

中東オマーンにおける石油随伴水からの新規水資源の創出 ～石油随伴水で砂漠を緑に～

清水建設株式会社

1. はじめに

清水建設株式会社は湾岸戦争によるオイルレイクの処理などの環境修復事業を切掛に、これまで20年以上に渡り、中東諸国と協力して環境問題の改善に取り組んできました。

特にオマーン国との繋がり長く、現地の王立大学にスタッフを常駐させて、石油随伴水、地盤汚染、油井廃棄物などの環境問題を解決すべく、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) や一般財団法人 JCCP国際石油・ガス協力機関の協力のもと、現地大学や関連省庁と連携して技術開発を行っています。

本プロジェクトもその成果のうちの一つで、産油国最大の廃棄物と言われている石油随伴水を効果的且つ経済的に浄化し、さらにその処理水を新たな水資源として活用することにより、当該国の産業振興に寄与することを目的としています。

2. 開発の背景と狙い

石油随伴水は原油とともに汲上げられる地下水を指します (図-1参照)。一般に石油随伴水は原油掘削量の3～6倍量であり、油田が古いほど水量は多くなってきます。オマーンにおいては特に多く、原油1に対して随伴水量が6～10倍となるサイトも存在しています。石油随伴水の中には非常に除去しにくい形態の油分などが含まれており、産油国共通の最大量の廃棄物となっています。

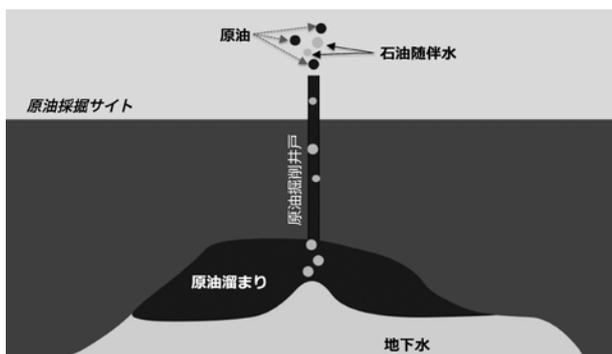


図-1. 石油随伴水概念図

この石油随伴水は、オマーンでは比重差を用いた簡易な処理 (スキミングやCPI等) が施され、ほとんど全てが膨大なエネルギーをかけて地下1,000～1,500mへ返送しているのが現状です。また、返送のエネルギー消費のみならず、返送途中の地下水汚染問題も顕著化してきています。

一方、オマーンを含む中東の産油国では地下水の枯渇、塩害被害等が大きな問題となっています。そのためこの随伴水を新たな水資源として利用できれば、水不足という大きな環境問題を併せて解決することができ、これまで利用できなかった広大な砂漠を緑化して、新たな産業振興や街創りも期待できます (図-2参照)。

このような背景のもと、オマーン政府、大学関係者の協力を得て、随伴水による水資源創出に向けて技術開発を進めて参りました。

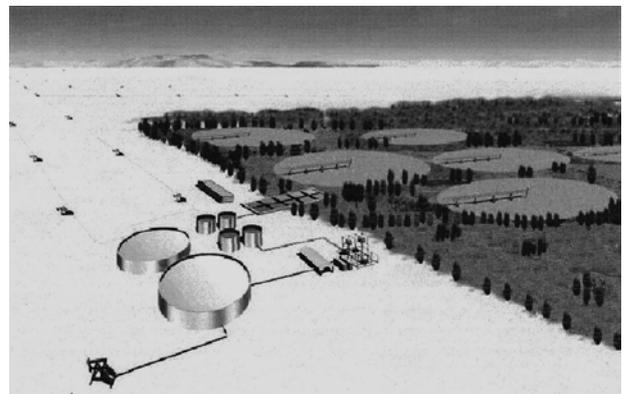


図-2. 油田サイトでの適用イメージ

3. 石油随伴水処理システムの開発

石油随伴水は1850年代後半に初めて油井が作られ採掘されるようになって以来、その処理技術も現在に至るまでに様々な開発がなされて来ました。現在も一次処理に利用されるオイルセパレータ (APIやCPI等) は浮遊油の回収には適していますが、油滴粒子の小さな懸濁油はその原理から除去することは出来ません。5 μ m以上の油滴が分離できるハイドロサイクロンと呼ば

れるサイクロン式の除去装置が開発されましたが、その操作性と稼働電力に問題があります。さらに微細な油分を除去するために採用された膜分離も高濃度油分排水においては膜交換コスト、電力コストが高くなります。

更に石油随伴水はその水量が膨大であるために、一般的な工場廃水の処理技術よりも格段に簡易で低コストの処理技術が要求され、既存技術そのままの適用は困難です。

これら効率やコスト以外にも、中東特有の課題が存在します。中東諸国ではその過酷な気象条件から、熱や砂塵に弱い精密な設備の使用が制限されます。また、プラントの実質運転管理者が近隣諸国からのワーカーであることから技術的能力の制約も生じます。

従って現地の石油会社のニーズは「高度な技術を用いた複雑な装置」よりも、「簡易でかつ汎用性が高く効率の良い処理システム」を求めていました。

私たちはこれらの効率、コスト及び中東特有のニーズに応えられる処理システムの開発を目指し、誰でも運転管理ができる扱いやすいシステムである「マイクロバブルを用いた凝集浮上処理法による水処理システム」を開発いたしました。管理の易しい幾つかの技術を、水質の異なる様々な随伴水に対処できる様に改良した浄化システムとして仕上げました。

処理の基本となるのは凝集浮上分離ですが、従来の制御や管理の難しい加圧タンクを持つ装置ではなく、誰にでも容易に運転/管理ができ、微細な油分粒子や有害重金属なども効率よく除去できるマイクロバブル技術を活用しました。さらに必要に応じろ過処理、吸着処理、脱塩処理等の高次処理工程を組み込むことにより種々の要求水質に対応（地下返送、海洋投棄、中水利用、灌漑利用等の各レベル）させることを可能といたしました。

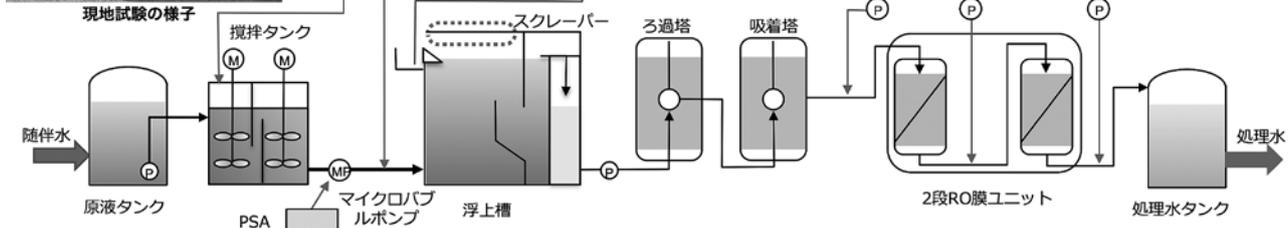


図-3. パイロットプラントのフロー

開発したシステムは、50m³/日規模のパイロットプラントとして作製し、実際の石油施設に持込み、厳しい環境条件下で連続処理実証試験を行い、確実な処理能力を確認しております（図-3参照）。

さらに本システムは、随伴水水質に応じて基本フローに、「有害重金属除去装置」、「硫黄化合物除去用の曝気機構」、「石油増進回収法で使用される増粘剤対策用の凝集剤選択」、「高濃度油分対策としての浮上速度調整」等、大きな変更を加えることなく、その場で水質の異なる多様な随伴水を効果的に処理できることを示しました。処理後の処理水からは再利用基準の基準値を超える油分等が検出されないことも確認しており（図-4参照）、処理水の再利用先に応じたシステムを構築することが可能です。

	再利用水の灌漑用基準*		飲料水基準	サイトA		サイトB		海水
	A	B		原水	処理水**	原水	処理水**	
油分 mg/L	0.5	0.5	-	14.5	< 1.0	28.9	< 1.0	
濁度 FTU	-	-	1.0	2.4	< 0.1	5.2	< 0.1	
SS mg/L	15	30	-	5.4	< 1.0	5.0	< 1.0	
塩素イオン mg/L	650	650	600	5,240	48	1,740	20	19,350
硫酸イオン mg/L	400	400	400	380	5	111	4	5
ナトリウム mg/L	200	200	400	2,410	252	1,603	174	10,280
マグネシウム mg/L	150	150	150	30.2	23.5	13.2	12.6	1,280
マンガン mg/L	0.1	0.5	0.4	<0.05	<0.05	0.04	0.09	0.00002
ホウ素 mg/L	0.50	2.40	0.50	4.5	0.7	4.4	2.1	4.50
亜鉛 mg/L	1	2	2	2.0	0.4	2.1	0.2	1.3
バリウム mg/L	1	2	1	0.10	0.38			0.015
リチウム mg/L	0.070	0.070	-	0.12	0.01	0.12	0.01	0.18
カルシウム mg/L	5	5	0.2	<0.1	<0.1	< 0.1	0.13	0.00003
銅 mg/L	0.5	1	2	<0.01	<0.01	< 0.01	< 0.01	0.00015
亜鉛 mg/L	5	5	3	<0.01	<0.01	0.04	0.04	0.00035
鉄 mg/L	1	2	1	<0.05	<0.05	0.37	0.47	0.00003
クロム mg/L	0.050	0.050	0.050	<0.02	<0.02	< 0.02	< 0.02	0.00002
カドミウム mg/L	0.01	0.01	0.003	<0.001	<0.001	< 0.01	< 0.01	0.00002
鉛 mg/L	0.100	0.200	0.010	<0.005	<0.005	< 0.005	< 0.005	0.0000027
ヒ素 mg/L	0.100	0.100	0.010	<0.005	0.009	< 0.05	< 0.05	0.00012
セレン mg/L	0.020	0.020	0.010	<0.002	<0.002	< 0.02	< 0.02	0.000155
水銀 mg/L	0.001	0.001	0.001	<0.0005	<0.0005	< 0.005	< 0.0005	0.0000014

*A: 主に生食用野菜、B: 主に加熱用野菜、**■はRO処理後、その他は吸着処理後

図-4. オマーンにおける灌漑用水及び水道水基準と石油随伴水処理水の水質（処理水水質は吸着処理後、■セル項目は吸着処理後ROにて脱塩処理後の数値）

4. 現地特産物由来廃棄物の有効利用

本プロジェクトのスムーズな展開のためには、現地の産業に寄与できるスキームを作ることが重要です。そこで私たちは中東の特産品であるデーツ（ナツメヤ

シ)の廃材に目をつけました。このデーツ材は繊維が非常に太く固いため有効利用が難しく、そのほとんどが廃棄物となっていました。

私たちはこのデーツ材を利用し炭化及び賦活化の検討を行い、既存の活性炭の約2倍の油分吸着性を有する新規活性炭の開発に成功いたしました(図-5参照)。この活性炭は随伴水処理システムの吸着処理工程への活用が可能です。

オマーンではデーツが農作物作付面積の第1位で、年間30万トンの生産量があります。これらデーツの廃材や樹木管理からでる伐採材を利用した高性能活性炭の開発事例は、これまでオマーン国内には無かった活性炭製造の産業化の可能性をも期待されています。

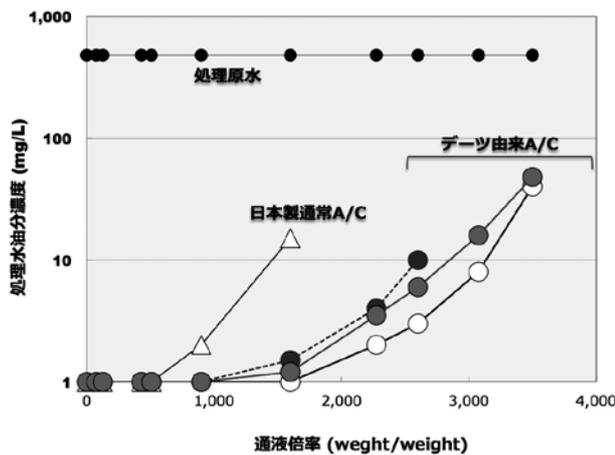


図-5. デーツ廃材からの活性炭の油吸着能

5. 石油随伴水処理水の有効利用

オマーンで農林水産業がGDPに締める割合は僅か1.2%です。しかしオマーン政府は、農業生産量の向上を目指して、2020年までにこの値を3.1%に上げる政策を謳っております(Oman Vision 2020)。

オマーンでは農業用水の90%以上は地下水に依存しています。しかしこの地下水の55%が補充の効かない化石水と考えられており、水資源の枯渇が現実的な問題となっています。そのため政府は現在、枯渇を懸念して新たな井戸の掘削を事実上禁止しています。また飲料水のほとんどは海水淡水化プラントに頼っています。

オマーン生活電力水省の調査によると、このような潜在的な水へのニーズと実際の供給との収支は、今後も慢性的な水不足傾向にあると予測しており、新たな

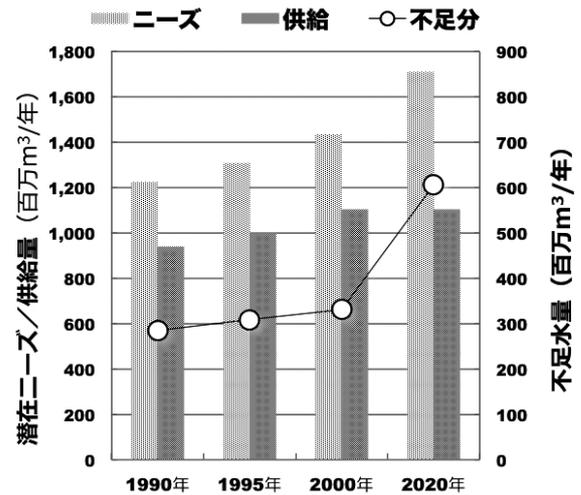


図-6. オマーンにおける水資源のニーズと供給

水資源確保が急がれています(図-6参照)。そのため石油随伴水処理水も新たな水資源として期待されています。水資源が確保され、十分に農業に供給できれば、広大な土地と豊富な太陽光の恩恵を受け、農業大国へ転身も夢ではありません。更に慢性的に余っている労働力の効果的な活用による国自体の活性化をも期待しています。



図-7. 随伴水処理水による灌漑試験の様子

随伴水処理水が本当に新たな水資源として利用できることを実証するために、オマーン農水省の協力を得て、処理水を用いた灌漑実証試験を行いました(図-7参照)。様々な随伴水処理水を灌漑用水として使い、数種類の農作物への影響を検討した結果、良好な生育を確認することができ、新たな農業の産業化の可能性が示されました。

随伴水にはその中に塩分を含む地域もあります。このような灌漑用水としては利用できない塩分濃度の高い随伴水の展開として、昨今注目されているバイオテクノロジー分野の一つである藻類技術の適用を検討しました。

藻類は食品や機能性物質の生産のみではなくバイオ燃料生産も期待されています。私たちはオマーン

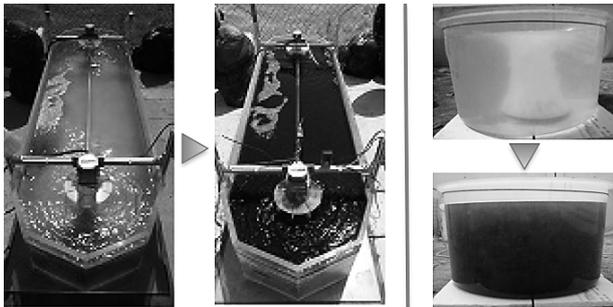


図-8. 随伴水処理水による藻類培養試験の様子
左：1m²レースウェイ試験、右：1m³タンク試験

国環境省の協力を得て、オマーン国内の特徴的地形(サブカ、塩湖、ラグーン等)に生息している藻類の探索を試み、更に現地にて大量培養の可能性を示しました。

中東は気温、日射量そして広大な土地という藻類培養に非常に有利な地域です。現地での培養試験でも、加温等の装置を付設することなく、屋外で容易に大量培養を行うことを示しました(図-8参照)。

私たちのラフな試算では、400m³/日の石油随伴水処理水を利用して有用な藻類の培養を行った場合、飼料用では1,000万円/年程度、食品用なら数億円/年の売上げが期待できます。また化粧品用物質が生産されればその何十倍になる可能性もあります。

藻類生産は、世界的注目を集めている技術でもあり、オマーンでも関心が高く、本開発プロジェクトでの取組みは地元報道機関により取り上げられました(図-9参照)。

Oilfield water to grow microalgae



RESearchers in Oman have been investigating the utilisation of oilfield produced water for cultivation of microalgae as part of the joint technical co-operation project for treatment and utilisation of oilfield produced water in Oman. The research team consists of scientists from Sultan Qaboos University (SQU), Petroleum Development Oman (PDO) and three research institutions in Japan.

Saline wastewater associated with oil production is produced in great quantities in the oilfields of Oman. This water is known in the industry as produced water and roughly half of it is re-used in the oil production process. However, the remaining water is disposed deep underground. If this disposed water is properly treated it can be utilised for beneficial uses such as microalgae cultivation. Microalgae can be cultivated for a variety of purposes such as medicine, products, cosmetics, food, fibre, feed, fertiliser, fuel. Different strains of algae grow in different conditions such as salinities, temperatures. The objective of the microalgae work is to identify suitable microalgae that can be cultivated with produced water in the oilfield environment.



ment Team, said that PDO is now reconsidering produced water as an asset rather than as a waste, and has been looking for new, beneficial ways to utilise produced water that is currently disposed.

"Considering that microalgae cultivation requires sunlight, warm temperatures, and space, in addition to water, the oilfields of Oman represent an ideal location for such cultivation. As such, microalgae cultivation is a utilisation option in which we have great interest."

Dr Rashid al Mamari, Project Leader of the SQU-JCCP Study, revealed that over the past three years they have collected 36 microalgae samples from 12 different locations in Oman, and have been testing samples in the lab and have started large-scale tests outdoors. "Roughly 200 different combinations of algae samples with varying water salinities, temperatures, and CO₂ levels were tested in multiple enrichment cycles. Following identification of the different strains of algae, 10 have been selected for isolation and further investigation till date. The ranges and optimum levels of temperature and salinity for growth of these 10 strains have been determined, and 19 liter samples of 4 strains have been pre-cultured outdoors at SQU. Outdoor mass culturing of 700 liter samples of 2 strains is ongoing. Growth has also been checked in the lab for the 10 strains with actual produced water from 3 different oilfields. The next step is to utilise actual produced water for 700 litre tests. At the same time, samples are being analysed to check possible end uses for cultivated microalgae. A lot of work has been completed to this point, and we hope to identify suitable microalgae soon," Dr Rashid added.

INTERVIEW

SPOTLIGHT

図-9. 随伴水 処理水を利用した藻類培養を報道したオマーンの新聞記事

6. 経済性の評価

開発した技術を実際に運用するには、経済的に優位なスキームであることを示す必要があります。

石油随伴水を10万m³/日以上排出する油田サイトAの処理状況をヒアリングした結果、開発した石油随伴水処理システムでは、システムの基本となる凝集浮上処理までの水質でも、現状と同レベルもしくはそれよりも優れていることが判りました。更にこのレベルまでの処理ランニングコストも優っており、低コストで高効率な処理が可能であることが示されました(図-10参照)。

主な油井サイトの処理コストとの比較

油井地区

Aサイト	10円/m ³
Bサイト	25円/m ³
Cサイト	12円/m ³

開発技術(Aサイト試算)

(図-3中の吸着処理まで) 8円/m³

Aサイトでの灌漑利用造水コスト

		基本処理	高度処置	Total
電力	kWh/day	800	2,727	3,527
	kWh/m ³	0.40	1.36	1.76
	円/m ³	2.4	8.16	10.56
薬品費等	円/day	11,520	11,423	22,943
	円/m ³	5.76	5.71	11.47
Total		8.16	13.87	22.03

図-10. 随伴水処理水処理コストの試算

上：各サイトの地下返送のための処理コストと、開発技術による吸着処理までの処理コスト試算。現状の水質レベルでは凝集浮上処理と同等であり、吸着処理を行うと格段に良い水質となる(図-4参照)。

下：基本処理は吸着処理までのコスト。高度処理は吸着処理後にROによる脱塩処理を実施。

次にこの処理システムを現状のサイトで適用し、更に処理水を農業(灌漑)利用した場合の試算も行いました。しかしいきなり全ての現状の処理施設を本システムに移行することは現実的ではないため、段階的な移行を前提として、石油随伴水10万m³/日のうちの1万m³だけを開発したシステムでRO処理まで行い、その処理水を灌漑利用(農産物(トマト)生産)する試算を行いました。

その結果、農業収入が処理コストを大きく上回り事業が成立することが試算され、さらに石油随伴水処理水を水資源として利用することで、地下返送コストが削減されるため、石油随伴水処理コスト全体としての約2割削減が可能であることを示しました(図-11参照)。

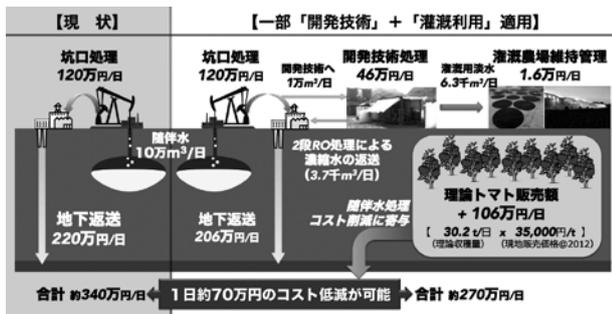


図-11. 提案技術を適用した場合の処理コスト削減効果

7. プロジェクトの社会的評価

本プロジェクトのキーは水処理技術そのものだけではなく、処理より得られる水資源の確保を提案したことです。これまで「廃棄物」であり「戻す、捨てる」ための処理を行っていた石油随伴水を、農業生産や藻類培養への利用性を実証し、新たな産業創出の可能性をも提案してきました。これを機にオマーンでは、本プロジェクトに協力頂いたオマーン政府関係者や大学関係者が中心となり、「水資源確保」「農業促進」「雇用促進」を目的とした石油随伴水処理/利用についての政府での取組みを議論する委員会が立ち上がり、本格的な検討に入っています。



図-12. プロジェクトオープニングセレモニーの主な参加者：①Dr. Al-Bemaniスルタンカブース大学学長、②森元在オマーン特命全権大使、③Dr. Al-Rumhy石油・ガス省大臣、④Mr. Raul (オマーン石油開発社社長)、⑤吉田 (一財) 国際石油交流センター常務理事 (全て開催当時の機関名及び役職名)

随伴水を新たな水資源として、そこから農業や藻類事業を展開し、オマーン国の産業振興に寄与する本スキームは、このプロジェクトのオープニングセレモニーに石油ガス大臣はじめ多くの要人が出席されるなど、オマーン国内での期待も大きいものでした(図-12参照)。また本スキームは環境保全対策としての評価も高く、オマーン政府が主催するOman Green Awardsにもノミネートされました。

8. 今後の展開

本プロジェクトは現在、ビジネス規模での実証を目指し推進しています。この計画では油田サイトに蓄積されている油性廃棄物(オイルスラッジ等)を利用したエネルギー利用も組み込み、水処理、処理水利用(灌漑/藻類培養)に必要なエネルギーを全て賄い、油田サイトでの地産地消型の新しい産業都市の創出を目指しています(図-13参照)。

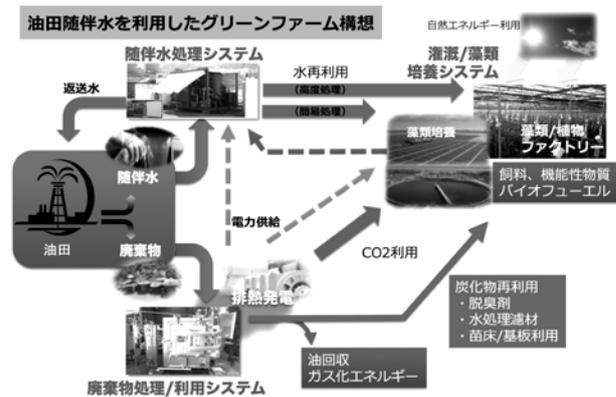


図-13. 本プロジェクトの発展型提案例

また本スキームはオマーンのみならず同じ環境条件である中東諸国にも展開できます。中東で生産される石油は2,400万バレル/日で、石油随伴水も約2,000万トン/日が発生していると考えられ、今はこの膨大な廃棄物である石油随伴水を、中東の新たな水資源とすべく引き続き開発を行う予定です。

9. 謝辞

本プロジェクトは一般財団法人JCCP国際石油・ガス協力機関(前 国際石油交流センター)の産油国等石油関連産業基盤整備事業の一環として、オマーン国石油ガス省、農林水産省、環境省、国営石油会社、大学等の多くの皆さまの協力のもとに実施されました。

清水建設株式会社