

高圧用メカニカルシール

High Pressure Mechanical Seal

化工機事業部 技術部 化工機設計課
山 本 元
Hajime Yamamoto

A mechanical seal is one of the most effective shaft seal instruments applicable to high pressure operations.

In these days, this type of seal is being developed for larger shaft sizes, for higher pressure operations, and for better performance.

Accordingly, the design and choice of this seal requires greater consideration. In this paper, the fundamental features which must be considered in the design and use of the mechanical seal attached to a high pressure reactor, are discussed with our field experiences and experimental studies.

メカニカルシールは、高圧軸封装置の中で最も信頼性の高い有用なものである。最近ではより大型化、高圧化、高性能化の一途を歩んでおり、その選定にあたっては、十分な検討が必要である。

ここでは、攪拌機付高圧反応槽用メカニカルシールの設計及び取扱の上で考慮しなければならない基本事項について、当社の経験、実験結果より一部紹介する。

ま え が き

当社が取扱う反応機又は重合機の使用圧力範囲は、低圧のものから $100 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ を超える高圧のものまで種々多様であるが、反応の高度化に伴い、高圧高温下で操作されるケースが増加している。

攪拌機付反応槽の軸封に使用するメカニカルシールについても、高圧高温仕様に対して所定の機能を発揮し信頼性の高いものであることはもとより、洩れ許容値、寿命等についてユーザーからの要求もより厳しいものになってきている。

このニーズに応えるべく、数々の研究、開発を行い、より信頼性の高い、安心して御使用願えるメカニカルシールの開発、供給に心がけている。第1図に当社高圧($100 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$)用メカニカルシール構造図の一例を示す。

一般にメカニカルシールを選定するための判断基準の最初のステップとして、圧力P、周速V、温度Tがある。攪拌機付反応槽用メカニカルシールの場合、低い回転数のダブルメカニカルシールが使用され、シール摺動面の潤滑に使用するシール液は、強制循環又はジャケット機構等により充分冷却される。このことから、メカニカルシールの構造、材質の選定に際しては、V、Tの影響は小さく、Pによる所が大きくなり、高圧用になるにしたがって、構造、材質等について種々の検討、配慮がより必要となってくる。

1. 摺動材料

1.1 摺動材料の必要条件

メカニカルシールは摺動面の摩擦に従い軸方向に動くことの出来る回転環（シールリング）とシート受座に固定される固定環（フローティングシート）とからなり、それぞれは軸に直角な面で接触し相対摺動している。この二つの平面を構成する材料を摺動材料と呼び相互に摺動特性のよい材料の組合せで使用される。

この材料の組合せは

- 1) 槽内内溶液及びシール液の種類
- 2) 使用圧力および温度
- 3) 攪拌軸回転数

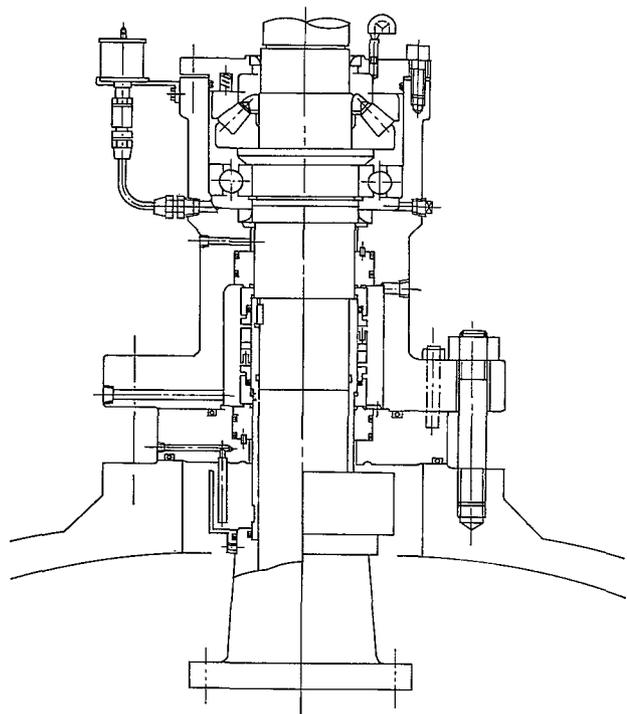
等によって決定されるが、摺動材料には次の諸条件を持っていることが必要である。

- 1) 耐食性があること

当社が製作している反応機、重合機はたえず耐食性が要求されており、ステンレスの他にグラスチール、ハステロイ、ニッケル、モネル、チタン等の耐食材料がベースとなっている。従って槽内液又はガスに接する部分には槽材なみの耐食性のある材料が必要である。

- 2) 耐摩耗性があること

メカニカルシールは長時間の連続運転に対しても常に安定したシール性能を発揮させなければならない。従って耐摩耗性の良否がメカニカルシール性能の決定的要因となる。



第1図 高圧用メカニカルシール

Fig. 1 Mechanical seal for high pressure operation

る。

3) 耐熱性がよく熱放散がよいこと

摺動面では相対摺動することにより摺動熱が発生する。例えばサイズφ200, ΔP100 kgf/cm², 回転数 100 rpm の条件で摩擦係数を0.3とすると約 2100 kcal/hr の発生熱となる。この熱をすみやかに摺動部近傍から取り去ってやらないと潤滑性が悪化して焼付, 熱割れの原因となる。この除熱はシール液の強制循環又はジャケットに通水して行いが, まず摺動材そのものが熱放散に優れていることが要求される。

4) 機械的強度が強く変形しにくい材料であること

摺動材料には圧力による応力, 摺動発熱による応力, 回転トルクによる応力等各種の応力が作用するが, これらの応力によって摺動面にひずみが生じにくい材料でなければならない。

5) 気密性があること

コーティング材, 鋳造材では極くまれに浸透洩れを経験するが, シールという目的から摺動部以外からの洩れは絶対に許されない。

6) 加工性, 成形性がよいこと

加工精度によってメカニカルシールの性能が左右されると言っても過言ではない。従って要求された精度に加工するためには, 加工性のよい材料が必要となる。

7) 自己潤滑性がよく相手材を傷つけないこと

今まで挙げた諸条件を全てかねそらえていても, 相対摺動することにより相手材をかじったり傷をつけたりするような相性の悪い材料では摺動材料としては適さない。

1.2 摺動材料の種類とその性質

攪拌機付高圧反応槽に使用されるもののうち代表的なものについて紹介する。

1.2.1 カーボン

摺動材料でもっともよく使用されているのが, カーボンである。その理由として, 耐食性, 自己潤滑性が優れ熱伝導率のよいことが挙げられる。但し強酸化性流体(硝酸, 濃硫酸, 発煙硫酸, 次亜塩素酸, 臭素等)には耐食的に使用出来ない。

カーボンは原材料の種類, 焼成上の工程, 含浸樹脂の種類等でその性質は大きく異り, その種類も数多くあるが, 高圧反応槽用メカニカルシールには通常焼結カーボンを使用する。

用する。

焼結カーボンは, 石油コークス, カーボンブラック, 黒鉛等を混合し, タールピッチ等をバインダーとして成形, 焼成して作られるが, 焼結の際にバインダー中に含有される揮発物がガス化し多孔質となるため, フェノール樹脂, フラン樹脂等を含有させ不浸透にして使用する。

このカーボンの問題点の一つは, プリスター現象である。この原因は, 含浸した樹脂の熱分解とか, カーボンと含浸した樹脂の熱膨張差によるものであるとされており, このプリスター現象は, シール液が水の場合には発生しにくく, 粘度の高い油, 高温の油又はPV値の高いものには発生しやすい。このような場合は樹脂を含まないで密度の高い等方性材料を用いるか, あるいは高圧でプレス成形した高密度の材料を焼結して無含浸で使えば防止出来るので高圧用シールには, この無含浸カーボンが使用される。

もう一つの問題点は, 他の金属材料に比べ機械的強度が1/10以下であるという点である。このため高圧用に使用する場合, 形状, 大きさの配慮及びカーボン材質の選定が大きなポイントとなる。第1表に代表的なカーボン材料の物性及び機械的性質を示す。

1.2.2 超硬合金

超硬合金は硬度が高く耐摩耗性に優れ, 熱伝導性が良いため, 高圧用メカニカルシールの摺動材として, カーボンとの組合せ又は超硬合金同志の組合せで使用される。

超硬合金とは一般に金属の炭化物をニッケル, クロム, コバルト等の金属と共に焼結した複合金のことでその種類は数多くある。

メカニカルシールに使用する超硬合金は強靱性があり硬く熱伝導性のよいタングステンカーバイト(WC)にコバルトをバインダーとしたWC-Co系の合金が使用される。しかしWC-Co系超硬合金は, バインダーのコバルトが酸に対して耐食性が劣るためアルカリには耐えるが強酸には使用出来ない。又シール液が水の場合でも相手材との摺動部に軽微な, すき間腐食の発生する事が確認されている。これら強酸性液及び水に対してはバインダーを使用しない耐酸超硬と呼ばれる超硬合金を使用する。

この耐酸超硬は, WC-Co系よりも硬さ, 熱伝導性が大きく, より高圧高温域での使用に有効な材料である。第2表に超硬合金の特性を示す。

第1表 カーボンの物理的および機械的性質

Table 1 Physical and mechanical properties of carbon and graphite

Material	Specific gravity	Shore hardness	Flexural strength (kgf/cm ²)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Modulus of elasticity (10 ⁶ kgf/cm ²)	Thermal expansion (10 ⁻⁶ /°C)	Thermal conductivity (kcal/m·hr·°C)	Max. working temperature (°C)
Graphite	1.8-1.9	40-60	350-500	600-800	180-250		28-35	120-130	400
Carbon	1.65	75	550	1500	150		4	20	350
Phenolic resin impregnated carbon	1.74	78	690	1300		0.13	4.4		300
Furan resin impregnated carbon	1.78 1.8	100 70	850 700	2300 1700	250 230	0.18 0.15	6		200
Acrylic resin impregnated carbon	1.75	85-90	700	2500			5		280

超硬合金は他の摺動材料と比べ高価であるため単体で使用する以外に金属母材へのコーティング又は金属リテーナーに保持して使用する場合が多い。これらの代表的な形状を第2図に示す。

コーティングは超硬の使用量が少ないため最も経済的であるが、金属母材がSUSのため熱伝導性が若干劣る。

焼ばめ方式は熱歪が摺動面に生じやすい事に注意が必要である。金属リテーナー材は超硬合金の熱膨張係数に近し、チタン材等を使用する。

Oリングマウント式は焼ばめの欠点である熱歪は防止出来るが構造的にやや複雑となる。

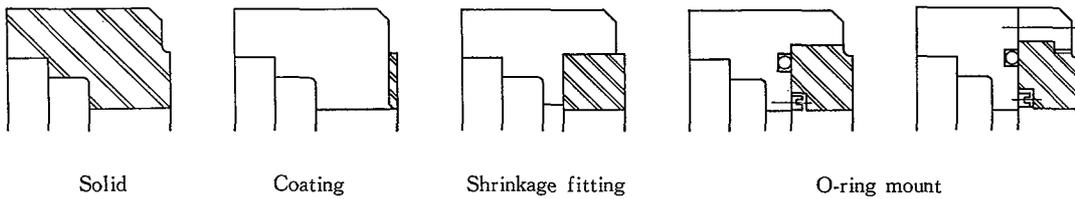
1.2.3 セラミック

セラミックは単体又は金属にコーティングして使用する

が、前者はアルミナ(Al_2O_3)、後者はコーティング組織が緻密で表面荒さが良好な酸化クロム(Cr_2O_3)がその代表である。

セラミックは耐食性、耐摩耗性に優れているが熱伝導率が他の金属に比較して低く耐熱衝撃性が悪いため高圧高温用には不向きである。

しかし近年の製造技術の発達により従来セラミックの欠点であった熱伝導率、耐熱衝撃性が大きく改善された炭化けい素(SiC)、窒化けい素(Si_3N_4)等ニューセラミックが注目されている。特にメカニカルシール用としては、耐熱性、耐食性及び耐摩耗性が高く摩擦係数が低くかつPV値が高い炭化けい素(SiC)が高圧用摺動材として使用され実績も増えてきている。第3表にSiCと他の摺動材料の特性



第2図 シールに使用される超硬合金の形状

Fig. 2 Shape of sealring using cemented carbide alloy

第2表 超硬合金の特性

Table 2 Properties of cemented carbide alloy

Composition (%)			Physical properties				Mechanical properties	
WC	Co	TiC TaC	Spacific gravity	Hardness HRA	Thermal expansion ($10^{-6}/^{\circ}C$)	Thermal conductivity (kcal/m·hr· $^{\circ}C$)	Compressive strength (kgf/cm 2)	Deflective strength (kgf/cm 2)
93-95	5-7	0	14.8-15	90.3-91.5	5	68-72	540	160-250
90-92	8-10	0	14.6-14.8	89.5-90.5	5.3	60-65	520	180-270
93-97	0	3-7	14.5-15.5	92.5-94	4.9	80-89	400	>70

第3表 摺動材料の耐熱衝撃性

Table 3 Thermal spalling resistance of rubbing material

Material	Silicon carbide	Alumina	Cemented carbide alloy Ni 16%	Cemented carbide alloy Co 7%	Silicon nitride	Graphite
Vickers' hardness	2570	1000-2000	1600	1600	2500	—
Deflective strength kgf/mm 2	45	38	42	70-77	—	—
Tensile strength σ_t kgf/mm 2	28	24	42	77	24	2.95
Young's modulus E kgf/mm 2	4.2×10^4	3.8×10^4	6.0×10^4	6.1×10^4	3.2×10^4	843.6
Thermal expansion α $10^{-6}/^{\circ}C$	4.3	7.0	6.0	6.0	3.2	2.2
Thermal conductivity K cal/cm·s· $^{\circ}C$	0.30	0.06	0.2	0.2	0.033	0.358
$\alpha/K \times 10^{-6}$ cm·s/cal	14.3	116	30.0	30.0	96.0	0.6
Thermal spalling resistance cal/cm·s	46.6	5.4	23.3	42.0	7.8	530

$$\text{Thermal spalling resistance} = \frac{\sigma_t}{E} \cdot \frac{K}{\alpha}$$

と耐熱衝撃値の比較を示す。

2.2.4 その他の摺動材料

上述以外のものでは、ステライト、ニレジスト、銅合金が使用されている。これらの中で銅合金は、超硬合金との組合せでの高圧(200 kgf/cm²G)回転テストにて良好な結果を得ている。

2. 軸シール

メカニカルシールには摺動部材間でのシールと、回転環及び固定環をそれぞれ軸及シート受座に弾性支持し、洩れを防ぐと共に振動を緩衝する働きをもつ軸シールとがある。

この軸シールには、通常、フッ素ゴム、ニトリルゴム等のOリングを使うが、シール液及び槽内液質、温度により、デュポン社製のカルレッツあるいはフッ素樹脂を使用する場合もある。

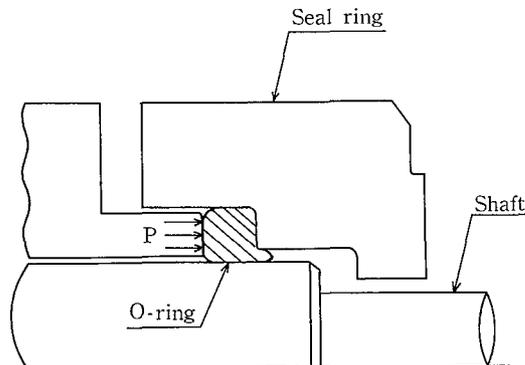
高圧の場合、回転環の軸シール用Oリングのはみ出しについて注意しなければならない。

回転環は適正な摺動面圧を維持するため軸方向への動きが可能な構造となっており、回転環のスムーズな軸方向への動きを得るためには、回転環と軸との間に適当なすき間が必要であるが、このすき間が必要以上に大きすぎると、第3図に示すようにOリングがこのすき間部へ入り込み、かみ込み現象を起こし回転環の軸方向作動不良の原因となる。従ってこのすき間はOリングがはみ出さないものでなければならない。

第4図にOリングのはみ出しに対するクリアランスの限界値を示す。これによると圧力が高くなるに従ってすき間を小さくしなければならないが、回転環の構造上必要以上に小さくする事が出来ない。したがって高圧用には、Oリング硬度を上げたり、バックアップリングを使用する等の方法を取り、軸とのすき間を確保する。尚バックアップリング材質は熱変形の大きい樹脂よりも金属の方がよい。

3. 構造

ダブルメカニカルシールの場合、缶内側及大気側シール共シール液圧による外圧を受ける。回転環、固定環共この外圧の影響で摺動面は第5図に示すように通常は外周寄り傾向となる。この状態で運転すると、摺動面部の油膜が形成されにくくなるため、異常摩耗、焼付等の原因となりやすい。特に固定環にカーボンを使用する場合は、カーボンの弾性係数は金属の $\frac{1}{10}$ 程度であるため、圧力によって生じる歪防止対策の考慮が必要である。

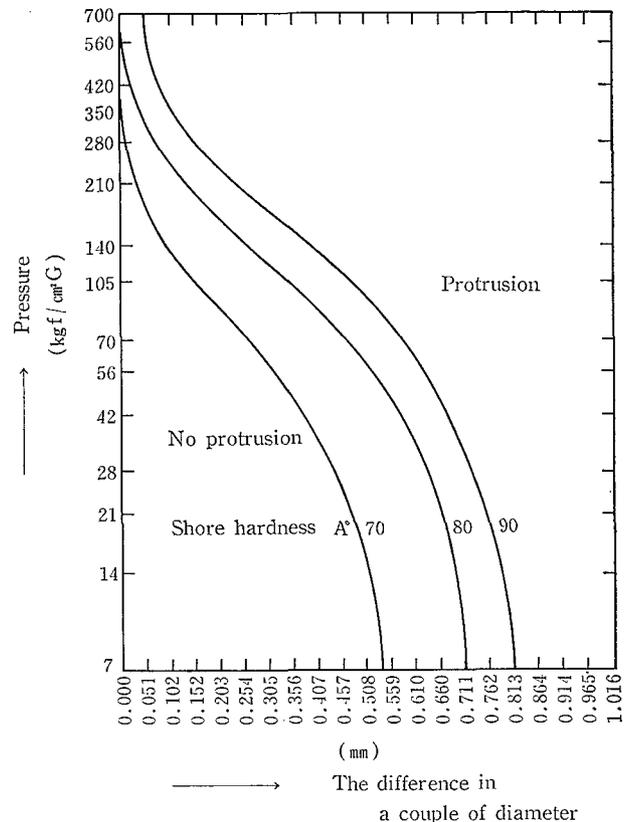


第3図 Oリングのはみ出し
Fig. 3 Protrusion of O-ring

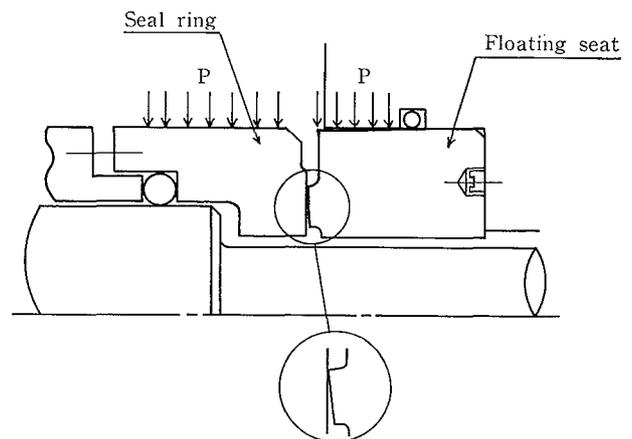
高圧用の場合はこの歪を最小限におさえるよう形状、大きさ、Oリングの取付位置等に特に注意が払われている。

第6図に形状による耐圧の差を示すが、その中でも特にOリング取付位置の影響が大きく、外圧による受圧面積をより小さくするため、Oリングを摺動面近くに取り付ける事が、歪防止に対して効果がある。

又、固定環は特殊形状のものを除いて、シート受座に固定され、その背面はシート受座に密着している。このため固定環の背面及びこれが当るシート受座フランジ部の仕上精度が重要なポイントとなり、面状態が悪ければ、その影響が即摺動面に波及する。納入時、両者の面状態が完全



第4図 Oリングのはみ出しに対するすき間の限界値
Fig. 4 Limit of clearance for protruded O-ring



第5図 圧力による摺動面の歪
Fig. 5 Deformation of sealing face due to pressure difference

Factor	Material thickness	Position of O-ring	Shape of sealing face	Flange size
Shape easy to deform				
Shape hard to deform				

第6図 形状による耐圧の差
Fig. 6 Shape factors affecting on pressure resistance of floating seat

で問題なく運転されていたものが、定期点検で、新品のメカニカルシールと組み替えたが、面の調整、仕上げが不十分であったり、行われていなかったことによる密着不良が原因でのトラブルの例もある。したがって、定期点検等でメカニカルシールを取り替えた時には、両者の面の調整、仕上げが確実にされている事の確認が必要である。

4. シール液

ダブルメカニカルシールの摺動部発熱の除去と潤滑及び圧力保持を目的として、シール箱内にシール液が供給される。供給方法には、加圧筒による封入式とプレッシャーユニットによる強制循環方式とがあるが、高圧用の場合は、摺動面圧が高く発熱量が大きいため、冷却能力の高い、プレッシャーユニットでの強制循環方式を用いる。

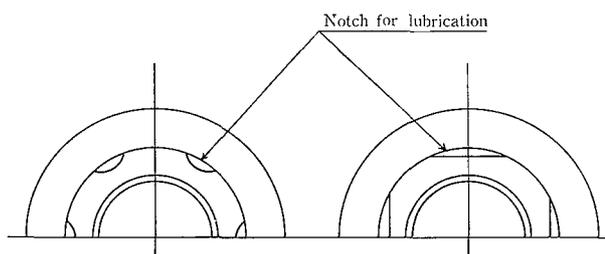
シール液には潤滑性のよい油 (ISO. VG 32 ~ 68 相当) がよく使用されるが、他に共液、水、溶剤、グリセリン、流動パラフィン等が使われることもある。

このシール液の選定に際しては、潤滑性が良い事はいうまでもないが、槽内液 (ガス) と反応し熱を発生したり、腐食性が增大したり、固形物が生成されたり、あるいは摺動面での粘度が高くなったりしないものであることと、槽内液体へのわずかな混入が許容されるものでなければならない。又、最近、共液、溶剤等特殊な液をシール液として使用するケースが増加しているが、上述の検討はもとより、その液のシール液としての摺動特性についても、テストを行う等によって把握しておく必要がある。

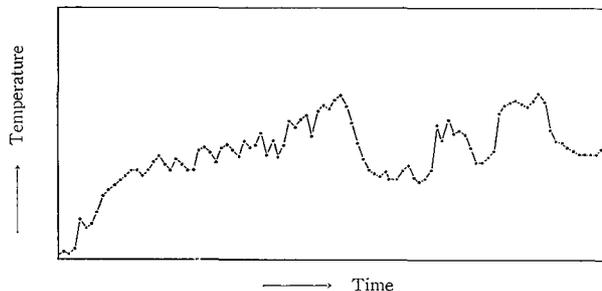
高圧用の場合は特にシール液の粘度及び温度管理も重要である。粘度が高すぎると、面圧が高いために摺動部へシール液が入りにくく、そのため潤滑性が悪くなり、異常発熱、摩耗、熱割れ等の原因となる。従って粘度の管理は、タービン油の場合、低圧用で使用する粘度より、250~300 Cst 低くする必要がある。又第7図に示すように、摺動面に潤滑溝を設け摺動部の回転を利用して、シール液を強制的に摺動端面部へ導入させるハイドロダイナミックシールも高圧用にはよく使用される。

シール液温度は、密封状態の完全さと耐久を維持し、熱歪はもちろん熱膨張による嵌合部及び回転環と軸とのすき間の変化を出来るだけ小さくする意味でも極低い値に保つ様にした方がよい。

この温度管理の上限値は、油のような高沸点液では 60°C、溶剤・水等沸点の低い液では大気圧下での沸点より30



第7図 ハイドロダイナミックシール
Fig. 7 Hydrodynamic seal



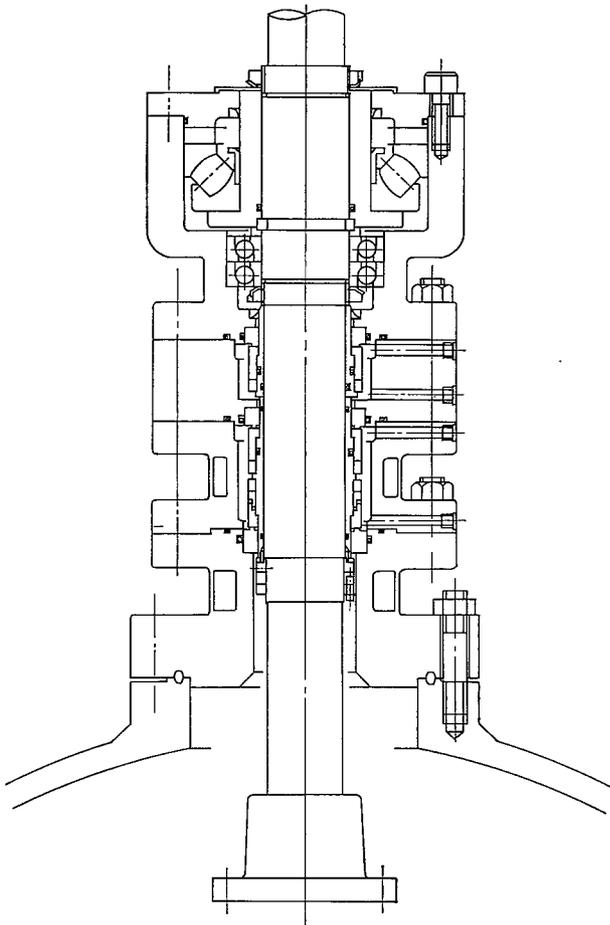
第8図 立上り時の摺動面近傍温度
Fig. 8 Temperature under the sealing face at start up

~40°C 低い温度で管理するようにする。又、シール液の循環流量の決定は、シール箱のシール液出入口部との温度差を油の場合10°C、水の場合3°C程度として計画する。

5. ならし運転及び再起動運転

高圧シールでしばしば問題となるものに、運転開始前のならし運転によるトラブルがあり、ならし運転の良否が、メカニカルシールの性能、寿命に大きく影響している。

このならし運転の必要性は、メカニカルシールの構造的な面と、摺動材のなじみとからきている。第8図に立上り時の摺動面近傍温度を測定した一例を示すが、定常状態では摺動面温度は、ほぼ一定値になるが、立上り時は図の如く非常にバラツキが目立ち不安定である。このような状態の時に急激な圧力、回転数の増加を行うと、洩れ、焼付き、熱割れの原因となり易い。ならし運転は、摺動面をなじませ理想的な摺動状態が得られる様に行うためのものであり、その方法は、シール液圧を一度に設定値まで昇圧させず、低圧 (5 kgf/cm²G 程度) から段階的に時間をかけ昇圧させ、変速が可能な場合は最低回転数からスタートさせる。又シール液の温度コントロールも必要であり、特に冬



第9図 3段シール
Fig. 9 Triple mechanical seal

場では、シール液温度が下がり粘度が高くなっているの
で、運転前に所定の粘度となるよう加温する方がよい。

又、バッチ運転等で運転を停止後長時間経過したのち再
起動させる場合があるが、このような場合でも運転停止時
間により適当な、ならし運転が必要である。

再起動時のならし運転は、シール液の種類、圧力等によ
って異なるが、一般的に24時間以内の停止であれば、ならし
運転は新しく組み込んだ場合に行うステップ的なならし
運転を省略してもよいが手廻しで数回廻した後再起動を行
う。停止時間が30日を超えた場合は前述と同要領のならし
運転が必要である。

む す び

以上高圧シールに関するごく一部を述べたが、当社 200
kgf/cm²G 回転テストでは、ダブル型シールで、洩れ、摩
耗、摺動面近傍温度、摺動特性等、満足のいく結果が得ら
れており、この圧力クラスまでは、ダブルメカニカルシ
ールの使用が可能であると判断している。又これ以上の圧力
範囲では、第9図に示す3段シールタイプを採用すること
になるが、プレッシャーユニットの圧力コントロールが複
雑であるため、現在は槽内圧力と連動させ自動制御出来る
プレッシャーユニットを開発し試作中である。

〔参考文献〕

- 鷺田：新メカニカルシール 日刊工業新聞社
- E. マイヤー：メカニカルシール 科学新聞社
- 宗：シールのごくい 技術評論社
- 川口ほか：メンテナンス (July 1984)
- 大越：潤滑 24.5 (1979) P25
- 藤田：潤滑 24.5 (1979) P31.32
- 古賀：潤滑 27.11 (1982) P42