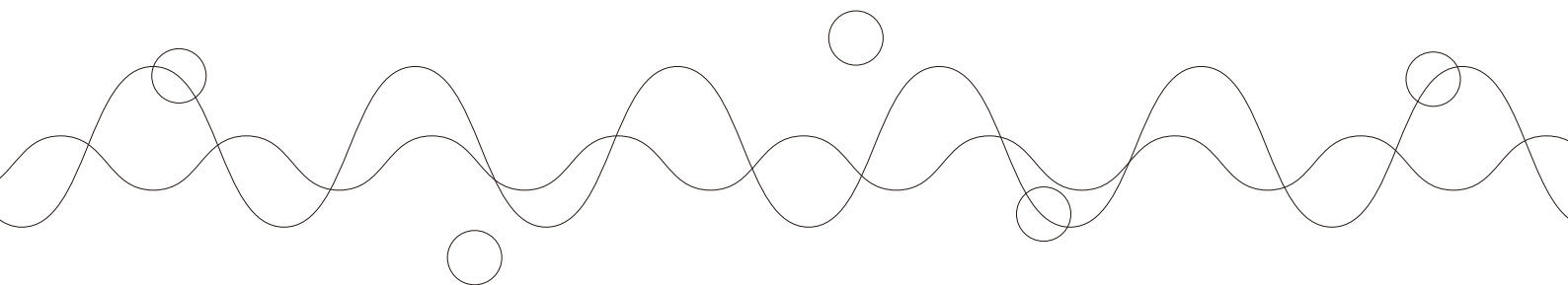


科学技術未来戦略ワークショップ報告書
**環境や社会の変化に伴う
水利用リスクの低減と管理**

令和元年8月19日(月)開催



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

エグゼクティブサマリー

本報告書は国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）が令和元年 8 月 19 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ（WS）「環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理」に関するものである。本 WS は今後、日本が世界の中で取り組むべき課題や推進すべき科学技術イノベーション戦略の検討を深めるために開催した。

利用可能な淡水資源の量には、空間的・時間的偏在性という制約が水利用リスクとして存在している。さらに、環境や社会の変化が水利用リスクとして加わっていく。とくに世界では、脆弱性の高い BOP ビジネス層（BOP ; Base of the Economic Pyramid）にも安全で低コストの水利用を可能とするための課題が残されている。国内では農村での過疎化、高齢化がより顕著だが、大都市圏と比べて対策が少ない状況である。それらの領域にも科学技術への顧みられていない需要が存在すると考えられる。環境や社会の変化にも対応した、多様な条件に応じるためには、革新技术／破壊技術／伝統技術、ハイテク／ローテクを含めた包摂的イノベーションが必要と考えられる。

このような多様な水利用リスクの課題に対して、地下水の利用可能量の可視化、水管理 ICT 支援技術、膜ろ過材料、凝集剤、吸着材、紫外線発光ダイオード（UV・LED）、下水再生水、リスク研究、水道インフラ劣化 AI 予測技術などの研究開発や社会実装の取り組みが先導的な研究者らによって行われている。話題提供では、それらの研究動向等について以下の知見を得ることが出来た。

- ・地球規模の水資源で、世界の水需要は人口増加、経済発展により今後も大きく拡大していく。世界規模の食糧供給のための灌漑用水として地下水が用いられているが、先端的なシミュレーション研究により持続可能性の危うさが示されている。仮想水の輸入を通して、日本にも影響がある。
- ・国内の農業人口減少、農地集積等を背景として農業用水管理の ICT による省力化支援技術の需要が増している。水田ごとの農業用水の遠隔操作、自動制御の技術開発が進み、省力効果に加えて、電気代の節減や節水効果も確認されている。
- ・膜ろ過システムにおいて国際的な膜材料の低廉化競争が進んでいる。高付加価値化において、性能指標の高度化だけではなく、自動化システム、省力化、原水の負荷変動吸収等に視野を拡張して、産業競争力に貢献する中長期的な基礎研究の重要性が増している。
- ・再生水における最先端の研究開発では、利用用途に応じた使用という方策のもと、定量的微生物リスク評価（QMRA）による衛生学的評価やトータルエネルギー消費量、トータルコスト比較等の社会実装のために境界領域に踏み込み、貴重な水資源を保全する取り組みが進んでいる。
- ・リスク学の観点から、水利用において守りたいもの、保護対象は時代とともに変遷してきている。先進国では水利用リスクの改善が進んだため、疾病予防対策の費用対効果だけを表面的にとらえて優先度を低くみてしまいがちだが、それは水利用の多様な価値、水管理の規範の議論を欠如させてしまった誤謬である。ステークホルダーとの協働・対話の効果的側面が研究と社会との相互作用における重要なキーワードである。
- ・水アクセスの不平等において、平均値ではなく、ばらつき、取り残される低い側の層に目を向

けることが重要である。解決策の一つとして分散型水処理がある。分散型水処理に適用可能な紫外線消毒について、国内の水道未普及地区、海外の島しょ部等での実証試験が進んでいる。

- ・水中の重金属成分やアニオン成分を除去する無機イオン吸着材の材料開発、実証試験が進んでいる。材料のナノ空間の構造を制御することで、除去率を高めている。世界各地の事情に対応可能な水処理を目指し、低価格プロセスで製造できる手法開発等が進められている。

総合討論では、特に、（１）研究開発を推進する上での課題として推進方法や体制、連携等について、（２）中長期的に取り組むべき研究開発課題について議論を行った。

（１）では、「社会実装に向けたステークホルダーとの協働・対話」に関して、個別技術の研究と全体との関係、水の研究を行う価値の議論、ナラティブの共有と社会との媒介の仕組み、コミュニティの力による持続性の構築、などが議論された。「社会実装のためのファイナンス」
として、制約条件となるファイナンス（投資、融資による資金）、組織のあり方、適用技術に応じたファイナンスのモデルなどが議論された。「持続性のためのビジネスモデル」として、一過性にならないための現地での教育の重要性、プロジェクト終了後も持続するためのビジネスモデル構築、などが議論された。「中長期的な時間軸での目標設定」について、SDGs の 2030 年に 100%社会実装という理想的な目標の踏まえ方（長期ビジョンの重要性）などが議論された。

（２）では、先立つものとして上記（１）におけるステークホルダーとの協働・対話が位置づけられた。そのうえで、「水循環システム」について世界における水資源、水循環という視点で重要な地下水の持続可能性、自然環境などに本来備わる水質の自浄能力、といったキーワードの補完と、水源と利用用途との関係の重要性が強調された。「水処理」では、安全性確保のための多様な処理プロセスと材料技術、水量と水質の安定性（変動性）とライフサイクルコストの議論、解決すべき課題の材料研究課題へのブレークダウン（上手な課題設定）といったキーワードが議論された。「社会実装のための診断」においては、日本の人口減少・高齢化対策への諸外国の関心、モニタリングで蓄積したデータの強み（データ資源の活用）、といったキーワードの補完と、社会や技術の動向を踏まえた分散型システムや融合技術の適時性、見える化したときに生じる課題が言及された。

これらの議論を総括して、世界中のどのような地域においても人間が生きていくうえで、多様な水の価値のステークホルダーとの協働・対話は欠かせないものであること、科学的な基本にしっかりと立脚した持続可能な水利用シナリオを検討すること、包括的な社会受容性に応じながら実現に向けた研究開発に挑戦していくこと、社会実装に当たっては中長期的な経済的要素の検討が不可欠であること、等が今後の方策を考えるうえで重要であると認識された。

本ワークショップで得られた知見は、戦略提言を目指す今後の調査活動に反映するとともに、俯瞰報告書の作成や CRDS 内外への知見提供に活用する。

目 次

エグゼクティブサマリー

1	ワークショップ開催概要	1
2	開会挨拶と趣旨説明	3
2. 1	「開会挨拶」佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）	3
2. 2	「ワークショップの趣旨説明」松村郷史（JST-CRDS フェロー）	4
3	話題提供	14
3. 1	「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）	14
3. 2	「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）	24
3. 3	「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）	33
3. 4	「水の再利用 CREST その後」田中宏明（京都大学 教授）	43
3. 5	「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）	53
3. 6	「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 -」 小能久美子（東京大学 准教授 / JST-CRDS 特任フェロー）	63
3. 7	「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）	73
4	全体議論	82
4. 1	「若手が考えた将来の社会・インフラ・新技術」山村寛（中央大学 准教授）	82
4. 2	「総合討論」	87
4. 3	「閉会挨拶」佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）	96
5	まとめ	97
付録 1	プログラム	99
付録 2	ワークショップ参加者リスト	100

1 ワークショップ開催概要

■ はじめに

科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、国内外の社会、科学技術イノベーションの動向及びそれらに関する政策動向を俯瞰調査・分析し、国として重要な研究開発領域・課題の抽出やその推進方法等について、戦略プロポーザルとしてまとめ、発信している。この活動の一環として、「環境や社会の変化に伴う水利用リスクの低減と管理」の作成に向けて、今後、日本が世界の中で取り組むべき課題や推進すべき科学技術イノベーション戦略の検討を深めるために、科学技術未来戦略ワークショップを開催した。

■ 開催趣旨

地球上で利用可能な淡水資源は限られている。安全と衛生が管理された水の供給は豊かな社会の存続のため不可欠である。世界の水に対する関心は高く、「持続可能な開発目標（SDGs）」では、目標 6「全ての人々の水と衛生の利用可能性と持続可能な管理を確保する」を設定し、未だ満たされていない水の課題に対して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。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り、科学技術への期待は今後さらに高まるものとみられる。

利用可能な淡水資源の量には、空間的・時間的偏在性という制約が存在する。さらに、今後は気候変動による降水パターンの変化や途上国の経済発展、人口増大に伴う工業用水や農業用水などの需要増大などの条件も加わっていく。これらの課題に対して、地下水の利用可能量の可視化、海水を淡水化する逆浸透膜、下水再生水などの研究開発が進んでいる。水質の安全と衛生を管理することも重要だ。環境水に含まれる重金属への慢性曝露による健康被害などの課題がまだ世界に残されている。さらに、今後は気候変動の影響による病原微生物の増加や水インフラの脆弱化などの課題も加わる。これらの課題に対して吸着剤・凝集剤、UV-LED（紫外線発光ダイオード）、劣化診断、リスク評価などの研究開発が進んでいる。

持続可能な水利用は各国の地域社会、地域経済で閉じた範囲の課題だけでなく、食料生産などに用いる水である「Virtual Water（仮想水）」を介して多国間、多地域間にまたがる課題だ。世界では、脆弱性の高い BOP ビジネス層（Base of the Economic Pyramid）にも安全で低コストの水利用を可能とするための課題が残されている。我が国では農村地などでの高齢化や分散化がより顕著だが、大都市圏と比べて研究開発が少ない状況だ。それらの領域にも科学技術へのアンメットニーズ（顧みられていない需要）が存在すると考えられる。環境や社会の変化に対応した次世代の多様な水需要を満たすシステム構築のため、多様な条件に応じて革新技術／破壊技術／伝統技術（ハイテク／ローテク）を含めた包摂的イノベーションが必要と考えられる。

上記に関連した最新の研究開発や国内外の技術動向等を有識者から話題提供いただく。上記の仮説を検証するとともに、科学的発展、技術的発展という観点からも取り組むべき研究開発課題や、研究開発を推進する上での課題、推進方法や体制などについて議論する。望ましい推進策の明確化を試みる。

■ 開催日等

日時： 令和元年 8 月 19 日（月） 13：00～18:00

場所： JST 東京本部別館 2 階会議室 A②

2 開会挨拶と趣旨説明

2. 1 「開会挨拶」

佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）

本日は水利用リスクを主題としたワークショップにご参加いただき、感謝しています。

さて、今年の夏もわが国では猛暑日が長く続いています。このような暑さの中で、私たちは熱中症にならないように、いい水をしっかりと飲まなければなりません。この会場ではこれは簡単に言えることなのですが、水の事情が全く異なる海外に行くと、実はそう簡単には言えない深刻な問題があります。

先月、アフリカのタンザニアに出張しました。タンザニアでの水の値段ですが、1m³で200円ぐらいします。東京での水の値段は1m³でおよそ100円なので、東京よりもタンザニアのほうが倍ぐらい高いのです。しかも、タンザニアの平均収入はおおよそ6,000円です。金銭感覚として、収入のかなりの部分を水が占める状況です。購入した大変に高価な水は気軽には飲まずに、少しずつ飲むような生活です。また、水を買うためのお金が払えないからといって、消毒の十分ないへん非衛生的な水や、高濃度のフッ素が含まれている水を子どもたちが飲んでいいる現実があります。このような問題はアフリカだけではなくて、アジア諸国にも存在します。

現在の日本は、非常にいい水が比較的安く手に入り、そのような水のありがたさになかなか思いがいたらない環境です。しかしながら、昔の東京の水事情を思い出してみますと、1964年の東京オリンピックのころは、大変な渇水でした。当時、私は高校生で水泳部に所属していましたが、渇水でプールの水を取りかえられずに、1カ月ずっと同じ水で泳ぐ羽目になりました。最後には塩素消毒剤を投入し過ぎて、細菌をやっつける前に、人間がやられるのではないかという笑い話をしていたものです。当時と比べると、東京の水の事情は、においも質もそのほかのあらゆる要素においても非常に状態がよくなっています。

では、もう日本国内で水の問題はないかといえば、そうでもありません。例えば、中山間農村地域での問題があります。中山間農村地域ではもう平均年齢が70歳を超えていて、人口もどんどん減少しています。そのような地域には小規模な水道はありますが、その水道の品質をどうやって保持していくのかは差し迫った課題となっています。これについて、従来通りのシステムでよいのかと本質の議論から考えなければなりません。

新しい科学技術を用いて、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限った課題ではなく、日本にとっても非常に重要な課題です。本日はぜひ忌憚なく活発なご議論をお願いします。

2. 2 「ワークショップの趣旨説明」

松村郷史（JST-CRDS フェロー）

まず、CRDS での検討を説明する。リスクはハザードと曝露の積という科学的考え方が確立している。さらに、昨今、IPCC や ISO などでは脆弱性にも関心を払っている。この弱者の要素も含めて議論する。

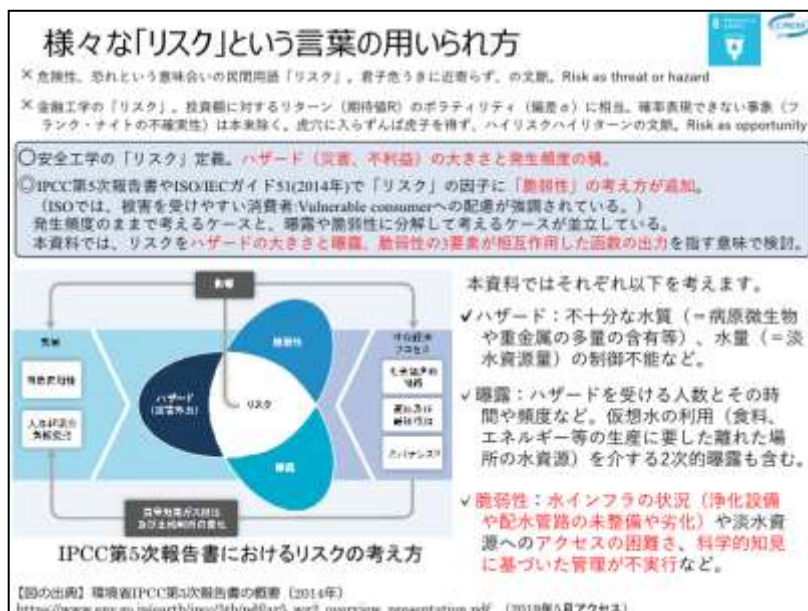


図 2.2.1 リスクの考え方の検討

水の質の課題は、水が溶媒として溶かしているものをまず考えた。もともと自然界に分布しているもの、人為の活動で拡散したもの、両者の影響ともに把握する必要がある。

汚染物質	自然影響	人為影響	QOL低下
微生物	バクテリア、ウイルス	排泄物（体内での増殖）	コレラ、赤痢、A型肝炎、下痢疾患
重金属・無機物質	カドミウム、メチル水銀	鉱山排水の未処理、農薬のメチル化	イタイイタイ病、水俣病
有機物質	鉛、ヒ素、フッ素	工業利用、地下水	脳症、骨変形
その他	ベンゼン、陰イオン界面活性剤	産業廃棄物として利用、合成洗剤として広く利用	白血病、歯痛

表. 日本の水質法における水質検査項目と基準（51項目）

項目	基準
微生物	大腸菌：100個/L以下、大腸菌群：100個/L以下、カドミウム及びその化合物：0.01mg/L以下、有機リン系化合物：0.01mg/L以下、有機窒素化合物：0.01mg/L以下、有機塩素化合物：0.01mg/L以下、有機金属化合物：0.01mg/L以下、有機燐化合物：0.01mg/L以下、有機硫黄化合物：0.01mg/L以下、有機シリコン化合物：0.01mg/L以下、有機フッ素化合物：0.01mg/L以下、有機塩素化合物：0.01mg/L以下、有機金属化合物：0.01mg/L以下、有機燐化合物：0.01mg/L以下、有機硫黄化合物：0.01mg/L以下、有機シリコン化合物：0.01mg/L以下、有機フッ素化合物：0.01mg/L以下
重金属	鉛：0.01mg/L以下、ヒ素：0.01mg/L以下、水銀：0.01mg/L以下、カドミウム：0.01mg/L以下、銅：0.01mg/L以下、亜鉛：0.01mg/L以下、マンガン：0.01mg/L以下、鉄：0.01mg/L以下、コバルト：0.01mg/L以下、ニッケル：0.01mg/L以下、モリブデン：0.01mg/L以下、セレン：0.01mg/L以下、ヨウ素：0.01mg/L以下、臭素：0.01mg/L以下、フッ素：0.01mg/L以下、塩素：0.01mg/L以下、臭素：0.01mg/L以下、フッ素：0.01mg/L以下、塩素：0.01mg/L以下
無機物質	アンモニア：0.01mg/L以下、亜硝酸：0.01mg/L以下、硝酸：0.01mg/L以下、硫酸：0.01mg/L以下、リン酸：0.01mg/L以下、珪酸：0.01mg/L以下、硼酸：0.01mg/L以下、炭酸：0.01mg/L以下、硫酸：0.01mg/L以下、リン酸：0.01mg/L以下、珪酸：0.01mg/L以下、硼酸：0.01mg/L以下、炭酸：0.01mg/L以下
有機物質	ベンゼン：0.01mg/L以下、トルエン：0.01mg/L以下、キシレン：0.01mg/L以下、ナフテン：0.01mg/L以下、フェノール：0.01mg/L以下、ホルムアルデヒド：0.01mg/L以下、アセトアルデヒド：0.01mg/L以下、酢酸：0.01mg/L以下、乳酸：0.01mg/L以下、グリコール：0.01mg/L以下、グリセロール：0.01mg/L以下、糖類：0.01mg/L以下、有機酸：0.01mg/L以下、有機塩基：0.01mg/L以下、有機燐化合物：0.01mg/L以下、有機硫黄化合物：0.01mg/L以下、有機シリコン化合物：0.01mg/L以下、有機フッ素化合物：0.01mg/L以下
その他	ベンゼン：0.01mg/L以下、トルエン：0.01mg/L以下、キシレン：0.01mg/L以下、ナフテン：0.01mg/L以下、フェノール：0.01mg/L以下、ホルムアルデヒド：0.01mg/L以下、アセトアルデヒド：0.01mg/L以下、酢酸：0.01mg/L以下、乳酸：0.01mg/L以下、グリコール：0.01mg/L以下、グリセロール：0.01mg/L以下、糖類：0.01mg/L以下、有機酸：0.01mg/L以下、有機塩基：0.01mg/L以下、有機燐化合物：0.01mg/L以下、有機硫黄化合物：0.01mg/L以下、有機シリコン化合物：0.01mg/L以下、有機フッ素化合物：0.01mg/L以下

✓ 微生物：
 ①病原となる微生物への曝露
 ✓ 他の汚染物質：
 ①自然の汚染物質への高濃度の曝露
 ②人為活動の管理不全による曝露

図 2.2.2 水の質としての課題

水の量の面では、日本国内でみると洪水など“Too Much Water”の課題が身近だ。世界に目を向けると水不足の“Too Little Water”が重要な課題だ。食料を輸入に依存する日本は、Virtual water の輸入を通じ、世界の水不足とつながっていると認識している。

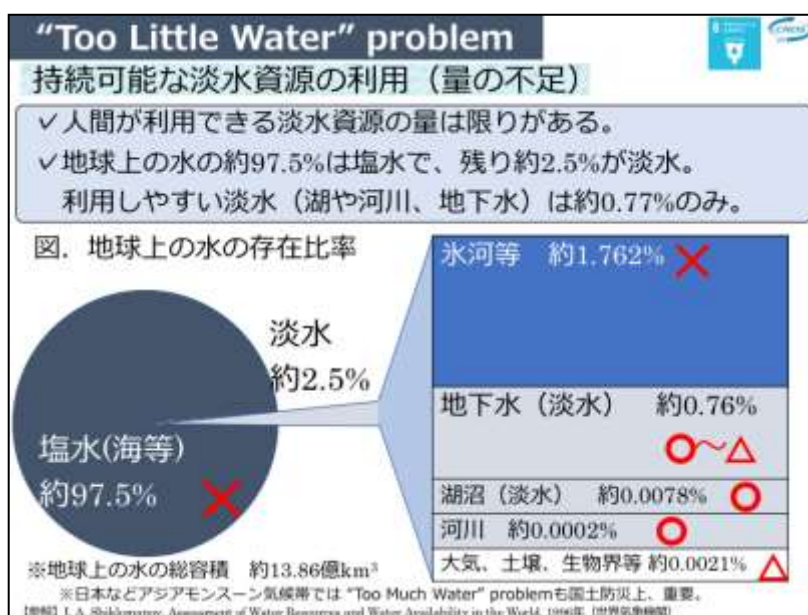


図 2.2.3 持続可能な淡水資源の量の不足

水利用の形態としては、大きく図 2.2.4 のような 3 つの区分（生活用水、工業用水、農業用水）で整理している。それぞれどの程度の量を使用しているかを図 2.2.5 に示す。内訳をみると、国内も世界も農業用水が 7 割程度と最も多い。

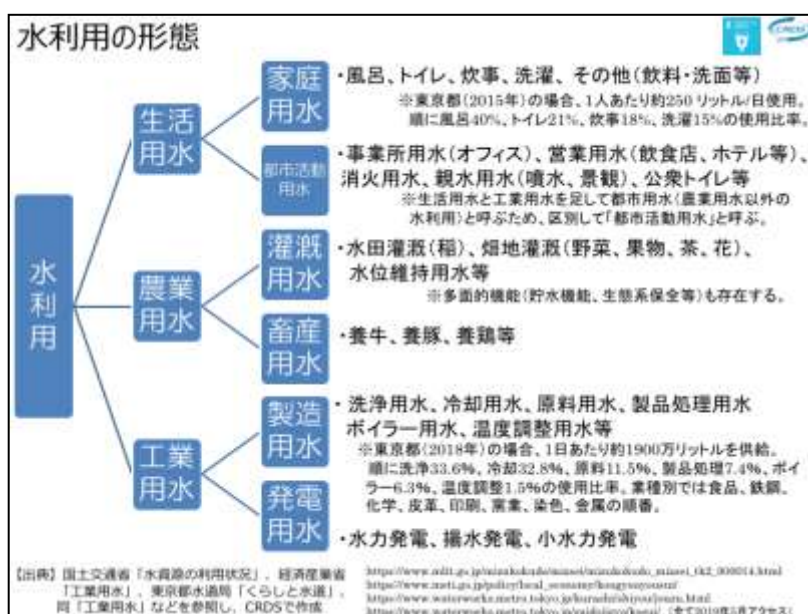


図 2.2.4 水利用の形態

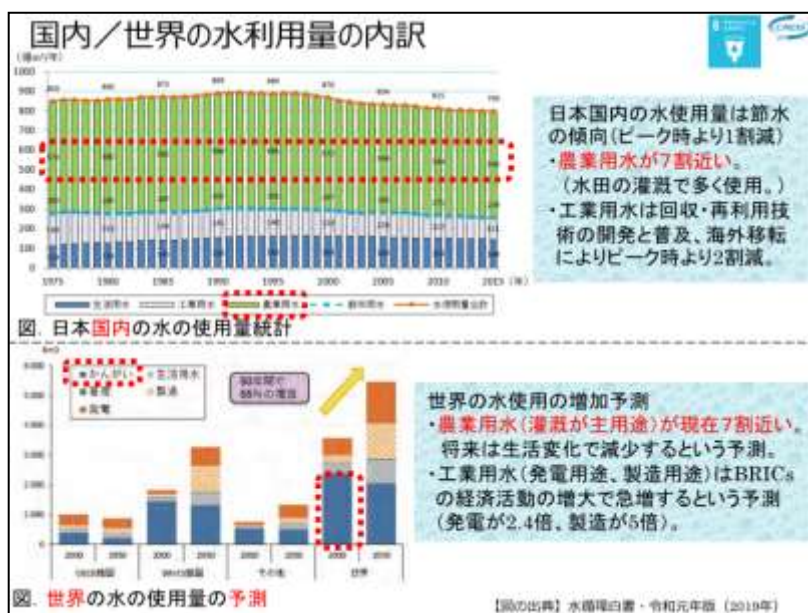


図 2.2.5 水利用の内訳

これらの情報をもとに、生活用水、農業用水を中心として、世界と国内でまだ満たされていない課題と今後増していくリスクを検討した。

まず、世界の課題をみる。経済産業省等で日本の水ビジネス海外展開の課題が整理されている。海水淡水化などを中心に技術を強化してきているが、国や地域ごとの違いが大きく、高い期待と比べると全体的に事業案件化が進まずシェアが低い。浄水、下水というメイン市場への参入は苦戦している。日本は優良な技術をもっているが、現地の価格条件や既設インフラなどの実情に合わない和新規参入や現地に根付くのが困難という状況だ。

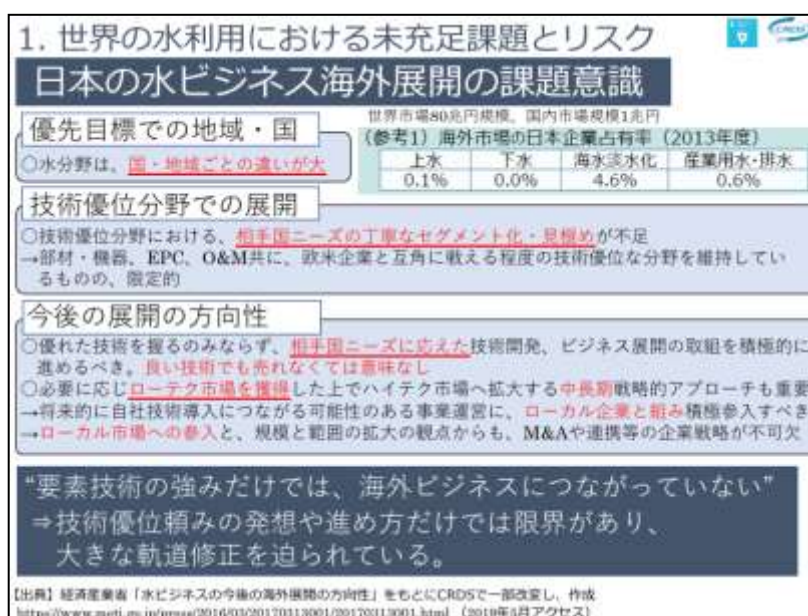


図 2.2.6 日本の水ビジネス海外展開の課題

さらに理解を深めるため、世界の各地域の実情を、所得と淡水資源量で区分して考える（図 2.2.7）。所得や資金は、同じ国の中でも地域ごと、都市と農村とでも違いがある。高所得のシンガポールや中東の産油国では、海水淡水化の技術を導入できる。ところが、アジアやアフリカの農村や集落（非都市部）では、ODA で井戸の開発などでカバーすることとなる。少ない所得で水に払うお金が高いという状況がある。この領域を今すぐ全て救うことはできなくても、一歩ずつでも良くする方向にしなければと捉えている。

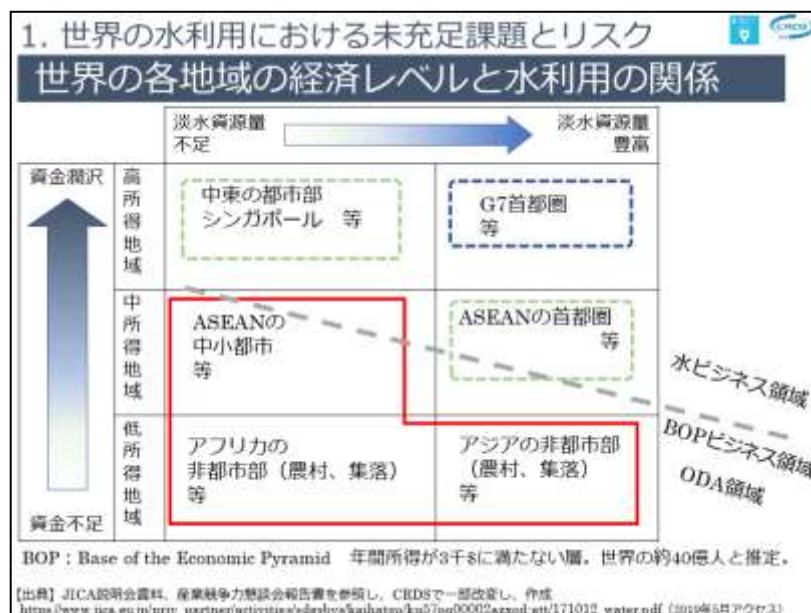


図 2.2.7 世界の各地域の経済水準と水利用の関係

海外の具体事例をみる。まず、低・中所得に位置し、縮小していく都市での事例で、米国のミシガン州のフリント市での水質事故だ。フリント市は 2014 年に財政破綻で追い込まれて、デトロイトから水道水を買えなくなり、フリント川に水源を変えて自己管理にした。その途端に泥水のように褐色の水道水が流れ、大騒ぎになった。50 年、100 年も前に敷設した鉛製の水道管を更新していなかった。加えて、腐蝕を防ぐリン酸塩の添加もフリント市が行わなかったため、一挙に鉛が溶けてしまったという説が有力だ。日本でも高度成長期に整備した水道インフラの老朽化、劣化が進行しており、注意しなければならない。

次の事例が、最も困難な淡水資源が不足するアフリカの低所得地域、SDGs の本丸のような事例だ。水汲み労働は今の日本では想像できない深刻な課題だ。昨年、公共広告が出ていたが、その中で紹介されていたエチオピアの奥地に住んでいる小さな女の子は、家族のために往復 2 時間かけて水くみに行かないと川の水が手に入らない。学校にも通えない。しかも、川の水は不衛生な泥水で、飲んだら、下痢になってしまう。小さなこどもが細い体で 20 キロぐらいのポリタンクを背負って行き来する負担も深刻だ。SDGs を最終的に達成するにはこういった人々を助ける方法を考えなければならない。2 つの課題解決が必要で、この水をどうにか安価に浄化する方法が 1 つ目。水道を接続できないような土地で負担少なく水を運搬する方法が 2 つ目だ。

1 つ目の課題は P&G の粉末型の簡易浄水剤がグッドプラクティスだ。この浄水剤は液体型で

はなく、粉末型で運搬が容易だ。かき混ぜると泥も微生物も凝集沈殿して除去できる。日本では240 パック 100 ドルほどでインターネットから購入できる。P&G は慈善事業として、先進国の消費者がこの商品を1つ買うと、1つアフリカに届ける事業をしている。1 パック 4g の軽い粉末で10 リットルの水を浄化できる。2004 年の開始から 2012 年までの 8 年で 46 億リットル相当の水を浄化したとある。

2 つ目の課題は、アイデア勝負だが、ヒッポローラーという車輪付きポリタンクが販売されている。平地であれば子どもが玩具のようにころころ転がして、90 リットルの水を運搬できる。体感の重さは10 リットルほどだそう。最先端の科学技術ではないが、こういう発想も大切だ。価格を調べると100 ドルほどだ。耐用年数は7年で、5万5千個以上が販売されたとある。

次に、国内の課題をみる。人口1千万を超える人口集中地域であるメガシティなどでは相当に取り組みが進んでいるが、過疎地での問題が大きい（図 2.2.8）。日本国内の水道の普及状況は97.2%で、世界平均よりも相当高い。しかし、全国平均と過疎地域を分けると、やはり、過疎地域の普及率が低い。国内でも、過疎地に目を向けると難しい問題と認識される。

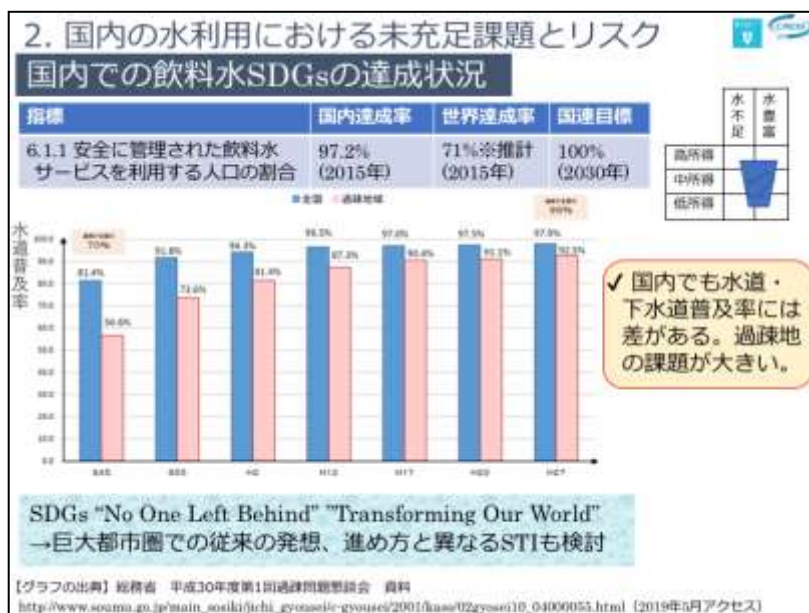


図 2.2.8 国内の水道普及率の細分化

過疎地域の浄水設備の状況だが、上水道（給水人口 5,001 人以上）と比べると、簡易水道（給水人口 100 人以上 5,000 人以下）では、かなり老朽化した施設がみられる。また、飲料水供給施設（50 人以上 100 以下）では、地方自治体が条例で対応しているが、例えば、壁もない、屋根だけあるところで浄水処理する設備までみられる。日本の現状で、上水道で供給されているのが1億2,000万人で、それ以外の簡易水道や飲料水供給施設などの総合計が700万人となる。人口比率では5%程度だが、大変なハンディを負っている。

国内の水道料金について、人口集中地域であるメガシティでは、比較的安価となり、給水までの距離が長くなる半島部や人口がまばらな農村地の多い東北地方、北海道では比較的高額の地

2. 国内の水利用における未充足課題とリスク

国内における水道水の値段

水道料金（円）
（東京都区部1世帯に2000世帯当たりと仮定した場合）2009年度（1/1～3/31）

■ 0円～1,000円
■ 1,000～2,000円
■ 2,000～3,000円
■ 3,000～4,000円
■ 4,000～5,000円
■ 5,000～6,000円
■ 6,000～7,000円
■ 7,000～8,000円
■ 8,000～9,000円
■ 9,000～10,000円
■ 10,000円以上

過疎地域などの水道料金は都市部より高額。水インフラの脆弱化も都市部より先に進む。

コスト対効果は建設費と維持管理費のトレードオフで考えることが必要

人口分散
人口が密集した区域は集約処理が経済的

国内でも人口分散、配水距離などの条件・制約、社会受容に応じながら、浄水・下水処理システムをre-design（再構築）する必要に迫られている。

【左図出典】 水のレジリエンスワーキンググループ「提言書～災害時の水の確保～」中丸幹 国連大学上級副学長、車大教授
<http://www.resilience-jp.biz/201808271315154/>
【右図出典】 国土交通省Webサイト、http://www.mlit.go.jp/road/secure/sb/sb1000/sb1000_001.html

図 2.2.9 国内の水道水の価格

[illegible]

図 2.2.10 環境の変化に伴う水利用リスク

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

は、今後も人が集まる。農村部の人口減少、高齢化比率は加速的に進む。日本に限らず、世界で社会増減が起こる。日本が経験する道を、他の国々もたどっていく。人口の多いメガシティは気付きやすく対策が進むが、中小都市や農村地は相対的に手薄で脆弱になりやすい。ここを強化する研究や対策は海外にも適用できるのではないかな。

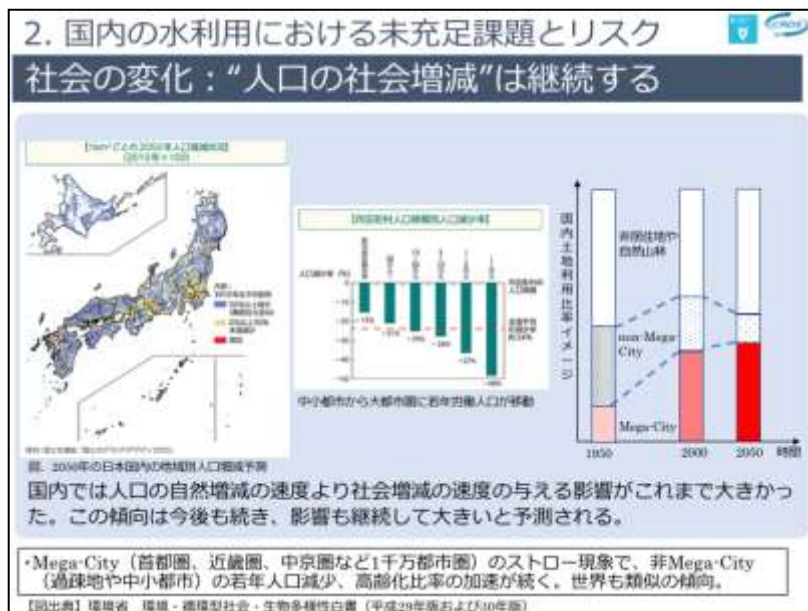


図 2.2.11 社会の変化：人口の社会増減

以上の認識から、包摂的イノベーションが重要と考えた(図 2.2.12)。水利用技術の分類だが、おおよそ水ビジネス領域に再利用、ODA 領域に井戸、湧き水、BOP ビジネス領域に小型浄水器や浄水剤が位置付ける。BOP ビジネス領域は廉価であることが求められ難度が高い。

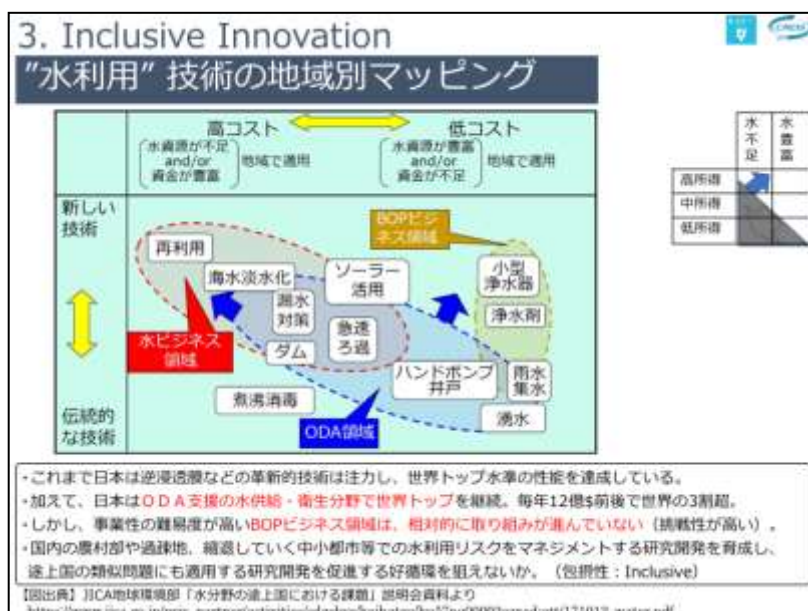


図 2.2.12 水利用技術のマッピング

伝統的な技術は革新的技術と比べ、くすんだ印象を持ちがちだが、包摂的に含めて考えたほうがよい（図 2.2.13）。難しい BOP ビジネス領域をリードできれば、SDGs に貢献できる。傍流の技術でも、ユーザーにとって付加価値が高ければ disruptive 技術になりえる。

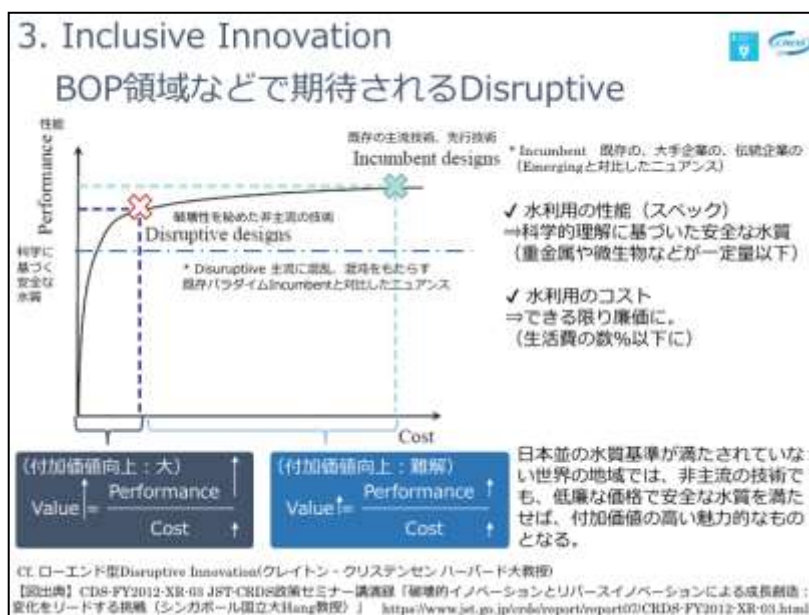


図 2.2.13 BOP ビジネス領域で期待される Disruptive Technology

課題解決には 3 種類の研究開発課題が重要と考えている。水循環システムの把握（図 2.2.14）、水処理（図 2.2.15）、簡易な診断（図 2.2.16）の 3 つだ。まず水循環の実態、速度をとらえ、持続性を把握する。また、流域全体で考えると下流末端の利用には、上流での利用、処理が重要だ。



図 2.2.14 水循環システムの把握

水処理はやはり、水利用リスクを制御するための鍵となる技術で、これは外せない。流域圏で考えると上流、下流でしっかりと水処理しなければならない背景が理解できる。

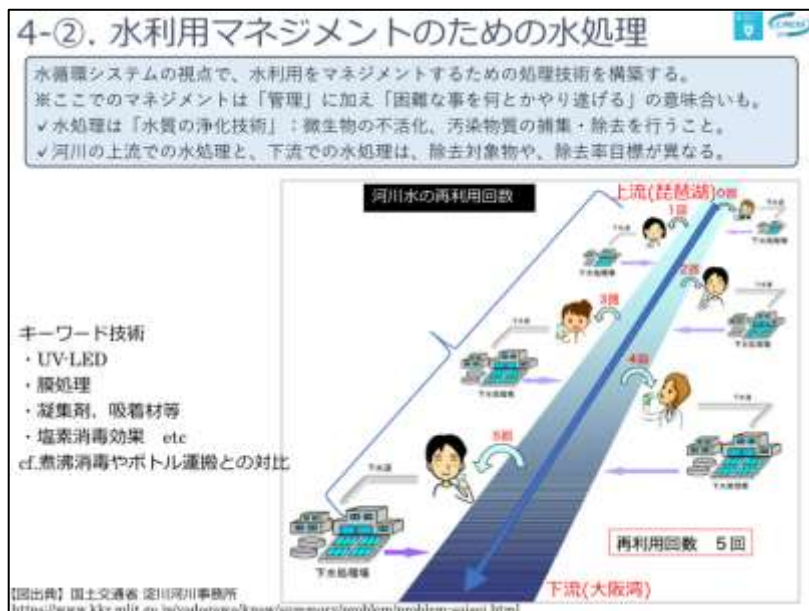


図 2.2.15 水処理

3つ目は、ひとまず簡易診断と書いたが、水質、水量ともに検査・計測と、それに基づく判断の負担を減らし、容易にする技術が期待される。水質でいえば、原水の把握、また水処理した処理水が狙った状態になっているか簡単にする技術だ。

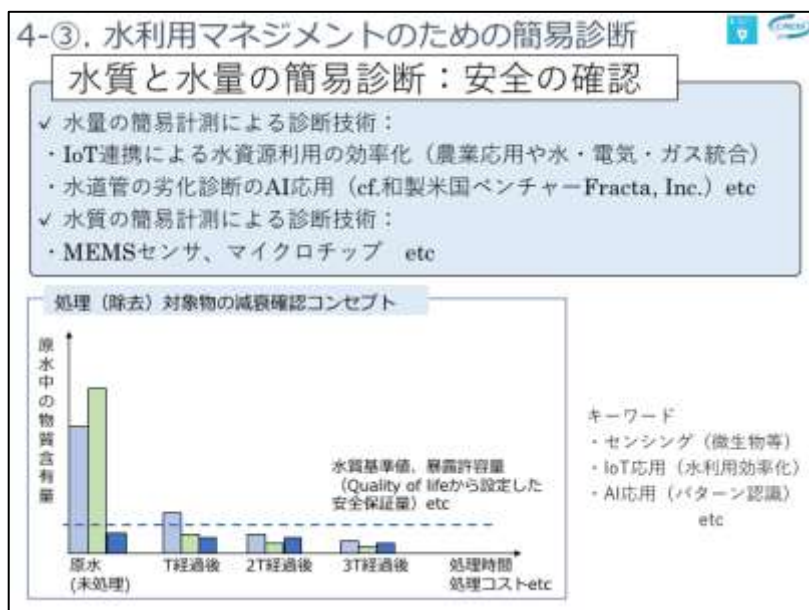


図 2.2.16 簡易な診断

JST では CREST で 2009 年から 2016 年まで水利用分野の研究支援をしたが、終了している

3 話題提供

3. 1 「地球規模の水資源研究の現状と課題」

和田義英（国際応用システム分析研究所（IIASA） 水資源プログラム長）

本日は地球規模の水資源の研究動向ということで、大きな視点から説明させていただく。

国際応用システム分析研究所（IIASA）には約 400 名の研究者がおり、9 つのプログラムがある。その 1 つが水資源プログラムで約 30 名が研究している。冷戦中に東西陣営の研究者が同じ場所で研究できることを目的に設立された国際研究機関である。日本を含めて 22 カ国が加盟している。日本の環境省も研究資金を供与している。最近は特に気候変動、IPCC に関する研究や、地球規模の水資源の研究、水分野のみならずエネルギーや食料をつなげたインターディシプリナリーな研究を目標にしている。SDGs に関する研究も実施している。

図 3.1.1 は IIASA がアジア開発銀行と共同で実施した研究で、2010 年から 2050 年までのアジアの水需要の変遷を、IPCC の 3 種類のシナリオを使用して示している。2010 年比で 2050 年は水需要が約 30%から 40%増加する。農業のシェアが落ちて工業と生活用水のシェアが非常に増える予測となっている。3 つのシナリオのうち、青は持続可能な政策を各国が協力して手がけるシナリオである。赤は、各国がそれぞれ自国の経済発展に投資していくシナリオである。技術協力がなないため、水不足の問題も残ることとなる。人口も増加し、どちらかというとなショナリズム的なシナリオで、水需要がさらに増加する予測である。

人口の変遷すなわち水需要の増加に伴い水不足が高まる。現在、アジアの約 12 億人が水不足にあるが、シナリオによっては 50%から 100%の水不足人口の増加が予測されており、サステナビリティシナリオ（青）のもとでも水不足が解決できないということで、さらにアンビシャスなシナリオ、SDGs のようなシナリオが必要になってきている。

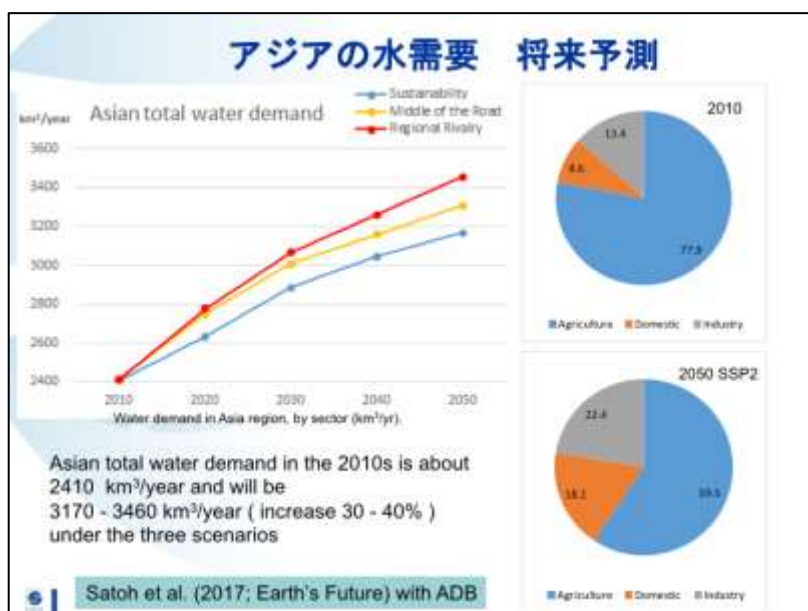


図 3.1.1 アジアの水需要の将来予測

都市への人口流入も進展していく。現在の都市人口比率が 5 割以上だが、2050 年には 7 割から 8 割になるという予測がある。特に、アジアやアフリカで都市人口比率が高まるとみられている。都市の中で水をどう使っていくかが大きな課題になってくると思う。最近では、サーキュラー・エコノミーという定義もあるが、水はどちらかというと rural の課題である。水源は過疎地域から来ているが、都市で使用されるということで、水マネジメントをどうするかが世界各国の課題になるであろう。

IIASA では、水理モデルで世界各地の水需要を計算している。図 3.1.2 は、1km から 10km メッシュでモデルを回し、どの地域にどれぐらいの水需要と水供給があるかを計算したものである。インドやパキスタン、中国東北部は農業用水が盛んに使われており、工業用水や生活用水の利用は都市部に限られる。水の供給は、地下水が青、表流水が赤、海水淡水化が緑で示されている。近年は海水淡水化の利用が非常に増えている。特に中東を含む西アジアや中央アジアで増加している。カザフスタンはカスピ海の水の淡水化が多くなっている。最近では、RO 膜などの技術の値段が非常に安くなっているため、多くの国が海水淡水化で水不足を解決しようとする傾向がみられる。

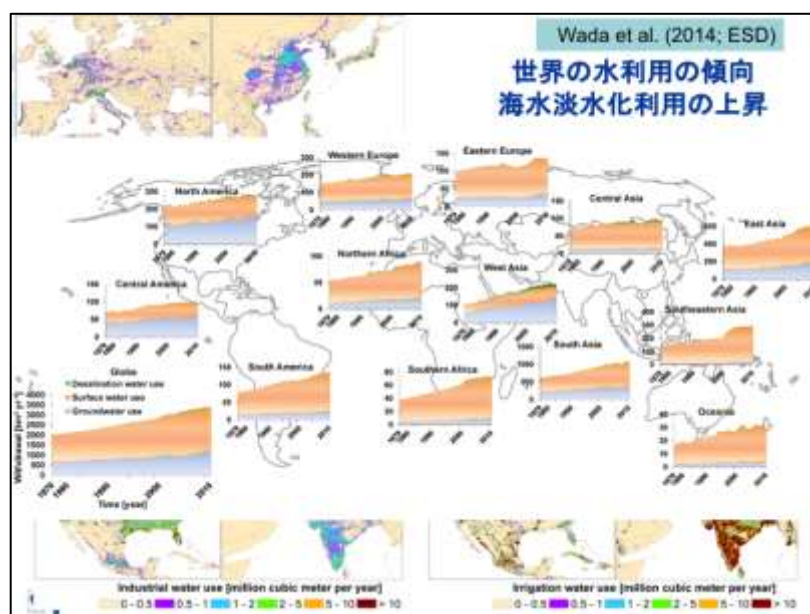


図 3.1.2 世界の水利用の傾向・海水淡水化利用の上昇

図 3.1.3 は世界の水利用の動向をモデル計算で示している。FAO や国連、日本などの統計資料だと、1 年や 5 年間隔で抽出されたデータはある。私たちは月間隔でどれぐらい水の需要と供給があり、水不足があるかを計算した。モデルを過去 110 年に遡って回している。セクターは橙が生活用水、紫が工業、緑が畜産、黄が灌漑。水の起源は地下水、表流水ともに組み込んでいるが、青色の地下水の利用が非常に増えていることが顕著に示されている。表流水は気候変動の影響もあり、1 年のうちの水供給の変動が非常に激しくなっている。また、表流水は 100 年間で増えるわけではない。氷河が溶けて増えている地域もごく一部あるが、基本的には増えないため、水需要が増加した場合にどこから供給できるかというと地下水になるため、世界的には地下水の

利用が非常に増えている。1960 年辺りから世界で、特にアジアで農業の灌漑が拡大しており、それに伴い地下水の利用が非常に大きくなっている。農業用水が水利用の 7 割から 8 割を占め、工業用水および生活用水が約 1 割である。

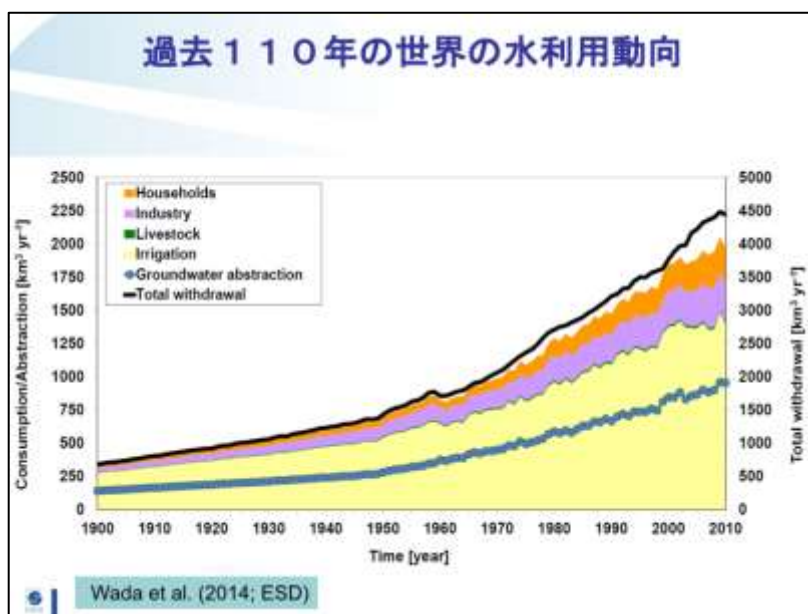


図 3.1.3 過去 110 年の世界の水利用動向

表流水のモデルはいろいろあるが、最先端の水理モデル、水資源モデルの開発では、地下水をどうモデルに統合するかが課題になっている。地球規模のシミュレーションになるとデータが非常に限られ、地質データがない場合もある。最近では幾つかのグループで米国地質研究所(USGS)のフローモデルを適用している。図 3.1.4 は地下水位を示しており、赤になるほど深く、青になるほど浅い地下水位である。統計データが限られ世界規模の検証はできないが、日米欧についてはある程度正確に地下水位が把握できている。地下水の水質を研究する場合には、地下水モデルを構築しないと、現状では全く対応できない。特に、農業用水の窒素やリンが地下水に移行し、どう拡散し、どのくらい川に流れていくかを把握するには地下水モデルが不可欠であり、このようなモデルの開発が世界では非常に進んでいる。

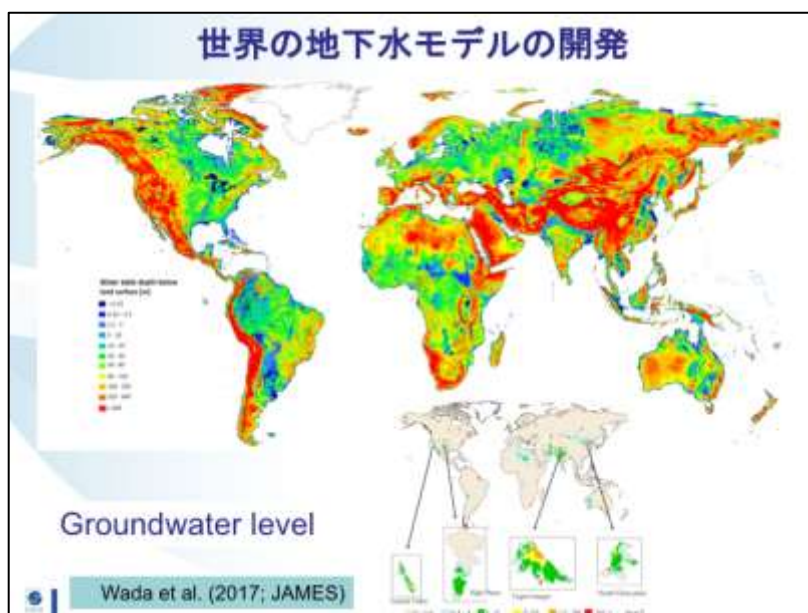


図 3.1.4 世界の地下水モデルの開発（地下水位）

図 3.1.5 は世界の地下水の汲み上げ動向を示している。データが非常に限られ、国連のデータなどを組み合わせながら計算している。灌漑が盛んな地域で地下水利用が顕著であり、米国のオガララ帯水層やセントラルバレー、インドの帯水層もよく表現されている。問題は、降雨から地下水に流れる涵養量と汲み上げ量を比べた場合、地域によっては汲み上げ量の方が多く地下水位が低下していることである。特にインドで水需要が増加し汲み上げが非常に多くなっている。オガララ帯水層や中東などの非常に雨が少ない地域、サウジアラビアなどでも砂漠の真ん中で農業をしていて、そこでは地下水に依存している。

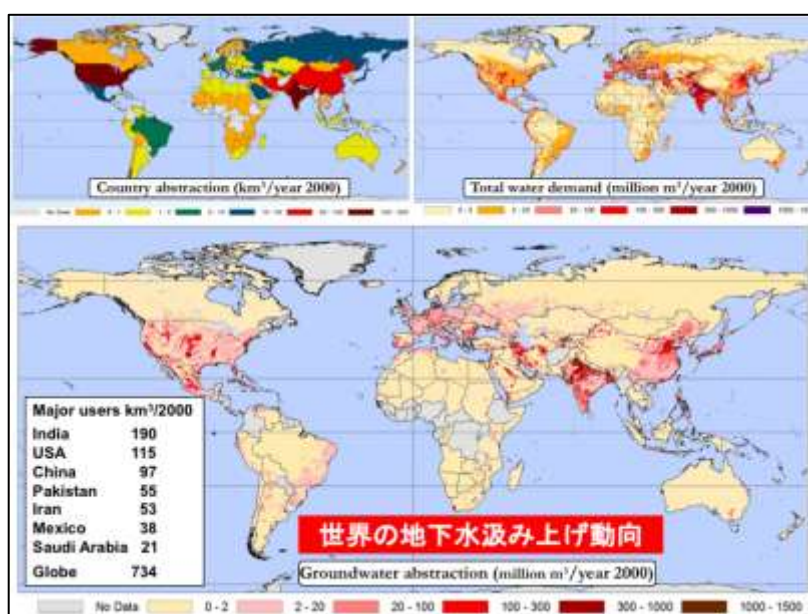


図 3.1.5 世界の地下水の汲み上げ動向

地下水の枯渇が世界で急速に進んでいる。汲み上げられた 2～3 割が枯渇性の化石水で農業に使われている。図 3.1.6 に世界の帯水層の利用量と涵養量のバランスを示す。ガンジス川上流域では汲み上げ量が涵養量の 50 倍以上、中東や乾燥地域では 20～40 倍以上ある。オガララ帯水層やメキシコの帯水層では、10 倍から 20～30 倍近くになっており、じっさいに地下水の水位が 1m 以上下がっていて、井戸をどんどん深くしている。このような持続可能でない地下水利用により食料生産が賄われているという状況にある。



図 3.1.6 世界の帯水層の利用と涵養のバランス

内陸の流域で水資源の減少が非常に進んでいる。図 3.1.7 は昨年発表した共著論文だが、NASA の GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 衛星の地球重力場観測データを解析したもので、内陸の流域の水資源の減少がどれぐらい進んでいるかを視覚化している。特にアラブ海やカスピ海など、海とつながっていない内陸流域で水資源の減少が非常に進んでいる。気候変動による蒸発散の増加や、人間活動による地下水の汲み上げが原因で水資源が急速に減少していることが示されている。GRACE 衛星は寿命で運用が終了したが、2002 年に打ち上げられてから、2016 年までの期間に 50% 以上も水資源が減っている地域もある。この衛星は地下水と土壌水分、表流水など、全ての水資源を監視できたため、多くの科学的成果をもたらした。

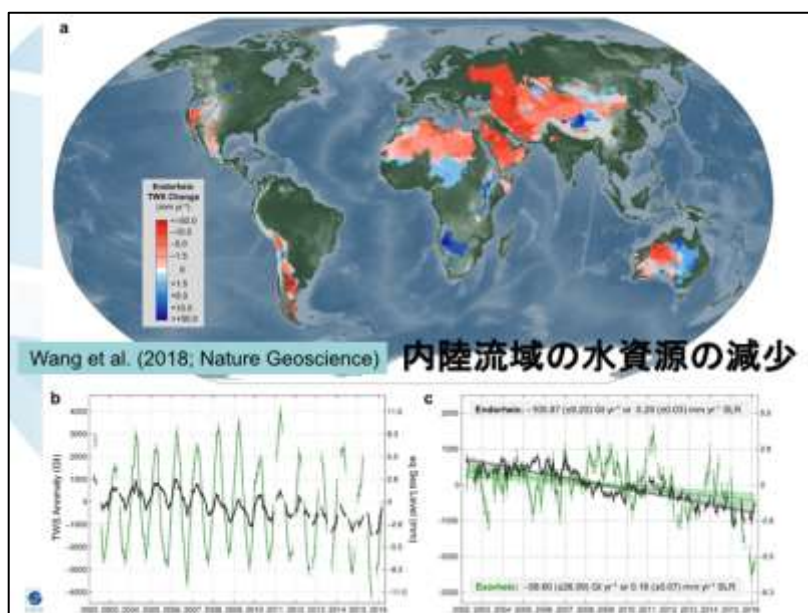


図 3.1.7 内陸流域の水資源の減少

地下水はローカルな問題と思われがちだが、農業に使われる地下水は農業作物の形で日本にも多く輸入されている（図 3.1.8）。つまり、仮想水（バーチャルウォーター）である。特に、米国やパキスタン、インドは枯渇性の地下水を使った農業作物を世界に輸出している。日本もオガラ帯水層を使った農業作物を米国から多く輸入している。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という非常に重要なメッセージである。中国はかつて仮想水輸出をしていたが、人口増加に伴い仮想水輸入国に切り替わり、米国やインドなどから地下水由来の仮想水を輸入している。仮想水を考えると水は SDGs の複数の目標と関連している。

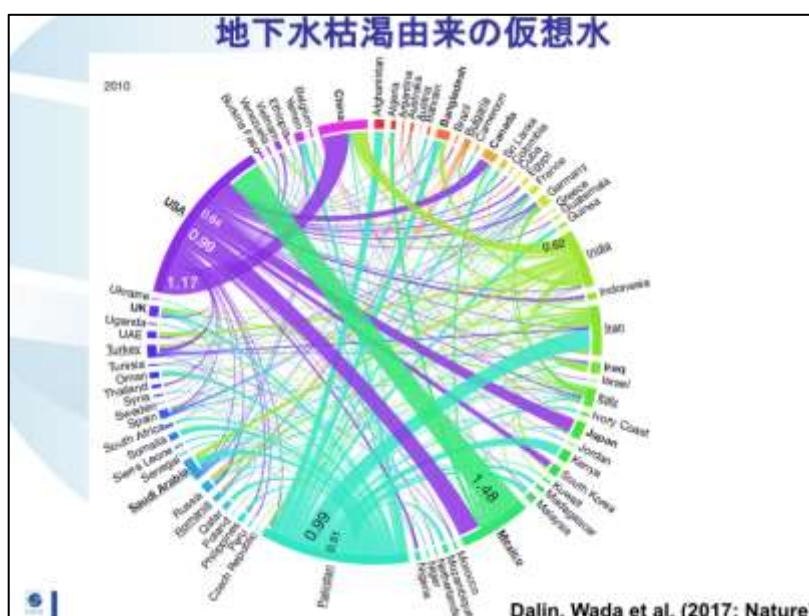


図 3.1.8 地下水枯渇由来の仮想水

図 3.1.9 に将来の水利用変化を示す。赤になるほど増加、青になるほど減少を示す。2010 年と 2100 年を比較すると、アフリカやアジア、南米で水利用が 100%以上増えている。日本は人口減少や技術進歩で水利用の減少が見込まれる。米国は東西で対照的で、西では農業が盛んなため需要が増える予測である。

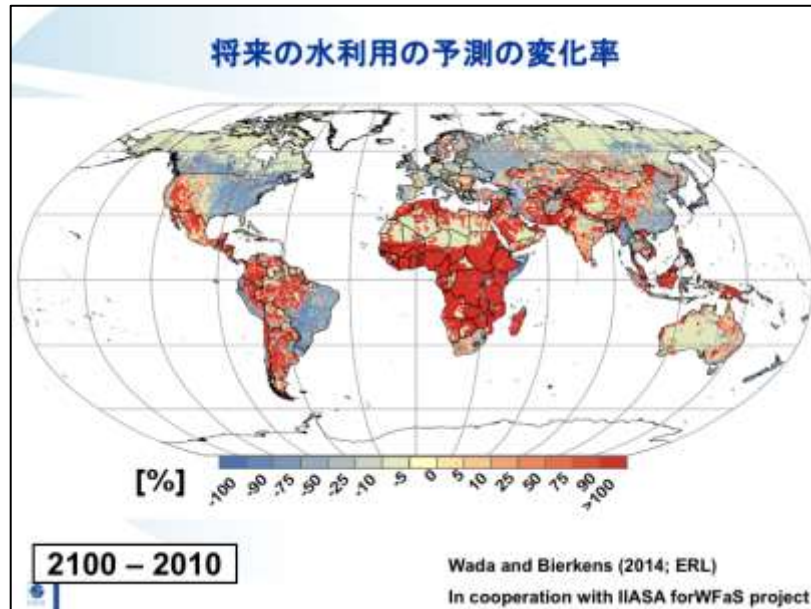


図 3.1.9 将来の水利用予測の変化率

図 3.1.10 は持続可能でない地下水利用の増加を示している。左下が現在、上側が将来予測だ。表流水は限られるため増加分は地下水で賄うことになり、赤色の持続可能でない地域が増加する。地下水の人工的な涵養が重要となる。SDGs では地下水に関する指標が明示的ではないため、国の政策で包含していく必要がある。

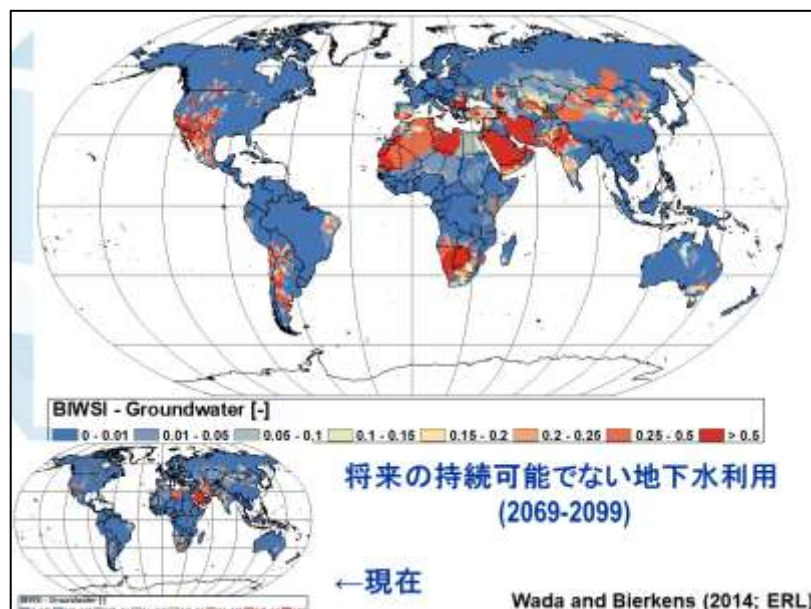


図 3.1.10 将来の持続可能でない地下水利用

地下水の汲み上げに使うエネルギーや食料生産との相関も考えなければならない。最新動向として水質や水温のモデル開発も進展している。図 3.1.11 は約 2 年前の共著論文で表流水の水温の計測をしている。

国連や世界銀行が、世界各国で水質のモニタリングと評価、解決策を、2027 年にかけて取り組む World Water Quality Assessment を今年から開始し、IIASA も参加している。2023 年にセネガルのダカールで行われる世界水フォーラムで発表されることになっている。

水質観測サイトが先進国に限られており、特にアフリカは非常に少ない。水質のモニタリングをどのように増やし、解決策につなげていくモデルを作り、どのように利用していくのが課題である。

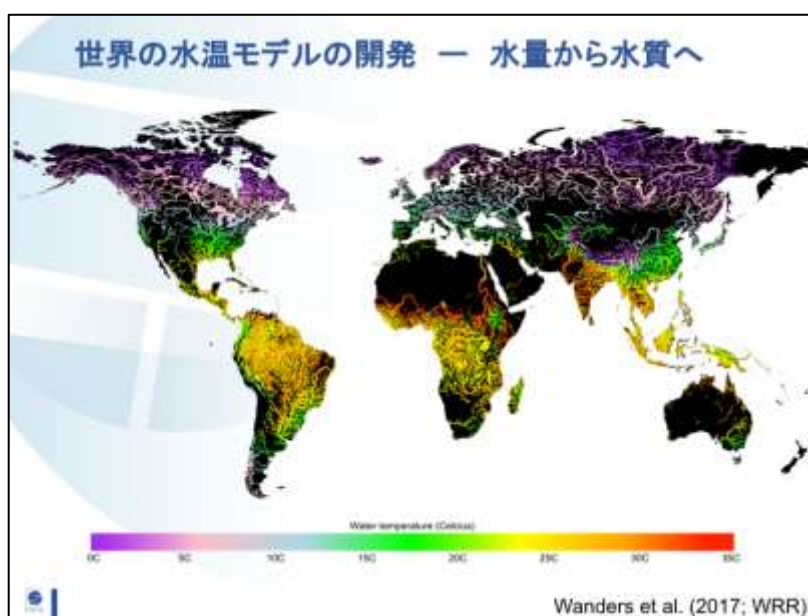


図 3.1.11 表層水の水温モデルの開発

SDGs の他の目標とのインタラクションについても、他分野の研究者とどのように共同研究していくか重要な課題になっている。

図 3.1.12 は IIASA で実施している研究で、水の需要と供給のバランスに問題があり水不足が存在する場合、どのようにインフラ投資をしたらよいかを水の経済モデルで計算している。アフリカに応用しているが、将来水需要が増え供給とのギャップが生まれた場合、どのようなインフラ設備が必要かを算出する。様々な解決策をモデルに取り込み、経済的なコストを計算させる。データによるが、解決策は幾らでも増やすことができる。それぞれにかかるコストとの兼ね合いとなる。需要、供給、ダム、海水淡水化などの解決策も組み込まれている。ダムや海水淡水化は非常にコストが高いという点がネックとなる。

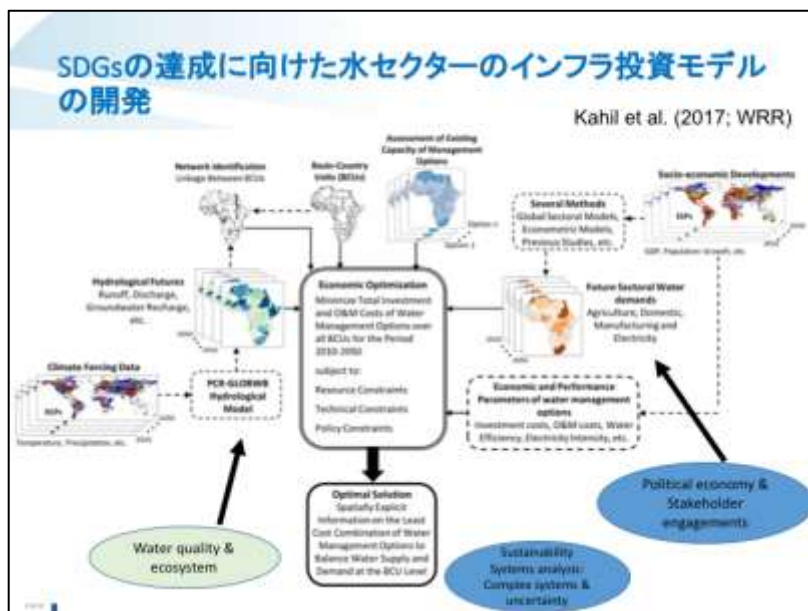


図 3.1.12 水セクターのインフラ投資モデルの開発

IIASA が実施しているもう一つの重要な研究は将来シナリオの開発である（図 3.1.13）。インダス川とザンベジ川でステークホルダーと一緒に取り組んでいる。インダス川は政治的な緊張があり非常に難しい状況だが、ネパールに皆さんを呼んでインダス川の水の供給と需要のバランスが将来どのように変わっていくか、どのような解決策があるかについて、シナリオ作りを行っている。ステークホルダーが科学的な知見を生かしていくこと、彼ら自身が技術を保有することは非常に重要なプロセスであり、IIASA では特に重視している。

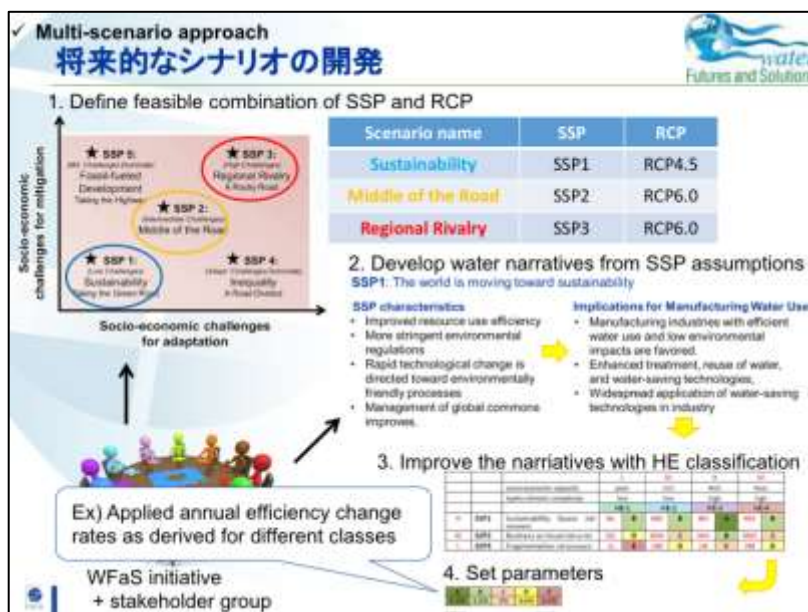


図 3.1.13 シナリオ開発

図 3.1.14 は、将来のアフリカにおける水供給と需要のバランスを 3 つのシナリオで示している。

「RR」は各国が自国の経済成長を優先するシナリオで水の需要が最も増加する。この場合、アフリカにおける水セクターへの投資は現在年間 6 兆円だが、約 2 倍の投資が必要になるという見積もりが出ている。

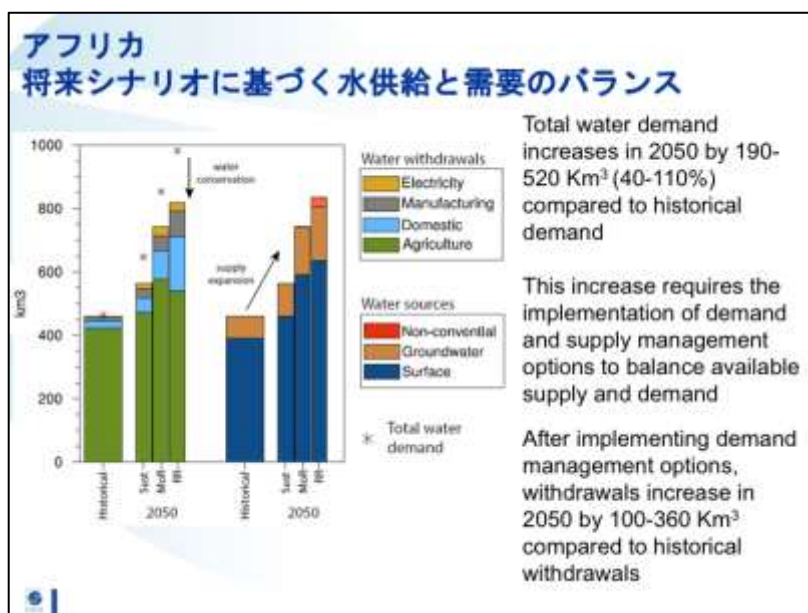


図 3.1.14 アフリカにおける将来の水供給と需要のバランス

最後に、図 3.1.15 に本日の発表のメインポイントをまとめる。

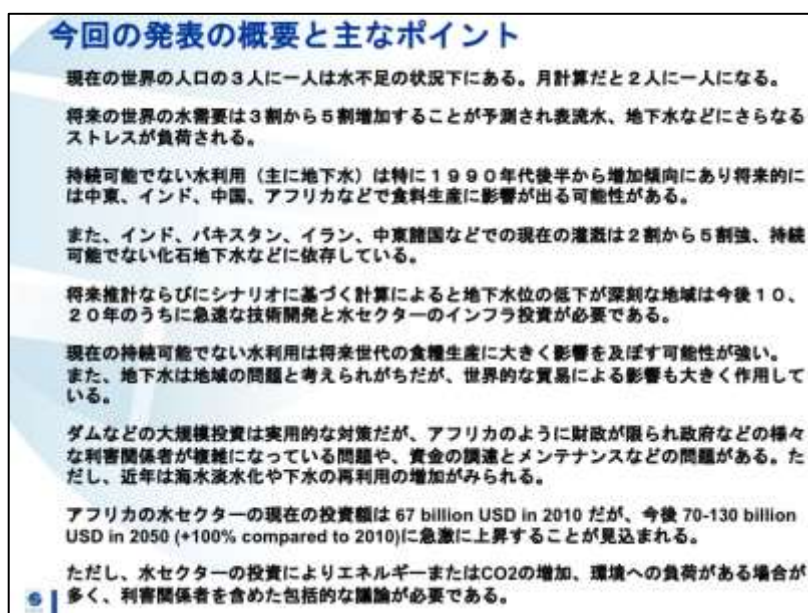


図 3.1.15 今回の発表の概要と主なポイント

3. 2 「農業水利システムへの ICT 水管理技術の導入」

友正達美（農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 水田整備ユニット長）

1. 水田灌漑用水の管理の現状と問題点

本日は最新の灌漑用水の管理技術にかかる話題を提供する。

農業セクターは、世界の水需要の 7～8 割を占める。日本国内でも最大の割合である。農業用水のうち、水田の灌漑用水が大半である。国内では農業人口の減少と高齢化の進行が水田灌漑用水の背景にある。政策誘導もあり、担い手への農地の集積が進み、大規模経営体、つまり大きな農家が沢山の農地をまとめて耕作、管理する姿に変化してきている。そのため、田んぼ一枚一枚の水管理、個々の田んぼまで水を送る農業水利システムの管理や運用にも担い手不足の影響が現れ、限られた担い手農家に多くの役割の負荷が集中する傾向にある。

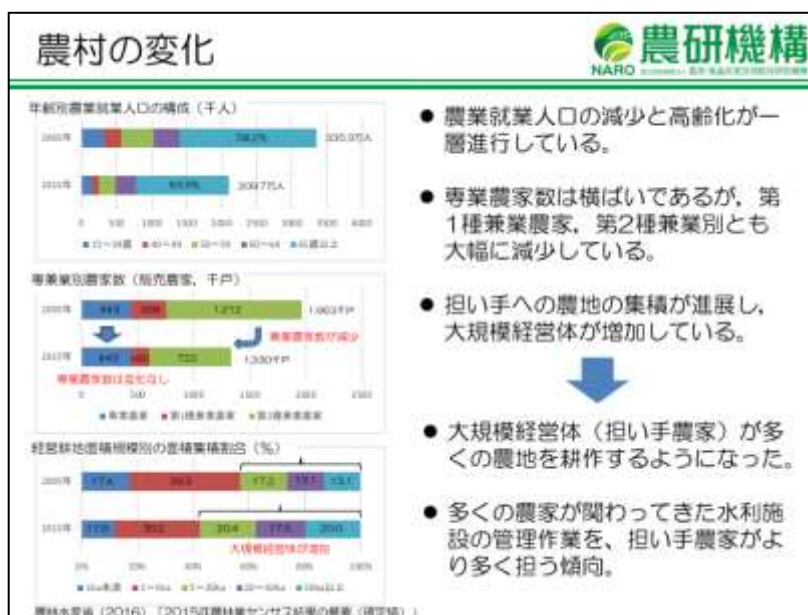


図 3.2.1 農村の変化

図 3.2.2 は水稻作に要する労働時間の推移を示している。日本では水稻作にかかる総労働時間は大きく減少している（灰色の棒グラフ）。これは、田植え機（水色の線）と除草剤（緑色の線）の普及で、それらの作業時間が劇的に短縮されたことが大きい。一方、水管理時間（赤色の線）は、微減に留まっている。負担の大きかった田植えや収穫の労働に対応した農業機械の技術開発が進んだ一方で、従前の数枚の田んぼだけの小規模農家では水管理の負担はあまり感じていなかったという時代背景がある。しかし、1つの大規模農家が何百枚もの水田の水管理を担うようになってくると、水管理の手間が甚大になる。また、このような大規模農家では、田植えや稲刈り労働のピーク時期を分散させるため様々な品種の組み合わせや、移植栽培（苗を田植え機で植える栽培方法）と直播き栽培（農地に直接、籾を播いて発芽させる栽培方法）という異なる栽培方法の組み合わせという経営上の工夫がなされる。すると、一枚一枚の田んぼで品種や栽培方式が違ってきて、それぞれ異なる水管理が必要となる。水管理の作業量が単純に増えるだけでなく、

複雑化する。このような変化に対応するため、水管理に ICT を用いた省力技術が検討されるようになってきた。

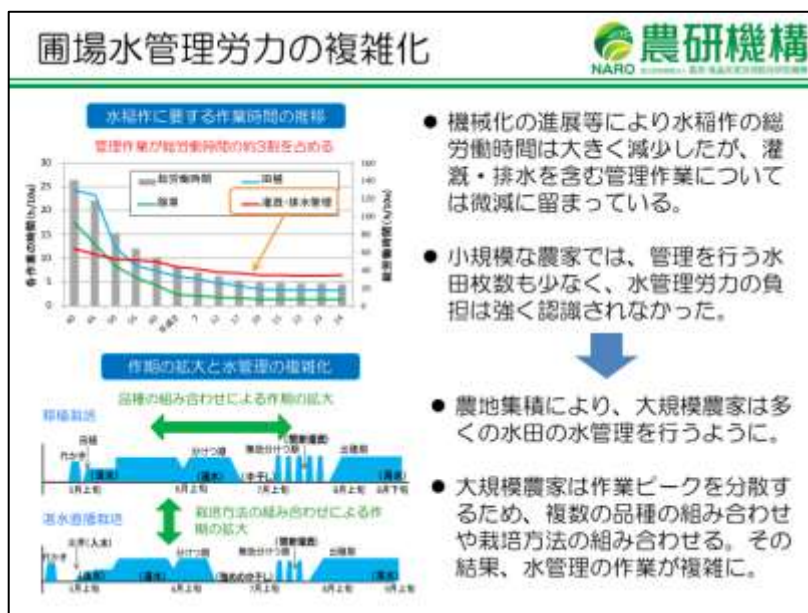


図 3.2.2 圃場水管理労力の複雑化

最末端にあたる田んぼ一枚一枚と、その一つ手前にあたるポンプ場での水管理の ICT 化について説明する。整備が進んだ水田では用水路からポンプで汲み上げて配水が行われている(図 3.2.3)。ポンプ場を取り上げる理由として、水利施設の維持管理費の高騰という農業経営上の現実的な課題がある。水を汲むために、ポンプを動かすと電気代が発生する。米価が下がるなか、農業で使用する電力料金が高騰する傾向にある。日本では水が安くても、水利施設の電気代のコスト負担は大きい。土地改良区の全国平均で水利施設の電気代が、約 25%を占めている。



図 3.2.3 農業水利システム

2. 圃場水管理システム

水田一枚ごとの水管理を ICT 技術で遠隔操作、自動制御する検討を紹介する。図 3.2.4 は農研機構が開発した装置で、市販化に至っている。田んぼの吸水口に設置すれば、遠隔操作で給水を ON/OFF 制御できる。給水バルブに後付け設置可能なので交換工事費用が不要だ。落水口に設置すれば、排水も制御できる。



図 3.2.4 圃場水管理システムの開発（１）

一台ごとに遠隔操作端末を割り当てると通信費が高額になるため、省電力無線で基地局と装置数十台単位とのデータ送受信を行わせて、基地局と操作端末とのデータ送受信はクラウド経由で行う方式で構築している。農家は携帯端末で田んぼの水位や、給水や排水などの状態がモニタリングできる。開閉指示も出せる。水田は水をはった湛水の状態にする期間が長い、何 cm の水位を維持と指示すれば、水位が自然に下がっても、その水位まで給水して戻す操作を自動で行ってくれる。



図 3.2.5 圃場水管理システムの開発（２）

全国各地でこの装置を試験運用した。水管理に要する時間を平均で約 8 割削減という効果を得た。水位計の計測値が遠隔で把握できるので、水の見回りにかかる時間を大きく削減できた。ただし、見回りの目的は水位だけでなく、水稻の生育状況や虫の繁殖等もあるので、ゼロ時間にまでは減らない。急に水位が下がる異常が起きた場合、現場を見に行くと、あぜにザリガニが穴を開けて水が漏れているようなこともある。そういった多様な見回りの目的までゼロにできないが、従前より作業時間を大きく節約できる。

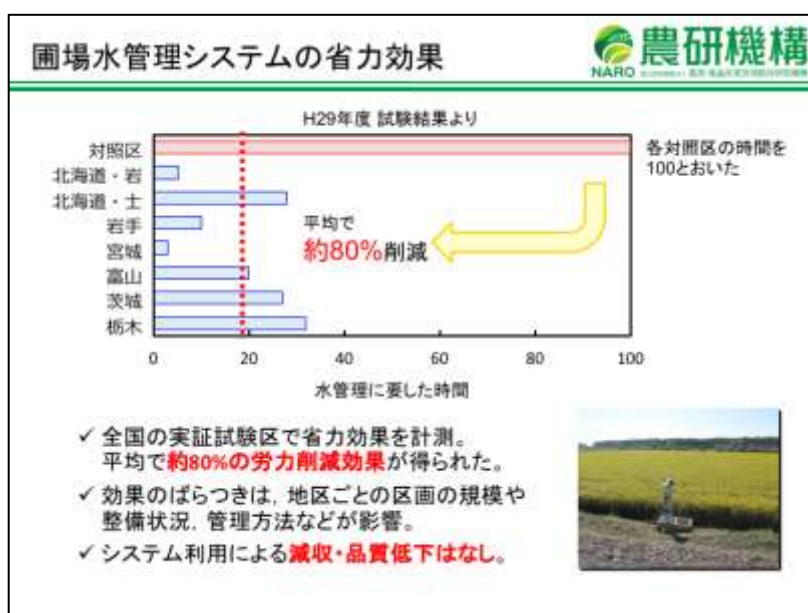


図 3.2.6 圃場水管理システムの省力効果

発展的開発として、スマート水管理ソフトとの連携の実証試験を進めている。水稻の発育まで

含めた全自動の水管理を目指している。過去の蓄積から、品種と植える時期が決まれば、気候に応じた成長経緯と水管理スケジュールの予測がたつ。つまり、品種と田植え日を入力すれば、基本的な成育スケジュールを機械的に作成できる。日々の実際の気象は毎年違ってくるが、実際の日々の気象の推移に従って自動的に調整させる機構も組み込んでいる。

さらに将来的には、異常な低温気象や気象災害などへの対応もできないかと考えている。

3. 圃場・水利施設連携型水管理システム (iDAS: Irrigation and Drainage Automation System)

次に、水田の水供給の1つ手前にあたる、ポンプ場の運転等に着目した配水管理のICT化を説明する。農研機構が開発したiDASというシステムの現場への実装が進んでいる。導入の対象先がポンプ場のレベルになるが、遠隔で監視したり操作したりするシステムの考え方は、田んぼ一枚一枚と同じ発想だ。

ポンプ場とパイプライン化している圃場は従来からポンプをON/OFF制御している。ポンプを回し続けている際はスイッチをON、灌漑しない時季や夜間に止める習慣のある地域ではOFFにしている。ここをIoTの活用によりシステムとして管理する。

また、農家が水を出すとパイプライン中の水圧が下がるので、その水圧の変動を検知するセンサをつけてモニタリングできるようにしている。ポンプの回転数もインバーターを付けておくことで、水の流量が遠隔、自動で調節できる。必要に応じてポンプの回転を緩める指示を送って、水供給を止められる。



図 3.2.7 iDAS と圃場水管理システムの連携

このシステムで得られる効果の検証試験を進めている。従来の小規模農家がそれぞれの田んぼを管理していた時代は、管理組合などがポンプ場を管理していて、水田とポンプ場の管理主体は別だった。大規模の農業法人が現れ始め、水田の水管理だけでなく、ポンプ制御も行いう状況が生まれ、このような連携制御の検証試験が実施できるようになってきた。

まず、低平地での実証試験を紹介する。図 3.2.8 は検証試験で得た導入効果である。従前は、ON にするとポンプが一定の水圧で動き続けていて無駄な電力や送水があったが、この試験では必要量だけを送水している。ポンプの流量や出力も同様に推移している。ポンプの電気代を約 4 割削減する効果があった。また、従前はパイプに常に過剰な圧力がかかっていたが、水圧が下がる時間が長くなり漏水リスクの低下という副次的な効果もあるのではないかと考えている。当然、節水という効果も結果的に得られる。

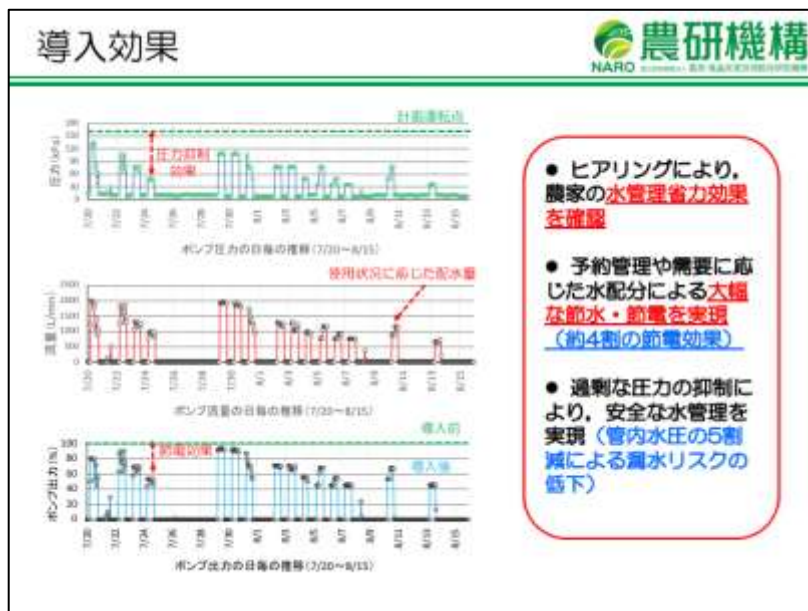


図 3.2.8 低平地の実証試験での導入効果

中山間地での検証試験も実施している。低平地での検証と比べると応用という位置づけになる。中山間地では、水田よりも高い位置に設置された配水槽に水を汲み上げ、一旦溜めてから、個々の圃場に水を送る方式となっている。中山間地の水田パイプライン地区でも、水位データと連携したポンプの自動制御と、インバーター制御を導入することで、電気代の節減、節水を狙っている。

中山間地での導入効果は、検証中だが、配水槽の水位を一定に保ちながら、農家の用水需要に応じて、揚水給水されるようポンプ回転数を段階的に制御することはできた。中山間地区でも節電の効果が得られるだろうと期待している。

4. 今後の課題

ここまで、農業用水の流れでみると最末端の田んぼ一枚一枚のレベルと、もう一段階手前の配水槽やポンプ場からの送水のレベルでの話題を説明した。さらに手前、より上流としては、いわゆる幹線用水路の制御や河川からの取水部分までが繋がってくる。

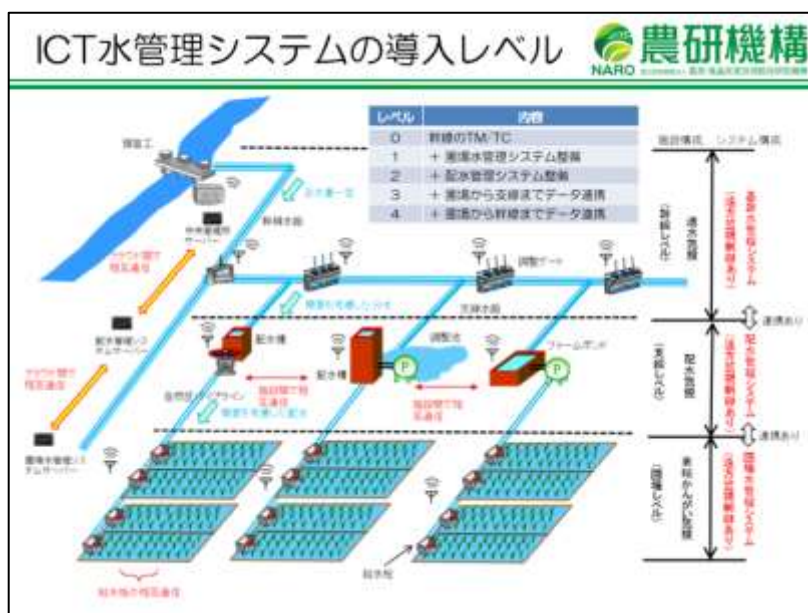


図 3.2.9 灌漑用水への ICT 水管理システムの導入レベル

その全体を ICT 化して統合するまでには、まだ相当の距離がある。上流において古くから利用されているテレコン・テレメーターといった基幹水管理システムの ICT 機器と、現在、末端から進みつつある田んぼ一枚一枚の水管理とを全体システムとしてどう繋げ、統合するのが今後の大きな課題である。

水管理においては必ず、これだけの水があるからこれだけ送るという供給側と、これだけ水が欲しいので水を送ってくれという需要側とがあり、この両者をどこかでしっかり調整しないとシステムが動かない。ICT 化しなくても調整は必要だが、ICT 化する上ではさらに様々な課題が出現する。ICT 化して見える化が進む中で、管理に関わる様々なステークホルダーでの相互の情報共有の仕方も、これまでにはなかった大きな課題となってくる。



図 3.2.10 現行システムの適用範囲

農業と水に関わる言葉に我田引水という四字熟語がある。これは農業分野での水利秩序と呼ぶ社会慣行に係る。人々が社会的な合意の上にたって水を使っていく在り方として、相互に監視しながら不正な我田引水をしないという緊張感によって秩序が守られてきたというのが、伝統的な水利秩序の維持である。ICT化が進めば、それが見える化し、従来把握されていなかったが実態として存在していた水利用も表面化する。ICT化が水利秩序の世界にどのような影響を与えるのか、個々の農家やポンプ管理者や上位施設管理者が持っている権限を、渇水などの状況に応じてどこまで、どのようにコントロールするのか、それらの権限付与の仕方は、今後より大規模なシステムを作るためには重要な課題となると考える。

【質疑応答】

Q: 渇水のように水が逼迫した時は、現状では、まだ上位の幹線のレベルまで連携できないため、自動で最適に配水してくれるような対応はできないという理解で良いか。

A: もし渇水協議会などで節水と決めれば、農業用水は取り入れ口のところでまず絞ってしまう。その絞った水をどのように配分するかという上位レベルではまだICT化はできていない。現行では水を管理している方の裁量で配分されることになる。取水が絞られた場合、ICT化できた最末端の水田管理がどうなるかだが、蛇口の開閉を機械に自動的にやらせているだけなので、手前の配水施設から水が来なければ蛇口を開けても水が出ない状態になる。ポンプ場の場合は、管理責任者が渇水の取水制限を受けて、水配分する土地改良区等と合意形成した上で、運転するかしないかを定めることになる。渇水のような事態が起きた場合、まだ人が介入する形であり、機械が黙っていても適切に自動調整をやってくれるという姿にはならない。

Q: iDAS というシステムの中で ICT 技術を基軸として、水位を測り、配水管理をするということだが、サーバの管理は誰が担うのか。

A: ICT サービスを提供しているメーカーがサーバを準備して、ユーザーは使用料を払う形となる。

Q: 今後の課題のなかで最終発展型として述べられた、川から取水する幹線も含めた農業用水全体の中央水管理者のようなところのサーバにデータを集めれば、ポンプ配水の管理も、圃場の管理も、元々の灌漑用水をとる頭首工も管理できる姿にならないか。このシステムをエンドユーザー側の下から積み上げて行くと、我田引水の問題は残るが、逆にトップダウン的に進めていけば、このシステムで効率的に全体管理できるような姿になるのではないか。

また、自分の田んぼを管理している農家が個別にセンサを導入して、お金を払ってサーバから情報を得て管理するのではなく、より上位の管理者で一体的に管理した方がユーザーにもメリットがあるのではないか。

A: 現行だと、末端のユーザーは自分のところに確実に水が来ること、水を配る側は末端まで水が届くようシステムを管理すること、という立場の違いがそれぞれの発想の前提にある。基本的には、田んぼ一枚一枚の水の蛇口をひねる権限は個々の農家が持つ権限で、システムの上位者はそこには触れられないという関係性が、ボトルネックとしてある。

Q: 全体を俯瞰的に見るようなシステムの構想を念頭にすれば、個々の圃場の権利は確保しつつ、情報を共有するプラットフォームのような横断的機関を形成し、全体的な大枠から、それぞれ

をどう最適化するのが良いという議論ができるようにならないか。

A：現在、水利システムの ICT 化が進んでいこうとする中で、データ連携をどのように図っていくべきなのか、という問題についてのご指摘と捉えた。どのように相互にデータ利用出来るような仕組みとするか、行政でも現在議論されていると聞いている。

3. 3 「浄水膜の現状・課題と今後の技術的展望」

山村寛（中央大学 理工学部 准教授）

本日は膜の研究について浄水、下水も含めて紹介する。水処理を膜技術だけで全て解決するというのはやや短絡的で、用途に応じた使い分けをしっかりと考える必要がある。図 3.3.1 は水処理の考え方を整理したマトリクスである。横軸は、どのような微細な物質を除去し、水を浄化するかを示す。環境や衛生のリスクを含む。縦軸が水の価値あるいは価格を表す。図のセルの見方だが、最も左下に位置する下水は非常に汚く、市場価値もない水準だ。環境保全のため活性汚泥法できれいにして、右斜め上の下水処理水にする。一方で、さらに水処理して大腸菌やクリプトスポリジウムなどを除去して衛生を確保すれば、市場価値があがり、浄水、トイレ洗浄水、再生水として利用できる。水処理への対価の源泉は、三次処理水から浄水にまで価値を上げるギャップである。

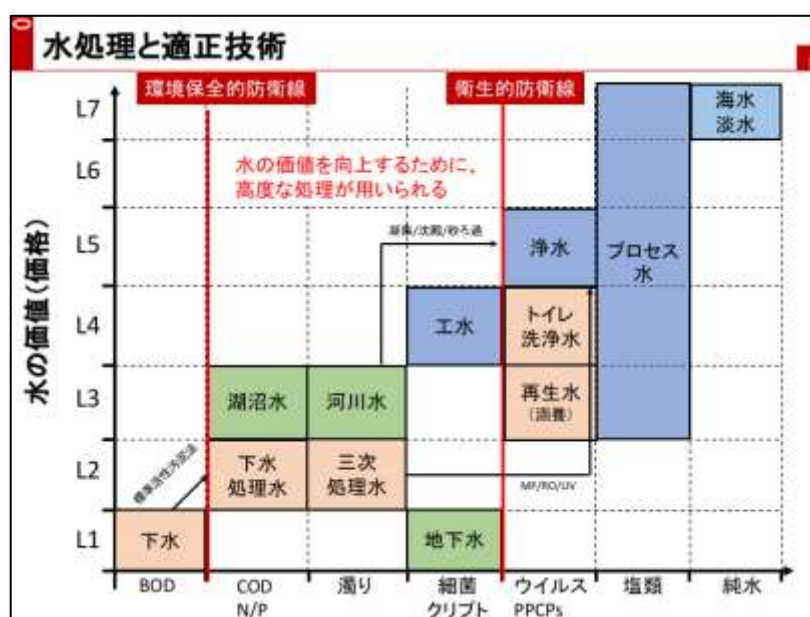


図 3.3.1 水処理と適正技術のマップ

技術の価値を即座に技術の優位性と錯覚しがちだが、しばしば誤った判断を招く。水は同じ処理を行ったとしても、用途によって技術の価値、価格が大きく異なる。具体的には、全く同じ膜でも水処理用では1㎡で1万円程度、医療用では約100万円を越える場合があり、その価格には100倍の違いがある。膜は用途に応じた適正価格がある。医療用では、処理された水の価格が非常に高いが、上下水道では水の価格を抑えるため、造水単価を抑える必要がある。上下水道は水の価格の低さゆえの難しさがある。先端研究で見落とされがちなのだが、社会実装を目指すなら避けられない観点だ。

膜の開発・利用における顧客利益を検討するため、図 3.3.2 のような式を考えている。第1項の分母の膜のコストとは値段だ。分子はろ過流速と膜の寿命の積だ。流速が高ければ、単位時間当たりでろ過できる水の量が多い。つまり透水性が高い。この数式から、顧客利益の向上には、

コストを下げるか、ろ過流速を上げるか、膜の寿命を長くするか、もしくは、ほかのプラスアルファの機能を大きくするかのいずれかとなる。MF（精密ろ過膜）と UF（限外ろ過膜）では、現在、日本製の膜の性能は、他国よりも少し勝っている。膜面積 1m^2 で 1 日当たりのろ過水量が $2\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 以上で、10 年保証という位置だ。他国の状況だが、MF と UF では、中国や韓国のキャッチアップは非常に早く、最近では良い性能の膜を作り始めている。品質のバラツキがまだ多いのだが、化学薬品体制に優れた PVDF（ポリフッ化ビニリデン）で中空糸膜を作っている。中国企業製の膜の断面を観察すると、日本企業製の膜と非常に近い構造や、ユニークな構造がすでに開発されている。もっとも脅威となるのは価格だ。日本製の 3 分の 1 程度で販売している。日本企業はそれらと競争しなければならない状況だ。MF と UF の市場だけでなく、NF（ナノろ過膜）、RO（逆浸透膜）も同様だ。日本企業は多くが、除去性能を保証しながら、透水性と強度を向上させてきて、今はまだ少しリードした位置にあるが、他国のキャッチアップと価格攻勢が厳しい。

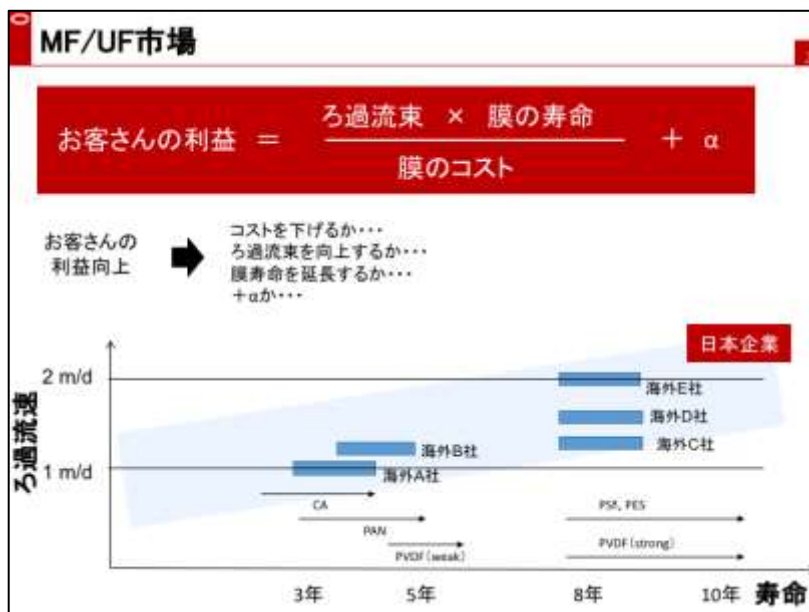


図 3.3.2 MF/UF の市場価値

中国と韓国の企業の状況だが、大学と共同開発して、製造技術力を高めている。少し前のデータだが特許と論文の推移をみてもわかる。

膜関連の特許登録推移について日米欧中韓の動向を特許庁が公表している（図 3.3.3）。青色の線が全体の特許数で、2002 年頃をピークに下がっている。高分子科学を基礎とした膜の素材や構造、製膜に関する技術は相当に成熟しており、目新しいことが出てきにくい状況になってきているとみられる。2005 年頃までは日本が最も多く基本技術の特許化していたが、それ以降は中国と韓国の登録件数が上回っている。

一方、論文数は全体的に増加傾向にある（図 3.3.4）。2000 年頃まで日本が最も多かったが、減少に転じている。逆に、欧州や中国が増えたため全体として増えている。

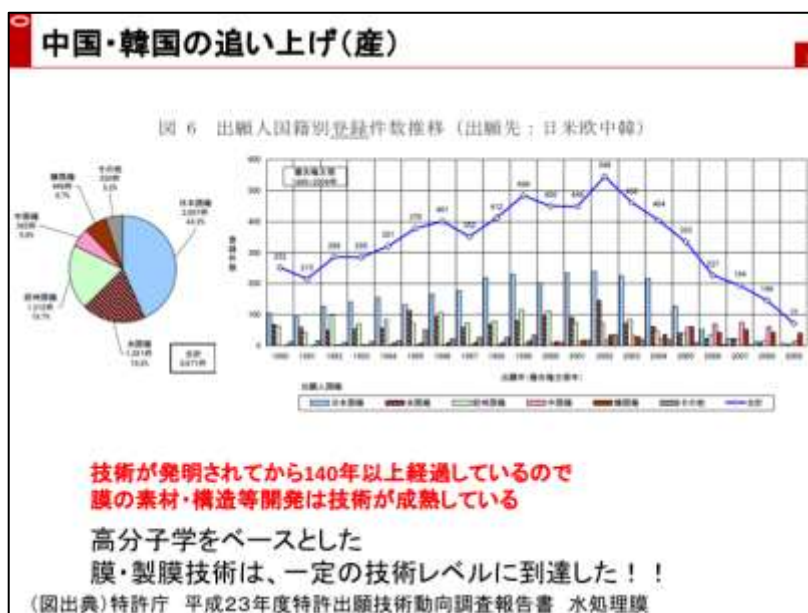


図 3.3.3 ろ過膜の中国・韓国の追い上げ(特許)



図 3.3.4 ろ過膜の中国・韓国の追い上げ(論文)

日本製の膜はろ過流速と寿命という性能は他国製より少し優れている(図 3.3.5)。ろ過膜の製膜技術における経験も蓄積している。しかし、中国が莫大な人数と時間、資本を投下しており、その差も埋められていくと悲観されている。従前どおり性能で高みを目指す方向性で顧客利益の維持を考えても、他国製の価格が3分の1であり、日本製は3倍の性能がなければ訴求力がない。性能を保持したままでの大幅なコストダウンや、国内生産をやめて中国企業で生産する国際分業体制の選択肢まで考えなくてはならない。日本企業が生き残るためには違う土俵での魅力が必要である。

現在の国内の膜メーカーは固定費を稼ぐだけでも精一杯といった状況で、開発投資力があまりない。顧客利益はプラスアルファの項で出さなければ、世界との競争力を持つことが難しい。膜ろ過が提供する新しい価値を検討した表を図 3.3.6 で示す。

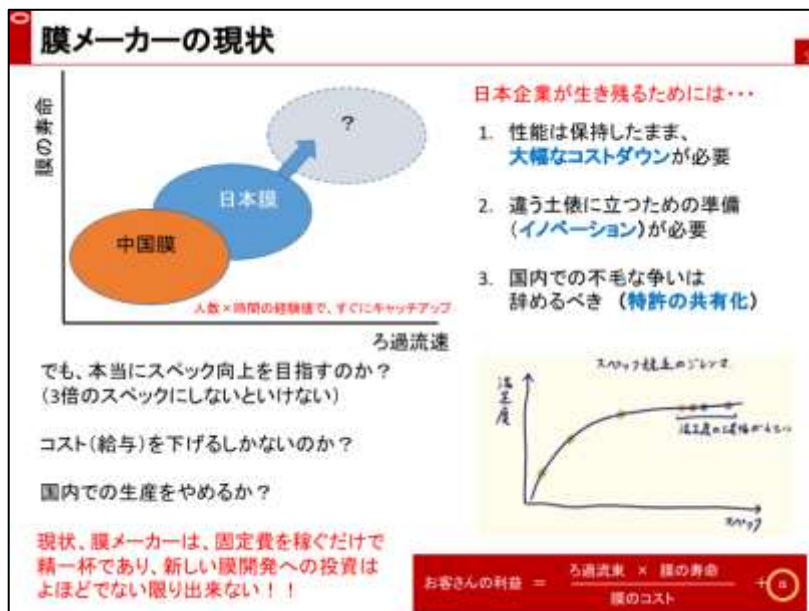


図 3.3.5 膜メーカーの現状と今後の方策



図 3.3.6 膜ろ過が提供する新しい価値

コストを考えつつ、従来の砂ろ過と膜ろ過を比較する。膜ろ過で水質がよくなる、操作も簡単

になるがコストは増える。次亜塩素酸や凝集剤の使用量を減らせるので、コストを下げられる。将来変化を考えると、さらに少子高齢化が進行して超広域化や超分散化社会になれば、省力化や自動化、無人管理などの要求が高まり、膜ろ過の確実性や扱いやすさ、コンパクト性などが推進力になるのではないかと期待している。

膜ろ過の自動化システムの設計にあたり、原水の水質は変動するので、その負荷変動を吸収しなければならない（図 3.3.7）。原水の水質の負荷変動を前処理で一定にできるなら、膜での負荷は常に一定となり、膜を最適化しておけば詰まらない。大変管理しやすいシステムを構築できる。一方、前処理で全ての負荷変動を吸収できない場合、膜ろ過で変動を吸収することも可能だ。この場合は、運転管理の最適や変動を吸収できる膜の開発が課題となる。

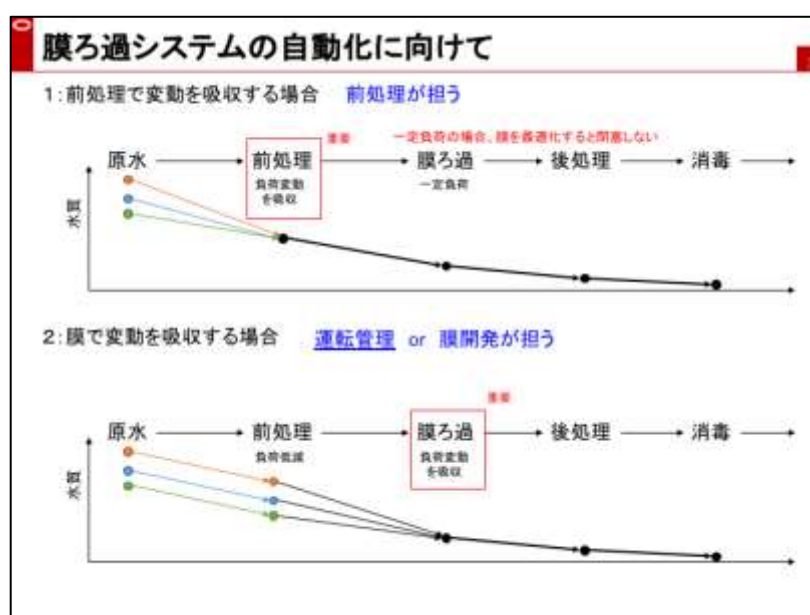


図 3.3.7 膜ろ過システムの自動化に向けて必要な要素

膜ろ過は、変動への対応方針が従来の土木工学の発想と少し異なる特徴もある（図 3.3.8）。土木インフラの場合、一旦建築した後は、安全率を設定して変動に対するリスクを管理している。膜ろ過の場合、変動に応じたフィードバック制御をかけられる点が特徴的だ。したがって、適量に水を処理できるので、過剰な設備投資は不要とできる。膜ろ過の価格が高い理由として、安全率の余裕分を非常に高く設定されている点が指摘されている。具体的には、ろ過水量が $6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ まで流せる膜を、設計値 $2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ で使用していて、設計値と安全分の割合が悪い事例などがある。原水変動に応じた適切な運転管理ができれば、過剰な設備を減らせて、設計値をもう少し上げられて、システムのコストを下げられる。

膜処理システムの研究開発項目を、図 3.3.9 に示す。既存製品を使って部分的に最適化する開発は企業ベースであり、3年程度の短い期間で担うことになる。一方、新しい価値の提供や全体最適は短期間では難しく大学ベースで5年から10年先を見据える項目となる。そのような展望を持ったうえで注力している3つの研究開発課題（膜が詰まらない新しい前処理剤の開発、リアルタイムでの膜の最適化、全く新しい膜）を順番に紹介する。

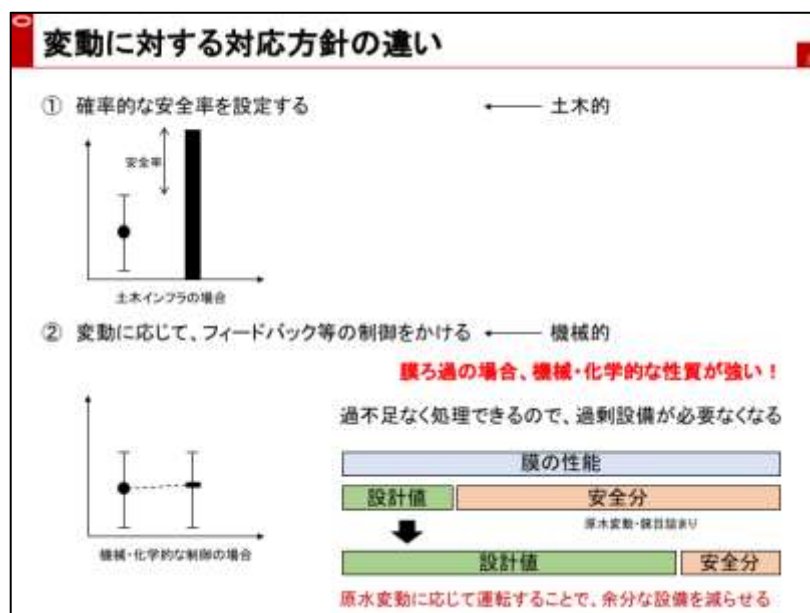


図 3.3.8 変動に対する対応方針

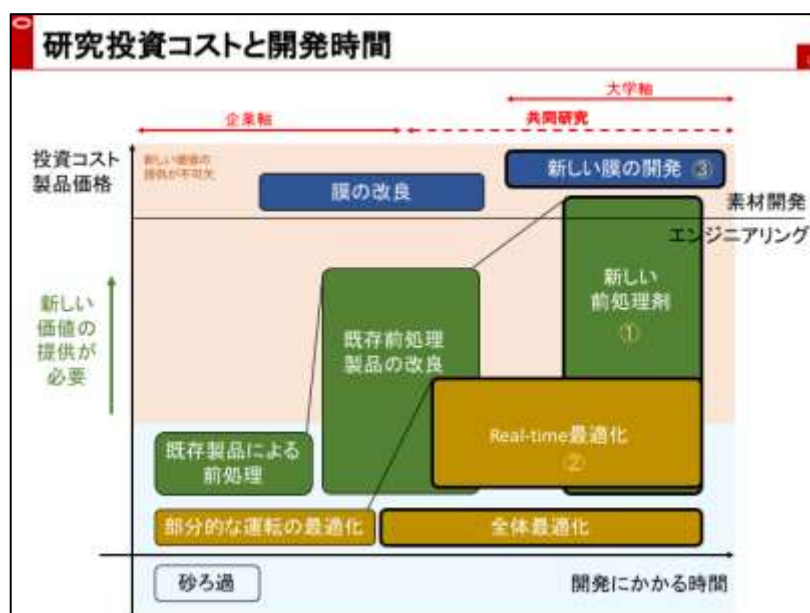


図 3.3.9 研究投資コストと開発時間

最初に、膜に特化した凝集剤の研究開発について紹介する（図 3.3.10）。凝集剤によって原水の水質、負荷の変動を前処理で担い、均質な処理水を膜で処理する考え方である。膜の孔径に近い大きさの粒子をメソ粒子と定義し、その詰まり方をゼータ電位で測定した。実験結果、メソ粒子のゼータ電位がゼロになる点が多量に詰まりにくかった。

メソ粒子のゼータ電位をゼロにしようと試みた（図 3.3.11）。まず国内の様々な市販の凝集剤を試験したが、ゼータ電位はゼロにならなかった。海外の凝集剤も調べた結果、ゼロになる試薬が 1 つ見つかり、膜との親和性も高かった。同様の特性を持った凝集剤を、市販の凝集剤を改良

することのできる研究を現在行っている。

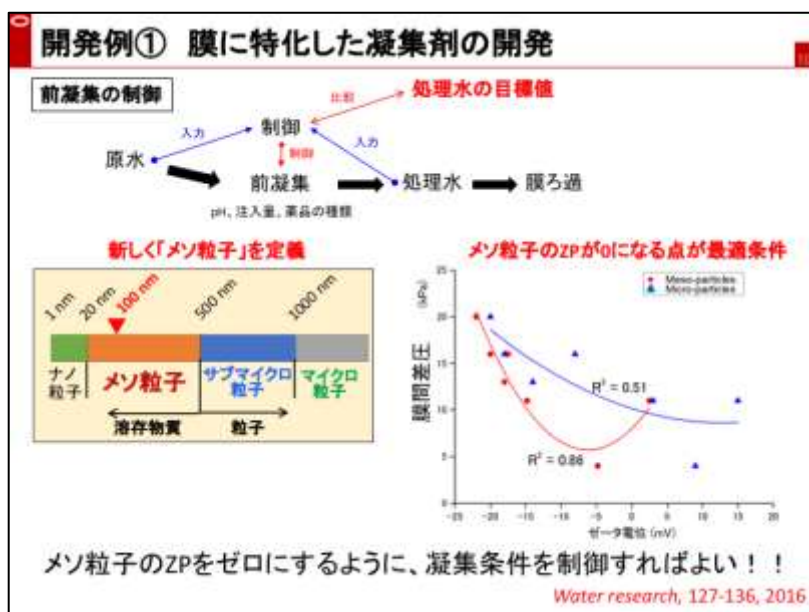


図 3.3.10 膜に特化した凝集剤の研究開発（1）

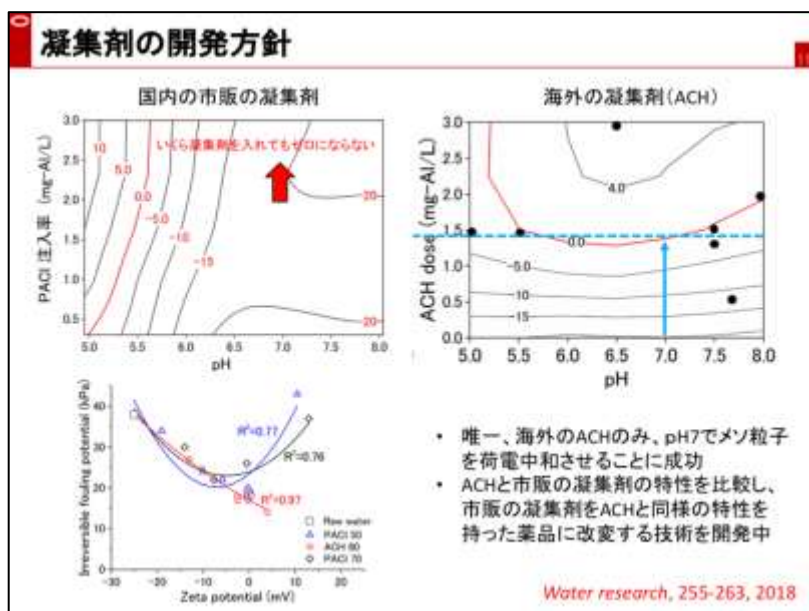


図 3.3.11 膜に特化した凝集剤の研究開発（2）

次に、リアルタイムでの膜の最適化の研究開発について紹介する（図 3.3.12）。こちらは膜の運転制御で原水の負荷の変動を吸収するアプローチだ。通常、膜の状態は圧力で管理する。圧力が一定値に達したら、膜を薬品で洗浄している。圧力での管理の課題はどのような成分がいつどのくらい詰まったかという質的情報が分からないことだ。そこで、膜の表面を直接監視する装置の研究を行っている。蛍光分光分析装置と光ファイバーを使って、膜の表面の変化を常時監視す

る検討だ。図 3.3.13 に測定結果を示す。横軸が膜の蛍光（発光）の波長で、縦軸が光源（励起光）の波長だ。膜を閉塞させる物質の成分に応じた等高線がピークとなって検出される。つまり、あるピークが出た場合、どの成分が詰まっているから、どの薬品で洗えばよい、という命令を出せるセンサの基本骨格を開発できた。

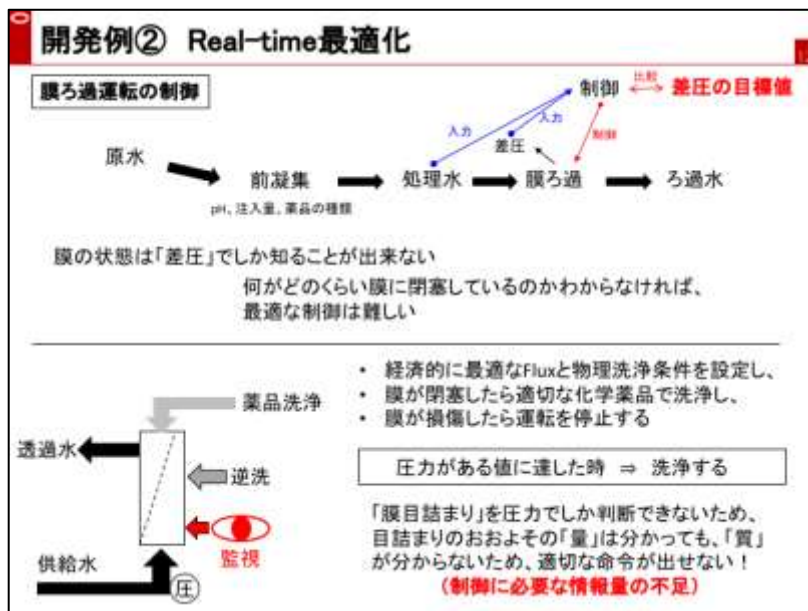


図 3.3.12 Real-time 最適化に向けた研究開発（1）

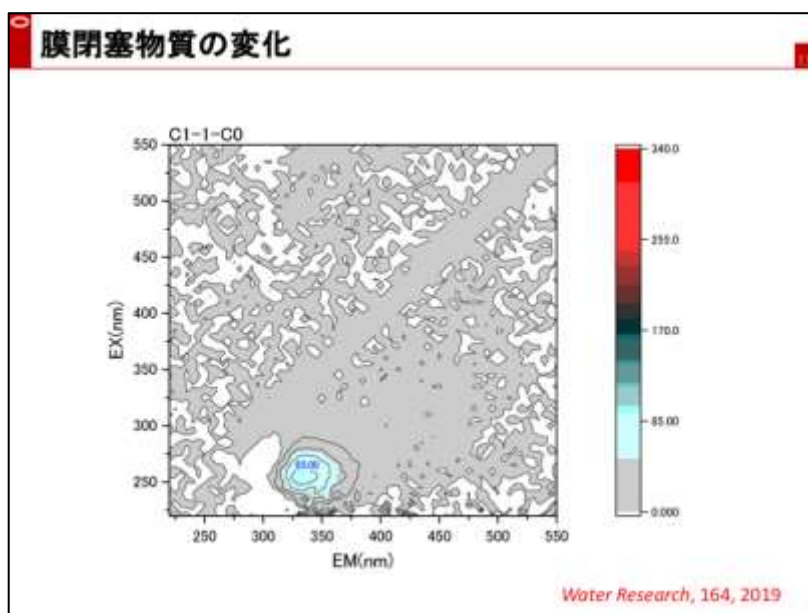


図 3.3.13 Real-time 最適化に向けた研究開発（2）

さらに、規格化や、自動運転システムの開発に取り組んでいる。将来的には、分析装置をもっと小型化できれば、POU（Point of Use）装置も狙える。トータルで開発を進めて、個別の要素

売りの技術ではなく、パッケージ技術として提供していくことが重要だ。

3 番目に、新しい膜の研究開発について紹介する（図 3.3.14）。膜で相分離する既存手法は成熟しているため、最適な膜の構造を見出すアプローチに注力している。ミクロの細孔構造が膜の物理強度、分離性能、流体特性に及ぼす影響をシミュレーションし、最適な 3 次元設計ができるよう共同研究している（図 3.3.15）。従来の加工法ではモデル計算された構造の膜を製膜できないため、ナノレベルの構造を制御する 3 次元プリンティング技術にも挑戦している。

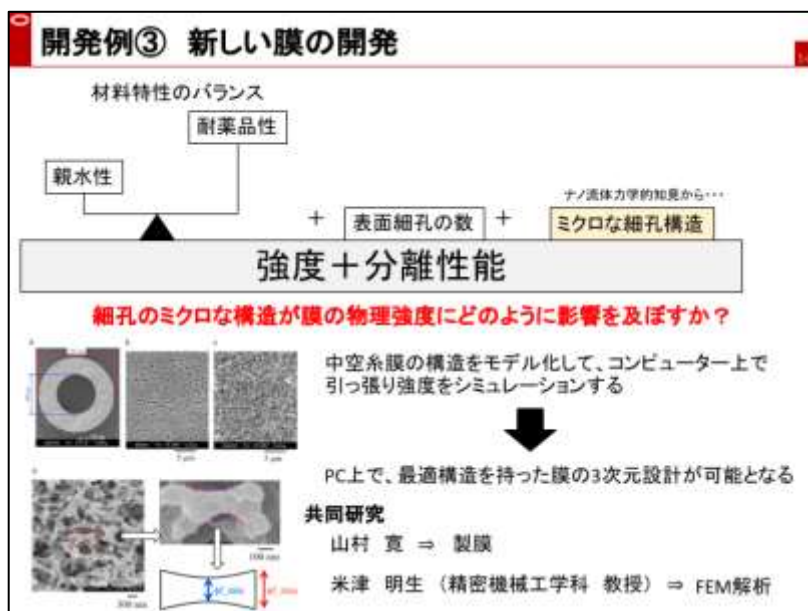


図 3.3.14 新しい膜の開発（1）

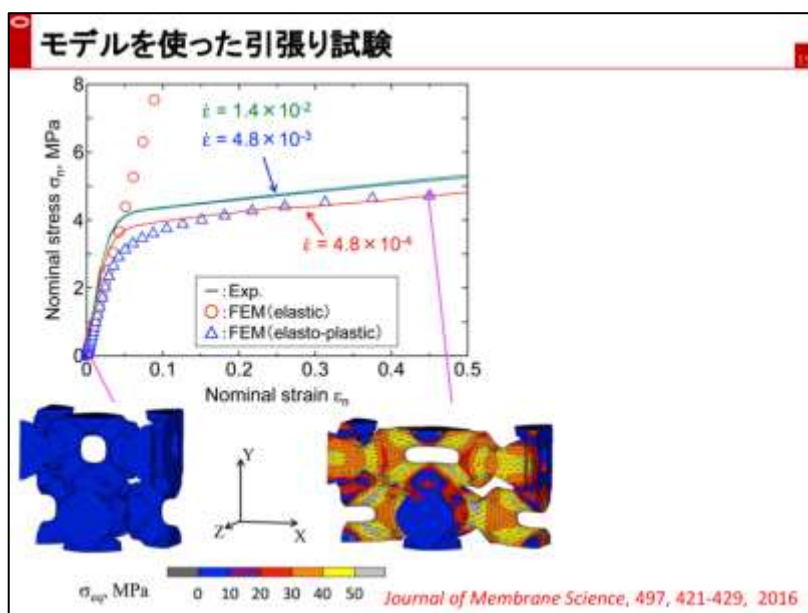


図 3.3.15 新しい膜の開発（2）

終わりに、これまでに紹介した課題以外で検討すべき課題を図 3.3.16 で示す。

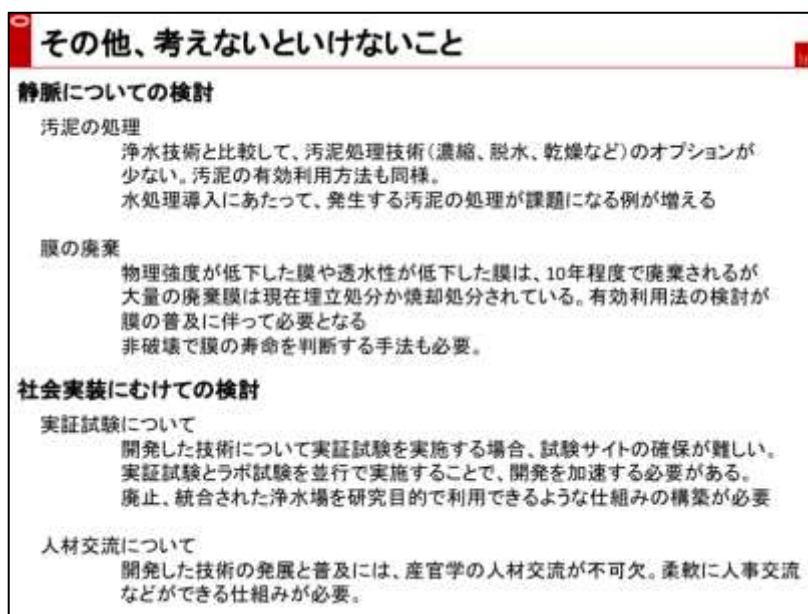


図 3.3.16 その他の検討すべき課題

【質疑応答】

Q：物理強度をモデル化して、膜を多様な用途にカスタマイズする研究開発課題について、膜の強度を高めることに焦点が当てられていた。たとえば、反対の方向の研究開発は考えられるか。つまり、強度は高くないが、ある用途では十分の強さで、ある材質を使えば 10 分の 1 のコストでできる、といった観点での研究開発は可能か。

A：その方向性での研究も可能で、学術的に見落とされているが実用的に重要な項目である。本日の紹介内容は、膜の細孔構造を最適化して、溶解性成分やウイルスなどの除去までを目指す方向性の内容だった。モデルの中に流体力学の流体特性を入れて、分離性能と一緒に評価しようという試みである。

Q：成熟した技術である一方で、論文数の総量が増えている理由は何か。

A：処理の対象とする水が違くと課題も変わるため、各国での研究が増えている状況と思われる。おおよそのトレンドとして、今年 6 月にも IWA の膜の学会では数 100 百件の発表があり、前処理剤、最適化、新しい膜に関する研究開発課題が大体 3 分の 1 ずつだった。

3. 4 「水の再利用 CREST その後」

田中宏明(京都大学 大学院工学研究科 附属流域圏総合環境質研究センター 教授)

本日は CREST「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」研究課題（平成 21～26 年度実施、「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）で得た成果と、終了後の発展、最新状況などの話題を紹介する。

SDGs について、日本でも企業がやっと関心を持ち始めた。目標 6 では排水処理の目標が非常にチャレンジングである。ところで、目標 6 の中には「安全な水の再利用（リサイクル）を実現する」というキーワードもある。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（図 3.4.1）。



図 3.4.1 水の再利用の利点

CREST では、“Fit on purpose”というコンセプトを掲げ、その水の再利用に関する研究開発を実施していた（図 3.4.2）。水の用途ごとに使う水のソースを変えられないか、都市に集められた水を一過性で捨てる前提の処理からカスタムメイドにもう少し利用する処理に変えられないかという動機である。

日本における工業用水の再利用率は、80%から 90%程度で非常に高い。しかし、生活用水の再利用率はわずか 1.3%である。低い原因を議論したが、排水に含まれるものとして、病原微生物や日常生活で使われる化学物質のリスク管理とそれに対する心理的側面が最大の課題だった。有害な物質が含まれていた場合、どこまで除去すればいいかを明らかにする必要があった。そして、再生水のコストも課題である。導入を目指すために、適用に見合う範囲やトレードオフをしっかりと見定めることとした。



図 3.4.2 水の用途を使い分ける“Fit-on-purpose”のコンセプト

再生水のヒト健康リスクについて、PRTR 法の第一種指定化学物質の濃度を推計した結果、水道水質基準に照らして、飲用以外の用途ではまず問題ないという値だった。

病原微生物についても、定量的微生物リスク評価（QMRA）という手法で、ウイルスのモニタリングデータをもとに調査した。WHO 基準の DALY（disability-adjusted life year、障害調整生命）の値を求め、水処理プロセスと水の用途ごとに整理した（図 3.4.3）。

水の衛生学的評価とバイオモニタリング 【水の衛生学的評価と管理手法の提案】									
那覇浄化センター 東レG PPTでの農業利用、都市利用における ケーススタディの評価結果のまとめ*									
処理プロセス		処理性能	Case 1 (農業利用)				Case 2 (都市利用)		
		平均 Log 除去率	計数	野菜収穫量 (kg/ha/年)	消費電 力(kWh/ha/年)	水質 指標(μg/L)	水質 指標(μg/L)	水質 指標(μg/L)	水質 指標(μg/L)
那覇浄化 センター	二次処理水	—	—	不適	不適	不適	不適	不適	不適
	濃縮+UF	3.3 Log	2.0 Log	不十分	適	適	不十分	不適	不適
東レPPT (東レG)	UF+NF	5.1 Log	5.1 Log	適	適	適	適	適	不十分
	UF+NF+RO	4.3 Log	4.3 Log	適	適	適	適	適	適
	UF+NF+RO+活性炭	5.1 Log	5.1 Log	適	適	適	適	適	適
東レPPT (T100 22)	濃縮+UF+NF	—	—	適	適	適	適	適	不十分
	濃縮+UF+NF+RO	—	—	適	適	適	適	適	適

* NoV遺伝子での評価結果のため、NoVの感染性を直接反映しておらず、リスクは安全側の評価
 ** UF+NF、UF+NF+RO処理では、再生水中のNoV濃度が遺伝子定量値でN.D（不検出）であったため、MS2 phageの平均除去率および、UF膜単独処理でのNoVの分散を考慮し算定
 (安井他, 2014)

図 3.4.3 水の衛生学的評価とバイオモニタリング

膜は UF 膜とセラミック膜を主に評価した（図 3.4.4）。凝集剤を大量に投入すると除去率は上がるが、消費エネルギー量が増えてしまう課題がある。

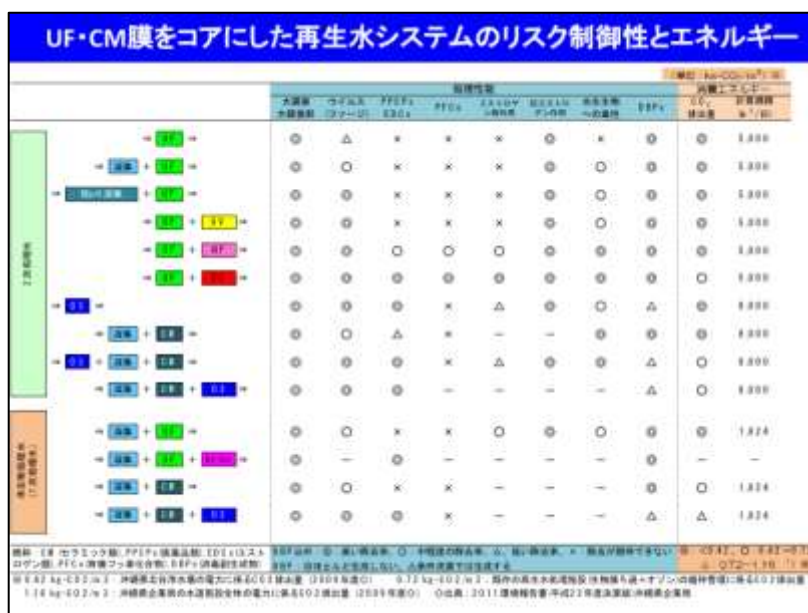


図 3.4.4 UF、再生水システムのリスク制御性とエネルギー

議論を深めるため、国内の水道供給に関わるエネルギー消費量を調査した（図 3.4.5）。再生水をつくるエネルギーに加え、使用地まで運ぶエネルギーも考慮する必要がある。その合計での価格、エネルギーの比較競争となると、社会実装が成立する地域は限られてくる。国内で既に再生水が整備された地域があるが、中身を詳細にみると、水道の消費エネルギーと比べて数倍高いケースがあり、まだ限定的なデモンストレーションとみなされて許容されている段階だ。一方、中国北部や米国カリフォルニア州など、水の輸送に大量のエネルギーが必要な地域では、再生水は競争力があって、導入が進んでいくとみられる。

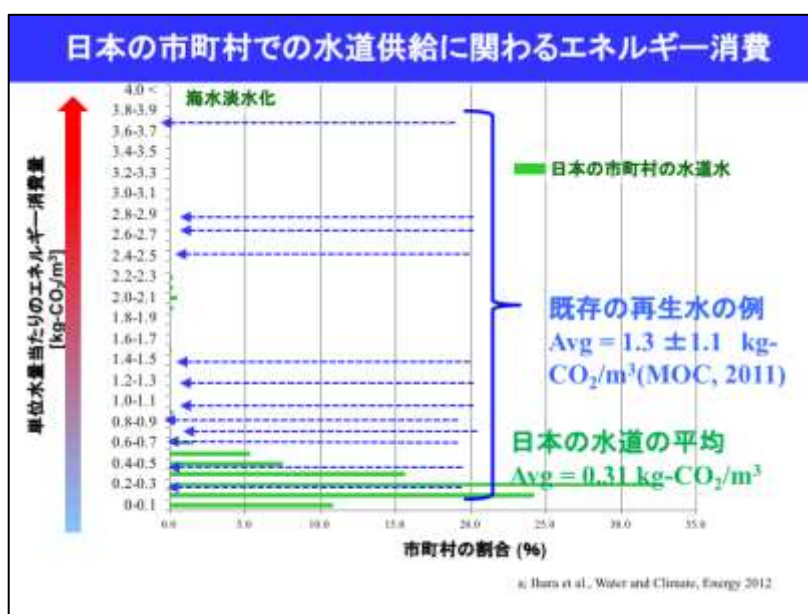


図 3.4.5 日本の市町村での水道供給に関わるエネルギー消費

水質を浄化するコストやエネルギーとリスクとのバランスを考える必要がある（図 3.4.6）。どのような水質の水からスタートして、何に使う水をつくるのかというゴールまでを明確にすること、そ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。

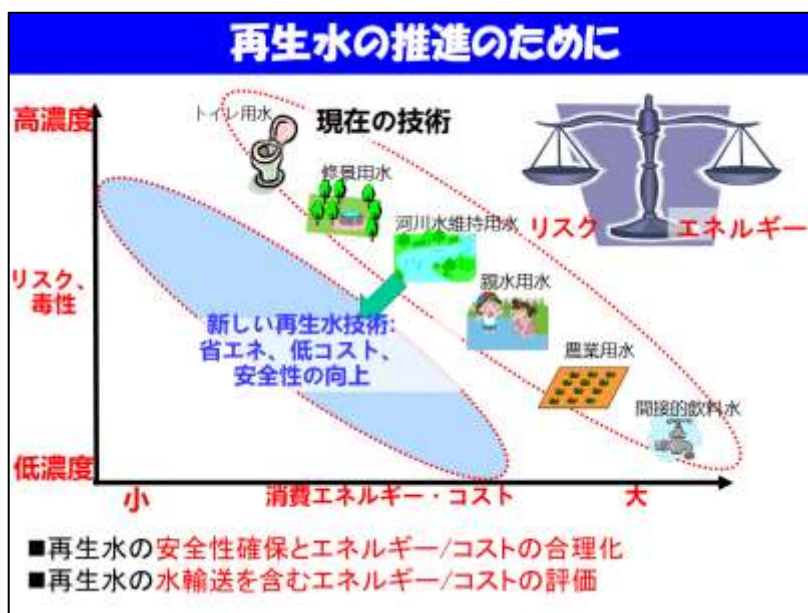


図 3.4.6 再生水の推進のために

再生水についての国際規格 ISO/TC282 の議論が進められている（図 3.4.7）。日本はリスクと性能の評価で議長国となり、CREST の成果がこの国際規格に反映されている。水の輸送にかかるエネルギーも含めて評価すべきだと主張したのだが、日本の担当範囲が再生水の製造プロセスだけだったこともあり、その考え方までは含められなかった。

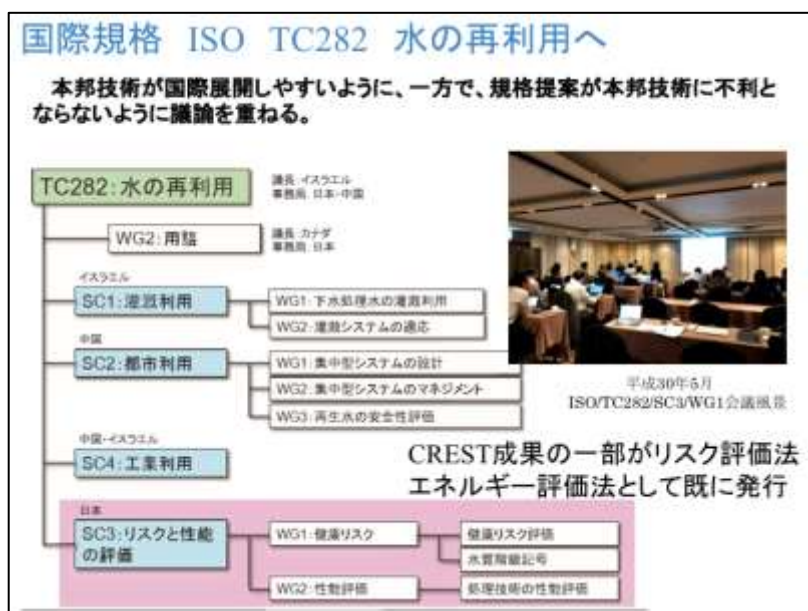


図 3.4.7 国際規格 ISO/TC282 水の再利用

日本国内でも島しょ部や半島地域などでは地理条件から水源確保の困難や水道代が高価なことがある。再生水の社会実装で最も可能性が高い地域として沖縄県糸満市を選んだ。沖縄本島は南北 100 キロ程度の縦長の地形だ（図 3.4.8）。水源のダムが 10 数個あるが、北部に集中している。沖縄の原生林には絶滅危惧種が多く棲息しており、その保護もあって新たなダムは造れない。断水しなくなったものの、2000 年頃から南部で農業用水、工業用水の需要が増え、最南端の糸満市では地下ダムを建設している。北部の水源から南部まで水を輸送するとエネルギー消費が大きいこともあり、糸満市は再生水の関心もあり、CREST 成果を発展させるため国土交通省 B-DASH の支援（平成 28、29 年度）で実証試験を行った。



図 3.4.8 沖縄本島中南部では再生水が重要な水資源

CREST で検証した UF 膜と UV（紫外線）殺菌の組み合わせシステムを用いた。病原微生物の除去率とコストのバランスが良く、栄養塩も残る、凝集剤も不使用、廃棄物も出ないという利点がある。B-DASH では 1 日 1,000 トン造水可能なプラントを建設した。

再生水を農業用水として、現地の農家に利用してもらっている。周辺にある汚い水を使う場合よりも非常に使いやすく、肥料や農薬の削減もできると好評だ。さらに、再生水で育てた農作物が、消費者からも安全で、環境によいと受け入れられている。

価格と処理サイズの課題だが、糸満市内で、1 万トン程度の水で供給できる範囲で農業用水をつくれば、現在の地下ダムとほぼ同等のコストにできると試算された（図 3.4.9）。

再生水の利用で、水資源を守ることができ、農業用水の窒素やリン不足を補える、海や環境が保全されれば観光産業にも貢献する。ボトルネックは輸送の問題で、今はトラックで再生水を運んでいるため、1 日で数 10 トン程度が限界という状況だ。もう少しで、再生水をパイプでつなぐ事業まで進められそうだが、あともう一押しの状況だ。

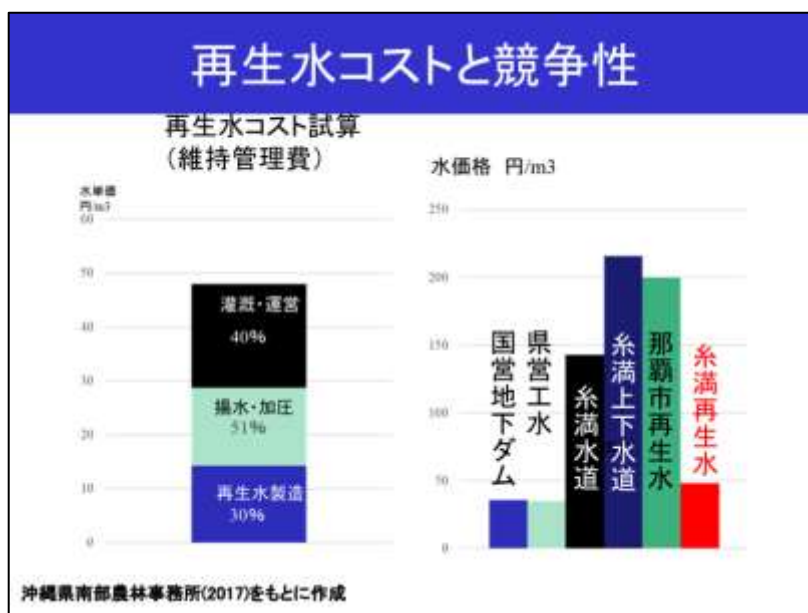


図 3.4.9 再生水コストと競争性

工業用水としてもコストやニーズを調査した。工業用水は塩分にシビアなため、RO 膜での濾過が必要だ。工業用水は 1 トン当たり 30 円程度と安い。水道水の 200 円との価格差が大きい (図 3.4.10)。工業団地では、工業用水を利用している企業でも、独自処理して利用している企業があった。多数の小さな工場では水道水を利用していた。

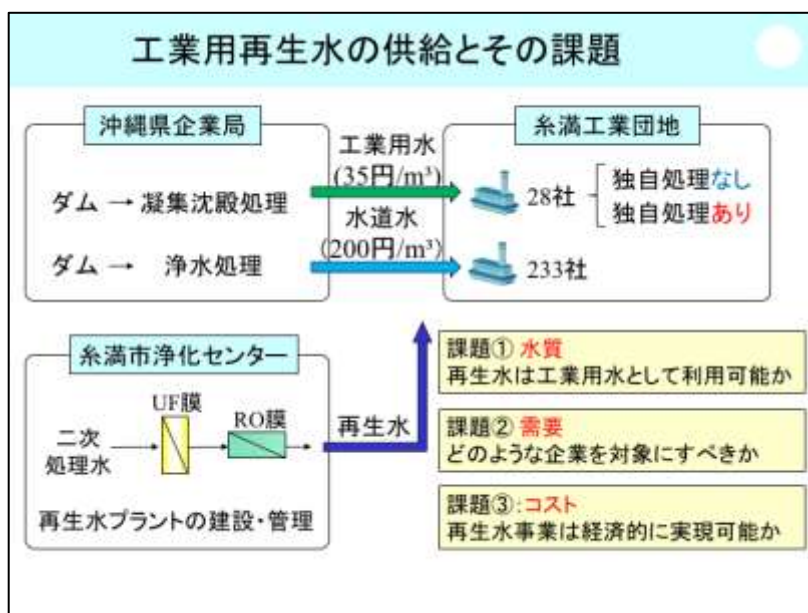


図 3.4.10 工業用再生水の供給と課題

コストのアンケート結果、それぞれ現在使用している水の料金以下なら利用するという回答が多かった。食品工場も、直接飲まない水であり、RO 膜で濾過した水質の再生水なら購入可能という回答が多かった (図 3.4.11)。

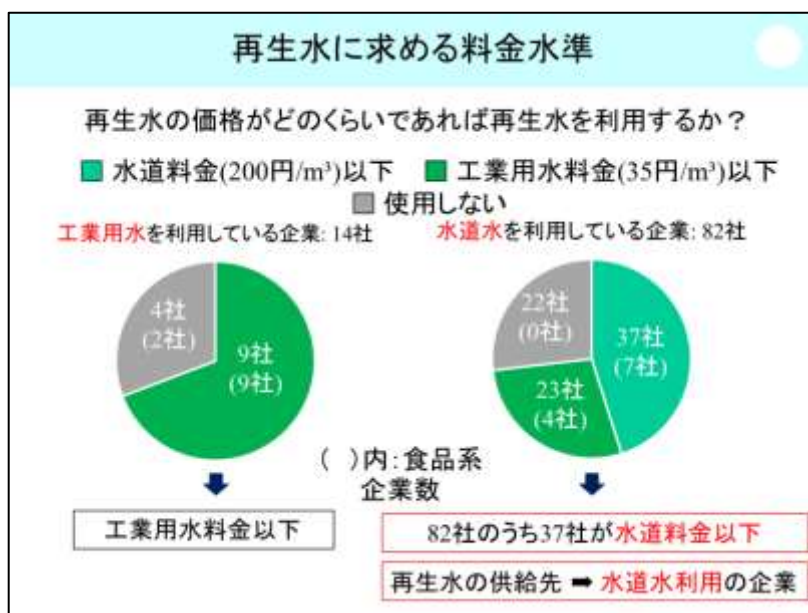


図 3. 4. 11 工業用再生水の供給と課題

コスト試算も行っている。RO 膜を用いるため造水コストが上がり、それに運搬コストが加わる。既存のパイプラインを使用すれば、水道料金より安くできるが、工業用水料金までは下らない。これまでの状況で、全体構想としては農業用水が中心だが、工業用水でも利用先があり得る。工業用水も北部ダムの水源であり、渇水期には調整にもなる。造水サイズを上手に検討すれば、日本の中でも再生水の社会実装の可能性がある（図 3.4.12）。



図 3. 4. 12 沖縄県糸満市での再生水利用の全体構想

最後に、間接的飲料利用の国際動向を紹介する。世界ではアメリカ、オーストラリア、南アフリカ、シンガポールなど、多くの地域で間接的な飲用水利用が進んでいる（図 3.4.13）。日本に

においても非意図的な間接的利用があるのだが、世界では意図的な利用の検討が進んでいる。

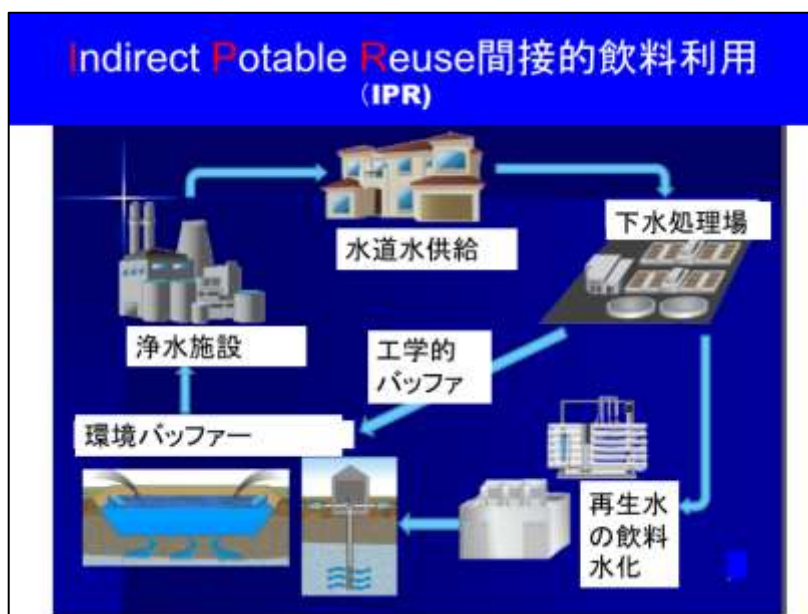


図 3. 4. 13 再生水の間接的飲料利用

2019 年 6 月にベルリンで IWA Water Reuse の国際会議が開催され、約 400 名が参加し、約 200 件の口頭発表があった。各国の主な議論を紹介する。米国では、間接的から直接的な飲用水利用に変える議論がなされている。コストが下がるだけでなく、環境バッファを通すよりも水質が良いメリットがある。環境バッファを無くす代わりに工学的バッファの冗長性を加える、オンラインで水質監視を行うといった検討がされている。欧州でも意外だが、間接利用の検討が進み、地下水経由や表流水経由で始まろうとしている。処理方法について、現在は膜濾過ではなく、オゾンと活性炭が中心だ。オゾンに促進酸化処理と生物活性炭を加える処理方法が内陸部向けに注目されている。先進的で驚いたが、スイスとドイツでは、新興化学物質や薬剤耐性菌種の浄化対策として、水環境中の間接的な地下水飲用利用で、オゾンと促進酸化処理の組み合わせ水処理をすでに実行したという報告があった。その他、中間体や副生物質、酸化物質に関する議論を行った。

8 月に第 5 回アジア水再利用シンポジウムを横浜で開催したが、約 100 名が参加し、中国、韓国、日本を中心に約 20 件の発表があった。シミュレーションを用いた濾過膜の解析や、バイオアッセイとノンターゲット分析を組み合わせた中間体の評価、オンラインモニタリングに関する報告などが注目を集めた。

国内での間接的な利用に関わる話題として、最近関心を集めた報道として、合流式下水道の雨天時越流水、CSO (Combined Sewer Overflow) の問題がある。東京のお台場で報道されたが、同様の問題が日本各地に残っている。古くに整備された下水道は雨水管と同じ管を使う合流式で、豪雨で処理能力を超えると未処理で公共用水域に放流される。琵琶湖では 2013 年に台風で下水処理できなかった汚水が放流されたことはあった。CSO だけでなく、下水道と雨水排水管が分かれた分流式下水道でも、汚水が雨天時に越流する SSO (Sanitary Sewer Overflow) の問題が

ある。SSO の問題はないだろうと思っていたが、我々が調査した結果、非常に不思議なデータが出た（図 3.4.14）。縦軸がノロウイルスの濃度だが、通常は冬に下水処理場への流入数が高くなる。琵琶湖ではほとんど出ないだろうと思っていたのだが、夏や秋に出た。この原因を調査中なのだが、下水処理水だけでなく、CSO、SSO が寄与している可能性が高いのではないかという状況だ。

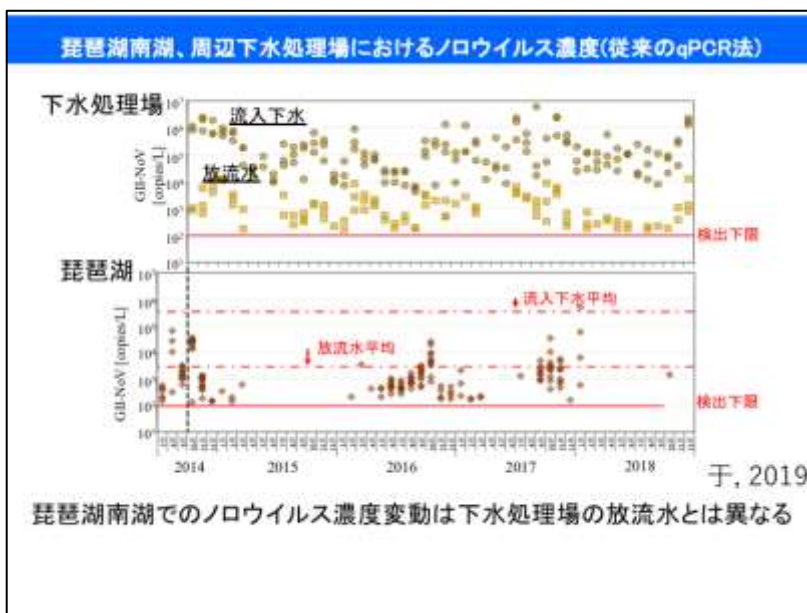


図 3.4.14 琵琶湖におけるノロウイルス濃度

昨年度から JST 未来社会創造事業で、バイオリスクの低減をスローガンに研究開発プロジェクトを実施している。ウイルスや薬剤耐性菌などを抑える必要がある。その対策には、オゾン処理が有望なのだが、コストに課題があるため、10 分の 1 ぐらいに下げるチャレンジングな研究を行っている（図 3.4.15）。

そして、排水処理を行う地点もあらためて検討する必要がある。エンドオブパイプだけでしっかり処理するだけでは十分ではない。雨水のはけ口や病院などを含めて、どこからバイオリスクのある物質が来るかを押さえる必要があるのではないかと考えている。

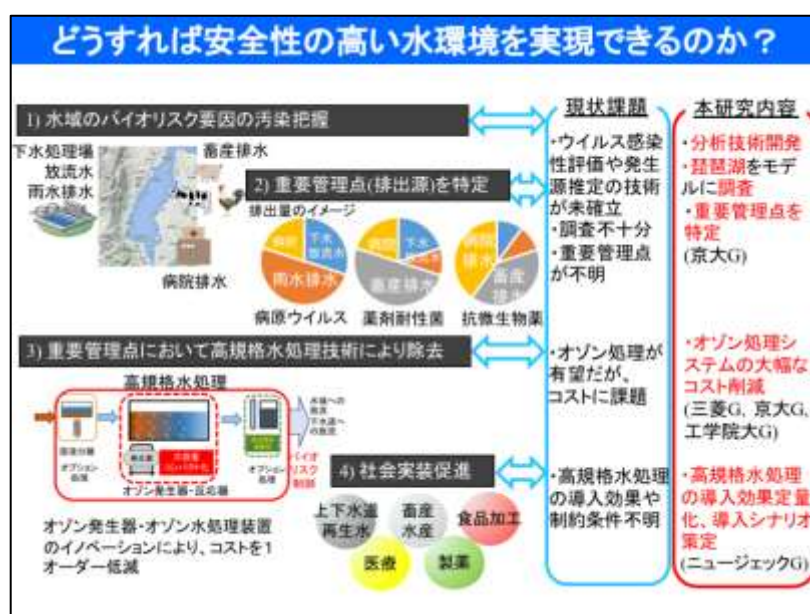


図 3.4.15 どうすれば安全性の高い水環境を実現できるのか

本日のまとめを図 3.4.16 に示す。今後さらに、気候変動の影響も加わっていく。渇水リスクなども踏まえ、再生水の現実的な社会実装の検討を進めることは世界的に重要である。また、古く整備された排水インフラの能力を超えた豪雨などが発生しやすくなり、バイオリスクを抑える技術を開発することが必要と考えている。

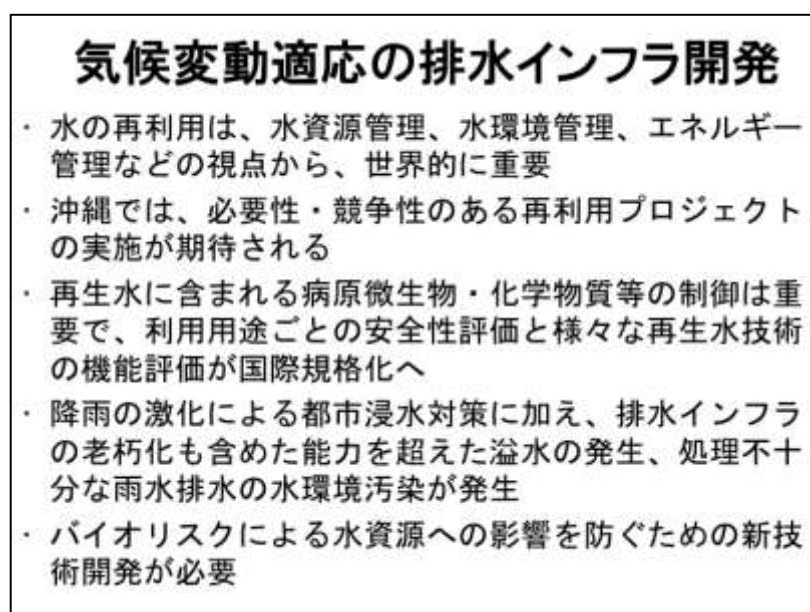


図 3.4.16 気候変動適応の排水インフラ開発

3. 5 「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 医学部 准教授）

本日は水利用リスクについて価値と協働という2つの観点からお話しさせていただく。

本発表に関し、福島県立医大の竹林由武氏に解析の手伝いを、名古屋大の中村晋一郎氏と東大の新田友子氏にコメントいただき、謝辞を申し上げる。

概要を最初に紹介する（図 3.5.1）。水利用リスクが全般的に改善してきたように見える中、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る。ステークホルダーとの対話と協働は、科学技術を社会実装する際の枠組みで議論されがちである。だが、それだけではなく、研究の深化ももたらす。このことについて、住民対話と協働知の創出という特集を水環境学会誌 2019 年 3 月号でも編集、企画した。

本日のお話の概要

- ◆ 水利用リスクは全般的に改善してきたように見える。
- ◆ 今、水利用リスク研究に本質的に求められるのは、水利用における「価値」に関する議論と、規範と根拠に基づいた社会実装である。
- ◆ そのために必要なのは、義務的な観点からも、効果的観点からも、ステークホルダーとの対話と協働である。
- ◆ ステークホルダーとの対話や協働は、水利用リスク研究分野ではまだやや弱いかもしれない。
- ◆ 価値の議論、対話と協働は、社会の前進を生むし、研究の深化ももたらす。

関連：水環境学会誌, 2019年3月号【特集】住民対話と協働知の創出
編集・企画：村上道夫、原圭史郎

図 3.5.1 概要

まず、リスク学とリスク概念について整理する。日本リスク研究学会が 13 年ぶりに「リスク学事典」の改訂版を今年出版した。リスク学は様々な分野の集大成の学問という性格があるが、概ね共通して言えることがまとめられている。そのなかで、リスク学とは「リスクの取り扱いを巡る個人的および社会的な意思決定にかかわる多様な学問の集合体」とある（図 3.5.2）。もっと端的に言えば、意思決定の学問である。リスク概念も、共通項が整理されている。脅かすものが原因や事象として一方にある。守りたいものが保護対象としてもう一方にある。そして、それぞれがどのくらいの大きさで、どのくらいの頻度であるのかということがリスク概念を構成する。したがって、リスク学を真剣に考えると「何を守りたいのか」という課題にあたる。古くは一般的に人々の「命」や「健康」だった。それが改善されてくると、生態系の保全も大事だ、と守りたいものの概念が広がる。私自身はリスク学を設計科学に軸足を置く科学として捉えている。

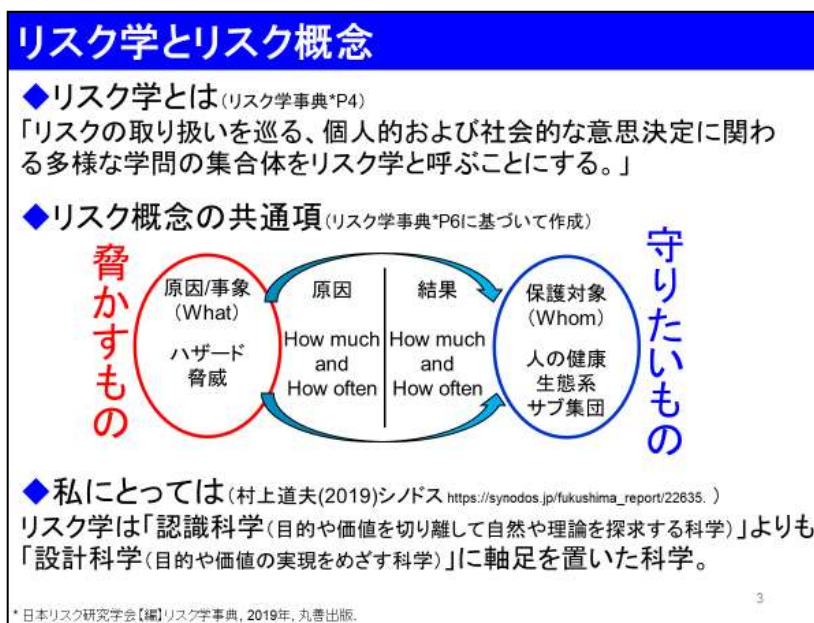


図 3.5.2 リスク学とリスク概念

様々なリスク要因がある中で、俯瞰的にリスクを評価した例として Global Burden of Diseases (疾病負担) 研究の報告がよく知られている (図 3.5.3)。この報告では各国ごとに 2005 年と 2015 年とを比較、評価している。安全でない水・衛生、不十分な手洗いによる感染の合計が 2005 年は約 12% だったが、2015 年は 9.4% に減少している。我が国では、実は 1% もない。この寄与は不十分な手洗いによる感染である。世界のリスク要因で「安全でない水」は 1990 年時点では 2 位だったが、2015 年には 14 位にまで改善されている。

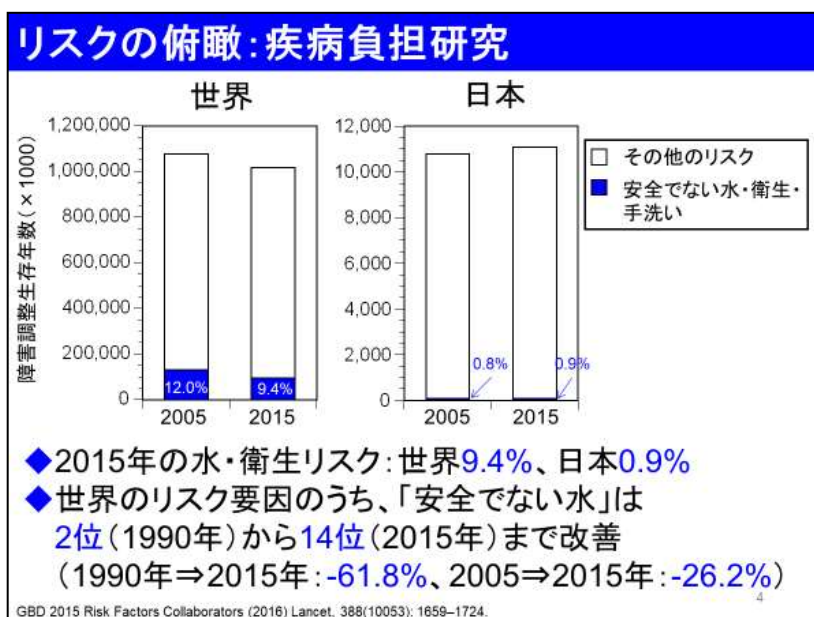


図 3.5.3 リスクの俯瞰：疾病負担研究

沖先生らのチームが MDGs (Millennium Development Goals) がどのように達成されたか分

析した報告も興味深い (Nature sustainability, 2, 429–434, 2019; <https://www.natureasia.com/ja-jp/natsustain/interview/contents/1>)。安全な水の目標が早期達成できた要因として、特に中国とインドの経済成長をあげている。時代に合ったちょうどよい目標値を設定したことやたびたび達成目標が緩和された歴史的経緯が紹介されている。こういうことを言うと怒られるかもしれないが、社会の発展で水の目標が達成された反面、先端的な科学や技術が、実際にどのくらいまで貢献したのかはよく分からないところがある。

そのような課題認識を背景に、これまでどのような水利用リスク研究が実施されてきて、今はどのような状況にあるか調査した結果を紹介する (図 3.5.4)。Pubmed と Science Direct でそれぞれ検索し、重複を排除して、論文数変化を示している。構造的トピックモデリングという単語同士の共起関係に着目した方法を用いている。これにより、タイトルやアブストラクトで water と risk という語を含む論文がどのような内容のものを 20 に分類した。

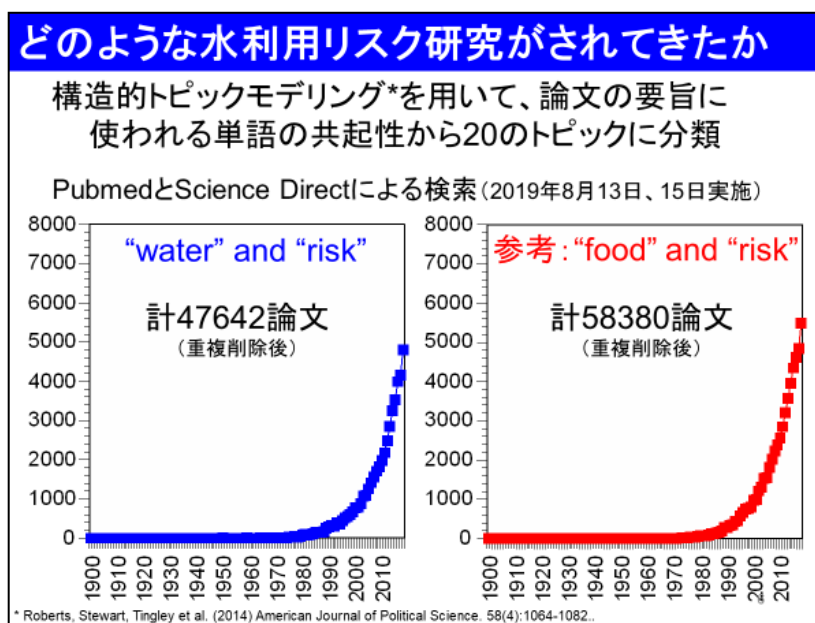


図 3.5.4 水利用リスク研究のトピック分類

20 のトピックの経年変化 (図 3.5.5) を見ると、子供や感染症という分類、つまり安全ではない水や衛生の問題で命をなくす子供が途上国にいて、そういうテーマの論文が 1991～95 年には水利用リスクの全論文の 15% 程度を占めていた。当時、非常に重要なテーマだったが 1995 年以降は減っている。反対に増えたのは水質・汚染や水文モデルというテーマである。

少々言い過ぎかもしれないが、子供・感染症の研究が興隆を迎えたのは 1990 年代前半ぐらいで、その後、占有率がだいぶ減って、先進国型に移行している。研究のテーマとして、水質・汚染問題は途上国にもあるので、完全に先進国だけに限定しているとはいえないが、高い水質を求めるような研究テーマへと移行したトレンドを示しているとみられる。また、グローバルな水文モデルを扱えるようになってきたというトレンドもある。

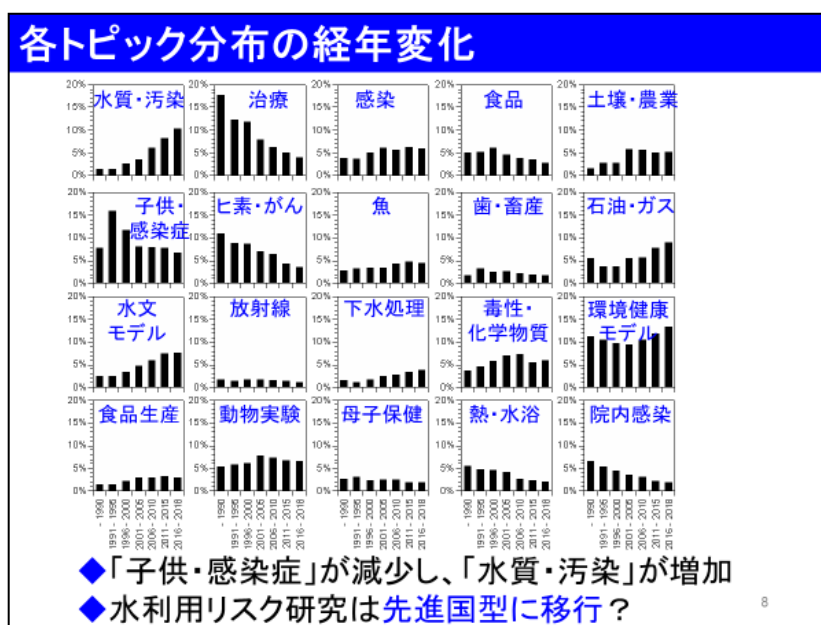


図 3.5.5 各トピック分布の経年変化

このようなトレンドを踏まえて、考えなければならない観点が費用対効果である。十数年前に報告された日本における安全対策の費用対効果の値を示す（図 3.5.6）。これは 1 年の寿命を延ばすために必要な費用が試算された結果である。日本での結果だが、他の先進国の議論でもほぼ同様の結果が出ている。安全管理や医学分野と比べると、環境分野の対策は費用対効果が大変悪い。概して、2～3 桁多くの費用がかかり、支払い意思額と比べても 1～3 桁高額である。これを見ると、そもそも低いリスクへの対策や、研究を進めることを正当化できるのかが論点となる。設計科学としてのリスク学はこのような課題も議論する。

環境分野の対策の効果	
項目	余命1年延長費用(万円/年)
シロアリ防除剤クロルデンの禁止	4500
苛性ソーダ製造での水銀法の禁止	57000
乾電池の無水銀化	2200
ガソリンのベンゼン含有率の規制	23000
ごみ焼却施設でのダイオキシンの規制	790(緊急対策)、15000(恒久対策)
浄水場でのトリハロメタン対策	1200~220000
安全管理(交通事故等)	2700
病気予防	330
医療	97
支払意思額	250~2500

◆(先進国の)環境分野の対策の費用対効果はよくない
◆そもそも低いリスクに対して対策を行ったり、研究を進めることは本当に正当化できるのか？

Kishimoto, Oka, Nakanishi (2003) Chemosphere, 53, 291-299. 岡田弘(2007)日本リスク研究学会誌, 17, 47-55.

図 3.5.6 環境分野の対策の効果

一方で、環境対策は非効率ではないとする反論もある（図 3.5.7）。たとえば、環境対策はヒト健康だけでなく生態系の保護などの目的も含むが、それが先ほどの数値には反映されていない。また、たとえば、焼却場を改善したらダイオキシンだけではなくそれ以外の化学物質の発生も低減するといった、定量化まで出来ている健康影響評価指標はごく一部であるとの指摘もある。

まとめると、環境対策で評価されているリスク低減の便益はごく一部である。また、水に関しては、公共性があり、生活の基盤であるから、一生懸命対策するのは大事という共通理解があるだろうし、多様な価値があったりする。あるいは、身近な水環境や飲み水を誇りに思うような社会で暮らしたいという本質的な欲求というか、そういう規範もある。なお、ここで述べる規範とは、「かくあるべき」といった意味合いを指す。

環境対策は本当に非効率か

環境対策は非効率的である、という意見への反論の例：

1. 環境対策は人の命を助けるだけでなく、生態系の保護などの目的も含む
2. 実際に定量化されている健康影響はごく一部
3. 医療などはよい成果のみが掲載されるが、環境分野では定量化できる便益のみが評価される

◆環境対策で評価されている便益(リスク低減)はごく一部。

◆水に関していえば：

- ＋公共性があり、生活の基盤である
- ＋多様な価値がある(健康改善、生態系保全、水資源利用、利便性)
- ＋身近な水環境や飲み水を誇りに思うような社会で暮らしたいという本質的な欲求や規範がある

東海明宏・岸本充生・濱生昌志(2009) 環境リスク評価論 大阪大学出版会。
村上道夫・永井孝志(2013) 水環境学会誌 36(4/9) 322-326

10

図 3.5.7 環境対策の効率性の考察

ここまです総括する（図 3.5.8）。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、悪いように見えるかもしれない。途上国の農村部など、世界の中の数 10% でまだ改善すべき余地が多くあるが、総じて改善する方向には進んでいるようにみえる。しかし、水利用において守りたいものは、実は、もっと広くて多様である。食品の分野で、組み換え遺伝子作物の論争の中で生まれた、「これは安全性に関するものではなくて、我々がどのような世界で生きたいかという、はるかに大きな問題である」という、社会科学分野で有名なフレーズがある。イギリス政府の報告書に引用されたことで広まった。安全は大事なのだが、安全以外の大事なものがある、安全だけ満たされたらそれだけでよいということではないという指摘である。そうした安全以外の対象を、どのような指標で判断するのか、指標で判断しないのであれば何をもって我々は「良い環境をつくる」とか「リスク研究をする」ということを言うか、という点が重要な課題となる。

水利用リスク研究に求められること

- ◆ 水利用リスクは、疾病という観点からみれば、順調に改善してきているし、先進国では小さなリスクのようにも見える。費用対効果は疾病という観点では低いかもしれない。
- ◆ しかし、水利用における「守りたいもの」の価値はもっと広く、多様である。「生きたいと思う世界*」の決定因子は安全だけではない。
例：人の健康、生態系保全、豊富で良質な魚介類、食糧安全、いつでも水が使える便利さ、おいしい水が飲める、安価であること、川や海での水遊び、よい水環境や飲み水への誇り、子孫への文化の継承、など
- ◆ 我々は、「守りたいものは何か」、「どのような規範と根拠に基づいてどのように達成するか」を追究する必要がある。

* Select Committee on Science and Technology, 2000. 11

図 3.5.8 水利用リスク研究に求められること

水の管理に関する議論で、規範が欠如していることは、古くから指摘されている。一例として1970年の水質汚濁環境基準の制定時になされた丹保先生の指摘がある（図 3.5.9）。ここで使われているルールという言葉は、私の言葉では規範である。

水環境基準制定の意義は非常に大きい。基準によって水環境は次第に改善されていった。また、水利用には多様な目的と価値と立場の異なる人がいるのも事実で、調整役がいなければ、単なる縦割り行政に陥ってしまう。ステークホルダーの調整や合意形成はリスク学が扱う範疇である。

水質汚濁環境基準制定時の指摘

- ◆ 水の管理に伴う規範に関する議論の欠如は古くから指摘がある。
丹保憲仁（1970）
「各省庁に代表されるさまざまな意見（利害）を企画庁あたりが調整役となってまとめた結果に過ぎない感が強く、わが国の水を将来どのように管理、利用し、どのように国民の福祉を増大させていこうかといった、水行政の基本に関するルールを読みとり難い」
- ◆ 一方で、水利用には多様な目的と価値と立場の異なる利害関係があるのもまた事実。
ステークホルダー間の調整と合意形成もまた、リスク学が扱う範疇。

丹保憲仁（1970）用水と廃水、12, 3. 12

図 3.5.9 水質汚濁環境基準制定時の指摘

リスク研究のフレームを食品安全分野の事例も踏まえ、さらに考えてみたい。食品安全分野で

は、いわゆるリスクガバナンスの中にリスクマネジメント、リスクアセスメント、リスクコミュニケーションの3つの側面に分けて考える（図 3.5.10）。マネジメントとアセスメントは機能分離と相互作用する、と食品安全分野では定まっている。またリスクコミュニケーションは、マネジメントやアセスメントを支える位置づけにある。

要点として、評価やマネジメントした結果をコミュニケーションするのではなくて、コミュニケーションしたものに基づいて何を評価するか、あるいは管理方法を決めると明示している。その際、ステークホルダーとして住民や消費者の意見も含めた様々な人の意見を聞くことがベースにある。

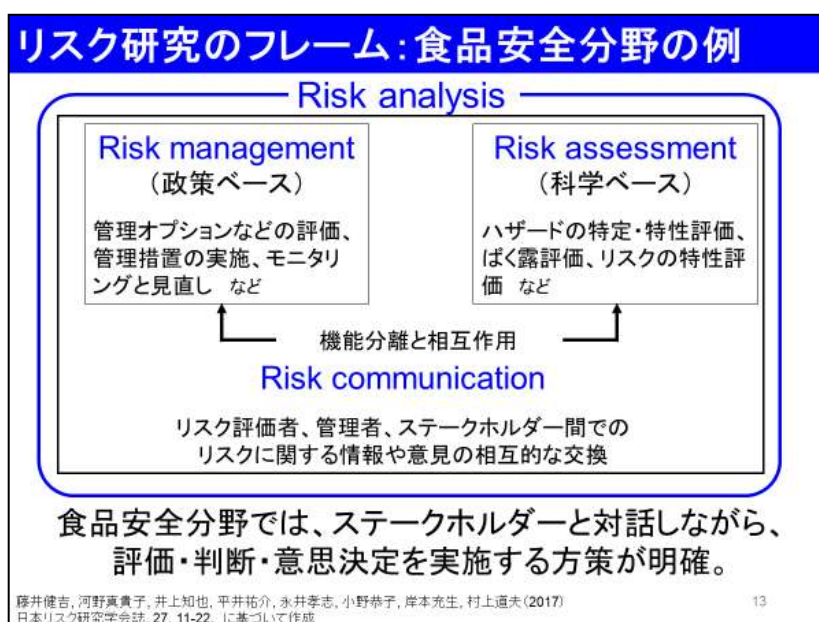


図 3.5.10 リスク研究のフレーム：食品安全分野の例

では、水利用リスク分野においてアセスメント、マネジメント、コミュニケーションの研究はどのような状況か。図 3.5.4 の 5 万件前後の水と食品の分野の論文で割合を調べた（図 3.5.11）。水分野では、食品分野と比べてアセスメントに関する論文が多く、2 割ぐらいある。マネジメントも多い。しかしコミュニケーションは、1%程度しかなく、食品分野と比べて少ない。SDGs の目標 6 の中には「水と衛生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」という文言が入っているが、この部分に関して水分野は弱い。

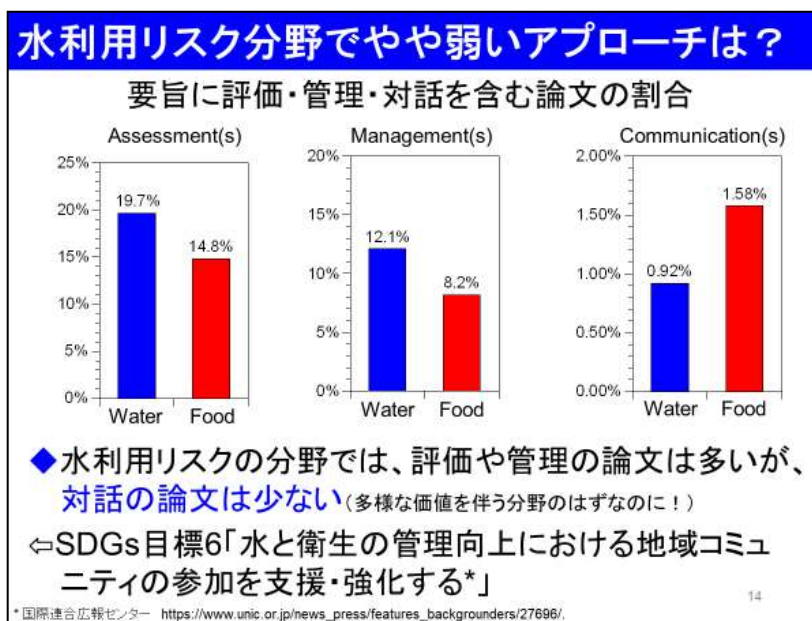


図 3.5.11 水利用リスク分野でやや弱いアプローチの考察

工学系における議論では、何が役立つのかという議論になる。その側面は大切であるのだが、その側面だけが全てではないことを言及したい。対話や協働の意義というのは、2つの側面がある（図 3.5.12）。

1つ目は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だ。これは消費者の権利としてジョン・F・ケネディーが、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述べた言葉に代表される。要は民主主義である。民主主義的な価値観が浸透していくと、こういうことが当たり前になっていく。医学分野の「インフォームド・コンセント」は、研究分野では1964年のヘルシンキ宣言、臨床分野では1981年のリスボン宣言で世界的に確立した。今では患者が意思決定に関与するのは当たり前になっていて、同意は患者が決めるが、昔はそうではなかった。極端な言い方をすると医師が勝手に決めていた。これと同じように水も、数十年後ぐらいの社会で「昔は水道料金って勝手に決められていたらしいよ」と話されている社会になっているかもしれない。このような想像もされる。

もう1つの側面は効果的側面である。対話や協働は、評価すべき価値とか管理すべきリスクを明示すると対策推進の上で効果的に機能するという側面である。途上国で、そのコミュニティの住民のニーズ、実際の現地の状態を知らないで水システムを入れても、うまくいかないという経験を日本はたくさんしてきた。こういったところも含めて、では、どうすれば克服できるのか、という問題意識がある。

対話・協働の意義に関する2つの側面

◆ 行政や専門家から見て「**義務的**」、住民から見て「**権利的**」側面
 人々は安全を求めたり、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（消費者の権利：Kennedy, 1962）

例：人口減少・少子化やインフラの老朽化・更新に伴う水道料金やそれを支えるシステムについて、住民が意見を反映させたり、意思決定に関与するのは、民主的な国家ではごく当たり前である

◆ **効果的側面**
 対話や協働は、評価すべき価値や管理すべきリスクを明らかにし、その対策推進の上で効果的に機能する

例：コミュニティ内の住民や関係者の知恵や協働が、本当にニーズに合った途上国の水・衛生システムの導入につながる

15

図 3.5.12 対話・協働の意義に関する 2 つの側面

大まかにだが、これまでの議論をまとめる（図 3.5.13）。研究についてステークホルダーと議論すると、それによって研究の優先順位づけがなされていくという考え方がある（Lancet, 383,156–165, 2014）。ステークホルダーは住民、研究者、行政、企業などが入る。医学分野の場合は患者さんが重要なステークホルダーとなる。

最初に、研究を始める段階から、資金提供者と患者さんと医療関係者らが議論しながら、どの研究をしていくかという議論をする、という考えは示唆に富む。また、こういう枠組みがあると、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、どのような価値を加味すべきか、どういう規範に基づいたリスク評価をすべきか、ということが出てくる。そうになると、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、ステークホルダー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。

加えて、こうしたことを協働や社会実装に関する研究事例として蓄積していくことを、学術分野において評価されるようになると、更にそれが進むのではないかと考えている。

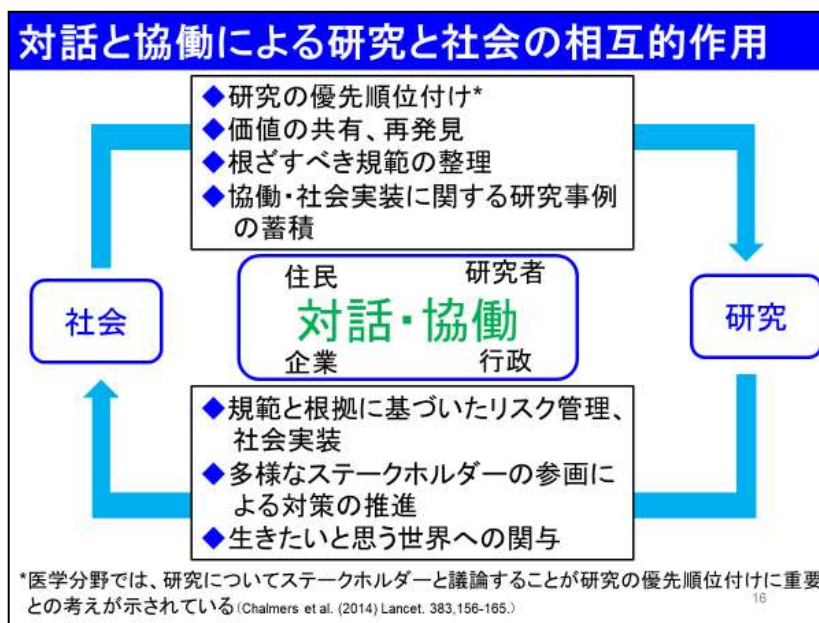


図 3.5.13 対話と協働による研究と社会の相互的作用

最後に、本日詳しく触れなかったが、ほかの問題意識についてもご紹介したい。

1 点目は、そもそも日本の水利用関連リスクの中で死亡率が高いのは、お風呂での溺死や熱中症である。農業従事者の事故死亡率も高い。こういうリスクの低減に関する研究は、公衆衛生の分野と思われるが、水利用リスク研究の対象なのではとも思う。

2 点目は、新興の水利用リスクとして、セキュリティの問題がまだ余り考慮されていないと思われることである。水をどこで、どのタイミングで、どの家が、どういうものに使っているかということは個人情報になる。この情報のセキュリティをどうとらえるか。下水道を調査して禁止薬物を使用しているという調査は、技術的には可能になっている。しかし、情報セキュリティをどうするかとなる。関連して、たとえば、水不足の途上国で外国人がホテルでたくさん水を使うことはどうかといったような、公平性や倫理の問題がある。更に、テロや悪意のある水質汚染の抑制に関する課題もあろう。悪意あるものに脆弱性を公開するような問題をはらむため、情報取り扱いが悩ましいが、どのようにその管理をするかという点も重要だ。

3 点目は、起きなかったリスクをどのように評価するか。これは結構難しい。例えば 2011 年にタイで洪水があったが、感染症がほとんど起こらなかった。しかし、なぜ起こらなかったかという評価は大変難しい。東日本大震災でも水系感染は限定的であって、ほとんど起こらなかった。しかし、なぜ抑え込めたのかという分析は、実は大変難しい。成功例として本当は評価し、分析する必要がある。あるいは、既存の水システムで、既に制御できていた新興の感染や化学物質のリスクをどう評価するかも、リスク学の方法論の問題でもあるが、大変難しい。これらにどう取り組むのか。

以上です。ご清聴いただき、ありがとうございました。

3. 6 「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 大学院工学系研究科 准教授 / JST-CRDS 特任フェロー）

本日は紫外線消毒による水処理の研究について紹介する。特に、国内の大都市と大きく異なる環境や、高齢化が顕著に進む社会という場所で行っている実証実験を紹介する。

図 3.6.1 は、水道管に接続された水にアクセス可能な人口の比率を示している。世界平均は 58% だが、平均値ではなく、地域に分けて詳細を見ていくと最高 89%（南米・カリブ海地域）から最低 16%（アフリカのサハラ砂漠以南地域）まで大きな幅がある。南アジアは 30% と低い地域だが、その中でも最高 58%（ブータン）、最低 12%（バングラデシュ）と幅がある。24% のネパールに注目して、都市部と農村部に分けて見ると、都市部は 50% だが農村部は 18% しかない。水アクセスの議論では平均値だけではなく、このような幅、ばらつきをしっかりと丁寧にすることが大切だ。つまり、国々の間、あるいは、同じ国の中でも都市と農村の間、そして、この図からは見えないが当然、富裕層と貧困層の間に、ギャップがある。このギャップの解消が鍵だと考える。特に、このばらつきの低い側、底辺の側を救うことが重要だ。これがまさに、SDGs の「誰ひとり取り残さない」の精神である。この「取り残される側」にもう少し目を向けなければいけないのではないか、という発想にたって研究を進めている。

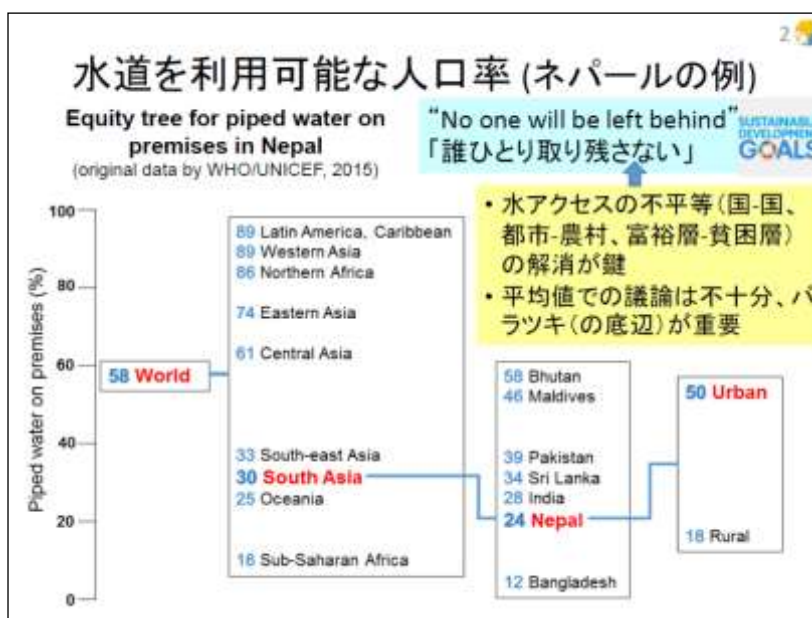


図 3.6.1 水道を利用可能な人口の比率

水処理を大きく分けると集約型と分散型の 2 つに分かれる（図 3.6.2）。集約型は、日本を含む先進国のほとんどが採用している方式である。集約した浄水場で一括処理し、管路で各家に配る方式だ。一方、分散型には幾つかレベルがある。一つは、Community Water Supply (CWS) と呼んでいるが、1 戸ごとではなく、数件寄り集まったコミュニティ単位で水処理するタイプだ。多くは近くの地下水をくみ上げて、その場で処理をして、ここから管路で配るという様式だ。給水拠点になっていて周辺の住人が水をくみに来るという場所もある。次に、もう少しスケールが

小さくなると、Point of Entry (POE) と Point of Use (POU) という方式がある。POE はその名が示す通り、建物に入る Entry の場で水処理をして、あとは各家で丸ごときれいになった水を使うという考え方だ。POU も名称の通り、使う Use の場で水処理する、つまり、蛇口に取りつける浄水器のような方式を指す。

SDGs の達成目標年が 2030 年であることを意識していない議論を聞くことがある。世界の全員に安全な水とトイレを 2030 年までに普及させるのは、集約型だけでは不可能といってよい。分散型とのベストミックスが鍵となる。それを見定めるため、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 3.6.2 集約型と分散型の水処理

SDGs は途上国だけのものと思われている機会がまだあるが、そうではない。日本でも水道未普及地区という課題がある。図 3.6.3 に示すよう、過去 30 年、国内で飲料水による健康被害が 140 件あったうち 130 件は微生物起因である。また、8 割以上が小規模水道設備で起きている。それらは 100 人以下の給水人口地区で、住民が自ら管理するため、使いやすい消毒技術が必要となる。

図 3.6.4 は国内の飲料水供給施設の事例である。中山間地の過疎地域で高齢化の進行したコミュニティが日本各地に点在している。地方自治体ごとに対応は異なるが、一例として、水道管を無理やり接続しない代わりに、技術指導と補助金の支援を行っているケースである。水源は伏流水で、次亜塩素を住民が投入する。丘の上の水タンクまでポンプで汲み上げている間に塩素が混ざって消毒される。水タンクには砂を敷き詰めており、簡易的な砂ろ過を行っている。重力の自然落下で各家庭に給水される。この仕組みの維持だが、住民が丘の上に登って、年に 1 回ろ過のための砂を取り出して洗浄、入れ替えし、当番制で月に 1 回塩素剤をもって上がって投入している。高齢者にとっての負荷は大きい。

ほかの先進国でもコミュニティの住民自ら管理する地域が残っている。JST の SICORP でカ

ナダと共同研究しているが、日本と似た悩み、事情をもつ小規模施設を視察した。

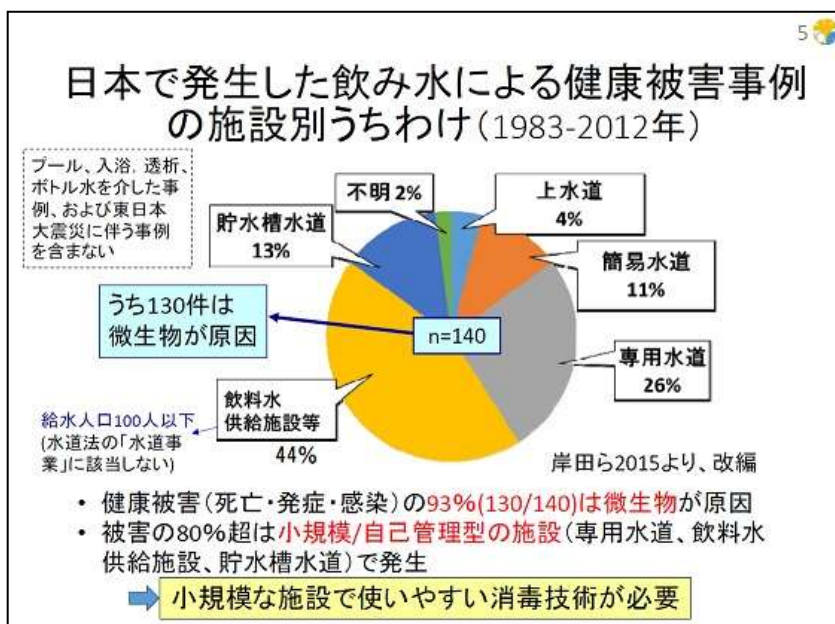


図 3.6.3 日本で発生した飲み水による健康被害の内訳



図 3.6.4 飲料水供給施設の国内事例

このような小規模施設の水処理について、分散型で紫外線発光ダイオード(UV-LED)による消毒を提案している(図 3.6.5)。推薦理由は複数ある。従来の紫外線光源である水銀ランプと比べて、非常に小さく、様々な装置形状が実現可能で、利用者が使いやすい。ウォームアップが不要で、劣化しにくい。もし破損しても水銀漏洩の恐れがない。飲料水供給施設での塩素消毒は任意で行政指導の限りであるため、住民に現地でヒアリングすると、保健所から塩素消毒を行うよう言われたが、実施していないと聞く機会が多くある。その理由は手間だけでない。たとえば、

塩素でお茶が不味くなるから避けているという意見もある。UV-LED 消毒であれば、塩素臭はしない。利用量に応じたオンデマンド運転もできる。寿命が 1 万時間（1 年＝8760 時間）を超える UV-LED が主流となってきたが、オンデマンド運転すれば 2 年、3 年に延びると期待できる。



図 3.6.5 紫外線発光ダイオード：UV-LED

水道未普及地区での UV-LED 実証試験の概要を紹介する。未処理の沢水を納屋に引き込んで、手洗い、野菜洗浄、農具洗浄のために日常利用されている家庭に UV-LED 装置 2 機種を 1 年間設置した（図 3.6.6）。住民に聞くと、沢水なので、山に生息する野生動物が糞尿をして、菌が混入していたら心配だという。災害等非常時には飲み水として利用できれば嬉しいともいわれていた。



図 3.6.6 1 年間の実証試験（2018／6 月 - 2019／6 月）

沢水由来の原水を分岐させ UV-LED 装置 2 機種を並列に接続した。小さい装置 A の処理流量は 2 L/min で POU を想定、大きい装置 B は 10 L/min で POE を想定している。おおよそ隔週ごとに、原水と装置 A 処理水、装置 B 処理水それぞれを採水して、大腸菌、大腸菌群、一般細菌、従属栄養細菌を測定した。すべて植えた菌ではなくて、実際に自然界にいた野生の株である。

実証試験の結果を説明する（図 3.6.7）。大腸菌、大腸菌群について、未処理の原水でも不検出の日が多かったが、散発的に、低濃度で検出された。処理水では装置 A、B ともに濃度、陽性率の低下が確認できた。装置 B の処理水では約一年間を通じて一度も大腸菌が検出されなかった。一般細菌と従属栄養細菌については、未処理の原水では両方とも常に検出され、従属栄養細菌が水質管理目標値の 2,000 を超過した日もあった。こちらについても処理水では装置 A、B ともに濃度、陽性率の低下が確認できた。1 年運転しても装置内部に目立った析出汚れや汚損は生じず、処理水質の経時的な劣化も見られなかった。適切な UV-LED 装置を選定し、給水末端で分散型の処理を行うことで安全性を高められることが示された。

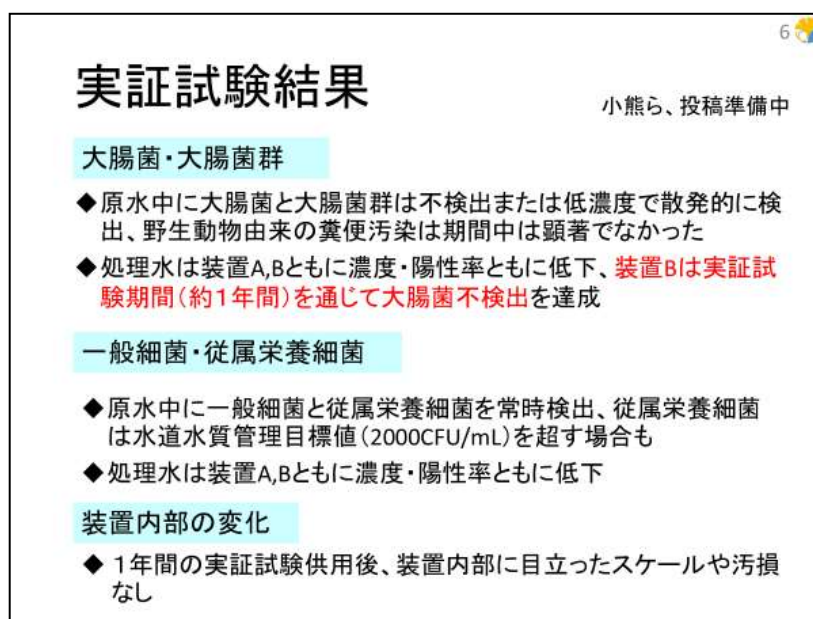


図 3.6.7 実証試験結果

次に、海外で実施している研究の中から、フィリピンで住民コミュニティと協働での取り組みについて紹介する（図 3.6.8）。専門家にとっては聞き慣れた話だが、途上国の多くは、地下水に依存した生活をしている。また、水道、下水道が未普及の地域がまだ多い。そのような地域ではセプティックタンクや浄化槽などの汚水がオーバーフローして、飲用の地下水に入ってしまうようなことが起きている。いわば、感染ルートができており、消毒技術のニーズがある。



図 3.6.8 主要な飲用水源としての地下水

水の問題を抱える途上国の多くは、低緯度地方に位置しており、強い太陽強度は得られる。送電線が未普及でも太陽光線があれば、太陽電池で直流電流を発生させられる。また、LED は直流電流駆動である。つまり、電気の交流・直流変換しなくても太陽電池で LED を駆動でき、相性がたいへん良い。また、コミュニティが遠隔地にあっても自立型で使いやすいというメリットもある(図 3.6.9)。

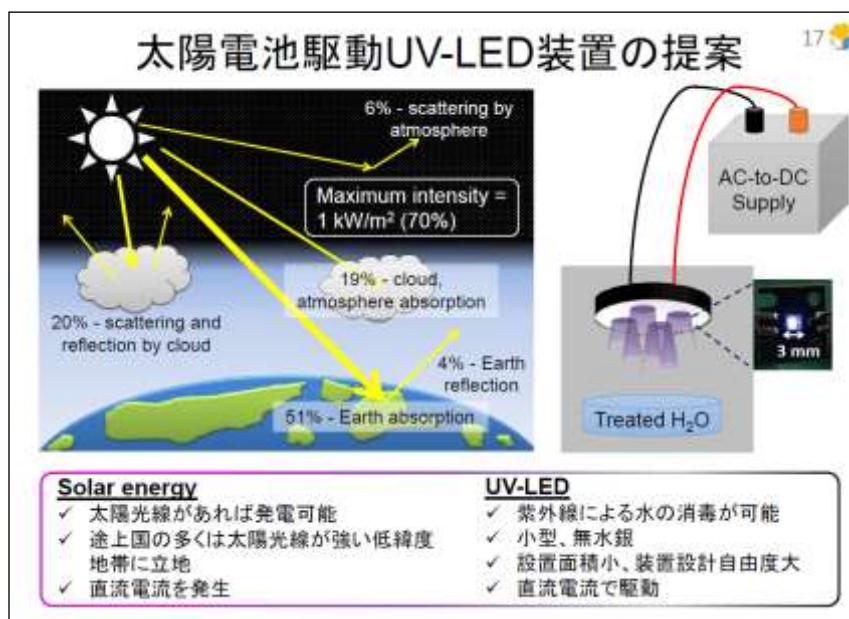


図 3.6.9 太陽電池駆動 UV-LED 装置の提案

現地試験の前に、日本の実験室内で、人工光源を用いた模擬試験を実施した。CIGS 太陽電池(セレン化銅インジウムガリウム太陽電池)で UV-LED 照射装置を点灯させ、大腸菌を不活化す

る試験を3回実施した結果を図3.6.10に示す。図の横軸が照射エネルギー量で、縦軸が大腸菌の生存率である。紫外線照射エネルギーが多くなると、大腸菌が不活化したことがわかる。3回の試験で、不活化効率のばらつきが少し大きかった理由は特定できていないが、可能性を検証して、エンジニアリングとして対応を考えている。この結果を踏まえ、現地試験の計画を作成している。

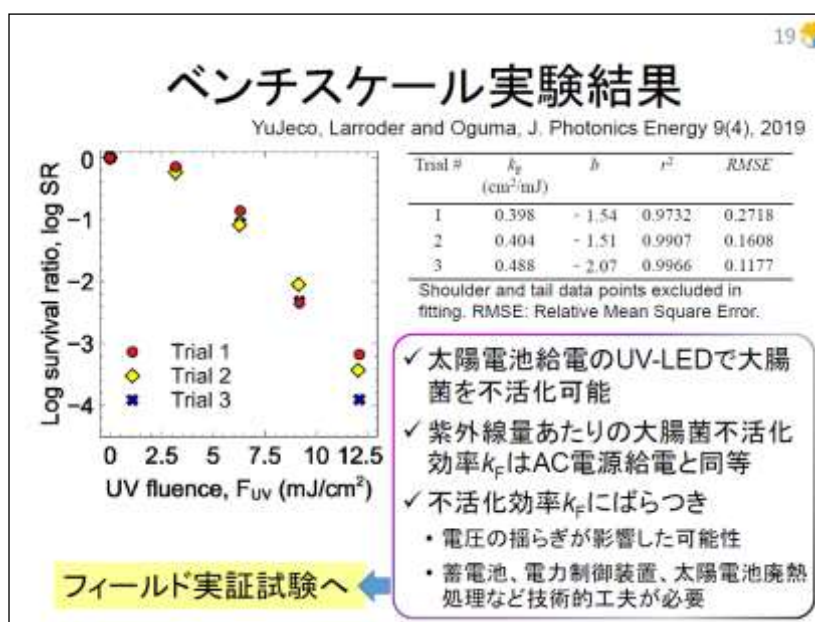


図 3.6.10 ベンチスケール実験結果

フィリピン現地での実証試験の計画を図3.6.11に示す。フィリピンは非常に島の数が多いが、その約半分が無人島である。電気、水道ともに未整備のオフグリッドの集落が多数ある。実証試験地に、イロイロ島、ギマラス島、パノボロン島の3か所を選んだ。左の表に地域別の人口と水道普及率で、首都圏は人口13%で水道普及率が88%に対して、地方都市や農村は、人口が首都圏より多いが、水道普及率はまだ低い状態だ。イロイロ島は比較的大きな島で、都市部は地方都市の区分になる。他の試験予定地は農村に該当し、水道が25%しか普及していない地域にあたる。

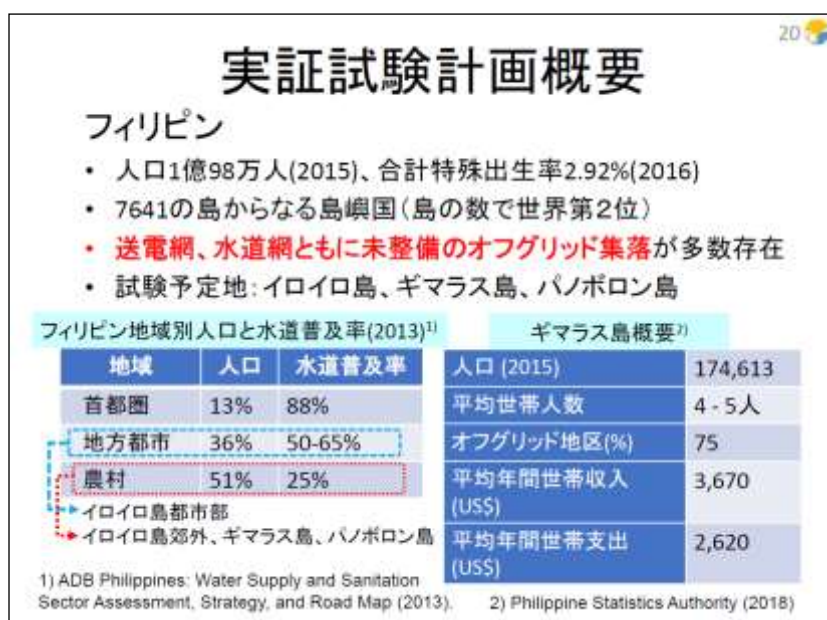


図 3.6.11 実証試験計画概要

パノボロン島現地で行った飲用水源のアンケート調査等の結果を図 3.6.12 に示す。72.9%が深井戸、8.6%が掘り抜き井戸と飲用水源を地下水に依存する住民が 80%以上いる。給水拠点は 7.1%のみが利用している。住民がタンクを持参して、RO 膜で浄化された水をリッター幾らで買う、あるいは、配達費も払って家まで届けてもらうシステムとなっている。

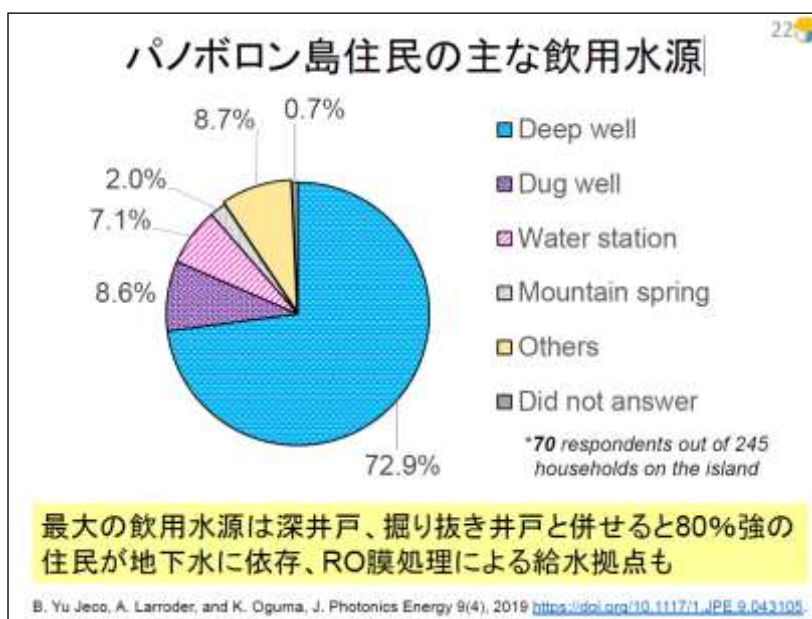


図 3.6.12 パノボロン島住民の主な飲用水源

パノボロン島の地下水中の大腸菌を簡易キットで計測した結果を図 3.6.13 に示す。赤色は大腸菌群、青の縞線は大腸菌だ。大腸菌の検出は、ふん便汚染が疑われるが、12 カ所中、不検出は 1 カ所のみだった。ほかの 11 カ所は高濃度の大腸菌や大腸菌群が検出された。飲み水として利用

しているが、水質の実際の数値としては問題で、まさに消毒が必要である。

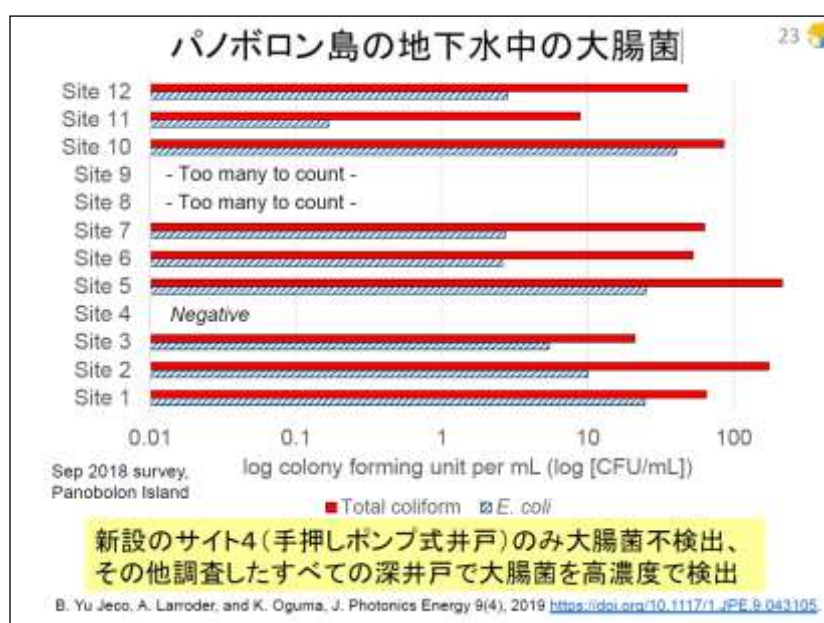


図 3.6.13 パノボロン島の地下水中の大腸菌

また、現地の高校と MOU (Memorandum of Understanding、覚書) と NDA (Non-Disclosure Agreement、秘密保持契約) を結んだ。持続性を持たせるため、2 週間に 1 度、現地の高校生に理科の授業の中で計測してもらえることとなった。さまざまな国で仕事をするなかで、水は教育の問題が大きいと感じている。水の重要性を初等教育から我が事として認識する機会をつくって、将来、彼らが子どもにも伝える夢を持って取り組んでいる。

まとめを図 3.6.14 に示す。SDG6 の達成には不平等の解消が重要である。平均値で議論していたのが MDGs だとすれば、SDGs はそのばらつきに目を向けようという考え方だ。また、達成目標年 2030 年を考えると、明らかに出来ないことに固執するのではなくて、分散型水供給システムをもっと積極的に考えるべきではと考えている。SDGs は途上国の文脈で話すことが多いが、実は日本国内や先進国でも取り残された、取り残されうる地域がある、そういった人がいるという認識が重要だ。

26 

まとめ

- ◆SDG6の達成には、水アクセスの不平等(国-国、都市-農村、富裕層-貧困層など)の解消が鍵
- ◆SDG6をターゲットイヤー2030年までに達成するには従来のインフラ水道だけではなく分散型水供給システムの効率的活用が必須
- ◆SDG6は途上国に限った話ではない、国内にも「取り残され」る人々がいる認識が重要
- ◆水道網や送電網からオフグリッドな地域でも利用可能な消毒技術としてUV-LED装置を開発中

本研究はJSPS科学研究費補助金、厚生労働科学研究費補助金、および東京大学GAPファンドの助成のもと実施しています。

図 3. 6. 14 まとめ

3. 7「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 学術研究・産学官連携推進機構 准教授）

信州大学では JST のセンター・オブ・イノベーション（COI）プログラムや文部科学省の地域イノベーション・エコシステム形成プログラムなどを活用し、材料発で浄水システムを革新する研究開発を推進している。私自身は主に信州大学内の材料技術の事業化などを担当しているが、本日はとくに手嶋勝弥教授と協働し進める無機結晶材料の水浄化用吸着材展開について話題提供する。

我々の取り組みはこれまでにない機能性材料を創成し、その材料を水処理に用いることでニーズに合致した浄水システムを提案できる点でユニークである。機能性材料創出のコアとなる結晶成長法、フラックス法を説明する。ここでいうフラックスとは水分野で通常意味する「流束」ではなく、材料分野の「溶媒」を指す。フラックス法はナノ空間を制御した機能性材料を簡単に育成できる特長がある（図 3.7.1）。原料とフラックス（溶媒）の混合物を加熱し、溶液を冷却して再結晶するだけという簡単なプロセスだ。

加熱源としては、伝統的な電気炉で十分で、高価な装置や複雑な操作が不要だ。その意味でローテクなのだが、結晶の特性を制御できて、多様なニーズを満たせる。



図 3.7.1 独自の強みであるフラックス法

フラックス法では、原料、使用する溶媒、加熱・保持・冷却温度などを最適に調整することで、育成する結晶の形をデザインできる。結晶の形は材料の機能に強く影響を及ぼすため、材料の持つ機能を設計できる面白さがある。

水中の無機イオン吸着材としての材料設計においては、表面に出る結晶面の制御が重要だ。表面で出入りするイオン種が制御される。結晶内の空間を数百 pm~数 nm レベルで制御すれば、水

中の様々な電荷をもつ分子に対する選択性を付与できる。また、数十 nm～数 μm のレベルでは結晶の 2 次凝集体の形を制御して、表面積を大きくすると、吸着速度を向上できる。結晶の形をデザインすることで、水処理における特性を調整できる。このような設計思想で進めている「重金属イオン」「アニオン」「放射性核種」の吸着材の研究を順に紹介する。

まず、重金属イオンの吸着材料について説明する。鉛、アルミニウム、マンガン、銅、鉄、クロム、カドミウム、ニッケル、亜鉛などのイオン種が対象だ。重金属は途上国に限らず先進国でも問題だ。たとえば古い水道管で用いられていた鉛が溶出する問題などだ。

重金属の吸着材として、層状チタン酸ナトリウム結晶 ($\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) という材料を世界初で実現した (図 3.7.2)。この結晶材料は、チタン酸が層状になっていて、その層の間にナトリウムイオンがある。例えば、イチゴをパイ生地で挟んだミルフィーユ菓子のような構造を想像するとよい (図 3.7.2 の右の写真)。チタン酸がパイ生地、ナトリウムイオンがイチゴの部分だ。このナトリウムイオンが鉛などの重金属イオンと交換されることによって、水中から有害な重金属イオンを除去する機能がある。電子顕微鏡像 (図 3.7.2 の中央の写真) を見ると、結晶が層状になっていることがわかる。表面積を大きくして、イオン交換サイトを多く露出させ、吸着速度を向上させる材料設計だ。

吸着性能を評価した結果、上述の 9 種類の金属イオンを 99% 以上除去できた。湿潤や乾燥による体積変化が約 10% と少なく、体積当たりの吸着容量が樹脂材料と比べ 3 倍程度大きい。浄水器用途では吸着速度が重要指標だが、1 時間で吸着材体積の 5,000 倍の水を処理できた。

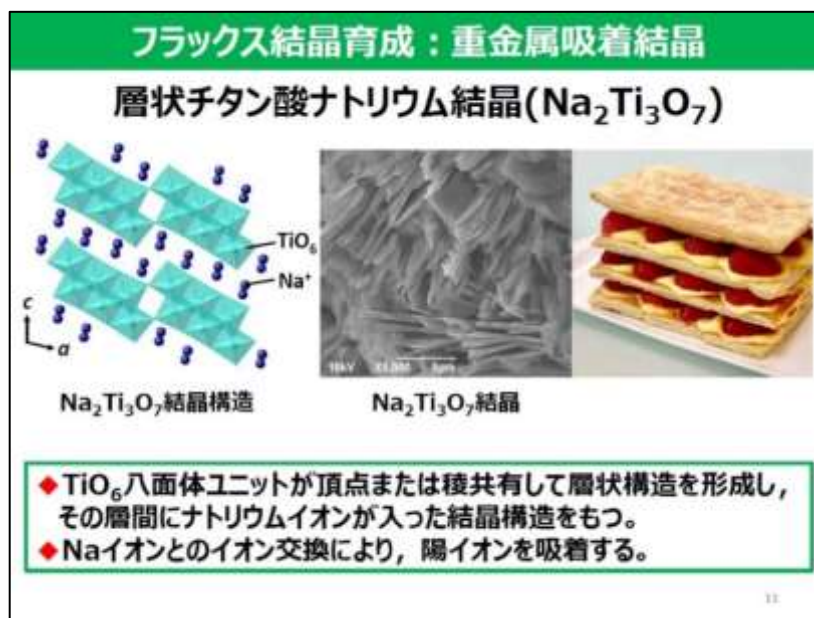


図 3.7.2 重金属を吸着する層状チタン酸ナトリウム結晶の開発

次に、アニオンの除去材料について説明する。硝酸・亜硝酸態窒素、ヒ素、フッ素、リン酸、硫酸、臭素、ヨウ素などのイオン種が対象だ。これらは人為と自然、両方に由来する汚染物質で地下水に主に含まれる。先進国でも分布しているが、地下水を未処理で利用することが多い途上国では深刻だ。たとえば、WHO 飲用水ガイドラインを上回る高濃度のフッ素が地下水に含まれ

る地域が各地にある。タンザニア北部のアルーシャ周辺の地下水は、最大 20ppm のフッ素を含む。高濃度のフッ素は骨フッ素症という骨が曲がる疾患につながる（図 3.7.3）。我々は、この課題の解決に向けて、アニオン吸着材として層状複水酸化物の除去性能を向上させる研究開発を進めている（図 3.7.4）。



図 3.7.3 地下水に含まれるフッ素による骨フッ素症が疑われる事例



図 3.7.4 アニオンを吸着する層状複水酸化物結晶の開発

アニオン吸着結晶も金属水酸化物が層状で構成されていて、その層の間でアニオンを捕捉する構造だ。アニオンはイオン交換反応の選択性の幅が非常に広い。特に、硝酸イオンは選択性が低く、捕捉が難しい。層間距離や層の中の電荷分布など結晶構造の制御を行い、そのような分子も

捕捉する研究開発を進めている。まだ端緒的な試験だが、図 3.7.5 に示す 6 種類のアニオンの除去性能を評価している。硝酸イオンで 80% 近くの捕捉率だった。ヒ素についても高い除去率の試験結果が得られている。



図 3.7.5 アニオン吸着性能

3 番目に、放射性核種の除去材料について説明する。ストロンチウム、セシウムなどのイオン種が対象だ。原発の汚染水処理対策に適用できないか応用研究も行っている。開発した複数の材料を多核種除去設備（ALPS）と同等の条件で、除去性能試験を行った（図 3.7.6）。

試験した材料の幾つかで、ある程度の結果が見られている。実装に必要な基準として、分配係数が 10^5 以上と設定されている。分配係数は吸着材の中に対象物が濃縮される比率を示す指標だ。この研究は企業の協力も得ながら進めている。この研究開発でも、結晶のイオン吸着サイトをデザインすることで、選択性や吸着性を引き出そうとしている。

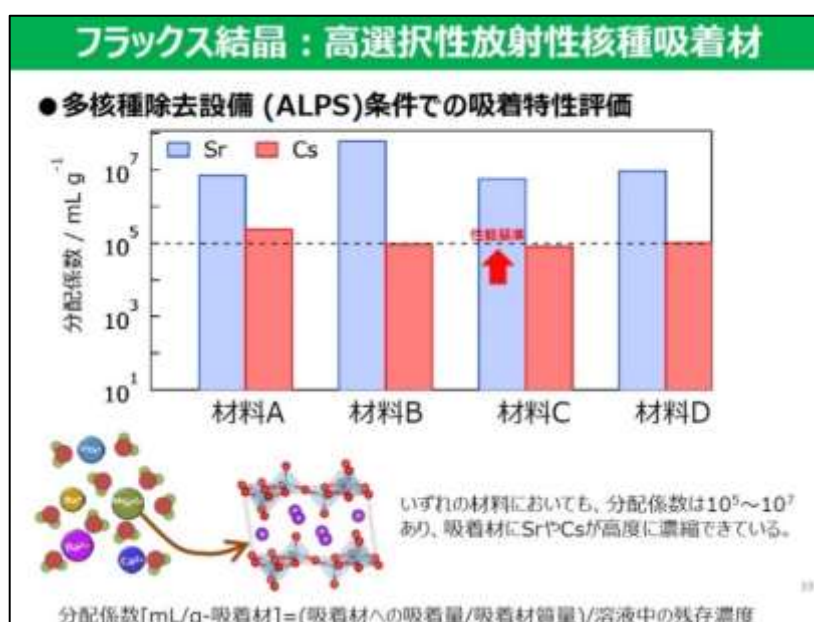


図 3.7.6 放射性核種を吸着する材料の開発

ここから、重金属イオンとアニオンの吸着材を浄水器に応用した社会実装を目指す取り組みを説明する。3つの要素を組み合わせた浄水器の技術思想を説明する(図3.7.7)。1段目の活性炭で、残留塩素や有機物質を除去する。2段目のイオン吸着材で、イオン性の金属物質、鉛やアルミニウムなどを除去する。3段目の中空糸膜で、微粒子や雑菌を除去する。開発したイオン吸着材はRO膜と比較するとローテクだが、この組み合わせでも、ある使用状況下では必要十分な浄水性能を狙える。



図 3.7.7 選択的イオン吸着材を用いた浄水器

ローテクという言葉にネガティブにとらえる人もいるが、多くのメリットがある。まず、除去

のための電力が要らない。BOP 層の生活地域の多くは水道インフラが未整備のため、水を利用する場所で水処理を行う分散型の水処理装置が必要であり、分散型でも効率が悪化しない吸着材は優位性がある。すなわち低コスト・分散型の BOP 対応の水ソリューションに直結する。RO 膜や多くの水処理設備は集中処理型であり、分散型と集中型を組み合わせる最適化するためにも、ローテクな吸着材を用いた水処理システムの必要性が高い。同時に、こういった用途では材料の機能が、直接的に利用者のベネフィットにつながるため、材料と価値の距離が非常に近い。その意味で、材料の新たな機能がソリューションそのものの在り方を変革しうる材料発イノベーションを目指せる分野ではないかと期待している。

我々の重金属吸着材を搭載した浄水ボトルを開発した（図 3.7.8）。産学連携で、携帯型浄水ボトル「NaTiO」という名称で発売に至った。信州大学でもフラックス法で作った結晶材料を「信大クリスタル」と命名し、大学広報誌でも取り上げて支援している。



図 3.7.8 携帯型浄水ボトルの開発とタンザニア現地試験

COI プログラムでのタンザニアでの応用検討について紹介する。現地では動物の骨を蒸し焼きにした骨炭でフッ素を除去しているが、性能が不十分だ。図 3.7.9 の右の写真が約 80 米ドルで既に販売されている浄水器で、骨炭とサンドフィルターと膜を組み合わせたものだ。我々は十分なフッ素除去性能を持った吸着材を開発し、それを用いた新型の簡易な浄水器を開発し、現地に届ける活動を推進している。

現地で我々の吸着材は Magic Powder と呼ばれている。原水でフッ素濃度が 8ppm 以上あったが、処理水は 1ppm 以下にまで浄化できており、WHO 飲用水基準を達成する浄水性能が出ている。電力不要で誰でも安全な水を得ることができる新たなソリューションだ。



図 3.7.9 タンザニアでの水浄化試験

海外での社会実装に当たっては、現地の原料やプロセスで実際にその材料を製造できること、その材料を使ったシステムを構築できることが重要だ。今はプロトタイプを作成している段階だが、フラックス法は良い意味でローテクなので、現地生産できる可能性も期待できる。

この吸着材は、繰り返し使用ができる点も長所だ（図 3.7.10）。塩化ナトリウム水溶液で洗えば吸着機能が回復する。塩化ナトリウムは現地調達でき、この浄水器を反復使用できるシステムを現地構築できる可能性がある。コストについては粗目の試算だが、材料価格ベースで約 200 円/m³ という数字で、これをさらに下げていく研究開発を検討している。

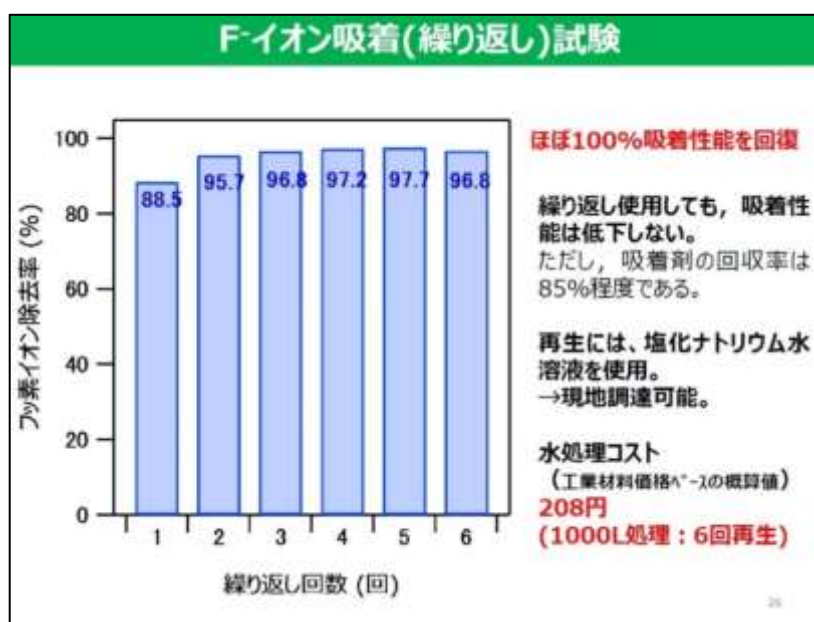


図 3.7.10 水溶性フッ素イオン吸着試験

世界中を見渡すと各地域に応じた水の課題がある（図 3.7.11）。

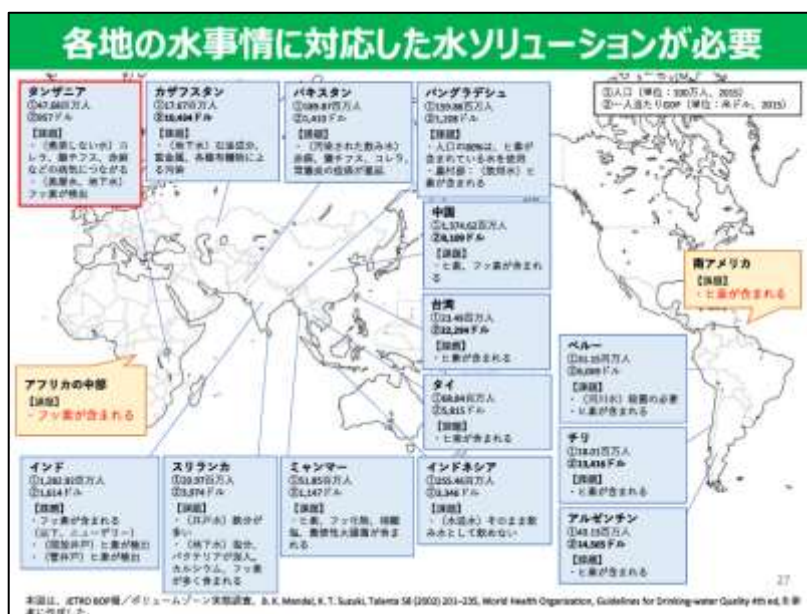


図 3.7.11 各地の水事情

中でも、水インフラが未整備の最貧国での問題がまだ多い。そういった状況でも対応できる超簡易型の浄水メディアを産学連携で共同開発している。図 3.7.12 に示す試作品はパックの中に活性炭とイオン吸着材を入れている。原水を注いで、しばらく待てば浄水できる仕掛けだ。各国での水の課題に応じて、問題となるイオンを除去する吸着材を開発し、搭載することを目指している。例えば、バングラデシュ向けにはヒ素の吸着材、タンザニア向けにはフッ素の吸着材を入れるというような形で、各地にカスタマイズした水処理ソリューションを安価に提供する狙いだ。



図 3.7.12 簡易型浄水パックの開発

【質疑応答】

Q：フラックス法によるイオン結晶育成の現地生産について、どのくらいの簡単さだと想像するとよいか。製造における品質管理なども含めるとどうか。

A：原料のレシピをしっかりと固めておくと、小学生でも作製できるぐらいの簡単さだ。大学のオープンキャンパスでは、小学生に試しに作ってもらっている。製造条件やプロセスさえしっかりと確立できれば、現地生産の可能性はかなり期待できる。

4 全体議論

4. 1 「若手が考えた将来の社会・インフラ・新技術」

山村寛（若手水ビジョン検討委員会 座長／中央大学 理工学部 准教授）

話題提供として、若手水ビジョンで議論した水インフラの将来像を紹介する。

国土交通省下水道部の支援を受け、水分野に関係する産官学 10 数名の若手専門家が 2015 年から 2016 年にかけて 7 回集まり、議論したものだ。この議論を実施した背景として、若者が希望ある将来像を見出せないという漠然とした不安があった。まずその原因がどこから来るのかを議論した。将来の水施策の姿として、現在何も手を打たなければ、人口も GDP も減り、災害リスクは増加し、暗い方向に向かう。そうならないように、水道ビジョンも下水道ビジョンも作られていて、水業界は団結して頑張っている。しかし、若手がワクワクするような理想はさらに高く、その現ビジョンと理想像とのギャップが若者の不安感の背景にあるのではないかと考えた。そういった課題意識のもと、未来の水業界の姿を議論した。

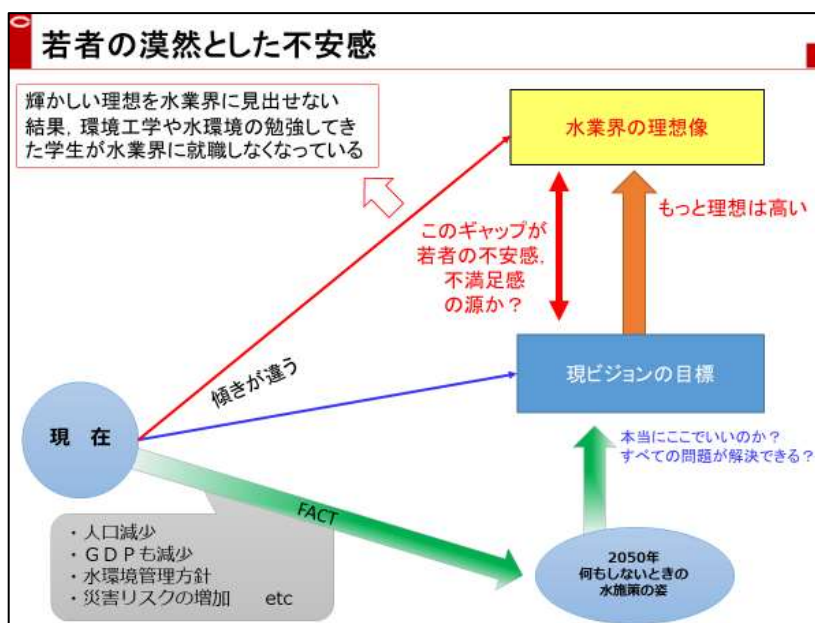


図 4.1.1 水分野の若手の漠然とした不安感

インフラの将来像の検討にあたって、重要な要素である人口動態について説明する。信頼性の極めて高い将来予測として人口動態がある。現状の出生率 1.41 程度が続くと人口減少、少子高齢化社会が訪れる。「地方消滅」（増田寛也著）での整理がわかりやすいので紹介する。人口減少は第 1 フェーズ、第 2 フェーズ、第 3 フェーズという 3 段階で進む（図 4.1.2）。2040 年頃までの第 1 フェーズは高齢者人口が増加して、労働人口が減少する。この段階では人口 1 億人を切ることはない。2040 年頃～2060 年頃の第 2 フェーズで高齢者人口の増加が止まり、労働人口がさらに減少する。この段階でもまだ人口 1 億人をかろうじて留める。2060 年頃以降の第 3 フェ

ーズでは高齢者人口も減り始め、日本の総人口が急激に減り始める。

日本は世界に先駆けて第1フェーズに突入している。第2フェーズ、第3フェーズにもいち早く到達するため、人口減少社会をもっとも早く経験することになる。諸外国は日本がどのようにこの困難を調整していくのか見守っている状況だ。

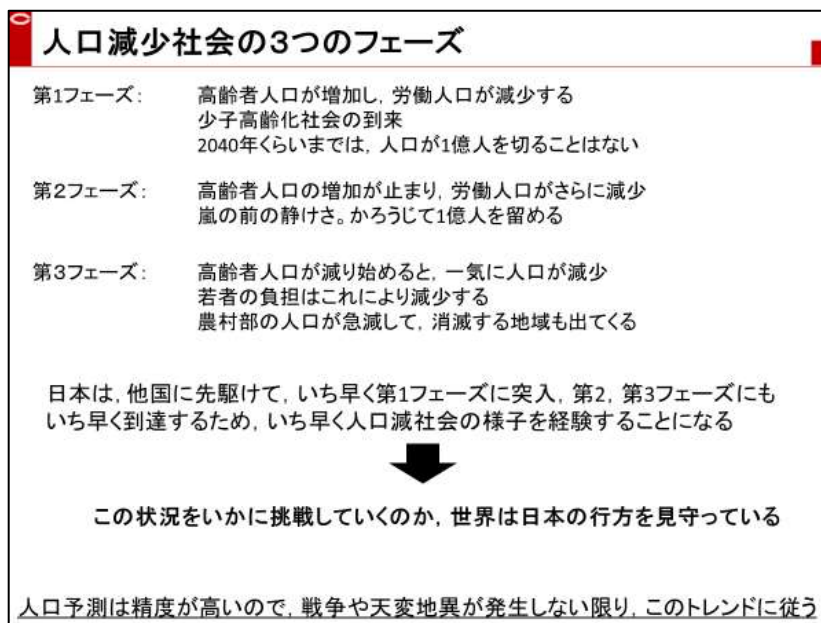


図 4.1.2 人口減少社会の3つのフェーズ

人口動態について、人口が減少するとサービス業が衰退し、雇用の多い都市に移住が進むので、農林水産村から都市への人口移動がさらに進む負のスパイラルに陥るという未来の予測がある(図 4.1.3)。

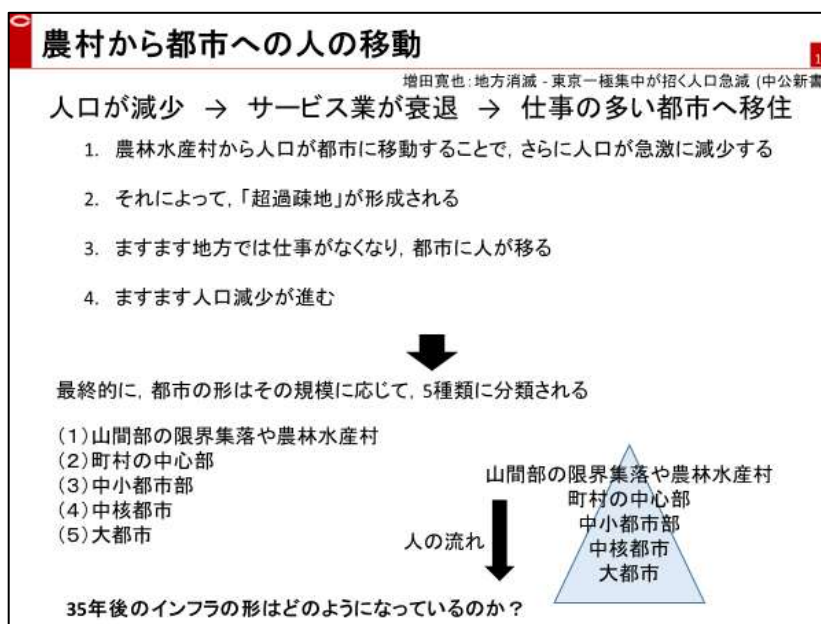


図 4.1.3 農村から都市への人の移動

そういった知見を踏まえて、2050 年の日本の都市形態は規模に応じて 5 種類に分かれるという議論に最終的に辿り着いた。山間部の限界集落、農林水産村から大都市まで、人口規模に応じて、2050 年のインフラの形も違うのではないかという意見だ。

総務省が自治体戦略 2040 を公開している。自治体ごとに、2015 年と比べて、2040 年にどのくらい人口が増減するかを規模別にまとめている（図 4.1.4、4.1.5）。この表でいえば、一番上の 100 万人以上の区分が大都市を構成する自治体。その下が中核都市を形成する自治体。その下で 1 万人以上までが中小都市。1 万人未満に町村中心部と農林水産村がある。

各自治体の人口増減の様子				
自治体	2015年人口	2040年人口	増減率	増減数
大都市	100万人以上	100万人以上	+	+
中核都市	50万人以上	50万人以上	+	+
中小都市部	10万人以上	10万人以上	+	+
町村中心部	1万人以上	1万人以上	+	+
農林水産村	1万人未満	1万人未満	+	+

総務省 自治体戦略2040

図 4.1.4 各自治体の人口増減の様子（1）

各自治体の人口増減の様子				
自治体	2015年人口	2040年人口	増減率	増減数
大都市	100万人以上	100万人以上	+	+
中核都市	50万人以上	50万人以上	+	+
中小都市部	10万人以上	10万人以上	+	+
町村中心部	1万人以上	1万人以上	+	+
農林水産村	1万人未満	1万人未満	+	+

総務省 自治体戦略2040

図 4.1.5 各自治体の人口増減の様子（2）

農林水産村では1人当たりのインフラの整備費が非常に高額になる。ここでは離散化に伴うネットワークの拠点や分散処理をしっかりと検討する必要がある（図 4.1.6）。農林水産村は食料生産の機能を果たす極めて大事な場であり、なくすわけにはいかない。このインフラは住民自らが管理する形が、将来はさらに常態化するという見解が聞かれた。

(1) 山間部の限界集落や農林水産村

13

- 山間部の限界集落や農林水産村は、食料生産や林業など、1次生産者が生活する場
- 今後は人口が減少して集落が減少するに従って、ますます集落間の距離が離れる方向に進む。
- 水道インフラについては、山間部の限界集落にもきちんと行き届いている。
- 下水道は浄化槽によってまかなわれている地域がほとんど。
- 結果として一人あたりに換算したインフラ整備費用が非常に高額
(新日本監査法人の試算によると、将来的に限界集落の水道を維持しようとする月に10,000円を超える水道料金が必要な地域もある)
- 水インフラを「水を供給・処理するだけの資産」としてではなく、「限界地域の拠点」として利用することで、その維持管理に要する投資効果を最大限にすることが求められる。
- 集落の離散化に伴って、そのネットワークや拠点も随時見直す必要が出てくるほか、離散化した拠点を効率的に監視・管理するシステムも必要となる
- このような地域には、「状況に応じてフレキシブルに変化できるシステム」が必要となる。

図 4.1.6 山間部の限界集落や農林水産村での課題

町村中心部、中小都市、中核都市、大都市の関係を図 4.1.7 に図示した。それぞれの大切な要素である役割や特徴などの項目をまとめた表を図 4.1.8 に示す。



図 4.1.7 将来の都市の形の関係

東京、名古屋、大阪が将来においても大都市である。役割は国際都市として外貨を獲得する場だ。中核都市の重要な役割は拠点都市として、中小都市や町村、限界集落を助けることだ。中小都市も、町村中心部にサービスを提供する機能を果たすことが重要な役割だ。

将来の町村中心部の特徴だが、コンパクトタウンの考え方が昨今かなり浸透している。コンパクトタウン化していれば、集中型のインフラが非常に効率よく導入できる。

中小都市では、分散と集中のミックス型とか、大都市では超集中型という形もあると考えている。

将来の都市の形(故郷近辺を例に)					
	限界集落 農林水産村	町村中心部	中小都市	中核都市	大都市
人口規模	～数百人	～数千人	～数十万人	～数百万人	東京 大阪 名古屋
役割	食糧生産 1次産業従事	生活の場	サービス 提供の場	価値 創造の場	外資 獲得の場
集中 分散	分散型	集中型	分散・集中 MIX型	集中型	超集中型
特徴	超過疎 超分散化	コンパクト タウン化	インフラ 格差	広域の リーダー	日本の リーダー
インフラ の形	住民で 運転管理 遠隔サポート	住民・行政職員 が運転管理 遠隔サポート	少数の技術者 が管理 遠隔サポート	一定規模の 技術者が管理 開発と研究	中規模の 技術者が管理 国際競争

図 4.1.8 将来の都市の形の整理表

まとめを述べる。2050 年を見据えると、日本の社会構造は徐々に変わっていく。将来の農林水産村や町村中心部の水インフラが遭遇する課題を考えると、海外の途上国での問題ではなくて、日本でも超過疎化やミックス型などの実現に向けた新しい技術開発の必要性がますます高まっていくだろう。

4. 2 「総合討論」

これまでの話題提供やコメントを踏まえ、総合討論を行った。社会実装に関わる内容に注目して、

(1) 研究開発を推進する上での課題として推進方法や体制、連携等について

(2) 中長期的に取り組むべき研究開発課題について

といった観点で、今後の望ましい施策の進め方を議論した。議論におけるキーワードを下記する。

(1) 研究開発を推進する上での課題として推進方法や体制、連携等について

(1a) [社会実装に向けたステークホルダー協働・対話]

「ステークホルダーとの協働・対話（ステークホルダー・エンゲージメント）の本来あるべき姿」

「個別技術の研究と全体との関係」

「水の研究を行う価値の議論」

「ナラティブ（Narrative）の共有と社会との媒介の仕組み」

「コミュニティの力による持続性の構築」

(1b) [社会実装のためのファイナンス]

「制約条件となるファイナンス（資金）、組織のあり方」

「適用技術に応じたファイナンスのモデル」

(1c) [持続性のためのビジネスモデル]

「一過性にならないための現地での教育の重要性」

「プロジェクト終了後も持続するためのビジネスモデル構築」

(1d) [中長期的な時間軸での目標設定]

「SDGsの2030年に100%社会実装という理想的な目標の踏まえ方（長期ビジョンの重要性）」

(2) 中長期的に取り組むべき研究開発課題について

(2a) [水循環システム]

「世界における水資源、水循環という視点で重要な地下水の持続可能性」

「自然環境などに本来備わる水質の自浄能力」

「水源と利用用途との関係」

(2b) [水処理]

「安全性確保のための多様な処理プロセスと材料技術」

「水量と水質の安定性（変動性）とライフサイクルコストの議論」

「解決すべき課題の材料研究課題へのブレイクダウン（上手な課題設定）」

(2c) [社会実装のための診断]

「社会や技術の動向を踏まえた分散型システムや融合技術の適時性」

「日本の人口減少・高齢化対策への諸外国の関心」

「見える化したときに生じる課題」

「モニタリングで蓄積したデータの強み（データ資源の活用）」

(1) では、社会実装を強く意識した議論が行われた。その中で、ステークホルダーとの協働・対話の良い進め方について、良い見解や事例が多く示された。水に関わる研究を行うにあたり、その価値を考察し、双方向でのステークホルダーとのコミュニケーションを行う取り組みの重要性が示された。また、技術開発だけでは社会実装できないことや、せっかく導入しても一過性に留まる懸念に対して、ファイナンス、ビジネスモデルといった要素の重要性も指摘された。

(2) では話題紹介で触れられなかった内容の補完や、あらためて重要性が議論されたキーワードがあげられた。とくに、水循環、水処理、診断ともに相互に関連するキーワードが多くあげられた。

総合討論で行われた議論について、それぞれのキーワードごとに整理して、以降に紹介する。

【(1a) 推進方法・体制等；社会実装のためのマルチステークホルダー協働】

(社会実装の課題；ステークホルダー協働)

- ・2016 年まで行った 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」では、水利用という言葉を意識的に使っていた。利用という言葉を入れることによって、水という物質にとどまるのではなく、社会が使う水としての研究をやろうというメッセージにした。水利用というキーワードが残っているのは、大変よいことだ。水利用にリスクが加わっていくというのが、現在型の課題となる。
 - ・サイエンスカフェなどで用いられるステークホルダーとの対話という言葉がある。サイエンスカフェの本来あるべき姿は、住民に啓発するという場ではなく、研究者が住民からの意見を聞いて、研究者が変わるという側面があるものと理解している。
- その観点で、ステークホルダーとの対話をした上で研究するという話題が複数あったことは意義深い。研究する主体のほうも良い方向に変わるためのものでもあると受け止められる。特に、水分野はそうあるべきではないかと考えている。実際にそういう姿勢で研究を展開しようとしている雰囲気が見られつつあり、ぜひ、こういう良い流れを JST などで汲み上げてほしい。

(水の価値の議論)

- ・インクルーシブ・イノベーションのマッピングで少し不安な点は、一要素技術的な個別技術、あるいは、要素システム的な個別技術がどうしても表に出てきて、それで構成しようとすることになる。最後は仕方がないが、大もとのところで、各研究者、あるいは、研究が行われている水の価値の研究者の主体としての何か意識しているものを、うまく組み上げて構成する必要がある。
- ・水利用の特別な例を挙げる。現在、多くの都市域では、圧力をかけて管路の水を配っていることで消防用水としての価値がある。消防に携わる人からみると水の価値と言える。水利用の全体から見ると一部分の価値だ。
- ・水の価値がどこにあるのか、が研究者ごとに恣意的に決まってしまう心配があらゆる分野で存在する。研究者が主体を担う場合に、避けられない構造である。研究者から提案する水の価値と、研究の重要性をどう取りまとめるかだが、CRDS のような場で、従来型の研究とは違う整

理をする仕事が求められる。

(社会実装の課題；ステークホルダー協働)

- ・ 水処理のプロセスとしてできることと別に、人がほとんどいない地域といった実際の条件も含めて考えなければいけない。持続的な水利用のためには、住民との協働や理解といったコミュニティの力を含めて進めなければならない。良い技術、良い装置があっても、必要なメンテナンスや維持管理が現地で行わなければ、動かしているうちに1年経ったら止まってしまうという問題が起こる。それでは、包摂的なイノベーションには辿り着かない。
- ・ 技術の社会実装に向けた研究では、むしろ研究者側が想像すらしなかったことを学ぶ機会が多くある。利用者に研究成果を無理やりに押しつけるのではなく、利用者から得る学びがあるという指摘はその通りだ。例えば、途上国の事例として、一家に一台の浄水器がほしくても、コストが見合わないからコミュニティに一台で我慢せざるを得ないという状況を想像していたところ、実際に現地の住民にお話を聞くと、みんなが集まる交流の場が欲しいからむしろコミュニティに一台のほうが良いと言われたりする。家庭の主婦が水を汲みに外出する理由ができて、集まりやすいから良いという。そういった視点は現地でしか得られない大きな学びである。
- ・ 現地のステークホルダーを巻き込んだ取り組みを進める理由は、まさにコミュニティの力で持続可能な仕組みをつくりたいという動機がある。研究者主導で技術導入を進めたけれども、研究プロジェクトが終わったら技術も朽ちてしまうということにならないように、現地の方にかかわっていただいて、たいへん困難ではあるけれども、持続性を確保したい。
- ・ 技術で解決できることは限られており、研究者はその謙虚さを常に忘れてはいけないと思う。水を研究対象にすると、歴史や文化慣習を含めた社会そのもの、生活そのものを扱うことになる。科学技術を実社会に展開し根付かせるのは容易ではないが、自然科学の枠を超えて社会科学の視点を盛り込むことに突破口があるのではと期待している。
- ・ 沖縄での再利用の研究は当初もっと大きく、13万トン of 下水処理場の半分ぐらいの再生水を沖縄の南半分にかけていく構想で、その計画を縮小して、実証を始めた。
- ・ 1つの理由はコストで、専用パイプラインを張り巡らせる計画を合理化した。もう1つ大きな問題は、再生水のリスク。農業で使うとバッドイメージを与えるのではないかと農業の流通業界関係者が当初、反対した。それをいかにして払拭するかが技術だけではなくなかなか難しかったため、実証試験で注力した。
- ・ CRESTで研究した設備をもう1段階大きなシステムにしたセンターをB-DASHで作った。農家に使ってもらった上で、市民を巻き込んで進めた。再生水に危ない病原微生物が入っていないかといった不安を市民が抱くかもしれないと考えていた。実際に市民と話すと、我々の懸念と違って、下水処理水には工場排水の重金属やダイオキシンが入っているので、それは大丈夫なのかというものだった。それを払拭するのが1つ目の課題だった。2つ目の課題は、この水を使ってくださいとお願いすると、きれいな水で作ったものだったらよいけれども、という反応だった。そのため、限られた自然のきれいな水を遺さないとどのような問題が起こるかを説

明した。自然の中に涵養された貴重な水を奪い取らずに、再生水をカスケード的に使ったほうが、どのくらい環境に対して良いのかを説得をするツールが必要だった。

- ・全く同じ構図が、実は、アメリカの DPR（直接の飲料水利用）で起きている。これまでに、40 年ぐらい時間がかかっている。そのほとんどの時間は説得に要している。最後のところで最も成功した取り組みは、本物に近いプロセスを一旦見せたことだと言われている。これだったら大丈夫だと理解されるところまで至るのにそれだけの時間がかかっている。
- ・これは科学技術の成果を社会に広げていく際の示唆を与えている。特に、新しい先端技術を導入することは必ずしも歓迎されず、一般の人の不安を生みだすことがある。それに時間をかけないといけない。
- ・水に関わる問題では、我々研究者も理論はわかっている、どのように市民に見せるかが大切だ。特に、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。研究課題の 1 つとして挙げられた社会実装型の診断のようなアイデアを伸ばして、うまく利用した見える化ができるようになれば、こういった課題の解決につながるかもしれない。この数字がオーケーだから、物質でオーケーだからという説明ではなくて、こんなことが生物の中では起こっていて、これで何も起こっていないので大丈夫ですよとか、そういうツールとしての利用の仕方はあると思う。
- ・水のリスクを考えるには価値をしっかりと考え出していくことが大切だ。社会実装の観点でも、どういう研究をするのかという観点でも、コミュニケーション、協働しなければならないということが基本となる。
- ・その観点で、水循環システムの把握、処理と診断といった研究の前に、実は協議、議論がある。そこでは水道の専門家だけではなく、コミュニティ、住民の方々もいて、その中で何をすべきかという議論が上位に存在する。水処理などの研究をするための前段階に、じつは枠組み作りのための研究がある。システムと処理と診断したものを、もう一回社会に落としましようという発想ではなく、その前段階にこの議論をおくべきだと考える。
- ・Lancet 誌で医学研究をする上での枠組みの議論がなされたことがある。水利用リスクでも研究をする上での枠組みは複数ある。エキスパート・ジャッジメントによって、体系的に、自動的に決めていく枠組みだけではなく、ステークホルダー・エンゲージメントで決めていくという枠組みがある。当たり前と言えば当たりの枠組みだが、明示的になっていることがポイントだ。例えば、ある現場で、ある事情があって、あるニーズがあって、だからこういう研究の行動があって、という一連の流れ、研究に至るまでのプロセスを明示化させていくことが大切だ。
- ・いわゆる、ナラティブが重要だ（Narrative；医療・看護分野で用いられる場合、医療看護従事者が一方的に治療や看護を行うのではなく、患者側の物語を聞いて疾患等の背景を理解して治療看護を進めるという双方向性のコミュニケーションといったニュアンス）。なぜ、どのようにして、といった共通理解をコミュニティとアカデミアとで共有していくプロセスが大切だ。その後、共通理解を社会に向けて打ち明けていくかも大事だ。
- ・2 点、考えなければいけない点がある。1 点目は、ナラティブを共有するという、学術として

の受け皿がないことだ。ナラティブを「学」として共有する枠組みがないため、研究の出どころがない。まだ、こういったワークショップなどでたまたま聞いて、何となく知っているだけという域にとどまっている。学としての受け皿が絶対に必要である。おそらく学会の問題もある。

- ・もう一つは、媒介の役割だ。社会の中に、誰かつなぎ役の人がいないと成立しない。
- ・工学、理系の専門家に限らず一般の方でも、それは社会科学者の役割だとよく簡単に言ってしまうが、実はそれは違っている。そういう仕事をする社会科学者ももちろんいる。議論をもとに、こういう枠組みを整理することは、むしろ、科学者の得意なわざだ。現場で担うのは、やはり、その問題の専門家だ。そのため、そういう研究者が、誰が、どう、その仕事をするのかという仕組みを考える点も大切だと考えている。

(社会実装の課題：国や地域レベルのステークホルダー調整)

- ・アフリカでは、国際河川が沢山ある。そのステークホルダーの調整が課題となる。ナイル川の上流のエチオピアではグランドルネッサンスダムを建設しており、下流のエジプトではナイル川の水量が減るという危機をもっている。上流、下流域のステークホルダーの合意形成に向けて、サイエンスとしても何らかの貢献を提供していく必要があるのではないかと考えている。
- ・コミュニティウォーターサプライはアフリカのような非常に大きな大陸では適している。世界銀行などがアフリカで多くのパイロットプロジェクトを行っている。その中からどうすれば、地域レベルや国レベルにアップスケールできるかが今後の課題だ。

(研究のための調整コストの問題)

- ・環境分野の研究の難しさとして、調整コストがすごくかかる。研究に至るまで、スタートするまでの調整とか、研究する上での地域との調整はすごく大変だと以前に伺ったことがあった。
- ・誰が課題設定を行っても、それぞれに難しさがある。研究者が地域にある課題を設定してから、その場で研究を進めるという方式だと、研究者の担う仕事が増え過ぎてしまい、研究にかかる時間がなくなる問題がある。

【(1b) 推進方法・体制等；社会実装のためのファイナンスング】

- ・IIASA では、インド、アフリカ、東南アジアなどでステークホルダーを集めたワークショップやエンゲージメントを行っている。その中で、実は技術面よりも政策にかかわる問題が多いことがわかっている。たとえば、インドでは補助金を出して地下水をくみ上げている。これは技術が向上しただけでは問題が解決しない。政策をセットで考えないといけない。アフリカの場合では、日本もかなり多くの ODA を拠出しているけれども、アフリカ各国の政府関係者と話すと、資金が足りていないと聞く。水のセクターではどのようにファイナンスング(投資、融資)をしていくかというのは重要な要素だ。
- ・IIASA ではタンザニアでプロジェクトを行っていて、ファイナンスングのメカニズムをどうするか検討している。グリーンプラネットファンドなどでも、気候変動に対するファンディングを水のセクターに使っていくという取り組みがある。

- ・ アフリカなど海外で水供給の実務を行う場合、長期プランを考える際、ファイナンス、資金のあり方、組織のあり方がかなり大きな制約条件になる。その制約条件の中でどういう水供給施設を作るかという順番になることが実際にある。
- ・ 例えば、アジアの地方中核都市や、アフリカの首都では、ものすごい量の水の需要がある。都市の人口増加が激しく、表流水から取水するしかないというような状況にまでなっている。今の事業体で何とか都市計画をつくらうと考えて、遠方の表流水から水源を持ってくる解決策がとられている。このような都市には、輸送コストや処理コストがかかり、表流水の水源によるリスクもあるという共通課題が生まれている。一方、分散型の供給や、地下水の持続性という観点は軽視されている。マネジメントが不可能で、ファイナンスが水循環のあり方を総合的に決めている要素がある。
- ・ これまでに分散型技術は数多く存在したが、社会に広く浸透したものがほとんどないことにもファイナンスの問題が絡んでいる。集約型技術のファイナンスしか存在しないから、分散型に投資できなかったという部分がある。民間のビジネスをうまくつakって、イノベーションを広げていかないと、分散型技術が浸透していかない課題がある。

【(1c) 推進方法・体制等；持続性のビジネスモデルの形成】

- ・ まず教育が大変に重要な要素となる。同時にビジネスも重要な要素である。現地でお金が落ちて、現地の経済が動くという仕組みをうまく持ち込まないと、技術だけを持ち込んでも持続しない。装置を持ち込むと同時に、現地でのビジネスモデルのようなものと一緒に提案して根付かせないといけない。
- ・ 水分野でも経営的、ビジネス的視点についても留意する必要がある。ビジネスがうまく回らないと研究の資金もなくなって、研究の活動量がどんどん下がっていく。衰退しないように、産業が活性化して、研究資金が捻出され、日本の良い未来像をつくる好循環をアカデミアからも構築していきたい。

【(1d) 推進方法・体制等；中長期的な時間軸での目標設定】

(時間軸：SDGs に向けて)

- ・ SDGs の目標期限は 2030 年となっている。水では 100%の人に完全に安全な水や下水衛生と掲げられている。集中型では達成は無理だけれども、分散型も交えたベストミックスで考えることはよい。しかし、SDGs の全ての目標を 2030 年に達成するのは無理がある。プロポーザルを検討するにあたり、2030 年の次の目標を狙ったぐらいの長期ビジョンを考えたい。
- ・ SDGs の水の目標の達成期限は、MDGs が別要因で達成できたことがあり、ここ最近トレンドとなっている無謀に思えるようなチャレンジングな目標を示す動きにのったものと受け止めている。性善説の五十歩百歩の出典となっている孟子の全文を読むと、世の中の現状で小さく考えるのではなく、難しいけれども、理想像を追求して大きく考える大切さを説いている。性

善説の色合いが強い SDGs もその意味合いに応じて、捉えたほうがよさそうだと考えている。SDGs の 2030 年の期限設定も、2030 年に完全達成できないからやらないという言い訳にするのではなくて、2030 年に完全に達成できなくても、100%社会実装という高い目標に向けて、少しずつでも進める大切さをみたほうがよいと思われる。というのも、最近の研究プロジェクトが来年、再来年の成果となんでもかんでも近視眼的に引っ張られていることを懸念している。中長期視点をもった、魅力のある研究支援方策を打ち出したい。

【(2a) 研究課題；水循環システム】

- ・水利用リスクの低減策をどのようにすべきか考えた際、世界における水資源、水循環という視点で、地下水の重要性はしっかりと位置づけなくてはならない。
- ・水循環システムに関して、海水淡水化を含めて、何を原水の水源として捉えるのかも重要である。水源側の軸に対して、農業、工業、生活用水など様々な水の利用用途で求められる内容を軸にとって、マッピングしておくと考えやすくなる。
- ・水源の安全性に関して、微生物や重金属のような汚染物質をどう捉えるかという課題がある。また水源が地下水か、表流水かといったことにもつながる。水不足の地域での中所得、低所得層での困難や、水が豊富な地域でも低所得層の困難という整理図をさらに進めて、どの地域にどのような水利用リスクがあるという全体を抑えて、それぞれでの重要なポイントに焦点を当てるようにしなければいけない。
- ・何らかの技術で水質を改善する手法と別に、ネイチャーベースソリューション、自然を使った水質改善手法がある。湖沼などに本来備わる自浄能力を使う手法だ。世界銀行やアジア開発銀行が最近関心を示しており、人為的な技術と自然の持っている浄化力を組み合わせながら、改善していく手法もある。
- ・シンガポールのような都市型国家の場合には再利用水 100%ということも現実的に考える必要がある。しかし、日本の農村地域のように自然が残っている地域は、その自然を利用して水質を改善していく考え方があってよい。

【(2b) 研究課題；水処理】

- ・原水の処理や除去といった安全性確保のための多様な技術に関して、処理プロセスとしての議論と、膜や吸着材といった素材系の技術が処理プロセスとして成り立つのかという議論がある。
- ・水量と水質の安定性も対象となる。安定性は、変動性とも言い換えできる。どのぐらい変動性のあるものを対象にして、どのような技術をカスタマイズするのかを検討していくこととなる。
- ・安全性、安定性に加えてコストの議論も大切になる。コストには、最初に材質、素材をつくる際の初期コストと、運転時に電気エネルギーを使うランニングコストとがある。それらをあわせてライフサイクルコストとなる。製造時の素材自体の値段が高くても、長寿命であれば、ライフサイクルコストは下がっていく。初期コストだけを見るのではなく、どれだけ長く使い続けられて、その期間で、どれだけのベネフィットを生み出せるかライフサイクルコストの観点から上手に示さないといけない。そのためには、消費エネルギーも入れてライフサイクルコス

トを評価していく必要がある。海水淡水化が新しい膜材料技術で意外に安くなる可能性があるとか、あるいは、長持ちする膜ができることによって、高価だったものがライフサイクルで安く評価されるということがある。

- ・世界、国、地域、地域コミュニティ、家庭といった各階層における水利用のニーズと、システム、モジュール、デバイス、材料といった各階層における技術シーズ、どちらも全体を俯瞰して議論する機会が限られており、議論の機会を設けること自体が非常に有益である。これまで日本は、材料レベルでのシーズや要素技術について強いと言われてきたが、その背景の一つには強い出口産業があった。つまり、解決すべき課題の質が非常に良かったのである。さらにその課題を、マルチステークスホルダーの密な議論により各技術シーズに落とし込みができていたことが、競争力の源泉と言える。
- ・水利用リスク管理の課題設定に関しても、あらゆる階層（水循環システム、水プラント、水処理モジュール、材料等）の研究者が、まずは課題を極めて正確に理解すること、その上で、各々の階層における技術の先端的な知見からその課題に対して何ができるか提案すること、さらに、ニーズ側から見たときにその提案が妥当であるかを判断すること、といったプロセスが必要とされる。この取り組みは、使う言葉や観点が異なる中で共通言語を作り上げていくという難しい取り組みになるが、課題を材料レベル等の各々の階層にまで相互にブレイクダウンして、議論の枠組みや研究開発テーマ設定、さらに異なる階層の技術シーズの組み合わせを検討することが重要になる。特に材料分野はサプライチェーンの最上流にあり市場（ニーズ）から遠いからこそ、このような密な議論が、日本の材料研究の強みを活かし他者（他国）には真似のできないソリューションを構築するために必要である。

【（2c）研究課題；社会実装型診断】

- ・検討中の簡易診断という言葉は、簡易を別の言葉にしたほうがよい。水道分野では簡易水道という言葉が誤解を受けている面があり、懸念される。簡易水道は、ただ規模が小さいという違いで簡易という言葉を用いているだけなのだが、全く何にも悪くなくても、よくない印象をもたれてしまっている。社会実装型の診断など、表現を工夫するとよい。
- ・分散型システムを入れていくことは、日本が進めている Society5.0 とも整合する。先進技術と ICT 技術との融合は一つのテーマとなる。また、人口 1 万人程度の地域において、エネルギーをあまり使わずに最適運転するための AI 支援技術も注目される。
- ・農業用水への ICT 導入検討の背景には、農業人口、マンパワーの減少がある。日本だけでなく、東南アジアのタイなどの国でも ICT に関心を示している。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社会に変わっていく。アジア各国も農業のサポートに ICT を入れていかなければいけないという問題意識を強く持っている。
- ・35 年後のインフラの将来像で、限界集落などでの住民での運転、管理、遠隔サポートが必要になるという課題は、まさに現在の農業用水がもともと農民自身で運転管理をしてきた点で一

致する。農業のマンパワーがいよいよなくなってきた、さあ、どうしようという時代になってきて、遠隔サポートが現実味を帯びてきている。人口減少・超高齢化は、今時点では日本の国内問題ではあるけれども、少し将来を見据えると、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だ。ステークホルダーそのものが消えてしまうという集落もあるが、縮小しつつ残っていく集落の中で、その地域社会の中に技術がどういう形で入っていくのが適切かをあらかじめ考察しておく必要がある。

- ・ステークホルダーが関係する課題として、見える化なら見える化した際に生じる課題がある。センサのとったデータを誰かに対してオープンにしようとするセキュリティの課題（誰に見る権限を持たせて、誰が利用する権限をもつのか）、などを含めた議論の必要性が多く生じる。ICTで技術的にできることだけではなく、どういう水利用にインパクトを与えるかということに、かなり踏み込んで議論を重ねる必要がある。
- ・日本の都市の水道では原水から排水に至るまで、多くのセンサが実装されていて、pH、濁度などをはじめとして多くの項目を測っている。
- ・実はこれは日本の大きな資産といえる。米国や欧州でも、そのようなモニタリングはできておらず、最近のICT、IoTの流行で、やっとセンサを入れてデータを集めている段階にある。言い換えれば、日本の強みといえる。都市用水だけでなく、農業用水でもしっかりと管理して、うまく使っていくことで、次のビジネスのシーズを創出できないかと期待される。

4. 3 「閉会挨拶」

佐藤順一（JST-CRDS 上席フェロー）

本日のワークショップでは水利用リスクという非常に難しい課題を扱いましたが、参加者の皆様からは、たいへん良い意見や考えを出して頂きました。心より感謝を申し上げます。

水利用について、まず、私たち人間が生きていく上で、水は絶対に必要なものという前提があります。その水を今後どのようにしていくのかという水利用リスクの課題に対して、議論をいただきました。本日の議論を振り返りますと、社会受容性の議論がありました。これについては、社会の要求を一個一個、包括的に組み上げて、今後どのような社会を作っていくのかというシナリオを描く必要があります。そのシナリオは、しっかりと基本的なサイエンスにたって描かれたものでなければなりません。社会受容性と基本的なサイエンスとがうまく結びついたシナリオを描くこと、そのシナリオを実現していくことは水利用リスクに限らず、材料でも、システムでも、ITでも、あらゆる分野で難しいことです。しかし、そのようなシナリオを作って、それをなんとかして上手に実現していく研究が、今後のよりよい社会につながっていく実りのあるものになると期待しています。

もう一点、本日のご議論でもたびたび触れられましたが、経済的観点も大切な要素です。日本ではPETボトル詰めの飲料水は1リットル当たりでだいたい200円の価格で販売されています。一方、水道水は、その1,000分の1以下の価格で提供されています。東京の水道水は飲める水質の価値なのにもかかわらず、ウォシュレットにも、風呂にも、洗濯にも使っています。これは、本日の冒頭に申しました海外の視点でみると、大変ぜいたくな話です。生活用水に限らず、農業用水でも当てはまりますが、立米あたり幾らという価格の観点をしっかりと考えておかないと、説得性という点で社会実装が難しくなります。価値を示すためのサイエンスを大きな意味で考えて、それに向かって進めていかなければなりません。

最後となりますが、本日は大変有意義なご議論をいただきまして、重ねて感謝の意を申し上げます。

5 まとめ

本ワークショップでは、水利用リスクをどのようにとらえるべきかといった本質的な議論から、社会実装に向けてどのような研究開発や取り組みを進めるべきかといった実践的な議論までを行った。環境や社会の変化が水利用リスクに与える様々な影響の把握、また、新たな研究や技術開発によって可能になってきた水利用リスクの管理手法などの最新情報を把握し、考察を深めた。

日本が世界の中で取り組むべき、水利用リスクにかかわる課題として、SDGs 目標 6「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」が設定され、未だ満たされていない水の課題に対してマルチステークホルダー協働での取り組みが促されている。このことについて、有識者から国内、海外での社会実装に関わる様々な先行事例や知見、経験などが共有された。水利用リスクに関しては、古典的な一方通行コミュニケーション（研究者から住民等ステークホルダーへの知識提供）ではなく、相互のコミュニケーション（両者が対話により、互いに学びをもつ）の関係構築が基本的に重要であるという共通認識を得た。既存の短期支援制度における短期目標等では、課題設定が達成可能な範囲に拘束され、協働の枠組み形成から始めることが難しい。そのため、SDGs のような理想像の目標に対して、一歩ずつでも近づけていく社会実装に関わる中長期的な時間軸の研究開発支援策が求められる。

水循環システムにおいて、世界的な淡水資源の不足は、地下水の枯渇化を招いていくことが強調された。持続可能な水利用リスクは各国の地域社会、地域経済で閉じず、食料生産などに用いる水である「Virtual Water（仮想水）」を介して多国間、多地域間にまたがっている。食料輸入率の高い日本は強く影響を受けるという隠された問題構造が特に強く印象付けられた。日本では直接的な地下水利用が少ないため、地下水の水利用リスクの課題認識が高くない。しかし、世界の食料供給には多くの地下水が利用されており、持続可能な開発には世界の地下水利用リスクをはじめとした、包摂的な課題解決策が必要となる。

安全で安定した水利用のためには、水源と利用用途とに対応した適切な水処理プロセスシステムが重要となる。水質と水量の安全性、安定性を確保するための水処理では、ライフサイクルでのコストを踏まえて、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できない地域が存在する。人口集中地域と比べて、あまり顧みられていない過疎地域の人々の水利用リスクを低減するためには、分散型技術による解決策が期待される。同様に、水処理のための材料研究などを行うにあたって全体システムの中から、持続的な社会実装の課題解決策からブレイクダウンした要素を導き出すことが求められる。さらに技術が持続的に根付くためには、適切な技術に加えて、資金（ファイナンス）や制度、現地の地域でのビジネスモデルの確立などが必要となる。

農業就業人口減少、高齢化という社会構造の変化により、農業用水の ICT 支援という需要が生まれてきている。このような社会構造変化の問題は農村が都市に先行して深刻化している。水利用の量の観点では、多くの水を必要とする灌漑用水の節水効果も同時に解決が期待される。ICT 技術、AI 技術等の進展により、融合技術の開発なども進められる素地が整っている。一方、見える化技術の進展によって、多様なステークホルダーの調整といった課題も新たに生まれ、先行

的に見定める必要がある。

水利用リスクを低減、管理するための研究開発は社会、経済と極めて距離の近い領域である。今回のワークショップでは複数の良好な事例が示されたが、先端的な研究を行いながら、ステークホルダーとの協働によって社会や経済の制約条件も乗り越えて、社会実装を目指す取り組みは、たいへん挑戦的な取り組みである。しかしながら、ますます水利用リスクが高まっていく社会や環境の変化を踏まえると、このような取り組みを後押しする、増やしていくための支援施策は世界の視点、将来の視点からみても望ましいといえる。

環境や社会の変化に対応した多様な水利用リスクを低減、管理するための、包摂的なイノベーションの壁の高さは再確認されたが、既存観念の枠に収まらない次世代型の取り組みが生み出されつつあり、その重要性の認識が高められた。ぜひ次世代型のムーブメントとして良い流れを広げ、形成していきたい。

付録1 プログラム

(敬称略)

13:00-13:20	開会挨拶 趣旨説明	佐藤順一 (JST-CRDS 上席フェロー) 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 総合討論	山村寛 (中央大学 准教授) 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)

付録2 ワークショップ参加者リスト

(敬称略)

【発表者】(五十音順)

小熊 久美子	東京大学 大学院工学系研究科 准教授/JST-CRDS 特任フェロー
田中 宏明	京都大学 大学院工学研究科附属流域圏総合環境質研究センター 教授
土井 達也	信州大学 学術研究・産学官連携推進機構 准教授
友正 達美	農研機構 農村工学研究部門 水田整備ユニット長
村上 道夫	福島県立医科大学 医学部 准教授
山村 寛	中央大学 理工学部 准教授
和田 義英	IIASA 水資源プログラム長

【コメンテーター】

大垣 眞一郎	東京大学 名誉教授
古米 弘明	東京大学 大学院工学系研究科附属水環境工学研究センター 教授

【JST-CRDS 水利用リスクチーム】

佐藤 順一	上席フェロー (環境・エネルギーユニット)
松村 郷史	フェロー/水利用リスクチームリーダー (環境・エネルギーユニット)
大平 竜也	フェロー (環境・エネルギーユニット)
中村 亮二	ユニットリーダー/フェロー (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)
佐々木 弥生	JST 情報基盤事業部 主査
松本 麻奈美	JST 未来創造研究開発推進部 主査

【JST-CRDS】

藤山 知彦	上席フェロー
岩瀬 公一	上席フェロー (科学技術イノベーション政策ユニット)
酒巻 哲朗	上席フェロー (科学技術イノベーション政策ユニット/海外動向ユニット)
尾山 宏次	フェロー (環境・エネルギーユニット)
長谷川 景子	フェロー (環境・エネルギーユニット)
吉田 修一郎	特任フェロー (環境・エネルギーユニット) / 東京大学 准教授

【JST】

金子 昌史	イノベーション拠点推進部 ビジヨナリーリーダー補佐
川居 龍一郎	国際部 主任調査員
川邊 隆	国際部 主任調査員

田中 春彦	国際部 主任調査員
片山 淳子	国際部 調査員
戸瀬 浩仁	挑戦的研究開発プログラム部 主査
阿部 仁	挑戦的研究開発プログラム部 係員
小林 恵	プログラム戦略推進部 主査

【JSPS（日本学術振興会）】

清水 美和	国際事業部 専門調査役
濱田 陸太郎	国際事業部 研究協力第一課 課長
稲垣 美実	国際事業部 研究協力第一課 国際協力員

【企業有識者】

松原 康一	(株) 日水コン 海外本部 海外技術統括部 技術第三部担当課長
高野 之郎	(株) 日水コン 海外本部 海外営業統括部

■ワークショップ報告書 編纂メンバー■

CRDS 水利用リスクプロポーザル検討チーム

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)
チームリーダー：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)
松本 麻奈美	主査	(JST 未来創造研究開発推進部)
佐々木 弥生	主査	(JST 情報基盤事業部)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いいたします。

CRDS-FY2019-WR-04

科学技術未来戦略ワークショップ報告書

環境や社会の変化に伴う 水利用リスクの低減と管理

令和元年 8 月 19 日（月）開催

令和 2 年 2 月 February 2020

ISBN 978-4-88890-661-6

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
環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit,

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.

