

令和2年3月17日  
材料試験部 ホットラボ課

1 補正の内容

当該輸送容器については設計変更があることから、新たに容器承認を取得する観点で進めてきたところであるが、新規申請と同様の検査項目を追加するとともに、輸送容器が製造時から既に40年が経っていることから、これまでの経年劣化を評価して健全性を確認し、これらを補正申請で追加することとなった。

このため、添付書類-5「当該輸送容器が当該輸送容器の設計及び製作の方法に適合するよう維持されていることを示す説明書」について、製造時検査項目、保安院通達による検査項目及び製作した以降現在に至る健全性について適切であることを記載することとした。

2 補正の理由

- ・令和元年度実施の輸送容器定期自主検査の記録を追加する。
- ・製作時検査項目及び保安院通達による検査項目について確認したことを示す。
- ・製作以降（約40年間）における当該容器の阻害要因（応力・疲労、熱、腐食、放射線）による当該容器の健全性への影響のないことを示す。

3 本補正に伴う変更箇所

容器承認申請書の添付書類-5の説明書本文の記載の変更し、別添-5に令和元年度実施分の別紙-9「BM型輸送容器 定期自主検査記録」の追加、別添-6「製作時検査項目並びに検査データの確認について」及び別添-7「JMHL-78Y15T型輸送容器健全性評価」を追加する。

添付資料：JMHL-78Y15T型輸送容器健全性評価

以上

# JMHL-78Y15T型輸送容器健全性評価

## 目 次

1. はじめに	1
1.1 構成部材	1
1.2 輸送実績	1
2. 応力・疲労評価	3
2.1 吊上用トラニオンの評価条件	3
2.2 吊上用トラニオンの応力計算	4
2.3 支持用トラニオンの評価条件	6
2.4 支持用トラニオンの応力計算	7
2.5 疲労評価	9
2.6 参考文献	9
3. 熱的評価	10
3.1 評価条件	10
3.2 結果	10
3.3 参考文献	11
4. 腐食評価	12
4.1 評価条件	12
4.2 結果	12
4.3 参考文献	12
5. 放射線評価	13
5.1 評価条件	13
5.2 計算	13
5.3 結果	16
5.4 参考文献	16
6. まとめ	17

## 1. はじめに

JMHL-78Y15T型輸送容器の基本的安全機能を維持する上で重要な構成部材について、使用期間中の繰り返し荷重に対する応力・疲労、温度、腐食並びに放射線の影響を評価しその健全性を確認する。

### 1.1 構成部材

JMHL-78Y15T型輸送容器の主要な構成部材を表1-1に示す。

表1-1 主な構成部材

構成部材	材質	主要寸法 (mm)
格納容器	ステンレス鋼 鉛 (蓋部)	外径φ1200/φ900、内径φ200
密封容器	ステンレス鋼	外径φ196、内径φ129.8
トランニオン (吊上用、支持用)	ステンレス鋼	φ150

注1：ボルト及びガスケットは点検時に取り換え可能であるため評価対象外とし、上記には含めない。

### 1.2 輸送実績

これまでの当該輸送容器の輸送実績は102回であり、安全解析書に示される収納物番号毎に整理したものを表1-2に示す。

なお、各輸送において、評価条件を下記のとおり設定する。

- ・輸送は1回あたり2日間とし、その間は放射線環境にさらされるものとする。
- ・トランニオンは輸送1回の1輸送物あたり、負荷のかかる回数を10回とする。(保管場所からの移動→架台から吊上げ、ホットケープ上への設置(収納物の収納)→ホットケープから吊上げ、架台への設置→輸送→架台からホットケープ上への設置→ホットケープから架台への設置→保管場所への移動と想定し、負荷のかかる回数7回を保守的に丸めて10回と仮定する。)
- ・繰り返しの熱荷重は、輸送1回あたり1回負荷されるものとする。
- ・使用年数は、最初の輸送である昭和55年(1980年)3月から令和2年(2020年)2月現在までとし、評価期間を40年とする。

表1-2 輸送実績

収納物 番号	収納物の種類	使用 回数	放射能強度 (TBq) (注1)	中性子強度 (n/s) (注1)
F1	照射済酸化ウラン燃料(高温ガスループ用被覆粒子燃料)	13	592	7.95E+04
F2	照射済酸化ウラン燃料(研究用棒状被覆粒子燃料)	15	1150	1.04E+06
F3	照射済酸化ウラン燃料(研究用環状被覆粒子燃料)	4	732	8.49E+05
F4	照射済酸化ウラン燃料(高燃焼度研究用被覆粒子燃料)	1	364	1.98E+06
F5	照射済酸化ウラン及び酸化トリウム燃料(研究用環状被覆粒子燃料)	2	670	8.00E+03
F6	照射済酸化ウラン及び酸化トリウム燃料(高燃焼度研究用環状被覆粒子燃料)	2	499	1.63E+06
F7	照射済酸化トリウム燃料	0	23	1.74E+02
F8	未照射酸化ウラン燃料	0	1.52	—
F9	照射済酸化ウラン燃料	39	387	7.90E+06
F10	長期照射済酸化ウラン燃料	20	611	2.48E+06
F11	照射済中濃縮板状ウラン燃料	0	160	1.32E+02
F12	照射済中濃縮板状ウラン燃料試験片	0	118	9.66E+01
F13	照射済低濃縮板状ウラン燃料試験片	0	64	1.78E+02
F14	照射済ウラン・プルトニウム炭化物及び窒化物燃料	5	514	8.82E+06
F15	照射済ウラン・プルトニウム酸化物燃料(I)	1	458	7.13E+06
F16	照射済ウラン・プルトニウム酸化物燃料(II)	0	377	7.81E+06
F17	照射済酸化ウラン燃料(高燃焼度出力急昇試験I用棒状燃料)	0	406	1.77E+07
F18	照射済酸化ウラン燃料(高燃焼度出力急昇試験I用棒状燃料)	0	193	1.98E+07
F19	照射済酸化ウラン・プルトニウム燃料(高燃焼度出力急昇試験I用棒状燃料)	0	181	2.15E+07
F20	照射済酸化ウラン・プルトニウム燃料(高燃焼度出力急昇試験I用棒状燃料)	0	110	2.09E+07

注1: 安全解析書(イ)-表5に記載された線源強度

## 2. 応力・疲労評価

JMHL-78Y15T型輸送容器の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材である吊上用及び支持用トラニオンについて、使用期間における繰り返し荷重に対する疲労評価を実施する。

### 2.1 吊上用トラニオンの評価条件

吊上用トラニオンのモデル図を図2-1に、評価条件について下記(1)～(3)に示す。

#### (1) 吊上総重量

安全解析書のイ章C.5項より

$$W = 1.57 \times 10^4 \text{ kg}$$

#### (2) 温度

安全解析書のロ章B.4.2項より格納容器外面の最高温度を適用し、

$$T = 53 \text{ }^\circ\text{C}$$

#### (3) 使用回数

輸送実績より

$$\text{輸送102回} \times 10 \text{回} = 1020 \text{回}$$

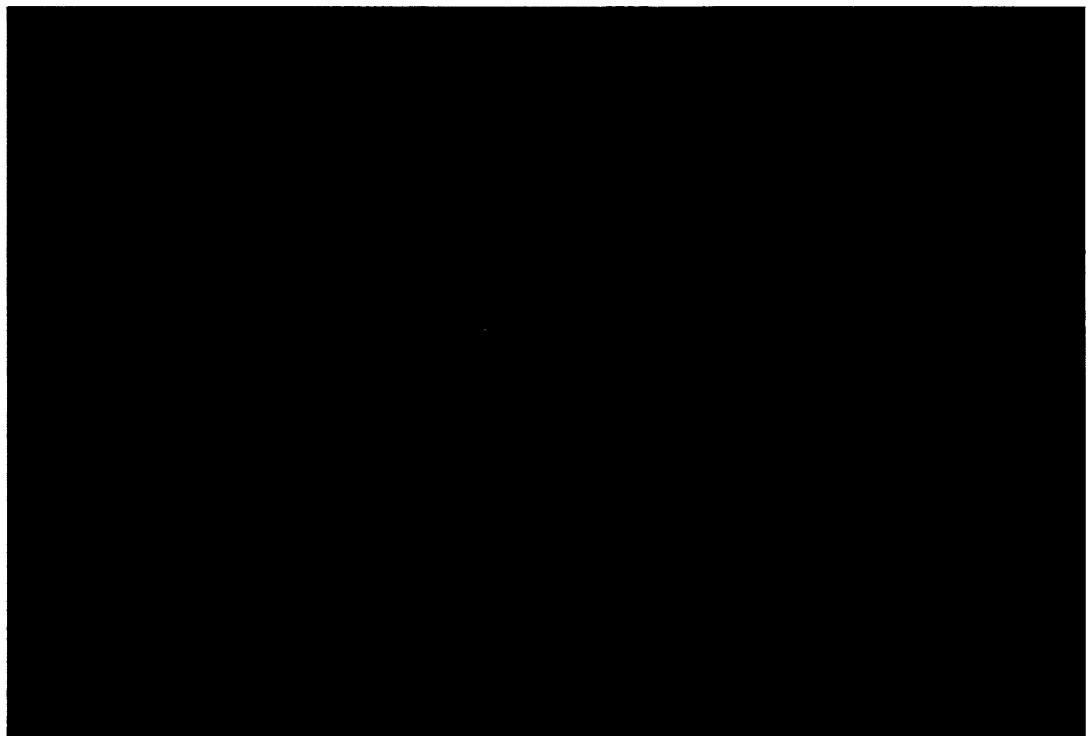


図2-1 吊上用トラニオンモデル

## 2.2 吊上用トラニオンの応力計算

吊上げ時の付加係数を3とすると、吊上用トラニオン1個にかかる荷重Pは

$$\begin{aligned} P &= 3 \cdot W \cdot g / 2 \\ &= 3 \times 1.57 \times 10^4 \times 9.80665 / 2 \\ &= 2.31 \times 10^5 \text{ N} \end{aligned}$$

### (1) 曲げ応力

トラニオンにかかる曲げ応力  $\sigma_b$  は

$$\sigma_b = M \cdot C / I$$

で表される。

ここで、

$$\begin{aligned} M &: \text{曲げモーメント } M = P \cdot x = 2.31 \times 10^5 \times 50 = 1.16 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm} \\ x &: \text{モーメントアーム } x = 50 \text{ mm} \\ C &: \text{トラニオン半径 } C = 75 \text{ mm} \\ I &: \text{断面二次モーメント } I = \pi d^4 / 64 = \pi \times 150^4 / 64 = 2.49 \times 10^7 \text{ mm}^4 \\ d &: \text{トラニオン外径 } d = 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

したがって、トラニオンにかかる曲げ応力  $\sigma_b$  は

$$\begin{aligned} \sigma_b &= M \cdot C / I \\ &= 1.16 \times 10^7 \times 75 / (2.49 \times 10^7) \\ &= 34.9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

### (2) せん断応力

トラニオンにかかるせん断応力  $\tau$  は

$$\tau = P / A$$

で表される。

ここで、

$$A : \text{トラニオンの断面積 } A = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 150^2 / 4 = 1.77 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

したがって、トラニオンにかかるせん断応力  $\tau$  は

$$\begin{aligned} \tau &= P / A \\ &= 2.31 \times 10^5 / (1.77 \times 10^4) \\ &= 13.1 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(3) 応力強さ

トラニオンにかかる応力強さSは

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

で表される。

したがって、トラニオンにかかる応力強さSは

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \\ &= \sqrt{34.9^2 + 4 \times 13.1^2} \\ &= 43.7 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(4) 繰り返しピーク応力強さ

トラニオンにかかる繰り返しピーク応力強さSaは

$$S_a = (S/2) \cdot (E_0/E_t)$$

で表される。

ここで、

$E_0$  : 設計疲労線図の基本縦弾性係数  $E_0 = 195000 \text{ MPa}$

$E_t$  : 材料の評価温度における縦弾性係数  $E_t = 192760 \text{ MPa}$

したがって、トラニオンにかかる繰り返しピーク応力強さSaは

$$\begin{aligned} S_a &= (S/2) \cdot (E_0/E_t) \\ &= (43.7/2) \cdot (195000/192760) \\ &= 22.1 \text{ MPa} \end{aligned}$$



### 2.3 支持用トラニオンの評価条件

支持用トラニオンのモデルを図2-2に、評価条件について下記(1)～(3)に示す。

(1) 吊上総重量

安全解析書イ章C. 5項より

$$W = 1.57 \times 10^4 \text{ kg}$$

(2) 温度

安全解析書ロ章B. 4. 2項より格納容器外面の最高温度を適用し、

$$T = 53 \text{ }^\circ\text{C}$$

(3) 使用回数

輸送実績より

$$\text{輸送102回} \times 10\text{回} = 1020\text{回}$$

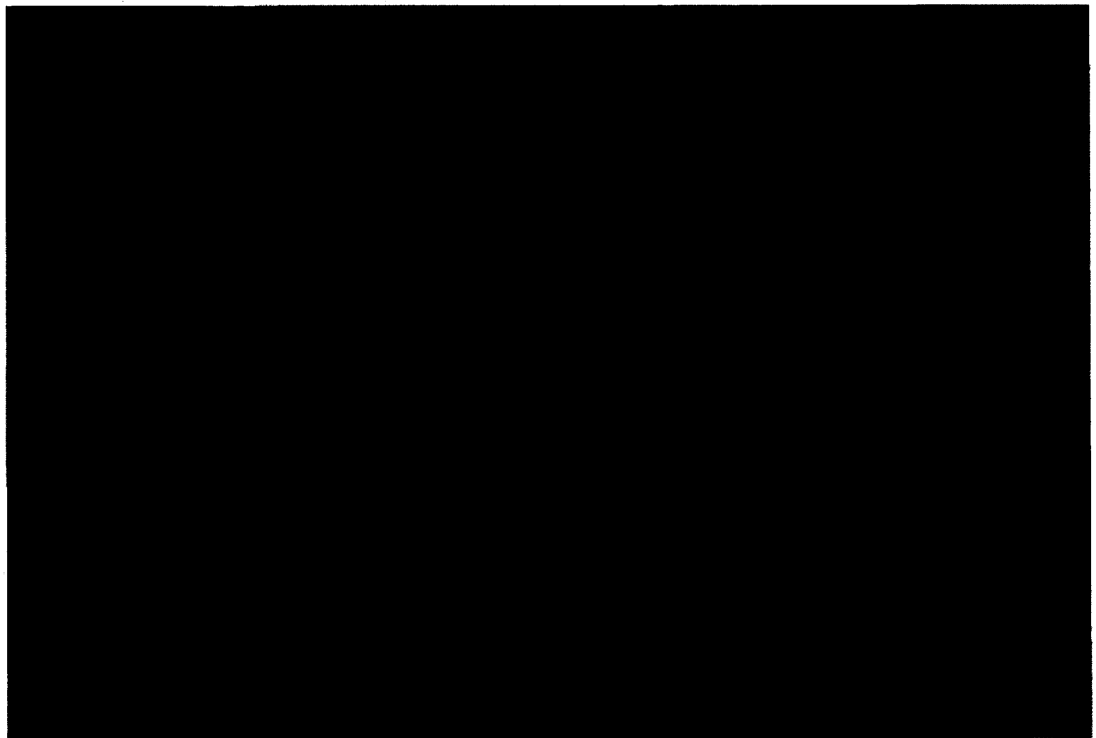


図2-2 支持用トラニオンモデル

## 2.4 応力計算

支持時の付加係数を3とすると、支持用トラニオン1個にかかる荷重Pは

$$\begin{aligned} P &= 3 \cdot W \cdot g / 2 \\ &= 3 \times 1.57 \times 10^4 \times 9.80665 / 2 \\ &= 2.31 \times 10^5 \text{ N} \end{aligned}$$

### (1) 曲げ応力

トラニオンにかかる曲げ応力 $\sigma_b$ は

$$\sigma_b = M \cdot C / I$$

で表される。

ここで、

$$M : \text{曲げモーメント } M = P \cdot x = 2.31 \times 10^5 \times 192.5 = 4.45 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$x : \text{モーメントアーム } x = 192.5 \text{ mm}$$

$$C : \text{トラニオン半径 } C = 75 \text{ mm}$$

$$I : \text{断面二次モーメント } I = \pi d^4 / 64 = \pi \times 150^4 / 64 = 2.49 \times 10^7 \text{ mm}^4$$

$$d : \text{トラニオン外径 } d = 150 \text{ mm}$$

したがって、トラニオンにかかる曲げ応力 $\sigma_b$ は

$$\begin{aligned} \sigma_b &= M \cdot C / I \\ &= 4.45 \times 10^7 \times 75 / (2.49 \times 10^7) \\ &= 134 \text{ MPa} \end{aligned}$$

### (2) せん断応力

トラニオンにかかるせん断応力 $\tau$ は

$$\tau = P / A$$

で表される。

ここで、

$$A : \text{トラニオンの断面積 } A = \pi \cdot d^2 / 4 = \pi \cdot 150^2 / 4 = 1.77 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

したがって、トラニオンにかかるせん断応力 $\tau$ は

$$\begin{aligned} \tau &= P / A \\ &= 2.31 \times 10^5 / (1.77 \times 10^4) \\ &= 13.1 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(3) 応力強さ

トラニオンにかかる応力強さSは

$$S = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2}$$

で表される。

したがって、トラニオンにかかる応力強さSは

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \\ &= \sqrt{134^2 + 4 \times 13.1^2} \\ &= 137 \text{ MPa} \end{aligned}$$

(4) 繰り返しピーク応力強さ

トラニオンにかかる繰り返しピーク応力強さSaは

$$S_a = (S/2) \cdot (E_0/E_t)$$

で表される。

ここで、

$E_0$  : 設計疲労線図の基本縦弾性係数  $E_0 = 195000 \text{ MPa}$

$E_t$  : 材料の評価温度における縦弾性係数  $E_t = 192760 \text{ MPa}$

したがって、トラニオンにかかる繰り返しピーク応力強さSaは

$$\begin{aligned} S_a &= (S/2) \cdot (E_0/E_t) \\ &= (137/2) \cdot (195000/192760) \\ &= 69.3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

## 2.5 疲労評価

吊上用トラニオンの繰り返しピーク応力強さは22.1MPa、支持用トラニオンの繰り返しピーク応力強さは69.3MPaであり、両方ともSUS304の応力疲労線図(S/N線図)における疲労限度(220MPa)を大きく下回っている。

したがって、本条件での吊上げ作業では回数に関わらず疲労破壊することはない。

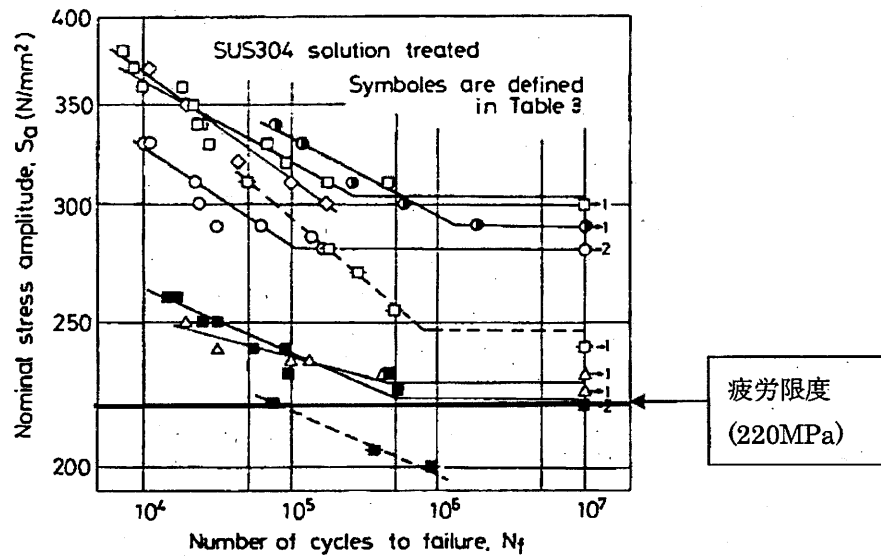


図 2-3 SUS304 の S/N 線図<sup>(1)</sup>

## 2.6 参考文献

- (1) 竹内悦男ほか、「室温におけるSUS304鋼の疲労特性」、日本機械学会論文集(A編)、51巻464号、(昭和60年4月)

### 3. 熱的評価

JMHL-78Y15T型輸送容器の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、使用期間中の温度に対する健全性を評価する。評価項目としては、①設計温度に対する構造健全性及び②繰り返し発生する熱荷重に対する疲労評価を実施する。

#### 3.1 評価条件

##### (1) 評価対象

評価対象は、密封容器(ステンレス鋼)及び格納容器(ステンレス鋼)とする。

##### (2) 温度

安全解析書(ロ)-表B.18に示される一般の試験条件での評価対象の最高温度にて評価を行う。したがって、密封容器の解析結果154℃を評価温度とする。

なお、これまでの実績では特別の試験条件に該当する事象はなかったものとし、評価対象外とする。

##### (3) 輸送回数

輸送実績より

・輸送102回

とする。

##### (4) 最大熱応力

安全解析書の(ロ)-表B.18に示される一般の試験条件での最大熱応力、9.88MPaにて評価を行う。

##### (5) 文献データ

- ・設計・建設規格<第I編 軽水炉規格>2005年版及び2007年追補版(JSME S NC1-2007) <sup>(1)</sup> (以下「設計・建設規格」という。)では、425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。
- ・ステンレス鋼便覧<sup>(2)</sup>では、融点(絶対温度)の1/3以下の低い温度領域においては、クリープの変形量が無視できるほどに小さいことが示されている。構成部材であるステンレス鋼の融点は1398℃以上(絶対温度で1671.15K)であることから、クリープを考慮すべき温度は約280℃以上となる。

#### 3.2 結果

##### ① 設計温度に対する構造健全性

使用環境温度は280℃よりも十分低く、設計用強度・物性値が規定されている

範囲であり、クリープを考慮する必要もないことから、構造強度への影響はない。

② 繰り返しの熱荷重による疲労の評価

発生する最大熱応力9.88MPaが、輸送毎に繰り返し発生する熱荷重として負荷されるものとする。この熱荷重は、2.5項の図2-3 SUS304のS/N線図で示された疲労限度(220MPa)を大きく下回ることから、輸送回数に関わらず、熱荷重による疲労を考慮する必要はない。

3.3 参考文献

- (1) (一社)日本機械学会、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第I編 軽水炉規格>2005年版及び2007年追補版(JSME S NC1-2007)」、(2007年9月)
- (2) ステンレス協会、「ステンレス鋼便覧(第3版)」、日刊工業新聞社(1995)、P.216、P.1428

#### 4. 腐食評価

JMHL-78Y15T型輸送容器の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、使用期間中の環境下での腐食等の経年変化に対する評価を実施する。

##### 4.1 評価条件

###### (1) 評価対象

評価対象は、密封容器(ステンレス鋼)及び格納容器(ステンレス鋼)とする。

###### (2) 評価期間

評価期間を40年とする。

###### (3) 使用環境

外気(大気暴露)

###### (4) 文献データ

ステンレス鋼に関する10年間の大気暴露データを基にした40年後の最大浸食深さの推定<sup>(1)</sup>によれば、浸食深さは最大で0.3mm以下である。

##### 4.2 結果

40年間の推定腐食量が最大0.3mm以下であることから、通常の使用環境では、鋼製部材の構造強度への影響はない。

##### 4.3 参考文献

(1) 腐食防食学会、「材料環境学入門」、丸善(株)(平成5年9月25日)、P.162、P.163

## 5. 放射線評価

JMHL-78Y15T型輸送容器の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、使用期間における放射線の影響を考慮して、文献に基づき、経年変化の影響を評価する。

### 5.1 評価条件

#### (1) 評価対象

評価対象は、密封容器(ステンレス鋼)及び格納容器(ステンレス鋼、鉛)とする。

#### (2) 放射線照射量

放射線照射量については以下の条件とする。

- ・中性子照射量に対する影響評価とする。
- ・中性子照射量の最大値として、安全解析書の(イ)-表5で規定される収納物で中性子強度が最大となる収納物を線源とし、評価対象の中で最小径となる密封容器内面(側面)に照射される量から中性子束を算出、評価する中性子照射量とする。
- ・照射回数は使用履歴から102回でその詳細は表1-2に示されたものとし、1回の作業日数は2日間とする。

#### (3) 文献データ

5.4項に示す文献には以下の評価が示されている。

- ・ステンレス鋼は  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  以下の中性子照射量に対して、顕著な特性変化は見られないことから、脆化を考慮する必要はない<sup>(1)(2)</sup>。
- ・鉛は放射線の影響はほとんどなく、耐放射線材料として使用実績も豊富であり、使用できる<sup>(1)</sup>。

### 5.2 計算

中性子照射量に対する経年変化の影響評価の計算結果を以下に示す。

#### (1) 中性子照射量の算出

表1-2から、それぞれの収納物に対し中性子強度、収納物長さを用いて評価を行う。

照射される領域を線源の側面とし、その表面積は、保守的に最も内側に配置される密封容器内側の収納物の長さの範囲とすると、表面積  $S$  は次のとおり算出される。

$$S = \pi \times D_i \times L$$



ここで、

S : 密封容器内面の表面積 (cm<sup>2</sup>)

Di : 容器内径 (cm)

L : 収納物長さ (cm)

次に、使用実績による使用回数をもとに、一回の期間が2日であることから、照射期間 t は次のとおり算出される。

$$t = N \times 2(\text{日間}) \times 24(\text{時間}) \times 60(\text{分}) \times 60(\text{秒}) = 1.728 \times 10^5 \cdot N$$

ここで、

N : 使用回数 (回)

t : 照射時間 (s)

以上より、中性子照射量 I は、

$$I = 1.25 \times n \times t / S$$

となる。なお中性子原強度は、遮蔽解析で (イ)-表 5 の中性子強度を 1.25 倍したものを評価に使用していることから、保守性を鑑みて中性子照射量の算出には 1.25 倍を考慮するものとする。

ここで、

I : 中性子照射量 (n/cm<sup>2</sup>)

n : 表 1-2 に示す中性子原強度 (n/s)

## (2) 計算結果

使用実績を考慮した各収納物に対する中性子照射量の算出結果を表 5-1 に示す。使用期間中の中性子照射量はこれらの総和となることから、

$$\Sigma I = 4.60 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$$

となる。

表 5-1 中性子照射量の算出結果

収納物 番号	使用 回数 N (回)	密封容器 内径 Di (cm)	収納物 長さ L (cm)	表面積 S (cm <sup>2</sup> )	照射 時間 t (s)	中性子 強度 n (n/s)	中性子 照射量 I (n/cm <sup>2</sup> )
F1	13	12.98	50	2039	$2.25 \times 10^6$	$7.95 \times 10^4$	$1.09 \times 10^8$
F2	15	12.98	50	2039	$2.59 \times 10^6$	$1.04 \times 10^6$	$1.65 \times 10^9$
F3	4	12.98	50	2039	$6.91 \times 10^5$	$8.49 \times 10^5$	$3.60 \times 10^8$
F4	1	12.98	50	2039	$1.73 \times 10^5$	$1.98 \times 10^6$	$2.10 \times 10^8$
F5	2	12.98	50	2039	$3.46 \times 10^5$	$8.00 \times 10^3$	$1.70 \times 10^6$
F6	2	12.98	50	2039	$3.46 \times 10^5$	$1.63 \times 10^6$	$3.45 \times 10^8$
F7	0	12.98	50	2039	0	$1.74 \times 10^2$	0
F8	0	12.98	50	2039	0	-	-
F9	39	12.98	50	2039	$6.74 \times 10^6$	$7.90 \times 10^6$	$3.26 \times 10^{10}$
F10	20	12.98	50	2039	$3.46 \times 10^6$	$2.48 \times 10^6$	$5.25 \times 10^9$
F11	0	12.98	50	2039	0	$1.32 \times 10^2$	0
F12	0	12.98	50	2039	0	$9.66 \times 10^1$	0
F13	0	12.98	50	2039	0	$1.78 \times 10^2$	0
F14	5	12.98	50	2039	$8.64 \times 10^5$	$8.82 \times 10^6$	$4.67 \times 10^9$
F15	1	12.98	50	2039	$1.73 \times 10^5$	$7.13 \times 10^6$	$7.55 \times 10^8$
F16	0	12.98	50	2039	0	$7.81 \times 10^6$	0
F17	0	12.98	40	1631	0	$1.77 \times 10^7$	0
F18	0	12.98	40	1631	0	$1.98 \times 10^7$	0
F19	0	12.98	40	1631	0	$2.15 \times 10^7$	0
F20	0	12.98	40	1631	0	$2.09 \times 10^7$	0
合計	102	-	-	-	-	-	$4.60 \times 10^{10}$

### 5.3 結果

密封容器及び格納容器を構成するステンレス鋼のこれまでの使用実績に対し、収納物による中性子照射量は $10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>未満となる。これは機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。

また、格納容器の構成材である鉛は放射線の影響はほとんどなく、引き続き使用することは問題ない。

### 5.4 参考文献

- (1) (一社)日本原子力学会、「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査標準：2013 (ASJ-SC-F006:2013)」、(2014年11月)
- (2) 土肥謙次ら、「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子遮蔽効果(その2)－熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響－」、(一財)電力中央研究所 (平成9年6月)、P.10

## 6. まとめ

JMHL-78Y15T型輸送容器の基本的安全機能を維持する上で重要な構成部材について、使用期間中の応力・疲労、温度、腐食並びに放射線の影響を評価した。

評価結果より、これまでの使用期間において応力・疲労、温度、腐食並びに放射線の影響の経年変化に対して、主要な構成部材の健全性が維持されていることを確認した。