

# 乾燥地域における水循環システムの構築 —オマーン国アルアメリットにおける検討—

環境計画研究室 宮尾徹

## 1.はじめに

IPCC 第4次評価報告書によると、20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇は温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が高く、それによる気候変動によって多くの半乾燥地域で水資源が減少すると予想している。そのため、今後水不足に直面する地域は拡大すると考えられる。乾燥地域とは一般的に、降水量が少なく蒸発散量が大きい陸地に水がほとんど存在しない地域である。世界の人口の34.7%が乾燥地域に居住しており、水源を海水淡水化や地下水に依存している。しかし、多くの乾燥地域は発展途上国であり、今後人口増加に伴う水消費量の増大から水不足に直面する人口が増加する懸念がある。そのため、地域の状況や今後の地球温暖化による気候変動に対応するために様々な地域で持続的な水循環システムが求められ、その必要性は今後拡大していくと予想される。

そこで本研究では、乾燥地における持続的な水循環システムの構築を目標として、オマーン国アルアメリットを対象に下水処理水の活用もしくは処分方法を検討する。アルアメリットは地下水保護区域のため下水処理水の放流が禁止されているが、人口増加に対応するため新たに下水処理場(STP)を建設する計画が進められている。そのため下水処理水の行き先を確保し、放流以外の選択肢を見出す必要がある。そこで各種のシステム案についてコストを算出し、最適なシステムを検討する。

## 2.オマーン国アルアメリットについて

オマーン国はアラビア半島の東側に位置し、年間降水量71mm、年間蒸発量2,387mmの極乾燥地域である。表流水は存在せず、水源は海水淡水化か地下水に依存している。アルアメリットは首都マスカットの内陸部に位置し、アルアメリット地区とアルハジル地区が隣接している。位置を図1に示す。このアルアメリットは新興都市として開発が進められており、人口が36,000人(2003)から250,000人(2045)に増加することが見込まれるが、それに伴って下水も増加することが予想される。この下水を処理するために新たな下水処理場が建設される。しかし、アルアメリットは地下水の保護区域に指定されているため下水処理水を放流出来ない。そのため下水処理水を放流する以外に新たな選択肢が必要である。

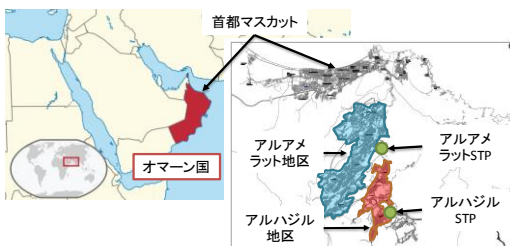


図1 オマーン国とアルアメリットの位置

## 3.下水処理水の活用もしくは処分方法の検討

### (1) 下水処理水の活用

下水処理水の活用として「下水の再生利用」(ケース1)について考察する。再生水は下水処理水に高度処理を施すためコストが高い。しかし、水不足の地域では上水の生産コストも高いため再生水がコスト面で優位となる可能性がある。再生水の利用方法はアルアメリットの地域特性を考慮して定性的に評価し、決定した。その結果アルアメリットにおける再生水の需要が存在し、効果も見込まれるという理由から、緑地への散水、農業、コンポスト加湿、修景用水としての湖の4つの利用方法が実現可能であるとする。これらを組み合わせた下水処理水の再生利用のコストを算出する。しかし、緑地の必要水量は季節によって変動するため、夏季以外では再生水の余剰が生じてしまう。これは地下水保護区域内での放流が禁止されている。よって、この余剰水を水源とする修景利用の湖を建設し、余剰水の行き先を確保する。

### (2) 下水処理水の処分

下水処理水の再生利用は必要施設が多いためコストが高くなる可能性がある。よって、このコストを避けつつ地下水を保護することが出来る下水処理水の処分方法として、「海への全量放流」(ケース2)、「地下水保護区域内(系内)で全量蒸発処分」(ケース3)、「地下水保護区域外(系外)へ全量送水」(ケース4)の3つの方法を考える。ケース2は海までの送水管を建設し、下水処理水を随時送水する。ケース3は大規模なため池を建設して多大な蒸発散量を利用して全量蒸発処理する。ケース4は系外の緑地等へ再生水を送水する方法である。

表1に各ケースの概要と特徴、必要な施設をまとめる。この各ケースの必要施設のコストを算出する。対象期間は下水処理場が稼働する2015年から人口増加の終息が見込まれる2045年までの31年間とする。

表1 各ケースの概要と必要施設

ケース	下水処理水を活用		下水処理水を処分・処理	
	ケース1 再生利用	ケース2 海へ全量放流	ケース3 系内で全量蒸発 処分用のため池を造り、 全量蒸発処分する	ケース4 系外へ全量送水
概要	下水処理水を散水と修景用水として再生利用する	STPから海まで直接送水し、全量放流する	処分用のため池を造り、全量蒸発処分する	系外へ送水し、そこで再生水として利用する
模式図				
長所	再生水の散水利用により緑地に使用する上水を削減できる			
短所	高度処理が必要 散水施設と余剰水放流先の建設が必要		再生水散水施設が必要 高度処理が必要ないため建設費と維持管理費が抑えられる	再生水散水施設や長距離の送水管が必要 送水管がケース2より短くなる
緑地への上水	○	○(>ケース1)	○(>ケース1)	○(>ケース1)
高度処理	○			
散水施設	○			
修景利用の湖	○			
必要施設	海までの送水管 蒸発用のため池 ため池への送水施設 系外への送水施設			
		維持管理		
	○(>ケース2)	○	○(>ケース2)	○(>ケース2)

#### 4.コストの計算

##### (1) ケース 1「再生利用」

修景利用の湖を各 STP 付近に建設する。蒸発によって干上がってしまうのを防ぐため 3 もしくは 6 個に分割して段階的に建設する場合も検討する。深さは 3,5,7m の 3 通りを比較する。表 2 に場合分けのシナリオを示す。再生水が溢れない程度の湖の大きさを計算した結果、分割数 1 個では 20 年以上、分割数 3 個では 5 年以上湖が夏季に干上がってしまった。分割数 6 個では干上がらなかつたため、その中で最もコストの低かつたシナリオ 1 を採用した。湖の大きさとコストはアルアメラット STP が 1 辺 450m, アルハジル STP が 1 辺 240m であり総コストは 14,345 百万円となつた。

再生水は 2045 年に 37,613 m<sup>3</sup>/日が緑地への散水に利用される。本研究ではこの散水量に見合う緑地が既に存在していると想定する。その場合、再生水は人口増加に伴って増加するため、再生水でまかないきれない緑地には上水で補完する。その推移を図 2 に、上水のコストを表 3 に示す。

表 2 湖のシナリオ

評価シナリオ	湖の分割数	深さ(m)
シナリオ1	6	3
シナリオ2	6	5
シナリオ3	6	7
シナリオ4	3	3
シナリオ5	3	5
シナリオ6	3	7
シナリオ7	1	3
シナリオ8	1	5
シナリオ9	1	7

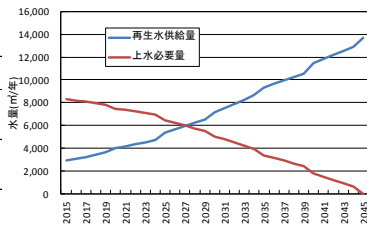


図 2 再生水の推移

表 3 上水のコスト

散水を上水で補完する量(m <sup>3</sup> )	上水の単価(円/m <sup>3</sup> )	補完する上水のコスト(百万円)
148,853,890	150	22,328

##### (2) ケース 2「海へ全量送水」

アルハジル STP からアルアメラット STP を経由して海まで至る距離 36.1km に送水管を建設する。送水管の本数を 1 本もしくは 2 本建設した場合で比較した。また、流速は 0.6m/秒以上で損失水頭が小さくなるように管径を設定した。結果を表 5 に示す。表 4 より本数 1 本の場合のコストが低かつた。よって送水管のコストは 1,633 百万円となつた。

表 4 海への送水管のコスト

区間	アルハジルSTP ~アルアメラットSTP		アルアメラットSTP ~放流地点	
	1	2	1	2
本数				
管の建設距離(m)	15,000	30,000	21,100	42,200
直径(mm)	409.2	290.6	700	600
損失水頭(m)	31.4	46.1	35.7	21.0
管の建設単価(円/m)	40,868	24,943	48,342	32,417
管のコスト(百万円)	613	748	1,020	1,368

再生水を散水利用しなかつた場合、緑地に散水する水は全て上水を使用する。上水使用量は 2045 年の再生水供給量に植物の需要水の季節変動を考慮して算出した。結果を表 5 に示す。

表 5 海への送水管のコスト

散水に必要な水量(m <sup>3</sup> )	上水の単価(円/m <sup>3</sup> )	補完する上水のコスト(百万円)
326,282,619	150	48,942

##### (3) ケース 3「系内で全量蒸発」

ため池の建設方法はケース 1 の湖と同様であるが、処分用のため池なので干上がっても問題としない。そのため、計算結果は分割せずに大きなため池を一つ建設して蒸発させる場合のコストが低かつた。また、ため池から水があふれ出す危険性やシートで覆われた池底から水がしみ出す恐れもあるため、高度処理を施した水を放流する。この高度処理に関するコストはケース 1 と同様である。また、緑地への上水に関してはケース 2 と同様である。このように系内で全量蒸発するために必要なコストを算出した結果、総コストは 103,863 百万円となつた。

##### (4) ケース 4「系外へ全量送水」

アルハジル STP からアルアメラット STP を経由してアルアメラットの北部に位置するワディ・アディへ至る約 21km の距離に送水管を建設する。計算方法はケース 2 と同様な方法で行つた。その結果、本数は 1 本の場合のコストが低かつた。高度処理に関してはケース 1 と同様である。また、緑地への上水に関してはケース 2 と同様である。

#### 5.結果および考察

コストの算出結果をまとめたものを表 6 に示す。表 6 よりケース 1 のコストが最も低かつた。他のケースのコストはケース 1 と比較してケース 2 は 1.02 倍、ケース 3 は 2.07 倍、ケース 4 は 1.29 倍のコストが必要であることが分かつた。また、各ケースのコストの内訳において、緑地への上水の費用が半分以上を占めていた。上水は散水に継続して使用されるため、毎日の使用量の差が結果を大きく左右したと考えられる。ケース 1 は再生水を上水の代替水源として使用したことで、上水のコストを大きく削減することが出来て、コストが低かつたと考えられる。

表 6 各ケースのコスト

ケース	下水処理水を活用	下水処理水を処分・処理			
	ケース1 再生利用	ケース2 海へ全量 放流	ケース3 系内で全 量蒸発	ケース4 系外へ全 量送水	
緑地への上水	22,328	48,942	48,942	48,942	
高度処理施設	12,275		12,275	12,275	
散水施設	2,626				
必要コスト(百万円)	11,671	2,240			
修景利用の湖					
海までの送水施設		2,240			
蒸発用のため池			41,200		
ため池への送水施設			242		
系外への送水施設				2,197	
維持管理	1,319	191	1,204	1,206	
計(百万円)	50,219	51,373	103,863	64,620	

#### 6.まとめ

アルアメラットにおける下水処理水の活用もしくは処分方法を検討した結果、再生水としての利用がコスト面でもっとも優れていることが明らかとなつた。主なコストは緑地への上水であり、これを削減することが総コストに大きく影響することが言える。これはアルアメラットが海水淡水化に依存しているため上水生産コストが高いことが理由として考えられる。このように上水の再生コストが高い水不足の地域においても、再生水の利用は効果的であることが言える。