

アンダーグラウンド—隠れたフロンティア

小出 仁 (環境地質学)
Hitoshi KOIDE

1. 最古のフロンティアとしての地下

陸上のフロンティアが 極地や砂漠ぐらしか残されなくなった今日 宇宙と海洋の開発に人類の未来がかかっているといわれている。通信衛星・気象衛星・資源探査衛星そしてスペースシャトルと 宇宙開発も実用段階に入ってきた。しかし 宇宙へ人類が移住したり地球の外の資源を利用できるようになるにはまだかなりの年月を要する。島国日本にとって海洋開発は特に重要であるが 国際関係や漁業との関係 そして海洋汚染の懸念もあり 慎重な開発が望まれている。

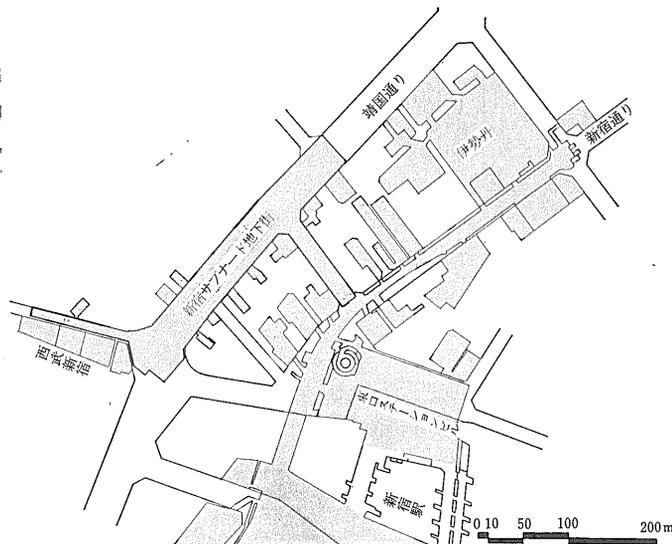
日本は人口が多いにもかかわらず国土が狭い。その上に山岳や急傾斜地が多いため 耕作地・住宅地・工業用地として利用できる面積はきわめて少なくなる。そのため 水面の埋立てや干拓 傾斜地の利用等によって利用しうる面積を増やしてきた。しかし それも利用しやすい場所はほとんど利用してしまっている状況であり 開発費用や防災・自然環境保護の面からの制約がますます大きくなっている。

都市では 高層化や交通の立体化によって 利用できる空間を拡大する努力がなされている。都市におけ

る空間利用の立体化は地下にも向かっている。地下鉄・地下商店街・地下駐車場をはじめ 通常 目にはふれないが 上下水道・電力線・ガス・通信回線等の地下施設が大都市の機能を支えている。地下商店街の中には東京の八重洲地下街のように延面積が 7万m² という巨大地下街もある。これらの地下街は地下鉄や地下駐車場や周囲のビルの地下ともからみ合って巨大地下都市を形成しつつある(第1図)。様々な施設が都市の地下を占拠しているのだから 新しい施設はしだいに深部に移らざるを得ない。国鉄総武・横須賀線の東京地下駅ホームは地下5階にあるし 営団地下鉄千代田線の国会議事堂前駅では 地表から約38mの深さにレールがある。今後 ますます地下深くに様々な施設が建設されることになるだろう。

このように見てくると 地下を隠れたフロンティアと呼ぶ意味が判っていただけだと思う。地下は見えないために宇宙や海洋ほど華やかにもてはやされていないが 現在でも実際には宇宙はもちろん海洋以上に身近に私達の生活に役立っているのであり また きわめて古くから利用されていた(竹内ら 1972)。北京原人の骨は中国周口店の鍾乳洞から発見されたのであり ラスコウやアルタミラの洞窟画をはじめとする様々の遺跡から 古代人類が地下洞窟を住居や倉庫あるいは神殿や墓として使っていたことがわかる。紀元前2160年ころのバビロニアで ユーフラテス川を横断する長さ900mの水底トンネルを掘ったと伝えられている。メソポタミアやペルシアでは 灌漑のためにガナートと呼ばれる導水トンネルが各地に掘られた。ギリシア・ローマにおいても 鉱山や水道のためにトンネルが掘られた。長大な導水トンネルの建設は 大水路橋と共にローマ人の最高の技術的偉業であり 約2000年後の今日でも使用されているトンネルがある(菊池 1983)。

石器時代には鋭利な石器を得るため 地下に坑道を掘ってフリントの採掘が行われていた(村上 1976)。文明の発達と鉱山技術の発達は密接に関連し かつその繁栄を支えた。アテネの繁栄はラウレリオン銀山によって支



第1図 新宿駅周辺における地下利用状況(地下1階) (渡部 1980)。

えられ、カルタゴやローマの発展にもイベリア半島の銀山の貢献が大きかったといわれる(村上 1976)。

鉱山 特に金山や銀山は、その生産が直接に国の財力をも富ませることになるので、競争で開発が進められた。日本の戦国時代でも、戦国大名達は競って鉱山開発を進め、採掘のためならたとえ城の下でも掘ることが許されていた。戦国大名の中でも鉱山開発に熱心だったといわれる甲州武田氏流の技術を受け継いだ大久保長安は金山開発によって徳川幕府創立期の財政基盤を造った。佐渡金山では、延長約900mの大水抜坑道である南沢疎水(1696年)が掘られている。このような地下坑道掘削技術は、金沢の辰巳用水や(約3km 1632年)箱根用水(約1.3km 1670年)のような用水路トンネルにも利用された。ヨーロッパでも採鉱冶金学について書かれたアグリコラの「デ・レ・メタリカ」は、近世初期の技術の集大成であった。産業革命においても蒸気機関は鉱山の排水のために発達し、改良されて高性能になってから一般に使用されるようになったものであり、鉄道もまた鉱山から発達したものであった。

人間の地下利用は、住居・貯蔵庫・墓から始まり、つづいて鉱山、さらに進んで用水路・交通路として利用されるようになったが、その起源はきわめて古く、歴史時代以前にさかのぼるといえる。特に、鉱山開発に伴って地下技術が進歩し、その技術が様々な方面に利用されていった。鉱山資源の開発や水利施設の成否は、一国の興亡にも関わる重大問題であったから、古くから激しい技術開発競争が行われてきたことは確かである。

地下墓地等は、元々人目から隠すために地下に造られる。鉱山や水利施設等も敵には知られないほうが安全である。したがって、地下施設は一般には秘密にされていることが多かった。また、知っていたとしても直接見ることが出来ない地下施設のことは忘れてることが多い。近代都市の住人も、足元の道路の下にどれだけの地下施設があるかを普段意識していないであろう。

地下施設と共に地下利用のための技術も秘密にされ、あるいは忘れられがちであった。まして、地下で厳しい技術開発競争が行われていることなど、一般の人々には想像もできないことであった。この事情は今でもあまり変わってはいない。地下深部に潜在する資源を探し、採取する技術は資源競争の行方を左右するものだが、日本ではほとんど注目されていない。

地下の秘密性は人々に悪い印象を与える一つの原因となっている。「地下に潜る」とか「アンダーグラウンド(underground)」または略して「アングラ」という言葉の持つ派生的な意味は明らかに地下の秘密性に基づくものである。迫害されていた時代の初期キリスト教徒

が地下を活用していたことは有名である。カタコンベは地中海周辺各地にあるキリスト教徒の地下墓地であるが、秘密の集会所としても使われていた。中部アナトリア地方のカップドキヤの無数の洞窟修道院は、初期キリスト教徒の聖地であったが、それらの中には網の目のようなトンネルで結ばれ、数万人を収容しえた地下都市も存在する(東方 1982)。仏教もまたインド・中国等に多くの洞窟寺院を残している。

日本人は特に地下に対して悪い印象を持っている傾向がある。日本は湿度が高く、地下水位が高いので、地下室は湿気に悩まされる。そのため欧米では、一般の住居に地下室があり、物置やプライベートな仕事場として利用されているが、日本では一般の住居に地下室はほとんどない。欧米人は地下室に愛着を持っている人が多いのに、逆に日本人は湿気の多い陰気な不健康な場所という印象しか持っていない。

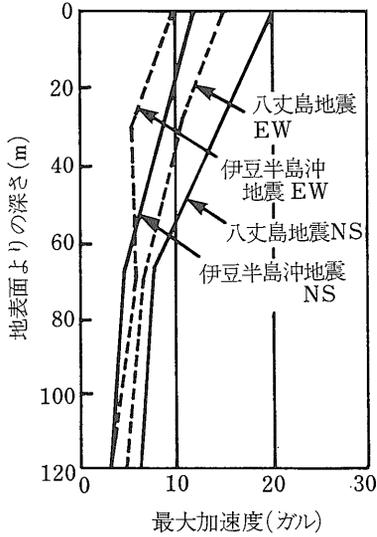
それにもかかわらず、前述のように世界的に見れば、日本は地下をよく利用している。国土が狭いためやむを得ず利用しているという面があるが、条件は悪くても利用可能であることを証明しているといえる。

2. 地下の安全性・耐震性

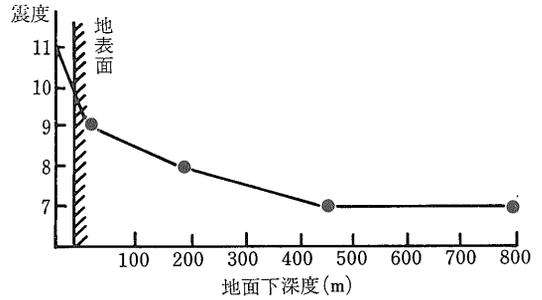
地下は危険であるという感覚はきわめて根強い。閉鎖空間に対する本能的な恐怖感の他に、戦後の一時期に続発した炭鉱等の事故も危険性を印象づけてしまったらしい。日本の石炭は比較的新しい地層中に存在するので、一般に岩盤が軟弱である上に、大戦中や大戦直後の無理な乱掘によって坑内が荒廃したことが、炭鉱事故多発の原因であった。また、石炭自体が可燃物なので、炭鉱の場合は火災や爆発の危険が潜在的に常にあるが、一般の地下では可燃物は人間が持ちこまないかぎり存在しない。火災時の危険は、高層ビルも共通の問題であるが、対策を十分に行うことによって回避できる。

人間が入る必要のある地下施設では、空気を補充する必要があるが、人間が入らなくてよい場合には、酸素をなくす事により、火災の危険を完全に絶つことができる。例えば、炭鉱でも、坑内作業の完全なロボット化ができれば、坑内空気中の酸素含有量を低くすることにより、坑内火災や爆発の危険をなくすことができる。石油やLNG等の地下備蓄の場合、地下の貯槽中には酸素がほとんどない状態にできるので、引火や爆発の危険はない。たとえ地表で大火災がおきたとしても、地下に貯えられた石油は安全である。したがって、石油やLNGの地下岩盤内貯蔵はきわめて安全な備蓄方法であるといえる。

地震の際に地下は危険であるという迷信も根強い。



第2図 川崎市での最大加速度振幅の深さ方向の分布 (久保 1981).



第3図 唐山炭鉱立坑沿いの深度による震度変化 (陝西省地震隊 1981).

気付かず 地表に出てきて大きな地震があったことを知って驚いたという話はかなりあるが 四国での観測結果はこれらの談話がある程度裏付けているといえよう。しかし 震源にごく近い地下ではどうであろうか？ この疑問にこたえるような例が中国にある。

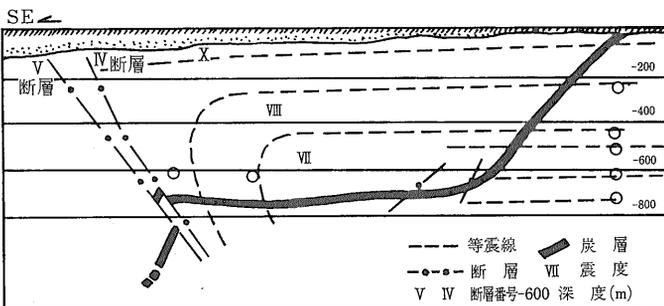
1976年唐山地震は世界史上第2位という大きな人的被害(死者24.2万人)を出した(史上最大被害は同じ中国の1556年華県大地震の死者83万人)。開らん炭田地帯の中心をなす炭鉱・工業都市唐山市の直下12kmを震源として マグニチュード7.8の大地震が発生したため 唐山市の人口106万人のうち死者14.8万人 重軽傷者44万人という壊滅的災害になった(高橋ら 1983)。ほぼ7人に1人が死亡し 負傷を加えると2人に1人が死傷したことになる。

唐山市の中央部を北北東—南南西に貫く地震断層が出現し 右横ずれ約1.5m 西側隆起約1mのくいちがいを生じた(松田 1979)。唐山炭鉱は 市の直下500~800mの深さにあり 坑内でV号断層と呼ばれていた断層が震源断層となったのである(陝西省地震隊 1981)。要するに 震源の直上というより 震源の一部であり 考えられる最悪の条件といってよいであろう。もちろん 坑内も相当の被害は免れられなかったが それにもかかわらず人的被害は地表の惨状から見ると考えられないくらい軽かった。

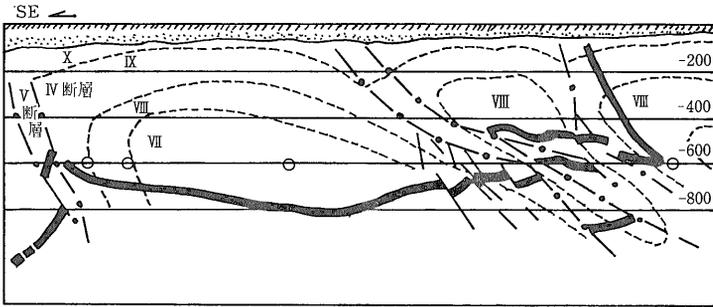
地震は地下で発生するのだから 地下の被害は大きいと考えがちであるが 実際は地下の方が振動は小さいのである。建設省土木研究所による川崎市の軟弱な堆積層中での測定では 地表から60m程度の深さまで急速に最大加速度が小さくなり 60m以深でも減衰率は小さくなるが 深さと共に振動が小さくなっている(第2図 久保 1981)。

昭和58年8月26日の大分県北部の地震(M 6.8 深さ110km)を 四国の花崗岩地帯で観測した結果では地表部では最大加速度37.5ガルであったが その88m直下での観測では最大9.06ガル 128m下では 最大6.64ガルであった。いかえれば 気象庁震度階で 地表部では震度4であったものが 130mの深さでは震度2相当でしかなかった。震度4は すわりの悪いものは倒れるくらいで かなり驚く程であるが 震度2では歩いている人や作業中の人は気が付かない。

鉱山の地下坑内で作業していた人々が地震にまったく



第4図 唐山1号鉱の震度分布断面図 (陝西省地震隊 1981).



第5図
唐山2号鉱の震度分布断面図
(陝西省地震隊 1981).

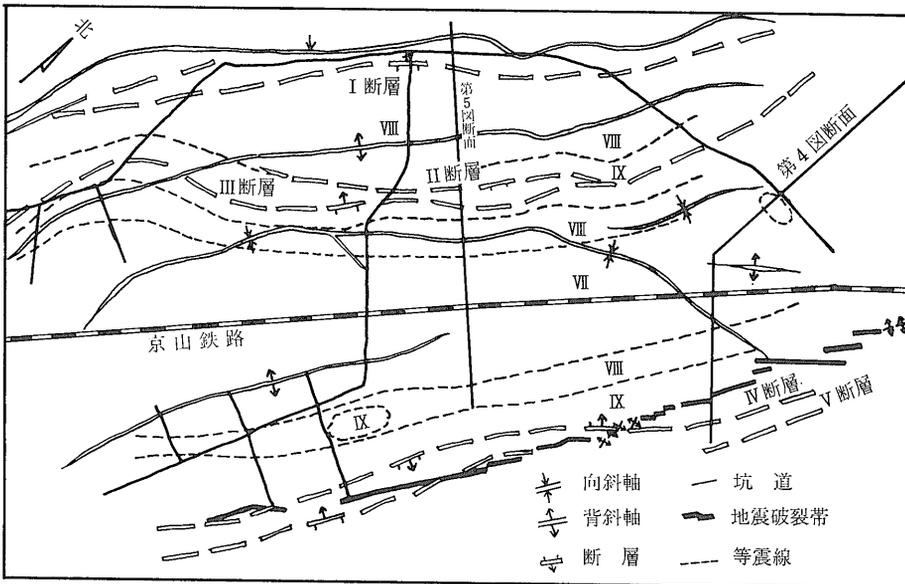
大地震7年後にやっと外国人記者団に公開された唐山市に入った日本からの特派員は「安全だった地下」と題して次のように報じている(1983年8月18日付朝日新聞・横堀特派員)。「唐山市には中国有数の開らん炭鉱(年産約2千万トン)がある。地下800余メートルの坑道でその夜1,100人の炭鉱労働者が働いていた。地震で地上の建物は全壊 それによって1,951人が死亡した。坑道内も電気が止まり エレベーターが動かなくなったが炭鉱労働者はジグザクに掘っている斜坑を伝って全員無事で地表に帰ってきた。地下は意外に安全—という教訓から 新たに建てられた公共建築には地下室が設けられ 薬品などの救急物質が蓄えられている。」

唐山炭鉱の坑道等の被害状況から 地下の震度分布が推定されている(陝西省地震隊 1981)。その結果によると唐山市地表で中国震度階で震度11 すなわち日本の気象庁震度階級で7相当の激震であったものが 地下500m以下では 中国震度階で震度7(気象庁震度4の中震に相当)になっている(第3図)。地下坑内の震度分布図(第

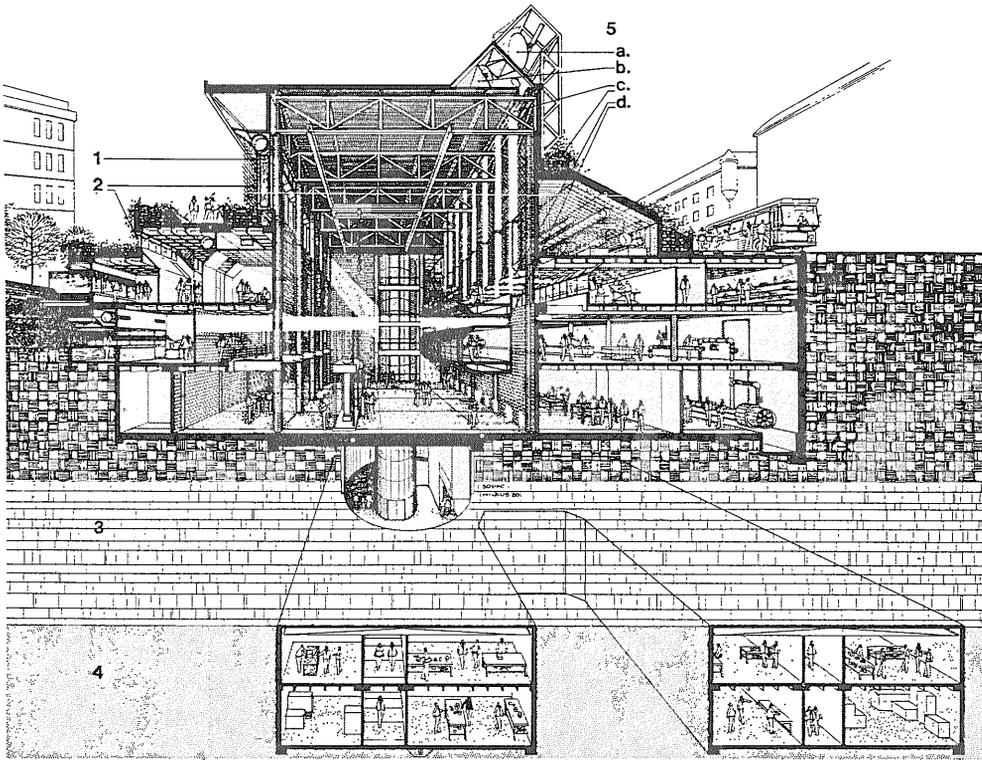
4図~第6図)を見ると 地下深部でも大きな断層の付近は中国震度階で震度9(気象庁震度5の烈震に相当)となり断層付近では震動が激しい。第4図 第5図 第6図のV断層は震源断層と考えられるので震動が激しいのは当然であるが それでも地表より震動はかなり小さい。また500m以深では断層から200~300mも離れると中震程度まで震度が低下するので耐震性に考慮が払われてさえいればほとんど被害は受けないであろう。

地表でも 大きな断層帯の直上部では被害が大きい傾向があるが 必ずしも明瞭ではない。地下では 全体に地震動は小さいものの 断層破砕帯と健全な岩盤部との差は きわめてはっきりしている。

日本でも トンネル等の地下施設が地震で被害を受けた例はあるが 地震動の直接の効果である慣性力による被害はごく軽微で 地下深部でトンネルの覆工に欠陥のない部分においては 震源の近傍でも覆工のわずかなキレットや剝落等の被害も生じていない区間もある(吉川



第6図
唐山炭鉱地下635m震度分布平面図
(陝西省地震隊 1981).



第7図
ミネソタ大学土
木・資源工学科
の地下教室
(BENNETT
1984)

1984). トンネル等の震害のほとんどは 地すべりなどの岩盤の変形や液状化によるもので これらは地表近くの軟質岩や風化岩・破碎岩中で発生したものである。他に まれではあるが 北伊豆地震の時の丹那トンネルや伊豆大島近海地震の時の稲取トンネルのように断層のずれによって破壊したものもあるが それもゆっくりしたずれによる変形で 慣性力による急激な破壊ではない。すなわち 地下の施設は 軟岩や風化岩あるいは断層破碎帯を除く堅硬な岩盤中であれば 地震による被害はほとんどない。地下で多少の被害があったとしても 慣性力の効果が小さいので 対策はたてやすいといえる。このように見えてくると 地震の危険の大きい地域こそ地下深部の岩盤中に施設を造る利点は大きいことがわかる。

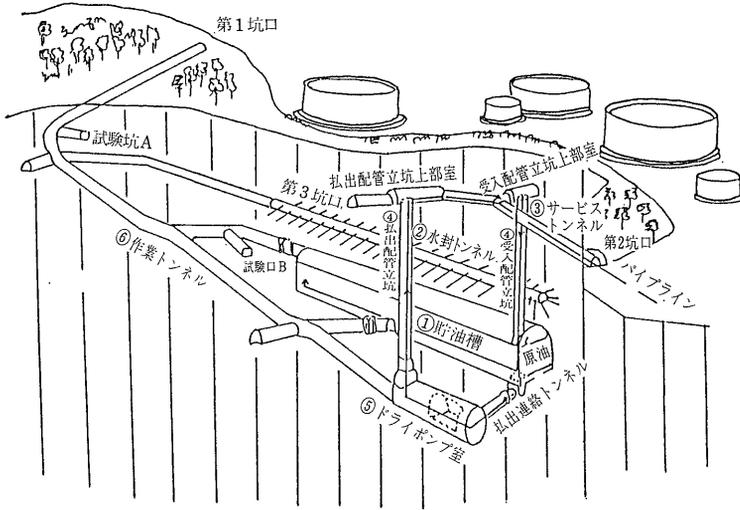
3. 最新のフロンティアとしての地下

地下空間利用の歴史は古いが ローマ時代の後は低調であった。しかし 産業革命は動力揚水ポンプや火薬の発達により鉱山の深部開発が可能となったことと密接に関連しているし 鉄道の発達はトンネル技術の発達を促した。アルプスを貫くシンプロン・トンネル(1906年完成)等がその代表であったが 現在では青函トンネルがトンネル技術の進歩を物語っている。科学技術の進歩は 戦争を契機としていることがしばしばあるが

地下利用技術も戦争あるいは戦争への恐れが動機となっている面があることは否定できない。戦前の日本軍は総計200万klの地下貯油槽を造っていたし 空爆を避けるため重要施設の地下移設計画を始めていた(水越 1981)。長野県松代の地下大本営は有名であるが 群馬県後閑には地下飛行機工場を建設するための地下空洞をほぼ完成していた。その空洞は今でも完全で農業等に若干利用されている(水越 1981)。核戦争の危険を忘れえない現代では核シェルターが各国で造られている。例えば永世中立国として知られるスイスでは 人口の80%以上を収容できる地下シェルターを持っている(東方 1982)。

戦時中に日本の造った地下壕はほとんど役に立つところまで行かなかったが 長崎市では原爆投下時にたまたま幹部達が地下壕内で会議中であつたため無事であつたので 広島の場合と異なり 救助体制に速やかに入れたといわれる(NHKTV 1984)。

唐山地震等の例から 地震災害を防ぐための防災シェルターも有効であることがわかる。省エネルギーと防災をかねた地下住宅も造られているが(東方 1982) 土地の有効利用と省エネルギーを兼ねて 学校の建物を地下に造るなどの工夫もされている(BENNETT 1984 第7図)。東京等では地震の際の避難広場の不足や狭さを補うため地下防災広場を造る必要がある。ただし 地表が大火災になった際の対策が必要であるが 地表の広場よりは対策は立てやすいであろう。



第8図
菊間実証プラント鳥瞰図
(星野 1983).

1970年に OECD (経済協力開発機構) は環境保全上の必要から各国政府に対し 地下利用推定政策の樹立 地下技術の開発 地下空間の計画的利用を図ることなどを勧告しているが 平和利用のために地下空間への関心が高まったのは なんとといっても1973年のオイル・ショック以後である。それは 地下資源そのものの重要性が再認識されたことと エネルギー・原材料・食料の備蓄の必要性が誰の目にも明らかになったためである。食料の地下貯蔵は石器時代から行われていたが 地下の恒温性は食料貯蔵に適している。日本では大谷石の採掘場跡の空洞にみかんの貯蔵が行われている。米などの穀類の地下備蓄も古くから行われている(鶴田 1983)。また 地下施設の省エネルギー性も重要な要素で 省エネルギー型地下住宅も考えられている。

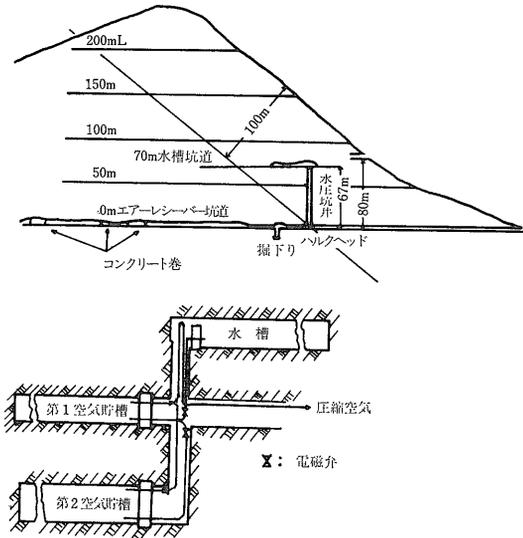
国際地質学連合 (IUGS) と国際測地学地球物理学連合 (IUGG) の新しい国際研究プログラムのための連合同作業委員会 (日本からは資源開発大学の西脇親雄が参加) は リソスフェア (岩石圏) を 1980年代のフロンティアとして位置付け 国際リソスフェア探査開発計画 (DELPP) を提唱した (IUGG & IUSG 作業委員会 1979)。1983年に 国連天然資源委員会でも地下空間利用の推進が決議されている。地下空間利用のための国際研究集會も数多く開かれているが 国内でも科学技術庁資源調査会によって地下空間の開発利用に関する調査が行われ 基礎資料集は既に出版されている (資源調査所 1984)。

石油は地下深部にボーリングを行って採取する。したがって 地下深部の石油を探すための探査技術と深部のボーリング技術が重要である。その技術の全貌は決して明らかにされないが 石油メジャー等は我々の想像を越えた高度の技術とノウハウを持っているであろう。

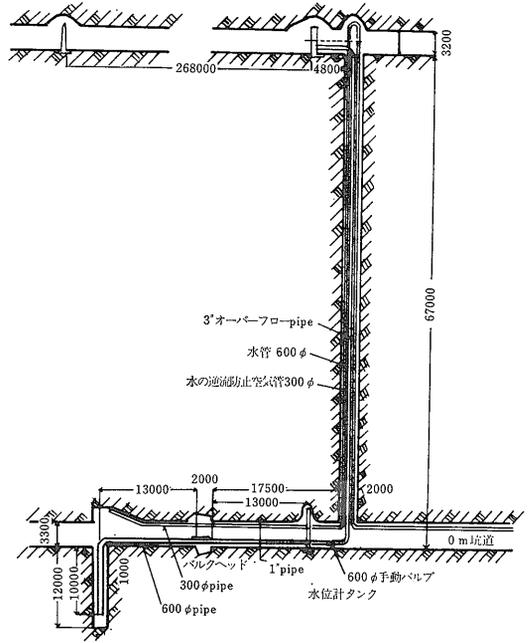
技術の差がはっきりわかるのはボーリング技術である。ボーリングは石油の採取のために必要だが 地下資源の探査や地下の状態の調査のために もっとも基礎的な技術である。ボーリングにも様々な種類や技術があるが 端的な指標になるのはボーリング掘削深度である (加藤・後藤 1976 1977)。石油ボーリングでは 1974年にアメリカで行われた 9,586m の深さのボーリングが最深である (池辺 1981)。しかし ソ連では 資源探査と学術研究及び掘削技術の開発を兼ねた深層ボーリングを各地で実施しており 目標は15,000mであるがもっとも進んだコラ半島地点では既に 12,000m に達している (朝日新聞 1984. 8. 3 夕刊)。日本でもっとも深いのは信濃川河口沖の海洋掘削で 深度5,315mである (池辺 1981)。

すなわち 大ざっぱに言えば ソ連や米国の約半分の深度であって いわゆる資源戦争といわれる国際競争でも大変不利な情勢であるといわざるをえない。米国でも 資源探査 地熱開発および地震予知と関連した学術用深層ボーリング計画がある (上田 1979)。日本でも一部の科学者の間で学術用深層ボーリングの計画が熱心に論議されている (新妻 1981)。もし実現すれば 純学術的な研究のみでなく 地殻開発においても画期的な前進をもたらすであろうが 現状では実現はかなり先になりそうである。

このように地下は最古のフロンティアであると同時に最新のフロンティアである。地下のフロンティアは宇宙ほど華やかではないが 資源開発や利用可能空間の拡大に直接役立つだけに その開発競争は重大な意義がある。



第9図 神岡鉱山における圧気貯蔵のためのエアレシバ坑道(長野 1958).



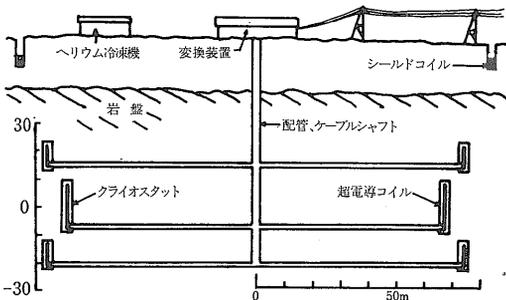
4. 地下エネルギー基地

オイル・ショックのような非常事態に対しては、備蓄がどうしても必要である。石油を地下の岩盤内の空洞に備蓄する方法は地震や火災への安全性や環境への影響を少なくするために大変優れている。そこで通産省では石油公団に委託し、愛媛県菊間町に石油備蓄実証プラントを建設し、その有効性の確認のための研究を行っている。花崗岩からなる丘陵地の地下(海面下42~62m)に幅15m高さ20m長さ112mの空洞を1981年に掘削し(第8図)25,000klの原油を実際に貯めて多種多様な観測を行っているもので世界にも類を見ない本格的な現場実証実験である。一般に岩盤条件の悪いとされる日本でも地下石油備蓄の有効性・安全性は十分に実証された(星野 1983 1984)。

石油や天然ガスを直接地下に備蓄するだけでなく、他

の形態のエネルギーとして地下に備蓄することもできる(資源調査所 1981)。三井金属鉱業の神岡鉱山では1957年から既に圧縮空気の地下貯蔵を行っている(長野 1958)。地表から100m以上の深さの片麻岩に幅2~10m高さ2~5m延長665mの空洞を造り7kg/cm²の圧力の空気を約8,000m³貯える(第9図)。電力需要が少ない夜間に圧縮機を運転して圧縮空気を地下空洞内に貯留し、日中にそれを放出して坑内で使うさく岩機・試錐機・ローダー等を運転する。しかし実際に圧縮空気を地下空洞内に貯えてみると相当の空気漏洩があることがわかった。そこで漏洩の原因と見られる割れ目にセメント・ミルクによるグラウチングを行ったがそれでもまだ漏洩するため消石灰を溶かした水を空洞内に入れ、その後空気を送り込んだところ微小な割れ目まで塞がれ、ほぼ完全に漏洩を止めることに成功した。この工事は通産省の補助により行われ、日本鉱業会の賞を得ている。高压空気貯蔵は気密性さえ保つことができ、条件さえあれば経済性も十分にあり、西ドイツや米国などで開発が進められている(林1982)。熱水の地下貯蔵もアメリカやスウェーデン等で開発されており、日本では山形で実規模試験が行われた(黒田 1982)。

超電導エネルギー貯蔵も強大な電磁力を支持するため地下の岩盤内に建設する必要がある(増田 1981 第10図)。フライホイールや蓄電池、さらに水素エネルギー貯蔵も安全性等の観点から大規模な施設は地下に造ることが考



第10図 超電導コイルの岩盤支持(資源調査所 1981).

第1表 地下発電所・変電所（水越 1981）.

区分	名称	所属	出力または設備容量(台数) (MW)または (MVA)	空洞寸法			掘削量 ($\times 10^3$ m^3)	運開年月 (年月)	
				高さ (m)	幅 (m)	長さ (m)			
発電所	雨龍	北海道電力	51 (3)	28.0	15.0	53.0	17.5	18.5	
	水 ^上 (田幸知)	東京電力	18.6 (1)	18.8	18.0	18.0	3.7	28.8	
	須田貝	"	46 (2)	28.3	15.0	54.3	21.5	30.12	
	奥只見	電源開発	360 (3)	37.8	17.5	85.6	70.5	35.12	
	黒部川第四	関西電力	258 (3)	31.6	20.0	117.0	95.4	36.1	
	鬼怒川 (旧下滝)	東京電力	127 (2)	35.0	19.5	46.2	28.5	38.11	
	川俣	"	27 (1)	34.1	17.1	33.2	13.1	38.11	
	塩谷	"	9.2 (1)	28.6	D=17.2mの円形 ドーム式		6.4	38.11	
	城山	神奈川県	250 (4)	38.0	20.0	133.0	100.	40.1	
	喜撰山	関西電力	466 (2)	49.7	25.6	60.4	70.8	45.1	
	新豊根	電源開発	1125 (5)	46.5	22.4	140.5	140.	47.11	
	沼原	"	675 (3)	44.5	20.0	130.0	97	48.6	
	奥多々良木	関西電力	1212 (4)	43.9	24.9	133.4	145.2	49.6	
	新冠	北海道電力	200 (2)	43.4	19.8	50.8	43	49.8	
	大平	九州電力	500 (2)	45.8	22.0	82.8	79.1	50.6	
	馬瀬川第一	中部電力	288 (2)	50.6	23.2	57.4	57.7	51.6	
	新高瀬川	東京電力	1280 (4)	54.5	27.0	163.0	211.7	52.6	
	奥吉野	関西電力	1206 (6)	41.6	20.1	157.8	128.2	55.2	
	第二沼沢	東北電力	460 (2)	47.5	23.6	96.5	95.7	56.5	
	本川	四国電力	600 (2)	47.4	24.3	98.0	89.7	施工中	
玉原	東京電力	1200 (4)	48.9	26.6	116.3	141	"		
今市	"	1050 (3)	51.0	33.5	160.0	180	"		
変電所	山岳	奥只見	電源開発	399 (3)	11.8	12.1	90.0	14.7	35.12
		黒部川第四	関西電力	267 (3)	13.0	20.0	149.0	115	36.1
		新高瀬川	東京電力	1468 (4)	30.3	20.0	109.0	71.9	52.6
都市	新日本橋九段	東京電力	780 (6)	16.5	71.0	92.5	119.9	46.6	
		"	1080 (6)	30.0	39.0	67.0	74	54.12	
		"	900 (3)	35.5	46.0	57.0	93	56.5	

えられている。

日本の地下水力発電所は 昭和18年に完成された北海道の雨竜発電所が最初であるが 急しゅんな山地が多いため多数の大規模な地下水力発電所が建設されている(第1表)。水力電源開発の大容量化とともに地下発電所の空洞も大規模化し 現在最大の新高瀬川発電所は空洞の高さ59.5m * 幅32.5m * 長さ139.5mで 掘削量は22万 m^3 発電容量も128万kWに達する(第11図)。地下発電所の多くが揚水発電所である。揚水発電所は上池と下池を持ち 電力の余っている夜間等に上池に水を揚げておき 電力需要の大きい時に発電をするので 一種のエネルギー貯蔵に他ならない。地下式にすると地上式に比較して高落差が得られやすい。下池を地下

1984年11月号

空洞とすれば 平地でも揚水発電所を造ることができる。

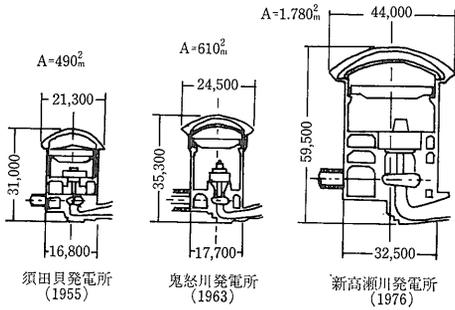
変電所は発電所の近くと需要地の都市の近くに造る必要がある。双方とも利用可能な土地が得にくいことが多いので地下に造られるケースが多くなっている(第1表)。東京新宿中央公園の地下には超高圧 275kV 地下変電所が造られているが 容積は12万 m^3 に達する。

地下原子力発電所も欧米では小規模な実験的なものは実績がある(第2表)。日本でも通産省において「地下立地式原子力発電所検討委員会」で検討され 技術的には可能であるとの結論が出ている。地下原子力発電所は安全性でもきわめて有利であるといえよう(第12図)。

エネルギー消費の増大に伴い エネルギー施設も巨大化せざるをえない。空間的にも 安全性や環境保全の

第2表 地下原子力発電所 (通産省資源エネルギー庁 1981).

分類	発電所名	所在地 (国名)	熱(t)及び電 気(e)出力	目的	格納状態		原子炉室 (m)	連開年月 (西暦年月)
					タービン 発電機	原子炉		
全 地 下 式	ハルデン Halden	ノルウェー	2万5,000kWt	実験用	—	地下 空洞内	長さ 高さ 幅 20 25 10	1959
	オーゲスタ Agesta	スウェーデン	12万5,000kWt 1万5,000kWe	発電と 発熱	地表部	地下 空洞内	長さ 高さ 幅 27 20 16	1964.3
	R-1	スウェーデン	1,000kWt	実験用	—	地下 空洞内	—	1964
	ショーズ Chooz	フランス	90万5,000kWt 30万 500kWe	発電	地表部	地下 空洞内	長さ 高さ 幅 42 25 21	1967.4
	ルサン Lucens	スイス	3万 kWt	実験用 発電	地下空洞内	地下 空洞内	—	1965 (1974閉鎖)



第11図 地下発電所の規模の比較 (山岳トンネルの工事実例集 1977).

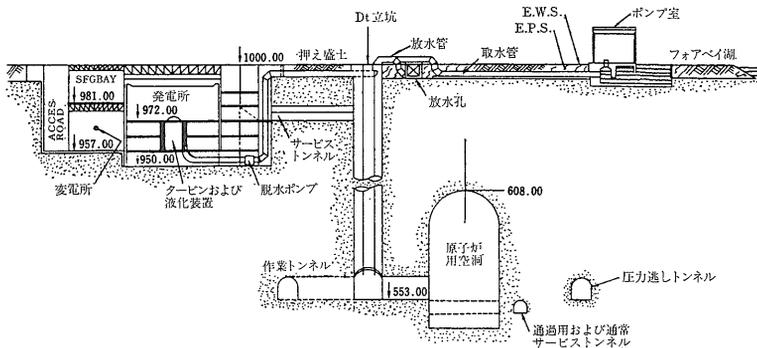
上からも 陸地のしかも都市に近い場所に巨大エネルギー基地を建設するのは困難になりつつある。エネルギー基地として地下空間を利用すれば 比較的都市に近い場所に立地することも可能である。安全性の上からも地下空間利用を大いに促進する必要がある。

5. 地殻開発と高レベル放射性廃棄物処分

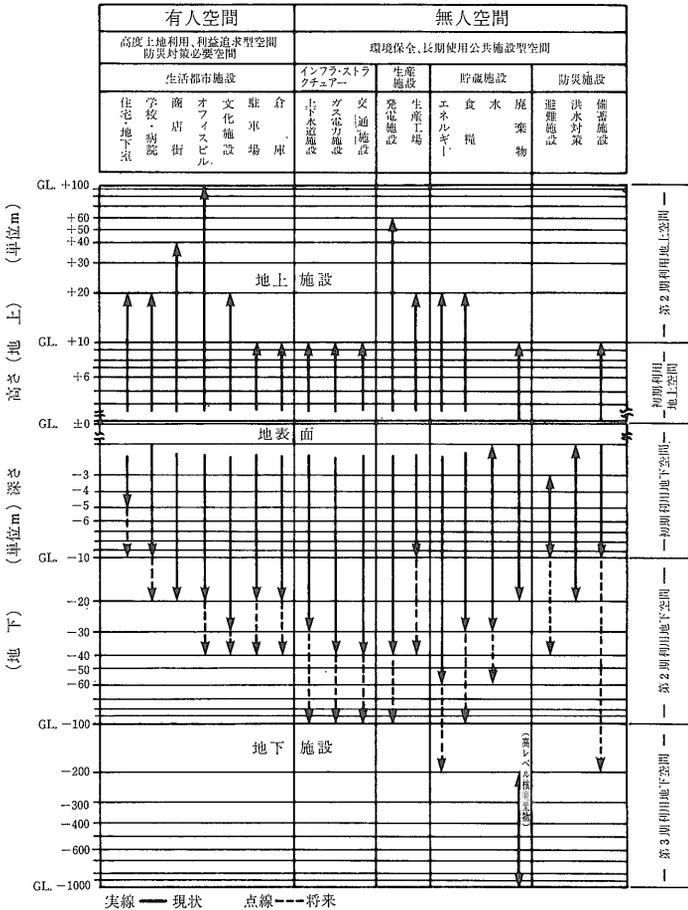
科学技術庁の調査による地下空間利用施設の建設時期

予想(第3表)によれば 今世紀末から21世紀初頭にかけて 地下空間利用が広範に進展すると考えられる。これを見ると 地下空間利用の計画性が大切であることが一層理解できる。古い放棄された炭鉱を再開発するのは 坑内図が残されていないときわめて危険である。なぜなら 旧採掘跡の空洞にはしばしば多量に水がたまっているので 不意に旧洞に掘り当たると出水による大被害を受ける恐れがある。しかし 古い空洞の位置が正確にわかっているならば 安全に再開発ができる。様々な目的で地下を開発するには 初めから十分な計画性が必要である。

利用される深度もより深部へ広がることは必至である(第13図)。1960年以前の初期には地下10m程度までの利用であったが 1960~1980年代の第2期には地下40m程度までの利用がなされ 1990年代には100~200mまで深くなり さらに大深度の第3期へと移行すると予測している。第4表には含まれていない資源開発の方面ではさらに深部までの利用が実現しており 南アの金鉱山では最深3,777mで これが人間の直接入った最高深部になっている(ギネスブック 1984)。前述のように 石油の採掘は10km近く 学術ボーリングでは12kmの深さ



第12図 CANDU 地下原子力発電所 (川本 1983).



第13図 地上・地下空間利用分野分布図 (資源調査所 1984)。

第4表 地下空間利用技術の構成 (資源調査所 1984)。

順 序	要 求 条 件	考 慮 す べ き 事 項	適 用 技 術
1. 計 画	1. 機 能 性	・目的に合致した機能を確保	計画技術, 環境技術
	2. 安 全 性	・安全な出入・心理的安全性確保	採光, 照明, 換気, 保安, 構造計画技術
	3. 経 済 性	・機能との関係を考慮	安全性技術, 経済計画技術
	4. 適 応 性	・地質に適応した構造物の計画	地質調査, 施設計画技術
2. 設 計	1. 規 模・構 造	・深度, 形状への配慮	計画技術の適応と最適構造設計技術
	2. 地 盤 条 件	・地質(岩, 土), 地下水等	調査技術
	3. 外 力	・土圧, 水圧, 地震等	応用解析技術, 構造設計技術
	4. 機 能 条 件	・目的, 安全性, 居住性, 移動性等	設備技術, 通信技術, 災害防止技術
3. 建 設	1. 掘 削	・安全性, 経済性, 工期等	建設技術, (掘削技術)
	2. ライニング	・掘削時発生現象防止対策	防護技術(止水, 崩壊, 予測対策技術)
	3. 設 備	・地山に応じたライニングの適用 ・防災面に留意した設備	急速防災技術(ライニング) 設備技術, 通信技術, 防災技術
4. 運 用	1. 機 能 性	・機能を発揮出来るメンテナンス	回収, 浄化技術, エネルギー自給技術
	2. 安 全 性	・災害発生対策	保守, 公害管理技術, 通信, 防災技術
	3. 経 済 性	・省エネルギーの管理	エネルギー省力化技術, 保守技術

に達している。

地下空間利用に必要な技術も多様である。(第4表)。中でも地下に特有な問題は地盤・岩盤の問題である。地下利用計画では当然 入念な地盤・岩盤の調査が必要である(第5表)。地下空間利用のために 綿密な地盤・岩盤の調査が行われた好例は前述の菊間における石油地下備蓄実証実験である(星野 1983 1984)。大規模な実験のための地下空洞を建設する適地を選定する1次調査 実施計画のための2次調査 工事施工中に地下岩盤の直接的なデータを得るための3次調査と 大まかに分けても3段階にわたる徹底した調査が行われた。

科学技術庁では 5年ごとに「未来技術予測」を実施している(科学技術庁 1982)。予測方法はデルファイ法が用いられている。デルファイ法は 多数の専門家にアンケートを繰り返して 互いの予見を確かめながらしだいに収斂させていく方法である。1983年の予測では 全課題(800)のうち 重要度比率がもっとも高い方から10の課題を列記すると第6表のようになり 5位に高レベル放射性廃棄物の貯蔵・管理 6位に低レベル廃棄物の処分技術と核燃料サイクルがあがっている。最上位の4課題はすべてガンに関するものであるから 大きく分ければ 放射性廃棄物の貯蔵・処分は

第5表 地盤・岩盤調査の進め方(吉川 1983).

段階	構造物	地形・地質		資料調査	地表踏査 (含む*)	物理探査	ボーリング	孔内検層	孔内試験	サウンディング	岩石質試験	原位置試験	地下水調査	ガス調査	工事の影響調査		
		岩	土														
位置 選定	線状構造物 (トンネル、共同溝、など)	山地	岩	◎	◎	+○	○				○		○	△			
		平地	土	◎	◎		○			○	○		○	△			
	拠点型構造物 (地下発電所、貯蔵施設、地下街)	山地	岩	◎	◎	+○	○	△	△		○						
		平地	土	◎	◎		○	△	△	○	○		○	△			
事前設計・ 施工計画	トンネル	坑道	山地	岩		◎	+◎	◎	○	△		◎		△	△		
	山地・平地		土	○	◎		◎	○	○	◎	◎		○	△			
	トンネル 開きよ	開削	平地	土	○	◎		◎	○	○	◎		○	△			
	地下発電所	山地	岩		◎	+◎	◎	○	◎		◎	○					
	燃料貯蔵 施設	坑道	山地	岩		◎	○	◎	○	○		◎		○			
			平地	岩		◎	△	◎	○	○		◎	○	◎			
		平地	土	○	◎		◎	○	◎	◎	◎	○	◎	△			
	地下街	平地	土	○	◎		◎	○	○	◎	◎	○	◎	△			
	施 工	トンネル	坑道	山地	土・岩		◎*		△	△	△		△	△	○	△	△
				平地	土		◎*		△	△	△		△	△	○	△	○
開削			平地	土		◎*		△	△	△		△	△	○	△	○	
地下発電所		山地	岩		◎*	○*	○	○	○		◎	○					
燃料貯蔵 施設		坑道	山地	岩		◎*		△	△	△		◎	△	◎			
		開削	平地	土・岩		◎*		△	△	△	△	◎	△	◎		△	
地下街	平地	土		◎*		△	△	△	△	◎	△	○	△	○			

* 施工箇所の観察・調査・計測
 山地：山岳地～丘りょう地
 平地：平野～台地
 +：短小なトンネル、軟弱岩、地山を除く
 岩：岩盤
 土：未固結～低固結地盤
 ◎：通常実施する
 ○：実施することが多い
 △：特殊な場合実施する

ガンに次ぐ最重要課題であると多くの専門家に認められていることになる。

日本の原子力発電設備量は1982年で約17百万kWであり 1982年の年間発電電力量の19.5%の発電を行った(科学技術庁 1984)。 現在までの放射性廃棄物累積量は第7表のようになり さらに原子力発電所からは第8表のような廃棄物が年々発生する。 日本のエネルギー資源から考えて 原子力発電への依存度は当然高まっていく一方であり 放射性廃棄物もその分蓄積されることになる。 したがって 放射性廃棄物の処理・処分技術の確立が急務となっている。

放射性廃棄物は 壊変によって放射性が低下してゆくので 一部の化学廃棄物よりむしろ対策は立てやすい面もある。 しかし 高レベル放射性廃棄物は10万年後にもわずかながら放射性が残存しているので 10年以上にわたって生物環境から隔離する必要があるとされている。 10年以上となれば 例えば隕石の落下のような

1984年11月号

きわめてまれな現象でさえ必ずしも無視しえなくなるし それ以上に 人間社会の変動が予測しえないので そのような長期にわたって地上で保管しつづけることは危険である。 後世にツケを回さないためにも安全な処分方法を考えなければならない。

永久処分法としては 宇宙へ打ち上げてしまうという案も考えられているが 打ち上げロケットの信頼性を考えれば 当分実用化は考えられない。 現在のところ 高レベル放射性廃棄物は地下深部に隔離するのが唯一の実現性のある方法と考えられている。 通常 地層処分は地下数100~1,000mの深さに鉾山のような坑道を掘削して 廃棄物パッケージを埋設するが(第14図) 大孔径ボーリングによってもっと深部に埋設したり 海洋底下の地層中に埋めこむ方法も考えられている。

高レベル放射性廃棄物を地下深部に安全に処分するには 長期問題を含むため 地球科学のほとんどあらゆる分野の協力が必要である(第9表)。 地下空間利用とし

第6表 科学技術庁未来技術予測における重要課題ベストテン
(科学技術庁 1982).
全課程(800)を通じて重要度比率の高い課題10のリスト

順位	課 題	重要度「大」の比率(%)	実現時期(年)
1	18. がんの転移を防ぐ有効な手段が開発される。 〔ライフサイエンス〕	96	1999
2	13. 細胞のがん化の機序が解明され、がんの予防が可能となる。〔ライフサイエンス〕	93	2001
2	25. 胃がん、肺がんのような固形がんにも有効な化学療法剤が開発される。 〔保健・医療〕	93	1999
2	27. がんの転移を防ぐ有効な手段が開発される。 〔保健・医療〕	93	2003
5	60. 高レベル放射性廃棄物の固化体の貯蔵管理技術が実用化される。 〔エネルギー・鉱物・水資源〕	92	1995
6	59. 低レベル放射性廃棄物の固化体の地層処分及び海洋投棄等の安全な処分技術が実用化される。 〔エネルギー・鉱物・水資源〕	91	1994
6	25. 核燃料サイクルを含めたFBR(高速増殖炉)システムが開発される。 〔エネルギー・鉱物・水資源〕	91	1999
6	30. 動脈硬化を非常に有効に治療する薬剤が開発される。 〔保健・医療〕	91	2001
9	56. 地震(マグニチュード6以上)の発生の有無をほぼ1ヵ月以内の精度で府県別程度の範囲内で予知できる技術が開発される。 〔安 全〕	90	2006
10	31. 肝炎をはじめとするウイルス疾患が容易に治療できるようなウイルス疾患に対する薬が一般に使用されるようになる。 〔保健・医療〕	89	1999

(資料) 科学技術庁 予測 昭58—1

第7表 放射性廃棄物累積量(科学技術庁 1984).

レベル(機関)	年 度		昭和57年度末での累積量
	固 体	液 体	
低レベル: 200ℓドラム缶 (原子力発電所、原研、動燃、RI協会等)			462,700
高レベル: m ³ (動燃再処理工場)	固 体		218
	液 体		156

てはもっとも困難な問題を含むだけに 高レベル放射性廃棄物の地層処分法の開発は 産業廃棄物の処分を始め地下空間利用技術の画期的な進歩をもたらすであろう。欧米各国でも 高レベル放射廃棄物の処理・処分問題に多くの努力がなされているが それは地下利用・地殻開発の典型的問題をかかえているためもある。日本では原子力委員会放射廃棄物専門部会の定めた計画に沿って国家的プロジェクトとして研究開発が進められており(第15図) 昭和60年度から始まる第2段階では深地層試

験を含めた本格的な研究開発が行われることになっている(柏木 第6図本誌)。

地下深部の処分場から廃棄物に含まれる放射性核種が生物圏に出てくる危険は 構造運動やダイアピルや侵食によって直接露出する等の可能性もあるが 地下水によって運び出される危険がもっとも大きい(第14図)。しかしきわめて小さい確立の危険性でも十分に検討する必要がある。

処分場の母岩としてはさまざまな種類の岩石が検討されている。岩塩は低間隙率と低透水性および塑性的で熱伝導度が高いという良好な性質を持つため 米国や西独で早くから注目されてきたが 日本には存在しない。構造的に安定な地域にあって低透水性の岩体 例えば花崗岩やはんれい岩等の貫入火成岩体や玄武岩・石灰岩・粘土質岩・凝灰岩等も候補として検討されている。粘土鉱物やゼオライト質凝灰岩は放射性核種を吸着して逃がさない効果がある。

高レベル放射性廃棄物は処理のしかたによって異なるが いずれにせよ容積としてはすべて集めてもそれほど大きくならない。したがって処分場の容積も大きくはないがあらゆる方法を使って徹底的に調査をする必要がある また周囲のかなり広い範囲に

についてもある程度の調査が必要であろう。予期しない地下水脈や破碎帯や岩質変化があると処分場の建設に致命的な場合もある。小断層や割れ目の検知が特に問題となる。処分場のごく近くでは 岩盤を極力乱してはならないので 坑道の掘削やボーリングは最小限にしなければならない。このような制約下で 岩質の変化や割れ目を検知し 岩盤の物性を把握するための技術を開発する必要がある。地下深部の地質調査技術の開発は地殻開発全般に重要な課題である。

処分場を掘削すると 地下に力学的・化学的・熱的な乱れが生じる。掘削により地殻の応力場を乱し 地下の空洞周辺に割れ目が発生する。処分場付近に達する立坑やボーリング坑は注意深く封じる必要がある。新オーストリア・トンネル工法(略称 NATM)は 岩盤力学の最近の発展の成果を生かし 地山をできるかぎり乱さず 岩盤自体の支持力を最大限に生かそうとする工法で トンネル掘削技術の画期的な進歩をもたらした。NATM の技術は 処分場の掘削に生かされるであろうが 処分場ではきわめて厳密な岩盤の管理が必要であり

第8表 100万kWeの軽水炉の年間廃棄物発生量(科学技術庁 1984).

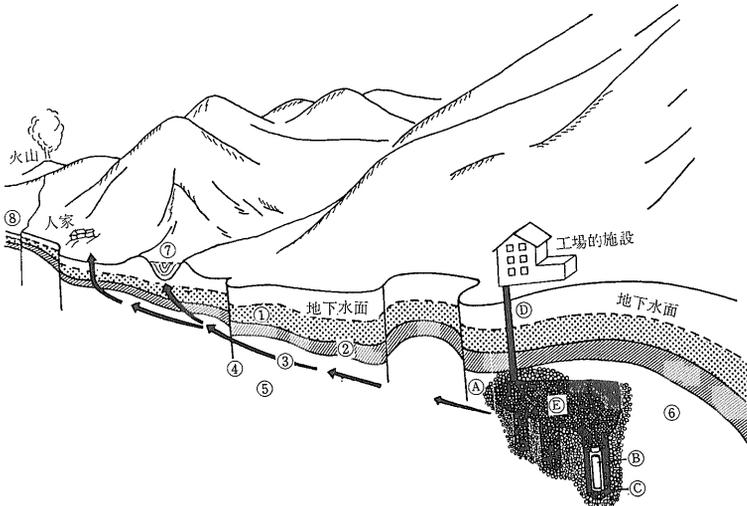
発生元及び形態	容量(処理・固化後) (m ³)	放射能量または重量	主な処分概念
1. ウラン採鉱・精練 — 鉱滓	60,000 (Pu再利用の場合40,000)	0.01Ci/m ³	— 地中処分
2. 燃料加工 — UO ₂ 燃料 — UO ₂ —PuO ₂ 燃料(年間再 装荷500~700kgPu)	— 10~50	無視可能 5~10kg (Pu)	— 海洋処分 ^{(注)2} — 地層処分
3. 軽水炉 — 各種固体廃棄物及び固形 化樹脂	100~500 ^{(注)1}	0.1~10Ci/m ³	— 海洋処分 — 地中処分
4. 再処理 — 固化済高レベル廃棄物 (HLW) — 圧縮済被覆ハル — 低及び中レベル ベータ・ガンマ固体廃棄 物 — 固体及び固形化アルファ 廃棄物	3 ^{(注)3} 3 10~100 1~10	150 MCi, (UO ₂ 燃料に対し 2 kgPu, UO ₂ —PuO ₂ 燃料に対 し5~10KgPuを含む) 1.5 MCi 0.01 MCi 1~5 KgPu	— 地層処分 または海洋底下処分 — 地層処分 または海洋底下処分 — 地中処分 — 地層処分 — 海洋処分

(注) 1. 原子炉タイプと固形化プロセスによる。 2. 比放射能がロンドン条約の規制値内のもの。
3. もとの液体廃棄物の容量は15m³。 4. 原子炉から取出し後150日。

工法の一層の進歩も必要であろう。 処分場の厳密な岩盤管理には 信頼のおける現場計測技術の開発と地下の応力や間隙流体圧の原位置測定技術や 岩盤の強度や変形特性を正確に推定する技術を開発しなければならない。 岩盤強度や変形特性も原位置測定が重要であるが 実際には原位置測定でも真の地下条件とは異なっていることに留意するべきである。 また 処分場の岩盤は極力乱してはならないので 処分場自体での原位置試験は制約される。 したがって 地下条件を完全に再現できるような室内実験技術の開発も重要であり その結果と少数

の原位置試験と弾性波速度等の間接的データから 地下岩盤の特性を知る方法を開発する必要がある。

地下水による放射性核種の搬出を遅くするには 母岩の透水性が低く 圧力差が小さく 母岩の核種吸着能力が大で 実流路が長く 水への核種浸出率が小さくなければならない。 割れ目が流体の通路になると 流速は数オーダー大きくなり 吸着の機会も少なくなる。 岩石の透水性は 実験室での測定値に比べて原位置測定値がずっと大きいことが多い(第16図)。 これは 主に岩盤内の割れ目のためである。 岩盤の割れ目を通る水の



第14図

高レベル放射性廃棄物の深層隔離の概念(角田 1983).

自然障壁 ①深い地下水面 ②不透水性の地層 ③ゆっくりした地下水の流れ ④長い流路 ⑤高い吸着能力ないしはイオン交換能力 ⑥ヒビ割れが少ない固い岩盤 ⑦ゆっくりした浸食速度 ⑧地殻変動ないしは火山活動の確率の低いこと

工学的障壁 ④十分に深いこと ⑥強固かつ耐腐食性の高いキャニスタ ⑦廃棄物自体が安定なこと ⑧貫通孔の埋め戻しができること ⑨透水性が低く かつ吸着能力が高いこと。

第9表 高レベル放射性廃棄物地層処分の研究概念

人工バリア		自然バリア		
固化法	容 器	空洞充填法	近地	遠 地
ガラス固化 焼結固化 人工岩石	金属 セラミクス	緩衝材 粘土 グラウト	潜頭結晶質岩体 花崗岩等 海洋底堆積物	不透水性地層 頁岩 凝灰岩 海洋プレート
合成法 化学的安定性 熱水によるリーチ ング	熱水によるリーチ ング 耐熱性 強度	空洞形状 地層・地下水 との相互作用 熱水によるリーチ ング・シーリン グ 強度 熱破碎 塑性 不透水性 核種移動・吸着 熱変質	地質調査法 (地下深部・海 底下) 割れ目系 透水性 核種移動・吸着 強度 熱破碎 水圧破碎 変形特性 その他岩石物性 (室内・原位置) 熱変質・変成 続成作用 熱水によるリーチ ング・シーリン グ 応力測定	地質調査法 (地下・海底下) 地殻変動・サブダ クション 地質未来予測 地下水挙動 地下水年代 断層調査法 岩石物性 (室内・原位置) 応力測定
< 1 Kb (~30Kb) <1000°C 強	< 1 Kb (~30Kb) <1000°C 強	< 1 Kb (~30Kb) <1000°C	< 1 Kb (~30Kb) <数100°C	< 1 Kb (~30Kb) <100°~200°C

室内試験→大型試験→原位置試験→地下実験室/数値実験

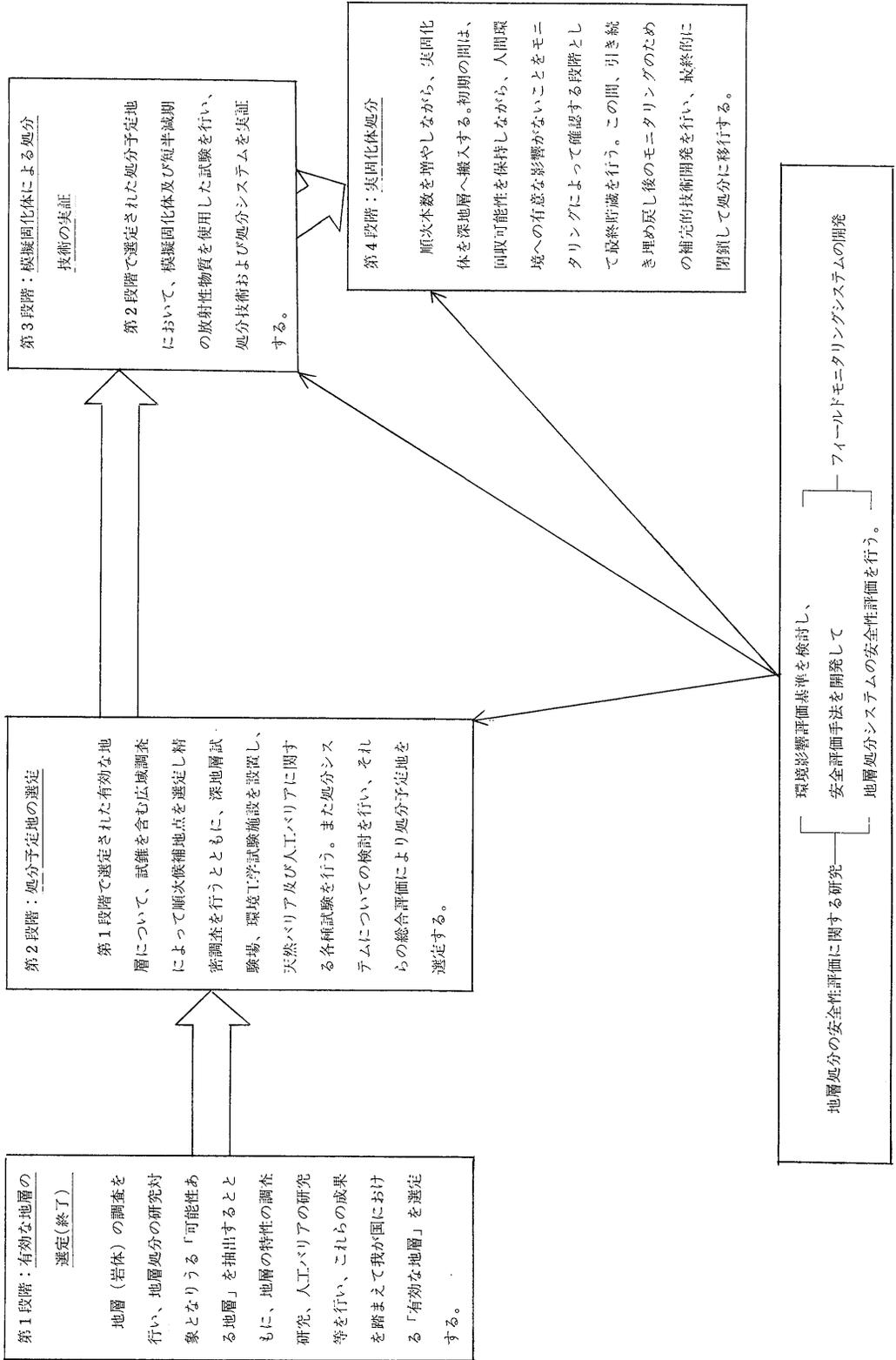
流れをどう評価するかは未だ十分に解明されていない大問題である。また 放射性核種を効果的に封じ込むためには透水率がきわめて低くなければならないが そのようなきわめて低い透水率をどう測定するかという問題もある。きわめてゆっくりした地下水の移動速度を推定するには 地下水の年代の測定法を開発する必要がある。

地下水の塩濃度やPHは 廃棄物固化体からの核種浸出速度やキャニスターの耐久性に大きな影響がある。地下水の化学的性質は母岩の化学的性質によってコントロールされている。結局 天然の岩体中に埋設された放射性廃棄物固化体やキャニスターや埋戻し材が地下水を媒介として相互反応し その結果として核種が移行ないし固定化する。地球化学的な系の総合的研究が必要である。廃棄物固化体(ガラス固化体 シンロック セラミック等)の安定性や埋戻し材の粘土の吸着性能も地下水ひいては地下の化学環境下で評価しなければならない。

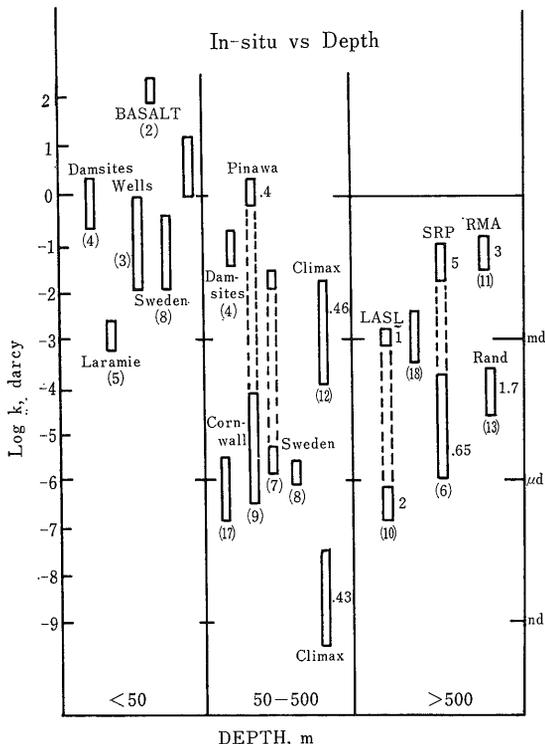
熱も力学的・化学的変化を誘発する。熱割れや含水鉱物の分解が重大な問題で 頁岩中の粘土鉱物は 100°C程度で水を放出しはじめる。加熱された水やガスは膨張して圧力を増し 流体破碎を起こす危険性がある。発熱性の高レベル放射性廃棄物を地下に埋設するには 岩石との力学的化学的反応や流体の挙動等解明しなければならない問題がまだかなりある。

廃棄物アセンブリーを地下深部に埋設した場合 周囲の岩石や地下水との相互反応を総合的に解析し 地質構造の安定性も含めた 地質未来予測を可能にしなければならない。そのためには 信頼のできるモデルの開発が必要であろう。

数万年~数10万年もの超長期の安定性を工学的な手法で実証することは 事実上不可能である。エジプトのツタンカーメンの墓や中国の馬王堆漢墓などは地下の保存性の実例になるが それでもたかだか数1000年にすぎない。しかし 数10万年は 地球科学では短期間であ



第15図 地層処分に至る全体像(廃棄物対策専門部会 1984)。



第16図 結晶質岩の透水率の原位置測定 (深度別) (BRACE 1980).

る。石油や天然ガスが大量に地下に埋蔵されていることは 数100 年以上の間地層中に封じ込められることを示している。天然鉱物や岩石は 超長期にわたって安定であったことを証明しうるものがある。特にアフリカのオクロの「天然原子炉」は ウランの高品位鉱床で約17億年前に天然に核分裂連鎖反応がおきたとされている(武内 1984)。すなわち 17億年前に放射性廃棄物をじかに地中に埋設する実験を行ったのと同じことであり その詳しい調査は地層の廃棄物隔離能力を実証しうるものとして注目を集めている。超長期の安定性の実証には 地球科学的手法が不可欠である。

1980年代の国際協同研究計画であるリソスフェア探査開発計画は 主目的は学術的な基礎研究であるが 地殻の性質や諸現象を正確に解明することにより 資源探査や廃棄物処分や災害予知等に貢献することをねらっている (IUGG & IUGS 作業委員会 1979)。

菊間の石油地下備蓄実証実験は最初の本格的な地下実験で 多様な調査観測が行われているが 石油備蓄が目的なので 備蓄中空洞内に立ち入れない。原子力環境整備センターが日本鉱業会に委託して 石灰石鉱山で行なっている低レベル放射性廃棄物の地下保管のための空洞建設試験は実験のみを目的としているので 様々な実

験・観測が可能である(山口 1984)。しかし 母岩は石灰石なので 花崗岩や堆積岩についての地下実験も今後必要であろう。岐阜県神岡鉱山の坑内の地下約1,000mの深さに 東京大学宇宙線研究所の陽子崩壊の地下観測施設がある(第17図)。これはノイズとなる宇宙線が地下深部に入りこむ数が少ないため 地下に施設を作ったものであるが 地下の隔離性や恒温性は様々な実験に都合がよい。例えば バイオテクノロジーの実験にも好都合である。また 精密工場や逆に騒音のひどい工場を地下に作るというアイデアもある。

地下は様々な可能性を持っており 今後10~20年の間に急速に開発が進むことになるだろう。しかし 地下の深部については まだ明らかになっていないことが多い。現在の実験技術では 地殻内の圧力・温度等の条件はほぼ完全に実験室内で再現できる。実験によって地下深部の状態を再現し 地下の現象を解明する学問分野は実験地学と総称され 急速な進歩を遂げつつある。しかし 地殻の総合的な挙動を実地に調べるには やはり 地下深部へのボーリングや地下原位置実験室が必要である。室内実験と原位置実験を並行して進め 短所を補いあうべきであろう。また 地下の基本的特性を明らかにするための 地下総合実験施設は 日本人の地下アレルギーを解消するためにも役立つであろう。

参 考 文 献

BENNETT, D. J. (1984) : Architectural design of the civil and mineral engineering building, Underground Space, 8 83-88.

BRACE, W. F. (1980) : Permeability of crystalline and argillaceous rock, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr 17 241-251.

林正夫 (1982) : エネルギーの地下備蓄における地盤耐震工学の役割 —— 地中開発について —— 土と基礎 30~10 297 7-15.

東方洋雄 (1982) : ザ・地下室 創拓社 222.

放射性廃棄物対策専門部会 (1984) : 放射性廃棄物処理処分方策について (中間報告) 原子力委員会 64.

星野一男 (1983 1984) : 菊間石油地下実証プラント 地質ニュース (その1) 350 6-18 (その2) 353 48-62.

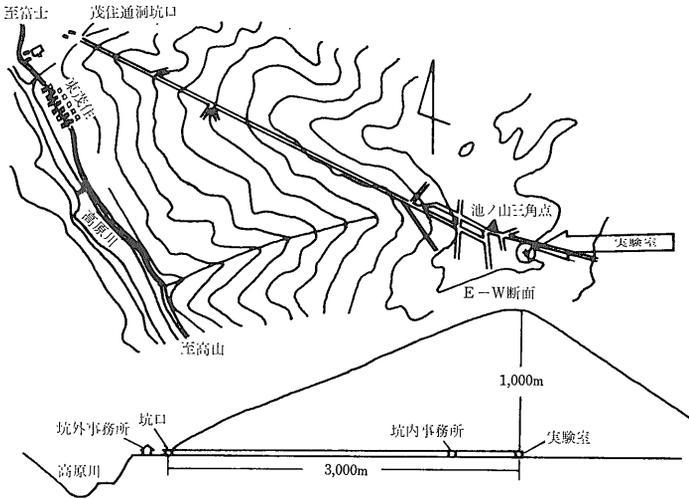
池辺稯 (1981) : 石油ボーリングの現状と深層ボーリングの問題点 月刊地球 3 69-76.

IUGG & IUGS 作業委員会 (1979) : The lithosphere : Frontier for the 1980'S, International Union of Geological Sciences and International Union of Geodesy and Geophysics.

科学技術庁 (1982) : 技術予測調査報告書.

科学技術庁原子力局監修 (1984) : 原子力ポケットブック 日本原子力産業会議 476.

加藤完・後藤進 (1976 1977) : わが国における大深度ボーリン



第17図
神岡地下素粒子実験室とその位置図
(斉藤・滑川 1983).

- グの現状 地質ニュース①264 32-40 ②270 36-43 ③274 31-37 ④286 24-29.
- 川本眺万 (1983) : 地下空間利用の将来展望 地下構造物ハンドブック 22-39.
- 菊池賢三 (1983) : 地下空間利用技術の展望 地下構造物ハンドブック 建設産業調査会 3-17.
- 久保慶三郎 (1981) : 地震と土木構造物 鹿島出版会 東京 279.
- 黒田和男 (1982) : エネルギーを地中に貯蔵する 地質ニュース 337 188-189.
- マクワーター N編 青木栄一 大出健訳 (1984) : ギネスブック 講談社 494
- 増田正美 (1981) : 電力貯蔵技術のみみつ——超電導エネルギー貯蔵—— 日刊工業新聞社 204.
- 松田時彦 (1979) : 唐山地震の地表地震断層 防災科学技術研究資料 44 中国の地震予知の現状 71-75.
- 水越達雄 (1981) : 地下工事の変遷と展望 土と基礎 28 5-9.
- 村上良丸 (1975 1976 1979) : トンネルの歴史 土木工学社 東京 (第1巻) 1975 281 (第2巻) 1976 285 (第3巻) 1979 283.
- 長野耕造 (1958) : 坑道レシーバーの建設について 日本鉱業会誌 74 414-423.
- 日本トンネル技術協会 (1980) : 日本におけるトンネル工事の現況 日本トンネル技術協会.
- 新妻信明 (1981) : 概説「深層ボーリング」シンポジウム 月刊地球 3 5-12.
- 斉藤修二・滑川正朗 (1983) : 神岡における地下実験室開削工事について 日本鉱業会誌 99 268-272.
- 山岳トンネルの工事実例集 (1977) : 北アルプスに大規模地下掘さく 東京電力・新高瀬川発電所 大型工事編 21-28.
- 陝西省地震隊 (王景明) (1981) : 唐山地震震煤礦区烈度の空間変化 唐山地震考察与研究 地震出版社 23-24.
- 資源調査所 (1981) : エネルギー貯蔵に関する基礎調査——電気エネルギー 機械エネルギー及び熱エネルギーの貯蔵を中心として—— 科学技術庁資源調査所資料 93 183.

- 資源調査所 (1984) : 地下空間利用に関する基礎資料 科学技術庁資源調査所資料 115 542.
- 高橋博・越井一郎・大村正好 (1983) : 唐山地震 その被害と抗震防震 地質ニュース (1)344 6-18 (2)345 14-27.
- 武内寿久祐 (1984) : 放射性廃棄物地層処分基礎研究への地質学の貢献 日本鉱業会講演要旨集 昭和59年春季 321-322.
- 竹内均・奈須紀幸・石和田靖章・持田豊・森浩一・井上孝 (1982) : 地底への冒険 リポート 204.
- 角田直己 (1983) : 固化体及び固化体廃棄物の処分 天沼僚・阪田貞弘監修 放射性廃棄物処理処分に関する研究開発 産業技術出版 テクノ・プロジェクト 429-444.
- 鶴田理 (1983) : 食糧の地下備蓄 地下構造物ハンドブック 建設産業調査会 307-311.
- 上田誠也 (1979) : 深層ボーリングのすすめ 月刊地球 1 453-457.
- 渡部与四郎 (1980) : 地下利用の現状と将来展望 トンネルと地下 11 325-329.
- 山口梅太郎 (1984) : 低レベル放射性廃棄物の地下保管のための空洞建設試験 (中間報告) 日本鉱業会講演要旨集 昭和59年春季 323.
- 吉川恵也 (1983) : 地盤調査法 地下構造物ハンドブック 397-403.
- 吉川恵也 (1984) : 鉄道トンネルの震災と地震対策 トンネルと地下 15 621-630.