

高温クリープ及び疲労による流下ノズルの寿命評価

1. 流下ノズルの寿命評価概要

ガラス溶融炉の構成部品である流下ノズルは、その運転に伴い加熱冷却の温度サイクルを受け、その高温側は材料のクリープ^{※1}温度領域にあるものの、流下ノズルに作用する機械荷重は流下ノズル自体の自重とガラス液位からのヘッドによる内圧等があるが、いずれも極めて小さい^{※2}ため延性破壊を起こす可能性はない。

しかしながら、温度サイクルにより発生する熱応力が材料の降伏応力に近いオーダーなので、これによる疲労損傷を念のため評価した。なお、温度領域がクリープ域であることも考慮して評価した。

ガラス溶融炉の流下ノズルを含むケーシング等は安全上の閉じ込めバウンダリを構成しないため、「加工施設、再処理施設及び特定廃棄物管理施設の溶接の技術基準に関する規則」における機種区分では機種区分外であり、国内にはクリープ疲労寿命評価に適用できる規格・基準類はない。

このため、クリープと疲労の相互影響を考慮した評価手法として、高温領域で使用される原子力発電設備のクラス1機器に適用される「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」(JSME)の元となっているASME SEC III Div.1 Subsection NHを参考にして、流下ノズルの寿命評価を実施した。

なお、クラス1機器への設計要求事項となっている安全率は、母材と溶接部の混在、形状・部位の多様性などのバラツキを考慮するためであるが、流下ノズルは、溶接部も形状不連続部位もないことから、それらのバラツキを考慮する必要はないので安全率は考慮していない。

ASME SEC III Div.1 Subsection NH Appendix Tにおけるクリープ疲労寿命評価の式は、以下のとおりである。

$$\sum_{j=1}^p \left(\frac{n}{N_d} \right)_j + \sum_{k=1}^q \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)_k \leq D (=1)$$

疲労による損傷度 クリープによる損傷度

ここで、 $(N_d)_j$: サイクル j における相当ひずみ範囲に対する許容繰返し数

$(T_d)_k$: 時間間隔 k における評価点の最高温度、及び応力に対応する最小クリープ破断強度より求められる許容時間

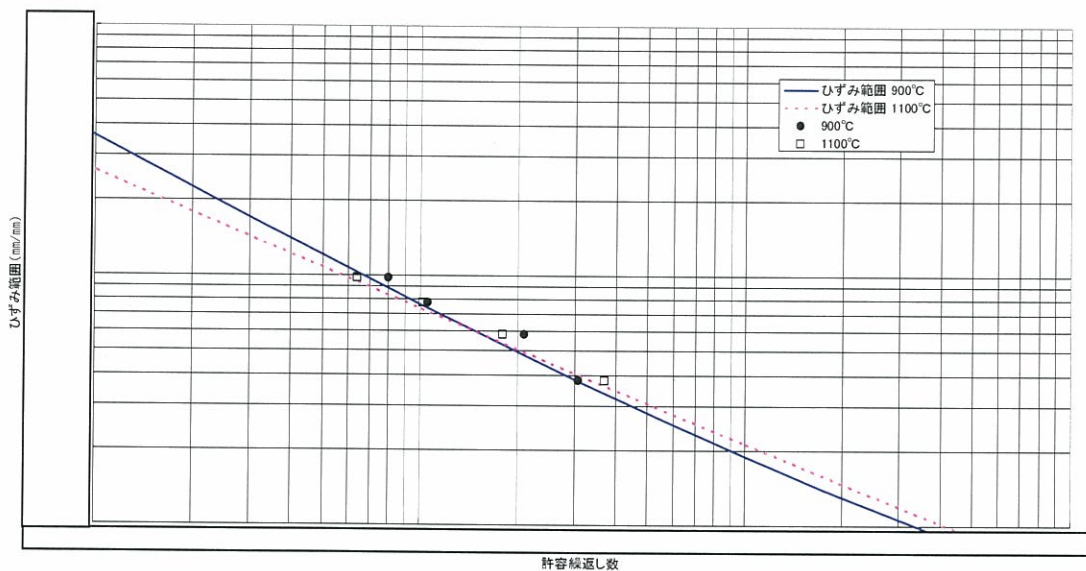
$(n)_j$: サイクル j の繰返し数

$(\Delta t)_k$: 時間間隔 k の継続時間

※1 : クリープとは、物体に持続応力が作用すると、時間の経過とともに歪み（変形）が増大する現象である。塑性変形は時間に依存しないのに対し、クリープは時間が経つほど変形量が増える。温度が高いほどクリープする度合いは大きく、金属材料では、一般に溶融点温度（絶対温度）の30%以上の高温域でクリープ変形が生じる。

※2 : ガラス液位からのヘッドによる内圧等については、「5. 流下ノズルにかかる機械荷重に関する影響」で述べる。

ガラス溶融炉の設計に先立って、服部博らによって流下ノズルの材料であるインコネル 690 の高温での材料強度データ（高温引張強度、クリープ強度、疲労強度）を取得する試験が実施されている。ガラス溶融炉の設計においては、これらの疲労試験データ（公開文献『服部博ら；ガラス溶融炉材料としてのインコネル 690 の高温強度特性（流下ノズル耐久性評価第一報）（社）日本原子力学会「昭 63 年会」』に示されているデータ）が用いられており、今回の評価においては同試験データを安全側に包絡した設計疲労曲線を用いている（図－1 参照）。



図－1 インコネル 690 設計疲労曲線

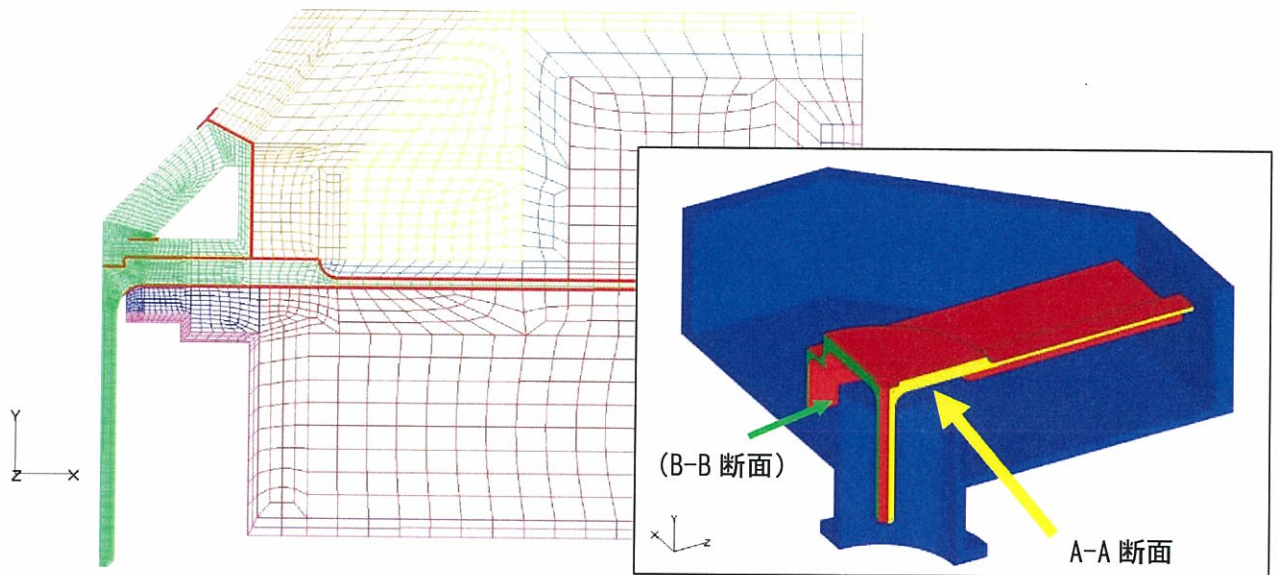
2. 流下ノズルの寿命評価の手順

- ① 運転中の流下ノズルの温度履歴を入力条件とした熱伝導解析を実施し、流下ノズル熱弾塑性クリープ解析用温度入力データ（温度分布）を作成する。
- ② 上記温度分布を用いた熱弾塑性クリープ解析を実施する。
- ③ 得られた解析結果（応力・ひずみの時間変化）から流下ノズルのクリープ疲労寿命予測を実施する。

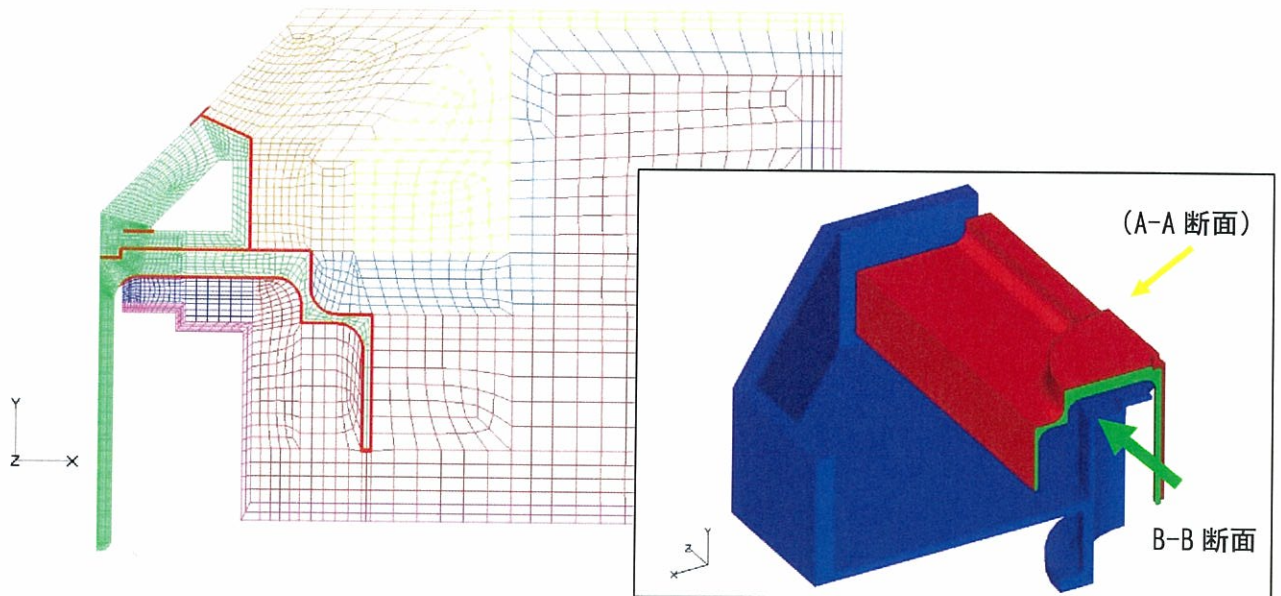
なお、熱伝導解析においては STAR CD 3.1B を、応力解析においては ABAQUS 6.6.3 を使用した。

3. 解析モデル

解析モデルを以下に示す。



解析モデル (A-A 断面)

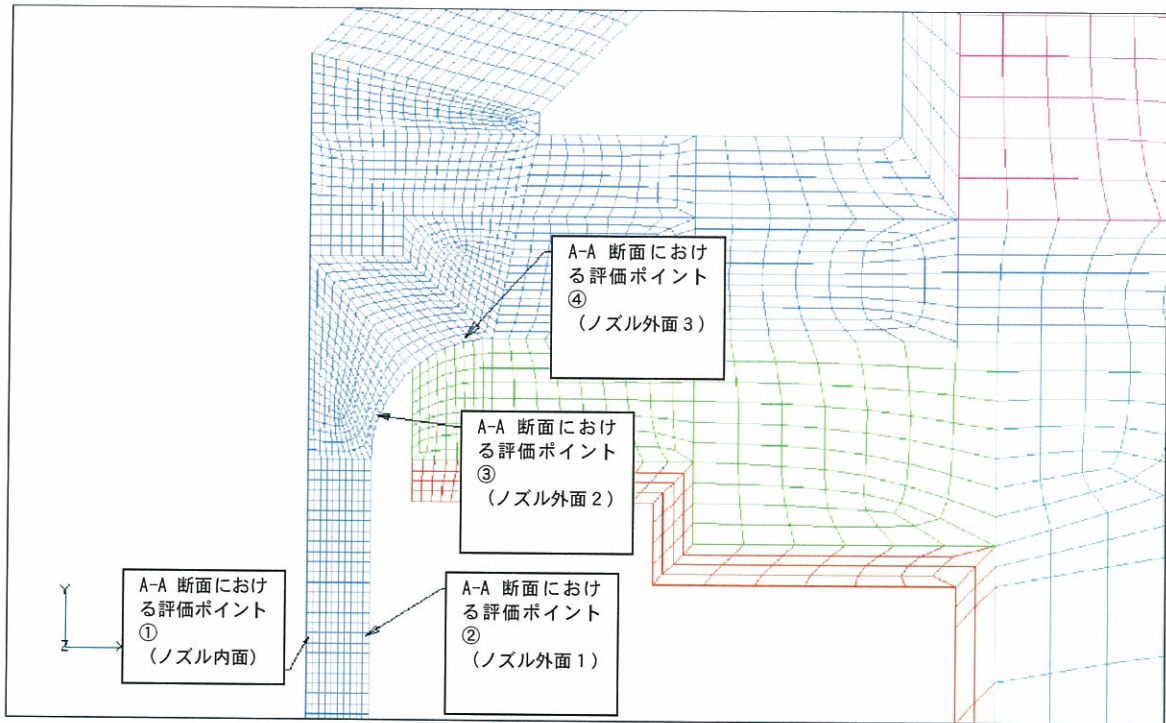


解析モデル (B-B 断面)

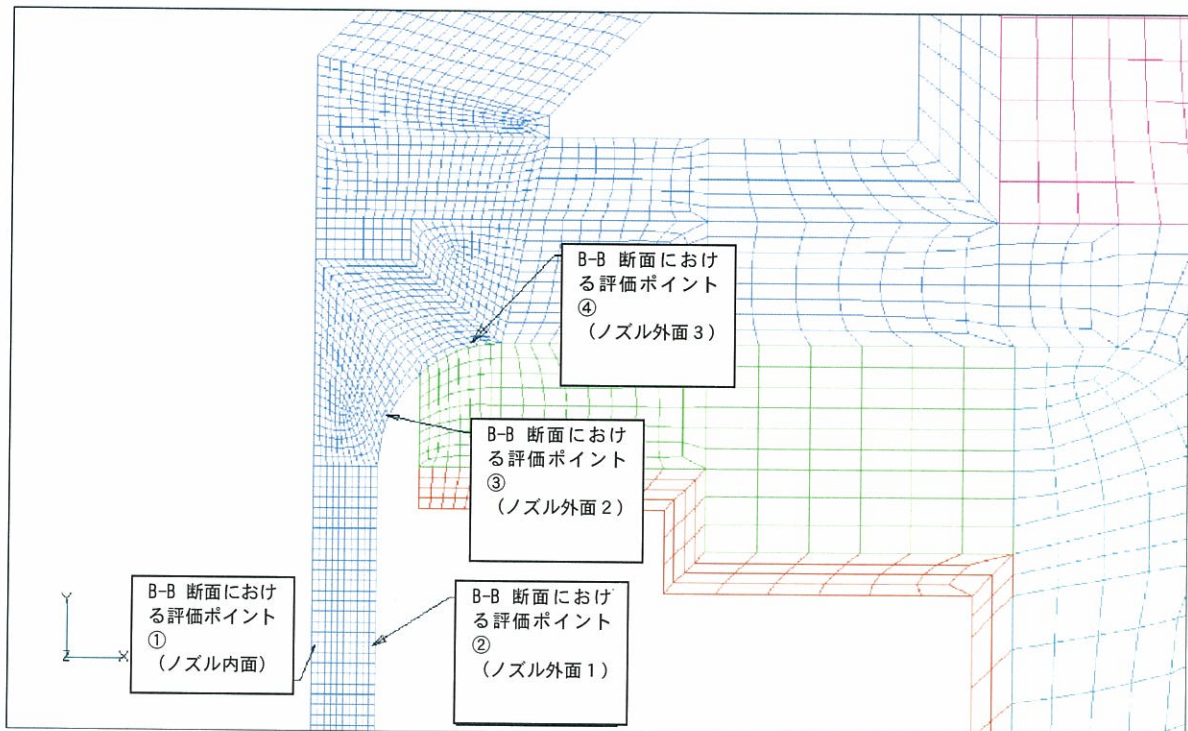
4. 寿命評価結果

今回の寿命評価結果においては、保守的に設定した設計疲労曲線により流下可能回数が約 2600 回であり余裕がある（1 年当たりの流下回数を 500 回とし、ガラス溶融炉の寿命期間を 5 年間とした場合の流下回数として、約 2500 回を上回る）ため、流下ノズルはクリープを考慮した疲労損傷に至ることはない。

なお、今後、材料強度データを取得するなどして、評価精度を向上させていく。



クリープ疲労損傷度評価点位置 (A-A 断面)



クリープ疲労損傷度評価点位置 (B-B 断面)

図-2 クリープ疲労損傷度評価点位置

5. 流下ノズルにかかる機械荷重に関する影響

(1) ガラスの重量により流下ノズルに発生する応力

ガラスの重量による影響を確認するために、ガラス液位からのヘッドによる内圧によって発生する応力の計算結果を以下に示す。

・ガラス液位からのヘッドによる内圧 P

$$P = \rho \cdot g \cdot H = \boxed{} \times 9.80665 \times \boxed{} = 0.043 \text{ [MPa]}$$

ここで、 ρ : ガラスの密度、 $\boxed{}$ [kg/m³]

H : 流下ノズル先端までのガラスの深さ、 $\boxed{}$ [m]

g : 重力加速度、9.80665 [m/s²]

・内圧により内面に生じる応力 σ_{θ}

$$\sigma_{\theta} = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \cdot P \dots\dots\dots (1)$$

$$K = \frac{D_o}{D_i} = \frac{2R_i + 2t}{2R_i} = \frac{R_i + t}{R_i} \dots\dots\dots (2)$$

式(1)に式(2)を代入し、整理する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{2R_i^2 + 2R_i t + t^2}{2R_i t + t^2} \cdot P = 6.92 \times 10^{-2} \text{ [MPa]} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 R_i : 内半径、 $\boxed{}$ [m]

D_o : 流下ノズルの外径、 $\boxed{}$ [m]

D_i : 流下ノズルの内径、 $\boxed{}$ [m]

t : 流下ノズルの板厚、 $\boxed{}$ [m]

2. ②の熱弾塑性クリープ解析の結果、流下ノズルの熱応力は100 (MPa) 以上である。これに対して、ガラス液位からのヘッドによる内圧によって発生する応力は 6.92×10^{-2} (MPa) と極めて小さいため、無視しうる。

(2) 流下ノズル内を流れるガラスによる流体振動について

流下ノズル内を流れるガラスによって流体振動が発生する可能性として次の2つの要因が考えられる。

- 流下ノズル内でのガラスの流動状態の変動によるもの
- 流下ノズル下端でのガラスの偏流によるもの

このうち、流下ノズル内での流動状態の変動については、流下ノズル付近のガラスのレイノルズ数は1.0以下であり、円管内の流れの乱流/層流境界のレイノルズ数 (10^3 オーダ) より十分小さいため、流下ノズル内のガラスの流れは常に層流である。

なお、流下ノズル付近のガラスのレイノルズ数を、ガラス温度 1000℃における動粘度を用いて計算すると以下のようなになる。

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} = \frac{0.041 \times \boxed{}}{\boxed{}} = 0.119$$

ここで、 Re : レイノルズ数 [-]

U : ガラスの流速、0.041 [m/s]

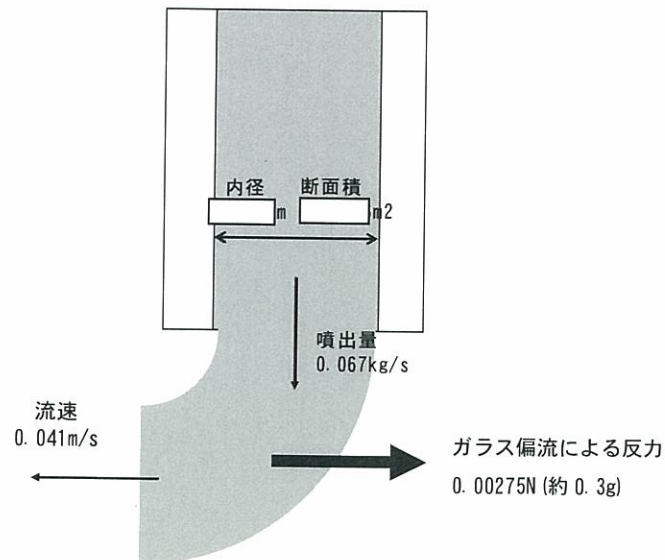
L : 代表長さ (流下ノズルの内径)、 $\boxed{}$ [m]

ν : 1000℃におけるガラスの動粘度、 $\boxed{}$ [m²/s]

以上のことから、流下ノズル内で乱流による流体振動が発生することはない。偏流による影響については次項 (3) で述べる。

(3) 偏流による流下ノズル上端部に発生する応力

流下ノズル下端でガラスが偏流した場合を仮定して、流下したガラスが流下ノズル下端を出てすぐに偏流を起こすものとし、流下ノズル上端部に発生する曲げ応力の計算結果を以下に示す。



・流下ガラスの流速

$$s = \frac{M}{\rho \cdot A} = \frac{0.067}{\boxed{} \times \boxed{}} = 0.041 \text{ [m/s]}$$

ここで、 M : ガラスの流量、240 [kg/h] (=0.067 [kg/s])

A : 流下ノズルの流路断面積、 $\boxed{}$ [m²]

ρ : ガラスの密度、 $\boxed{}$ [kg/m³]

- ・ 偏流により流下ノズルに発生する反力 F

$$F = M \times s = 0.067 \times 0.041 = 2.75 \times 10^{-3} \text{ [N]}$$

- ・ 偏流により流下ノズル上端部に作用する曲げモーメント M_t

$$M_t = F \times L = (2.75 \times 10^{-3}) \times \boxed{} = \boxed{} \text{ [N}\cdot\text{m]}$$

ここで、 L : 流下ノズルの長さ、 $\boxed{}$ [m]

- ・ 流下ノズルの断面係数 Z

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} = \boxed{} \text{ [m}^3\text{]}$$

ここで、 D_o : 流下ノズルの外径、 $\boxed{}$ [m]

D_i : 流下ノズルの内径、 $\boxed{}$ [m]

- ・ 流下ノズル上端部に発生する曲げ応力 σ_b

$$\sigma_b = \frac{M_t}{Z} = \frac{\boxed{}}{\boxed{}} = 42.0 \text{ [N/m}^2\text{]} = 4.20 \times 10^{-5} \text{ [MPa]}$$

2. ②の熱弾塑性クリープ解析の結果、流下ノズルの熱応力は 100 (MPa) 以上である。これに対して偏流によって流下ノズル上端部に発生する曲げ応力は 4.20×10^{-5} (MPa) と極めて小さいため、無視する。

以 上

構造材としての健全性

a. 素材段階における検査

流下ノズルとインナーケーシングは、一体鍛造材からの削りだしであり、素材（インコネル690）そのものについて材料確認及び荒加工後（図の青色部分）のUT（超音波探傷検査）を実施して材料に問題がないことを確認している。

b. 最終加工後の検査

最終加工後について、PT（浸透探傷検査）及び寸法・外観検査により表面に有意な欠陥がないことを確認している。

以上の検査実績より、流下ノズル・インナーケーシングに対する材料的な欠陥の可能性は考えにくい。

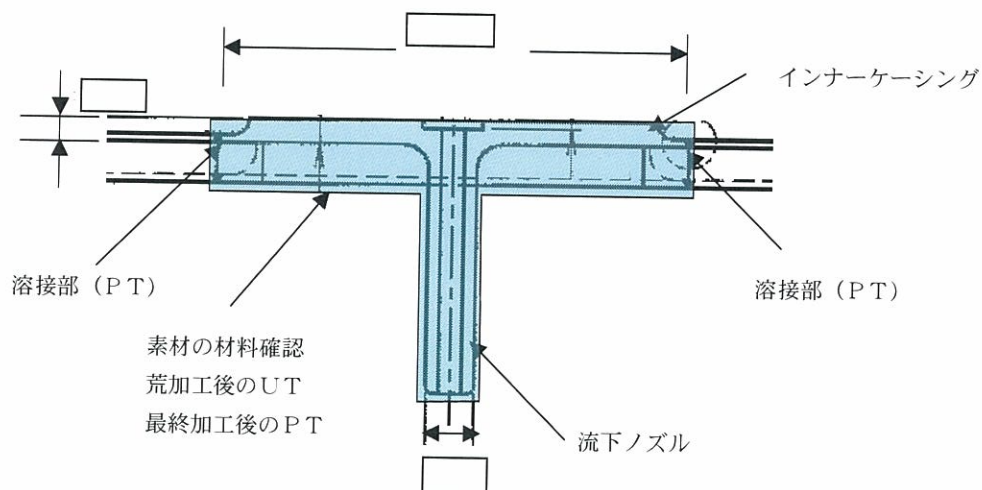


図 流下ノズル・インナーケーシングの検査

流下ノズルの耐食性について

1. はじめに

「ガラス溶融炉におけるガラスの流下停止」に係る原因究明において、溶融炉底部から流下ガラスが流出し、流出ガラスが流下ノズルと高周波加熱コイル間を下降したというケースを検討する上で、流下ノズルのインナーケーシングにクラック等が発生し、溶融ガラスが流出したというシナリオが考えられる。

クラック等の要因としては、高温クリープ疲労やガラスによる侵食が考えられることから、ここでは、ガラスによる流下ノズル材料の耐食性評価を行った。

2. 日本原子力研究開発機構による侵食試験

日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、ガラス溶融炉材料の耐食性評価において、流下ノズル材料の動的侵食試験^{*}を実施している^[1]。動的侵食試験は、流下ノズル内を通過するガラスによる流下ノズル材料の侵食速度を評価するものである。以下に試験概要を示す。

(1) 試験方法

溶融ガラス中にφ19mmの試料（インコネル 690）を挿入し、温度 1150℃、試料回転速度 350rpm で 24 日間にわたり動的耐食性を調べる。

(2) 試験結果

最大 0.175mm の侵食深さが測定された。

3. 侵食量評価

JAEA における動的侵食試験の結果より、侵食速度は最大 3.0×10^{-4} mm/h となる。ここで、高レベル廃液ガラス固化建屋のガラス溶融炉 A はこれまでに 200 本程度製造していることから、流下時間を 4 時間と仮定すると 800 時間の流下時間となり、侵食量は約 0.24mm となる。これに対して、流下ノズルは肉厚 mm であることから、侵食によってクラック等が発生し、ガラスが流出したとは考えられない。

以 上

¹ 正木敏夫ら；”ガラス溶融炉材料の耐食性評価”、(社)日本原子力学会「1991年春の年会」K44

流下ノズル上端部付着状況からの評価

クラック等によってガラスが流出した場合、局所的に流出し、ガラスが残留すると考えられる。

一方、結合装置内の観察結果からは、流下ノズル上端部の観察される範囲全てと高周波加熱コイルの上部のほぼ全周にガラスが残留していた。

以上の結合装置観察結果から、クラック等が発生した可能性は低い。



図 流下ノズル上端部のガラス付着状況

高周波加熱コイル付着サンプルによる付着ガラスの付着時期の推定

結合装置取り外し時に回収した高周波加熱コイルの中段、上面から採取したサンプルを分析した。第4ステップの5バッチ（AT-1-A005）以降の Cs-137 放射能計算値と比較し、今回の分析結果はいずれも低い値を示している。つまり、流下ノズルと高周波加熱コイルの間等に付着していたガラス等が第4ステップにおける流下ガラスである可能性は極めて低いと考えられる。

以上から、第4ステップの時点で流下ノズルにクラック等が発生していた可能性は極めて低く、クラック等からガラスが流出したと仮定した場合、その流出時期は今回の運転に限られる。

つまり、2時間程度で流下ノズル上端部などに付着しているガラスが流出したことになることから、流下ノズル健全性及び流下性確認試験（3バッチ）を行い、流下ノズル外側から継続したガラスの流出の有無を確認することで、クラックの有無を評価することが可能である。

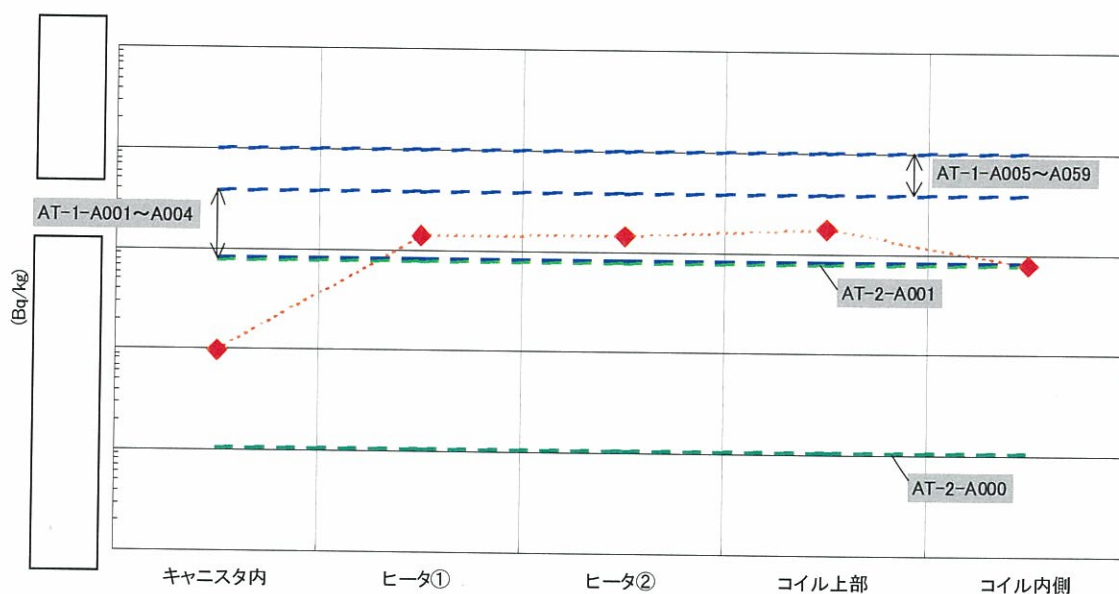


図 第4ステップでの Cs-137 放射能濃度と今回サンプルの比較