

JAERI - M
89-120

重水減速・冷却型研究炉の反応度投入事象
解析コード“EUREKA-2D”

1989年9月

小菅 征夫・入子 真規*・大西 信秋

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, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

重水減速・冷却型研究炉の反応度投入事象
解析コード“EUREKA-2D”

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部
小菅 征夫・入子 真規^{*}・大西 信秋

(1989年8月8日受理)

反応度投入事象解析コードとしては、EUREKA およびそれを改良したEUREKA-2などが知られているが、これらは軽水炉用に開発されたもので、熱力学的物性値や動特性定数で異なる重水減速・冷却型原子炉には厳密には適用できない。また、使用している熱伝達相関式などから、一般に常温・常圧の研究用原子炉へそのまま適用するには問題が生じる。

反応度投入事象解析コード・EUREKA-2Dは、これらの問題を解決し、EUREKA-2を常温・常圧の重水減速・冷却型研究用原子炉に使用できるように改造したものである。

本報告書は、コードの特徴と改造内容および本コードを用いて重水減速・冷却型研究用原子炉であるJRR-2の安全評価のために行った解析例について述べる。

Computer Code for the Analyses of Reactivity Initiated
Accident of Heavy Water Moderated
and Cooled Research Reactor "EUREKA-2D"

Ikuo KOSUGE, Masanori IRIKO* and Nobuaki OHNISHI

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

(Received August 8, 1989)

Codes, such as EUREKA and EUREKA-2 have been developed to analyze the reactivity initiated accident for light water reactor.

These codes could not be applied directly for the analyses of heavy water moderated and cooled research reactor which are different from light water reactor not only on operation condition but also on reactor kinetic constants.

EUREKA-2D which is modified EUREKA-2 is a code for the analyses of reactivity initiated accident of heavy water research reactors.

Following items are modified:

- i) reactor kinetic constants
- ii) thermodynamic properties of coolant
- iii) heat transfer equations

The feature of EUREKA-2D and an example of analysis are described in this report.

Keywords: Reactivity Initiated Accident, Safety Assessment, Research Reactor, Heavy Water, EUREKA

* CSK Co. Ltd.

目 次

1. 序	1
2. EUREKA-2Dの特徴	2
3. コードの改造	4
3.1 遅発中性子データに関する改造	4
3.2 熱力学的物性値の変更	6
3.3 熱伝達相関式の変更	9
4. 反応度投入事象の解析例	18
4.1 計算モデルと入力データ	18
4.2 計算結果	18
5. 結 言	29
謝 辞	29
参考文献	29
付 録 A 重水ヘルムホルツ自由エネルギー式	30
付 録 B 蒸気表作成に必要な各物性値の状態式	32
付 録 C 重水蒸気表作成プログラムの概要	36
付 録 D EUREKA-2で用いている軽水の物性値	39
付 録 E 入力データについて	43

Contents

1. Introduction	1
2. General Description of EUREKA-2D	2
3. Modification of Computer Code	4
3.1 Modification of Delayed Neutron Data	4
3.2 Modification of Thermodynamic Properties	6
3.3 Modification of Heat Transfer Equations	9
4. Sample of Calculation	18
4.1 Calculation Model and Input Data	18
4.2 Results	18
5. Conclusion	29
Acknowledgements	29
References	29
Appendix A Helmholtz's free energy equation of heavy water	30
Appendix B Characteristic equation of thermodynamic properties for calculation of heavy water vapor table	32
Appendix C Program for calculation of heavy water vapor table	36
Appendix D Thermodynamic properties of light water in EUREKA-2 ...	39
Appendix E User's guides for input data	43

1. 序

反応度投入事象は、原子炉の安全評価において想定される重要な事象の一つである。

反応度投入事象に関する実験的研究が行なわれる一方、これまでに反応度投入事象時における核熱水力学の挙動を解析するためのコードの開発が行なわれてきた。解析コードは、当初の一点近似動特性コードから、より詳細なモデルを取入れた核熱水力結合動特性コード、さらに空間分布を考慮した多領域核熱水力結合動特性コードへと進展してきている。

軽水炉用の反応度投入事象解析コードの代表的なものの一つに EUREKA⁽¹⁾ がある。EUREKA は数多くの実験解析を通してモデルの妥当性が検証されているが、その後、急激な熱発生があるような苛酷な炉心状態を解析する場合に数値解析上生じる熱水力学的不安定性を解決するとともに、いくつかの改良を加えた EUREKA-2⁽²⁾ が開発された。

しかしこれらのコードは、もともと軽水炉用に開発されたもので、熱力学的物性値や動特性定数で異なる重水減速・重水冷却型研究炉（以下「重水炉」という）には厳密には適用できない。また、一般に常温・常圧の研究用原子炉へは、使用している熱伝達相関式などからそのまま適用するには問題が生じる。

本報告書で述べる反応度投入事象解析コード EUREKA-2 D は、これらの問題を解決し、EUREKA-2 を常温・常圧の重水炉に使用できるように改造したものである。

以下第2章に EUREKA-2 D の特徴を、第3章に改造内容を示す。また、第4章では研究用重水炉である JRR-2 の反応度投入事象について本コードを用いて行った解析例を示す。

2. EUREKA-2Dの特徴

EUREKA-2Dは多領域核熱水力結合動特性解析コードEUREKA-2を常温・常圧の重水炉に適用できるように改造したものであり、その基本的特徴はそのまま引継がれている。

なお、本章および次章で述べる改造部分以外の計算モデル、数値計算法入力データの方法等はEUREKA-2と同じである。

EUREKA-2の主な特徴は、以下の通りである。

(1) EUREKA-2は、多領域核熱水力結合動特性解析コードである。

核的には、中性子束の空間分布が時間的に一定とした一点近似動特性方程式を解いて原子炉出力を得る。

原子炉出力は、核分裂によって発生する熱出力と γ 線による崩壊熱の和で与えられる。崩壊熱はShureの式を用いている。

(2) 動特性方程式の反応度寄与としては、制御棒の引抜きやスクラム、また、冷却材の温度変化や流量変化によって誘起される時間依存の反応度及び各炉心領域におけるフィードバック反応度からなる。

フィードバック反応度は、ドップラー効果、冷却材温度効果、ボイド効果、被覆材膨張効果による反応度からなり、中性子束分布、温度変化、ボイド発生の空間依存を考慮し、空間の重み関数（中性子束と随伴中性子束との積）をかけて空間積分することによって反応度の空間依存性を考慮している。

(3) 冷却材の熱水力挙動は、質量、エネルギー、運動量の保存式を一次元均質流熱平衡流動の仮定に基づいて解く。

熱伝導モデルは、半径方向一次元時間依存の熱伝導方程式を基本としている。熱伝導体形状としては、円柱のほかに平板についても計算できる。

その他、即発減速材加熱効果、サブクールボイドモデル、垂直スリップモデル、エンタルピー輸送モデルを考慮している。

(4) 数値計算法としては、動特性方程式については5段階のRunge-Kutta法で解く。

数値解法に用いる熱流動方程式は、保存式を分割された体系（ノード）ごとに体積積分して得る。

燃料温度分布は、熱伝導体をメッシュ分割し、熱伝導体の中心では熱伝達は起こらないこととし（過渡状態の境界条件）、表面温度は、表面熱流束と沸騰曲線との交点を反復計算により求め、三角行列式を解くことによって得られる。

EUREKA-2Dは、このような特徴をもつEUREKA-2に以下のような部分について改造を行なった。

(1) 動特性方程式に用いる遅発中性子比率および遅発中性子先行核崩壊定数から成る遅発中性子定数について、従来の6群に加えて重水炉固有の核分裂生成物からの γ 線と重水との光中性子反応による光遅発中性子(Photoneutron)定数を9群追加し、合わせて15群とした。

(2) 熱水力計算に使われる冷却材物性値を軽水のものから重水のものへ変更した。

物性値としては、冷却材の比容積、内部エネルギー熱膨張率、等温圧縮率、定圧比熱、表面張力、熱伝導率、粘性係数がある。

(3) 熱伝達相関式および限界熱流速相関式については、常温・常圧条件下で運転される板状燃料を使用する研究用原子炉に適用できるように開発された熱伝達パッケージ⁽³⁾（以下「研究炉用熱伝達パッケージ」という）に変更した。

使用している相関式は、上記のような研究炉の熱水力特性を考慮して従来に関連実験と比較検討して導出されたものである。

3. コードの改造

3.1 遅発中性子データに関する改造

3.1.1 光遅発中性子データの組み込み

光遅発中性子に関するデータ⁽⁴⁾を組み込んだ。表 3.1 に光遅発中性子まで含めた遅発中性子 (15群) に関するデータ (遅発中性子相対比率および崩壊定数) を示す。さらに遅発中性子相対比率と中性子源については、データとして入力できるように改造を行なった。

3.1.2 遅発中性子群数の拡張にともなうコードの改造

動特性方程式については、6群でも15群でも基本的に解法は変わらない。しかし EUREKA - 2 では、核的動特性計算と γ 線による発熱 (11群), ^{239}U , ^{239}Np の発熱効果等を一連の計算ループの中で同時に処理していること等により、群数の拡張には若干の注意が必要とされる。

コードの変更点を理解するため、EUREKA-2 で用いられている数値解法から説明する。次の微分方程式を考える。

$$\dot{n}(t) = \alpha n(t) + R(n, t) \text{ -----(1)}$$

ここで、 α は t に対して定数である。積分、変形して

$$n(t) = n(0) + t \int_0^1 [\alpha n(0) + R(n, u)] e^{\alpha t(1-u)} du \text{ -----(2)}$$

また、次の関数を導入する。

$$C_m(x) = \int_0^1 u^{m-1} e^{x(1-u)} du$$

$$\begin{cases} C_1(x) = (e^x - 1) / x \\ C_{m+1}(x) = (m C_m(x) - 1) / x \end{cases} \text{ -----(3)}$$

以上の表式を用いて、 $t=h$ での解 $n(h)$ は次のように段階的に計算される (図 3.1 参照)。

$$n_1 = n_0 + \frac{h}{2} \cdot [\alpha n_0 + R(n_0, 0)] \cdot C_1\left(\alpha \cdot \frac{h}{2}\right) \text{ -----(4)}$$

$$n_2 = n_1 + \frac{h}{2} \cdot [R\left(n_1, \frac{h}{2}\right) - R(n_0, 0)] \cdot C_2\left(\alpha \cdot \frac{h}{2}\right) \text{ -----(5)}$$

$$n_3 = n_2 + h \cdot [\alpha n_0 + R(n_0, 0)] \cdot C_1(\alpha h) \\ + 2h \cdot [R\left(n_2, \frac{h}{2}\right) - R(n_0, 0)] \cdot C_2(\alpha h) \text{ -----(6)}$$

$$n_4 = n_3 + h [R(n_0, 0) - 2R\left(n_2, \frac{h}{2}\right) + R(n_3, h)] \cdot [2C_3(\alpha h) - C_2(\alpha h)] \text{ -----(7)}$$

$$n_5 = n_4 + h [R(n_4, h) - R(n_3, h)] \cdot [2C_3(\alpha h) - C_2(\alpha h)] = n(h) \text{ -----(8)}$$

ここで以上の一般論を，動特性方程式に適用する。

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\phi}(t) &= \frac{[\rho(t) - \beta] \phi(t)}{A} + \sum_i \lambda_i C_i(t) + S \quad \text{-----(9)} \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{C}_i(t) &= \frac{\beta f_i}{A} \phi(t) - \lambda_i C_i(t) \quad \text{-----(10)} \end{aligned} \right.$$

ここで，

t = 時間

ϕ = 炉出力

C_i = i 群の遅発中性子先行核の数

β = 全遅発中性子比率 ($\sum_i \beta_i$)

A = 即発中性子寿命

ρ = 反応度

f_i = i 群遅発中性子相対比率 (β_i / β)

λ_i = i 群崩壊定数

S = 中性子源

$r(t) = \rho(t) / \beta$, $C_i(t) = \beta f_i \cdot W_i(t) / A \lambda_i$ を(9), (10)式に代入, (1)式の形に変形すると,

$$\begin{aligned} \dot{\phi}(t) &= \frac{\beta}{A} [r(t_1) - 1] \phi(t) \\ &\quad + \frac{\beta}{A} [r(t) - r(t_1)] \phi(t) + \frac{\beta}{A} \sum_i f_i W_i + S \quad \text{-----(11)} \end{aligned}$$

$$\dot{W}_i(t) = -\lambda_i W_i(t) + \lambda_i \phi(t) \quad \text{-----(12)}$$

さらに, EUREKA-2 では r 崩壊熱を取扱うことができる。

$$\dot{r}_j(t) = -\lambda_j r_j + E_j \phi(t) \quad \text{-----(13)}$$

r_j = j 群密度

λ_j = j 群崩壊定数

E_j = j 群の熱発生割合

以上から(11), (12), (13)式は次のように(1)式の形に帰着できる。

$$\alpha = \frac{\beta}{A} [r(t_1) - 1] \quad : (11) \text{式について}$$

$$= -\lambda_i \quad : (12) \quad "$$

$$= -\lambda_j \quad : (13) \quad "$$

$$R = \frac{\beta}{A} [r(t) - r(t_1)] \phi(t) + \frac{\beta}{A} \sum_i f_i W_i + S \quad : (11) \text{について}$$

$$= \lambda_i \phi \quad : (12) \quad "$$

$$= E_j \phi \quad : (13) \quad "$$

以上から

$$\text{全群数} = (\text{遅発中性子群数} + 1) + (r \text{ 発熱等群数})^*$$

として、6群計算に加えて15群計算可能とするために次の修正作業を行なった。

- i) $\sum_i f_i W_i$ 等群数について和をとる項については、和の回数を可変とした。
- ii) $n(h)$ 等全群数の回数だけ、計算される項について繰り返し数を可変とした。
- iii) α , R 等、単に全群数の回数だけ繰り返されるのではなくて計算オプション等の変更により配列内容の変わるものについては、繰り返し計算の途中で適当に分岐条件の設定を行なった。

3.2 熱力学的物性値の変更

EUREKA-2の熱水力計算に使われる物性値には冷却材(軽水)の比容積、内部エネルギー、熱膨張率、等温圧縮率、定圧比熱、表面張力、熱伝導率、粘性係数、さらに、燃料構成物質(UO₂等)の密度、熱伝導率、線膨張率、定容比熱がある。冷却材に重水を使用している重水炉をEUREKA-2コードで解析できるようにするためには、これらの物性値を重水のものに変更する必要がある。このうち、比容積、内部エネルギー、熱膨張率、等温圧縮率、定圧比熱の5つの物性値は、コード内には組み込まれておらず、温度と圧力の関数で表わされた蒸気表から得られる。残りの物性値はコード内に組み込まれており、温度の関数で表されている。したがって、EUREKA-2を重水炉の解析に使用するためには新たに重水の蒸気表を作成し、また、コード組み込みの冷却材の物性値を重水データに変更する必要がある。

3.2.1 重水蒸気表の作成

軽水については、状態量の実用国際状態式が1967年国際蒸気性質会議で設置された国際フォーミュレーション委員会で定式化され⁽⁶⁾、それを基に、熱水力計算に必要な蒸気表が作成されている。しかし、重水の場合、軽水に比べて実験データが極端に少なく、軽水のような実用国際状態式は定式化されていない。このため、熱水力計算に必要な重水蒸気表は作成されていない。

重水の蒸気表を作成するためには、基礎となる定式化された状態式が必要である。P.G.Hill等は、この基礎状態式となるヘルムホルツ自由エネルギーを以下のように定式化した⁽⁷⁾。

$$\psi = \psi_0(T) + RT [\ln \rho + \rho Q(\rho, T)] \text{-----(14)}$$

ここで、

ρ : 密度

R : ガス定数

T : 熱力学的温度

定式化した詳しい ψ の式は、付録Aに示す。(14)式は、液体および蒸気の単相状態を圧力では約100 MPaまで、温度については約800°Cまで表現可能であり、(14)式により飽和状態を含む熱力学的状態量を実験精度内で求める事ができる。

(14)式から微分法により、蒸気表作成に必要な各物性値の状態式が次のように表せる。

* 発熱群数は、²³⁹U、²³⁹Npの効果を含む。

圧力

$$P = \rho RT \left[1 + \rho Q + \rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_\tau \right] \text{-----} (15)$$

内部エネルギー

$$u = \frac{d}{d\tau} (\phi_0 \tau) + RT \rho \tau \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_\rho \text{-----} (16)$$

等温圧縮率

$$K = \left[\rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \right]^{-1} \text{-----} (17)$$

定圧比熱

$$C_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_\rho - \frac{\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho}{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T} \text{-----} (18)$$

熱膨張率

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \text{-----} (19)$$

ここで、 $\tau = \frac{1000}{T}$

これらの式を各物性値が計算できるよう定式化した。その結果を付録Bに示す。

次に、これらの定式化された式より EUREKA-2 が参照可能な重水蒸気表を作成するプログラムを開発した。このプログラムは、温度が 3.8°C から 800°C、圧力が 0 MPa から 100 MPa までの任意の温度および圧力に対する飽和水、飽和蒸気、未飽和水および過熱蒸気の各物性値（比容積、内部エネルギー、等温圧縮率、熱膨張率、定圧比熱）を計算し、出力する。詳しくは、付録Cに示す。

3.2.2 蒸気表に示された以外の物性値の変更

すでに述べたように、EUREKA-2 の熱水力計算に使われる物性値のうち蒸気表に示されない物性値には粘性係数、熱伝導率および表面張力の3つがある。EUREKA-2 では、これらの物性値に対して軽水用として付録Dに示す式及び値が組み込まれている。

これらの物性値を重水のものに変更する必要があるが、軽水のように定式化されていない。そこで、ここでは粘性係数および熱伝導率は、図 3.2, 3.3 に示すデータを使用して定式化した。一方、表面張力については重水のデータが入手できなかったため、軽水の式の臨界点温度のみを重水データに変更して使用した。以下に、重水の定式化した式を示す。

(1) 粘性係数

(a) 飽和液体の場合

$$\mu = C_1 \times 10^{-6} \times \exp \{ D_1 + D_2 \times \ln t - D_3 \times (\ln t)^2 + D_4 \times (\ln t)^3 \} \text{-----} (20)$$

(b) 飽和および過熱蒸気

飽和液体と同じ

ここで、

 μ : 粘性係数 [Pa・S]

t : 温度 [°C]

 $C_1 = 9.80665$ $D_1 = 1.5406442$ $D_2 = 3.1687588$ $D_3 = 0.86352163$ $D_4 = 0.058285215$

(2) 熱伝導率

(a) 飽和液体の場合

$$\lambda = \frac{1}{C_2} (E_1 + E_2 \times t - E_3 \times t^2 + E_4 \times t^3 - E_5 \times t^4) \text{-----(21)}$$

(b) 飽和および過熱蒸気の場合

飽和液体と同じ

ここで、

 λ : 熱伝導率 [kcal / m・s・°C]

t : 温度 [°C]

 $C_2 = 3600.0$ $E_1 = 0.4711150605$ $E_2 = 0.1823205299 \times 10^{-2}$ $E_3 = 0.1171421185 \times 10^{-4}$ $E_4 = 0.2534529921 \times 10^{-7}$ $E_5 = 0.3020713380 \times 10^{-10}$

(3) 表面張力

軽水の場合と同じ。ただし、臨界点温度は重水の温度である 643.89 K を用いる。

EUREKA-2 では、粘性係数はサブルーチン VISC, 熱伝導率は THCON, 表面張力は SURTEN でそれぞれ計算される。したがって、各サブルーチンに含まれる上記の軽水データを重水データに置換した。

ところで、飽和圧力および飽和温度は蒸気表に示されており参照可能であるが、EUREKA-2 ではこれとは別に、コード内に付録 D に示す飽和圧力計算式および飽和温度計算式がサブルーチン STH 20 φ, STH 201, STH 203, STH 204, STH 205 に組み込まれている。

そこで重水の飽和圧力計算式として(22)式⁽⁷⁾を用い、軽水の式と置換した。また、飽和温度計算式については、軽水のような計算式によらず、数値解法 (Newton 法) により(22)式から温度を求めるようコードを改造した。

重水の飽和圧力計算式

$$P = P_C \times \exp \left[\frac{1}{\theta} \left\{ \alpha_1 (1-\theta) + \alpha_2 (1-\theta)^{1.9} + \alpha_3 (1-\theta)^2 + \alpha_4 (1-\theta)^{5.5} + \alpha_5 (1-\theta)^{10} \right\} \right] \text{-----} (2)$$

ここで、

- P : 圧力
- P_C : 臨界点圧力
- $\theta = T/T_C$
- T : 温度
- T_C : 臨界点温度
- $\alpha_1 = -7.81583$
- $\alpha_2 = 17.6012$
- $\alpha_3 = -18.1747$
- $\alpha_4 = -3.92488$
- $\alpha_5 = 4.19174$

3.3 熱伝達相関式の変更

今まで EUREKA-2 で使用されてきた熱伝達相関式および限界熱流束相関式は、主として高温高圧の軽水型発電用原子炉を対象としており、常温常圧の研究用原子炉に適用するには不向きであること、また、限界熱流束を実際より大きく計算することなど問題があった。そこで、この熱伝達相関式、限界熱流束相関式および相関式選択論理等をプログラムしたサブルーチン群（以下、「熱伝達パッケージ」という）を、板状燃料を使用する研究炉の熱水力解析用に開発された研究炉用熱伝達パッケージに変更した。以下に、その概要を述べる。

3.3.1 熱伝達パッケージの構成

EUREKA-2 の熱伝達パッケージおよび研究炉用熱伝達パッケージの構成は、次の通りである。

(1) EUREKA-2 熱伝達パッケージの構成

EUREKA-2 の熱伝達パッケージは、HTS2, PCHF, QDOTN, TWFIND, TWQW の5つのサブルーチンより構成されており、各サブルーチンの機能は以下のとおりである。

- HTS2 : LIENDENFROST 温度および限界熱流束温度を求め、また、熱伝達相関式を定める。
- PCHF : 限界熱流束を求める。
- QDOTN : 熱伝達係数を計算する。
- TWFIND : 壁温を求める。
- TWQW : 熱伝達係数、壁温等を求めるために必要な物性値を準備する。

また、パッケージの構造を図 3.4 に示す。

(2) 研究炉用熱伝達パッケージの構成

研究炉用熱伝達パッケージは 11 のサブルーチンより構成されており、各サブルーチンの機能は以下のとおりである。

- YY HFLX : 熱伝達相関式を選択する。
- YY HFC : Dittus - Boelter 相関式
- YY CHEN : ONB 温度, DNB 温度および限界熱流束を計算する。
- CHEN : Chen の相関式
- CHF : DNB 温度を求めるために反復計算する。
- YY ONB : Bergles - Rohsenow の相関式
- YY PSTD : DNB 後の熱伝達相関式
- YY COL2 : Colier の相関式
- YY ROH2 : Rohsenow の相関式
- MSTRCT : 金属の物性値の計算
- POLY : MSTRCT で用いる内挿ルーチン

また、パッケージの構造を図 3.5 に示す。

使われている熱伝達相関式、限界熱流束計算式は、表 3.2 ~ 3.3 に示すとおりである。

3.3.2 研究炉用熱伝達パッケージの組み込み

3.3.1 に示したように EUREKA-2 熱伝達パッケージと研究炉用熱伝達パッケージとは構成に差があるため、研究炉用熱伝達パッケージをそのまま EUREKA-2 に組み込むのは不可能である。そこで、以下の変更を行ない、研究炉用熱伝達パッケージを組み込んだ。

- (1) サブルーチン HTS2 を大幅に改造し、EUREKA-2 と研究炉用熱伝達パッケージとのインターフェイスとした。すなわち、このサブルーチンで研究炉用熱伝達パッケージで必要となる変数の受け渡しおよび英国単位系、MKH 単位系の変換を行なっている。
- (2) サブルーチン PCHF 中の限界熱流束計算式を研究炉用熱伝達パッケージで使用している限界熱流束計算式と入れ替えた。
- (3) 熱伝達係数を計算するサブルーチン QDOTN は、研究炉用熱伝達パッケージ中で熱伝達係数を計算するため廃止した。
- (4) Newton-Raphson の繰り返し法により壁温を計算するサブルーチン TWFIND は、研究炉用熱伝達パッケージ中で同じ Newton-Raphson の繰り返し法で壁温を求めているため廃止した。
- (5) 研究炉用熱伝達パッケージで必要とする変数のうち、EUREKA-2 では使われていない変数は、以下のように入力等で与えることとした。
 - ① 限界熱流束の計算に必要な流路巾は、入力で与えることとした。入力方法については付録 E で述べる。
 - ② ヒート・スラブの接しているボリューム入口でのサブクール・エンタルピーは、新しくサブルーチン HSUBCL を追加し、計算させることとした。

この結果、組み込んだ新しい熱伝達パッケージの構造を図 3.6 に示す。

表 3.1 遅発中性子データ

群	崩壊定数	遅発中性子相対比率	
Group No. i	Decay constant λ_i (sec ⁻¹)	Relative value μ_i	Renormalized value μ_i^*
1	3.01	0.0364	3.642225×10^{-2}
2	1.14	0.0997	9.976094×10^{-2}
3	0.301	0.3410	3.412084×10^{-1}
4	0.111	0.1685	1.686030×10^{-1}
5	0.0305	0.1885	1.886152×10^{-1}
6	0.0124	0.0283	2.831730×10^{-2}
7	0.277	0.0885	8.855410×10^{-2}
8	0.0169	0.0278	2.781699×10^{-2}
9	0.00481	0.0095	9.505807×10^{-3}
10	0.00150	0.00458	4.582800×10^{-3}
11	0.000428	0.00280	2.801712×10^{-3}
12	0.000117	0.00317	3.171938×10^{-3}
13	0.0000437	0.000442	4.422702×10^{-4}
14	0.00000363	0.000140	1.400856×10^{-4}
15	0.000000626	0.0000571	5.713490×10^{-5}
合 計		0.9993891	1.0

注) 遅発中性子相対比率をコードに内蔵するにあたっては、文献値 μ_i を厳密に規格化した μ_i^* を用いた。

表 3.2 研究炉用熱伝達パッケージ熱伝達相関式

		下向流 (G < 0)	上昇流 (G > 0)
液単相流	Re < 2000	(a)式	Max [(a)式, (c)式]
	2000 ≤ Re < 2500	(a)式と(b)式で内挿	(c)式と(b)式で内挿
	Re ≥ 2500	Dittus - Boelter(b)式	Dittus - Boelter(b)式
核沸騰	沸騰開始点	Bergles - Rohsenow (d)式	Bergles - Rohsenow (d)式
	サブクール	修正 Chen (e)式	修正 Chen (e)式
	飽和	Chen (g)式	Chen (g)式
遷移沸騰		Bjornard & Griffith (j)式	Bjornard & Griffith (j)式
最小安定膜沸騰温度		Henry (k)式	Henry (k)式
膜沸騰		修正 Bromley (l)式	修正 Bromley (l)式
蒸気単相流	Re < 2000	(a)式	Max [(a)式, (c)式]
	2000 ≤ Re < 2500	(a)式と(b)式で内挿	(c)式と(b)式で内挿
	Re ≥ 2500	Dittus - Boelter(b)式	Dittus - Boelter (b)式

I. 液単相流の熱伝達

① 下向流 (G < 0)

$$Re < 2000 \text{ で, } Nu \equiv \frac{hD}{k} = 4.0 \quad (a)$$

$$Re \geq 2500 \text{ で, } Nu = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} \quad (b)$$

2000 ≤ Re < 2500 で, (a)式と(b)式で内挿。

② 上昇流 (G > 0)

$$Re < 2000 \text{ で, } Nu = 0.17 Re_f^{0.33} Pr_f^{0.43} \left\{ \frac{(Pr_1)_f}{(Pr_1)_w} \right\}^{0.25} \left\{ \frac{g \beta D_e^3 (T_w - T_1)}{\nu^2} \right\}_f^{0.1} \quad (c)$$

と, (a)式の大きい値を選ぶ。

Re ≥ 2500 で, (b)式

2000 ≤ Re < 2500 で, (c)式と(b)式で内挿。

II. 核沸騰熱伝達

① 沸騰開始点の表面温度 T_{ONB}

$$q = 911 P^{1.156} \left\{ \frac{9}{5} (T_{ONB} - T_s) \right\} \frac{2.1615}{P^{0.0234}} \quad (d)$$

表 3.2 (続き)

② サブクール核沸騰熱伝達

$$q = 0.023 \text{Re}_b^{0.8} \text{Pr}_b^{0.4} \frac{k}{D_c} (T_w - T_l) + S \cdot 6.81 \frac{k_f^{0.79} C_{pf}^{0.45} \gamma_f^{0.49} (T_w - T_s)^{1.24} (P_w - P)^{0.75}}{\sigma^{0.5} \mu_f^{0.29} h_{fg}^{0.24} \gamma_g^{0.24}} \quad (e)$$

ここで, $\text{Re}' \equiv \frac{GD_e}{\mu_{f,g}} \times 10^{-4}$

$$S = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{1+0.12 \text{Re}'^{1.14}} & \text{Re}' < 32.5 \\ \frac{1}{1+0.4 \text{Re}'^{0.78}} & 32.5 < \text{Re}' < 70.0 \\ 0.1 & 70.0 < \text{Re}' \end{array} \right. \quad (f)$$

③ 飽和核沸騰熱伝達

$$q = F \cdot 0.023 \{ \text{Re}_f (1-x) \}^{0.8} \text{Pr}_f^{0.4} \frac{k_f}{D_e} (T_w - T_s) + S \cdot 6.81 \frac{k_f^{0.79} C_{pf}^{0.45} \gamma_f^{0.49} (T_w - T_s)^{1.24} (P_w - P)^{0.75}}{\sigma^{0.5} \mu_f^{0.29} h_{fg}^{0.24} \gamma_g^{0.24}} \quad (g)$$

ここで,

$$\frac{1}{x_{tt}} \equiv \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left(\frac{\gamma_f}{\gamma_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1}$$

$$F = \left\{ \begin{array}{ll} 1.0 & \frac{1}{x_{tt}} \leq 0.1 \\ 2.35 \left(\frac{1}{x_{tt}} + 0.213 \right)^{0.736} & \frac{1}{x_{tt}} > 0.1 \end{array} \right. \quad (h)$$

$$\text{Re}' \equiv \frac{G(1-x) D_e}{\mu_{f,g}} F^{1.25} \times 10^{-4}$$

$$S = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{1+0.12 \text{Re}'^{1.14}} & \text{Re}' < 32.5 \\ \frac{1}{1+0.42 \text{Re}'^{0.78}} & 32.5 < \text{Re}' < 70.0 \\ 0.1 & 70.0 < \text{Re}' \end{array} \right. \quad (i)$$

表 3.2 (続き)

Ⅲ. Post - DNB 熱伝達

① 遷移沸騰熱伝達

$$q = \delta q_{\text{DNB}} + (1 - \delta) q_{\text{MSFB}} \quad (\text{j})$$

$$\text{ここで, } \delta \equiv \left(\frac{T_{\text{W}} - T_{\text{MSFB}}}{T_{\text{DNB}} - T_{\text{MSFB}}} \right)^2$$

② 最小安定膜沸騰温度

$$T_{\text{MSFB}} = T_{\text{HN}} + (T_{\text{HN}} - T_{\text{I}}) \sqrt{\frac{(\gamma k C_p)_{\text{I}}}{(\gamma k C_p)_{\text{W}}}} \quad (\text{k})$$

ここで, $T_{\text{HN}} = 324^\circ\text{C}$ とする。

③ 膜沸騰熱伝達

$$q = 0.62 \left[\frac{3600 \text{ k}_g^3 \gamma_g (\gamma_{\text{I}} - \gamma_g) h_{\text{fg}}' (1 - \alpha)}{\mu_g \lambda_c (T_{\text{W}} - T_{\text{S}})} \right]^{1/4} (T_{\text{W}} - T_{\text{S}}) \quad (\text{l})$$

$$\text{ここで, } h_{\text{fg}}' = h_{\text{fg}} \left\{ 1 + 0.5 \frac{C_{\text{pg}} (T_{\text{W}} - T_{\text{S}})}{h_{\text{fg}}} \right\}$$

$$\lambda_c = 2 \pi \left(\frac{\sigma}{\gamma_{\text{I}} - \gamma_g} \right)^{1/2}$$

④ 蒸気单相流熱伝達

I. 液单相流の熱伝達と同じ。

表 3.3 研究炉用熱伝達パッケージ限界熱流束計算式

DNB熱流束

① 下向流 ($G < 0$)

$$q^* = 0.005 G^{*0.611} \tag{a}$$

$$q^* = \left(\frac{A}{A_H} \right) \frac{\Delta h_i}{h_{fg}} G^* \tag{b}$$

上式の2式の値 q^* の内、小さい方の値をとる。上式から選んだ値が下記の値より小さい時は下記の式の値をとる。

$$q^* = 0.7 \left(\frac{A}{A_H} \right) \left\{ w / \left(\frac{\sigma}{\gamma_1} \right)^{1/2} \right\}^{1/2} / \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_1} \right)^{1/4} \right\}^2 \tag{c}$$

② 上昇流 ($G > 0$)

(a)式と(c)式の内、大きい方の値をとる。

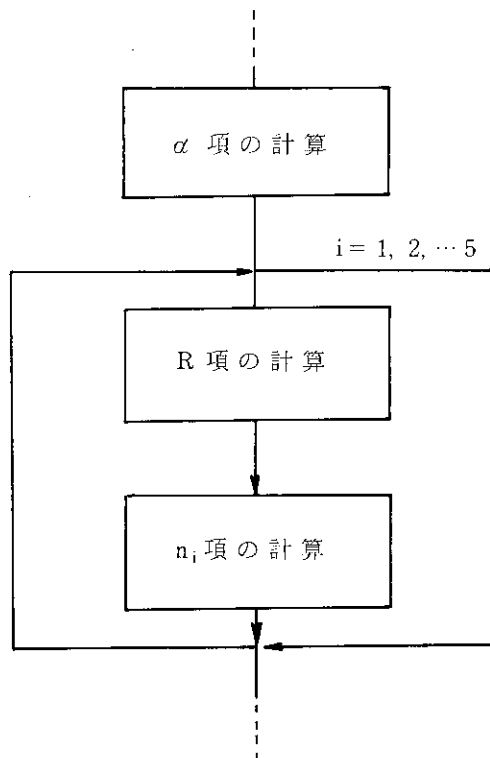


図 3.1 計算概念図

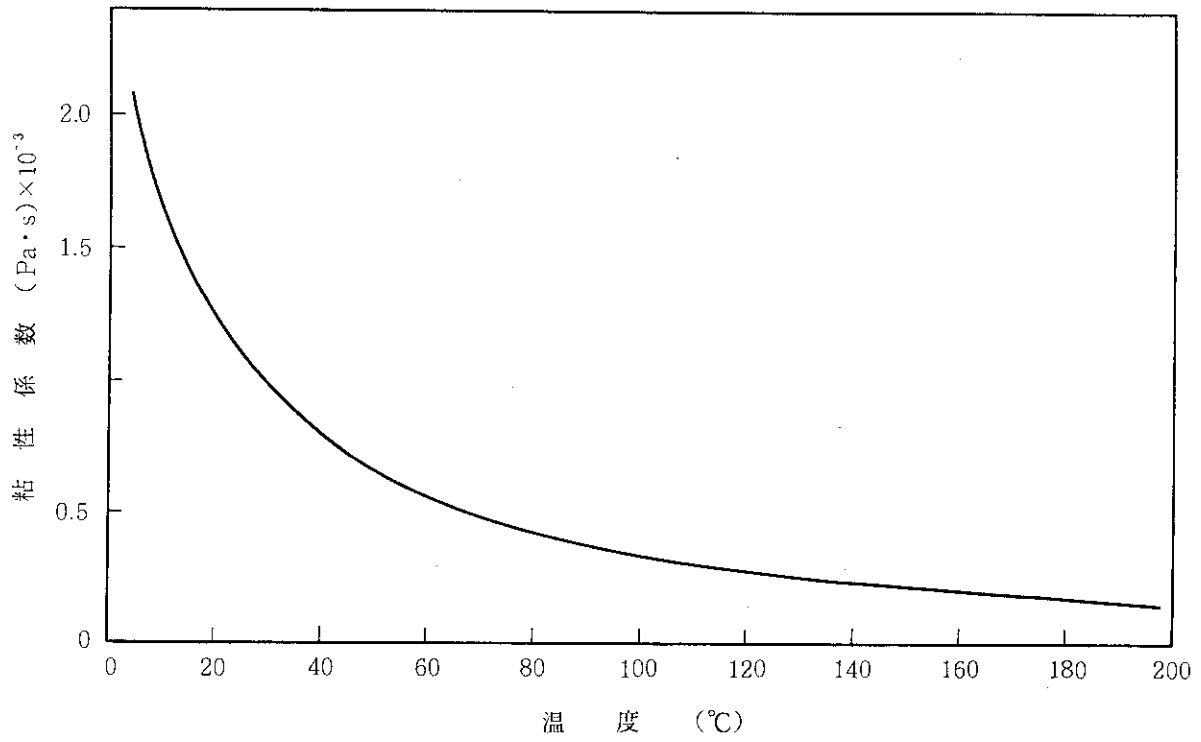


图 3.2 粘性係数 - 温度曲线

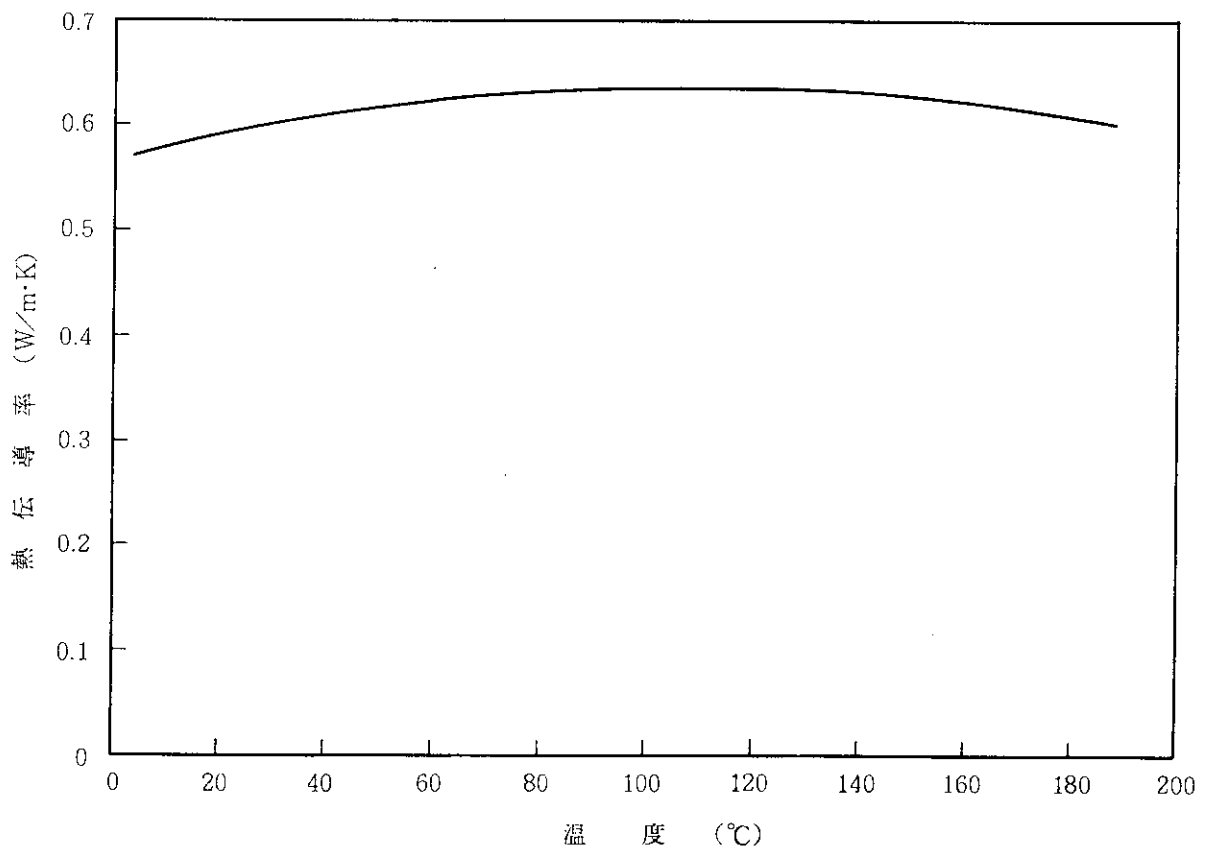


图 3.3 熱伝導率 - 温度曲线

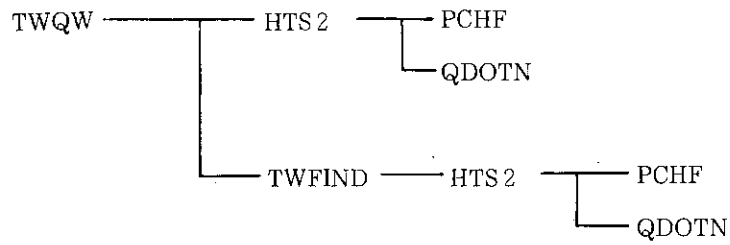


図 3.4 EUREKA-2 熱伝達パッケージの構造

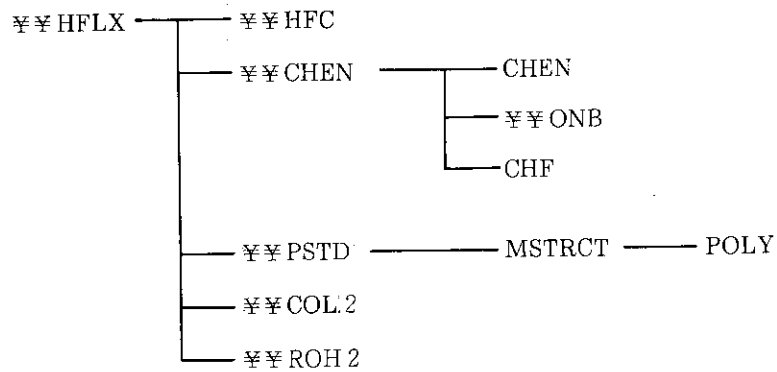


図 3.5 研究炉用熱伝達パッケージの構造

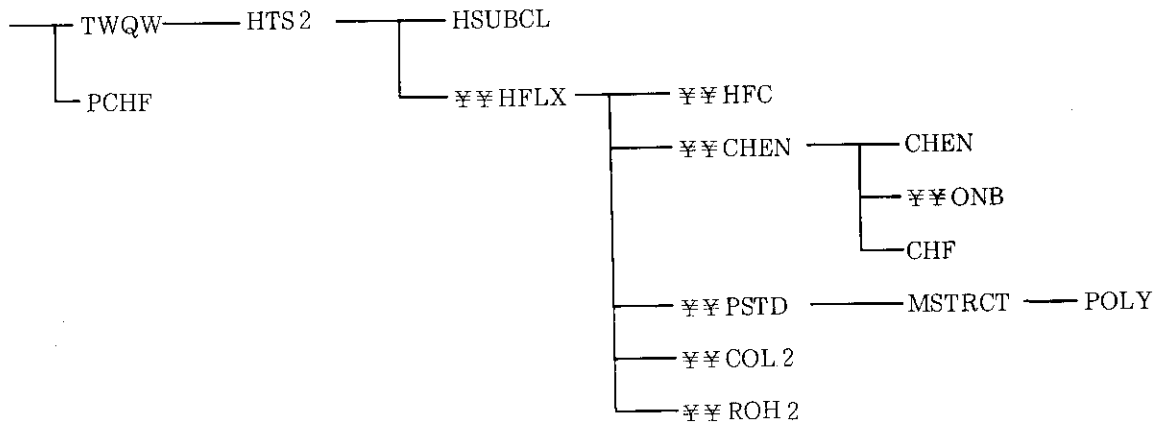


図 3.6 EUREKA-2D の熱伝達パッケージの構造

4. 反応度投入事象の解析例

EUREKA-2 Dコードを用いて研究用原子炉である JRR-2 の安全評価のために行った反応度投入事象の解析を例として以下に示す。

JRR-2 は、重水減速・冷却型で板状燃料を用いた熱出力 10 MW の研究炉である。炉心は 24 体の燃料要素と 6 本の制御棒で構成されている。

JRR-2 の炉心配置を図 4.1 に、一次冷却系統を図 4.2 に示す。また、燃料要素を図 4.3 に、燃料要素の諸元を表 4.1 に示す。

燃料要素は、燃料板 15 枚が円周方向に 3 枚づつ、同心円状に 5 層に配置されている。冷却材は燃料板の間を下から上に向かって流れる。

4.1 計算モデルと入力データ

(1) 計算モデル

図 4.4 に計算に用いたチャンネル分割を示す。出力密度に応じて炉心燃料領域を 4 チャンネルに分割したモデルとする。第 1 チャンネルはホットチャンネルであり、熱的に最も厳しい燃料板とその流路は、炉心位置 2 A にある燃料要素の最も外側の燃料板とその両側の流路である。第 2 ～第 4 チャンネルは平均チャンネルとする。

図 4.5 にヒートスラブ（燃料）およびノード（冷却材）分割を示す。各チャンネル内のヒートスラブおよびノードは軸方向に 10 分割した。

(2) 入力データ

表 4.2 ～ 4.7 に計算に用いた入力データであるスクラム反応度、スクラム設定値およびスクラム時間、熱水路係数、フィードバック反応度、出力分布、フィードバック反応度重み関数、物性値を示す。

なおこれらの入力データは結果が最も厳しくなるように選定した。

4.2 計算結果

反応度投入事象のうち起動時における制御棒の異常な引抜き事象について行なった計算例について以下に示す。

本事象の反応度付加率は、同時に引抜き可能な全制御棒が炉心から連続的に引抜かれるものとして $0.1\% \Delta k/k/sec$ を想定した。表 4.8 に本事象における原子炉の初期条件を示す。このうち、いくつかの条件については運転条件や炉心条件の不確定性も考慮してパラメトリックな解析を行なった。

図 4.6 ～ 4.9 にホットチャンネルの計算結果を示す。

表 4.1 燃料要素の諸元

外形 (mm)	約φ 103×約 950	
U-235濃縮度 (wt%)	約 45	
U-235含有量 (g/要素)	約 220	
ウラン密度 (g/cm ³)	約 1.6	
芯材	厚さ (mm)	約 0.51
	幅 (mm)	約 49
		約 58
		約 67
		約 76
長さ (mm)	約 600	
被覆材	厚さ (mm)	約 0.38
燃料板	厚さ (mm)	約 1.27
	幅 (mm)	約 58
		約 67
		約 76
		約 85
長さ (mm)	約 625	
冷却水流路数	6	
冷却水流路ギャップ (mm)	約 2.59×1 約 3.00×5	
燃料芯材	ウラン・アルミニウム分散型合金 (UAlx-Al)	
被覆材	アルミニウム合金 AG 3 NE 又は相当品	
構造材	アルミニウム合金 AG 3 NE 又は相当品	

表 4.2 スクラム反応度

制御棒位置 引抜率 (-)	y (m)	落下時間 t (sec)	反応度	
			相対値 (-)	ρ (ΔK/K)
1.0	0.711	0.0	0.0	0.0
0.9	0.6399	0.174	0.006	0.00022
0.8	0.5688	0.246	0.022	0.00081
0.7	0.4977	0.301	0.056	0.00207
0.6	0.4266	0.348	0.112	0.00414
0.5	0.3555	0.389	0.192	0.00710
0.4	0.2844	0.426	0.300	0.01110
0.3	0.2133	0.460	0.440	0.01628
0.2	0.1422	0.492	0.625	0.02313
0.1	0.0711	0.522	0.825	0.03053
0.0	0.0	0.550	1.0	0.03700

表 4.3 スクラム設定値及びスクラム時間

スクラム 信号	スクラム 設定値	スクラム時間 (sec)	
		スクラム 遅れ時間	落下時間
中性子束超過 (低設定)	440 KW	0.05	0.55
(高設定)	11 MW	0.05	0.55

表 4.4 熱水路係数

核的熱水路係数 (F_N)	
($= F_R \cdot F_L \cdot F_Z$)	2.35
半径方向出力分布因子 (F_R) × 局部的出力分布因子 (F_L)	1.91
軸方向出力分布因子 (F_Z)	1.23
工学的熱水路係数	
冷却水バルク温度上昇因子 (F_b)	1.21
フィルム温度上昇因子 (F_f)	1.37

表 4.5 フィードバック反応度係数

ドップラーフィードバック反応度		減速材温度フィードバック反応度	
温度 °C	反応度 $\Delta K/K$	温度 °C	反応度 $\Delta K/K$
10.0	0.000131	10.0	0.002912
26.85	0.0	26.85	0.0
126.85	- 0.000738	40.0	- 0.003179
226.85	- 0.001372	51.85	- 0.006726
326.85	- 0.001928	76.85	- 0.016324
400.0	- 0.002272	95.0	- 0.025093

ボイドフィードバック反応度

ボイド率 -	反応度 $\Delta K/K$
0.0	0.0
0.02	- 0.001268
0.04	- 0.002557
0.06	- 0.003824

表 4.6 出力分布およびフィードバック反応度重み関数

出力分布

Core Top

	チャンネル1	チャンネル2	チャンネル3	チャンネル4
1	5.6815562693D-04	1.8482697682D-02	1.3254439505D-02	2.4845850162D-02
2	5.9821677121D-04	1.9461671978D-02	1.3981392236D-02	2.6399338189D-02
3	7.2747969162D-04	2.3661303194D-02	1.7536489834D-02	3.2035711412D-02
4	9.2137407224D-04	2.9905979607D-02	2.3342153419D-02	4.0559979043D-02
5	1.0566492215D-03	3.4341238709D-02	2.7415080360D-02	4.7391343055D-02
6	1.1378143111D-03	3.7024302335D-02	2.9984310557D-02	5.2370471344D-02
7	1.1618632265D-03	3.7907064338D-02	3.1029927497D-02	5.4730578153D-02
8	1.1363112539D-03	3.7144643982D-02	3.0571847695D-02	5.4212748811D-02
9	1.0837042514D-03	3.5481230247D-02	2.9277274340D-02	5.1842683746D-02
10	1.0852073086D-03	3.5589928501D-02	2.9376856905D-02	5.1364687430D-02

Core Down

ドップラー効果に対する重み関数

Core Top

	チャンネル1	チャンネル2	チャンネル3	チャンネル4
1	1.6950611936D-04	1.0514229223D-02	5.2105482199D-03	6.1306043741D-03
2	2.9823208139D-04	1.8464789489D-02	9.3864707646D-03	1.0872154554D-02
3	4.6956238473D-04	2.9102464004D-02	1.5650534581D-02	1.7817625522D-02
4	6.8156031458D-04	4.2351209808D-02	2.4789496380D-02	2.7941083206D-02
5	8.8009261921D-04	5.4829774514D-02	3.3452260170D-02	3.7874741684D-02
6	1.0143596670D-03	6.3388971127D-02	3.9733133916D-02	4.5837008401D-02
7	1.0486942615D-03	6.5739226565D-02	4.1889524902D-02	4.8980595261D-02
8	9.6770590799D-04	6.0831935770D-02	3.9132236427D-02	4.6110607258D-02
9	7.7896716992D-04	4.9097724346D-02	3.1741367321D-02	3.7552443031D-02
10	5.1577955794D-04	3.2654371791D-02	2.1122911706D-02	2.4975495602D-02

Core Down

ボイドおよび冷却材温度効果に対する重み関数

Core Top

	チャンネル1	チャンネル2	チャンネル3	チャンネル4
1	1.8413865155D-04	1.1467531500D-02	5.9406796829D-03	8.9337694465D-03
2	2.4801390649D-04	1.5386802622D-02	8.0827823569D-03	1.2160658411D-02
3	3.7900666050D-04	2.3472781766D-02	1.3129255098D-02	1.8740035909D-02
4	5.8442211598D-04	3.6167922191D-02	2.2346723574D-02	2.9853197902D-02
5	7.6803872561D-04	4.7604725840D-02	3.0672795099D-02	4.0720360736D-02
6	8.9104178464D-04	5.5391865728D-02	3.6659174626D-02	4.9555430520D-02
7	9.2934460064D-04	5.7970453962D-02	3.9054466434D-02	5.3698416351D-02
8	8.7854493038D-04	5.4994863983D-02	3.7432471981D-02	5.1947422340D-02
9	7.6299175637D-04	4.7951921639D-02	3.2797887831D-02	4.5555644200D-02
10	6.3908929611D-04	4.0410850313D-02	2.7669805369D-02	3.7964670161D-02

Core Down

表 4.7 物 性 値

密 度

芯 材 密 度 (kg/m ³)
3.95 × 10 ³

被 覆 材 密 度 (kg/m ³)
2.69 × 10 ³

熱伝導度

芯材熱伝導度 (kcal/mhr °C)
78.97

被覆材熱伝導度 (kcal/mhr °C)
118.8

線膨張係数

温 度 (°C)	芯材線膨張係数 (1/°C)
19.85	15.0 × 10 ⁻⁶
126.85	15.3
226.85	15.5
326.85	15.8
426.85	16.1
526.85	16.3

温 度 (°C)	被覆材線膨張係数 (1/°C)
19.85	23.1 × 10 ⁻⁶
126.85	25.1
226.85	26.4
326.85	28.4
426.85	30.9
526.85	34.0

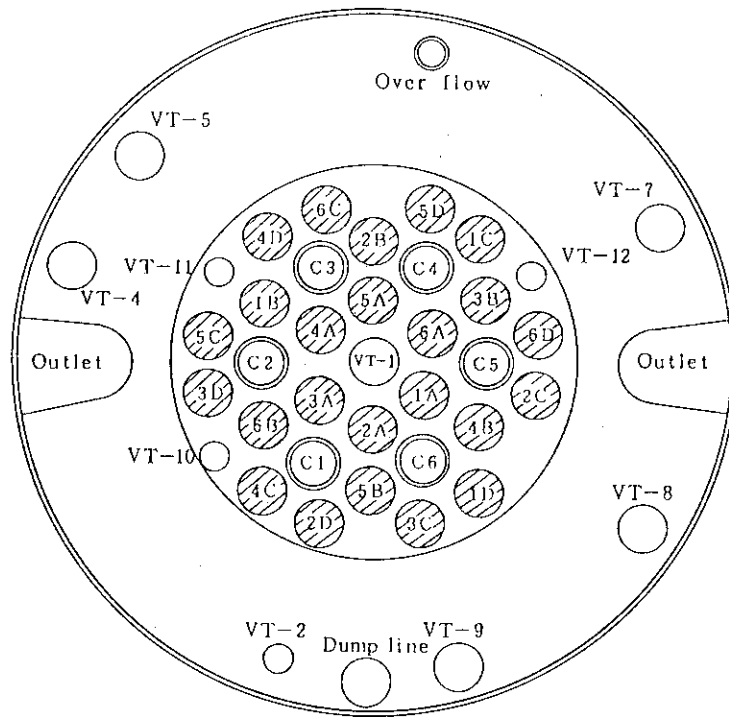
比 熱

温 度 (°C)	芯材比熱 (kcal/m ³ °C)
10	526.0
50	533.1
100	542.0
150	551.0
200	559.9
250	568.9
300	577.8
400	595.7
600	631.4

温 度 (°C)	被覆材比熱 (kcal/m ³ °C)
10	576.0
50	587.8
100	602.5
150	617.3
200	632.1
250	646.9
300	661.6
400	691.2
600	750.3

表 4.8 原子炉の初期条件 (ベースケース)

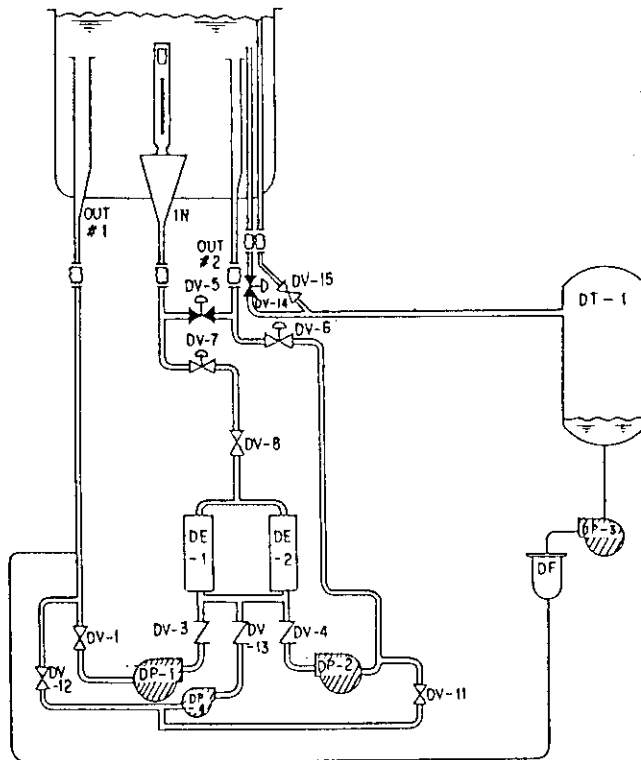
出力 (MW)	冷却材 流量 (m ³ /Hr)	燃料芯材 最高温度 (°C)	燃料板表面 最高温度 (°C)	冷却材 最高温度 (°C)
10 ⁻⁷	45	50.0	50.0	50.0



記号	説明
1A~6A	燃料 (Aリング)
1B~6B	燃料 (Bリング)
1C~6C	燃料 (C-Dリング)
1D~6D	燃料 (C-Dリング)
C1~C6	制御棒
VT-1~VT-12	垂直実験孔

図 4.1 JRR-2 の炉心配置

- 凡例
記号
- 伸縮管継手
 - ∩ 逆止弁
 - ⊗ 空気作動弁
 - ⊗ 電動弁
 - ⊗ 手動弁
- 作動状態
- ◀ 弁閉状態
 - ◐ ポンプ運転状態



ポンプ等の記号の説明

DP-1	主重水ポンプ # 1
DP-2	主重水ポンプ # 2
DP-3	重水補助ポンプ
DP-4	非常用重水ポンプ
DT-1	重水貯蔵タンク
DE-1	主重水熱交換器 # 1
DE-2	主重水熱交換器 # 2

図 4.2 JRR-2 一次冷却系統図

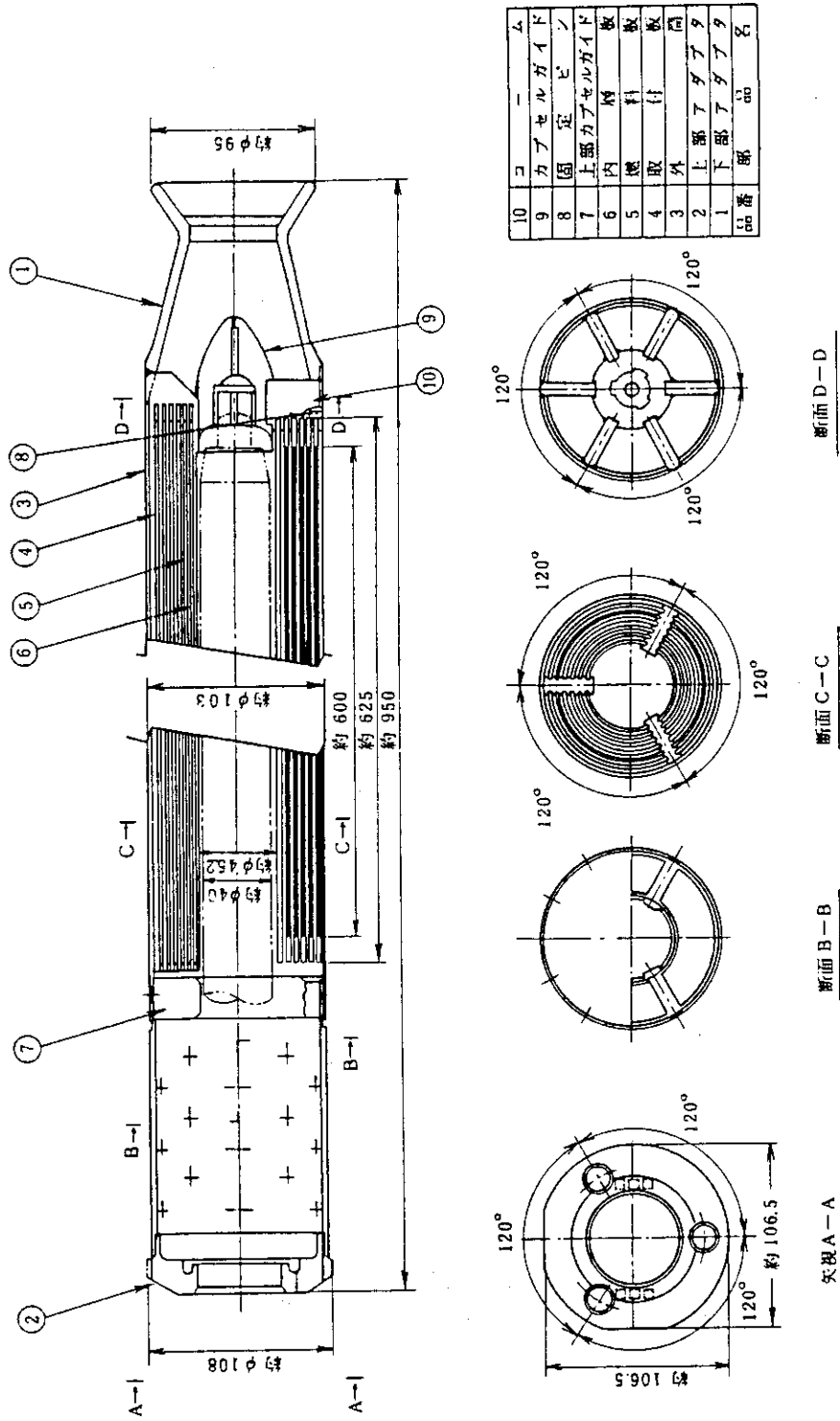


図 4.3 JRR-2 の燃料要素

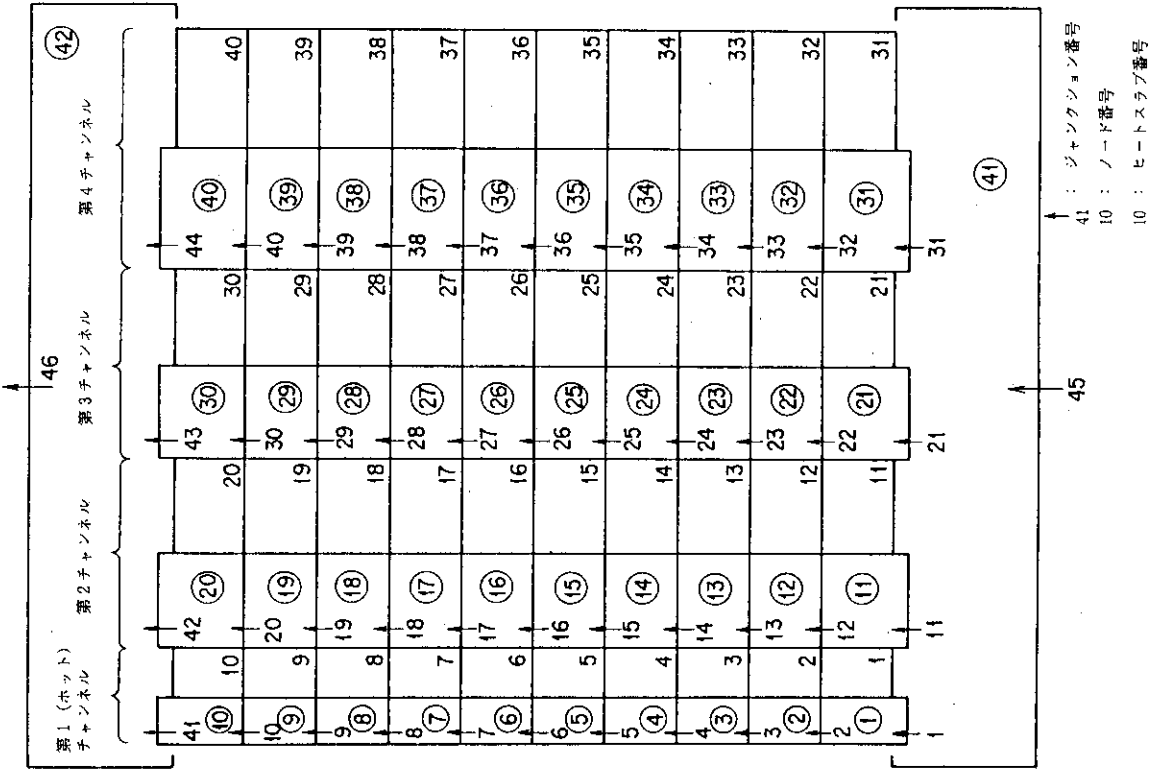


図 4.5 ヒートスラブおよびノード分割

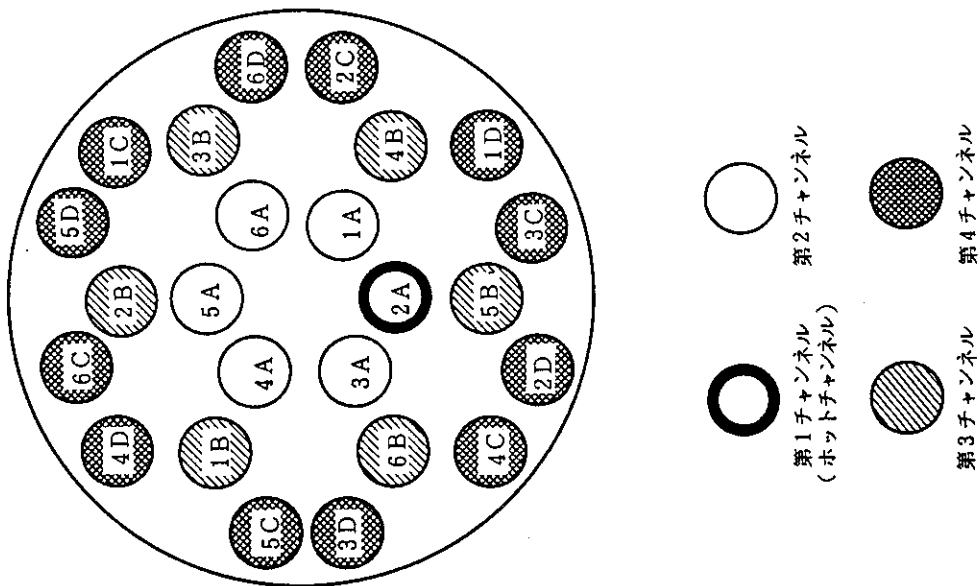


図 4.4 チャンネル分割

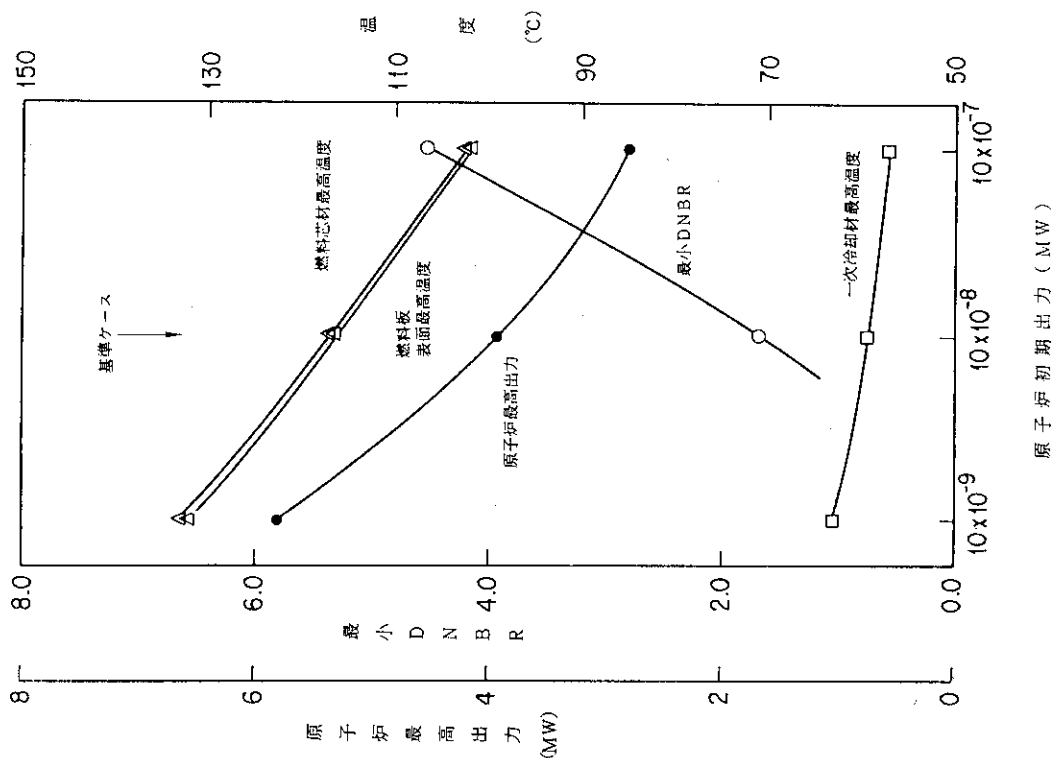


図 4.7 「起動時における制御棒の異常な引抜き」のパラメータスタディ(原子炉初期出力の影響)

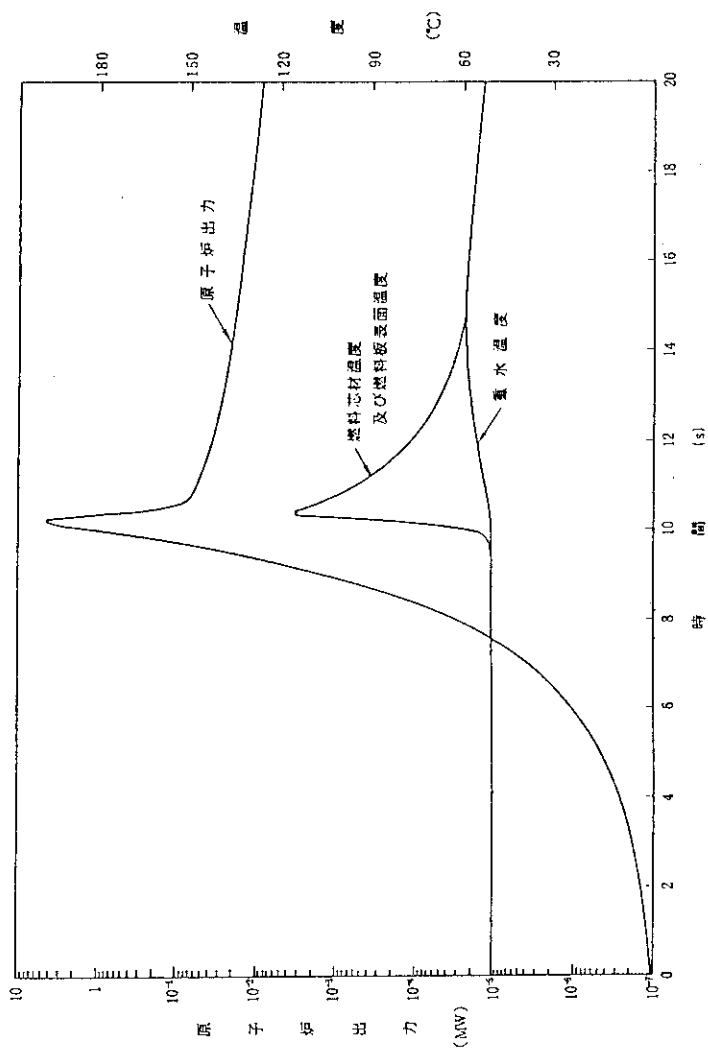
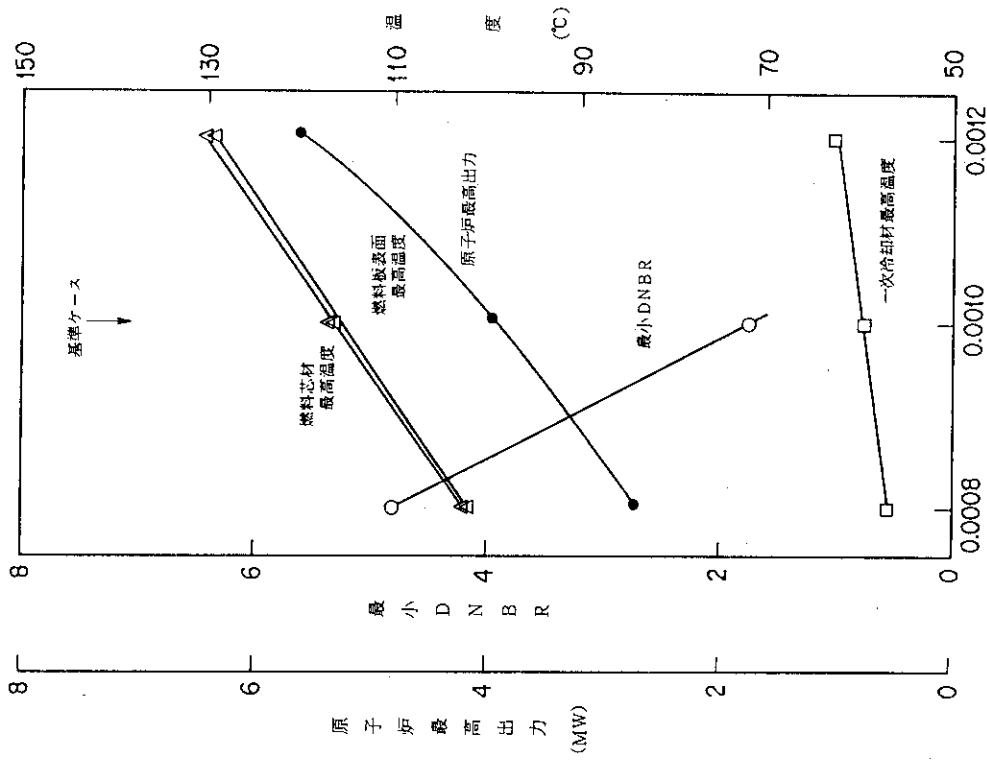
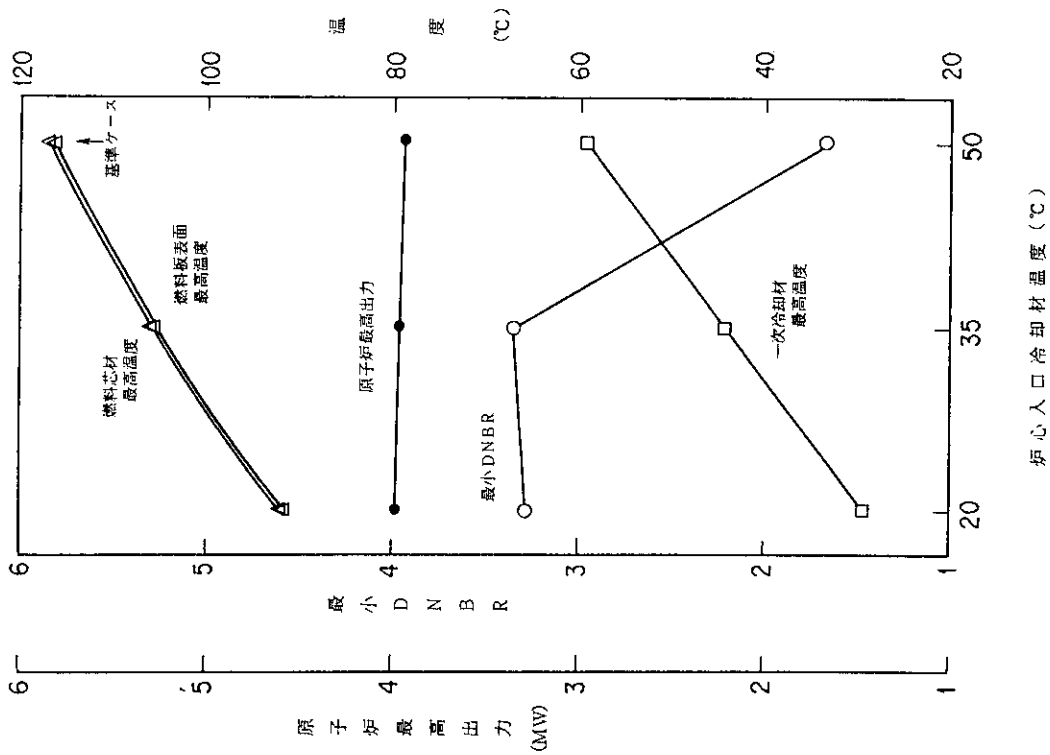


図 4.6 起動時における制御棒の異常な引抜きの過渡変化(ベースケース)



反応度付加率 (ΔK/K/S)

図 4.9 「起動時における制御棒の異常な引抜き」のパラメータスタスディ(反応度付加率の影響)



炉心入口冷却材温度 (°C)

図 4.8 「起動時における制御棒の異常な引抜き」のパラメータスタスディ(炉心入口冷却材温度の影響)

5. 結 言

軽水炉用に開発された多領域核熱水力結合動特性解析コードを常温・常圧の重水減速・重水冷却型研究用原子炉の反応度投入事象解析に使用できるように改造した。

改造したコードを研究用重水炉である JRR-2 の中濃縮ウラン燃料炉心の反応度投入事象に関する安全評価解析に適用することによってその有効性を確認した。

謝 辞

本報告書をまとめるに当って、角田準作 JRR-2 管理課長をはじめ JRR-2 管理課の各位には多大の御協力を載しました。また、研究炉管理部白井英次次長には貴重な御助言を載しました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Ishikawa, et al., "EUREKA-A Computer Code for Uranium-Oxide Fueled, Water Cooled Reactor Kinetic Analysis", JAERI 1235 (Sep. 1974).
- 2) 大西信秋 他 "軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2", JAERI-M 84-074, 1984年5月
- 3) 数土幸夫 他 "JRR-3 改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討", JAERI-M 84-066, 1984年3月
- 4) JAERI 1025; 「JRR-2 の臨界実験と特性測定」, P 12
- 5) R.J. Wagner, IDO-17114 (1966).
- 6) 日本機械学会「1980 SI 蒸気表」
- 7) P.G. Hill, R.D. Macmillan and Victor Lee, "Tables of thermodynamic Properties of heavy water in S.I. unit", AECL 7531, December 1981.
- 8) 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第4版」

5. 結 言

軽水炉用に開発された多領域核熱水力結合動特性解析コードを常温・常圧の重水減速・重水冷却型研究用原子炉の反応度投入事象解析に使用できるように改造した。

改造したコードを研究用重水炉である JRR-2 の中濃縮ウラン燃料炉心の反応度投入事象に関する安全評価解析に適用することによってその有効性を確認した。

謝 辞

本報告書をまとめるに当って、角田準作 JRR-2 管理課長をはじめ JRR-2 管理課の各位には多大の御協力を載しました。また、研究炉管理部白井英次次長には貴重な御助言を載しました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Ishikawa, et al., "EUREKA-A Computer Code for Uranium-Oxide Fueled, Water Cooled Reactor Kinetic Analysis", JAERI 1235 (Sep. 1974).
- 2) 大西信秋 他 "軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2", JAERI-M 84-074, 1984年5月
- 3) 数土幸夫 他 "JRR-3 改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討", JAERI-M 84-066, 1984年3月
- 4) JAERI 1025; 「JRR-2 の臨界実験と特性測定」, P 12
- 5) R.J. Wagner, IDO-17114 (1966).
- 6) 日本機械学会「1980 SI 蒸気表」
- 7) P.G. Hill, R.D. Macmillan and Victor Lee, "Tables of thermodynamic Properties of heavy water in S.I. unit", AECL 7531, December 1981.
- 8) 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第4版」

5. 結 言

軽水炉用に開発された多領域核熱水力結合動特性解析コードを常温・常圧の重水減速・重水冷却型研究用原子炉の反応度投入事象解析に使用できるように改造した。

改造したコードを研究用重水炉である JRR-2 の中濃縮ウラン燃料炉心の反応度投入事象に関する安全評価解析に適用することによってその有効性を確認した。

謝 辞

本報告書をまとめるに当って、角田準作 JRR-2 管理課長をはじめ JRR-2 管理課の各位には多大の御協力を載しました。また、研究炉管理部白井英次次長には貴重な御助言を載しました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) M. Ishikawa, et al., "EUREKA-A Computer Code for Uranium-Oxide Fueled, Water Cooled Reactor Kinetic Analysis", JAERI 1235 (Sep. 1974).
- 2) 大西信秋 他 "軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2", JAERI-M 84-074, 1984年5月
- 3) 数土幸夫 他 "JRR-3 改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討", JAERI-M 84-066, 1984年3月
- 4) JAERI 1025; 「JRR-2 の臨界実験と特性測定」, P 12
- 5) R.J. Wagner, IDO-17114 (1966).
- 6) 日本機械学会「1980 SI 蒸気表」
- 7) P.G. Hill, R.D. Macmillan and Victor Lee, "Tables of thermodynamic Properties of heavy water in S.I. unit", AECL 7531, December 1981.
- 8) 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第4版」

付録A 重水ヘルムホルツ自由エネルギー式

重水のヘルムホルツ自由エネルギーの式を以下に示す。

$$\phi = \phi_0(T) + RT[\ln \rho + \rho Q(\rho, T)]$$

ここで、

ρ : 密度

T : 熱力学的温度

R : ガス定数

$$Q = (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \\ \times \left[\sum_{i=1}^8 A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-1} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} \right]$$

$$\phi_0(T) = \sum_{i=1}^6 C_i \left(\frac{T}{1000} \right)^{i-1} + C_7 \ln T + \frac{C_8 T \ln T}{1000}$$

$$\tau = 1000/T$$

$$\tau_c = 1$$

$$E = 4.3$$

$$\tau_{aj} = 1.553 \quad (j=1)$$

$$\rho_{aj} = 0.7 \quad (j=1)$$

$$\tau_{aj} = 2.53 \quad (j>1)$$

$$\rho_{aj} = 1.1 \quad (j>1)$$

$$C_1 = 1866.73$$

$$C_2 = 4661.9$$

$$C_3 = 64.605$$

$$C_4 = -284.8833$$

$$C_5 = 100.1333$$

$$C_6 = -13.135$$

$$C_7 = 0.32684$$

$$C_8 = -1211.253$$

また、係数 A_{ij} については、表A.1に示す。

表A.1 係数 A_{ij}

i	j	A_{ij}	i	j	A_{ij}
1	1	73.13848592	1	5	-6.73408249
2	1	-285.20415917	2	5	24.03602093
3	1	535.71659288	3	5	-41.08079830
4	1	-649.81000614	4	5	45.39111005
5	1	574.63280680	9	5	139.21659329
6	1	-387.92157774	10	5	566.02305152
7	1	206.34569512	1	6	-5.24802962
8	1	-79.89428513	2	6	18.52690633
9	1	-996.36169097	3	6	-31.42397369
10	1	-766.27290006	4	6	26.43208802
1	2	24.74108348	9	6	96.31411481
2	2	-105.57317181	10	6	453.20280933
3	2	200.87302906	1	7	-1.17583447
4	2	-235.18776440	2	7	4.13816432
5	2	224.56976938	3	7	-6.55842224
6	2	-40.09924297	4	7	4.75774631
7	2	128.77154771	9	7	19.39184297
8	2	-28.40907978	10	7	103.56819758
9	2	-1389.08003142			
10	2	-1672.09705556			
1	3	11.64775625			
2	3	-42.51820251			
3	3	72.45541064			
4	3	-82.55391089			
9	3	-267.85482520			
10	3	-998.64982710			
1	4	2.66566642			
2	4	-9.19657655			
3	4	15.13096920			
4	4	-7.24860975			
9	4	-46.83904320			
10	4	-227.34793319			

付録B 蒸気表作成に必要な各物性値の状態式

蒸気表作成に必要な各物性値の状態式を以下に示す。なお、下線を引いた微分量は後に述べる。

圧力

$$P = \rho RT \left[1 + \rho Q + \rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_\tau \right]$$

内部エネルギー

$$\begin{aligned} u &= \frac{d}{d\tau} (\phi_0 \tau) + RT \rho \tau \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_\rho \\ &= \phi_0 + \tau \frac{d\phi_0}{d\tau} + 1000 R \rho \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_\rho \end{aligned}$$

エンタルピー

$$\begin{aligned} h &= RT \left[1 + \rho Q - \rho T \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_\rho + \rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_\tau \right] + \frac{d(\phi_0 \tau)}{d\tau} \\ &= RT \left[1 + \rho Q + \rho \tau \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_\rho + \rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_\tau \right] + \phi_0 + \tau \frac{d\phi_0}{d\tau} \end{aligned}$$

定圧比熱

$$\begin{aligned} C_P &= \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P \\ &= \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_\rho + \left(\frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_T \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \\ &= \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_\rho - \frac{\left(\frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho}{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T} \end{aligned}$$

定容比熱

$$\begin{aligned} C_V &= \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_\rho \\ &= - \frac{\tau^2}{1000} \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} \right)_\rho \\ &= - \frac{\tau^2}{1000} \left[2 \left(\frac{d\phi_0}{d\tau} \right) + \tau \left(\frac{d^2\phi_0}{d\tau^2} \right) + 1000 R \rho \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \tau^2} \right)_\rho \right] \end{aligned}$$

等温圧縮率

$$K_T = \left[\rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \right]^{-1}$$

微分量

$$\textcircled{1} \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{\rho} = \left[\sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} + (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (j-2) (\tau - \tau_{aj})^{j-3} \right] \\ \times \left[\sum_{i=1}^8 A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-1} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} \right]$$

$$\textcircled{2} \quad \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \tau^2} \right)_{\rho} = \left[2 \sum_{j=1}^7 (j-2) (\tau - \tau_{aj})^{j-3} \right. \\ \left. + (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (j-2) (j-3) (\tau - \tau_{aj})^{j-4} \right] \\ \times \left[\sum_{i=1}^8 A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-1} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} \right]$$

$$\textcircled{3} \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} = (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \\ \times \left[\sum_{i=1}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} \right. \\ \left. + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-10} \right]$$

$$\textcircled{4} \quad \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \rho^2} \right)_{\tau} = (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \\ \times \left[\sum_{i=1}^8 (i-1) (i-2) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-3} \right. \\ \left. + E^2 e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} - 2 E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) \right. \\ \left. \times A_{ij} \rho^{i-10} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) (i-10) A_{ij} \rho^{i-11} \right]$$

$$\textcircled{5} \quad \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} = \left[\sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \right. \\ \left. + (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (j-2) (\tau - \tau_{aj})^{j-3} \right] \\ \times \left[\sum_{i=1}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} \right. \\ \left. - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-10} \right]$$

$$\textcircled{6} \quad \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{\rho} = \left[\sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} + (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (j-2) (\tau - \tau_{aj})^{j-3} \right] \\ \times \left[\sum_{i=1}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} \right. \\ \left. + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-10} \right]$$

$$\begin{aligned}
 \textcircled{7} \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial \rho} \right)_{\tau} &= RT \left[\frac{1}{\rho} + (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \right. \\
 &\quad \times \left\{ \sum_{i=1}^8 A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-1} + \rho \sum_{i=1}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} \right. \\
 &\quad - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-8} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} \\
 &\quad \left. \left. + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-9} \right\} \right] \\
 \textcircled{8} \quad \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \rho^2} \right)_{\tau} &= RT \left[-\frac{1}{\rho^2} + (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \right. \\
 &\quad \times \left\{ 2 \sum_{i=1}^8 (i-1) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-2} \right. \\
 &\quad + \rho \sum_{i=1}^8 (i-1)(i-2) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-3} \\
 &\quad + E^2 e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-8} - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} \\
 &\quad - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-8) A_{ij} \rho^{i-9} - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-9} \\
 &\quad \left. \left. + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-10} + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9)^2 A_{ij} \rho^{i-10} \right\} \right] \\
 \textcircled{9} \quad \left(\frac{\partial^3 \phi}{\partial \rho^3} \right)_{\tau} &= RT \left[\frac{2}{\rho^3} + (\tau - \tau_c) \sum_{j=1}^7 (\tau - \tau_{aj})^{j-2} \right. \\
 &\quad \times \left\{ 3 \sum_{i=1}^8 (i-1)(i-2) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-3} \right. \\
 &\quad - E^3 e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-8} \\
 &\quad + \rho \sum_{i=1}^8 (i-1)(i-2)(i-3) A_{ij} (\rho - \rho_{aj})^{i-4} \\
 &\quad + E^2 e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} A_{ij} \rho^{i-9} + 2 E^2 e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-8) A_{ij} \rho^{i-9} \\
 &\quad + E^2 e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-9} \\
 &\quad - 2 E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9) A_{ij} \rho^{i-10} \\
 &\quad - E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-8)(i-9) A_{ij} \rho^{i-10} \\
 &\quad \left. \left. - 2 E e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9)^2 A_{ij} \rho^{i-10} \right\} \right]
 \end{aligned}$$

$$+ e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9)(i-10) A_{ij} \rho^{i-11} \\ + e^{-E\rho} \sum_{i=9}^{10} (i-9)^2 (i-10) A_{ij} \rho^{i-11} \}]$$

$$\textcircled{10} \quad \left(\frac{d\phi_0}{dT} \right) = (i-1) \sum_{i=1}^6 C_i \frac{T^{i-2}}{1000^{i-1}} + \frac{C_7}{T} + \frac{C_8}{1000} \ln T + \frac{C_8}{1000}$$

$$\textcircled{11} \quad \left(\frac{d\phi_0}{d\tau} \right) = -\frac{T^2}{1000} \left(\frac{d\phi_0}{dT} \right)$$

$$\textcircled{12} \quad \left(\frac{d^2\phi_0}{dT^2} \right) = \sum_{i=1}^6 (i-1)(i-2) C_i \frac{T^{i-3}}{1000^{i-1}} - \frac{C_7}{T^2} + \frac{C_8}{1000} \frac{1}{T}$$

$$\textcircled{13} \quad \left(\frac{d^2\phi_0}{d\tau^2} \right) = \frac{T^3}{10^6} \left\{ 2 \left(\frac{d\phi_0}{dT} \right) + T \left(\frac{d^2\phi_0}{dT^2} \right) \right\}$$

$$\textcircled{14} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial \tau} \right)_{\rho} = -\frac{1000}{\tau^2} R \left[1 + \rho Q + \rho \tau \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{\rho} + \rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} \right] \\ + RT \left[2 \rho \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{\rho} + \rho \tau \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \tau^2} \right)_{\rho} + \rho^2 \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} \right] \\ + 2 \left(\frac{d\phi_0}{d\tau} \right) + \tau \left(\frac{d^2\phi_0}{d\tau^2} \right)$$

$$\textcircled{15} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial \rho} \right)_{\tau} = RT \left[Q + 3\rho \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} + \tau \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{\rho} + \rho \tau \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{\rho} \right. \\ \left. + \rho^2 \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \rho^2} \right)_{\tau} \right]$$

$$\textcircled{16} \quad \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{\rho} = \rho R \left[1 + \rho Q + \rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} - \rho \tau \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{\rho} \right. \\ \left. - \rho^2 \tau \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} \right]$$

$$\textcircled{17} \quad \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\tau} = RT \left[1 + 2\rho Q + 4\rho^2 \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)_{\tau} + \rho^3 \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \rho^2} \right)_{\tau} \right]$$

$$\textcircled{18} \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} \right)_{\rho} = 2 \left(\frac{d\phi_0}{d\tau} \right)_{\rho} + \tau \left(\frac{d^2\phi_0}{d\tau^2} \right)_{\rho} + 1000 R \rho \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial \tau^2} \right)_{\rho}$$

付録C 重水蒸気表作成プログラムの概要

C.1 プログラムの構成

プログラムの構成は、以下のとおりである。

- ① 入力データ（温度，圧力）を読み込む。
- ② 入力データ数に応じて領域の割り当てを行う。
- ③ 入力データの単位変換を行う。
- ④ 温度基準の飽和量を求める。
- ⑤ 圧力基準の飽和量を求める。
- ⑥ 単相状態の熱力学的状態量を求める。
- ⑦ ④，⑤，⑥で求めた状態量の単位変換を行う。
- ⑧ ファイル出力，リスト出力を行う。

C.2 使用ファイル

重水蒸気表作成プログラムで使用するファイルは、以下のとおりである。

ファイル番号	内 容	RECFM
1	重水の熱力学的状態量 出力用	VBS
5	入力データ読み込み用	FB
6	プリントアウト用	FB

C.3 入力データの説明

- (1) Card 1 カウントカード Format (6 I 6)

カラム	内 容	記 号
1～6	未飽和水および過熱蒸気の温度代表点数*	NT
7～12	" 圧力代表点数*	NP
13～18	温度基準飽和量代表点数 (NS ≤ NT)	NS
19～24	圧力基準飽和量代表点数 (NS 2 ≤ NP)	NS 2
25～30	温度，圧力単位選択フラグ IOPT = 0 : TEMP [°C], PRES [At] IOPT ≠ 0 : TEMP [°K], PRES [kPa]	IOPT
31～36	= 0 (必ず0を入力する)	IFLG

* NT, NP は未飽和水および過熱蒸気の代表点の温度，圧力であるばかりでなく，温度基準飽和量，圧力基準飽和量の代表点温度であり，圧力である。

(2) Card 2. 温度カード Format (6D 12.5)

カラム	内 容	記 号
1 ~ 12	代表点温度 ($3.8^{\circ}\text{C} \leq T(I) \leq 800^{\circ}\text{C}$)	T(I)
.....	T(I)を順に入力していく。(I = 1 ~ NT)

(3) Card 3. 圧力カード Format (6D 12.5)

カラム	内 容	記 号
1 ~ 12	代表点圧力 ($0. \text{MPa} < P(J) \leq 100 \text{MPa}$)	P(J)
	P(J)を順に入力していく。(J = 1 ~ NP)	

C.4 出力ファイルの内容

1番ファイルに出力される重水蒸気表作成プログラムの出力は、EUREKA-2Dコードが直接参照できるよう以下の形式で出力される。なお、出力ファイルはバイナリーである。

(1) Record 1.

	変数名	内 容
1	NT	未飽和水および過熱蒸気の温度代表点数
2	NP	" 圧力代表点数
3	NS	温度基準飽和量代表点数
4	NS 2	圧力基準飽和量代表点数

(2) Record 2.

	変数名	内 容	単 位
1	T(I)	代表点温度	K
2	P(J)	代表点圧力	Pa
3	B(1, I)	温度基準飽和圧力	Pa
4	B(2, I)	温度基準飽和水比容積	m^3/kg
5	B(3, I)	" 内部エネルギー	J/kg
6	B(4, I)	" 熱膨張率	$1/\text{K}$
7	B(5, I)	" 等温圧縮率	$1/\text{Pa}$
8	B(6, I)	" 定圧比熱	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$
9	B(7, I)	温度基準飽和蒸気比容積	m^3/kg
10	B(8, I)	" 内部エネルギー	J/kg
11	B(9, I)	" 熱膨張率	$1/\text{K}$
12	B(10, I)	" 等温圧縮率	$1/\text{Pa}$
13	B(11, I)	" 定圧比熱	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$

	変数名	内 容	単 位
14	C (1, J)	圧力基準飽和温度	K
15	C (2, J)	圧力基準飽和水比容積	m ³ /kg
16	C (3, J)	" 内部エネルギー	J/kg
17	C (4, J)	" 熱膨張率	1/K
18	C (5, J)	" 等温圧縮率	1/Pa
19	C (6, J)	" 定圧比熱	J/kg・K
20	C (7, J)	圧力基準飽和蒸気比容積	m ³ /kg
21	C (8, J)	" 内部エネルギー	J/kg
22	C (9, J)	" 熱膨張率	1/K
23	C (10, J)	" 等温圧縮率	1/Pa
24	C (11, J)	" 定圧比熱	J/kg・K
25	D (1, K, L)	未飽 未飽和水および過熱蒸気の比容積	m ³ /kg
26	D (2, K, L)	" 内部エネルギー	J/kg
27	D (3, K, L)	" 熱膨張率	1/K
28	D (4, K, L)	" 等温圧縮率	1/Pa
29	D (5, K, L)	" 定圧比熱	J/kg・K

ただし, I = 1 ~ NS

J = 1 ~ NS2

K = 1 ~ NT

L = 1 ~ NP

付録D EUREKA-2 で用いている軽水の物性値

(粘性係数・熱伝導率・表面張力・飽和圧力・飽和温度)

(1) 粘性係数

(a) 飽和液体の場合

表D・1に示すように温度に関するテーブルで与えられる。

(b) 飽和および過熱蒸気

次の式で与えられる。

① $t \leq 340^\circ\text{C}$

$$\mu = 1.0 \times 10^{-7} \{ 0.407 t + 80.4 - \rho (1858 - 5.9 t) \}$$

② $340 < t \leq 365$

$$\mu = 1.0 \times 10^{-7} \{ (365 - t) [0.407 t + 80.4 - \rho (1858 - 5.9 t)] \\ + (t - 340) (0.407 t + 80.4 + 353 \rho + 676.5 \rho^2 + 102.1 \rho^3) \} \times \frac{1}{25}$$

③ $365 < t$

$$\mu = 1.0 \times 10^{-7} (0.407 t + 80.4 + 353 \rho + 676.5 \rho^2 + 102.1 \rho^3)$$

ここで、

 μ : 粘性係数 [Pa・s] t : 温度 [°C] ρ : 密度 [g/cm³]

(2) 熱伝導率

(a) 飽和液体の場合

表D・2に示すように温度に関するテーブルで与えられる。

(b) 飽和および過熱蒸気の場合

$$\lambda = \{ 17.6 + 5.87 \times 10^{-2} t + 1.04 \times 10^{-4} t^2 - 4.51 \times 10^{-8} t^3 \\ + (103.51 + 0.4198 t - 2.771 \times 10^{-5} t^2) \rho + 2.1482 \times 10^{14} \frac{\rho^2}{t^{4.2}} \} \times 10^{-3}$$

ここで、

 λ : 熱伝導率 [W/(m・K)] ρ : 密度 [g/cm³] t : 温度 [°C]

(3) 表面張力

① $T < 100$

$$\sigma = 58.0$$

② $100 \leq T \leq 639$

$$\sigma = \frac{A_1 (T_c - T)^2}{1 + 0.83 (T_c - T)} + A_2 (T_c - T)^2 + A_3 (T_c - T)^3 + A_4 (T_c - T)^4 + A_5 (T_c - T)^5$$

③ $639 < T$

$$\sigma = 1.0$$

ここで,

 σ : 表面張力 [N/cm]

T : 温度 [K]

 T_c : 臨界点温度 (647.3 K) [K]

$$A_1 = 1.160936807 \times 10^{-1}$$

$$A_2 = 1.121404688 \times 10^{-3}$$

$$A_3 = -5.75280518 \times 10^{-6}$$

$$A_4 = 1.28627465 \times 10^{-8}$$

$$A_5 = -1.14971929 \times 10^{-11}$$

(4) 軽水での飽和圧力計算式

$$P = P_c \cdot \exp \left[\frac{\sum_{D=1}^5 k_D (1-\theta)^D}{\theta \{ 1 + k_6 (1-\theta) + k_7 (1-\theta)^2 \}} - \frac{1-\theta}{k_8 (1-\theta)^2 + k_9} \right]$$

ここで,

$$k_1 = -7.691234564 \times 10^0$$

$$k_2 = -2.608023696 \times 10^1$$

$$k_3 = -1.681706546 \times 10^2$$

$$k_4 = 6.423285504 \times 10^1$$

$$k_5 = -1.189646225 \times 10^2$$

$$k_6 = 4.167117320 \times 10^0$$

$$k_7 = 2.097506760 \times 10^1$$

$$k_8 = 1.0 \times 10^9$$

$$k_9 = 6$$

Q : T/T_c

P : 圧力

 P_c : 臨界点圧力 θ : 換算温度

T : 温度

 T_c : 臨界点温度

(5) 軽水での飽和温度計算式

① $P < 1378.951459$ [N/m²]

$$T = (a_1 \cdot \ln P + a_2) \ln P + a_3$$

$$\textcircled{2} \quad 1378.951459 \leq P \leq 3102640.782 \text{ [N/m}^2 \text{]}$$

$$T = b_9 F^8 + b_8 F^7 + b_7 F^6 + b_6 F^5 + b_5 F^4 + b_4 F^3 + b_3 F^2 + b_2 F + b_1$$

$$\textcircled{3} \quad 3102640.782 \text{ [N/m}^2 \text{]} < P$$

$$T = C_6 X^5 + C_5 X^4 + C_4 X^3 + C_3 X^2 + C_2 X + C_1$$

ここで,

P : 圧力

T : 温度

$$a_1 = 0.84488898$$

$$a_2 = 2.9056480$$

$$a_3 = 219.74589$$

$$F = \ln (1.450377377 \times 10^{-3} \times P)$$

$$b_1 = 274.9043833$$

$$b_2 = 13.66254889$$

$$b_3 = 1.176781611$$

$$b_4 = -0.189693$$

$$b_5 = 8.74535666 \times 10^{-2}$$

$$b_6 = -1.7405325 \times 10^{-2}$$

$$b_7 = 2.147682333 \times 10^{-3}$$

$$b_8 = -1.383432444 \times 10^{-4}$$

$$b_9 = 3.800086611 \times 10^{-6}$$

$$X = 1.450377377 \times 10^{-4} \times P$$

$$c_1 = 6669.352222$$

$$c_2 = -4658.899$$

$$c_3 = 1376.536722$$

$$c_4 = -201.9126167$$

$$c_5 = 14.82832111$$

$$c_6 = -0.4337434056$$

表 D.1 軽水の粘性係数 (EUREKA-2)

温度 (°C)	粘性係数 (Pa·s)
0.0	17.531×10^{-4}
10.0	12.992×10^{-4}
37.8	6.801×10^{-4}
65.6	4.271×10^{-4}
93.3	2.991×10^{-4}
121.1	2.277×10^{-4}
148.9	1.830×10^{-4}
176.7	1.518×10^{-4}
204.4	1.308×10^{-4}
232.2	1.150×10^{-4}
260.0	1.030×10^{-4}
287.8	0.936×10^{-4}
315.6	0.850×10^{-4}
335.4	0.780×10^{-4}
343.3	0.759×10^{-4}
360.0	0.699×10^{-4}
373.9	0.357×10^{-4}

表 D.2 軽水の熱伝導率 (EUREKA-2)

温度 (°C)	熱伝導率 (W/m·K)
0.0	0.567
37.8	0.629
93.3	0.679
121.1	0.685
148.9	0.685
176.7	0.679
204.4	0.660
260.0	0.604
315.6	0.517
343.3	0.449
373.9	0.274

付録E 入力データについて

コードの改造により、データを入力する上でいくつかの変更および追加を行った。ここでは、その変更点および追加点について述べる。ここで述べていない入力データの入力方法については変更はなく、この部分については文献を参照されたい。

E.1 動特性計算のためのオプション

EUREKA-2 マニュアルでは次のようである

動特性定数：140000

.....

W1 I NODEL 出力計算の指定

1 = 即発中性子1群および遅発中性子6群

2 = 上記1および遅発 γ 放射11群

3 = 上記2および ^{239}U , ^{239}Np

以上に加えて、EUREKA-2 Dコードでは光遅発中性子を含む遅発中性子15群計算を指示するため次のオプションを加える。

4 = 即発中性子1群および遅発中性子15群

5 = 上記4および遅発 γ 放射11群

6 = 上記5および ^{239}U , ^{239}Np

E.2 中性子源、遅発中性子相対比率の入力データ形式

中性子源、遅発中性子相対比率の入力の形式について述べる。具体例についてはE.3を参照されたい。

(1) データ形式

データは、次の形式に従う。

\square '(4文字)' \square (実数) \square (実数) (実数) \square /
データ名 データ値

区切りのための、空白(\square)の数は任意。

(2) データ名とデータの数

データ名	内 容	データ数
SOUR	中性子源強度 (MW)	1
BET 6	遅発中性子相対比率(6群)注)	6
BET 5	遅発中性子相対比率(15群)注)	15
\$END	データ項目読み取り終了	0

注) 群の順序が一般に用いられているものと逆(大→小)となることに注意。

(3) データ並びの数

最大値 256

(4) データ読み取り機番

機番 55

E.3 中性子源，遅発中性子相対比率のデータの例とデータ作成上の注意点

以下，具体的な例について，データ作成上の注意点を示す。

(1) フリー・フォーマット入力

図 E.1 に示した 2 例はともに 6 群遅発中性子相対比率 β_i をプログラムでの設定値から

$$\beta_i = 0.1, 0.2, \dots, 0.6 \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \text{注}$$

に変更するものである。

(2) データ相互の順序関係

図 E.2 に示した 2 例は，中性子源データ 'SOUR' と 6 群遅発中性子相対比率 'BET6' について順序が逆転しているがともに同じ結果を与える。

(3) データ項目の重複と優先

図 E.3 の例では中性子源データ 'SOUR' が二回指定されているが，最後の値が優先する。全データ並びの数が 256 以下なら同一データ項目が幾つ重複しても良い。

(4) \$END の使用方法

\$END はデータの読み取りを終了させる働きをする。一連のデータの終了の目印になるが，これは必ずしも必要ではない。データ並びがなくなった時，コードはそれ以降の読み取りを終了するからである。

\$END の便利な使い方は，あらかじめデータのスタックを作っておき，その中からデータをピック・アップする場合である (図 E.4)。図の例では，中性子源の強度は，30 (W) となる。\$END が無ければ，最後の入力項目が優先となり，50 (W) となる。

(5) デフォルト値

E.2 で述べた形式でデータが入力されない場合 (入力エラー等も含む)，中性子源，遅発中性子相対比率は，プログラム中の次の設定値を用いる。

中性子源 0 (MW)

遅発中性子相対比率 15 群: 3.1 節表 3.1 と同じ。

6 群: オリジナル EUREKA-2 と同じ。

(6) 出力結果の確認

遅発中性子データ，中性子源の初期設定値，修正値はコードの出力リストで確認できる (図 E.5)。

(7) データ作成上の注意

データ作成時下記事項を注意されたい。

- ① データ 72 カラム以降に順序番号がある。
- ② データ項目名を引用符 (') で囲まない。

注) 以下で用いられる β_i , S 等の値は説明上の仮想値であって規格化等もされていない。

③ データ項目の終りにスラント (/) を置かない。

E.4 熱伝達パッケージの変更に伴う入力の変更

熱伝達パッケージの変更により、EUREKA-2D コードを使用する場合、次の4点に注意する必要がある。

E.4.1 限界熱流束増倍係数

変更前のEUREKA-2 コードでは入力データ中のオプション・カード(082030)により、限界熱流束増倍係数を入力することが可能であったが、EUREKA-2D コードでは、入力できない。もし、このオプション・カードを指定した場合には無視される。

E.4.2 熱流束増倍係数

変更前のEUREKA-2 コードでは入力データ中のオプション・カード(082031)により、熱流束増倍係数を入力することが可能であったが、EUREKA-2D コードでは入力できない。もし、このオプション・カードを指定した場合には無視される。

E.4.3 流路巾

変更前のEUREKA-2 コードでは、流路巾を入力する必要がなかったが、EUREKA-2D では流路巾を入力する必要がある。ここでいう流路巾とは、各ヒート・スラブが面している流路(ノード)の長手方向の巾である。

(1) データ数

各ヒート・スラブに対して1個ずつの流路巾を入力する必要がある。すなわち、ヒート・スラブ数がN個の場合には、流路巾もN個入力する必要がある。ただし、Nは50以下でなければならない。

(2) 単 位

[m]である。

(3) 入力方法

データの読み取りは、機種65より行なわれるため、データは機種65に入力する。入力はフリー・フォーマット形式である。データはスラブ1に対応する流路巾から順番に、スラブNに対応する流路巾まで入力する。順序の入れ替えは不可。データの最後には「/」を必ず入力する。「/」を忘れると、データを読み続けようとし、エラーとなる。

(4) 入 力 例

入力例を図E.6に示す。

E.5 JCL

EUREKA-2D用JCLの1例を図E.7に示す。

動特性用データは機番55から読まれ、流路巾は機番65から読まれる。

```
000410 //FT55F001      DD *
000411 'BET6'      0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 / BETA 6G FOR DEMO
```

```
000410 //FT55F001      DD *
000411 'BET6'
000412 0.1
000413 0.2
000414 0.3
000415 0.4
000416 0.5
000417 0.6 / BETA 6G FOR DEMO
```

図E.1 フリー・フォーマット入力の例

```
00410 //FT55F001      DD *
00411 'BET6' 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 / BETA 6G FOR DEMO
00412 'SOUR' 10.0E-6 /
```

```
00410 //FT55F001      DD *
00411 'SOUR' 10.0E-6 /
00412 'BET6' 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 / BETA 6G FOR DEMO
```

図E.2 データ相互の順序関係

```
000410 //FT55F001      DD *
000411 'SOUR' 10.0E-6 / NEUTRON SOURCE : 10(W)
000412 'BET6' 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 / BETA 6G FOR DEMO
000413 'SOUR' 20.0E-6 / NEUTRON SOURCE : 20(W)
```

図E.3 データ項目の重複

```
000410 //FT55F001      DD *
000411 'SOUR' 10.0E-6 / NEUTRON SOURCE : 10(W)
000412 'SOUR' 20.0E-6 / NEUTRON SOURCE : 20(W)
000413 'SOUR' 30.0E-6 / NEUTRON SOURCE : 30(W)
000414 '$END' /
000415 'SOUR' 40.0E-6 / NEUTRON SOURCE : 40(W)
000416 'SOUR' 50.0E-6 / NEUTRON SOURCE : 50(W)
```

図E.4 \$ENDの使用方法

```

*****
* KINETIC DATA EDIT *
*****

```

--- ORIGINAL DATA ---

*** THE DATA ARE CHANGED AS FOLLOWING ***

EXTERNAL SOURCE = .0

GROUP	BETA (6 GROUP)	EXTERNAL SOURCE =	.1000000D-04
1	.3443000D-01		
2	.2179700		
3	.1990400		
4	.3886100		
5	.1170100		
6	.4294000D-01		
GROUP	BETA (15 GROUP)		
1	.5710000D-04		
2	.1400000D-03		
3	.4420000D-03		
4	.3170000D-02		
5	.2800000D-02		
6	.4580000D-02		
7	.9500000D-02		
8	.2780000D-01		
9	.8850000D-01		
10	.2830000D-01		
11	.1885000		
12	.1685000		
13	.3410000		
14	.9970000D-01		
15	.3640000D-01		
GROUP	BETA (6 GROUP)		
1	.1000000		
2	.2000000		
3	.3000000		
4	.4000000		
5	.5000000		
6	.6000000		
GROUP	BETA (15 GROUP)		
1	.1000000D-01		
2	.2000000D-01		
3	.3000000D-01		
4	.4000000D-01		
5	.6000000D-01		
6	.7000000D-01		
7	.8000000D-01		
8	.9000000D-01		
9	.1000000		
10	.1100000		
11	.1200000		
12	.1300000		
13	.1300000		
14	.1400000		
15	.1500000		

--- INPUT DATA IMAGE ---

'SOUR'	10.0E-6 / EXTERNAL NEUTRON SOURCE		
'BET6'	0.1 0.2 0.3 0.4	0.5	/ BETA 6G FOR DEMO
	0.6	0.04	0.06
'BETS'	0.01 0.02 0.03 0.04	0.09	0.10 0.11
	0.07 0.08 0.09 0.10	0.13	0.14 0.15 / BETA 15G FOR DEMO
	0.12 0.13 0.13 0.14	0.15	

図E.5 出力結果の確認 (出力リストの一部)

```
//FT65F001 DD *
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 /
```

図E.6 流路巾の入力例

```
//JCLG JOB
//JCLG EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 93341599,IK.KOSUGE,0514.03
  T.6 W.4 C.5 I.5
  OPTP PASSWORD=
/*
/*      FORT GO STEP
/*
//GO      EXEC PGM=TEMPNAME,REGION=2048K
//STEPLIB DD DSN=J1599.EUR2DD.LOAD,DISP=SHR
//FT04F001 DD DSN=J1599.EURPLTC.DATA,DISP=(NEW,CATLG,DELETE),
//          UNIT=TSSWK,SPACE=(TRK,(300,50),RLSE),
//          DCB=(BLKSIZE=18987,LRECL=0,RECFM=VS)
//FT05F001 DD DSN=J1599.SENUMA.DATA(JRR2C),DISP=SHR
//FT06F001 DD SYSOUT=*
//FT15F001 DD DSN=J1599.STM020.DATA,DISP=SHR
//FT16F001 DD DSN=&&FT16,DISP=NEW,UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(50,50))
//FT55F001 DD *
  'SOUR' 0.0 /
/*
//FT65F001 DD *
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0
  0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 0.0486D0 /
/*
++
//
```

図E.7 EUREKA-2D用JCLの一例