



Title	水道における多面的リスク管理
Author(s)	友野, 勝義; 眞柄, 泰基
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 8, 81-89
Issue Date	2000-11-01
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/7212
Type	bulletin (article)
Note	第8回衛生工学シンポジウム（平成12年11月16日（木）-17日（金）北海道大学学術交流会館）. 2 環境保全・リスク環境. 2-4
File Information	8-2-4_p81-89.pdf



[Instructions for use](#)

2-4

水道における多元的リスク管理

○(株)東京設計事務所 友野勝義

北海道大学大学院工学研究科 真柄泰基

1. はじめに

一瞬にして百万人余の飲料及び生活用水を奪い、復旧に最大 90 日を要した阪神大震災の例を持ち出すまでもなく、水道にとって地震は重大なリスクである。しかし水道にとってのリスクは地震だけではない。例えば、地震、洪水、渇水、落雷、豪雪、停電、配水管破裂、火災、塩素漏洩、水源汚染、水道水中発癌物質、突発水質事故、クロスコネクション、ゲリラ的毒物投入等多数ある。これらのリスクはそれぞれ性格が違い、自然的リスク、社会的リスク、人間的リスクに分類することができよう。¹⁾ 自然的リスクは発生そのものを制御できないが、人間的リスクは対策実施によってある程度制御できるなど、対応も異なってくる。

大地震の被害は甚大であり、水道施設のみでなく需要者にも多大な影響をもたらす。したがって、地震対策を行うのは当然である。しかし、他のリスクに対しては対処する必要がないのであろうか。確かに、渇水対策としてのダム建設、停電対策としての自家発電設備、塩素漏洩対策としての次亜塩素酸ソーダへの転換等それぞれのリスクに対して部分的にもせよ対策は行われている。対策の実施には当然コストが伴う、つまり投資を要する。投資を行うのは緊急性のあるものから、というのが常識でありが、リスク管理の専門家が考える緊急性、優先度と最終的にコストを負担する需要者のそれとは必ずしも同一ではない。^{2) 3)} また、効率的な投資のためには投資に対する効率、つまり便益の多寡が問われなければならない。ほとんど全てのケースで財源に制約があると考えられ、経済効率と緊急性を考慮してリスク対策のための投資が行われなければならない。事実はどうであろうか。

2. リスク管理の基本的要素

2.1 リスクの構造

一口にリスクといっても、一つのリスクに対応した被害の形態は一つとは限らない。たとえば、地震リスクに関して、その被害は配水管や構造物の損傷、料金収入の減少、火災消失面積増加、応急給水のための費用、消費者剰余の喪失等からなっている。⁴⁾ いま仮に本来のリスクを原リスク、その下にある上記のリスクをサブリスクと呼ぶことにする。あるリスクに対して発生可能なサブリスクがいくつかあるとすれば、そのリスクの発生に際して、サブリスク全部が原リスクの対象に応じて同じ割合で発生するとは限らない。

2.2 リスク対応の形態

一般にリスク対策とはリスクの原因を取り除くことと受け取られている。それで間違いではないが、実際には①リスクの低減、②リスクの転嫁、③リスクの保有に分けて考えることができよう。⁵⁾ 「リスクの低減」とは損害を発生させる事象を事前に、発生確率を小さくするか、損害を少なくするかの対策たとえば、耐震補強、改築、移転などを行う。「リスクの転嫁」

は損害の発生は許容するが、発生した損害を保険や証券化などの金融上の対策を行うことでヘッジする。この場合、保険料等の費用が発生するが、①に比較すれば少額で済むことが多い。ただし金銭的リスク以外はなくなっていない。「リスクの保有」は積極的な対策を行わず現状のままにしておくか、せいぜい発生した場合の緊急対応マニュアルなどを作成するにとどめる。損害があまり大きくない場合とか資金に余裕がない場合に使われる。

しかし、リスクの種類によっては上記の区分は必ずしも明確ではない。例えば、地震対策では、本来 100km の脆弱管の取替えをすべきところ、50km で済ませた場合には、対策を講じた区間については「リスクの低減」になっているが、残った区間については「リスクの保有」となっている。もっとも、「リスクの低減」が常に「リスクの保有」に勝るとは限らない。対策の効用(便益)がその費用を上まわらなければ「リスクの保有」に掛けた方が、特別な事情がない限り、得策かもしれない。対策によってリスクを 100%除去しない限り、上記二つの要素が必ず存在する。

2.3 リスクのコスト

一般にリスクのコストとは、リスクの発生があった場合、それが原因で失われた価値、あるいは現状復旧するに要する費用と定義することができる。たとえば、地震リスクにあっては、破壊された構造物や管路の復旧費、断水期間中の水道料金収入、応急給水の経費等があげられる。さらに、大災害時のように給水量の極限的に少ない状態での需要者にとっての水道水の価値、つまり消費者剰余や断水、あるいは給水制限によって失われる生産一般の消失額等も考慮に入れる必要がある。3) 4) リスクのコストの算定は、リスクの種類によって異なる考え方をしなければならない。たとえば水道水中の発癌物質を含む健康阻害物質のリスクについては、リスクの形態をできるだけ特定し、それらのコストを積算しなければならない。その過程では、原因物質ごとの暴露量の推定、dose-response 曲線の特定、喪失人命と生産時間の推定等が必要となる。⁶⁾

2.4 リスク対策のコスト

前述のようにあるリスクに対して一つの対策が一義的に存在するとはいえない。一般的に、ある特定のリスクに対して複数の対策案策定が可能であり、さらにその対策を実行する程度の応じて複数のシナリオが想定し得る。配水管の地震対策一つをとってみても、脆弱管の取替え、離脱防止金具取付け、応急給水水槽や器具の設置、近隣事業体との相互援助協定締結等があり、取替え案一つについても(1)脆弱管全部を取り替える、(2)特に弱いもののみを取り替える等方針が分かれる。換言すれば、一つのリスクのための対策は多様であり、したがってそのコストの多寡も多様である。その他のリスクについても同様である。

2.5 リスク対策の便益

コストと同じく、リスク対策の便益についても、いくつもの決定因子がある。一例として、地震リスクの対策の便益について考えてみると、特定の対策の結果としての便益でも、想定

する震度や生起確率によって値が異なる。つまり、想定震度が大きければ対策のない場合の被害が大きく、したがって対策の便益も大きい。一方生起確率が大きければ便益も大きくなるが、逆もまた真なりである。水道水中の発癌物質リスクについては、複雑な因子が絡んでくる。

リスク対策の便益の発現は、リスクの発生と直接関連している。つまり、リスク対策を行っても、リスクが実際に発生しなければ、コストがかかっただけで便益は発生しない。その意味で、恒常的なリスクと確率論的なリスクについて、対策の便益発生の様態は異なる。たとえば突発水質汚染事故のリスク対策の便益は、確率論的にしか発生しないが、水道水中発ガン物質対策の便益は定常的に発生していると考えることができる

確率論的リスクの便益はリスクによる本来被害と対策後の被害との差である。いまリスク i の被害を M_{iO} 、対策後被害を M_{iR} とすれば

$$M_{iR} = f_i M_{iO} \dots\dots\dots(1)$$

ここに

f_i : リスク減少率

リスク減少率は対策必要作業量に対する実施量の比、対策の効率等の関数であるとみなすことができる。

また、リスク i のサブリスクを ij とすれば、

$$M_{iO} = \sum_{j=1}^n M_{iOj} \dots\dots\dots(2)$$

したがって、サブリスクの減少率を f_{ij} とすれば、

$$M_{iR} = \sum_{j=1}^n f_{ij} M_{iOj} \dots\dots\dots(3)$$

ただしこの場合、サブリスク減少率 f_{ij} の合計が必ずしも原リスク減少率 f_i とはならないことに注意しなければならない。

いま、リスク i 対策の便益を B_{iR} とすれば、

$$B_{iR} = M_{iO} - M_{iR} \dots\dots\dots(4)$$

また、リスク対策の費用を C_{iR} とすれば、

$$B_{iR} \geq C_{iR} \dots\dots\dots (5)$$

を考慮することになる。ただし、必ずしも便益が費用を上回るとは限らないので、

$$E_i = \frac{B_i}{C_i} \dots\dots\dots (6)$$

という比率、つまり便益コスト比も同時に考慮する。

3. リスク管理の体系

上記のように、水道に関しても多様なリスクがあり、それらへの対応も一様ではない。さらにリスク対策のための投資を考えると、その優先度を決定しなければならず、その際当然その便益を考慮して投資の効率を求める必要がある。また、リスク管理従事者の判断とコストを最終的に背負う需要者の認識間の乖離を埋めながらリスク対策の方針を決定するというプロセスを体系化する必要がある。

3.1 リスク管理の手順

一般にリスク管理（リスク・マネジメント）とは、(1)リスク同定、(2)リスク暴露量計量、(3)作用量・効果関係想定、(4)リスク被害推定、(5)リスク対策実施といった段階で行われる。水道の場合、リスクの種類によって異なった記述が必要となる。たとえば地震リスクについては、(1) リスク同定（地史的に地震がリスクになり得るかどうかの判断）、(2)リスク規模・生起確率想定、(3)リスク被害推定、(4)対策案検討評価、(5) リスク対策実施となる。水道水中の発癌物質の場合は、上記一般の場合に類似するが、「被害推定」と「リスク対策実施」との間に「対策案検討評価」のステップが必要となる。リスクを多元的に捕らえる際にはできるだけこのような統一した手順を踏む必要がある。

3.2 多元的リスク管理

あるリスク、たとえばリスク A については次のようなプロセスが基本的に要求される。

リスク A:

ステップ1：リスク同定(含、サブリスク同定)

ステップ2：(2-1)生起確率想定

(2-2) リスク規模想定(震度、THMs 濃度等)

ステップ3：リスク被害推定(サブリスクごと及びその総計)

ステップ4-1：対策案策定

” 4-2: 対策案評価(対策のコスト及び便益)

リスク B、リスク C、・・・リスク i について同様なプロセスが必要であるため、多元的リスク管理全体としては図 1 のような体系となる。それぞれのリスクに対する対策が出揃い、評価が行われた後、ステップ 5 として多元的なリスクの総合的な評価が行われる。最後のステップ 6 で対策が実施される。対策が実施されるのは、全ての有意義リスクのコストと対策の便益を評価した上で、限られた財政的リソースを使って全体として最も便益が高い対策(一つあるいは複数)を実施することとなる。

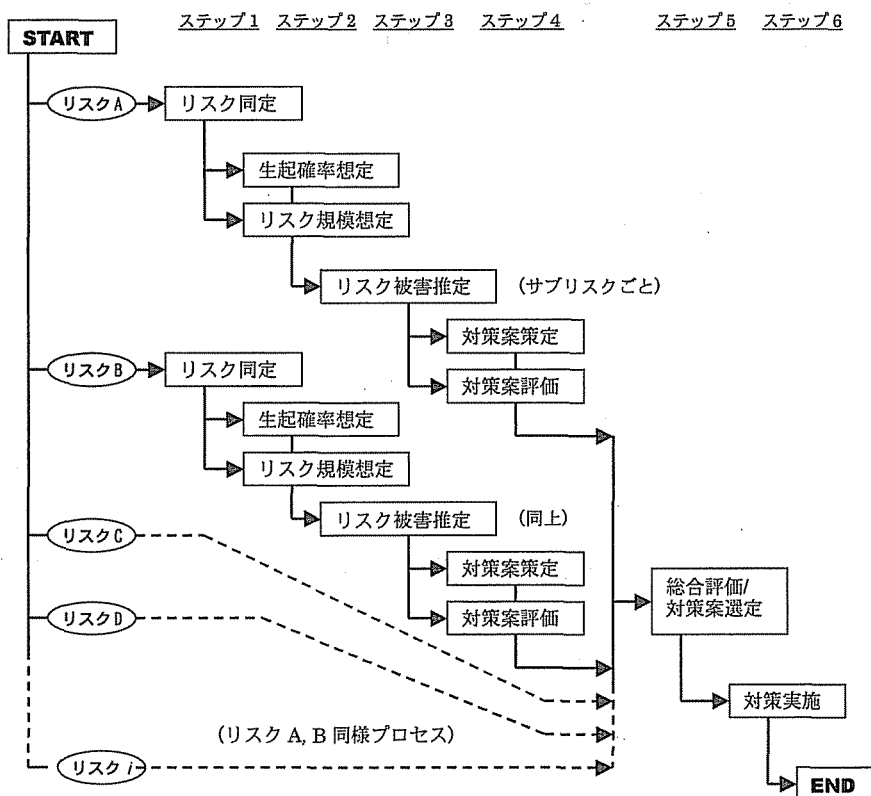


図 1 多元的リスク管理の体系

4. リスクの実体と対策についての一考察

リスクの実体とリスク対策の手順について若干考察する。

4.1 配水管に対する地震リスク

水道においても大地震のリスク、特に配水管の被害はきわめて大きい。人口 10 万人規模の平均的な日本の都市における配水管の地震リスクをモデル化し、サブリスクの分析と対策の効果を検討した。⁴⁾ モデルの構成要素は以下である。

- 1) 給水人口：100,000 人
- 2) 配水管延長 287 km。同管種構成：ダクタイトル鋳鉄管(DIP) 29.7%、鋳鉄管(CIP) 9.5%、鋼管(SP) 3.6%、石綿セメント管(ACP) 18.2%、硬質塩化ビニール管(PVCP) 32.4%

3)想定震度：レベル2(震度7)

上記管延長と管種構成で平均的な地盤におかれているとして、無対策の場合の被害は以下のよう

1)被害復旧日数：21日

2)リスクコスト(無対策の場合のコスト)

(1)配水管被害額(各管種合計)：1,221.9百万円(サブリスク1)

(2)給水量減少による給水収入減少額：57.3百万円(サブリスク2)

(3)応急給水運営経費：439.9百万円(サブリスク3)

(4)消費者剰余の減少：346.5百万円(サブリスク4)

(5)生産一般の減少額：2,900百万円(サブリスク5)

総計 4,965.6百万円

対策のコストは次である。

3)リスク対策コスト

(1)A案：(DIPの20%、CIPの40%、ACPの80%、及びPVCPの80%をSII(離脱防止)型DIPに取り替え) 5,551百万円

(2)B案：(DIPの10%、CIPの20%、ACPの40%、及びPVCPの40%をSII(離脱防止)型DIPに取り替え) 2,776百万円

(3)C案：(DIPの5%、CIPの10%、ACPの20%、及びPVCPの20%をSII(離脱防止)型DIPに取り替え) 1,388百万円

対策実施の結果、リスクコストは以下のようになる。

4)対策実施後リスクコスト

(1)A案：601.9百万円

(2)B案：2,245.8百万円

(3)C案：3,444.8百万円

5)対策の便益

したがって、リスク対策の便益は無対策の場合のリスクコストと対策後のリスクコストの差として次のように求められる。

(1)A案： $4,965.6 - 601.9 = 4,363.7$ 百万円

(2)B案： $4,965.6 - 2,245.8 = 2,819.8$ 百万円

(3)C案： $4,965.6 - 3,444.8 = 1,520.8$ 百万円

ただし、これはいつでも得られるのではなく、地震が発生したときに便益が生じるものである。いま地震の生起確率を1/70(70年に1度)とすれば、上記便益の得られる確率が1/70、つまり上記便益の1/70が毎年得られると考えることができる。したがって、A、B、C案それぞれの毎年の便益は62.3百万円、40.3百万円、21.7百万円となる。

6)地震対策の経済効果と対策の意義

対策(この場合配水管)の寿命を50年とすれば上記の1年当たり便益50年分の現在価値は、

割引率を5%とすれば、A、B、C案それぞれ1,137百万円、735百万円、369百万円となる。これらはどれも対策の費用に見合う額ではない。

4.2 水道水中発癌物質のリスク

水道水中の発癌物質、特にトリハロメタンのリスクとその対策について若干の量的評価を試みた。⁷⁾ いま、ある水道の総トリハロメタン濃度が150 $\mu\text{g/L}$ あったと仮定し、その対策として高度浄水処理、ここではオゾン処理及び粒状活性炭処理を導入する場合のコストと便益について検討する。

考える対象給水人口を100,000人とし、年齢構成は日本の平均的な都市住民の人口統計を準用する。いま総トリハロメタン濃度が100 $\mu\text{g/L}$ の場合の発ガン率を10万分の1(一生[70年]曝露を受けた[飲用した])として10万人に一人の発ガン数増加とし、70歳の人口が1,000人であれば、その発ガン患者増加数は0.01人である。発ガンリスクが曝露時間に比例するとすれば、N歳の人の増加発ガン率は(N/70)/1,000,000となる。そこで、先の統計に従って年齢グループごとの増加発ガン人口を次のように求める。

$$P_i = \frac{(n_{iL} + n_{iU})}{2} \times \frac{1}{70} \times 10^{-5} \times x_i \dots\dots\dots (7)$$

- ここに、 P_i : 年齢グループiの増加発ガン人口
- n_{iL} : 年齢グループiの下限年齢
- n_{iU} : 年齢グループiの上限年齢
- x_i : 年齢グループiの人口

これを全ての年齢グループについて合計する。詳細は省くが、その結果、人口10万人の濃度100 $\mu\text{g/L}$ の総トリハロメタンによる増加発ガン人口は0.533人となる。比例関係からいって、濃度150 $\mu\text{g/L}$ の場合は0.800人、これを75 $\mu\text{g/L}$ まで除去した場合には0.400人となる。

上記の人数に一人あたりの社会的損失を掛けると各グループ全体のリスクを、さらに対象人口全体のリスクを求めることができる。あるグループに属する人口一人の社会的損失は本来発ガンしないで生産に従事したと仮定した場合の平均余命中の生産額とすべきである。しかし、その計算は困難なので仮に働き盛りの人に支払われる平均的な保険金(5千万円とする)に相当するものとする。ただし、35才~54才以外の年齢層に対しては1より小さい低減率を乗じる。この結果人口10万人当たりでは年間21百万円となる。

次いで上記発ガンによる経済損失を前記高度浄水処理施設の経済耐用年数(30年と仮定)にわたって合計する。ただし、前述地震リスクの場合と同様割引率5%を適用する。従って、人口10万人の損失総計は次のようになる。

$$¥21,000,000 \times 15.37 = ¥323,000,000$$

ただし、15.37は割引率5%の場合の均等払い現在価値係数(Uniform series present worth factor)

この3.23億円が総トリハロメタンを75 μ g/L除去した場合の便益となる。これは水1m³当たり1.65円であり、施設建設費と運転費の両方を考慮に入れた1立方メートル当たり高度浄水の経費約15.1円⁸⁾に比較するとはるかに小さい。ただし、(1)上記高度処理の導入によってトリハロメタン以外の発ガン物質の除去も期待できること、(2)先の一人当たり経済損失5千万円は個人の収入であり、所属する会社あるいは社会への貢献度は個人の収入の2倍程度あり、(3)かかる医療費も保険金額程度になると仮定出来ること等を考慮すれば、上記便益は3倍程度になる可能性がある。それにしても高度浄水の経費全部をまかなうには足りない。

5. 多元的リスク管理における対策の効果と優先リスク

上記節2.2において、各リスクの同定→生起確率・リスク規模想定→被害推定→対策案策定・評価と進み、リスクa~iの全体について総合的な評価を行った上で、実施すべき対策を決定すべきことを述べた。

上記節3.1及び3.2において二つのリスクについて対策のコストと便益(共に現在価値)について考察した結果が以下である。

1) 地震リスク対策：

対策コスト： A、B、C案それぞれ5,551百万円、2,776百万円、1,388百万円

便益： A、B、C案それぞれ1,137百万円、735百万円、369百万円

これらを年間のコスト及び便益に換算すると

年間対策コスト： A、B、C案それぞれ287.0百万円、143.5百万円、71.8百万円

年間便益： A、B、C案それぞれ58.8百万円、38.0百万円、19.1百万円

便益コスト比： A、B、C案それぞれ0.20、0.26、0.26

2) トリハロメタン対策：

対策コスト： オゾン処理325百万円+GAC処理500百万円=825百万円

便益： 323百万円

同じく年間のコスト及び便益に換算すると

年間対策コスト： 53.7百万円

年間便益： 21.0百万円

便益コスト比： 0.39

以上をまとめると、地震リスク対策はA、B案についてはトリハロメタン対策より大きな便益をもたらす。しかし必要投資額はそれぞれ6.7倍、3.4倍であり、便益コスト比は逆にかなり小さい。

一般の認識として、水道におけるリスクは地震が最も大きく、これに対する対策を第一に行うべきであると受け止められている。上記の検討からは、投資効率のみを考えればトリハロメタン対策をやった方が有利であるということが出来る。したがって、トリハロメタン対策を優先すべきであろうか。一般にリスクコストが同じであれば、発生確率が小さく影響リスクの大きなリスクの方がより重要なリスクと認定される傾向にある。⁹⁾ 前記によれば地震被害は

59.7 億円と非常に大きく、生起確率を加味してもそのリスクコストは 0.85 億円である。これと比較し、トリハロメタンのリスクコストは 0.21 億円である。リスク対策投資政策についてのアカウントビリティは水道事業者に帰するが、決定は最終的にコストを負担する需要者を含めて行わなければならない。事業者が必要と判断し、需要者が同意すれば、たとえ投資額が大きくても地震リスク対策を行わなければならない。また、上記以外のリスクについてもこのようなリスクの計量と対策の便益を算定し、対策の必要性を決定すべきである。

6. 社会的考察の必要性

社会全体として対応しなければならないリスクは多数あり、そのコスト、対応策、対策の優先度、対策のコスト、便益も多様である。現在のように社会全体として財政的にリソースが制約されている状況では、分野ごとに優先リスクを決めるのみでなく、横断的に、つまり分野を超えて優先すべきリスクを考えねばならないであろう。

参考文献

- 1) 友野勝義、白水 暢 水道におけるリスク管理の現状 水道協会雑誌 64:01 (Vol.724) pp.32-41 (1995)
- 2) Slovic, P., et al, Intuitive Toxicology. II. *Expert and Lay Judgments of Chemical Risks in Canada*, Risk Analysis, 15, pp.661-675 (1995)
- 3) 友野勝義、白水 暢 水道のリスクに対する需要者の認識 水道協会雑誌 65:10 (Vol.745) pp.15-25 (1996)
- 4) 友野勝義、真柄康基 水道におけるリスク対策の費用と便益に関する一考察(1)及び(2) 水道協会雑誌 68:08 (Vol.779) pp.2-12 及び 68:09 (Vol.780) pp.26-36 (共に 1999)
- 5) 草野直幹 土木分野におけるリスクマネジメントの必要性 土木学会誌 84:07 (2000)
- 6) Tomono, K. and Magara, Y., *The Cost of Anti-Risk Measures and Perceptions of Risks*, Proc. 6th Symposium of Sanitary Engineering, Hokkaido Univ. (1998)
- 7) 友野勝義 リスクとお金の話 水道公論 日本水道新聞 Vol.34-9 (1998)
- 8) 高度浄水施設導入ガイドライン 日本水道協会 (1988)
- 9) リスクマネジメントガイド 日本規格協会 (三菱総合研究所編) (2000)