化など、工業上重要な変化は定圧で進行する場合が多い。エンタルピーさえ定義しておけば、単にプロセス前後のエンタルピーの差分をとるだけで熱量を求めることができ、たいへん便利である。これが、エンタルピーが重宝される最大の理由である。反応熱や潜熱を求めるのに、プロセスでの膨張仕事 $p dV$ を計算し、これと内部エネルギー変化とを足し合わせたりしていたら、面倒この上ない。なお、機械工学では外部から加熱される熱を正、外部へなす仕事を正と定義する。したがって、**図 1.1** において系から外界に向

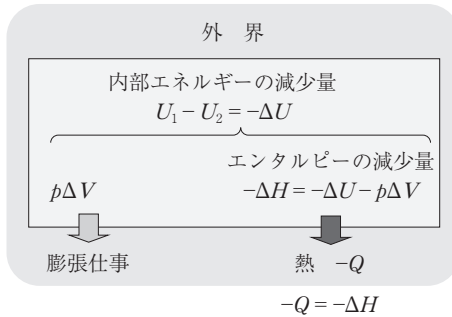


図 1.1 定圧の閉じた系における熱とエンタルピーの関係

かって移動する熱に負号が付いているのは、 $-Q (> 0)$ の熱が放熱されたことを表している。

ちなみに、伝熱の分野でよく使われる**温度伝導率（熱拡散率, thermal diffusivity）** $\alpha = \lambda / \rho c_p$ という物性値は、**定積比熱（specific heat at constant volume, constant volume specific heat, isovolumetric specific heat）** c_v ではなく**定圧比熱（specific heat at constant pressure, constant pressure specific heat, isobaric specific heat）** c_p が用いられている。これは、温度の式が内部エネルギーではなくエンタルピーの式から導かれているからである（定圧では $\delta q = dh = c_p dT$ 、ここで T は温度である）。われわれは、流れの動圧に比べて大気圧 10^5 Pa という相対的に高压の世界、つまり熱力学的に定圧とみなせる世界（ $p dV$ は無視できないが、 $-V dp$ は無視できる世界）に生活している。化学実験も試験管やフラスコの中で、大気圧下で行われる場合が多い。密閉容器で実験して破裂したら、たいへん危険である。現実の世界では、定積プロセスよりも定圧プロセスを扱うことのほうが圧倒的に多いのである。

多くの人が初めて熱力学を学んだときに、内部エネルギー U に pV を足したものとはいったい物理的に何を意味するのだろうか？と悩んだのではないかと思う。エンタルピーは、上述したようにわれわれがよく遭遇する定圧という条件下において、われわれが扱う熱を求めるときに便利なように定義されたというだけのことである。われわれが利用しない膨張仕事ははっきり区別して考えていますよ、ということを明確にしたにすぎない。

なお本書では、熱 Q 、体積 V 、エントロピー S 、内部エネルギー U 、エンタルピー H 、ギブス自由エネルギー G 、ヘルムホルツ自由エネルギー A 、エクセルギー E に小文字の表記を使う場合があるが、小文字で記述されているものは単位質量当り（あるいは単位モル数当り）で定義される熱 q 、比容積（specific volume） v 、比エントロピー（specific entropy） s 、比エンタルピー（specific enthalpy） h 、比ギブス自由エネルギー（specific Gibbs free energy） g 、比ヘルムホルツ自由エネルギー（specific Helmholtz free energy） a 、比エクセルギー e （specific exergy）であることを表す。

例題1.1

熱力学でよく用いられる第一法則の式 $\delta Q = dU + p dV$ は、エネルギー保存則（law of conservation of energy）から導かれるが、あくまでも損失がない場合に成り立つ式である。損失がある場合に、上述したピストン以外にこの式が成り立たなくなる例を示せ。

解答

例えば、断熱された ($\delta Q = 0$) 静止した剛体の箱 ($dV = 0$) の中に、注射針を使って流体を注入して、箱を閉じた場合を考える。流体は初期に乱れた状態にあるが、いずれ乱れは粘性によって減衰して静止する。 $\delta Q = dU + p dV$ の式からは $dU = 0$ となるはずだが、実際には粘性散逸により内部エネルギーが増加するため、 $dU = 0$ とはならない。

例題1.2

保存量（conserved quantity）とはなにか？

解答

一般に、検査体積における物理量のバランスを考えると、① 質量をもった実態として境界から流入・流出する量、② 検査体積内で生成・消滅する量、③ 異なる形態として外界とやり取り（変換）される量、の三つが検査体積において増減する結果として、④ 検査体積内の物理量が時間的に増減する。保存量とは、

索引

<p>【あ】</p> <p>アノード anode 98</p> <p>【い】</p> <p>位置エネルギー potential energy 8</p> <p>1次エネルギー primary energy 109</p> <p>【う】</p> <p>運動エネルギー kinetic energy 8</p> <p>運動量 momentum 7</p> <p>運動量保存則 law of conservation of momentum 3</p> <p>【え】</p> <p>エクセルギー exergy 59</p> <p>エネルギー energy 7</p> <p>エネルギー保存則 law of conservation of energy 6</p> <p>エリクソンサイクル Ericsson cycle 83</p> <p>塩橋 salt bridge 101</p> <p>エンタルピー enthalpy 3</p> <p>エントロピー entropy 18</p> <p>エントロピー生成 entropy production 24</p>	<p>【お】</p> <p>温度伝導率 thermal diffusivity 5</p> <p>【か】</p> <p>外燃機関 external combustion engine 85</p> <p>化学ポテンシャル chemical potential 45</p> <p>可逆プロセス reversible process 2</p> <p>化石エネルギー fossil energy 110</p> <p>カソード cathode 99</p> <p>活量 activity 50</p> <p>活量係数 activity coefficient 50</p> <p>カーボンニュートラル carbon neutrality 110</p> <p>カリナサイクル Kalina cycle 85</p> <p>カルノーサイクル Carnot cycle 61</p> <p>還元反応 reduction reaction 97</p> <p>【き】</p> <p>基準電極 reference electrode 101</p> <p>ギブス自由エネルギー Gibbs free energy 22, 30</p> <p>ギブスの相律 Gibbs' phase rule 56</p> <p>共電解 co-electrolysis 125</p>	<p>【け】</p> <p>検査体積 control volume 4</p> <p>【こ】</p> <p>高位発熱量 higher heating value 39</p> <p>工業仕事 technical work 8</p> <p>向流 counter flow 74</p> <p>固体酸化物形燃料電池 solid oxide fuel cell 14, 94</p> <p>コンバインドサイクル combined cycle 93</p> <p>【さ】</p> <p>最終エネルギー消費 final energy consumption 110</p> <p>再生可能エネルギー renewable energy 110</p> <p>再生サイクル regenerative cycle 83</p> <p>再生ブレイトンサイクル regenerative Brayton cycle 83</p> <p>再熱サイクル reheat cycle 83</p> <p>酸化反応 oxidation reaction 97</p> <p>【し】</p> <p>質量 mass 7</p> <p>自発プロセス spontaneous process 30</p> <p>自発変化 spontaneous change 33</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

習熟率
learning rate 93

状態量
① quantity of state
② state quantity 2

【す】

スケールメリット
advantage of scale 93

【せ】

生成物
product 39

成績係数
coefficient of performance 87

石炭ガス化複合発電
integrated coal gasification
combined cycle 94

絶対仕事
absolute work 8

ゼーベック係数
Seebeck coefficient 89

ゼーベック効果
Seebeck effect 89

全エンタルピー
total enthalpy 8

【た】

断熱効率
adiabatic efficiency 27

【ち】

中間冷却
inter-cooling 83

超臨界サイクル
supercritical cycle 84

直交流
cross flow 75

【て】

定圧比熱
① specific heat at constant
pressure

② constant pressure specific
heat

③ isobaric specific heat 5

低位発熱量
lower heating value 39

定常流動系
steady flow system 7

定積比熱
① specific heat at constant
volume
② constant volume specific
heat
③ isovolumetric specific heat 5

デマンドレスポンス
demand response 110

電気化学ポテンシャル
electrochemical potential 102

電気仕事
electrical work 12

電極
electrode 97

【と】

等エンタルピー膨張
isenthalpic expansion 29

閉じた系 2

トリプル発電システム
triple power generation
system 94

トリラテラルサイクル
① trilateral cycle
② variable phase cycle 85

【な】

内燃機関
internal combustion engine 85

内部エネルギー
internal energy 2

内部電位
inner potential 99

【に】

2次エネルギー
secondary energy 109

【ね】

熱拡散率
thermal diffusivity 5

熱機関
heat engine 14

熱中立点
① thermal neutral point
② thermoneutral point 126

熱浴
thermal bath 80, 84

熱力学第一法則
the first law of
thermodynamics 2

熱力学第二法則
the second law of
thermodynamics 24

ネルンストの式
Nernst equation 104

【は】

反応熱
heat of reaction 37

反応物
reactant 39

【ひ】

比エクセルギー
specific exergy 6, 66

比エンタルピー
specific enthalpy 6

比エントロピー
specific entropy 6

比ギブス自由エネルギー
specific Gibbs free energy 6

ヒートポンプ
heat pump 86

比ヘルムホルツ自由エネルギー
specific Helmholtz free
energy 6

非膨張仕事	
non-expansion work	12
標準エンタルピー変化	
standard enthalpy change	39
標準ギブス自由エネルギー変化	
standard Gibbs free energy change	40
標準周囲状態	
standard state of surroundings	59
標準状態	
standard state	38
標準水素電極	
standard hydrogen electrode	100
標準生成エンタルピー	
standard enthalpy of formation	38
標準生成ギブス自由エネルギー	
standard Gibbs free energy of formation	40
標準電極電位	
standard electrode potential	100
標準物質	
reference substance	38
比容積	
specific volume	6
開いた系	
open system	7

非理想溶液	
non-ideal solution	50
【ふ】	
ファラデー定数	
Faraday constant	102
不可逆プロセス	
irreversible process	24
フガシティー	
fugacity	47
ブレイトンサイクル	
Brayton cycle	80, 82
【へ】	
平衡	
equilibrium	33
平衡定数	
equilibrium constant	51
並流	
① parallel flow	
② co-flow	74
【へ】	
ヘスの法則	
Hess's law	38
ペルチェ効果	
Peltier effect	89
ペルチェ素子	
Peltier element	89
ヘルムホルツ自由エネルギー	
Helmholtz free energy	22

【ほ】

膨張仕事	
① expansion work	
② pressure-volume work	
③ displacement work	3

【ま】

マイヤーの関係式	
Mayer's relation	23

【む】

無次元性能指数	
dimensionless figure of merit	91

【ら】

ランキンサイクル	
Rankine cycle	80, 82

【り】

理想溶液	
ideal solution	50
流動仕事	
flow work	8

【れ】

冷凍機	
refrigerator	86
冷凍サイクル	
refrigeration cycle	86

【ろ】

ローレンツサイクル	
Lorenz cycle	85

[C]	[I]	[S]
COP coefficient of performance <i>87</i>	IGCC integrated coal gasification combined cycle <i>94</i>	SHE standard hydrogen electrode <i>100</i>
[H]	[L]	
HHV higher heating value <i>39</i>	LHV lower heating value <i>39</i>	SOFC solid oxide fuel cell <i>94</i>

— 著者略歴 —

- 1989年 東京大学工学部船舶工学科卒業
1991年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（船用機械工学専攻）
1994年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（機械情報工学専攻）
博士（工学）
1994年 株式会社日立製作所機械研究所勤務
2001年 株式会社日立製作所研究開発本部勤務
2002年 東京大学大学院工学系研究科助教授
2007年 東京大学大学院工学系研究科准教授
2010年 東京大学生産技術研究所教授
現在に至る

エネルギー変換工学

Energy Conversion Technologies

© Naoki Shikazono 2023

2023年4月10日 初版第1刷発行

検印省略

著者	しか	その	なお	き
発行者	鹿	園	直	毅
	株式会社		コロナ社	
	代表者		牛来真也	
印刷所	新日本印刷株式会社			
製本所	有限会社	愛千製本所		

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04536-9 C3353 Printed in Japan

(金)



©COPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。