

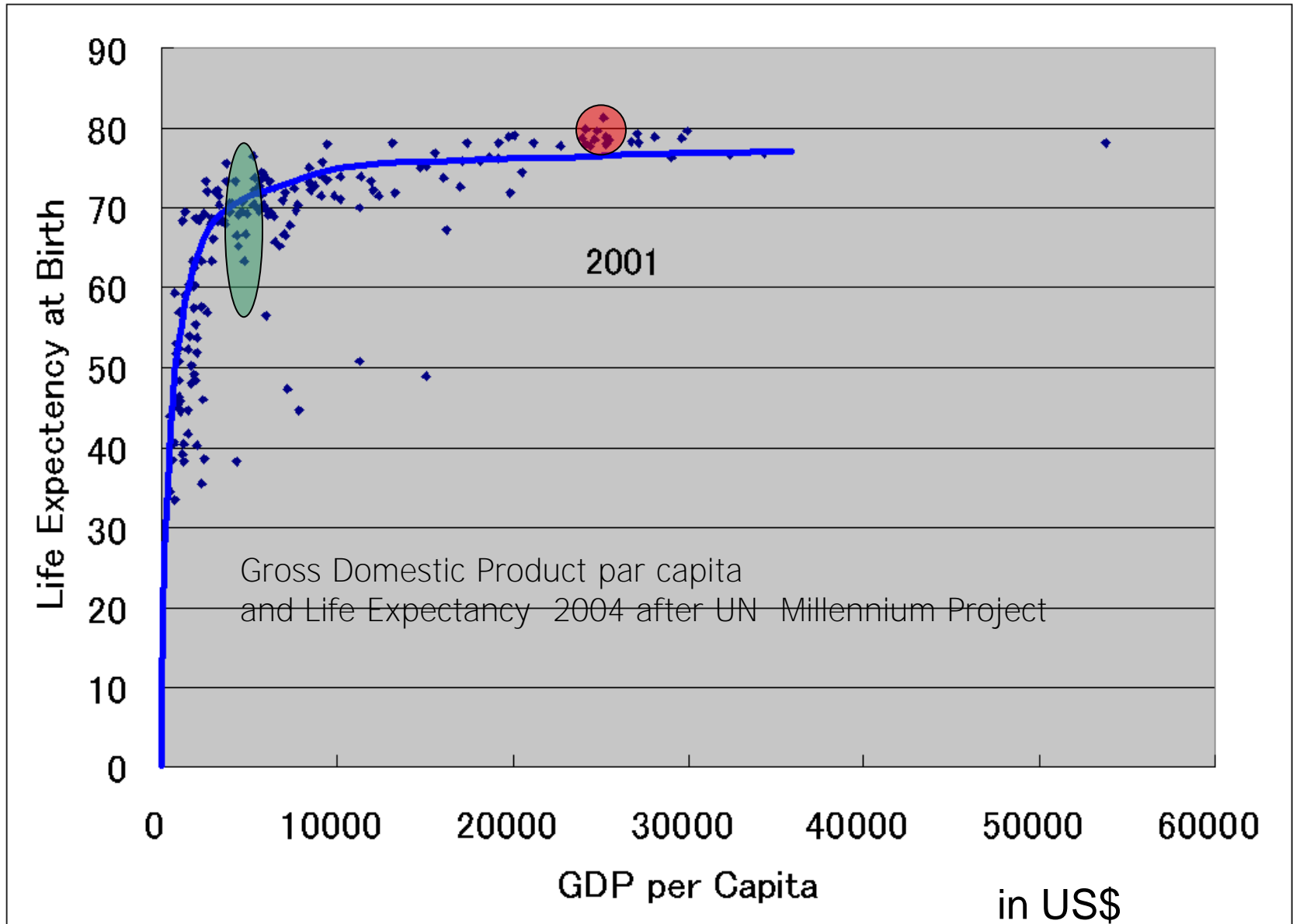
# 金属資源と人間の限界

2012年 5月18日

**前田正史** (まえだまさふみ)

東京大学 理事・副学長 生産技術研究所 教授

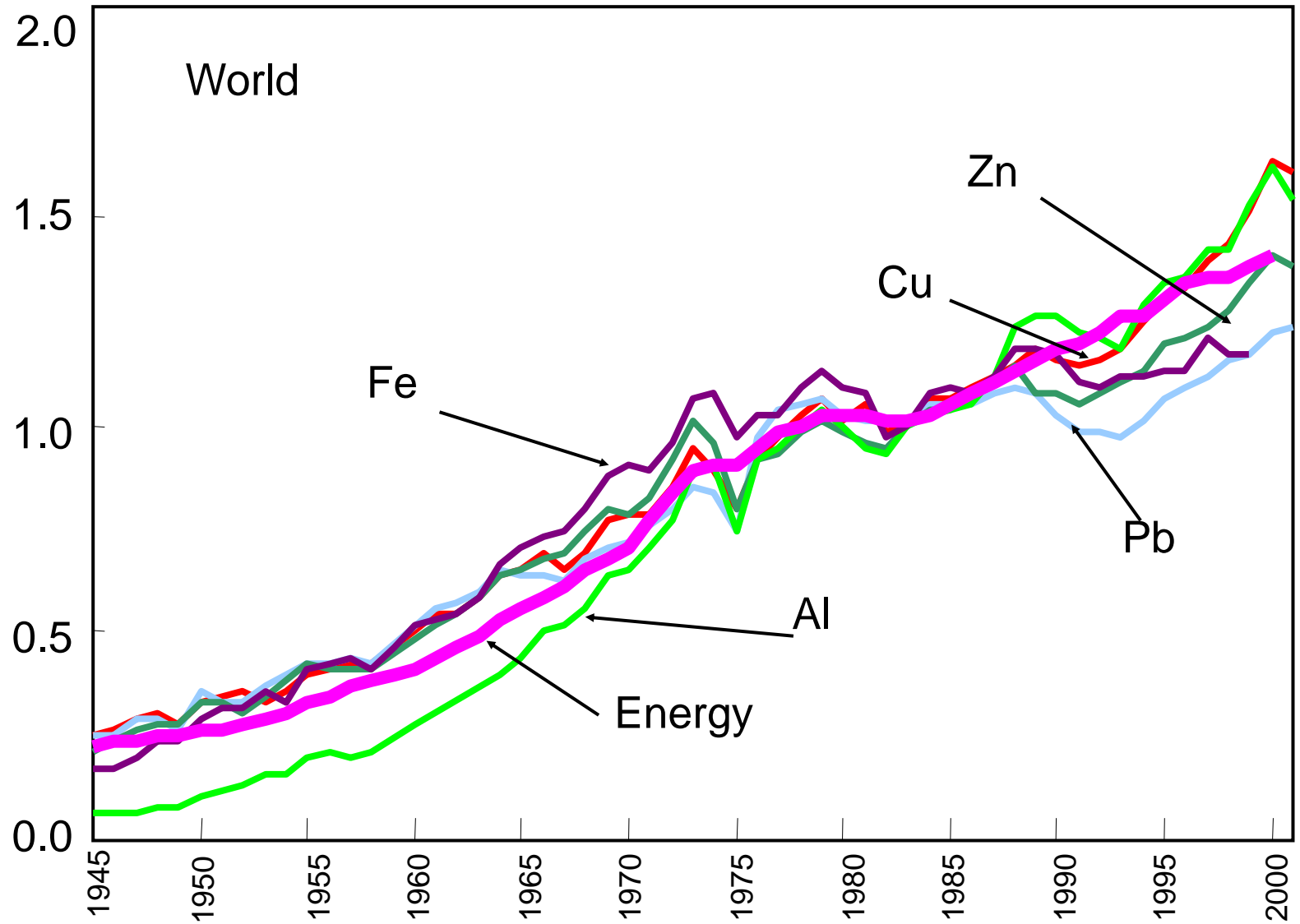
# 国民一人あたり総収入と平均余命



資源種		数量 [億トン]	年
エネルギー資源	石炭	52.45	} 約 117
	石油	41.99	
	天然ガス	22.23	
食物	穀類	34.53	} 約 44
	肉類	2.84	
	牛乳	5.83	
	水産物	0.89	
木材	薪炭	18.50	} 約 33
	用材	14.24	
鉱物	石灰石	37.50	} 約 50
	鉄鉱石	11.10	
	銅鉱石純銅換算	0.15	
	銅鉱石+ずり	1.54	
	ボーキサイト	1.99	
繊維		3.41	2003
植物油脂		1.31	2009
ゴム		0.24	2010

- **Contemporary future: within 5-10 years**
    - Sharp rises and falls
  - **Near future: 10 years**
    - Metal Security and country risk
  - **Mid-future: 50 years**
    - Volatility of resources
- Definitions of “future” are introduced by Prof. Tadao Umesao according to classification of Histories

# 世界のエネルギーと鉱物資源消費



Global trends in indices (using 1983 as a base year) of key metals and energy consumption from 1945 to 2001. (IEA,1996-2001;OECD,1994-2001;WBMS,1997-2001)

- 物理的性質
  - 固体の体積
  - 移動速度の限界
- 熱力学的性質
  - 化学反応の限界
  - エネルギーと資源採取とのトレードオフ
- 地球の資源量
  - 持続性の限界
    - 人類、鉱物資源

•質量体積  $1/\rho = V/m$  (1-1)

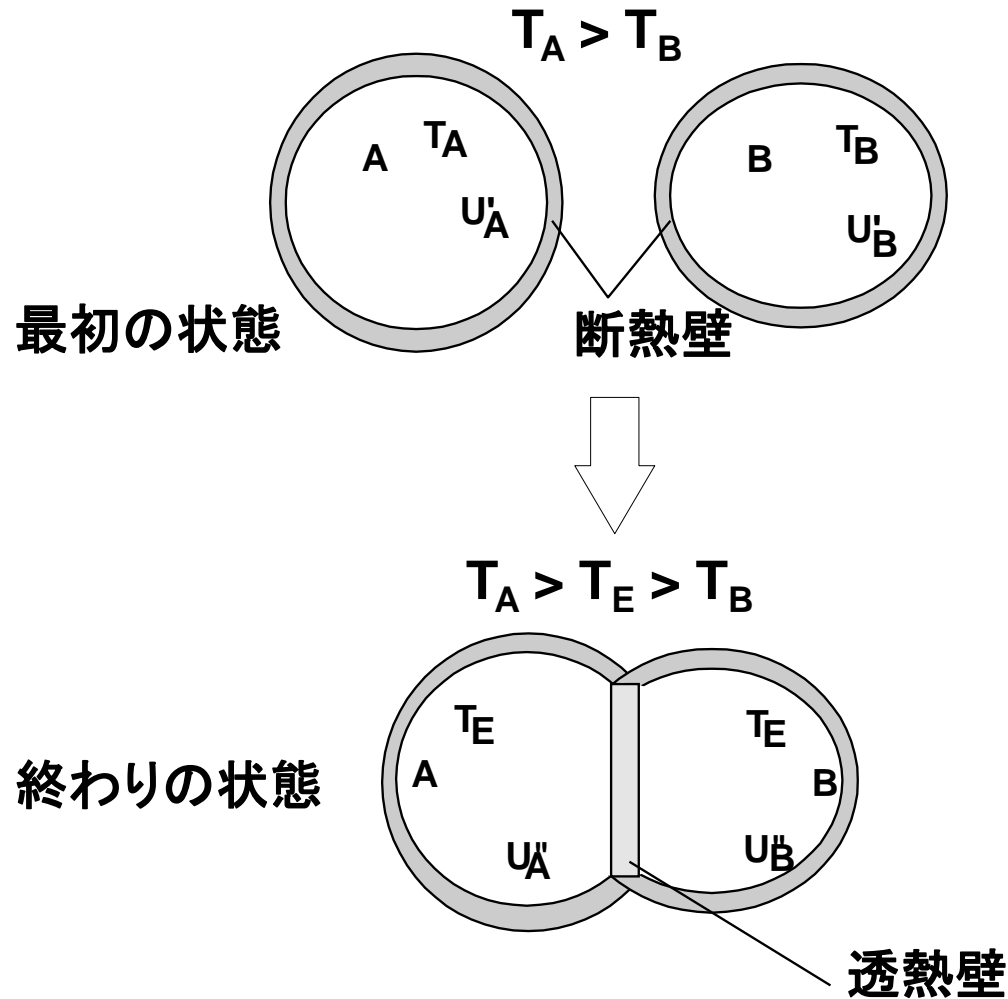
•モル体積  $v = V/n$  (1-2)

表 1 典型金属のモル体積一覧  $v_0$   
(298K,  $10^5\text{Pa}$ )  $v_L$  (融点.,  $10^5\text{Pa}$ )

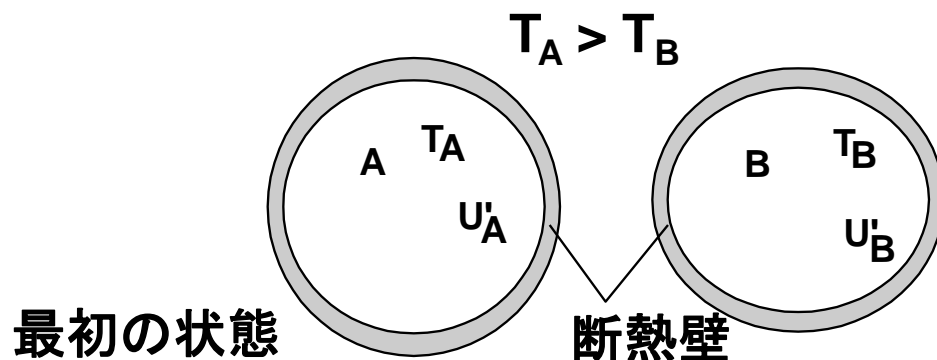
物質	Al	Ag	Au	Cu	Fe	Ti
$\rho$	2.7	10.5	19.3	8.7	7.9	4.5
$v_0$	10	10.3	10.2	7.1	7.1	10.6
$v_L$	11.3	11.4	11.4	7.9	8	11.7

100円玉 4.8g/枚  
 Ni(25%) – Cu(75%)  
 M 58.7 63.5  
 $M_{\text{AVE}} = 62.3 \cong 13$ 枚

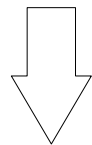
10円玉 4.5g/枚  
 Cu(95%) Zn, Sn  
 $\cong 14$ 枚 = 1mol



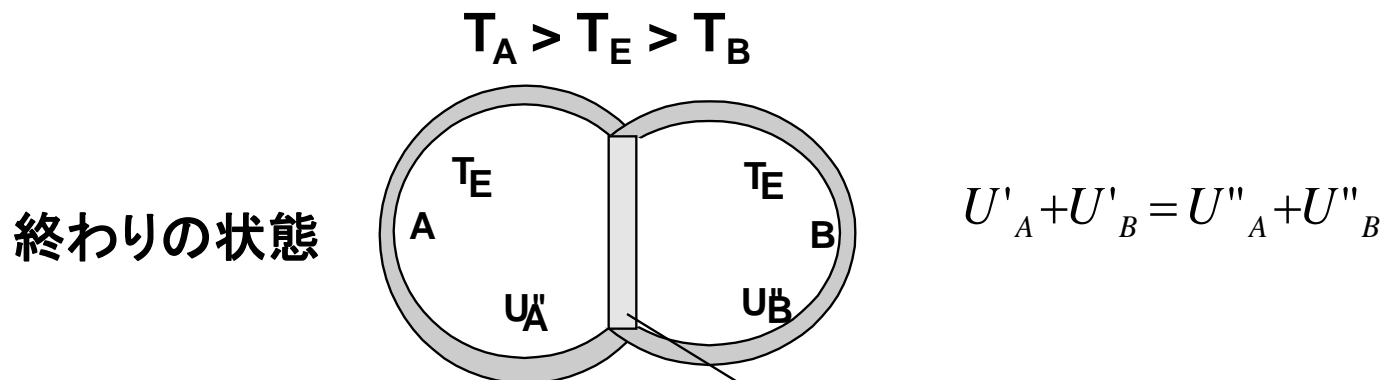




$$\Delta U_A = U''_A(T_E, V''_A, n''_A) - U'_A(T_A, V'_A, n'_A)$$



$$\Delta U_B = U''_B(T_E, V''_B, n''_B) - U'_B(T_B, V'_B, n'_B)$$



透熱壁

$$-\Delta U_A = U'_A - U''_A = U''_B - U'_B = \Delta U_B = Q$$

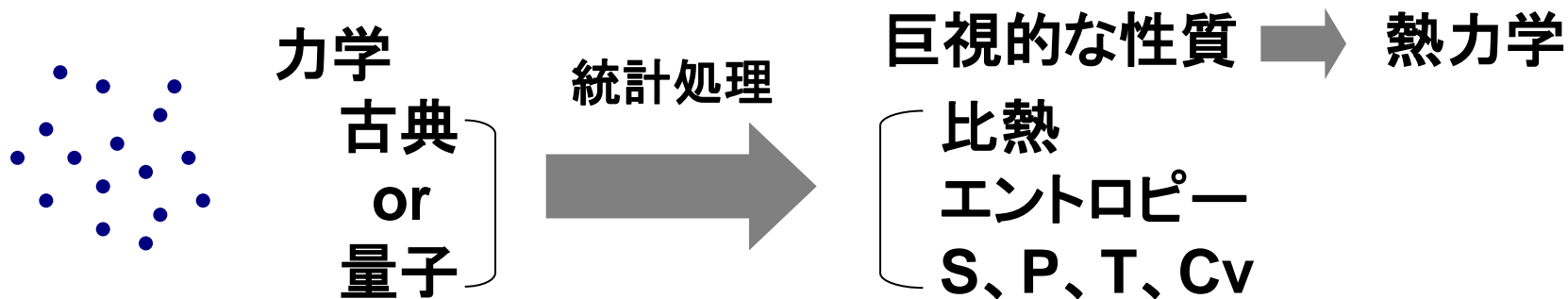
$$\frac{dU}{dT} > 0$$

- 放熱して温度が下がれば,内部エネルギーUが下がる、つまり集合を構成している系つまり粒子等(分子、原子)の運動エネルギーは下がる。
- 系(分子、原子)全体の運動エネルギーは集合(系の集合)の中で均一になろうとする。
- 実験事実として集合の比熱はあまり温度と関係ない。つまり集合に与えられたエネルギーに比例して温度が上昇する。
- とすると、系の集合全体の運動エネルギーは温度Tと比例関係??
  - $\frac{1}{2}\langle mv^2 \rangle = \frac{1}{2} kT$

比熱とは一単位量の物質を一単位温度上昇するために必要な熱エネルギー

$C_v$ は定積比熱

$C_p$ は定圧比熱



1モル =  $10^{23}$ ヶの粒子の集まり  
 $10^{23}$ ヶの運動方程式



- 状態量Uの外にもう一つエントロピーSという状態量が存在することもわかっている。
- 化学熱力学の基本式  $\Delta U = T\Delta S - P\Delta V$
- エントロピーは集合に含まれた非常に多くの系の不規則、あるいは無秩序な状態に関する“力学的”概念であると同時にその変化量は熱エネルギーの指標である。
- エントロピーは集合に含まれた非常に多くの系の不規則、あるいは無秩序な状態に関する“力学的”概念
- 水が蒸発して水蒸気になると集合内の系について知りうる位置情報が不確定になる、つまりエントロピーは水蒸気の方が遙かに大きい
- つまり、水を水蒸気にするためにはエントロピーを増加しなくてはならず、そのためにはエネルギーが必要である

- $G = \sum \mu$

- 最初  $G_1 = \sum \mu_i$ 、最後  $G_2 = \sum \mu_j$

- $\Delta G = G_2 - G_1$

- $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

- 物質は  $\mu$  の勾配で移動する

- 化学反応は  $\mu$  が小さくなる方向にすすみ、その結果  $\Delta G$  は符号として負の方向に反応は進むように符号を定めている

$$\blacksquare \mu_{\text{水}} = \mu_{\text{水}}^{\circ} + RT \ln a_{\text{水}}$$

□  $\mu^{\circ}$  純物質の化学ポテンシャル

□  $\ln$ は自然対数:  $\log$ は10を底とする対数で、 $\ln$ は $e(2.7182818284 \dots)$ を底とする対数

□ 電氣的に中性な化学種の化学ポテンシャルは、同じ温度におけるもっとも安定な形の元素単体からの標準生成自由エネルギーを持って定義する。(増子昇)

□  $a$ : 活量: 純物質との化学的力の比: 純物質の時に1とする。

## ■ 氷と水が平衡していると

$$\square \mu_{\text{水}} = \mu_{\text{氷}}$$

$$\square \mu_{\text{水}}^{\circ} + RT \ln a_{\text{水}} = \mu_{\text{氷}}^{\circ} + RT \ln a_{\text{氷}}$$

□ いずれも純物質なので  $a=1$  つまり  $\ln a = 0$

$$\blacksquare \mu_{\text{水}}^{\circ} = \mu_{\text{氷}}^{\circ}$$

- コンベンション(規則)として、相の化学ポテンシャルの変化量は、「使用後」-「使用前」とし、 $\Delta G$ と表記する。

- じつは化学ポテンシャルの差はギブスの自由エネルギーの差であるのでGと表記してある。

- $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

- $\Delta G = \mu_{\text{氷}} - \mu_{\text{水}}$

- 特に標準物質の差の場合は  $\Delta G^\circ$ と表記する。

- 過去の学者の測定結果温度の関数で表になっている。

- 全ての物質は化学ポテンシャルを持つ
- 一様な物質の集団を相という
  - 気相、液相、固相
- 相が安定的に共存するときにこれらの相は平衡している。
  - 平衡しているとき二つの相を構成する全ての物質の化学ポテンシャル $\mu$ は同じである。(プリゴジンの定義): 逆が平衡の定義
  - 水と氷、水と一気圧の水蒸気
    - $\mu_{\text{水}} = \mu_{\text{氷}}$  あるいは  $\mu_{\text{水}} = \mu_{\text{水蒸気(一気圧)}}$
  - サラダドレッシングのオイルとヴィネガー
    - $\mu_{\text{塩@oil}} = \mu_{\text{塩@vinegar}}$   $\mu_{\text{醤油@oil}} = \mu_{\text{醤油@vinegar}}$



## ■ エネルギー

- 原子や分子の集合を構成する個々の原子のもつ運動エネルギーの総和を内部エネルギー $U$ という量で表す
- $U$ が上がると温度が上昇する
- 集合の持つエネルギーの本質は難しいが、この変化を物質を媒介して温度変化などを測定することにより知ることが出来る
- 工学的な応用は可能である

## ■ エントロピー $S$

- 集合に含まれた非常に多くの系の不規則、あるいは無秩序な状態に関する“力学的”概念

## ■ 化学熱力学の基本式 $\Delta U = T\Delta S - P\Delta V$ $dU = TdS - pdV$

内部エネルギー変化 = 熱エネルギー + 体積変化仕事

## ■ エンタルピー $H=U+PV$

- 圧力を一定で考える際に便利な状態量
- 大胆に言えば圧力一定で、ある温度上昇に必要なエネルギー

## ■ ギブスの自由エネルギー $G=H-TS = \sum \mu_i$

- 物質の変化について考えるときに便利な状態量
- 全ての物質は化学ポテンシャル(化学的力)を持ち  $\mu_i^\circ + RT \ln a_i$  と表現
- $\mu_i$  は  $i$  という物質の化学ポテンシャル
- 平衡(見かけ上変化のない状態)している二つの相を構成する全ての物質の化学ポテンシャル  $\mu$  は同じである
- サラダドレッシングの油の層と水の層の塩分ポテンシャル、オイルポテンシャル、醤油ポテンシャルの数値は全て同一である。

- Duhemの定理から系を置く場に対して自由度が2与えられている。例えば、温度と圧力を任意に選べる。
- 閉鎖系を作る側にたてば、系に入れる化学種の数 $C$ とする。これらの元素の化学ポテンシャルを任意に決めることができる。つまり、 $C$ 個の自由度がある。
- ここまであわせて、 $2 + C$ になる。
- 考える相の数を $P$ とする。
- 相内では平衡が成立しているのでGibbs-Duhemの関係が成り立っている。したがって束縛条件式が、相一つにつき一つあることになる。つまり $P$ 本の束縛式がある。
- 相の数 $P$ 、化学種の種類 $C$ 個の組合せからなる系が取りうる変数の数を自由度という。自由度を $F$ とする。
- さらに一般化して、その他の束縛条件があればその数を $n$ とすれば次のようになる。もちろん、示強性状態量が増えて、例えば磁場、電場等も考慮すればその数だけ自由度が増えることにある。
  - $F = C + 2 - (P + n)$       これをギブスの相律という。
  - 水を成分とすると $C=1$ 、氷相と水相の2相あれば $P=2$ 、1圧力を一定条件とすると $n=1$
  - つまり $F=0$ 、自由度なし。温度一定。

- 物理的性質
  - 大きさと体積、移動速度の限界
- 熱力学的性質
  - 化学反応の限界
  - エネルギーと資源採取とのトレードオフ
- 地球の資源量
  - 持続性の限界
    - 人類
    - 鉱物資源

# Goldshmidtの分類

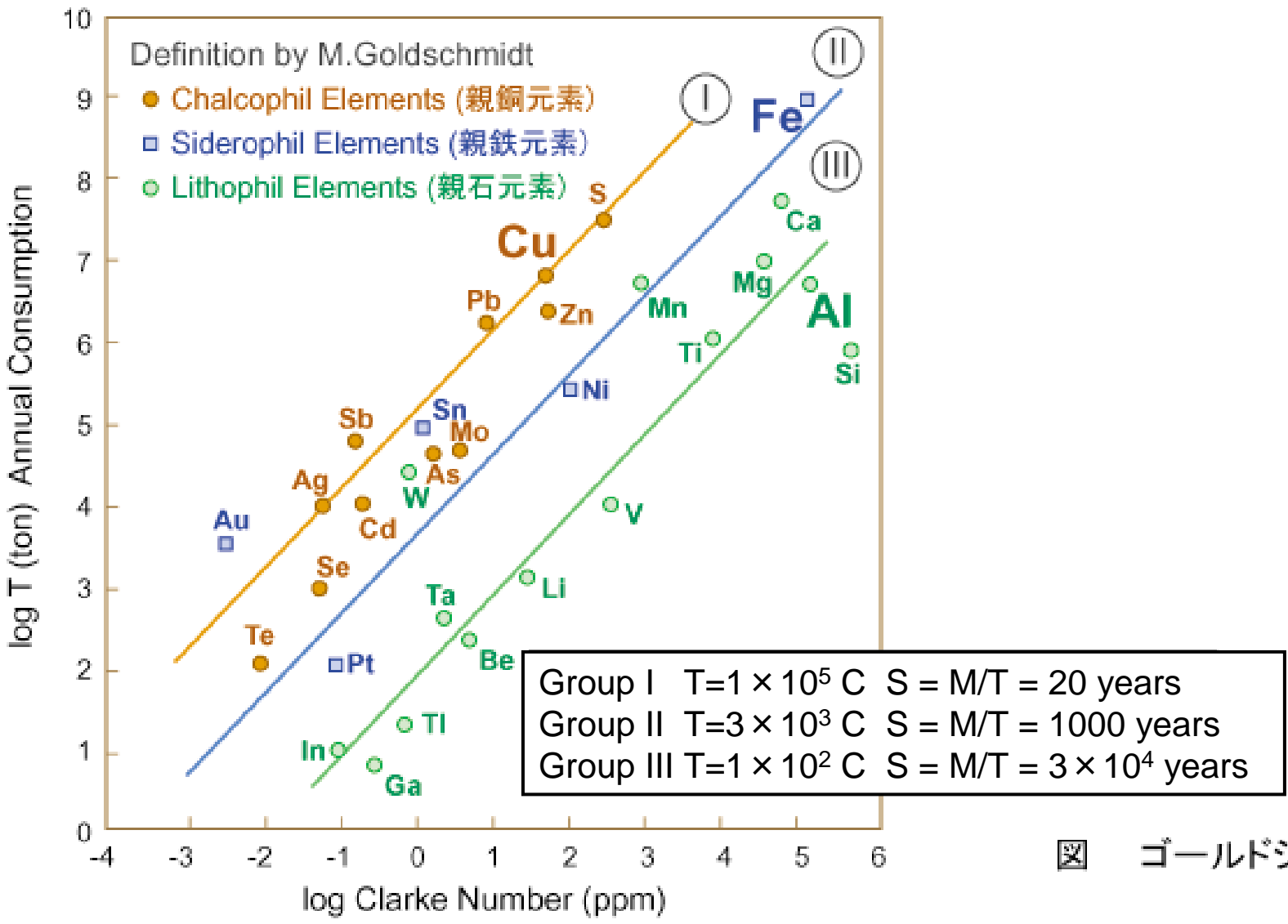
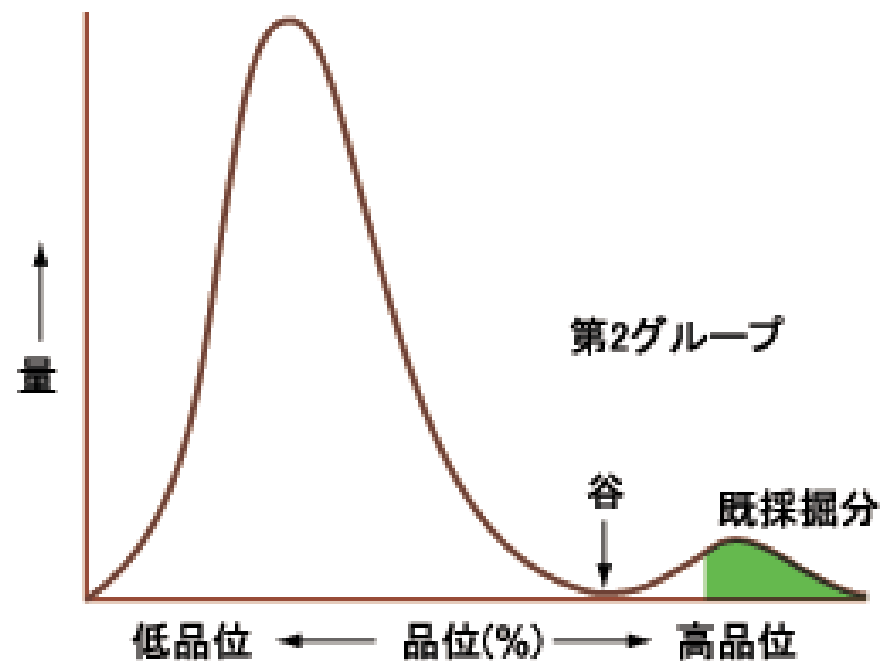
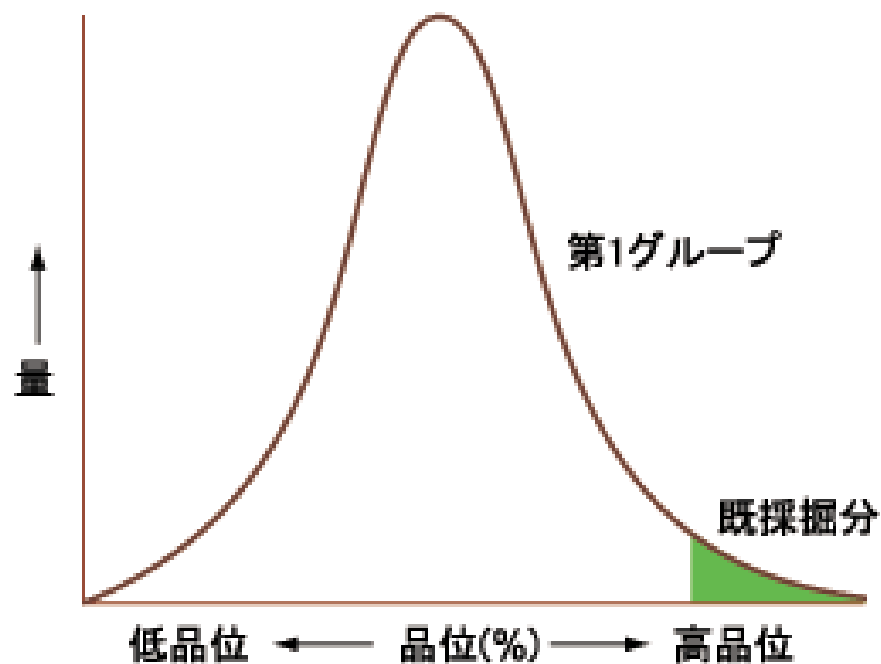


図 ゴールドシュミットの分類



1)地球科学的に豊富な資源(第1グループ)と 2)乏しい資源(第2グループ)[Skinner (1976) による]

# 銅一キロ獲得するために必要なエネルギーと鉱石品位

(Tilton & Skinner 1987)

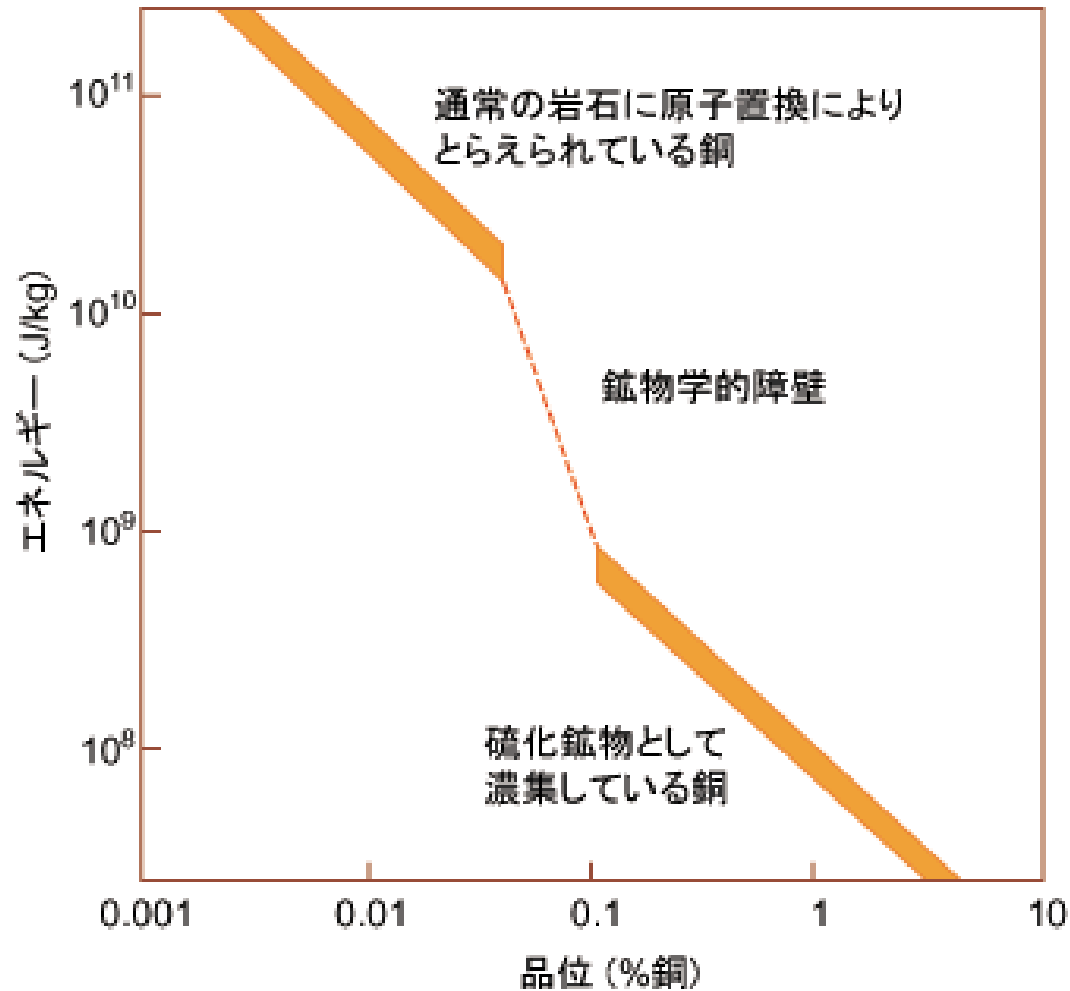


図 銅を1kg回収するためのエネルギーと品位  
[Tilton and Skinner (1987) による]

- Range of vision of human beings is a very important boundary condition of resource management,
- because we do not recognize “it” if we do not see “it” and if “it” is not seen we never recognize “it”. We even will try to ignore “it” to retain our mental stability.
- We need other economic conditions to create upstream materials flows which never happen naturally.

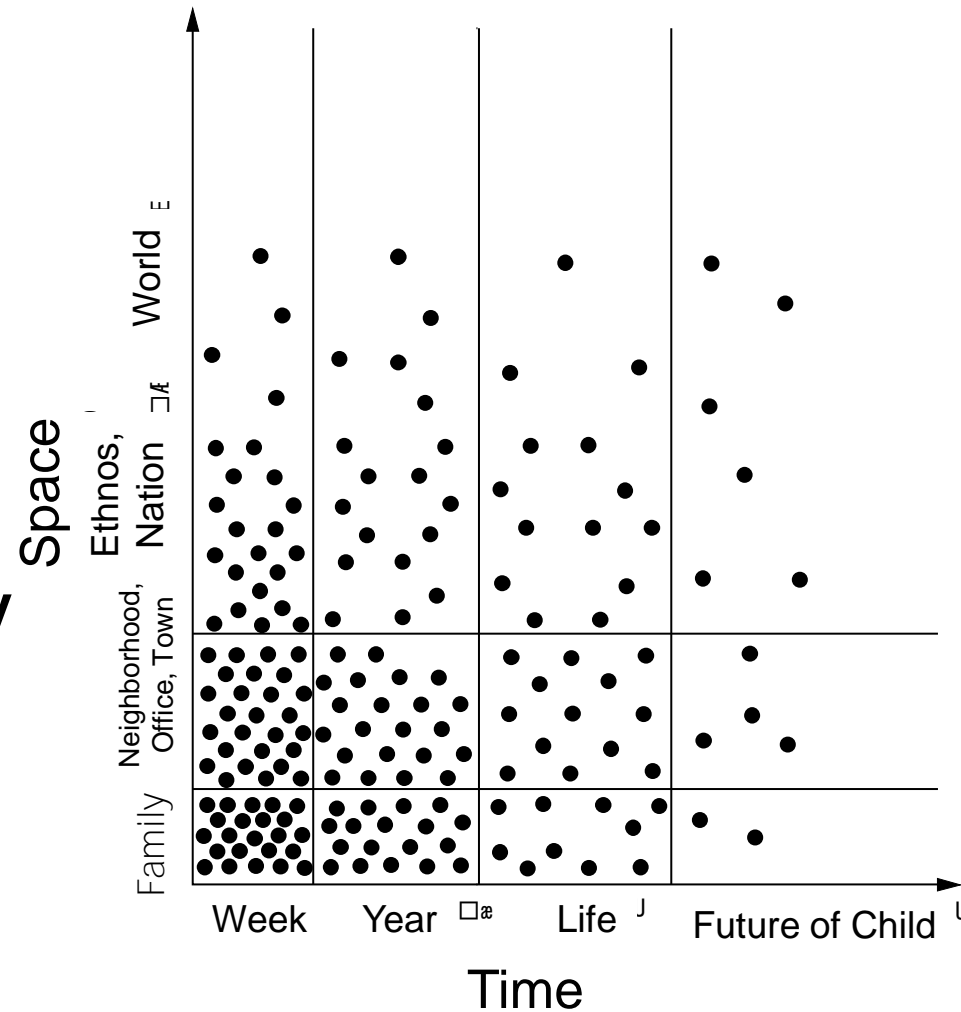


Figure The limits of “our ” vision