

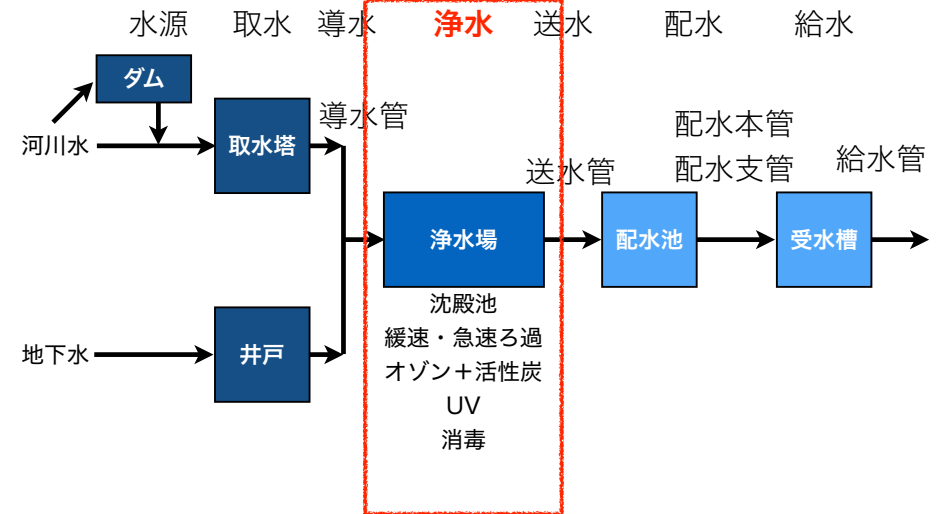
衛生工学 上水道

4. 水道水質, 消毒



名古屋大学減災連携研究センター
Disaster Mitigation Research Center, NAGOYA UNIVERSITY

上水道システム



浄水処理

- ✓ 凝集沈殿
- ✓ ろ過 (緩速, 急速)
- ✓ 高度浄水処理 (生物, オゾン, 活性炭)
- ✓ **消毒**

水道水質

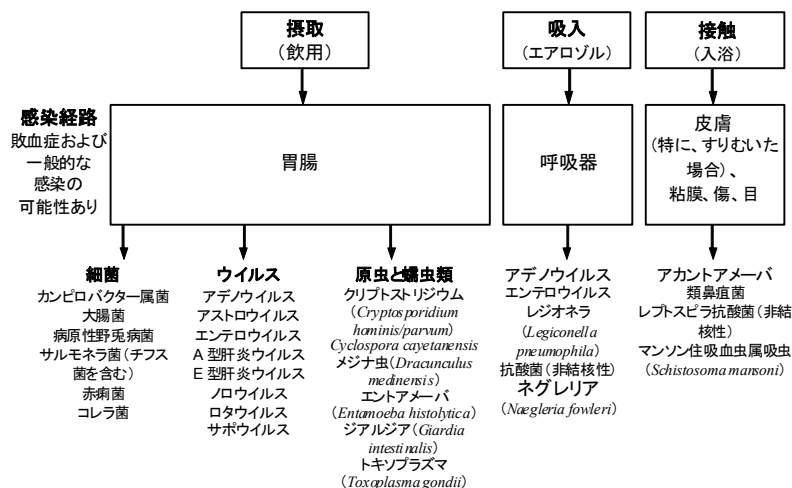
水道水質で考慮すべき点

- 微生物学的視点 (Microbial aspects)
- 化学的視点 (Chemical aspects)
- 放射線学的視点 (Radiological aspects)
- 受容性の視点 (Acceptability aspects)

飲料水の微生物学的危害因子

- 病原細菌, ウイルス, 原虫および蟻虫類による感染症
- 水系病原体
 - ✓ 病原体は健康に対し, 急性的あるいは慢性的な影響を与える可能性がある
 - ✓ 病原体の中には環境中で増殖するものもある
 - ✓ 病原体は個別に存在する
 - ✓ 病原体はしばしば, 凝集体として, あるいは水中のSS分に吸着して存在し, その濃度は時間で変化する
 - ✓ 疾病に至る病原体への暴露量は, 個人の免疫状態と共に, 病原体の用量, 感染度, および毒性に依存する
 - ✓ 感染した場合, 病原体はその宿主内で増殖する
 - ✓ 特定の水系病原体の中には, 食品, 飲料, または暖かな水の中で増殖できるものがあり, 感染の可能性が長く続き, 増大することもある
 - ✓ 多くの化学物質と異なり, 病原体には蓄積効果はない

水系病原体の伝播経路とその例



定量的微生物リスク評価

Quantitative microbial risk assessment (QMRA)

- ヒト病原体からの感染リスクを評価するための数学的手法であり, 水系微生物危害因子, 特に散発的な疾病に関連するリスクを理解し管理する上で有用である。
- QMRAは, **暴露に関する利用可能な情報**, 例えば, 病原微生物の摂取数など, と**用量-反応モデル**を体系的に組み合わせることによって, **飲料水中の病原微生物の暴露に伴う感染確率**を評価するものである。その後, 不顕性感染の頻度, 期間, 疾病の重篤度などの**疫学上のデータ**を使用して, 疾病負荷を評価することができる。

参照病原体に関する耐容疾病負荷と 原水水質との関係 計算例

河川水 (ヒトおよび家畜による汚染)	単位	クリプト スポリジウム	カンピロバクター	ロタウイルス*
原水水質 (C_0)	1L 中の微生物数	10	100	10
耐容リスクレベルを達成するのに 必要な処理性能 (PT)	対数減少値	5.89	5.98	5.96
飲料水質 (C_0)	1L 中の微生物数	1.3×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.1×10^{-5}
非加熱飲料水の摂取量 (V)	一日当たりの L 数	1	1	1
飲料水による曝露量 (E)	一日当たりの微生物数	1.3×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.1×10^{-5}
用量-反応関係 (r) ^a	一微生物当たりの感染 確率	2.0×10^{-1}	1.9×10^{-2}	5.9×10^{-1}
感染リスク (P_{inf})	一日当たり	2.6×10^{-6}	2.0×10^{-6}	6.5×10^{-6}
感染リスク (P_{inf})	一年当たり	9.5×10^{-4}	7.3×10^{-4}	2.4×10^{-3}
感染後の発症 (下痢症) リスク (P_{ill})	一回の感染当たりの発 症確率	0.7	0.3	0.5
発症 (下痢症) リスク (P_{ill})	一年当たり	6.7×10^{-4}	2.2×10^{-4}	1.2×10^{-3}
疾病負荷 (db)	一患者当たりの DALY	1.5×10^{-3}	4.6×10^{-3}	1.4×10^{-2}
感受性を持つ人の割合 (f_s)	人口比 (%)	100	100	6
健康影響目標値 (HT)	年間 DALY ^b	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-6}

$$\begin{aligned} \text{計算式: } C_0 &= C_0 \div 10^{PT} & P_{inf} &= E \times r & HT &= P_{ill} \times db \times f_s \div 100 \\ E &= C_0 \times V & P_{ill} &= P_{inf} \times P_{ill} \end{aligned}$$

©WHO飲料水水質ガイドライン第4版, 国立保健医療科学院, 2012

飲料水の化学的有害因子

- 数種類の化学汚染物質は、飲料水を通じた長期間にわたる暴露の結果、ヒトの健康に悪影響を及ぼすことが示されている。これらは、様々な汚染源から飲料水に混入するであろう化学物質のうちごく一部であるにすぎない。
- 化学物質の発生源別分類
 - ✓ 自然由来：岩石、土壌および地質学的状況と気候の影響
 - ✓ 産業発生源および市街地：鉱業（採掘業）、製造業、加工業、下水（新しく顕在化している多くの汚染を含む）、固形廃棄物、市街地流出、燃料の漏出
 - ✓ 農業活動：堆肥、肥料、集約的な動物の飼育と農薬の使用
 - ✓ 浄水処理または飲料水と接触する材料：凝集材、消毒副生成物、配管材料
 - ✓ 公衆衛生上の目的で水に使われる農薬：昆虫による疾病伝播を防止するための幼虫駆除剤

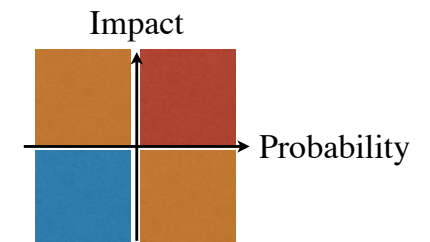
化学物質のガイドライン値の導出

- 2つのアプローチ：物質による発がんメカニズムについて考察する必要がある。
 - ✓ 閾値のある化学物質
 - ✓ 閾値のない化学物質（多くは遺伝毒性を有する発がん物質）
- 化学物質の発がん性評価は、通常、長期間曝露による実験動物による研究に基づく。
 - グループ1 ヒトに対して発がん性のある物質
 - グループ2A ヒトに対しておそらく発がん性がある物質
 - グループ2B ヒトに対して発がん性を示す可能性がある物質
 - グループ3 ヒトに対して発がん性による分類ができない物質
 - グループ4 ヒトに対しておそらく発がん性がない物質

リスク科学

$$\text{Risk} = \text{Probability} \times \text{Impact}$$

- 微生物リスク
 - ✓ Target level
 - > 感染率： $10^{-4}/\text{year}$
 - ✓ QMRA
- 化学物質リスク
 - ✓ Target level
 - > 発がん率： $10^{-5}/\text{lifetime}$
 - ✓ 毒性評価
- DALYs (Disability-Adjusted Life Years)



水道水質基準

- ー 水質基準のうち水道法により規定されるもので、水道水が備えなければならない水質上の要件。
- ー 水道法第4条
 1. 病原生物に汚染され、又は病原生物に汚染されたことを疑わせるような生物若しくは物質を含むものでないこと。
 2. シアン、水銀その他の有毒物質を含まないこと。
 3. 銅、鉄、弗素、フェノールその他の物質をその許容量をこえて含まないこと。
 4. 異常な酸性又はアルカリ性を呈しないこと。
 5. 異常な臭味がないこと。ただし、消毒による臭味を除く。
 6. 外観は、ほとんど無色透明であること。

水道における水質基準

- ー 水道水は、水道法第4条の規程に基づき、「水質基準に関する省令」で規定する水質基準に適合することが必要。
 - ✓ 水道水質基準（51項目）
 - ✓ 水質管理目標設定項目（26項目）
 - ✓ 要検討項目（47項目）
- ー 水質検査計画を策定し、需要者に情報提供
- ー ただし、**残留塩素濃度の下限値（遊離塩素で0.1mg/L以上、結合塩素で0.4mg/L以上）**は、水質基準ではなく、水道法22条の衛生上の措置として記載

現在の水質基準 平成15年4月に大幅な改正

- ✓ **消毒副生成物**に関してはトリハロメタン類以外にもハロ酢酸等の問題や新たな化学物質による問題が提起されていること。
- ✓ クリプトスポリジウム等の**耐塩素性病原性微生物**の問題が提起されていること。
- ✓ 世界保健機構（WHO）においても、飲料水水質ガイドラインを10年ぶりに全面的に改定作業が進められていること。
- ✓ 規制改革や公益法人改革の流れの中、水質検査についての見直しなど**水道水質管理の分野**においても、より合理的かつ効率的なあり方を検討すべきことが求められていること。

水道水質基準

- ー **水質基準項目（51項目）**
 - ✓ **健康**に関する項目と**水道水が有すべき性状**に関連する項目
- ー **水質管理目標設定項目（26項目）**
 - ✓ 将来にわたり水道水の安全性の確保等に万全を期する見地から、体系的・組織的な監視によりその検出状況を把握し、**水道水質管理上留意すべき**項目
- ー **要検討項目（47項目）**
 - ✓ **毒性評価が定まらない**、若しくは浄水中の存在量が不明等の理由から水質基準、水質管理目標設定のいずれにも分類できない項目

水道水質基準項目の意義

> 病原性微生物関連

- 病原性微生物とともに水中に混入してくる微生物を指標

> 一般細菌；1mlの検水で集落数が100以下

- 標準寒天培地を用いて、35～37℃で22～26時間培養した場合、肉眼で認められる集落となって発現する細菌

> 大腸菌；検出されないこと

- 特定酵素基質培地法によって β -グルクロニダーゼ活性を有すると判定される細菌
- 人をはじめとする恒温動物の腸管内に多数生息

消毒副生成物

- 自然水中には存在しないが、浄水処理過程で注入される塩素やオゾン等の酸化消毒剤が、水中の無機物質やフミン質等の前駆物質と反応して生成される。
- 基準値は、生涯にわたって連続的に摂取しても、健康に影響を生じない水準を基として設定
 - ✓ **総トリハロメタン**（クロロホルム、ブロモジクロロメタン、ジブロモクロロメタン、ブロモホルム）；0.1mg/L以下
 - ✓ **クロロ酢酸**；0.02mg/L以下、**ジクロロ酢酸**；0.04mg/L以下、**トリクロロ酢酸**；0.2mg/L以下
 - ✓ **臭素酸**；0.01mg/L以下
 - ✓ **ホルムアルデヒド**；0.08mg/L以下

味覚関連項目

- 塩化物イオン；200mg/L以下
- 有機物（**全有機炭素（TOC）**）；5mg/L以下
 - ✓ 全有機炭素（TOC）とは、水中に存在する有機物を構成する全ての炭素のことで、水中の有機物濃度の指標。
- ナトリウム；200mg/L以下
- カルシウム・マグネシウム等（硬度）；300mg/L以下
 - ✓ 硬度とは、水中にイオン状となって存在するカルシウム（Ca⁺⁺）とマグネシウム（Mg⁺⁺）の量を、これに対応する炭酸カルシウム（CaCO₃）に換算して表したものの。

におい関連物質

- フェノール類；0.005mg/L以下
 - ✓ フェノールおよび各種フェノール化合物。自然水中には腐植質等に由来して含まれることがあるが、その量はわずかで、通常は工場排水等の混入に起因。
 - ✓ 塩素と反応してクロロフェノールとなり、不快な刺激臭
- ジェオスミン；0.00001mg/L以下
 - ✓ かび臭の原因物質。富栄養化に伴う藍藻類アナベナ
- 2-メチルイソボルネオール（2-MIB）；0.00001mg/L以下
 - ✓ かび臭の原因物質。富栄養化に伴う藍藻類フォルミディウムやオシラトリア

基礎的性状

- pH値（ガラス電極法）；5.8以上8.6以下
- 臭気（官能法）；異常でないこと
- 味（官能法）；異常でないこと
- 色度（比色法，透過光測定法）；5度以下
- 濁度（比濁法，透過光測定法，積分球式光電光度法，散乱光測定法，透過散乱法）；2度以下

海外の飲料水水質基準

— WHO飲料水水質ガイドライン

- ✓ 微生物，無機物質，有機物質，農薬，消毒副生成物，放射能，利便性等に関連する項目
- ✓ 水源から蛇口までの体系的な水質管理の実施（**水安全計画**の策定）

— 米国における飲料水水質基準（USEPA）

- ✓ 安全飲料水法（Safe Drinking Water Act, 1974）にもとづいて規定
- ✓ 目標最大許容レベル（MCLG），最大許容レベル（MCL）

名古屋市上下水道局の水道水質検査計画

— 水質検査計画

- ✓ 「水道水質検査優良試験所規範（水道GLP）」の認定取得
- ✓ 妥当性評価
 - ＞ 水道水質検査における妥当性評価ガイドライン
- ✓ 内部精度管理
 - ＞ 局内
- ✓ 外部精度管理
 - ＞ 厚生労働省

名古屋市上下水道局，水道の水質，<https://www.water.citynagoya.jp/category/suidousuisitsu/index.html>

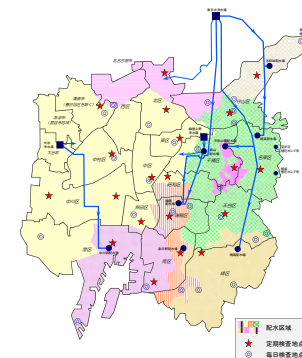
名古屋市上下水道局の水道水質検査

— 水道法で義務付けられている項目

- ✓ 毎日検査項目（3項目）
- ✓ 水質基準項目（51項目）

— 水質管理上必要な項目

- ✓ 水質管理目標設定項目（26項目）
- ✓ 要検討項目（16項目）
- ✓ 放射性物質（3項目）
- ✓ その他の項目（33項目）



名古屋市上下水道局，水道の水質，<https://www.water.citynagoya.jp/category/suidousuisitsu/index.html>

名古屋市上下水道局 水道水の放射性物質の測定

採水日：令和2年4月14日

(単位: Bq/L)

採水か所	春日井浄水場		鍋屋上野浄水場	
試料名	原水	浄水	原水	浄水
採水時刻	9:00	9:00	9:00	9:00
ヨウ素131	不検出(0.6)	不検出(0.7)	不検出(0.7)	不検出(0.6)
セシウム134	不検出(0.5)	不検出(0.8)	不検出(0.8)	不検出(0.7)
セシウム137	不検出(0.5)	不検出(0.7)	不検出(0.7)	不検出(0.7)

採水か所	大治浄水場		北区辻町地内
試料名	原水	浄水	水道水
採水時刻	9:00	9:00	14:10
ヨウ素131	不検出(0.6)	不検出(0.6)	不検出(0.7)
セシウム134	不検出(0.6)	不検出(0.7)	不検出(0.6)
セシウム137	不検出(0.7)	不検出(0.6)	不検出(0.6)

名古屋市上下水道局, 水道の水質, <https://www.water.city.nagoya.jp/category/suidousuisitsu/index.html>

消毒

Disinfection

- 一人に対して有毒な微生物(病原菌など)を**不活化**する(感染力をなくす)こと。
- 滅菌(Sterilization)：すべての微生物を殺す

消毒理論

Chickの法則

- ✓ 細胞死滅速度に関する法則 (N ：生細菌細胞数, K ：特定の消毒剤による反応速度定数)

$$\frac{dN}{dt} = -K \cdot N$$

CT値

- ✓ 病原性微生物等と消毒剤との接触量の指標
- ✓ 消毒剤の濃度と消毒剤が残留している時間の積
- ✓ 病原性微生物等の一定量(90%, 99%, 99.9%等)を不活化するのに必要なCT値が個々の細菌, 原虫等について消毒剤ごとに求められている。

塩素処理

- 水処理において, 液化塩素, 次亜塩素酸ナトリウム, 次亜塩素酸カルシウムなどの塩素剤を使用した消毒処理。

✓ 利点

- ＞ 気体, 液体(HOCl), 粉末(さらしこ)で入手可能
- ＞ 水への溶解度が高い
- ＞ 人に有害でない範囲で管網の安全確保可能
- ＞ 多くの微生物の代謝活性を止める
- ＞ 強力な酸化剤であり, 不飽和化合物などの酸化を生じる
- ＞ **残留性**が高い

✓ 欠点

- ＞ 有毒ガスであり, 取り扱いには注意が必要
- ＞ フェノールなどと容易に反応して**臭気**を発生
- ＞ **有機塩素化合物(全有機ハロゲン化合物, トリハロメタン)**を生成する

塩素要求量と塩素消費量

一 塩素要求量 Chlorine Demand

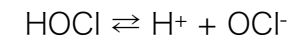
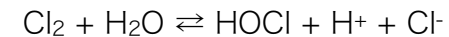
- ✓ 水に塩素を加えて、所定の接触時間（厳密には塩素注入から水が消費者に到達するまでの時間、普通は1時間）ののち、**遊離塩素**が残留するために必要な塩素量
- ✓ 遊離残留塩素0.1mg/Lとなる点での塩素投入量 a mg/Lを求め、 $a - 0.1$ [mg/L]で算出

一 塩素消費量

- ✓ アンモニア性窒素や有機性窒素が存在すると、注入した塩素と反応していったん**結合塩素**を生じる塩素量。

塩素反応について

- 一 遊離型塩素： HOCl , OCl^-
- 一 結合塩素： NH_2Cl , NHCl_2 , NCl_3
- 一 塩素を水中に入れると、



- 一 塩素の存在形態は**pH**に依存
 - ✓ pH5以下ではほとんどが HOCl 、pH7で80%、pH9ではすべてが OCl^- 。**塩素の不活化力は酸性側で強く、アルカリ側では急激に低下する。**

塩素反応（アンモニアがある場合）

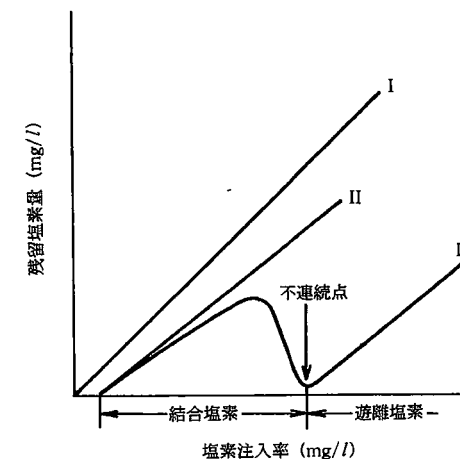
- 一 塩素はアンモニアと反応して、**結合塩素**（モノクロアミン、ジクロアミン、トリクロアミン）が生じる。



- 一 さらに塩素を加えると、結合有効塩素が減少



塩素注入と残留塩素量との関係



不連続点塩素処理法

- アンモニアを含む水に塩素の注入量を増やしていくと残留塩素量が増加するが、ある点に達すると急激に減少し、ついで再び増加する。このような形で最低点を示す点を**ブレイクポイント（不連続点）**という。
- この不連続点以上に塩素を注入して水を処理する方法を不連続点塩素処理法という。

前塩素処理と後塩素処理

前塩素処理 Pre-chlorination

- ✓ 有機物による汚濁や細菌群の多い原水については、沈殿やろ過を行う前に、**原水**に塩素を注入する方法。
- ✓ 鉄、マンガン、アンモニア、亜硝酸の除去、沈殿池内の藻類繁茂の抑制、沈殿池の沈降汚濁腐敗の防止。
- ✓ ろ過後に投入する塩素量は少量で済む。アンモニア性窒素が高い、または容易に酸化されるものを大量に含む原水の場合には大量の塩素が必要。

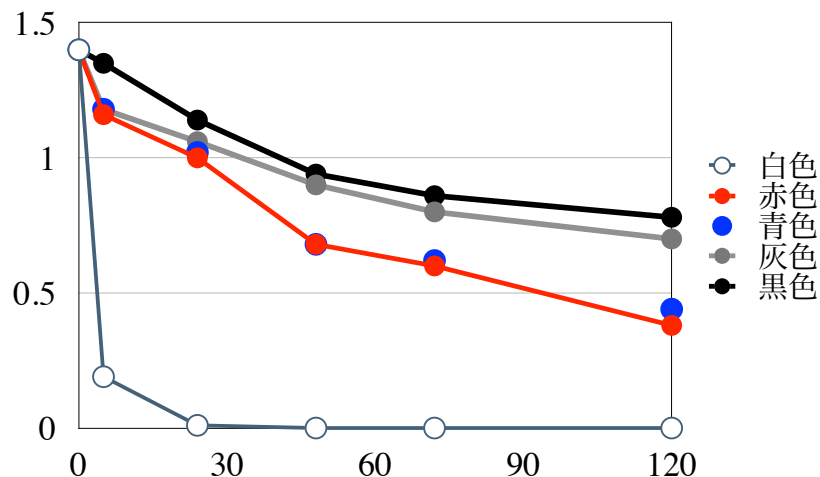
中間塩素処理 Intermediate chlorination

- ✓ 砂ろ過前の沈殿水に塩素を注入する方法。
- ✓ **トリハロメタンの低減化**に有効。

後塩素処理 Post-chlorination

- ✓ 浄水処理の最後の工程に**消毒**のため塩素を注入すること。
- ✓ **給水栓水の残留塩素を一定以上保持**するよう、塩素の注入を行う。

応急給水用ポリタンク 冬期屋外直射日光下での残留塩素濃度変化



オゾン, 紫外線

オゾン処理法

- ✓ オゾンの酸化力により、細菌やウイルスの不活化、色度の除去、異臭味の除去、有機物の酸化分解などを行う。
- ✓ オゾンは消毒効果が高い。トリハロメタンを生成しない。
- ✓ 持続性がない。アンモニア態窒素を除去できない。

紫外線消毒 (UV)

- ✓ 紫外線のもつ殺菌作用を利用する消毒法。水銀ランプを用いると253.7nmを主とする紫外線を得ることができ、これを水に照射することにより、有効な殺菌を行うことができる。
- ✓ 懸濁物質が存在する場合は消毒効果が低下。残留効果ない。

水安全計画

- 一 水道水の安全性を一層高め、今後とも国民が安心しておいしく飲める水道水を安定的に供給する
- 一 **水源から給水栓**に至る統合的な水質管理の実現
- 一 食品製造分野における**HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point)** の考え方を取り入れ
- 一 **水源から給水栓**に至る各段階で危害評価と危害管理を行い、安全な水の供給を確実にする水道システムを構築するもの

厚生労働省、水安全計画策定のためのガイドライン、2008

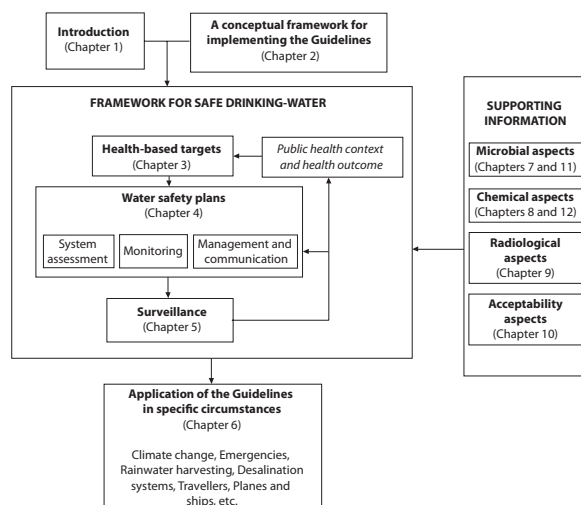
HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point)

- 一 微生物汚染等の危害をあらかじめ分析 (Hazard Analysis) し、その結果に基づいて、製造工程のどの段階でどのような対策を講じればより安全な製品を得ることができるかという重点管理点 (Critical Control Point) を定め、これを連続的に監視



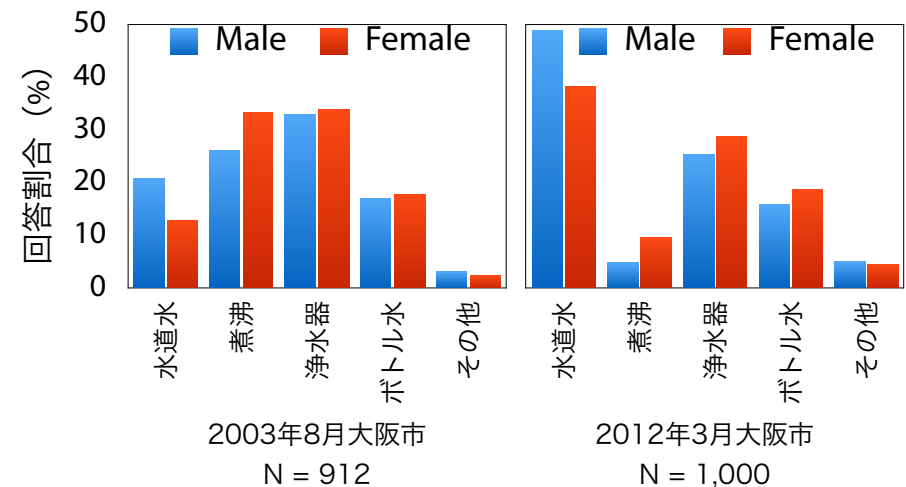
厚生労働省、HACCP、http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/shokuhin/haccp/

Framework for safe drinking water



©Guidelines for Drinking-water Quality - 4th ed., WHO, 2011

飲用形態



水道水質に対する不安の因果モデル



平山, 伊藤, 加川, 水道協会雑誌, 73(12), 12-21, 2004

需要者の水道水質リスクに対する コントロール感の付与

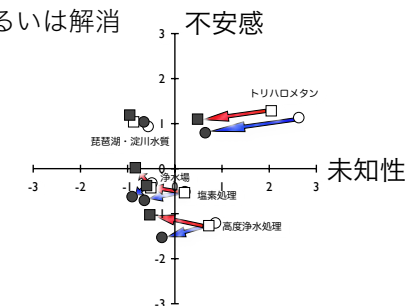
- ー 水道水質に関する需要者のコントロール感
 - ✓ 正確な情報をもとに、自分の意思で飲料水のリスクを選択することができているという認識をもつこと
- ー コントロール感の付与している情報
 - ✓ 水道水質に対する不安が低減あるいは解消。不安感

コントロール感を付与した情報

- ・トリハロメタンに関するリスク
- ・リスク回避に関する情報

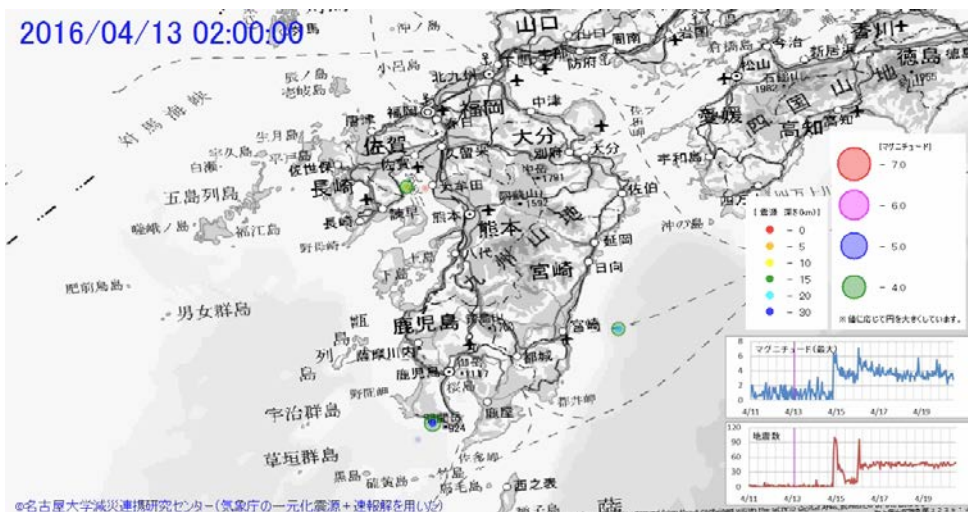
コントロール感を付与しない情報

- ・トリハロメタンに関するリスク
- ・高度浄水処理に関する情報



平山ら, 水道協会雑誌, 74(1), 2-11, 2005

2016年熊本地震



©名古屋大学減災連携研究センター, 2016

KiK-net益城



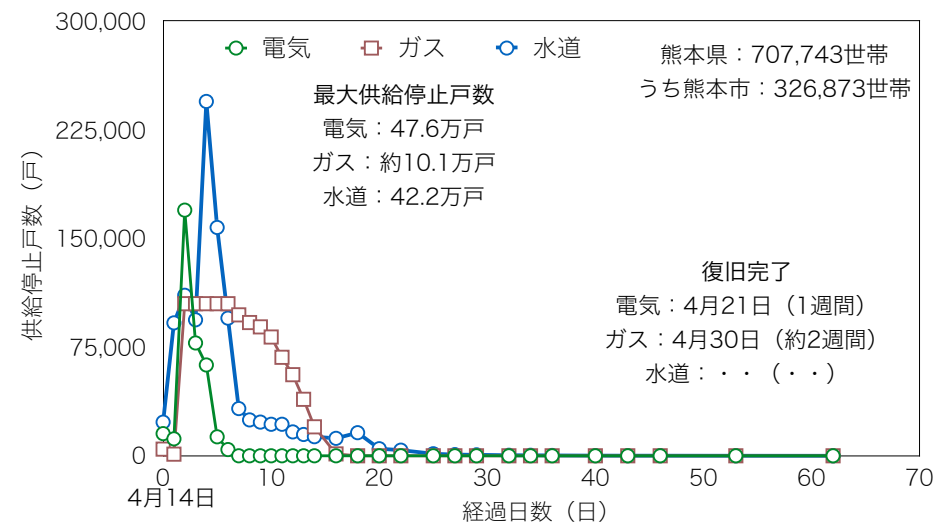
©防災科学技術研究所, 2016, 2018

1995年阪神淡路大震災と2016年熊本地震

	熊本地震	阪神・淡路大震災
活断層	日奈久・布田川断層帯	野島断層
発生日時	2016年4月16日（土）1:25	1995年1月17日（火）5:46
地震の規模	Mj 7.3	Mj 7.3
地震の種類	活断層型（直下型）地震	活断層型（直下型）地震
死者行方不明	259人（関連死含む） 【直後50人】	6,434人 【直後5,500人】
被災自治体	熊本県	2府県 （兵庫10市10町，大阪5市）
建物被害	全壊8,648棟，半壊34,398棟	全壊104,906棟，半壊144,274棟
避難者	約18万人	約32万人
震度6弱以上 暴露人口	915,877人	3,596,836人
災害廃棄物	289万トン （推定値，2017年9月時点）	2,000万トン （非公共1,450万，公共550万）

©熊本県危機管理防災課，2018，©兵庫県，2008

熊本地震でのライフライン被害



益城町惣領地区（污水管の被災）



益城町寺迫地区



水道施設の被災（西原村）



©小仲, 2016

配水管の被災（抜け）



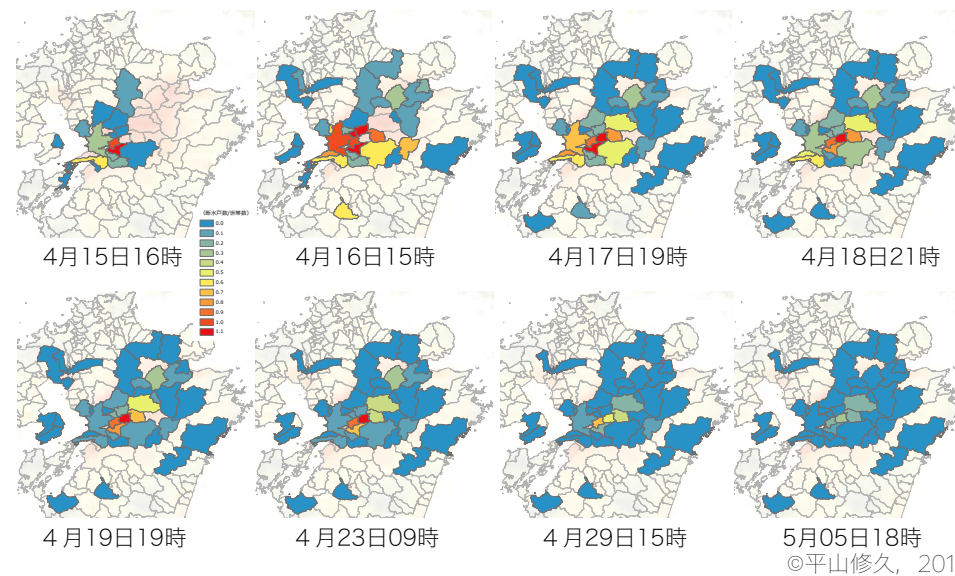
©小仲, 2016

配水管の被災（抜け）

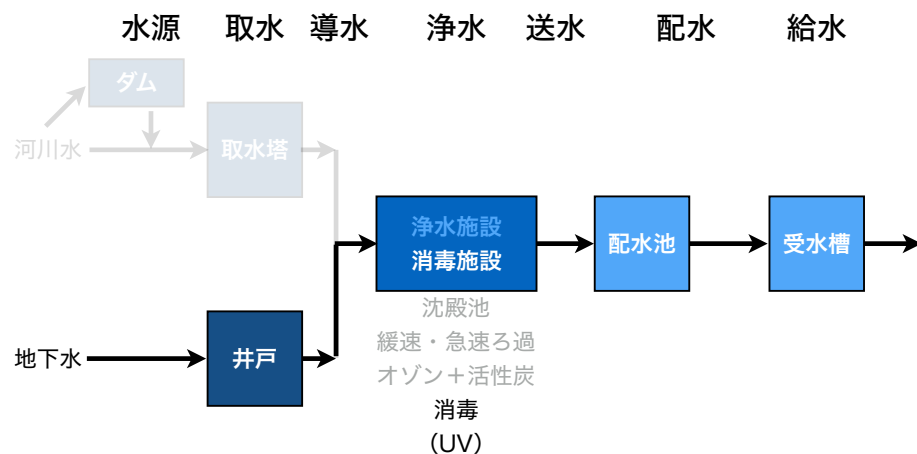


©小仲, 2016

断水率の推移



熊本地域の上水道システムの特徴



熊本の水道



水質異常時における摂取制限を伴う 給水継続の考え方

- > 厚生労働省健康局水道課長通知（平成28年3月31日健水発0331第6号）
- > 給水の緊急停止，水道法第23条
 - 「人の健康を害するおそれ」とは，**水道水質基準に適合しない場合ではなく**，その水を使用すれば直ちに人の生命に危険を生じ，又は身体の正常な機能に影響を与えるおそれがある場合
- > 摂取制限を伴う給水継続

あなたならどうする？

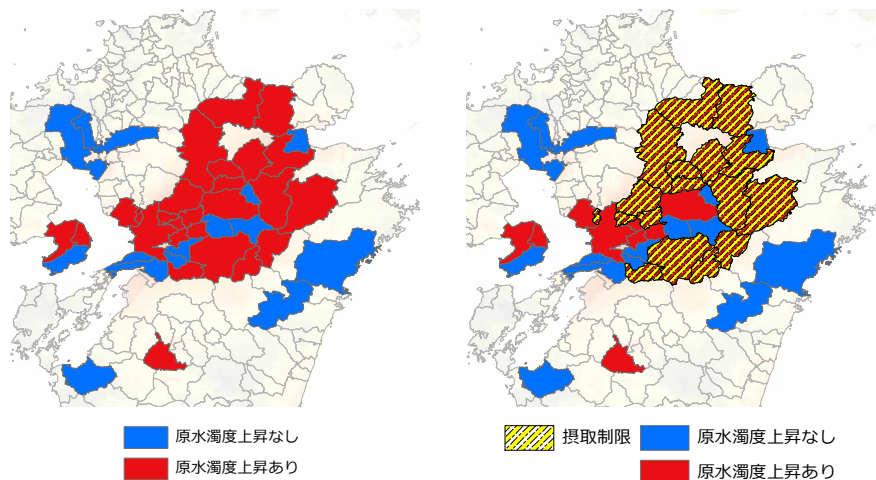
あなたは水道技術管理者です。地震後，原水の濁度が上昇し，配水・給水の水質が，水道水質基準（濁度2度以下）に適合することができません。

A.給水停止（断水）する。

B.摂取制限を伴う給水継続を行う。

原水の濁度上昇と摂取制限

原水の濁度上昇



©平山修久, 2016

課題_第4回

NUCTにて提出（締切：5月14日24時）

1. 用語についての説明（数行）

- 1) 水道水質で考慮すべき4点
- 2) 塩素消毒のメリット・デメリット

2. あなたは水道技術管理者です。地震後、原水の濁度が上昇し、配水・給水の水質が、水道水質基準（濁度2度以下）に適合することができません。あなたは、A. 給水停止する？B. 摂取制限を伴う給水継続を行う？その理由とともに示すこと。