

## 廃液の沸騰評価について

### 1. はじめに

9/5 に提出した「再処理工場 高レベル廃液ガラス固化建屋における供給液槽 B の安全冷却機能の一時喪失について（補正）」の添付資料-9「供給液槽 B の安全冷却機能喪失時における廃液の温度評価」について、評価式および使用したパラメータの数値のみを記載した。パラメータの妥当性（出典含む）等を補足する目的から、本書において、評価式の考え方などについて示す。

なお、添付資料-9 では、J と kcal など一部単位が混在していたため、本書では、単位等の統一した式、パラメータなど見直すため、報告書の式および表が異なる箇所がある。

### 2. 安全上の評価方法

一般的に温度が一樣な物体において、一定熱量 Q で加熱（冷却）する場合、その時間的な温度変化は下記の式で示される。

本評価では、式（A）をベースに評価を実施している。

$$Q = \rho CV \frac{dT}{dt} \quad \dots \text{式（A）}$$

Q : 単位時間当たりの加熱（冷却）量（W）

$\rho$  : 密度（kg/m<sup>3</sup>）

C : 比熱（J/kg・K）

V : 体積（m<sup>3</sup>）

T : 温度（℃）

t : 時間（s）

## 2. 1. 再処理事業指定に基づく評価

2020年7月に認可された再処理事業変更許可申請書については、添付書類八の「六ヶ所再処理施設における新規制基準に対する適合性 安全審査 整理資料 第28条：重大事故等の拡大防止等」の「補足説明資料7-3」において、初期条件の設定を含めた評価方法の記載を実施している。（参考資料-1）

式（1）では、崩壊熱は、高レベル廃液（以下、廃液という）および貯槽の温度上昇のみに寄与するものとして評価を実施している。

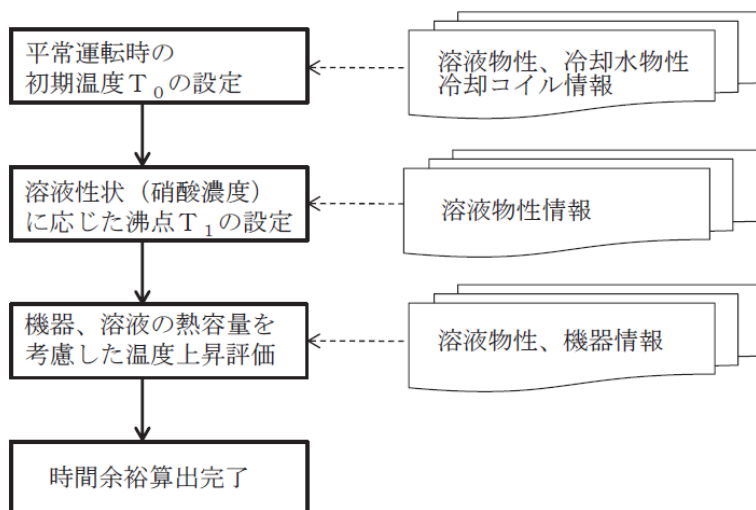
$$\Delta t = \{(M \times C) + (\rho \times V \times C')\} \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q \times V} \quad \dots \text{式 (1)}$$

算定パラメータは以下のとおりである。

また、評価に用いたパラメータの値、設定根拠等については添付に示す。

（以降の評価も同様）

- $\Delta t$  : 冷却機能の喪失から沸騰開始までの時間余裕 (s)
- M : 貯槽の質量 (kg)
- C : 貯槽の比熱 (J/kg・K)
- $\rho$  : 廃液の密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- V : 貯液量 (m<sup>3</sup>)
- C' : 廃液の比熱 (J/kg・K)
- T<sub>1</sub> : 廃液の沸点 (°C)
- T<sub>0</sub> : 廃液の初期温度 (°C)
- Q : 崩壊熱密度 (W/m<sup>3</sup>)



図一 1 : 再処理事業指定における評価フロー

## 2. 2. 通常の運転管理における廃液の沸騰に至るまでの時間評価

通常の運転管理における廃液の沸騰までに至る時間余裕の評価では、式(1)の崩壊熱を崩壊熱密度に変更した式である。

本評価においても、崩壊熱は、高レベル廃液および貯槽の温度上昇のみに寄与するものとして評価を実施している。

$$\Delta t = \{(M \times C) + (\rho \times V \times C')\} \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q \times V} \quad \dots \text{式 (1)}$$

右辺の分子および分母をVで除算する。

$$\Delta t = \{(M \times C) + (\rho \times V \times C')\} / V \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q}$$

$$\Delta t = \{(M/V \times C) + (\rho \times C')\} \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q}$$

$\rho_{\text{tank}} = M/V$ と置換する。

$$\Delta t = (\rho_{\text{tank}} \times C_{\text{tank}} + \rho_{\text{HALW}} \times C_{\text{HALW}}) \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q} \dots \text{式 (2)}$$

算定パラメータは以下のとおりである。

- $\Delta t$  : 冷却機能の喪失から沸騰開始までの時間余裕 (s)
- $\rho_{\text{tank}}$  : 貯槽等の密度 (kg/m<sup>3</sup>) ※
- $C_{\text{tank}}$  : 貯槽の比熱 (J/kg・K)
- $\rho_{\text{HALW}}$  : 廃液の密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $C_{\text{HALW}}$  : 廃液の比熱 (J/kg・K)
- $T_1$  : 廃液の沸点 (°C)
- $T_0$  : 廃液の初期温度 (°C)
- $Q$  : 崩壊熱密度 (W/m<sup>3</sup>)

※:  $\rho_{\text{tank}}$  は、貯槽の質量を保有する貯液量で除算した値であり、貯槽材質に基づく値とは異なる。式の一般化にあたり、貯槽の比熱に乗算することから、便宜上、貯槽等の密度と表記しているものである。

なお、式(2)は式(1)と同じため、添付-1「各評価条件表」については、式(1)で使用するパラメータを表記する。

$$\Delta t = \{(M \times C) + (\rho \times V \times C')\} \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q} \quad \dots \text{式 (1)}$$

## 2. 3. 放熱等を考慮した廃液の沸騰に至るまでの時間評価

### (1) 評価方法の考え方

2. 1 および 2. 2 では、廃液の崩壊熱は、溶液および貯槽の温度上昇のみに寄与する計算である。

しかし、実際の崩壊熱は全て廃液に伝達するわけではなく、廃液から冷却水コイルへの熱伝達、貯槽表面からセル雰囲気への熱伝達を除いた熱量が廃液への温度上昇に寄与する。なお、貯槽内に流入するオフガスへの熱伝達は考慮していない。

このため、安全冷却水の供給停止時は、時間経過とともに以下の状況変化が起きる。

- ①崩壊熱  $Q$  より貯槽からセル内雰囲気への熱伝達  $Q_a$  と冷却水コイル（冷却水含む）への熱伝達  $Q_{cw}$  を除いた熱量  $Q_{wt}$ （廃液温度上昇に使用される熱量）で廃液および貯槽の温度が上昇する。

$$Q_{wt} = Q - Q_a - Q_{cw}$$

- ②冷却水の供給停止に伴い、徐々に冷却水コイルの温度と廃液温度に差がなくなる。

- ③その後、廃液等の温度が上昇することで、崩壊熱  $Q$  と貯槽からセル内雰囲気への熱伝達  $Q_a$  が一定となると、廃液等の温度上昇が終了し平衡状態となる。

$$0 = Q - Q_a$$

以上の現象を踏まえ、放熱を考慮した評価において、時間経過とともに沸騰に至るか評価を行う目的から、式 (A) を陽解法※により式変形を実施した。

※陽解法とは、常微分方程式の解法におけるテイラー展開の右辺第 1 項で打ち切った 1 次精度の方法

$$T^{(n+1)} = T^{(n)} \times \Delta t \cdot \frac{dT}{dt}$$

温度一様な物体における時間的な温度変化は、以下の式 (B) となる。

$$T^{(n+1)} = T^{(n)} \times \Delta t \cdot \frac{Q}{\rho C V} \dots \text{式 (B)}$$

$\Delta t$  : 時間  $t$  に対する有限刻み (s)

$n$  : ステップ

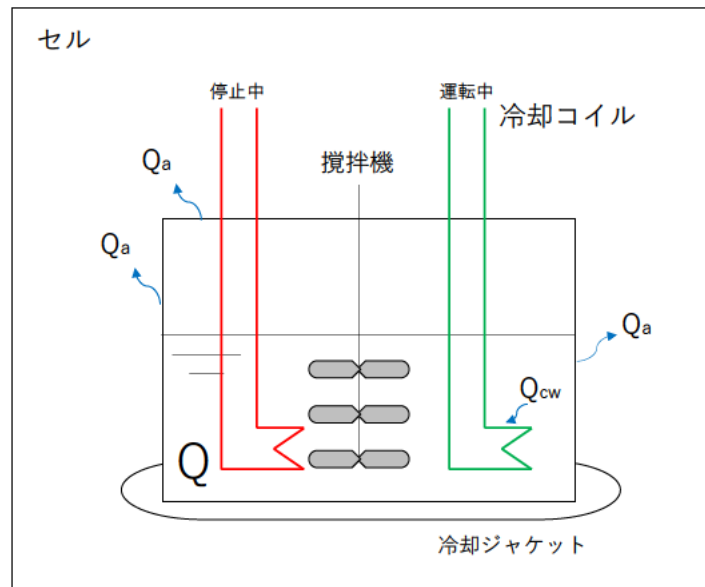
その他パラメータは式 (A) を参照。

## (2) 計算モデルの概要

(1) の考え方をベースに計算モデルの構築を実施した。

貯槽の形状は、円筒で端部が鏡板であるが、計算モデルでは、簡易的に評価を行うため、円柱モデルとした。貯槽からの放熱に寄与する表面積は、貯槽底部を除く貯槽側面と貯槽上面とした。貯槽底部には、冷却ジャケット（安全冷却水A系列の工事のため、停止中。）が設置されており、放熱に関する評価が煩雑となるため、断熱部として評価した。

また、冷却コイルへの熱伝達については、冷却コイル中に含まれる冷却水の温度上昇を考慮することから、冷却コイルが廃液と接している範囲における熱伝達として評価を実施した。



## (3) 評価

熱移動量はニュートンの冷却則を用いて計算を行う。

$$Q = hA(T - T_m)$$

- Q : 媒質中に置かれた物体の熱量 (W)
- h : 熱伝達係数 ( $W/(m^2 \cdot K)$ )
- A : 媒質中に置かれた物体の表面積 ( $m^2$ )
- T : 媒質中に置かれた物体の温度 (K)
- $T_m$  : 媒質の温度 (K)

(1) の考え方のように、時間変化による熱バランスは以下の式で示される。

$$Q_{wt} = Q - Q_{cw} - Q_a$$

$$Q_a = h_a \cdot A \cdot (T_{wt} - T_{wt0})$$

$$Q_{cw} = h_{cw} \cdot A_c \cdot (T_{wt} - T_{cw})$$

- $Q_{wt}$  : 廃液温度上昇に寄与する熱量 (W)  
 $Q$  : 崩壊熱量 (W)  
 $Q_{cw}$  : 冷却水への熱伝達 (熱量) (W)  
 $Q_a$  : 貯槽表面からの熱伝達 (熱量) (W)  
 $h_a$  : 貯槽表面熱伝達係数 (W/(m<sup>2</sup>・K))  
 $A$  : 貯槽からの放熱面積 (m<sup>2</sup>)  
 $T_{wt}$  : 廃液温度 (°C)  
 $T_{wt0}$  : セル内温度 (°C)  
 $h_{cw}$  : 冷却コイル熱伝達係数 (W/(m<sup>2</sup>・K))  
 $A_c$  : 冷却コイル伝熱面積 (m<sup>2</sup>)  
 $T_{cw}$  : 現在の冷却水温度 (°C)

また、式 (B) より、冷却水温度と廃液温度 (貯槽温度) の時間変化は以下の式となる。

$$T_{cw}^{(n)} = T_{cw} + dt \cdot \frac{Q_{cw}}{M_{cw} \cdot C_{cw}} \quad \dots \text{式 (3)}$$

$$T_{wt}^{(n)} = T_{tw} + dt \cdot \frac{Q_{wt}}{\rho_{wt} \cdot C_{wt} \cdot V_{wt} + M_k \cdot C_k} \quad \dots \text{式 (4)}$$

- $T_{cw}^{(n)}$  : 時間刻み経過後の冷却水温度 (°C)  
 $T_{cw}$  : 現在の冷却水温度 (°C)  
 $dt$  : 時間刻み (s)  
 $Q_{cw}$  : 冷却水への熱伝達 (熱量) (W)  
 $M_{cw}$  : 冷却水重量 (kg)  
 $C_{cw}$  : 冷却水比熱 (J/kg/K)  
 $T_{wt}^{(n)}$  : 時間刻み経過後の廃液温度 (°C)  
 $T_{wt}$  : 現在の廃液温度 (°C)  
 $T_{wt0}$  : セル内温度 (°C)  
 $Q_{wt}$  : 廃液温度上昇に寄与する熱量 (W)  
 $\rho_{wt}$  : 廃液密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_{wt}$  : 廃液比熱 (J/kg/K)  
 $V_{wt}$  : 貯液量 (m<sup>3</sup>)  
 $M_k$  : 貯槽重量 (kg)  
 $C_k$  : 貯槽比熱 (J/kg/K)

#### (4) 評価における不確かさについて

今回使用した式については、熱伝導方程式より導いたものであり、式については、一般的なものである。

式に使用するパラメータは、文献値、設計図面などより引用しているものの、廃液の分析結果により算出したものや再処理事業指定申請書に記載と異なる値を使用したものがある。

このことから、不確かさの確認目的から、感度解析を実施した。

##### a. 崩壊熱

崩壊熱は、廃液中の核種分析の結果より、崩壊熱を算出している。ガラス固化体製造中は、供給液槽から供給槽、供給槽からガラス溶融炉へ廃液を常時移送している。供給液槽の液位が一定値以下となると、前段の高レベル廃液混合槽から供給液槽へ廃液を移送する。

供給液槽には分析ポイントがないため、前段の高レベル廃液混合槽の廃液の分析結果、供給液槽の残液量より供給液槽の組成を算出する。

分析については、設計誤差として 10%を見込んでいることから、感度解析を実施した。

評価の結果、分析結果の崩壊熱を 20%まで増加させても、沸点に到達しない結果であった。

	当初評価	①崩壊熱+10%	②崩壊熱+20%
崩壊熱 Q [W]	5371	5909	6446
廃液温度 $T_{wt}$ [°C]	55.9	59.2	62.14

##### b. 貯槽からの放熱面積

本評価における貯槽からの放熱面積は、貯槽の胴部（全域）および天板部（鏡板）とした。しかし、実現象では廃液が接する貯槽の一部から貯槽上面に熱が移動するため、時間断面などで考えると温度ムラが生じることから、放熱面積を過剰としている可能性があるため、放熱面積を変更し評価を実施した。

貯槽からの放熱面積については、廃液の接液部のみとした場合、当初評価の半分の面積とした場合で評価した。

貯槽からの放熱面積を接液部のみとした場合、沸点に到達する結果となった。一方、貯槽胴部および天板部の半分の面積の場合、沸騰に至らなかった。

実現象としては、廃液に対する放熱面としては、貯槽側面および底部、気相部（空気）になる。

このため、廃液が接する貯槽面積は、液位相当の側面部 (6.41m<sup>2</sup>)、底部 (2.54m<sup>2</sup>) の 8.95m<sup>2</sup> となる。また、気相部との接触面積は、貯槽底部と同様 (2.54m<sup>2</sup>) であり、廃液表面積 (放熱面積の) 合計は、11.49m<sup>2</sup> である。

よって、貯槽からの放熱面積を当初評価の半分とした面積においても、沸点に到達しなかったことから、廃液の接する放熱面を全て考慮した場合でも、沸点に到達しない。

なお、放熱面積は、機器表面からの熱伝達  $Q_a$  に使用し、貯槽表面熱伝達係数  $h_a$  は、静止空気に対する表面の熱伝達率を想定したものであり、放熱面である金属、溶液の物性によらないため、評価上問題ないと考える。

	当初評価	①	②
放熱面積 A [m <sup>2</sup> ]	21.52	6.41	10.76
廃液温度 $T_{wt}$ [°C]	55.9	129.44	87.10

①貯槽内の廃液高さ相当の貯槽側面面積

②当初評価 (貯槽側面 (全域) + 底面) の半分

#### c. 貯槽表面熱伝達係数

貯槽表面熱伝達係数は、「空気調和・衛生工学便覧」(P402 表 17・20 静止空気に対する表面の熱伝達率) を参考に設定した。

貯槽からの放熱は、側面と鏡板となっており、保守側の評価結果となるよう冷却ジャケットは見込んでいない。よって、熱流の方向が上向き及び水平の熱伝達率のうち、最低値となる表面の位置が垂直、熱流の方向が水平の 8.29 W/(m<sup>2</sup>・K) を保守側に切り下げて、8 W/(m<sup>2</sup>・K) として設定した。(自然対流)

一方、再処理事業指定申請書 添付資料八では、「7.2.1.2.2(2)不確かさの影響評価」の「a. (b) 実際の熱条件の影響」において、貯槽等の表面とセル雰囲気管の熱伝達係数※を約 1.8~3.3 W/(m<sup>2</sup>・K) としている。

※：伝熱工学資料 第5版 「2・3・1 平板に沿う自然対流熱伝達」より算出。

このため、感度解析として、貯槽表面熱伝達係数を 8~3.2 W/(m<sup>2</sup>・K) まで計算を実施した。感度解析の結果、3.3 W/(m<sup>2</sup>・K) 以上は沸点に到達しないことが確認された。また、3.2 W/(m<sup>2</sup>・K) 以下では、沸点に到達する結果となった。

貯槽表面熱伝達係数が 3.2 W/(m<sup>2</sup>・K) の時は沸点に到達する結果となったが、初期における温度上昇カーブは、8 W/(m<sup>2</sup>・K) に比べ高く推移する結果であった。

このことから、貯槽表面熱伝達係数 3.2 W/(m<sup>2</sup>・K) は過剰な設定である可能性がある。

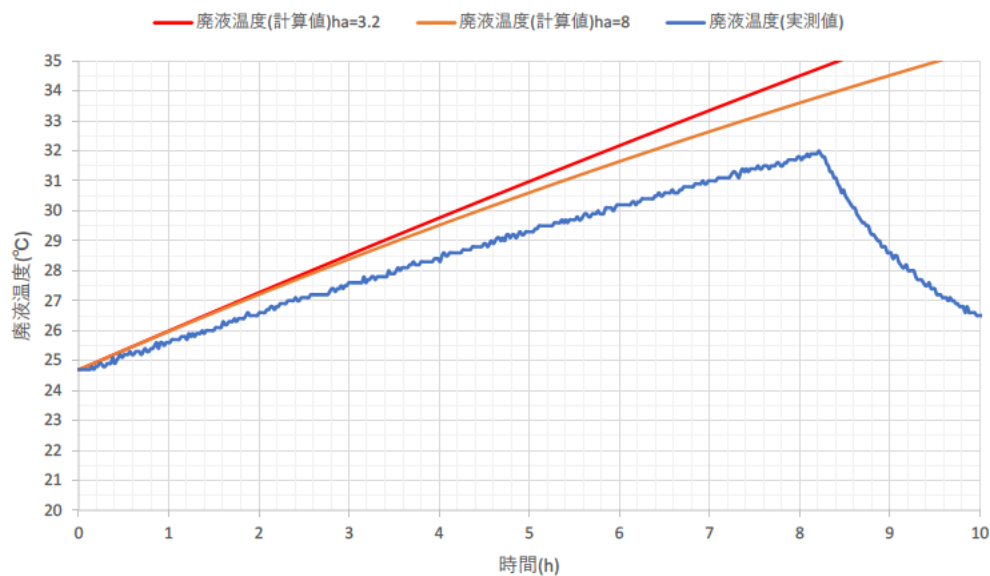
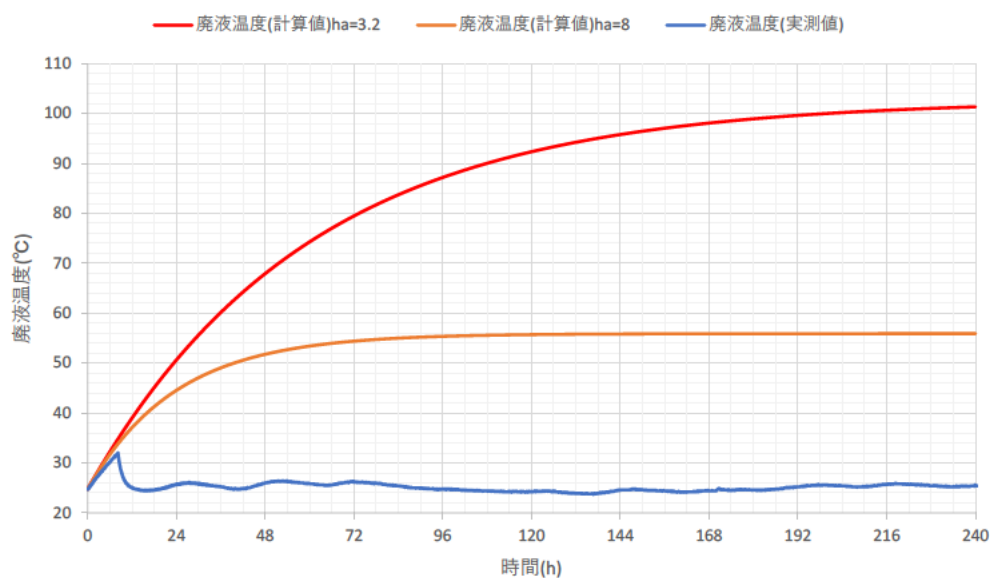
供給液槽 B が設置されているセルについては、常時換気 (■ m<sup>3</sup>/h) が行われ



ている。このため、評価では自然対流を想定しているが、供給液槽Bの貯槽表面には、強制対流が生じている可能性があることから、評価した結果に対して、実際の廃液温度の上昇が緩やかであったと考えられる。

	当初評価	試算 a	試算 b	※	※
貯槽表面熱伝達係数 $h_a$ [W/m <sup>2</sup> /K]	8	6	4	3.3	3.2
廃液温度 $T_{wt}$ [°C]	55.9	66.3	87.10	100.34	102.70

※：再処理事業指定申請書の記載値



#### d. まとめ

不確かさとして、貯槽表面熱伝達係数、貯槽からの放熱面積、崩壊熱の各パラメータの感度評価を行った。

感度評価の結果、再処理事業指定申請書に記載の貯槽表面熱伝達係数  $h_a$  を使用すると、沸点に到達する可能性があるが、実際の廃液温度上昇カーブに比べ、早期に温度が上昇し、実態に即していない可能性がある。

このため、保守的な評価を行うために用いた各パラメータについては、不確かさはあるものの、今回設定した評価条件は過度ではないものとする。

よって、各パラメータ設定については、不確かさを考慮しても、妥当であるとする。

### 3. 添付

添付-1：各評価条件表

以上

# 各評価条件表

添付-1

表-1：再処理事業指定に基づく評価条件

記号	項目	値		出典等
M	貯槽の質量	8300	kg	再処理事業指定申請書 安全審査整理資料 第 28条より
C	貯槽の比熱	499	J/kg・K	
$\rho$	廃液の密度	1300	kg/m <sup>3</sup>	
V	貯液量	5	m <sup>3</sup>	
C'	廃液の比熱	3349	J/kg・K	
T <sub>1</sub>	廃液の沸点	102	°C	
T <sub>0</sub>	廃液の初期温度	41	°C	
Q	崩壊熱密度	3600	W/m <sup>3</sup>	

※：再処理事業指定申請書 安全審査整理資料 第28条では、0.8 kcal/kg・K。  
他表と単位を合わせるためJに換算したものである。

$$\Delta t = \{(M \times C) + (\rho \times V \times C')\} \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q \times V} \quad \dots \text{式 (1)}$$

表-2：通常の運転管理における廃液の沸騰に至るまでの時間評価条件

記号	項目	値		出典等
M	貯槽の質量	8300	kg	※1
C <sub>tank</sub>	貯槽の比熱	418.6	J/kg・K	鉄の比熱を丸めた値 (0.112kcal/kg・°C)
$\rho_{HALW}$	廃液の密度	1300	kg/m <sup>3</sup>	※1
V	貯液量	2.825	m <sup>3</sup>	※2
C <sub>HALW</sub>	廃液の比熱	3064	J/kg・K	化学便覧より
T <sub>1</sub>	廃液の沸点	110	°C	
T <sub>0</sub>	廃液の初期温度	40	°C	
Q	崩壊熱密度	2320	W/m <sup>3</sup>	※2

※1：再処理事業指定申請書 安全審査整理資料 第28条より

※2：実測値、分析結果等より算出した値

$$\Delta t = \{(M \times C_{tank}) + (\rho_{HALW} \times V \times C_{HALW})\} \times \frac{(T_1 - T_0)}{Q \times V} \quad \dots \text{式 (1)}$$

表-3：放熱等を考慮した溶液の沸騰に至るまでの時間評価条件

記号	項目	値		出典等
$T_{cw0}$	冷却水初期温度	24.2	°C	※1
$M_{cw}$	冷却水質量	108	kg	図面より算出
$C_{cw}$	冷却水比熱	4186	J/kg/K	水の比熱より
$h_{cw}$	冷却コイル熱伝達係数	2000	W/m <sup>2</sup> /K	熱交換機器ハンドブック 式(23・14)より
$A_c$	冷却コイル伝熱面積	3.49	m <sup>2</sup>	図面より算出
$T_{wt0}$	廃液初期温度、セル内初期温度	24.7	°C	※1
$Q$	崩壊熱量	5371	W	※1
$\rho_{wt}$	廃液密度	1300	kg/m <sup>3</sup>	※2
$C_{wt}$	廃液比熱	3144	J/kg/K	化学便覧より
$V_{wt}$	廃液量	2.646	m <sup>3</sup>	※1
$M_k$	貯槽の質量	8300	kg	※2
$C_k$	貯槽の比熱	418.6	J/kg/K	鉄の比熱を丸めた値 (0.112kcal/kg・°C)
$h_a$	貯槽表面熱伝達係数	8	W/m <sup>2</sup> /K	空気調和・衛生工学便覧 表17・20より
$A$	貯槽からの放熱面積	21.52	m <sup>2</sup>	図面より算出 (貯槽側面および上面)

※1：実測値、分析結果等より算出した値

※2：再処理事業指定申請書 安全審査整理資料 第28条より

$$T_{cw}^{(n)} = T_{cw} + dt \cdot \frac{Q_{cw}}{M_{cw} \cdot C_{cw}} \quad \dots \text{式 (3)}$$

$$T_{tw}^{(n)} = T_{tw} + dt \cdot \frac{Q_{wt}}{\rho_{wt} \cdot C_{wt} \cdot V_{wt} + M_k \cdot C_k} \quad \dots \text{式 (4)}$$

$$Q_{wt} = Q - Q_{cw} - Q_a$$

$$Q_a = h_a \cdot A \cdot (T_{wt} - T_{wt0})$$

$$Q_{cw} = h_{cw} \cdot A_c \cdot (T_{wt} - T_{cw})$$