

原子力向け製品ラインアップ

1. はじめに

2020年10月に政府より宣言¹⁾された2050年カーボンニュートラル実現に向けた取り組みとして、温室効果ガスの排出抑制が重要である。特に2021年4月に表明された『2030年度の温室効果ガス排出46%削減(2013年度比)』を実現するためには、これらの目標に配慮したエネルギーミックス²⁾が行われる必要がある。今後、化石燃料依存からの脱却を進めるにあたり、再生可能エネルギーが重要視されるのはもちろんであるが、真のエネルギーミックスを考えれば、決してコストという点を無視するわけにはいかない。これらの点をカバーし得るエネルギーとして期待されているのが、CO₂排出が限りなく低く、発電コストが比較的安いと考えられている原子力発電である。安全性の観点から、慎重に慎重を重ねた上で運用されることが前提ではあるが、日本政府の2030年度エネルギーミックス目標値として、原子力比率が20～22% (2019年度比率は約6%)まで引き上げられていることから、その期待が感じられる。

当社としても、過去から、原子力設備の安全性向上のため、重大事故時のシール健全性改善取り組みを進めており、使用環境に適した実績材料の提案や、新規材料の開発、及び、形状提案などを常に行っている。本報では、材料面、形状面などの複数の点から、原子力用途で推奨され得る製品を紹介する。

2. エラストマー材料の提案

原子力用材料として使用する場合、重大事故時の環境³⁾を想定するのであれば、200℃の高温蒸気や、数百kGyの高放射線量が重畳することが想定される。また、使用部位によっては、高温蒸気に曝される可能性はあるものの、放射線量が重大事故時より低い部位も想定されるため、環境に適した材料提案が必要と考えられる。このことから以下の材料の紹介を行う。

2-1) 改良EPDM H3070及びH0880

当該改良EPDMはバルカーテクノロジーニュースNo.30⁴⁾、No.34にて紹介している。優れた耐放射線性と、耐高温蒸気性を特徴としており、一般のEPDMとは一線を画している。そのため、使用環境においては精査する必要はあるものの、原子力設備のシール材として使用出来る範囲は広いと考えられ、優れたユーティリティ性を有している。また、様々な断面形状や、大口径品の製作も可能であり、既設シール材にて問題が生じているのであれば、改良EPDMは問題解決につながる糸口になり得る製品と考えている。

2-2) TOUGHUORO[®] シリーズ

改良EPDM程の耐放射線性を有していないが、高温の耐蒸気性や、各種耐薬品性は、むしろTOUGHUORO[®]シリーズの方が優れていると考えられる。材質としてはFEPMであり、ふっ素ゴムの一種であるが、EPDMに近い構造を有している。この構造により、ふっ素ゴムでは使用困難な高温蒸気や、無機酸、無機アルカリに対しての使用が可能であり、また、EPDMでは使用困難な乾熱環境での高温使用が可能となる材料となっている。

TOUGHUORO[®]シリーズ(SS70:JISタイプA硬度70度品)と標準FKMとの耐蒸気性の差異を確認するため、当社FKM-70品(JISB2401-1 従来の識別記号4種D)との各種環境下での比較を行った。

乾熱200℃中圧縮永久ひずみグラフをFigure1、飽和蒸気200℃中圧縮永久ひずみグラフをFigure2に示す。

圧縮永久ひずみ率は、エラストマー材料の耐熱性を判断する指標の一つであり、実際の使用状態を模擬した試験方法である。試験方法としては、試料を所定の圧縮率まで潰し、その圧縮率のまま、試験環境内(実機を想定した高温乾熱や蒸気環境など)で所定時間保持する。試験環境から取出し後、圧縮を開放し、試験試料の復元性を確認することで、その環境に対する耐性を確認する手法である。評価として、圧縮永久ひずみ率が0%に近いほど、劣化が少ない健全な状態であり、逆に100%に近くなるほど、劣化が進行し、

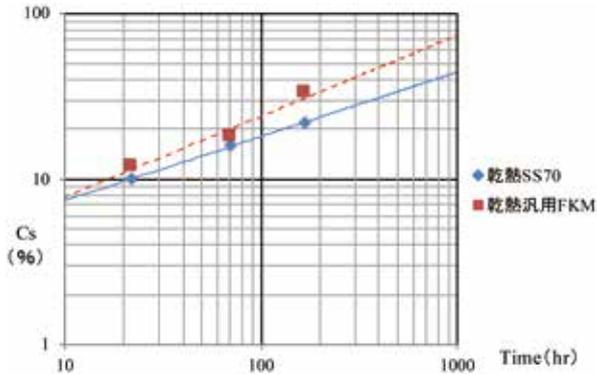


Figure1 乾熱200°C中圧縮永久ひずみグラフ

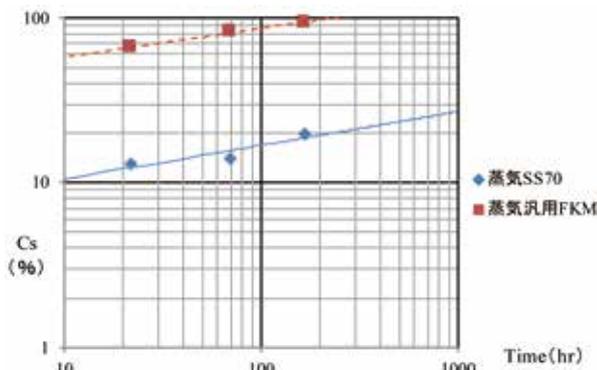


Figure2 飽和蒸気200°C中圧縮永久ひずみグラフ

シール限界に近づいていると判断する。グラフの見方としては、近似曲線が下側にあり、かつ傾きが小さくなるほど、その試験環境における耐性が強いと判断出来る。

圧縮永久ひずみ率の測定、及び算出方法をFigure3に示す。Figure1のグラフより、乾熱200°C環境では、SS70と汎用

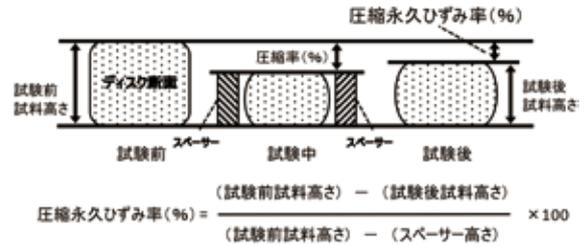


Figure3 圧縮永久ひずみ率の測定、及び算出方法

FKMには大きな差異は確認されず、むしろ、SS70の方が僅かながら耐熱性に優れているように見える。Figure2のグラフより、飽和蒸気200°C環境では、汎用FKMが加水分解と考えられる大幅な変形を生じているのに対し、SS70では、近似曲線の傾きが小さく、当該環境では長期使用が可能と予測される。また、SS70の近似曲線の傾きは、乾熱、飽和蒸気共に近似している。このことから、TOUGHUORO® シリーズは暴露環境違いによる寿命への影響は非常に少ないことが確認出来る。

上記結果から、放射線量がない、もしくは低線量環境において、200°C近傍の乾熱、蒸気などの環境が長期間連続して続くのであれば、改良EPDMより、TOUGHUORO® シリーズを使用したほうが、設備自体の健全性を向上させることも可能ではないかと考えられる。形状に関しても、改良EPDM同様に、様々な断面形状、大口径品の製作が可能であるため、改良EPDMとの併用により、原子炉設備の広い範囲の網羅が可能と考えられる。

TOUGHUORO® シリーズバリエーション及び、乾熱、蒸気環境での老化試験データをTable1に示す。

Table1 TOUGHUORO® シリーズバリエーション

| Material name | Steam-resistant TOUGHUORO® - SS series | | | Low compression set TOUGHUORO® ZS series |
|---------------------------------------|---|------|------|--|
| | SS70 | SS80 | SS90 | ZS80 |
| Physical properties | | | | |
| Hardness (ShoreA) | 74 | 84 | 90 | 85 |
| Tensile strength (MPa) | 23.1 | 24.6 | 22.8 | 24.3 |
| Elongation (%) | 190 | 150 | 110 | 120 |
| 100% Modulus (MPa) | 8.3 | 15.2 | 20.9 | 19.9 |
| Aging test in air 200°C×168h | | | | |
| Hardness change (ShoreA) | ±0 | +1 | -1 | -1 |
| Tensile strength change (%) | -3 | -7 | -8 | -7 |
| Elongation change (%) | -5 | -7 | -5 | -4 |
| Aging test in steam 200°C×168h | | | | |
| Hardness change (ShoreA) | +1 | ±0 | -1 | -1 |
| Tensile strength change (%) | -23 | -19 | -14 | -14 |
| Elongation change (%) | +8 | +19 | +27 | +13 |
| Volume change (%) | +1 | +1 | +1 | +1 |

TOUGHUORO® シリーズはTable1の通り、耐高温蒸気用のSSシリーズがJISタイプA 硬度70度、80度、90度品の3種類と、SSシリーズの圧縮永久ひずみ性を、更に改善したZS80度品の計4種類のバリエーションを用意している。

3. エラストマーシール

3-1) シール形状

当社として、ガスケット用途(固定用)、パッキン用途(運動用)として様々な製品をラインアップしており、各種機器取り付け部やご使用条件に合わせた特注品についても対応可能である。固定用はフランジ溝に装着後、圧縮変形状態を考慮した形状とすることが望ましい。運動用は機器に要求される特性(低摺動、耐圧性など)を確保しつつ、劣化についても考慮された形状とすることが望ましい。

シール形状により期待される特性が大きく変わるため、以下に形状ごとの特徴を記載する。シール形状の一覧をTable2に示す。

3-2) 特徴

- ・Oリング: シールの中で最も汎用性が高く、各種規格品がラインアップされており、コストも安く使い勝手が良い。固定用、運動用両方に使用可能である。

| | |
|----------|-----------------------|
| 標準ラインアップ | JIS規格品、ISO規格品、JASO規格品 |
| 製作可能寸法 | 小口径品～大口径品まで対応可 |

- ・角リング: 比較的汎用的に使用が出来る、装着溝内で転動やねじれが発生しないため、Oリングで転動やねじれが発生した場合に使用される。

| | |
|----------|----------------|
| 標準ラインアップ | 標準品の設定はなし |
| 製作可能寸法 | 小口径品～大口径品まで対応可 |

- ・甲丸シール: 装着溝内で転動やねじれが発生せず、シール面との接触側はOリングのようにR形状にしたシールである。

| | |
|----------|----------------|
| 標準ラインアップ | 標準品の設定はなし |
| 製作可能寸法 | 小口径品～大口径品まで対応可 |

- ・横Uガスケット: フランジ面にうねり・歪みがある場合や強度の弱いフランジ(樹脂製など)に使用出来る、自緊式シールのため低締付力で使用出来る。非加圧側にスペーサーリングを設けることで耐圧性を持たせることが可能である。

| | |
|----------|-------------------------|
| 標準ラインアップ | 標準品の設定はなし |
| 製作可能寸法 | 小口径品～大口径品、楕円、額縁タイプまで対応可 |

横Uガスケットシール方法をFigure4に示す。

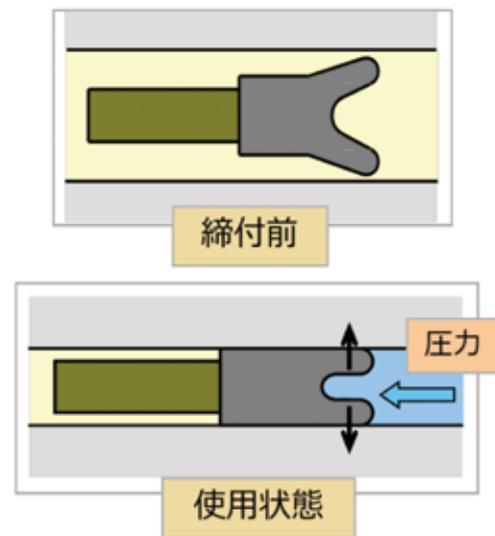


Figure4 横Uガスケットシール方法

Table2 シール形状の一覧

| 用途 | 固定用 | | | | | | 運動用 | | |
|-------------------|----------|------|----|--------|-------------------------------|---|----------|------|--------|
| | 形状 | | | | | | | | |
| 名称 | Oリング | 角リング | 甲丸 | 横U | インフラートシール 反転タイプ 膨張タイプ | | Oリング | Xリング | Uパッキン |
| コスト ^{※1} | 低 | 低 | 低 | 中 | 高 | 高 | 低 | 低～中 | 低～中 |
| タイプ | スクイーズタイプ | | | リップタイプ | 中空タイプ | | スクイーズタイプ | | リップタイプ |

注) ※1 イメージ感を示す。

- ・インフラートシール⁵⁾: 中空構造をしており、中空部を空気で加圧させることで膨張させシール相手面に接触してシールするタイプ。反転タイプと膨張タイプがある。

| | |
|----------|------------------------------------|
| 標準ラインアップ | 反転タイプ: 断面寸法4サイズ 膨張タイプ: 断面寸法3サイズ |
| 製作可能寸法 | 小口径品～大口径品、額縁型など対応可 |

反転タイプシール方法をFigure5に示す。
膨張タイプシール方法をFigure6に示す。



Figure5 反転タイプシール方法

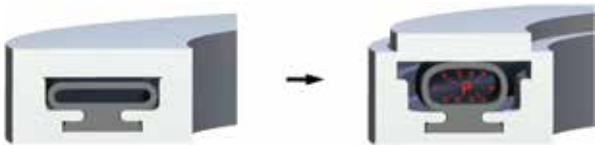


Figure6 膨張タイプシール方法

- ・Xリング: 運動用シールでシール接触部のくぼみに潤滑剤を保持することで、低摺動で使用が出来る、長時間の潤滑効果が得られる。

| | |
|----------|----------------|
| 標準ラインアップ | 軸径φ7～φ100 |
| 製作可能寸法 | 小口径品～大口径品まで対応可 |

Xリング組付け状態をFigure7に示す。

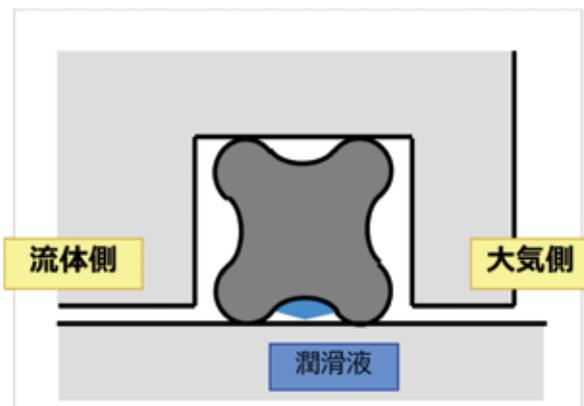


Figure7 Xリング組付け状態

- ・Uパッキン: 運動用シールで、低摺動で使用することが可能である。ロッド用、ピストン用、ロッド・ピストン兼用タイプがあり、フルードパワーを用いた機器で良く使われている。

| | |
|----------|--|
| 標準ラインアップ | ロッド用、ピストン用、ロッド・ピストン兼用、大断面タイプ、小断面タイプ、空気圧用 |
| 製作可能寸法 | 小口径品～大口径品まで対応可 |

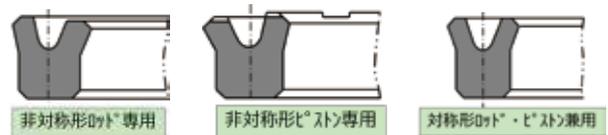


Figure8 Uパッキンの種類

4. グランドパッキン

4-1) 制御弁用グランドパッキン⁶⁾

原子力用の弁としては、大きく分類するとON-OFF弁と制御弁の2種類がある。ON-OFF弁は弁開度を全開または全閉で使用される場合が主であり、常時作動しない。これに対し制御弁は弁の開度により、流量や圧力を調整するため、常時作動する弁となる。

代表的な弁の構造とグランド部の構造について、例として空気作動制御弁概要図をFigure9に示す。

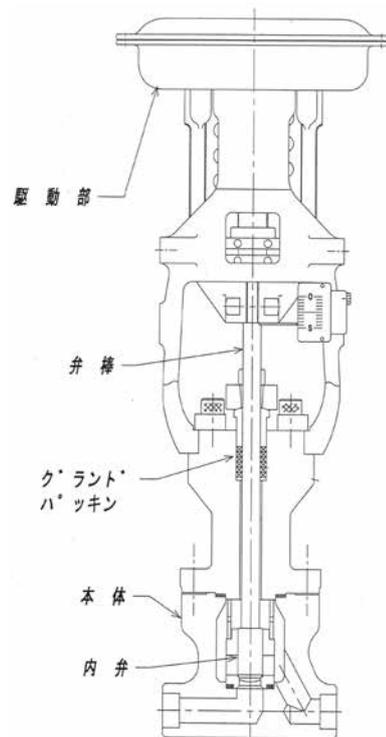


Figure9 空気作動制御弁概要図

制御弁用グラントパッキンは摺動部と、同時に漏れに対するシール部となっており、弁の制御性を考慮すると、摺動抵抗が小さく、かつ同時にシール性に優れると言う相反する機能が要求される。また、原子力用グラントパッキンは、耐放射線性、水質規制などからの不純物規制、性能安定性、耐久性など高い信頼性が要求される。

過去およそ30年前から原子力用制御弁に使用されているグラントパッキンについて、シビアアクシデントに想定される耐放射線性800kGyに対する影響の評価結果を含め、原子力用グラントパッキンNo.6399LAE（アダプターパッキン）、No.VF-20LAE（メインパッキン）について紹介する。

4-2) 材料構成

No.6399LAEは炭素繊維をPTFEディスパージョンで処理したのち断面角形に編組し、PTFE ディスパージョンと微粒黒鉛で仕上げたのち、潤滑油で処理したパッキンである。

No.6399LAEはアダプターパッキンとして使用し、構成概要図をFigure10に示す。

No.VF-20LAEはインコネルワイヤーで補強した膨張黒鉛ヤーンを断面角形に編組したのち、潤滑油で処理したパッキンである。

No.VF-20LAEメインパッキンとして使用し、構成概要図をFigure11に示す。

制御弁に使用する場合は、No.6399LAEとNo.VF-20LAEを組み合わせて使用する。グラントパッキン組み合わせ概要図の例をFigure12に示す。

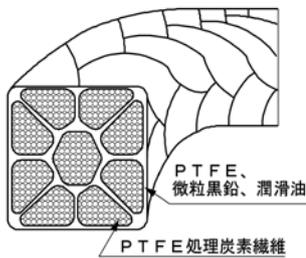


Figure10 No.6399LAE 構成概要図

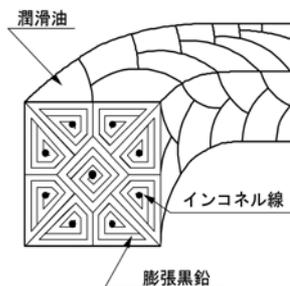


Figure11 No.VF-20LAE 構成概要図

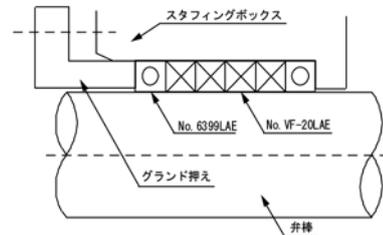


Figure12 グラントパッキン組み合わせ概要図

4-3) 特徴

- ・制御弁用グラントパッキンに必要な要素である低摺動抵抗と優れたシール性能を長期にわたり安定して発揮する。
- ・シビアアクシデントに想定される耐放射線性を有する。
- ・ハロゲンイオンや硫黄、低融点金属合金などの成分濃度を厳重に規制し、使用材料も放射線劣化を起こさないものを厳選している。

4-4) 使用範囲

No.6399LAEとNo.VF-20LAEを組み合わせた場合の、使用範囲をTable3に示す。

Table3 使用範囲

| 用途 | 制御弁・ON-OFF弁 |
|--------|-------------|
| 最高使用温度 | 363℃ |
| 最高使用圧力 | 18.9MPa |
| pH 範囲 | 0～14 |

4-5) グラントパッキンの耐放射線性

No.6399LAEとNo.VF-20LAEの放射線照射の有無による基礎特性(圧縮特性、摺動特性、シール特性)及び耐熱特性(熱減量特性)を相対比較し耐放射線性の影響を評価する。

- ・放射線照射条件：未照射、100kGy、800kGy
- ・グラントパッキン組み合わせ概要図 Figure12参照
- ・基礎特性試験治具概要図 Figure13参照
- ・耐熱特性条件：350℃

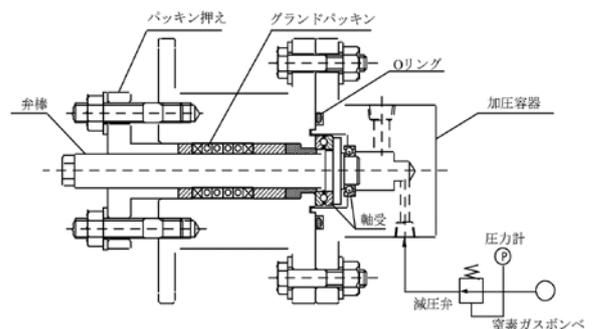


Figure13 基礎特性概要図

4-6) 耐放射線性評価結果概要

耐放射線性結果概要をTable4に示す。グランドパッキン外観をTable5に示す。

基礎特性(圧縮特性、摺動特性、シール特性)及び耐熱特性(熱減量特性)については、放射線照射の影響は認められない。

放射線照射によりNo.6399LAEの補助材であるPTFEの低分子化の影響で、編組の解れが認められ、僅かに摺動抵抗の増加が認められるが問題の無い程度である。No.6399LAEの解れは想定しており、炭素繊維に影響は及ぼさない。また、スタフイングボックス内では拘束されており、アダプターパッキンとしての機能は果たすものとする。

No.6399LAEとNo.VF-20LAEは、シビアアクシデントで想定される放射線量においても使用上問題ないものとする。

Table4 耐放射線結果概要

| 放射線量 | 基礎特性*1) | | | 耐熱特性*1) |
|--------|---------|---------|-------|---------|
| | 圧縮特性 | 摺動特性*2) | シール特性 | 熱減量特性 |
| 100kGy | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |
| 800kGy | ◎ | ○ | ◎ | ◎ |

*1) 圧縮特性、摺動特性、シール特性は組み合わせ。耐熱特性は単独。
◎：影響なし(未照射時と比較し同等)
*2) 摺動特性：μk値 ◎：0.030以下 ○：0.040以下

Table5 グランドパッキン外観

| バルカーNo. | 新品 | 未照射 熱処理後 | 100kGy 熱処理後 | 800kGy 熱処理後 |
|-------------|----|-------------|----------------|----------------|
| No.6399LAE | | | | |
| No.VF-20LAE | | | | |

4-7) 耐性確認試験評価結果

圧縮特性結果をFigure14、摺動特性結果をFigure15、シール特性結果をTable6、熱減量試験結果をFigure16、Figure17に示す。

各特性結果より、放射線照射による性能に影響する変化は軽微であり、使用上問題ないものとする。

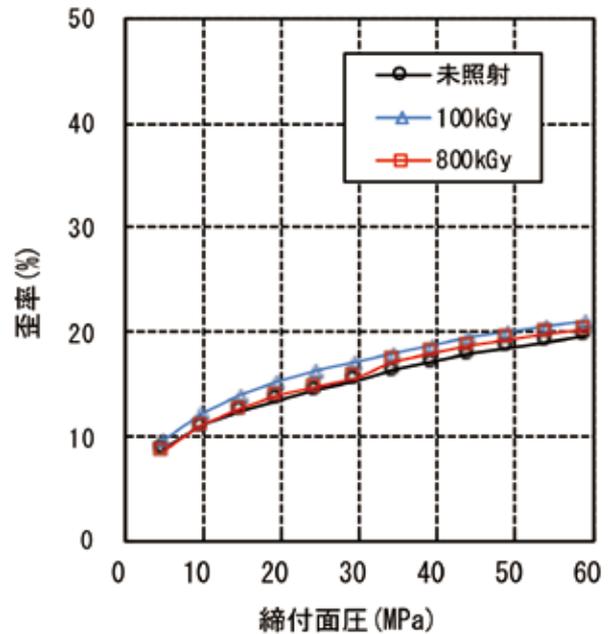


Figure14 圧縮特性結果

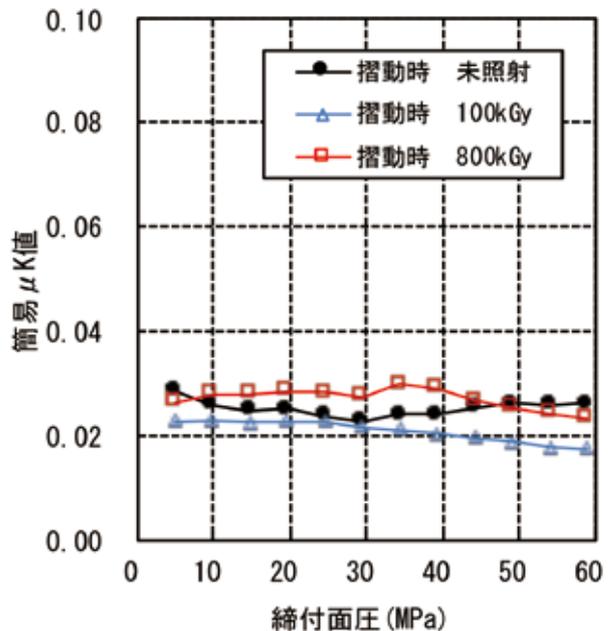


Figure15 摺動特性結果

Table6 シール特性結果

| 放射線照射量 | 内圧をシールするために必要な締付面圧 (MPa) | | |
|--------|--------------------------|-----------|-----------|
| | 1MPa | 4.9MPa | 9.8MPa |
| 未照射 | 9.8 | 14.7~19.6 | 19.6~24.5 |
| 100kGy | 9.8 | 14.7~19.6 | 19.6~24.5 |
| 800kGy | 9.8~14.7 | 24.5 | 24.5 |

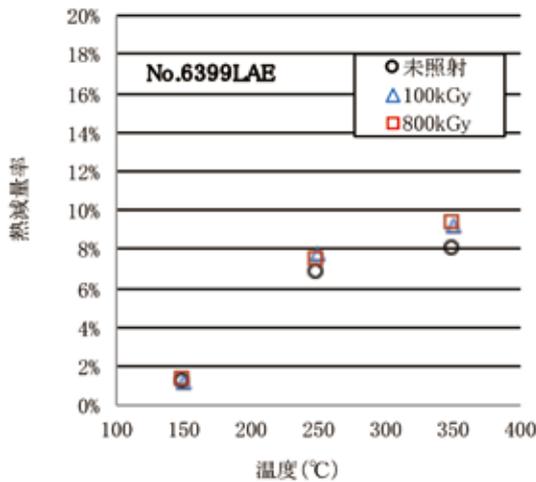


Figure16 熱減量試験結果 (No.6399LAE)

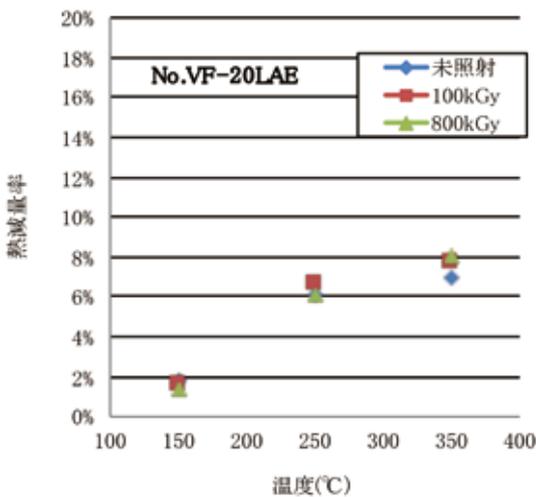


Figure17 熱減量試験結果 (No.VF-20LAE)

5. 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では、災害などリスクヘッジによる安定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。

6. 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁: 令和2年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021), 第2章 第3節『2050年カーボンニュートラルに向けた我が国の課題と取組』
- 2) 森田 一成: 朝日新聞デジタル SDGs ACTION, 『エネルギーミックスとは? 日本の2030年度目標や現状、課題を紹介』(2022.08.22)
- 3) 鈴木 憲, 松田 真一, 杉村 卓哉: バルカー技術誌. No.34, 14-18 (2018)
- 4) 鈴木 憲: バルカー技術誌. No.30, 14-19 (2016)
- 5) 上田 彰, バルカー技術誌, No.17, 8-15 (2009)
- 6) 青木 晃, 瀬戸田 末広, 安東 博, 松岡 邦彦: バルカーレビュー VOL.38 No.5, 1-8 (1994)



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



須川 修司

H&S事業本部
商品開発部
ガスケット開発チーム