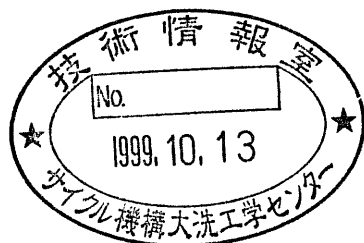


照射初期燃料温度評価手法の検討 (研究報告書)

1999年6月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

照射初期燃料温度評価手法の検討
(研究報告書)

石井 徹哉^{*1} 根本 潤一^{*2} 浅賀 健男^{*1}

要 旨

高速炉用ペレット型 MOX 燃料では、照射初期において、燃料溶融に対する余裕（熱的裕度）が最も小さくなると考えられている。このため、照射初期の燃料温度を評価する手法を整備することが必要と考えられている。

そこで本検討では、1988 年時に試作されたが、それ以降に得られた知見を反映することなく、また、マニュアル類も未整備であった照射初期燃料温度評価手法を、改めて整備しなおすこととした。また、整備後の手法を利用しての照射試験の試験条件検討等も行っている。

以下にその概要を記す。

1) 照射初期燃料温度評価用として 1988 年に試作されていた手法（注）について、燃料融点及びリロケーション挙動に関する最新の知見を反映させた改良を施し、燃料温度評価に関する不確かさを $\pm 60^{\circ}\text{C}$ 程度に減ずることに成功した。（以降 FEVER-M と称する）

（注）：照射初期燃料温度評価コード FEVER

2) 整備した FEVER-M により、「常陽」で計画中の PTM 試験である B10 照射試験の試験条件検討を行った。この結果、安全に試験を実施でき、かつ、所定の目的を達し得る条件として、最大線出力を 620W/cm とすればよいことを確認できた。

3) 照射初期燃料温度評価手法の整備で得られた知見を熱設計に反映する試みとして、ホットギャップ（製造時のギャップ幅からリロケーション挙動によるギャップ幅変化量を差し引いたもの）に基づくギャップ熱伝達率評価を試みたところ、同方法を用いることで熱設計上最も合理的（保守性を可能な限り削減）と考えられる温度評価値に近い値を得られることが確認できた。リロケーション挙動の定量評価にはまだ課題が残されているものの、今回の結果から、ホットギャップに基づくギャップ熱伝達率評価を熱設計に取り込むことは、従来の製造時ギャップ幅に基づくギャップ熱伝達率評価よりも熱設計を合理化できる手法の一つとして将来的に有望であることが確認できた。

* 1 大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発 Gr

* 2 原子力システム株式会社

Investigation of the fuel temperature evaluation method at BOL

Tetsuya ISHII *¹ Junichi NEMOTO *² Takeo ASAGA *¹

ABSTRACT

It is one of the major subjects in the improvement of the design method for determining the thermal conditions of the solid type Mixed - Oxide (MOX) fuels in FBR to evaluate the fuel temperature at BOL as precisely as possible. Therefore, we have planned to modify the fuel temperature evaluation method " FEVER ", which was developed by JNC in 1988, as one of the investigation for the establishment of the precise fuel temperature evaluation method. And, we also have planned to use the modified FEVER, named " FEVER-M ", for estimation of the irradiation conditions of the PTM test in Joyo, called " B10 test ", planning to perform in 2000.

In this work, the following results were obtained;

- 1) As a result of the modification, the uncertainty in the fuel temperature evaluation of " FEVER-M " is reduced to about $\pm 60\text{K}$.
- 2) Estimating the irradiation conditions of " B10 " test using the method " FEVER-M ", it is found that the appropriate maximum linear heat rate for the test is 620 W/cm. The detail plan of the " B10 " test were also determined based on the results.
- 3) Based on the results of this work, it is found that one of the effective procedure for the improvement of the accuracy of the fuel temperature evaluation method seems to calculate the fuel temperature taking the pellet relocation phenomena into account. In future, although there are a lot of matters to be discussed in this phenomena, the design method for the thermal conditions of the MOX fuels in FBR should be performed with taking the pellet relocation phenomena into account.

*1 Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division,
O-Arai Engineering Center

*2 Nuclear Energy System Inc.

目次

1. はじめに	-----	1
2. 照射初期燃料温度評価手法の概要	-----	1
2-1. 照射初期燃料温度評価手法の位置づけ	-----	1
2-2. 整備した照射初期燃料温度評価手法の概要	-----	2
2-2-1. 燃料内温度分布の評価方法	-----	2
2-2-2. 温度に関連する燃料挙動の取り扱い	-----	4
2-2-3. 燃料融点の取扱い	-----	10
2-3. 計算コードとしての形態	-----	11
3. FEVER-M の較正結果	-----	12
3-1. 較正の必要性と較正方法	-----	12
3-2. B5D2 試験試料について	-----	12
3-3. FEVER-M 較正結果	-----	13
3-4. 燃料溶融時の溶融量評価値の不確かさ幅	-----	14
4. FEVER-M を用いての B10 照射試験条件の検討	-----	15
4-1. B10 照射試験計画の目的と概要	-----	15
4-2. B10 照射試験実施に関する制限事項	-----	16
4-3. B10 照射試験条件の検討結果	-----	18
4-4. 熱設計手法に関する今後の改善方策	-----	19
5. 課題事項	-----	21
6. まとめ	-----	22
7. 謝辞	-----	23
参考文献	-----	24
付録 照射初期燃料温度評価用計算プログラム FEVER-M 利用マニュアル	-----	A-1～A-47

図表目次

表 2-1	リロケーション量評価式作成用データの一覧	-----	26
表 2-2	FEVER-M に導入した MOX 燃料融点値一覧	-----	27
表 3-1	FEVER-M 較正用試料の詳細	-----	28
表 3-2	溶融試料の製造時データ等の一覧	-----	29
表 4-1	B10 照射試験条件検討結果一覧	-----	30
表 4-2	ホットギャップに基づくギャップ熱伝達率の試評価結果	-----	31
図 2-1-1	リロケーション量と製造時ギャップ幅との相関	-----	33
図 2-1-2	リロケーション量と照射中最大線出力との相関	-----	33
図 2-1-3	リロケーション量評価式の再現性	-----	34
図 2-2	融点報告値の整理 (O/M=2.00)	-----	35
図 2-3	修正後の Aitken&Evans 融点評価値	-----	36
図 2-4	FEVER-M プログラムフローチャート	-----	37
図 3-1	中心空孔径評価結果	-----	38
図 3-2	燃料中心温度 (照射中最高温度) 評価結果	-----	39
図 3-3	溶融面積割合評価結果	-----	40
図 3-4	PTM 試験試料の照射後組織観察例(B5204)	-----	41
図 4-1	B10 試験で想定されている線出力履歴	-----	42
図 4-2-1	FEVER-M による燃料中心温度評価結果 (O/M=1.94)	-----	43
図 4-2-2	FEVER-M による燃料中心温度評価結果 (O/M=1.96)	-----	44
図 4-2-3	FEVER-M による燃料中心温度評価結果 (O/M=1.97)	-----	45
図 4-3	ギャップ部温度上昇量評価結果	-----	46

1. はじめに

高速炉用ペレット型 MOX 燃料では、照射期間中常に燃料温度が変動するが、照射初期において、最も燃料溶融に対する余裕（熱的裕度、燃料の中心温度（最高温度）と燃料融点との差）が小さくなると考えられている。高速炉に限らず原子炉は、燃料が溶融しない範囲で運転する必要があることから、照射初期の熱的裕度をできるだけ精度良く評価することが、設計合理化や燃料の高性能化を図る上で極めて重要な研究課題とされている。

そのような、熱的裕度の高精度評価、即ち、照射初期の燃料温度の高精度評価については、照射初期の溶融限界線出力評価試験（PTM 試験、実際に燃料が溶融するような線出力で燃料を照射し、燃料ピン軸方向の溶融域分布に基づき軸方向での溶融境界位置を推定、これと軸方向線出力分布とを合わせることで溶融限界線出力値を評価するとの極短期の照射試験）結果を利用しての手法開発、改良が試みられてきている。

さらに、現在、「常陽」での 3 回目の PTM 試験（B10 照射試験）が計画されており、この試験の試験条件を検討するためにも、早急に照射初期の燃料温度評価手法を整備することが要求されている。

このような状況の中、最近になってようやく、90 年代初頭に常陽で行なわれた PTM 試験（B5D2 試験^{1,2)}）の結果が整理され、挙動解析等を暫定的ではあるが、実施可能な状態となってきた。

そこで本検討では、B5D2 試験結果等をもとに、JNC 内ですでに試作されていた照射初期燃料温度評価手法（計算コード名：FEVER）を改めて整備した。整備しなおした温度評価手法（FEVER）は 1988 年に試作、計算コード化されたもので、B5D2 試験条件検討の際には同手法を用いて得られた計算結果が参照されている。ただし、FEVER コードは、オリジナルソースリストや開発バージョンの管理が不適切である等、開発者以外が利用できるように整備されておらず、コード中に導入されているサブモデルの一部に改善の余地が残されていたものでもある。

また、本検討を実施する理由の一つともなった「常陽」で実施予定の B10 照射試験に関しては、既に、試験条件検討のための予測評価を今回整備した燃料温度評価手法を用いて行っており、照射試験実施担当部署による同試験の設工認申請作業も順調に進行している。

本報告書では、今回整備した燃料温度評価手法の概要（基とした 1988 年時の手法の詳細は文献 3 を参照されたい）を、B5D2 試験結果を用いての同手法較正結果も含めて説明する。また、「常陽」で実施予定の B10 照射試験に関する予測評価結果についても説明する。あわせて、本報の付録として、計算コード化した照射初期燃料温度評価手法の利用マニュアルを添付する。

なお、本検討で使用した線出力評価値（後述の表 2-1、表 3-1、表 3-2、表 4-2 中に示した線出力値）は、いずれも平成 10 年 12 月時点での評価値である。また、B5D2 試料についての値は、平成 6 年 7 月時点の燃焼率測定結果をもとに評価されたものであるが、同試料については、現在、平成 6 年 7 月時点の燃焼率測定結果確認のための追加測定が行なわれているところである。燃焼率評価結果が確定されるまでにはまだ時間を要することから、本検討では、表に示した線出力値を暫定値として用いている。その旨、留意されたい。

2. 照射初期燃料温度評価手法の概要

2-1. 照射初期燃料温度評価手法の位置づけ

今回改良対象とした 1988 年に試作された計算コード化された温度評価手法は、JNC において、

燃料挙動解析コードとして開発、改良が進められている CEDAR コード⁴⁾を基礎としたものである。本報告書中では、便宜上、1988 年時点の計算コードを「旧版の FEVER」と呼称することとした。

旧版の FEVER の基礎となっている CEDAR コードは、熱的（温度）評価と応力評価とを同時に実施し、温度と応力とを関連づけながら燃料内の挙動を詳細に評価しようとするものである。このことから、CEDAR コードでは、温度評価のみに関連するモデルの一部を改良するような場合でも、改良に際して応力評価に支障が生じないことを確認する必要がある。このために例えば、燃料と被覆管との機械的相互作用（例えば、燃料ペレットと被覆管が接触している状況）が強く生じていたと考えられる長期間照射された燃料についての評価結果が妥当であることを確認すること等が必要となる。したがって、CEDAR コードの様に応力評価結果を反映させながら温度評価を行うものは、評価結果検証のために多くの PIE 結果と検証時間が必要となり、評価モデル改良等、計算コードへの最新知見の取り込みに時間がかかってしまう面があるといえる。

これに対し、燃料の熱的裕度評価上重要と考えられる照射初期（例えばプレコンディショニング段階）は、機械的相互作用が無視できるか、あったとしても小さく、従って、応力評価を伴わない熱的評価であっても比較的精度よく燃料の温度を予測できると考えられる。そのような、応力評価を伴わない熱的評価であれば、温度評価に関するモデルの変更に際して検証作業量が少なくて済むことから、最新の知見を容易に、かつ、短時間で反映することが可能となる。

FEVER コードは、上記のような観点に基づき、開発が進められていたものである。

しかしながら、1988 年の試作以降に常陽で行なわれた PTM 試験（B5D1、B5D2 の 2 種類の試験がある^{1,2)}）の結果は反映されておらず、現状知見に基づく、手法改善（計算コード中のサブモデル改良）の余地がいくつか認められるものとなっている。また、試作段階にあったことから、マニュアル類も不備であった。

そこで、今回は、最新の知見の中で反映可能なものを取込んで 1988 年時の試作手法の改良（計算コード中のサブモデルの改良）を行うとともに、改良後のものを FEVER-M という名称のもとに、マニュアル類も含めて改めて整備することとした。

2-2. 整備した照射初期燃料温度評価手法の概要

2-2-1. 燃料内温度分布の評価方法

燃料の熱的裕度を評価する上での根幹となる燃料の熱的状态、即ち燃料内温度分布 $T(r)$ は、簡単には、

$T(r) = \text{被覆管内表面温度} + \text{燃料} \cdot \text{被覆管ギャップ部温度上昇量} + \text{燃料内温度上昇量}$ として評価することができる。このうち、被覆管内表面温度は、通常、サブチャンネル温度解析により既知の値として与えられることから、燃料・被覆管ギャップ部温度上昇量と燃料内温度上昇量を評価する手法の開発が必要となる。

まず、燃料内温度上昇量は、簡単には 1 次元の伝熱計算で評価することが可能である。以下に解析的な評価式を示す。

$$Q = \int 2\pi r \cdot q \cdot dr = -k \cdot 2\pi r \frac{dT}{dr} \quad \text{----- (2-1)}$$

$$\int_r^R \frac{dr}{r} \int_0^r q \cdot r \cdot dr = \int_{T_s}^{T_r} k \cdot dT \quad \text{----- (2-2)}$$

Q：熱量、q：発熱密度分布、k：熱伝導度、R：燃料外半径、Ts：燃料外表面温度、
Tr：径方向位置 r での温度

この式は、一般的な円管内の温度分布を評価する際に利用されるものであり、実用的な評価方法といえる。旧版のFEVERでも上記の1次元伝熱評価式が用いられており、別の手法に置きかえる必要性が特に認められないことから、FEVER-Mにおいても上記のものを用いることとした。

ここで、式中の熱伝導度kに関しては、一般物質の場合、低温側ではフォノン伝導、高温側ではフォトン伝導（あるいは電子伝導）が伝熱を支配する伝熱機構の変化に応じて、単調ではない強い温度依存性を示すことが知られている。MOX燃料については、2000℃を越える高温域での熱伝導度実測評価（熱伝導度自体は実測できる物性ではない。比熱、及び熱拡散率が実測されるものであり、それらの積に、測定試料のかさ密度を乗じることで熱伝導度が評価できる）が困難であるため、高温側の伝熱機構がフォトン伝導か電子伝導であるかについては議論の余地がある。しかしながら、いずれの機構であっても、理論的考察からは概ね温度の3乗に比例するものであると予想できることから、JNC内では、高温域については温度の3乗と相関づけた以下の式を採用している³⁾。

$$k = \frac{D}{1 + \alpha(1 - D)} \left\{ \frac{1}{0.0238 + 1.2(2.0 - OM) + 2.48 \times 10^{-4}(1 + 0.0859 \cdot PU)T} + 6.95 \times 10^{-11} T^3 \right\}$$

k：熱伝導度 [W/m/K]、D：理論密度比 [-]、OM：O/M比 [-]、----- (2-3)
PU：Pu濃度 [-]、T：温度 [K]、α：調整係数

これに対し、高温の伝熱機構を電子伝導と考え、電子伝導の理論に忠実に定式化したもの等、上記以外にも数種類の熱伝導度評価式が提示されている（特に、気孔が及ぼす効果、即ち密度依存性については種々の考え方が提示されており、研究者間で統一的な見解、取り扱い方が見出されていない）。しかしながら、現在までに取得されている熱伝導度実測評価値の質、量がともに不十分であることから、それら提示式の取捨選択を、十分な理論的裏付けのもとに行うことは困難な状況にある。そこで今回は、実際の照射燃料に関する挙動解析での使用実績があるという点から、JNCで取得された熱伝導度実測評価値等に基づき定式化し、旧版のFEVERでも採用している上記の(2-3)式を、FEVER-Mにも用いることとした。

次に、燃料・被覆管ギャップ部温度上昇量であるが、これについては、一般に、Ross&Stouteが提示したギャップ熱伝達率評価モデル⁵⁾を基礎にした手法の使用が多く認められる。以下にその例を示す³⁾。

$$\Delta T_G = \frac{W}{2\pi R_{ci} H_{FC}} \quad \text{-----} \quad (2-4-1)$$

ΔT_G：ギャップ部温度上昇量

W：線出力

R_{ci}：被覆管内半径

H_{FC}：ギャップ熱伝達率

$$= H_c + H_s + H_r \quad \text{-----} \quad (2-4-2)$$

H_c：ガスによる熱伝達項

$$= \frac{K_G}{C(R_f + R_c) + TJD + G} \quad \text{-----} \quad (2-4-3)$$

R_f, R_c：燃料、被覆管の表面粗さ、TJD：温度ジャンプ距離、

G : オンパワー時ギャップ幅、 K_G : ギャップ部ガス熱伝導度、C : 係数
 H_S : 固体接触による熱伝達項 (燃料-被覆管接触時)
 H_R : 輻射による熱伝達項

$$= \sigma \left\{ \frac{1}{\epsilon_f} + \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right) \right\}^{-1} (T_{fs}^2 + T_{ci}^2)(T_{fs} + T_{ci}) \quad \text{----- (2-4-4)}$$

T_{fs} : 燃料外表面温度 [K]、 T_{ci} : 被覆管内表面温度 [K]、
 ϵ_f 、 ϵ_c : 燃料、被覆管輻射率 (=0.8 , 0.9)、
 A_f/A_c : 燃料、被覆管伝熱面積比 (=1.0)、
 σ : Stefan-Boltzman 定数 (=5.66961×10⁻¹²)

上式は、ギャップ部における熱伝達は2ないし3種の経路 (燃料と被覆管が接触していなければガス及び輻射の2経路、接触している場合は、それらにあわせて接触部での固体熱伝達を考慮する) から成るとするもので、Ross&Soute ギャップ熱伝達率モデル⁵⁾を一部修正したもの³⁾である。旧版のFEVERでは、上記のものが用いられている。

ここで、上記モデル中で想定されている3種類の経路のうち、燃料と被覆管とが接触している場合に機能するとして固体接触による熱伝達は、被覆管内表面と燃料外表面とが面接触している状態を想定しているものである。一方で、ガス熱伝達項の評価式に導入されているように、被覆管と燃料それぞれに表面粗さがあることを考慮すると、被覆管と燃料とが完全な面接触となるには長期にわたる接触が必要 (クリープ変形等により表面粗さが失われることが必要) と考えられる。即ち、実際には固体接触ではなく、表面粗さに応じたガス熱伝達により、接触時のギャップ部熱伝達が支配されている可能性が考えられる。

そこで、FEVER-Mにおいては、燃料と被覆管とが接触するような場合については、固体接触による熱伝達は無視することとし、表面粗さに応じたガス熱伝達の寄与を考慮して熱伝達率を評価することとした。以下に、FEVER-Mで用いることとしたギャップ熱伝達率評価式を改めて示す (詳細は、本報付録を参照されたい)。

$$H_{FC} = H_G + H_R \quad \text{----- (2-5)}$$

$$H_G = \frac{K_G}{C(R_F + R_C) + TJD + G} \quad \text{----- (2-4-3)}$$

R_F 、 R_C : 燃料、被覆管の表面粗さ、TJD : 温度ジャンプ距離、
G : オンパワー時ギャップ幅、 K_G : ギャップ部ガス熱伝導度、C : 係数

$$H_R = \sigma \left\{ \frac{1}{\epsilon_f} + \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right) \right\}^{-1} (T_{fs}^2 + T_{ci}^2)(T_{fs} + T_{ci}) \quad \text{----- (2-4-4)}$$

T_{fs} : 燃料外表面温度、 T_{ci} : 被覆管内表面温度、 ϵ_f 、 ϵ_c : 燃料、被覆管輻射率、
 A_f/A_c : 燃料、被覆管伝熱面積比、 σ : Stefan-Boltzman 定数

2-2-2. 温度に関連する燃料挙動の取り扱い

照射中の燃料には、中心部に大きな空孔部が生じたり、製造時には均一であったPu濃度分布が変化する等の各種の現象が生じる。それらは燃料挙動と総称され、その発生機構や、影響などについての研究が進められてきた^{6,7)}。

そのような過去の研究の結果、照射初期の燃料温度に影響を及ぼしうる燃料挙動として、

- ・ 組織変化（組織再編挙動とも呼ばれる）⁶⁻⁹⁾：照射中に製造時には均一であった組織が変化し、新しい組織が形成される現象。典型例として、高温側から順に中心空孔、柱状晶領域、ガスバブル領域、等軸晶領域が形成され（それぞれ、形成しきい温度を有していると考えられている）、もっとも低温側となる外周部では製造時からほとんど変わらない組織（未変化領域）が維持されることが確認されている。
- ・ ギャップ幅変化^{8,9)}：照射中に、製造時に比べ燃料・被覆管ギャップ幅が変化する現象。照射初期から燃焼度 50GWd/t 程度の中期照射の燃料では、通常、製造時よりもギャップ幅が狭くなる⁸⁾が、100GWd/t を超えるような長期照射の高燃焼度燃料では製造時と同程度まで再開している場合が確認されている⁹⁾。
- ・ Pu 再分布挙動¹⁰⁾：照射中に、製造時には均一であった Pu 濃度分布が変化する現象。典型例として、外周部の Pu 濃度に比べ、燃料中心部では Pu 濃度が増加、中央部では Pu 濃度が減少する傾向が確認されている。外周部の Pu 濃度は、通常、照射中の Pu の消耗により製造時よりも低くなる。
- ・ O/M 比再分布挙動¹¹⁾：照射中に、製造時には均一であった O/M 比分布が変化する現象。典型例として、燃料中心部では製造時よりも低い O/M 比に、外周部では定比（2.00）に近い O/M 比となると考えられている（燃料中の局所的な O/M 比を正確に測定することは非常に困難であるため、実際の照射燃料に関して実験的に十分に確認できているわけではないが、炉外での模擬試験結果では前記の変化傾向が確認されている）。

以上の 4 種類程度を考慮しておくことが考えられる。これらに関し、以下で、温度への影響の及ぼし方や、挙動の発生規模についての定量評価方法を示す。

1) 組織変化

照射中の燃料内には、中心空孔や柱状晶形成等の組織変化が生じることが知られている。この組織変化は、結晶粒成長や、燃料内に存在している微小気孔（ポア）が温度や温度勾配に応じた物質輸送により高温側である燃料中心部へと移動すること等により生じると考えられている。現在までの経験からは、高温側から、中心空孔、柱状晶、ガスバブル、等軸晶、未変化領域といった組織が形成されることが確認されており、簡単には、中心空孔はその大きさ自体が、他は領域内の密度分布を介して、燃料温度に影響を及ぼすと考えられている。

このことから、燃料温度を評価する上では、組織変化挙動を考慮する必要があると考えられている。ただし、伝熱機構と燃料内の結晶の状態との相関等、組織変化が燃料温度に及ぼす微視的な影響については十分な理論的考察は行えておらず、旧版の FEVER では、組織領域個々の伝熱特性は考慮しないこととしていた。

現在においても、組織変化の微視的影響に関する知見は十分に得られておらず、微視的影響の定量化を行っていない。このため、FEVER-M においても、旧版の FEVER と同様、柱状晶領域径等、中心空孔径以外の組織変化領域が燃料内の伝熱機構に対して及ぼしうる影響（例えば、結晶粒の形状や結晶粒界の状態に応じて伝熱機構に変化が生じる可能性が考えられる）は考慮しないこととし（即ち、組織領域別に燃料を区分し領域個々に特定の伝熱特性を与えることはしない）、中心空孔の成長量と密度分布のみを評価し、燃料温度評価に反映させることとした。

以下で評価モデルを概説する。

まず、組織変化をポアの移動によるものと考え、高密度化による体積減少量を中心空孔形成量とすればよい。即ち、密度分布を評価し、その結果得られる高密度化量を中心空孔形成量とする

ことで、燃料温度評価に必要な組織変化挙動を評価できることとなる。

密度分布は、局所的なポア量の変化から評価できる。このポア量の変化は、ポアの移動によって生じるものであり、ポアの移動は、簡単には、燃料成分である U 酸化物、Pu 酸化物の蒸発・凝縮機構による輸送の結果として起こると考えられている。ポアの移動速度については、以下のような評価モデルが提示されている⁴⁾。これは旧版の FEVER で用いられたものである。

$$v = M \cdot D_G \cdot \left(\frac{1}{k_B T} \frac{dP}{dT} - \frac{n}{k_B T^2} \right) \cdot \beta \cdot \frac{dT}{dr} \Big|_{\text{solid}} \quad \text{----- (2-6-1)}$$

v : ポア移動速度 [cm/s]、 k_B : ボルツマン定数 (= 1.3708×10^{-16})、T : 温度 [K]、 $dT/dr|_{\text{solid}}$: 固相での温度勾配

$$M = \frac{M_w}{N_A \cdot \rho_{TD}} \quad \text{----- (2-6-2)}$$

M_w : 燃料分子の質量、 ρ_{TD} : 理論密度、 N_A : アボガドロ数 (= 6.022×10^{23})

$$D_G = \frac{3}{8} \left(\frac{\pi \cdot k_B \cdot T}{2M_G} \right)^{1/2} \frac{1}{n \cdot \pi \cdot d^2} \quad \text{----- (2-6-3)}$$

n : 1 c c 当りのガス分子のモル数、d : ポア内ガス分子の直径 (= 3.759×10^{-8})、

$$M_G = \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{-1} \quad \text{----- (2-6-4)}$$

M_1, M_2 : ポア内ガス分子の質量 (= $28/N_A, 270/N_A$)

P : 蒸気圧

・ U 系の蒸気圧 $P_U = C_U \cdot P_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ ----- (2-6-5-1)

C_U : 固相での U 濃度

$$\begin{aligned} P_0, Q/R &= 3.269 \times 10^{11}, 7.1902 \times 10^4 & T < 2000\text{K} \\ &= 9.841 \times 10^{11}, 7.4186 \times 10^4 & 2000\text{K} < T < 2200\text{K} \\ &= 2.682 \times 10^{12}, 7.6354 \times 10^4 & T > 2200\text{K} \end{aligned} \quad \text{----- (2-6-5-2)}$$

・ Pu 系の蒸気圧 $P_{Pu} = C_{Pu} \cdot 7.5062 \times 10^{-3} \cdot 10^{P_1}$ ----- (2-6-6-1)

C_{Pu} : 固相での Pu 濃度 ($C_U + C_{Pu} = 1.0$)

$$P_1 = \frac{-5404.1 + 6854.6 \times (2.0 - OM)}{T} + 18.166 \ln T - 0.003389T - 130.65 \quad \text{-- (2-6-6-2)}$$

OM : O/M 比

上記のモデルは、ポア移動速度に大きな影響を及ぼす燃料内の蒸気種に関し、U 系蒸気種として UO_2 を、Pu 系蒸気種として PuO_{2-x} をそれぞれ想定したものである。モデル中の係数 β は、気相 (ポア内) における温度勾配は固相における温度勾配の定数倍となるとの仮定に基づき導入されているもので、概ね 2 から 4 程度の値が用いられる^{3,4)}。上記のモデルに関しては、蒸気圧の評価方法等、議論の余地が残る部分はあるが、現在のところ、このモデルに代わり得るものを検討できていないことから、FEVER-M においても、旧版の FEVER と同様に上記モデルを用いることとした。

なお、ポアの移動量、即ち密度変化については、上記のモデルで得られるポア移動速度に、燃料

内に存在するポア量を乗じることで評価できる。その詳細は、参考文献 12 を参照されたい。

2) ギャップ幅変化

2-1) ギャップ幅変化の要因について

照射により、燃料と被覆管の間のギャップ幅が製造時のものから変化することが知られており、燃焼開始直後には製造時よりもギャップ幅が狭くなるとの経験が得られている⁸⁾。このようなギャップ幅変化の要因については、まず、燃料、被覆管の熱膨張差が考えられる。この他に、不可逆的な変形である燃料、被覆管のスエリング等が考えられ、現時点では概ね

- ・ 熱膨張
- ・ 燃料のスエリング
- ・ 燃料のクリープ
- ・ 被覆管のスエリング
- ・ 被覆管のクリープ
- ・ 燃料の焼き締まり
- ・ 燃料のホットプレス
- ・ 燃料のリロケーション

をギャップ幅変化の要因として考慮することで、良好な精度でギャップ幅変化量を予測できるものと考えられている^{3,4)}。

これに関し、今回整備するとした温度評価手法では、応力評価を伴わない形で燃料温度を評価することとしている。そのため、ギャップ幅変化の要因として挙げた上記のうち、応力評価を必要とする以下の3種

- ・ 燃料のクリープ
- ・ 燃料のホットプレス
- ・ 被覆管のクリープ

は機能上、考慮することができないものである。

また、照射初期に限定して考えると、ある程度燃焼が生じなければ顕在化しない（潜伏期間がある）と考えられている被覆管のスエリングは、照射初期を対象とする温度評価では、無視することができるものである。一方、燃料のスエリングは、燃料内に生成、蓄積される FP により生じるものであることから、照射開始後から生じると考えられるものの、照射初期のスエリング量は微量であることから、照射初期の燃料温度評価上、その効果は無視できると考えられる。

そこでギャップ幅の変化については、

- ・ 熱膨張
- ・ 燃料の焼き締まり
- ・ 燃料のリロケーション

の3つの要因から評価することとした。なお、このような考え方は旧版の FEVER と同様のものであるが、要因を限定してギャップ幅変化を評価することで温度評価精度にどの程度の影響が生じるかについては、今回も検討は行っていない。

上記の要因のうち、リロケーション以外については、ほぼ、機構が把握できているとともに、ギャップ幅変化に対する寄与を定量的に評価するモデルが構築され、実際の評価に供されている。そこで FEVER-M においても、熱膨張、燃料の焼き締まりについては既存の評価手法をそのまま流用することとし、旧版の FEVER で用いられたものをそのまま用いた。詳細については文献 3, 12 を参照されたい。

一方、残るリロケーションは、機構が十分に把握できていないことから、経験的に評価されているものである。以下でこのリロケーション量評価方法を説明する。

2-2) リロケーション量評価方法について

まず、照射後試験結果からは、ごく短期間の照射しか経験していない燃料を含め、非常に多くの燃料で、ギャップ幅が製造時よりも減少していることが確認されている^{3,8,13-16)}。通常、照射を経験した燃料には多数のクラックが生じていること等から、一般には、照射開始直後の燃料内の急激な温度変化等により燃料に欠けや割れが生じ、それら欠け割れ片が被覆管側に移動、即ち、ギャップ幅を減少するように再配置される結果、ギャップ幅が製造時のものよりも減少すると考えられており、そのような現象がリロケーション挙動と称されている。

しかしながら、リロケーション挙動を炉外で模擬することが困難であること等から、上記のような燃料の欠け割れ、及び再配置を明確に説明できる機構モデルは構築されておらず、現段階では、経験的に挙動を評価、即ち、実際に生じたギャップ幅減少量を再現できるように簡易な定式化を行うに留まっている。

これに関し、JNC内では、最近になってようやく、照射初期の挙動に着目した照射試験結果の整理に目が向けられるようになり、不十分ながらもリロケーション量に関する実測値が蓄積され始めてきた。

そこで今回は FEVER-M 用に、最近蓄積されたりロケーション量実測値に基づき、従来のリロケーション量に関する経験的評価式の係数を再調整することで再現性の高い評価式を改めて得ることを考えた。現在、JNC内では蓄積されたデータに基づき、従来のリロケーション挙動に関する経験的評価とは異なる観点からの検討が JNC内でも別に試みられている。ただし、評価モデルの妥当性や評価式導出の論拠等を明確化し、客観的に説明できるようになるまでには時間を要すると思われる。そこで今回は、先に示した様に、従来知見を利用してより再現性の高いリロケーション挙動評価式を作成することとした。

まず、リロケーション量実測値についてであるが、「常陽」Mk-II 炉心や海外炉を含め、短期間の照射を経験した燃料で、詳細に照射後の燃料・被覆管残留ギャップ幅が測定されたものとして、PE01（海外照射、ただし燃料は旧 PNC で製造されたもの）試験試料、B4M 試験試料（「常陽」照射、380W/cm 程度を達成したと評価されている高線出力短期照射試験）、B5D2 試験試料（「常陽」照射、数%程度の燃料溶解を達成したと評価されている PTM 試験）がある³⁾。

これら以外にも、例えば PTM 試験として行なわれた P19, P20 試験等、海外でも、照射後の残留ギャップ幅測定結果が報告されている照射試験はある³⁾。しかしながら照射後残留ギャップ幅については、照射中の振動等により燃料に偏芯が生じることから、局所的な値は残留ギャップ幅として意味を持たず、周方向複数点の測定結果を平均したものを残留ギャップ幅として採る必要があると考えられている。これに関し、上記の PE01, B4M, B5D2 試験試料は、周方向 8 点程度の測定結果を平均していることが確認できているが、P19 や P20 試験等の海外での測定結果は、測定方法の詳細が必ずしも十分把握できていないため、現時点では先に挙げた 3 種の試験結果と同列に取り扱うべきではないと考えられる。

そこで今回の整備においては、上記の 3 種の試験結果のみに基づきリロケーション量評価式を作成することとした。評価式作成に利用した試料の詳細は表 2-1 に示す。なお、表に示した試料は、いずれもごく短期間の照射を経験したもので、燃焼度は非常に低いものである。先にギャップ幅変化の要因の一つとしてあげた燃料の焼き締まりは、照射初期に生じる不可逆的な挙動であり、ギャップ幅を増加させる効果を有すると考えられているが、照射時間が極めて短く、燃焼がほとんど進

行していない場合には、その効果は極めて小さいと考えられている³⁾。照射後の試料の密度測定を実施していないことから、表 2-1 中の試料に生じた焼き締め量を実験的に確かめられているわけではないが、表 2-1 中の試料はいずれも、ごく短期間の照射しか経験していない燃焼度が極めて低いものであり、従来知見³⁾に基づくと、焼き締め量は極めて小さいと考えられ、焼き締めによる顕著なギャップ幅増加が生じたとは考えにくい。そこで、表 2-1 中の試料には焼き締めによるギャップ幅変化は生じていないものと考え、照射後の残留ギャップ幅測定値と製造時のギャップ幅との差をリロケーション量として考えることとした。

繰り返しになるが、リロケーション挙動はその機構が不明である。ただし、照射中の欠け割れが寄与すると考えられることから、燃料の温度や幾何学的形状と関連がある可能性が考えられる。そのようなことから従来は、線出力（温度を代表するものとして）や製造時のギャップ幅（幾何学的形状を代表するものとして）のいずれかを因子としてリロケーション量評価が試みられてきた^{13,14)}。

これに関し、表 2-1 中のデータからは、図 2-1-1、図 2-1-2 に示すように、リロケーション量が線出力や製造時のギャップ幅の両者に依存する傾向が認められる。そこで今回は、燃料が経験する温度、幾何学的形状の両者がともにリロケーション挙動に対して効果を及ぼし合うと考えることとし、既に提示されている経験的評価式どうしを組み合わせることを試みた。以下に式の形状を示す。

$$R = C_1 G_0 + (C_2 + C_3 \cdot W) R_f \quad \text{----- (2-7)}$$

R：リロケーション量(直径値)、 G_0 ：製造時ギャップ幅(直径値)、W：線出力、

R_f ：製造時燃料外半径、 $C_1 \sim C_3$ ：係数

上式の第 1 項は FRAP モデル^{14,15)}、第 2 項は EPRI モデル¹³⁾に基づくもので、上式は、製造時ギャップ幅に依存してリロケーション量はほぼ決まる（FRAP モデル的）が、製造時の燃料外半径や照射中の温度（線出力で代替）に応じ、画一的でない動きを示す（EPRI モデル的）としてリロケーション挙動を表現したものである。

この(2-7)式を用いて先の 3 試験結果を整理した結果を図 2-1-3 に示す。(2-7)式中の係数 C_1, C_2, C_3 は、最小二乗法に基づく多変量解析により同時に求めた。以下には得られた式を示す。

$$R = 0.6G_0 + (-40.0 + 0.05 \cdot W) \times 1.0 \times 10^{-3} \times R_f \quad \text{----- (2-8)}$$

R：リロケーション量(直径値) [cm]、 G_0 ：製造時ギャップ幅(直径値) [cm]、

W：最大線出力 [W/cm]、 R_f ：製造時燃料外半径 [cm]

図 2-1-3 には、(2-8)式の実測値に対する再現性を示したが、実測値と評価値との差は概ね $\pm 40 \mu\text{m}$ 程度と、比較的良好な再現性を達成していることがわかる。試験試料の線出力範囲が 300W/cm を超えるものであることから、より低線出力側への外挿性に不確かさは残るものの、ここに示した試験試料の条件範囲内であれば、今回用いた式で良好にリロケーション量を予測評価できると考えられる。

そこで、FEVER-M におけるリロケーション量評価式として(2-8)式を用いることとした。ただし、式中の線出力については、現時点ではまだ、リロケーション量の経時変化を考察できる知見を得ていないことから、暫定的に照射中の最大線出力を用いている。また、(2-8)式作成に用いた表 2-1 中の照射条件（最大線出力）は、1 章で示した様に、現時点での暫定値である。

3) Pu 再分布及び O/M 比再分布挙動

Pu 再分布は、燃料内の Pu 濃度分布が製造時の均一なものから変化する現象¹⁰⁾、O/M 比再分布は、燃料内の O/M 比分布が製造時の均一なものから変化する現象¹¹⁾ である。これらはともに、照射初

期から発生する可能性が高いことが経験的に確認されている。

それに対し、燃料の融点や熱伝導度は Pu 濃度や O/M 比に対する依存性を有していることが知られている。このことから、照射初期の燃料の温度を評価する上で、Pu 再分布や O/M 比再分布挙動は重要なものであると考えられている。

しかしながら、この両者はともに、定性的、即ち、挙動の機構や挙動の傾向といった事項はほぼ明らかになってきているものの、それらに関する考察に基づく定量評価結果は、必ずしも実際の挙動を精度良く再現できるものではなく、定量評価手法は開発途上にあるといえる。

そこで、温度評価誤差の原因となる可能性は考えられるが、FEVER-M においても、旧版の FEVER と同様に O/M 比再分布や Pu 再分布を考慮しないこととした。ただし、今後の研究進展により、良好な評価精度で両挙動を評価できるモデルが確立できた場合には、それらを FEVER-M に組み込んでいく必要がある。

2-2-3. 燃料融点の取扱い

今回整備することとした照射初期燃料温度評価手法は、すでに 1. に示したが、PTM 試験の評価にも利用する予定であり、燃料が溶融した場合の溶融量を評価することが必要となる。このためには、燃料融点を適切に評価できていることが要求される。

この燃料融点については、従来、未照射 MOX 試料についてのサーマルアレスト法による測定結果である Aitken&Evans の報告値（1968 年公開、図 2-2 に示す）¹⁷⁾ が用いられてきた。この値は、ほぼ同時期に報告された Lyon&Bailey の値¹⁸⁾ との整合性が良好でなく、同値に比べてやや高めな値と思われるが、O/M 比を変化させ融点の O/M 比依存性を系統的に取得しているという点で、現在においても希少なデータとして高い価値を有しているものである（現在、Aitken&Evans 以外に O/M 比依存性評価のために O/M 比をパラメータとした融点測定結果は報告されていない）。

しかしながら同値については、1985 年に、1968 年時の値（以下、旧値と称する）をおよそ 20℃ 程度下方修正した値（以下、修正値と称する）が改めて報告されている¹⁹⁾。この修正値は、図 2-2 に示すように、旧値よりも Lyon&Bailey の値¹⁸⁾ との整合性が高いものである。さらに、修正値と整合する実験値が JNC でも得られ始めている²⁰⁾。また、修正に至った理由の詳細は不明であるが、1985 年の報告値の評価に際しては、UO₂ の融点を IAEA の推奨値である 2847℃、PuO₂ の融点を、現時点でも最も信頼性が高いと考えられている 2390℃としていたことが明らかとなっている¹⁹⁾。

これらのことから、現時点においては、従来用いられてきた旧値よりも 1985 年に改めて報告された修正値の方が、信頼性は高いと考えられる。

そこで今回は、旧版の FEVER で用いられていた Aitken&Evans の旧値に換えて、1985 年に報告された修正値を FEVER-M の融点として用いることとした。なお、1985 年の文献 19 中では、O/M 比 2.00 についてのみ報告されている。そこで今回は、旧 PNC が入手していた非公開情報^{*}) も併用して、Aitken&Evans が示した融点の O/M 比依存性評価図から値を読み取り、それらを個々に修正することにより、O/Pu 比で 1.60 から 2.00、Pu 濃度 0 から 100% の範囲についての修正値を得ることとした（図 2-3 参照）。再評価後の融点は、表 2-2 にまとめた。表中に記載のない値は、表中の値を直線補間して求めることとしている。

*) 旧 PNC が Aitken から 1976 年に入手した非公開情報には、サーマルアレスト法で融点を評価する際の手法が示されており、1968 年時の方法と、1968 年以降の知見蓄積に応じて 68 年時の手法を見直したものが併記されている。1985 年に報告された修正値は、1976 年の非公開情報に記載さ

れていた見直し方法により得られる値と整合するものであることから、今回の評価では、旧 PNC が得た非公開情報に基づき得られる値を、1985 年の修正値として用いている。ただし、このような取扱いで問題がないか、また、1985 年時に 1968 年公開値のすべてについて修正結果を公開していない理由等、1985 年の修正内容に関する詳細については、Aitken に対して確認をとっていない。

2-3. 計算コードとしての形態

今回整備した照射初期燃料温度評価手法 FEVER-M は、計算コード化したものである。そこで、計算コードとしての機能等を以下にまとめる。

まず、プログラミングは FORTRAN77 言語を用いて行っており、JNC 保有の富士通製大型計算機上での運用を前提としている。計算に必要な入力値は、ファイルに保存しておき、計算時にファイル名を指定する形式としている。

次に、具体的な計算の手順であるが、まず、図 2-4 にはフローチャートを示した。プログラム中では、燃料ピンを軸方向に最大で 5 セグメントに分割、各セグメントを径方向に最大で 10 ノードに分割して取り扱っている。ただし、1 次元の伝熱計算により燃料温度を評価するとしたことから、セグメント間、即ち、軸方向の熱流は存在しないものとしており、各セグメントは熱的に独立したものとして位置づけている。また、図 2-4 からわかるように、各セグメントに共通のものとして与える燃料ピン内プレナムガス圧を算出、その後、各セグメントについて個々に径方向温度分布を算出していく手順となるようプログラミングしている。

計算に要する時間であるが、現在のところは、CPU 時間で 10 分を超えない程度（大型計算機の JOB クラスは A クラス）である。実時間としても 10 分を超えない程度である。

なお、計算に必要な入力値であるが、FEVER-M は、照射期間中の任意の時刻について、被覆管内表面温度を入力値として与えることで、ギャップ部温度上昇量及び燃料内温度分布とを応力評価を伴わない形の 1 次元伝熱計算により評価するものである。この燃料内の温度分布評価においては、Pu 濃度、O/M 比、及び密度に対する依存性を考慮した熱伝導度評価式を用いており、ポアの移動速度に応じて得られる中心空孔の形成量、密度分布を熱伝導度評価に反映させているが、Pu 再分布、O/M 比再分布は考慮しないとしたことから製造時の値をそのまま用いることとしている。

このことから、

- ・ 照射期間中の被覆管温度、線出力の変化履歴
- ・ 製造時の燃料ペレット寸法、被覆管寸法（外半径、内半径等）
- ・ 製造時の燃料仕様（O/M 比、Pu 富化度等）

を入力値として与える必要がある。なお、この他の入力値の詳細やプログラムの運用方法の詳細、あるいは、本報中で説明していない FEVER-M 中の各サブモデルの詳細（係数値等）等については、本報付録のマニュアルを参照されたい。

3. FEVER-M の較正結果

3-1. 較正の必要性と較正方法

燃料温度を評価する手法を確立するためには、導入する個々の評価モデルを現実的に構築することに加えて、照射試験結果等を用いて温度評価結果を補正することが必要となる。これは、現在のところ、温度評価手法に導入している一部の物性評価式や挙動評価モデルに、理論的考察のみでは実際の現象を表現しきれないものがあるためである。実際の現象は、非常に多くの要因が複雑に関連しあって生じるものであるが、そのような事象進展を忠実にモデル化することは困難であるため、要因を限定する等の簡素化を行って評価式や評価モデルを構築することとなる。このため、例えば 2. に示した熱伝導度評価式の密度依存項中の係数 α のように、評価結果を調整するための係数を導入し、実際の現象に対する再現性を確保する方法が用いられることとなる。

FEVER-M においては、2. に示したように、熱伝導度評価式中の係数 α 、及び、ポアの移動速度評価式中の係数 β の 2 種類が調整係数に相当する。これらは、FEVER-M で用いた熱伝導度及びポア移動速度評価式において、従来から調整係数として位置づけられてきたものであり、任意に選択された評価対象試料の温度評価値（推定値もしくは実測値）を計算で適切に再現できるよう、パラメータ解析的に最適値が求められてきた。ただし、必ずしも汎用的な値が得られるわけではなく、従来は、係数 α については 1.5 を下回る程度、 β については 2 から 4 程度の範囲のなかで研究者個々に異なる値が用いられてきている^{3,4,12)}。

そこで FEVER-M に導入する α 値、 β 値についても、従来同様、任意に選択した試料を用いてのパラメータ解析から決定することとした。この調整係数値決定作業が「較正」である。

較正の方法であるが、まず、係数 α は、熱伝導度、即ち、温度に直接影響を及ぼすものである。一方、係数 β は、ポアの移動速度、即ち、中心空孔径に直接影響を及ぼすものである。このことから、較正には、燃料温度、及び、中心空孔径が評価済みの照射試験結果を用いることが必要とわかる。

そのような照射試験結果として、今回は、「常陽」で行われた PTM 試験である B5D2 試験の結果を用いることとした。PTM 試験は、燃料を溶融させる試験である。照射中の燃料では、燃料ピン軸方向に線出力分布が生じていることから、燃料が溶融する場合には、燃料温度と密接な相関を有する線出力分布に応じて軸方向に溶融境界が生じることとなる。この溶融境界位置については、燃料の照射中の最高到達温度（燃料中心温度の最大値）を燃料融点と同一であったと考えることができる。このことから、燃料ピン軸方向の溶融境界位置における燃料中心温度評価値が燃料融点に一致することをもって、温度評価手法を妥当、即ち、較正を終えたと考えることができる。

そこで、今回の較正においては、B5D2 試験試料のうち溶融境界位置のものについて、照射後の金相観察により得られている中心空孔径を再現しつつ、燃料温度評価値が燃料融点と一致するよう、先の 2 種類の調整係数をパラメータ解析的に最適化することとした。

次節では、較正に用いた B5D2 試験試料について説明する。

3-2. B5D2 試験試料について

「常陽」で 1992 年 6 月に行なわれた PTM 試験である B5D2 試験は、Pu 富化度約 20wt.%、燃料ペレット直径約 6.5mm ϕ の燃料ピン 2 4 本を B 型特殊燃料集合体として「常陽」で照射したものであ

る^{1,2)}。照射後試験で得られた燃焼率実測値から推定すると到達最大線出力は700W/cm程度と評価されており、24ピンすべてに溶融が認められている。照射後の横断面金相観察結果からは最大で約10%程度の溶融量を達成したと評価されている。

このB5D2試験実施に際しては、試験計画時の溶融/未溶融に関する予測評価技術の妥当性確認を主眼とした先行試験として、溶融限界線出力予測値相当で照射するB5D1試験が1991年6月に行なわれている。このB5D1試験には、B5D2試験と同様の燃料ペレットが用いられており、合計4ピンが最大620W/cm程度の線出力で照射されている。

これらのうちの3ピンについては、燃料ピン軸方向の溶融境界位置を判定可能な程度の燃料溶融が認められたことから、B5D2試験ピンと同様に燃料温度が既知の試験結果としてFEVER-Mの較正に用い得るものである。しかしながら、先行試験との位置づけであったために、B5D1試験試料は溶融面積割合が詳細に評価されていない等、照射後試験に不十分な面が認められる。

そこで、今回は、B5D2試験試料のみに較正用試料を絞り込むこととした。

B5D2試験試料のうち、溶融境界位置の試料については表3-1に、また、燃料ピンの軸方向中央部から採取した試料（最大溶融部と考えられる）については表3-2に、製造時の燃料仕様や照射後金相観察結果等を整理して示した。

3-3. FEVER-M 較正結果

3-2.に示した較正用試料を用いて、調整係数である α （熱伝導度評価式の密度依存項中の係数）及び β （ポア移動速度評価式のポア内温度勾配評価項中の係数）の2値をパラメータ解析により最適化したところ、 α 値として0.8、 β 値として3.4を得た。

これらを用いて再度、較正用試料の温度評価を行い、較正後のFEVER-Mによる評価結果の妥当性を確認することとした。

まず、図3-1に中心空孔径評価結果と実測値との比較を示す。図3-1からは、較正後のFEVER-Mによる評価結果は、実測値をほぼ $\pm 0.016\text{cm}$ の範囲で再現していることがわかる。この不確かさ幅は小さなものではないが、中心空孔径の実測に関するJNC内での経験からは、通常、照射後の燃料の横断面金相観察で中心空孔径を評価する際には、少なくとも0.005cm程度と、比較的大きな不確かさを見込んだ方が良く考えられている。したがって、実測値の不確かさが小さくないことを考慮すると、較正後のFEVER-Mによる中心空孔形成量評価結果は比較的良好な再現性を有していると考えられることができる。

次に、照射中の燃料中心温度最大値評価結果と推定値（融点）との比較を図3-2に示す。図3-2からは、較正後のFEVER-Mによる評価結果は、推定値をほぼ $\pm 60^\circ\text{C}$ の範囲で再現していることがわかる。照射中の燃料中心温度最大値の推定値として用いた燃料融点に $\pm 35^\circ\text{C}$ 程度の不確かさがあること¹⁹⁾を考慮すると、較正後のFEVER-Mは、非常に良好に燃料中心温度を再現できていると考えられることができる。

以上のことから、FEVER-Mは、較正の結果、以下の不確かさを有する温度評価手法として整備できたと考えられる。

- ・燃料温度評価に関して $\pm 60^\circ\text{C}$ の不確かさ（ただし、燃料中心部の照射中最高温度について）
- ・中心空孔形成量に関して $\pm 0.016\text{cm}$ （半径値）の不確かさ

3-4. 燃料溶融時の溶融量評価値の不確かさ幅

FEVER-Mは、1.に示した様に、B10 照射試験の試験条件検討に利用するものとしても整備している。このB10 照射試験のようなPTM 試験を「常陽」で実施する場合には、溶融面積割合が20%を超えないように試験条件を設定するよう規制されている。

このことから、FEVER-Mによる溶融量評価値の不確かさを把握しておく必要がある。

そこで、B5D2 試験の溶融試料について溶融量を評価し、それを実測値と対比することで、溶融量評価値の不確かさを検討することとした。

図3-3には、溶融面積割合に関する比較結果を示した。溶融面積割合は、以下の式にて評価したものである。

$$(\text{溶融面積割合}) = \left\{ \frac{\text{溶融半径}}{\text{燃料外半径}} \right\}^2 \quad \text{----- (3-1)}$$

溶融半径、燃料外半径：いずれもFEVER-Mによるオンパワー時ノミナル評価値

図3-2からは、まず、校正後のFEVER-Mによる評価結果は、実際の溶融面積割合をほぼ±4%程度の範囲で再現していることがわかる。ただし、一部の試料(B5204とB5222)については、著しい差(表3-2からはおよそ±8%程度の差)が認められる。

これに関しては以下のように考えることができる。

燃料の溶融量は、燃料融点を超える領域の大きさであることから、簡単には、燃料の温度分布を妥当に評価できていれば、実測される溶融量を適切に再現でき得ると考えられる。ただし、溶融している燃料の温度分布を妥当に評価するためには、溶融部の伝熱特性を把握し、モデル化できていることが必要である。これに関しては、現状、十分な知見を得ていないことからモデル化を行っておらず、FEVER-Mでは、溶融部も未溶融部も同一の熱伝導度とし、同じ伝熱方程式にて計算している。このことから、現状のFEVER-Mでは、溶融が生じた燃料についての温度評価は、未溶融燃料に対する温度評価よりも不確かさが大きい可能性が考えられる。

一方で、評価値との差が著しい二つの試料(B5204とB5222)は、表3-2からわかるように、他の試料との間で燃料仕様上の差が大きいわけではない(図3-3中に仕様の一部は付記している)。このことから、これら2試料に特異性が無ければ、溶融領域を判定する際の不確かさが大きかった可能性が考えられる。照射後の燃料断面金相観察における溶融境界の判定指標には、ポアフリーゾーン(ポアが結晶内に認められない領域)がある。このポアフリーゾーンの境界部を溶融境界位置として判定することとなるが、例えば図3-4に示す様に(この図は、図3-3中の過小評価側データ(表3-2中のB5204試料)の横切断面金相写真である)必ずしも同心円状にポアフリーゾーンが分布しているわけではなく、溶融量実測値には、無視できない不確かさが生じている可能性が考えられる。同時に、不確かさを定量化することにも困難があると考えられる。

以上のことから、図3-3に示した評価値と実測値間の差については、溶融部の伝熱特性のモデル化が行えていないこと、実測上の不確かさを明確にできていないこといずれによるものかは不明確である。

そこで、試験条件検討のような設計的評価に際しては、もっとも保守的な考え方をういた方がよいと判断し、B10 照射試験の試験条件検討に際しては、FEVER-Mによる溶融面積割合評価はおよそ±8%の不確かさであると考えることとした。

4. FEVER-M を用いての B10 照射試験条件の検討

すでに 1. にて述べたが、今回整備した照射初期燃料温度評価手法 FEVER-M は、「常陽」での 3 回目の PTM 試験である B10 照射試験の試験条件検討に利用することを整備目的の一つとしている。

この節では、FEVER-M の適用例として、B10 照射試験の試験条件検討のために行った予測評価について説明する。

4-1. B10 照射試験計画の目的と概要

現行の熱設計では、製造時のギャップ幅に基づき評価した燃料・被覆管ギャップ部の熱伝達率を、燃料温度評価に用いている。これに関しては、すでに 2. に示した様に、照射開始後にリロケーション挙動等によりギャップ幅減少が生じることを実験事実として確認できていることから、ギャップ幅が大きい場合に値が小さくなる（即ち、燃料温度は上昇する）ギャップ熱伝達率を製造時ギャップ幅から評価することは、熱設計上、燃料温度を過大に評価することとなる。即ち、現行の熱設計では、過剰に安全裕度（保守性）を設定しているといえる。

そこで、実際の炉運転履歴下でのギャップ幅減少量を実験的に確認し、その結果をもとに、現行の熱設計の中でギャップ熱伝達率に関して設定されている過剰な保守性を削減（合理化）していくことが必要視されている。

また、実験炉「常陽」では、炉心を Mk-II から Mk-III へと変更する予定であるが、現在のところ、直接、「常陽」Mk-III ドライバー燃料の熔融限界線出力評価に適用可能な知見は得られていない。このため、「常陽」に関する熱設計上の保守性を合理化していく上では、先のギャップ幅減少量の把握に加え、「常陽」Mk-III ドライバー燃料に直接適用可能な熔融限界線出力を評価することも必要視されている。

上記の状況を考慮して、現在、「常陽」におけるプレコンディショニング時のギャップ閉塞挙動、及び、プレコンディショニングを経験した燃料での熔融限界線出力を評価することを目的とする照射試験が計画されている。この試験は B10 照射試験と呼ばれており、プレコンディショニングを経験させる短期間の照射試験（MPR-2 試験と別称されている）を行った後燃料集合体を一旦炉外に取出し、MPR-2 試験ピンについては照射後破壊試験へ、残るピンについては再度炉内に装荷して PTM 試験を行うとのものである。

この B10 照射試験については、「常陽」での PTM 試験実施に関する制約から、燃料ピンの最大熔融面積割合が 20% を超えないように試験条件を設定する必要がある。これに加え、今回の PTM 試験では、「常陽」Mk-III ドライバー燃料の熔融限界線出力評価に直接利用できる知見を得ることを目指している。このため、「常陽」Mk-III ドライバー燃料で予想される熱的状态（燃料内の温度差や、プレコンディショニング後の出力急昇時の燃料温度上昇量）を、「常陽」Mk-III ドライバー燃料と異なる形状の PTM 試験用燃料で模擬することも必要となる。

したがって、燃料温度を適切に評価できる手法を用いて、照射試験中の燃料の熱的状态を予測評価した上で試験条件を決定することが必要とされる。

そこで、照射初期の燃料温度評価手法として整備した FEVER-M を用いて、B10 照射試験の試験条件を検討することとした。ただし、B10 照射試験については、試験実施上の支障が無い場合（例えば熔融面積が制限を越えない等、予備解析結果が試験目的に合致したものであれば）、実際の炉運転履歴を模擬するとの観点から、図 4-1 に示すような、420W/cm 程度で 24 時間ホールド（炉心出力で見た場合には 70%出力に相当する）、その後一旦炉外に取出し（MPR-2 試験ピン取出しのため）、

再装荷後、420W/cm 程度（70%出力）で1時間ホールドした後に出力を急昇させ、最大620W/cm 程度を達成するとの出力履歴にて実施することが計画されている。また、B10 照射試験の中でPTM 試験に供される燃料の仕様についても、「常陽」でのPTM 試験実施に関する制約等から

製造時 O/M 比	1.94 から 1.99 の範囲内
Pu 富化度	30%以下
製造時密度	87%TD から 95%TD
ペレット径	直径約 6.4mm φ から約 6.6mm φ
被覆管	内直径 約 6.7mm φ 外直径 約 7.5mm φ

との仕様とすることが規定事項として条件づけられている。参考までに、「常陽」Mk-III ドライバー燃料の仕様は

製造時 O/M 比	1.94 から 1.99 の範囲
Pu 富化度	30%以下
製造時密度	約 94%TD
ペレット径	直径約 4.6mm φ
被覆管	内直径 約 4.8mm φ 外直径 約 5.5mm φ

である。

これらのことから、今回の予測評価は、上記した出力履歴や燃料仕様想定値を前提として行うこととした。次節以降で、試験条件設定上の判断基準や予測評価結果を説明する。

4-2. B10 照射試験実施に関する制限事項

FEVER-M にて B10 照射試験時の燃料の状態を予測評価する場合、照射初期のギャップ幅減少量の確認と PTM 試験の実施という B10 照射試験の目的から考えて、

- ・ PTM 試験での条件である最大溶解量が 20%を超えないこと
- ・ 「常陽」Mk-III ドライバー燃料ピンを模擬できていること
- ・ プレコンディショニング段階でギャップ閉塞が期待できること

を満足する照射試験となることが要求される。

上記3条件のうち、1番目については、4-1 に示した最大線出力候補値である 620W/cm において、PTM 試験用の燃料ピンでの最大溶解量が保守側の評価においても 20%を超えないことを、予測評価で確認できればよい。また、3番目については、すでに3. に示したリロケーション量評価式を用いれば、最大線出力 620W/cm の場合には、製造時直径ギャップ幅が 120 μ m を超えていればリロケーションによるギャップ幅縮小を期待できることがわかる（リロケーション評価式の不確かさを ± 40 μ m と考えた場合。図 2-1 参照）。想定されている製造時ギャップ幅が 200 μ m 前後であることを考慮すると、3番目の基準は、問題なく達成できていると考えられる。

残る2番目に示したドライバー燃料の模擬性とは、「常陽」Mk-III ドライバー燃料の溶解限界線出力に直接適用できる実験結果を、「常陽」Mk-III ドライバーとは異なる 6.5mm φ 程度の太径ピンを用いた PTM 試験で取得することを意味しており、これを可能とするための方策を予め検討しておく必要がある。

そこで、PTM 試験用ピンによる「常陽」Mk-III ドライバー燃料ピンの模擬性について検討することとした。

まず、燃料温度は簡単には以下の式にて評価できる。

$$\int_{T_s}^{T_c} \lambda dT = \int_{r_{cv}}^R \frac{dr}{r} \int_{r_{cv}}^r q \cdot r \cdot dr = \frac{W}{4\pi} - \frac{1}{2} q \cdot r_{cv}^2 \cdot \ln \frac{R}{r_{cv}} \quad \text{----- (4-1)}$$

T_c : 燃料中心部温度、 T_s : 燃料外表面温度、 R : 燃料外半径、

r_{cv} : 燃料内半径 (中心空孔半径)、 W : 線出力、 q : 発熱密度、 r : 燃料内径方向位置

上式の右辺第2項は、中心空孔が燃料温度に及ぼす影響を表す項である。この第2項中の $\ln(R/r_{cv})$ に乗じられる部分は、以下のように変形できる。

$$\frac{1}{2} q \cdot r_{cv}^2 = \frac{1}{2\pi} \frac{W}{(R^2 - r_{cv}^2)} r_{cv}^2 = \frac{W}{2\pi} \left\{ \left(\frac{R}{r_{cv}} \right)^2 - 1 \right\}^{-1} \approx \frac{W}{2\pi} \frac{r_{cv}^2}{R^2} \quad (R > r_{cv}) \quad \text{----- (4-2)}$$

上記の式の展開において、中心空孔半径と燃料外半径の比が小さいことを考慮すると、燃料温度は主として、先の燃料温度に関する式中の右辺第1項、即ち線出力に依存していることがわかる。従って、燃料外表面温度と線出力が同一である場合には、ピン径に関わらず燃料中心部温度はほぼ同一のものとなる可以考虑することができる。

また、燃料外表面温度は以下の式にて評価できる。

$$T_s = T_{ci} + \Delta T_G = T_{ci} + \frac{W}{2\pi \cdot R_c \cdot H_{FC}} \quad \text{----- (4-3)}$$

T_{ci} : 被覆管内表面温度、 R_c : 被覆管内半径、 H_{FC} : ギャップ熱伝達率

上式からは、 ΔT_G (ギャップ部温度上昇量) が線出力 W に強く依存することがわかる。

このことから、B10 照射試験のような出力急昇を伴う照射の場合、燃料外表面温度が同一で、かつ、同一の出力急昇を経験するのであれば、ピン径に関わらず、出力急昇後の ΔT_G はほぼ同一に、即ち、燃料中心部温度もほぼ同一のものとなると予想できる。従って、出力急昇前の燃料外表面温度を模擬できれば、出力急昇後の燃料中心部温度を模擬できると考えられる。

ここで、上式中のギャップ熱伝達率 H_{FC} は、すでに2.にて示した様に、簡単には以下のように表すことができる。

$$H_{FC} \approx \frac{K_G}{C(RF + RC) + TJD + G} \quad \text{----- (4-4)}$$

RF, RC : 燃料、被覆管の表面粗さ、 C : 係数、 TJD : 温度ジャンプ距離、

G : オンパワー時ギャップ幅、 K_G : ギャップ部混合ガス熱伝導度

式中の表面粗さに関する項はピン径に関わらず一定値であり、他の TJD, K_G 項は燃料温度、即ち、線出力 W に依存するものである。残る G 項 (ギャップ幅) の大きさは、熱膨張等による寸法変化に依存する以外に、製造時の大きさにも強く依存するものである。このことから、製造時のギャップ幅 (燃料ペレット外半径) を調整することで、線出力やピン径が固定されている場合においても、燃料外表面温度を任意に制御可能であると考えられる。

従って、製造時のギャップ幅を調整し、出力急昇前の時点での「常陽」Mk-III ドライバー燃料ピンに予想される温度を PTM 試験用ピンで模擬することで、出力急昇後の「常陽」MK-III ドライバー燃料ピンで予想される温度を、B10 試験用の太径ピンで模擬することが可能と考えられる。即ち、「常陽」Mk-III ドライバー燃料に直接適用できる溶融限界線出力値を取得できると考えられる。

以上のことから、B10 照射試験の試験条件検討のための予測評価の中で、溶融面積割合の確認に加え、B10 試験用燃料の製造時ギャップ幅について、「常陽」Mk-III ドライバー燃料ピンの B10 試験用燃料による模擬を達成するための最適化も行うこととした。

4-3. B10 照射試験条件の検討結果

まず、製造時ギャップ幅の最適化について示す。表 4-1 には、評価結果を示した。表 4-1 からは、製造時ギャップ幅を 300 μ m または 320 μ m とした場合には、FEVER-M 上では、出力急昇前の Mk-III ドライバー燃料における熱的状态（燃料外表面温度、燃料中心温度）を太径ピンにて模擬できていることがわかる。

また、4-2 に示した様に、出力急昇前の状態を模擬できれば出力急昇後の状態も模擬できると考察したが、表 4-1 からは、FEVER-M 上で、出力急昇後の Mk-III ドライバー燃料の燃料外表面温度、燃料中心温度を模擬できていることがわかる。

さらに、図 4-2-1 から図 4-2-3 に示した FEVER-M による温度変化履歴評価結果からも、太径ピンにて「常陽」Mk-III ドライバー燃料の温度変化履歴を模擬できていることがわかる。

これらのことから、B10 照射試験で PTM 試験に供する燃料については、製造時ギャップ幅を直径値で 300 μ m から 320 μ m の範囲に調整することで、Mk-III ドライバー燃料に直接適用可能な溶融限界線出力値を得られるものと考えられる。なお、予測評価では、O/M 比に、仕様上の下限である 1.94、及び、通常の製造条件下で生じやすいと考えられる 1.96 及び 1.97 の 3 値を採ったが、表 4-1 からは、O/M 比は製造時ギャップ幅の最適化に関しては特に影響を及ぼさないと考えられる。

次に、溶融量について検討する。表 4-1 には、溶融面積割合として

$$(\text{溶融面積割合}) = \left\{ \frac{\text{溶融半径}}{(\text{燃料外半径})} \right\}^2 \quad \text{-----} \quad (4-5)$$

により求めた量を示している。先に示した様に、FEVER-M での溶融面積評価値については、不確かさとして $\pm 8\%$ 程度を考慮する必要があると考えられる。これに関し、表 4-1 中に示した評価結果は最大で 4%程度であることから、保守側に考えた場合でも溶融量予想値は 12%程度と、PTM 試験実施上の条件である 20%以内の溶融量であることを満足していることがわかる。

このことから、B10 照射試験については、予め想定されていた最大線出力 620W/cm との条件下で実施することが可能と考えられる。

以上のことから判断すると、B10 照射試験では、製造時ギャップ幅を直径量で 300 μ m から 320 μ m の範囲とすることで、B10 照射試験の目的である「常陽」Mk-III ドライバー燃料に直接適用可能な溶融限界線出力値の取得を期待できるとともに、最大線出力を 620W/cm とするとの出力に関する想定条件（図 4-1 参照）を変えることなく、安全に試験を実施できると考えられる。

なお、この結果や従来熱設計手法による評価結果等に基づき、既に、B10 照射試験を最大線出力 620W/cm との条件のもとに実施することとして進められている照射管理課による設工認申請作業は順調に進行中である。ただし、試験用燃料のギャップ幅については、必ずしもここに示した条件通りに製造できるとは限らない。このため、B10 試験用燃料の製造が終了した時点で、再度 FEVER-M による評価を行い、B10 照射試験で得られる溶融限界線出力の「常陽」Mk-III ドライバー燃料への適用方法を確認する予定である。

4-4. 熱設計手法に関する今後の改善方策

今回整備した FEVER-M のような挙動解析的な温度評価手法は、計算を行う上で設定すべき条件が多すぎること等から、そのままでは熱設計上の温度評価手法として利用できない。このため、設計合理化の一環として熱設計における温度評価手法の改良を考えていく場合には、部分的に、FEVER-M 整備の中で得られた知見を現行の熱設計手法中に反映していくこととなる。

本報の趣旨からは少し逸脱するが、FEVER-M にて得られる知見の利用方法の一例という位置付けで、4-1 にて触れたオンパワー時のギャップ幅に基づくギャップ熱伝達率評価手法の取り込みの試みをこの節で説明する。

B10 照射試験の目的でもあるが、熱設計を合理化する方策の一つとして、ギャップ熱伝達率評価において、照射中のギャップ幅減少の効果を取り込むことが考えられる。これは、従来設計では、ギャップ熱伝達率を製造時ギャップに基づき評価しているため、照射中のギャップ幅減少量分、燃料温度を過大に、即ち、過剰な保守性を設定してしまうこととなっているためである。具体的な改良策としては、従来の製造時ギャップ幅に基づくギャップ熱伝達率評価を、オンパワー時のギャップ幅（ホットギャップと呼ぶ、燃料、被覆管の熱膨張によるギャップ幅変化は考慮しない）に基づくギャップ熱伝達率評価へと置きかえることが考えられる。

そこで、FEVER-M に導入したりロケーション量評価式を用いて、上記のホットギャップに基づくギャップ熱伝達率評価の有用性を検討してみることにした。

図 4-3 に、ホットギャップに基づくギャップ熱伝達率評価式を用いた場合のギャップ部温度上昇量評価結果を示す。この図の横軸のギャップ部温度上昇量推定値は、燃料中心温度が既知（あるいは既知として取り扱い得る）の照射試料について、現行の熱設計上の温度評価手法（FEVER-M のような局所的な密度分布を考慮して温度を評価する手法と異なり、燃料を組織変化領域別に区分し、領域個々に特定の密度を与え、温度を計算するものである）により燃料中心温度から逆算することで得られた燃料外表面温度と、被覆管内表面温度との差をとったものである。これらの値は、熱設計手法上、最も合理的な（保守性を可能な限り削減した）ギャップ部温度上昇量といえる。図中に示した試料は、PTM 試験である B5D1、B5D2 試験中で熔融限界線出力で照射されたと判断されている試料と計装線付き照射試験である INTA-1 試験³⁾の試料である。詳細は表 4-2 に示した。なお、INTA-1 試験では、計装線により温度の時間変化が測定されていることから、1 試料から複数のデータを取り出して利用している。

一方、縦軸は、ホットギャップに基づくギャップ熱伝達率評価式を試作し、それを用いて算出したものである。ギャップ熱伝達率評価式には、JNC 内で GEAP 式と通称されるものを基礎とする以下の形状のものを用いた²⁾。

$$H_{FC} = H_0 \times GF \times PF \quad \text{-----} \quad (4-5)$$

HFC：ギャップ熱伝達率 [W/cm²/°C]、H₀：係数 = 1

GF：ギャップ幅依存項

$$= 100 / G_h$$

G_h：ホットギャップ幅（直径値）[μm]

PF：線出力依存項

$$= 0.304 \exp(0.00262 \times W) \quad W: \text{線出力 [W/cm]}$$

上式の各係数値は、表 4-2 に示した試料を用いて最小二乗法にて求めたものである。なお、上式で得られるギャップ熱伝達率からは、以下のようにしてギャップ部温度上昇量を求めている。

$$\Delta T_G = \frac{W}{2\pi R_{ci} H_{FC}} \text{----- (4-6)}$$

ここでは(4-5)式の妥当性については考察しないが、図 4-3 からは、ホットギャップに基づくことで、熱設計上の最適値に近いギャップ部温度上昇量評価値が得られることがわかる。即ち、ホットギャップの考え方を熱設計に取り込めれば、ギャップ部温度上昇量評価に関する過剰な保守性を排除でき、現在の熱設計手法を十分に改良しうるものと期待される。

ただし、ホットギャップの考え方を熱設計に取り入れていくためには、リロケーション量評価値について統計論的な観点から不確かさを明確化する必要があることや、信頼性の高いホットギャップに基づくギャップ熱伝達率評価式の策定等、課題が多く認められる。このため、ここに示したようなホットギャップの考え方を取り入れての熱設計手法改良には、時間を要すると考えられる。

5. 課題事項

今回整備した照射初期燃料温度評価手法は、現時点で利用し得る最新の知見を反映して整備したものである。しかしながら、すでにくつか示したように、温度評価を行う上で重要な物性、例えば熱伝導度等が十分に把握できておらず、今後継続的に検討していくべき課題事項が残されている。

ここでは、そのうちの特に重要と思われるものを例示する。

1) 炉外試験の実施

燃料の熱伝導度等の物性値、あるいは、燃料の融点や熱伝導度に対し無視できない効果を有するPu再分布挙動、O/M比再分布挙動等の燃料挙動については、現在、JNC内で評価式や定量評価モデルの開発を進めている。しかしながら、それら開発は、主として照射後試験結果に頼ったものである。

このため、モデル評価結果と照射後試験結果との差が認められた場合には、照射試験実施時の照射条件の不確かさによるものか、モデル化が不十分なことによるものかを弁別できず、定量評価精度の改善策を的確に検討できない状態となることが多々見受けられる。

これに対し、一般に、高い定量評価精度をモデルに求める上では、炉外試験のような、試験試料の雰囲気等が明確となっている試験結果をまず再現できるように評価手法を校正し、その後、照射後試験結果と対比させ、照射後試験結果と評価結果との差から照射条件の不確かさにかかわる要因を取り除いた上で照射試料特有の傾向のモデル化状態を改善していくといった方法が必要と考えられる。

従って、モデル開発に必要な情報を取るための炉外試験をJNC内で早急にかつ積極的に実施していくことが必要と考えられる。

2) 照射初期の燃料挙動データの充実

今回の検討では、「常陽」でのPTM試験であるB5D2試験、海外でのPTM試験であるPE01試験、「常陽」での短期照射試験であるB4M試験といった試験結果を反映させて、照射初期の燃料挙動の理解に基づく温度評価手法の整備を目指した。

しかしながら、これら試料の試験条件は、線出力やO/M比等の燃料仕様に違いはあるが、「もんじゅ」や「常陽」で想定されている条件を網羅する程、広範なものではない。また、試験の主眼が照射初期の燃料挙動解明におかれていなかったことから、照射初期の挙動解明に適用することを考えると、照射後試験結果の質、量はともに不十分と考えられる。

従って、より精度の高い温度評価手法を開発していくためには、照射初期の挙動把握を主目的とするB10照射試験のような短期照射試験の実施に注力していくことが必要と考えられる。

6. まとめ

高速炉用ペレット型 MOX 燃料では、照射初期において、燃料溶融に対する余裕（熱的裕度）が最も小さくなると考えられている。このため、照射初期の燃料温度を評価する手法を整備することが必要と考えられている。

そこで本検討では、1988 年時に試作されたが、それ以降に得られた知見を反映することなく、また、マニュアル類も未整備であった照射初期燃料温度評価手法を、改めて整備しなおすこととした。また、整備後の手法を利用しての照射試験の試験条件検討等も行っている。

以下にその概要を記す。

1) 照射初期燃料温度評価用として 1988 年に試作されていた手法について、燃料融点及びリロケーション挙動に関する最新の知見を反映させるとの改良を施し、マニュアル類も含めて改めて整備した（以降 FEVER-M と称する）。

2) 整備した FEVER-M による評価結果については、「常陽」で行なわれた溶融限界線出力評価試験である B5D2 試験結果を用いて妥当性を検討した。その結果、同評価手法は、整備後、以下の状態にあることを確認できた。

- ・ 燃料温度に関し $\pm 60^{\circ}\text{C}$ 程度の不確かさ（ただし、照射中の燃料中心部最高温度に対して）
- ・ 中心空孔径に関し $\pm 0.016\text{cm}$ （半径値）程度の不確かさ
- ・ 燃料溶融量に関し $\pm 8\%$ 程度（溶融面積割合）の不確かさ

3) 整備した FEVER-M は、「常陽」で計画中の PTM 試験である B10 照射試験の試験条件検討に利用した。FEVER-M を用いた予測評価からは、同試験で想定されている最大線出力 620W/cm のもとで予想される燃料溶融量は、保守側の評価においても 12% 程度と、「常陽」での PTM 試験で許容されている燃料溶融量最大値 20% 未満であることが確認できた。

4) 照射初期燃料温度評価手法を整備することで得られる知見を熱設計に反映する試みとして、FEVER-M 整備に当たって試作したリロケーション量評価式を利用しての照射中のギャップ幅（ホットギャップ）に基づくギャップ熱伝達率評価の熱設計への取り込みを試行した。この結果、ホットギャップに基づくギャップ熱伝達率評価を取り込むことにより、熱設計上、最も合理的（保守性を可能な限り削減）と考えられる温度評価値に近い値を得られることが確認できた。このことから、実際に熱設計に取り込めるようになるには時間を要するが、ホットギャップに基づくギャップ熱伝達率評価を熱設計に取り込むことは、従来の製造時ギャップ幅に基づくギャップ熱伝達率評価よりも熱設計を合理化できる手法の一つとして有望であることが確認できた。

7. 謝辞

本検討を進めるにあたって各種の助言を頂いた若狭湾エネルギー研究センター所属の丸山 忠司氏、大洗工学センター 照射施設運転管理センター 照射管理課、同 燃料材料試験部 照射燃料試験室 ならびに 筆者の所属先である システム技術開発部 燃料材料技術開発 Gr のメンバー各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 浅賀 健男ら、PNC ZN9430 93-005 「高速炉用混合酸化物燃料の溶融限界線出力評価 (中間報告)」(1993)
- 2) 籠田 栄一ら、PNC ZN9410 94-100 「高速実験炉「常陽」高線出力試験用集合体(B5D-1, B5D-2) 照射総合報告書」(1994)
- 3) 細川 隆徳ら、PNC ZN9410 88-125 「燃焼初期における燃料温度評価手法の検討」(1988)
- 4) 水野 朋保ら、PNC ZN9460 93-001 「高速炉燃料ピン挙動解析コード CEDAR-3 (Rev.0) ユーザーズ マニュアル」(1993)
- 5) A.M.Ross and R.L.Stoute, "Heat transfer coefficient between UO₂ and zircoloy-2", AECL-1552 (1962).
- 6) R.W.Cahn, P.Haasen and E.J.Kramer, "Materials Science and Techonology : Nuclear Materials " (Volume 10A and 10B), VCH, New York, 1994.
- 7) D.R.Olander, " Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements", US.DOE., 1976.
- 8) 浅賀 健男ら、PNC ZN9410 93-025 「「常陽」Mk-II 炉心燃料挙動評価－燃料要素挙動」(1993)
- 9) 鶴飼 重治ら、PNC ZN9410 89-015 「高燃焼度燃料の照射挙動評価－Phenix P-3 照射試験 結果」(1989)
- 10) M.Bober and G.Schumacher, "Material transport in the temperature gradient of fast reactor fuels", Advances in Nucl. Sci. and Technol., vol.7 (1973) 121-179.
- 11) S.K.Evans and E.A.Aitken, "Oxygen redistribution in (U,Pu)O_{2-x} fuels", GEAP-14036 (1975).
- 12) 水野 朋保ら、PNC ZN9410 93-069 「高速炉燃料ピン挙動解析コード CEDAR-3(Rev.0)の 開発」(1993)
- 13) C.R.Kennedy et al., "UO₂ pellet fragment relocation : Kinetics and mechanics", EPRI NP-1106(1979).
- 14) L.J.Siefken et al., "FRAP-T5, A computer code for the transient analysis of oxide fuel rods", NUREG/CR-0840(1979).

- 15) L.J.Siefken et al., "FRAP-T6", NUREG/CR-2148 (1981).
- 16) K.Lassmann and H.Blank, "Modelling of fuel rod behaviour and recent advances of the transuranus code", Nucl. Engrg.Des. 106 (1988) 291-313.
- 17) E.A.Aitken and S.K.Evans, "A Thermodynamic data program involving plutonia and urania at high temperatures", GEAP-5672 (1968) .
- 18) W.L.Lyon and W.E.Baily, "The solid-liquid phase diagram for the UO₂-PuO₂ system", J.Nucl.Mat 22 (1967) 332-339.
- 19) M.G.Adamson, E.A.Aitken and R.W.Caputi, "Experimental and thermodynamic evaluation of the melting behavior of irradiated oxide fuels", J.Nucl.Mat. 130 (1985) 349-365.
- 20) K.Yamamoto et al., "Melting temperature and thermal conductivity of irradiated (U,Pu)O₂ fuel", Trans.ANS., vol.66 (1992) 179-182.
- 21) 金子 洋光ら、PNC ZN841 83-45 「FBR 照射燃料ピンの解析 (キャップコンタクト簡易式の作成)」 (1983)

表 2-1 リロケーション量評価式作成用データの一覧

試験種類	製造時キップ幅[μ m]	最大線出力[W/cm]	製造時燃料外半径[mm]	直径リロケーション量[μ m]
PE01	226	438	2.687	77
	228	427	2.686	116
	260	430	2.670	90
	261	447	2.669	110
	161	437	2.719	65
	161	483	2.719	56
	158	479	2.721	16
	161	397	2.719	15
	221	431	2.689	72
	226	473	2.687	104
	228	426	2.686	116
	229	390	2.685	124
	260	429	2.670	90
	262	471	2.669	99
	261	431	2.669	110
	263	383	2.668	82
B5D2未熔融試料	186	653	3.255	127
	187	652	3.254	95
	239	684	3.227	108
	240	663	3.226	84
	129	654	3.282	64
	136	660	3.280	61
	136	646	3.280	68
	181	678	3.257	110
	182	656	3.257	122
	185	658	3.255	78
	191	611	3.252	63
	193	606	3.251	73
	197	609	3.250	103
	139	650	3.278	57
	136	644	3.279	63
	134	602	3.280	56
B5D2熔融試料	185	671	3.254	56
	188	665	3.254	80
	183	671	3.254	79
	186	676	3.254	122
	240	730	3.226	162
	240	739	3.226	136
	239	730	3.227	157
	129	688	3.281	48
	133	692	3.281	51
	134	686	3.280	45
	133	678	3.279	59
	136	679	3.278	45
	136	686	3.280	55
	135	698	3.280	69
	181	719	3.257	103
	187	725	3.254	92
	184	715	3.256	124
	184	719	3.256	97
	196	667	3.249	86
	191	669	3.252	77
191	665	3.253	77	
135	689	3.280	34	
135	684	3.279	67	
131	680	3.281	52	
B4M	164	387	2.698	28
	185	381	2.687	69
	151	368	2.704	49
	170	347	2.695	36
	151	335	2.704	0
	165	380	2.698	73
	180	362	2.690	74
	123	386	2.719	27
	141	373	2.710	25
	134	366	2.714	50
135	388	2.712	31	

表 2-2 FEVER-Mに導入したMOX燃料融点値一覧

Pu濃度 (%)	O/Pu=2.00	O/Pu=1.90	O/Pu=1.80	O/Pu=1.70	O/Pu=1.60
0	2847.000	2847.000	2847.000	2847.000	2847.000
5	2829.000	2820.500	2815.400	2797.600	2767.275
10	2811.000	2795.600	2783.800	2756.600	2720.150
15	2786.500	2773.700	2766.150	2717.500	2704.225
20	2762.000	2758.000	2755.000	2692.000	2703.000
25	2738.000	2760.650	2754.975	2699.575	2711.950
30	2714.000	2753.300	2759.850	2722.550	2720.900
35	2688.000	2737.350	2748.525	2731.825	2724.950
40	2662.000	2713.000	2726.000	2726.000	2706.000
45	2634.825	2674.675	2682.350	2696.675	2664.000
50	2607.650	2619.450	2627.600	2653.650	2600.700
55	2583.825	2578.125	2581.050	2618.825	2535.400
60	2560.000	2542.000	2542.000	2584.000	2494.000
70	2519.325	2501.150	2504.525	2534.925	2429.725
80	2483.550	2469.700	2476.650	2501.450	2382.150
90	2454.075	2447.150	2458.475	2474.475	2334.575
100	2428.000	2428.000	2450.000	2453.000	2287.000

表 3-1 FEVER-M較正用試料の詳細

試験体	試料番号	製造時のデータ					最大線出力 [W/cm]	融点[℃]	燃料中心部 温度評価値 [℃]	中心空孔半 径実測値 [cm]	中心空孔径 評価値[cm]
		O/M比[-]	密度[%TD]	被覆管内径 [cm]	燃料外径 [cm]	直径ギャップ 幅[μm]					
B5D2 (較正用)	B5201T	1.98	90.51	0.3346	0.32550	182	626.0	2759.5	2743.9	0.0394	0.0460
	B5202B	1.98	91.20	0.3348	0.32550	186	653.0	2759.5	2740.7	0.0455	0.0409
	B5203B	1.98	92.06	0.3346	0.32540	184	645.0	2759.5	2732.9	0.0196	0.0332
	B5204T	1.98	90.24	0.3347	0.32540	187	652.0	2759.5	2758.8	0.0463	0.049
	B5205B	1.97	95.01	0.3346	0.32270	239	684.0	2758.0	2778.7	0.0345	0.0314
	B5206T	1.97	95.08	0.3346	0.32260	240	663.0	2758	2806.4	0.0371	0.0351
	B5211T	1.98	90.31	0.3346	0.32810	130	629.0	2759.5	2753.4	0.0398	0.0435
	B5212B	1.98	91.07	0.3346	0.32820	129	654.0	2759.5	2758.7	0.0331	0.0371
	B5213T	1.98	91.18	0.3348	0.32810	134	623.0	2759.5	2748.2	0.0364	0.0397
	B5214B	1.98	90.27	0.3348	0.32800	136	660.0	2759.5	2765.6	0.0298	0.0445
	B5214T	1.98	91.75	0.3348	0.32800	136	646.0	2759.5	2774.1	0.0337	0.0422
	B5215T	1.97	94.70	0.3347	0.32570	181	678.0	2758.0	2804.5	0.0341	0.0343
	B5217T	1.97	94.89	0.3348	0.32570	182	656.0	2758	2769.9	0.0322	0.0303
	B5218T	1.97	95.17	0.3348	0.32550	185	658.0	2758.0	2776.9	0.0347	0.0311
	B5219B	1.96	90.51	0.3347	0.32520	191	611.0	2752.8	2712.2	0.0386	0.0338
	B5219T	1.96	91.35	0.3347	0.32510	193	606.0	2752.8	2736.4	0.046	0.0408
	B5221B	1.96	91.81	0.3348	0.32500	197	609.0	2752.8	2699.9	0.0406	0.0254
	B5222B	1.96	90.76	0.3347	0.32780	139	650.0	2752.8	2768.6	0.0362	0.0435
B5224B	1.96	91.45	0.3347	0.32790	136	644.0	2752.8	2764.9	0.0365	0.0385	
B5224T	1.96	90.22	0.3347	0.32800	134	602.0	2752.8	2752.2	0.0279	0.0436	

表 3-2 熔融試料の製造時データ等の一覧

試料番号	製造時のデータ				最大線出力 [W/cm]	融点[℃]	燃料中心部 温度評価値 [℃]	熔融面積割合[%]	
	O/M比[-]	密度[%TD]	燃料外径[cm]	直径ギャップ幅 [μm]				実測評価値	計算評価値 (ミル)
B5201	1.98	91.59	0.32540	185	615.0	2759.5	2766.4	3.0	1.57
B5202	1.98	91.48	0.32540	188	609.0	2759.5	2760.5	4.7	1.34
B5203	1.98	90.58	0.32540	183	614.0	2759.5	2773.8	3.4	2.32
B5204	1.98	90.71	0.32540	186	619.0	2759.5	2781.2	10.5	2.74
B5205	1.97	94.95	0.32260	240	668.0	2758.0	2863.7	9.2	7.5
B5206	1.97	95.33	0.32260	240	671.0	2758.0	2879.5	10.0	8.69
B5207	1.97	94.89	0.32270	239	668.0	2758.0	2864.2	7.4	7.55
B5208	1.98	91.42	0.32810	129	629.0	2759.5	2806.2	3.6	3.86
B5209	1.98	90.19	0.32810	133	633.0	2759.5	2818.9	3.1	5.86
B5210	1.98	90.80	0.32800	134	628.0	2759.5	2806.4	4.5	4.26
B5211	1.98	91.01	0.32790	133	621.0	2759.5	2794.4	3.4	3.11
B5212	1.98	91.94	0.32780	136	622.0	2759.5	2792.9	3.0	2.44
B5213	1.98	92.32	0.32800	136	629.0	2759.5	2806.6	2.3	3.4
B5214	1.98	91.86	0.32800	135	633.0	2759.5	2827.4	8.5	5.66
B5215	1.97	95.01	0.32570	181	667.0	2758.0	2850.1	5.1	5.61
B5216	1.97	94.77	0.32540	187	664.0	2758.0	2863.4	6.7	7.2
B5217	1.97	94.95	0.32560	184	655.0	2758.0	2844.3	7.7	5.12
B5218	1.97	94.88	0.32560	184	659.0	2758.0	2862.7	6.7	7.14
B5219	1.96	90.82	0.32490	196	611.0	2752.8	2803.8	6.6	4.84
B5220	1.96	91.54	0.32520	191	612.0	2752.8	2804.8	4.3	4.47
B5221	1.96	92.05	0.32530	191	609.0	2752.8	2794.4	7.2	3.24
B5222	1.96	91.18	0.32800	135	631.0	2752.8	2840.8	2.7	8.42
B5223	1.96	90.75	0.32790	135	627.0	2752.8	2836.7	10.7	8.32
B5224	1.96	90.98	0.32810	131	623.0	2752.8	2828.8	8.5	7.21

*

*

表 4-1 B10照射試験条件検討結果一覧

試験体	製造時のデータ				最大線出力 [W/cm]	融点[°C]	出力急昇後 (620W/cm到達時)			急昇前中心 温度 (420W)	急昇前外表 面温度
	O/M比[-]	被覆管内径 [cm]	燃料外径 [cm]	直径ギャップ 幅[μm]			燃料中心部 温度評価値 [°C]	外表面温度 評価値 [°C]	溶融面積率 [%]		
Mk-III	1.94	0.24	0.229	220	620	2760	2797.1	825.1	2.88	2263.0	820.9
ドライパー	1.96	0.24	0.229	220	620	2755	2802.0	880.9	3.60	2256.4	854.5
	1.97	0.24	0.229	220	620	2753	2804.8	908.9	3.98	2253.1	871.1
太径ピン	1.94	0.335	0.32	300	620	2760	2793.0	782.3	2.01	2270.5	788.6
ケース1	1.96	0.335	0.32	300	620	2755	2798.5	837.7	2.57	2260.9	821.8
	1.97	0.335	0.32	300	620	2753	2801.3	865.3	2.84	2255.3	838.3
太径ピン	1.94	0.335	0.319	320	620	2760	2804.2	802.7	2.82	2281.3	804.6
ケース2	1.96	0.335	0.319	320	620	2755	2809.7	858.2	3.51	2273.9	837.9
	1.97	0.335	0.319	320	620	2753	2812.5	886	3.86	2269.4	854.5

表 4-2 ホットキヤップに基づくキヤップ熱伝達率の試評価結果 (1/2)

試験名	試験ヒン名	被覆管内半径 [cm]	線出力 [W/cm]	熱設計値		試評価値	
				キヤップ熱伝達率 [W/cm ² /℃]	キヤップ部温度上昇 量 [℃]	キヤップ熱伝達率 [W/cm ² /℃]	キヤップ部温度上昇 量 [℃]
B5D-1	B5101B	0.3349	602	0.998	286.6	1.334	214.3
	B5101T	0.3349	595	0.979	288.9	1.299	217.8
	B5102B	0.3345	583	0.680	408.0	1.079	257.1
	B5102T	0.3345	574	0.735	371.2	1.041	262.2
	B5104B	0.3347	618	0.825	356.2	1.248	235.5
	B5104T	0.3347	559	0.702	378.4	0.980	271.1
B5D-2	B5201T	0.3346	626	1.638	181.9	1.551	192.0
	B5202B	0.3348	653	1.534	202.4	1.712	181.4
	B5203B	0.3346	645	1.811	169.5	1.668	184.0
	B5204T	0.3347	652	2.198	141.1	1.697	182.7
	B5205B	0.3346	684	2.171	150.0	1.598	203.7
	B5206T	0.3346	663	2.512	125.6	1.463	215.6
	B5211T	0.3346	629	1.762	169.8	1.971	151.8
	B5212B	0.3346	654	2.018	154.2	2.231	139.4
	B5213T	0.3348	623	1.626	182.3	1.885	157.2
	B5214B	0.3348	660	2.792	112.4	2.215	141.7
	B5214T	0.3348	646	2.801	109.6	2.072	148.2
	B5215T	0.3347	678	4.332	74.4	1.945	165.7
	B5217T	0.3348	656	2.550	122.4	1.762	177.1
	B5218T	0.3348	658	2.414	129.6	1.756	178.2
	B5219B	0.3347	611	1.121	259.2	1.408	206.4
	B5219T	0.3347	606	1.223	235.6	1.368	210.6
	B5221B	0.3348	609	0.950	304.6	1.365	212.1
	B5221T	0.3348	591	0.969	290.2	1.292	217.6
	B5222B	0.3347	650	2.470	125.2	2.084	148.4
	B5224B	0.3347	644	1.932	158.5	2.054	149.1
B5224T	0.3347	602	2.091	136.8	1.708	167.5	
INTA-1	11102	0.2783	12	0.170	41.5	0.182	38.9
		0.2783	36	0.241	86.2	0.194	106.9
		0.2783	40	0.208	110.9	0.197	117.0
		0.2783	49	0.204	138.4	0.203	139.1
		0.2783	60	0.214	160.3	0.211	163.0
		0.2783	75	0.224	191.5	0.222	193.2
		0.2783	90	0.234	219.5	0.233	220.4
		0.2783	100	0.241	237.0	0.242	236.9
		0.2783	113	0.249	258.9	0.252	255.4
		0.2783	126	0.258	279.7	0.264	272.7
		0.2783	138	0.273	288.9	0.275	286.4
		0.2783	147	0.288	292.8	0.285	296.3
		0.2783	158	0.289	311.5	0.295	305.7
		0.2783	173	0.303	327.1	0.311	318.1
		0.2783	185	0.313	338.5	0.325	326.2
		0.2783	197	0.316	357.0	0.339	333.1
0.2783	211	0.321	375.9	0.356	339.4		
0.2783	224	0.326	393.7	0.373	344.2		
0.2783	237	0.343	394.9	0.389	347.6		
0.2783	245	0.356	393.3	0.401	349.4		

表 4-2 ホットキヤップに基づくキヤップ熱伝達率の試評価結果 (2/2)

試験名	試験ヒン名	被覆管内半径 [cm]	線出力 [W/cm]	熱設計値		試評価値	
				キヤップ熱伝達率 [W/cm ² /℃]	キヤップ部温度上昇 量 [℃]	キヤップ熱伝達率 [W/cm ² /℃]	キヤップ部温度上昇 量 [℃]
INTA1	I1104	0.2781	12	0.167	42.5	0.184	38.4
		0.2781	36	0.240	86.6	0.196	106.0
		0.2781	40	0.212	108.8	0.198	116.4
		0.2781	49	0.209	135.1	0.204	138.5
		0.2781	60	0.224	153.1	0.212	162.2
		0.2781	75	0.240	178.3	0.223	192.3
		0.2781	90	0.253	203.9	0.235	219.3
		0.2781	100	0.257	222.7	0.243	235.6
		0.2781	113	0.262	246.1	0.254	254.0
		0.2781	126	0.272	265.0	0.266	271.3
		0.2781	138	0.292	270.1	0.277	284.8
		0.2781	148	0.301	280.9	0.287	294.7
		0.2781	158	0.303	297.8	0.297	304.0
		0.2781	173	0.323	307.2	0.314	316.3
		0.2781	185	0.339	313.3	0.327	324.3
		0.2781	197	0.342	330.2	0.341	331.1
		0.2781	211	0.350	345.2	0.358	337.3
		0.2781	224	0.369	347.9	0.375	342.1
		0.2781	237	0.401	337.8	0.392	345.5
		0.2781	245	0.442	317.3	0.404	347.2
INTA1	I1105	0.2782	12	0.171	40.5	0.183	37.9
		0.2782	36	0.241	84.7	0.195	104.9
		0.2782	40	0.211	107.2	0.197	114.9
		0.2782	49	0.207	134.0	0.203	136.7
		0.2782	59	0.218	155.0	0.211	160.2
		0.2782	74	0.231	182.1	0.221	190.1
		0.2782	88	0.244	207.5	0.233	217.0
		0.2782	98	0.249	225.8	0.241	233.4
		0.2782	111	0.255	248.5	0.252	251.8
		0.2782	124	0.262	270.7	0.263	269.1
		0.2782	135	0.274	282.6	0.274	282.8
		0.2782	145	0.286	290.3	0.283	292.7
		0.2782	155	0.288	307.9	0.293	302.2
		0.2782	170	0.303	321.0	0.309	314.7
		0.2782	182	0.314	332.0	0.322	323.0
		0.2782	194	0.317	349.7	0.336	330.0
		0.2782	207	0.326	364.3	0.352	336.6
		0.2782	220	0.335	376.2	0.369	341.6
		0.2782	233	0.347	383.8	0.385	345.3
		0.2782	241	0.353	390.4	0.397	347.2

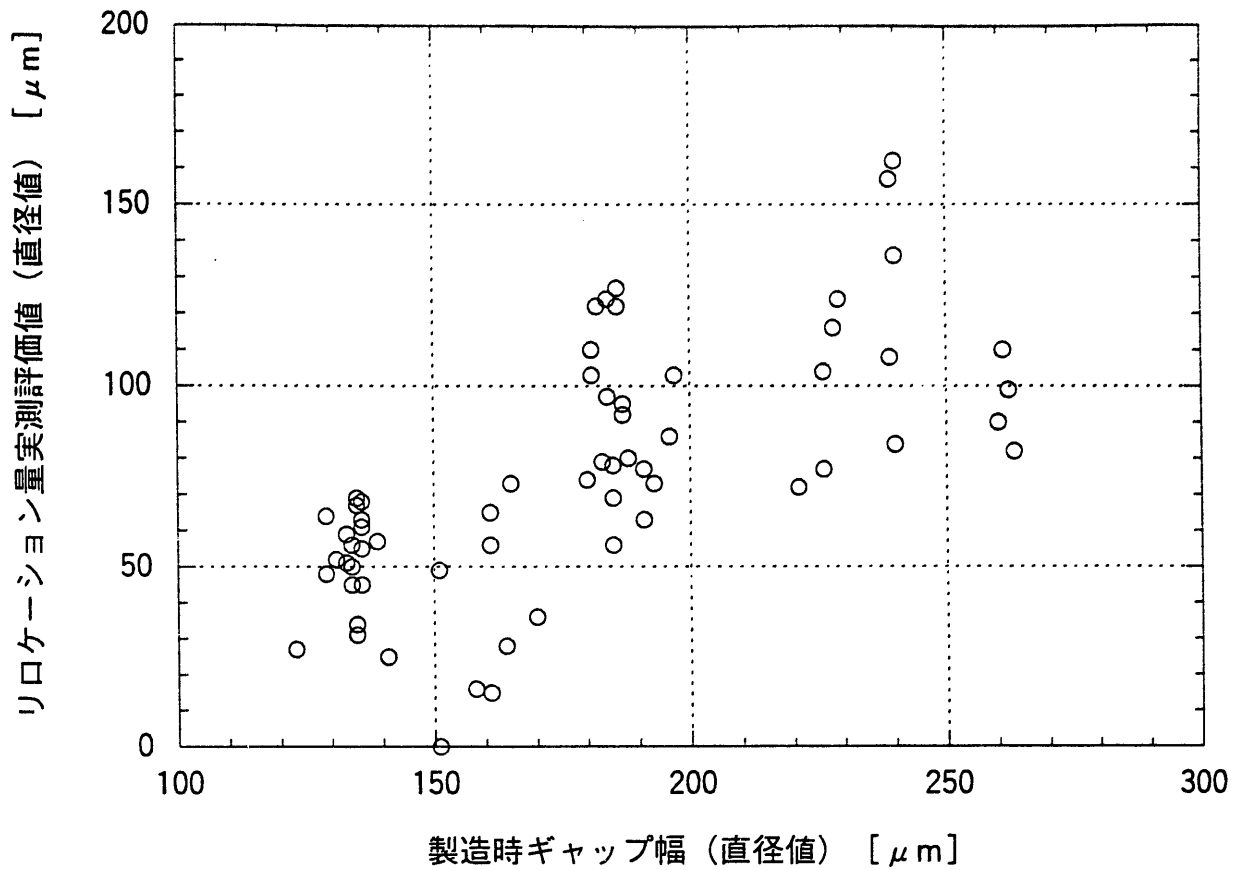


図 2-1-1 リロケーション量と製造時ギャップ幅との相関

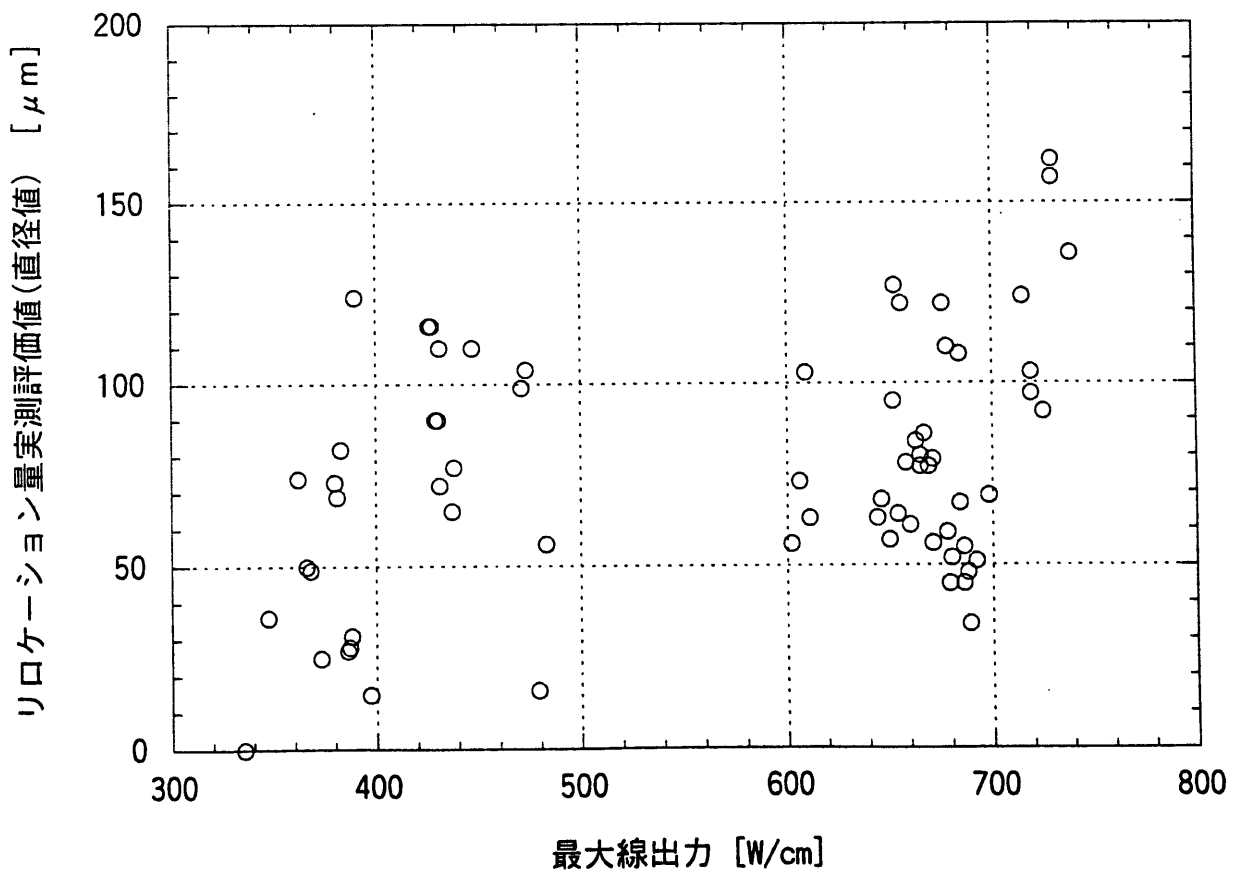


図 2-1-2 リロケーション量と照射中最大線出力との相関

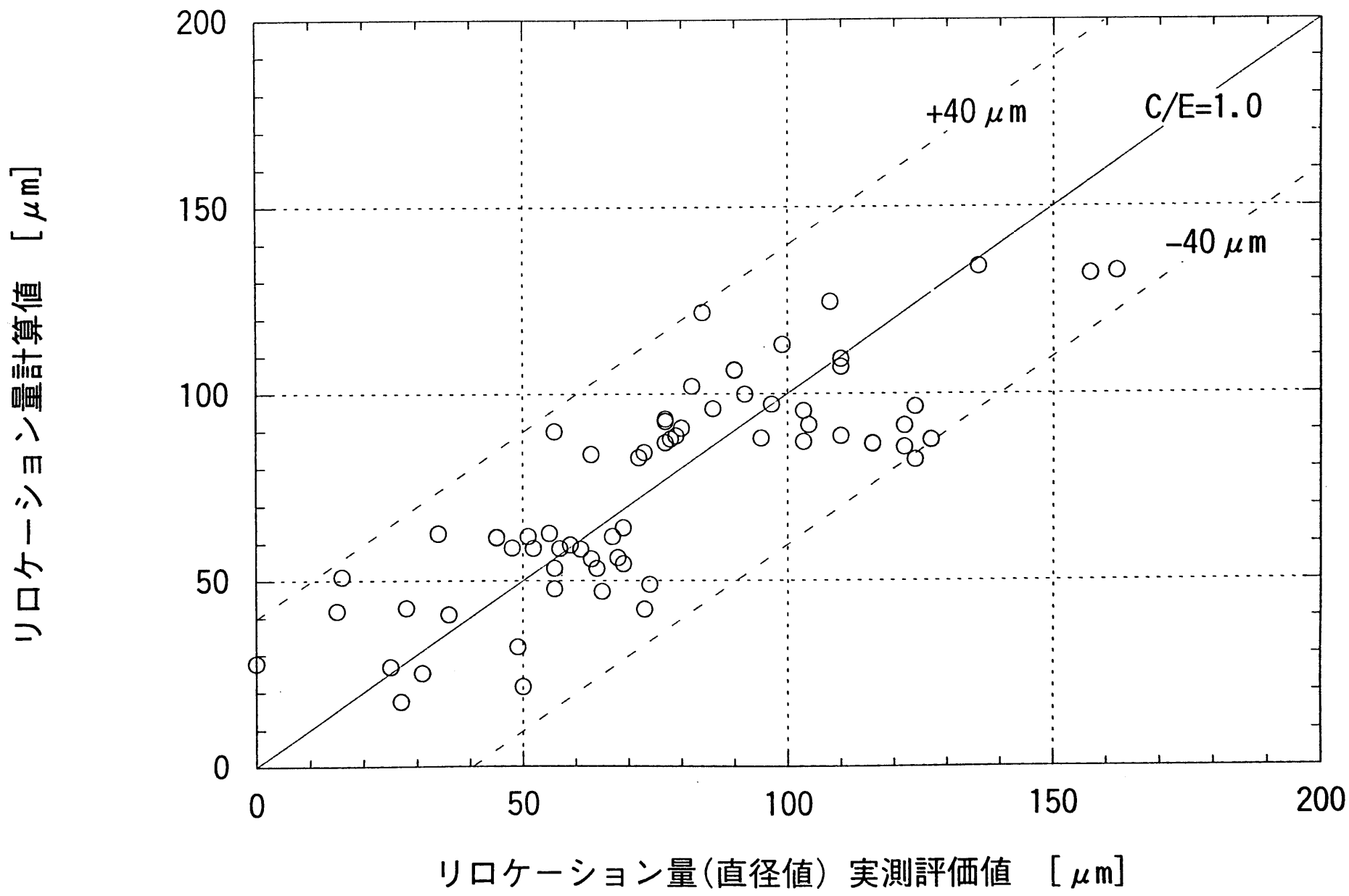


図 2-1-3 リロケーション量評価式の再現性

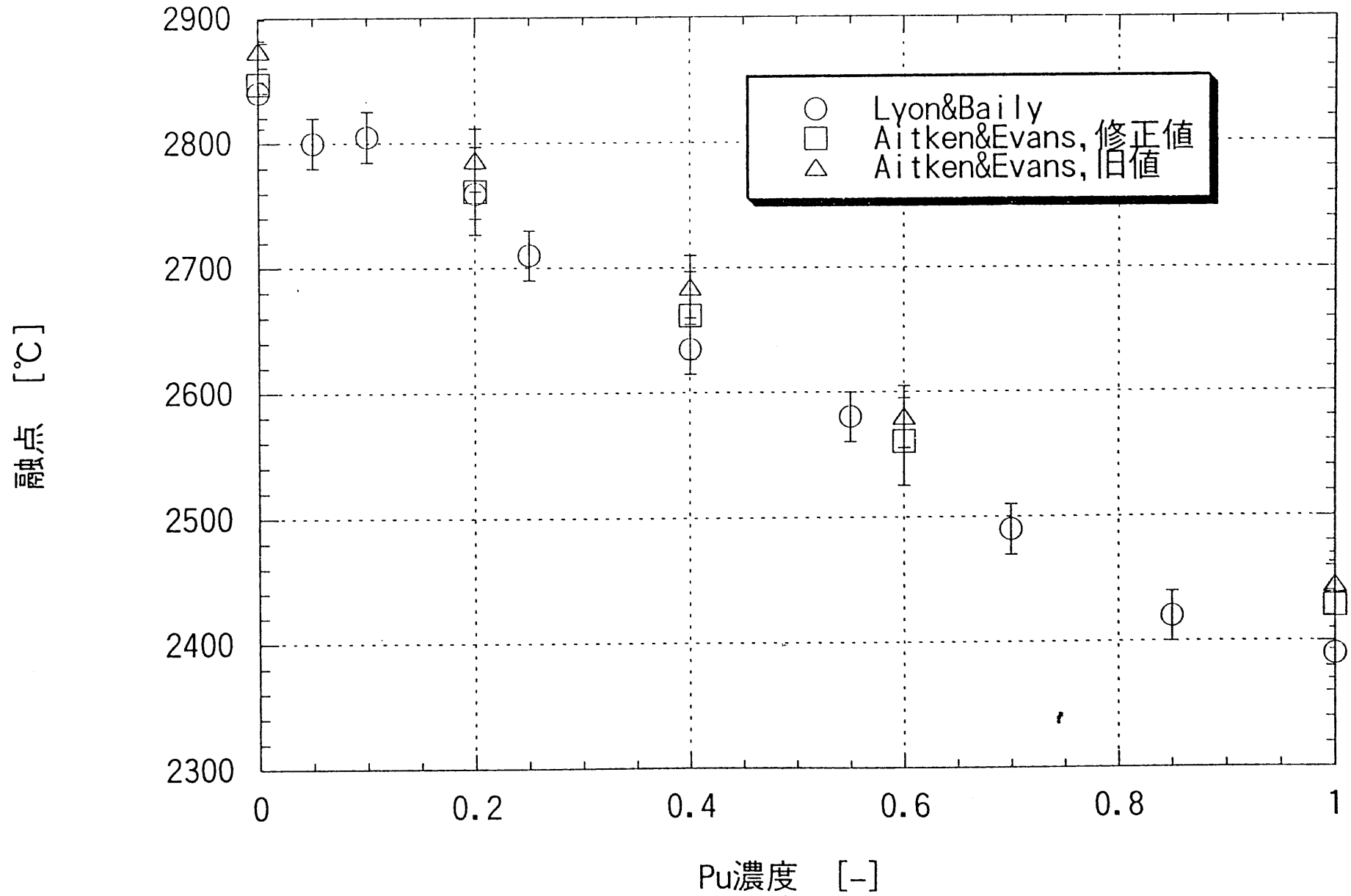


図 2-2 融点報告値の整理 (O/M=2.00)

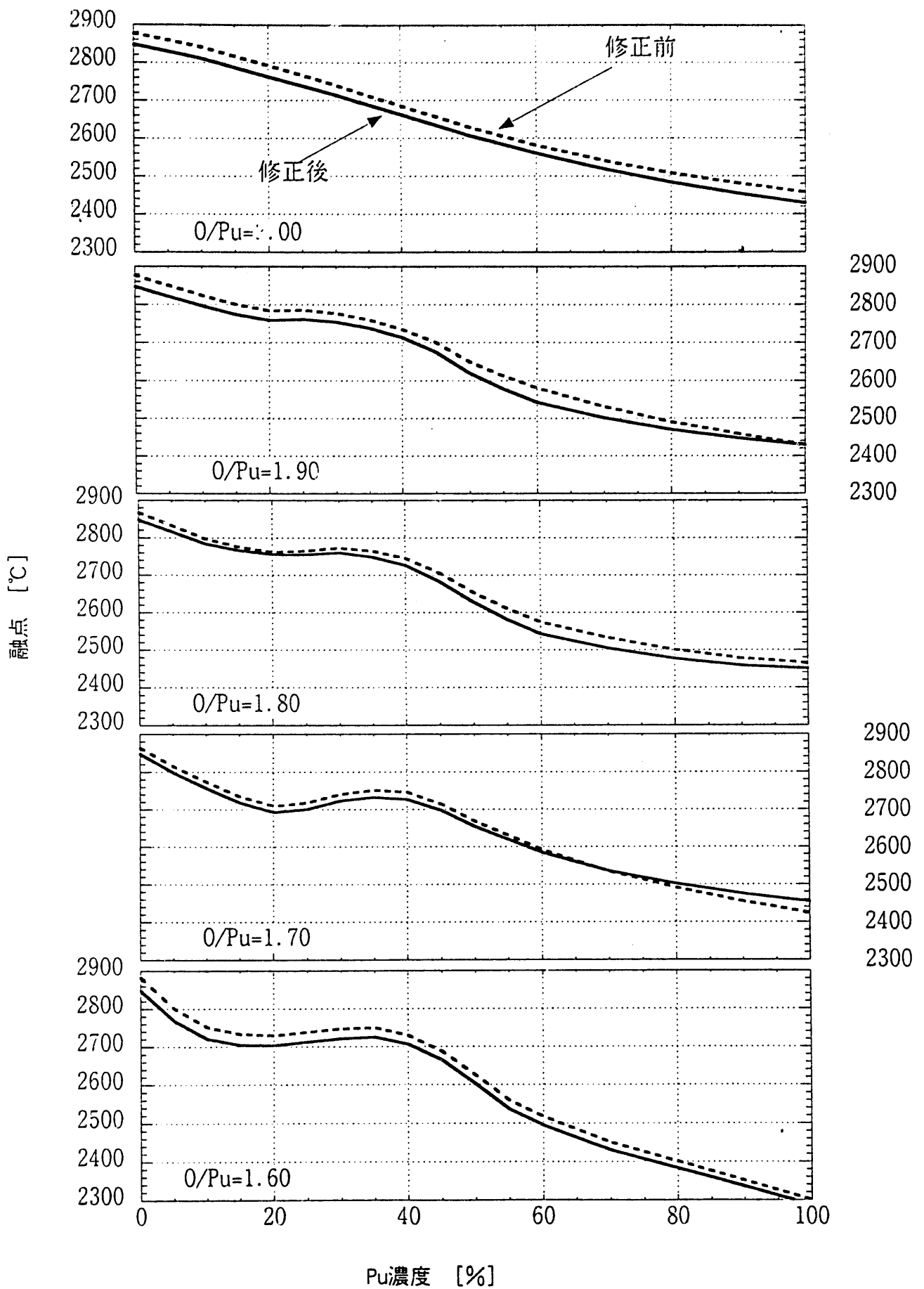


図 2 - 3 修正後の Aitken&Evans 融点評価値

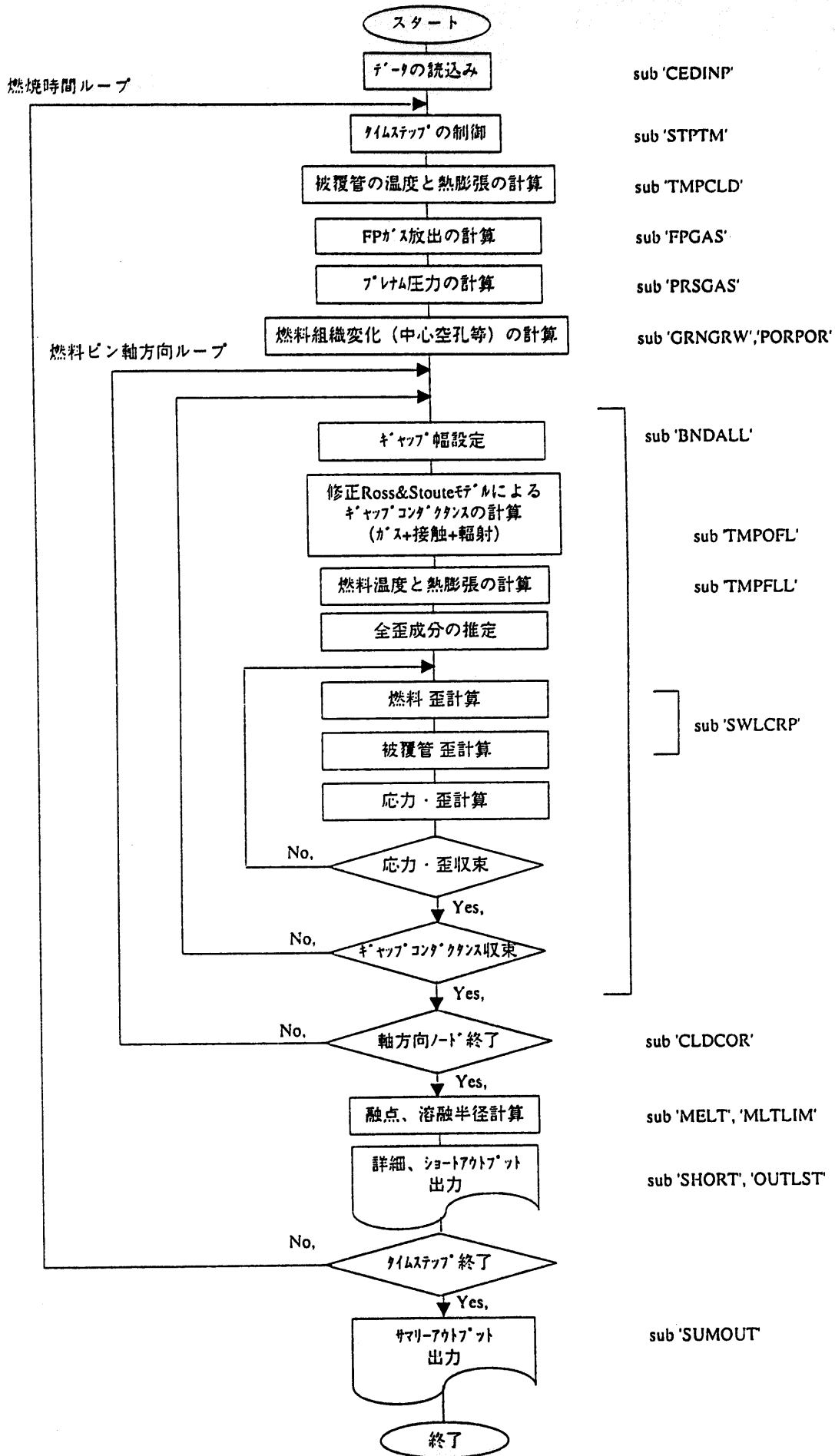


図 2-4 FEVER-M プログラムフローチャート

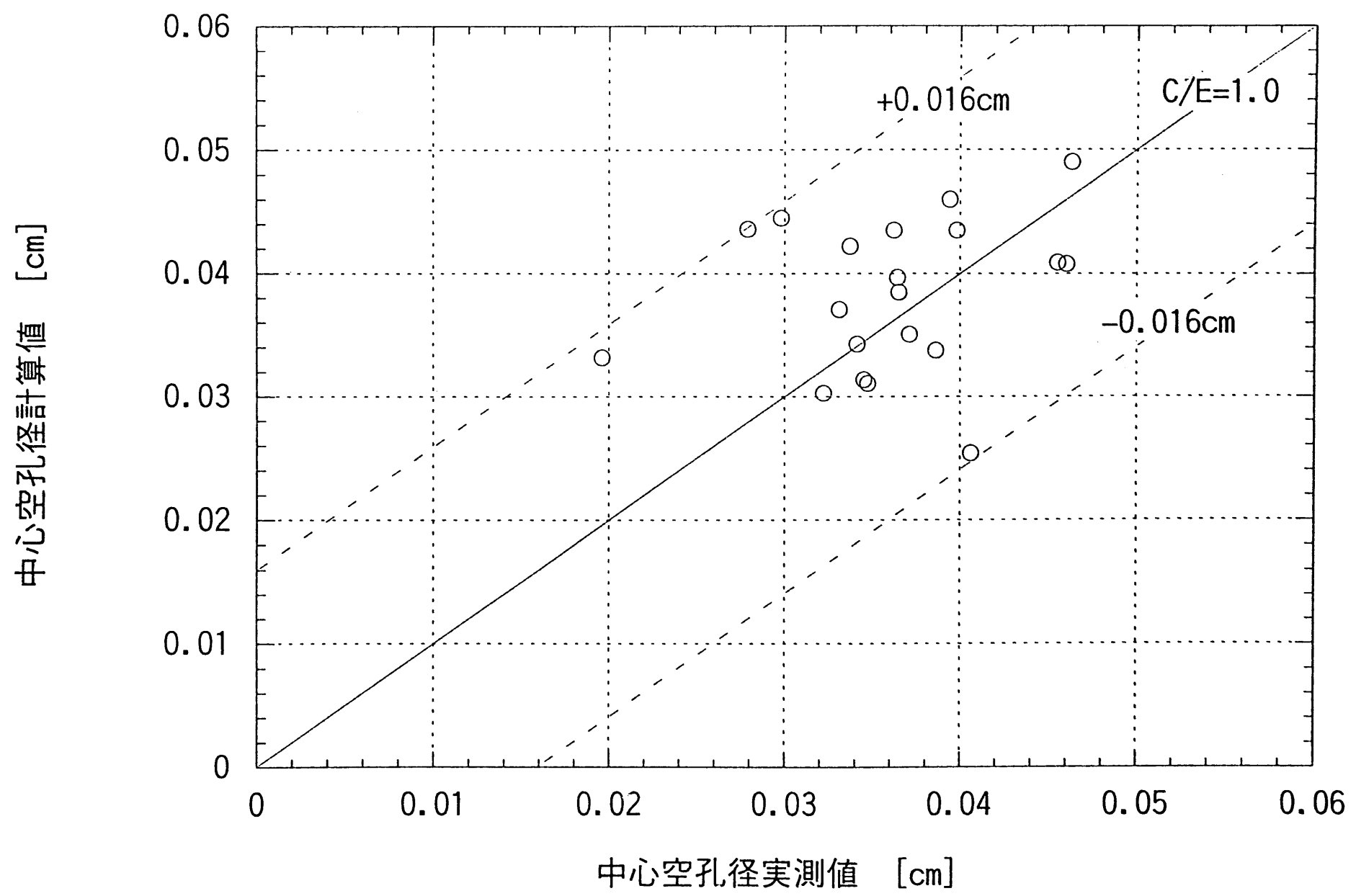


図 3-1 中心空孔径評価結果

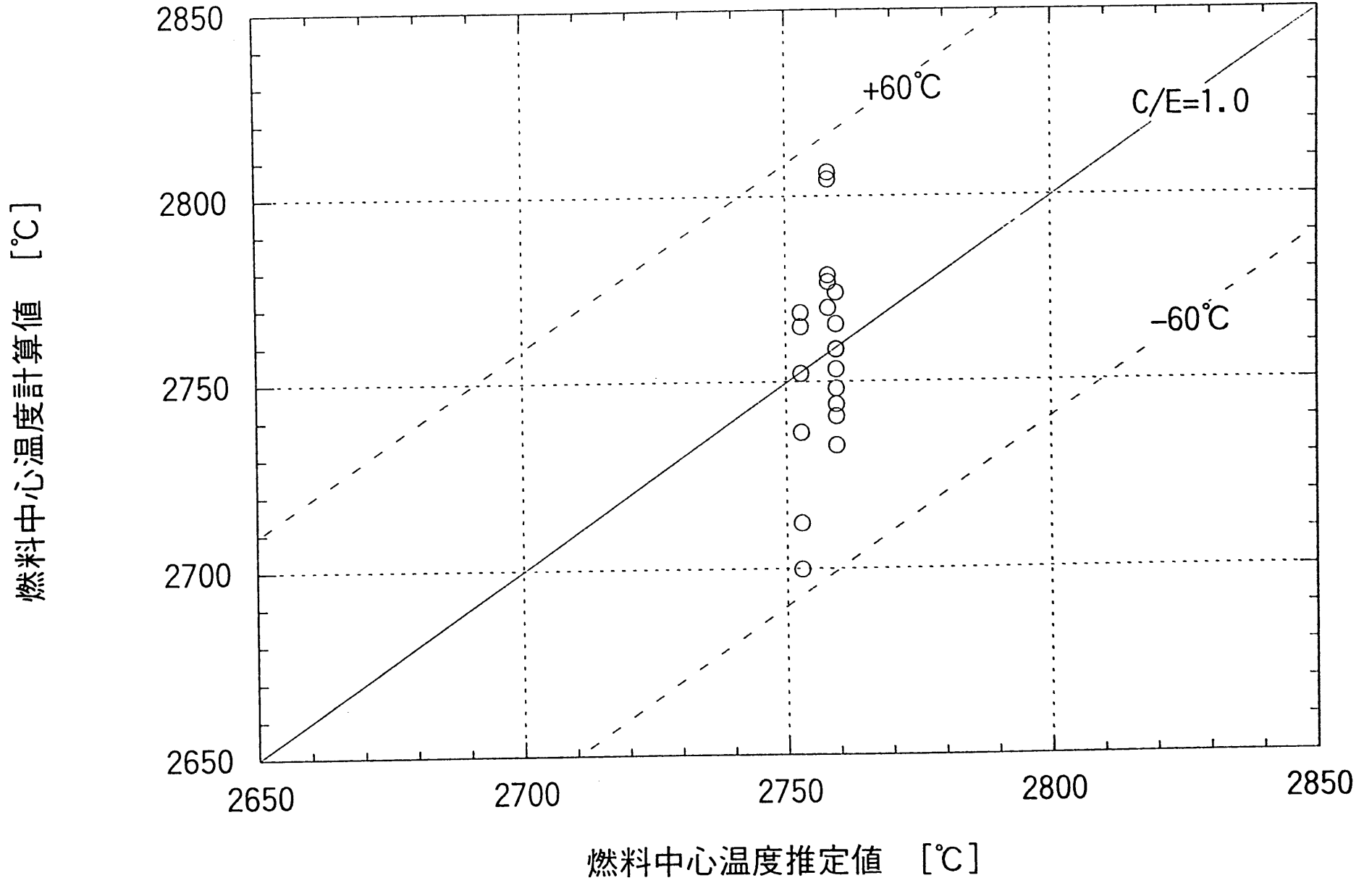


図 3-2 燃料中心温度 (照射中最高温度) 評価結果

溶融面積割合計算値 [%]

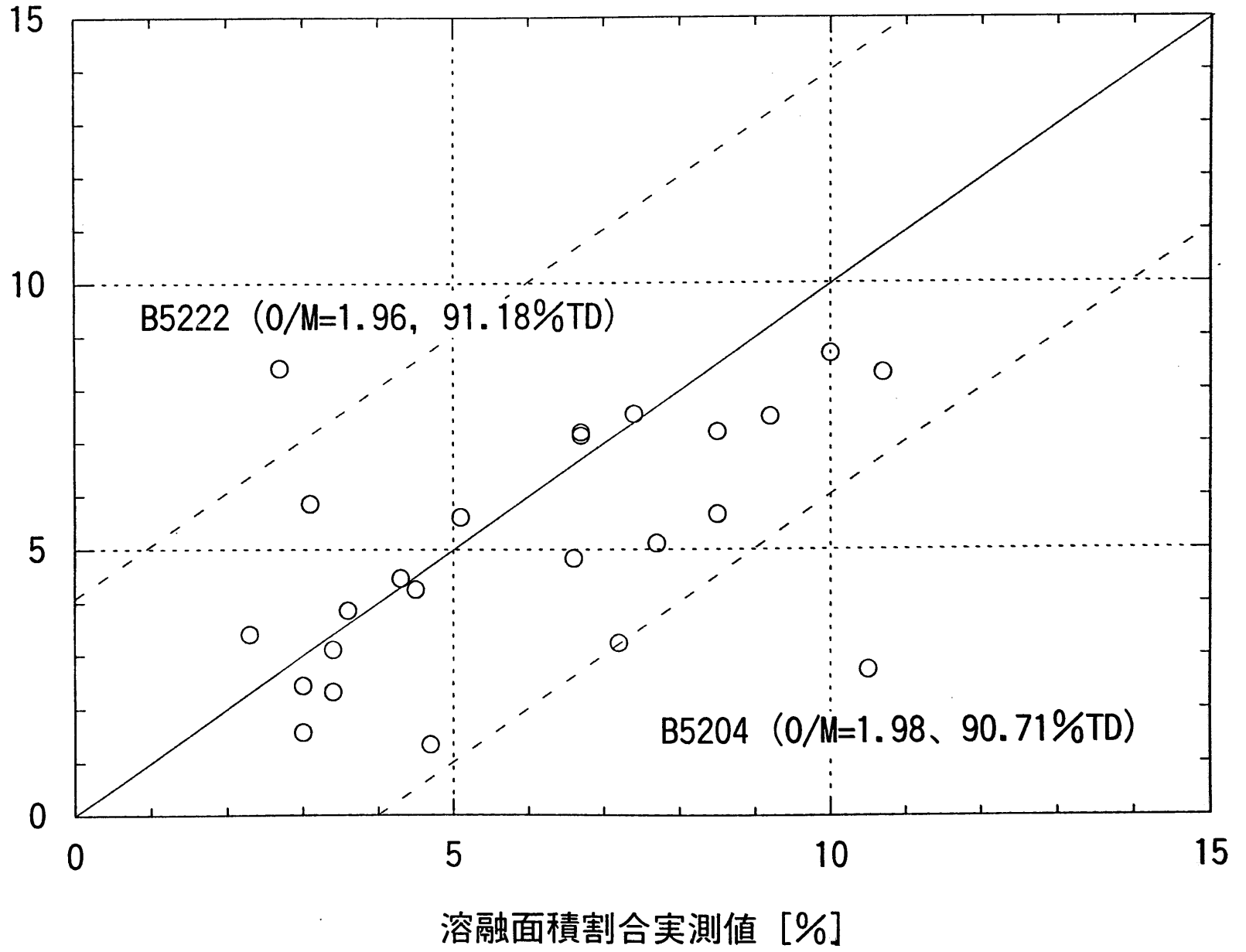


図 3-3 溶融面積割合評価結果

"JOYO" MK-II PFB052

Specimen NO. G80422

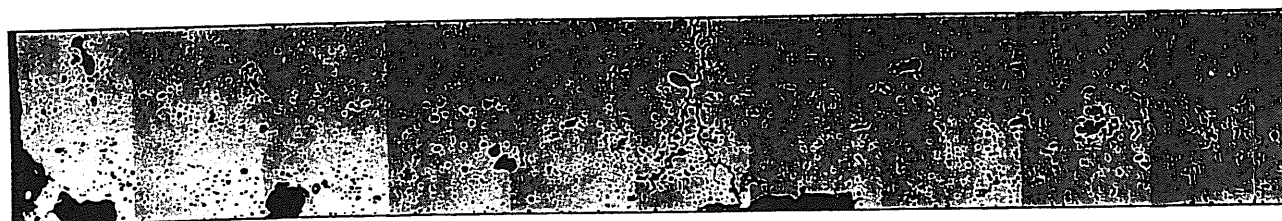
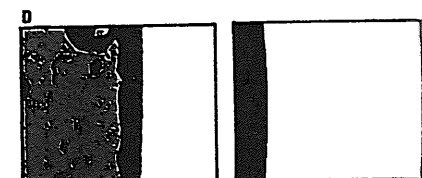
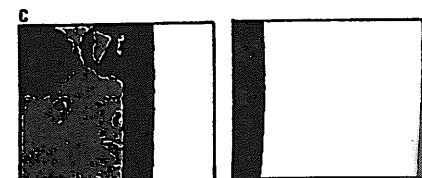
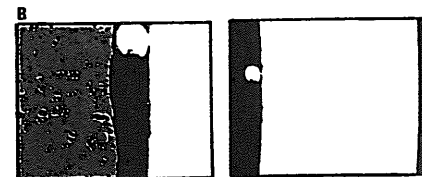
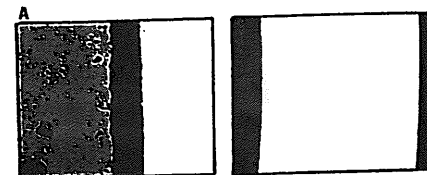
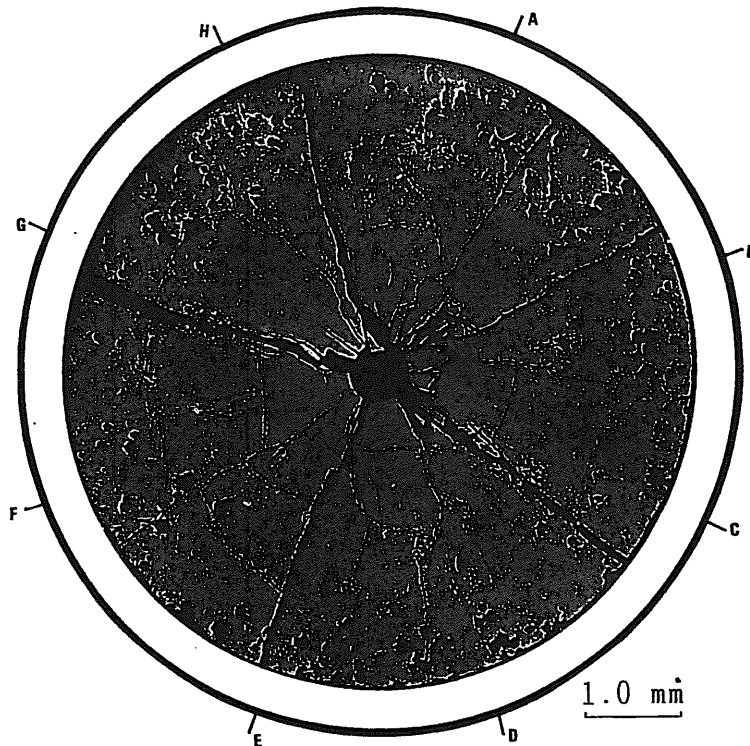
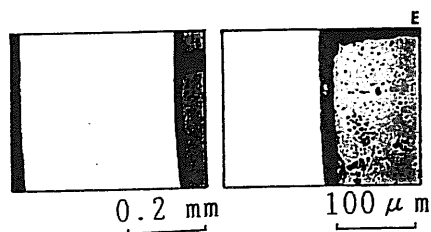
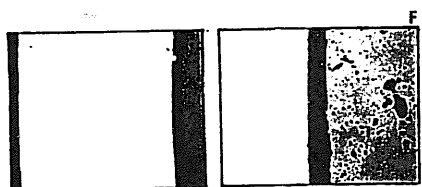
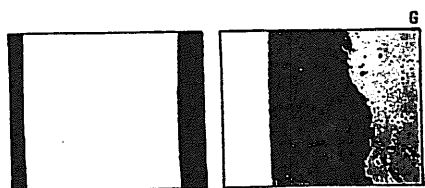
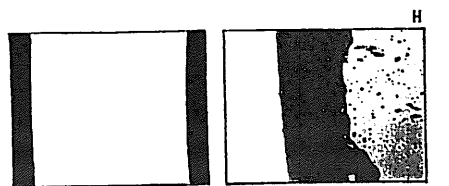


図 3-4 PTM 試験試料の
照射後組織観察例(B5204)

As-Polished

E03GS07

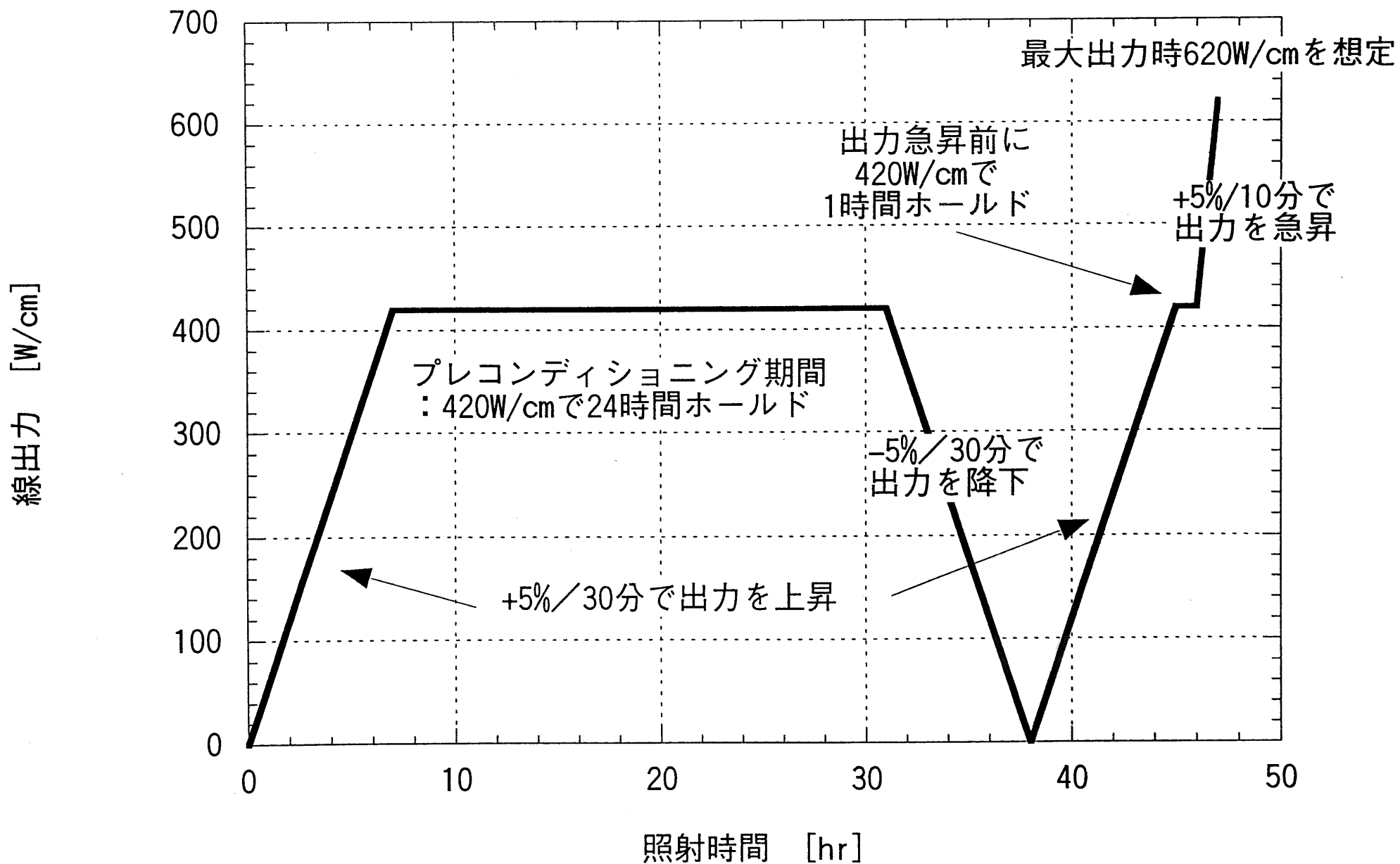


図 4-1 B10試験で想定されている線出力履歴

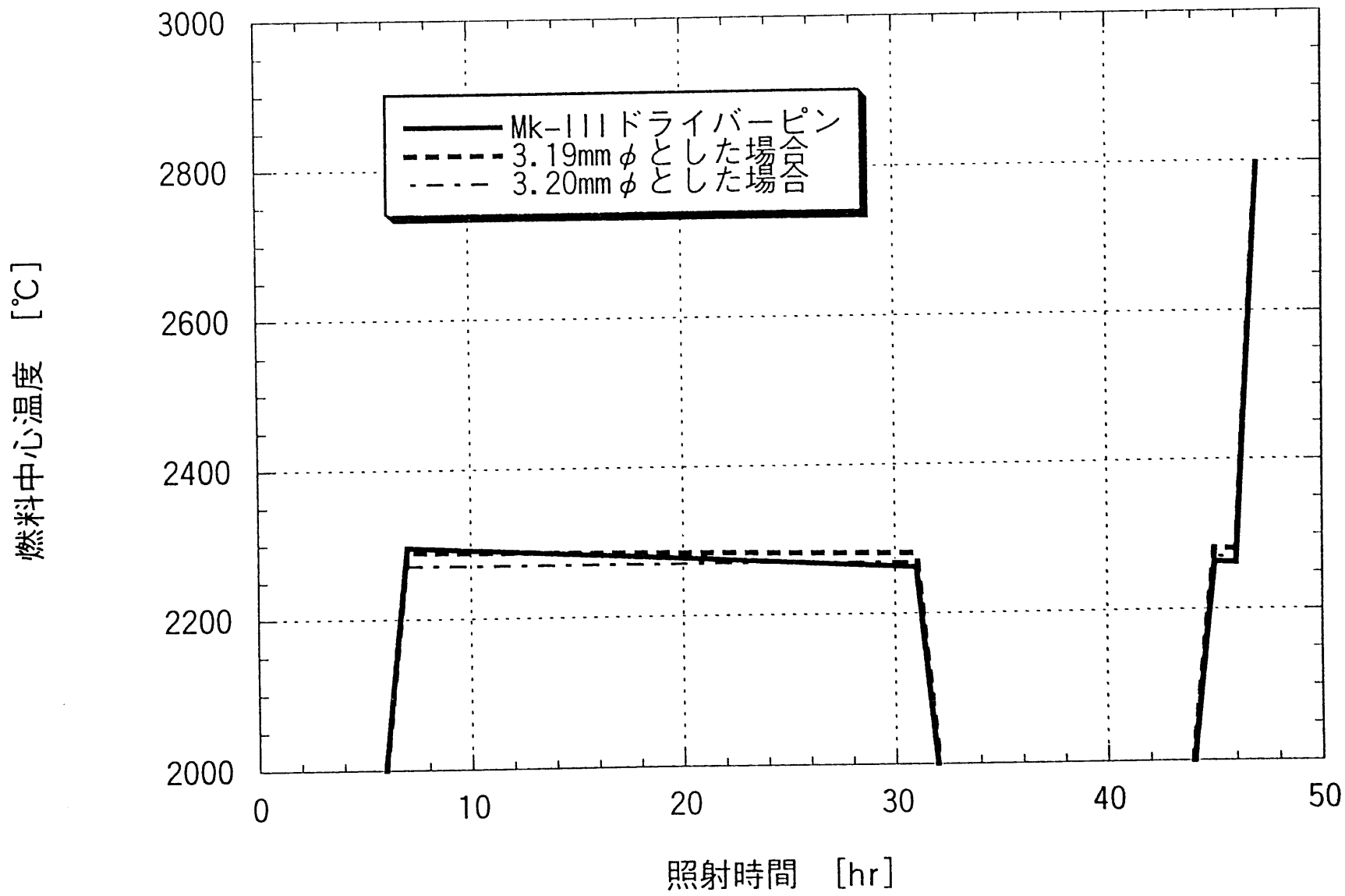


図 4-2-1 FEVER-M による燃料中心温度評価結果 (O/M=1.94)

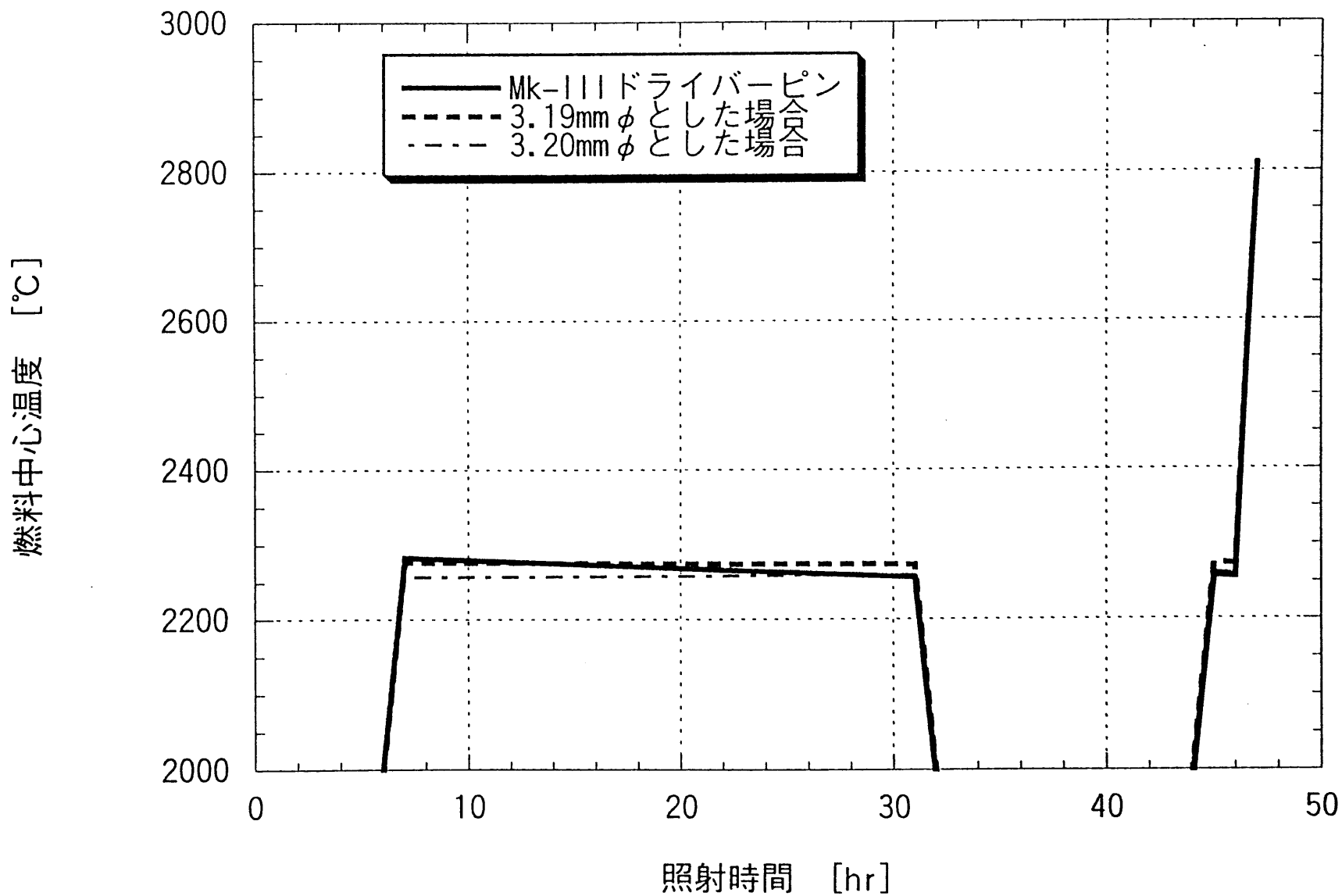


図 4-2-2 FEVER-M による燃料中心温度評価結果 (O/M=1.96)

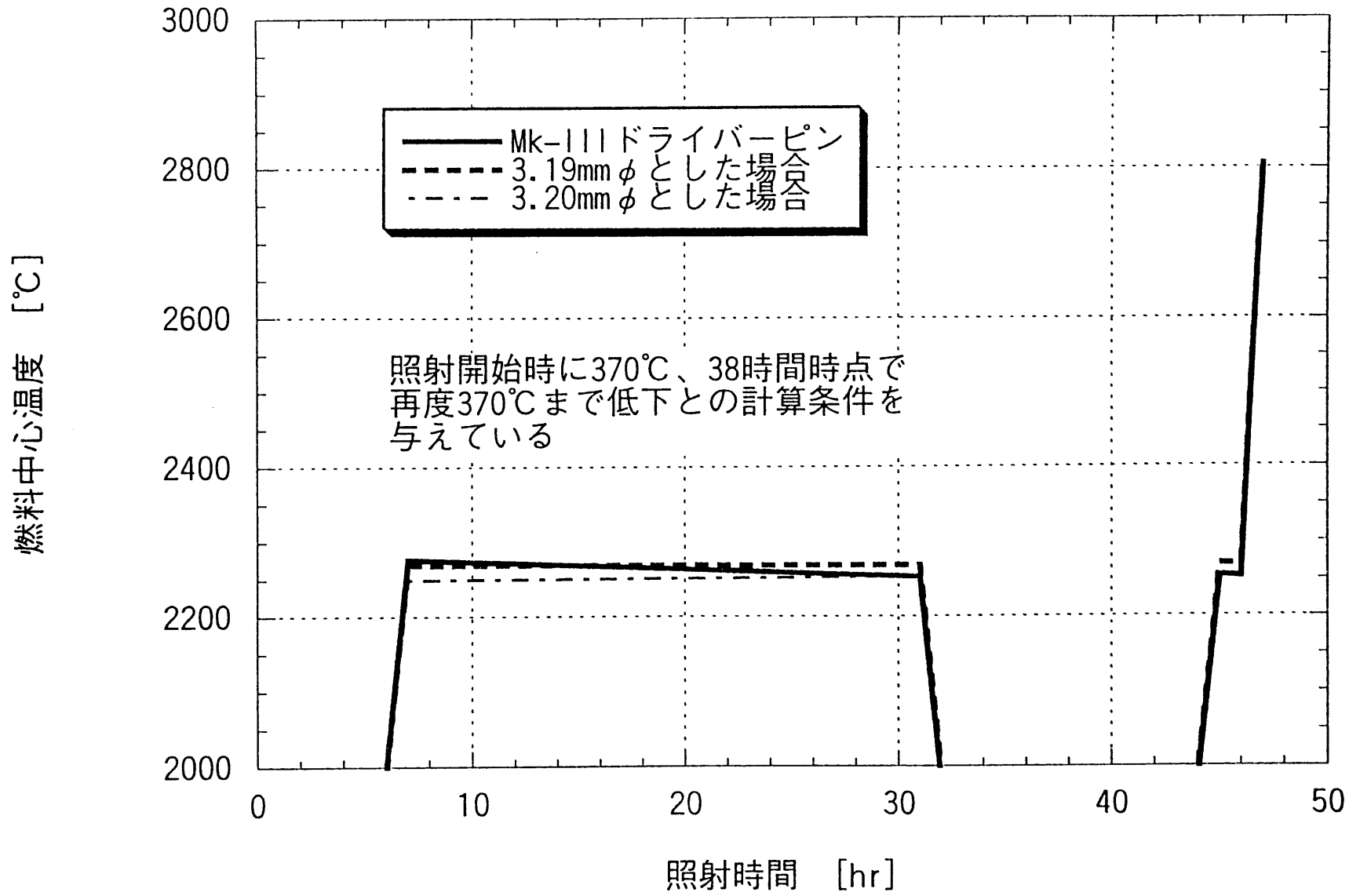
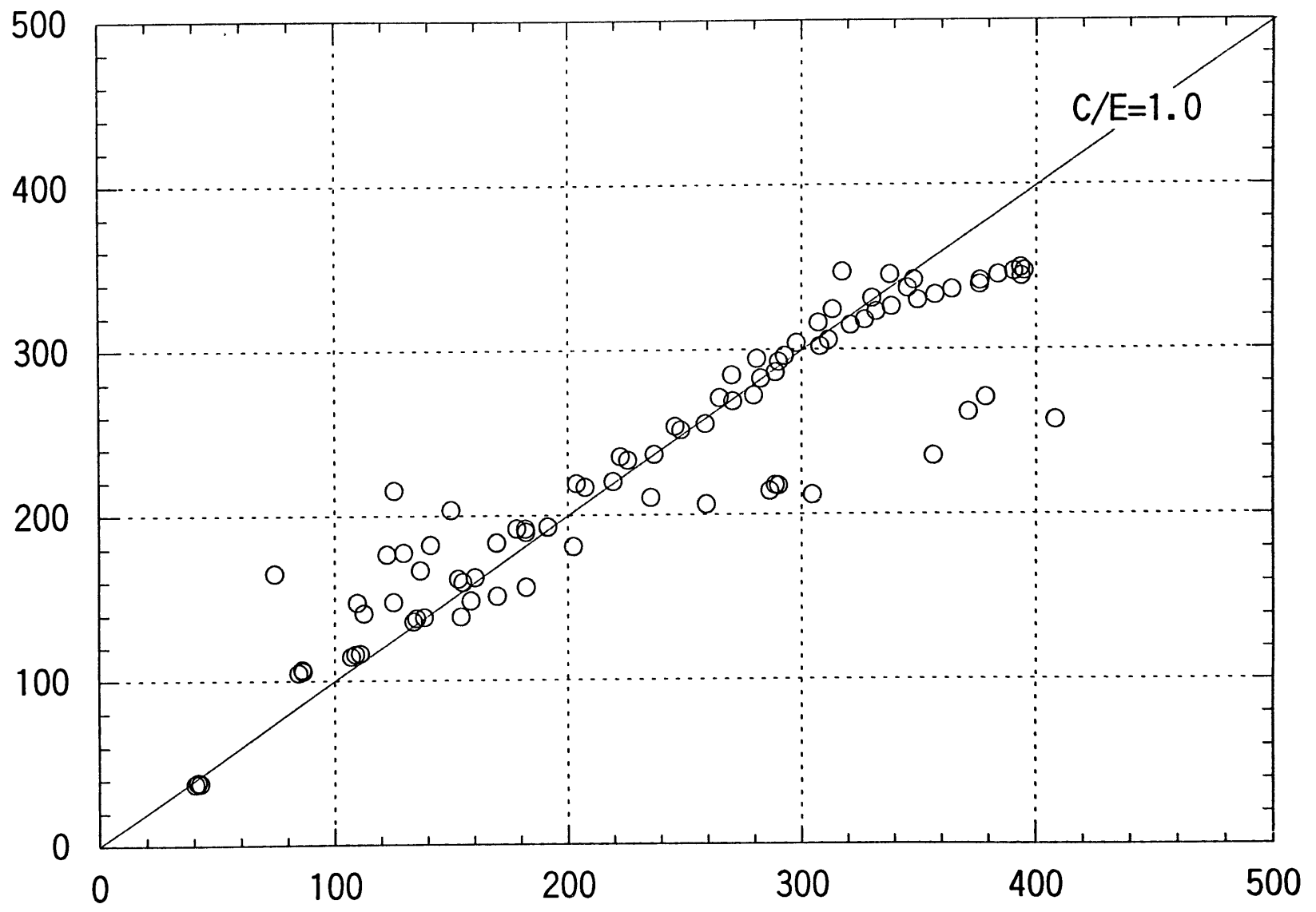


図 4-2-3 FEVER-M による燃料中心温度評価結果 (O/M=1.97)

ギヤップ部温度上昇量推定値 [°C]



ギヤップ部温度上昇量推定値 [°C]

図 4-3 ギヤップ部温度上昇量評価結果

付録 照射初期燃料温度評価用計算プログラム FEVER-M 利用マニュアル

目次	1. プログラムの概要	-----	A-2
	2. 主要計算モデル	-----	A-3
	2.1 燃料熱伝導度式	-----	A-3
	2.2 リロケーション	-----	A-3
	2.3 熱膨張	-----	A-3
	2.4 ギャップコンダクタンス	-----	A-4
	2.4.1 ギャップガス熱伝達係数	-----	A-4
	2.4.2 固体接触熱伝達係数	-----	A-5
	2.4.3 輻射熱伝達係数	-----	A-6
	2.4.4 混合ガス熱伝導度	-----	A-6
	2.4.5 純粋ガス熱伝導度	-----	A-7
	3. プログラムの構造	-----	A-8
	3.1 フローチャート	-----	A-8
	3.2 ツリーチャート	-----	A-8
	4. 入力	-----	A-12
	4.1 出力コントロールデータ	-----	A-12
	4.2 入力データ	-----	A-13
	5. 出力	-----	A-35
	6. 実行	-----	A-47

1. プログラムの概略

本計算プログラムは、数時間から数日程度の照射初期の燃料温度評価手法を確立することを目的として、燃料挙動解析コードである CEDAR コードを基に開発しているものである。

本計算プログラムの主たる特徴は、基とした CEDAR コードが温度評価に応力評価を反映させることで燃料内の状態を詳細に評価しようとするものであるのに対し、燃料内の応力状態を考慮せずに温度を評価していることである。

具体的には、CEDAR コードでは、応力評価結果を反映させることで、ギャップコンダクタンス評価の際にオンパワー時のギャップ幅を

- ・ 燃料および被覆管の熱膨張量
- ・ 燃料および被覆管のスエリング
- ・ 燃料および被覆管のクリープ
- ・ 燃料のホットプレス
- ・ 燃料の焼きしまり

から評価して温度評価精度の向上を図っているのに対し、FEVER-M では、ギャップ幅を

- ・ 燃料および被覆管の熱膨張量
- ・ 燃料の焼きしまり

から評価することで応力評価を不要とし、温度評価を簡素化していることである。

このような簡素化は、燃料内の応力の状態、即ち、燃料と被覆管との機械的相互作用が燃料温度に及ぼす影響が小さいと考えられる照射初期にのみ適用可能と考えられるが、応力評価を削除することで計算プログラムに導入している各種のサブモデル変更時の検証作業が容易となることから、温度評価に関する最新の知見を反映しやすいものとなっている。

以降には、現段階で FEVER-M に導入している主要サブモデル、現段階でのプログラム構造、および現段階での運用方法をまとめた。

2. 主要計算モデル

2.1 燃料熱伝導度式

$$K = \frac{D}{1+1.5(1-D)} \left[\frac{1}{0.0238+1.2(2.0-O/M)+2.48 \times 10^{-4}(1+0.0859Pu)T} + 6.95 \times 10^{-11} T^3 \right]$$

K : 燃料熱伝導度 (W/mK)

T : 温度 (K)

D : 燃料密度 (fraction of theoretical density)

O/M : O/M比 (fraction)

PU : プルトニウム富化度 (=PuO₂ / [(U,Pu)O_{2-x}]) (fraction)

出典 PNC SN9410 88-125

2.2 リロケーション

$$U_{rel} = 0.124 G_0 \text{ *)}$$

U_{rel} : リロケーション量 (cm)

G₀ : 製造時ギャップ幅 (cm)

出典 PNC SN9410 88-125

*) 実際の計算では、これとは異なるモデルを用いている。

2.3 熱膨張

$$\alpha_{(Pu,U)O_2} = [X \alpha_{PuO_2} + (1.0-X) \alpha_{UO_2}] \beta$$

$$\alpha_{PuO_2} = 8.496 \times 10^{-6} + 4.302 \times 10^{-9} T + 11.14 \times 10^{-16} T^2$$

$$\alpha_{UO_2} = 7.107 \times 10^{-6} + 5.162 \times 10^{-9} T + 3.42 \times 10^{-13} T^2$$

$$\beta = 1 - 5.1(O/M - 2.0)$$

$\alpha_{(Pu,U)O_2}$: (Pu,U)O₂の熱膨張率 (1/°C)

α_{PuO_2} : PuO₂の熱膨張率 (1/°C)

α_{UO_2} : UO₂の熱膨張率 (1/°C)

X : PuO₂の重量比 (fraction)

T : 温度 (°C)

O/M : O/M比 (fraction)

出典 PNC SN241 85-23(1)

2.4 ギャップコンダクタンス

ギャップ熱伝達率 H_g は、次式に示す3種類の熱伝達機構から考える。

$$H_g = H_{gas} + H_{solid} + H_{rad}$$

ここで、

H_{gas} : ギャップ混合ガス熱伝達係数

H_{solid} : 固体接触熱伝達係数

H_{rad} : 輻射熱伝達係数

以下、それぞれについて記述する。

2.4.1 H_{gas} : ギャップガス熱伝達係数

ギャップ熱伝達係数 H_{gas} は、次式で計算する。

$$H_{gas} = \frac{K_{mix}}{c \cdot (R_f + R_c) + (g_f + g_c) + GAP}$$

ここで、

GAP : ホットギャップ幅($r_{ci} - r_{fo}$: cm)

c : $2.75 - 2.5016 \times 10^{-3} P_{FC}$

P_{FC} : 燃料-被覆管接触圧(kgf/cm²)※)

R_f, R_c : 燃料及び被覆管表面粗さ(cm)

$R_f = 1.0 \times 10^{-4}$

$R_c = 1.0 \times 10^{-4}$

g_f, g_c : Temperature jump distance (cm)

$$g_f + g_c = 2A \cdot \left[\frac{K_{mix} \sqrt{T_{gas}}}{P_{gas}} \right] \cdot F$$

ここで、

A : 定数(=2872. cm)

K_{mix} : ギャップガス混合ガス熱伝導度(W/cm/ K)

T_{gap} : ギャップガス温度 ($(T_{fo} + T_{ci}) / 2.0$ (K))

T_{fo} : 燃料表面温度(K)

T_{ci} : 被覆管内面温度(K)

P_{gas} : プレナムガス圧力(dyne/cm²: 1 kgf/cm² = 9.80665×10^5 dyne/cm²)

F : 混合ガス種のモル分率、質量数等により定まる関数

$$F = \left(\frac{2 - a_{mix}}{a_{mix}} \right) \sqrt{\frac{1}{\sum \frac{f_i}{\sqrt{M_i}}}}$$

f_i : i 種ガスのモル分率(-)

$i=1$ ヘリウム(He)

$i=2$ アルゴン(Ar)※)

$i=3$ クリプトン(Kr)

$i=4$ キセノン(Xe)

M_i : i 種ガスの質量数(-)
 $M_1=4.003$
 $M_2=39.944^{*)}$
 $M_3=83.800$
 $M_4=131.300$

k_i : i 種ガスの純粋ガス熱伝導度(W/cm/K)

a_{mix} : 混合ガスのaccomodation factor

$$a_{mix} = \frac{\sum_j f_j a_j (\sqrt{M_j})}{\sum_j f_j (\sqrt{M_j})}$$

$a_1 = 0.23$, $a_3 = 0.62$
 $a_2 = 0.54^{*)}$, $a_4 = 0.61$

出典 PNC SN941 84-33

*) 計算プログラム中には記述されているが、実際の計算には使用していない。

2.4.2 H_{solid} : 固体接触熱伝達係数^{*)}

固体接触熱伝達係数 H_{solid} は次式で計算する。

$$H_{solid} = \frac{K_s \times P_{fc}}{A_0 \times \sqrt{\hat{R}} \times H_M}$$

ここで、

K_s : 実効固体熱伝導度(W/cm/°C)

$$K_s = \frac{2 \times K_{ci} \times K_{fo}}{K_{ci} + K_{fo}}$$

K_{ci} : 被覆管内面熱伝導度(W/cm/°C)

K_{fo} : 燃料ペレット外面熱伝導度(W/cm/°C)

A_0 : 定数(≈ 0.5)

P_e : 被覆管/燃料ペレット接触圧(kgf/cm²)

R : 二乗平均表面粗さ(cm)

$$\hat{R} = \sqrt{\frac{(R_e^2 + R_f^2)}{2}}$$

R_f, R_c : 燃料及び被覆管表面粗さ(cm)

$$R_f = 1.0 \times 10^{-4}$$

$$R_c = 1.0 \times 10^{-4}$$

H_M : Meyer硬度(kgf/cm²)

$$H_M = \sigma_y / 3$$

σ_y : 被覆管降伏応力(kgf/cm²)

出典 CRFD-1075/AECL-1552(1962)

*) 現在使用しておらず、 H_{solid} は $H_{solid}=0.0$ としている。

2.4.3 H_{rad} : 輻射熱伝達係数

輻射熱伝達係数 H_{rad} は、次式で計算する。

$$H_{\text{rad}} = \sigma \left[\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right) \right]^{-1} (T_{\text{fo}}^2 + T_{\text{ci}}^2) (T_{\text{fo}} + T_{\text{ci}})$$

ここで、

$T_{\text{fo}}, T_{\text{ci}}$: 燃料表面温度及び被覆管内表面温度(K)

σ : Stefan-Boltzman定数

$$\sigma = 5.66961 \times 10^{-12} \text{ (W/cm}^2\text{/K}^4\text{)}$$

ϵ_f, ϵ_c : 燃料及び被覆管輻射率 (無次元数)

$T_{\text{fo}} < 1000\text{(K)}$

$$\epsilon_f = 0.8707$$

$1000 < T_{\text{fo}} \leq 2050\text{(K)}$

$$\epsilon_f = 1.311 - 4.404 \times 10^{-4} \times T_{\text{fo}}$$

$2050 < T_{\text{fo}}$

$$\epsilon_f = 0.4083$$

$$\epsilon_c = 0.4$$

A_f, A_c : 単位長さ当たりの燃料-被覆管伝熱面積(cm^2) ($A_f/A_c=1.0$ と仮定)

出典 CRFD-1075/AECL-1552(1962)

2.4.4 混合ガス熱伝導度

混合ガス熱伝導度は、次式で計算する。

$$k_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{k_i}{1 + \sum_{j=i}^n \psi_{ij} \frac{X_j}{X_i}} \right)$$

ここで、

k_{mix} : 混合ガス熱伝導度 (W/cm/K)

k_i : i 種純粋ガスの熱伝導度 (W/cm/K)

n : ガス成分数

X_i : i 種および j 種ガスモル分率(-)

$i=1$ ヘリウム(He)

$i=2$ アルゴン(Ar)

$i=3$ クリプトン(Kr)

$i=4$ キセノン(Xe)

$i=5$ 水素ガス(H_2)

$i=6$ 窒素ガス(N_2)

$$\psi_{ij} = \phi_{ij} \left[1 + 2.41 \frac{(M_i - M_j)(M_i - 0.142 M_j)}{(M_i + M_j)^2} \right]$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{k_i}{k_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{1/4} \right]^2}{2^{3/2} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/2}}$$

出典 NUREG/CR-0497 TREE-1280 Rev1(1980)

2.4.5 純粋ガス熱伝導度

単原子分子の純粋ガス熱伝導度は、次式で計算する。

$$\text{He} : K = 3.366 \times 10^{-3} T^{0.668}$$

$$\text{Ar} : K = 3.421 \times 10^{-4} T^{0.701}$$

$$\text{Xe} : K = 4.0288 \times 10^{-5} T^{0.872}$$

$$\text{Kr} : K = 4.726 \times 10^{-5} T^{0.923}$$

$$\text{H}_2 : K = 1.6355 \times 10^{-3} T^{0.8213}$$

$$\text{N}_2 : K = 2.091 \times 10^{-4} T^{0.846}$$

ここで

K : 純粋ガス熱伝導度 (W/m-K)

T : ガス温度 (K)

出典 NUREG/CR-0497 TREE-1280 Rev1(1980)

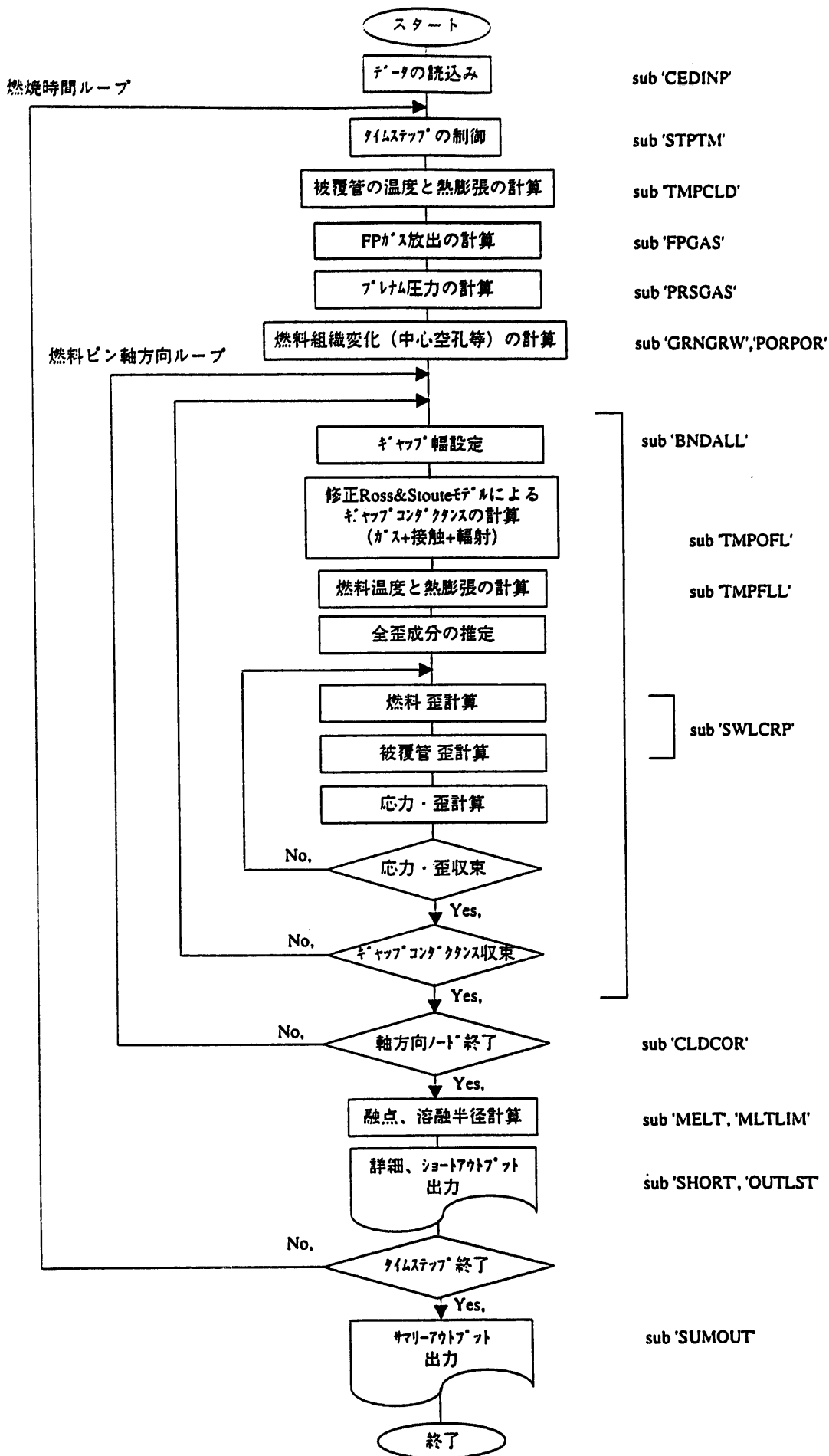
3. プログラムの構造

3.1 フローチャート

このプログラムは、R-Z体系としている。プログラム中では、燃料スタック部を軸方向に最大で5分割（5セグメント）し、各セグメントは径方向に最大で10分割（10ノード）して取り扱うことができる。計算は、まず、径方向について行い、その後、別のセグメントに移るという手順としているが、各セグメントのFPガス放出量の総和から得られるプレナムガス圧を各セグメントのギャップ熱伝達率計算に用いているものの、セグメント間での熱流等は考慮しておらず、独立したセグメントについての計算を一括して行う様な形態のものである。図A-1にプログラムのフローチャートを示した。

3.2 ツリーチャート

図A-2～A-3にプログラムのツリーチャートを示す。副プログラムの左側に*が付いたルーチンは組み込み関数である。（このツリーチャートはFORTRANプログラム開発・保守パッケージWISEPACKを用いて作成、出力したものである）



図A-1 FEVER-Mプログラムフローチャート

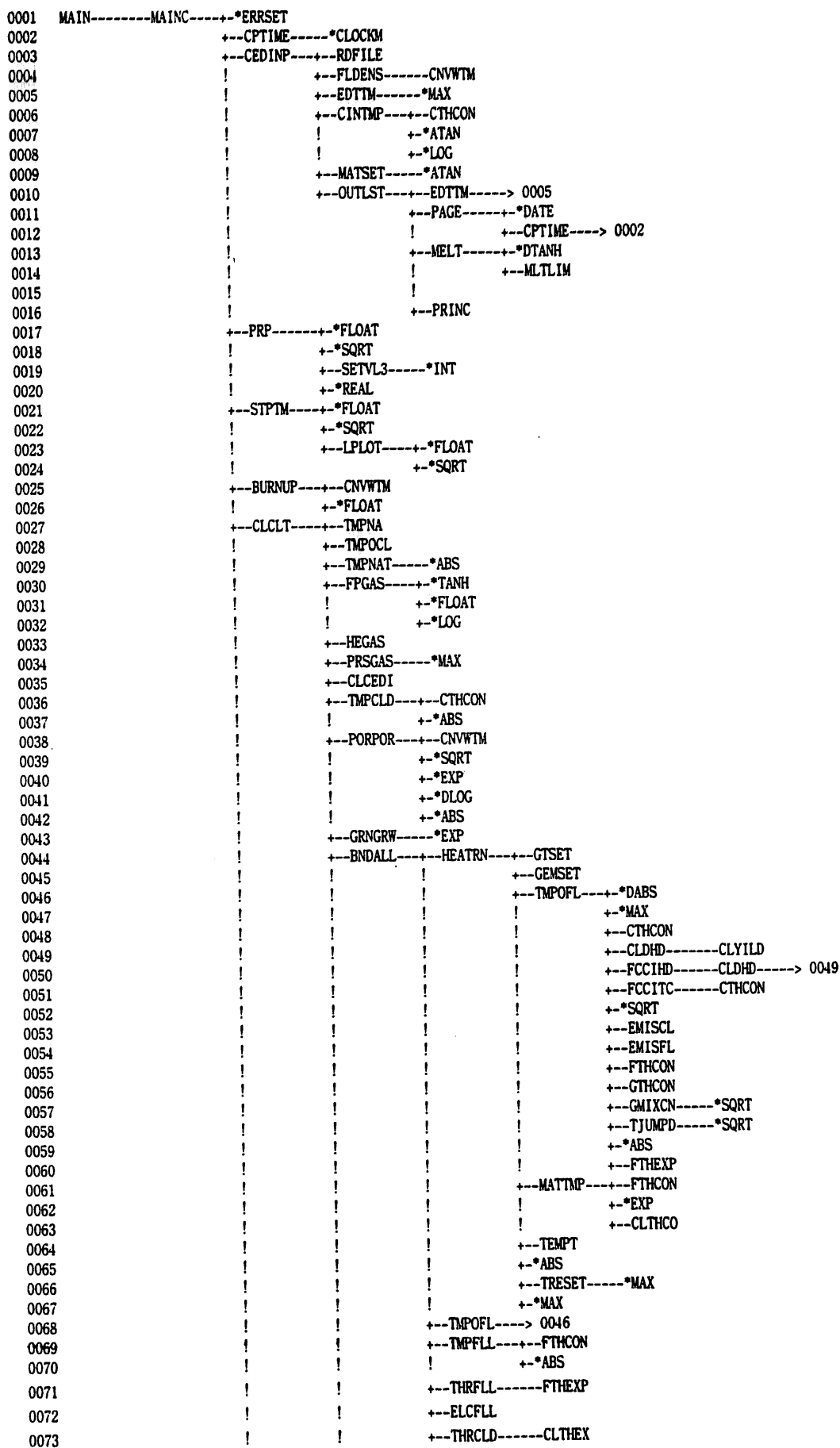


図 A-2 FEVER-Mプログラムツリーチャート(1/2)

*がついたルーチンは組み込み関数

```

0074      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0075      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0076      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0077      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0078      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0079      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0080      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0081      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0082      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0083      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0084      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0085      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0086      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0087      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0088      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0089      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0090      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0091      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0092      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0093      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0094      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0095      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0096      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0097      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0098      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0099      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0100      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0101      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0102      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0103      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0104      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0105      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0106      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0107      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0108      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0109      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0110      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0111      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0112      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0113      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0114      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0115      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0116      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0117      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0118      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0119      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0120      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0121      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0122      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0123      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0124      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0125      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0126      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0127      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0128      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0129      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0130      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0131      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0132      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0133      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0134      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0135      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0136      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0137      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0138      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0139      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0140      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0141      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0142      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0143      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0144      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
0145      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !

```

図 A - 3 FEVER-Mプログラムツリーチャート(2/2)

4. 入力

このプログラムの入力データとして、「出力コントロールデータ」と「入力データ」の二つが必要である。「出力コントロールデータ」は、計算結果の出力をコントロールするデータで、「入力データ」は燃料ピン製造仕様、照射履歴等を入力するデータである。

4.1 出力コントロールデータ

出力コントロールデータは、詳細アウトプットとショートアウトプットの出力を制御するためのデータである。図A-4に出力コントロールデータサンプル、図A-5にカード別入力説明を示す。

	-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----
カード1⇒	1 3 5
カード2⇒	1 4 5 7 9 12
	-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----

図A-4 出力コントロールデータサンプル

カード1 ショートアウトプットコントロールカード

フォーマット	変数名	意味
I5	ICONTS	ショートアウトプット出力コントロールフラグ
I5	ISTEP1	ショートアウトプット出力開始時刻点番号
I5	ISTEP2	ショートアウトプット出力終了時刻点番号

ICONTS =0：全ての時刻点においてショートアウトプットを出力する。
 1：ISTEP1～ISTEP2の時刻点においてショートアウトプットを出力する。
 2：全ての時刻点においてショートアウトプットを出力しない。
 ただし、ICONTS =1の時は、必ずISTEP1<ISTEP2でなければならない。

カード2 詳細アウトプットコントロールカード

フォーマット	変数名	意味
I5	ICONTL	詳細アウトプット出力コントロールフラグ
I5	ISTEPS(1)	詳細アウトプット出力時刻点番号 1
I5	ISTEPS(2)	詳細アウトプット出力時刻点番号 2
I5	ISTEPS(3)	詳細アウトプット出力時刻点番号 3
I5	ISTEPS(4)	詳細アウトプット出力時刻点番号 4
I5	ISTEPS(5)	詳細アウトプット出力時刻点番号 5

ICONTL =0：全ての時刻点で詳細アウトプットを出力する。
 1：ISTEPS(1)～ISTEP(5)で指定された時刻点で詳細アウトプットを出力する。
 2：全ての時刻点で詳細アウトプットを出力しない。
 ただし、ICONTL =1の時に指定できる時刻点番号は5個までである。

図A-5 カード別入力説明

4.2 入力データ

「入力データ」は次の4つのデータ群によって構成されている。

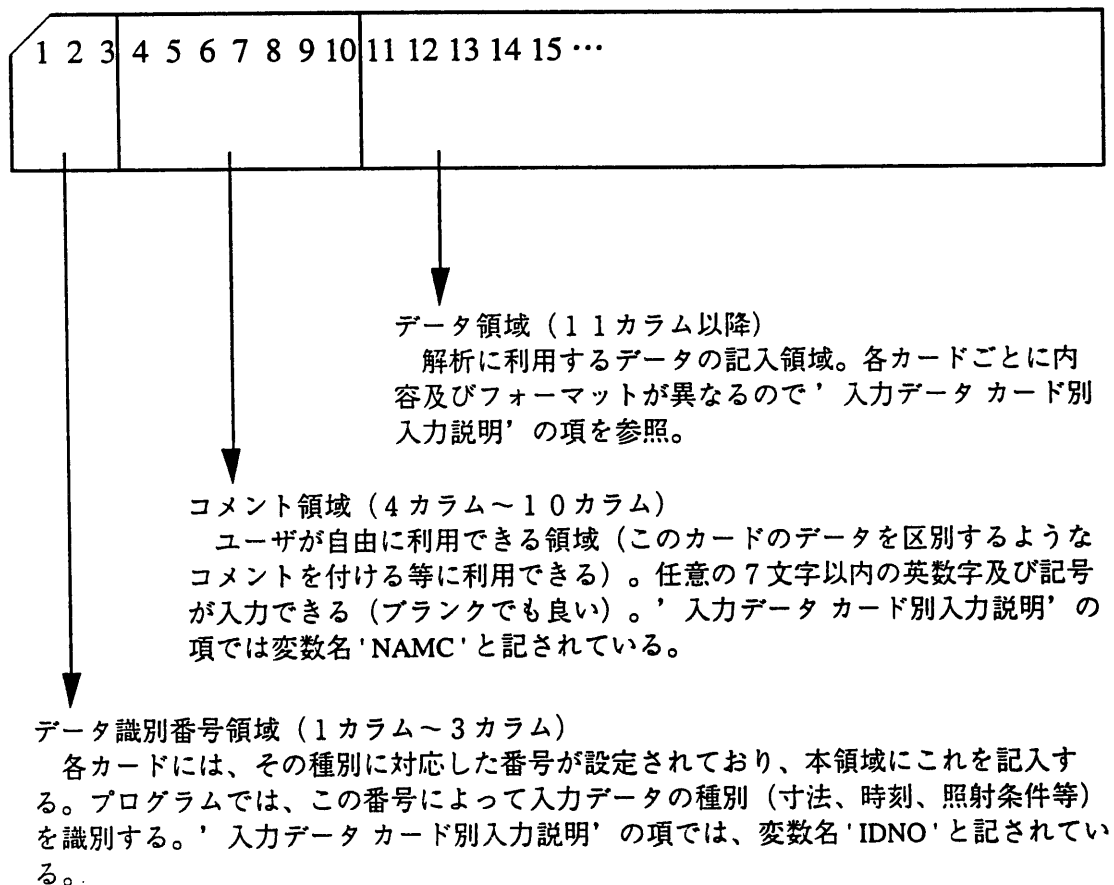
- ①タイトル、コメントカード (2枚)
- ②燃料製造仕様カード
- ③照射履歴カード
- ④オプションカード、物性値、その他のプログラム制御因子

①、②、③のデータ群入力、データ記述形式が固定されており、<①、②、③データ群記述形式>の項で説明する。

④の入力形式は、NAMELISTを用いた自由記述形式となっており、<④データ群記述形式>の項で説明する。

<①、②、③データ群記述形式>

①、②、③のデータ群では、原則として1枚のカード中の構成を次の形式としている。



①、②、③のデータ群カードは、④のデータ群より前に配置しなければならない。また、データ認識番号領域に記入される変数名 'IDNO' によってカードの配置順序が決まっているので、下記の順序にしたがって①、②、③のデータ群カードを並べなくてはならない。(図A-6入力データサンプル参照)

①、②群のカード ('100'カード～'45j'カード) は 'IDNO' の昇順で必要分入力する。 ('101', '102', '103', '200', '250', '300', '35i', '40i', '45j' カードの順)

③群のカード ('500'カード～'80i'カード) は、①、②群のカードの後に配置する。③群のカードのなかでは、'500'カードを先頭に置き、以下は '50k', '60k', '70i', '80i' カードの順で各時刻点ごとに繰返し入力する。

- i は、それぞれのカードを入力するごとに、1 から順に1 ずつ増やしていく。
 j は、それぞれのカードを入力するごとに、0 から順に1 ずつ増やしていく。
 k は、照射条件入力時刻点 ('50k'カード) を入力するごとに、1 から順に1 ずつ増やしていく。
 各カードの詳細については、'カード別入力説明' の項を参照。

<④データ群入力形式>

④データ群は、①、②、③のデータ群より後に配置しなければならない。本データ群では、オプション選択肢、物性値及びモデルのパラメタ等プログラム制御因子を入力する。このデータの入力形式は NAMELIST形式[※]で、この形式は一般にフリーフォーマットであり、',' を区切り記号として、登録されている変数に数値を直接代入するものである。

入力は次の規則を守らなければならない。

- i) NAMELIST名 ('OPTDAT') を明記する。カードの第2 カラムに'¥' (もしくは '&', '\$') を記入し、続いてNAMELIST名である 'OPTDAT' を記入する。
- ii) データ代入文を書く。各データの後は',' で終了すること。
- iii) データの最後は、カードの第1カラムを除いたいずれかの位置に'¥' (もしくは '&', '\$') とし、続いて 'END' を入力する。

データ代入文の記述方法は、例えばQQF(1,1)に1.0を代入する場合、

QQF(1,1)=1.0,

と記述する。

なお、入力するデータがない場合でも、i) と iii) は必要である。

※ NAMELISTの詳細については、例えば「富士通 FACOM OS IV FORTRAN77 文法書」を参照のこと。

次ページ以降に入力データサンプル (図A-6)、入力データカード別入力説明、NAMELIST変数説明 (表A-1) を示す。

```

-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----
101TITLE  B5101B
102COMMENT
200MESH      10      6      1      2      2      1
250HGHCPRS  141.46  9.000E-01  1.033E+00  0.0          1.000E-05  1.000E-05
300AMOLE     1.000E-00
351RADFC     5.500E+01  1.000E-05  3.251E-01  3.349E-01  3.750E-01
352RADFC     8.646E+01  0.0        0.0        3.349E-01  3.750E-01
401D.G.O.P   0.9081  1.000E+01  1.960E+00  0.190E+00  6.700E-01  1.680E-01
500TIME      0      0      0      0      0.0  12.0  7.0  0.0  10  0
501TIME      0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1.0  0.0  0.0  1  1  0  0  0
601COOL 1.   0.000  0.000E+00  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
701TIMEPO.   1.000E+00  0.0        0.0        0.0        0.0        0.0
751TIMEPO.   1.000E+00  1.000E-01  0.0        0.0        0.0        0.0
801CLAD 1.   370.000  370.000
502TIME      0.0  1.0  0.0  0.0  0.0  0.0  20.0  0.0  0  0  0  0  0
602COOL 2.   0.00  0.000E+00  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
802CLAD 2.   370.00  370.00
503TIME      0.0  6.0  45.0  0.0  0.0  0.1  0.0  0.0  0  0  0  0  0
603COOL 2.   378.77  1.870E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
803CLAD 2.   483.84  541.05
504TIME      0.0  7.0  45.0  0.0  0.0  0.0  0.0  30.0  0  0  0  0  0
604COOL 2.   387.91  1.910E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
804CLAD 2.   486.59  545.18
505TIME      0.0  8.0  53.0  0.0  0.0  0.0  0.0  30.0  0  0  0  0  0
605COOL 2.   600.43  2.960E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
805CLAD 2.   550.47  641.15
506TIME      0.0  9.0  5.0  0.0  0.0  0.0  0.0  30.0  0  0  0  0  0
606COOL 2.   608.96  3.000E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
806CLAD 2.   553.03  645.00
507TIME      0.0  9.0  20.0  0.0  0.0  0.0  5.0  0.0  0  0  0  0  0
607COOL 2.   428.71  2.110E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
807CLAD 2.   498.85  563.60
508TIME      0.0  9.0  38.0  0.0  0.0  0.0  5.0  0.0  0  0  0  0  0
608COOL 2.   387.91  1.910E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
808CLAD 2.   486.59  545.18
509TIME      0.0  10.0  23.0  0.0  0.0  0.0  30.0  0.0  0  0  0  0  0
609COOL 2.   375.12  1.850E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
809CLAD 2.   482.75  539.40
510TIME      0.0  12.0  7.0  0.0  0.0  0.0  3.0  0.0  0  0  0  0  0
610COOL 2.   0.00  0.000E+15  3.700E+02  5.000E+01  1.500E+00
810CLAD 2.   370.00  370.00
&OPTDAT
      QQF(1,1)=1.5,QQF(3,14)=2.56,
&END
-----+-----1-----+-----2-----+-----3-----+-----4-----+-----5-----+-----6-----+-----7-----

```

図A-6 入力データサンプル

入力データカード別入力説明

' 1 0 1 ' カード

10				20				30				40				50				60				70				80																																																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO				NAMC				NAMP				NAMD				CMNT(1)~(12)																																																															
1 3				A 4 . A 3				A 4 . A 2				3 A 2				1 2 A 4																																																															

IDNO : データ種別認識番号 ' 1 0 1 '

NAMC(1)~(2) : コメント

NAMP(1)~(2) : タイトル

NAMD(1)~(3) : タイトル

CMNT(1)~(12) : タイトル

コメント及びタイトルには、データの名称、種類等、任意の英数字及び記号が入力できる。

本カードのタイトル (NAMP,NAMD,CMNT) は、コード内の変数に保存され、計算結果出力時に印字される。

(詳細アウトプットには、NAMPとNAMDが印字され、サマリーアウトプットには、NAMP,NAMD,CMNTが印字される。)

・ 1 0 2 ・ カード

10				20							30						40						50						60						70						80																																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO				NAMC		CMNT 2(1)~(15)																																																																									
				(1) (2)																																																																											
13				A4. A3		15A4																																																																									

IDNO : データ種別認識番号 ' 1 0 2 '

NAMC(1)~(2) : コメント

CMNT 2 (1)~(15) : サブタイトル

コメント及びサブタイトルには、データの名称、種類等、任意の英数字及び記号が入力できる。
 本カードの内容は、コード内の変数に保存され、計算結果出力時にサマリーアウトプットの頁で印字される。

' 1 0 3 ' カード

10			20								30								40								50								60								70								80																												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO			NAMC								JOPT																																																																				
			(1) (2)																																																																												
1 3			A 4 . A 3								1 5																																																																				

IDNO : データ種別認識番号 ' 1 0 3 '

NAMC(1)~(2) : コメント

JOPT : リスタート計算機能セレクト (図 4.1.4 参照)

= 0: 通常の実行でリスタート機能を使用しない。

= 1: 通常の実行に加えリスタートファイルを作成する。

= 2: リスタートファイルを読み込んでリスタート計算を実行する。*

= 3: リスタートファイルを読み込んでリスタート計算を実行し、再度リスタートファイルを作成する。*

リスタート機能を使用しない場合には、このカードは省略できる。(省略したときは、コード内で自動的にJOPT=0とセットされる。)

※ JOPT=2,3を指定した場合には、燃料製造仕様データ (' 2 0 0 ' カードから ' 4 5 j ' カードまで) はリスタートファイルに記録されているため不要である。ただし、ネームリスト入力データは、リスタートファイルに記録されていないのでリスタート計算時の入力データでも必要となる。リスタート計算を行う場合の入力データ例を、図 4.1.5、図 4.1.6 に示す。

' 2 0 0 ' カード

10			20						30						40						50						60						70						80																																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO	NAMC		MRF	MRC	MZF	MZC	IFLAGX	IFLAGP	PFACT						TFACT						FFACT																																																										
	(1) (2)																																																																														
13	A4. A3		15	15	15	15	15	15	F 10.0						F 10.0						F 10.0																																																										

IDNO : データ種別認識番号 ' 2 0 0 '

NAMC(1)~(2) : コメント

MRF : 燃料の半径方向分割数 (最大10分割)

MRC : 被覆管の半径方向分割数 (最大6分割)

MZF : 燃料の軸方向分割数 (最大9分割)

MZC : 被覆管の軸方向分割数 (最大10分割)
(燃料の軸方向分割数 + 1 (上部プレナムノード))

IFLAGX : 被覆管温度入力セクタ
 = -1: 被覆管表面温度を簡易熱流力計算により計算する。
 = 1: 被覆管外表面温度を ' 8 0 i ' カードで入力する。
 = 2: 被覆管肉厚中心温度を ' 8 0 i ' カードで入力する。

IFLAGP : ペレット内径方向の出力分布係数の入力セクタ
 = 1: 入力しない。(ペレット内径方向の出力分布係数は全ノード1.0となる。)
 = 2: 半径方向の分布係数を1組(半径方向分割数)入力する。
 (全軸方向ノードについてその値が適用される。)
 = 3: 全ノード(半径方向分割数 * 軸方向分割数)の分布係数を入力する。
 ペレット内径方向の出力分布係数は ' 4 5 j ' カードで入力する。

' 2 5 0 ' カード

10			20						30						40						50						60						70						80																																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO	NAMC		HGHC0						HGHP0						PRSCG						VLMLPL						PSSA						PSSL																																														
	(1)	(2)																																																																													
1 3	A 4	A 3	F 10.0						F 10.0						F 10.0						F 10.0						F 10.0						F 10.0																																														

IDNO : データ種別認識番号 ' 2 5 0 '

NAMC(1)~(2) : コメント

HGHC0 : 被覆管全長 (cm)

燃料スタック長と上部プレナム部有効長さの和。燃料スタック長は ' 3 5 i ' カード HGIBFZ の MZF 枚の和でなければならない。

プレナム部有効長さは、被覆管内断面積に、この値を乗ずるとガスプレナム体積となる実効的な長さである。(実際のプレナム部長さからプレナムスプリング、プレナムスリーブ等の内容物体積分(プレナム死体積)を差し引いたもの。下記の VLMLPL で入力する下部ガスプレナム体積は本入力値の考慮対象外としている。)

HGHP0 : 燃料ペレット 1 個分の高さ (cm)

PRSCG : 燃料ピン製造時室温封入ガス圧力 [プレナムの内圧] (kg/cm²) 又は 0.0

PRSCG = 封入ガス圧力とした場合 ; プログラム内でこの圧力から封入ガス量 (モル) を計算する。 ' 3 0 0 ' カードの AMOLE は、モル分率で与える。

PRSCG = 0.0 とした場合 ; ' 3 0 0 ' カードで封入ガス量 (AMOLE) をモル数で入力する。

<次ページへ続く>

<前ページからの続き>

- VLMLPL : 下部プレナム体積 (cm³)
 燃料ピン下部にガスプレナムがある場合のガスプレナム体積。 燃料ピン下部にプレナムがない場合 (上部プレナムタイプの場合) は 0.0 を入力する。
- PSSA * : 燃料ピン 1 本当たりの冷却材流路断面積 (cm²)
- PSSL * : 燃料ピン 1 本当たりの冷却材ぬれぶち長さ (cm)

$$PSSL = (\text{ピン円周} + \text{ワイヤ円周}) \quad (\text{バンドル内部ピンの場合})$$

※ PSSA と PSSL は ' 2 0 0 ' カードの IFLAGX が 1 または 2 の場合には、ナトリウム温度の逆算にのみ使用し、燃料ピン挙動解析上は本来不要のデータである。 ナトリウム温度逆算値に興味がない場合には概ね以下の値で問題ない。

$$PSSA = 1.0 \times 10^{-5}$$

$$PSSL = 1.0 \times 10^{-5}$$

' 3 0 0 'カード

10				20							30							40							50							60							70							80																																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO				NAMC							AMOLE(1)~(6)																																																																				
				(1) (2)																																																																											
13				2 A 4 . A J							6 F 10.0																																																																				

IDNO : データ種別認識番号 ' 3 0 0 '

NAMC(1)~(2) : コメント

AMOLE (1)~(6) : 燃料ピン初期封入ガスの成分別モル分率 (' 2 5 0 ' カード、PRSCGに封入ガス圧力を入力する場合)

燃料ピン初期封入ガスの成分別モル数 (' 2 5 0 ' カード、PRSCGに0.0を入力する場合)

AMOLE (1) : He

AMOLE (2) : Ar

AMOLE (3) : Kr

AMOLE (4) : Xe

AMOLE (5) : H₂

AMOLE (6) : N₂

AMOLE (7) : H₂O

・ 3 5 i' カード (i は 1 から MZC まで本カードを入力するごとに 1 ずつ増やす。)

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
DNO										NAMC										HGHBFZ (k)										RADIFZ (k)										RADOFZ (k)										RADCIZ (k)										RADCOZ: (k)																			
										(1)					(2)																																																																
1 3										A 4. A 3										6 F 10.0																																																											

- IDNO : データ種別認識番号 ' 3 5 i'
- NAMC(1)~(2) : コメント
- HGHBFZ : 燃料スタック領域の軸方向 k 番目のノードの長さ (cm) ※
- RADIFZ : 軸方向 k 番目のノードの燃料ペレットの内半径 (cm) ※
- RADOFZ : 軸方向 k 番目のノードの燃料ペレットの外半径 (cm) ※
- RADCIZ : 軸方向 k 番目のノードの被覆管の内半径 (cm)
- RADCOZ : 軸方向 k 番目のノードの被覆管の外半径 (cm)

※ プレナムノードでは入力不要。

このカードは、' 2 0 0 ' カードで入力した被覆管の軸方向分割数 (MZC) 枚入力する。ただし、燃料に関する入力は 1 枚目から MZF 枚目のカードまで入力し、上部プレナムに関する入力は MZC 枚目のカードに入力する (下部プレナムについての入力は不要)。

燃料スタック領域では、炉心上端ノードが 1 番目、下端ノードが MZF 番目のノードとなる。' 2 5 0 ' カード、HGHC0 の値の算出に用いるスタック長は、本カードの HGHBFZ の MFZ 枚の和でなければならない。

'40i'カード (iは1からMZFまで本カードを入力するごとに1ずつ増やす。)

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO										DNSCFZ (k + 1)										GRNSFO (k)										OBYMO (k)										CNPUO (k)										CNPAO (k)										CNUAO (k)																			
NAMC																																																																															
(1) (2)																																																																															
A 4 . A 3										6 F 10 0																																																																					

- IDNO : データ種別認識番号 '40i'
- NAMC(1)~(2) : コメント
- DNSCFZ : 軸方向k番目のノードの燃料ペレットの理論密度比 (fraction of TD)
- GRNSFO : 軸方向k番目のノードの燃料ペレットの初期結晶粒径 (μm)
- OBYMO : 軸方向k番目のノードの燃料ペレットのOM比 (—)
- CNPUO : 軸方向k番目のノードの燃料ペレットのPu富化度 (重量率)
- CNPAO : 軸方向k番目のノードの燃料ペレットの ($^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$) / Pu_{TOTAL} の値 (重量率)
- CNUAO : 軸方向k番目のノードの燃料ペレットの $^{235}\text{U} / \text{U}_{\text{TOTAL}}$ の値 (重量率)

炉心上端ノードが1番目、下端ノードがMZF番目のノードとなる。

このカードは'200'カードで入力した燃料の軸方向分割数 (MZF) 枚必要である。

'45j'カード (jは0からNまで本カードを入力するごとに1ずつ増やす。)

EPWD = 2で $MRF \leq 6$ の時 $N = 1$, $MRF > 6$ の時 $N = 2$

EPWD = 3で $MRF \leq 6$ の時 $N = MZF$, $MRF > 6$ の時 $N = MZF * 2$

10			20						30						40						50						60						70						80																																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO			NAMC						FPWD(1)~(6)																																																																						
			(1)			(2)																																																																									
13			A4, A3						6 F 10.0																																																																						

IDNO : データ種別認識番号 '45j'

NAMC(1)~(2) : コメント

EPWD : ペレット内径方向の出力分布係数

'200'カードのIFLAGPが

= 1の時 ; このカードは不要

= 2の時 ; 半径方向ノード分割数 (MRF) 分のデータを1組入力する。

= 3の時 ; 半径方向ノード分割数 (MRF) 分のデータを軸方向ノード分割数 (MZF) 組入力する。

入力順序は中心のノードから外側のノードの順に入力する。このカード1枚には6個分しか入力できないので、それ以上のデータがあるときは次のカードに入力する。これを燃料の軸方向ノード分割数 (MZF) 分、炉心上端ノードから下端ノードの順に入力する。

このカードは '450' ~ '45N' まで (N+1) 枚の入力を必要とする。

' 500 'カード

10		20				30				40				50				60				70				80																																																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO	NAMC		TMB(1)~(4)								TME(1)~(4)								MTM	MLT																																																											
13	2 A 4 . A 1		4 F 5.0								4 F 5.0								13	13																																																											

IDNO : データ種別認識番号 ' 500 '

NAMC(1)~(2) : コメント

TMB(1)~(4) : 計算開始時刻

TMB (1):日 , TMB (2):時 , TMB (3):分 , TMB (4):秒 (浮動少数点入力なので小数点を用いても良い。)

TME(1)~(4) : 計算打切時刻

TME (1):日 , TME (2):時 , TME (3):分 , TME (4):秒 (浮動少数点入力なので小数点を用いても良い。)

MTM : 照射条件を入力する時刻点総数 (最大49まで入力可能)

計算開始時刻から打切時刻までに入力する ' 50k ' カードの枚数。

・50k'カード (kは1からMTMまで本カードを入力するごとに1ずつ増やす。)

10			20						30						40						50						60						70						80																																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO			NAMC						TMSD (1. k) ~ (4. k)						TMW (1. k) ~ (4. k)						ISWPD		ISWFD		ISWPR		ITRP		ITRAN																																																		
13			A4. A3						4F5.0						4F5.0						13		13		13		13		13																																																		

IDNO : データ種別認識番号 '50k' (k ≥ 10の時、'50k'は「500+k」を意味する。)

NAMC(1)~(2) : コメント

TMSD(1)~(4) : 照射条件入力時刻

TMSD (1):日, TMSD (2):時, TMSD (3):分, TMSD (4):秒 (浮動少数点入力なので小数点を用いても良い。)

TMW(1)~(4) : このカードのTMSDで入力された時刻から、次の'50k'カードのTMSDで入力される時刻までの目標タイムステップ幅*1。

TMW (1):日, TMW (2):時, TMW (3):分, TMW (4):秒 (浮動少数点入力なので小数点を用いても良い。)

ISWPD *2 : 燃料の軸方向ノード線出力分布のデータ入力セクタ

= 0 燃料の軸方向ノード線出力分布を本時刻点で入力しない。

= 1 燃料の軸方向ノード線出力分布を本時刻点で入力する。 ('70i'カードで入力)

ISWFD *2 : 燃料の軸方向ノード中性子束分布のデータ入力セクタ

= 0 燃料の軸方向ノード中性子束分布を本時刻点で入力しない。

= 1 燃料の軸方向ノード中性子束分布を本時刻点で入力する。 ('75i'カードで入力)

<次ページへ続く>

<前ページからの続き>

- ISWPR : このカードのTMSDで入力された時刻での詳細アウトプット出力セレクト
 = 0 詳細アウトプットを本時刻点で出力する。
 ≠ 0 詳細アウトプットを本時刻点で出力しない。
- ITRP : ' 6 0 k'、' 7 0 i'、' 7 5 i'、' 8 0 i' カードの入力省略セレクト
 = 0 ' 6 0 k'、' 7 0 i'、' 7 5 i'、' 8 0 i' カードの入力を省略しない。
 = 1 ' 6 0 k'、' 7 0 i'、' 7 5 i'、' 8 0 i' カードの入力を省略し、前後の時刻点での入力値から内挿する。
 (計算開始時刻点と計算終了時刻点では、' 6 0 k'、' 7 0 i'、' 7 5 i'、' 8 0 i' カードの入力を省略してはならない。)
- ITRAN : 熱計算における定常、非定常計算セレクト
 = 0 次の時刻点まで定常計算を行う。
 = 1 次の時刻点まで非定常計算を行う。

- ※1 タイムステップ幅は、応力歪計算等の収束状況によりコード内で調整される。従って、計算収束が得られない場合には、タイムステップ幅は本入力値より小さい値となる。
- ※2 計算開始時の照射条件入力時刻点 (' 5 0 1' カード入力時刻点) では、燃料軸方向ノード出力分布と中性子束分布の入力が必ず必要である。2回目以降の照射条件入力の場合には ISWPD, ISWFD に 0 を入力すると以前に入力された出力分布、中性子束分布の値が継続して使用される。

5 0 kから 8 0 iまでのカードについてはMTM組の入力を必要とする。(MTM: ' 5 0 0' カードで入力する照射条件入力の時刻点総数)

'60k'カード (kは本カードを入力する時刻点の'50k'カードのkと同じ値にする)

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO	NAMC									PLHGR (k)										PFLUX (k)										TMPT (k)										FLWNH (k)										PRSNH (k)																													
13	A4. A3									F 10.0										F 10.0										F 10.0										F 10.0										F 10.0																													

IDNO : データ種別認識番号 '60k' (k ≥ 10の時、'60k'は「600+k」を意味する。)

NAMC(1)~(2) : コメント

PLHGR : '50k'カードで入力した時刻 (TMSD) での最大線出力密度 (W/cm)

PFLUX : '50k'カードで入力した時刻 (TMSD) での最大高速中性子束 (n/cm²-s)

TMPT : '50k'カードで入力した時刻 (TMSD) での冷却材入口温度^{*1} (°C)

FLWNH^{*2} : '50k'カードで入力した時刻 (TMSD) での燃料ピン1本当たりの冷却材流量 (g/s)

PRSNH^{*2} : '50k'カードで入力した時刻 (TMSD) での冷却材圧力軸方向平均値 (kg/cm²)

※1 下部プレナム計算を行う場合は、下部プレナム温度としても利用される。

※2 FLWNHとPRSNHは'200'カードのIFLAGXが1または2の時には、冷却材温度の逆算にのみ使用し、燃料ピン挙動解析上は本来不要のデータである。この場合、冷却材温度逆算値に興味があれば、概ね以下の値で問題ない。

$$FLWNH = 50.0 \sim 100.0$$

$$PRSNH = 1.5$$

・70i'カード (iは本カードを入力するごとに1ずつ増やす。)

10										20										30										40										50										60										70										80									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO										NAMC										PWRT (k. 1) ~ (k. MZF)																																																											
										(1) (2)																																																																					
13										A4. A3										6 F 10.0																																																											

IDNO : データ種別認識番号 '70i' (i ≥ 10の時、'70i'は「700+i」を意味する。)

NAMC(1)~(2) : コメント

PWRT : 燃料の軸方向ノード線出力密度相対分布
(軸方向の最大のノードを1.0として規格化した値)

このカードは、'50k'カードでISWPD=0とすると省略できる。省略すると以前の時刻点で入力した値がそのまま用いられる。計算開始時刻点では必ずこのカードが必要である。

PWRTは'200'カードで入力した燃料の軸方向ノード分割数(MZF)分だけ入力する。入力順序は燃料の炉心上端ノードから炉心下端ノードの順で入力する。このカード1枚に6個分のデータまでしか入力できないので6個以上入力するときは次のカードに入力する。

'75i'カード (iは本カードを入力するごとに1ずつ増やす。)

10				20								30								40								50								60								70								80																											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO				NAMC								FLXT (k. 1) ~ (k. MZC)																																																																			
				(1) (2)																																																																											
13				A4. A3								6 F 10.0																																																																			

IDNO : データ種別認識番号 '75i' ($i \geq 10$ の時、'75i'は「750+i」を意味する。)

NAMC(1)~(2) : コメント

FXLT : 燃料の軸方向ノード中性子束密度相対分布
(軸方向最大のノードを1.0として規格化した値)

このカードは、'50k'カードでISWFD=0とすると省略できる。省略すると以前の時刻点で入力した値がそのまま用いられる。

計算開始時刻点では必ずこのカードが必要である。

FXLTは'200'カードで入力した被覆管の軸方向ノード分割数(MZC)分だけ入力する。入力順序は燃料の炉心上端ノードから炉心下端ノード、上部プレナムノードの順で入力する。(下部プレナムを考慮している場合でも、下部プレナムノードの中性子束相対分布の値は与える必要はない。) このカード1枚に6個分のデータまでしか入力できないので6個以上入力するときは次のカードに入力する。

'80i'カード (iは本カードを入力するごとに1ずつ増やす。)

10			20						30						40						50						60						70						80																																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
IDNO	NAMC		TMPCLT (k. 1) ~ (k. MZC)																																																																												
	(1)	(2)																																																																													
13	A4	A3	6 F 10.0																																																																												

IDNO : データ種別認識番号 '80i' (i ≥ 10の時、'80i'は「800+i」を意味する。)

NAMC(1)~(2) : コメント

TMPCLT : 被覆管温度* (°C)

このカードは、'200'カードで IFLAGX = -1 とすると入力不要となる。

TMPCLTは'200'カードで入力した被覆管の軸方向ノード分割数(MZC)分だけ入力する。入力順序は燃料の炉心上端ノードから燃料の炉心下端ノード、上部プレナムノードの順で入力する。このカード1枚に6個分のデータまでしか入力できないので6個以上入力する時は、次のカードに入力する。

下部プレナム計算を行う場合、下部プレナムノードの温度は、'60k'カードのTMPTで入力する冷却材入口温度に設定されるので、入力は不要である。

* IFLAGX = 1の時は被覆管の表面温度を、IFLAGX = 2の時は被覆管の中心温度を入力する。

表 A - 1 NAMELIST変数説明

NAMELIST 変数	設定値	内 容
IOPTN(4)	= 1 = 2 = 3 ※	ギャップコンダクタンス一定値 (1000btu/ft ² ・h・F) ギャップコンダクタンス一定値 (1500btu/ft ² ・h・F) Ross&Stoute モデル
IOPTN(19)	= 0 ※ = 1	下部プレナムなし 下部プレナム付き (上部プレナムも付加可能)
QQF(1,1)	1.5 ※	燃料熱伝導度式の密度依存項の係数 (-)
QQF(19,1)	2760.0 ※	燃料融点 (Solidus) (°C)
QQF(20,1)	2760.0 ※	燃料融点 (Liquidus) (°C)
QQF(3,14)	2.56 ※	ポア移動速度係数 (-)
QQG(15,1)	0.124 ※	リロケーション率 (-)
QQG(3,3)	1.0×10 ⁻⁴ ※	燃料の表面粗さ (cm)
QQG(4,3)	1.0×10 ⁻⁴ ※	被覆管の内表面粗さ (cm)

※は、デフォルト値 (入力省略時の自動設定値)

5. 出力

計算結果出力リストは、次の3種に大別できる。以下にその内容について説明する。

(1) 詳細アウトプット

ピン全体の主要な項目に関する各ノードのアウトプットで入力で指定した時刻点毎に出力される。

(2) ショートアウトプット

ピン全体の軸方向共通（または最大）及び、軸方向角ノード毎のアウトプットで、入力データで入力した時刻点間の毎タイムステップに出力される。

(3) サマリーアウトプット

ピン全体の最終的な計算結果の主な項目をピックアップしたもので、入力で指定した時刻までの計算結果が出力された後の一番最後に出力される。

各アウトプットの出力順序は、最初に「ショートアウトプット」が出力され、次に「詳細アウトプット」が出力される。後は入力で指定した計算終了時刻までの各時刻点で「詳細アウトプット」を出力し、時刻点間の各タイムステップごとに「ショートアウトプット」が出力される。入力データで指定した時刻までの計算が終了したら、「サマリーアウトプット」が出力されて終了となる。この他に入力データそのものやそれを編集したものが出力される。

次ページ以降に出力の実例を挙げて、必要な項目についての説明をする。

0B5201 (1)

99-01-28 (2) CP-TIME 2.191(SEC) (3) PAGE 13 (4)

TIME STEP NUMBER 4 (5) IRRADIATION TIME 6.100(HRS) (6) 0. (D) 6. (H) 6. (M) 0.000(S) (7)

** OPERATION CONDITIONS

ROD PEAK POWER (W/CM) 618.07 (8) COOLANT PRESSURE (KG/CM2) 1.50 (9)
 NEUTRON FLUX (N/CM2-S) 3.00E+15 (10) FLOW RATE (GR/S) 50.00 (11)
 INLET TEMP. (DEG C) 370.00 (12)

** ROD INFORMATIONS

CHANGE IN CLAD LENGTH (CM)..... 1.4637 (13) 1.03474 (%) (14) CHANGE IN FUEL STACK HIGHT (CM)..... 1.3585 (15) 2.47008 (%) (16)
 PLENUM VOLUME (CC)..... 31.5093 (17) CENTRAL VOID VOLUME (CC)..... 0.2684 (18)
 PELLET-CLAD GAP VOLUME (CC)..... 0.4545 (19) TOTAL VOLUME (CC)..... 32.2322 (20)

PLENUM PRESSURE (KG/CM2)..... 3.0428 (21)
 FRACTION OF HE/AR/KR/XE/H2/N2/H2O IN GASES 1.0000/ 0.0000/ 0.0000/ 0.0000/ 0.0090/ 0.0000/ 0.0000 (22)
 INITIAL FILL GAS (MOLES).... 1.310E-03 (23) RELEASED HE GAS (MOLES).... 1.511E-07 (24)
 RELEASED FP GAS INCREMENT (MOLES).... 0.000E+00 (25) RELEASED FP GAS TOTAL (MOLES).... 0.000E+00 (26)

OAXIAL NODE NO.	1	2	(27)
SEGMENT POWER (W/CM)	618.07		(28)
BURNUP (MWD/MTM)	2.45E+01		(29)
BURNUP (FISS/CM3)	5.89E+17		(30)
BURNUP (ATOMIC %)	2.61E-03		(31)
FAST FLUX (N/CM2-S)	3.00E+15	3.00E+14	(32)
FAST FLUENCE (N/CM2)	3.06E+19	3.06E+18	(33)
OCLAD OUTER RADIUS (CM)	0.378500	0.379102	(34)
CLAD INNER RADIUS (CM)	0.338228	0.338766	(35)
DENSIFIED OUTER RAD. (CM)	0.000000		(36)
FUEL OUTER RADIUS (CM)	0.334440		(37)
EQUIAX OUTER RAD. (CM)	0.273342		(38)
CULMNR OUTER RAD. (CM)	0.188560		(39)
MELT RADIUS (CM)	0.048917		(40)
FUEL INNER RADIUS (CM)	0.040032		(41)
CLAD DIAM. CHANGE (%)	0.93333	1.09390	(42)
OCORROSION LAYER			
INNER DEPTH (CM)	0.000000	0.000000	(43)
OUTER NA DEPTH (CM)	0.000000	0.000000	(44)
INNER TOTAL THICK. (CM)	0.000000	0.000000	(45)
OCOOOLANT TEMP. (C)	499.451	603.000	(46)
CLAD OUTER TEMP. (C)	499.505	603.000	(47)
CLAD INNER TEMP. (C)	554.453	603.000	(48)
FUEL OUTER TEMP. (C)	796.940		(49)
FUEL CENTER TEMP. (C)	2774.294		(50)
OFILM COEF. (W/CM2-C)	4816.2770	4816.2770	(51)
HEAT FLUX (C-NA) W/CM2	259.8956	0.0000	(52)
OFUEL-CLAD DIA-GAP (CM)	0.0075746		(53)
CONTACT PRES. (KG/CM2)	3.04276		(54)
OGAP COEF. HFC (W/CM2-C)	1.21E+00		(55)
GAP COEF. HR (W/CM2-C)	0.00E+00		(56)
GAP COEF. TOT (W/CM2-C)	1.21E+00		(57)
OFRICTION FORCE (KG)	0.00E+00		(58)
AXIAL FORCE FZ (KG)	1.15E+00		(59)
AXIAL FORCE F(L-1) (KG)	1.15E+00		(60)
RELOCATION POWER (W/CM)	0.0000		(61)
RELOCATION RATE (DR/CO)	0.00E+00		(62)
FPGAS RELEASE (%)	0.00E+00		(63)
FP RELEASE (%) TOTAL	0.00E+00		(64)

出力例 1 詳細アウトプット (1)

出力説明1 詳細アウトプット (1)

番号*	内 容	単 位
1	入力データタイトル (入力データ101カードで入力したタイトルがここに出力される)	
2	計算実行年月日	年月日
3	このページを出力する直前までに使用したCPU時間	秒
4	詳細アウトプット出力ページ数	
5	時刻点番号 (詳細アウトプットを出力するごとに1づつ増える)	
6	照射時間 (入力で指定した時間)	hour
7	照射時間 (入力で指定した時間)	日時分秒
8	ピン軸方向最大線出力 (入力値)	W/cm
9	冷却材圧力	kg/cm ²
10	ピン軸方向最大中性子束 (入力値)	n/cm ² · sec
11	ピン1本当たりの冷却材流量	g/sec
12	冷却材入口温度	℃
13	被覆管全長変化量	cm
14	被覆管全長変化率	%
15	燃料ペレット全長変化量	cm
16	燃料ペレット全長変化率	%
17	プレナム体積	cm ³
18	中心空孔体積	cm ³
19	ギャップ体積	cm ³
20	被覆管内容積から燃料ペレットの体積の合計を差し引いた値	cm ³
21	プレナム内圧	kg/cm ²
22	ピン内各種ガス存在率 (モル分率) He,Ar,Kr,Xe,H ₂ ,N ₂ ,H ₂ O	—
23	製造時封入ガス量	mole
24	Heガス放出量	mole
25	1 タイムステップでのFPガス放出量増分値	mole
26	FPガス放出量	mole
27	軸方向ノード番号	
28	線出力密度 (各軸方向の伸びによって補正された値)	W/cm
29	燃焼度	MWD/MTM
30	燃焼度	fission/cm ³
31	燃焼度	atomic %
32	高速中性子束	n/cm ² · sec
33	積分高速中性子束	n/cm ²
34	被覆管外半径	cm
35	被覆管内半径	cm
36	高密度化領域半径	cm
37	燃料ペレット外半径	cm
38	等軸晶領域半径	cm
39	柱状晶領域半径	cm
40	燃料ペレット熔融半径	cm
41	中心空孔半径	cm
42	被覆管外径変化率	%
43	被覆管FCCI層深さ	cm
44	被覆管ナトリウム腐食層深さ	cm
45	被覆管全面腐食層厚さ	cm
46	冷却材温度	℃
47	被覆管外表面温度	℃
48	被覆管内表面温度	℃
49	燃料ペレット外表面温度	℃
50	燃料ペレット中心温度	℃

※ この番号は、「出力例1 詳細アウトプット (1)」の番号にそれぞれ対応している。

出力説明 1 詳細アウトプット (1)

51	冷却材-被覆管フィルム係数	W/cm ² °C
52	被覆管-冷却材熱流束	W/cm ²
53	燃料-被覆管直径ギャップ幅	cm
54	燃料-被覆管接触圧 (非接触の時は0となる)	kg/cm ²
55	燃料-被覆管ギャップの熱伝達率	W/cm ² °C
56	被覆管腐食層の熱伝達率	W/cm ² °C
57	被覆管腐食層、燃料-被覆管ギャップの熱伝達率の合計	W/cm ² °C
58	燃料と被覆管接触時の摩擦力	kg
59	燃料軸方向力、燃料と被覆管接触時の摩擦力の合計	kg
60	燃料軸方向力	kg
61	リロケーション発生出力	W/cm
62	リロケーション率 (リロケーション量/初期ギャップ幅)	—
63	FPガス放出率	%
64	FPガス放出率合計	%

※ この番号は、「出力例 1 詳細アウトプット (1)」の番号にそれぞれ対応している。

@B5201

99-01-28

CP-TIME 2.193(SEC)

PAGE 14

TIME STEP NUMBER 4

IRRADIATION TIME 6.100(HRS)

0. (D) 6. (H)

6. (M) 0.000(S)

DETAILS OUTPUT FOR AXIAL NODE 1 (1)

MESH NO.	RADIUS (CM)	RADIAL POWER (W/CM)	BURNUP (MWD /MTM)	DENSITY (% TD)	RETAINED FP GAS (MOLES)	GRAIN GROWTH (MICRON)	OXIGEN CONCENT (O/M)	PU CONTENT (PU/M)	NUMBER OF CRACKS R T Z	SWELLING(%) GAS FP	DENSIFI -CATION (%)	HOT PRESS. (%)	
1	0.04003	61.8070	2.45E+01	95.7271	4.36E-07	14.3346	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0172	0.0000
2	0.11297	61.8070	2.45E+01	97.2159	4.28E-07	12.9590	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0172	0.0000
3	0.15369	61.8070	2.45E+01	95.5519	4.35E-07	11.6183	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0176	0.0000
4	0.18596	61.8070	2.45E+01	92.9823	4.47E-07	10.6824	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0193	0.0000
5	0.21386	61.8070	2.45E+01	91.7927	4.52E-07	10.2081	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0200	0.0000
6	0.23861	61.8070	2.45E+01	91.6654	4.53E-07	10.0447	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0200	0.0000
7	0.26089	61.8070	2.45E+01	91.6602	4.53E-07	10.0066	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0200	0.0000
8	0.28126	61.8070	2.45E+01	91.6601	4.53E-07	10.0006	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0200	0.0000
9	0.30014	61.8070	2.45E+01	91.6601	4.53E-07	10.0000	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0200	0.0000
10	0.31779	61.8070	2.45E+01	91.6601	4.53E-07	10.0000	1.9800	0.1950	0 0 0	0.0000	0.0005	-0.0200	0.0000
11	0.33444												

(2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11)(12)(13) (14) (15) (16) (17)

MESH NO.	THERMAL STRAIN (%)	TOTAL SWELLING (%)	CREEP STRAIN (%)			TOTAL STRAIN (%)			STRESS(KG/CM2)		
			<RADIAL>	<HOOP>	<AXIAL>	<RADIAL>	<HOOP>	<AXIAL>	<RADIAL>	<HOOP>	<AXIAL>
1	4.375375	-0.016675	0.000000	0.000000	0.000000	4.752966	3.592202	2.470076	-12674.787	-23445.121	-33856.949
2	4.045815	-0.016675	0.000000	0.000000	0.000000	3.863958	3.966961	2.470076	-15599.592	-14605.757	-29048.546
3	3.643694	-0.017047	0.000000	0.000000	0.000000	3.208314	3.873826	2.470076	-14737.367	-7958.958	-22256.519
4	3.201138	-0.018807	0.000000	0.000000	0.000000	2.510788	3.719380	2.470076	-13208.429	-751.411	-13628.043
5	2.739069	-0.019559	0.000000	0.000000	0.000000	1.851797	3.539998	2.470076	-11360.481	6490.190	-4822.932
6	2.288887	-0.019627	0.000000	0.000000	0.000000	1.244034	3.352063	2.470076	-9346.339	13946.906	4201.150
7	1.873535	-0.019630	0.000000	0.000000	0.000000	0.693450	3.163457	2.470076	-7241.579	21183.865	13204.267
8	1.505621	-0.019630	0.000000	0.000000	0.000000	0.217829	2.978974	2.470076	-5108.794	27771.549	21711.478
9	1.190514	-0.019630	0.000000	0.000000	0.000000	-0.174576	2.802106	2.470076	-3003.066	33441.315	29376.176
10	0.927138	-0.019630	0.000000	0.000000	0.000000	-0.486218	2.635154	2.470076	-967.479	38099.540	36033.435
1	0.978821	0.000000	0.000040	-0.000020	-0.000021	1.019964	0.931849	0.930313	-13.757	-1089.036	-1107.780
2	0.959485	0.000000	0.000020	-0.000009	-0.000011	0.982289	0.933184	0.930313	-30.080	-632.845	-668.077
3	0.940457	0.000000	0.000005	-0.000001	-0.000003	0.946063	0.933769	0.930313	-37.271	-189.047	-231.704
4	0.921726	0.000000	-0.000006	0.000004	0.000002	0.911188	0.933672	0.930313	-36.066	243.085	201.382
5	0.903281	0.000000	-0.000013	0.000007	0.000006	0.877578	0.932956	0.930313	-27.137	664.230	631.240
6	0.885114	0.000000	-0.000017	0.000009	0.000008	0.845153	0.931674	0.930313	-11.093	1074.991	1057.905

(18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29)

出力例 2 詳細アウトプット (2)

出力説明 2 詳細アウトプット (2)

番号*	内 容	単 位
1	軸方向ノード番号	
2	燃料径方向メッシュ番号 (中心が1となる)	
3	燃料径方向メッシュ境界位置半径	cm
4	線出力	W/cm
5	燃焼度	MWD/MTM
6	理論密度	%TD
7	燃料ペレット内FPガス残留量	mole
8	結晶粒径	μ m
9	O/M比	—
10	Pu濃度	—
11	径方向クラック数 (径方向応力によるクラック)	本
12	周方向クラック数 (周方向応力によるクラック)	本
13	軸方向クラック数 (軸方向応力によるクラック)	本
14	結晶粒界上のFPガスによるスエリング歪	%
15	固体FPによるスエリング歪	%
16	デンシフィケーション	%
17	ホットプレス歪	%
18	燃料、被覆管径方向メッシュ番号 (この出力例の場合には上段の1~10が燃料で、下段の1~6が被覆管である)	
19	熱膨張歪	%
20	スエリング歪 (合計)	%
21	径方向クリープ歪	%
22	周方向クリープ歪	%
23	軸方向クリープ歪	%
24	径方向全歪	%
25	周方向全歪	%
26	軸方向全歪	%
27	径方向応力	kg/cm ²
28	周方向応力	kg/cm ²
29	軸方向応力	kg/cm ²

※ この番号は、「出力例 2 詳細アウトプット (2)」の番号にそれぞれ対応している。

0B5201 99-01-28 CP-TIME 2.197(SEC) PAGE 15
 TIME STEP NUMBER 4 IRRADIATION TIME 6.100(HRS) 0.(D) 6.(H) 6.(M) 0.000(S)

DETAILS OUTPUT FOR AXIAL NODE 2

MESH NO.	THERMAL STRAIN (%)	TOTAL SWELLING (%)	CREEP STRAIN (%)			TOTAL STRAIN (%)			STRESS (KG/CM2)		
			<RADIAL>	<HOOP>	<AXIAL>	<RADIAL>	<HOOP>	<AXIAL>	<RADIAL>	<HOOP>	<AXIAL>
1	1.089232	0.000000	-0.000002	0.000002	0.000000	1.088723	1.089998	1.089303	-2.893	12.123	3.935
2	1.089232	0.000000	-0.000002	0.000002	0.000000	1.088747	1.089974	1.089303	-2.607	11.836	3.935
3	1.089232	0.000000	-0.000002	0.000002	0.000000	1.088770	1.089951	1.089303	-2.336	11.565	3.935
4	1.089232	0.000000	-0.000002	0.000002	0.000000	1.088792	1.089929	1.089303	-2.081	11.310	3.935
5	1.089232	0.000000	-0.000002	0.000002	0.000000	1.088813	1.089908	1.089303	-1.839	11.068	3.935
6	1.089232	0.000000	-0.000001	0.000002	0.000000	1.088832	1.089889	1.089303	-1.610	10.839	3.935

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩ ⑪ ⑫

TEMPERATURE DISTRIBUTION (DEG C)

AX/RAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	NA
PLENUM												603	603	603	603	603	603	603	603
AXIAL- 1	2774	2649	2490	2305	2092	1862	1627	1397	1179	978	797	554	545	536	526	517	508	500	499

⑬

MELTING TEMPERATURE (DEG C)

AX/RAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AXIAL- 1	2759	2759	2759	2759	2759	2759	2759	2759	2759	2759	2759

⑭

RADIUS (MM)

AX/RAD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	NA
PLENUM												3.388	3.455	3.522	3.589	3.657	3.724	3.791	
AXIAL- 1	0.400	1.130	1.537	1.860	2.139	2.386	2.609	2.813	3.001	3.178	3.344	3.382	3.449	3.517	3.584	3.651	3.718	3.785	

⑮

出力例 3 詳細アウトプット (3)

出力説明 3 詳細アウトプット (3)

番号*	内 容	単 位
1	被覆管径方向メッシュ番号 (この出力はプレナム部の被覆管に関する項目である)	
2	熱膨張歪	%
3	スエリング歪 (合計)	%
4	径方向クリープ歪	%
5	周方向クリープ歪	%
6	軸方向クリープ歪	%
7	径方向全歪	%
8	周方向全歪	%
9	軸方向全歪	%
10	径方向応力	kg/cm ²
11	周方向応力	kg/cm ²
12	軸方向応力	kg/cm ²
13	燃料、被覆管冷却材メッシュ境界位置温度 (この出力例の場合には一番上段がプレナム部の被覆管メッシュ境界位置の温度、冷却材温度を示し、二段目が燃料ピンスタック領域の分割メッシュ境界位置の温度を左から燃料、被覆管、冷却材の順で出力している)	℃
14	燃料メッシュ境界位置融点	℃
15	燃料、被覆管メッシュ境界半径 (この出力例の場合には一番上段がプレナム部の被覆管の分割メッシュ境界半径を示し、二段目が燃料ピンスタック領域の分割メッシュ境界半径を左から燃料、被覆管の順で出力している)	mm

※ この番号は、「出力例 3 詳細アウトプット (3)」の番号にそれぞれ対応している。

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪							
---	200	9.175000E+00	8.333333E-03	542.87	3.0764E+00	0.0000E+00	2.5329E+00	1.0480E+00	4.0304E+19	3.2315E+01	0.00000						
1	1	2	0000000000	4.431E-03	1.084E+00	0.0	0.00E+00	796.2	2573.2	5.E-02	-2.52E+04	3.66E+04	6.45E-12	2.08E-07	2.53E-02	509.	
⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙

出力例 4 ショートアウトプット

出力説明4 ショートアウトプット

番号*	内 容	単 位
1	タイムステップ番号	
2	照射時間	hour
3	タイムステップ時間幅	hour
4	軸方向最大線出力	W/cm
5	プレナム内圧	kg/cm ²
6	FPガス放出率	%
7	燃料全長変化率	%
8	被覆管全長変化率	%
9	軸方向最大積分中性子束	n/cm ²
10	ピン平均燃焼度	MWD/MTM
11	過渡計算開始時の照射時間	秒
12	軸方向ノード番号	
13	ギャップ状態番号 1 ; オープン (上部ノードオープン) 2 ; オープン (上部ノードスティックコンタクト) 3 ; オープン (上部ノードスリップコンタクト、燃料圧縮) 4 ; オープン (上部ノードスリップコンタクト、燃料引張) 5 ; クローズ (スティック) 6 ; クローズ (スリップ、燃料圧縮) 7 ; クローズ (スリップ、燃料引張)	
14	ギャップ収束計算回数	回
15	応力歪収束計算回数	回
16	各径方向メッシュのクラック数* ¹ (最内周メッシュ~最外周メッシュ)	本
17	半径ギャップ幅	cm
18	ギャップ熱伝達率	W/cm ² ℃
19	燃料-被覆管接触圧 (非接触の時は0となる)	kg/cm ²
20	燃料-被覆管摩擦力	kg
21	燃料表面温度	℃
22	燃料中心温度	℃
23	中心空孔半径	cm
24	燃料最内周メッシュ周方向応力	kg/cm ²
25	燃料最外周メッシュ周方向応力	kg/cm ²
26	被覆管最外周メッシュスエリング歪	—
27	被覆管最外周メッシュ周方向クリープ歪	—
28	燃料最内メッシュ軸方向全歪	—
29	冷却材温度	℃

※ この番号は、「出力例4 ショートアウトプット」の番号にそれぞれ対応している。

※1 クラック数が10本以上の時は*が出力される

SUMMARY OUTPUT

```

TITLE:          0B5201
COMMENT:
RUN DATE:      99-01-28
NUMBER OF TOTAL TIME STEP      165
EFFECTIVE FULL POWER DAYS      0.2708
TOTAL CPU TIME (SECONDS)      2.5650
FP GAS RELEASE (%)      0.0000
TOTAL GAS RELEASED (MOLES)      0.00E+00
MOLE FRACTION (HE/AR/KR/XE/H2/N2/H2O)      1.0000/ 0.0000/ 0.0000/ 0.0000/ 0.0000/ 0.0000/ 0.0000
MAXIMUM PLENUM PRESSURE (KG/CM2)      3.0428
FUEL STACK LENGTH (CM)      55.3532 DL/L (%)      0.6423
CLAD LENGTH (CM)      142.4475 DL/L (%)      0.6981
<OPERATIONAL CONDITION>
      1          2
MAXIMUM POWER      (W/CM)      618.07
FLUENCE      (N/CM2)      3.40E+19      3.40E+18
BURNUP      (MWD/MTM)      27.26
**CLADDING
  OUTER RADIUS      (CM)      0.3776      0.3777
  INNER RADIUS      (CM)      0.3374      0.3375
  DIAMETER CHANGE      (%)      0.6802      0.7107
  CORROSION DEPTH(NA) (MM)      0.00E+00      0.00E+00
  CORROSION DEPTH(FUEL) (MM)      0.00E+00      0.00E+00
  MAX. MIDWALL TEMP. (C)      526.98      603.00
**GAP CONDITION
  RESIDUAL GAP(DIA.) (MIC.)      185.64
  CONTACT HOLD TIME (DAYS)      0.0000
**FUEL
  OUTER RADIUS      (CM)      0.3281
  CENTRAL VOID RADIUS (CM)      0.0466
  MELT RADIUS      (CM)      0.0474
  COLUMNAR RADIUS (CM)      0.1962
  EQUIAXED RADIUS (CM)      0.2669
  EQUIAXED RADIUS NO2 (CM)      0.0000
  DENSIFIED RADIUS (CM)      0.0000
  NODE LENGTH      (CM)      55.3532
  AXIAL STRAIN      (-)      6.42E-03
  MAX. CENTERLINE TEMP.(C)      2774.29
  MAX. OUTER SURF TEMP.(C)      798.58
  NO OF RADIAL CRACKS(I/O)      0/ 0
**CLADDING STRAIN
  SWELLING (AVERAGE)      5.43E-12      9.86E-13
  CREEP (CIRCUM) ID      -2.56E-07      2.55E-08
  CREEP (CIRCUM) OD      1.09E-07      2.17E-08
  MAX. HOOP STRESS
  (MIDWALL)      3.94E+00      7.27E+00
  CDF (MONJU)      2.15E-51      2.14E-51
  
```

出力例 5 サマリーアウトプット

出力説明 5 サマリーアウトプット

番号*	内 容	単 位
1	入力データタイトル (入力データ101カードで入力したタイトルがここに出力される)	
2	入力データサブタイトル (入力データ102カードで入力したサブタイトルがここに出力される)	
3	計算実行年月日	年 月 日
4	計算終了時タイムステップ数	
5	実効照射日数	EFPD
6	CPUタイム (実使用時間)	秒
7	FPガス放出率	%
8	FPガス放出量	mole
9	ピン内各種ガス存在率 (モル分率) He,Ar,Kr,Xe,H ₂ ,N ₂ ,H ₂ O	—
10	最大プレナム圧力	kg/cm ²
11	燃料スタック長	cm
12	燃料スタック長変化率	%
13	被覆管全長	cm
14	被覆管全長変化率	%
15	最大線出力	W/cm
16	積分中性子束	n/cm ²
17	燃焼度	MWD/MTM
18	被覆管外半径	cm
19	被覆管内半径	cm
20	被覆管外径変化率	%
21	被覆管ナトリウム腐食深さ	mm
22	被覆管FCCI深さ	mm
23	被覆管肉厚中心最高温度	℃
24	残留直径ギャップ幅	μm
25	燃料-被覆管接触時間	day
26	燃料外半径	cm
27	中心空孔半径	cm
28	燃料溶融半径	cm
29	柱状晶領域半径	cm
30	等軸晶領域半径	cm
31	等軸晶領域半径(No.2)	cm
32	高密度化領域半径	cm
33	燃料軸方向ノード長さ	cm
34	燃料軸方向歪	—
35	最高燃料中心温度	℃
36	最高燃料外表面温度	℃
37	径方向クラック数 (内側/外側)	本
38	被覆管スエリング歪 (半径方向平均値)	—
39	被覆管周方向クリープ歪 (内側メッシュ)	—
40	被覆管周方向クリープ歪 (外側メッシュ)	—
41	被覆管肉厚中心周方向応力最大値	kg/cm ²
42	CDF (中央メッシュの値)	—

※ この番号は、「出力例 5 サマリーアウトプット」の番号にそれぞれ対応している。

6. 実行

図A-7に実行JCLのサンプルを示す。ダミーファイルが指定されている外部記憶参照番号があるが、削除してしまうと実行時エラーとなってしまいますので注意が必要である。また、表A-2に入出力ファイルの外部記憶参照番号、入出力の種類、ファイルの説明を示す。

```
//POE1H11# JOB ( ),MSGCLASS=X,MSGLEVEL=(1,0),
//          NOTIFY=POE1H11,CLASS=A,TIME=0005
//*-----*//
//CEDAR EXEC PGM=MO1,PARM='FLIB(DYNALLOC=0,ERRCUT=0)'
//STEPLIB DD DSN=POE1H11.FEVERM.LOAD,DISP=SHR
//*-----*//
//FT04F001 DD DSN=POE1H11.FEVERM01.DATA($SEL),DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
//FT05F001 DD DSN=POE1H11.FEVERM01.DATA(B5201),DISP=SHR
//FT06F001 DD SYSOUT=*,DCB=(LRECL=133,BLKSIZE=1330,RECFM=FB)
//FT07F001 DD DUMMY
//FT09F001 DD DUMMY
//FT11F001 DD DUMMY
//FT21F001 DD DUMMY
//FT20F001 DD DUMMY
//FT35F001 DD DUMMY
//FT50F001 DD DUMMY
//
```

図A-7 実行JCLサンプル

表A-2 入出力ファイル対応表

外部記憶参照番号	入出力	入出力ファイルの種類
04	入力	出力コントロールデータファイル
05	入力	入力データファイル
06	出力	計算結果出力ファイル
07	出力	ダミーファイル
09	出力	ダミーファイル
11	出力	ダミーファイル
20	出力	ダミーファイル
21	出力	ダミーファイル
35	出力	ダミーファイル
50	出力	ダミーファイル