

戦略プロポーザル

環境や社会の変化に伴う 水利用リスクの低減と管理

STRATEGIC PROPOSAL

Research and development about risk management in water use considering of environmental and social changes

研究開発戦略センター（CRDS）は、国の科学技術イノベーション政策に関する調査、分析、提案を中立的な立場に立つて行う公的シンクタンクの一つで、文部科学省を主務省とする国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）に属しています。

CRDSは、科学技術分野全体像の把握（俯瞰）、社会的期待の分析、国内外の動向調査や国際比較を踏まえて、さまざまな分野の専門家や政策立案者との対話を通じて、「戦略プロポーザル」を作成します。

「戦略プロポーザル」は、今後国として重点的に取り組むべき研究開発の戦略や、科学技術イノベーション政策上の重要課題についての提案をまとめたものとして、政策立案者や関連研究者へ配布し、広く公表します。

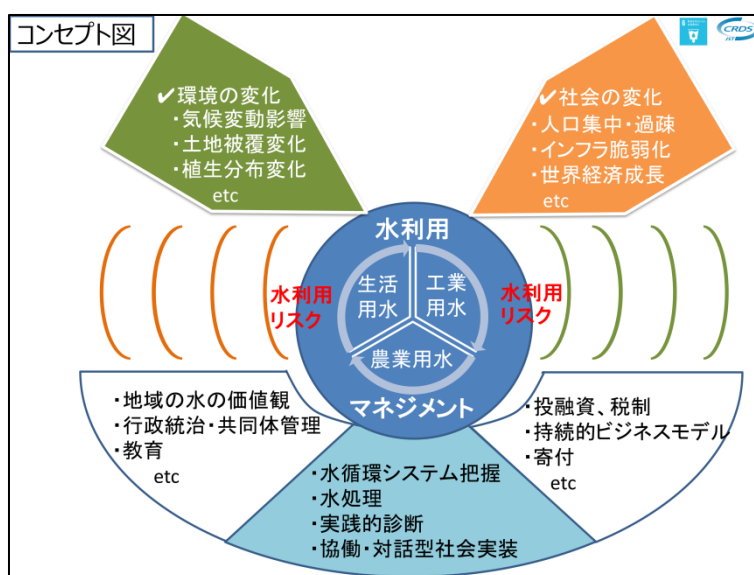
公的な科学技術研究は、個々の研究領域の振興だけでなく、それらの統合によって社会的な期待に応えることが重要です。「戦略プロポーザル」が国の政策立案に活用され、科学技術イノベーションの実現や社会的な課題の解決に寄与することを期待しています。

さらに詳細は、下記ウェブサイトをご覧ください。

<https://www.jst.go.jp/crds/>

エグゼクティブサマリー

水利用とは、水という物質と、利用という人間の行為を合わせた概念を示す。本プロポーザルでは水利用におけるリスクを低減、管理するために実施すべき研究開発戦略を提案する。現在、世界および国内で、水利用リスクに関わる未解決の課題が存在する。さらに、2030年や2050年といった中長期的な時間軸で見ると、環境や社会の変化によって、水利用リスクはさらに増大していく。水利用リスクの理解を深めるには、人々を平均値としてではなく分散値として捉え、取り残される個人の領域にまで視野を広げる必要がある。この領域には顧みられていない潜在的需要が存在する。それらの課題の調査、分析から導き出された、我が国として取り組むべき科学技術イノベーションの推進戦略を述べる。



コンセプト図 水利用リスクの低減と管理

水は人間の生命、健康の観点から基本的人権でもある。多様な水の価値は、人間が文化的に生きていくうえで、世界中どのような地域においても欠かせない。しかし、人間が利用可能な淡水の量には、空間的・時間的偏在性などの制約が存在する。水の質という側面でも、安全性に関わる課題が存在する。自然環境では、水は砂泥や溶存物質、微生物、熱、エネルギーなどの運び手となっている。さらには水へのアクセス性、公衆衛生、経済性、処理や運搬に係るエネルギーなどの要素も存在する。これらの要素が複合的に水利用リスクを形成している。

世界の水利用において、推定 40 億人存在する年間所得 3 千ドル以下の層が安全な水を廉価に入手できない問題が未だ残されている。子どもや女性の水汲み労働問題なども未解決である。世界の水需要は人口増加、経済発展により今後も拡大し、水利用リスクはさらに増大していく。たとえば、世界では食糧供給のため、地下水の灌漑利用量が急激に増大しており、枯渇化が危惧される。これは他国に限定された問題ではなく、食料を輸入に頼る我が国は、間接的に水利用を行っている関係にある。間接的水利用も含めた可視化を通して、地域／世界の持続可能な水循環システムのシナリオ構築が必要である。

国内の水利用においても、高度経済成長期に整備された水インフラの老朽化が進んでいる。さらに、農村部での水利用リスクが大都市と比べて高まっている。農村部では過疎化、高齢化、圃

場の分散化・広域化などの進行が著しい。大都市に適した集中型技術と比べ、農村部に適した分散型技術は手薄である。

さらに、気候変動は水利用に対しても大きな影響を与える。豪雨、豪雪、渇水などの極端降水現象の頻発化などにより、世界、国内ともに水利用リスクがさらに増大していく。

それらの背景を踏まえ、革新技術、破壊的技術、伝統技術を含めた包摂的イノベーションの促進策が有効と考えられる。具体的には下記の研究開発の促進により、水資源供給・需要の多様な変動性を把握、制御して、持続的な水利用システムを構築することが望まれる。

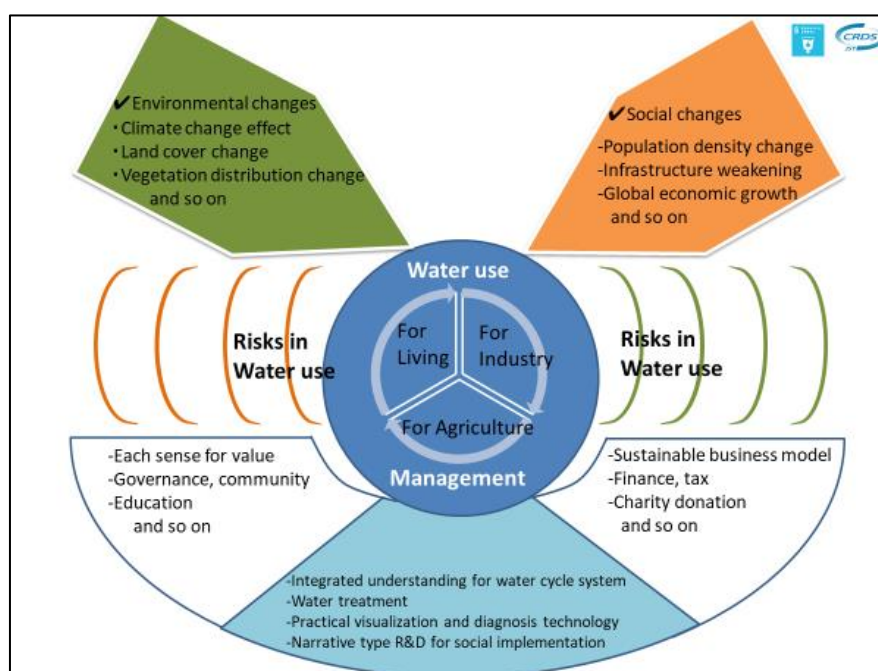
- (1) 水循環システムの把握：世界、国内、河川流域などにおける水資源の循環を把握する研究開発である。蒸発散や降水、地下水浸透などの自然の水循環の素過程に加え、治水・利水、土地利用変化、地下水汲み上げなどの人間活動による社会システム要素も含めた評価が重要となる。水源の変動性や持続性、水の価値を示すことで、以降の研究開発に対して指針を与える役割も担う。
- (2) 水利用リスクのマネジメントのための水処理：水利用の需要に対し、変動性のある水源の原水を安全に制御するための多様な処理技術である。適用地域での除去対象や用途に応じて、逆浸透膜などのろ過膜、凝集剤、吸着剤、光触媒などの素材開発や紫外線消毒などの最適化、それらを組み合わせた機器設備や再生水などのシステム型の研究開発がある。分散型水処理やライフサイクルコスト・エネルギーの評価なども含まれる。
- (3) 水利用リスクの実践的診断：水質や水量の観測・分析技術と、効率的、効果的な水利用のために可視化する技術である。水質に関わる水中不純物検出技術として、MEMS や次世代シーケンサーなどの多様な技術を用いて、迅速、高感度、網羅、その場で病原微生物などの存在量や拡散、挙動を可視化する技術などの研究開発がある。水量制御や水処理に情報通信技術を応用する技術も注目される。たとえば、IoT による農業用水の遠隔・自動制御、AI による上下水道管の脆弱性予測・検知、機械学習による水処理の消費エネルギー高効率化などがある。さらには、持続的、公平な水利用に向けたデータ資源の蓄積や利活用などもある。
- (4) 多様な利害関係者との協働・対話型社会実装：水利用リスクは人々の多様な価値観にも関わるため、合理性、非合理性あわせもつ人間性の要素を切り離すことができない。再生水などの先鋭的な研究開発成果では、科学的な分析結果の蓄積や客観的事実の咀嚼という欠如知識提供モデルだけでは社会実装が難しい。諸個人の主観に基づく経済的価値、社会的価値、環境的価値などについて対話し、共有することによって、共同体としての共感、信頼の関係を形成する共創モデルが注目される。上記の各研究開発に関連する側面がある。

水利用リスクは社会、経済に密接した研究開発領域である。科学的分析や技術開発の蓄積に立った持続可能な水利用シナリオの検討に加え、多様な水への主観と社会受容性に応じて社会実装を目指す研究開発の取り組みは、きわめて挑戦的なものとなる。しかしながら、水循環研究による課題の可視化や、水処理技術や診断技術の小型化や低廉化などが進み、実現可能性が高められつつある。また中長期的に持続可能な水利用システムの構築を志向した研究開発は、先導性や学術的価値の高さが認められ始めている。さらに、水利用リスクは本質的に複合型学問領域の課題である。したがって、学問領域越境型、融合型などの研究推進という要請が必然的で、世界をリードする水研究では、この傾向が顕著にみられている。

我が国においても、良好な事例が幾つかあるが、ますます水利用リスクが高まっていく世界と国内の情勢を踏まえると、このような取り組みを増進、拡大する施策が望まれる。

Executive Summary

Water use is a concept that combines the substance of water with the human act of using it. We propose R & D strategies to be implemented to manage risks in water use. Currently, there are unresolved various risks in water use worldwide and in Japan. In addition, over a medium- to long-term timeframe such as 2030 or 2050, environmental and social changes will further increase risks in water use. To better understand the risks in water use, it is necessary to broaden the consideration about individuals left behind in detail. There is potential neglected demand in this area. After studying and analyzing these issues, we describe the strategies to promote science, technology and innovation.



Conceptual figure

Water is regarded as human basic rights for human survival and health. And, wide variety value of water includes culture value in any part of the world. However, because of spatial and temporal uneven distribution, the amount of freshwater that can be used by human beings has limited. There are also safety issues in terms of water quality. In the natural environment, water is a carrier of muds, sands, substances, microorganisms, temperature, energy and the like. There are also factors such as accessibility to water, sanitation, economy, and energy for treatment and transportation. These factors combine to form risks in water use.

There remains the serious problem, base of the economic pyramids peoples (BOP) cannot afford safety water at a reasonable price in the world. BOP means individuals with an annual income of less than \$ 3,000. It is estimated over 4 billion population. Furthermore, there remains the problem of water fetching that makes children and women negative influence.

Due to global population explosion and economic growth, global water demand will continue to increase and risks in water use will further increase. For example, due to food supply, the use of groundwater for irrigation is rapidly increasing in the world, and groundwater will be disappeared in each place. This is not a problem limited to other countries far away from Japan. Japan relies on food imports and any parts of those are made by unsustainable water. Other words, Japan also relates the problem through using indirectly unsustainable water unconsciously. So, visualizing indirect water use, we should create a scenario for a sustainable regional / global water cycle system.

Regarding domestic, there is the problem about aging of the water infrastructure developed some decades ago. In addition, the risks of water use in rural areas is increasing seriously compared to metropolitan areas. In rural areas, depopulation, aging, discontinuity and widening of agriculture field are remarkable. Compared to centralized water treatment technology suitable for metropolitan areas, decentralized water treatment technology suitable for rural areas is less mature.

In addition, climate change has a significant impact on risks in water use. Due to the frequent occurrence of extreme precipitation phenomena such as localized heavy rain, heavy snow, drought, etc., the risks in water use will increase further both in the world and in Japan.

Based on these backgrounds, we regard promoting inclusive innovation as effective. Inclusive innovation includes radical technology, disruptive technology, incremental technology, and traditional technology. It is desired to establish and maintain a sustainable water use system by grasping and controlling various variability of water resource supply and demand. Specifically, we propose to promote the following R & D themes.

(1) Integrated understanding for the water cycle system:

R & D to understand the circulation of water resources in the world, domestic and local watersheds. In addition to the elemental processes of the natural water cycle such as evapotranspiration, precipitation, and groundwater infiltration, it is important to evaluate social system influences such as dams, embankment, land use change, and groundwater pumping. By showing the variability and sustainability of water sources and the value of water, it also plays a role in visualizing guidelines for the other R & D themes.

(2) Water treatment:

A variety of water treatment technologies to safely control raw water from variable water sources in response to demand for water use. Depending on the removal target and application, suited water treatment technology is different. So, there are complicated many needs for problem solving type R&D. About R&D themes of materials, there are such as reverse osmosis membranes, flocculants, adsorbents and photocatalysts. Also, there are optimization of ultraviolet disinfection, water treatment equipment and so on. And there are systematic R&D themes such as decentralized water treatment system, reuse water system and the assessment of and life cycle costs and energy and so on.

(3) Practical visualization and diagnosis technology of risks in water use:

This theme means monitoring and analysis technology for water quality and quantity, and visualization technology for efficient and effective water use. Research on various technologies for detecting impurities in water related to water quality. Technologies that enable to visualize pathogen microorganisms with rapidly, high sensitivity, comprehensively, simply, or in the spot is expected. To develop those, there are some R&D applying such as MEMS and next-generation DNA sequencers. Furthermore, there are challenging themes such as visualization of the diffusion or behavior of pathogen microorganisms. Recently, there are noticed R&D themes about water quantity control that applied information and communication technology. For examples, there are remote and automatic control of agricultural water using IoT, prediction and detection of vulnerability of water supply pipes and sewage pipes using AI, and energy efficiency improvement of water treatment equipment using machine learning and so on. In addition, there is accumulation and utilization of data resources for sustainable and equitable water use.

(4) Collaborative and narrative dialogue interactive R&D for social implementation:

Since risks in water use also involve diverse values of people, it is impossible to separate the elements of humanity that have both rationality and irrationality. In the case of cutting-edge R & D such as treated sewage reuse, it is difficult to implement socially with only the lack of knowledge provision model of accumulating scientific analysis results and explanation in plain terms with objective facts. Economic values, social values, environmental values, etc. is based on the subjectivity of various people. So, co-creation model is more hopeful than the lack model. In co-creation model, communicating and sharing of each various sense of values, resonance and trust relationship forms as a community. There are aspects related to each of the above R & D.

Risks in water use is an area of R & D closely related to society and economy. In addition to examining sustainable water use scenarios based on accumulation of scientific analysis and technological development, R & D efforts aimed at social implementation in response to various water subjective values and social acceptability are extremely challenging. However, R & D aimed at establishing a sustainable water use system in the medium to long term has been regarded as leading and high academic value. Additionally, risks in water use is essentially an issue in a hybrid discipline. Therefore, the demand for integrated cross-disciplinary and beyond-disciplinary R&D promotion is inevitable and cannot be ignored. This trend is remarkable in world-leading water research.

Although some good practices have been made in Japan as well, considering the world and domestic situation where risks in water use are increasingly increasing, it is desirable to encourage tactics and policy to increase and expand such efforts.

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	3
2-1.	現状認識および問題点	3
2-2.	社会・経済的効果	11
2-3.	科学技術上の効果	14
3	具体的な研究開発課題	19
4	研究開発の推進方法および時間軸	26
付録 1	検討の経緯	28
付録 2	国内外の状況	30
付録 3	専門用語説明	35

1 研究開発の内容

「環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理」とは、中長期的な時間軸で水利用リスクを低減、管理していくことを目指すものである。「水利用」とは、水という物質と、利用という人間の行為を合わせた概念である（図 1.1）。人類が健康で豊かな暮らしを過ごすために淡水資源を安全かつ経済的に用いる営みを指している。「水利用リスク」とは、利用可能な淡水資源の空間的・時間的偏在性などの量の不安定性、水の中に含まれる物質の変動などによる質の不安定性、水利用へのアクセス性、相対的価格、公衆衛生、処理や運搬に係るエネルギーなどの要素、さらに変化していく環境や社会の条件が与える変動性を網羅的に含めた概念である。

水利用リスクに関する課題に対して、本プロポーザルにおいては包摂的イノベーションの実現のため、「水循環システムの把握」、「水利用リスクのマネジメントのための水処理」、「水利用リスクの実践的診断」、「多様な利害関係者との協働・対話型社会実装」を推進する取り組みを提案する。

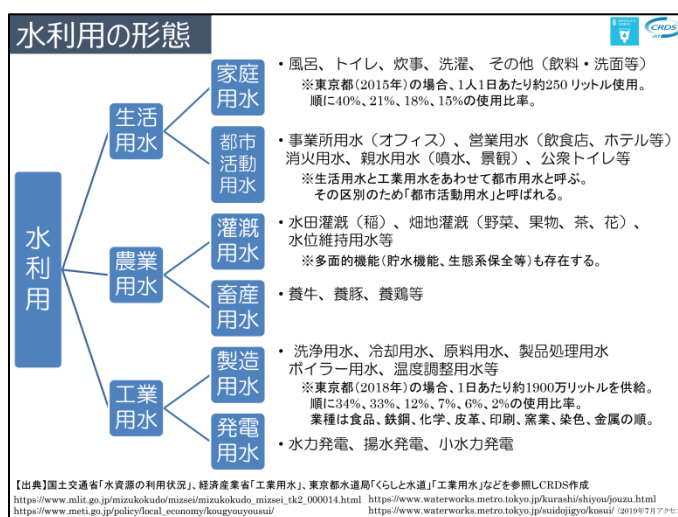


図 1.1 水利用の形態

現代における世界の水利用リスクとして、推定 40 億人存在する年間所得 3 千ドル以下の BOP ビジネス層（Base of the Economic Pyramid）と呼ばれる人々が安全な水を廉価に利用できない課題や、身体的負担の大きい水汲み労働から女性、子どもが解放されないといった課題が残されている。国内でも、人口密度の低い中山間地の農村部などで、水供給インフラの維持が困難になってきており、脆弱性が高まっている。世界の各地域の実情の理解には、所得や淡水資源量を詳細に分析することが有効である（図 1.2）。同じ国の中でも地域や、個人の所得に違いがある。高所得国では、水不足でも海水淡水化の技術を導入できる。ところが、政府開発援助（ODA）領域にあたるアジアやアフリカなどの農村地域などでは、井戸掘削により地下水を利用するケースが多く、その公衆衛生や持続性の確保が課題となる。

さらに、気候変動の影響による降水現象の極端化などの環境の変化が水利用リスクを増大させる。加えて、さらなる都市人口集中や農村過疎化や水道インフラの脆弱化などの社会の変化も水利用リスクを増大させる。

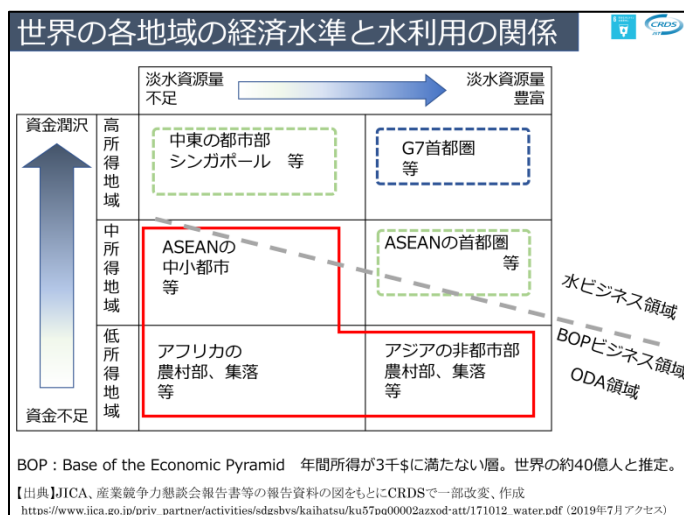


図 1.2 世界の各地域の経済水準と水利用の関係

これらの課題を研究開発に対する顧みられていない潜在的需要として捉えると、多様な地域、時代の情勢に応じた革新技術、破壊的技術、伝統技術を選択、実装する包摂的イノベーションが解決策となる。その実現には、水循環システムの把握、水処理技術、実践的診断技術、協働・対話といった研究課題がある。

水循環システムにおいて、世界的な人口増大、経済成長に伴い、各地域で持続可能な淡水資源の脆弱化が進行している。水利用は各国の地域社会、地域経済への直接的影響で閉じない。食料生産などに用いる水は仮想水と呼ばれ、これは多国間、多地域間に間接的影響を与える。食料輸入率の高い日本においても、世界の水危機の影響を受ける問題構造が隠されている。日本では直接的な地下水利用が少ないが、世界の食料供給には多くの地下水が利用されており、枯渇化が進んでいる。このような世界の水利用リスクの可視化をはじめとして、包摂的な水循環システムの把握が、持続可能な開発に向けて重要となる。

安全で安定した水利用のためには、水源と利用用途に応じ適度な水処理プロセスシステムが求められる。水質、量などの安全性、安定性の確保の観点に加え、ライフサイクルでの経済性、総エネルギー使用量などの観点も踏まえて、持続可能性を検討しなければならない。水利用においては、集中型技術では対応が困難な地域が存在する。過疎地域の水利用リスクを低減するためには、従来型の集中型技術に加え、新しい分散型技術による解決策の推進が期待される。膜ろ過材料、凝集剤、吸着剤による不純物捕捉処理技術や、紫外線発光ダイオード（UV-LED）による消毒処理技術などの社会実装志向型研究をさらに推進することが望まれる。

水利用診断技術として、水管理 IoT 支援技術や水道インフラ劣化 AI 予測技術といった情報通信技術応用や、微小電気機械システムセンサやウイルスセンサなどの異分野融合技術への期待が高まっている。たとえば、農村では、都市よりも先に社会構造変化が深刻化している。農業の灌漑用水では大量の水と、その供給のために電気エネルギーを必要とし、管理人口も減少している。水管理 IoT 支援技術の浸透は、管理者負担の軽減、エネルギー節約による経済効果、節水という環境効果などの改善が同時に期待される。

社会実装にあたり、再生水や雨水浸透などの取り組みで見られる協働・対話が注目される。科学的な分析の蓄積や客観的事実の咀嚼に加えて、地域の利害関係者との協働・対話を通して、地域共同体の活性化への貢献もみられており、特筆される。

2 研究開発を実施する意義

2-1. 現状認識および問題点

(1) 世界の人々が豊かに生きていくために必要な水利用

人間の体内では水分が過半を占める。淡水を補給しなければ、人間は生存できない。また人間が健康で文化的な生活を過ごすための、食料の生産、工業製品の製造、サービスの提供のためにも水が必要である。我が国の都市生活にあたって、身近な生活用水の約 10 倍の水利用が必要となる（図 2.1.1）。

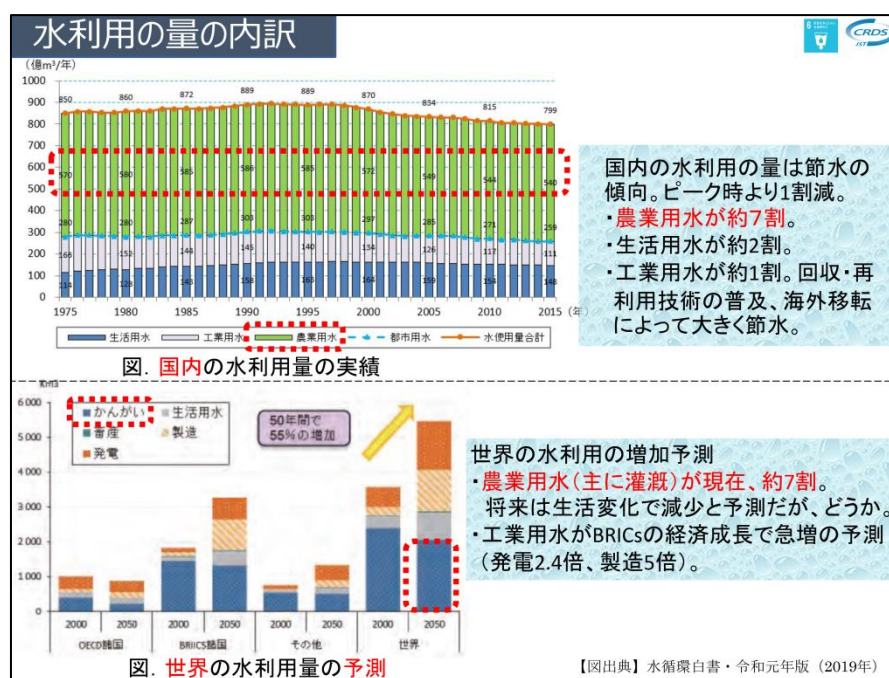


図 2.1.1. 水利用の内訳

利用可能な淡水資源には、空間的・時間的偏在性という制約が存在する。その偏在性のために、干ばつや安全な水にアクセスできない”Too Little Water”と呼ばれる渇水、水不足の問題と、極端な降水現象による”Too Much Water”と呼ばれる洪水災害の問題が存在する。水不足は気候という環境要因に加え、人口過密や経済発展などの社会要因によっても生じ、大陸中央の乾燥地や途上国の都市などで深刻である。洪水はとくに沿岸地域などで深刻である。地域に応じた課題解決策の検討が欠かせない。将来を見据えると、気候変動による降水や融雪パターンの変化、人口増大に伴う生活用水や農業用水の需要増大、途上国の経済発展に伴う工業用水の需要増大などから水利用リスクが増していく（コラム 1 参照）。

水量の観点では、最近の日本では洪水災害が身近で、直接的な被害を受ける。一方で、世界の多くの地域では人口爆発、経済成長による水不足が差し迫った課題である。食料を輸入に依存する日本は、仮想水の輸入を通し、世界の水不足問題とつながっており、間接的に影響を受ける（コラム 2 参照）。世界的にみて、水不足地域からの廉価な製品輸入などのサプライチェーンは持続性が懸念され、広く開かれた視野で水循環をとらえる必要がある。

コラム1 本プロポーザルにおける「リスク」という用語の捉え方

リスクはハザードと曝露の積という科学的考え方が浸透しており、この理解がわかりやすい。さらに、昨今、国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC) や国際標準化機構 (ISO) などでは脆弱性の要素にも関心を大きく向けている。本プロポーザルでも、弱者、脆弱性の要素に目を向けた。

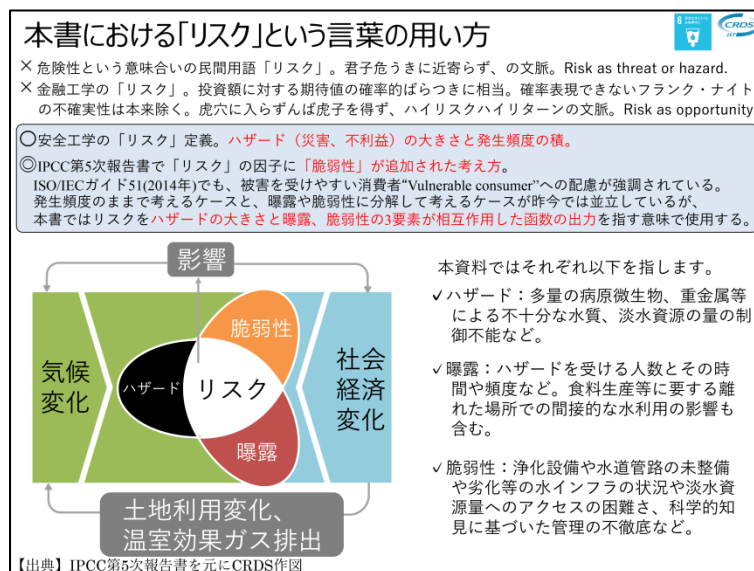


図 2.1.2 本プロポーザルにおけるリスクの考え方

コラム2 世界における地下水資源の課題

現在の日本では地下水の利用が少ないため、関心はあまり高くないが、世界では多くの国が飲用水源や農業用水として地下水を利用し、依存している（図 2.1.3、2.1.4）。

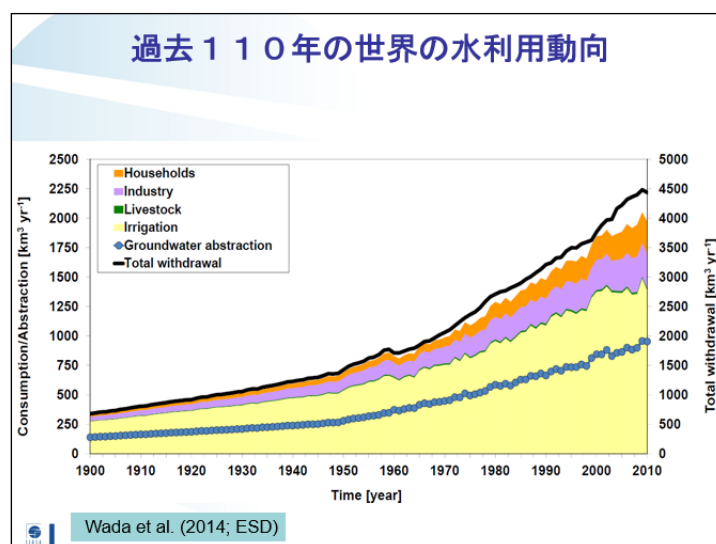


図 2.1.3 世界の水利用動向（和田 IIASA プログラム長 WS 資料より）

途上国の農村地では水道、下水道が未普及の地域が多い。そのような地域では浄化槽などの汚水が溢れ、飲用地下水源に病原微生物が混入する感染ルートができてしまっている。

また、インド周辺ではヒ素、アフリカ東部ではフッ素の自然土壌中の高濃度含有による慢性曝露の問題などがある。



図 2.1.4 主要な飲用水源としての地下水（小熊東大准教授・CRDS 特任 F WS 資料より）

人間活動のための汲み上げが原因で地下水が急速に減少している地域がある。米国のオガラ帯水層が有名だが、インド、中近東、北アフリカ、中国華北地域などで地下水が減少している。汲み上げられた 2～3 割が化石水と呼ばれる水資源で、急速に枯渇化が進んでいる（図 2.1.5）。

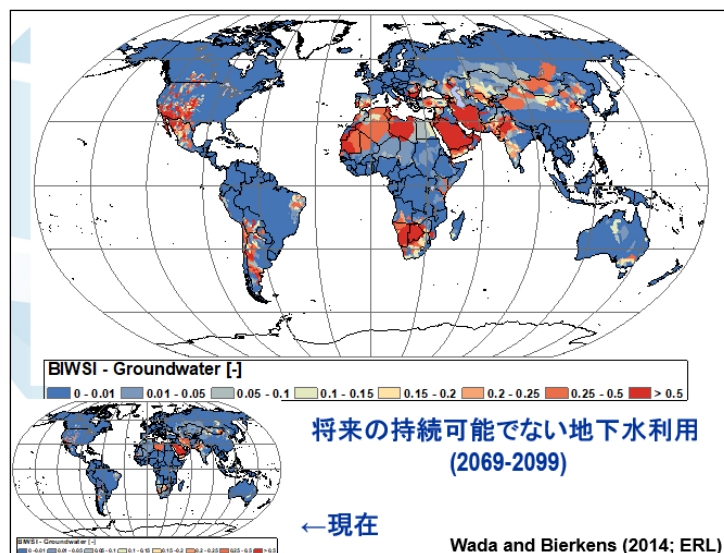


図 2.1.5 持続性のない地下水利用（和田 IASA プログラム長 WS 資料より）

地下水は地域に閉じた問題と考えがちだが、外国で農業に使われた地下水は農業作物の形で日本にも多く輸入されている。間接的な水利用、つまり仮想水である。日本はオガラ帯水層を使った農業作物を多く輸入している。地下水の枯渇は世界規模で考えていかなければならない。中国はかつて仮想水輸出国だったが、輸入国に変わっている。仮想水を考えて水は SDGs の複数の目標と関連している。SDGs では地下水に関する明示的な指標はないが、beyond SDGs として考察が必要である。

(2) 満たされていない水利用リスクの課題の姿の理解

世界の水に対する関心は高い。国連の「持続可能な開発目標 (SDGs)」では、目標 6 として「全ての人の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理を確保する」が掲げられている。世界の 100% 全ての人を対象にして、未だ満たされていない水の課題に対し、マルチステークホルダー協働での取り組みを促している。

100% 全てという目標までの困難さを理解するには、たとえば、水道管に接続された水にアクセス可能な人口の比率を丁寧にみるのが有効である (図 2.1.6)。2012 年時点で世界平均は 56% だが、地域ごとには南米・カリブ海の最高 88% から、サハラ砂漠以南アフリカの最低 16% までの大きな幅がある。中央アジア・コーカサス地域は 56% と世界平均値と同じだが、その中でもアルメニアの最高 97%、ウズベキスタンの最低 43% と国ごとに幅がある。平均値 61% のカザフスタンの中でも、都市部は 90% だが農村部は 28% しかない。さらに、富裕層と貧困層の間にギャップがある。このように、平均値に留まらず、ばらつきの低い側までしっかりと見て、取り残された層を救うことが重要となる。これがまさに、SDGs の「誰ひとり取り残さない」の精神で、取り残される側に目を向けた持続可能な解決策が求められている。

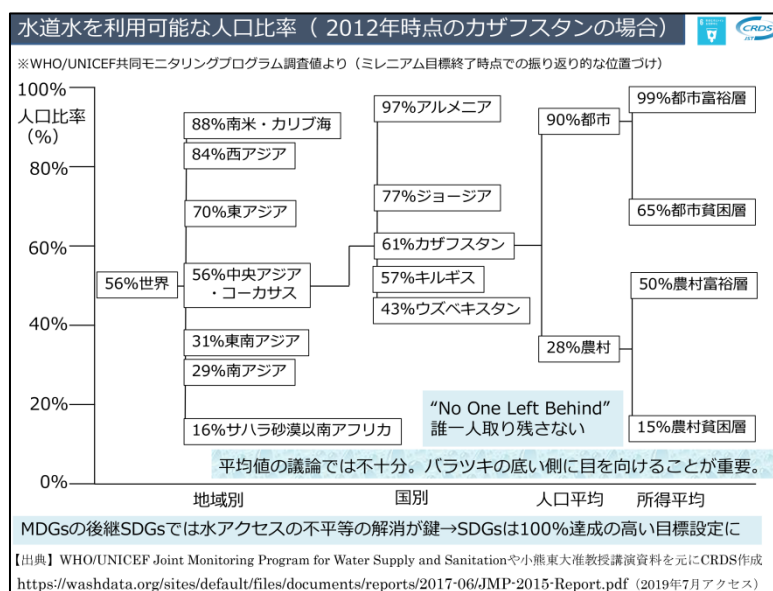


図 2.1.6 水道を利用可能な人口比率の事例

日本国内の水道の普及率は 97.2% で、世界平均よりも相当高い。国内のばらつきも同様に分けると、首都圏、近畿圏、中京圏といった大都市圏では高い普及率だが、中山間地や島しょ部などに多い過疎地の普及率が低く、92.5% である (図 2.1.7)。国内でも、過疎地に目を向けると、SDGs の挑戦的目標の真の難しさの理解が進む。

過疎地域の浄水設備の状況として、都市部と比べて小規模で、かなり老朽化した施設がみられる。過去 30 年の国内での飲料水健康被害の 8 割以上は、このような小規模水道設備で起きている (図 2.1.8)。日本の現在の人口統計では、上水道で供給されているのが約 1 億 2,000 万人で、それ以外の小規模水道設備の総合計が約 700 万人となる。人口比率では 5% 程度で、地方自治体や住民の自治管理で対応しているが、相対的に高いハンディを負っている。

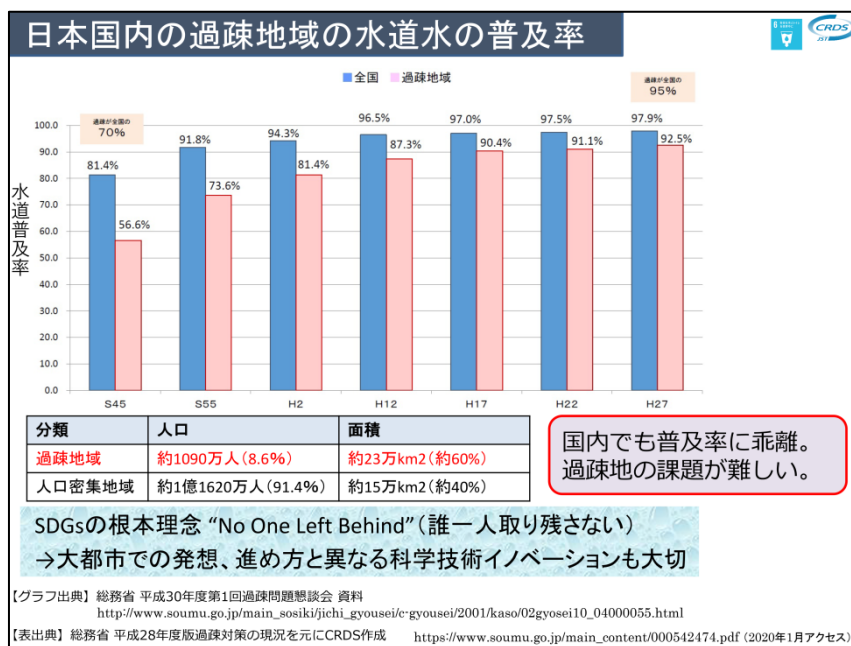


図 2.1.7 国内の水道普及率の差異

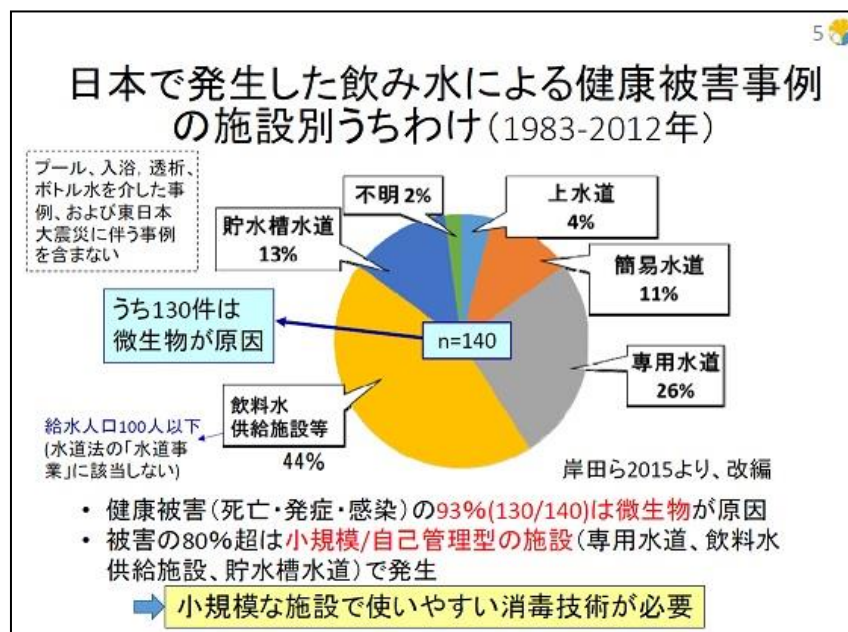


図 2.1.8 国内での飲料水による健康被害の内訳 (小熊東大准教授・CRDS 特任 F WS 資料より)

SDGs の理念や挑戦的な課題設定は我が国でも徐々に関心を広げつつあるが、良い流れをいっそう加速、展開する必要がある。とくに、慈善団体や寄付などによる開発途上国への貢献に加え、科学技術への期待がますます高まるものとみられる。一方、従来型の研究開発の取り組みで、大変な労力をかけて海外で技術協力を行ったもののプロジェクト終了後に途絶えてしまった事例の原因や、社会受容がうまく進まない新技術などの原因の分析も行われている。持続的な水利用を構築するためには、そのような課題の振り返りも大切である。

(3) 環境の変化と社会の変化による水利用リスクの増大

環境の変化として、気候変動が水利用リスクを増大させる（図 2.1.9）。アジア・モンスーン気候地域では、気候変動により、“too much water”問題がより深刻化する認識が広がりつつある。“too much water”とは洪水や集中豪雨、台風の激化など局所、短時間での過剰な水の災害を差している。蒸発散量の増加などにより降水現象が不安定化し、豪雨が増加すると、水源となる湖沼や河川へ流入する濁質成分や夾雑物が増加し、水質が悪化し、人々の水利用に負の影響を与える。気候変動による“too little water”問題も、世界各地で深刻化する。雪解け水が河川の源流の取水源となる地域では、気温上昇で積雪量が減少し、さらに融雪が早期化し、渇水につながる。気温上昇は灌漑の時期の不安定化につながり、農業にも影響を与える。水温上昇は生態系の変化、微生物増加、水質悪化とつながることも懸念されている。

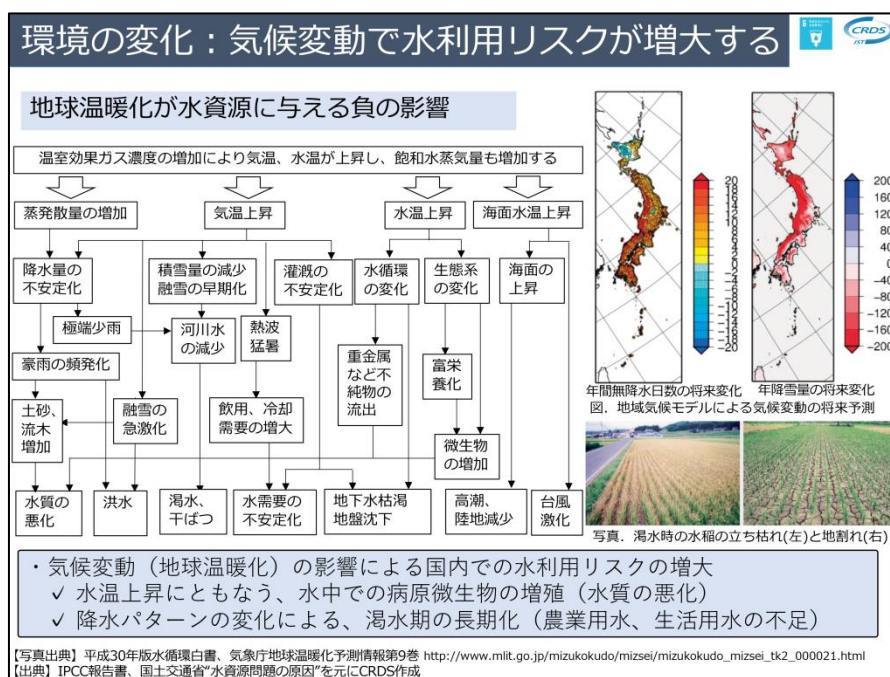


図 2.1.9 環境の変化に伴う水利用リスク

社会の変化として、人口の社会増減の効果が大きい（図 2.1.10）。人口の自然増減とは出生と死亡を示し、人口の社会増減とは転入、転出を示す。人が仕事を求めて、農村から都市へ移動する。戦後の日本史を振り返ると、過疎、過密は社会増減の影響が大きい。大都市圏には今後も人が集まる。農村部の人口減少、高齢化比率はすでに加速的に進んでいる。日本が経験する道を、他の国々も辿っていく。大都市圏の問題は気付きやすく、対策の必要性が理解されやすい。しかし、農村地や小都市は相対的に手薄となり、脆弱化しやすい。我が国では、とくに昭和の高度成長期に、大都市圏では過密化により渇水が深刻化した。水供給関係者等の努力により、当時と比較して格段に水資源が安定的に確保されている。また、アジア諸国等にも技術やノウハウの協力を行っている。大都市圏の水不足解決に適した集中型水処理の研究開発は非常に熟成している。一方、過疎地域での解決策は世界各国とも未成熟である。人口密度が低く、広域に人々が分散居住した過疎地域に適した技術は、集中型技術よりも分散型技術が適していると考えられる（コラム 3 参照）。また、日本と同様の人口動態をアジア、アフリカ諸国も辿っていくため、潜在的に

研究開発への需要がある。分散型の研究開発は集中型と比較して未成熟の状況だが、解決策の検討もみられる。集約型だけで、世界中の 100%全員のの人々に安全な水とトイレを身近に普及させるのは不可能で、分散型との最適な組み合わせが必要となる。集中型の技術の進展とは別に、分散型の技術進展も可能性が高まってきている。その見定めのため、都市の発展レベル、都市の規模、国、地域などの違いに応じた、最適な方法論を探る研究が求められる。

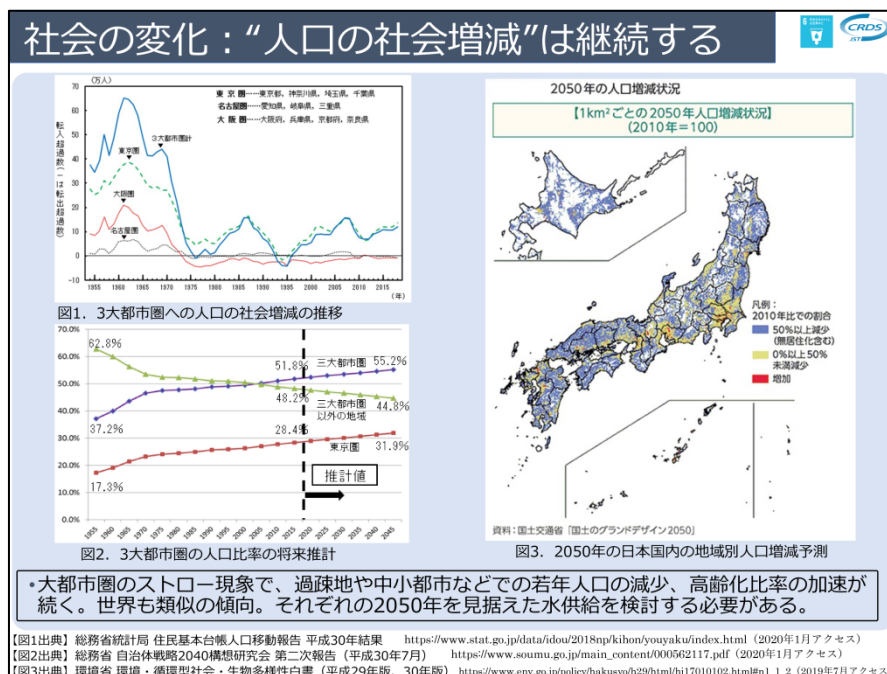


図 2.1.10 社会の変化：人口の社会増減

コラム3 集約型と分散型の水処理

集約型の水処理システムは、浄水場で一括処理し、管路で各家に配る方式である。分散型の水処理システムは幾つかレベルがある。数件が集まった共同体単位で水処理する方式は Community Water Supply (CWS) と呼ばれる。さらに小さくなると、建物の入り口で水処理する Point of Entry (POE)、蛇口ごとに浄水器を取り付ける Point of Use (POU) という方式がある。



図 2.1.11 集約型と分散型の水処理（小熊東大准教授・CRDS 特任 F WS 資料より）

コラム4 農村地の水利用における課題

水田に適量の水を維持するため、水量監視や水供給・排水制御などの水管理労働が必要である。国内では農業人口減少と高齢化が進行し、大規模農家が多くを農地を担う姿に変化してきている（図 2.1.12）。

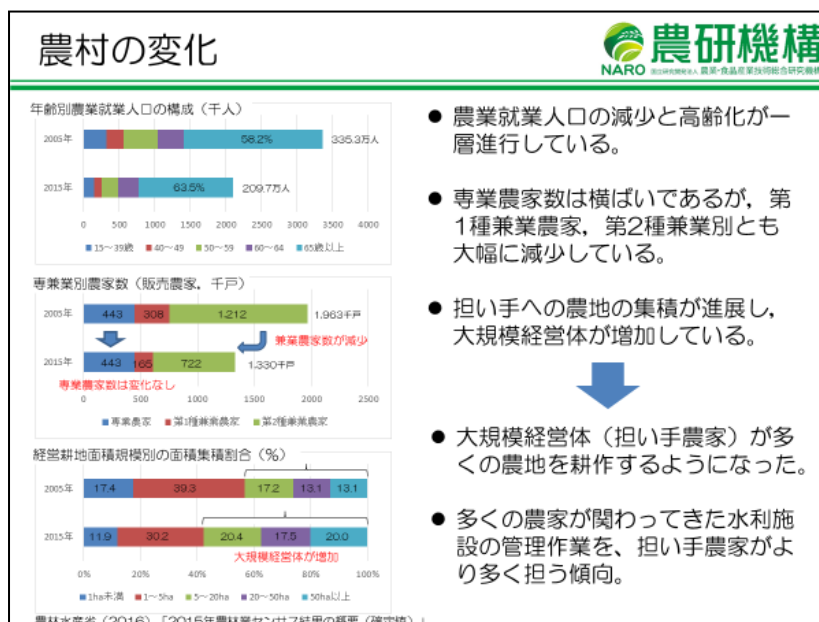


図 2.1.12 農村の変化（友正農研機構ユニット長 WS 資料より）

田植え機と除草剤の普及で、水稻作に要する日本国内の総労働時間は減少しているが、水管理時間が最も長くなっている（図 2.1.13）。背景として、飛び地の圃場や異なる品種、異なる栽培方法の混合化により、水管理が複雑化したことがある。農業用水の水管理の効率化は、水供給のためのポンプなどの電気代金を節減する効果もあり、複数の便益がある。

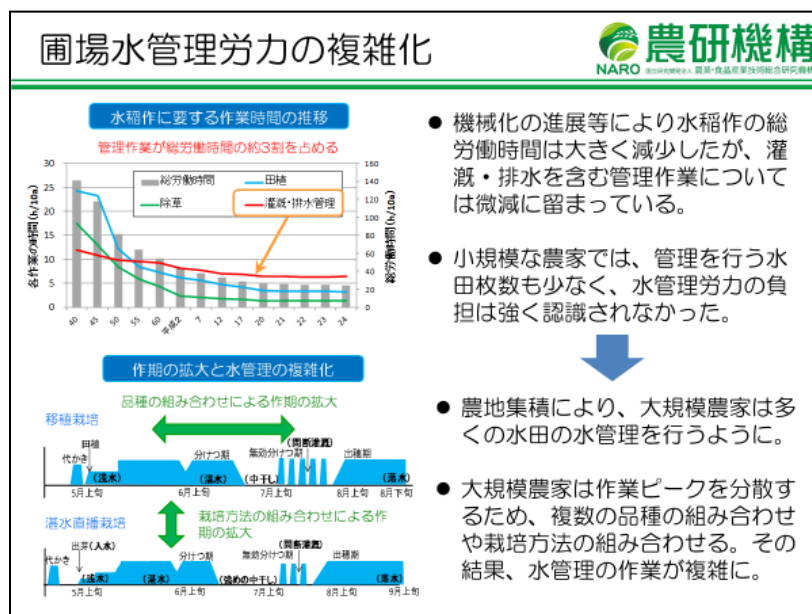


図 2.1.13 圃場水管理労力の複雑化（友正農研機構ユニット長 WS 資料より）

2-2. 社会・経済的效果

水利用リスクの問題を考えるうえで、経済性、社会性はともに重要な指標である。科学的に正しい知見と適切な技術を用いて、品質の良い水を、コストを安く提供していくことは海外にとっても、日本にとっても非常に重要であり、経済的にも社会的にも極めて意義深い。社会実装のためには、水利用の多様な用途に対して、経済的価値と社会的価値を考えなければならない。

（1）経済的效果の考察

経済的效果として、安全で安定な水利用を持続可能にする意義が高い。日本国内の都市部では、水道利用料金は 1000 リットル（1 トン、1 m³と同量）あたり 100 円程度で提供されており、経済的負担が限りなく抑えられている（図 2.2.1）。一方、人口密度の低い中山間地や島しょ部、また水配送距離が長くなる半島部では 1000 リットルあたり 300 円程度となっている。水道料金収入を超過した水処理料金は何らかの補填財源で補われることとなる。小都市などでの経済的脆弱化は静かに進行してきた。今後も日本国内の水利用の経済的負担を抑えるためには、場当たりの対応ではなく、水利用リスクの理解を深めて、先制的に対応することが有効である。そのため、我が国の人口動態やインフラ劣化、災害激甚化などの変化を見据えて、バランスのとれた水利用システム検討していくことが大切である。

水利用の値段		※水1 m ³ =1000リットル=1000 kg =1トン	
	1 m ³ 換算料金	備考	
東京都区部の水道水	約100円	家庭用小口料金。従量課金制。高度浄水処理等。	
国内過疎地の水道水 (離島や中山間地等)	約300円	家庭用小口料金。従量課金制。	
国内の工業用水	約30円	浄水場からの給水。従量課金制。簡単な水処理。	
国内の農業用水	約3円	土地改良区等での定額課金。	
国内地下水(井戸)	0円	地盤沈下防止のため、条例で汲み上げを規制。	
国内ボトル詰め水	約200,000円	自動販売機等での飲料水販売。	
(参照) 香水	約10,000,000円	小瓶詰め価格。香り成分の分子やブランド等の価値。	
タンザニア水道水	約200円	現地調べ。現地平均月収6000円に対して高価。	
パプアニューギニア業者	約6,000円	水宅配業者。現地BOP層の日給約500円に対し高価。	

国内の生活用水でも多様な条件、制約によって個別に料金が異なっている。

- ✓人口の密集度：人口密集地では大規模集中型の水供給が可能だが、過疎地では高額になる。
- ✓送水距離などの地理的条件：半島の先端地域などでは送水コストがあがる。
- ✓水道管路の敷設状況：水道インフラ経年劣化は全国で課題。給水車運搬は水道管よりも高額。
- ✓政治：水道インフラ保守更新財源の無い地域が発生。近視眼的な価格設定等の不採算の問題。

国内においても水利用システムは、近視眼的な価格設定ではなく、将来の社会受容を見据えた議論により再構築を行う必要がある。

【参考】水の日本地図(朝日新聞出版、沖大幹監修/村上道夫、田中幸夫、中村百一郎、前川美湖著)、Water Aidレポート“Water: At what cost?”などを参照しCRDS作成
<https://washmatters.wateraid.org/publications/water-at-what-cost-the-state-of-the-of-the-worlds-water-2016> (2019年5月アクセス)

図 2.2.1 国内における水道水の値段

なお、工業用水では1000リットルあたり30円程度、農業用水では3円程度が我が国の平均的価格と見積もられ、経済的効用のみを見た場合は留意が必要である。経済的価値を交換価値、使用価値で考えれば、水は使用価値が高いが、食料やエネルギーと比べ交換価値が低い特徴が価格に表れている。差益のみ見た場合、ミネラルウォーターのボトル詰め飲料水は0.5リットルあたり100円程度で販売されており、理想的な一物一価は現実の市場では容易には見られず、一物多価であることを示している。ただし、ボトル詰め飲料水は水道と違って輸送コストなどが必要で、十分に所得のある消費者が対象である点などから、水道水と同列の評価は避けるべきである。本プロポーザルでは、まずは世界において不足する廉価で安全な水の課題に重点を置くこととしたため、ボトル詰め飲料水ビジネスなどの詳述は他に任せている。

なお、日本だけでなく、世界的にも集中型の研究開発と比べ、分散型の研究開発にフロンティア領域が多く存在する。わが国の課題解決のため分散型の研究開発領域を推進することは、世界の水利用リスクの経済的課題にも貢献可能な技術シーズの創出につながる。集中型技術への投資、融資はこれまで多くあるが、分散型に対応したものがなく、社会への浸透が進んでいない。民間の水利用ビジネスをうまく巻き込んだ分散型技術を構築できれば、そのような課題に対するブレークスルーとなる。

海外展開を考えるにあたり、優れた技術であっても一律に適用することは難しい(図2.2.2)。従って、2ページの図1.2のように、現地の社会受容性に応じて参入を見極めることが重要である。例えば、アジアやアフリカでも首都や地方中核都市、工業都市では大量の水の需要があり、資金もある。需要に対して供給が不足し、さらに輸送コストや処理コストがかかり、表流水の水源の汚染リスクもあるといった課題が生まれてきている。それらの課題解決策には商機がある。

ただし、水ビジネス領域においても、すでに水道インフラが敷設された地域に後発参入することは大変難しい。一方、アフリカやアジアの乾燥地では、我が国の最も高い水道料金価格帯と同等以上の価格となっている。世界に数多く存在する平均所得が月1万円相当に満たない層の金銭感覚では、この価格帯の水道水は極めて高価な商品となっている。このような層に対して廉価に安全な水を供給する技術の創出は社会的に極めて価値が高い。

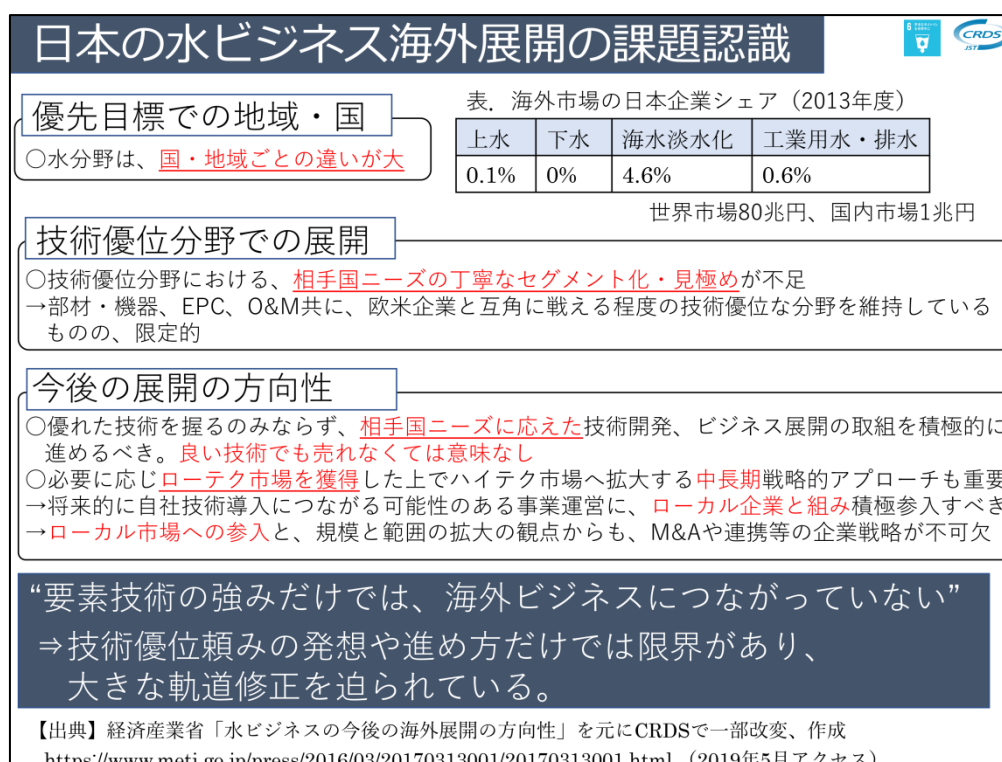


図 2.2.2 日本の水ビジネス海外展開の課題

（2）社会的効果の考察

社会的効果として、我が国の水道、下水道設備は公共サービスの代表的事例とみなされている事実留意する必要がある。水道、下水道がセーフティーネットとして機能してきた役割を引き続き担える姿が何よりも望ましい。水利用においては技術的側面に加え、政策や地域共同体の意思形成に関わる社会的側面の問題が多いことも指摘されている。この側面に向き合うことは公正で持続可能な社会を考えるための入り口として有意義である。

我が国の社会構造は引き続き徐々に変化していく。中長期観点で2050年の姿を見据えたとき、現在とは異なる社会構造に変化した像が予測される。日本全体の人口減少・少子高齢化および、都市部への人口移動が相俟って、特に過疎地域における地域コミュニティの衰退は深刻な問題となる。

農村地などの過疎地域では、1人当たりインフラ整備費がさらに高額になってしまう。もし井戸水、湧水が水源として利用可能な場合は、分散処理の検討により、経済的負担の少ない救済策を講じられる。もしそのような廉価な水源が利用できない場合、離散化に伴ったネットワーク型水処理拠点を設け、地域共同体のハブ的な役割を果たす次善策が考案される。水処理の技術として対応可能でも、担う人が力を発揮できなければ持続性が構築できないという現実的課題もある。

過疎地域においては、国内においても海外においても持続的な水利用のためには、地域共同体の人々の力が主要な要素となっていく。必要なメンテナンスや維持管理を現地で行わなければならない、良い技術、良い装置があるだけでは根付かず終わってしまう。そのためには、現地の住民や事業関係者などの利害関係者を巻き込んだ取り組みをもって地域共同体の力を活用した継続性をもたせることが大切である。

中小規模の都市部において、コンパクトタウン化を進め、集中型水処理の適用範囲に含める方が有効である。ただし、集中型に含められない外縁地域が必ず残り、地域共同体の力を活用した分散型も混合して検討する必要がある。

大都市圏での集中型水供給は一般市民にとって益々ブラックボックスの状態となる。それに対し、自ら水管理を担う地域との交流や、学習の機会を通じて、都市生活を送る人々にも水利用の恩恵を思い起こす契機ともなる。

なお、研究開発によってコスト低減が図れたとしても、水道、下水道料金を短絡的に無償化することは、中長期視点でみれば誤謬である。世界の事例をみても、無償化すると節水の動機が働かなくなる側面がある。すると、水道設備保全、更新費の拠出も難しくなる。このように社会的効果と経済的効果は密接に相関しており、分離せずに捉えることが中長期的に正しい選択肢につながる。

2-3. 科学技術上の効果

(1) 社会受容を満たす破壊的技術の育成と包摂的イノベーションへの貢献

多様な水利用リスクを解決するためには、国内、世界ともに包摂的イノベーションが重要である。科学技術によるイノベーションの様式には諸説あるが、現在もっとも影響力ある学説としてはクレイトン・クリステンセン教授による分類があげられる。イノベーションの様式を詳細に考察し、従来型の技術改良、革新的な技術創出、主流技術を破壊的に逆転する傍流技術（図 2.3.1）を区分し、経営学的思索が深められている。本提案は、それらの3つの視点を含めた包摂的イノベーションを理解、推進できる人材層を拡大することを狙うものである。その理由として、世界における水利用リスクは、適用地域の気候や、住居の集中度、都市インフラの経年状況、共同体の価値観などの条件に応じ、一律ではない。適用地域に無理やりに単一技術を適用するのではなく、広い視野をもって適用地域の条件にあった技術手段を選択しなければ、根付くことが難しい。現実をみると、包摂的イノベーションの検討が有効な解決手段となる。

とりわけ、開発途上国や農村地域などに適した技術開発は、先進国や都市部での技術開発と比べ未開拓の状況である。そのような未開拓領域においては、主流技術を破壊的に逆転しうる傍流技術が生まれる潜在性があり、新しい研究開発を推進することは理にかなっている。また、我が国の研究開発力の実践力維持という観点においても望ましい。

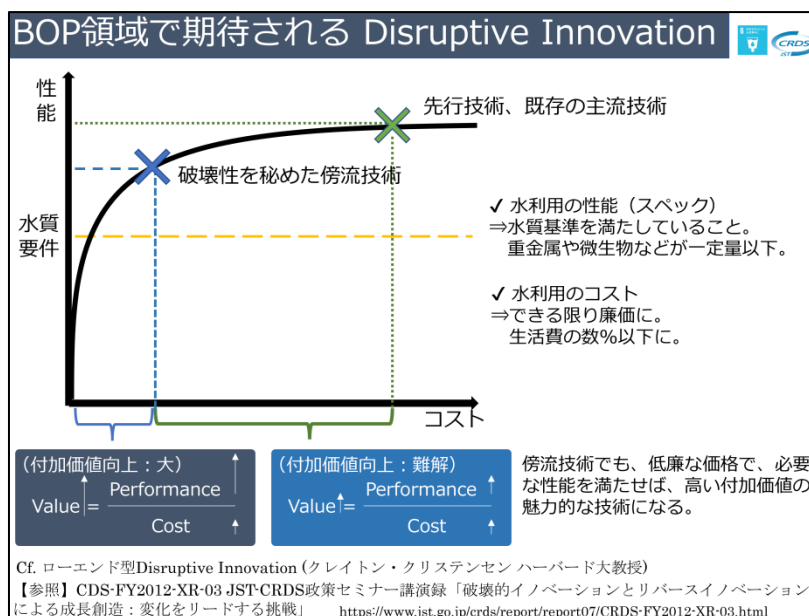


図 2.3.1 主流技術を破壊的に逆転する傍流技術の概念図

水利用リスクに対する包摂的イノベーションのための技術分類を示す（図 2.3.2）。市場が成立しており、相対的に所得に余裕のある地域では水ビジネス領域として海水淡水化や再生水が、市場未形成の ODA 領域には井戸や湧水が位置付けられる。初期的市場が存在している BOP ビジネス領域としては、小型浄水器や凝集剤が位置付けられ、研究開発課題が未だ残っている。BOP ビジネス領域では、従来型の集中型水供給とは異なる要求性能も必要となり、新しい研究開発のアプローチが求められる。ODA 領域や、BOP ビジネス領域の研究開発を促進することにより、SDGs に直接的に貢献することができる。

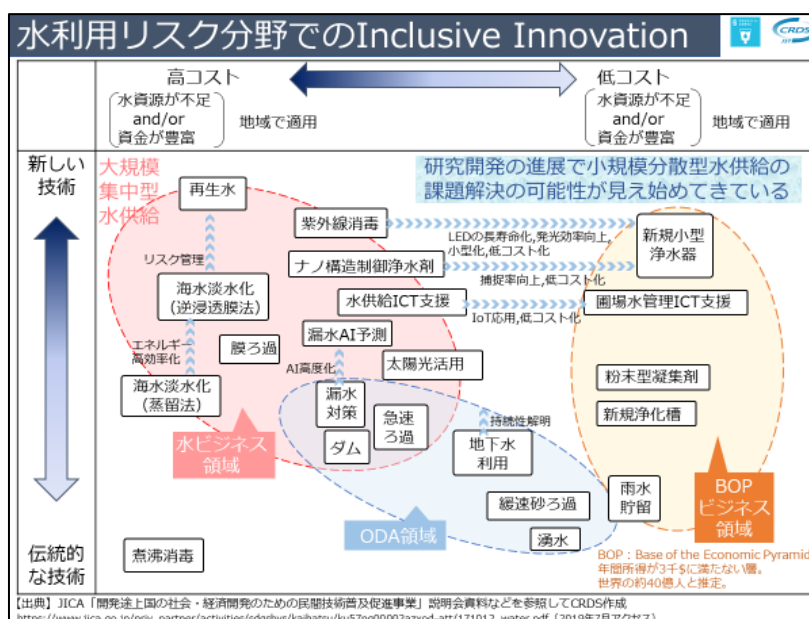


図 2.3.2 水利用の技術マッピング

(2) 社会実装に向けた新規学問領域の開拓

先述の課題解決には、図 2.3.2 で示した水処理技術に加え、水循環システム把握、実践的診断、協働・対話型社会実装も必要と考えられる。そのうち、協働・対話型社会実装については、再生水のような先鋭的技術を考えると必要性が理解しやすい（コラム 5 参照）。再生水は客観的に安全が担保された水質でも、感覚的、主観的に健康衛生に不安をもたらす側面がある。そのような水利用リスクに関しては、研究者が、多様な利害関係者に向けて客観的に科学知識提供を行うという努力だけでは、容易には進展しなかった事例がみられる。一方、研究者と多様な利害関係者が協働・対話を行うことで、相互間の信頼関係が構築され、高い次元の理解と研究の深化がもたらされた事例が注目される。理系と文系という区分さえ越境するが、世界的に感銘を与える研究開発では、このような要素まで重視した研究開発が推進されている。

近代の科学研究の方向性を第 1 種基礎研究とみなすと、そのような社会実装を志向する方向性は第 2 種基礎研究にあたりと捉えられる（図 2.3.3）。

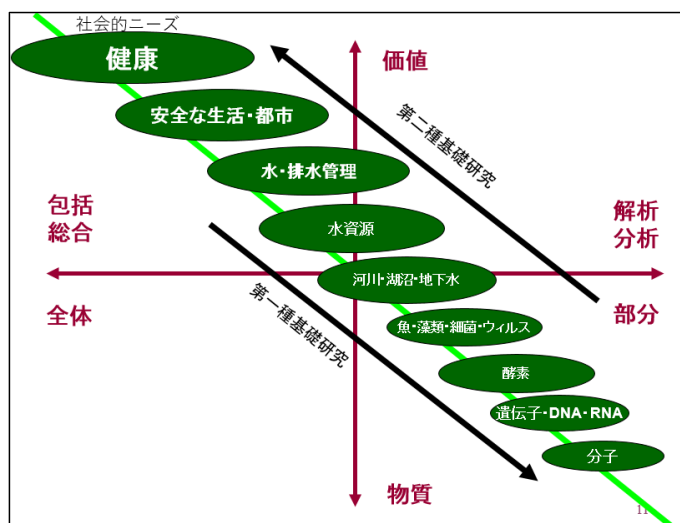


図 2.3.3 水利用リスク研究における 2 つの方向性（片山東大教授 WS 資料より）

水分野においても多くの研究は第 1 種基礎研究に属する。細分化した詳細を解明していく方向性で、様々な学術的理解の蓄積は進んでいる。一方、社会実装を志向する場合は第 2 種基礎研究の方向性が欠かせない。全体を包括し、多様な価値を示していく研究開発の方向性となる。

また、水利用リスクが平均的に改善してきたようにみえる現在、我が国においては水利用における価値の議論ならびに規範と根拠に基づいた社会実装が本質的に求められている。水利用リスクに関して、先進国における疾病への費用対効果という観点に限ると、効率が悪く見えるかもしれない。一方、世界に視野を広げると、途上国の農村部などで数億人の人々に対して改善すべき余地がまだ多くある。さらに、水利用において守りたい対象は、もっと広くて多様である。安全は大事だが、安全だけが満たされたならば完結するわけではない。意思決定のための学問領域であるリスク学分野において、先進国でも古くは一般的に人々の「命」や「健康」が守りたいものとして多く研究されてきた。現在それらが改善されてきて、生態系、利便性、子孫、文化などと守りたいものの価値が広がっている。研究段階から、多様な利害関係者と議論しながら、研究の方向性を検討する協働・対話の枠組みがあると、研究者側が価値を共有したり、定めようとした

りする。価値が共有されると、規範や根拠に基づいたリスク管理の社会実装もできるようになり、利害関係者の参画による対策が推進され、生きたいと思う世界に関与する、という実感を様々な人たちが得られるようになる。設計科学としても捉えられる水利用リスク研究から、このような規範の議論を追及していくことは、他の環境分野にも良性の刺激を与える効果が期待できる。加えて、こうした協働や社会実装に関する研究事例を蓄積し、我が国の学術コミュニティにおいても評価される潮流を形成できれば、更に広がりをもって良いフィードバックをもたらせられる。また、水利用リスクではアセスメント、マネジメントに関する研究報告は多いが、コミュニケーションは1%程度と少ない（図 2.3.4）。SDGs の目標 6 中にある「水と衛生に関わる分野の管理向上における地域コミュニティの参加を支援・強化する」に関する科学技術を高度化する効果も期待される。

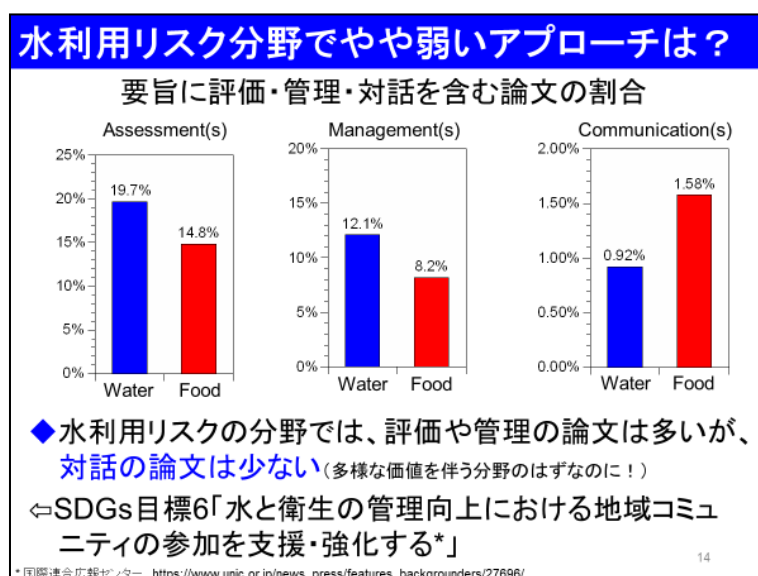


図 2.3.4 水利用リスク分野でやや弱いアプローチの考察（村上福島県医大准教授 WS 資料より）

コラム5 再生水の利点と課題

再生水は水のリサイクルと呼ぶことができ、複数の利点をもつ。SDGs の目標 6 の中にある「安全な水の再利用（リサイクル）を実現する」は再生水を指している。水の再利用は、安定した水資源、含有栄養素の資源利用、貴重な淡水資源の保全、汚染物質のマネジメント、エネルギーコスト負担の低減といった多くの利点がある。再生水は宇宙用途などから実用化が進み、アメリカ、シンガポール、オーストラリア、南アフリカといった国々では既に飲用水利用まで普及が進んでいる。中国、イスラエルなどもたいへん注力している。我が国には技術優位性があり、工業用水の再利用率は 80%～90%程度と非常に高いが、生活用水の再利用率はわずか 1%程度である。

我が国における再生水の利用率が低い理由として、心理的抵抗感、病原微生物や排水中の新興化学物質のリスク、コストといった課題がある。それらの課題を解決し、水の用途ごとに使い分けを行うことで、環境負荷や経済的負担、エネルギー損失などの低減につながる。(図 2.3.5)

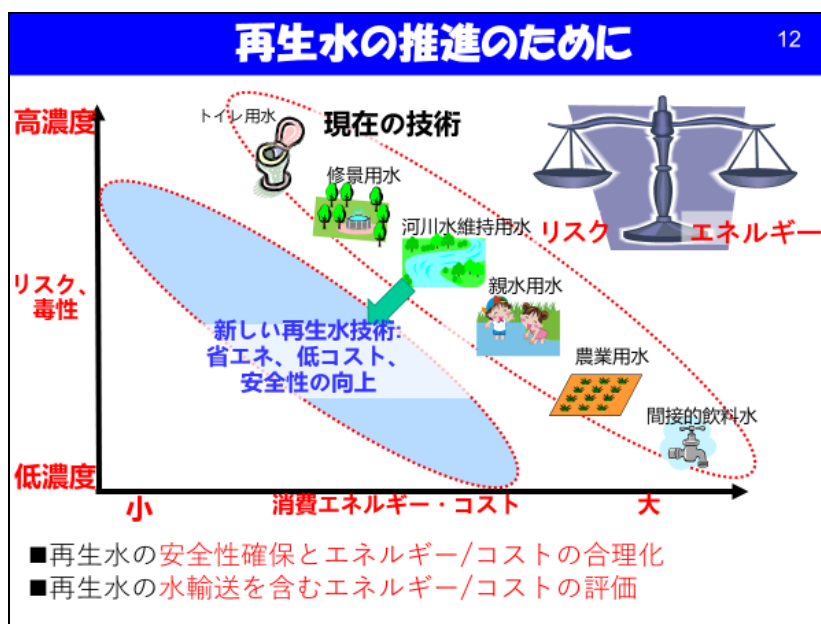


図 2.3.5 水の再利用の推進のために必要な課題（田中京大教授 WS 資料より）

心理的抵抗感の課題については主観的な要素が鍵となる（コラム 6 参照）。病原微生物などのリスクの課題では客観的事実の蓄積、咀嚼の要素となる。コストの課題には、生活用水、工業用水、農業用水それぞれの既存の水源の水の価格や、必要な水質が指標となる。導入の前に、適用範囲やトレードオフなどの客観的な見定め、そして協働・対話が必要である。どのような水質の水から、何に使う水を作るのかという道筋を明確にして、実際に使われている水資源との価格競争性を持つ必要がある。再生水の利用によって、自然環境の貴重な水資源を守られること、経済的負担が少なくできること、農業用水であれば窒素やリン不足を補えることなどの共通理解が必要となる。社会受容性のためには、住民などの利用者との協働・対話を通して、時間をかけて共感を醸成する道筋が有効である。

3 具体的な研究開発課題

(1) 水循環システムの把握

水利用リスクを正しく把握するための研究開発であると同時に、解決策を検討するための基盤となる知識を提供する研究開発となる。水循環に関わる素過程を明らかにする基礎研究課題と水資源の管理、活用のための応用研究開発課題をともに包含する。世界規模から河川流域圏、地域共同体生活圏までのそれぞれの階層での水循環が対象となる。自然の水循環システムの変化に加えて、人間活動が与える変化も対象とする。直接的な水利用に加えて、間接的な水利用である仮想水も含まれる（図 3.1）。

淡水資源は生活用水だけでなく、食料生産のための農業用水や経済活動のための工業用水にも必須である。また、安全、安定的に淡水を供給するためにはエネルギー利用や経済的負担などの要素も必要となる。淡水資源とそれらの人間活動に関する要素は相互に関連しているため、本研究課題が対象とする学問領域は、水分子の物質的性質の研究領域だけでなく、自然科学全般に跨る複合型学問領域かつ学際領域となる。さらに、社会・経済－水文学などのような学問領域越境型も必然的に含まれる。

たとえば、国内の水利用の一般的な形態として、水源は過疎地で貯留され、中山間地の農村部を経て、河口の都市部や湾岸工業地域で使用され、海に到るという河川流域圏のつながりがある。このような前提を指標化や可視化し、健全で持続的な水循環マネジメントシナリオを設計する研究開発課題である。

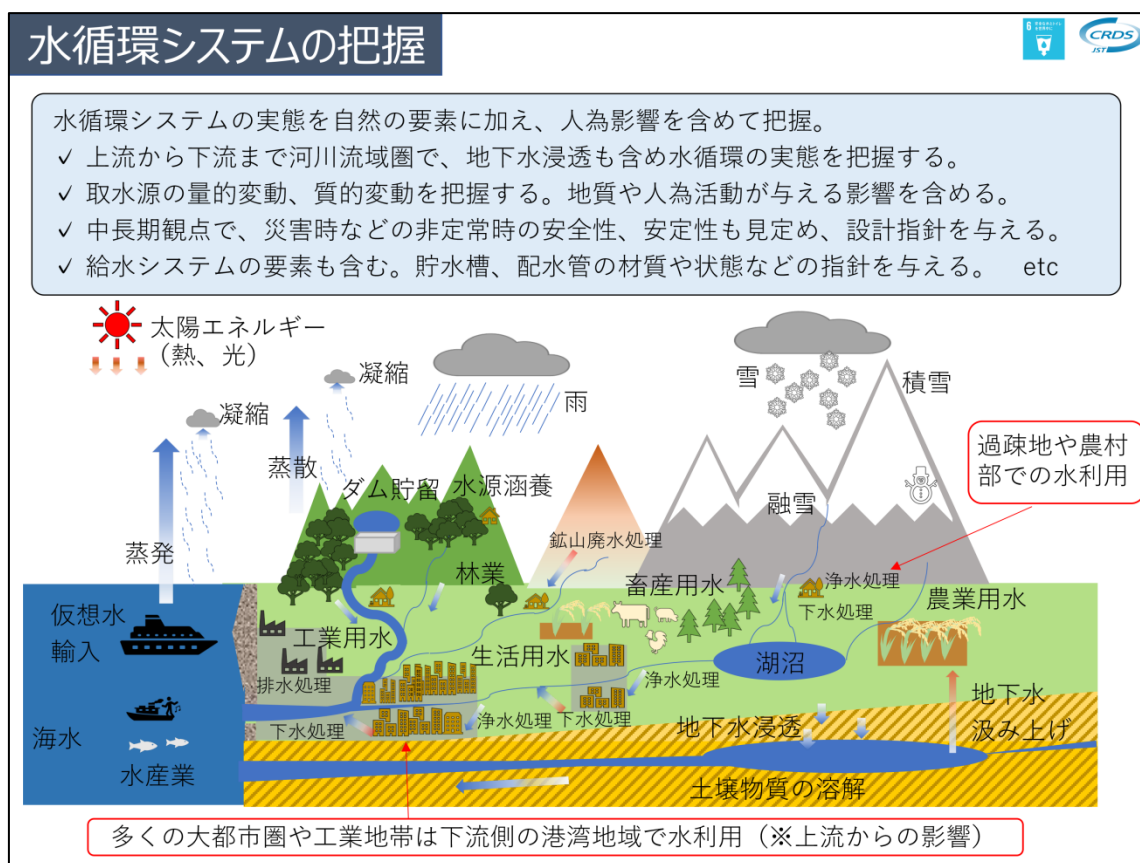


図 3.1 水循環システムの把握

具体的には以下のような研究開発課題事例があげられる。

- ・環境変化に伴う水循環システム変化と持続可能シナリオ構築。たとえば、気候変動に伴う降水現象の極端化、温暖化に伴う微生物リスク増大、森林植生の変化などが水利用に与える影響を評価する。それらをもとにシナリオを構築する。
- ・社会変化に伴う水循環システム変化と持続可能シナリオ構築。たとえば、世界の人口増大と経済成長、都市の過密化や土地被覆、農村の過疎化や農地利用変化などが水利用に与える影響を評価する。それらをもとにシナリオを構築する。
- ・仮想水やウォーターフットプリントとしての、モノやサービスの水利用の可視化。ライフサイクル全体での影響を定量分析し、持続シナリオを構築する。
- ・水利用に必要なエネルギーの可視化。地理条件などを踏まえた水道管敷設とボトル運搬との比較シナリオ作成、浄水・下水処理や海水淡水化のエネルギー高効率化のコベネフィット評価。
- ・水源の原水の変動性の把握と、流域で必要な水質との比較。例えば病原微生物の流域拡散とリスクの相関、土壌不純物分布推定と流域圏でのリスクシナリオ設計。

などがある。(CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2018-WR-07」「CRDS-FY2019-WR-04」等を参照)

(2) 水利用リスクのマネジメントのための水処理

水処理は水利用リスクを制御するための鍵である。地域の水資源量の不足に対して海水淡水化による造水技術や、水源水質の安全性のばらつきに対する浄化処理技術などを含む制御技術である(図 3.2、3.3)。水利用の多様な用途に対して、水処理の要素技術や材料技術だけでなく、科学的に適した処理プロセスや水供給まで含んだシステムを検討する設計工学も含まれる。社会実装のためには、中長期的視点でのライフサイクルコストや水処理、運搬に必要なエネルギー量も検討する必要がある。

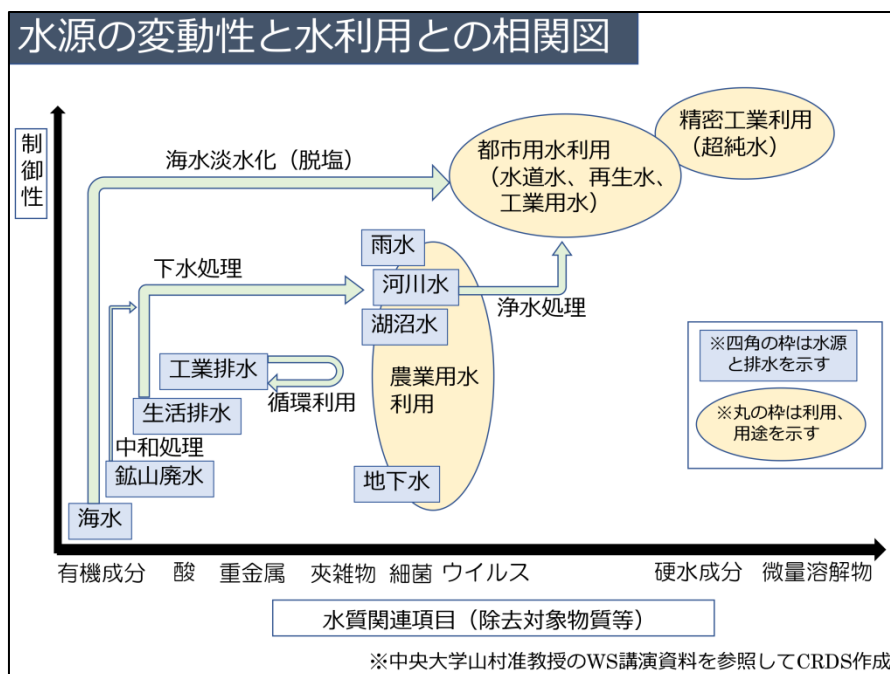


図 3.2 水源の変動性と水利用との相関

安全な水質→汚染物質の曝露に関係				表. 日本水道法における水質検査項目と基準値（51項目）	
表. 汚染物質と汚染源の事例					
汚染物質	自然影響	人為影響	QOL低下	項目：基準	項目
微生物	バクテリア	自然界に分布	排泄物（体内での増殖）	コレラ、赤痢、A型肝炎、下痢疾患	微生物
	ウイルス	自然界に分布	排泄物（体内での増殖）		微生物
重金属・無機物質	カドミウム	自然土壌中に分布	鉱山廃水の未処理	イタイイタイ病	重金属
	メチル水銀	微生物による水銀のメチル化により生成	反応副生成物：水銀触媒のメチル化	水俣病	重金属
	鉛	土壌中に分布	工業利用	鉛脳症	無機物質
	ヒ素	土壌中に分布	地下水	発がん性	無機物質
有機物質	フッ素	土壌中に分布	地下水	骨変形	無機物質
	ベンゼン	原油中に存在	基礎化合物として利用	白血病	有機物質
	陰イオン界面活性剤	自然界に分布（天然石鹸）	合成洗剤として広く利用	関節痛	有機物質
					有機物質
✓微生物： ●病原となる微生物への曝露 ✓他の汚染物質： ●自然の汚染物質への高濃度の曝露 ●人為活動の管理不全による曝露					
				項目：基準	項目
				一般細菌：300個/ml以下	臭素酸：0.01mg/L以下
				大腸菌：検出されないこと	微生物
				カドミウム及びその化合物：0.003mg/L以下	トリクロロメタン：0.03mg/L以下
				水銀及びその化合物：0.0005mg/L以下	プロモクロロメタン：0.03mg/L以下
				セレン及びその化合物：0.01mg/L以下	プロモホルム：0.09mg/L以下
				鉛及びその化合物：0.01mg/L以下	ホルムアルデヒド：0.08mg/L以下
				ヒ素及びその化合物：0.03mg/L以下	亜鉛及びその化合物：1.0mg/L以下
				六価クロム化合物：0.05mg/L以下	アルミニウム及びその化合物：0.2mg/L以下
				亜硝酸塩窒素：0.04mg/L以下	鉄及びその化合物：0.3mg/L以下
				シアニド化合物及び有機シアニド：0.01mg/L以下	銅及びその化合物：1.0mg/L以下
				硝酸塩窒素及び亜硝酸塩窒素：10mg/L以下	マンガン及びその化合物：0.05mg/L以下
				フッ素及びその化合物：0.8mg/L以下	ナトリウム及びその化合物：200mg/L以下
				ホウ素及びその化合物：1.0mg/L以下	塩化物イオン：200mg/L以下
				四塩化炭素：0.002mg/L以下	カルシウム、マグネシウム等（硬度）：300mg/L以下
				1,4-ジオキサン：0.05mg/L以下	揮発性有機物：500mg/L以下
				シス-1,2-ジクロロエチレン及びトランス-1,2-ジクロロエチレン：0.04mg/L以下	有機物（全有機炭素（TOC）の値）：3mg/L以下
				ジクロロメタン：0.02mg/L以下	陰イオン界面活性剤：0.2mg/L以下
				テトラクロロエチレン：0.01mg/L以下	非イオン界面活性剤：0.02mg/L以下
				トリクロロエチレン：0.01mg/L以下	ジェオスミン：0.00001mg/L以下
				ベンゼン：0.01mg/L以下	2-メチルイソボルネオール：0.00001mg/L以下
				塩素酸：0.6mg/L以下	フェノール類：0.005mg/L以下
				クロロホルム：0.02mg/L以下	pH値：5.8以上8.6以下
				クロロホルム：0.06mg/L以下	味：異常でないこと
				ジクロロメタン：0.03mg/L以下	臭気：異常でないこと
				ジクロロメタン：0.1mg/L以下	色度：5度以下
					濁度：2度以下

図 3.3 水の質としての課題

安全な水利用のためには、水に含まれている物質や病原微生物などを用途に応じて除去、浄化する水処理が必要となる。溶質や病原微生物はもともと自然界に分布しているものと、人為的活動で拡散したものの両者がある。ともに影響を把握し、水処理する必要がある。水処理に関する要素技術は、熟成技術である緩速ろ過、急速ろ過やオゾン処理、活性汚泥法に加えて、以下のような研究開発課題事例がある。

- ・膜分離技術。逆浸透膜、ナノろ過膜、限外ろ過膜、精密ろ過膜、正浸透膜やセラミック膜など。
- ・紫外線応用技術。紫外線発光ダイオード（UV-LED）消毒技術や光触媒利用など。
- ・水処理薬剤。材料としては凝集剤、吸着材、消毒剤、イオン交換樹脂、活性炭など。
- ・生物処理応用技術。膜分離活性汚泥法や自然環境の微生物の水質浄化能力の把握と評価など。

まず、単一技術のみで世界全ての課題を解決するのは不可能であり、用途やコスト、エネルギーなどの多様な条件をグルーピング化し、適切な使い分けや組み合わせ、高度化を検討するのが有効である。

膜分離技術の高度化を目指す場合、コスト単位当たりの水処理量の数値を向上させる軸がある。そのために、目詰まりを防止して寿命を延ばす、除去対象物質を捕捉しながら単位時間当たりのろ過流量を向上させる、といった研究開発がある。なお、学術的観点からは見落とされがちだが、経済的観点から膜分離のコスト低減化を図るための指針を示す研究が高い価値をもつ側面がある。たとえば、ある用途に対して、安全性として必要な機械強度などの要求性能を保ったまま、大幅なコスト低減を可能にする材料や構造を設計する研究開発課題もある。膜処理の導入で他の設備を不要とする方向性もある。いずれも全システムの中で諸性能のバランスをみて設計する戦略が重要である。全く異なる軸として、膜分離技術で実現可能な新しい機能を実証する方向性もある。たとえば、自動・遠隔監視可能な水処理システムの構築のため、膜の目詰まり状態を圧力差とい

量的情報だけでなく、閉塞物質の計測により質的情報で把握可能にしようとする研究開発もある（CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2019-WR-04」等を参照）。

病原微生物の消毒は UV-LED 応用が期待される。我が国の近年の水質事故の約 9 割は病原微生物に起因する。約 8 割が過疎地域などの小規模水道や自己管理型の水供給設備である。これには、使いやすく管理負担が少ない分散型水処理技術（コラム 3 参照）が適しており、塩素耐性菌にも対応する UV-LED が有力である。また、高温多湿のアジア地域の都市部における貯水槽方式の水供給では、使用までの貯留期間に残留塩素が揮発し、微生物が増殖する衛生リスクがある。その対応にも UV-LED は注目される（CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2018-WR-07」「CRDS-FY2019-WR-04」等を参照）。

水源の原水に捕捉対象となる重金属イオンや陰イオンなどが溶存している場合、それらを除去できる水処理薬剤が求められる。吸着材においては、オングストローム単位から数十ナノメートル単位の方法内部の空間構造、表面構造を制御して、捕捉対象物質への選択性を付与する研究開発などが進展している。世界の BOP ビジネス層が安全な水を利用可能な価格で入手できるよう、イオン吸着材と活性炭、中空糸膜などを廉価に組み合わせた浄水器の研究開発などが検討されており、今後が期待される（CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2019-WR-04」等を参照）。

凝集剤においても、米国プロクター・アンド・ギャンブル社が運搬負荷の少ない粉末型凝集剤を実用化し、根気強く慈善事業を継続し、存在感を発揮している。また、膜分離に適した凝集剤などの研究開発が検討されている。新しい凝集剤の研究開発についてさらなる進展が期待される。

その他の水処理技術においても詳細は記述しないが、研究開発の進展に応じて、社会実装を見据えた現地条件などの検討がみられ、より発展していくことが期待される。

（3）水利用リスクの実践的診断

水利用リスクには多様な指標がある。その指標の可視化、および、指標に基づく判断の負担を軽減化する技術に対する需要は期待が高い。多様な指標として、用途に応じて、水質、水量、経済的価格、使用エネルギー、供給水圧などがあり、その検査、観測、分析などの負担がある。

水質指標に関しては、図 3.3 に示した不純物を検出、可視化する技術が必要となる。ただし、原水に不純物成分の混入経路が存在しない場合、病原微生物に検出の焦点を絞られる。病原微生物として薬剤耐性菌やノロウイルスなどがある。病原微生物の有無や存在量の情報把握のため、極微量や夾雑物存在条件での検出、測定的时间短縮化や手法簡便化、リアルタイム検出、網羅的一斉解析などの課題がある。さらに挑戦的だが、病原微生物の実際の感染能力や増殖能力といった課題もある。これらを実現するアプローチとして、微小電気機械システム（MEMS）や次世代シーケンサーなどのナノ、バイオ技術を応用して、ウイルスを検出する研究開発がなされており、これらの進展が注目される（CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2018-WR-07」等を参照）。

また、過疎地域の課題や災害時への多重防護策として、国内の地下水源の病原微生物の混入実態調査や挙動研究により水利用リスクを可視化することも有効である（CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2015-WR-08」等を参照）。

これらの研究開発に当たり、基礎研究段階から、将来は実際のフィールドに適用するというモチベーションをもち、適用可能性を段階に応じて検証することが重要である。

次に、水量やエネルギー、経済的価格の指標に関しては、情報通信技術を応用した水インフラ

や水処理の可視化が期待される。たとえば、IoT 応用による農業用水の遠隔・自動制御の実用化、実証試験が行われ、節水効果に加えて省力効果、経済効果があることが明確に示されている（コラム 4、CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2019-WR-04」等を参照）。他にも、AI による上下水道管の脆弱性予測・検知、機械学習による水処理設備のエネルギー高効率化などの注目される研究開発が行われている。

このような情報通信技術を活用した分散型システムの社会実装の推進は、わが国が進めている Society5.0 とも整合する。農業用水への ICT 導入は日本だけでなく、アジアなどの海外にも波及可能である。アジア各国も日本に続いて高齢化が進み、人口が減少していく。限界集落などでの小規模分散型の水処理設備の住民での運転、管理、遠隔サポートが必要になるという課題は、現在の農業用水の自治管理の姿と一致する。我が国の人口減少・超高齢化は、現時点では国内問題だが、将来を見据えると、少なくともアジア圏の農業や一般水路にも共通する問題となる。縮小しつつ残っていく地域社会の中における水管理技術は海外からも注目される。

さらに、公平で持続的な水利用に向けたデータ資源の利活用などの課題もある。我が国では、水利用に関わるデータを長期にわたり蓄積しており、その利活用は可能性が高いものと期待されている。一方で、ステークホルダーが関係する課題として、見える化した際に生じる課題がある。データをオープン化するにはセキュリティの課題などを含めた議論があらかじめ必要となる。情報通信技術で可能となることに加えて、水利用へ与えるインパクトの先見的な考察、議論を重ねる必要がある。

（4）多様な利害関係者との協働・対話型社会実装

水利用リスクは人々の多様な価値観にも関わるため、合理性、非合理性あわせもつ人間性の要素を切り離すことができない。特に再生水（コラム 5 参照）などの先鋭的な研究開発成果では、科学的な分析結果の蓄積や客観的事実の咀嚼という欠如知識提供モデルだけでの社会実装が難しい。河川流域圏でみると、最も上流に当たる地域を除けば、人々は非意図的で間接的な再生水利用をすでに行っている。しかし、先入観や印象で判断する先天的習性をもつ人間にとって、科学的に安全性を確認した再生水であっても意図的な利用は心理的抵抗感を拭えない。客観的な事実提示のみでは、そのような諸個人の主観に対し、解決策にならない事例がある。特に、新しい先端技術を導入する場合、一般の人はよく知らない異質なことは避けたいというような不安心理や拒否反応を生みだすことさえある。また、飲み水や食べ物に関わる問題は、飲む側、食べる側の市民の側から選べない問題であり敏感になりやすい。数字や物質での説明で留まらず、時間と労力がかかるが、市民への見せ方、理解のされ方が重要となる（コラム 6、附録 3 参照）。

そのような背景から、協働・対話で水の経済的価値、社会的価値、環境的価値などを共有することで、共同体としての共感を形成する共創モデルが注目される。欠如知識提供モデルを従来型の一方向コミュニケーションとした場合、この協働・対話型共創モデルは現代的な双方向コミュニケーションといえる。

研究者による科学的知識を咀嚼した説明に加え、地域社会の利害関係者との協働・対話を通して、研究成果の社会実装に加え、地域共同体の活性化にも貢献する効果がある。さらに、研究者も触発される作用も指摘されている。従来型ではみられない、このような相互作用は特筆に値する。

工学系における議論では、実用性や即効性、何の役に立つのかといった指標を重視する場面が多い。このような視点から見ると協働・対話の効果は哲学の要素を含み、遠回りのように映る。ただ、そのような指標は大切だが、万能ではないことに留意が必要である。協働・対話には、2つの重要な側面がある。1つ目に行政や専門家から見たら義務的な側面、住民から見たら権利的な側面に関するものがある。これは消費者の権利とも呼ばれ、人々が安全を求めたり、情報を知らされたり、選択したり、意見を反映させる権利があるという民主主義的な価値観に基づく。2つ目は効果的側面である。協働・対話は、評価すべき価値や管理すべきリスクを明示すると対策を推進する上で効果的に機能する。途上国などで、地域共同体の住民のニーズ、実際の現地の状態を知らずに水システムを入れても、うまく進まない事例を我が国は多く経験してきており、それらを通して得られた教訓とも言える。

地域共同体に密接な技術の社会実装を進める際、編年体的な知識伝達や技能訓練では地域共同体の人々にとって無味乾燥で、根付かないことがある。一方で、紀伝体的な理解共有を織り交ぜると地域共同体の人々にとって物語として親しみやすく、持続性を形成することがある。中長期視点で見れば、このような社会受容性や、社会との媒介の仕組みは、無視できない大切な要素である。

新技術の導入に限らず、縮小していく住民コミュニティにおける水供給システムにおいても、将来の姿、維持方策という観点で意思決定を図るフューチャー・デザインの考え方を導入し、住民コミュニティで合意形成を作り上げていく取り組みなどが良好事例として注目される。

協働・対話は研究する主体も良い方向に導かれる側面があり、水利用リスク分野でみられ始めつつあるこのような研究の潮流はたいへんに良い流れと受け止められ、ぜひ促進すべきである。(附録2、CRDS ワークショップ報告書「CRDS-FY2019-WR-04」等を参照)

コラム6 協働・対話型共創モデルが重要となる背景の哲学的理解

合理性、非合理性あわせもつ人間性の要素として、先人の慧眼により優れた分析がこれまでになされている。哲学分野の知見を借りて考察を整理する（図 3.4）。大陸合理論のルネ・デカルトの示した客観的合理性の獲得と説明が、今日の議論でもよくみかけられるアプローチである。一方で、イギリス経験論のフランシス・ベーコンがイドラと呼称した偏見、先入観といった人間の主観の要素は無視できない。新技術の社会実装を進める際、そのような主観の要素が、最大の障壁となる場面さえ現実として見られてきた。主観と客観という対立の視座のままでは、本質的に優れた技術であったとしても、社会実装が進まなくなることがみられる。

ここで、西田幾多郎が善の研究で示した思索のように、一円的な主観と客観の見方に視座を転回する。その視座に立つと、客観的事実に対しても、主観に応じた取得情報の取捨選択がとられてしまう現実の構造を現実として受け入れられる。従来型の二元対立的視座からでは、客観的事実に沿わない主観的態度は徹底的に改めるべき非難対象となるが、これでは対立構図を生み断絶を深めてしまう。言い換えると、現実の社会受容を相手として、新しい科学技術の社会実装を目指すという善良な動機に関わらず、従来型の二元対立的視座しか持たない場合、善悪二元論に変容し、本末転倒に陥ってしまうことさえある。そのため、多様な人間の価値観を総合した社会受容を一円的な構造観で浩然と捉えた哲学的視座を併せ持つことが妥当となる。

多様な利害関係者との協働・対話により、自他共栄を目指す道筋を探索するアプローチは困難だが、大局的にみると、効果的である。

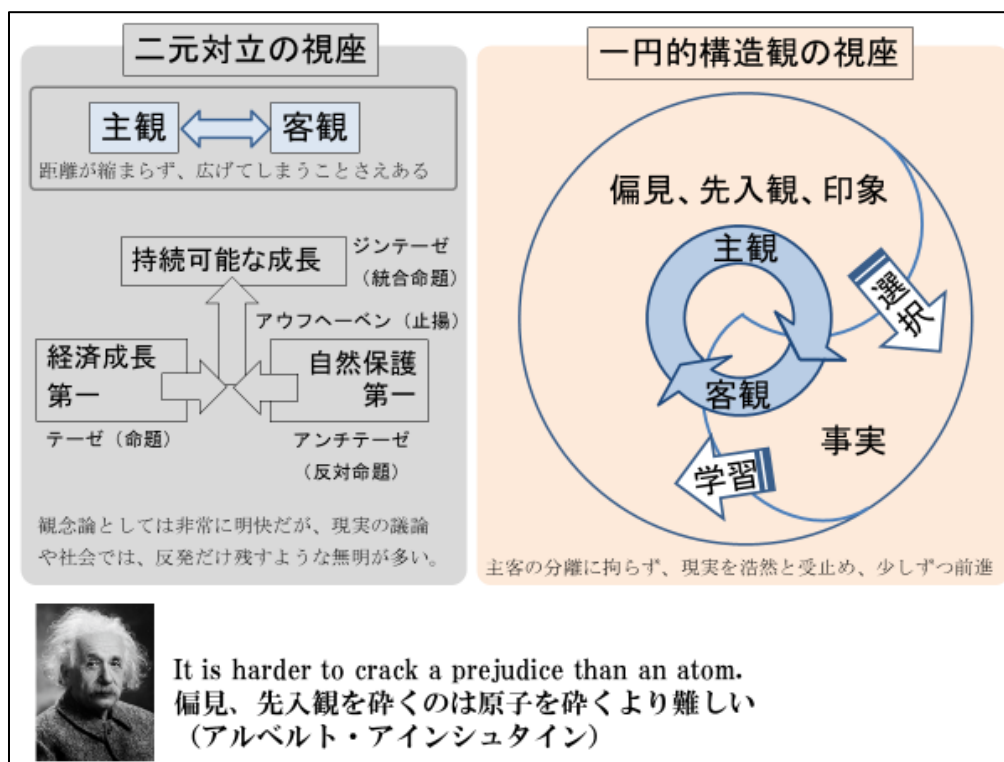


図 3.4 主観と客観の一円的な視座の概念図

4 研究開発の推進方法および時間軸

SDGs の目標期限が 2030 年であることは意識する必要がある。水に関する目標 6 では、世界中の 100% 全ての人を取り残されることなく、安全な水へのアクセス可能になること、下水の衛生を確立することなどが掲げられている。この背景には、SDGs の前身にあたる MDGs で掲げられた水の目標が中国やインドの経済成長によって達成され、アフリカやアジアでの水汲み労働などの深刻な問題の改善が未だ残っていることなどを受けている。また、先進国による開発途上国への技術協力事業などにおいて、いったん技術導入されても、事業終了後に根付かず途絶えてしまった事例からも学びがある。

これらの背景から、2030 年の極めて挑戦的な目標を理想像として踏まえながら、2030 年よりも先の長期視点を同時に見据えることが実践的知恵として重要である。言い換えれば、近視眼的な流行に刹那的に追随するのではなく、根付く研究開発と社会実装の良好事例を増加させて、持続的な潮流を形成していく中長期育成の観点をもつことが重要である。

科学技術イノベーション政策の手段として、水利用リスクマネジメントのための包摂的イノベーションプログラム（第 1 期）の推進が望まれる（図 4.1、4.2）。推進方法として、多様な地域の水利用リスクという縦糸と多様な専門分野という横糸を紡ぎあわせたネットワーク型研究、将来を支える若手研究、海外との共同研究の推進などがあげられる。ネットワーク型研究としては、中長期視点で根付く社会実装を見据え、課題解決型基礎研究や融合型、越境型研究を促進することが有効と考えられる。その支援中から、多様な利害関係者との協働・対話型社会実装を推進し、相互信頼関係を構築していくことが望まれる。そして支援終了後には、自治体や民間事業者、上下水行政や農業用水行政の所管省庁の実証事業や施策に接続していくことが期待される。課題解決型基礎研究の推進段階から、中長期視点での枠組みを形成していく姿が望ましい。短期的に進捗は示しつつ、中長期の視点を維持することが重要である。

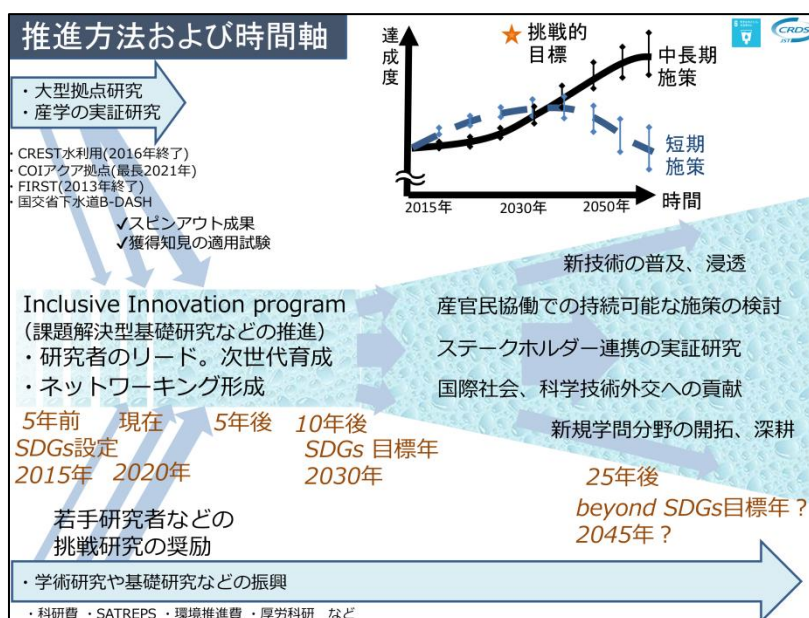


図 4.1 推進方法および時間軸の構想

推進方策



Global & Local : 着眼大局+着手小局（実験室と現地検証）

- ✓ 現地試験を行わないと想定が及ばない多様な自然条件、人為条件がある。
- ✓ 途上国、先進国ともに大都市圏よりも農村、過疎地等のほうが困難。

水循環システム（全体像）の視点をもって要素研究を推進

- ✓ 水循環システムの実像を科学的にしっかりと把握し、指針を立てる。
- ✓ 安全な水質を適量、利用可能にするための水処理、実践的診断など水利用マネジメント技術を開発する。普及可能性の端緒的な検証を進める。

学のConscienceで産官を先導（水供給は信頼構築が必須）

- ✓ 水道事業者（官）やコミュニティは新技術の導入には慎重。まず学で科学的にしっかりとした検証することを期待している。また、複雑で巨大な水システム全体視点からの助言という役割も学に対して期待している。
- ✓ 学は企業（産）と協力しつつ、Conscience-drivenで研究開発を実施。

挑戦的失敗を受容できる進め方（寝ていて転んだ人はいない）

- ✓ モデル実験、小規模検証などの“small test”でアイデアをまず検証する。
- ✓ 目指す製品・サービスはエンドユーザーの使用手法や保守などの実際を見据えてデザイン志向で検討する。
- ✓ コスト試算する場合は粗くとも楽観と悲観の両方のシナリオを検討。

図 4.2 推進方策（留意点）

我が国においては、水循環基本法（平成 26 年制定）、新・水道ビジョン（平成 25 年策定）、新・下水道ビジョン（平成 26 年策定）などがまとめられており、水利用に関わる関係者の努力は続けられている。特に国内の大都市圏においては高度な運用、管理がなされ、世界の中でも高い水準の技術を保有している。海外との共同研究、技術協力も進められている。しかしながら、水利用リスクの課題もまた存在している。たとえば、水道・下水道設備の脆弱化、水管理技術伝承の断絶、水道事業者の財政悪化、水災害の頻発化などの予測可能な水利用リスクへの対応があげられる。さらに世界をリードする学際研究や、地域の課題解決に資する実証研究、適応研究は国内大都市圏の技術熟成度と比べて手薄である。昨今、このような課題に対して、新材料や ICT などの進展を背景とした応用研究、さらに協働・対話や国際共同研究などを進める研究者らにより、課題解決に向けた兆しがみられつつあることは大変素晴らしい。また、水利用の価値を共有する利害関係者は住民、水道事業者、企業と広がりをもつ。多様な利害関係者との連携や協働の経験をもつ若手研究者の支援は、将来の水利用の安全、安定を担う人材層の維持、育成にもつながる。

海外との共同研究の振興も望ましい。水利用リスク研究は人類、共生、福祉といった枠組みで語ることができ、本質的に平和を希求する学問でもある。世界の研究開発は盛んであり、科学技術外交という観点では極めて有効である。海外との共同研究を促進し、世界各国の文化や慣習の違いを知る研究者層を拡大することは我が国においても十分な価値をもつ。海外の水道未普及地域においては、投資や持続的なビジネスモデルの構築といった困難は残されている。さらに、住民との信頼関係の構築や価値観の共有がなければ、根付かないという難度の高さも依然として存在する。一方で、世界の地域の水利用を健全で持続的な姿とする取り組みは、遠く離れた地での出来事であっても、感銘を与えるものである。水利用リスク分野の世界をリードする研究は、そのような潮流に向かいつつある。我が国にとっても視野が広く、社会受容に根差したマネジメントができる研究者層の育成、維持は、我が国の発展につながるものとなる。

付録1 検討の経緯

JST 研究開発戦略センター（CRDS）では 2018 年度に戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補を CRDS 戦略スコープ 2018 策定委員会において指定し、2018 年 6 月に CRDS 内に検討チームを発足させた。その後、検討チームにおいて提言作成へ向けた調査・分析・検討を重ねた。

チームの活動では、調査によって国内外の研究開発動向・技術水準を明らかにしながらスコープの焦点を絞り、その過程において提言の方向性を検討するため、国内外の学協会などにおける意見交換や、有識者とのインタビュー・意見交換を実施した。それに並行して、国内外の文献資料や統計情報などによって俯瞰的、中立的な視点にたつて分析を進めた。また、下記の 3 回のワークショップを開催し、最新の研究開発動向などの知見を得た。

これらを通して得られた知見と CRDS の環境・エネルギーユニットによる俯瞰調査で得られた知見を総合的にまとめ、本戦略プロポーザルを発行するに至った。

・「環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理」俯瞰ワークショップ（平成 30 年 3 月 9 日開催）

13:30-13:45 開会挨拶 佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）

趣旨説明 松本麻奈美（JST-CRDS フェロー）

13:45-14:10 「水中ウイルス濃縮法の開発から水安全工学へ」 片山浩之（東京大学 准教授）

14:10-14:35 「紫外発光ダイオードによる水中微生物の制御：現状と展望」

小熊久美子（東京大学 准教授）

14:35-15:00 「水中ウイルスの迅速・高感度検出のための MEMS アプタセンサー技術の開発」

北島正章（北海道大学 助教）

15:00-15:25 「光を用いたウイルス検出における現状と課題」

藤巻真（産業技術総合研究所 研究グループ長）

15:35-16:00 「病原ウイルスの水環境中動態解明を目的とした網羅的解析技術」

三浦尚之（国立保健医療科学院 主任研究官）

16:00-16:25 「薬剤耐性菌のリスク：下水処理場でのモニタリングと水利用でのリスク評価」

渡部徹（山形大学 教授）

16:25-16:50 「下水道における病原微生物への対策と課題」 李善太（土木研究所 研究員）

17:05-17:55 話題提供 野田英之（日立製作所 主任研究員）

総合討論 司会・進行 松本麻奈美（JST-CRDS フェロー）

17:55-18:00 閉会挨拶 佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）

※本ワークショップの結果は CRDS-FY2018-WR-07 として CRDS より発行している。

・サイエンスアゴラ「安全な「水」の科学技術を考える」ワークショップ（平成 30 年 11 月 10 日開催）

13:00-13:10 開会挨拶 佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）

趣旨説明 松村郷史（JST-CRDS フェロー）

13:10-13:30 「巨大都市東京における水道システムの管理」 田村聡志（東京都水道局 技監）

13:30-13:50 「東京下水道の発展と今後の展望」 襲岩滋之（東京都下水道局 技術開発担当部長）

- 13:50-14:10 「持続的な「水・人間環境」構築を目指した「水」大循環シミュレーション」
大西領（JAMSTEC グループリーダー）
- 14:20-14:40 「水不足問題と新しい造水技術 ～世界の水不足問題と逆浸透膜などの進展～」
都築浩一（日立製作所 技術アドバイザー／COI アクア・イノベーション拠点機構長）
- 14:40-15:00 「タンザニアの水調査 ～フッ素汚染した水～」 中屋眞司（信州大学 教授）
- 15:00-15:20 「水と衛生 -紫外線消毒技術の展開-」
小熊久美子（東京大学 准教授／JST-CRDS 特任フェロー）
- 15:25-15:55 全体討論 司会・進行：松村郷史（JST-CRDS フェロー）
- 15:55-16:00 開会挨拶 佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）

・「環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理」科学技術未来戦略ワークショップ（令和元年8月19日開催）

- 13:00-13:20 開会挨拶 佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）
趣旨説明 松村郷史（JST-CRDS フェロー）
- 13:20-13:45 「地球規模の水資源研究の現状と課題」 和田義英（IIASA 水資源プログラム長）
- 13:45-14:10 「農業水利システムへの ICT 水管理技術の導入」
友正達美（農研機構 水田整備ユニット長）
- 14:10-14:35 「浄水膜の現状・課題と今後の技術的展望」 山村寛（中央大学 准教授）
- 14:45-15:10 「水の再利用 CREST その後の発展」 田中宏明（京都大学 教授）
- 15:10-15:35 「水利用リスク研究に必要なものは何か：価値と協働」
村上道夫（福島県立医科大学 准教授）
- 15:35-16:00 「紫外線水処理の新展開 -多様な環境と社会への適応を目指して-」
小熊久美子（東京大学 准教授／JST-CRDS 特任フェロー）
- 16:00-16:25 「フラックス法により実現したイオン吸着材によるローテク型の水ソリューション
-社会実装事例と BOP を含む水システム展開-」 土井達也（信州大学 准教授）
- 16:35-17:55 全体議論 若手水ビジョンの議論紹介 山村寛（中央大学 准教授）
総合討論 司会・進行：松村郷史（JST-CRDS フェロー）
- 17:55-18:00 閉会挨拶 佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）
- ※本ワークショップの結果は CRDS-FY2019-WR-04 として CRDS より発行している。

（※それぞれのワークショップにおける所属、役職などは開催時のもの）

付録2 国内外の状況

国内外の研究開発の推進プログラム、プロジェクトを以降に紹介する。

- (1) JST-CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」研究領域（2009 年～2017 年 3 月、総研究費約 50 億円）

CREST は課題解決型研究開発の支援制度であり、研究領域ごとに公募型研究が行われている。当該研究領域では、気候変動により深刻化する水問題を緩和するための革新的技術を創出するための研究開発が推進された。

水循環、水資源、浄水・造水処理、農業・工業・生活用水としての水利用、下水・排水処理を網羅した 17 の研究開発課題が採択された。大垣眞一郎研究総括と依田幹雄副研究総括らのマネジメントにより、国際的に高い水準にある研究開発成果が多く創出された。特徴として、社会課題解決志向から、水分野に関わる研究を「全てが繋がったまとまり」として捉え、従来は異分野ごとに行われていた研究の相互の協力を強め、融合研究を促進している。

※水に関わる分野は工学分野（土木工学、都市環境工学、水処理学、分析化学、化学工学、情報工学、水資源学、河川工学など）、理学分野（水文学、地質学、地下水学、気象学など）、医学・生命科学分野（微生物学、ウイルス学など）、農学分野（農学、森林学、水産学、植物学、農業土木工学、土壌学など）と非常に広範にわたる。それらの学術的課題に対して、専門とする学協会が個別に活動を深めている。水利用の研究のあるべき姿として、学術の区分よりも経済的、社会的、公共的価値を創造する観点を重視した領域運営がなされた。

(参照) CREST「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」

<https://www.jst.go.jp/crest/water/> （2019 年 10 月アクセス）

- (2) JST-COI（センター・オブ・イノベーションプログラム）ビジョン3「活気ある持続可能な社会の構築」「世界の豊かな生活環境と地球規模の持続可能性に貢献するアクア・イノベーション拠点」（2012 年～2021 年予定、拠点当たり年間 1 億円～10 億円程度の研究開発費）

信州大学を中核として、(株)日立製作所、東レ(株)、昭和電工(株)、(国研)物質・材料研究機構、長野県などが共同で実施している。(国研)海洋研究開発機構、理化学研究所、(一財)高度情報科学技術研究機構、北川工業(株)、トクラス(株)、栗田工業(株)、中央大学なども参画している。カーボンナノチューブを配合させた RO 膜や独自の吸着材の開発、水の大循環シミュレーション、アフリカのタンザニアにおける地下水フッ素汚染の現地調査と解決策の検討などを推進している。

(参照) 信州大学 COI アクア・イノベーション拠点

<http://www.shinshu-u.ac.jp/coi/> （2019 年 10 月アクセス）

- (3) JST/JICA-SATREPS (地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム)「ナイル流域における食糧・燃料の持続的生産」プロジェクト (2009 年 6 月～2015 年 3 月、1 課題あたり JST から国内研究費約 3,000 万円/年と JICA から ODA 経費約 6,000 万円/年)

SATREPS は JST と JICA が連携した国際共同プログラムである。開発途上国の自立的研究開発能力の向上や課題解決に資する持続的な活動体制構築などを支援している。

乾燥地エジプトでは、水源をナイル川に依存している。急激な人口増加が進み、食糧増産や雇用拡大が緊急的な課題となっている。当該プロジェクトでは、既存農地の節水により確保した水を用いて沙漠の農地化を拡大した。水収支の正確な測定、防風林による土壌への水分捕捉、点滴灌漑や細溝灌漑による収穫量の増大など現地条件に応じた手法を見出し、社会実装に貢献した。

(参照) SATREPS ナイル川プロジェクト成果紹介

https://www.jst.go.jp/global/case/environment_energy_4.html (2019 年 10 月アクセス)

- (4) JST-RISTEX「持続可能な多世代共創社会のデザイン」研究開発領域「分散型水管理を通じた、風かおり、緑かがやく、あまみず社会の構築」プロジェクト (2015 年 10 月～2020 年 3 月予定、1 課題あたり数百万円から 3000 万円未満/年)

現在の集中型水管理システムは上水道、下水道が地中化され、生活者の目に見えないため、人々が水管理の意識を持ちにくい課題がある。その解決のため、現システムを補完する分散型サブシステムとして、雨水を貯留し、地下へ浸透させる取り組みを多様なステークホルダーを巻き込んで実施している。水を軸とした「あまみず社会」をコンセプトとして、多世代コミュニティを再構築する活動を推進している。

(参照) RISTEX あまみず社会プロジェクト紹介

https://www.jst.go.jp/ristex/i-gene/projects/h27/project_h27_3.html (2019 年 10 月アクセス)

- (5) 内閣府 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 第 1 期「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」地域実装支援チーム研究課題番号 No.62「地域自立型の次世代型・水インフラマネジメントシステムへの転換」プロジェクト (2016 年 9 月～2019 年 3 月)

人口減少の進む地方部では、今後のインフラ維持管理は成長型シナリオではなく、脱成長型シナリオが余儀なくされる。北海道に多く存在する過疎地域の小規模水道の実態調査および課題解決策の検討のため、(地方独法) 北海道立総合研究機構と北海道大学が共同で、富良野市における課題解決シナリオを検討した。発展途上国における共同井戸・共同水栓の利用者らによる維持管理も参考にして、地域自立管理型水道と地域ぐるみの水道管理支援体制モデルを提案している。

(参照) SIP「地域自律型の次世代型・水インフラマネジメントシステムへの転換」成果報告書

https://www.hro.or.jp/list/building/result_pdf/H30h/399.pdf (2019 年 10 月アクセス)

- (6) NEDO「省エネルギー型海水淡水化システムの実規模での性能実証事業」(2014 年～2023 年 3 月予定)

内閣府の最先端研究開発支援プログラム (FIRST)「Mega-ton Water System」プロジェクト (2009～2013 年) の RO 膜の研究開発成果を実証する事業として、(株) 日立製作所と東レ (株) によってサウジアラビアで実規模での性能実証が実施されている。

- (7) 厚生労働科学研究費 健康安全・危機管理対策総合研究事業「小規模水供給システムの安定性及び安全性確保に関する統合的研究」(2017 年～2020 年 3 月予定)

人口密集地以外の地域に存在する小規模水供給システムを有する地域は、顕著な人口減少や過疎化、高齢化、さらには既存施設の老朽化などの様々な問題を抱えている。施設の管理や財政面で小規模水供給システムの維持が困難となるなど、さしせまった状況に直面している。

安全で衛生的な水を供給可能とするため、水供給システムの現地調査、住民との連携による維持を前提とした分散型の水供給システムの技術的及び運営面の研究などが行われている。

(参考) 厚生労働科学研究成果データベース

<https://mhlw-grants.niph.go.jp/niph/search/NIDD00.do?resrchNum=201826008A> (2019 年 10 月アクセス)

- (8) 国土交通省 B-DASH (下水道革新的技術実証事業)「下水処理水の再生処理システムに関する実証事業」(2015 年 8 月～2017 年 3 月)

灌漑用水の慢性的不足に悩む沖縄県糸満市で 1 日 1000 トンの再生水を提供するための統合的な実証試験が推進された。(1) の JST-CREST の中の研究開発課題「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」で得られた成果を発展させている。

(参考) JST ニュース 2016 年 10 月号紹介記事

https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2016/201610/pdf/2016_10_p12-13.pdf (2019 年 10 月アクセス)

- (9) 環境省/ERCA 環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクト S-14「気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究」(2015 年～2020 年 3 月予定)

気候変動の緩和策と適応策の効率的で効果的な実施策に関する知見を提供する統合的な研究開発を推進している。水利用リスクに関わる研究開発として、気候変動によって極端化する豪雨などの水災害、海面上昇への備えのための経済的な費用便益の分析などが行われている。

(参考) 環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクト S-14

<http://s-14.iis.u-tokyo.ac.jp/> (2019 年 10 月アクセス)

(10) 米国環境保護庁「飲料水中の鉛の測定と制御」(2018～2021 年、総額約 400 万ドル予定)

米国環境保護庁 (EPA) は国家優先事項「飲料水中の鉛の検出と制御に関する分野越境的研究 (Transdisciplinary Research into Detecting and Controlling Lead in Drinking Water)」という枠組みで下記 2 件の課題を採択している。

・ 人々の解放：飲料水中の鉛の消費者による検出と管理 (Untapping the Crowd: Consumer Detection and Control of Lead in Drinking Water)

バージニア工科大マーク・エドワーズ教授を中心とした市民参加プロジェクト。鉛への曝露の低減や失った水道水への信頼の再構築などを目指している。同教授はワシントン DC での水道の鉛汚染調査の実績で、天才賞と呼ばれるマッカーサー・フェローシップを受けている。ミシガン州フリント市での水道の鉛汚染事故でも市民への協力も行っている。

・ 共同体での鉛リスクと低減モデルの開発 (Development of a Community-Based Lead Risk and Mitigation Model)

鉛曝露による健康被害に敏感な乳幼児や妊婦等のため、リスク評価に基づく鉛曝露低減策などの構築を目指している。

(参照) EPA 採択課題概要

https://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/recipient.display/rfa_id/637/records_per_page/ALL (2019 年 10 月アクセス)

(11) ビル&メリンダ・ゲイツ財団 トイレ再発明チャレンジ (Reinvented the Toilet Challenge)
(2011 年～、総額 2 億ドル以上)

ビル&メリンダ・ゲイツ財団は、マイクロソフト創業者ビル・ゲイツ氏とその妻により 2000 年に創設された慈善団体。2006 年に米国の著名投資家ウォーレン・バフェット氏から 300 億ドルの寄付を受け、世界最大規模の基金を運用している。世界では発展途上国などで、まだ約 10 億人の人々が屋外排泄を余儀なくされ、不衛生な環境により下痢性疾患などに晒されている。その課題解決のため、「トイレ再発明チャレンジ」では実用的で廉価な節水型トイレ、下水道が未整備の地域でも衛生的に処理できる新型トイレなどの開発を助成している。

(参照) ビル&メリンダ・ゲイツ財団 水と衛生

<https://www.gatesfoundation.org/What-We-Do/Global-Growth-and-Opportunity/Water-Sanitation-and-Hygiene> (2019 年 10 月アクセス)

(12) EU Horizon Europe での水に関する研究開発イノベーションプロジェクト

EU では Horizon2020 (2014～2020 年) において、水に関する研究開発イノベーションに助成している。後継の Horizon Europe (2021 年～2027 年) でも、水に関する課題が議論されている。

(13) オランダ デルタプログラム及び定量的微生物リスク評価による無塩素給水

オランダは干拓で国土を造成した歴史を背景に、水を重点領域と定めている。デルタプログラムは、気候変動で激化する高潮、洪水のリスク評価と対策検討などの研究開発を支援している。また、オランダでは、水供給実務において定量的微生物リスク評価を義務化している。オランダの水道会社は、水源から配水までリスクを評価することで、塩素消毒無しの給水の安全性を担保している。

(参考) 科学技術・イノベーション動向報告～オランダ編～ (2016 年度版)

<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/OR/CRDS-FY2016-OR-05.pdf> (2019 年 10 月アクセス)

(14) 中国 水質汚染防止行動計画 (水十条) での水質改善のための投資

中国では水質汚染が深刻であり、水十条 (2015～2020 年) を定め、水質汚染防止への投資増加や汚水処理率、再生水利用率の向上などの目標を設定している。罰則強化などに加え、科学技術の利用や普及も拡充している。大学による膜分離活性汚泥法や水資源確保、再生水などの研究開発課題に助成している。

(15) シンガポール、イスラエル、南アフリカにおける再生水の社会実装の取組

シンガポールは地理的制約と人口過密から水不足の脅威に晒されている。淡水資源の自給率向上のため、海水淡水化や雨水貯留に加え、再生水を **NEWater** と名付け主要な水源と位置付けている。既に飲料水利用も行われている。環境水資源省、公益事業庁は、再生水普及のための事業と同時に世界の水処理企業を誘致して、水ビジネス拠点を構築している。

イスラエルも気候的制約や農業需要などから、淡水資源の自給率向上や節水技術を推進している。点滴灌漑や海水淡水化に加え、再生水を重視しており、世界で最も普及率が高い。特に農業用水で 8 割以上も再生水利用している。同時に、水利用に関連するスタートアップ企業の育成も図っている。

南アフリカは乾燥気候に属し、干ばつも発生する。水不足地域にある西ビューフォート町では再生水の導入を進めるにあたり、人種差別の可能性という風評まで含めて、丁寧な協働対話を行っている。多様な利害関係者との合意形成を透明性高く行うことで、社会受容を得ている。

(参考) JETRO シンガポールの水および環境部門に関する市場調査 (2018 年 1 月)

https://www.jetro.go.jp/ext_images/world/asia/infra-reports/sg_201801_5.pdf

(参考) イスラエル大使館 世界をリードするイスラエルの水技術ローカルイノベーションの活用

<https://israel-keizai.org/news/israel-leads-world-in-water-tech-by-tapping-local-innovation/>

(参考) JICA (株) 日立製作所 南アフリカ共和国ダーバン市水道衛生局報告書 (2016 年)

http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12250551.pdf (上記 3 件全て 2020 年 2 月アクセス)

付録3 専門用語説明

・水循環

地球上の水は、氷雪や湖沼、河川、地下水、海洋、水蒸気、生物中の水分など多様な形で常に巡り動いている。海水や地表面の水が蒸発し、上空で雲が形成され、やがて雨や雪の形で地表面に降り、氷雪や湖沼に一時的に留まり、河川や地下水浸透を経て海に至るという自然の循環を繰り返している。さらに、人間による利用や貯留、河川整備、地下水汲み上げ、運搬、排水処理、森林管理、土地改良などの人為的な活動も水循環に大きな影響を与えている。

・包摂性

包摂は、英語の *inclusive* の直訳に当たる。ニュアンスは、排他性を意味する *exclusive* の対義語であることを念頭におくと理解しやすい。つまり、*inclusive* とは *no exclusive* であり、包摂性とは排他性がないことを意味する。包摂的イノベーションとは、排他性を与える社会変革とは真逆の、誰一人取り残さないイノベーションである。

・仮想水 (Virtual Water)

米や小麦、肉牛、鶏卵などの食料生産のための農業用水、衣服や材料などの製造のための工業用水といった水利用は飲料水などの直接的な水利用に対して、消費者から直接は見えない間接的な水利用である。このような形の水資源の消費量を可視化するため、1990年代にロンドン大学のトニー・アラン教授が考案した概念が仮想水である。

・4つのイドラ (先入的謬見)

哲学者フランシス・ベーコン (英国、1561年～1626年) が帰納法によって導き出した、人間が潜在的に持つ4種類の偏見、先入観のこと。それぞれ洞窟、種族、劇場、市場と名付けられている。洞窟のイドラは、各個人の狭い経験によって生じる偏見、先入観を指す。科学による客観的事実の説明だけでは、このような偏見、先入観をもつ各個人は、それぞれに程度の差はあっても、それぞれの主観から理解する範囲を限定し、あるいは都合よく判断し、客観的事実そのものの自体の認識ができない。このような偏見、先入観が存在することを万人が認識し、更生することで正しい理解に到るという主張がある。一方、万人がそのような理想状態に到ることは現実的には有り得ないと捉え、このような制約を元に最善の方策を探るべきという主張もある。いずれの主張にしても社会受容性は諸個人の主観的認識の総合で形成されるものであるため、主観の否定だけをしていても際限がない。実践的な観点に立つと、多様な利害関係者との協働・対話による共創的アプローチがより有効な方策とみられる。

■戦略プロポーザル作成メンバー■

総括責任者：佐藤 順一	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
リーダー：松村 郷史	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
メンバー：大平 竜也	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
中村 亮二	フェロー/ユニットリーダー	(環境・エネルギーユニット)
長谷川 貴之	フェロー	(海外動向ユニット)
吉田 有希	フェロー	(科学技術イノベーション政策ユニット) (2019年4月～)
佐々木 弥生	主査	(JST 情報基盤事業部)
松本 麻奈美	主査	(JST 未来創造研究開発推進部)
小名木 伸晃	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット) (～2019年3月)
松田 一夫	フェロー	(環境・エネルギーユニット) (～2019年3月)
中川 勝統	JST PM 育成・活躍推進プログラム研修生	(～2019年3月)

※お問い合わせ等は下記までお願いします。

CRDS-FY2019-SP-06

戦略プロポーザル

環境や社会の変化に伴う 水利用リスクの低減と管理

STRATEGIC PROPOSAL

Research and development about risk management in water
use considering of environmental and social changes

令和 2 年 3 月 March 2020

ISBN 978-4-88890-670-8

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町
電 話 03-5214-7481
E-mail crds@jst.go.jp
https://www.jst.go.jp/crds/
©2020 JST/CRDS

許可無く複写／複製をすることを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT

GA C CTAAC T CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN-978-4-88890-670-8

