

# 原子炉冷却材ポンプ軸シールの流量シミュレーション

## Reactor Coolant Pump Seal Leak Rate Simulation

技術本部 竹下 興二\*1  
高砂製作所 小西 揚\*2  
神戸造船所 河野 文紀\*3

原子炉冷却材ポンプは加圧水型原子力発電所の重要なコンポーネントであり、軸貫通部に高压のシールを有している。軸シールは3段のシールで構成されている。高压側のNo.1シールは非接触式の静圧シールで、最も重要である。このシールからの流量はシール水温度によって変化するが、複雑な挙動を示すため、シールの状態を把握するのが困難であった。そこで、シールについて故障物理的な検討を行い、流量変化のメカニズムを明らかにした。これを基に開発した流量シミュレーションでは現象をよく説明できるようになった。そこで、これをシールの異常診断システムの状態診断のツールに展開した。

Hydrostatic seals are used as the No.1 seals of RCPs (Reactor Coolant Pumps) in PWR power plants. The leakage rate of the No.1 seal is one of the most important indicators used to diagnose the RCP's operating condition. But observed operating data of the leakage rate seem to be very complicated. In order to fully understand this phenomenon the principle causes of the phenomenon were characterized and sensitivity of the leakage rate to various parameters was evaluated analytically and experimentally. Combining the element data, a computer simulation of leakage rate variation was carried out. The results calculated agree well with the measured data. It was verified that the friction force between the secondary seal and the insert affects the leakage rate variation, and that the simulation using a simple model is effective for estimating the seal leakage rate variation with changes in the seal water temperature.

### 1. ま え が き

原子炉冷却材ポンプ(RCP)の軸シールは3段のシールから構成されており、高压側のNo.1シールは非接触式の静圧シールで、低压側のNo.2、No.3シールは接触式メカニカルシールである。特にNo.1シールは、原子炉系圧力条件下で使用される流量制限型シールである。

シール流量は、通常0.2~1.4 m<sup>3</sup>/hで、シール水温度によって変化する。あるときは比例し、あるときは逆比例するといった、複雑な挙動を示すので、シール流量の変化からシールの状態を把握するのは困難であった。そこで、この挙動を解明するための故障物理的な検討を行った。そして、要因を定量化するため、ポンプ運転中のデータ分析、そしてシールの摩擦力の計測及び軸やケーシングの熱変形解析を行った。これらの結果を総合した流量シミュレーションを行い、流量変化のメカニズムを明らかにした。この流量シミュレーション手法が、シールの状態把握に有効であることが確認され、これをシールの異常診断システムの状態診断のツールに展開した。

ここでは流量変化メカニズムと状態診断に活用できるように簡単化したシミュレーションモデルを紹介する。

### 2. 静 圧 シ ー ル

図1はRCPの断面図を示す。主軸は、ポンプ上方の電動機により駆動され、スラスト軸受は、電動機に取付けられており、これが主軸の軸方向変位の基準となっている。

図1に示すようにインジェクション水がサーマルバリアフランジを通り、No.1シールの外周部に供給され、一部はシール水としてNo.1シールを通りNo.2シールを冷却し、体積制御タンクに戻される。そして、残りのインジェクション水は水潤滑軸受に流れ、原子炉系に注入される。

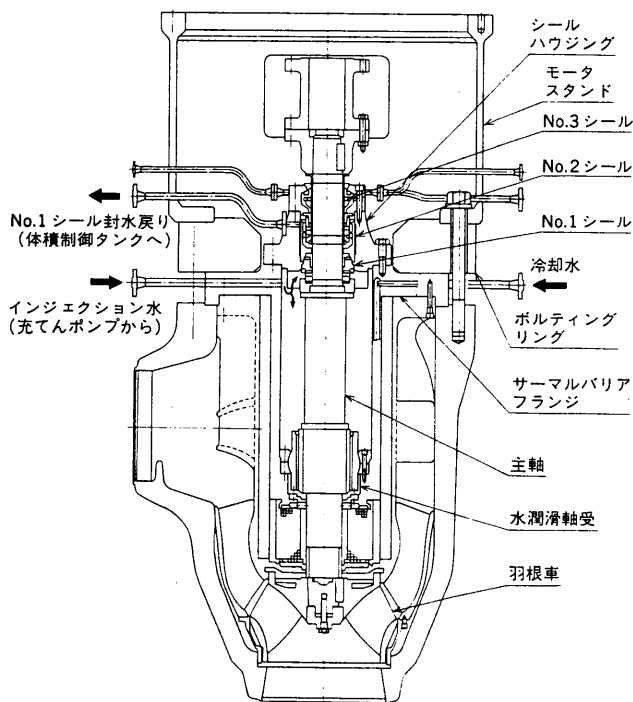


図1 RCPの断面図 軸シールは3段のシールで構成されている。  
Cross-section of RCP

シール水の温度が変化すると、この水に接している部材がその温度に応じて熱変形する。

軸シールの断面図を図2に示す。No.1シールランナが主軸に固定され、No.1シールリングはシールハウジングの中に、サポート、インサートを介して取付けられている。インサートには、スリッパシールとOリングで構成されるセカンダリシールを介して、軸方向には移動自在にかつ漏れを生じないように嵌装(か

\*1 高砂研究所主査

\*2 機械技術部ポンプ設計課

\*3 原子力プラント設計部プラント設計課

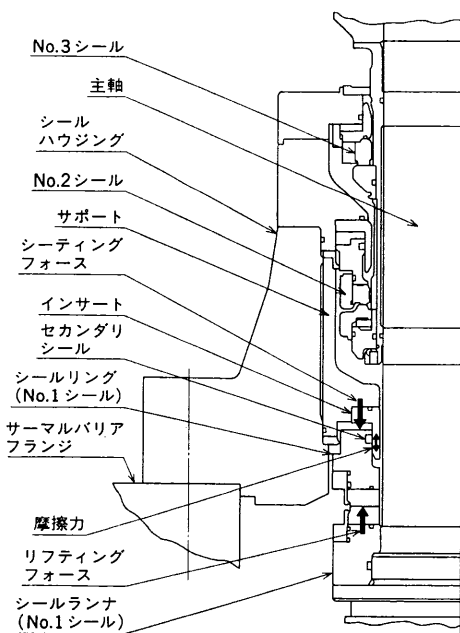


図2 シールの断面図 シーティングフォース、摩擦力和リフティングフォースがバランスする点でシールすきまが保持される。  
Cross-section of seals

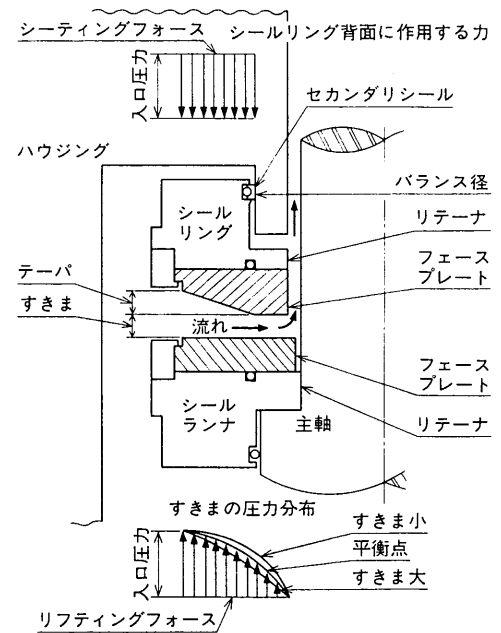


図3 静圧シールのモデル図 シール面には流れに沿ってすきまが小さくなるようなテーバ加工がなされている。  
Simplified model of a hydrostatic seal

んそう) されている。移動に際しては、セカンダリシールの摩擦力が作用する。シールに高压のシール水が作用すると後述する静圧シールの原理に基づいてシールランナとシールリングの間に10~20 μmの小さなすきまが保持される。

3. シールの特性

図3に簡便化された静圧シールのモデルを示す。シール水圧力は、バランス径からシールリングの滑動面外径までの部分に作用し、シールリングを下方に押付ける力(以後シーティングフォースと呼ぶ)となる。シール滑動面も圧力分布を積分した力(以後リフティングフォースと呼ぶ)がシールリングに対し上方に作用する。シールリング表面に設けられた微細なテーバによりシールすきま内の圧力は図に示すように、すきまが小さくなるとリフティングフォースが大きくなるように、また、すきまが大きくなるとリフティングフォースが小さくなるように変化する。これはシール軸方向の変位に対し、力が変化するのでフィルム剛性と呼ばれる。前述のシーティングフォースとセカンダリシールの摩擦力の和が、リフティングフォースと釣合った点の圧力分布になるようなシールすきまが保持される。

No.1シールの流量変化を生ずる要因を検討する。原子炉の通常運転に注目すると、原子炉系の圧力は一定であるので、シール水温度変化によるシール周りの部材の熱変形と粘性変化が重要な要因となる。

4. 流量シミュレーション

まず第一に、セカンダリシールの摩擦力を実験的に計測した<sup>(2)</sup>。その結果、最大の摩擦力は1.5 kN (153 kgf)であった。また変位の方向が変わるとき、セカンダリシール部には弾性変形領域があり、その変形領域が18 μmであった。この間では、力はほぼ変位に比例している。これを近似的に次のように表すことができる。

$$\frac{dF_f}{d\Delta} = k_f = 3.0 \text{ kN}/18\mu\text{m} \quad (1)$$

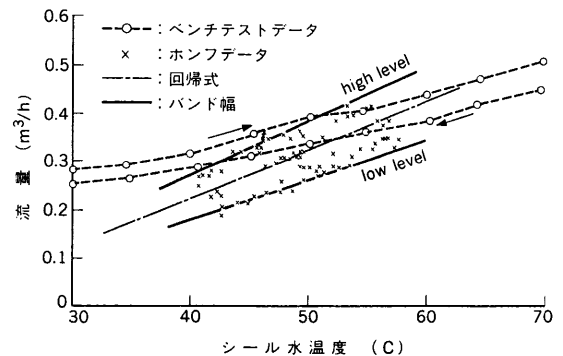


図4 シール水温度と流量(ポンプデータ) 通常運転時のデータは一定の領域内にある。  
Seal leakage rate and seal water temperature (pump data)

$$\left. \begin{aligned} F_f > 1.50 \text{ kN} \text{ のとき } F_f &= 1.50 \text{ kN} \\ F_f < -1.50 \text{ kN} \text{ のとき } F_f &= -1.50 \text{ kN} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

シール水温度と流量の関係は、シールによって、異なっており、シールの工場試験データあるいはプラントの運転初期のデータを基に、図4を得る。運転データから、流量  $q_0$  とシール水温度  $T$  との重回帰式を求めると、次のようになる。

$$q_0 = 0.01 T - 0.20 \quad (3)$$

軸やシールリングの相対変位については、軸、ハウジング、フランジ(図1に示すボルティングリングとサーマルバリアフランジ)、サポートの四つの部材に分けて、FEM(有限要素法)により、シール水温度に対するシールリングとシールランナの相対変位を求めた。FEMの非定常熱変形解析を時分割ごとに行うことは、計算時間が膨大となるので、これを簡単なモデルに近似することにした。図5はあらかじめFEM解析結果を分析し、簡便化されたモデルの熱変形シミュレーションのブロック図である。

これらの部材の変位  $X_i$  は時定数をそれぞれ  $T_{si}$ 、 $T_{soi}$  とする2個の一次遅れ要素に近似でき、 $X_i$  の総和を  $\Delta$  とすると、次のようになる。

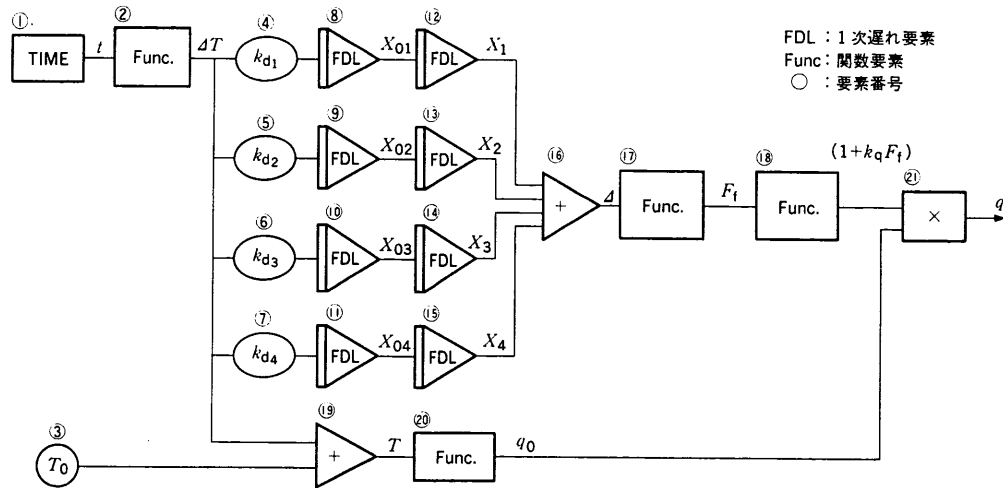
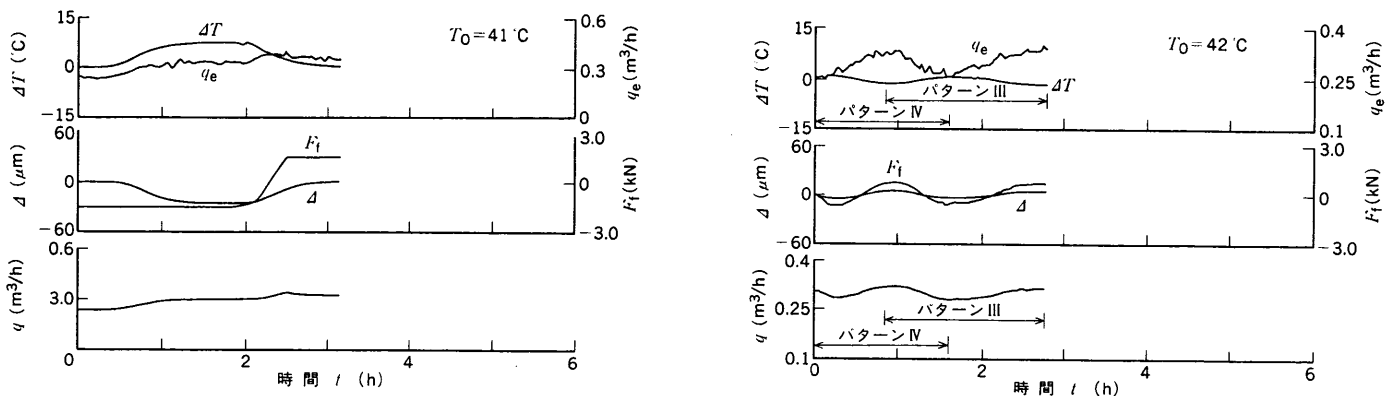
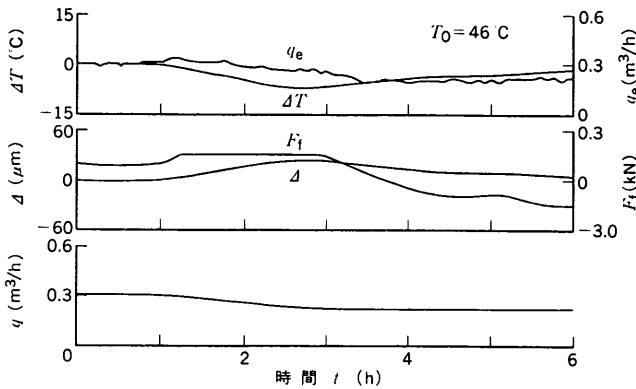


図5 流量シミュレーションブロック図 それぞれの部材は2個の1次遅れ要素に近似できる。  
Leakage rate simulation block diagram



(a) パターンI (シール水温度が上昇下降により元の値になっても流量は増加一方の傾向になる)

(c) パターンIII, IV (シール水温度に対し流量は可逆性がある)



(b) パターンII (シール水温度が下降上昇により元の値に戻ったとき流量は減少一方となる)

図6 シール水温度に対する四つの流量変化パターン シール水温度変化二つのパターンに対し、流量は四つの変化パターンがある。  
Four patterns of seal leakage rate variation with seal water temperature

表1 シミュレーションに用いた時定数  
Time constants for leakage rate simulation

部 材	時定数(h)		変形感度 $k_d$ ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )
	$T_{so}$	$T_s$	
主 軸	0.2	0.02	4.3
ハウジング	0.5	0.5	1.6
フランジ	0.3	0.02	-3.8
サポート	0.1	0.02	-5.0

$$\frac{dX_{0i}}{dt} = \frac{1}{T_{soi}} (k_{di} \cdot \Delta T - X_{0i}) \quad (4)$$

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{1}{T_{si}} (X_0 - X_i) \quad (5)$$

$$\Delta = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 \quad (6)$$

$$i=1\sim 4$$

これらの計算結果の詳細は紙面の都合で割愛するが、四つの部材の時定数が異なるため、シール水温度の変化時間によって、シールリングとシールランナの相対変位は複雑な変化をする。また式(4)、(5)の結果はFEMの非定常熱変形解析結果とよく合うように  $T_{soi}$ 、 $T_{si}$  を選定することができた。

流量は、セカンダリシールの特性から、次式のように実験式で

表すことができる。

$$q/q_0 = 1 + k_q \cdot F_i \quad (7)$$

$$k_q = 0.15/1.50 \text{ kN} \quad (8)$$

シール水温度  $T$  は基準温度  $T_0$  との差  $\Delta T$  を入力することにした。すなわち

$$\Delta T = T - T_0 \quad (9)$$

とした。四つの部材の時定数及び熱変形の定数  $k_d$  を表1に示す。

図6(a)、(b)、(c)はポンプ運転のデータのうち  $\Delta T$  と実測流量  $q_e$  をプロットしたものである。図の  $F_i$ 、 $\Delta$ 、 $q$  はシール温度データを入力してシミュレーションによって計算されたものである。図6(a)、(b)、(c)の  $q_e$  と  $q$  を比べると、よく合っていることが分かる。

表2 シール水温度と流量変化パターン  
Patterns of seal leakage rate variation with water temperature

パターン	シール水温度変化	流量変化	スタート点
I			low level
II			high level
III			high level
IV			low level

図6(a)は  $\Delta T$  を逆V字状に上昇、下降させ、元の温度に戻したときのデータであるが、 $q_e$  は増加一方の傾向を示し元の流量より増加している。図6(b)はV字状に  $\Delta T$  を下降、上昇させたものであるが、 $q_e$  は減少一方の傾向を示し元の流量より減少している。シミュレーションの結果も同様の傾向を示している。図6(c)は、下降上昇下降と変化させているが、 $q_e$  は、逆比例的傾向で、可逆性のある流量変化を示している。

シールのすきまの変化は小さくても、流量はすきまの3乗に比例するため、変化幅が比較的大きく、またシール水温度と流量の関係は、一見複雑に見える。しかし、そのメカニズムを分析し、シミュレーション計算により評価してみると、パターンI、IIでは、 $\Delta$ が変化しているのに  $F_f$  は一定となっていることから、セカンダリシール部でスリップが生じていると判断される。一方パターンIII、IVではスリップが生じていないことが分かる。その結果シール流量の複雑な変化は、ポンプを構成する部材やシールの特性によって生ずる現象であることが分かる。図4に示す high level, low level の間で前述のシール水温度とシール流量の関係が保持される一定のルールに従って変化している限りシールは正常である。シールリングとシールランナの相対的な位置関係から二つの温度変化モードに対して表2に示すように四つの流量変化モードがある。

5. 異常診断システムへの展開

RCP No.1 シールでは、流量が複雑な挙動を示すため、流量だけをモニタしているだけでは、シールの状態を正しく把握することがむづかしい。また、流量を決める影響パラメータが多いので、一つの指標だけで判定ができず、異常の予兆をとらえることが困難である。このため本報に記載のようなシミュレーションにより  $q$  を求め、これを実際の流量  $q_e$  と比較することにより、シールの状態診断を容易にすることができる。すなわち

$$\Delta q = q_e - q \tag{10}$$

とし、偏差  $\Delta q$  の大きさが異常の予兆を示すパラメータとなり、いち早くシールの異常を検出することができる。

図7はシミュレーションによるシールの状態診断を取入れた異常診断システムの概念図である。状態診断モジュールで通常シールの健全性をモニタする。異常診断モジュールでは、あらかじめそれぞれの要因と  $\Delta q$  の変化パターンをデータベース化しておくことによって、 $\Delta q$  が大きくなったときは、その変化パターンか

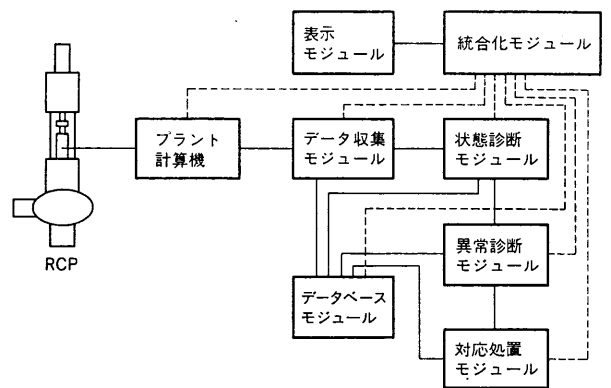


図7 RCP軸シールの異常診断システム  
RCP seal diagnostic system  
状態診断にシール流量シミュレーションが用いられている。

ら原因を同定する。

また、流量が多いときや少ないときは、表2のパターンI、パターンIIに示すように、シール水の温度を変化させることにより、high level より low level へあるいは low level より high level へ移行するような運転法により対応することができる。その影響評価は、実行前にシミュレーションにより確認することが可能であるので、運転者も安心して操作ができる。

なお本報では、定格出力運転中のシールに注目して記述したが、原子炉系の圧力、温度、冷却水温度、雰囲気温度などを考慮した流量シミュレーションを開発し、状態診断に利用している。

6. あとがき

RCP No.1 シールの流量変化のメカニズムを分析し、実験やFEM解析により要因とその影響を定量化し、シミュレーションにより、その現象を解明した。また、このシミュレーション手法を用いて、運転中のシールの状態診断が容易にできることを示した。そして、このような状態診断法を取入れた異常診断システムに展開した。

説明記号

- $F_f$ : セカンダリシールの摩擦力
- $k_d$ : 比例定数 (温度 vs 変位)
- $k_f$ : 比例定数 (変位 vs 摩擦力)
- $k_q$ : 比例定数 (摩擦力 vs 流量)
- $q$ : 流量 (計算値)
- $q_0$ : 流量 (実験式)
- $q_e$ : 流量 (実測値)
- $T$ : シール水温度
- $T_0$ : シール水基準温度
- $T_s$ : 一次遅れ要素時定数 (二段目)
- $T_{s0}$ : 一次遅れ要素時定数 (一段目)
- $\Delta T$ : シール水温度変化分
- $X$ : 変位
- $X_0$ : 一次遅れ要素変位 (一段目)
- $\Delta$ : 変位の和

添字 1: 主軸 2: ハウジング 3: フランジ 4: サポート

参考文献

- (1) Takeshita, K., Reactor Coolant Pump Seal Leak Rate Simulation, JSME/ASME ICON-1(1991)
- (2) 竹下, 川口ほか, 静圧シール用セカンダリシールの特性, 日本機械学会第68回通常総会講演会前刷 (1991)
- (3) 柴田ほか, PWR 一次冷却材ポンプ国産機の開発, 三菱重工技報 Vol.16 No.6 (1976) p.30