

# 木の燃焼の科学

木質バイオマスエネルギー実践講座

平成18年11月21日(火)

NPO里山倶楽部

燃焼という現象は、化学的には、酸化現象です。例えば、炭素に酸素が化合することを炭素の酸化というわけですが、この化合の際に大量の熱を発生させます。この発生する熱が発する電磁波が炎として目に見えるわけです。

とまあ燃焼ということを科学的に説明するとこんなことになるのでしょう。

そこで、木を燃やすときに知っておきたい科学的な事柄を以下に説明しておきたいと思えます。

## 木の燃焼とは？

- 炭素C、水素Hと硫黄Sが酸素O<sub>2</sub>と化合すること
- 炭素は二酸化炭素に
- 水素は水に
- 硫黄は二酸化硫黄にそれぞれ変身し、その際、大量の熱を出す。

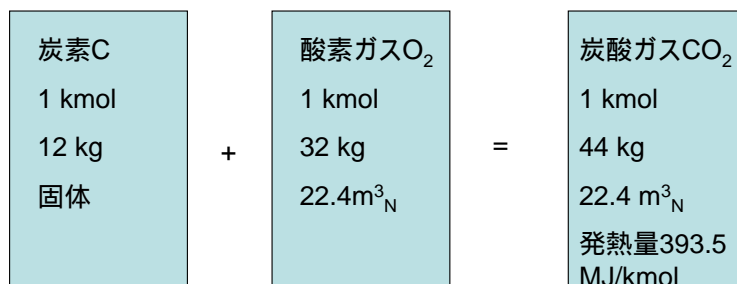
木の組成元素の中で実際に燃焼現象を起す元素は、炭素C、水素Hと硫黄Sの3つなのですが、このうち硫黄は木材中にほとんど含まれません。したがって、木材の燃焼については炭素と水素だけを考えればよいことになります。

炭素Cは燃焼すると酸素O<sub>2</sub>と引っ付いて二酸化炭素CO<sub>2</sub>になります。

水素Hは同じく燃焼によって酸素O<sub>2</sub>と引っ付いて水H<sub>2</sub>Oになります。

ついでに硫黄Sは二酸化硫黄SO<sub>2</sub>になるのですが、木材の場合、除外して構いません。

# 炭素の燃焼



$$\begin{aligned} \text{理論酸素質量} &= 32/12 = 2.67 \text{ kg/kg-c} \\ \text{理論酸素体積} &= 22.4/12 = 1.867 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg-c} \end{aligned}$$

この図は炭素の燃焼の説明図です。

物質量はモルという単位で表します。モルについては後に説明します。

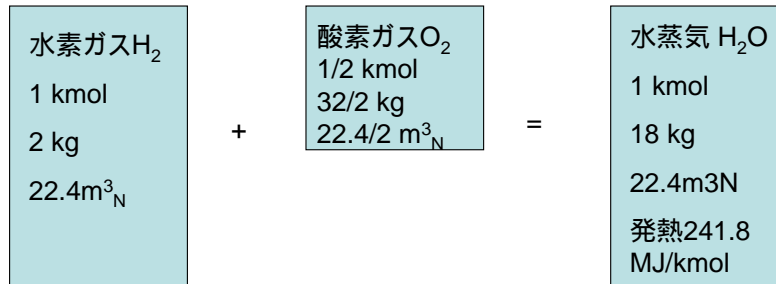
この図は炭素1キロモル(kmol)が酸素1キロモル(kmol)と化合して炭酸ガス(二酸化炭素)1キロモル(kmol)になることを説明しております。この化合の際に393.5MJの熱が発生することが計測されています。

ついでに炭素1kmolは質量が12kgで普通固体です。酸素は気体(ガス)で1kmolが32kgで標準状態(0℃、1気圧)のときに体積が22.4m<sup>3</sup><sub>N</sub>あります。そして、燃焼でできる炭酸ガスも気体で1kmolが両者の質量の和44kgになります。標準状態のときの体積は22.4m<sup>3</sup><sub>N</sub>です。

体積単位のm<sup>3</sup>の後につけたNは標準状態であることを示したものです。

下に示した計算は炭素1kgを燃焼するのに必要とされる酸素の質量が2.67kgで、標準状態での体積は1.867m<sup>3</sup><sub>N</sub>であることを求めたものです。

# 水素の燃焼



理論酸素質量 = 16/2 = 8 kg/kg-h

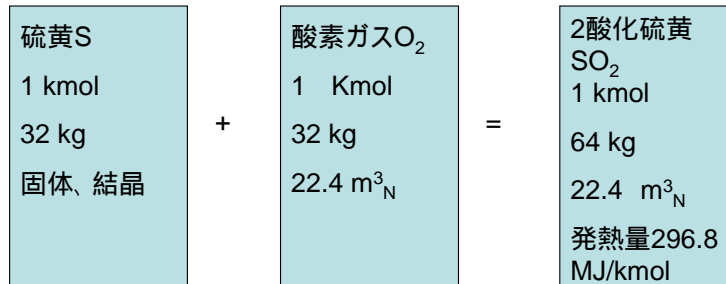
理論酸素体積 = 11.2/2 = 5.6 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/kg-h

この図は水素の燃焼を説明したものです。

水素1kmolは2kgしかありませんが、標準状態の体積はやはり22.4m<sup>3</sup><sub>N</sub>です。

水素1kmolは酸素1/2kmolと化合して水H<sub>2</sub>Oを1kmol(18kg)生じます。このときの発熱量は241.8MJと計測されています。

# 硫黄の燃焼

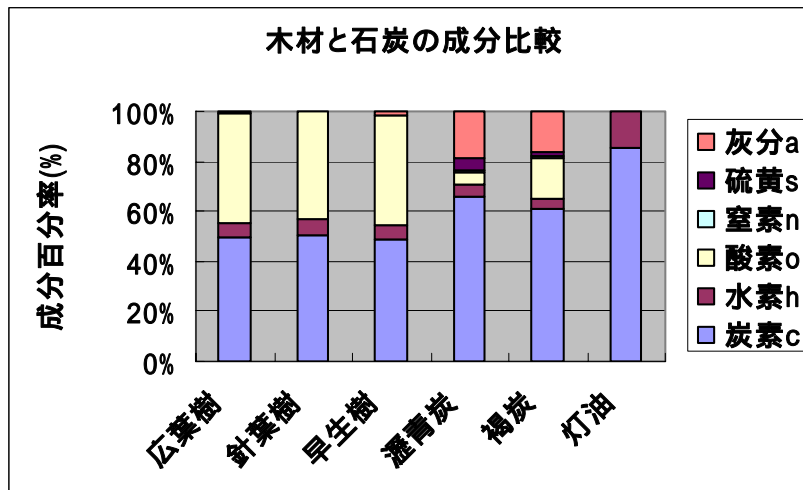


理論酸素質量 =  $32/32 = 1 \text{ kg/kg-s}$   
理論酸素体積 =  $22.4/32 = 0.7 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{kg-s}$

硫黄の場合は1kmolが32kgもありますが、普通は固体です。これも酸素1kmolと化合して二酸化硫黄SO<sub>2</sub>を1kmol(64kg,22.4m<sup>3</sup><sub>N</sub>)になり、発熱量は296.8MJと計測されています。

# 木材と石炭・灯油の成分比較

- 燃烧成分は炭素、水素、硫黄

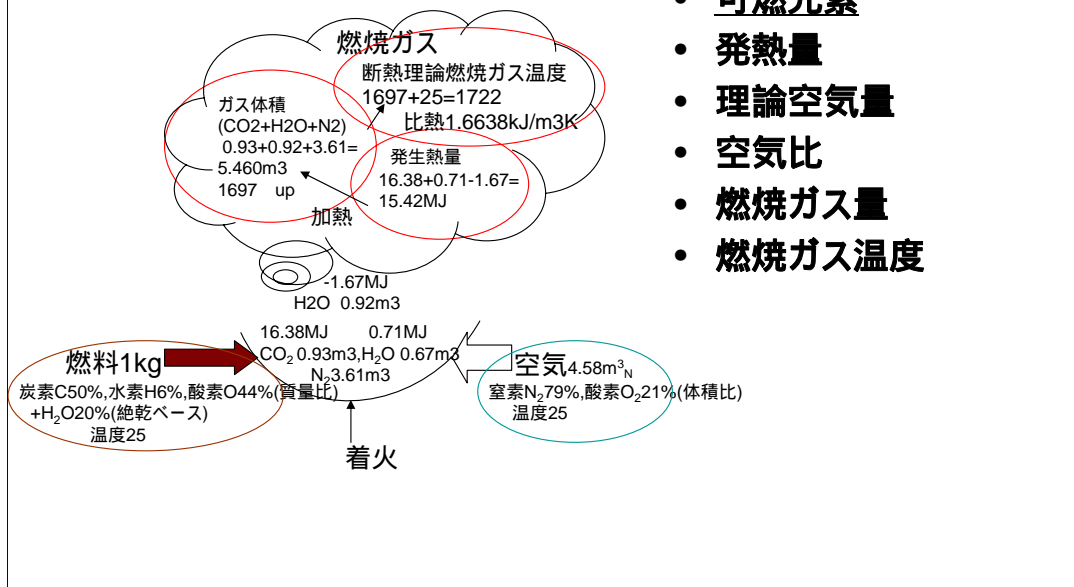


この図は広葉樹、針葉樹、早生樹(早く生長する樹木)と石炭および灯油の組成を比較したものです。木材の特徴は酸素を多く含み、硫黄をほとんど含まないことです。また、灰分も石炭に較べて大変少ないことも特徴でしょう。

いずれも燃焼物質の大部分が炭素です。それぞれ水素も含んでいます。

灯油は精製されたものですから、灰分と硫黄は取り除かれております。

# 木質燃料の直接燃焼



- 可燃元素
- 発熱量
- 理論空気量
- 空気比
- 燃焼ガス量
- 燃焼ガス温度

先の3元素の燃焼についての説明図で、それぞれの元素1kgあたりの燃焼に要する理論酸素量を計算してありますが、その関係を使って、この図は描いてあります。

左下の燃料(木材)1kgに対して右下の空気4.58m<sup>3</sup>Nが理論酸素量を供給するための空気量で、これを燃料1kgあたりの理論空気量といいます。木材1kgには炭素0.5kg, 水素0.06kg, 酸素0.44kgが含まれています。この図の場合、これに絶乾ベースで含水率が20%ある場合について示しています。

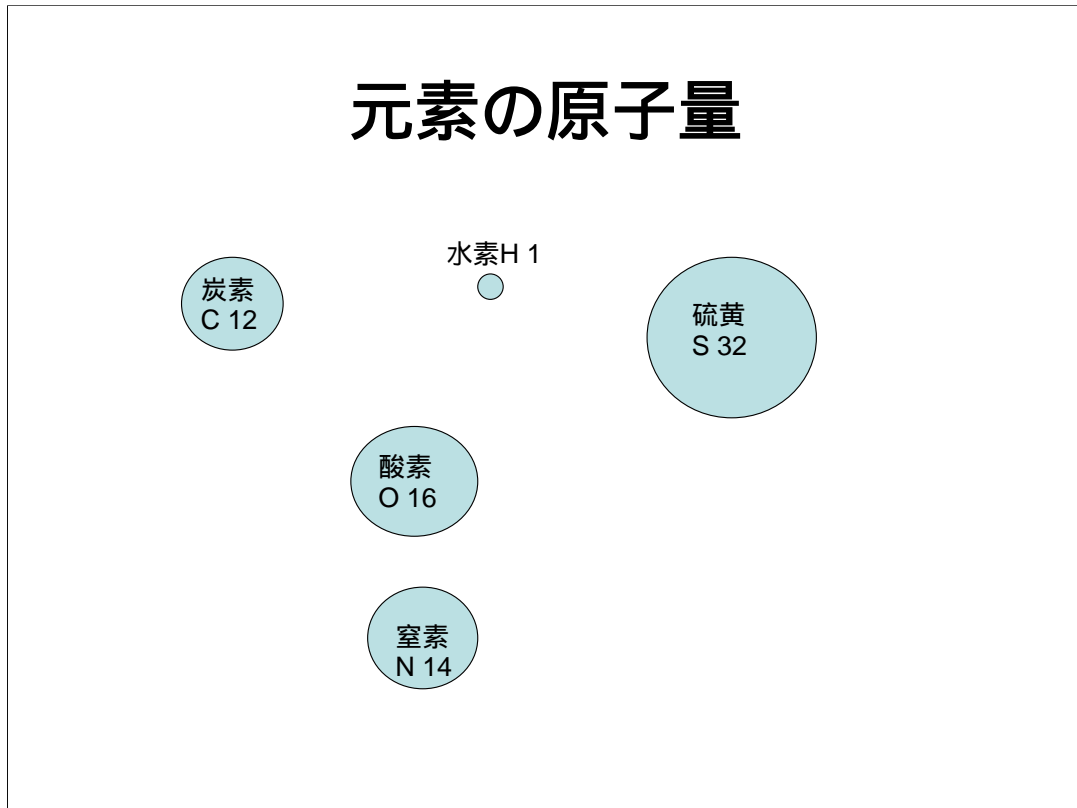
空気はその体積の79%が窒素N<sub>2</sub>で21%が酸素です。その他炭酸ガスやアルゴンなどが含まれるのですが、大変少量なので、ここでは省略して考えております。

燃料も空気もボイラーに投入されるときを温度を25 とします。

ボイラー内で着火されると、これが炭酸ガス0.93m<sup>3</sup>N, 水蒸気0.92m<sup>3</sup>Nと窒素3.61m<sup>3</sup>Nが合計で5.46m<sup>3</sup>Nの燃焼ガスを生じ、炭素と水素の酸化熱が合計で15.42MJ出るために、この熱が全く漏れることなく、全部燃焼ガスに吸収されると仮定すると1697 の温度上昇を起すこととなります。このような燃焼ガスの仮定の獲得温度を断熱理論温度といいます。窒素は空気中の窒素がそのまま燃焼ガスに加わります。

ここで燃焼ガスは燃焼の結果得られるガスのことで、いわゆる排ガスです。この高温になったガスが温水を作ったり、スターリングエンジンの加熱に使われたり、蒸気発生に使われたりするわけです。

# 元素の原子量



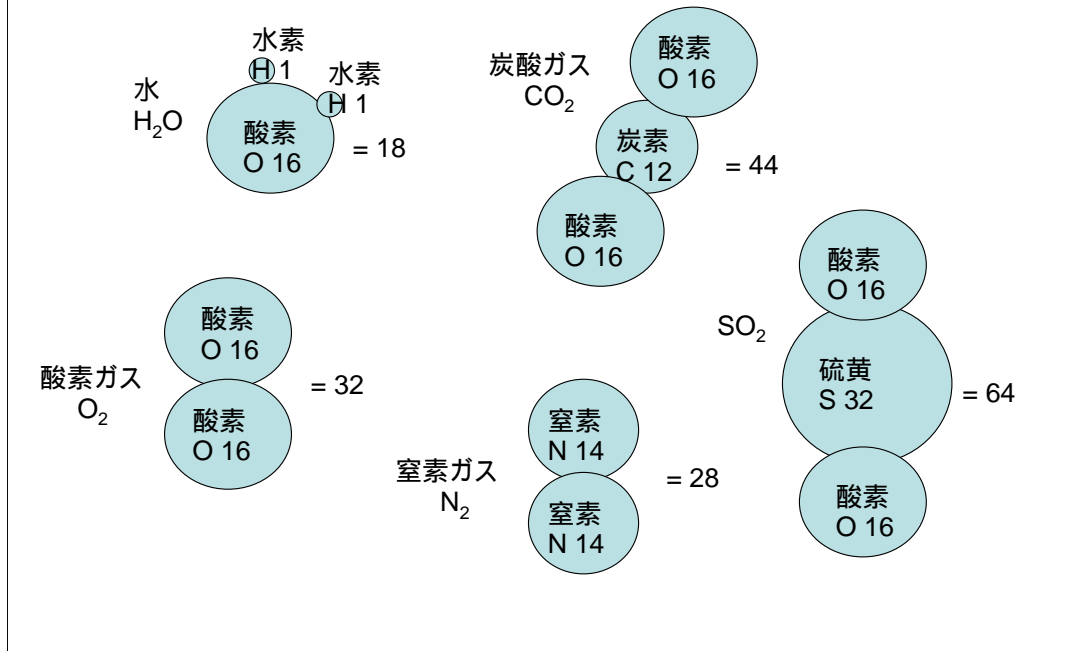
ここで、原子量、分子量という物質の量についての決まりを話しておきましょう。

まず、元素の原子量ということですが、炭素の原子量を12として、他の原子の量が決められております。

水素は1、硫黄は32、酸素は16、窒素は14です。このくらい覚えておけば、木材の燃焼に関しては間に合います。



# 化合物の分子量



分子量とは原子量から計算される分子の量です。ここに示したものでは水はH<sub>2</sub>Oですから原子量16の酸素Oに原子量1の水素Hが二つ付いているので水分子H<sub>2</sub>Oの分子量はそれらを足して18になります。同様に、炭酸ガスCO<sub>2</sub>=C(12)+O(16)x2ですから分子量は44になります。以下同様です。酸素ガスO<sub>2</sub>の分子量は32、窒素ガスN<sub>2</sub>は28、二酸化硫黄SO<sub>2</sub>は64です。

# モル

1000キロモル

$6.02 \times 10^{23}$ 個の原子(分子)の集団

気体体積  $22.4$  $m^3$

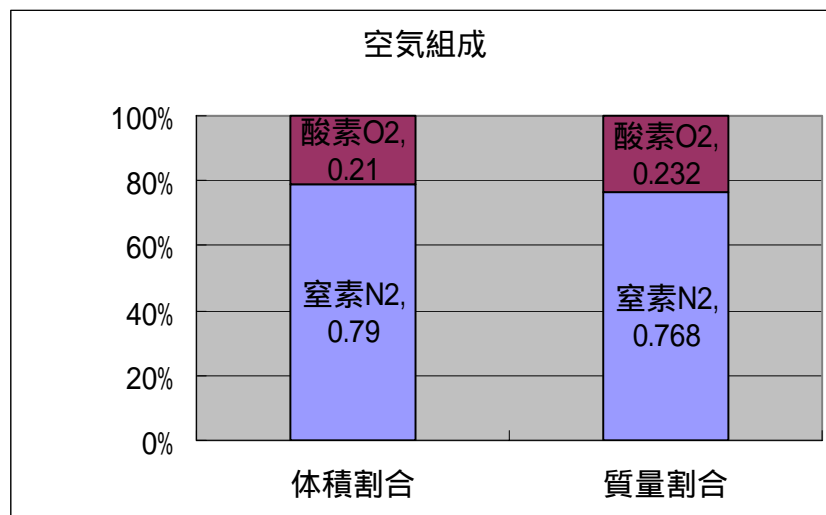
質量 原子量(分子量) g

$m^3_N$ =標準状態-1気圧、0 °Cのときの体積

物質量を表す単位としてモル(mol)が使われていますが、これはアボガドロ数 ( $6.022 \times 10^{23}$ 個)の原子(分子)の集団の量を1モル(mol)とします。この1000倍がキロモル(kmol)です。この量にはアボガドロの法則というものがあります。それは、1molの物質の質量がその原子(分子)量にg(グラム)をつけたものになるということです。また、その物質が気体である場合、標準状態(1気圧、0 °C)のとき、いずれの場合にも22.4リットルの体積を持つということです。

これで、先ほど示した燃焼現象の説明図に書いた数値が出てくるわけです。

# 酸素は空気から供給



燃焼に関しては、もう一つ大切な量があります。それは空気の組成です。

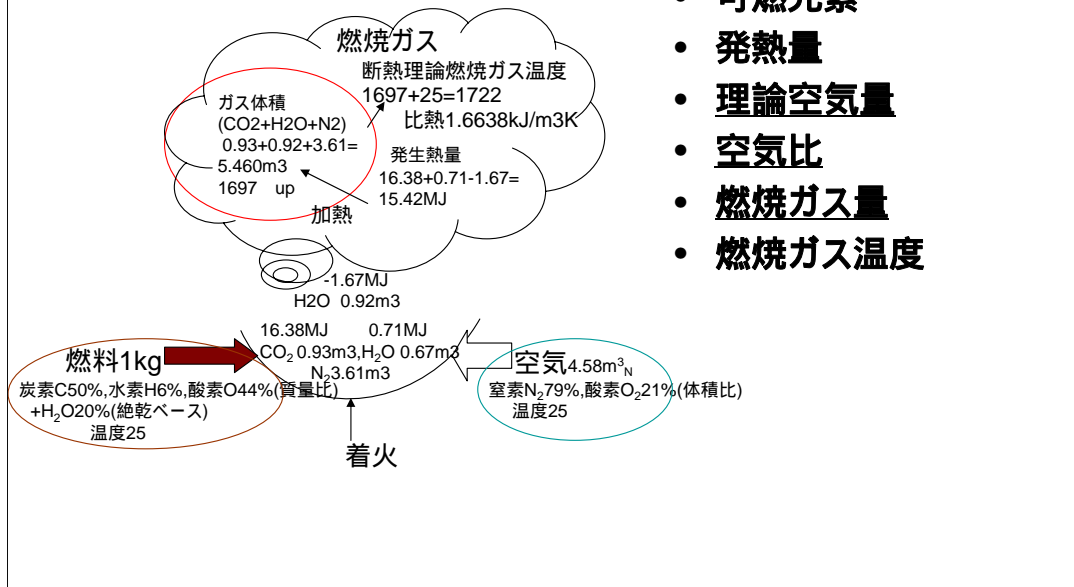
燃焼に必要な酸素は一般的に空気によって供給されます。この空気は体積割合で窒素79%、酸素21%とします。その他、ごく少量の炭酸ガスなどが含まれますが、それらは省略して考えます。質量の割合では、窒素76.8%、酸素23.2%になります。

## 燃焼ガスの量

木材が燃焼して燃焼ガスになります。  
誤解しないでください。  
これは燃焼した後の高温の排ガスのことです。

# 木質燃料の直接燃焼

## 燃焼ガスの体積

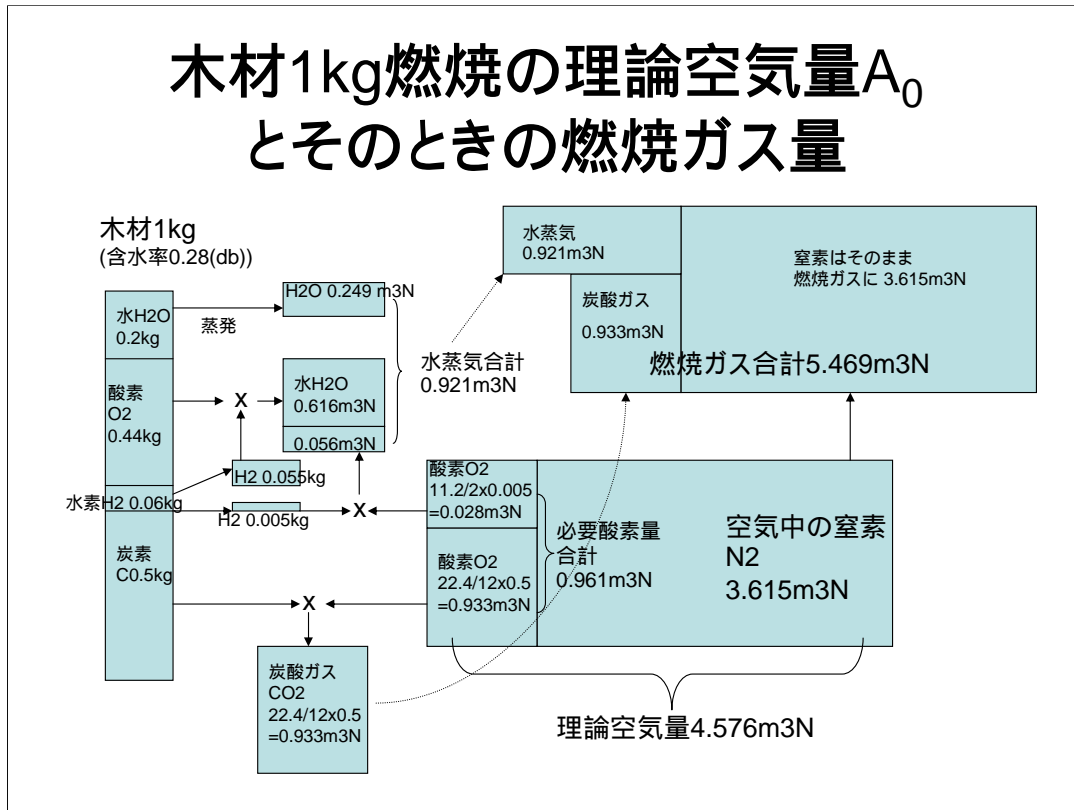


- 可燃元素
- 発熱量
- 理論空気量
- 空気比
- 燃焼ガス量
- 燃焼ガス温度

燃焼ガス量について考えて見ます。

燃焼ガスとは、燃焼の結果できる気体のことです。いわゆる排ガスですね。これが熱をもっているために、その熱を利用することになるわけです。

# 木材1kg燃焼の理論空気量 $A_0$ とそのときの燃焼ガス量



## 理論空気量

木材1kgを燃焼させるのに必要な理論空気量を求めてみます。

この図はその量の関係を示したものです。

左の木材1kgに絶乾ベースで水分が20%分含まれるものとし、木材を構成する元素は炭素0.5kg、水素0.06kg、酸素0.44kgです。これに水分0.2kgが含まれているわけです。ここには酸素が含まれているわけですが、この酸素は水素0.055kgと化合して水になるものとし、そして残りの水素0.005kgだけが、空気の酸素と化合すると考えると、水素の燃焼用の空気中の酸素は0.028m<sup>3</sup>Nと求められます。先に示した計算では、1kgの水素は22.4/2m<sup>3</sup>Nの水蒸気になるわけですから、木材中の水素0.06kgは0.06x22.4/2m<sup>3</sup>N=0.672m<sup>3</sup>Nの水蒸気になります。

20%の水はそのまま0.249m<sup>3</sup>Nの水蒸気になります。結局合計0.921m<sup>3</sup>Nの水蒸気ができるわけです。

0.5kgの炭素は酸素0.933m<sup>3</sup>Nと化合して0.933m<sup>3</sup>Nの炭酸ガスになります。

したがって、空気からは0.961m<sup>3</sup>Nの酸素を供給しなければなりません。その21%が酸素0.961m<sup>3</sup>Nを供給できる空気量は0.961/0.21=4.576m<sup>3</sup>Nになります。これが理論空気量です。これを $A_0$ としておきます。

この空気には窒素が3.615m<sup>3</sup>N含まれているわけですからこれがそのまま燃焼ガスに含まれることに成ります。したがって、水蒸気0.921m<sup>3</sup>N+炭酸ガス0.933m<sup>3</sup>N+窒素3.615m<sup>3</sup>N=4.569m<sup>3</sup>Nが理論空気量で含水率20%の1kgの木材が燃えたときにできる燃焼ガス量です。

## 追加空気量 = 空気比

- 実際には理論空気量よりやや多目の空気Aが必要
- 実際の空気量  $A = mA_0$  または  $A = A_0$ とも書く
- mまたは は空気比、または空気過剰係数という
- 燃焼室全体に燃料と空気を均一に混合することは困難
- 理論空気量だけでは空気不足の部分がでる
- CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>などの未燃ガス、すすなど排出

### 空気比

先の理論空気量は空気と燃料が十分に交じり合って完全燃焼する場合のものです。実際には、そんなに上手くは燃えてくれません。空気が上手く交じり合わずに不完全燃焼部分を発生させるために、一酸化炭素CO、水素H<sub>2</sub>、メタンCH<sub>4</sub>などの未燃ガスや固形のススなどが排出します。これをできるだけ少なくするように空気を余計目に加えてやる必要があります。この追加分を追加空気量といい、理論空気量に対する比で表した空気比という言葉でその量を表します。

理論空気量をA<sub>0</sub>、実際の空気量をAを、 $A = mA_0$ または  $A = A_0$ と係数mまたは を用いて表します。

このmまたは を空気比または空気過剰係数と呼びます。

## 窒素バランスによる空気比の計算

- 乾き燃焼ガス中の $N_2$ の体積( $0.79mA_0$ )と理論空気中の $N_2$ の体積( $0.79A_0$ )の比は空気比  $m$  に等しいから、多少の省略をして
- $m=0.21/(0.21-((O_2)-1/2x(CO)))$ 
  - ( $O_2$ ):燃焼ガス中の酸素体積割合
  - ( $CO$ ):燃焼ガス中の一酸化炭素の体積割合
- エレクトロ・ケミカル・センサーで( $O_2$ )( $CO$ )を計測できる

実際の燃焼時には、上の空気比をここに掲げたような式で求めることができます。

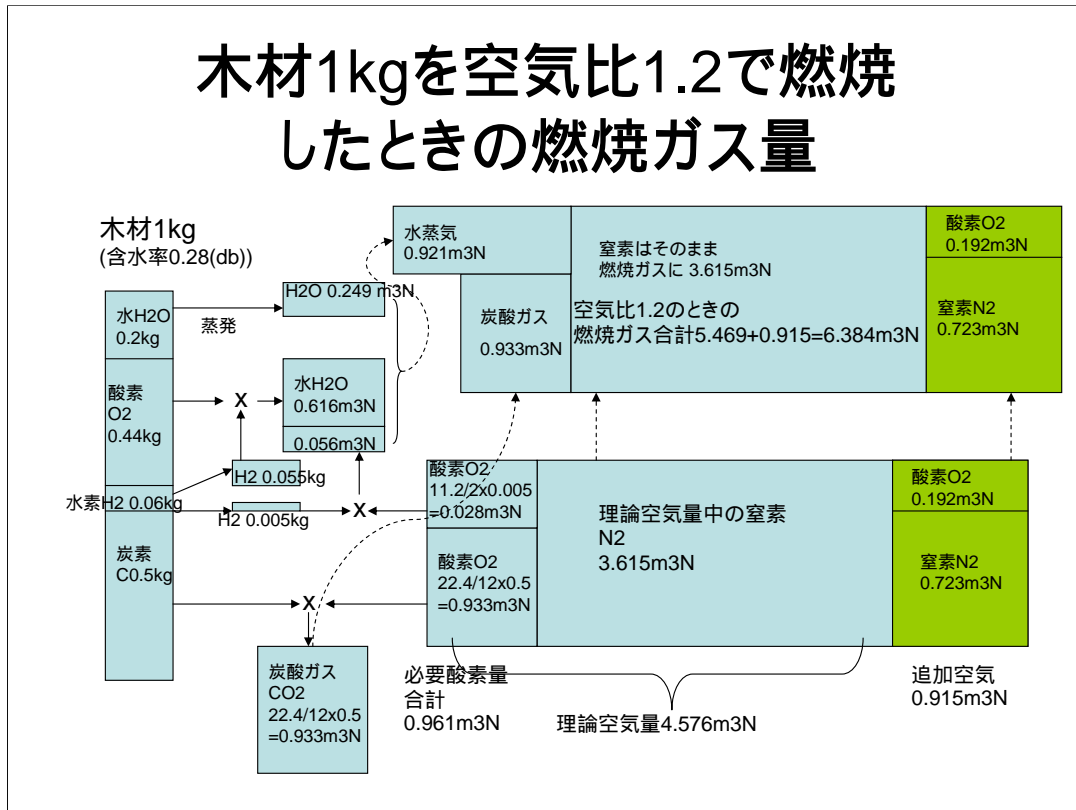
空気比はここに示したように、燃焼ガス中の窒素 $N_2$ の体積と理論空気量中の窒素の体積が分かればその比からもとめられるわけです。

また、エレクトロ・ケミカルセンサーで酸素 $O_2$ と一酸化炭素 $CO$ の燃焼ガス中の割合は比較的簡単に求められるところから、この二つの割合を使って空気比 $m$ を求める式も求められています。

エレクトロ・ケミカルセンサーとは、一種の燃料電池で、+ - の両極に等量の酸素がながれているときには両極間に電位差はできないが、酸素量の差ができると電位差を生じて電流が流れるという機構なのだそうです。あまりよくは分かりませんが。

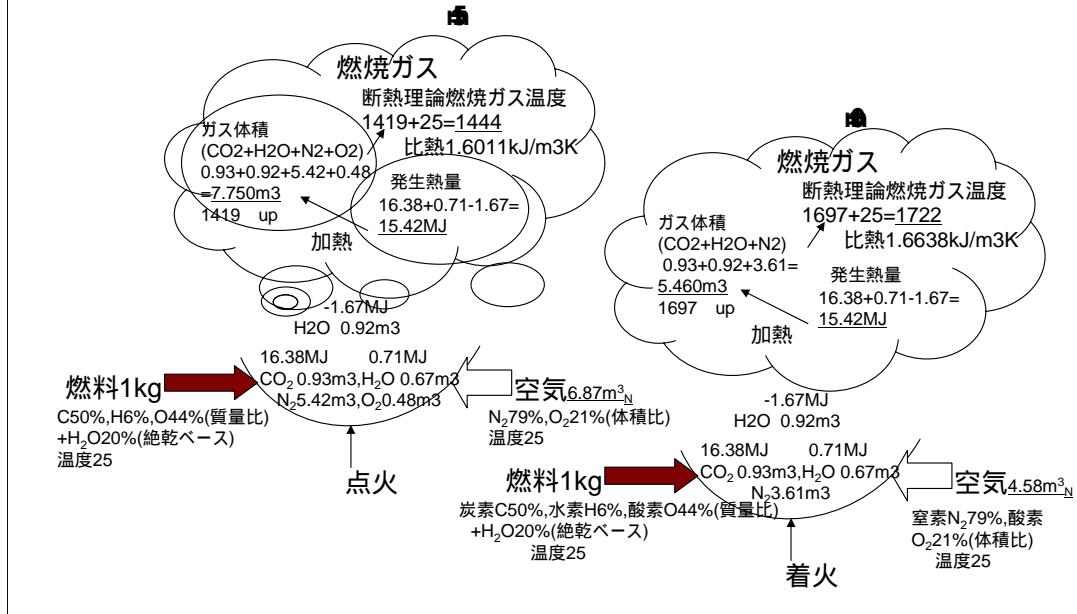


# 木材1kgを空気比1.2で燃焼 したときの燃焼ガス量



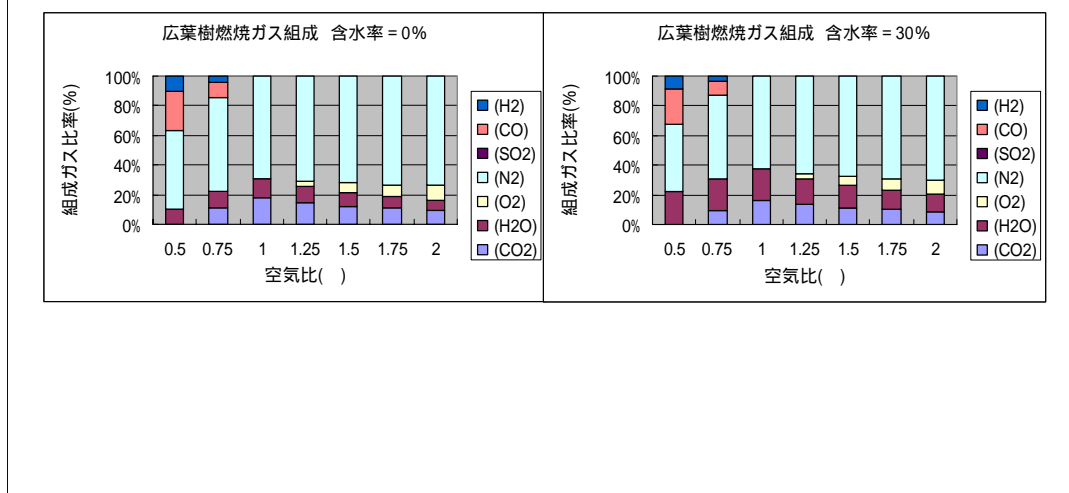
この図は、1より大きい空気比で完全燃焼した場合の燃焼ガス量の増加分について示したものです。当然、追加空気量分だけ燃焼ガスが多くなります。

# 木質燃料の直接燃焼と熱利用 空気比mの影響



空気比の大きさに関係なく、完全燃焼の燃料1kgあたりの発生熱量は同じですから、空気比が大きいほど燃焼ガス量が増加するため、断熱理論燃焼ガス温度は低くなります。その関係をこの図は示しています。ちょっと細かすぎましたかな。

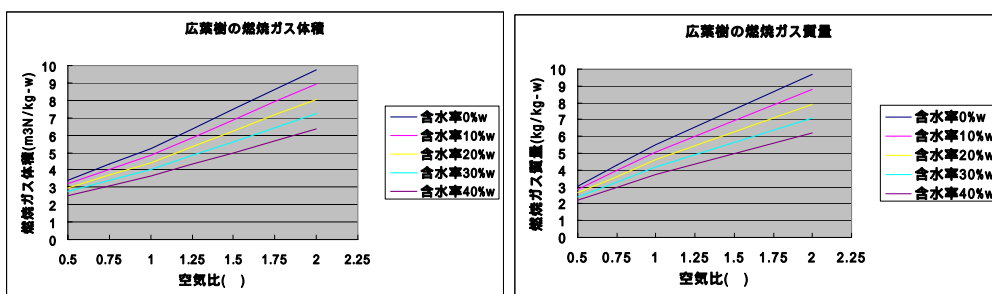
# 完全燃焼後の燃焼ガス組成



この図は完全燃焼後の燃焼ガスの組成を示したものです。左が含水率0%の場合、右が含水率30%の場合です。右の方が水蒸気量の割合が大きくなっております。

横軸は空気比を空気不足の0.5から追加空気量が理論空気量と同じ量になる2までとっております。1以下では未燃ガスが出ており、1以上では窒素と酸素が多くなります。

# 空気比を考慮した燃焼ガス量



この図は燃料1kgあたりの燃焼ガス量を示しています。

横軸は空気比です。

左は燃焼ガスの体積を含水率別に示したもので、右は質量の方を表しております。

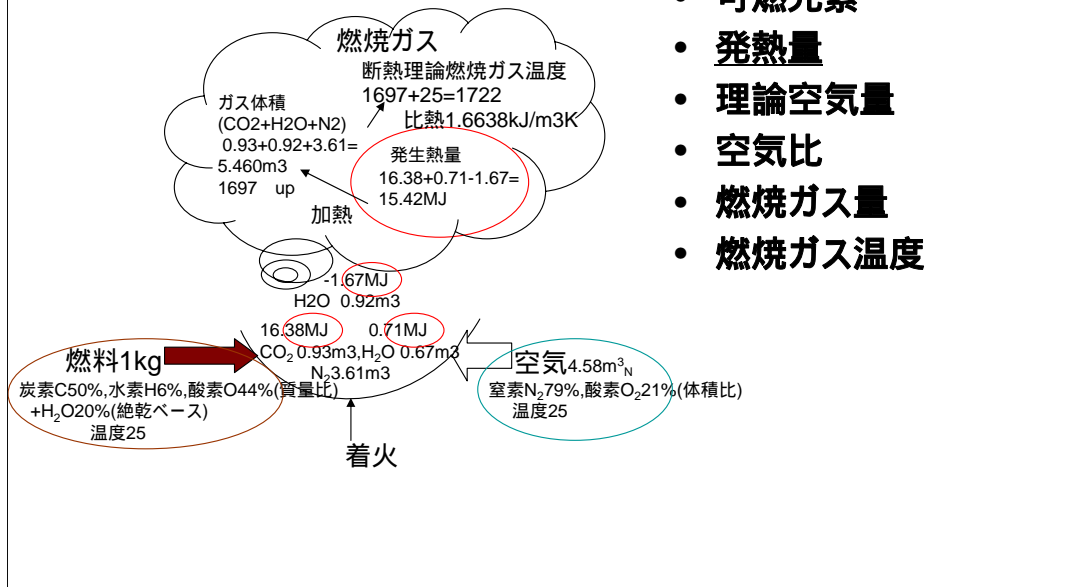
## 発熱量

木が燃えるとどのくらいの熱がでるの？  
木材は水分を含んでいる  
水の影響は？

それでは、発熱量について考えて見ましょう。

# 木質燃料の直接燃焼 発熱量

- 可燃元素
- 発熱量
- 理論空気量
- 空気比
- 燃焼ガス量
- 燃焼ガス温度

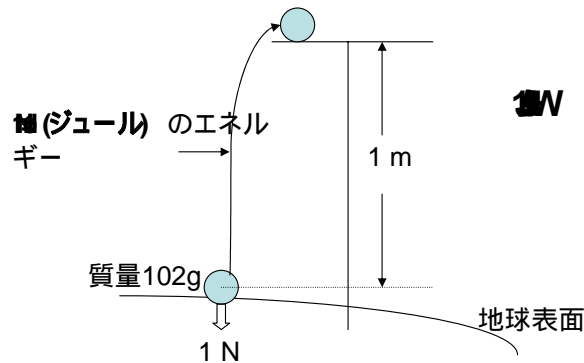


先ほど示したものと同一図です。

発生熱量について、燃料1kgを完全燃焼させる場合に理論的に必要な空気量が4.58m<sup>3</sup>Nで、炭素からの発熱量が16.38MJ、有効水素からの発熱量が0.71MJで水の蒸発のために使われて消耗する熱量が1.67MJであるため、結局発生熱量は15.42MJになることをしめています。

## ジュール (J)とワット(W)

- 質量102グラムの地上の重さ1N(ニュートン)を1 m持ち上げるエネルギー = 1 J(ジュール)
- これを1 秒間で持ち上げる能力を1W



ここで熱の単位について述べておきます。

熱量の単位には国際ルールではジュール(J)を用いることに決まっております。熱もエネルギーの一種です。

1Jとは、1N(ニュートン)の力が1mの距離だけ働いたときのエネルギーです。1Nm=1J  
具体的には、1Jは地球上で質量約102gのものを1m持ち上げるときの仕事量(エネルギー)に相当します。

この102gの質量を1m持ち上げるという仕事のエネルギーは、1時間かかってやっても、1秒間でやっても同じです。この仕事を1秒間でやるときの能力を1Wといいます。

$1\text{J}/\text{s}=1\text{W}$

1時間でやった場合にはその能力は $1\text{J}/3600\text{秒}=1/3600\text{W}$ という微小なものになります。ジュール(エネルギー)とワット(能力)との関係はこのようなものです。

## 熱エネルギーの単位

- 質量1gの水の温度を1℃ 上げるのに必要な熱量は1cal(カロリー)
- 1cal=4.186J(ジュール)の熱エネルギー
- 25℃ の水1 (= 1000cc)を45℃ に暖めるには  $1,000 \times (45-25) = 20,000\text{cal} = 20\text{kcal}$  必要
- これは  $20 \times 4.186 = 83.72\text{kJ}$  の熱エネルギー

熱の単位は良くカロリーで表されます。これは質量1gの水を温度1℃ 上げるのに必要な熱量が1カロリー(cal)ということで分かりやすい単位なので、今でも一般に使われています。

カロリーとジュールの関係は、定義の仕方によって僅かに数値が違ったりしますが、 $1\text{cal} = 4.186\text{J}$  と覚えておけばよろしいかと思います。



## 桁数の大きな数値の呼び方

- エネルギー(熱量など)の単位:J(ジュール)
- $1000\text{J}=1\text{kJ}$  (キロ)
- $1000\text{kJ}=1\text{MJ}$ (メガ)
- $1000\text{MJ}=1\text{GJ}$ (ギガ)
- $1000\text{GJ}=1\text{TJ}$ (テラ)
- $1000\text{TJ}=1\text{PJ}$ (ペタ)
- $1000\text{PJ}=1\text{EJ}$ (エクサ)

ジュールという単位は非常に小さな単位です。

それで、その千倍をkJという単位で呼びます。それから数値が千倍になる毎に、MJ,GJ,TJ,PJ,EJのように呼ばれています。これは西欧式の呼び方ですね。日本だと、万、億、兆と4桁単位で大きくなるのですが。

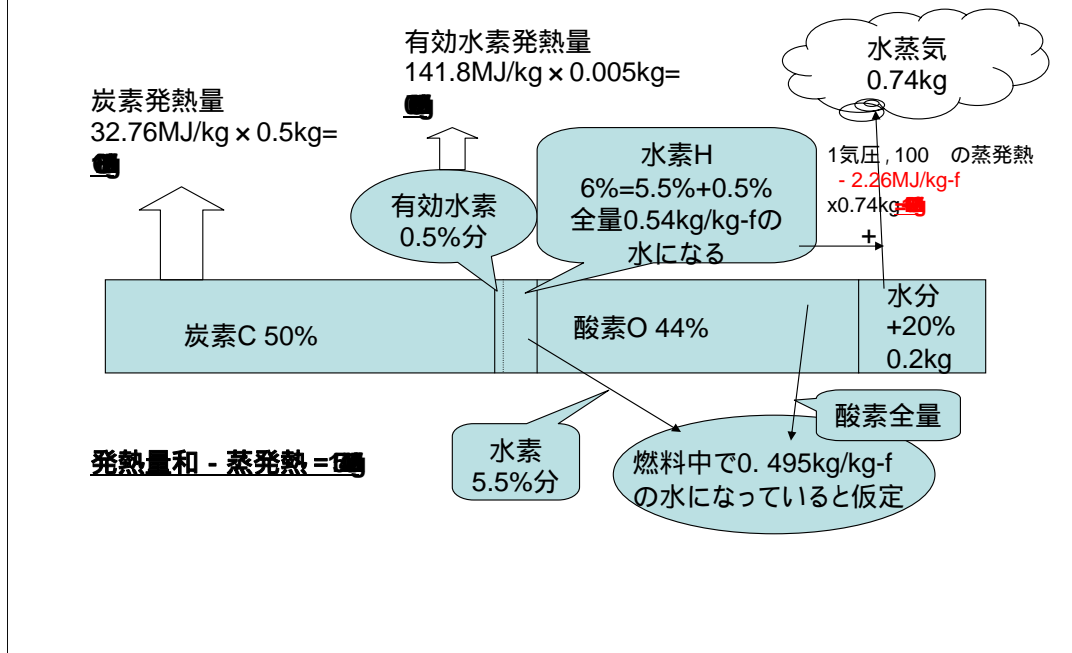
## 可燃成分の発熱量(1気圧、25 )

可燃成分	高発熱量 $H_H$			低発熱量 $H_L$		
	kJ	Wh	Wh	kJ	Wh	Wh
水素 $H_2$ (気体)	142	39.7	39.7	120	32.8	32.8
炭素(固体、グラファイト)	32.8	9.1	9.1	左に同じ		
硫黄(固体、結晶)	9.1	2.5	2.5			

山崎正和著「熱計算入門」財団法人/省エネルギーセンターp14

炭素、水素、硫黄の三つの可燃成分の発熱量(1気圧、25 )を表にしたものを示します。  
下に書いた書物からの転載です。

# 木材1kg-fの発熱量内訳



木材1kgの完全燃焼時の発熱量をしめしました。

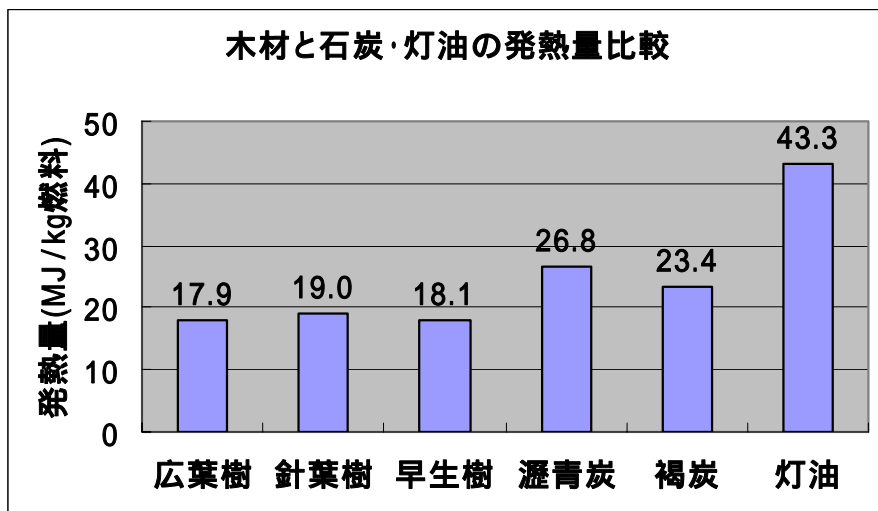
半分を占める炭素の発熱量が16.38MJです。

水素は約6%含まれているわけですが、酸素も44%含まれているので、この両者が化合して水素の5.5%分が水になってしまいます。これは元から水なのかもしれない。残りの0.5%分のみが空気中の酸素と化合して熱を発すると考えると、その発熱量は0.709MJです。

木材中の水素と酸素が化合してできる水と木材に含まれる水を蒸発させるための熱量を単純に100 の蒸発熱2.26MJ/kg(水)として計算すると1.672MJになりますので、これを引いた15.417MJが有効な発熱量であるとしています。

実は、水の蒸発は100 以下でも起こるわけですので、蒸発熱の方はちょっとあいまいですね。こまかなことはまあいいことにしましょう。

# 木材と石炭・灯油との熱量比較



この図は計測された低発熱量の例です。樹木、石炭、灯油を比較しました。

灯油は精製されたものですが、さすがに熱量が高いですね。木材の2倍以上です。

ですが、幾分か灰を溜めた低温利用の場合には、木材の方が実用的には良い場合もあるのですよ。部屋の暖房や給湯などには、そんなに高温は必要ないのですからね。

# 木質と石炭・灯油の成分・発熱量

絶乾ベース

	成分表 (重量%)						高発熱量	低発熱量
	炭素c	水素h	酸素o	窒素n	硫黄s	灰分	MJ / kg	MJ / kg
広葉樹 オレゴンハンノキ	49.55	6.06	43.78	0.13	0.07	0.41	19.30	17.94
針葉樹 ダグラスファー	50.64	6.18	43.00	0.06	0.02	0.10	20.37	18.98
早生樹 ポプラ	48.45	5.85	43.69	0.47	0.01	1.53	19.38	18.06
瀝青炭 ケンタッキー産	65.78	4.62	4.86	1.26	4.74	18.74	27.81	26.77
褐炭 テキサス産	60.98	4.45	15.82	1.08	1.08	16.65	24.36	23.36
灯油	85.50	14.20	0.29	0	0.01	0	46.84	43.38

熊崎実著「木質バイオマス発電への期待」林業改良普及双書No.135p62による

前図の数値内容です。

今まで広葉樹、針葉樹、早生樹などといったものは実はこの熊崎氏の書物から取ったものです。

## 固体・液体 燃料の成分・発熱量

種類	成分組成(質量%)							高発熱量 Hh		低発熱量 HI	
	c	h	s	o	n	w	a	MJ/kg	kcal/kg	MJ/kg	kcal/kg
木材	42.66	5.22	0.00	36.60	0.10	15.00	0.42	16.8	4,020	15.3	3,660
木炭	76.09	2.43	0.00	6.48	0.00	12.90	2.10	28.6	6,830	27.8	6,630
瀝青炭	61.10	4.58	3.76	12.87	1.18	7.90	8.61	25.7	6,140	24.5	5,860
無煙炭	84.0	3.68	1.00	2.84	1.18	1.30	6.00	33.4	7,980	32.6	7,780
ガソリン	85.50	14.40	0.10	0	0	0	0	46.89	11,200	43.75	10,450
灯油	85.50	14.20	0.01	0.29	0	0	0	46.84	11,100	43.38	10,360
軽油	96.09	13.64	0.27	0	0	0	0	46.06	11,000	43.09	10,290
A重油	85.81	13.49	0.44	0.15	0.01	0.10	0	45.64	10,900	42.70	10,200
B重油	85.20	11.39	2.71	0.49	0.10	0.10	0.01	43.96	10,500	41.47	9,910

この表は山崎氏の先ほど示した書物からの転載です。

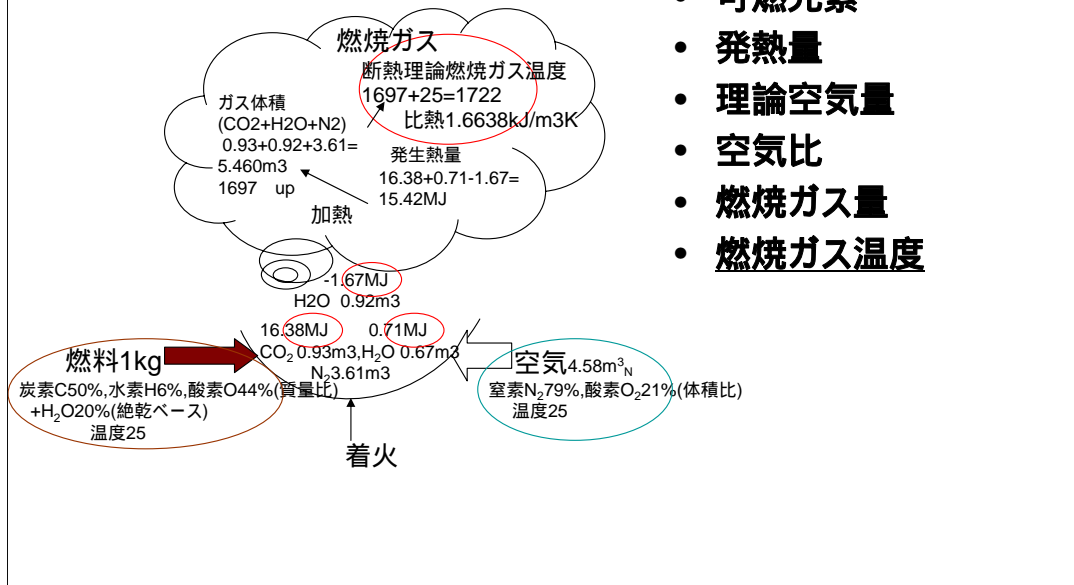
同じ石炭でも無煙炭と瀝青炭の差は大変大きいことが分かります。

# 燃焼ガス温度

木材を燃やしたときの燃焼ガスは  
どのくらいの温度になるのか？  
水分の影響は？  
空気比の影響は？

# 木質燃料の直接燃焼

## 燃焼ガス温度



- 可燃元素
- 発熱量
- 理論空気量
- 空気比
- 燃焼ガス量
- 燃焼ガス温度

発生熱量15.42MJは、燃焼ガスに吸収されて、燃焼ガスの温度を上げます。つまり、発生熱というエネルギーは、燃焼ガス温度という形になって保持されるわけです。

単位量のガスを定圧の状態ですら上げるのに必要な熱量を定圧比熱といいます。この比熱の値は温度によって少しずつ違うのですが、この図のように25 から1700 くらいまで上昇するわけですから、その間の平均の比熱を求めて、概算します。

発生熱量を燃焼ガス量で割り算をして1m<sup>3</sup>Nあたりの熱量を求め、これをさらに平均比熱で割り算をしてやれば、おおよその上昇温度を求めることができます。ただし、これは燃料のもつ熱が全て利用できて、放射や伝導でにげていくことはないとした完全断熱状態での理論的な値です。断熱理論燃焼ガス温度といいます。



## 断熱理論燃焼ガス温度

- 燃料と空気の温度が基準温度で、放射熱0、燃焼効率1の場合
- 断熱理論燃焼ガス温度  $T_{th}$
- $T_{th} = H_l / (G \cdot c_{pm}) + T_0$   $T_0$ :基準温度
- 発熱量 $H_l$ を燃焼ガス量 $G$ と平均定圧比熱 $c_{pm}$ で割った値が上昇温度に等しい

前の図で説明した断熱理論燃焼ガス温度を式で説明したものです。

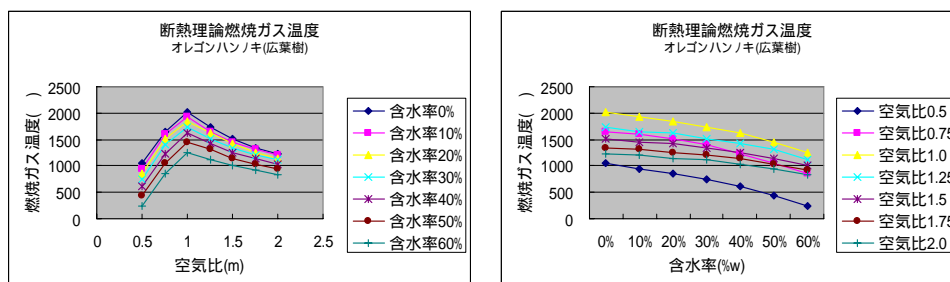
## 燃焼ガス温度の計算式

- 燃焼ガス温度:  $T_g = (\eta \cdot H_l + Q_p - Q_r) / (G \cdot c_{pm}) + T_0$
- $T_0$ : 基準温度
- $\eta$ : 燃焼効率
- $H_l$ : 低発熱量
- $Q_p$ : 燃料および空気の顕熱
- $Q_r$ : 燃焼ガスからの放熱量
- $G$ : 湿り燃焼ガス量
- $c_{pm}$ : 燃焼ガスの平均比熱

これは実際の燃焼ガス温度の計算式です。燃焼効率や空気の顕熱、燃焼ガスから放射などで逃げる熱も計算項目に入れてあります。

実際の放射熱などの損失は、炉自体の構造などによって異なります。ボイラーはストーブと違って温水や熱油などを作ることが目的なのですから、放射熱などは極力出ないように設計されます。

# 木材の断熱理論燃焼ガス温度



この図は燃焼ガス温度への含水率と空気比の影響を断熱理論燃焼ガス温度の形で示したものです。

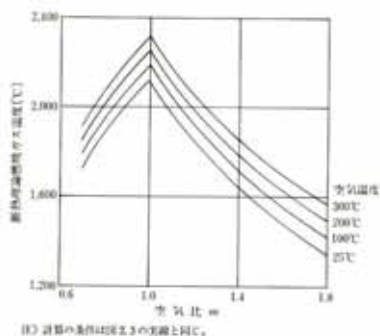
左は横軸に空気比をおき、含水率別にガス温度を示したものです。右は逆に含水率を横軸にして、空気比ごとに温度曲線を描いたものです。

空気比1のときがもっとも温度が高く、空気比が低いと急激に温度が下がっています。

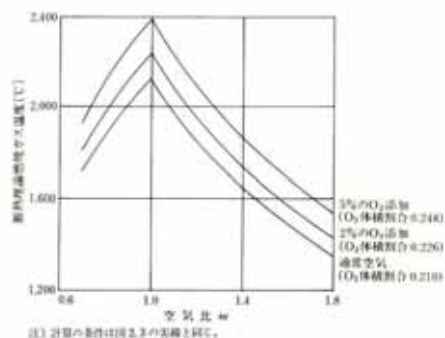
含水率が高いほど温度は下がります。とくに空気比が低く、不完全燃焼状態では、その下がり方が大きくなることなどが示されています。

# 燃焼ガス温度を上げる方法

山崎正和著「熱計算入門」p50,51



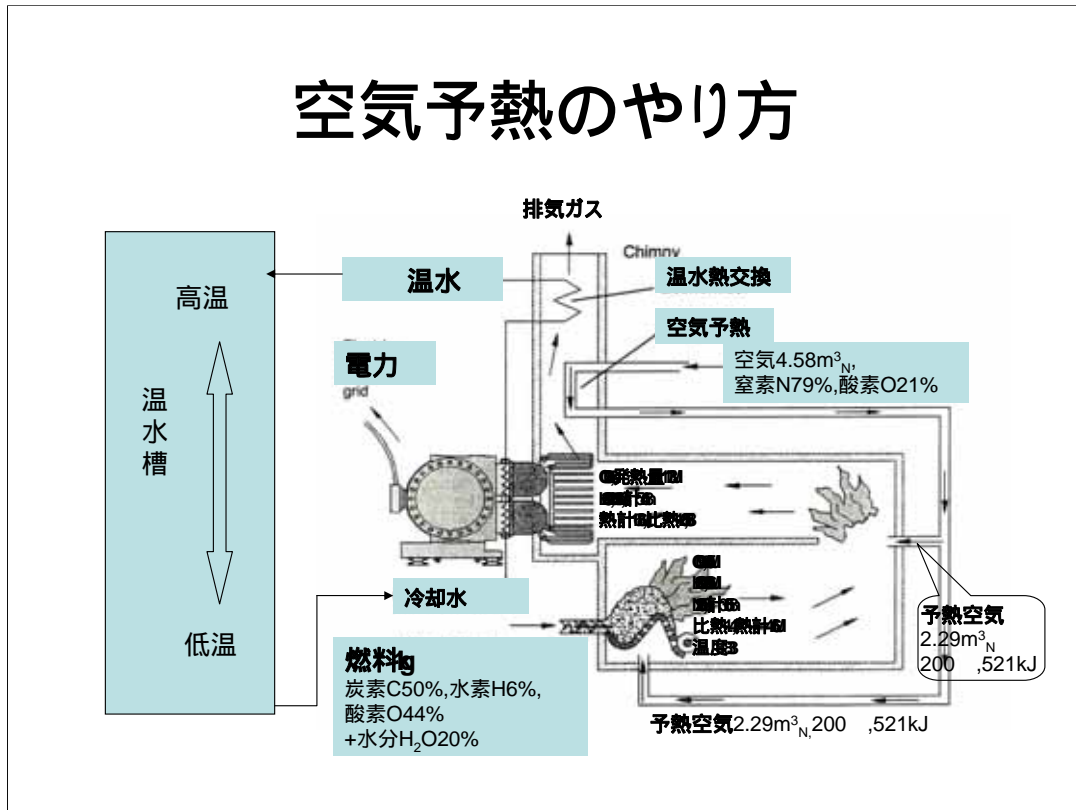
予熱空気使用による  
断熱理論燃焼ガス温度  
(燃料:プロパン)



酸素富化空気使用による  
断熱理論燃焼ガス温度  
(燃料:プロパン)

これは山崎氏の著書からの転載ですが、燃焼用空気を予熱すると温度を上げることができること、また、酸素富化空気を使ってもガス温度を上げることができることが示されています。

# 空気予熱のやり方



この図はMAWERA社のスターリングエンジン付き木質チップボイラーの説明図ですが、スターリングエンジンに熱供給をした後の燃焼ガス(排気ガス)はまだまだ高温ですから、これを使って燃焼用空気の予熱とさらに温水を作っている図です。燃焼ガスの使用目的がスターリングエンジンであろうと、熱油つくるであろうと、いずれの場合でも煙道の最終段階で水に熱交換する部分を作って排気ガスの温度をさげる必要があります。温水熱交換部をエコマイザーと呼ぶ場合がありますが、これは、排気ガス温度の調節に不可欠なものです。ですから、この温水を上手に潤沢に使うことがボイラー使用上の要諦ということになります。

# 木の燃焼の科学 終

ご静聴ありがとうございました。

皆様ありがとうございました。

このくらいでこの講義は終わりにしておきます。