

**Key Issues :**

**3 : 魚の回遊・舟運**

**気候区分 :**

Cs : 地中海性気候

**主題 :**

- 水力発電所の魚類用バイパス・スクリーン

**効果 :**

- 下流域でのサーモン回遊の改善



**プロジェクト名 :**

Puntledge 水力発電所の魚類用バイパス・スクリーン

**国名 :**

カナダ、British Columbia (BC) 州、Vancouver島

**実施機関／実施期間 :**

- プロジェクト : BC Hydro社  
1993年 - 1995年
- Good Practice : BC Hydro社  
1993年 - 1995年

**キーワード :**

魚類用バイパス・スクリーン、下流域での魚の回遊、魚道

**要旨 :**

George Eicher が特許を有するペンストック用スクリーンの設計を、Puntledge発電所の取水口に採用した。このスクリーンは、発電用の取水流から若い魚を区別して河川に戻す。この方法により、タービンによる魚類の死亡数は減少し、バイパス・スクリーン設置による致死率は1%未満となった。

**1. プロジェクトの概要**

1913年、カナダのCollieries社は、この地方の炭鉱に電力を供給するためにPuntledge川に水力発電所を建設した。この発電所は、Comox貯水ダムとそのダム下流4kmに位置する小規模な取水ダムと取水口、およびそこから7km下流の発電所までの開水路とペンストックからなる。1953年に、BC電力委員会は発電所増設プロジェクトを推進し、1956年に完成させた。増設された発電所は、取水ダムからPuntledge川の右岸に位置する24MWの発電所までの延長5.1kmのペンストックを含んでいる。BC Hydro社は1962年にこの発電所を買収した(図1)。

最初の湛水とその後の増設プロジェクトは、サーモンに対して重大な影響を与えた。遡上対策は各ダムでこれまでも検討されてきたが、魚類の下流への回遊はタービンを通過するため大量の死亡につながっている。これは解決しなければならない課題であった。最初の研究では、ルーバ、ドラムスクリーン及び垂直スクリーンが検討されたが、George Eicher が特許を有するペンストック・スクリーンが、Puntledge 取水ダムでは最も経済的であるとの結果が得られた。魚が回遊する間はタービンを回さないとする代替方策は、現在価値で、魚用バイパス・スクリーンによる対策費用の約6倍と見積もられた。最終的な設計作業は1993年に始まった。

(仮訳)

1950年代からの設計記録には、いくつかの魚用スクリーンの代替計画が示されている。魚用スクリーンの設置を想定してダムの取水設備部分には4箇所の取水口が設置されていた。しかし、この内の2箇所だけが発電に使用されていた。これらの取水口は、ダム直下流部で直径3.66mの木製ペンストックに接続している。残り2箇所の取水口はダム下流側で閉塞されていた。

ペンストック内の流速は2.64m/sである。最初の1,200m区間のペンストック勾配は、管路内の水頭損失について有利なものであり、管路天端から9.49m上の水頭勾配を維持している。スクリーン設置箇所選定の重要な要素は、スクリーン設置工事に伴う発電所の停止時間であった。その結果、閉塞した2箇所の取水口にそれぞれスクリーンを設置すべきであるとの結論が出された。2条の水圧管路は、スクリーン直下流部で直径3.66mの水圧管路に接続される。発電所が停止している間に必要とされる作業には、木製ペンストックと新設の鋼製ペンストックとの接続、使用済みの開口部（直径3.66m）のキャッピング、取水ゲートの移設が含まれていた。

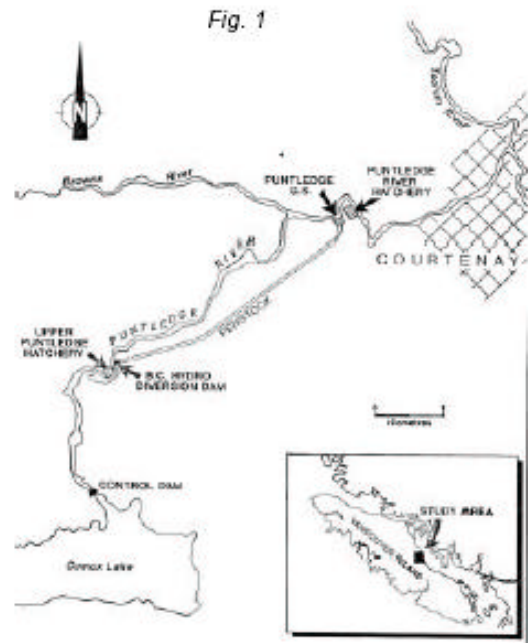


Figure 1 Location of Puntledge River Study Area.

図1 Puntledge 川調査地域の位置

## 2. プロジェクト地域の特徴

Puntledge川流域は、Vancouver島山地のForbidden高原を源流として、その集水面積は450km<sup>2</sup>である。第二次及び第三次の水流がComox湖へ流れ込み、今度は、その北端部の流出口からPuntledge川に流れ込んでいる。Comox湖の主な支川は、上流側Puntledge川とCruikshank川であり、小さい支川としては、Toma Perseverance、Cumberlandなどの河川がある。湖の支流は全体で約49kmになり、魚の生息地になり得る緩やかな勾配で、その流域での産卵箇所の70%に達している。下流側のPuntledge川は17.5kmあり、Georgia海峡のComox湾に向かって北東方向に流れている。下流域では、Browns、Morrison、Tsolumの3河川が主な支川である。

## 3. 主要な影響

歴史的にPuntledge川は、大量のサーモンとニジマスの生育を支えてきており、この水系はVancouver島東海岸において最も重要なサーモン漁獲地の一つとして認知されてきた。1913年のComox湖における貯水池ダムの建設は、Comox湖の支川で産卵する銀鮭、夏チヌックサーモン、ニジマスに影響を及ぼした。増設プロジェクトでは8.5 /sの増取水を行っており、その結果、チヌックサーモン漁獲量は大幅に減少した。成魚に対しての遡上対策は両ダムで講じられていたが、若い魚の下流への回遊はPuntledge発電所のタービンを通過するため約60%の致死率をもたらした。

Puntledge川の1949年から1973年の間の水力発電所建設によるチヌックサーモン（秋・夏）及び銀鮭の漁獲量の減少結果は表1に示す通りである。効果の大きさが異なる幾つかの影響緩和策が採用されたが、最後に残った主な環境影響問題は、タービンによる魚類の致死率であった。このため、1988年にBC Hydro社は、下流への魚の回遊の問題を解決することを決定した。

表 1 Chinook salmon および Coho salmon の漁獲量の推移

| Five Year Period | Summer Run Chinook (X) | Fall Run Chinook (X) | Coho(X) |
|------------------|------------------------|----------------------|---------|
| 1949 - 1953      | 2,636                  | 2,760                | 2,840   |
| 1954 - 1958      | 1,530                  | 3,960                | 2,400   |
| 1959 - 1963      | 820                    | 1,430                | 3,650   |
| 1964 - 1968      | 423                    | 495                  | 3,600   |
| 1969 - 1973      | 380                    | 252                  | 2,140   |

#### 4. 影響緩和策

ペnstock取水口から若い魚を遠ざけるこれまでの試みは、失敗もしくは短期的な対策にすぎなかった。1992年に、固定式垂直スクリーン、回転式ドラムクリーン及びEicher式スクリーンの3つの代替方策が考案された。それぞれのスクリーンの設計と費用見積りでは、Eicher式スクリーンが最も安価で約400万ドルであった。垂直スクリーンの費用見積りは800万ドル以上で、ドラムスクリーンは物理的な現場条件もあり垂直スクリーンよりも更に費用が高い結果となった。このことから、Eicher式スクリーンを最終的な設計として選定した。

Eicher式スクリーンは比較的新しい発想であって、現存するのはわずか2つの先例だけであった（オレゴン州ポートランド近くのWillamette

FallsにおけるSullivanプラン

ト（1982）、及びワシントン州

ポートアンジェルス近くの

Elwha プロジェクト

（1989）。それは、流れに

対して浅い角度でペnstock

内設置したくさび形の

ワイヤー・スクリーンから成

り、ペnstockの頂部から

分岐するバイパス・パイプ

を通して魚を逃がす。この

設計は以下の2つの点で特

有なものである。まず、従来

のスクリーンに比べて入口

部の流入速度が大きく、次

にスクリーンに沿った移動

時間がとても短いことである

（図2）。

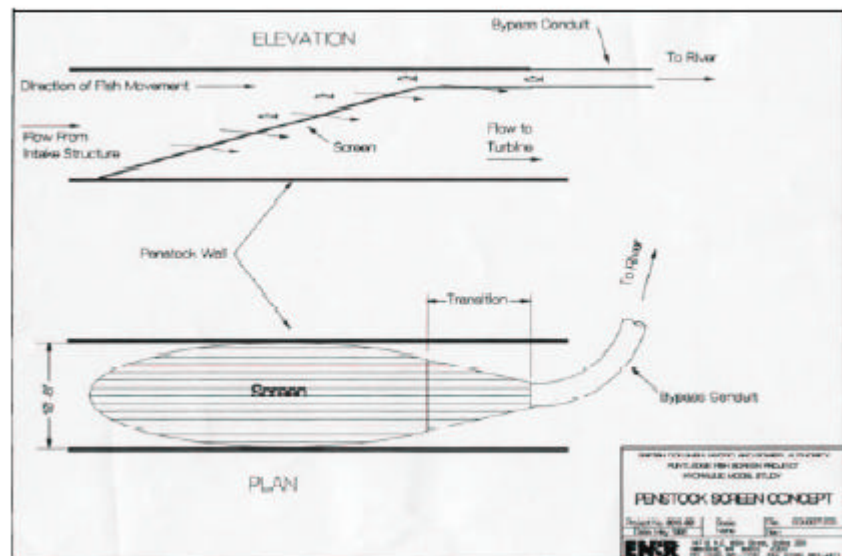


図 2

既存の直径3.66mの水圧鉄管に単一のスクリーンを設置することが考えられた。流入部の速度基準を満足させるために、その直径をElwhaプロジェクトにおける直径2.74mのプロトタイプよりもかなり大きな4.37mに増やさなければならなかったが、ダム下流の水圧鉄管の低勾配部はかなりの距離があるため、このような水圧鉄管の幅は許容できなかった。また、魚が真っ暗なパイプの中でかなりの距離を回遊しなければならないため、スクリーンが機能しないかもしれないという懸念もあった。そこで、Elwhaプロジェクトではスクリーンが取水口に非常に近く位置していたため、Puntledge発電所におけるスクリーンの位置も直径3.2mの水圧鉄管2条を利用して、できる限り取水口の近くにすべきであることが決められた。

最終設計の開始時は、スクリーン部の流速分布を一樣にするため、水路形状はスクリーン上流部の水平方向の曲

がりをなくし、下流方向は取水設備径の最低10倍の長さまで設置すべきであるとの判断がなされた。これらの基準は、既設の水圧鉄管の溝内に取り付けることを許容しないで、水圧鉄管の溝から切り離した導流堤の再配置を必要としている。下流方向は取水設備径の3倍の長さの位置までは既設の水圧鉄管の溝が含まれているため設置が可能となる。

これと他の問題を解決するため、1:10.96スケールの取水庭、取水設備、水圧鉄管、スクリーン及び迂回水路の水理模型を製作した。プロトタイプ材料はくさび形のワイヤー・スクリーンが使用された。スクリーンを支持する設備は幾何学的に製作された。そのモデルは実際（実物大）の流速と同様にフルード数でスケーリングされた速度を使用して実験できるように設計された。フルード相似則に準じた模型実験の間、スクリーン設置位置に至るまでの取水庭、取水口及び水圧鉄管の水の流れが研究された。スクリーンを通過する流速と損失水頭の測定データは、実流速による模型実験で収集された。実流速実験におけるスクリーン直上流の流れが、フルードスケール実験において相似になるように模型実験が実施された。

水理模型実験の結果は、追加の設備建設費と比較してスクリーン直下流付近で得られた改善効果が小さいことを示した。したがって、スクリーン位置を下流側において取水設備径の3倍の長さまで設置することとした。

水理模型実験の二つ目の課題は、スクリーンの格子間隔を変化させて経済性を決定することであった。迂回水路の入口に近づくにしたがってスクリーンの格子間隔を徐々に減少させることが、3:1の規定の速度基準を達成するのに役立つかもしれないというElwhaプロジェクトからの目安があった。幾つかのわずかな経済性が実証されたが、それらはより複雑な製作と追加の損失水頭を相殺することができくくらい十分なものとは見なされなかった。このため、58%の一定の隙間がある、標準のJohnsonステンレスくさび形のワイヤー・スクリーンを選定した。

0.49mのわずかな利用可能な落差は、迂回パイプが大気圧以上の圧力を保持するという問題を引き起こした。したがって、迂回水路の入口を水圧鉄管の上部内に設置し、長方形の迂回パイプが水圧鉄管の上部を完全に抜け出すまで水圧鉄管を先細りにした。水圧鉄管のインバート部は、この変化の間、一定に保たれている。それぞれの迂回水路の流量は0.71 l/sである。スクリーンはその中央部で水平トラニオンを回転させることで清掃される。また、くさびワイヤーのバックフラッシュ（一括引き落とし）の動作は、清掃の効果的な手段を提供している。迂回水路入口の両サイドにあるスクリーン・フレームに取り付けられた2つの油圧シリンダによって回転する。調整可能なタイマーは、スクリーンの回転をコントロールしている。

このプロジェクトは、どちらのスクリーンからも迂回パイプに接続することができる評価設備の設計とその設置を含んでいた。この設備は流速減勢タンク、ウルフ・トラップ、集水タンク、評価タンク、排水タンク、沈降井そして放流パイプから成る。迂回水路の流れは流速減勢タンクの下部に入り込み、ここでタンク内の乱流拡散で流速が減少する。水の流れは、このタンク下流端の角落し堰でコントロールされる。流れの15%のサンプリングはこの堰で行われる。それぞれの集水タンクは、4箇所の排水タンクの一つに順番に魚を迂回することが可能な評価タンクに徐々に排水させることができる。サンプリングしない魚は、制御堰を越流して沈降井に流れ込み、放流パイプを通じて河川に戻される。堰上のあらゆるポイントに設置できるウルフ・トラップは、傾きを調整することができ、トラップの下流端で流量をコントロールするために流れをそらすことができる。

エネルギー消散の上昇を調節するため、評価設備への迂回パイプの接続における湾曲の最小半径を3倍まで減少させた。これは塵芥によってパイプ閉塞の危険を増大させるが、この評価設備は、スクリーンの性能を実証するために長時間操作可能であり、危険性は容認できるものと考えた。全体概要図を図3に示す。



## Puntledge発電所の取水

迂回する魚の観測を可能にするため、アクリルガラス・ポートが各スクリーンの先端と側面に沿った水圧鉄管の内壁に設置された。魚はパイプを通して進み、Eicher式スクリーンによって迂回パイプに導かれる。そして魚は流速が衰え流量が角落し堰から溢れ出る減勢室に入り込む。2m×15mのステンレス鋼で製作されたウルフ・トラップは、堰のクレスト部に沿って取り付けられ、96時間の間、4箇所のファイバークラス集水タンクの内1箇所て拘束された魚を集めた。

南向きの水圧鉄管のEicher式スクリーンを評価する際、2つの主要な目的と2つの副次的な目的が研究された。主要な目的は、スクリーンを通過する野生種と養殖の若いサーモンの直接死亡率を正確に求めること、野生種と養殖の若いサーモンの個体数の中で潜在している死亡率を正確に求めることである。副次的な目的は、スクリーンに沿った迂回水路と関わりのあるスケール損失の度合いを特徴づけるために野生魚のサンプル数を測定すること、回遊する野生の若いサーモンの数と時間を測定することである (Bengeyfield, 1994)。片側は16%以上のスケール損失があったか、もしくはそれぞれの2つのゾーンの40%以上のスケール損失が同一側面にあったか。

(仮訳)

で、魚は傷を付くように分類された。2歳の若いサーモンの回遊総数は、比例収容率法及びトラップ効率法を用いて計算された。また、逆流循環による死亡数も観測された。

実験で使用した魚は1993年の研究でも用いられ、2箇所の異なった場所に戻された。最初のグループは第3取水口の除塵装置の下流に放たれた。このグループは、スクリーンと評価設備を通過して危害に合った魚を測定するために使用された。2つ目のグループは、評価設備のみを通過し、損傷がないかどうかを確認した減勢室で放たれた。最初の研究結果は、表2に示す通りである。

表2 1993年5月24日～7月30日の実験期間における総致死率、  
スケール損失及び回遊総数の比較 (Benneyfield,1994)

|                         | Direct Mortality | Latent Mortality | Backwash Cycle Mortality | Total Mortality | Scale Loss Average (%) | Run Size Estimates |
|-------------------------|------------------|------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|--------------------|
| Coho Juvenile Salmon    | 0.05             | 0.13             | 0.73                     | 0.91            | 4.6                    | 102,700 - 119,000  |
| Chinook Juvenile Salmon | 0.14             | 0.58             | 0.73                     | 1.45            | 6.1                    | 15,200 - 17,600    |

第4取水口の魚の評価手順は第3取水口の手順に従ったが、野生種の銀鮭とチヌックスサーモンの回遊総数だけが第2スクリーンを評価するために使われた (Benneyfield 1995)。養殖魚は健康状態に問題がある比率が高かったため、このグループには使わなかった。2つ目の研究結果は、表 - 3 に示す通りである。

表3 1994年4月20日～12月12日の実験期間における総致死率、  
スケール損失及び回遊総数の比較 (Benneyfield, 1995)

|                         | Direct Mortality | Latent Mortality | Backwash Cycle Mortality | Total Mortality | Scale Loss Average (%) | Run Size Estimates |
|-------------------------|------------------|------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|--------------------|
| Coho Juvenile Salmon    | 0.06             | 0.05             | 0.73                     | 0.84            | 6.10                   | 88,698 - 71,892    |
| Chinook Juvenile Salmon | 0.00             | 0.19             | 0.73                     | 0.92            | 5.60                   | 11,987 - 9,716     |

2番目の研究ではEicher式スクリーンの適用のための様々な提案があった。それは取水設備除塵装置の清掃、水圧鉄管の定期点検時におけるアクリルガラスの清掃、そして大型のスチールヘッドと1歳の若いチヌックスサーモンが逃れることを防止する集水タンクのジャンプ・スクリーンの引き揚げによるスクリーン上での魚同士の衝突を減少することを含んでいる (Benneyfield,1995)。

1990年～1991年の若い銀鮭の回遊が10万8,600匹から14万9,000匹と推測されていた期間に、Eicher式スクリーンを使用していたならば、逆流循環の結果としてタービンによる若いサーモンの死亡数は、1シーズンあたり1,358匹から1,862匹の間で変動していたであろう (Benneyfield,1995)。1989年～1993年までの4つの方法による迂回実験結果は、表 - 4 に示す通りである。

表4 1989年～1993年の間の4つの異なる方法によるサーモン迂回結果

| YEAR    | METHOD            | BYPASS RATE | (N)     |
|---------|-------------------|-------------|---------|
| 1989    | Behavioral Device | 8.6%        | 114 000 |
| 1990    | Electrical Field  | 11.1%       | 149 000 |
| 1992-93 | Barrier Net       | >99%        | 240 739 |
| 1993    | Eicher Screen     | 99.8%       | 59 300  |

## 6. 成功の要因

成功の要因として以下のことが挙げられるだろう。

### 6.1 設計基準の確立

このプロジェクトの最も困難だったことの一つは設計基準を確立することであった。BC Hydro社は水産庁の代表とElwha設備の設計と評価に関わった人たちが出席するワークショップを開催した。主にワークショップでの意見の一致に基づいて、設計基準は以下のコンポーネントで選ばれた。

- 魚類の選定
- スクリーンの流況
- スクリーンの物理的特性
- バイパスに係るパラメーター
- 放流の特性
- ペンストックの勾配
- 評価設備

### 6.2 プロジェクトの実施計画

1993年度の魚類回避期においてスクリーン運用をするという要求から、建設工程が決められた。スケジュールは非常に厳しく、設計の一部分が完成する毎に工事発注を行うことが必要であった。スクリーン部品は、現場に搬入される前に、工場内で完全に組み立てられ試験された。現場では大きなクレーンの運転のための用地は制限されており、注意深い搬入順序が要求された。スクリーンを既設の水圧鉄管に接続するために必要な発電所の運転停止期間は、発電機の定期点検が実施されている間の2週間半であった。運転停止の延長は、1日あたり1万5,000ドルの損失をもたらした。

### 6.3 水理模型実験

上記の設計基準の全てを満足するようにスクリーンを設計するため、ワシントン州レッドモンドにあるENSR Consulting & Engineeringが水理模型実験を実施した。模型実験の目的は以下の通りである。

- 水理特性を考慮したスクリーン設置に関わる総合的なレイアウト、位置、詳細設計を最適化すること。
- 最終設計の水理特性がプロジェクトのために確立された設計基準を満足することを確認すること。
- スクリーンの設置によって生じる損失水頭を算定すること。

1:10.96スケールの物理的な水理模型が製作された。このモデルは、取水庭、取水設備、円錐形の部品、水圧鉄管を含んでいる。またそのモデルは、実流速と同様にフルード数でスケーリングされた速度を使用して実験できるように設計された。スクリーン設置位置までの取水庭、取水設備、水圧鉄管内の流れのパターンは、フルード相似律に準じた模型実験の間に研究された。スクリーンを通過する流速と損失水頭の測定データは、実流速模型

実験で収集された。実流速実験におけるスクリーン直上流の流れのパターンが、フルードスケール実験において相似になるように模型実験が実施された。

## 7 第三者のコメント

BC Hydro社は、Puntledgeプロジェクトについていくつかの賞を受賞したことにより、産業界のリーダーとして認められてきた。その賞には以下を含む。

- Association of Professional Engineers and Geoscientists 1995 Environmental Award Competition Design, Construction and Monitoring Phase が、Eicher式魚用バイパス・スクリーンの設計・施工に対して贈呈された。
- 新技術の開発に対してElectric Power Research Institute (EPRI) contribution to the Electrical Industry and Customer。
- Electrical Power Research Institute (EPRI) 1994 Generation and Storage Product Champion が、BC Hydro社の Mr. H.A.Smith へ贈呈された。

## 8 詳細情報の入手先等

### 8.1 参考文献

- Benguefield, W. (1994). Evaluation of the Eicher Fish Screen at Puntledge Diversion Dam. White Rock, B.C.: Global Fisheries Consultants Ltd.
- Benguefield, W. (1995) Evaluation of the Eicher Fish Screen at Puntledge Diversion Dam: Year 2 (1994). White Rock, B.C.: Global Fisheries Consultants Ltd.
- Fish Passage Workshop, Milwaukee, Wisconsin 6-8 May 1997. S.I.: Alden Research Laboratory Inc.
- Knight, J.W. & D.J. Salisbury (1997). “British Columbia Hydro: Commitment to the Environmental Movement: Puntledge River Hydro Intake Facility” in Waterpower ’97: Proceedings of the International Conference on Hydropower, Atlanta, Ga., August 5-8, 1997. New York, N.Y.: ASCE.
- Matthews, J.G. & J.W. Taylor (1994). “Design and Construction of Eicher Penstock Fish Screens” in Electricity ’94 Conference Proceedings: Toronto, Ontario, March 1997. [CD-ROM] Montreal, Quebec: Canadian Electrical Association.
- Smith, H. (1993). Puntledge River Fish Screens: Development of a Fish Passage Solution at the Puntledge Hydro Intake Facility. BC Hydro Environment.

### 8.2 問い合わせ先

BC Hydro

Address : 6911 Southpoint Drive, Burnaby, BC, V3N 4X8, Canada

Tel : +604 528-2438

Fax : +604 528-1940

Email : niels.nielsen@bchydro.com

Web Site: www.bchydro.com