

**マイクロ・ピコ水力発電施設の
実用化に向けた評価及び研究
完了報告書**

2023年2月

**阿南工業高等専門学校
地域連携・テクノセンター**

鶴羽 正幸

—目 次—

ページ

1. はじめに	3
2. 実証実験の背景と目的	3
3. 小水力発電について	3
4. 木屋平総合支所での実証実験	4
4-1. ペルトン式小水力発電機について	5
4-2. 設計図	8
4-3. 設置写真	9
4-4. 有効落差と流路損失	9
4-5. ペルトン式水車での小水力発電実証実験	10
4-6. 設計時から追加で改造した内容	11
4-7. ノズルの詰まりと主軸ベアリングの破損について	20
4-8. 主な故障履歴	21
4-9. 発電設備撤去前の運転確認及び各種データ採取	22
4-10. ペルトン水車の分解と劣化診断	24
4-11. 実証実験での反省点及び改良すべき点について	29
5. 木屋平釣り堀での実証実験	32
6. マイクロ・ピコ水力発電設備の撤去	34
7. 徳島ビジネスチャレンジメッセ2022出展	35
8. まとめ	36

1. はじめに

2018年度より徳島県企業局と官学連携し、安価で導入が可能なマイクロ・ピコ水力発電や系統連系技術の研究・検証を行い、そのデータの蓄積によるノウハウを用いた市町村や民間施設へ導入促進を行うため、2019年4月から3年間の実験を開始し、計画通り約3年間の稼動を継続した。

2022年3月に3年間の実験期間を終えたため、締めくくりとして、設備の点検と、劣化診断についての内容も含めた実証実験の全体報告書をまとめた。

2. 実証実験の背景と目的

(1) 背景

現在、地球温暖化の要因となっているCO₂削減に向けて、世界の脱炭素実現への大きな潮流の中で、2021年に日本政府によって、2030年に2013年比で46%のCO₂削減の環境方針が示された。この基本方針は以前の計画の前倒しの計画となり、早急な具体的な対策による実効性が問われている。その具体的な対策の取り組みの一つとして、現在、大きな比率を占める石炭火力発電の代替となる、再生可能エネルギーの導入が益々重要になってきている。この再生可能エネルギーのうち、日本国内のあらゆる地域で導入可能性が高く、環境負荷も少なく、昼夜を問わず安定して稼動が可能な小水力発電について、本格的に導入事例を増やしていくためにも、まず実証してノウハウを積み重ねていくことが重要である。

(2) 目的

2018年度徳島県企業局「自然エネルギー地産地消モデル普及促進事業」で実施

- ・研究題目: マイクロ・ピコ水力発電機の研究開発
- ・研究目的: 徳島県内への小水力発電の普及促進
- ① 高落差の立地条件での発電機を導入実証し、安定稼動への課題と対策を明確化
- ② 山間部における災害発生時の非常用電源としての適用について検討
- ③ FIT(固定価格買取制度)を適用したマイクロ・ピコ水力発電の実証
- ④ 研究期間: 2018年4月17日～2022年3月31日

3. 小水力発電について

一般河川や農業用水路、上下水道施設などの既設の水路における水流の勢いや落差を利用する小規模な水力発電の総称。世界的に統一された定義はないが、日本では出力1万～3万キロワット以下を「中小水力発電」と呼ぶことが多い。また、新エネルギー法(「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」1997年6月施行)の施行令改正(2008年4月施行)により新エネルギーとして認定された出力1000キロワット以下の水力発電に限定し、小水力発電とよぶケースも増えている。

小水力発電の原理は、水の落差と流量を利用して水車を回すという大型水力の発電と同様であるが、建設時の環境負荷が低く、短時間で設備を設置することができる特徴がある。また、発電時の二酸化炭素排出がなく、純国産の再生可能なエネルギーでもある。更に、太陽光や風力の発電と比較して、昼夜を問わず年間を通じて発電ができるため、設備利用率が高いという特徴があり、出力変動が少なく常時発電できることも利点である。国内では、未開発の包蔵水力(技術的・経済的に利用可能な水力エネルギー量)が有する可能性も大きく、今後の導入の促進が期待される。

4. 木屋平総合支所での実証実験

(1) 基本条件

設置先： 美馬市木屋平字川井(美馬市木屋平総合支所敷地内)

水車形式： ペルトン式

総落差： 64m

有効落差： 約44m(流量0.01m³/sのとき)

発電電力： 0.8kW(理論) → 0.8kW(実績)

売電単価： 34円/kWh(税抜) 連続運転時の売電収入は月2万円弱

(2) 履歴

年	月・日	実施内容	備考
2018	4月17日	共同研究契約締結	
	11月～12月	詳細設計	
2019	1月～2月	機器の製作	
	2月28日	木屋平に搬入、据付	
	4月～	試運転、実証実験開始	0.45kW
	5月15日	圧力管空気抜き弁の設置	0.6kW
	6月19日	防音ボックスの設置	
	7月26日	フェンスの設置	
	8月20日	ノズル詰まり、主軸のガタツキ	
	8月30日	ノズル交換、主軸の補修実施	
		ノズル数変更バルブの設置	
9月20日	遠方起動停止装置の設置		
2020	3月9日	ノズル位置調整により出力アップ	0.75kW
	6月18日	最大出力0.8kWを記録	0.8kW
2021	1月18日	配管(45°エルボ)の破損を発見	凍結による破損
	3月3日	配管(45°エルボ)の補修実施	
2022	3月31日	実証実験終了	

(3) 発電実績

実証期間における発電および売電の実績は、下表の通り。

年度	発電実績 (kWh)	売電実績 (円)
2019年(令和元年)	1,365	51,051
2020年(令和2年)	2,746	102,700
2021年(令和3年)	850	31,790
(合計)	4,961	185,541

4-1. ペルトン式小水力発電機について

(1) 発電機仕様

ペルトン式小水力発電機仕様

分類	項目	仕様
水車	方式	横軸ペルトン式(立回転)
	水車外径	φ405mm
	ノズル数	3(ノズルにより切替可)
	ノズル口径	φ10
	カップ数	20
	給水口径	呼び50
発電機	種類	永久磁石付同期発電機
	定格容量	2.2kW
	定格電圧	3相 AC200V
	定格回転数	1,150rpm
	増速比	2.25
	増速方式	タイミングベルトとプーリー
	張力調整	有り
給水	遮断弁	電動ボールバルブ付き
	分岐	3分岐ユニット付
	給水調節	3ノズル個別のボールバルブ付き
発電出力	理論最大出力	0.8kW
系統連系	インバータ、ドライバー	有り
	その他付属機器	トランス等有り
装置	装置寸法	巾600mm×奥行1,000mm×高さ870mm
	装置重量	約180kg
制御盤	制御盤寸法	巾1,200mm×奥行450mm×高さ2,000mm
	制御盤重量	約120kg
付帯機器	防音ボックス	特注製の防音ボックスを含む(内部設計、製作)

(2)導入したペルトン式小水力発電の特長

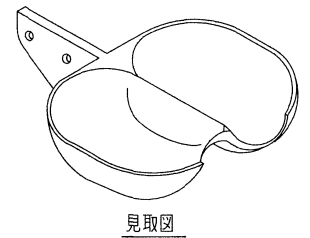
特長1

カップ(バケット)の材質は、ステンレス製(SUS304)で、ロストワックス(蝋)による鋳造で製作。ツリー状に枝別れして多数を同時に製作できることから、100個単位の製作を日研工業株式会社に依頼した。

このロストワックスによる鋳造は、砂型と比較して、出来た鋳造部品の表面が滑らかで、自動車のエンジン周りの部品として広く使われている。初期費用として金型代が必要であるが、二回目以降に注文する場合は、製作費のみとなり、金型費用で20万円、カップ単価で1,800円程度と比較的安価に製造できるのが強みである。

特長2

ノズルからの噴射水を受けるカップ(バケット)の形状は、流体解析によって割り出した独自設計である。カップ正面からの噴射水は、カップに当たった後、ちょうど噴射された方向に180度方向変換して跳ね返る条件が、噴射水のエネルギーを最大に受け止めて、回転エネルギーに変換できる様に工夫している。



特長3

回転板に取り付けられているカップ(バケット)数については、カップ12個と20個の比較実験を行ったところ、20個の方が、10%ほど発電出力が高いという結果を基に採用している。

特長4

主軸を支えて回転する単列深溝玉軸受(ベアリング)は、一般的なダスト等を保護するシール付きベアリングでは、水をシールできないため、水の侵入を防ぐことができる接触シール式ベアリング(メーカーはNTN)を採用している。

主軸ハウジング内部への水の浸入については、主軸前部に取り付けたオイルシールによって防ぐ構造としているが、万が一、水がベアリング部まで侵入した場合でも、接触シール式ベアリングにより、ベアリング鋼球部に水が浸入してくることはない。

また、ベアリングの寿命は、中の鋼球の径が大きいほど、大きな荷重に耐えて、寿命が長い。そのため、内径と外径の差が大きく、幅の広いベアリングを選定し、特に、荷重の掛かる箇所には2個連ねて合計3個組み込んでいる。

特長5

タイミングベルトのプーリー比で、増速比を確保。平歯車機構や、遊星歯車機構もあるが、タイミングベルトは、騒音も低く、回転が円滑に伝達できるのがメリットである。

木屋平総合支所では、周辺に住宅が有り、騒音を低減する必要があったため採用した。

(3)使用する制御機器について

発電制御の主要機器は、安川電機製とし、PLC は三菱電機製、電力量モニタ及び UPS は、オムロン製のものをそれぞれ使用。詳細については、下表にまとめた。

分類	型式	仕様	メーカー
系統連系インバータ	Enewell-GC	2.2kW AC200V	安川電機
発電機制御ドライバ	Enewell-GD	5kW AC200V	安川電機
高調波フィルタモジュール	EUJ710801		安川電機
ACリアクトル	UZBA-B		安川電機
漏電遮断器	NV63-CV	3P50AF/30AT	三菱電機
サーキットプロテクタ	CP30-BA		三菱電機
電磁接触器	S-T25,S-T20	コイル AC100V	三菱電機
PLC(シーケンサ)	FX3U-64MR	入出力 32 点	三菱電機
リレー	MY2N	AC200V,AC100V	オムロン
電力量モニタ	KM50-C		オムロン
無停電電源装置(UPS)	BW40T	400VA/250W	オムロン

※発電機及びパワーコンディショナーのメーカー選定について

四国電力送配電管轄内では実績のあるメーカーでないと申請が通らない。

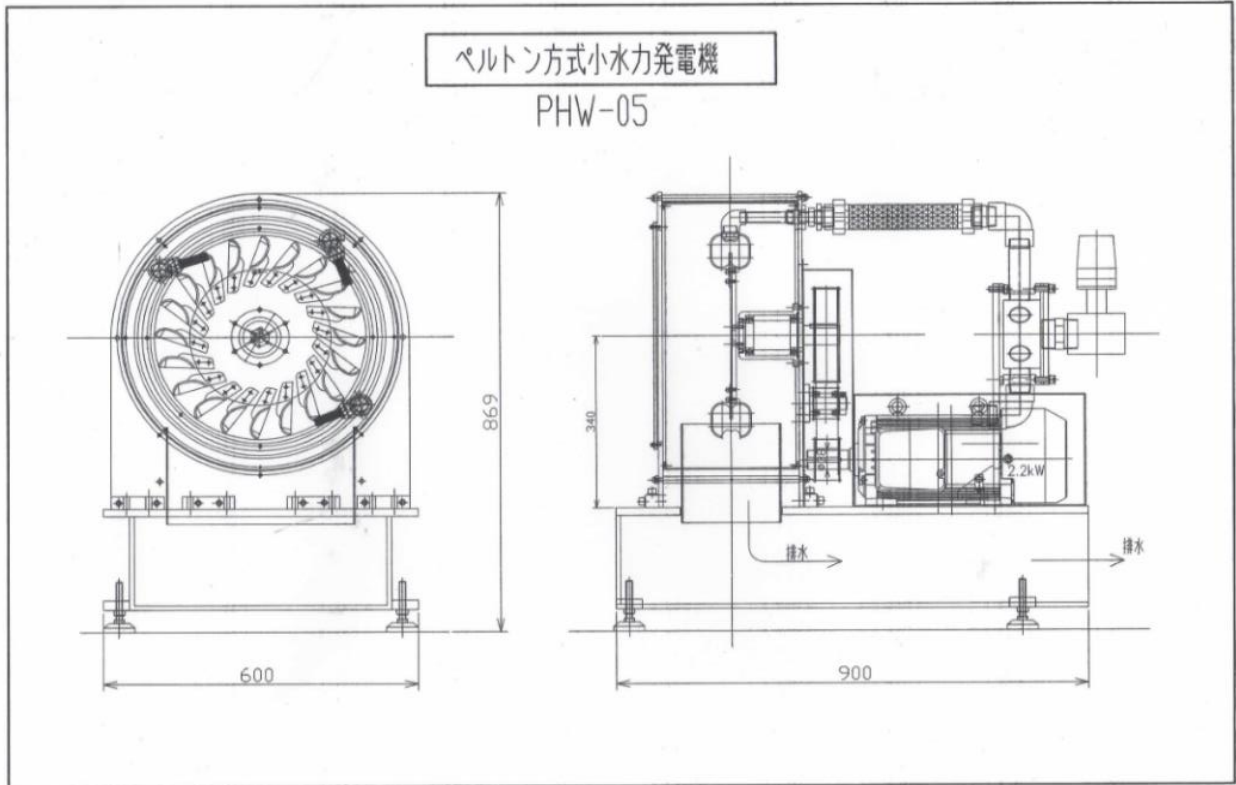
過去、三菱電機製の発電機を搭載したシステムで申請を試みた際には、小水力発電で十分な実績がないことを理由に却下された。この時には、国内の小水力発電において、十分に実績がある安川電機製の発電機とパワーコンディショナーのシステムで承認された。

以上の経緯があり、今回も安川電機製を採用することとした。

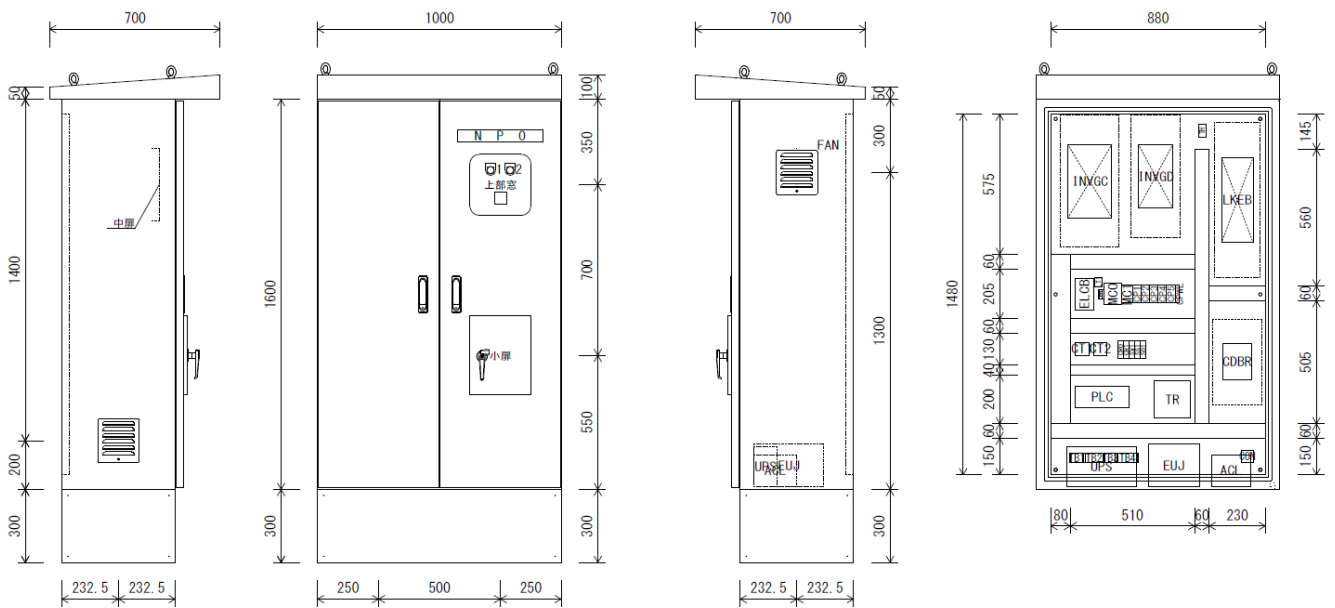
4-2. 設計図

ペルトン式

① 水車本体 (本図は設計段階の図面で、実証実験の中で各ノズルに手動バルブを追加)



② 制御盤



4-3. 設置写真



装置全景(防音ボックス無し)



装置全景(防音ボックス有り)

4-4. 有効落差と流路損失

(1) 有効落差

$$\text{有効落差 } H' [\text{m}] = \text{総落差 } H [\text{m}] - \text{流路損失 } \Delta H [\text{m}]$$

(2) 流路損失

$$\text{流路損失 } \Delta H [\text{m}] = \lambda / D \times V^2 / 2g \quad (\text{ダルシー・ワイズバッハの式})$$

λ : 圧力管の摩擦係数 0.01

※摩擦係数は、PE管メーカーの技術者に確認した数値

D: 圧力管の内径[m]

L: 圧力管長さ[m]

V: 管内流速[m/s]

Q = 流量[m³/s]

S = 圧力管断面積[m²]

ここで、立地条件及び圧力管の仕様より

$\lambda = 0.01$, $d = 0.075\text{m}$, $L = 560\text{m}$, $Q = 0.01\text{m}^3/\text{s}$, $g = 9.8\text{m}^2/\text{s}$ とする

圧力管の断面積は

$$S = \pi \times (0.075 / 2)^2 \doteq 0.0044\text{m}^2$$

管内流速は

$$V = Q / S = 0.01 / 0.0044 \doteq 2.26\text{m/s} \text{ なので}$$

$$\text{圧力管の流路損失 } \Delta H [\text{m}] = 0.01 \times 560 / 0.075 \times (2.26)^2 / (2 \times 9.8)$$

$$\doteq 74.67 \times 0.261 \doteq 19.49\text{m}$$

(3)理論上の発電出力

実際の総落差 $H=64\text{m}$

有効落差 $H'[\text{m}]=\text{総落差 } H[\text{m}] - \text{流路損失 } \Delta H[\text{m}]$

$$=64\text{m}-19.49\text{m}=44.51\text{m}$$

理論上の発電出力は

$$\text{発電出力 } P=9.8QH' \eta=9.8 \times 44.51 \times 0.01 \times 0.2 \doteq 0.872\text{kW}$$

4-5. ペルトン式水車での小水力発電実証実験

① (参考)2019年4月18日の結果

静水圧 -----0.58MPa 稼動時水圧 ----0.48MPa

発電出力 ----454W(最大値)

② 課題

- ・圧力管内の空気が抜け切れていないため、水圧が低い
- ・稼動時の騒音が大きい
- ・河川流量低下時に発生する、圧力管の空気混入対策が必要

③ 課題解決に向けた対応方針

- ・圧力管に空気抜き弁を設置し、静水圧で0.64MPa(理論値)を実現する
- ・騒音対策として遮音板などを取り付ける
- ・3つのノズルにバルブを設置し、流量調節することで圧力管の空気混入を防止する

④ その他

- ・FIT制度で義務付けられているフェンスの設置が必要
- ・発電機を遠方からでも監視及び起動停止できないか

4-6. 設計時から追加で改造した内容

下記5項目を実施した。

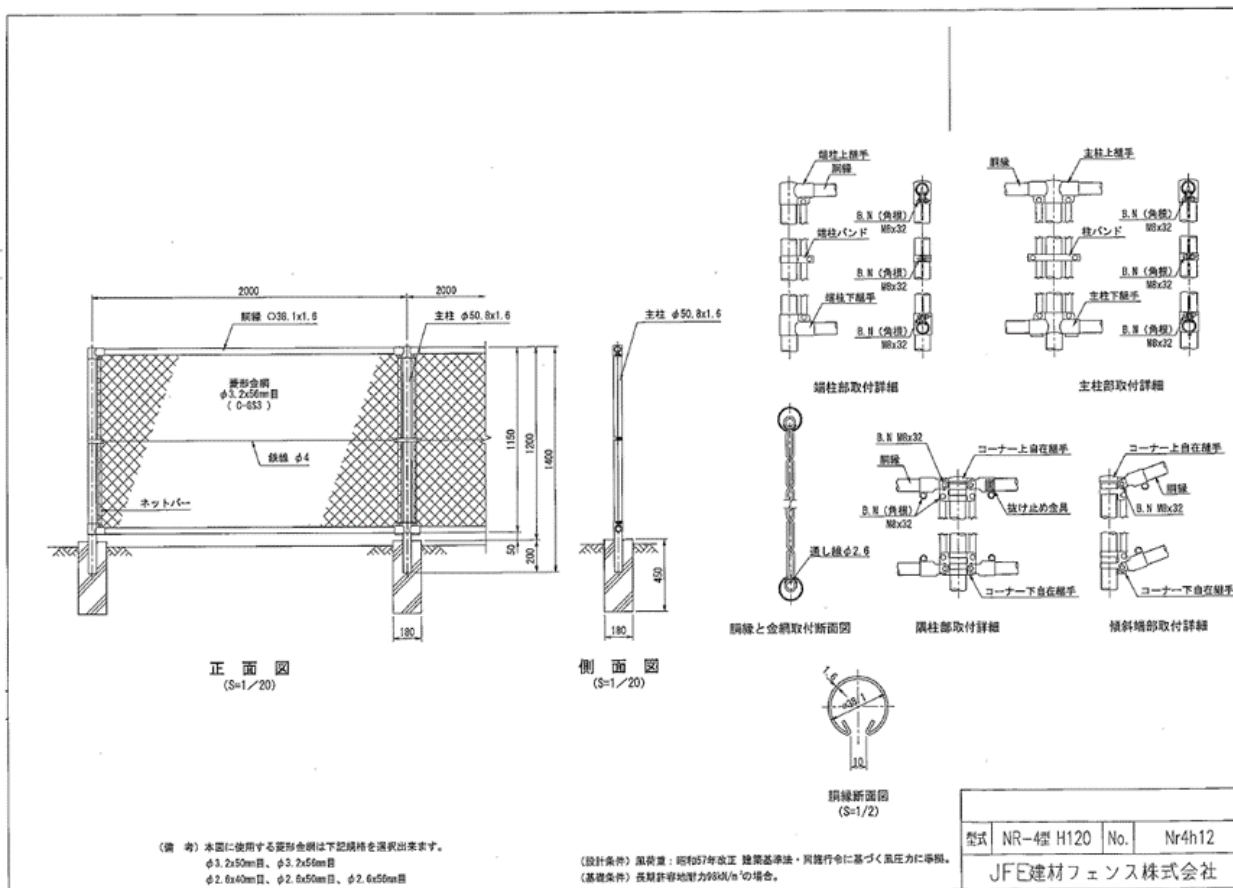
- (1)安全フェンスの設置 -----発電設備の周囲にフェンスを設置し、安全対策を行う
- (2)防音ボックスの設置 -----稼動中の騒音を低減し、近隣住民への影響を少なくする
- (3)圧力管空気抜き弁の設置 -----圧力管内の空気を除去し、水圧を確保する
- (4)ノズル数変更バルブの設置 ----ノズル本数を変更(流量調節)できるようにする
- (5)遠方起動停止装置の設置 -----遠方で監視及び起動停止できるようにし、省力化を図る

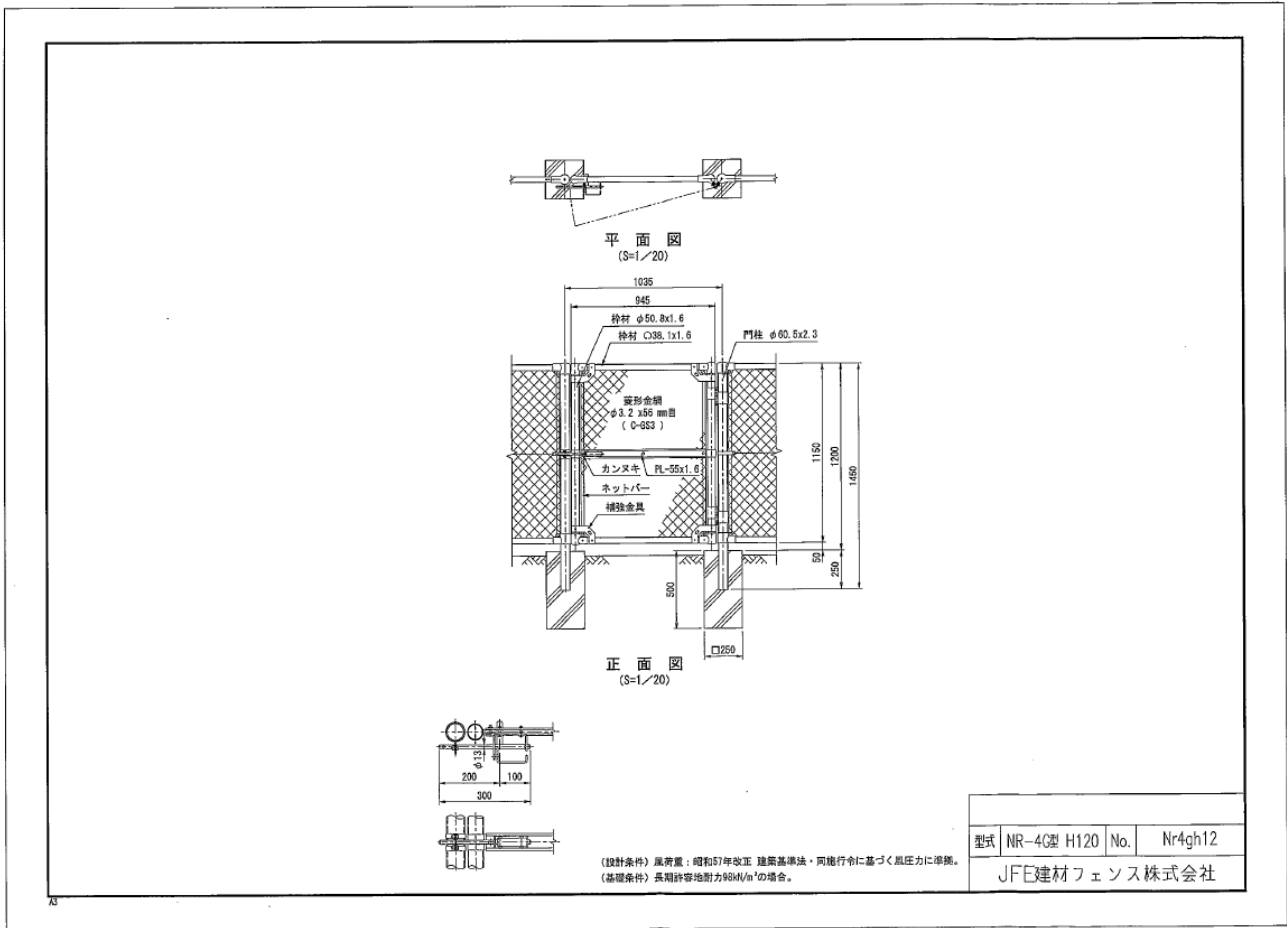
(1)安全フェンスの設置

① フェンス仕様

高さ:1,200mm 塗装色:ライトグリーン

② フェンス図面





③ フェンスの設置





④ まとめ

- ・FIT 制度では、柵塀等の設置が義務付けられているため、フェンスの設置工事を行った。
- ・高さ1, 200mmのフェンスに施錠式の門扉を設けたことで、関係者以外容易に立入りできないようにした。

(2) 防音ボックスの設置

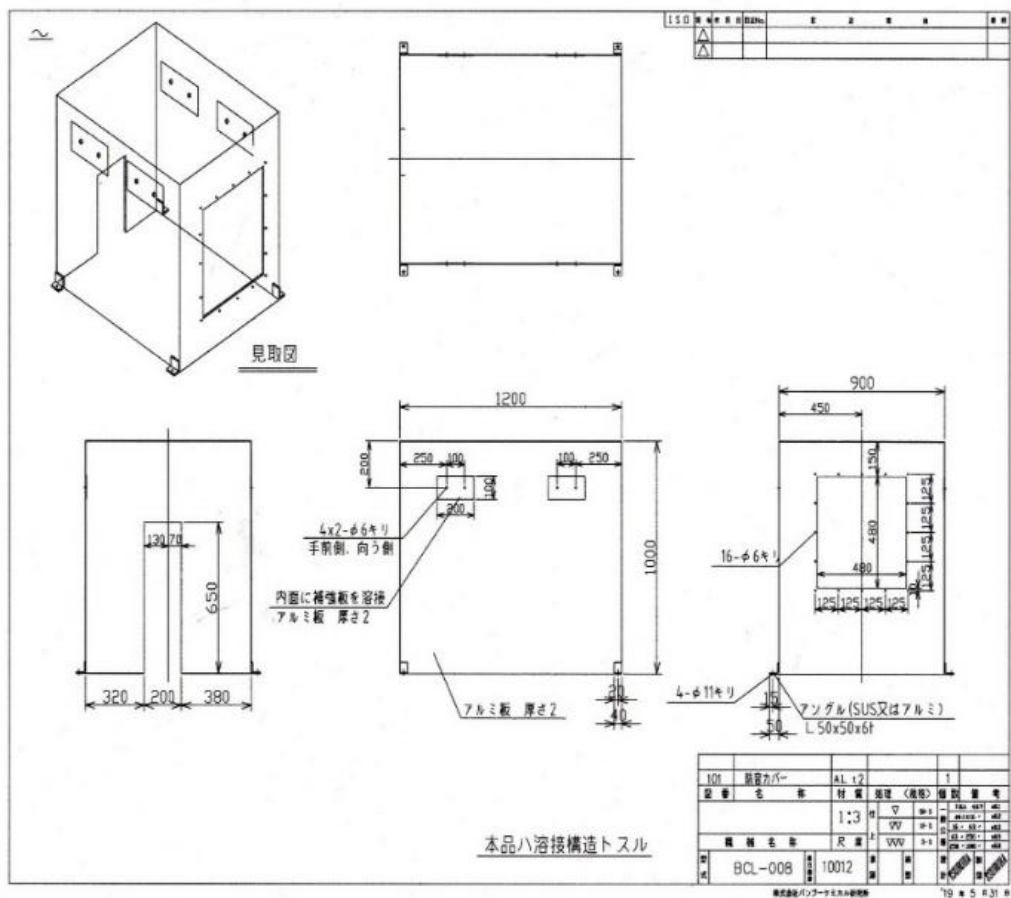
① 防音ボックスの仕様

区分	項目	仕様	備考
使用環境	耐候性	屋外仕様	
	固定方法	コンクリート基礎にアンカーボルトを打込み固定	
	運搬性	防音ボックスに取手を取付	
防音箱	防音箱の寸法	巾900mmx奥行1, 200mmx高さ1, 000mm	
	防音箱の材質	アルミ板厚2mm	
	のぞき窓の寸法	縦520mmx横520mmx厚さ5mm	
	のぞき窓の材質	PET 材料	
	重量	約28kg	
性能	数値目標	15dB以上の低減	

② 騒音源の写真-----下写真の赤色枠内のペルトン水車が騒音源



③ 設計図



④ 防音材料(メーカー: イノアック)

防音材はウレタン吸音材 カームフレックスF2
吸音性に優れたウレタン吸音材として市販されている

【特長】

- ・グラスウールより吸音率が約20%アップ
- ・1,000Hz 以上の高周波騒音対策に最適

【固定方法】

- ・ボックス内面への固定は両面テープ(強力タイプ)を使用

【取付け範囲】

- ・底面から約30mmまでは取付せず(雨水等の吸い上げ防止のため)

防音性能を高めるため、下記表のF2-30(厚さ30mm)を採用



防音材の写真

品番	厚さ(mm)	巾(mm)	長さ(mm)	質量(g)	購入数
F2-10	10	1000	1000	250	—
F2-20	20	1000	1000	500	—
➡ F2-30	30	1000	1000	750	6

① 防音ボックスの製作

阿南市にある武市鉄工へ大久保産業(株)経由で製作依頼。



底面からの写真



手前左が上面の写真



左側がのぞき窓の水車正面



左側が配管用の切り欠き

② 現地設置

- ・アンカーボルト用穴あけ ϕ 10.5x深40(4箇所)
- ・アンカーボルトSC1015(M10x50)打込み
- ・アンカーボルトに防音ボックスを縫付けることで固定



防音ボックス設置後の全景



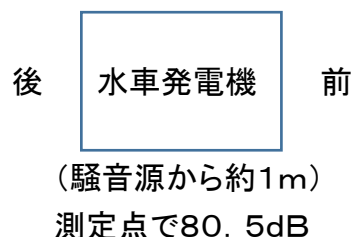
防音ボックス

③ 騒音レベルの測定

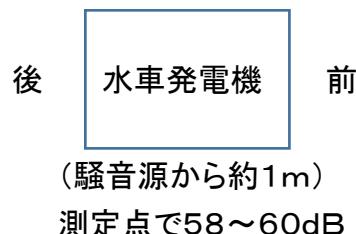
水車発電機を稼働させ、防音ボックス設置前と設置後の騒音レベルを比較。

- ・使用した騒音計---型式GM1351(メーカー: BENETECH)
- ・騒音測定時の条件: 稼働時水圧0.48MPa 発電出力: 570W~580W

○ 防音ボックス設置前の騒音レベル



○ 防音ボックス設置後の騒音レベル



④ 防音についての評価、まとめ

- ・近隣の住宅(約20mの位置)での騒音レベルは、45~45.5dBとなり体感では、ほとんど騒音を感じないレベルであった。
- ・防音ボックスによる防音効果は、騒音源から約1m離れた位置で、約20dBの騒音低減となっており、目標値15dB以上をクリアした。
- ・市販品の防音ボックス購入を検討していたが、のぞき窓及び配管用の切り欠き加工が必要であることから、製作という形をとった。

(3) 圧力管空気抜き弁の設置

① 使用部材

下表の部材を採用

1	空気弁用サドルバンド	配水ポリパイ用75x25	日邦バルブ(株)	7個
2	六角ニップル	32Ax20A	日立金属(株)	7個
3	ボールバルブ	VHB3 20A	大和バルブ(株)	7個

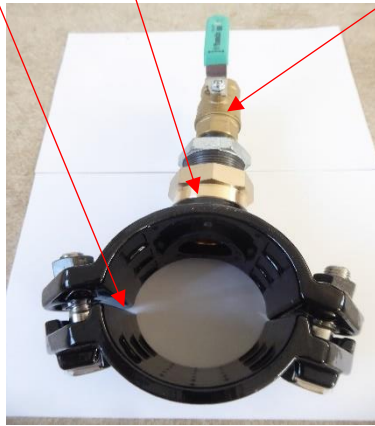
② 空気抜き弁の設置

- ・圧力管計7箇所を設置
- ・圧力管に空気抜き弁用の穴あけを行った(穴径はφ8mm)

③ 空気抜き弁設置の効果

- ・空気抜き弁設置後: 静水圧0.6MPa、稼働時水圧0.52MPa、発電出力594W
(参考)2019年4月18日: 静水圧0.58MPa、稼働時水圧0.48MPa、発電出力454W
- ・2019年4月18日のデータと比較し、稼働時水圧が0.04MPa、発電出力が140W向上

サドルバンド 六角ニップル 空気抜き弁(ボールバルブ)



部材のユニット組立



取付後の空気抜き弁

④ 圧力管空気抜き弁の評価とまとめ

- ・圧力管には、上下に波打っている箇所が複数あり、この位置に空気溜まりがあると想定して空気抜き弁の設置を行った。
- ・配管内に空気溜まりが存在すると、圧力管内の水圧が低下し、水車発電機の発電出力低下につながる事が証明できた。
- ・予算の都合上、自動的に空気が抜ける「空気弁」を採用しなかったが、恒久対策としては、メンテナンスが容易となる「空気弁」の採用が望ましい。

【参考資料】

空気弁用サドルバンドと空気弁について

配水ポリエチレン管対応 空気弁用サドルバンド

●小型急速空気弁 NAV-STD が配水ポリエチレン管に取り付けできます。
●穿孔機は「ポリエチレン管用ハンディドリル PHD」をご利用ください。

鋼鉄サドル (メカニカル式) KS-HPJW

出水現場や雨天環境下での施工もOK

EFサドル KS-EFVJW

電気融着工法 (EF) により取付管に密着

配水ポリエチレン管対応 浸透防止フィルム

耐油性、耐薬品性、耐酸性に優れた外部浸透防止用フィルムです。

サドルバンド

サドル径	サドル長さ	サドル重量
50	100	0.5
75	150	0.8
100	200	1.2
150	300	2.0
200	400	3.0

空気弁用サドルバンド

空気弁

寸法表

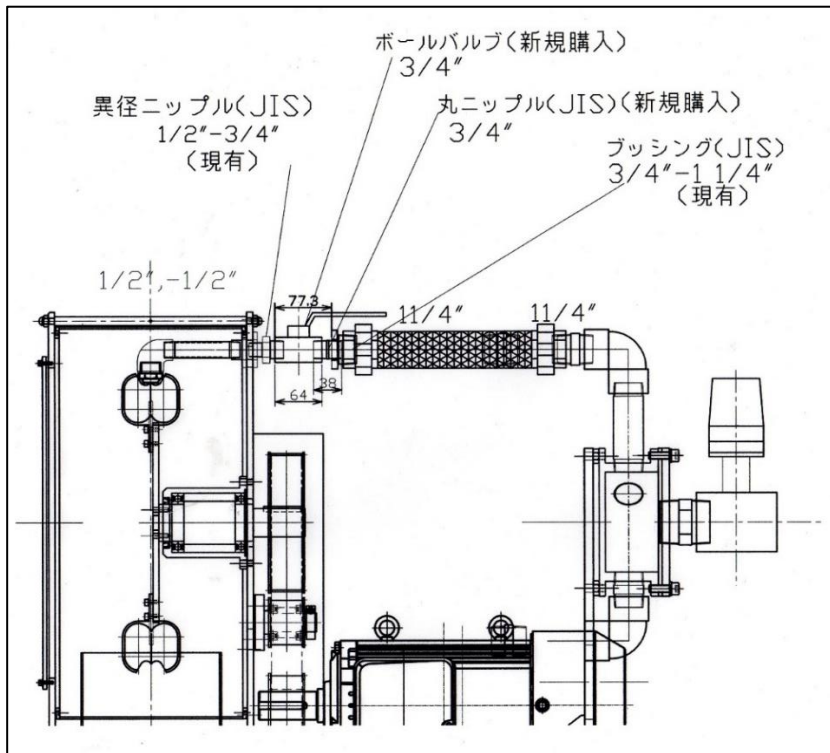
口径	全高	取付高	取付径	取付厚	取付穴径	取付穴間	取付穴径	取付穴間
50	100	50	50	10	10	100	10	100
75	150	75	75	10	10	150	10	150
100	200	100	100	10	10	200	10	200
150	300	150	150	10	10	300	10	300
200	400	200	200	10	10	400	10	400

空気弁

(4)ノズル数変更バルブの設置

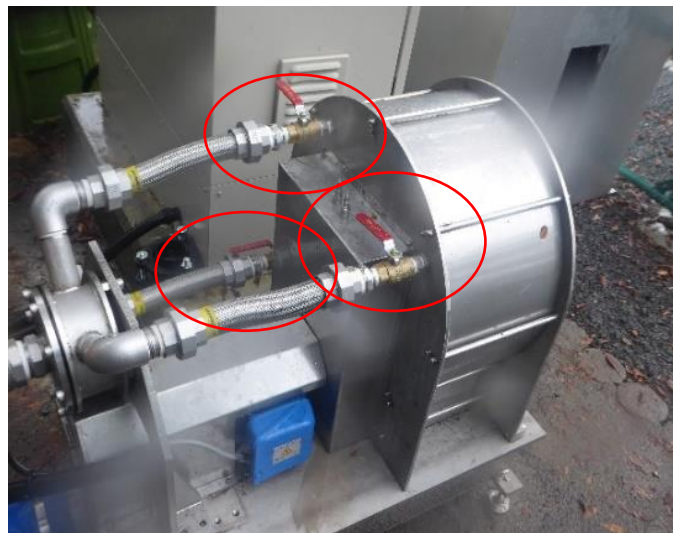
① 設計

- ・ノズル数変更用の手動バルブとして、ボールバルブを採用



② 設置

- ・3つのノズルにボールバルブを設置
- ・ボールバルブ設置に伴い、分岐ユニットの位置を圧力管側へ移動



③ ノズル数変更バルブの効果とまとめ

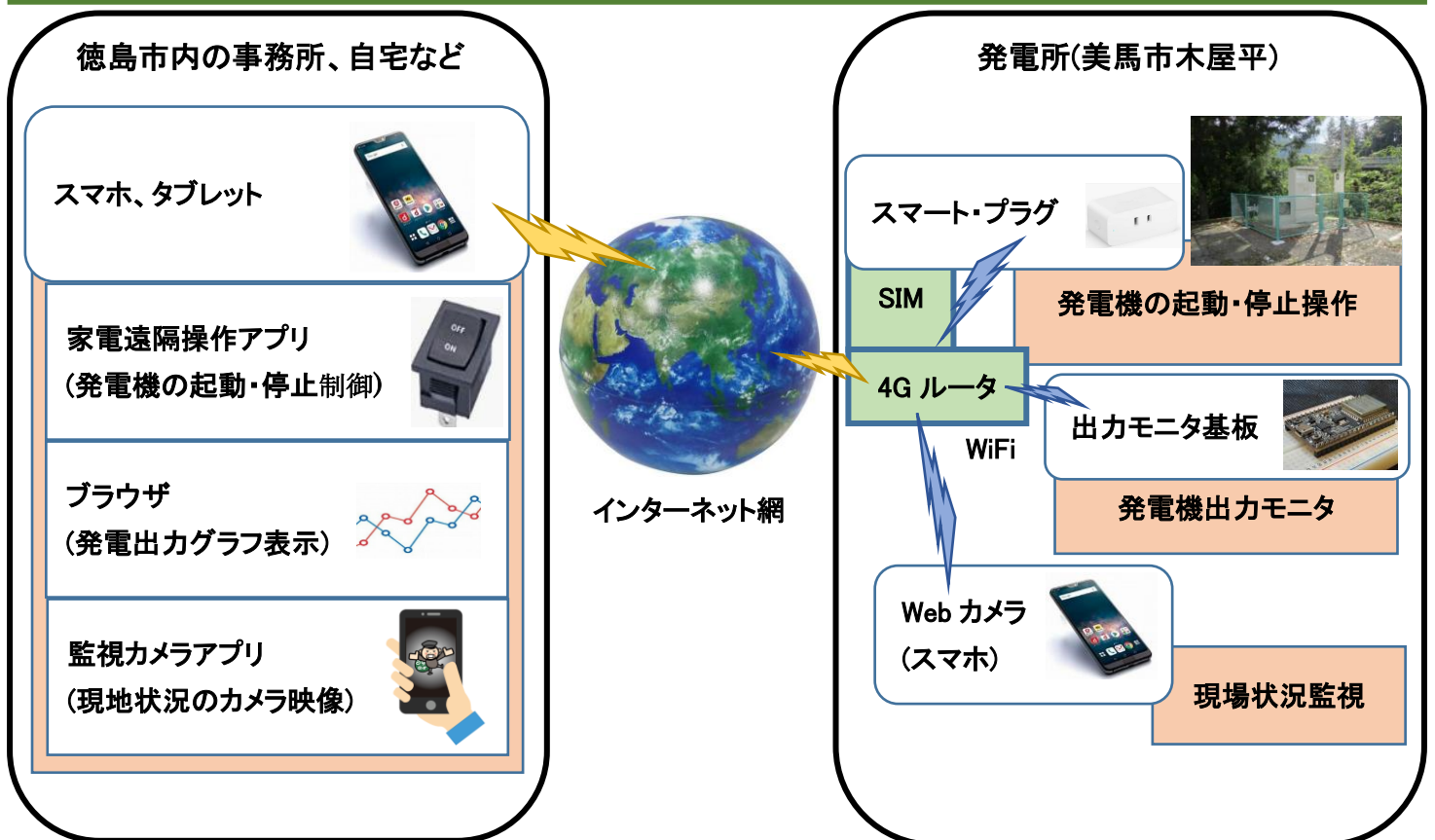
- ・濁水時、ノズル数を3本→2本へ変更することで、圧力管内への空気混入を防ぐことができた。
- ・バルブの設置は有効であったが、濁水が深刻になると、水車稼働に必要な水量が確保できず、濁水対策として十分ではない。(可能であれば、取水地点の取水効率向上が望ましい)

(5) 遠方起動停止装置の設置

① 装置の概要

下図の遠方起動停止装置を制御盤内に設置し、Smart Lifeアプリを用いることで遠方からでも発電機の起動・停止操作を実現した。

遠方起動停止装置の概要



② 効果とまとめ

- ・遠方から発電状況の確認や起動・停止操作ができるようになり、現地へ赴く回数が減った。
- ・本装置は、市販の電子機器とユーザーに開放されたアプリを組合わせたものであり、安価かつ容易に設置・導入できる点がメリットである。

4-7. ノズルの詰まりと主軸ベアリングの破損について

確認日:2019年8月20日

発生事由:2019年8月16日から発電出力が出ていないことから原因調査を実施

調査結果:ノズルの詰まり及び主軸ベアリングの破損が原因であった

- ① ノズルの詰まり-----3ノズルのうち1ノズル(左側)に小石と枯葉が詰まっていた



- ② ベアリングの破損-----回転板の分解で主軸にガタツキあり

破損原因:オイルシールの取付方向が反対で水が侵入したため



破損したオイルシール AC2847E0 (NOK)



破損した接触シールベアリング 6010LLU (NTN)

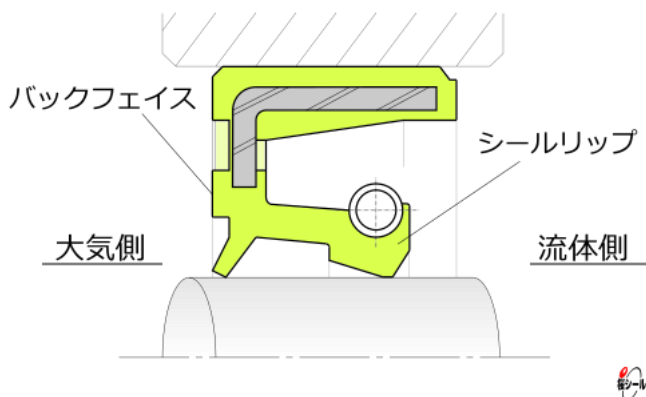


対策:ノズルの詰まり対策として、取水地点及び取水管(ネトロンパイプ)を定期的に清掃した。
なお、恒久対策としては、取水地点から水車までの間に沈砂地を設けることが望ましい。
オイルシールの取付誤りについては、取付図を記録として残し、再発防止を図る。

【参考資料】

オイルシールの取付方向について

シールリップが流体側(バックフェイスが大気側)になるよう、図示の向きで取付するのが正しい方向。



4-8. 主な故障履歴

3年間の実証実験の中で発生した故障やトラブルについて、下記表にまとめた。

発生年月日	故障内容	故障原因と対応について
2019年 8月7日	発電出力低下	降雨により取水地点に土砂の堆積発生 →取水地点の手入れ・清掃及びネトロンパイプの手入れにより 出力回復
2019年 8月16日	発電機異常停止	小石による詰まり(ノズル1本) →小石の除去及び手入れ実施 水車主軸にガタツキあり →8月30日に主軸及びベアリング交換実施
2019年 8月30日	発電機運転不可	配管に土砂の侵入 →9月19日、20日で土砂除去 ネトロンパイプ及び土嚢(堰き止め用)の流出、発電機運転不可 →9月19日、20日で取水地点の手入れ、土嚢の再設置 10月4日にネトロンパイプ新設し、運転再開
2020年 9月25日	発電出力低下	ネトロンパイプの詰まり →9月29日にネトロンパイプを手入れ・清掃し、出力回復
2020年 11月26日	発電出力低下	ネトロンパイプに落ち葉付着 →ネトロンパイプの手入れ・清掃し、出力回復
2020年 12月11日	発電出力低下 (運転停止)	取水地点の貯水量の低下により、運転停止 →12月23日に取水地点を清掃し、運転再開

2021年 1月18日	配管破損 (運転停止)	凍結による配管の破損、漏水により、運転停止 →3月3日に補修完了し、運転再開
2021年 8月20日	発電機異常停止	降雨により取水地点に土砂の堆積発生 →8月24日に取水地点の手入れ・清掃及びネトロンパイプの 手入れ、運転再開

4-9. 発電設備撤去前の運転確認及び各種データ採取

目的:実証実験を終えた水力発電設備の劣化診断をする

実施日:2022年9月7日

実施場所:木屋平総合支所

① 積算電力計の表示(動作確認前)

売電---4,961. 3kW. h

買電---1,806. 2kW. h

② 運転確認及び各種データ採取結果

各種データ採取を実施し、特に異常が無いことを確認。

なお、取水地点の湧水により、運転確認に必要な水量が十分でなかったため
運転確認は一部実施できず。(5分程度運転したのち水量不足となった)

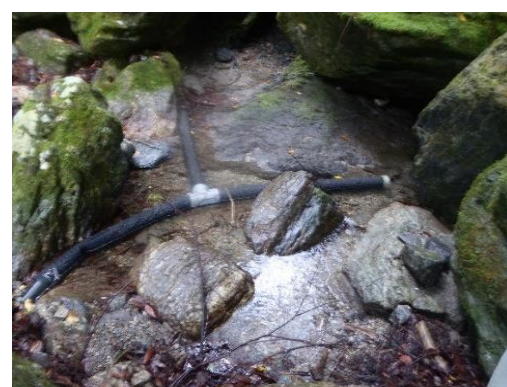
各種データ採取結果を次ページの表に示す。



水車外観



制御盤



取水地点の水量

診断項目	対象機器	内容	測定・確認箇所	使用機器	判定基準	実施結果
ゆるみ確認	端子及び ねじ締め 箇所	ゆるみが無いか	—	ドライバー スパナ	—	ゆるみ箇所 ⇒W1(内線) U1(内線) ※組立時本締め が出来ていない
絶縁抵抗 測定	発電機 外線ケーブル	対地間での 絶縁抵抗を測定	発電機単体 外線ケーブル単体	メガー	1MΩ以上	発電機単体 ⇒100MΩ 外線動力 ケーブル単体 ⇒すべて∞
漏電遮断器 動作確認	漏電遮断器	テストボタンに よる動作確認	—	—	—	正常に動作
運転状況 確認	装置全体	目視確認 異音確認 水圧確認	—	—	—	目視確認 ⇒異常なし 異音確認 ⇒発生なし 圧力計指示 ⇒0.6MPa
異常振動 確認	水車 発電機	振動計による 異常振動確認	水車 発電機周辺	振動計	参考値	水量不足のため 測定不可
温度上昇 確認	発電機	サーモビューワによる 温度確認	巻線部周辺 軸受部周辺	サーモビューワ	参考値	水量不足のため 測定不可

電圧・電流測定	
測定箇所	測定結果
電圧測定 制御ドライバ端子AC側(U/T1)	U1-V1: 151.8V
電圧測定 制御ドライバ端子AC側(V/T2)	V1-W1: 72.3V
電圧測定 制御ドライバ端子AC側(W/T3)	U1-W1: 51.8V
電圧測定 制御ドライバ端子DC側(+)	335.3V
電圧測定 系統連系インバータAC側(R/L1)	R5-S5: 253.3V
電圧測定 系統連系インバータAC側(S/L2)	R5-T5: 253.5V
電圧測定 系統連系インバータAC側(T/L3)	S5-T5: 252.8V
電流測定 発電機-制御ドライバ(Enewell-GD)間	0.68A
電流測定 制御ドライバ-系統連系インバータ(Enewell-GCR2)間	0.64A
電流測定 系統連系インバータ(Enewell-GCR2)-漏電遮断器間	0.15A

電圧・電流測定については、測定途中で水量不足となったため、参考値としての記録。

4-10. ペルトン水車の分解と劣化診断

目的: 3年間の実証実験を終えたペルトン水車を分解し、摺動部等にどのような摩耗や破損があるか確認

実施日: 2022年10月27日

実施場所: 吉野川北岸工業用水道施設

(1) ペルトン水車の分解



回転板とランナー



主軸のオイルシール部



伝動プーリー部



伝動プーリー部



テンションプーリー部



タイミングベルト



タイミングベルト



主軸分解後



主軸部



主軸ベアリングとハウジング



分解後のハウジング内部



ベアリング



主軸のオイルシール



破損したオイルシール



破損したオイルシール



腐食し破損したオイルシールのバネ



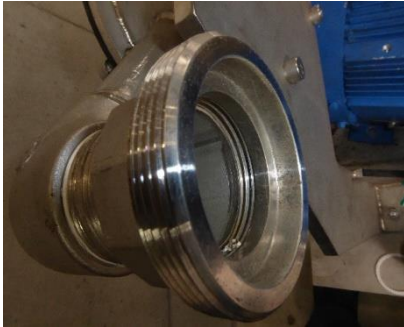
分岐ユニット



ノズルと接続管



ノズルの内部(3箇所)



給水の接続部(3箇所)



ノズルと接続パイプ

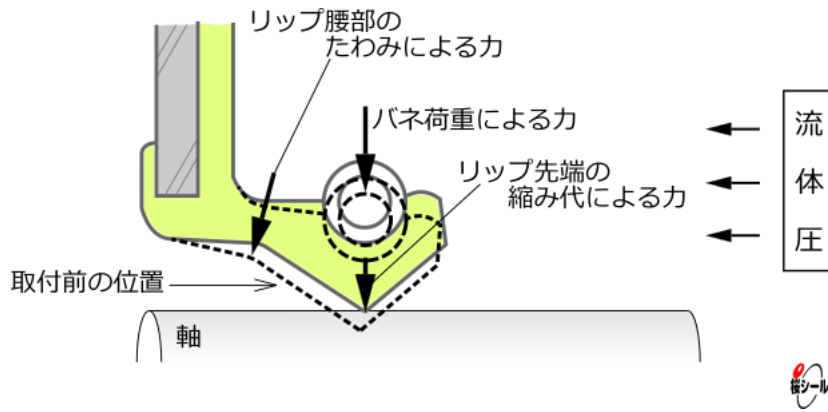


分解後の本体

分解した結果、オイルシールのバネが腐食により破損していることが分かった。これは、バネ材質が標準品のSWPA(ピアノ線)であったことが原因とみられる。今回の実証実験では、SWPA(ピアノ線)を使用した。本格的に導入する際にはSUS304のバネを使用するのが望ましい。

SUS304のバネを使用したオイルシールは、武蔵オイルシール工業(株)で購入可能。ただし、指定の商社を経由し購入することとなるため、注意が必要。(見積単価:約500円)

今回のケースでは、オイルシールのバネが腐食により破損し、リップ部が回転軸の表面を締め付ける力が働かなくなり、内部のベアリングに水が混入、ベアリング内部のボールからグリスが流れ出し、ボールの焼き付き現象により、想定よりベアリングの摩耗が進んだと考える。



(2) PT検査の実施

回転板、ランナー5個(抜粋)、シャフトについて、最初に浸透液、続いて現像液を対象物に噴霧し、ウエスで拭きとった後、目視による検査を実施した。その結果、回転板、ランナー5個、シャフトに亀裂の発生等もなく、問題無いことが分かった。



PT検査の様子



使用した浸透液



ランナー内側に浸透液を塗布



ランナー外側に浸透液を塗布



ランナー内側に現像液を塗布



ランナー外側に現像液を塗布



ランナー内側に現像液を塗布(拡大)



ランナー内側に現像液を塗布(拡大)



シャフトに浸透液を塗布



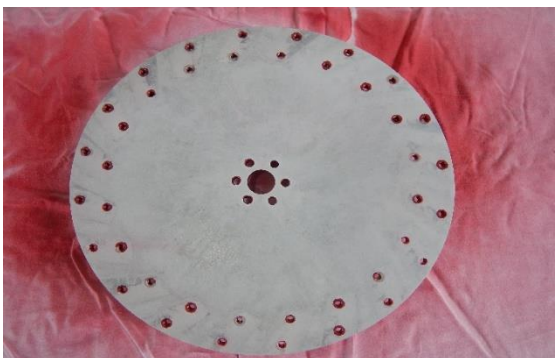
シャフトに現像液を塗布



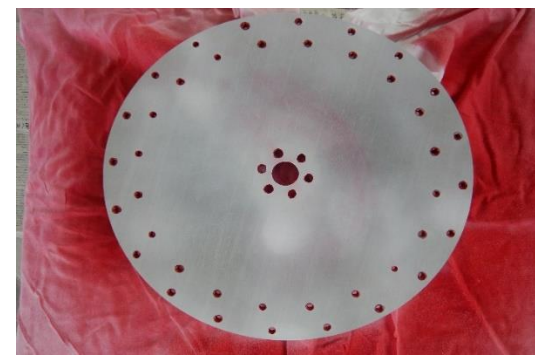
回転板に浸透液を塗布(両面)



回転板に現像液を塗布(両面)



拭き取り後(1面)



拭き取り後(2面)

4-11. 実証実験での反省点及び改良すべき点について

(1) 沈砂タンク設置について

実証実験では、沈砂タンクがない場合、どの程度水車に影響を及ぼすか検証を行った。その結果、ノズルに小石や落ち葉が詰まり、稼動に支障が出るケースが複数回あったことから、本格的に導入する際には、沈砂タンクの設置が望ましい。

参考として、約8～9年前に環境省の実証補助事業として、那賀町と阿南高専が連携し、効果を実証した沈砂タンクの写真を添付する。

【参考1】那賀町岩倉地区



取水地点



集水タンク1000L



【参考2】那賀町北川地区



取水・沈砂タンクの設置(北川地区)500L

【沈砂タンクの設置概要】

取水した水は、沈砂タンク上部に導水管を接続し、注水できるようにする。

沈砂タンクの出口配管は、沈砂タンク底面より少し上がった位置の出水口から導水管で接続し、出口配管には手動バルブを設ける。

これにより、導水管に入った小石やゴミ類は、タンクの底に沈みこみ、導水管内に混入した異物は分別されるため、水車への影響を大幅に低減できる。

(2) 圧力管の選定と配管接続について

実証実験の結果をふまえ、発電出力向上のためには、下記2点が改良すべき箇所といえる。

① 圧力管は極力大きな内径の管を採用

費用との兼ね合いとなるが、圧力管の内径は極力大きなものを採用し、流体と圧力管の摩擦による圧力損失をいかに減らすかが重要である。

この実証実験では、内径75mmを採用したが、予算が許せば内径100mmもしくは125mmを採用していれば、より大きな発電出力が得られたと考える。

【内径100mmの流路損失について】

立地条件及び圧力管の仕様より

$$\lambda=0.01, d=0.1\text{m}, L=560\text{m}, Q=0.01\text{m}^3/\text{s}, g=9.8\text{m}^2/\text{s}$$

圧力管の断面積は

$$S=\pi\times(0.1/2)^2=0.00785\text{m}^2$$

管内流速は

$$V=Q/S=0.01/0.00785\approx 1.274\text{m/s}$$

ダルシー・ワイズバッハの式より

$$\begin{aligned} \text{内径100mmの流路損失 } \Delta H &= 0.01 \times 560 / 0.1 \times (1.274)^2 / (2 \times 9.8) \\ &\approx 56 \times 0.08281 \approx 4.64\text{m} \end{aligned}$$

【内径125mmの流路損失について】

立地条件及び圧力管の仕様より

$$\lambda=0.01, d=0.125\text{m}, L=560\text{m}, Q=0.01\text{m}^3/\text{s}, g=9.8\text{m}^2/\text{s}$$

圧力管の断面積は

$$S=\pi\times(0.125/2)^2\approx 0.0123\text{m}^2$$

管内流速は

$$V=Q/S=0.01/0.0123\approx 0.813\text{m/s}$$

ダルシー・ワイズバッハの式より

$$\begin{aligned} \text{内径125mmの流路損失 } \Delta H &= 0.01 \times 560 / 0.125 \times (0.813)^2 / (2 \times 9.8) \\ &\approx 44.8 \times 0.0337 \approx 1.51\text{m} \end{aligned}$$

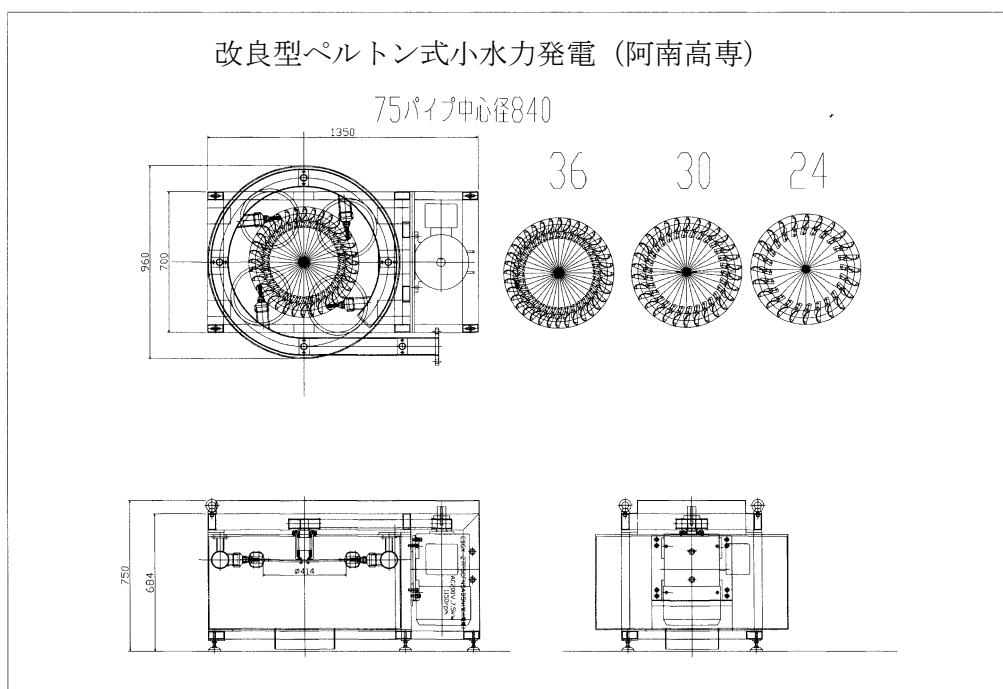
また、圧力1MPa対応が可能なポリエチレン管(PE管)の呼び径による価格差調査を行ったので、下表にまとめる。長さは30mで統一。(価格は税抜き)

呼び径	φ75	φ100	φ125
価格	49,000	83,000	123,000

②エルボや異径継手の多用を避け、流路損失を減らす

実証実験用に製作したペルトン水車は、輸送を考慮し、コンパクト化を図った。その結果、分岐ユニットからノズルまでの間で、エルボや異径継手を多用することとなり、流路損失が大きくなってしまった。この反省点をクリアすべく、当方で改良型のペルトン式水車発電機の設計を行い、完成したのが下図である。

この改良型ペルトン式小水力発電の特長は、給水圧力管径を75mmと大径サイズを採用し、4箇所のノズル直前まで大きな円弧状に曲げた構造である。この構造により、従来のものより流路損失が低減され、総合効率としては、50%超と高効率化が期待できる。



(3)小水力発電の適地選定について

今回の実証期間では、取水地点の取水能力の低下により、発電機を停止せざるを得なかったケースが多くあった。原因の一つとして、適地選定時、取水地点は水量が十分貯まる状態であったが、台風等により、取水地点に土砂が流れ込み、水深が浅くなったことで、十分な水量が貯められない状態になったことが挙げられる。

今後、適地選定する際には、土砂が流れ込んでくる可能性も考慮すべきである。

(4)凍結による配管の破損について

冬季は気温の低下により配管が凍結し、その影響により45° エルボが破損するというトラブルがあった。この問題は、木屋平総合支所が山間部にあり、平地より凍結リスクが高いことを考慮した運用や対策ができていなかったことで発生した。

改善点としては、下記2点が挙げられる。

運用面では、冬季(12月～3月)は、配管のブロー弁を小開することで、常に水が流れている状態にし、配管の凍結防止を図る。恒久的な対策としては、金属配管部には保温材を取付することで、凍結リスクを低減する。

5. 木屋平釣り堀での実証実験

(1) 発電機仕様

クロスフロー式小水力発電機仕様

	大項目	項目	仕様	備考
1	立地条件	総落差	12m	阿南高専にて計測
2		有効落差	7m	阿南高専にて計測
3		流量	20L/秒	阿南高専にて計測
4		設置場所	美馬市木屋平釣り堀	
5	給水	方法	圧力管	
6		管径×長さ	内径75mm×4本	
7		接続方法	3FNジョイント	
8		取水	既設の圧力管を流用	
9		バルブ	無し	
10	排水と設置	方法	貯水槽へ排水	
11		設置台	設置台を新設して貯水槽上に水車を設置	
12	水車	方式	水平軸回転クロスフロー方式	
13		型式	CHW-05	
14		水車寸法	外径318mm×内径169mm×巾600mm	
15		羽根枚数	12	
16		水車横分割数	4	
17		ガイドベーン	全幅に設置、開度は外部ネジで調節可能	
18		外形寸法	巾820mm×奥行780mm, 高520mm	
19		重さ	約100kg	
20	伝動、増速	伝動増速手段	歯付ベルトと歯付プーリー	
21		増速比	3	
22	発電システム	発電機種類	永久磁石付同期発電機	
23		発電機容量	1.5kW	
24		発電機電圧	200V	
25		定格回転数	1,150rpm.	
26		系統連系機器	パワーコンディショナー、ドライバー	
27		制御盤、型式	屋外仕様、CHW-05C	
28		制御盤寸法	巾1000mm×奥行700mm×高2000mm	
29		付帯機器	高出力抑制ユニット、同抵抗ユニット	
30		同上	ACリアクトル	
31		同上	フィルターユニット	
32		同上	直流分流入防止用トランス	
33	発電出力	理論発電出力	400W	
34		年間発電出力	3,360kW.h	

(2) 設置写真



クロスフロー水車



制御盤

(3) 考察

① 立地条件

- ・総落差12m（現地での実測による）
- ・既存の内径75mmの管4本（アメゴ養殖用池に給水している管を流用）
- ・取水地点から発電機までの配管にはうねりが複数箇所あり

② 理論発電出力

発電出力 $P=9.8QH \eta=9.8 \times 7 \times 0.02 \times 0.3 \doteq 0.4\text{kW}$
(有効落差:7m, 流量: $0.02\text{m}^3/\text{s}$)



③ 実際の発電出力

制御盤の発電出力表示は0.043~0.047kWであった
発電出力 $P=9.8QH \eta=9.8 \times 0.8 \times 0.02 \times 0.3 \doteq 0.047\text{kW}$
(有効落差:0.8m, 流量: $0.02\text{m}^3/\text{s}$)

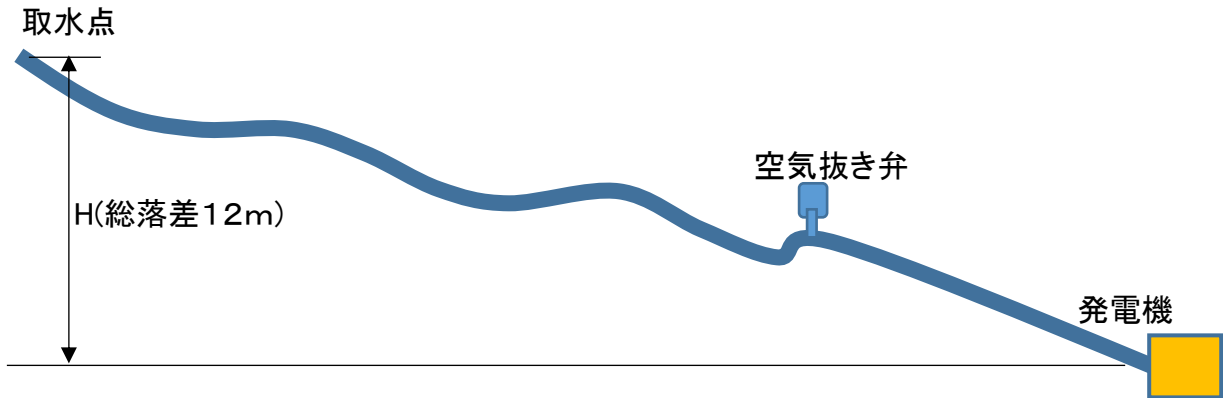


④ 水車回転数からの発電出力の計算

稼働中の水車の回転数は120rpm. だったので
増速比3倍により、発電機の回転数は360rpm. であったと考えられる
ここで、発電機の回転数360rpm. と定格回転数1150rpm. の比は
 $360/1150=1/3.2$
3乗の比で考えると $1/32.8$
よって、水車回転数から導き出される発電出力は
定格出力 $1.5\text{kW} \div 32.8 = 0.0457\text{kW}$
(実際の発電出力とほぼ一致する)

⑤発電出力が理論発電出力と乖離している原因

- ・老朽化による配管の凹み、配管が上下に波打ち、うねっている箇所が複数あり、空気溜まりがあると思われる
- ・総落差(12m)相当の水頭圧が得られず、有効落差が約0.8mであったことから、配管が開水路(樋)状態になっている



⑥総括

既存の圧力管の老朽化や配管にうねりがあることで、想定していた水頭圧が得られなかったことが、問題点であることが分かった。

この問題を解決するには、原因となっている箇所を特定し補修するか、既存の圧力管を流用せず、新たな圧力管を敷設するなどの対応が必要である。

6. マイクロ・ピコ水力発電設備の撤去

実証実験が完了したため、マイクロ・ピコ水力発電設備(木屋平総合支所及び木屋平釣り堀)の撤去及び撤去した制御盤等を指定の倉庫へ搬入した。

(1) 木屋平総合支所



制御盤及び水車撤去後



コンクリート基礎ハツリ



基礎及びフェンス撤去後



撤去したコンクリートとフェンス



撤去した電力引込線及び計器



電力引込線及び計器撤去後

(2) 木屋平釣り堀



制御盤撤去後



電線管の切断



基礎部の電線管切断

(3) 倉庫搬入



倉庫搬入時



制御盤の搬入



搬入完了後

7. 徳島ビジネスチャレンジメッセ2022出展

目的: 実証実験の認知度向上や小水力発電の普及促進のため、県民の方や事業者が多数来場する徳島ビジネスチャレンジメッセにおいて、木屋平総合支所で使用したペルトン水車を出展し、広く情報発信する。

実施日: 2022年10月13日～10月15日

場所: アスティとくしま

概要: 阿南高専のブースに木屋平総合支所で使用したペルトン水車を展示。

展示パネルを3枚(A1サイズ)用意し、モニタ画面には、木屋平総合支所の発電機が稼働している動画を表示。また、配布用パンフレットは200部用意した。



徳島ビジネスチャレンジメッセの展示全景

効果: 会場となったアスティとくしまには、3日間で1万人以上が来場。阿南高専のブースに多くの方が訪れ、ペルトン水車に興味を持ち、詳細を知りたいという声も挙がるなど、盛況であった。

19. まとめ

木屋平マイクロ・ピコ水力発電の系統連系を含めた実証事業を阿南高専が受託し、計画どおり3年間の実証事業を完了することができた。

今回、非常用電源としての適用については、実証することができなかった。しかしながら、水量さえ確保できれば、24時間連続運転し、問題なく発電できたことから、設備を改良すれば、災害時の非常用電源としての活用も期待できる。

実証実験では、FIT を利用した売電を行ったが、FIT 申請するに当たり、圧力管を敷設する山の所有者から登記書類を集めることや、申請手続きが煩雑で、多大な時間と労力を要した。しかしながら、今回の実証実験を通して、ノウハウの蓄積と手続きのマニュアル化が進んだため、今後FIT 申請を行う場合、かなりの省力化が見込めるようになった。これは、大きな成果である。

また、今回使用した水車は、加工、組み立て、設置工事まで、徳島県内の会社に委託し、無事完遂できたことで、小水力発電における地産地消のモデルケースとなった。この地産地消モデルは、徳島ビジネスチャレンジメッセ2022において、上々の反響であったことから、今後県内で小水力発電導入の機運が高まるきっかけとなることを期待したい。

今後とも、政府方針の大目標に向けて、やれる所から、着実に成果を積み上げていきたいと考えている。

徳島県企業局をはじめ、美馬市及び地域の方々による、本実証事業全体に対しての絶大なご協力に感謝申し上げます。

—以上—