第Ⅲ部

気候変動影響に対する
適応策に関する研究

Ⅲ－４：水資源分野における
気候変動への対応

１．水資源計画・管理における施策動向

１．１　大規模渇水に対する備えの必要性と国土交通省における施策動向

昭和 53 年の福岡渇水の発生や、平成 6 年の列島渇水等、大規模な渇水は度々発生してきている。また、世界でも 2006～2008 年のオーストラリアでの渇水など、過去例のないような大きな渇水が発生している。それに加えて今後はⅡ部の第 5 章で示したように気候変動に伴いダム枯渇回数の増加や枯渇日数の長期化など渇水リスクの上昇が懸念されている。渇水リスクの上昇は予測されるものの、どの程度上昇するかを定量的に予測（降水量がどの程度減少するか等）することは、第Ⅱ部 5 章でも論じたように、予測結果に幅があるため現時点では極めて困難である。そのため、将来的に渇水が発生することを前提として対応策を可能な限り現時点で検討しておくことが重要である。

現在までに大規模な渇水を経験した地域では渇水に対する経験や知見が一定量蓄積されていると考えられるものの、現在までに大規模な渇水を経験してこなかった地域においては一度大規模な渇水が発生した場合に大きな混乱が発生する可能性がある。また、渇水の経験が豊富な地域においてもこれまでに経験の無い規模の大規模な渇水が発生する可能性は否定できないため、予め大規模渇水に対して備えることは重要なことである。大規模渇水への対応として、現在計画されている水資源施設の整備を着実に進めることが重要である一方で、新設の水資源施設に大きく依存することは困難な状況であり、大規模渇水が発生した場合のソフト的な対応を事前に想定しておくことが対応策として必須である。大規模渇水に対する国土交通省における施策動向として、水源が枯渇し国民生活や社会経済活動に深刻かつ重大な支障が生じる渇水を「ゼロ水」とし、ゼロ水発生時の対応について事前に検討・設定・準備する「ゼロ水タイムライン」について現在検討を行っている。ここでは、現時点でのゼロ水タイムライン検討について簡単に紹介する。なお以下で紹介する内容は「水資源分野における気候変動への適応策のあり方検討会（平成 24 年 7 月～)」において検討を行っている段階のものであり、今後の検討会を踏まえて修正される可能性がある。

１．２　ゼロ水タイムラインの概要

ゼロ水タイムラインの検討は大きく分けて、「①過去の渇水等の降雨状況を踏まえたゼロ水シナリオの設定」、「②渇水の進展に伴う影響項目とその状況設定」および「③被害や影響を最小とするための需要側、供給側等の事前予防、対応措置の検討」という構成となっている。

１．２．１　過去の渇水等の降雨状況を踏まえたゼロ水シナリオの設定

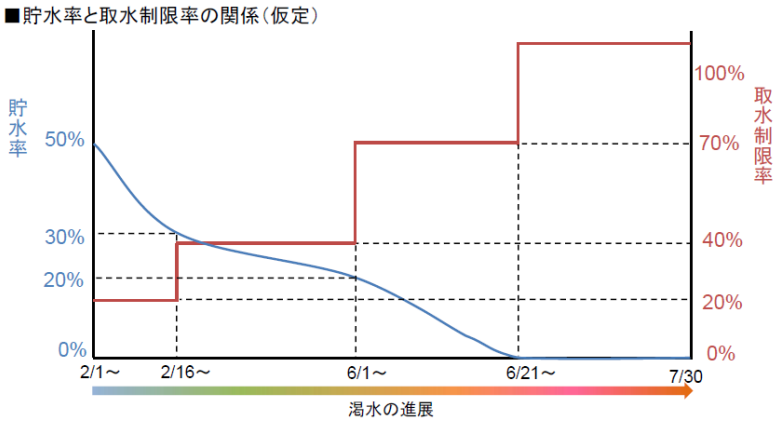
最初に、過去の降水量データを基にして、それらを多角的に分析してより厳しい渇水状況が発生するようにゼロ水のケース設定を行う。設定手法の考え方としては、現在以下のケースが考えられているが、今後の検討によって変更になる可能性がある。

ケース0：既往最大規模の渇水時の降水量を対象とする
ケース1：12ヶ月降水量（※）が一番少ない期間を対象とする。
ケース2：冬期の最小降水量と夏期の最小降水量を連続させる。
ケース3：年間降水量（※）が1番少ない年と2番目に少ない年を連続させる。

ケース4：過去の渇水時に台風による回復が行われなかったものとする。
ケース5：各月単位毎の降水量最小値を12ヶ月間組み合わせる。

※12ヶ月降水量：連続した12ヶ月の総降水量
　年間降水量：1月～12月の総降水量

ここで想定した降水量と、既往渇水時の貯水率の減少率等の情報を参考にしてゼロ水シナリオを設定するための取水制限率を時系列的に設定する。図-Ⅲ4.1.2.1.1は貯水率と取水制限率の時系列での設定事例である。降雨は上述のケース2により設定し、既往渇水時の貯水率の減少状況を参考に、ゼロ水シナリオを設定するための取水制限率を時系列的に設定した。具体的には、11月1日には貯水率を100%とし、既往渇水時はその後の少雨により貯水率が減少し1月末に50%まで減少したため、取水制限を開始したものとした。それ以降は図-Ⅲ4.1.2.1.1に示す日数の経過に従い渇水が進展するものと仮定した。ここでの事例では、シナリオを簡略化するため、取水制限率＝給水制限率とし、表-Ⅲ4.1.2.2.1に示す通り20%取水制限で減圧給水、40%で8時間断水、70%で16時間断水が発生し、100%では24時間断水が発生するものと仮定した（国土交通省水資源部2014）。ここで示した事例は過去に大きな渇水を経験している流域を対象とした設定事例であり、今まで渇水を経験していない流域での設定方法については今後の検討課題である。また、設定方法についても上述した降雨の設定に応じて変更・検討する必要がある。



貯水率	50%～30%	30%～20%	20%～0%	0%
取水制限率	20%	40%	70%	100%
制限日数	15日	105日	20日	40日

図-Ⅲ4.1.2.1.1　貯水率と取水制限率の時系列での設定イメージ（国土交通省水資源部2014）

表-Ⅲ4.1.2.2.1　取水制限率に応じた影響項目の整理イメージ（国土交通省水資源部 2014）

取水制限率	20%	40%	70%	100%	100%（長期間）
断水率	減圧給水	8時間（夜間）断水	16時間断水	24時間断水	24時間断水

水道断水状況		減圧給水	8H（夜間）断水	16H断水	24H断水	24H断水
社会・経済活動	農業（耕作）	番水実施	番水強化	収穫量の減少	収穫量の減少	農作物枯死、収穫量激減
	農業（畜産）	畜舎の清掃用水不足	家畜の飲用水不足	家畜の健康状態悪化	家畜の斃死	家畜の斃死
	水産・海運	漁港の清掃用水不足	水産物加工場の操業への影響	製氷用水不足鮮度悪化	河川・湖沼の漁獲量減少	食品流通への影響
	工業	生産調整、回収水増加	工場の稼働日数減少	減産、水の輸入（コスト増）	脱臭・脱硫が困難	操業停止
	商業（デパート等）	水の出悪化	トイレの一部閉鎖 飲料水買い占め	食品類品薄 サービス低下	客足低下が顕著 一部食品販売停止	臨時休業
	商業（ホテル、観光等）	水の出悪化	トイレの一部閉鎖 ガソリンスタンドでの洗車休止	入浴の制限 クリーニング停止 テーマパーク、プールの休園、営業時間短縮 観光資源枯渇 清掃頻度減	臨時休業	臨時休業
	商業（飲食店）	水の出悪化	トイレの一部閉鎖 営業時間短縮	清掃頻度減 営業時間短縮	臨時休業	臨時休業
	オフィス	水の出悪化	トイレの一部閉鎖	清掃頻度減　衛生状態悪化 職場環境悪化　能率低下	トイレ閉鎖 水冷のシステムはダウン	臨時休業
	発電　水力 発電　火力	水力発電量低下 火力への依存増大	水力さらに低下 火力への依存増大	都市用水への融通による減電 ボイラー用水等の不足による減電	ダム枯渇、河川水量減少によりさらに減電 代替水源無ければ停止	計画停電の実施
	建設業	下水処理水利用増加	散水、機械清掃に支障 工事の遅れ	コンクリート養生水不足 生コン使用現場停止	緊急的な工事以外中止	緊急的な工事以外中止
	銭湯、理容等	水の出悪化	洗髪に支障 営業時間短縮	公共の風呂閉鎖	臨時休業	臨時休業
福祉・医療	病院	水の出悪化	夜間診療の中止 人工透析が困難等医療活動に支障 入浴回数削減	緊急以外の外来医療中止 緊急以外の手術困難 給食体制に支障	通常の医療水準維持不可ならば休診 緊急以外の外来医療中止	入院患者の転院
	老人ホーム	水の出悪化	夜間のトイレ使用不可による紙おむつ増加 入浴回数削減	清掃頻度減少 水を利用しない調理メニューへ	外部からの支援が不可欠	入所者の移転
	保育所・児童施設	水の出悪化	保育時間短縮　共働き家庭へ影響	保育所は閉鎖 水を利用しない調理メニューへ	入所児童の移動開始	入所児童の移動開始
公共施設・サービス	役所	水の出悪化	トイレの一部閉鎖	避難所・簡易トイレの設置と維持管理業務増大 行政サービス低下	最低限の窓口業務以外の業務停止 水冷のシステムはダウン 行政機関の業務継続に支障	住民の最低限機能維持
	銀行・郵便・電話	水の出悪化	トイレの一部閉鎖	営業時間短縮	業務や社員の地方への移転 水冷のシステムはダウン	住民の最低限機能維持
	学校	水の出悪化	プール中止・給食メニューの変更や中止	大学・高校は休校	小中学校は休校	全ての学校休校
	交通機関等	水の出悪化	作業能率低下による安全に対するリスク増大	交通機関の運行に支障 SAの使用制限　安全面の低下	運行に必要な人員が確保出来ず、運行に支障	運行停止
	公共施設（公園、焼却場）	水の出悪化	公営プール中止 植栽への散水制限	公園等への簡易トイレ設置　公園機能低下 ゴミの焼却機能低下	下水処理場の機能不全 ゴミの焼却停止	ゴミの一時保管 公園機能喪失
	防災	水の出悪化 減圧により消火用水に支障	消火用水不足による火災被害増加	さらに火災リスク増加 緊急対応困難	山火事・野火の消火困難	火災発生時のリスク激増
個人生活	個人生活	水の出悪化　高台では断水し給水車出動 ポリタンクの用意	生活時間への制約増加 高齢者の水運搬負担	健康状態悪化　ストレス増加 幼児を抱える家庭での共働き困難	バケツ等くみ置きによる生活のため労力増大 トイレ不可　公共設置の簡易トイレ利用	渇水疎開

注）影響項目、状況想定は、各流域の特性等により異なることも想定される。

１．２．２　渇水の進展に伴う影響項目とその状況設定

取水制限率と、「社会・経済活動」、「福祉・医療」、「公共施設・サービス」、「個人の生活」各分野への影響について、渇水の進展に伴う影響項目とその状況設定を行う（表-Ⅲ4.1.2.2.1）。各分野については、できる限り細分化を行う。たとえば社会・経済活動であれば、「農業（耕作）」、「農業（畜産）」、「水産・海運」、「工業」、「商業（デパート・スーパー）」、「サービス業（ホテル、観光、娯楽）」、「サービス業（飲食店）」、「オフィス」といった細分類を行う。

１．２．３　被害や影響を最小とするための需要側、供給側等の事前予防、対応措置の検討

次に、1.2.2で想定した状況設定を考慮した対策を検討する。ここでの対策は、ゼロ水が発生する以前の事前予防と発生した以降の対応措置に分けられる。

●事前予防：

通常時から水資源供給施設の整備、既存施設の機能向上、施設の再編や運用の見直しによる水供給の効率化を推進する。また、限られた水資源を有効に利用するため、需要マネジメントを行い節水型社会を構築していく。さらに、海水淡水化装置、給水タンク、輸送のためのトラック、水備蓄（ペットボトル）等の備えを実施する。

●対応措置：

取水制限率に応じて、需要側および供給側の対応を設定しておく。例えば社会経済活動の農業（耕作）、農業（畜産）、水産・海運の例を下表に示す。

表-Ⅲ4.1.2.3.1　農業（耕作）、農業（家畜）、水産・海運の取水制限率別の対応策イメージ
（国土交通省水資源部2014）

影響項目		想定される内容
1－1）農業（耕作）	農作業への負担増	・取水制限による番水実施に伴い、農業従事者の労力が増加。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・キャベツ等植え替えが必要な作物への影響。利根川平成2年夏渇水では、ホウレンソウ、キャベツ、白菜等野菜に不作あり。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・取水制限による番水実施に伴う農業従事者の労力がさらに増大。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・農作物被害（収穫量減少、品質の低下）が想定。【かんがい用水】
	農作業への負担増	・農業用機械等洗浄用水の不足が想定。【農機具等洗浄水】
	品質低下の懸念	・水不足による病害虫の発生が想定。【防除用水】
	商品価値低下の懸念	・農産物加工場で収穫物の洗浄ができなくなると想定。【洗浄水不足】
	営農地周辺への影響	・農作物被害の増大が想定。【かんがい用水】
	農作物の損失	・農作物の枯死、収穫量激減が想定。【かんがい用水】
1－2）農業（畜産）	畜産従事者の負担増	・節水による清掃作業等への影響。【畜舎用水】
	畜産従事者の負担増	・家畜の飲用水の不足。【畜産用水】
	家畜品質低下の懸念	・家畜の健康状態悪化が懸念されることと想定。【畜産用水】
	家畜の損失	・夏期畜舎冷却用水が不足しニワトリ等が熱死するなどが想定。【畜舎・鶏舎維持用水】
	家畜の損失	・牛・豚・鶏等の斃死が想定され、疎開も考えられるが、受け入れ先が無ければ不可能【家畜の成育管理】
	家畜の損失	・牛・豚・鶏等の斃死が増大。【家畜生命維持用水】
1－3）水産・海運	水産従事者の負担増	・節水による清掃作業等への影響。【洗浄用水】
	水産業への影響	・水産物加工工場の操業等に支障が発生すると想定。【食品加工用水】
	水産業への影響	・鮮度管理のための製氷に支障、流通にも影響。【製氷用水】
	水産業、海運業への影響	・船舶で使うボイラー水、飲料水、風呂水等の給水が出来なくなる。航行停止は工業製品の出荷停止に繋がり影響は消費地へも拡大するものと想定。 ・ただし外洋航路など大型船では海水淡水化装置を使用している。（日本船主協会HP）【操船・操業用水】
	漁業資源の減少	・河川や湖沼の水量低下による漁獲量の低下【河川水量】
	食品流通への影響	・長期的には農業・畜産での収穫量低下を補うため、水産物の消費量が増えるが対応・体制が追いつかなくなる。H6列島渇水事例あり。【営業用水】

取水制限率（%）

20％	40％	70％	100％	100%（長期間）

１．３　今後の課題

ゼロ水タイムラインの検討は現在も継続して行われている段階であり、今後最終的なとりまとめが完成した後、各地域においてとりまとめに基づいてゼロ水タイムラインを作成することが期待される。

参考文献：

国土交通省水資源部 2014：第 6 回気候変動による水資源への影響検討会、平成 26 年 3 月

２．気候変動によるダム貯水池の水質への影響と適応策の検討

２．１　検討の目的

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第５次評価報告書においては、将来、温室効果ガスの排出量がどのようなシナリオをとったとしても、世界の平均気温は上昇し、21 世紀末に向けて気候変動の影響のリスクが高くなると予測されている。こうした見解を受けて、中央環境審議会は 2015 年 3 月に「日本における気候変動による影響の評価に関する報告と今後の課題について（意見具申）をとりまとめた。この中で、気候変動が日本にどのような影響を与えうるのか、また、その影響の程度、可能性等（重大性）、影響の発現時期や適応の着手・重要な意思決定が必要な時期（緊急性）、情報の確からしさ（確信度）がどの程度あるかを科学的に取りまとめた。しかしながら、この中では、気候変動による湖沼・ダム貯水池の水環境への影響については、具体的な予測の研究事例は確認できないと報告している。

そのため、本検討においては、気候モデルによる現在及び将来気候の計算結果を使用し、ケーススタディ対象ダムについて、気候変動がダム貯水池の水質に与える影響について定量的な評価を試みた。また、適応策の一例として、現在と将来の水質の変化を解消するための対策について検討を行った。

２．２　検討の概要

図-Ⅲ4.2.2.1 に示すとおり、ケーススタディダムに対して、流域の流出・利水モデル、ダム貯水池の水質モデルを構築し、これに気候変動予測モデルの出力結果を入力することで、気候変動によるダム貯水池の水質・水温への影響を試算した。計算結果については、気候変動によりダム貯水池に生ずる可能性のある水質変化現象として、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」に分類して整理した。また、この将来の水質に対して現状の対策を継続した場合の効果と、この現在と将来の水質の変化の解消をするための対策の効果を試算した。

なお、本検討の各段階における計算結果や考察等を含む詳細な内容については、国総研資料 856 号「気候変動によるダム貯水池の水質への影響に関する研究」と題して、国総研ホームページにおいて（http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0856.htm）公表しており、本稿では本検討の手法と結論を中心に要点を記す。

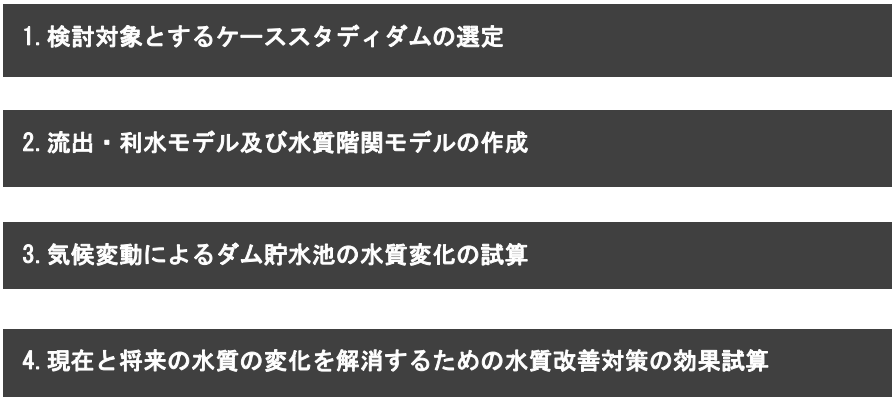


図-Ⅲ4.2.2.1　本研究のフロー

２．３　検討対象とするケーススタディダムの選定

本検討では、気候変動によりダム貯水池に生ずる可能性のある水質変化現象として、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」への適応策を検討可能な４つのケーススタディ対象ダムを選定した。

具体には、我が国の閉鎖的ダム水域における主要な水質問題となる藻類増殖の観点から、流入リン面積負荷率が大きく貯水池の水交換速度が小さいダムとして、「耶馬溪ダム」、「釜房ダム」を選定した。上記で選定した「釜房ダム」が東北の太平洋側に位置するのに対し、わが国を代表する豪雪地帯を流域に抱え、気候変動による気温上昇により融雪への影響が大きいと思われる東北の日本海側から「寒河江ダム」を選定した。同ダムは、水深が深く、冷水放流による農業等の利水面への影響も懸念されることから、気候変動による春先の融雪期の流況や水温に影響も検討も可能となる。さらに、「耶馬溪ダム」と東北の「釜房ダム」・「寒河江ダム」を地理的に補完する観点および「濁度の上昇」が問題となっていることから「早明浦ダム」を選定した。

２．４　流出・利水モデル及び水質解析モデルの作成

２．４．１　流出モデルの基礎構造

各ダム流域に適用した流出モデルは、非定常の分布型物理モデルであるWEPモデルを基本とし、融雪・積雪を考慮したものである。WEPモデルは表-Ⅲ4.2.4.1.1および図-Ⅲ4.2.4.1.1に示すように、水循環の素過程のみならず熱輸送の素過程も同時に解析でき、モデル解析を通して気候変動による水循環系の変化を把握するのに適している。

表-Ⅲ4.2.4.1.1　流出モデルで考慮する素過程

水循環素過程	①蒸発散	⑥地表面流れ
	②浸透	⑦河道内の流れ
	③表面流出	⑧地下水流れ
	④中間流出	⑨積雪・融雪
	⑤地下水流出	
熱輸送素過程	①正味放射	⑤潜熱フラックス
	②短波放射	⑥顕熱フラックス
	③長波放射	⑦地中熱フラックス
	④人工排熱	⑧地表面温度

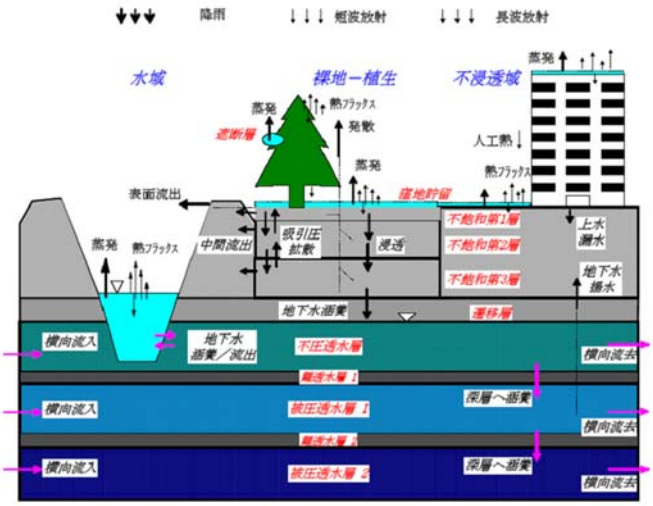


図-Ⅲ4.2.4.1.1　モデルの鉛直構造

（出典：WEP モデル解説書、土木研究所、水工研究グループ）

２．４．２　流出モデルの計算条件

流出モデルに設定する地形・地質、土地利用、気象条件、地表流条件、河道条件を表-Ⅲ4.2.4.2.1 に示す。各ダムで構築した流出モデルの計算範囲は、ダム上流域から下流における利水基準点までとし、解析メッシュサイズは 200m とした。

表-Ⅲ4.2.4.2.1　流出モデルに用いる計算条件

項目		内容	出典
地形・地質	計算領域	流域界	国土数値情報、河川管内図
	標高	標高(50m メッシュデータ）から 200m メッシュを作成	国土数値情報
	表層地質	表層地質メッシュ	国土数値情報
土地利用	土地利用面積	100m メッシュ土地利用	国土数値情報
気象条件	降水量	国交省雨量観測所、アメダス観測所の時間降水量	国土交通省、気象庁
	ティーセン分割	観測所位置から作成	国土交通省、気象庁
	気温	気温データ（時間）	気象庁
	ティーセン分割	観測所位置から作成	気象庁
	日射量	全天日射量データ（時間）	気象庁
	時刻データ	日照時間	気象庁
	相対湿度	相対湿度データ（時間）	気象庁
	風速	風速データ（時間）	気象庁
地表流	落水線方向	標高データから作成	作成データ
	傾斜	標高データから作成	作成データ

河道	河床標高	標高データから作成	作成データ
	河川幅	地形図等から設定	作成データ
	河川位置	地形図から河川ラインを設定	国土数値情報、 国土地理院地形図

２．４．３　利水モデルの基本構造

図-Ⅲ4.2.4.3.1 にモデルの概念図を示す。利水モデルは日単位を基本とし、ダム直接取水及びダム～利水基準点上流までの取水・還元を考慮したモデルとした。

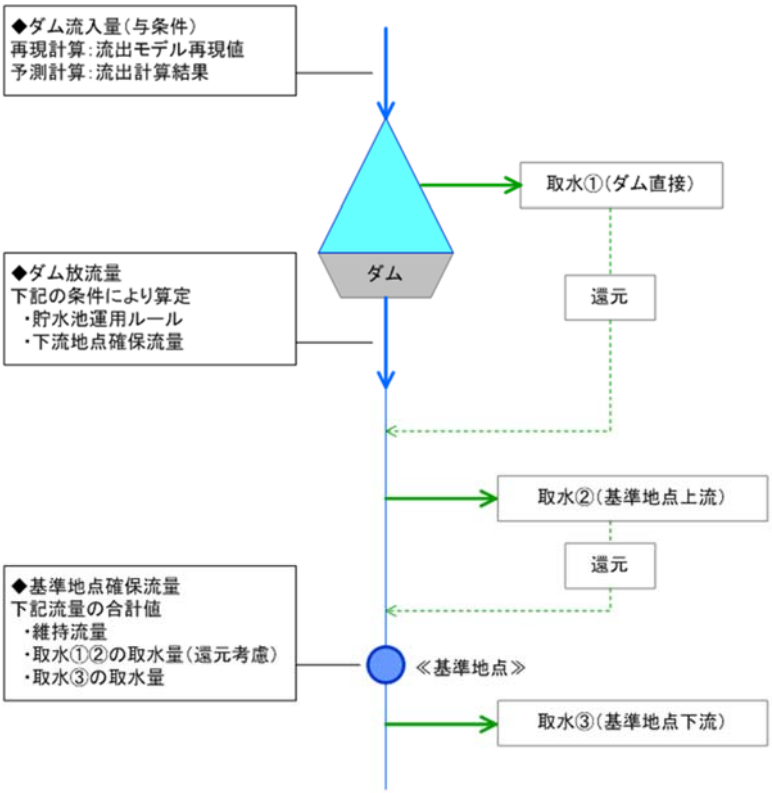


図-Ⅲ4.2.4.3.1　利水モデルの基本構造

２．４．４　水質解析モデルの基本構造

本検討で適用した水質解析モデルには、国内の複数のダム貯水池において、環境影響評価や水質解析への適用実績のある鉛直二次元モデルを用いた。図-Ⅲ4.2.4.4.1 に水質解析モデルの基本構造を示す。

水質解析において考慮した生態系モデルは、各水質項目（ダム貯水池・放流水・取水の窒素、リン、COD、クロロフィルａ、水温、SS 等）について、ダム貯水池における流入、放流、取水、蒸発散、一次生産、無機化分解、熱収支、酸素消費、沈降等のプロセスを表現可能なものとした。

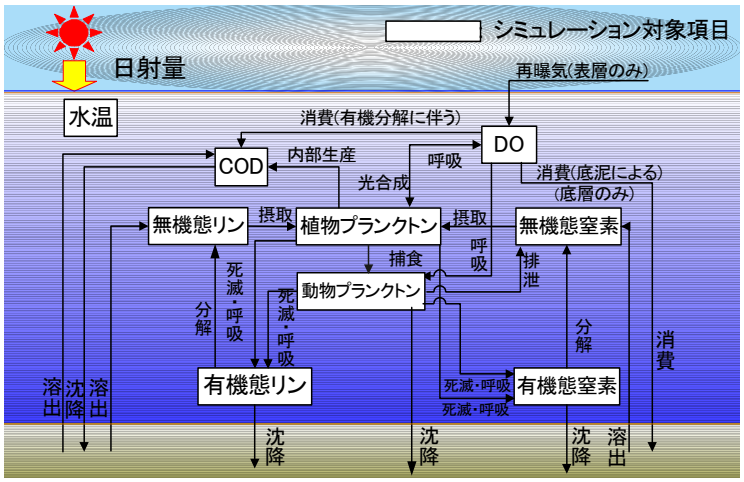


図-Ⅲ4.2.4.4.1　水質解析モデルの基本構造

２．５　気候変動によるダム貯水池水質の変化試算

２．５．１　将来予測シナリオの選定

第Ⅱ部第１章 5.に示すとおり、2014 年 6 月 6 日に環境省が日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測に供することを目的に、RCP シナリオに基づいた地域気候モデル（MRI-NHRCM20：水平格子間隔 20km）の出力結果を公表しており、本検討では、同出力結果を用いたダム貯水池の水質変化試算を実施した。

本検討においては、環境省が公表する RCP シナリオに基づく気候変動予測モデルによる予測出力結果（全 19 ケース）のうち、図-Ⅲ4.2.5.1.1 に示す考え方により表-Ⅲ4.2.5.1.1 に示す計 7 ケースを予測計算ケースとして選定した。第Ⅱ部第 5 章と異なり、Step①として 4 つの放射強制シナリオの違いを見る観点を加えている。

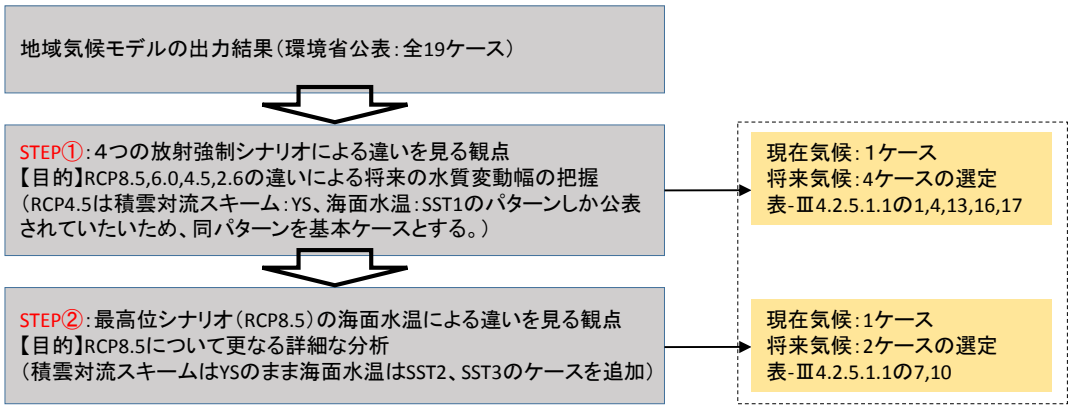


図-Ⅲ4.2.5.1.1　予測計算ケース選定の考え方

表-Ⅲ4.2.5.1.1　RPC シナリオ全 19 ケースのうち本研究で採用した予測ケース

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 16ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13		RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 1ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
—			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
—			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18			SST2	YS	HFA_rcp26_c2
19			SST3	YS	HFA_rcp26_c3

RPC4.5 の２ケース（c2,c3）は平成 26 年の本検討時点で未実施

・・・本検討対象ケース

２．５．２　気温及び降水量データのバイアス補正方法

気候変動予測モデルの現在気候における出力結果には、観測値と差違がある。そのため、気候変動予測モデルの出力値については、長期的な平均や分散等の統計的な観点から、観測値に近づけるバイアス補正を行った上で、取り扱う必要がある。

本検討では、気候変動予測モデル出力値のうち気温、降水量に対して、表-Ⅲ4.2.5.2.1 に示す手法によりバイアス補正を実施した。気温は、月毎に概ねの変化パターンを持つことから、モデル値と観測値の月平均値の差分をバイアスとし、気候モデルにより計算された日平均の気温に月毎に設定したバイアスを乗せる差分法により補正した。降水量は気温とは異なり年によって当該月中の降水頻度が異なることから、モデル値と観測値の累積分布関数(CDF)を作成し、パーセンタイル毎に補正する CDFDM 法を採用した。

表-Ⅲ4.2.5.2.1　バイアス補正方法

気象要素	バイアス補正方法	手順概要
気温	差分法	①対象メッシュ毎に観測値とモデル値(現在気候)の月毎の平均気温を算出する。 ②観測値とモデル値の差（モデル値-観測値）を月別に算出し補正値（バイアス）とする。 ③モデル値（将来気候）の値から当該月の補正値を増減させる。
降水量	CDFDM 法	①観測値とモデル値(現在)を昇順に並べ替える。(月別) ②観測値とモデル値を比較するため、月別の累積分布関数(CDF)を構築し、観測値と同じパーセンタイルのモデル値の比を算出しモデル誤差（バイアス=観測値/モデル値）とする。気候変動モデルの将来気候で構築した CDF に対応するパーセンタイル時のバイアスを当該データに乗じる。(モデル補正値=モデル値(将来)×バイアス(比率) ③補正したモデル値(将来)を日付順に並べ替える。

２．５．３　気候変動によるダム貯水池の水質変化試算

２．４で構築した流出・利水モデルおよび水質解析モデルを用いて、気候変動によるダム貯水池の水質変化の試算を行った。具体には、２．５．２でバイアス補正を行った気温および降水量のデータをもとに表-Ⅲ4.2.5.3.1 に示す条件で流出・利水計算を行い、その計算結果をもとに表-Ⅲ4.2.5.3.2 に示す条件で水質計算を行った。

計算結果については、ダム毎に、気象条件（気温・降水量）、流況（ダム流入量）、水質変化現象（藻類増殖（表層 Chl-a・表層 Chl-a25 μg超過日数）、底層水質悪化（底層 DO2.0mg/l 低下日数）、濁度の上昇（表層 SS・放流 SS25mg/l 超過日数）、水温の上昇（表層水温・放流水温・温水放流日数・温水放流温度・冷水放流日数・冷水放流温度））の項目で整理した。

表-Ⅲ4.2.5.3.1　流出・利水計算条件

項目		内容
計算モデル		分布型流出モデル（WEP モデル）
計算期間		現在気候　：1984 年 9 月～2004 年 8 月 将来気候　：2080 年 9 月～2100 年 8 月
地形・地質形状		検証計算と同様
気象条件	気温	バイアス補正後のモデル出力値
	降水量	バイアス補正後のモデル出力値
	日射量 日照時間	降水量と関係式から日射率を算出し、最大可能日照時間及び最大可能日射量に乗じて推定
	湿度	降水量からの推定値
	風速	実績値による月平均値
下流基準点の取水量 (利水計算)		現在気候期間における近 5 ヵ年の日平均パターン

表-Ⅲ4.2.5.3.2　水質計算条件

項目		内容
計算モデル		鉛直二次元モデル
計算期間		現在気候　：1984 年 9 月～2004 年 8 月 将来気候　：2080 年 9 月～2100 年 8 月
貯水池形状		検証計算と同様
流入量		流出モデルの計算結果
放流量		利水モデルの計算結果
気象条件	気温	バイアス補正した日平均気温（流出モデルと同様）
	日射量	降水量により日射率を設定（流出モデルと同様） 最大可能日射量を上限とする。
	湿度	降水量からの推定値（流出モデルで設定する条件のダム貯水池に該当するメッシュの値）
	風速	実績値による月平均値（流出モデルで設定する条件のダム貯水池に該当するメッシュの値）
	雲量	日射率からの推定値
流入水温		気温との関係式で日平均水温を設定（検証計算と同様）
流入水質		ダム流入流量から LQ 式で設定（検証計算と同様）
選択取水の取水位置		最新の施設諸元、運用ルールを設定
水質保全施設の運転状況		最新の施設諸元、運用ルールを設定

２．６　現在に対する将来の水質悪化への対策検討

本検討においては、気候変動に伴う将来の水質悪化に対して、現状の対策を継続した場合の効果を確認した上で、さらに水質悪化を解消することを目指した対策を新たに設定し、現状対策の増強変更も含めこれを適応策と捉え、その効果を試算した。ただし、ダムの水温については、将来の水温を現在の水温に完全に戻すために膨大な貯留水を人為的に冷却することが非現実的なことから、絶対的な水温変化ではなくダム湖流入前後の水温差に着目し、将来の冷温水放流日数を、現在の冷温水放流日数とするための対策の検討を行った。本検討により得られた知見の概要は以下のとおりである。

【藻類増殖】

（気候変動による水質変化の予測）

- ケーススタディ対象ダムにおいては、気候変動により、平均年降水量はやや増減するものの、気温上昇による蒸発散量も増大するため、平均年総流入量が顕著な増加を示すケースはほとんどない。そのため、流入負荷量が顕著に増加するケースもほとんどないと考えられ、全体的には、藻類増殖に顕著な変化は見られない。ただし、釜房ダム、耶馬溪ダムにおいては、気温上昇に伴う水温上昇により藻類増殖期が早期化・長期化する場合が見られる。以下の図-Ⅲ4.2.6.1.1 に釜房ダムの流入量、図-Ⅲ4.2.6.1.2 に釜房ダムの表層 Chl-a の試算結果を示す。

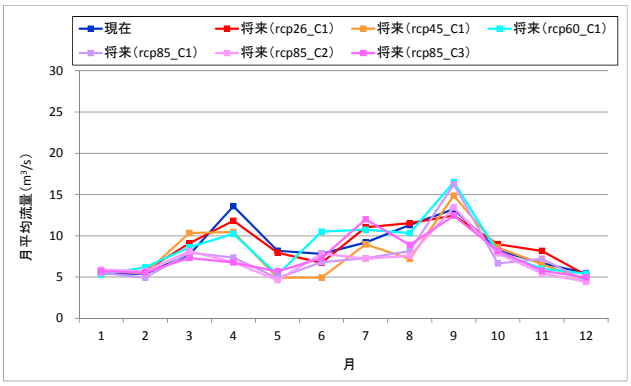


図-Ⅲ4.2.6.1.1　釜房ダムの流入量

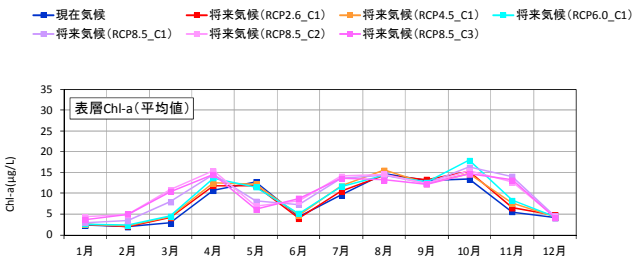
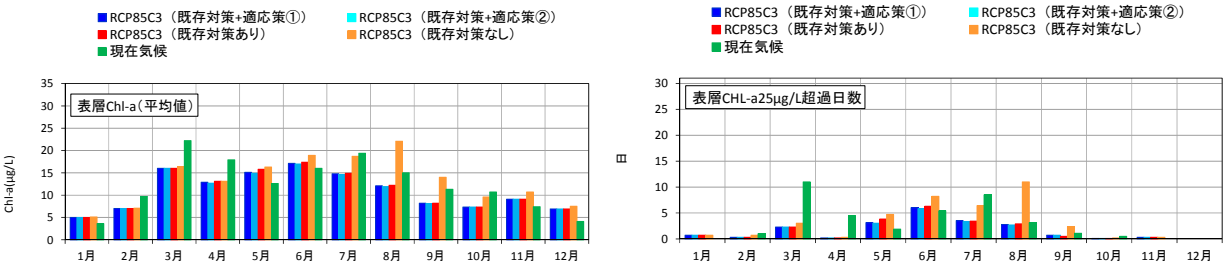


図-Ⅲ4.2.6.1.2　釜房ダムの表層 Chl-a

（対策効果試算）

➢　このような藻類増殖に対する水質改善対策としては、既設の曝気循環施設が有効であり、さらには、釜房ダムで散気量の増量、耶馬渓ダムで曝気開始時期の前倒し及び散気量増量により、効果が増すと考えられる。図-Ⅲ4.2.6.1.3 に耶馬渓ダムにおける藻類増殖への対策の試算結果を示す。



図Ⅲ4.2.6.1.3　耶馬渓ダムにおける藻類増殖への既存対策・適応策の効果試算
（左：表層 Chl-a 月平均値、表層 Chl-a25μg/L 超過日数）

※適応策①：既存の浅層曝気施設（2 台）の運用開始時期を 5 月から 4 月に変更
適応策②：適応策①の条件に加え、浅層曝気施設（水面設置式）の散気量を 2 倍に増加

【底層水質悪化】

（気候変動による水質変化の予測）

➢　ケーススタディダムのうち耶馬渓ダム、寒河江ダムにおいては、気候変動により、水温上昇に伴う有機物分解のための酸素消費量が増加し、底層の貧酸素化の進行が見られる。図-Ⅲ4.2.6.1.4 に耶馬渓ダムの底層 DO が 2mg/L を下回る日数の試算結果を示す。

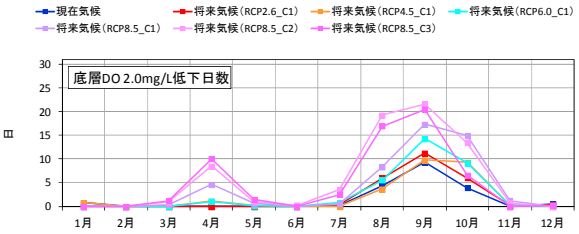


図-Ⅲ4.2.6.1.4　耶馬渓ダムの底層 DO が 2mg/L を下回る日数

（水質改善対策の効果試算）

- このような底層水質悪化に対する適応策としては、深層曝気施設や高濃度酸素水供給施設が有効と考えられる。図-Ⅲ4.2.6.1.5 に耶馬渓ダムにおける底層水質悪化への対策の試算結果を示す。

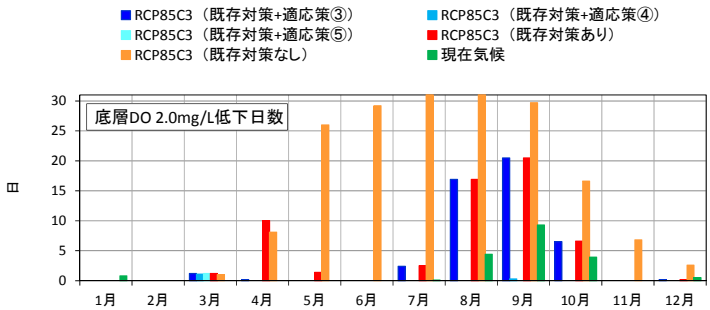


図-Ⅲ4.2.6.1.5　耶馬渓ダムにおける底層水質悪化への既存対策・適応策の効果試算
（底層 DO2.0mg/L 低下日数）

※適応策③：既存の深層 DO 改善設備の運用開始時期を 5 月から 4 月に変更。
適応策④：適応策③の条件に加え、深層 DO 改善設備の散気量を 2 倍に増加。
適応策⑤：適応策③の条件に加え、高濃度酸素水供給装置を 1 台設置。
（運用時期：深層 DO 改善設備と同様の 4～9 月、散気量：80m^3/h、吐出 DO 濃度：300%）

【濁度の上昇】

（気候変動による水質変化の予測）

- ケーススタディダムのうち寒河江ダムにおいては、気候変動により、発生頻度は低いがダムへの流入量規模の増大やダムの流出土砂の特性から、濁度の上昇が見られる。
- ただし、本検討で用いた気候モデルの予測結果は、アンサンブルデータではないため、本結果は気候モデルの偏りによる現象である可能性は否定できない。図-Ⅲ4.2.6.1.6 に寒河江ダムの表層 SS 年平均値及び放流 SS25mg/l 超過日数の試算結果を記す。

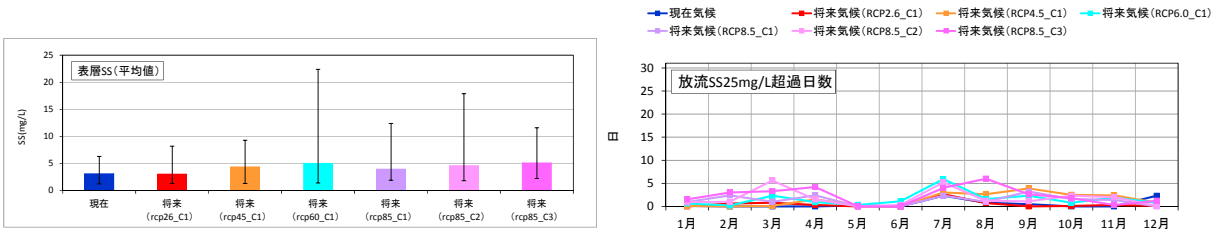


図-Ⅲ4.2.6.1.6　寒河江ダムの表層 SS 年平均値（左）と放流 SS25mg/L 超過日数（右）

（水質改善対策の効果試算）

このような大規模な出水に伴う濁度の上昇に対する適応策としては、選択取水設備の効果は限定的と見られ、清水バイパスのような新規施設の検討も有効と考えられる。しかし、可能性の限定的な事象とも解され、大きな費用を要する適応策の可否は、環境影響を踏まえつつ慎重に検討する必要がある。図-Ⅲ4.2.6.1.7 に寒河江ダムにおける濁度の上昇への対策の試算結果を示す。

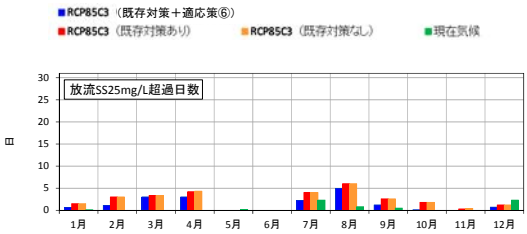


図-Ⅲ4.2.6.1.7　寒河江ダムにおける濁度の上昇への既存対策および適応策の効果試算
（放流 SS25mg/L 超過日数）

※適応策⑥：清水バイパス。本川からの流入水をダム下流にバイパスする。

【水温の上昇】

（気候変動による水質変化の予測）

- ケースタディダムにおいては、気候変動により、気温上昇に伴って貯水池内水温が上昇するが、ダム流入水温も上昇するため、ダムの流入水温変動幅に対する現状の温水放流日数からの顕著な増加は見られない[注)]。図-Ⅲ4.2.6.1.8 に早明浦ダムにおける温水放流日数と温水放流時の超過水温の試算結果を示す。

注）上述のとおり、将来気候の水温から現在の水温に人為的に冷却することに膨大な費用とエネルギーを要し、非現実的であることから、「ダムの現状の流入水温の変動幅に対する現状の温水放流日数」と「ダムの将来の流入水温の変動幅に対する将来の温水放流日数」を同等とする観点から評価した。

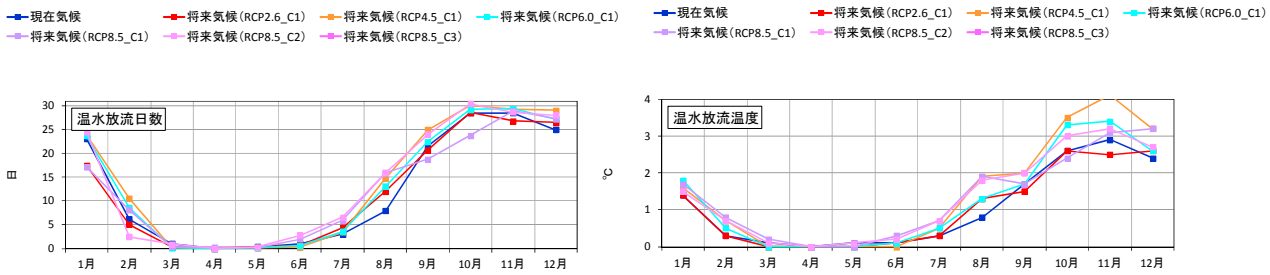


図-Ⅲ4.2.6.1.8　早明浦ダムにおける温水放流日数（左）と温水放流時の超過水温（右）

（適応策）

このような冷温水放流の増加に対する適応策としては、選択取水設備の運用ルールを気候変動による流入水温の変動等に対して柔軟なものに変更することが有効と考えられる。図-Ⅲ4.2.6.1.9 に釜房ダムにおける温水放流への対策の試算結果を示す。

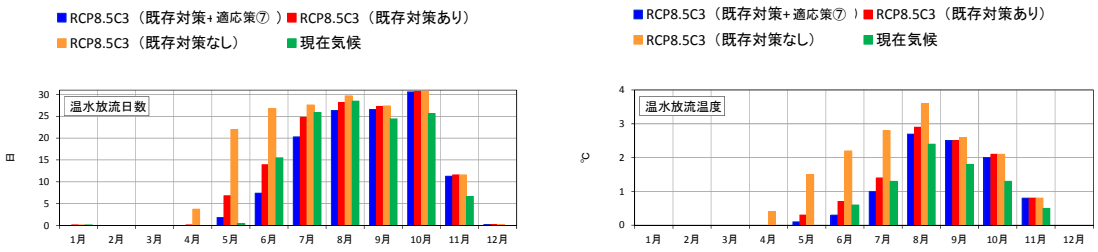


図-Ⅲ4.2.6.1.9　釜房ダムにおける温水放流への既存対策および適応策の効果試算

※適応策⑦：現状の表層取水を基本とした設備から任意層の取水が可能な設備に改造し、将来気候の流入水温に応じた運用目標水温を設定。

２．７　まとめ

本検討においては、4 つのケーススタディ対象ダムについて、それぞれ流域の流出・利水モデル、ダム貯水池の水質モデルを構築した。これらのモデルに、現在気候及び RCP2.6～8.5 の 6 ケースの将来気候に対する気候モデルの出力結果をバイアス補正して入力することにより、気候変動によるダム貯水池の水質・水温への影響を試算した。

試算結果については、気候変動によりダム貯水池に生ずる可能性のある水質変化現象として、「藻類増殖」、「底層水質悪化」、「濁度の上昇」、「水温の上昇」に分類して整理した。ダムごとに、変化が大きいと考えられる現象の種類はダムにより異なるが、全ての水質変化現象に対して悪化傾向を示す可能性が見られた。

これらの現在気候に対する将来気候下での水質悪化を解消することを目標として、現在対策済みの施設の効果を試算するとともに、選択取水設備、曝気循環設備等、従来採用されている水質改善対策の追加（既存設備の運用変更や増強を含む）を基本とした対策を設定し効果を試算したところ、これらの対策の有効性が見出された。

本検討で得られた知見をもとに、国土交通省が 2015 年 11 月に策定した「国土交通省気候変動適応計画」において、ダム貯水池の水環境に対する気候変動適応策については、選択取水設備、曝気循環設備等の水質保全対策を引き続き実施するとともに、気候変動に伴う水質の変化の内容と程度に応じ水質保全設備の運用方法の見直し等を検討することが位置づけられた。これを受けて、ダム貯水池の水質保全に係る調査・対策検討・運用・効果検証等のマネジメントサイクルをより充実し、これを間断なく適用することが気候変動への適応策として機能するとの認識のもと、今後、上述のマネジメントサイクルの体系的整理を進めていくこととしている。

参考文献

川崎将生、西村宗倫（2015）気候変動によるダム貯水池の水質への影響に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、No.856.*

３．　都市域における水資源確保代替案としての再生水利用の検討

３．１　検討の目的

平成 24 年度末現在で、下水道普及率は 76%を超えており、下水道の普及に伴って下水道に流入する水量も膨大なものとなっている。併せて、水処理技術、特に膜処理を中心とした技術の開発と普及により、一度使用された水（排水・下水）を、利用用途に応じた水質に再生して利用することも可能となってきており、都市内に豊富に存在する水資源として下水処理水の価値が高まりつつある。

このことから、再生水を利用することは、渇水リスクを軽減する効果が期待され、地球温暖化への有効な適応策として捉えられつつある。例えば、慢性的渇水に対する安全度を向上するために、再生水を雑用水や農業用水等に供給することや、緊急渇水時の水利用の安定化に向けた方策として、平常時の再生水利用の形態を、渇水時にはより高度な利用に転換することも考えられる。

しかし、海外では、降水量の少ない地域を中心に、下水処理水の再利用率が高くなっているのに対し、日本における下水処理水の再利用率は極めて低水準にとどまっている状況である。

そこで、本章では、都市域における水資源確保代替案としての再生水利用の意義や可能性について、水量面や膜処理技術の開発動向の観点から概観するとともに、膜処理技術を活用した再生水利用について、再生水の水質・安全面や環境負荷の軽減効果（電力消費量削減効果、CO_2 排出量削減効果）の観点から評価することとした。

３．２　水量面からの再生水利用の可能性

日本では、生活用水として年間152億m^3の水道水が利用され、そのうち約97%にあたる148億m^3の排水が下水道を経由して公共用水域に排出されている（国土交通省水管理・国土保全局水資源部、2014）。

このように、下水道の普及に伴い、都市域における水資源確保代替案としての下水処理水の意義・可能性は非常に大きなものとなってきているが、平常時の下水処理水の再利用率については、1.3%（平成23年度）と極めて低水準にある。

また、下水再生水の用途別再利用状況については、図-Ⅲ4 3.2.1に示す通りとなっており、修景用水や親水用水、河川維持用水のような付加価値的な用途への利用が中心となっており、水洗トイレ用水に代表される都市用水としての利用のように、水資源確保代替策としての再生水の利用はまだ少ないのが現状である。このことは換言すれば、再生水の水資源確保代替案としての水量面からの可能性は非常に大きいものと考えることができる。

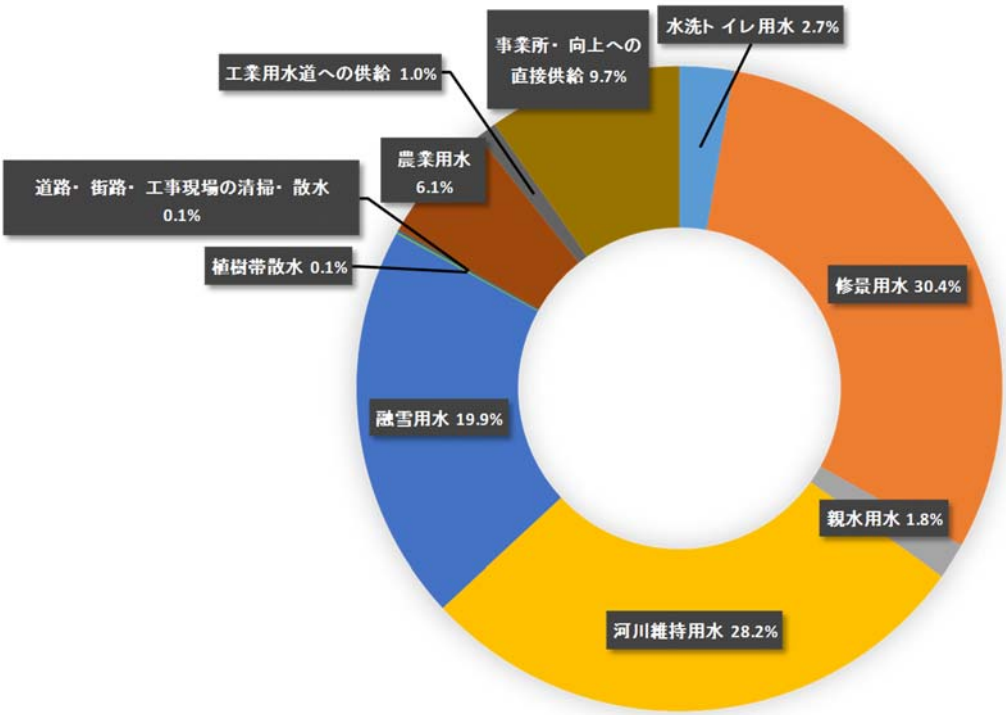


図-Ⅲ4.3.2.1　下水再生水の用途別利用状況（平成 26 年度）

３．３　膜処理技術の開発動向

再生水利用における処理技術として活用が期待される膜処理技術は、下水中のSS成分はもとより、大腸菌等の細菌を確実に除去し、ウイルスや微少な物質についても低減効果が期待できる技術であり、再生水利用において膜処理技術を活用することにより、再生処理施設のコンパクト化や水質面での再利用用途の多様化等を図ることが可能となる。

海外市場における日本の膜メーカーの水処理用膜のシェアは、全膜種では60%となっており、日本が大きなシェアを占めている（有限責任中間法人膜分離技術振興協会・膜浄水委員会、2008）。膜処理技術は、わが国が世界屈指の技術・ノウハウを有している技術分野である。下水道における膜処理技術は、近年、低コスト型膜モジュールの開発や膜の長寿命化が図られており、現在もコスト、エネルギー使用量の削減等、様々な観点からの研究や技術開発が進められており、都市域における水資源確保代替策としての再生水利用の可能性は今後一層高まってくるものと想定される。

なお、膜処理技術の再生水利用への導入形態としては、「①下水二次処理水を対象とした膜処理の導入」、「②サテライト処理場（下水処理場に至る前の下水管から下水を取り込む中間浄化施設）における膜分離活性汚泥法(以下、MBRという)の導入」の２パターンが考えられる。前者については、利用目的に応じた膜の選択により多様な用途への利用が可能であり、下水処理場の周辺地域では特に有効である。その一方で、後者については、利用箇所の近傍でサテライト処理場を設置するため、下水処理場から離れた地域でも低コストで利用が可能となる。

３．４　MBRにおける下水処理水の安全性の評価

（１） 目的

感染性胃腸炎の主な原因となるノロウイルスは人の腸管に感染して増殖し、糞便中に排出されるため、流行期には下水処理場に高濃度で流入する。下水処理場に流入するノロウイルスは、活性汚泥処理により一定程度除去されるものの活性汚泥と処理水の分離に重力沈降の原理を用いている従来型の処理法（以下、従来処理法という）では、対数除去率（90%除去で 1log）で 2log～3log 程度（99～99.9%除去）（国土交通省、2010）であり、再利用用途によっては、凝集剤の添加や消毒の強化等の対応では不十分な場合がある。

一方、MBRは、活性汚泥と処理水を孔径0.1～0.4μm程度の膜で分離するもので、ウイルス対策として有効であるとの報告がある（武村ら、2003）。そこで、MBR施設についてノロウイルス除去の実態を調査した。

（２） 調査方法

１）調査時期及び対象施設

調査は、ノロウイルスが流行する 2010 年 12 月から 2011 年 2 月に実施した。7 つの MBR 施設の流入水及び膜ろ過水（以下、処理水という）を各 3 回採水した。採水にあたっては，水理学的滞留時間を考慮し、G 処理場は 24 時間コンポジットの採水を行い、その他の処理場は代表的時間におけるスポット採水を行った。表-Ⅲ4.3.4.1 は各処理場と使用している膜の概要である。有機膜 6 か所（平膜 3 か所、中空糸膜 3 か所）、無機膜 1 か所であり、膜の使用期間は 11 カ月から 5 年 10 カ月である。なお、A、C、G 処理場はリン除去を目的として凝集剤を添加している。

表-Ⅲ4.3.4.1　調査対象とした膜分離活性汚泥法処理施設の概要

処理場	凝集剤	生物処理方法	膜の種類／形状	膜の設置位置	好気槽MLSS (g/L)	調査時における膜の使用時間	調査時における膜のろ過流束 (m3/m2)
A	添加	循環式硝化脱窒法	有機／平膜	浸漬型	10.6～11	5年8ヶ月～5年10ヶ月	772～799
B	－	循環式硝化脱窒法	有機／平膜	浸漬型	12.2～14	3年3ヶ月～5年1ヶ月	675～838
C	添加	嫌気-無酸素-好気法	有機／平膜	浸漬型	9.1～10.3	11ヶ月～1年0ヶ月	170～196
D	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	10.3～11.1	4年8ヶ月～4年10ヶ月	568～586
E	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	8～9.2	2年8ヶ月～2年10ヶ月	126～134
F	－	循環式硝化脱窒法	有機／中空糸膜	浸漬型	11.2～12.3	2年8ヶ月～2年10ヶ月	188～197
G	添加	循環式硝化脱窒法	無機／モノリス	別置型	5.6～9.4	10ヶ月～1年0ヶ月	543～625

２）ウイルスの検出手法

①　試料水からの濃縮

1次濃縮である陰電荷膜法（Katayama,H.、2008）は、まず試料水中で負電荷のノロウイルスに多価の陽イオン（塩化マグネシウム（$MgCl_2$）や塩化アルミニウム）を添加することによって電荷を正に転換させて、陰電荷膜上にノロウイルスを捕集する。陰電荷膜に捕集されたノロウイルスにpH 3の硫酸溶液を用いてマグネシウムなどの陽イオンを洗浄し、その後、pH 10の水酸化ナトリウム10 mlで溶出する。これを遠心式限外ろ過膜によって1mL以下に濃縮する。陰電荷膜１枚で処理する試料の量は流入水

20mL、処理水1Lとした。

② ノロウイルスの検出

濃縮液 140 µl に対して QIAamp viral RNA mini kit（Qiagen）を用いて RNA ゲノムを抽出し、その後、逆転写酵素（SuperScript II、Invitrogen）を添加して cDNA 溶液とした。ノロウイルスの定量を 10 倍希釈 3 連法による最確数法により行うため cDNA 溶液を段階希釈し、各希釈液 5µL をリアルタイム PCR に供した。リアルタイム PCR に用いたプライマー・プローブ及び反応条件等は厚生労働省医薬食品局食品安全部による「ノロウイルスの検出法」（厚生労働省、2007）に記載された方法に準じ、ノロウイルスの遺伝子型 GI と GII ごとに 50 サイクル増幅させ陽性/陰性を判断して MPN 値を求めた。求めた MPN 値にこれまでの濃縮倍率の逆数を乗じ実験水中のゲノム量からノロウイルス濃度を算出した。

③ 除去率の算出

除去率は、対数除去率として算出した。また、処理水中のノロウイルス濃度が不検出となった場合は、処理水の検出下限値を処理濃度と仮定して除去率を算出し、「＞対数除去率」とした。

（３） 結果

調査結果を表-Ⅲ4. 3. 4. 2に示す。12～2月の感染性胃腸炎の流行期における流入水中のノロウイルス濃度は10^4～10^7 MPN-copies/Lのばらつきがあったものの、膜ろ過水中のノロウイルスは検出限界以下であった（33～36 MPN-copies/L未満）。各処理場における除去率の最大値は、A,C処理場がノロウイルスGIIで5.9 log以上、F処理場が5.3 log以上、E,G処理場が5.2 log以上、D処理場が5.1 log以上、B処理場が4.6 log以上であった。

表-Ⅲ4.3.4.2　MBRのノロウイルスの除去効果

濃度単位：MPN-copies/L、対数除去率：log

A処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/4	1.4×10^{4}	2.6×10^{5}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.7×10^{1}	>2.6	>3.9
2011/1/7	5.4×10^{5}	2.7×10^{7}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>4.2	>5.9
2011/2/4	1.3×10^{6}	5.1×10^{5}	1.6×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>4.6	>4.2

B処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/21	2.2×10^{3}	1.4×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>1.8	>4.6
2011/1/18	8.9×10^{3}	8.9×10^{5}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>2.4	>4.4
2011/2/4	5.6×10^{3}	4.5×10^{4}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.8×10^{1}	>2.2	>3.1

C処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/21	2.7×10^{5}	2.7×10^{6}	1.9×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>3.9	>4.9
2011/1/12	1.3×10^{6}	2.7×10^{7}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>4.6	>5.9
2011/2/2	1.4×10^{6}	9.2×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>4.6	>5.4

D処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/10	ND	2.4×10^{4}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.4×10^{1}	—	>2.8
2011/1/12	2.5×10^{4}	4.4×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	>2.8	>5.1
2011/1/31	ND	ND	1.8×10^{3}	ND	ND	3.6×10^{1}	—	—

E処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/20	ND	2.5×10^{5}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.4×10^{1}	—	>3.9
2011/1/17	1.4×10^{5}	1.4×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.4×10^{1}	>3.6	>4.6
2011/2/7	1.5×10^{5}	5.6×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>3.6	>5.2

F処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/20	ND	1.3×10^{4}	1.6×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	—	>2.6
2011/1/24	5.7×10^{3}	5.7×10^{4}	1.6×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>2.2	>3.2
2011/2/4	2.2×10^{3}	6.7×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.5×10^{1}	>1.8	>5.3

G処理場

採水日	流入水			処理水			対数除去率	
	GI	GII	検出下限	GI	GII	検出下限	GI	GII
2010/12/15	2.4×10^{5}	5.2×10^{6}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>3.9	>5.2
2011/1/19	7.0×10^{5}	4.4×10^{6}	1.7×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>4.3	>5.1
2011/2/9	2.6×10^{5}	2.6×10^{6}	1.8×10^{3}	ND	ND	3.3×10^{1}	>3.9	>4.9

３．５　膜処理を用いた再生水システムによる環境負荷の評価

（１） 目的

独立行政法人科学技術振興機構の CREST（戦略的創造研究推進事業）の領域研究「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において、課題名「21 世紀型都市水循環系の構築のための水再生技術の開発と評価」の下で京都大学と共同研究を実施しており、国総研では「新しい循環型水利用システムのエネルギー評価」を担っている。ここで、「新しい循環型水利用システム」とは、水需要の高い

都市域に位置する下水処理場やサテライト処理施設を新たな水源と考え、再生水をトイレ洗浄水や散水用水などの非飲用用途に再利用することによって、水輸送に係るエネルギーを削減し、流域全体の水利用に係るエネルギー消費の削減を図るシステムである。

本節では、国総研が担っている研究内容として、膜処理を用いた再生水システムの導入による電力消費量・ライフサイクル CO_2（LC-CO_2）削減効果を評価するとともに、LC-CO_2 と処理水質の関係を評価することとした。

（２） 再生水システムによる電力消費量・LC-CO_2 削減効果

再生水は水洗トイレ用水利用や修景用水利用等、都市域で利用されている地域が多数ある。ここでは、沖縄県内で、下水処理水をさらに高度に処理した水を再生水利用するシナリオを設定し、図-Ⅲ4.3.5.1 に示す X 地区で 4000m³/日、Y 地区 1000m³/日の再生水が利用されるものとした。再生水の処理フローについては、CREST 研究において開発中である、「UF 膜処理＋UV 消毒」、「UF 膜処理＋ナノろ過膜(NF 膜)処理」、「UF 膜処理＋逆浸透膜(RO 膜)処理」の 3 つの処理フローを設定し、従来型フローとして、実施設での実績がある「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」の処理フローを比較対象として設定した。電力消費量は、構成する機器の電力消費量を積み上げて計算した。また、LC-CO_2 は、平成 22 年度に検討した国総研の計算手法（国土交通省国土技術政策総合研究所、2011）に基づき、再生水施設の建設、維持管理及び廃棄に係る LC-CO_2 を算定した。電力に係る CO_2 原単位は、平成 21 年度の沖縄電力の値である 0.931kg-CO_2/kWh（沖縄電力、2012）を適用した。

また、再生水の送水ポンプ及び送水管に係る LC-CO_2 は、「持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究（e-Pipe）報告書」（(財）水道技術研究センター、2011）に記載されている手法に基づき算定した。

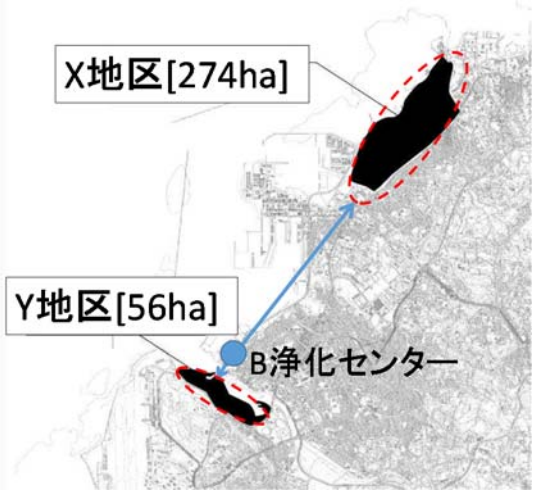


図-Ⅲ4.3.5.1　再生水の都市用水利用地域

図-Ⅲ4.3.5.1 の地域における再生水の都市利用における消費電力原単位の試算結果を図-Ⅲ4.3.5.2 に示す。

オゾン処理において多くの電力を消費する試算結果となり、そのため、開発中の 3 つの膜処理フローについては、いずれも「生物膜ろ過処理＋オゾン処理」のフローよりも消費電力原単位が小さくなった。また、この 3 つのフローの間でも、消費電力原単位には大きな差が生じ、低分子量の物質を除去できる高度な膜処理を含むフローほど、消費電力原単位が大きくなる結果となった。このため、膜処理を含む処理フローについては、利用用途に応じて適切なフローを選定する必要があると考えられる。

また、この都市利用シナリオについては、再生水の送水ルートにおける最も標高が高い地点が29mと比較的低いため、再生水処理施設に係る電力消費量と比較して、再生水送水ポンプに係る電力消費量は相対的に低い結果となった。このように、再生水利用においては、地域の標高差が、再生水供給に係る電力消費量に大きな影響を与えることがわかった。

また、モデルとしている図-Ⅲ4.3.5.1のX地区、Y地区が存在するC市、D市の水道供給に係る消費電力原単位を、平成21年度水道統計（(社）日本水道協会、2011）のデータを用いて算定し、開発中の3つの膜処理フローの数値と比較した。その結果、いずれのフローも、この地域の水道供給に係る消費電力原単位よりも小さくなり、電力消費量の観点では、高度な膜処理を用いた再生水供給であっても、水道供給よりも効率的であることが分かった。しかし、当該地域は、水道供給に係る電力消費量が比較的大きく、地域によって、再生水と水道供給に係る電力消費量の比較結果は大きく変わりうる旨、留意が必要である。

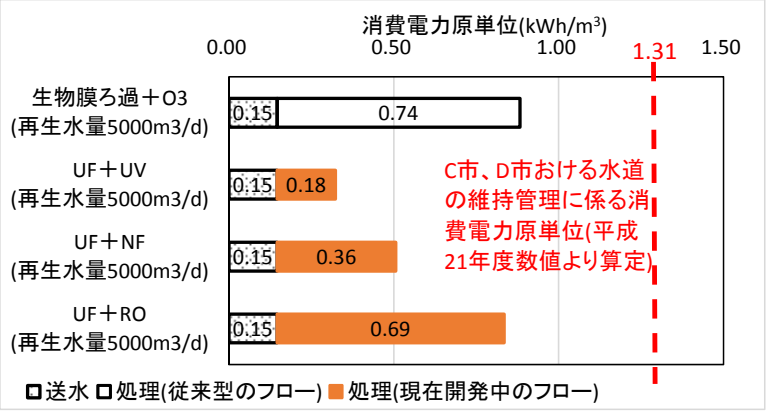


図-Ⅲ4.3.5.2　再生水の都市用水利用における電力消費量の比較

図-Ⅲ4.3.5.1の地域における再生水の都市利用における$LC\text{-}CO_2$の試算結果を図-Ⅲ4.3.5.3に示す。なお、都市利用における再生水送水に係る$LC\text{-}CO_2$の算定については、送水ポンプや送水管だけでなく、再生水利用地区における再生水の配水管の建設に係る$LC\text{-}CO_2$も算定した。配水管の延長については、下水道管の配管密度の経験値を踏まえ、150m/haと設定して、$LC\text{-}CO_2$を計算した。図-Ⅲ4.3.5.3に示す$LC\text{-}CO_2$の計算結果は、図-Ⅲ4.3.5.2に示す消費電力原単位の傾向と同様であり、これは、いずれの処理フローも、$LC\text{-}CO_2$の数値の大半は電力消費量によるものであるためと考えられる。

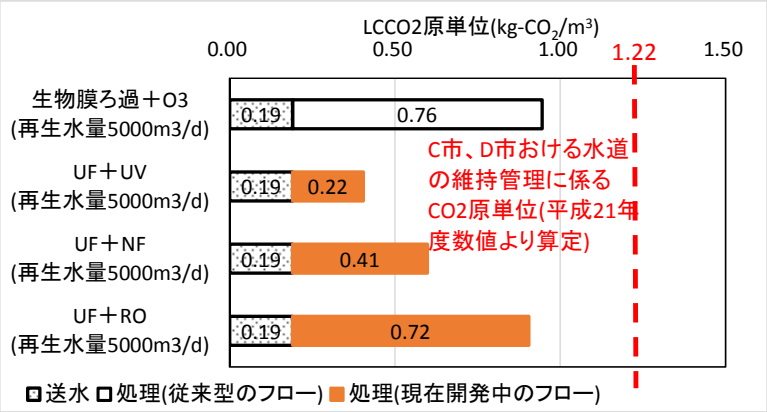


図-Ⅲ4.3.5.3　再生水の都市用水利用における $LC\text{-}CO_2$ の比較

（３） 再生水システムのエネルギー消費量と処理水質の比較検討

再生水システムについて、電力消費量や LC-CO_2 を比較するだけでなく、全有機炭素(TOC)等の水質についても比較検討を行った。なお、浮遊物質(SS)や濁度については、全ての再生水システムで、再生水中において低い値を示し、膜処理フローについては全てのシステムで検出限界を下回っていた。

従来型のフローである「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」と、CREST 研究において開発中のフローである「UF 膜処理＋UV 消毒」、「UF 膜処理＋NF 膜処理」、「UF 膜処理＋RO 膜処理」について、LC-CO_2 と再生水の水質項目値の比較を行った。なお、「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」については既存の再生水処理施設の公表データから引用し、「UF 膜処理＋UV 消毒」、「UF 膜処理＋NF 膜処理」、「UF 膜処理＋RO 膜処理」については、CREST 研究において稼働している実験プラントの再生水水質の実測値から引用した。

図-Ⅲ4.3.5.4 に、再生水の都市用水利用シナリオにおける、LC-CO_2 と再生水の TOC 濃度の相関を示す。「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」と「UF 膜処理＋UV 消毒」については、ともに再生水の TOC 濃度が約 6mg/L であったが、LC-CO_2 は「UF 膜処理＋UV 消毒」の方が大幅に小さいため、「UF 膜処理＋UV 消毒」の方が省エネルギーで高度な処理が出来ると考えられる。また、「UF 膜処理＋NF 膜処理」、「UF 膜処理＋RO 膜処理」については、再生水の TOC 濃度がそれぞれ 0.7mg/L、0.1mg/L であり、「UF 膜処理＋UV 消毒」よりもエネルギーを消費するが、「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」と比べれば、少ないエネルギー消費で、より高度な処理が可能であると言える。

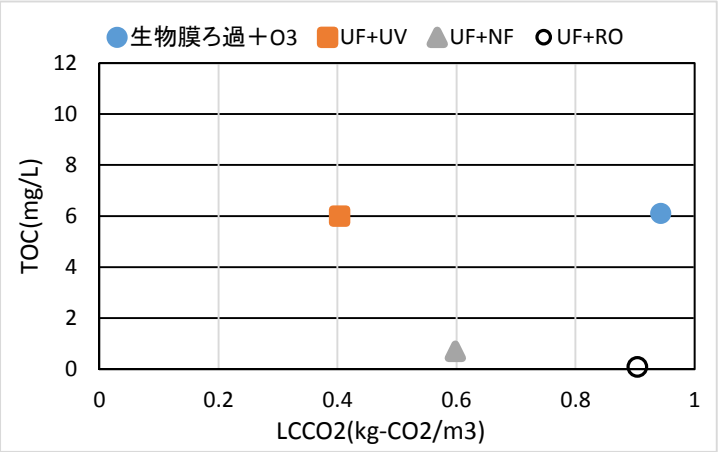


図-Ⅲ4.3.5.4　再生水の都市用水利用における LC-CO_2 と TOC の相関

その一方で、図-Ⅲ4.3.5.5 に示す通り、「UF 膜処理＋UV 消毒」による再生水が最も高い色度を示し、「生物ろ過膜処理＋オゾン処理」は、オゾンによる色度除去効果のため「UF 膜処理＋NF 膜処理」と同等の再生水の色度を示した。このように、水質項目値によって、LC-CO_2 と水質項目値の相関の傾向が異なっている。また、「UF 膜処理＋RO 膜処理」による再生水の色度は 0 度であり、LC-CO_2 は比較的高いものの、かなり高度な処理を行っていることが示された。

その他、再生水の BOD 濃度については、いずれのフローにおいても 0.5～1.2mg/L の範囲であり、大きな差は見られなかった。また、再生水中の大腸菌数については、いずれのフローにおいても検出限界以下であり、大腸菌数の観点では衛生学的に問題のない結果が示された。

また、「UF 膜処理＋NF 膜処理」については、リン除去率が 85%と高い値を示したが、アンモニウムイオン濃度が高い原水を対象とした窒素除去率については、10%と低い値であった。「UF 膜処理＋RO

膜処理」については、窒素、リンの除去率がそれぞれ 92%、100%とかなり高い値を示し、栄養塩除去にも対応できることが示された。しかし、再生水の利用用途によっては、ここまでの高度な処理を要求しないものもあるため、利用用途に応じた処理フローの採用が必要と考えられる。

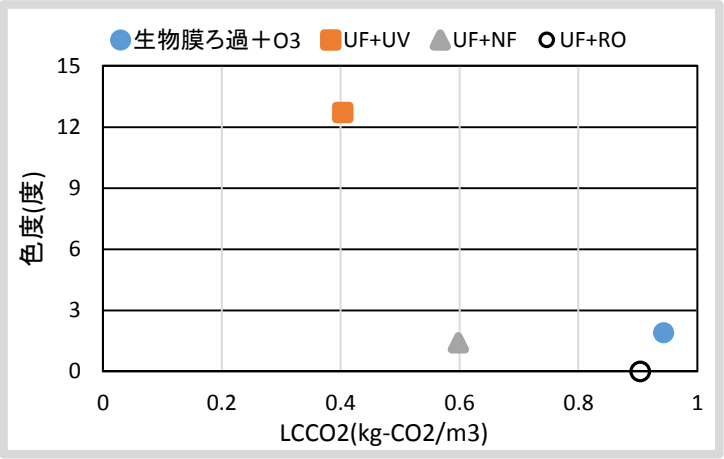


図-Ⅲ4.3.5.5　再生水の都市用水利用における LC-CO_2 と色度の相関

３．６　結論

日本国内では、生活用水のほとんどが排水として下水道を経由しているが、水資源確保代替策としての下水処理水の利用は極めて低水準にとどまっている。その一方で、下水中の大腸菌等の細菌を確実に除去し、ウイルスや微少な物質についても低減効果が期待できる膜処理技術について、低コスト、エネルギー使用量の削減等、様々な観点からの研究や技術開発が進められており、都市域における水資源確保代替策としての再生水利用の可能性は今後一層高まってくるものと想定される。

膜処理技術の一つであるMBR処理施設を対象に、ノロウイルスの除去率について調査を行った結果、ノロウイルスの除去率は最大で5.9logを確認することができ、処理水中のノロウイルス濃度は全て33～36MPN-copies/L未満となり、MBRによる下水処理水の安全性が確認された。

また、水資源に乏しい沖縄県において、膜処理を用いた再生水の都市用水利用シナリオを設定し、膜処理による電力消費量・LC-CO_2を評価した結果、従来型の再生処理フローや水道供給よりも効率的であることが分かった。ただし、地域の標高差が、再生水供給に係る電力消費量に大きな影響を与えるため、シナリオの設定により効果は大きく変わることに留意する必要がある。

参考文献：

沖縄電力(株)(2012) ホームページ
http://www.okiden.co.jp/environment/report2012/sec11/sec114.htm#tbl10
厚生労働省（2007）ノロウイルスの検出方法について、食安監発第1105001号（最終改正食安監発第0514004号）
国土交通省（2010）下水道におけるウイルス対策に関する調査委員会報告書
国土交通省国土技術政策総合研究所（2011）平成22年度下水道関係調査研究年次報告書集、国土技術政策総合研究所資料No.654、pp.77-82
国土交通省水管理・国土保全局水資源部（2014）平成26年版日本の水資源について

(財)水道技術研究センター（2011）持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究（e-Pipe）報告書
(社)日本下水道協会（2016）平成26年度版下水道統計　第71号　p.98
(社)日本水道協会（2011）平成21年度水道統計　施設・業務編　第92-1号
有限責任中間法人膜分離技術振興協会・膜浄水委員会監修、浄水膜(第2版)編集委員会編集（2008）浄水膜（第2版)、技報堂出版
Katayama, H., Haramoto, E., Oguma, K., Yamashita, H., Tajima, A., Nakajima, H. and Ohgaki, S. (2008) One-year monthly quantitative survey of noroviruses, enteroviruses, and adenoviruses in wastewater collected from six plants in Japan, Water Research, vol.42 pp.1441-1448