

# 地下空間を利用した水資源開発に関する研究 DEVELOPMENT OF WATER RESOURCE BY USING UNDERGROUND SPACE

江崎哲郎\*・宮永佳晴\*\*・蔣 宇静\*\*\*・三谷泰浩\*\*\*  
 Tetsuro ESAKI, Yoshiharu MIYANAGA, Yujin JIANG and Yasuhiro MITANI

The short supply of water is a fundamental and crucial problem not only daily life in urban area also in agricultural and industrial use in all nations. Though most of water supply from river and underground water, it is not enough in concentrate urban areas and it is important to develop a new water resource in harmonic with environment and economy. As a result of some discussions of an effective and manifold utilization of underground space, two kinds of unique using methods are proposed, that is an utilization of welling-out water from the abandoned coal mine and an underground water storage tank as a buffer against water shortage problems. Both methods are conformable with environment when they are developed and are an appropriate cost.

## 1. 地下空間開発と地下水問題

多くの地下空間は空間そのものを利用するために建設される。これらの地下施設では、その空間内への湧水、漏水があり、空間の維持をはかるために排水設備を設け地表に常時排水を行っている。また、これらの建設にあたって、地下水の湧水は工事の重大な障害となることがあり、その湧水による地下水の低下は周辺環境に影響を及ぼすため、工事中の湧水防止策が積極的に行われ、完成後も漏水対策が図られる。この発生する地下空間内の水は、地下空間を利用する立場からは邪魔な存在であり、特に量が多いとき、水質が悪いときは、開発そのものに、また、その後の維持管理に大きな障害となる。これに対応して、この方面の技術の進展はめざましく、例えば最近建設された地下鉄トンネルの漏水は、以前に建設された地下鉄と比べて1オーダー以上減少している（図-1）<sup>1)</sup>。また、地盤沈下の抑制など環境保全のために大都市では、開発による地下水汲上げが制限されたため、最近ではむしろ地下水位は回復し、東京、大阪の低地や地下空間では水位上昇による障害すら発生してきているのが現状であり、この地下水をど

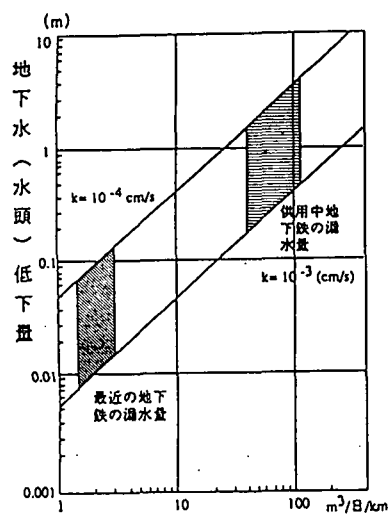


図-1 地下鉄トンネルの湧水量

\* 正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム工学研究センター  
 \*\* 正会員 工博 電源開発(株) 審議役  
 \*\*\* 正会員 工博 九州大学助教授 工学部環境システム工学研究センター  
 \*\*\*\* 正会員 工修 九州大学助手 工学部環境システム工学研究センター

のように安定に制御するかが今後の課題である。

他方、近年、都市への人口集中、一人当たりの水の消費量の増加、水質汚染の進行、ダム、地下水などの取水制限などの理由から、大都市圏のみならず各地方地域において、上水道、工業用水、農業用水、水産のための水資源の慢性的不足が増加している。さらに異常気象などによる渇水時には水不足が深刻な問題となっており、新たな水資源の確保が急務となっている。世界的にみても、世界の都市人口が全人口の2/3になる2030年頃には、飲料水の不足が最大の都市問題になるといわれている。

水利用のための水源は、河川水と地下水に依存している。都市用水に限ってみると、わが国における年間取水量は約327億立米で、毎年約1.5%増加している。水源別には、河川水が85%、地下水が15%である<sup>2)</sup>。

従って、地下水は、貴重な水源といえるが、地下水の過剰採取で、都市部では井戸水、湧水の枯渇が問題となっている。また、地下水は、地表水と合わせて考えるべきもので、河川流量の安定化に重要な役割を果たしており、地下水の減少は、渇水の一つの原因ともなる<sup>3)</sup>。

地下水は安価で簡便な上、水質が良好なこと、水温の変化が少ないこと、水量が安定していることなどの特徴により、水資源として高く評価され、わが国の近代化、工業化の進展にともなって需要が増大した。しかし、地下水の涵養量を上回って過剰に取水したため地下水位の低下を招き、地盤沈下、地下水の塩水化などの地下水障害を引き起こしている例が多い。

地下水の過剰取水による地盤沈下は、明治末期に始まり、東京では最大地盤沈下量4.5m、大阪では2.8mを記録している。現在では沈下現象は沈静化しているものの、全国で1000km<sup>2</sup>を超えるゼロメートル地帯を生じ、この非回復の沈下によって恒久的な洪水、高潮などの危険の高い地域となっている。さらに、新潟平野、濃尾平野、筑後佐賀平野ではこの問題が解決しておらず、地下水揚水の規制が行われている<sup>4)</sup>。また、臨海部における地下水の過剰採取によって、帯水層に押さえ込まれていた海水が上昇し、陸側に侵入して地下水の塩水化が生じている地域も多い。この影響は、地下水採取の規制が行われたとしても復元には長い年月が必要である。

以上から、地下水は豊富に存在するものの、その利用量は有限であり、地盤沈下等の地盤環境上の障害を生じないような、開発方法、方式が考えられねばならない。最近の調査結果では、地盤沈下の顕著な上記地域の障害を生じない揚水量は1km<sup>2</sup>当たり1日1000t程度であり、一人当たりの消費量を考えると人口密度3000人/km<sup>2</sup>を越えると区域内の自給量を上回り地下水は外部に依存することになる<sup>5)</sup>。

ここでは、地下空間を利用した地下空洞ダムによる貯水システムについて新しい視点からの水資源開発の具体的提案を行う。

## 2. 水資源としての地下空間への期待

図-2に鉄道トンネルの恒常湧水量の調査結果を示す<sup>6)</sup>。全体の60%のトンネルに多量の湧水があり、14%のトンネルは長さ1km当り1ℓ分以上である。日本国内のトンネルの総延長を考えても推定される湧水量は水資源として対象となる量と推定される。最近の地下開発は、大規模、長大化、深部化の傾向にあるので、湧水量は今後着実に増加すると推定され、少なくとも各施設毎にローカルな水資源として期待できる。この水資源としての特徴は、①天候に左右されず安定した水量が確保でき、経年的枯渇も少ないこと、②一般に深部ほど水質も良好となること、③湧水を集める方式なので井戸揚水と異なり水位低下が問題とならないこと、④水収支が明確となれば漏水量を調節して適正

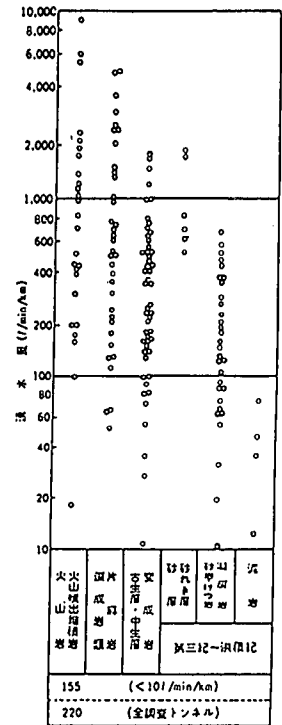


図-2 鉄道トンネルの湧水量

な地下水制御を行える見通しもあること、などが挙げられる。

次に河川水についてみると、わが国には年間平均1750mmの降水があり、この約70%が河川に流出する。その量は、蒸発分等を差し引いても4300億立米に達する。この量を考えると水資源としては豊富にあるが、地形上流路が短く、急勾配のため、この豊富な降水量も降雨後極めて短時間に流出してしまい、洪水量と渇水量の差が甚だしい。しかも、既往の水利用は農業用水が大部分を占めており、需要期以外は大量の水が無効放流されているにもかかわらず、新規用水を生み出す余地が少ない。このように自然流況に対する利用量は10~20%程度にとどまっている。この無効流量を貯留し、夏期渇水期の不足分を補給することは、新たな水資源の開発に加えることができる。

このような河川水の効率利用のために一般にダムが建設され、降雨時の水を貯水する方法がとられる。しかし、ダム建設に対して近年、多くの批判があり、この整備は困難な状況にある。また年々適当なサイト払底の問題があり、時間と費用のかかる事業となっている。米国では、大型ダムが水問題解決の切り札だった時代はすでに過去のものになったといわれており、大型ダムへの財政支出を停止している。大型ダムは環境破壊だけでなく、塩害、堆砂、洪水を引き起こし、本来の目的が達成できなかったり、ダム決壊のリスクもあるため、流域住民の反対も強まっている。これを受けて世界銀行などでは、大型ダム開発よりも効率的な水管理を行う方が重要と考えるようになってきている。国内でも計画中止などが具体化しており、21世紀に向けての環境重視の社会改革の中、水の需要管理と利用効率の向上が一段と重視され、節水、リサイクルなども含めて水資源開発には新しい視点が不可欠であり、従来の大規模開発に代わって大きな意味を持つと考えられる。ここでは、地下空間を利用した地下空洞ダムによる貯水システムについて新しい視点からの水資源開発の具体的提案を行う。

### 3. 新しい水資源としての旧三池炭坑の湧水の利用

#### 3・1 現状

炭鉱、鉱山は地下から膨大な量の岩石、鉱物を長年にわたって掘削するため、平面的にも、3次元的にも巨大な地下空間が形成される。当然空間の増加、掘削深度の増加とともに湧水が多くなる。この排水費用は鉱山経営を圧迫し、多量の湧水は安全にも影響するなど、負の資源としての考え方が強い。1997年閉山した三池炭鉱は明治時代から操業し、過去に2億1余の石炭を産出した。採掘跡空間が広大で、特に湧水の多い炭鉱として有名であった。現在の湧水量は、海底である三川四山地区（大牟田市三池港）65V分、有明地区（高田町）20V分、陸上地区（大牟田市内）6V分である。このうち、陸上地区は地元の農業用水等として既に利用している。したがって、毎分85t、日量約12万t程度が水資源として利用可能である。この海底部からの湧水は、降雨による影響がほとんどなく、経年的変化もなく恒常的に湧水している。

湧水の水質は、濁度がやや高いので沈澱池を設けているが、そのまま河川に放流するのに支障のない程度の水質である。塩分は約1,100~1,800ppm程度で、海水（約2万ppm）と比べて格段に少ない。

一般に炭坑湧水は水質が悪いというイメージがあり、実際閉山後に地表に湧出している水には、pHが低く強酸性を示したり、鉄分、 $\text{SO}_4$ などが多く含まれることがあり、廃坑後に問題となる場合がある<sup>7)</sup>。しかしながら、三池炭鉱の湧水は、塩分を除けば上水道水としても利用可能な良好な水質である。

#### 3・2 水資源としての利用可能性

図-3に三池炭鉱の展開状況の見取図

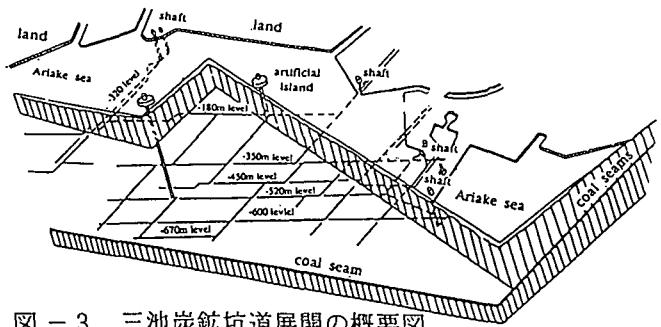


図-3 三池炭鉱坑道展開の概要図

を示す。炭坑は有明海海底に展開しており、維持されている主要基幹坑道は総延長250km、平均深さ400m、約40km<sup>2</sup>の範囲に網目状に分布する。湧水はその空坑道より浸出してくる浸透水である。この水は、坑道内各レベルで集水ピットで集められ地表に排水される。97年3月現在、最深部の水位は400mであり常時汲み上げられていたが、閉山により揚水が停止されて徐々に水位が上昇している。地下湧水は、井戸による揚水と異なり、トンネル湧水と同じで空洞壁面からの浸透水であるため、集水ピットのレベルが決められれば、水位の変動はなく、ほぼ一定の湧水量が得られ、季節的変化、降雨量による変化は見られない。炭鉱の開発区域は地表下300～800 m の古第三紀層岩盤内であって、開発面積の増加に比例して、

湧水は約100年間にわたって増加してきた。従って、この水は地表付近の第四紀層中の地下水と区別される独立した帯水層からの深層地下水であって、恒常的な湧水量を持続する見通しがある。また、帯水層を異にするので、第四紀層の圧密沈下に影響を及ぼさないと考えられる。但し、塩分が多いため、水道水、農業用水として使用するためには、ほかの水と混ぜて希釈して使用することが必要である。他の水源と混合しないとすれば、塩分を除去するための逆浸透膜法による淡水化プラントが必要である。逆浸透膜法を利用した淡水化プラントの建設費および運転費は、水源の塩分濃度、施設規模に大きく影響される。三池炭坑の湧水は、塩分濃度が海水に比べ極めて低いため、格段に安く済む。(図-4)

### 3・3 水資源開発の直接効果、間接効果

①1日12万t(海水淡水化を必要とするときは約6万t)の天候に影響されない安定な水資源が、送水施設などの地上設備の建設期間を要するのみで短期間で得られる。勿論、ダム建設費などと比べて安価である。②海水淡水化設備を行ったとしても、現在のほかのダムなどの水資源開発と同程度のコストで済み、経済性も高い。③佐賀筑後平野は農業の盛んなところである<sup>9)</sup>。佐賀白石平野では平成5年の渇水期に最大18cmも沈下を生じた。佐賀県が公表したデータによれば、同平野では年間最大20～40mmの沈下を生じており、地下水の取水制限および代替水源の確保が急がれている。この水資源の開発は代替水源となり得る。また、第四紀層の地下水でないので、圧密による地盤沈下を回避できる<sup>9)</sup>。④この事業が推進されると有明海海底に賦存する莫大な石炭資源を将来開発できる可能性を残しておくことになり、炭鉱の再生も期待できる。また、地下400m、延長250kmに及ぶ地下空間が将来再生利用される可能性が残されることになり、地下揚水発電所の建設などが考えられる<sup>10)</sup>。⑤同規模の水資源を確保するとすれば、新規ダム等の開発に要する時間と費用は莫大なものと考えられる。新規立地で、この規模の開発が可能なサイトは近くには得られない。また、その候補地の自然環境保全が達成される。また、炭鉱が閉山されると、この地点の荒廃、新たな鉱害の発生が懸念されるが、地下水利用が行われるとその防止にも役立つとともに土地の有効利用に貢献できる。

## 4. 渇水対策としての「地下空洞ダム」の利用

大都市では水資源の不足が大きな問題となっており、いわゆる“水がめ”の確保が急務となっている。地

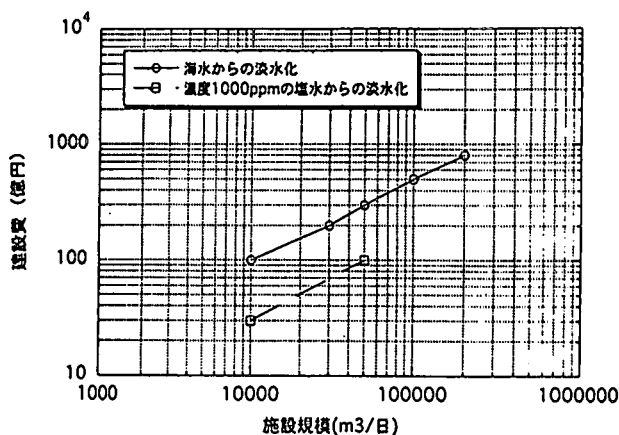
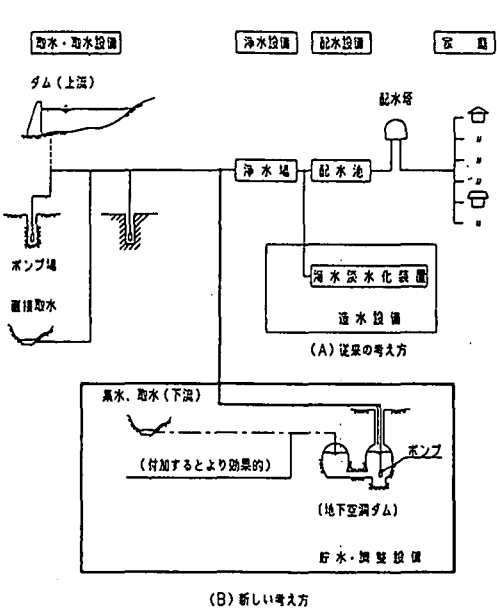


図-4 海水淡水化のコスト例

下空間建設技術のうち、石油備蓄、トンネルなどの建設技術は、最近では、確立された技術と位置づけられ、経済的合理性も確保されるようになってきている。ここでは、大都市周辺に地下空洞を掘削し、渇水時の”水がめ”としての利用について、その効果、問題などを検討する。

4・1 渇水対策についての従来の考え方

近年、降水が少ない期間が長期化した場合の、水不足の問題が、深刻化するケースが増加している。これに対する対策としては、新たな集水、貯水のためのダムの新設が一般的であるが、ダムの建設の困難性、計画の長期化等の理由から、沖縄本島等の離島など給水制限の回数が多い地域で、海水淡水化プラントを導入するケースが多くなっている（図－5(A)）。ダムの場合は建設費は高いが、維持費が安く、耐用年数も長い。さらに建設費には国の補助が期待できるので、住民の負担はあまり大きくならない。ところが、この海水淡水化装置の大きな問題点は運転・維持費が非常に高いことである。この場合にも建設費に対しては補助が期待できるが、維持費については補助が無いので、すべて住民負担となる。そのため、ある離島では装置を配置したが、負担があまりにも大きいので現在は使用を停止しているという。海水化プラントは非常に精密な装置で、必要な期間、時間だけ運転するという方式をとるのが困難で連続運転が原則なので、自然の水で間に合う期間も、造水を続けなければならないという点に問題があるようである。

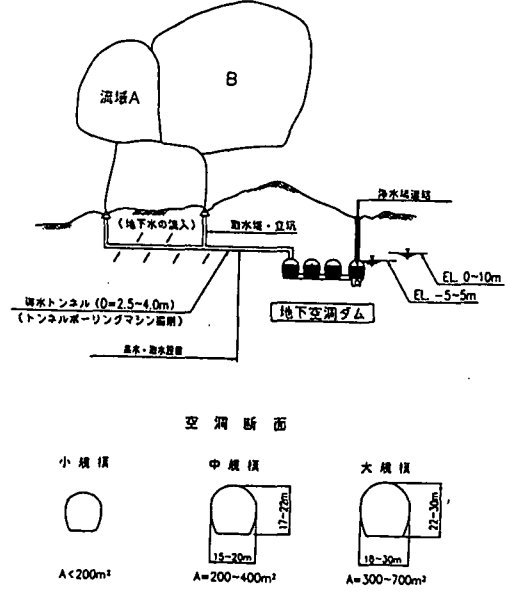


図－5 渇水対策のフロー

4・2 新方式の提案

提案する新方式は年間を通して絶対的に給水量が不足している場合には適用できないが、降水に恵まれたわが国では、降水を効率的に集水して、貯留・運用することによって、新たに造水までしなくても渇水対策は可能という考え方である（図－5(B), 図－6）。

水道水の需要は、電気と同様に季節によって、また、1日のうちでも時間によって、需要の変動がある。電気は貯留がきかないので、揚水発電で、この変動に対応するのが一般的になっている。一方、水道水は配水池、もしくはダム貯留によって日間もしくは年間の調整を行っているが、一部の地域では、渇水時にそれらの設備では対応できなくなっている。その原因は配水池はもともと火災の時の消火用水等を考慮して設計されたものであり、建設費も高いので、さほど大きな容量をもっていない。一方貯水池は、通常の時でも、降水量の1/3位は蒸発散でなくなり、渇水時には当然その量も増加するため、実際にはあまり役立たなくなり、水不足→給水制限→断水となっていると考えられる。渇水問題が発生しているのが西日本のみで東日



図－6 地下空洞ダムによる貯水・調整システム

本にほとんど発生していないことから蒸発散量が大きな影響を及ぼしている可能性が強い。

ここで提案する「地下空洞ダム」を用いるシステムは、取水設備と浄水設備の間に、貯水用のダムと調整用の配水池の機能を合わせもつ、比較的容量の大きな「地下空洞ダム」を配置することによって、

①不需要期の余分な水を集水・貯留しておいて、需要期に補給水として使用する（年間調整）

②夜間の需要の少ない時間帯の水を貯留し、昼間使用する（日間調整）

の、両方の調整を行うことによって「負荷平準化」を行い、自然の雨水を効率的に運用することによって漏水対策を行うシステムである。（図－５(B)）

#### ４・３ 新方式の特徴

新方式を用いる場合、ダムの方式及び、淡水化方式と比較すると以下のような特徴を有する。

地下ダムと一般のダムとを比較した場合の特徴について表－１に示す。

表－１ 新方式と一般のダムの比較

| 利点                                                                                                                                                                                                                                                          | 欠点                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ①山地などの強固な地下岩盤内に建設するので、ダムと比べて環境問題が少ない。<br>②蒸発散が無いので貯水した水は100%以上有効に使えること。空洞内に浸透、流入する地下水が加わるので、水の量は増える。<br>③山・川のないところにも立地可能である。一般には需要地に近い地質良好な場所で、大規模の場合、掘削ずりの処理条件の良い海岸部に立地するのが有利である。<br>④コストはダムよりやや割高であるが配水池に比べれば、大幅に安い。<br>⑤補償物件がほとんどないので、建設までのリードタイムが非常に短い。 | ①空洞容量の1.4倍という大量の掘削ずりが出るので、排土処理の問題がある。規模が大きい場合は埋立計画とセットで考える必要がある。但し、掘削ずりは骨材資源として良好な硬岩なので、一時的にストックし、骨材として利用するシステムも考えられる。このような建設と碎石製造の連携システムが成立すれば、廃棄物であるずりは資源として再利用されることになり、経済性はもちろん環境保全にも役立ち逆に利点となる。<br>②地下に設けるのでポンプアップの動力費がかかる。<br>③空洞周辺のため池、井戸等に影響を及ぼす可能性がある。 |

海水淡水化装置と比較した場合の特徴について、表－２に示す。

表－２ 新方式と海水淡水化装置との比較

| 利点                                                                                                                                                                                                 | 欠点                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| ①維持費がほとんどかからないので、年間の運転コストが大幅に安い。償却年数を海水淡水化施設の20年に対して、50年と長くすることができる。<br>②建設費に対する補助を考慮すると、その差はさらに大きくなる。<br>③海水淡水化装置が連続運転なのに対して、需要の増減に対応して、起動停止、補給水量の増減の調整が容易である。<br>④取水堰と導水トンネルを付加すれば、容易に水量の増加もできる。 | ①地下空洞ダムだけでは大きな増水効果は期待できない。<br>②集水設備の付加がなければ、漏水期間が長期化した場合には対応が困難になる。<br>③建設期間は長くなる。 |

なお、地下空洞はおおむねEL.0m前後の標高レベルに設置するので、集水・取水用の堰は川の末端、海への出口に近い位置に設けることができるので、環境への影響も少ない。取水可能な川があれば、送水トンネルさえ伸長すると、容易に水量を増加させることができるので、集水設備を付加するのが望ましい。具体的な地下空洞ダム概念図を図-7に示す。

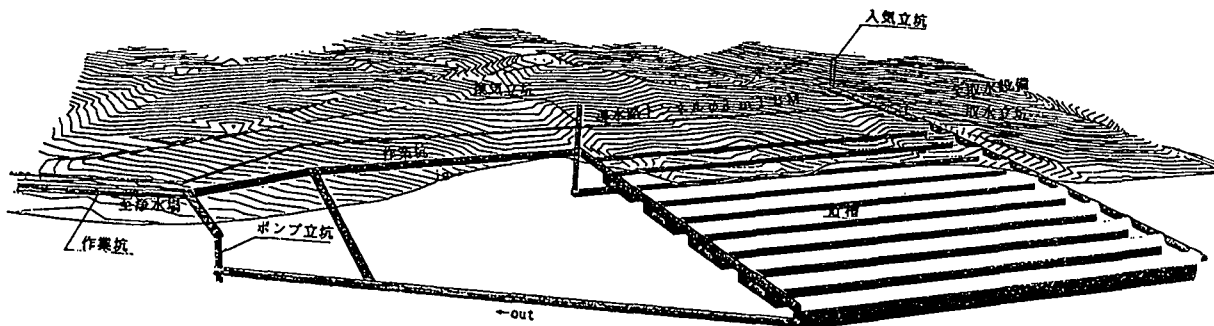


図-7 地下空洞ダムの概念図

このように、今までは「地下空洞ダム」の発想がなかったので、「一般のダム建設が困難である」→「海水淡水化装置」という考え方になったと思われる。この地下空洞ダムは、日本で3カ所建設された石油地下備蓄用の岩盤タンクの技術を応用したものであり、空洞の断面の設計、施工を工夫することにより、地下空洞のコストを大幅に低減させて、このような分野にも経済的に採用できると考えられる<sup>11) 12)</sup>。

わが国は豊かな降水に恵まれた国である。よって、まず第1にこの自然の雨を有効に集水、貯留して有効に活用することが、省エネルギー（大きな動力費がかからない）の面からも、住民の負担を少なくする面からも、必要となる。1日1万tの淡水化装置は建設費だけで約100億円かかり、維持費も高いが、川の流量に換算すると、 $Q=0.116\text{m}^3/\text{秒}$ という非常に小さな流量にしかない。そもそも、海水淡水化装置は、降水が期待できない中東などや国内では離島で実用化されたものであり、我が国では降水の有効利用をまず考えて「地下水空洞ダム」も利用できないという最後の段階で検討すべきものと考えられる。

## 5. まとめ

我が国の人口一人当たりの年間降水量は約5300立米で、降水量が約半分のヨーロッパと同程度と言われている。さらに急峻な地形で河川の流路が短いため、雨水は河川から急速に海へと流出することを考えると有効に利用できる水量は相当に少ない。しかも降雨は梅雨期や台風時に集中するので、平準化して利用するには、ダム等の貯水施設が必要になる。このようにしてダム建設による水資源の開発が進められてきたが、その貯水量の合計で約200億立米で、首都圏の一人当たりの貯水量は約30立米、3カ月間降雨がないとなくなってしまう勘定であり、水資源の確保はすでに大きな都市問題となっている。

一方では、今後の開発は、環境との両立が不可欠であり、経済性も無視するわけにはゆかない。元来、都市は食料、各種資源などを自給自足できないものであり、周辺からの供給が不可欠である。水資源の確保においても、地表水、地下水ともに後背地への負荷が極めて大きいという認識のもと、その負荷が低減されることを念頭に多様な水資源開発がなされねばならない。海水の利用、廃水のリサイクリングはもとより、節水なども重要であるが、ここに示した、地下空間からの湧水や、地下空洞ダムの利用も、建設技術、利用技術には既存のもので問題がなく、実用化できるが、むしろこれらを含めた外部に負荷を少なくする総合的水利用システムの構築が成否の鍵となろう。

## 6.参考文献

- 1) 地下開発地盤環境管理検討会：昭和63年度地下開発地盤環境管理調査報告書, pp.61-62, 1989
- 2) 国土庁：日本の水資源, 1994
- 3) 上田憲一：日本の水問題を考える, 技報堂, 1996
- 4) 環境庁：環境白書, 1997
- 5) 環境庁：地盤沈下未然防止のための安全地下水位の算定手法検討調査（平成7年度環境庁委託業務結果報告書）, 1996
- 6) 大島洋志：わかりやすい土木地質学入門, 土木工学社, 1997改
- 7) 西田正・江崎哲郎・青木一男：旧産炭地における古洞水の湧水, 土と基礎, vol.34, No.11, pp.45-50, 1986
- 8) 佐賀県：地盤沈下の現状, 1996
- 9) T.Esaki, G.Y.Zhan, K.Shikata : Analytical system assisting underground development with prediction and confinement of changes in the subterranean environment, Land Subsidence IAHS Pub No.234, pp.287-294, 1995
- 10) 江崎哲郎・大久保洋介・棚橋由彦・甲斐貴司：鉱山施設を利用した地下揚水発電とその経済性評価, 地下空間利用シンポジウム1995, pp.17-24, 1995
- 11) 宮永佳晴・福原朗：地下石油備蓄基地の設計について, 電力土木No.219, pp.63-74, 1989
- 12) 蒔田敏昭・宮永佳晴・野間正治：石油地下備蓄基地建設工事, 土木施工Vol.33, No.5, 21-29, 1992