

小水力発電の開発・設計の基礎について

(株)山水設計コンサルタント 山根 健司

内容

1. 計画から運転までの工程
2. 発電計画
3. 小水力発電の適用場所
4. 私たちとエネルギー

1. 計画から運転までの工程

(1) 小水力開発のステップ

■全体の流れ(例)

■FS(フィージビリティスタディ)調査、可能性調査

- ・地点の発掘、候補地点選定
- ・現地調査を実施して、経済性、実行性のある地点を選択
- ・概略設計、概算工事費算出、事業化の可否を検討

■基本設計

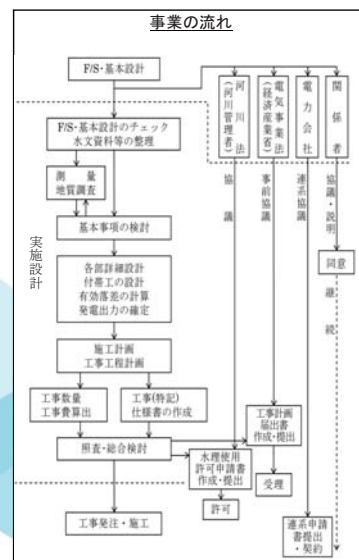
- ・基本設計を実施(測量、流量測定、概算工事費算出等)
- ・河川法許可の事前説明・系統連系協議、計画の事前説明など

■実施設計(詳細設計)

- ・施工図面の作成、設計書、特記仕様書の作成
- ・許認可申請(各法令事前協議、申請書提出、系統連系協議)

■建設工事～完成

- ・土木工事、建築工事、機器据付工事
- ・試験調整
- ・法的手続き等



1. 計画から運転までの工程

1) FS(フィージビリティスタディ)調査、可能性調査

- 市長村単位などの地域単位、または特定の区域にて行なう。
- 関係者の聞き取り等にて、可能性のある地点を抽出する(数箇所～10箇所程度)
- 現地調査にて、候補地点を数箇所程度に絞り込む
- 各候補地点を調査し、調査結果をまとめる。
 - ・落差、流量、流況等の調査
 - ・発電設備のイメージ化(概略図面の作成、需要設備、水車発電機の仮選定等)
 - ・発電出力、年間発電量
 - ・kWhあたりの建設単価による経済性評価
 - ・工事費用の算出
 - ・問題点の抽出(水利権、法的規制、アクセス路など)
- 経済性評価の目安:「kWhあたりの建設単価」が250円以下(補助金は不含)であれば、経済性ありと判断。(財団法人 新エネルギー財団の指標) 但し、現在は、FITにより売電単価が以前に比べ高く、FIT単価や事業年数による検討も行う

2) 基本設計 ～ 導入が決定、または導入を前提に実施する～

- 実施設計に補助制度を利用する場合、公募要領の必要事項を満たす内容で行なう
- 基本設計の実施項目
 - ・地形の測量後、総落差、有効落差、損失落差を算出
 - ・流量測定データに基づき、流況曲線作成、維持流量、最大使用水量等を算出
 - ・水車発電機器の機種選定、発電出力、年間発電量の算出
 - ・土木レイアウト図面、発電設備レイアウト図、単線結線図等の作成
 - ・工事費用の算出、収支計算、経済性の評価

【法的手続き等】

- 河川法、その他の法令の許可:計画概要の説明を実施
- 系統連系協議:計画の事前説明を実施

3) 実施設計 ～ 工事計画が決定後に実施する～

- 補助制度を利用する場合、採択後に着手する。
- 実施設計の実施項目
 - ・ 基本設計の再検討、必要により修正
 - ・ 施工図面の作成
 - ・ 入札用の特記仕様書の作成

【法的手続き等】

- 河川法、その他の法令の許可: 事前協議、申請書提出
- 系統連系協議: 発電設備の概要についての事前協議

4) 建設工事～完成

- 補助制度を利用する場合、採択後に業者を決め、着工する。
- 建設工事は、工事工程に従って行なう。
 - ・ 土木工事、建築工事、電気工事
 - ・ 水車発電機器の据付
 - ・ 試験調整
- 建設工事後、事業主(地方自治体)の完成検査を行なう。
- 補助制度を利用する場合、完成検査を受ける。(年度末の締切日に注意)

【法的手続き等】

- 着工前: 工事計画届け、主任技術者の届け出
- 工事中: 系統連系申請、保安規程の届け出
- 売電契約等 ⇒ 再生可能エネルギー全量買取制度への移行

2) 電気事業法 (経済産業省)

① 一般用電気工作物

- 20kW未満、水量1.0m³/s未満の場合で法的手続きが不要

② 自家用電気工作物となり、法的手続きが必要

- 一般用電気工作物以外のもの
 - ・ 工事計画届け
 - ・ 電気主任技術者、ダム水路主任技術者の選任/届け出
 - ・ 保安規程の制定、届け出
- ただし、200kW未満で、電気工作物としてのダム、堰がない場合は、工事計画届け、およびダム水路主任技術者の選任/届け出は不要

※上記は、2011年3月の電気事業法施行規則の改正にて一部規制緩和が実現したもの

③ その他関係法令

- その他、計画地点により、「建築基準法」、「自然公園法」、「砂防法」、「森林法」、「国土利用計画法」、「国有林野法」、「農地法」、「農業振興地域の整備に関する法律」、「文化財保護法」などの法的手続きが必要

(2) 法的手続き等

1) 河川法 (国土交通省)

① 水利権

- 発電の場合、規模に係わらずすべて「特定水利使用」
- 取得手続きの難易度、煩雑さは、河川の種別等により全く異なる

② 処分権者

- 一級河川 : 国土交通省
- 二級河川 : 都道府県知事
- 準用河川、普通河川 : 市町村長(事業者主体が自治体の場合、許可は不要)

③ 手続き

- 一級河川の場合、非常に困難
 - ・ 大中水力導入の場合とほぼ同じ手続きが必要(農業用水利用も同じ)
 - ・ 農業用水が「許可水利権」で、これに完全従属する場合は、手続きが一部簡素化
 - ・ また、平成 23 年3月1日より国土交通大臣が行う許可処分に加え、従属発電の一部について都道府県知事等が行うことが可能
 - ・ まず、最寄りの河川工事事務所に相談
- 「小水力発電を行うための水利使用の許可申請ガイドブック rev3」を参照
- ・ 国交省HP: <http://www.mlit.go.jp/river/riyou/syosuiryoku/>

④ 流水占用料

- 都道府県知事に流水占用料等支払いの手続き
- 水利使用料(年額) = 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)

3) 系統連系、売電について

① 系統連系とは

- 発電設備を既設需要設備や、電力会社の配電線に接続して運用すること

② 系統連系の手続き

- 系統連系申請書の提出、許可
(連系に必要な技術要件を満たしたものであれば、特に問題はない)

3) 系統連系、売電について

③ 売電について

■ 再生可能エネルギーの固定買取制度の施行（2019年度時の価格）

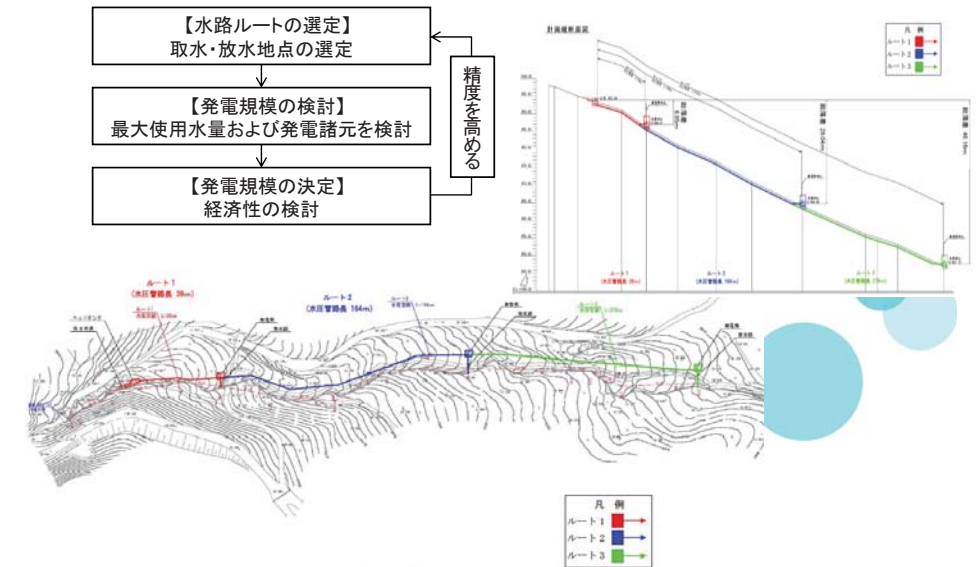
● 中小水力

	5,000kW以上 30,000kW未満	1,000kW以上 5,000kW未満	200kW以上 1,000kW未満	200kW未満
2018年度（参考）				
2019年度	20円+税	27円+税	29円+税	34円+税
2020年度				
2021年度				
調達期間	20年間			

● 中小水力（既設導水路活用型）※ 既に設置している導水路を活用して、電気設備と水圧鉄管を更新するもの。

	5,000kW以上 30,000kW未満	1,000kW以上 5,000kW未満	200kW以上 1,000kW未満	200kW未満
2018年度（参考）				
2019年度	12円+税	15円+税	21円+税	25円+税
2020年度				
2021年度				
調達期間	20年間			

2.1 発電計画の策定手順



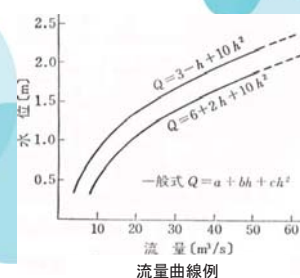
2.2 流量資料

- 発電計画の信頼性＝流量資料の精度
- 流量資料として、好ましくないもの
 - 1) かなり離れた他の河川流域
 - 2) 同じ流域でも、流域面積が違いすぎるもの
 - 3) 短期間のもの（最低1年以上のデータが好ましい）
 - 4) 雨量から類推するもの
 - 5) 欠測の日があるもの
- 計画地点の流量資料が得られない場合は、まず流量調査を始める。

2.2.1 流量曲線

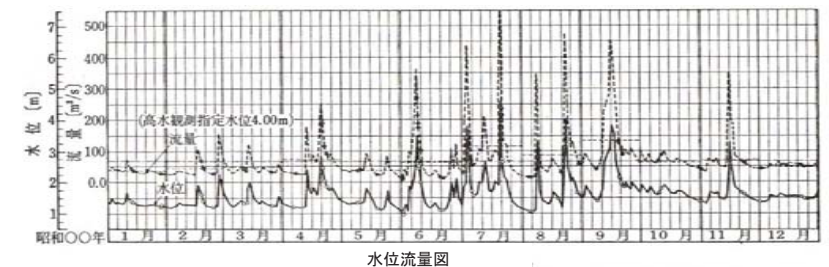
河道地点の水位観測と流量の実測を同時に行う

- ・水位(h)と流量(Q)の関係を作図する(流量曲線)
- ・水位(h)を縦軸、流量(Q)を横軸として、2次放物線の式で表す。
 $Q = a + bh + ch^2$
- ・定数a、b、cは、hとQの実測値から求める。
- ・河川の水位と流量の間には、一定の関係があり、測水する地点の毎日の観測水位から、2次放物曲線で流量を知ることが出来る。



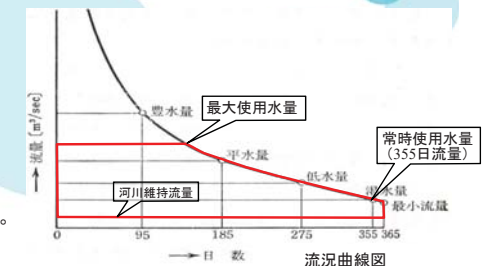
2.2.2 水位流況図

縦軸に毎日の水位と流量を、横軸に歴日に表した図を水位流量図という



2.2.3 流量曲線図

- ・1年間(365日間)の毎日の流量を、最大流量から最小流量まで順次並べ替えた表を流況表といい、これを図化した曲線を流況曲線図という。
- ・流況曲線は河川流況の概略を図に表したもので、発電所の使用水量の選定や可能発電電力量の算定など、発電計画にあたって有効に利用される。



2.4.2 土木設備(取水設備～水槽・放水路)

1) 取水設備

取水設備は、河川を横断して河川水を水路に導き入れるための設備で、ダム、取水口、及び付属設備から構成される。取水ダム(取水堰)とは、河川の水を取り入れるために設ける低いダム(又は堰)のこと。取水口は、河川の水を水路に導き入れるための設備で、水路に流木・塵芥が流入するのを防止するためにスクリーンを設ける。

2) 沈砂池

河川の水には、常に多少の土砂が混入しており、水路式の場合には、土砂が混入したまま水路に流入し、水路内に沈殿して水路の通水能力を低下させたり、水圧管路や水車を磨耗させる。このため、一般に導水路に入る直前に流入土砂を沈殿排除するための水槽を設ける。この池のことを沈砂池という。

3) 導水路

取水口より取水した水を水槽まで導水する構造物。自由水面で流れる無圧式と、内部に全体に水圧のかかった圧式に分類される。比較的簡易な構造物だが、寒気が厳しく降雪の多い地方や、落葉、土砂崩れ等の多い地方では、水路の上に蓋をすることもあります。

4) 水槽(ヘッドタンク)

導水路の終端部で水圧管路と連結する部分に、水槽(ヘッドタンク)が設置される。水槽では、土砂及び塵芥、氷雪等の最終的な除去、使用水量の微小変動の調整、および水車停止の際に水を安全に河川に流下させるための水路(余水路)等を設置する。

5) 放水路

放水路は、水車から放出された水を河川に導くための水路で、構造としては導水路とほぼ同様なもの。

2.4.3 土木設備(水圧管路)

水槽から発電所・水車へ導水するための管路を水圧管路という。水圧管路の形式は、地上敷設式と埋設式に大別される。小水力発電における水圧管路本体の材料としては、鉄管、強化プラスチック複合管(FRPM管)、ダクタイル鑄鉄管、塩化ビニル管等多種類の管が使用される。

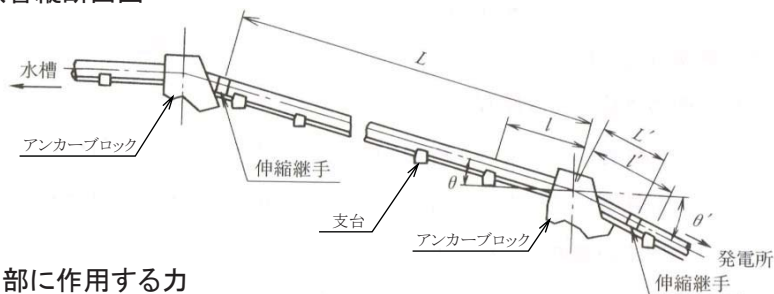
1) 露出管路

- (1)水圧管路の曲部では、①管内水圧合力(不平衡力)、②遠心力、③管の傾斜による推力、④管内流水の摩擦力などが働くため、固定台(アンカブロック)で固定する。
- (2)水圧管路の平面線形は、極力直線とする。
- (3)鋼管を使用する場合のアンカブロック間隔は、一般的に50m～100m程度とする。
- (4)アンカブロック間の直線区間は、コンクリート製の小支台で支持する。

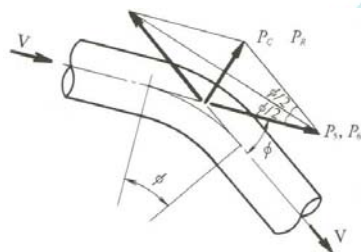
2) 埋設管路

- (1)傾斜部管路の基礎は、傾斜角度が 15° 以上の場合、上流管路の滑動力を埋設固定台で受けるものとしている。(出典：土地改良事業計画設計基準設計「パイプライン」基準書)
- (2)埋設管路では、強化プラスチック複合管(FRPM管)や耐圧ポリエチレンリブ管(ハウエル管)などの一般市販管が使用できる。これらの管は直線配管が原則であるが、継手部の設計曲げ角度内の曲げ配管も可能である。(出典：水力発電設備の樹脂管(一般市販管)技術規格 JEAC2601-2010)

水圧鉄管縦断面図



わん曲部に作用する力



P_C : わん曲部に作用する遠心力
 P_R : わん曲部に作用する不平衡力
 Φ : わん曲部の合成角
 P_C : 遠心力による推力
 P_R : 不平衡力による推力
 V : わん曲部の流速

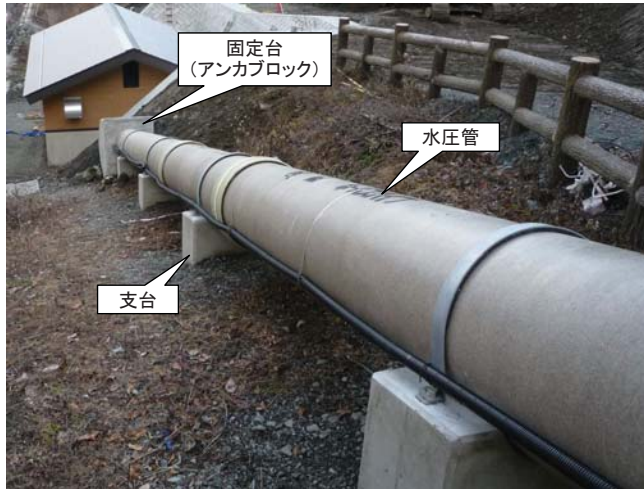
出典)水門鉄管技術基準

支台、および固定台(アンカブロック)安定計算における荷重の組み合わせ
(鉄管:露出管の場合)

荷 重	支台の 安定計算	アンカブロック の安定計算
(1)支台又はアンカブロックの質量	○	○
(2)支台又はアンカブロックが支承する管及び水の質量	○	○
(3)管軸方向の推力		
1)管の自重による推力	—	○
2)管内水の摩擦による推力	—	○
3)漸縮管に作用する内圧による推力	—	○
4)伸縮継手に作用する内圧による推力	—	○
5)支承部摩擦力	○	○
6)伸縮継手摩擦力	—	○
7)わん曲部に作用する遠心力による推力	—	○
8)わん曲部に作用する不平衡力による推力	—	○
(4)地震力	○	○
(5)風圧による側面からの力	○	—

出典)水門鉄管技術基準

水圧管路:露出部



FRPM管



鋼管

2.4.4 発電所建屋

発電所建屋は、一般に、水車発電機等の主機器、付属機器、開閉装置、運転保守員の事務室等を収容するための鉄筋コンクリート製基礎と建屋からなる。

また、主機器の据付け組立用に天井クレーンやホイスト設備等の吊設備が一般に設けられていますが、中小水力の場合には発電所を無人化とすることが一般的なので、運転保守員の事務室は省略する等、スペースを極力節約してコンパクトな建屋とし、吊設備も省略する場合が多い。

■発電所建屋の形式

- ① 屋内式 : 水車、発電機を建物内に設置した普通の発電所
- ② 屋外式 : 水車、発電機等の主機器を収容する建物を省略したもので、発電機床面を地表面に設けて、発電機を風雨から防ぐための保護カバーを設けた発電所
- ③ 半屋外式 : 主要機器だけを収めることのできる建物を設け、機械の組立、分解は屋外用のクレーンを使って行う発電所
- ④ 地下式 : 主として気象、地形あるいは風致等の点から採用されるもので、全ての機器を地下に収容する発電所
- ⑤ 半地下式 : 発電機室天井を地表面とするもので、天井にハッチを設けて、水車、発電機の組立・分解や搬入出を行う発電所

※) 建屋の材料は、鉄筋コンクリートを使用する場合が一般的ですが、小規模水力の場合にはプレハブ式や木材を使用したものもある。

2.5 損失落差、有効落差

有効落差＝総落差－損失落差

※) 総落差＝取水位－放水位

2.5.1 損失落差略算式

$$H_L = a \times L_1 + b \times L_2 + c \times L_3 + \Delta h_L$$

L_1 : 導水路延長、 L_2 : 水圧管路延長、 L_3 : 放水路延長

$a = c = 1/1,000$ (無圧水路)

$1/700$ (圧力水路)

$b = 1/200$ ← 水圧管路の摩擦損失水頭

Δh_L : その他損失 $\approx 0.50m + \alpha$

2.5.2 損失落差の基本式

1) 水圧管路 摩擦による損失水頭

$$\Delta h_f = f_f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = f_f \frac{L}{D} \frac{Q^2}{2gA^2}$$

$$f_f = \frac{124.5n^2}{D^{1/3}}$$

Δh_f : 摩擦による損失水頭 (m)

f_f : 摩擦損失係数

n : 粗度係数

L : 水圧管路 (m)

D : 水圧管径 (m)

A : 流積 (m²)

2) 水圧管路 流入による損失水頭

$$\Delta h_e = f_e \frac{V^2}{2g} = f_e \frac{Q^2}{2gA^2}$$

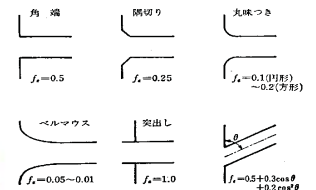
Δh_e : 流入による損失水頭 (m)

f_e : 流入損失係数

n : 粗度係数

D : 水圧管径 (m)

A_2 : 流入後の流積 (m²)



3) その他損失水頭

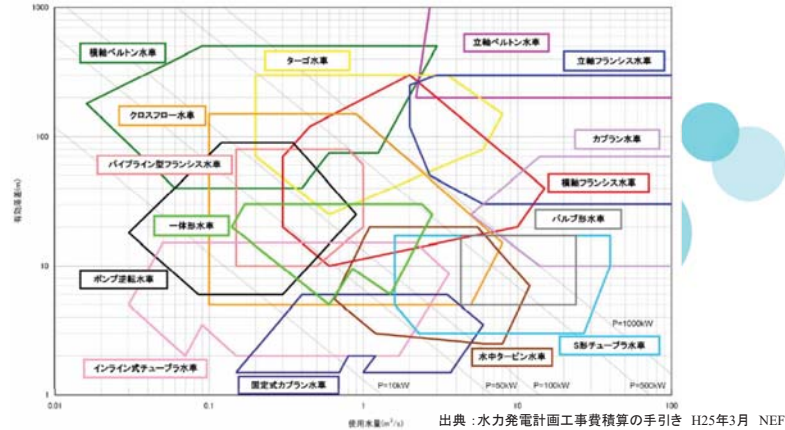
取水口～水槽間の水面低下量、スクリーンによる水面低下量、水圧管路曲り部の損失水頭、水圧管路入口弁の損失水頭などがあり、それぞれを計算、および合計し、総損失水頭を算出する。

2.6 水車発電機の設定

2.6.1 水車の選定

水車は、使用水量の大小や落差の大小によってその適用機種が異なりますので、その地点に合った最も経済的な水車を選定します。

水車の型式は、最大使用水量と有効落差の適用範囲によって定まり、下図に示すような水車選定図を利用することで、初期段階での水車形式選定と基本計画の立案が可能です。



2.6.2 発電機の設定

発電機には同期発電機と誘導発電機があり、電力系統への接続の有無及び経済性を考慮して最も適した発電機を選定します。

2.6.3 効率の算定

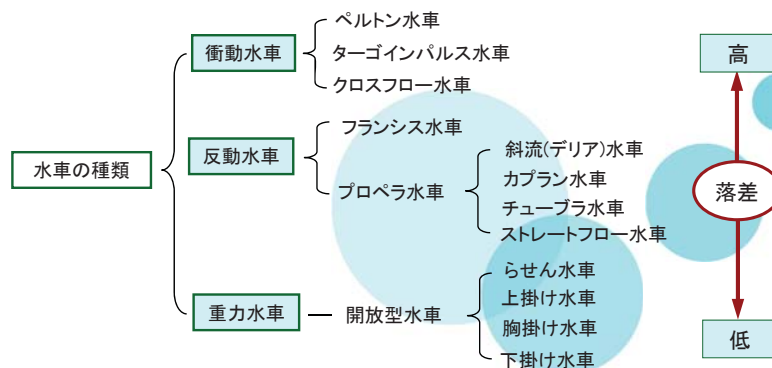
水車の出力と入力との比を効率といい、水車出力を P (kW)、有効落差を H (m)、流量を Q (m^3/s) とすれば、効率 $\eta = P / (9.8QH)$ で表され、水車の種類、水車の回転速度、比速度及び流量比(使用水量/最大使用水量)によって変化します。

効率の具体的な算定方法については、「水力発電計画工事費積算の手引き 3.電気設備選定の手引き」等により算出が出来、初期段階での計画立案に利用出来ます。

但し、各メーカーにより、水車効率が違うので、詳細に計画を進めるためには、メーカーへの確認が必要です。

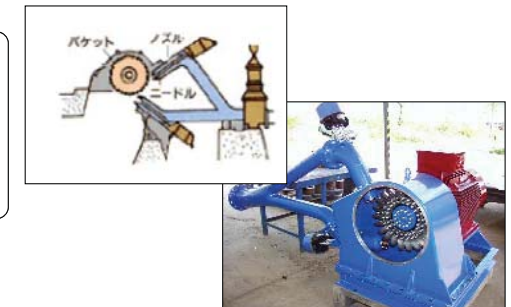
(1) 水車の種類

- 水車には、落差や流量の違いにより、様々な種類があります。(下図参照)
- 衝動水車は、速度のエネルギーを利用する水車で、高落差用です。
- 反動水車は、圧力のエネルギーを利用する水車で、低落差～中落差用です。
- 重力水車は、水の重さを利用する水車で、超低落差用です。
- この他に、ポンプを利用した「ポンプ逆転水車」などがあります。



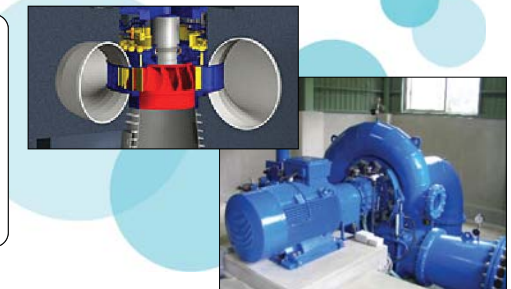
① ペルトン水車

- 水をノズルから噴出させ、その勢いでバケットを回転させる水車
- ノズルから噴出する水の量を調節することにより出力を簡単に調節可能
- 100m以上の高落差に適している
- 好率が良く、部分負荷特性も優れている



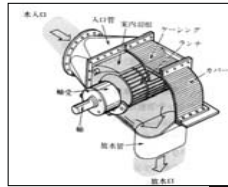
② フランシス水車

- 水はランナの全周から中心に向かって流入し、水圧によりランナを回転させつつ、ランナ内で軸方向に向きを変えて流出する
- ガイドベーンにて流量調整が可能
- 最も一般的な水車で、10数m～数100mの中～高落差に広く適用
- 効率が良く、吸い出し管高さが利用できる利点があり



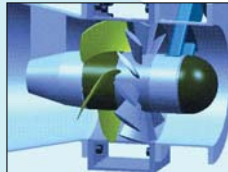
③ クロスフロー水車

- 水流が円筒形のランナに軸と直角方向より流入し、ランナ内を貫通して流出する。また流量調整機構(ガイドベーン)を備えた水車
- 衝動水車の分類だが、反動水車の性質も備えている
- 数m～100m程度の落差に広く適用
- フランシス水車の領域とある程度ラップする
- フランシス水車と比較して効率は落ちるが、価格が安い傾向にあり



④ プロペラ(カプラン水車)

- フランシス水車と同じタイプの水車
- 羽根の動かない水車がプロペラ水車で、流量の変化等に応じて羽根の開度を調整できる水車がカプラン水車
- 羽根を動かすことにより、部分負荷でも高効率で運転できる
- 2m～数10mの低い落差に適用



3. 小水力発電の適用場所 31

(1) 概要

- 基本的に、落差と流量のあるところであれば、場所を問わず発電は可能
- ただし、設備、法的手続き、補助・支援制度の活用、経済性は、地点毎に全て異なる

一般河川



砂防・治山ダム



農業用水



上水道



トンネル湧水



下水処理排水



ダムの維持放流



既設発電所放流



工場排水



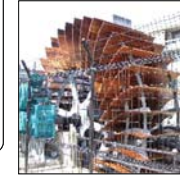
ビル冷却水



⑤ 開放型水車(下掛け、上掛け水車、らせん水車)

- 古典的な水車で、水の重みで水車を廻す
- 1～5m程度の非常に低い落差で使用
- 部分負荷特性に優れている
- 最大出力は下/上掛け水車で100kW程度、らせん水車で300kW程度

開放型下掛け水車



開放型上掛け水車



らせん水車



衝動水車

速度のエネルギー利用
高落差用 中落差用
ペルトン水車 クロスフロー水車



反動水車

圧力のエネルギー利用
中落差用 低落差用
フランシス水車 カプラン水車



重力水車

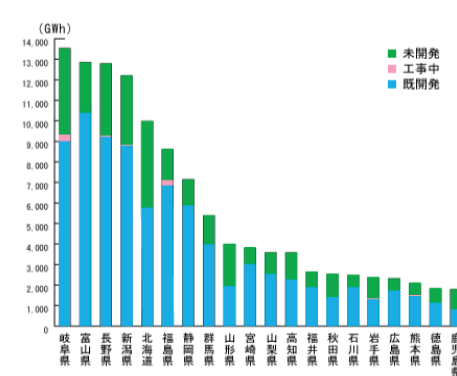
水の重さを利用
超低落差用
下掛け水車 上掛け水車 らせん水車



4. 私たちとエネルギー 32

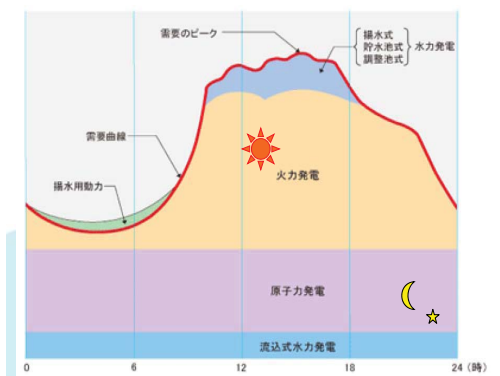
(1) 小水力発電を開発する意義

都道府県別包蔵水力のグラフ



出典: 資源エネルギー庁HP水力のページより

電源のベストミックスの例



出典: 電気事業連合会HPより

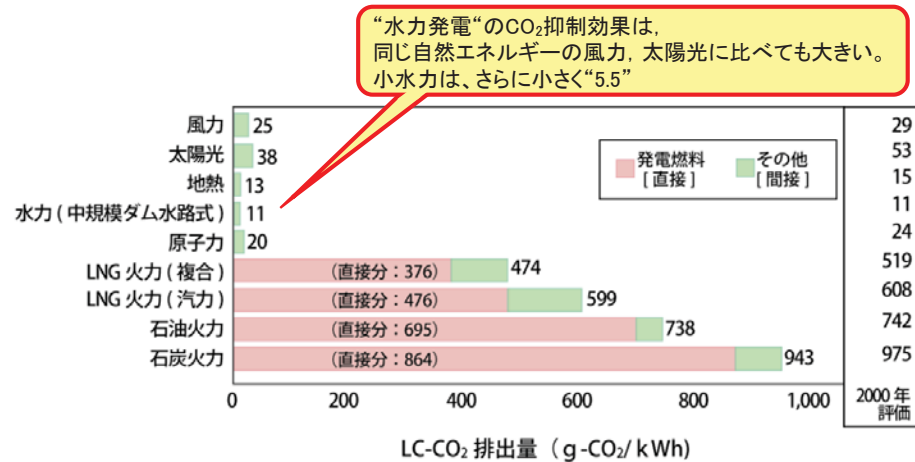
日本の貴重な純国産エネルギー

中山間地域での開発可能性、地域振興

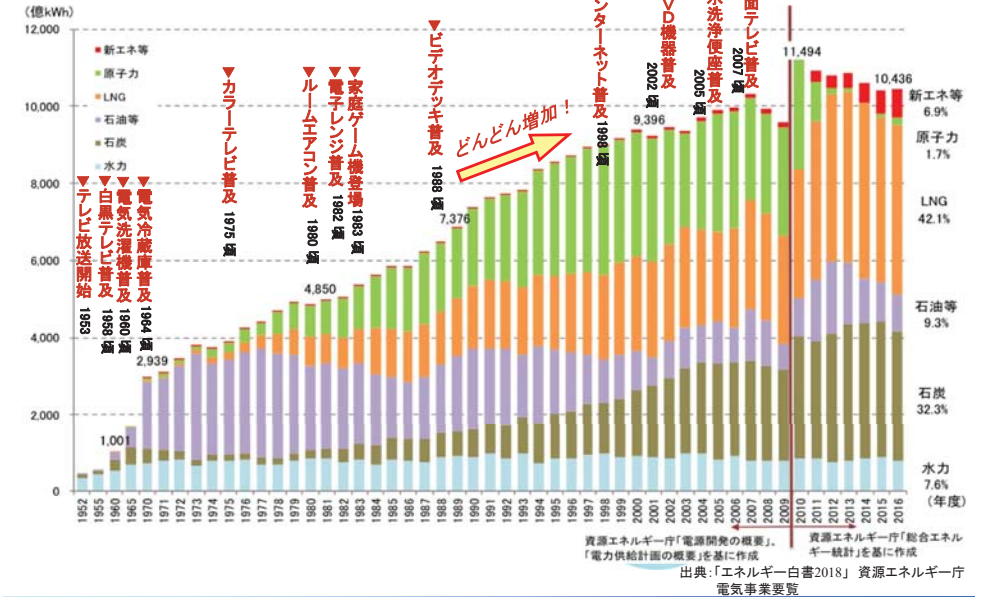
安定性のある優れたエネルギー

再生可能エネルギーの不安定性を補完

4) 太陽光、風力、水力、火力、原子力 それぞれのCO₂排出量は？

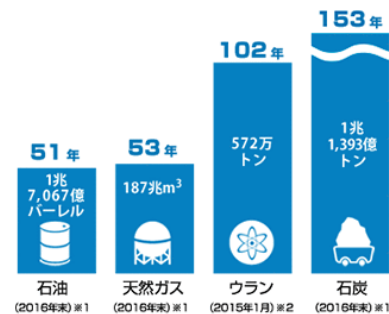
電源別ライフサイクルCO₂排出量の評価結果出典: 電力中央研究所「日本の発電技術のライフサイクルCO₂排出量評価」

(4)日本の発電電力量の推移



◇小水力の発生するエネルギーは～ 子供たちの世代に残すべき 無限の再生可能エネルギー

エネルギー資源の確認埋蔵量(可採年数)



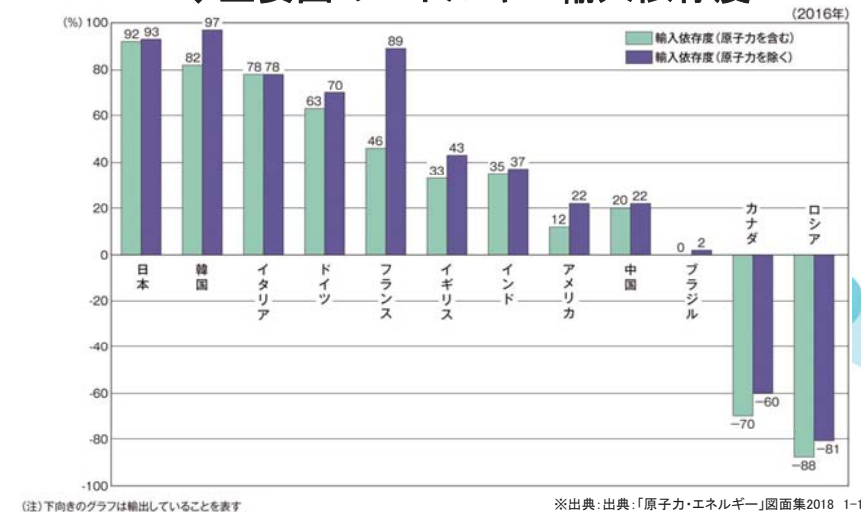
※1 可採年数＝確認埋蔵量／年間生産量
※2 ウランの確認埋蔵量は費用130ドル/kgU未満
出典: 原子力・エネルギー図面集2017

石油をはじめ化石燃料は石炭を除けば、
あと数十年分の埋蔵量しかありません



水のもたらすエネルギーは無限
の再生が可能です

◇主要国のエネルギー輸入依存度



日本はエネルギー資源の92% (原子力を除くと93%) を輸入に頼り、
他の主要国と比べエネルギー供給構造が脆弱な状況！