

．クリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物対策

1994 年以降我が国でも顕在化したクリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物による汚染問題は水道水質管理上の重要課題となっている。

厚生労働省においては、平成 8 年 10 月、「水道におけるクリプトスポリジウム暫定対策指針」(以下「暫定対策指針」という。)を策定し、クリプトスポリジウム等による汚染のおそれの検討及び汚染のおそれがある場合における適切なる過処理を指導してきた。また、平成 12 年に制定された水道施設の技術的基準を定める省令(平成 12 年厚生省令第 15 号)において、原水に耐塩素性病原微生物が混入するおそれがある場合にはろ過等の設備を設置すべきことが規定された。

この結果、我が国では原水中におけるクリプトスポリジウムなどの検出事例や浄水中での検出による給水停止事例は毎年報告されているものの、暫定対策指針策定の契機となった埼玉県越生町の集団感染(平成 8 年 6 月)以降に大規模な感染事故の発生はない。この事実や各国の状況、さらには今般の WHO 飲料水水質ガイドライン案(3 訂版)等に照らせば、暫定対策指針の基本姿勢及び水道事業体に求めた措置は正しかったものと判断されるが、万全を期するためには、今回の水質基準の改正を機に一層の対策の充実・強化を行っていくことが肝要である。

実際、暫定対策指針策定から 6 年が経過したが、クリプトスポリジウム等に関する対策が必要とされる浄水施設数は 3,404 施設あるが(平成 14 年 4 月現在)このうち、対策済みの施設数は 1,916 施設に止まっている。水道水の安全に万全を期するためには、これら耐塩素性病原微生物に対する対策を一層推進していく必要がある。

1 . 基本的考え方

病原微生物を対象とした即時監視は技術的制約から現実的とは考えられない。従って、その対策の原則は、汚染を未然に防ぐことにあり、そのためにあらかじめ水源域における汚染源の特定、原水汚染の機会、程度、その変動等を把握することが重要である。その上で、必要な処理能力を有する設備の導入あるいは改善を図ることで安全が確保されるものである。

このことについては、クリプトスポリジウム等についても例外ではなく、その対策の検討に当たっては、汚染の未然防止を基本とすべきである。ただ、注意すべきこと

は、クリプトスポリジウム等の耐塩素性病原微生物には塩素消毒が無効なことで、これに替わる措置が必要となることである。なお、我が国では塩素耐性を有する病原微生物としてクリプトスポリジウム及びジアルジアに関心が払われているが、これら2種類の原虫類とともに、将来的に起こり得るサイクロスポラ (*Cyclospora*) など新たな病原微生物への対策にも注意しておく必要がある。

2. リスクの試算

暫定対策指針においては、検査の実行性の観点から、通常、試料水 10L を用いてクリプトスポリジウムの存在の有無を検査することとしているので、仮に、原水中に毎年 1 個/10L のクリプトスポリジウム・オーシストが検出された場合におけるリスクを WHO が提唱する参考許容値 (Reference Level of Acceptable Risk、単位は DALYs) の考え方をを用いて試算すると、ろ過等の措置を行わない場合には、WHO の参考許容値 (1.4×10^{-6} DALYs) を大幅に上回る (100 倍)。一方、浄水操作により 2log 除去 (99% 除去) が保証される場合には、リスクは概ね WHO の参考許容値と同程度の水準になる。換言すれば、原水中に 1 個/10L 程度の汚染であってもオーシストが検出された場合には適切な浄水操作が必要であることを示すものである。(参考 1)

ところで、通常の日感染リスクが十分に低いものとする、年間感染リスクは日感染リスクの和に近似することができる。その結果、感染リスクに係る様々な変動要因がある中で、年間感染リスクは特異的に高い値を示す日感染リスク値に強く影響される。言い換えれば、その特異的に高い値を発生させない措置を講じることで年間感染リスクは低く抑えられることが、原水中のオーシスト調査の結果を基にしたモンテカルロ・シミュレーションにより示されている。(参考 2)

このシミュレーションでは、相当量の浄水に存在するオーシストを常時監視し、その結果を日々の給・配水の可否判断に反映させるという想定となっており、実際上の浄水管理には適応し得ないものである。しかしながら、このシミュレーションにより、年間感染リスクに影響する変動要因が種々ある中で、年間感染リスクは特異日の感染リスクに大きく影響されていること、その特異日を排除する (発生させない) ことが安全につながるという方向性が明確に示されている。

これを実際の浄水場の運営に当てはめれば、「特異日を発生させない」措置とは、暫定対策指針に示されるどころの「ろ過施設の整備と浄水工程の管理強化」である。

3. 講ずべき対策

基本的考え方からも、また、リスクの試算結果からも、クリプトスポリジウム等の耐塩素性の病原微生物対策としては、汚染のおそれの把握と適切な浄水操作（ろ過処理）が必要であるとの結論に達する。

一方で、暫定対策指針上、対策が必要な施設が3,404施設あるにもかかわらず、対策済みの施設数は1,916施設に止まっていることを考えれば、本専門委員会としては、対策の一層の強化を目指し、水道法第22条に基づく措置として、消毒に加え、塩素耐性微生物に係る措置（原水がクリプトスポリジウム等により汚染され、又は汚染されているおそれがある場合には、適切なる過操作を行うべきこと）を加えることが必要であると考えられるものである。

なお、水質基準とすることについては、仮に米国環境保護庁（USEPA）で用いている微生物許容感染リスクの考え方（ 10^{-4} /年以下）を採用したとしても、極めて多量（15トン）の試料水を用いて検出されないことを確認することが求められること、また、クリプトスポリジウム等の検出方法に未だ問題点が残っていることから、現実的ではない。

4．留意事項

(1) クリプトスポリジウム等による汚染のおそれの判断

クリプトスポリジウム等による汚染のおそれについては、暫定対策指針において、「水道の原水から大腸菌群が検出されたことがある場合」又は「水道の水源となる表流水、伏流水若しくは湧水の取水施設の上流域又は浅井戸の周辺に、人間又は哺乳動物の糞便を処理する施設等の排出源がある場合」に、指標菌（大腸菌及び嫌気性芽胞菌）の検査を行い、これが検出された場合に「汚染のおそれ」があると判断することとされている。しかしながら、排水処理として塩素消毒がなされている場合があることを想定すれば、大腸菌を指標とすることに蓋然性を欠く事態も生じ得る。

クリプトスポリジウム等による汚染は、水源域における人間又は哺乳動物の糞便処理施設などの汚染源、降雨や融雪などに伴った農業用地からの流入汚染、野生動物の活動などを主たる原因とし、また、レクリエーション等のための水源への人の出入りや地層の亀裂など地質学的な特性も汚染につながる要素となる。

このようなことを考えるとき、汚染のおそれの判断基準については、さらに検討を加え、より精緻なものとする必要がある。

(2) 規制の円滑な実施

耐塩素性微生物対策を水道法第 22 条で義務付けた場合、多くの水道事業者等において新たに施設整備が必要となることが予想される。このため、規制の実施に当たっては、例えば、施設整備に要する期間を準備期間とするなど、その円滑な実施に配慮すべきである。ただし、そのような場合においても、施設整備が完了するまでの間は、安全な飲料水の確保の観点から、原水の監視を強化するなど水質管理の一層の充実が必要なことはいうまでもない。

(3) 暫定対策指針の廃止

暫定対策指針の根幹は、「原水がクリプトスポリジウム等により汚染され、又は汚染のおそれがあると判断される場合には、適切なる過措置をとる」ということである。従って、これらの措置が法令上規定された段階で、暫定対策指針は 6 年間にわたる役割を終えることとなる。

しかしながら、水道水中の耐塩素性微生物対策は、これらの措置に限られるものではなく、汚染のおそれの判断 適切なる過施設の整備 適切なる過管理といった一連の流れの中で総合的な対応が求められる。このような観点からすれば、暫定対策指針としては廃止されるものの、耐塩素性病原微生物対策やその法令の解説書として、再編・整理され、関係者に提供されることが望まれる。

(参考1) WHO の提唱する Reference Level of Acceptable Risk (参考許容値)

WHO はクリプトスポリジウムを含む微生物による汚染に対しては、原水の汚染状況の把握と汚染量を許容できる範囲 (Reference Level of Acceptable Risk : 参考許容値) にまで低減できる浄水処理工程の導入により対応するよう提言している。WHO の水質基準にクリプトスポリジウム等に関する項目は含まれない。

疾病ごとの健康影響は多様で、比較に際しては共通の尺度が必要となる。WHO では感染症に限らず全ての疾病における健康影響度を『Disable Adjusted Life Years (DALYs : 障害調整生存年数)』という指標を用いて表現し、それぞれの疾病毎に健康影響度を算出することで比較を行っている。その際用いる疾病毎の健康への影響度は0から1の間の値をとり、影響が全くないものを0、死を1と規定している。

DALYs 値は疾病によって失われた余命 (Years of Life Lost : YLL) と障害を持って過ごす時間 (Years of Life Lived with a Disability : YLD) の和で、以下の式で表される。

$$DALYs = YLL + YLD$$

クリプトスポリジウム症に関する DALYs 値の計算は、以下の手順で算出されている。

クリプトスポリジウム症の主な症状は下痢 (水様便) で、疾病による負荷量の研究 (Murray、1996) によると水様便の平均加重は 0.066 とされている。本症では下痢症状が平均 7.2 日 (0.020 年) 続く。米国ミルウォーキーにおけるクリプトスポリジウム集団感染事例より、健常者での死亡は 10 万人当たり 1 名 (40 万人のうち 4 名死亡) と推定される。オランダの 1993~1995 の統計資料によると、下痢症が原因の死亡は 75 歳以上に認められ、その余命は 13.2 年となる。本症の発症者は感染者の 71% とされる。損失生存余命 (YLL) および障害をもって過ごす時間 (YLD) は以下の通りとなる。

$$\text{有症者 1000 人あたり } YLL = 1 \times 1000 \times 1/10^5 \times 13.2 = 0.13$$

$$\text{感染者 1000 人あたり } YLL = 0.13 \times 0.71 = 0.0923$$

$$\text{有症者 1000 人あたり } YLD = 0.066 \times 1000 \times 0.020 = 1.32$$

$$\text{感染者 1000 人あたり } YLD = 1.32 \times 0.71 = 0.937$$

上記の結果より、健康影響度は以下の通りとなる。

$$\text{感染者 1000 人あたり : } 0.0923 + 0.937 = 1.03 \text{ DALYs}$$

1 回のクリプトスポリジウム感染による健康影響度は感染者 1000 人あたり、1.03 DALYs と計算される。

我が国における現行の「水道におけるクリプトスポリジウム暫定対策指針」では、原水の汚染濃度把握のために、概ね 10L の試料水よりオーシスト数を測定している。仮に、原水 10L 中に 1 個のオーシストが存在するものとして、無処理あるいは上水処理後の水道水に潜むクリプトスポリジウム症のリスクを試算した(表)。クリプトスポリジウムによる感染確率は後述の Haas らの式 (Equ (1)) より求められ、オーシスト 1 個の摂取による感染率は 4.0×10^{-3} となる。

ところで WHO は水道水中の臭素酸の摂取による腎細胞癌 (Renal cell cancer) の許容発生率を 10^{-5} (1/100,000 人) としている。腎細胞癌は平均 65 歳で発生し、その平均余命は 19 年である。このときの死亡確率を 60% とし、症状の重さは致死であることから 1 とする。損失生存余命 (YLL) は以下の通りとなる。

$$YLL = 1 \times 0.60 \times 19 = 11.4 \text{ DALYs}$$

本症より派生する障害をもって過ごす時間 (YLD) は YLL に比べて十分に小さく、YLD は無視できる。人の寿命を 80 年と仮定した腎細胞癌の年間の DALY は、以下の通りである。

$$10^{-5} \times 11.4 \div 80 = 1.4 \times 10^{-6} \text{ DALYs}$$

すなわち、WHO の発癌物質 (臭素酸) による癌の年間許容発生率は、障害調整生存年数 1.4×10^{-6} DALYs に相当する。

表に示した試算によると、無処理 (1.5×10^{-4}) では WHO の参考許容値を大幅に上回る。一方、2log 除去が保障された上水処理 (1.5×10^{-6}) であれば、概ね WHO の参考許容値と同程度のリスク水準にあるといえる。

なお、旧建設省土木研究所資料第 3533 号 (1998 年 1 月) によれば全国 67 ヶ所の下水処施設におけるオーシストの調査では処理水中のオーシスト数は 0.05 ~ 1.6 個/L であったとされている。この数値に、河川における希釈率 (10 倍) を加味すれば概ね 1 個 / 10L 以下と推測される。また、同調査における河川水でのオーシスト数は 0.05 ~ 3.2 個 / L で (最大値の 3.2 個 / L は越生町におけるクリプトスポリジウム集団感染直後の越辺川の値で、これを除くと最大値は 0.1 個 / L)、両者のデータはよく符合する。

表 1 クリプトスポリジウムの年間リスク

原水中のオーシスト濃度	1 個/10L			
上水処理における除去率	3 log	2.5 log	2 log	無処理
水道水中の濃度	10^{-4} 個/L	3×10^{-4} 個/L	10^{-3} 個/L	10^{-1} 個/L
飲用日量	1L/日			
曝露量/日	10^{-4} 個/日	3×10^{-4} 個/日	10^{-3} 個/日	10^{-1} 個/日
1 オーシスト摂取による感染確率	4×10^{-3}			
DALYs/case 1 感染あたりの健康影響度	1.03×10^{-3} DALYs (発症率 71%を採用)			
1 日あたりの感染率 (年間)	4×10^{-7} /日 (1.5×10^{-4} /年)	1.3×10^{-6} /日 (4.7×10^{-4} /年)	4×10^{-6} /日 (1.5×10^{-3} /年)	4×10^{-4} /日 (1.5×10^{-1} /年)
1 人あたりの年間健康影響度	1.5×10^{-7} DALYs	4.8×10^{-7} DALYs	1.5×10^{-6} DALYs	1.5×10^{-4} DALYs

(参考 2) 微生物許容感染リスクに基づく評価

Haas らによれば、クリプトスポリジウムの用量-作用 (infection probability/particle) に関する計算式は、次のとおり与えられる。

$$P(N) = 1 - \exp(-N/k) \quad \text{Equ(1)}$$

N: 摂取オーシスト個数

k: パラメータ (= 238.6)

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^n \quad \text{Equ (2)}$$

P_n: 反復暴露による感染確率

n: 反復回数

P₁: 単回暴露による感染確率

上記式によるとオーシスト 1 個を摂取した時の感染確率は Equ (1) より

$$P(1) = 1 - \exp(-1/238.6) = 0.0042$$

Haas CN et al., Accessing the risk posed by oocysts in drinking water. *Journal of American Water Works Association* 88(9):131-136,1996.

米国 EPA によれば、微生物許容感染リスク 10^{-4} /年以下を満足することを目標にしている。この目標を満たすための条件を一日の水道水の飲用量を 1L として試算すると (摂取日量の分布の 97.5 パーセンタイルがおよそ 1000ml、矢野一好等、2000 年) Equ (2) より、

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^n = 10^{-4} \quad (P_1 = 2.7 \times 10^{-7})$$

を満たすことが求められる。Equ (1) から N を求めると、 $N = 6.51 \times 10^{-5}$ となり、 6.51×10^{-5} 個/L 以下、すなわち 15.4t 当り 1 個 (6.5 個/100t) と計算される (飲用量を 2L/day とすれば 1 個/30t)。

ところで、クリプトスポリジウムの感染リスクを考える場合、高度に汚染された原水の流入や浄水処理における障害など様々な要因で平常時の年間感染リスクを超えるような日感染確率 (特異日の感染確率) が生じることを想定する必要がある。たとえば 10^{-4} を年間感染リスクとした場合、浄水中のクリプトスポリジウム濃度 2.5 個 / 100L で日感染リスクが 10^{-4} となるが (1 日飲水量 1L、1 個摂取した場合の感染確率 0.4% として計算) このような測定値は実際に観測され得る汚染である。

ちなみに、年間感染リスクは、感染しない確率を算出してその値を 1 から減じることで得られることから、次式で計算される。

$$YRisk = 1 - \prod_{\text{日}}^{\text{年}} (1 - Drisk_i) \quad \text{Equ (3)}$$

ここで、*Yrisk*: 年間感染リスク、*Drisk_i*: *i*日目の日感染リスク、とする。

通常、この値は 10^{-4} などの値をとり、1 より非常に小さい値となる。従って、 $\prod_{\text{日}}^{\text{年}} (1 - Drisk_i)$ の値はほぼ 1 に近似される。ここで、特異日の感染リスクを *p* とすると

$$YRisk = 1 - \prod_{\text{日}}^{\text{年}} (1 - Drisk_i) \times (1 - p) = 1 - \prod_{\text{日}}^{\text{年}} (1 - Drisk_i) + \prod_{\text{日}}^{\text{年}} (1 - Drisk_i) \times p \quad \text{Equ (4)}$$

Equ (4) が得られる。ここで、*p* が通常の年間リスクよりも十分に大きな値をとるとすると、

$$YRisk = 1 - \prod_{\text{日}}^{\text{年}} (1 - Drisk_i) \times (1 - p) \approx 1 - \prod_{\text{日}}^{\text{年}} (1 - Drisk_i) + p \quad \text{Equ (4)}$$

となり、結局のところ通常の年間の「感染確率」に特異日の「感染確率」を加えればよいことがわかる。すなわち、年間感染リスクは特異日の値に大きく影響され、その値が年間リスクのほぼ全てを占めることが示される。

上記のことを念頭に入れて、仮の目標値として米国 EPA の微生物許容感染リスク 10^{-4} /年以下を達成するための特異日感染リスクの排除条件を検討した研究報告がある (Masago et al., 2002)。そこでは、相模川水系におけるクリプトスポリジウムの調査結果 (Hashimoto et al., 1999) をもとにモンテカルロ・シミュレーションを用い、浄水中に、ある限度以上のオーシストが含まれている日には飲用が中止されるものとして年間感染リスクの計算を行っている。詳細は原著に譲るが、シミュレーションでは水系におけるオーシストの分布様式が概ね適合すること、非加熱の水道水の飲水量は Teunis 等 (1997) の報告を採用 (0.153L/日を中央値とした対数正規分布)、その他の変動要因として降雨による原水中のオーシスト量の変化、浄水処理効率等々が組み込まれている。その結果、対策指針に定められた条件、すなわち 20L の検水からオーシストが検出された日には給水が停止される (その日の感染リスクが 0 である) ものとして、年間感染リスクの 95% 値はおおよそ 1 log 程度低下することが示された。さらに、オーシスト測定の際の検水量を変化させて検討した結果、検水量をおおよそ 80 L 以上にすることで年間感染リスクの 95% 値を許容リスク以下にすることができたとしている。

(参考文献)

矢野一好、保坂三継、大瀧雅寛、田中愛、伊予亨、土佐光司、市川久浩 (2000) 日本水環境学会シンポジウム講演集 (摂南大学 9月13 - 14日)

Y. Masago, H. Katayama, A. Hashimoto, T. Hirata and S. Ohgaki (2002). Assessment of Risk of Infection Due to *Cryptosporidium parvum* in Drinking Water, *Water Science and Technology. Water Science & Technology* 46(11-12): 319-324.

Hashimoto A. and Hirata T. (1999). Occurrence of *Cryptosporidium* oocysts and *Giardia* cysts in Sagami river, Japan. *Proceedings of Asian Waterqual '99: 7th IAWQ regional conference*, 2: 956-961.

Teunis P.F.M., Medema G.J., L. Kruidenier and A. H. Havelaar (1997). Assessment of the risk of infection by *Cryptosporidium* or *Giardia* in drinking water from a surface water source. *Water Research*, **31**(6):1333-1346.