

シリーズ 21世紀の新技术を展望する



21世紀の地下開発

— 日本における循環型社会に適応した地下開発の在り方 —

幌延地圏環境研究所 所長
北海道大学名誉教授 工学博士
石島 洋二

1. はじめに

人類が文明を持つに至ってから20世紀までは、地下開発といえば地下資源の採掘を意味していた。日本における地下資源の採掘活動は20世紀に入って急激に活発になり、そして21世紀になる前に大部分の活動を停止してしまった。世界的に見ると、地下資源の採掘活動は、日本の場合より緩慢であるという違いはあるが、同じ推移を辿るものと予想される。既に、石油の生産量は21世紀初頭にピークを迎え、現在は減産過程に入っているか、入る直前にあるとされている。今世紀末には、多くの地下資源の採掘量が相当程度に減少するであろう。我々の子孫は、いずれ地下資源のない状態を前提とした社会システムの構築に迫られることになる。21世紀はこの近未来と従来の過渡期にあると言える。この時期を乗り切り、後世により環境を渡すために、本世紀は様々な準備をすることが要求される。地下開発も同様であり、従来に加えて新しい内容を付け加える必要があると考えられる。本稿ではこれについて述べさせていただきたい。

2. 現在のエネルギー事情とその特殊性

日本が必要とするエネルギー源は、依然として大部分を石油、石炭、ウランなどの地下資源に依存している。昨年来、石油は高騰しているが、電力生産費用の上昇を押さえるために、石炭火力発電所はフル操業している。このことは石炭の輸入量が増加したことからもわかる。1970年代のオイルショックから学んだエネルギー源の分散化が功を奏したわけ

で、石油の高騰は経済活動に大きな悪影響をもたらさずに済んだ。

この対策は今しばらくは有効に機能するであろうが、2つの問題を孕んでいる。

第一はエネルギー源のコストの上昇である。わが国では、当面、エネルギー源として、石炭とウランへの依存度が増すことになる。これは日本だけでなく世界に共通する傾向である。既に、石炭の価格は上昇し続けている。ウランの価格はまだそれほどでもないようであるが、フランスはウラン資源の買い占めに走っている。ウラン資源は数カ国に独占されており、いずれ値段も上昇するであろう。エネルギー源を完全に輸入に頼るのはリスクが大き過ぎる。僅かでも国内産のエネルギー資源を確保することは重要である。

一時は、日本を取り巻く海底に分布するメタンハイドレードに期待が寄せられた。しかし今や、メタンハイドレードを口にする専門家は皆無である。このことからわかるように、調査が進むにつれて資源としての有望性がないことが明らかになってきている。

それでは、国内資源はないのかといえば、そうではない。これについては後で紹介させて頂く。

第二は、主要なエネルギー源である石炭とウランは、いずれもエネルギーを取り出す過程で、やっかいなゴミの排出を伴うことである。石炭火力発電所や製鉄所などからは膨大な量のCO₂が排出され、原子力発電所からは長期に毒性が持続する高レベル放射性廃棄物が出る。CO₂については全くの垂れ流し

であり、既に、地球の温暖化をもたらし始めているといわれている。高レベル放射性廃棄物は長期間に亘って毒性を持つが、現在は、一時的に保管しているに過ぎない。これらが地球規模での環境悪化をもたらさないように、適切に処分する方法を確立し実行しなければならない。

石炭もウランも地下から取り出したもので、それらを燃すことによって生じた廃棄物は地下に戻るが自然であり、地表に捨てれば環境悪化をもたらす。地下には、地表から隔離されているために処分に適した空間があり掘りも十分に大きい。CO₂ や高レベル放射性廃棄物を地下深部に埋設・処分する方法をここでは地下処分と呼ぶことにする。地下処分は石炭やウランをエネルギー源とするいずれの国も実施しなければならない。それは人類がかって経験したことのない新しい地下開発である。

21 世紀においては、従来型の地下資源開発と新規の地下処分の 2 つが同じ重要性を持って実施されることになる。

3. 採鉱と地下処分の関係

地下資源開発では、既に存在している鉱床から有用な資源を安く効率よく取り出すことが重要で、その手段・技術として採鉱学が発達した。地下処分では、地下処分が長期に環境に悪影響を与えないことが最大の課題・目標になる。しかし、安全性に対する保障は、次に述べる理由によって工業製品のように

には簡単にはいかない。すなわち、地下を構成する岩盤は、亀裂など多くの欠陥と不均質性を持つ天然材料であるので、材料としての評価が難しい。さらに岩盤は地下水の流れ場になっており、また、地震をはじめとして様々な自然現象を受けるが、これらの擾乱を長期に受けるときの挙動を正確に予測する手法はまだ開発されていない。

上述のように、採鉱と地下処分では目的が全く異なるが、図-1 に示すように、地下を対象とするので共通点が多い。特に、地下処分後（図-1 B 2）と採掘終了後（図-1 A 2）とは同じ状態になる。地下処分では処分後に起こる諸現象とそれらによってもたらされる擾乱の予測が重要であるが、これについては、採鉱の経験から多くを学ぶことが可能である。

過去の鉱山開発はしばしば鉱害をもたらした。中でも、硫黄鉱山は例外なく鉱害をもたらし、現在もその償いを続けている。しかし坑内掘炭鉱は重大な鉱害をもたらしていない。このような過去の経験・事例の集積と解析は、以下に述べるように、地下処分の質を向上させる上で大いに寄与すると考えられる。

4. 高レベル放射性廃棄物の地層処分と炭鉱の経験

周知のようにわが国では、高レベル放射性廃棄物の処分場がどこになってもよいように、火成岩と堆積岩の両方について処分方法を研究することになっている。カナダやフィンランドのように良質の花崗

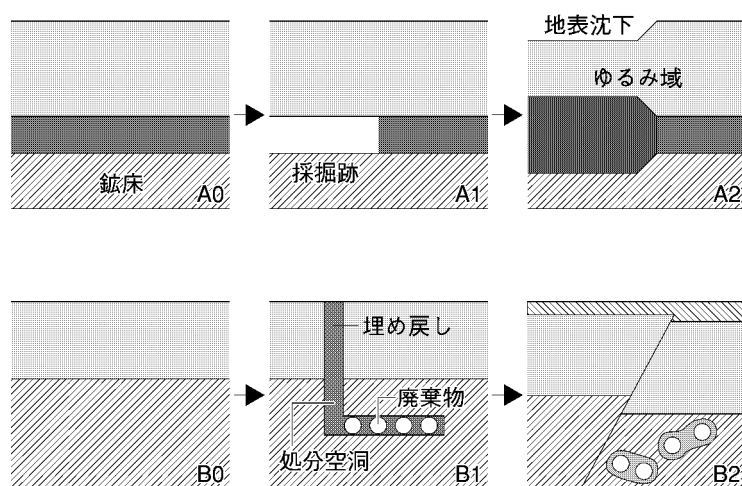


図-1 プロセスから見た採鉱 (A) と地下処分 (B)

岩のある国では、ここに処分場を建設することになっている。これらの国では、処分施設の設計は極めて簡明である。岩盤の長期強度が十分に大きいので、地表下 600 m に設けた空洞は、廃棄物に含まれる種々の核種の毒性が消えるまでの長期間、自立すると予測される(図-2 a)。したがって、処分後、処分空洞の入り口にベントナイト製プラグを打設し、地表に至る全空洞を埋め戻すだけで、長期間に亘る完全な遮蔽を保障することができる。一方、日本の花崗岩は楯状地を構成するものに比べて、不均一で亀裂の頻度が密であり、透水係数が大きく強度が小さい。また、割れ目は一度できると長期に亘って塞がらない。こういった諸条件を考慮すると、設計は困難さを伴うであろう。

堆積岩は火成岩に比べて一般に強度が低い。幌延の珪質岩の場合、長期強度が小さいために、地表下 500 m に設けた素掘空洞は自立せず、瞬時につぶれるという予想が得られる(図-2 b)。しかし、長期に亘って隔離を保証するという観点からいうと、空洞が自立するか否かは遮蔽性能に大きく影響しない。

日本では、地下処分の観点から、堆積岩が火成岩に比べて有利な点がある。それは、処分場を埋め戻して閉鎖した後に起こる諸現象を予測する上で、類似の事象があることで(図-1 参照)、予測の信頼性を増す上で大きく寄与する。炭鉱やガス田を中心に、地表下の堆積岩中に空洞を掘削した事例が多数ある。採掘空間の地表下深度が 1,000 m を超えた炭鉱が北海道には複数存在していた。金属鉱山でも深部化したものはあるが、多くは鉱床が山中にあるので、

地表の水準から測ると深部とは言えない。

釧路コールマインは現存する唯一の坑内掘炭鉱である。海底下を採掘して 60 年経過する間に、相当に広い範囲が採掘された。この間、海底は沈下を起し、海底部には恐らく開口亀裂も発生したと推測される。また、釧路は地震の頻発地域である。大地震の後では、坑内からの総排水量がある期間、変化するので、地震によって採掘空間の周囲が影響を受けることは間違いない。これらの事象の存在にもかかわらず、海水が坑内に浸入した形跡は皆無である。

泥岩などに生じた開口亀裂は、速やかに塞がることを我々は多くの事例で知っている。また炭鉱では、採掘空間・坑道を問わず、支保の効力がなくなると周囲の緩み域から供給される破碎岩塊で埋め尽くされるという現象が日常的に発生する(図-1 A 2)。破碎した岩塊は時間とともに次第に圧密され、長期の時間経過の後には硬い岩盤に変わるであろう。

釧路コールマインでは、現在、かつてルームアンドピラー法で採掘した跡をロングウォール法で採掘しており、切羽面に旧坑道が現れる。この坑道の調査で次のことが確認されつつある。すなわち、破碎岩は固結の過程にある。個々の岩塊の間に生じた隙間は次第に閉じる。つまり、亀裂は塞がる。

採掘跡に取り残された鋼柵を数万年後に取り出す機会があれば、鉄の化石を含む健硬な堆積岩として観察されることであろう。同様に、地層の変化が激しくないような堆積岩にガラス固化体を埋設した場合、周囲の岩盤は時間経過とともに安定化に向かうので、遮蔽性能は次第に向上するであろう。

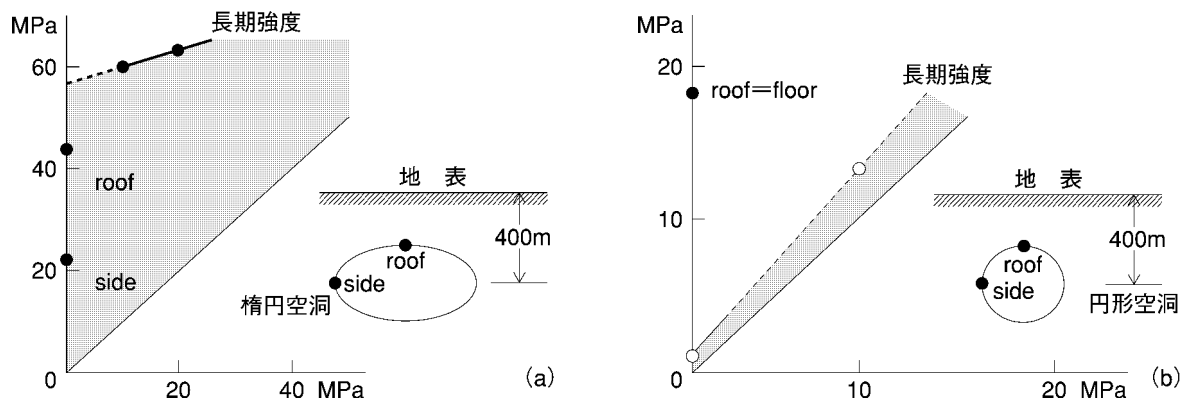


図-2 空洞の長期安定性。(a) は花崗岩中に設けた場合、(b) は堆積岩中に設けた場合。空洞周辺に生じる応力が長期強度を超えれば破壊するので、空洞は自立しない。空洞は (a) では自立し、(b) では自立しないことがわかる。

5. CO₂ の炭層内貯留と炭鉱で開発された技術

地下にあった気体が大気中に漏れる天然現象はしばしば発生する。火山噴火が起こる度に膨大な量のガスが大気中に放出される。また、炭層に含まれるガスは地層の遮蔽性能が十分でない所では大気中に逃げる。海底部に危うい状態で堆積しているメタンガスハイドレードからは、かなりの量のメタンガスが海水に溶け出していると推測される。このように気体が地下から漏出する現象は自然界では頻繁に起こっている。このことから次の2つを読み取ることができる。第一は、岩盤中に気体を長く留めておくことは難しいことである。油田やガス田の存在は例外もあることを示しているが、これらは地層の遮蔽性能が優れていたことが寄与している。第二は、漏洩した気体の量が許容値以下であれば、地球の浄化機能が作用し、環境に及ぼす影響が無視できる程度に小さくなることである。これは、CO₂ を地下処分した場合、漏れがあっても、流量が小さければ問題にならないことを意味する。上述のように、遮蔽性能に優れた地層はそれほど多くないが、ある程度の遮蔽性能を持った地層は数多く存在する。これらの地層でも処分可ということになれば、処分に適した地下領域が広がり、大量の処分が可能になる。

CO₂ が水に溶解する量と水圧は正の相関関係にあるので、深度に比例して CO₂ の処理量が増える。帯水層は CO₂ の処理に適しているが、さらに別の利点もある。地下微生物は、岩石の空隙を住処とするものより、地下水中に分布しているものの方が、体の寸法、密度、種類のいずれも圧倒的に大きい。CO₂ を唯一の炭素源として増殖する地下微生物の存在が確認されている。実験室では1週間程度で容積の1/6程度がこの微生物の遺骸や排泄物の沈殿物で占められた。このような微生物のいる地下に CO₂ を送り込めば、岩盤の空隙が沈殿物で塞がるので、多量の CO₂ を処分しつつ地層の遮蔽性能を向上させることが可能になる。CO₂ を原料として最終的にエネルギー源となる CH₄ を生産する微生物群も存在するようである。このような地層が国内で見つかれば、日本は CH₄ の産出国に変わる可能性がある。

炭層内にボーリングをすれば、周囲の炭層に含ま

れていたメタンガスがこの孔めがけて湧出する。メタンガスの生産量を上げるために、別の孔を掘削しここに CO₂ を圧入する方法がある。炭層中に圧入された CO₂ はメタンを追い出し、それまでにメタンが占めていた隙間に収まる。結果的に、メタンの生産と CO₂ の地下貯留が同時に実施される。この意味で炭層は地中貯留に適した地層であるが、透水・透気性が小さいので、帯水層に比べると処分量は小さい値に留まる。メタンの生産量と処分可能な CO₂ の量をできるだけ増加させる方法の開発が今後の課題として残されている。

このために、次の2つの技術は有効である。第一は、CH₄ の生産を向上させるために、生産井を炭層部分で曲げ先端部が炭層に沿うようにする作孔技術である。回収されるメタンガス量は炭層内の孔長に比例するので、これが長いほど生産性が向上する。第二は、CO₂ の注入井の着炭区間を拡大する技術である。CO₂ の注入流量は拡大部の表面積に比例するので、極力、大きくするのが望ましい。このとき拡大部を注入井と生産井を繋ぐ線上に沿って生産井の向きに長く伸びるような形状にすれば、CH₄ を効率的に生産井に向かわせるよう制御できるので理想的である。これら2つの技術は、かつて炭鉱で試行されているので、開発は容易であると考えられる。

6. 新しい地下資源の開発

北海道には石炭資源が相当にある。炭鉱で過去に掘削された石炭のほとんどは1,000 m よりも浅い範囲に留まっており、それより深部は未開発のまま残っている。北海道の陸上部の深度1,200~3,000 m の範囲に賦存している炭量は 7.5×10^{10} ton と見積もられている。この膨大な量の石炭は、採掘では採算に合わないが、可燃性の気体として取り出す方法ならば採算が取れる可能性が、炭層への CO₂ 貯留の研究をきっかけとして生じている。

深度が1,000 m 程度であれば、前節で述べた炭層に CO₂ を圧入してメタンガスを生産する方法は、技術的な磨きをかけることにより、採算の取れるものとなるであろう。

深部炭層の利用法として、炭層を現位置で燃焼さ

せ可燃性ガスを取り出す地下ガス化が再び注目されている。この方法はかつてロシアで盛んに試みがなされたが、現在、中国やアメリカ合衆国が取り上げ、プロジェクトが立ち上がっている。地下ガス化は、浅い炭層を対象とすれば、発生する有毒ガスが地下水を汚染したり、亀裂を伝って大気中へ漏洩する危険性がある。しかし、深部炭層を対象とすれば、このような問題は発生しない。地下ガス化にはもう一つの利点がある。地下ガス化をした後、炭層に接する上下盤には連結したひび割れが発達する。空隙率の大きくなった領域には、大量のCO₂を貯留する

ことが可能になる。

7. おわりに

地下処分は今世紀に実施されることになる新しい分野であるが、この地下開発には従来型の地下開発に属する採鉱の経験と技術が有用であることを述べた。ある産業で培われた技術は、周辺分野への応用が可能なものが多いであろう。高度の専門性を持った技術士各位が新しい分野を開拓しようとするときに、ここで述べた話がヒントにでもなれば望外の喜びである。

シリーズ 21 世紀の新技术を展望する 投稿募集

会誌「コンサルタンツ北海道」では、誌上において表題の特集をシリーズとして組んでいます。本号で3回目となりますが、現在までに10名近い方々の論文を掲載させて頂き、会員の皆様から好評を頂いております。

広報委員会ではこれに関連した投稿を広く会員の皆様からも受け付け、技術の交流を図りたいと考えております。

つきましては、本誌巻末に記載の原稿執筆要領をご参照の上、ご投稿頂けますようお願い申し上げます。

広報委員会

問い合わせ先 〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1

株式会社ドーコン内 北海道技術士センター事務局

TEL 011-892-3959 FAX 011-892-3969

広報委員会直通メール kouhou@ipej-hokkaido.jp