

高安受水場における脱炭素化を目指して ー公民連携による小水力発電の実装ー

林 和志¹

¹大阪広域水道企業団 八尾水道センター 施設整備課 (〒581-0007 大阪府八尾市光南町1-4-30)

高安受水場において公民連携で小水力発電を実装している。本稿では、水撃圧発生時の既設送水管に対する安全性の検証や実装後の安定受水継続のためのシステム構築、環境負荷低減への妥当性評価に加え、更なる脱炭素化を見据えた取組みを報告する。

キーワード 2050年ネット・ゼロ、公民連携、小水力発電、高安受水場他脱炭素化事業協定書

1. はじめに

2015年に合意されたパリ協定では「産業革命前からの世界の平均気温上昇を2℃未満とし、1.5℃未満に抑える努力をする」という国際的目標が採択された。これを達成するため、我が国では、地球温暖化対策計画¹⁾において2050年ネット・ゼロを目標としている。その中で、水道分野は、2030年度までに21.6万t-CO₂(2013年度比約5%)削減を目標としている。そのためには、省エネ施策に加え、再エネ普及によるCO₂の正味削減が求められている。しかし、当センターでは老朽化施設の更新・耐震化需要の増加と料金収入減少で再エネを導入する財源の余裕はなかった。そこで、民間事業者の経営力と技術的ノウハウを活用し、メンテナンスを含めた公民連携での小水力発電実装に向け、2021年度にプロポーザル方式で民間事業者を選定した。選定後、公民で小水力発電システムの設計を行い、2022年度から20年間の場所貸しで小水力発電を実装している。本稿では、小水力

発電システムの設計段階で検証した水撃圧発生時の既設送水管への安全性、安定受水継続のためのシステム構築、小水力発電量の計画値と実績値の比較から環境負荷低減への妥当性について章立てする。さらに、今後の展開では、更なる脱炭素化の具体策を提示する。なお、本稿では「小水力発電」と「小水力発電システム」に区分している。ここで「小水力発電」は発電機能を有する設備のみとし「小水力発電システム」は発電設備に加え、受水に係る水理を含む機構に区別する。

2. 設計時における水撃圧に対する安全性の検証

図-1の系統図で示すように、当センターは、枚方市にある村野浄水場で浄水処理した水を全量受水している。村野浄水場から送水された浄水は、当センターの高安受水場で二系統で受水する。その際、受・配水池で大気解放していた受水時の圧力を小水力発電に活用する。ここで、小水力発電実装にあたり、水車が緊急停止した場合を想定する必要がある。水車が緊急停止すると、無拘束運転や水車電動弁の閉鎖により、水撃圧が発生する可能性がある。水撃圧の発生は、管体変形や接合部離脱に繋がるリスクがある。そのため、次節以降で、水撃圧発生時の既設送水管に対する安全性を、土地改良事業計画設計基準及び運用・解説—設計「パイプライン9-2非定常的な水理現象の解析」²⁾に基づき検証する。

(1) 無拘束運転時の水撃圧

万一、停電や異常が生じると、水車は緊急停止する。緊急停止すると、系統連系規程に従い、小水力発電の解

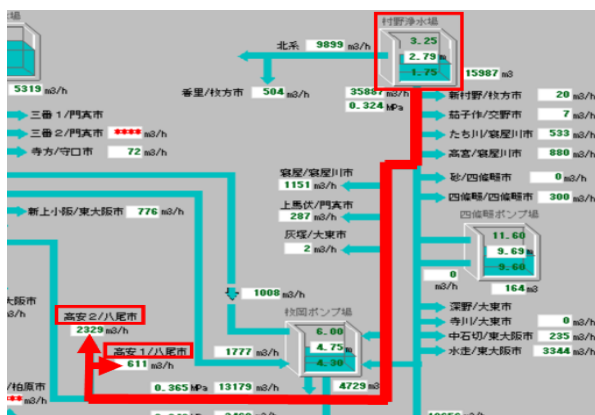


図-1 村野浄水場～高安受水場間系統図

列リレーは切り離される．これにより，水車は無拘束運転となり流量が減少する．このとき，流速も減少し，水圧は上昇する．水圧上昇による水撃圧で，村野浄水場と高安受水場間の送水管に破損リスクが生じる．そこで，受水圧力と無拘束運転時の水撃圧の水頭和を算出し，水頭和と最大静水圧の比較で送水管への安全性を検証する．まず，無拘束運転時の水撃圧 H_{max1} を求めるためにJoukowskiの式(1a)を用いる．

$$H_{max1} = -\frac{\alpha}{g}(V - V_0) \quad (1a)$$

ここで， H_{max1} は無拘束運転時の水撃圧， α は圧力伝搬速度， g は重力加速度， V は流量操作後の流速， V_0 は水車の流速である． V を求めるためには，異なる径の管を接続して布設されている送水管の等価配管径 D が必要となる． D は式(1b)を用い，2.085mと算出される．次に，無拘束運転時に流れる流量 Q を求める．75kWクラスの定格流量は，水車1基605 m^3/h （約0.1680 m^3/s ）である．高安受水場には写真（図-2）のように75 kWクラスの水車を4基設置しており，これを考慮すると，定格流量 Q_0 は0.6722 m^3/s となる．図-3の特性図から， Q は水車1基あたり0.0972 m^3/s であるため，4基分の Q は0.389 m^3/s となる．

$$D = \frac{(L_1 D_1 + \dots + L_n D_n)}{(L_1 + \dots + L_n)} \quad (1b)$$



図-2 高安受水場に設置の小水力発電（水車4基並列設置）

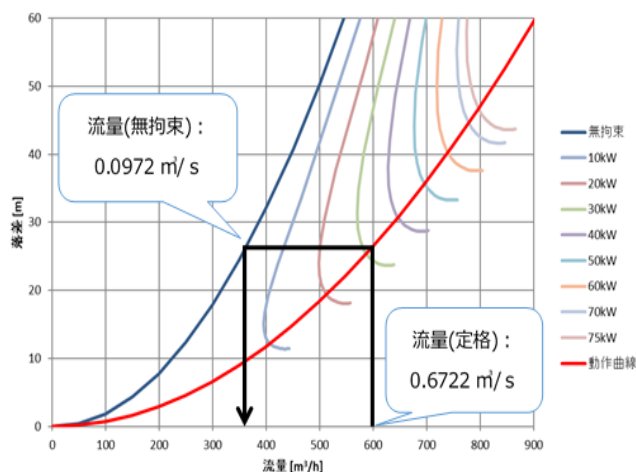


図-3 特性図（75kWクラス水車 200 J -575）

Q ， D を式(1c)に代入すると， V は0.114m/sとなる．

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (1c)$$

これまで得られた数値から， V_0 は0.197m/sとなる．

$$V_0 = \frac{Q_0}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (1d)$$

次に圧力伝搬速度 α は，式(1e)から求められる．

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\frac{W_0}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{C_1 D_n}{E t_n} \right)}} \quad (1e)$$

ここで， W_0 は水の単位体積重量， K は水の体積弾性係数， C_1 は埋設状況による係数， D_n は村野浄水場から高安受水場までの各送水管口径， E は配管材ヤング率， t_n は異なる径に基づく各送水管厚を表す．これら数値を式(1e)に当てはめると， α は1049.3m/sとなる．以上から，各数値を式(1a)に代入した結果， H_{max1} は8.87mとなる．受水圧力は，通年で概ね30.59m（約0.30MPa）である．浄水は村野浄水場からのポンプで圧送されているため，受水圧力を流量調整部静水圧 H_0 と同義とみなす．このとき， H_0 と H_{max1} との水頭和は，39.46m（約0.39MPa）となる．設計時に基準としていた水道施設設計指針2012³⁾において「給水管に分岐する箇所での配水管内の最大静水圧は，0.74MPaを超えない」と定めている．水頭和は，0.74MPa未満となるため，無拘束運転時の水撃圧に対し，既設送水管は安全である．

(2) 水車電動弁閉鎖時の水撃圧

水車無拘束状態での水車電動弁の閉鎖は，水圧上昇を招くことで，水撃圧が発生する場合がある．そこで，受水圧力と水車電動弁閉鎖時の水撃圧の水頭和を算出し，水頭和と最大静水圧の比較で送水管への安全性を検証する．まず，水車電動弁閉鎖時の水撃圧 H_{max2} を求めるためにAllieviの式(1f)を用いる．

$$H_{max2} = \left\{ \frac{K_a}{2} + \sqrt{K_a + \frac{K_a^2}{4}} \right\} H_0 \quad (1f)$$

K_a はAllieviの管路定数である． K_a は式(1g)から求める．

$$K_a = \left\{ \frac{L(V - V_0)}{g H_0 T_v} \right\}^2 \quad (1g)$$

L は等価配管長， V は流量操作後の流速， V_0 は水車の流速， g は重力加速度， H_0 は流量調整部静水圧， T_v は流量操作時間である． L は式(1h)から33,610mと算出される．

$$L = L_1 + \dots + \frac{L_n \pi D_{n-1}^2}{\pi D_n^2} \quad (1h)$$

水車電動弁全閉に要する時間は92sであるため，水車弁全閉時の T_v は92sである．また，水車電動弁が全閉になると， V は0 m/sとなる．これらを式(1g)に当てはめると， K_a は0.019となる．これを(1f)に代入すると， H_{max2} は4.54mとなる． H_0 と H_{max2} の水頭和は，35.13m（約0.34MPa<0.74MPa）となるため，水車電動弁閉鎖時の水撃圧に対し，既設送水管は安全である．

3. 安定受水継続のためのシステム構築

(1) 遠隔臨場での異常の早期発見とその対応

当センターおよび民間事業者は、発電量および流量をリアルタイムでクラウド監視している(図-4)。発電量または流量が低下すると、事前登録した端末にメールが自動通知される。このシステム構築により異常を早期発見する。また、民間事業者側では、水車電動弁の「異常リセット」「起動」「停止」の遠隔操作が可能となっている。これら遠隔臨場で安定受水を継続している。

(2) 既存設備と二系統受水の強みを活かした安定受水

小水力発電システムでは、受水管二系統のうち、小水力発電を通過する一系統は、流量固定となる。一方、小水力発電非通過の別系統は、流量が変更できる。たとえば、水車の緊急停止で水車弁が閉止すれば、通常なら二系統合計の流量は減少するが、このときに小水力発電非通過の既存設備の受水流量調整弁の開度を上げる。この開度調整は、監視制御システムの遠隔操作で行う(図-5)。このシステムで二系統合計の流量安定化を図る。また、将来予測される水需要減少にもこのシステムが有効に働く。上記2点のシステムが、安定受水継続のバックボーンとなっている。次章以降で、安定受水を基盤とした発電量、それに伴うCO₂削減効果について述べる。

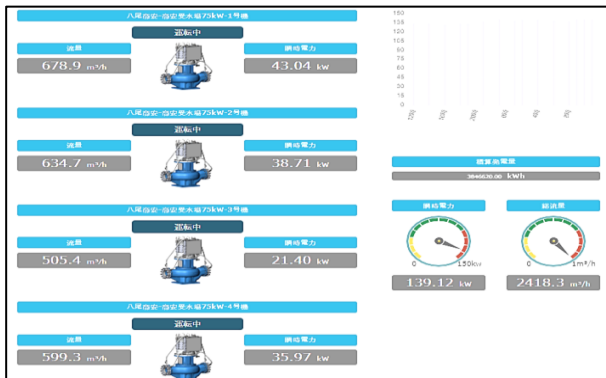


図-4 クラウド監視の画面

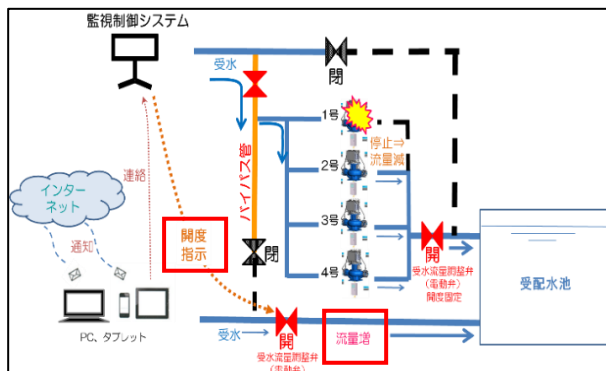


図-5 安定受水のメカニズム

4. データの収集

(1) データ収集の目的

データ収集の目的は、小水力発電によるCO₂削減効果の定量化である。以下の式のように発電出力は、流量と有効落差(本稿では受水圧力)で決定する。つまり、流量または有効落差が大きいほど発電出力は高くなる。

$$\text{発電出力 [kW]} = \text{流量 [m}^3/\text{s]} \cdot \text{有効落差 [m]} \cdot \text{効率} \cdot 9.8 \text{ (重力加速度)}$$

(2) 収集するデータの区分・種類

発電量の計画値と実績値を季節ごとに比較するため、収集するデータの区分は月単位とした。さらに、流量および発電量の関係を把握するため、収集するデータの種別は、小水力発電を通過する流量ならびに発電量とした。次章では、これらデータを基に発電量、流量、CO₂削減量の比較し、CO₂削減量を「見える化」している。

5. 小水力発電のCO₂削減効果

(1) 発電量およびCO₂削減量の計画値

小水力発電4基分の計画諸元を表-1にまとめた。計画発電出力は、4基で121.6 kW、また最大使用水量および受水圧力は、実績データを基にそれぞれ 0.744 m³/s、30.43 mと算出した。年間発電量は101万kWhを計画している。これに伴うCO₂削減量は、令和5年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2024)⁴⁾で公表されている2030年度の電力排出係数(0.000370 t-CO₂/kWh)を適用し、年間で374 tを見込んでいる。また、人口換算したCO₂削減量は、日本の温室効果ガス排出量データ⁵⁾で公表されている2023年の一人当たりCO₂排出量(7.95 tCO₂/人)を適用し、年間で47人分のCO₂を削減できると見込んでいる。

表-1 4基分の小水力発電の計画諸元

計画発電出力	121.6 kW
最大使用水量	0.744 m³/s
受水圧力	30.43 m
電圧	6600 V
水車形式	縦型インラインポンプ逆転水車
年間発電量	101万kWh
CO ₂ 削減量	374 t
人口換算したCO ₂ 削減量	47人分

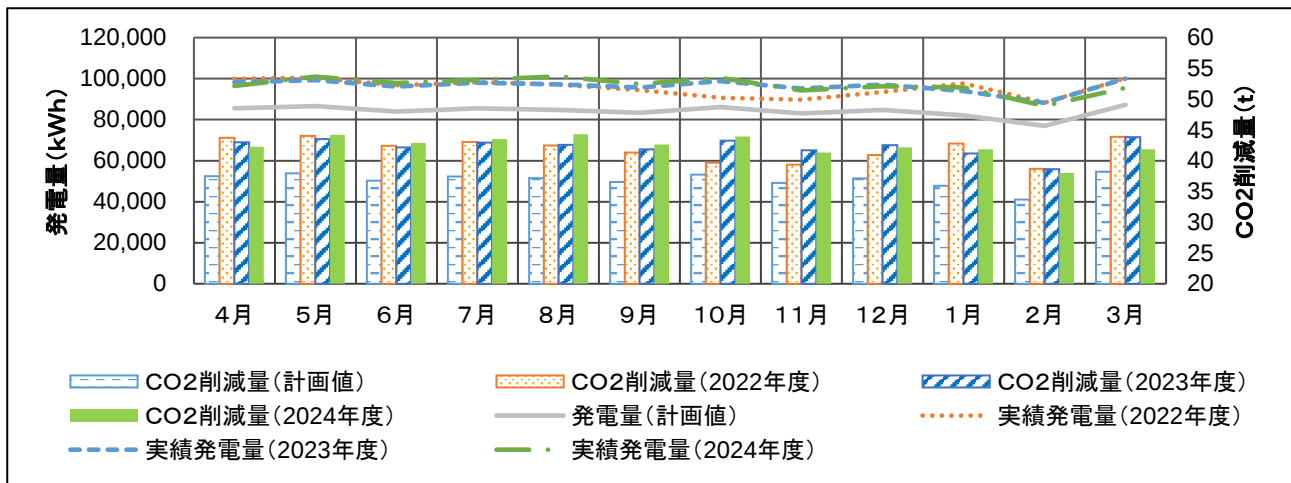


図-6 小水力発電量とCO2削減量

表-2 小水力発電を通過する流量と小水力発電量，CO2削減量の関係

	2022年度	2023年度	2024年度
小水力発電を通過する流量	20,260,020 m ³	20,819,700 m ³	20,858,250 m ³
小水力発電量	1,074,103 kWh	1,084,551 kWh	1,087,682 kWh
CO2削減量	397 t	401 t	402 t

(2) 計画値と実績値の比較

計画諸元の発電量ならびにCO2削減量と、2022年度～2024年度の実績発電量ならびにCO2削減量を月単位に区分，比較したグラフを図-6に示す。なお，実績発電量に基づくCO2削減量は，計画値と同条件で比較するために，2030年度の電力排出係数（0.000370 t-CO2/kWh）を適用する。また，表-2では図-6の「小水力発電量」および「CO2削減量」のデータを年度単位とした上で「小水力発電を通過する流量」を項目に加え，各年度で比較している。次章で，これらを踏まえた分析と環境負荷低減への妥当性について考察する。

6. 考察

図-6から発電量およびCO2削減量の実績値は，どの月も計画値を上回っている。また，表-2から流量が増えると，発電量も増加している。ここで，発電に必要な流量に注目する。流量は，天候や季節によって変動する。11月～2月の冬季ならびに梅雨時期（6月）は水需要減少に伴い，流量は低下する。一方，梅雨時期を除く春季から夏季（6月を除く3月～10月）は水需要増加に伴い，流量は増加する。これらを踏まえれば，図-6から流量と発電量の相関関係が推測され，さらに表-2がこの推測を裏付ける。通年で受水圧力は大きな変動がないため，流量が発電量に大きく影響していると考えられる。以上のことから，安定受水が安定した発電に帰結する。表-2から流量増加に伴い，CO2削減

量は397t，401t，402tと増加している。2022年度からのCO2削減量の累積値は1,200 tに上る。これは人口換算で，のべ150人分（7.95 t CO2/人で算出）のCO2削減量に相当することから，環境負荷低減への妥当性は一定評価できると考察する。

7. 今後の展開

脱炭素化を更に進めるため，小水力発電と同様にプロポーザル方式で民間事業者を選定し，当該事業者と2024年10月2日に「高安受水場他脱炭素化事業協定書」（以下「脱炭素化事業」という）を締結した。次節以降で脱炭素化事業の具体策を4点示す。

(1) 太陽光発電の実装

脱炭素化事業の1点目は，太陽光発電の実装である。設置予定の太陽光パネルの仕様を表-3に示す。高安受水場の受・配水池の上部には，太陽光パネル設置に適した約4,700m²の未利用空間がある。未利用資源活用の観点から，この空間ポテンシャルを活用することで，

表-3 受・配水池上部に設置予定の太陽光パネル仕様

種類	単結晶シリコン
質量	8.6 kg
寸法	W1762・D1134/H30
太陽電池合計容量	864枚・440W=380.16kW
太陽電池傾斜	5°

表-4 八尾水道センターの年間消費電力量（2024年度）（単位 kWh）

月	庁舎	龍華 配水場	高安 受水場	南部低区 配水池	北部低区 配水池	神立加圧 ポンプ場	高区 配水池	北部 制御所	南部 制御所	山畑 ポン プ場	合 計
4	12,582	79,760	443,729	12,916	1,221	850	808	279	206	718	553,069
5	12,790	82,979	453,032	13,113	1,282	913	908	330	215	728	566,290
6	14,119	84,361	450,917	12,251	1,227	769	799	281	208	714	565,646
7	19,508	96,673	482,128	13,547	1,283	915	1,255	271	188	682	616,450
8	19,116	97,690	470,873	14,265	1,330	975	1,407	328	207	801	606,992
9	17,168	92,695	456,101	13,371	1,264	841	1,128	280	214	685	583,747
10	14,876	85,776	464,473	13,660	1,305	889	885	280	194	690	583,028
11	13,723	77,162	450,181	13,127	1,291	964	880	329	228	781	558,666
12	18,435	80,557	471,417	13,445	1,460	989	980	270	187	663	588,403
1	19,355	80,111	461,741	13,446	1,357	754	748	337	219	835	578,903
2	18,450	73,086	416,331	11,285	1,163	782	763	279	198	671	523,008
3	17,058	81,523	456,737	11,894	1,404	790	746	269	185	621	571,227
合 計	197,180	1,012,373	5,477,660	156,320	15,587	10,431	11,307	3,533	2,449	8,589	6,895,429

いわゆるメガソーラーのような森林破壊、土砂災害、景観障害の社会問題の発生を回避する。受・配水池上部に設置予定の864枚のパネル重量は、構造計算により耐荷重に問題のない結果を得ている。設置要件は耐久性、耐震性、耐風水害性を最優先としている。実装後は、年間で44万kWhの太陽光発電量を見込んでいる。

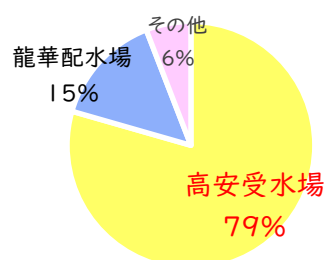


図-7 八尾水道センターの年間消費電力量比率（2024年度）

(2) 電源を特定した地産地消電源の実現

脱炭素化事業の2点目は、小水力発電と太陽光発電を合わせた地産地消電源の実現である。高安受水場に電源を特定化し、小水力・太陽光発電量（計画値145万kWh）を高安受水場の電力消費に充てる。現状では、小水力発電で発電された電力は送電網を経て、不特定の家庭や事業所で利用されている。これを今後は、高安受水場の電力消費に充てることで、小水力・太陽光発電のマイクログリッド化を図る。

(3) 非化石価値付電力の供給

脱炭素化事業の3点目は、非化石価値付電力の供給である。前節のマイクログリッドでの発電量145万kWhに対し、表-4の当センターの2024年度の消費電力量から高安受水場の年間消費電力量は、約547万kWhであることがわかる。つまり、高安受水場の地産電力比率は26%となる。一方、残りの74%は、従来の化石燃料由来の電力供給となる。そこで、この74%の供給電力を対象に、脱炭素化事業で選定さ

れた民間事業者が、小売電気事業者の登録を受けた上で、日本卸電力取引所（JEPX）の証書付きの非化石電力を調達する。これを高安受水場に供給することで、脱炭素100%を実現する。なお、JEPXは日本で唯一、電力を売買できる市場である。また、図-7の当センターの2024年度の消費電力量比率から高安受水場の年間消費電力量は、当センター全体の年間消費電力量の79%を占めている。このため、高安受水場の脱炭素化は、当センターの脱炭素化への大きな一歩となる。

(4) 定置型蓄電池の設置

脱炭素化事業の4点目は、定置型蓄電池の設置である。定置型蓄電池の出力は、三相三線200V、スペック814kWhを有しており、太陽光発電で発電した電気を蓄える。これにより、夕方の電力需要増加



図-8 脱炭素化事業総括

時の調整電源や夏季・冬季のデマンドレスポンス (DR) の実効性を高める。DRは、効率的なエネルギー利用に資する取組みである。さらに、定置型蓄電池は、非常時の防災用電源を確保する付加価値もある。ここで、4点の脱炭素化事業を図-8にまとめる。脱炭素化事業で年間2,000t (0.000370t-CO₂/kWhで算出) のCO₂削減効果が得られる。年間2,000tは、従来の小水力発電のみのCO₂削減量374tと比較すると、約5.3倍に相当する。加えて、龍華配水場においても高安受水場と同様の内容で脱炭素化を検討している。実現すれば、当センターの90%以上の消費電力量 (約650万kWh) の脱炭素が図れ、年間2,400tのCO₂削減に貢献できる。これを人口換算すると300人分 (7.95t CO₂/人で算出) のCO₂削減量に相当し、2050年ネットゼロの一助となる。

8. おわりに

本稿では、設計時における水撃圧に対する安全性の検証や安定受水継続のためのシステム構築、「小水力発電量とCO₂削減量」の二軸管理による「見える化」で環境負荷低減への妥当性を評価した。また、今後の展開に脱炭素化事業4点を述べた。これら成果は、公民連携で達成できたことである。今後、民間事業者とのパートナーシップをさらに深化することで、更なる脱炭素化が期待できる。最後に、2025年2月に閣議決定されたエネルギー基本計画⁶⁾では、CO₂削減量のロードマップに2013年度比で2030年46%減、2035年60%減、2040年73%減、2050年ネット・ゼロが示された。加えて、デジタルトランスフォーメーション (DX) が進むにつれ、AIに不可欠な半導体需要の増加が予測される。これに伴い半導体製造による消費電力量や、AIの活用機会拡

大でデータセンターでの消費電力量は増加する。たとえば、ChatGPTのような生成AIを活用した一回の質問・回答は、電力量を2.9Wh消費する。これは、一般的なインターネット検索一回あたりの消費電力量0.3Whの約10倍に相当する。膨大な電力消費とともに、更なる発展が期待できる経済・社会構造の変革期ゆえに環境負荷低減は、すべての産業の共通課題といえる。脱炭素化の加速化が一層求められる中、本稿の事例が最適解導出の端緒となれば幸甚である。

大阪広域水道企業団事業統合に伴う対応

本論文は (前) 八尾市水道局施設整備課配水係長 (2021.4-2025.3 在籍) 時に実施したものである。

関連論文

高安受水場における公民連携によるゼロカーボン達成に向けた小水力発電事業、2024

謝辞：本稿執筆にあたり、ご協力いただいた株式会社DK-Powerの皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 環境省：地球温暖化対策計画
- 2) 農林水産省：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説—設計「パイプライン9-2 非定常的な水理現象の解析」
- 3) 公益社団法人日本水道協会：水道施設設計指針 2012
- 4) 経済産業省：令和5年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2024)
- 5) 国立研究開発法人国立環境研究所：日本の温室効果ガス排出量データ
- 6) 経済産業省：エネルギー基本計画