

JAERI-M
91-203

高レベル廃液貯槽における異常過渡事象
解析コードHLSTの開発

1991年11月

阿部 仁・館盛 勝一・鈴木 伸一・内藤 俣孝

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

高レベル廃液貯槽における異常過渡事象解析コード
H L S T の開発

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部
阿部 仁・館盛 勝一・鈴木 伸一・内藤 俣孝

(1991年10月24日受理)

高レベル廃液中には、再処理溶媒抽出工程から分離された超ウラン元素や核分裂生成物が溶解しており、それらの崩壊熱によって廃液は加熱されている。したがって実際の高レベル廃液貯槽では、冷却機能が絶えず作動しており、廃液の温度上昇・沸騰を防いでいる。

しかし貯槽系統において、誤操作や機器の故障が加わり、その冷却機能の一部あるいは全部が失われた場合には、廃液の温度は上昇し、場合によっては沸騰さらに蒸発乾固を引き起こす可能性がある。H L S T (Simulation Code for Transient Phenomena in High Level Liquid Waste Storage Tank) は、高レベル廃液貯槽系の熱収支を解析することを目的に作成した計算コードであり、冷却コイル中を流れる冷却水の流量に異常が生じたと仮定することで冷却機能の喪失を模擬し、廃液状態の経時的变化をシミュレートすることができる。

本報告書はH L S Tのコード手引書であるとともに、プログラム内容説明書でもある。

Development of Computer Code HLST for Analysing Transient
Phenomena in High Level Liquid Waste Storage Tank

Hitoshi ABE, Shoichi TACHIMORI, Shin-ichi SUZUKI
and Yoshitaka NAITO

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 24, 1991)

Transuranics and fission products separated from the solvent extraction process in the fuel reprocessing plant dissolve in high level liquid waste, and heat the waste by their decay heat. The storage tank is equipped with cooling system to prevent the liquid from rising temperature and boiling. But there is a possibility of temperature rise, boiling of the liquid and subsequent release of radioactivity under a loss of cooling accident, which would occur as a result of failure of equipment or misoperation. A simulation code HLST for analysis of transient phenomena in a High level Liquid waste Storage Tank has been developed and can be used to analyze loss of cooling accident. The HLST simulates time change of the liquid waste conditions depending degree of degradation of cooling.

This report is an explanation of the code as well as for user's manual.

Keyword : Reprocessing Plants, High Level Liquid Waste,
Loss of Cooling Accident, Safety Evaluation,
Storage Tank

目 次

1. 緒 言	1
2. 計算コードH L S Tの概要	3
3. 解析モデル	5
3.1 計算対象モデル	5
3.2 解析方法	5
4. 入出力説明	11
4.1 入力説明	11
4.2 出力説明	16
5. 計算実行例	17
5.1 サンプル問題	17
5.2 入力データ例	19
5.3 計算結果	25
6. 結 言	28
謝 辞	29
参考文献	29
付録1 サンプル計算に使用した崩壊熱データ	30
付録2 高レベル廃液貯槽に至る各元素毎の工程到達率例	32
付録3 物性値の温度・濃度変化データ	33

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Calculation Code HLST	3
3. Analytical Models	5
3.1 System Model	5
3.2 Analytical Methods	5
4. Input Preparation and Code Output	11
4.1 Input Preparation	11
4.2 Code Output	16
5. Sample Calculations	17
5.1 Sample Problems	17
5.2 Sample Input Data	19
5.3 Results of Calculation	25
6. Conclusion	28
Acknowledgements	29
References	29
Appendix 1 Decay Heat Data of Fission Product Elements Used for the Simulation of Sample Problem	30
Appendix 2 Example of Arrival Rate of Fission Product Elements to the HLLW Storage Tank	32
Appendix 3 Physical Properties of Solution Used in the Code	33

記号の説明

(ローマ文字)

- B : 水のみかけの蒸発量 (kg/s)
 b_w : 容器壁厚さ (m)
 CE : 体膨張率 (deg^{-1})
 C_p : 廃液の比熱 (J/Kgk)
 D : 密度 (kg/m^3)、あるいは直径 (m)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 h : 境膜伝熱係数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
 k : 熱伝導度 (W/mK)
 k_{av} : 容器壁の熱伝導度 (W/mK)
 L : 冷却コイル長さ (m)
 L_h : 水の蒸発潜熱 (J/kg)
 Q : 廃液液位 (m)、あるいは容器底面内径 (m)
 M_s : 廃液中の無機塩類の質量 (kg)
 Nu : ヌッセルト数 (-)
 Q_p : 廃液からの発熱量 (W)
 Ra : レイリー数 (-)
 r : 容器底面の半径 (m)
 T : 温度 (K)
 T_b : 沸点 (K)
 Δt : 廃液温度と容器内壁あるいは容器外壁温度と外界温度の差
 U : 総括伝熱係数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
 V : 容積 (m^3)
 w : 冷却水の質量流量 (kg/s)
 X : 蒸発した水が凝縮して還流される割合 (%)

(ギリシャ文字)

- μ : 廃液の粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
 ρ : 廃液の密度 (Kg/m^3)

(添字)

- 0 : 計算初期値、平常時値
 b : 廃液タンク底面
 b_l : 廃液-廃液側容器底面間
 b_r : 外界側容器底面-外界間
 c : 冷却水
 c_1 : 冷却コイル入口
 c_2 : 冷却コイル出口
 f : 温度 T_i における値 (T_i : バルク温度と壁面温度の平均温度)
 l : 廃液
 r : 外界
 sk : ソルトケーキ
 w_l : 廃液-廃液側容器側壁面間
 w_r : 外界側容器側壁面-外界間

1. 緒 言

再処理施設の事故時安全性評価手法の開発・整備を目的として、計算コードシステム REPRO-ACE の作成を行っている。図1に REPRO-ACE の概略を示す。REPRO-ACE は、事故事象解析コード (TRANS-ACE¹⁾、AEROSOL-ACE)、安全評価用コード (ACCI-EDITOR)、ソースターム解析コード (SOURCE-ACE、REACTR)、さらに再処理各工程での異常な過渡変化を追跡する異常過渡事象解析コード (EXTRA、PNST) からなる。異常過渡事象解析コードは、様々な起因事象を想定し、それによって引き起こされる異常な過渡変化の規模・進展速度等を解析し事故に至る可能性と起因事象の重要性を評価することを目的とする。

EXTRA は、溶媒抽出工程 (ミキサセトラ、パルスカラムによる抽出) を模擬するコードであり、抽出器内濃度プロフィールをシミュレートする。抽出器に供給される供給液の酸性度や溶媒の流量に異常が生じた場合の、抽出器内における核種の異常蓄積や抽残液側への漏洩等を解析することができる。PNST はプルトニウム溶液貯槽工程を対象として、常時供給されている硝酸水溶液の酸性度が変化した時のプルトニウムの加水分解、さらにはポリマー生成を計算するコードである。

高レベル廃液貯槽には、抽出工程から分離された超ウラン元素や核分裂生成物等が溶解しており、それら核種の崩壊熱によって廃液は常時加熱されている状態にある。したがって同貯槽では冷却機器が絶えず作動しており、廃液の温度上昇・沸騰等を防止している。しかし同貯槽系統において機器の故障やなんらかの誤操作が加わり、冷却機能の一部あるいは全部が失われた場合には、廃液温度は上昇する。さらにその冷却機能喪失の状態で新たに熱的均衡状態に至らない場合には、沸騰・蒸発乾固にまで到達する可能性があり、放射性核種の気相への放出等、安全評価上重要な問題となる。そこで異常な過渡事象解析コード開発の一環として高レベル廃液貯槽を取り上げ、熱収支の解析により廃液の温度変化、蒸発等の事象をシミュレートする計算コード HLST (Simulation Code for Transient Phenomena in a High Level Liquid Waste Storage Tank) の開発を行った。HLST では供給される冷却水の入口温度や時間的な流量変化を任意に設定できるため、様々な状況に応じた冷却機能喪失事象を模擬することができ、冷却機能の低下により引き起こされる事象を経時的に解析することができる。

本報告書は、HLST に採用した解析モデルの説明を行うと共に、計算コードの入出力説明を行うことで、計算コードの使用手引書としての性格を持たせている。

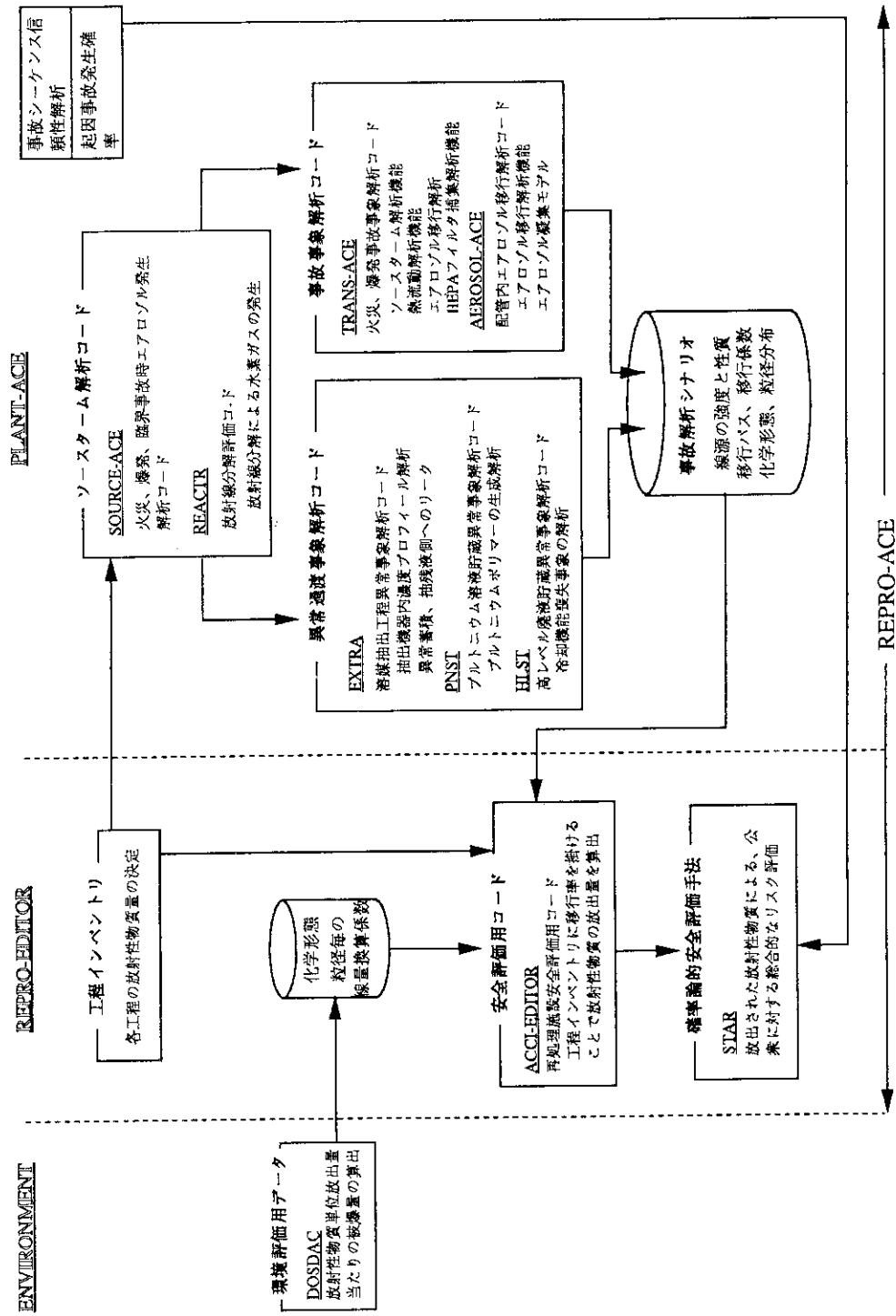


図1 REPRO-ACEコードの構成

2. 計算コードHLS Tの概要

HLS Tでは、高レベル廃液中に冷却コイルが挿入されており、そのコイル内に冷却水が流れる構造を考える。そしてその冷却水の流量の低下（あるいは停止）によって冷却機能低下を模擬し、それによって引き起こされる廃液の温度上昇、さらに場合によっては沸騰・蒸発乾固までに至る状態の変化をシミュレートする。また元素毎に気相放出速度を予め設定しておくことで、廃液が沸騰に至った状態での核種の気相への放出量の評価を行うことができる。また供給される冷却水の入口温度や時間的な流量変化を任意に設定できるため、様々な状況に応じた冷却機能喪失事象を模擬できる。

図2にHLS Tのシステム構成図を示す。HLS Tは大きく分けて、過渡計算を行う事象解析部分と出力する図を作成する作図制御部分とから構成される(4.1.2章参照)。

HLS Tでは、燃焼度・冷却期間等を考慮して算出した放射性核種の存在量に、各元素毎の高レベル廃液貯槽に至る割合、即ち工程到達率を掛け、総和を取ることによって初期インベントリを設定する(付録1参照)。

冷却機能が一部（あるいは全部）喪失しそれによって引き起こされる事象を平常時を含めて以下の4過程に分けて解析する。

(1)過程1：平常時

冷却機能は正常に作動している。熱的平衡が保たれており、廃液の温度上昇は生じない。

(2)過程2：異常の発生～沸騰

冷却機能の低下によって廃液の温度が上昇する。しかし発生する熱量は廃液の温度上昇に消費され、この過程では水の蒸発は生じず、したがって液位の変化はないものと仮定する。

(3)過程3：沸騰～蒸発乾固

廃液の温度があらかじめ設定した廃液の沸点に達した場合、廃液は沸騰するものと見なされる。この過程では、廃液の温度は沸点で一定である代りに、水の蒸発が生じ液位の低下・濃縮が進行する。なおHLS Tでは、高レベル廃液貯槽に設置されているコンデンサの健全性の有無も解析中に考慮するために、発生した水蒸気がコンデンサで凝縮し還流される割合も入力によって設定できる。

(4)過程4：蒸発乾固～融解

廃液中の水の量をあらかじめ計算しておき、水の全量が蒸発した時点で蒸発乾固に至ったものと判断する。この過程では廃液はソルトケーキとして存在し、その比熱に応じた割合で温度上昇していく。そしてソルトケーキの融点に達した時点で融解が生じたと判断し、その時点で計算を終了する。

HLS Tでは貯槽タンク内壁面あるいは外壁面基準の総括伝熱係数を自然対流熱伝達式に従ってプログラム内で自動的に計算する。その計算に必要な廃液の密度、体膨張率、比熱、粘性係数、熱伝導率等の物性値を廃液の温度・濃度をパラメータとしてプログラム内に内蔵しており、廃液の温度変化、濃度変化に対応した総括伝熱係数の算出ができるように考慮されている。さらに各元素について、廃液沸騰時の気相への放出速度を入力データとして与え、沸騰経過時間を用いて全体の放出量を算出する。

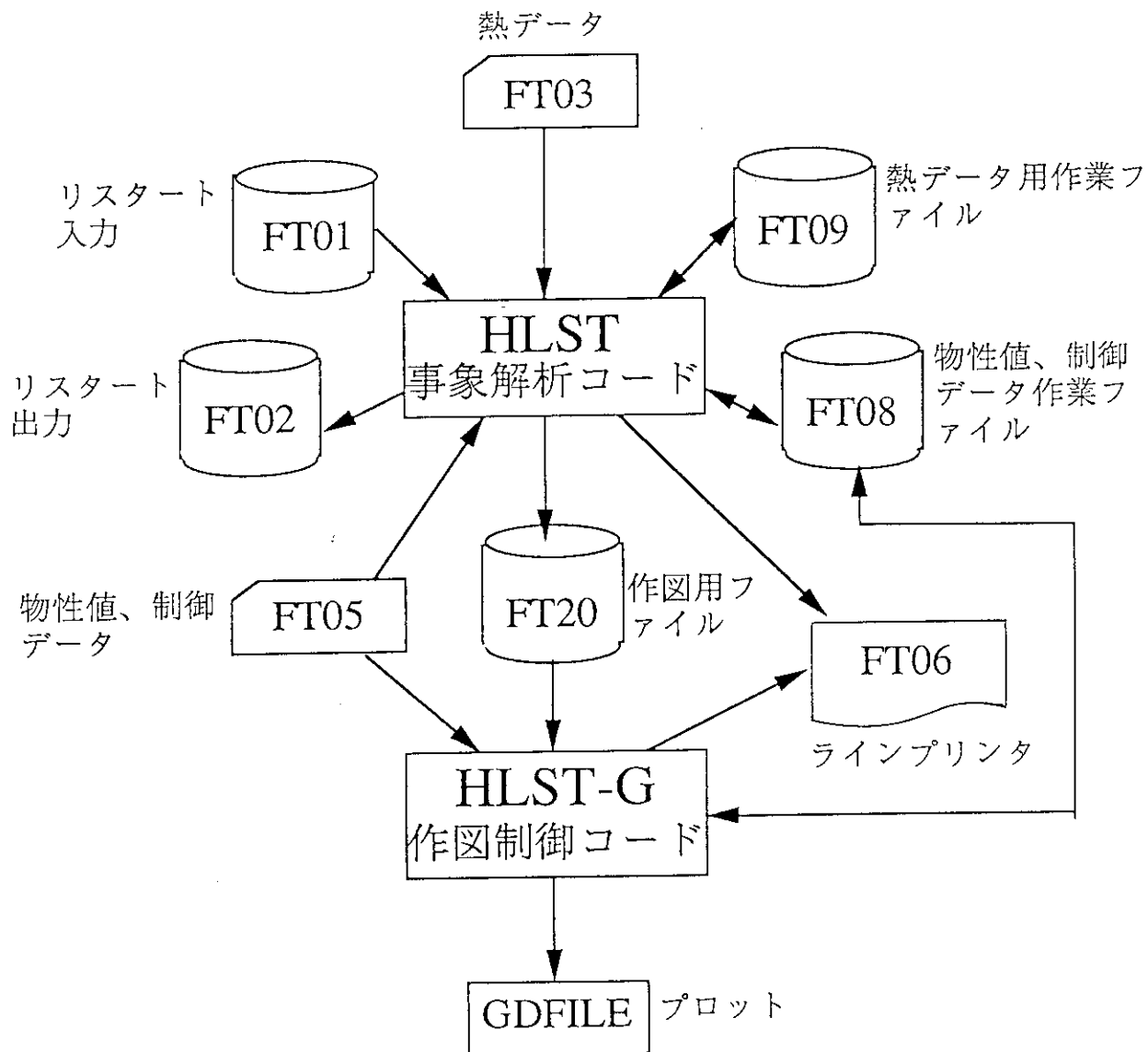


図2 HLSTシステム構成図

3. 解析モデル

3.1 計算対象モデル

計算対象とする廃液タンクを図3に示す。廃液タンクは半径 $(r-b_w)$ (m)の円形の底面を有する円筒型をしており、そこに高さ Q^0 (m)の液位で廃液が貯蔵されている。 b_w (m)は、タンクの容器壁厚である。廃液中には、長さ L (m)の冷却コイルが挿入されており、その中に冷却水を流すことによって冷却機能を担っている。冷却コイル入口における冷却水温度を T_{c1} (K)、出口温度を T_{c2} (K)、冷却水の質量流量を w_c (kg/s)そして比熱を C_p (J/kg·K)とする。また廃液の温度を T_L (K)、タンク外界の温度を T_r (K)とする。

3.2 解析方法

3.2.1 インベントリ計算

ORIGEN²コード等を用いて、初期濃縮度、比出力、燃焼度そして冷却期間に対応した使用済燃料中の各核種組成を算出する(付録1参照)。計算対象とする核種を、ウラン・プルトニウムとその他の核種とに分け、高レベル廃液貯蔵工程に至る到達率をユーザー入力する(付録2参照)³⁾。核種の内、希ガスとヨウ素については高レベル廃液には含まれないものとする(すなわち工程到達率0(%))。核種毎に使用済燃料組成と工程到達率を掛け算することで高レベル廃液貯蔵工程における各核種の存在量を算出する。なおHLS Tでは、ウラン・プルトニウムについて0.5(%)、その他の核種について100(%)を工程到達率のデフォルト値として内蔵している。廃液発生量は入力により Q /ton·H·M単位で指定する。また発熱量 Q_p (W)は、ORIGENコードの計算結果から算出し入力する。廃液中の核種の存在量から無機塩類の質量 M_s (kg)を算出する。

廃液の初期容積 V_{L^0} (m³)、廃液中の水の初期容積 V_w^0 (m³)は以下の式で表わされる。

$$V_{L^0} = \pi (r - b_w)^2 \cdot Q^0$$

$$V_w^0 = (V_{L^0} \cdot D_{L^0} - M_s - M_{HNO_3}) \times 10^{-3}$$

ここで Q^0 は廃液の初期液位 (m)、 D_{L^0} は廃液の初期密度 (kg/m³)、 M_{HNO_3} は廃液中の硝酸の質量である。また水の密度を1000 (kg/m³)とする。

3.2.2 異常事象解析

(1) 総括伝熱係数 U の計算

1) 自然対流熱伝達式

自然対流熱伝達はヌッセルト数を用いて以下の様に表わされる。

$$Nu = \frac{h \cdot Q}{k_f} = a [(Q^3 \cdot \Delta t)(\rho^2 \cdot g \cdot C_E \cdot C_p / \mu \cdot k)]_f = a \cdot Ra^m$$

さらに係数 a と指数 m の値は、 Ra の大きさにより以下の3領域に分けて設定される。

$$Ra > 10^8 \quad \dots \dots \dots Nu = 0.13 Ra^{1/3}$$

$$Ra = 10^4 \sim 10^8 \quad \dots \dots \dots Nu = 0.59 Ra^{1/4}$$

$$Ra < 10^4 \quad \dots \dots \dots Nu = 1.36 Ra^{1/6}$$

2) 計算手順

① 任意の壁面温度を設定する。

$$T_{wq} = (T_q - T_r) \times 2/3 + T_r$$

$$T_{wr} = (T_q - T_r) \times 1/3 + T_r$$

$$T_{bq} = (T_q - T_r) \times 2/3 + T_r$$

$$T_{br} = (T_q - T_r) \times 1/3 + T_r$$

② 廃液～容器内壁、容器外壁～外界についてそれぞれRaを計算する。
その際空気のk_rに以下の式を用いる。

$$k_r = 0.024(T_r/273)^{0.82}$$

③ それぞれの場合のNuを計算しh_{wq}、h_{wr}、h_{bq}、h_{br}を算出する。またU_{wq}、U_{wr}、U_{bq}、U_{br}を以下の式から算出する。

$$U_{wq} = 1 / \left(\frac{1}{h_{wq}} + \frac{bw}{kav} \frac{2(r-bw)}{2r-bw} + \frac{1}{h_{wr}} \frac{r-bw}{r} \right)$$

$$U_{bq} = 1 / \left(\frac{1}{h_{bq}} + \frac{bw}{kav} \frac{2(r-bw)^2 \pi}{r^2 \pi + (r-bw)^2 \pi} + \frac{1}{h_{br}} \frac{(r-bw)^2}{r^2} \right)$$

$$U_{wr} = U_{wq} \frac{r-bw}{r}$$

$$U_{br} = U_{bq} \frac{(r-bw)^2}{r^2}$$

④ T_{wr}'、T_{br}'を以下の式を用いて計算する。

$$T_{wr}' = T_q - \frac{U_{wq}}{h_{wq}} (T_q - T_r) - bw \frac{U_{wq}}{kav} \frac{2(r-bw)}{2r-bw} (T_q - T_r)$$

$$T_{br}' = T_q - \frac{U_{bq}}{h_{bq}} (T_q - T_r) - bw \frac{U_{bq}}{kav} \frac{2(r-bw)^2 \pi}{r^2 \pi + (r-bw)^2 \pi} (T_q - T_r)$$

⑤ T_{wr}とT_{wr}'、T_{br}とT_{br}'を比較し両者の差が収束判定値(デフォルト値=10⁻³)内にあれば計算を終了する。差が判定値外の場合には、T_{wr}'、T_{wq}'をT_{wr}、T_{wq}として、またT_{br}'、T_{bq}'をT_{br}、T_{bq}として②にもどり再計算する。T_{wq}'、T_{bq}'は以下の計算式から算出する。

$$T_{wq}' = T_q - \frac{U_{wq}}{h_{wq}} (T_q - T_r)$$

$$T_{bq}' = T_q - \frac{U_{bq}}{h_{bq}} (T_q - T_r)$$

3) 廃液物性値の温度・濃度依存性

廃液の温度・濃度に依存した総括伝熱係数 U を設定できるようにするためには、温度・濃度に依存した廃液の各物性値が必要となる。HLS Tでは、温度・濃度をパラメータとした、硝酸についての ρ 、 C_p 、 μ 、 k 、 CE がプログラミングされており⁴⁾、温度・濃度変化に対応した総括伝熱係数を設定できる様に考慮されている(付録3参照)。

(2) 事象解析

1) 熱均衡計算

①過程1：平常時

冷却機能は正常に作動している。熱均衡を以下の様に考える。

$$Q_p = q_c + q_w$$

q_c : 冷却コイルによって取り去られる熱量
 q_w : 容器壁面から逃げる熱量

この様な熱均衡に基づき、廃液と冷却コイル外壁面間の総括伝熱係数 $U_{c\ell}$ を以下の式から算出する。そしてこの $U_{c\ell}$ は廃液の温度によらず一定であると仮定して異常時における計算を行う。

$$U_{c\ell} = \frac{W_c \cdot C_{p_c}}{\pi \cdot D_c \cdot L} \ln \frac{T_{\ell} - T_{c1}}{T_{\ell} - T_{c2}}$$

ここで D_c (m)は冷却コイルの外径である。

②過程2：異常の発生～沸騰

冷却機能に異常が生じ、廃液の温度上昇が始る。この過程では以下の様に熱的均衡を考える。

$$Q_p = q_c + q_w + q_{\ell} + q_{wc}$$

q_c : 冷却コイルによって取り去られる熱量
 q_w : 容器壁面から逃げる熱量
 q_{ℓ} : 廃液温度上昇に消費される熱量
 q_{wc} : 容器壁の温度上昇に消費される熱量

上式で冷却機能が全て失われた場合は、 q_c は0となる。この熱均衡式から廃液温度 T_{ℓ} (K)、冷却コイル出口における冷却水温度 T_{c2} (K)、容器壁温度 T_w (K)を以下の式の連立によって算出する。

$$T_{c2} = (1-\alpha) \cdot T_{\ell} + \alpha \cdot T_{c1}$$

$$Q_p = \beta (T_{c2} - T_{c1}) + \gamma (T_{\ell} - T_r) + \delta \frac{dT_{\ell}}{dt} + \varepsilon \frac{dT_w}{dt}$$

$$T_w = \frac{1}{2} \left(\frac{h_{w\ell} - U_{w\ell}}{h_{w\ell}} + \frac{U_{w\ell}}{h_{wr}} \right) \cdot T_{\ell} + \frac{1}{2} \left(\frac{U_{w\ell}}{h_{w\ell}} + \frac{h_{wr} - U_{w\ell}}{h_{wr}} \right) \cdot T_r$$

$$\alpha = \exp(-\pi U_{c\ell} D_c L / \beta)$$

$$\beta = w_c \cdot C p_c$$

$$\gamma = 2 U_{w\ell} (r - bw) \pi \ell + U_{b\ell} (r - bw)^2 \pi$$

$$\delta = V_\ell D_\ell C_\ell$$

$$\varepsilon = [r^2 \pi \ell - (r - bw)^2 \pi \ell + r^2 \pi bw] D_w C_w$$

③過程3：沸騰～蒸発乾固

廃液の温度が廃液の沸点 T_b に達した場合廃液は沸騰し、廃液中の水の蒸発が始まる。この過程では以下の様に熱均衡を考える。

$$Q_p = q_c + q_w + q_{H_2O}$$

q_c : 冷却コイルによって取り去られる熱量

q_w : 容器壁面から逃げる熱量

q_{H_2O} : 水の蒸発に消費される熱量

この過程では、廃液の沸騰により水の蒸発が生じ液位の減少と廃液の濃縮が進む。また高レベル廃液貯蔵に設置されているコンデンサの健全性も考慮に入れるため、蒸発した水がコンデンサによって凝縮され、貯蔵に還流される割合を X (%)として入力する。即ちコンデンサの機能が正常である場合には $X=100$ 、機能が完全に失われている場合は $X=0$ である。廃液位 ℓ (m)、水のみかけの蒸発量 B (kg/s)を、以下の方程式の連立によって算出する。

$$Q_p = -10^3 \pi (r - bw)^2 L h \frac{d\ell}{dt} + \beta (T_{c2} - T_{c1}) + \gamma (T_b - T_r)$$

$$T_{c2} = T_b - (T_b - T_{c1}) \cdot \exp(\zeta \cdot \ell)$$

$$B = -10^3 \pi (r - bw)^2 \frac{d\ell}{dt} (1 - X \times 10^{-2})$$

$$\zeta = -U_{c\ell} D_c \pi L' / \beta \quad (L' = L / \ell)$$

④過程4：蒸発乾固～融解

廃液中の水が全て蒸発した時点で蒸発乾固に至ったものと仮定する。この過程における熱均衡を以下の様に考える。

$$Q_p = q_w + q_{wc} + q_{sk}$$

q_w : 容器壁面から逃げる熱量

q_{wc} : 容器壁の温度上昇に消費される熱量

q_{sk} : ソルトケーキの温度上昇に消費される熱量

ソルトケーキの高さ ℓ_{sk} (m)は以下の様に仮定する。

$$\ell_{sk} = \ell^0 - (V_{\ell^0} \cdot D_{\ell^0} - M_s) \cdot 10^3 / (\pi \cdot r^2)$$

この過程におけるソルトケーキの温度 T_{sk} (K)と容器壁面温度 T_w (K)を以下の方程式の連立によって算出する。

$$Q_p = M_{sk} \cdot C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} + \gamma' (T_{sk} - T_r) + \varepsilon' \frac{dT_w}{dt}$$

$$T_w = \frac{h_{wr} + U_{wq}}{2h_{wr}} T_{sk} + \frac{h_{wr} - U_{wq}}{2h_{wr}} T_r$$

$$\gamma' = 2 U_{wq} (r - bw) \pi \cdot Q_{sk} + U_{wq} (r - bw)^2 \pi$$

$$\varepsilon' = [r^2 \pi Q_{sk} - (r - bw)^2 \pi Q_{sk} + r^2 \pi bw] D_w C_w$$

2) 放射性物質の放出

各元素について、廃液沸騰時の気相への放出速度を入力データとして与え、廃液が沸騰した場合にその経過時間を用いて全体の放出量を算出する。

(3) 数値解法

H L S Tでは(2)で述べた常微分方程式をRunge-Kutta-Gill(R-K-G)法を用いて解く。

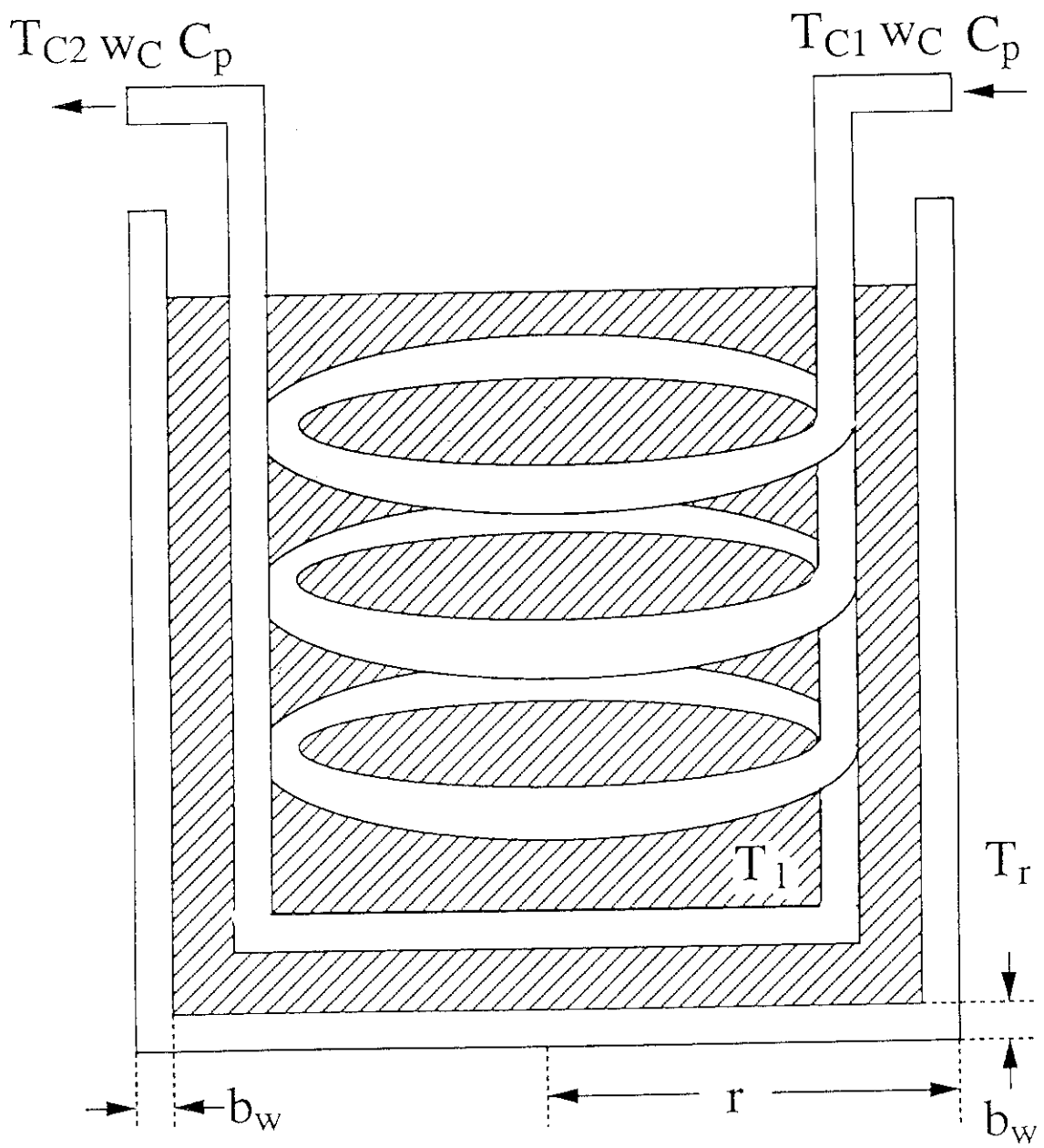


図3 計算対象とする廃液貯槽タンクモデル

4. 入出力説明

4.1 入力説明

入力データとして、図2に示したように事象解析部分には、物性値データ、制御データそして熱データが、作図制御部分には制御データが必要となる。

事象解析部分、作図制御部分とも書式なし(リスト指示)入力であり、1つのREAD文に対応するデータを任意カラム、複数カードに記述できる。データとデータの区切りは1個以上の空白または1個のカンマ(前後に数個の空白があってもよい)を設ける。また第1カラムをアスタリスク(*)としたカードはコメントと見なされる。

4.1.1 入力データ

(1)事象解析部分

1)物性値、制御データ

カードNo	変数名	単 位	入力形式	内 容
1	TITL	—	CH*72	計算タイトル
2	IRUN	—	I*4	=0:初期計算 =1:リスタート計算(現在は機能なし)
3	DT	sec	R*8	時間刻み幅
	CPULIM	min	R*8	CPUリミット
4	DTMAX	sec	R*8	最大時間刻み幅
	DTMIN	sec	R*8	最小時間刻み幅
5	IPR	—	I*4	ラインプリンタ出力データを指定するカード枚数、MAX=5
6*	PRST(i)	sec	R*8	プリンタ出力開始時間(i=1~IPR)
	PRED(i)	sec	R*8	プリンタ出力終了時間(i=1~IPR)
	PRCT(i)	—	R*8	プリンタ出力分割数(i=1~IPR)
7	IGP	—	I*4	作図ファイル出力データを指定するカード枚数 MAX=5

カードNo	変数名	単 位	入力形式	内 容
8 *2	GPST(i)	sec	R*8	作図ファイル出力開始時間(i=1~IGP)
	GPED(i)	sec	R*8	作図ファイル出力終了時間(i=1~IGP)
	GPCT(i)	—	R*8	作図ファイル出力分割数(i=1~IGP)
9	EPS(i)	—	R*8	i=1:温度平衡判定、 i=2:ゼロ割チェック値 i=3:相対変化量の最大値、i=4、5:未使用
10	NEPS	—	I*4	時間刻み幅増減目安値
11	TRA	m	R*8	貯蔵タンク半径
	WT	m	R*8	貯蔵タンク壁厚さ
12	DC	m	R*8	冷却コイルの内径
	CLEG	m	R*8	冷却コイルの管長
13	WCO	kg/s	R*8	冷却水初期質量流量
14	IDTWC	—	I*4	冷却水質量流量の時間変化データ数(最大で5)
15	DTWC(i)	sec	R*8	冷却水質量流量変化時間幅(i=1~IDTWC)
	WCMR(i)	kg/s	R*8	変化後の冷却水質量流量(i=1~IDTWC)
16	TL	K	R*8	初期廃液温度
	TR	K	R*8	外界温度
	TC1	K	R*8	冷却コイル入口の冷却水温度
16	TB	K	R*8	廃液の沸点
	TM	K	R*8	ソルトケーキの融点
17	DW	kg/m ³	R*8	容器壁の比重

カードNo	変数名	単 位	入力形式	内 容
18	CONDAV	W/mK	R*8	容器壁の熱伝導度
19	CDV	%	R*8	初期硝酸濃度
20	CPC	J/kgK	R*8	冷却コイル冷却水の比熱
	CL	J/kgK	R*8	廃液の初期比熱
	CW	J/kgK	R*8	容器壁の比熱
	CSK	J/kgK	R*8	ソルトケーキの比熱
21	XLH	J/kg	R*8	水の蒸発潜熱
	X	%	R*8	蒸発した水がコンデンサにより凝縮され貯蔵タンクに戻される割合
22	WST	Q	R*8	廃液発生量
23	IRS	—	I*4	放出元素の個数
	IRSE(i)	—	I*4	放出元素の原子番号(i=1~IRS)
24	RSV(i)	kg/s	R*8	核種の気相への放出速度 原子番号の順に全ての元素について設定する。
25	ARV(i)	%	R*8	工程到達率 原子番号の順に全ての元素について設定する。

* 1 (カード6)

出力間隔 Δp は時刻 T が

$$PRST(i) \leq T \leq PRED(i)$$

の場合、

$$\Delta p = \frac{PRED(i) - PRST(i)}{PRCT(i)}$$

となる。

$$PRED(IPR) < T$$

の場合、

$$PRST(IPR) \leq T \leq PRED(IPR)$$

の Δp である。

*2 (カード8)

出力間隔 ΔG は時刻 T が

$$GPST(i) \leq T \leq GPED(i)$$

の場合、

$$\Delta G = \frac{GPED(i) - GPST(i)}{GPCT(i)}$$

となる。

$$GPED(IGP) < T$$

の場合、

$$GPST(IGP) \leq T \leq GPED(IGP)$$

の ΔG である。

2) 熱データ

カードNo	変数名	単 位	入力形式	内 容
1	DUMTIL	-	CH*72	熱データタイトル
2*1	CELM	-	CH*2	核種名
	QELM(i)	W	R*8	核種の発熱量(i=1~103(=NELM))
	WELM(i)	kg	R*8	核種の質量(i=1~103(=NELM))

*1 (カード2)

QELMの核種名は名称のの前後に必ず ' を記述する。

(2) 作図制御部分

カードNo	変数名	単 位	入力形式	内 容
1	CFITL	-	CH*72	作図データタイトル
2	BOILTM	sec	R*4	沸点到達時間
	DRYTM	sec	R*4	蒸発乾固到達時間

カードNo	変数名	単 位	入力形式	内 容
2	ELTMM	sec	R*4	融点到達時間
3	CFIGT	—	CH*72	グラフタイトル
4	CID	—	CH*72	ARGUS用図形識別記号
5	ITYP	—	I*4	作図タイプ番号 =1:廃液温度 v. s. 時間 =2:ソルトケーキ温度 v. s. 時間 =3:冷却水出口温度 v. s. 時間 =4:容器壁温度 v. s. 時間 =5:廃液位 v. s. 時間 =6:廃液体積 v. s. 時間 =7:積算蒸発量 v. s. 時間 =8:単位時間の核種放出量 v. s. 時間 =9:核種の積算放出量 v. s. 時間 =10:放熱密度 v. s. 時間 =11:発熱密度 v. s. 時間
	IXTP	—	I*4	X軸のタイプ、=1:線形、=2:対数
	IYTP	—	I*4	Y軸のタイプ、=1:線形、=2:対数
6*1	IXN0	—	I*4	X軸最小値(整数部分)
	IXN9	—	I*4	X軸最小値(指数部分)
	IXX0	—	I*4	X軸最大値(整数部分)
	IXX9	—	I*4	X軸最大値(指数部分)
7	CXTTL	—	I*4	X軸タイトル(空白時:標準タイトルを表示)
8*1	IYN0	—	I*4	Y軸最小値(整数部分)
	IYN9	—	I*4	Y軸最小値(指数部分)
	IYX0	—	I*4	Y軸最大値(整数部分)

カードNo	変数名	単位	入力形式	内容
8	IYX9	—	I*4	Y軸最大値(指数部分)
9	CYTTL	—	I*4	Y軸タイトル(空白時：標準タイトルを表示)

* I (カード6、8)

各変数の対応は、

$$IXNO \times 10^{IXN9}, IXXO \times 10^{IXX9}$$

である。

カード6中のデータが全て0の場合には、作図データに合わせて自動スケールで作図を行う。(カード8も同様である。)

4.2 出力説明

H L S Tでは以下の項目についての時間変化を出力することができる。

- ① 廃液温度
- ② ソルトケーキ温度
- ③ 冷却水出口温度
- ④ 容器壁温度
- ⑤ 廃液位
- ⑥ 廃液体積
- ⑦ 積算蒸発量
- ⑧ 単位時間の核種放出量
- ⑨ 核種の積算放出量
- ⑩ 放熱密度
- ⑪ 発熱密度

5. 計算実行例

5.1 サンプル問題

5.1.1 形状モデル、物性値等

(1) 廃液容器

廃液容器は、ステンレス鋼 SUS410で構成されていると仮定し、その物性値を容器壁の物性値として採用する。

容器底面半径 r	: 2.5 (m)
容器壁厚さ b_w	: 0.02 (m)
容器壁密度 D_w	: 7.73E3 (kg/m ³)
容器壁比熱 C_w	: 460.9 (J/kg·K)

(2) 冷却コイル

冷却水入口温度 $T_{c,i}$: 288 (K)
初期質量流量 w_c	: 9.5 (kg/s)
冷却水比熱 $C_{p,c}$: 4.19E3 (J/kg·K)
長さ L	: 10 (m)
コイル外径 D_c	: 8.07E-2 (m)

(3) 廃液

初期廃液温度 $T_{l,0}$: 323 (K)
初期廃液位 l_0	: 3.3 (m)
比熱 C_l	: 4.19E3 (J/kg·K)

(4) ソルトケーキ

比熱 $C_{s,k}$: 8.37E2 (J/kg·K)
--------------	-------------------

(5) その他

外気温度 T_r	: 293 (K)
廃液沸点 T_b	: 381 (K)
水の蒸発潜熱 L_h	: 2.23E6 (J/kg)

5.1.2 廃液発生条件

(1) 処理済燃料諸元

燃焼度28,000 (MWD/t)、濃縮度4.5 (%)、冷却期間180 (days)の条件を仮定し、ウラン1 tあたりの使用済燃料の組成をORIGEN2²⁾から算出した。また西独PSEプロジェクトでは、高レベル廃液貯蔵の諸元として、廃液の比放射能を 1.75×10^{13} (Bq/kg)、廃液の容積を75 (m³)と設定している⁵⁾。そこでORIGEN2から得られたウラン1 tあたりの全放射エネルギーとこの例題で仮定した廃液容積を用いて、廃液の比放射能が 1.75×10^{14} (Bq/kg) (安全側の値として仮想的に10倍の放射エネルギーを仮定した。)となるよ

うに各核種の発熱量と質量を計算した。このように求めた使用済燃料諸元を付録1に示した。

(2) 工程到達率

核種の工程到達率としては、付録2に示す値^{*)}とデフォルト値を併用する(対象となる工程到達率が付録2中にある場合にはそちらを優先する)。

5.1.3 放射性物質放出挙動

沸騰に伴い、核種が気相へ放出される。核種のうち揮発性核種(Ru, Cs, Rb)については、放出速度として $2.78E-7$ (kg/s)を、またその他の核種については $2.78E-9$ (kg/s)を用いる。Ruについての放出量をアウトプットする。

5.1.4 事故シナリオ

(1) ケース1

冷却コイル中の冷却水の質量流量が一定割合で減少し10分間で0 (kg/s)になった。また廃液タンクの上部に存在するコンデンサがなんらかの原因によって機能を停止しており、蒸発蒸気の還流割合Xは0 (%)であると仮定する。

(2) ケース2

冷却コイル内の冷却水の質量流量がケース1と同様に10分間で0 (kg/s)になった。さらに異常事象発生から2時間後に冷却機能が復旧し、経過時間に比例して冷却水流量が回復し、10分後に初期流量に復帰した。Xは0 (%)と仮定する。

5.2 入力データ例

ケース1の解析に使用した入力データを以下に示す。

(1) 事象解析部分

```

* TITLE
-----          SAMPLE CALCULATION CASE-1          -----
*
* RESTART FLAG
* =0 : FIRST RUN          =1 : RESTART RUN
0
*
* DELTA-T(SEC)    CPU LIMIT(MIN)
1.25D-01          9.9D0
*
* MAX. DELTA-T(SEC)  MIN. DELTA-T(SEC)
1.00D+00          8.00D-03
*
* COUNT OF PRINT DATA <MAXIMUM COUNT = 5 >
3
* DIV-1
* FROM(SEC)    TO(SEC)    DIV
0.0D+00        3.0D+04    1.0D+01
* DIV-2
* FROM(SEC)    TO(SEC)    DIV
3.0D+4         3.0D+05    2.0D+01
* DIV-3
* FROM(SEC)    TO(SEC)    DIV
3.0D+5         5.0D+05    2.0D+01
*
* COUNT OF GRAPHIC DATA <MAXIMUM COUNT = 5 >
3
* DIV-1
* FROM(SEC)    TO(SEC)    DIV
0.0D+00        3.0D+04    1.0D+01
* DIV-2
* FROM(SEC)    TO(SEC)    DIV
3.0D+4         3.0D+05    2.0D+01
* DIV-3
* FROM(SEC)    TO(SEC)    DIV
3.0D+5         5.0D+05    2.0D+01
*
* EPSLON
* (1)          (2)          (3)          (4)          (5)
1.0D-20        1.0D-50        0.4D0        0.0D0        0.0D0
*
* NEPS
4
*
* STORAGE TANK DATA
* RADIUS(M)    THICKNESS(M)
2.5D+00        2.0D-02
*
* COOLING COIL DATA

```

```

* CALIBER(M)      LENGTH(M)
8.07D-02         10.0D+00
*
* INITIAL MASS FLOW RATE(KG/SEC)
9.0D+00
*
* COUNT OF NEXT CARD < MAXIMUM COUNT = 5 >
1
*
* TIME OF DECREMENT(SEC)  MASS FLOW RATE
* 60.0D0                100.0D0
* 60.0D0                0.0D0
*
* TEMPERATURE DATA (KELVIN)
* WASTE LIQUID          OUT OF TANK          INLET OF COOLING COIL
323.00D+00            293.00D+00            288.00D+00
*
* BOILING POINT        MELTING POINT
381.00D+00            1273.00D+00
*
* SPECIFIC GRAVITY OF TANK WALL(KG/M**3)
7.73D+03
*
* HEAT-CONDUCTIVITY OF TANK    < (J/M*SEC*K)=(W/M*K) >
*
11.6D0
*
* DENSITY AND NO3-CONCENTRATION OF WASTE LIQUID(KG/M**3)
* CONCENTRATION OF HNO3 IN THE WASTE LIQUID (%)
17.0D+00
*
* SPECIFIC HEAT CAPACITY(J/KG*K)
* COOLING          WASTE LIQUID          TANK WALL          SALT CAKE
4.19D+03          4.19D+03          460.90D+00        8.73D+02
*
* LATENT HEAT EVAPORATION(J/KG)          COLLECTION EFFICIENCY(%)
2.23D+06          0.0D+00
*
* ENRICHMENT RATIO(LITRE)
64.7D-03
*
* COUNT OF ELEMENT          EMISSION ELEMENT NO.
*                          44:RU(RUTHENIUM)
1                          44
*
* EMISSION VELOCITY(KG/SEC)
* ( 1)-->(50)
2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09
2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09
2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09
2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09
2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09
2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09
2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09          2.78D-09
*                          (37):RB

```

```

2.78D-09  2.78D-07  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
*          (44):RU
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-07  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
* (51)-->(100)          (55):CS
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-07
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
* (100)-->(103)
2.78D-09  2.78D-09  2.78D-09
*
* ARRIVAL RATIO(%)
* ( 1)-->(50)
100.00D+00  0.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  0.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  0.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  99.90D+00  99.90D+00  59.90D+00  99.99D+00
0.00D+00  99.99D+00  99.99D+00  99.79D+00  64.65D+00
4.99D+00  49.95D+00  79.95D+00  39.80D+00  49.82D+00
79.94D+00  4.99D+00  79.99D+00  99.99D+00  19.90D+00
* (51)-->(100)
4.93D+00  59.90D+00  0.00D+00  0.00D+00  99.99D+00
99.99D+00  99.99D+00  99.99D+00  99.99D+00  99.99D+00
99.99D+00  99.99D+00  99.99D+00  99.99D+00  99.99D+00
99.99D+00  99.99D+00  99.99D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
0.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
100.00D+00  0.50D+00  99.50D+00  0.50D+00  99.29D+00
99.99D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
* (101)-->(103)
100.00D+00  100.00D+00  100.00D+00
*END OF DATA

```

(2)作図制御部分

HLST-G GRAPH MREP DATA ('90/10/04)

```
*
* BOILING TIME      DRY UP TIME      MELTING TIME
* 1.6884E+04        1.60422E+05      2.14687+05
```

```
*
* FIG.1 VARIATION OF WASTE LIQUID TEMP.
* TESTDIM1
```

```
*
* FIGURE TYPE (1-12)      X AXIS TYPE      Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
* 1                        1                2
* X AXIS MIN (N*10**M)    X AXIS MAX (N*10**M)
* N      M                N      M
* 0      0                2      5
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M)    Y AXIS MAX (N*10**M)
* N      M                N      M
* 1      2                2      3
* Y AXIS TITLE
```

```
*
* FIG.2 VARIATION OF SALT CAKE TEMP.
* TESTDIM2
```

```
*
* FIGURE TYPE (1-12)      X AXIS TYPE      Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
* 2                        2                2
* X AXIS MIN (N*10**M)    X AXIS MAX (N*10**M)
* N      M                N      M
* 1      0                5      6
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M)    Y AXIS MAX (N*10**M)
* N      M                N      M
* 1      2                1      3
* Y AXIS TITLE
```

```
*
* FIG.3 VARIATION OF COOLING TEMP.
* TESTDIM3
```

```
*
* FIGURE TYPE (1-12)      X AXIS TYPE      Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
* 3                        2                1
* X AXIS MIN (N*10**M)    X AXIS MAX (N*10**M)
* N      M                N      M
* 1      0                5      6
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M)    Y AXIS MAX (N*10**M)
* N      M                N      M
* 0      0                0      0
```

* Y AXIS TITLE

*
 FIG.4 VARIATION OF STORAGE TANK WALL TEMP.
 TESTDIM4

* FIGURE TYPE (1-12)	X AXIS TYPE	Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
4	2	2
* X AXIS MIN (N*10**M)	X AXIS MAX (N*10**M)	
N M	N M	
1 0	5 6	
* X AXIS TITLE		
* Y AXIS MIN (N*10**M)	Y AXIS MAX (N*10**M)	
N M	N M	
1 2	1 4	
* Y AXIS TITLE		

*
 FIG.5 VARIATION OF LIQUID LEVEL
 TESTDIM5

* FIGURE TYPE (1-12)	X AXIS TYPE	Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
5	1	1
* X AXIS MIN (N*10**M)	X AXIS MAX (N*10**M)	
N M	N M	
0 0	2 5	
* X AXIS TITLE		
* Y AXIS MIN (N*10**M)	Y AXIS MAX (N*10**M)	
N M	N M	
0 0	4 0	
* Y AXIS TITLE		

*
 FIG.6 VARIATION OF LIQUID VOLUME
 TESTDIM6

* FIGURE TYPE (1-12)	X AXIS TYPE	Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
6	2	1
* X AXIS MIN (N*10**M)	X AXIS MAX (N*10**M)	
N M	N M	
1 0	5 6	
* X AXIS TITLE		
* Y AXIS MIN (N*10**M)	Y AXIS MAX (N*10**M)	
N M	N M	
0 0	1 2	
* Y AXIS TITLE		

*
 FIG.7 VARIATION OF EVAPORATION
 TESTDIM7

* FIGURE TYPE (1-12)	X AXIS TYPE	Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
----------------------	-------------	-----------------------------

```

      7                2                2
* X AXIS MIN (N*10**M) X AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 1          0          5          6
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M) Y AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 1          0          1          5
* Y AXIS TITLE

```

*
FIG.8 VARIATION OF RELEASE VALUE
TESTDIM8

```

* FIGURE TYPE (1-12) X AXIS TYPE Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
* 8                2                2
* X AXIS MIN (N*10**M) X AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 1          0          5          6
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M) Y AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 1          -7         1          -6
* Y AXIS TITLE

```

*
FIG.9 VARIATION OF TOTAL REALEASE VALUE
TESTDIM9

```

* FIGURE TYPE (1-12) X AXIS TYPE Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
* 9                1                1
* X AXIS MIN (N*10**M) X AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 0          0          2          5
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M) Y AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 0          0          5          -2
* Y AXIS TITLE

```

*
FIG.10 VARIATION OF HEAT RELEASE DENSITY
TESTDIMA

```

* FIGURE TYPE (1-12) X AXIS TYPE Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
* 10               2                2
* X AXIS MIN (N*10**M) X AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 1          0          5          6
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M) Y AXIS MAX (N*10**M)

```

```

*      N          M          N          M
*      1          2          1          5
* Y AXIS TITLE

*
FIG.11 VARIATION OF HEAT DENSITY
TESTDIMB
*
* FIGURE TYPE (1-12)      X AXIS TYPE      Y AXIS TYPE (1:LINER/2:LOG)
* 11                      2                      2
* X AXIS MIN (N*10**M)    X AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 1          0          5          6
* X AXIS TITLE

* Y AXIS MIN (N*10**M)    Y AXIS MAX (N*10**M)
* N          M          N          M
* 1          4          1          6
* Y AXIS TITLE

```

5.3 計算結果

ケース1については、廃液温度(図4)、廃液位(図5)、放射性物質放出量の時間変化(図6)を、またケース2については、廃液温度の時間変化(図7)を示した。

ケース1では、廃液は、252分(4時間12分)後に沸点、2000分(33時間20分)後に蒸発乾固、さらに2327分(38時間48分)後に融点に達した。

一方、ケース2では廃液温度は約73(°C)まで上昇したが、システムの復帰によって温度は序々に低下し、約830分(約14時間)後に、正常時における温度に戻った。

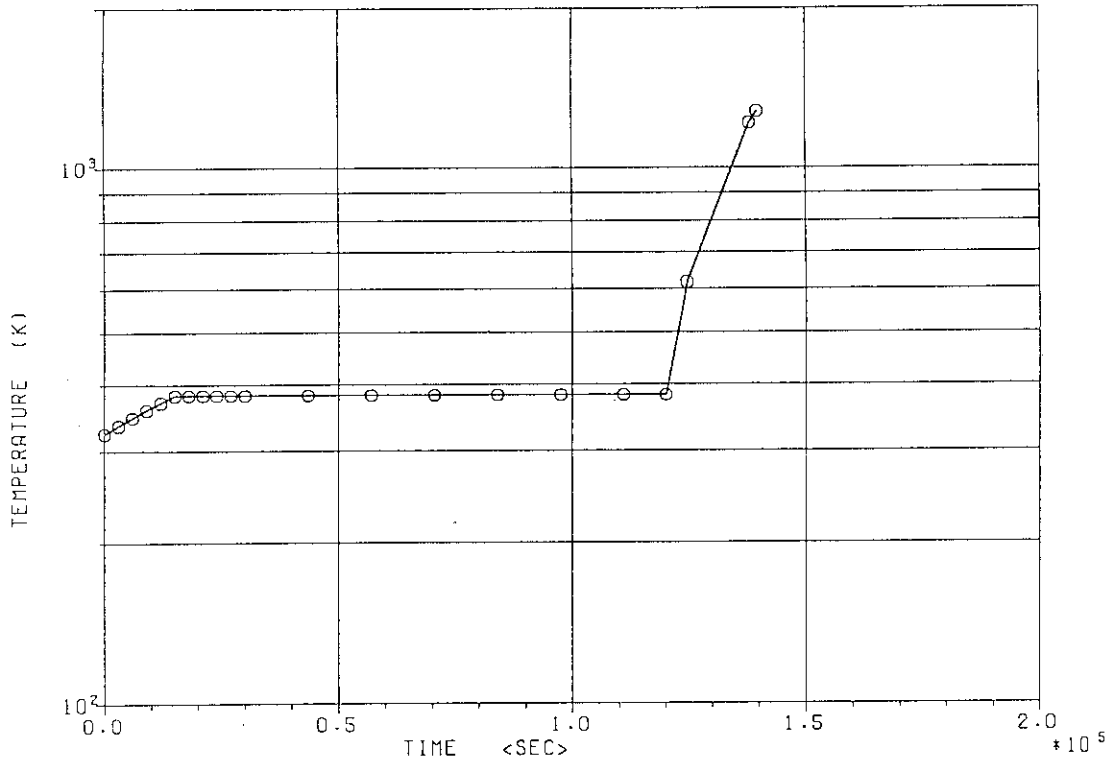


図4 廃液温度の時間変化 (ケース1)

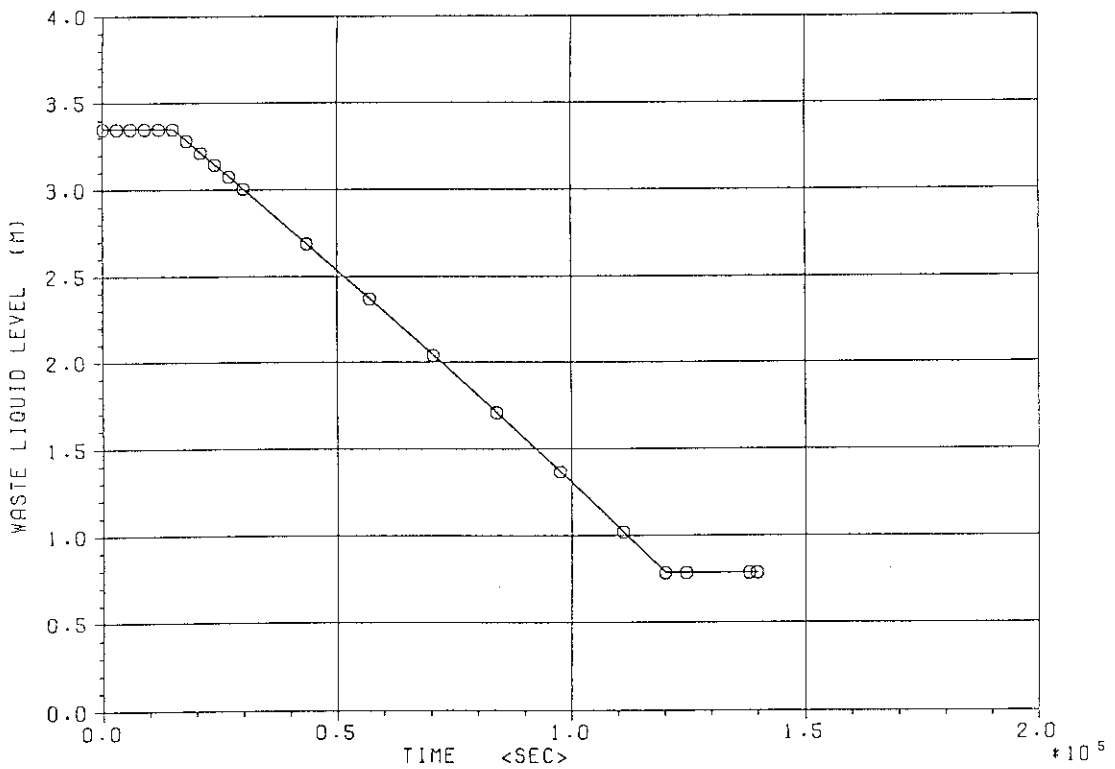


図5 廃液位の時間変化 (ケース1)

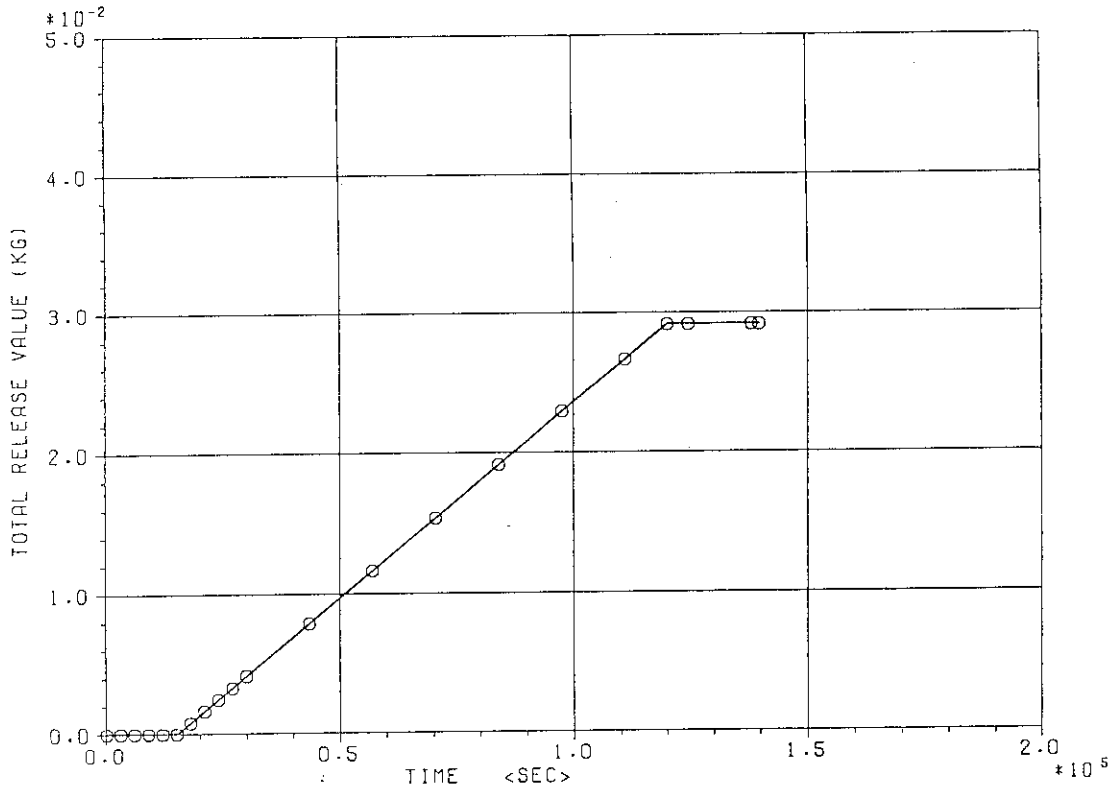


図6 放射性物質放出量の時間変化 (ケース1)

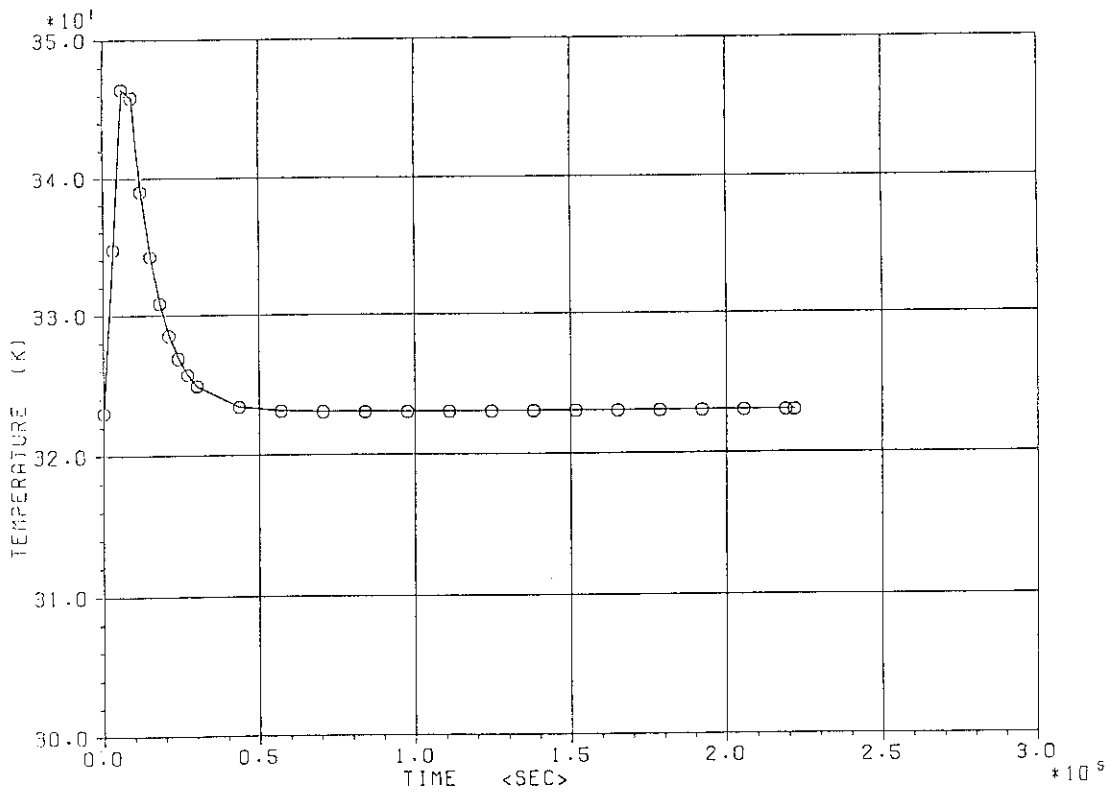


図7 廃液温度の時間変化 (ケース1)

6. 結 言

再処理工程のうち、高レベル廃液貯蔵工程を取り上げ、同工程における冷却機能喪失によって引き起こされる異常な過渡変化を解析する計算コードHLS Tの開発を行った。HLS Tは再処理施設を対象とした総合的な安全評価手法体系であるREPRO-ACEの一部を構成する計算コードとして位置付けられる。工程の様々な異常過渡事象をシミュレートすることで、それによって引き起こされる異常事象の規模、進展速度等を解析し、起因事象の重要性を明らかにすることは、再処理施設の安全評価を行う上で重要である。

今後の課題としては以下の項目が挙げられる。

(1) 放射性物質の放出挙動

放射性物質の放出挙動に関するデータが不足している。溶液温度上昇時、溶液沸騰時また蒸発乾固後における揮発性核種、不揮発性核種の放出挙動をどの様にモデル化するかを含めて、放射性物質の放出挙動に関するデータを充実させる必要がある。

(2) 計算コードの検証

開発したコードの検証計算を行い、コードの性能、モデルの正確さ等、様々な問題点を抽出し、コードを改良していく。

(3) 物性値データの精度向上

現在廃液の物性値としては硝酸の値がプログラミングされている(付録3)。しかし実際の廃液中には様々な核種が溶解しており、現在のモデルでは廃液の濃縮による物性値の変化は正確には模擬できない。したがってより実際の廃液に近い溶液における物性値の温度変化、濃度変化に関するデータを取得し、プログラムに反映させる必要がある。

(4) 脱硝反応の付加

現在のプログラムでは、硝酸の蒸発は考慮されていない。硝酸の蒸発による脱硝反応の影響を考慮する必要がある。

(5) 他の計算コードとの接続

図1に示したREPRO-ACEでは、ソースタームを解析する計算コードの整備が平行して進められている。それらコードとの接続を図るため、コード間のインタフェースの作成を行う。

さらに、REPRO-ACEの整備の一環として、他の工程における異常な過渡変化を追跡する計算コードの作成・整備を進めて行く予定である。

謝 辞

本計算コード作成にあたって、多くの方々の御指導、御助言を頂いたことに感謝致します。特に原研燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室、西尾軍治氏、野村 靖氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 西尾軍治、阿部 仁、内藤倣孝、"再処理施設における事故時放射性物質移行解析コードTRANS-ACEの開発"、JAERI-M 89-014 (1989).
- 2) A. G. Croff, "A User's Manual for The ORIGEN2 Computer Code", ORNL/TM-7175 (1980).
- 3) W. Hauser, H. W. Wiese and W. Wenzel, "Thermal Loading of A Repository for Vitrified High-Level Radioactive Wastes from Reprocessed LWR Spent Fuel Including Plutonium-Recycling, And from FBR Spent Fuel", CONF-890207-857, p. 653-659 (1989).
- 4) D. F. Collins, J. Ballantyne, "Atomic Energy Technical Data Sheets. Properties of Substance in SI Units", INIS-mf 4753 (1974).
- 5) R. Leicht, et. al., "Anwendung der Sicherheitsanalyse auf Oberirdische Anlagen des Integrierten Entsorgungskonzepts", Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung Abschlussbericht Fachband 5 (1985).

謝 辞

本計算コード作成にあたって、多くの方々の御指導、御助言を頂いたことに感謝致します。特に原研燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室、西尾軍治氏、野村 靖氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 西尾軍治、阿部 仁、内藤倣孝、"再処理施設における事故時放射性物質移行解析コードTRANS-ACEの開発"、JAERI-M 89-014 (1989).
- 2) A. G. Croff, "A User's Manual for The ORIGEN2 Computer Code", ORNL/TM-7175 (1980).
- 3) W. Hauser, H. W. Wiese and W. Wenzel, "Thermal Loading of A Repository for Vitrified High-Level Radioactive Wastes from Repressed LWR Spent Fuel Including Plutonium-Recycling, And from FBR Spent Fuel", CONF-890207-857, p. 653-659 (1989).
- 4) D. F. Collins, J. Ballantyne, "Atomic Energy Technical Data Sheets. Properties of Substance in SI Units", INIS-mf 4753 (1974).
- 5) R. Leicht, et. al., "Anwendung der Sicherheitsanalyse auf Oberirdische Anlagen des Integrierten Entsorgungskonzepts", Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung Abschlussbericht Fachband 5 (1985).

付録1 サンプル計算に使用した崩壊熱データ(ORIGEN2コードを用いて算出)

```

*
*  TITLE
* ----- HLST SAMPLE DATA (HEATING DATA) -----
* ELEMENT      Q(WATTS)      WEIGHT(KG)
' H'           1.158D+00      0.0
' HE'          0.0           0.0
' LI'          0.0           0.0
' BE'          0.0           0.0
' B'           0.0           0.0
' C'           0.0           0.0
' N'           0.0           0.0
' O'           0.0           1.673D+04
' F'           0.0           0.0
' NE'          0.0           0.0
' NA'          0.0           0.0
' MG'          0.0           0.0
' AL'          0.0           0.0
' SI'          0.0           0.0
' P'           5.583D-03      0.0
' S'           8.070D-01      0.0
' CL'          0.0           0.0
' AR'          0.0           0.0
' K'           0.0           0.0
' CA'          0.0           0.0
' SC'          0.0           0.0
' TI'          0.0           0.0
' V'           0.0           0.0
' CR'          0.0           0.0
' MN'          8.080D-01      0.0
' FE'          7.987D-02      0.0
' CO'          2.460D+02      0.0
' NI'          0.0           0.0
' CU'          0.0           0.0
' ZN'          4.125D+01      0.0
' GA'          0.0           0.0
' GE'          0.0           0.0
' AS'          0.0           0.0
' SE'          0.0           4.323D+00
' BR'          0.0           0.0
' KR'          0.0           2.390D+01
' RB'          0.0           2.107D+01
' SR'          1.567D+04      5.253D+01
' Y'           4.704D+04      2.709D+01
' ZR'          7.158D+04      2.541D+02
' NB'          1.378D+05      7.342D-01
' MO'          0.0           2.854D+02
' TC'          0.0           6.815D+01
' RU'          1.828D+04      2.489D+02
' RH'          5.626D+05      5.132D+02
' PD'          0.0           1.896D+03

```

'AG'	7.745D+03	1.239D+01
'CD'	5.571D-01	1.843D+01
'IN'	7.606D-01	0.0
'SN'	3.548D-01	1.202D+01
'SB'	5.609D+03	4.069D+00
'TE'	1.551D+03	5.067D+01
' I'	6.434D-03	2.680D+01
'XE'	1.670D-02	4.956D+02
'CS'	1.346D+05	2.395D+02
'BA'	3.460D+04	1.186D+02
'LA'	3.441D+01	1.029D+02
'CE'	4.282D+04	2.185D+02
'PR'	4.475D+05	9.391D+01
'ND'	2.812D-01	3.135D+02
'PM'	4.511D+03	1.080D+01
'SM'	0.0	6.458D+01
'EU'	1.130D+04	1.810D+01
'GD'	0.0	1.335D+01
'TB'	2.770D+00	0.0
'DY'	0.0	0.0
'HO'	0.0	0.0
'ER'	0.0	0.0
'TM'	0.0	0.0
'YB'	0.0	0.0
'LU'	0.0	0.0
'HF'	0.0	0.0
'TA'	0.0	0.0
' W'	1.660D-01	0.0
'RE'	0.0	0.0
'OS'	0.0	0.0
'IR'	0.0	0.0
'PT'	0.0	0.0
'AU'	0.0	0.0
'HG'	0.0	0.0
'TL'	0.0	0.0
'PB'	0.0	0.0
'BI'	0.0	0.0
'PO'	0.0	0.0
'AT'	0.0	0.0
'RN'	0.0	0.0
'FR'	0.0	0.0
'RA'	0.0	0.0
'AC'	0.0	0.0
'TH'	0.0	0.0
'PA'	0.0	0.0
' U'	0.0	5.852D+02
'NP'	1.190D+01	2.479D+01
'PU'	6.811D+02	7.200D+00
'AM'	7.872D+02	2.921D+01
'CM'	1.444D+05	1.012D+01
'BK'	0.0	0.0
'CF'	0.0	0.0
'ES'	0.0	0.0
'FM'	0.0	0.0
'MD'	0.0	0.0
'NO'	0.0	0.0
'LR'	0.0	0.0

* END OF HEATING DATA

付録2 高レベル廃液貯槽に至る各元素毎の工程到達率例^{*)}
 軽水炉燃料の再処理における各核種の高レベル廃液貯槽に至る到達率の例を示す。

元素	原子番号	工程到達率(%)
G e	32	99.90
A s	33	99.90
S e	34	59.90
B r	35	99.99
K r	36	0.00
R b	37	99.99
S r	38	99.99
Y	39	99.79
Z r	40	64.65
N b	41	4.99
M o	42	49.95
T c	43	79.95
R u	44	39.80
R h	45	49.82
P d	46	79.94
A g	47	4.99
C d	48	79.99
I n	49	99.99
S n	50	19.90
S b	51	4.93
T e	52	59.90
I	53	0.01
X e	54	0.00
C s	55	99.99
B a-E r	56-68	99.99
T l-P o	81-91	100.00
U	92	0.50
N p	93	99.50
P u	94	0.50
A m	95	99.29
C m	96	99.99
B k	97	100.00
C f	98	100.00

付録3 物性値の温度・濃度変化データ⁴⁾

H L S Tは、溶液の密度、比熱、粘度そして熱伝導度の温度・濃度変化を、また体膨張率の温度変化を、内部で自動計算できるようにプログラミングされている。なお密度、比熱、粘度そして熱伝導度については硝酸の、また体膨張率については水の値を用いた。以下の式においてtは液温(°C)である。

(1)密度 ρ (kg/m³)
 $\rho = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2$

(2)比熱 C_p (J/kg·K)
 $C_p = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3$

%	(1)密度 ρ (kg/m ³)			%	(2)比熱 C_p (J/kg·K)			
	a_0	a_1	a_2		a_0	a_1	a_2	a_3
2	1017.0	-0.33571	-1.7857E-3	0	4298.0	-5.3111	7.7165E-2	-3.1987E-4
5	1036.8	-0.66143	1.4286E-3	10	3715.5	8.05E-2	1.2630E-2	-4.4613E-5
10	1062.0	-0.30357	-2.6786E-3	20	3345.6	2.3089	3.0303E-3	-5.8923E-5
20	1126.0	-0.48571	-1.7857E-3	30	3090.6	4.3292	-3.7662E-2	2.3569E-4
30	1205.0	-1.42500	6.2500E-3	40	2907.8	5.4007	-4.2424E-2	2.3569E-4
40	1275.8	-1.24860	1.0714E-3	50	2783.9	3.9402	-1.1364E-2	6.7340E-5
50	1336.8	-1.34860	1.0714E-3	60	2603.3	1.2071	3.1061E-2	-1.7677E-4
60	1367.0	3.2143E-2	-1.3393E-2	70	2427.1	0.2329	1.5476E-2	-6.7340E-5
70	1473.0	-1.03930	-5.3571E-3	80	2176.7	1.3030	-1.4394E-2	7.5758E-5
80	1473.0	-1.03930	-4.4643E-3	90	1953.3	-1.0303	2.0455E-2	-7.5758E-5
90	1496.0	-0.61071	-8.0357E-3	100	1760.0	0	0	0
100	1526.0	-0.69286	-7.1429E-3					

(3)粘度 μ (Pa·s)

$$\mu = (a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 + a_5 \cdot t^5) \times 10^{-3}$$

%	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
10	1.2823	5.3227E-2	-7.7687E-3	3.4165E-4	-6.8559E-6	5.2801E-8
20	1.4156	4.8486E-2	-7.5589E-3	3.3960E-4	-6.9541E-6	5.4663E-8
25	1.7153	-1.1280E-2	-1.6595E-3	6.6035E-5	-1.0260E-6	6.1331E-9
30	1.9706	-4.7993E-2	1.7304E-3	-8.1930E-5	1.9910E-6	-1.7334E-8
40	2.3665	-5.3049E-2	8.3627E-4	-6.5562E-6	-1.3425E-7	2.4022E-9
50	3.0845	-1.0134E-1	2.8190E-3	-5.2471E-5	4.6146E-7	-1.1349E-9
60	3.9956	-2.2409E-1	1.2125E-2	-4.1762E-4	7.4641E-6	-5.3332E-8
70	3.8568	-1.9797E-1	1.0144E-2	-3.4074E-4	5.9230E-6	-4.0800E-8
80	3.1490	-1.0211E-1	2.7157E-3	-4.4966E-5	2.3494E-7	1.3148E-9
90	1.7833	2.5099E-2	-6.0801E-3	2.9529E-4	-6.3638E-6	5.1768E-8
100	1.2958	-4.3340E-2	2.6279E-3	-1.1189E-4	2.3039E-6	-1.7814E-8

(4) 熱伝導度 k (W/m·K)

$$k = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2$$

%	a_0	a_1	a_2
0	0.5671	1.6597E-3	-5.4978E-6
10	0.5279	1.8604E-3	-6.8506E-6
20	0.4941	1.8062E-3	-6.0931E-6
30	0.4661	1.6334E-3	-5.4870E-6
40	0.4347	1.5032E-3	-4.5130E-6
50	0.4100	1.1060E-3	-1.8831E-6
60	0.3784	1.1198E-3	-2.4567E-6
70	0.3491	9.0957E-4	-1.3853E-6
80	0.3265	7.5022E-4	-9.7403E-7
90	0.2958	6.0368E-4	1.0823E-7
100	0.2710	5.0000E-4	0

(5) 体膨張率 $C E$ (deg⁻¹)

$$C E = 0.053 \times 10^{-3} \quad (\sim 10^{\circ}C)$$

$$= 0.150 \times 10^{-3} \quad (10 \sim 20^{\circ}C)$$

$$= 0.302 \times 10^{-3} \quad (20^{\circ}C \sim)$$