

地下空間を利用した水資源の開発と環境保全への効果
WATER RESOURCE DEVELOPMENT IN DEEP UNDERGROUND AND ITS EFFECT
OF ENVIRONMENTAL CONTROL

江崎哲郎*・三谷泰浩**・蔣宇静***・鹿田光一****

Tetsuro ESAKI, Yasuhiro MITANI, Yuijing JIANG and Kouichi SIKATA

Water resource is confronted in a critical situation due to the restriction of the future developments in the river and in the shallow underground. This study proposes one of the development methods of water resource by using the fresh water reserved in the rockmass at deep underground. Some experiences of the past developed projects in the rockmass assure the possibility of development at depth. The proposed method will secure the steady water supply and will accomplish the environmental protection by an adequate operation.

keywords : water resource, deep underground, geoenvironment, underground water, subsidence

1. まえがき

近年，都市の人口集中によって多くの都市問題が生じ，21世紀へ向けての大きな課題となっている。その都市の問題の1つに水資源の確保がある。都市部における需要の増加に追いつけない水資源の量的不足が根本的な問題であるが，新規開発の困難，水質汚染の進行，河川水，地下水などの取水制限などの理由から，また大都市圏のみならず各地域においても，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。とく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いる。また，世界レベルでみても，途上国の水資源問題は極めて大きな課題である。

水資源は70%がダムなどの表流水，30%が地下水によって賄われているが，前者はダム適地の不足，立地の難しさ，自然環境の保護，後者は塩水化，地盤沈下などの問題があり，新たな開発は一層厳しい状況にある。そのため従来の方式に加えて水資源の開発の多様化が急務となっている。これらについては，廃水等の再生利用，雨水の利用，海水の淡水化などがあげられているが，主要な水資源となるには経済性等の多くの問題があり，早急な普及は難しい¹⁾。著者らは地下空間の湧水の積極的利用や渇水時の“水瓶”としての貯水タンクの建設などの新しい水資源開発についての提案を行ってきたが²⁾，更に現状の問題について分析をすすめた上で，岩盤内地下空間からの水資源の開発方式を提案してみる。まず，多くの事例をもとに，賦存量，開

キーワード：水資源，深部地下，地盤環境保全，地下水，地盤沈下

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム科学研究センター

** 正会員 工修 九州大学助手 工学部環境システム科学研究センター

*** 正会員 工博 九州大学助教授 工学部環境システム科学研究センター

**** 正会員 工博 九州東海大学講師 工学部土木工学科

発方式、環境保全への効果などについて以下の検討を行う。

(1) 岩盤内における水資源賦存量、及び経済性、環境保全の両面から見た開発可能な地下水資源の検討を行う。従来、ほとんどの地下水は平野部からの揚水によるものであるが、山岳トンネル及び地下岩盤内の地下空間である鉱山などの湧水の例をもとに開発の可能性を探る。

(2) 岩盤からの取水の特徴と問題点を明らかにする。

(3) 岩盤内空間からの適切な集水技術について、環境にインパクトを与えない取水量を検討する。

2. 公共財として位置づけられた水資源開発の経緯と現状の問題点

水資源問題は、工学的問題の中でも人とその社会へのかかわりがひととき強い問題である。明治初期に約3000万人であった人口は昭和初期には約6000万人、現在では約1億2000万人へと推移した。また1人当り水使用原単位が急増したことにより、既存の農業水利に加えて発電用水、さらに都市用水の急増に対処するために、今日まで恒常的な水資源の開発と水利調整が進められてきた。

我が国では地形的にダムの建設の可能な地点が限られていることから、治水・利水目的をあわせもった多目的ダムを建設すべきであるという考えが芽生え、戦後の河川総合開発事業へと発展していった。

一方で急激な水利用の増加は水源地問題、地盤沈下、水質問題を引き起こした。工業用水法により、地盤沈下を防止するための地下水のくみ上げを制限したが、地盤沈下は鎮静の気配を見せず、拡大した0メートル地帯を中心とした大規模な被害を受けるに至った。

現在我が国を代表する利根川や淀川水系などでは河川利用率がすでに50～60%近くにもなっており、開発と同時に適正利用を積極的に推進する時代になってきた。すなわち開発適地の枯渇、開発効率の低下などの激しい制約条件の中で、従前どおりひき続き水を開発・供給すると同時に、水利用の合理化・高度化、節水型社会の形成、人口・産業の分散施策、水源地対策など、水利用の立場から見た地域のあるべき姿について水需要側への働きかけを図るという方向が必要となってきた。

更に、最近では異常気象、不安定取水、河川水利用率の上昇等に伴う渇水の長期化などが問題化している。また、都市圏への人口集中の再浮上、環境用水、消流雪用水、レクリエーションなど豊かで潤いのある社会形成に必要な水への要請など、新たな水利用と需要増に対してもより安定した水供給が必要となってきた。その中でダムに偏重した開発方式では限界があり、水資源の多様化が極めて重要となってきた。

3. 地下水資源の賦存量³⁾

地球上の水の総量は約13億km³であり、大気圏、海洋、陸地、地下を廻る水の循環は閉じた系である。地球上の水の97%以上は海洋にある。水資源として重要な淡水は3%以下で、その70%が極地の氷である。湖沼や河川などの地表水が占めている面積は陸地の3%以下にすぎない。河川水は、全体で1200km³にすぎないが、循環速度が速く利用しやすいので開発が進んでいる。

地球上の水の中で最も不確定なのが地下水である。これは地殻には海のような底がなく、岩盤中の間隙の分布もよくわかっていないからである。岩盤内に4%の体積率で地下水が含まれていると仮定し、それを全陸地面積倍して浅層の地下水の量が450万km³と算出されている。更に、深層の地下水は560万km³と推定されている。これは河川水より4桁多い莫大な量である。比較的循環の速い地下水は、浸食谷の谷底よりも上の山体に含まれている地下水である。地下水は深層へ行くほど循環速度が遅くなり、かん水や塩水が多くなる。

国内における地下水賦損量は表-1に示す地域で推定されている。これは実用的な井戸の深度を開発可能

な深度とみなし、地盤の間隙率を30%として推計したものである。しかしながら、この統計は30年前のものであり、井戸の深度は浅く、莫大な賦存量があるものの実際に開発すれば、地盤沈下などの障害が発生する可能性が高い。深部では間隙率は小さくなるが、厚い岩盤内には、かなりの賦存量が期待されることは確実であろう。また、日本の多くを占める山地も、同様の岩盤で構成されており、これらも加えると開発可能性のある賦存量は倍加する。

表－1 日本の地下水賦存量³⁾

地域	賦存量 (億m ³)
関東平野	5,000
濃尾平野	4,012
大阪平野	2,783
京都盆地	360
奈良盆地	554

4. 岩盤内地下水の開発事例と新しい開発方式の提案

ここでは筆者らが開発以来研究を行ってきた、特に開発と環境の調和に配慮した水溶性天然ガスの開発、および石炭鉱山の坑道からの湧水などを例として、新しい2つの岩盤内地下水の開発方式について述べる。

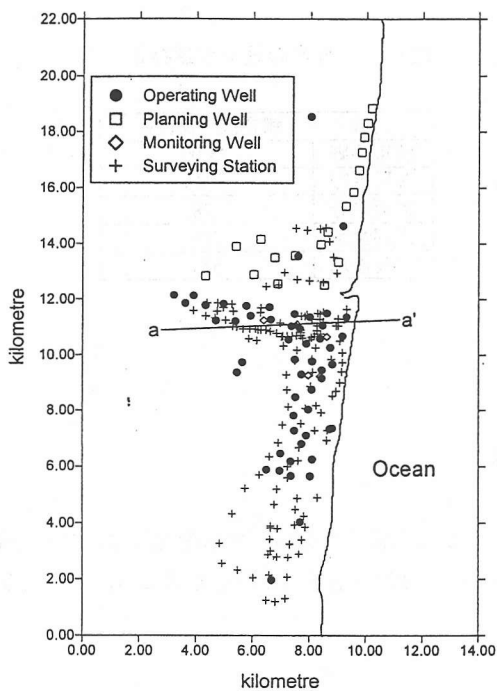
4・1 深部岩盤からの揚水による方式

まず、S地区での水溶性天然ガスの開発例を示す。水溶性天然ガスはエネルギー資源に乏しいわが国にとって貴重な資源であり、1950年代から新潟や千葉で開発が開始された。しかし、1960年代に新潟で過剰な揚水に起因する急速な地盤沈下が社会問題となった。その後、千葉でも同様の沈下公害が問題となった。このため天然ガスかん水の採取規制が行われるとともに、一部では還元圧入による対策がとられた。現在では沈下の予測方法の確立や環境に対する認識の高揚もあって沈静化しつつあるが、原因は過剰な揚水にあるといわれている。このような中、S地区での開発が1975年から開始された。この水溶性ガス鉱床は、面積約160km²、第三紀中新世後期～更新世前期の堆積岩からなり、その中の化石水として水溶性天然ガスが賦存し約130億m³の鉱量が確認されている。岩盤の強度は3.9～18.8MPa、空隙率は16～30%である。生産井は直径10cm、深さ平均約1000m、比較的小さな透水係数を考慮して各生産井の間隔は約500mである。図－1および2に示すように、約20km²の地区に生産井、試掘井の合計58坑井が掘削された。帯水層の深度は-355～-1180m、上部沖積層からの流下を防止するため、孔壁とケーシングの間にフルホールセメンティングが行われている。生産能力は水量として1日当たり約7,000t、ガス量として約1万m³である。また、1坑井当たり平均水量は1日当たり約200t、坑井の動水位は平均-170mである。

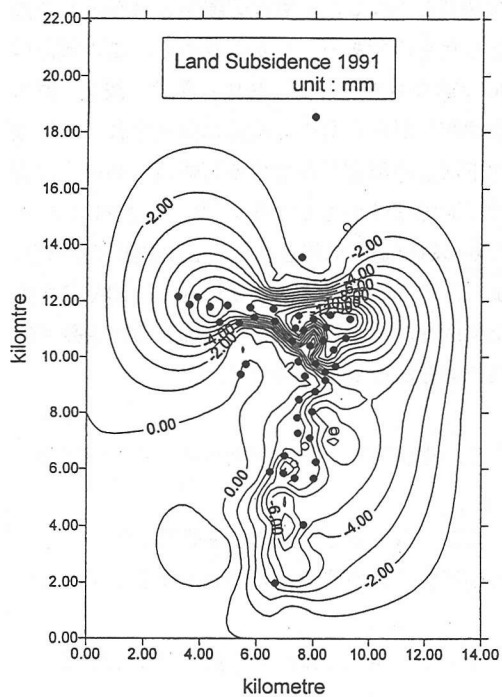
S地区の開発操業に当り、合理的な開発と沈下鉱害の未然防止のため監視当局に「天然ガス技術委員会」が設置され、次の監視体制を実施している。(1)水準測量、126地点延べ測線延長約53km、毎年1～2回、(2)観測井2地点、沖積層の水位観測の浅い坑井の水位およびガス層に達する深い坑井の水位の連続観測、(3)各生産坑井の見掛けの動水位観測、(4)休止坑井の水位回復観測。

また、揚水に起因する地盤沈下の形態、および量を正確に把握するために、観測データをもとに地下水流動－地盤沈下のシミュレーションを行っている⁴⁾。すなわち、FEM水平二次元浸透流解析および鉱山の地盤沈下の計算法である影響円解析を用いた浸透流沈下同時解析モデルを作製して、有害な地表沈下を生じない揚水量、水頭低下量を求めるとともに、今後の新規開発による沈下の予測を行って計画の適正さを定量的に確認している。

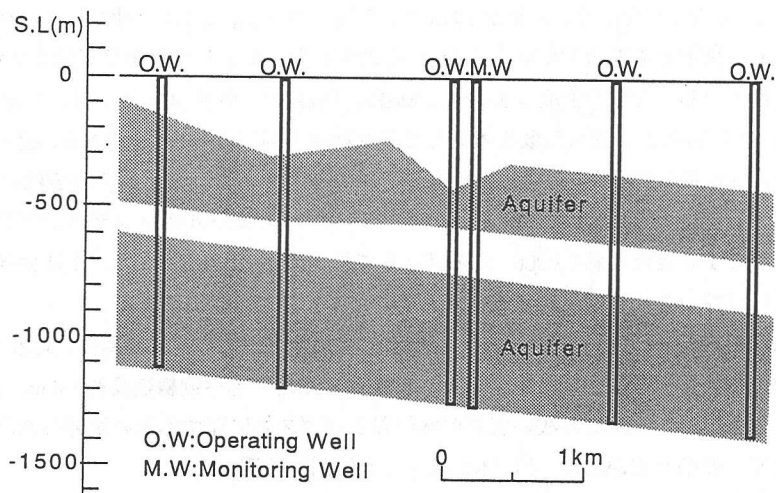
これらの実績をもとに揚水基準を設け、地区内の揚水量の適正值を決め、開発初期の水位低下速度を制限



図－1 S地区の坑井および水準測量点の分布



図－3 地盤沈下等高線図（1991年）



図－2 地層断面の例（a-a'）

したり、各坑内の水位をコントロールして、地区内の全域にわたって年間沈下量を 20mm 以内に抑えることに成功している。図－3にある1年間の地盤沈下量の分布を示すが、中央部付近でも局所的な沈下はなく値も微量である。

当地区では沖積層から養鰻や家庭用の井戸揚水が行われ圧密沈下を生じているが、沖積層の圧密と深部揚水に起因する沈下を区別している。例えば、1987年にこの地区の1部で水産会社が養魚場を新設し、第1期日量2.2万t、第2期2.7万tの浅部地下揚水を始め、環境庁の調査により至近の水準点に35mmの沈下を生じた⁹⁾。この原因は沖積層のものとされ深部揚水によるものではないことが確認されている。以上のように当地区は $1.1 \sim 5.8 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ という難透水性の岩盤内の取水が精度のよいシミュレーションに基づき適切な揚水管理の下で、23年間被害などの問題を生じることなく操業を継続している。

S地区の水溶性天然ガスの開発は次のような特色がある。

(1) 約20km²に及ぶ沖積平野の中で、深部岩盤内は平均坑井水位低下量-170mに達するにもかかわらず、沖積層の圧密沈下を生じることはない。そして、適切なシミュレーションと揚水管理により、それに基づく地表沈下を環境的な制限値以内に抑えられることを実証している。

(2) 厚い帯水層から適正な水量を採取することによって、天然ガス田特有の局所的な目玉的な沈下を生じず、沈下は広範囲に分散し、直上の沈下量も小さく抑えられる。

(3) 各坑井は23年間の長期的揚水にもかかわらず、水量の減少は少なく安定している。廃止したのは58坑井中4坑井のみである。この4坑井もガスの含有などの理由であり、坑井は長期的に安定な取水が可能である。また、将来揚水を中止したときは、相当な沈下の回復が期待される。

(4) 岩盤の透水係数が 10^{-5}cm/sec オーダーと非常に小さく、坑井が深いにもかかわらず、水中ポンプの採用によって揚水原単位は30円/t程度と小さい。

(5) この地区では岩盤内空隙に含まれる水の賦存量に対して1日当たり 10^5 程度に汲み上げを制限している。この値は一般に考えられている地表からの浸透量1日1mmとオーダー的に符合する。この適正な取水を行うことによって、環境と調和した天然ガスの開発が経済的にも可能となった。

次に福岡市の南東約20kmの丘陵地の古第三紀堆積岩中に帯水層の賦存状況および透水係数の分布を求める目的で行った325mの深いボーリング中での湧水圧試験の結果を示す。当地点は標高83.73m、地下水位一

表－2 深層ボーリングにおけるJFT試験結果

地表からの深さ (m)	区間長 (m)	地質状況	き裂数 (本)	き裂の密度 (/m)	透水係数 ($\times 10^{-5} \text{cm/sec}$)
108.30～133.00	24.70	砂岩、礫岩、頁岩	15	0.61	9.23
129.40～148.00	18.60	細粒砂岩	10	0.54	17.04
143.56～157.20	13.64	細粒砂岩 *	7	0.51	25.43
157.20～170.00	12.80	細粒砂岩、頁岩、炭層 *	0	0	35.29
172.25～190.40	18.15	細粒砂岩と炭質頁岩	1	0.06	4.74
189.95～207.15	17.20	凝灰質礫岩と粗粒砂岩	0	0	0.64
205.10～228.80	23.70	凝灰質礫岩と炭質頁岩	1	0.04	11.98
227.90～247.10	19.20	中粒砂岩と頁岩	7	0.36	10.74
246.42～276.10	23.70	細粒砂岩と砂質頁岩	16	0.68	20.87
270.05～294.75	24.70	礫岩、頁岩、細粒砂岩と炭層	10	0.40	27.04
302.94～308.40	5.40	粗粒砂岩と砂質頁岩 **	1	0.19	87.39
307.94～312.40	4.46	砂質頁岩 **	1	0.22	7.38
312.40～325.00	12.60	緑色片岩	1	0.08	1.80

* 148.60m～160.39mで断層を確認；

** 310.50mで古生層基質岩に着岩。

39.15m, 地表から310.5mまでは古第三紀層砂岩, 頁岩, 310.5m以深は基盤をなす古生層緑色片岩である。この基盤はこの地点付近で露出し, 断層面が存在する。表-2に試験結果を示す。湧水圧試験は13区間で, 主として頁岩層をパッカー位置とし, その間の砂岩, 礫岩などの区間を調べた。この結果, 透水係数は, $8.7 \times 10^{-4} \sim 6.4 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ の間にあり, 10^{-4} オーダー以上が8区間と岩盤として透水係数はやや大きいといえよう。透水係数が大きくなった位置は, 断層, 基盤との境界付近であり, 亀裂密度との関連がある。大島らによれば⁶⁾, 第三紀層は比較的湧水量が少ないとされているが, 適切な地点を選べば, 地下への涵養量である1km²当たり1日1,000t, 地表の1km²当たり3,000人に相当する地下水の供給は可能と考えられる。

このような深部岩盤からの揚水は, 地下への涵養量とバランスのとれた量を維持すれば長期的にも安定した水資源となり得よう。

4・2 岩盤内坑道からの湧水による方式

岩盤内に穿つ坑道からの取水は長い歴史を有する。そのうち最も有名なものが, イランの地下水トンネル「カナート」(qanat)である。これは, 高地の帯水層に掘られたトンネルを通じて, 低地の平原にまで, 重力を利用して, 水を引いてくる仕組みである。このタイプの地下水トンネルは, 中東, スペイン, チリ北部などにおいても見出される。イランでは, 過去3000年間の間に, およそ4万の「カナート」が掘り抜かれたものと推定されており, そのうちのおよそ半分が, 1970年代の初頭においても, 依然として機能し, イランにおける給水量の4分の3が, 「カナート」を通じて供給されていた。最近では, トンネルを維持するよりも, 動力ポンプで水を汲み上げることが普及してきた⁷⁾。

図-4にM炭鉱の展開状況の見取図を示す。炭坑は海底に展開しており, 主要基幹坑道は総延長250km, 平均深さ400m, 約40km²の範囲に網目状に分布する。操業中は毎分約85tの恒常湧水があった。湧水はその坑道に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。操業時は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, カナート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, 季節的变化, 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300~800m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している。

図-5に大島らによる鉄道トンネルの恒常湧水量の調査結果を示す。JRには3800本, 総延長2050kmのト

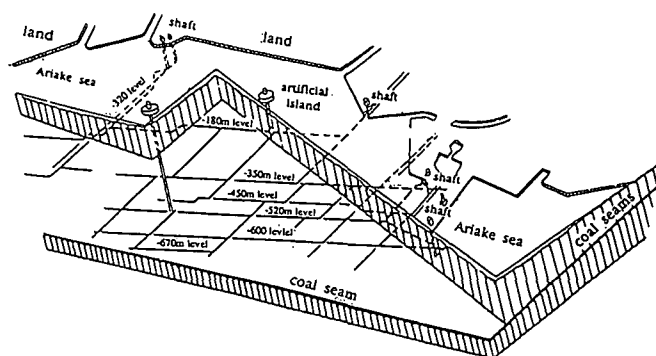


図-4 M炭鉱の展開状況の見取図

区分	比湧水量 $m^3/\text{min}/\text{km}$	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
10	$5.0 \leq q$	$\sigma = 1.9$	$\sigma = 1.9$	$\sigma = 1.9$	$\sigma = 2.2$	$\sigma = 2.7$	$\sigma = 2.5$	$\sigma = 2.2$
9	$2.0 \leq q < 5.0$							
8	$1.0 \leq q < 2.0$							
7	$0.5 \leq q < 1.0$							
6	$0.2 \leq q < 0.5$					$\bar{x} = 6.0$	$\bar{x} = 6.6$	
5	$0.1 \leq q < 0.2$		$\bar{x} = 4.8$	$\bar{x} = 5.2$	$\bar{x} = 5.9$			$\bar{x} = 5.4$
4	$0.05 \leq q < 0.1$	$\bar{x} = 4.7$						
3	$0.02 \leq q < 0.05$							
2	$0.01 \leq q < 0.02$							
1	$q < 0.01$							
比湧水量	地質	第三紀層	寒成岩	中・古生層	新成岩	火山岩 火山 砕屑岩	新成岩	合計
		103本 26.0%	23本 5.8%	92本 23.2%	80本 20.2%	69本 22.5%	9本 2.3%	396本

図－5 鉄道トンネルの恒常湧水量

ンネルがあり（1985年調べ）、調査した396本のトンネルのうちの1 km当たりの湧水量は $0.1 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ の範囲のものが多い。 $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 以上のものは60トンネル（15%）に及ぶ。日本国内のトンネルからの湧水は $1000 \text{ m}^3/\text{min}$ 、この合計は日本における地下水使用量の3%に相当する。

この方式では山麓部から水平坑を掘り、湧水を集めることになるが、その地層での経験、空隙や亀裂密度、地形などの調査を行って賦存量を確認して、適切な開発計画を行えば、環境と調和した開発が見通される。

4・3 地下岩盤内からの水資源の特徴と問題点

岩盤内からの地下水は次のような特徴がある。①天候に影響を受けず安定した水量が確保できる。経年的に枯渇も少ない。②一般に深部岩盤内の水は汚染も少なく水質が良好で、浄水などの処理が少なくすむ。③温度が一定であり、恒温性が利用できる。④透水係数が比較的小さいので湧水量は少ないが、岩盤の固結度が大であるので水位低下などによる地盤沈下などの影響がない。⑤日本は80%が山地であり、沖積層の厚い平野部を除けば、需要のある地域の近くで開発できる。従って、送水距離が少なくて済む。⑥河川水の場合と比べて、貯水、取水、供給の施設が不要で小規模の施設でよい。維持管理コストも小さい。他の目的で利用される地下空間からの排水の利用というハイブリッドな視点からの可能性も大である。前述のトンネル湧水その他、斜面安定対策の排水トンネルを兼ねた水資源の開発も期待できる。

但し、開発にあたって次のような問題点もある。①地温勾配は100mにつき $2 \sim 3^\circ\text{C}$ であるので、深部の水はかなり高温であり、溶存物質も多くなり、水質が良いとは限らない。②一般に深い坑井の掘削は初期費用が大きく、開発リスクが大きいため、十分な調査、技術的検討が必要である。

5. まとめ

他の資源と異なり、水資源は至るところ身近に存在する。また、利水のための費用が考慮されるものの、水は安価なものとして大量に使用される。しかし、一方では特定の地域に必要なときに必要な量を安定に供給しなければならないという命題があり、公共財としての性格が強いので、海水淡水化のように、他の製品と同様な経済原理にもとづく水の供給の考え方が適切かどうか慎重に考えることが重要である。

我が国の人口一人当たりの年間降水量は約5300m³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。このような考えの下でダム中心の水資源の開発が進められてきたが、その貯水量の合計は約200億m³で、首都圏の一人当たりの貯水量は約30m³にしかすぎず、3カ月間降雨がないとなくなってしまう勘定である。

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。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。海水の淡水化、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、深部地下空間の水資源は、沖積層の厚い平野を除けば、至るところで身近に開発の可能性がある、人口密度3000人/km²程度まではその地域で自給できることが見込まれる。建設技術、利用技術には既存のもので問題がなく、特に最近では地下調査解析技術、試す技術、ポンプ設備も格段に進歩し、また、他方では水供給のコストも増大しているので、開発は経済的に十分に可能と考えられる。これらの方式はある特定の地域に必要な時に、必要な量を適切な水質で安定供給できるという水資源開発本来の意義に沿うものと考ええる。

参考文献

- 1) 国土庁長官官房水資源部編：平成10年度版水資源白書，大蔵省印刷局印刷局。
- 2) 江崎哲郎，宮永佳晴，蔣 宇 静，三谷泰浩：地下空間を利用した水資源開発に関する研究，地下空間シンポジウム論文・報告集，No.3，pp.261-267，1998。
- 3) 環境庁監修：地盤沈下とその対策，白亜書房，1990。
- 4) Esaki,T.,K.Shikata, K.Aoki and T.Kimura:Surface Subsidence in Natural Gas Field, Int. Assoc. of Hydrological Sci. Pub. No.200, pp.163-172, 1991。
- 5) 環境庁：昭和62年度全国地盤沈下地域の概況，1988。
- 6) 大島洋志，高木盛男，榎本秀明：鉄道トンネルの湧水量実態調査，鉄道技術研究所速報，No. A-85-195，国鉄鉄道技術研究所，1985。
- 7) パトリック マッカリー：沈黙の川，pp.230，築地書籍，1998。