



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	軽水炉による原子力発電を止めてもエネルギー資源の埋蔵量枯渇は7年早まるだけである
Author(s)	藤井, 義明
Description	資源・素材2011（堺）－平成23年度資源・素材関係学協会合同秋季大会－、2011年9月26日～2011年9月29日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、堺市
Citation	資源・素材2011（堺）企画発表・一般発表(A)講演資料集, 2011, 303-306
Issue Date	2011-09-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/47183
Type	conference paper
File Information	MMIJ2011. (A)303-306. pdf



軽水炉による原子力発電を止めてもエネルギー資源の埋蔵量枯渇は 7 年早まるだけである

北大工 藤井義明

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日 14:46 に 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) が発生した。この地震とその後の大津波によって東京電力福島第一原子力発電所の冷却機能が失われ、メルトスルー・水素爆発等により 850 PBq (原子力保安院推定) の放射性物質が漏れ、7 月 19 日付けの東電ロードマップによれば冷温停止まであと 3 ヶ月～6 ヶ月かかるとされている。この放射性物質の量は、広島型原爆 (15 kT) 20 発分、1986 年チェルノブイリ原子力発電所事故の 1/10 といわれている。ちなみに、1945 年から 1980 年までに広島・長崎を含め 504 回、440 MT の大気圏内核爆発が行われ、世界中に人為的に放射性物質がばら撒かれたが (Fujii, 2011)、この内、核分裂の合計収量は 189 MT なので、チェルノブイリ原子力事故 63 回分、福島第一原発の 630 回分に当たる。

有名過去の原子力事故の 1979 年スリーマイル島原子力発電所事故は、国際原子力事象評価尺度 (INES, International Nuclear Event Scale) でレベル 5、チェルノブイリがレベル 7 である。福島第一原発の事故については、原子力保安院は 3 月 12 日の時点でレベル 4、18 日に暫定的にレベル 5 にすると発表した、日本政府は 4 月 11 日にレベル 7 であると発表した。

この事故は、今後の世界のエネルギー政策に大きな影響を与えつつあり、たとえば、スイス政府は 5 月 25 日 2034 年までの脱原発政策を決定した。ドイツでは 6 月 6 日に国内全ての原発を 2022 年までに停止することなどを定めた案が閣議決定された。イタリアでは 6 月 12～13 日に行われた原子力発電所の再開の是非を問う国民投票で反対が 94.05%となった。我が国では菅首相が 7 月 19 日の予算委員会で個人的な考えとして「脱・原発依存」の方針を打ち出した。一方、フランス政府・ロシア政府・アメリカ政府は原子力政策に変更なしという対場のようなのである。

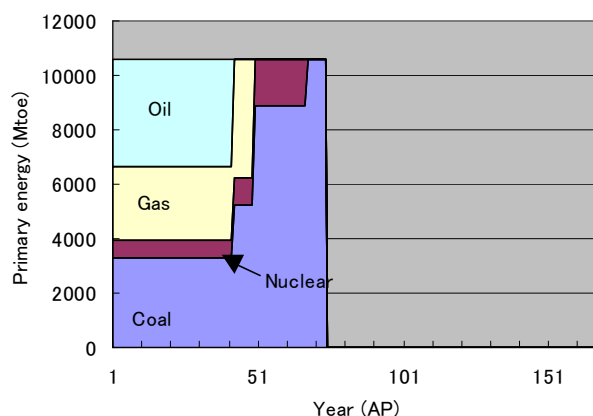
ここでは、エネルギー資源の埋蔵量と未来などについてデータを示し、読者の判断材料としたい。

2. 鉱石ウランのエネルギー供給に対する寄与

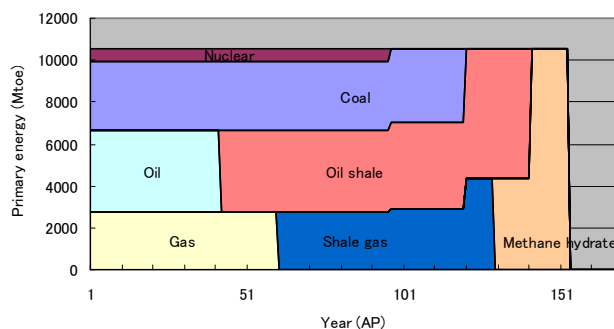
一次エネルギー消費量が現在のまま変らないと仮定すれば、主要なエネルギー資源の埋蔵量は 74 年で枯渇する (Fig. 1a、藤井・石本、2011)。もちろん、埋蔵量の枯渇は資源量の枯渇を意味しないし、新しい鉱床の発見や新技術により埋蔵量は増加するが、人口増加や経済発展によるエネルギー消費量増加で可採年数は減少するので、74 年という値には目安という程度の意味はある。鉱石ウランの可採年数は 123 年 (OECD/NEA-IAEA URANIUM2009)であり、一次エネルギーの 5.8%を賄っている、鉱石ウランだけで一次エネルギーを賄おうとすると 7 年分にしかない。したがって、鉱石ウランを使うのを止めたとしても、主要なエネルギー資源の埋蔵量

の枯渇が 74 年から 67 年になるだけで大した違いはない。

これに、シェールガス・オイルシェール・メタンハイドレートの推定埋蔵量を加えると埋蔵量の枯渇は 153 年後になる (Fig. 1b)。この場合も、鉱石ウランがない場合は 153 年が 146 年後になるだけである。



(a) Oil, gas, coal and uranium



(b) Estimated reserves of shale gas, oil shale and methane hydrate are considered.

Fig. 1 Exhaustion of reserves of major energy resources.

もちろん、今すぐに原発を全て止めると、電力が不足してしまうが、30 年程度かけて火力発電所を増設し、流通体制を整えれば徐々に原発をなくすことは可能である。また、MOX 燃料はウランを数割節約するだけなので、7 年が 9 年になる程度であり、やはり大差なく、むしろ核廃棄物処理の意味合いが強い。

ただし、主要なエネルギー資源の埋蔵量枯渇後も人類が今と同じような文化生活を営もうとするならば、現在の技術の延長線上で実用可能性がある大量エネルギーは、以下に述べるようないずれも核エネルギーである。

3. 高速増殖炉

軽水炉では主にウラン鉱石中に 0.7%含まれるウラン 235(残りはほとんどウラン 238)の核分裂でエネルギーを得るが、高速増殖炉では、核分裂の際に放出される中性子によりウラン 238 をプルトニウム 239 にしてプルトニウムの核分裂によりエネルギーを得る。同じ量のウラン鉱石から概略 100 倍のエネルギーを得ることができ、電力あたりの廃棄物も概略 1/100 となる。負荷変動への追従性もよい(常磐井, 2011)。

したがって、これから全てのウランを高速増殖炉で使えば一次エネルギーを 700 年賄うことができる。ただし、冷却に金属ナトリウムを使うことなどに起因する技術的課題が多く、すぐに実用化するのは難しいと考えられる。資源エネルギー庁の資料(<http://www.enecho.meti.go.jp/policy/nuclear/pptfiles/0602-5.pdf>)によると 2025 年頃の実証施設、2050 年頃に商業ベースの導入とされている。しかしながら、福島第一原子力発電所の事故で、運転中止中のもんじゅの運転再開に目処が立っていないことに象徴されるように、開発は大幅に遅れるのではないかと予想される。

4. トリウム

トリウム 232 はトリウム 233、プロトアクチニウム 233 を経てウラン 233 となり核分裂による発電に利用することができる(マッケイ, 2010)。トリウムは主にトルコ・オーストラリア・インド・ノルウェー・アメリカ・カナダなどに賦存するモナザイト(CePO_4)から、レアアース、燐とともに得られ(インドのモナザイトのトリウム品位は 8%である)、インドでは既にウラニウムと混合して発電に用いられている。既知埋蔵量は 1.58 Mt、資源量は 6 Mt である。発電に必要なトリウムの量が 278 $\mu\text{g/kWh}$ なので既知埋蔵量により 2.04×10^{22} J の発電が可能であり、このエネルギーは、2008 年のエネルギー消費量(IEA, 2010)、 3.53×10^{20} J (8428 Mtoe)の 58 年分にあたる。前述のように、原子力発電はエネルギー消費量の 5.8%を賄っている(IEA, 2010)ので、ウランの後継としての可採年数は 1000 年ともいえる。トリウムは、核分裂時にプルトニウムを生成しない、使用済み核燃料に含まれるトリウムが強烈な放射線を出す等の特徴から、核兵器に転用しづらいという欠点を有し、従来あまり積極的に利用されて来なかったが、二酸化炭素排出を削減して温暖化を防止するという題目の下での原子力発電推進においては、上記特徴が核不拡散の観点から核保有国にはむしろ歓迎されている。

トリウムはもともとほとんどが核分裂するので高速増殖炉のような原理で可採年数を大幅に増やすことはできない。

5. 海水ウラン

海水中には濃度 3.3 ppb で 4.5 Gt のウランが炭酸ウラニルの形で溶けている(Davies et al., 1964, 堀部ら, 1986)。このウランはもともと河川から海洋へ流入している年間 27 kt のウランに起因している。海水は飽和しているので現在流入しているウランは海底に沈殿する。海洋プレートの平均寿命を 1.67 億年と仮定すると、海底表層堆積物中に 4.5 Tt のウランが賦存することになる。ウランは年間 27 kt がプレートとともに沈み込むが、

プレートと海底堆積物の一部はマグマとなり、地殻に火成岩の成分としてウランを供給する。なお、マントル中のウラン 238、235 濃度はそれぞれ 30.8、0.22 ppb である(Turcotte & Scubert, 2002)。

海水中のウラン資源量の 25%が利用できると仮定すれば、埋蔵量は 1.1 Gt となる。現在の消費量 67 kt/y で除せば 1.7 万年分、原子力発電がエネルギー消費量の 5.8%を賄っていることを考慮すれば、世界の一次エネルギー消費 1000 年分となる。もっとも、鉱石ウランでも今すぐ高速増殖炉のみに転換できれば世界の一次エネルギーを賄って 720 年分と膨大な量になる。MOX 燃料ではウランを 2~3 割しか節約できないことは既に述べた。

海水が未飽和となった場合に海洋堆積物中のウランが溶出し、海水中のウラン濃度が一定になる可能性も指摘されている(玉田ら, 2006)。Ulrich et al. (2009)に示されている、炭酸の存在下でのいくつかの条件下におけるウラニナイト溶解速度定数の最小値 $1.58 \times 10^{-12} \text{ mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ を用い、海底堆積物中のウランが粒径 1 μm ~1 mm で沈殿していると仮定、ウラニナイトの平均的な密度として 8600 kg/m^3 を用い、ウラニナイト表面は全てウランを含まない海水流に接していると仮定すると、溶出量は 42 Gt/y~42 Mt/y と計算される。この溶出量は、世界の一次エネルギー全てを賄うための捕集量 1 Mt/y よりも十分大きく、海水が不飽和となった場合には溶出による濃度の回復が期待できる。仮に、海底堆積物中のウランの 1/4 が捕集可能とすれば世界の一次エネルギー全てを賄うための 1 Mt/y のウランを 100 万年にわたって捕集できることになる。

海水ウランの捕集は、タンニン捕集材(日経産業新聞、2010)等を装備したモール状捕集システム(玉田ら, 2006)を暖流の流れる大陸棚に設置して行えばよいと考えられ、具体的な捕集可能海域として、フィリピン・台湾・沖縄~土佐湾、オーストラリア東岸、フロリダ、アフリカ東岸などの大陸棚が挙げられる(ヨーロッパは海流温が低いため海水ウランの捕集には適していない)。捕集に適する面積は世界で 280 万 km^2 と見積もられ(石本, 2011)、その 4%を利用すると世界の一次エネルギーを賄うための 1 Mt が捕集可能である。捕集コストは現在の鉱石ウランの 3 倍程度(日経産業新聞、2010)とされているが、将来さらに低減できると予想される。ただし、軽水炉におけるウランの鉱石調達・製鉱コストは発電コストの 2.9%未満(内閣府原子力委員会ウェブサイト)なので、海水ウランが現在の鉱石ウランの 3 倍のコストであっても、発電コストの増加は 5.8%未満であり、再生可能エネルギーの発電コスト(資源エネルギー庁, 2009)より依然として割安である。また、沖縄~土佐湾で捕集される海水ウランは我が国のエネルギー自給率の向上に大きく寄与すると期待される。

以上のように、軽水炉で世界の一次エネルギー全てを賄うことは、不可能ではなさそうだが、捕集に必要な面積の 11 万 km^2 は広大であり、また、多量の核廃棄物の処理には非常な困難が予想される。そこで、高速増殖炉の使用を検討してみる。軽水炉でウラン鉱石に含まれている 0.7%のウラン 235のうち 0.6%までが使われ、高速増殖炉でウラン鉱石の 60%まで核

分裂可能と仮定すれば、単純計算では高速増殖炉のみを用いると海水ウランの埋蔵量は 10 万年分～1 億年となる。ところが年間捕集量が先に述べた、河川から海洋へのウラン流入量を下回ると、可採年数が飛躍的に大きくなることを以下に示す。

地球の表面積は $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$ であり、その 71% が海とすれば、大陸の面積は $1.5 \times 10^8 \text{ km}^2$ である。大陸地殻の平均厚さを 35 km とすれば、体積は $5.3 \times 10^9 \text{ km}^3$ である。大陸地殻の平均比重を 2.85 とすれば大陸地殻の質量は $1.51 \times 10^{19} \text{ t}$ であり、ウランは地殻に 3 ppm 含まれている(中嶋、1991)ので 45 Tt となる。地殻から海水への流入は地殻中のウラニウム質量に比例し初期値 27 kt/y、海底堆積物とプレートから地殻へのウラン供給量は海底堆積物中のウラン質量に比例し、初期値 27 kt/y と仮定する。また、プレート運動が一定の割合で減速し 60 億年後に停止すると仮定する。海水ウランの捕集速度は高速増殖炉で世界の一次エネルギーを賄える 10 kt/y とし、ウラン 238 の半減期 45 億年も考慮して、シミュレーションしてみると、21 億年後までは地殻から海洋へ供給されるウランの量が 10 kt/y を超えている(Fig. 2 中の C to S)ので過剰なウランは沈殿し海水中のウラン濃度は一定である。つまり 21 億年間にわたってウラン 10 kt/y の捕集が可能である。それ以降は、地殻から海洋へ供給されるウランの量が 10 kt/y を切り海水中のウラン濃度が減少を開始するため、21 億年と比較すれば無視できるほどすぐに海水ウランは捕集不可能となる。なお、この議論は高速増殖炉の使用を前提としているため、ウラン 238 の量だけが問題で、崩壊に伴うウラン 235 の含有率低下は問題でない。

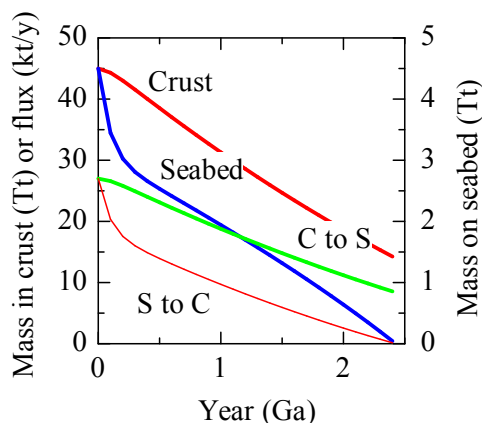


Fig. 2 Prediction on amount and flux of uranium. C: crust, S: seabed.

6. 核融合発電

実現性が高いとされている、重水素とリチウムに中性子をあてて作った三重水素との核融合の場合、1 つの重水素原子と 1 つのリチウム原子から 12.6 MeV のエネルギーが発生する。原子力発電の熱効率 33% を用いれれば取り出せる電力は 405 GJ/mol であり、2008 年のエネルギー消費量(IEA, 2010)、3.5

$3 \times 10^{20} \text{ J/y}$ を賄うには、重水 8700 t/y、リチウム 6020 t/y が必要である(遠心分離等により海水中の重水を濃縮したのち電気分解で製造する重水素製造時の電力は核融合により発生する電力の 1/700 とされているので無視した)。世界の海水量を $13.6 \times 10^{17} \text{ t}$ 、重水濃度を 0.0145% とすると重水は 197 Tt 存在し、その 1/4 が抽出可能として 49 Tt であるから重水は 56 億年分あるが、リチウムの埋蔵量は 4.1 Mt である(西山、2009)から 680 年分である。一方、海水中のリチウムは 230 Gt といわれており(北九州私立大学国際環境工学部分離工学研究室ウェブサイト、<http://chemeng.env.kitakyu-u.ac.jp/research/Lithium.pdf>)、1/4 が捕集できれば、960 万年分となる。もちろん核融合の商業運転までには大幅な技術革新が必要である。

3 つの重水素原子から ^3He や三重水素を経てヘリウム・水素・中性子を発生する反応なら 1 つの重水素原子あたり 4.8 MeV のエネルギーを発生する。上記と同様に計算すれば重水は約 21 億年分となるが商業運転にはさらに困難な課題を克服する必要がある。

核融合発電では、炉壁が放射化する程度で、大量の核廃棄物の生成はないが、これは核分裂発電と比べた場合、大きな利点である。

7. 結局どうすればいいのか？

原発の耐震性や津波に対する安全性が十分でないことが福島第一原子力発電所の事故で明らかになった。安全性を大幅に向上させるために 2926 億円(泊 3 号機の例、内閣府原子力委員会資料、<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2003/siryo19/siryo1-2.pdf>)の建設費が 1000 億円余計にかかったとし、運転期間は 50 年、稼働率を考慮して実質出力 70 万 kW とすれば、50 年で 3100 億 kWh 発電し、コスト上昇は kWh あたり 0.32 円となる。安全性を向上させるといっても限度があり、ある設定値以上の津波や地震では事故が生じる可能性がある。原発の発電コストには補償・廃炉コストを上乗せし積み立てておく必要もある。たとえば今回の福島のような 1000 年に一度の事故で一基あたり 2 兆円の補償・廃炉コストが予想されると仮定すれば、予想される補償金は 2 兆円の 50/1000 で 1000 億円、コスト上昇は kWh あたり 0.32 円である。合計 kWh あたり 0.64 円のコストは現状で kWh あたり 5.9 円といわれる(内閣府原子力委員会資料、<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/siryo/houkoku2/p51.pdf>)原子力による発電コストを 11% 押し上げ、原子力のシェアを下げるには十分な理由となるが、強力な廃止理由にはならない。

かといって、仮に全ての一次エネルギーを現在と同じ規模の原子力発電所で賄うと現在の 17 倍の核反応炉数となり、安全が確保されたとしても安心感とは程遠い状況になろう。また、高速増殖炉について元北大総長の丹保先生は「悪魔と契約してでも人間は生き延びなければならないのか」という問いを発せられている(吉田、2011)。

武田邦彦氏は、「100 年前の人間が現代の技術を想像できなかったように、我々も 100 年後の技術を想像できるわけが

なく、100 年後は我々の想像もできない画期的な技術ができているから心配ない」という意を述べている(同氏ウェブサイト)。筆者はこの意見に基本的に同意するものの、心配ないとはいっても、やはり、そのときそのときで最善と思われる選択をする方がよいと考える。筆者の考える最善の選択は、今のところ以下のようなものである。

まず、二酸化炭素削減を目指して軽水炉を大幅に増設することは止めたほうがいい。特にアジアの島国・半島国など我が国同様の地震国での新設は控えるべきであろう。大陸にある安定した岩盤の国々でも、研究開発・建設・解体・廃棄物処理や電力需要平準化に関わる揚水発電コストを考えると、本当に原子力発電所が二酸化炭素を削減しているのか疑わしく、仮に二酸化炭素を削減しているとしても、IPCC の AR4 (IPCC, 2007) に基づいて計算した 2050 年における気温の抑制効果は二酸化炭素排出 1%削減あたりたったの 0.012°C である(藤井, 2011)。IEA によると 2050 年までに 1920 基の原子力発電所を建設すると CO_2 排出は 9%削減できる(西田, 2010)。つまり、原子力発電所の温暖化削減効果は 1 基あたりわずか 0.000056°C である。また、軽水炉によるウランの大量消費が行われると将来の高速増殖炉用のウランが足りなくなるということもあり得る。したがって、安全性を大幅に向上させる技術開発に注力するとともに、予想される最大の地震・津波に耐えられない炉は定期点検後に順次停止する。安全性が確保できた炉は運転を再開し、将来の海水ウランに備えるべきと考える。安全性の審査は公正な機関によりガラス張りで行われるようなシステムを構築する必要がある。また、使用済み燃料は速やかに処理し、高レベル放射性廃棄物も速やかに地層処分してしまう必要があろう。

原発を推進しない分、化石エネルギーからの二酸化炭素排出は増加するが、どうしても削減したければ米・中・印の非効率な石炭火力発電所の効率を日本並みに引き上げることによって原発 216 基分削減できる(橋口, 2010)。あるいは、エネルギー枯渇を早めるが CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) でも削減できる。この他に世界の人口安定化は言わずもがなであり(藤井, 2011)、日本は地震予知・津波対策にもっと真剣に取り組む必要があろう。

最後に、いわゆる再生可能エネルギー・自然エネルギーについて一言二言述べておきたい。

まず、直訳のため仕方がないのかもしれないが、エネルギー密度が薄く、現在の技術ではごく一部しか利用できないために、一見無尽蔵にあるかのように見えるエネルギーのことを再生可能エネルギーと呼んでいるようである。しかしながら、エネルギー保存則が成り立つ限り、エネルギーに消滅も再生もなく、言葉の使い方が明らかにおかしい。

次に、自然エネルギーなど言わずともエネルギー資源は全て自然である。たとえば、太陽エネルギーは自然な核融合から発生する可視光線を中心とする自然な電磁波であり、地熱は自然な U, K, Th の自然な同位体崩壊や自然な微惑星衝突の熱であり(The KamLAND Collaboration, 2011)、水力は太陽エネルギーが運び上げた水の位置エネルギーを利用す

る。風力や波力は太陽エネルギーに起因する大気や海水の対流エネルギーを利用する。

これらと同じように、ウランは自然な超新星爆発時の自然な核融合で生成した。石炭・石油・天然ガスは自然の樹木や植物プランクトンなどが自然に埋没して自然の地熱エネルギーや自然なバクテリアによる分解・還元や自然な重力に起因する地圧の作用でできた。

これに対して、水素は人間がエネルギーを加えて天然ガスや水から作るものでエネルギー資源ではない。バイオエタノールは、自生の樹木といった立派なエネルギー資源を、または、天然の森林を人間が大量に破壊して造成した畑で人間が大量の石油を用いて作ったサトウキビなどをさらに、人間がエネルギーを加えて加工し作った工業製品であり、自然エネルギーどころかエネルギー資源ですらない。

原子力は核分裂炉を使うから自然エネルギーではないというならば、工場で作った太陽光パネルを使う太陽光エネルギーや、工場で作った発電機を用いる風力エネルギーも自然エネルギーではないことになる。

参考文献

- Davies, R. V., Kennedy, Dr. J., McLroy, R. W., Spence, Dr. R., C.B., F.R.S. and Hill, K. M. (1964), Extraction of Uranium from Sea Water, *Nature*, Vol. 203, pp. 1110-1115
- Fujii, Y. (2011), The Role of Atmospheric Nuclear Explosions on the Stagnation of Global Warming in the Mid 20th Century, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 73, Nos. 5/6, pp. 643-652, doi:10.1016/j.jastp.2011.01.005
- 藤井義明(2011)、本当に二酸化炭素は減らすべきか?、J. MMIJ. (投稿中)
- 藤井義明・石本さやか(2010)、海水ウランが 120 万年分ある、資源・素材 2010(福岡)企画発表一般発表(A)講演資料、pp. 325-328、9/15、福岡
- 橋口昌道(2010)、地球環境問題の解決に向けた新たなグリーンコール政策の展開、資源・素材 2010(福岡)企画発表スライド
- 堀部純男・大町北一郎・菅野昌義(1986)、海洋鉱物資源、読売新聞社
- International Energy Agency (2010), Key World Energy Statistics
- IPCC (2007), Fourth Assessment Report: Climate Change 2007
- 石本さやか(2011)、海水ウランで人類の未来は **バラ** 色か? 北海道大学工学部平成 22 年度卒業論文
- デービッド・J.C.マッケイ(2010)、持続可能なエネルギー、産業図書
- 内閣府原子力委員会ウェブサイト、<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/siryo/houkoku2/p51.pdf>
- 中嶋悟(1991)、地球の資源と環境、鉱物学雑誌、Vol. 20, No. 4, pp. 233-241
- 日経産業新聞 2010 年 9 月 28 日報道
- 西田厚聰(2010)、経済危機と地球温暖化への課題とその対応、エネルギー・トップ講演会、経済危機と地球温暖化への課題とその対応、エネルギーと動力別冊、pp. 5-35
- 西山孝(2009)、レアメタル・資源—38 元素の統計と展望、丸善
- 資源エネルギー庁(2009)、エネルギーに関する年次報告書
- 玉田正男 瀬古典明・笠井昇・清水隆(2006)、モールド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)
- The KamLAND Collaboration (2011), Partial Radiogenic Heat Model for Earth Revealed by Geoneutrino Measurements, *Nature Geoscience*, Published Online: 17 July 2011, DOI: 10.1038/NNGEO1205
- Turcotte, D. L. and Schubert, G. (2002), *Geodynamics*, Cambridge University Press
- 常磐井守泰(2011)、海水ウランと化学法濃縮による新フロントエンド、日本原子力学会誌、Vol. 53, No. 4, pp. 4-5
- Ulrich, K.-U., Ilton, Eugene, S., Veeramani, H., Sharp, J. O., Bernier-Latmani, R., Schofield, E. J., Bargar, J. R. and Giammar, D. E. (2009), Comparative Dissolution Kinetics of Biogenic and Chemogenic Uraninite under Oxidizing Conditions in the Presence of Carbonate, *Geochem. Cosmo. Acta.*, Vol. 73, pp. 6065-6083
- 吉田文和・深見正仁・藤井賢彦(2011)、持続可能な低炭素社会 III、北大出版会