

| | |
|-------------------|---|
| 氏 名 | 三 浦 誠 二 |
| 授 与 学 位 | 博 士 (工 学) |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平 成 5 年 5 月 12 日 |
| 学 位 授 与 の 根 拠 法 規 | 学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 |
| 最 終 学 歴 | 昭 和 50 年 3 月 茨城大学大学院工学研究科機械工学第二 専攻修士課程修了 |
| 学 位 論 文 題 目 | 配管系および機器内変動流の特性とその制御に 関する研究 |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 長南 征二 東北大学助教授 井小萩利明 |

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

研究の背景と目的

火力、原子力および水力の各発電所は流体を通す配管系から構成されていると言っても過言ではない。また、その内部ではおびただしい数の配管要素（オリフィス、分岐管等）が使用されている。近年、各発電プラントは大容量化、高速化が図られている。それに伴い、信頼性向上の研究が重要となっている。大容量高速化によってこれまで気がつかなかった配管系の微小な特異現象が拡大され、騒音や振動の問題として表出することがある。また、高速化によって配管系統の不安定流動や流れの変動が大きくなり、計量機器類の示度が不正確になることもあり得る。さらに、高速化に付随して、高速偏流等も一部要因となる炭素鋼配管の減肉現象（管内流体によって配管の管壁に腐食（エロージョン/コロージョン）が生じ、管材が薄肉化する現象）等も問題である。本研究は、発電プラントの安全運転、信頼性向上のために、設計計画上的問題となる配管およびその周辺機器内の流動現象の幾つかに関して実用流動条件に近いところで調査、解明を行い、工学的立場から検討したものである。

配管系および機器内変動流の問題点と研究対象の範囲

オリフィスやT管継手の圧力損失や流量特性に関する研究は数多い。しかし、大口径の実用流動条件下（乱流の場合の速度場）の管内オリフィス下流の変動流成分については未知な部分が多い。

また、流れがはく離することが多い直角分岐部の速度分布や速度変動は十分には知られていない。さらに、分岐と曲がりの連続流路に関する研究も少ない。第2章ではオリフィス下流の変動流成分を、第3章では流れがT管継手で直角に分岐し、更にエルボによって転向する場合の管内速度分布、乱れ度分布を検討した。

左右分岐支管の互いの管軸が同一直線上になく、ある角度（ずれ角）を持つ十字分岐管を含む配管系（図1）では、分岐流量比などの流動条件に応じて、各支管および系全体の流量が非周期的に一定の幅の高流量状態H—低流量状態Lのステップ状に切り替わる現象がある（図2）。H時には分岐中心から中央支管入口に向けた分岐部外側（背側）で流れの急減速によって発生したと思われる非常に不規則な渦が観察され、L時には左右支管を貫通する渦心を有する回転方向一定の旋回流が観察される（図3）。この旋回流の発生、消滅と上述した流量変動とは完全に同期しており、左右支管内の旋回流の発生、消滅に伴う管内流れの圧力損失の増減が、流量変動を引き起している。分岐要素は流量配分のために用いられるので、流量変動はできるだけ小さい方が望ましい。第4、5章では、上述した十字分岐管内の局所不定流動によって引き起こされる配管系全体の流動変動現象を対象にし、その特性究明と制御を検討した。

保守の困難な環境下での溶液や潤滑油の移送用としてフルイディクスの特性を利用したフルイディクポンプがある。フルイディクポンプは、一度押しのけ室に移送液を引き込み、それを押し出す容積形ポンプの形式を取る。第6章では、Reverse Flow Diverter(RFD)と呼ばれる同軸上に対向する2個のノズルを持つ要素から構成されるノズル形フルイディクポンプの運転特性や構成要素と性能について検討した。本ポンプの具体的運転特性や構成要素に関する研究は少なく、これまでほとんど明らかにされていない。

第2章 管内オリフィス下流の変動流動成分

オリフィス下流の速度および圧力の変動成分を把握することを目的として、実用流動条件下（ $Re_b \approx 1.7 \times 10^5$ ）のオリフィス下流の変動流動成分について実験的に研究した。その結果、次の結論を得た。(1)オリフィス下流直後の噴流周囲の乱れ度は壁面近傍の約2倍である。(2)管中心軸上の乱れ度の最大位置はオリフィスの下流約4～6.5d（オリフィス孔径）である。(3)オリフィス下流直後断面の噴流周囲の乱れ度の最大位置はオリフィスエッジ面より内側にある（図4）。(4)オリフィス下流の逆流域の壁面変動圧力には下流の逆流のない領域のそれに比べ、高周波成分が多く含まれる（図5）。

第3章 直角分岐後の管内流動特性

流れがT管継手で直角に分岐し、更にエルボによって転向する場合の管内速度分布、乱れ度分布の把握を目的とし、特に、分岐流量比や本管とエルボの取付角等のそれらに及ぼす影響について実験的にデータの収集を行い、以下の各項を明示した。(1)T管継手とエルボの間隔Lが短い場合、エルボ下流の流れはエルボを2個組み合わせた3次元曲管の流れと同様、エルボの取付角 θ に依存する

(図6)。また、エルボの内部および出口直後の乱れ度は間隔が長い場合に比べて大きい。(2)T管継手の直角分岐直後断面の平均流速の分布は直角方向への分岐流量比が小さいほど偏る(図7(a))。(3)T管継手と連続したエルボの下流の平均流速の分布はエルボの取付角が 0° や 90° の場合、直角方向への分岐流量比にあまり依存しない(図7(b))。(4)T管継手と連続したエルボの下流の乱れ度はエルボの取付角が 90° や 180° の場合、直角方向への分岐流量比が小さいほど大きい(図7(c))。

第4章 十字分岐管を含む配管系の流動変動現象とその特性

左右分岐支管の互いの管軸がある角度を持つ十字分岐管を含む配管系で非周期的に発生する流量変動現象の支配因子の抽出を目的として、本現象に及ぼす分岐流量比と配管構造因子の影響を実験的に研究した。その結果、次の結論を得た。(1)流量変動は左右分岐管の取付角 θ が約 $8\sim 20^\circ$ (すなわち、左右支管軸の交差角が約 $160^\circ\sim 140^\circ$)の場合の特定の分岐流量比 q (中央支管流量/本管流量)の範囲内で発生する(図8)。(2)左右支管方向への分岐損失係数 ζ が極大となる分岐流量比は左右支管の取付角が増すにつれて大きくなる。(3)左右支管の流量比が約 $3:5$ の不均衡になると流量変動は発生しない。(4)流量変動に及ぼす左右支管長さ S 、および、中央支管入口長さ i の影響は今回の実験範囲($S = 3.6\sim 11.8 d_0$, $i = 1.4\sim 3.4$ 。ただし、 d_0 :本管直径)では上記分岐流量比や左右支管取付角の影響ほど明瞭ではない。

第5章 十字分岐管を含む配管系の流動変動の制御

左右分岐支管の互いの管軸がある角度を持つ十字分岐管を含む配管系で非周期的に発生する流量変動現象の制御を目的として、分岐部流路構造、乱れ、および、制御流の上記変動に及ぼす影響解明の実験を行った。また、変動の発生しない実プラント用十字分岐管モデルの検証実験も行った。その結果、次の結論を得た。(1)上記変動現象は不安定流動部の構造に大いに依存する。また、小規模な構造変更により、どちらか一方へ安定させることが可能である(図9)。(2)流れ場の乱れの度合いを大きくすると、旋回流の形成は困難となり、その結果、変動は発生しなくなる。(3)本研究で扱ったような旋回流の有無による変動現象の安定化には微量な制御流の注入も効果がある(図10)。(4)大形実験装置による実験によって、スケール(規模)による影響のないことを確認した。

第6章 周期変動流ポンプの運転特性とポンプ性能に及ぼす構造因子の影響

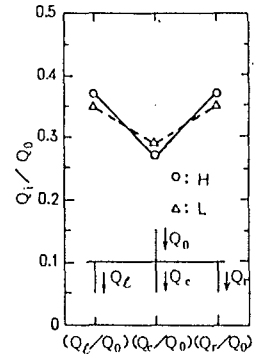
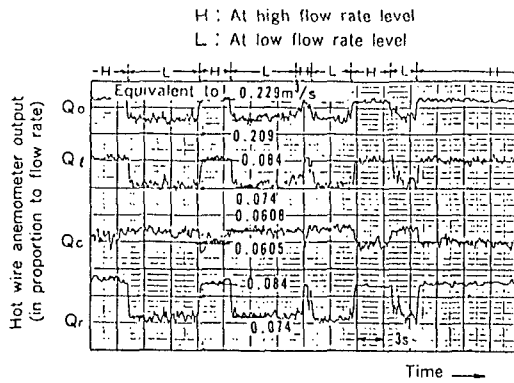
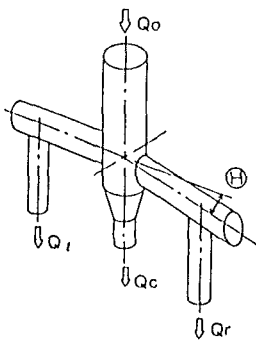
2個の対向するノズル(ジェットレシーバ)から構成されるノズル形フルイディクポンプ(図11)の運転特性および構造因子による特性差の把握を目的とし、実験的に研究を進めた結果、次の結論を得た。(1)本ポンプは同じ揚程 $H(=H_2-H_1)$ でも、押しのけ室に出入りする合成流量の構成比などが変化するために、吸込高さ H_1 、吐出し高さ H_2 の各組合せによって性能が変化する(図12, 13)。(2)押しのけ室の吐出し圧力 P_d によって流量の制御は可能であるが、キャピテーションの発生により制御範囲は制限される。(3)押しのけ量によっても流量や効率を制御できるが、ある範囲を越すとその制御効果は小となる。(4)同一形状のノズルを組み合わせる場合、同一揚程では、ノズル径の小さい方が、容積効率は高いが流量は小さい。(5)2個のノズルの径 d をほぼ同じにした方

が高揚程側では流量が大である（図14）。

第7章 結 論

配管およびその周辺機器内の流動現象に関して、実用流動条件に近いところで実験的に詳細なデータの収集と特性解明を進め、各種特性および新発見を明示した。主な結論は次のとおりである。

- (1) 代表的配管要素であるオリフィス、T管継手部の変動成分を含めた流動特性が分かり、プラント配管の減肉監視の重点化と計量機器の設置箇所や精度設定の最適化が図れるようになった。
- (2) 従来構造の十字分岐管では左右支管の取付角と分岐流量比が流動変動の支配的因子であることを突き止めた。さらに、変動のメカニズムを解明することにより、変動の発生しない十字分岐管を見出すことができた。
- (3) ノズル形フルイディクポンプの運転特性と構造特性を模型実験によって把握することにより、実機ポンプの最適設計の見通しが得られた。



各支管の流量分配状況

図1 十字分岐配管系

図2 本管および各支管の流量変動記録例(H時の本管の $R_e = 1.7 \times 10^5$)

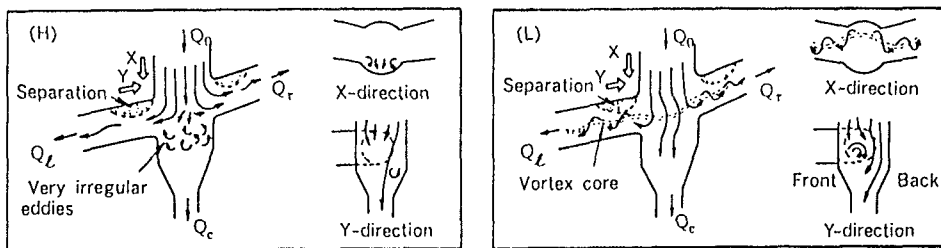


図3 気泡注入法により観察した分岐部の流動状況

(H時の本管の $R_e = 1.1 \times 10^6$, $Q : Q_c : Q_r = 0.38 : 0.24 : 0.38$)

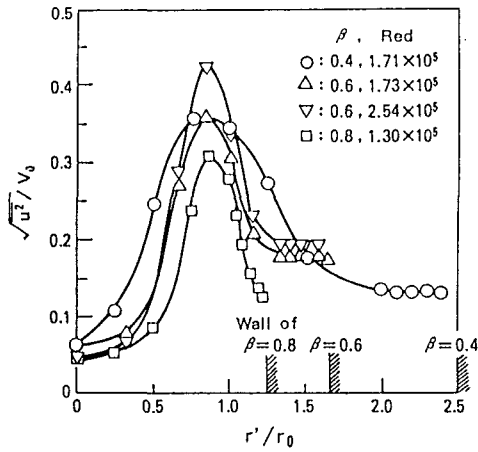


図4 オリフィス直後断面の乱れ度分布 (約1D下流断面)

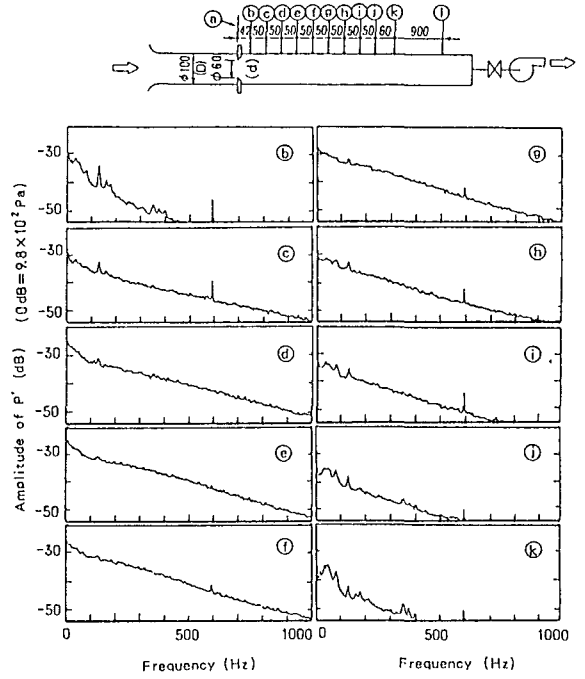


図5 壁面圧力変動の周波数分布特性 (\$\beta=0.6, Q=0.176 \text{ m}^3/\text{s}, R_{ed}=2.54 \times 10^5\$)

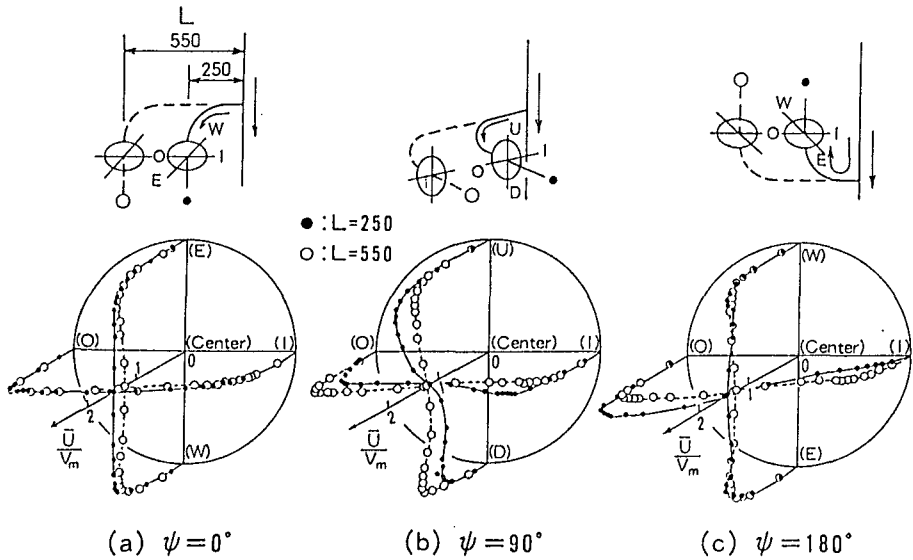


図6 エルボ下流断面の平均速度分布 (\$Q_2/Q_0=0.41, R_{e_0} \approx 1.5 \times 10^5\$)

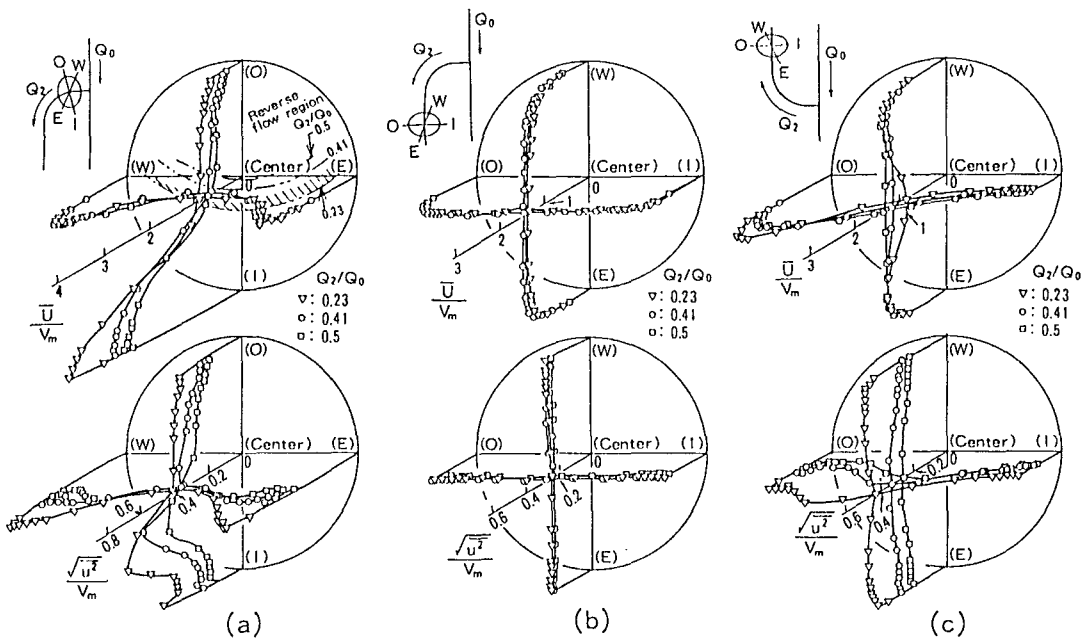


図7 分岐後の平均速度と乱れ度の分布

(a), (b)は $\psi = 0^\circ$, (c)は $\psi = 180^\circ$, $L = 250\text{mm}$, $R_o \approx 1.5 \times 10^5$

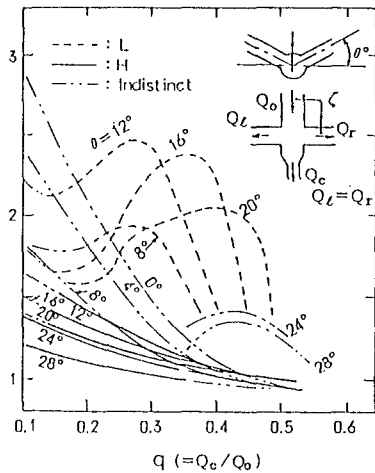


図8 分岐流量比の影響

| Test name | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) |
|--------------|------------|-----|-----|-------------------|-----------------------|
| Test piece | Front Back | | | | |
| Flow pattern | $H \ll L$ | L | H | $H \rightarrow L$ | $H \leftrightarrow L$ |

図9 分岐部構造と流動パターン

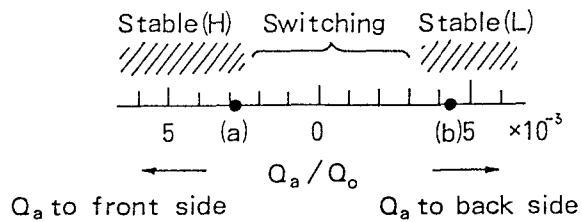


図10 空気注入による安定化の実験結果

(Q_a : 注入空気量)

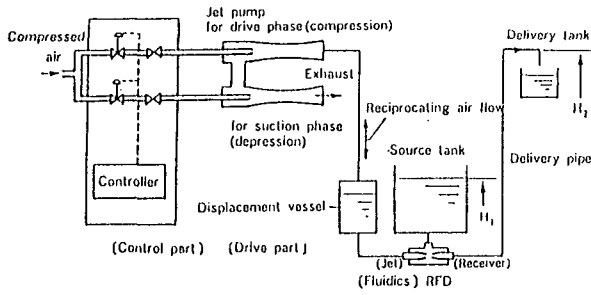


図11 ノズル形フルイディクポンプシステム

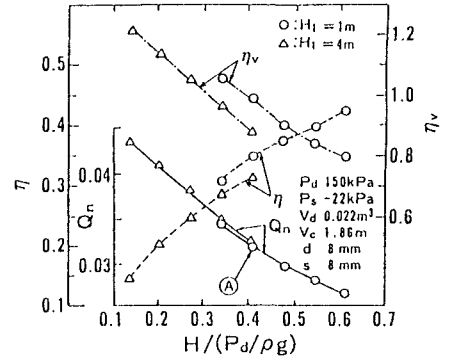


図12 供試ポンプの特性例

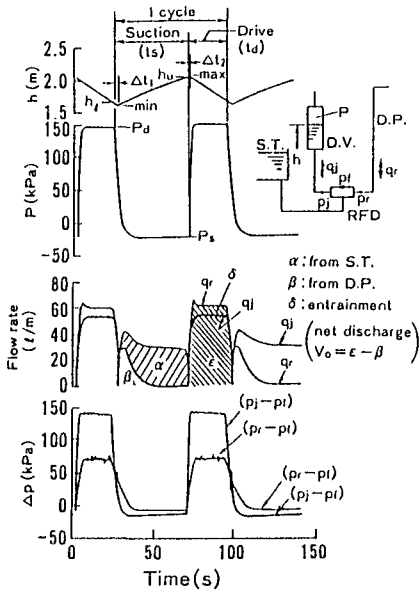


図13 図12の①運転時の各所の時刻歴特性

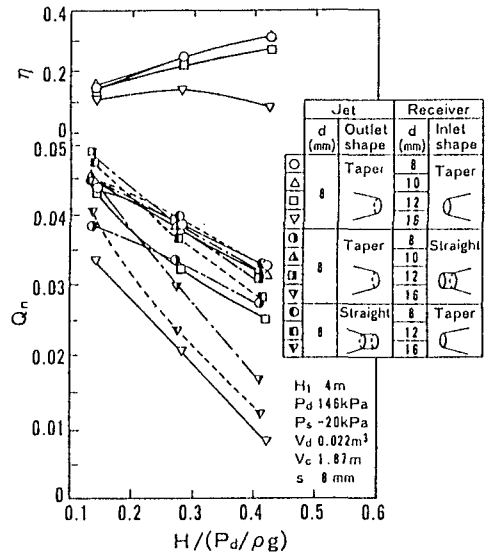


図14 ノズル形状のポンプ性能に及ぼす影響

審査結果の要旨

立地難，経済性，安全管理等の観点から，火力・原子力発電プラント等の大容量・高速化が急速に進められつつある。それに伴って，これらのプラント用配管の異常減肉，BWR用十字分岐管内変動流に基づく大幅な出力変動等の難問題がしばしば生じている。本論文は，これらのプラントの十分な安全性，信頼性の向上を目的として，これらのプラント用配管およびその周辺機器内の変動流を実流動状態において流体力学的に詳細に解明したもので，全編7章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では，流量計測，圧力脈動および余裕水頭の軽減用に多用されている管内オリフィスの下流側の変動流成分を熱線流速計，圧力変換器，火花流線可視化法等により詳細に解明し，オリフィス直下流の噴流周囲の乱れ度が壁面近くのその2倍に達し，このような高乱れ度の範囲がオリフィス口径の4ないし6.5倍に及んでいること等を明らかにし，減肉解析のための基礎資料を提示している。

第3章では，しばしば減肉に悩まされているT管継手とエルボの組合わせにおける管内速度分布，乱れ度分布を種々の分岐流量比 Q_2/Q_0 ，取付角 ϕ について系統的に明らかにし，T管とエルボの間隔が短く，小 Q_2/Q_0 ， $\phi=90^\circ$ または 180° において減肉の危険が大きいことを示している。これは有用な知見である。

第4章では，左右分岐管の互いの管軸がある角度を持つBWR用十字分岐管を含む管系で非線形的に1～20sの不定間隔で発生する大振幅流量変動の詳細を，熱線流速計，流れ可視化法等により解明し，さらに，分岐流量比，取付角，支管長さの影響等を明らかにしている。

第5章では，上記十字分岐管部に発生する変動流が左右分岐管を貫通して間欠的に発生する渦流による事実を明らかにし，中央支管入口部の形状の小変更，入口乱れの増大，微量制御流の流入等により効果的に抑制されることを明らかにした。これは重要な知見である。

第6章では，可動部分が全くなく，BWR用に好適とみられる2個の対向するノズルから構成されるノズル形フルイディクポンプの運転特性とそれに及ぼす構造因子の影響について研究している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は，BWR用十字分岐管部に発生する大出力変動の抑制法を見出し，併せて減肉の主因とみられる変動流の特性を明らかにしたもので，流体力学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。