

# 燃料プールの水漏れ緊急対応措置

## 1. はじめに

当社は過去から、原子力発電所の重大事故時を想定した環境に耐え得るシール材の検討、提案を行ってきた。メタルシール材を含めた無機シール材はもちろんのこと、耐放射線性に優れたエラストマー材料や、各種評価手法の提案などを行うことで、それぞれのシール部位の問題点を解決し、健全性を高めてきた。しかしながら今回、材料という点ではなく、シール製品の形状設計という観点から、実際に優れた機能を実現させることが出来たため、本報にて報告する。

原子力発電所には、使用済燃料を安全に貯蔵・冷却するために燃料プールを設置している。燃料プールでの想定事故を考えた場合、燃料プールの冷却機能、または注水機能の喪失などにより水位が低下することがある。その中で、燃料プールが損傷し水位の維持が出来なくなった場合、速やかに燃料プールの損傷箇所(燃料プール壁面などの亀裂)からの漏水を緩和させることが必要であり、その手法の一つとして金属鋼板の周囲にパッキンを取り付けた止水版を損傷箇所に接触させる手段が考えられる(Figure1)。この手法は、シール機能が容易に実現する場合、非常に有効な手法であるが、実際は簡単なものではない。理由として、シール材に与えられる荷重が、燃料プールの静水頭の低圧力しか存在しないため、Oリング形状のシール材では、シールに必要な圧縮面圧が確保出来ないため、確実に漏水を緩和させることが出来るとは言い難い。つまり、この手法を現実のものとするためには、低圧力下においても非常に鋭敏に変形するシール製品を準備する必要がある。材料自体が低圧力でよく変形させるために、低応力の材料を用いることも検討する必要があるが、それだけでは不十分である。

本検討において、上記シール製品の特性を満足させるためには、低応力材料の選定とシール材の形状設計が必須であり、当社形状設計技術により完成させることが可能となった。

今回、当該シール製品が、低圧力下において鋭敏に変形

出来る機構を、開発プロセス含め報告する。

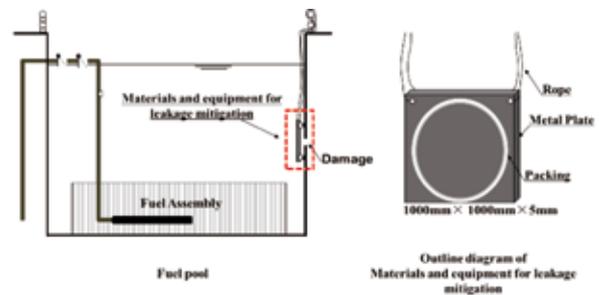


Figure1 燃料プールからの漏洩を軽減するための設備

## 2. シール材料

重大事故時の燃料プールの環境条件は、水温100℃に到達し放射線による線量は0.71MGyとなる。

今回使用するこれらの環境条件を考慮し、Table1に示すEPDM50度品、60度品、70度品の3種類からFEAを行い、最適な材料を選定した。

Table1 候補材料物性値

材料	硬さ (ShoreA)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	100%引張応力 (MPa)
H3070	72	17.9	170	7.5
H0160	64	13.2	260	2.7
H0150	49	10.7	535	1.1

## 3. シール材装着溝

今回検討する手段では、燃料プール上方からシール材を装着したパネルのようなものをプール内に降下させ、水漏れが発生している穴(傷)部分をそのパネルに付いたシール材で漏水を緩和しなければならない。そのためにはまず、パネルを立てた状態で燃料プール中を移動し漏洩部に達し、漏洩部壁に接触するまでパネルからシール材が脱落しないよう

工夫する必要があった。通常シール材装着は矩形の溝に装着することが多いが、今回の場合矩形の溝では、シール材の脱落が懸念される、そこでシール材の脱落を防ぐことが可能なアリ溝を選定した(Figure2)。

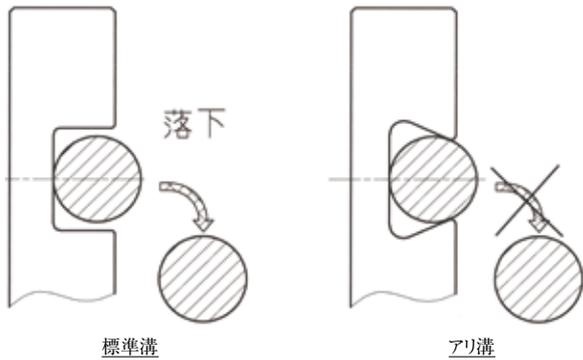


Figure2 パッキン装着溝

シール材用溝としてアリ溝は規格化されていないが、当社ではアリ溝を脱落防止用としてよく使用しており、当社での過去実績と経験から寸法と形状を決定した。

#### 4. パッキン形状

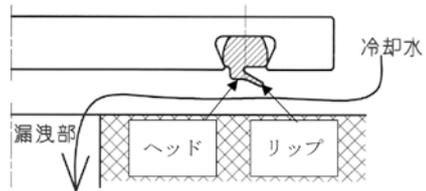
シール材形状については、各種規格化されていて種類も多く、比較的成本の安いOリングが使用されることが多い。Oリングは荷重を負荷し圧縮することで気密性を発揮するタイプのシール材であるが、今回の使用方法では、シール材を圧縮止水性能を発揮させるための荷重を期待出来ない。低い荷重でも止水性能を発揮可能な形状とする必要があることから、リップタイプのパッキンとした。

まずは形状の案だしをしたのち、形状と材料硬度違いでの机上検証(FEA)を行った結果をTable2～5に示す。

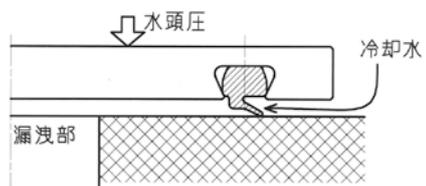
Table2 FEA解析データ

項目	隙間距離 (mm)		圧縮量 (mm)		
	無負荷	水頭圧負荷時			
材料記号	装着時	常温	100℃	常温	100℃
H3070	3.8	3.49	3.71	0.31	0.09
H0160		3.10	3.38	0.70	0.42
H0150		2.37	2.59	1.43	1.21

① 冷却水が漏水している状況



② パッキンのリップが壁面に接し水頭圧でパッキンを押し漏水停止



③ 漏水停止すると水頭圧+差圧によりパッキンを押し付けることでシール性は更に向上

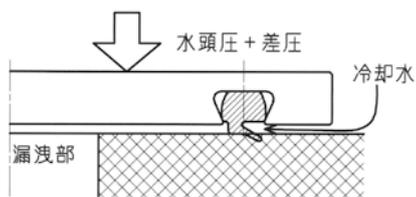


Figure3 パッキンコンセプト

Table3 装着状態FEA結果

溝にパッキンを装着した状態		
H0150	H0160	H3070

Table4 水頭圧負荷(常温)状態FEA結果

常温で水頭圧負荷した状態		
H0150	H0160	H3070

Table5 水頭圧負荷(100℃)状態FEA結果

100℃で水頭圧負荷した状態		
H0150	H0160	H3070

FEAの結果、材料硬度は水頭圧レベルでの低荷重でも鋭敏に変形し、漏水を緩和出来そうなゴム硬度50度品で決定した。

リップ形状は、低圧(低荷重)時はリップ部分で止水させ、止水性能と漏水によってシール内部が負圧になると、更にパッキンが圧縮されてリップの次にリップ根本のヘッド部に当たる。これにより、シールが圧縮されて変形することを防止するとともに、ヘッド部も圧縮されることで、更なる止水性能を向上させることが可能になる(Figure3)。

各材料硬度に対する評価は次のようになる。

- ・H3070：常態物性において、全材料中最も100%引張応力が高い。引張強さは全試料中最も大きく、破断伸びは最も小さい。

当該材料によるFEAを実施した場合、水頭圧負荷時の圧力差での圧縮量は、全試料中最も小さい。100%引張応力が全試料中最も大きいことが明確であるため、同荷重負荷時にH0150より圧縮量が大きくなることは考えにくい。そのため、H3070による実機模擬評価は不要と判断した。

- ・H0160：常態物性において、全材料中二番目に100%引張応力が低い。引張強さは全試料中二番目に低いが、破断伸びも二番目に大きい。当該材料によるFEAを実施した場合、水頭圧負荷時の圧力差での圧縮量は、全試料中H0150に次いで二番目に大きい。100%引張応力がH0150より大きいことが明確であるため、同荷重負荷時にH0150より圧縮量が大きくなることは考えにくい。そのため、H0160による実機模擬評価は不要と判断した。

- ・H0150：常態物性において、全材料中最も100%引張応力が低い。引張強さは全試料中最も低いが、破断伸びは最も大きい。

当該材料によるFEAを実施した場合、水頭圧負荷時の圧力差での圧縮量は最も大きい。これは明らかに、100%引張応力が小さいことが原因と考えられる。また、次点のH0160対比で常温では約2倍、100℃では約三倍の圧縮量が期待される。このことから、低荷重に対し最も鋭敏な反応が可能と考えられるため、当該材料を実機模擬試験に使用することとした。

## 5. 検証試験

机上検証で決定した形状と材料で要求性能を満足出来るかどうかを確認するために、実機よりも小さいスケールの実機模擬試験装置で止水性能を確認した。

実機と同じサイズでベンチ試験することは、スペース的に無理があるため小型の模擬評価装置を製作し、評価を行うこととした。装置に装着するパッキンは、断面形状が実機と同じ形状・寸法で、周長のみ小型試験装置に合わせた寸法とした。なお、試験方法としては、実機を想定した縦型のシール試験が好ましいが、低圧力においてリップ部の有効性を確認するため下向きでの試験とした。

### 5-1) 試験方法

次の試験方法に従い、選定したリップパッキンの止水性能を確認した。

- ・サイズは約300mm×300mm×30mmで、シールの挙動が分かりやすくするために透明容器を作成し、底部中央に破損を想定した穴(損傷模擬孔)をあけ、止水と排水を行うためのバルブを設け、透明容器に所定量の水を張る(Figure4,5)。
- ・アリ溝を切った試験片にリップパッキンを装着する(Figure6,7)。

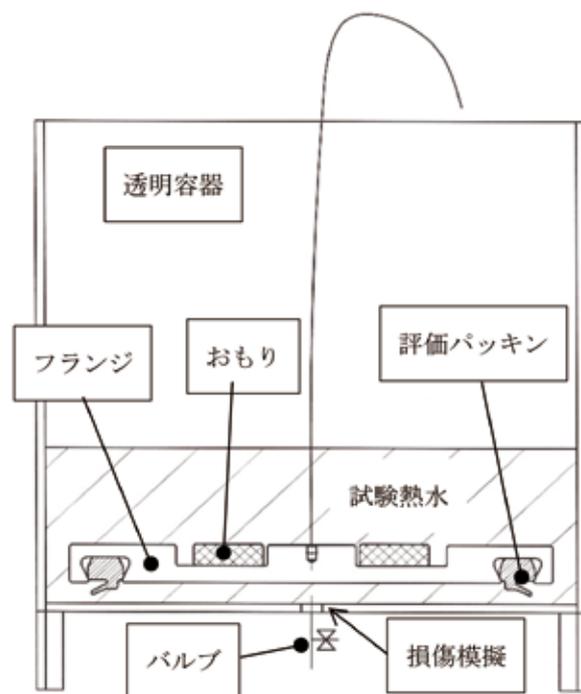


Figure4 評価用装置イメージ図

- ・試験片のパッキン面を下向きにして水を張った透明容器に試験片を沈める。実機荷重を想定した試験片自重により底部からの漏洩を封止する。
- ・透明容器下部バルブからの漏洩の有無を目視により確認する(Figure8)。

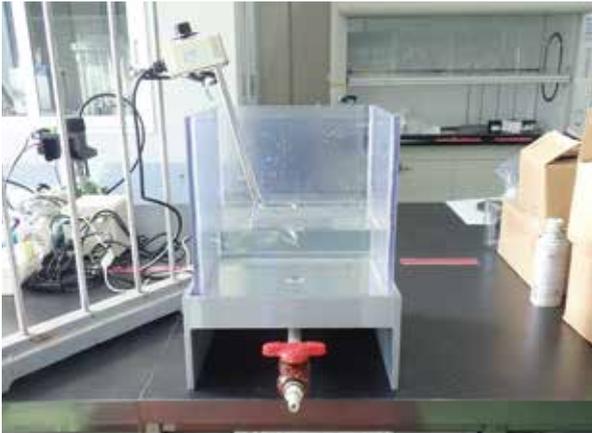


Figure5 試験容器外観



Figure6 パッキン装着外観



Figure7 パッキンリップ部外観

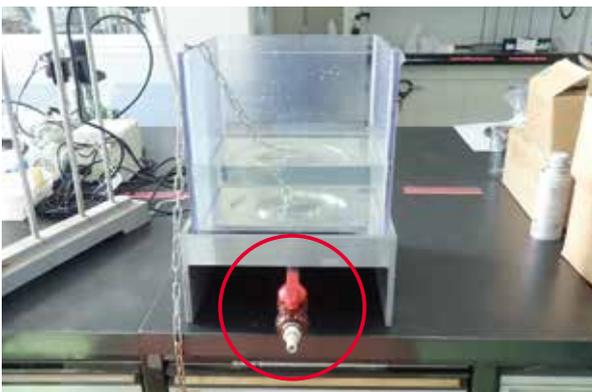


Figure8 試験容器バルブ解放状態(漏れなし)

## 5-2) 評価結果

試験は、 $90 \pm 10^\circ\text{C}$ 熱水中、パッキンへ実機を想定した自重を負荷、これら環境での止水性試験において、試行数3回行い漏洩は確認されなかった(Table6)。

Table6 テスト結果

No.	荷重 [N]	水温 [ $^\circ\text{C}$ ]	評価時間 [min]	結果
1	15.7	$90 \pm 10$	10	漏れなし
2				
3				

試験では、容器下部漏洩箇所へ徐々にフランジを低下させると、試験片を容器下部へ接触する前にパッキンのリップ部が容器底面へ吸い付くように密着し瞬間的に漏洩が停止した。また、密着したフランジ部を取外す際には、試験片に装着したリップパッキンと容器底部が真空吸着のような状況となり、容易に取り外せなかったため、非常に強いシール性を有していると考えられる。

## 6. まとめ

### 6-1) FEAによる形状および材質の検討

形状に関しては、水頭圧でシールする必要があり、静水頭圧以下の低圧縮荷重でシール材が鋭敏にたわむ必要がある。そのため、FEAの検討形状案の通り、リップパッキン形状にすることで、低圧縮荷重であっても容易にたわむことが可能であることが確認出来た。

### 6-2) 実機模擬フランジによる止水性能確認

実機を模擬したフランジ及びパッキンを製作し、静水頭圧以下の荷重で、 $90^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 熱水環境下での止水可否確認を行った。パッキンを取り付けたフランジをライニング損傷模擬した穴に近づけたところ、低荷重で容易に変形することが確認され、評価容器下部に設置後、数秒で漏洩は完全に遮断された。N=3で実施したが全て同様の結果であり、再現性が確認された。

上記結果より、低荷重でも容易に変形し、かつ完全にシール漏洩を防ぐことが出来ることから、当該検討形状案が実機環境でもシールすることが可能と考えられる。

評価パッキン寸法は、断面寸法が実機と同じで、周長のみ異なることから、大きな差がある状態ではないため、そのまま周長を伸長させれば、比較的容易に実用化することが可能と考えられる。

いじわるテストとして、おもりを取り外し、かつ液面を低下させた状態で、同様にシールが可能であるかを確認した。

結果として、正規試験のような極短時間でシールが確保出来るわけではないものの、時間経過とともに漏洩量が低下し、最終的に漏洩は止まり、以後安定したシール性を確保出来たと考えられる。また、パッキンを外してフランジのみでシール出来るかどうか合わせて確認したが、漏洩量の多少の低下は確認されたものの、完全には止まらず、パッキンの有効性が改めて確認出来た。

## 7. おわりに

環境対策として、地球規模でのカーボンニュートラルへの取り組みが行われる中、温室効果ガスを排出しないエネル

ギーである原子力発電所の再稼働も進みつつある。

我々シールメーカーは、機器や設備用のシール材だけでなく、異常時や災害などリスクヘッジに対応するためのシール材開発も含めて、安定した供給体制へ取り組み、また、環境負荷を低減した製品開発を進めていく所存である。

## 8. 参考文献

- 1) 日本保全学会 第20回学術講演会 2024年、浜岡原子力発電所における燃料プール損傷時対策の検討
- 2) 鈴木 憲、バルカー技術誌、No.30、14-19、(2016)
- 3) 鈴木 憲、南 暢、須川修司、バルカー技術誌、No45、18-24、(2023)



鈴木 憲

H&S事業本部  
商品開発部  
エラストマー開発チーム



南 暢

H&S事業本部  
商品開発部  
エラストマー開発チーム

今井 富康 中部電力株式会社  
八賀 敦規 中部電力株式会社  
三須 一輝 中部電力株式会社