

3-(2) 水道と水道水の安全性

北海道大学工学部衛生工学科 助教授 小林 三樹

1. 危険回避施設としての水道

水道は安全な飲料水を得られないことに起因する不衛生な生活、下痢、高率の乳幼児死亡、消化器系伝染病の危険と大火の恐怖から、都市民の安全を保つ施設として造られた。したがって水道の社会的位置付けは、そもそも都市生活上の危険回避手段であって、社会資本が一応整備された現在でも、基本的に不可欠の社会機能である。社会の発展に伴い、水道にもより高度な安定性と安全性が求められている。

2. 水道のリスク

水道事業の関連するリスクは次の3つに大別される。

1) 水道施設の存在が地域社会に及ぼしうる危険【水道施設の安全性】

ダムの決壊、導送水管渠の決壊、浄水場・配水池の池壁崩壊、高置水槽の倒壊
化学薬品とくに塩素ガスの漏出、スラッジの放出 など

2) 水道施設の機能障害により市民が水道サービスを享受しえない危険【水道供給の安定性】

渇水、地震、水源の高度汚染、停電、施設事故などによる断減水。
(給水量不足は生活上の不便のみならず、不衛生な生活を強いて「健康上の危険」をももたらす)

3) 水質不良の給水を受けることによる健康上の危険【水道水の安全性】

水源の汚染(水源地域の諸活動からの常時汚染と事故汚染、天災による加重、交通事故に起因する汚染、富栄養化による汚染、故意の毒物投入など)に対し適切な措置がとられずに給水された場合の危険

浄水場での汚染(塩素化有機物の生成、浄水処理ミス、故意の毒物投入など)

配水・給水過程での汚染(管材料の溶出・腐食、汚水吸引、直結器具からの逆流、クロスコネクション、故意の毒物投入、ビル内受水槽・高置水槽の汚染、汚染と塩素消失による細菌繁殖など)

3. 水道における危険管理の要素

1) 危険の源泉と伝播経路の把握 (Risk Identification)

危険をもたらしうる総ての要因の拾いだし、発生確率、伝播経路、予防手段、検出手段、防衛手段、被害拡大防止手段などと、それらが有効に機能する確率の明確化

2) 危険の計量 (Risk Assessment)

被害発生確率、用量-反応関係の把握、被害規模、影響の重大さ、回復の困難さなどの見積もり

3) 危険の管理 (Risk Management)

危険削減代替案の作成・評価、受容されうる危険度の判定、施策の総合判定、施策の実施、効果の監視

上記した要素について定量的な取り扱いをして、対策の優先順位、政策の妥当性などを論理づけるのが米国流の危険管理であるが、我が国の水道事業にあっては定量的危険管理は未だ殆ど行われていないと言ってもよいと思われる。

4. 欧米の水道と日本の水道の差異

古代ローマ市の11系統の水道のうち、水質が良好なものは6系統にすぎず、他は水質不良の濁り水とか温泉水で内1本は飲用不可であり都市清掃用水として利用されたという¹⁾。

17世紀以降、英仏蘭独で水道が造られ始めるが、かならずしも良質の水に恵まれた訳ではなかった。18世紀に入ると大都市ロンドンやパリでは良質水のみでは需要を賄えず、都心部の河水を大量に揚水して供給する水道さえ現れた²⁾。19世紀に入るとコレラ予防のため、取水点変更や種々のろ過処理が試行錯誤されつつ工夫された。彼らは清濁いろいろな水道を自らの所産として体験してきた。潜在する危険は常に市民に意識され、危険を低下させる努力が継続して払われてきたと思われる。

江戸時代の日本の水道は良く機能していたが、開国に伴う外来の強い消化器系伝染病菌には無力であった。そこで英国で定着したばかりの水道形態を、「信頼に足る完璧な技術形態」と信奉して導入した。新水道は「旧水道とは不連続な文明開化の技術体系」として人々に受容された

新水道の特徴は①そのまま飲める水道である（砂ろ過水）。②配水途中で市街地内の汚水が混入しない方式である（鉄管使用、有圧配水）の2点にあった。人々は新水道に絶大な信用を寄せ、水源地域の保清に務め、供給者はその信頼に応えた。上流取水と丁寧な緩速ろ過を中心とした英国流水道が敗戦まで続いた。基本的にはこの信頼関係が現在にまで続いており、危険論議になじめなくしている理由（背景）のひとつになっていると思われる。

塩素殺菌は我が国では1922年に始まるが、消化器系伝染病発生時に僅か注入するだけの臨時的なものであった。敗戦後 GHQ指令で主要大都市（米軍駐留都市）に塩素注入を義務付けられた経験を経て、1957年の水道法で総ての水道に塩素殺菌が義務付けられ、消化器系伝染病が急速に消滅した³⁾。（現在 赤痢疫病の患者発生数は年間1000人弱だがその1/3、集団発生数の $\frac{1}{2}$ 近くは海外での感染と推定されている⁴⁾）。

戦後は浄水技術、水質基準思想とも米国の強い影響をうけた⁵⁾。急速な都市化に応ずるため、下流取水・急速ろ過が普通の形態になった。1970年前後から上流湖沼の富栄養化に起因する異臭味が問題化し、対応の遅れもあって、1980年代には約2000万人⁶⁾の国民にとって水道水は時期的には、そのままでは飲めないとも評されるものになってしまった。

臭いことに端を発して水道水水質への信頼が低下し、ビン入り飲料水や家庭用浄水器が売れている事実は、水道という国民の財産の在り方として真剣に受け止めねばなるまい。おいしい水の希求と微量有機汚染物質の問題は、水量と水質の相克を通じて、一元水道形態のままでやりゆけるか否かを定める重大な課題になっている。

5. 水道施設の存在が地域社会に及ぼしうる危険の管理

我が国で水道用ダムの決壊事例は未だない。

東京都水道局の山口貯水池と村山貯水池の堤体（土堰堤）は 100ポンド爆弾の爆撃に耐ええないと計算され、首都の安全確保のため 1943年に玉石コンクリート張りで補強された。ダム決壊の洪水波の伝播予測と予測被災戸数の調査が当時なされた。

函館市水道局の笹流ダム（扶壁式堰堤）は建設当時（1933年）、資金難と資材難による極限設計であったこととコンクリート表面の風化が進んだことから、1948年、1984年に補強工事が施された。

大規模浄水場には大量の液化塩素（最大日水量×最大注入率×数十日分）が貯蔵されている。浄水場は市街地近くの高台に位置する例が多く、塩素の外部漏洩には高度の注意が

払われている。塩素貯蔵タンク1基の破壊を、起こりうる最大事故と想定した中和反応装置が設備されている。1975年頃をピークに汚濁の進行が一段落したことで、洪水など災害後の道路復旧が早やかになされるようになったので、貯蔵量を削減しようようになった。

地震災害時に塩素系統の(貯蔵から配管にいたるまでの)安全を、完全には確保しえないとの判断から、液化塩素の使用を、次亜塩素酸ナトリウム液(NaClO)に切り替える浄水場が現れている。既に切り替えた大都市に川崎市水道局の例がある。関東地域に予想されている大地震を想定した塩素ガス漏洩確率と被害規模の予測、事故の重大さの判定がなされた上での決定と考えられる。塩で貯蔵して必要量の塩素ガスを電気分解法で現地製造する小規模な装置も市販されている。

地震災害時に配水池の水を確保し、流出による2次災害を防ぐための緊急遮断弁の設置も普及している⁷⁾。

6. 水道施設の機能障害により市民が水道のサービスを享受しえない危険の管理

水道水供給の安定性と継続性は、サービスの質を構成する基本である。断水や給水制限は生活上の不便のみならず、長期化する場合、人々に不潔な生活を強いて保健上の危険をもたらす。配水圧の不足は、均一な水分配を不可能にし、さらに汚水の吸引などの遠因となり給水水質の安全性を損ねる。

降水量のゆらぎ、渇水、地震の頻度は、統計的によく処理されており、断減水を避けるための施設整備が鋭意進められているところである。しかし水源流域に、事故規模によっては長期間の取水停止を余儀なくされるほどの工場や鉱山を抱えている水道もあるが、その危険管理は必ずしも定量的になされてるわけではない。

渇水に対しては、複数河川にまたがっての貯水と取水の運用、河道外貯水、経年備蓄貯水、複数浄水場の幹線連絡管などの建設によって、大中都市の中には数十年確率の事象に耐えうる施設をそなえた都市もある。水道規模の広域化は安定性を高める利点が評価されている⁸⁾。

渇水や地震が、何日間の断減水をもたらすかは、これら投下施設能力との関係できまるので、水道施設の中では、定量的危険評価の最も進んでいる部分といえる。地震直後の給水確保設備、復旧し易さを念頭に置いた配水管設計、渇水や事故時の水道局相互の応援給水態勢なども、危険管理の施策といえる。

7. 水質不良の給水を受けることによる健康上の危険の管理

1) 水源流域の汚染への対応

我が国の水道は水源水量の70%を表流水に依存している。水源流域の土地を水道局が保有し実効ある土地利用規制を行っている例は、多摩川の羽村上流の面積の約4割 216km²を水源林として経営する東京都水道局以外には、横浜市、福岡市、前橋市等が数100ha規模で保有するのみである。

流域の水質汚濁制御は、県や市の公害行政部局の権限に属し、水道局は一利水者に過ぎない。水道法43条に、「水道事業者は、水源の水質保全のため必要と認めた時は、関係行政機関に対し、汚濁防止に関し意見を述べ適当な措置を講ずべきことを要請できる」と規定されている。水道局にとって水質事故の未然防止は水質管理上重要であり、水源パトロールで事故を察知または予知した場合、公害部局に通報して措置を要請することとなる。

主要な水道局は、取水点上流流域の潜在汚染源(集落、鉱山、尾鉱、工場、農畜産施設、リゾート施設、養魚場、病院、研究所、廃棄物貯留、農業排水路など)の所在を把握して

おり、予期せぬ事故などの無いように、予兆に耳目をそばだてている。しかしリスクマネジメントの基本手法のひとつとされる事故（失敗）経路を明確にし事故確率を見積もるイベントツリーの作成、要因別の汚染規模予測などは殆どなされていないと思われる。

実際に生じていない事故の可能性に対して、どの程度の安全対策を講じさせるかの判定は、立場によって相当に相異しているといわざるを得ない。わが国では小さな事故が起こる都度に世論が喚起されて、採られるべき安全対策水準が向上してきた。結果的に対策が後手に回った例は多いが、我が国流の合意形成過程であったとも考えられる。内陸部への工場立地の進展、使用化学物質の複雑多岐化、タンクローリー車による薬品や油輸送の増加などは、先手を打って事前に危険を回避する手法の導入を必要としてると言えよう。

新規の開発行為に対しては、土地利用、採掘権や保安林伐採の許可権限を有する官庁が、水道局にも事前協議した上で行政指導をするとか、開発者側が紛議を避けるため相当な措置を講ずるといった方法で、実質的に危険が回避されている例が多い。

淀川や利根川といった他府県にまたがる流域では、流域水質汚濁防止連絡協議会といった組織が作られており、汚濁の進行がくい止められ事故時の連絡等にうまく機能している。

浄水場着水より少しでも早く 水源の水質異変を察知するための モニタリング、バイオアッセイによる監視、河道外貯水、複数水源導水施設、オイルフェンス、活性炭設備、捨水設備、大容量配水池、浄水場間相互融通連絡管などが、水道側の自衛手段として採られている。また、汚染事故時に原因者を同定しうるだけの分析技術の保持、原因者への賠償要求なども、水源事故を減らすことに 誘因として寄与している。

廃棄物や有機溶剤による地下水汚染、野生動物媒介による寄生虫卵汚染などで、飲み水に困る住民に対しては水道敷設を急ぐことで救済されている。

2) 浄水場での汚染への対応

微量安定有機物の塩素化の問題が明らかになって以来、国をあげて有機塩素化合物の生成を減らす研究がなされ、その成果が殆どの浄水場で既に実施されている^{8) 9)}。低減対策として、水源や取水点の変更、前塩素の削減、酸化剤の変更、有機成分の物理手段による除去、塩素注入点の変更、生成有機塩素化合物の活性炭による除去、配水途上での塩素分割注入など必要な方法(未だ研究段階の方法もあるが)の導入によって、塩素化有機物の濃度を最小限にする施策が 成果をあげつつある。

浄水場や配水池への外部からの侵入者を防ぐため柵の設置、巡視などが強化されているが、故意犯による毒物投入の防止策は今後の重要な課題と言えよう。

3) 給配水過程での汚染への対応

配水管が埋設されている公道下は、各種埋設物が錯綜しており、上部から交通荷重、下部から沈下の影響を受ける過酷な状況にあり、配水管弁類の点検もままならない状態にある。重要なライフラインスペースとして共同溝の普及が待たれている⁷⁾。

塩素濃度を一定の範囲に保つための配水管網整備、配水ブロック制、漏水の削減、管内面の防食・更生等が進められている。管内が減圧・負圧になった場合に、需要家側直結器具からの吸引逆流が地域的汚染を生じる危険が大きい。温水器、皿洗い機、自動販売機などの普及を放置しえず、直結器具の形式認定制度がある。

私有地内へ水道管から分岐されたあとは私有設備としての給水装置となる。蛇口を出るまで、汚染の機会は減らされるべきである。配水管の水圧を高めに制御することによって、直結式給水方式で給水可能な戸数を増す努力も一部でなされている。またある規模以上の大形もしくは中高層建築物で、水道水を受水して内部に再給水する施設は、独立の「簡易専用水道」と位置付けられ、水質管理の責任が明確にされている。中高層の事務所や住居

建物が増加する傾向の中で、建物内の水質管理の徹底が重要さを増している。

8. 飲料水の水質基準（欧米と日本）

1) WHOの飲料水水質ガイドライン

飲料水の安全判定の目安や処理目標としての各国の水質基準は、各国がその国内状況（水事情、社会全体の環境水準、文化、技術力、経済条件、優先事項等）を総合的に勘案して決められるべきものと位置づけ、WHOは基準作りを援護する詳細な資料を指針として示した。飲料水の水質を可能な限り高い水準に保つよう不断の努力を呼び掛けた上で、受容危険水準はそれぞれの国の社会全体で考えて決定されるべきこととされたのである。それに伴い国際飲料水基準（1971）、欧州飲料水基準（1970）は廃止された。

発癌性など特殊毒物のガイドライン値（一生飲用しても健康に障害を生じない水質）としては、動物実験値（体重換算）を無閾値仮定の線形多段外挿モデル式で外挿し、安全率（不確実性係数）を $10^{-2\sim3}$ にとり、飲料水の寄与率で配分した値が、体重70kgの人が70年間1日2ℓ飲用しつづけて、余剰癌発生が10万人に1人に相当すると推定される濃度として求められている^{10 11 18}。

2) 米国の水質基準

安全飲料水法（Safe Drinking Water Act, 1974）に基づいてEPAが基準案（暫定基準）を作成し、公聴会等を経て数年かけて決定する。それは最大汚染濃度（Maximum Contaminant Level, MCL）であり、処理技術、経済性、監視体制をも総合的にしん酌して定められるもので、強制力をもつ。その外に強制力をもたない健康目標値（Non-enforceable Health Goals）として推奨最大濃度（Recommended Maximum Contaminant Level, RMCL）が示されており、可能な限りこの目標値に近付ける努力が求められている^{11 12 13}。

3) 日本の水質基準

水道法4条に水質の要件が規定され、それを受けて水質基準に関する厚生省令が定められている。強制力をもった基準であり、一般人にはこの値を境に安全と危険に分かれるかのごとく認識されている。日本での実態、欧米の基準値、動物実験値等をもとに、ある安全係数を乗じた最大無作用量もしくは許容限度を定めたものと考えられるが、数十年にわたる実績に裏付けられたものである。項目、数値、分析法には随時見直しの手加えられている。日本の水道水質基準に関する歴史的経緯については山村勝美氏の論文³に詳しい。

給水の質に健康を害する恐れがあることを知った場合、ただちに給水を停止し周知させるべきことが水道法23条に規定されている。基準値を越す値が見い出され、その原因が明らかでも代替手段が即座にない場合、総合的な判断に基づいて（処理の強化、水源変更等の措置は急いでとられるとしても）、当座はそのまま給水が続けられることもあると考えられる。これも危険管理と言えるであろう。

発癌性物質に関しては生活環境審議会の報告を受けて、欧米の資料、国内の実態等を参考に4項目について、水道環境部長通知で制御目標値（総トリハロメタン）、暫定的な水質基準（トリクロロエチレン等3物質）がそれぞれ1981年と1984年に示されている⁹。

我が国では受容危険水準（Risk Acceptance, An Acceptable Risk Level）についての一般通念を得るに至っていないので、一生涯の摂取で十万人に一人の余剰死亡といった欧米基準の考えかたがそのまま適用されている¹⁸。

9. 水道水質の危険評価例

我が国で水道水の危険度の定量的評価手法について提案を行ったのは、住友 恒氏^{14~16}

のみと思われる。住友氏は安全度 Y を、実際の水質値（すなわち実際の摂取濃度） A と基準値 B との差 $Y = A - B$ で表すことを提唱した。 A に年平均値、 B に固定した基準値をもちいて Y の正負を見ると、従前からの基準適合判定といったものになる。

住友氏の提案手法は、水質値 A を時間的に変動する確率変数（出現頻度分布値）としてあつかう。分母にする値 B は、水質基準値でも、基準値の数分の一、数十分の一でもよいが、その基準値を定めるもとの現象がそもそも分布をもった事象であることに着目し、 B にも用量－反応関係に基づく発癌確率、発病確率、飲用する人の側の感受性分布などの確率変数を用いようとするものである。氏はこの手法を発展させることにより、浄水プロセスの代替案別に総合危険率の算定が可能であることを示している。

我が国の水道統計に、浄水の水質値が公表されるようになったのは、昨年からであり、全国的に時間的超過率をもって安全度を評価するといったことは未だなされていない。

B. N. Ames氏は危険度の評価指標として、 $Y = A/B$ 型の尺度を提唱している。 A には単純にヒトの平均摂取量または最大摂取量を、 B にはラットまたはマウスの実験で半数に癌化が認められた標準生涯期間にわたる摂取量を、 mg/kg/day 単位でとって徐し、%表示したものである。Ames氏はこの指標(Human Expose Dose / Rodent Potency Dose)を略してHERPと名付けた。人間への発癌性が疑われている物質別にこの指標値を求めることにより、対策の緊要な物質が順位づけられる。

Ames氏は最近の報文¹⁷で、米国水道の平均クロロホルム濃度 $83 \mu\text{g/l}$ の水を毎日 1 l 飲み続けて、この可能危険指標HERPは 0.001% 、シリコンヴァレイで最もトリクロロエチレン濃度の高い井戸の水(2.8 mg/l)を 1 l/d 飲んでHERPは 0.004% であるのたいして、ビール 354 ml 中のアルコール 18 ml はHERPにして 2.8% 、ライトコーラ 354 ml 中のサッカリン 95 mg はHERPにして 0.06% 、普通の住宅の空気を日 14 時間吸うとホルムアルデヒドを 0.6 mg 摂取しHERPにして 0.6% になるなどの例を挙げ、水道の塩素処理は、それによって消化器系伝染病が抑制されていることを割り引くまでもなく、発癌要因として言い立てる合理性に乏しいと述べている。

10. おわりに

水道施設に関連する危険の管理について、現状を概説的に述べた。水道の抱える主な危険は、渇水、地震、水源水質事故の3つと考えられる。このうち確率統計学的に扱われたことの殆どないのが水源水質事故である。水源水質の悪化は年単位で徐々に進行するが、汚染排出量と希釈流量の時間的変動によって、水質値は日や時間の単位で変化している。水質の安全性を確率変数の合成によって評価する住友氏の提案の広い実用化が望まれる。

日本の水道の揺らん期には、内陸部に森林地帯が多く、水源水質の良さにも助けられて、水道は人々の信頼を得てこれた。それに比べて現在では、工鉱農畜産業や都市など多数の潜在汚染源が流域内部に立地している大河川中下流部からの取水に、大半の大都市水道が依存している。しかるに水源地域での汚染事故に対する定量的な危険の把握は、全くと言ってよいほどなされていないのが実状と思われる。

危険の存在を事前に科学的（定量的）に把握して、関係諸主体の納得・合意を得ながら、施策を実施し、社会としての最適化（必ずしも危険の最小化とは限らない）を達成する手法が、リスクマネジメントであると筆者は認識している。日本の水道の例では必ずしも危険が定量的に把握されているわけではないが、各主体の施設管理の徹底、協議、行政指導、裁判判例などによって、実質的にはほどほどの危険管理がなされ、何とか安全が保たれてきたと考えられる。

水道は、人々に選択の余地のない生活基本材を供給する基盤施設である以上、高度な安全性と安定性を必要としている。サービス水準を高める渇水対策にも、水質改良にも、資金投下を要する。量と質の異なるリスクを併せ持つ水道が、全体としてバランスのとれた危険管理をしていくことが肝要と考えられる。

資料のご教示を賜った厚生省水道整備課長 小林康彦氏に深謝申し上げる。

参考文献

1. 松井三郎 古代ローマの水道と下水道 日伊文化研究 22号 (1984、3)
2. 鯖田豊之 水道の文化(ー西欧と日本ー) 新潮社 (1983、10)
3. 山村勝美 我が国の水道水質基準に関する歴史的経緯 水道協会雑誌 525号 (1978、6)
4. 厚生統計協会 国民衛生の動向(昭和60年) 厚生の指標32-9 (1985、8)
5. 山村勝美 これからの水道と水質保全 水質汚濁研究 7-2 (1984、2)
6. 住友 恒 安全性からみた水道の広域化目標の具体化 水協誌 562号 (1981、7)
7. 後藤圭司 ライフラインの安全性(水道を例として) 土木学会誌71-11(1986、11)
8. 日本水道協会浄水処理問題特別調査委員会
トリハロメタンに関する対策について 水協誌 561号 (1981、6)
9. 厚生省水道環境部水道整備課 水道における総トリハロメタン対策について
水協誌 561号 (1981、6)
10. WHO Guidelines for Drinking Water Quality 飲料水水質ガイドライン
日水協抄録委訳 水協誌54-11、56-5、56-6 (1985.11、1987.5、1987.6)
11. 中室克彦 発癌物質の水質基準設定 水質汚濁研究 9-9 (1986、9)
12. T.B.Taylor "Drinking Water Standards, Principles and History 1914 to 1976"
Jour.of New England Wat.Wks.Assn., 91-3 (1977.9)
13. J.A.Cotruvo.et.al., Development of Revised Primary Drinking Water Regulations"
Jour.Ame.Wat.Wks.Assn., (76-11)(1984.11)
14. 住友 恒 上水道における塩素処理の安全性評価 水道協会雑誌52-3 (1983、3)
15. 住友 恒、松岡 譲、安田正人 水道水源の安全性評価 水協誌 568号 (1982、1)
16. 住友 恒 水道水の安全性に関する定量的検討 水質汚濁研究 9-8 (1986、8)
17. Bruce.N.Ames,R.Magaw,L.S.Gold "Ranking Possible Carcinogenic Hazards"
Science vol.236 p.271 (1987.4.17)
18. 丹保憲仁編著 水道とトリハロメタン 技報堂出版 (1983.10)
19. Safe Drinking Water Committee,National Research Council "Drinking Water and Health" vol.1--5 (1977--1985) National Academy of Sciences,USA
20. Office of Technology Assessment ,Congress of United States "Assessment of Technologies for Determining Cancer Risks from the Environment"
OTA,US GPO (1981)