

## ガラス固化体9段積み保管時の固化体容器の健全性について

令和元年10月18日  
再処理廃止措置技術開発センター  
ガラス固化部

### 1. 概要

保管能力増強においては、全動力電源喪失時に排風機による強制空冷ができない場合においても、自然通風換気によりガラス固化体の冷却を維持できるよう対策を講じることとしている。

自然通風換気時には、換気風量が減少するため排気温度が上昇し、ガラス固化体温度が上昇するが、廃止措置計画変更認可申請書「再処理施設の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則との適合性 別紙-5 第十七条（保管廃棄施設）」に記載のとおり、ガラス固化体の中心温度が485℃(ガラスの失透温度500±15℃を安全側に485℃とした値)を下回る設計としている。この場合、固化体容器の応力は弾性範囲内で健全であり、閉じ込め機能に影響はないことについて、以下のとおり評価している。

### 2. 自然通風換気状態での温度評価について

自然通風換気状態におけるガラス固化体等の温度評価は、自然通風換気時の保管ピットの換気風量について評価し、その換気風量を条件として行うガラス固化体の伝熱評価により評価している。

#### 2.1 自然通風換気時における換気風量の評価

自然通風換気時における保管セルの換気風量については、ガラス固化体の崩壊熱によって冷却空気の密度差により生じる通風力と冷却空気の流路における圧力損失がバランスする条件から換気風量を評価している。保管セルの換気に係る換気経路の概要を図-1に示す。

#### ①評価方法

##### ・通風力の評価

冷却空気の密度差により生じる通風力については、冷却空気温度が上昇する保管ピット以降の換気経路について考慮している。通風力の評価式を以下に示す。

【自然通風換気での通風力：DF】

$$DF = g(\rho(T_{in}) - \rho(T_{out})) \times H$$

H：排気経路において冷却空気が上昇する高さ

$\rho$ ：冷却空気の給気温度または排気温度での空気密度

・圧力損失の評価

換気経路の圧力損失については、換気経路の形状変化等による圧力損失、及び経路の摩擦による圧力損失を考慮している。給気から排気に至る換気経路について圧力損失を評価している。

圧力損失係数、管路の摩擦係数については「管路・ダクトの流体抵抗 日本機械学会」、及び「空気調和・衛生工学便覧Ⅱ 空調設備編」に基づき評価している。評価式を以下に示す。

【形状変化に伴う圧力損失：DP<sub>1</sub>】

$$DP_1 = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \mu^2$$

【経路の摩擦による圧力損失：DP<sub>2</sub>】

$$DP_2 = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \mu^2$$

ζ：圧力損失係数（拡大部：1.0, 縮小部：0.5

（曲がり部：ダクト径、曲がり角等を考慮し、「空気調和・衛生工学便覧Ⅱ」から評価した値）

λ：摩擦係数（層流：λ = 64/Re）

（乱流：λ = 0.3164Re<sup>-1/4</sup>, 2000 < Re < 10<sup>5</sup>）

（乱流：1/√λ = 1.8log(Re/7), 6 × 10<sup>3</sup> < Re < 4 × 10<sup>7</sup>）

μ：流速

ρ：空気密度

d：管路の相当直径

L：管路の長さ

②評価条件

自然通風換気状態での換気風量の評価においては、以下の評価条件を考慮している。

- 保管セルでのガラス固化体の保管本数は 630 本（9 段積み）とする。
- これまでに保管ピットに保管しているガラス固化体については、製造実績に基づき保管期間の減衰を考慮した発熱量で評価する。
- 今後に製造するガラス固化体の発熱量は、安全側に最大発熱量 0.65 kW で評価する。
- 保管能力増強においては排気経路上のダクト等に断熱材を施工することから、断熱材を考慮した条件でダクト等からの放熱による排気温度の低下を考慮する。
- 換気経路上のフィルタについて、換気風量に応じて圧損を考慮する。
- 入気温度は 35 °C で評価する。

### ③評価結果

上記の評価条件で自然通風換気時の換気風量について評価した結果、保管セルの換気風量は約 9000 m<sup>3</sup>/h と評価される。

保管セルの天井コンクリート温度は「使用済燃料貯蔵施設規格コンクリートキャスク、キャニスタ詰替装置およびキャニスタ輸送キャスク構造規格 日本機械学会」が定める事故時の一般部分の温度制限値(175 °C)を下回る設計としている。保管セル換気風量とガラス固化体発熱量の関係から評価した排気温度に基づく自然通風換気状態での保管セルの天井コンクリート温度は約 150 °Cであり、制限値(175 °C)を満足する。

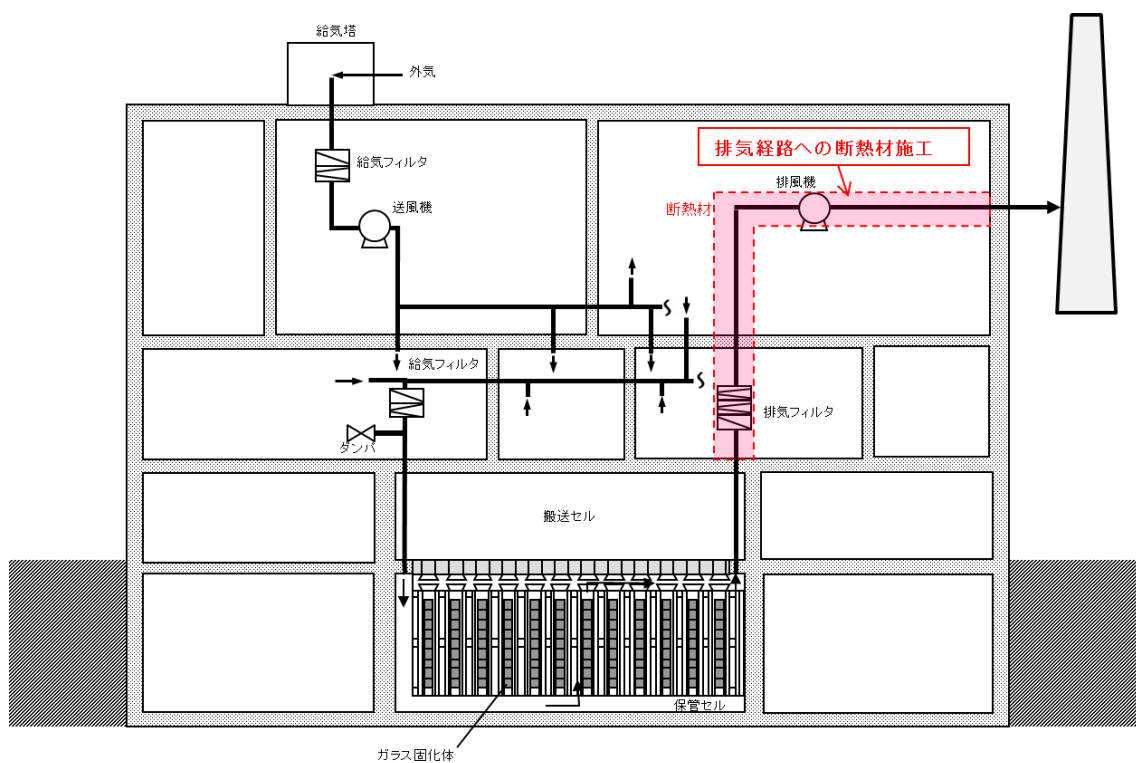


図-1 保管セル換気経路の概要図

## 2.2 ガラス固化体の温度評価

### ①評価モデル

ガラス固化体の表面温度は、換気風量に基づくガラス固化体表面での熱伝達条件等を考慮し、ガラス固化体の発熱量と表面からの伝熱量のバランスから評価している。

また、ガラス固化体における伝熱は、発熱がある円筒座標系の定常熱伝導とし、ガラス固化体の中心温度を評価している。ガラス固化体温度の評価に係る概要を図-2 に示す。

【熱バランスによる評価式】

ガラス固化体の発熱量  $Q_g$  が固化体表面からの対流熱伝達、及び輻射伝熱による伝熱量とバランスする条件から、ガラス固化体の表面温度  $T_s$  を評価している。熱バランスの関係式を以下に示す。

$$Q_g = Q_{t1} + Q_r$$

$$Q_{t2} = Q_r$$

$Q_g$  : ガラス固化体発熱量 (0.65 kW)

$Q_{t1}$  : 対流熱伝達による固化体表面から冷却空気への伝熱量 ( $Q_{t1} = hS_1 \times (T_s - T_a)$ )

$Q_r$  : 輻射伝熱による固化体表面からピットへの伝熱量 ( $Q_r = c \cdot (T_s^4 - T_p^4)$ )

$Q_{t2}$  : 対流熱伝達によるピットから冷却空気への伝熱量 ( $Q_{t2} = hS_2 \times (T_p - T_a)$ )

【円筒座標系の定常熱伝導評価式】

ガラス固化体の温度分布について、式①を  $r=0$  で  $dt/dr=0$ ,  $r=r_1$  で  $T=T_s$  を境界条件として求めた温度分布の式②から  $r=0$  でのガラス固化体中心温度  $T_c$  を式③で算出している。

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} \dots \textcircled{1}$$

$$T = T_s + \frac{Q_g}{4\lambda} (r_1^2 - r^2) \dots \textcircled{2}$$

$$T_c = T_s + \frac{Q_g}{4\lambda} \cdot r_1^2 \dots \textcircled{3}$$

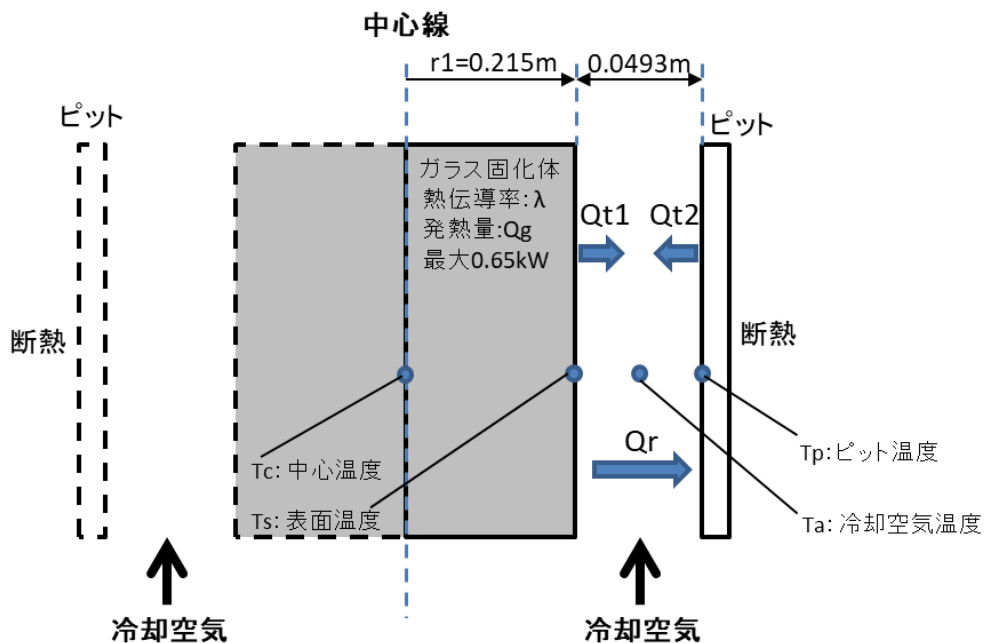


図-2 ガラス固化体温度の評価に係る概要図

## ②評価条件

ガラス固化体表面温度及びガラス固化体中心温度の評価においては、以下の評価条件を考慮している。

- ガラス固化体の発熱量は、安全側に最大発熱量 0.65 kW で評価する。
- ガラス固化体の発熱は、一様な発熱分布として評価する。
- 固化体容器温度は、固化体表面温度  $T_s$  として評価する。
- ガラス固化体表面とピット間の輻射伝熱を考慮する。
- ガラス固化体周辺の冷却空気温度は、安全側にピット出口温度で評価する。
- ピット外面は断熱条件とする。

## ③評価結果

上記の評価条件で自然通風換気でのガラス固化体中心温度  $T_c$ 、及びガラス固化体容器温度  $T_s$  について評価した結果、ガラス固化体中心温度  $T_c$  は約 410 °C、ガラス固化体容器温度  $T_s$  は約 350 °C と評価される。

ガラス固化体中心温度は 485 °C (ガラスの失透温度 500±15 °C を安全側に 485 °C とした値) を下回る設計としている。自然通風換気状態でのガラス固化体中心温度は約 410 °C であり、485 °C を満足する。

### 3. 固化体容器の応力評価について

ガラス固化体の 9 段積み保管時に、自重及び地震力により固化体容器に発生する応力と温度上昇に伴う固化体容器の内圧上昇により発生する応力の合計が、固化体容器(SUS304L 製)の降伏応力を下回ることを評価している。

#### 3.1 自重及び地震力による応力評価

ガラス固化体 9 段積み保管時に自重及び地震力により固化体容器に発生する応力  $\sigma$  は、以下の式により評価している。

$$\sigma = P/A + M/Z$$

P : 自重及び地震力による荷重 (地震力は基準地震動に基づく鉛直震度 : 0.78)

A : 固化体容器胴部の断面積 ( $\phi$  430 mm、t6 mm に腐食代 0.5 mm を考慮)

M : 偏心モーメント (固化体段積み時の偏心を考慮したモーメント (段積み荷重 × 偏心距離))

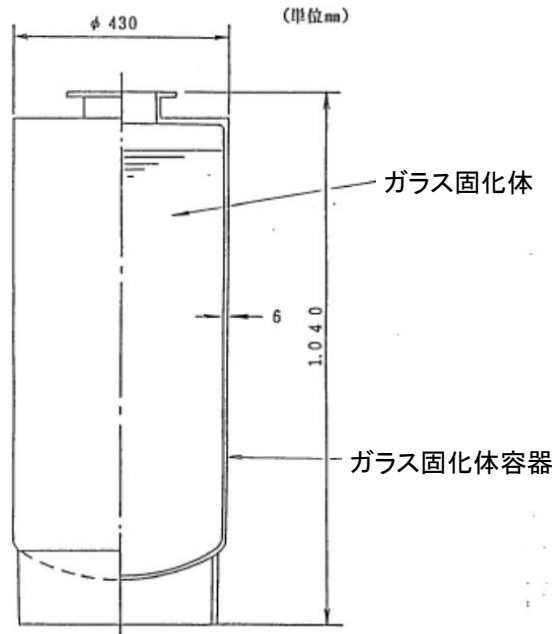
Z : 固化体容器の断面係数 ( $\phi$  430 mm、t6 mm に腐食代 0.5 mm を考慮)

#### 3.2 内圧上昇による応力評価

評価温度に応じた内圧上昇を荷重とした固化体容器に発生する応力を FEM 解析コード Nastran により評価している。

### ①解析モデル

解析モデルにおける部材厚さは腐食代 0.5 mm を除いた寸法に設定している。固化体容器の仕様を以下に示す。



ガラス固化体容器仕様	
形状	円筒型
材質	SUS 304L
重量	400kg
寸法	胴部外径 高さ 胴部板厚
	Φ 430 mm 1,040 mm 6 mm

### ②材料物性

解析に用いる材料物性のうち、縦弾性係数については「JSME 発電用原子力設備規格 材料規格」のオーステナイト系ステンレス鋼の値を用いている。

また、降伏応力(SUS304L)については、「JSME 発電用原子力設備規格 材料規格」の値を用いている。

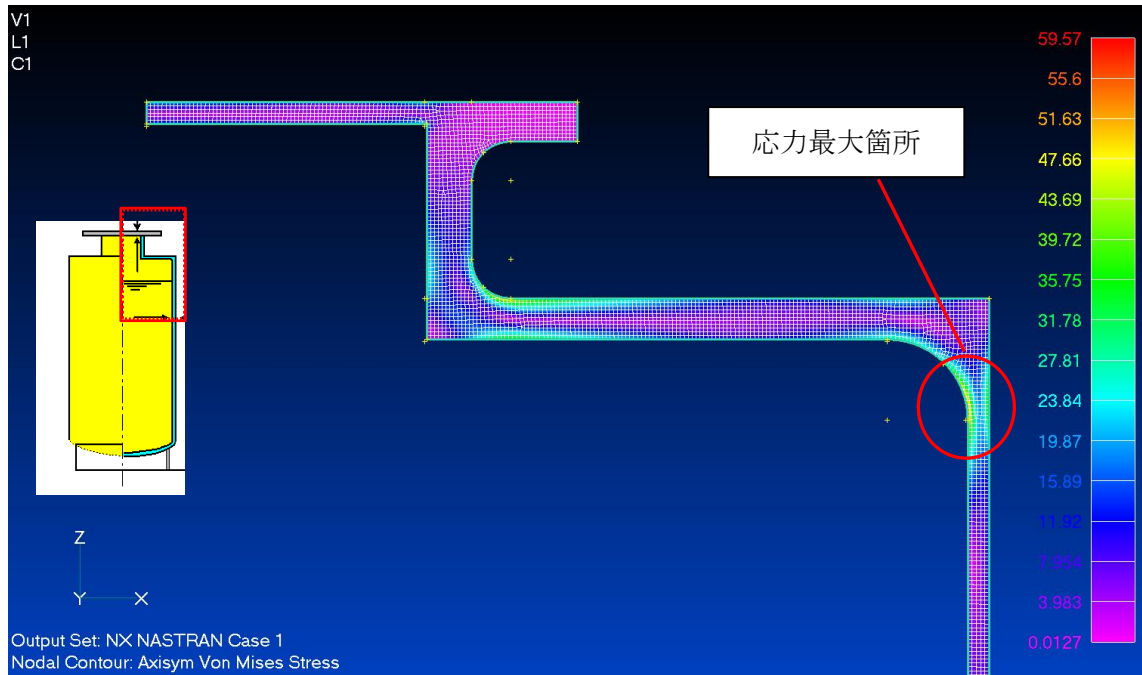
### 3.3 評価結果

自然通風換気状態における固化体容器温度は、約 350 °C と評価している。この温度条件において、固化体容器の評価応力(69.9 MPa)は固化体容器の降伏応力(104 MPa)を下回る(表-1 参照)。

自然通風換気状態において固化体容器の応力は弾性範囲内で健全であることから閉じ込め機能に影響はなく、放射性物質の異常な水準の放出に至ることはない。

表-1 固化体容器の応力評価結果

固化体容器温度 [°C]	自重及び地震力 による応力① [MPa]	内圧による 応力② [MPa]	固化体容器応力 ①+②合計値 [MPa]	固化体容器 降伏応力(Sy) [MPa]
350	10.3	59.6	69.9	104



内圧による応力解析結果(固化体容器温度 350 °C)