

衛生工学 上水道

4. 净水施設（高度净水处理）
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

高度净水处理

高度浄水処理とは

－ 通常の浄水処理

- ✓ 懸濁物質の除去や消毒に高い効果

－ 高度浄水処理

- ✓ 通常の浄水処理では除去し難い溶解性物質の除去に効果
- ✓ 臭気物質, トリハロメタン前駆物質, 色度, アンモニア態窒素, 陰イオン界面活性剤など
- ✓ 各種化学物質や湖沼の富栄養化等によって汚染された水道水源に対処し, 清浄で異臭味等のない水道水の供給を確保するための浄水処理

高度浄水処理施設

－ 生物処理

－ オゾン処理

－ 活性炭処理

生物処理

- 河川の自浄作用などの自然界の浄化作用を応用
- 自然に成長する微生物の膜に原水を接触させることによってアンモニア態窒素の硝化や臭気、藻類、鉄、マンガン等の除去を行う。
- **アンモニア態窒素の硝化能力**が高い。
- アンモニア態窒素；原水中にあると前塩素または中間塩素で酸化するが、トリハロメタンが増加したり、カルキ臭の原因となるクロラミン類が発生。

オゾン処理

- **異臭味や色度の除去、トリハロメタン生成能の低減**などに高い効果を発揮。
- 残留オゾンの持続性がない。
- 有機物との反応によりアルデヒド等の副生成物が生じるため、活性炭処理が義務づけられている。
- 実際には、
 - ✓ オゾン処理+粒状活性炭処理
 - ✓ オゾン処理+生物活性炭処理

オゾン発生および注入設備

- オゾンは一般に乾燥した空気または酸素を高電圧の放電空間に通すことにより生成。
- 生成したオゾン化空気は、オゾン注入設備によって細かな気泡にして水中に放ち、オゾン接触槽で接触させる。
- 注入濃度は1~2mg/L
- 接触時間は5~15分

活性炭処理

— 活性炭

- ✓ 木質や石炭などを原料とする多孔性の炭素質の物質で、気体や液体中の微量有機物などを吸着する性質を持つ。

— 活性炭処理は、

- ✓ 活性炭のもつ優れた吸着力を利用して、異臭味、有機炭素化合物、合成洗剤、農薬など広範囲の物質を除去または低減する処理
- ✓ 粉末活性炭処理、粒状活性炭処理、生物活性炭処理

活性炭処理

一 粉末活性炭処理

- ✓ 一般に水質事故や短期間の異臭味発生などの際に応急的に行うもの。

一 粒状活性炭処理 (Granular Activated Carbon:GAC)

- ✓ 活性炭吸着池に粒状活性炭を充填し、これに原水を流入させて吸着除去を行う。

一 生物活性炭処理 (Biological Activated Carbon:BAC)

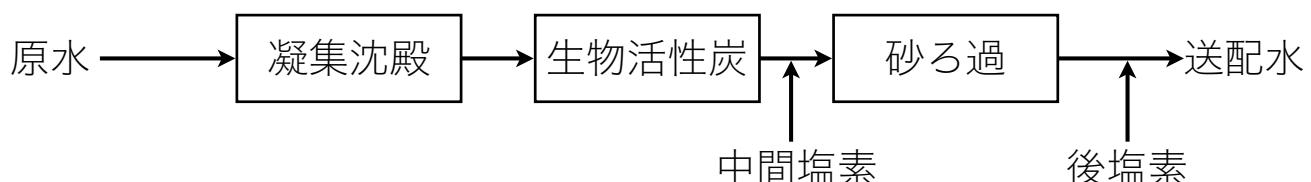
- ✓ 活性炭層内の微生物による有機物の分解作用を利用して活性炭の吸着機能を長く持続させる。前段で塩素は注入しない。

粒状活性炭処理単独の場合



活性炭の寿命が短い。生物漏洩を防ぐために活性炭の適正な洗浄が必要。

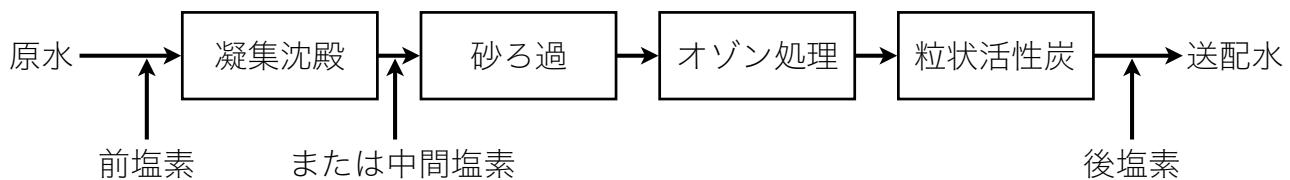
処理効果○ 建設費○ 維持管理費○



活性炭の目詰まり防止のため、沈殿水の濁度管理が重要。

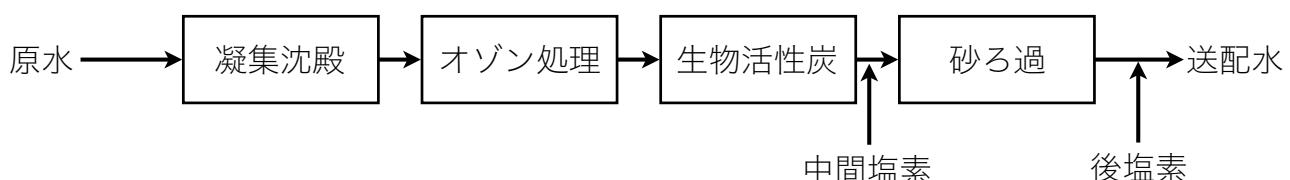
処理効果○ 建設費○ 維持管理費○

オゾン処理を併用する場合（1）



生物漏洩を防ぐために活性炭の適正な洗浄が必要。

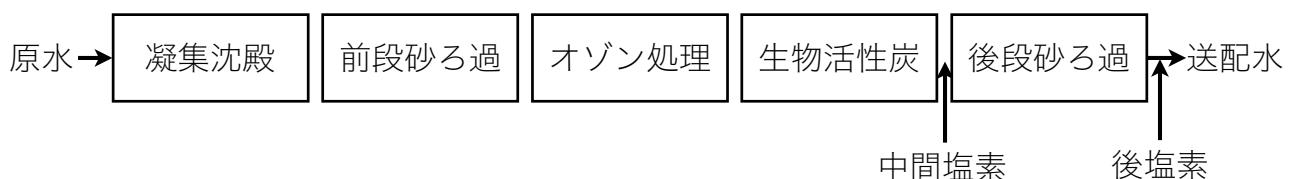
処理効果○ 建設費△ 維持管理費△



活性炭の目詰まり防止のため、沈殿水の濁度管理が重要。

処理効果○ 建設費△ 維持管理費○

オゾン処理を併用する場合（2）



活性炭への汚濁負荷が減少するが、2段の砂ろ過が必要。

処理効果○ 建設費△ 維持管理費○



生物漏洩を防ぐために活性炭の適正な洗浄が必要。

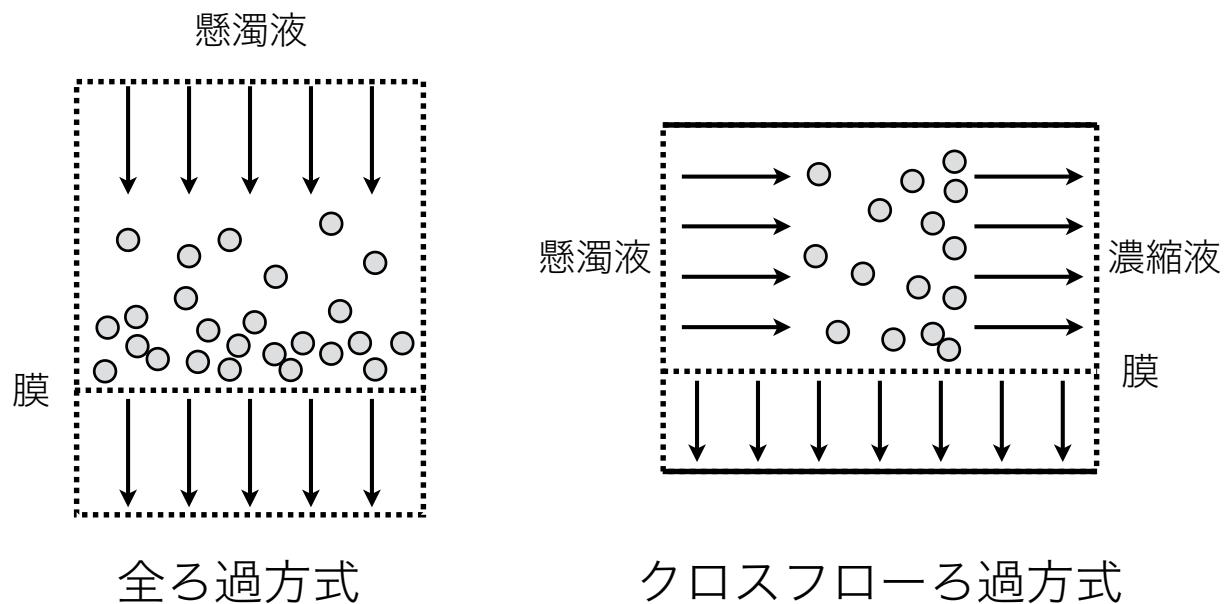
処理効果○ 建設費△ 維持管理費○

膜処理

膜処理 (Membrane process)

- 逆浸透膜, 限外ろ過膜, 精密ろ過膜, イオン交換膜, 透析膜などにより水中の不純物を分離する処理方法。
- 凝集などの前処理をしないで, 原水をこれらの膜に通すことで清浄な水を得ることができる。
- 小規模水道, 海水の淡水化
- 膜分離 : 膜を利用して物質の分離, 除去, 濃縮を行うこと。
- **膜ろ過法** : 原水を膜に通して, 溶解性成分などの小さな不純物まで分離除去する浄水方法。

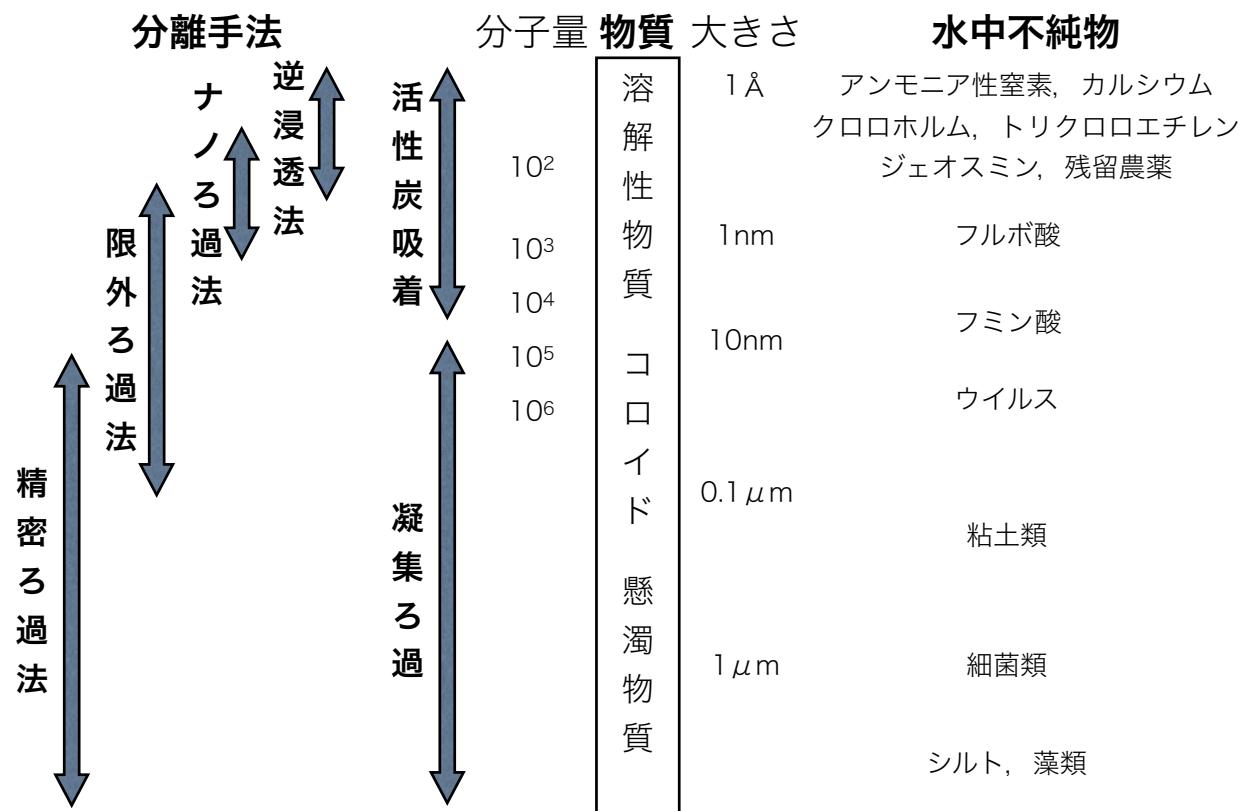
全ろ過方式とクロスフロー方式



各種膜ろ過法

膜ろ過法	使用膜	分離対象	操作圧
精密ろ過法	精密ろ過膜 (Micro-filtration: MF)	0.01~ $10\mu\text{m}$ 粒子	減圧 - 数100kPa
限外ろ過法	限外ろ過膜 (Ultra-filtration: UF)	Mw数1,000~3,000,000分子	数100kPa - 1MPa
ナノろ過法	ナノろ過膜 (Nano-filtration: NF)	Mw数100~数1,000分子	数100kPa - 数MPa
逆浸透法	逆浸透膜 (Reverse Osmosis: RO)	Mw~350分子	数MPa - 10MPa

水中不純物の大きさと分離方法



川井浄水場 (横浜市水道局)



Gold Coast Desalination Plant, Queensland, Australia



膜ろ過技術の問題点

– ファウリング

- ✓ 膜ろ過における、膜自身の変質ではなく外的要因による膜性能の低下。膜供給水中の溶質が膜によって阻止されることにより、膜の目詰まりや流路閉塞あるいは付着層の形成をもたらす現象。

– 環境負荷

- ✓ 相変化を伴わない分離法
- ✓ 消費エネルギーとCO₂排出量
- ✓ 汚泥の処理方法、特に薬品洗浄廃水の処理
- ✓ 廃棄膜モジュール（10万m³/日の浄水場で約2,000本の膜モジュール）

水道水質

水道水質基準

- 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。
- 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

- 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）
- 水質検査計画を策定し、需要者に情報提供
- 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。
- ✓ クリプトスパリジウム等の**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

－ 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

－ 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

－ 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°C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（ CaCO_3 ）に換算して表したもの。

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；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）

消毒

－ Disinfection

－ 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

－ 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

－ 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

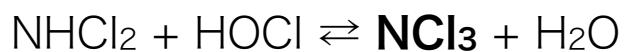
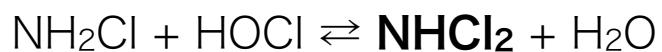
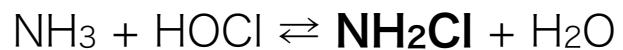
- － 遊離型塩素：HOCl, OCl⁻
- － 結合塩素：NH₂Cl, NHCl₂, NCl₃
- － 塩素を水中に入れると、



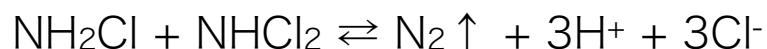
- － 塩素の存在形態はpHに依存
 - ✓ pH5以下ではほとんどがHOCl, pH7で80%, pH9ではすべてがOCl⁻。塩素の不活性力は酸性側で強く、アルカリ側では急激に低下する。

塩素反応（アンモニアがある場合）

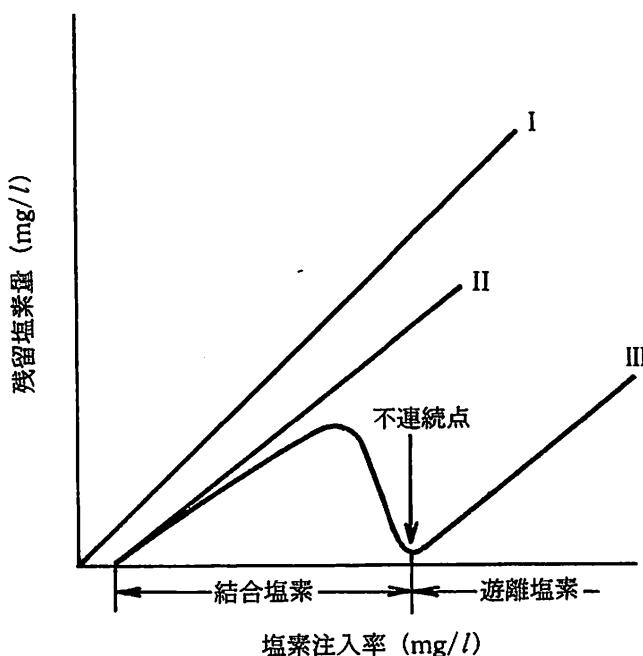
- 塩素はアンモニアと反応して、**結合塩素**（モノクロラミン、ジクロラミン、トリクロラミン）が生じる。



- 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**ブレークポイント（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。
- ✓ ロ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

- ✓ 净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。

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

- ✓ 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

- 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
- 水源から給水栓に至る統合的な水質管理の実現
- 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
- **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**

HACCP

(Hazard Analysis and Critical Control Point)

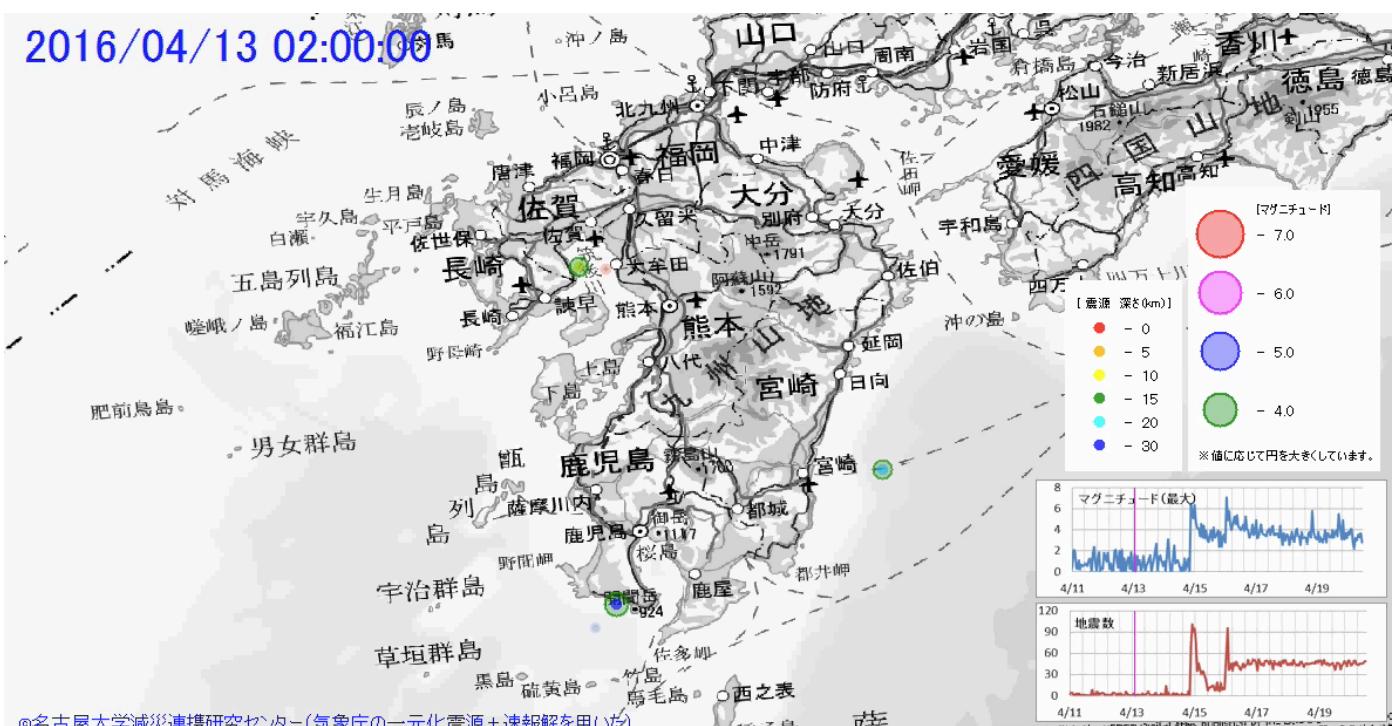
- 微生物汚染等の危害をあらかじめ分析 (Hazard Analysis) し、その結果に基づいて、製造工程のどの段階でどのような対策を講じればより安全な製品を得ることができるかという重点管理点 (Critical Control Point) を定め、これを連続的に監視

HACCPによる管理の例

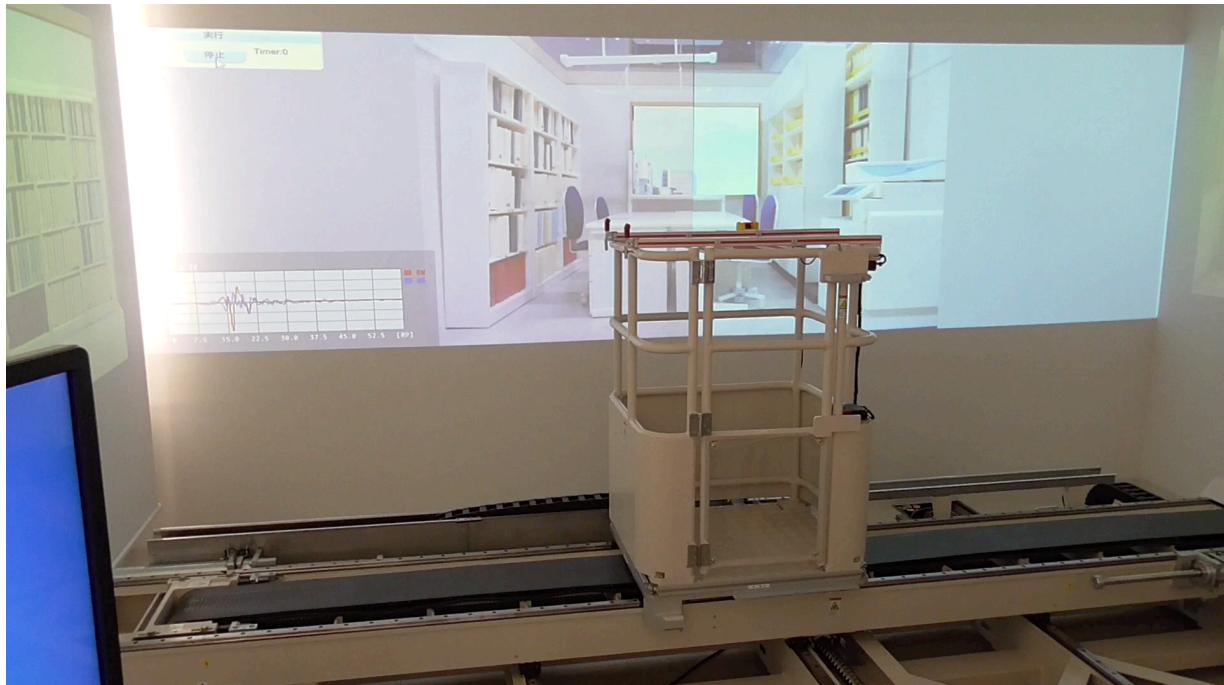


厚生労働省、HACCP、http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/shokuhin/haccp/

2016年熊本地震



KiK-net益城



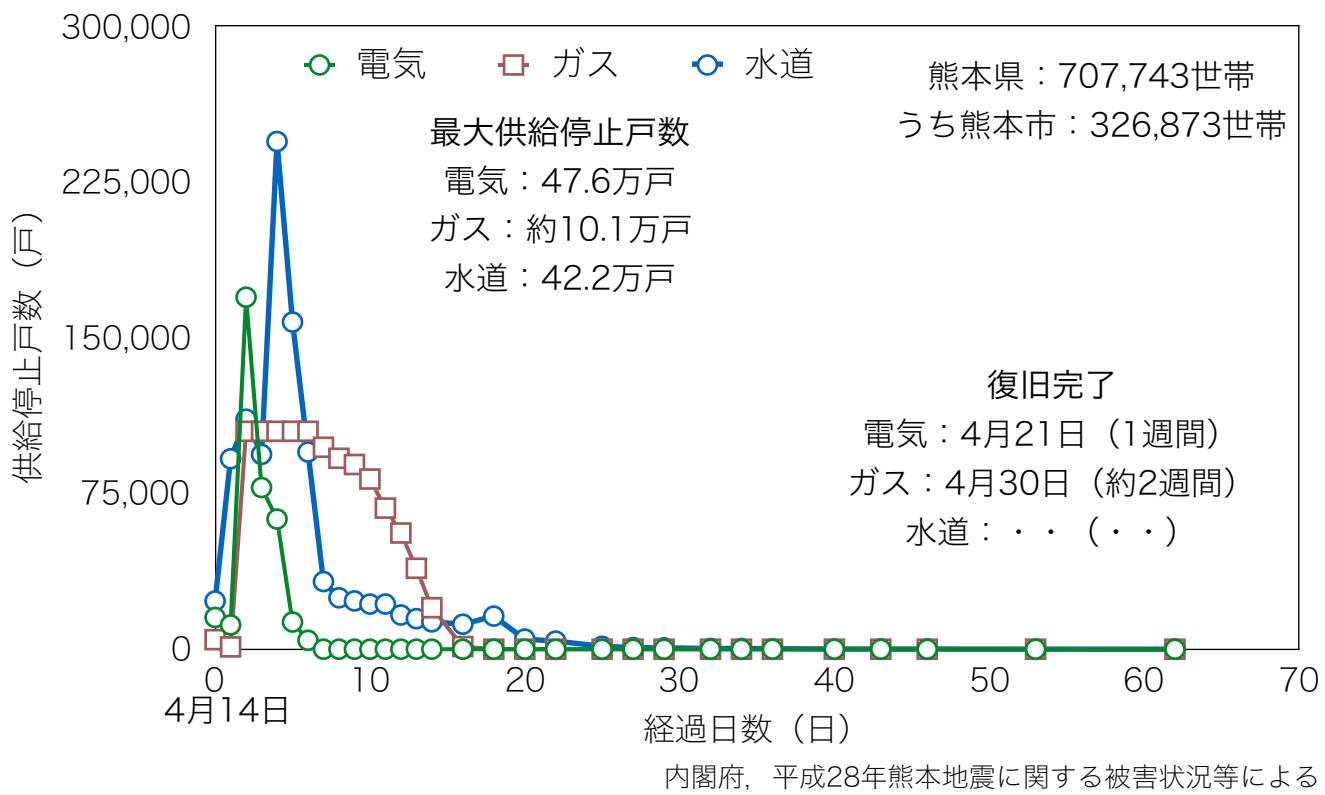
©防災科学技術研究所, 2016, 2018

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	915,877人	3,596,836人
暴露人口		
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



熊本の水道



益城町惣領地区 (污水管の被災)



分流式 (雨水, 汚水) + 净化槽?



液状化?による污水管の被災

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)



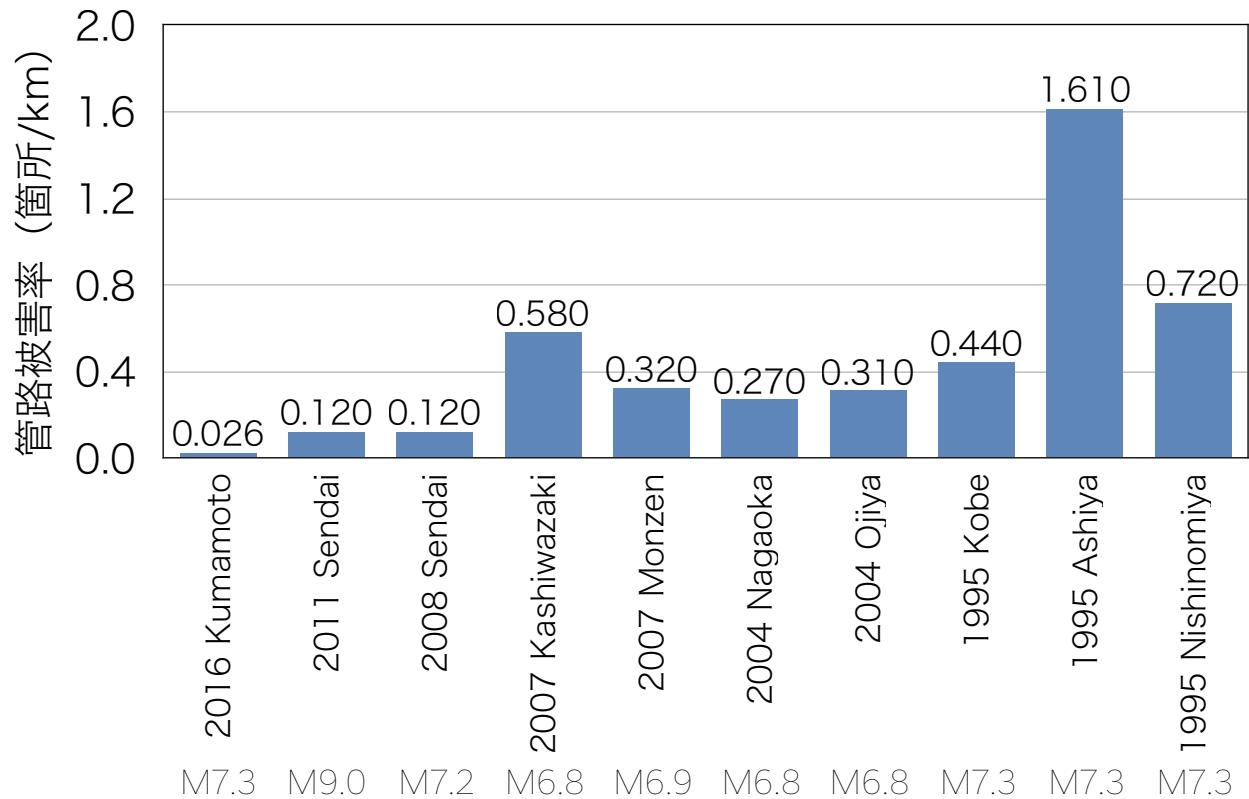
©小仲, 2016

配水管の被災（抜け）

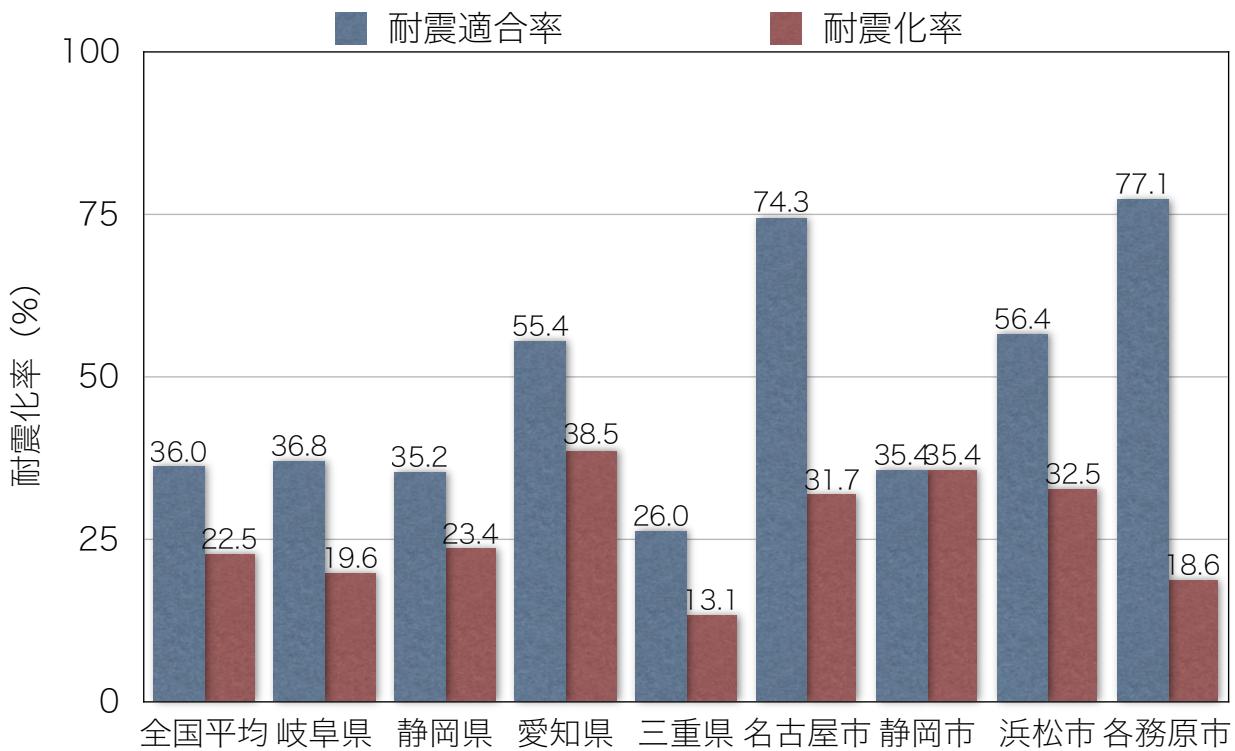


©小仲, 2016

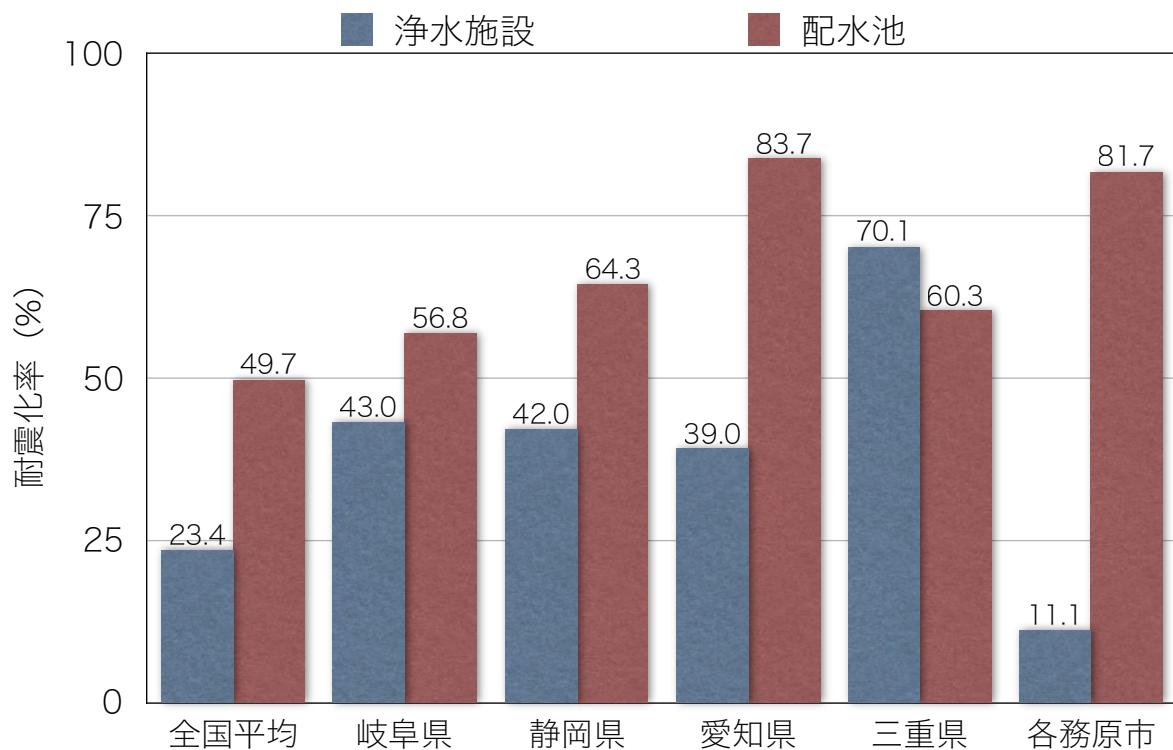
管路被害率



東海圏での基幹管路の耐震化状況 (H26)



浄水施設・配水池の耐震化状況 (H26)



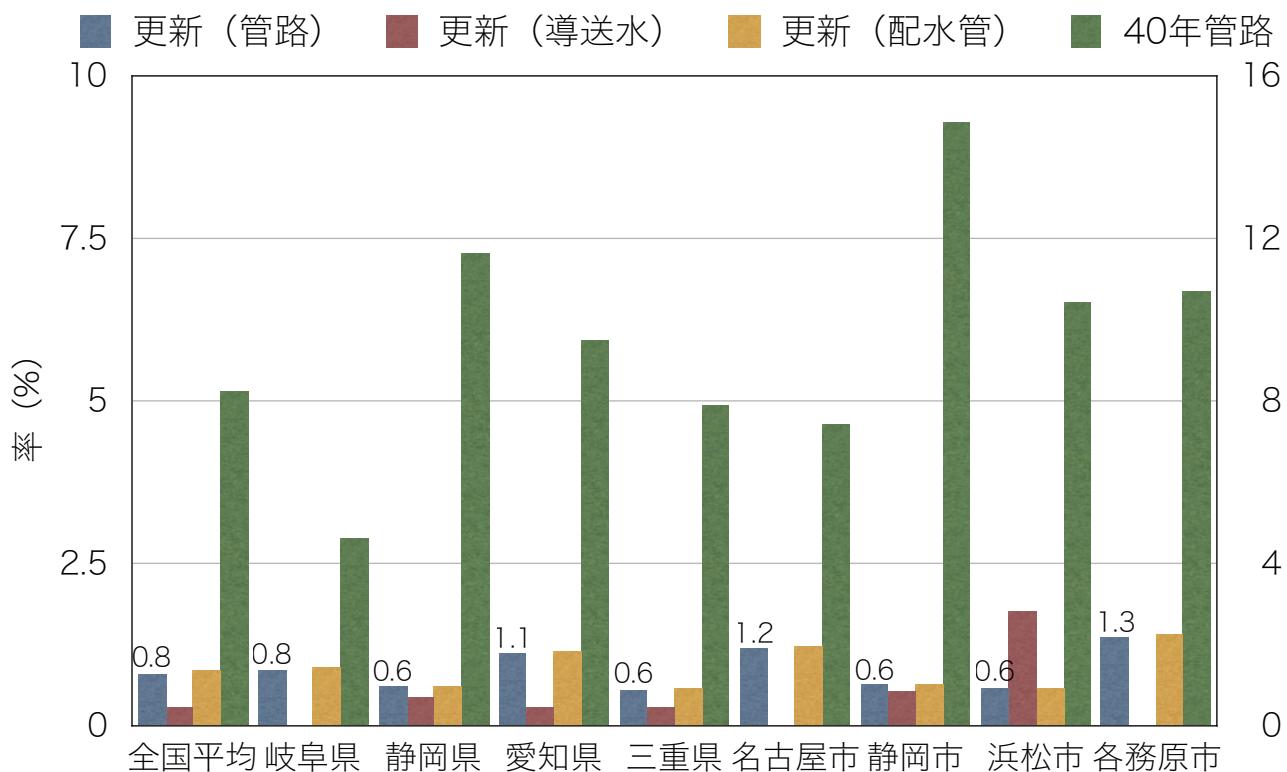
管路の耐震化（更新）



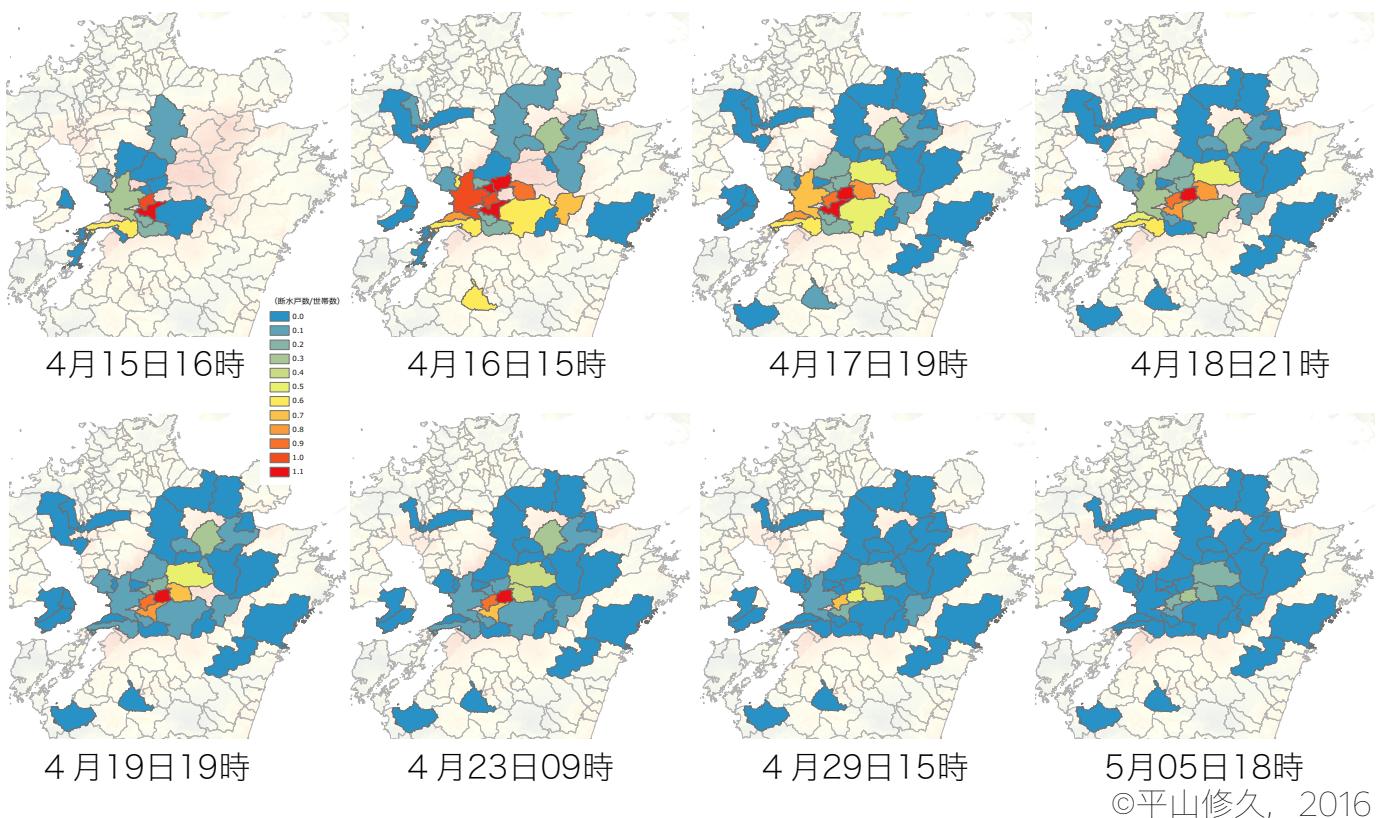
管路の更新、耐震化を進めているが...



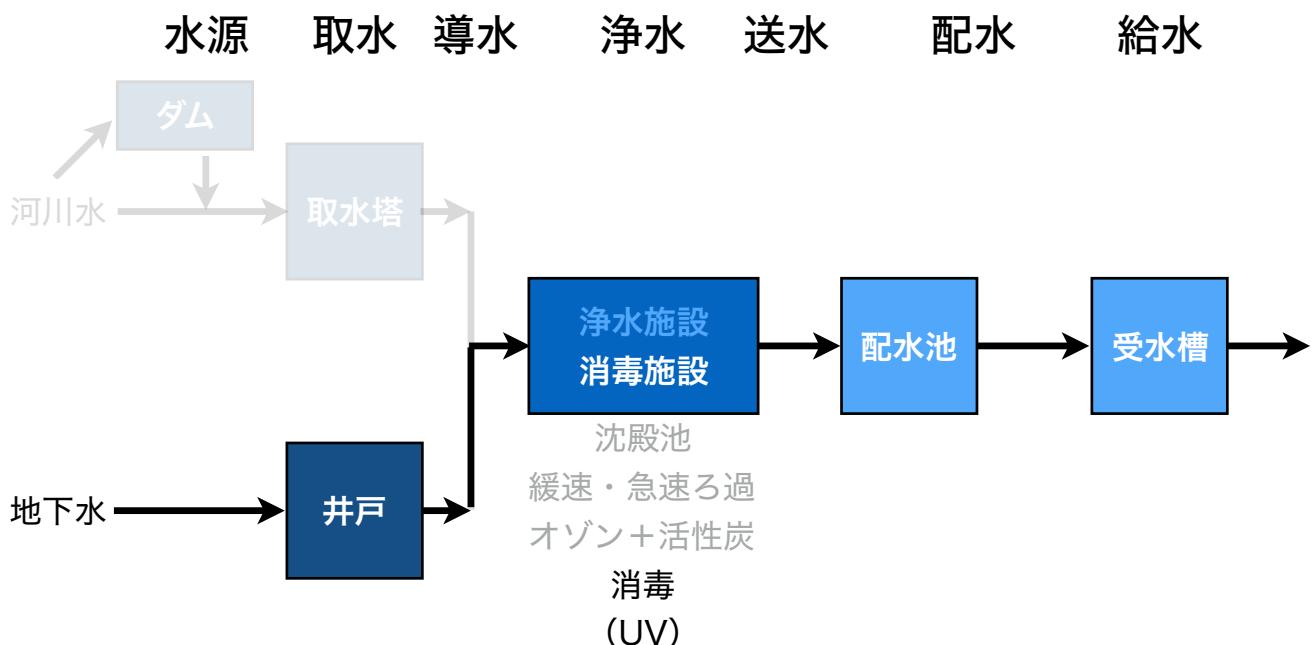
管路の更新状況



断水率の推移



熊本地域の上水道システムの特徴



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

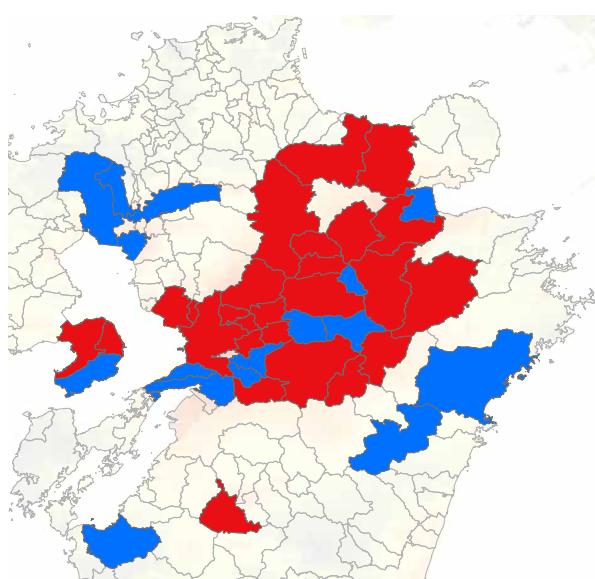
あなたならどうする？

— 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。

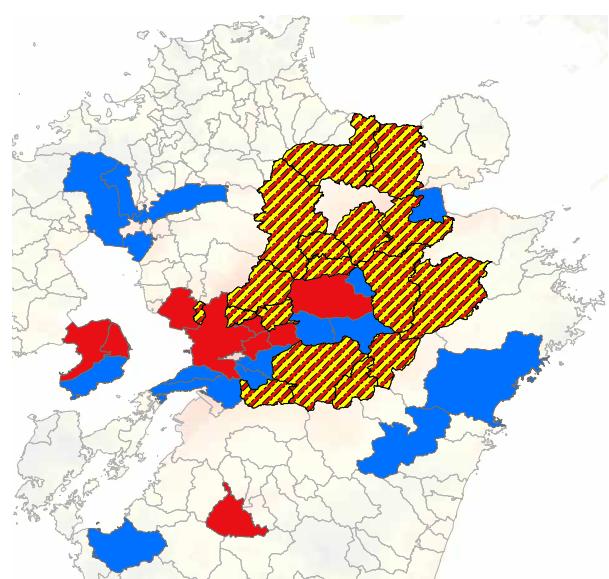
- A. 給水停止（断水）する。
- B. 摂取制限を伴う給水継続を行う。

原水の濁度上昇と摂取制限

原水の濁度上昇



■ 原水濁度上昇なし
■ 原水濁度上昇あり



■ 摂取制限 ■ 原水濁度上昇なし
■ 原水濁度上昇あり

熊本地震でわかったこと

> 考え方

- 水道システムとしての災害対策
- 災害時の水供給（**量と質**とのバランス），水道事業体だけではなく，市民，地域と事業体で。

> 技術

- 被災地域での**緊急時の水循環システム。**

> 計画

- **受援計画**
- 地域**事業継続。**