

環境鉱山に関する提言

小出 仁¹⁾

1. 環境鉱山について

著者は、最近、環境鉱山という考え方を提案し、本誌上でもその考え方を簡単に述べた(小出, 1993)。その際、環境鉱山の一例として紹介したCO₂地中貯留において、大きな進展があった。特に、環境問題への関心の高いノルウェーで、1996年からCO₂地中貯留が実施されることになった(Korbøl, 1994)。これは環境鉱山の実現ともいえる。そこで、環境鉱山の考え方をあらためて紹介したい。

つい最近まで、人類は地球を無限に広いものと思っていた。特に、海は広大で、海水の総量は膨大なもので、何でも“水に流して”しまえば解決すると考えていた。しかし、人口増加と産業の発達や生活の高度化により、地球も狭く感じられるようになってきている。人々の環境意識が高まり、“水に流す”のも許されない状況になってきている。人類は地球という閉空間の中に住んでいることを意識しなければならなくなってきている。

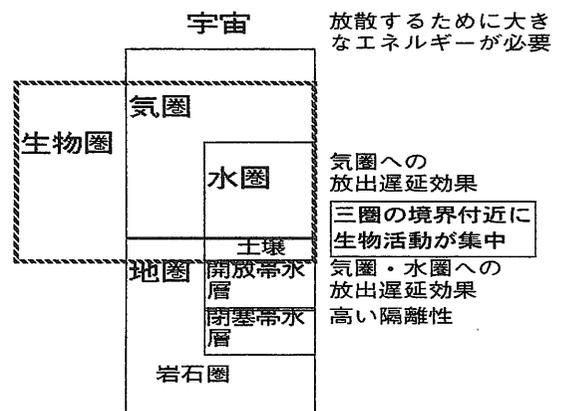
閉空間の性格は、自身の住む家やオフィスの小部屋について考えれば、すぐに理解できる。人間が小部屋の中で生きていくためには、様々な物を小部屋の中に運び込まなければならぬのはもちろんであるが、それと共に不要になった物を運び出さなければ、小部屋はたちまち一杯になって住めなくなる。すなわち、限られた閉じた空間の中で人間が生きていくためには、必要な資源を空間の中に運び込むと共に、不要になった物、つまり廃棄物を空間の外に出さなければならない。人間の体自体も同様のことをしていることは、誰でもよく知っている。しかし、地球を対象にすると、空間が有限であることを切実に感じる事が出来なかった。

地球は有限であるが、しかも人間は地球の空間の

ごく一部しか利用できない。生物が住めるのは地圏のごく表層と大気圏の下部及び水圏だけであり、しかも、それら三圏の境界付近に生物活動の大部分が集中する(第1図)。人間の生活圏はさらに狭く、特に産業活動は海岸や河岸、つまり地圏・水圏・気圏の三圏境界付近に集中する傾向がある。人間だけでなく生物の活動は三圏境界付近がもっとも活発である。ところが、環境破壊のもっとも激しいのもこの三圏の境界付近である。

地下資源の採掘とは、資源を地圏の内部から人間の生活圏に運び込むことである。産業革命以前は、その量は微々たる物であり、未開拓のフロンティアも残っていたので、問題にならなかった。しかし、現代では掘り出した資源の行く末に注意を払わなければならないようになってきている。

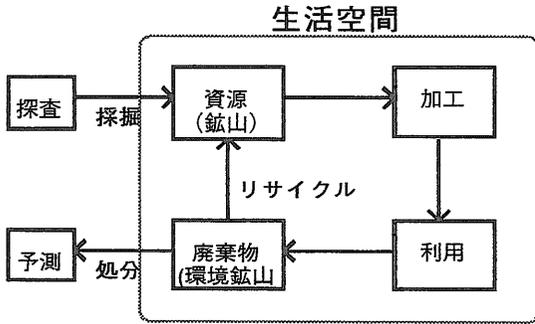
人間の生活圏の中で、滞留し、循環している物質も相当量にのぼる。資源の節約のためにも、再利用可能な物質は回収して再利用する必要がある。しかし、リサイクルにも限界がある。回収にあまりにも多くのエネルギーや労力を要するために、かえってリサイクルが資源の浪費になる場合もある。



第1図 廃棄物貯留の場の問題。

1) 地質調査所 環境地質部

キーワード: 地球環境, 鉱山, CO₂, 廃棄物, 地中処分, 貯留



第2図 環境鉱山の概念.

我々は今後、有限な地球に住んでいるという制約の下に、物質が生活空間に運び込まれ、利用され、滞留・循環し、最終的に生活空間外に出されるまでを総合的に管理して行く必要がある。そのため、環境鉱山という概念を提唱している(第2図)。

環境鉱山とは、

- (1) 資源と環境は切り放せない関係にあるので、一体で考える必要がある。資源の採掘は生活空間に新しいものを加えることなので、掘り出すのと同時に後始末も考えておく必要がある。
- (2) 廃棄物の山もリサイクルの観点からは一つの鉱山とみなすことができる。しかし、リサイクルの限界も知る必要がある。
- (3) 鉱山(資源の採掘)で培った技術・設備を環境問題—後始末に応用する。
- (4) 資源を探すためには過去の地質現象を知る必要がある。廃棄物の処分では未来の地質環境の変化を予測しなければならない。地球の変化を過去から未来まで統一的に研究する新しい学問体系が必要である。

2. 廃棄物貯留の場の問題

廃棄物の量はできる限り減らす必要があるが、完全にゼロにはできない。「廃棄物増加の法則」が、多くの場合に成り立っていることに注意したい。もちろん、厳密な意味での法則ではないが、「エントロピー増加の法則」のアナロジーと考えると判りやすい。すなわち、人間が手を加えれば加えるほど総体としては廃棄物が増加する、あるいは、増加しがちであるということである。例えば、ある物を完全にリサイクルして、一見すれば廃棄物をゼロにする

第1表 日本人1人あたり1年間に処分する必要のある廃棄物量

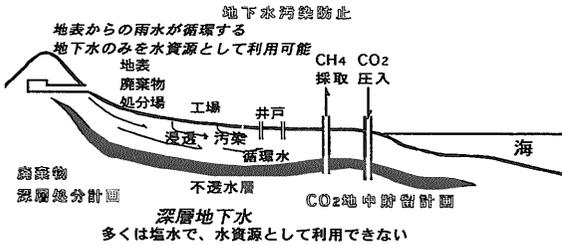
CO ₂	約9500 kg (容積約5000 m ³)
産業廃棄物	最終処分 約700 kg (再生利用約1200 kg, 総排出量約4トン)
一般廃棄物	約400 kg
低レベル放射性廃棄物	約0.085 kg
高レベル放射性廃棄物	約0.003 kg

ことができたように見えていても、そのためにエネルギーを大量に使えばエネルギー源の方で廃棄物が大量に増えてしまう。何か仕事をすれば、少なくとも人間の労力かエネルギーを使う。別の新しい種類の廃棄物を生むこともある。総合的な視野のもとで廃棄物問題は評価する必要がある。ただし、無害な廃棄物は増加しても、有害な廃棄物の量を減らすことができれば、意義がある。廃棄物を減らす努力は必要だが、その効果は注意深く吟味する必要がある。

第1表に、日本人1人当たりに出す廃棄物のおおよその量を示す。一般廃棄物より産業廃棄物の方が量が多いことが判る。しかし、産業廃棄物の方がリサイクルされている量も多い。第1表を見ると、特にCO₂の排出量が膨大なことも判る。CO₂は主にエネルギー源となっている化石燃料の燃焼によって排出される。CO₂は毒性が低く、地球温暖化の主因として糾弾されているのもひとえに排出量が多いためである。

量が大いことは、それだけでも問題の解決を困難にする。CO₂を最大限に利用するとしても、排出量と比べれば僅かである。また、リサイクルではエネルギー源にならないことは、熱力学の基本法則からも明らかである。膨大な量のCO₂を収容する場所をどこかに見いださなければならないというきわめて単純な問題をどうしても解決する必要がある。

原子力は、現在既に化石燃料に次ぐ重要なエネルギー源になっているが、廃棄物の量はごく少ないことが、第1表からも読みとれる。廃棄物の排出量が少ないことは、原子力の長所である。しかし、その代わりに数万年もの長期にわたって有害な高レベル放射性廃棄物(HLW)が残る。化石燃料と原子力以外の代替エネルギーは、当分コストの面から量的に多くを望めそうにない。



第3図 廃棄物深層処分と地下水.

現在の高度産業社会は、エネルギーによって支えられている。そのエネルギーから生み出されるCO₂と高レベル放射性廃棄物は、それぞれ量および質(長期有害性)の面での廃棄物の横綱格であるが、それらの処分法は共にまだ解決されていない。これらの廃棄物対策の解決なくして、人類文明の明日はないといっても過言ではない。

有害な廃棄物あるいはあまり有害ではなくても大量の廃棄物を生活空間の中に置いておくことは避けるべきであろう。人間や生物活動の中心は気圏・水圏・地圏の三圏境界付近にあるので、有害な廃棄物は三圏の境界から出来る限り遠ざける方が良いと思われる。しかし、廃棄物はとかく三圏境界つまりウォーターフロント近くに捨てられることが多い。無害な廃棄物とはかく、有害な廃棄物は三圏境界付近に捨てられてはならない。

それでは、有害な廃棄物はどうすればよいか？無害化が可能であれば、無害化するべきであろう。しかし、実際は、理論的には無害化できる場合でも、実用的には無理というケースが多い。高レベル放射性廃棄物はその例である。生活空間の内部で保管するのも、保管の確実性を考慮すれば、空間の利用効率を無視しても、決して好ましい策ではない。管理していても絶対に安全とはいえないだけでなく、万一の場合には、生活空間にあるだけに、影響も直接的になる恐れがある。安全性を科学的に比較評価すれば、生活空間内での保管と生活空間から遠くへ処分するのを比較評価すれば、生活空間外への処分の方がはるかに安全性が高いであろうことは明らかである。

生活空間からもっとも遠いのは宇宙である。しかし、宇宙への廃棄物処分が可能になる見込みはない。第1図を見れば、有害な廃棄物を処分できる可能性のあるのは地下深部だけであることが判る。

3. 廃棄物深層処分

有害な廃棄物を地下深部に処分する方法については、高レベル放射性廃棄物の地層処分がもっともよく研究されている。高レベル放射性廃棄物の地層処分については多くの紹介があるので(小出, 1992)ここで詳しく述べないが、地下数百メートル程度の深度に坑道を掘って、放射性廃棄物を埋め戻す方法であるから、環境鉱山の代表例といえる。

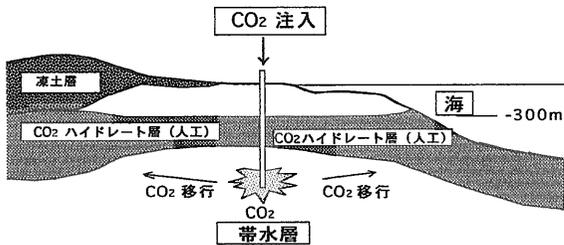
放射性廃棄物地層処分では、地下水による放射性物質の漏出についてももっとも注意が払われ、詳細な研究がなされている。また、地質環境の長期的な変化の予測が試みられている(小出, 1992)。

地下には、多少の地下水はどこでも存在していると考えべきである。しかし、地下深部の地下水は地表とは隔離され、移動はあってもきわめて遅い。地表とは隔離された地下水は、通常塩濃度が高く、水資源として利用されない。飲料水や農業用水として利用されるのは、常に地表からの天水が侵入し、循環して、淡水に保たれている開放帯水層の地下水である。したがって、水資源としての地下水を保全するためには、地表や浅所からの汚染を防ぐことが重要である。したがって、廃棄物は地表や浅所に置くより、水資源として利用される帯水層より深部の隔離された岩体中に処分するのが、地下水保全にもっとも良いといえる(第3図)。

4. CO₂ 地中貯留

CO₂を地下に貯蔵ないし処分するという考えは、古くから存在したが、容量やコスト等の問題で実用性がないと思われていたためほとんど検討されなかった。従来、地球温暖化対策として主に検討されたのは海洋処分であった。しかし、EOR(原油増進回収法)の一種として、CO₂を原油貯留層に圧入し、かわりに原油を回収する方法は(Tanaka et al., 1992)、米国では既に一部で実用的に使用されており、日本でも実験が行われている。

EORは、一石二鳥の方法であるが、原油回収に重点があり、CO₂貯留量は多くない。エンジニアリング振興協会では、世界のEORによるCO₂圧入可能量約600億トンと、従来考えられていたより多いことを示したが、それでも世界のCO₂排出量



第4図 CO₂ ハイドレート形成による地下自己封入 (Koide et al., 1994).

は約200億トン以上であるので、3年分にしかならない(Tanaka, et al., 1992)。

海洋処分も研究は進んだが、海洋生物への若干の影響は避けられないところから、早急な実用化は困難であることがますます明らかになってきた。

CO₂ 地中貯留は、CO₂ 貯留を主眼とする点で EOR と区別される。貯留を主眼にすると対象範囲が広がり、貯留可能性が格段に増加することが明らかになった(小出, 1993)。

CO₂ 地中貯留は油田や天然ガス田のように気体を逃がさないトラップ構造の下に貯留する場合、トラップ構造のない一般の帯水層に貯留する場合に大別される。一般の帯水層では地下水に溶解しうる量の CO₂ しか貯留できないが、利用しうる帯水層の広がりが多いので総貯留可能性は大きくなる(Tanaka et al., 1994)。また、地下深部の帯水層は明確なトラップ構造がない場合でも、岩石の透気性が低いので、CO₂ が逃げにくい。

凍土ができる状況に近いくらい低温な地域や、海底下の低温の堆積層中では、CO₂ ハイドレートが形成されるため、CO₂ がほとんど完全に帯水層中に閉じこめられるであろう(Koide et al., 1994)。したがって、低温の帯水層はほぼ完璧な CO₂ 貯留空間になる(第4図)。

CO₂ を地下深部の帯水層に圧入するのは、シンプルであり、生物圏から遠ざける効果的な手段である。CO₂ 地中貯留は天然ガス開発、EOR(原油増進回収法)は石油開発とのアナロジーから環境鉱山の例と考えることができる。

1994年10月に京都で開催された第2回 CO₂ 国際シンポジウムで、ノルウェーは1966年から北海ガス田で大規模な CO₂ 地中圧入を開始することを発表し注目を集めた(Korbøl, 1994)。ノルウェーは、

水力発電だけで国内需要をまかない、余った電力を輸出している。しかし、ノルウェーは重い CO₂ 税を3年半も実施しているが、税制だけでは2000年までに CO₂ 総排出量を1989年レベルに抑制するという目標の達成は困難であることが判明したという。そこで、天然ガス田からメタンと共に産出する CO₂ を分離して、北海の地下に再圧入する。

対象となる天然ガス田は、北海のスレイブナーガス田で、産出ガスに9.5%の CO₂ を含んでいる。ガス中の CO₂ 含有率が2.5%以下になるように、余分の CO₂ をアミン吸収法で分離回収する。CO₂ の回収量は年100万トンにもなるので、もし大気中に放出するとノルウェーの CO₂ 排出量を3%増加させることになる。そのため北海の地下800から1000メートルの深度の帯水層(砂岩)に圧入し、地中貯留する。

CO₂ を多く含む天然ガス鉱床は、アジアにも多い。東南アジア最大規模といわれるインドネシアのナツナ巨大天然ガス田は、日本にとっても将来の重要なエネルギー源になると期待されているが、CO₂ 含有率が71%(容積比)に達する(小出・飯島, 1993)。ナツナガス田は、本格稼働すれば年間約1,400万トンの LNG を生産できるが、そうすると CO₂ も年間約1億トンも一緒に出てくる。日本の年間排出量の1割近い CO₂ を、そのまま大気中に排出することはできないので、ナツナでも CO₂ 地中貯留が検討されている。CO₂ 地中貯留がナツナ天然ガス鉱床開発の実現の鍵になっている。

世界的にも、天然ガス開発が地下深部の鉱床にまで進むにつれ、CO₂ に富む天然ガスが多くなると予想される。天然ガスと共に産出する CO₂ を大気中に放出しては、地球温暖化の原因になる。したがって、天然ガス開発と CO₂ 地中還元をセットで進めなければならないケースが今後多くなるであろう。これらは環境鉱山の典型例といえる。

5. 国土深部基盤環境総合調査計画の提案

地下深部の地質調査は従来資源の探査開発を目的として行われてきた。そのため、資源の存在する可能性の大きな地域に限られ、しかも、資源探査に有用と考えられたデータしか採取されていないという問題がある。国内の鉱山事情から資源探査・開発の

ための地質調査は急速に減少すると予測される。今後は資源開発よりも空間利用や環境保全のために地下が使われる様になりつつある。また、地下深部のデータは建造物や都市の基盤として重要になり、地震などの防災のためにも欠かすことのできない基本資料である。

このため、環境保全・地下空間利用・防災のための地下深部基盤データの取得を目的とした地質環境の総合調査計画を提案する。従来、ボーリング等の地下地質調査が濃密に実施されているのは、石油・金属鉱床・地熱等の地下資源の存在が有望とされた地域である。在来型の地下資源があまり期待できないとされた地域ではほとんど調査がなされていない。

ところが日本では在来型の地下資源の探査・開発が行き詰まりを見せているのに対し、最近の大発見である菱刈や恐山の金鉱床はまったく新しいタイプで、従来あまり期待されていなかった場所で発見されている。恐山の金鉱床などは浅く、霊場として多くの人の目に触れる機会も多かったにも関わらず、従来知られていなかったタイプであったため、高品位の鉱床にも関わらず見逃されていた。天然ガスなども予想以上に地下に広範囲に存在していることが判りつつあり、技術の発達によっては貴重なエネルギー資源として利用できるようになる可能性もある。まったく新しいタイプの地下資源は、むしろ従来資源がないと思われていた地域でこそ発見の可能性が残されている。また、地下資源の可能性がないことが確認されれば、廃棄物処分場などの別の目的で利用できる。地球温暖化対策のためCO₂を地下圧入して、希薄なため従来経済的に開発できなかった天然ガスを代わりに回収するというアイデアも出されている(小出, 1993)。

日本列島は地下の調査が比較的に濃密になされている地域に入るのであろうが、調査の空白地域が要所を占めているため、総合的な地下のイメージを得難くしている。特に首都圏や関西圏などの都市域の地下深部の調査が少ないことは地震などの防災や環境保全のために障害となる。北上山地や六甲山地などの花崗岩分布域も調査の空白地帯である。

このため従来地下資源が期待できないとされていた地域で、系統的にボーリングをし、また衛星などを利用したりリモートセンシング・物理探査・地球化学探査・地下水調査で補完し、従来の資源調査データと併せて、日本の地下地質環境の三次元的総合データベースを構築することを提案したい。

この総合調査が直接目的とするのは、

- 1) 非在来型資源探査
- 2) 深部基盤環境調査
- 3) 地殻利用可能性調査
- 4) 地震予知・防災基盤データ調査
- 5) 深部地下水総合調査

であるが、本調査の遂行により、日本列島の地下の詳細なイメージが得られるとともに、日本の地球科学のレベルを大きく向上させ、世界をリードするような研究成果も期待できると思う。

文 献

- 小出 仁(1991): 地質調査所における高レベル放射性廃棄物地層処分研究の方向, 地質ニュース, no. 439, 6-18.
- 小出 仁(1992): 放射性廃棄物地層処分と地質長期未来予測, 地質ニュース, no. 449, 51-54.
- 小出 仁(1993): CO₂の地中貯留, 概要と可能性, 地質ニュース, no. 462, 6-12.
- 小出 仁・飯島正樹(1993): CO₂対策技術としての地中処理, 化学工学, 57, 614.
- Koide, H., Takahashi, M., Tsukamoto, H. and Shindo, Y. (1994): Self-trapping mechanisms of carbon dioxide in the aquifer disposal, Second International Conference on Carbon Dioxide Removal, Book of Abstracts, 50.
- Korbøl, R. (1994): Sleipner Vest CO₂ disposal: Injection of extracted CO₂ into the Utsira formation, Second International Conference on Carbon Dioxide Removal, Book of Abstracts, 51.
- Tanaka, S., Hakuta, T., Haino, H. and ENGINEERING ADVANCEMENT ASSOCIATION OF JAPAN (ENAA) (1992): Possible contribution of carbon dioxide flooding to global environmental issues, Energy Convers. Mgmt, 33, 587-593.
- Tanaka, S., Koide, H. and Sasagawa, A. (1994): Possibility of CO₂ underground sequestration in Japan, Second International Conference on Carbon Dioxide Removal, Book of Abstracts, 55.

KOIDE Hitoshi (1995): A proposal of environmental mines.

〈受付: 1995年1月10日〉