

海水中ウラン濃縮におけるエントロピー

中村 聡, 佐賀大学文化教育学部, 2014.1.28

海水中に含まれるウランを採取する研究が行われているが、これに違和感を覚えて、普通は問題にしないエントロピーを計算してみた。結果的にはエントロピーで結論めいたことは言えなかった。以下はその記録メモ。

動機 ウランに限らず金属資源を採取するとき通常は地下の鉱物から採取している。それは特定の鉱物中に目的の金属元素が高濃度に存在するからである。鉄を得るのに鉄鉱石を選ばず「何でも良いから石を集めて溶かす」等と言うことはしない。確かにどんな石にも少しは鉄が含まれるが、それを集めたのでは大幅に効率が下がる。ウランもウラン鉱石から採るのが普通で、これが前者だ。海水から得るのは後者、つまり鉄を鉄鉱石でも何でもない石から精錬するようなものだ。

通常ならそう言うことをしても採算が合わないが、ウランの場合には特殊事情があるのも事実だ。ウランの資源量は発電量換算で石油の半分以下だから、今は良くて「温暖化対策に原子力を」などと主張するための根拠固めとしては、新しい“ウラン鉱山”(=海水)を開発して資源量を確保することが必要条件になる。そして燃料当の発電量が大きいことで、採算が取れる可能性もある。そこで具体的には吸着剤を海に沈めるのだそうだ。

普通なら何か元素を海水から抽出して経済的に成り立つのは難しい。原因は濃度の低さで、濃縮のコストが大きすぎる。濃縮には当然エネルギーを消費するが、ウランの場合は発電で得られるエネルギーと、エネルギー同士の比較が可能だ。

物理学のエントロピーは濃縮に必要な最低限のエネルギーを与える。問題点は「現実にはそれよりも桁違いに大きなエネルギーを消費してしまい、エントロピー計算は実際を大幅に過小評価してしまう」点だ。けれどももし、その常識に反して「“充分な桁違い”が出ない」場合、面白い(推進には困った)結論になる。そこで試みに計算してみた。

計算過程 分離に際して発生するエントロピー低下は次のように計算する。混合のエントロピーは、スターリングの公式を使って、

$$S = -R \sum_i n_i \log(n_i/n) \quad (1)$$

となる(白鳥・中山「環境理解のための熱物理学」など)。ただし R は気体定数、 n_i が成分 i のモル数、 $n = \sum_i n_i$ とする。

水とウランの分離の場合、水の濃度が圧倒的に大きいので、 $n_{\text{水}} \simeq n$ 即ち $\log(n_{\text{水}}/n) \simeq 0$ の近似が成り立ち、上式はウランについてのみ計算すれば良い。更にウランのモル数で規格化したエントロピー

$$S = -R \log(n_{\text{ウ}}/n) \quad (2)$$

を計算しよう。

海水中のウラン濃度は $3 \mu\text{g/L}$ 程度と言うが、モル濃度が必要なので換算すると、

$$\frac{n_{\text{ウ}}}{n} = \frac{3 \times 10^{-6} [\text{g/L}] \div 238 [\text{g/mol}]}{10^3 [\text{g/L}] \div 18 [\text{g/mol}]} = 2.3 \times 10^{-10} \quad (3)$$

有効数字1桁ほどで充分なので四捨五入して、海水の比重も真水と同じにした。これを代入してエントロピーは、

$$S = -8[\text{J/mol}\cdot\text{K}] \times \log(2.3 \times 10^{-10}) = 1.8 \times 10^2[\text{J/mol}\cdot\text{K}] \quad (4)$$

となる。

比較・考察 このエントロピー低下は環境中への熱放出によるエントロピー増加で補償される必要があり、その熱エネルギーが「熱以外の形でウラン分離のために供給されたエネルギーの下限値」を与える。そこで環境温度を 300 K (=27°C) として熱エネルギーに直すと、

$$Q = S \times T = 1.8 \times 10^2[\text{J/mol}\cdot\text{K}] \times 300[\text{K}] = 5 \times 10^4[\text{J/mol}] \quad (5)$$

のようになる。

更にウラン-235の濃縮プロセスが続き、その部分にも同様の分析が可能であるが、それを計算しても上ほどには大きくなるはずなので省略して、この数字を原子力発電の発電量と比較してみる。ウラン-235の発熱量は大凡 200 MeV/個。単位換算して

$$200[\text{MeV/個}] \times 1.6 \times 10^{-13}[\text{J/MeV}] \times 0.007 \times 6 \times 10^{23}[\text{個/mol}] = 1.3 \times 10^{11}[\text{J/mol}] \quad (6)$$

ここで 0.007 は天然ウラン中のウラン-235の存在比である。発電時のエネルギー変換効率は 3割ほどと言われるので、これに 0.3 を掛けて発電量は、

$$E = 4 \times 10^{10}[\text{J/mol}] \quad (7)$$

がこのウラン 1 mol から得られる電力 (の上限) ということになる。

海水からウランを分離する際に要する最低エネルギー (式 (5)) に比べて、80 万倍のエネルギーであるから、この計算の限りにおいて「燃料の分離に要するエネルギーは、燃料の燃焼による発電で賄い得る」と言える。

現実問題としては分離に要するエネルギーは、エントロピー計算による数字よりも何桁も大きいのが通例だから、ここに計算したほどの大きな余裕はないものと推測されるが、それを決めるのは、前述の吸着剤とか具体的な分離方法とそのプラント設計に依存するので、それはまさに研究によって試みられている内容そのものに踏み込むことになる。更に経済性に関してはこれらに加えて社会の状態までも関係する。それらから生まれる桁違いが 80 万倍以内に収まるかどうか、と言う問題に帰着してしまう。

以上の通り、残念ながら海水中ウランの場合でも「エントロピー計算だけで何か意味ある結論に達する」ことはできなかった。

余談 それにしても海水中のウラン濃度は想像したより高い。濃度順に並べて上から 20 番目辺りだろうか？ 海水を浴びるのは普通のことだし、時には飲んでしまったりする。それでも多分ベクレルを計算すると小さいのでしょうけれど、100 以上ある元素の中で濃度の高い上位にウランが来るとは！ もちろん濃度が高いと分離に要するエネルギーが減るので、上の結果に海水中ウラン濃度の高さも部分的に寄与している訳だ。