

■ 展望・解説 ■

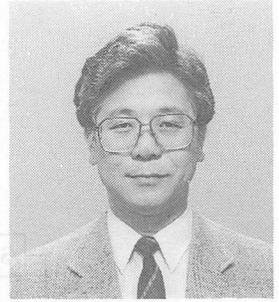
エネルギー分野の単位系

Unit Systems for Energy Technology

野 崎

Ken Nozaki

健*



1. はじめに

平成4年5月に改正、平成5年11月から施行された計量法によると、法律で定めるわが国の計量単位（法定計量単位）は「国際単位系」（フランス語で Le Système International d'Unités, 略称SI, エスアイと読み, S. I. と書いてはいけない）によることになった¹⁾。改正前に使用が認められていた非SI単位は一定の猶予期間をおいて法定計量単位から削除される。エネルギー関連では、1999年にダイン、エルグが2003年には重量 $\text{kg} \cdot \text{m}$ （熱量は1999年）、カロリー（栄養学的な使用を除く）が削除、すなわち法定計量単位として商取引や証明に使用することが禁止される。また、1960年にSIの採用が国際度量衡総会で決議されたのに伴い、日本工業規格（JIS）も1974年からSIへの移行を開始し、1990年以降のものはSIのみで記述するようになった。国際性を重視する学術雑誌等は、既にほとんどがSIに移行している。

SIは、要約すればメートル系のMKS単位系を中心とするので、CGS単位系のダイン、エルグも排除される。天気予報のミリバールがヘクトパスカルに変更されたのもこれを受けてのことである。このように従来から慣れ親しんできた単位が変更されるのには不便を感じるが、長期的には整合性があり間違いの少ない単位系に移行するのだから望ましいことである。以下ではエネルギー分野でこれまで使用されてきた各種単位との対比を含めて関連するSIについて解説する。

2. 単位の歴史とSIの概要

(1) 単位の歴史

歴史的にみると単位の使用に先だって数の概念がな

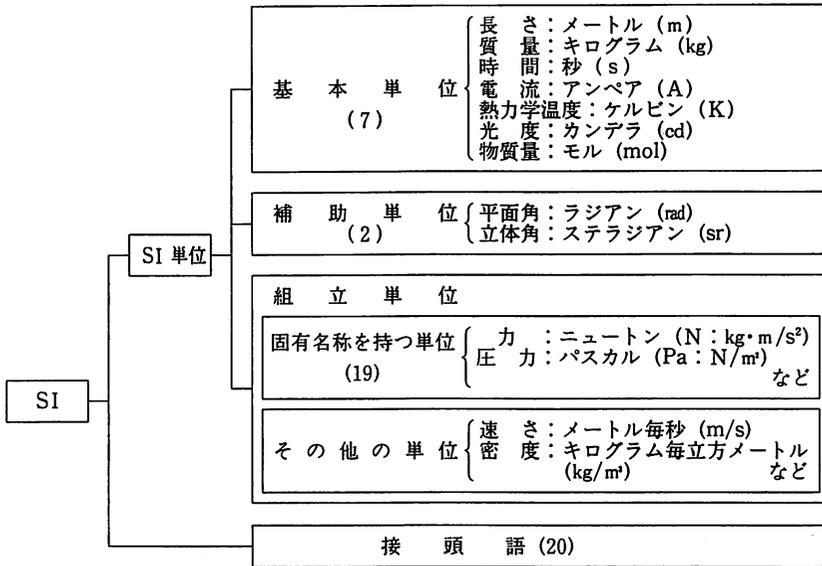
くてはならないが、約12,000年前の中央アフリカの遺物によれば、既に乗除算の知識と素数の概念があったという²⁾。最初に用いられた単位系は、古代エジプトのような農耕文化と関連して、長さ、暦（時間）、穀物の量であったとされる。

しかし、縄文時代の遺構に見られるように、農耕文化以前でも長さの単位がなければ構築物の建築は困難であり、人間の身体を基準としたものと考えられる。このような長さの単位には、尺（スパン：手を伸ばした時の親指と中指の長さ）、フィート（足）、寸（インチ：親指の幅）などがある³⁾。コンピュータで使われる digit もラテン語の digitus（指）が語源とされ、4 digit が 1 palm（ラテン語：palma）で、わが国の柄（つか：親指を除く掌の幅）に等しい。身体以外の基準では、grain（ラテン語：granum）が小麦1粒の重量を指し、ヤード・ポンド法では0.0648gに相当する。なお、メートル法の mètre の語源はギリシャ語の尺度、グラムはフランス語の gramme でギリシャ語の小量という意味だと辞書にある。

フランス革命の翌年、1790年の憲法制定国民議会において度量衡統一の動議がタレーランにより提案され、科学アカデミーにボルタ、ラグランジュ、ラプラス、モンジュ、コンドルセからなる委員会が設置された。1791年に地球の北極と赤道の距離の千万分の1を十進メートル法の単位と制定し、フランスのダンケルクからスペインのパルセロナまでを測量するのに10年近くを要したという。

余談ではあるが、15世紀のエンリケ航海王子に始まる大航海の時代には、メートル法に先立ち地球を基準とする距離の単位である海里（nautical mile）が広く普及していた⁴⁾。すなわち、地球の子午線の1分（1/60度）に相当する距離を1海里（=1852m）とし、メルカトル図法の発明（1569年）による海図の完成と相まって、海里とノット（knot, 時速1海里の速度）

* 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所
エネルギー部 高温エネルギー研究室 主任研究官
〒305 つくば市梅園1-1-4



補助単位：組立単位を作るとき基本単位と同様に使用されるもの。

組立単位：基本単位を乗除したもの。

接頭語：キロ、ミリなど、計量単位に付して10の整数乗倍を示すもの。

図-1 国際単位SIの構成

表1 基本単位

量	基本単位		
	名称	記号	定義
長さ	メートル	m	メートルは、光が真空中で1/(299 792 458) sの間に進む距離である
質量	キログラム	kg	キログラムは、(重量でも力でもない) 質量の単位であって、それは国際キログラム原器の質量に等しい
時間	秒	s	秒は、セシウム-133の原子の基底状態の二つの超微細準位の間の遷移に対応する放射の9 192 631 770周期の継続時間である
電流	アンペア	A	アンペアは、真空中に1メートルの間隔で平行に置かれた、無限に小さい円形断面積を有する無限に長い2本の直線状導体のそれぞれを流れ、これらの導体の長さ1メートルごとに 2×10^{-7} ニュートンの力を及ぼし合う不変の電流である
熱力学温度	ケルビン	K	ケルビンは、水の三重点の熱力学温度の1/273.16である
物質質量	モル	mol	モルは、0.012キログラムの炭素12の中に存在する原子の数と等しい数の要素粒子 ^a または要素粒子の集合体(組成が明確にされたものに限る)で構成された系の物質質量とし、要素粒子または要素粒子の集合体を特定して使用する
光度	カンデラ	cd	カンデラは周波数 540×10^{12} Hzの単色放射を放出し所定の方向の放射強度が $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$ である光源の、その方向における光度である

^aここでいう要素粒子とは、原子、分子、イオン、電子、その他の粒子をいう。

表2 補助単位

量	補助単位		
	名称	記号	定義
平面角	ラジアン	rad	ラジアンは、円の周上でその半径の長さに等しい長さの弧を切り取る2本の半径の間に含まれる平面角である
立体角	ステラジアン	sr	ステラジアンは、球の中心を頂点とし、その球の半径を1辺とする正方形の面積と等しい面積をその球の表面上で切り取る立体角である

表3 固有の名称をもつ組立単位

量	単位	単位記号	他のSI単位 による表わし方	SI基本単位 による表わし方
周波数	ヘルツ (hertz)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン (newton)	N	J/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル (pascal)	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール (joule)	J	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
仕事率, 電力, 工率, 動力	ワット (watt)	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電気量, 電荷	クーロン (coulomb)	C	A·s	s·A
電圧, 電位, 電位差, 起電力	ボルト (volt)	V	J/C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量, キャパシタンス	ファラド (farad)	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム (ohm)	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンズ (siemens)	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウェーバ (weber)	Wb	V·s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度, 磁気誘導	テスラ (tesla)	T	Wb/m ²	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー (henry)	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度または度 (degree Celsius)	°C	K	K
光束	ルーメン (lumen)	lm	cd·sr	
照度	ルクス (lux)	lx	lm/m ²	
放射能	ベクレル (becquerel)	Bq		s^{-1}
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ, 吸収線量指標	グレイ (gray)	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
線量当量, 線量当量指標	シーベルト (sievert)	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

は、現在も広く使用されている。

さらに、航海術が単位に大きく寄与した例として、船舶の経度を定めるための航海用時計（クロノメータ）の改良がある。緯度は天測により容易に観測できるのに対し、経度の測定には天測時の正確な時刻を必要とする。時刻1分の誤差は経度15分の誤差、すなわち赤道上で15海里に相当するので、1598年にはスペイン国王が、続いてオランダ国民議会が経度測定に懸賞をかけた。ガリレオも応募して、木星の衛星の運行を利用する方法と振り時計を提案したが、洋上での実用に耐えなかったという⁵⁾。

陸地を視認せずに大洋を横断する航法は、夜間に座礁する危険が常にある。濃霧によるものではあったが、1707年に軍艦4隻と2000名におよぶ海難事故がアイルランド西海岸で発生した。これを契機に1714年に英国政府は経度局を設置するとともに時計懸賞条例を發布し、フランス政府も追従した⁵⁻⁷⁾。ちなみに、1760年に英国政府の賞金を獲得したハリソンのぜんまい時計は81日間の航海で5.1秒の誤差だった⁶⁾。なお、イギリスのグリニッチ天文台を経度ゼロ線とする標準子午

線を設け、世界の標準時を定めたのは1884年のことである^{6,7)}。

さて、1870年にパリで開始された国際メートル委員会を契機に、1873年に国際度量衡局が設置され、1875年にメートル条約締結、1887年に専門家による第1回国際度量衡委員会を開催、1889年には第1回国際度量衡総会（CGPM）が開催されて各国にメートル原器の分配が始まった^{3,6-8)}。

わが国がメートル条約に加盟したのは1885年であり、1890年にメートル原器とキログラム原器が到着し、1891年に度量衡法（メートル原器を基準にした尺貫法）が公布された（施行1893年）⁷⁾。また、当初、農商務省商務局が所管していた度量衡器に関する業務を担当するため中央度量衡器検定所（現在の通商産業省計量研究所）が設立されたのは1903年のことである⁹⁾。

(2) 電磁気単位系の統一とSIへの移行

電磁気に関しては、19世紀中ごろに古典力学に基づくCGS系の絶対電気単位系が定義されたが、実用的な精度が得られなかった。このため、19世紀後半に電信・電灯産業と関連技術が発展するに伴い、1893年の

表4 接頭語

単位に乘ぜられる倍数	接頭語	
	名称	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y
10 ²¹	ゼタ	Z
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ⁻²¹	zepto	z
10 ⁻²⁴	ヨクト	y

シカゴの国際電気会議で標準電池と標準抵抗を用いるΩ, A, Vなどの実用単位(国際電気単位)が制定され、1948年にいたるまで両者の併用が続き混乱を極めた¹⁰⁻¹²⁾。そこで、古典力学の絶対単位系に電流をつけ加えて、絶対電気単位系に国際電気単位を組み込むことを目的とするMKSA単位系(有理化単位系)が1908年に規定されたが、実測に苦心し1946年になって両者の換算係数を決定するに至った¹²⁾。

これに基づき、1948年の第9回CGPMで「全ての国が採用し得る単一の実用的な計量単位系」を確立することが決められ、1954、60年の第10、11回CGPMを経て、MKSA系に温度(ケルビン度、1968年にケルビンに変更)と光度(カンデラ)を加えた国際単位系(SI)が採択された^{7, 10, 13)}。

さらに、SIは1969年に国際標準化機構(ISO、1947年設置、わが国は1952年加入)に採択され、ISO/R 1000-1969が制定された。JISのSI移行については冒頭で触れた(JIS Z 8203-1985「国際単位(SI)及びその使い方」参照)。

(3) SIの概要と計量法

現在、SI単位系は図-1に示すように、7つの「基本単位」と角度に関する2つの「補助単位」を代数的に組み合わせる「組立単位」(表1~3)で構成されており、いわゆる「一貫した単位系」(coherent unit system)を形成している¹³⁾。使用上の便宜を考慮して、19個の組立単位には固有の名称が与えられている。これらのSI単位に、表4に示すキロ(k)やミリ(m)などの20個の「接頭語」を組み合わせるSI単位系が構成される。

基本単位は、幾何学が「長さ」だけを基本量とし、これに運動学が「時間」を追加し、さらに古典力学が「質量」または「力」、電磁気学が「電流」または「電気量」、熱力学が「温度」、光学が「光度」、化学が「物質質量」をそれぞれ基本量として必要とすることに対応している¹³⁾。電磁波の一種である光度が基本単位とされたのは、人間の目に見えることが重視された結果であり、物質質量(モル)は1971年に追加された。組立単位の名称、パスカルとジーメンスは1971年、電離放射線に関する組立単位の名称、ベクレルとグレイは1975年、シーベルトは1979年に採択された^{8, 13)}。

SIでは単位の定義はなるべく標準原器によらずに、いわゆる原子標準を採用するように努めている。このため、キログラム原器のみが現用で、時間(秒)はセシウム原子時計(1967年以降)、長さ(m)は光速(1983年)を基準とし、電圧および抵抗標準は1990年からそれぞれジョセフソン効果と量子ホール効果に基づく物理定数で定義している。現在わが国の電気標準の設定・維持は通商産業省電子技術総合研究所が担当している。各種物理定数や原子量は計測精度の向上等で勧告値が随時変更されるので、理科年表などで最新のデータを手に入るとよい¹⁴⁾。

非SI単位であるが、表5に示すような実用上の重要性あるいは特殊な分野に限定して併用を認める「SI併

表5 SI単位と併用してよい単位

量	単位の名称	単位記号	定義
時間	分	min	1 min=60 s
	時	h	1 h=60 min
	日 ^{a)}	d	1 d=24 h
平面角	度	°	1°=(π/180) rad
	分	'	1'=(1/60)°
	秒	"	1"=(1/60)'
体積	リットル ^{b)}	l	1 l=1 dm ³
質量	トン	t	1 t=10 ³ kg

^{a)} 計量法では「日」は時間の単位ではない。

^{b)} リットルの記号は、立体のl(エル)であるが、紛らわしいときは、立体のL(エル)も使用してよい。

用単位」があり、ml, km/h, MeVのように接頭語や他のSI単位との併用も許される。また、当分の間に限り併用してよい「SI暫定併用単位」には、海里、ノット、オングストローム、アール、ヘクタールなどが、対応する単位がSIにない「SI暫定規格値」として、無次元の比率量、例えば重量分率 (wt%) や体積分率 (vol%) などがある¹⁵⁾。

SIでは単位記号についても規定している。なお、SI併用単位のリットル (l) は、数字の1と紛らわしいので、米国がSIを導入するにあたって大文字のLを採用したため、国際的にはlとLが併用されている。わが国ではlを用いることもあるが、特殊な活字を使用することは望ましくない。通常、量記号 (変数記号のこと) はイタリック、単位記号はローマンで表わして両者を区別する (JIS Z 8202, 「量記号, 単位記号および化学記号」参照)。

月面など重力の異なる地点では質量は同じでも異なる重量を与えるので、SI基本単位には重量ではなく質量が採用された。これは物理学的には当然のことであるが、計量法では身体の重量を計る「体重計」が販売できなくなり、「体質量計」では耳慣れないので、「ヘルスメータ」に改称したという笑話がある。

SIでは重力単位系 (1 kgf = 9.80665 N) は全て排除され、冒頭にも述べたように工学分野で広く使われてきた重力単位系の仕事 (kgf・m) や圧力 (kgf・cm²) などの単位が、わが国の計量法でも2003年に禁止される¹⁾。ただし、血圧のmmHgと生体内圧力のTorrは計量法での継続使用が例外的に認められる。ヤード・ポンド法は典型的な非SI単位系であるが、計量法では航空分野と輸入品に限って「法定計量単位」とみなしている。このため、圧力のkgf・cm²は禁止されるにもかかわらず、米国の圧力でpsiは例外的に許容されることになりそうである。

このほか、計量法では①SIにない計量単位として、無効電力 (var), 皮相電力 (V・A), デシベル (dB) などを、②対応するSI単位があるが国内外で広く用いられているため計量法の対象とする単位として、回転速度 (rpm, rph), 粘度のポアズ (1 P = 0.1 Pa・s), 動粘度のストークス (1 St = 10⁻⁴ m²/s), pH, 気圧などを定めている。また、真珠の質量に限って尺貫法の「もんめ」、同様に宝石のカラット (= 0.2 g), 金貨のトロイオンス (= 31.1035 g) が例外的に認められているが¹⁾、無論SIとの併用はできない¹⁵⁾。

単位に関する参考資料として、計量法の解説¹⁾、SI

単位の基本量に対応して、①空間・時間および周期現象、②力学、③熱、④電磁気、⑤光、⑥音、⑦物理化学、⑧電離放射線の各分野で分類整理したハンドブック類^{8,15)}、SIの基礎と解説^{10,13)}、SIとISO9000の解説³⁾、辞書形式^{13,16)}、一般向け単位の知識⁹⁾、単位をテーマにした掌編小説 (ショートショート)¹⁷⁾ などがある。

3 エネルギー分野で使用される単位の実例

3.1 エネルギー分野でのSI単位

(1) エネルギーと熱量

SIではエネルギーと熱量はジュール (J), 力はニュートン (N), 仕事率と電力はワット (W) で表わし、calは認められない。計量法では工率として内燃機関の馬力 (仏馬力, 1 PS = 75 kgf・m/s ≈ 735 W) が当分の間認められているが、SIとの併用はできない¹⁵⁾。ここで、PSはドイツ語のPferde Starkeの略で、英馬力の (1 HP ≈ 745.7 W) と区別する。

既にほとんどの物理化学系の学術誌は、国際純粋・応用物理学連合 (IUPAP) や国際純粋・応用化学連合 (IUPAC) の勧告に従いSI移行を完了している¹⁰⁾。ただし、どうしてもcalやPSなどの非SI単位を使用する必要がある場合は、多くの学術誌が冒頭で両者の換算定数を定義することを容認している。後述の温度とも関連して、calにはさまざまな定義が存在するので、必ず相当するJの値を付記しなくてはならない。かつて、栄養学でkcalをCalと書いて大カロリーと呼んでいた時代もあった。

なお、IUPACでは図表の変数を無次元化して表示する事を勧告している。このため、例えば反応エントロピー変化を ΔS (J/K・mol) と書くところを、化学系の学術雑誌では $\Delta S / JK^{-1} mol^{-1}$ と表示する。同様に、電流*i* (A) は*i*/Aと表わすので、Aを面積と勘違いして電流密度と誤解した例がある。

(2) 温度

温度の定義は、「水の三重点の熱力学温度 (絶対温度のこと) の1/273.16」(表1) とされている。水の三重点の温度はセルシウス温度で0.01°Cなので、いわゆる絶対0度は0 K = -273.15°Cになる。周知のように、熱力学的温度Kはケルビンと読み、度はつけない。なお、国際温度目盛は1948, 68, 76, 90年に改訂されているので、それぞれの年を添記し、T₉₀, t₆₈ (大文字は熱力学温度、小文字はセルシウス温度) と表わして区別することがある¹³⁾。t₆₈では水の沸点は99.974°Cになる。

(3) 大きな数と小さな数……接頭語の使い方

最近、接頭語にヨタ (Y), ゼタ (Z), ゼプト (z), ヨプト (y) が追加された (表4)¹⁹⁾.

プランク定数 ($h=6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$) は y でも小さすぎるが、光の波数を ν , 光速を c , 周波数を ω とすれば、光子エネルギーは $h\nu = h\omega$ であるから、 $1 \text{ cm}^{-1} (=100 \text{ m}^{-1}) = 0.124 \text{ meV} = 19.86 \text{ y}\cdot\text{J}$, $1 \text{ Hz} = 4.14 \text{ f}\cdot\text{eV} = 0.399 \text{ n}\cdot\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ になる。なお、波数は SI では m^{-1} を使用するべきであるが、多くの場合、従来どおりに cm^{-1} (kyser と呼んでいた), あるいは 10^2 m^{-1} と書いている。

電子ボルトは $1 \text{ eV} = 160.2 \text{ z}\cdot\text{J} = 23.0 \text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$ と表わされ、ボルツマン定数を k とすれば、分子の運動エネルギーは kT であるから、 $1 \text{ K} = 13.8 \text{ y}\cdot\text{J} = 8.315 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1} = 1.986 \text{ cal}\cdot\text{mol}^{-1}$ になる。ちなみに、アボガドロ定数は $602 \text{ Z}\cdot\text{mol}^{-1}$ となる (mol^{-1} の単位を持つので定数であり、アボガドロ数とは言わない)。

上記の例からもわかるように、原則として接頭語は一つしか使用できず、二つ以上の SI 単位を合成する場合も同様である。基本単位 kg の場合は g に直接接頭語をつけ、例えば mg と書き μkg とはしない。ただし、基本単位 kg が分母にあるときは、例えば MJ/kg と表わし kJ/g とはしない。

接頭語と同じ単位記号を使用する場合、例えばトルク (単位: ニュートンメートル) を mN と書くと、ミリニュートンと混同するので、順序を変えて Nm または $\text{N}\cdot\text{m}$ と書く。熱伝導率の W/mK も、mK をミリケルビンと誤解する恐れがあるので、W/Km とした方がよい。なお、/ の使用は 1 回以下で、例えばモル熱容量は J/molK あるいは $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ と書き、 $\text{J}/\text{mol}/\text{K}$ としない。また、/ の右側は全て分母とみなすので、 $\text{J}/(\text{molK})$ と書く必要はない。

通常、接頭語は数値が 0.1 と 1000 の間になるように選ぶが、値が 0.1 あるいは 1000 をまたがる場合や慣例については、気圧の 1013 hPa のような例外が認められている。

電力で、1000kW, 100万kW という表現がよく使われるが、本来は 1MW, 1GW とすべきである。また、大文字で KG, KWH などとする例を散見するが、kg, kWh が正しい。mV を MV とした誤例もある。

地球環境問題で話題の大気中の二酸化炭素濃度上昇に関連して、毎年大気中に放出される化石燃料由来の炭素の量は 6 Pg (ベタグラム = 10^{15}g) と書くべきであるが、6 Gt と表現する例が多い。

3.2 エネルギー統計と単位

(1) エネルギー統計

エネルギー統計を利用する場合、国や年代により単位が異なり、解析の支障となることが多い。このため、エネルギー統計に関する書物にはエネルギーの単位について比較的詳しい説明がある^{18,19)}。

代表的なエネルギー統計には、通商産業省の「エネルギー生産供給統計年報」があり、これをベースにした「総合エネルギー統計」が入手しやすい¹⁸⁾。また、国際比較のためには日本エネルギー経済研究所の「エネルギーバランス表」が良く使われ、この他にも各種のエネルギーデータが存在する¹⁹⁾。

(2) 発熱量と発電効率

エネルギー統計では、通常、エネルギーを熱量で表わし、非SIとして cal ($\approx 4.18 \text{ J}$), BTU (British Thermal Unit, $1 \text{ BTU} = 1055.06 \text{ J}$, 1000 ft^3 の天然ガスの発熱量が 10^6 BTU に相当), Therm ($=10^5 \text{ BTU}$), Q (Quadrillion, 英国では 10^{24} , 米国では 10^{15} を指し, 米国で $1 \text{ Q} = 10^{15} \text{ BTU} \approx 1 \text{ EJ}$, Quad と書く), TOE (Ton Oil Equivalent, $1 \text{ TOE} \approx 10^7 \text{ kcal} \approx 40 \times 10^6 \text{ BTU} \approx \text{石炭} 1.5 \text{ t} \approx \text{天然ガス} 1110 \text{ m}^3$ に相当, 原油発熱量を $9250 \text{ kcal}/1$ で換算) などがよく用いられている^{18,19)}。世界の化石燃料の採掘量の推移を図-2に示す。現在、年間約 200 EJ ($\approx 5 \times 10^9 \text{ TOE}$) の化石燃料が採掘されている²⁰⁾。

さて、エネルギー利用に占める電力の割合が増加すると、電力と燃料の発熱量の換算が問題になる。わが国では電力の平均発熱量として $2250 \text{ kcal}/\text{kW}$ を使用

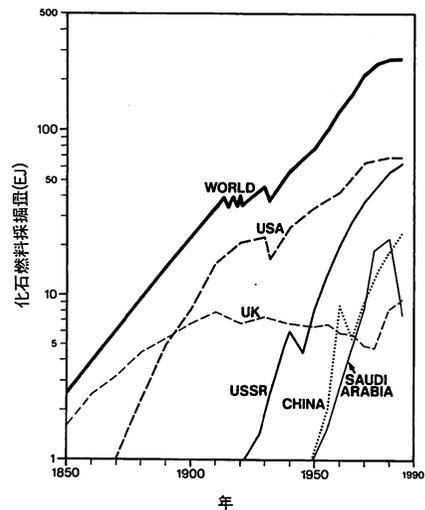


図-2 世界の化石燃料の採掘量の推移

しており、これは発電の熱効率38.1%に相当する。水力発電あるいは原子力の割合が多いカナダやフランスの総エネルギー需要量を他国と比較する場合にも発電効率が問題になる。石炭や石油の平均発熱量は年によって異なるので注意が必要である¹⁸⁾。

燃料の燃焼により生成する水が液体状態か蒸気であるかによって発熱量に違いが生じる。水素の場合 286 と 242MJ/mol であって、両者の差は水の蒸発熱に相当する。液体状態の水を生成する場合を高位発熱量 (HHV: Higher Heating Value)、蒸気の場合を低位発熱量 (LHV: Lower Heating Value) という。化石燃料でも水素の割合が多いほど両者の差は大きく、天然ガスの場合 891 と 803MJ/mol で 10% 程度の差があるが、コークス (100%炭素) の場合、両者は一致する。排気ガス中の水が蒸気である内燃機関は LHV を使うのに対し、火力発電では HHV を使用する。

(3) 石油に関する単位

石油に関して習慣的に日本は kl, ヨーロッパは t, アメリカは バレル (石油は 1 barrel = 0.15898764 kl, その他の液体は 0.119240 kl) または ガロン (1 gal = 3.7854121 l) を用いている。体積と質量の換算には石油の密度が必要であり、約 0.86t/kl であるが、石油の種類、時期により異なる。なお、石油系の比重には API 度 (American Petroleum Institute degree) があり、d を 140/9 = 15.6°C の水に対する比重として、API 度 = (141.5 (1-d) / d) + 10 で定義される¹⁹⁾。

4 おわりに

このほか、エネルギー技術に関連する単位、例えば熱伝導率 (W/Km)、熱伝達係数 (W/m²K)、熱拡散率 (m²/s) などについて従来の単位との変換^{8,21)}、SI・メートル法条約および ISO 規格、日本における単位と標準の制度 (計量法と JIS 規格) などに

ついて記述しなかったが、紙面の都合で割愛させて頂く。この小文が少しでも読者諸賢のお役に立てば幸いである。

引用文献

- 1) 通商産業省機械情報産業局計量行政室 (編): 新計量法の概要 (1994), 第一法規.
- 2) J. D. Bernal (鎮目 訳): 人間の拡張…物理学史講義, p.17 (1976), みすず書房.
- 3) 三井清人: 国際単位と品質規格 (1993), ほるぷ出版.
- 4) K. Mendelsshon (常石 訳): 科学と西洋の世界制覇, p. 43 (1980), みすず書房.
- 5) S. Mason (矢島 訳): 科学の歴史 (上), p.270, 296 (1955), 岩波書店.
- 6) 川上正光: 単位の知識 (1993), 日刊工業新聞社.
- 7) 菅井ほか (編): 科学技術史年表 (1956), 平凡社.
- 8) (社) 計量管理協会 SI 単位の活用ハンドブック編集委員会: SI 単位の活用ハンドブック (第 2 版) (1984), コロナ社.
- 9) 鎌谷親善: 技術大国百年の計, p.118 (1988), 平凡社.
- 10) 竹中俊夫: SI の使い方 (第 2 版) (1982), オーム社.
- 11) 高木純一: 電気の世界…計測を中心として (1967), オーム社.
- 12) 湯川秀樹 (編): 古典物理学 (I), p.475 (1975), 岩波講座 現代物理学の基礎 (1).
- 13) 海老沢 寛: 新版 単位の小辞典 (1994), 講談社サイエンスティフィク.
- 14) 国立天文台 (編): 理科年表平成 6 年 (1993), 丸善.
- 15) 国際単位研究会 (編): SI 単位ポケットブック (1991), 日刊工業新聞社.
- 16) 高田誠二 (編著): 量の表現辞典 (1994), 朝倉書店.
- 17) 清水義範: 単位物語 (1994), 講談社文庫.
- 18) 資源エネルギー庁官房企画調査課 (編): 総合エネルギー統計 (1994), 通商産業研究社.
- 19) 松井賢一: エネルギー・データの読み方 (1986), 電力新報社.
- 20) V. Smil: General Energetics, p.184(1991), John Wiley & Sons.
- 21) 川村長司: 燃焼とエネルギー変換の工学 (1987), 日刊工業新聞社.