

小水力発電施設の導入について —芽室川西地区の事例—

帯広開発建設部 帯広農業事務所 第1工事課

○谷口 雄二
岩渕 雄大
野中 一瞳

国営かんがい排水事業 芽室川西地区は、北海道帯広市及び河西郡芽室町に位置する約2万haの受益地において水需要の変化に対応した用水再編により新たに畑地かんがい用水を確保し、用水路や水源である美生ダムの管理設備等の整備を行い、併せて小水力発電施設整備による維持管理費の低減を図るものである。

本稿では、用水施設整備に併せ新設する小水力発電施設の導入に係る調整及び整備に向けた技術的検討状況について紹介する。

キーワード：小水力発電、畑地かんがい

1. 地区概要

本地区は、帯広市及び芽室町に位置する20,623haの農業地帯であり、小麦、ばれいしょ、てんさい、豆類の畑作物を中心に、スイートコーン、ながいも等の野菜類を組み合わせた農業経営が展開されている。

地区内の農業用水は、国営芽室土地改良事業（昭和56年度～平成19年度）により造成された用水施設により芽室町の区域に配水されているが、近年の営農状況の変化に伴い水需要が変化している。

一方、帯広市の区域では用水施設が未整備であるため、農業用水は主に降雨に依存しており、農業生産性が低く、営農上の支障となっている。

また、美生ダムでは経年的な劣化により、管理設備の故障等が生じ、農業用水の安定供給に支障を来すとともに、施設の維持管理に多大な費用と労力を費やしている。

このため、本事業では水需要の変化に対応した用水再編により新たに畑地かんがい用水を確保し農業生産性の向上及び農業経営の安定を図り、併せて用水路や美生ダムの管理設備、小水力発電施設等の整備を行い、維持管理の軽減を図るものである（図-1）。

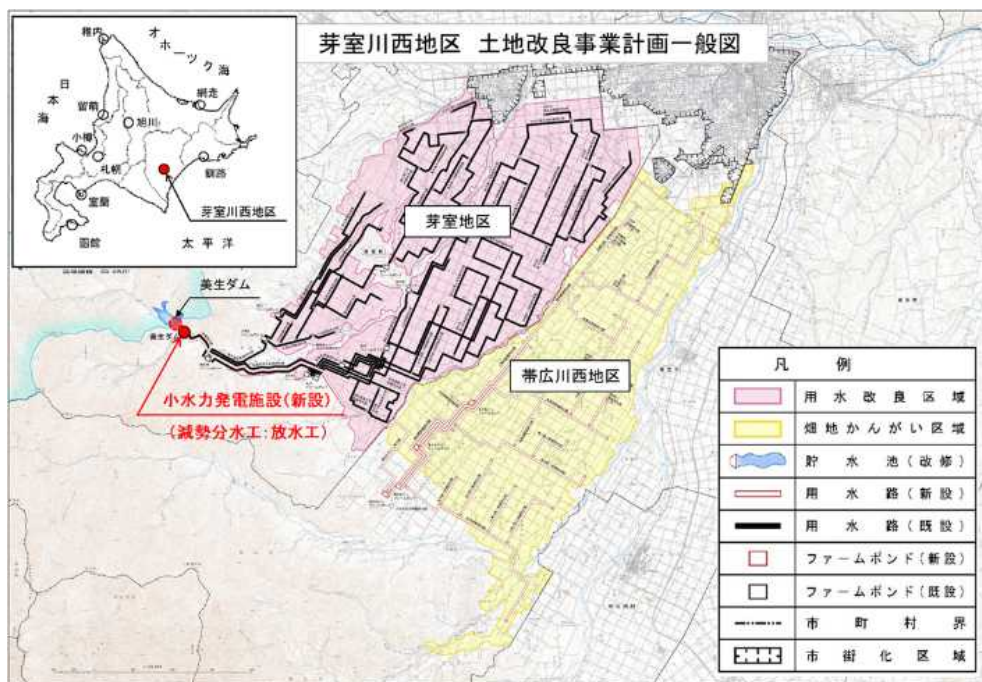


図-1 芽室川西地区用水施設位置

表-1 美生ダム諸元

形 式	かんがい／重量式コンクリート・フィル複合
所 在 地	河西部芽室町字上美生
河 川	十勝水系美生川
堤高／堤頂長／堤体積	47.2m／350m／201千m ³
有効貯水量／総貯水量	600万m ³ ／940万m ³
洪水吐	13.5m×5門(自由越流方式)
取水形式	直立4段式シンダーゲート
着手／施工	昭和63年(1988)／平成11年(1999)
造成事業	国営かんがい排水事業「芽室地区」(S56～H19)
関係事業	国営かんがい排水事業「芽室川西地区」(H29～)
かんがい面積／関係市町	11,784ha／芽室町、8,839ha／帯広市



写真-1 美生ダム

2. 小水力発電の構想について

(1) 本地区における小水力導入の背景

平成24年3月、政府は農業の体質強化と震災からの復興等を図るため、平成24年度～28年度までの5年間の土地改良事業の基本方針となる「土地改良長期計画」を策定し、その中の政策課題“地域を「育む」”において、「小水力発電等の自立・分散型エネルギーシステムへの移行と美しい農村環境の再生・創造」を政策目標に掲げ、小水力発電施設により発生した余剰電力の売電収入の充当範囲を地域の土地改良施設全体の維持管理費にまで拡大し、小水力発電など農業水利施設等を活用した再生可能エネルギーの導入促進を施策とした。

また、芽室町では広域にわたる水利施設の維持管理に多大なる労力及び費用を要しており、維持管理費の負担軽減が課題となっていた。これらをふまえ、本地区においても農業水利施設（美生ダム）に着目し、本地区における用水施設の維持管理費の負担軽減を目的として、水力（農業用水）を利用した小水力発電施設の導入の可能性について検討を行った（表-1、写真-1）。

(2) 整備による効果の検討

本地区の事業計画における小水力発電施設の導入に関して検討フローのとおり行った（図-2）。

検討フローから発電計画の経済性評価は、当該計画による発電原価と売電価格を概略比較して判定した。

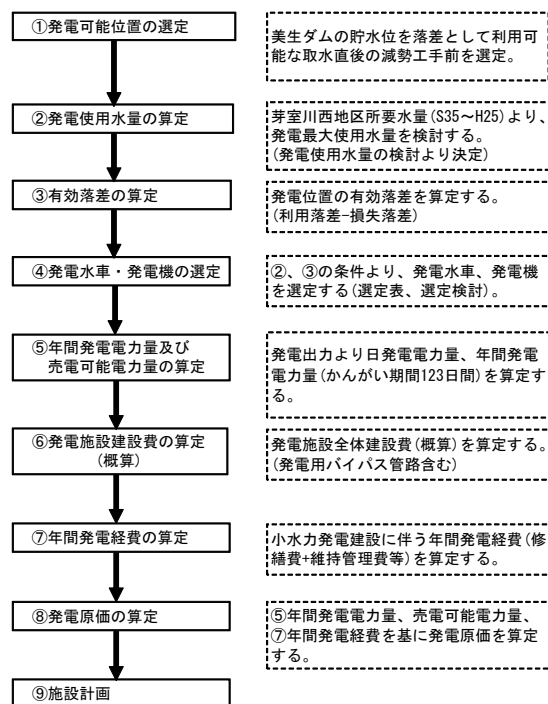


図-2 小水力発電施設の導入に関する検討フロー



写真-2 小水力発電施設 検討位置

3. 最終的に設置することになった発電機に係る検討経緯

本地区の小水力発電施設の位置は、発電使用水量が確保可能であり美生ダムの貯水位を落差として利用可能な減勢工手前とした。

発電出力は、発電所の位置や既設導水管利用の有無、発電使用水量等により変化する。発電所の位置決定にあたっては、ダム直下より既設減勢工までの区間にて、既設減勢工近接のほか発電所建設可能なダム直下の副ダム付近、ダム取付護岸最下流付近、既設減勢工付近及び既設減勢工に近接した4地点において、最も費用対効果が優れる地点を選定した（写真-2）。

(1) 基本設計の概要

美生ダム地点直下で発電を行う場合、発電に利用可能

な流量は主に「かんがい取水量」である。また、美生ダム満水時に洪水吐から越流している「無効放流量」については、減勢工吐水槽から美生川への放流施設を整備することで発電に利用することが可能となる（図-3）。

「平成 30 年度芽室川西（一期）地区小水力発電施設基本設計業務」では、「国営芽室川西土地改良事業」における水利用計画を実行した場合の美生ダム操作後計算を行い、昭和 59 年～平成 25 年（30 ヶ年）の流量変動を整理し、そのデータを基礎資料として最適案の検討を実施した。

(2) 発電期間

美生ダム取水口は通年取水となっているが、9 月～翌年 4 月については肥培かんがいや育苗用水のみの取水となるため、取水量は 0.01 m³/s～0.204 m³/s と極めて小さく、この時期でのかんがい取水量のみを利用した発電は不可能である。そのため、無効放流を含めて利用することとし、通年を対象とした（表-2）。

(3) 発電使用水量の検討

美生ダムにおける小水力発電計画は、美生ダムの貯水位と放水位の落差を利用するもので、発電に使用する水量は、下記 2 種類とし、かんがい用水の最大通水量（Q＝4.518 m³/s）の利用を基本とした（図-4）。

- ①美生ダム流入量の一部（美生ダム地点制限流量、ダムへの貯水量を除いた量）
- ②貯水利用量（かんがい用水の貯水利用時）

a) 発電利用可能量

美生ダムにおける小水力発電計画は、発電使用水量を

数ケース想定し比較検討の上、適正規模を決定した。

ケース検討を行う際の最大使用水量は、豊水～平水流量（10 ヶ年平均値）を目安に流量設定を行った（表-3）。

また、発電使用水量を決定する際に実施した検討手順フローを示す（図-5）。

b) 最大使用水量

最大使用水量は、各検討ケースについて kWh 当り建設費比較を行い、最も安価となるケースの最大使用水量を採用する（表-4）。

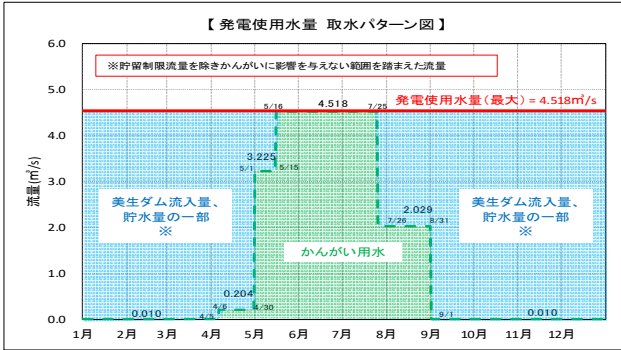


図-4 美生ダム 取水パターン

表-3 美生ダム発電利用可能量流況

(かんがい用水量+利用可能量)

年度	美生ダム発電利用可能量流況 (かんがい用水量+利用可能量)						単位: m³/s
	最大 1日	最小 365日	常時 365日	一 40日	豊水 95日	平水 185日	低水 275日
H16	17.336	0.002	0.076	7.615	5.031	2.212	0.837
H17	16.965	0.001	0.081	9.081	4.833	2.622	0.891
H18	19.075	0.023	0.111	11.618	5.868	2.971	0.803
H19	20.744	0.001	0.205	11.003	5.142	2.004	0.51
H20	13.763	0.002	0.002	6.774	4.404	2.709	1.273
H21	18.333	1.169	1.236	12.086	7.365	4.745	2.722
H22	27.228	1.423	1.543	17.939	8.163	4.979	3.222
H23	27.907	1.592	1.601	11.624	6.834	4.297	2.590
H24	32.745	1.392	1.414	10.544	5.567	3.411	2.034
H25	24.189	1.750	1.911	13.013	7.978	4.592	2.353
平均	21.829	0.736	0.818	11.130	6.119	3.454	1.724

- ①. 発電利用可能量の整理(上表)
- ②. ①の豊水、平水流量を目安に最大使用水量の基準値を設定し、基準値から0.5m³/sずつ増減させたケースにてダム収支計算を実施(各ケースの貯水位変化を把握)
→かんがい最大流量4.518m³/sを基準値とし、5.5～3.5m³/sのケースについて実施した
- ③. 各ケースの水理計算及び②のダム水位により、有効落差を整理
- ④. 最大使用水量と有効落差の組み合わせにより、適用可能な水車形式を選定
→クロスフロー水車、フランシス水車が選定された
- ⑤. 水車形式、台数、最大使用水量の条件を合わせた各ケースについて、各々の年間発電電力量を算出
- ⑥. ⑤を建設費で除したkWh当り建設費が最も安いケースを最適発電計画として採用
→クロスフロー水車、1台、最大使用水量4.518m³/sとした

図-5 最大使用水量検討フロー

表-4 最大使用水量検討比較

水車形式	水車台数: 1 台		水車台数: 2 台	
	ケース	最大使用水量 Qmax(m³/s)	ケース	最大使用水量 Qmax(m³/s)
クロスフロー 水車	ケース①s	5.500	ケース①w	5.500
	ケース②s	5.000	ケース②w	[大: 4.780] + [小: 0.720]
	ケース③s	4.518	ケース③w	[大: 4.340] + [小: 0.660]
	ケース④s	4.000	ケース④w	[大: 3.928] + [小: 0.590]
	ケース⑤s	3.500	ケース⑤w	[大: 3.470] + [小: 0.530]
横軸 フランシス 水車	ケース①s	4.518	ケース①w	[大: 3.040] + [小: 0.460]
	ケース②s	4.000	ケース②w	[大: 3.218] + [小: 0.782]
	ケース③s	3.500	ケース③w	[大: 2.850] + [小: 1.150]
	ケース④s	3.000	ケース④w	[大: 2.500] + [小: 1.000]
	ケース⑤s	2.500	ケース⑤w	[大: 2.140] + [小: 0.860]

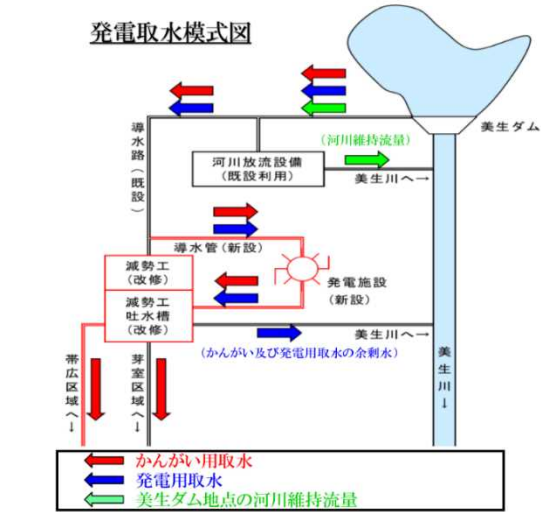


図-3 発電取水模式図

表-2 期別取水量

	期別取水量(m³/s)				
	I 期	II 期	III 期	IV 期	V 期
	5/1～5/15	5/16～7/25	7/26～8/31	9/1～4/5	4/6～4/30
美生ダム取水口	3.225	4.518	2.029	0.010	0.204

(4) 発電形式の特徴

農業用水利施設の発電形式は、落差利用型と流水利用型に大別され、美生ダムにおける発電は、落差利用型の発電形式となる。

農業用水を利用した小水力発電導入の手引きでは、落差利用型の小水力発電は、位置エネルギーを利用して電力を発生させており、位置エネルギーの大きさは高さ重量の積に比例しているため、落差と流量が大きいほど大きな電力を得ることができる。

使用水量 3.5～5.5 m³/s、有効落差 20m程度の場合、「クロスフロー水車」、「横軸フランシス水車」が選定される(図-6)。

横軸フランシス水車の長所は、落差変化に対しては、効率低下が少ないことである。これに対し、クロスフロー水車の長所は、一般的に流量変化への対応範囲が広いこと、構造が横軸フランシス水車に対して簡単であるため価格が安いことが特徴である(表-5)。

(5) 有効落差

有効落差の設定は、水車形式によって異なり「横軸フランシス水車」と「クロスフロー水車」においては次式のとおりとなり「横軸フランシス水車」の有効落差が大きくなる(図-7)。

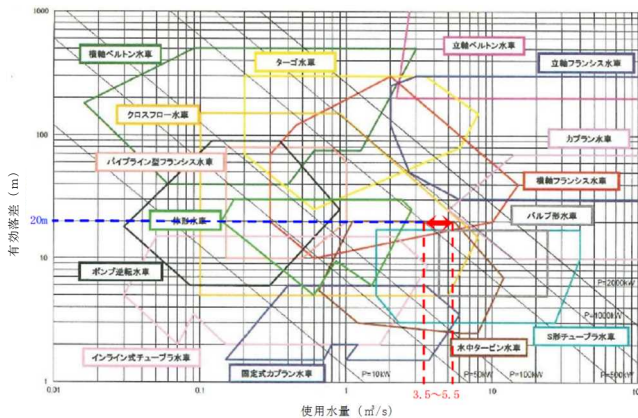


図-6 水車選定¹⁾

表-5 水車特性対比表

項 目	横軸フランシス水車	クロスフロー水車	備 考
イメージ写真			
流量変化対応範囲	最大使用水量の40%まで	最大使用水量の15%まで(羽根形状によって異なる)	
落差変化対応範囲	最大有効落差の70%まで【○】	最大有効落差の70%まで【○】	
有効落差	吸出し管を使用するため、有効落差は上下流水位差となり、クロスフロー水車に対して有効落差が若干大きくなる。【○】	有効落差は上流水位－水車ランナ軸中心までとなるため、横軸フランシス水車に対して有効落差が若干小さくなる。【△】	クロスフロー水車は、ドラフトチューブ設置により、横軸フランシスと同様の有効落差とすることが可能
価格	一般的にクロスフロー水車より高価である。【△】	一般的に横軸フランシス水車より安価である。【○】	

- ・クロスフロー水車 有効落差＝(総落差－ランナ中心と放水口の差)－損失落差
 - ・横軸フランシス水車 有効落差＝総落差－損失落差
- 美生ダムの小水力発電施設については、約 30m 程度の低落差であり、35m 程度の落差であればドラフトチューブ効果（ドラフトチューブ効果とは、ランナ出口にドラフト（吸出し）管を取り付けて出口で流れを減速させ、ランナ出口の圧力を下げる事で有効落差を加算することができる効果である。）が期待できる（メーカー聞き取り）。

そのため、クロスフロー式水車も横軸フランシス水車と同様に次式のとおりとなる。

・有効落差＝総落差－損失落差

a) 損失落差

損失落差は、スクリーン損失、流入損失、流出損失、バルブ損失、急拡損失、急縮損失、漸拡損失、曲がり損失、屈折損失、分流損失、摩擦損失が考えられる(表-6)。

b) 有効落差

最高出力時の有効落差は、次式によって求められる。

・有効落差＝総落差－損失落差
＝(取水水位－放水水位)－損失落差
＝400.70m－367.67m－10.22m
＝22.81m

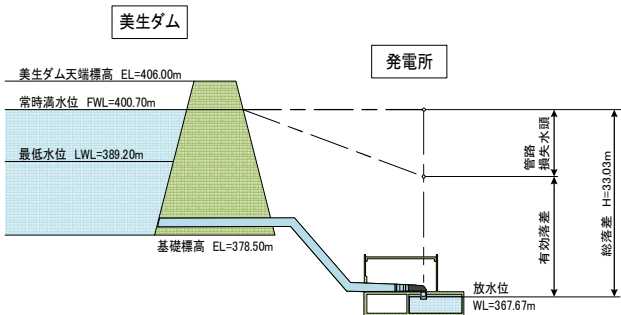


図-7 有効落差

表-6 最大使用水量ごとの損失落差

最大使用水量毎の損失落差		
項目	単位	損失水頭
①スクリーン	m	0.01
②流入	m	0.11
③流出	m	0.26
④バルブ	m	0.38
⑤急拡	m	0.02
⑥急縮	m	0.10
⑦漸拡	m	0.07
⑧漸縮	m	0.02
⑨曲がり	m	0.53
⑩屈折	m	1.88
⑪分流	m	1.22
⑫摩擦	m	5.62
損失水頭の合計	m	10.22

(6) 発電可能水位

ダムの貯水位は日々変化し、その水位変動はそれぞれのダムの特性によって異なるが、頭首工や水路の水位変動に比べ、極めて大きな変動が生じる。

美生ダムにおいては、ダム貯水位の変動幅が 11m 以上 (FWL400.7m～LWL389.2m) あるため、水車の特性や流量を考慮し、水位の変動に対する発電利用可能範囲を決定する必要があるが、個別のメーカー及び水車により異なるため、ここでは「中小水力発電ガイドブック²⁾」より、発電利用可能な落差変動幅を 115%～70%とした。

基準水位は、常時満水位 (400.7m) とし、上限値 (総落差に対する 15%水位) 下限値 (落差に対する 70%水位) は、次式で求まる (図-8)。

- ・ 上限：基準水位－有効落差× (1+0.15)
=400.7m+22.81m×0.15=404.10m
- ・ 下限：基準水位－有効落差× (1-0.7)
=400.7m-22.81m×0.30=393.90m
- ・ 発電可能水位：WL404.1m (発電上限水位)
～WL393.90m (発電下限水位)

(7) 売電単価

売電価格は、経済産業省資源エネルギー庁のホームページに示されている売電単価を採用する。なお本売電価格の有効期限は 20 年である。

a) 発電原価

発電原価は、年間経費を売電可能電力量で除した値で、次の算式により算定する。

発電原価 (円/kWh) = 年間経費 / 売電可能電力量

b) 年間経費

年間経費は、「農業用水を利用した小水力発電導入の手引き³⁾」に示されているように、直接費、資本費、管理部門費の合計により算出する。

上述の内容をふまえ、当該施設における売電単価と年間経費 (建設費用、発電原価、その他管理費) を比較し経済性の評価を行った (表-7)。

美生ダムにおける小水力発電について、発電原価を算定した結果、F I T 制度を適用した売電価格：29 円/kWh (消費税抜き) に対し、2 倍以上の費用対効果が得られることが分かった。

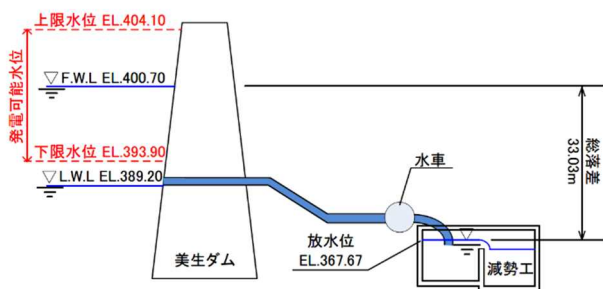


図-8 発電可能水位

4. 検討における留意点

芽室川西地区における小水力発電の発電計画は、以下に示す F I T 制度適用単価を前提に計画されており、2022 年度からその適用には、「地域活用要件」を満たす必要があるとされている。

地域活用要件の概要は、「事業計画策定ガイドライン (水力発電)」の中で「中小水力発電について、1,000kW 未満かつ地域活用要件を満たすものに限り、F I T 制度の新規認定を認めることとする」と示されている。

この F I T 申請の新規認定に向け必要となる「地域活用要件」について、本施設における適用の可否を施設管理者との協議内容を踏まえ検討を行い、地域一体型の地域活用要件である「通常時の発電電力を蓄電し、非常時の電力として利用する。」ことで「地域活用要件」をみたすこととした。

蓄電池を採用する際に、据え付け型の蓄電池とした場合、発電施設現地での電気利用に限定され、電気利用者は災害時に市内から距離の離れた山間部に位置する発電施設に来る必要があるため、現実的にこれを利用することは困難が予想される。

表-7 小水力発電における年間経費計算例³⁾

■小水力発電における年間経費の計算例（参考）

年間経費

	項目	金額	計算式
直接費	建設費	829,000 千円	
	売電可能電力量	4,266MWh	4,490MWh×0.95
	①人件費	3,000 千円	0.5 人
	②修繕費	2,362 //	740kW×1.182 円/kW×2.7
	③水利使用料 ^{※1} (小水力発電の場合)	994 //	1,976 円/kW×常時理論水力+436 円/kW×(最大理論水力-常時理論水力)
	④認費	740 //	740kW×1,000 円/kW
	小計	7,096 //	
	⑤減価償却費 ^{※2}	41,450 //	(829,000 千円-1 円) ÷ 20 年
	⑥借入金利息	15,751 //	829,000 千円×0.019
	⑦一般管理対応費	18,653 //	37,305 千円×1/2
資本費	⑧固定資産	0 //	
	⑨共用施設維持管理費	75,854 //	
	⑩その他	0 //	
管理部門費	小計	12,000 //	2.0 人×6,000 千円
	⑩その他	0 //	
	小計	12,000 //	
合計		94,950 //	

注) 常時理論水力：436kW、最大理論水力：740kW

項目の説明

項目	説明
①人件費	原則として計上しない。ただし、委託運営費を要する場合は、協議の上計上する。この例では、年収 600 万円相当として 0.5 人分を計上している。
②修繕費	公営電気事業者の電気料金算出に使用されている標準修繕費により計上する。2,000kW 未満の場合は 2,000kW 単価を用いる。
③水利使用料	法令等により所定額を計上する。ただし、河川管理者との協議次第では、減額または除されることもある。
④認費	当該発電施設を運転するために必要な光熱費、消耗品費等の費用で、農林水産省と電気事業連合会との覚書により、出力 (kW) × 1,000 円を計上する。
⑤減価償却費	建設費について、残存価額 1 円 (備忘価格) とし定額法により算出した額とする。この例では、総合耐用年数を 20 年としている。
⑥借入金利息	建設費について、当該償還計画に基づき算定した平均化した利率により計上する。この例では、年利 3.0%、5 年償還後 15 年償還の平均化した利率 1.9%としている。
⑦一般管理対応費	⑤減価償却費の 50/100 を上限として協議の上、所要額を計上する。
⑧固定資産税	土地改良施設の場合、固定資産税がからないので計上しない。
⑨共用施設維持管理費	水路等の共用施設に係る維持管理費として、1 人分の人件費相当額等を目安に協議の上、所要額を計上する。この例では 2.0 人分を計上している。
⑩その他	その他小水力発電の運転に必要とする費用として、必要額を計上する。

^{※1} 資源エネルギー庁ホームページ (<http://www.enecho.meti.go.jp/hydraulic/index.html>)

揚水発電所以外：1,976 円×常時理論水力+436 円× (最大理論水力-常時理論水力)
揚水発電所：[1,976 円×常時理論水力+436 円× (最大理論水力-常時理論水力)] × 補正係数 a

補正係数 a：年間発生電力量-揚水に係る年間発生電力量 × 5/6 年間発生電力量

^{※2} 減価償却費の計算式は税制変更後、平成 19 年 4 月 1 日以後に取得する新規取得資産について償却可能限度額と残存価額を準し、耐用年数経過時に 1 円 (備忘価格) まで償却できるようになっている。

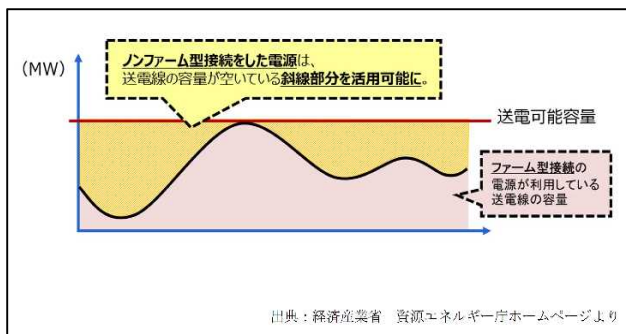


図-9 ノンファーム型接続による送電線利用イメージ⁴⁾

このことについて、施設管理者（芽室町）への聞き取り調査により、芽室町市街地にある中央管理センターには非常電源装置がないため、蓄電池を設置する場合はその予備電源として利用したいとの要望を確認した。

このため、蓄電池は発電所から移動が可能な「可搬式」型の蓄電池を選定する（中央管理センターでの利用）。本発電計画において蓄電池を選定する際に留意すべき事項は以下のとおりとなる。

- ・災害時の使用目的・用途（必要な電池容量）
- ・施設規模（発電室に設置可能な規模、移動可能な重量）
- ・コスト（耐用年数毎に更新が必要）

また、本施設は、令和3年1月13日に適用された「ノンファーム型接続」を適用する施設である（図-9）。ノンファーム型接続は、系統の容量が確保されているファーム型接続に対し、あらかじめ系統の容量を確保せず、系統の容量に空きがある時にそれを活用し、送電する方法である。このため、系統の空き状況に応じて、発電量の「出力制限」が行われることを前提に接続契約を締結するといった留意点がある。

5. まとめ、今後の展望

国営かんがい排水事業 芽室川西地区では土地改良長期計画の取り組みとして、地域資源の有効活用によるクリーンエネルギーの推進及び温室効果ガスの排出抑制を図るとともに、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理の推進、土地改良施設の維持管理費の軽減を目的として農業用水を利用した小水力発電施設の検討を行った。

この検討の結果、本地区における小水力発電施設の整備は、土地改良施設の適切な管理に効果を発揮し、食料供給や国土保全機能を損なわない適切な資源利用の確保に資することが示された。

本稿が他地区における小水力発電施設の導入検討にあたっての一助となれば幸いです。

参考文献

- 1) 農林水産省：鋼構造物計画設計技術指針（小水力発電設備編）
- 2) 資源エネルギー庁：中小水力発電ガイドブック
- 3) 日本水土総研：農業用水を利用した小水力発電導入の手引き
- 4) 資源エネルギー庁：ホームページ