

技術報告書

DLDAPPシステムの計算および設計

1. はじめに

DLDAPPシステム（Duo Leveraged Double Acting Piston Pump）は、エネルギー効率の最大化、機械的堅牢性の確保、そして持続可能な運用性を重視して設計された、油圧工学分野における画期的な革新技术です。**PMTHPP**プロジェクトへの統合を目的として開発された本システムは、高圧下で大量の水を効率的に送水する中核的コンポーネントとして機能し、従来方式と比較して大幅なエネルギー消費の削減を実現します。

この技術は、レバレッジ（てこ）機構と可動滑車という、確立された2つの機械的原理を戦略的に組み合わせることで、ピストンの動作を最適化しています。これにより、流量および油圧の安定性を維持しつつ、必要な作動力を大幅に低減することが可能となります。

従来の技術文献に見られるポンプシステムとは異なり、DLDAPPは地下レベルから上部貯水池まで延びる垂直型の貯水チャンバー（水室）へと水を送水します。この革新的な構造により、重力による位置エネルギーと蓄積された油圧エネルギーを最大限に活用し、極めて高効率な閉ループ型エネルギー回路を構築しています。

本報告書では、本システムの物理的基盤、性能に関する計算、技術的動作原理、ならびにDLDAPPを再生可能エネルギー分野の先進的プロジェクトにおける戦略的ソリューションとして位置づける主要な技術的優位性について、詳細にわたり解説します。

2. システムの目的

DLDAPPシステム（Duo Leveraged Double Acting Piston Pump）は、大量の水を高圧下で連続的に送水するための、効率的かつ革新的なソリューションを提供することを目的として開発されました。本システムは、PMTHPPプロジェクトの運用要件を満たすために設計されています。

以下に、本システムの主な目的を示します：

- 機械的レバレッジと可動滑車の併用によって、送水プロセスにおけるエネルギー効率を最大化し、消費電力を大幅に削減すること。
- 100メートルを超える高低差を安全かつ安定的、かつ高い機械的信頼性をもって克服し、上部貯水池への水輸送を可能にすること。
- 従来のポンピングシステムに見られる主要な非効率要因を排除する設計により、水力的および機械的損失を最小限に抑えること。
- PMTHPPの閉ループ構成内で外部エネルギー源に依存することなく、連続的かつ自立的な運転を実現すること。
- 従来の技術文献に記載されていない破壊的アプローチの技術的実現可能性を実証し、再生可能水力エネルギーの大規模かつ低環境負荷での利用可能性を拡大すること。

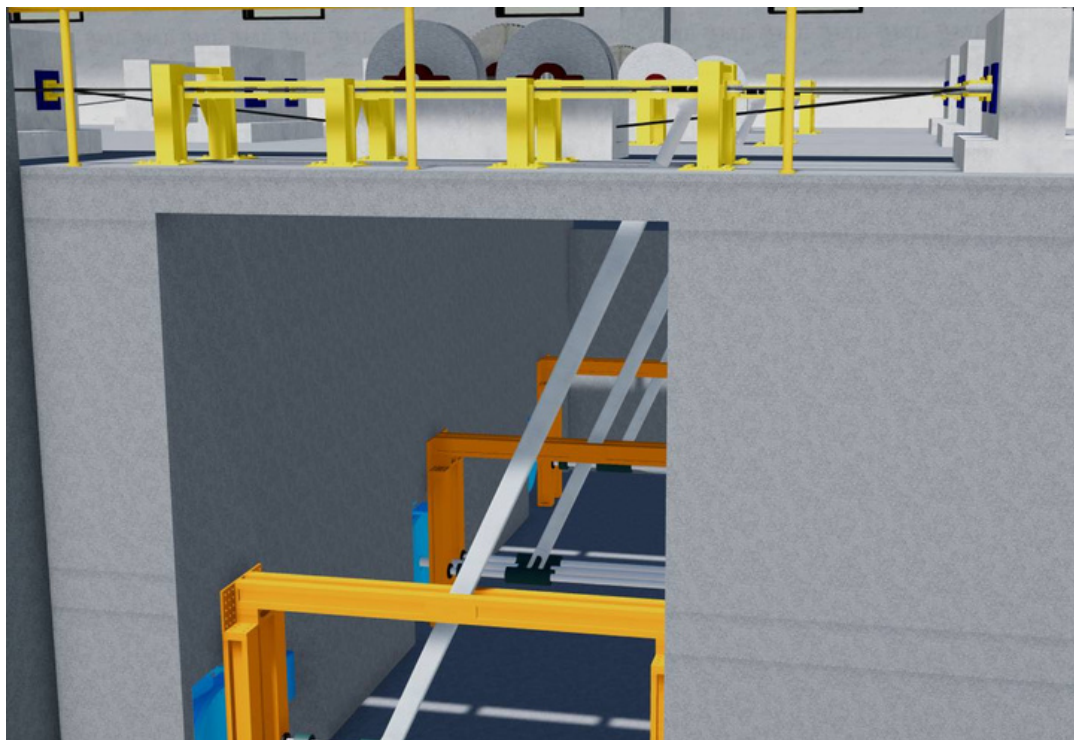
3. 基本原理と動作

DLDAPPシステム（Duo Leveraged Double Acting Piston Pump）は、従来のポンプ技術の限界を克服するために、古典的な機械力学および流体力学の原理を革新的に応用したものです。

3.1 動作原理

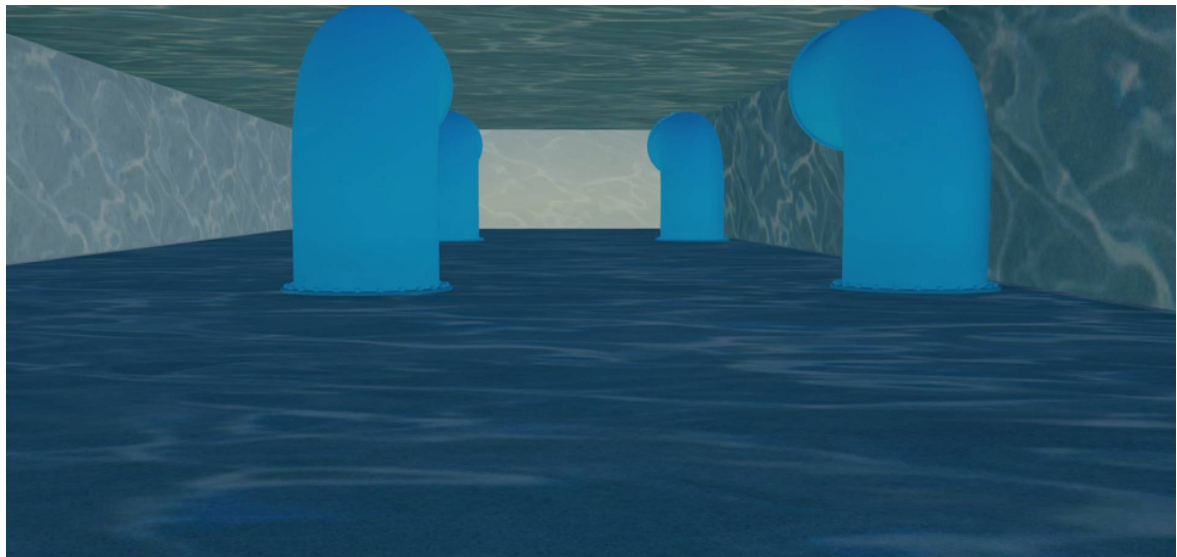
DLDAPPは、機械式で可動滑車によって駆動される複動ピストンポンプのユニットで構成されています。この構成により、ピストンの往復運動によって両方向に水を送ることが可能となり、作動サイクルが最適化され、単動ポンプと比較して体積効率が実質的に2倍になります。

本システムは、約 $i = 2.76$ の機械的伝達比をもつてこの機構を採用しており、ピストンを作動させるために必要な力を大幅に軽減します。さらに、可動滑車を組み込むことで荷重を分散させ、要求される作動力を一層低減しています。



3.2 垂直型貯水槽（ウォーター・チェンバー）

従来の技術文献に記載されているシステムとは異なり、DLDAPPは水を地下レベルから上部貯水池まで約125メートルの高さにわたって延びる、垂直型貯水槽（ウォーター・チェンバー）、にポンプで送ります。この貯水槽は加圧された水路として機能し、重力による位置エネルギーを効率的に蓄積します。



3.3 統合型水力サイクル

ポンプで送られた水はウォーター・チェンバー内に蓄えられ、その後PMTHPPシステムのタービンに供給されます。蓄積された位置エネルギーは、運動エネルギーへ、さらにフランシス水車およびペルトン水車によって機械エネルギーへと変換され、閉ループで連続的かつ高効率なサイクルが完成します。

このプロセスにより、水をポンプで送る際に使用されたエネルギーがシステム内で再利用され、運用の持続可能性と全体的な効率が最大化されます。

4. 計算と設計

DLDAPPシステムの設計は、必要な流量、揚程（ポンプでくみ上げる高さ）、およびシステムのエネルギー効率を考慮した特定の運用パラメータに基づいて行われました。

4.1 垂直貯水槽（水室）の底部における圧力

$$H = 109,5m$$

$$\rho = 1000kg/m^3$$

$$g = 9,81m/s^2$$

$$P = \rho \times g \times H$$

$$P = 1000 \times 9,81 \times 109,5$$

$$P = 1.074.195Pa$$

$$P = 10,74bar$$

4.2 ピストン1回の往復による変位面積と体積

$$r = 0,5m$$

$$d = 1m$$

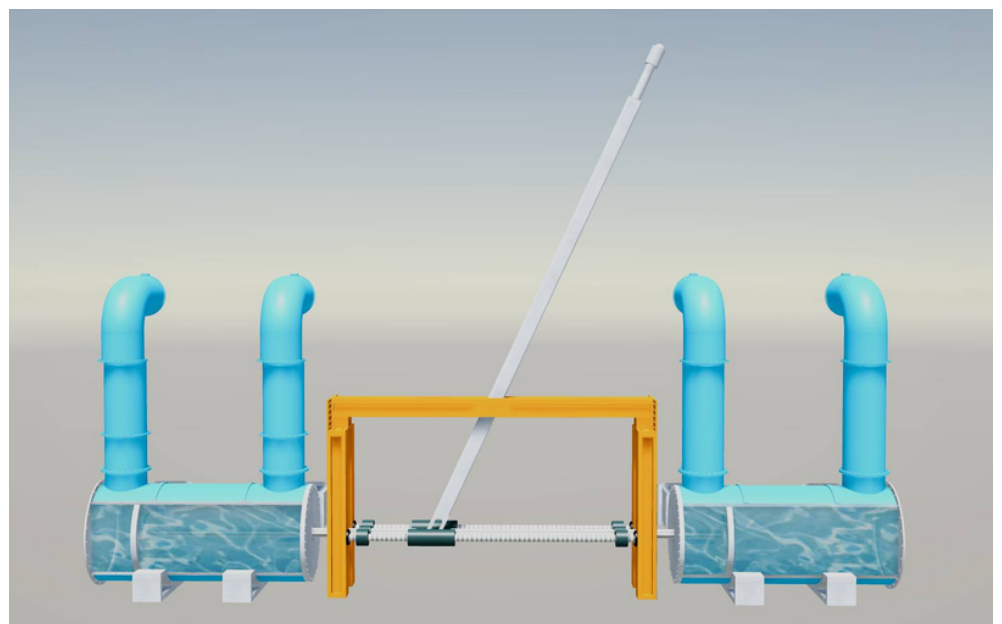
$$A = 0,7854m^2$$

$$V = 1m^3$$

$$V = A \times L$$

$$L = \frac{1}{0,7854}$$

$$L = 1,273m$$



4.3 ピストンごとに必要な力

$$P = 1.074.195Pa$$

$$A = 0,7854m^2$$

$$F = P \times A$$

$$F = 1.074.195 \times 0.7854$$

$$F = 843.672N$$

$$F = 86,01kgf$$

4.4 てこと可動滑車による力の低減

本システムは2つのピストンが同時に動作する構成となっており、各ピストンの出力は合算され、全体として高い吐出能力を実現しています。

$$F = 843.672N$$

$$\text{総必要力（合計）} = F_t = 2 \times F$$

$$F_t = 1.687.345N$$

$$i = 2,76$$

$$F_r = \frac{F_t}{i}$$

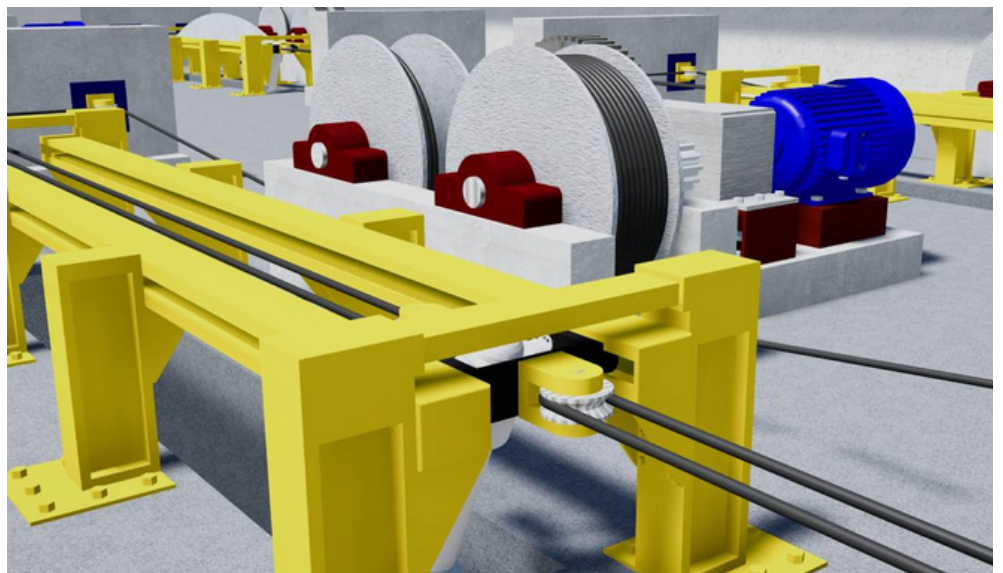
$$F_r = \frac{1.687.345}{2.76}$$

$$F_r = 611.357N$$

$$F_f = \frac{611.357}{2}$$

$$F_f = 305.678N$$

$$F_f = 31,17kgf$$



5. ポンプシステムに必要な動力の計算

DLDAPP (Duo Leveraged Double Acting Piston Pump)

システムにおける水圧ピストンの作動には、高効率の機械的伝達を実現するために、力を増幅するように設計されたリンク式でこの機構が採用されています。この上部アームは、1回のポンピングサイクルあたり3.76メートルの直線運動を行います。

システムは可動滑車（動滑車）を用いて力を分散・増幅しているため、ドラムに巻き取られるワイヤーロープ（鋼索）の有効長さは7.52メートル、つまりこのアームの移動距離の2倍となります。この寸法設計により、ピストンが両方向に完全に作動することが保証されます。

5.1. ドラムの寸法設計

この上部アームが3.76メートル移動するために、鋼索を巻き取るドラムが使用されます。

$$r = \text{半径} \quad r = 0,4m$$

$$D = \text{直径} \quad D = 0,8m$$

$$C = \text{円周} \quad C = 2,513m$$

1サイクルあたり7.52メートルのケーブルを巻き取るために、ドラムが必要とする回転数は以下の式で求められます：

$$N = \frac{7,52}{2,513} = 2,99 \text{ 回転} \quad \text{または} \quad f = 3Hz$$

5.2. 動力伝達と歯車装置

ドラムで毎秒3回転という要件を満たすために、三相誘導モーター（4極・定格回転数1800rpm）を使用した歯車システムが採用されました。

このモーターは、直径0.9メートル・回転数30rpmのセクター型中間ギア（半円形ギア）に動力を伝達します。

そこから、動力はドラムに取り付けられた小型ギアに伝達され、このギアは180rpmで回転し、毎秒3回転の動作要件を満たします。

半円形ギア

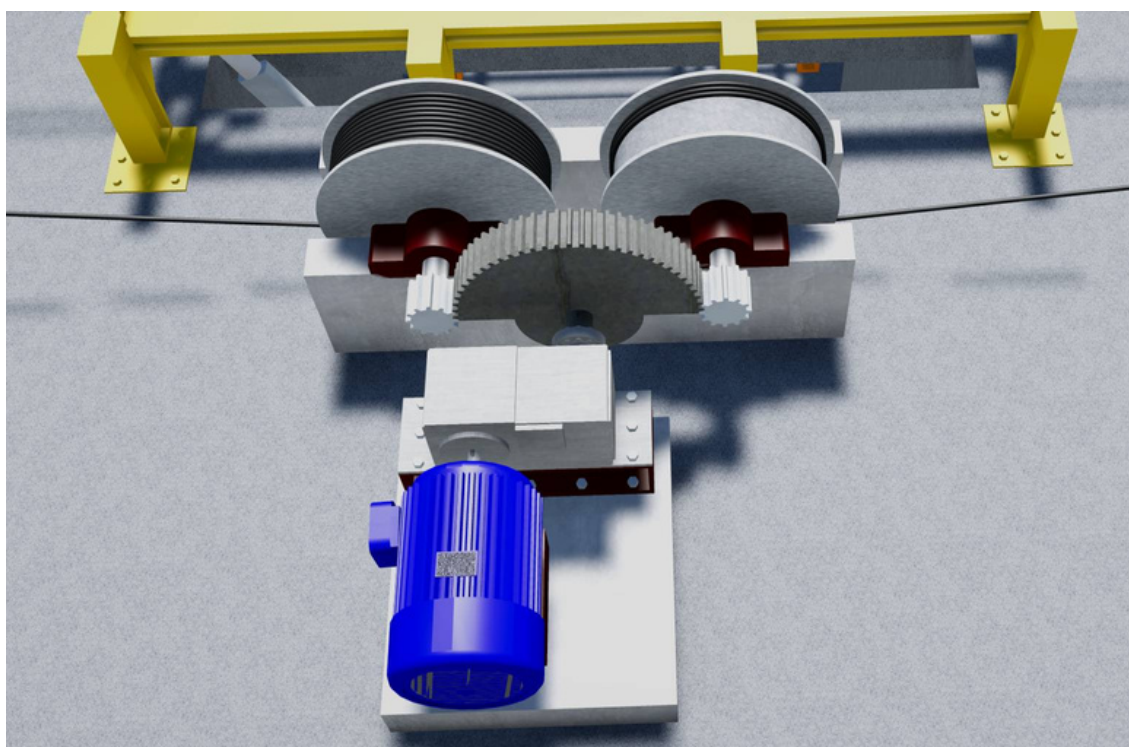
$D = \text{直径 } D = 0,9m$

$N_{mot} = \text{回転数 } 30rpm$

小型ギア

$N_{mov} = \text{回転数 } 180rpm$

$$\frac{N_{mot}}{N_{mov}} = \frac{D_{mov}}{D_{mot}} \quad \frac{30}{180} = \frac{D_{mov}}{0.9} \quad D_{mov} = 0,15m$$



5.3. ドラムにおけるトルクの計算

$$F_f = 305.678N$$

$$r = 0,4m$$

$$f = 3Hz$$

$$\pi = 3,14$$

$$T = F \times r$$

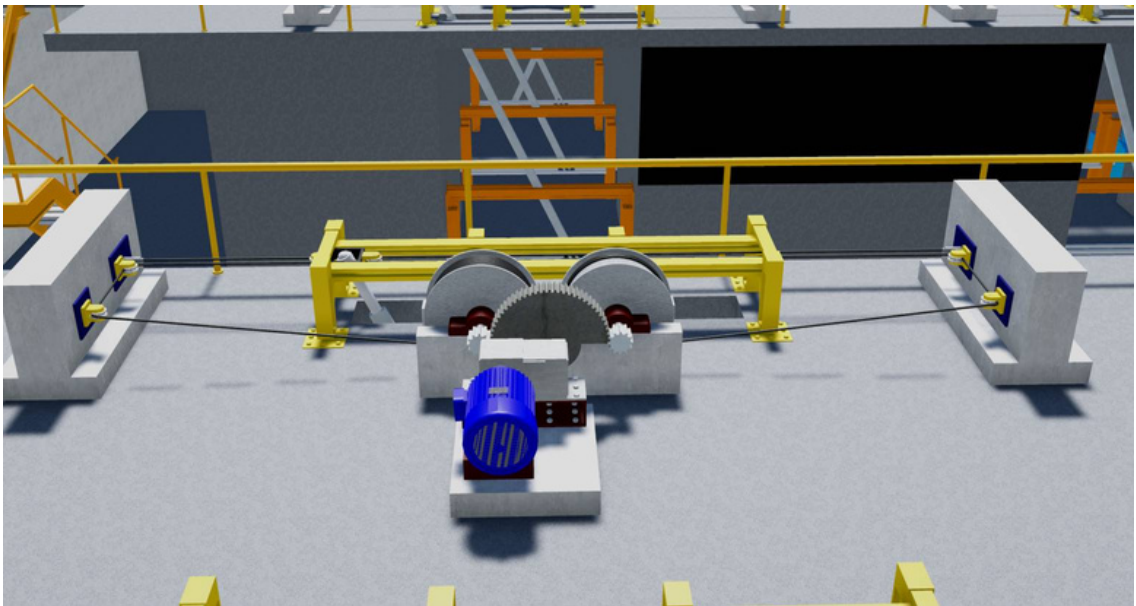
$$T = 305.678 \times 0,4$$

$$T = 122.271Nm$$

$$\omega = 2\pi \times f$$

$$\omega = 2 \times 3,14 \times 3$$

$$\omega = 18,84rad/s$$



5.4. 各ポンプユニットに必要な動力の計算

各DLDAPPユニットの動作に必要な動力は、ピストンに加わる力、ピストンのストローク長、1秒あたりの作動回数（動作周波数）に基づいて算出されます。この計算には、機械的効率、摩擦損失、およびシステム内の負荷分散も考慮されます。

$$T = 122.271 Nm$$

$$\omega = 18,84 rad/s$$

$$\eta = 0,9$$

$$P = T \times \omega$$

$$P = 122.271 \times 18,84$$

$$P = 2.303.593 W$$

$$P_f = \frac{P}{\eta}$$

$$P_f = \frac{2.303.593}{0,9}$$

$$P_f = 2.559.584 W$$

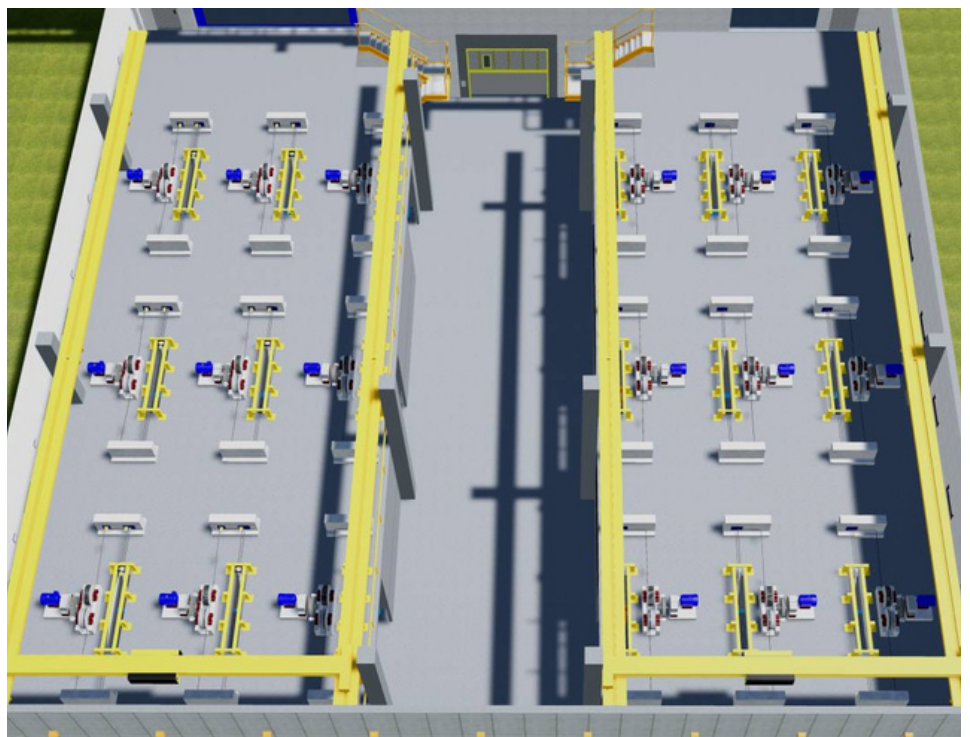
本システムは18台のポンピングユニットが同時に作動する構成となっているため、必要な総動力は次のように求められます：

$$P_t = 18 \times P_f$$

$$P_t = 18 \times 2.559.548$$

$$P_t = 46.071.868 W$$

$$P_t = 46,1 MW$$



6. PMTHPPシステムのエネルギーバランス

PMTHPPシステムは、フランシス水車とペルトン水車の統合構成、および閉ループのDLDAPPポンプ回路によって運用され、エネルギー自給自足を確保しつつ、大幅な正味出力の余剰を実現しています。

システム全体の発電量は、両水車の出力の合計です：

$$P_{Pelton} = 68,8MW$$

$$P_{Francis} = 21,8MW$$

$$P_T = 68,8 + 21,8$$

$$P_T = 90,6MW$$

18基のDLDAPPポンプユニットによる連続運転時の総消費電力は次のとおりです：

$$P_C = 41,6MW$$

利用可能な正味出力：

$$P_N = P_T - P_C$$

$$P_N = 90,6 - 41,6$$

$$P_N = 44,5MW$$

本システムは、44.5 MWの出力余剰で稼働しており、高いエネルギー効率と運用上の実現可能性を示しています。

水車によって生成された電力は、ポンプの消費を完全に補うだけでなく、外部供給や販売に適した正味出力を提供し、外部エネルギーに依存せず自己完結的に運用可能なシステムを実現しています。

結論 – DLDAPPシステムと水圧ポンプ

本報告書では、PMTHPP（水力発電閉ループシステム）の中心的構成要素である DLDAPP（デュオ・レバレジッド・ダブルアクティング・ピストン・ポンプ）システムの動作原理、技術的基礎、および設計計算について詳細に説明しました。

従来のポンプシステムとは異なり、DLDAPP は機械的に駆動される 両動式ピストンと、テコおよび可動滑車の組み合わせを採用しています。この構成により、ピストンを作動させるために必要な力が大幅に削減され、流量や運転の安定性を損なうことなく、機械的および エネルギー的に高効率なシステムが実現されます。

設計計算は、静水圧、ピストン面積、容積変位、トルク、ドラムにおける出力など、実際の物理パラメータに基づいて行われました。これにより、大流量かつ深度のある運用条件下でもシステムが安定し、 エネルギー的にも実現可能であることが確認されました。また、導入された機械的減速機構により、各ポンプにかかる負荷が大幅に軽減され、適切な電動機による駆動が可能であることも証明されました。

DLDAPPシステムは、従来の回転動力式ポンプ技術に依存せず、高効率で堅牢なポンピングソリューションの構築が可能であることを実証しています。本コンセプトは、PMTHPP のような閉ループ型 プロジェクトにおいて特に有効であり、水力エネルギーの制御と圧力の再利用が、システム全体の実現可能性と持続可能性を左右する鍵となります。