

エネルギーを正しく理解するための入門講座

村井正治

目次

はじめに	03 ページ
基礎知識の習得と理解 (I)	05 ページ
【01】 エネルギーの種類	
【02】 貯めておけるエネルギー	
【03】 エネルギーと混同されがちなもの	
【04】 エネルギーの単位	
【05】 エネルギーは相互に変換できる	
【06】 エネルギーは相互に変換しやすいので注意する必要がある	
【07】 エネルギーは利用しても無くならない(重要)	
【08】 エネルギーには利用価値の高いものと低いものがある	
【09】 「利用価値の高いエネルギー」と「利用価値の低いエネルギー」ができる理由	
【10】 「利用価値の高いエネルギー」は「利用価値の低いエネルギー」に変換される	
【11】 利用価値の高いエネルギーの発生源は『核反応』である	
【12】 利用価値が低いエネルギーは宇宙に廃棄されている	
【13】 永久機関であることを素早く見抜くために	
【14】 化学エネルギーについて	
【15】 エネルギーに熱エネルギーが絡むと取り扱いが厄介になる	
【16】 熱の移動には方向性がある理由 (重要)	
【17】 一つの温度の熱源だけでは継続して仕事などに変換することができない	
【18】 熱エネルギーを 100%仕事などへ継続的に変換することはできない	
【19】 2つの熱源の温度差が大きいと仕事などへの変換率が高くなる	
【20】 熱エネルギーを仕事に変換する際の最大の効率	
【21】 化学エネルギーも 100%を仕事や電気に継続的に変換することはできない	
【22】 熱エネルギーの性質についての復習	
基礎知識の習得と理解 (II)	28 ページ
【26】 化学エネルギーを仕事や電気に変換できる上限は自由エネルギー	
【27】 多くの人が悩むエントロピーとはどんなものなのか	
【28】 熱力学的エントロピーと統計力学的エントロピー	
【29】 自然界ではエネルギーが関与する変化があればエントロピーは必ず増加する	
【30】 エンタルピーという用語について (反応熱・燃焼熱の計算方法)	
【31】 エクセルギーという用語について	
【32】 気体のする仕事について	
【33】 不可避免的に熱エネルギーに変換されてしまう現象	
【34】 仕事を電気エネルギーに変換する	
【35】 総合問題 ラジオメーターの羽根が回り続ける原理	
【36】 総合問題 「水飲み鳥」が動き続ける原理	
参考: 温暖化抑制対策	39 ページ
【41】 炭酸ガスを炭素と酸素に分解することを考えてはいけない	
【42】 炭酸ガスを原料に使用することを考えてはいけない	
【43】 わが国ではバイオエタノールを自動車の燃料に使用しても完全な炭酸ガス排出抑制にはな	

らない

- 【44】水素は化石燃料に代替できるエネルギー源ではない
- 【45】わが国では「CO₂フリー水素」は存在しにくい
- 【46】わが国では電気自動車でも炭酸ガスの排出を完全には抑制できない
- 【47】CO₂の排出を増やさないでエネルギーを消費するのは難しい
- 【48】燃料電池の発電効率を高めるためには電池を大幅に増やす必要がある
- 【49】わが国のバイオマスに過剰な期待をしてはいけない？
- 【50】人工光合成は技術が完成しても実用化にはならない
- 【51】水素は無尽蔵にあるという説明をしてはいけない
- 【52】不安定電源で水素を製造するコスト負担は小さくない
- 【53】水を太陽光で分解する技術を実用化するのは難しい
- 【54】空気中の炭酸ガスを吸収して回収する提案は実用的ではない
- 【55】炭酸ガスを燃料用のメタンに変換してはいけない

参考: 注意したい発表や報告の例.....47ページ

- 【61】水から化学エネルギーを取り出す
 - 【61-1】水で動く自動車
 - 【61-2】水から水素を製造すればエネルギーは無尽蔵に確保できる
 - 【61-3】水素エネルギーを使いこなせればエネルギー大国への道が開ける
- 【62】水道水の流れを利用して発電する
- 【63】燃料へ添加物を添加して発熱量を増やす
 - 【63-1】燃料へ添加物を添加して発熱量を増やす
 - 【63-2】水を攪拌しながら電気分解して得たものを燃料に混合する
- 【64】永久磁石を使ってエネルギーを取り出す
 - 【64-1】永久磁石で血行を促進し肩こりを治す
 - 【64-2】永久磁石を使う発電機の動力が削減できた
- 【65】100°Cの熱源だけで熱を電気に変換できる発電素子
- 【66】炭酸ガスを分解して炭素として固定する
 - 【66-1】炭酸ガスを炭素と酸素に分解する
 - 【66-2】炭酸ガスを炭素と酸素に電気分解する
 - 【66-3】炭酸ガスとメタンを反応させて炭素に分解する
 - 【66-4】炭酸ガスと水素を反応させて炭素に分解する
- 【67】炭酸ガスを原料にする
 - 【67-1】炭酸ガスからメタンをつくる
 - 【67-2】炭酸ガスを電解還元してエチレンなどを製造する
 - 【67-3】炭酸ガスの人工光合成でエチレンなどを製造する
 - 【67-4】有機化合物を使用して炭酸ガスをメタンに変換する
 - 【67-5】炭酸ガスと水からメタンを作る
 - 【67-6】炭酸ガスを光還元して一酸化炭素にする
 - 【67-7】炭酸ガスを光還元してメタノールにする
 - 【67-9】枯渇油田に炭酸ガスを注入してメタンに変換する
- 【68】自動車が発生する振動で発電する
- 【69】永久機関であることを見抜けなかった例
- 【70】水素社会は素晴らしい
 - 【70-1】水素を使用するニーズの開発が必要だ
 - 【70-2】水を太陽光で分解して水素をつくる
 - 【70-3】再生エネで発電した電力で水を電解して水素を製造するのでエコなのだ
 - 【70-4】アンモニアをエネルギーキャリアに使用する
- 【71】排熱をもっと有効に活用すべきだ
 - 【71-1】排熱の有効利用を促進すべき
 - 【71-3】家庭用コージェネレーションは魅力的だ
 - 【71-4】排熱を吸熱反応の熱源にして有効利用する
- 【72】人工光合成は素晴らしい

【73】多数の風力発電所を設置して北極の氷を増やす

付録：エネルギー関連技術・設備の概要……………66ページ

【81】熱を仕事に変換する

【81-1】内燃機関

【81-2】外燃機関（スターリングエンジン）

【81-3】火力発電設備

【82】水素ガスを製造する方法

【83】太陽光発電

【84】燃料電池の概要

【85】電気を蓄える

【85-1】蓄電池の概要

【85-2】キャパシタの概要

【86】ヒートポンプ

【87】蓄熱技術

【88】伝熱について

【89】風力発電

【90】電力の品質管理について

付録

エネルギー確保の難しさ……………79ページ

付録

用語集……………80ページ

はじめに

原子力発電の可否や地球温暖化などに人々の関心が集まり、エネルギーに関する議論が活発になってきました。

しかし、目に見えないこともあってエネルギーというものは必ずしも正しく理解されていないらしく、新聞やテレビ・ネット等で報道・発表されている内容にも技術的な間違いや勘違いが散見されます。

多くの皆さんはエネルギーに関して十分に知識は持っておられるのに、どうして間違いや勘違いが少なくないのでしょうか。確たることはいえませんが、知識の習得に関心が偏り、「深い理解」が不足しているのかもしれない。

エネルギーを取り扱う理論、とくに熱エネルギーが絡んでくると抽象的な説明が多くなり、いくぶん理解を得にくいのは確かですが、ごく初歩的な内容をきちんと理解すれば、容易に苦手意識や勘違いを払拭することができるはずです。

そこで、高等学校時代に理科が苦手だった人でも理解しやすいように、数式や専門的な用語の使用を極力ひかえた解説資料を作成してみました。

できるだけイメージを掴みやすいように説明したこともあり、厳密さとは縁遠いものになっていますが、高度な学問をすることを目的としないのであれば大きな問題はないはずです。

もし専門家になるための学問として勉強をされるのであれば厳密でハイレベルな内容も必要なのかもしれませんが、大多数の皆さんは報われることが少ない努力をするよりも、取り敢えず実用性を優先し、もし必要が生じたら後戻りをして必要な内容を取り込まれたほうが効率的に優れているのではないのでしょうか。

私ごとで恐縮ですが、学生時代にも複雑な数式を駆使して書かれている熱力学などの学問とは距離をおいていましたし、実用面で必要な初歩的な内容だけを理解していただけでしたが、困ったことはありませんでした。

難しい理論をマスターしていなくても世の中に氾濫している程度のエネルギーに関する情報なら大きな間違いをせずに対応できると考えており、そのことを多くの人に知ってほしいと思っています。

初歩段階の内容を軽視せず、納得できるまでは先を急がないようにして、苦手意識を克服してみましよう。きっと、明かりが見えてくるはずですよ。

皆様のご活躍をお祈りいたします。

なお、最近は地球温暖化に関する議論が盛んになっていることから、その議論に対応できるように重点をおいたために化学的な内容が多くなっています。

多忙な方は【22】程度まで理解して下さい。大半の問題には対応できるはずですよ。

【参考】 (理解しようと努力をする必要はありません。)

物理学の専門家の皆さんは「熱」を下記のように取り扱っておられるようです。ただ、いわゆる熱エネルギーといわれているものは分子などの粒子の運動エネルギーなのだということとは理解しやすいのですが、粒子の運動エネルギーがどの程度のエネルギー量なのかイメージしにくいために、あまり実用的ではないように思えます。

また通念を見直すための多大な努力が必要になるはずですよ。ということで、一般の人々がエネルギーに関して大きな誤解をしないことを目標にして学ぶのであれば、本質的な間違いが生じない範囲での脱線はゆるされるのではないのでしょうか。

- * 物理学では「熱」と「温度」は明確に区別される概念である。
- * 「熱」は「運動エネルギー」などと同じ範疇のエネルギーではない。「運動エネルギー」は状態量であり、「熱」は状態量ではない。
- * 「熱」は物体内に蓄えられるものではない。「仕事」と同様にある物体から別の物体へのエネルギーの移動としてのみ存在する。すなわち、温度の異なる物体から物体への自発的なエネルギーの流れを「熱」と呼ぶ。エネルギーを伝達する方法は、「熱」と「仕事」しかない。よって、「熱」はある物体に「仕事」以外でその物体に伝達されたエネルギーと定義される。なお、「熱」という形態を通して移動したエネルギーの量を「熱量」という。
- * 「熱」の形でエネルギーを加えると、蓄えられるエネルギーはもはや「熱」ではなく、構成する原子や分子の運動エネルギーや位置エネルギーの形をとる。
- * 「温度」は熱平衡状態にある原子や分子などの乱雑な並進運動の運動エネルギーの平均値であり、熱伝達を生じさせる性質をもつ。
- * 粒子の乱雑な並進・回転・振動などによる運動エネルギーの総量を「内部エネルギー」と呼ぶ。このエネルギーを日本では「熱エネルギー」と呼ばれることが多いが、正しくは「温度によるエネルギー」である。

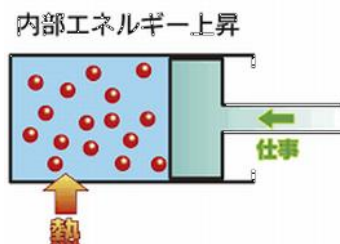
※『「熱」や「仕事」が状態量ではない』、という説明が理解しにくいようです。

状態（物質量と温度と圧力または濃度）が決まれば、どういう経路でその状態になったのかに無関係に

決まる量を状態量といいます。

たとえば「エンタルピー」や「内部エネルギー」などは状態量なので、最初と最後の状態が同じであれば、途中の経路がどうであっても出入りは同じになります。

状態量である内部エネルギーを変化させるのに「熱」と「仕事」をどのように配分するかは任意にできるので、直感的には、「熱」や「仕事」は状態量ではないよさだという気がするはずですが。



基礎知識の習得と理解 (I)

【01】エネルギーの種類

よく知られているように、エネルギーには色々な種類があります。主要なものについて簡単に注釈しておきます。

《熱エネルギー》……最も身近なエネルギーですが、他の種類のエネルギーよりも安定で他のエネルギーに効率よく変換させにくい欠点があります。高温の熱だと、エネルギーなのだ、と認識されやすいのですが、常温の熱はなんとなくエネルギーらしくないこともあって、エネルギーなのだ、との確信を持たれにくい傾向もあるようです。われわれが普段生活している環境に存在する常温の熱もエネルギーです。

勘違いしやすいのですが、温度が低い南極の氷なども熱エネルギーを持っています。さらに温度が下がって、もし絶対温度で0度になったと仮定したら、その物質はもはや熱エネルギーを持ち得なくなります。

《電気エネルギー》……非常に使い勝手がいい便利なエネルギーですが、そのままでは保存しにくいという欠点があります。そこで、多量の電気を使用する場合には、発電量と需要量が常に同じになるように厳密に管理しないと電気の質が低下して、問題を起こしてしまいます。

《光エネルギー》……太陽から降り注いでいる太陽光はいろいろな波長の光が混ざっています。紫外線や可視光線、赤外線などで、紫外線の波長は短く、赤外線の波長は長くなっています。なお、波長の短い光の方が大きなエネルギーを持っています。太陽光の資源量は膨大なのですが、直接的には保存しにくいことや希薄なエネルギーなので広い面積を使って光エネルギーを集めなくてはならないなどの欠点があります。

《仕事》……エネルギー関連で使われる『仕事』という用語は、ある物体に「力」を加えてその物体の位置を変化させたときの、「力の強さ」×「物体の位置の変化の大きさ」のことです。例えば、荷物を床から棚に上げるとき、荷物には持ち上げるために力をかけます。そして棚まで持ち上げたのだから、床から棚までの距離を移動させる「仕事」をしたことになります。

《位置のエネルギー》……ダムに貯められた水や坂道にあるブレーキをかけた車などのように、落下を防止する手段があれば保存することができるのですが、手段がないと保存はできません。

《運動エネルギー》……動いているものは運動のエネルギーを持っています。

運動エネルギーは、運動している物体の質量と、動いている速度の2乗に比例します。

$$(\text{運動エネルギー}) = (1/2) \times (\text{質量}) \times (\text{速度})^2$$

《化学エネルギー》……化学エネルギーとは化石燃料や水素などの燃焼（酸素との反応）や蓄電池の放電など、化学物質どうしを反応させた際に放出されるエネルギーです。ただし、化石燃料や水素そのものはエネルギーではありません。

なお、水や二酸化炭素（炭酸ガス）は地球上の一般的な環境下では極めて安定なので、利用しやすい化学エネルギーを持っていません。

《原子核エネルギー》……太陽や原子炉内や地球の中心部などのような核反応が起こる場所では巨大なエネルギー量を発生させることが可能です。ただ、一般的なエネルギーの説明とは切り離して説明されることが多いようです。

その他に、濃度差エネルギー、放射線のエネルギー、磁気エネルギー、バネのエネルギー、音波エネルギーなどいろいろなエネルギーがあります。これらのエネルギーも他の種類のエネルギーに変換することが可能です。

【02】貯めておけるエネルギー

大切なエネルギーは何時でも利用できるように貯めておきたいのですが、電気エネルギーなどは貯めておけないので、需要と供給を一致させる必要があります、不便です。

貯めておくことのできるエネルギーは、具体的には、化学エネルギー、位置のエネルギー、運動エネルギー、熱エネルギーなどです。

ただ、地球上では運動エネルギーは各種の摩擦によって熱エネルギーに変換されやすいし、熱エネルギーも温度の異なる熱エネルギーと混ざりやすいので長時間の保存には向きません。

そこで、エネルギーを貯めておくためには「化学エネルギー」と「位置のエネルギー」が重要な役割を担っています。

（余談）

地球も自転などによる運動エネルギーを持っていますが、地球の外部との間に摩擦や抵抗がほとんどないので運動エネルギーが保存されています。

厳密には月の影響をうけて運動エネルギーが少しずつ減っています。

【03】エネルギーと混同されがちなもの

私たちが動かない物体に『力（ちから）』を加えていると、自分の持っているエネルギーを使ってしまうので、「力」もエネルギーなのではないかと考えている人がおられるかもしれません。しかし、「力」そのものは「エネルギー」ではありません。

「力」と「エネルギー」を混同させないように注意しましょう。

例えば、大きなトラックを押して移動させようと懸命に押したのにトラックがびくともしなかった場合には、トラックに「力」をかけることはできたのですが、トラックが持っているエネルギーの量は増えておらず、エネルギーを与えることはできていません。トラックを押した人は自分の体内に蓄えてある栄養分を消費させたのですが、単に栄養分が持ち得る化学エネルギーを熱エネルギーに変換してしまっただけです。

磁石（永久磁石）はエネルギーを持っているのではないかと誤解されやすいようです。磁石に釘を近づけると釘が移動して磁石にくっついてしまうので、永久磁石は特殊なエネルギーを持っているのではないかと勘違いされやすいようです。

永久磁石自体は「特別な」エネルギーを持っているわけではありません。釘が永久磁石に対して位置のエネルギーを持っているだけです。

【注釈】上記の説明で、「特別な」と記したのは、永久磁石も位置のエネルギーや熱エネルギーはもち得るからです。N極とS極が南北逆さまに向いていた時には、多少の摩擦はあっても、本来の方向に戻ろうとして動きます。位置のエネルギーを持っていたからです。それでは、持っていた位置のエネルギーはどこに消えたのでしょうか。動いたときに、各種の摩擦が生じて、熱エネルギーに変換されたはずです。

化石燃料や水素ガス（水素分子）もエネルギーそのものではなく、エネルギーの発生源です。酸素などと混合されてはじめて化学エネルギーを持つことになります。

化石燃料や水素ガスを酸素が存在しない月に持って行っても、エネルギーを取り出すことはできないので、役に立ちません。

「水素分子」ではなく、水（H₂O）分子などのなかの「水素原子」は空気中の酸素とは反応しないのでエネルギー発生源にはなりません。水は水素原子と酸素原子から構成されているので水素原子は無尽蔵にあります。この水素原子を利用すればエネルギーも無尽蔵にあるのだ、などと勘違いしないようにしましょう。

【04】エネルギーの単位

エネルギーの単位としては、公式的にはジュール（J）という単位を使用することになっていますが、慣用的に他の単位も使用されています。

どの単位も相互に簡単に換算できるので、学術論文などの公式なものではない場合には、イメージしやすい単位を使っても問題はありません。

1 ジュールは1ニュートンの力がその力の方向に物体を1メートル動かすときの「仕事」です。地球上での標準的な重力加速度の下でおよそ102.0グラム（インスタントラーメン1袋くらいの重さ）の物体を1メートル持ち上げる時の「仕事」に相当します。

【注釈】1ニュートンは、1キログラムの質量をもつ物体に1m/秒²の加速度を生じさせる力と定義されています。

【注釈】重力加速度とは、高いところから物体を落としたとき、空気の抵抗が無い場合に、その物体の速度が単位時間当たりどれだけ速くなるかを示した量です。

ただ、重力加速度の値は地球上の場所によって異なるため、標準重力加速度を定めてその値を世界中で使うことにしています。国際度量衡総会で、標準重力加速度の値は9.80665 m/秒²と規定されています。なお、よく知られているように、（質量）×（加速度）＝（力）、です。

カロリー（cal）は熱量の単位で、かつては広く用いられていましたが、国際度量衡総会で、カロリーはできるだけ使用せず、もし使用する場合にはジュール（J）の値を併記すること、と決議されました。1カロリーとは、水1グラムの温度を1℃上げるために必要な熱量なので、イメージが掴みやすい利点があります。

キロワット時（kWh）という単位は電力の単位であるキロワット（kW）と時間（h）からなる単位で、1キロワット時とは、1キロワットの電力を1時間消費もしくは発電したときの電力量ということになります。

米国の資料などでは、英熱量（BTU）という単位をよく見かけます。カロリーの定義をヤード・ポンド法の単位に置き換えたもので、1BTU（British thermal unit）は1ポンドの重さの水の温度を華氏の尺度で1度上げるのに必要な熱量と定義されています。

●仕事エネルギー及び熱量の換算

J	kgm	kW.h	PSh	HPh	kcal
1	0.1020	0.0 ₅ 2778	0.0 ₅ 3777	0.0 ₅ 3724	0.0 ₃ 2389
9.0807	1	0.0 ₅ 2724	0.0 ₅ 3704	0.0 ₅ 3652	0.002343
3.6×10^6	3.671×10^5	1	1.3596	1.3405	860.0
2.648×10^6	2.7×10^5	0.7355	1	0.9859	632.5
2.686×10^6	2.739×10^5	0.746	1.014	1	641.6
4186	426.9	0.001163	0.001581	0.001559	1

0.0₅2778は、0.0000002778とあらわす。

【05】エネルギーは相互に変換できる

エネルギーには、よく知られているように、「熱」や「電気」や「運動」など、いろいろな種類のものがありますが、どんな種類のエネルギーも直接的または間接的に他の種類のエネルギーに変換することができます。いろいろなエネルギーが他の種類のエネルギーに変換される例を下に示してみます。括弧の中は、あるエネルギーから他の種類のエネルギーに変換する際に利用される手段です。

熱 ⇒ 仕事（気体の熱膨張を利用して物体を動かす）
 熱 ⇒ 化学エネルギー（熱を吸い取る吸熱反応をさせる）
 熱 ⇒ 光（白熱電球で照明する）
 熱 ⇒ 電気（熱を直接電気に変換する「熱電素子」を使って発電する）

電気 ⇒ 熱（電気ストーブを使って暖房する）
 電気 ⇒ 仕事（モーターで電車を動かす）
 電気 ⇒ 光（LED電球で照明する）
 電気 ⇒ 化学エネルギー（水を電気分解して得た水素を燃料に使用する）

仕事 ⇒ 電気（発電機を駆動する）
 仕事 ⇒ 熱（気体を圧縮して発熱させる）
 仕事 ⇒ 運動エネルギー（トロッコ押して速度を上げる）
 仕事 ⇒ 位置のエネルギー（揚水発電所のポンプで水をくみ上げる）

位置のエネルギー ⇒ 仕事（エレベーターの釣合錘が下がる）
 位置のエネルギー ⇒ 運動エネルギー（坂道でボールを転がす）

化学エネルギー ⇒ 熱（薪を燃やして暖房する）
 化学エネルギー ⇒ 電気（燃料電池で発電する）
 化学エネルギー ⇒ 仕事（人間が食物を食べて動き回る）
 化学エネルギー ⇒ 光（蛍が発光する。蠟燭をともし）

光 ⇒ 電気（太陽電池で太陽光発電をする）
 光 ⇒ 化学エネルギー（植物を生育させる）
 光 ⇒ 熱（光を黒色の物体に照射する）

運動エネルギー ⇒ 仕事（風の運動エネルギーで風車を回す）
 運動エネルギー ⇒ 熱（走っている自転車にブレーキをかける）

【06】 エネルギーは相互に変換しやすいので注意する必要がある

エネルギーにはいろいろな種類がありますが、比較的簡単に相互に変換することができるので、常にエネルギー全体を眺めておくことが大切です。

例えば、自分は太陽光で発電した電気を買って使用しているのだ、と主張してみても、かならずしも環境に優しい訳ではない場合もあります。

もし自分が太陽光を利用して発電した電気をつかっているのだと仮定したら、他の人が化石燃料を使用して発電した電気を使わざるを得ないことになり、社会全体で考えれば自分が環境問題に貢献していることにはならないのかもしれない、ということまで考えを進める必要があります。

太陽電池で発電した電力で水を電気分解して水素ガスを製造し、その水素ガスを自家発電や自動車の燃料にしたら炭酸ガスを排出しないはずだ、と勘違いしがちです。

しかし、太陽電池で発電した電力を水の電気分解に使用せずに電力系統に流したら、化石燃料を使っている火力発電所での発電量を減らすことができ、結果として炭酸ガス（二酸化炭素）の排出量が削減できるはずですが。

言い換えれば、自家発電や自動車などの燃料として水素ガスを使用しても炭酸ガスの排出が大幅に減るわけではありません。

以上のように、エネルギーはどんな種類のもので「所詮は同じエネルギーなのだ」ということをよく納得して、その意識を強く持つておくことが大切です。

【07】 エネルギーは利用しても無くならない（重要）

エネルギーというものは、利用しても種類や状態が変わるだけで、消えて無くなってしまいうわけではありません。

街灯を灯しておく、電気エネルギーを消費しますが、この電気エネルギーは光エネルギーや熱エネルギーに変わり、その光エネルギーも最終的にはほとんどが熱エネルギーに変わります。そして、これらの熱エネルギーは大気を持っている熱エネルギーと混ざり合ってしまう。街灯に利用した電気エネルギーは跡形もなく消滅したわけではありません。

電気エネルギーは使うとなくなるし、われわれの周りの大気や海水などが持っている熱エネルギーは“なんとなく”エネルギーらしくないこともあって、エネルギーを使うと直感的に無くなってしまふと誤解しがちですが、その先入観を取り除いて正しく理解することが大切です。

エネルギーの一種である「電気エネルギー」は利用すると消費されて無くなりますが、モーターを回して他の種類のエネルギーである「仕事」に変わったり、電気器具を使用すれば同じように他の種類のエネルギーである「光エネルギー」や「熱エネルギー」などに変わるだけで、エネルギーそのものが無くなったわけではありません。

また、独楽（コマ）を床で回転させていると時間とともに回転速度が遅くなってきます。この場合には独楽が持っていた「運動のエネルギー」が空気や床との間の摩擦で「熱エネルギー」に変わっています。最終的に独楽が停止した時には、当初、独楽が持っていた「運動エネルギー」が全て「熱エネルギー」に変わってしまったのです。

必要があつてエネルギーを使用した場合でも、また、上記の独楽のように人間の意思によらずに運動のエネルギーが熱エネルギーに変わったような場合でも、エネルギーの総量が変化するわけではありません。このことを『**エネルギー保存の法則**』といっています。

ここではエネルギー総量は減らないという話をしましたが、エネルギーの総量が自然に増えることもありません。

例えば、エネルギーを使って装置などを動かし、使ったエネルギー以上のエネルギーを生み出すこともできません。「エネルギー保存の法則」が知られていなかった時代には、使ったエネルギーよりも多量のエネルギーを生み出す装置の研究がさかんに行われていたようです。

【08】エネルギーには利用価値の高いものと低いものがある

エネルギーは消えて無くなるわけではないのなら、「エネルギー不足」になるなどと心配する必要は無いのではないかと、という疑問がでるかもしれません。

世の中で確保することの重要性が強調されている「エネルギー」はエネルギーの中の『利用価値の高いエネルギー』です。

『利用価値の低いエネルギー』であれば、大気中の熱エネルギーや海水中の熱エネルギーなど、身近に膨大な量のエネルギーが存在しています。ただ「利用価値の低いエネルギー」は原理的にまたは経済的に「利用価値の高いエネルギー」に簡単に変換することができません。

なお「利用価値の高いエネルギー」の典型が電気エネルギーであり、広い用途で利用されています。また「利用価値の低いエネルギー」の典型が、大気や海水や陸地などが持っている常温の熱エネルギーです。

電気エネルギーを思い浮かべると分かりやすいのですが、『利用価値の高いエネルギー』は一般的に不安定な場合が多く、安定な状態に変化しようという性質を持っています。エネルギーを利用するということは、多くの場合、不安定な状態のエネルギーを安定な状態（活用しにくい状態）のエネルギーに変えることです。

繰り返しになりますが、エネルギーという側面からみたら、世の中のいろいろな変化は、エネルギーの総量を変化させることなく、不安定な状態のエネルギーをより安定な状態のエネルギーに変換しているだけなのです。

（余談）

常温の大気を持っている熱エネルギーもエアコンなどを使って、より温度の高い熱エネルギーにして暖房に使用しています。そのために、エアコンには暖房に利用している熱エネルギーよりも少ない量の「仕事」というエネルギーを投入しています。

暖房用のエアコンでは投入したエネルギーよりも多くのエネルギーを得ることができますが、エネルギー保存の法則に反しているわけではありません。

大気よりも温度の高い熱エネルギーと大気よりも温度の低い熱エネルギーがあれば、両者を高温熱源と低温熱源にして仕事をすることができ、その逆の操作をしています。

すなわち、エアコンは「仕事」というエネルギーを投入して、大気を持っている熱エネルギーを大気よりも高い温度の熱エネルギーと低い温度の熱エネルギーとに分割する働きをしています。

それ故に、大気中の熱エネルギーを効率よく高温と低温に分割できたら使用した電気エネルギーよりも多くの高温の熱エネルギーを得ることができます。

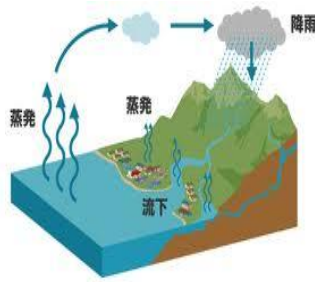
高温の空気と低温の空気は放置しておくとも自然に混合されて均一な温度になりますが、その逆は自然には進まないで、やむなく仕事や電気エネルギーという便利なエネルギーを使って強引に分割を進めています。

（余談）

海水が持っている利用価値の低い「熱エネルギー」も“利用価値がない”ということではありません。例えば、海水を蒸発させることで液体の水を気体の水蒸気にして、雨という恵みを与えてくれています。

しかし人間が意のままにコントロールすることはできません。人間の意のままにコントロールしやすく、使い勝手がいい（いろいろな用途に使用しやすい）エネルギーが“利用価値が高いエネルギー”なのでしょう。

なお、下図では海水が持っていた熱エネルギーが全て有効に利用された訳ではありません。宇宙空間という温度の低い場所に多くの熱エネルギー（赤外線）を捨てることのできるため、このようなことが可能になります。



【注釈】宇宙空間にはほとんど物質がないので温度があるという話は不自然ですが、熱エネルギーの分身である赤外線が飛び回っています。宇宙空間を多く飛び回っている赤外線は極めて低温の温度に対応しているものです。

【09】「利用価値の高いエネルギー」と「利用価値の低いエネルギー」ができる理由

仕事や電気エネルギーなどはその 100%を熱エネルギーに変換することができます。

しかし、熱エネルギーからはその 100%を仕事や電気エネルギーなどに変換することは本質的にできません。そのために、いろいろな種類のエネルギーはどうしても最終的に熱エネルギーに変換されやすくなります。

また、熱エネルギーでも高温だったり常温よりも低い温度だったりすると、利用価値は高くなりますが、これらの熱エネルギーも、なにもしないで放置しておくと、常温の熱エネルギーと混ざり合って自然に、より利用価値の低い熱エネルギーになってしまいます。

例えば、高温の水と低温の水を同じ容器に入れておくと、かき混ぜなくても自然に混ざり合って全体が同じ温度の水になってしまいますが、その逆はありません。

すなわち、エネルギーにはいろいろな種類がありますが、そのいろいろな種類のエネルギーのなかに、他の種類のエネルギーへの変換が相対的に進みにくい「熱エネルギー」というエネルギーもあるために、エネルギーの移動や変換に方向性（進みやすい方向）がでてきます。

種々のエネルギー相互間の変換や移動が進みやすい方向にある、行き着く先のエネルギー、とくに常温の熱エネルギーは利用価値が低くなります。

言い換えれば、「熱エネルギー」、とくに地球上においては常温の熱エネルギーは他の種類のエネルギーと比較して安定で変化しにくいエネルギーなので、すべてのエネルギーが行き着く先の墓場だと考えることもできます。

エネルギーの出入りが全くできない容器（仮想上のもの、実際には存在しません）に閉じ込めである「熱エネルギー」は安定で全く変化を起こしません。

「エネルギー」という用語には、物を動かしたりする活動的なイメージがありますが、エネルギーのうちの「熱エネルギー」は、それ自体が全く変化せず他のものになにも影響を与えないことも可能です。

海水中の「熱エネルギー」もエネルギーであることには変わりがないことは、海水が持っている熱エネルギーのお陰で海水中の水が水蒸気になり、水蒸気が雨となって山に降り、水力発電で電力に変換させることが出来ることから納得できるはずです。

【注釈】水は液体の状態よりも気体の状態の時の方が多くのエネルギーを持っています。そのために、液体の水を気体の水（水蒸気）にするためには、熱エネルギーを加える必要があります。この熱のことを専門用語では「蒸発潜熱」といいます。25℃のときの1グラムの水の蒸発潜熱は 580 カロリー程度です。水1グラムの温度を1℃高めるために必要な熱量が1カロリーなので、それと比べると蒸発潜熱は大きな熱量であり、海水のもっている熱エネルギーが多量に活用されていることがわかります。

なお、熱エネルギーには他の種類のエネルギーに変換しにくい特徴はありますが、温度の異なった熱エネルギーは混ざり合って同じ温度の熱エネルギーになろうとする性質も持ち合わせています。よって、熱エネルギーの移動を遮断するのはかなり厄介です。

【注釈】 温度の異なる水を接触させて時間が経つと均一な温度の水になってしまいます。しかし、均一な温度の水を放置しておいても温度の高い水と温度の低い水に分離されることはありません。均一な温度になっている方が安定だからです。

【10】「利用価値の高いエネルギー」は「利用価値の低いエネルギー」に変換される

不安定なエネルギーが同じエネルギー量の安定なエネルギーに変わるときには、認識できるような色々な変化を伴わせることができます。

上記の【07】の独楽の場合には、エネルギーの総量は変化していないのに、勢いよく回転運動したり、フラフラしながら回っていたり、静止してしまったりします。

「利用価値の高いエネルギー」を消費すると、なんとなく、エネルギーが消滅したと考えたくなりますが、消滅したのではなく、他の種類のエネルギーに変わっただけなのだ、という認識を確実にするために、生命活動について考えてみましょう。

地球上の生き物の営みは、物質という視点からみると、掌握することが完全に不可能なほど煩雑極まりない変化をしています。エネルギーという側面からみると、全体としては、「利用価値の高いエネルギー」を手に入れて、それを「利用価値の低いエネルギー」にしているだけです。

言い換えれば、生命活動は「不安定なエネルギー」が「安定なエネルギー」に変化していく現象の一つだと考えることができます。極めて複雑な経路を辿ってはいるのですが、太陽光で大気を温めていることと同じなので不思議な気がするはずですが。

人間は太陽光という「利用価値の高いエネルギー」を利用して生産された食物を摂取し、その中の栄養分（炭水化物や脂肪やたんぱく質）を肺から取り入れた空気中の酸素と反応させることで得られる化学エネルギーを、一部は仕事（心臓の働きなども含め）などに、残りの大半は熱エネルギーに変換しながら生活を続けています。

この仕事なども回りまわって最終的には常温に近い温度の熱エネルギーに変換され、「利用価値の低いエネルギー」になっています。

その食物のほとんどは、地球上では極めて安定で利用できる化学エネルギーを持ち得ない炭酸ガス（二酸化炭素）や水、場合によっては空気中の窒素、に太陽光という利用価値の高いエネルギーを取り入れて作られています。

この例のように、どこからか「利用価値の高いエネルギー」を入手しないと生物は営みを続けることができません。地球上ではこの「利用価値の高いエネルギー」のほとんどが太陽光です。

恒星から遠く離れた宇宙空間に漂っている地熱も得られない小さな天体などでは「利用価値の高いエネルギー」を得ることができないので、生命活動は本質的にあり得ません。

【11】 利用価値の高いエネルギーの発生源は『核反応』である

エネルギーの変換・移動には方向性がある、利用価値の高いエネルギーがどんどん利用価値の低いエネルギーになっているのであれば、利用価値の高いエネルギーはどこで発生しているのでしょうか。

地球上にある物質は全て「原子」が寄り集まってできています。また、原子は原子核と電子で構成されています。この原子核を略して「核」と言っている場合が多いようです。

利用価値の高いエネルギーの発生源は「核融合反応」や「核分裂反応」、「核崩壊」などの『核反応』です。核反応がおこると、一般的な化学反応とは比べ物にならない多量のエネルギーを放出します。

われわれは太陽の中で起こっている核融合反応で発生した太陽光というエネルギーを得て生活しています。

この太陽光という利用価値の高いエネルギーを気の遠くなるような長期間にわたって他の種類のエネルギーに比較的変換されにくい化学エネルギーの発生源というかたちで貯め込んできたのが化石燃料です。

【注釈】「核分裂」とは、巨大な原子核が不安定なために、中性子などと衝突して割れることです。

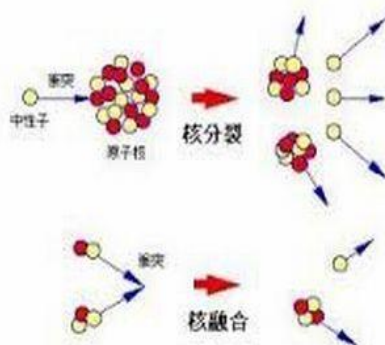
「核崩壊」とは、巨大な原子核が不安定なために、自然に壊れることです。その壊れた原子核の片割れの流れが放射線です。なお核分裂によっても中性子線という放射線が放出され、この中性子線が核分裂を継続させます。核崩壊よりも核分裂のほうがたくさんの熱を出します。

地球上では核融合反応は水素爆弾で瞬時に大量のエネルギーを発生させることはできても、われわれの生活に有効利用できるように徐々に長時間継続的にかつ安価に核融合反応を進行させる技術は、現状では開発できていません。

一方、核分裂反応は原子力発電所で利用されていますが、燃料ウランの鉱石埋蔵量は潤沢とはいえないようです。コスト高を覚悟して海水中のウランを特殊なキレート樹脂というものを選択的に付着させて集めれば資源的には問題はないのかもしれませんが、最も気になるのは放射性廃棄物の処理でしょう。

厳重に管理することは絶対に不可能な数万年という長期間にわたって放射線を発生し続ける放射性廃棄物を後世に残しておくことにならざるを得ませんが、それでも構わないのですか、という難しい判断を求められています。

現に、原子力発電の関係者は放射性廃棄物をどこの地域でどのように（地中深くなど）保管したらいいのか悩んでいるところです。



地球の中心部でも核反応（核崩壊）が起こっており、中心部から放散される熱量は、地表面1平方メートルあたり平均すると60mW程度といわれています。

地熱を取り出しやすい場所には、当然のこととして温泉も多く、わが国では地熱を取り出しやすい場所の多くが国立公園になっていることから、地熱を活用しにくくなっています。

また、地熱を水蒸気や熱水として取り出す場合には、砒素などのような地中の好ましくない物質を持ち出してくることもあるので注意が必要です。

なお、地熱発電を行う場合には、火力発電などと比べて熱エネルギーの温度が低いので、熱エネルギーから電気エネルギーへの変換効率が悪いという問題もあります。

（好奇心の旺盛な人のために）

天然のウラン（ウラン鉱石中のウラン）中には、原子力発電に使用するウラン235という物質は0.72%しか含まれていません。

残りの大半はウラン238という物質です。このウラン235を3~5%にまで濃縮して原子力発電所でウラン燃料として使用されています。

ウラン235とウラン238とでは質量が僅かに違うだけなので、この質量の僅かな違いを利用して濃縮するためには高度な技術が必要になります。

(余談)

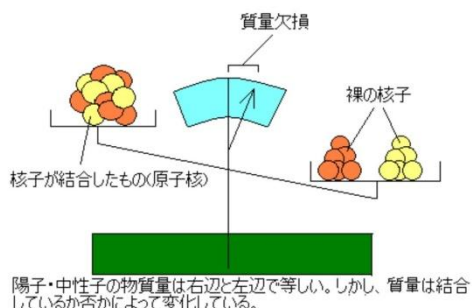
原子核はどうして融合したり分裂したり、崩壊したりするのでしょうか。原子核は小さくても大きくても安定性が悪くなり、「鉄」原子の原子核が最も安定であるとされています。「鉄」は原子番号が26番目の元素ですが、88番目の元素である「ラジウム」になると自然に崩壊します。

(好奇心の旺盛な人のために)

他の種類のエネルギーから変換するのではなく、利用価値の高いエネルギーが核反応で発生するのであれば、エネルギーというものは種類が変わることがあっても消滅はしないはずなので、エネルギー総量は明らかに増加し、従来から一般的に採用されてきた“エネルギー保存の法則”には反するはずですが。

私たちが中学校か高等学校で学んだ“エネルギー保存の法則”は核反応が含まれない状況で成り立つ法則です。一般的な話では、核反応は無縁なので、従来からのエネルギー保存の法則が正しいものと考えても構いません。

そのかわりに、水素の核融合反応では0.7%の「質量」が減り、ウランの核分裂反応では0.09%の「質量」が減ります。これは物理学者のアインシュタインの提案した、(エネルギー) = (質量) × (光の速度)² という式に対応しています。



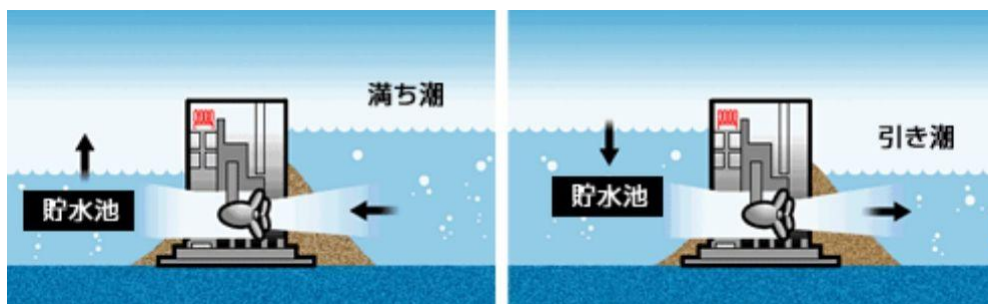
どうして「質量」が「エネルギー」に変換されるのか理解するためには、高度な知識が必要ですが、現実に原子力発電所では、漏れたり飛散した訳ではないのに、原子炉内の核燃料の質量が減少しています。

(好奇心の旺盛な人のために)

エネルギーの発生源がわかりにくい例を考えてみましょう。

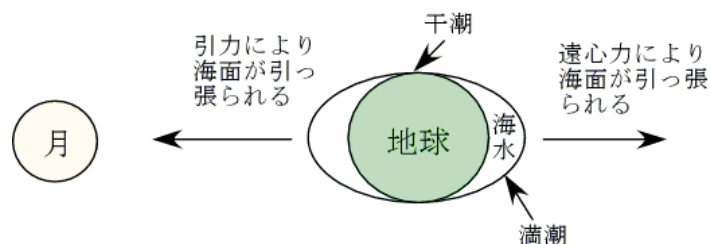
海水の干満を利用して発電をする場合に、エネルギー保存の法則によれば、発電した電力量に相当する何かのエネルギーが減ってはいけません。

潮汐発電ではどんなエネルギーが減少して、その分だけ電気エネルギーに変換されたのだろうか、と考えてみたことはありますか。よく考えてみると、その分だけ地球の自転の運動エネルギーが減少し、一日の時間が長くなっているはずですが。



現に、地球の自転速度は主として海水によるブレーキ効果のために少しずつ遅くなっており、ここ2,500年の平均では100年に1.7ミリ秒程度遅くなっているようです。

干満に伴う海水の移動が全く抵抗なしにスムーズに進めばこんなことにはならないはずですが、海水同士の衝突、海水と陸地や海底との摩擦、などで地球の自転運動にブレーキをかけています。わずかですが、潮汐発電も海水の移動の抵抗になっているはずですが。



地球は自転しているので、満潮になるべき場所が移動します。そのために、海水が移動せざるを得ないので、自転を遅らせる方向に摩擦などが発生し、僅かずつ自転の速度が遅くなります。また、発電用に海水を堰き止めておくと、堰き止められた海水分への月の引力が地球の自転とは逆方向に引っ張る力になります。

【12】利用価値が低いエネルギーは宇宙に廃棄されている

太陽などから利用価値の高いエネルギーを得て、利用価値の低いエネルギーに変換しているのであれば、地球には利用価値の低いエネルギーが溜まってしまわないのでしょうか。

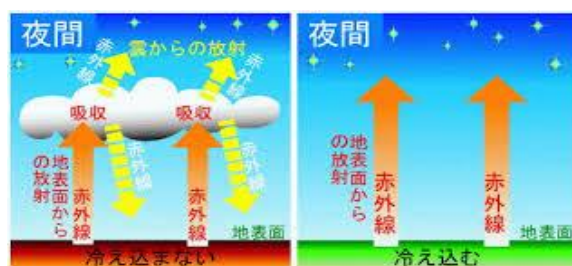
地球の表面からは、利用価値の低くなった熱エネルギーを「赤外線」として宇宙空間に放出しているので、利用価値が低くなったエネルギーが溜まってしまことはありません。

【注釈】赤外線は可視光線と同様に電磁波の一種です。熱エネルギーは物質中の原子や分子が運動しているために存在しているので、物質がないと存在しませんが、赤外線は電磁波なので、物質が存在しない宇宙空間でも飛び回っています。物質が赤外線を受けると、赤外線のエネルギーが物質を構成している原子や分子の運動に変わり、熱エネルギーになります。物質は自分の温度に対応する赤外線を常時放出しています。よって、自分の温度以上の温度の熱に対応する赤外線を受取らないと温度が下がってしまいます。この熱の移動の方式を輻射伝熱といっています。

温度が高い物質からだけではなく、われわれの身近にある物体や地表面や海面や大気などからもその温度に対応した赤外線が放射されています。

そのために、地球から宇宙の方向に放射された赤外線が雲によって反射されて戻ってくることが少ない晴れた日の夜は、気温の低下が大きくなります。

曇っている夜の方が、晴れている夜よりも気温の低下が小さいことは、経験的に知っていることです。



(余談)

摂氏マイナス 270 度（絶対温度では 3 度）よりも高い温度であれば、宇宙に熱エネルギーを赤外線として放出できるはずですが。宇宙空間には絶対温度で約 3 度に対応する電磁波が飛び交っている（宇宙背景放射）、絶対温度が 3 度以下だと逆に宇宙空間から熱エネルギー（赤外線）を受け取るようになります。

北極や南極が寒いといっても、北極や南極の温度は宇宙空間を飛び交っている赤外線に対応する温度よりもはるかに高いので、熱エネルギーが赤外線として北極や南極から宇宙空間に放棄されており、北極や南極は何時までも低い温度に保たれています。

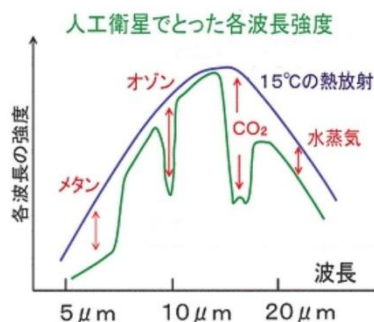
もし、この宇宙空間への放棄がなかったら、地球上の温暖な地域から熱エネルギーが北極や南極に移動して、温度がどんどん高くなるはずで。

(余談)

宇宙への利用価値の低いエネルギーの廃棄しやすさが僅かでも悪くなると地球上の気温や海水などの温度が高くなってくると考えられています。

例えば、空気中の炭酸ガス（二酸化炭素）の濃度が高くなると、炭酸ガスは陸地や海などから放射された赤外線の一部を吸収しやすいので、僅かですが赤外線が宇宙に放散されにくくなります。

炭酸ガスは吸収した赤外線を何時までも吸収したままではなく、すぐに放出もします。炭酸ガスが吸収した赤外線を放出する際に、その放出の方向が宇宙の方向だけであれば問題はないはずですが、四方八方の方向に放射されるので、結果として、地球の表面の方向にも一部が戻ってくるので厄介です。



(好奇心の強い人のために)

炭酸ガスはどうして赤外線を吸収するのでしょうか。炭酸ガスの分子も振動などの運動をしますが、運動しやすい周波数があります。その周波数と同じ赤外線を照射されると、運動が激しくなり、赤外線のエネルギーが炭酸ガス分子の運動エネルギー、すなわち熱エネルギーに変わります。

【13】 永久機関であることを素早く見抜くために

永久機関の極めて簡単な例を右図に示します。

水の中に二つの極めて回転しやすい滑車を上下に設置して、これらの滑車に紐（ひも）をかけ、その紐がぐるぐると動くようにします。

紐には重量も形も同じ空き缶が等間隔で、かつ、同方向を向けて多数結び付けてあり、空き缶の開口側に薄いゴムの膜を張っておきます。

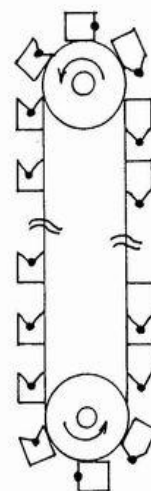
なお、空き缶の中は空気です。このゴムの膜の中心には重い鉛の塊がつけてあるので、図のようにゴムの膜はたわみます。

よって、右側と左側では空き缶部分（空気の部分）の体積に差があるので体積が大きいほうが浮き上がる力が大きいという「アルキメデスの原理」に従って浮力に差がでてきます。

左側よりも右側のほうが浮き上がる力が強いので、ぐるぐると何時までも時計とは逆方向に回転を続けるように思えます。

しかし、いつまでも回転を続けるのではないかと本気で考えた人は、もう一度、考え直してみましょう。

もし、滑車や空き缶がぐるぐる回っていると仮定すると、どこかに摩擦などの「抵抗」があり、その抵抗に抗して動き続けるためにはエネルギーを加える必要がありますが、この「装置」にはどこからも、いかなるエネルギーも、加えられていません。



エネルギーが全く加えられていないのに、抵抗に抗してぐるぐる回転させるためのエネルギーが生まれてしまったのなら、エネルギー保存の法則に反します。

回り続けるのではないかと考えた人は恐らく、力の強弱だけに注目しているのではないでしょう。右側と左側では明らかに浮力の差がありますので、下の滑車の所で右側が左側を引っ張っていることは間違いありません。

しかし、右側と左側の力の強弱を比較するためには、この浮力の差の他に滑車の軸の摩擦力や滑車や空き缶と水の摩擦力、紐を曲げる力、その他の多くの力を合算する必要があります。

全ての力を確実に拾い出して合算すれば右側と左側が釣り合うはずですが、どうしても目立つ力だけを考慮するために間違いが起こります。

よって、永久機関かどうかを判断するためには、力の強さの比較をするのではなく、エネルギーや物質の出入りが無いかどうかを確認する方法で見分けることが大切です。

【14】 化学エネルギーについて

ある物質と他の物質が反応した場合には、ほとんどの場合にエネルギーを放出したり吸収したりします。

例えば、木材を燃やせば（高温で空気中の酸素と反応させれば）炭酸ガス（二酸化炭素）と水が生成して熱エネルギーや光エネルギーがでます。これは木材を空気中に置いておくよりも空気中の酸素と反応させて炭酸ガスと水にしたほうが安定だからです。

たとえ高温で燃さなくても、木材を常温で腐敗させれば、時間はかかりますが、同様のことが起こります。ただ、放出する熱エネルギーの温度は低くなります。

言い換えれば、不安定な組み合わせの物質同士を反応させて、安定な物質にしてしまえば、色々なエネルギーを放出します。

なかには他の物質と反応させなくても、ある種の爆薬のように、単独で分解反応して多量のエネルギーを放出するものもあります。

このように反応することで他の種類のエネルギーに変換できるものを化学エネルギーといっています。

といっても、われわれの生活では多くの場合、エネルギーを得るための化学反応は大気中の酸素が反応相手になっており、社会で必要とする多くのエネルギーを化石燃料と大気中の酸素との反応に依存しているので厄介です。

地中におとなしく眠っていた石油や石炭のような炭素原子を含む化合物を地上に持ち出し、大気中の酸素と反応させ炭酸ガスにして空中に散らばらせてしまっているからです。

困ったことに、化石燃料を燃焼してできた炭酸ガスをどのようにして閉じ込めておけばいいのか安価・確実・簡単という三拍子が揃った方法が見つかりません。

残念なことに、入手しやすい炭酸ガスや水は地球上の通常環境では極めて安定で、利用できる化学エネルギーを持ち得ません。そのために、例えば、利用できる化学エネルギーを持ち得ない炭酸ガスを原料にして、化学エネルギーを持ち得るメタノール（メチルアルコール）を作るためには、エネルギー保存の法則から考えても、外から多量のエネルギーを持ち込む必要があります。

（好奇心の旺盛な人のために）

$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ の反応で得た水素ガスを使って $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ の反応で炭酸ガスをメタノールに変換するのであれば、二つの式を纏めると

$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{O}_2$ のような反応式になります。

この式に基づいて計算すると、メタノールを 1 mol、実際にはあり得ないような理想的な条件で

製造する場合でも、7.267 kJ/mol のエネルギーを外部から供給する必要があります。この値には装置を稼働させるために必要になるエネルギーなどは含まれていません。

このようにして製造したメタノールを燃焼させることを考えると、メタノールを燃焼させる反応は $\text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ になります。

この反応式に基づいて計算すると、メタノール 1 mol が持ち得る発熱量は 7.267 kJ/mol となり、製造に要したエネルギー量を超えることはありません。

言い換えれば、装置を動かすためのエネルギーを無駄にし、設備費に多大な資金を投入して苦労してメタノールを製造しても、燃料にするのならメリットは全くありません。メタノールを燃焼した際に発生する炭酸ガスの回収コストも上乘せられて大損になるだけです。

燃焼用メタノールの製造のように、総合的に考えれば、炭酸ガス（二酸化炭素）を原料に使用しても、環境にやさしい製品だ、と自慢できるものではない場合がほとんどなので勘違いしないように注意しましょう。

工業用のメタノールを製造する場合でも、炭酸ガスを原料に使用するメリットはありません。

ただ、肥料などに使用されている尿素という物質などは炭酸ガスの空中への排出が問題になっていなかった頃からアンモニアと炭酸ガスから合成しており、どうしても必要があって炭酸ガスを原料に使用しているので例外です。

なお、化学エネルギーの利点は反応しやすい物質同士を引き離しておくことで比較的保存しやすいことですが、その代償として、化学エネルギーを 100% 仕事や電気エネルギーに変換することはできません。

保存しやすいということは比較的安定だということでもあり、電気エネルギーのような不安定なエネルギー（高級なエネルギー）への転換は自由に行えないのはやむを得ません。

（好奇心の旺盛な人のために）

いろいろな物質（分子）について、25°C、常圧におけるエンタルピー（エントロピーではありません）という値がリストになっています。このエンタルピーの値を単純に足し引きすれば、反応熱は簡単に計算できます。

エンタルピーとは、物質が発熱や吸熱および体積変化による外部に対する仕事量で変化する量で、一言でいえば、熱エネルギーだけではなく体積変化による仕事も考慮したエネルギーの量です。

【15】 エネルギーに熱エネルギーが絡むと取り扱いが厄介になる

「熱エネルギー」はエネルギーの中でも最も身近なエネルギーの一つですが、その割には勘違いしやすく、取扱いに煩わしさがあります。相対的に安定なエネルギーなので、他の種類のエネルギーに変換しにくいことから、取扱が厄介だろうことは直感的にわかります。

「50°Cの1リットルの水と50°Cの1リットルの水との組み合わせ」と「30°Cの1リットルの水と70°Cの1リットルの水との組み合わせ」とでは、エネルギーの総量はほとんど同じなのに、前者では安定で全く変化しないし、仕事などの他の種類のエネルギーに変換することはできません。

しかし、後者では変化はするし、僅かではあっても、仕事などの他の種類のエネルギーに変換することができます。

このように、熱エネルギーは同じエネルギー量でありながら様子が違ってくるという厄介さがあります。

具体的には、熱エネルギーには次のような特性があります。

- ①熱の移動には方向性がある（熱は高温側から低温側にのみ移動する）。
- ②一つの温度の熱源だけでは、継続して仕事などに変換することができない。

③熱の全て（熱エネルギーの100%）を仕事などへ変換することはできない。

④二つの熱源の温度差が大きいが仕事などへの変換効率を高くできる。

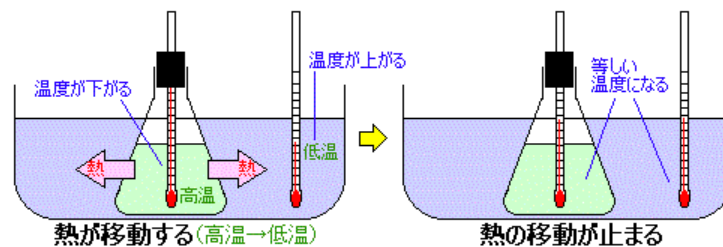
【16】熱の移動には方向性がある理由（重要）

高温側から低温側には熱エネルギーは自然に移動しますが、その逆は起こりません。

すなわち、温度が均一（場所によって温度が違わない）になる方向にしか移動しません。

そして場所によって温度が違わない状態になってしまうと安定になってしまっていてそれ以上の変化は起こりません。

例えば、同量の70℃の水と30℃の水が接していたら、自然に（勝手に）混ざり合ってしまうって50℃程度の温度の水になってしまいます。そうしたら安定になってしまっていて変化を起こす術を持ち得なくなります。



どうして熱エネルギーは自然に移動して均一な温度になったほうが安定なのか、その理由を考えてみましょう。

大きな池に赤色の鯉と白色の鯉を同数ずつ大量に放流した場合を考えてみます。確率計算をすると、赤色の鯉、白色の鯉だけで集団になるよりも、赤白ができるだけ入り乱れた集団（大きな網ですくうとどこの場所でも赤白が同数に近くなっている集団）になる方が確率が高いことがわかります。

また、数学の確率計算の知識によれば、鯉の数が増えるほど、この確率は大きくなるので、分子の数のように非常に大きな数になれば、マクロにみたら、間違いなく完全に均一に混合された状態になります。

そういった状態になる方が確率が高くなるということは、より安定になるということの意味し、自然に入り乱れてしまいます。このことは非常に重要な自然現象です。この現象のために、熱エネルギーの取り扱いが煩わしくなっています。

熱エネルギーの実体は分子運動であり、高温のときの分子のほうが低温のときの分子よりも激しく運動しています。

温度の違う分子の移動も赤と白の鯉の話と同様なことがいえ、高温の分子と低温の分子がそれぞれ別にかたまっているよりも、入り混じった状態の方が確率が高くなるために、自然に混ざり合ってしまう、その逆の現象は起こりません。

イメージを掴みやすくするために、別の説明をしてみます。上記のように温度の高い分子と温度の低い分子が時間とともに均一に混合された状態になっていくのは、分子などが規則性を持たずにランダムに動き回っているからです。

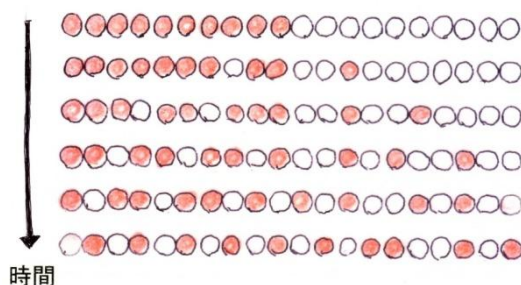
ランダムに動き回っているために、特定の1個の分子に着目すると、ある時間が経過した後にその分子が容器内の何処にいるのかわかりません。言い換えれば、どの場所にも同じ確率でいるはずで、また他の全ての分子についても同じことがいえます。

よって、容器内のどの部分も全く同じ確率になっているので、同じ状態になってしまうはずで

す。言い換えれば、自然に、できるだけ均一な混合状態になります。

さらに言い換えれば、自然に変化するのだから均一な混合状態の方が安定な状態なのだといえます。

ということで、時間とともに均一に混合されてしまいます。



【注釈】分子の運動は本当に規則性がなくランダムなのでしょうか。コロイドという非常に小さい微粒子を顕微鏡で観察するとコロイド粒子がランダムに動き回っていることが確認されています。コロイド粒子と衝突をする分子がランダムに運動しているのでコロイド粒子の運動もランダムになると考えられます。

(好奇心の旺盛な人のために)

高等学校の数学に確率・統計という分野があります。その中に順列・組合せという項目がありますが、この順列・組合せを利用した説明の一例を載せておきます。



上図の左図のように、最初2つに仕切られた箱を考えます。仕切りの両側には異なった気体が封入されています(温度が違う同一の気体と考えてもよい)。

図中の白黒の玉はこの気体分子を表わしていて、その数は $N=8$ 個です。

いま両者を隔てる仕切りをはずすと、気体はランダムな運動をおこなうので2種類の気体は混合し、一例として上図右図のようになります。

この混合した気体が、元の左図のように、片方ずつに偶然分かれる確率を考えてみます。圧力は容器内で一定とすると、個数は半分ずつに分かれるはずで。

するとこの場合の数は $8C4 = 70$ だから、白黒が逆の場合を考えても35分の1となります。ここで、 nCr は、 n 個の異なるものの中から重複を許さずに r 個を選出する選び方の総数のことです。 $nCr = n! / r! (n-r)!$ なので、

$$8C4 = 8! / 4! \times (8-4)! = 40320 / 24 \times 24 = 40320 / 576 = 70$$

なお、 $n!$ は1から n までの整数を全てかけあわせたものです。

N を変えて計算をしてみると、 $N=4$ で3分の1、 $N=6$ で10分の1、また $N=10$ で126分の1、 $N=12$ で462分の1と、 N が大きくなるにつれて急激に確率は減少します。

N がアボガドロ数 (6×10^{23}) の大きさになる頃にはほぼ完全にゼロになります。したがって1度混合したものが再び分離して元の状態に戻るといえることは、現実には観測されないといっても構いません。

【注釈】アボガドロ数とは1モルの分子の数です。

(好奇心の旺盛な人のために)

移動に方向性があるのは熱エネルギーだけではありません。水に溶けた食塩や砂糖、大気中の炭酸ガスなど、色々なものがあります。

海水のように水に食塩が溶けている場合、食塩の濃度が低いものと濃度の高いものを同じ容器に入れて接触させておくと自然に全体が同じ濃度の水溶液になり、その逆はありません。

よって、濃度の異なる水溶液が入手できるのであれば、これらは熱エネルギーと同じように均一に混ざり合っ、より安定な状態になろうとするので、他の種類のエネルギーに変換することができます。

言い換えれば、不安定な状態から安定な状態に変化する際にはエネルギーを放出させることができます。

経済性を無視しても構わないのであれば、海水と河川水などの淡水を組み合わせることで発電することも可能です。

2009年の新聞に、『ノルウェーの電力会社スタットクラフトは再生可能エネルギーの一つとして注目される「浸透圧発電所」の運転をオスロ近郊の町トフテで始めた』との記事が載っていました。

海水と淡水を組み合わせれば原理的には発電は可能です。海水と淡水の組み合わせで仕事を、この仕事を電気エネルギーに変えるのです。

海水と淡水の組み合わせを仕事に変える方法はいくつか提案されていますが、この記事の方法は半透膜という水を通させ食塩を通させない膜を使用する方法です。

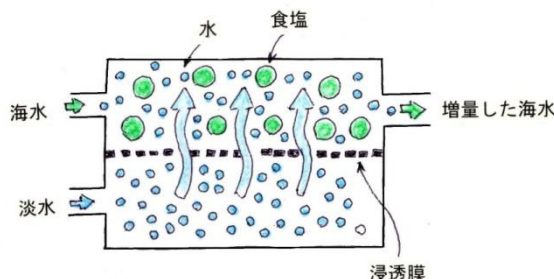
一言でいえば、中東などで大規模に海水から淡水を製造している方法の逆の操作をするだけです。海水から淡水を製造するためには海水側に圧力をかけて水だけ膜を透過させるのです。

海水を高圧の容器に入れるために海水に加えられたエネルギー（仕事）の一部が、食塩の濃度が高くなった海水と得られた淡水の組み合わせが持っている濃度差エネルギーに変換されます。

海水からの淡水の製造とは逆に、海水と淡水を半透膜で隔てておくと、海水と淡水が混ざり合ったほうが安定になれるので、自然に淡水側から海水側へ水が移動し海水側の水量を増やすと共に圧力を高めることができます。

この増量し食塩の濃度が低下した海水で水車を回して仕事を、この仕事を発電機で電力に変換します。

ただ、世の中では逆の事業・操作を大々的に行っているのです、経済性の面で問題はあります。



【注釈】半透膜を挟んで液面の高さが同じ、溶媒のみの純溶媒と溶液がある時、純溶媒から溶液へ溶媒が浸透しますが、溶液側に圧を加えると浸透が阻止されます。この圧を溶液の浸透圧といいます。生物が体内に水を取り込むのもこの原理です。体内のほうが溶解物（溶けているもの）の濃度が大きいので、体外の水を吸い取ることができるのです。

【17】一つの温度の熱源だけでは継続して仕事などに変換することができない

同量の 70℃の水と 30℃の水の組み合わせと、50℃と 50℃の水の組み合わせでは、保有している熱エネルギーはほぼ同じです。しかし、前者は変化を起こすことができますが、後者では二つを接触させても全く変化は起きません。

後者の場合は全体が同じ温度で均一であり、エネルギーでありながら極めて安定な状態でこれ以上変化のしようがありません。

【注釈】上記の説明はマクロにみた場合の話です。50℃と 50℃の水の組み合わせではマクロにみたら全く変化は起きませんが、ミクロにみたら水の分子は動き回っており相互に混ざり合っています。

不安定さが全くない極めて安定な状態から不安定な状態にするためには、別途、他からエネルギーを調達して注入する以外には方法がありません。

よって、一つの温度の熱エネルギーだけでは、より高級なエネルギーである仕事や電気エネルギーに変換することはできません。

「熱エネルギー」を「仕事」というエネルギーに“継続的に”変換させようとする、熱エネルギーの本質である分子運動はあらゆる方向を向いたものが渾然と混じり合っているために、分子運動の方向を問わない（分子運動の向いている方向が同じものを揃える必要が無い）気体の体積膨張に頼るのが好都合になります。

しかし、気体の体積を膨張させて（例えばピストンを押し広げて）仕事をして、気体の体積を元の体積に戻せないと（ピストンを膨張前の状態に戻さないと）、同じ仕事を繰り返すことができません。

気体の体積を元に戻すためには、温度を下げて分子運動を小さくするほかに対応方法がありませんが、温度を下げるためには、熱の移動には方向性があるために低い温度の熱源（温度を下げるための熱エネルギーの受け入れ先）が存在しないと困ります。

そのために、熱エネルギーを仕事というエネルギーなどに“継続的に”変換するためには、「温度の高い熱源」と「温度の低い熱源」がどうしても必要になります。

なお、一般的には、「温度の低い熱源」としては、常温の大気や海水、河川水などが用いられています。

上記のように、熱エネルギーはその温度分布が均一な状態で確率が最大になるために安定であり、変化を起こさせることができません。安定であれば変化しようとならないので、折角エネルギーではあっても、仕事や電力などにして有効利用することが難しくなります。

そこで、不安定さを作り出すために、温度の低い熱エネルギーと組み合わせざるを得ません。

大量にある海水中の熱エネルギーは仕事をさせるためのエネルギーとしてはあまり注目されていませんが、経済性を考えなくてもいいのなら、深海の温度の低い海水を汲み上げて表面の温度の高い海水と組み合わせれば、海水温度差発電に利用できます。

（余談）

地球規模で考えれば、温度の低い熱源として宇宙空間を利用することができることから、海水の持っている熱エネルギーも相対的に温度の高い熱源と看做すことができます。

すなわち、海水中の熱エネルギーも海水から水を蒸発させる際に必要なエネルギーとして利用されます。

直接または間接に熱エネルギーを赤外線として宇宙に放出して空気中の水蒸気は冷却され、水滴になって高山に雨を降らせることで「位置のエネルギー」に変換されています。

（好奇心の旺盛な人のために）

気体などの体積膨張を利用しなくても、熱エネルギーを仕事や電気エネルギーに変換する方法はあります。

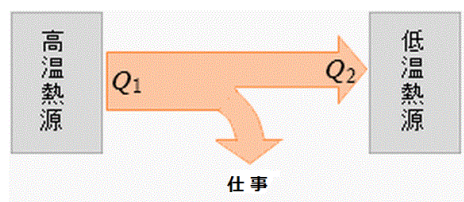
「熱エネルギー」を「仕事」に変換する方法として、形状記憶合金（グチャグチャに変形させておいても元の形に戻ることができる金属）や特殊な高分子材料（分子量が大きい有機化合物）など、ある温度で急激に状態変化をする物質を使用して仕事を取り出すこともできます（相変換物質を利用した方法）。

また、熱エネルギーを直接電気に変換する方法として、「熱電変換素子」を使用したり、ナトリウムイオン（ Na^+ ）が特殊なアルミナ（酸化アルミニウム）というセラミックスを透過しやすい性質を利用した「アルカリ金属熱電変換技術」などもあります。

しかし、これらの方法で熱エネルギーを仕事や電気エネルギーに変換するためにも、温度の高い熱源と温度の低い熱源の両方が必要です。

【18】熱エネルギーを 100%仕事などへ継続的に変換することはできない

温度の高い熱源と、温度の低い熱源を使って熱エネルギーを仕事に変える装置を「熱機関」と言っています。大規模なものとしては、火力発電所のボイラーと蒸気タービンなどがあります。



熱エネルギーを 100%仕事などへ変換できない理由には、

- ① なにかをすると、後戻りができない現象が必ず付随してきてしまう、
 - ② 後戻りが可能な場合（現実には無いのですが有ると仮定しても）でも利用できない部分や無駄になる部分がある、
- の二つが考えられます。

前項の説明でもわかるように、せっかく加熱した気体などを冷却しなくてはならず、仕事に変換できなかった温度の高い熱源の熱の一部は温度の低い熱源の方に移動してしまい、温度の低い熱エネルギーになってしまうために、どうしても温度の高い熱源の熱を 100%仕事に変換することはできません。

また地球上の現実の世界では、あちこちに摩擦や抵抗などがあって、折角得た仕事の一部があまり役に立たない温度の熱エネルギーに変化したり、保温をしても熱エネルギーが漏れたりするので、熱エネルギーを仕事に変換できる割合はさらに下がります。

相対的に安定なエネルギーである熱エネルギーを、極めて不安定なエネルギーである電気エネルギーなどに変換するのであれば、1対1で変換できるはずがないだろうことは直感的にもわかるはずです。

熱エネルギーはどんな温度の熱エネルギーであっても、同じ温度の熱エネルギーしか存在しないときには他の種類のエネルギーに変換できないし、移動すらもできません。

熱が移動している時には必ず温度差があり、温度が低い場所があります。言い換えれば、同じ温度の熱エネルギーしか存在しない状態はエネルギーでありながら極めて安定です。

例えば 80℃の水がどんどん供給できる熱源があると仮定し、20℃の川の水が多量に得ることができると仮定します。

ある瞬間に供給された 80℃の一定量の水が持っている熱エネルギーを仕事などに変換したために、この水に残っている熱量が減って水の温度が 20℃になってしまったとき、熱源として供給された水と最初から 20℃だった川の水は同じ温度になってしまいます。

川の水と同じ 20℃の水だけになってしまったら（均一な温度になったら）、もうこれ以上変化のしようがありません。

ということは、温度の高い熱源として供給された 80℃（絶対温度で 353 度）の水が持っていた熱エネルギーのうち 20℃（絶対温度で 293 度）の水が持ち得る熱エネルギーの部分は仕事などに変換できないことになります。

言いかえれば、変化のしようがなくなってしまった熱エネルギーは捨て去る以外に方策がありません。この捨てざるを得なくなってしまった熱エネルギーの引き取り先がどうしても必要になりますが、これが 20℃の川の水です。

蛇足になりますが、上記のように、絶対温度で 353 度から 293 度までしか仕事などに変化させることができないということだと、80℃程度の温度の熱源では、持っている熱エネルギーのほんの一部(17%)しか仕事などに変換できないことになります。

なお、以上の説明は水の比熱が温度で変化しないという仮定にしてありますが、正確には比熱は温度で変化するので厳密ではありません。

【19】 2つの熱源の温度差が大きいと仕事などへの変換率が高くなる

高温熱源と低温熱源の2つの熱源の温度差が大きい組み合わせになるに従って不安定になるだろうことは容易に思いつきます。

また、地熱発電などのように、蒸気の温度が火力発電のように高くない場合には、発電効率を高くすることができないこともよく知られています。

2つの熱源の温度差がゼロの場合（均一に混合している場合と同じ）が出現確率が最も高いと前にも記しましたが、温度差が大きい組み合わせになるに従って出現確率が小さくなり、さらに、出現しにくいということは不安定であるということなので、不安定であればあるほど安定な方向に向かって変化しやすく、他のエネルギーである「仕事」などへ変換される機会が増えるのではないかと直感的に頭にうかびます。

高温の熱源の絶対温度を T_2 とし、低温の熱源の絶対温度を T_1 とします。前にも説明したように、 T_2 の温度の高温の熱源だけではこの温度の熱エネルギーを仕事に変えることはできません。言い換えれば、熱エネルギーを利用したために、高温の熱源の温度 T_2 が低温の熱源の温度 T_1 に近づく、だんだん熱エネルギーを仕事に変えることができなくなってきます。

高温の熱源の熱エネルギーのうち、低温の熱源の温度以下の部分は、低温源に移動させる方法がありません。移動させるためには、さらに低温の熱源が必要になりますが、一般的な環境のもとでは常温よりも低い温度の熱源を多量に確保するのは困難です。

すなわち、高温の熱源の温度で一定量の物質が持っている熱エネルギーのうち、低温の熱源の温度で同じ物質が持ち得る熱エネルギーに相当する分は仕事などに変えることができないはずで

す。

物質の質量が同じで、加える熱量も同じでも、物質の種類によって温度の上昇しやすさは違います。

この温度の上がりやすさを示すのが比熱ですが、もし熱源を構成している物質の比熱が温度によって変化せずに常に一定であると仮定すれば、エネルギーとしての熱量は絶対温度に比例するはずで、高温の熱源の熱エネルギーのうち仕事に変えることができる割合は $(T_2 - T_1) / T_2$ となり、高温の熱源と低温の熱源の温度差が大きいほうが仕事に変換できる割合は大きくなるはずで

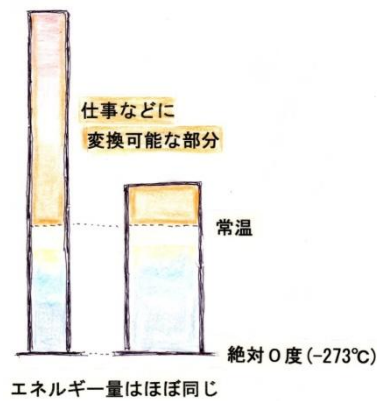
す。

現実には熱源を構成している物質の「比熱」は温度によって変化するので、上記の説明は定量的には正しくはありません。

また、摩擦などがあって高温の熱源の熱エネルギーの一部はどうしても仕事に変換できずに低温の熱源に流れざるを得ないので、高温の熱源の熱エネルギーを仕事に変換できる割合はさらに低下します。

しかし、温度差が大きいほうが高温の熱源の熱エネルギーを仕事に変換できる割合は大きくなることは間違いありません。

例えば、燃料を燃やして火力発電をする場合には、低温側の熱源には通常は海水や大気を利用するので、同じ熱量であっても高温側の熱の温度をできるだけ高くしておくと、仕事、さらに電力への変換効率を高めることができ、発電効率は高くなりますが、高温に耐える装置用の材料を確保できるかどうかで高温側の温度の上限が決まってしまう。



(好奇心の旺盛な人のために)

上記のように、高温の熱源の絶対温度を T_2 とし、低温の熱源の絶対温度を T_1 としたときに、最高効率 $(T_2 - T_1) / T_2$ を超えることはありませんが、この理想状態での最高効率を「カルノー効率」と言っています。

【20】 熱エネルギーを仕事に変換する際の最大の効率

前記の【19】に記したように、「熱エネルギー」を「仕事」に変換する際の最大の効率 $(T_2 - T_1) / T_2$ は「カルノー効率」であることが分かっています。

この「カルノー効率」は、「カルノーサイクル」という仮想的で理想的な「熱機関」の効率であり、実際にはカルノー効率と同じ効率で熱エネルギーを仕事に変換することはできません。

自然界ではどうしても摩擦などの抵抗があるために、利用したエネルギーが熱エネルギーに変換されるからです。

摩擦などの抵抗で熱エネルギーが発生し、その熱エネルギーが自然界に存在している熱エネルギーと混ざり合うと勝手に元に戻ることはできなくなります。

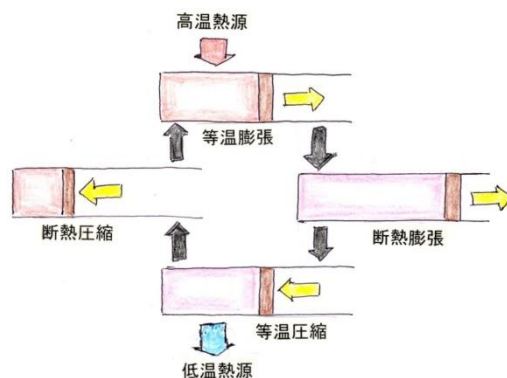
少し難しくなりますが、別の言い方をすれば、カルノーサイクルは後述の「エントロピー」が変化しないことを前提にしていますが、実際には「エントロピー」の増加を無くすることは不可能だからです。

(好奇心の旺盛な人のために)

カルノーサイクルは次のような行程を繰り返しています。

- ① 等温膨張……気体が膨張して外に向かってした「仕事」と外から流入した「熱エネルギー」は同量です。
- ② 断熱膨張……気体が膨張して外に向かってした「仕事」と気体の温度が下がったことで減った「熱エネルギー」は同量です。
- ③ 等温圧縮……気体を圧縮して内側に向かってした「仕事」と外へ吐き出した「熱エネルギー」は同量です。
- ④ 断熱圧縮……気体が圧縮されると温度が上昇します。気体を圧縮して内側に向かってした「仕事」と気体の温度が上がることで増えた「熱エネルギー」は同量です。

上記の①～④のエネルギーを差し引きすると、(①で高熱源から受取った熱エネルギー) - (③で低熱源に吐き出した熱エネルギー) = (①で外に向かってした仕事) - (③で内に向かってした仕事) になります。



高熱源から受取った熱量から仕事への変換効率は、 $\{(高熱源の温度 T_2) \times (比熱) - (低熱源の温度 T_1) \times (比熱)\} \div (高熱源の温度 T_2) \times (比熱)$ なので、気体の比熱が温度で変化しないと仮定したら、 $\{(高熱源の温度 T_2) - (低熱源の温度 T_1)\} \div (高熱源の温度 T_2)$ になるはずですが。

気体の比熱が温度で変化しないと勝手に仮定したので厳密には正しくはないのですが、ヘリウムのような原子が一つだけで分子になっている気体では温度が変化しても比熱はあまり変化しないので、大雑把に言えば、大きな間違いはありません。

仮定をおかない厳密な説明方法もあります。

【21】 化学エネルギーも 100%を仕事や電気に継続的に変換できない

熱エネルギーがその 100%を仕事や電気に変換することができないことから、熱エネルギーと親密な関係にある化学エネルギーもその 100%を仕事や電気に変換するのが難しそうだと直感的には感じます。

燃料などを燃焼させて得た「熱エネルギー」を仕事や電気に変換する場合には燃料と酸素の組み合わせが持っている化学エネルギーを 100%熱エネルギーに変換できても、前記のように、得られた熱エネルギー 100%を仕事や電気に変換することはできません。

また、燃料を熱に変換せずに、燃料電池を使って燃料（水素）と酸素の組み合わせが持っている化学エネルギーを直接電気に変換しても 100%の変換効率（発電効率）を得ることはできません。

燃料電池の一種であるリン酸型燃料電池を使って 190℃で水素ガスと空気中の酸素ガスが反応して水ができる反応をさせた場合には、実際には不可能な理想的な条件で反応が進んだと仮定しても、持っている化学エネルギーの 9.3%は電気エネルギーに変換することはできません。

現実には各種の抵抗があって、さらに多くの化学エネルギーが熱エネルギーに変換されてしまい、燃料電池を使用しても水素ガスが持っている化学エネルギーを電気エネルギーに変換できる割合は 50%以下のようなようです。

【注釈】一つの燃料電池での発電量を少なくすれば電気エネルギーへの変換効率が高くなります。極限まで発電量を減らしたら、90%程度の変換効率になるはずですが、燃料電池の費用が嵩むので現実的ではありません。

よって、水を電気分解して水素ガスを製造し、その水素ガスを燃料電池の燃料にして発電しても、水素ガスの製造に使用した電気エネルギーの半分以下になってしまいます。以上のように、化学エネルギーには相対的に他の種類のエネルギーに変換させにくい特徴があります。

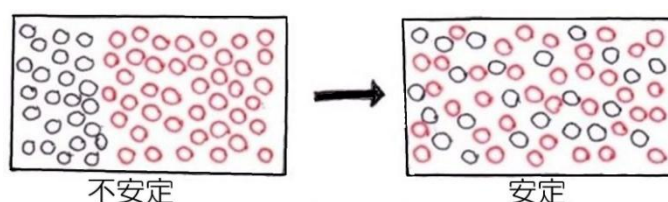
【22】熱エネルギーの性質についての復習

熱エネルギーの本質は、ある物質を構成している分子の運動エネルギーです。この分子運動は、高温になるほど激しくなります。分子運動の状態が異なる分子が同じ場所にあった場合には、【16】のように均一な状態になるように渾然と混ざり合っています。

渾然と混ざり合っている方が、出現確率が高く安定だからです。また、分子同士が衝突してエネルギーのやり取りもします。

分子運動であれば、少なくとも「分子運動の強さ」と「分子運動の方向」があるはずですが。しかし、個々の分子の運動の強さも分子の運動が向いている方向もいろいろなものが渾然と混ざり合っています。

高温のお湯と水道水を同じ容器に入れたらすぐに混ざり合ってしまうし、その逆は起こらないように、渾然と混ざり合っているほうが安定だからです。



「分子運動の方向」が分布をもたずに混ざり合っていたら、「分子運動の方向」に関しては出現する確率が高くなっており、安定で、もはや変化させようがありません。どんなことをしても、同じ方向を向いて運動をしている分子だけを集めて「分子運動の方向」に分布をもたせて不均一にすることもできません。

すなわち、運動の方向が混ざり合っている分子運動のエネルギーはエネルギーでありながら安定で、他のエネルギーに変換する方法が見つかりません。

ある方向を向いて運動している分子があっても、必ず逆向きの方向に向いて運動している分子もあるので運動エネルギーとして取り出すことが不可能であり、外部に対して影響を与える術がないのです。

ということで、熱エネルギーは他の種類のエネルギーと比べて本質的に安定で、他のエネルギーに変換することができない部分が必ずあることとなります。

しかし、「分子運動の強さ」に関しては、温度の違う熱エネルギーと組み合わせることで分布をもたせて不均一にして不安定にすることができ、変化を起こさせることができるようになるので、熱エネルギーの一部を仕事などに変換することができます。

「温度の高い熱源」と「温度の低い熱源」があれば、高温熱源の熱エネルギーのうちの分子運動の方向にかかわる部分は他の種類のエネルギーに変換させることができませんが、分子運動の強度にかかわる部分は他の種類のエネルギーに変換させることができるはずです。

また、この部分は二つの熱源の温度（分子運動の強度）の差が大きくなるとより不安定になるであろうことは直感的に理解できるはずです。

高温熱源と低温熱源の組み合わせで、高温熱源の熱エネルギーが本質的に持っている安定な部分を捨て去るためのゴミ箱が低温の熱源だ、と見做すことができます。

基礎知識の習得と理解(Ⅱ)

【26】 化学エネルギーを仕事や電気に変換できる上限は自由エネルギー

熱エネルギーを仕事や電気エネルギーに変換する場合の変換効率の上限は「カルノー効率」でしたが、化学エネルギーを仕事などに変換する場合の上限は「自由エネルギー」の値を計算すればわかります。

190℃程度の温度で運転されるリン酸型燃料電池でも、化学エネルギーの9.3%がどうしても電気エネルギーに変換することができない理由は、水素と酸素が反応して水が生成する反応も分子が活性化される過程など途中でいろいろな過程を通じて進んでいますが、どこかの過程で化学エネルギーを熱エネルギーに変化させざるを得ない現象が発生したり物質が偏在せず均一になるように分散して安定になってしまう現象などが起こるからです。

上記の9.3%の残りの90.7%が190℃で水素ガスと酸素ガスの組み合わせが持っている化学エネルギーのうちの、理論的には「仕事」や「電気エネルギー」などに100%変換できる「自由エネルギー」といわれる部分です。

(好奇心の旺盛な人のために)

この「自由エネルギー」は一口でいえば、持っている化学エネルギーから反応に伴って「エントロピー」が増加するために仕事や電気エネルギーなどへの変換が不可能になるエネルギーを除いたものです。

なお、この「エントロピー」いう用語が多くの人を悩ませています。

(好奇心の旺盛な人のために)

水素ガスを燃料にして発電する燃料電池にはいろいろな種類がありますが、低い温度で作動する燃料電池の方が「自由エネルギー」が大きくなり、理論的には発電効率が高くなります。

高温になるほどエントロピー変化が大きくなるからです。

【27】 多くの人悩むエントロピーとはどんなものなのか

分子運動の激しさなどが違う分子の集団や煙突から大気中に排出される炭酸ガスなどはできるだけ渾然と混合することで安定になろうとします。

濃度の異なった食塩水を静かに接触させた場合でも自然に均一な濃度になってきますが、その逆が起こった経験をした人は居られないはずで

ということです、ひとたび分散されて安定になってしまったら、それ以上変化しにくくなることは直感的にわかるはずで

熱エネルギーの場合でもエネルギーの総量は同じであっても、他の種類のエネルギーへの変換のしやすさは、均一な状態になっておらずあまり安定になっていない状態のほうが都合であることは当然です。

例えば、「同量の70℃の水と30℃の水の組み合わせ」と「同量の50℃と50℃の水の組み合わせ」では、保有している熱エネルギーはほぼ同じにも拘わらず、前者は“変化”を起こすことができますが、後者では二つを接触させても全く変化は起きません。

このように、エネルギー量だけに注目していると正しく把握をすることができません。

また、【22】でも説明したように、熱エネルギーには安定で変化しにくく利用しにくい部分が紛れ込んでいるために熱エネルギーや熱エネルギーと関係が深い化学エネルギーはエネルギーであるにもかかわらず電気エネルギーなどと比較して有効利用しやすさに不都合な差があります。

これらの様子を定性的ではなく定量的に把握したいときに有用になるのが「エントロピー」というものです。

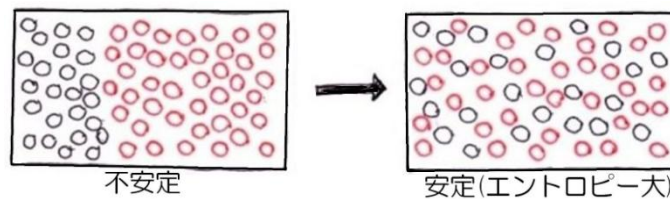
「エントロピー」は熱力学では『状態(1)を基準にしたときに、状態(2)とのエントロピー差は{(エネルギーの変化量)/(絶対温度)}を状態(1)から状態(2)まで積分したものと定義されていますが、この定義のままでは、そのイメージを掴むのは容易ではありません。

熱力学で定義された「エントロピー」という値を使用して計算をすると、現実の現象をかなり正しく表すことができるのですが、上記の定義では抽象的すぎてどんなものなのかそのイメージが掴みにくく、熱力学を学んだ人のなかには悩んでしまった人も多いはずです。

そのイメージを掴むためのヒントを与えてくれたのがボルツマンという人です。

統計力学という学問を利用して、熱力学で定義されているエントロピーというものが出現確率(出現しやすさ)に対応していることを厳密に証明してくれました。

「出現しやすい」ということは安定性が高いということに他ならないので、熱エネルギーや物質を構成している粒子の分布が、偏在しないでばらばらに分散されて安定性が高くなると(変化しにくくなると)エントロピーは大きな値になります。



言い換えると、エントロピーが増加すると安定な部分が多くなり、不安定で「利用価値の高い」部分が減少してきます。

化石燃料と空気の組み合わせが持っている化学エネルギーを仕事や電気エネルギーに変換しようとしている際にも、「粒子の運動の強さ」や「物質を構成している粒子の種類」が偏在しないで均一にバラバラに分散して安定化してしまうので自然に不安定な元の偏在した状態に戻ることはなく、エントロピーが増加することが避けられません。

よって、自然界でエネルギーや物質の出入りが無い領域では何らかの変化をさせると必ずエントロピーは増加するので、エネルギーの総量は同じままでも、安定性が高まり、エネルギーの利用価値が低くなってしまいます。

【注釈】何らかの変化をさせると必ずエントロピーが増加するのは、例えば、何らかの変化をさせると、摩擦などの抵抗のために、変化をさせるために利用したエネルギーの一部が熱エネルギーに変換され、この熱エネルギーが周りの熱エネルギーと混ざり合ってしまうと安定になって、自然には元には戻らなくなる現象が避けられないからです。

以上のことから、エネルギーの総量からエントロピーの増加に伴って利用価値が低くなったエネルギー量を差し引いた「自由エネルギー」はエネルギーの総量よりも少なくなります。なお、エントロピーの増加に伴って利用価値が低くなるエネルギー量は、エントロピーの定義から(エントロピーの変化量) × (絶対温度)なので、

「自由エネルギー」 = (エネルギーの総量) - (エントロピーの変化量) × (絶対温度) になります。

「利用価値の高いエネルギー」の塊である「電気エネルギー」などはエントロピーとは無縁で、自由エネルギーと等価です。

(好奇心の旺盛な人のために)

ボルツマンという人が導き出した統計力学でのエントロピー(S)は、出現確率に対応する「微視的な状態数」が Ω のとき

$$S = k \ln \Omega$$

で表されます。ここで、比例係数 k はボルツマン定数と呼ばれています。なお、ln は自然対数であることを示しています。

【注釈】「微視的な状態数」とは次のようなものです。

ミクロ的な状態が違っていても、マクロ的な状態は同じように観測されることがあります。そこで、あるマクロ的な状態を実現するミクロ的な状態は何種類あるのか、ということ「微視的な状態数」といいます。

例えば、粒子Aと粒子Bの二つの粒子があるときに、二つの粒子が持っている全エネルギーが6なら粒子Aと粒子Bが(0, 6)、(1, 5)、(2, 4)、(3, 3)、(4, 2)、(5, 1)、(6, 0)の場合が考えられ、微視的な状態数は7となります。微視的な状態数が大きくなれば出現確率が大きくなるので、エントロピーも大きくなります。

(好奇心の旺盛な人のために)

上記の【16】で赤い鯉と白い鯉の話をしました。熱エネルギーの本質である分子の運動も、水に溶けている塩も、空気中にある炭酸ガスも、一か所に偏って存在するよりも、できるだけ分散して存在する方が安定になります(出現確率が大きくなります)。そのために、その逆をやらうとすればエネルギーを加える必要があります。身近な例は家庭用のエアコンでしょう。

電気エネルギーを消費してエアコンを駆動すれば、ある一つの温度の空気を、より温度の高い空気より温度の低い空気にすることができます。

より温度の高い空気は暖房に利用し、より温度の低い空気は冷房に使用しています。

言い換えれば、エントロピーを減少させようとする、エアコンで消費する電気エネルギーのように、必ず「利用価値の高いエネルギー」を消費します。

(好奇心の旺盛な人のために)

ある変化が起こった後に、逆の変化(後戻り)ができることを「可逆変化」といい、逆の変化が不可能な場合を「不可逆変化」といいます。

可逆変化ではエントロピーの変化はゼロです。エントロピーが増加しない場合には、取り返しのつかないロスが発生しないので、完全に逆の変化が可能になります。

ということで、エントロピーは効率低下が起きるか否かの目安になります。

エントロピーが増加しない理想的な変化を「等エントロピー変化」といっており、世の中では、どうかして等エントロピー変化に近づけようと努力をしています。

【28】熱力学的エントロピーと統計力学的エントロピー

統計力学で導き出されたエントロピーに関する説明をそのままイメージとして頭の片隅に取り込んでおくことも大切ですが、移動する熱エネルギー量を絶対温度で除した値がどうして物質を構成している粒子が偏在しないでバラバラになっている状態と同義なのか理解しにくさが残ります。

(好奇心の旺盛な人のために)

熱力学的エントロピーがどんなものなのかイメージを掴むために、比熱というものを考えてみましょう。厳密な話ではありません。

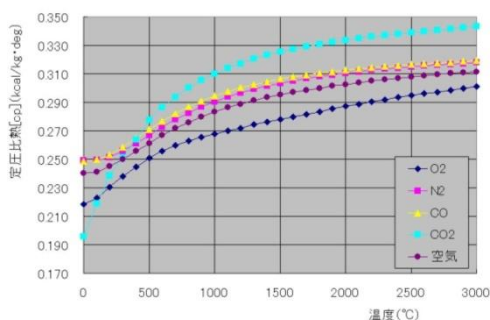
【注釈】どうしてここで「比熱」というものを唐突に持ち出したのかその理由を記しておきます。

統計力学の分野で「エントロピー」は分子運動の種類の数(自由度)と関係があることが証明されていますし、「気体定数」はボルツマン定数と1モルの分子の数(アボガドロ数)を掛け合わせたもので、このボルツマン定数は「エントロピー」を統計力学で定義する際に必要な定数なので、気体の比熱は「エントロピー」とも繋がりがありそうです。

熱力学では、前項のようにエントロピーは、『状態(1)を基準にしたときに、状態(2)とのエントロピー差は $\{(\text{エネルギーの変化量}) / (\text{絶対温度})\}$ を状態(1)から状態(2)まで積分したもの』と定義されています。

エントロピーの定義を変形すると、基準になる温度を T_1 としたとき、より温度が高い T_2 の時のエントロピーは、温度が T_1 のときのエントロピーに、 $\{(\text{比熱}) / T\}$ を T_1 から T_2 まで積分したものを加えたものになります。

なお、「比熱」(正確には定圧比熱)は、一般的には、温度上昇によって大きな値になる温度の関数(T を含んだ式)としてデータ集などに載っています。



以上のことから、温度の上昇によって比熱の値が大きくなりやすい場合には、エントロピーの変化も大きくなりやすいはずで、「エントロピー」は温度変化による比熱の変化しやすさ、ということもできそうです。

比熱が大きいと同じ量の熱エネルギーを持っていた場合でも温度が低くなるはずで、高温側の熱の温度が低いと低温側の熱(多くの場合は常温の熱)との温度差が小さくなって「仕事」や「電気」などの高級なエネルギーへの変換効率が悪くなります。

言い換えれば、エントロピーは、持っている熱エネルギーのうちの仕事などに変換しにくい部分の割合を示していると考えられます。

ここで、熱エネルギーのうちの仕事などに変換しにくい部分は統計力学でいう出現確率の大きい状態であり、両者は同じことをいっていることとなります。

【29】自然界ではエネルギーが関与する変化があればエントロピーは必ず増加する

電線に電気を流せば抵抗があるために一部が熱エネルギーに変わるし、何かを動かせば摩擦で一部が熱エネルギーに変わります。

自然界では何かをするとき、抵抗(いろいろな種類の抵抗があります)や摩擦を完全に無くすることはできないので、利用したエネルギーの一部が熱エネルギーという安定なエネルギーに変換されてしまうことを防ぐことができません。

熱エネルギーに変換されて周囲に存在する熱エネルギーと混ざり合ってしまうと、エネルギーであることに変わりはないのに、もはや変化は起こりにくくなってしまいます。

熱エネルギーだけではなく、水に溶けている少量の塩や空中に排出した炭酸ガスなども、自然に周囲と混ざり合っ均一になろうとしますが、その逆は起こりません。

「エントロピー」は出現しやすさに対応しているので、自然界ではエントロピーが増加していく、言い換えれば、不安定な状態が安定な状態に変化していくのは当然のことです。

自然界にも部分的にはエントロピーが減少する現象は無数にありますが、エネルギーや物質の出入りの無い領域を仮定して、その領域内だけに着目したら、なにか変化が起こると、その領域内では必ずエントロピーは増大しています。例えば、蓄電池で動くエアコンを考えてみます。

エアコンなので、もとの大気を持っていた熱エネルギーを大気より高い熱エネルギーと大気より低い熱エネルギーに分割してくれます。

この大気の部分のことだけに注目するとエントロピーは減少しています。しかし、蓄電池、エアコン、一定量の大気だけを含む領域を頭に描いて、その領域は外部とのエネルギーや物質の出入りは無いものとする、その領域内全体ではエントロピーは必ず増加しています。

地球全体では、太陽から太陽光エネルギーを受け取り、それらのエネルギーが最終的には相対的にエントロピーの大きな状態である海や陸地や大気などの温度の熱エネルギーに変換されますが、これらの熱エネルギーを赤外線として宇宙に放出することができるので、エントロピーの限らない増加は抑制されています。

【30】 エンタルピーという用語について（反応熱・燃焼熱の計算方法）

エントロピーという用語に似ていて、混同されやすいのが「エンタルピー」です。

〔(エンタルピー) = (内部エネルギー) + (圧力) × (体積)〕 と定義されています。

なお、物体は多数の分子でできているので、ミクロにみれば、これらの分子同士の分子間力による位置エネルギーと、分子（原子）の熱運動による運動エネルギーがあります。これらを合わせたものを「内部エネルギー」といっています。内部エネルギーは、多くの場合は、大雑把に熱エネルギーと考えても大きな間違いにはなりません。

ある物質に熱エネルギーや仕事などのエネルギーを与えると、温度が変わるだけではなく、ほとんどの場合、圧力や体積が変わります。

例えば、シリンダーの中に入っている気体を加熱すると、温度が上がるだけではなく、中の圧力が変わったり、体積が変わったりしますし、逆にピストンに仕事を加えて圧縮すれば気体の温度は上がります。

シリンダーの中の気体が膨張して、ピストンを押し広げると、ピストンの外に対して仕事をしたことになります。ある力である距離を移動させると、「力」×「移動距離」が仕事だからです。なお、ピストンを押し広げなかったら内部の圧力は上昇しますが、外に対して仕事はしていません。

シリンダーの中の気体に与えた熱エネルギーは、気体の温度が上昇した分だけ気体が持っているエネルギーが増加したのではなく、仕事も熱エネルギーも同じくエネルギーなので、外に対してした仕事にも変換されたはずで。

そこで、熱エネルギーと（体積変化×圧力）とを纏めて取り扱うと便利になります。その纏めた値がエンタルピーなので、エンタルピーはエネルギーの量であるはずで。当然、エンタルピーの単位はエネルギーの単位と同一です。

（好奇心の旺盛な人のために）

一般に、化学反応を行わせると発熱したり吸熱したりしますが、体積や圧力が変化することも多いので、熱エネルギーにだけ注目したのでは片手落ちになってしまいます。そこで、化学反応の反応熱・燃焼熱を計算する時には、反応前後のエンタルピーの差を計算すれば正しい値が計算できます。

様々な物質の 25°C におけるエンタルピーの値はいろいろなデータ集に記載されています。このデータ集の ΔH_f° と記されている欄が 25°C におけるエンタルピーの値です。一例として、メタンの燃焼でどの程度の発熱をするのか計算をしてみます。

反応式は $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ です。

25°C におけるエンタルピーは古いデータ集では次のような数値になっています。

CH_4 : -74.9 kJ/mol O_2 : 0 kJ/mol CO_2 : -94.1 kJ/mol

気体の H_2O : -57.8 kJ/mol

反応後の得られた物質のエンタルピーの合計から反応前の物質のエンタルピーの合計を差し引くと反応した際に放出される反応熱が得られます。

計算をすると次のようになります。

$$\{-94.1 + 2 \times (-57.8)\} - \{-74.9 + 2 \times 0\} = -803 \text{ kJ/mol}$$

分子が持っているエネルギーがマイナスになるということは、エネルギーを外に出したということなので、メタン 1 mol を燃焼させたら、803 kJ/mol の発熱をすることになります。

【31】 エクセルギーという用語について

エネルギーの話では、稀に「エクセルギー」という用語が使用されています。

また、大切なのは省エネルギーではなく省エクセルギーなのだ、と主張もされています。その

通りで、ほぼ「利用価値の高いエネルギー」に相当します。

前述のように、エネルギーは使用しても無くなりません。エネルギーの種類や状態が「より安定な形態のエネルギー」に変わるだけです。

そこで、「仕事」というエネルギーに 100%変換することができるエネルギーを「エクセルギー」といっています。別の言い方をすれば、使用したら無くなる（使用したら、人為的に利用しにくい常温の熱エネルギーに変換されてしまう）エネルギーのことです。

電気エネルギーなどは理想状態では 100% 仕事に変換できますが、熱エネルギーは「仕事」に 100%変換することはできません。特に、一般的な状態では、常温の熱エネルギーはほとんど「仕事」には変換できないので、エネルギーは持っているけれどエクセルギーはほぼゼロだということになります。

それでは常温ではない熱エネルギーはどの程度のエクセルギーを持っているのでしょうか。高温の熱源の絶対温度を T_2 とし、低温の熱源の絶対温度を T_1 としたときに、高温の熱源の熱のうち「仕事」に変えることができる割合は、現実には存在しない理想的な状態で $(T_2 - T_1) / T_2$ （カルノー効率）となります。

世の中ではほとんどの場合、低温の熱源は常温になるので、高温の熱源のエクセルギーは熱エネルギーが持っている総量の $(T_2 - T_1) / T_2$ に比例するはずですが。

また、一般的には大量に入手しにくいのですが、常温よりも温度の低い熱源があればエクセルギーを持っていることになります。なぜならば、この場合には、常温の熱源が「高温の熱源」になり、常温よりも温度の低い熱源が「低温の熱源」になって、常温の熱を仕事に変換することが出来るからです。

エクセルギーは使用したら無くなるので理解しやすい利点がありますが、カルノー効率が現実離れしている場合が多いので、計算値の絶対値を信用しすぎないように注意する必要があります。また、エクセルギーが小さい熱源は動力などには役に立ちませんが、人間が生活するための快適な環境を準備してくれている場合も多いので、全く役に立たない、と言ってしまうと語弊があります。

なお、「仕事」に 100% 変換することができるという意味でエクセルギーに似ている「自由エネルギー」は化学反応が関与している場合に多用され、物理変化を取り扱うことが多い機械工学などではエクセルギーが多用されているようです。

【32】気体のする仕事について

「熱エネルギー」を「仕事」というエネルギーに“継続的に”変換させようとする、熱エネルギーの本質である分子運動はあらゆる方向を向いたものが場所による分布を持たずに混じり合っているために、分子運動の向いている方向が同じものを揃える必要が無い気体の体積膨張に頼るのが好都合になります。

気体に熱エネルギーを与えると、温度が上昇して膨張するし、気体が膨張すると外に向かって「仕事」をしたことになります。

例えばピストンが付いているシリンダーに入っている気体を加熱すると、膨張してピストンを動かしますが、ピストンを動かす「力」は気体の圧力とピストンの面積を掛けた値になるはずですが、また、この「力」にピストンが「移動した距離」を掛けあわせれば「仕事」になるはずですが。

もしピストンの外部が真空であれば、外部の圧力はゼロなのでシリンダー内部から外部に向かう「力」が無くてもシリンダー内の気体は膨張しますが、気体が仕事をしたことにはなりません。気体が外部に向かって仕事をしていないのだから、気体が膨張しても温度は下がらないはずですが。もし、膨張して温度が下がったとしたら、気体が持っていた熱エネルギーの一部が消えたことになりませんが、エネルギー保存の法則から忽然とエネルギーが消えることはありません。

1モルの気体の膨張による体積の変化と絶対温度の変化は、理想的な状態を考えると、ほとんどの気体で次の関係になることが知られています。なお、この式は「気体の状態方程式」といわれています。

$$\text{「圧力」} \times \text{「体積」} = \text{「気体定数」} \times \text{「温度」}$$

【注釈】気体定数（通常はRと表示されています）とは、 $8.3144598 \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ で、単位のとりにかたによって数値は変わります。

【注釈】「圧力」は（力÷面積）であり「体積」は（面積×移動した距離）なので、「圧力」×「体積」は「力」×「移動した距離」になり、「仕事」の定義と同じになります。

気体が同じ圧力（力÷面積）のまま変化する場合には（等圧変化では）、この気体が行う「仕事」は体積の変化（面積で割ったら移動した距離）に比例するので簡単です。「仕事」は「力」×「移動した距離」だからです。

気体が同じ温度のまま変化をするときには（等温変化では）、上記の「気体の状態方程式」の「気体定数」×「温度」が一定なので、「圧力」×「体積」は変化しないし、圧力は体積によって変化するので計算がちょっと複雑になります。

この場合に気体が初期の体積から終点の体積まで変化した場合には、その気体が行った仕事は{(終点の体積)÷(初期の体積)}の自然対数の値に気体定数と絶対温度をかけた値になります。

気体が外部との熱のやりとりをしない断熱変化をする場合には、気体を持っているエネルギー量は変化しないし、気体が膨張して外部に向かって「仕事」をしたら、この「仕事」というエネルギーと同量の「熱エネルギー」が減るので次式のように温度が下がります。

$$\text{「仕事の量」} = \{(\text{初期の絶対温度}) - (\text{終点の絶対温度})\} \times (\text{定容モル比熱})$$

なお、この結果を導くためには、少し計算が必要です。

(好奇心の旺盛な人のために)

気体の状態方程式はどうして気体の種類によって変化しないのでしょうか。1気圧のもとでは1モルの気体の体積はどんな気体でも22.4リットルからあまり変わらない値になります。

気体の体積といっても分子の体積自体はほんの僅かで、分子が運動している範囲が気体の体積になっているためにどの気体の体積もあまり変わらない値になっています。

言い換えれば、質量が小さい分子は運動速度が大きいので、分子が壁にぶつかる強さには差がありません。

実際の気体（実在気体といいます）は上記の気体の状態方程式を修正した状態式でより正確に示すことができます。分子によって分子自体の体積や分子同士が互いに引き合う力が異なるので、これらを補正するための修正項を導入しているからです。

(好奇心の旺盛な人のために)

「気体定数」はボルツマン定数というものと1モルの分子の数（アボガドロ数）を掛け合わせたものですが、このボルツマン定数はエントロピーを統計力学で定義する際に必要な定数です。また、溶液の話である浸透圧の計算にも気体定数が必要になります。ということで、液体の話にどうして気体定数が必要なのかと疑問に感じますが、気体定数の素性を正確に理解するのは厄介です。どうもこの定数の名前の付け方に問題があるようです。

[33] 不可避免的に熱エネルギーに変換されてしまう現象

自然界にはいろいろな「抵抗」があって、価値の高いエネルギーの一部が熱エネルギーに変換されるのを止められません。ひとたび熱エネルギーに変換されると、周りの熱エネルギーと混ざ

り合って利用価値が低いエネルギーになってしまいます。

摩擦（粘性抵抗なども含む）……………代表的な現象が誰もが知っている摩擦です。

導電抵抗……………電気を流した時に、電線などで抵抗のためにその一部が熱エネルギーになることが避けられません。

【蛇足】電線の抵抗の原因はどんなものなのでしょうか。金属では原子核（プラスに荷電）が格子状に並んでいて、外側に電子の殻があります。外側の電子は自由電子（束縛を受けていない電子）となっていて、原子核の格子を動き回ることができるために金属は導体になっています。常温では、プラスに荷電した原子核の熱による動きが電子を散乱させ干渉を起こすために、それが電気抵抗の主な原因になっているのだといわれています。金属中の不純物が邪魔をして金属原子の格子が崩れている場合にも、電気抵抗の原因の一つになりますが、その影響はあまり大きなものではない、とされています。

接触抵抗……………2つの導電物質を接触させて電流を流すと、その接触している部分で電圧が低下したり温度が上昇したりします。

【蛇足】電気を通す導体は多くの場合に金属なので、空気と接触していると表面に金属が酸素と反応してできた酸化膜が発生します。金属の酸化物は電気を通しにくいものが多いので抵抗になります。

反応抵抗……………化学反応では、「活性化エネルギー」というバリア（障壁）があって、このバリアを乗り越えないと反応が進みません。しかし、このバリアを越えるために費やしたエネルギーと同量のエネルギーがバリアを乗り越えた後に返還されるので、反応熱には影響しません。ただ、このバリアを越えるために費やされるエネルギーが価値の高いエネルギーだと返還されるエネルギーは、多くの場合に、価値の低い熱エネルギーなので問題があります。

【蛇足】たとえば、水素を燃料にして、熱エネルギーを経由せずに、直接発電できる燃料電池では、電極での化学反応に伴う反応抵抗のために発電効率が低下して、発電量が減少し、代わりに熱エネルギーが発生します。

【蛇足】活性化エネルギーというバリアを小さくするのが触媒の役目です。触媒はバリアを小さくして反応速度を大きくするだけで、反応に伴って放出または吸収されるエネルギーの量（反応熱）には全く関与しません。

拡散抵抗（物質移動抵抗）……………燃料電池などでは、電極の表面への燃料の水素や空気の供給速度が不足していると発電効率が悪くなります。また、二つの電極（正極と負極）に挟まれた部分に電解質というものがあり、この中を水素イオン（ H^+ ）などのイオンが移動しています。このイオンの移動速度（拡散速度）が遅くても発電効率が低下して化学エネルギーが熱エネルギーに変換される割合が大きくなります。

【34】仕事を電気エネルギーに変換する

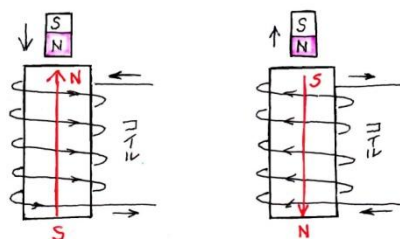
「仕事」の「電気エネルギー」への変換はエネルギー変換の中心的な技術です。

発電所などで発電機を回すために加えた仕事が発電機が電気エネルギーに変換されるのですが、どのような原理で変換されているのでしょうか。

電気を通す材料（金属など）の近くで磁場を変化させれば電流が発生して電気エネルギーが生じます。磁場を変化させるだけなら簡単に変化させられるだろうと思いますが、磁場を変化させるためには磁石に力をかけて移動させる必要があります。

下図のようにN極をコイルに近づけると、または遠ざけると、コイルに電流が流れ、磁場が発生します。発生した磁場に反発され、または引っ張られながらN極をコイルに近づけ、または遠ざける必要があるので「力」をかける必要があります。

「力」をかけて、遠ざけたり近づけたり、移動させることが「仕事」というエネルギーなので、磁石を動かす仕事が電気エネルギーに変換されることとなります。



それでは、どうして磁場を変化させると電気エネルギーが発生するのでしょうか。

原子は原子核と多数の電子で構成されていますが、これらの電子は磁界の向きや強さによって一定の動き方をしています。

もし突然に磁界が大きく変わったら、原子核の周りの電子の動き方も変わります。その結果、金属などは電子の動き方が落ち着く状態になるまで、隣あった原子間で電子のやりとりをし、結果として、ほんの一瞬ですが、その物体の中の電子は動き、電流（電子）が流れます。

磁界が変化しなくなったら即座に電流は流れなくなります。

なお、強い磁石を近づけると大きな電流が流れるのは、それだけ金属などの中の電子の動き方の変化が大きくなるからです。

【35】総合問題 ラジオメーターの羽根が回り続ける原理

街の中を歩いていると窓辺に下図のような置物が置いてあって、中で羽根がぐるぐる回っているのを見かける事があります。

これは「クルックスのラジオメーター」というものです。この羽根には動力源は接続されていないので、どうして回り続けているのだろう、と不思議に思っている人も少なくないようです。

さして難しい話ではないので、練習のために諦めずに考えてみましょう。



羽根が回り続けている原理は次のようなものです。

羽根の片面を白く、もう一方の面を黒く塗ってあり、通常 4 枚の羽根が白黒、白黒となるように回転軸に固定されています。

羽根に赤外線を含む光（太陽光など）があたると、光の吸収率の大きい黒く塗った面が白く塗った面よりも暖められ、黒い面に接触した気体分子の方が白い面に接触した気体分子よりも温度が高いため激しい気体運動をし、気体分子の羽根の面への衝突の強さも大きくなり、羽根車は回転する力を得ることができます。

しかし、赤外線は熱エネルギーを持っている物体から放射されているのだから赤外線をより強く放

射する温度の高い熱源がありさえすれば羽根の回転という仕事をを行わせることができるのではないかと勘違いしてはいけません。この点が重要なので、敢えてラジオメーターの説明をしています。

例えば、ラジオメーターを同じ温度の同質の物体で取り巻き、あらゆる方向から同一波長で同一の強さの赤外線浴びせた場合には、羽根の両面の温度の差はなくなり、結果として、羽根は回転しなくなります。なお、「同質の物体」と記したのは、温度が同じでも放射される赤外線の強さが物質によって異なるからです。

羽根も温度をもっているので羽根からも赤外線が放射されています。羽根の表面から放射される赤外線がラジオメーターを取り巻いている物質から放射される赤外線よりも弱い間は、羽根の表面では受け取る赤外線のほうが多くなり、ついには同じ温度になってしまいます。

ラジオメーターが置いてある周辺の一部に、羽根の表面より弱い赤外線しか放射しない温度の低い場所を作っておけば、羽根の表面から放射される赤外線を受け取る側になってくれるので、羽根の両面の温度差を作ることができるようになります。

以上のように、熱エネルギーを仕事（羽根が摩擦に抗して動き続ける）に変換するためにはどうしても「高温の熱源」と「低温の熱源」が必要です。

太陽光を当てる場合には、高温の熱源は太陽光であり、低温の熱源はラジオメーターが置いてある場所の周囲に存在する物体です。

【36】総合問題 「水飲み鳥」が動き続ける原理

昭和 20 年代に発明され、40 年代に爆発的に売れ、いたるところに置いてあった「水飲み鳥」という玩具があります。「平和鳥」とも呼ばれていました。

現在も販売されていますが、ガラス製なので破損した際の安全性向上のために、中に入っている溶剤は引火しやすいエーテルから燃えにくいジクロロメタンに変わっているようです。

内容は難解ではないのですが、すこし複雑なので、練習のために深く考えてみましょう。きちんと説明ができるようであれば問題なく卒業です。

この玩具の鳥の形をした部分がお辞儀をしてコップの中の水に嘴をつっこむ動作を繰り返し続けるものですが、電池仕掛けでもなく、「エネルギーを加えていない」のにどうして動き続けるのだろうと不思議がっていた人も多いようで、中には永久機関ではないかと考えている人もおられたようです。

永久機関というものは世の中には絶対に存在しませんし、また、この動作は決して巷で言われているような「難解な話」ではありません。

「エネルギーを加えていない」という認識が間違っているだけで、簡単な熱機関（熱を仕事に変換する装置）にすぎません。



鳥の頭の部分が水を吸収しやすいフェルトで覆われているために、吸収されている水が蒸発することで温度が下がって「温度が低い熱源」を存在させることができ、室内の空気を「温度が高

い熱源」とした熱機関になって動き続けています。

この「水飲み鳥」を水の入ったコップとともに空気が入れ替わらない小さなガラスケースに入れておけば、ケースの中の湿度が上昇して鳥の頭の部分から水が蒸発出来なくなり、結果として頭の部分を「温度が低い熱源」にできなくなるので、熱エネルギーを仕事に変換できなくなって動かなくなります。

このことから、「水飲み鳥」が永久機関ではないことは理解できるはずです。

総合的にみれば、室内の空気から熱エネルギーの供給をうけており、「エネルギーを加えていない」訳ではありませんし、不要になった熱エネルギーは水を蒸発させて取り去っています。

室内の空気などから「水飲み鳥」に伝えられた熱エネルギーのほんの一部が仕事になり、その仕事も「水飲み鳥」が動く時の摩擦などで熱エネルギーに変わっています。

水飲み鳥の動作は次のようなものです。

細いガラス管の両端が膨れており、それが頭部とお尻にデザインされており、お尻の部分にはガラス管が内部まで差し込まれている構造になっています。内部は完全に密封して空気が抜かれた状態になっており、少量の色のついた沸点の低い溶剤（蒸発しやすい溶剤）が入れています。

ガラス管のほぼ中央部には、金属プレートが固定されており、ここが水を繰り返し飲み続ける動作を担う支点になっています。

水飲み鳥の頭部と嘴は、外側を吸水性に優れたフェルトで巻いてあります。

フェルトが水で濡れていると、水の蒸発で蒸発熱を奪われて温度が下がります。頭部の温度が下がると溶剤の蒸気圧が小さくなるので（頭部では溶剤の蒸気の一部が液体にもなっています）、頭部は温度が高いお尻の部分よりも圧力が下がります。

【注釈】蒸気圧という用語について簡単に説明します。液体や固体の物質はその物質と接している空間に分子を散らばらせています。例えば、水は接している空間に水蒸気を、溶剤では溶剤の蒸気を散らばらせています。

また、固体の水（氷）でも水蒸気を散らばらせています。しかし、その散らばらされている量は温度によって決まる量以上にはなりません。一般的に温度が高いほど多くの量を散らばらせることができます。

もし、空間がもともと真空であれば、空間の中は散らばらされた分子だけが存在しますが、その時の圧力がその液体の蒸気圧になります。分子が散らばっていない完全な真空では0気圧ですが、例えば水の場合には温度が100℃以上では1気圧以上の蒸気圧になります。空間にもともと空気などが入っている場合でも、真空の時と同じだけ液体や固体の分子が散らばってしまいます。

1気圧の場合には、おなじ体積であれば、空気だけの時と空気中に液体や固体の分子が散らばっている時で分子の数の合計は変わりません。言い換えれば、空気だけの時の方が空気中の分子の数は多くなります。液体や固体の分子が散らばっているときには空気の蒸気圧と液体や固体の蒸気圧は「分圧」といわれています。分圧を合計したら全圧になり、1気圧になります。



この圧力の差で、上の写真のようにお尻の部分にあった溶剤がガラス管内に押し上げられます。これによって重心（重さの中心）がお尻の部分から頭の方向に移動し、バランスが崩れてコップに倒れこみ、水を飲む姿勢になって嘴から水を吸い取ります。

コップに倒れ込んだ姿勢の時に、下図のようにお尻の部分に差し込まれているガラス管の下端が液面からはみ出し、ガラス管内および頭部に蒸気（気体）が入り込んで、ガラス管内の溶剤をお尻の部分に流れ落とします。

そして、お尻の部分が重くなると、重心がお尻の方向に移動して元の姿勢を取り戻します。こうしてお辞儀をする運動を繰り返しています。



フェルトに含まれた水が蒸発して水蒸気になっても、その水蒸気がそのままその場所に留まっていると、ガラスケースに入れた時のように、継続的に水を蒸発させることはできませんが、水蒸気が拡散できる状態の時には、水蒸気になった水の分子もできるだけ大気中に均一に分散しているほうが安定なので（エントロピーが大きくなるので）自然に拡散してしまいます。

それでは、この水飲み鳥という玩具はどこが面白いのでしょうか。

常温という最も利用価値の低い熱に取り囲まれているにもかかわらず、温度差は大きくないのですが、上手に常温よりも温度の低い熱源を入手していることです。

この常温よりも温度の低い熱源の確保に、自然界ではエントロピーが増大しやすいという特質を上手に利用しています。

エントロピーが増大することを阻害されている（水蒸気の拡散を阻害されている）ガラスケースに入っている場合には、ケースに入っていない場合と同様に熱エネルギーの移動は可能なのに、「温度の低い熱源」は得られず、結果として熱機関にはなり得ません。

エントロピーが増大する現象が重要な役割を果たしていることがよくわかる格好な例なので注目を集めています。

参考：温暖化抑制対策

近年、エネルギーに関する議論が盛んになってきました。地球温暖化が深刻な影響を及ぼし始めたことが一因になっているのではないのでしょうか。

多くの人々が炭酸ガス（二酸化炭素）の排出量の削減に関していろいろな提案をされていますが、なかには間違った議論もあるようです。

地球温暖化の抑制は極めて重要な課題なので別枠にまとめて整理しました。

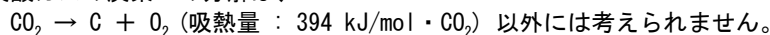
【41】炭酸ガスを炭素と酸素に分解することを考えてはいけない

炭酸ガス（二酸化炭素）は炭素と酸素が結合してできているのだから、邪魔になるのなら、固体の炭素と気体の酸素に分解すればいい、と考える人もおられるようです。

知的興味から炭酸ガスの分解反応の研究をされているのであれば、とやかく言う必要もありませんが、この提案を実用化しようとする、エネルギーの無駄遣いになり結果として炭酸ガスの

排出量を逆に増やしてしまいます。また極めて高コストなものにもなってしまうので、経済的な観点からもあり得ない話です。

【説明】炭酸ガスの炭素への分解は、



化学反応では、反応を進めたときに発熱する場合には、その逆の反応を進めようとするこの発熱の場合と同量のエネルギーを加える必要があります。

そうでなければ、エネルギーというものが忽然と消えてしまうか、新たに発生したりすることになり、エネルギー保存の法則に反することになります。

例えば、炭素（石炭など）を燃焼させて炭酸ガスにした場合には多量の熱エネルギーを発生しますが、逆の反応を進めて炭酸ガスを炭素と酸素に分解しようとする、理論的には、炭素を燃焼したときに発生した熱エネルギーと同量のエネルギーを加える必要があります。

そんなエネルギーが入手できるのであれば、炭酸ガスを炭素に戻すよりも、そのエネルギーを上手に利用して、新たな炭素を含んだ燃料の燃焼を削減したほうが賢明であることは言うまでもありません。

実際に炭酸ガスを分解するためには、そのための装置を運転する動力が必要になったり、反応ロスが出たりすることで、理論値以上に多量のエネルギーを消費してしまい、結果的に分解した炭酸ガスよりも多くの炭酸ガスを新たに発生させてしまうことになります。

エネルギーの無駄使いをして、費用をかけて、炭酸ガスの排出量を増やしても構わないのであれば、炭酸ガスを炭素に分解して固定することはさして難しい技術ではありません。

【42】炭酸ガスを原料に使用することを考えてはいけない

炭酸ガスが邪魔なのであれば、これを原料にして有用な物質に変換したらいいのではないかと考える人も少なくないようです。

しかし特殊な場合を除き、炭酸ガスを原料にしたら、温暖化抑制という観点からは、逆効果になってしまいます。

化学エネルギーを持ち得ない炭酸ガスを化学エネルギーを多く持ち得るメタンのような物質に変換しようとする、最低限、化学エネルギーが増加する分だけのエネルギーをどこからか調達する必要があります。そうしないとエネルギー保存の法則に反します。

もし、そんな簡単に（安価に）調達できるエネルギーがあるのなら、製造する際のロスによるエネルギーの無駄遣いを出さないためにも、設備費などの無駄な出費をかけないためにも、そのエネルギーをそのまま利用することで化石燃料の使用量を減らした方がはるかに賢明なはずで

【注釈】例えば、太陽光を利用して製造した水素ガスと炭酸ガスを反応させてメタノール（メチルアルコール）を合成することは可能です。この場合には、炭酸ガスの排出量を削減できるのではないかと勘違いしがちですが、天然ガス（メタンなど）を原料にしてメタノールを製造したほうが炭酸ガスの大気中への排出量削減という視点からは有利になります。

ただ、窒素肥料として使用されている尿素は温暖化が話題になる以前から炭酸ガスとアンモニアを反応させて合成されています。この場合のように、炭酸ガスがどうしても必要な場合もありますが、ほとんどの場合、炭酸ガスを原料に使用するという話は非現実的なものなので注意しましょう。

【43】わが国ではバイオエタノールを自動車の燃料に使用しても完全な炭酸ガス排出抑制にはならない

バイオエタノールとはサトウキビなどを発酵させて得られるエタノール（エチルアルコール）です。ブラジルなどでは自動車用の燃料にも利用されています。

【注釈】エタノールは石油化学工場などでも簡単に製造できます。そこで、植物などの天然の材料を使って製造されたエタノールを区別するためにバイオエタノールと言っています。

しかしわが国では、バイオエタノールを燃料にして自動車を駆動させても炭酸ガスの完全な排

出抑制効果は期待できません。例えば、このエタノールを燃料にして発電をして、得られた電力を電力系統に流し込んだら火力発電所での発電量が削減され、化石燃料の使用量が減ります。

火力発電所での化石燃料使用量削減を犠牲にして自動車を駆動したら、間接的に自動車が炭酸ガスを排出していることになるはずでず。

自動車をどんな方法で動かしても利用価値の高いエネルギーを消費してしまうので、わが国では炭酸ガスの排出量を増やしてしまうこととなります。ただ、自動車を駆動する方式によってエネルギー変換効率に差があるので、変換効率の高い方式で駆動することが大切になります。

【余談】自動車を動かすと「エネルギー」（利用価値の高いエネルギー）を消費することは誰もがよく知っています。自動車を駆動するために必要な「仕事」という種類のエネルギー量は車体重量や空気抵抗などに大きな影響を受けます。自動車を動かすときには、加速抵抗やこらがり抵抗（タイヤの変形など）や空気抵抗などの抵抗（力）に対抗する必要があります。「力」は「質量」×「加速度」だし、「抵抗（力）」×「移動した距離」が「仕事」という種類のエネルギーなので、車体重量は「エネルギー」消費に大きな影響を与えているはずでず。

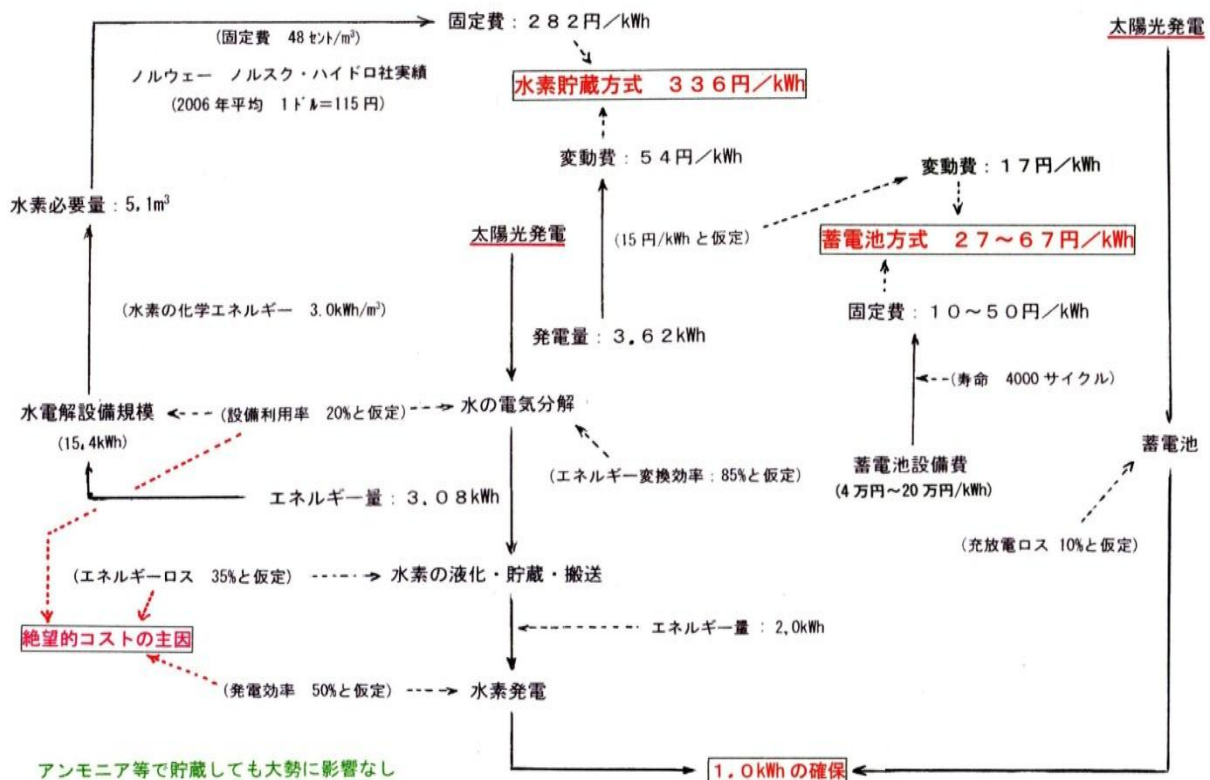
【44】水素は化石燃料に代替できるエネルギー源ではない

水素はごく特殊な場所以外では天然に存在していません。そこで水素を入手するためには、化学工場などで副生している水素を活用するか、多くのエネルギーを使って水を電気分解したり、化石燃料を高温で水蒸気と反応させたり、工業的に製造する必要があります。

化学工場などで副生している水素も発電用のボイラーなどの燃料に使用されており、捨てられているわけではありません。すでに燃料として使用している水素を取り上げたら、そのボイラーなどの燃料を化石燃料で補う必要があります。よって、再生可能エネルギーのような化石燃料に代替できるエネルギー源ではありません。

敢えて水素とエネルギー問題のかかわりを求めるのであれば、エネルギーを輸送したり貯蔵したりするための手段の一つとして活用することができることです。

しかし、エネルギー、特に電力、の貯蔵手段としては使い勝手もコスト面でも二次電池（蓄電池）に対抗できない可能性が高いと思われます。



【45】わが国では「CO₂フリー水素」は存在しにくい

「CO₂フリー水素」という用語は炭酸ガスを直接または間接に空気中に排出することなく製造された水素ガスという意味で使用されています。

【注釈】一般的には水素ガスはメタンなどの炭化水素化合物と水蒸気を高温で反応させて製造しています。炭化水素化合物と水蒸気を反応させると水素ガスと炭酸ガスの混合ガスが得られるので、水素ガスと炭酸ガスを分離すれば水素ガスを得ることができます。

北欧のアイスランドやノルウェーなどでは「CO₂フリー水素」が存在し得ます。これらの国では、わが国とは異なり、化石燃料を使用した火力発電設備がほとんどないからです。

「CO₂フリー水素」が存在し得ないのなら、水素ガスを燃料にする燃料電池に完全な温暖化抑制効果を期待することはできません。

火力発電が盛んなわが国で「CO₂フリー水素」が存在しにくい理由は次のようなものです。

例えば、風力発電で得られた電力があるとします。この電力を使って水を電気分解したら炭酸ガスを排出しないで水素ガスを得ることができます。

一方、この電力を電気分解に使用せずに送電線網（電力系統）に流したら火力発電の負荷が下がり、炭酸ガスの排出量が減少します。

同じ電気で、水素ガスを得ることもできるし、炭酸ガス排出量を削減することもできます。

言い換えれば、水の電気分解で水素ガスを製造する場合には、火力発電所での炭酸ガス排出量削減というメリットを放棄することと引き換えに水素ガスを入手しているのです。

よって、水素ガスを得るために炭酸ガスを排出していることと同じことになります。

電気エネルギーというエネルギーはどんな用途にも利用しやすいので、送電線や配電線網が確立しています。

わが国では電力の多くを火力発電で得ているので、自然エネルギーで発電した電力を電力系統に流せば火力発電の負荷が下がり、結果として炭酸ガスの排出量が減少します。

すなわち、太陽光や風力が持っている自然エネルギーを電気エネルギーというエネルギーに変換する行為が炭酸ガスの排出量を減らしているのであって、電気エネルギーを使って水素ガスを製造したり、その水素ガスを燃料にして自動車を駆動することが炭酸ガスの排出量を減らしている訳ではありません。

理解をより確実なものにするために、別の説明をしてみます。

我々が入手できる利用価値の高いエネルギーは、一次的には、水力や地熱も含めた自然エネルギー、原子力、化石燃料だけです。これらを利用しやすい電気エネルギーや熱エネルギーなどに変換して利用しています。必要があれば水素ガスに変換することもできます。

わが国では利用価値の高いエネルギーを一定量必要としています。

自然エネルギーと原子力とで足りない部分は化石燃料を使用せざるを得ませんが、化石燃料を使用すれば、炭酸ガスを排出することになります。

自然エネルギーと原子力と化石燃料の必要量の合計のうち、自動車の駆動に自然エネルギーを使用したら、その分だけ他の用途で化石燃料を使用せざるを得なくなります。

結果として、自動車の駆動に自然エネルギーを使用しても炭酸ガスの排出量を抑制することには直結しません。

ということは、太陽光発電で得られた電力を電気自動車の蓄電池に充電をしたら、化石燃料を使用した火力発電所の発電量が増加して、間接的に炭酸ガスの排出量を増やすことになります。わが国では利用価値の高いエネルギーを消費したら、炭酸ガスの排出量を増やしてしまうことに注意する必要があります。

なお、実用化されている自動車駆動方式の中では電気自動車が最も炭酸ガス排出抑制効果が大いことは確かです。

【47】CO₂の排出を増やさないでエネルギーを消費するのは難しい

自宅の屋根に太陽光発電設備を設置して、発電して得られた電力を冷房などに利用したら CO₂の排出を増やしていないのではないかと考える人も少なくないようです。

しかし、太陽光発電設備で発電した電力を電力系統(送電線網)へ流したら、火力発電所の発電量を引き下げることができ、結果として、火力発電所からの CO₂ 排出量が減るはずですが。

言い換えれば、火力発電所から発出される CO₂ を削減できるというメリットを捨てて冷房などに使用していることになります。よって、冷房などにエネルギーを使えば CO₂ を排出してしまうことと同じことになるはずですが。

この例のように、わが国では、利用価値の高いエネルギーを消費したら直接的または間接的に CO₂の排出量を増やしてしまいます。

このことから、CO₂の排出量を抑えるためには省エネルギーやエネルギーの無駄遣い抑制が非常に大切になってきます。

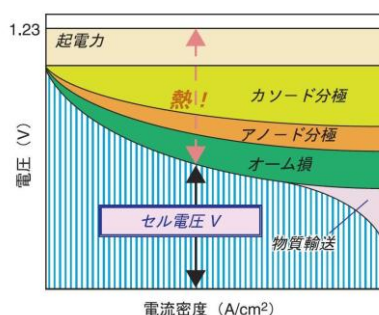
【48】燃料電池の発電効率を高めるためには電池を大幅に増やす必要がある

燃料電池を普及させるためにも燃料電池のコストを大幅に引き下げる必要がありますが、燃料電池の性能を大幅に向上させることは簡単ではありません。

反応温度が低い燃料電池(固体高分子型燃料電池)の場合には、理論的には水素と空気のリ組み合わせが持っている化学エネルギーの9割以上の発電効率を得られる筈ですが、電池には「分極」という本質的な問題があって大幅に発電効率が下がってしまいます。

同一の電池で負荷を大きくしようとすれば発電効率が低下します。下図のように、負荷を大きくして電流密度を大きくすると分極が大きくなり電圧が下がります。

発電効率の向上と設備費の低減がトレードオフの関係になっています。



【49】わが国のバイオマスに過剰な期待をしてはいけない？

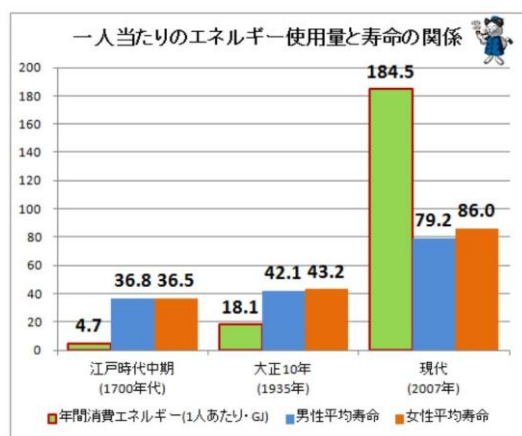
温暖化防止対策のためにバイオマスの活用が推奨されていますが、わが国でエネルギー源として利用可能なバイオマスはどのくらい有るのでしょうか。

江戸時代のことを考えてみると、当時は必要なエネルギーの大半をバイオマスに頼っていたはずであり、当時の人口(3000万人前後)で当時の文化水準だったらなんとか賄えることができていたようです。

なお、江戸時代中期のエネルギー消費量は、人口増加も考慮してわが国全体で比較すると、現在の170分の1程度だったと推定されています。

わが国に降り注ぐ太陽光が当時と現在とで大きく変化はしていないので、現在でも入手できるバイオマスの量がけた違いに多くなっているとは考えられません。

また、成長力の大きい植物を育て続けていると、長年にわたって蓄積されてきた土壌中の養分(有機物)を短期間に吸収してしまって土地が砂漠化しやすいので注意が必要です。



【50】人工光合成は技術が完成しても実用化にはならない

植物が光合成で作りに出しているデンプンや蛋白質のような複雑な化学構造を持った物質を、太陽光を使って人工的に合成する技術も遠い将来には完成するのかもしれませんが、工業化は100%不可能です。

反応装置を作る費用が巨額になって、核融合と同様に、経済競争力が皆無だからです。農業や林業に経済性の面で対抗できません。

【51】水素は無尽蔵にあるという説明をしてはいけない

水の惑星である地球には水素は無尽蔵にあるのではないか、という誤解もあるようです。水と太陽光があれば水素ガスは無尽蔵に製造できるのだ、という主張なのかもしれませんが、水は地球上では化学エネルギーを持ち得ないので、エネルギーとして无尽蔵にあるのは太陽光だけであって、水とは全く関係がないはずで

言い換えれば、无尽蔵にあるのは水素原子で、エネルギーを取り出すことができる水素分子ではありません。

【52】不安定電源で水素を製造するコスト負担は小さくない

太陽光発電などの不安定電源で発電された電力で水を電気分解して水素ガスを製造するのは経済性の面で負担が非常に大きいことに注意する必要があります。

電気分解では電極で化学反応が進むので、水素製造設備の生産能力は電極の面積に比例してしまいます。そのために石油化学などと違って設備費に規模の効果が出にくいこと、電極そのものが高価格であること、不安定電源を利用するために設備の稼働率が低いこと、などから多くの人が予想されているよりもはるかに高コストになるはずで

【53】水を太陽光で分解する技術を実用化するのは難しい

酸化チタン(TiO₂)などを触媒にすれば水を太陽光エネルギーで直接的に水素ガスと酸素ガスに分解することができます。化学的な興味を引きやすいのですが、実用的にこの方法で水素ガスを製造するようになる可能性は非常に小さいはずで

この方法では、太陽電池で発電して、その電力で水を電気分解する方式に経済的に対抗できません。

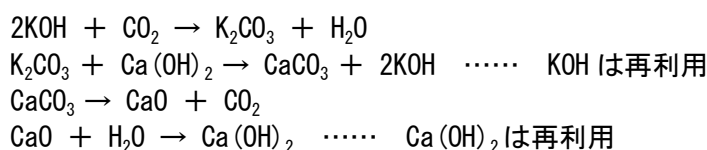
また、水を太陽光で分解して得られる水素ガスと酸素ガスの混合ガスは極めて危険で、ごく少量でしか取り扱うことはできません。大きな装置で水の分解を行った場合には、雷雲が近づいてきただけで装置内に火花がとぶことがあります。火花がとんだ瞬間に爆発します。水素と酸素の混合ガスを圧縮機で圧縮するのも危険なので、膜分離も難しく適当な分離手段もありません。

【54】空気中の炭酸ガスを吸収して回収する提案は実用的ではない

低コストで空気中のCO₂を回収する検討が外国で進んでいると報告されていました。膨大な量の空気を化学処理できるのか、という疑問はとりあえず棚に上げておきます。

CO₂は名前の通り酸性なので、強アルカリ性の水溶液で空気中のCO₂を吸収することは可能です。例えば、水酸化カリウム(KOH)の水溶液と空気を接触させたらCO₂が吸収されて炭酸カリウム(K₂CO₃)の水溶液になります。

ただ、炭酸カリウムは熱分解しにくいので水溶液に水酸化カルシウム(Ca(OH)₂:消石灰)を加えて、水に溶けにくい固体の炭酸カルシウム(CaCO₃:石灰石と同じもの)にし、この炭酸カルシウムを熱分解してCO₂を回収する必要があります。



以上のように化学処理が複雑だし、流体のように配管輸送しにくい炭酸カルシウム(CaCO₃)や生石灰(CaO)などの固形物を取り扱う必要があることから、効率的なプラントにするのが難しいという問題があります。

強アルカリ性の水溶液で空気中のCO₂を吸収するためには、吸収液と空気を接触させる必要があります。接触面積をどうにかして大きくする必要がありますが、そのためには吸収液の液滴の径を小さくするか、吸収液中に分散させる空気の気泡の径を小さくする必要があります。簡単ではありません。

というように、大規模に実施できるような話ではありません。

【55】炭酸ガスを燃料用のメタンに変換してはいけない

炭酸ガスからメタンを合成するための水素ガスを水の電気分解で製造するというのであれば、水も炭酸ガスと同様に利用価値の高い化学エネルギーを持ち得ないので、化学エネルギーを持ち得るメタンを作るためには、外部から多量のエネルギーを供給せざるを得ません。

全くロスなしに理想的に反応が進んだと仮定しても、炭酸ガスと反応させることによって水素ガスをメタン製造の原料にした場合には、製造されたメタンの持っている燃焼熱は、もとの水素ガスの持っている燃焼熱の約8割に減ってしまいます。(残りの2割は反応を進めている際に利用しにくい熱エネルギーなどになります)

なお、逆の反応である、メタンと水蒸気を反応させて水素と炭酸ガスに変換することは、水素の製造を目的にして、世界中で大規模に実施されています。

この場合には、原料のメタンよりも得られた水素ガスの方が酸素との組み合わせで多くの化学エネルギーを持ち得るために、メタンと水蒸気を反応させるときには、多量の熱エネルギーを供給する必要があります。なお、この反応は炭化水素の水蒸気改質（スチームリフォーミング）と呼ばれています。炭化水素はメタンに限らず、エタンやプロパンや液状のナフサ（粗製ガソリン）でも構いません。

以上のことから、炭酸ガスを原料にしてメタンを製造するという提案は価値のあるものとは考えられません。

また、化学反応処理は一般的に期待されているほど安価ではありません。

参考：注意したい発表や報告の例

エネルギーに関連のある報道や発表された内容について、注意する必要がありそうだ、と感じたものを挙げてみました。内容がいくぶん高度なものもあるかもしれませんが。取捨選択して関心のある項目を一読してみてください。

【61】水から化学エネルギーを取り出す

水（ H_2O ）は地球上では極めて安定な物質です。大量に確保できる空気中の酸素とも反応しないので、利用可能な化学エネルギーを持ち得ません。よって、水から大量の化学エネルギーを取り出すことは本質的にできません。

【61-1】水で動く自動車

過去に水で動く自動車という話があって、多くの人が説明を聞きに行ったという騒ぎがあり、マスコミも取り上げていました。

例えば、金属ナトリウムが多量にある極めて特殊な場所であれば、水とナトリウムの組み合わせで大きな化学エネルギーを持つことができますが、金属ナトリウムを製造するためには極めて多量のエネルギーを必要としますし、安価に入手するのは不可能です。

言い換えれば、地球上の通常的环境下では、水は外部からエネルギーを加えることで水力発電への利用のように「位置のエネルギー」は持ち得ても、また、加熱されることによって「熱エネルギー」を持ち得ても、利用できる化学エネルギーの発生源にはなり得ません。化学エネルギーの発生源にはなり得ないので、水に大きな仕事をさせて自動車を動かすことは不可能です。

なお、この水で動く自動車では、水を「触媒」で変化させる、という説明がされていましたが、触媒はどんなことでもできる奇跡的な能力を持っているわけではありません。触媒というものは、理論的に可能な反応の「反応速度を大きくする」ことができるだけで、エネルギー面に関して理論的に不可能な反応を可能にするわけではありません。どんな触媒があっても、外部からエネルギーを加えることなく、水を水素と酸素に分解するような反応は絶対に進みません。

酸化チタン（ TiO_2 ）という固体の物質（触媒）を共存させて水を太陽光に当てると水素ガスと酸素ガスに分解されますが、これは太陽光という利用価値の高いエネルギーを加えているから分解が可能になっています。

同様に、ある種の細菌も太陽光を受けて水を水素ガスと酸素ガスに分解します。この細菌の体内にある酵素が触媒の働きをしているからです。

【61-2】 水から水素を製造すればエネルギーは無尽蔵に確保できる

下記のような主張が公表されていました。

- * 水素エネルギーの利点は、なんといっても無尽蔵にあることだ。
- * 太陽光などの再生可能エネルギーと並んで（水素は）次世代の主演となり……
- * 水の惑星地球にとって水素は、つぎることのないエネルギーなのです。

「水は水素と酸素からできているのだから水素は無尽蔵にある。よって、水素エネルギーも無尽蔵なのだ」と考えておられるのかもしれませんが、しかし、水は地球上では極めて安定で、これらと空気中の酸素を組み合わせても化学エネルギーの発生源にはなり得ません。

水から水素ガスを作る場合には、他のエネルギーを注入する必要があります。エネルギーの注入なしに化学エネルギーを持ち得ない水から化学エネルギーを持ち得る水素ガスができるということであれば、エネルギー保存の法則を完全に否定しています。

水は水素原子と酸素原子が結合している化合物であり、この結合を切り離すためには、理論的にも、水素ガスの燃焼熱と同じ量のエネルギーを必要とします。そうでないと、エネルギー保存の法則に反します。

もしそんなエネルギーがあるのなら、水を分解するのではなく、そのエネルギーを直接使用した方がはるかに経済的です。

また、太陽光で水を分解して水素ガスを製造するのだから水素ガスは無尽蔵にあるのだ、と主張されているのかもしれませんが、無尽蔵にあるのは太陽光であって水素ガスではありません。

【61-3】 水素エネルギーを使いこなせればエネルギー大国への道が開ける

水素ガスはエネルギー源ではなく、エネルギーを移動または貯蔵するための手段の一つにすぎません。水素ガスは地下やその他から湧き出しているものではないので、他のエネルギーを消費しないと確保することはできません。

再生可能エネルギーの利用可能量は、おおまかに考えれば、国土の面積に比例するはずですが、よって、国土が狭く人口密度も高いわが国では未利用の再生可能エネルギーが必ずしも潤沢とはいえません。

これから先の世の中では、食料不足が深刻になりそうなので、太陽光は食料確保に必要であるとともに、林業にも必要です。狭い国土しか持っていない我が国は保有している再生可能エネルギーも多くはないので、エネルギー大国になることができるはずがありません。

水素ガスを使いこなす、という表現の裏に、水素ガスを製造したり利用したりする技術は発展途上で、我が国がその開発の先頭を走っている、との誤解もありそうです。水素関連の技術にはさして難しいものはなく、古くから完成しています。

第二次世界大戦前のドイツでは水素ガスと一酸化炭素から燃料油を製造していました。この時に最大の問題だったのは、鋼鉄製の反応装置が爆発してしまうということでした。

鋼鉄が「水素脆化」という現象で劣化したからです。この問題も現在ではかなり情報が蓄積されています。

【注釈】水素脆化とは、鋼材中に吸収された水素によって鋼材の強度が低下する現象です。

【62】 燃料へ添加物を添加して発熱量を増やす

【62-1】 少量の添加剤を加える

燃料に加えることで燃料の発熱量が増加する、とって燃料に少量添加する添加剤を販売している話を耳にする事があります。

添加剤自体が燃焼して発熱する分は発熱量が増えるかもしれませんが、すでに煤などを発生させずにほぼ完全燃焼させているのであれば、いかなることをしても燃料の燃焼に伴う発熱量を高めることはできません。

燃料が保有し得る化学エネルギー量を超える熱エネルギーを発生させたいとの考えはエネルギー保存の法則に反します。

【62-2】水を攪拌しながら電気分解して得たものを燃料に混合する

発表の概要は次のようなものです。

『水を特殊な振動攪拌をしながら電気分解を行うことにより、ナノ・マイクロバブル（酸素と水素のガスが微細な泡になったもの）が生成します。これが破裂することで、強力なエネルギーが起こり、その結果、安全な酸素と水素の結合体のガスが得られます。プロパンガス・天然ガスに50%混合することで、従来燃料の使用量を半減し、熱量を単体燃料比較で約1.2倍に引き上げる特性を持っています。』

「酸素と水素の結合体のガス」がどんなものなのかわかりませんが、酸素と水素の混合ガスが安全に取り扱えると仮定しても、酸素と水素の混合ガスが保有している化学エネルギーと同量かそれ以上の電気エネルギーを注ぎ込まないとこの混合ガスを製造することはできません。

高級な電気エネルギーを注ぎ込んで製造した酸素と水素の混合ガス（化学エネルギーを持っている）をプロパンガスや天然ガスに混ぜても、この混合ガスが持ち得る化学エネルギー分が増加するだけで、それ以上の有利になることはありません。

【63】水道水の流れを利用して発電する

水道水の流れを利用して水車を回して発電する設備を作る計画があるとの報道がありました。水道水の流れも「運動のエネルギー」を持っており、その運動のエネルギーで水車を回して発電することは可能です。

ただ、水道水の流れが持っている「運動のエネルギー」は何処から得たものでしょう。忽然と発生したものではないはずです。

水道水が持っている「運動のエネルギー」は水道水を送り出すために設置されている送水ポンプから与えられたものです。この送水ポンプに大量の電気エネルギーを加えておいて、得られた水道水の「運動のエネルギー」を発電に利用するという事は、自分が使っている電気エネルギーの一部を抜き取って、新しい電気エネルギーを獲得したのだ、といていることになります。

もし水道水が必要以上に「運動のエネルギー」を持っているのであれば、送水のために投入しているエネルギー量を削減すべきではないでしょうか。

【64】永久磁石を使ってエネルギーを取り出す

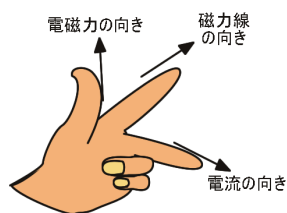
永久磁石は特殊のエネルギーを持っているわけではありません。エネルギーに関連する話があったら鵜呑みにしないで、落ち着いて考えてみましょう。

【64-1】永久磁石で血行を促進し肩こりを治す

肩こりを磁石で治すという記事が目にとまりました。その一部を下記に転記します。

『血液成分の中には、プラスイオンとマイナスイオンに電離するものが含まれている。これが血管中を流れるということは、電流が流れることに等しい。ここに磁石によって磁場を加えると、「フレミングの左手の法則」により力が発生する。この力がイオンの流れを活発にし、血液の流

れをよくすると考えられている。』



水などの液体の中でプラスイオンとマイナスイオンに解離しやすい物質を電解質といいます。最も典型的なのは、水中の食塩（塩化ナトリウム NaCl ）です。

純度の高い水は電気を通しにくいのですが、海水は溶けている食塩がイオン（ Na^+ と Cl^- ）になっているので、電気を通します。また、血液中にも食塩などの電解質が含まれているので電気を通すはずですが。

ただ、電解質を含んだ血液が流れていても、電線の中のように電流が流れている訳ではありません。電解質が解離したプラスイオンとマイナスイオンは通常は同量であり、いわゆる「電気」とはいえず、同量のプラスイオンとマイナスイオンが流れていても電流ではありません。

電流が流れているわけではないので、電磁気学とは無関係で、力も生じません。

また、血液の流量を増やすためには、抵抗に抗して血液流すための追加のエネルギーが必要になりますが、そのエネルギーの供給の役には立っていません。たとえ「力」が生じたとしても、「力」はエネルギーではありません。

なお、永久磁石を使った肩こり治療器具には本当に効果があるのか、その原理はどんなものなのか、は承知していませんが、上記の説明は間違っているようです。

【64-2】永久磁石を使う発電機の動力が削減できた

報道の概要は次のようなものです。

『発電機を回す時に生じる磁石の抵抗（注：力学的なもの）を大幅に軽減させる仕組みを発案した。永久磁石を用いた発電機は磁石を円盤に並べて相対させ、軸を回転させることで電気を発生させる。しかし、磁石同士が引き合う力が働くために回転が重くなるが、4台以上の発電機を1本の軸でつなげ、各台の磁石の位置を軸から見て均等な角度でずらすことで、磁石が引き合う力を相殺させ回転が軽くなった』

「仕事」というエネルギーは、「力」×「移動した距離」なので、回転を軽くしておいて回転が重い時と同じ量の「仕事」を得ることは絶対にできないはずですが。

4台以上の発電機を1本の軸で繋いだために、回転が重いときと軽い時の平均の力で滑らかに回転するようになったというだけで、エネルギーに関する魅力的な提案ではなさそうです。

【65】100°Cの熱源だけで熱を電力に変換できる発電素子

報道の内容は概略下記のようなものです。

『素子の構造はアルミ合金電極と銅合金電極の間に、活物質となる亜鉛化合物と誘電体化合物、導電性高分子の3種類を最適な比率で混ぜたものを挟んだものである。』

この活物質を1cm角で1gほど用いてセルを試作し、LEDを点灯させるデモを実施した。セルをドライヤーで温めることで、赤色LEDを3個点灯させた』

通常の熱電変換素子を使用して熱エネルギーを電気エネルギーに変換する場合には一つの熱源だけでは電気エネルギーを得ることはできませんが、この素子は一つの熱源だけで（低温の熱源がなくても）発電ができるということです。

電流を通す物質は自由に動けるキャリアを多く含んでいます。このキャリアは電荷だけでなく、熱も同時に運びます。すなわち、熱の流れと電流は相互に作用しあっているため、電流を希望する方向に流すためには熱も同じ方向に流す必要があり、必ず高温の熱源と低温の熱源が必要になります。

ということで、気体の膨張・圧縮を利用した熱機関と同様に、二つの熱源がないと熱エネルギーを電気エネルギーに変換することは本質的に出来ません。

【注釈】キャリアとは、電気伝導に寄与する、伝導電子、正孔（ホール）、伝導イオンなどの総称です。熱電変換素子に関しては後記の【71-2】を参照してください。

ただ、報道によれば電流が流れたことは事実らしいので、100℃程度の温度になると、この「発電素子」に使用されている材料間で反応が起こり、乾電池のように化学エネルギーが電気エネルギーに変換された可能性もあります。

いずれにしても、一つの温度の熱源だけで熱エネルギーを電気エネルギーや仕事に変換することはありえません。熱力学は完成度の高い理論なので、熱力学を否定していると思われる現象に出会ったら、まず、他に原因があるはずだ、と考えて調べてみましょう。

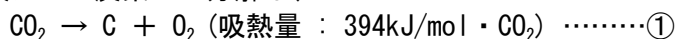
【66】炭酸ガスを分解して炭素として固定する

炭酸ガスが邪魔になるのなら、固体の炭素と気体の酸素に分解すればいい、と提案される人が絶えません。

知的興味で反応の研究をされているのであれば、とやかく評論をする必要もありませんが、エネルギーの無駄遣いになり、かつ極めて高コストなものになってしまうので、経済社会のなかではあり得ません。

【66-1】炭酸ガスを炭素と酸素に分解する

炭酸ガスの炭素への分解は、



以外には考えられません。

化学反応では、反応を進めたときに発熱する場合には、その逆の反応を進めようとするこの発熱の場合と同量のエネルギーを加える必要があります。

そうでなければ、エネルギーというものが忽然と消えてしまうか新たに発生したりすることになり、エネルギー保存の法則に反することになります。

例えば、炭素（炭など）を燃焼させて炭酸ガスにした場合には多量の熱エネルギーを発生しますが、逆の反応を進めて炭酸ガスを炭素と酸素に分解しようとする、理論的には、炭素を燃焼したときに発生した熱エネルギーと同量のエネルギーを加える必要があります。

そんなエネルギーが入手できるのであれば、炭酸ガスを炭素に戻すよりも、そのエネルギーを上手に利用して、新たな炭素を含んだ燃料の燃焼を削減したほうが賢明であることは言うまでもありません。

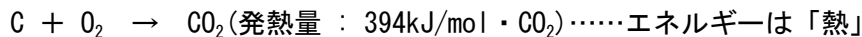
実際に炭酸ガスを分解するためには、そのための反応装置を運転する動力が必要になったり、反応ロスが出たりすることで、理論値以上に多量のエネルギーを消費してしまい、結果的に分解した炭酸ガスよりも多くの炭酸ガスを新たに発生させてしまうことになります。

エネルギーの無駄使いをして、費用をかけて、炭酸ガスの排出量を増やしても構わないのであれば、炭酸ガスを炭素に分解して固定することはさして難しい技術ではありません。

【66-2】炭酸ガスを炭素と酸素に電気分解する

溶融塩に炭素酸ガスを吹き込み、これを電気分解して炭素と酸素に分解する、という研究が目に留まりました。

上にも記したように、理論的には炭素を燃焼して得られるエネルギーと炭酸ガスを分解するために必要なエネルギーは同じはずです。



とくに問題なのは、炭酸ガスの分解に必要なエネルギーを電気エネルギーで供給していることです。同じエネルギー量でも、熱エネルギーと電気エネルギーでは価値が違います。

炭素を燃料にする火力発電の発電効率が50%だったとした場合には、炭素（石炭など）を燃やして得た熱の2倍のエネルギーを使って炭酸ガスを分解し、もとの炭素に戻そうとしていることとなります。

これも反応が理論通りに進んだ場合です。分かっているながら50円硬貨を100円で買うのと同じです。

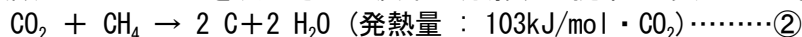
もし、火力発電で発電した電力ではなく、太陽光発電で得られた電力を使用するのだ、と主張しても、太陽光発電で得られた電力を利用したら化石燃料を使用した火力発電所の発電量が増加して、間接的に炭酸ガスの排出量を増やすこととなります。

炭酸ガスを分解して得られた炭素が価値のあるものである場合には、炭酸ガスの分解ではなく、例えば、カーボンナノチューブの製造方法、などとなるべきでしょう。

もっとも、カーボンナノチューブであれば、量的にも、エネルギー問題の範疇の話ではないはずです。

【66-3】炭酸ガスとメタンを反応させて炭素に分解する

炭酸ガスとメタンを反応させて炭素に分解する提案もありました。この場合には



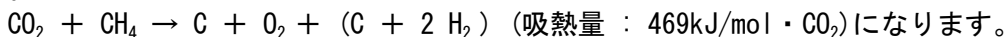
と考えられます。CH₄は天然ガスの主成分であるメタンです。

この反応は、化学熱力学的には上記の【61-1】の①反応を複雑にしたものにすぎません。その説明をします。

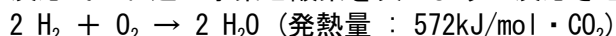
反応①の $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$ (吸熱量 : $394\text{kJ/mol} \cdot \text{CO}_2$) の左辺と右辺にCH₄を加えると、 $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2 + \text{CH}_4$ (吸熱量 : $394\text{kJ/mol} \cdot \text{CO}_2$) となります。

右辺を加工してみます。

右辺のCH₄を、 $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ (吸熱量 : $74.9\text{kJ/mol} \cdot \text{CO}_2$)、と書き換えると次のようになります。



この反応式の右辺の水素と酸素を次のように反応させます。



右辺の物質とエネルギーを整理すると、 $2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$ (発熱 : $103\text{kJ/mol} \cdot \text{CO}_2$)

となり、全体としては $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$ (発熱量 : $103\text{kJ/mol} \cdot \text{CO}_2$)

となって、②の反応と同じものであることがわかります。

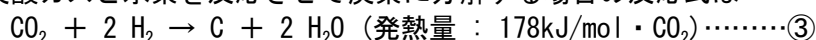
なお、気体(CO₂)と気体(CH₄)を反応させて固体(C)ができる反応は、反応装置の工学的な面からは、かなり厄介です。

【66-4】炭酸ガスと水素を反応させて炭素に分解する

炭酸ガスと水素を反応させて炭素に分解するという提案もありました。

過去に我が国でも実施され、中国などでは現在も行われている、水素を石炭などから製造する場合の逆のことにすることになります。

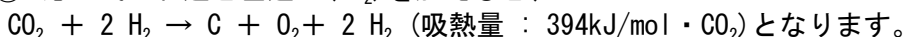
炭酸ガスと水素を反応させて炭素に分解する場合の反応式は



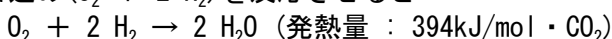
と考えられます。

この反応も上記の【61-1】の①反応を修飾したものにすぎません。

① 応の式の右辺と左辺に(2H₂)を加えると、



右辺の(O₂ + 2 H₂)を反応させると



右辺の物質とエネルギーを整理すると、

C + 2 H₂ O(発熱量 : 178kJ/mol · CO₂)となり、①の反応は③の反応と実質的に同じものであることがわかります。

【67】炭酸ガスを原料にする

利用価値のある化学エネルギーを持ち得ない炭酸ガスを利用価値のある化学エネルギーを多く持ち得るメタンのような物質に変換しようということなので、最低限、化学エネルギーが増加する分だけのエネルギーをどこからか調達する必要があります。そうしないとエネルギー保存の法則に反します。

もし、そんな簡単に調達できるエネルギーがあるのなら、製造する際のロスによるエネルギーの無駄遣いを出さないためにも、設備費などをかけないためにも、そのエネルギーをそのまま利用することで化石燃料の使用量を減らした方がはるかに賢明です。

窒素肥料として使用されている尿素は昔から炭酸ガスとアンモニアを反応させて合成されています。この場合のように、炭酸ガスがどうしても必要な場合もありますが、ほとんどの場合、炭酸ガスを化学原料に使用するという話は非現実的なものなので注意しましょう。

【67-1】炭酸ガスからメタンをつくる

炭酸ガスと水の電気分解で製造した水素からメタンを合成するためには、外部から多量のエネルギーを供給せざるを得ません。

全くロスなしに理想的に反応が進んだと仮定しても、炭酸ガスと反応させることによって水素ガスをメタン製造の原料にした場合には、製造されたメタンの持っている燃焼熱は、もとの水素ガスの持っている燃焼熱の約78%に減ってしまいます。(残りの22%は反応を進めている際に利用しにくい熱エネルギーなどになります)

なお、逆の反応である、メタンと水蒸気を反応させて水素と炭酸ガスに変換することは、水素の製造を目的にして、世界中で大規模に実施されています。

この場合には、原料のメタンよりも得られた水素の方が酸素との組み合わせで多くの化学エネルギーを持ち得るために、メタンと水蒸気を反応させるときには、多量の熱エネルギーを供給する必要があります。

この反応は炭化水素の水蒸気改質(スチームリフォーミング)と呼ばれています。炭化水素はメタンに限らず、エタンやプロパンや液状のナフサ(粗製ガソリン)でも構いません。

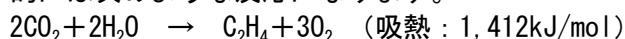
以上のことから、炭酸ガスを原料にしてメタンを製造するという話は全くナンセンスです。

【67-2】炭酸ガスを電解還元してエチレンなどを製造する

炭酸ガスの電解還元は、過去に多くの大学が参加して大々的に研究をしていたことがあります。エチレンは石油化学の中心的な物質であることから、なんとなく魅力的な研究だと感じられたのかもしれませんが。

なお、電解還元とは、電気エネルギーを利用して化合物を還元する方法です。「還元」とは、水素を付加したり、酸素を取り除いたり、金属などの場合には原子価を小さくすることで、「酸化」の反対の意味を持つ用語です。

具体的には次のような反応になります。



化学エネルギーを持ち得ない炭酸ガスと水から化学エネルギーを持ち得る物質に転換するのだから、吸熱分のエネルギーを別途供給する必要がありますが、その供給するエネルギーに高級な電気エネルギーを使用したのでは、理想的に反応できたと仮定しても、エネルギーを無駄使いしていることとなります。

なお、電気を利用して化学反応を進める技術は電気化学と言われていますが、一般的には、電極の表面で反応が進むために、多数の電極が必要になって、設備費が嵩む傾向があります。

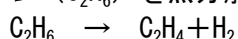
(余談)

「原子価」とは原子が他の種類の原子と結びあっている「手」の数です。例えば、鉄の原子は潜在的には3本あり、3本とも使っているものは3価といい、3価の酸化鉄は空気中では極めて安定です。

金属の鉄は原子価が0価で、酸素と反応しやすく、酸化鉄になりやすいので、金属の鉄を微粉にすると燃焼しやすくなります。

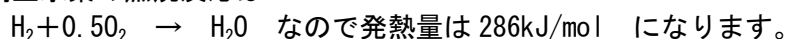
(好奇心の強い人のために)

エタン (C_2H_6) を熱分解する場合には、反応式は次のようになります。



1モルのエチレンあたり必要エネルギーは137kJ/mol (熱エネルギーで供給)

副生水素の燃焼反応は



よって、エチレン加工工程のエネルギー収支は149kJ/molの発熱となります。

一方、原料エタンは燃料の価値があるので、発熱量を求めてみます。

反応式は、 $\text{C}_2\text{H}_6 + 3.5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ (発熱 : 1,561kJ/mol)

よって、エタンを熱分解する場合には

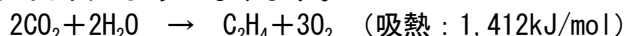
1,561kJ/mol - 149kJ/mol = 1,412kJ/molの熱を消費したことになります。

このエネルギー量は、理論的には、炭酸ガスの電解還元でエチレンを合成した場合に必要なエネルギーと同量になります。

【67-3】炭酸ガスの人工光合成でエチレンなどを製造する

炭酸ガスを原料にする人工光合成でエチレンを製造する提案もありました。

反応式は次のようになります。



人工光合成の場合は、1モルのエチレンあたり必要エネルギーは1,412kJ/molの電気エネルギーを消費したことに同じになります。

火力発電でメタンを燃料にして発電した場合の反応式は
 $\text{CH}_4 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (891kJ/mol の発熱) です。

よって、1,412kJ/mol の電気エネルギーを得るためには、火力発電所の発電効率が100%でも、1.585モルの炭酸ガスを発生することになります。

発電所の発電効率が50%の場合には、3.17モルの炭酸ガスを排出することになり、原料にした炭酸ガスの1.5倍の炭酸ガスを排出することになる筈です。

結論的には、エチレン合成用の光合成装置を設置するよりも、エチレンはエタンを熱分解して、太陽光の利用のためには太陽光発電装置を設置したほうがはるかに賢明だと考えられます。

なお、太陽光を使用するためには、広大な面積の装置であり、設備費や運転管理に多大な負担を強いられることから、実用化は実質的には不可能です。

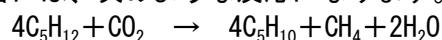
太陽光しか入手できるエネルギーが無い場合には、太陽電池で発電して、その電力で水を電気分解し、得られた水素と炭酸ガスを反応させた方がはるかに賢明です。

【67-4】 有機化合物を使用して炭酸ガスをメタンに変換する

有機化合物は空気中の酸素と組み合わせて化学エネルギーを持ち得るので、炭酸ガスをメタンに変換する際に必要なエネルギーとしてこの化学エネルギーを活用することはできません。

有機物としてn-ペンタン (C_5H_{12}) を使用する場合を考えてみます。

n-ペンタンを1-ペンテン (C_5H_{10}) にまで脱水素して、得られた水素と炭酸ガスを反応させる場合には、次のような反応になります。



この反応は吸熱反応で、メタンを1モル(16g)製造するために337kJの熱を供給する必要があります。

しかし、生成物の ($4\text{C}_5\text{H}_{10} + \text{CH}_4$) の発熱量は、原料のn-ペンタン ($4\text{C}_5\text{H}_{12}$) の発熱量を337kJだけ超えるだけなので、製造した際に投入したエネルギーと同量であり、エネルギー面でのメリットはありません。反応ロスや設備費や運転経費などを考慮すると、大損になりますし、炭酸ガスの排出量を増やしてしまいます。

なお、分子から水素が外れやすそうな有機物(入手が難しい物質)を使用して炭酸ガスをメタンに変換したという報告もありましたが、非現実的なものであり、環境問題と関係づけることができる話ではありません。

【67-5】 炭酸ガスと水からメタンを作る

炭酸ガスと水からメタンを作ろうと考えている人もおられるようです。

炭酸ガスも水も地球上では極めて安定であり、化学エネルギーを全く持ち得ないので、炭酸ガスをメタンに変換できたとしても、得られたメタンが持ち得る化学エネルギーと同等かそれよりも多くのエネルギーをどこからか調達する必要があります。

そんなエネルギーを容易に大量に調達できるのであれば、そのエネルギーを有効利用して、メタン(天然ガスの主成分)などの化石燃料を燃焼する量を減らし、炭酸ガスの排出量を減らした方がはるかに賢明です。

(好奇心の旺盛な人のために)

インド洋の深海の熱水鉱床の近くで、水が分解された水素と海水に溶解している炭酸ガスから

メタンが生成する例が報告されています。

地中深くは、酸素が大気中に多量に発生する以前の古い時代の状態のままで、還元雰囲気（酸素を取り込みやすい雰囲気）の場所が多いことから、水の分解で生成した酸素が消費されやすく、メタンが生成しやすい特殊な状態だろうと考えられます。

ということで、あまり参考にはなりません。

【67-6】炭酸ガスを光還元して一酸化炭素にする

ルテニウムとレニウムというレア・アース（希土類元素）を含んでいる超分子錯体という物質を触媒にすれば、可視光により高い効率で炭酸ガスを一酸化炭素に還元することが可能であると報告されていました。

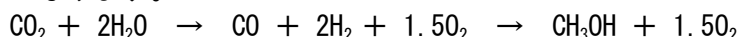
この炭酸ガスを可視光線で分解する方法は、太陽光を受けるための広大な面積の反応装置から極めて有害な一酸化炭素が完全に漏えいしないように管理する必要がありますが、完全な管理は至難です。また、炭酸ガスを一酸化炭素に変換したら、一酸化炭素と酸素の混合ガスになるはずで、この混合ガスは爆発しやすいので多量に取り扱うのは危険です。

【67-7】炭酸ガスを光還元してメタノールにする

この報告では、触媒に酸化チタン（TiO₂）を使用しています。この触媒は、太陽光で水を水素ガスと酸素ガスに分解する際に有効です。

しかし、たとえメタノール（CH₃OH）が得られたとしても、水素を製造する場合とは異なり、メタノールは水に溶解しているので、広大な面積の太陽光を受ける反応装置から水を取り出して、メタノールを蒸留などで分離する必要があります。よって、工業化するのは経済的に無理です。

経済性以前の話として、この話は安全面で致命的な問題を抱えています。この反応の全体は次のようになります。



この反応式のように、可燃性のメタノールが酸素と共存してしまいます。ある日、突然に爆発する可能性があり、極めて危険です。

また、一般論として、メタノールの合成のような簡単な反応に使用するエネルギーは、低級なエネルギーである熱エネルギーで十分であり、相対的に高級なエネルギーである太陽光は、より高級な電気エネルギーに転換するほうが賢明なはずで、

【67-8】炭酸ガスを原料にしてメタノールを製造する

炭酸ガスを原料にしてメタノールを製造する大型の試験装置を動かしていると発表されたことがありました。

炭酸ガスと水素ガスが安価であれば、それらを原料にしてメタノールを合成することは既存の技術だけで問題なく製造可能です。勘違いしやすいのですが、この方法は地球温暖化防止の役に立つことはなく、逆効果になります。

触媒を使用して水の太陽光分解で水素ガスを製造する、とのことでしたが、危険極まりないので触媒を使用した水の太陽光分解は実現性が100%ありません。

そこで、水素ガスは太陽電池で発電した電力で水を電気分解する方法で製造するものとして説明します。

太陽電池で発電した電力を、メタノール製造用の水素ガスの製造には使用せずに、電力でなくてはならない別の用途に利用すれば、それだけ火力発電による発電量を削減できます。そうすると、炭酸ガスの排出量が減少します。

この火力発電の発電量削減で減少する炭酸ガスの排出量は、炭酸ガスを使用してメタノールを製造した場合に固定できる炭酸ガスの量よりも多くなります。

よって、メタノールを入手したいのであれば、太陽光発電によって火力発電の発電量削減で用量が減る発電用燃料の天然ガスなど炭化水素の一部を原料にして、現状の方法でメタノールを合成するほうが賢明です。

炭酸ガスを原料にしてメタノールを製造すれば炭酸ガスの排出量を削減できるという提案は勘違いですが、なぜこんなことになるのでしょうか。

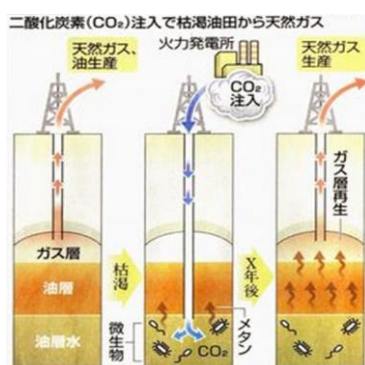
メタノールの製造に必要なエネルギーは低級なエネルギーである熱エネルギーで十分なのに、高級なエネルギーである電力を使用しているからです。

【67-9】 枯渇油田に炭酸ガスを注入してメタンに変換する

新聞などで報道された技術の概要は、枯渇油田に残っている油分と注入した炭酸ガスを微生物の力を借りて反応させ、炭酸ガスをメタンに変換させるというものです。

国内の枯渇油田は小規模で、本格的なエネルギー対策にはなりそうにない、という話は棚に上げておきます。

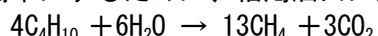
直感的に水素原子はどこから入手するのだろうかという疑問が生じます。



内容はかなり専門的なものですが、大学が説明している内容の方法では、水素を入手することができないので、外部から持ち込んだ炭酸ガスを本格的にメタンに変換することはできません。

いずれにしても水素原子を確保しないといけません、水は水素原子の供給源にはなりません。水分子を水素と酸素に分解して水素を利用しても、残された酸素で酸化されれば、元の木阿弥です。

簡単にするために、枯渇油田に残っている油分をn-ブタンと考えたときには、反応式は



であり、n-ブタンがメタンに分解されただけで炭酸ガスが生成・増加しており、外部から炭酸ガスを受け入れて、それをメタンに変換する余力はありません。

外部から導入した炭酸ガスをメタンにするためには、どうしても枯渇油田に残っている油分から水素原子を取り上げて、この水素と炭酸ガスを反応させる必要がありますが、この反応は、熱をどんどん与えないと進まない吸熱反応という種類の反応です。

この吸熱反応に加える必要がある熱量は、反応の前後の分子のエンタルピーという定数を足し引きすれば簡単に求めることができますが、枯渇油田中に残っている炭化水素化合物がどんなものか不明ですし、専門的になりすぎるので割愛します。

概算では、微生物の助けを借りて炭酸ガスから得られたメタンが持ち得る化学エネルギーの3分の1程度になりそうです。

枯渇油田では、この熱を得る方法は地熱しか考えられませんが、地熱は平均すると1平方メートルあたり60mW程度といわれており、メタンの生成をどんどん進めるにはあまりにも少なすぎます。

また、化学反応にはどの程度の割合まで進ませることができるのか（押し込んだ炭酸ガスの何パーセントがメタンになるのか）、という問題もあります。

上記のような吸熱反応では、高温で反応させるほど反応が進む度合いが大きくなります（反応式の右側に進む度合いが大きくなります）。温度が低いとある程度まで反応が進んでもそれ以上は進まなくなるはずで

物質収支が取れていないのでは、実社会で意味のあるものとはなり得ません。

【68】自動車が発生する振動で発電する

報道内容によれば、首都高速道路 295km、一日平均通行台数 115 万台の場合に振動発電で 500 万 kW もの大電力の発電が可能で、火力発電所の 2~3 基に相当する、とのことでした。

振動もエネルギーであることから、電気エネルギーに変換できても不思議ではありませんし、電気エネルギーが得られたのであれば、エネルギー保存の法則からも、必ず得られた電気エネルギーと同量のエネルギーをどこからか持ってきたこととなります。

高速道路の場合には、どこから上記のような膨大なエネルギーを調達できるのでしょうか。

高速道路に関係がある利用価値の高いエネルギーの大半は、自動車の燃料と空気中の酸素との組み合わせが持っている化学エネルギーです。

振動発電のエネルギーのもとになりそうなのは走行抵抗の 20%程度を占めるとされる「転がり抵抗」ではないかと想像できます。

砂地のように車輪がめり込むことがない道路では転がり抵抗の大半はタイヤを変形させるために発生し、変形を繰り返すために消費されたエネルギーの大半は熱エネルギーに変換されています。空気が十分に入っていないタイヤで走行するとタイヤがすぐに熱を持つことはよく経験することです。

また、振動発電素子に圧力を加えただけで、発電できるわけではありません。（圧力）×（移動した距離）がエネルギーなので、振動発電素子に圧力を加えてどのくらい素子の厚みが薄くなったのか、ということで発電量が決まるはずで

しかし、素子の厚みの変化が大きくなるようにすると、素子に加えるエネルギーは増加するはずですが、「転がり抵抗」が増加してしまい、自動車の燃料の消費が増えて、何をしているのか分からなくなります。

以上のように、消費されている燃料と酸素の組み合わせが持っている化学エネルギーが振動エネルギーに変換されている割合は、相当に小さなものと考えられますが、この振動エネルギー量をこえた発電はエネルギー保存の法則から絶対にできません。

ために、仮定をおいて簡単な計算をしてみましょう。

首都高速道路 295 kmの全てが往復 4 車線で、20mに 1 台の自動車が走行していると仮定すると、59,000 台の車が首都高速道路上を走っていることとなりますが、これで 500 万 kW の発電をするためには、1 台平均で 85kW の発電をするための振動エネルギーを発生させる必要があります。

トヨタが発表している 5 人乗りの燃料電池自動車の燃料電池発電能力は 114kW とされており、発電能力の 75%を振動発生のために使用しなくてはならないこととなります。以上のように、報道内容は桁違いにオーバーな内容にもなっています。

【69】永久機関であることを見抜けなかった例

かなり以前の新聞に「水圧でエコ発電機」という記事が載っていました。特許権を取得されたものです。

一口で言えば、この「エコ発電機」に外部から供給されているエネルギーは補充される水の位置のエネルギー（入口と出口の落差分）のみであり、わずかなエネルギーしか供給されていないのに、それ以上のエネルギー量の電気エネルギーが得られるはずはありません。

上下2つの滑車で保持されている球体連結ベルトの右側の部分は水に浸かっていないので浮力は生じませんが、左側は水に浸かっているため浮力が上向きに働いています。

発明者がこの装置が「動く」と主張している理由は、右図の 8a と記されている球体が水圧で上方に持ち上げられる力の方が左側の球体連結ベルトの浮力よりも大きい、というものです。この2つの力の大小の比較自体には間違いはありません。

この発明では水槽から 7a と記されたノズルを通しての排水量を極力少なくするように工夫をしています。また、水槽からの排水をこの装置の回転を利用したポンプで水槽に戻す工夫もしています。ただ、実際にどの程度の排水を装置一式の外部（系外）へ排出したのかは記されていません。

もし努力をして、少量にした水槽からの排水の全てをポンプで水槽に戻したのであれば、この装置一式には外部からは全くエネルギーは加えられていないことになります。よって、エネルギー保存の法則から、装置を駆動させる際の各種の摩擦などで消費されるエネルギーの補給もできず、当然のことながら永久機関（絶対に動かない装置）です。

装置一式の外部に少量の排水を流し、水槽の水の消費分を外部から別途補充したのであれば、装置一式は（補充水の重量）×（水槽の水面と水槽に付随している排水ノズルの高低差）に相当する位置のエネルギーを外部から受け入れていることになります。

しかし、特許明細書に記されている球体間の寸法を採用すると、水に浸されている左側の球体連結ベルトをその浮力に抗して下方に移動させるために要する仕事だけで外部から受け入れているエネルギーよりも大きくなります。

同じ時間での排水の体積（水の別途補充量の体積）よりも新たに水に浸されてくる球体の体積の合計の方が大きくなるからです。よって、この場合も永久機関と考えざるを得ません。

発明者は水槽の水の消費を減らそうと努力していますが、このことは外部からのエネルギーの供給を減らそうと同じことなので、永久機関に近づける努力をしていることになり、不思議な検討をしていることになります。

最大の問題点は、力学的な「力」の大小を比較検討しているにもかかわらず、多くの摩擦抵抗など、計算が厄介な「力」を合算していないために、力が釣り合っていることが分からなくなっていることです。

この種の間違いを避けるためには、力学的な力の大小の比較をするのではなく、エネルギーの出入りをチェックすることが大切です。

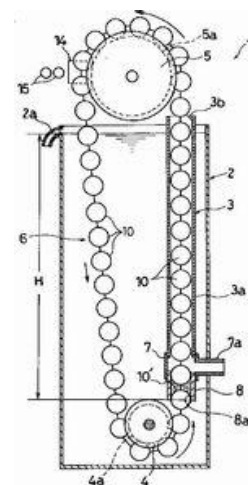
（好奇心の旺盛な人のために）

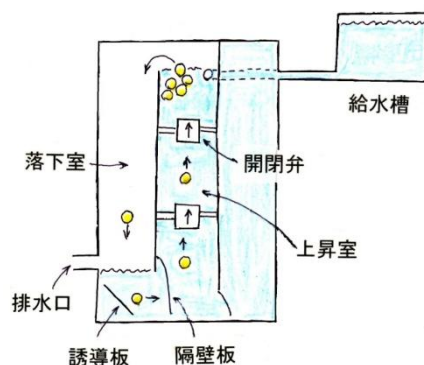
「球体循環装置」と名付けられていて特許になっている装置があり、肯定的に説明されている情報も数多くあるようですが、間違いなく永久機関と見做すべきでしょう。

比重の軽い球体が水中を浮き上がる特性を利用するもので、球体が空中を落下する際のエネルギーを利用するのだそうです。

ただ、補給水の位置のエネルギー以外に外部からエネルギーの供給を受けていないので、本質的に球体が順調に循環するはずはありません。水の追加補充をする場合に排水口よりも低い場所から汲み上げているのであれば完全な永久機関になるはずですが。

位置のエネルギーを持っている水を活用するのであれば、常識的には水車を利用するでしょう。





【70】水素社会は素晴らしい

将来は水素社会になる、などという記事を多く目にします。

しかし、水素ガスは他の利用価値の高いエネルギーを使って製造しなくてはならず、エネルギーの単なる運搬や貯蔵に利用できるだけです。

エネルギー保存の法則のことを考えれば、決して新たなエネルギー源になってはなりません。また、水素ガスを製造するためにはエネルギーが無駄になったり、製造設備に多額の資金を投入する必要もあります。

太陽光発電で得た電力を使用して水を電気分解すれば、水素ガスが化石燃料の代替役になってくれるのではないかと考えている人も多いようです。

太陽光発電をすれば、化石燃料の使用量を抑制できることは間違いありませんが、なぜその電力を電力のまま使用せずに、水の電気分解に優先的に使用しなくてはいけないのでしょうか。

各種のエネルギーの中でも、水素ガスが持ち得る化学エネルギーは貯蔵しやすい特徴を持っていますが、化学エネルギーよりも高級な電気エネルギーのほうが使い勝手が良く、社会で利用できる分野が広いことから、特別な理由がない限りはコストをかけて水を電気分解して水素ガスを製造する必然性はありません。

その特別な理由とは、化石燃料の使用が制限されたり原子力発電がなくなった場合、国内の再生可能エネルギーだけでは必要とする利用価値の高いエネルギーを確保できないので海外の再生可能エネルギーを液化水素に変換して輸入する必要がある場合などかもしれません。

この場合でも、輸入した液化水素は、まず火力発電所の燃料に優先的に使用して、出来るだけ使い勝手が良い電気社会を継続させた方が賢明なはずで、水素ガスはどうしても電力に従属せざるを得ません。

(好奇心の旺盛な人のために)

水を電気分解したら水素ガスと酸素ガスに分解されることは誰でも知っていますが、この方法で水素ガスを製造している例がほとんどなく、その経済性に関する信頼性の高い情報は入手しにくい状態にあります。

ノルウェーのノルスク・ハイドロ社という電気化学が得意な会社が公開している情報(水素エネルギーシステム Vol. 33 No. 1 19 ページ (2008))によれば、水の電気分解設備(規模:6万 m³/時)の製品水素ガス 1 m³あたりの固定費は 48 セント(2006年)だそうです。

2006年における円ドル換算は、平均して1ドル=115円くらいなので、水素 1 m³あたりの固定費は 55円程度とみなせます。

水素ガスおよび都市ガスの 1 m³あたりの低発熱量はそれぞれ 2567kcal と 9870kcal であり、都市ガス 1 m³の発熱量に対応する水素ガスは 3.84 m³なので、水素 3.84 m³あたりの固定費は 211円になります。

この固定費は水の電気分解設備がフル稼働しているときの値なので、稼働率が低い場合には補正する必要があります。太陽光発電設備の平均的な稼働率は 7 分の 1 程度なので、この値を使用すると固定費だけで 1480円になり、都市ガス価格の 10 倍以上の金額になりそうです。

【70-1】水素を使用するニーズの開発が大切だ

下記のような主旨の記事がありました。

『水素で描く夢……水素は身近な元素なのに使ってこなかった。課題は経済性だ。水素が様々な分野で使われるとコストは下がる。水素社会の実現には、ニーズ開発も重要だ。』

エネルギーの使用量を減らそうと言っている最中に、ニーズを開発しようという話には違和感があります。石油精製工場では石油の脱硫に利用し、化学工場では化合物と水素を反応させることが多々あります。しかし、なにぶん水素ガスは古くから使用している物質であり、ハツとするような用途があるとも思えません。

【注釈】石油の脱硫とは、石油の中の硫黄分（炭化水素化合物と結合している硫黄原子）を水素と反応させて硫化水素（ H_2S ）にして分離することです。

水素ガスが持ち得るエネルギーは化学エネルギーであり、安定性（変化しにくさ）が高いため、本質的に汎用性は低くならざるを得ません。化学エネルギーよりも電力の方が汎用性という面では格段に優れています。「水素社会」よりも「電気社会」の方が格段にすぐれていると思えます。

【70-2】水を太陽光で分解して水素をつくる

酸化チタン（ TiO_2 ）という物質などを触媒にすれば、水を太陽光エネルギーで直接的に水素ガスと酸素ガスに分解することができます。この反応は、本多—藤島効果といわれています。酸化チタンの他に半導体触媒や金属錯体触媒を使用する報告もあります。

化学的な興味を引きやすいのですが、実用的にこの方法で水素を製造するようになる可能性は皆無だと考えてもいでしょう。太陽電池で発電して、その電力で水を電気分解する方法に対抗できないからです。

以下にその理由を列举してみます。

- ① 水素と酸素の混合ガスから水素を安全に分離するのは極めて難しい。
- ② 水素ガスの配管を引き回して水素を集めるのは極めて厄介である。
- ③ 水素ガスの長距離移送は送電ほど簡単ではない。
- ④ 超高純度の水を使用しないと原料の水に含まれている微量の溶解物が酸化チタンなどの触媒表面に析出する。
- ⑤ 水を扱うので、装置の設置が太陽電池の場合と比較して格段に難しくなる。設置場所が制約される。傾斜させにくい。

最も致命的なのは上記の①でしょう。水素と酸素の混合ガスは極めて危険で、ごく少量でしか取り扱うことはできません。

雷雲が近づいてきただけで、装置内に火花がとぶことがあります。火花がとんだ瞬間に爆発します。

【70-3】再生エネで発電した電力で水を電解して水素を製造するのでエコなのだ

化石燃料と水蒸気を反応させて水素ガスを製造するのであれば、その際に炭酸ガスを排出するので魅力は無いけれど、再生可能エネルギーを利用して発電した電力を使用して水を電気分解すれば、炭酸ガスの排出がなくなるのだ、という意見もあります。

しかし、炭酸ガス排出量を削減するのであれば、再生可能エネルギーを利用して発電した電力を水の電気分解に使用せず、国内の電力系統に接続するだけで簡単に削減できます。

火力発電による発電量が削減できて、炭酸ガス排出量が削減されるからです。同じ電気で、水素ガスを得ることもできるし、炭酸ガス排出量を削減することもできます。

言い換えれば、水の電気分解で水素ガスを製造する場合には、炭酸ガス排出量削減というメリットを放棄することと引き換えに水素ガスを入手しているのです。よって、水素ガスを得るために炭酸ガスを排出していることと同じことになります。

わが国の現状では、太陽光発電や風力発電で電力を作ることがエコなのであって、水素ガスを製造して、その水素ガスを利用することがエコなのではありません。

【70-4】アンモニアをエネルギーキャリアに使用する

「エネルギーキャリア」とは、再生可能エネルギーなどで発電した電力が、需要と供給のバランスを取りにくいので、保存しやすい化学エネルギーに変換して、貯蔵や移送をする際に便利な物質のことです。アンモニアがそのエネルギーキャリアに適しているのではないかと考えられているようです。

再生可能エネルギーで発電した電力で、水を電気分解して水素を製造し、この水素と空気を分離して得た窒素と反応させてアンモニアにする方法が提案されています。

アンモニアの合成反応は「発熱反応」（反応の際に発熱する反応）なので、理論的には外部からエネルギーを加える必要はありませんが、アンモニアを水素と窒素に分解するときには、一般的には、希土類元素のルテニウム（Ru）という金属を使った触媒が使用されています。

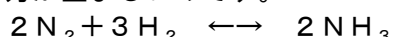
但し、理論的には分解して得られた水素の燃焼熱の16%程度の熱エネルギーを加える必要があり、エネルギーロスが発生します。

水素ガスから電力への変換効率を50%とし、アンモニア分解時のエネルギーロスを16%とすると、アンモニアをエネルギーキャリアとして採用することで、水素ガスを製造するために水の電気分解で使用した電力の持っていたエネルギーは42%に減ってしまいます。

これに、アンモニア合成・分解設備の固定費や運転費が上乗せされるので、どうみても経済的に成り立つ話ではなさそうです。

なお、アンモニア（NH₃）の合成反応は体積が減少し発熱する反応なので、圧力が高く温度が低い方が化学平衡の面から有利になります。

いいかえれば、次の反応式で左側と右側はどんな割合になっているかということで、右側の割合が大きい方が望ましいのです。



ということで、アンモニアを常圧で合成してもメリットはあまりありません。また、合成圧力が低くなりすぎると、アンモニア合成装置が巨大になり、設備費が増加します。

（好奇心の旺盛な人のために）

最も安価に製造されているアンモニアを購入して、そのアンモニアを分解して得た場合でも水素の価格は350円/kg・H₂程度になります。同じ発熱量のLNGは110円程度なので3倍の価格になっています。

化石燃料を利用した安価な水素源を利用してもこんなに高価になるということはアンモニアへの加工費が非常に高価だということです。さらにアンモニアの分解のコストや空気の深冷分離などのコストも上積みされます。

【注釈】空気の深冷分離とは空気の圧縮・冷却を繰り返して、空気を液化した後に蒸留などの方法で液化窒素と液化酸素に分離することです。

【71】 排熱をもっと有効に活用すべきだ

【71-1】 排熱の有効利用を促進すべき

次のような記事を目にしました。

『「省エネ大国」と自負してきた日本だが、燃料などのかたちで消費するエネルギーのうち実に3分の2が使われることなく「排熱」として捨てられている。その排熱を冷暖房などに使うコージェネレーションというシステムの導入が企業の間で急速に進んでいる。また排熱を繰り返し利用することで、工場などのエネルギー消費を劇的に減らす技術の開発も進んでいる。』

多種あるエネルギーのうち、熱エネルギーが最も利用価値が低いエネルギー（安定なエネルギー）なので、熱エネルギー以外のエネルギーは最終的には全て熱エネルギーに変換されます。逆に熱エネルギーから他のエネルギーに変換しようとするが無駄が避けられません。

環境に多量にある熱エネルギー（大気や海水の熱エネルギーなど）よりも温度が高いか低い排熱は利用価値がありますが、これらと比べてかなり温度差がある排熱以外は冷暖房やお湯・冷水として使用する場合はほとんどで、適当な温度を確保するために利用されるだけです。

下水が持っている熱エネルギーをヒートポンプで取り出して地域で使用することも千葉市の幕張新都心で実施していました。ただ、下水から熱エネルギーを取り出すためには熱交換器というものを使用しますが、その熱交換器が汚れて熱が伝わりにくくなることや、下水中の固形物の除去などのような厄介な面もあります。

熱エネルギーを電気エネルギーや仕事などの他種のエネルギーに変換する場合には、必ず高温源と低温源が必要です。

高温源の絶対温度を T_2 、低温源の絶対温度を T_1 としたとき、熱を電気や仕事などのエネルギーに変換する際の究極の変換効率 $\{(T_2 - T_1) / T_2\}$ ですが、実際にはこれよりも大幅に小さい効率になります。

上記の変換効率の式から、排熱は仕事などに変換しにくいことがよくわかるはずですが、それ故に利用しにくく、排熱になっています。

北欧のように気温が低い地域では暖房用に低質な熱エネルギーを必要とするので、熱エネルギーを有効に利用しやすいはずですが。

国内でも製油所などでは重油タンクの保温用に低質な熱エネルギーを多量に用いるので低質な熱エネルギーの有効利用が可能となり、発電コストの削減が可能になっています。

【71-2】 排熱の有効利用に熱電変換技術を利用する

古くから、大気や海水などの温度との温度差が大きい排熱を電気に変えるのに熱電変換技術が有効だ、と主張されています。

排熱の温度を「高温の熱源の温度」、常温を「低温の熱源の温度」、と考えて熱機関を作れば排熱を仕事に変換し、その仕事を電気に変換することはできます。

ただ、高温の熱源と低温の熱源の温度差が小さいと、熱エネルギーから「仕事」へのエネルギー変換効率が低すぎるために経済的に成立しないので、排熱として捨てられています。

熱電変換技術を利用しても高温の熱源と低温の熱源の温度差が小さいと、熱機関と同様に、熱エネルギーから電気エネルギーへの変換効率は非常に小さくなります。

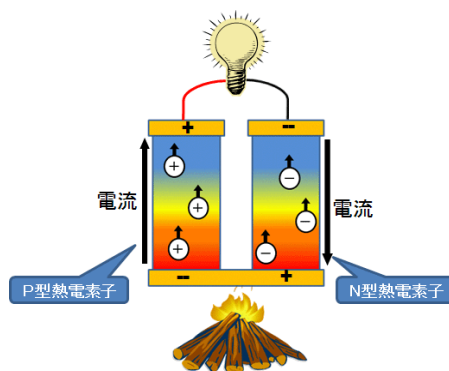
ただ熱電変換素子を使用する発電の場合には、価格低減努力をしても、設備費の面で気体の膨張を利用した機械的な熱機関に対抗するのは難しく、サイズの小ささ、駆動部分がない、維持費の低さ、無音作動、軽量、長寿命、などの利点を生かせる小規模な分野に利用されています。

(好奇心の旺盛な人のために)

温度が高くなると、マイナスの電荷を持った電子を出しやすい材料とプラスの電荷を持ったホールを出しやすい材料を組み合わせ、熱エネルギーから電気エネルギーを取り出す方法を「熱電変換技術」といっています。

電気を通す物質は自由に動けるキャリアを多く含んでいますが、このキャリアは電荷だけでなく、熱エネルギーも同時に運びます。

すなわち、熱の流れと電流は相互に作用しあっているのです。電流を希望する方向に流すためには「高温の熱源」と「低温の熱源」が必要になります。



【71-3】家庭用コージェネレーションは魅力的だ

コージェネレーション（コージェネ）とは燃料を使用して電気エネルギーと熱エネルギーを同時に利用する方式のことです。

火力発電ではどうしても排熱が出てしまいますが、我が国ではほとんどの火力発電所で排熱を海水に捨てています。排熱の適当な用途が無いからです。そこで、発電の際に避けられない排熱を有効利用しようと多くの人が考えるのは当然です。

現在、行われている家庭用コージェネは、天然ガスなどの都市ガスから水素ガスを製造して、その水素ガスを燃料電池などの燃料にし、発電するとともに排熱も家庭用の温水などに利用するもので、「エネファーム」と名付けられています。

しかし、残念なことに、普及が順調だとはいえません。補助金などもあるのですが、なお経済的な魅力に乏しいし、設置スペースの問題もあるようです。

捨てている排熱を有効利用できるのなら、省エネに非常に有効ではないか、と思えますが、競争相手がいます。具体的には、電力で駆動するヒートポンプで大気中の熱エネルギーを取り出して家庭用の温水を作る「エコキュート」です。

「エネファーム」も含め、家庭用のコージェネの問題点は、小規模であるために設備費が割高になること、熱エネルギーも電力も需要量が変動するために両者の需要量をマッチさせる必要があること、などではないでしょうか。

一方、「エコキュート」が注目されるのは、技術開発が進み火力発電所の発電効率が非常に高くなったためです。天然ガスを燃料に使用したコンバインドサイクルという発電方式では、60%程度まで発電効率が向上しています。

また、ヒートポンプも高性能化が進んでおり、使用した電力の5倍程度の熱エネルギーを得ることができます。

雑な計算ですが、発電効率60%のうちの10%分でヒートポンプを駆動してその5倍の熱を得れば、燃料が持ち得る化学エネルギーから電力として50%と熱として50%を得ることが出来ることとなります。

燃料電池を利用した家庭用コージェネよりも、経済性の面や使い勝手に優れた「エコキュート」のほうに魅力がありそうです。両者の普及率も、「エコキュート」が600万台、「エネファーム」が25万台(2018年時点)と大差がついています。

【71-4】 排熱を吸熱反応の熱源にして有効利用する

化学反応には反応熱を放出する発熱反応だけではなく吸熱反応も存在します。吸熱反応とは、熱エネルギーをどんどん与えないと進まない反応です。

排熱を吸熱反応に必要な熱源にすれば、得られた反応生成物を利用して「利用価値の高いエネルギー」に変換できるのではないかと考えている人もおられます。

誤解してはいけないのは、一般的に吸熱反応では温度が高いほど反応が進みやすいことです。逆にいえば、温度が低いと反応が進みにくくなります。

ここでいう「反応が進みやすい」という意味は、反応の速度が大きいということではなく、反応物を生成物に変化できる割合が大きいという意味です。専門用語では「化学平衡が生成側に偏る」といいます。

吸熱反応で規模の大きな工場としては、天然ガスと水蒸気を反応させて水素ガスを製造する工場があります。この反応に、いわゆる温度の低い排熱を投入しても、少ししか水素ガスは生成しません。

どうしてもこの方法で多量の水素ガスを得たいのであれば、生成した水素ガスを分離しながら反応を進める必要があります。そのためには、生成した水素ガスを逐一分離するために水素ガスだけ通過させることができる装置材料を安価に確保できないと反応装置を設計できません。こんな材料を入手するのは不可能でしょう。

例えば、白金（プラチナ）製の膜などは水素だけ通過させる性質を持っているので、超高純度の水素の製造に使用されています。

しかし、水素ガスは通過させることができるものの、実用的な反応装置が必要とするほど水素ガスの通過速度が大きくないし、なんといっても高価すぎます。

【注釈】吸熱反応なので、反応の温度が低いと下記の反応式で「 m 」が大きくなりません。原料が未反応のまま出てきてしまいます。 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow m \times (3\text{H}_2 + \text{CO}) + (1-m) \times (\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O})$ [ここで $0 < m < 1$ です]
すなわち、 m が大きくならないので、少し生成した H_2 を次々に抜き取りながら反応を進める必要があります。

【72】 人工光合成は素晴らしい

太陽電池で発電した電力を利用して、工場で水と炭酸ガスから食料などを合成するほうが植物を育てるよりも太陽光エネルギーの利用効率が高くなるのだ、という話であれば完全には否定できませんし、土地の利用効率も高くなるのかもしれませんが。

しかし、発電装置を作り、有機物合成装置を作って食糧などの有機物を合成するためには天文学的な莫大な資金を投じる必要があり、林業や農業と競争するのは常識的には無理でしょう。

また、確信的なことは言えないのですが、この話には本質的な誤解もあるのではないかと思います。

ずっと先の話になるのですが、植物の光合成に近づいた人工の光合成では、葉緑素のような複雑な分子構造の有機物が重要な役割を果たしているのでしょうか。

ただ、複雑な分子構造の有機物は紫外線などで分解しやすく、安定的に保つことはできないのではないのでしょうか。

植物などでは、補給や修復をしながら反応の中心になっている有機物を一定の濃度になるように制御しているのでしょうか。このようなことは、生命体であるがゆえにできることで、生命体外では難しいように思えます。植物でも生命を失って枯れてしまうと、葉はすぐに茶色に変色してしまいます。

紫外線などで分解しない葉緑素代替物などが合成できれば問題ないのかもしれませんが、炭素原子と水素原子の結合などは紫外線で簡単に切断されやすいので、容易ではなさそうです。

【73】 多数の風力発電所を設置して北極の氷を増やす

北極の氷が減ってきており、なんとかしたいということで米国の大学から提案された方法です。この報道を見て、大風呂敷な話だ、とだけ感じていたのではいけません。一言でいえば、この提案はエネルギーという視点が欠けていて、物質だけに注目していることが問題なのです。

十分に電力を確保することができて無数の冷凍機を運転できるとしても北極の氷を増やすことはできません。海水の温度を下げて氷にするためには北極が保有している熱エネルギーの一部を北極以外の場所に移さなくてはなりません。

しかし熱エネルギーは高温側から低温側にしか移動できないので、北極が保有している熱エネルギーを移動させるためには、北極よりも低温の場所が必要になりますが、宇宙以外にはそのような場所はありません。

北極から宇宙への赤外線による熱エネルギーの移動を現状以上に増やすためには北極の温度を現状よりも高くする必要があり、氷を増やしたいという希望とは矛盾してしまいます。

付録：エネルギー関連技術・設備の概要

【81】 熱エネルギーを仕事に変換する

【81-1】 内燃機関

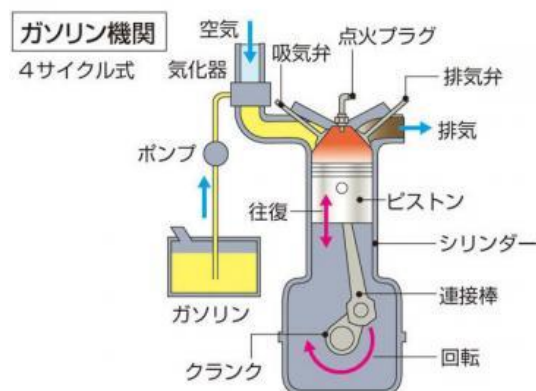
最も身近なものは自動車のエンジンでしょう。ガソリンエンジンやディーゼルエンジンなどは内燃機関といわれています。外部からシリンダー中の気体を加熱するのではなく、シリンダー内部で燃料を燃焼（爆発）させて温度を上げる方式だからです。

燃料が持ち得る化学エネルギーを、背伸びをして40%程度の効率で仕事に変換できるよう。将来的には50~60%程度になる、という掛け声もありますが。

これらの数値は最適な駆動条件でのものであり、駆動条件が刻々と変化する自動車では平均的な効率は大幅に低下します。

できるだけエンジンを最適な駆動条件で運転して効率を上げようと蓄電池とモーターを組み合わせたものが「ハイブリッド」といわれている方式です。

なお、船舶用のディーゼルエンジンでは、効率が50%を超えています。



【81-2】外燃機関（スターリングエンジン）

気体は温めれば膨張し、冷やせば収縮します。スターリングエンジンはシリンダーの中の気体を外から温めて膨張させたり、冷却して収縮させたりして仕事をさせる熱機関です。古くから知られている熱機関ですが、効率よく中の気体を温めたり冷却したりするのが難しく、本格的に使用はされていませんでした。

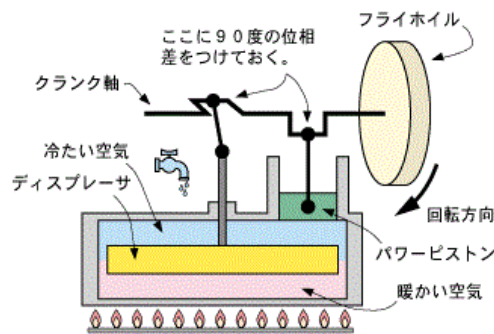
ただ、内燃機関とは異なり爆発を伴わない熱機関なので、運転が非常に静かであり、わが国の最新式の潜水艦に採用されています。

【注釈】中の気体を素早く温めたり冷却したりしやすいように考え出されたのがディスプレイサというピストンを使用する方法です。

容器の一端を熱し続け、反対側は冷やし続けることにします。容器の中には、ディスプレイサピストンというものを置きます。ピストンといっても容器とピストン壁の間には隙間があります。このピストンを上や下に動かすと、ピストンとケースとの隙間を通して気体は上や下に移動します。

ディスプレイサピストンを上に動かした時、気体は下側の高温部に流れ込み、高温の壁で温められるので膨張します。気体の体積が膨張するので、出力ピストン（パワーピストン）を持ち上げます。

逆に、ディスプレイサピストンを下に動かした時は、気体は上側の低温部に流れ込み、壁によって冷やされて収縮します。このようにしてディスプレイサは、気体の素早い加熱・冷却によって、気体に膨張・収縮を素早く行かせます。



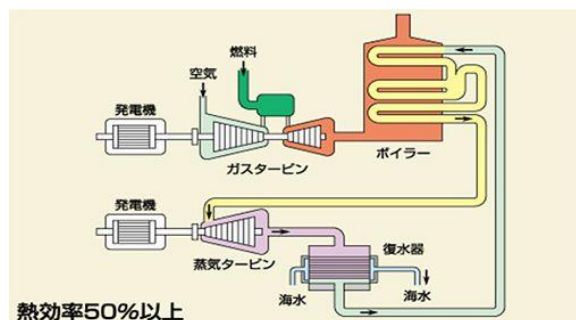
【81-3】火力発電設備

ガスタービンは天然ガス等を燃焼させて膨張させた燃焼ガスでタービンを回転させる設備です。近年になって、ガスタービンの効率が飛躍的に高くなって注目されるようになりました。

技術が急速に進歩したのは、高温に耐える金属材料の研究開発が進んだからです。ガスタービンも熱エネルギーを仕事に変換しているので、耐熱性の高い金属材料を使って燃焼ガスの温度を高くすることができればエネルギー変換効率は高くなります。

ガスタービンの技術進歩によって、ガスタービンと水蒸気タービンを組み合わせた発電設備（コンバインドサイクル）では、発電効率が60%程度まで向上しています。

コンバインドサイクルとは、高圧で燃料を燃焼させてできた高圧の燃焼ガスでガスタービンを回し、さらに、ガスタービンから出てきた燃焼ガスは未だ高温なのでボイラーで水蒸気を発生させて、水蒸気タービンを回し、ガスタービンと水蒸気タービンの両方で発電機を回して発電する設備です。



なお、ガスタービンの耐熱性が向上すれば、現状よりもさらに発電効率が高くなりますが、耐熱材料の開発もそろそろ限界に近付いてきています。

下の写真は水蒸気タービンの羽根車とガスタービンの羽根車です。



【82】水素ガスを製造する方法

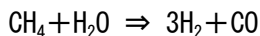
水素ガスを得るためには、水を電気分解するか、多量の熱を加えながら化石燃料と水を反応させるか、のどちらかの方法が実用的な製造方法です。

- ① **水を電気分解する場合**……………水を電気分解する場合には、エネルギーの保存の法則から理論的には、水素ガスを燃焼させて得られるエネルギーと同等の電気エネルギーを最低限必要とします。

現実にはどうしてもロスや無駄が出てしまうので、理論量以上の電気エネルギーが必要になります。

電力を得るために最も一般的な、天然ガスを利用した火力発電を採用した場合には、発電の段階でのエネルギーの変換効率が最新の発電所でも 60%程度、電気分解の段階でエネルギーの変換効率が 90%程度、総合すると 55%以下の変換効率になるので、現状では次項の天然ガスと水蒸気を反応させる方法が主流です。

- ② **天然ガスと水を反応させる場合**……………天然ガスと水蒸気を反応させる反応は、多量の熱エネルギーを供給する必要がある吸熱反応なので、1,000℃近い高温で熱エネルギーを加えながら触媒というものを詰めた耐熱性の高い金属製のチューブ（管）の中で反応させる水蒸気改質（スチームリフォーミング）という技術を用います。

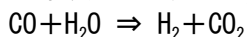


この際、副生する一酸化炭素は改めて別の触媒が充填されている反応器で水蒸気と反応させて、水素ガスと炭酸ガスに変換します。具体的には、下図の「高温シフト」および「低温シフト」と記されている設備で反応させています。

高温と低温の2段で反応させているのは、化学平衡という問題があるからです。

高温だと反応速度は速いのですが、未反応の（CO+H₂O）が多くなります。

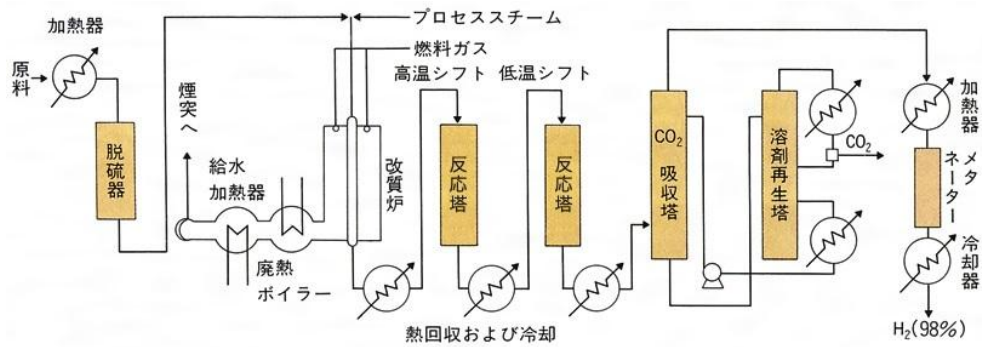
そこで未反応の（CO+H₂O）を低温で反応させます。



副生した炭酸ガスは吸収塔で特殊な液体に吸収して水素と分離します。

言い換えれば、水素ガスはメタン分子の中の水素原子と水分子中の水素原子が源になっており、エネルギー変換効率は 70%程度のようなのです。

なお、下図の「メタネーター」とは製品の水素ガス中に微量に残っている一酸化炭素が邪魔になるので水素ガスと反応させてメタンに変換する設備です。



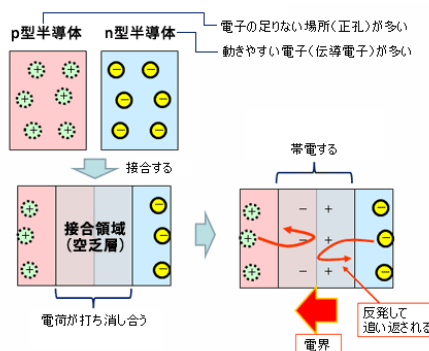
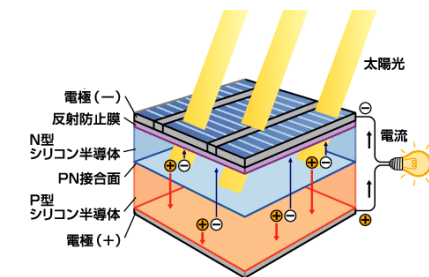
- ③ 石炭や重質油などと水を反応させる場合……蒸発させにくい原料を使用する時には、耐火レンガなどで内張りされた耐熱性のある高温の反応器の中に、粉碎または噴霧などで微粒化した原料と水蒸気と空気から窒素などを分離した酸素ガスを吹き込んで、触媒なしで反応させます。
- この種の原料は灰分を多量に含むために、触媒がすぐに閉塞してしまって役に立たなくなるからです。なお、酸素ガスは反応を進めるために必要な熱を発生させるために加えられています。同じ量の水素ガスを製造する場合には、原料に含まれる水素原子の量が少ないので、天然ガスを水蒸気と反応させて水素を製造する場合よりも、炭酸ガスが多く副生されます。
- わが国でも石油化学が勃興する以前には、この方法で水素を製造し、空気から分離した窒素と反応させてアンモニアを製造していました。

【83】太陽光発電

太陽電池は、半導体を利用して、光エネルギーを直接的に電力に変換する装置です。物質を構成している原子は、「電子」を持っていますが、この電子は光を受けると、それを吸収したり、反射したりします。

光エネルギーを吸収した電子は、その光エネルギーを放出して元に戻ろうとしますが、太陽電池はこの「光エネルギーを吸収した電子」を選別して、外部の電気回路へ押し出します。

エネルギーを吸収した電子を選別するために、半導体の性質が利用されています。外部の電気回路に取り出された電子を電気エネルギーとして利用します。



太陽電池にはいろいろな種類がありますが、下記に比較表を載せてあります。

種類		モジュール 変換効率	野外での 信頼性	省資源性	特長
シリコン系	単結晶シリコン	15~20%	◎	△	最も歴史がある 高価だが高性能 製造時エネルギーが多くなる
	多結晶シリコン	12~17%	◎	○	最も広く使われている 単結晶より省エネ製造ができる
	薄膜シリコン	7~11%	△	◎	軽量で低照度特性が良いため室内用で普及 大量生産可 光劣化抑制が課題
	HIT	16~20%	◎	○	結晶系シリコンとアモルファスシリコンの結合 高性能だが高価
化合物系	CIGS	9~12%	○	◎	部分的な影の全体の影響が少ない 製造工程が簡単で量産可 価格低減余地有
	CdTe	9~10%	○	◎	製造コストが安い 価格が安い 製造時のエネルギーが少ない
	III-V族多接合	20~30%	◎	△	超高性能 非常に高価 宇宙用
有機系	色素増感 (小面積セル)	8~10%	△	◎	カラフルな色で作れる 研究開発途上 寿命、効率、耐久性(波漏れ)が課題
	有機半導体 (小面積セル)	1~5%	△	◎	常温で製造可 カラフルで軽量 研究開発途上

【84】燃料電池の概要

燃料電池は水素ガスと空気中の酸素の組み合わせが持っている化学エネルギーを、熱エネルギーを経由せずに電気エネルギーに変換する装置です。

リン酸型燃料電池 (PAFC)、熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC)、固体酸化物型燃料電池 (SOFC)、固体高分子型燃料電池 (PEFC)、などがよく知られています。

燃料電池の運転温度は、高い順に、SOFC>MCFC>PAFC>PEFC となっています。高温で運転すると副生する熱の温度が高くなるので、この熱の価値が高くなりますが、理論的には、高温になるほど燃料(水素ガス)の持ち得る化学エネルギーを電気エネルギーに変換できる割合が小さくなります。高温になるほど化学エネルギーのうちの「自由エネルギー」の割合が小さくなるからです。

【注釈】水素と酸素が反応して水が生成する反応では、高温になるほど化学エネルギーの中の「自由エネルギー」相当分の割合が少なくなります。専門的になりすぎますが、自由エネルギーはエンタルピーから{(絶対温度) × (エントロピー変化)}を差し引いたものだからです。

- ① **リン酸型 (PAFC)** ……リン酸を電解質(イオンが移動しやすい物質: この燃料電池の場合には水素イオン H^+)として利用したものです。耐久性に関しては、炭素系材料の腐食、触媒(白金の微粒子)の粒径が大きくなって表面積が減少、リン酸が漏れ出して消失、触媒層のリン酸による濡れ、などが主要な問題のようですが、決定的な欠陥は、装置の主要な構成材料である炭素繊維などの炭素系の材料が酸化され消耗し、長期の運転に耐えることができそうにないと考えられることです。

【注釈】固体の微粒子は粒径が大きくなる傾向があります。粒径が大きくなると同じ重量では表面積が小さくなるので安定になるからです。固体でも液体でも表面の部分、手を繋ぐ相手が不足するので不安定になっています。

過去に電力会社が、1万1000kWの発電プラントを建設したものの、短期間で燃料電池の主要材料の炭素系材料が酸化され、失敗に終わった例がありました。

- ② **熔融炭酸塩型 (MCFC)** ……この燃料電池は電解質（イオンが移動しやすい物質）としてアルカリ金属炭酸塩の熔融塩（温度を上げて融かしたものを）を使用しています。なお、アルカリ金属とは、リチウム、ナトリウム、カリウムなどです。この燃料電池も劣化を抑制するのが難しいという問題を抱えています。その主因は、使用している電解質（アルカリ金属炭酸塩の熔融塩）が各種の材料を溶解する性質を持っていることです。

具体的には、リチウムとカリウム（又はナトリウム）の炭酸塩（ Li_2CO_3 、 K_2CO_3 など）の混合物を高温で熔融させたものを電解質に使用していますが、この熔融塩に全く溶解しない材料は金（ゴールド）だけです。よって、使用している無機材料の微粉の粒径が意に反して成長するし、金属材料は腐食します。

過去に、巨額な公的資金（450億円と報告されています）を投じて開発を進め、1,000kWの設備まで運転しましたが、その後の開発は途切れています。

- ③ **固体酸化物型 (SOFC)** ……高温で運転する燃料電池です。電極や電解質にセラミックスを使用した燃料電池で、本質的な欠陥としては、全てがセラミックスで構成されているために、脆くて壊れやすく、信頼性を確保しにくいことと、製造コストが高いことです。

ただ、運転温度が高いため、排ガスの熱を有効利用して、全体として発電効率を高めることができる利点があります。

一般的には、電解質としてジルコニア（酸化ジルコニウム）というセラミックスにレア・アース（希土類元素）の一種であるイットリウムの酸化物を少量混ぜた特殊なセラミックス材料を使用しています。

【注釈】セラミックスの中をイオンが移動するのだろうかという疑問に感じられるかもしれませんが、高温になれば、このセラミックスの中を酸化物イオン（ O^{2-} ）というイオンが移動できるので燃料電池に利用されています。

電解質も二つの電極（燃料極と空気極）もそれぞれ異なった物質（セラミックス）なので、これらの物質の熱膨張係数が完全に一致しているわけではありません。

たとえ2種類の電極や電解質の熱膨張係数を揃えることができて、大きな面積の電池では完全に温度分布をなくすことは不可能なので、燃料電池が複雑な構造をしていたら、大きな温度差を上げ下げしても電解質と2種の電極が絶対に相互間の剥離や破損しないようにするのが厄介です。

卓上で実験している段階では、面積が小さく熱膨張の絶対量が小さいので応力も小さくなりますが、大規模な装置にするためには剥離や破断・破損を避けるのが非常に難しくなります。

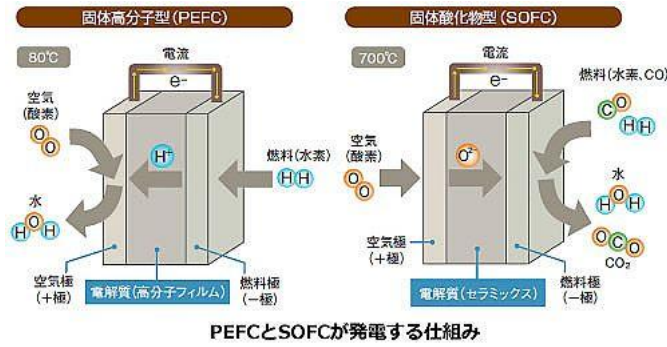
- ⑤ **固体高分子型 (PEFC)** ……燃料電池車（水素を燃料に使用する自動車）に積み込まれているのがこのタイプの燃料電池で、注目されています。初めて人工衛星の電源に使用されたのが1965年で、本格的に開発が始まったのが1980年ころです。30年以上開発を続けていますが、とくに経済性の面で魅力のある商品になっていないようです。

化学反応は一般的に反応温度を低くすると反応速度が小さくなります。この燃料電池は運転温度が低いので、反応速度を確保するために、やむなく高価な白金を多量に触媒として使用しています。

電解質も高価で特殊なフッ素樹脂を使用していますし、生成した水の処理や供給ガスの湿度の管理など、設備的にも複雑になりやすいことから、コスト削減が課題です。

燃料電池本体のコスト削減も残された課題ですが、自動車用については、触媒として使用する白金の資源量も問題になりそうだと指摘されています。

すでにガス会社や電機会社から、「エネファーム」という名前で販売が始まっていますが、市場経済体制下で生き残れる商品にまでは到達できていないようです。



【85】電気を蓄える

【85-1】蓄電池（2次電池）の概要

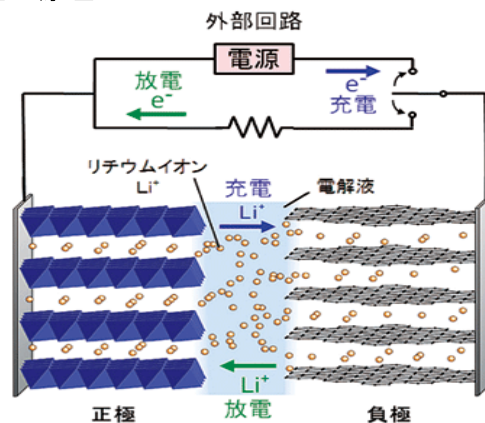
鉛蓄電池、ナトリウム硫黄電池（NaS電池）、リチウムイオン電池、亜鉛臭素電池、レドックスフロー電池、ニッケル水素電池、ニッケルカドミウム電池、金属空気二次電池、金属リチウム二次電池、その他があります。なお、最近では全固体電池が注目されています。

	鉛電池	NaS電池	ニッケル水素電池	リチウムイオン電池
※1 エネルギー密度	約35Wh/kg	約110Wh/kg	約60Wh/kg	約120Wh/kg
※2 エネルギー効率	87%	90%	90%	95%
※3 寿命 (サイクル数)	4500	4500	2000	3500

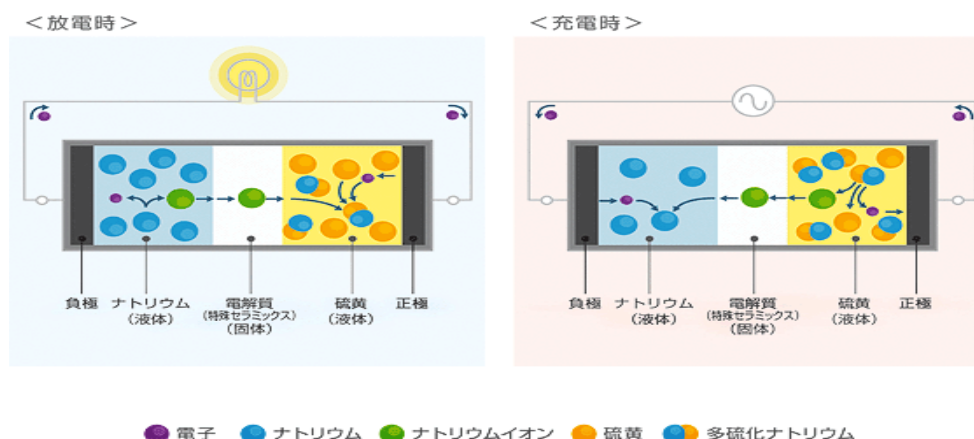
※1エネルギー密度: 1kgあたりに蓄電可能な電力量
 ※2エネルギー効率: 充電を100として放電できる効率
 ※3サイクル数: 1回の充放電を1サイクルとして何サイクル充放電できるかを示す指標

※同一条件での比較ではないため、あくまでも参考値
 出典: AIST、NEDO資料に基づき新エネルギー対策課作成

リチウムイオン電池の原理



NAS電池の原理



新しい高性能な蓄電池が開発されたら電気自動車その他に多大な恩恵をもたらすだろうと考えて、将来の技術開発に期待をされている人も少なくないでしょう。

しかし、蓄電池の原理はすでによく知られており、どんな材料を組み合わせると理論的な蓄電量がどの程度になるかということもよく分かっています。

ただ、単位体積または単位重量あたりの蓄電量と製造コストと電池の寿命と安全性と材料の確保の難易度などから最適な電池が決まってきます。

例えば、理論的な蓄電量が非常に大きいとされる金属リチウム電池（リチウムイオン電池ではありません）では、デンドライトという金属リチウムの小さな塊（結晶）が好ましくない場所に成長し、電気的な短絡を起こしてしまうという難問が克服できていません。

また、小さな体積の中に危険極まりないエネルギーを多量に詰め込めば、その蓄電池の危険性は飛躍的に増大してしまいます。

【全固体蓄電池について】

多くの分野でリチウムイオン電池が利用されていますが、安全性や耐久性が必ずしも十分ではないことから全固体蓄電池の開発が盛んになっています。

リチウムイオン電池ではリチウムイオンが液体の電解質の中を動き回っていますが、全固体蓄電池では無機化合物である酸化物や硫化物などの固体の中を動き回ります。

安全性が高い、劣化しにくい、使用できる温度範囲が広い、などという利点があるのですが、固体の集電体と固体の電解質を密着させにくいために抵抗が大きくなりがちなのが課題です。

なお、酸化物としては $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ のような物質が、硫化物としては $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ などが有名です。硫化物の方が柔軟性に優れているということで有力視されているようです。

【85-2】キャパシタの概要

蓄電池のように化学変化で放出されるエネルギーを電気エネルギーに変換するものではなく、下図のように、充放電に伴って電解質イオン（プラスイオンとマイナスイオン）の溶液内移動と吸脱着が起こっているだけです。

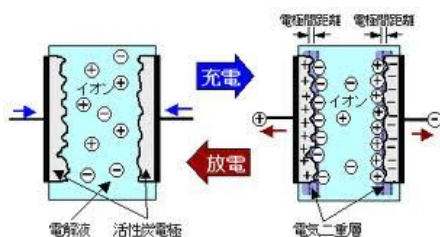
ただ、蓄電量は多くなく、同じ体積では、Ni-Cd電池の60分の1から80分の1程度と言われていますが、充放電の速度が非常に速いので、電力会社などで電力需給の微調整のために利用されています。

なお、蓄電池（2次電池）は充放電の速度がそれほど早くないので、急速な需要変動には追従できません。

電解質イオンが吸脱着できる電極の面積が広い方が蓄電量も多くなるので、電極には表面積の大きい活性炭などが用いられています。

理論的には活性炭電極の比表面積を大きくすることで蓄電量も増加するはずですが、活性炭電極の比表面積が大きすぎると内部の細孔径が小さくなるため、イオンが実際に吸着できる有効な面積が減少し、かつ細孔内でのイオンの拡散が阻害されるので容量が低下します。

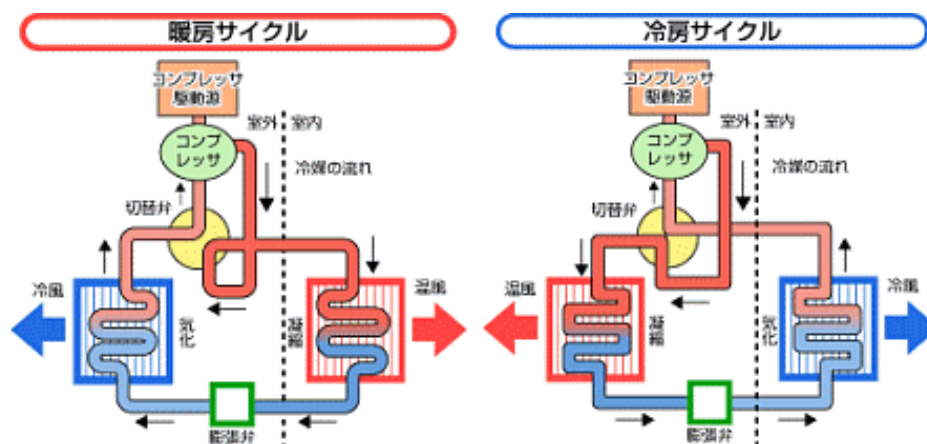
【注釈】比表面積とは、ある物体について単位質量あたりの表面積または単位体積あたりの表面積のことです。



【86】ヒートポンプ

ヒートポンプとは少ない投入エネルギーで、気体や液体を元の温度よりも高温と低温に分割して利用する技術のことです。

エアコンや冷蔵庫、最近では大気中の熱エネルギーを利用して温水を得るための「エコキュート」などにも利用されています。なお、この際に投入されるエネルギーは、一般的には、利用価値の高いエネルギーである「仕事」（間接的には電気など）です。



エアコン等に一般的に使用されているヒートポンプは、気体を圧縮すると温度高くなり、膨張させると温度が低くなる現象を利用しています。

ヒートポンプを利用すると、駆動用に使ったエネルギー以上の熱エネルギーを得ることができるため、大切なエネルギーを有効に使えます。

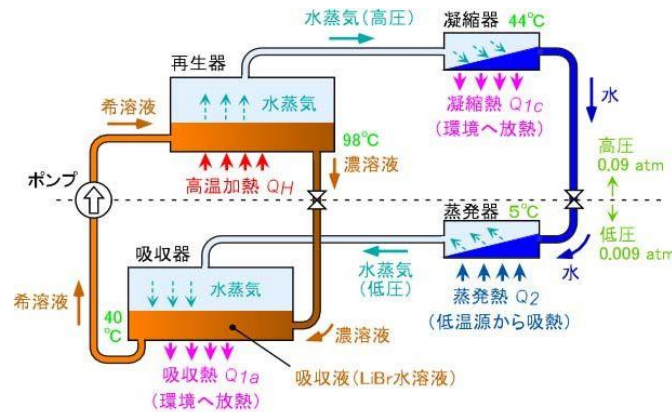
わが国で販売されている最新のヒートポンプエアコンは、1の投入エネルギーで6の熱エネルギーを得ることができるといわれています。

高い効率を実現できたのは、画期的で新規な原理を導入したためではなく、きめ細かい技術を積み重ねてきたためです。

【注釈】高温の熱源と低温の熱源があれば仕事を得ることができ、その時の最大の変換効率はカルノーサイクルの効率（カルノー効率）だったはずですが、逆に、仕事を使って一つの熱源からこの熱源よりも高温の熱エネルギーを得るときに、最も好都合なサイクルは「逆カルノーサイクル」といわれています。逆カルノーサイクルでは温度が低い熱源から、1の仕事を使ってどのくらいの熱エネルギーを奪えるかという比を「性能係数」と言っています。性能係数は、(低温の熱エネルギーの温度) ÷ {(高温の熱エネルギーの温度) - (低温の熱エネルギーの温度)} になって、例えば、絶対温度で低温側が 260°K で得られた高温側が 310°K の場合には、260 ÷ (310 - 260) で性能係数は 5.2 になります。

なお、世の中には吸収式ヒートポンプというものもあり、温度の高いお湯（太陽光で加熱したお湯など）を用いて冷房することも可能です。「高温の熱源」と「低温の熱源」があれば、熱エネルギーを「仕事」などに変換できるので、常温よりも温度の高いお湯と常温の大気があれば、温度の高いお湯が持っている熱エネルギーの一部を「仕事」に変換することは可能です。

この「仕事」を利用すれば、大気が持っている熱エネルギーを大気よりも高い温度の熱エネルギーと低い温度の熱エネルギーとに分割することが可能になるはずです。



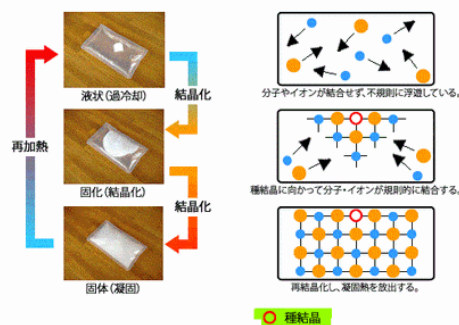
【87】蓄熱技術

熱エネルギーは最もポピュラーで相対的に安定なエネルギーなのですが、長期間貯蔵しておくのが厄介です。

他の種類のエネルギーには変換しにくいのに、高温側から低温側に移動しやすいので、蓄熱をするためには工夫が必要です。

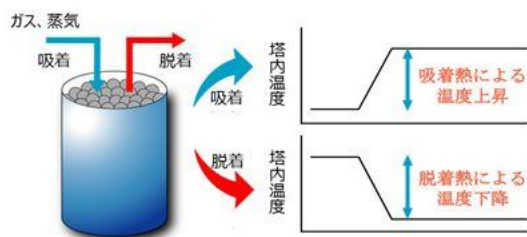
- ① **潜熱型**……物質が液体から固体になるときに熱エネルギーを放出し、固体から液体に融けるときに熱エネルギーを吸収する性質を利用するものです。

利用が検討されている物質には、水和塩、無機塩共晶混合物、パラフィンワックス、氷、硝酸塩、ポリエチレン、多価アルコールなどがありますが、省スペースという面からは氷蓄熱（冷房用）が最も優れています。といっても蓄熱装置の大きさは家庭用エアコンの室外機の5倍程度の大きさになります。



- ② **濃度差型**……液体の媒質に対する媒体（溶けているもの）濃度の差による変化で、熱エネルギーを貯蔵するもので、媒質と媒体の分離さえできれば熱ロスがなく、長期間の蓄熱が可能です。臭化リチウム／水系吸収式、シリカゲルやゼオライト／水吸着式、などがあります。

ゼオライトに吸着されている水の脱着エネルギーは液体の水の蒸発エネルギーより大きいというメリットがありますが、蓄熱装置が嵩張るので移動を伴う用途には適していません。

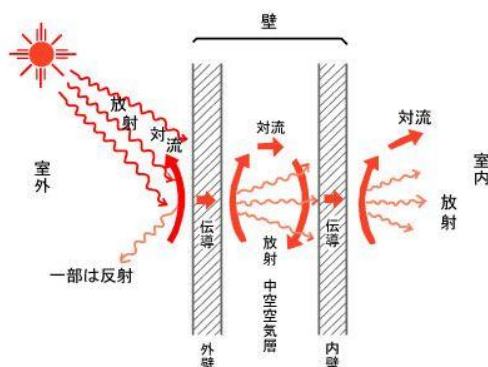


③**化学型**……化学反応に伴うエネルギーの出入りを利用するもので、水が付加する水和反応、金属水素化物の生成反応、水酸化物やアンモニアの熱分解反応、クラスレートの生成反応、などの利用が検討されています。

水素吸蔵合金が水素を吸蔵して金属水素化合物を作る反応は発熱反応で、吸蔵合金が水素を吸蔵・放出する反応は可逆性に富み、反応速度が速く、反応熱も比較的大きく、利用しやすいようです。

【88】伝熱について

熱エネルギーは、よく知られているように、高温側から低温側の方向に向かって移動します。伝熱には、伝導、対流、放射（放射）の3種類の現象があります。



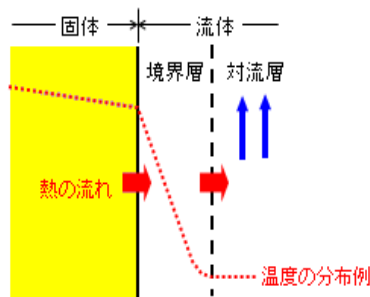
伝導伝熱では、高温の熱源と低温の熱源の温度差に比例して、熱移動量が多くなります。また、物質によって伝熱しやすさが異なり、空気のように伝導伝熱しにくいものが断熱材に活用されています。



対流伝熱でも、高温の熱源と低温の熱源の温度差に比例して、熱移動量が多くなりますが、実際には対流伝熱は複雑です。

固体の物質の表面に接触して境膜（境界層）という領域があり、この部分は伝導伝熱になってしまうので、この境膜の厚さで伝熱速度が大きく変化してしまいます。

この境膜の厚みは、気体や液体の流れの乱れや流速が大きくなると剥ぎ取られて薄くなり、対流伝熱が促進されます。



輻射伝熱では伝熱量は絶対温度の4乗に比例するので、高温になると急速に大きくなります。よって、高温での伝熱は輻射伝熱が主体になります。

例えば、天然ガス（メタン）と水蒸気を反応させて水素ガスを製造する大規模な装置では、この反応が多量の熱を吸い取るので、触媒が詰め込んである反応管に多量の熱を伝える必要があります。そこで、この反応管の周りに耐火煉瓦の壁をつくり、この壁をバーナーで高温に加熱して、壁から放射される輻射熱で反応管を加熱しています。

なお、輻射伝熱は他の伝熱方式とは異なり、真空中でも熱を伝えることができる特徴があります。

【89】風力発電

風車は風が持っている「運動エネルギー」を「仕事」というエネルギーに変換しています。

風の持っている運動エネルギーはどの程度の割合で「仕事」に変換できるのでしょうか。

もし、風が持っている運動エネルギーの全てを仕事に変換したら、運動エネルギーがゼロになってしまいます。

運動エネルギーがゼロだと、風速がゼロだということであり、上流の風の行き場所が無くなってしまいますので、風が持っている運動エネルギーの100%を仕事に変換することができないことは直感的に納得できます。

簡単な理論計算から、風車の下流の風速が上流の風速よりも3分の1だけ遅くなっているときに、風が持っている運動エネルギーから仕事へのエネルギー変換効率が最も高くなります。

また、発電量は翼（ブレード）の半径の2乗、風速の3乗に比例します。

【注釈】風力発電の発電量が風速の3乗に比例することは簡単に計算できます。

風の持っている運動エネルギーは $(1/2) \times (\text{質量}) \times (\text{風速})^2$ であり、通り過ぎる空気は（面積） \times （風速） \times （時間） \times （空気の密度）なので通り過ぎる空気の持つ運動エネルギーは

$(1/2) \times (\text{面積}) \times (\text{風速}) \times (\text{時間}) \times (\text{空気の密度}) \times (\text{風速})^2$

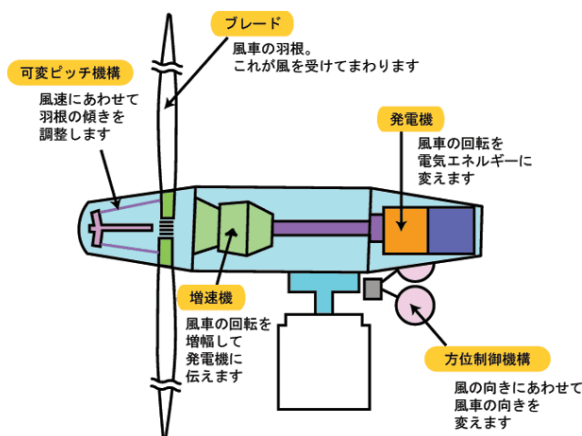
となって、風力発電の発電量が風速の3乗に比例することが分かります。

風力発電におけるエネルギー変換効率の理論上の最高値は59パーセントであることが知られており、「ベッツの限界」といわれています。実際には、摩擦などによる損失があって、エネルギー変換効率は40～45%程度ようです。

地面から離れた高い場所の方が邪魔ものが少なく風が強いので、大型の風車の方が発電に好都合になります。

偏西風がコンスタントに吹いているヨーロッパの国とは異なり、わが国では自然環境の厳しさや人口密度が過密であることなどの不利な面があります。

具体的には、風速の変化で発電量が変動しやすい、落雷や台風などの強風による故障のリスクがある、地震で発電停止しやすい、風車のブレード部分に渡り鳥などの野鳥が巻き込まれてしまうことがある、風車から低周波音や機械音が発生して近隣に騒音問題を起こすことがある、などです。



【90】電力の品質管理について

電力を何気なく利用していますが、その裏では厳しく品質が管理されています。

電気エネルギーは本質的に不安定なエネルギーなので、蓄めることが難しく、瞬時に長距離の区間を送電する必要があることから、品質の管理も厄介です。

電力の品質とは……わが国では大半の電力を交流で送電していますが、残念なことに周波数が 50 サイクルと 60 サイクルに二分されています。

電力消費量が発電量を上回ると周波数が低下しますが、できるだけ正確にこの周波数を制御しないと、回転機（モーター）の回転数が変動するために、生産設備に影響を与えてしまいます。電力会社によって管理基準が若干異なりますが、周波数の変動を $\pm 0.1 \sim 0.3$ サイクル にコントロールしています。

電圧も変動したら困るので、 $101 \pm 6V$ にコントロールすることが法律で定められています。また、2 秒以下の瞬時の電圧低下でも低下する電圧が正常な電圧の 10% 以内にするのが求められています。

変動が上記の制限以内でも、継続的な電圧の微小な変動も照明器具がチラチラするので問題になります。

その他にも、高調波（波長が整数倍の波）などが混ざらないようにしなくてはなりません。なお、高調波は需要側に原因があるので、啓発が必要になります。

電力の品質向上対策……周波数や電圧の変動を抑制するためには、電力の需要量と供給量のバランスを保つ必要があります。

そのためには、発電機を制御して電力供給量を変更する必要があるので、各種の発電設備を組み合わせて、需要の変動に追従する努力をしています。

例えば、大規模な火力発電所では小回りがききませんが、揚水発電所での水量の調節は比較的短時間でできることから、比較的小さな変動にも追従できます。

ただ、揚水発電所の水量の調節も瞬時に目標量に変動させることはできないので、小さな変動は変電所に設置してある電力用コンデンサ（蓄電装置。二次電池ではない）や変圧器で微調整されています。なお、二次電池は応答が素早くないために、瞬時の調節には向きません。

揚水発電所とは電力需要の少ない時に下の貯水池の水を上貯水池に汲み上げておいて、必要になった時に発電をする水力発電所です。

水量が調整できるダム式の水力発電所（揚水発電所も含む）は、エネルギーの貯蔵だけでなく、電力の品質管理のためにも大切です。

(余談)

水道の蛇口を急に閉めた時、壁の中で「カーン」とか「ドン」というような音がすることがあります。

これはウォーターハンマー（水撃作用）という現象です。流れている水を急に止めると、流れている水の運動エネルギーの行き場がなくなるために、水撃に変換されます。

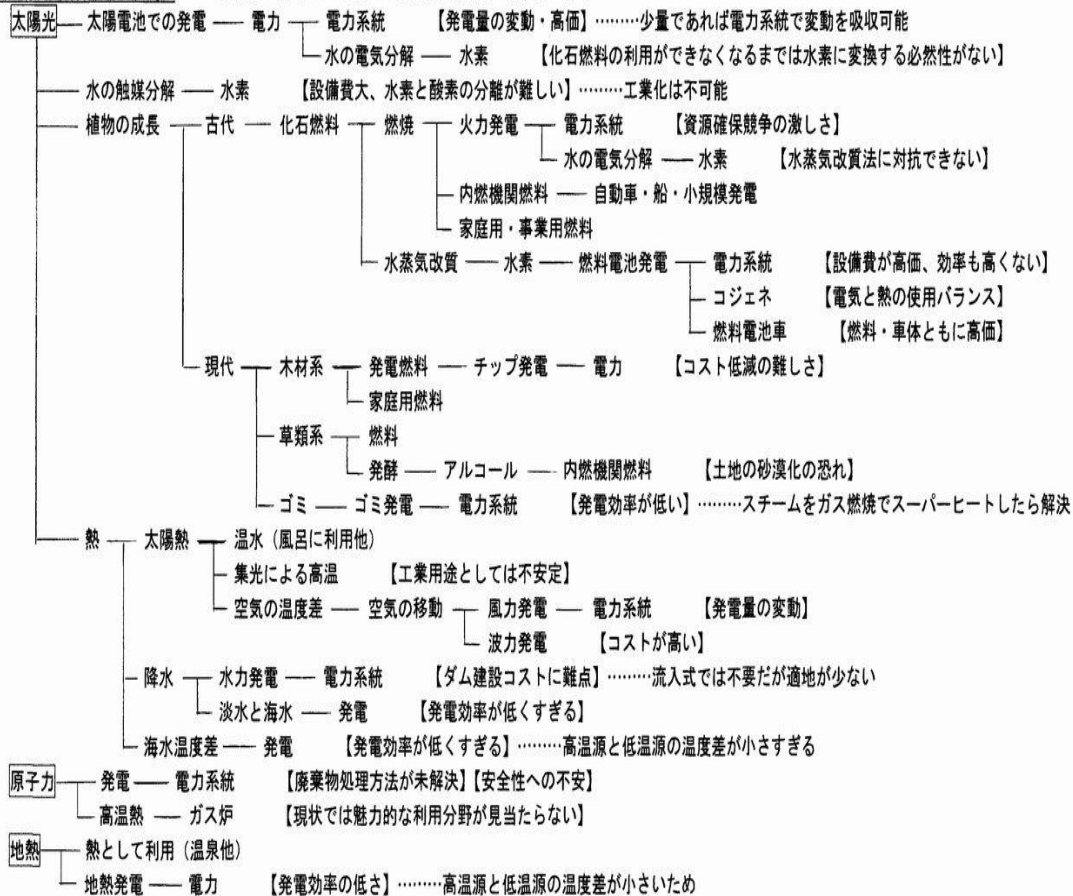
水蒸気などの気体でも、流れを急に遮断すると衝撃（ハンマーリング）が発生します。規模の大きな装置では、この衝撃が大きくなると装置が破損することがあります。

水力発電所や火力発電所などのような大規模な設備での流量変動の際には、徐々に変動させることが大切になります。

付録

エネルギーの確保の難しさ

エネルギーの誕生（核反応）……太陽光・原子力・地熱のみ。技術未開発の核融合は除く



核反応以外

潮汐発電（地球の自転エネルギーを消費） 【経済的に発電できる場所が見当たらない】

廃熱・環境熱

ヒートポンプによる熱利用

付録

用語集

- アボガドロ数……………1モルの原子または分子の個数。 6.02×10^{23} 。
- 宇宙空間……………低温熱源と考えられ、地球表面の不要な赤外線を受け取ってくれる。
- 宇宙背景放射……………宇宙空間を飛び回っている絶対温度で3°K（-270°℃）に相当する電磁波。
- 永久機関……………エネルギーを供給しなくても動き続けることができる装置。空想的なもので絶対に存在しない。
- エネルギー保存の法則……………エネルギーがある形態から他の形態へ変換する前後で、エネルギーの総量は一定不変であるという法則。
- エクセルギー……………常温を基準にしたときに獲得できる最大の仕事量。
- エコキュート……………ヒートポンプを利用して家庭用の温水を確保する設備。直接加熱するよりも5倍以上の温水を確保できる。商品名。
- エネファーム……………燃料電池を利用した家庭用発電設備。副生する温水も活用できる。コジェネの手段として活用されている。商品名。
- エンタルピー……………物質の発熱・吸熱にかかわるエネルギー量。圧力が一定の条件下にあるときに発熱して外部に熱を出すとエンタルピーが下がり、吸熱して外部から熱を受け取るとエンタルピーが上がる。
- エントロピー……………他の種類や状態のエネルギーに変換させにくさを定量化するための指標。自然界では偏在するよりも分散している方が安定で変化しにくくなることからどうしても必要になる概念。大きくなると変化しにくくなる。
- 化学エネルギー……………化学結合によって物質内に蓄えられるエネルギー。化石燃料を多用しているために重要な用語になっている。
- 化学平衡……………可逆反応において順方向の反応と逆方向の反応の反応速度が釣り合って反応物と生成物の組成比が変化しない状態。
- 可逆・不可逆……………一旦進んだものや変化したものを元の状態に戻すことができるような性質や機能を可逆という。
- 拡散抵抗……………電池ではイオンの移動速度（拡散速度）が遅いと電気エネルギーへの転換効率が低下して化学エネルギーが熱エネルギーに変換される割合が増加する。
- 核反応……………原子核が他の粒子との衝突によって、別の種類の原子核に変わる事。核分裂・核融合などがある。
- ガスタービン……………回転式熱機関の一種で、圧縮空気と燃料を混合して燃焼させ、得られた高温高圧ガスでタービンを回転させる。
- 活性化エネルギー……………物質が1つの状態から他の状態に変化する場合、途中の段階で高い障壁を越えなければならない。この障壁を越えるために必要なエネルギーの大きさ。反応熱には影響を与えない。
- カルノー効率……………熱エネルギーを仕事に変換する際の極限の効率。
- 気体定数……………理想気体の状態方程式における係数。理想気体だけでなく、実在気体や液体における量を表すときにも用いられる。
- 気体の状態方程式……………理想気体の温度・圧力・容積には相互関係があり、状態方程式と呼ばれる式で記述される。
- 逆カルノーサイクル……………仕事を使って一つの熱源からこの熱源よりも高温の熱エネルギーを得るときに、最も好都合なサイクル。

吸熱反応……………周囲から熱エネルギーを奪って進む化学反応。一般に吸熱反応は自然には起こりにくく、加熱するなど外からエネルギーを与える必要がある。

高位発熱量・低位発熱量……………燃料を燃焼させたときに生成した水が液体の時に高位発熱量で、液体ではなく蒸気の時に低位発熱量

コジェネ……………石油やガスなどの一次エネルギーから、動力と熱、電力と熱のように2種類以上の二次エネルギーを取り出すシステム。

コンバインドサイクル……………蒸気タービンとガスタービンを組み合わせた高効率の発電方式。

再生可能エネルギー……………利用する以上の速度で自然に再生することができるエネルギー。

仕事……………(力の強さ) × (移動した距離)

実在気体……………実際に存在している気体。理想気体は分子の大きさや分子間のエネルギーなどを考慮していない。

自由エネルギー……………エネルギーの総量から仕事に変換できないエネルギー量を除いたエネルギー。全量を実仕事に変換することができる。

ジュール……………国際的に推奨されているエネルギーの単位。

常温……………日本工業規格では 20℃±15℃ (5～35℃) の範囲として規定。安価に極めて多量に入手できる熱エネルギーの温度。

触媒……………反応速度が大きくなるように手助けをする物質。活性化エネルギー(反応速度に影響)を小さくするだけで反応熱には影響を与えない。

浸透圧……………半透膜を挟んで溶媒のみの純溶媒と溶液がある時には純溶媒から溶液へ溶媒が浸透するけれど、溶液側に圧を加えると浸透が阻止される。この圧を溶液の浸透圧という。

スケール効果(装置) ………………設備の規模が大きくなると単位規模あたりの設備費が安価になる。

赤外線……………可視光線の赤色より波長が長く、電波より波長の短い電磁波。熱エネルギーの移動に重要な役割を果たしている。

接触抵抗……………2つの導体を接触させて電流を流すと接触部に電圧降下と温度上昇が生じる。表面が酸化され、不導体が生成することが主原因。

絶対温度……………考えられる最低の温度を零度としたときの温度。(絶対温度) = (摂氏の温度) + (273度)

水蒸気改質……………炭化水素と水蒸気を高温で反応させて水素と一酸化炭素に変換する方法。代表的な吸熱反応。

水素キャリア……………分子内に水素原子を有しており、水素を手放しやすく取り扱いやすい物質。水素の貯蔵や輸送を簡単にするために用いることが提案されている。

水素社会……………エネルギーを水素にして貯蔵・輸送する社会。燃料電池などが重要な役割を果たす予定。

正極と負極……………電位が高い方を正極(せいきょく)、低い方を負極(ふきょく)と呼ぶ。

送電線・配電線……………発電所～変電所間などを経由する線を送電線と呼び変電所(変圧器)から各家庭へ電気を配る線を配電線と呼ぶ。

CO₂フリー水素……………炭酸ガスを直接または間接に排出せずに製造された水素。わが国では入手するのが難しい。

潮汐発電……………潮の干満の落差を利用して発電する方法。地球の自転に伴う運動のエネルギーを電気エネルギーに変換することになる。

超伝導……………特定の金属や化合物などの物質を非常に低い温度に冷却したとき、電気抵抗が急激にゼロになる現象。

定圧比熱……………圧力が一定の状態での比熱。体積膨張で外部に向かって仕事をするので定容比熱よりも大きくなる。

定容比熱……………容積が一定の状態での比熱。

電気分解……………化合物に電圧をかけることで、陰極で還元反応、陽極で酸化反応を起こして化合物を化学分解する方法。

電磁波……………電気が流れるときに発生する「電場」と「磁場」がお互いに絡み合いながら波を描いて進む電気の流れ。

内部エネルギー……………物体がもつエネルギーのうち、分子などの運動ではなく、物体全体としての運動に関する運動エネルギーを引いた残りのエネルギー。

二次電池……………蓄電池。電気エネルギーを化学エネルギーとして貯蔵するための機器。

熱電変換素子……………仕事を經由しないで熱エネルギーを電気エネルギーに変換できる素子。

燃料電池……………水素やメタノールを電極表面で酸素と反応させて、熱エネルギーを經由せずに発電する装置。

バイオエタノール……………植物系の物質を発酵して製造したエチルアルコール。ブラジルなどでは自動車の燃料に利用されている。

反応抵抗……………化学反応の速度が十分に大きくない場合には抵抗成分（反応抵抗）になる。燃料電池などでは白金触媒の使用量を減らすと抵抗が増え、熱エネルギーに変換される割合が増加する。

反応熱……………化学反応に伴い発生もしくは吸収される熱エネルギー。圧力が一定の条件で反応させたときのエンタルピー変化。

微視的な状態数……………注目しているエネルギーがマクロにみてある値をとるときに、取りうるミクロな状態の数。

ヒートポンプ……………ある温度（常温など）の熱エネルギーをより高温の熱エネルギーとより低温の熱エネルギーに分割する設備。

比熱……………物質 1 グラムの温度を 1 度℃上げるのに必要な熱量。

分子運動……………物質を構成する分子や原子の不規則で無秩序な微視的な運動。並進・回転・振動の 3 種類がある。

分極……………外部の回路に電流が流れるように電極電位をずらす操作、または、外部回路に電流が流れることによって電極電位がずれる現象。

モル (mol) ……原子や分子の数が 6×10^{23} 個が 1 モル。炭素原子が 12 グラムの時の個数。

揚水発電所……………電力需給に余力のある時に水をポンプでくみ上げておいて必要な時に発電する発電所。

ラジオメーター……………受けた電磁波で素子の温度が上昇する熱効果を用いた電磁波検出機器。教育玩具として販売されていることが多い。