

地下利用技術の課題と地球深部情報

星野一男¹⁾

1. はじめに

地下開発は宇宙、海洋開発とならぶ20世紀後半のメガ・サイエンスである。

宇宙開発の歴史は1950年代の後半から始まった。ソ連、米国の有人ロケットが人類史上初めて地球を離れて宇宙に発射され月の裏側など何百万年来人間が決して手にすることの無かった見聞が我々の身近に溢れる様になったのである。これに伴ってその利用技術が進められる機運が出てきたのは1970年代になってからである。メガ・サイエンスは巨大な国費を必要とするからその目標(効果)は明確で判り易いものでなくてはならない。宇宙開発の初期の目標は地球及び宇宙の新資源開発であった。1972年に打ち上げられた最初の科学衛星が地球資源技術衛星(Earth Resources Technology Satellite, ERTS)と名づけられたことはその間の事情をよく物語っている。この名前はやがてLANDSATと改名される。地球からの放射線映像、いわゆるリモートセンシングがただ単に当初予想していた資源・地質情報のみだけではなく気象、海洋、植物生態等地球表面のあらゆる実態についての情報を含んでいることが判明したからである。

有人ロケットの打ち上げから40年、LANDSAT衛星の打ち上げから20年を経て、現在宇宙開発は完全に実用の段階に入っているといえる。しかし、その主役は当初に予想されたものとはかなり食い違っているのが実情のようだ。日常的に最も身近なものに天気予報の気象衛星映像があり、GPS(Global Positioning System)がある。自家用車でもGPS機器を据えつける人が増えている。初めてGPS衛星が打ち上げられたのは1975年であったが20年足ら

ずで一般家庭にまで使われるようになったのである。

GPSのような衛星利用技術がこれ程発展することを宇宙開発の初期の頃に予想できた人が皆無に近かったことは非常に重要なことである。新技術の開発初期においてそれがどんな利用技術に繋がるかを予測することは誰にとっても難しい。つまり、人間が従来踏み込んだことのない世界に入りこもうとする時、その新しい空間の実像が判らないうちには、その情報が我々にどのように役にたつかを予測する事は原則的に無理だという事であろうか。

さて、地下開発を先行した宇宙開発の足取りに対比してみると、現在はロシア、ドイツなどで10,000 m規模の科学ボーリングが実施されており、これは宇宙開発でソ連、米国で最初の衛星ロケットが打ち上げられた1960-70年頃に相当するのではないだろうか。宇宙開発ではこのあと5-10年位で応用課題を研究するための衛星がうちあげられている。最近話題を集めている“超深層ボーリング”は性格としてはロシア、ドイツの科学ボーリングと似ているが時期的には応用衛星に相当する役割も期待されているのではないだろうか。

建設(建築・土木)分野では昨今新領域として地下への関心が高まっている。建設という観点で見れば現在直接対象となっている地下の深度は100 mから1000 mそこそこにすぎないが、そこは人間の手で掘り、人間の眼が見つめる現実の地盤空間である。建設技術者にとってまず必要なものは空間の地盤情報である。地盤情報と地質情報とは言葉は似ているが内容は質的にかなり違う。もし信頼性の高い周辺の地質情報が得られれば、地盤情報をさらに幅広く活用することが出来る。

1) 元所員、前 清水建設(株)顧問、現在 (株)エンジニアリング振興協会 研究理事：
〒247 鎌倉市今泉台4-31-6

キーワード：大深度地下空間開発、超深層ボーリング、深部地盤情報、石油地下貯蔵空洞、東京湾地下物性断面図

第1表 地下空間利用の事例(日本産業技術振興協会, エンジニアリング振興協会, 1988)

利用形態	日 本	海 外
エネルギー地下貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> ・石油備蓄技術…菊間(愛媛), 久慈(岩手), 串木野(鹿児島) ・LNG地下貯蔵…根岸(横浜) 	<ul style="list-style-type: none"> ・LPG地下貯蔵…フィンランド, スウェーデン, フランス, 韓国, 台湾, アメリカ ・圧気貯蔵…西ドイツ, フィンランド, ノルウェー ・熱水貯蔵…スウェーデン
地下発電所	<ul style="list-style-type: none"> ・揚水式…新高瀬川発電所(長野)他40カ所 	<ul style="list-style-type: none"> ・揚水式発電所…アメリカ, ヨーロッパ, オーストラリア等多数 ・原子力発電所…ヨーロッパ5カ所, アメリカで1カ所
食料貯蔵	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤冷凍庫…大谷石採石跡地(栃木) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ワイン, 穀物, 種子, 飲料水等の貯蔵, 冷凍食品の貯蔵
地下都市	<ul style="list-style-type: none"> ・地下街…川崎市, 札幌市等多数 	<ul style="list-style-type: none"> ・ライフラインの地中化, 共同溝, 地下スポーツセンター, 図書館, 教室, 教会(ロックチャーチ), 音楽堂, 会議場
地下工場	<ul style="list-style-type: none"> ・爆着工場(騒音防止が目的で地下に立地) 	<ul style="list-style-type: none"> ・精密機械工場, ワイン等の醸造工場
地下実験室	<ul style="list-style-type: none"> ・陽子崩壊観測施設…神岡鉱山 	<ul style="list-style-type: none"> ・コロラド大, ミネソタ大(米), ハーゲンパッハ(スイス), レマン湖畔(フランス LEP), ハンブルク(西ドイツ)
地下室付住宅	<ul style="list-style-type: none"> ・新住宅開発プロジェクト「地下室利用システム技術の開発」(つくば, 製科研究実験住宅) 	<ul style="list-style-type: none"> ・欧米での住宅は地下室付が多い(米國中東北部では80%)
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱山跡地の坑道観光…尾去沢鉱山(秋田), 鯛生鉱山(大分)等地下展示場, 世界最大のホログラフィスタジオ…大谷石採石跡地(栃木) 	<ul style="list-style-type: none"> ・防災施設(非常用飲料水, 食糧の貯蔵, シェルター, 電気通信およびデータ処理センター)

地下空間の本格的開発が始まったばかりの時点で完全な未来展望を語ることは本当に難しい。宇宙開発の時と同じようにある程度機器の開発が先行し、地下の地球科学像がもっと鮮明になった段階で飛躍的に広がる事ができるであろう。ここでは我国における地下開発の現況、その技術課題を述べ、どのような深部情報が期待されているかを述べてみたい。

2. 地下空間開発の現況

色々な方面で行われている地下空間利用の実例としてエンジニアリング振興協会の研究会が1988年にまとめたものとして第1表がある。地下都市, 地下工場, 地下室付住宅等は地上で造られている建造物を地下空間にも広げるといふものである。一方, エネルギー地下貯蔵とか地下発電所は地下深部の環境を生かすという意図で堅硬な地殻岩盤の中に十分に大きな空洞(トンネル)を掘削し, 使用するもので積極的な地下利用と言え。以下, 後者の岩盤

内大規模地下構造物を中心に取り上げてみたい。

これらの大規模地下構造物の規模は第2表に示す通りである。最も大きな石油地下備蓄基地の例でみると平面的広がりが通常1000 m×1000 m程度, 地表からの深さは10-200 m程度である。最も深度の大きな放射性廃棄物の貯蔵(処分)基地では1000 mの深さが想定されている。

我が国で建設されている最近の大規模地下構造物の実態をみるために石油地下備蓄基地の例を見てみよう。

石油地下備蓄は石油危機問題に端を発して1975年ごろより具体化した地下岩盤利用の新形式である。岩手県久慈市, 愛媛県菊間市, 鹿児島県串木野市の3ヶ所で1981-85年にわたってフィージビリティ・スタディ及び事前調査が行われた後, 1986年より大規模な基地建設が開始され昨年1994年に3基地とも竣工したばかりである。それぞれの基地は175-150万klの原油貯蔵容量を持っている。

原油の貯蔵方式はいわゆる水封式と称して掘削し

第2表 大規模地下構造物の広さと深さ(星野, 1984)

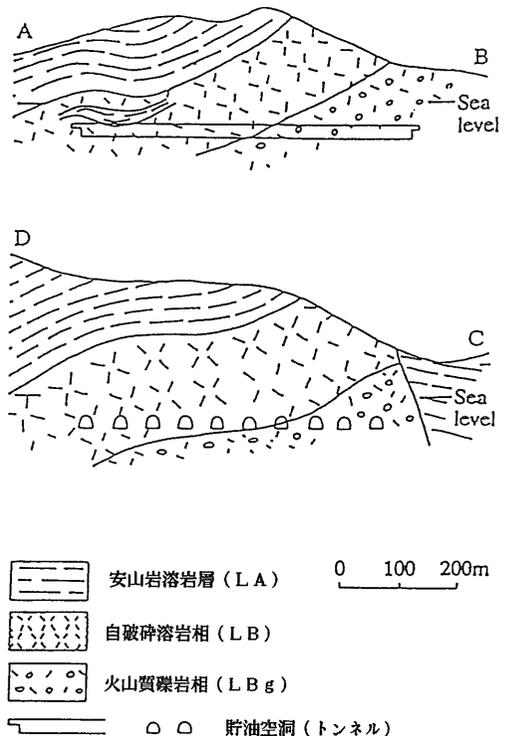
大規模地下構造物	敷地の広さ (m×m)	深さ (m)
地下鉄駅舎	100×200	10~50
地下発電所	100×100	30~100
地下放射性廃棄物貯蔵基地	1000×1000	100~1000
石油地下備蓄基地	1000×1000	10~200

た空洞の壁面は地下水を含んだ岩盤のままに保持し、周辺の地下水圧力によって原油流体を常温・常圧状態で空洞内に閉じ込める方法を採用している。この形式では、地下水位を保持したまま、その表面を鉄板などで蔽わない、いわば裸の岩盤が剥き出しのまま巨大なトンネルを掘削することが必要であり、わが国の地下利用にエポックを画した多くの新技術が開発された(星野, 1990; 蒔田, 1991; 松村, 1994)。

串木野基地では物性的に不均質性の大きい火山岩を対象にしているために石油地下備蓄の技術的問題点が集約されている。基地の主体は鹿児島県西部に広く広がる第三紀中新世北薩安山岩類に属する火山碎屑岩中に掘削された10本の大断面のトンネル型空洞である(第1図)。各トンネルの長さは555 m、断面の幅、高さはそれぞれ18, 22 mである。トンネル1本ごとに17万5千klの原油が貯蔵できる。トンネルの地表からの深さはほぼ200 mであるが、海拔深度は空洞の天端が約20 m、底盤が約40 mである。

地下開発を順調に行うための最初の課題は地下の地質予測である。この場合、北薩安山岩類は中新世当時の複数の火山活動によって海底に噴出した各種の火山岩よりなる累層でありこの様な水封式の大断面トンネルが工学的に安定するための岩盤としては北薩安山岩類に多い安山岩溶岩相(第1図のLA)は脆性が強く割れ目が多いために不相当であると思われる。その下部に存在する自破砕溶岩相(同LB)及び火山質礫岩相(同LBg)が力学特性と透水係数の点で好適であることが分かって来たのである。そのために、基地の建設に着工する前のボーリング調査等により自破砕溶岩相及び火山質礫岩相の地下の分布を明らかにすることが必要であった。

1981年から1984年に実施したトンネル掘削前の事前ボーリングは第2図に示すように1.5×1.5 km

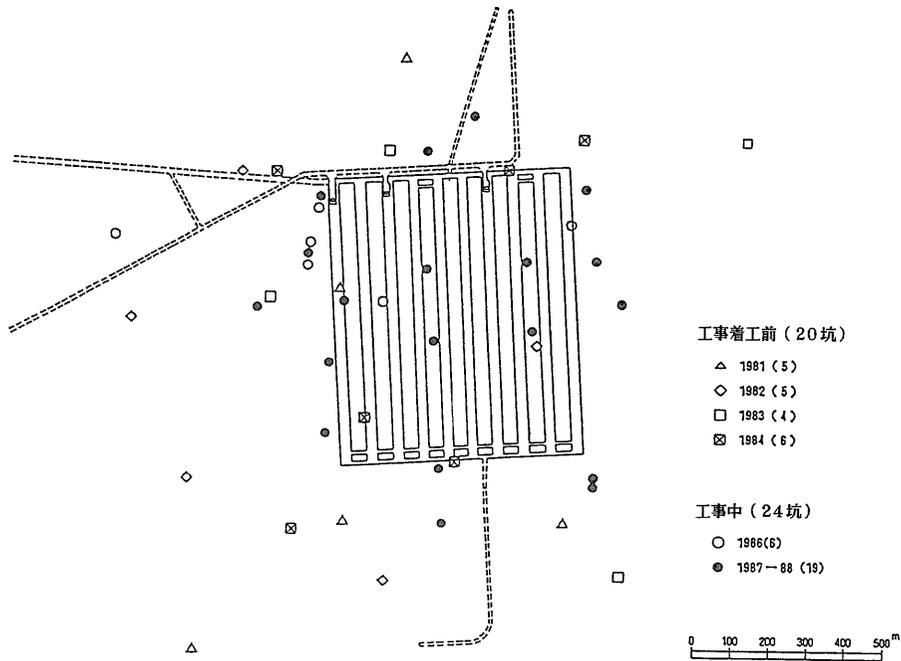


A-B断面: トンネルに平行

C-D断面: トンネルに直交

第1図 串木野地下石油備蓄基地の地質と空洞配置を示す断面図(HOSHINO, 1993b)。

の範囲に20本掘削した。ひきつづき、建設に並行して24本のボーリングを掘削している。これらの地質調査によって深度海拔-50-100 mまでの地下地質、特に地質構造要素や岩盤の物理的・水理的性質が判明し、事前調査時に把握した地下地質をトンネル掘削中に更に確認しつつ工事を進めることができた。



第2図 串木野地下石油備蓄基地の平面図(HOSHINO, 1993b). 10本のトンネルと44の調査ボーリングの位置を示す.

3. 大深度開発における地盤情報と地質情報

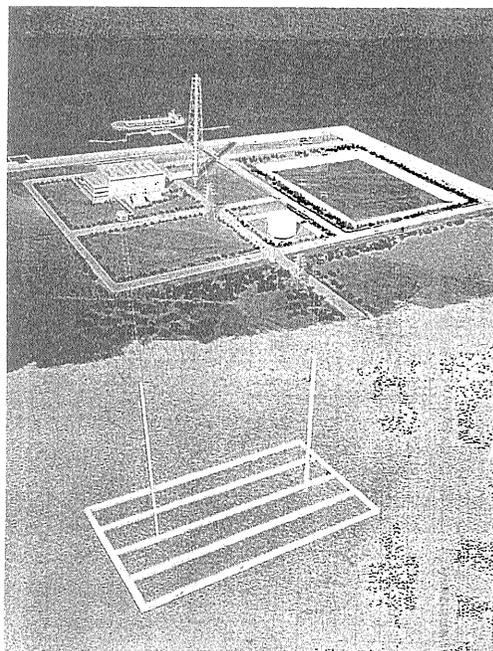
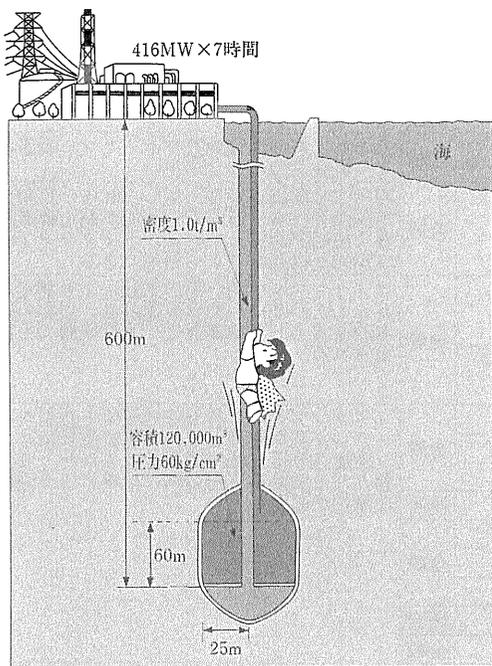
石油地下備蓄の後を受けてLPG(液化石油ガス)の地下備蓄基地プロジェクトが現在進行中である。LPG地下備蓄では貯蔵圧力は7気圧に近くなるのでトンネル型空洞の設置深度は原油の場合よりも約100メートル深くしなければならない。従って更に深度の大きなボーリング調査が行われている。更に大深度における将来的な地下空間開発を目指して盛んに研究・開発されているものに、高レベルの放射性廃棄物の処分・貯蔵、圧縮空気貯蔵、超電導エネルギー貯蔵等がある。

高レベル放射性廃棄物処分・貯蔵に想定されている岩盤内空洞は第2表に示したように深い場合には1000m程度の深層につくられる。

圧縮空気貯蔵, CAES (Compressed Air Energy Storage)は夜間に過剰な電力をもって地下の気密空間に空気を圧縮して貯蔵しておき, 昼間にその圧縮空気を取り出し電力を発電するシステムである。ドイツでは岩塩中に作られた空洞を利用する形ですでに実用に供されている。この空洞は地下650-800mの深さに岩塩を溶解してつくられた紡錘状の気

密空間である(高橋ほか, 1991)。日本では花崗岩のような堅硬岩盤中に作るケースと軟質泥岩中に作るケースがそれぞれ研究されている。我が国では大量の電力を消費する大都市は第四紀層の上に在ることが多いので関東南部のような地質条件を想定した軟質泥岩のケースがよく研究されている(林, 1990; 岡本ほか, 1995)。第3図の左は軟質泥岩型CAESの, 右は堅硬岩盤型CAESの構想図である。林(1990)によれば軟質岩中の地下600mの深度に半径25m, 高さ60m, 容積12万m³の気密性空洞内に60kg/cm²の圧縮空気を貯蔵すると, 40万kWクラスの発電を行うことができるという。

このような大深度における地下開発に際して一般に必要なとされている調査項目と調査法は第3表の如くである(エンジニアリング振興協会, 1994)。建設技術者はこれを地下開発に必要な地盤情報のリストと呼んでいる。ここに述べられている大部分の項目, すなわち岩石・岩盤の物理的性質, 岩石・岩盤の力学的性質, 地盤の応力状態, 及び岩石・岩盤の化学的特性(以上を取りまとめてここでは便宜的に岩盤の物性と呼んでおく)は掘削するトンネル空洞の壁面及び周辺の力学的・水理的安定性に直接関



第3図 (左)軟質泥岩型圧縮空気貯蔵タンク(林, 1990):
(右)堅硬岩盤型圧縮空気貯蔵タンク(エンジニアリング振興協会, 1994)

与する地盤(物性)情報である。また、空洞に近接した範囲の地形、地盤構成や地盤の耐震性も直接的地盤情報にはいるかもしれない。しかし、一方、あえて区別すれば、地下水状況及び広域の地質構造等は広域的地質情報である。

このような直接的情報としての地盤調査、及び広域的情報としての地質調査について設計上必要とされる調査の範囲(深度)についてエンジニアリング振興協会では第4図のようにまとめている(エンジニアリング振興協会, 1994)。すなわち、まず、深さに着目して第4図を見ればトンネルの深度の1.5倍(硬岩)から2倍(軟岩)の深度までを必要な調査範囲としている。上に紹介したCAESの例をとれば深さ600mないし800mの建設にたいしては1200mから1600mまでのボーリング深度が必要である。また、平面的な範囲については建設深度に相当する幅が必要であり、上の例ではトンネルの左右にそれぞれ600mないし800mの調査域が求められる。これらの数字は多くの実績に基づいて定められたものであり串木野の前例に照らしても妥当な数字であろう。以上は地盤調査の深度と範囲である。

広域的の情報としての地質調査について第4図は

地下水を例として挙げている。それによればトンネル深度の2倍から4倍(硬岩)、あるいは5倍(軟岩)の調査範囲が必要とされている。地下水は岩盤中をある程度自由に移動するので更に広い範囲にわたって調査しなければならないのは当然であろう。この広がりも当然深度についても適用される。

従来、地下岩盤開発が100m未満の浅深度にとどまっていた時には地下地質もそれほど地表と変わらないという期待で2-300mのボーリングで済ませられたにしても、今後数100mを越える大深度における開発に移行するにつれて、このような直接的地盤情報を目標とする建設深度の1.5から2倍程度のボーリングの他に広域的の地質情報を目標とする数倍程度の大深度ボーリングが更に必要と考えられている。

単純化して言えば、地下構造物の建設時の事前の地質情報としては地下構造物設置深度の少なくとも10倍の深度までの状況が明らかになっていることが望ましい。串木野基地のケースでいえば、もっと深度の大きな科学ボーリング等が既に行われていて広域の中新世火山の形態が以前に明らかになっていたとしたら、ボーリングの数はもっと少なく

第3表 地下の開発に必要な地盤情報とその調査法(エンジニアリング振興協会, 1994)

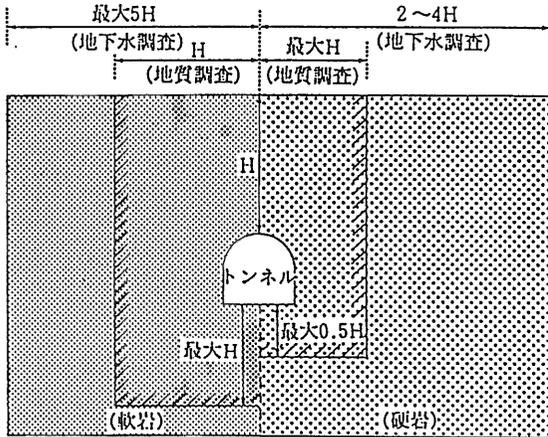
調査項目	地盤情報	調査方法	技術内容(技術レベル)		
			適用地盤	概要・技術レベル	
地形, 地盤構成および地質構造	地層, 岩種 割れ目, 風化, 変質	地表地質調査, コア観察 ボアホールテレビ, ボアホールレーダ	全般	主として地表地質調査やボーリング調査により調査されることが多い	
	断層, 褶曲, 地層の連続性	屈折法・反射法地震探査 地表地質調査 トモグラフィ(弾性波他), VSP, 電気探査, 電気検層	全般	屈折法地震探査が多く用いられる. 反射法地震探査は水平方向の分解能が高く構造探査で使用例が増えている. トモグラフィ法は複雑な構造探査にも適用できる	
掘削面・地下空間の安定性	岩石・岩盤の物理的性質	弾性波速度	速度検層(P波, S波) 屈折法地震調査 超音波速度試験	全般	コアサンプルを使い室内試験により測定されることが多い. 弾性波速度は, 岩石の基本的性質として地震探査や速度検層でも測定される
		密度	密度試験		
	岩石・岩盤の力学的性質	一軸圧縮強度	一軸圧縮強度	全般	コアサンプルから行う室内試験と坑道やボーリング孔を利用して行う原位置試験により実施される. 原位置試験は大がかりな試験となるため地下構造物の規模により適切な選択が必要
			粘着力, 内部摩擦力		
		変形係数	原位置岩盤試験	全般	
			孔内載荷試験		
			ストリットジャッキ試験	硬岩	
		地盤の応力状態	地山の初期地圧	オーバーコアリング法	
	AE法 水圧破砕法				
	岩石・岩盤の化学的特性	粘度鉱物の種類, 含有量	X線分析	軟岩	膨潤性等の主原因となる粘度鉱物を調べる. また, 各種の室内試験により軟岩特有の諸性質を調べる
浸水崩壊度		浸水崩壊度試験 スレーキング試験			
吸水膨張度		吸水膨張試験			
膨潤度, 膨張圧		膨潤度試験			
地盤の耐震性	動的性質	動的試験	全般	実際に振動を起こす動的試験や振動予測のため弾性波速度を調査する	
	弾性波速度	屈折法地震探査			
地下水状況	帯水層, 地下水位	電気探査, 電気検層	全般	地盤の比抵抗等を測定し, 帯水層の分布・性状を調査する. 地下水検層は, 孔内水の比抵抗変化から地下水の流動を調査する	
		トモグラフィ(比抵抗, 電磁波) 地下水検層			
	間隙水圧, 地下水圧	間隙水圧試験, 湧水圧試験	全般	ボーリング孔を用いて行う	
		透水係数	ルジオンテスト	全般	ルジオンテストは注入式, 湧水圧試験は圧力解放式で, いずれもボーリング孔を用いて行う
	湧水圧試験 室内透水試験		全般	ボーリング調査により得られたコアサンプルを用いて室内試験により調査する	
作業環境の安全性	酸欠空気, 有毒ガス 水質	ガス調査	全般	ボーリング孔より試料やガスの採取を行い調査する	

て済んだであろう。現在は色々な制約から設置深度の5割増しぐらいのボーリング深度しかとれないが、将来更に大きな深度での地下構造物になれば基礎調査段階でのボーリング深度を思い切って大きく設定することが必要になるであろう。

4. 深部地質情報への期待

以上に地盤情報と地質情報の区別を述べたが、従来、地質研究者が提供する地質資料と建設技術者が求める地盤情報とがあまりにも乖離しすぎていることが往々にして見られた。

1980年代の後半ごろ、先に述べたCAESやSMES(超電導エネルギー貯蔵)の研究会が活発に



第4図 地下トンネル型構造物の調査範囲の目安 (エンジニアリング振興協会, 1994). H: 深度

行われるようになり、関連の建設技術者は大都市近傍の適地についての情報を求めていた。私がこれはおおきな問題だと思ったのは東京、千葉、神奈川の地下物性についての誤解が関係の人々に根強いことであった。当時、ヨーロッパ、アメリカでは日本に先んじてテストプラント等の開発を行っていたがその場所は大都市の近傍が多かった。欧米の都会の基盤はほとんどが変成岩、花崗岩、或いは中生代、古生代等の物性的に堅硬な岩盤である。首都クラスを見ても、ロンドンしかり、ニューヨーク、ワシントン、ストックホルム等、堅硬な岩盤の上にある。このような国で使われた設計諸元をそのまま関東平野にもってこようとしていた。ところが、東京等の基盤は比較にならない程弱い。この事がほとんど理解されていなかった。研究所・大学一般の地質資料、ボーリング資料は地質時代、岩層区分のことばかりで産業界が求めている地盤データの記載はほとんど無い。そこで関東平野は第三、四紀層で構成されている、と言っても、パリ盆地も第三紀層の上にあるそうだがと反論される始末であった。

このような時に必要なのはある地質構造の中に地盤の物性値がどのように分布しているかという地質物性図である。この際、バラバラの地質柱状や点的な物性データをいくら並べても説得力は少ない。広域にわたる両者の関係図が必要とされるのである。第5図は応急的にまとめられた地質物性断面図の一例である。

これは、石油、天然ガス、防災関係で行われた数

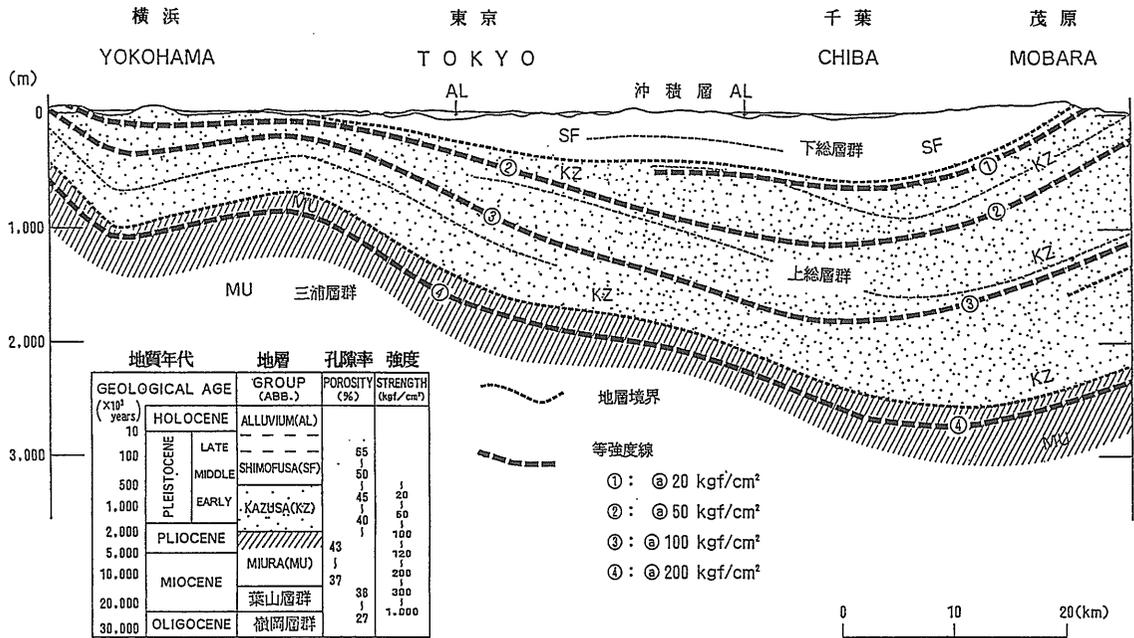
100から3000 m クラスのボーリング資料から編集した東京湾周辺地域の地質構造を基にして、その上にボーリングコアや地表岩石試料について測定した一軸強度値の深度分布を描いたものである。(星野他, 1989, 1990, 1992; HOSHINO, 1993 a). 同図では沖積層及び下総、上総、三浦、葉山層群の地層境界を細点線で、一軸強度の等強度線を20, 50, 100及び200 kg/cm²の強度毎に示してある。三浦、房総の地層対比についてはまだ問題の多いこと(たとえば遠藤ほか, 1991), 強度測定のできたコアがやや局部的であること等から本図は一応の全体像を示したものにすぎない。しかし、これによって、東京首都圏地下開発について直接的な地盤情報を提供することが出来る。

いま、かりに CAES 空洞を千葉付近に建設するとしよう。第5図によると600 m 付近の深度における強度は約20 kg/cm²である。一般にある程度の断面のトンネルを地下に掘削するためには岩盤の強度は少なくとも200 kg/cm²が必要と言われている。従って、この深度でトンネル型空洞(堅硬岩盤型)の圧縮空気貯蔵槽を計画するのは無理であり、もしどうしてもトンネル型ということであれば約2000 mの深度まで下がらなければならない。実際に、現在このような地域で計画されているのは第3図(左)に描かれているような、強度20 kg/cm²程度の軟質地層でも実現可能な水没無人掘削の紡錘型貯蔵槽である。(林, 1990)。しかし、川崎、横浜の方に場所を移せば1000 m 以浅の深度にトンネル型空洞を作る可能性もでてくる。

口絵のカラー図面は第5図の原図に上記の水没無人掘削方式紡錘型貯蔵槽(軟質泥岩型)のモデル(第3図左)と多目的地下ドーム・システムのモデルを重ねたものである。それぞれのモデルの写真は地層断面図のスケールに比較して拡大されているので深度がずれていることに注意して頂きたい。

このような例は強度のような典型的な地盤情報ですら対象深度の数倍にまで広げた広域の地質情報と総合することが効果的であることを示している。

一般に堆積岩の強度等の物性は圧密(孔隙率)と造構応力の2要素に左右される。第5図で下総・上総層群までは等強度線と地層境界はほぼ並行していてこの一連の堆積盆地では圧密が強度形成の主因であることを示している。しかし、不整合を隔てて三



第5図 東京湾岸地域の地質・物性断面図(HOSHINO, 1993a).

浦層群以下ではむしろ造構応力あるいは地殻変動の影響が強いであろう。1992年に掘削された科学技術庁の江東ボーリングでは三浦層群の下では葉山層群は欠如して約2600 m以深は先第三系の秩父系が分布しているらしい(鈴木, 1993)。深部の地質構造は上総層群等と違って単純な褶曲構造ではないらしい。おそらく、3000 mから数1000 mの深部では先第三系の堅硬な岩盤となっているようである。そうだとすれば東京首都圏はこの深度になってようやく欧米諸国の首都圏と物性的に肩を並べることになる。地質データと物性データが同じ重みで並べられた広域の深部地質情報が我々の手中に入った時にこそ我々は地下開発について信頼性の高い展望を物語ることができるのではないだろうか。

このような深部地質情報の必要性は建設分野とか都市基盤開発のためだけではなく、地震防災、地球環境保全等応用地球科学のほとんどあらゆる分野を通じて共通の課題でもある。色々な関係機関が協同して努力しなければならぬ事を痛感する。

(この原稿は本来、本誌488号“特集：ICDPと我が国の陸上探層掘削計画”のために寄稿したものである。諸般の事情で掲載が別号となったが内容はもとのままである。同号と併読して下されるように希

望する。)

文 献

エンジニアリング振興協会(1994)：地下空間利用ガイドブック，清文社，421。
 遠藤秀典・上嶋正人・山崎俊嗣・高山俊昭(1991)：東京都江戸川区GS-ED-1ボーリングコアの古地磁気・石灰質ナンノ化石層序。地質学雑誌，97，419-430。
 林 正夫(1990)：水没工法による深部軟岩でのドーム空間建造に関する構想研究—都市型CAESの実現を目指して—。土木学会論文集，418/III-13，17-44。
 星野一男(1984)：大規模地下構造物，土質基礎工学ライブラリー-26；建設計画と地形・地質，土質工学会編，179-197。
 星野一男(1990)：岩盤内石油備蓄の現況と課題。資源・素材関係学協会合同大会地下空間分科会資料，5-8。
 星野一男・釜井俊孝(1989)：東京湾周辺軟岩層の地質・物性の概要。第21回土木学会岩盤力学シンポジウム講演論文集，231-235。
 星野一男・渡辺浩平・釜井俊孝(1990)：東京湾周辺軟岩層の地質・物性の概要(その2)。第22回土木学会岩盤力学シンポジウム講演論文集，491-495。
 星野一男・渡辺浩平・八田敏行・釜井俊孝(1992)：東京湾岸地域の深部軟岩層の地質・物性断面。第24回土木学会岩盤力学シンポジウム講演論文集，479-483。
 HOSHINO Kazuo (1993a)：Geological evolution from the soil to the rock: Mechanism of lithification and change of mechanical properties, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks, Athens, Greece, 131-138.

HOSHINO Kazuo (1993b): Construction of underground caverns for petroleum storage in orogenic areas; Geological stability, Engineering Geology, 35, 199-205.

日本産業技術振興協会・エンジニアリング振興協会(1988): 地下空間利用技術に関するテクノロジー・アセスメント. 147 p.

岡本敏郎・田中幸久・川崎 了・日比野敏(1995): 軟岩地盤における圧縮空気貯蔵ガスタービン発電の成立性とその特徴, 一大深度における泥水掘削・鋼管シャフト方式の適用—. 応用地質, 35, 264-272.

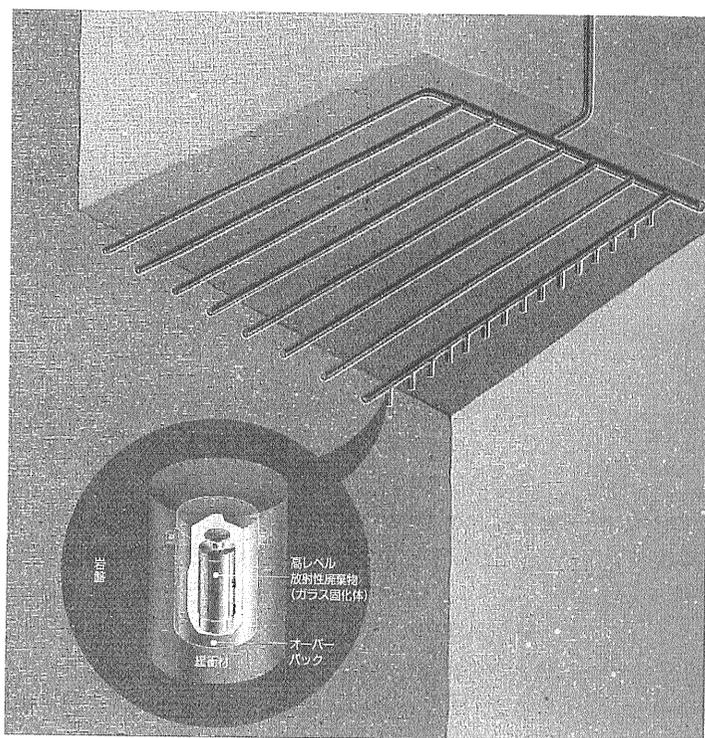
鈴木宏芳(1993): 東京圏の地盤構造—地震活動との関連. 日本地質学会講演要旨, 132-133.

高橋 学・高津浩明・鶴田 修・小出 仁(1991): 岩盤内地下空間の利用例—ドイツとスウェーデンにおける石油の石炭備蓄への転用事例—. 地質ニュース, no. 447, 50-57.

蒔田敏昭(1991): 地下石油備蓄基地建設の概要. 資源・素材学会誌, 107, No. 13, 927-938.

松村克之(1994): わが国における地下石油備蓄基地建設の経緯と現状. 資源・素材学会誌, 110, No. 7, 521-525.

HOSHINO Kazuo (1995): Role of geologic data for the utilization of underground space in great depth.



高レベル放射性廃棄物の処分場イメージ

- 高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)
高レベル放射性廃液をガラスで固め、ステンレス製の容器に封入したもの。
- オーバーバック
ガラス固化体に地下水が接触することを抑止し、地圧などの外圧からガラス固化体を保護する容器。
- 緩衝材
オーバーバックと地層の間に充填し、地下水の侵入と放射性物質の移動を抑制するもの。

(高レベル事業推進準備会)