

社会工学入門 - 21 世紀の地下利用

北海道大学大学院工学研究科岩盤力学分野 石島 洋二

1. 人類の生存が怪しくなり始めた現代

我々日本人の快適な生活はエネルギーや資源の大量消費によって賄われている。全世界的に見ても人口の爆発的な増加を背景に、消費量は加速度的に増加している。エネルギーの主な拠り所である地下資源は有限であり、このままいけば、枯渇するのは目にみえている。今から4000年前に栄えたミノス島のクレタ文明やイースター島の巨像文明の衰退は、木材の消費による森林の消滅に起因しているとされている。このように、資源の枯渇による文明の衰退については既にいくつか前例がある。

エネルギーや資源の大量消費は、ゴミの大量発生を伴う。平成 14 年度に日本が輸入した石炭は約 1.5 億 ton、鉄鉱石は 13 億 ton である。この他、塩、魚などあらゆるものを世界中からかき集めている。これらを消費し後には相当量のごみが残る。石炭灰は火力発電所だけからでも 480 万 ton 排出し、炭酸ガスの総量は 12.4 億 ton に上る。気の遠くなるような量のごみが毎年、産み出されているわけで、日本はごみ大国といえる。

ゴミは、大気や地下水の汚染、地球温暖化、海面上昇、砂漠の拡大、オゾン層の破壊などさまざまな負の効果をもたらしている。都市ゴミの中には各種の重金属などが微量ではあるが存在し、焼却過程で濃縮される。したがって焼却灰を埋め立てれば、重金属汚染の危険が生じる。極めて厄介なゴミの一つに原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物がある。この毒性は数千年というオーダで持続する。これらのごみを我々人類や動植物が生存する地表や水圏、大気圏などに捨てるのが危険なことは明らかである。

エネルギーと資源の大量消費は、人類の生存すら危うくする状況を生み出している。われわれ人類は、現状に任せて種の終焉に至るのか、あるいは問題を何らかの方法で解決して生き永らえるのかという重大な岐路に立っている。もし解決策が見出せるならば、そのための技術は人類の技術的な進展における第4の milestone となるであろう。

2. 問題解決の場としての地下 - 地下空間の性能

2.1 概説

地下空間は地表に比べて膨大な拡がりを持ち、かつ「手つかず」の状態であり、今後の開発が待たれるフロンティア領域である。この空間は以下に述べるように多くの特徴があり、慎重に計画を立てるならば、上記の問題を解決し得る場となる。もちろん「臭いものにフタ」式に、地下に穴を掘ってそこにゴミを埋めるならば、かけがえのない地球を根本的に汚してしまうことになってしまう。これにつ

いては既に苦い教訓がいくつかある。わが国ではかつて通洞式という安上がりの方で硫黄を採掘した。現在、採掘跡に雨水が流入し、鉱石に触れて汚染された水が河川に流出しており、この対策に毎年多大の経費を要している。一度、環境を壊すと、そのつけを将来に亘って払い続けなければならないことをこの事例は示している。

2.2 地下の状態 - 地圧・地温・化学的環境・微生物・地震

地圧

地下岩盤には水圧と同様に地圧と呼ばれる圧力(応力)が分布している。水は強度がないので、水中に隙間を作ることはできない。地下を構成する岩盤は強度があるので、空洞を作ると、回りの岩盤が地圧を支え、空洞の空間は長期間維持される。

地圧は一般に深さとともに増加する。このために、深部になると、空洞周囲の岩盤には巨大な圧力が生じる。この圧力が岩石の強度を超えると岩石は破壊し、空洞は維持できなくなる。したがって、ある限界を超えた深度では、破壊が起きるために空洞を作ることは不可能になる。

地温

地下の温度(地温)は、季節によらず一定しており、深くなるにつれて確実に増加する。100m 下がると3~5 上昇するので、地下2000mでは60~100 の温度状態になる。地温は地圧と併せて人類が地下深部に進出する妨げの主要因になっている。

ヒートポンプによって地温を冷暖房に利用する技術は、実用の域に達している。

温度一定の条件は、焼酎・ワイン・日本酒・チーズなどの熟成に適しているので、これらの空洞内貯蔵は昔から行われている。

地下を通して流れる水の温度も一定に保たれている。これも各種の利用が考えられる(例:ワサビ栽培)。

化学的環境・微生物

地表に住む生物は生命の維持に大気圏に含まれる酸素を利用している。地中の多くの微生物も同じである。このために、地下は酸欠状態に、岩盤の隙間の水は還元状態になっている。このために地下では金属が錆びない(例:銅鐸)。

原始地球では大気に酸素がなかった(酸素はシアノバクテリアが作ったとされている)。地下岩盤の隙間は原始地球の環境に似ており、原始地球に生息した微生物がいるとされている。最近の研究で、地表下 5km までは(海底においても)、嫌気性の微生物が岩盤の隙間などに地表と同程度の密度で生息していることが明らかになっている。これらの微生物の中には、高温に耐えて、バイオマスからメタンガスを作り、あるいは、油をよく分解する働きのある有用なもの、あるいはその逆のものなど、多くの機能を持ったものが存在すると考えられる。

地震

地震は岩盤(あるいは岩盤に入っている割れ目、つまり断層)の破壊現象であり、もちろん、地下深部で発生する。地下は地震の発生源に近いので地表よりも揺れるだろうと思うであろうが、実際はその逆で、揺れは地表の数分の1である。このことは阪神大震災のとき地下鉄や地下街の被害

が少なかったことから理解できよう。

2.3 地下水・天然ガス・地質構造

地下水

地下水は地表に近く空隙の大きい岩盤に貯留されている。日本の場合には、年代が最も若く隙間の多い四紀層がこの役目をしている。地下水はゆっくりではあるが流動しているので、どこかが汚染されると、拡散する。地表近くの地下水は汚染しないように大事に守る必要がある。

地下水が貯留されている岩盤の下部には、しばしば水を通しにくい隙間のほとんどない地層(例えば、泥が固まった泥岩など。これらは不透水層と呼ばれる)がある。このような地質構造の場合には、それより下部には水がないか、あっても極めて少なく、しかも地表とは切り離された状態になっている(化石水という)。

天然ガス

上部を厚い泥岩層が覆っている空隙の多い岩盤中には、しばしば石油・天然ガスが貯留されている。これは泥に含まれていた微生物や植物の死骸から出た油分が上に行けなくて、下部の岩盤内空隙に溜まるためである。現在、苫小牧や新潟県で上記のタイプの天然ガスの発見が相次いでいる。苫小牧のガスは札幌に都市ガスとして供給されている。

天然ガスを胚胎する地質構造

泥岩は何万年もの期間、石油・ガスを封じ込める能力がある。岩盤には気体や液体を通しやすいものと、泥岩のように極めて通しにくいものがあり、それらがしばしば互層状態をなしている。場合によっては、通しにくい地層がフタのような地質構造(背斜構造)もある。

このような地質構造において、不透水層の下部に危険な廃棄物を入れたらどうなるだろう。石油やガスと同じように、数万年の間、動かずに同じ場所に留まるであろう。このために、人類にとって貴重な地表近くの地下水を汚染することがない。

2.4 岩盤の耐久性と隔離性

岩盤の耐久性

岩盤には強いものから弱いものまで様々あるが、強いもの(硬岩)は、強度・耐久性ともコンクリートよりはるかに優る。硬岩中に設けた空洞はあらゆる方向から地圧という圧力を受け、いわば、天然の pre-stress 構造になっている。

この特性を利用すれば、地下に巨大な圧力容器を安価に作ることができる。このタンクは石油やガスを安全かつ大量に溜める目的に利用することができる。ただし、岩盤はひびが多いので、このひびからガスが漏れる対策を講じなければならない。原油を貯蔵する場合には、貯蔵空洞の回りに地下水を引き込み水圧で石油を空洞内に封じ込める方法を用いることができる(水封式という)。

岩盤の遮蔽・隔離性

岩盤の遮蔽性は宇宙線に対しても発揮され、地球に降り注ぐ宇宙線の大部分は地下深部には届かない。これを利用して原子を構成する素粒子である陽子の寿命を測る研究施設が地下深部

に建設されている。隔離性は古来より墳墓の建設に利用されてきた。現在は危険な廃棄物の処理に利用されようとしている。

3. 都市における地下利用

人口密度の高い都市にあっては、全てを地表に置くことはできない。住民は、快適さの追求には賛成するが、その産物であるゴミの後始末を身近でするのは反対である。道路や墓地の建設反対、ゴミ処理工場やゴミ処分場反対といったニュースが連日賑わいをみせている。都市の美観と環境を保護しつつ住民のエゴを解決する唯一の方法は、地下空間を有効に利用することである。

東京の環状道路における未工事部分の問題については、残りの道路を地下にもってくれば解決するであろう。扇大臣も地下にしたらという提案をしている。住民の嫌うゴミ処理工場、下水処理工場の地下移行は今後一層進むであろう。神田川では洪水調整池を地下に設置した(巨大なトンネルを建設した)。今後、この川では洪水で悩むことはないであろう。下水道に光ケーブルや電線を通し、総合的なライフラインを建設する作業が始まっている。

都市部における地下空間の開発を合理的かつ迅速に進めるために、これを可能にする法的整備が平成 13 年になされた(従来は地主の権利は地球の中心まであったが 40m に制限された)。

4. 地球規模の環境問題とその解決 - 地球システム

気の遠くなるような大量のごみはどのように処分すべきか。ごみの量を極力減らすようなシステムの構築に努めるほかない。ごみの中で有害なごみは地表に捨てるわけにはいかない。長期に亘って人類がごみの毒性の悪影響を受けないようにするには、ごみを地下深部に隔離するしかない。この試みは始まっている。

炭酸ガスの地下貯留

炭酸ガスを石油・ガスの採掘跡(採掘後の地層はすかさずの状態になっている)に埋設することが検討されている。採掘跡の容量はかなり大きい上に、ある程度の圧力をかけても問題ないので(地圧と水圧が封じ込めてくれる)、相当量の炭酸ガスを埋設することが可能である。炭層に炭酸ガスを圧入する処分法には、押し出されてくるメタンガスを回収できるという楽しみがある。なお、採掘後の地層に炭酸ガスを注入した場合にも、十分に時間が経過した後は、微生物の作用で炭酸ガスが可燃性ガスに変るといわれている。

高レベル放射性廃棄物の地層処分

原子力発電所から出る高レベル放射性廃棄物は、自国の地下深部に埋設する地層処分が化学的・世代的にもっとも優れた方法であることが、現時点では世界的な合意事項になっている。わが国でも 2030 年頃から地層処分を実施する計画になっている。既にアメリカやフィンランドでは放射性廃棄物の地層処分が開始されている。

都市ごみの地下貯留

新しいタイプの都市ゴミの処分法が出現しようとしている。これは都市ゴミをスラリーにして、地下深部の空隙の多い地層に圧入しようというものである。圧入孔の周りに孔を設けておくと、やがてここから(微生物の分解によって生成された)メタンガスが出てくる。重金属を含む固形分(大部分は炭素)は、そのまま岩盤空隙を充填した形で半永久的に固定化される。

エネルギーや物質の大量消費に伴い、地球規模のサイクルが狂い始めようとしている。狂ってしまえば、人類を含めた多くの動植物の種が滅亡するであろう。現在はその一手手前に立っている。この問題解決に地下空間が重要な役目を果たし得ることを述べた。

我々に残された唯一の処女空間である地下空間の開発は慎重に進めるべきである。20年前にアメリカで地下深部に達するボーリング孔を掘削し、ここに高放射性廃液を投棄したところ地震が発生した。これは岩盤の破壊が起こったためである(岩盤に水圧を加えると強度が低下する)。

かけがえのない地球を住み易くするためには、エネルギー・資源の使用とゴミ処理を繋ぐサイクルのシステム化を地球規模で進める必要がある。上記の炭酸ガスや都市ゴミの地下深部への圧入は、穏やかで壮大なサイクルの具体例である。われわれ資源開発工学科では、地球システムという観点から、従来培った地下開発技術を発展させ、地下資源の採掘のみならず、地下空間の新たな利用に向けた研究開発を展開している。