

JAERI-M

9 6 3 1

FREG-4：照射履歴に従った燃料ペレット-  
被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム

1981年8月

原山 泰雄・泉 文男・石橋 明弘\*

この報告書は、日本原子力研究所がJAERI-Mレポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

FREG - 4 : 照射履歴に従った燃料ペレット -  
被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム

日本原子力研究所東海研究所安全工学部  
原山泰雄・泉 文男・石橋明弘\*

(1981年7月27日受理)

プログラム FREG シリーズは、燃料棒内の温度分布とそれに基づく蓄積熱量を計算する。温度分布は、燃料棒の照射履歴に従って計算される。燃料棒内の温度は、燃料ペレット表面と被覆管内面との間のギャップ熱伝達係数に強く影響される。したがって、FREG もこの熱伝達係数をいかに求めるかに重点がおかれている。

FREG - 4 は、FREG - 3 の拡張プログラムである。FREG - 3 からの主要な変更点は、ギャップ熱伝達に影響を持つ F.P. ガスの放出率の取扱いである。すなわち、ペレット残留のガスと放出されたガスを区別し、燃料棒全体の圧力が一定になるよう放出されたガスはプレナム部に向かって移動し、そこで中性子吸収や壊変によって変化すると考える。

この報告書は、FREG - 3 から修正されたモデルと使用手引とを記載する。

---

\* センチュリ・リサーチ・センター (株)

JAERI-M 9631

FREG-4: A computer program to predict the fuel-to-cladding heat transfer coefficient in accordance with the fuel-rod irradiation history.

Yasuo HARAYAMA, Fumio IZUMI and Akihiro ISHIBASHI\*

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment, JAERI  
(Received July 27, 1981)

Program FREG series calculate temperature distribution in a fuel rod and the stored energy based on the distribution. The temperature distribution is calculated accordance with the fuel rod irradiation history. The temperature in the fuel rod is severely influenced with gap heat transfer coefficients between fuel pellet surface and cladding inner surface. Emphasis is placed on how to find the gap heat transfer coefficients.

FREG-4 is a version-up program of FREG-3. Major modification from FREG-3 is handlings of fission product gas release, which have influences on the gap heat transfer. FREG-4 distinguishes fission-product isotopes remained in pellets and fission-product gaseous isotopes released from the pellets, and considers that the released isotopes are transported for plenums to balance whole fuel rod internal pressure and transformed into another isotopes due to decay and the neutron absorptions.

The present report describes modified models from FREG-3 and user's manual for FREG-4.

Keywords: FREG-4 Program, Gap Conductance, Fuel Rod,  
Stored-Energy, Temperature Distribution, Irradiation History,  
Fission-Product Gas, Release Rate, Manual

---

\* Century REsearch Center Corporation.

## 目 次

1. プログラム概要 .....	1
1.1 計算目的 .....	1
1.2 計算モデル .....	1
1.2.1 幾何学的モデル .....	1
1.2.2 物理学的モデル .....	1
1.3 解 法 .....	3
1.4 プログラム構成 .....	7
1.5 プログラム沿革 .....	15
2. F. P. ガスに関する取扱い .....	17
2.1 F. P. ガス生成量 .....	17
2.1.1 核分裂性物質の存在量 .....	17
2.1.2 F. P. ガス生成量 .....	20
2.2 F. P. ガス放出率 .....	23
2.2.1 F. P. ガス放出率関係式 .....	23
2.2.2 照射履歴による放出率の修正 .....	24
2.2.3 各アイソトープの放出係数 .....	25
2.3 プレナム等に放出されたF. P. ガス .....	26
3. 修正, 追加されたモデルおよび計算法 .....	29
3.1 燃料ペレットに関するモデル .....	29
3.1.1 燃料ペレットの再組織化モデル .....	29
3.1.2 燃料ペレットの焼きしまりモデル .....	30
3.1.3 再配置 (リロケーション) モデル .....	31
3.2 被覆管クリープ .....	33
3.3 ホットギャップモデル .....	34
3.3.1 ホットギャップの定義 .....	35
3.3.2 ホットギャップモデル .....	35
4. 入・出力について .....	40
4.1 入力について .....	40
4.2 出力について .....	40
謝 辞 .....	41
参考文献 .....	42
Appendix A 核分裂性物質およびF. P. アイソトープの存在量を求める近似式 .....	43
Appendix B 入力手引 .....	51
Appendix C プログラムリスト (マイクロフィシュ) .....	71

## Contents

1. Introduction .....	1
1.1 Objectives of program .....	1
1.2 Calculational models .....	1
1.2.1 Geometrical model .....	1
1.2.2 Physical model .....	1
1.3 Solutions .....	3
1.4 Construction of program .....	7
1.5 History of program .....	15
2. Handlings of fission product gases .....	17
2.1 Production of fission product gases .....	17
2.1.1 Changes of fissile materials .....	17
2.1.2 Production of fission product gases .....	20
2.2 Release rates of fission product gases .....	23
2.2.1 Relationships for release rate .....	23
2.2.2 Modified release rate due to irradiation history .....	24
2.2.3 Release coefficients of isotopes .....	25
2.3 Gas released to plenum .....	26
3. Models modified from FREG-3 .....	29
3.1 Models for fuel pellets .....	29
3.1.1 Restructuring model .....	29
3.1.2 Densification model .....	30
3.1.3 Relocation model .....	31
3.2 Cladding creep .....	33
3.3 Hot gap model .....	34
3.3.1 Definition of hot gap .....	35
3.3.2 Hot gap model .....	35
4. Input and Output .....	40
4.1 Input .....	40
4.2 Output .....	40
Acknowledgments .....	41
References .....	42

Appendix A	Approximation to calculate atom numbers of fissile materials and fission product isotopes .....	43
Appendix B	User's manual .....	51
Appendix C	Listing of programs (Microfiches) .....	71

## 1. プログラム概要

### 1.1 計算目的

プログラムFREG-4は、燃料棒内の温度分布とその温度分布に基く蓄積熱量についての安全性評価計算を目的としている。すなわち、燃料棒の安全性判定上問題となるLOCA直前に燃料棒に蓄えられる熱量を評価することである。特に燃料棒内の温度分布を決定するさい重要なパラメータであるギャップ熱伝達率を計算することに力点がおかれている。

FREG-4の特色の1つは、Kr, Xeとなる核分裂生成物の各アイソトープについて、その核分裂収率、中性子吸収、壊変を考慮して求めることにある。

FREG-3では、計算上、ガスが放出されたとしても、それは元の位置にとどまるとされて計算が行なわれていた。FREG-4は、ペレットに残留するガスと、放出されたガスをそれぞれ別個に独立に取扱う。放出されたガスは燃料棒内空間に再配分され、その移動した位置において中性子吸収や壊変等によって変化するとされる。

このような変更を行った理由は、FREG-3の計算結果が、F.P. ガス放出量を大きく見積っているのではないかと考えられたことその他に、被覆管ジルコニウム合金のSCC破損に影響を与えると考えられる燃料棒内よう素量の推定を行う機能をプログラムに附加することである。

### 1.2 計算モデル

#### 1.2.1 幾何学的モデル

FREG-4が取扱う計算対象は、単一の燃料棒である。幾何学的モデルの概要をFig.1に示す。計算にさいし燃料棒は3つの領域に分割される。すなわち、ペレットスタック部と上、下部のプレナムである。しかし、下部プレナムはなくてもよい。

燃料スタック部は、被覆管を含めて軸方向に等分割した計算領域を設定する。この分割された計算領域をFREG-4ではセグメントと称する。

各セグメントは、半径方向に内側から燃料ペレット、ギャップおよび被覆管領域を考える。燃料ペレット部については半径方向に50等分した計算領域を設定する。ギャップと被覆管はそれぞれ1個の計算領域とする。

なお、FREG-4の取扱う燃料ペレットは、形状に関し2種である。すなわち、中実ペレットと中心孔を有するペレットである。ただし、ペレット外径はペレットスタックを通して同一であるとされる。

#### 1.2.2 物理学的モデル

燃料棒内の内部に関する状態、内圧、ガス組成は、燃料棒内全体にわたって同一であると仮定される。この仮定のもとに、各セグメントに対して軸方向熱流を無視した中心対称の定常熱伝導



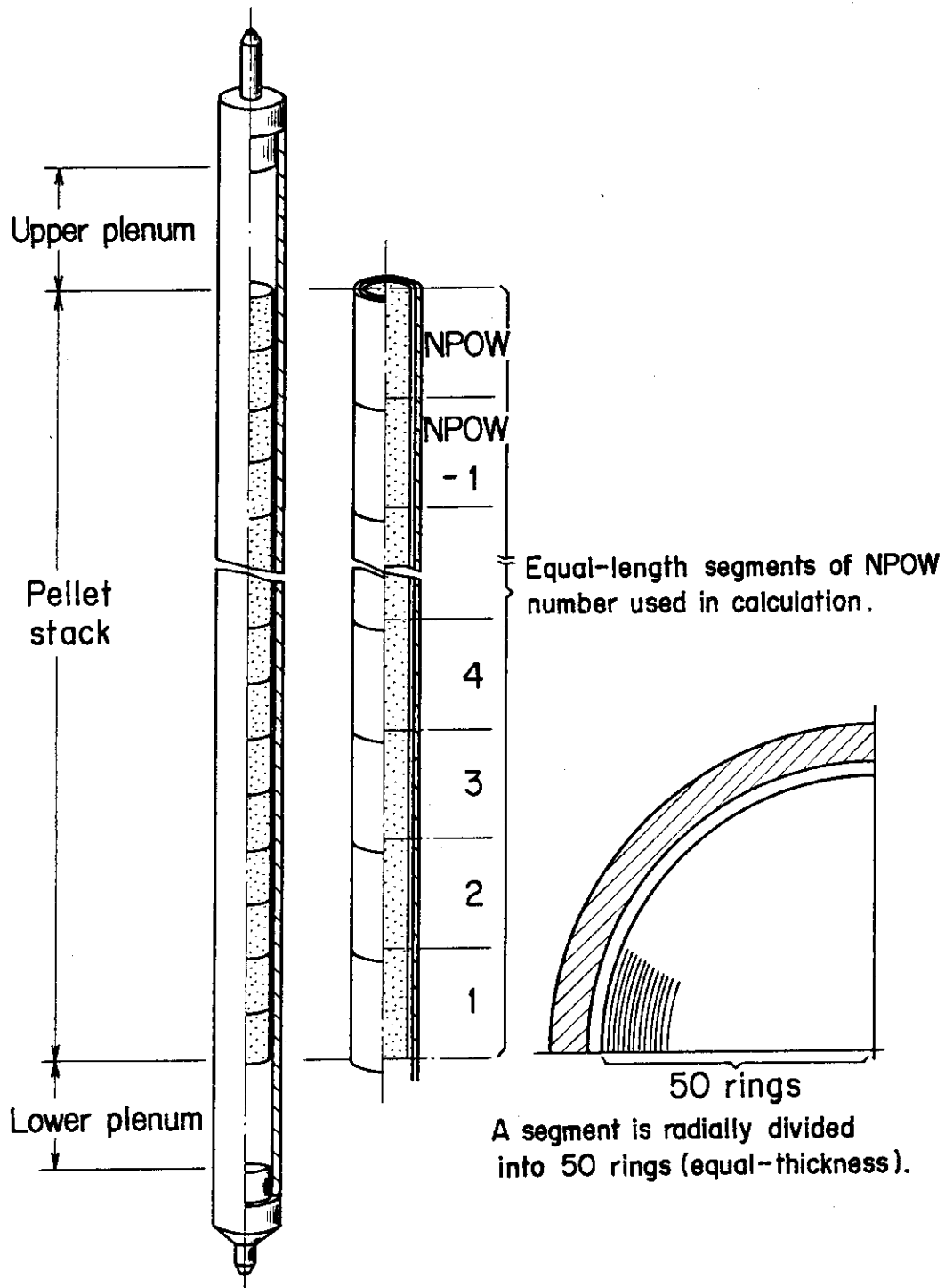


Fig. 1 Schematic diagram of fuel rod used in FREG-4

方程式が適用される。

この方程式を解くためには、境界条件として、被覆管外の冷却水温度、冷却水圧力および燃料棒出力が与えられねばならない。

FREG-4は、これらの境界条件が燃料棒の照射履歴によって変化すると考える。そのため、この境界条件は、燃料棒の照射履歴データとして入力される。

熱伝導方程式を解くにさいし、冷却水と被覆管表面および被覆管内面とペレット表面間には、膜熱伝達係数を適用する。

### 1.3 解 法

FREG-4の流れ図をFig.2に示すが、計算上の主要ループを取出したものをFig.3に示す。解法の主要点に関しFig.3をもとに説明する。

最も内側の第1ループは、燃料棒の照射履歴の指定された時点における指定されたセグメントの温度分布を求めるものである。このセグメントに1.2.2節で説明した軸方向流れを無視した定常熱伝導方程式を適用し、これを差分法によって解き、温度分布を求める。方程式を解くに必要な条件、そのセグメントにおける出力、冷却水温度、圧力等は、このループの外側で与えられるか、このループでただちに与えることができるようになっている。

ペレットの温度分布を確定するには、ペレットの外表面温度がその境界条件として決められねばならない。そこで、計算の最初にあつては、被覆管内面とペレット外面間の膜熱伝達係数（ギャップ熱伝達率）にある仮定値を設け、ペレットの外表面温度の推定を行う。ペレット内の温度分布に基き、ペレットの熱膨脹等を計算する。ペレット外径の変化をもとにギャップ寸法の変化（被覆管内面に接触することもありうる）を考える。ギャップ寸法の変化（温度分布によって変化する）を考慮してギャップ熱伝達率の再評価を行い、仮定値との比較を行う。

上記の手順をプログラムではくりかえし計算で行っている。そのさい、収斂の判定にギャップ熱伝達率を使用している。

Fig.3の第2のループは、計算を行うべきセグメントを指定するループである。

Fig.3の第3のループの目的は、燃料棒内部の状態が全体として収斂状態になるまで計算を続行することである。

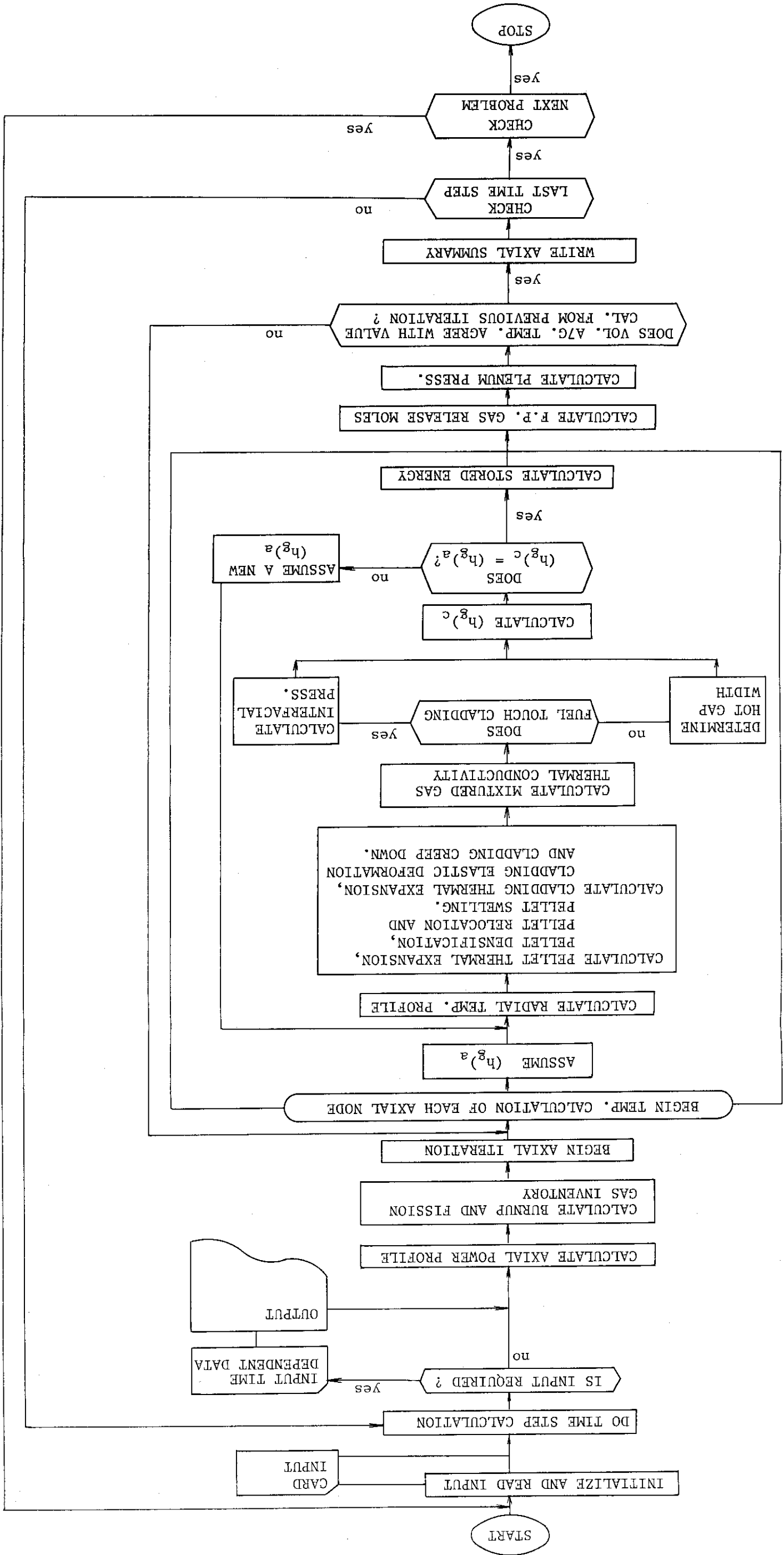
例えば、あるセグメントでF.P.ガスの放出が大きいたした場合、その放出されたガスはそのセグメント内のギャップに停つてはらず、他の部分に移動するであろう。このように各セグメント単独で扱うことができない。このため、この第3のループにおいて、燃料棒内部の状態の全体としての収斂計算が行なわれる。

このループ内で行なわれる計算事項は、燃料棒内圧とそれに関連したガス放出量、プレナム体積の変化、プレナム温度等である。また、このループの各ステップで、ギャップガスの組成、プレナムを含めた各セグメントのギャップ等、各空間への滞留ガスの配分が計算される。

なお、収斂判定のパラメータとして全燃料ペレットの体積平均温度を使用している。

最も外側のループは、燃料棒の照射履歴を制御する。このループで、指定された照射履歴の各時点における燃料棒を分割した各セグメントの出力、冷却水温度、圧力が設定される。これらのパラメータは各セグメントの温度分布を求める場合の境界条件を与えるものである。

Fig. 2 Flow chart of program FRG-4



JAFRI - M 9631

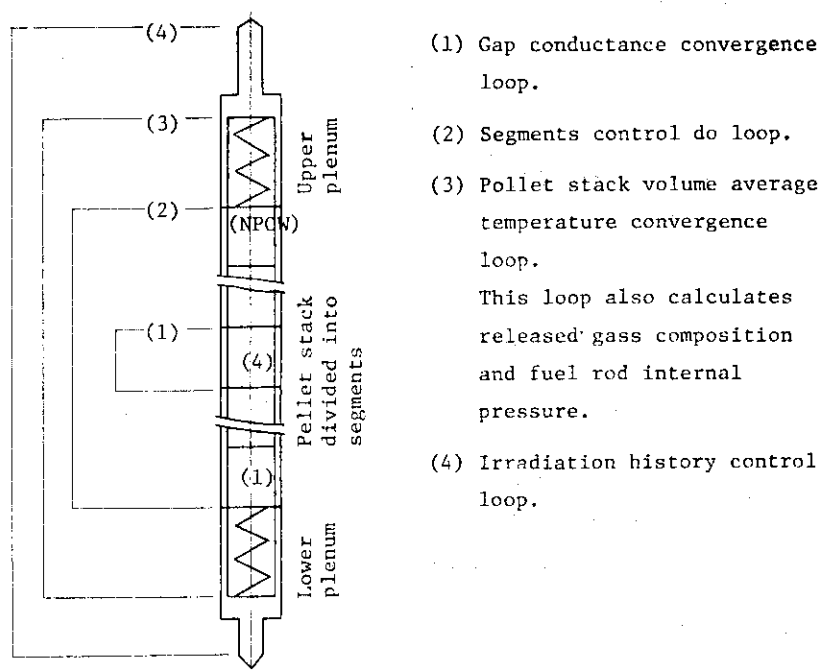


Fig. 3 Main loop of FREG4

#### 1.4 プログラム構成

FREG-4は、主プログラムおよびブロックデータを含めて65個の副プログラムで構成される。主プログラムおよび各副プログラム間の主要な呼び出し関係の構成をFig.4に示す。また、これら各副プログラムの主機能はTable 1にまとめられている。

FREG-4の主プログラムは、プログラム全体の制御を行う外、照射履歴に追従する計算の制御および燃料棒全体の状態のくりかえし計算の収斂制御を行う。このくりかえし計算の収斂判定には、燃料ペレットスタック全体の体積平均温度を使用している。このくりかえし計算は通常3~4回のくりかえしで収斂する。そのため、最大くりかえし数を5に制限してDOループで処理している。

各セグメント内の温度分布の収斂計算の判定には、ギャップ熱伝達率を使用する。この収斂計算の制御は副プログラムST3TO8で行なわれる。ST3TO8は、FREG-4の主要な計算事項を制御しているので主プログラムに準ずるものである。また、燃料棒の内圧に関する事項、F.P.ガスの生成、ペレットからの放出、プレナム体積とその平均温度等は、すべて主プログラムから呼び出される副プログラムMOLMOLで制御される。

各副プログラムで処理する内容と対応させて示した詳細流れ図をFig.5に示す。

計算結果の出力は、通常副プログラムPRINT1とPRINT2とのどちらかによる。必要ならば、これに加えてPRINT3を使用して、全セグメントについてのより詳細な温度分布を出力させることもできる。これら出力のコントロールは第2群入力として与える履歴データに付されたコントローラによる。詳細は、Appendix-Bの入力手引を参照されたい。

なお、FREG-4プログラムリストをAppendix Cにマイクロフィッシュの形で収録している。必要があれば参照されたい。

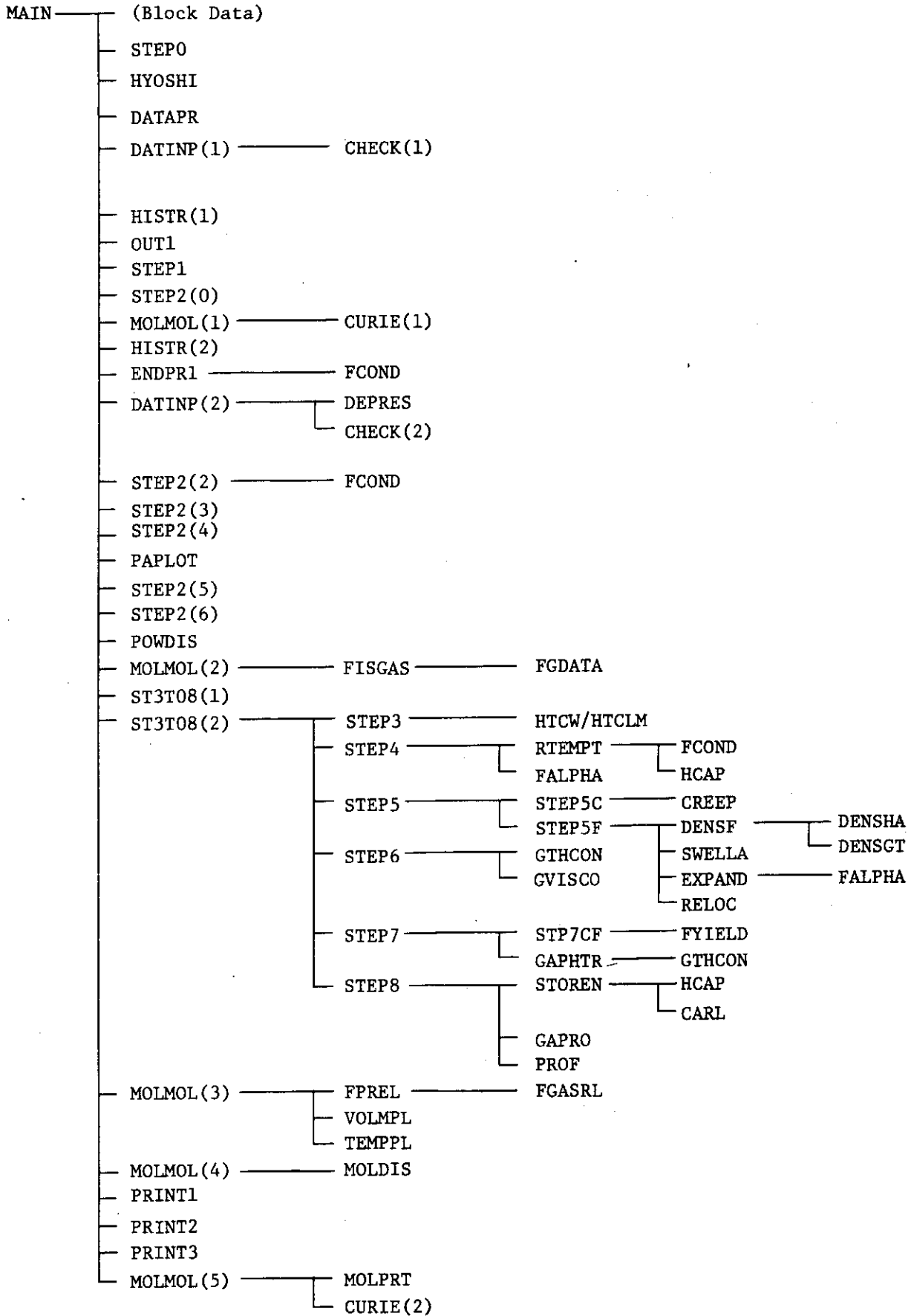


Fig. 4 Structure of FREG4 Sub Program

Table 1 副プログラムの機能

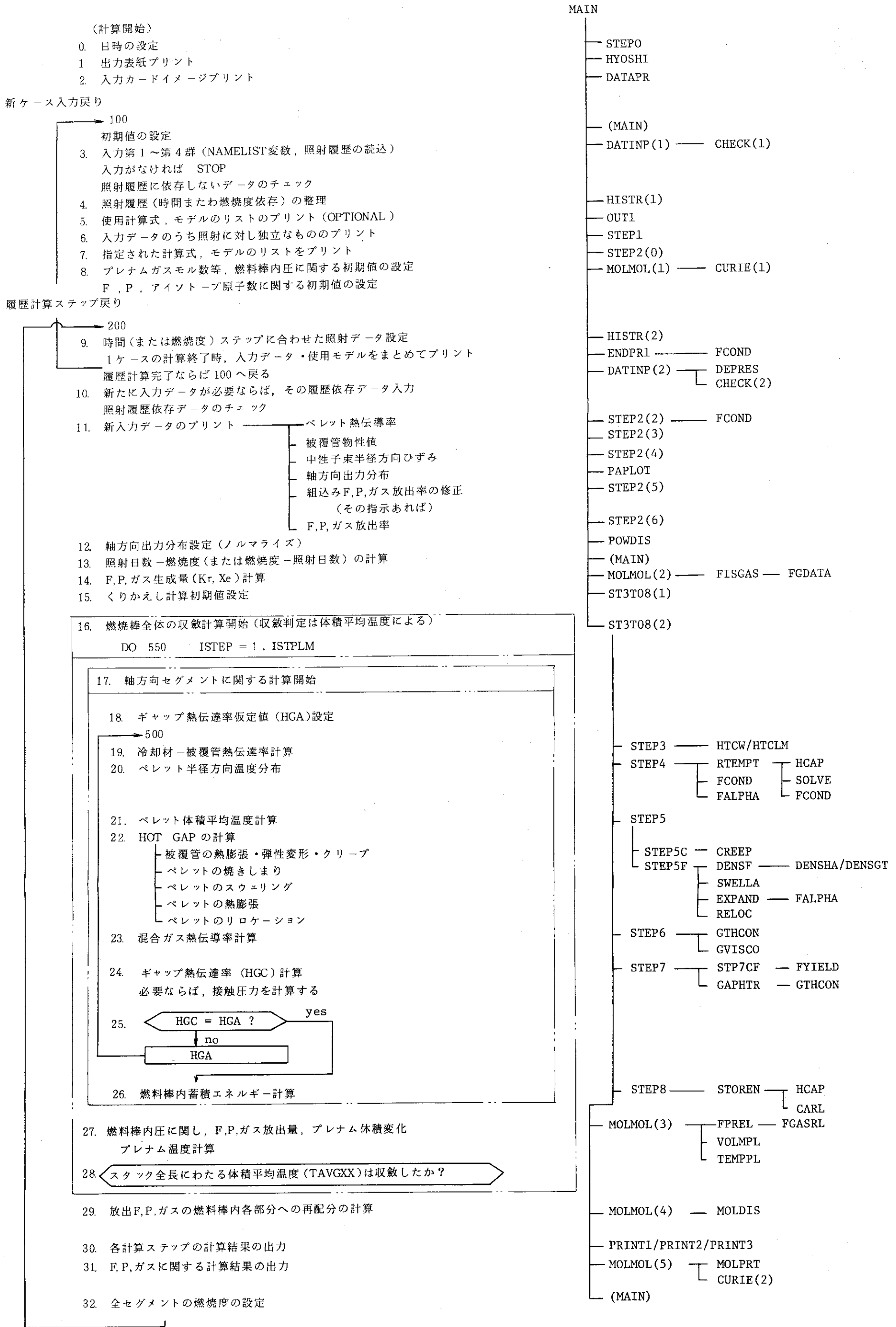
副プログラム名	機 能	FORTRAN STEP
MAIN	プログラム全体の流れを制御する	119
Block DATA	計算に必要な定数及び熱的・機械的物性値を設定する。 また、諸種の初期値の設定	86
CARL	蓄積エネルギー計算	25
CHECK (KS)	KS = 1 : 照射履歴依存しない } 入力データの一貫性を調べる KS = 2 : 照射履歴依存 }	71
CREEP	被覆管クリープ変形量計算	144
CURIE (KS)	KS = 1, FPガスのRadio-Activity を計算するための初期値 の設定 KS = 2, Radio-Activity の計算および出力	188
DATAPR	入力カード80コラムのカードイメージをプリント・アウトする	22
DATINT (KS)	KS = 1, タイトル 等出力履歴に依存しない入力値および出力履歴データの 入力, 必要ならばその単位変更をする。 KS = 2, 燃料棒の出力履歴に依存するデータを必要に応じ入力する	246
DENSF	ペレットのDensification量計算	22
DENSGT	MeyerのDensification modelによる計算	20
DENSHA	RolstadのDensification modelによる計算	28
DEPRES	ペレット内熱中性子束歪を $I_0$ ベッセル函数により近似計算を行う。	20
ENDPRI	入力カードの最後がSTOP (4H)のとき, 計算結果出力後, その 計算の入力データおよび使用計算モデルの一覧表をプリントする。	300
ERROR	物性値等の内挿計算のさい, 表からはずれたパラメータが与えられた ときの警告	26
EXPAND	ペレットの熱膨張モデルにより, ペレットの熱的変位量を計算する	78
EN1	FISGASで使用するFunction	7
EN2	FPガスのchainの計算に使用する。	7
EN3		7
FAC		7
FALPHA	ペレット熱膨張率を計算する	26
FCOND	ペレット熱伝導率計算式が用意されている	6
FGASRL	MATPRO (Trapped gas model) によるガス放出率計算モデル	14
FGDATA	F.P.ガス計算のための核データの設定および核種による放出率の設定	87
FISGAS	燃料棒内のXe, Kr等fission productについて核変換, 崩かい chain計算を行ない必要な核種の原子数を求める。	293
FPREL	ペレットからのF.P.ガスの放出率を計算する	58
FYIELD	被覆管温度依存Yield Stressを関数形で計算する	9
GAPHTR	MATPRO (cracked pellet model) によるギャップ熱伝達率 を計算する。	37

副プログラム名	機 能	FORTRAN STEP
GAPRO	繰返し計算中のGap Conductance が収斂しないとき、その収斂状況をグラフ化して出力する。	67
GTHCON	MATPRO により混合ガスの熱伝導率を計算する (GAPHTR から呼ばれる)	50
HCAP	UO <sub>2</sub> の Heat Capacity 計算 (温度依存)	21
HEAD	出力の各頁の Heading をプリントする。また出力頁の頁カウントをも行う。	49
HISTR (KS)	KS = 1, 入力で与えられた出力履歴データを調べ、妥当な出力変動範囲内で計算が行なえるように、出力履歴の再分割を行う KS = 2, 時間ステップが変る毎に、必要なパラメータを再設定する	230
HTCLM	液体金属 (液体ナトリウム) の場合の冷却材-被覆管間の熱伝達係数計算	11
HTCW	冷却材が水の場合の冷却材-被覆管間の熱伝達係数を Dittus - Boelter の式によって計算する。	60
HYOSHI	計算結果の出力の表紙を作成する。	16
MOLDIS	ペレットから放出された F.P ガスの燃料棒内空間 (ボイド、ギャップ、プレナム) 内の再分布を計算する。	45
MOLMOL (KS)	燃料棒内圧を計算する。内圧に関係する、ガスのモル数、ガス温度等の計算を制御する。 KS = 1, 初期プレナム・ガスのモル数の計算。その他初期値の設定 KS = 2, 軸方向に分割された各セグメント毎の F.P ガス存在量の計算 KS = 3, ペレットからのガス放出量を計算し、燃料棒内の各成分ガスの mole fraction を定める。プレナム体積の変化、プレナム温度を計算し、燃料棒内圧を定める KS = 4, 放出ガス量の集計および燃料棒内空間への再配分 KS = 5, ガス放出量、各核種毎の radio activity の出力。 次の time step への初期値の設定	247
MOLPRT	ペレットからの放出ガス量の出力	104
OUT1	このプログラムに用意されている計算式、モデルの一覧表をプリントする	189
PAPLOT	入力された軸方向出力分布をライン・プリンターによって描く	73
POWDIS	入力された軸方向出力分布を規格化し、平均またはピーク値に合わせる	39
PRINT1	計算結果を出力する	305
PRINT2	計算結果を2頁に要約して出力する。	149
PRINT3	全セグメントについての温度分布をプリントする。このルーチンは独立した副プログラムではなく、PRINT1 に含まれている。	-
PROF	半径方向温度分布をラインプリンターによって図化して出力する。	137

副プログラム名	機 能	FORTRAN STEP
RELOC	ペレットクラックのrelocationを計算する。	33
RTEMPT	各セグメント内のペレットについての半径方向温度分布の計算	138
STEP 0	計算を行った日付, 時刻をシステムより得る	13
STEP 1	計算に必要な初期値の決定。選ばれたオプションに従い入力値をプリントする。	157
STEP 2 (KS)	<p>KS = 0, F.P. ガス量計算に必要な初期値の計算とその設定, およびオプションの入力値のプリント</p> <p>KS = 1, 未使用</p> <p>KS = 2, 計算に使用する燃料ペレットの熱伝導率を変更する指示があった場合, その使用する熱伝導率の表を出力する。</p> <p>KS = 3, 被覆管物性値について, 上記KS = 2と同じ</p> <p>KS = 4, ペレット内中性子束歪について, 上記KS = 2と同じ</p> <p>KS = 5, F.P. ガス放出率に関し組込みデータとなっている Hoffman-Coplin の放出率に, 係数FPDIALを乗じて使用する場合, 温度に対する放出率を出力する</p> <p>KS = 6, F.P. ガス放出に関し, 温度に対する放出率の表を出力する</p>	288
STEP 3	冷却材-被覆管の間の熱伝達係数の計算およびペレット外表面温度の計算	74
STEP 4	ペレット内温度分布, 中心孔径(再組織化)の計算	158
STEP 5	被覆管について弾性変形(内, 外圧による), 熱変形とクリープ変形, ペレットについて熱膨張, スウェリング, relocation と densification を考慮してギャップ巾を計算する。	181
STEP 5C	被覆管の弾性変形, 熱変形とクリープ変形を計算する。	56
STEP 5F	ペレットについて熱膨張, スウェリング, relocation と densification を計算する。	95
STEP 6	ギャップ中のガス熱伝導率を計算する。	65
STEP 7	ギャップ・コンダクタンスの計算, 接触していれば, その接触圧力を計算する。	160
STEP 8	蓄積エネルギーを計算する。	71
STOREN	蓄積エネルギーを計算する。	15
STP 7CF	被覆管のヤング率, ポアソン比, 降伏応力, メイヤー硬度熱伝導率および燃料ペレットの熱伝導率の計算。また, 燃料-被覆管の間の接触圧力を算出する。	39
ST3T08 (KS)	<p>KS = 1, 収斂計算のための初期値の設定</p> <p>KS = 2, 燃料スタックをNPOW個に分割した各セグメントの Gap-Conductance をくり返し法で求め, 半径方向一次元温度分布を求める。</p> <p>また, 燃料棒内全体の平均温度の収斂の最終回においては, 各セグメントに関する諸種のパラメータをstoreする。</p>	309



副プログラム名	機 能	FORTRAN STEP
SWELLA	燃料ペレットのスウェリング量を計算する。	28
TEMPPL	プレナム部の平均温度（内圧計算のための）を算出	124
TEPP TERP	線形内挿を行うための Function である。Table Function で与えられた諸数値の内挿計算を行う。	24 55
VOLMPL	プレナム部の体積変化（ペレットスタックの熱膨張, densification を考慮し）を計算する。	35



JAERI - M 9631

Fig. 5 Detail flow chart of FREG-4

## 1.5 プログラム沿革

FREG-4 は、FREG-3<sup>1),2)</sup>を基礎にして開発したプログラムである。FREG-3とFREG-4の主要な相違は Table 2 に示す通りである。

FREG-3とFREG-4との最大の相違点は、1.1節で述べたように燃料ペレットから放出されたF.P.ガス(主としてKr, Xe)の取扱いにある。すなわち、燃料ペレット内に残留するガスと放出されペレット外に出たガスとをそれぞれ独立に取扱うことである。

FREG-3のF.P.ガス放出の取扱いは、大略次のようになっていた。

- (i) 燃料ペレット内で生成した全ガス量を推定する。
- (ii) ペレット内の温度分布等から放出率を算定する。
- (iii) 先に(i)で求めた全ガス量と放出率から放出ガス量を求める。

生成ガス量の計算にさいし、Kr, Xeに関係するアイソトープの核分裂収率、各アイソトープの中性子吸収、壊変を考える。

この手法における問題点は次のように考えられる。

- (a) 一旦放出されたと考える放出ガス量も次のタイムステップでは、元のセグメントに含まれているとして全ガス量の計算が行なわれる。
- (b) 放出されたガスは元のセグメントにとどまらず、燃料棒内の空間に再分布するであろう。
- (c) 上記(b)の状況を考えるとき、(a)のような取扱方法では、中性子吸収が燃料棒の軸方向位置で異なるので、アイソトープの変化量の計算に現実との相違が生じるであろう。

これらの問題を解決するため、FREG-4はペレットに残留するガスと、放出されたガスをそれぞれ独立に取扱う。放出されたガスは、燃料棒内空間に再配布され、その移動した位置において中性子吸収等の変化を起すとする。詳しくは2章に記述する。

FREG-4開発の当初の予定では、ペレットと被覆管間の接触圧力算出法を改良することにしていた。その検討結果は、JAERI-M8107にまとめられている。その結論として、弾性論を適用した二次元軸対称問題から得られる接触圧力評価式をFREG-4に利用しようとする、ペレットと被覆管の軸方向の伸びの差と、半径方向の干渉量との二つの量が必要であることが分った。

この軸方向伸びを考慮した接触圧力の計算をFREG-4に組込むためには、プログラムの大巾な改造を必要とする。そこで、FREG-4の段階では、この改造を見送ることとし、次の version up の作業にゆずることとした。

しかしながら、接触圧力に密接な関係があるホットギャップを取扱っている部分を整理すると共に、多少の修正を行った。整理された主要なものは、副プログラムSTEP 5とSTEP 7とである。例えば、FREG-3では、被覆管とペレット各々の半径方向変位量計算を行う副プログラムがSTEP 5とSTEP 5Aとして二つ存在していた。そのため、計算が冗長になり、かつ必要以上に複雑となっていた。そこで、FREG-4への version up にさいし、STEP 5として統合、整理を行った。STEP 7, STEP 7Aについても同様に統合、整理を行った。

ただし、ホットギャップの評価法の基本的モデルは、FREG-3に準じている。

Table 2 Comparison FREG-3 with FREG-4

	FREG-3	FREG-4
基礎プログラム	GAPCON-THERMAL-1 組込みのモデルについては GAPCON-THERMAL-2より転用したものあり	FREG-3
主要相違点	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ プレナム圧力評価のためのプレナム平均温度（冷却水温度 + 10°F）</li> <li>◦ F.P. ガス release rate : その照射時点までの最大の release rate をその時点の release rate とする。</li> <li>◦ ベレット中央部では, restructuring と densification によって密度上昇を2重評価</li> <li>◦ F.P. ガス生成量を計算するときの熱中性子束が著しく大きくなる。</li> <li>◦ 接触圧力評価式は平面応力条件の式を使用</li> <li>◦ 被覆管のクリープ量は入力データで与える。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 原研で開発した新しい方法 (JAERI-M 6249) を追加</li> <li>◦ 照射履歴とその時点における release rate を用いて計算によって release rate を決定する方法を追加</li> <li>◦ densification による密度上昇は restructuring の外側のみとした。</li> <li>◦ F.P. ガス生成量の計算方法の修正 (検討結果, JAERI-M 7417)</li> <li>◦ 接触圧力評価式の検討とプログラム組込み (検討結果, JAERI-M 8107)</li> <li>◦ 被覆管クリープによる gap 寸法変化量を計算によって与える。</li> </ul>
報告書	<p>JAERI-M 6742, User's guide JAERI-M 7278, プログラム解説 JAERI-M 6878, IFA-224の解析</p>	<p>JAERI-M9631, プログラム解説と User's guide</p>

## 2. F.P. ガスに関する取扱い

FREG-4 は、燃料棒内の温度分布を計算することが目的である。燃料棒内の温度分布を求めるにさいし、最大の求めるべき課題はギャップ熱伝達である。ギャップ熱伝達は、ギャップ中のガスの熱伝導、ペレットと被覆管が接触すればその接触部の固体同志の熱伝導および放射熱伝達の3つの事項で構成される。

このうち、ガスの熱伝導による項には、当然ながら、ガスの熱伝導率の良、不良が大きな影響を与える。通常、燃料棒内には、製作時 He が封入されている。しかし、燃料棒が照射されると、そのペレット中に希ガス（主として Kr, Xe）が生成され、これがペレットから放出される。したがって、燃料棒の使用状態下では、燃料棒内のガスは初期封入のガスとペレットから放出されたガスの混合ガスとなる。

燃料棒を扱うプログラムにおいて、この放出ガス量を推定しなければならない主な理由は、

- i) 燃料棒内のガス量の増加による内圧の上昇、
- ii) ペレットから放出されるガス Kr, Xe の熱伝導率が He に比較して小さいため、ギャップ熱伝達率の低下を引き起すこと。

のためである。

この章において、FREG-4 のこれら F.P. ガスの取扱いについて記述する。

プログラムで考慮する F.P. ガスに関し取扱うアイソトープは Table 4 に記載される核種である。ただし、各アイソトープの燃料棒内での挙動は、必ずしも明確でないため、とりあえず次のような取扱いを行っている。Iodine はペレットから放出されるが、そのセグメント内に停るとされる。また、 $T_e$  はペレット内に停り、放出されないとされる。

### 2.1 F.P. ガス生成量

#### 2.1.1 核分裂性物質の存在量

FREG-4 は、F.P. ガスの生成計算上、核分裂収率、中性子吸収および壊変を考える。核分裂収率を考えるためには、核分裂性物質の存在量の変化を推定しなければならない。そのため Kr, Xe の生成率の計算に先立ち、燃料ペレット中に存在する核分裂性物質の製作時からの変化が計算される。この計算には、GAPCON-THERMAL-1<sup>3)</sup> のモデルを基本にして、修正を加えて使用している。

燃料ペレットの製作時に使用される核分裂性物質は U-235, U-238, Pu-240, Pu-241 の4核種とする。これら核種の中性子吸収等による変化について、プログラムでは15種の核種を取上げる。これら核種の核種間の関係等を Table 3 に示す。また、使用する核分裂断面積と半減期の値をも記載する。

ペレット内に含まれる核分裂性物質等の各時点における存在量の推定計算法の詳細は Appendix - A に記述される。いま例として、U-238 および U-239 について示す。U-238 および U-239 の存在量 ( $N_1, N_2$ ) に関する微分方程式は、

Table 3 核分裂性物質間の関係とデータ

Identi- fication No. in Program	Scheme of Nuclide	cross section (burns)		half -life
		absorb (fast)	fission (fast)	
1	$^{238}\text{U} \rightarrow \text{absorb. n}$	2.7 (14)	0 (0.1)	
2	$^{238}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow \text{absorb. n} \ \& \ \text{decay}$	36	14	23.5 m
3	$^{239}\text{U} \text{ decay} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow \text{absorb. n} \ \& \ \text{decay}$	60		2.35 d
4	$^{239}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{240}\text{U} \rightarrow \text{decay}$			14.1 hr
5	$^{240}\text{U} \text{ decay} \rightarrow ^{240\text{m}}\text{Np} \rightarrow \text{decay}$ $^{239}\text{Np} + \text{n}(7/12) \uparrow$			7.3 m
6	$^{239}\text{Np} + \text{n}(5/12) \rightarrow ^{240}\text{Np} \rightarrow \text{decay}$			1 hr
10	$^{235}\text{U} \rightarrow \text{absorb. n}$	693.0 (6.6)	553.0 (1.4)	
11	$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{236}\text{U} \rightarrow \text{absorb. n}$	6.0		
12	$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{237}\text{U} \rightarrow \text{decay}$			6.75 d
13	$^{237}\text{U} \text{ decay} \rightarrow ^{237}\text{Np} \rightarrow \text{absorb. n}$	170 (13)	(1.5)	
14	$^{237}\text{Np} + \text{n} \rightarrow ^{238}\text{Np} \rightarrow \text{absorb. n} \ \& \ \text{decay}$	1600		2.1 d
15	$^{238}\text{Np} \text{ decay} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow \text{absorb. n} \ \& \ \text{decay}$	597 (2.6)	17 (2.6)	
7	$^{238}\text{Pu} + \text{n} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \text{absorb. n}$ $^{239}\text{Np} \text{ decay} \rightarrow \uparrow$	1110.0 (1.6)	740.0 (1.6)	
8	$^{239}\text{Pu} + \text{n} \rightarrow ^{240}\text{Pu} \rightarrow \text{absorb. n}$ $^{240}\text{Np} \text{ decay} \rightarrow \uparrow$ $^{240\text{m}}\text{Np} \text{ decay} \rightarrow \uparrow$	290 (1.6)	(1.6)	
9	$^{240}\text{Pu} + \text{n} \rightarrow ^{241}\text{Pu} \rightarrow \text{absorb. n}$	1350 (1.6)	950 (1.6)	

$$\frac{dN_1}{dt} = -\sigma_1 \phi N_1 \quad (\text{U-238})$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\sigma_{1,c} \phi N_1 - (\sigma_2 \phi + \lambda_2) N_2 \quad (\text{U-239})$$

と表わされる。0 から t 時間経過後の存在量 ( $N_{1,t}$ ,  $N_{2,t}$ ) を, その時間の間, 中性子束は一定であるとして, プログラムは

$$N_{1,t} = N_{1,0} \exp(-\sigma_1 \phi t) \quad (\text{U-238})$$

$$N_{2,t} = N_{2,0} \exp\{-(\sigma_2 \phi + \lambda_2) t\} + \frac{\sigma_{1,c} \phi}{\sigma_2 \phi + \lambda_2} N_{1,t} \{1 - \exp\{-(\sigma_2 \phi + \lambda_2) t\}\} \quad (\text{U-239})$$

と与える。ここで,

- $\phi$  = 中性子束
- $\sigma_i$  = 吸収断面積
- $\sigma_{i,c}$  = capture cross section
- $\lambda$  = ほうかい定数

である。

計算に必要とされる中性子束は, 入力で与えられる燃料棒出力に比例していると仮定して求める。中性子束は

$$P = 3.2 \times 10^{-11} \cdot \phi \cdot V \cdot (A_{\text{U-235}} \sigma_{f,\text{U-235}} + A_{\text{U-238}} \sigma_{f,\text{U-238}} + A_{\text{Pu-239}} \sigma_{f,\text{Pu-239}} + A_{\text{Pu-241}} \sigma_{f,\text{Pu-241}}) \quad (2.1)$$

から,

$$\phi = P / \{ 3.2 \times 10^{-11} \cdot V (A_{\text{U-235}} \sigma_{f,\text{U-235}} + A_{\text{U-238}} \sigma_{f,\text{U-238}} + A_{\text{Pu-239}} \sigma_{f,\text{Pu-239}} + A_{\text{Pu-241}} \sigma_{f,\text{Pu-241}}) \} \quad (2.2)$$

として求める。ここで

- P : 燃料棒の線出力密度 (W/cm),
- $\phi$  : 中性子束 ( $\text{n/cm}^2/\text{sec}$ ),
- V : 燃料棒ペレットの単位長さ当りの体積 ( $\text{cm}^3/\text{cm}$ ),
- A : 原子数密度 ( $\text{n/cm}^3$ ),
- $\sigma_f$  : 核分裂断面積 ( $\text{cm}^2$ )

である。なお, 定数  $3.2 \times 10^{-11}$  は核分裂数の出力への変換定数で単位は W-sec/fission である。

先の存在量推定に使用する近似式は時間 t がかなり小さくなければならない。一方, 燃料棒の照射履歴に追従して計算を進める照射履歴ループの時間ステップは, かなり大きく取られる。このため, FREG-4 は, 燃料物質および後述の核分裂生成物の存在量を求めるとき, 照射履歴ループから与えられた時間ステップをさらに細分化して計算が行なわれる。また, 中性子束の計算に使用される燃料棒出力は, 細分化された時間ステップの中央値を使用する。

細分化時間ステップは照射履歴ループの時間ステップを  $1/2, 1/4, 1/8, 1/16 \dots$  と切つてゆく。計算の収斂判定として、後述の Xe の総存在量を使用している。

### 2.1.2 F.P. ガス生成量

FREG-4 は、核分裂生成物に関する核種として19種を考える。これら核種について核分裂収率、中性子吸収、壊変を考慮して存在量を求める。

壊変等の関係、使用するほうかい定数および断面積の値を Table 4 に示す。また、計算に使用する核分裂収率等を Table 5 に示す。

各核種の存在量を推定する計算法は、先に 2.1.1 で述べた核燃料物質の方法と基本的に同じである。その詳細は Appendix-A に記述する。

いま例として Kr-83 および Kr-84 について示す。それぞれの存在量 ( $N_{101}, N_{102}$ ) の微分方程式は

$$\frac{dN_{101}}{dt} = \gamma_{Kr-83} \Sigma'_f \phi - \sigma_{101} \phi N_{101} \quad (Kr-83)$$

$$\frac{dN_{102}}{dt} = \gamma_{Kr-84} \Sigma'_f \phi + \sigma_{101} \phi N_{101} \quad (Kr-84)$$

と表わされる。ここで、

$\gamma$  = 核分裂収率

$\sigma$  = 中性子断面積

$\phi$  = 中性子束

$$\Sigma'_f = V \cdot A \cdot \sigma_f$$

$V$  = 燃料ペレット長 1 cm 当りの体積 ( $\text{cm}^3/\text{cm}$ )

$A$  = 単位体積当りの原子数 ( $\text{n}/\text{cm}^3$ )

$\sigma_f$  = 核分裂断面積 ( $\text{cm}^2$ )

である。この方程式の解の近似法は 2.1.1 と全く同じで次のように与えられるとする。

$$N_{101,t} = N_{101,0} \exp(-\sigma_{101} \phi t) + \frac{\gamma_{Kr-83} \Sigma'_f \phi}{\sigma_{101} \phi} \{ 1 - \exp(-\sigma_{101} \phi t) \} \quad (Kr-83)$$

$$N_{102,t} = N_{102,0} + (\gamma_{Kr-84} \Sigma'_f \phi + \sigma_{101} \phi N_{101,t}) t \quad (Kr-84)$$

これらの近似法による計算結果は、ORNL-2127 に記載の原子数変化と非常に良い一致を示す。<sup>12)</sup>



Table 4 核分裂生成ガスの生成と壊変

Ident No.	Scheme of Nuclide	Decay Constant (1/sec)	Cross Section (burns)
101	yield $\rightarrow$ $^{83}\text{Kr} \rightarrow$ absorb n		180
102	$^{83}\text{Kr} + \text{n}$ yield $\rightarrow$ $^{84}\text{Kr}$		
103	yield $\rightarrow$ $^{85\text{m}}\text{Kr} \rightarrow$ decay	$4.375 \times 10^{-5}$	
104	$^{85\text{m}}\text{Kr} (0.21)$ yield $\rightarrow$ $^{85}\text{Kr} \rightarrow$ absorb n & decay	$2.042 \times 10^{-9}$	15
105	$^{85}\text{Kr} + \text{n}$ yield $\rightarrow$ $^{86}\text{Kr}$		
106	yield $\rightarrow$ $^{131\text{m}}\text{Te} \rightarrow$ decay	$6.684 \times 10^{-6}$	
107	$^{131\text{m}}\text{Te} (0.18)$ yield $\rightarrow$ $^{131}\text{Te} \rightarrow$ decay	$4.62 \times 10^{-4}$	
108	$^{131\text{m}}\text{Te} (0.82)$ $^{131}\text{Te} (1.0) \rightarrow$ $^{131}\text{I} \rightarrow$ decay	$9.964 \times 10^{-7}$	
109	$^{131}\text{I} \rightarrow$ $^{131}\text{Xe} \rightarrow$ absorb n		85
110	yield $\rightarrow$ $^{132}\text{Te} \rightarrow$ decay	$2.468 \times 10^{-6}$	
111	$^{132}\text{Te} \rightarrow$ $^{132}\text{I} \rightarrow$ decay	$8.37 \times 10^{-5}$	
112	$^{131}\text{Xe} + \text{n}$ $^{132}\text{I} \rightarrow$ $^{132}\text{Xe} \rightarrow$ absorb n		5
113	yield $\rightarrow$ $^{133}\text{I} \rightarrow$ decay	$9.167 \times 10^{-6}$	
114	$^{133}\text{I} \rightarrow$ $^{133}\text{Xe} \rightarrow$ decay & absorb n	$1.522 \times 10^{-6}$	190
115	$^{134}\text{Xe} + \text{n}$ yield $\rightarrow$ $^{134}\text{Xe}$		
116	yield $\rightarrow$ $^{135}\text{I} \rightarrow$ decay	$2.873 \times 10^{-5}$	
117	$^{135}\text{I} (0.3) \rightarrow$ $^{135\text{m}}\text{Xe} \rightarrow$ decay	$7.219 \times 10^{-4}$	
118	$^{135}\text{I} (0.7)$ yield $\rightarrow$ $^{135}\text{Xe} \rightarrow$ decay & absorb n $^{135\text{m}}\text{Xe}$	$2.092 \times 10^{-5}$	$2.7 \times 10^6$
119	$^{135}\text{Xe} + \text{n}$ yield $\rightarrow$ $^{136}\text{Xe}$		

Table 5 核分裂断面積および核分裂収率

	Fast neutron				Thermal neutron			
	Cross section (barns)							
$^{235}\text{U}$	1.4				553.			
$^{238}\text{U}$	0.1				0.			
$^{239}\text{Pu}$	1.6				740.			
$^{240}\text{Pu}$	---				0.			
$^{241}\text{Pu}$	1.6				950.			
Yields (%) from Fission of :								
	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$
$^{83}\text{Kr}$	0.77	0.40	0.38	--	0.52	--	0.29	0.208
$^{84}\text{Kr}$	0.92	0.85	0.52	--	0.97	--	0.47	0.341
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	1.22	0.73	0.69	--	1.30	--	0.535	0.30
$^{85}\text{Kr}$	0.0	0.0	0.0	--	0.0	--	0.0	0.0
$^{86}\text{Kr}$	1.70	1.38	0.90	--	1.93	--	0.75	0.40
$^{131\text{m}}\text{Te}$	0.52	0.0	0.0	--	0.44	--	0.0	0.0
$^{131}\text{Te}$	3.11	3.2	3.3	--	2.52	--	3.7	3.01
$^{131}\text{I}$	0.0	0.0	0.10	--	0.0	--	0.09	0.0
$^{131}\text{Xe}$	0.0	0.0	0.0	--	0.0	--	0.0	0.0
$^{132}\text{Te}$	5.5	4.4	3.5	--	4.33	--	5.2	4.44
$^{132}\text{I}$	0.2	0.3	0.26	--	0.0	--	0.15	0.03
$^{132}\text{Xe}$	0.0	0.0	0.0	--	0.0	--	0.0	0.0
$^{133}\text{I}$	5.50	5.5	5.7	--	6.69	--	5.3	6.54
$^{133}\text{Xe}$	0.0	0.0	0.0	--	0.0	--	1.2	0.0
$^{134}\text{Xe}$	5.9	6.6	6.4	--	7.92	--	7.47	7.81
$^{135}\text{I}$	5.6	5.9	6.3	--	6.17	--	5.7	7.23
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	0.0	0.0	0.0	--	0.0	--	0.0	0.0
$^{135}\text{Xe}$	0.5	0.1	0.5	--	0.13	--	1.51	0.07
$^{136}\text{Xe}$	6.0	5.9	6.9	--	6.46	--	6.66	7.04

## 2.2 F.Pガス放出率

FREG-4のF.P.ガス放出率モデルは次のようになっている。まず、ある照射時間 $t$ においてそのときの燃料棒の状態から放出率関係式を使用して放出率が計算される。次に、照射履歴にもとづく出力の変動や温度の増減を考慮して、先の放出率の修正を行う。

なお、各アイソトープの燃料ペレットからの放出に関しては、各アイソトープ毎の放出係数を考える。

### 2.2.1 F.P.ガス放出率関係式

FREG-4は、F.P.ガス放出率を計算するための基本モデルとして5種のオプションを持っている。このモデルはkey word MGRELによって選択される。入力によって特に指定がなければHoffman Coplinモデルが選ばれる。

#### (1) Hoffman Coplinの関係式 (MGREL=0)

Hoffman Coplinの関係式<sup>5)</sup>は、燃料ペレットの体積平均温度に対して放出率を決定するものである。それらの値はTable 6に示す通りである。この関係式は、GAPCON-THERMAL-1に使用されていたものであり、FREG-4は値そのものについて特に修正せず流用している。ただし、GAPCON-THERMAL-1の本来の使用法は、燃料ペレットスタック全長に対する体積平均温度に対し放出率を定めるものである。

FREG-4では、各セグメントの体積平均温度に対し放出率を定めるものとして使用している。

Table 6 Hoffman Coplin関係式の体積平均温度に対するF.Pガス放出率

温度(°C)	放出率	温度(°C)	放出率	温度(°C)	放出率
0	0.0	840	0.008	1015	0.09
745	0.0006	850	0.009	1030	0.1
755	0.0008	855	0.01	1100	0.16
760	0.001	890	0.02	1160	0.2
785	0.002	920	0.03	1300	0.3
800	0.003	940	0.04	1470	0.4
810	0.004	955	0.05	1690	0.5
820	0.005	975	0.06	2000	0.52
825	0.006	985	0.07	10000	1.0
830	0.007	1000	0.08		

#### (2) 入力値による指定 (MGREL=1)

F.P.ガスの放出率を入力値によって指定することができる。放出率は、軸方向に分布するものとして、5個までの値を与えることができる。従って、このオプションを指定する場合は、分割セグメントの総数を5個以内または5の倍数とすることが望ましい。5の倍数でないセグメント

数が与えられたときには、放出率の軸方向分布にひずみが生じる。

(3) 二領域関係式 (MGREL = -1)

F.P.ガスの放出率は燃料ペレットの半径方向温度分布に基づき、次のような二領域を設定して求められる。

温度 1650°C以下の領域： 4%放出

温度 1650°C以上の領域： 100%放出

とするものである。

(4) 四領域関係式 (MGREL = -2)

先の(3)と同じであるが、領域を四つに分割するものである。すなわち、

温度 1000°C以下の領域： 0.5%放出

温度範囲 1000°C ~ 1300°Cの領域： 10%放出

温度範囲 1300°C ~ 1600°Cの領域： 60%放出

温度 1600°C以上の領域： 100%放出

とするものである。

(5) MATPRO version 9関係式 (MGREL = -3)

MATPRO version 9のF.P.ガス放出率計算モデル<sup>6)</sup>は、次のように表わされる。

$$F = 1 - (1 - k') \frac{1 - e^{-kt}}{kt}$$

$$k = 0.25 \exp(-14.800/T)$$

$$k' = \exp(-6.920/T + 33.95 - 0.338 \text{ DEN})$$

ここに、F = ガス放出率 (fractional)

k' = トラップされずに放出される F.P. ガス率 (fractional)

k = k' の増加される単位時間当りの放出されるトラップガスの確率

T = 温度 (°K)

t = 照射開始からの時間 (hr)

DEN = 燃料の密度 (% T.D)

である。ただし、 $T < 935^\circ\text{K}$  のときは  $T = 935^\circ\text{K}$  に設定する。

## 2.2.2 照射履歴による放出率の修正

F.P.ガス放出率関係式によって得られた放出率は、照射履歴を考慮して修正される。通常、放出率は生成される全F.P.ガス量に対して定められている。この定義が満足されるように修正を行う。

修正に使用する基本関係式は

$$B(t + \Delta t) = \{ A(t + \Delta t) - A(t) \} R_{inst}(t + \Delta t) + A(t) R(t) \quad (2.3)$$

である。ここで、

A : 各時点 (t or t + Δt) における全F.P.ガス量 (燃料ペレット内の残留および放出されたガスの総和)

- B : 各時点においてペレットから放出されたF.P.ガス量,  
 $R_{inst}$  : 各時点におけるF.P.ガス放出率(先の2.2.1の関係式から計算された値),  
 R : ある時間までにペレット放出されたF.P.ガス量の全F.P.ガス量に対する割合(比)  
 t : 時間  
 $\Delta t$  : タイムステップ

とする。

この関係式は次のような考えに基づく。

- (i) タイムステップ  $\Delta t$  の間に生成したF.P.ガス  $\{ A(t + \Delta t) - A(t) \}$  は  $t + \Delta t$  時間後の放出率,  $R_{inst}(t + \Delta t)$  で放出される。  
 (ii) 時間  $t$  までに放出しているF.P.ガス量は,  $t + \Delta t$  時間になってもそのまま放出された状態とする。

時間  $t + \Delta t$  における放出率,  $R(t + \Delta t)$  は  $B(t + \Delta t) / A(t + \Delta t)$  なので, (2.3)式から

$$R(t + \Delta t) = \left\{ 1 - \frac{A(t)}{A(t + \Delta t)} \right\} R_{inst}(t + \Delta t) + \frac{A(t)}{A(t + \Delta t)} R(t) \quad (2.4)$$

である。ただし,  $R_{inst}(t + \Delta t) > R(t)$  の場合には,  $R(t) = R_{inst}(t + \Delta t)$  とし,  $R(t)$  を  $R_{inst}(t + \Delta t)$  で置きかえる。この置き直しは, 出力ないし温度が上昇しつつある状態に対応する。そのような場合, 燃料ペレット内に残留していたガスがさらに放出されることを考慮したものである。

なお, (2.4)式のプロプログラム内の使用にさいして,  $A(t) / A(t + \Delta t)$  の比は, 各アイソトープを通じて, Xe-134の比を使用している。

### 2.2.3 各アイソトープの放出係数

燃料ペレットから燃料棒内空間へのF.P.ガスの放出はF.P.のアイソトープによって異なる。FREG-4はこの効果を取入れた。ただし, この測定値は, Fig. 6に示すように崩壊定数に対して得られている。

FREG-4の各アイソトープの放出係数は, Fig. 6中のXe-133の放出係数を1として, 他のアイソトープはXe-133の放出率に対する比とした。すなわち, Fig. 6から放出率に関する勾配  $k$

$$k = \frac{\log \{ (\text{Xe-135 mの放出率}) / (\text{Xe-133の放出率}) \}}{\log \{ (\text{Xe-135 mの崩壊定数}) / (\text{Xe-133の崩壊定数}) \}} \quad (2.5)$$

を定める。次に, 崩壊定数  $\lambda_i$  のアイソトープの放出係数  $R_{f,i}$  は

$$\log R_{f,i} - \log 1 = k \{ \log \lambda_i - \log (\text{Xe-133の崩壊定数}) \} \quad (2.6)$$

より定められる。

ただし, プログラムでは, 崩壊定数がXe-133のそれより小さなものと安定核種についての放出係数は1に設定している。

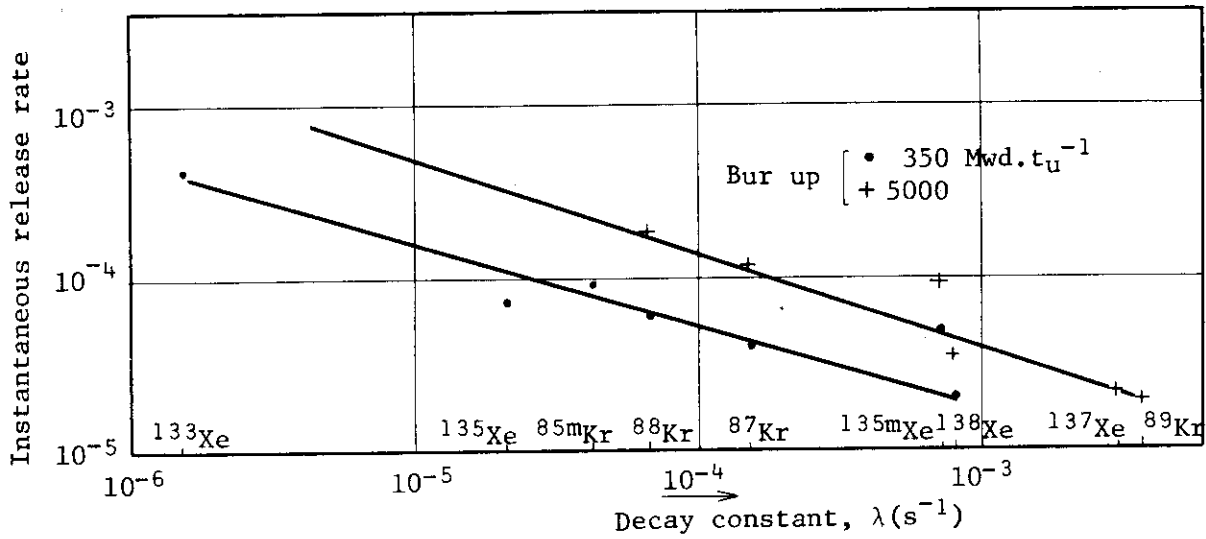


Fig. 6 Radioactive fission gas release (7)

### 2.3 プレナム等に放出されたF.P.ガス

#### (1) 燃料棒内圧

燃料ペレットからプレナム、ギャップ等にF.P.ガスが放出されると、燃料棒内圧はガスの量が増加するため上昇する。

燃料棒内圧 ( $P_{int}$ ) は、常に平衡状態にあり、かつガスが理想気体の法則に従うとして、

$$P_{int} = \frac{mR}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{V_{gap,i}}{T_{gap,i}} + \frac{V_{void,i}}{T_{void,i}} \right) + \frac{V_{up}}{T_{up}} + \frac{V_{lp}}{T_{lp}}} \quad (2.7)$$

から計算される。ここで、

- N = セグメント数
- V = 体積 (cm<sup>3</sup>)
- T = 温度 (°K)
- m = 燃料棒内空間に含まれる全ガスのモル数
- R = 気体定数

suffix :

- gap = ペレットと被覆管の間のギャップ
- void = ペレット中心孔
- up = 上部プレナム
- lp = 下部プレナム

である。

なお、mは放出F.P.ガス量と初期封入ガス量の加算値である。放出ガス量は生成ガス量に2.2節で述べた放出率を乗じて求められる。

プログラムにおいて、 $T_{\text{void}}$  には、燃料ペレット内面温度、 $T_{\text{gap}}$  にはペレット表面温度と被覆管内面温度の算術平均を採用している。

$T_{\text{up}}$  と  $T_{\text{lp}}$  は、JAERI-M 6249 の方法<sup>8)</sup> によって計算される。すなわち、これらの温度は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_{\text{up}}}{T_w} &= C_{\text{up}} (\Delta T_m / T_w) \\ \frac{T_{\text{lp}}}{T_w} &= C_{\text{lp}} (L/D, \Delta T_m / T_w) \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

で求められる。ここで

$$T_w = \text{冷却水温度 (}^\circ\text{K)}$$

$$\Delta T_m = T_m - T_w$$

$$T_m = \text{プレナムに接するペレット端面の中心温度 (}^\circ\text{K)}$$

$$L = \text{プレナムの長さ (cm)}$$

$$D = \text{被覆管外径 (cm)}$$

である。 $C_{\text{up}}$  と  $C_{\text{lp}}$  は、 $\Delta T_m / T_w$  や  $L/D$  をパラメータとする係数である。それらの値は Table 7 に示される。

### (2) 放出された F.P. ガスの分布

放出された F.P. ガスは、燃料棒内の空間に分布するが、その分布は (2.7) 式に示される通り、その場所の温度に依存する。

FREG-4 は、この放出 F.P. ガスが燃料棒内で混合等が平衡に達していると考え、次の分布計算を行う。セグメント  $i$  のギャップ、中心孔に含まれるガス量 ( $m_i$ ) は、

$$m_i = \frac{P_{\text{int}}}{R} \left( \frac{V_{\text{gap},i}}{T_{\text{gap},i}} + \frac{V_{\text{void},i}}{T_{\text{void},i}} \right) \quad (2.9)$$

とする。また、プレナムについてのガス量 ( $m_{\text{up}}$ ,  $m_{\text{lp}}$ ) も同様に、

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{up}} &= \frac{P_{\text{int}}}{R} \left( \frac{V_{\text{up}}}{T_{\text{up}}} \right) \\ m_{\text{lp}} &= \frac{P_{\text{int}}}{R} \left( \frac{V_{\text{lp}}}{T_{\text{lp}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

で計算する。

### (3) 放出された F.P. ガスの核変換

FREG-4 は放出された F.P. ガスについても、ペレット内残留の F.P. ガスと同様に、中性子吸収、崩壊等を考え、核変換を計算する。その計算方法は、2.1 節に述べたのと全く同じであるが、fission yield による生成は除かれる。

Table 7 Coefficient to evaluate plenum average temperature

(A) Case of heat conduction (to be applied lower plenum)

L/D	ATc/Tw	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
5	1.0	1.0042	1.0079	1.0114	1.0145	0.0175	1.0202	1.0228	1.0253	1.0276	1.0298	1.0319	1.0339	1.0358	1.0376	1.0394	
6	1.0	1.0035	1.0066	1.0095	0.0121	1.0145	1.0168	1.0189	1.0210	1.0229	1.0247	1.0264	1.0281	1.0296	1.0312	1.0326	
7	1.0	1.0030	1.0057	1.0081	1.0103	1.0124	1.0144	1.0162	1.0179	1.0195	1.0211	1.0226	1.0240	1.0253	1.0266	1.0278	
8	1.0	1.0026	1.0049	1.0071	1.0090	1.0109	1.0126	1.0141	1.0156	1.0171	1.0184	1.0197	1.0209	1.0221	1.0232	1.0243	
9	1.0	1.0023	1.0044	1.0063	1.0080	1.0096	1.0111	1.0125	1.0139	1.0151	1.0163	1.0175	1.0185	1.0196	1.0206	1.0215	
10	1.0	1.0021	1.0040	1.0057	1.0072	1.0087	1.0100	1.0113	1.0125	1.0136	1.0147	1.0157	1.0166	1.0176	1.0185	1.0193	
15	1.0	1.0014	1.0026	1.0038	1.0048	1.0058	1.0066	1.0075	1.0083	1.0090	1.0097	1.0104	1.0110	1.0116	1.0122	1.0128	
20	1.0	1.0010	1.0020	1.0028	1.0036	1.0043	1.0050	1.0056	1.0062	1.0068	1.0072	1.0078	1.0083	1.0087	1.0091	1.0096	
25	1.0	1.0008	1.0016	1.0023	1.0029	1.0034	1.0040	1.0045	1.0050	1.0054	1.0058	1.0062	1.0066	1.0070	1.0073	1.0076	
30	1.0	1.0007	1.0013	1.0019	1.0024	1.0029	1.0033	1.0037	1.0041	1.0045	1.0048	1.0052	1.0055	1.0058	1.0061	1.0064	

(B) Case of temperature distribution assumed linear in axial direction (to be applied upper plenum)

ATc/Tw	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
—	1.0	1.0515	1.1003	1.1469	1.1918	1.2351	1.2770	1.3179	1.3577	1.3966	1.4347	1.4721	1.5088	1.5449	1.5804	1.6154



### 3. 修正, 追加されたモデルおよび計算法

FREG-3に含まれていたモデルおよび計算法のうち, 修正および追加されたものについて本章で記述する。他のモデル等は, そのまま, FREG-4においてもFREG-3同様に組込まれ使用されている。それらについては, FREG-3の解説書<sup>1), 2)</sup>を参照されたい。

#### 3.1 燃料ペレットに関するモデル

燃料ペレットの照射挙動に関するモデルのうち, 再組織化, 焼きしまりと再配置のモデルが修正された。

##### 3.1.1 燃料ペレットの再組織化モデル

燃料ペレットが高温状態となること, 温度勾配が発生することのため, ペレット内の気孔は中心部に移動し, 中心孔を形成する。気孔の移動した部分のペレットは再組織化(restructuring)され, 密度が上昇する。

FREG-4は, 再組織化モデルとしてGAPCONに使用されたモデルを利用している。再組織化をプログラムに取入れる理由は, 次の二つの現象を考慮するためである。

- 1) 燃料ペレット中心孔の形成
- 2) 密度変化に伴う燃料ペレットの熱伝導率の変化

再組織化モデルは, Christensenの実験<sup>9)</sup>に基づくもので, ペレット内の再組織化する境界温度を照射時間によって一義的に決定できると仮定する。その関係式は,

$$1/T_{RS} = A \log_{10}(t) + B \quad (3.1)$$

である。ここで,

$T_{RS}$  : 組織変化が起る境界の温度 (°K)

$t$  : 出力状態におかれた時間 (hr)

A, B : 係数

である。AとBの係数について, FREG-4はGAPCONに使用されている値,  $A = 1.367 \times 10^{-5}$ ,  $B = 4.8 \times 10^{-4}$  を使用している。

このモデルは, 組織変化がおこる温度,  $T_{RS}$  と出力状態の時間,  $t$  を結んでいる。そのため, 高出力でも, 低出力でも出力状態におかれた時間が同じならば,  $T_{RS}$  は等しくなるという矛盾を含む。この矛盾を解決するため, FREG-4は, (3.1) 式を

$$\left. \begin{aligned} 1/T_{RS} &= A \log_{10}(t') + B \\ t' &= \frac{Bu/La}{24 \times 10^6 \cdot A_s} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

に変形して使用する。ここで、

Bu : 計算対象のセグメントにおける燃焼度 (MWD/ton UO<sub>2</sub>)

La : 計算対象セグメントの軸方向長さ (cm)

A<sub>S</sub> : 先の (3.1) 式が求められた基準の線出力密度 (w/cm)

である。なお、A<sub>S</sub>としてプログラムでは 600 w/cm としている。

上記の (3.2) 式で与えられる温度 T<sub>RS</sub>以上のペレットの部分は、入力で与えられる密度 (FRSIN) まで密度が上昇するものとする。そして、この密度上昇に見合う体積が中心孔を形成するとする。また、温度計算においては密度変化によって変化する熱伝導率を使用される。

### 3.1.2 燃料ペレットの焼きしまりモデル

燃料ペレットの焼きしまりは、再組織化を起す部分以外で起ると FREG-4 は考える。すなわち、再組織化の半径 (R<sub>RS</sub>) より外側のペレットの部分が焼きしまりを起すとする。再組織化半径より外側のリング状領域の燃料ペレットの焼きしまりによる体積変化 ( $\Delta V/V$ ) と、長手および半径方向の歪 ( $\Delta L/L$ ,  $\Delta R/R$ ) の間には内径の変化がないとした場合、次の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \frac{\Delta V/V}{\alpha + 2\beta / \{1 - (R_{RS}/R_0)^2\}} \\ \Delta L/L &= \alpha \bar{\varepsilon} \\ \Delta R/R &= \beta \bar{\varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

ここで、

$\alpha$ ,  $\beta$  : 長手、半径方向の異方性係数で、 $\alpha + 2\beta = 3$  とする。

R<sub>RS</sub> : 再組織化した半径

R<sub>0</sub> : ペレット外半径

$\bar{\varepsilon}$  : 平均体積歪

である。

焼きしまりによるペレットの体積変化を評価するモデルとして、FREG-4 は 2 つのモデルを用意している。第 1 のモデルは、ハンデンの焼結 UO<sub>2</sub> ペレットのスタック長変化に関する照射データから得られた Rolstad のモデルである。他のモデルは、GAPCON-THERMAL-2 に採用されている R. O. Meyer に基づくモデルである。モデルの選定は第 2 群入力の key word MDEN によって行なわれる。ただし、特に指定されない場合、MDEN = 1 となり、Rolstad モデルが選ばれる。

Rolstad のモデル<sup>10)</sup> (MDEN = 1) は、最大焼きしまり率、 $(\Delta L/L)_{\max}$  を与える式と、その焼きしまり率に至る途中の変化の式で成立している。最大焼きしまり率は

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\max} = \frac{222 \times (100 - TD)}{(TS - 1180)} \quad (3.4)$$

で与えられる。この最大焼きしまり率に至るまでの途中の変化、 $(\Delta L/L)_b$  は

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_b = 3 - 0.93 e^{-B_u} - 2.07 e^{-35 B_u} \quad (3.5)$$

で与えられる。ここで

TD : 初期密度 (%TD)

TS : ペレット焼結温度 (°C)

$B_u$  : 燃焼度 (MWd/kg UO<sub>2</sub>)

である。ただし、使用にさいして (3.4) 式で与えられる最大焼きしまり率が  $(\Delta L/L)_{\max} = g$  の場合、(3.5) 式で  $3-g$  となる  $B_u$  を  $B_0$  とし、(3.5) 式は  $(B_0, 3-g)$  点以降の変化量を使用しなければならない。

このモデルは、最大焼きしまり率が、ペレットの初期密度と焼結温度のみによって決まり、その最大値は3%以下とする。また、最大焼きしまり率に至るまでの変化は、燃焼度に依存しほぼ燃焼度3~4 MWd/kg-UO<sub>2</sub> (約3400~4500 MWd/MTM) で飽和する。

このモデルを使用して得られる値は、ペレットスタックの長手方向の歪 ( $\Delta L/L$ ) である。プログラムでは、 $\Delta V/V = 3 \cdot (\Delta L/L)$  として一旦体積歪に直し、 $\alpha = \beta = 1$  として (3.3) 式から、焼きしまりによる半径方向歪  $\Delta R/R$  を計算する。

第2のモデルは、MDEN = 2 でえられる Meyer によるもの<sup>4)</sup> で

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} \left\{ \frac{\ln(\text{bu}/C)}{\ln(2000/C)} \right\} \quad (3.6)$$

と表わされる。ここで、

bu : 燃焼度 (bu ≤ 2000 MWd/MTM)

$\rho$  : 最大焼きしまり密度 (%T.D)

$\Delta \rho$  : 最大焼きしまり密度と初期密度間の差 (%TD),

$$\Delta \rho = \rho_{\text{densified}} - \rho_{\text{initial}}$$

C : 定数

である。Cの値は次の様に与えられる。

$\rho_{\text{initial}}$	C の 値
92% T.D 以下	5 (MWD/MTM)
92% T.D 以上	20 (MWD/MTM)

このモデルの場合、 $\alpha = 1.5$ ,  $\beta = 0.75$  として (3.3) 式から燃料ペレットの焼きしまりによる半径変化を評価する。

### 3.1.3 再配置 (リロケーション) モデル

FREG-3 に使用した再配置 (relocation) モデルは、GAPCON-THERMAL-2 のモデル<sup>4)</sup> と同じである。このモデルをそのプログラムリストから少し整理して表すと、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\text{DELGR}}{\text{GAPR}} &= 0.42 \frac{B}{1+B} + 0.009P + 0.03 \\ B &= \exp(\text{burnup}^{1/4} - 4) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

となる。ここで、

- DELGR = ペレットの半径増加 (cm)
- GAPR = 製作時のコールド半径ギャップ (cm)
- P = 線出力密度 (kW/ft)
- burnup = 燃焼度 (MWd/MTM)

である。Fig. 7 は (3.7) 式の burnup による変化を示す。場合によっては、さらに保守的モデルとして

$$\frac{\text{DELGR}}{\text{GAPR}} = \left\{ (3.7) \text{ 式の } \frac{\text{DELGR}}{\text{GAPR}} \right\} - 0.28 \quad (3.8)$$

とする。

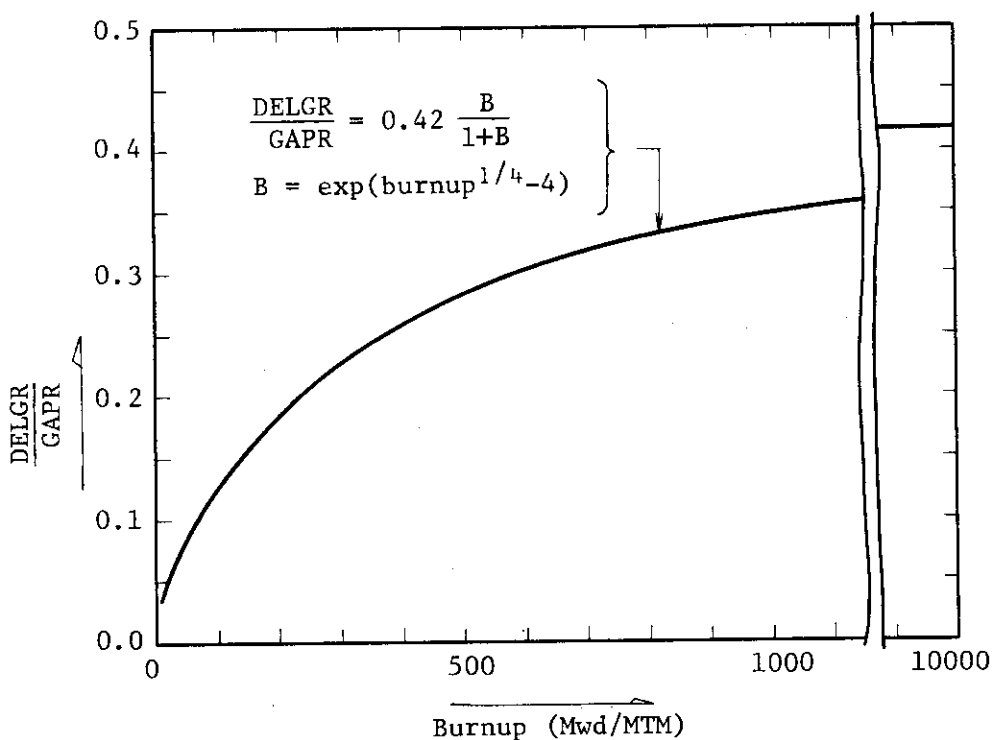


Fig. 7 Pellet radius increase of relocation model due to burnup

(3.7) 式は burnup = 0, P = 0 でも再配置によるペレットの半径増加があることになる。このことはモデル上特に問題とは云えないが、このような不連続性はしばしばギャップ熱伝達率の収斂計算を悪くする原因となる。

そこで、FREG-4は、burnup = 0, P = 0のとき DELGR = 0であり、burnup = 256 MWd/MTMで(3.7)式に接続するように使用する。すなわち、

$$\frac{\text{DELGR}}{\text{GAPR}} = 0.42 \left( \frac{B}{1+B} - B_0 \right) + 2.7432 \times 10^{-4} P + (0.03 + 0.42 B_0) \frac{\text{bn}}{256} \quad (3.9)$$

$$B = \exp(\text{burnup}^{1/4} - 4)$$

$$B_0 = \exp(-4) / \{ 1 + \exp(-4) \}$$

$$\text{bn} = \begin{cases} \text{burnup}, & \text{burnup} \leq 256 \\ 256, & \text{burnup} > 256 \end{cases}$$

として使用する。ここで

$$P = \text{線出力密度 (w/cm)}$$

$$\text{burnup} = \text{燃焼度 (MWd/MTM)}$$

とする。さらに、再配置モデルの選定 key word MRELOC が 2 の場合には、保守的モデルとして

$$\frac{\text{DELGR}}{\text{GAPR}} = \{ (3.9) \text{ 式の } \frac{\text{DELGR}}{\text{GAPR}} \text{ の値} \} - 0.28 \quad (3.10)$$

とされる。

プログラム内のペレットクラックの再配置によるペレット半径増加は、プログラム内において次のような取扱いが行なわれる。各時間ステップにおける再配置量が計算され、先の時間ステップの再配置量と比較される。もし先の時間ステップにおける値より小さいとき、先の時間ステップにおける再配置量を、その時間ステップにおける量とする。また、ペレットと被覆管内面間の接触圧力が起るギャップサイズ寸法の計算には用いられない。すなわち、再配置量を加えることによってギャップが閉じるような状態になったら、接触圧力を 0 にするかあるいは再配置量を 0 にする処置を行う。

### 3.2 被覆管クリープ

FREG-3では、被覆管のクリープ変位は、燃料棒の照射履歴に応じた値として入力で与えねばならなかった。FREG-4は、被覆管のクリープとして、クリープ計算式からえられる被覆管径の変位量を使用できるよう修正された。しかしながら、使用できるクリープ計算式は、現在1種のみしか組込まれていない。

この組込みのクリープ計算式は、プログラムBUCKLEに使用されている式である<sup>11)</sup>。その式は次のように表示される。

$$\dot{\epsilon}_t = \{ 1 + aK \exp(-Kt) \} \cdot B \phi^{0.85} \exp(-Q/RT) \cdot \sinh(S \cdot \sigma_t) \quad (3.11)$$

ここで、

$\dot{\epsilon}_t$  : 円周方向のクリープ歪速度 (1/hr),

t : 時間 (hr)

- $\phi$  : 高速中性子束 ( $n/cm^2 \cdot sec$ ) ( $E > 1 MeV$ ),
- $T$  : 被覆管温度 ( $^{\circ}K$ )
- $R$  : ガス定数 ( $1.987 cal/mole^{\circ}K$ )
- $a$  : 定数 ( $= 900 hr$ )
- $K$  : 定数 ( $6 \times 10^{-3} hr^{-1}$ )
- $B$  : 定数 ( $9.5 \times 10^{-13}$ )
- $\sigma_t$  : 円周方向応力 (psi)
- $S$  : 応力係数 ( $1.7 \times 10^{-4}$ )
- $Q$  : 活性化エネルギー ( $cal/mole$ ) で次のような値とする。

$$T_{crit} = 640 - 0.001 \sigma$$

$T < T_{crit}$  のとき,

$$Q = 16.980$$

$T > T_{crit}$  のとき,

$$Q = 16.980 - 76.2 (T - T_{crit})$$

とする,

である。

上記 (3.11) 式の時間  $t$  に照射時間を入れると、時間硬化型のクリープ式となってしまう。そこで、プログラムでは (3.11) 式を加工硬化型のクリープ式として使用する。いま、ある時間  $t$  におけるクリープ歪を  $\epsilon_t$  としたとき、 $\epsilon_t$  の値となる時間  $t_1$  を (3.11) 式を時間  $t$  について積分した

$$\epsilon_t = \{ t_1 + \alpha \exp(-K t_1) \} B \phi^{0.85} \exp(-Q/RT) \cdot \sinh(S \cdot \sigma_t) \quad (3.12)$$

から求める。次に時間  $t$  から  $t + \Delta t$  の間のクリープ歪速度  $\dot{\epsilon}_t$  を (3.11) 式で  $t = t_1$  として定める。また、 $t + \Delta t$  時間後のクリープ歪は、 $\epsilon_{t+\Delta t} = \epsilon_t + \dot{\epsilon}_t \cdot \Delta t$  で求める。

### 3.3 ホットギャップモデル

FREG のホットギャップモデルは、ギャップ熱伝達率計算モデルとの組合せで開発された。したがって、ホットギャップモデルは単独に存在するのではなく、ギャップ熱伝達率計算モデルを指定すると、そのギャップ熱伝達率計算モデルに附随するものとしてホットギャップモデルがえらばれる。

これらの選択は入力キーワード、MREV1 で行なわれ、その関係は、次の通りである。

MREV 1	ギャップ熱伝達率モデル	ホットギャップモデル
-2	MATPRO-09	} ホットギャップモデル-1
-1	RESAR-41	
0	Modified Ross and Stoute	
1	Modified Ross and Stoute	ホットギャップモデル-2

ギャップ熱伝達率計算モデルによりホットギャップモデルを切換える主要な理由は次の通りである。例えば、RESAR-41では、ホットギャップを0としても、ギャップ熱伝達率を計算することができる。しかし、Ross and Stoute のモデルでは、ホットギャップを0にすることは許されない。仮にホットギャップを0にするとギャップ熱伝達率が異常に大きくなる。

### 3.3.1 ホットギャップの定義

FREGは、被覆と燃料ペレットについて各々熱膨張等の変位要因を考慮している。被覆と燃料ペレット間に接触がない限り、これらの要因による変位は相互の関係はなく独立に発生すると仮定して、計算される。被覆管および燃料ペレットのそれぞれの全変位量は、それら要因による変位の和として定義される。また、各々の変位は、計算を行っている時点までの積算変位で表わされている。

いま、ある時点における被覆管と燃料ペレットの半径方向全変位量をそれぞれ  $\Delta r_c$ 、 $\Delta r_f$  とする。その時のホットギャップ、 $\Delta r_g$  を、初期ギャップを  $\Delta r_g^0$  として、

$$\Delta r_g = \Delta r_g^0 + \Delta r_c - \Delta r_f \quad (3.13)$$

と表す。ここに、

$$\left. \begin{aligned} \Delta r_c &= \Delta r_c^T + \Delta r_c^E + \Delta r_c^C \\ \Delta r_f &= \Delta r_f^T + \Delta r_f^D + \Delta r_f^R + \Delta r_f^S \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

とする。ただし、 $\Delta r_c$  と  $\Delta r_f$  は被覆管内面での半径方向変位と燃料ペレット外面での半径方向変位である。上付の添字 T は熱歪、E は内外圧力による弾性歪、C はクリープ歪、D は焼きしまり、R はリロケーション、S はスウェリングによることを示す。なお、変位に付けられた符号は半径が増加する方向を正にとる。

FREGは、「Soft contact 領域」という概念を持っている。その領域は、ペレットおよび被覆の表面粗さ ( $\delta_f$ 、 $\delta_c$ ) から決定されるある幅 (RESGAP) 以内であるとする。RESGAPは

$$\text{RESGAP} = 1.98 (\delta_f + \delta_c) \quad (3.15)$$

と定義される。これは、ギャップ熱伝達率に関する Ross and Stoute のモデルから、接触圧力を0として決められた。

### 3.3.2 ホットギャップモデル

FREG-4はギャップ熱伝達率計算のために3種のモデルを持つ。それぞれの関係式をTable 8にまとめて示す。RESAR-41、修正された Ross and Stoute モデルの詳しい説明は、FREG-3の解説書に述べられているので、そちらを参照されたい。

ここでは、FREG-4のホットギャップの取扱いを中心に説明する。

FREGは、保守的な解(多少高めの温度となる)を得る安全性評価コードとしての性格と最適推量解を得るための設計用コードとしての性格の二面性を持っている。そのため、燃料ペレットおよび被覆管の各変位要因のそれぞれについて数種の変位計算モデルが組込まれている。それら

Table 8 Relationships of gap heat transfer.

		MATPRO-version 9 <sup>6)</sup>	RESAR-41 <sup>13)</sup>	Modified Ross and Stoute <sup>14)</sup>
Gap heat transfer coeff.	Open gap	$hg = (1-F)h_o + Fh_c$ $h_o = \frac{k_{gas}}{\Delta r + \delta}$ $h_c = C_1 P^n + \frac{k_{gas}}{\delta}$	$hg = \max(h_1, h_2)$ $h_1 = \frac{k_{gas}}{\Delta r + 14.4 \times 10^{-6}}$ $h_2 = 1500 k_{gas} + \frac{4.0}{0.006 + 2\Delta r}$	$hg = \frac{k_{gas}}{\Delta r + (g_f + g_c)} + hr$ $(\Delta r \geq c(\delta_f + \delta_c))$
	Closed gap	$hg = C_1 P^n + \frac{k_{gas}}{\delta}$	$hg = 0.6P + \frac{k_{gas}}{14.4 \times 10^{-6}}$	$hg = \frac{k_m P}{a_o \delta^{0.5} H} + \frac{k_{gas}}{t + (g_f + g_c)} + hr$
Nomenclature		<p>hg = Gap heat transfer coefficient                      k<sub>gas</sub> = Thermal conductivity of gas mixture                      P = Pellet-cladding contact pressure                      Δr = Nominal hot gap width</p>		
		<p>C<sub>1</sub> = 5×10<sup>-4</sup> (for Zry-UO<sub>2</sub>), 4×10<sup>-4</sup> (for S/S-UO<sub>2</sub>)                      δ = R.M.S. of fuel and cladding roughness (4.4×10<sup>-6</sup> m)                      n = 1 (P≤1000psi), 1/2 (P&lt;1000psi)  <math>F = \frac{1}{a_1 \left( \frac{100 \cdot \Delta r}{R_f} \right)^{a_2} + 1.429} + 0.3</math>                      R<sub>f</sub> = hot radius of the fuel pellet (m)                      a<sub>1</sub> = 100 - 98F'                      a<sub>2</sub> = 4.0 - 0.5F'  <math>F' = 1 - \frac{1}{\left( \frac{x-600}{1000} \right)^4 + 1}</math>                      x = burnup (Mwd/MtU)</p>	<p>hr = radiation heat transfer coefficient (W/cm<sup>2</sup>-C)                      k<sub>m</sub> = 2k<sub>f</sub>k<sub>c</sub>/(k<sub>f</sub>+k<sub>c</sub>)                      k = thermal conductivity (W/cm-C)                      a<sub>0</sub> = 140.2√δ - 0.103 (cm<sup>1/2</sup>)  <math>\delta = \left\{ \frac{1}{2} (\delta_f^2 + \delta_c^2) \right\}^{1/2}</math>                      δ = R.M.S. of surface roughness (cm)                      H = Mayer's hardness (kg/cm<sup>2</sup>)                      t = C (δ<sub>f</sub>+δ<sub>c</sub>) (cm)                      C = 1.98e<sup>-0.00125P</sup>                      g = temperature jump distance (cm)                      suffix: f = fuel, c = cladding</p>	
Unit	hg	W/m <sup>2</sup> -K	Btu/hr-ft <sup>2</sup> -F	W/cm <sup>2</sup> -C
	k <sub>gas</sub>	W/m-K	Btu/hr-ft-F	W/cm-C
	P	N/m	psi	kg/cm <sup>2</sup>
	Δr	m	ft	cm



のモデルのうちどのモデルを使用するかは使用者が指定しなければならない。

ホットギャップの評価に2種のモデルがある。両モデルの考え方の基本は次の通りである。燃料ペレットの熱膨張およびGeithhoffモデルで計算される拘束スウェリングによる燃料ペレットの変位は、被覆を押し広げうる能力を持つ。しかし、無拘束スウェリングおよびリロケーションによる変位は、被覆に拘束され、ペレットの他の要因による変位内に吸収され、被覆との接触力を発生する能力を持たないとするものである。

#### (1) ホットギャップモデル-1

このモデルは、使用者が指定した各変位要因に関する変位計算モデルを使用する。ただし、接触開始後、燃料ペレットのスウェリングとリロケーションについては、修正計算が行なわれる。このモデルは、GAPCON-THERMAL-1が行っていたホットギャップの取扱いを修正・改良して作成されたモデルである。

使用者が指定した変位計算モデル（熱膨張、スウェリング、リロケーション、焼きしまり、内外圧力差による弾性、クリープ等による変位計算モデル）を用い、(3.13)式より、ホットギャップ幅、 $\Delta r_g$ が求められる。

$$\Delta r_g = \Delta r_g^0 + \Delta r_c - (\Delta r_f^T + \Delta r_f^D + \Delta r_f^R + \Delta r_f^S)$$

である。接触がないと判定された場合は、このホットギャップ幅をギャップ熱伝達率計算に使用する。

$\Delta r_g$ が「soft contact 領域」に入ったら、接触が始ると考える ( $\Delta r_g \leq \text{RESGAP}$ )。しかし、ただちに接触力が発生するとはせず、次のように取扱う。

i) リロケーションによる $\Delta r_f^R$ は、被覆による拘束を考えずに算出されているので、被覆による拘束により小さくなるとする。すなわち、リロケーション変位量を

$$\Delta r_f^R = \Delta r_g^0 + \Delta r_c - (\Delta r_f^T + \Delta r_f^D + \Delta r_f^S) - \text{RESGAP} \quad (3.16)$$

で、修正再計算する。

ii) 上記(3.16)式の結果が $\Delta r_f^R < 0$  (リロケーションによる $\Delta r_f^R = 0$ としても、ギャップ幅が負となる)となる場合には、 $\Delta r_f^R = 0$ としスウェリングによる $\Delta r_f^S$ の修正を行う。すなわち、 $\Delta r_f^S$ を

$$\Delta r_f^S = \Delta r_g^0 + \Delta r_c - (\Delta r_f^T + \Delta r_f^D) - \text{RESGAP} \quad (3.17)$$

で修正再計算する。

ただし、スウェリングによる変位計算モデルとしてGeithhoffの拘束モデルがえらばれたとき ( $\text{ISWELL} \leq 1$ )には、この作業は行なわれない。

iii) 上記i)およびii)の結果が正ならば、ホットギャップは(3.13)式より再計算される。ii)をも行ってなお負となる場合は、接触力が発生するとする。

#### (2) ホットギャップモデル-2

このモデルでは、最初に接触に至るまでの燃料ペレットの最大変位可能量を考える。Soft contact 領域に至るまでの最大変位可能量 (GAP 9)は、初期ギャップ $\Delta r_g^0$ 、被覆の変位量

$\Delta r_c$  および燃料ペレットの焼きしまりによる変位  $\Delta r_f^D$  を考慮し、

$$GAP\ 9 = \Delta r_g^D + \Delta r_c - \Delta r_f^D - RESGAP \quad (3.18)$$

から求められる。

先にも述べたように、FREGは、各変位要因による変位算出方法のそれぞれについて数種の計算モデルを組込んでおり、それら計算モデルのどれを使用するかは使用者が指定する機構になっている。ホットギャップの評価にさいし、Soft contact 領域に至るまでは、使用者指定の変位計算モデルを使用するのは、モデル-1と同じである。しかし、接触開始以後、モデル-2ではプログラム内で自動的に変位計算モデルを切り換えてホットギャップの評価を行う。これは、モデル-2の特徴である。

熱膨張による燃料ペレットの変位計算モデルのうち、最も保守的（最小の値となる）な値を与えるモデルから得られる変位量を  $\Delta r_f^{T*}$  とする。同様に燃料スウェリングによるものを  $\Delta r_f^{S*}$  とする。

このモデル-2では、使用者指定の熱膨張およびスウェリングによるホットギャップ評価に先立って、 $\Delta r_f^{T*}$  および  $\Delta r_f^{S*}$  を使用したホットギャップ評価が行なわれる。

これら、 $\Delta r_f^{T*}$ 、 $\Delta r_f^{S*}$  を含めた燃料ペレット変位量をもとにホットギャップを1～5の級（GRADE）に分類する。そして各級に応じて接触圧力の評価を変更する。

ホットギャップ評価の詳細は、Table 9 に示す通りである。Table 9は、級、変位項目、接触圧力、変位量の修正値等の関係を表示している。どの級に属するかは判定は、表中の「 $\Sigma \Delta r$ 」の値と、先述の（3.18）式が与える最大変位可能量  $GAP\ 9$  の値との比較で行なわれる。すなわち、 $(\Delta r_f^T + \Delta r_f^S + \Delta r_f^R) < GAP\ 9$  となったら、接触が開始すると判定し、その級はTable 9 に示す  $\Sigma \Delta r$  のどれに該当するかで決定される。該当する級をホットギャップおよび接触力の級とする。

Table 9 ホットギャップモデル-2におけるホットギャップ分類

GRADE	$\Sigma \Delta r$	接触後のHOT GAP	接触圧力	変形量の修正
1	$\Delta r_f^{T*} + \Delta r_f^{S*}$	$\Sigma \Delta r - \text{GAP9}$	(*)	なし, $\Delta r_f^R = 0.0$
2	$\Delta r_f^T + \Delta r_f^{S*}$	$\Sigma \Delta r - \text{GAP9}$	or $\frac{(*)}{76 + 94C}$	なし, $\Delta r_f^R = 0.0$
3	$\Delta r_f^T + \Delta r_f^S$	RESGAP	0.0	$\Delta r_f^S = \text{MAX} \{ 0., \text{GAP9} - \Delta r_f^T \}$ $\Delta r_f^R = 0.0$
4	$\Delta r_f^T + \Delta r_f^S + \Delta r_f^R$	RESGAP	0.0	$\Delta r_f^R = \text{MAX} \{ 0., (\text{GAP9} - \Delta r_f^T - \Delta r_f^S) \}$
5	$\Delta r_f^T + \Delta r_f^S + \Delta r_f^R$	$\Sigma \Delta r - \text{GAP9}$	0.0	なし

- (注) 1. RESGAP =  $1.98 \times (\delta_f + \delta_c)$       2. (\*) 干渉量より算出する  
 3. 記号は 3.3 節本文参照のこと。      4. C = (相互干渉量) / (最大相互干渉量)

## 4. 入, 出力について

### 4.1 入力について

FREG-4の入力は, FREG-3の入力法と大差はない。多少オプションキーワード等が追加された。

入力法の詳細については Appendix-B に収録してあるので参照されたい。

### 4.2 出力について

FREG-4の出力は, かなり多岐に渡るが, 入力データとそれを整理してプリントアウトしたもの及び計算結果の出力とに大別される。計算結果の出力も, 詳細版と簡約版とがある。

これら出力について, 出力内容, 出力させるためのオプションキーワードおよび出力する副プログラム名等を Table 10 にまとめて示す。

Table 10 Output summary of FREG-4

No.	Contents	Key word etc.	Out put subroutine
1	出力の表紙		HYOSHI
2	入力データのカードイメージの出力		DATAPR
3	入力された照射履歴データをもとに計算において使用する履歴 (内挿等を行った結果) をプリントする。		HISTR
4	入力データを整理してプリントする。		STEP1 STEP2 (0)
5	(1) 燃料ペレットの熱伝導率プリント (2) 被覆管物性値プリント (3) 半径方向出力分布比プリント (4) 軸方向出力分布比プリント (5) F.P ガス放出率プリント		STEP2 (2) STEP2 (3) STEP2 (4) STEP2 (5) STEP2 (6)
6	各 F.P アイソトープに関する放出の係数 (release rate に乗ずるための係数)	MGAS LGASPR = 1	FGDATA
7	計算結果, 温度分布, 変位量, その他 (詳細版)。これは照射履歴と共に読み込まれるコントローラ IPD (1,J), J: 計算ステップ数によって出力の有無が決まる。	IPD (1,J) ≥ 1	PRINT 1
	計算結果 (簡約版)	IPD (1,J) ≤ -1	PRINT 2
	全セグメントの温度分布をプリントする。	IPD (1,J)  ≥ 2	PRINT 3
	全セグメントの半径方向温度分布をラインプリンターによって図化して出力する。	IPD (1,J)  +  IIPROF  ≥ 3	PROF
8	Xe, Kr についてのペレット残留, 放出に関する情報	LGASPR = 1	
9	プログラムで取扱う F.P. アイソトープのペレット残留, 放出に関する原子数およびキューリー数	NUCLEI = 1	
10	入力データおよびオプションキーワード等を整理縮約したプリント		ENDPRI

## 謝 辞

FREG-4 は, FREG-3 をその基礎にしている。FREG-3 の開発に多大の努力をされた森島淳好氏 (企画室) に謝意を表す。FREG-4 の開発に多くの助言をえた燃料安全第一研究室の市川達生氏はじめ研究室室員各位に併せて謝意を表す。

なお, FREG-3, FREG-4 を通じプログラムの改良, 修正にセンチュリー・リサーチ・センターの大坪直昭氏の助力をえた。記して謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 原山泰雄, 泉 文男, "FREG-3: 照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達率評価プログラム——計算方法と計算モデルについて——", JAERI-M 7278 (1977)
- 2) 原山泰雄, 泉 文男等, "照射履歴に従った燃料ペレット-被覆管ギャップ熱伝達解析プログラム FREG-3 の入力手引", JAERI-M 6742 (1976)
- 3) C.R. Hann, C.E. Beyer and L.J. Parchen, "GAPCON-THERMAL-1: A computer program for calculating the gap conductance in oxide fuel pins", BNWL-1778 (Sep. 1973)
- 4) C.E. Beyer, C.R. Hann, D.D. Lanning, F.E. Panisko and L.J. Parchen, "GAPCON-THERMAL-2: A computer program for calculating the thermal behavior of an oxide fuel rod", BNWL-1898 (Nov. 1973)
- 5) J.P. Hoffman, D.H. Coplin, "The release of fission gas from uranium dioxide pellet fuel operated at high-temperature", GEAP-4596, (Sep. 1946)
- 6) Edited by P.E. MacDonald and L.B. Thompson, "MATPRO-version 9: A handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior", TREE-NUREG-1005 (Dec. 1976)
- 7) M. Bruet, J. Dodelier, P. Melin, M.L. Pointus, "Contact 1 and 2 experiments: behaviour of PWR fuel rod up to 15000 MWd.  $tU^{-1}$ ", IWGFPT/7 (1980)
- 8) 原山泰雄, 泉 文男等, "燃料棒プレナム内平均温度の考察", JAERI-M 6249 (1975)
- 9) J.A. Christensen, "Columnar grain growth in oxide fuels", Trans. Am. Nuc. Soc. Vol.15, No.1 (Jun. 1972)
- 10) E. Rolstad, A. Hanevik and K.K. Knudsen, "Measurements of the length changes of  $UO_2$  fuel pellets during irradiation", Enlarged HPG Meeting on Computer Control and Fuel Research, June 4-7 (1974)
- 11) P.J. Pankaskie, "BUCKLE - An analytical computer code for calculating creep buckling of an initially oval tube", BNWL-B-253, (1973)
- 12) M. Ichikawa, private communication.
- 13) Westinghouse Nuclear Energy System, "Reference Safety Analysis Report (RESAR-41)", Vol.II, Docket-STN-50480-2, Dec., 1973
- 14) A.M. Ross and R.L. Stoute, "Heat Transfer Coefficients between  $UO_2$  and Zircaloy-2", CRFD-1075, June 1962

## Appendix A 核分裂性物質およびF.P.アイソトープの 存在量を求める近似式

核分裂性物質と Kr, Xe に関係した F.P. アイソトープの存在量を求めるための近似式を Table A に示す。表中, Ident. No. は, プログラム内の配列等に対応する番号であり, 次欄のアイソトープを指定する。

表中に使用した記号は次の通りである。

N : 各アイソトープの存在量 (プログラム内の使用においては燃料棒の長さ 1cm 当りに含まれる原子数)

$\sigma$  : 断面積 (burns)

$\phi$  : 中性子束 ( $n/cm^2/sec$ )

t : 時間 (sec)

$\lambda$  : decay constant ( $sec^{-1}$ )

$\gamma$  : fission yield

suffix

数字 : 各アイソトープ

o : 時間 0

t : 時間 t

c : capture cross section

なお,  $f_i$  は fission yield による生成率で,

$$f_i = \phi (\gamma_i \sigma_{f,U-235} N_{U-235} + \gamma_i \sigma_{f,U-238} N_{U-238} + \gamma_i \sigma_{f,Pu-239} N_{Pu-239} + \gamma_i \sigma_{f,Pu-241} N_{Pu-241})$$

で表わされる量とする。

Table A Approximation to calculate atoms number of fissile material and fission products isotopes.

Ident. No.	Isotope	Differential equation	Approximation of solution used in program	Parameter in approximation
1	U-238	$\frac{dN_1}{dt} = -\sigma_1 \phi N_1$	$N_{1,t} = N_{1,0} e^{-X_1 t}$	$X_1 = \sigma_1 \phi$
2	U-239	$\frac{dN_2}{dt} = \sigma_1, c \phi N_1 - (\sigma_2 \phi + \lambda_2) N_2$	$N_{2,t} = N_{2,0} \exp(-X_1 t) + \frac{X_1}{X_2} N_{1,t} \{1 - \exp(-X_2 t)\}$	$X_1 = \sigma_1, c \phi$ $X_2 = \sigma_2 \phi + \lambda_2$
3	Np-239	$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - (\sigma_3 \phi - \lambda_3) N_3$	$N_{3,t} = N_{3,0} \exp(-X_3 t) + \frac{X_{2,1}}{X_3} N_{2,t} \{1 - \exp(-X_3 t)\}$	$X_{2,1} = \lambda_2$ $X_3 = \sigma_3 \phi + \lambda_3$
4	U-240	$\frac{dN_4}{dt} = \sigma_2, c \phi N_2 - \lambda_4 N_4$	$N_{4,t} = N_{4,0} \exp(-X_4 t) + \frac{X_{2,2}}{X_4} N_{2,t} \{1 - \exp(-X_4 t)\}$	$X_{2,2} = \sigma_2, c \phi$ $X_4 = \lambda_4$
5	Np-240m	$\frac{dN_5}{dt} = \lambda_4 N_4 + \frac{7}{12} \sigma_3 \phi N_3 - \lambda_5 N_5$	$N_{5,t} = N_{5,0} \exp(-X_5 t) + \frac{X_{3,1}}{X_5} N_{3,t} \{1 - \exp(-X_5 t)\} + \frac{X_4}{X_5} N_{4,t} \{1 - \exp(-X_5 t)\}$	$X_{3,1} = (\frac{7}{12}) \sigma_3, c \phi$ $X_4 = \lambda_4$ $X_5 = \lambda_5$
6	Np-240	$\frac{dN_6}{dt} = \frac{5}{12} \sigma_3 \phi N_3 - \lambda_6 N_6$	$N_{6,t} = N_{6,0} \exp(-X_6 t) + \frac{X_{3,2}}{X_6} N_{3,t} \{1 - \exp(-X_6 t)\}$	$X_{3,2} = (\frac{5}{12}) \sigma_3, c \phi$ $X_6 = \lambda_6$



Table A (con't)

Ident. No.	Isotope	Differential equation	Approximation of solution used in program	Parameter in approximation
7	Pu-239	$\frac{dN_7}{dt} = \sigma_{14}\phi N_{14} + \lambda_3 N_3 - \sigma_7 \phi N_7$	$N_{7,t} = N_{7,0} \exp(-X_7 t)$ $+ \frac{\lambda_{14}}{X_7} N_{14,t} \{1 - \exp(-X_7 t)\}$ $+ \frac{\lambda_{3,3}}{X_7} N_{3,t} \{1 - \exp(-X_7 t)\}$	$X_7 = \sigma_7 \phi$ $X_{14} = \sigma_{14, c} \phi$ $X_{3,3} = \lambda_3$
8	Pu-240	$\frac{dN_8}{dt} = \sigma_7 \phi N_7 + \lambda_5 N_5 + \lambda_6 N_6 - \sigma_8 \phi N_8$	$N_{8,t} = N_{8,0} \exp(-X_8 t)$ $+ \frac{\lambda_5}{X_8} N_{5,t} \{1 - \exp(-X_8 t)\}$ $+ \frac{\lambda_6}{X_8} N_{6,t} \{1 - \exp(-X_8 t)\}$ $+ \frac{\lambda_7}{X_8} N_{7,t} \{1 - \exp(-X_8 t)\}$	$X_8 = \sigma_8 \phi$ $X_5 = \lambda_5$ $X_6 = \lambda_6$ $X_7 = \sigma_7, c \phi$
9	Pu-241	$\frac{dN_9}{dt} = \sigma_8 \phi N_8 - \sigma_9 \phi N_9$	$N_{9,t} = N_{9,0} \exp(-X_9 t)$ $+ \frac{\lambda_8}{X_9} N_{8,t} \{1 - \exp(-X_9 t)\}$	$X_9 = \sigma_9 \phi$ $X_8 = \sigma_8, c \phi$
10	U-235	$\frac{dN_{10}}{dt} = -\sigma_{10} \phi N_{10}$	$N_{10,t} = N_{10,0} \exp(-X_{10} t)$	$X_{10} = \sigma_{10} \phi$
11	U-236	$\frac{dN_{11}}{dt} = \sigma_{10} \phi N_{10} - \sigma_{11} \phi N_{11}$	$N_{11,t} = N_{11,0} \exp(-X_{11} t)$ $+ \frac{X_{10}}{X_{11}} N_{10,t} \{1 - \exp(-X_{11} t)\}$	$X_{10} = \sigma_{10, c} \phi$ $X_{11} = \sigma_{11} \phi$

Table A (con't)

Ident. No.	Isotope	Differential equation	Approximation of solution used in program	Parameter in approximation
12	U-237	$\frac{dN_{12}}{dt} = \sigma_{11}\phi N_{11} - \lambda_{12}N_{12}$	$N_{12,t} = N_{12,o} \exp(-X_{12}t) + \frac{\lambda_{11}}{\lambda_{12}} N_{11,t} \{1 - \exp(-X_{12}t)\}$	$X_{11} = \sigma_{11}, c\phi$ $X_{12} = \lambda_{12}$
13	Np-237	$\frac{dN_{13}}{dt} = \lambda_{12}N_{12} - \sigma_{13}\phi N_{13}$	$N_{13,t} = N_{13,o} \exp(-X_{13}t) + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{13}} N_{12,t} \{1 - \exp(-X_{13}t)\}$	$X_{12} = \lambda_{12}$ $X_{13} = \sigma_{13}\phi$
14	Np-238	$\frac{dN_{14}}{dt} = \sigma_{13}\phi N_{13} - (\sigma_{14}\phi + \lambda_{14})N_{14}$	$N_{14,t} = N_{14,o} \exp(-X_{14}t) + \frac{\lambda_{13}}{\lambda_{14}} N_{13,t} \{1 - \exp(-X_{14}t)\}$	$X_{13} = \sigma_{13}, c\phi$ $X_{14} = \sigma_{14}\phi + \lambda_{14}$
15	Pu-238	$\frac{dN_{15}}{dt} = \lambda_{14}N_{14} - (\sigma_{15}\phi + \lambda_{15})N_{15}$	$N_{15,t} = N_{15,o} \exp(-X_{15}t) + \frac{\lambda_{14}}{\lambda_{15}} N_{14,t} \{1 - \exp(-X_{15}t)\}$	$X_{14} = \lambda_{14}$ $X_{15} = \sigma_{15}\phi + \lambda_{15}$
101	Kr-83	$\frac{dN_{101}}{dt} = f_{101} - \sigma_{101}\phi N_{101}$	$N_{101,t} = N_{101,o} \exp(-X_{101}t) + \frac{f_{101}}{X_{101}} \{1 - \exp(-X_{101}t)\}$	$X_{101} = \sigma_{101}\phi$
102	Kr-84	$\frac{dN_{102}}{dt} = f_{102} + \sigma_{101}\phi N_{101}$	$N_{102,t} = N_{102,o} + (f_{102} + X_{101} \cdot N_{101,t})t$	$X_{101} = \sigma_{101}\phi$

Table A (con't)

Ident. No.	Isotope	Differential equation	Approximation of solution used in program	Parameter in approximation
103	Kr-85m	$\frac{dN_{103}}{dt} = f_{103} - \lambda_{103}N_{103}$	$N_{103,t} = N_{103,0} \exp(-X_{103}t) + \frac{f_{103}}{X_{103}} \{1 - \exp(-X_{103}t)\}$	$X_{103} = \lambda_{103}$
104	Kr-85	$\frac{dN_{104}}{dt} = f_{104} + \gamma_{103}\lambda_{103}N_{103} - (\lambda_{104} + \sigma_{104}\phi)N_{104}$	$N_{104,t} = N_{104,0} \exp(-X_{104}t) + \frac{f_{104}}{X_{104}} \{1 - \exp(-X_{104}t)\} + \frac{X_{103}}{X_{104}} N_{103,t} \{1 - \exp(-X_{104}t)\}$	$X_{104} = \lambda_{104} + \sigma_{104}\phi$ $X_{103} = 0.21 \times \lambda_{103}$
105	Kr-86	$\frac{dN_{105}}{dt} = f_{105} + (\lambda_{104} + \sigma_{104}\phi)N_{104}$	$N_{105,t} = N_{105,0} + f_{105} \cdot t + X_{104} \cdot N_{104,t} \cdot t$	$X_{104} = \sigma_{104}\phi$
106	Te-131m	$\frac{dN_{106}}{dt} = f_{106} - \lambda_{106}N_{106}$	$N_{106,t} = N_{106,0} \exp(-X_{106}t) + \frac{f_{106}}{X_{106}} \{1 - \exp(-X_{106}t)\}$	$X_{106} = \lambda_{106}$
107	Te-131	$\frac{dN_{107}}{dt} = f_{107} + 0.18\lambda_{106}N_{106} - \lambda_{107}N_{107}$	$N_{107,t} = N_{107,0} \exp(-X_{107}t) + \frac{f_{107}}{X_{107}} \{1 - \exp(-X_{107}t)\} + \frac{X_{106}}{X_{107}} N_{106,t} \{1 - \exp(-X_{107}t)\}$	$X_{107} = \lambda_{107}$ $X_{106,1} = 0.18\lambda_{106}$

Table A (con't)

Ident. No.	Isotope	Differential equation	Approximation of solution used in program	Parameter in approximation
108	I-131	$\frac{dN_{108}}{dt} = -\lambda_{108}N_{108} + 0.82\lambda_{106}N_{106} + \lambda_{107}N_{107}$	$N_{108,t} = N_{108,0} \exp(-X_{108}t) + \frac{\lambda_{106}}{\lambda_{108}} N_{106,t} \{1 - \exp(-X_{108}t)\} + \frac{\lambda_{107}}{\lambda_{108}} N_{107,t} \{1 - \exp(-X_{108}t)\}$	$X_{108} = \lambda_{108}$ $X_{106,2} = 0.82\lambda_{106}$ $X_{107} = \lambda_{107}$
109	Xe-131	$\frac{dN_{109}}{dt} = -\sigma_{109}\phi N_{109} + \lambda_{108}N_{108}$	$N_{109,t} = N_{109,0} \exp(-X_{109}t) + \frac{\lambda_{108}}{\lambda_{109}} N_{108,t} \{1 - \exp(-X_{109}t)\}$	$X_{109} = \sigma_{109}\phi$ $X_{108} = \lambda_{108}$
110	Te-132	$\frac{dN_{110}}{dt} = -\lambda_{110}N_{110} + f_{110}$	$N_{110,t} = N_{110,0} \exp(-X_{110}t) + \frac{f_{110}}{\lambda_{110}} \{1 - \exp(-X_{110}t)\}$	$X_{110} = \lambda_{110}$
111	I-132	$\frac{dN_{111}}{dt} = -\lambda_{111}N_{111} + \lambda_{110}N_{110}$	$N_{111,t} = N_{111,0} \exp(-X_{111}t) + \frac{\lambda_{110}}{\lambda_{111}} N_{110,t} \{1 - \exp(-X_{111}t)\}$	$X_{111} = \lambda_{111}$ $X_{110} = \lambda_{110}$
112	Xe-132	$\frac{dN_{112}}{dt} = -\sigma_{112}\phi N_{112} + \sigma_{109}\phi N_{109} + \lambda_{111}N_{111}$	$N_{112,t} = N_{112,0} \exp(-X_{112}t) + \frac{\lambda_{109}}{\lambda_{112}} N_{109,t} \{1 - \exp(-X_{112}t)\} + \frac{\lambda_{111}}{\lambda_{112}} N_{111,t} \{1 - \exp(-X_{112}t)\}$	$X_{112} = \sigma_{112}\phi$ $X_{109} = \sigma_{109}\phi$ $X_{111} = \lambda_{111}$

Table A (con't)

Ident. No.	Isotope	Differential equation	Approximation of solution used in program	Parameter in approximation
113	I-133	$\frac{dN_{113}}{dt} = -\lambda_{113}N_{113} + f_{113}$	$N_{113,t} = N_{113,0} \exp(-X_{113}t) + \frac{f_{113}}{X_{113}} \{1 - \exp(-X_{113}t)\}$	$X_{113} = \lambda_{113}$
114	Xe-133	$\frac{dN_{114}}{dt} = -(\lambda_{114} + \sigma_{114}\phi)N_{114} + \lambda_{113}N_{113}$	$N_{114,t} = N_{114,0} \exp(-X_{114}t) + \frac{X_{113}}{X_{114}} N_{113,t} \{1 - \exp(-X_{114}t)\}$	$X_{114} = \sigma_{114}\phi + \lambda_{114}$ $X_{113} = \lambda_{113}$
115	Xe-134	$\frac{dN_{115}}{dt} = f_{114} + \sigma_{114}\phi N_{114}$	$N_{115,t} = N_{115,0} + f_{115}t + X_{114} \cdot N_{114,t} \cdot t$	$X_{114} = \sigma_{114}\phi$
116	I-135	$\frac{dN_{116}}{dt} = -\lambda_{116}N_{116} + f_{116}$	$N_{116,t} = N_{116,0} \exp(-X_{116}t) + \frac{f_{116}}{X_{116}} \{1 - \exp(-X_{116}t)\}$	$X_{116} = \lambda_{116}$
117	Xe-135m	$\frac{dN_{117}}{dt} = -\lambda_{117}N_{117} + 0.3\lambda_{116}N_{116}$	$N_{117,t} = N_{117,0} \exp(-X_{117}t) + \frac{X_{116,1}}{X_{117}} N_{117,t} \{1 - \exp(-X_{117}t)\}$	$X_{117} = \lambda_{117}$ $X_{116,1} = 0.3\lambda_{116}$

Table A (con't)

Ident. No.	Isotope	Differential equation	Approximation of solution used in program	Parameter in approximation
118	Xe-135	$\frac{dN_{118}}{dt} = -(\lambda_{118} + \sigma_{118}\phi)N_{118} + f_{118} + 0.7\lambda_{116}N_{116} + \lambda_{117}N_{117}$	$N_{118,t} = N_{118,0} \exp(-X_{118}t) + \frac{f_{118}}{X_{118}} \{1 - \exp(-X_{118}t)\} + \frac{X_{116,2}}{X_{118}} N_{116,t} \{1 - \exp(-X_{118}t)\} + \frac{X_{117}}{X_{118}} N_{117,t} \{1 - \exp(-X_{118}t)\}$	$X_{118} = \lambda_{118} + \sigma_{118}\phi$ $X_{116,2} = 0.7\lambda_{116}$ $X_{117} = \lambda_{117}$
119	Xe-136	$\frac{dN_{119}}{dt} = f_{119} + \sigma_{118}\phi N_{118}$	$N_{119,t} = N_{119,0} + f_{119} \cdot t + X_{118} \cdot N_{118} \cdot t$	$X_{118} = \sigma_{118}\phi$

## Appendix B 入力手引

FREG-4の入力データは、カード入力形式で、その第1枚目のカードは、タイトルカードである。FREG-3は連続計算が可能で、入力カードでタイトルカードから次のタイトルカードまでの計算を“ケース”と呼ぶ。1計算ケースの中で照射履歴に従って時間あるいは燃焼度を計算に適するように分割した分割点を“ステップ”と云う。ステップは、入力された照射履歴の最初の点を第1ステップとしたシリーズナンバーになる。

### B.1 入力データの構成

FREG-3の入力データは次の8群で構成される。入力データカードの順序もここで記述する順序に従う。Fig.B.1にデータ構成および順序を示すので、以下の説明に参照されたい。入力データには最初に読み込まれて初期値の設定に使われるものと計算の進行に伴って読まれ使用されるものがある。

#### 1) TITLE and END card (第1群入力)

このカードは、各計算ケースの入力カード群の最初に必要なTITLEカードである。すべての入力カード群の最後に特定のシグナルをパンチしたカードを付けるとEND cardになる。

このカードは、1枚のカードであり、20A4のFORMAT形式で読まれる。TITLEカードとして使用する場合は、1~80コラム内に任意の文字をパンチしてよい。ただし、次に述べるENDカードになるシグナルを入れてはならない。TITLEカードの内容は、出力の各頁の第1行に印刷される。

ENDカードとして使用するときのシグナルは、

- i) コラム1~4に“STOP”
- ii) ブランクカード

の2種がある。FREG-4の入力カードは第1群のTITLEカードから始まり第8群で終るいくつかの計算ケースの入力カード群と最後のENDカードによって構成される。

#### 2) MAIN NAMELIST DATA card (第2群入力)

& INPUT .....&で区切られているNAMELIST形式の入力cardである。入力内容については、B.2節参照のこと。ここで入力されるデータがFREG-4の主要入力データである。

#### 3) HISTORY DATA card (第3群入力)

計算する燃料棒の照射履歴のdataを入力する。照射履歴は、出力、冷却水温度、冷却水圧力の変動のある時点における時間(または燃焼度)を入力する。ただし、1ステップ以上50ステップまでにしなければならない。入力型式は7F 10.0, 5I 2のFormat形式である。この入力の中の5I 2は後述の5)~8)入力群を制御するsignalの入力である。詳しくは、B.3節参照のこと。このHistory dataの最後にはデータ終了を表すカードを入れなければならない。この終了シグナルは-1.0でコラム1~10にパンチする。

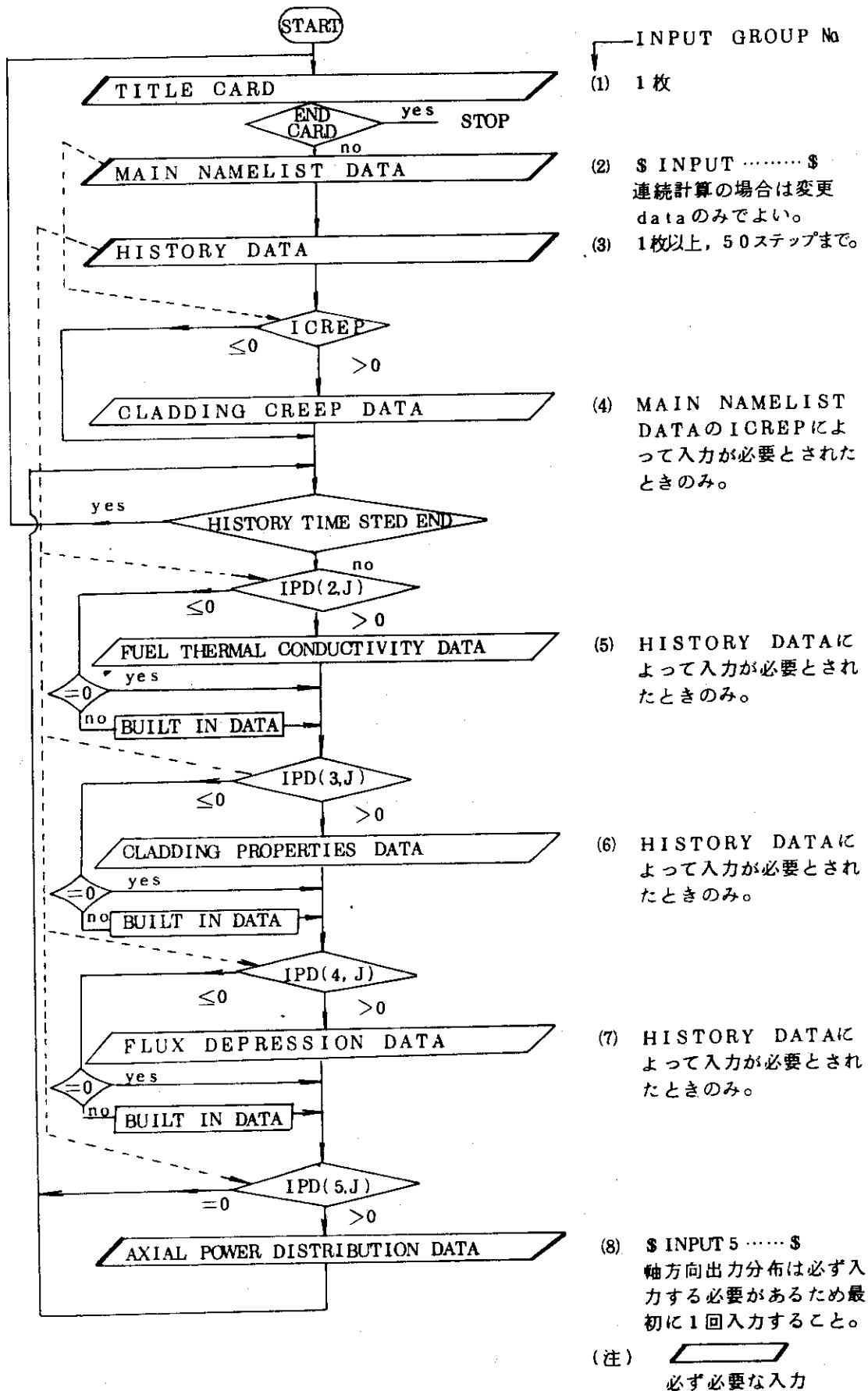


Fig. B.1 FREG-4 入力 DATA の構成および順序



## 4) CLADDING CREEP DATA card (第4群入力)

第2群のNAMELIST DATA中のOPTION signal, key word ICREPによって必要(ICREP<0)とされるとき, 入力されねばならない。入力データは, 時間に対する被覆管外直径変位値で, F 10.0, E 10.0のFormat形式で読込まれ, 20対まで許される。詳しくはB.6節参照のこと。このデータカード枚数は, key word ICREPと一致しなければならない。

## 5) FUEL THERMAL CONDUCTIVITY DATA card (第5群入力)

第3群のHISTORY DATAで入力が必要とされたときに読込まれる。入力型式は & INPUT 2 ……&のNAMELIST形式で, 30対まで許される。詳しくはB.4節参照のこと。

## 6) CLADDING PROPERTIES DATA card (第6群入力)

第3群のHISTORY DATAで入力を必要とされたときに読込まれる。入力型式は, & INPUT 3 ……&のNAMELISTで, 30対まで許される。詳しくは, B.4節参照のこと。

## 7) FLUX DEPRESSION DATA card (第7群入力)

このデータは, 燃料ペレットの半径方向熱中性子束分布である。第3群のHISTORY DATAで入力が必要とされたときに読込まれる。入力は, & INPUT 4 ……&のNAMELIST形式で, 20対まで許される。詳しくは, B.4節参照のこと。

## 8) AXIAL POWER DISTRIBUTION DATA card (第8群入力)

燃料の軸方向出力分布を与えるデータで, 第2群入力のNPOW+1個のデータが必要である。照射履歴に従ってこの分布を変更することも可能である。そのかわり, 最初のステップには必ず入力されねばならない。DATAは, & INPUT 5 ……&のNAMELIST形式で入力される。詳しくは, B.4節参照のこと。

**B.2 主入力データ**

FREG-4の主な入力変数は, 第2群の入力によって与えられる。この入力はNAMELIST形式である。

もし, 連続的に数ケースの計算を実行する場合, 第2のケースからは, この入力群中の変更のあるデータのみを与えればよい。ただし, この場合, 第2のケース以後のデータの単位系は, 原則として最初に与えた単位系のkey word KUNITで決定される。

第2群の入力変数のFORTRAN SYMBOL NAMEとその定義をTable B.1に示す。Table B.1の左欄はblock dataによる設定値を示す。この設定値のまま使用する場合は, 特に入力する必要はない。

**B.3 照射履歴データの入力**

## B.3.1 まえおき

FREG-4は, 時間(または燃焼度)に依存した照射履歴のパラメータを入力しなければならない。この照射履歴に関するデータは, 第3群として入力され, 最大50ステップまで与えることが許される。

計算の1ステップに関する情報は1枚のカードに納められる。

1枚のカード上のデータ構成, 形式をFig.B.2に示す。この節の説明にさいし, 図中に示す

Table B.1 Fortran symbol name and definition for 2nd input group

番号	FORTRAN NAME	単 位		説 明	Set in block data
		cm-kg系	Ft-lb系		
1	FRPUO2			重量比 $\text{PuO}_2 / (\text{PuO}_2 + \text{UO}_2)$	
2	FR35			重量比 $\text{U}^{235} / (\text{U}^{235} + \text{U}^{238})$	
3	FR40			重量比 $\text{Pu}^{240} / (\text{Total Pu})$	
4	FR41			重量比 $\text{Pu}^{241} / (\text{Total Pu})$	
5	FRDEN			ペレット密度/理論密度	
6	FRSIN(S)			組織変化した燃料の密度/理論密度	0.98
7	FRDENS			焼きしまりした燃料密度/理論密度	0.965
8	DFS	CM	INCH	ペレット直径	
9	DCI	CM	INCH	被覆管内径	
10	DCO	CM	INCH	被覆管外径	
11	LFUEL	CM	INCH	燃料柱長さ	
12	DSINZ	CM	INCH	組織変化している部分の外直径	
13	DVOIDZ	CM	INCH	ペレットの初期中心孔径	
14	LVOIDZ	CM	INCH	ペレットの初期中心孔長さ LVOIDZ > 0, ペレットスタック上部からの長さ LVOIDZ ≤ 0, ペレットスタック下部からの長さ	
15	KPLEN			プレナム存在の有無 KPLEN = -1 : 上部プレナムのみ KPLEN = -2 : 上部および下部プレナム有	-1
16	VPLENZ	CM <sup>3</sup>	INCH <sup>3</sup>	上部プレナム体積	
17	VPLENL	cm <sup>3</sup>	INCH <sup>3</sup>	下部プレナム体積	0.0
18	ATMOS	ATMOS-PHERES	ATMOS-PHERES	初期封入ガス圧	
19	TM	°C	°C	ペレット融点	2790
20	ROUF(S)	CM	INCH	ペレット表面粗さ (算術平均値)	0.00033
21	ROUC(S)	CM	INCH	被覆管内表面粗さ (算術平均値)	0.00017
22	SIGHF(S)	Watt CM <sup>2</sup> -°C	BTU HR-FT <sup>2</sup> -°F	冷却材-被覆管熱伝達係数 > 0 SIGHFの値を熱伝達係数とする。 = 0 冷却材をナトリウムとして熱伝達係数を計算する。 = -1 冷却材を水としてDITTUS-BEOLTERの式で計算する。 = -2 冷却材を水としてJENS-LOTTE Sの式で計算する。 = -3 飽和温度を境として-1, -2の双方を用いる。	-2

番号	FORTRAN NAME	単 位		説 明	Set in block data
		cm-kg 系	Ft - lb 系		
23	DE	CM	INCH	冷却材流路の相当直径 (SIGHF = -1, -3のときのみ)	
24	V	$\frac{M}{SEC}$	$\frac{FT}{SEC}$	冷却材速度 ( " )	
25	DTEMP(S)	°C	°C	炉心を通過する冷却材の軸方向温度差 ( $T_{OUTLET} - T_{INLET}$ )	
26	SINTEM	°C	°F	ペレット焼結温度 (MDEN=1のときのみ入力)	1750
27	DDISH	CM	INCH	ペレット・ディッシュの外直径	
28	HDISH	CM	INCH	" 深さ	
29	FRACHE			初期封入ガスの組成 ヘリウム/初期封入ガス	
30	FRACAR			" アルゴン/ "	
31	FRACH			" 水 素/ "	
32	FRACN			" 窒 素/ "	
33	FRACKR			" クリプトン/ "	
34	FRACXE			" キセノン/ "	
35	S	$\frac{CC}{gr(FUEL)}$	$\frac{CC}{gr(FUEL)}$	燃料に吸着されているガスの量 ( $H_2, N_2$ のみ)	
36	XX			吸着ガスの組成 $H_2 / (H_2 + N_2)$	
37	NOH			吸着ガス中の水素の挙動を指定するシグナル (注) 原プログラム (GAPCON-THERMAL-1) 内では常に NOH=1 とする。すなわち水素は被覆管と反応、又は被覆管よりもれ出てしまい、混合ガスの組成とはならないとしている。このため、この入力変数は無意味となっている。	1
38	ITYPE			原子炉型式, ITYPE = 1 (BWR), ITYPE = 2 (PWR)	1
39	IFLUX			= 0 : 高速中性子照射 > 0 : 熱中性子照射	1
40	FFBTF (ITYPE)			原子炉型式 ITYPE における 高速中性子束/ 熱中性子束の比 (例) FFBTF(2)=0.8 のように入力する。	
41	KOOL			1以上の整数値を指定すると冷却材の温度を被覆管内面温度とする。冷却材-被覆管熱伝達係数、被覆管温度計算は行なわない。	0
42	NPOW			計算を行なう燃料柱セグメント数 (最大20等分割)	

番号	FORTRAN NAME	単 位		説 明	Set in block data
		cm-kg 系	Ft - lb 系		
43	IPEAK			与えられた線出力密度 (履歴data 参照) が平均出力かピーク出力かを指定するシグナル。 > 0 平均出力を入力 ≤ 0 ピーク出力を入力	0
44	ICDF			内外圧力の差による被覆管の弾性変形を考慮するシグナル < 0 被覆管の弾性変形が考慮される。 ≥ 0 考慮されない。 (注) ICREP > 0 のとき, この弾性変形も考慮して, DATA が作られているならば ≥ 0 としなければならない。	-1
45	ICREP			被覆管クリープ変形を計算するOPTION > 0 時間対クリープ変形による半径 (内半径の変位 (CM OR / INCH)) の表を ICREP 枚入力する。(最大20) = 0 クリープしない。 = -1: BUCKLE の式使用	-1
46	IYIELD			被覆管耐力の計算を指定するシグナル = 0 : プログラム GAPCON-THERMAL-1 に用意された値を用いる。	0
47	MGAS			F. P. ガス放出モデルOption = 0 : 各セグメントで生成する F. P. アイソトープの生成を計算し, 放出率は全生成量に対する比とする。 = 1 : ペレット内と放出したガスは別途に計算される。各アイソトープの放出率は decay constant の函数と考える。	1
48	MGREL			F. P. ガス放出率の計算モデルOption = 0 : Hoffman Coplin モデル = 1 : 軸方向に分布した放出率を入力する。 = -1 : 温度による 2 領域モデル = -2 : 温度による 4 領域モデル = -3 : MATPRO version 9 モデル	0
49	GRELR			MGREL = 1 のとき, F. P. ガス放出率を入力する。軸方向分布で最大 5 個まで。 例, GRELR(1) = 0.1, 0.15, 0.2, 0.15, 0.1	

番号	FORTRAN NAME	単 位		説 明	Set in block data
		cm-kg 系	Ft-lb 系		
50	FPDIAL			F.P. ガス放出率を定数倍して使用する ときのその倍率係数。 (Hoffman Coplin のモデルについてのみ 有効, 使用するときはFPDIAL = 1 で なければならない)	1
51	NEXP			ペレットの線熱膨張係数の計算式を指定 するシグナル。 = 0 熱膨張は考慮しない。 = 1 ROTH & HALEMAN の式を用い る。(GAPCON) = 2 CONWAY FINCEL & HAIN の 式を用いる。(GAPCON-THERMAL-1)	2
52	MEXP			ペレットの熱膨張による変位量を計算する MODEL を指定するシグナル。(文献-1 参照) = 1 HALF CRACK MODEL (GAPCON-THERMAL-1 MODEL) = 2 PLASTIC MODEL (面積バランス) = 3 2 領域モデル (BRITTLE MODEL + PLASTIC MODEL) = 4 線膨張モデル	4
53	ISWELL			ペレットのSWELLING 量を計算する MODEL を指定する。 = 0 SWELLING を考慮しない。 = 1 GEITHOFF, et. al. MODEL (GAPCON ORIGINAL) を用いる。 = 2 REVISED GAP CLOSURE MODEL (GAPCON-THERMAL-1 に追加されたMODEL) を用いる。	2
54	MREST			ペレットの再組織化による計算を行なうシ グナル = 0 再組織化を行なわない。 > 0 再組織化を考慮し, 寸法変化を計算し て次のTime-Step の初期値とする。	1
55	MDEN			ペレットのDENSIFICATION による変位 を計算するシグナル = 0 DENSIFICATION は行なわない。 = 1* HALDEN DENSIFICATION MODEL を用いる。 = 2* GAPCON-THERMAL-2 のMODEL を用いる。	1

番号	FORTRAN NAME	単 位		説 明	Set in block data
		cm-kg 系	Ft-lb 系		
56	MRELOC			ベレットのRELOCATIONによる変位を計算するシグナル = 0 RELOCATIONは行なわない。 = 1 GAPCON-THERMAL-2使用モデルを用いる。	1
57	II PROF			燃料温度分布をPRINTするシグナル。 = 0 プリントしない。 = 1 詳細温度分布とライン・プリンタによる温度分布の図をプリントする。 ただし、照射履歴のコントローラ $ IPD(1, J) $ が2以上でなければ出力されない。	0
58	MCONV			GAP-CONDUCTANCEの収束繰返し計算の方法を指示する。 = 0 プログラムGAPCON-THERMAL-1と同じであるが、収束加速因子、及び体積平均温度収束繰返し計算の回数によつての予測値の設定に改良がなされている。 = 1 NEWTON-RAPHSON法によつて収束させる。	0
59	MREV 1			GAP-CONDUCTANCEの計算法についての指示 = 0 Ross & Stoute 修正式。 ホットギャップモデル-1使用。 = 1 ROSS & STOUTEの修正式使用。 ホットギャップモデル-2使用。 = -1 RESAR-41の式を使用する。 = -2 MATPRO-version 9の式を使用する。 (MREV1=-1, -2共ホットギャップモデル-1使用)	1
60	IOUT 1			プログラムに用意されたオプションの一覧表をプリント・アウトするシグナル。 = 0 プリント・アウトしない = 1 プリントアウトする	0

番号	FORTRAN NAME	単 位		説 明	Set in block data
		cm-kg 系	Ft-lb 系		
61	LGASPR			F.P ガス放出についての情報をプリントアウトするシグナル = 0 プリント・アウトしない = 1 プリント・アウトする	0
62	NUCLEI			FISSION PRODUCT (ガス)のRADIO-ACTIVITYを計算しプリント・アウトするシグナル。 = 0 計算しない。 = 1 計算する。	0
63	ISPA			運転履歴に依存させて、変化させたい入力パラメータ (本表中に(S)で示した入力変数のみに有効, 詳細はB.5節に述べる) の数を示す。最大1caseにつき3個。	0
64	NAMSP			ISPAによって指定された変化させたい入力変数名を指示する。変数名はコード化された番号によって与えなければならない。 ISPA = 0 のときこの入力は無効となる。	
65	NHIST			運転履歴の独立変数を指定する。 = 0 時間 (DAY) = 1 燃焼度 (MWD/MTM)	0
66	KUNIT			入力データの単位系を指示する。 = 0 FT-LB-BTUを主とした単位系 = 1 CM-KG-KCAL " " ここで選ばれた単位系は以後に行なわれる入力についても、ほぼ共通している。以後の各入力dataの単位は各々の項で参照されたい。	1

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧入力コントロールデータ (IPD)
時間または燃焼度	線出力密度	冷却材入口温度	冷却材圧力	< 補助 DATA >			
	kW/ft	°F	psi				
	W/cm	°C	kg/cm <sup>2</sup>				

notes : 1. 単位の上段は KUNIT = 0 のときの単位, 下段は KUNIT = 1 のときの単位  
2. FORMAT (7F10.0, 5I2)

Fig.B.2 Constitution of irradiation history data card

指示番号①, ②~⑧を使用する。

以下, 入力カードの①, ②~⑧の順に従って説明する。⑤, ⑥, ⑦の補助データの使用法については別途 B. 5 節に詳述する。

照射履歴データ入力の後には, コラム 1~10 に -1.0 をパンチしたカードを追加しなければならない。これが照射履歴データ入力の終了シグナルになる。

### B. 3. 2 照射履歴データ

#### ① 独立変数：時間または燃焼度

照射履歴の最も基本となる変数で, 時間または燃焼度である。入力第 1 ステップを基準とした積算値で与える。時間で指定するか燃焼度で指定するかは, 第 2 群入力のオプション選択の key word NHIST によって決定される。すなわち, NHIST=0 ならば時間 (単位 day), NHIST=1 ならば燃焼度 (単位 MWd/MTM) である。

Fig-B. 2 の②~⑧のデータは, この独立変数に対応した値が入力されねばならない。

時間を独立変数として選んだ場合, 100 日を越える時間間隔 ( $\Delta T$ ) が履歴として与えられると, プログラムは自動的にその時間間隔を等分割して履歴を作成する。その分割数は,  $1 + \Delta T(\text{日}) / 100(\text{日})$  の整数値とし, もし  $\Delta T / 100$  が整数値ならば, その数に置きかえる。また, 分割が行なわれた場合, ②~⑦のパラメータは, ①によって直線内挿した値とする。

燃焼度が独立変数として選ばれた場合には, 上記のような分割は行なわない。

#### ② 線出力密度

第 2 群入力を入力された IPEAK によって選択された燃料棒平均出力, あるいはピーク出力を与える。すなわち, IPEAK > 0 ならば平均出力, IPEAK ≤ 0 ならばピーク出力を与えねばならない。これは, もし平均出力で与えなければ IPEAK > 0, ピーク出力で与えなければ IPEAK ≤ 0 にするということである。

出力変化 ( $\Delta P$ ) が 100 w/cm を越えて与えられた場合には, 時間間隔が  $1 + \Delta P(\text{w/cm}) / 100(\text{w/cm})$  で与えられる整数値個に等分割され, 自動的に履歴データを作成する。計算は, ①, ②によって作成された履歴に従って行なわれる。入力した点については必ず計算される (Fig. B. 3 参照)。入力データは最大 50 ステップまで計算されるが, 分割された場合最大 100 ステップまで許される。

なお, 時間および線出力密度の増加が大きく, 両方共に分割が必要とされた場合, 必要とされる分割数の大きい方に従って分割され, 履歴データが作成される。

#### ③ 冷却材入口温度

冷却材の軸方向温度分布は, この値を基準として計算される。すなわち, 冷却材軸方向温度分布は, 第 2 群の入力 DTEMP (冷却材出口温度と入口温度の差) および後述の軸方向出力分布により計算される。入力値の単位は °F または °C である。この単位は, 第 2 群入力の key word KUNIT によって °F から °C へあるいは °C から °F へ変換される。

#### ④ 冷却材圧力

FREG-4 では冷却材圧力の軸方向分布を考えない。常時, その履歴ステップ内では一定とする。入力値の単位は psi または kg/cm<sup>2</sup> である。この単位は第 2 群入力の key word KUNIT によって psi から kg/cm<sup>2</sup> へあるいは kg/cm<sup>2</sup> から psi へ変換される。



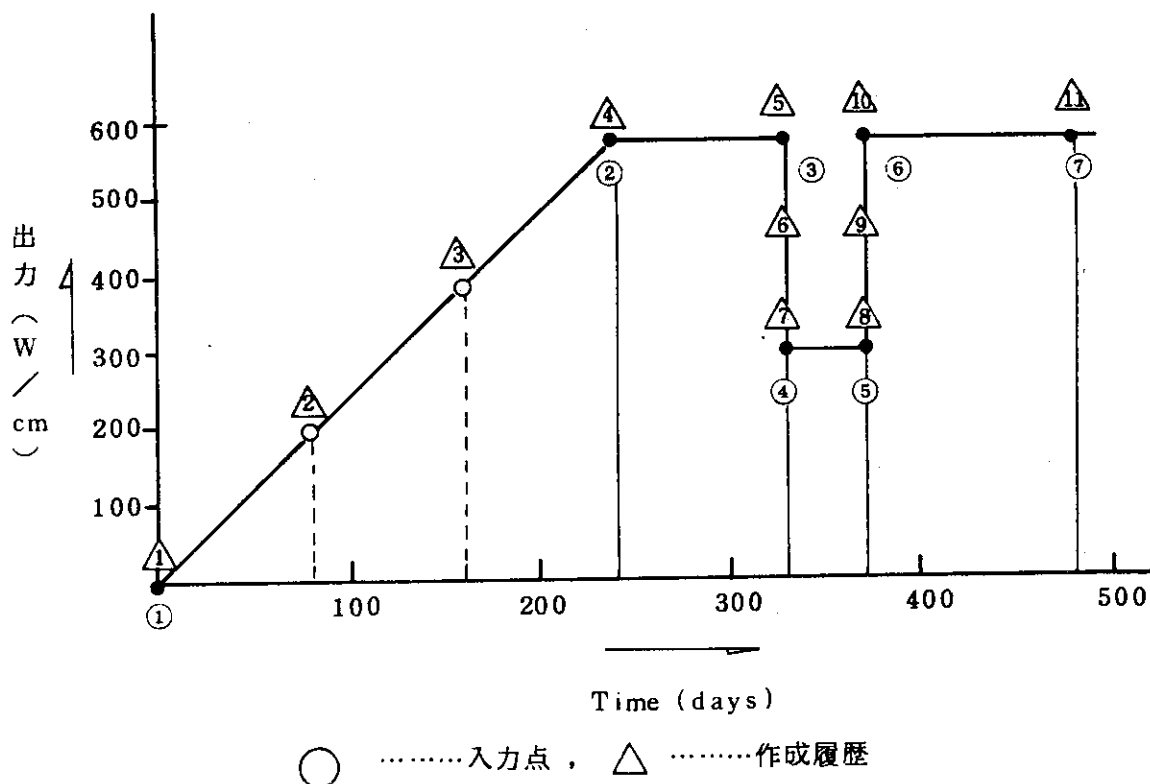


Fig. B.3 時間による履歴の作成例

⑤~⑦ 補助データ

②~④以外に履歴をもつデータを選び変化させたい場合に使用する。選べるパラメータ、およびその使用方法は B.5 節「補助照射履歴データ」を参照されたい。

⑧ 入力コントロールデータ

履歴データ中に 5 個のコントローラが用意されている。このコントローラは、各履歴ステップ毎に変更することが可能である。シンボル名は IPD (I, J) である (I: コントローラの種類, J: 計算ステップ No.)。

1) 温度分布プリントアウトコントローラ, IPD (1, J)

このコントローラは、第 1 番目のコントローラで、この値を変えることにより次のような温度分布の出力を行う。N = IPD (1, J) として、

N = 0: 軸方向各 section の半径方向温度分布はプリントされない。

N = 1: 軸方向各 section の半径方向温度分布を詳細にプリントアウトする。

N = 2: 上記 1 のプリントアウトの外、ラインプリンタによる温度分布図を出力する。

N < 0: 1 ステップの計算結果を 2 ページに要約してプリントする。ただし、第 2 群入力 II PROF が 1 以上でなければならない。

2) 燃料熱伝導率コントローラ, IPD (2, J)

このコントローラは、第 2 番目のコントローラで、この値を変えることにより、照射履歴に従って燃料熱伝導率の算出式を切替えることが可能である。このコントローラの値によって次のようなことが実行できる。

- = 0 : 前ステップと同じ表または計算式を用いる。そのため計算の第1ステップで、0を指定してはならない。
- = N : 温度に対する熱伝導率の表を入力しなければならない。入力は一対のデータで、B.4節に述べる方法によって入力されなければならない。N ≤ 30 である。
- = -N : プログラムに組込まれた計算式が使用される。組込み計算式は次の通りである。
  - = -2 : WARD Design equation
  - = -3 : Godfrey equation
  - = -4 : Lyons equation

### 3) 被覆管熱的、機械的物性値のコントローラ, IPD (3, J)

このコントローラは第3番目の制御数で、この値によって、被覆管に関する熱的、機械的物性値が選択される。

- = 0 : 前ステップで使用されたと同じ値(表)が用いられる。そのため、計算の第1ステップでは0を指定することは許されない。
- = N : 温度に対する各パラメータの表を入力する。入力は一対のデータで、B.4節に述べる方法によって入力されなければならない。  
N ≤ 30 である。
- = -N : プログラムに組込まれている表を用いる。
  - = -2 : 被覆管をジルカロイ-2として、組込みの表を用いる。
  - = -4 : 被覆管をジルカロイ-4として、組込みの表を用いる。
  - = -9 : 被覆管をステンレス鋼として、組込みの表を用いる。

上記各物性値の組込みの値は、Table B.2, B.3, B.4に示す通りである。なお、ジルカロイ-4のデータは未検討である。使用にさいしては変更の必要があろう。

### 4) 燃料ペレット内半径方向熱中性子束分布のコントローラ, IPD (4, J)

このコントローラは第4番目の制御数で、この値によって燃料ペレット内半径方向熱中性子束分布が決定される。

- = 0 : 前ステップと同じ表を用いる。または、熱中性子束のdepressionを考慮せずフラットと考える。
- = N : 直径対熱中性子束の相対値の表を入力する。入力は一対のデータである。この入力はB.4節に述べる方法によって入力されなければならない。N ≤ 20 である。
- = -1 : プログラムに組込まれた値が使用される。それは、副プログラムDEPRESによって計算される。

### 5) 軸方向出力分布のコントローラ, IPD (5, J)

このコントローラは、第5番目の制御数で、この値によって燃料棒の軸方向の出力分布が決定される。

- = 0 : 前ステップと同じ分布が用いられる。そのため、第1ステップにおいて0を指定することは許されない。
- = 1 : 新しい出力分布が入力される。この入力は3.4節に述べる入力法によって入

力されねばならない。計算の第1ケース第1ステップは必ず1とし、入力カードが用意されねばならない。

Table B.2 20%冷間加工316ステンレス鋼の物性値

温 度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	熱伝導率 ( $\text{w/cm}^{\circ}\text{C}$ )	降伏強さ ( $\text{kg/cm}^2$ )	ヤング率 ( $\text{kg/cm}^2$ )	ポアソン比	線熱膨張係数 ( $\text{cm/cm}^{\circ}\text{C}$ )	Meyer 硬さ ( $\text{kg/cm}^2$ )
25	0.145	6350	1972000	0.267	16.45E-6	19200
50	0.148	6150	1968000	0.268	16.60E-6	18400
75	0.152	6000	1960000	0.270	16.75E-6	17800
100	0.155	5850	1945000	0.272	16.87E-6	17500
125	0.159	5730	1925000	0.274	17.00E-6	17200
150	0.162	5650	1910000	0.276	17.12E-6	17000
175	0.166	5590	1890000	0.278	17.23E-6	16800
200	0.169	5540	1872000	0.280	17.32E-6	16600
225	0.173	5500	1850000	0.282	17.42E-6	16480
250	0.176	5450	1835000	0.283	17.48E-6	16350
275	0.180	5400	1815000	0.285	17.55E-6	16220
300	0.183	5350	1795000	0.287	17.65E-6	16100
325	0.187	5320	1785000	0.288	17.73E-6	16000
350	0.190	5300	1755000	0.290	17.84E-6	15900
375	0.194	5280	1735000	0.292	17.94E-6	15850
400	0.197	5260	1715000	0.294	18.05E-6	15820
425	0.201	5230	1695000	0.297	18.14E-6	15760
450	0.204	5210	1680000	0.299	18.22E-6	15680
475	0.208	5200	1650000	0.301	18.32E-6	15550
500	0.211	5120	1625000	0.302	18.40E-6	15390
525	0.215	5020	1600000	0.304	18.50E-6	15180
550	0.218	4900	1575000	0.306	18.56E-6	14850
575	0.221	4750	1550000	0.308	18.65E-6	14400
600	0.225	4600	1525000	0.309	18.71E-6	13750
625	0.229	4250	1490000	0.311	18.85E-6	12850
650	0.232	3900	1454000	0.313	18.89E-6	11650

Table B.3 ジルカロイ-2の物性値

温 度 (°C)	熱伝導率 (w/cm°C)	降伏強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング率 (kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線熱膨張係数 (cm/cm°C)	Meyer硬さ (kg/cm <sup>2</sup> )
25	0.126	3150	972000	0.370	5.83E-6	9470
100	0.134	2450	914000	0.400	6.25E-6	7360
200	0.145	1670	850000	0.446	6.66E-6	5030
300	0.156	1110	780000	0.492	6.97E-6	3340
400	0.170	850	710000	0.492	7.18E-6	2560
500	0.184	700	640000	0.492	7.34E-6	2110

Table B.4 ジルカロイ-4の物性値

温 度 (°C)	熱伝導率 (w/cm°C)	降伏強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング率 (kg/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	線熱膨張係数 (cm/cm°C)	Meyer硬さ (kg/cm <sup>2</sup> )
25	0.129	3150	972000	0.370	5.83E-6	9470
100	0.136	2450	914000	0.400	6.25E-6	7360
200	0.143	1670	850000	0.446	6.66E-6	5030
300	0.152	1110	780000	0.492	6.97E-6	3340
400	0.164	850	710000	0.492	7.18E-6	2560
500	0.180	700	640000	0.492	7.34E-6	2110

#### B.4 照射履歴に伴つて変更しうる物性値, モデル

前節の入力コントローラによって必要とされるとき, 各履歴ステップに応じ, 読みこまれる。これらのデータとして, 1) 燃料ペレット熱伝導率, 2) 被覆管の熱的・機械的物性値, 3) 燃料ペレット内半径方向熱中性子分布, 4) 軸方向出力分布がある。

これらのデータは, コントロールデータ (B.3節に述べたコントローラ) によって指定された時のみ, 付加すればよく, 常に入力しなければならないものではない。ただし, 計算の第1ステップで4)に述べる軸方向出力分布は計算条件として, 必ず入力しなければならない。

##### 1) 燃料熱伝導率

第2番目のコントローラがNのとき (IPD (2, J) = N) だけ必要になる。入力は, NAMELIST法である。NAMELIST名はINPUT2で, 入力に必要なFORTRAN名等をTable B.5に示す。ここで入力する温度・熱伝導率は表に示す単位で入力されねばならない。第2群中で入力された単位切替key word KUNITによる変換は行なわれない。コントローラを負にする (プログラム組込みの熱伝導率を使用) 場合を除くと, 計算の第1ステップでは, このデータを必ず与えなければならない。

##### 2) 被覆管の熱的・機械的物性値

このデータは, 被覆管に関する熱的・機械的物性値で照射履歴と共に読み込まれる第3番

Table B.5 燃料ペレット熱伝導率入力について  
(NAMELIST名, INPUT 2)

	FORTRAN変数名	単 位
温 度	CF1	℃
熱 伝 導 率	CF2	W/cm-℃
熱 伝 導 率 (再結晶化後)	CF3	W/cm-℃

目のコントローラがNのとき (IPD (3, J) = N) のみ必要となる。入力は NAMELIST法で、NAMELIST名は、INPUT 3である。入力に必要な FORTRAN 変数名等を Table B.6 に示す。これらの入力値は表に示されるように第 2 群で入力された単位変換の key word KUNITの値に従った単位系で入力されねばならない。

### 3) 燃料ペレット内熱中性子束分布

このデータは、燃料ペレット内熱中性子束分布に関するもので、照射履歴と共に読み込まれた第 4 番目のコントローラがNのとき (IPD (4, J) = N) のみ必要とされる。入力は、NAMELIST方式で、NAMELIST名 INPUT 4である。入力に必要な FORTRAN 変数名等を Table B.7 に示す。入力値のうち、直径の単位は、単位変換 key word KUNIT の値に応じた単位で入力されねばならない。

### 4) 軸方向出力分布

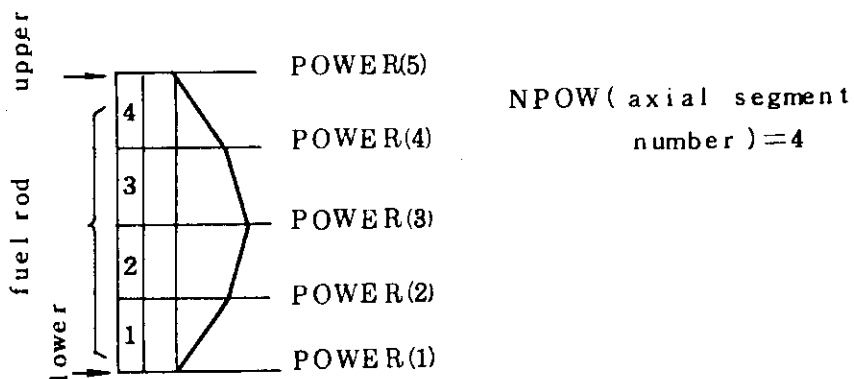
このデータは、燃料棒の軸方向出力分布を定めるもので、照射履歴と共に読み込まれた第 5 番目のコントローラが0でないとき (IPD (5, J) ≠ 0) のみ必要になる。入力は NAMELIST方式で、NAMELIST名 INPUT 5である。入力データは、第 2 群入力の NPOW で与えられた数より 1 多く必要である。燃料棒の最下部の出力分布を POWER(I) とし順次上方に NPOW + 1 までの出力分布を入力する。入力値は、線出力密度そのものの値でも相対値でもよい。この出力分布は、第 2 群の入力で与えられた IPEAK (軸方向出力分布に対して、履歴データ中の線出力密度が平均値であるかピーク値であるかを指定する) との関係を考えて入力しなければならない。なお、計算対象となる axial segment の相対出力は、その segment の上下端の分布の平均値 (POWER(I) + POWER(I + 1)) / 2) で与えられる。この出力分布の入力例を Fig. B.4 に示す。なお、このデータは、計算の第 1 ステップでは必ず与えねばならない。

Table B.6 被覆管熱的・機械的物性値の入力について  
(NAMELIST名, INPUT3)

	FORTRAN 変 数 名	単 位	
		KUNIT=0	KUNIT=1
温 度	AA1	°F	°C
熱 伝 導 率	AA2	BTU/hr-ft-°F	W/cm-°C
耐 力	AA3	psi	kg/cm <sup>2</sup>
ヤング率	AA4	psi	kg/cm <sup>2</sup>
ポアソン比	AA5	-	-
線熱膨張係数	AA6	1/°F	1/°C
メイヤー硬度	AA7	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>

Table B.7 燃料ペレット内径方向熱中性子束分布の入力について

	FORTRAN 変 数 名	単 位	
		KUNIT=0	KUNIT=1
直 径	RV1	in	cm
熱中性子束相対値	RV2	-	-



Example of input card

b&INPUT5 POWER(1) = 0.01, 0.7, 1.0, 0.7, 0.01&

Fig. B.4 Input example of fuel rod axial power distribution  
(under NPOW = 4 and IPEAK = 0 condition)

## B. 5 補助照射履歴データ

先にB.3節でふれたように、FREG-4は照射履歴のパラメータとして、線出力密度、冷却材入口温度、冷却材圧力の3つを用意している。さらにこれらに加えて例えば冷却材出口温度等のパラメータを照射履歴に依存させて変化させたい場合、ここで述べる入力によって処理することができる。

### B. 5.1 照射履歴に依存して変化させることができるパラメータ

照射履歴と共に入力し、照射履歴に応じて変えることができるパラメータは、以下の通りである。

#### 1) 冷却材出口温度

第2群の入力の中のDTEMP(冷却材出口と入口の温度差)を照射履歴と共に変化させる。

#### 2) 再組織化するときのペレット密度

第2群入力のうちFRSIN(ペレットが再組織化するときのペレット密度)

#### 3) ペレット外表面粗さ

第2群入力のペレット外表面粗さ、ROUF

#### 4) 被覆管内表面粗さ

第2群入力の被覆管内表面粗さ、ROUC

#### 5) 冷却材-被覆管熱伝達係数

冷却材-被覆管表面熱伝達係数を固定値とするが、照射履歴に従って変化させる。

### B.5.2 使用法

このデータを使用して計算したいとき、その使用法は以下の通りである。

- 1) 照射履歴に依存して変化させたいパラメータを決定する。ただし、選べるパラメータの種類の数、最大3個までである。これを決定したら、第2群の入力のISPAにその個数を入力する。
- 2) 決定したパラメータが何であるかを指定する。そのために、第2群入力のNAMSPにパラメータのコード番号を入力する。NAMSPの値によって選定されるパラメータをTable B.8に示す。
- 3) 選定したパラメータの照射履歴による変化値を第3群入力カードの41~70コラムに入力する。

Table B. 8 照射履歴データに追加するパラメータ

NAMSP	Explanation	unit
1	冷却材出口-入口温度差	℃
2	再組織化するときのペレット密度	fraction
3	ペレット外表面粗さ	cm
4	被覆管内表面粗さ	cm
5	冷却材-被覆管熱伝達係数 (固定値であるか時間依存)	W/cm <sup>2</sup> -℃

B.5.3 使用入力例

冷却材温度差と被覆管表面熱伝達係数を履歴性をもつデータに切替えることを考える。

1) 第2群入力のISPA, NAMSPに、次のように数値を入れる。

ISPA = 2 (パラメータが冷却材温度差と熱伝達係数の2個である)

NAMSP (1) = 1, NAMSP (2) = 6 (Table B.8を参照すれば、冷却材温度差のコード番号は1, 熱伝達係数は5である)

2) 第2群の照射履歴カードの41~50コラムに冷却材出口と入口の温度差を, 51~60コラムに熱伝達係数を入力する (Fig.B.5参照)。この場合, パラメータは2個であるから61~70コラムはブランクである。

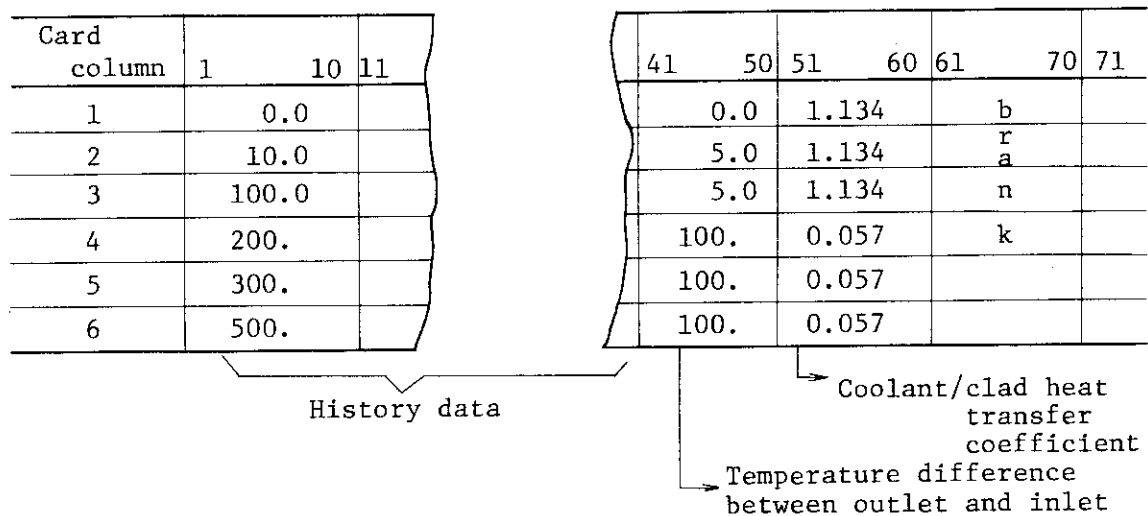


Fig. B.5 Example using history - depended parameter on irradiation history card (3rd input group)

B.5.4 使用上の注意

1) 照射履歴データについて説明したように, 100日あるいは100 w/cmをこえるような時間, 出力変化の入力は, プログラム内で自動的に小分割が行なわれる。そのような場合には, ここで与えられたパラメータも, 時間に対して直線内挿の値が用いられる。

2) このパラメータの単位は, 第2群入力中のKUNITの値のいかんにかかわらず, TableB8に記載された単位で入力されねばならない。

3) ここで述べたオプションの各パラメータは, プログラム内で使用されている変数を直接置き換えるようにプログラムされている。すなわち, NAMSP = 1, 2, 3, 4.によって与えられる値は, 第2群入力中のデータ, DTEMP, FR SIN, ROUF, ROUC を置き換える。

このために, 連続したケースの計算を行うときには, 新しいケースの最初の入力にさいしそれぞれの値を再設定しなければならない。もしこれを行なわないと, 前ケースの最終値が, 次ケースの初期値として計算される。

4) NAMSP (I) = 5 (冷却材-被覆管表面熱伝達係数を変化させる) のとき, これによって与



えられる数値は、第2群入力中のSIGHFに置き換る。そのため、正数値ならば、その値を熱伝達係数とし、0または負の数値の場合は、SIGHFについて説明したオプションと同性値のものとして取扱われる。

5) ISPA=0と与えたときには、たとえ照射履歴カード中に、この節で説明した追加データがパンチされていたとしても(コラム41~70), すべて無視される。

6) ISPAに与えた数とNAMSPに与えた数が一致しない場合、追加の履歴データの個数はいずれか小さい方の数と解釈する。

例えば、ISPA=3, NAMSP(1)=1あるいはISPA=1, NAMSP(1)=1, NAMSP(2)=2のとき、いずれもISPA=1, NAMSP(1)=1と解釈し、照射履歴入力カードのコラム41~50に与えられた数値のみしか用いられない。

### B.6 被覆管クリープダウンデータの入力

FREG-4の計算に、被覆管クリープダウン量をプログラム外から与えたいとき、入力データとして時間対変化量の表を入力して計算を遂行することができる。

まず、第2群入力中のICREPの値として、次に述べるデータカードの枚数(正整数)を入力する。

計算に使用するクリープダウン量データは、入力の第4群として入力される。入力形式はFig.B.6に示す通りである。

クリープダウン量は、履歴データによって与えられる照射時間について上記入力値から、直線内挿によってえられる。このえられた被覆管変位量は、被覆管の全変位量に加算される。したがって、クリープダウン変位量の符号は、負となるので、マイナス(-)を付して入力されねばならない。入力の照射時間の単位はhrであり、第2枚目よりの時間は第1枚目の時間を基準とした積算時間である。ここで入力された時間の単位はhr, 照射履歴の時間の単位はdayであるが、プログラム内で単位変換が行なわれる。

### B.7 サンプルインプットデータ

1つのインプットデータのサンプルをFig.B.7に示す。これは、副プログラムDATAPRによって入力カードイメージを出力したものである。

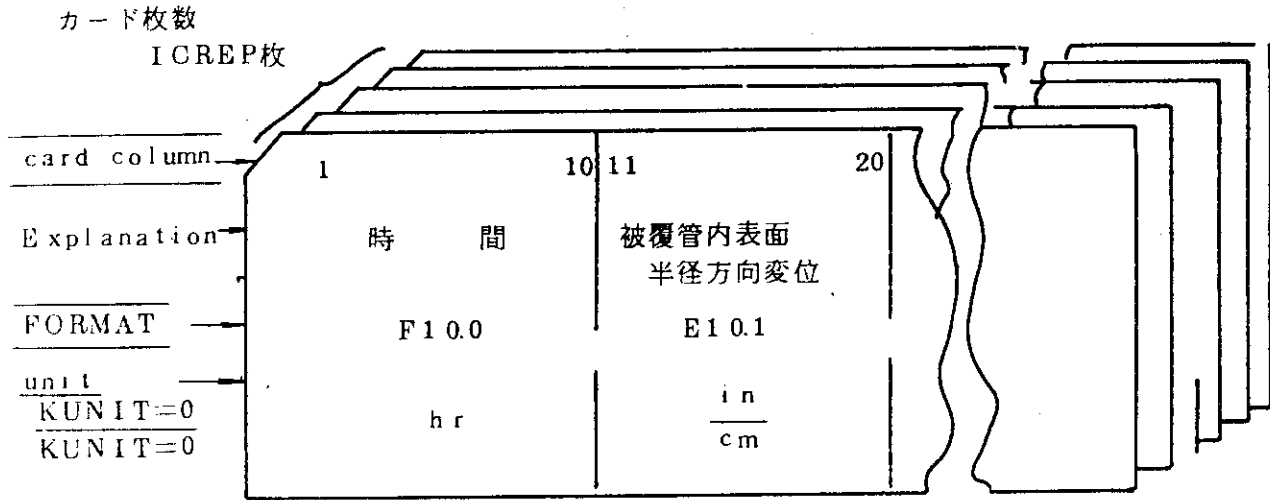


Fig. B.6 Input card FORMAT of cladding creep down data

```

INPUT DATA LIST
-----
CARD NO. ....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8

1.  A SAMPLE DATA OF TEST RUNS FOR PUBLISHING A JAERI-M REPORT.
2.  &INPUT
3.  FR35=0.10,FRDEN=0.95,FRSIN= 0.98, DFS=1.085,DCI=1.090,DCO=1.278,
4.  LFUEL=59.98,VPLENZ=1.58, ATMOS=1.0,TM=2800.,ROUF=0.00015,ROUC=0.00008,
5.                                     ROUF=0.00033,ROUC=0.00017,
6.  DTEMP=0.0, DE=1.3343, V=5.035, ITYPE=1,ICREP=-1,IIPROF=1,
7.  SINTEM=1750.,DDISH=0.0,HDISH=0.0,FRACHE=1.0, FRACN=0.0,
8.  DVOIDZ=0.18,LVOIDZ=12.0,
9.  SIGHF=-1.,NOH=1,IFLUX=1,NPOW=10,IPEAK=0,ICDF=-1,NEXP=2,MEXP=4,
10. MREST=2,MCONV=1,MRELOC=1,MDEN=1,MREV1=1,NHIST=0,KUNIT=1,NUCLEI=0,
11. LGASPR=1,MGAS=1&END
12. 0.0 0. 25. 1.0 +1-4-2-1 1
13. 0.00004000 0. 240.0 34.144 -1
14. 0.04170000 100.0 240.0 34.144 -1
15. 0.08336000 200.0 240.0 34.144 -1
16. 0.12502000 300.0 240.0 34.144 -1
17. 0.16668000 400.0 240.0 34.144 -2
18. 0.33332000 0.0 240.0 34.144 -1
19. 0.33336000 0.0 25. 1.0 -1
20. -1.
21. &INPUT5
22. POWER(1)= 8.5, 9.5, 10.28,11.0,11.7,12.14,12.57,13.0,13.28,13.43,13.5&END
23. STOP

END OF CARD ....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
    
```

Fig. B.7 A sample data of FREG-4.

## Appendix C プログラムリスト(マイクロフィッシュ)

FREG-4のプログラムリストをマイクロフィッシュで収録した。巻末に添付する。