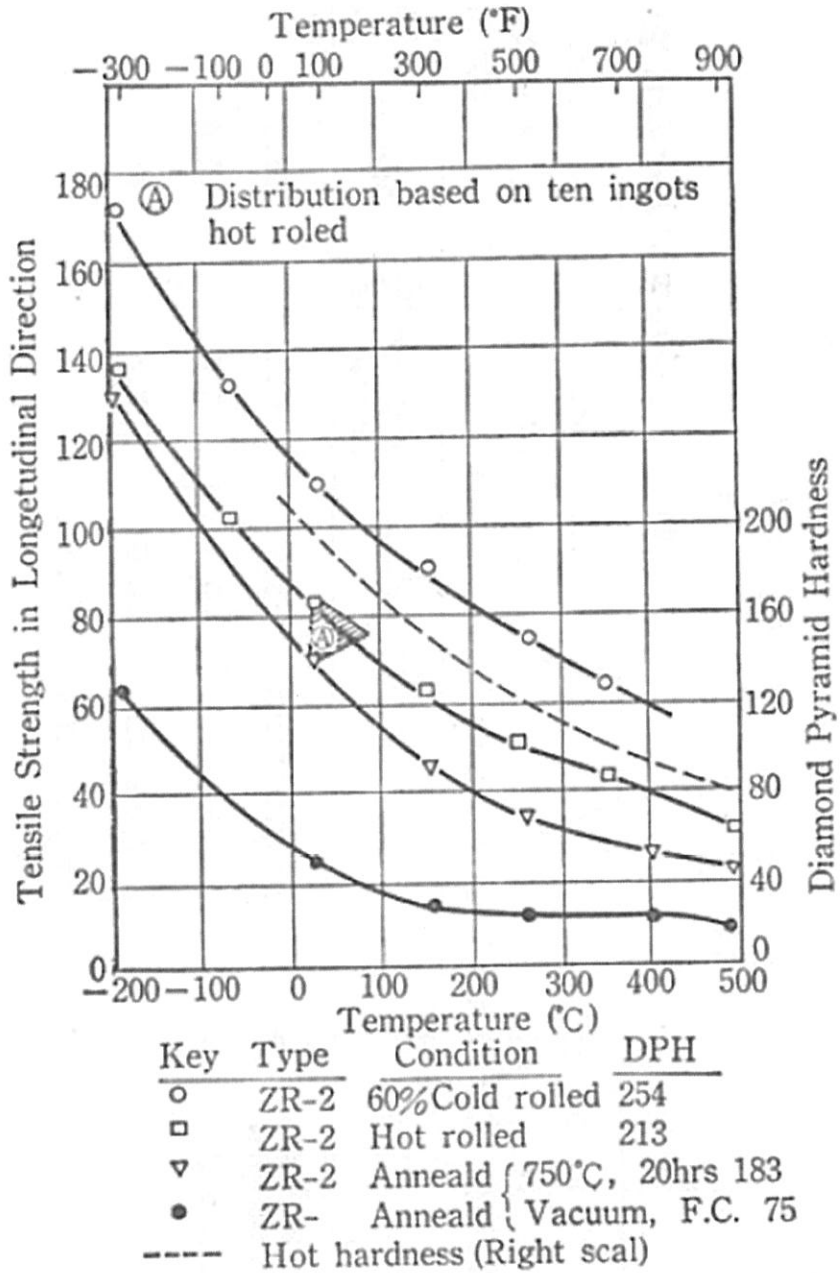


A.4.2.3 ジルカロイ-4、ジルコニウム合金被覆管の低温特性

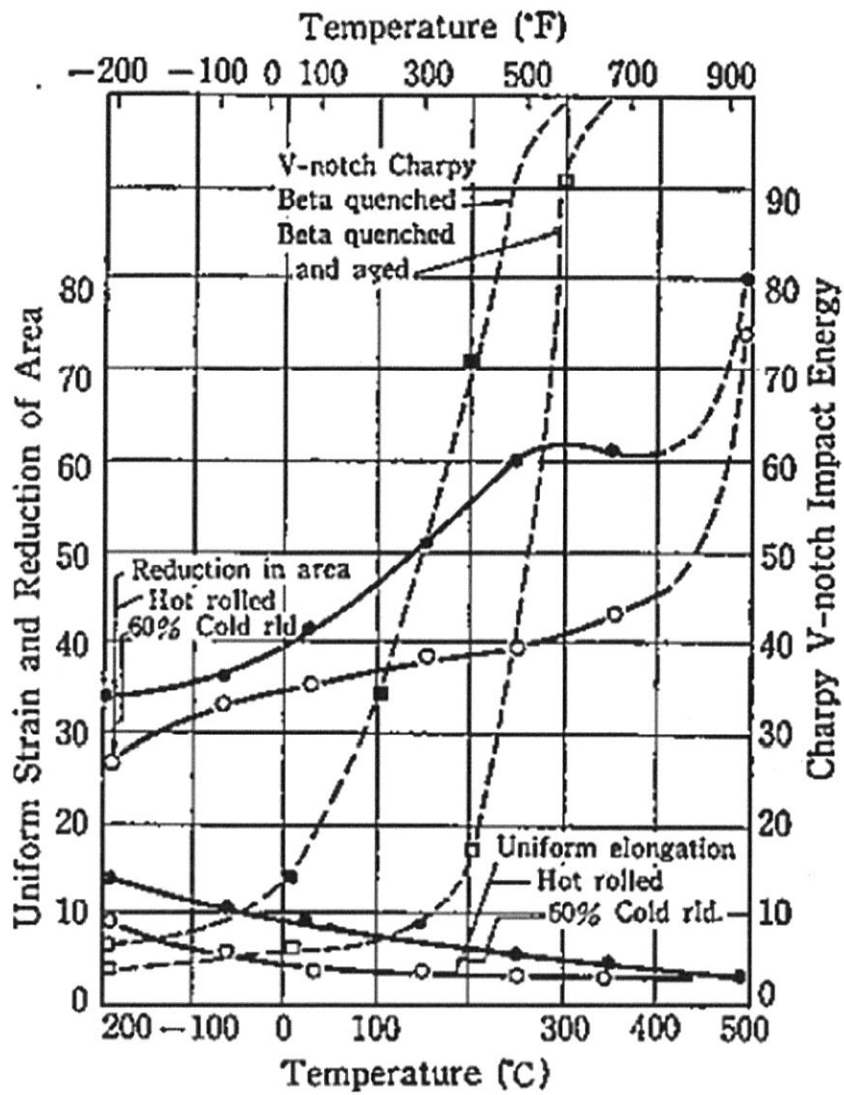
本輸送容器の密封境界としてはジルカロイ-4およびジルコニウム合金製の燃料被覆管が該当する。ジルコニウムおよびその合金の低温特性を示すデータとして、ジルコニウムおよびジルカロイ-2被覆管の引張強度および延性の温度依存性およびを図(ロ)A-8と図(ロ)A-9に示す。

ジルコニウムおよびその合金の一般的な特徴として、低温における脆性破壊やじん性低下がなく、図(ロ)A-8と図(ロ)A-9に示すように温度の低下によっても引張強度は上昇し、延性は確保される。したがって、ジルカロイ-4およびジルコニウム合金は低温において機能を損なうことはない。



図(ロ)A-8 ジルコニウムおよびジルカロイ-2の引張強さの温度依存性

(出典) 小久保定次郎、原子炉用材料、昭和45年5月



図(ロ)A-9 ジルカロイ-2の延性の温度依存性

(出典) 小久保定次郎、原子炉用材料、昭和45年5月

せん断応力 τ_x および τ_y は互いに直角であり、組み合わせ応力は以下の通りとなる。

$$\tau = \sqrt{(\tau_x^2 + \tau_y^2)}$$

よって

$$\tau = \boxed{} \text{MPa}$$

SUS304 の溶接部の許容せん断応力は表(ロ)A- 3 より 71 Mpa である。発生応力は基準値より小さく、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{71}{\boxed{}} = \boxed{}$$

A.4.5 固縛装置

運搬する際には車輛や運搬用コンテナにワイヤや専用の固縛部材等を用いて固縛される。このため、本輸送容器に固縛装置は装備されていない。

A.4.6 圧力

本輸送容器は密閉されておらず、輸送容器内外で差圧が生じることはない。一方、密封境界である燃料棒の健全性について評価する必要がある。周囲の圧力が 60 kPa まで低下した場合に密封境界である燃料棒の健全性について評価する。周囲の圧力が 60 kPa(a)まで低下すると、密封境界である燃料棒との差圧（ゲージ圧）は、最大内圧 $\boxed{}$ Pa（「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた燃料棒最大内圧）を用いると $\boxed{}$ MPa となり、この内外圧差が被覆管に作用することになる。

被覆管の材質は、ジルカロイ-4 およびジルコニウム合金であり、それについて発生する応力を評価した。なお、17×17 型タイプ 64 に対する評価は被覆管肉厚の薄い 17×17 型タイプ 57 の結果に包絡されることから評価を省略する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{PD}{2t}$$

ここで、

σ_{θ}	被覆管にかかる円周方向応力	MPa
P	内圧	□ MPa
D	被覆管内径	$\left\{ \begin{array}{l} 9.40 \text{ mm (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)} \\ 8.36 \text{ mm (17} \times \text{17 型タイプ 57)} \end{array} \right.$
t	被覆管肉厚	$\left\{ \begin{array}{l} 0.66 \text{ mm (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型)} \\ 0.57 \text{ mm (17} \times \text{17 型タイプ 57)} \end{array} \right.$

これらを用いると

$$\sigma_{\theta} = \square \text{ MPa (14} \times \text{14 型, 15} \times \text{15 型), } \square \text{ MPa (17} \times \text{17 型タイプ 57)}$$

被覆管の材質は、ジルカロイ-4 およびジルコニウム合金であり、引張応力が働いているので、基準値は、表(ロ)A-3 より □ MPa (被覆管部) および □ MPa (溶接部) である。

したがって、燃料棒の被覆管に発生する応力は基準値より小さく、安全率は以下の通りである。

$$\text{安全率 (燃料棒)} = \frac{\square}{\square} = \square$$

$$\text{安全率 (燃料棒溶接部)} = \frac{\square}{\square} = \square$$

A.4.7 振動

固有振動数解析の結果、本輸送容器の固有振動数は□Hzである（詳細は、「(ロ)A 付属資料6」参照）。一般的に運搬中にトラック、トレーラー等から受ける励振力の周波数は最大でも□Hz未満であり、本輸送物の固有振動数と差がある。図(ロ)A-15に示すように、振動数比□の場合、減衰を保守的に考慮しない場合でも変位振幅倍率は□%程度である。一般的に輸送中にトラック、トレーラーに発生する振動の加速度は、段差等の通過を考慮しても□未満であることから、増幅を保守的に□%考慮しても輸送容器に負荷される荷重は輸送物の□倍未満である。

容器の径方向に輸送物の□倍の荷重が発生した場合については、一般の試験条件における積み重ね評価（(ロ)-A.5.4）において自重の□倍荷重がかかった評価においても輸送容器に変形は生じないことから、輸送容器に破損、亀裂が生じるおそれはない。

容器の軸方向に□倍の荷重がかかった際の、軸方向の端部に発生する荷重 F は

$$F = \square MG$$

ここで、

M 輸送物の重量 □kg

G 重力加速度 9.80665m/s²

よって、

$$F = \square \text{ N}$$

となる。

ポリウレタンが変形するのに必要な軸方向の荷重 F_1 は、

$$F_1 = \pi \times \left((D/2)^2 - ((D - 2t)/2)^2 \right) \times \sigma$$

ここで、

D 外容器のポリウレタンの外径（外容器の外径－外板厚） 632.3mm

t 外容器のポリウレタン厚さ（最薄部） □mm

σ ポリウレタン（10pcf）の圧縮強度 □MPa

よって、

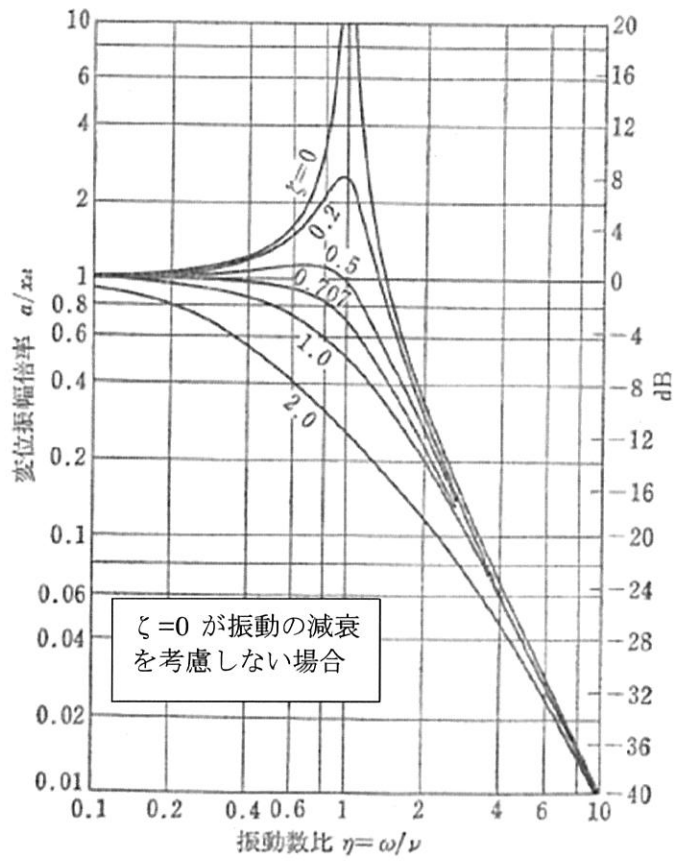
$$F_1 = \square \text{ N}$$

となる。

$F < F_1$ となるため、容器の軸方向に発生する振動によって、ポリウレタンに変形は生じないことから、輸送容器に破損、亀裂が生じるおそれはない。

以上のことから、輸送容器が変形しないことを考慮しても、輸送中に発生する振動によって輸送容器に破損、亀裂が生じるおそれはない。

なお、Traveller XL 型輸送物は世界中で多くの輸送実績があるが、振動によって収納物も含めて輸送物が破損したという報告はない。



図(ロ)A-15 力による強制振動の共振曲線²

² 参考文献 2 実用 機械振動学, 國枝正春, 1984

A.5 一般の試験条件

A.5.1 熱的試験

本輸送物は A 型核分裂性輸送物であるため、B 型輸送物に要求される一般の試験条件下の熱的試験は該当しない。ただし、核分裂性輸送物に要求される特別の試験条件下の耐火試験に供する前の条件として、環境温度 38℃太陽ふく射下で輸送物表面温度が一定になるまで置くことが求められるため、「(ロ)B.4 一般の試験条件」において環境温度 38℃太陽輻射下で 1 週間置くとした条件で評価している。

本輸送物は被覆管を密封境界に設定しており、太陽ふく射条件下に 1 週間置いた際に燃料棒の密封性が維持されることを評価により確認する。

「(ロ)B.4 一般の試験条件」で得た内容器の最高温度 □℃から最低温度 -40℃までを考慮する。

A.5.1.1 温度および圧力の要約

一般の試験条件における温度および圧力は、太陽ふく射熱による輸送物の最高温度とその温度上昇による最高圧力から求める。「(ロ)B.4 一般の試験条件」に示す解析結果より一般の試験条件下で輸送物最高温度は内容器外表面で □℃である。保守的な仮定として内容器内部温度も内容器外表面と均一とみなし、□℃であるとして本輸送物の密封境界である燃料棒内圧を求めると絶対圧 □ Pa となる。初期条件を 0℃、1 気圧(1.01×10⁵ Pa)として内容器の最大内外圧差を求めるとゲージ圧 □ Pa となる。

A.5.1.2 熱膨張

外容器の主要の構造材はステンレス鋼からなり、クラムシエルの主要構造材はアルミニウム合金からなるが、外容器とクラムシエルはゴム製のショックマウントを介して接続されているため、熱膨張差はショックマウントにて吸収される。

クラムシエルと燃料集合体間の熱膨張差については、以下の前提で考える。

・燃料集合体を □℃で装荷し、最低温度 -40℃で輸送する

・長手方向を考慮する

・燃料集合体、軸方向スペーサー、スタッドの線熱膨張係数は、アルミニウム合金との熱膨張差が大きくなる被覆管の線熱膨張係数で代表する

熱膨張量は以下の式で表される。

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0$$

ΔL 熱膨張量 mm

α 線熱膨張係数 1/K

ΔT 温度変化 K

L_0 初期長さ mm

ここで、

$$\Delta T = \square \text{ K}$$

アルミニウムの線熱膨張係数 α_{Al} : $2.262 \times 10^{-5} / \text{K}$

ジルカロイ-4 およびジルコニウム合金の線熱膨張係数 α_{Zr} : $4.441 \times 10^{-6} / \text{K}$

$L_0 = 5130.8 \text{ mm}$ (クラムシエルの全長)

から

$$\Delta L_{Al} - \Delta L_{Zr} = (\alpha_{Al} - \alpha_{Zr}) \Delta T L_0 = \square \text{ mm}$$

軸方向スペーサーと集合体との間には $\square \text{ mm}$ のゴム製のパッドがあり、スタッドと燃料集合体の接触部は $\square \text{ mm}$ のラバーコルクがあるため、これらによって熱膨張差は吸収される。

このため熱膨張による顕著な応力は発生しない。

A.5.1.3 応力計算

本輸送物の外容器に密封装置はなく、容器の内外圧力差により応力が発生することはない。よってここでは密封境界である燃料棒に発生する応力のみ評価する。

被覆管の材質は、ジルカロイ-4 およびジルコニウム合金であり、それについて発生する応力を評価した。放射性物質を収納している燃料棒被覆管にかかる応力を次式で計算する。なお、17×17型タイプ 64 に対する評価は被覆管肉厚の薄い 17×17型タイプ 57 の結果に包絡されることから評価を省略する。

内圧により円筒部分に発生する最大応力は次式で示す円周方向引張応力 σ_θ である。

$$\sigma_\theta = \frac{PD}{2t}$$

ここで、

σ_θ 被覆管にかかる円周方向応力 MPa

P 内外差圧 $\square \text{ MPa}$

(「B.4.4 最大圧力」において太陽輻射を考慮して得られた燃料棒最大内外差圧)

D 被覆管内径 $\left\{ \begin{array}{l} 9.40 \text{ mm} \quad (14 \times 14 \text{ 型}, 15 \times 15 \text{ 型}) \\ 8.36 \text{ mm} \quad (17 \times 17 \text{ 型タイプ } 57) \end{array} \right.$

A.5.5 貫通

告示別記第三第一号(ロ)(4)で要求されている貫通試験については、重量 6kg、直径 3.2cm の軟鋼棒が 1m の高さから輸送容器の外容器の外表面に落下した場合の、外板の貫通の有無を評価する。なお、外容器の外板はステンレス鋼製であり、板厚は 2.65mm である。

落下前の棒が持つポテンシャルエネルギー E_p は以下のとおりである。

$$E_p = MGH = 5.89 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

M : 軟鋼棒の質量 6kg

G : 重力加速度 9.80665 m/s²

H : 落下高さ 1000mm

一方、軟鋼棒が外板を貫通するのに必要なエネルギー E_s は以下のとおりである。

$$E_s = \frac{\pi}{2} \tau dt^2 = 1.05 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

τ : 外板の破壊せん断強さ 298MPa (引張強さ517 MPa/ $\sqrt{3}$)

d : 軟鋼棒の直径 32mm

t : 外板の板厚 2.65mm

ポテンシャルエネルギー E_p は、外板を貫通するのに必要なエネルギー E_s より小さく、安全率は以下の通りとなる。

$$\text{安全率} = \frac{1.05 \times 10^5}{5.89 \times 10^4} = 1.78$$

以上のことから、外板が軟鋼棒の落下によって貫通することはない。また、外板が貫通することがないことから、燃料集合体への影響もない。以上のことから本項目の場合にも基準に合致する。

A.5.6 角又は縁落下

告示別記第三第一号(ロ)(2)で要求されている角又は縁落下については、当該輸送物は主要構造物がステンレス鋼製でその重量は最大で kg であるので該当しない。

A.5.7 結果の要約およびその評価

一般の試験条件として、熱的試験、水噴霧、自由落下、積み重ね試験および貫通試験の各試験条件に対して評価をした結果、容器には局所的な変形が生じるが収納物である燃料集合体に、健全

B.4.3 最低温度

輸送物内収納物からの崩壊熱は無視できるほど小さいため、周囲温度を -40°C とした場合、輸送物の最低温度は周囲温度に等しく -40°C である。(ロ)A.4.2 で述べたように、主要構造材であるステンレス鋼、アルミニウム合金は -40°C となっても、脆性破壊やじん性低下がなく、使用されている材質が機能を損なうことはない。

B.4.4 最大内圧

一般の試験条件下における輸送物の圧力上昇は温度上昇によるもののみである。輸送容器自体は密閉構造となっておらず、圧力上昇は発生しないため、ここでは温度上昇による燃料棒の内圧を次式で計算する。なお、燃料棒の密封溶接は空調の効いた屋内で行われるが、ここでは密閉時の温度を保守的に 0°C とする。

$$P = P_0 \frac{T+273}{T_0+273} \quad (1)$$

ここで

P : 最大内圧

P_0 : 常温時の内圧 Pa

T : 最高温度 $^{\circ}\text{C}$

T_0 : 0°C

燃料棒内圧は種類毎に異なるが、ここでは最も高い Pa とする。

(1)式を用いて最大内圧を計算すると燃料棒では Pa となる。従って、燃料棒の応力解析には、内圧が Pa、外圧が 1.01×10^5 Pa とし、内外差圧は Pa を用いる。

B.4.5 最大熱応力

一般の試験条件下において、A型輸送物に対する熱的要件が無いこと、本輸送物の収納物の崩壊熱が無視できるほど小さいことから、本輸送物各部の温度は等しく、温度分布を生じない。

そのため、輸送物各部に熱応力は生じない。