

海水ウランが 120 万年分ある

北大工 藤井義明・石本さやか

1. はじめに

地球の気温が 10 度変動すれば人類の存続が危うくなると仮定すると、下のようないくつかの危機が考えられる。

まず、あと数千年(ディクソン&アダムス、2004)から 5 万年(Berger & Loutre, 2002)で氷期のピークになり、現在より 10 度ほど気温が下がるといわれている。このような、主にミランコビッチサイクルに基づく気候変動は、10 万年程度の周期(図 1)で太陽が赤色巨星になるまで続く。

また、2 億年後には、パンゲアウルティマ(図 2)生成時の大陸の衝突に伴う活発な火山活動で放出される温暖化ガスにより、極地の雪氷も全てなくなる程度に温暖化すると予想されている(ディクソン&アダムス、2004)。このような、大陸移動に伴う気候変動は、地球において現状と類似した熱移動が生じている限りは億年スケールで繰り返し続く。

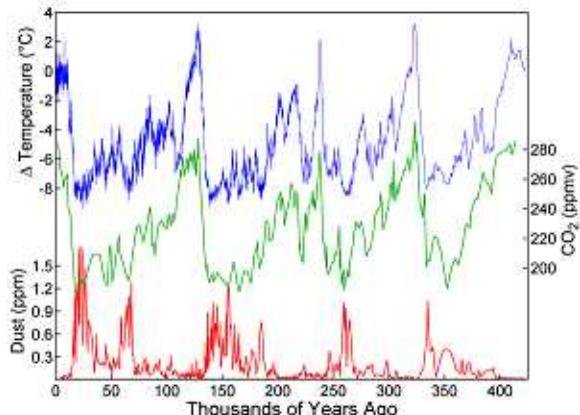


図 1 この 40 万年の気温変化(ウィキペディア)

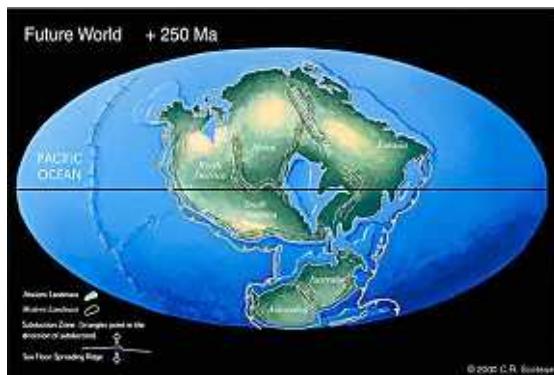


図 2 Pangea Ultima の想像図 (PALEOMAP Project, <http://www.scotese.com/Default.htm>)

それに加えて、太陽エネルギーは 10 億年に 1% の割合で増加しているので、ステファンボルツマンの法則より、14 億年後には今よりも 10 度ほど気温が高くなる。

これらの危機を人類が乗り越えたとしても、63 億年後に太陽が核の水素を使い果たして赤色巨星となり、水星と金星を飲み込む事態に至っては、もはや、他の惑星に移住を終えてい

ない限り、人類の存続は無理と思われる。なお、地球自体は消滅することではなく、109 億年までゆっくりと冷え、それ以降も冷え切った惑星として冷え切った太陽とともに宇宙に存在を続ける。

以上のような自然の営みによる気候変動の他にも、人類の存亡にはさまざまな問題があると思われるが、例としてエネルギーの枯渇を考えてみる。

現在の主要なエネルギー資源の R/P は、石油 41 年(BP 統計 2007)、天然ガス 65 年(BP 統計 2007)、石炭 122 年(BP 統計 2009)、ウラン 100 年 (OECD/NEA-IAEA URANIUM2009) である。埋蔵量を増加させる要因として、資源価格の高騰・新しい鉱床の発見・新技術の開発があるものの、生産量を増加させる要因として人口増加や経済発展に伴うエネルギー需要の増加があり、R/P が増えると言いつることはできない。

埋蔵量の増加要因と生産量の増加要因がほぼ相殺されると仮定すれば、上述以外のエネルギー資源が開発できない場合には、氷期のピーク以前に人類の存続に致命的な影響が生じると考えられる。

ここでは、まず、埋蔵量も消費量も変わらないと仮定し、上記主要エネルギー資源だけを用いた場合、メタンハイドレートとオイルシェルなども用いた場合、について、一次エネルギーの内訳の推移と埋蔵量の枯渇を予想してみた。

埋蔵量を使いきっても、資源量がならない限り、高騰するコストに対応した消費は続くと思われる。このとき、人類がエネルギーに払えるコストが変わらないと仮定すれば、使用できる一次エネルギーの総量は減少し続け、一人あたりのエネルギーが減少するか、人口が減少するか、あるいはその両方が同時に進行すると考えられる。

人類の未来として、このような事態(使用可能な一次エネルギーの減少)はあまり歓迎されるものではない。ところが、最近開発された海水ウランの新しい捕集技術を用いると、莫大な量のウランが捕集できる見込みがあり、人類の未来が大きく改善される可能性がある。そこで、この海水ウランの資源量・埋蔵量、人類の未来への影響について考察した結果を示す。

2. 埋蔵量が枯渇する時期

石油・天然ガス・原子力・石炭の埋蔵量のみを考えた場合、人類は 74 年で埋蔵量を使い切ってしまう(図 3)。なお、ここでは、ある資源の埋蔵量が枯渇した場合は、枯渇しなかった資源が、枯済前の割合を保ったまま生産量を増加して需要をまかなうものと仮定した。

これらに、オイルシェル・メタンハイドレートの埋蔵量を推定して加えても、埋蔵量を使い果たすのは 86 年後でありさほど変わらない(図 4)。なお、ここで、オイルシェル・メタンハイドレート

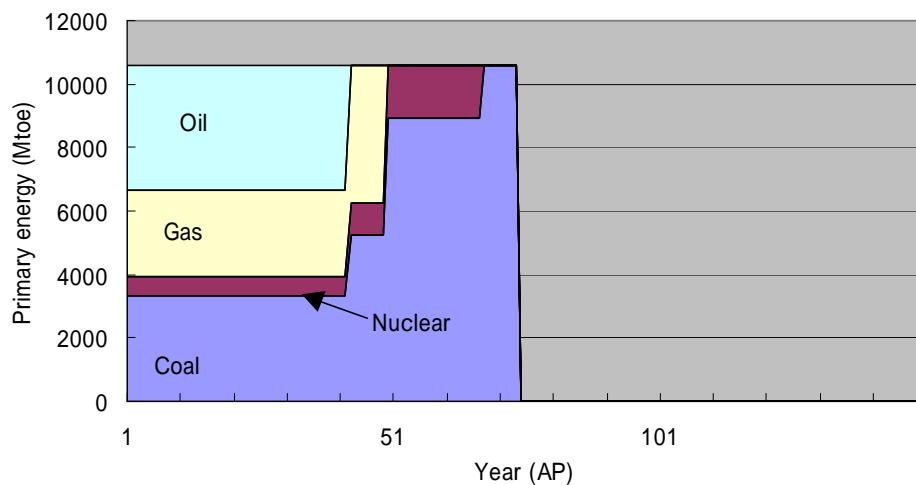


図3 石油・天然ガス・原子力・石炭の埋蔵量の枯渇(AP: after present)

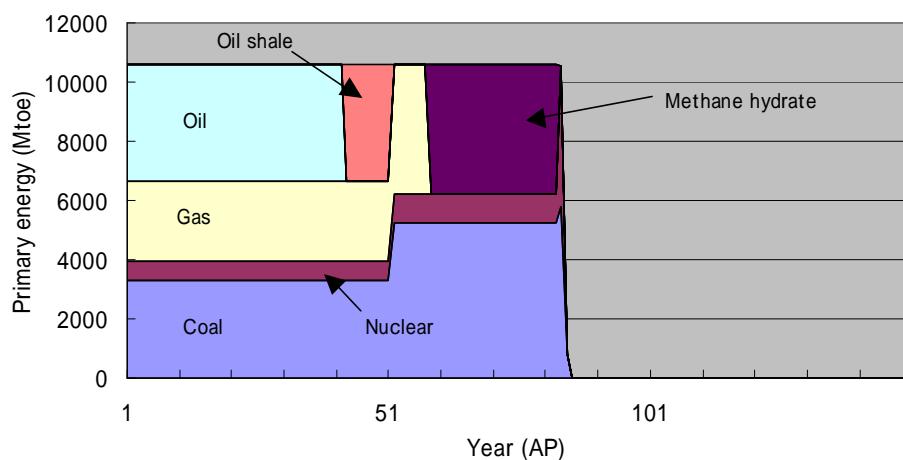


図4 石油・天然ガス・原子力・石炭に加えてオイルシェル・メタンハイドレートが商業生産された場合

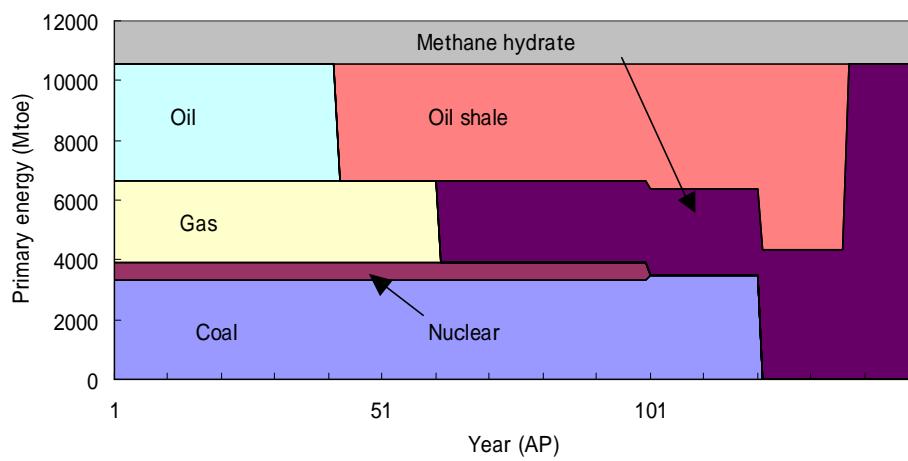


図5 上図において、オイルシェルとメタンハイドレートは埋蔵量と資源量が等しいと仮定した場合(極端に楽観的な見通し)

の資源量はそれぞれ 408602 Mt, 404 Tm³ とし、これらの埋蔵量と資源量との比は、石油または天然ガスの埋蔵量と資源量との比(それぞれ 1.258 Tbbl/15 Tbbl, 185 Tm³/437 Tm³)に等しいと仮定して推定した。また、この場合、石油の埋蔵量が枯渇した後をオイルシェル、天然ガスの枯渇後をメタンハイドレートが受け持つと仮定した。

オイルシェル・メタンハイドレートの埋蔵量が資源量と等しいという非現実的なまでの楽観的推定をした場合でも、150 年後に埋蔵量は枯渇すると予想される(図 4)。

つまり、オイルシェルとメタンハイドレートの商業生産が可能になったとしても、人類は、今と同じ程度の一次エネルギーは後 100 年程度しか使えず、その後は生活レベルの低下と人口減またはその両方が避けられない。もちろん人為的二酸化炭素排出量は減らそうとしなくとも大幅に減少する。

エネルギー資源の埋蔵量枯渇後も、生活レベルを低下させず、人口も維持しようとすれば、早期に高速増殖炉を商業運転する必要があるが、ウランの R/P は 100 年であり、人為的二酸化炭素排出削減のために軽水炉が大幅に増設されてしまうと、高速増殖炉が商業化したときには既にウランがないという事態も考えられないことではない。

このような状況は、海水ウランを利用すると大幅に改善することができると予想される。

3. 海水ウラン

海水には多数の元素が溶け込んでいるが、ウランも pH8.3 の海水中に、ウラニルイオン(UO_2^{2+})の炭酸錯体($UO_2(CO_3)_3^{4-}$)の形で 3.3 ppb の濃度で溶けており、地球上の海水に溶解しているウランは合計で 45 億 t になる。また、海底の岩盤表層にはこの 1000 倍のウランが含有しており、海水からウランを回収しても、岩盤からの溶出により溶存濃度は一定に保たれると考えられている(玉田・瀬古、2000)。

海水と海底表層のウランを半分回収できると仮定してみる。そうすると 2.3 兆トンを現在の世界の生産量 6.5 万トンで割って 3500 万年分となる。

しかしながら、前述のように、100 年もすればエネルギー資源は底をつくと予想される。海水ウランで世界の全ての一次エネルギーを賄うと仮定すれば、現在、原子力発電が世界の一次エネルギーの 3.5% を賄っている(2004 年)ので、耐用年数は $3500 \text{ 万年} \times 0.035 = 120 \text{ 万年}$ となる。これが、本小文の題名、「海水ウランが 120 万年分ある」の由来である。

さらに、高速増殖炉が実用化されれば、理論的にではあるが、軽水炉で利用できる 0.7% のウラン 235 だけではなく、ウランのもつエネルギーの 60%まで利用できるようになるので、使用量は 1/86 で済み、放射性廃棄物の量を 1/86 にしながら海水ウランは 1 億年持つことになる。

無尽蔵のエネルギーがあれば、前述の 120 万年ないし 1.1 億年は短縮されてしまうが、水不足は淡水化で、食料不足は高層ビル畳をつくって気温・湿度・降雨・人工日射・施肥等を完全に最適にコントロールして、鉱物資源・工業材料・建設材

料は全てエネルギーを湯水のように使ってリサイクルして、気候変動も少なくとも都市は全部ドームで覆って解決、ということになる。もちろん自動車は全て電気自動車になるし、住宅も、好むと好まざるに関わらずオール電化住宅となる。

残念なことに、海水ウランのコストはウラン鉱石の 2 倍程度になると予想されており、高速増殖炉も安全に相当のコストがかかると予想されているので、上記のようにエネルギーを湯水のように使って人類の存亡にかかわる致命的な問題(のうちあまり政治や経済には直接の関係がないものだけ)は全て解決ともいえないが、エネルギー資源の埋蔵量を使いきった時点で、人類の生活レベルの低下か人口減少かその両方が生じるのは確実なので、何もないよりは相当心強いといえるだろう。

しかしながら、海水が動かなければこの大量のウランも採取のしようがなく、実際に従来、海水をくみ上げて採取しようという研究もあったようだが、処理しなければならない海水の量に難があり、実用化には至っていない。

ところが、たとえば、日本近海では、黒潮に乗って 1 年に 520 万トンのウランが通過している(玉田ら、2006)。これは、ウラン鉱石の埋蔵量 500 万トン ~ 600 万トンとほぼ同量であり、世界のウラン消費量 6.5 万トンで割ると約 100 年分となる。この一部でも採取できれば、貴重な国産エネルギー資源を大量に確保できることになる。

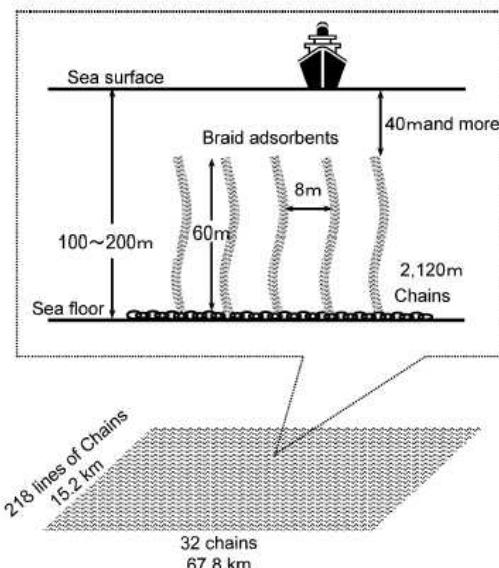


図 6 モール状捕集システム(玉田ら、2006)

このために、アミドキシム基で処理した特殊な海藻状の捕集装置を海底に多数設置するシステム(図 6)が開発されている(玉田ら、2006)。このシステムで捕集されたウランは、通常のウラン鉱石(ここでは、陸ウランと呼ぶ)と同じように、ウラン 235 を 0.7% 含んでおり、陸ウランと同じプロセスで核燃料を製造できる。日本の一次エネルギー全てを軽水炉で賄うのに必要な 52000 トンのウランを捕集するのに、玉田ら(2006)の見積もりを利用すれば、5800 km² の面積が必要と計算される。

沖縄から土佐湾にかけては、ウラン捕集に適した海域が

6000 km² あるといわれている(玉田ら、2006)ので、この広大な面積の確保も不可能ではないかもしれないが、かなりの努力を要すると思われる。一方、全て高速増殖炉を用いるとすれば、ウラン捕集に必要な面積は 67 km² となり、十分可能と考えられる。発電に用いる燃料のコストがどうなるかは定かではないが、燃料の原料としてのウランにかかるコストは同じ発電量あたり当然 1/86 となる。

最後に、今一度、海水ウランは国産エネルギーということを強調しておきたい。

4. 海水ウランの問題点

海水ウランは内陸国では採取できず、沿岸国でも捕集に適した海域に面していなければ採取できない。海水ウランを捕集できない国ではエネルギーが尽き、自然エネルギーに頼るか、海水ウラン捕集が可能な沿岸国から高価な電力または海水ウランを購入する必要がある。違法に入手しようとする国も現れると予想されるので、海水ウラン捕集国では、捕集に適した海域や捕集装置の防衛にコストがかかると考えられる。

また、現在世界を支配している国々には、核不拡散の方針があるので、原子力発電は軽水炉に限っても現時点では限られた国にしかできない。ましてや高速増殖炉ではプルトニウム型原子爆弾の原料が大量に製造されるわけであるから、将来にわたっても、現在核技術を保有しない国には核技術の移転は行われないと思われる。

したがって、現在核技術を保有していない裕福でない内陸国、特にインフラも整備されていない僻地では、実質的に、現在と同様、一般的に不安定なエネルギー源といえる自然エネルギーを使うしか生き延びる術はなくなると思われる。

このように、海水ウランに頼った未来は、現在よりもさらに国家間格差が拡大し、政治的・経済的に非常に不安定な社会になることが予想される。

5. まとめ

約 100 年後と思われるエネルギー資源の埋蔵量枯渇後を考えると、人類の存亡は高速増殖炉と海水ウランにかかっており、ある程度の文化的生活を保ちながら生き残るためににはこれらの導入は避けられないと思われる。

海水ウランだけの導入でも 120 万年分のエネルギーが確保できる。しかし、捕集に必要な面積が大きすぎることや、大量に生じる放射性廃棄物の量を減らすためにも、高速増殖炉の導入も必要と思われる。

むしろ、化石燃料を工業原料としての炭化水素とみなし、炭化水素や鉱物資源の枯渇なども考えて、より豊かな未来を目指すために、早期から積極的に高速増殖炉や海水ウランの開発を進め、化石燃料の備蓄や鉱物資源の備蓄・リサイクルに努めるという手も考えられる。なお、自由経済の下では、日本が、輸入している化石燃料や鉱物資源を節約しても他の国が使うだけなので、これらについては、備蓄には意味があるが節約は無意味と考えられる。

多少重複するが、誤解がないように改めて述べたいのは、こ

こで原子力発電を行わざるを得ないというのは、人類が生き延びるために、人為的二酸化炭素排出を削減するためではない。前述したように、100 年もすれば化石エネルギーの埋蔵量は枯渇してしまい、二酸化炭素は出したくても出せなくなる。したがって、無機成因説による無尽蔵の石油が発見されることでもない限り、地球温暖化を心配する必要はない。実際、2010 年のムスコカサミットでの議論は経済対策に終始し、温暖化のことなど一言も話題にされなかった。

この小文では、太陽光発電、地熱発電、風力発電等の自然エネルギーについてはコストの推移に不確実要素が多いために現状維持と仮定した。もちろん技術開発により自然エネルギーのコストが低下すれば状況は好転する。エネルギー資源の浪費にならない範囲で自然エネルギーの研究・開発を続けることが、人類の未来を改善する可能性を否定するものではない。

将来の展望として、埋蔵量枯渇後の一次エネルギー供給について検討したいと考えている。

たとえば、エネルギー資源の消費量内訳はコストに反比例しており、これからもそうであると仮定する。ここでいうコストとは、単なる熱量あたりの原価のことではなく消費者に提供できる価格、不安を解消するための社会的コスト、政情不安な国が生産国であることの政治的コストなどを全て含んだ結果的なものである。

また、コストは埋蔵量が 0 になるまでは一定で、その後は資源量に反比例し、一次エネルギーに費やすトータルコストは変わらず(経済成長なし)、人口が一次エネルギーに比例すると仮定すると、非常に特殊な条件下での解ではあるが、将来的な人口の推移に関するひとつの予想が得られる。

人口が一次エネルギーに比例するとの仮定はかなり乱暴であるが、現在そして将来も続くと思われる水不足の状況では、食料生産は、灌漑と農機具の生産・運転、肥料生産においてエネルギーに依存しているので、あながち、まったくの的外れではないと思われる。

現在使われていないエネルギー資源については、初期のコスト・埋蔵量・導入時期をいくつか仮定して組み入れていく。初期コストの仮定としては、鉱石のコストや採掘コスト、既往の研究などを参考にして、なるべくもっともらしい推測を試みる。

引用文献

- Berger, A and Loutre, M. F. (2002), An Exceptionally Long Interglacial Ahead? *Science*, Vol. 297, Issue 5585, pp. 1287-1288
- ドゥーガル・ディクソン& ジョン・アダムス(2004)、フューチャー・イズ・ワイルド、ダイヤモンド社
- 玉田正男・瀬古典明・笠井昇・清水隆(2006)、モール状捕集システムによる海水ウラン捕集のコスト試算、日本原子力学会和文論文誌, Vol. 5, No. 4, p. 358 - 363 (2006)
- 玉田正男・瀬古典明(2000)、海水中有用金属捕集の現状と将来展望, Vol. 551, *Isotope News*, pp. 2-6