論 說 報 告

第十九卷第七號 昭和八年七月

發電水路の方式と水流速とに關する經濟的研究

會員 榎 本 卓 藏

An Economical Study regarding the System and the Water Velocity of Hydro-electric Conduits.

By Takuzo Enomoto, Member.

内 容 梗 概

發電經濟上より，流込式水路と水壓式水路とを比較し，一般的に水壓式水路の優れる所以を説明し，併せて發電用水路に於ける經濟的水流速を決定する根據に關しての私見を述べたるものである。

1. 緒 言

獨り發電用水路のみならず水道，灌漑用水路に於ても，その設計に當つては取水口に於ける自然流量の變化を知らねばならぬと同時に，水量の使用せらるゝ狀態を想定しなければならぬことは言ふ迄も無いが，發電用水路以外のものに於ては，水そのものゝ輸送に終始してゐる關係上，何等土木以外の技術的考察を必要としないに反し，發電用水路に於ては，水量の變化が電力需要狀態に依つて左右せらるゝから，是非共電氣技術的想定を必要とすることゝなる。此意味に於て著者は，電氣技術者としての立場から聊か之等に關聯した水路の方式と水流速とに就き，發電經濟の原則を基礎として觀察し，その私見を述べんとするものであるが，素より淺學非才の論ずる所なるを以て，宏く會員諸賢の御叱正を希ふと同時に，多少なり御參考の一端に資することを得ば，著者の幸甚之に過ぐるものは無い。

2. 流込式水路と水壓式水路との經濟的比較

一般に貯水池又は調整池を設置して，自然流量を調節する場合には主として水壓式水路を採用し，自然流量そのまゝを引用する場合には流込式水路が採用せられてゐるものであるが，素々此採用別は，

(1) 水壓式水路に依らざれば，水量の調整が完全に行はれ難きこと。

(2) 一定水量を流過せしむる場合に於て，水壓式水路は流込式水路より一般に多額の工費を要したること。

(3) 水壓式水路は流込式水路に比較し，一般に水路内の洩水多きものと豫想せらるゝこと。

等の理由から決定せられつゝあつたもので，從來自然流量を調整せざる場合は，地質の良否にかゝはらず，總て流込式水路を採用せねばならぬと云ふ樣な慣行にとらはれてゐたものである。勿論之等の理由のみに依り，此兩方式の使用別が判然と定まるものであれば問題は無いのであるが．

著者は發電經濟の立場から，

(1) 一定の水量を流過せしむる場合に於て，水壓式水路は流込式水路に比し，最大許容水流速を大ならしめ得ること。

(2) 流込式水路は所定流量以上の水量取入不可能なるに反し，水壓式水路の場合に於ては水路內損失水頭の或

程度の增加を許し得るものとせば，所定水量以上の流量をも取水し得らるゝこと。

等の事由に依り，上述の慣行理由が强ち絕對的のものでは無く，自然流量そのまゝを利用する場合に於ても，電力負荷の特性と地質の關係から，水壓式水路を採用したる方，經濟的に有利となる場合が多いことを力說せんとするものである。尤も，從來の水壓式水路の場合に於ては，貯水池なり調整池なりを其始端に必ず附屬する關係上，水路內に混入する土砂の程度は流込式の場合に比し遙かに尠きものであるとの建前と，粗面係數の値を幾分小に採り得ると云ふ理由から，其許容流速を流込式の場合より大ならしめ得るとの見解は何人にも持たれてゐたものであるが，之に關する一定の基準が示されてゐた譯のものではなく。又示さるべく余りに困難な問題でもあつたのである。

然し，經濟的見地より其水流速を流込式水路の場合より高め得ると云ふことを理論的に論及したるものが無い樣に思はれるのであるが，若し御心付きの節は御教示を願ひ度いのである。扨て流込式水路に於ては最大使用水量を流過し得るに充分なる斷面積と水路勾配とが與へられてゐるのであるから，流過水量の如何に關らず，其損失水頭は殆んど一定と見て差支は無いであらう。勿論，嚴密なる意味に於ては流過水量の程度により水路內の水面勾配に多少の變化を來たすことゝなるが，實際上の問題としては省略し得る程度のものであるから，玆には之を無視するものとする。然し一方水壓式の場合に於ては，流過水量の値により水路內の損失水頭は著しく異なつてくる。

今，

A: 水路の潤水斷面積 (平方米)，　L: 水路延長 (米)

C: 流速係數，　R: 動水半徑 (米)

η_c: 水車，發電機の合成能率 (小數)，　g: 重力に依る加速度

γ: L/A^2C^2R

とすれば，任意の時刻に Q 立方米每秒の水量を水路內に流過せしめんとするには總損失水頭

$$h=\gamma Q^2 \text{ (米)}$$

に相當する水路勾配を必要とする。而して水路方式が流込式の場合に於ては，Q の値を最大流過水量としたるときの總損失水頭 h_m を水路勾配として與へらるゝものであるから，任意の時刻に流過する水量 Q によりて生ずる損失水頭に相當する電力 P_l は

$$P_l=9.8\,\eta_c h_m Q \text{ (キロワット)}$$

であるが，水壓式の場合に於ては Q の値に依り動水勾配從つて h の値が變化してくるから，

$$P_l=9.8\,\eta_c \gamma Q^3 \text{ (キロワット)}$$

で表されなければならぬ。即ち流込式水路に於ける損失水頭に相當する電力は流過水量の一乘に比例するけれども，水壓式水路に於ける夫は流過水量の三乘に比例することゝなる。而して水路の流過水量は水力發電所に於ける電氣負荷の特性に依り，時々刻々に變化するもので，又最渴水量以上の流量を取入水量とする場合に於ては天候並に季節的に變動するものであるから，發電所の 1 箇年間の運轉時間數を T，水路內にて失はるゝ 1 箇年間の總勢力を流込式の場合 w，水壓式の場合 w' にて表すならば，

$$w=9.8\,\eta_c h_m \int_0^T Q\,dt \text{ (キロワット)} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$w'=9.8\,\eta_c \gamma' \int_0^T Q^3\,dt \text{ (キロワット)} \quad \cdots\cdots(2)$$

となる。但し η_c の値は Qの値により多少變化するものなれども，其程度僅少なる故，玆には一定なるものと

假定する。尙$\int_0^T Q dt$がT時間內に於ける各時刻の流過水量を示す曲線にて造られたる面積に等しく，$\int_0^T Q^3 dt$が同樣，T時間內に於ける各時刻の流過水量の値を三乘したるものに依りて造られたる曲線のなす面積に相當することから，前式は又次の如く書き換へることが出來る。

$$w_l = 9.8\,\eta_z\,h_m\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q\right]T \text{（キロワット時）} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$w_l' = 9.8\,\eta_c\,\gamma'\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q^3\right]T \text{（キロワット時）} \quad \cdots\cdots(4)$$

而して，各時刻に於ける流過水量の平均は1箇年平均發電所負荷率を推定することに依りて，直ちに之を求め得らるゝに反し，各時刻に於ける流過水量を三乘したるものゝ平均を求むることは，實際運轉せらるゝ場合を假想して，各時間每に計算するより方法無く，甚だしき手數を要することゝなるが，然し此値を計算することが卽ち總損失勢力を求むることであるのだから，輕々には取扱ひ得られないのである。今(4)式を書き換へ

$$w_l' = \frac{9.8\,\eta_c\,\gamma'\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q^3\right]\times\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q\right]^3 T}{\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q\right]^3} \quad \cdots\cdots(5)$$

とすれば，一般に負荷變動に伴ふ流過水量の變化激しきことに歸因し，

$$\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q^3\right] > \left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q\right]^3$$

なる關係にあるから，

$$\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q^3\right] \Big/ \left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q\right]^3 = K \quad \cdots\cdots(6)$$

但し　　$K>1$

とし，尙小數にて表したる1箇年平均發電所負荷率をf_s，水路の最大流過水量をQ_m立方米每秒とすれば，

$$f_s = \left(\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q\right) \Big/ Q_m \quad \cdots\cdots(7)$$

なる故，

$$w = 9.8\,\eta_z\,h_m\,f_s\,Q_m\,T \text{（キロワット時）} \quad \cdots\cdots(8)$$

$$w_l' = 9.8\,\eta_c\,\gamma'\,K f_s^3\,Q_m^3\,T \text{（キロワット時）} \quad \cdots\cdots(9)$$

なる形にて表さるゝことなる。

卽ち，此結果に於て明かなる如く，流込式水路の場合に於ても，其1箇年間の總損失勢力を計算するに當つては，必ず1箇年平均發電所負荷率を考慮に入れ，1箇年平均使用水量を基準として爲さる可きものであるに拘はらず，從來發表せられたる此種の論文に於て，以上の關係が閑却せられたることは，計算の結果に於て甚だしき誤差を與へるものと云はなければならない。殊に水壓式水路の場合に於ける計算式が與へられなかつた關係上，1箇年間の損失勢力の積算に於て，煩雜なる手數を避くる便宜上，稍々もすれば，

$$\left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q^3\right] = \left[\frac{1}{T}\sum_{t=0}^{T} Q\right]^3$$

なりと假定し，實際の値と遠ざかつた結果を與へてゐた場合が多かつたのであるが，(9)式にて示す如く，同一需要地に送電する旣設各水力發電所に於ける旣往各1箇年間の負荷曲線から，各1箇年平均發電所負荷率に對する

K の値を求め，之等の平均を示す關係曲線を豫め造り置くならば，流込式水路の場合と同樣容易に損失落差に依る 1 箇年間の總電力量を算出することが出來，然も各時刻の流過水量を三乘したるものゝ平均を求むる場合と，其結果に於て大差なからしむることを得るものである。而して f_s の値は一般に渇水量に依りて設備せられたる水力發電所に於ては，需要負荷の特性のみによりて變化することゝなるけれ共，渇水量以上を標準使用水量とする水力發電所にては，需要負荷の特性のみならず，渇水狀態に依り著しく異なるものであるから，豐水期に於ける負荷狀態と渇水狀態との兩方面から觀察しなければならぬことゝなる。從つて或水力發電地點の 1 箇年平均發電所負荷率を推定するに當つては同一地方の河川，同一需要地の既設水力發電所の豐水期に於ける 1 箇年平均負荷率を參考とし，取水口に於ける平年を代表する渇水曲線を基礎として爲さねばならぬ必要を生ずるのである。

今或水力發電地點取水口に於ける平年代表の渇水曲線に於て任意の流量 Q と夫に對する渇水日數 n との關係が近似的に

$$Q=a+bn+cn^2$$

茲に　　$a,\ b,\ c$ は定數

にて表さるゝものと假定し，且つ渇水日數 N_s 日に相當する流量 Q_s を標準使用水量，小數にて表したる豐水期の平均發電所負荷率を f' とすれば，渇水となるべき流量の限界は，常時利用する調整池を有する場合又は調整池を有せざる場合 Q_s であり，渇水時のみ利用する調整池を有する場合 $f'Q_s$ である。從つて，1 箇年平均發電所負荷率 f_s の値は，

(1)　調整池を有せざる場合，

$$f_s=\frac{1}{365Q_s}\left[f'Q_s(365-N_s)+\frac{1}{100}(100-p)\int_0^{N_s}(a+bn+cn^2)dn\right]$$

(2)　渇水時のみ利用する調整池を有する場合，

イ．無溢流減壓水槽を有するとき，

$$f_s=\frac{1}{365Q_s}\left[f'Q_s(365-N_a)+\int_0^{N_a}(a+bn+cn^2)dn\right]$$

ロ．溢流減壓水槽を有するきと，

$$f_s=\frac{1}{365Q_s}\left[f'Q_s(365-N_a)+\frac{1}{100}(100-p)\int_0^{N_a}(a+bn+cn^2)dn\right]$$

(3)　常時利用する調整池を有する場合，

イ．無溢流減壓水槽を有するとき，

$$f_s=\frac{f'}{365Q_s}\left[Q_s(365-N_s)+\int_0^{N_s}(a+bn+cn^2)dn\right]$$

ロ．溢流減壓水槽を有するとき，

$$f_s=\frac{f'}{365Q_s}\left[Q_s(365-N_s)+\frac{1}{100}(100-p)\int_0^{N_s}(a+bn+cn^2)dn\right]$$

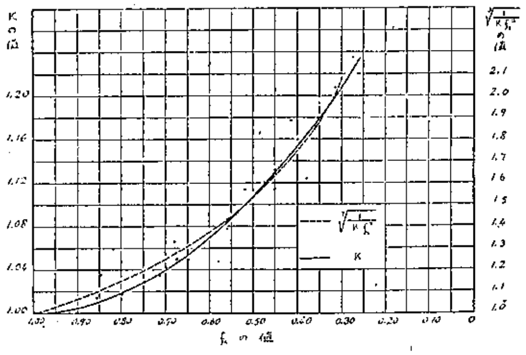
にて示さる。茲に N_a は $f'Q_s$ に相當する渇水日數にして，p は渇水期間に於ける輕負荷時又は負荷急減等の場合，取入口，水槽，溢流減壓水槽よりの waste water を渇水期間總流量の百分率にて示したものである。

尙，K の値は一般に f_s の値に反比例するものにして，關西大都市に送電せらるゝ一水力發電系統に就て，此關

係を求めて見ると第一圖の如き曲線となる。

扨て流込式水路と水壓式水路とに於て，最大流過水量の値，1 箇年平均發電所負荷率の値並に水路勾配，水路延長を同一なりと假定し，兩水路內に於ける 1 箇年間の損失勢力を互に等しからしむる樣，その潤水斷面積を決定するものとすれば，$h_m=\gamma Q_m^2$ なるに依り，γ'，R'，A' を總て水壓式水路に對するものとすれば，

第　一　圖



$$\gamma=\gamma' K f_s^2$$

或は

$$A^2=\frac{C'^2R'}{C^2RKf_s^2}\cdot A'^2 \quad\text{.......}(10)$$

なる關係となる。

而して一定形狀の水路斷面を有するものに於ては，Kutter 氏の流量公式により

$$C=\frac{100\sqrt{R}}{m+\sqrt{R}}$$

尙　　$R=\sqrt{K_3A}$　　但し，K_3 は一定數

なる故，粗面係數を同等の値と假定すれば，

$$A=\sqrt[3]{\frac{\sqrt[4]{K_3'A'}(m+\sqrt[4]{K_3A})^2}{\sqrt[4]{K_3A}(m+\sqrt[4]{K_3'A'})^2Kf_s^2}}\cdot A' \quad\text{.......}(11)$$

となるが，一般に

$$\sqrt[3]{\frac{\sqrt[4]{K_3'A'}(m+\sqrt[4]{K_3A})^2}{\sqrt[4]{K_3A}(m+\sqrt[4]{K_3'A'})^2}}\fallingdotseq 1$$

と見做し得ることから，近似的には

$$A\fallingdotseq\sqrt[3]{\frac{1}{Kf_s^2}}\cdot A' \quad\text{.......}(12)$$

と表すことが出來る。而して標準使用水量を渴水量以上とする場合は勿論，渴水量を標準使用水量とする場合に於ても，一發電系統に於ける綜合負荷の最底部を常に分擔する特殊の場合を除き，一般に f_s の値が 0.7 以上となることは稀であり，且つ f_s の値の增加に伴ひ，K の値は減少するものであるから，通例

$$Kf_s^2<1$$

となるものである。從つて $w_e=w_e'$ ならしめたる場合の水壓式水路の潤水斷面積は，流込式水路の夫に比し遙かに小ならしめ得る結果となる。

言ひ換へるならば最大流過水量を同一とする場合，粗面係數の差異によるものは除外し，單に水路に於ける年損失勢力の積算したる値を同等とすることのみに於て，水壓式水路の最大流速は，流込式水路の最大流速より遙かに大ならしめ得ることが出來ると云ふことになる。

即ち，流込式水路の最大水流速を V 米每秒とし，水壓式水路の最大水流速を V' 米每秒とすれば，

$$V'\fallingdotseq\sqrt[3]{\frac{1}{Kf_s^2}}\cdot V \quad\text{.......}(13)$$

であつて，f_s の値の低下したる發電系統のもの程，兩者の差異を甚だしくすることは第一圖に於て見らるゝ通りである。從つて水壓式水路が流込式水路に比し，水壓に對する補强並に漏水防止による工事費を余分に要することゝなるも，一面以上の結果に示す如く，潤水斷面積を流込式水路の場合より狹小ならしめ得ることから，必ずしも全體としての工事費を增加するものとは斷言し得ぬのである。

而して水壓に對する補强並に漏水防止による工事費の增加は，岩質，最大水壓並に水路斷面積の程度に依り異なるものであるから，之を一律に示すことは頗る困難ではあるが，同一最大流過水量に對し，粗面係數の差異を考慮するものとせば，岩質良好の場合 10% 以下，岩質稍不良の場合と雖も 20% を超過することは尠ない樣である。

尤も，之等に關する研究は會員諸賢の專門的領分に屬することであるから，その場合，場合に就ての數値は改めて御敎示を仰ぐことゝし，本論に於ては水壓式水路が流込式水路より常に多額の工事費を要すると謂ふ從來よりの一般的觀察が絕對的のものでは無く，寧ろ反對なる結果に到達すべき場合多きことを，理論と實際との二方面から論述したものである。

次に最大流過水量の問題であるが，水壓式水路に於てはその最大流過水量を或程度迄增加せしめ得る利點がある。元來發電水路の標準使用水量を渇水量以上に採ると云ふ所謂水火併用發電方式の旺盛となつた所以のものは，水力のみを利用する場合に比し，發生電力原價を比較的低廉ならしめ得ると云ふ經濟的見地からと，一面渇水標準の場合より河川流量なるものを，より有效に利用し得ると云ふ點とに存するものであるから，渇水補給火力發電に依る經費が安價となればなる程，標準使用水量の基準も從つて向上せしめなければならぬ結果を招致するものであつて，かの汽力發電に於ける熱能率並に發電容量が漸次改善又は增大しつゝある今日，發電水力の標準使用水量基準も之に伴ひ當然引き上げらるべきものであることは想像するに難くない。* 殊に我國の如く，將來開發し得る發電水力に自から限度のある國柄に於ては，發電水路の最大流過水量に或程度の融通性を保たしむると云ふことは國家經濟上重要なる意義を有するものと謂はなければならぬ。併し乍ら，流込式水路に於ては，經濟上到底之等は許し得られざるものであつて，水壓式水路に於てのみ或範圍內可能とせらるゝ處のものである。

斯くの如く，河川に於ける自然流量のみを利用する場合に於ても，水壓式水路は發電經濟上からは勿論，將來に於ける最大取水量增加に對する可能性を有する點等に於て，遙かに流込式水路に優るものにして，假令流込式水路の場合に比し漏水多き傾向を有するものとしても，その差は實に僅少なるものであるから，今後開發せらるべき發電水路に對しては，地勢，地質，水路延長，標準使用水量の基準，發電方式，負荷の特性等を綜合的に觀察し，極力水壓式水路を採用す可きであらう。

勿論この場合に於ては，取水口に於て水路天端上の水深をして最低，水路內の損失水頭に打勝つ程度に保たしめなければならぬ關係上，取水用堰堤の高くなることは免れないことゝなるも，一面それだけ水路延長の短縮となるから，之に依る工事費の增加は大した問題では無い。

3. 發電水路に對する經濟的水流速

この問題に就ては本會誌上は勿論，內外の著書，雜誌を通じ從來より發表せられたる論文頗る多く，此處に事新らしく述べたてる必要も無い樣であるが，著者は著者自身の新らしき見解から，其根本原則に對し少しく批判を加へて見たいと思ふのである。

扨て水路の最大流過水量が一定である場合に，夫に對する水流速を求むることは，取りも直さず潤水斷面積を求

---

* 拙著：　電氣學會誌　昭和 8 年 2 月號參照。

むることであるから，便宜上以下潤水斷面積に就て考察することゝする。

凡そ送電線路，發電用水路の如き發送電用管線路の經濟的斷面積を決定するに當つては，之等施設に對する年支出額を最小ならしむる樣爲さねばならぬことは勿論である。

即ち發送電用管線路の特性として，施設に對する經費支出と，管線路内にて失はるゝ勢力に對する支出とは互に反比例することから，かの Kelvin 氏が送配電用導線の經濟的斷面積に關する法則を誘致したと同樣の根據から，水路の場合も其經濟的斷面積が決定せられつゝあつた從來よりの方法に從へば，水路設備に投下したる資金に對する配當利子，減價償却，諸税，保險等の年固定經費率並に損失電力量に對する電氣料金を共に水路の斷面積には何等關係無く一定であると假定し，以上兩支出年額を最小ならしむる樣な斷面積を求めてゐたものであるが，之等に關する批判を爲す前，先づ第一に筆者の不滿足に感じたるものは，經濟的斷面積決定上重要な根本要素となる可き損失電力量の算定方法が既發表何れの論文に於ても實際と合致しない不合理なものであつたことである。

即ち f_s を全然考慮しなかつたものや，考慮しあるものも，渇水狀態と負荷特性との兩方面より漫然と算定方法を與へたるもの殆んど無く，殊に水壓式の場合に對しては，計算の煩雜となることから，實際と遠ざかつた推定の下に爲されつゝあつたことは前述した通りであるが，之等根本要素の値如何に依り求めんとする結果に著しき變化を與ふることに首肯し得るならば，徒らに經濟的斷面積決定に關する近似式誘導に汲々とするよりも，寧ろ根本要素に對する算定方法を合理的に指示したる方，發電經濟の實際的方面に，より以上の利益を齎らすことゝなるは推察するに難くないであらう。

扨て此場合損失電力量の算定は，(8) 及 (9) 式に據ることゝし，又水路設備に對する工事資金は，一般に水路の潤水斷面積の函數として表すことを得るものなる故，D_1 を水路斷面積の變化に關係せざる工事資金の部分とし，λ_1 を開渠水路斷面積の變化によりて異なる工事資金の部分に於ける比例定數，α, β, γ を隧道斷面積形狀に依る面積定數，t を卷立コンクリートの厚さ（糎），b を1立方米當り切擴掘鑿費，i_2 を1立方米當りコンクリート費，σ を導坑1立方米當り掘鑿費と切擴1立方米當り掘鑿費との比とすれば，次の如く表さる。

開渠水路の場合：

$$Z_1=D_1+\lambda_1 A \quad (\text{圓}) \qquad \cdots\cdots(14)$$

隧道水路の場合：

$$Z_1=D_1+L\left[\frac{\alpha b}{K_2}A+(b+i_2)\beta t\sqrt{\frac{1}{K_2}}A^{0.5}+(\sigma-1)\beta t\sqrt{\frac{1}{K_2}}\,bA_0A^{-0.5}+(\sigma-1)\gamma t^2 bA_0A^{-1}+(b+i_2)\gamma t^2+\frac{1}{K_2}(\sigma-1)\alpha bA_0\right] \quad (\text{圓}) \qquad \cdots\cdots(15)$$

玆に，Z_1 は水路工事費，K_2 は隧道の形狀，流込式隧道の場合に於ては潤水面積上の空隙の程度によりて異なる定數にして，$A=K_2D^2$ なる關係を有するものとする。A_0 は導坑面積にして A に對し定數を取るものとする。

從つて，從來よりの經濟的斷面積決定方法に從へば

流込式水路の場合：

$$\frac{\partial}{\partial A}\left[S_1Z_1+\frac{1}{10^4K_3A^3\sqrt{K_3A}}\left\{9.8\eta_c(m+\sqrt[4]{K_3A})^2Lf_sQ_m{}^3T\omega\right\}\right]=0 \qquad \cdots\cdots(16)$$

水壓式水路の場合：

$$\frac{\partial}{\partial A}\left[S_1Z_1+\frac{1}{10^4K_3A^3\sqrt{K_3A}}\left\{9.8\eta_c(m+\sqrt[4]{K_2A})^2LKf_s{}^3Q_m{}^3T\omega\right\}\right]=0 \qquad \cdots\cdots(17)$$

を滿足する A の値を求むることであつた。

茲に，S_1 は投下資金に對する年固定經費率（小數），ω は損失電力量 1 キロワット時當りの電氣料金（圓）とする。

從つて，S_1 の値が一定なる場合に於ても，ω の値の想定如何に依り，求むる經濟的斷面積の値も亦異なる結果となるものである。されば工事竣工後，長期間に亙る ω の平均値を豫想推斷することの適，不適が，直接施設に對する經濟，不經濟の限界を分岐すると云ふ極めて不安定な根據に置かれてゐることゝなる。

扨て一般に管線路なると否とを問はず，總て一定發電力施設に關する經濟的研究の根本原則なるものは，投下資金に對する年固定經費率を一定とする場合に於て，單位發生電力量に對する原價從つて，電氣料金を最低ならしめんとし，又電氣料金を一定とする場合には，年固定經費率從つて，利益配當を最高ならしめんとするに在るのであるから，Kelvin 氏法則を誘導したると同様の根據を適用する場合と雖も，其目的が經濟的施設を決定するものである以上，當然その結果は以上の經濟的根本原則に依りたる場合の結果と一致せざるべからざるものである。卽ち，發電端に於ける 1 キロワット時當り電氣料金を ω'，水路以外の發電設備費を Z_2，Z_2 に對する年固定經費率を S_2，取水口に於ける總落差を H_t，發電設備に對する 1 箇年間の運轉維持費並に營業費の分擔額を Δ_1 とすれば

流込式水路の場合：

$$\omega'=\frac{S_1Z_1+S_2Z_2+\Delta_1}{6.8\eta_cQ_mf_sT\left[H_t-\frac{1}{10^4K_3A^3\sqrt{K_3A}}\{(m+\sqrt[4]{K_3A})^2Q_m{}^2L\}\right]-W_p}\ (\text{圓})\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(18)$$

水壓式水路の場合：

$$\omega'=\frac{S_1Z_1+S_2Z_2+\Delta_1}{9.8\eta_cQ_mf_sT\left[H_t-\frac{1}{10^4K_3A^3\sqrt{K_3A}}\{(m+\sqrt[4]{K_3A})^2Kf_s{}^2Q_m{}^2L\}\right]-W_p}\ (\text{圓})\ \ldots\ldots\ldots(19)$$

にて表さる。茲に，W_p は水壓鐵管內に於ける損失水頭に依る 1 箇年間の相當電力量にして，n を其條數，F を摩擦係數，l を長さ（米），d を內徑（米），h_0 を摩擦に依る以外の損失水頭（米）とすれば

$$\gamma_0=\frac{Fl}{12.074d^5}$$

なるを以て　$W_p=9.8\eta_cnQ_mf_sT\left\{\gamma_0Kf_s{}^2\frac{Q_m{}^2}{n^3}+h_0\right\}$（キロワット時）

にて示さるゝものである。

送配電線路の場合に於ては，電力として既に表されたるものゝ輸送であつて，其始端に於ける電氣料金も既知のものであるから，單に送配電線路そのものに投下したる資金のみにより，其終端に於ける電氣料金の値が求め得らるゝけれども，水路の場合に於ては，發電所設備を通過せざれば保有勢力が電力として表し得られざるものなる故，發電經濟的考察に對しては當然發電迄の設備に對する投下資金を考慮しなければならぬことゝなる。何となれば，發電所設備を含まざる水路そのものゝみにては，發電用水路としての特徴を保持したるものではなく，發電設備迄を包含してこそ，發電水路として發電經濟的に考察する條件が具備せらるゝことゝなり，送配電線路と同様の取扱ひを受くべき性能を有することゝなるからである。

尙，嚴密なる意味に於ける電氣料金の理論は，夫れ自身に於て既に一研究項目をなす程重大なる問題ではあるが，電氣供給なるものが一つの企業であり，營利事業である一面，一つの公益事業であるところから，投下資金に

對する利益配當も相當の値であると同時に，餘り過大なることも許されないと云ふ原價說に從ふものとすれば，大體に於て，需要料金，電力量料金，需要家料金の 3 項目より成り立つことゝなるから，玆では電力量料金と需要家料金とを合せその分擔額を假りに $\varDelta_1$ にて代表せしむることゝしたのである。

扨て (18), (19) 式に (14), (15) 式の Z_1 の値を置換したる後，A に就て微分し，その結果を零に等しからしむることに依つて得たる A の値は，(16), (17) 式を解きたる場合の A の値と一致しなければならぬのである。然るに一般經濟的根本原則に從ふ

$$\frac{\partial \omega'}{\partial A}=0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (20)$$

の場合に於ては，唯，年固定經費率の値のみ假定することに依り，必然的に其經濟的斷面積が求め得らるゝに反し，從來の方法に於ては前述の如く，年固定經費率のみならず，電氣料金の値をも推定しなければならぬ關係上，假令，年固定經費率を同値とするも兩者の結果が互に一致するものとは云ひ得ない。

勿論，(20) 式より求めたる經濟的斷面積に相當する ω' の値と同値なる樣，(16), (17) 式の ω の値を推定したる場合に於ては，其結果が全く一致するものであることは數値例に依る圖式解法の結果に於て明かに看取せらるゝ處であり，又 (16), (17) 式に於ける電氣料金 ω を，斷面積の函數即ち ω' として表したる後，微分方程式を解きたる結果と，(20) 式を解きたる結果とが全く一致することから見ても明かである。

即ち，今算式の煩雜を防ぐ便宜上，流速係數 C 並に動水半徑 R が，斷面積の値には關係せず一定なるものとし，且つ Z_1 が潤水斷面積に關し直線的に變化するものとして，以上の關係を立證せんに，

(20) 式に依る場合は

流込式水路のとき：

$$\frac{\partial}{\partial A}\left[\frac{S_1(D_1+\lambda_1 A)+S_2 Z_2+\varDelta_1}{9.8\,\eta_c Q_m f_s T\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n_3}\gamma_0 K f_s^2 Q_m^2+h_0\right)-\frac{Q_m^2 L}{A^2C^2R}\right\}}\right]=0$$

を解き

$$9.8\eta_c C^2 R Q_m f_s T A\left[C^2 R S_1\lambda_1\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0 K f_s^2 Q_m^2+h_0\right)\right\}A^3\right.$$
$$\left.-3S_1\lambda_1 Q_m^2 L A-2Q_m^2 L(S_1D_1+S_2Z_2+\varDelta_1)\right]=0$$

水壓式水路のとき：

$$\frac{\partial}{\partial A}\left[\frac{S_1(D_1+\lambda_1 A)+S_2 Z_2+\varDelta_1}{9.8\,\eta_c Q_m f_s T\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0 K f_s^2 Q_m^2+h_0\right)-\frac{K f_s^2 Q_m^2 L}{A^2C^2R}\right\}}\right]=0$$

を解き

$$9.8\,\eta_c C^2 R Q_m f_s T A\left[C^2 R S_1\lambda_1\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0 K f_s^2 Q_m^2+h_0\right)\right\}A^3\right.$$
$$\left.-3S_1\lambda_1 K f_s^2 Q_m^2 L A-2K f_s^2 Q_m^2 L(S_1D_1+S_2Z_2+\varDelta_1)\right]=0$$

となり，又 (16), (17) 式の ω を ω' と置換したる場合は

流込式水路のとき：

$$\frac{\partial}{\partial A}\left[S_1(D_1+\lambda_1 A)+\frac{C^2RQ_m{}^2LA^2\{S_1(D_1+\lambda_1 A)+S_2Z_2+\varDelta_1\}}{C^2RA\left[C^2RA^2\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}-Q_m{}^2L\right]}\right]=0$$

を解き，

$$C^6R^3\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}A^5\left[C^2RS_1\lambda_1\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}A^3 -3S_1\lambda_1Q_m{}^2LA-2Q_m{}^2L(S_1D+S_2Z_2+\varDelta_1)\right]=0$$

水壓式水路のとき：

$$\frac{\partial}{\partial A}\left[S_1(D_1+\lambda_1 A)+\frac{C^2RKf_s{}^2Q_m{}^2LA^2\{S_1(D_1+\lambda_1 A)+S_2Z_2+\varDelta_1\}}{C^2RA\left[C^2RA^2\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}-Kf_s{}^2Q_m{}^2L\right]}\right]=0$$

を解き，

$$C^6R^3\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}A^5\left[C^2RS_1\lambda_1\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}A^3 -3S_1\lambda_1Kf_s{}^2Q_m{}^2LA-2Kf_s{}^2Q_m{}^2L(S_1D_1+S_2Z_2+\varDelta_1)\right]=0$$

となるを以て，何れも其經濟的斷面積は，

流込式水路の場合：

$$A=2\sqrt{\frac{Q_m{}^2L}{C^2R\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}}}\cdot\cos\frac{\varphi}{3}\qquad(\text{平方米})$$

但し，

$$\varphi=\cos^{-1}\frac{S_1D_1+S_2Z_2+\varDelta_1}{S_1\lambda_1\sqrt{\dfrac{Q_m{}^2L}{C^2R\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}}}}$$

水壓式水路の場合：

$$A=2\sqrt{\frac{Kf_s{}^2Q_m{}^2L}{C^2R\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}}}\cdot\cos\frac{\varphi}{3}\qquad(\text{平方米})$$

但し，

$$\varphi=\cos^{-1}\frac{S_1D_1+S_2Z_2+\varDelta_1}{S_1\lambda_1\sqrt{\dfrac{Kf_s{}^2Q_m{}^2L}{C^2R\left\{H_t-n\left(\frac{1}{n^3}\gamma_0Kf_s{}^2Q_m{}^2+h_0\right)\right\}}}}$$

となり，其結果は全く一致するものである。

一方，事業そのものゝ經營上より見るも，一定施設に對する年固定經費率と，夫に依る電氣料金とが個別の立場から決定せらるべき性質のものにあらざることは，原價說に依る電氣料金の定義よりして容易に了解し得らるゝ處で，電氣料金を一定とすれば，夫に應じて年固定經費率が決定せられ，又年固定經費率が一定なれば，夫に相當する樣，電氣料金の値を定めねばならぬことゝなり，この兩者は何れも投下資金を通じ，互に離るべからざる關係に置かるゝことゝを併せ考ふる時は，從來採り來つた方法が理論に誤りであつたことが立證し得られやう。

尤も，Kelvin 氏法則そのものは，單に電氣線路への投中資金と夫に對する年固定經費率とが與へられたる場

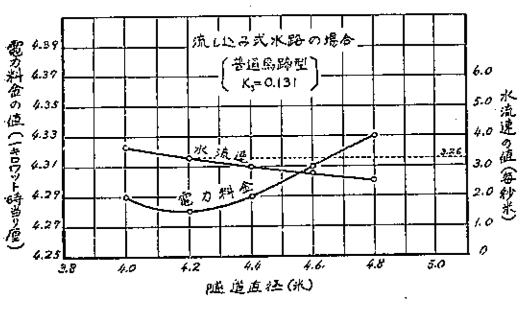
合，經濟的斷面積を目安的に算出する爲の謂はゞ漠然たる根據の下に立てられたるものなる故，巨額の工事費を實際に投ずる實地計算に當つて，同法則と同樣なる根據をそのまゝ適用すること夫自身が既に正鵠を缺いて居ることゝなるのである。

されば，水路の經濟的斷面積を決定するに當り，若し年固定經費率が一定である場合には，其損失電力量に對する電氣料金を，又電氣料金が一定である場合には，年固定經費率を，それぞれ施設に投下したる資金に準據して割り出されたる値に採らねばならぬものであつて，何れか一方を斷面積に關して定數とするならば他の一方は必ず斷面積に關して變數となるのである。而して，一般に年固定經費率は最低，事業經營の安定を害せざる程度，即ち公債利子以上の利益配當を含むものとなせば宜しきものであつて，其將來に對する目安は電氣料金を想定する場合より容易であるから，本論の場合に於ても年固定經費率を一定とし，電氣料金を斷面積の函數に採るのが順當であらう。

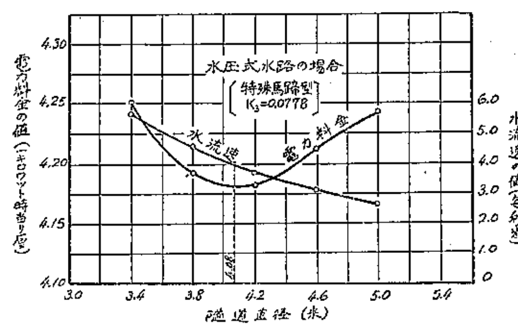
之を要するに，水路の如き管線路の場合と雖も，其經濟的斷面積の決定に際しては，(16), (17) 式に示す如き特殊の經濟的條件を與ふる必要なく，一般經濟的根本原則に從ひ，一定年固定經費率の下に，應じ得る電氣料金の値を最低ならしむる施設となせばよいのであつて，總ては (20) 式に據るを簡便且つ適當のものであると信ずるのである。勿論，(20) 式を解きたる結果は A に就ての高次方程式となるを以て，實際的には圖式に依り其經濟的斷面積を決定するより外，方法無きものであるが，之等の手數は從來採り來つた (16), (17) 式の場合に於ても同樣である。只，近似的結果を與ふる爲の算定式に關しては，種々の假定の下に從來多くの發表があるが，所謂，學術的興味としてゞは無く，實際上の應用を主眼とするならは目下の處，之等の手數は致方ないものであらう。

今，(20) 式に依る圖式計算の結果，水路の經濟的斷面積，從つて經濟的水流速なるものが如何なる程度のものと

第　二　圖



第　三　圖



なるかに就て，一實例に適用したる結果を示して見ると，**第二圖**，**第三圖**の如きものとなる。尙，同實例に於て，(16), (17) 式を採用したる場合，電氣料金の推定如何に依り經濟的斷面積，從つて經濟的水流速が如何に變化するかを示して見ると**第四圖**，**第五圖**の如くである。本實例は何れも**第六圖**に示す如き馬蹄型隧道にして次の數値を有するものである。

流込式隧道の場合：

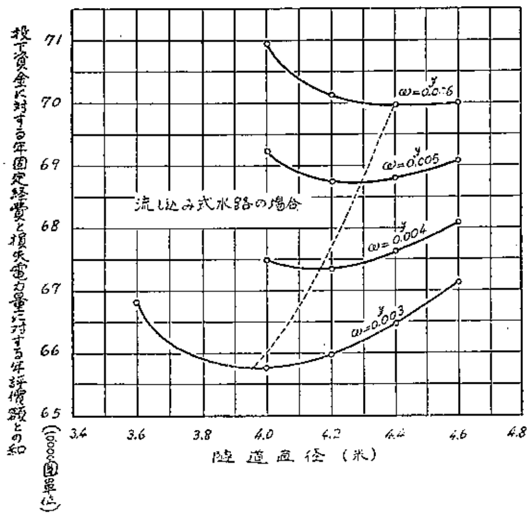
$L=5\,000$ 米	$K_2=0.7175$	$D_1=4\,200\,000$ 圓
$i_2=25.2$ 圓	$\sigma=1.71$	$Z_2=6\,500\,000$ 圓
$b=12.2$ 圓	$A_0=4.41$ 平方米	$f_3=0.56$

$\alpha=0.83$	$Q_m=41.7$ 立方米每秒	$n=3$
$\beta=0.95$	$H_t=192$ 米	$\gamma_0=0.0069$
$\gamma=0.223$	$S_1=0.1$	$h_0=0.38$ 米
$t=0.3$ 米	$S_2=0.12$	$K_3=0.131$

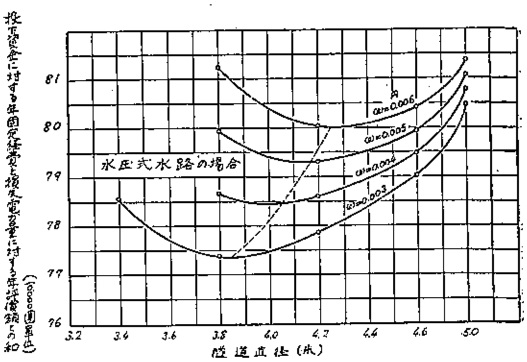
水壓式隧道の場合:

$L=4\,175$ 米	$K_2=0.845$	$D_1=6\,000\,000$ 圓
$i_2=26$ 圓	$\sigma=1.71$	$Z_2=8\,650\,000$ 圓
$b=12.2$ 圓	$A_0=4.41$ 平方米	$f_s=0.56$
$\alpha=0.846$	$Q_m=55.5$ 立方米每秒	$n=4$
$\beta=0.924$	$H_t=185$ 米	$\gamma_0=0.0069$
$\gamma=0.274$	$S_1=0.1$	$h_0=0.38$ 米
$t=0.3$ 米	$S_2=0.12$	$K_3=0.0778$

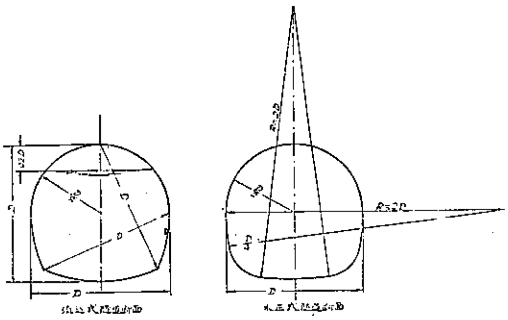
第　四　圖



第　五　圖



第　六　圖



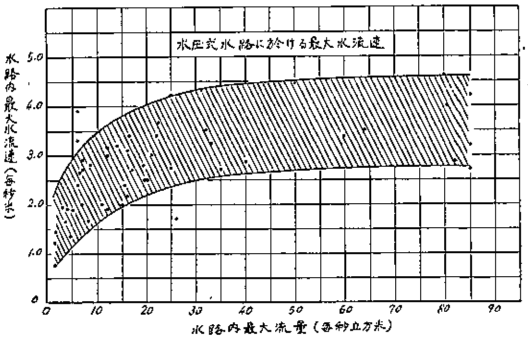
4. 發電水路に對する最大許容水流速

發電經濟の根本原則に立脚して決定せられた發電水路内の經濟的水流速も其程度が水路内面に於ける施工材料

を剝奪する樣では何等採用の價値は無い。卽ち，發電水路内の水流速に關しては，經濟的考察を必要とする一方，最大許容限度に關する吟味を爲さねばならぬことは此處に述ぶる迄も無く周知の事柄である。

水路內水流速の最大許容限度は，流量に土砂が混入し居らざるものとすれば，コンクリート卷立に於て，每秒5~6 米位であらうと稱せられてはゐるが，一般發電水路に於ては，土砂を絕對に混入せしめないと云ふ譯にはゆかぬから，畢竟，水路內に流入する含有土砂の程度を想定することに依りて大略の見當を定めると云ふことになる。從つて，沈砂裝置に於ける排砂の程度如何が直接，最大許容水流速に關係することゝなり，大貯水池を有し完全に沈砂の目的が達し得らるゝ場合の如きは，最大水流速を上記の値近くに採り得らるゝものと考へらるゝのである。又從來の水壓式水路の盡くに見る如く，必ず貯水池なり調整池なりを併有する場合に於ては，自然流量のみ利用する水壓式水路に比し，其許容水流速を當然，より大に採り得ることゝなる。今，歐米に於ける旣設水壓式發電水路の水流速を plot して見ると，第七圖の如きものであり，本邦に於ても大貯水池を有する水壓式水路に於て，其水流速を每秒 4 米以上に採りたる實例はある。

第　七　圖



然しながら，之等從來の實例記錄を以て，直ちに水路內水流速なるものゝ最大許容限度と見做すことは出來ない。何となれば，若し旣設水路の水流速が許容限度のものであるならば，水路內面に於ける水垢，藻，水虫等の附着餘裕を與ふるものではないが，事實は全く之に反し居ることゝ，一般發電水路の修理なるものが，地質又は施工上の原因より來たる部分的のもの多き點とに徵して明かであるからである。殊に發電用水路に於ては負荷の特性に依り，最大流速を必要とする最大使用水量の流過時間は，1 箇年を通じ，一般に 10% 以下にして，最近の如く標準使用水量が渴水量以上平水量又は 4 箇月水量に迄，向上せられつゝある時代に於ては尙更，最大使用水量の流過時間數は減少するものであるから，水路の最大許容水流速限度は從來の觀念より相當引き上げらる可きものであり，從つて今後設計せらる可き水路に對する最大水流速も，從來の實例以上に採り得るものと信ずるのである。

水路に於ける水流速の最大許容限度に關しては，從來より實驗報告の發表せられたるものあれど，その多くは運河又は夫に類する流量變化少なき水路に於て爲されたる結果に過ぎざるもので，之を直ちに流過狀態の特異性を有する發電水路の場合に適用することは出來ない。

卽ち，一定水路に於ける水路內面施工材料の剝奪が，含有土砂，水流速の程度のみならず，最大水流速の繼續時間に關係するものであると云ふことに首肯し得るならば，其事由は自から明かなるものであらう。

從つて，發電經濟の根本原則に立脚して決定せられたる水路內の經濟的水流速は，其最大許容限度を超過する程度のものでは無いと云ふことが前數值例の結果から推察し得られやう。

5. 結　　言

水壓式水路は，流込式水路に比し一般に粗面係數の値を小に採り得ると云ふ事實からのみでなく，發電經濟上より論じ，其水流速を著しく大に採り得るものである。

此結果，一定流過水量の場合，水壓式水路は常に流込式水路より多額の工費を要するものであると云ふ從來の論據は，經濟的意味に於て覆へさるゝことゝなつたのである。

次に，發電水路の經濟的斷面積又は水流速を決定する場合には，經濟的條件を構成する根本要素に關しての調査研究が最も重要なるものであり，其算定方法如何に依り，求む可き結果に著しき相違を招致することゝなる。

尙，此問題に關し，從來採用し來つた Kelvin 氏法則誘導と同樣の經濟的根據は，理論上發電經濟の根本原則と相容れざるのみならず，相聯關した2數値を同時に假定しなければならぬ關係上，不安定なる結果を與へることゝなる。之に反し，發電經濟の根本原則に準據して求めたる筆者の算定式に依る場合は，只，1數値を想定することに依り決定的な結果を與ふることが出來る。即ち本式に依るときは推定す可き電氣料金の如何に依り水路に投下す可き資金を增減しなければならぬと云ふ樣な條件[1]も省かれ，又掘鑿關係から，水路斷面積が局限せらるゝ場合並に技術施工上困難とせらるゝ斷面積の最大限度に達せざる範圍ならば，落差と水量との組合せに對する考慮も不必要となつて來るのである[2]。

勿論，電力賣却に際しては，S_1 の値を事業經營上許し得る最低の値に採りたる場合の ω' の値に準據しなければならぬのであるが，實際に當り ω' に準據したる値より以上に賣却し得られたりとするも，そは收益多大となり，S_1 從つて利益配當を增加せしむる結果となるものであるから，本論の如き經濟的研究の效果が，事業經營上に及ぼす影響は僅少である。即ち，經濟的研究の效果は事業經營上の許し得る最低配當がなし得らるゝや否やを云ふが如き收益減の場合に於てのみ現はるゝことを必要條件とするものにして，本論の如き研究目的も自から，夫等の場合に處する所以に外ならざるものである。（完）

---

(1)　松田文次氏：　土木學會誌 大正 10 年　8 月號參照。

(2)　永井專三氏：　土木學會誌 大正 10 年 12 月號參照。