

金属キャスク用金属ガスケット TOMBO™ No.NU1855「ナフシル®」

工業製品事業本部 配管・機器部品技術開発部

1. はじめに

わが国はエネルギー資源に乏しく、原子力発電所から発生する使用済燃料を再処理して有効活用する原子燃料サイクルの推進を基本方針としています。使用済燃料は再処理するまでの間、資源として中間貯蔵する必要があり、日本では乾式貯蔵で輸送・貯蔵兼用の金属キャスクが使用されています。金属キャスクとは、燃料プールから引き揚げた使用済燃料を収納して輸送・貯蔵する容器です。

金属キャスクの放射性物質の閉じ込め境界に使用される金属ガスケットは、今までは海外製が使用されていましたが、ニチアスでは金属ガスケット TOMBO™ No.NU1855 ナフシル®（以下、ナフシル）を開発し、国産化しました。

本稿ではナフシルの主な特長についてご紹介いたします（図1）。



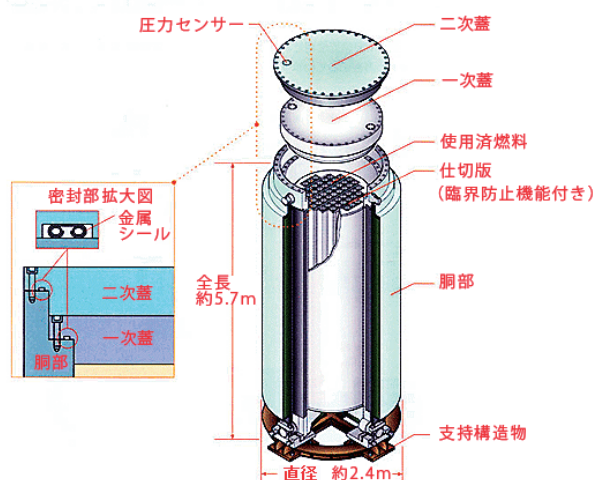
図1 NU1855「ナフシル®」

2. 金属キャスク用金属ガスケットに求められる性能

原子力発電の使用済燃料を貯蔵する金属キャスクの蓋の密封境界部は、金属ガスケット、蓋、ボルトおよび本体胴フランジで構成され、蓋と本体胴フランジの間に設置した金属ガスケットをボルトで締め付けることにより、密封境界部の密封性能を確保しています（図2）。なお、図2の金属シールは金属ガスケットと同意です。

使用済燃料は、金属キャスクに装荷されたのち、最長で60年間金属キャスク内で乾式貯蔵されます。また原子力発電所から中間貯蔵施設への輸送等における落下などの事故発生時においても、金属キャスクには放射性物質の閉じ込め機能が維持されることが求められます。

そのため、金属キャスクに使用される金属ガスケットには、主に次の性能が要求されます¹⁾。

図2 乾式貯蔵用 金属キャスク²⁾

①貯蔵期間の60年以上にわたり、金属ガスケットが熱による経年劣化後（貯蔵開始初期100～130℃）も、所定のリークレートを満たすこと。（長期健全性）

②金属キャスク蓋の密封境界部に外力が作用して金属ガスケットとの接触部に一時的な変位が生じて、所定のリークレートが維持されること。（動的横ずれ変位時の漏えい率）

これらの要求に対する適合性は、金属ガスケットの試験体を使用して、日本のさまざまな研究機関で評価されています³⁾。

3. シールメカニズム

現在国内で採用されている金属ガスケットは、コイルスプリング+内被+外被の三層構造（図3）となっています。長期においてはばね反力の低下の少ない金属（Alloy90）を用いたコイルスプリングの反力を内被で線圧に変換し、さらに線圧により外被を機器フランジのセレーション（旋削加工面の山谷）に食い込ませるシールメカニズム（図4）となっています。金属系のガスケットでありながら、なじみやすく、コイルスプリングの反力により、復元量が比較的に大きいという特長があります。

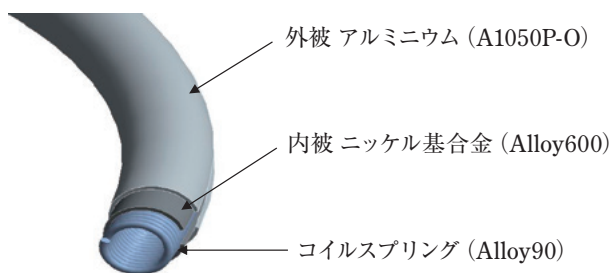


図3 構造・材質

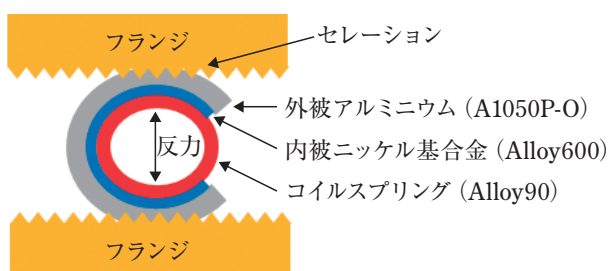


図4 シールメカニズム

4. ナフシルのご紹介

ナフシルは、お客さまのご要求仕様により個別に設計する製品です。以下では、本製品の一般的な仕様をご説明します。

4.1 構造および形状

密着したコイルスプリングの両端を溶接して輪状にし、内被で被覆した後、外被で被覆した構造です。代表的な形状は図5に示す眼鏡形、図6に示す単線形（つば付き）があります。内被は内向きに被覆した内開きと外向きに被覆した外開きがあります。図5の内リング、外リング、および図6は外開きです。

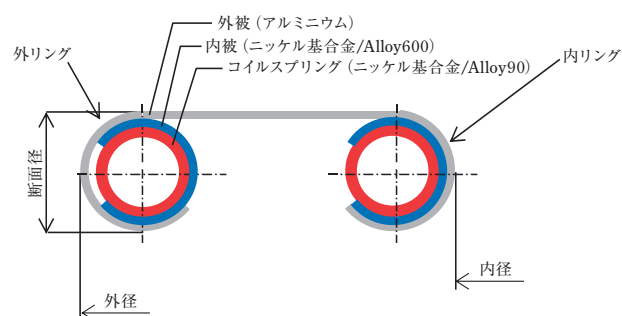


図5 眼鏡形

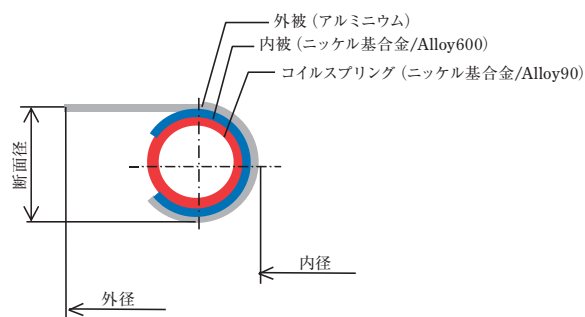


図6 単線形（つば付き）

4.2 構成材料

代表的な構成材料は表1のとおりです。

表1 構成材料

コイルスプリング		内被		外被	
材質	種類	材質	種類	材質	種類
ニッケル基合金/Alloy90	UNS N07090	ニッケル基合金/Alloy600	UNS N06600	アルミニウム	A1050P-O

4.3 製作寸法

代表的な製作寸法は表2のとおりです。

表2 代表的な製作寸法

形状	断面径 (mm)	最小内径 (mm)	最大外径 (mm)
眼鏡形	10.0	1000	2100
	4.0	70	150
単線形	4.0	24	70

4.4 基本性能

4.4.1 シール機能

ナフシルは圧縮することにより圧縮線圧が大きくなりシール開始点 (e0, Y0) に到達します。さらに圧縮して裕度をもたせた点 (e2, Y2) で基本締付量となり、基本締付量となる溝深さで締め切って(メタルタッチ)使用します。この締め切ったときの圧縮線圧を締切線圧といいます(図7)。

復元させるとシール限界点 (e1, Y1) に到達し、リークします。ここでいうシールとはヘリウム漏れ試験で漏れ量 $1.0 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下を基準としています。うず巻き形ガスケットなどの一般的な管フランジ用ガスケットのリークレートが、 $3.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 程度であるのと比較して⁴⁾、ヘリウムリークレートにおいて数十万倍以上の優れたシール特性を示します。

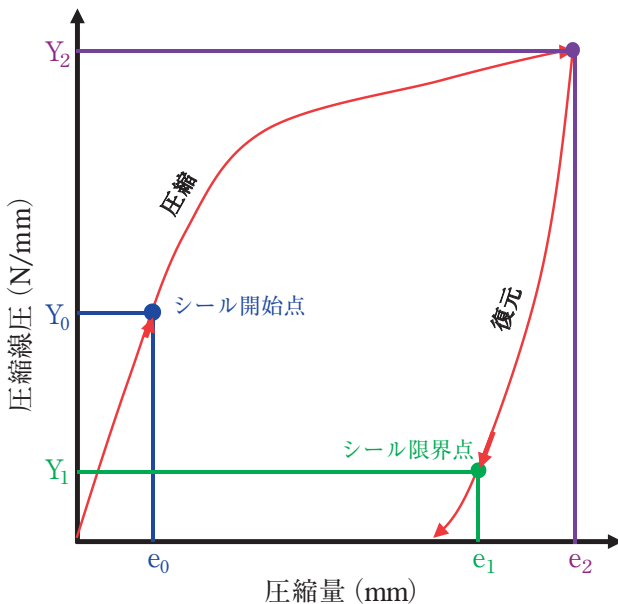


図7 シール機能

4.4.2 使用温度・圧力

ナフシルの使用温度・圧力範囲を表3に示します。

「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則（第7条四項）」では、金属キャス

クに対して、 -40°C から 38°C の範囲で、亀裂、破損等の生じるおそれがないことを要求しています。また、金属キャスクの貯蔵中の最高温度はJNES（独立行政法人原子力安全基盤機構）殿の報告書²⁾に貯蔵開始初期の 119°C と記載されています。

ナフシルは、これらの金属キャスクに要求される温度・圧力範囲を満足しています。また、表3の温度・圧力範囲で使用可能なことを検証しています。

表3 使用温度・圧力

使用温度範囲	$-40^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$
使用圧力範囲	F.V. $\sim 2.0\text{MPaG}$

5. 基本特性試験データ

代表断面径の推奨溝深さとナフシルの締切線圧を表4に示します。

締切線圧とは、溝深さ（基準）まで締め付けたときの狙いの基準となる締付線圧です。

表4 溝深さと基準締切線圧

断面径 (mm)	基本締付量 e2 (mm)	溝深さ (mm)		基準締切線圧 Y2 (N/mm)
		基準 呼び	許容差 ($\pm$)	
10.0	1.1	8.9	0.10	350
4.0	0.9	3.1	0.10	230

代表断面径の製品の圧縮復元特性試験結果を、図8（断面径10.0mm）と図9（断面径4.0mm）に示します。

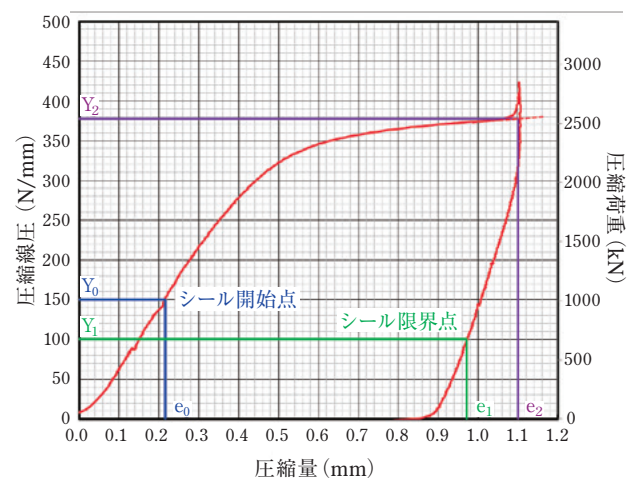


図8 圧縮復元特性試験結果（眼鏡形二重被覆×断面径10.0mm×内径1040mm×外径1100mm）

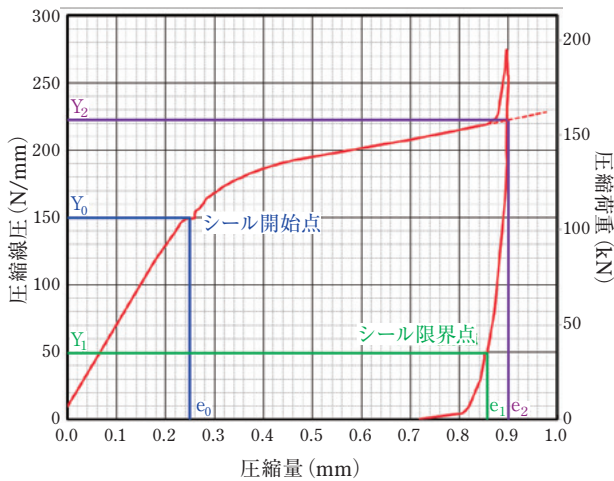


図9 圧縮復元特性試験結果（眼鏡形二重被覆×断面径4.0mm×内径100mm×外径126mm）

6. 要求性能試験データ

2章の金属ガスケットに要求される性能の検証試験を実施しました。金属ガスケットを金属キャスクの蓋を模擬したフランジの溝に装填し、溝に締め切るまで締め込み、加熱による経年劣化を付与した後、キャスクの蓋に衝撃的な横ずれが起きることを想定した変位（動的横ずれ変位）を与え、その変位を付与する前後のヘリウムガスの漏れ量の変化を計測しました。

6.1 試験試料

眼鏡形二重被覆

断面径10mm×内径φ250mm×外径φ298mm

（蓋用金属ガスケットの内径・外径のスケールダウンサイズ）

6.2 経年劣化条件および横ずれ変位付与方法

加熱による経年劣化の条件は表5に示す条件で、温度・時間換算パラメータ（ラーソン・ミラー・パラメータ（以下、LMP））は、平成15年度JNES殿の報告²⁾に記載されている貯蔵中の使用済燃料から発生する崩壊熱の減衰を考慮した設計上限値（貯蔵初期温度120℃、60年貯蔵後70℃）に相当する値「7375」を採用しました。計算式は下式となります。

$$LMP = T \times (C + \log t)$$

T：絶対温度 (K)，C：材料定数 (= 14)，

t：保持温度 (h)

材料定数Cは、原子力安全基盤機構殿の実証試験で採用されている、14としました。

動的横ずれ変位は図10に示す錘落下式装置を用いて与えました。

表5 経年劣化条件

LMP	加熱温度 (℃)	保持時間 (h)
7375	190	85

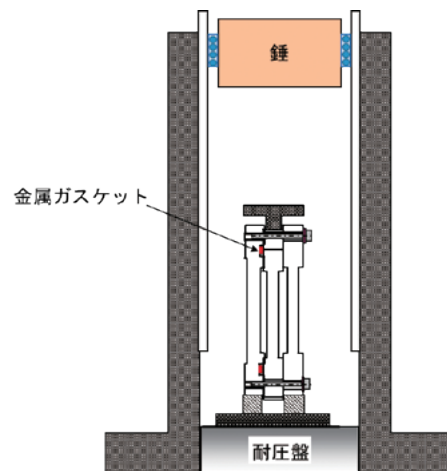
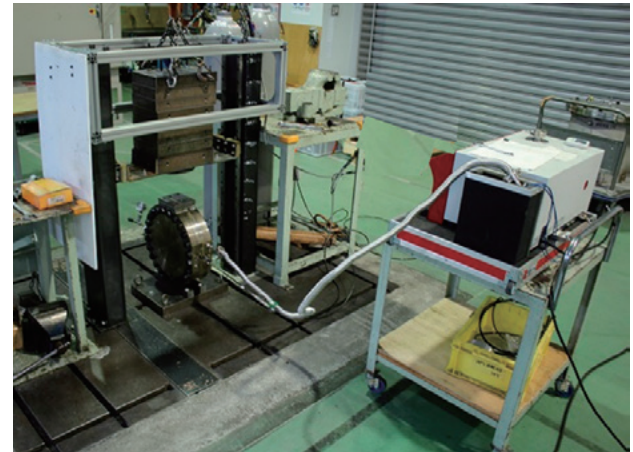


図10 動的横ずれ装置

6.3 試験結果

動的横ずれ変位を与えた直後の漏れ量（横ずれ量と漏洩率の関係）を図11に示します。動的横ずれ変位が金属ガスケットの最大ずれ量の3.0mmにおいて基準漏れ量以下であることを確認しました。基準漏れ量とは金属キャスク実機の60年間の使用済み燃料貯蔵における許容漏れ量を当該試験試料の寸法に換算した値です。

ナフシルは、2章で述べた金属キャスクに使用される金属ガスケットに要求される性能を満足することを確認しました。

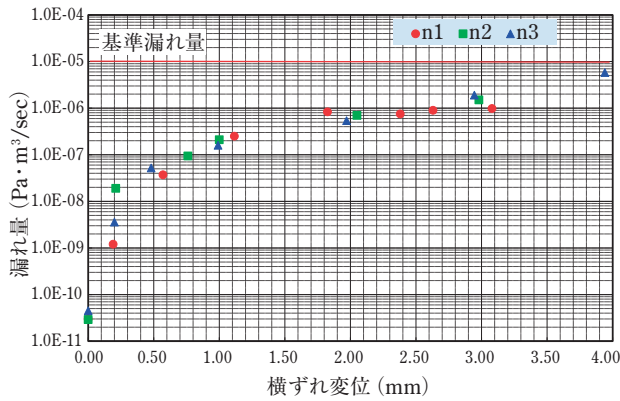


図11 動的横ずれ変位と漏れ量の関係

7. ナフシルの品質管理

ナフシルは、ヘリウムガス（0.05MPaG）での漏れ量が $1.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下という優れたシール性能を持つガスケットです。この優れたシール性能の製品を安定してお届けするため、特に厳格な品質管理を実施しています。

材料および製造工程での最高水準のトレーサビリティを確保しています。溶接部は、溶接事業者検査の解釈6.「溶接規格等によらない場合」⁵⁾に従い、溶接部を溶接事業者検査に準拠した内容で管理しています。

また、製品の出荷にあたっては、内径φ1100mmのナフシルを試験試料として製作し、国内最大級の圧縮試験機（10MN）（図12）を使用し、特性試験を実施して圧縮特性およびシール性能を確認しています。

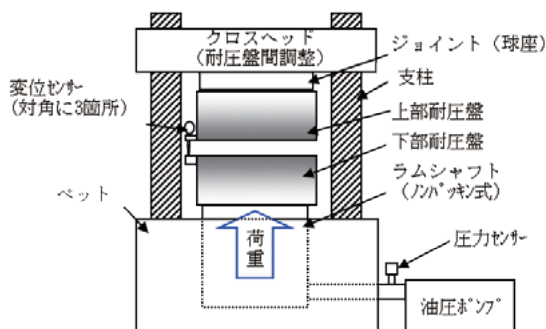


図12 10MN圧縮試験機（載架台φ1600mm）

8. おわりに

本稿では、原子力発電から発生する使用済燃料を輸送・貯蔵する金属キャスクに使用される金属ガスケットTOMBO™ No.NU1855「ナフシル®」の概要、特長についてご紹介いたしました。

今後もお客さまの安全への取り組みに貢献するよう、安定した品質の製品を供給させていただく所存です。

本製品および金属キャスク関連部材に関するお問い合わせ、ご意見・ご要望がございましたら、工業製品事業本部電力事業推進チームまでお願いいたします。

参考文献

- 1) 「ニチアス製キャスク用金属ガスケットの経年劣化評価 報告書」, ニチアス(株) (2013年10月)
- 2) 日本原子力発電(株)ホームページ
<https://www.japc.co.jp/project/cycle/drycask03.html>
- 3) 「平成15年度金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書1/3」 独立行政法人原子力安全基盤機構 (平成16年6月)
- 4) JIS B 2490-2008「管フランジ用ガスケットの密封特性試験方法」, 解説7項
- 5) 「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」 溶接事業者検査（原子力設備）の解釈（内規）（平成21・04・28 原院第3号）

*「ナフシル」は、ニチアス(株)の登録商標です。

*「TOMBO」は、ニチアス(株)の登録商標または商標です。

*本稿の測定値は参考値であり、保証値ではございません。

