

未利用の水力

～さまざまな可能性を考える～

小林 久 (茨城大学農学部)

未利用 の水力

はじめに（未利用の出力帯，経済性というメガネ）

■ 一般的な未利用（エネルギー調査）

- 未利用の放流
- 用水路の中の未利用落差
- 余剰圧という未利用

■ ダムのムダを考える。

- 落差にムダはないか？
- 流量にムダはないか？
- 砂防ダムの役割は河床固定だけか？

■ 環境変化とさまざまな着眼による開発

- インフラ整備がつくる開発適地
- 期別の遊休容量を活かす（農業用水）
- 見落としていた未利用（このき谷）
- 小流量・低落差という未利用
- 流れの過程に生産を組み込む発想
- その他（稼働率という制約・・・）

■ 規制による開発制限

- 取水管理のルール・技術によるムダ
- 自然公園，保護・保全区域など（イギリスの事例）

■ 小規模という開発制約

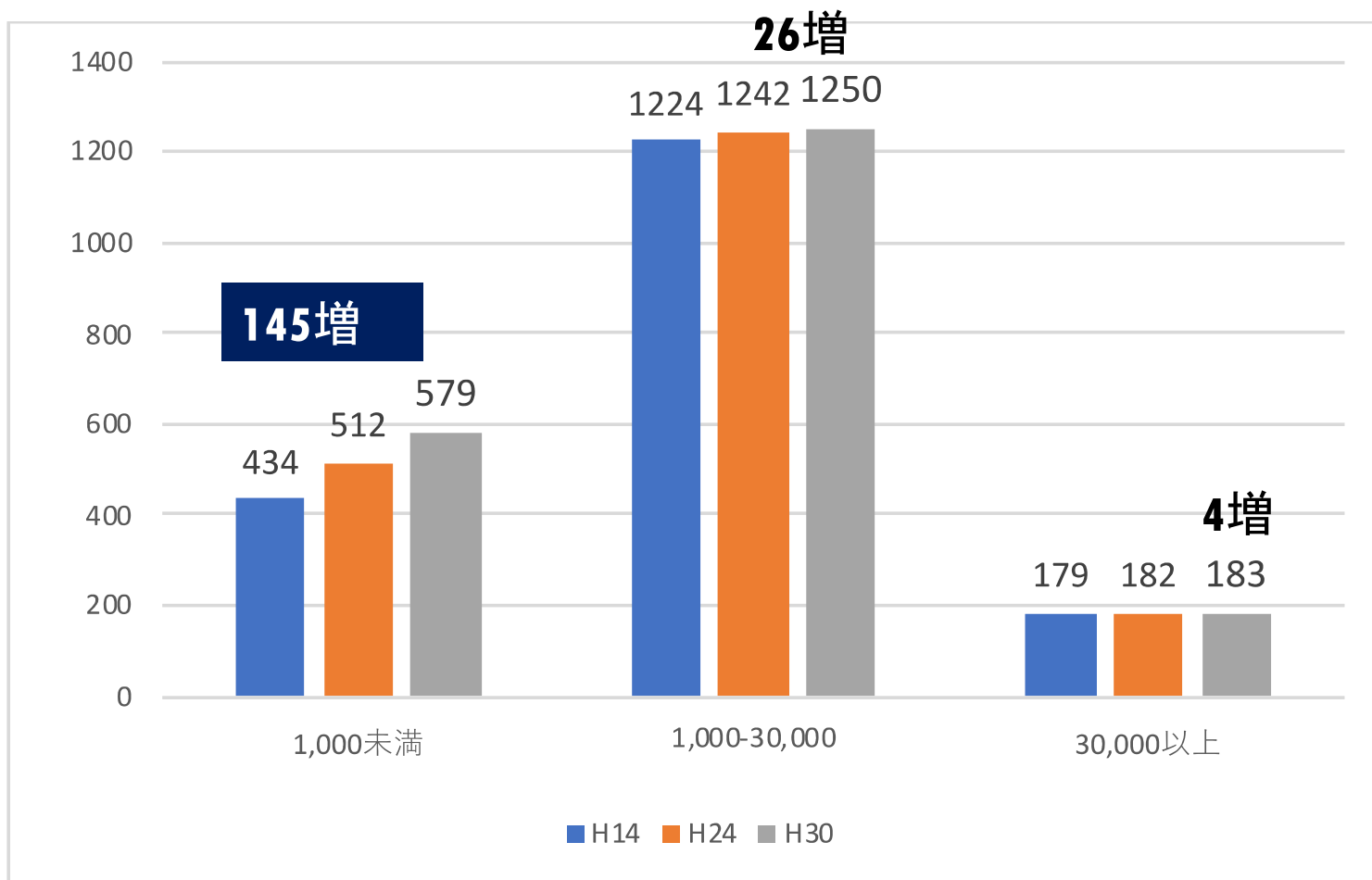
■ 電力系統の開発制約

- 系統連系だけか？－将来の水力開発オプションを遠望する－

はじめに

未利用の出力帯

発電所数の変化（H14～H30）

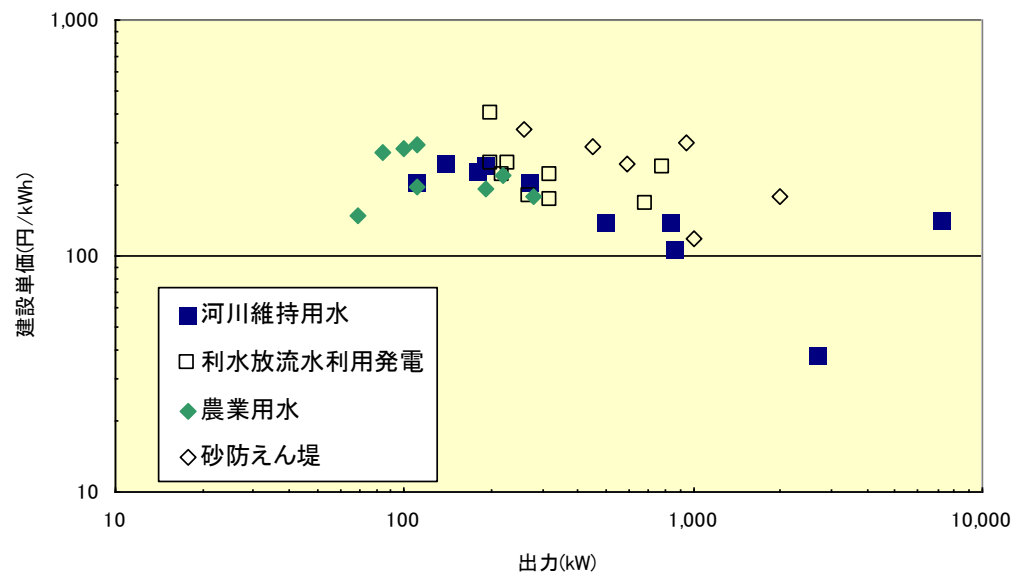


出典：資源エネルギー庁

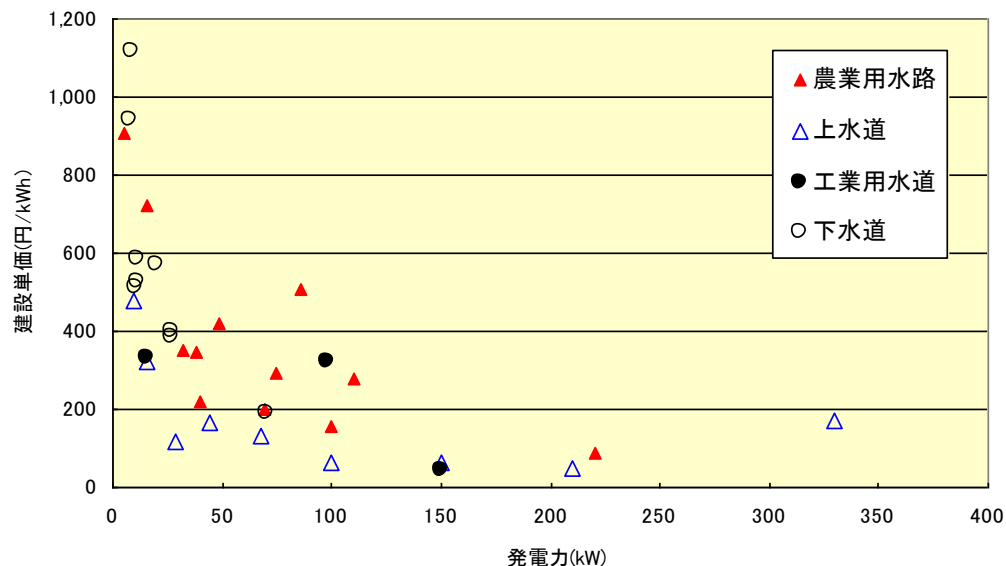
経済性というメガネ

発電施設単体としての経済性ではなく，治水，利水，生態系保全，気候変動とエネルギーを，水資源の循環過程の中で俯瞰する立場からの経済性で見れないか？

出力と建設単価の関係(ダム利用)



出力と建設単価の関係(水路利用)



出典：H20年度未利用落差発電包蔵水力調査

一般的な未利用

H20年度未利用落差発電包蔵水力調査

- 調査の対象（NEF〈エネ庁委託〉，2009）
 - ✓ 未利用の放流
 - ✓ 用水路の中の未利用落差
 - ✓ 余剰圧という未利用
 - ダム
 - 維持流量／利水放流／農業利水
 - 砂防ダム
 - 水路
 - 農業用水／工業用水／上水／下水

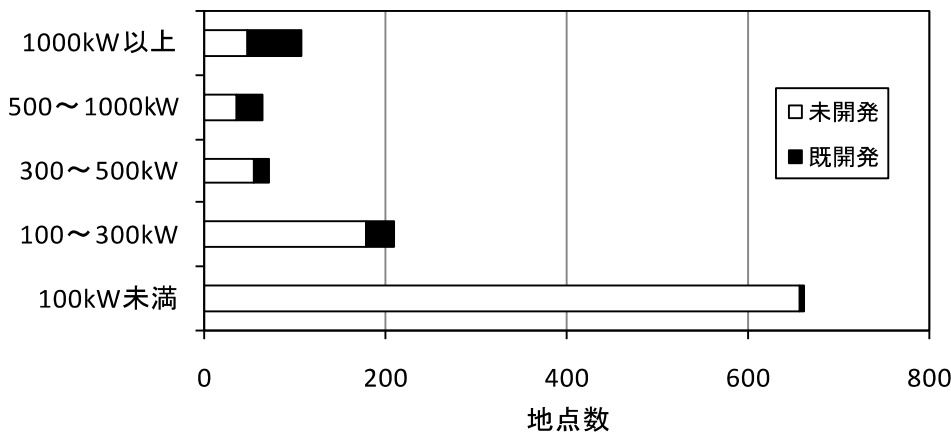


■地点数1,389，総出力：33万kW（16.6億kWh）
出典：日立産機システムHP

調査結果

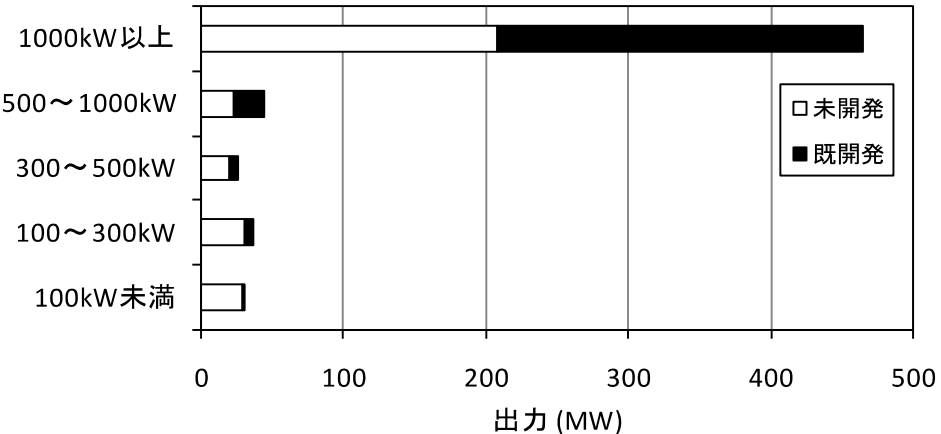
地点数

地点数の分布 (ダム利用)

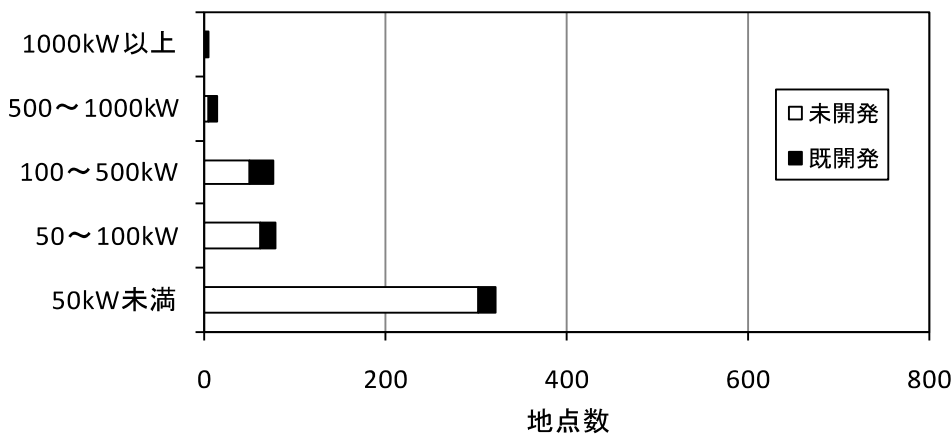


出力

出力の分布 (ダム利用)



地点数の分布 (水路利用)



出力の分布 (水路利用)

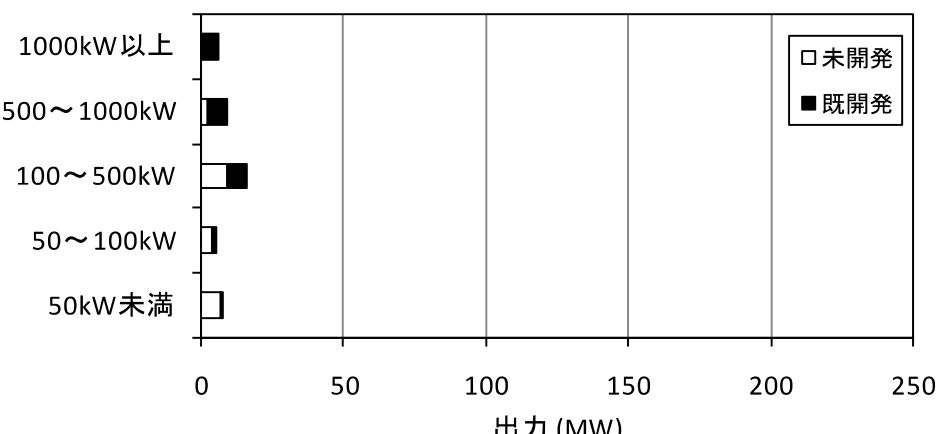


図 1.3 未利用落差発電包蔵水力 規模別地点数

図 1.4 未利用落差発電包蔵水力 規模別出力

スクリーニング条件（一部）

- ダム放流
 - ✓ 落差：治水ありダム高(H) x 0.65, 治水なし H x 0.8
 - ✓ 出力100kW以上（Phase I）
- 砂防ダム
 - ✓ 砂防えん堤単独利用
 - ✓ 出力100kW以上（Phase I）
- 農業用水路
 - ✓ 通水185日以上
 - ✓ 落差1.5m以上
- 上水
 - ✓ 10.000m³/d以上
 - ✓ 落差1.5m以上

ダムのムダを考える。

既存インフラを活用した再エネ普及加速化事業

(パシフィックコンサルタンツ [環境省〈一部国交省連携〉委託] , H30～)

目的

既存インフラ等を活用して系統制約を克服, 再エネ普及を拡大する方策を検討する。

検討内容

- ダムを活用した水力発電事業化検討
- 砂防堰堤を活用した水力発電事業化検討
- 既存インフラ活用による系統制約の解消に関する調査

- NPDの開発は可能か？
- 落差にムダはないか？
- 流量にムダはないか？
- 砂防ダムは使えないか？

【ダムの運用見直しによる発電電力量向上手法検討】

発電量増大要因に関する試算

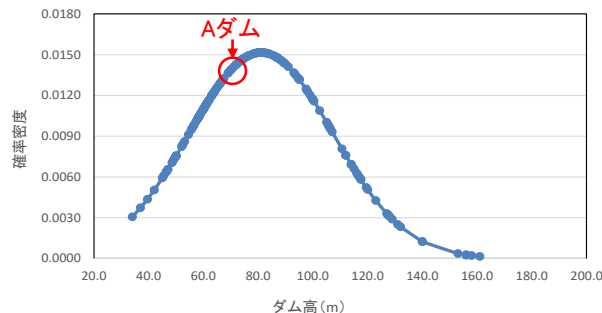
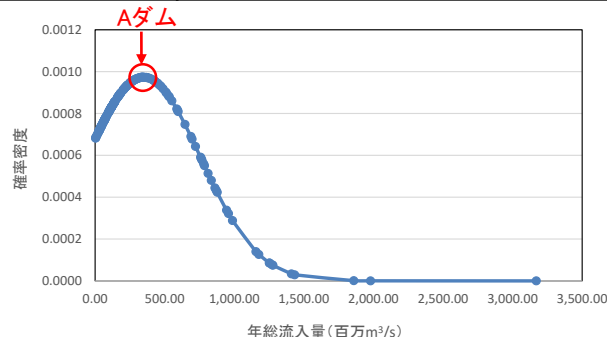
- 発電量増大に繋がる貯水池運用方法の見直し方策は、「発電貯水位を上げる方策」と「発電放流量を増やす方策」とに大別される。
- ここでは、両者のどちらが発電量増大への効果が大きいかに着目し、発電シミュレーションによる試算を行った。

■ 試算モデルの構築

- 発電を実施している多目的ダム(直轄ダム、補助ダムおよび水機構ダム)の中で平均的なパラメータを持つAダムを対象に発電量試算モデルを作成した。

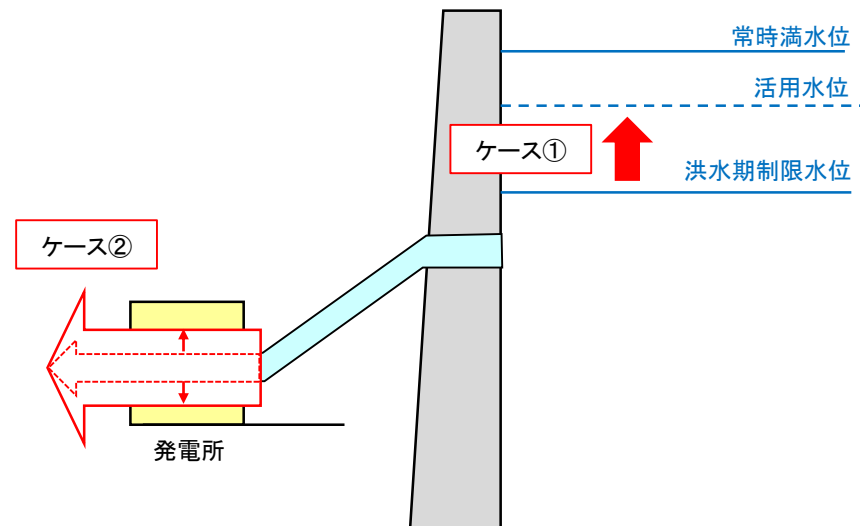
表2-27 着目パラメータ

着目パラメータ	発電量への影響
年総流入量	年総流入量が多いと放流量も多い
ダム高	ダム高が高いと有効落差が確保できる



■ シミュレーション条件

- モデルダムの10年間流況(実績)に対する発電量を計算する
- ・ ケース①(貯水位を上げる)
洪水期の制限水位を上げる【2.0m(弾力的管理の最大値を目安)】
- ・ ケース②-1(放流量を増やす)
最大発電使用水量を【1.0m³/s】増やす
- ・ ケース②-2(放流量を増やす)
最大発電使用水量を【2.0m³/s】増やす



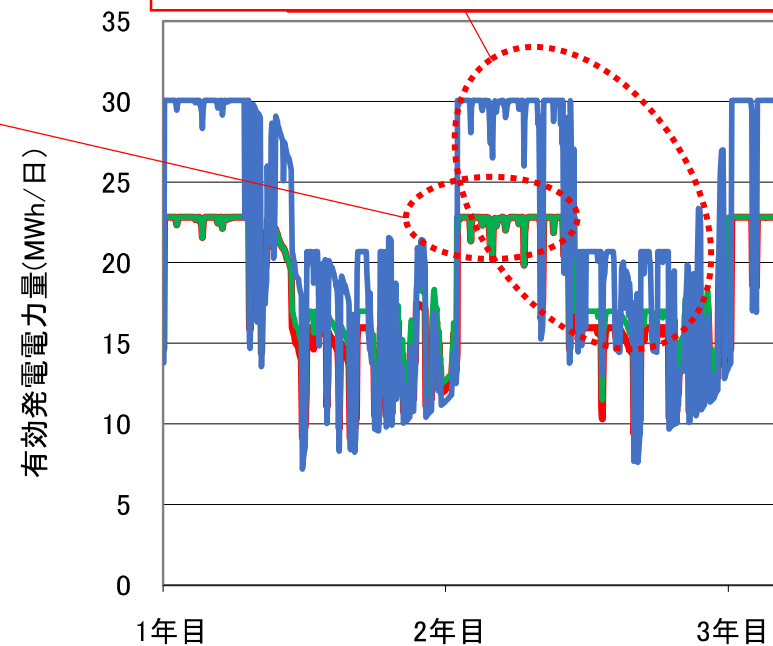
【落差増，流量増による発電量試算】

ケース	平均 年発電電力量	現況に対する 増加率
現況運用	6,650MWh	—
ケース①（貯水位を+2.0m）	6,851MWh	約3 %
ケース②-1（発電放流量+1.0m ³ /s）	8,100MWh	約22 %
ケース②-2（発電放流を+2.0m ³ /s）	9,014MWh	約36 %

ケース①洪水期の貯水位が高いが、発電量の増加は小さい



ケース②多くの期間で発電量が増加している

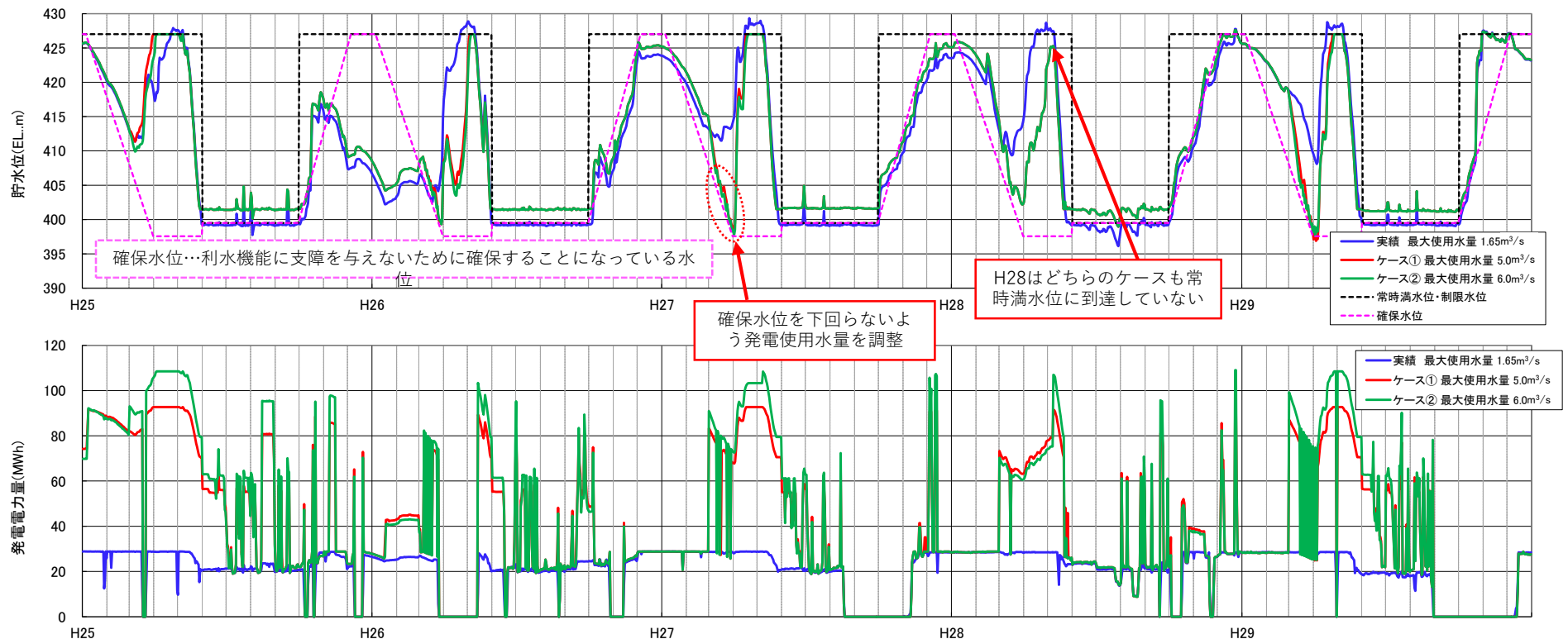


AIを用いた融雪期の「運用」と「弾力運用」を組合わせた場合

(単位：MWh)

ケース	融雪期 (3-5月)		洪水期 (6-9月)		通年		融雪期 常時満水 水位到達	渇水年 融雪期 貯水率
	電力量	増加率	電力量	増加率	電力量	増加率		
実績：使用水量1.65m ³ /s	2,202	—	2,155	—	7,548	—	5年/5年	107 %
ケース①：使用水量5.0m ³ /s	6,182	181 %	3,874	80 %	14,548	93 %	4年/5年	92 %
ケース②：使用水：6.0m ³ /s	6,711	205 %	4,062	88 %	15,251	102 %	4年/5年	92 %

※H28は過去15年間 (H15～H29) の中で融雪期の総流入量が最も少ない渇水年である。



※弾力運用時の事前放流は見込んでいない

【砂防堰堤のポテンシャル調査】

（１）砂防堰堤の情報収集・データベース作成

➤ 直轄砂防事務所管内の砂防堰堤約5,000基に関して、発電事業者が水力事業可能性を検討するため、「基礎情報」・「発電ポテンシャル」等の情報を収集し、データベース（一覧表、個別表、ポテンシャルマップ）を作成した。

一覧表

整理番号	施設名	位置									位置座標	
		整備局名	事務所名	水系・ 山系名	幹川名	河川名	溪流名	県名	郡・市名	町・村名	緯度	経度

個別表

水力発電候補地点調査票(様式1)				整理番号		〇〇		施設名		〇〇		調査更新年月日		2020/3/29			
位置	整備局名		〇〇地方整備局			事務所名		〇〇事務所				位置図					
	水系・山系名		〇〇水系			幹川名		〇〇川									
	河川名		〇〇川			溪流名		〇〇沢									
	県名		〇〇県			位置座標		緯度		38.44864							
	郡・市名		〇〇市			経度		140.04906									
町・村名		〇〇町															
施設諸元	完成年度		1956			改築完了年度		-									
	施設種別		砂防堰堤														
	構造諸元	堤高		12.60 m													
		有効高		7.00 m		堤長		58.00 m		天端幅						3.00 m	
		型式		不透透													
		構造		重力式			基礎		石英閃緑岩								
	魚道の有無		無														
	※2流木捕捉工の有無		無			元河床勾配		1/80									
	流域面積		242.00km ²			計画洪水流量		1,200.00m ³ /s									
	近傍の流量観測所名		寒河江ダム														
流量諸元	堰堤地点流量	※3豊水流量		32.40m ³ /s		平水流量		17.50m ³ /s									
		低水流量		12.10m ³ /s		濁水流量		14.50m ³ /s									
		※4取水施設の有無		無			既設道路の有無		有								
周辺状況	堆砂状況		満砂														
	特記事項		なし														

※1位置情報に関しては管内図を参考に決定

※2流水構造工に関しては、2018年9月時点の情報

※3流量諸元に関しては、国土交通省水文・水質データベースに基づき、当該砂防堰堤の近傍の観測データと流域面積推定で算出（2007～2018年平均）

※4取水施設の有無に関しては、1/25000地形図精度で確認できる精度であり、現地確認したものではありません

※1位置座標に関しては管内図を参考に確定
 ※2流木捕捉工に関しては、2018年8月時点の情報
 ※3流量諸元に関しては、国土交通省水文・水質データベースに基づき、当該砂防堰堤の近傍の観測データを流域面積按分で算出(2007～2016年平均)
 ※4取水施設の有無に関しては、1/25000地形図精度で確認できる精度であり、現地確認したものでない

ポテンシャルマップ



位置図を一覧から表示

一覧から詳細を表示

地図から詳細を表示

図3-3 砂防堰堤の水力発電ポテンシャルデータベース

(2) 水力発電事業化検討モデルの選定

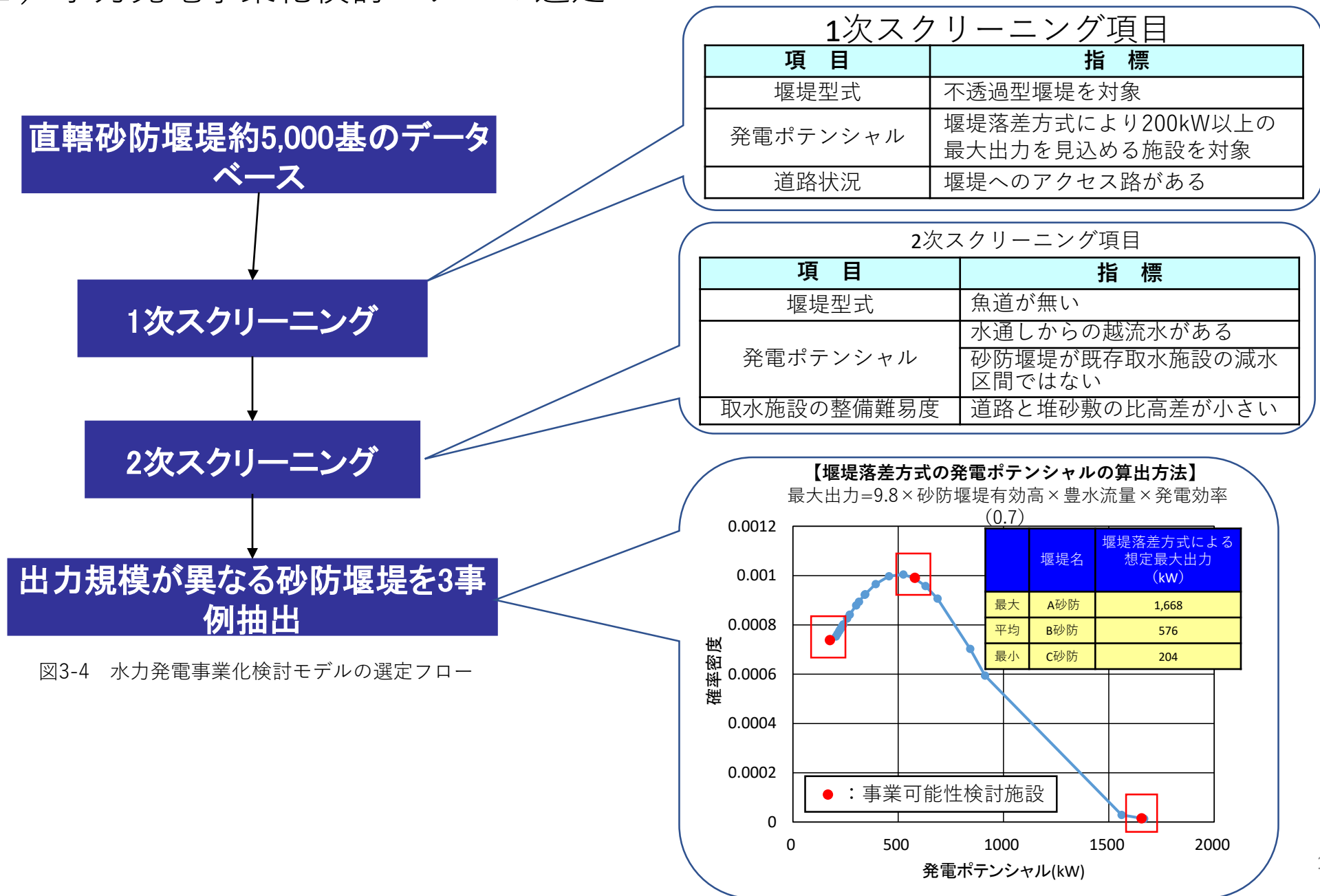


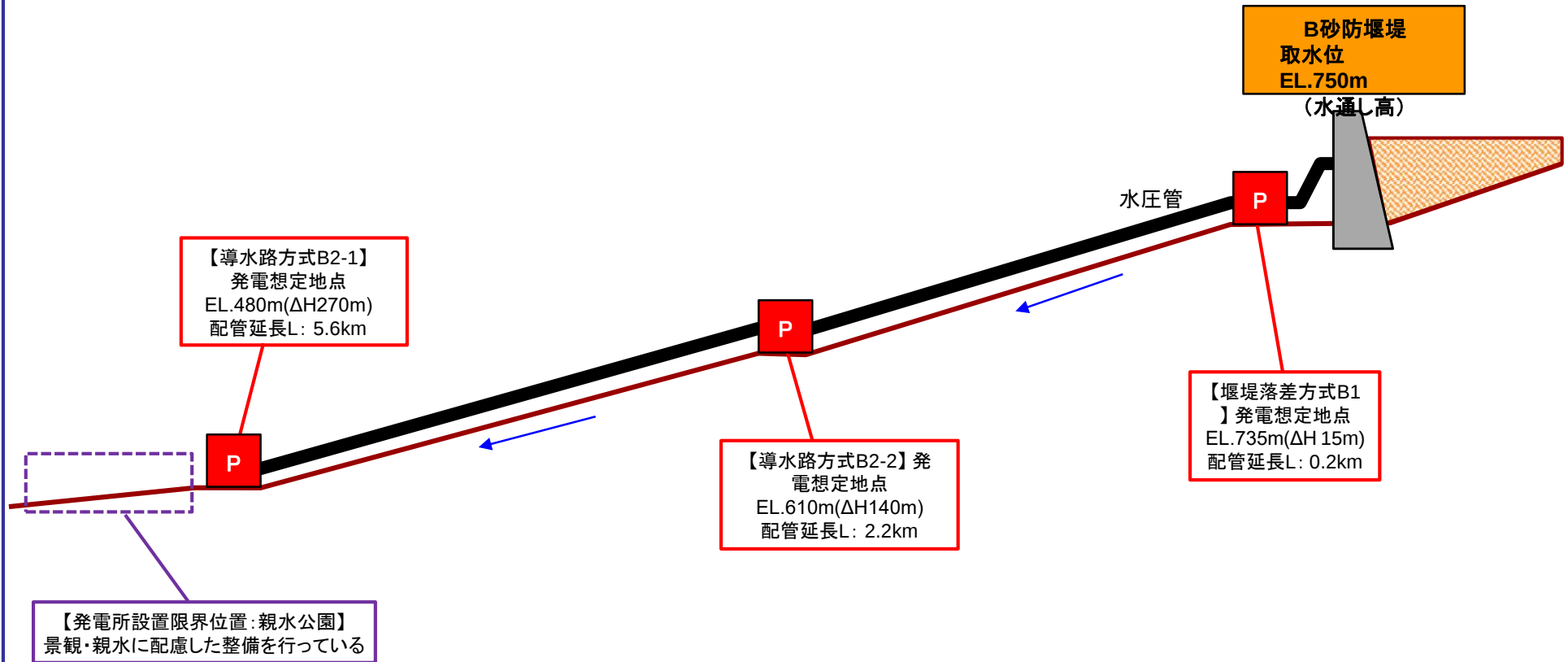
図3-4 水力発電事業化検討モデルの選定フロー

(3) 検討結果の例

【②B砂防堰堤の発電計画】

発電設備配置計画（B砂防堰堤）

- 発電所設置地点、配管ルートの設定を行った。
- 堰堤落差方式の発電所設置地点は、平場が確保できる砂防堰堤の右岸下流地点（B1）とした。
- 導水路方式では、親水公園の直上流（B2-1）、B砂防堰堤との中間地点（B2-2）の2箇所とし、配管ルートは、既設道路に埋設することを基本とした。



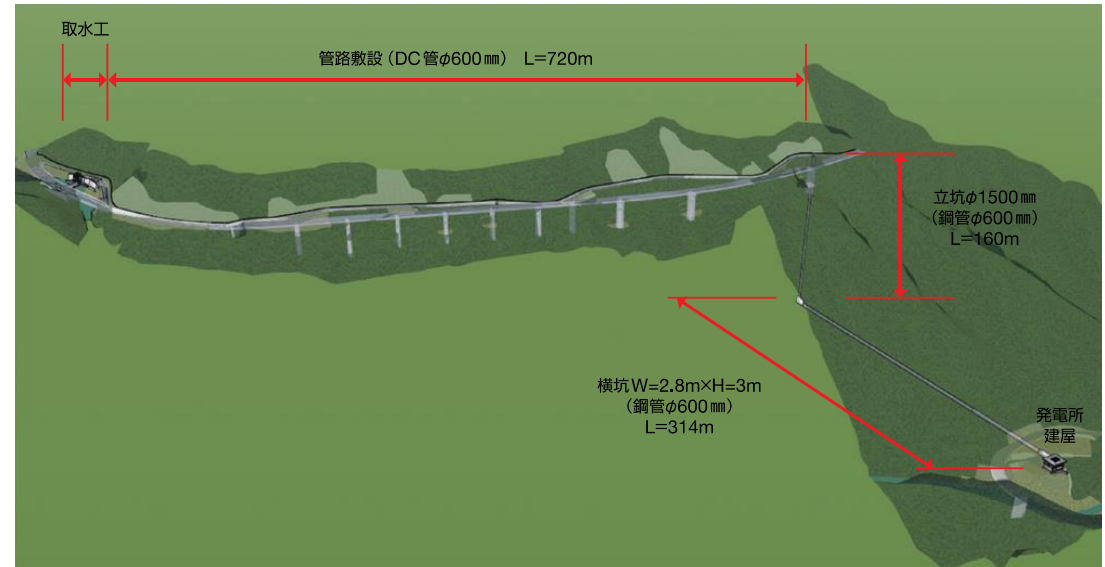
発電シミュレーション結果（B砂防堰堤）

- ▶最大使用水量は、砂防堰堤地点の35日流量である15.64m³/sを上限として、5.0～15.64m³/sの3ケース設定し、近10ヶ年の流況データを用いて発電量シミュレーションを実施した。
- ▶発電シミュレーションの結果、堰堤落差方式では、最大使用水量を5.0m³/s（平水量程度）とした場合の工事費kWh単価が、279円/（kWh/年）と最も安価となった。
- ▶導水路方式では、導水延長が長いケースB2-1で、最大使用水量を5.0m³/s（平水量程度）とした場合の工事費kWh単価が、140円/（kWh/年）と最も安価となった。

B砂防堰堤			ケース B1			ケース B2-1			ケース B2-2		
			堰堤落差方式			導水路方式①(下流側)			導水路方式②(上流側)		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
ケース条件	総落差	m	15	15	15	270	270	270	140	140	140
	最大使用流量	m ³ /s	15.64	10.00	5.00	15.64	10.00	5.00	15.64	10.00	5.00
	常時使用流量	m ³ /s	3.13	2.00	1.00	3.13	2.00	1.00	3.13	2.00	1.00
発電シミュレーション結果	最大発電出力	kW	1,500	990	490	33,100	21,200	10,200	17,200	10,700	5,300
	年平均有効発電電力量	MWh/年	4,809	4,201	2,827	94,065	84,320	56,002	47,285	42,193	29,048
	平均合成効率	%	61.73	64.21	66.73	63.22	68.75	73.05	58.83	65.35	71.42
	設備利用率	%	37.27	50.99	69.40	34.15	47.87	66.04	33.07	47.38	65.63
	概算事業費	百万円	1,748	1,265	788	18,049	13,112	7,854	13,491	8,707	5,545
	事業費kW単価	百万円/kW	1.13	1.28	1.61	0.55	0.62	0.77	0.79	0.81	1.04
	事業費kWh単価	円/(kWh/年)	364	301	279	192	156	140	285	206	191

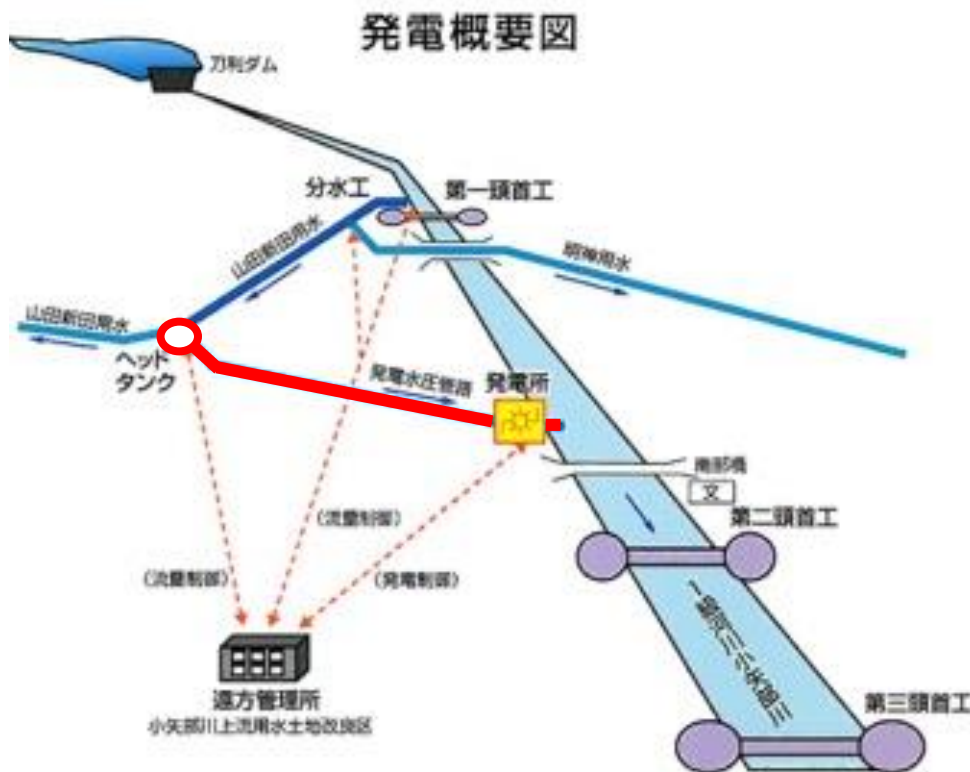
環境変化とさまざまな着眼による開発

道路整備がつくった開発適地（船間発電所）

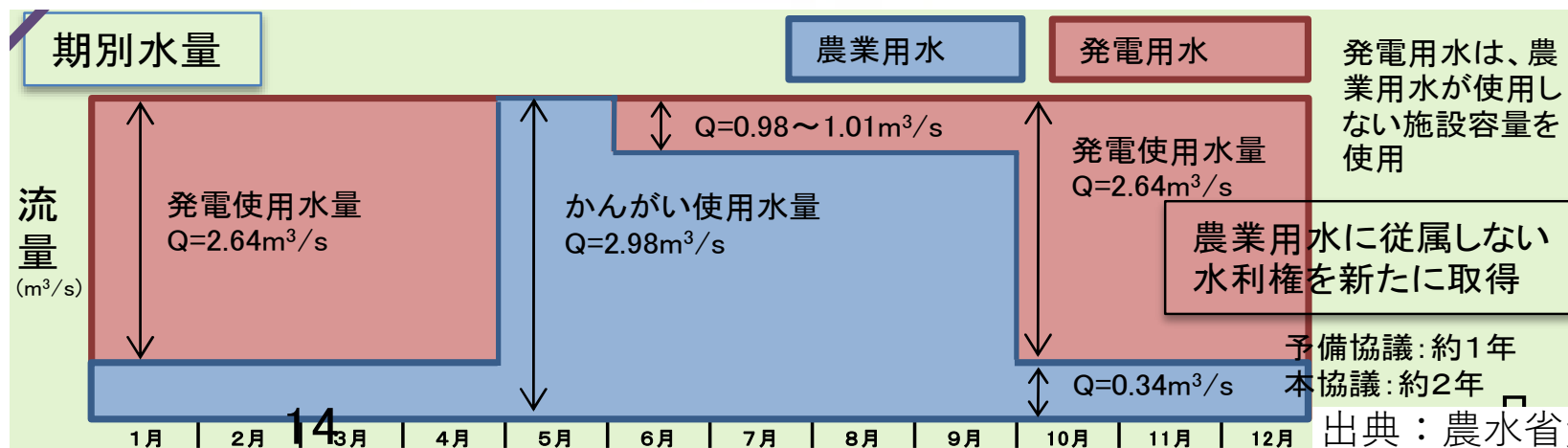


概要	
発電所名	船間発電所
水系	—
河川（用水名）	普通河川・馬口川
最大出力	995.0kW
最大使用水量	0.586 m^3/S
有効落差	204.72m
水車	縦軸ペルトン水車
発電機	同期発電機
発電開始日	2014年8月

容量の空き時間に着眼する開発（山田新田用水発電所）



出力：520kW
 最大使用水量：2.64m³/s
 落差：25.2m
 水車：フランス
 発電機：横軸かご型三相誘導発電機



見過ごしていた未利用 (このき谷発電所)



出典：J-Power発表資料

最大使用水量：3.22m³/s
有効落差：7.4m
最大出力：199kW



小流量・低落差という未利用

- 未利用落差調査でも落差1.5m未満，100kW未満（Phase I）は対象外
- 開発適地の考え方の拡大

欧州では，落差と流量のバランスのよい地点は開発し尽されたため，落差と流量のバランスが悪い高落差・小流量（ペルトン水車の領域），低落差・大流量（軸流水車の領域）の水車発電機器の開発・導入が進んでいる。

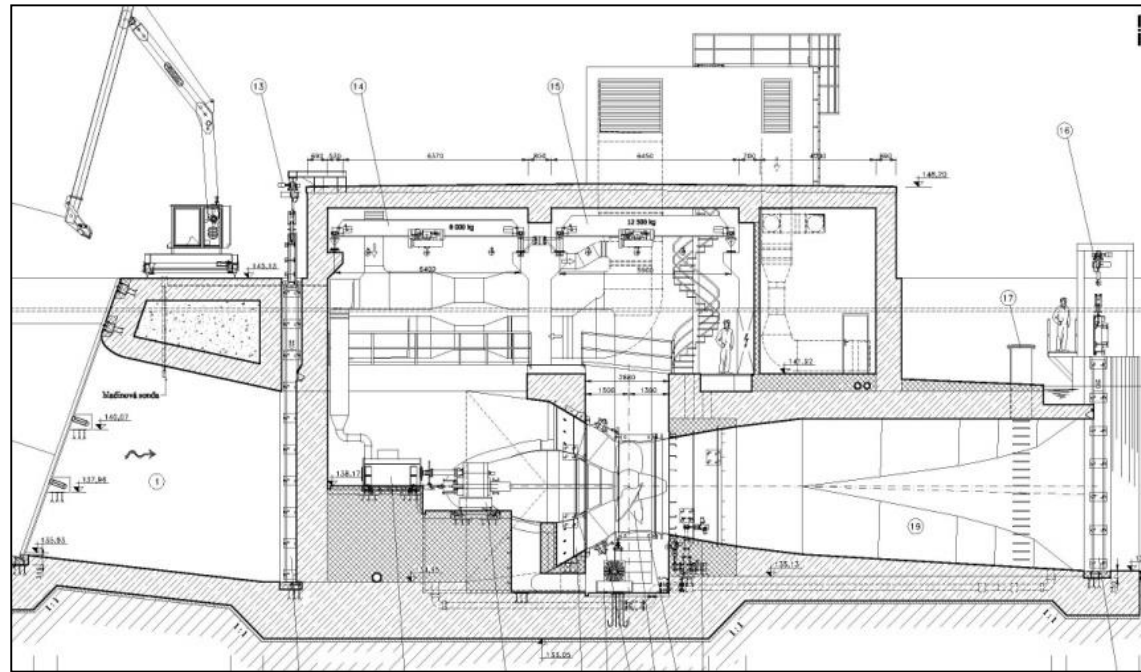
低落差を多段で利用



落差1mを利用



低落差・大流量



最大出力	2,648kW（水車出力）
最大流量	160m ³ /秒
有効落差	1.9m
河川名	エルベ川（ラベ川）
水車型式	ピット形チューブラ水車
水車発電機台数	4

高落差・小流量



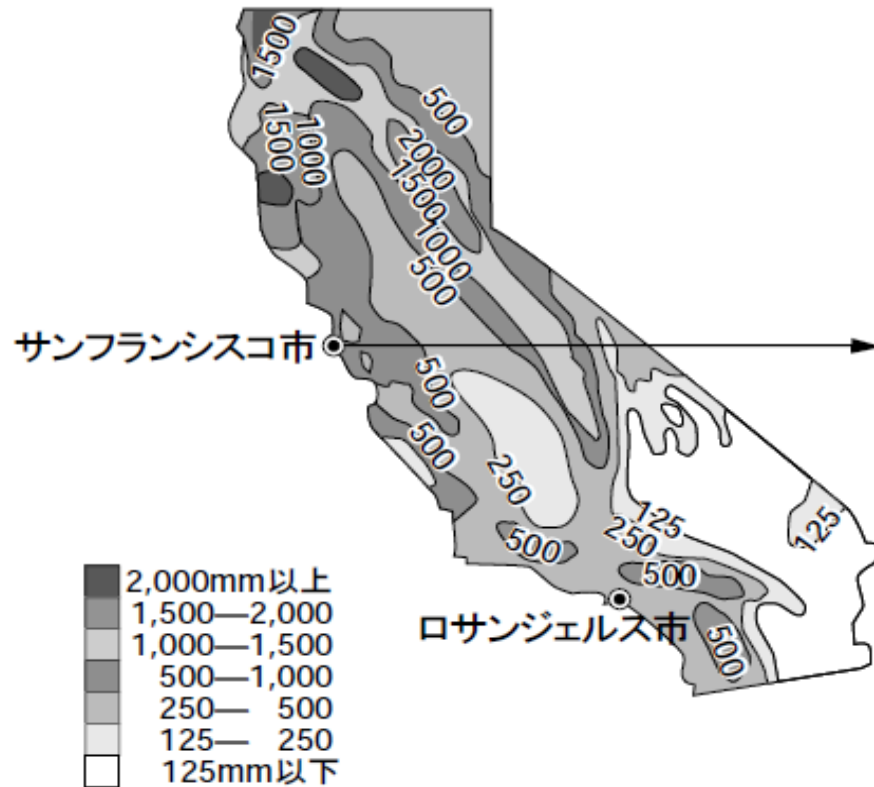
立軸ペルトン水車
(写真：(株) イズミ)



使用水量：0.04m³/s
落差：258.0m
出力：92 kW

オーストリア，チロル地方
水道水源→受水槽手前に設置され発電設備

流れの過程に電力生産を組み込む カリフォルニア SWP

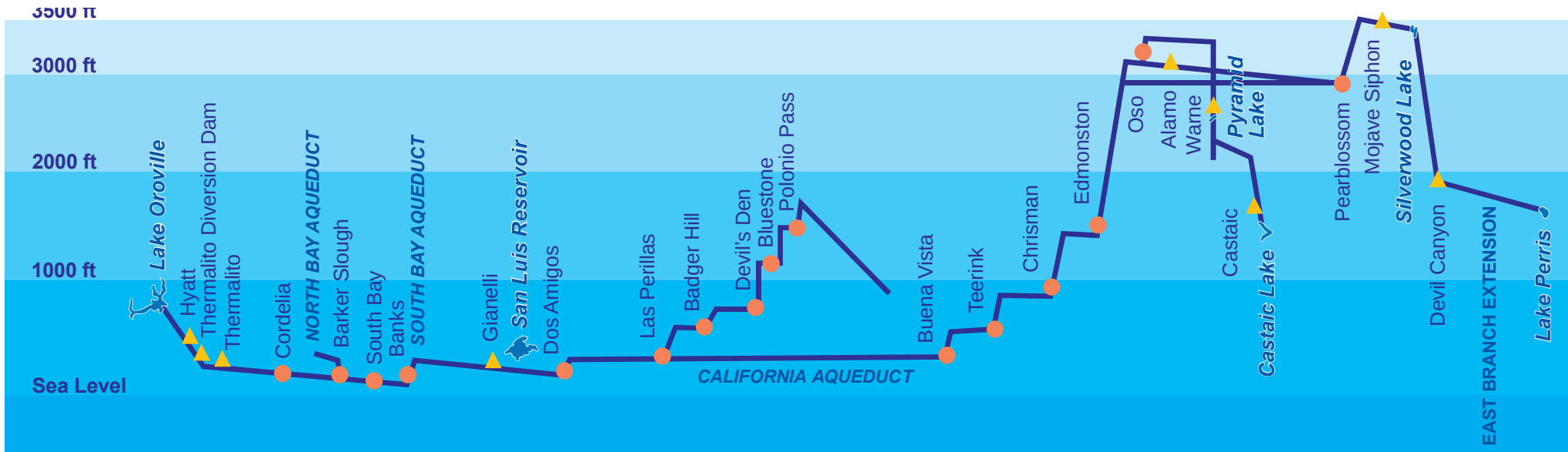


- 27 百万人のカリフォルニア住民と 750,000 エーカーの農地への水供給
- 総延長約700 マイルの幹線水路，トンネルとパイプライン
- 貯水施設36，ポンプ場21，発電所5，pumping-generating 施設5



出典：The Metropolitan Water District of Southern California(2016) 2015 Urban Water Manegment Plan

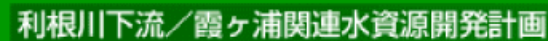
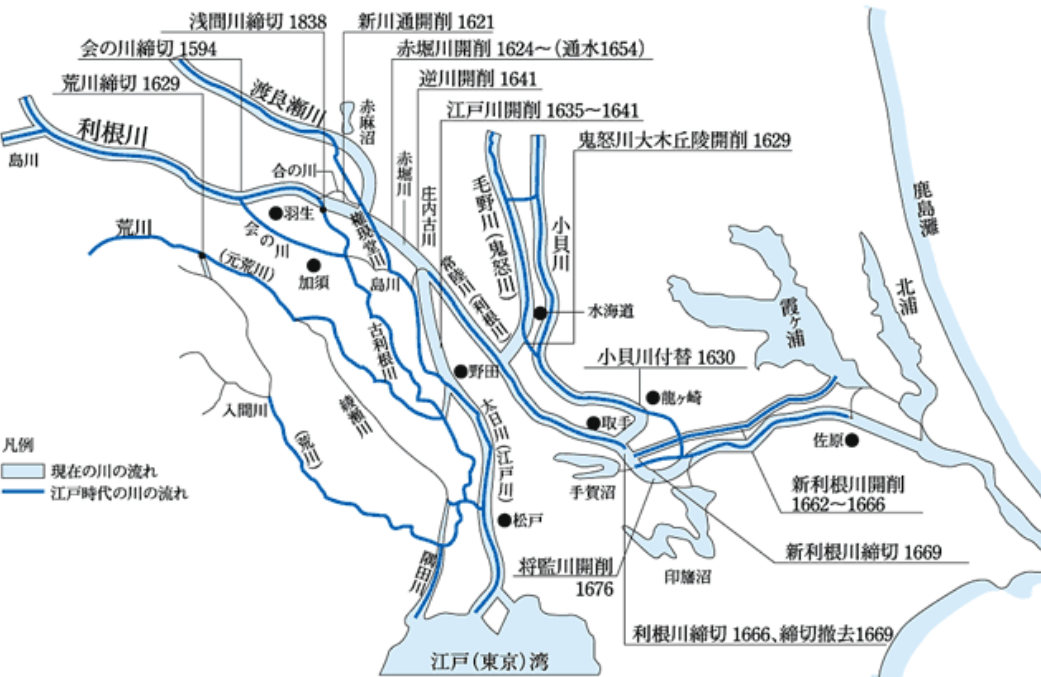
Water Energy Nexus



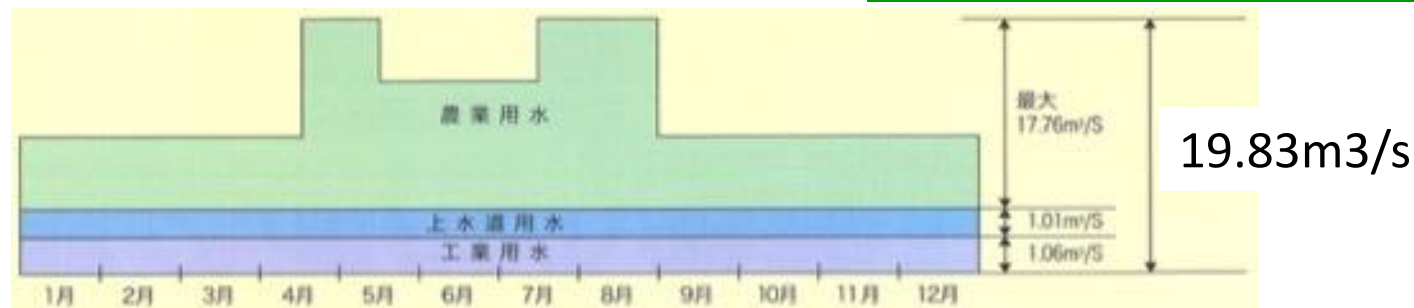
電力消費：10,000 GWh／年
発電量：6,500 GWh／年 (総出力3,000 MW)

出典：SWPパンフレット

霞ヶ浦用水

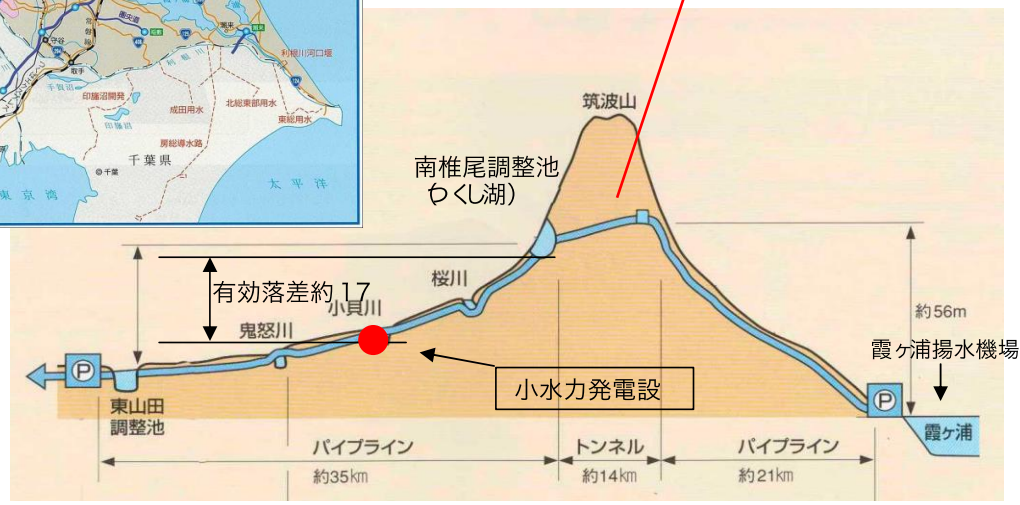


出典：国土交通省関東地方整備局
霞ヶ浦河川事務所



出典：霞ヶ浦用水土地改良区，水資源機構霞ヶ浦管理所など

トンネル延長：14,200m
EL52.5m→46.1m (1/2,000)



小貝川発電所

最大出力	110kW
有効落差	17.372m
使用水量	0.769m3/s

稼働率という制約を超える

1日数回、計10時間以下の放水を利用

運河の水を
横取り

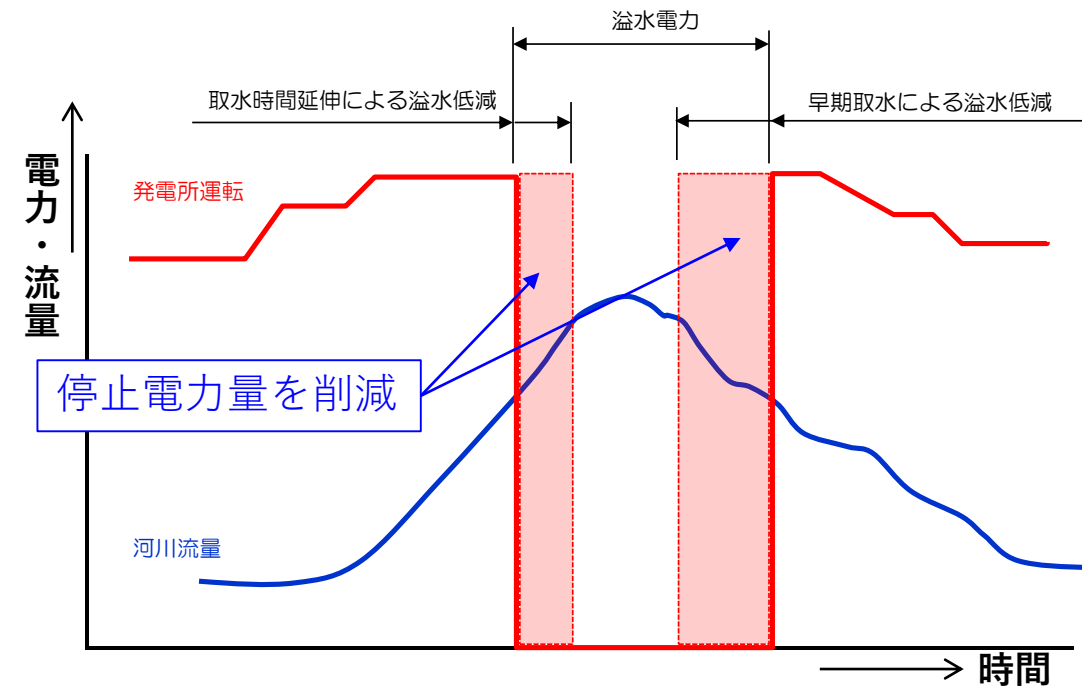


© 2013 Google

© 2009 GeoBasis - DE/BKG

規制による開発制限

- 取水管理のルール・技術によるムダ
- 自然公園，保護・保全区域など（イギリスの事例）



出典：水力発電懇話会資料

小規模という開発制約

織田史朗の「農村主導の小水力開発」

「打開策として小水力地点の開発による方法が農村電化と直結して行えば、現下の国内事情と対照して最も適当であり、敏捷であり、又可能性も大である」と主張（織田，1947）

- 農村は、**電力不足を解消**し、農業電化に加えて、**電力販売収入**が得られる。
- 電力会社は、多額の建設費用を負担せずに**供給電力量**を増やせる。
- 国は、電力不足解消を通じた**食料増産と産業振興**を達成できる。

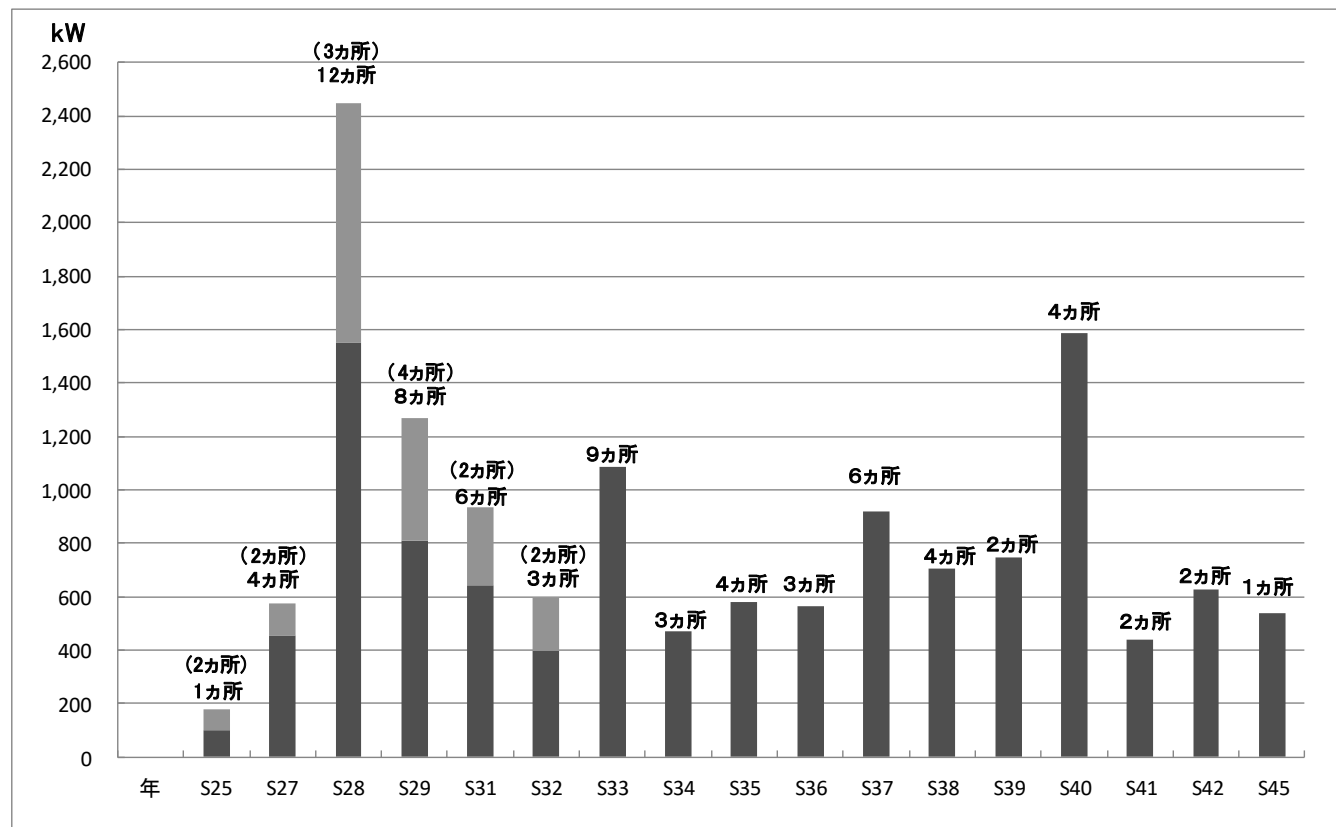
戦前の「村営や組合のもとにつくられた自家用小水力発電所が、多く失敗の記録を残している」（織田，1949）

「売電会社の下請け**発電をなす一事業者**であり、多面また一般の需用家と同じでその必要とする電力を買戻すという形式」の事業とする（織田，1949）

➤ 農業電化協会主催の小水力発電研究会の開催（1947）

中国地方の小水力発電所年度別建設数（昭和25～45年）

現存発電所は53カ所 その内 FIT対応48カ所（準備中含む）

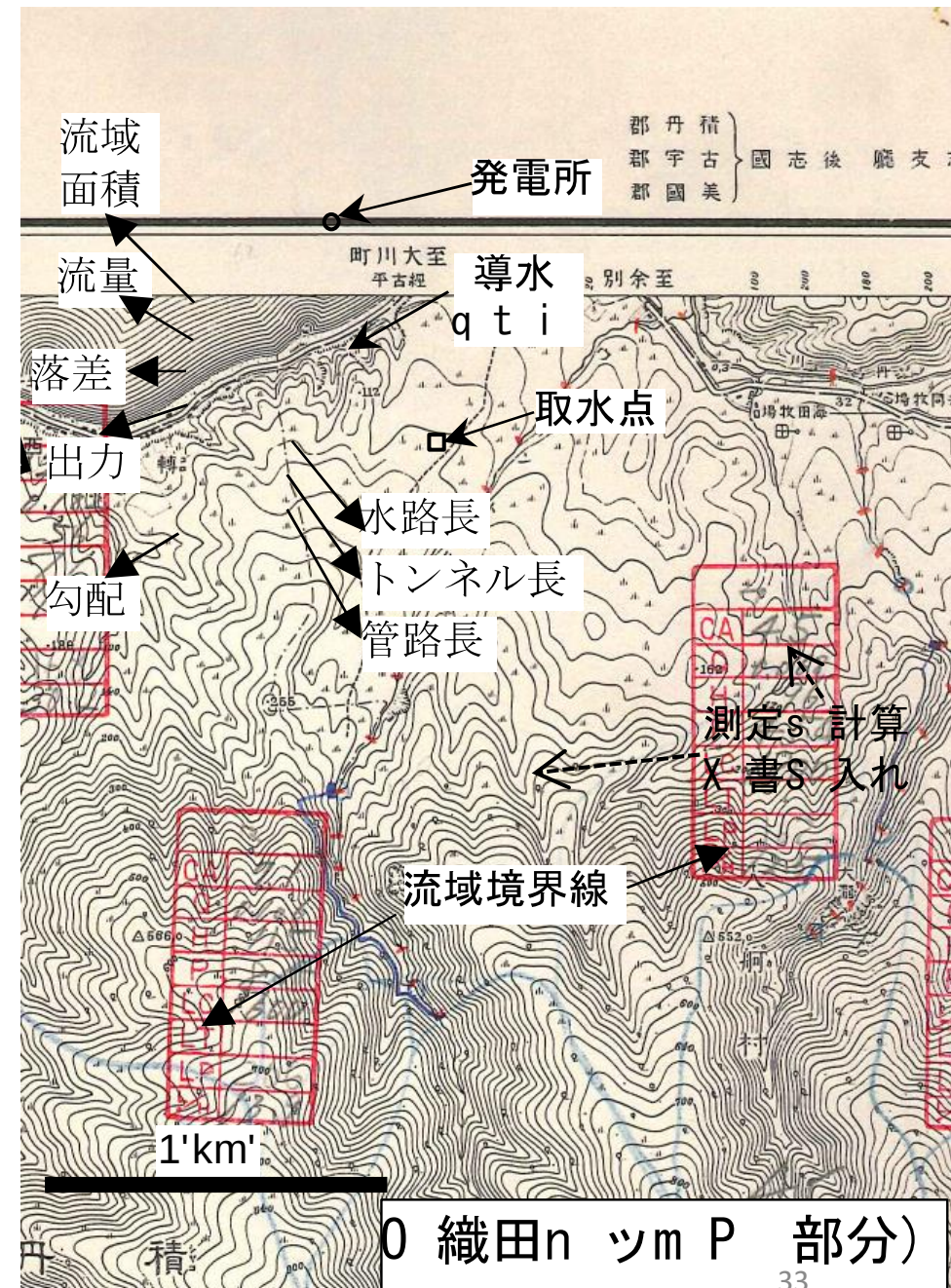


総発電所数	90箇所
（単独運転）	8箇所
総出力	12,200kW
（単独	371kW）
廃止出力	3,491kW
現在出力	10,790kW

出典：沖武宏（元イーモル工業顧問）

「織田のポテンシャル推計」

- 農山漁村電気導入促進法制定にも尽力した織田史郎が、小水力発電による農山村開発のために1/5万地形図上の解析と概査により、流域分割線、流域面積計測値、個別の開発候補ごとの取水点、導水ルート・延長、推計流量、概算出力などを記入した地形図副
- 全国（沖縄と小島嶼を除く）を対象とし、1955年代に水力発電技術者の視点から開発可能な4,000地点以上を約1,200葉の地形図副にマッピング



- 概ね出力1,000kW以下（低水～平水基準）の開発ポテンシャル推計の実施
- 1/5万地形図の解析と現地概査で，昭和25～30年頃に流域分割，流域面積計算，取水・導水ルート検討，流量・流況推計などからの見積もり→約160万kWの開発ポテンシャル

「水路系包蔵水力の算定」 農土誌74(9)

点番号	X座標	Y座標
No.0	4370	4136
No.1	4097	3872
No.2	3623	3608
No.3	3145	3413
No.4	2783	3242
No.5	2534	2954
No.6	2334	2588
No.7	2197	2549
No.8	1807	2480
No.9	1699	2500

図-1 水路仕様入力用ダイアログボックス

入力し，3次元地形地図を生成す。
3) 水路系のデータは，図-1の3
使用し，水路名，水路種類（開放

直線群で近似する^{注5)}。第二に 50 m メッシュ標高データの各メッシュ中心座標を通る水平垂直直交の格子網ライン(200×200 本)を作成し，各メッシュ中心座標に標高データをもたせる（図-2 の g 1, g 2...）。第三に，この格子網ラインと 2 次元水路線の直線群とのすべての交点の 2 次元座標を求める（図-2 の C 1, C 2...）。第四に，この交点の高さを各交点が乗る格子網ラインの直近二つ

織田の試算は，妥当

各交点間の 10 等分するような直線群で近似して，これを「水路縦断」とする^{注7)}。

このような手順で求められた「水路縦断」には，逆勾



図-3 計算結果の画像データ出力（左：落差 10 m ケース，
右：落差 2 m ケース）

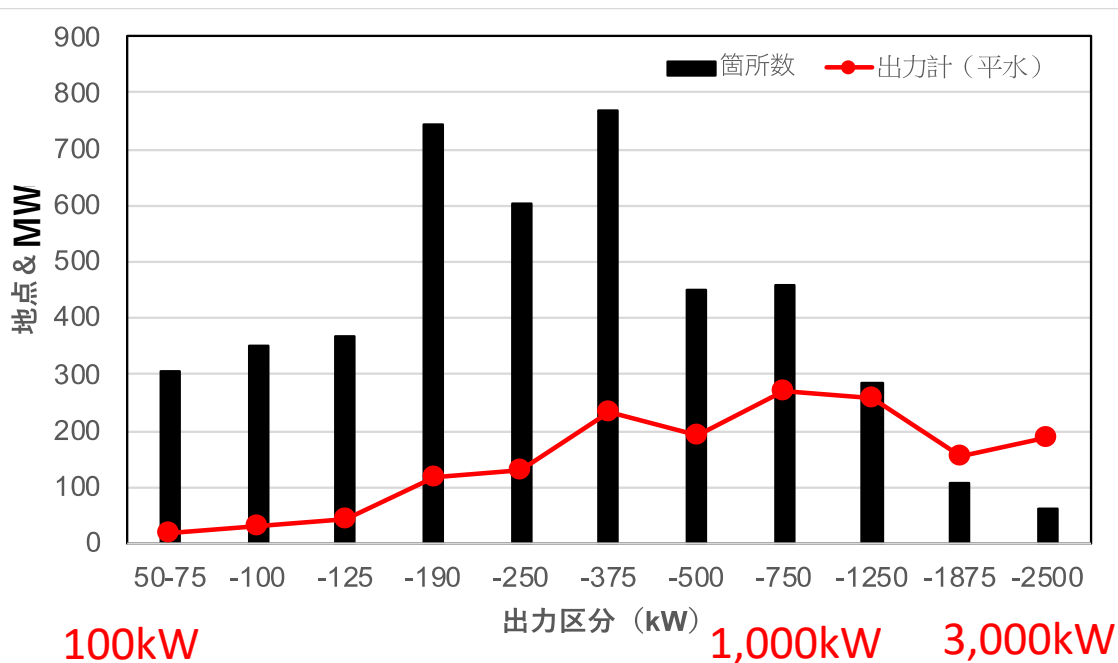
離の設定の違いにより，同勾配でも水路の包蔵水力の推計に差が出ることを示している。水路縦断から同じ勾配条件の区間を抽出する場合，縦断から同じ勾配区間を単位と

全国の1,000-2,000kW (3,000kW) 級以下の余力の推計 4,500地点, 160万kW

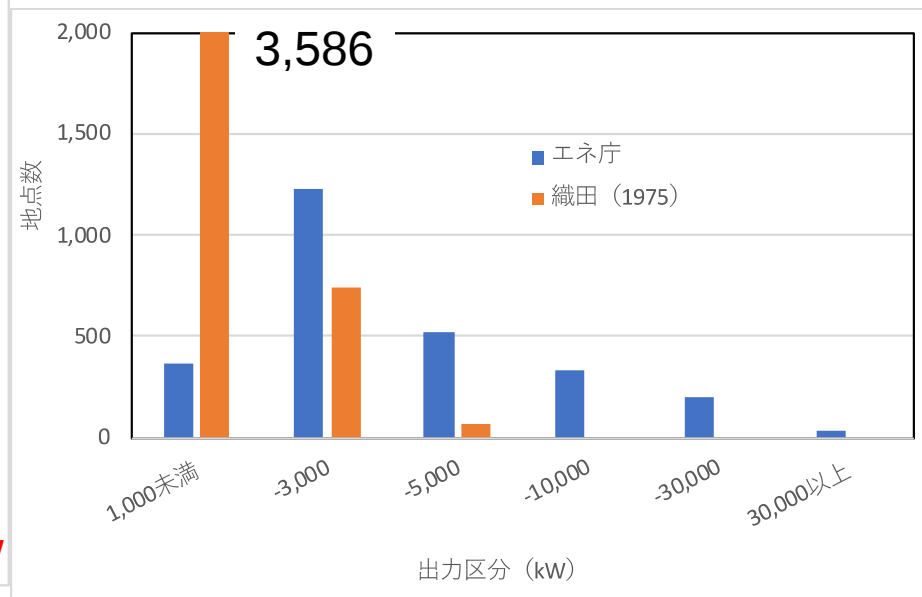
エネ庁と織田試算の比較

3,000kW未満

1,593地点 → 4,500地点



織田史郎 (1975) 小規模水力発電の開発問題



※平水基準の推計を豊水基準に読み替えた出力別地点数

平水基準→現在の開発では, 1.5~2.0倍の出力

電力系統の開発制約

制約を超える？未利用水力も使う新たなかたち

系統連系だけか？～EV（動く蓄電池）による電源供給の可能性～

走行距離（km/年）（集落調査から）

	1台目	2台目
回答戸数	9戸	7戸
距離総計	102,720	37,660
平均	11,413	5,380

燃費を15km/Lit., 燃料単価を150円/ℓとすると, 16.8万円/戸・年
（集落で336万円）

自動車	
16,793	km/戸
335,860	km
33,586	kWh

- 50km/日・戸
= 4日毎（200km走行）に充電
- 1回（20kWh）/hrの充電
- EVは5回/日の充電でOK

- 19hr（380kWh）/日が余剰
- 20戸の家庭電力消費（280kWh/日）を十分に賄える。

仮定 集落20戸
10km/kWh

20kW

→ 115,600kWh/yr（66%稼働率）→

82,000kWh/yr
が余剰となる。

技術革新（IT, AI） 新ビジネス／起業

- 充電スケジュールリング
- 充電管理
- 自動運転
- 給電技術・負荷調整
- :

EVによる電力供給のイメージ

- 1戸当たり2日毎に1.5hrの充電（30kWh）
→ 10台x1.5hr = 15hr/日でOK
- まだ, 4rの充電（80kWh）が可能（余裕／公的利用）

おわりに

未利用の小水力を活かすために求められる新たな視点・発想

「小さな水力発電があれば，中越地震被災地の養鯉被害は防げた。」

- 地域経済の活性化と持続的な地域形成のための小水力発電開発
 - 雇用機会の増大，魅力ある労働市場の形成・・・
 - ユニバーサルサービス，社会基盤の維持・・・
 - 【例】石徹白：FITによる売り上げ，分散独立電源の活用
- 新たなビジネス展開・社会システムの芽を育成
 - 分散電源活用の新ビジネスと地域エネ産業の展開
 - 安定電源（小水力）+変動電源+ガスコジェネ+可動電源のエネシステム
 - 【例】GSが消えていく山村での電気自動車のニーズへの対応
「電気を道路で運ぶ」ユニバーサルサービス
- 自立的防災のための電源
 - 被災時の電源確保とダメージの最小化・最短化
 - 【例】HOPE（東松島の特定供給）