

JAERI-Data/Code  
2002-004



JP0250174



溶液燃料体系の臨界事故解析コード : AGNES2

2002年3月

中島 健・山根 祐一・三好 慶典

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

溶液燃料体系の臨界事故解析コード：AGNES2

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部  
中島 健・山根 祐一・三好 慶典

(2002年2月4日受理)

溶液燃料体系の臨界事故解析コード AGNES2 を開発し、TRACY 実験解析により、その適用性を検証した。

AGNES2 は、一点炉動特性コード AGNES に対して放射線分解ガスボイドの生成及び消滅モデルを組み込んだコードである。この結果、放射線分解ガスボイドの生成・消滅による出力振動を計算することが可能となった。本報告書には、AGNES2 コードの計算モデルと入力データがまとめられている。

TRACY の実験解析では、低濃縮ウラン溶液を用いた超臨界実験について、AGNES2 コードにより出力及びエネルギーの時間変化を計算し、実験との比較を行った。この結果、出力振動の初期における出力の時間変化は、実験値をほぼ再現した。また、エネルギーの時間変化については、実験範囲全般にわたりよい一致をみた。

---

本報告書には、科学技術庁（現、文部科学省）の委託によってなされた研究成果の一部が含まれている。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

**A Kinetics Code for Criticality Accident Analysis of Fissile Solution Systems: AGNES2**

**Ken NAKAJIMA, Yuichi YAMANE and Yoshinori MIYOSHI**

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

**(Received February 4, 2002)**

A kinetics code AGNES2 for the analysis of a criticality accident in fissile solution has been developed, and it was validated through the analysis of TRACY experiments.

AGNES2 is a code in which a model describing radiolytic gas void production and disappearance was incorporated into the one point kinetics code AGNES. The incorporation enabled this code to calculate power oscillations due to the production and disappearance of radiolytic gas void. The calculation model and input data of AGNES2 are summarized in the present report.

In the experiment analyses of TRACY, power and energy profiles for supercritical experiments were calculated using the AGNES2 code, and they were compared with the experiments. As a result, the power profiles almost reproduced the experiments for the early part of power oscillation. Moreover, the energy profiles agreed well with the experiments for the whole period.

**Keywords : Solution Fuel, Criticality Accident, AGNES2 Code, Modified Energy Model, Radiolytic Gas, Void Model, TRACY Experiment, Experiment Analysis**

---

This work includes a part of research results carried out under the auspices of the Science and Technology Agency (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, at present), Japan.

## 目次

1. はじめに -----	1
2. 計算モデル -----	3
2.1 概要 -----	3
2.2 核計算モデル -----	3
2.3 熱伝達モデル -----	6
2.4 放射線分解ガスボイドモデル -----	8
2.5 反応度計算 -----	15
2.6 その他 -----	18
3. 入力データ -----	20
3.1 入力データ形式 -----	20
3.2 サンプル入力 -----	31
4. 計算例 -----	34
4.1 概要 -----	34
4.2 TRACY 実験解析結果 -----	36
5. まとめ -----	41
謝辞 -----	42
参考文献 -----	42

Contents

1. Introduction -----	1
2. Calculation Model -----	3
2.1 Outline -----	3
2.2 Neutronic Model -----	3
2.3 Heat Transfer Model -----	6
2.4 Radiolytic Gas Void Model -----	8
2.5 Reactivity Calculation -----	15
2.6 Others -----	18
3. Input Data -----	20
3.1 Input Data Format -----	20
3.2 Sample Input -----	31
4. Calculation Examples -----	34
4.1 Outline -----	34
4.2 Results of TRACY Experiment Analyses -----	36
5. Summary -----	41
Acknowledgements -----	42
References -----	42

## 1. はじめに

再処理施設や加工施設などのいわゆる核燃料施設における臨界事故は、1999年に我が国で発生したJCOウラン加工工場の臨界事故を含めて、これまでに22件が報告されている<sup>1)</sup>。このうち、1件を除く21件はスラリーを含む溶液取扱い工程で発生している(1件はプルトニウム金属の取扱い時に発生)。これは、溶液系では臨界質量が小さくなること及び配管等により容易に移送が可能であることなどが原因と考えられる。

このような溶液燃料体系における臨界事故では、放射線分解ガスによるボイドが出力挙動に大きな影響を与える。このガスボイドは、高エネルギーを持った重イオンである核分裂片が溶液中に発生し、主に水を分解することにより生成される。溶液体系においてボイドは大きな負の反応度効果を有しており、このボイドの生成・消滅により出力は大きく変化する。図1-1に、日本原子力原子力研究所(以下、原研)の過渡臨界実験装置TRACY<sup>2)</sup>において実施した、溶液系の臨界事故を模擬した超臨界実験時の出力変化を示す(TRACYについては、第4章参照のこと)。

何らかの原因により、正の反応度が体系に添加され、臨界を超過すると、出力は増加する。この出力増加により、温度が上昇するとともに放射線分解ガスボイドが発生する。ボイドは大きな負の反応度効果を有しているため、ボイドの発生により出力は急激に減少する。出力の低下に伴い、ボイドの生成量も減少する。また、それまでに生成されたボイドは溶液中を浮力により上昇し、やがて体系外へと消失してしまう。この結果、ボイドにより補償されていた反応度が再び体系に添加され、出力が上昇する。出力が上昇すると、再び放射線分解ガスボイドが発生し、出力が低下する。このような、ガスボイドの生成・消滅の繰り返しの伴い、出力振動が発生する。この間、温度は上昇を続け、添加された反応度を補償できるようになると、出力振動は収まり、その後、出力はゆっくりと低下していく。

図1-1に示したような溶液燃料体系での超臨界時の出力挙動を解析するためには、この放射線分解ガスボイドの効果を計算する必要がある。本報告書は、放射線分解ガスボイドのモデルを組み込んだ溶液燃料体系の臨界事故解析コードAGNES2について述べる。

AGNES2コードは、「圧力モデル」を用いた一点炉動特性コードAGNES<sup>3)</sup>をベースとしている。圧力モデルは、実験により求めた圧力評価式を用いて、圧力を計算し、その時間変化から放射線分解ガスボイドの生成量を計算するモデルである<sup>4)</sup>。しかし、このモデルではボイドの移動による消滅を取扱うことが出来ない。このため、AGNES2コードでは、体系を2次元R-Zに分割し、生成したボイドの上昇・消滅を取扱えるようにするとともに、あらたに開発した「修正エネルギーモデル」により放射線分解ガスボイドの生成を計算できるようにした。修正エネルギーモデルは、放射線分解により生成したガス(マイクロバブル)が、体系からのエネルギーにより成長するという、「エネルギーモデル<sup>4,5)</sup>」の基本的考え方を踏襲し、ボイドの移動を評価できるように「修正」したモデルである。

本報告書の構成は、次のとおりである。第2章において、AGNES2コードにおける計算モデルについて説明する。その後、第3章にて、入力データについて述べ、第4章で、TRACY実験に対する解析例を示す。最後に、まとめを述べる。

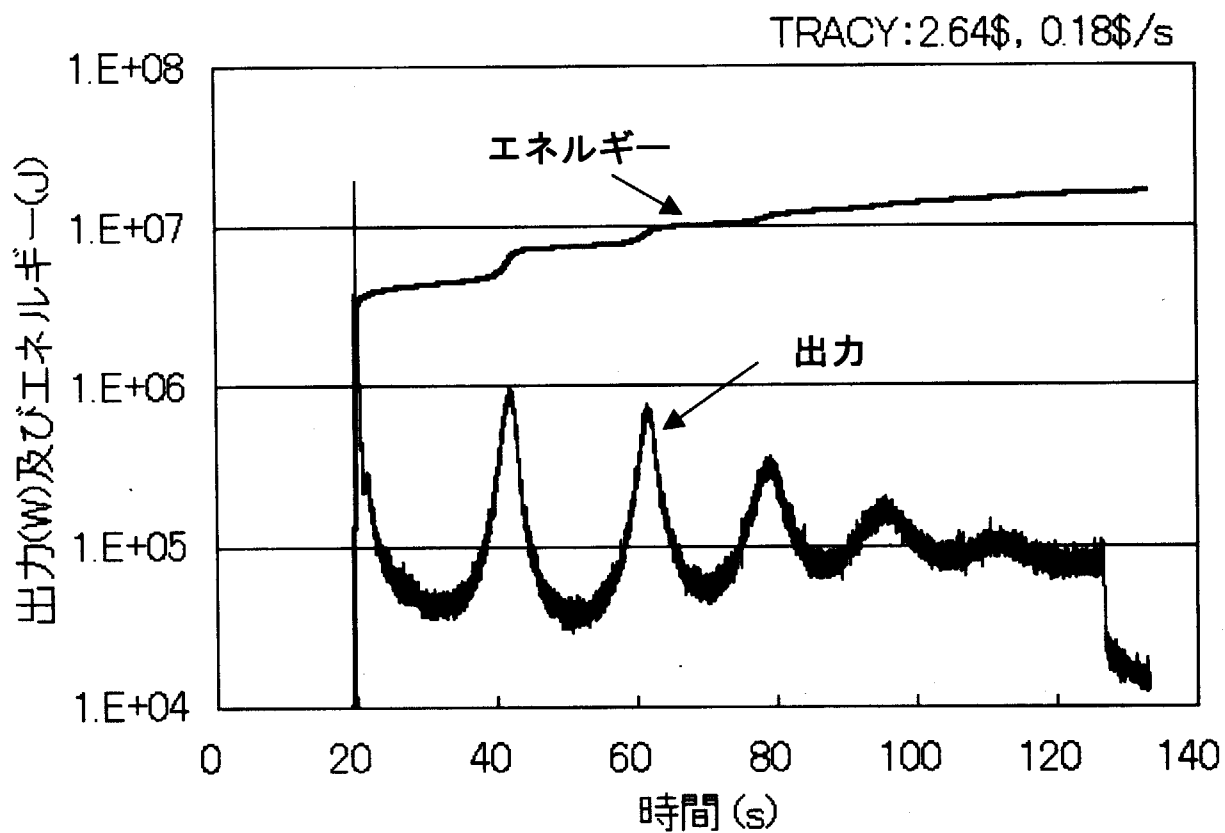


図 1-1 溶液燃料体系における超臨界時の出力変化の例 (TRACY 実験結果)



## 2. 計算モデル

## 2.1 概要

AGNES2 コードは、一点炉動特性方程式に、溶液燃料体系に特有の放射線分解ガスによるボイドフィードバック効果を評価するためのボイドモデルを組み込んだ臨界事故解析用動特性コードである。同コードにおいて、核計算は一点炉モデル、熱伝達の計算は、1次元モデルを使用している。また、放射線分解ガスボイドの計算は、2次元 R-Z モデルにて行っている。本章では、AGNES2 コードで使用している各計算モデル（核計算モデル、熱伝達モデル、放射線分解ガスボイドモデル等）について述べる。

## 2.2 核計算モデル

AGNES2 コードの核計算では、以下の中性子源付き一点炉動特性方程式を使用している。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P + \sum_{m=1}^G \lambda^{(m)} C^{(m)} + S \quad (2.2-1)$$

$$\frac{dC^{(m)}}{dt} = \frac{\beta^{(m)} P}{\Lambda} - \lambda^{(m)} C^{(m)} \quad (2.2-2)$$

ここで、

- $t$  : 時間
- $P$  : 出力密度
- $C^{(m)}$  : 第  $m$  群先行核密度
- $\lambda^{(m)}$  : 第  $m$  群先行核崩壊定数
- $\beta^{(m)}$  : 第  $m$  群実効遅発中性子割合
- $\beta$  : 実効遅発中性子割合 ( $= \sum_{m=1}^G \beta^{(m)}$ )
- $\Lambda$  : 中性子生成時間
- $G$  : 先行核群数
- $S$  : 外部中性子源

である。

(2.2-1)式の両辺に  $-\omega_k P(t)$  を加え、時間  $t$  について  $t_k$  から  $t_{k+1}$  まで積分すると

$$P_{k+1} = e^{\omega_k \Delta t} \left[ P_k + \int_0^{\Delta t} d\xi \left\{ \frac{\rho(\xi + t_k) - \rho_k}{\Lambda} P(\xi + t_k) e^{-\omega_k \xi} \right. \right. \quad (2.2-3)$$

$$\left. \left. + \sum_{m=1}^G \lambda^{(m)} \left( C^{(m)}(\xi + t_k) - C_k^{(m)} \frac{P(\xi + t_k)}{P_k} \right) e^{-\omega_k \xi} + S \left( 1 - \frac{P(\xi + t_k)}{P_k} \right) e^{-\omega_k \xi} \right\} \right]$$

ただし、

$\Delta t$  : 時間メッシュ幅 ( $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ )

$k$  : 時間メッシュ番号

$P_k = P(t_k), C_k^{(m)} = C^{(m)}(t_k), \rho_k = \rho(t_k)$

$$\omega_k = \frac{\rho_k - \beta}{\Lambda} + \frac{1}{P_k} \sum_{m=1}^G \lambda^{(m)} C_k^{(m)} + \frac{S}{P_k}$$

である。

同様に(2.2-2)式の両辺に、 $-\gamma_k^{(m)} C^{(m)}(t)$ を加え、時間  $t$  について  $t_k$  から  $t_{k+1}$  まで積分する。

$$C_{k+1}^{(m)} = e^{\gamma_k^{(m)} \Delta t} \left[ C_k^{(m)} + \int_0^{\Delta t} d\xi e^{-\gamma_k^{(m)} \xi} \left\{ \frac{\beta^{(m)}}{\Lambda} \left( P(\xi + t_k) - \frac{P_k}{C_k^{(m)}} C^{(m)}(\xi + t_k) \right) \right\} \right] \quad (2.2-4)$$

ここで、

$$\gamma_k^{(m)} = \frac{\beta^{(m)} P_k}{\Lambda C_k^{(m)}} - \lambda^{(m)}$$

である。

$\omega_k$  と  $\gamma_k^{(m)}$  はそれぞれ時間メッシュ  $k$  における出力密度および先行核密度のペリオドであり、次の時間メッシュの計算に近似的に用いている。

すなわち、

$$\omega = \frac{1}{P} \frac{dP}{dt}, \quad \gamma^{(m)} = \frac{1}{C^{(m)}} \frac{dC^{(m)}}{dt} \quad (2.2-5)$$

であり、時間  $t$  後の出力密度および先行核密度は次式で表わされる。

$$P(\xi + t_k) = e^{\omega_k \xi} P_k \quad (2.2-6)$$

$$C^{(m)}(\xi + t_k) = e^{\gamma_k^{(m)} \xi} C_k^{(m)} \quad (2.2-7)$$

これより、(2.2-3),(2.2-4)式は次式のようになる。

$$P_{k+1} = e^{\omega_k \Delta t} \left[ P_k \left\{ 1 + \frac{\Delta t}{2\Lambda} (\rho_{k+1} - \rho_k) \right\} + \sum_{m=1}^G \lambda^{(m)} C_k^{(m)} \left( \frac{e^{\Delta t(\gamma_k^{(m)} - \omega_k)} - 1}{\gamma_k^{(m)} - \omega_k} - \Delta t \right) + S \left[ \frac{e^{-\Delta t \omega_k} - 1}{-\omega_k} - \Delta t \right] \right] \quad (2.2-8)$$

$$C_{k+1}^{(m)} = e^{\gamma_k^{(m)} \Delta t} \left[ C_k^{(m)} + \frac{P_k \beta^{(m)}}{\Lambda} \left( \frac{e^{\Delta t(\omega_k - \gamma_k^{(m)})} - 1}{\omega_k - \gamma_k^{(m)}} - \Delta t \right) \right] \quad (2.2-9)$$

ここで、反応度に関する積分は次のように近似した (台形公式)。

$$\int_0^{\Delta t} d\xi \{ \rho(\xi + t_k) \} \approx \frac{\Delta t}{2} \{ \rho(t_{k+1}) + \rho(t_k) \}$$

時間幅  $\Delta t$  は、(2.2-6)式の  $P_{k+1}$  を  $P_{k+1}^{(1)}$ 、(2.2-8)式の  $P_{k+1}$  を  $P_{k+1}^{(2)}$  としたとき、次の式を満足するよう  
に決められる。

$$\frac{P_{k+1}^{(2)} - P_{k+1}^{(1)}}{P_{k+1}^{(1)}} \leq \varepsilon \quad (2.2-10)$$

ただし、 $\varepsilon$  は入力で与えられる。

なお、外部中性子源  $S$ 、中性子生成時間  $\Lambda$ 、実効遅発中性子割合  $\beta^{(m)}$ 、 $\beta$  及び先行核崩壊定数  $\lambda^{(m)}$  は一定であり、これは入力で与える。

## 2.3 熱伝達モデル

熱伝達の計算は、領域を3つに分けた1次元モデルにより行う。熱伝達計算における領域の模式図を図2.3-1に示す。同図の各領域はそれぞれ溶液燃料（第1領域）、燃料容器（第2領域）及び冷却材（第3領域）に対応している。ここでは、各領域の熱伝達モデルについて述べる。

第1領域（ $R_1$ ）および第2領域（ $R_2$ ）はそれぞれメッシュ（小領域）に分割されている。各メッシュにおける温度は次式により計算される。

$$V_i(\rho C_p)_N \frac{\partial T_i}{\partial t} = \gamma_i P V_i + (hA)_{i-1}(T_{i-1} - T_i) - (hA)_i(T_i - T_{i+1}) \quad (2.3-1)$$

ここで、

- $i$  : 空間メッシュ番号
- $N$  : 領域番号
- $T_i$  : メッシュ  $i$  の温度
- $V_i$  : メッシュ  $i$  の体積
- $(\rho C_p)_N$  : 領域  $N$  における密度と比熱の積
- $\gamma_i$  : メッシュ  $i$  の出力割合
- $(hA)_i$  : メッシュ  $i$  における熱伝達係数×伝熱面積
- $t$  : 時間

である。

第3領域におけるエネルギーバランス方程式は、

$$V_K(\rho C_p)_3 \frac{\partial T_K}{\partial t} = \gamma_3 P V_K + (hA)_{K-1}(T_{K-1} - T_K) - \omega C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (2.3-2)$$

ここで、

- $\omega C_p$  : 流量率×比熱
- $T_{in}$  : 冷却水入口温度
- $T_{out}$  : 冷却水出口温度
- $K$  : 第3領域の空間メッシュ番号

である。

ここで、次式を仮定する。

$$T_K = \frac{1}{2}(T_{out} + T_{in})$$

このとき、(2.3-2)式は

$$V_K(\rho C_p)_3 \frac{\partial T_K}{\partial t} = \gamma_3 P V_K + (hA)_{K-1}(T_{K-1} - T_K) - (hA)_K(T_K - T_{in}) \quad (2.3-3)$$

となる。ただし、 $(hA)_K = 2\omega C_p$  とした。

各間隔での温度が(2.3-1),(2.3-3)式で計算された後、各領域での温度が次式により計算される。

$$\bar{T}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{I1} T_i V_i}{\sum_{i=1}^{I1} V_i}, \quad \bar{T}_2 = \frac{\sum_{i=I1+1}^{I2} T_i V_i}{\sum_{i=I1+1}^{I2} V_i}, \quad \bar{T}_3 = T_K$$

ただし、

$\bar{T}_1$  : 領域 1 の平均温度  
 $\bar{T}_2$  : 領域 2 の平均温度

である。

なお、後で述べる放射線分解ガスボイドモデルでは、2次元 R-Z 体系を使用している。熱伝達モデルで使用している 1次元体系と 2次元体系との諸量の関係は次のとおりである。

$$V_i = \sum_j V_{i,j}, \quad \gamma_i = \frac{\sum_j \gamma_{i,j} V_{i,j}}{\sum_j V_{i,j}}, \quad T_i = \frac{\sum_j T_{i,j} V_{i,j}}{\sum_j V_{i,j}}$$

ここで、添え字  $i, j$  は各々径(R)方向、軸(Z)方向の小領域番号を示す。

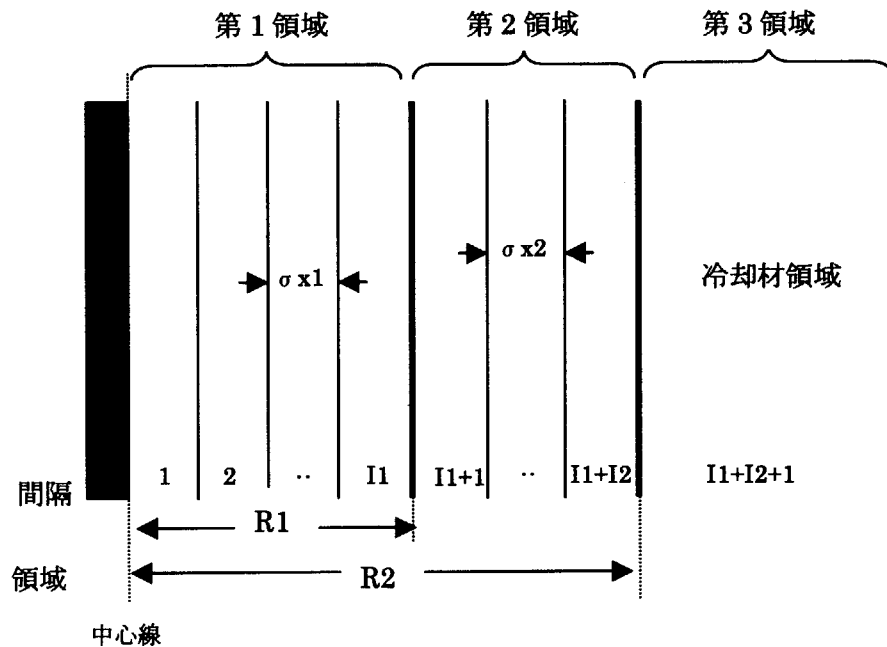


図 2.3-1 熱伝達モデルに関する模式図

## 2.4 放射線分解ガスボイドモデル

## 2.4.1 ガスバブルの形成機構

溶液燃料体系では、高 LET 粒子である核分裂片が溶液中を飛行するため、溶液（水）の放射線分解により、ガス（水素、酸素）が発生する。放射性分解により発生したガスは、溶液が過飽和状態であれば、バブルとして残る。Spiegler によると、硝酸ウラニル溶液中のガスバブルの形成は次のように行われる<sup>6)</sup>。

- 1) 核分裂片が飛跡の中心  $4\mu\text{m}$  の領域に約  $30\text{MeV}$  のエネルギーを与える。
- 2) このエネルギーにより、 $1.4\mu\text{m}$  径の水蒸気と水素 ( $4 \times 10^5 \text{H}_2$  分子) の混合バブルが発生する。
- 3) 水蒸気は約  $10^{-8}$  秒で凝縮し、半径  $0.05\mu\text{m}$  の水素バブルが残る。
- 4) 水素バブルは溶液中の水素ガス濃度が飽和でない場合には約  $10\mu\text{s}$  で溶解する。
- 5) 溶液中の水素ガス濃度が飽和濃度に達した場合には、バブルは溶解せずに成長し始める。

溶液が未飽和状態では、放射線分解により発生したバブルは約  $10\mu\text{s}$  で溶解してしまうために、炉物理上の「ボイド」としての寄与、すなわち溶液の密度を低下させ、体系に負の反応度を与える効果は無視できる。このことは、ボイドの生成-消滅のバランスを考えることにより明らかとなる。

$$\frac{dV}{dt} = S - \frac{V}{10^{-5}} \quad (2.4-1)$$

ここで、

- $V$  : ボイドの体積 ( $\text{m}^3$ )  
 $S$  : ボイドの発生率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $V/10^{-5}$  : ボイドの消滅率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

である。

ボイドの発生率は水素ガスの G 値（放射線の単位エネルギー当りに生成する分子 ( $\text{H}_2$ ) の量）を用いて以下のように表わすことができる。

$$S = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 100} (PV_{core}) \cdot G_{\text{H}_2} \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \cdot \frac{1}{4 \times 10^5} \quad (2.4-2)$$

ここで、

- $PV_{core}$  : 炉出力 (W)  
 $G_{\text{H}_2}$  : 水素ガスの G 値 (分子/100eV)  
 $r$  : 水素ガスバブルの半径 ( $0.05\mu\text{m}$ )

である。また、 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ 、水素ガスバブル内の水素分子数  $4 \times 10^5$  を用いた。

なお、ここで取り扱っている溶液では、 $G_{\text{H}_2} \sim 1$  (分子/100eV) であるので、(2.4-2)式は以下のようなになる。

$$S = 8 \times 10^{-11} PV_{core} \quad (2.4-3)$$

この関係式をボイドのバランス式(2.4-1)に用いると、

$$\frac{dV}{dt} = 8 \times 10^{-11} PV_{core} - \frac{V}{10^{-5}} \quad (2.4-4)$$

となる。ここで、一定出力で平衡状態となっているボイド体積は次式となる。

$$V = 8 \times 10^{-16} PV_{core} \quad (2.4-5)$$

いま、出力( $PV_{core}$ )が、1 kW とするとボイド体積は  $8 \times 10^{-13} \text{ m}^3$  ( $8 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$ ) となる。また、ボイド反応度係数は約  $-10^{-5} \phi / \text{m}^3$  ( $-10^{-1} \phi / \text{cm}^3$ ) であるので、このときのボイド反応度は  $\sim -10^{-7} \phi$  と非常に小さく、その反応度効果は無視できる。このため、溶液が水素ガスに対して飽和状態となるまでは、放射線分解が起こってもその炉物理上の影響は現われない。

## 2.4.2 修正エネルギーモデル

放射線分解ガスの濃度が飽和濃度を上回った場合、反応度効果を持つガスボイドが形成される。このときのボイドの生成、移動、消滅は「修正エネルギーモデル」により記述される。このモデルは、以下の仮定が成立するものとしている。

- ・出力に比例して放射線分解ガスが生成される。
- ・この分解ガス濃度が飽和濃度を超えると、ボイドとして存在するようになる。
- ・ボイド体積の増加率は、出力と（飽和濃度を超えた）分解ガス濃度の積に比例する。
- ・ボイドは体系内を上昇し、系外へ消失する。径方向へのボイドの移動は考えない。

AGNES2 コードでは、燃料領域である領域 1 を 2 次元 R-Z の小領域に分割して、ボイドの計算を行う。この分割した小領域( $i,j$ )におけるボイド率  $F_{i,j}$  のバランス式は次式のようにかける。

$$\frac{\partial F_{i,j}}{\partial t} = \nu \cdot \gamma_{i,j} P \cdot (C_{i,j} - C_0) \cdot \theta(C_{i,j} - C_0) - \nu_{i,j} \cdot \frac{\partial F_{i,j}}{\partial z} \quad (2.4-6)$$

ここで、  
 $F_{i,j}$  : ボイド率  
 $C_{i,j}$  : 分解ガスのモル濃度(mol/m<sup>3</sup>)  
 $P$  : 出力密度(W/m<sup>3</sup>)  
 $\gamma_{i,j}$  : 出力割合  
 $\nu_{i,j}$  : ボイド上昇速度(m/s)  
 $\nu$  : 変換定数(m<sup>6</sup>/J<sup>2</sup>·mol),  $\nu = a_0 + a_1 \cdot F_{i,j} + a_2 \cdot F_{i,j}^2$  で与える。  $a_0, a_1, a_2$  は定数。  
 $C_0$  : 分解ガスの飽和モル濃度(mol/m<sup>3</sup>)  
 $\theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$

である。

(2.4-6)式の右辺第 1 項はボイドの生成項であり、第 2 項は移動による消滅項である。分解ガスのモル濃度  $C_{i,j}$  は、次式で表現される。

$$\frac{\partial C_{i,j}}{\partial t} = G \cdot \gamma_{i,j} P - \frac{C_{i,j}}{F_{i,j}} \cdot \nu_{i,j} \cdot \frac{\partial F_{i,j}}{\partial z} - \frac{C_{i,j}}{\tau} \quad (2.4-7)$$

ここで、  
 $G$  : 分解ガス生成率(mol/J)  
 $\tau$  : 分解ガスの消滅時定数(s)

である。

(2.4-7)式の右辺第 1 項は、分解ガスの生成項であり、第 2 項はボイドが移動することによりボイド内の分解ガスが消滅する項である。ここで、第 2 項の  $C_{i,j}/F_{i,j}$  は、ボイド内に含まれる分解ガスのモル濃度であり、移動により消失するボイド体積をモル濃度に変化する係数である。(小領域



( $i,j$ )の体積を  $V_{i,j}$  とすると、この領域におけるボイド体積は  $F_{i,j} \cdot V_{i,j}$  であり、このボイドに含まれる分解ガスモル量は  $C_{i,j} \cdot V_{i,j}$  であるので、単位ボイド体積の分解ガスモル量 (ボイド中のモル濃度) は  $C_{i,j}/F_{i,j}$  となる。) また、第3項は分解ガスが再結合等により消滅する効果を表している。

上記(2.4-6)、(2.4-7)式中にある速度  $v_{i,j}$  は、ボイドの浮力と抗力の釣り合いによる次式で表す<sup>7)</sup>。

$$v_{i,j} = \left( \frac{8 \cdot r_{i,j} \cdot g}{3 \cdot C_D} \right)^{0.5} \quad (2.4-8)$$

$$r_{i,j} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot F_{i,j}}{C_{i,j} \cdot R \cdot T_{i,j}} \quad (2.4-9)$$

- ここで、
- $r_{i,j}$  : 平均ボイド半径(m)
  - $\sigma$  : 溶液の表面張力(N/m)
  - $g$  : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)
  - $C_D$  : 抗力係数,  $C_D = b_0 + b_2 \cdot F_{i,j}^2 + b_4 \cdot F_{i,j}^4$  で与える.  $b_0, b_2, b_4$  は定数.
  - $R$  : 気体定数(J/mol·K)
  - $T_{i,j}$  : 温度(K)

である。

なお、出力割合は入力により与えるが、内部で次のように規格化される。

$$\gamma_{i,j} = \frac{\gamma'_{i,j} \cdot V_{i,j}}{\sum_{i,j} \gamma'_{i,j} \cdot V_{i,j}} \quad (2.4-10)$$

ここで、

- $\gamma'_{i,j}$  : 入力で与える出力割合
- $\gamma_{i,j}$  : 規格化された出力割合

である。

### 2.4.3 エネルギーモデルの導出

修正エネルギーモデルにおいて、ボイドが移動しない場合を考えてみる。このとき、2つのバランス式(2.4-6)及び(2.4-7)は次のようになる。

$$\frac{\partial F_{i,j}}{\partial t} = v \cdot \gamma_{i,j} P \cdot (C_{i,j} - C_0) \quad (2.4-11)$$

$$\frac{\partial C_{i,j}}{\partial t} = G \cdot \gamma_{i,j} P \quad (2.4-12)$$

(2.4-12)式より、

$$C_{i,j} = G \cdot \gamma_{i,j} \int P dt = G \cdot E_{i,j} \quad (2.4-13)$$

となる。ここで、 $E_{i,j}$ は小領域( $i,j$ )におけるエネルギー密度である。 $C_0$ に対応するエネルギー密度を $E_0$ とし、(2.4-11)式を時間について $t_0$ から $t$ まで積分すると、

$$F_{i,j} = v \cdot \int_{t_0}^t \gamma_{i,j} P \cdot G (E_{i,j} - E_0) dt = \frac{v}{2} G (E_{i,j}^2 - E_0^2) \quad (2.4-14)$$

となる。ここで、 $t_0$ は放射線分解ガスのモル濃度が飽和濃度( $C_0$ )に達する時間である。 $E_{i,j} \gg E_0$ の場合、

$$F_{i,j} \approx \frac{v}{2} G E_{i,j}^2 \quad (2.4-15)$$

となり、ボイド率はエネルギー密度の2乗に比例する。これは、エネルギーモデルといい米国で行われたウォータボイラ型原子炉の動特性実験 KEWB の解析のために提案された、放射線分解ガスのモデルである<sup>5)</sup>。

## 2.4.4 数値解法

次に、ボイドのバランス方程式を解くにあたっての数値解法について述べる。  
ボイドのバランス方程式(2.4-6)を次のように差分化する。

$$F_{i,j}^{k+1} - F_{i,j}^k + \Delta t \cdot v_{i,j} \frac{F_{i,j} - F_{i,j-1}}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}} = S_{i,j} \cdot \Delta t \quad (2.4-16)$$

ここで、

$F_{i,j}$  : 小領域( $i,j$ )のボイド体積 (またはボイド率)

$k$  : 現時間ステップの状態を示す

$\Delta t$  : 時間ステップ

$v_{i,j}$  : ボイド速度

$Z_{i,j}$  : 小領域( $i,j$ )の高さ

$S_{i,j}$  : 小領域( $i,j$ )のボイド発生項

である。

(2.4-16)式を以下のように整理する。

$$F_{i,j}^{k+1} = F_{i,j}^k - \frac{\Delta t \cdot v_{i,j}}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}} F_{i,j} + \frac{\Delta t \cdot v_{i,j}}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}} F_{i,j-1} + S_{i,j} \cdot \Delta t \quad (2.4-17)$$

これを Crank-Nicolson 法により次のように表わす。

$$F_{i,j}^{k+1} = F_{i,j}^k - \frac{\Delta t \cdot v_{i,j}}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}} \frac{1}{2} (F_{i,j}^{k+1} + F_{i,j}^k) + \frac{\Delta t \cdot v_{i,j}}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}} \frac{1}{2} (F_{i,j-1}^{k+1} + F_{i,j-1}^k) + S_{i,j} \cdot \Delta t \quad (2.4-18)$$

これを整理すると

$$a_{i,j-1} F_{i,j-1}^{k+1} + b_{i,j-1} F_{i,j}^{k+1} = c_{i,j-1} \quad (2.4-19)$$

ここで、

$$a_{i,j-1} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta t \cdot v_{i,j}}{Z_{i,j} - Z_{i,j-1}}$$

$$b_{i,j-1} = 1 - a_{i,j-1}$$

$$c_{i,j-1} = (1 + a_{i,j-1}) F_{i,j-1}^k - a_{i,j-1} F_{i,j}^k + S_{i,j} \cdot \Delta t$$

となる。

(2.4-19)式は  $i$  を固定すると次式のようなになる。

$$a_{N-1} F_{N-1}^{k+1} + b_{N-1} F_N^{k+1} = c_{N-1} \quad (2.4-20)$$

ただし、

$$a_{N-1} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta t \cdot v_N}{Z_N - Z_{N-1}}$$

$$b_{N-1} = 1 - a_{N-1}$$

$$c_{N-1} = (1 + a_{N-1})F_{N-1}^k - a_{N-1}F_{N-1}^k + S_N \cdot \Delta t$$

である。

この(2.4-20)式は以下のマトリックスで表わされる。

$$\begin{bmatrix} a_0 & b_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{N-1} & b_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0^{k+1} \\ F_1^{k+1} \\ \vdots \\ F_{N-1}^{k+1} \\ F_N^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_{N-1} \\ c_N \end{bmatrix} \quad (2.4-21)$$

このマトリックスを Gauss の消去法により解く。即ち、 $N=1$  のとき

$$F_0^{k+1} = 0$$

であるから

$$F_1^{k+1} = \frac{c_0}{b_0}$$

$N=2 \sim N$  のとき

$$F_N^{k+1} = \frac{c_{N-1} - a_{N-1}F_{N-1}^{k+1}}{b_{N-1}} \quad (2.4-22)$$

となり解が求まる。各  $i$  についても同様である。

## 2.5 反応度計算

## 2.5.1 フィードバック反応度

ある時間ステップでのフィードバック反応度は小領域毎に次式により求める。

$$\Delta\rho_{i,j}^T = \alpha_{T1}(T_{i,j} - T_{i,j}^0) + \alpha_{T2}(T_{i,j} - T_{i,j}^0)^2 + \alpha_{Tn}(T_{i,j} - T_{i,j}^0)^n \quad (2.5-1)$$

$$\Delta\rho_{i,j}^D = \alpha_D \ln\left(\frac{T_{i,j}}{T_{i,j}^0}\right) \quad (2.5-2)$$

$$\Delta\rho_{i,j}^V = \alpha_{V1}F_{i,j} + \alpha_{V2}F_{i,j}^2 \quad (2.5-3)$$

ここで、

$\Delta\rho_{i,j}$  : 小領域( $i,j$ )のフィードバック反応度  
(添字  $T, D, V$  はそれぞれ温度、ドップラー、ボイドを示す)

$T_{i,j}$  : 小領域( $i,j$ )の温度

$T_{i,j}^0$  : 小領域( $i,j$ )の初期温度

$F_{i,j}$  : 小領域( $i,j$ )のボイド率

$\alpha_{T1}, \alpha_{T2}, \alpha_{Tn}$  : 温度フィードバック反応度係数 (1次、2次、 $n$ 次)

$\alpha_D$  : ドップラーフィードバック反応度係数

$\alpha_{V1}, \alpha_{V2}$  : ボイドフィードバック反応度係数 (1次、2次)

である。

これから、全フィードバック反応度は重み係数を含めて次式で表わされる。

$$\rho_{FB} = \sum_{i,j} (w_{i,j}^T \cdot \Delta\rho_{i,j}^T) + \sum_{i,j} (w_{i,j}^D \cdot \Delta\rho_{i,j}^D) + \sum_{i,j} (w_{i,j}^V \cdot \Delta\rho_{i,j}^V) \quad (2.5-4)$$

ここで、

$w_{i,j}^T$  : 小領域( $i,j$ )の温度フィードバック重み係数

$w_{i,j}^D$  : 小領域( $i,j$ )のドップラーフィードバック重み係数

$w_{i,j}^V$  : 小領域( $i,j$ )のボイドフィードバック重み係数

である。

フィードバック反応度の時間遅れがある場合は、次式となる。

$$\frac{d\rho_{FB}}{dt} = \frac{1}{\tau_R} \left[ \sum_{i,j} (w_{i,j}^T \cdot \Delta\rho_{i,j}^T) + \sum_{i,j} (w_{i,j}^D \cdot \Delta\rho_{i,j}^D) + \sum_{i,j} (w_{i,j}^V \cdot \Delta\rho_{i,j}^V) - \rho_{FB} \right]$$

ここで、 $\tau_R$  : フィードバック反応度の遅れ時間  
である。

### 2.5.2 重み係数

重み係数  $w_{i,j}$  は出力分布 ( $\gamma_{i,j}$ ) の2乗 (あるいは1乗) または入力で与えられる。出力分布を使用する場合の重み係数は、次のように規格化されて用いられる。

$$w_{i,j} = \gamma_{i,j}^2 \quad ; \text{出力分布の2乗} \quad (2.5-5)$$

$$w_{i,j} = \gamma_{i,j} \quad ; \text{出力分布} \quad (2.5-6)$$

$$w'_{i,j} = \frac{w_{i,j} \cdot V_{i,j}}{\sum_{i,j} w_{i,j} \cdot V_{i,j}} \quad ; \text{規格化} \quad (2.5-7)$$

ここで、

$w_{i,j}$  : 出力分布の2乗 (あるいは1乗) または入力で与える重み係数

$w'_{i,j}$  : 規格化された重み係数

である。

入力で重み係数を与える場合、すべての小領域( $i,j$ )において

$$w_{i,j} = \text{入力値}$$

となる。これは、計算において出力分布 (温度分布) を一様にした場合の反応度フィードバック効果を補正するために使用する<sup>8)</sup>。この場合、初期値と最終値及び時定数を与え、下式のように初期値から最終値に指数関数状に変化させることが出来る。この変化は、ボイドが発生した時刻から開始する。

$$w(t_v) = w_E + (w_I - w_E) e^{-t_v/\tau} \quad (2.5-8)$$

ここで、

$t_v$  : ボイド発生を基準とした時間

$w_I$  : 重み係数の初期値

$w_E$  : 重み係数の最終値

$\tau$  : 時定数

である。

## 2.5.3 添加反応度

添加反応度については、次式で与える。

$$\rho_{in}(t) = \rho_0 + \rho_1 \cdot t + \rho_2 \cdot t^2 \quad (2.5-9)$$

ここで、

- $\rho_{in}(t)$  : 時刻  $t$  での添加反応度 ( $\phi$ )
- $\rho_0$  : 初期反応度 ( $\phi$ )
- $\rho_1$  : 1次添加反応度係数 ( $\phi/s$ )
- $\rho_2$  : 2次添加反応度係数 ( $\phi/s^2$ )

であり、入力与えられる。この値は、 $t > \text{TTIME}$  の場合、入力値に無関係にゼロとなる。 $\text{TTIME}$  は反応度印加終了時間である。

この他、溶液燃料体系での特徴である給液事象に着目し、給液流量と結び付けた次に示す反応度添加式も使用できる<sup>9)</sup>。

$$\rho_{in}(t) = \frac{100 \cdot B}{\beta_{eff}} \left[ (H_c + \lambda)^{-2} - \left\{ (H_c + \lambda) + \frac{W}{A} \cdot t \right\}^{-2} \right] \quad (2.5-10)$$

ここで、

- $B$  : バックリング反応変換係数 ( $\Delta k/k \cdot m^2$ )
- $\beta_{eff}$  : 実効遅発中性子割合
- $H_c$  : 臨界液位 (m)
- $\lambda$  : 外挿距離 (m)
- $W$  : 給液流量 ( $m^3/s$ )
- $A$  : 炉心断面積 ( $m^2$ )

である。

## 2.5.4 スクラム反応度

スクラムに指定された変数がスクラム設定値を上回る場合には、スクラム設定値を越えた時刻  $T_s$  から  $\text{TIMDEL}$  だけ遅れた時刻  $t = T_s + \text{TIMDEL}$  にスクラム反応度  $\rho_s$  が(5-9)式に加えられる。

$t \geq T_s + \text{TIMDEL}$  において

$$\rho = \rho_{in}(t) + \sum_{j=1}^3 \rho_j + \rho_s \quad (2.5-11)$$

となる。ただし、

$\text{TIMDEL}$  : スクラム遅れ時間

である。

## 2.6 その他

## 2.6.1 ボイド移動速度への液位変化の影響

給液による液位高さの変化によりボイドの溶液燃料体系から抜け出る時間が変わり、過渡時のボイド量評価に少なからず影響がある。ここでは、給液による液位変化の効果を、液位を固定してボイド速度の相対的な変化に置き換えてボイド速度を次式のように補正する。

$$v' = \frac{h_0}{h_0 + \left(\frac{W}{\pi r^2}\right)t} v \quad (2.6-1)$$

ここで、

$v$	: ボイド速度
$h_0$	: 初期液位
$W$	: 給液流量
$r$	: 体系の半径
$t$	: 時間
$v'$	: 給液を考慮したボイド速度

である。



## 2.6.2 ボイド沸騰モデル

本コードでは簡単な沸騰モデルによるボイドの計算も行うことができる。沸騰モデルにおけるエネルギーバランス方程式は、

$$E(t) = C_p(T_B - T_0) + \rho h'' x(t) \quad (2.6-2)$$

ここで、

$T_B$	: 溶液の沸点
$T_0$	: 溶液の初期温度
$h''$	: 蒸気エンタルピ
$C_p$	: 熱容量
$\rho$	: 溶液密度
$x$	: 蒸気割合 (重量比)

である。

(2.6-2)式より

$$x(t) = \frac{E(t) - (T_B - T_0)C_p}{\rho h''} \quad (2.6-3)$$

となる。また、体積比で表わした蒸気の割合  $b$  は

$$b(t) = \frac{x(t) \cdot v''}{[1 - x(t)]v' + x(t)v''} \quad (2.6-4)$$

ただし、

$v'$	: 溶液比容積
$v''$	: 蒸気比容積

である。

これより沸騰ボイドの体積  $V_B(t)$  は

$$V_B(t) = b(t) \cdot V \quad (2.6-5)$$

ただし、

$V$	: 溶液体積
-----	--------

である。

溶液の温度  $T_i$  が  $T_B$  を越えると沸騰計算が開始される。入力で  $T_B \leq 0$  とした場合、沸騰計算は行わない。ある時刻  $t_i$  において、 $T_i \geq T_B$  となった場合、(2.6-3)~(2.6-5)式により、ボイド体積が計算される。

### 2.6.3 圧力の評価式

放射線分解ガスボイドが、急激に成長するときに圧力が発生する。AGNES2 コードでは、この圧力変化を評価するために、米国 KEWB 実験において開発された圧力評価式を使用している<sup>3)</sup>。この評価式では、KEWB 実験から得られた以下の関係を使用している。なお、以下の議論では、ボイドの発生開始、すなわち放射線分解ガスのモル濃度が飽和濃度を越えた時間  $t_c$  ( $C(t_c) = C_0$ ) を時間の基準としている ( $t \equiv t - t_c$ )。

- 1) 圧力の時間変化  $p_0(t)$  は安定 (または最大) 逆炉周期  $\omega_0$  の関数として以下のように与えられる。

$$p_0(t) = p_m \frac{1 - \exp(-\omega_0 t)}{1 - \exp(-1.5)} \quad (0 < t < 1.5/\omega_0)$$

$$= p_m \exp\left(-\frac{t - 1.5/\omega_0}{\tau}\right) \quad (t > 1.5/\omega_0)$$
(2.6-6)

ここで、

$\omega_0$  : 安定 (または最大) 逆炉周期

$\tau$  : 圧力緩和時間

$p_m$  : 最大圧力

である。

- 2) 圧力の最大値 (上記の最大圧力) は、ボイド発生開始時の出力密度  $P_c$  に比例し、次式で表される。

$$p_m = FG_{H_2} P_c - p_b$$
(2.6-7)

ここで、

$F$  : 比例定数

$G_{H_2}$  : 水素ガスの G 値

$p_b$  : 圧力バイアス

である。

これらの関係式は、KEWB 実験結果から導かれた経験式である。従って、他の実験等への適用性については十分な検討が必要となる。現時点の AGNES2 コードにおいて、この圧力評価式は今後の検討のためのオプションとして取り扱われている。

## 3. 入力データ

### 3.1 入力データ形式

AGNES2 コードの入力データ形式を以下の表に示す。入力データはカードイメージで与える。なお、先頭 (1 文字目) が C で始まる行はコメント行とみなされる。

AGNES-2入力データ形式(1/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.1	インデックス	format(I6) インデックス(固定)	5桁以内の整数。9999で計算を終了する	INDEX
card No.2	タイトル	format(A72) タイトル	最初の6文字を「VER3J+2文字の空白」とし、第7文字以降にタイトル文字列を入れること。	HOLI
card No.3	コントロール1	format(I12,8I6) 初回計算リスタートファイルの入力指定	初回計算(リスタートファイルなし) 初回計算(リスタートファイルあり) リスタート計算 KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する 蒸発効果の計算を行う KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する KRFILE=0の時必要 入力しない 入力する	KRFILE KRCNTL KRGEO KRNUCL KRTHRM KRVOID KRSCRM KRBOIL
		コントロールデータの入力指定	=0 =1 =-1 =0 =1 =0 =1 =0 =1 =0 =1 =0 =1 =0 =1 =2 =0 =1 =0 =1 =0 =1	
		幾何データの入力指定		
		核系データの入力指定		
		熱系データの入力指定		
		ポイドデータの入力指定		
		スクラムの入力指定		
		沸騰計算の入力指定		

AGNES-2入力データ形式(2/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.4	コントロール2	format(3I12,3E12.5) 時間幅最大数 プリント間隔 プリントファイルの出力間隔 最大許容時間幅(sec) 計算終了時間(sec) 反応度印加終了時間(sec)		NMAX NPRT NPLT HMAX TMAX TTIME
card No.5	幾何データ1	format(1I2,5E12.5) 炉心形状フラグ	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要  =0 球 =1 円筒 =2 平板	IG  RAD(1) THIC2 VOL(3) HEIGHT WRATE
card No.6	幾何データ2	format(5I12) 軸方向メッシュ分割数 第1領域径方向メッシュ分割数 第2領域径方向メッシュ分割数 軸方向メッシュオブション	IZM ≥ 1 I1 ≥ 1 I2 ≥ 1 and I1+I2 ≤ 30  等間隔 入力指定 (card 7)	IZM I1 I2 IZP  IV
card No.7	幾何データ3	format(6E12.5) 軸方向メッシュ高さ(m)	IZP(card 6)=1の時必要 1からIZMまで繰り返し入力	HZ(IZM)

AGNES-2入力データ形式(3/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.8	核系データ1	format(6I12) 群数 初期先行核密度入力オプション 反応度添加方式オプション 出力分布入力回数	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要  =0 =1 =0 =1 n ≤ 0 =1 >1 初期出力分布のみ指定 出力分布の時間変化指定(ITM個: card 15)	M NSTART  IRHO  ITM
card No.9	核系データ2	format(6E12.5) 中性子寿命(sec) 初期出力密度(W/m <sup>3</sup> ) 核系モデルの収束判定 実効発中性子係数	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	ALIFE AN(1) ERROR GAMMA
card No.10	核系データ3	format(6E12.5) 第1群遅発中性子割合 第2群遅発中性子割合 第3群遅発中性子割合 第4群遅発中性子割合 第5群遅発中性子割合 第6群遅発中性子割合	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要  省略値は1.0	B(1) B(2) B(3) B(4) B(5) B(6)
card No.11	核系データ4	format(6E12.5) 第1群先行核崩壊定数 第2群先行核崩壊定数 第3群先行核崩壊定数 第4群先行核崩壊定数 第5群先行核崩壊定数 第6群先行核崩壊定数	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	AL(1) AL(2) AL(3) AL(4) AL(5) AL(6)

AGNES-2入力カード形式(4/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.12	核系子一タ5	format(6E12.5) 第1群先行核密度(m <sup>-3</sup> ) 第2群先行核密度(m <sup>-3</sup> ) 第3群先行核密度(m <sup>-3</sup> ) 第4群先行核密度(m <sup>-3</sup> ) 第5群先行核密度(m <sup>-3</sup> ) 第6群先行核密度(m <sup>-3</sup> )	NSTART(card 8)=1 and KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	C(1,1) C(2,1) C(3,1) C(4,1) C(5,1) C(6,1)
card No.13-1	核系子一タ6	format(6E12.5) 初期反応度(cent) 1次反応度印加係数(cent/sec) 2次反応度印加係数(cent/sec <sup>2</sup> ) 投入反応度(cent)	IRHO(card 8)=0 and KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	R1 R2 R3 RHOSW
card No.13-2	核系子一タ7	format(6E12.5) 初期反応度(cent) バックリング反応度係数(Δk/k/m <sup>2</sup> ) 外挿距離(m)	IRHO(card 8)=1 and KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	R1 BCONV RAMDAD
card No.13-3	核系子一タ8	format(6E12.5) 時刻(sec) 反応度(cent)	IRHO(card 8)≦0 and KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要 abs(IRHO)繰り返す abs(IRHO)繰り返す	thotm(nrho) rhoin(nrho)
card No.14	核系子一タ9	format(6E12.5) 第1領域での反応度時間遅れ(sec) 第2領域での反応度時間遅れ(sec) 第3領域での反応度時間遅れ(sec) 外部中性子源(W/m <sup>3</sup> /sec)	KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RTC(1) RTC(2) RTC(3) EXTS
card No.15	核系子一タ10	format(6E12.5) 出力分布の指定時刻(sec) ITM(card 8)=1 ITM(card 8)>1	KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要 0.0を指定 時刻指定(ITM回数15,16,17を繰り返す)	TIMP(ITM)
card No.16	核系子一タ11	format(6E12.5) 径方向相対出力密度(W/m <sup>3</sup> )	KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要 IT個人入力(IT=11+12)	PR(IT)
card No.17	核系子一タ12	format(6E12.5) 軸方向相対出力密度(W/m <sup>3</sup> )	KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要 IZM個人入力	PZ(IZM)

AGNES-2入力データ形式(5/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.18	熱系データ1	format(5I12) 初期温度分布オプション	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	NTEQ
		温度フィードバック重み係数オプション	=0 =1 =0 or >1 =1 =-1 =-2	IWEIT
		ポイドフィードバック重み係数オプション	=0 or >1 =1 =-1 =-2	IWEIV
		ドップラーフィードバック反応度のN次の次数		NWT
card No.18-1	核系データ2	format(6E12.5) 温度反応度係数重み	IWEIT=-1 and KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	TCONST
card No.18-1-1	核系データ2-1	format(6E12.5) 温度反応度係数重みの初期値 温度反応度係数重みの最終値 時定数	IWEIT=-2 and KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	TCA TCB TCT
card No.18-2	核系データ3	format(6E12.5) ポイド反応度係数重み	IWEID=-1 and KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	VCONST
card No.18-2-1	核系データ3-1	format(6E12.5) ポイド反応度係数重みの初期値 ポイド反応度係数重みの最終値 時定数	IWEID=-2 and KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	VCA VCB VCT
card No.19	熱系データ4	format(6E12.5) 領域1の密度(kg/m <sup>3</sup> ) 領域1の比熱(J/kg/K) 領域1の熱伝導率(J/m/sec/K) 領域1から2への熱伝達率(J/m <sup>2</sup> /sec/K) 領域1から2への熱伝達実効面積(m <sup>2</sup> )	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RHO1 CPI ALMD1 HTC1 AREA1

AGNES-2入力データ形式(6/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.20	熱系データ5	format(6E12.5) 領域2の密度(kg/m <sup>3</sup> ) 領域2の比熱(J/kg/K) 領域2の熱伝導率(J/m/sec/K) 領域2から3への熱伝達率(J/m <sup>2</sup> /sec/K) 領域2から3への熱伝達実効面積(m <sup>2</sup> )	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RHO2 CP2 ALMD2 HTC2 AREA2
card No.21	熱系データ6	format(6E12.5) 領域3の密度(kg/m <sup>3</sup> ) 領域3の比熱(J/kg/K) 冷却材流量(m <sup>3</sup> /s) 冷却材入口温度(K)	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RHO3 CP3 OMEGA TZERO
card No.22	熱系データ7	format(6E12.5) 第1領域の反応度温度1次係数(cent/K) 第1領域の反応度温度2次係数(cent/K <sup>2</sup> ) 第1領域の反応度温度n次係数(cent/K <sup>n</sup> ) 第1領域のドップラー温度係数(cent)	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RC1(1) RC2(1) RC3(1) RCD(1)
card No.23	熱系データ8	format(6E12.5) 第2領域の反応度温度1次係数(cent/K) 第2領域の反応度温度2次係数(cent/K <sup>2</sup> ) 第2領域の反応度温度n次係数(cent/K <sup>n</sup> ) 第2領域のドップラー温度係数(cent)	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RC1(2) RC2(2) RC3(2) RCD(2)
card No.24	熱系データ9	format(6E12.5) 第3領域の反応度温度1次係数(cent/K) 第3領域の反応度温度2次係数(cent/K <sup>2</sup> ) 第3領域の反応度温度n次係数(cent/K <sup>n</sup> ) 第3領域のドップラー温度係数(cent)	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RC1(3) RC2(3) RC3(3) RCD(3)
card No.25	なし			
card No.26	なし			



AGNES-2入力データ形式(7/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.27	熱系データ10	format(6E12.5) 初期温度分布 初期温度分布 初期温度分布 初期温度分布 ... 初期温度分布 初期温度分布	NTEQ=1 and KRFILE $\geq$ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要 PT(R,Z)においてR=1からIT+1、 続いてZ=1からIZMまで繰り返し返す。 ここで、PT(IT+1,1)は第3領域の初期温度 となる。また、PT(IT+1,2)~PT(IT+1,IZM) ダミー入力(未使用)である。	PT(1,1)~ PT(IT+1,1) PT(1,2)~ PT(IT+1,2) ... PT(1,IZM)~ PT(IT+1,IZM)
card No.28	ポイドデータ1	format(6I12) ポイド上昇モデルオプション  ポイド発生モデルオプション  過渡時重み係数オプション  ダミー 体積変化オプション	KRFILE $\geq$ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要  ポイド速度入力(card 31-2) Bubbleモデル(card31-1)  修正エネルギーモデル 他のオプションは、現在使用不可。  初期値を使用 ステップ毎にコード内計算  使用する 使用しない	IVEL  IST  IWEVD  IWEI2 IVEL2

AGNES-2入力カード形式(8/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.29	ポイドデータ2	format(6E12.5) ポイド反応度1次係数(cent/%Void) ポイド反応度2次係数(cent/(%Void) <sup>2</sup> ) ダミー ポイド収束判定値(-) Cd0のコード内フィッティング	KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要    =0 =1 使用しない 使用する	VC1 VC2 VALC EPS ICALCD
card No.29-1	ポイドデータ3	format(6E12.5) 定数項 1次係数 1次係数	ICALCD(card 29)=1 and KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	CALCD0 CALCD1 CALCD2
card No.30	ポイドデータ7	format(6E12.5) ポイド飽和濃度(mol/m <sup>3</sup> ) 水素ガスポイドのG値(mol/J) 定数(ポイドモル濃度の減衰消滅の時定数) エネルギー---ポイド変換係数(m <sup>6</sup> /mol/J) (a <sub>0</sub> ) エネルギー---ポイド変換1次係数 (a <sub>1</sub> ) エネルギー---ポイド変換2次係数 (a <sub>2</sub> )	IST(card 26)=3 and KRFILE ≥ 0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	CD CG CTAV CONSTN CONST1 CONST2

AGNES-2入力データ形式(9/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.31-1	ポイドデータ8	format(6E12.5) 燃料溶液温度25°Cのときの密度(g/cm <sup>3</sup> ) ポイドの圧力(atm) 放射線分解ガスバブル半径(m) バブルモデルにおける定数(b <sub>0</sub> ) バブルモデルにおける2次定数(b <sub>2</sub> ) バブルモデルにおける4次定数(b <sub>4</sub> )	IVEL(card 26)≠0 and KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要	RHO25 PRESG RG CDB CDB1 CDB2
card No.31-2	ポイドデータ9	format(6E12.5) ポイド速度1(m/sec) ポイド速度2(m/sec) ポイド率1(-) ポイド率2(-)	IVEL(card 26)=1 and KRFILE≧0(card 3) or KRGEOM=1の時必要 V1 ≦ V2 α1 ≦ α2	VLCTY1 VLCTY2 VALC1 VALC2
card No.31	その他1	format(I12.5E12.5) スクラムオブション  スクラム設定値 スクラム時間遅れ(sec) スクラム反応度(cent)	出力密度 エネルギ密度 逆ベリオド 時刻	ISCRAM  VSCRAM TIMDEL RSCRAM
card No.32	その他2	format(6E12.5) 溶液沸点(K) 溶液密度(kg/m <sup>3</sup> ) 溶液の蒸発エンタルピ(J/kg) 溶液の比容積(m <sup>3</sup> /kg) 蒸気の比容積(m <sup>3</sup> /kg)	=1 =2 =3 =4	TBOIL DENSI HBOIL VLIQU VVAPE

AGNES-2入力データ形式(10/10)

カード番号	カテゴリ	入力項目	説明	変数名
card No.32-1	その他2-1	format(6E12.5) 蒸発反応度1次係数(cent/kg) 蒸発反応度2次係数(cent/kg <sup>2</sup> ) 蒸発率の係数A(kg/時間) 蒸発率の係数B(-) : 蒸発率=A*T <sup>B</sup> (T: °C)	KRTHRM=2 の時必要	REVC(1) REVC(2) EVPM(1) EVPM(2)
card No.33	その他3	format(6E12.5) 圧力デバイス(Pa) 出力 - 圧力変換係数(Pa/m <sup>3</sup> /W) 圧力モデルでの水素ガスポイドのG値(mol/100eV) 圧力緩和時間(sec) 圧力モデルにおける臨界エネルギー密度(J/m <sup>3</sup> )		PC PG GH2 TI AECPX
card No.34	終了	format(i5) インデックス(固定)	現在、未使用。 9999	

3.2 サンプル入力

サンプル入力として、次章に示す TRACY 実験解析のうち、Run61 の入力データを以下に示す。

<サンプル入力 : TRACY Run61 の実験解析>

```

0000
VER3 run-61 ramp feed exp. =264.0cent at 15.374sec initial power=1.e-4/m3
C--- CONTROL DATA
C---KRFIL-KRCNTL-KRGEOM-KRNUCL-KRTHRM-KRVOID-KEDCRM-KRBOIL
      0  0  0  0  0  0  0  0
C---  NMAX  --- NPRT  --- NPLT  --- HMAX  --- TMAX  --- TTIME
      500000      50      500      1.0E-3      160.0      15.56500
C--- GEOMETRY DATA
C----- IG  --- RAD(1)  --- width  --- VOL(3)  --- HEIGHT  --- WRATE
      1      0.2471      0.0100      0.219      0.53530      0.0010
C----- IZM  --- I1  --- I2  --- IZP  --- IV  ---
      5      5      1      0      1
C--- NUCLEAR DATA
C----- M  --- NSTART  --- IRHO  --- ITM  ---
      6      1      0      1
C----- ALIFE  --- AN(1)  --- ERROR  --- GAMMA  ---
      4.4620E-5      1.000E-5      1.000E-4      1.0
C-----
      BETA (1)-(6)
      2.617E-4      1.649E-3      1.502E-3      2.980E-3      8.897E-4      3.248E-4
C-----
      AL (1)-(6)
      1.244E-2      3.050E-2      1.114E-1      3.010E-1      1.140E+0      3.010E+0
C----- R1  ---R2  ---R3  --- rhosw  --- for IRHO=0
      0.0      16.960      0.0
C----- RTC1  --- RTC2  --- RTC3  --- EXTS  ---
      0.0      0.0      0.0      0.0
C----- TIMP  ---
      0.0
C----- PR  ---
      1.000E+0      1.000E+0      1.000E+0      1.000E+0      1.000E+0      0.000E+0
C----- PZ  ---
      1.000E+0      1.000E+0      1.000E+0      1.000E+0      1.000E+0
C--- THERMAL DATA
C----- NTEQ  --- IWEIT  --- IWEIV  --- NWT  ---
      1      -2      -2      0
C---TCA(start)--TCB(end)---TCT time(s)
    
```

```

1. 5000E+00 1. 0000E+00 0. 5000E+02 therm
1. 5000E+00 1. 2000E+00 0. 5000E+02 void
C--RHO (kg/m3)-CP (J/kg/K)--COND (W/m/K)-HTC (W/m2/K)--AREA (m2) ----- card 19
1. 5890E+03 2. 5350E+03 1. 0000E+04 1. 0000E+02 3. 2520E-01 region 1
8. 0000E+03 5. 0425E+02 1. 6240E+01 1. 0000E+03 3. 2520E-01 region 2
C--RHO (kg/m3)-CP (J/kg/K)--OMEG (m3/s)--TZERO (K)
1. 2050E+00 1. 0060E+03 3. 3325E-05 2. 9315E+02 region 3
C----- RC1 ----- RC2 ----- RC3 ----- RCD ----- REGION 1.
-4. 0531E+0 -2. 4919E-2 0. 000 0. 000
C----- RC2 ----- RC2 ----- RC3 ----- RCD ----- REGION 2.
0. 00 0. 00 0. 00 0. 00
C----- RC2 ----- RC2 ----- RC3 ----- RCD ----- REGION 3.
0. 00 0. 00 0. 00 0. 00
C----- INITIAL TEMP DISTR -----
301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0
301. 0
301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0
301. 0
301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0
301. 0
301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0
301. 0
301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0 301. 0
301. 0
C--- VOID DATA
C----- IVEL ----- IST ----- IWE1VD ----- IWE12 ----- IVEL2 -----
7 3 0 0 1
C----- VC1 ----- VC2 ----- DUMMY ----- EPS0 ----- icalcd
-4. 3370E+1 -9. 0830E-1 0. 000E+0 1. 0 0
C----- CD ----- CG ----- CTAV ----- CONSTN ----- CONST1 ----- CONST2
15. 0 5. 616E-7 0. 000E+0 1. 000E-7 0. 0 0. 0
C----- RH025 ----- PRESG ----- RG ----- CDB ----- CDB1 ----- CDB2
1. 0703E+3 1. 000E+0 5. 000E-8 4. 500E-3 4. 500E-3 0. 0
C--- SCRAM DATA
C----- ISCRAM ----- VSCRAM ----- TIMDEL ----- RSCRAM -----
4 1000. 0 0. 0 0. 0
C--- BOILING DATA
C----- TBOIL ----- DENS1 ----- HBOIL ----- VLIQU ----- VVAPE
373. 0 1590. 0 2. 260E+6 1. 670E+0 1. 0

```

C--- PRESSURE DATA

C---	PC	---	PG	---	GH2	---	T1	---	AECPX
	6.900E+4		2.900E-5		1.100E+0		2.000E-3		4.170E+7
9999									

## 4. 計算例

### 4.1 概要

AGNES2 コードによる計算例として、原研で実施している過渡臨界実験装置 TRACY の実験解析を行った。以下に実験の概要と解析条件を示す。

TRACY は再処理施設等の核燃料施設における臨界事故を模擬した超臨界実験を行うための装置（原子炉施設）である<sup>2)</sup>。燃料として<sup>235</sup>U濃縮度 9.98wt%の硝酸ウラニル水溶液を使用し、炉心タンクにこの溶液燃料を給液し、超臨界状態とする。炉心タンクは外径 52cm、肉厚 1cm、高さ約 200cm の円筒形状で、ステンレススチール製である。炉心タンクの中心には、直径 7.6cm の貫通孔があり、その内部を調整トランジェント棒（制御棒）が移動する。炉心タンクには 3 本の安全棒の他に、温度計、圧力計、液位計が取り付けられている。また、タンク周辺には核計装（起動系、運転系、安全出力系、過渡系）が設置されている。

超臨界実験を開始するための反応度添加は、①溶液燃料を一定の給液速度（最大 65l/min）で炉心タンクに給液する方法（ランプ給液）、②調整トランジェント棒を電動駆動により一定速度（最大 900cm/min）で炉心から引き抜く方法（ランプ引抜）、③調整トランジェント棒を圧縮空気駆動により瞬時（約 0.2 秒）に炉心から引き抜く方法（パルス引抜）の 3 とおりで行う。反応度の添加量は最大 3\$, また実験 1 回あたりの積分出力（エネルギー）は 9 kW 時（32MJ、 $10^{18}$ 核分裂相当）以下に制限されている。

AGNES2 コードによる実験解析では、表 4.1-1 に示す 4 つの「ランプ給液」実験を対象とした。これらのうち Run61、71、76 は、反応度添加量がほぼ一定（約 2.7\$）で給液速度（反応度添加率）が異なっている実験である。また、Run61 と 98 の組み合わせでは、給液速度がほぼ一定（約 60l/min）で反応度添加量を変化させた実験となる。

計算では、出力分布を一様とし、出力及び温度についての空間依存性を無くした。これにより、ボイドパラメータ等のサーベイ計算が容易となるが、反応度フィードバックに空間分布の効果が含まれないこととなる。これを補償するために、温度反応度係数及びボイド反応度係数の「重み」を入力により与えた。また、放射線分解ガスの発生後は、溶液の攪拌により、温度及びボイド分布がほぼ一様になると考えられることから、ボイド発生後、ある時定数をもって、「重み」が 1 に変化するようにした。今回の解析では、温度、ボイドともに、初期重みを 1.5 とし、時定数 50 秒で 1.0 に変化することとした。

表 4.1-2 に、今回の計算で使用する主要なパラメータの値を示す。溶液密度は測定値であり、また、比熱は Forehand の文献<sup>4)</sup>をもとに算出した。即発中性子寿命、実効遅発中性子割合、温度及びボイド反応度係数は、別途行った核計算により求めた<sup>10)</sup>。この他、放射線分解ガスボイドに関するパラメータは、TRACY 実験解析においてサーベイ計算を行い、ボイド挙動が支配的な第 1 出力ピーク以降の出力挙動を再現するように決定した。



表 4.1-1 解析対象とした TRACY 実験の条件

Run	U濃度	硝酸濃度	臨界液位	最終液位	給液率	反応度添加条件	
	(gU/l)	(N)	(mm)	(mm)		(%)	(cent/s)
61	422.1	0.77	461.4	535.3	59	2.64	18
71	392.7	0.75	503.4	603.0	40	2.75	9.8
76	396.2	0.74	496.3	589.5	20	2.69	5.0
98	391.7	0.73	500.5	559.5	60	1.81	16

表 4.1-2 解析で使用了した主要なパラメータ

パラメータ	単位	Run61	Run71	Run76	Run98
溶液密度	g/cm <sup>3</sup>	1.589	1.548	1.553	1.547
溶液比熱	J/g·K	2.535	2.641	2.632	2.65
初期出力密度	W/m <sup>3</sup>	1.00E+05			
即発中性子寿命	s	4.462E-05	4.744E+01	4.705E-05	4.744E-05
実効遅発中性子割合:1群	—	2.617E-04	2.599E-04	2.601E-04	2.599E-04
実効遅発中性子割合:2群	—	1.649E-03	1.638E-03	1.639E-03	1.683E-03
実効遅発中性子割合:3群	—	1.502E-03	1.492E-03	1.493E-03	1.492E-03
実効遅発中性子割合:4群	—	2.980E-03	2.960E-03	2.962E-03	2.960E-03
実効遅発中性子割合:5群	—	8.897E-04	8.837E-04	8.844E-04	8.837E-04
実効遅発中性子割合:6群	—	3.248E-04	3.227E-04	3.229E-04	3.227E-04
実効遅発中性子割合:合計	—	7.607E-03	7.556E-03	7.561E-03	7.601E-03
温度反応度係数(1次)	cent/K	-4.053E+00			
温度反応度係数(2次)	cent/K <sup>2</sup>	-2.492E-02			
ポイド反応度係数(1次)	cent/%	-4.337E+01			
ポイド反応度係数(2次)	cent/% <sup>2</sup>	-9.083E-01			
温度係数の重みの初期値	—	1.5			
温度係数重みの最終値	—	1.0			
温度係数重みの時定数	s	50			
ポイド係数の重みの初期値	—	1.5			
ポイド係数重みの最終値	—	1.0			
ポイド係数重みの時定数	s	50			
分解ガスの飽和濃度	mol/m <sup>3</sup>	15.0			
分解ガスのG値	mol/J	5.616E-07			
変換定数	m <sup>6</sup> /J·mol	1.00E-07			
抗力係数	—	4.50E-03			

## 4.2 TRACY 実験解析結果

AGNES2 コードによる4つのTRACY 実験解析の結果として、出力とエネルギーの時間変化を図4.2-1～4.2-8に示す。図には、比較のために実験結果も示してある。

実験との比較では、いずれのRunについても出力の第1及び第2パルス程度までは、実験をよく再現していることがわかる。また、エネルギーの時間変化は、実験時間全体にわたり、実験値をほぼ再現している。表4.2-1には、第1パルスのピーク出力及びパルス（終了時）のエネルギー、実験終了時のエネルギーの実験値と計算値の比較を示してある。第1パルスのエネルギーに関しては誤差が約20%であるが、第1パルスのピーク出力及び実験終了時のエネルギーでは、誤差10%以内で両者は一致しており、計算値が妥当なものであることが分かる。

表 4.2-1 解析結果の実験との比較

## Run61

		実験値	計算値	C/E*
第1パルスのピーク出力	(W)	2.34E+07	2.48E+07	1.06
第1パルスのエネルギー	(J)	4.39E+06	4.04E+06	0.92
実験終了時のエネルギー	(J)	1.61E+07	1.77E+07	1.10

\* C/E = 計算値/実験値

## Run71

		実験値	計算値	C/E
第1パルスのピーク出力	(W)	1.20E+07	1.16E+07	0.97
第1パルスのエネルギー	(J)	4.39E+06	4.43E+06	1.01
実験終了時のエネルギー	(J)	2.28E+07	2.11E+07	0.92

## Run76

		実験値	計算値	C/E
第1パルスのピーク出力	(W)	4.13E+06	4.33E+06	1.05
第1パルスのエネルギー	(J)	4.14E+06	4.20E+06	1.02
実験終了時のエネルギー	(J)	2.21E+07	2.02E+07	0.91

## Run98

		実験値	計算値	C/E
第1パルスのピーク出力	(W)	2.23E+07	2.05E+07	0.92
第1パルスのエネルギー	(J)	5.63E+06	4.43E+06	0.79
実験終了時のエネルギー	(J)	1.55E+07	1.60E+07	1.03

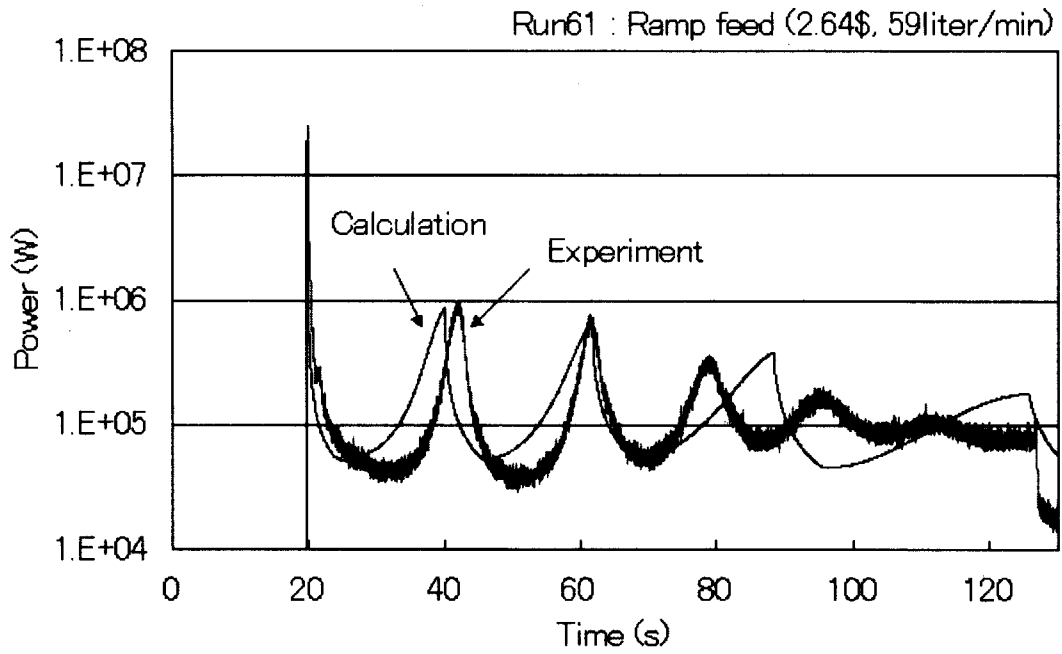


図 4.2-1 TRACY 実験解析結果 : Run61 出力

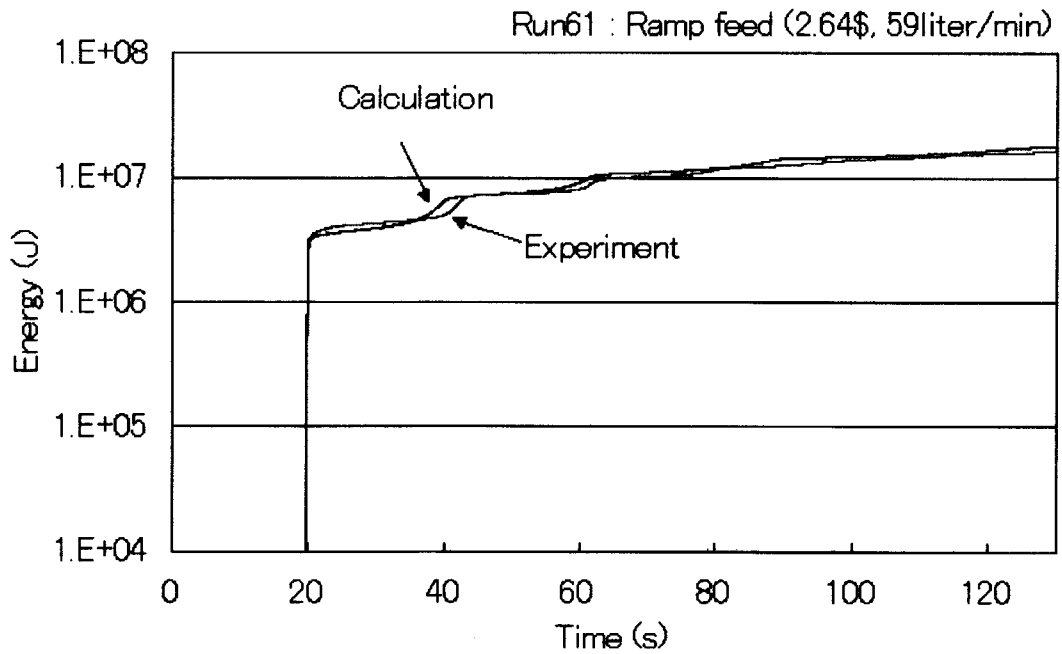


図 4.2-2 TRACY 実験解析結果 : Run61 エネルギー

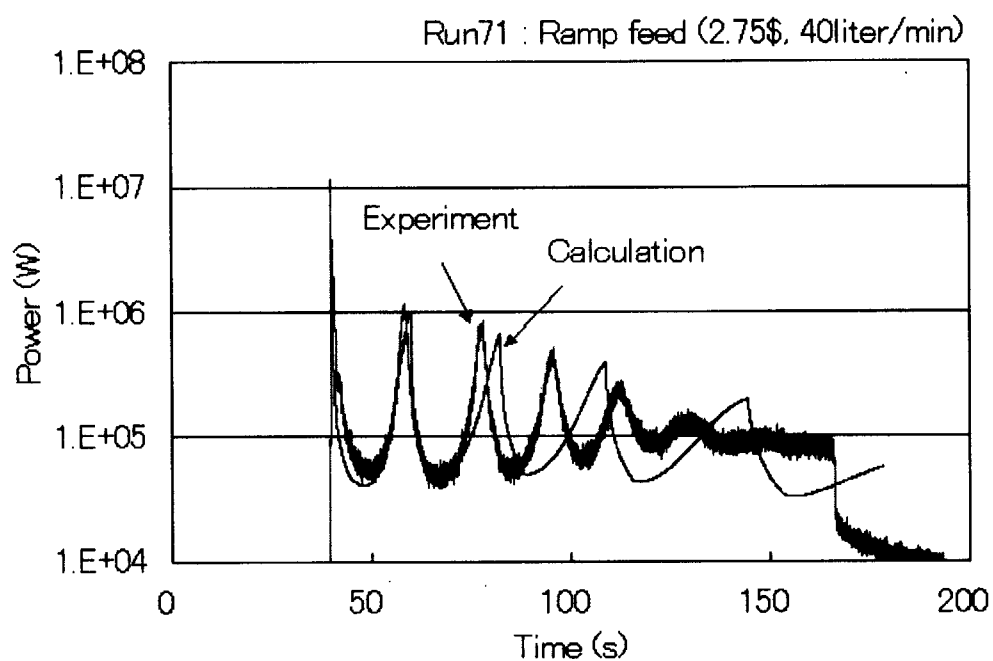


図 4.2-3 TRACY 実験解析結果 : Run71 出力

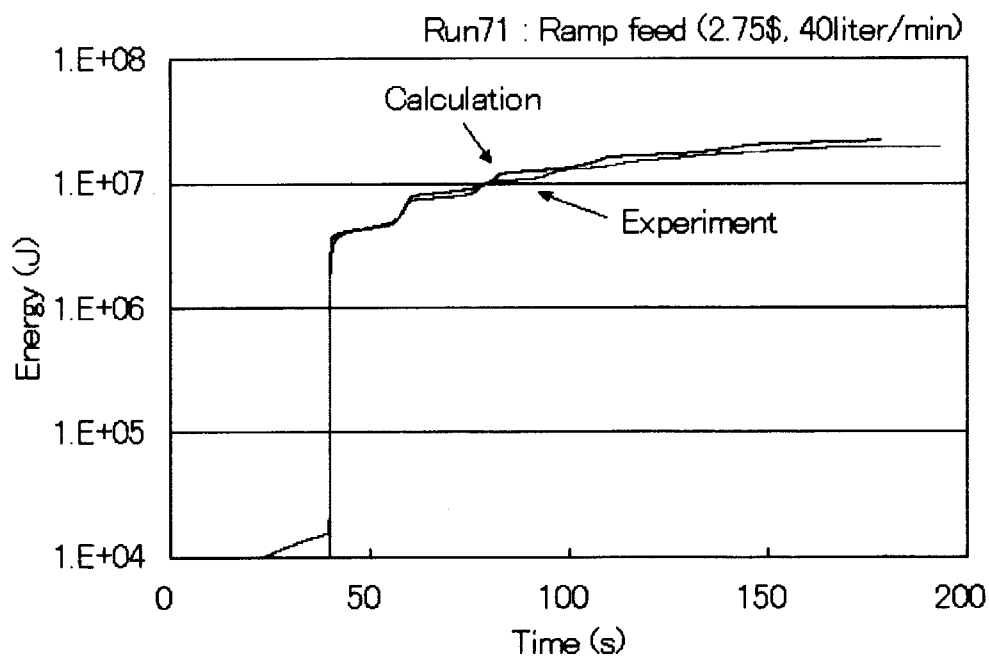


図 4.2-4 TRACY 実験解析結果 : Run71 エネルギー

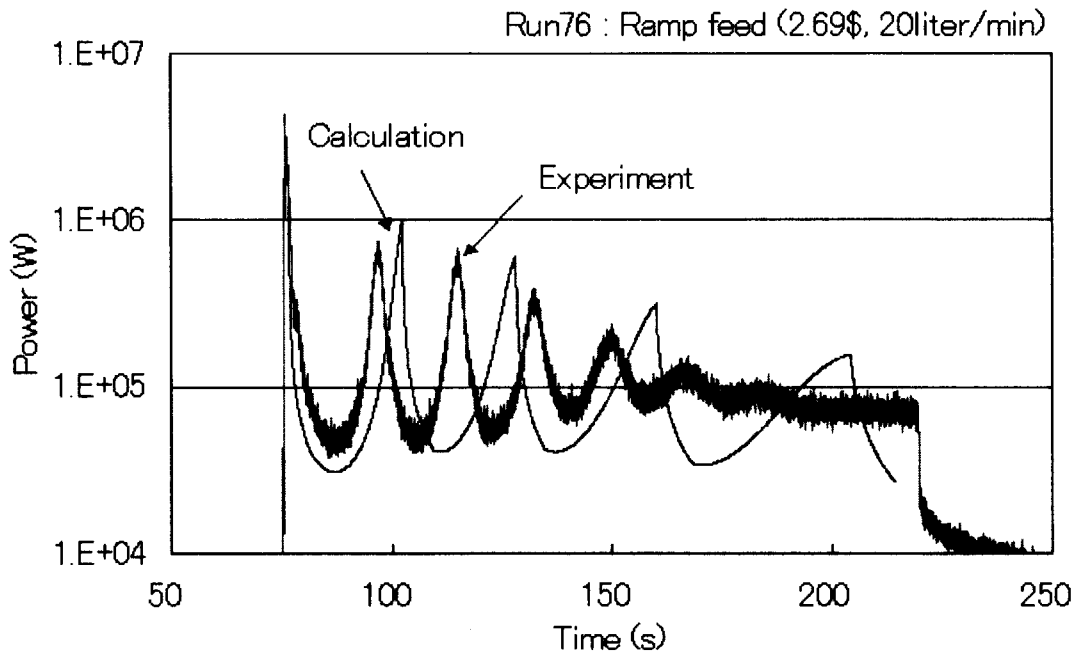


図 4.2-5 TRACY 実験解析結果 : Run76 出力

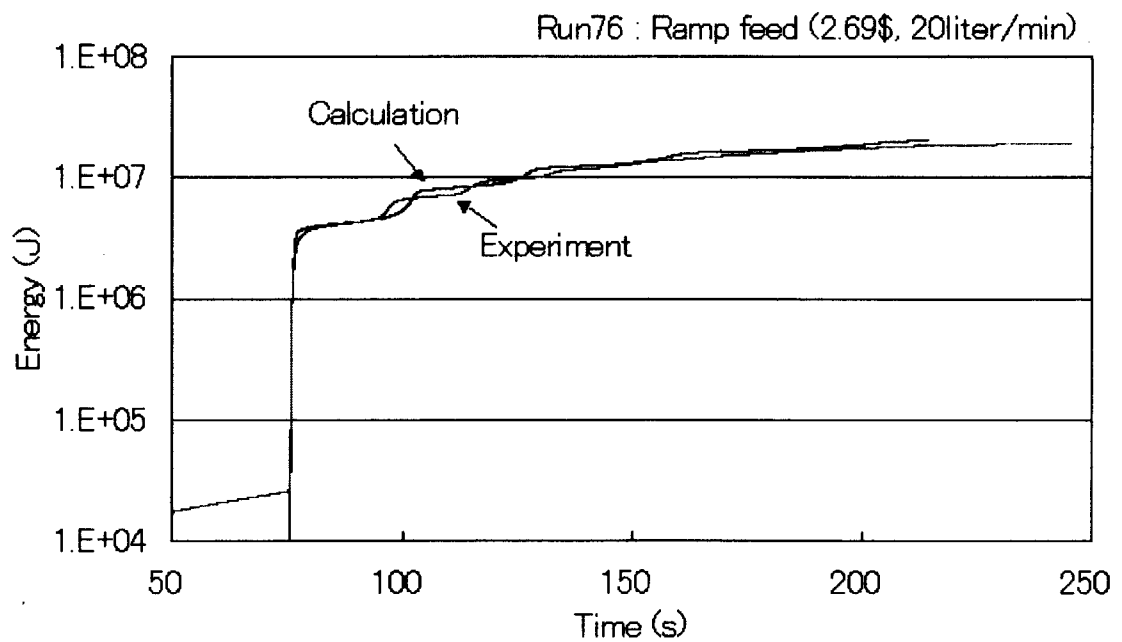


図 4.2-6 TRACY 実験解析結果 : Run76 エネルギー

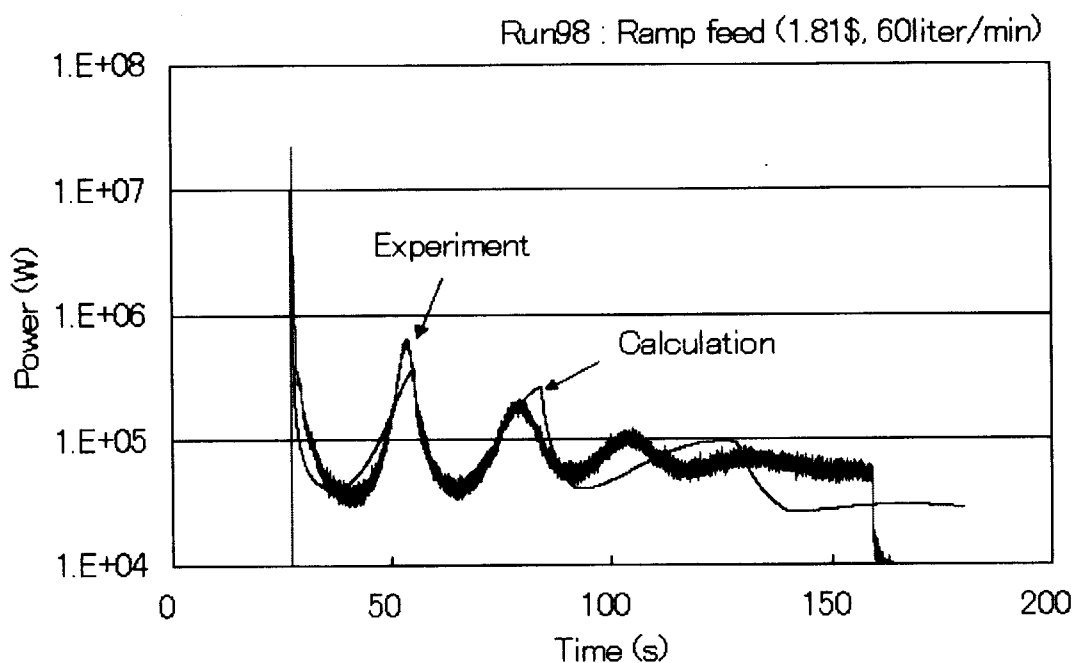


図 4.2-7 TRACY 実験解析結果 : Run98 出力

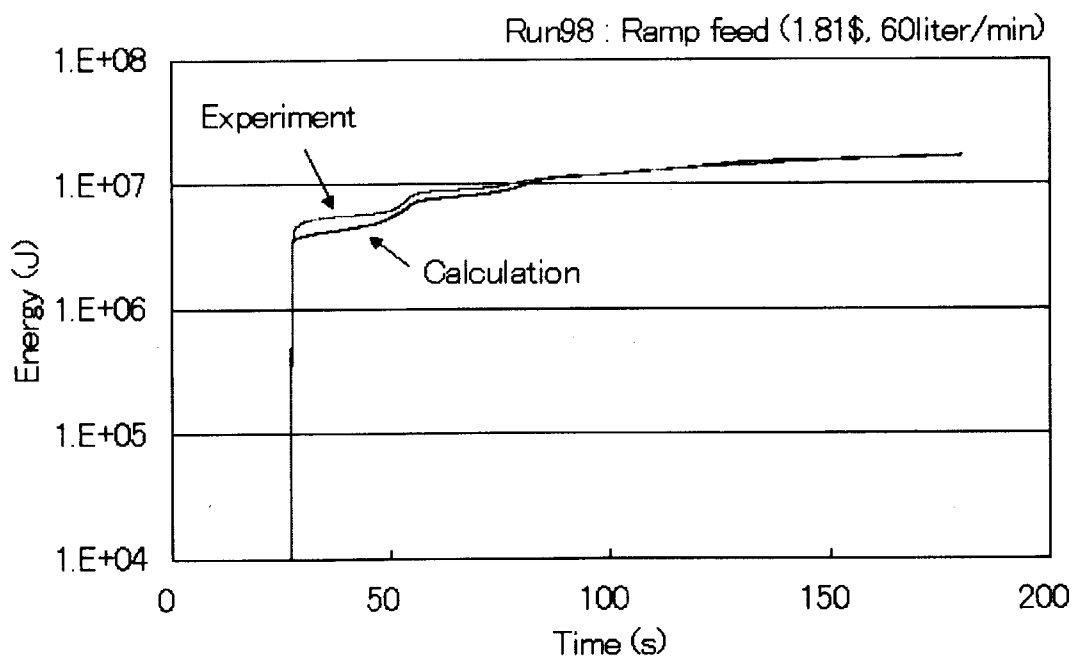


図 4.2-8 TRACY 実験解析結果 : Run98 エネルギー

## 5. まとめ

溶液燃料体系の臨界事故解析コード AGNES2 を開発し、TRACY 実験解析により、その適用性を確認した。

AGNES2 コードでは、溶液系に特有の放射線分解ガスボイドによる反応度効果を取扱うために、「修正エネルギーモデル」にもとづく分解ガスのボイド生成モデルを組み込んだ。また、生成したボイドが上昇して体系から消失する効果を取り入れるために、体系を2次元 R-Z に分割し、ボイドの上昇による変化を計算できるようにした。この結果、放射線分解ガスボイドの生成・消滅による出力振動を計算することが可能となった。

TRACY の実験解析では、反応度添加量・添加率の異なる4つのランプ給液実験について、AGNES2 コードにより出力及びエネルギーの時間変化を計算し、実験との比較を行った。この結果、出力振動の初期（第2出力パルス近傍まで）については出力の時間変化は、実験値をほぼ再現した。また、エネルギーの時間変化については、実験範囲全般にわたりよい一致をみた。さらに、第1出力パルスのピーク値及びエネルギー、実験終了時のエネルギーについては、20%以内で実験値を再現した。以上のことから、今回の対象となった範囲の TRACY 実験あるいはその類似の事象に関しては、AGNES2 コードを用いた臨界事故評価が十分に適用可能であることが確認できた。

今後は、TRACY 実験解析を中心として、より広範囲の反応度添加条件への AGNES2 コードの適用性検討を行っていく予定である。特に、今回使用した計算パラメータの妥当性の検討が重要と考える。また、今回は検討を行わなかった圧力評価式の TRACY 実験への適用性検討も今後行う予定である。さらに、JCO 臨界事故のような強制冷却条件下での出力挙動や、海外での自然冷却条件下で長時間継続した臨界事故等の放熱条件が出力挙動を支配している状況への適用性の検討も重要である。このような事故の解析を行うには、熱計算に関するモデルの改良が必要となる。これについては今後の課題として検討を進める。

## 謝 辞

AGNES2 コードの開発に当たっては、(株)日本総合研究所の金 栄璨、山口兆一、大川理一郎の各氏、及び(株)ナイスの Liem Peng Hong 氏にご協力いただいた。また、原研・奥野浩氏には本報告書に関する有用な助言をいただいた。この場を借りて、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) T. P. McLaughlin et al., "A Review of Criticality Accidents, 2000 Revision," LA-13638 (2000).
- 2) H. Yanagisawa et al., "Experiments on Transient Behavior of a Low-Enriched Uranyl Nitrate Solution System with TRACY to Study Hypothetical Criticality Accidents in Reprocessing Plants," *Proc. Sixth Int. Conf. Nucl. Criticality Safety*, September, Versailles, France, p.900 (1999).
- 3) 中島健, 大西信秋, 「溶液燃料体系の動特性解析コード AGNES の開発」, JAERI-M 85-212 (1985).
- 4) H. M. Forehand, Jr., "Effect of Radiolytic Gas on Nuclear Excursions in Aqueous Solutions," NUREG/CR-2517 (1982).
- 5) M. S. Dunenfelt et al., "Kinetics Experiments on Water Boilers -"A" CORE REPORT-Part III, Analysis of Results," NAA-SR-5416 (1962).
- 6) P. Spiegler et al., "Production of Void and Pressure by Fission Track Nucleation of Radiolytic Gas Bubbles during Power Bursts in a Solution Reactor," NAA-SR-7086 (1962).
- 7) 気液二相流技術ハンドブック, 機会学会編, コロナ社 (1989).
- 8) 小原徹, 他, 「TRACY 実験におけるフィードバック反応度の空間分布効果-第1出力ピーク特性の評価-」, JAERI-Research 2001-037 (2001).
- 9) A. F. Henry, "The Application of Reactor Kinetics to the Analysis of Experiments," *Nucl. Sci. Eng.*, **3**, 52 (1958).
- 10) 山本俊弘, 私信 (1999).



# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度	°C	Wb/A
光束照度	ルーメン	lm	cd·sr
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射線量当量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘 度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>6</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)  
= 4.184 J (熱化学)  
= 4.1855 J (15 °C)  
= 4.1868 J (国際蒸気表)  
仕事率 1 PS (仏馬力)  
= 75 kgf·m/s  
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

溶液燃料体系の臨界事故解析コード：AGNESS2

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています