

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

国際戦略編

世界の水需給評価

平成 30 年 12 月

“Global Water Supply-Demand Assessment”

Strategy for International affairs

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

国立研究開発法人科学技術振興機構
低炭素社会戦略センター

LCS-FY2018-PP-02

概要

地球規模課題のひとつとして、水需給の持続可能性についての関心が集まっている。本提案書では、地球環境統合評価モデルとリンクした水資源需給のマクロバランスの予備的評価により、食糧供給制約の可能性を示した。また、エネルギー供給のための効率的な水利用、および水供給における効率的エネルギー利用などについての水・エネルギーネクサス問題に関して、文献調査によって論点を整理し、水需給とエネルギーの関係を含めた持続可能性について課題を整理した。最後に、水・エネルギーネクサス問題解決への支援、および各種のストレスに強靱な水システムの基盤整備についての政策提言を行った。

Summary

Sustainability on water supply and demand issues attracts attention as one of global scale issues. In this proposal document, the macroscopic balance of water supply and demand with the linkage of an integrated assessment model, GRAPE (Global Relationship Assessment to Protect Environment) is preliminary assessed, and the possibility of a food supply constraint is indicated. A literature survey on the water-energy nexus, such as efficient water utilization for energy supply and efficient energy utilization for water supply is conducted to obtain discussion points and possible solutions regarding sustainability, including the relationship between water supply and energy. Political countermeasures are proposed to assist the resolution of water-energy nexus issues, as well as to improve the resiliency of the water system foundation to various kinds of stresses.

目次

概要

1. マクロバランスからみた世界水需給	1
1.1 世界水需給モデルの全体表現	1
1.2 水需給モデルの全体表現	2
1.3 社会経済シナリオと SSP	2
1.4 気候変動シナリオと RCP	3
1.5 試算ケース	3
2. 試算結果	3
3. エネルギーと水利用	6
4. 持続可能性と水利用	7
5. まとめ	8
6. 政策立案のための提案	8
参考文献	8

1. マクロバランスからみた世界水需給

1.1 世界水需給モデルの全体表現

長期的な水資源需給を明示的に扱うため、水資源評価の簡易モジュールを地球環境統合評価モデル¹⁾ GRAPE (Global Relationship Assessment to Protect the Environment) [1]に組み込んで評価を行った。世界地域分割は、カナダ、アメリカ、西欧、日本、オセアニア、中国、東南アジア、インド、中東・北アフリカ、サブサハラアフリカ、ブラジル、その他中南米、中欧、東欧、ロシアの 15 地域である。

モデルの水需給モジュールでは、図 1 に示すように、地域降水量から、農業用、生活用、産業用に至る水需要に至るまでのマクロフローを表現した。このように、水資源需給の脆弱性は、気候変動による水供給ポテンシャル変化、経済成長や人口増加によって増大する水需要の両方によって影響を受ける。生活用と産業用の需要は、GDP と人口の関数として表現されている。ベース年の 2000 年の需要については、国連食糧農業機関 (FAO) の水関係統計である AQUASTAT[2]を参考としている。その後の時点については、農業生産、人口および GDP の増減に応じて、水需要が変化する構造とした。ある地域の降水は、表層水として河川水または地下水として利用できる分 (Blue Water) と、土壌に吸収され植物に吸収されると考えられている分 (Green Water) に分類される。実際には化石地下水も用いられているが、枯渇の問題があるため、分析範囲から除いた。

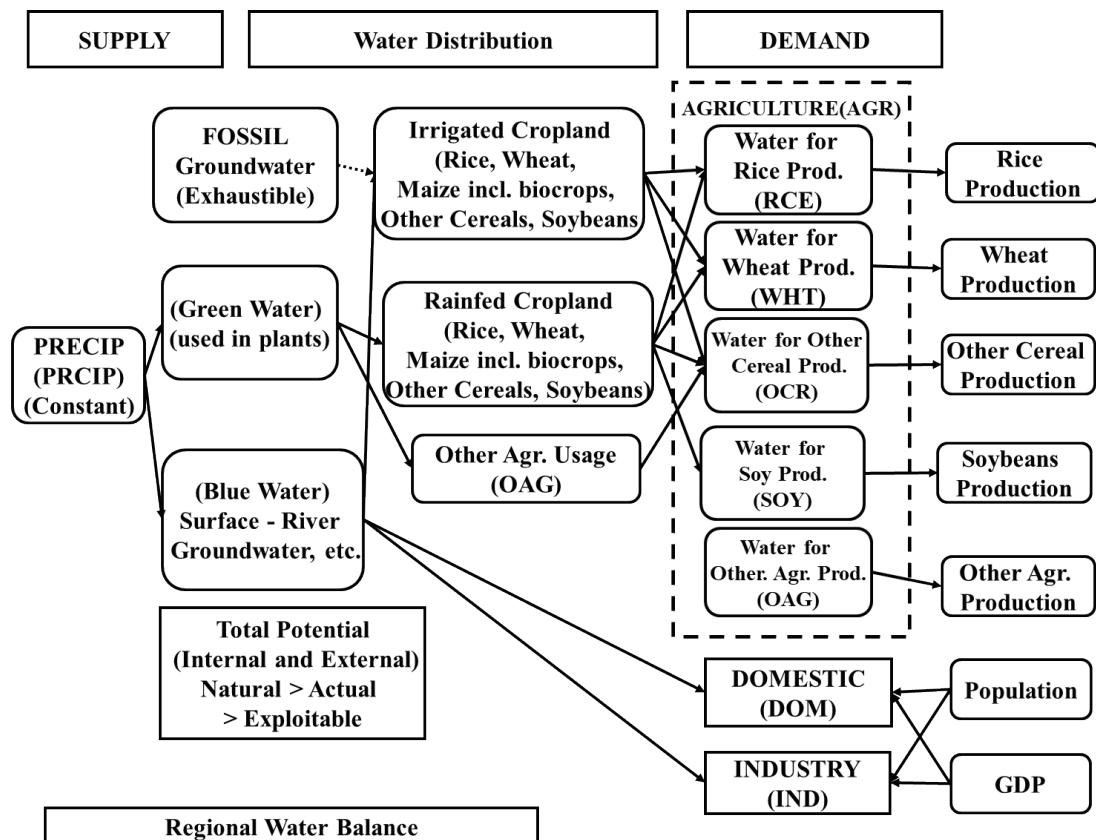


図 1 統合評価 GRAPE モデルの水需給フロー

¹⁾ 気候変動、エネルギー、土地利用、経済などの世界超長期における関連を評価するために開発された数理分析モデル。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の報告書などでも、その試算結果が紹介されている。

1.2 水需給モデルの全体表現

農業用水供給は穀物用天水供給分、穀物用灌漑供給分、その他農業用利用に分割し、灌漑水は暫定的に穀物に供給されるとした。想定した穀物は、コメ、ムギ、トウモロコシ、ダイズ、その他穀物である。生産量あたりに必要な水量（天水、灌漑水）の合計で、コメ 4,500m³/ton、ムギ 1,000m³/ton、その他の穀物 1,500m³/ton である。地域降水量の想定は中東・北アフリカ地域が約 150mm/yr と他の地域と比較して大幅に小さく、一方でブラジル、中南米、東南アジア、日本のそれが 1,000mm/yr を超えているので、食糧生産の可能性に対して水供給が大きな影響を与えていることが表現されている。

1.3 社会経済シナリオと SSP

将来の水需給の不確実性を見るため、社会経済軸と、気候変動軸の 2 次元について、感度分析を行った。社会経済軸として採用したのは、統合評価モデルコミュニティで幅広く用いられている共通社会経済経路（SSP; Shared Socioeconomic Pathways）で採用されている人口および GDP の想定である[3]。

SSP は SSP1 から SSP5 という 5 種類の 2100 年までの代表的な社会経済シナリオで構成されている。SSP2 が最も中庸なシナリオとされ、緩和策と適応策の難易度によって、その他のシナリオが配置されている。両者の対策が最も難しいとされるのは、技術進展が低く、人口高位、経済成長が低い SSP3 であり、その逆に両者の対策について最も難易度が低いとされるのは、技術進展高、人口低位、経済高成長である SSP1 である。

人口や GDP との関連は、水需給に大きな影響を与えるパラメータである。生活用や産業用の水需要、および食糧需要は一人当たり GDP および人口の関数を想定しているためである。食糧需要は、カロリーとタンパク質の摂取に分類してモデル化しており、人口に一人当たり GDP の対数を乗じた定式化を行い、直近年の片対数回帰分析によって、地域差を表現するとともに、将来の人口や GDP の変動にも対応するものとしている。一人当たり食糧需要は先進国ではほぼ飽和しているが、サブサハラアフリカなどの後発途上国では、伸びが推定されている。

世界人口は、2050 年の SSP1、2 および 3 それぞれについて約 85 億人、約 92 億人および約 99 億人となっている。2100 年では SSP1、2 および 3 について、約 69 億人、約 90 億人、約 127 億人としている。特に今世紀後半の SSP3 では、人口の水需給に与えるストレスが大きく、一方で SSP1 では、世界人口が減少に転じることから、人口圧力は相対的に低減されている

世界の基準 GDP でみると、2010 年時点で 63 兆ドル（2010 年実質値、以下同）であったものが、2050 年では SSP1、2 および 3 それぞれについて約 219 兆ドル、約 182 兆ドルおよび約 142 兆ドルとなっている。2100 年では SSP1、2 および 3 について、約 415 兆ドル、約 392 兆ドル、約 201 兆ドルとしている。なお、所得の向上による水需要増加は、高所得になるほど飽和傾向が強いことを、2010 年の実績値をベースとしてモデル化している。そのため、水需給へのストレスという意味では、一定の水準以上の経済レベルにある地域については、GDP よりも人口の方がパラメータとして影響が大きい。

1.4 気候変動シナリオと RCP

気候変動軸として採用したのは、IPCC 報告書でも採用されている、代表濃度経路シナリオ (RCP; Representative Concentration Pathways) である[4]。長期的な放射強制力²⁾のシナリオに対応して、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 および RCP8.5 の4種類のシナリオがある。

感度分析の対象としては、放射強制力に関して制約を設けない Baseline に加え、パリ協定の2°C 目標にほぼ対応する RCP2.6、および RCP4.5 と RCP6.0 の3種類の制約を加えたシナリオを試算した。なお、RCP シナリオが違えば、降水量、CO₂ 濃度上昇による肥沃化効果³⁾、温度等の変化し穀物収率も変化するが、その点もシナリオに内包されている。

1.5 試算ケース

試算ケースを整理すると表1のようになる。気候変動に制約を設けない Baseline シナリオでは社会経済シナリオの差異を見るため、SSP1、2、3の全てを試算した。また、最も中庸な社会経済シナリオである SSP2 に対しては、気候変動の影響をみるため、Baseline に加えて、RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 の3種類の試算を行っている。

表1 試算ケース

社会経済シナリオ 気候変動シナリオ	SSP1	SSP2	SSP3
Baseline	○	○	○
RCP 2.6		○	
RCP 4.5		○	
RCP 6.0		○	

(○が試算ケース)

2. 試算結果

気候シナリオ RCP2.6 と社会経済シナリオ SSP2 の組み合わせの試算結果例を図2に示す。他のケースでも同様であるが、農業、生活、産業と分類した場合、現在の水需要のシェアが最も大きいのは、農業用需要であるが、将来は人口増加や経済成長によって、増加が想定される。なお、農業用水需要は表層水による灌漑用水であり、天水供給は含まない。

²⁾ 産業革命時以降の温室効果ガス濃度上昇などにもなう放射エネルギー収支の変化量。単位は太陽定数と同じ、W/m²である。

³⁾ CO₂ 濃度上昇に伴い、植物成長が従来と比較して促進されること。

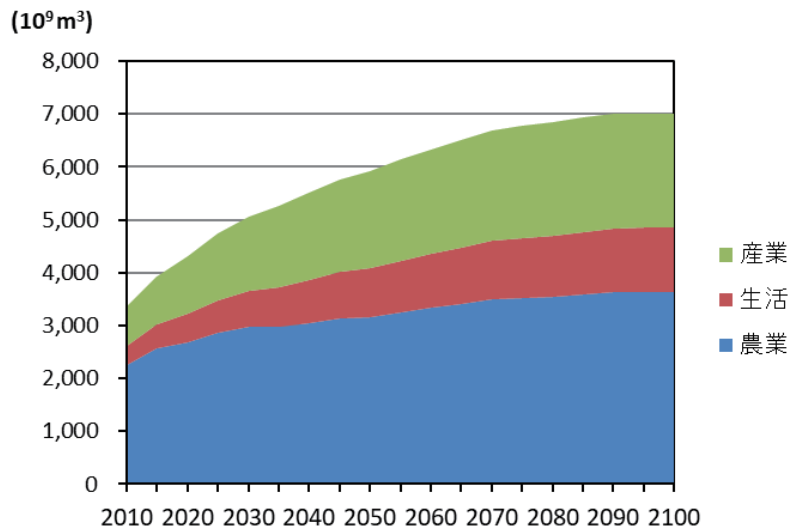


図2 SSP2 RCP2.6 世界全体での取水量

ケース別の試算結果を、全体需要についてまとめたものを図3に示す。SSPが同じ場合は、人口シナリオとGDPシナリオが一致するので、Baselineにおける生活用と産業用の取水量は同一となり、農業取水需要の差が全体の差となって現れる。

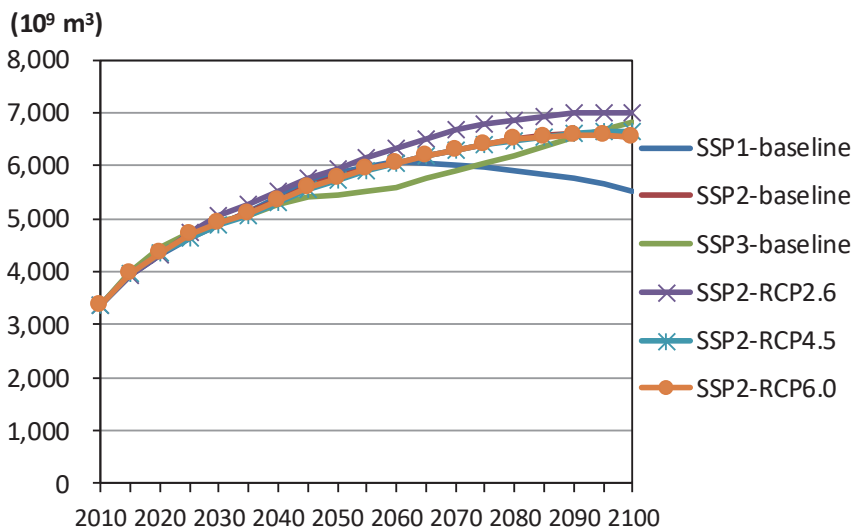


図3 世界全体での取水量 (合計)

農業水需要を図4に示す。2030年にRCP2.6 SSP2の需要が高まるのは、CO₂肥沃化効果などが他のシナリオより低いためである。長期的には一人あたり所得の関数である一人あたり食糧需要の飽和傾向が強まるため、Baseline ケース間の比較では、2100年で人口がSSP1の2倍弱となるSSP3 ケースの水需要が高まり、世界の地域によっては農業生産用の水資源が逼迫する。なお、降水量やCO₂濃度上昇に伴う肥沃化効果が含まれているため、RCP4.5やRCP6.0ではRCP2.6よりも穀物収量が増加し、結果的にRCP2.6シナリオよりも農業取水量が減少する結果となっている。

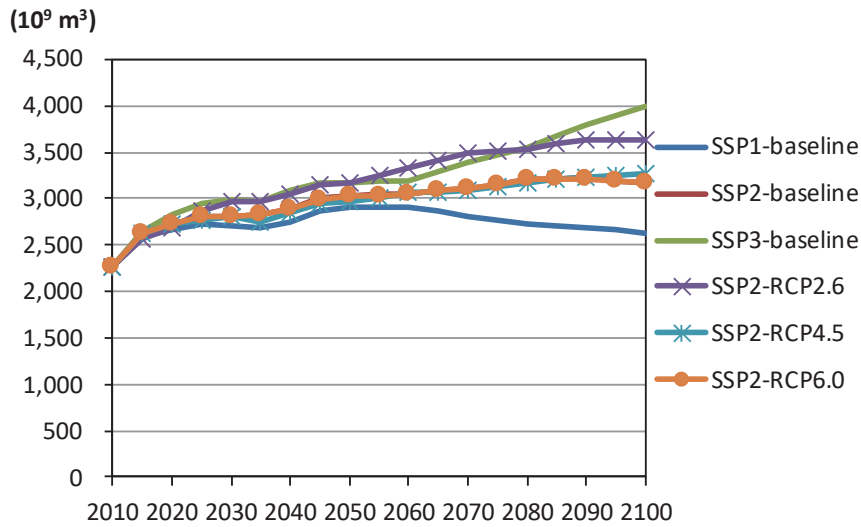


図4 世界全体での取水量（農業用）

生活用水、産業用水の需要を図5、図6にそれぞれ示す。SSP1では経済成長が他のSSPシナリオより大きいいため、今世紀前半では人口が中庸な成長であるSSP2と同程度の水需要となり、今世紀後半には人口減少のため、需要自体が低下していく。SSP3は他のSSPシナリオと比較してGDP成長が相対的に低いため、水需要は三つのSSPシナリオの中で最も低位となった。なお、前述のとおり、分析では需要関数はGDPおよび人口のみをパラメータとしたため、RCP間の違いは表れない。実際には、気候変動による需要変動要因も需要の違いとして考慮すべきであるが、今後の課題とする。

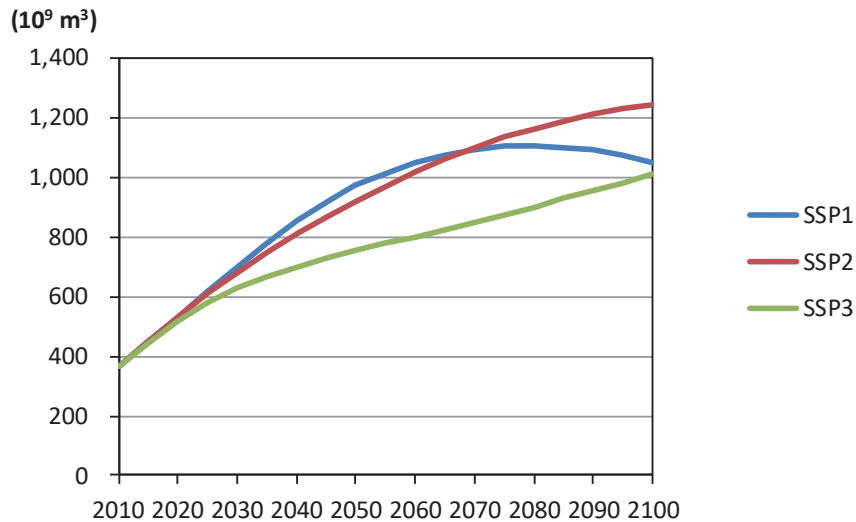


図5 世界全体での取水量（生活用）

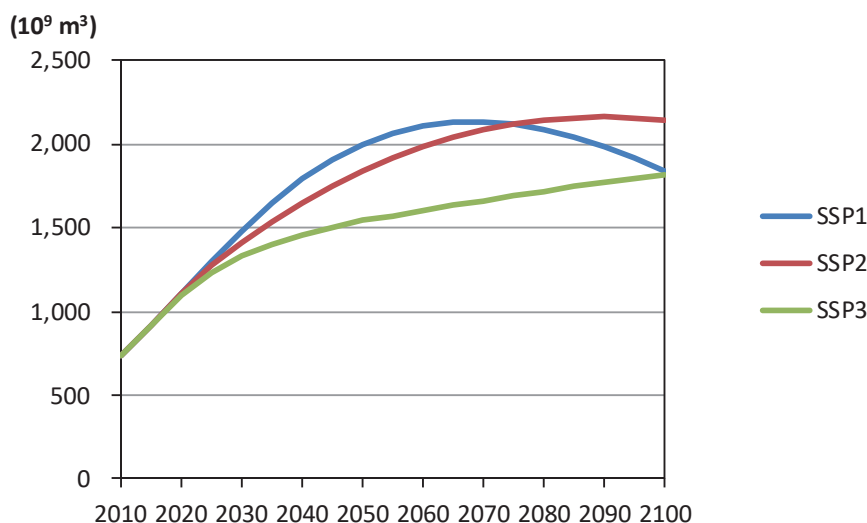


図6 世界全体での取水量（産業用）

3. エネルギーと水利用

エネルギーと水資源の関係についても注目が集まっている。乾燥地域では水力、火力および原子力発電用の水資源の逼迫、火力および原子力発電用冷却水の温度上昇に伴う発電効率の低下などが危惧されている。また、バイオマス資源は、燃料や発電における低炭素原料として期待されているが、それ自体が水を利用して成長するものであり、水資源の多寡はその供給ポテンシャルに大きな影響を与える。

国際エネルギー機関（IEA）では、World Energy Outlook 2016[5]で水・エネルギーネクサス問題の特集し、エネルギー供給における水利用（Water for energy）、上水供給および下水処理を含む水供給システムにおけるエネルギー利用（Energy for water）の両方に言及している。また、花崎[6]は、水文学と気候変動の視点から、水・エネルギーネクサス問題と最近の研究動向を議論している。

Water for energy では、表2に示すように、発電および一次エネルギー資源生産に関するものが中心である。水力発電に関しては、降水量の変化や、雪氷面積の縮小に伴う発電量の変化について議論しており、地域差が大変大きい、世界全体で見ると多雨と小雨のばらつきはあるものの、世界全体では効果がほぼ相殺されるとする研究が紹介されている。また、火力発電や原子力発電に関しては、海水を冷却に用いておらず、河川水を用いている多くの国で、冷却水温が上昇し、排水温度の制約から発電出力が低下したり、発電効率が下がったりする影響を指摘している。冷却塔型の場合は蒸発量が増加する。なお、日本では大型の火力発電および原子力発電のほとんどが海岸に立地し、海水から冷却水を造水しているため、海外で見られるような淡水資源への影響は顕在化していない。

それ以外にも、太陽熱発電やバイオ燃料製造といった再生可能エネルギーからのエネルギー供給、および化石燃料生産による水利用の増加の可能性が指摘されている。

米国エネルギー省の進める革新技術開発プログラム ARPA-E では、発電部門の対策として、水消費の少ない冷却システムの開発を目指して、ARID（Advanced Research In Dry cooling）プログラム[7]を立ち上げ、水節約型システム、乾式システムを含む14のプロジェクトを展開し、開発を進めている。その方式別内訳は、空冷型熱交換器（3プロジェクト、以下数字のみ）、吸収式冷却（4）、放射冷却および冷熱蓄熱（3）、排ガス中水蒸気回収および冷熱蓄熱（2）、空冷復水器

と冷熱蓄熱の組み合わせ（1）となっている。通常の場合、これらのシステムを組み合わせの場合、従来型システムと比較して設備が大型になり発電効率も低下するが、技術開発によって低コストで節水型のシステムを実現するとしている。

表 2 エネルギー供給の水利用および課題の例

種 類	課 題
水力発電	・ 河川流量の変化に伴う発電量の変化
火力発電（河川水）（貫流、冷却塔）	・ 水温上昇に伴う出力低下 または発電効率低下、蒸発量の増加 ・ 海水利用の場合は影響なし
原子力発電	・ 同上
地熱発電	・ 同上
太陽熱発電	・ 潜在需要の大幅増加に伴う水消費増加
化石燃料生産	・ 非在来資源の生産に伴う水消費増加
バイオ燃料製造	・ 潜在需要の大幅増加に伴う水消費増加

(World Energy Outlook 2016 (IEA) [5]、および花崎[6]をもとに作成)

IEA[5]では、2014年における世界の電力消費において、水利用システムの占める割合が全体の約4%に達するとしている。表3に示すEnergy for water課題では、このエネルギー消費をどう減らしていくかが課題である。例えば、水資源が圧倒的に不足している中東・北アフリカ地域では、海水脱塩によって水を供給しているが、その技術は、逆浸透膜と蒸留によっている。蒸留法は大量の燃料を燃焼させて水を得るものであるが、逆浸透膜法についてはほぼ電力のみで造水が可能である。また、システム全体でのエネルギー利用効率を上げるため、漏水対策が重要であるとしている。

表 3 水利用システムのエネルギー利用および課題の例

種 類	課 題
取水（表層水、地下水）	・ 地下水くみ上げの電力消費
脱塩（膜、蒸留）	・ 蒸留における燃料消費の多さ
配水	・ 漏水による追加的エネルギー消費
廃水処理	・ 不完全な下水処理により環境汚染

(World Energy Outlook 2016 (IEA) [5]をもとに作成)

4. 持続可能性と水利用

国連の持続可能な開発目標（SDGs）[8]では、目標 6 において、全ての人に安全な水へのアクセスを確保すべきであり、2050年までに4人に1人以上が慢性的な水不足の影響を受ける影響が高いとしており、森林、山地、湿原、河川など水源に関する生態系を保護または回復し、水の利用効率を改善し、開発途上地域の水処理技術を支援するための国際協力も必要としている。その他、目標 2（飢餓）および目標 15（陸上資源）などでも、水に関する間接的事項について行動目標と指標を公開している。

5. まとめ

地球規模の課題となりうる水資源供給のマクロバランスの予備的検討により、水資源が食糧供給の制約になりうる可能性が示唆された。また、水・エネルギーネクサス問題について整理した。

なお、水供給に関する経済分析は、今回の分析に含まれていない。一般的に言って、水供給料金は、農業用では安価で、その他の利用では相対的に高いとされているが、一般的にはその供給コストを回収できていないと言われている。また、現時点の分析は水資源のマクロ的な分配と利用に着目し、将来の潜在的な水ストレスの可能性を指摘するにとどまっている。

今後は、産業用水におけるエネルギー向け水利用を切り出すなど、統合評価モデルに対して水・エネルギーネクサスについての新しい評価要素を加えるほか、SDGs と水システムの直接的および間接的関係についてもさらに考察を深める予定である。

6. 政策立案のための提案

水供給可能量の世界地域差は大きく、かつ質の確保も求められている。質と量の両面での持続可能な水供給システムの確立に向けて、2つの面での国際支援に通ずる政策強化を提言する。

(1) ストレスに強靱な水供給システムの基盤整備

気候変動、自然災害などの自然要因、食糧、生活、産業における水需要からの社会経済要因を考慮し、ストレスに強靱であり、かつ質の高い水供給システムの確立を、特に脆弱性の高い世界の途上地域で進めるべきである。

(2) エネルギー・水ネクサス問題解決への支援

エネルギーの利用が水ストレスに与える影響も指摘されている。地球全体で見た場合の持続可能性を確保するために、水節約型のエネルギー需給システム、およびエネルギー節約型の水需給システムの両者の確立のため、国際協力を含めた政策支援強化が必須である。

参考文献

- [1] Kato et al, "A sustainable pathway of bioenergy with carbon capture and storage deployment", Energy Procedia, Vol.114, pp. 6115–6123, 2017.
- [2] FAO AQUASTAT, Food and Agriculture Organization, <http://www.fao.org/nr/water/aquastat>, 2018 (accessed May 22, 2018).
- [3] O'Neill et al., "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century", Global Environmental Change, Vol.42, pp. 169-180, 2017.
- [4] van Vuuren et al, "The representative concentration pathways: an overview", Climatic Change, Vol.109, No.5, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>, 2011.
- [5] World Energy Outlook 2016, International Energy Agency, 2016.
- [6] 花崎, 「水文学から見た水・エネルギー連環の主な要素と最近の研究の動向」, エネルギー・資源, Vol.39, No.4, pp. 238-241, 2018.
- [7] ARID (Advanced Research In Dry cooling), USDOE, <https://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/arid> (accessed July 23, 2018).
- [8] Sustainable Development Goals webpage, United Nations, <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs> (accessed May 22, 2018).

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

国際戦略編

世界の水需給評価

平成 30 年 12 月

“Global Water Supply-Demand Assessment”
Strategy for International affairs,
Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2018.12

国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 客員研究員 黒沢 厚志 (Atsushi KUROSAWA)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<http://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2018 JST/LCS

許可無く複写・複製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。
