

水道における有害物質低減技術と普及状況について

1 水質汚染事故への対応策の考え方

水道は一般に水源→取水→浄水処理→送配水・給水という段階を経て供給されている。原水における水質汚染事故が発生した場合、汚染物質や濃度等により除去、影響阻止の可否を判断し、各段階において対応が図られる。

各段階では、影響緩和措置、汚染物質除去等の対応がとられるが、対応が不可能な場合は後段での対応がとられる。給水は最後段であるため、対応が不可能な場合には総合的に判断して給水停止の措置がとられる。

これらの対応事例を表-1 に示す。

表-1 水質汚染事故への対応策・緊急措置

想定事例		対応策(緊急措置等)
到達位置	除去の可否	
水源 (取水のおそれあり)	影響阻止可能	影響緩和措置(オイルフェンス、吸着マット等)、その他の措置
	影響阻止不可能	取水停止、水源切替え、その他の措置
取水段階 (浄水施設に未達)	影響阻止可能	影響緩和措置(粉末活性炭等)、その他の措置
	影響阻止不可能	浄水処理・塩素消毒の強化、取水・給水停止(応急給水)、配水系統の変更・水運用、その他の措置
浄水施設 (送配水施設に未達)	影響阻止可能	浄水処理・塩素消毒の強化、その他の措置
	影響阻止不可能	給水停止(応急給水)、配水系統の変更・水運用、その他の措置
送配水・給水段階 (送配水・給水施設に到達)	X	給水停止(応急給水)、その他の措置

出典：財団法人水道技術研究センター，水質汚染事故に係る危機管理実施要領策定マニュアル，平成 11 年 2 月を基に作成

2 水道における水質事故対策技術の概要

原水における水質汚染事故が発生した場合、水源～送配水・給水の各段階ではそれぞれの機能、特性を考慮して対策技術がとられる。一般に原水の水質汚染事故対応として、汚染物質に対する到達緩和措置、浄水処理（通常処理）の強化、高度浄水処理の整備、影響緩和措置等があり、水源～給水の各段階について表-2 に示す。

表-2 原水水質汚染事故における水源～給水の各段階における対策技術

	水源	取水	浄水処理	送配水・給水
到達緩和措置	—	・オイルフェンス、 吸着マット	—	—
浄水処理の強化	—	・粉末活性炭注入	・塩素強化 ・凝集剤増量	—
高度浄水処理の整備	—	—	・オゾン注入率増加 ・水量減（反応時間増加）	—
影響緩和措置	・水源変更 ・予備水源 ・原水調整池	・取水系統変更	—	・浄水備蓄 ・配水施設内貯留 ・水融通 ・配水系統変更 ・水運用

2-1 到達緩和措置

水質汚染物質に対する影響緩和措置としては、オイルフェンス、吸着マットによる対策等があるが、油が水中に拡散している場合には油臭を除去するために後述の粉末活性炭注入が必要となる。

2-2 浄水処理（通常処理）の強化

水質汚染事故に対しては浄水処理の強化として、緊急措置として実施する粉末活性炭増量（仮設を含む）、塩素強化、凝集剤増量などがあり、原水水質事故における汚染物質との関連を表-3 に示す。

表-3 除去可能な汚染物質

	粉末活性炭	塩素	凝集剤
病原菌	—	○	—
耐塩素性病原生物	—	—	○
臭気	○	△	—
アンモニア態窒素	—	○	—
農薬類、重金属類	○	—	—
有機物質	○	○	○
トリハロメタン前駆物質	○	—	○
ヘキサメチレンテトラミン	—	—	—

注) 除去可能：○（塩素についてはカビ臭の除去はできないので△）

原水が病原菌類に汚染されている場合には塩素強化あるいは接触時間を増加（流量を減ずる）することは有効な対策となる。耐塩素性病原生物に対しては塩素による除去効果はないため、凝集剤増量により対応を図る。

臭気については原因物質を塩素酸化により除去できる場合が多いが、カビ臭は除去できない。カビ臭には粉末活性炭注入が必要である。粉末活性炭はその吸着効果により農薬類、重金属類の多くを除去できる。

アンモニア態窒素は不連続点塩素処理により除去されるため原水で高濃度となった場合は注入量を増やせば対応できる。この場合、塩素臭（クロラミン臭）が残存するが事故時の臨時対策として有効である。

有機物質には種々の物質があるが、塩素、凝集剤、粉末活性炭により低減できる。有機物質のうち、消毒副生成物（以下、DBP）は塩素との反応で生成するので、DBP前駆物質については、塩素の注入により増加するため有効な対策ではない。DBP前駆物質のうち、トリハロメタン前駆物質等は凝集剤により除去されることから、前塩素を中塩素として塩素注入点を替えれば低減され、有効な対策となる。また、トリハロメタン前駆物質は粉末活性炭注入も有効な対策である。しかし、これらの対策は今回問題となっているヘキサメチレンテトラミン（以下、HMT）について有効な対策とはならない。以下に詳細を述べる。

塩素とHMTの反応によるホルムアルデヒドの生成は、**図-1**、**図-2**に示すように30分程度と短時間で進行し、凝集剤による除去効果も小さい（東京都実験結果）ことから、中塩素処理は有効な対策とならない。

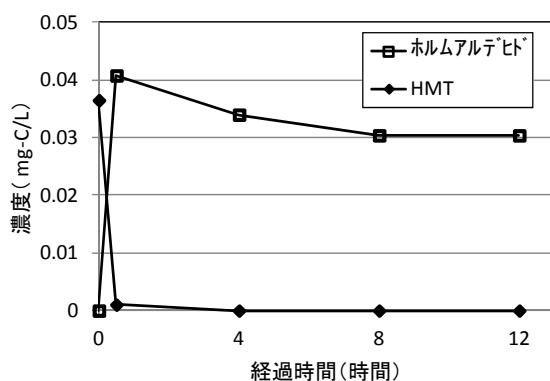
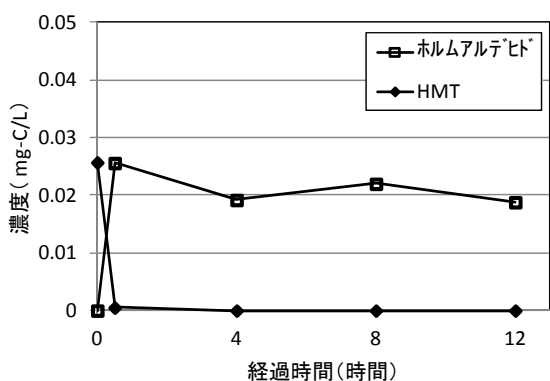


図-1 ボトル水に添加した HMT と塩素の反応

図-2 浄水場原水 HMT と塩素の反応

(出典：金見ら，ヘキサメチレンテトラミンの浄水処理過程での挙動，水道協会雑誌，平成 24 年 10 月)

次に、粉末活性炭によるHMTの除去性を**図-3**に示す。粉末活性炭注入率を増加してもHMTの除去はほとんど確認できないことから粉末活性炭は有効な対策とならない。

東京都が実施した実験結果によれば、HMTはオゾンによる除去、ホルムアルデヒドは生物活性炭による除去が確認されている。したがって、後述の高度浄水処理が有効となる。なお、HMTと塩素によるホルムアルデヒドの生成は短時間（30分程度で95%以上）で進行するため、前塩素注入後（ホルムアルデヒド生成後）に粉末活性炭を注入する対策も有効と考えられるが、塩素の反応時間が必要なため、多くの施設では対応が困難である。

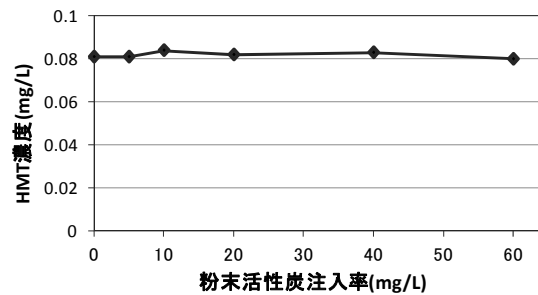


図-3 粉末活性炭によるHMTの除去性

(出典：金見ら，ヘキサメチレンテトラミンの浄水処理過程での挙動，水道協会雑誌，平成24年10月)

2-3 高度浄水処理の整備

水道における水処理は、塩素消毒のみ、ろ過処理（ろ過又は凝集＋砂ろ過）が基本である。塩素消毒のみでは病原菌などの不活化、ろ過処理では濁度などの固形物処理（不溶解性成分の処理）がなされる。一方、近年は原水に溶解性成分も多く含まれる場合があり、その対応技術として高度浄水処理が導入されている。

原水水質の成分に対応する浄水処理技術を表-4、我が国において代表的な浄水処理方式の概要を表-5に示す。表-4に示すように不溶解性成分は上記のろ過処理が有効に機能するが、溶解性成分は高度浄水処理が有効に機能する。表-5に示すように高度浄水処理は活性炭、オゾン、生物活性炭処理及びそれらの組合せとなる。

表-4 原水水質成分とその対応技術

原水水質成分		水質対応技術	単位プロセス	
対応する水質成分				
不溶解性成分	濁度	低濁度	凝集沈殿 緩速ろ過 直接ろ過 急速ろ過 膜ろ過(MF膜/UF膜)	
		高濁度 中濁度	凝集沈殿 急速ろ過 膜ろ過(MF膜/UF膜)	
	藻類	珪藻、藍藻等	藻類対応技術	浮上分離 膜ろ過(MF膜/UF膜) マイクロストレーナ
	耐塩素性病原微生物	耐塩素性病原微生物	耐塩素性病原微生物対応技術	凝集沈殿 直接ろ過 急速ろ過 膜ろ過(MF膜/UF膜) 紫外線処理
溶解性成分	異臭味	異臭味原因物質	異臭味対応技術	オゾン 活性炭 ナノろ過膜(NF膜)
	有機物(TOC)	色度	色度対応技術	オゾン
		農薬 有機化学物質 トリハロメタン前駆物質	有機物対応技術	活性炭 ナノろ過膜(NF膜) 凝集沈殿 急速ろ過 直接ろ過 イオン交換 エアストリッピング 活性炭
		揮発性物質		
	消毒副生成物	トリハロメタン 臭素酸 ハロ酢酸等	消毒副生成物対応技術	活性炭(ただし、臭素酸は除く) 促進酸化処理(AOP) ナノろ過膜(NF膜) 逆浸透膜(RO膜) 酸化・消毒剤の変更 pH調整
	無機物	鉄、マンガン	無機物対応技術	凝集沈殿 マンガン接触ろ過 生物処理
		アンモニア態窒素		生物処理 不連続点塩素処理
硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素		逆浸透膜(RO膜) イオン交換 電気透析(ED) 晶析 石灰軟化 ナノろ過膜(NF膜)		
腐食性物質		pH調整 後アルカリ エアストリッピング		
塩素酸 臭素酸		薬品管理		

出典：財団法人水道技術研究センター，浄水技術ガイドライン 2010 を基に作成

表-5 浄水処理方式の分類（我が国における導入例）

分類	浄水処理方式		浄水処理フロー	
高度浄水処理	粉末活性炭処理方式	<ul style="list-style-type: none"> 濁質の除去を基本とする通常の浄水処理に粉末活性炭処理のみを追加した浄水処理方式であり、他の高度浄水処理プロセスを含まない。 	通常の浄水処理の前段で粉末活性炭処理を行う。	原水→〔粉末活性炭〕→〔凝集沈殿〕→（中塩素）→〔急速ろ過〕→（後塩素）→浄水
	粒状活性炭処理方式 ※	<ul style="list-style-type: none"> 濁質の除去を基本とする通常の浄水処理に粒状活性炭処理を追加した浄水処理方式である。 	通常の浄水処理の後段で粒状活性炭処理（主に活性炭の吸着作用を利用）を行う。	原水→（前塩素）→〔凝集沈殿〕→（中塩素）→〔急速ろ過〕→〔粒状活性炭〕→（後塩素）→浄水
			通常の浄水処理の間で粒状活性炭処理（活性炭層内の微生物による有機物等の分解作用と活性炭の吸着作用を利用）を行う。	原水→〔凝集沈殿〕→〔粒状活性炭〕→（中塩素）→〔急速ろ過〕→（後塩素）→浄水
	オゾン処理＋粒状活性炭処理方式 ※	<ul style="list-style-type: none"> 濁質の除去を基本とする通常の浄水処理にオゾン処理、粒状活性炭処理、生物処理の一つまたは複数を組み合わせた浄水処理方式である。 	通常の浄水処理の後段でオゾン処理と粒状活性炭処理（主に活性炭の吸着作用を利用）を行う。	原水→〔凝集沈殿〕→（中塩素）→〔急速ろ過〕→〔オゾン〕→〔粒状活性炭〕→（後塩素）→浄水
			通常の浄水処理の後段でオゾン処理と粒状活性炭処理（活性炭層内の微生物による有機物等の分解作用と活性炭の吸着作用を利用）を行う。	原水→〔凝集沈殿〕→〔急速ろ過〕→〔オゾン〕→〔粒状活性炭〕→（後塩素）→浄水
			通常の浄水処理の後段でオゾン処理、粒状活性炭処理（活性炭層内の微生物による有機物等の分解作用と活性炭の吸着作用を利用）、急速ろ過（多層ろ過）を行う。	原水→〔凝集沈殿〕→〔急速ろ過〕→〔オゾン〕→〔粒状活性炭〕→（後塩素）→〔急速ろ過〕→浄水
			通常の浄水処理の間でオゾン処理と粒状活性炭処理（活性炭層内の微生物による有機物等の分解作用と活性炭の吸着作用を利用）を行う。	原水→〔凝集沈殿〕→〔オゾン〕→〔粒状活性炭〕→（中塩素）→〔急速ろ過〕→（後塩素）→浄水

表-5 浄水処理方式の分類（我が国における導入例）

分類	浄水処理方式		浄水処理フロー	
			通常の浄水処理の間でオゾン処理、後段でオゾン処理と粒状活性炭処理（活性炭層内の微生物による有機物等の分解作用と活性炭の吸着作用を利用）を行う。	原水→〔凝集沈殿〕→〔オゾン〕→〔急速ろ過〕→〔オゾン〕→〔粒状活性炭〕→（後塩素）→浄水
	生物処理方式 ※		通常の浄水処理の前段で生物処理を行う。	原水→〔生物処理〕→〔凝集沈殿〕→（中塩素）→〔急速ろ過〕→（後塩素）→浄水
	生物処理＋粒状活性炭処理方式 ※		通常の浄水処理の前段で生物処理、後段で粒状活性炭処理（主に活性炭の吸着作用を利用）を行う。	原水→〔生物処理〕→（前塩素）→〔凝集沈殿〕→（中塩素）→〔急速ろ過〕→〔粒状活性炭〕→（後塩素）→浄水
	生物処理＋オゾン処理＋粒状活性炭処理方式 ※		通常の浄水処理の前段で生物処理、後段でオゾン処理と粒状活性炭処理（吸着作用または微生物による有機物等の分解作用を利用）を行う。	原水→〔生物処理〕→〔凝集沈殿〕→〔急速ろ過〕→〔オゾン〕→〔粒状活性炭〕→（後塩素）→浄水
通常の浄水処理	通常の浄水処理方式	・凝集沈殿＋急速ろ過、緩速ろ過、膜ろ過等、濁質の除去を目的とする浄水処理であり、かつ、高度浄水処理のいずれも含まない浄水処理方式である。	凝集沈殿＋急速ろ過、緩速ろ過、膜ろ過等、濁質の除去を目的とする浄水処理を行う。	原水→〔凝集沈殿＋急速ろ過・緩速ろ過・膜ろ過〕→（後塩素）→浄水
消毒のみ	消毒方式	・濁質の除去を目的とする浄水処理を行わずに、塩素消毒のみを行う浄水処理方式である。	塩素消毒のみを行う。	原水→（後塩素）→浄水

（注）〔 〕…単位処理プロセス（ここでは粉末活性炭を単位処理プロセスと位置づけている）（ ）…薬品注入

※ 粉末活性炭処理を併用する場合がある。

出典：財団法人水道技術研究センター，厚生労働省委託費による水道事業における高度浄水処理の導入実態及び導入検討等に関する技術資料，平成21年3月を基に作成

粉末活性炭処理では通常処理（凝集沈殿＋急速ろ過）の前段の粉末活性炭処理で吸着可能な有機物、重金属類等を除去している。HMTに対しては前述のように除去はできない。

粒状活性炭処理では粉末活性炭と異なり、破過するまで継続通水して使用する。塩素注入点が粒状活性炭の後段にある場合には、生物が繁殖し生物活性炭としての機能（生物処理機能の付加）を有する。これらの高度浄水処理におけるHMT及びホルムアルデヒドの除去率を図-4に示す。HMT除去率は生物活性炭単独で75%程度、オゾン＋生物活性炭処理で100%除去されている。ホルムアルデヒドはオゾンでは分解されず生物活性炭で100%除去できる。

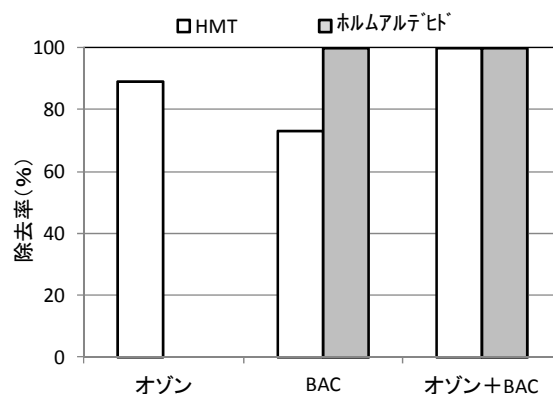


図-4 HMT及びホルムアルデヒドの高度浄水処理による除去率

（出典：金見ら，ヘキサメチレンテトラミンの浄水処理過程での挙動，水道協会雑誌，平成24年10月）

生物処理は水中に含まれる各種の物質を微生物の働きによって分解又は凝集させて浄化する処理法である。したがって、微生物を集積して除去効果を上げる必要があり、充填材等に付着させる方法が一般に実施されている（ハニカム方式等）。生物処理では原水水質に適合する種類の微生物が優占的に増殖しその特性に応じた処理効果を発揮する。表-4の溶解性成分における鉄、マンガン、アンモニア態窒素等の除去に有効である。こうした特性を考慮すると突発的な水質汚染物質に対しては、その物質に適した微生物が少ないため、対応がとれにくいものと考えられるが、水質基準以下で微量に存在している物質が継続して流入している場合には有効に機能するものと考えられる。その場合は流量を低くして生物反応時間を長くすることが有効と考えられる。

オゾンは酸化力が強く、異臭味、有機物の除去効果が大きい。酸化力が強く、種々の物質が生成することから後段に活性炭を設置する。前述の図-4に示すように、HMTの除去性はオゾン処理単独で90%程度と大きい。

2-4 影響緩和措置

配水池には送水量に対して需要水量の時間変動を調整し、非常時においても一定の時間、給水できる機能を持つ必要があり、配水池の有効容量は、時間変動調整容量の他に非常時対応容量として、配水池より上流側の対応分（渇水、水質事故、施設事故等）及び配水池より下流側の対応分（災害時応急給水、施設事故等）、さらに消防用水を考慮して、計画一日最大給水量の12時間分を標準とするとしており、時間の余裕度をもたせることは有効な対策のひとつとなる。

また、原水の水質事故による汚染の影響を緩和する方法として、代替水源の確保（予備水源、原水調整池等）、施設内貯水量の確保（浄水備蓄、配水施設内貯留等）、運用変更（水源切替、配水系統の変更等）、広域水融通（浄水場間の連絡管）などがある。

3 対策技術の普及状況

3-1 高度浄水処理の導入状況

高度浄水処理について、高度浄水処理方式ごとに単位処理プロセス別及び水源種類別に集計した結果を表-6に示すとともに、概要を以下に述べる。

- ・粉末活性炭処理の件数は248（高度浄水処理全体の63.3%）であり、このうち他の高度浄水処理プロセスと併用しない「粉末活性炭処理方式」の件数は222（同56.6%）となっている。
- ・粒状活性炭処理の件数は146（同37.2%）であり、このうちオゾン処理又は生物処理と併用しない「粒状活性炭処理方式」の件数は92（同23.5%）、オゾン処理と併用する「オゾン処理＋粒状活性炭処理方式」の件数は31（同7.9%）、生物処理と併用する「生物処理＋粒状活性炭処理方式」の件数は13（3.3%）、オゾン処理及び生物処理と併用する「生物処理＋オゾン処理＋粒状活性炭処理方式」の件数は10（同2.6%）となっている。
- ・生物処理の件数は47（同12.0%）であり、このうちオゾン処理又は粒状活性炭処理と併用しない「生物処理」の件数は24（同6.1%）となっている。なお、これらの分類において、粉末活性炭処理との併用の有無については区別していない。
- ・水源種類別にみると、表流水の件数が229（同58.4%）、ダム・湖沼水の件数が98（25.0%）、その他の件数が16（4.1%）となっている。
- ・HMT除去に有効なオゾン＋生物活性炭について、利根川水系では千葉県（ちば野菊の里浄水場、柏井浄水場（東））、東京都（金町浄水場、朝霞浄水場、三郷浄水場、三園浄水場、東村山浄水場）で整備されている。一方、HMT除去に有効とされない粉末活性炭処理あるいは通常処理の浄水場も多く、対応困難な状況である。

表-6 高度浄水処理プロセス別・水源種類別にみた高度浄水処理の導入状況

浄水処理方式	単位処理プロセス				水源種類				合計	比率	実績 一日平均 浄水量 (H22年度) (m ³ /日)
	粉末 活性 炭 処 理	粒 状 活 性 炭 処 理	オ ゾ ン 処 理	生 物 処 理	表 流 水	ダ ム ・ 湖 沼 水	地 下 水	そ の 他			
粉末活性炭処理方式	○				148	56	10	8	222	56.6%	10,375,296
粒状活性炭 処理方式		○			30	23	25	6	92	23.5%	824,118
	○	○			6	2	0	0			
オゾン処理＋ 粒状活性炭処理方式		○	○		17	7	1	2	31	7.9%	6,339,016
	○	○	○		4	0	0	0			
生物処理方式				○	3	2	7	0	24	6.1%	450,229
	○			○	6	5	1	0			
生物処理＋ 粒状活性炭処理方式		○		○	7	1	5	0	13	3.3%	228,477
	○	○		○	0	0	0	0			
生物処理＋ オゾン処理＋ 粒状活性炭処理方式		○	○	○	6	2	0	0	10	2.6%	702,142
	○	○	○	○	2	0	0	0			
合計	248	146	41	47	229	98	49	16	392	100.0%	18,919,278
比率	63.3%	37.2%	10.5%	12.0%	58.4%	25.0%	12.5%	4.1%	100.0%	—	

(水道統計水質編（平成18年度版）を基に作成)

3-2 広域水融通

緊急連絡管の整備による地域間の水融通は、**図-5**に示すように、水源が別となるため、水質汚染事故時の対策として有効である。最近の国庫補助事業による整備の例を以下に示す。

- 大阪府堺市緊急時用連絡管整備事業
(大阪市水道事業－堺市水道事業の間)
- 神奈川県内広域水道企業団緊急時用連絡管事業
(神奈川県内広域水道企業団用水供給事業－横浜市水道事業の間)
- 奈良県吉野町緊急時用連絡管整備事業
(吉野町上水道事業－大淀町上水道事業の間)

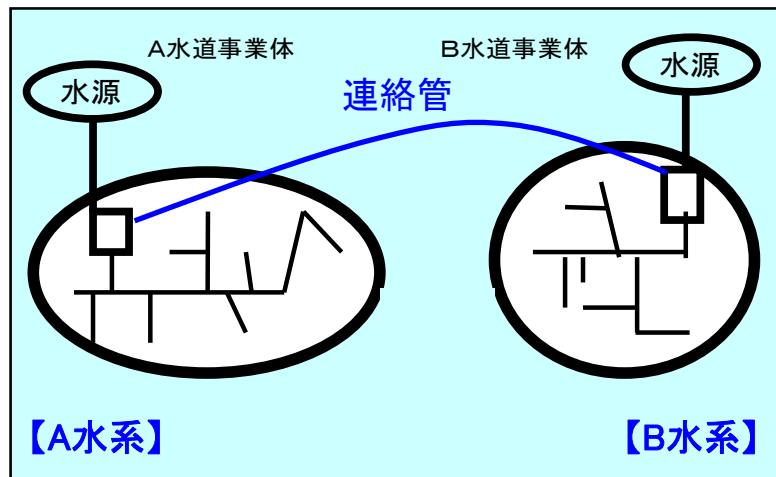


図-5 水系をまたがる共用浄水場のイメージ

3-3 浄水場バックアップ可能水量

原水の水質事故による汚染の影響を緩和する方法として、代替水源の確保（予備水源、原水調整池等）、施設内貯水量の確保（浄水備蓄、配水施設内貯留等）、運用変更（水源切替、配水系統の変更等）、広域水融通（浄水場間の連絡管）等がある。

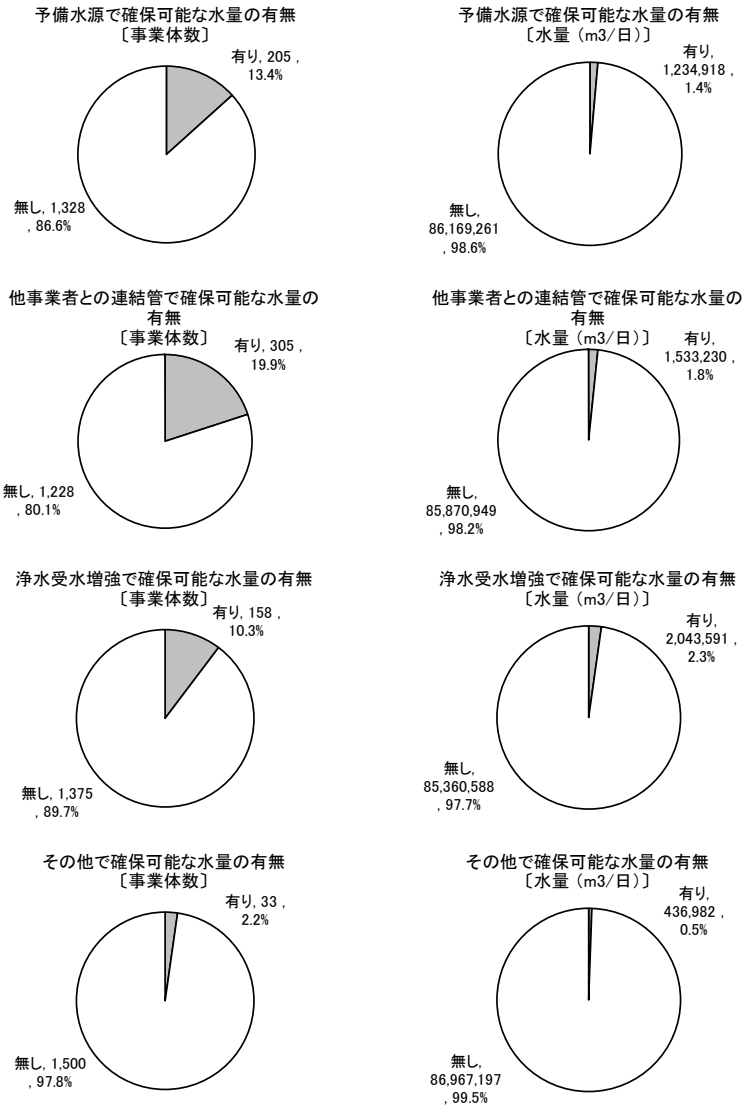
水道統計では、浄水場が被災し、供給不能となった場合の確保可能水量をバックアップ可能水量と定義して集計している。

表-7 水道統計におけるバックアップ可能水量の定義

バックアップ可能水量の種別	定義
他事業者との連結管で確保可能な水量	・被災時に他水道事業との連結管で確保可能な水量
予備水源で確保可能な水量	・被災時に使用可能な予備水源水量（予備水源とは、通常使用している水源の能力が低下した場合に、使用できる井戸等の水源をいう。）
浄水受水増強で確保可能な水量	・被災時に水道用水供給事業から増強される受水量 （水道事業者と水道用水供給事業者との間で受水量が定量的に確定している場合）
その他	・上記以外で被災時に確保可能な水量

図-6 に水道統計施設・業務編（平成 22 年度）を基に作成したバックアップ可能水量を示す。整理したデータにおいては、何らかのバックアップ水量を確保している水道事業者は 35.5%（547 事業者/1,541 事業者）であった。他事業者との連結で確保される事業体は全体の 20% 近くに達する。

水量については、計画一日最大給水量ベースで全量の 6.0%であり、浄水受水増強確保による水量が多く、2.3%である。また、図-7 に実績一日平均給水量に対するバックアップ可能水量の割合を示す。全体で見ると 7 割はバックアップ水量が確保されていない。



水道統計施設・業務編(平成22年度)を基に作成
 バックアップ水量の有りと無しの合計は、計画一日最大給水量に一致する。
 バックアップ水量の合計は 5,248,721 m³/日であり、計画一日最大給水量の6.0%に相当する。
 何らかのバックアップを確保している水道事業者は、1,541事業者のうち547事業者(35.5%)である。

図-6 バックアップ可能水量

(出典：水道統計施設・業務編(平成22年度)を基に作成)

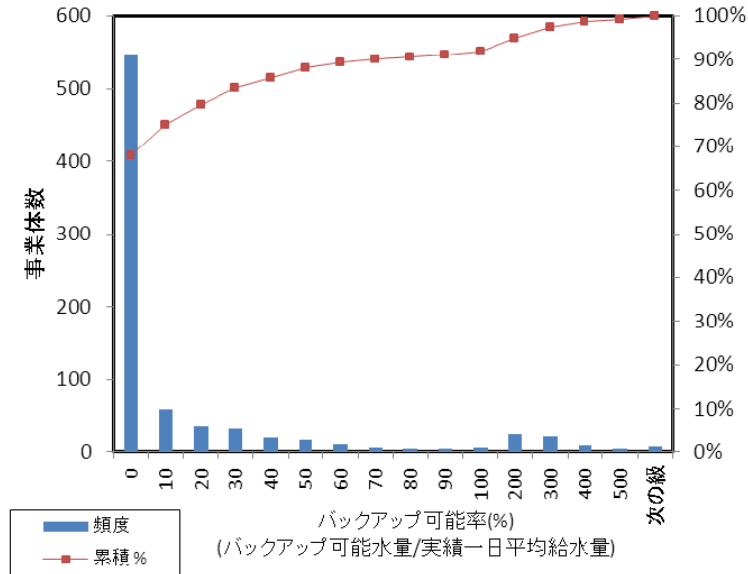
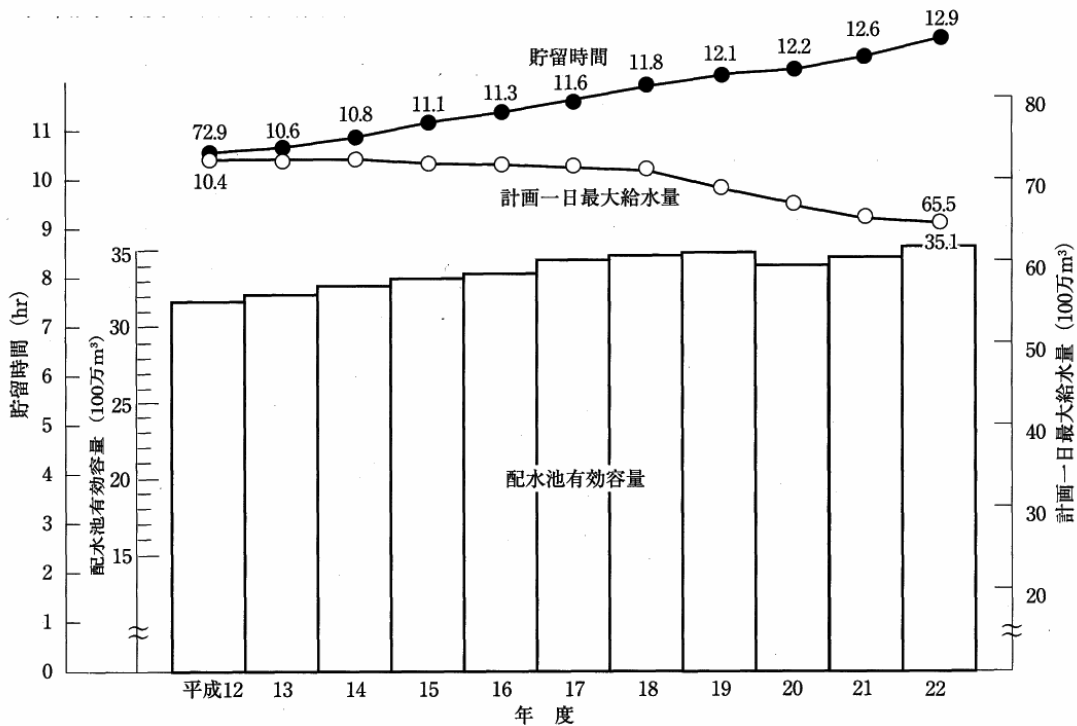


図-7 バックアップ可能率
(バックアップ可能水量/実績一日平均給水量)

3-4 配水池貯留時間

前述のように配水池の貯留に余裕度があれば水質汚染事故の影響緩和に有効であり、実績を図-8に示す。上水道事業における配水池有効容量は年々増加し、平成22年度には配水池有効容量は3,515万m³、配水池貯留時間(配水池有効容量÷計画一日最大給水量×24時間)は12.9時間となっている。



出典：水道統計施設・業務編 (平成22年度)

図-8 上水道事業における配水池有効容量・貯留時間・計画一日最大給水量の推移

また、全国の分布状況を図-9に示す。配水池貯留時間が12時間～14時間の事業体は最も多く350事業体以上あり、全体の65%程度となっている。また、6時間以下の事業体が全体の20%近く存在する。6時間以下のうち、図-10に示すように表流水を主な水源としている事業体は26%（48事業体、バックアップ水量確保13事業体）であり、水質汚染事故が発生した場合に配水池の貯留時間の面からは対応困難な状況が想定される。

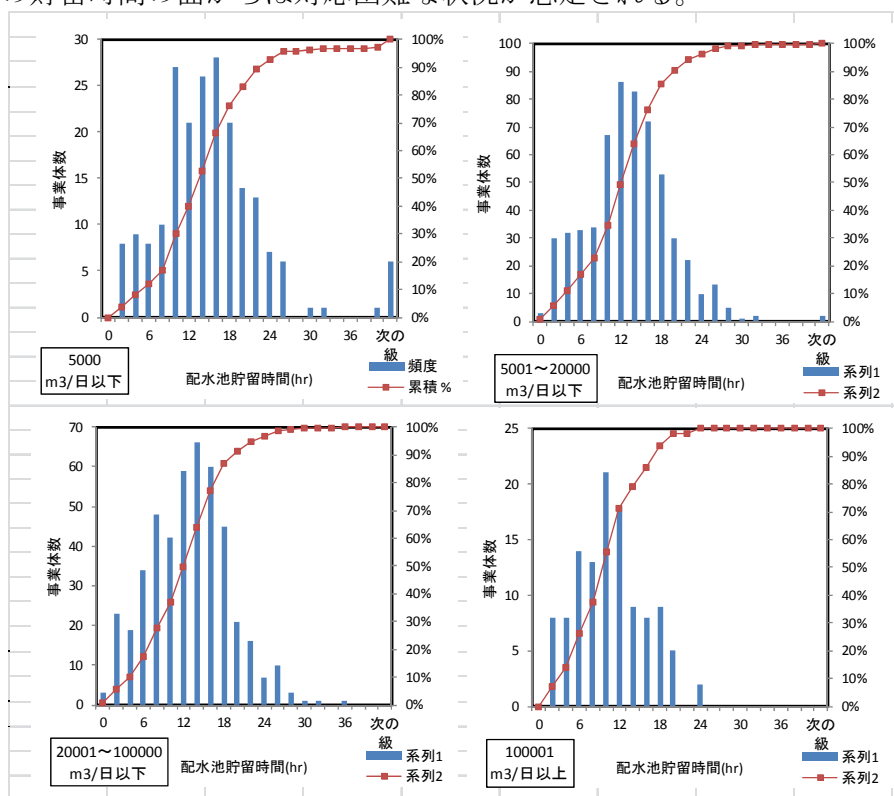


図-9 上水道事業体における配水池貯留時間の状況

(配水池貯留時間=配水池総容量÷計画一日最大給水量)

出典：水道統計施設・業務編（平成22年度）

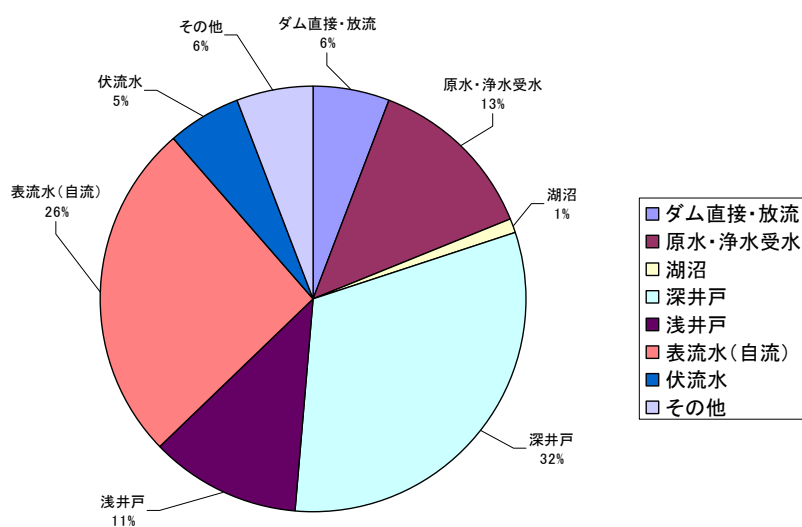


図-10 上水道事業体における配水池貯留時間6時間以下の水源

(配水池貯留時間=配水池総容量÷計画一日最大給水量)

出典：水道統計施設・業務編（平成22年度）

