

氏名	藤江秀夫
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和 61 年 6 月 11 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 26 年 3 月 東北大学理学部物理学教室卒業
学位論文題目	インペラ内を気液が分離して流れる場合のうず巻ポンプの二相流時性能に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 大宮司久明 東北大学教授 西山 哲男 東北大学教授 橋本 弘之

論文内容要旨

軽水冷却型原子炉の冷却材喪失事故時に冷却材配管が循環ポンプの上流側で破断したような場合、高温、高圧の冷却材がポンプを通過して破断口から流出する時、減圧、沸騰し、体積が増加して高速となり、インペラを加速するため、インペラが破損して飛散し、格納容器などを破損することが懸念されるようになり、このような状態におけるうず巻ポンプの挙動を解明することが必要となった。本研究は、このような状態におけるうず巻ポンプの性能を理論的に明らかにしようとする試みである。

第 1 章では、軽水冷却型原子炉の冷却材喪失事故時の冷却材循環ポンプの挙動を明らかにするために行われた従来の実験結果を整理して、二相流時ポンプ性能の特長をあきらかにし、更に従来の理論的研究ではこれらの実験で得られたポンプ性能を十分説明できず、その原因は、インペラ出口におけるボイド率の重要性、すなわち気相、液相それぞれの流速の重要性の見落としにあることを明らかにした。

第 2 章では、二相流がインペラ内を流れる場合、遠心力などのために気液が分離し、通常の管内二相流とは大きく異なった流動状態となることを考慮し、インペラから流出する気相、液相の流速を、インペラ内における気相、液相それぞれの運動量保存の式から求め、この流速を用いて二相流が流れる場合のうず巻ポンプの水力トルクを求める方法を提案した。この計算において必要な気相、液相と壁面間あるいは気液界面の摩擦係数は、圧力 6.9 MPa における特定の条件に対する計算結果

と実験結果とが一致するような値として求めた。このようにして求めた正流・正回転および逆流・逆回転の両状態における計算結果を米国 CE 社の実験結果と比較し、次の結論を得た。

(1) 二相流のボイド率と水力トルクとの関係についての計算結果は図1に示すように、正流・正回転の場合は、定格流量、定格回転数では実験結果と良い一致を示す。しかし、定格流量で回転数が定格の50%程度の際には図2に示すように、実験結果と計算結果とは傾向的には一致しているが、一致の程度は十分ではない。この原因としては、摩擦係数がインペラの回転速度に依存しないとした仮定が考えられる。

(2) 逆流・逆回転の場合は図3に示すように、計算結果と実験との一致は十分ではない。これは、二相流の場合のうず室内の流動状態が、単相流の場合と異なることが原因と考えられる。

(3) 系統圧力が異なる場合、気液界面の摩擦係数が気相の密度に比例すると仮定し、圧力 6.9 MPa における実験結果を用い 3.3 MPa における水力トルクを計算すると、定格条件に近い場合は、図1に示したように実験結果に近い結果が得られる。しかし、定格流量で回転数が定格の50%程度の場合には図2に示したように、計算結果は圧力により殆んど変化せず、実験結果との差が大きい。この原因としては、気相、液相と壁面との間の摩擦係数の圧力依存性を無視したことが考えられる。

第3章では、第2章で用いたうず巻ポンプに二相流が流れる場合には、インペラ出口における気相、液相の流速が重要であるという考え方

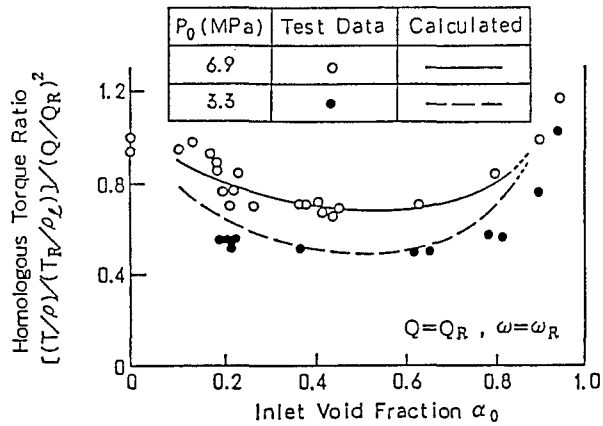


図1 水力トルクの計算結果と実験結果との比較 (その1. 定格流量, 定格回転数の場合)

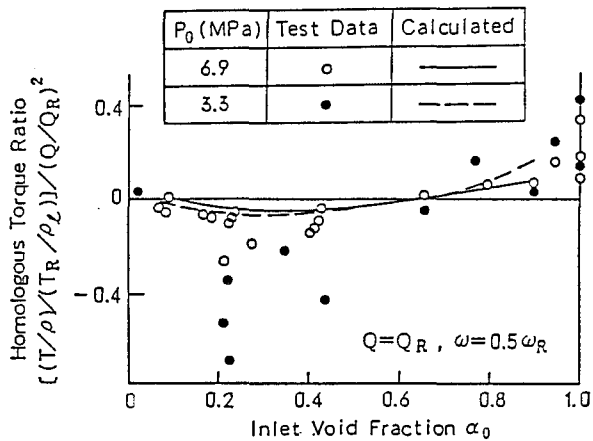


図2 水力トルクの計算結果と実験結果との比較 (その2. 定格流量, 50%回転数の場合)

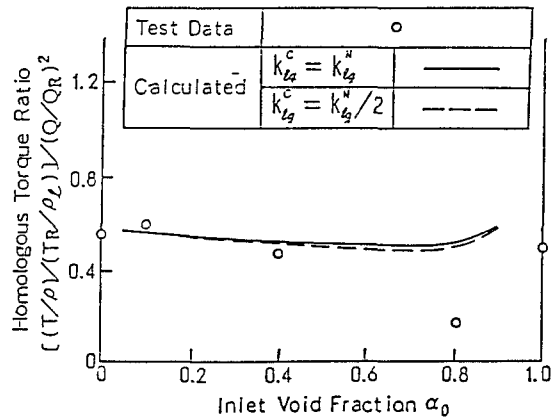


図3 水力トルクの計算結果と実験結果との比較 (その3. 逆流・逆回転の場合)

を引き継ぎ、インペラ内で遠心力などにより気相と液相とが分離し異なる速度で流れ、異なる速度でインペラから流出することを考慮して揚程を求めた。すなわち、

(a) インペラ内における気相、液相それぞれの運動量保存の式から圧力勾配を求め、これをインペラ入口から出口まで積分することにより、インペラ出入口間の差圧を求めた。この時に必要となる流路壁面と気相および液相との間、および気相と液相との界面の摩擦係数は、第2章において水力トルクの予測に用いた値と同じものを用いた。

(b) 異なる速度でインペラから流出した気相と液相とは、インペラ流出後に再び混合し、条件によって流速が変化し、あるいは案内羽根根部などと衝突し、ポンプ吐出管から流出するが、この間の圧力変化は、

(i) 異なる流速の気相と液相とが混合する時の圧力変化は、混合時に運動量は保存されるとして求め、

(ii) 流速変化に伴う圧力変化は、流路断面積がステップ状に変化する拡大管または縮小管を流れる二相流の圧力変化の計算式として

Chisholm が提案した式を用いて求め、

(iii) 二相流が案内羽根などに衝突して生ずる圧力変化は、弁を流れる二相流の圧力変化の計算式として、Chisholmが提案した式と同じ形の式の係数を一部変えて求めた。

このようにして求めた揚程の計算結果は、定格条件の時には図4に示すように実験結果と良い一致を示すが、定格条件以外（例えば、定格流量で回転数が定格の50%）の時には図5に示すように、実験結果との一致の程度は十分ではない。この原因は二相流の時の衝突損失の求め方などにあると考えられる。

第4章では、うず巻ポンプに二相流が流れる場合、単相流の場合と同様の相似則が適用可能か否かを検討した。

まずポンプに二相流が流れる場合の水力トルクを求める基礎方程式の検討から、気相、液相と壁面との間および気液界面における摩擦係数がインペラ直径に依存しなければ、水力トルクに関しては、二相流の場合にも単相流の場合と同様の相似則が適用

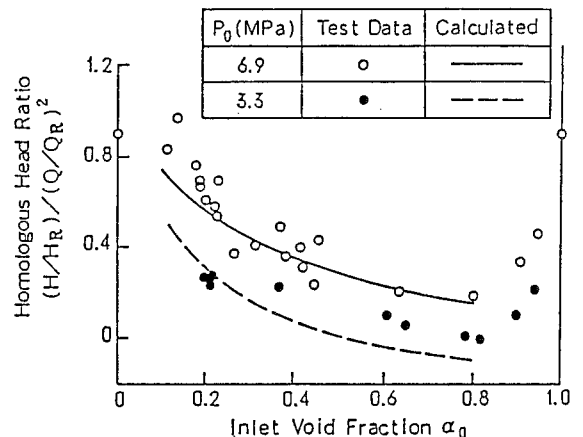


図4 ポンプ揚程の計算結果と実験結果との比較
(その1. 定格流量, 定格回転数の場合)

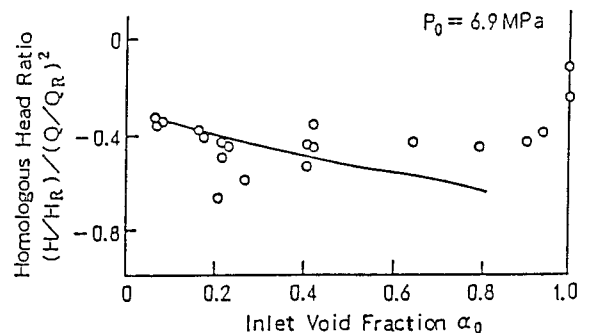


図5 ポンプ揚程の計算結果と実験結果との比較
(その2. 定格流量, 50%回転数の場合)

可能であり、一方、気相、液相と壁面との間の摩擦係数のインペラ直径への依存性は小さく、また気液界面の摩擦係数は、液相の体積流量が定格流量の100倍以上というように非常に大きい場合、あるいは気相、液相の体積流量が共に定格流量の1/10以下というように非常に小さい場合を除けば、インペラ直径に依存しないと考えてよいことを明らかにした。

すなわち、うず巻ポンプに二相流が流れる場合にも、水力トルクに関しては、本研究が対象とする大部分の運転条件においては、単相流の場合と同様の相似則が適用可能であるとの結論を得た。

審査結果の要旨

1970年ごろから、軽水冷却型原子炉（軽水炉）の冷却材喪失事故時の冷却水循環ポンプの挙動が問題になっている。すなわち冷却材の配管が何らかの原因で破断した場合に、高温高圧の冷却材が沸騰膨張するため、ポンプが高速回転し羽根車が破壊し、その破片が原子炉の安全運転上重要な機器を破損する虞れがあるというものである。この軽水炉の仮想事故解析には、うず巻ポンプのボイド率20～80%の二相流時性能を知る必要がある。この範囲の二相流時性能に関しては、かなりの実験研究が公表されているが、それらを正当に説明しうる理論はなく、また縮尺モデルの実験結果から実機の性能を予測する相似則も確立されていない。本論文は、このようなポンプの二相流時性能に関する未解決で重要な問題を扱ったもので、全編5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、うず巻ポンプの羽根車内で上記ボイド率の二相流が気液に分離して層状流になることを考慮し、気相と液相それぞれに運動量保存の方程式をたて、これを解いて羽根車のトルクを求める方法を提案している。この方法では、気相または液相と固体壁面の摩擦係数と気液境界面の摩擦係数を与える必要がある。これらの値は二つの特定の運転状態の実験値に合わせて与えることができ、その計算結果は定格運転時には上記ボイド率の範囲にわたって実験結果と良く一致し、また低速回転時、逆流逆回転時にもある程度まで実験結果を説明できるものになる。この方法は、ボイド率の変化を含め、気相と液相を分けて計算しているという点で実際現象に則したものである。

第3章では、前章の方法に、羽根車から流出する層状流の混合減速過程の損失水頭を加味して、揚程を予測する方法を提案している。トルクの場合と同様に、実験結果との一致の程度はこの種の解析としては極めて良好である。

第4章では、うず巻ポンプの二相流時性能に対する单相流の相似則の適用可能性を広範かつ詳細に検討している。基礎方程式の次元解析と管内二相流からの類推をもとに、無次元摩擦係数がポンプ縮尺比に無関係ならば相似則が厳密に成立すること、しかしながら気相または液相と固体壁面の係数はわずかに縮尺比に関係し、他方気液境界面の係数は一般に縮尺比によらないことを明らかにしている。

第5章は総括である。

以上要するに本論文は、軽水炉の仮想事故解析に関連してうず巻ポンプの気液が分離して流れる場合の二相流時性能を予測する方法を提案し、またこの流れへの相似則適用可能性を詳細に検討したもので、流体力学と機械工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。