

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H04153

研究課題名(和文) 循環型でしなやかな社会の構築を目指した自立型水再生循環・エネルギーシステム

研究課題名(英文) Autonomous water reclamation and energy system aiming for building recycling and resilient

研究代表者

中島 淳(Nakajima, Jun)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：00309098

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,930,000円

研究成果の概要(和文)：東南アジアなど途上国の地域に見合った自立型の水再生循環とエネルギーマネジメントの実装に寄与するため、膜分離と紫外線照射に重点を置いた水再生循環に係る技術開発、電気自動車を活用させたオフグリッドの省・創・蓄エネルギー技術の最適化および仮想発電所構築に係る技術開発、ライフサイクルアセスメントによるインパクト評価を中心とした本システム導入可能性とその評価手法についての検討を行った。水再生循環に適用可能な多様な技術開発、および住宅の電源安定化の実大実証試験に基づいたシミュレーションツールの開発に大きな進展が得られ、さらに自立型水循環・エネルギーマネジメントシステム導入の可能性とその評価手法が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

途上国などにおいて喫緊の課題である安全な水供給や健全な水循環システムの構築とエネルギーの安定供給のため、あるいは我が国を含めて災害時に孤立した地域での水とエネルギー供給などのために、新しい自立型の水・エネルギーシステムの社会実装の必要性と可能性を示した点は社会的意義が大きい。また、水とエネルギーのそれぞれの最先端技術を複合した総合的なシステムを構築する可能性について、個々の技術の基礎となる新たな知見、技術開発に資するシミュレーションツール開発、システムの評価手法などの多様な側面から示唆したことには、高い学術的意義を有するといえる。本研究成果は、持続可能な循環型レジリエンス社会の建設に貢献する。

研究成果の概要(英文)：To contribute to implementation of autonomous water reclamation-circulation and energy management suitable for the regions of developing countries such as Southeast Asia, development of the technologies related to water reclamation-circulation focusing on membrane separation and ultraviolet irradiation and the technologies for optimization of saving / creation / storage of energy in off-grid system focusing on application of electric vehicles as well as the construction of virtual power plants were studied. Feasibility of introducing this system and its evaluation method by life cycle assessment were also examined. A large progress in developing various technologies applicable to water reclamation-circulation and development of simulation-tools based on full-scale verification test of power supply stabilization of houses was acquired. The possibility of introducing autonomous water reclamation-circulation and energy management system with its evaluation method was also exhibited.

研究分野：環境工学

キーワード：自立型水・エネルギーシステム 水再生循環 省・創・蓄エネルギー 循環型社会 レジリエンス社会

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世界的な水の安定確保、省エネルギー技術、資源リサイクル技術の開発・普及・徹底が重要な課題となっている。また、気候変動による水資源の空間的・時間的な偏在化の拡大、資源や生活水準の格差拡大も重要な課題である。新興国や途上国においては、安全な水供給や健全な水循環システムの構築、エネルギーの安定供給は喫緊の課題である。東南アジアなど途上国では不安定な電力供給が原因となり、安定的な水供給や水処理ができない、衛生環境が維持できない等の問題もみられる。また、インフラが十分に整備されず、財源の問題からこのような状況を改善できない地域も多い。一方で、我が国は比較的水資源に恵まれているものの、東日本大震災のような自然災害も多く、災害時に孤立した村落地域での水やエネルギー供給が大きな課題である。

このような課題を解決するために、省・創・蓄エネルギー技術やピークシフトコントロール等の運転手法最適化の開発をすすめて、自立したエネルギーシステムを構築しながら水供給や水再生循環系に導入することによって、新しい自立型の水循環・エネルギーシステムを社会に実装することが可能である。また、途上国にこうした自立型のシステムを導入することで、従来型の大規模な配水管網や排水管整備と違って莫大な費用を要しないことから、インフラ整備の促進が期待できる。自立型の水再生循環・エネルギーマネジメントに関する研究開発と実装は、循環型でしなやかな社会の構築に貢献することが期待される。

水再生循環技術を一変させたものは膜分離と紫外線照射である。近年では膜の価格が下がっており、途上国においても導入が可能になり、逆浸透膜(RO)を用いることにより飲用可能な再生水を得ることが出来るようになった。紫外線については、消毒だけでなくオゾン等を併用した促進酸化処理(AOP)による難分解性有機物の分解や、水銀を用いないUV-LED等の開発、様々な波長の紫外線ランプの水処理への適用などが進展した。また、建築物においてはより一層の再生可能エネルギーの導入施策や新しいエネルギーマネジメントに係る技術の導入が図られており、個別の発電端を利用して電力システムを補助しようとする仮想発電所(VPP)が議論されている。一方、途上国では必ずしも安定電源が確保できない状況から、各国・地域それぞれに適合可能な創エネルギー技術や蓄電技術、また地域の文化に適合しやすい省エネルギー技術の必要性が認識され、小規模分散型の住宅や村落で適用できるオフグリッド技術開発に目が向けられている。

研究代表者および分担者はこれまでに、水再生循環と自立したエネルギーマネジメントに関する研究グループを形成し、実験棟を用いた共同の研究や、エネマネハウスプロジェクトでのネット・ゼロ・エネルギー・ハウス(ZEH)の提案を行ってきた。また、分散型排水処理、東南アジア諸国の生活雑排水の再生再利用の研究経験を有することから、これらの経験を基盤として本研究課題への取り組みが開始された。

### 2. 研究の目的

本研究では、東南アジアなど途上国の地域に見合った自立型の水再生循環とエネルギーマネジメントを実装するために、必要とされる水再生循環に係る技術開発、エネルギーマネジメントに係る技術開発、および自立型水循環・エネルギーシステムの導入可能性とその評価手法についての検討を行うこととした。水再生循環に係る技術としては、水再生と再利用に現在最も適した技術である膜分離と紫外線照射に重点を置いた。また、途上国での応用やエネルギー自立面の重要性からも省エネルギー技術の活用に配慮して、自然型浄化方法を用いた水再生についても可能な技術の検討を深めることとした。エネルギーマネジメントに係る技術としては、建築物の省エネルギー、創エネルギーに加えて、蓄エネルギーを加えた最適なシステム構築に重点を置き、とくに今後の普及が見込まれる電気自動車(EV)を活用させたオフグリッド技術開発に重点をおいた。そして建築物による仮想発電所(VPP)構築への道筋を展望することとした。こうした技術開発を自立型水循環・エネルギーシステムとして実装してゆくためには、建築物の存在する地域に見合ったシステムの検討が必要である。また、これらの技術とシステムそして政策の導入可能性と有効性の検討も重要である。さらにシステムの評価方法の確立が必要といえ、本研究ではライフサイクルアセスメント(LCA)によるインパクト評価の適用を検討することとした。

以上のことから、本研究では以下の3点を目的としている。

(1) 水再生循環に係る技術開発のために、膜や酸化処理を用いた効率的な水再生技術、紫外線を用いた飲用水および再生水の高品質化、自然型浄化方法を用いた水再生についての適用可能な技術とその課題を明らかにする。

(2) エネルギーマネジメントに係る技術開発のために、省・創エネルギー技術と蓄エネルギー技術の最適化および仮想発電所(VPP)構築のシナリオについて検討し、実装可能な技術とその課題を明らかにする。

(3) 地域に見合った自立型水循環・エネルギーシステムの導入可能性について検討するとともに、LCAの応用などその有効性の評価手法に関する知見を提供し、本システムの導入可能性とその課題を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 水再生循環に係る技術開発

膜や酸化処理を用いた効率的な水再生技術については、大学研究棟雑排水を対象として、生物処理(接触ろ床法)と精密膜(MF)分離を組合わせた装置を用いて2年間の連続処理実験を行い、水質特性、処理性能および再利用可能性を検討した。再利用用途拡大のため、この処理水と市販フミン酸を用いたバッチ式の微細気泡オゾン処理実験を行い、脱色および残存有機物の生分解性の向上を検討した。さらに、生物処理で残存する洗剤由来の直鎖アルキルベンゼンスルホン酸(LAS)代謝物のスルホフェニルカルボン酸(SPC)のオゾン処理による生分解性向上を検討した。

紫外線を用いた飲用水および再生水の高品質化については、様々な紫外線ランプを用いた消毒および有機物の分解と、紫外線を組合わせた効率的な促進酸化処理について多面的に検討した。照度が一定条件下での低圧水銀ランプ(254nm)とオゾンランプ(185nmおよび254nm)の効果を比較し、オゾンランプ185nm紫外線の太陽菌ファージMS2の不活化およびLAS分解の効果を検討した。また3波長(172nm、222nm、254nm)の紫外線光源を用いたLASの分解実験、254nm紫外線照射と過酸化水素の併用による促進酸化実験、222nm紫外線照射と過酸化水素併用によるLAS分解のモデル化を行った。次に、紫外線照射に係る性能評価を目的として、PCR法を用いて紫外線量を正確に測定できる手法を、Ampliconの違いによる紫外線感受性の差異から検討した。流入下水中の指標細菌に対し254nmの紫外線照射を行い、紫外線耐性を検討した。また、被災時における紫外線を用いた効果的な簡易処理について検討するために、流入下水を好気または嫌気条件下で静置後254nmの紫外線照射を行い、新環境基準と比較した。また、UV-LEDデバイス(265nm、280nm)の流入下水中大腸菌群や太陽菌の不活性化性能および光回復性についての低圧水銀ランプとの比較、紫外線の照射による効果的な藻類増殖抑制の波長、貯水槽内壁面での紫外線消毒の効果について検討した。

自然型浄化方法を用いた水再生技術の開発について、廃水から金属を除去する人工湿地法の開発のためのラボ実験を行った。東南アジアで一般的な水産物であるミスハマグリ(ミナモト)の廃棄貝殻を人工湿地のろ材として用い、抽水植物ガマを植栽した。亜鉛、カドミウム、銅、鉛、マンガンを含む模擬廃水を滞留時間2~7日の連続バッチ式で処理した。また、湿地で生育する代表的な植物の一つでバイオマス資源として有望なウキクサについて、バイオマス量を速やかに推定し栄養塩類の除去量を予測するため、葉面積を非破壊的に測定する画像解析方法を開発した。また、細菌と藻類を組合わせた水再生システムとして、散水ろ床型フォトバイオリクターに藻類-細菌系を構築し、対照系とした通常の散水ろ床法と比較した。

### (2) エネルギーマネジメントに係る技術開発

住宅の省エネルギー技術としては、建築における空調方式として、吹抜けなどの大空間における放射、対流方式や全館空調システムについて、実験およびシミュレーションを用いて省エネルギー性、快適性について評価を行った。建築空間の実際の物理現象を再現したうえでエネルギー性能を評価するために、空間をマクロに捉えるエネルギーシミュレーションに、気流性状を詳細に再現できる数値流体力学(CFD)を連成させる手法について検討した。

省・創エネルギー技術と蓄エネルギー技術の最適化のために、住宅の電源安定化の実大実証試験およびシミュレーションツールの整備を行った。創エネルギー技術としては太陽光発電(PV)を用い、蓄エネルギー技術として家庭用蓄電池(LiB)と固体酸化物形燃料電池(SOFC)さらには今後の急速な普及が見込まれる電気自動車(EV)との組合せを検討対象とした。そして、EVと据置型LiBの組合せによる住宅の電源安定化をめざし、V2H(車(Vehicle)から家(Home))システムを検討した。実大実証試験では模擬負荷をかけた実験を行い、家庭での電力自給について検討した。電力システムについては、連系した状態だけではなく、それぞれを系統から外した自立実験も行った。これらの実験結果にもとづき、様々な利用状況を模擬した仮電力需要を入力して、電力収支のシミュレーションができるツールを開発した。また、得られた電力収支結果を電力会社の電気料金メニューと参照させ、月毎および年間の電気料金の算出を検討した。

次に、仮想発電所(VPP)の導入シナリオを検討し、地域分散型エネルギーが成立できるシミュレーションツールのパラメータ設定について検討した。また、住宅のみならず中小規模のオフィスビルを想定し、V2Hの有無に対して電力収支と電気料金への影響を様々なシナリオでシミュレーションした。

### (3) 自立型水循環・エネルギーシステムの導入可能性とその評価

地域に見合った水循環・エネルギーシステムを検討するために、東南アジア途上国の水利用に関する知見として、水道の普及が不十分なインドネシア国バンドン市内のスラム地域を対象に、公共井戸や個人井戸の水質を調査するとともに、住民に対して水利用や水にかかる支払意思等に関するアンケート調査を行った。また、ベトナム国のハノイ市近郊地域の家庭用雨水利用施設の実態調査を行い、膜分離と紫外線照射装置の試験導入の効果を検討した。その結果をもとにエネルギー自立型雨水処理装置をベトナム国に試験設置する計画であったが、コロナ禍の影響で困難となり国内で実施することになった。大学キャンパス内の1施設の屋根(集水面積98m<sup>2</sup>)から雨天時に雨水を集水し、雨水タンク、膜ろ過装置、紫外線消毒装置、太陽光発電パネル、蓄電池から構成される雨水処理装置を導入し、水量や水質のモニタリングを行いながら、運転にかかるエネルギーを自然エネルギーでカバー出来る可能性について検討した。

他方、自立型システム導入が将来的に有効と考えられる地域として、ベトナム国北部カウ川流域(ハノイ市隣接地域)を選定し、水循環系の健全性を評価するとともに改善方法を分析した。健全性は、水需給バランス(WS)の推定に基づく過去15年間の水資源の量的分析と水質統合指標(WQI)や環境基準超過率を用いた近年の水環境の質的分析とを組合わせることによって、

総合的に評価した。

自立型水循環・エネルギーシステムの LCA によるインパクト評価の検討として、実験施設の無い日本の大学研究棟における雨水利用および再生水利用による環境負荷削減のポテンシャルを算定した。また、ベトナムの大規模な複合型高層ビル(敷地面積約 1 万 m<sup>3</sup>)に対して、雨水利用と再生水利用を想定した評価を行った。さらに比較的小規模の自立型水循環システムの構成要素となる浄化槽について、温室効果ガス、富栄養化、大気汚染等複数種類の環境負荷を考慮したタイプ別の評価を試みた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 水再生循環に係る技術開発

大学研究棟雑排水の平均 BOD は分流式下水道の流入水質と同等であり、窒素・リン濃度は低かった。使用人員当たりの BOD 負荷原単位は設計の際の参考値と比較して僅少であった。生物処理の BOD 平均除去率は 95%以上で、精密膜分離による処理でさらに除去率は向上した。他方、溶解塩分(電気伝導度)に変化はみられなかった。処理水の濁度、pH、BOD に関して、国内の再生水の基準値および米国 EPA の推奨値と比較したところ、生物処理水のみでは濁度で基準を満たすことができなかったが、精密膜分離との組合せで基準を満足し、多様な用途で効率的な再利用が可能であることが分かった。また、生物処理水を対象に生分解試験を行ったところ TOC 濃度が 3mg/L にまで減少したが淡黄色は残った。一方、微細気泡オゾン処理(注入率 10mg/L 程度)を行った処理水の場合は TOC 濃度が 1mg/L にまで低下し、フミン質様の難分解性有機物を含む処理水の生分解性を向上させることができた。フミン酸溶液を用いた実験では、注入率 80 mg/L のオゾン処理によって約 50%の TOC が除去され、BOD/TOC の増加と生分解性の向上が認められた。また、生物処理で残存する SPC はオゾン処理によって消失し、処理水の生分解性の向上が確認された。このように、微細気泡オゾン処理によって脱色と生分解性の向上が確認され、処理時間が長いほど効果が大きかったことから、再利用目的に対応した効率的な処理が可能と考えられた。

様々な紫外線ランプによる処理水の高品質化を検討した。消毒に関してはオゾンランプ 185nm の大腸菌ファージ不活化への寄与は小さいこと、オゾンランプ照射後に確認された溶存オゾンは不活化には影響しないこと、有機物分解に関しては 3 波長の中で 172nm が LAS の分解に最も効果的であること、254nm では過酸化水素添加で分解率が大きくなることなどが分かり、また 222 nm の紫外線ランプと過酸化水素併用における LAS 濃度変化のモデル化に成功した。さらにオゾンランプの 185nm 紫外線が LAS の分解に寄与していること、発生したオゾンの LAS 分解に対する影響は小さいことが分かった。紫外線照射に係る性能評価について、PCR 検出では塩基配列による紫外線感受性の差異が示唆され、PCR で 5log 程度まで検出可能であること、Amplicon が長くなるにつれて紫外線感受性が高くなることが確認された。紫外線耐性についての検討では、5 種の指標細菌に対する紫外線照射で 3log 不活化以後にテーリング現象が見られ、また指標細菌間での耐性に大きな差はみられなかった。さらに、流入下水に対する紫外線照射で新環境基準と現行河川類型 B の基準値を満たすこと、好気性条件下で静置した後に紫外線照射を行った方が効率的であることが分かった。また流入下水の UV-LED 照射消毒に関して、不活化効率のみを考慮した際には低圧水銀ランプ 254nm が優位だが、光回復を考慮した場合には UV-LED の 265nm でも同等の消毒効果を得られること、さらに藻類の増殖抑制の検討結果から紫外線照射による増殖が作用したこと、222nm が藻類の不活化に効果的な波長であること、貯水槽等のタンク内壁面では水中よりも消毒効率が高くなる示唆が得られたことなど、紫外線を用いた再生水の高品質化に貢献する多大な知見が得られた。

自然型浄化方法を用いた水再生技術については、貝殻を充填した人工湿地法は従来型の砂利充填よりも高い pH 中和能力を示し、亜鉛、カドミウム、銅、鉛、マンガンの除去率は良好であった。貝殻や砂利に蓄積された除去金属割合が、植物蓄積よりも大きかった。貝殻を充填した人工湿地では植物の根の伸長が良好で、金属硫化物の除去に貢献する硫酸還元細菌数が多かった。これらの結果から、東南アジアの水産廃棄物を再利用した人工湿地による金属除去が可能で、それによって水の再利用の可能性が広がると示唆された。ウキクサの乾燥重量は画像解析で測定した葉面積の一次関数で表され、アオウキクサ、ウキクサ、ミジンコウキクサでそれぞれ関係式が得られた。ウキクサのバイオマス量と窒素・リン除去量は葉面積変化と栄養塩類に対する収率係数の典型値から推定することができた。得られた結果から、再生水の水質浄化に加えてバイオマス生産量の算定も可能となる。細菌と藻類を組み合わせた水再生システムでは、滞留時間が長い条件において、藻類・細菌系が高い性能を示し硝化も進行した。藻類としては緑藻が優先しており、従属栄養細菌数も算定された。炭素源資化性の平均発色量(AWCD)と多様性を表す Shannon 指数は、滞留時間とともに増加がみられた。これらの結果から、省電力型の散水ろ床に光を照射して藻類・細菌系を構築し、多様な汚染物質の除去と水再生が可能であることが示された。

##### (2) エネルギーマネジメントに係る技術開発

住宅の省エネルギー技術として、全館空調システムは空調面積が増加するため増エネとなる場合があるが、太陽熱や夜間放射、夜間通風などの自然エネルギーを蓄熱材などに蓄熱し有効利用することで、室内環境の改善および省エネルギーになることを確認した。また、複数台の空調機を有する空間においては、対流や放射などの熱移動現象をそれぞれ詳細に検討する必要がある。複数台の空調機のエネルギー効率を非定常に再現するためのシミュレーション手法を提案した。

省・創エネルギー技術と蓄エネルギー技術の最適化について、住宅の電源安定化の実大実証試験結果をもとに、EVを含めた家庭での電力自給について電力収支の計算ができるシミュレーションツールを開発することができた。まずは電力料金に影響を与える要因を調査し、経済性に対する各パラメータの最適設定方針を定めた。そして電力収支と電力料金の变化傾向から、各パラメータの最適解を明らかにすることができた。また、基準ケースと比較したV2Hシステムの省エネ性能と節約量の把握および投資回収期間の推定を行った。こうして、開発したシミュレーションモデルを用いて、地域分散型エネルギーが成立できるパラメータ設定の検討が可能となった。

仮想発電所構築シナリオについては、自然任せのPV発電に加え、SOFCでは負荷を感知すると発電が始め定格運転となった。LiBは、PVが負担している以外の負荷をほぼすべて賄うことができた。PVの発電変化などに対してはV2Hの追従性が高く、V2H接続時の電源安定性が確認できた。とくに系統から独立した自立運転時には、V2H接続時にLiBの蓄電容量を効率よく消費し、長時間電源確保につなげることができた。オフィスへの通勤に太陽光による電力の「職場から住宅への送電」(夜間電力活用であればその反対)としてEVを活用することで、ピークシフトが達成でき、地域分散型エネルギーの適用範囲が広がることが分かった。LiBは本来の夜間充電をさせ昼間に給電すると設計より、夜間充電をさせず昼間の余剰電力を蓄える専用として使う方が、エネルギーの最大利用に対して効率がよく経済性もよいと考えられた。夜間にV2HからLiBに電力貯蔵するより、次の日の余剰電力を蓄えるため、LiBからV2Hに電力貯蔵する方が有利である。今回は、昼間電力が安い料金プランの検討は行っていないが、将来の昼間電力を下げる政策にも適合すると考えられる。以上のように、省・創エネルギー技術と蓄エネルギー技術の最適化のためのシミュレーションツールの開発に成功し、またVPP導入の効果予測にも本ツールの応用が可能であることが示された。

### (3) 自立型水循環・エネルギーシステムの導入可能性とその評価

インドネシア国バンドン市内のスラム地域における生活用水源である水道公社、公共井戸、個人井戸、それぞれの割合を把握でき、また住民の収入や水質改善への支払意思額を明らかにした。複数の公共井戸や個人井戸から大腸菌・大腸菌群が検出され、硝酸態窒素や電気伝導度で高い値もみられたが、これらは下水の影響と考えられた。雨水利用マニュアルのウェブ調査では、途上国では雨水の飲用が先進国よりも多いが、消毒に関する記述は不十分であった。ベトナム国ハノイ市近郊地域住民は雨水の飲用利用を好んでおり、収集雨水についてRO膜ろ過を用いた家庭用浄水器と紫外線照射装置を使用して水質変化を調査したところ、貯蔵雨水中の大腸菌群と大腸菌が十分に減少し装置の適用可能性が明らかになった。大学キャンパス内に導入されたエネルギー自立型雨水処理装置については、雨水原水に大腸菌群は検出されたが大腸菌はほとんど検出されなかった。膜ろ過および紫外線消毒は効果的であり、大腸菌群は不検出となった。処理にかかる電力量と水量の実測データを用いて簡易なシミュレーションを行い、可能な代替率や年単位の雨水利用可能水量などを計算した。また、電力量と発電・蓄電容量から、導入した設備で十分にエネルギー自立した雨水処理ができるものと考えられた。

ベトナム国カウ川の分析結果より、乾季ではいずれの年においても流域全体で高ストレス状態( $WS>0.4$ )、雨季では最下流で中ストレス状態( $WS>0.2$ )となるが、年変動も大きいことが分かった。一方、水質統合指標(WQI)は本川流下過程で悪化し、2020-2021年の調査結果ではWQIが雨季・最下流地点で許容レベルを超過(Polluted Level)、雨季・乾季いずれも流入支川の一部分で許容レベルを大きく超過(Very Polluted Level)している実態であった。水質各項目(2017-2019年の75%値)についてはBODや $NH_4$ など5項目で超過の状態、季節的には雨季の面源流出の影響が、地域的には下流域ほど基準超過率が大きく生活系・畜産系など汚染源の影響が、それぞれ確認された。現状では水循環系の健全性は低く、とくに水環境汚染の対策が優先課題とされる結果を得たが、総合評価の結果として、水資源の利用負荷が水環境汚染の原因と連動しているとも推察され、用途目的別の水再生・循環利用や雨水など新水源の直接利用は、水資源の量的・質的問題の同時解決に有効であることが示された。

LCAによる評価の検討では、大学研究棟の雨水利用および再生水利用によって、最大で8割近くの上水使用量が削減され自立型に近い水循環が成立可能であること、32%の温室効果ガスが削減可能であること等が分かった。ベトナムの複合型高層ビルの事例では、1000 $m^3$ 規模の雨水貯留では10%、100 $m^3$ 規模の再生水利用では8%の温室効果ガス削減につながると推計された。浄化槽のタイプ別評価では、環境負荷を単一指標(LIME2)により統合化した結果、リン除去型浄化槽が最も環境負荷が低い一方、温室効果ガス削減の観点からはコンパクトタイプの浄化槽などがより優位であった。この環境負荷のトレードオフ関係から、立地ごとの水環境に応じた浄化槽タイプの選択が重要であることが示唆された。このように、LCA評価手法が水再生および自立型水循環・エネルギーシステム導入の評価手法として十分に有効であることが明らかとなった。

最後に、アメリカ合衆国ウィスコンシン州に建設予定である「Cold War Veterans Memorial」の設計案の国際デザインコンペティションに、本研究分担者がプロジェクトの成果を反映させた自立型自然サーキュレーション建築の創造「Eternal Circulation」を共同提案し、ファイナリスト(ベスト4)に選出された。自立型水循環・エネルギーシステム実装のニーズが、世界的にますます高まっていることが示された評価結果といえる。本研究において、コロナ禍の影響でエネルギー自立型雨水処理装置の国内設置を余儀なくされたことは残念であった。近い将来に東南アジアでの実施が可能となり、新たな成果が得られることを期待している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 27件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Nguyen Thuong Thi, Soda Satoshi, Kanayama Akihiro, Hamai Takaya	4. 巻 13
2. 論文標題 Effects of Cattails and Hydraulic Loading on Heavy Metal Removal from Closed Mine Drainage by Pilot-Scale Constructed Wetlands	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 1937 ~ 1937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w13141937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 原 拓也、川本 邦男、 福田 和宏、中川 功、NGUYEN Thi Thuong、惣田 訓	4. 巻 63(6)
2. 論文標題 石灰石・木炭を充填したラボスケール人工湿地による酸性坑廃水の中和・金属処理の基礎検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 用水と廃水	6. 最初と最後の頁 437 ~ 443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 DINH THI TO UYEN, SEMBA SHIORI, NAKAJIMA JUN, SODA SATOSHI	4. 巻 58
2. 論文標題 Image Analysis for Estimation of Biomass and Nutrient Removal of Duckweed Lemna aoukikusa, Spirodela polyrhiza, and Wolffia globosa in Lab-Scale Cultivation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Water Treatment Biology	6. 最初と最後の頁 35 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2521/jswtb.58.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 清水聡行、惣田訓、芳野浩志、中島淳	4. 巻 31(3)
2. 論文標題 大学研究棟雑排水を対象とした浄化槽処理水のオゾン処理による脱色と残存有機物の生分解性向上	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 浄化槽研究	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 惣田訓、清水聡行、芳野浩志、中島淳	4. 巻 58(2)
2. 論文標題 微細気泡オゾン処理-生物処理によるフミン酸試薬の3次元励起-蛍光スペクトルの変化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本水処理生物学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Tatsuhiro, Ozaki Akihito, Lee Myonghyang	4. 巻 14
2. 論文標題 Optimal Air Conditioner Placement Using a Simple Thermal Environment Analysis Method for Continuous Large Spaces with Predominant Advection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 4663 ~ 4663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en14154663	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yamaguchi Yohei, Yoshikawa Naoki, Amano Koji, Hashimoto Seiji	4. 巻 13
2. 論文標題 Decomposition Analysis of Global Water Supply-Demand Balances Focusing on Food Production and Consumption	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 7586 ~ 7586
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su13147586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Pandey Aishwarya, Katam Keerthi, Joseph Prasanth, Soda Satoshi, Shimizu Toshiyuki, Bhattacharyya Debraj	4. 巻 231
2. 論文標題 Micropollutant Removal from Laundry Wastewater in Algal-Activated Sludge Systems: Microbial Studies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water, Air, & Soil Pollution	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11270-020-04749-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 SHIMIZU Toshiyuki、YAMADA Kiyoshi	4. 巻 76
2. 論文標題 ANALYSIS OF WATER USAGE BY WEB QUESTIONNAIRE SURVEY AND LONG TIME CHANGES OF WATER DEMAND STRUCTURE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)	6. 最初と最後の頁 11_355 ~ 11_364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.76.6_11_355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Dente Sebastien M. R.、Shimizu Toshiyuki、Wang Tao、Hashimoto Seiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Can Material and Energy Be Saved by Differentiating Water Quality Targets in the Water Purification Process?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 8730 ~ 8730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su12208730	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Sari Wulan Nurindah、Atsushi Ichiki、Toshiyuki Shimizu、Dewanti	4. 巻 1
2. 論文標題 The Implementation of Urban Drainage Maintenance to Reduce Inundation Risk	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Indonesia Sustainable Development Planning	6. 最初と最後の頁 241-257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.46456/jisdep.v1i13.77	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katam Keerthi、Tiwari Yashendra、Shimizu Toshiyuki、Soda Satoshi、Bhattacharyya Debraj	4. 巻 -
2. 論文標題 Start up of a trickling photobioreactor for the treatment of domestic wastewater	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Water Environment Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/wer.1554	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Dinh Thi To Uyen、Soda Satoshi、Nguyen Thi An Hang、Nakajima Jun、Cao The Ha	4. 巻 722
2. 論文標題 Nutrient removal by duckweed from anaerobically treated swine wastewater in lab-scale stabilization ponds in Vietnam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 137854 ~ 137854
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.137854	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 PRAMUGANI Ahsin、SODA Satoshi、ARGO Teti Armianti	4. 巻 8
2. 論文標題 CURRENT SITUATION OF BATIK WASTEWATER TREATMENT IN PEKALONGAN CITY, INDONESIA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 188 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/journalofjsce.8.1_188	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 SODA Satoshi、MINAMI Tetsuo	4. 巻 49
2. 論文標題 Water Quality Index Analysis of Water Pollution of Ha Long Bay, Vietnam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Conservation Engineering	6. 最初と最後の頁 209 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5956/jriet.49.209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nguyen T.A.H.、Ngo H.H.、Guo W.S.、Nguyen T.H.H.、Soda S.、Vu N.D.、Bui T.K.A.、Vo T.D.H.、Bui X.T.、Nguyen T.T.、Pham T.T.	4. 巻 312
2. 論文標題 White hard clam (Meretrix lyrata) shells media to improve phosphorus removal in lab-scale horizontal sub-surface flow constructed wetlands: Performance, removal pathways, and lifespan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bioresource Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biortech.2020.123602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen T.A.H., Ngo H.H., Guo W.S., Nguyen T.T., Vu N.D., Soda S., Nguyen T.H.H., Nguyen M.K., Tran T.V.H., Dang T.T., Nguyen V.H., Cao T.H.	4. 巻 741
2. 論文標題 White hard clam ( <i>Meretrix lyrata</i> ) shells as novel filter media to augment the phosphorus removal from wastewater	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.140483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Soda, S., Sasaki, R., Nguyen, T.T., Hayashi, K., and Kanayama, A.	4. 巻 67
2. 論文標題 A Laboratory experiment system for developing mine drainage treatment technologies using constructed wetlands - Sequencing batch treatment of Cd-containing neutral mine drainage -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources Processing	6. 最初と最後の頁 111 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KITAMOTO Eriko, YAMADA Satoshi, MUNEMOTO Shinsaku, OIKAWA Kiyooki	4. 巻 85
2. 論文標題 STUDY ON CENTRALITY OF STREET NETWORK INCORPORATING SLOPES	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 2267 ~ 2276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aija.85.2267	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinsaku Munemoto and Associates Architects	4. 巻 474
2. 論文標題 Affinity: A Relationship between Architecture and People	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Architecture & Culture	6. 最初と最後の頁 62 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Yoshikawa, Toshiyuki Shimizu, Koji Amano, Jun Nakajima	4. 巻 1
2. 論文標題 Evaluation of Greywater Reclamation and Reuse System in a Japanese University Building	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Asia-Japan Research Institute of Ritsumeikan University	6. 最初と最後の頁 44-55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.34389/asiajapan.1.0_44	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nyimas Suryani, Atsushi Ichiki, Toshiyuki Shimizu, Sri Maryati	4. 巻 17(6)
2. 論文標題 Investigation of the Water Supply System and Water Usage in Urban Kampung of Bandung City, Indonesia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Water and Environment Technology	6. 最初と最後の頁 375-385
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2965/jwet.18-068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Keerthi Katam, Toshiyuki Shimizu, Debraj Bhattacharyya, Satoshi Soda	4. 巻 55(4)
2. 論文標題 Nutrient, Linear Alkyl Benzene Sulfonate, and Caffeine Removal from Synthetic Wastewater with an Algalbacterial Culture and an Activated Sludge Culture in Batch Mode	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japanese Society of Water Treatment Biology	6. 最初と最後の頁 79-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2521/jswtb.55.79	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takehiro Zukawa, Yoshiki Sasaki, Takako Kurosawa, Naoyuki Kamiko	4. 巻 214
2. 論文標題 Photolysis of Indigo Carmine solution by planar vacuum-ultraviolet (147nm) light source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 123-129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2018.09.102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 川口衛, 佐藤圭輔, 森颯人, 菅原庄吾	4. 巻 23
2. 論文標題 汽水湖阿蘇海における底質酸素消費速度の推定とリン収支の定量評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 環境システム計測制御学会誌「EICA」	6. 最初と最後の頁 152-163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 清水聡行, 佐竹孝, 柴田峻太郎, 中島淳	4. 巻 60
2. 論文標題 浄化槽と膜分離を組み合わせた雑排水の再生	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 用水と廃水	6. 最初と最後の頁 861-871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Qingsong Ma, Hiroatsu Fukuda, Myonghyang Lee, Takumi Kobatake, Yuko Kuma, Akihito Ozaki	4. 巻 222
2. 論文標題 Study on the utilization of heat in the mechanically ventilated Trombe wall in a house with a central air conditioning and air circulation system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Energy	6. 最初と最後の頁 861-871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apenergy.2018.04.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Mishima I., Hama M., Tabata Y., Nakajima J.	4. 巻 78
2. 論文標題 Long-term investigation of phosphorus removal by iron electrocoagulation in small-scale wastewater treatment plants	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Water Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1304 ~ 1311
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2166/wst.2018.402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yasunori Kikuchi, Yuichiro Kanematsu, Naoki Yoshikawa, Tatsuya Okubo, Michiko Takagaki	4. 巻 186
2. 論文標題 Environmental and resource use analysis of plant factories with energy technology options: A case study in Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 703-717
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2018.03.110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計138件(うち招待講演 0件/うち国際学会 27件)

1. 発表者名 志賀淳一, 多田悠吾, 神子直之
2. 発表標題 下水処理における UV-LED 光源の実用化に向けた基礎的検討
3. 学会等名 第24回日本水環境学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原柊斗, 清水聡行, 神子直之
2. 発表標題 真空紫外線を用いた有機物の効果的な分解に関する検討
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松岡秀悟, 神子直之
2. 発表標題 流入下水における種々の指標細菌の紫外線耐性
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李明香
2. 発表標題 住宅の天井裏空間を利用した空気循環システムの提案（その1）数値シミュレーションによる室内環境改善およびエネルギー性能の検証
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡林あゆみ、佐藤圭輔、Htet Thu Soe、Giang Pham Quy
2. 発表標題 ベトナム北部・カウ川流域への流域統合モデルの適用と水環境の総合評価
3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢田うさぎ、近本智行、粕谷敦、和田一樹、増田恭大、桑山絹子
2. 発表標題 気流感変動制御システムを有するオフィスの実測・実験評価
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中井元哉，清水聡行
2. 発表標題 LAS代謝物質(SPC)のオゾン酸化分解とその生分解性向上
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田島加奈子、神子直之
2. 発表標題 様々な PCR 検出部位の紫外線感受性に関する検討
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H.T.Soe, K.Sato, P.T.K. Chinh, P.Q.Giang, T.Yazawa
2. 発表標題 Evaluation of River Water Quality and Water Stress Assessment using Hydrological Model in the Upper Thai Binh River Basin, Vietnam
3. 学会等名 第55回日本水環境学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 盧宏泰，近本智行，土井脩史
2. 発表標題 V2H + LiBを持つ実験住宅における電力需給挙動の検証（その1） 自立時、連系時模擬的生活負荷を与えた場合
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 盧宏泰，近本智行，土井脩史
2. 発表標題 V2HとLiBを持つ実験住宅におけるエネルギー運用の検証と地域分散型エネルギーへの適用
3. 学会等名 第37回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Linh Dieu Tran, Jun Nakajima, Toshiyuki Shimizu, Naoyuki Kamiko
2. 発表標題 Consideration of Existing Rainwater Harvesting System and Its Enhancement Using Membrane Filtration
3. 学会等名 Water and Environment Technology Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤圭輔, 加藤颯人, Thuong Thi Nguyen, Thom Thi Vu, Hang Thi An Nguyen
2. 発表標題 排水の種類に応じた人工湿地プラントの設計 ~ 2つの取組の事例紹介 ~
3. 学会等名 第14回人工湿地ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 盧宏泰、近本智行、土井脩史
2. 発表標題 V2H+LiB を持つ実験住宅におけるエネルギー運用の検証
3. 学会等名 エネルギー資源学会第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	李 明香  (Lee Myonghyang)  (00734766)	立命館大学・理工学部・准教授   (34315)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉川 直樹 (Yoshikawa Naoki)  (10583271)	立命館大学・理工学部・講師  (34315)	
研究分担者	宗本 晋作 (Munemoto Shinsaku)  (20581490)	立命館大学・理工学部・教授  (34315)	
研究分担者	惣田 訓 (Soda Satoshi)  (30322176)	立命館大学・理工学部・教授  (34315)	
研究分担者	佐藤 圭輔 (Sato Keisuke)  (30456694)	立命館大学・理工学部・准教授  (34315)	
研究分担者	清水 聡行 (Shimizu Toshiyuki)  (50584025)	立命館大学・理工学部・講師  (34315)	
研究分担者	近本 智行 (Chikamoto Tomoyuki)  (60388113)	立命館大学・理工学部・教授  (34315)	
研究分担者	神子 直之 (Kamiko Naoyuki)  (70251345)	立命館大学・理工学部・教授  (34315)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ベトナム	Vietnam Japan University, VNU-Hanoi			
インド	Indian Institute of Technology Hyderabad			