

キャスク用トライパック®の経年劣化影響評価

The Evaluation for the Characteristics after Aging on the TRYPACK® for Metal Cask

研究開発部 事業部研究グループ

野々垣 肇

Hajime Nonogaki
R&D Division, R&D Group

三菱重工業株式会社 技術本部 高砂研究所

構造研究室 主査

浅田 和雄

Kazuo Asada

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Takasago Research & Development
Center Structure Laboratory assistant chief manager

基幹産業事業部 技術サービスチーム リーダー

神浦 洋文

Hirofumi Kamiura

Basic Technology Industries Group Technical service team Leader

三菱重工業株式会社 技術本部 高砂研究所

構造研究室 主任

丹 保弘

Yasuhiro Tan

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Takasago Research & Development
Center Structure Laboratory Senior Research Engineer

基幹産業事業部 プロダクトグループ

ガスケット・その他シール担当

山中 幸

Yuki Yamanaka

Basic Technology Industries Group Gasket/Other seal Product

三菱重工業株式会社 技術本部 高砂研究所

機器・自動化装置研究室 主任

赤松 哲郎

Tetsuro Akamatsu

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Takasago Research & Development
Center Machinery Laboratory Senior Research Engineer

三菱重工業株式会社 神戸造船所

原子燃料・バックエンド設計部 燃料取扱設計課

主席技師

村上 和夫

Kazuo Murakami

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Kobe Shipyard & Machinery Works

Fuel Handling & Transport Systems Designing Section

Nuclear Fuel & Back-End Systems Designing Department

Engineering Manager

《Summary》

On the assumption that spent nuclear fuel will be transported after long-term storage, we evaluated the sealability after aging of TRYPACK® for metal cask.

In result, we obtained the sealability of $1 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ max. after aging on TRYPACK®.

This meets the standard for sealability in transport condition for metal cask.

Moreover, we confirmed that the TRYPACK® has the equivalent characteristics for the test specimen used by NUPEC project.

We confirmed that the difference in the material for coil spring has no effect on the characteristics.

Keywords: TRYPACK®, metal cask, spent nuclear fuel, NUPEC

1. はじめに

金属キャスクの密封境界を構成する金属ガスケット並びに蓋および本体フランジ(以下「密封境界部」という。)について、使用済燃料を長期間貯蔵した後の輸送に係る

密封性能の評価は、財団法人原子力発電機構(以下「NUPEC」と称す。)殿により、リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験(金属キャスク貯蔵技術確証試験)として実施されている⁽¹⁾⁽²⁾。

本稿では、当社のキャスク用金属ガスケット「トライ

パック」について、試験装置も含め金属キャスク貯蔵技術確証試験と同様の評価方法により、二重リング構造(複列型)のトライパックの静的および動的な変位時(口開きおよび横ずれ)の密封特性を取得し、密封境界部変位時の密封特性に対する静的および動的挙動の影響を平成14年度NUPEC殿の試験結果と比較検討し評価した。

2. 試験項目および試験方法

断面径 10mm の複列型トライパックについて、平成14年度NUPEC殿の試験条件を参考に以下の試験を実施した。

- 1) 静的横ずれ試験
- 2) 動的口開き試験
- 3) 動的横ずれ試験

試験対象とするガスケットの構成・寸法を図1に示す。NUPEC殿供試ガスケットとの違いはスプリング

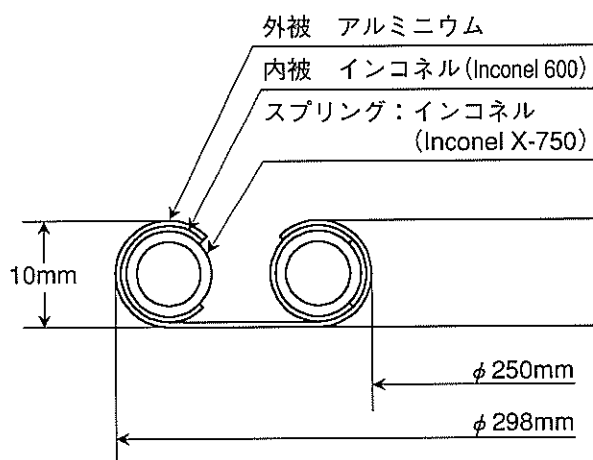


図1 複列型トライパック構成・寸法

表1 劣化条件

劣化条件	備考
190°C×85h (120°C温度低下×60年相当)	LMP (C:14) [*] 7375 ※NUPEC殿試験 ⁽¹⁾ と同一

*: $LMP = T (C + \log t)$
 T: 温度 (K)
 t: 時間 (h)
 C: 定数 (=14)

材料 (NUPEC殿供試ガスケットはNimonicスプリング) だけであり、他の材質、構成部材寸法すべて同じである。

また、各試験項目において、経年劣化条件としてはラーソンミラーパラメーター法 (LMP法) を適用して加熱により与えた。表1に劣化条件を示す。

2-1 静的横ずれ試験

本試験は、長期貯蔵による経年劣化を模擬したガス

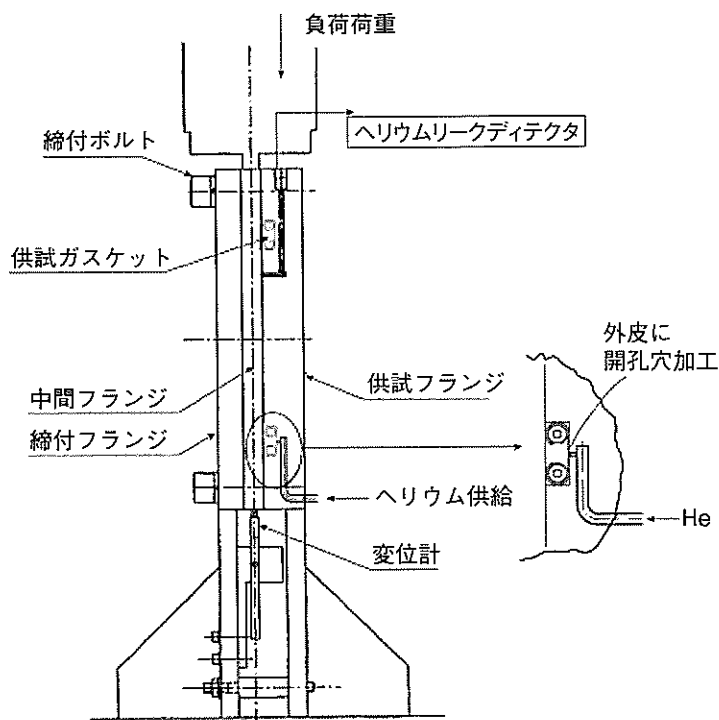


図2 静的横ずれ試験装置図

ケットについて、密封境界部の静的な横ずれに対する密封特性を取得し、落下試験時におけるフランジ部変形に対するガスケットの横ずれ量の限界を評価するため実施した。

静的横ずれ試験装置を図2に示す。

ガスケットを供試フランジにてボルト締結した供試体を加熱炉内に設置し、経年劣化付与条件にて加熱後、圧縮試験機にて復元特性を計測し、劣化後線圧を確認した。

再度ボルト締結した後、静的横ずれ試験装置に設置し、横ずれ変位を段階的に与え、その間の漏えい量をヘリウムリークディテクターで測定し、横ずれ量と漏えい量の関係を取得した。

片側横ずれ量付加後、フランジ位相を180° 変更し、ずれを戻す方向にて再度横ずれ量と漏えい量の関係を取得した後、再び試験装置を組替え、復元特性を取得した。

2-2 動的口開き試験

金属キャスク落下試験では一次蓋、二次蓋の垂直方向の衝撃により口開きが生じる可能性があり、金属ガスケットの動的な口開きに対する健全性を評価する必要がある。そこで供試フランジに衝撃的に口開き変位を与えたときのガスケット特性を取得し、口開きの限界量を評価した。

動的口開き試験は図3に示すように加熱劣化を付与したガスケットを縮付けたフランジを振り子式衝撃試験機に設置し、重錘を所定の振り上げ角度に設定し、重錘を切り離してフランジに衝突させることにより衝撃荷重を負荷して実施した。

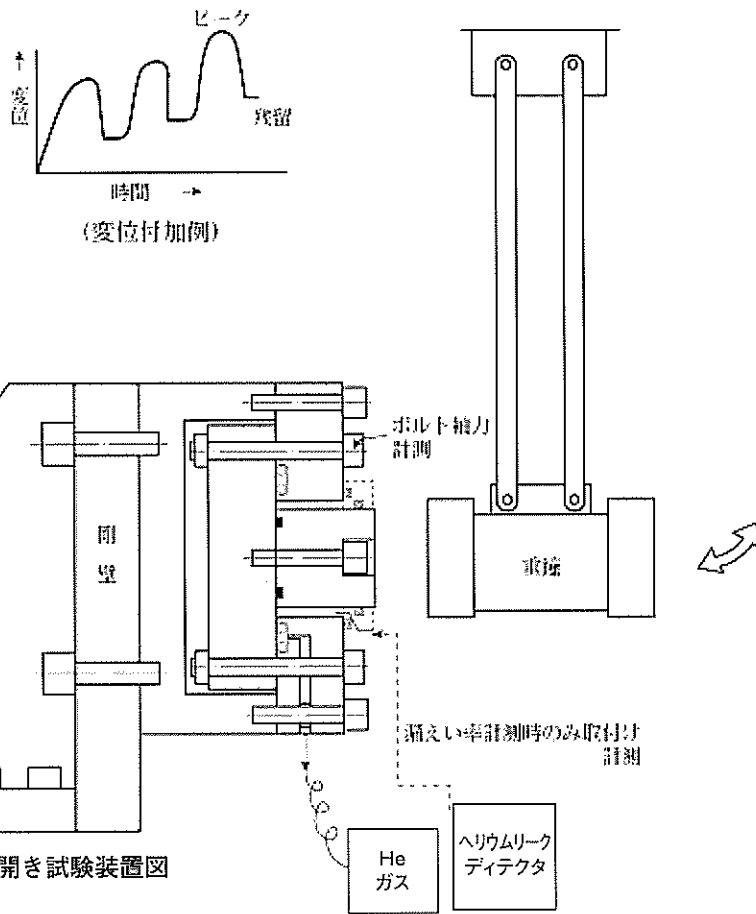


図3 動的口開き試験装置図

また、動的口開き試験では試験前後についてガスケットの残留線圧、漏えい量を確認するために圧縮復元試験を行った。

漏えい量測定は内側リングの内径側から真空引きを行い、内側、外側リングの間にヘリウムを供給して漏えい試験を行った。内側フランジ開口部は閉止して真空を保持した。

2-3 動的横ずれ試験

金属キャスク落下試験では一次蓋、二次蓋の水平方向の衝撃により横ずれが生じる可能性があり、金属ガスケットでの横ずれに対する健全性を評価する必要がある。そこで供試フランジに衝撃的に横ずれを与えたときのガスケット特性を取得し、横ずれ量の限界を評価した。

動的横ずれ試験は図4に示すように加熱劣化を付与したガスケットを締付けたフランジを振り子式衝撃試験機に設置し、重錘をフランジに衝突させることにより衝撃荷重を荷重して実施した。

また、動的横ずれ試験では動的試験前後に圧縮復元特性を取得し、ガスケットの残留線圧、漏えい量を確認した。

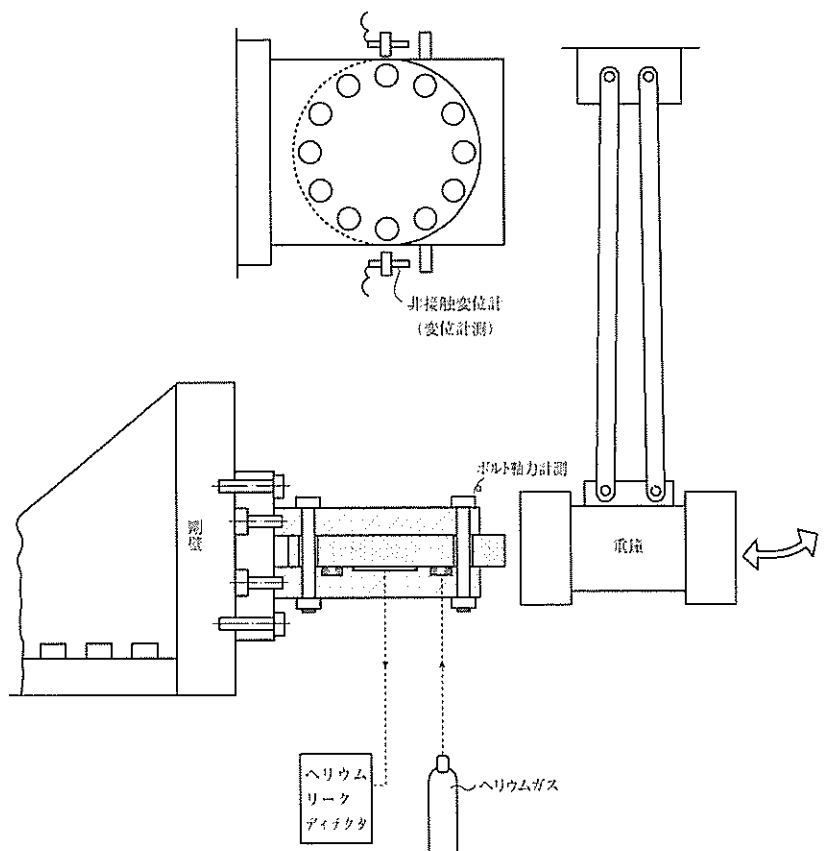


図4 動的横ずれ試験装置図

漏えい量測定は内側リングの内径側から真空引きを行い、内側、外側リングの間にヘリウムを供給して漏えい試験を行った。

3. 密封特性の評価

今回取得したトライパック[®]の密封特性について、NUPEC殿で実施した平成14年度試験結果と比較し評価を行った。

3-1 静的横ずれ試験

静的横ずれ試験前後に実施した圧縮復元試験による線荷重変化例を図5に、静的横ずれ試験により取得したデータ一覧を表2に示す。また、横ずれ量と漏えい量の関係をNUPEC殿試験結果と比較した結果を図6に示す。

トライパック[®]は加熱劣化後横ずれ前の漏えい量として

$5 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の範囲にあり、片側横ずれ(3 mm)後で漏えい量は $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ まで上昇した。また、位相を反転し、戻し方向に横ずれさせた場合の漏えい量は $5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ まで上昇することが認められたが、許容基準として設定されている $1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (実機輸送時の漏えい基準にガスケット周長比を考慮した設定値)⁽¹⁾に対し充分余裕があることを確認した。

また、NUPEC殿試験結果と比較すると、トライパック[®]は比較的横ずれに対する漏えい量の変化傾向にバラツキが少なく、NUPEC殿で供試したガスケットと同等と評価する。

3-2 動的口開き試験

動的口開き変位と漏えい量との関係をNUPEC殿試験結果と比較した結果を図7に示し、振上角度・回数と漏えい量の関係を図8に示す。また、動的口開き試験に

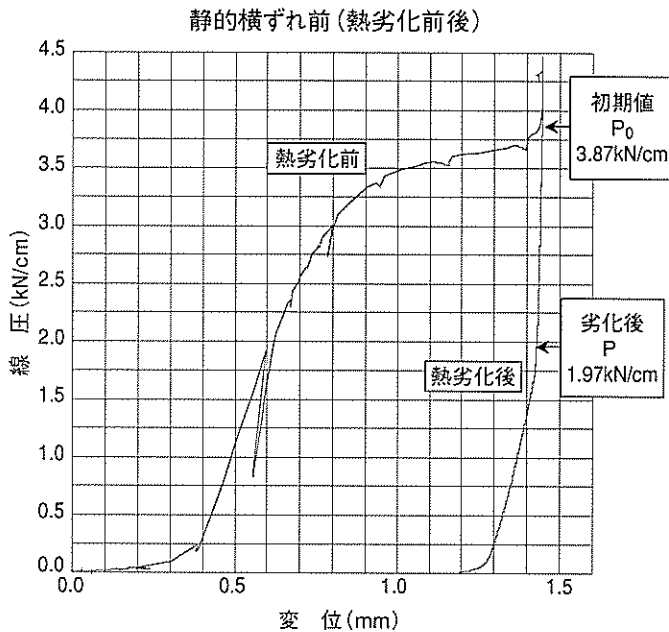


図5 圧縮復元特性例

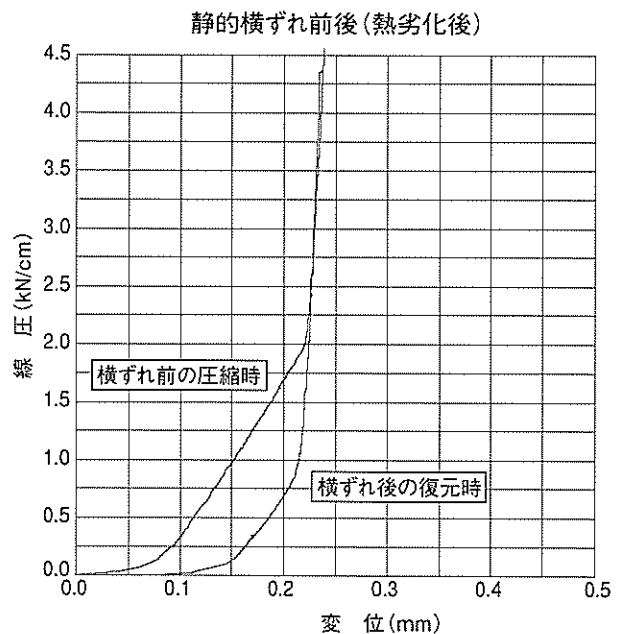


表2 静的横ずれ所得データ一覧

分類	劣化条件			締切線圧 (kN/cm)			横ずれ時漏えい量 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)			往時漏えい量上昇開始時横ずれ量 (mm)	横ずれ後口開き限界変位量 ($1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 基準) ^{*1} (mm)
	温度 (°C)	時間 (h)	LMP (C=14)	初期値 P_0	劣化後 P'	線荷重変化率 $\frac{P_0 - P'}{P_0}$	横ずれ前	往方向最大ずれ時 ()内ずれ量	復方向初期位置復帰時		
トライパック	190	85	7359	3.871	1.970	0.48	5×10^{-11}	1×10^{-9} (3 mm)	5×10^{-8}	1.4	(1×10^{-10}) 0.08
	190	85	7359	4.002	2.100	0.47	2×10^{-10}	2×10^{-9} (3 mm)	1×10^{-8}	1.0	(9×10^{-9}) 0.07
NUPEC殿試験結果 ⁽¹⁾	189	85	7359	3.602	2.110	0.41	5×10^{-12}	1×10^{-9} (3 mm)	7×10^{-8}	0.8	(1×10^{-7}) 0.08
	190	85	7359	3.621	1.980	0.45	9×10^{-11}	9×10^{-11} (1.5mm)	---	---	(6×10^{-11}) 0.15

*1 ()内は開始時漏えい量 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)。下段は $10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ までの復元量 (mm)

*2 輸送時の漏えい量基準値として設定した値⁽¹⁾

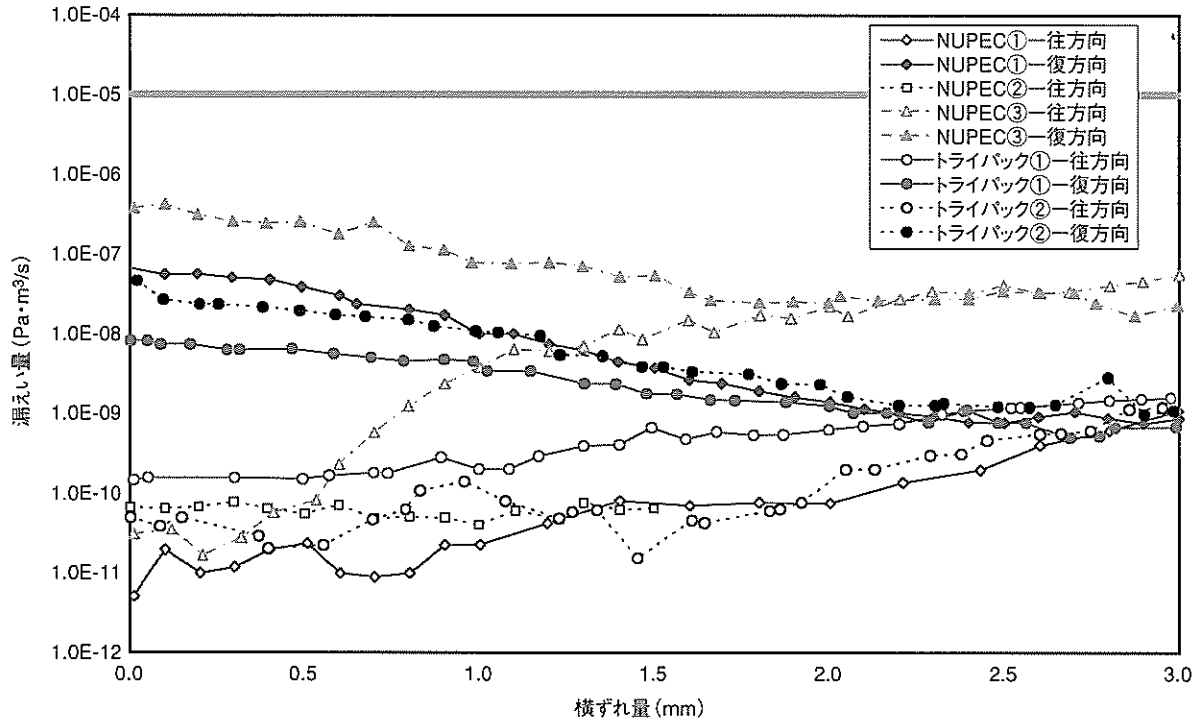


図6 静的横ずれ量と漏えい量の関係(NUPEC殿データ⁽¹⁾との比較)

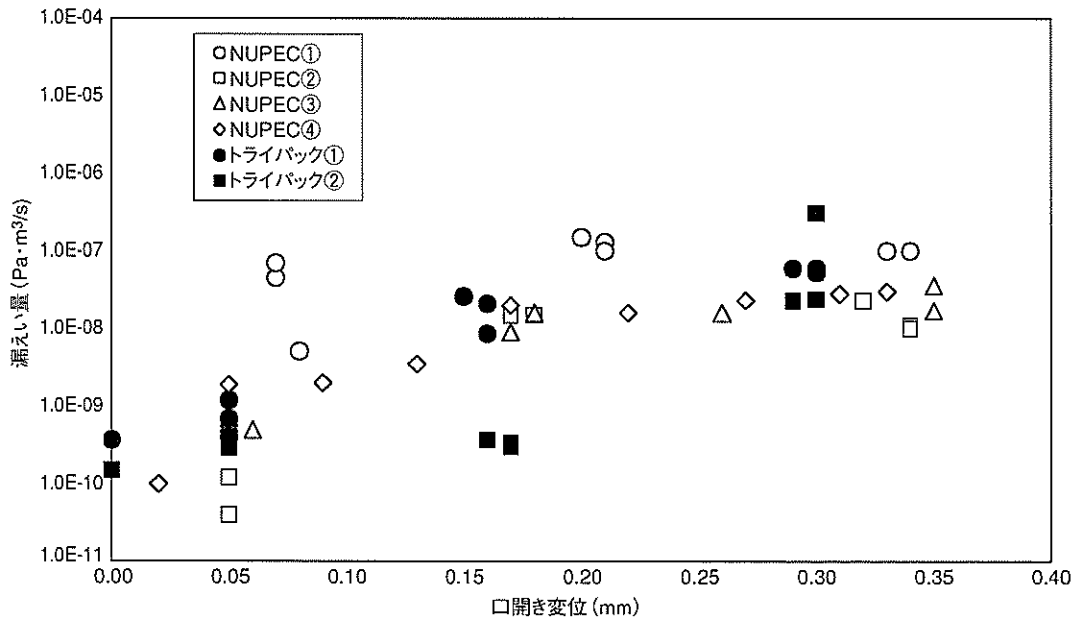


図7 動的口開き変位と漏えい量の関係(NUPEC殿データ⁽¹⁾との比較)

表3 動的口開き所得データ一覧

劣化条件			加熱後						動的後				
			締切線圧 (kN/cm)			復元前漏えい量 (Pa·m³/s)	再圧縮時漏えい量 (Pa·m³/s)	復元時漏えい線圧 (kN/cm)			再復元時漏えい線圧 (kN/cm)	再圧縮時密封線圧 (kN/cm)	再圧縮時密封漏えい量 (Pa·m³/s)
温度 (°C)	時間 (h)	LMP (C=14)	初期値 P ₀	劣化後 P'	線荷重変化率 $\frac{P_0 - P'}{P_0}$			開始点	¹ 1×10 ⁻⁸ Pa·m³/s 基準	² 1×10 ⁻⁵ Pa·m³/s 基準			
192	85	7407	3.72	2.00	0.46	3.0×10 ⁻¹¹	9.0×10 ⁻¹⁰	0.20	0.13	0.04	0.19	1.40	8.0×10 ⁻¹⁰
192		7407	3.74	1.78	0.52	5.0×10 ⁻¹⁰	8.0×10 ⁻¹⁰	0.09	0.07	0.04	0.90	1.60	2.0×10 ⁻⁹

*1: 貯蔵時の漏えい量基準値として設定した値¹⁾

*2: 輸送時の漏えい量基準値として設定した値¹⁾

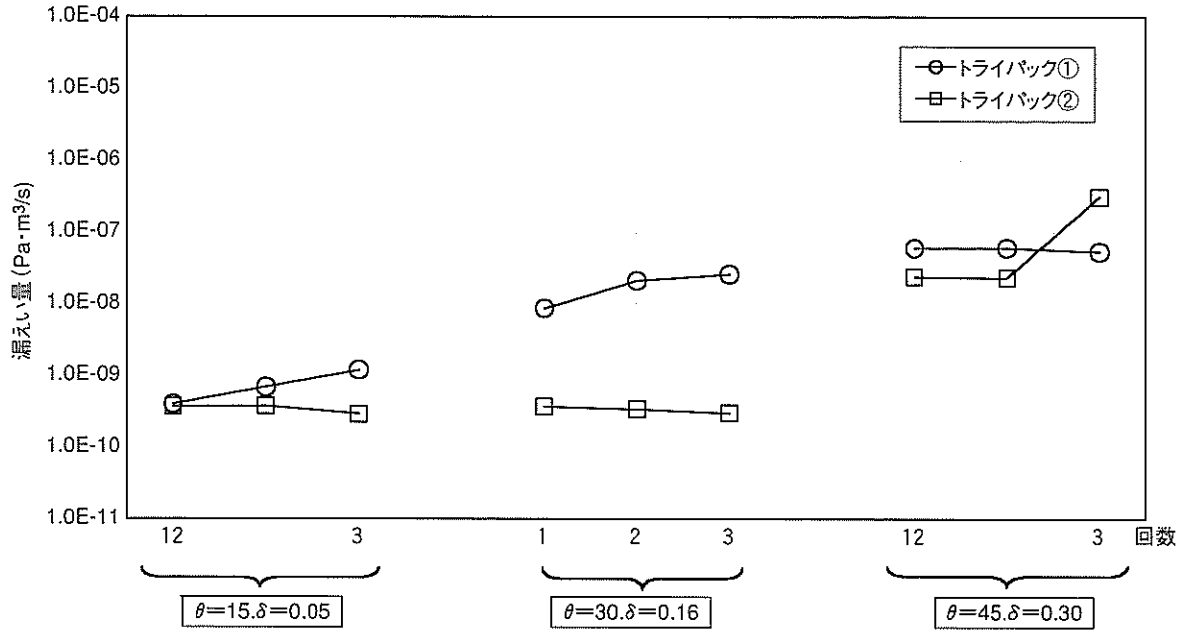


図8 動的口開き試験時の振上角度・回数と漏えい量の関係

θ：振上角度 (°)
δ：横ずれ量 (mm)

より取得したデータ一覧を表3に示す。

劣化付与ガスケットの動的口開き変位は0.3mmまで開口させた。劣化付与ガスケットの復元変位は約0.2mmであり、最大口開き変位0.3mmはガスケットを充分開口できる変位量である。

図7よりガスケットの漏えい量は、バラツキはあるものの口開き変位とともに大きくなる傾向を示しているが、最大口開き変位0.3mmで 10^{-6} ~ 10^{-7} Pa·m³/sオーダーのレベルであり、許容基準として設定されている 1×10^{-5} Pa·

m³/sに対し充分余裕があることを確認した。

NUPEC殿試験結果と比較すると、バラツキは生じているものの、同様な傾向を示しており、NUPEC殿で供試したガスケットと同等と評価する。

3-3 動的横ずれ試験

動的横ずれ変位と漏洩量の関係をNUPEC殿試験結果と比較した結果を図9に示す。また、試験後ガスケットの断面形状(代表例)を図10に示す。また、動的横ず

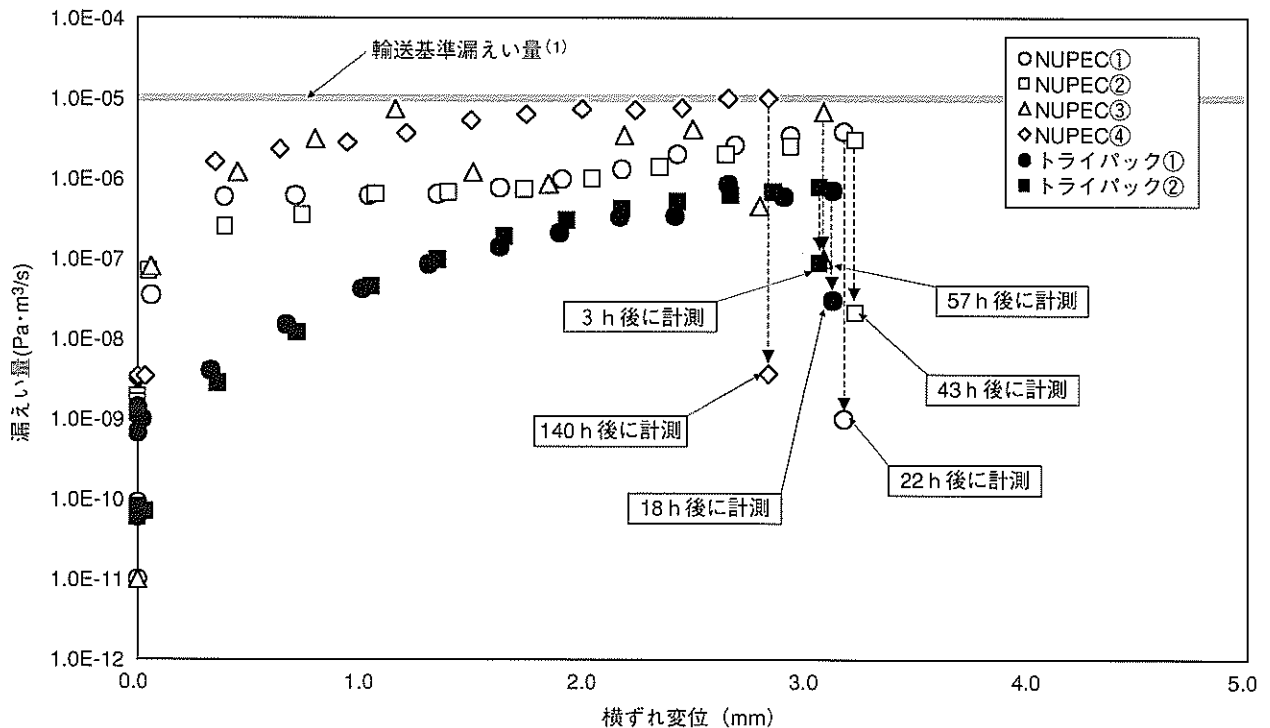


図9 動的横ずれ変位と漏えい量の関係(NUPEC殿データ⁽¹⁾との比較)

れ試験により取得したデータ一覧を表4に示す。

劣化付与ガスケットの動的横ずれ変位は最大3mmまで横ずれさせた。図9より、ガスケットの漏えい量は横ずれ変位とともに大きくなる傾向を示したが、動的試験後の最終変位値の漏えい量でも $10^7 \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ オーダーのレベルであり、許容基準として設定されている $1 \times 10^5 \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ に対し充分余裕があることを確認した。

NUPEC殿試験結果と比較すると、横ずれ変位に伴う漏えい量の上昇傾向は緩やかであった。また横ずれ直後の最大漏えい量は3mmずれ後で $10^7 \sim 10^8 \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ のレベルであり、輸送基準($1 \times 10^5 \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)に対し充分余裕がある。さらに、時間経過によって漏えい量は減少し、 $10^8 \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ レベルとなり、NUPEC殿供試ガスケットと同様に性能的余裕があるものと考えられる。

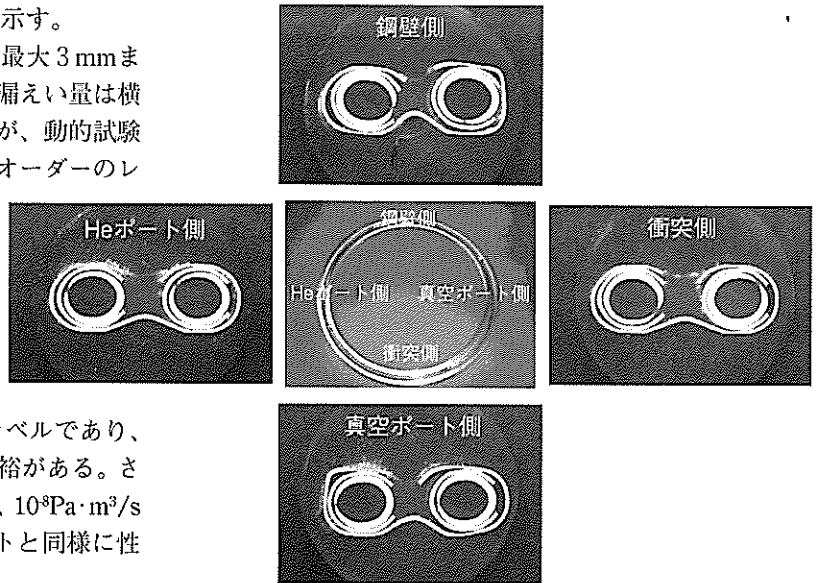


図10 動的横ずれ試験後のガスケット断面形状例 (劣化条件:190℃×85時間 フランジ:9H24 ガスケット:B-6)

表4 動的横ずれ所得データ一覧

劣化条件			締切線圧 (kN/cm)			劣化後復元時漏えい線圧 (kN/cm)			動的後復元時漏えい線圧 (kN/cm)			口開き漏えい量 (Pa·m³/s)		
温度 (°C)	時間 (h)	LMP (C=14)	初期値 P ₀	劣化後 P'	線荷重変化率 $\frac{P_0 - P'}{P_0}$	開始点	*1	*2	開始点	*1	*2	動的横ずれ前	動的横ずれ後	
							$1 \times 10^{-8} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 基準	$1 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 基準		$1 \times 10^{-8} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 基準	$1 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 基準		圧縮	復元
192	85	7407	3.72	2.00	0.46	0.10	0.10	0.10	1.39	1.39	0.80	4×10^{-10}	7×10^{-10}	8×10^{-9}
192		7407	3.66	2.05	0.44	0.09	0.09	0.09	1.00	1.00	0.34	2×10^{-10}	1×10^{-9}	8×10^{-9}

*1: 貯蔵時の漏えい量基準値として設定した値¹⁾

*2: 輸送時の漏えい量基準値として設定した値¹⁾

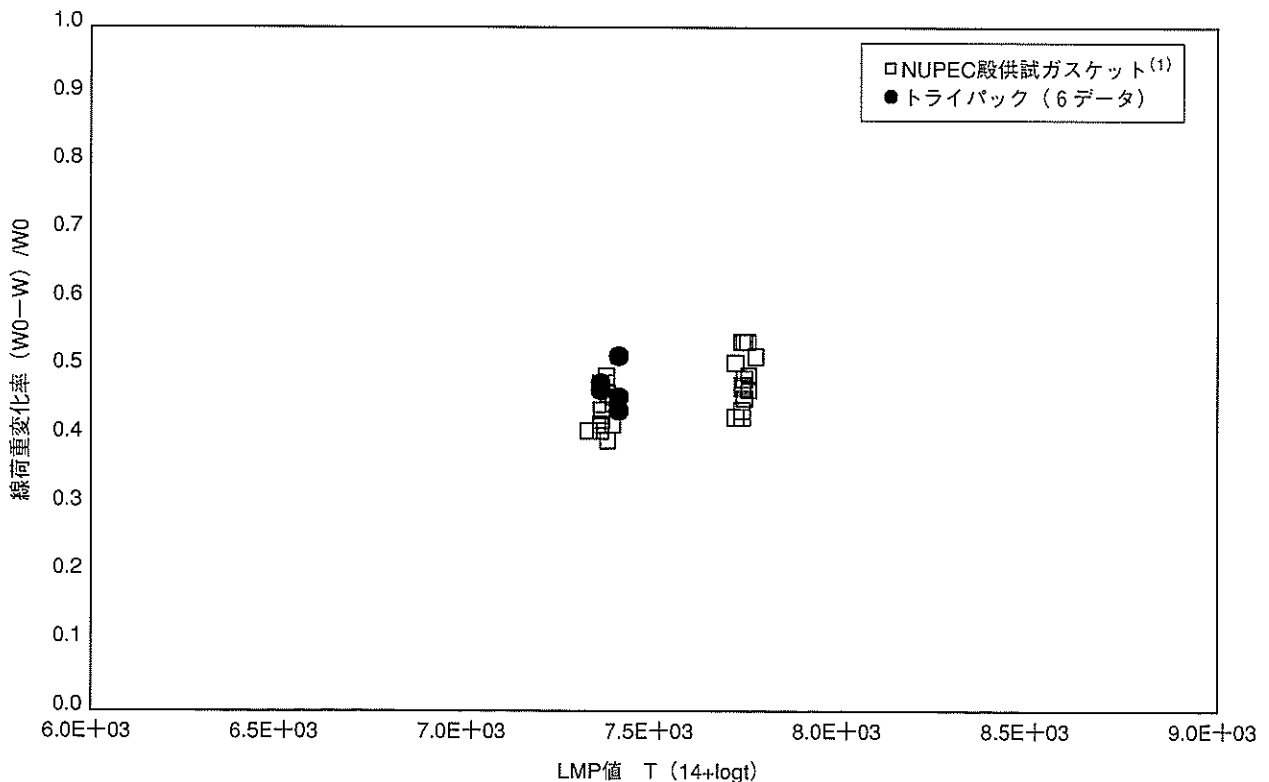


図11 LMP値とガスケット線荷重変化率の関係

3-4 静的変位と動の変位の比較

(1) 断面形状の比較

静的横ずれ試験後と動横ずれ試験後の断面形状比較した結果、双方ともずれ方向での外皮の変形が大きく、内周リング、外周リングともフランジに接触したものと考えられるが、両者に大きな差異は無かった。また、NUPEC殿供試ガスケットについても、ずれ方向の変形が大きく、ずれ挙動は同様であると考えられる。

(2) 静的横ずれ特性と動横ずれ特性の比較

静的横ずれ特性と動横ずれ特性の比較では、静的に比べて動的の漏えい量が大きくなる傾向を示した。この原因としては、動的ではフランジとガスケットの接触面にずれが生じ、リークパスが生じて漏えい量が大きくなったものと考えられる。

NUPEC殿供試ガスケットも同様の傾向を示し、トライパック[®]とNUPEC殿供試ガスケットは同等の性能を有していると考えられる。

3-5 LMP値と線荷重変化率の関係

図11にトライパック[®]とNUPEC殿供試ガスケットのLMP値と線荷重変化率の関係を示す。

いずれも190℃×85 hの劣化条件により締切荷重は約50%に低下しており、両者の有意差は見られなかった。

4. おわりに

断面径10mmの復列型トライパック[®]について、NUPEC殿のリサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験（金属キャスク貯蔵技術確証試験）と同様、静的横ずれ試験、動的口開き試験、動横ずれ試験を実施しその密封特性を評価したが、いずれも金属キャスクの輸送基準である $1 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を満足する結果となった。

また、NUPEC殿供試ガスケットと同等の特性を有することが確認され、スプリング材質の違いによる影響はないことが確認された。

金属キャスク貯蔵技術においてはまだいくつか評価されるべき事象が残されているものと思われるが、トライパック[®]はその高い密封性能をもって原子力発電所外における中間貯蔵施設の実現の手助けとなることを確信している。

（参考文献）

- (1) 金属キャスク貯蔵技術確証試験平成13年度報告書 (財)原子力発電技術機構
- (2) 金属キャスク貯蔵技術確証試験平成14年度報告書 (財)原子力発電技術機構
- (3) Valqua Technology News No.6 SPRING 2003 日本バルカー工業(株)