

JAERI-M

5728

GAPCON-THERMAL-1 プログラム注解

1974年6月

原山 泰雄・泉 文男・藤田 操・栗山 實
内田 正明・山田 礼司・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、お申しこしてください。

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.

GAPCON-THERMAL-1 プログラム注解

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，藤田 操，栗山 實
内田正明，山田礼司，石橋明弘*

(1974年5月20日受理)

酸化燃料ピンのギャップ熱伝達，計算コードGAPCON-THERMAL-1 (BNWL-1778) を FACOM230-60 および CDC6600 で使用可能なように変換した。この報告書は，変換されたソースプログラムとプログラムに組込まれている主要な物性値，計算式，モデル等の検討をまとめたものである。物性値関係については，他の文献とも比較し，値の妥当性を吟味し，結果は図表化し，入力と出力例を付した。

JAERI-M 5728

A commentary on the program GAPCON-THERMAL-1

Yasuo HARAYAMA, Fumio IZUMI, Misao FUJITA,
Minoru KURIYAMA, Masaaki UCHIDA, Rayji YAMADA
and Akihiro ISHIBASHI*

Division of Reactor Safety, Fuel Reliability Laboratory-1

(Received May 20, 1974)

Program GAPCON-THERMAL-1 (C. R. Hann, C. E. Beyer and L. J. Parchen, "A Computer Program for Calculating the Gap Conductance in Oxide Pins", BNWL-1778, September 1973) is converted such that it may be used with computer FACOM 230-60 or CDC 6600.

The results of reviewing material properties, relationships and model incorporated in the program are described. The values of material properties are compared with those reported in the literature. The values evaluated are given in figures.

* Century Research Center Corporation

目 次

1	はじめに	1
2	コードの検討	2
2.1	GAPCON-THERMALの来歴	2
2.2	プログラムの内容	2
(1)	ギャップ熱伝達率	2
(2)	混合ガスの組成	2
(3)	ギャップの幅	3
(4)	ペレットの熱伝導率	4
(5)	被覆管の物性	4
(6)	中性子束ひずみ	4
(7)	冷却材	5
(8)	入力書式	5
3	計算の流れ	6
4	モデルと物性値	11
(1)	ジルカロイ被覆管の物性値	11
(2)	UO ₂ の熱伝導率	12
(3)	ポアによるUO ₂ の熱伝導率の補正係数	14
(4)	UO ₂ の熱膨脹率	14
(5)	UO ₂ の組織変化温度	14
(6)	UO ₂ ペレットのFPガス放出率	15
(7)	冷却水-被覆管の熱伝達係数	16
(8)	UO ₂ の比熱	16
5	利用上の問題点	35
(1)	安全についての保守性	35
(2)	接触熱伝達	36
(3)	プログラムの収斂法	39
(4)	燃料棒表面における熱伝達率	41
(5)	接触圧力を求める計算式の検討	42
6	今後の課題	45
7	ソースプログラムおよび出力例	45
8	謝 辞	46
	文 献	46

1 はじめに

さきに公表された“GAPCON プログラム” (HEDL-TME-72-128) が高速炉用燃料ピンを基にしたモデルを主体とし、若干の変更を加えて熱中性子炉用に改訂しているのに対し、GAPCON-THERMAL-1 (BNWL-1778) は、さらに、これを改造して、熱中性子炉用のモデルに置きかえて作られたものである。

GAPCONからGAPCON-THERMAL-1への改造の主な点はペレットのスウェリングモデルのオプション追加、被覆管のクリープに関するオプション追加、燃料を軸方向にセグメント化することによるFPガス放出モデルの2次元化、被覆管の弾性変形モデルの修正、ペレット蓄積エネルギーの計算プログラムの新設、ペレット熱伝導率、燃膨張率計算式の改訂、ジルカロイ被覆管の物性値変更などである。

GAPCON-THERMAL-1は燃料と被覆管の材質と寸法、封入ガスの組成、軸方向の出力分布などを入力し、燃焼度と出力密度をパラメータとして、ギャップ熱伝達率、温度分布、体積平均温度、FPガス放出割合、燃料-被覆管の熱的、機械的状态、蓄積エネルギー等を計算するプログラムである。

なお、このコードは、原著まえがきにもある通り、燃料の設計コードとして用いるべきではなく、事故解析のために使用する一連の計算コードの一つとして使用すべきものである。

2 コードの検討

2.1 GAPCON-THERMAL の来歴

GAPCON-THERMAL-1 は、冷却材喪失事故時の直前における燃料ペレット蓄積エネルギーの評価に必要な燃料ペレットの温度分布を算出するための主要因子であるギャップ熱伝達率の計算を主目的とするコードである。したがって、このコードを燃料の設計コードとして用いるべきではない。

USAECは軽水炉燃料の炉内における焼きしまりが、ギャップ熱伝達率にどのように影響するかを評価するため、先にGAPCON⁽¹⁾を使用することを薦めたが、その後、GAPCONコードの検討が進むにつれて、初期ギャップが広い燃料を長期間照射した場合のギャップ熱伝達率が、他のコードによる予測値や実験データに比してあまりにも低く評価されることが判明した⁽²⁾。

GAPCON-THERMAL-1 は、先にUSAECの依頼をうけてWestinghouse Hanford Companyが開発したGAPCONをさらに、Battelle Pacific Northwest LaboratoriesがUSAECの依頼によって改造したコードであり、GAPCONとの混同をさけるためにGAPCON-THERMAL-1と改名されている。

さきのGAPCONの基になったコードは高速炉用燃料棒のコードで、これを熱中性子炉用に改造したとはいうものの、GAPCONの中には高速炉用燃料ピンの照射データによったモデル（たとえばFPガス放出モデルやスウェリングモデル）が含まれていた。これに対して今回の改訂版は、さらに熱中性子炉用に適するように改造しているため“THERMAL”をコード名に含ませてあり、今後さらに改訂が進められてゆく予定であるため今回はその初版としてプログラム名の末尾に-1がつけられている。

2.2 プログラムの内容

(1) ギャップ熱伝達率

ギャップ熱伝達率の計算はRoss & Stout⁽³⁾の式を若干修正して使用している。ギャップ熱伝達率の評価に際して、その主要因子となるのは、ギャップガスの熱伝導率であり、ギャップが存在する時はギャップ幅、ギャップが消失した場合は、接触面のあらさ、接触圧力が作用した場合は表面の硬度と接触圧力がこれに関係する。ギャップが消失した場合の接触熱伝達率の評価は、複雑ではあるが、熱伝達率の値自身は良好になるので、蓄積エネルギー評価上ではやや重要度が薄れる。したがって、蓄積エネルギーの評価上問題となるのは、高温ギャップが存在する場合で、このコードで、もっとも重点を置いているのは、混合ガスの熱伝導率と高温ギャップ幅の評価である。

(2) 混合ガスの組成

混合ガスの組成は、初期封入ガス、ペレット吸着ガス、核分裂生成ガスの量と、その放出割合によって定まる。核分裂ガスの生成は副プログラムFISGASで計算される。

FISGASでは、核燃料物質（²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu、²⁴¹Pu等）の中性子捕獲断面積、

吸収断面積、核分裂ガスの生成に関係する元素（クリプトン、テルル、ヨウ素、キセノンの同位元素）の分裂収率が、高速中性子束、熱中性子束のそれぞれについて、プログラムに組込まれるほか、クリプトン、テルル、ヨウ素、キセノンの同位元素の衰変定数が組込まれ、このデータからクリプトン、キセノンの生成量を、中性子束と照射時間の関数として計算している。

クリプトンについては、 ^{83}Kr 、 ^{84}Kr 、 $^{85\text{m}}\text{Kr}$ 、 ^{85}Kr および ^{86}Kr の5核種を、キセノンについては、 ^{131}Xe 、 ^{132}Xe 、 ^{133}Xe 、 ^{134}Xe 、 $^{135\text{m}}\text{Xe}$ 、 ^{135}Xe 、および ^{136}Xe の7核種を考えている。これら各核種の生成については、Fission yield で生成するものの外、核種間のdecayによるもの、中性子の吸収によるものを考える。例えば、 ^{135}Xe は、yield および $^{135\text{m}}\text{Xe}$ と ^{135}I のdecayからの生成を考慮し、 ^{135}Xe 自体はdecay および中性子の吸収によって ^{136}Xe に変換するものとしている。

プログラム内に大きな誤りはないが、もともと高速炉用のPu生成量を計算するためのプログラムを核分裂生成ガス用に改造したものらしく、不要なカードが約30枚近く残っている。また、このsubroutineには余分なDimension、DATA statementが非常に多く、核分裂生成ガスの計算だけについて言えば、未整理状態である。

核分裂ガスの放出モデルは、GAPCONの高速炉用燃料に合わせたDutt⁽⁴⁾らによるデータの代わりにGAPCON-THERMALではHoffman-Coplin⁽⁵⁾のモデルを採用した。Hoffman-Coplinのモデルは、ガスの放出率を、ペレットのスタック全長にわたる体積平均温度の関数として計算する方式である。ペレットのスタック全長にわたる体積平均温度を求めるため、ペレットスタック全長を、最高20等分(NPOWで入力)し、その各セグメントごとに一次元的な半径平均温度を計算し、体積平均温度を求め、この算術平均をスタック全長にわたる体積平均温度としている。

Hoffman-Coplinの実験は、3フィートの短いロッドによるもので、これを大型商用炉の燃料棒に適用するのは問題であると原報の著者も述べている。

吸着ガス（水素ならびに窒素）の放出は、FPガスの場合と同じ放出率で計算している。GAPCONではNMIXというシグナルで、ガスの放出機構を指定していたが、GAPCON-THERMALでは、放出ガスはすべてプレナムおよびギャップに放出され、初期封入ガスと完全混合するものとしている。ただしNOH=1で水素は被覆管と反応するものとし、NOHを入力しない場合はコードの中で自動的にNOH=1として扱われる。

核分裂ガス中のキセノンの熱伝導率はヘリウム約5%にすぎず、その生成率もかなり大きいので、混合ガスの熱伝導率に及ぼすキセノンの効果は大きい。

(3) ギャップの幅

ギャップの幅は、ギャップ熱伝達率の支配的因子であるが、ギャップ幅を決定するペレットと被覆管の変形はペレットの熱膨脹、スウェリング、被覆管の熱膨脹、弾性変形が扱われるほか、オプションにより被覆管の（クリープ変形+弾性変形）を時間ステップごとのテーブルとして外部から入力できるようになっている。

ペレットの熱膨脹率はGAPCONではRoth and Halteman⁽⁶⁾のデータを使用した式を使用していたが、GAPCON-THERMALではConway, Finckel and Klein⁽⁷⁾の式に変えた。

ペレットのスウェリングはGAPCONではGeithoff⁽⁸⁾のモデルを使用していたが、このモ

デルは、ペレットが外部から拘束されている場合に適用されるべきもので、ギャップが存在する時に適用するのは妥当でないため、GAPCON-THERMAL では無拘束スウェリングモデルを開発し、オプション ISWELL<0 によって使用できるようにしている。

外圧による被覆管のクリープダウンは、ギャップを減少させる方向に作用し、ギャップ熱伝達率を増加させるので、蓄積エネルギーの観点から見ればクリープダウンを見込まないほうが安全側であり、コードではクリープダウンに関する特定モデルは組込まれていないが、前記のようにオプションとして外部入力できるようにしている。

初期ギャップが大きい燃料では、上記の考慮の他にリロケーション（ペレット破片の移動）を考えなければ、実験データと合わせることがむずかしい。原報の著者も、“検討”の章のギャップ消失の項で、かなりの紙数を割ってリロケーションについて多くの文献を引用し、さらに熱サイクルとラチェッティングの試算を行なっているが、結局定量化したモデリングには到達できず、リロケーションを1300 °C以上の領域の急激なスウェリングに肩代りさせてしまったようである。

(4) ペレットの熱伝導率

ペレットの熱伝導率は、GAPCONで用いたGodfrey⁽⁹⁾らから得られた式の代りにLyons^(10,11)の式を用いた。また気泡による熱伝導率の補正式はLoeb⁽¹²⁾の代りにMaxwell-Euckenの式とした。

しかしながら、菊池らの実験⁽¹³⁾によれば、 UO_2 の熱伝導率は閉気孔の分布と密接な関係をもつ。閉気孔が少くなり、開気孔が増加する気孔率（約10%、 UO_2 密度90%TD）を過ぎると熱伝導率は急激に低下する。

LoebおよびMaxwell-Euckenの式共、この変化を記述しない上、 UO_2 密度が90%以下ではoverestimateになるおそれがある。

(5) 被覆管の物性

燃料被覆管は20%冷間加工の316ステンレス鋼と、ジルカロイ-2、ジルカロイ-4の物性が組込まれている。GAPCONでは、ジルカロイ-2と4に分けずに同一のデータを使用していた。組込まれている物性は熱伝導率、耐力、ヤング率、ポアソン比、熱膨脹率、メイヤー硬度で、共に温度の関数として表の形式で組込まれている。原著の付録C-20頁に掲げられているジルカロイ-4のデータステートメントを見ると熱伝導率の他は212 °Fから932°Fまですべて同一値を用いているところからジルカロイ-4の物性値に関する検討は今後の課題として残されたようである。

なお、GAPCONではジルカロイの熱伝導率にHW60908の引用文献から採用したと思われるデータを使用しているが、GAPCON-THERMALではScott⁽¹⁴⁾のデータに修正された。

(6) 中性子束ひずみ

燃料ペレット内の半径方向中性子束ひずみに関しては、内部組込、外部入力の両者が用意されている。内部組込の場合は、副プログラムDEPRESで計算されるが、 PuO_2 を含む燃料あるいは ^{235}U の濃縮度が4%以上の場合には、この副プログラムを使用すべきではない、としている。

(7) 冷却材

冷却材については、ナトリウム、水の冷却に関する物性（レイノルズ数、プラントル数をそれぞれ分解して水力学的相当直径と流速を外に出して、その残りを温度依存の係数にまとめ、データとして組込んでいる）が組込まれている。したがって、冷却材の種類判別用シグナル兼熱伝達率（SIGHF）、冷却材温度、流速、水力学的相当直径を入力することにより、冷却材-被覆管の熱伝達が計算される。冷却材が水およびナトリウム以外の場合（SIGHF>0）はSIGHFの値自身が熱伝達率として入力され、流速、水力学的相当直径の入力は不要となる。

(8) 入力書式

入力変数ならびに、オプションシグナルの入力については原著の付録Bにのべられており、これらの入力仕様から、プログラム内での計算の流れも類推できるので詳述をさけるが、簡単にのべると、入力形式はNAMELIST形式による合計60項目の入力値と、この入力中に含まれている物性値選択用ならびにモデル選択用シグナルによって外部入力が許されるオプションデータに分けられる。オプションデータは、書式化された入力形式で書かれる。

NAMELIST形式は、数ケースの連続した計算をする場合に、入力カードの繰返しをさけるために有効であり、連続計算の場合、変更したい変数のみ入力すれば、その他の変数は前ケースの入力データがそのまま使用される。

後者のオプションデータの輸入は、燃料の熱伝導率、被覆管の物性値、ペレット内半径方向中性子束ひずみ、時間ステップに対応する被覆管の変形量の4項目が用意されており、すでにのべたように書式化（FORMATTED）して入力する。したがって一連の数ケースの計算で、上記4項目のデータを変えて計算することも可能である。

3 計算の流れ

原著の付録Cに載せられているソースプログラムリストを基にして作った流れ図をFig. 1*
に示す。なおFig. 1では、ソースプログラムのステートメントラベルのうち、主なものを付
記した。**ここではFig. 1について、計算の流れを説明する。

(1) NAMELIST 変数の入力 (原著付録D-1, 入力カード参照)

NAMELIST 変数は全部で60項目あるが、その中で計算に必要な変数ならびに、オ
プション指定シグナルを入力する。計算完了シグナルが入力されれば、ステップ(43)に
とんで計算を終了する。

(2) 書式化された変数の入力

UO₂ の熱伝導率 (温度依存), 被覆管の物性値 (温度依存とした熱伝導率, 耐力, ヤ
ング率, ポアソン比, 熱膨脹率, メイヤー硬度), 燃料ペレット半径方向の中性子束ひず
み (ペレット直径依存), 被覆管のクリープ変形量 (照射日数依存) を, ステップ(1)で入
力したオプション指定シグナルの指示にしたがって入力する。(原著付録B-10ではペ
レット半径方向の中性子束ひずみの外部入力例, NFLX=9でペレット直径に対するひず
みが9点与えられている。)

(3) 燃料棒の軸方向の出力分布計算 (副プログラムPOWDIS)

軸方向の分割数は, NAMELIST 中の変数NPOW で与えられ, 分布はPOWER (配
列) で与えられる。

(4) ギャップ熱伝達率の仮定値の設定

$$HGA=1000 \text{ Btu/hr-ft}^2-\text{°F}$$

(5) 半径方向, 中性子束ひずみの計算

(6) 入力変数, 温度依存としたUO₂ の熱伝導率, ペレット直径に対する中性子束ひずみ,
制御オプションのプリントアウト

時間増分, 出力増分の繰返し計算開始 (ステートメントラベル470)

(7) 軸方向出力分布計算 (副プログラムPOWDIS)

(8) 燃料棒内のFPガス生成量の計算 (副プログラムFISGAS)

(*) ソースプログラムリストによると, 主要な計算の流れはすべて主プログラムで行なわれているので, 主
プログラムを基にして流れ図Fig. 1を作成した。

(**) 第7章にマイクロフィルムで添えたソースプログラムのステートメントラベルは, 昇順になっているの
で, ソースプログラムを参照する場合, ステートメントラベルをindexとして利用すると便利である。

-
- (9) 燃料棒内に放出されたFPガスならびに蒸発性不純物の収斂計算開始 (Do loop 1410 開始)
- (10) 軸方向セグメントの繰返し計算開始 (Do loop 1370 開始)
- (11) ギャップ熱伝達率収斂計算開始 (ステートメントラベル520)
- (12) 冷却材-被覆管熱伝達率 (副プログラムHTCW, HTCLM), 被覆管表面温度, 内面温度計算
- (13) ベレット半径方向温度分布の計算
- (14) セグメントのベレット体積平均温度の計算
- (15) ベレットの熱膨脹計算 (副プログラムEXPAND)
- (16) ベレットのスウェリング計算 (Geithoff model)
- (17) 被覆管の熱膨脹計算
- (18) 被覆管の弾性変形計算
- (19) ベレットのスウェリング計算 (新しいモデルによる無拘束スウェリングの計算, 副プログラムSWELL)
- (20) FPガス放出率の計算
- (21) ギャップガス組成の計算 (ギャップガスのモル分率の計算)
- (22) ギャップガスの各成分ガスの熱伝導率と粘性係数を求め, 混合ガスの熱伝導率を計算。
- (23) ギャップガス圧力の計算
- (24) ギャップ熱伝達率の計算

$$HGC = HSOLID + HGAS + HRAD$$

ギャップ熱伝達率は固体による接触熱伝達, ギャップガスの熱伝導による熱伝達, 輻射熱伝達の和として求める。

-
- (25) ステップ(4), もしくはステップ(27)で仮定したHGAとステップ(24)で計算したHGCを比較し収斂条件を満足していればステップ(29)に進み収斂していなければ, 次のステップ(26)に移る。
- (26) ステップ(11)から, ステップ(25)までの繰返しが35回を超えれば, 収斂に失敗したもものとして, ステップ(28)に進む。35回以下ならば次のステップ(27)に移る。
- (27) HGA (ステップ(4), もしくは, このステップ(27)で前回の繰返し計算で作られたもの)とHGC (ステップ24)を基にして, 新しいギャップ熱伝達率 (new HGA)を仮定してステップ(11)に戻る。

-
- (28) 収斂失敗の出力
- 35回の繰返し計算で収斂しなかったことをプリントアウトし, その時のHGA, HGCを出力して次のステップ(29)に移る。

-
- (29) 計算結果の出力。(オプションシグナルMINIで制御される。)MINI<0の時は

ステップ (32)に進む。

軸方向各セグメントの出力 (MINI=0)

ピークセグメントのみ出力 (MINI>0)

- (30) ベレット蓄積エネルギーの計算 (オプションシグナル Istor>0 の時は蓄積エネルギーを計算せずステップ (32)に進む)
- (31) ベレット蓄積エネルギーの出力 (出力例参照)
- (32) ベレット組織変化を越しているかどうかの判定
ベレット組織変化を越しており、その計算が終了していれば、ステップ (34)に進む。
ベレット組織変化を越していなければ、ステップ (34)に進む。
ベレット組織変化を越していると判定され、その計算が終っていないければ、次のステップ (33)に移る。
- (33) ベレット組織変化後のベレット寸法を計算し、ステップ (11)に戻る。
-

(34) Do loop 1370 End (ステップ10参照)

(35) 軸方向セグメント全体のベレット体積平均温度 (TAVGXX) の計算。

(36) 軸方向セグメント全体のFPガス放出量計算

(37) TAVGXXの収斂判定

ステップ (35)で計算した全セグメントのベレット体積平均温度を、前回の計算値と比較して判定条件を満たしていれば、さらに、ステップ(9)へ1度だけ戻って修正計算を行なう。すでに修正計算が終了していれば、ステップ (39)に進む。

ステップ(9)で述べた Do loop 1410 の繰返しが一度も行なわれていなければ、ステップ (38) → (9)に戻る。

(38) Do loop 1410 End (ステップ9参照)

(39) 計算結果の総合出力 (付録D-8頁参照)

(40) 照射日数が所定の最高日数に達しているかどうかの判定

最高に達していれば、次のステップ (41) に移る。最高に達していなければ、日数増分を加えてステップ(7)に戻る。

(41) 照射日数を初期値に戻す。

(42) 線出力密度が所定の最高値に達しているかどうかの判定。

達していれば、ステップ(1)に戻って新ケースの計算に移る。

達していなければ出力増分を加えて、ステップ(7)に戻る。

(43) 計算終了 (ステップ(1)参照)

GAPCON-THERMAL-1のソースプログラムのカード枚数、GAPCON-THERMAL-1とGAPCONのソースプログラムのカード枚数を参考までに下表に示す。

	GAPCON-THERMAL-1	GAPCON	備 考
主プログラム	1178	893	
副プログラム			
HTOW	25	25	水-被覆管の熱伝達係数の計算 Ditts-Boelter
HTCLM	10	10	ナトリウム-被覆管の熱伝達係数の計算
TERP	25	25	表の内挿 (指標に対する直線内挿)
HCAP	29	—	UO ₂ 1モルの蓄積エネルギーの計算
DEPRES	20	20	ペレット半径方向中性子束ひずみ計算
EXPAND	36	36	ペレット熱膨脹係算
TEPP	21	—	表の内挿 (変立変数-従属変数の関係が直線内挿できるものとする)
SWELL	17	—	ペレット無拘束スウェリングの計算
※ MOVEKA	7	—	番地の移しかえ
POWDIS	61	—	軸方向出力分布の計算
CARL	31	—	UO ₂ 1グラム中の蓄積エネルギーの計算
MOVEAA	7	—	番地の移しかえ
FISGAS	239	223	FPガス生成量の計算
合 計	1706	1232	

※ MOVEKAはどこからも呼び出されない。

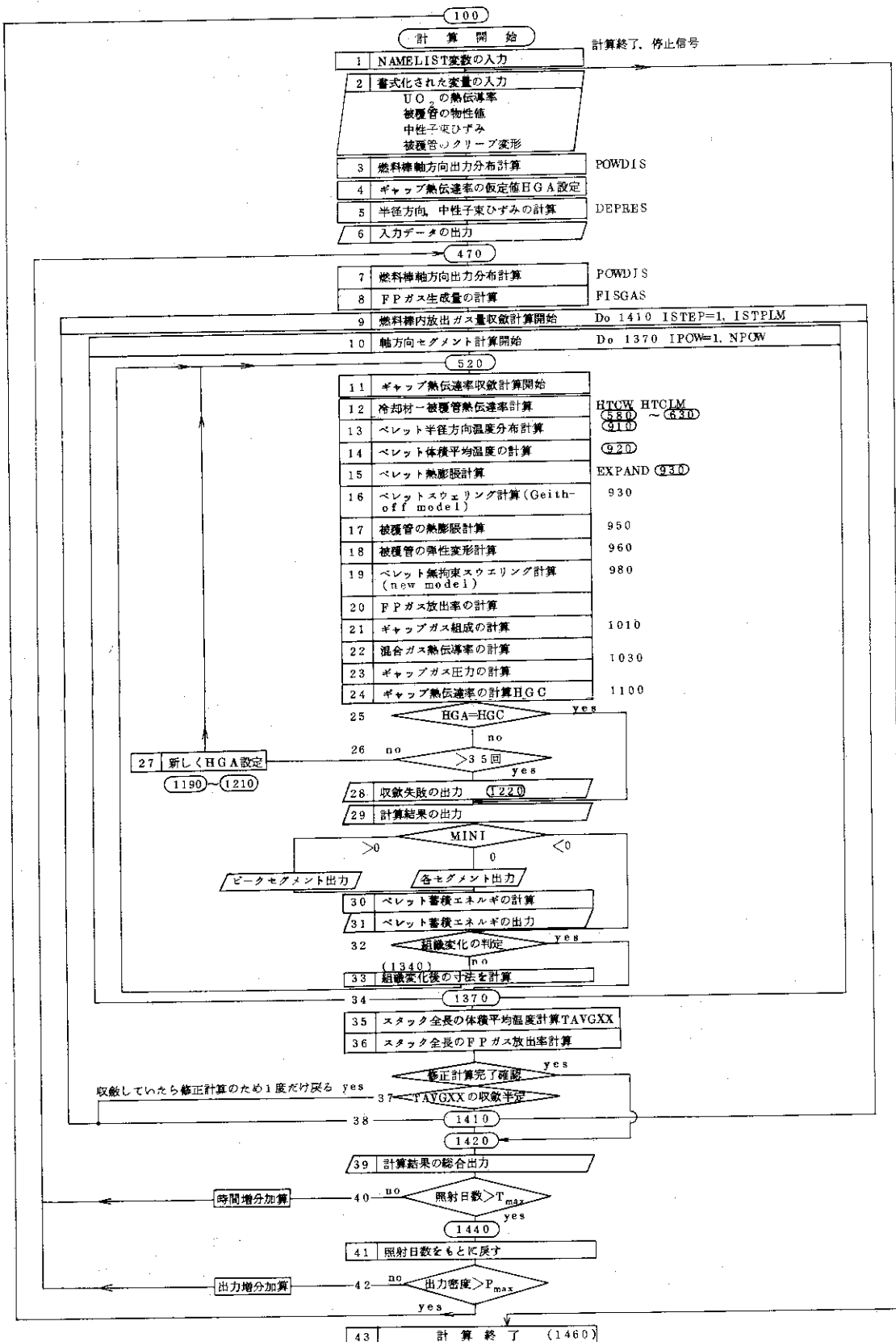


Fig. 1 GAPCON-THERMAL-1主プログラムの計算流れ図

4 モデルと物性値

原報に報告されている燃料、被覆管の物性値、照射挙動モデルに関する計算式などを個別に検討し、原報以外の文献等と比較した結果をここに載せた。

これらの検討は、体系立てて行なわれたわけではないので、各項目はそれぞれ独立なものとして参照されたい。

(I) ジルカロイ被覆管の物性値

GAPCON-THERMAL-1には、ジルカロイの物性値（熱伝導率、耐力、ヤング率、ポアソン比、熱膨張係数、メイヤー硬度）が温度依存として表の形式で入力されている。

（原著C-19頁参照）

これらの値と他の文献から得られた値を重ね書きした結果を下記のグラフに示す。

熱伝導率	Fig. D-178
耐力	Fig. D-177
ヤング率	Fig. D-167
ポアソン比	Fig. D-481
熱膨張係数	Fig. D-169(A)
メイヤー硬度	Fig. D-925

D) ジルカロイの熱伝導率 (Fig. D-178)

D-178において

曲線9 ---- ; GAPCONのデータ

曲線10 ×—× ; GAPCON-THERMAL-1のZry-2のデータ

曲線11 —→ ; GAPCON-THERMAL-1のZry-4のデータ

である。

曲線9はHW-60908の54頁に報告されているものとほぼ一致しており、控え目な値となっている。これに対して、曲線10、11はASTM Special Technical Publication #314 (1962)に報告されているデータ（曲線2）に近く、その他の参考文献から得られたデータと比較しても、平均的な値となっている。

D) ジルカロイの耐力 (Fig. D-177)

D-177の*印の曲線がGAPCON、ならびにGAPCON-THERMAL-1に用いられたものである。図からも分るように、完全焼鈍材の耐力と考えられ、Zirconium Highlights WAPD-ZH-12に近い値であり、耐力としては低い値となっている。

燃料-被覆管の初期ギャップが大きい場合には、燃焼度がかなり高くなっても、燃料と被覆管の間に大きな接触圧を生ずるような計算結果に至らないため、ECOS事故解析の一環として使用するGAPCON-THERMAL-1では耐力はkey factorとはならない。

D) ジルカロイのヤング率 (D-167)

直線3が、GAPCON、GAPCON-THERMAL-1に用いられた値である。これは、

HW-60908 の Longitudinal 方向の値に近い。耐力の項でのべたと同様の理由で、ヤング率は key factor にならない。

なお、原著の付録 C-19 頁の line 41 では 752 °F のヤング率が 1.31×10^7 psi となっており、572 °F の値 1.11×10^7 psi より高い値となっている。この値は GAPCON のデータでも同様である。先述のべた通り、ヤング率はこのコードでは key factor ではないので、ギャップ熱伝達率の計算結果には大きな影響は与えないが、このデータがミスによるものか、故意によるものか、実測データにもとづくものか、定かでない。

iv) ジルカロイのポアソン比 (Fig. D-481)

GAPCON⁽¹⁾, GAPCON-THERMAL-1 共に同一データを使用しており、25 °C で 0.370, 300 °C で 0.492 とし、この間を直線で結び、300 °C 以上では 0.492 (不変) としている。(Fig. D-481 の折線 2) ポアソン比は熱応力の計算に入ってくるが sensitive ではなく、またコードの性格からも key factor ではない。

v) ジルカロイの熱膨張係数 (Fig. D-169(A))

Fig. D-169(A) の曲線 4 が GAPCON, GAPCON-THERMAL-1 に用いられた値である。ジルカロイの熱膨張係数は、その異方性のために、報告書によってかなりのばらつきが見られる。報告されたデータは、a 軸方向、c 軸方向、等方的としてその平均値を $\alpha_m = \frac{1}{3}(\alpha_c + 2\alpha_a)$ としたもので、およびそれぞれについて、真の熱膨張率 $(\frac{\Delta l}{l})_{\Delta T \rightarrow 0}$ 、平均熱膨張率 $\frac{1}{l_1}(\frac{l_2 - l_1}{T_2 - T_1})$ などに表示されている。したがってこれらのデータを簡単に比較するのはむずかしいが曲線 4 は、等方的と仮定した平均値とすればやや高めめの値、すなわち、ギャップ熱伝達率をひかえ目に算出するような値となっている。

iv) ジルカロイのメイヤー硬度 (Fig. D-925)

メイヤー硬度の報告値は見当らなかったため、GAPCON-THERMAL-1 で用いられた値のみをグラフ化した。この値は、Fig. D-177 (耐力) に示した * 印曲線の 3 倍となっている。メイヤー硬度は、接触熱伝達率を評価する際の因子の一つであり、ホットギャップが存在する場合は無関係である。

ジルカロイの物性値の中で、ホットギャップが存在する場合のギャップ熱伝達率の評価に影響を与える因子は熱膨張率と熱伝導率である。外圧による被覆管のクリープダウンを考慮すれば、そのクリープ特性も問題となるが、被覆管の内側へのクリープダウンは、蓄積エネルギーの評価上、有利な因子となるので、GAPCON-THERMAL-1 では外部入力による以外は、クリープを扱っていない。

(2) UO₂ の熱伝導率 (Fig. C-85, C-533)

GAPCON で用いられた Godfrey ら⁽⁹⁾ の式と、GAPCON-THERMAL-1 で用いられた Lyons ら^(10,11) の式の比較を、Fig. C-533 に、両者の $fkd\theta$ を Fig. C-85 に示す。

Fig. C-533 の曲線(9)は Godfrey の式 (1300 °C まで)、曲線 (25) × 印は GAPCON で用いられた Godfrey の式で密度を 95% とした場合、曲線 (12) は旧 Lyons、曲線 (20) は GAPCON-THERMAL-1 で用いられた新 Lyons の式で密度を 95% とした場合である。1600 °C 以上で曲線 (20) は、曲線 (25) よりやや上になっているが 1600 °C 以下では両

者はほぼ等しい。

Fig. C-85 の曲線(1)は Godfrey の式で密度を 100%TDとした場合、曲線(2)は新 Lyons の式で密度を 95%TDとした場合、曲線(3)は旧 Lyons で密度を 95%とした場合の $\int_0^T kd\theta$ を示す。Lyons の式は 95%TDの UO_2 ペレットによる実験を基にして作られた式である。

(4, 1), (4, 2) 式は、それぞれ GAPCON-THERMAL-1 と GAPCON で用いられた UO_2 の熱伝導率の式である。(4, 1) 式は Lyons の式に 95%TDの場合を 1 にノルマライズした Maxwell-Eucken の補正項を乗じたものであり、(4, 2) 式は Godfrey の式に 100%TD の場合を 1 とした Loeb⁽¹²⁾ の式で $a = 2.5$ とした補正項を乗じたものである。

$$k = \frac{1.025}{0.95} \times \left[\frac{F}{1 + (1-F) \times 0.5} \right] \times \left[\frac{38.24}{402.4 + T} + 6.1256 \times 10^{-13} (T - 273)^4 \right] \quad (4.1)$$

k = Thermal Conductivity (W/cm·°C) T = °C

F = Fraction of Theoretical Density

$$k = (1 - 2.5P) \times \left(\frac{45.1}{135 + T} + 4.79 \times 10^{-13} \times T^3 \right) \quad (4.2)$$

k = Thermal Conductivity (W/cm·°C) T = °K

P = Volume Fraction of Porosity

Table 4.1 $\int kd\theta$ の比較

		GAPCON-THERMAL-1		GAPCON	
計算式		(4.1) (Lyons)		(4.2) (Lyons)	
		ポア-による補正	$\int_0^{2800} kd\theta$	ポア-による補正	$\int_0^{2800} kd\theta$
		Maxwell-Eucken		Loeb	
密度 % TD	100	1.079	100.31 W/cm	1.0	103.68 W/cm
	97	1.031	95.866	0.925	95.905
	95	1.0	92.973	0.875	90.720
	93	0.969	90.137	0.825	85.536
			$\int_{500}^{2800} kd\theta$		$\int_{500}^{2800} kd\theta$
密度 % TD	100	1.079	66.934 W/cm	1.0	67.559 W/cm
	97	1.031	63.967	0.925	62.493
	95	1.0	62.037	0.875	59.115
	93	0.969	60.144	0.825	55.737

燃料ペレットの密度を 100, 97, 95, 93%TD とし、(4, 1), (4, 2) 式によって $\int_0^{2800} kd\theta$, $\int_{500}^{2800} kd\theta$ を求めたものを Table 4.1 に示した。

これによると100%TDの場合には(4,2)式が若干大きくなる。93ないし97%TDでは、97%TDの $\int_{500}^{2800} kd\theta$ で(4,2)式の方がやゝ大きい値になるほかは(4,1)式の方が大きい。実用炉では、運転中のペレット表面温度が500°C前後になっているので $\int_{500}^{2800} kd\theta$ で比較するほうが妥当であろう。したがって燃料ペレット密度が93ないし97%では(4,2)式のほうが保守的である。

(3) ポアによる UO_2 の熱伝導率の補正係数 (Fig. D-934)

GAPCON⁽¹⁾ではLoeb⁽¹²⁾を、GAPCON-THERMAL-1ではMaxwell-Euckenを用いている。両者共に原式は100%TDを基準にした式となっているが、GAPCONでは100%TD基準のまま、GAPCON-THERMAL-1では95%TDの場合を1にノルマライズして使用している。Fig. D-934は、両者を95%TDの場合に1となるようにして比較したものである。これによると、密度が95%以下の場合にはLoebによる補正のほうがきびしくなる。

(4) UO_2 の熱膨脹率 (Fig. D-812)

GAPCONではRoth and Halteman⁽⁶⁾を基にして、これを種々の混合比の混合酸化物燃料($PuO_2 + UO_2$)に適用できるようにHorn and Paniskoによって改められた式が用いられたがGAPCON-THERMAL-1では UO_2 用としてConway, Fincel and Hein⁽⁷⁾の式を用いている。両者の比較をFig. D-812に示す。

D-812の直線群(7)はGAPCONに用いられた式である。 PuO_2 を含まない場合は(7)に示す式で $C=0$ としたものとなり、(7)の直線群の中で一番勾配のゆるやかな直線で(原著(6)式で $C=0$ としたもの)ある。曲線(8)はGAPCON-THERMAL-1に用いられた式である。ここで注意しなければならないのは、直線(7)が真の熱膨脹係数をあらわしているのに対して曲線(8)は25°CからT°Cまでの平均熱膨脹係数を示していることである。したがって、この二つの線を直接比較することはできない。上のべた原著(6)式で $C=0$ とした場合の計算式から25°Cを基準とした温度Tまでの平均熱膨脹係数の計算式を求めると、原著の(7)式となる。Fig. D-812の曲線(9)は原著(7)式のグラフである。曲線(8)、(9)は共に25°Cを基準とした平均熱膨脹係数であるからこの両者を比較すると、両者は約1130°Cで交叉し、高温側では曲線(8)が上になっている。したがって、低出力のペレットでは曲線(9)によるほうが熱膨脹は大きく、高出力ペレットでは曲線(8)によるほうが熱膨脹は大きくなる。原著で述べられているように、GAPCONでは、曲線(9)で得られた値に1.15を乗じて実験結果と合わせるようにしているがGAPCON-THERMAL-1では、曲線(8)をそのまま使用している。ギャップ熱伝達率の計算に関して、 UO_2 の熱膨脹係数はGAPCONよりGAPCON-THERMAL-1のほうが保守的である。

(5) UO_2 の組織変化温度 (Fig. D-936)

UO_2 の組織変化温度はGAPCON、GAPCON-THERMAL-1ともにChristensen⁽¹⁵⁾の式を使用している。Fig. D-936は、両者を比較したものであるが、両者共に組織変化

を起す温度を時間の関数として扱っており、時間の増加と共に組織変化温度は徐々に減少してゆく。両者は3.5時間で交叉しそれ以後は、曲線(2)すなわちGAPCON-THERMAL-1のほう組織変化温度を低く見積っている。

UO₂ ペレットが組織変化を起すと稠密化してペレット中心に孔があき、燃料温度が下る傾向になる。3.5時間以後の計算では、GAPCON-THERMAL-1のほう組織変化温度が低くなり、組織変化を起す領域が増加し、中心孔が大きくなる計算となる。このため燃料の蓄積エネルギーの評価に対する組織変化の影響は、3.5時間以前ではGAPCON-THERMAL-1が保守的で3.5時間以後ではGAPCONが保守的である。

(6) UO₂ ペレットのFPガス放出率 (Fig. D-937)

GAPCON-THERMAL-1ではHoffman-Coplin⁽⁵⁾の関係式を用いている。プログラムではこの関係を燃料スタック全長にわたる体積平均温度に対する放出率として、表形式にして使用している。これをTable 4.2に示す。

Table 4.2 ペレットスタックの体積平均温度とFP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.	855.0	0.01	1300.0	0.3
745.0	0.0006	890.0	0.02	1470.	0.4
755.0	0.0008	920.0	0.03	1690.	0.5
760.0	0.001	940.0	0.04	2000.	0.52
785.0	0.002	955.0	0.05		
800.0	0.003	975.0	0.06		
810.0	0.004	985.0	0.07		
820.0	0.005	1000.0	0.08		
825.0	0.006	1015.0	0.09		
830.0	0.007	1030.0	0.1		
840.0	0.008	1100.0	0.16		
850.0	0.009	1160.0	0.2		

Fig. D-937の曲線(1)は、Table 4.2をグラフにしたものである。

Fig. D-937には、このほかW. B. Lewis, GEの設計報告書に用いられているFPガス放出率を示した。

W. B. Lewis (Nuclear Application 2 171, 1966)は、FPガス放出率の最大値として次式(4.3)を提唱している。

$$\max \% \text{Release} < \frac{0.5 \int_{ST}^{1000} kd\theta + 10 \int_{1000}^{1300} kd\theta + 60 \int_{1300}^{1600} kd\theta + 95 \int_{1600}^{OT} kd\theta}{\int_{ST}^{OT}} \quad (4.3)$$

またGEの設計報告書では(4,4)式を用いている。

$$\% \text{Release} = \frac{4 \int_{ST}^{1650^{\circ}\text{C}} kd\theta + 100 \int_{1650^{\circ}\text{C}}^{OT} kd\theta}{\int_{ST}^{OT} kd\theta} \quad (4,4)$$

UO₂ の熱伝導率にLyons の式を用い、ペレットの表面温度を400, 500, 600 °Cとし、ペレット平均温度をペレット表面温度と中心温度の算術平均値として、(4,3), (4,4)式を用いてFPガスの放出率を求めた。

Fig. D-937によると、ペレット表面温度を400~600 °Cとした場合、W. B. Lewis によるFPガス放出率は、GAPCON-THERMAL より保守的であり、GAPCON-THERMAL はGEより保守的となる。

(7) 冷却水-被覆管の熱伝達係数

Duttus-Boelter (Fig. D-929), と Jens-Lottes (Fig. D-526) の計算図表。

GAPCON-THERMAL-1 では加圧水型、もしくは沸騰水型のサブクーリング領域の、冷却水-被覆管の熱伝達係数の計算式としてDittus-Boelterの式⁽¹⁶⁾を使用している。沸騰領域では一般にJens-Lottesの式が用いられるが、これはGAPCON-THERMAL-1ではプログラム化されていない。

こゝでは参考のため両者の熱伝達係数の計算図表を載せた。加圧水型の一例として、冷却水温度=320 °C, 水力学的相当直径=1.4 cm, 冷却材流速=4m/sec, 被覆管外径1.07 cm, 線出力密度600W/cmとすると、Fig. D-929により冷却材と被覆管表面の温度差は61.7 °Cとなる。

沸騰水型の一例として線出力密度600w/cm, 被覆管外径1.43cmとすると、被覆管表面熱流束は約134W/cm²となり、冷却材圧力を70kg/cm²とするとFig. D-526より、冷却材と被覆管表面の温度差は約9 °Cとなる。

(8) UO₂ の比熱 (Fig. D-700)

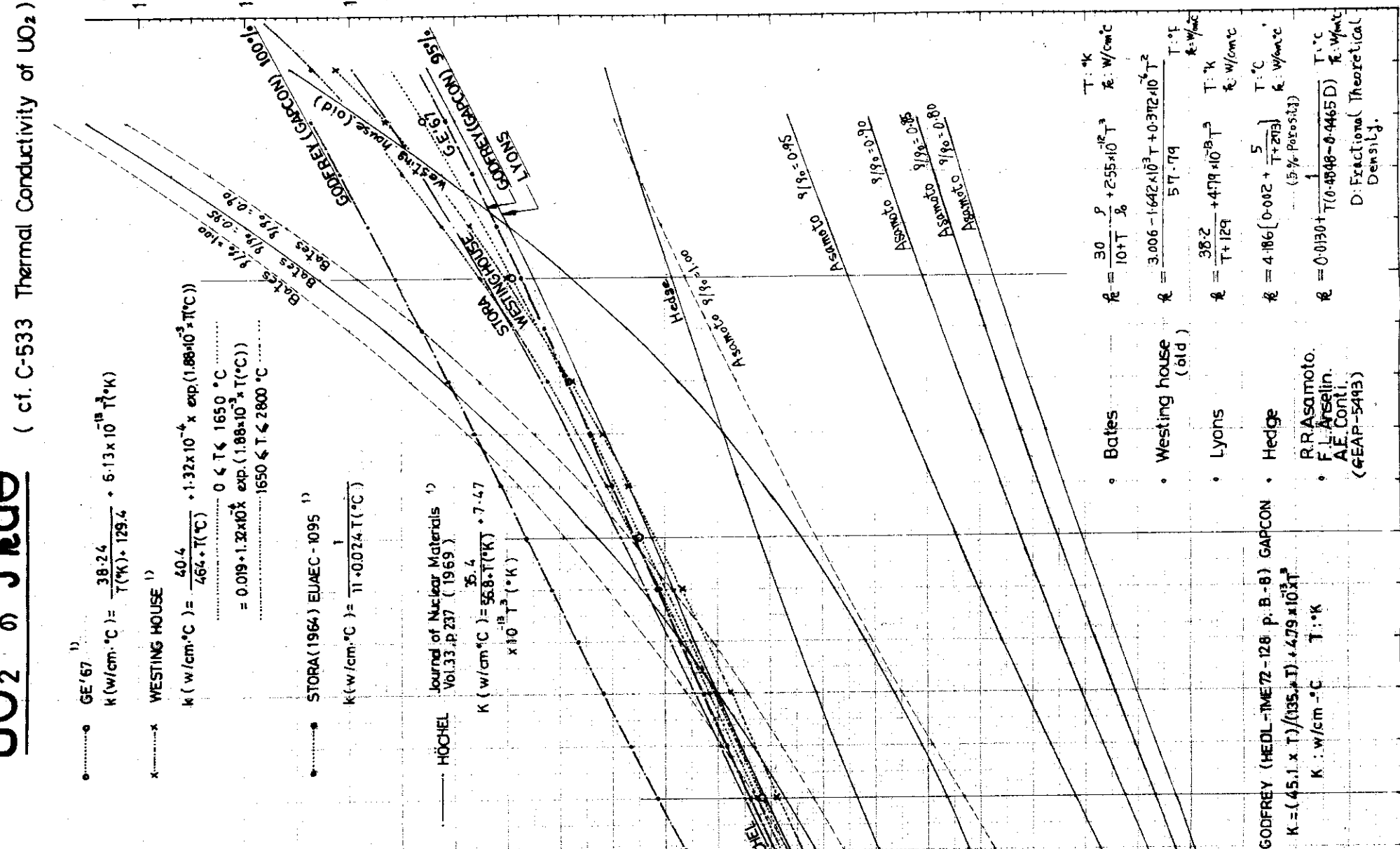
GAPCON-THERMAL に用いられたUO₂ の比熱をFig. D-700の曲線(8)に示す。曲線(8)は2200 °C以上になると、かなり大きな値となっている。

UO₂ の k の J と d の関係

(cf. C-533 Thermal Conductivity of UO₂)

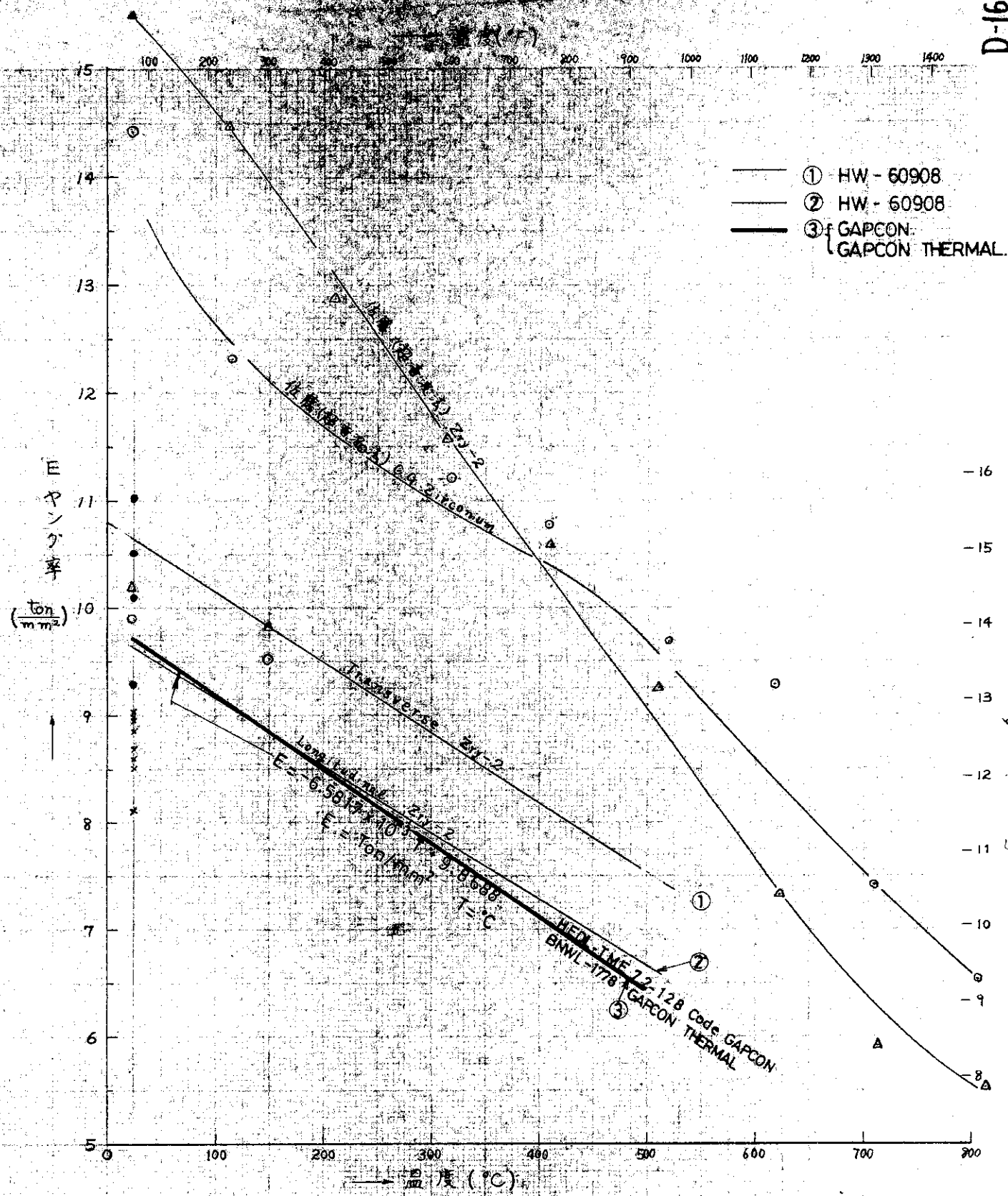
1) 1970.7.7 ADDED T.S

T (°C)	Bates		West. H.		Hedge		Lyons		R.R. Asamoto		F.L. Arselin		A.E. Conti	
	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$	$\frac{1}{2} \times 10^{-5}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	9.89	8.63	8.19	4.87	9.31	8.49	8.49	8.49	6.047	4.299	3.492	3.029	2.725	2.725
200	16.04	15.26	14.46	9.27	13.18	15.43	15.43	15.43	11.372	8.142	6.650	5.791	5.234	5.234
300	21.76	20.66	19.59	13.25	18.03	21.31	21.31	21.31	16.159	11.644	9.560	8.399	7.580	7.580
400	25.74	24.05	22.05	16.85	22.03	26.41	26.41	26.41	20.534	14.987	12.280	10.778	9.809	9.809
500	29.29	27.71	26.12	20.12	25.97	30.90	30.90	30.90	24.885	17.925	14.850	13.079	11.989	11.989
600	32.19	31.10	29.09	23.09	29.35	34.96	34.96	34.96	28.399	20.797	17.299	15.284	13.976	13.976
700	34.72	33.65	31.19	25.81	32.46	38.63	38.63	38.63	31.945	23.532	19.648	17.411	15.958	15.958
800	36.82	35.89	33.01	28.32	35.35	42.00	42.00	42.00	35.995	26.153	21.919	19.471	17.885	17.885
900	38.58	37.81	34.77	30.65	38.08	45.12	45.12	45.12	39.570	28.675	24.106	21.475	19.766	19.766
1000	40.05	39.45	36.36	32.86	40.60	48.03	48.03	48.03	41.672	31.115	26.238	23.431	21.607	21.607
1100	41.19	40.78	37.84	34.98	43.02	51.72	51.72	51.72	44.656	33.478	28.316	25.444	23.412	23.412
1200	42.63	42.01	39.21	37.05	45.39	55.30	55.30	55.30	47.591	35.778	30.347	27.219	25.188	25.188
1300	43.58	43.01	40.34	39.12	47.54	58.96	58.96	58.96	50.332	38.021	32.336	29.063	26.934	26.934
1400	44.42	43.80	41.23	41.23	49.67	62.55	62.55	62.55	53.049	40.212	34.268	30.876	28.691	28.691
1500	45.17	44.55	42.05	43.42	51.72	66.05	66.05	66.05	55.683	42.359	36.206	32.664	30.361	30.361
1600	45.85	45.26	42.81	45.73	53.70	69.48	69.48	69.48	58.257	44.463	38.074	34.429	32.044	32.044
1700	46.48	45.93	43.51	48.20	55.69	72.84	72.84	72.84	60.771	46.551	39.958	36.169	33.708	33.708
1800	47.06	46.56	44.16	50.84	57.50	76.15	76.15	76.15	63.232	48.544	41.791	37.891	35.356	35.356
1900	47.59	47.15	44.77	53.61	59.24	79.42	79.42	79.42	65.643	50.566	43.604	39.595	36.996	36.996
2000	48.07	47.71	45.34	56.50	61.10	82.69	82.69	82.69	68.009	52.594	45.396	41.283	38.610	38.610
2100	48.50	48.24	45.87	59.50	63.04	85.91	85.91	85.91	70.335	54.486	47.169	42.956	40.217	40.217
2200	48.89	48.74	46.37	62.64	64.94	89.08	89.08	89.08	72.618	56.489	48.924	44.614	41.813	41.813
2300	49.24	49.21	46.84	65.82	66.82	92.21	92.21	92.21	74.868	58.399	50.669	46.260	43.398	43.398
2400	49.56	49.64	47.28	69.10	68.64	95.30	95.30	95.30						
2500	49.85	49.84	47.69	72.50	70.45	98.35	98.35	98.35						
2600	49.98	49.88	47.98	76.00	72.24	101.37	101.37	101.37						
2700	50.05	49.82	48.16	79.60	74.11	104.35	104.35	104.35						
2800	50.07	49.74	48.24	83.30	76.01	107.28	107.28	107.28						
2900	50.04	49.64	48.24	87.10	77.94	110.16	110.16	110.16						
3000	50.00	49.54	48.16	91.00	79.90	113.00	113.00	113.00						



Center Pellet Temperature. O₂ (°C)

1969.3.4 改訂 森島 潤吉 編



HW-60908	- Annealed	KAPL-M-RLM-16	July 1958
Oct 1959	Δ 2.5% CW	BMI-1168	Feb 1957
Page 58	○ Annealed	BMI-1168	Feb 1957

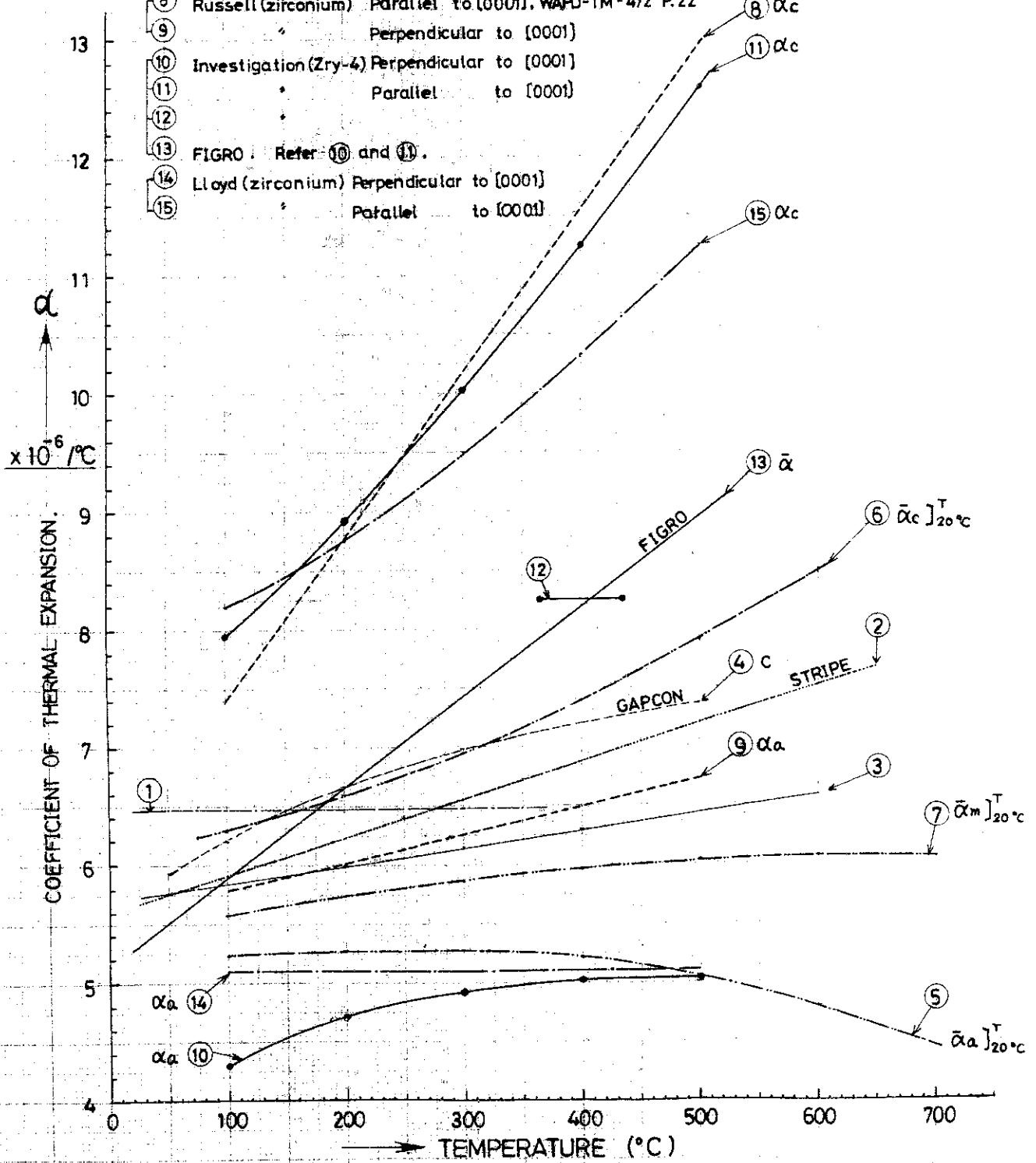
注) STRIPE (WAPD-TM-652 P40) 及び
② を用いて。

● JRPDR Test Assy 用 Zry-2 管 (A 社 図様) 1/4 Hard
引張試験 (位相) の stress-strain curve の単位: 1964年10月15日
Longitudinal direction, Room temperature, 引張速度 2mm/min.
引張試験機 (島津製作所製) 荷重回 125
● JRPDR Test Assy 用 Zry-2 管 (B 社 図様) 1/4 Hard
引張試験の stress-strain curve の単位: 1965年1月14日
Longitudinal direction, Room temperature curves, 引張速度 2mm/min
参考図 C-99

(森島)

COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION FOR ZIRCALOY.

- ① $\bar{\alpha}_m$ (from 20°C to 370°C) = $6.48 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ for randomly oriented Zry-2.
Lustman, B. and F. Kerze. The Metallurgy of Zirconium, Mc Graw Hill, 1955
- ② $\alpha = 5.62 \times 10^{-6} + 3.152 \times 10^{-7} T$ T = °C HW-60908 P.56 (Zry-2), (STRIPE WAPD-TM-652 P.40)
- ③ ORNL-3281 (1962) P.59 (Zry-2)
- ④ HEDL-TME72-128 code GAPCON, BNWL-1778 code GAPCON THERMAL.
- ⑤ J. Nucl. Mater. 20 ('66) 75. $\bar{\alpha}_m - \alpha$ -axis] $_{20^\circ\text{C}}^T$
- ⑥ " " $\bar{\alpha}_m - \epsilon$ -axis] $_{20^\circ\text{C}}^T$
- ⑦ " " $\bar{\alpha}_m$ - Mean Value] $_{20^\circ\text{C}}^T$
- ⑧ Russell (zirconium) Parallel to [0001], WAPD-TM-472 P.22 α_c
- ⑨ " Perpendicular to [0001] α_c
- ⑩ Investigation (Zry-4) Perpendicular to [0001] α_a
- ⑪ " Parallel to [0001] α_a
- ⑫ " " " " " " " "
- ⑬ FIGRO Refer ⑩ and ⑪. $\bar{\alpha}$
- ⑭ Lloyd (zirconium) Perpendicular to [0001] α_a
- ⑮ " Parallel to [0001] α_c

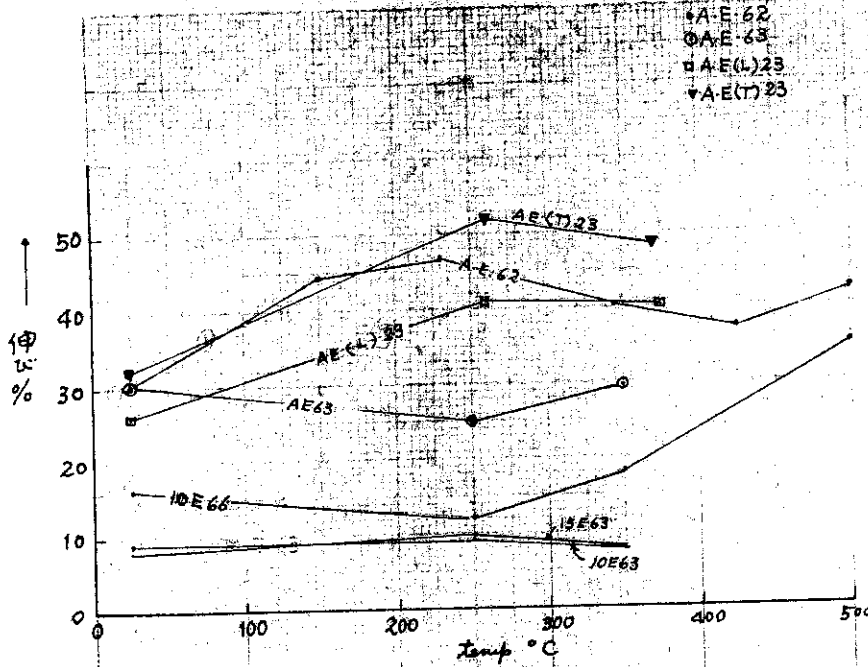


others. i) $\alpha_c = 6.57 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\alpha_a = 5.63 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (at R.T.) iodide Zirconium KAPL-M-RLM-15, May 1958.
 ii) $\alpha = 8.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ Nuclear Eng. 3.24.102, March, 1958.
 iii) $\alpha = 6.48 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (const.) for JPDR Design Report, GEAP-3767 P.52.

Zry 2 の 抗張力、耐力、伸び (HW-60908)

1972.5.16
1964.9.15

D-177



23. Zirconium Highlights WAPD-ZH-12. Nov. 1958.

62. Shober, F.R. et al. The Mechanical Properties of Zr and Zry-2. BNWL-1168. Feb. 1957.

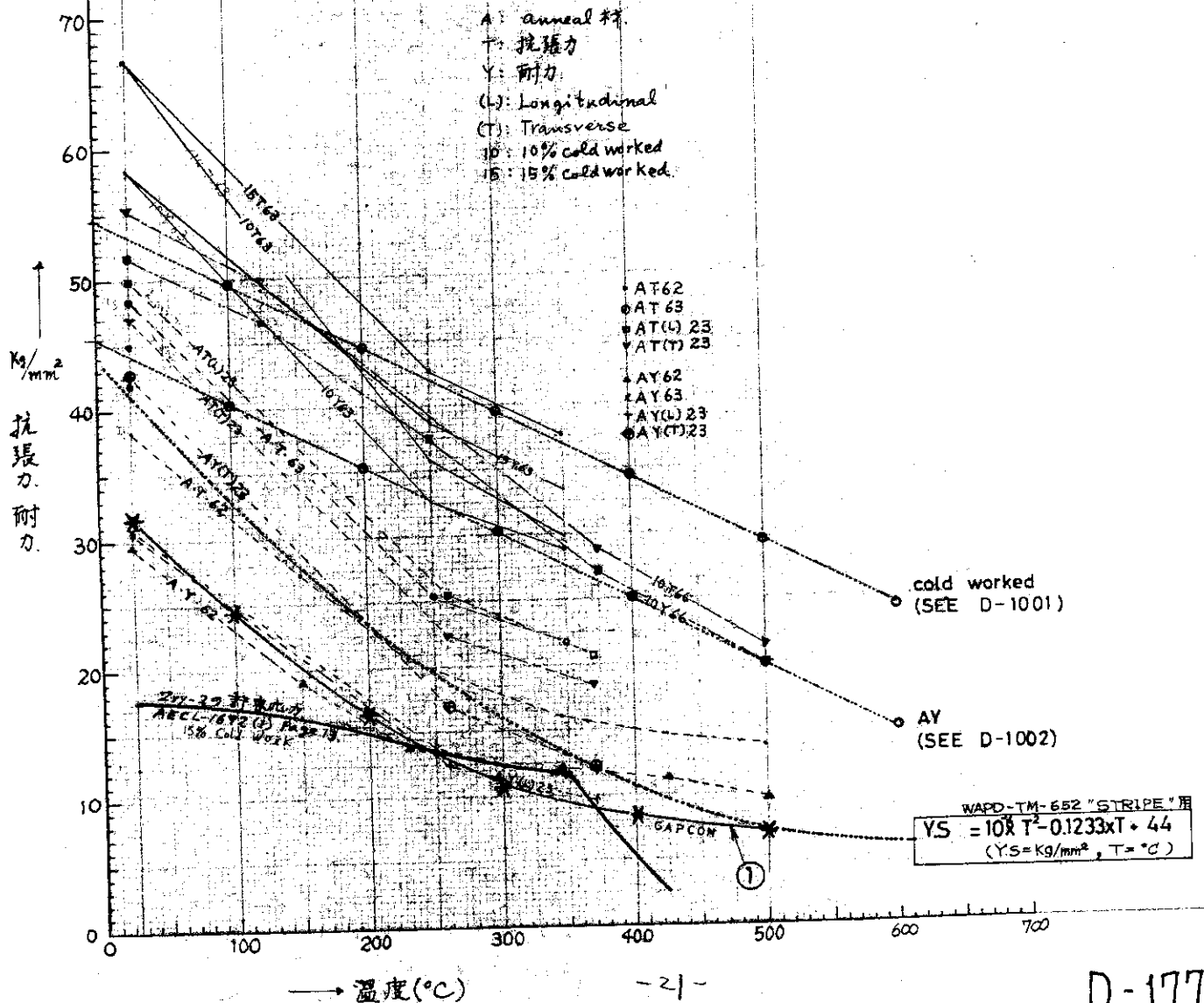
63. Mc Mulien, W. D. Interim Report on Creep Behavior of Zry-2 and Zry-3. WAPD-TM-132, April, 1958.

o AECL-1692

66. Burgess, A.B. and T.G. Edwards. Elevated Temperature Tensile Properties of Zry-2. HW-51722. August 1957.

GEMP-346(1965)

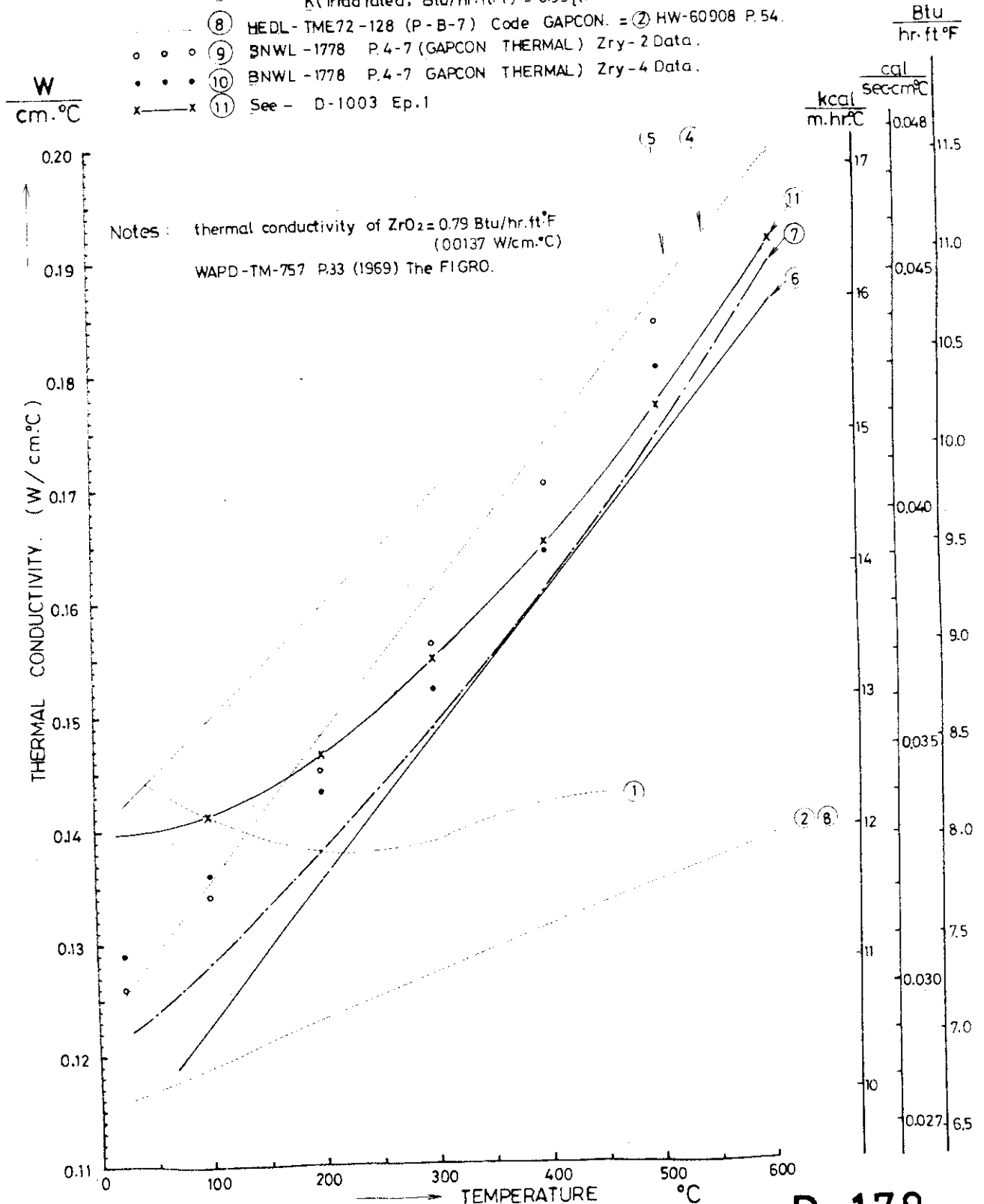
① HEDL-TME 72-128 Code GAPCON. BNWL-1778 p.4-7 GAPCON THERMAL. GAPCONとGAPCON THERMAL-1のデータは一致している



Thermal Conductivity of Zircalloy.

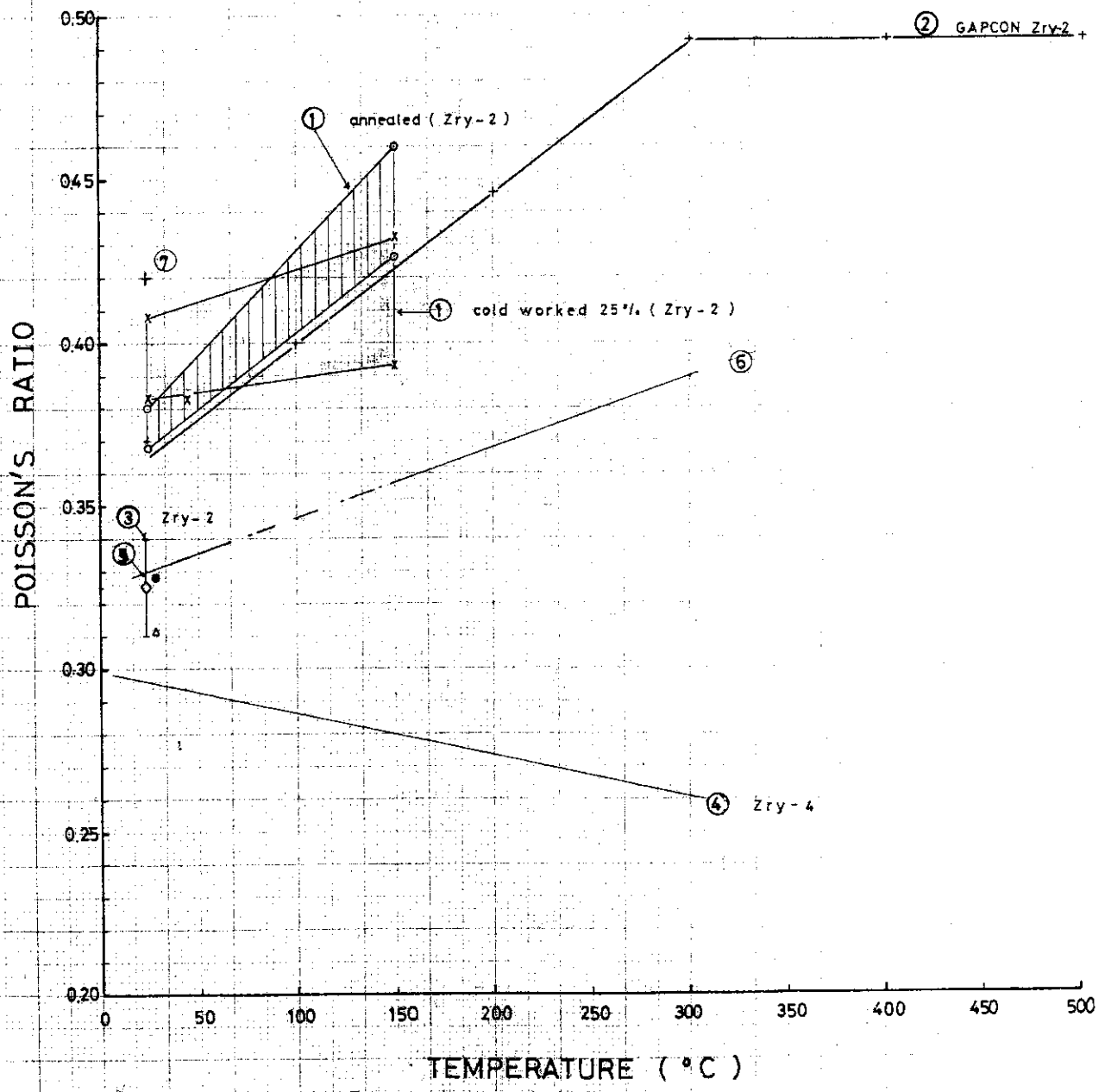
REFERENCES:

- ① HW-60908 P. 54.
- ② HW-60908 P. 54.
- ③ ASTM Special Technical Publication No.314 (1962). Added 1966.10.12.
- ④ JAERI-memo 3592. P.77. Added 1970.6.19. $K_{Zr} = 0.010962 \times T + 10.5462$ K: Kcal/m.hr°C
T: °C
- ⑤ WCAP-3269-41 (1965) W.H.(PWR) Designing Data. $K_{Zry} = (Btu/ft-hr°F) = 0.00316 \times T(°F) + 7.97$
- ⑥ WAPD-TM-652 STRIPE (LWBR Development Program) P.34. (Zry-4 Irradiation Data.)
 $K_{Zry-4} = 1.26 \times 10^{-6} \times T(°C) + 0.1102$ K: W/cm°C
- ⑦ WAPD-TM-757 FIGRO P.7 EQ.1
 $K(\text{irradiated, Btu/hr.ft.}^2°F) = 0.95 \{ (7.23 + (2.41 \times 10^{-3}) \times T(°F) + (1.3 \times 10^{-6}) \times T^2) \}$
- ⑧ HEDL-TME72-128 (P-B-7) Code GAPCON. = ② HW-60908 P.54.
- ○ ○ ⑨ BNWL-1778 P.4-7 (GAPCON THERMAL) Zry-2 Data.
- ● ● ⑩ BNWL-1778 P.4-7 (GAPCON THERMAL) Zry-4 Data.
- x—x ⑪ See - D-1003 Ep.1



POISSON'S RATIO OF ZIRCONIUM ALLOY

- 1 BUREAU OF MINES, ZIRCONIUM (ASTM Special Technical Publication No. 314 (1962))
 - Δ WAPD
 - x BMI
 - KAPL
- 2 HEDL-TME 72-128 Code GAPCON p.B-7; BNWL-1778 code GAPCON THERMAL.
- 3 WAPD-BT-10 (1958) R.E.Johnson 0.325 ± 0.015 (at R.T.)
- 4 WCAP-3269-41 (1965) p.17 $\nu_{Zry-4} = 0.301 - 7.03 \times 10^{-5} T(^{\circ}F)$
- 5 WAPD-TM-652 Code STRIPE p.37 0.325 (at R.T.) (from AECL-2143, Nov' 1964)
- 6 $\nu = 0.325(1 + 6.59 \times 10^{-4} T(^{\circ}C))$
- 7 $\nu = 0.42$ for JPDR Design Report GEAP 3767 P.54.

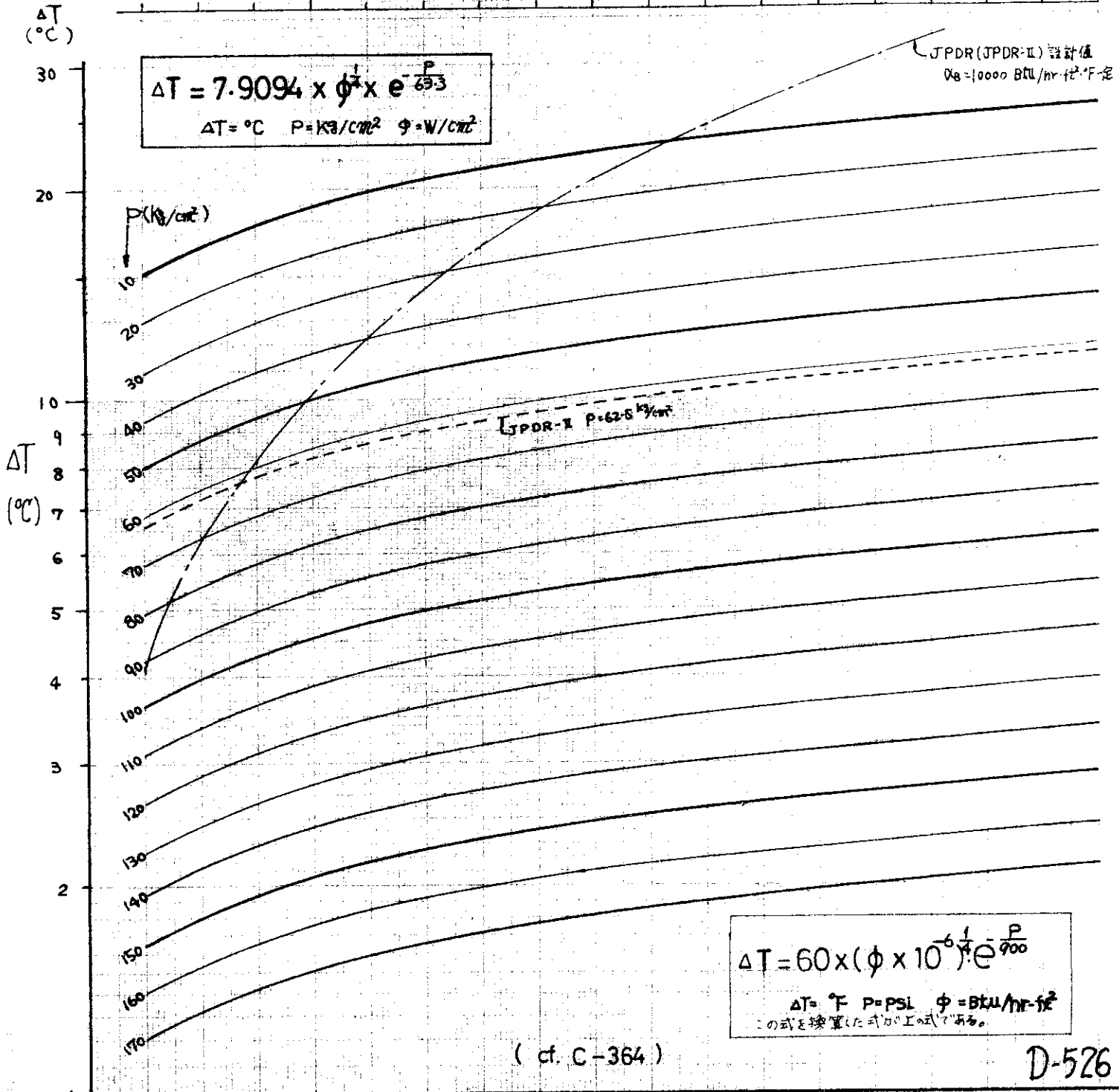
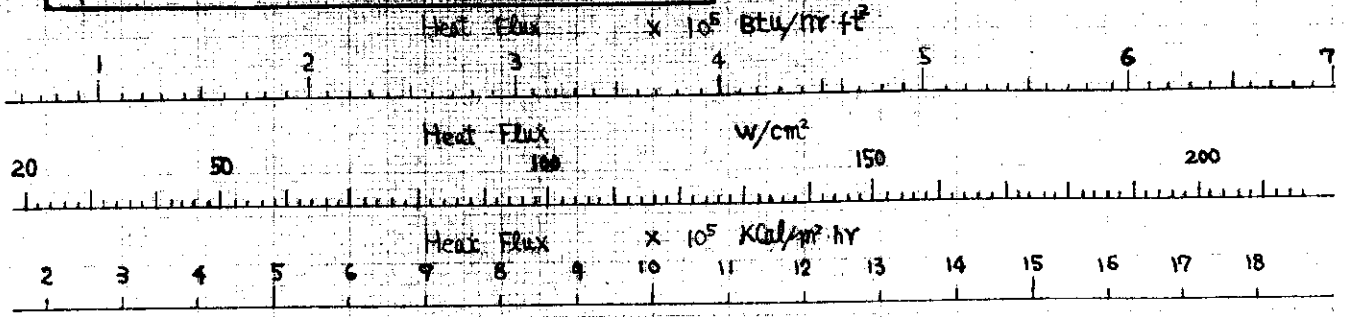


$$\Delta T = \frac{\phi}{\alpha_b} = 0.82 e^{-\frac{P}{653} \phi^2}$$

ΔT	温度差	°C
α_b	熱伝達率	Kcal/m ² ·hr·°C (Kcal/cm ² ·hr·°C)
ϕ	熱流束	Kcal/m ² ·hr
P	圧力	Kg/cm ²

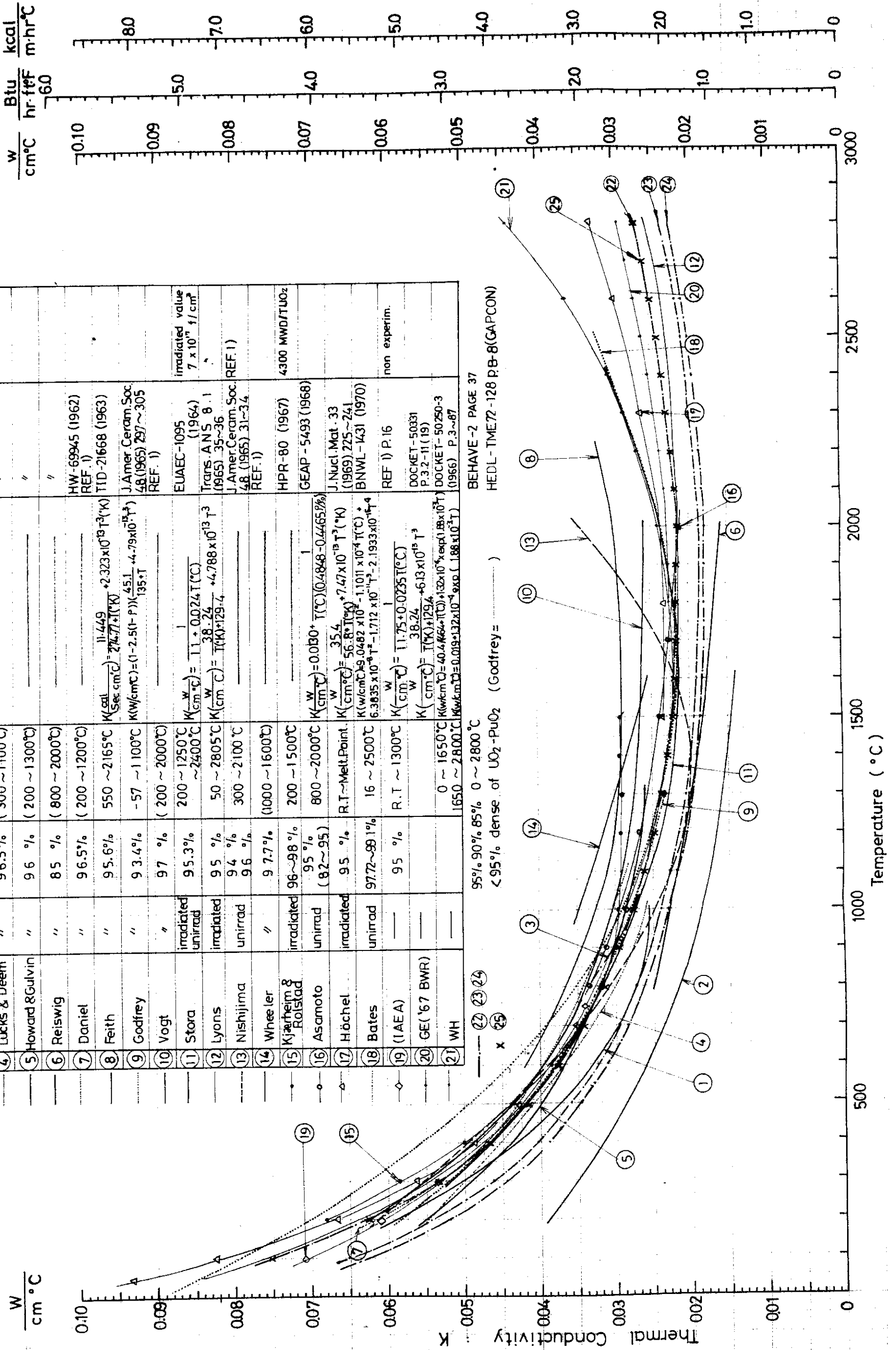
この式の適用範囲

圧力 P	6 ~ 175 kg/cm ²
水温 T	150 ~ 315 °C
流量	4 × 10 ⁴ ~ 3.7 × 10 ⁷ kg/m ² ·hr
熱流束 φ	~ 6.8 × 10 ⁶ kcal/m ² ·hr
流速	1 ~ 12 m/sec



THERMAL CONDUCTIVITY OF UO₂

NO.	Investigators	Irradiation	UO ₂ % of T.O.	Temperature	Equation	References	Remarks
1	Kingery	unirradiated	73%	100 ~ 1000 °C		J. Amer. Ceram. Soc. 37(1954)107~110	
2	Hedge & Fieldhouse	"	74.5%	204 ~ 1666 °C		AECU-3381(1956)	
3	Scott	"	96%	(800 ~ 1100 °C)		REF. 1)	
4	Lucks & Deern	"	96.5%	(300 ~ 1100 °C)		"	
5	Howard & Gulvin	"	96%	(200 ~ 1300 °C)		"	
6	Reiswig	"	85%	(800 ~ 2000 °C)		"	
7	Daniel	"	96.5%	(200 ~ 1200 °C)		HW-69945 (1962)	
8	Feith	"	95.6%	550 ~ 2165 °C	$K(\frac{cal}{sec \cdot cm \cdot C}) = 27.4 - 7.7 \times 10^{-4} T^{1.3} (K)$	TID-21668 (1963)	
9	Godfrey	"	93.4%	-57 ~ 1100 °C	$K(\frac{cal}{sec \cdot cm \cdot C}) = 11.449 + 2.323 \times 10^{-13} T^{13} (K)$ $K(W/cm \cdot C) = (1 - 2.5(1 - P)) K(\frac{cal}{sec \cdot cm \cdot C}) \times 0.451 + 4.79 \times 10^{-13} T^{13}$	J. Amer. Ceram. Soc. 48(1965)297~305	
10	Vogt	"	97%	(200 ~ 2000 °C)		REF. 1)	
11	Stora	irradiated unirradiated	95.3%	200 ~ 1250 °C ~ 2400 °C	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = 11 + 0.024 T (C)$	EUAEC-1095 (1964)	irradiated value $7 \times 10^{-11} 1/cm^2$
12	Lyons	irradiated	95%	50 ~ 2805 °C	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = \frac{38.24}{T(K)^{1.294}} + 4.788 \times 10^{-13} T^3$	TRANS. ANS 8.1 (1965) 35~36	
13	Nishijima	unirradiated	96%	300 ~ 2100 °C		J. Amer. Ceram. Soc. 48 (1965) 31~34	REF. 1)
14	Wheeler	"	97.7%	(1000 ~ 1600 °C)		HPR-80 (1967)	4300 MWD/TUO ₂
15	Kjærheim & Rolstad	irradiated	96~98%	200 ~ 1500 °C		GEAP-5493 (1968)	
16	Asamoto	unirradiated	95%	800 ~ 2000 °C	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = 0.0130 \cdot T(C) + 0.4848 - 0.4465 P(\%)$	J. Nucl. Mat. 33 (1969) 225~241	
17	Höchel	irradiated	95%	R.T. ~ Melt. Point.	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = 56.8 T^{0.354} + 7.47 \times 10^{-13} T^3 (K)$	BNWL-1431 (1970)	
18	Bates	unirradiated	97.72~99.1%	16 ~ 2500 °C	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = 9.0482 \times 10^{-2} - 1.1011 \times 10^{-4} T(C) + 6.3835 \times 10^{-8} T^2 - 1.712 \times 10^{-11} T^3 - 2.1933 \times 10^{-14} T^4$	REF. 1) P. 16	non experim.
19	(IAEA)	"	95%	R.T. ~ 1300 °C	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = 11.75 + 0.0235 T (C)$	DOCKET-50331 P. 3-2-11 (19)	
20	GE ('67 BWR)	"	"	0 ~ 1650 °C	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = 40.4 K(664 T(C)) + 132 \times 10^{-11} T^2 \exp(1.88 \times 10^{-4} T)$	DOCKET-50250-3 (1966) P. 3~87	
21	WH	"	"	1650 ~ 2800 °C	$K(\frac{W}{cm \cdot C}) = 0.019532 \times 10^{-4} \exp(1.88 \times 10^{-4} T)$	BEHAVE-2 PAGE 37 HEDL-TME72-128 P. 8 (GAPCON)	

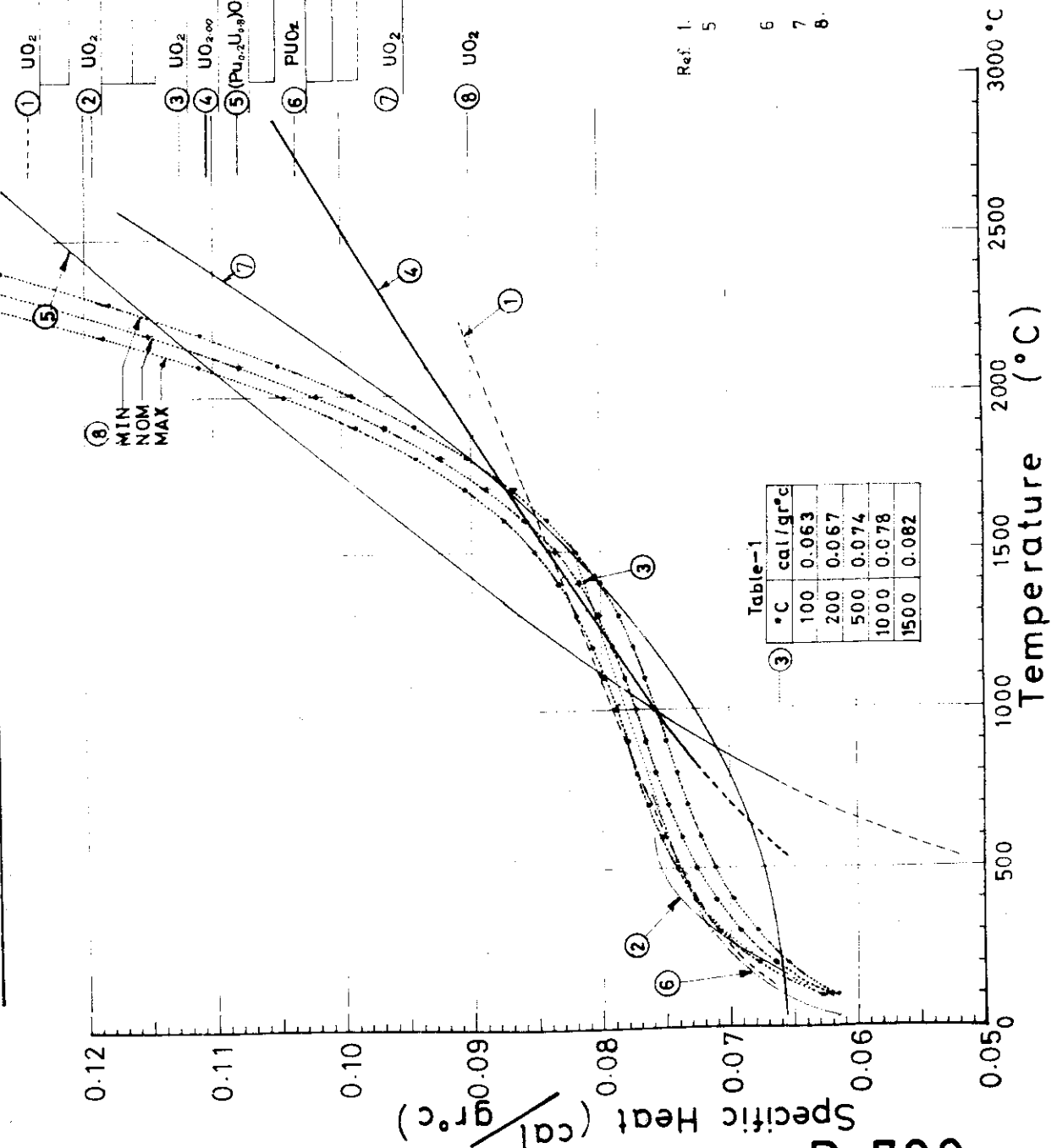


Specific Heat of UO₂ and (Pu_nU_{n-n})O₂ vs. Temperature

- ① UO₂ Cp(cal/mole°C) = $18.45 + 2.431 \times 10^{-3} T(^{\circ}K) - 2.272 \times 10^{-7} T^2(^{\circ}K)$ ref.1
Cp(cal/gr°C) = $0.06833 + 0.9003 \times 10^{-5} T(^{\circ}K) - 0.845 \times 10^{-9} T^3(^{\circ}K)$
- ② UO₂ Cp(cal/mole°C) = $15.29 + 1.716 \times 10^{-2} T(^{\circ}C) - 1.41 \times 10^{-5} T^2(^{\circ}C)$ ref.1
Cp(cal/gr°C) = $0.0566 + 0.6355 \times 10^{-4} T(^{\circ}C) - 0.5222 \times 10^{-7} T^2(^{\circ}C)$
for 160°C ≤ T ≤ 603°C
- ③ UO₂ See Table 1 (ref.1)
- ④ UO_{2.00} Cp(cal/gr°C) = $0.06186 + 1.52 \times 10^{-5} T(^{\circ}C) - 1345 T^2(^{\circ}C)$ ref.5
- ⑤ (Pu_nU_{n-n})O₂ Cp(cal/gr°C) = $0.05252 + 2.8 \times 10^{-5} T(^{\circ}C) - 4500 T^2(^{\circ}C)$ ref.5
for 800°C ≤ T ≤ 1290°C
- ⑥ PUO₂ Cp(cal/mole°K) = $1934 + 1.56 \times 10^{-3} T(^{\circ}K) - 2.8 \times 10^{-5} T^2(^{\circ}K)$ ref.6
Cp(cal/gr°C) = $0.07137 + 0.5756 \times 10^{-5} T(^{\circ}K) - 0.1033 \times 10^{-4} T^2(^{\circ}K)$
for 300°K ≤ T ≤ 1000°K
- ⑦ UO₂ Cp(cal/gr°C) = $0.0823 \times 10^{-2} T^2 - 0.9556 \times 10^{-6} T + 0.0657$ (T: °C) ref.7
- ⑧ UO₂ Cp(cal/mole°K) = $A * D * B^2 * e^{B/K} + 2 * E * K + \frac{F * C}{G * K^2} * e^{C/(G * K)}$ ref.8
K² (e^{B/K} * (-1))

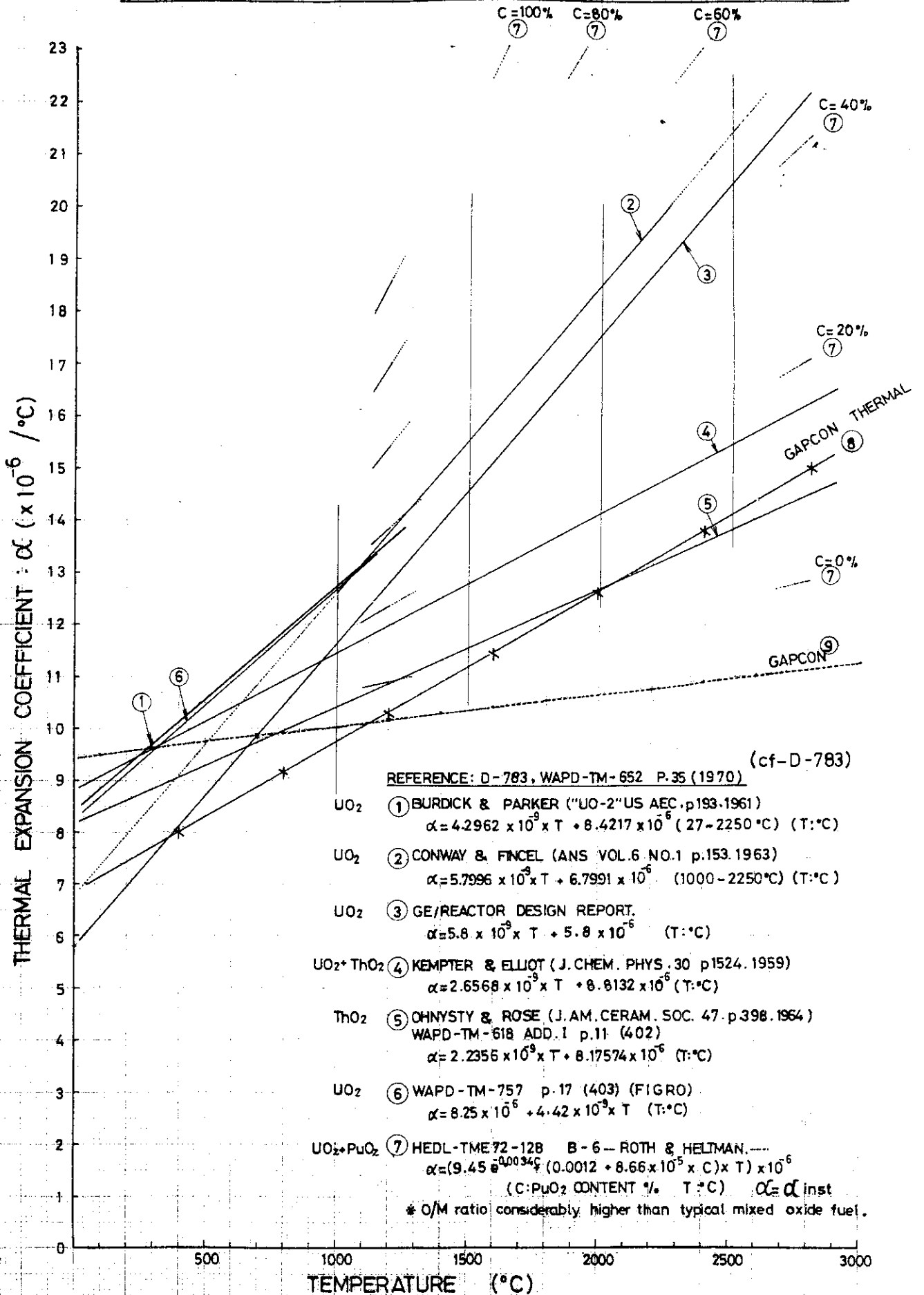
A : NOMINAL = 1.0
B : 535.285 C : 37.6946 D : 19.1450 E : 0.000784733
F : 56.43730.0 G : 0.001986 K : °K

Ref. 1. UO₂ J. Belle. U.S.A.E.C.
5 21st AEC High Temperature Fuels Committee Meeting, 6E San Jose, California, Contributions to 21st High Temperature Fuels Committee Meeting - PUO₂-UO₂ Phase Diagram.
6 JAERI memo No 3171 Page 24. (7)UO₂-PuO₂系における熱容量-温度関係の測定.
7 JAERI memo 3592 P. 77 (1969.6) '熱容量の測定' 燃料特性コード BUREKA 1)
8 BNWL-1778 p.C-4. (GAPCON THERMAL)



D-700

THERMAL EXPANSION COEFFICIENT OF UO₂ AND ThO₂.



(cf-D-783)

REFERENCE: D-783, WAPD-TM-652 P.35 (1970)

UO₂ ① BURDICK & PARKER ("UO-2" US AEC, p.193, 1961)
 $\alpha = 4.2962 \times 10^{-9} \times T + 8.4217 \times 10^{-6} \quad (27-2250^\circ\text{C}) \quad (T:^\circ\text{C})$

UO₂ ② CONWAY & FANDEL (ANS VOL.6 NO.1 p.153, 1963)
 $\alpha = 5.7996 \times 10^{-9} \times T + 6.7991 \times 10^{-6} \quad (1000-2250^\circ\text{C}) \quad (T:^\circ\text{C})$

UO₂ ③ GE/REACTOR DESIGN REPORT.
 $\alpha = 5.8 \times 10^{-9} \times T + 5.8 \times 10^{-6} \quad (T:^\circ\text{C})$

UO₂+ThO₂ ④ KEMPTER & ELLIOT (J. CHEM. PHYS. 30 p1524, 1959)
 $\alpha = 2.6568 \times 10^{-9} \times T + 8.8132 \times 10^{-6} \quad (T:^\circ\text{C})$

ThO₂ ⑤ OHNYSTY & ROSE (J. AM. CERAM. SOC. 47 p.398, 1964)
 WAPD-TM-618 ADD.1 p.11 (402)
 $\alpha = 2.2355 \times 10^{-9} \times T + 8.17574 \times 10^{-6} \quad (T:^\circ\text{C})$

UO₂ ⑥ WAPD-TM-757 p.17 (403) (FIGRO)
 $\alpha = 8.25 \times 10^{-6} + 4.42 \times 10^{-9} \times T \quad (T:^\circ\text{C})$

UO₂+PuO₂ ⑦ HEDL-TME 72-128 B-6 - ROTH & HELTMAN, ----
 $\alpha = (9.45 \times 10^{-9} + 0.0034 \times 10^{-6} \times C) \times T + 8.66 \times 10^{-6} \quad (C: \text{PuO}_2 \text{ CONTENT } \%, T:^\circ\text{C}) \quad \alpha = \alpha_{inst}$

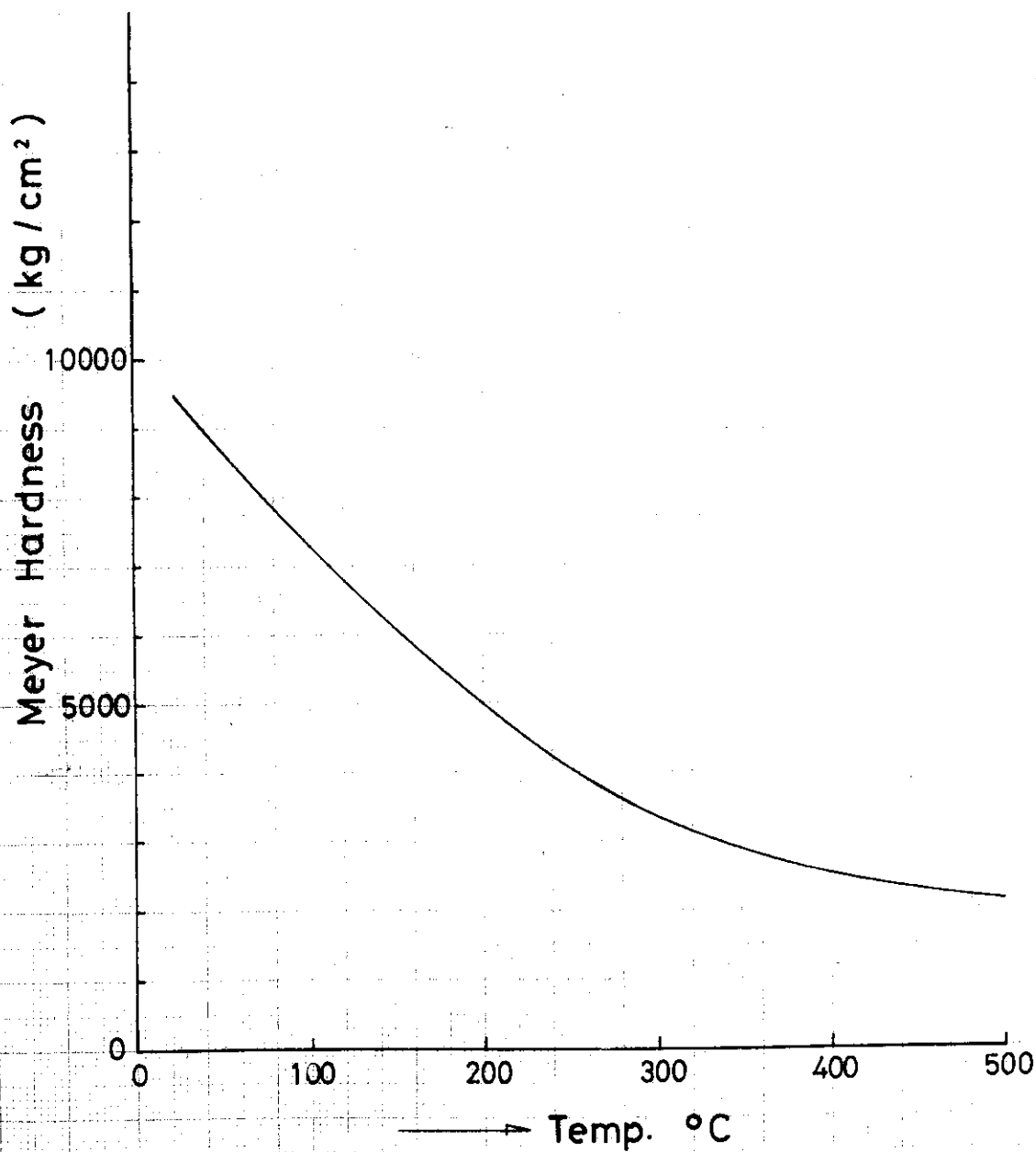
* O/M ratio considerably higher than typical mixed oxide fuel.

— x — x UO₂ ⑧ BNWL-1778 p. 4-6 (GAPCON THERMAL) $\alpha_{avg} = ((T^2 - 625) \times 2.896 \times 10^{-9} + (T - 25) \times 6.797 \times 10^{-6}) \times \frac{1}{T - 25}$
 (CONWAY, FANDEL, AND HEIN) T: °C

----- UO₂ ⑨ HEDL-TME-72-128, B-6 $\alpha = (9.45 \times (T - 25) + 0.0006 \times (T^2 - 625)) \times 10^{-6} / (T - 25)$
 (ROTH and Helteman) GAPCON T: °C (25°C ~ T) - 28 - 1974.1.25.M.F. D-812

Zircaloy - 2 Meyer Hardness

HEDL - TM72 -128 Code GAPCON.
BNWL-1778 Code GAPCON THERMAL.



Temperature Drop at the Coolant-Cladding Interface

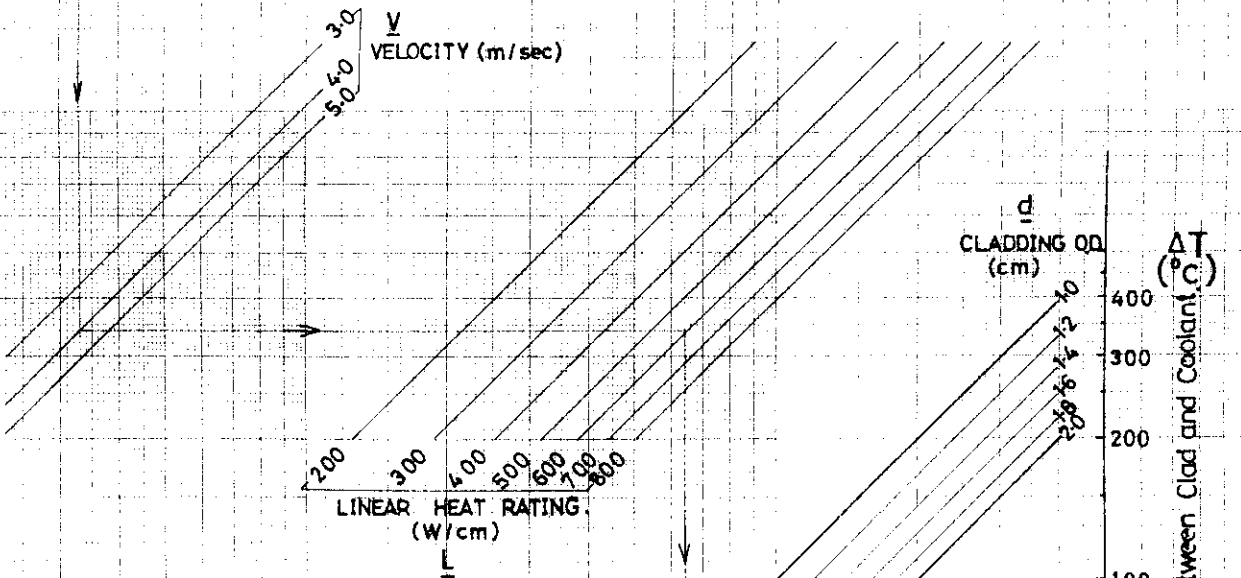
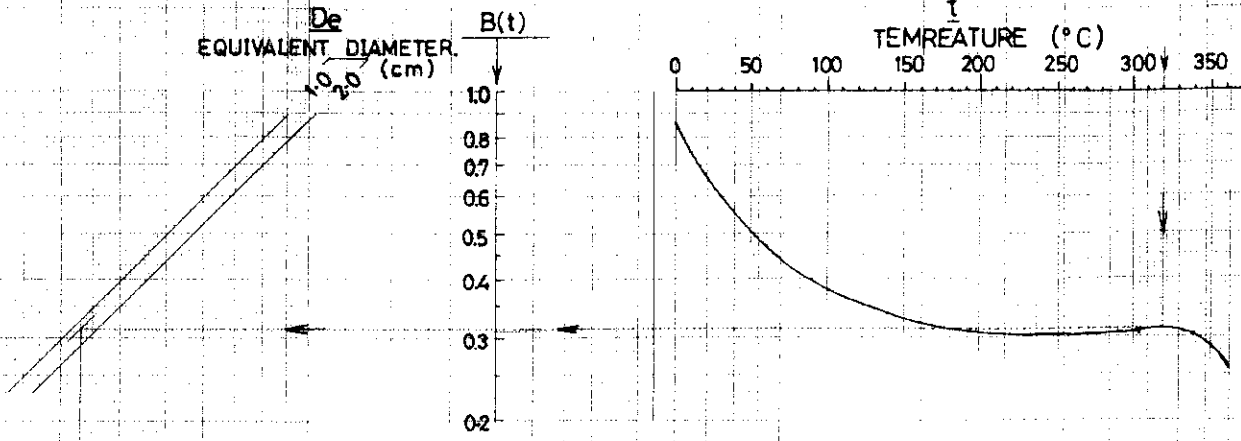
$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = B(t) \cdot \frac{L \cdot De^{0.2}}{d \cdot V^{0.8}}$$

where $B(t) = 1 / [100^{0.08} \times 0.023 \times Pr^{0.4} \times (\mu/P)^{0.8} \times K]$

$$h_f = 0.023 \cdot (K/De) \cdot (De \cdot V \cdot \rho / \mu)^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$

$$\Delta T = \phi / h_f = L / (h_f \cdot \pi d)$$

- ΔT = Temperature Difference between Clad and Coolant ($^{\circ}\text{C}$)
- L = Linear Heat Rating (W/cm)
- De = Equivalent Diameter (cm)
- d = Cladding Outer Dia. (cm)
- V = Coolant Velocity (m/sec)
- h_f = Cladding-to-Coolant Heat Transfer Coefficient (W/cm 2)
- Pr = Prandtl's Number
- μ/P = Kinematic Viscosity (cm 2 /sec)
- K = Thermal Conductivity of Coolant (W/cm $^{\circ}\text{C}$)
- ϕ = Heat Flux of Cladding O.D. (W/cm 2)
- t = Mean Temperature of Coolant (pressurize water) ($^{\circ}\text{C}$)
- $100^{0.08}$ = Conversion Factor from (m/sec) $^{0.8}$ to (cm/sec) $^{0.8}$

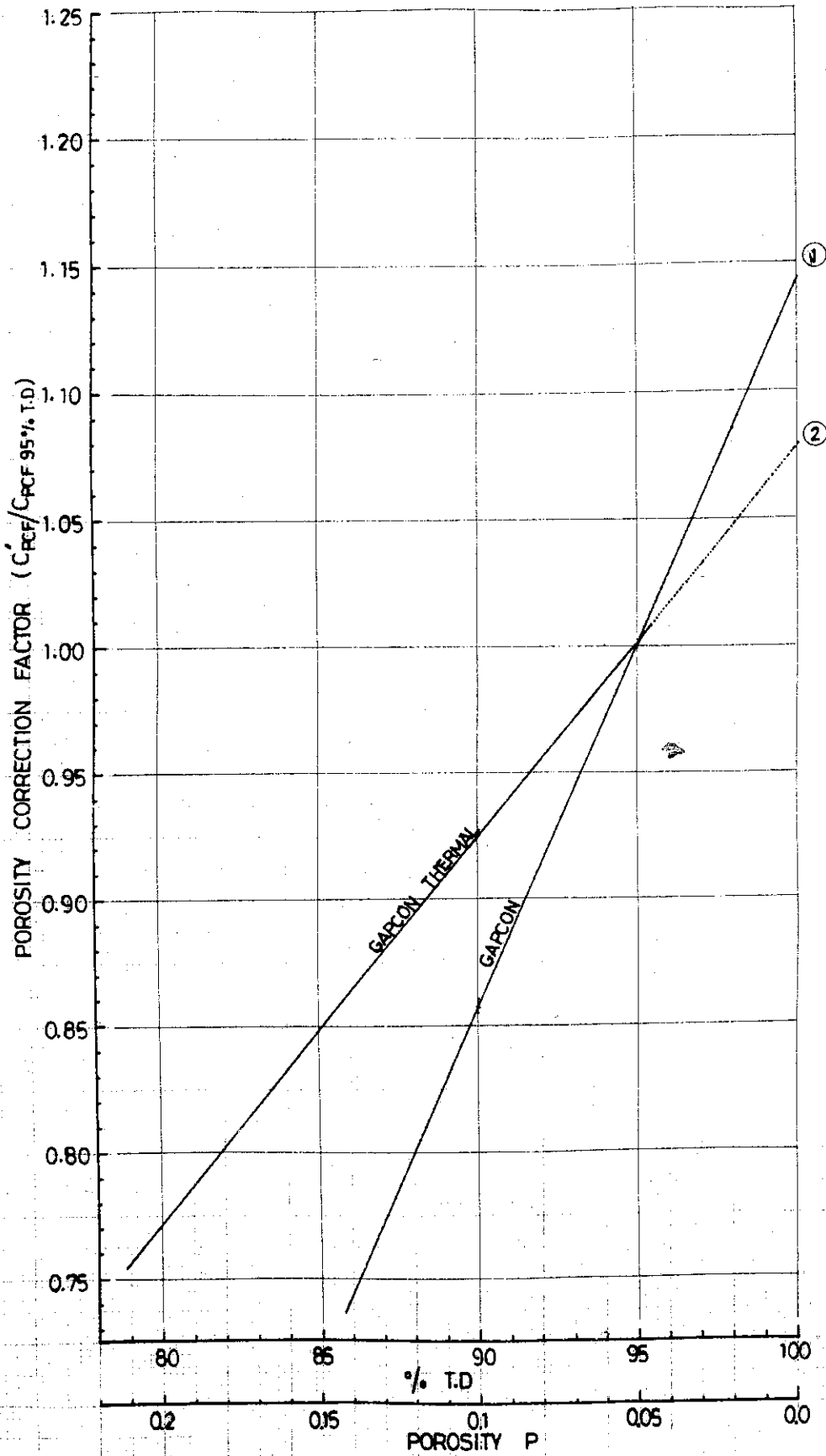


EXAMPLE:
 MIHAMA-3
 where $t = 320^{\circ}\text{C}$ $De = 1.4\text{cm}$
 $V = 4\text{ m/sec}$ $L = 600\text{ W/cm}$
 $d = 1.07\text{ cm}$
 $\Delta T = 61.7^{\circ}\text{C}$

**POROSITY CORRECTION FACTOR (C_{PCF})
FOR THERMAL CONDUCTIVITY OF UO_2 .**

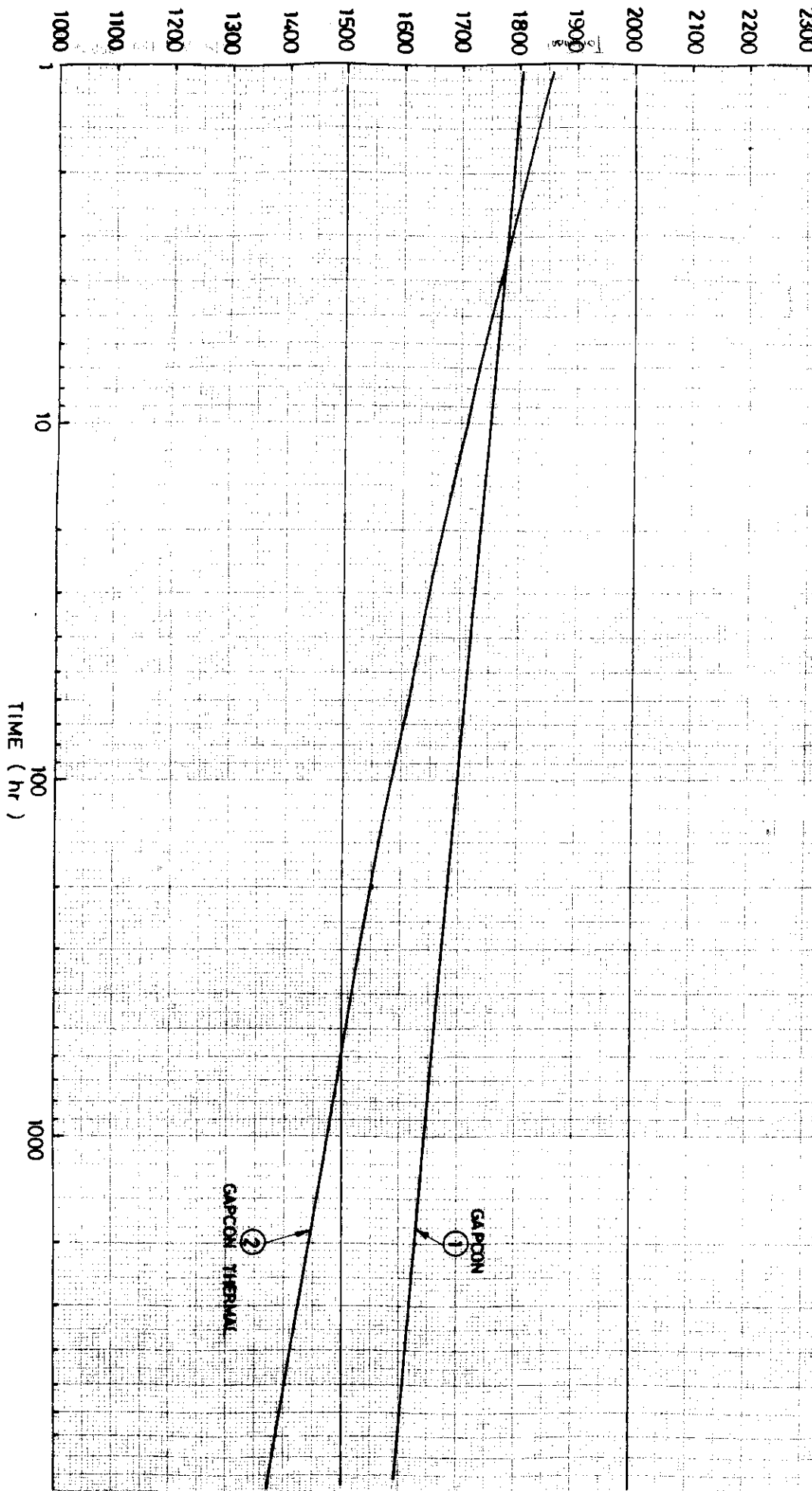
Tschann

D-934



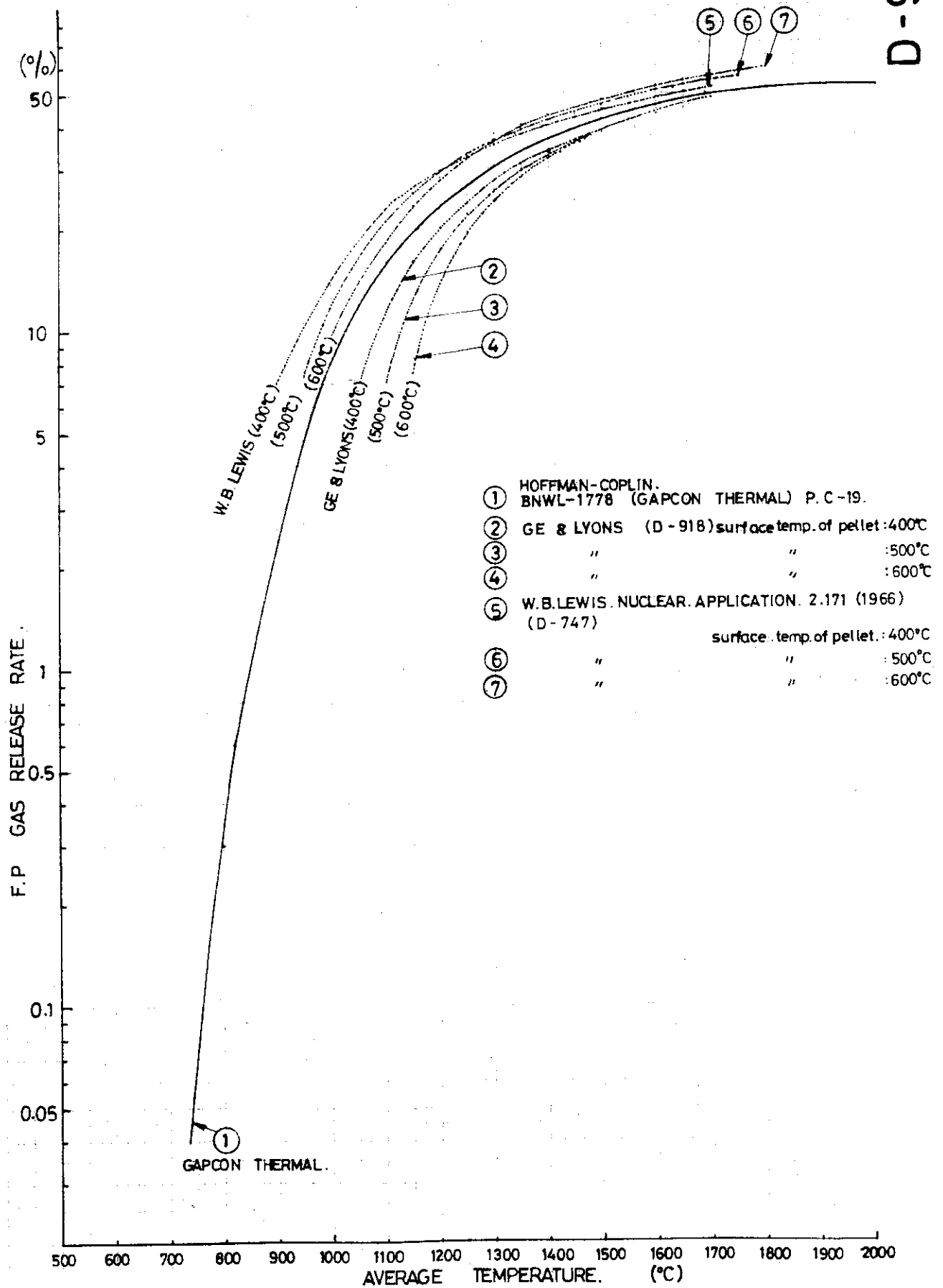
TEMPERATURE (°C) FUEL RESTRUCTURING TEMPERATURE. (GAPCON)

- ① $1/T_{RS} = 0.00001367 \log_{10}(t) + 0.0000480$ HEDL-TM-72-128 P. 8-17 (GAPCON) (by CHRISTENSEN)
 - ② $1/T_{RS} = 0.000003435 \log_{10}(t) + 0.0000469$ properties and behavior of fast reactor fuels, (PIZ14),
 Trans. Am. Nuc. Soc. Vol. 15 No. 1, June 1972. (by CHRISTENSEN)
- T_{RS} : temperature to which restructuring occurs (°K)
 t: time at power (hr).



F.P Gas Release Rate from UO₂ Pellet.

D-937



D-937

5 利用上の問題点

(1) 安全についての保守性

“このコード (GAPCON-THERMAL-1)中の多くのモデルは、データの最良推定値を基にして作られており、コードはデータに合わせるように人工的な細工を加えていない。”と原著者は述べている。

この意味は個々のモデルについては、それぞれのデータにもとづいて、その最良推定値が得られるようにしてあるが、これら多数のモデルをコーディングして、一つのまとまった GAPCON-THERMAL-1 コードを作成した場合、これらの総合としての実験データに合わせるために、個々のモデルを修正するようなことはしなかった。ということであろう。たとえば、GAPCONでは UO_2 の熱膨脹率の計算式として Roth and Halteman⁽⁶⁾ の実験から得られた式をもとにしたが、ギャップ熱伝達率に関する予測値と合わせるために、上式に 1.15 を乗じて使用している。これは燃料の変形に関する他の現象（たとえばリロケーション、スウェリング等）のモデル化の不備な点を、熱膨脹率の補正^{?)}によって肩代わりさせているものと思われる。コードが複雑多岐にわたってくると、このような肩代わりの補正はかえって個々の現象の正しい姿を見失うおそれが出てくる。GAPCON-THERMAL-1 で個々のモデルに人工的な補正を加えなかったのは上記の理由によるものであろう。

冷却材喪失事故直前の燃料蓄積エネルギーの評価に際して、ホットギャップは重要な因子であり、これはペレットとの熱膨脹、スウェリング、リロケーション、被覆管の熱膨脹、弾性変形、外圧によるクリープ変形などに依存する。

これらの現象の中で、(1)もし正確なモデル化が可能なら、最良推定値を基にしてモデル化する。(2)正確なモデル化がむずかしければ、保守的にモデル化する。(3)正確なモデル化がむずかしく、さらにギャップをせばめる方法に作用する現象は無視する。という考え方でコードを組んでも保守性は保たれるであろう。

たとえば GAPCON-THERMAL-1 では、被覆管のクリープを外部入力によって指定できるようにってはいるものの、クリープモデルとしてはプログラム化されていないので、外部からの指定がなければ、クリープは事実上無視されたことになり、上記(3)の考え方に相当する。

したがって、GAPCON-THERMAL-1 は、上記事故時の蓄積エネルギー算出用としては、保守性を有しており、妥当と認められるかもしれないが、燃料設計用最良推定値予測用コードとして使用することは問題である。

緒論の終りに、“大きな直径ギャップに関するモデルを作ることが、最も急がれていたので、我々はこの点に努力を集中した。”とのべられているが、この点とは、具体的にギャップ消失に関するリロケーションのモデルの検討、非可逆的ラチェッティングのモデルの検討、スウェリングの検討が主なものであろう。結果としては先きのべた通り、リロケーションと非可逆的ラチェッティングのモデル化は成功せず、新しいスウェリングモデル（無拘束スウェリングモデル）を開発し、これと GAPCON で用いられていた Geithoff のスウェリングモデルを組合せた計算によって代行させる結果となっている。

したがって、大きいギャップ寸法に無関係な現象の取扱いについては、GAPCONの内容を無神経と思われる程そのまま使用しているか、改修しても詳細な考察は払われていない。たとえば、付録C-19 ページのジルカロイ-2のヤング率は、誤まりと思われるデータがGAPCONと同じく、そのままのせられているし、C-20ページのジルカロイ-4の物性値については熱伝導率の他は、詳細に検討されているとは思われない。また、BWRの場合、冷却材と被覆管の熱伝達率は一般にJens Lottesの式が用いられる例が多いが、これに相当する式は用意されていない。

高速炉用プログラムを熱中性子炉用プログラムに改造し、GAPCON-THERMAL-1と改名され、冷却材-被覆管の熱伝達率の計算に、ナトリウム用の計算式(副プログラムHTCLM)、と加圧水型用としてDittus-Boelter⁽¹⁶⁾の式(副プログラムHTCW)は用意されているものの、沸騰水型の場合のJens Lottesの式が用意されておらず、SIGHFに熱伝達率の値を外部入力しなければならないのは、片手落ちの感がないではない。

(2) 接触熱伝達

燃料表面と被覆管内面間の熱伝達率を計算するのに、GAPCON, GAPCON-THERMAL-1共、修正したRoss and Stouteの実験式を使用している。Ross and Stouteの式を計算機プログラムで使用する場合注意すべき問題点のいくつかをここで説明する。

i) Ross and Stouteは、ギャップ熱伝達が3つの要素で構成されていると考える。すなわち、ペレット表面と被覆管内面間の熱輻射によるもの、ギャップ中に含まれるガスの熱伝導によるもの、接触によって発生する接触熱伝達である。

熱輻射による熱伝達は、軽水炉燃料棒のように燃料ペレット表面温度が1000°C以下の場合、他のガスによる熱伝導等に比べて小さく、全体の熱伝達の数%程度にすぎず、これを無視しても大きな値の変更は起らない。

数値計算を行えば分る通り、接触が起った場合、接触熱伝達は全体の熱伝達に非常に大きな効果を持っている。

ii) プログラムGAPCONおよびGAPCON-THERMAL-1において使用されているギャップ熱伝達の式は次のようである。

$$k_g = \frac{k_m \cdot P_i}{a_0 R^{0.5} \cdot H} + \frac{k_g}{C(R_1 + R_2) + (g_1 + g_2)} + h_r \quad (5.1)$$

ここで、

$$k_m = \frac{2k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

k_1 = 被覆管熱伝導率 (内面温度における)

k_2 = ペレット熱伝導率 (表面温度における)

P_i = 接触圧力

a_0 = 定数 $0.5 \text{ cm}^{\frac{1}{2}}$

$$R = \left(\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

R_1 = 被覆管内表面のあらさ, 高さの算術平均値

R_2 = ペレット表面のあらさ, 高さの算術平均値

H = 被覆管のメイヤ-硬度

k_g = 接触面のガス熱伝導率

$C = P_i$ に依存する係数

g_1, g_2 = 被覆管内面とペレット外表面の " Temperature jump distance "

h_r = 輻射熱伝達率

この式は, ギャップが閉ざされた場合の式である。もしギャップがある場合は, $R_1 = 0$ であるから, 第1項はなくなる。さらに第2項は, ギャップがあり, $t_H \geq C(R_1 + R_2)$ ならば次のように修正される。

$$k_g = \frac{k_g}{t_H + (g_1 + g_2)} \quad (5.2)$$

ここで, t_H は熱料と被覆管のギャップの半径方向の厚さである。

この関係は, Table 4.1 に示す通りである。ここで補正係数 C は接触圧力に関係するものとしている。接触圧力はギャップが閉ざされなければ発生しないにもかかわらず, ギャップがありその大きさが $0 \leq t_H < C(R_1 + R_2)$ の間は Table 4.1 の第2段目の式を使用するという, 混乱した使用方法になっている。

Table 4.1 GAPCONにおけるギャップ熱伝達計算式

ギャップ		h_g
なし ($t_H \leq 0$)		$\frac{k_m \cdot P_i}{a_0 \cdot R^{0.5} H} + \frac{k_g}{C(R_1 + R_2) + (g_1 + g_2)} + h_r$
あり ($t_H > 0$)	$t_H < C(R_1 + R_2)$	$\frac{k_g}{C(R_1 + R_2) + (g_1 + g_2)} + h_r$
	$t_H \geq C(R_1 + R_2)$	$\frac{k_g}{t_H + (g_1 + g_2)} + h_r$

{ただし, $C = 1.98 \exp(-0.00125 \cdot P_i)$ }

GAPCONに使用されているギャップ熱伝達率計算式の概略の様子は図示すると大略 Fig. 4.1 のようになるであろう。

すなわち, ギャップがある場合とない場合とで, ギャップ寸法の変化に対する熱伝達率が極端に異なることである。さらに, ギャップ寸法が $0 \leq t_H \leq C(R_1 + R_2)$ の間では, 熱伝達率は一定となる。これらのことは熱伝達率を求める上での非常な障害を与える。

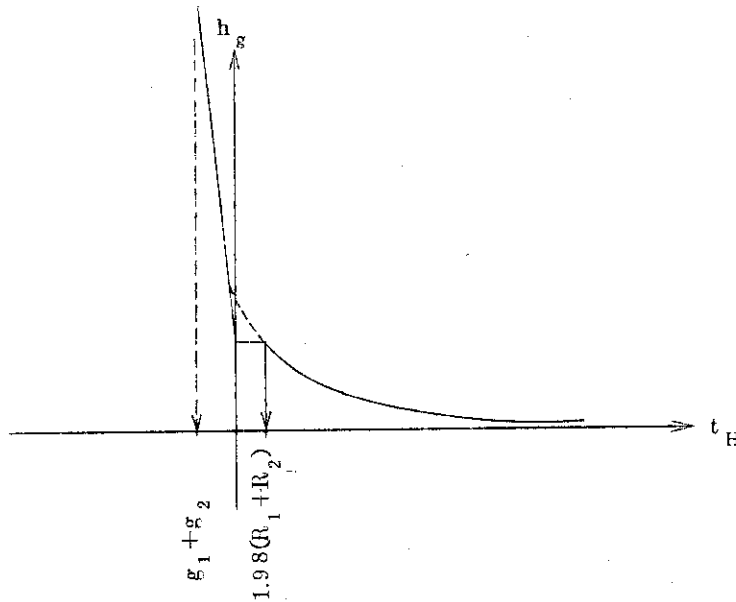


Fig. 4-1 GAPCONプログラムの熱伝達係数の概略

iii) Jump distance について

プログラムGAPCONはJump distance に関し以下に説明するように考えている。

Ross and Stoute によれば、二つの物体にかこまれたガスの層においてガス中の熱伝導抵抗による温度降下があり、さらに物体表面で急激な温度降下があるとしている。Jump distance とは物体表面近くでのガス中の温度勾配を外挿し表面における急激な温度降下に等しくなる距離である。

いま、ギャップを通る熱量を Q 、ペレットの半径を r_1 、被覆管内半径を r_2 、ガスの熱伝導率を k_g としたとき、ギャップ中($r_1 \leq r < r_2$)における熱伝導は次式に従う。

$$-k_g \frac{dT}{dr} = \frac{Q}{2\pi r}$$

したがって、ガスの熱伝導による熱温度降下 ΔT_g は、

$$\Delta T_g = \frac{Q}{2\pi k_g} \ln(r_2/r_1)$$

である。ペレット表面における温度勾配は、

$$\left| \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_1} = \frac{Q}{2\pi r_1} \cdot \frac{1}{k_g}$$

であり、被覆管内面における温度勾配は、

$$\left| \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_2} = \frac{Q}{2\pi r_2} \cdot \frac{1}{k_g}$$

で表わされる。表面における温度差を ΔT_1 、 ΔT_2 、Jump distance を g_1 、 g_2 とすると

$$k_g \cdot \Delta T_1 = g_1 \cdot \frac{Q}{2\pi r_1}$$

$$k_g \cdot \Delta T_2 = g_2 \cdot \frac{Q}{2\pi r_2}$$

が成立する。ガス層における全温度降下は、

$$\begin{aligned} k_g (\Delta T_1 + \Delta T_g + \Delta T_2) &= \frac{Q}{2\pi} \left\{ \frac{g_1}{r_1} + \ln(r_2/r_1) + \frac{g_2}{r_2} \right\} \\ &= \frac{Q}{2\pi r_1} \{ r_1 \ln(r_2/r_1) + g_1 + g_2 (r_1/r_2) \} \end{aligned} \quad (5.3)$$

と表される。

ここで、GAPCONは次のように考える。

ペレット半径 (r_1) と被覆管内半径 (r_2) はほとんど等しいので、 $r_2 = r_1 + t$ 、(t ; 半径ギャップ寸法) とすれば、

$$r_1 \ln(r_2/r_1) \cong r_1 (t/r_1) = t, \quad r_1/r_2 \cong 1$$

なので、

$$\phi (= \frac{Q}{2\pi r_1}; \text{heat Flux}) = \frac{k_g}{t + (g_1 + g_2)} \cdot \Delta T \quad (5.4)$$

となる。 $t = 0$ ならば、GAPCONが与えているように熱伝達率は $k_g / (g_1 + g_2)$ となる。

(3) プログラムの収斂法

燃料ペレットと被覆管内面間の間隙 (ギャップ, gap) における熱伝達 (ギャップ熱伝達) が温度、ギャップ寸法によって変化すると考える。その時燃料棒内温度分布を求める計算プログラムには困難な問題が生じる。

例えば、プログラムにおいて最初ギャップ熱伝達率に大きな値を仮定すると、燃料ペレットの温度は低く計算され、燃料ペレットは収縮 (熱膨張の減少) することになる。その結果、ギャップ寸法は増大しギャップ熱伝達率は減少する。一方、ギャップ熱伝達率が小さな値だとすると、燃料ペレットの温度は高く計算され、その結果、燃料ペレットの熱膨張によりギャップ寸法が減少し、ギャップ熱伝達率は最初仮定した値より大きくなければならないという結果になる。

燃料棒内各部分の温度を求めるプログラム内においては、上記の二つの場合をくりかえしながら最適な値に収斂させるという手法が一般に採用されている。これは、プログラム GAPCON, GAPCON-THERMAL-1 ばかりでなく、FIGRO等においても行なわれているものである。

収斂法としては、何故かいずれのプログラムにも原始的手法が用いられ、しかも、計算結果の発散、あるいは振動がしばしば起る。

これは、ギャップ熱伝達率を求める計算式、Ross and Stoute の式自体の中に内存する問題点が多い（第5章(2)に説明した通り）が、収斂方法にも問題がある。

いま、燃料および被覆管の熱伝導率に温度依存性がないとし、被覆管の熱膨脹による変位も無視した、最も簡単なモデルを考えてみよう。

ペレット表面温度 (T_s) は、ギャップ熱伝達率を (h_g) 被覆管内面温度を (T_i) とすると、次のように表わされる。

$$T_s = h_g \phi + T_i \quad (5.5) \quad 5.5$$

ここで、 ϕ はギャップにおける熱流束で、燃料棒の線出力密度を P とすれば、 $\phi = P / 2\pi R$ (R ; ペレット半径) であり、出力に比例している。

次に、ペレットの熱膨脹 (ΔR) は

$$\Delta R = \left\{ \frac{1}{2} (T_c - T_s) + (T_s - T_{R.T}) \right\} \alpha_f \cdot R$$

ここで、 α_f ; ペレット熱膨脹係数

T_c ; ペレット表面温度

と表わされる。したがってギャップにおける半径ギャップ寸法 g は次のように表される。

$$g = g_c - \alpha_f \cdot R \left\{ \frac{1}{2} (T_c - T_s) + (T_s - T_{R.T}) \right\} \quad (5.6)$$

ここで、 g_c ; 室温におけるギャップ

また、 $T_c - T_s$ は出力 P に関係しており、

$$T_c - T_s = \frac{P}{4\pi k}$$

と表される。ただし、 $g < 0$ の場合はペレットと被覆管の干渉値と考える。

ギャップ熱伝達率 (h_g) は、Ross and Stoute の式等を参考にすれば、大略次のように書かれる。

$$h_g = A |g| + \frac{B}{g_j + g} \quad (5.7)$$

ここで、 A, B ; 定数

g_j ; Temperature jump distance

であり、 $g \geq 0$ の場合 (ギャップがある場合) は

$$h_g = \frac{B}{g_j + g}$$

であり、 $g \leq 0$ (接触している) 場合は

$$h_g = A (-g)$$

となる。

すなわち、燃料棒のギャップ熱伝達率を求めるということは、以上述べた (5.5), (5.6) (5.7) の3式を満足するような h_g を求めることである。上記の3式は熱伝導率等が一定として説明したが、一般にはもっと複雑な函数形をとる。

すなわち,

$$\left. \begin{aligned} T_s &= f_1(h_g) \\ g &= f_2(T_s) \\ h_g &= f_3(g) \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

と表されるであろう。

燃料棒のギャップ熱伝達を求めるといことは数学的には(5.8)の3つの連立方程式を解くことに帰着する。

しかるに、GAPCON-THERMAL-1を含め、この種プログラムの収斂の方法は、Try and Error法とでも言うような、原始的な手法しか用いられていない。これは、上述のような問題に対する分析が未だ充分に行なわれていないためではないかと考えられる。

(4) 燃料棒表面における熱伝達率

プログラムGAPCONおよび今回のGAPCON-THERMAL-1もBWR燃料棒を計算するのには、必ずしも適していないことは既に解説等において指摘した通りである。特に燃料棒表面における熱伝達は、Dittus-Beilert(PWR)、Jenes-Lottes(BWR)の実験式で計算される。しかしさらに、燃料被覆管表面の酸化被膜および附着するcrudまでを考慮すると、被覆管表面における熱伝達率は小さくなる。このときの総括熱伝達率は次式で計算できる。

$$\frac{1}{H} = \frac{R_{clad}}{\alpha R_{crud}} + \frac{R_{clad}}{k_{crud}} \ln \frac{R_{crud}}{R_{oxide}} + \frac{R_{clad}}{k_{oxide}} \ln \frac{R_{oxide}}{R_{clad}} \quad (5.9)$$

ここで、 H ；総括熱伝達率

α ；crud表面と冷却材間熱伝達率

k ；熱伝導率

R ；半径

また、被覆材の表面に酸化被膜が生じ、さらにこれにcrudが付着していると考える。

上記(5.9)の式は、燃料棒単位長さにつき、被覆管を流れる熱量を Q としたとき、熱流束が $-k \frac{dT}{dr} = Q/2\pi r$ で表されることを利用することによりただちに求められる。すなわち、表面における熱伝達による温度降下を ΔT_α 、crud、および酸化被膜における熱伝導による温度降下を ΔT_{crud} 、 ΔT_{oxide} とすれば、これらは

$$\Delta T_\alpha = \frac{Q}{2\pi R_{crud}} \cdot \frac{1}{\alpha}$$

$$\Delta T_{crud} = \frac{1}{2\pi r k_{crud}} \ln \frac{R_{crud}}{R_{oxide}}$$

$$\Delta T_{oxide} = \frac{Q}{2\pi k_{oxide}} \ln \frac{R_{oxide}}{R_{clad}}$$

と表わされる。この三者における全体の温度降下(ΔT)は

$$\begin{aligned} \Delta T &= \Delta T_{\alpha} + \Delta T_{\text{crud}} + \Delta T_{\text{oxide}} \\ &= \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha R_{\text{crud}}} + \frac{1}{k_{\text{crud}}} \ln \frac{R_{\text{crud}}}{R_{\text{oxide}}} + \frac{1}{k_{\text{oxide}}} \ln \frac{R_{\text{oxide}}}{R_{\text{clad}}} \right) \end{aligned} \quad (5.10)$$

被覆管表面での熱流束 ($Q/2\pi R_{\text{clad}}$) で (5.10) 式を整理すれば

$$\frac{Q}{2\pi R_{\text{clad}}} = \left\{ \frac{1}{\frac{R_{\text{clad}}}{\alpha R_{\text{crud}}} + \frac{R_{\text{clad}}}{k_{\text{crud}}} \ln \frac{R_{\text{crud}}}{R_{\text{oxide}}} + \frac{R_{\text{clad}}}{k_{\text{oxide}}} \ln \frac{R_{\text{oxide}}}{R_{\text{clad}}}} \right\} \Delta T = H \cdot \Delta T$$

となり、先の (5.9) 式がえられる。

(5) 接触圧力を求める計算式の検討

接触圧力を P_i 、燃料の外半径の増加と被覆管内半径の減少し互いに拘束されないものとしたとき) の和を δ とすれば、次式が成立する (たとえば、チモンエンコ、材料力学 (中), P-192 参照)。

$$\frac{r_1 P_i}{E_c} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_c \right) + \frac{r_1 P_i}{E_f} (1 - \mu_f) = \delta$$

- ここで、
- r_1 = 被覆管の内半径
 - r_2 = 被覆管の外半径
 - E_c = 被覆管のヤング率
 - E_f = ペレットのヤング率
 - μ_c = 被覆管のポアソン比
 - μ_f = ペレットのポアソン比

である。

これを P_i について解けば、

$$P_i = \frac{\delta}{r_1 \left\{ \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_c \right) \cdot \frac{1}{E_c} + (1 - \mu_f) \times \frac{1}{E_f} \right\}} \quad (5.11)$$

である。この式を変形整理することにより、

$$P_i = \frac{E_c}{r_1} \delta \left[\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_c + \frac{E_c}{E_f} (1 - \mu_f) \right]^{-1} \quad (5.12)$$

をうる。

ここで δ について考える。

- 1) 燃料ペレット外半径の増加は ΔR である。
- 2) 被覆管外表面に作用する外部圧力 P_2 によって被覆管内半径の減少は次のようになる。

$$\frac{2 r_1 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \cdot \frac{P_2}{E_c}$$

外部圧力は $P_2 \geq 0$ であれば、内半径は減少するので、接触圧力が増大するように作用する。

3) 被覆管の熱歪に基づき被覆管内半径の変化 (Δr_1) は、内面における円周方向歪を ε_t とすれば

$$\varepsilon_t = \frac{2\pi\Delta r_1}{2\pi r_1}$$

と表わされる。これに Young's modules を乗じ、 $E_c \varepsilon_t = (\sigma_t)_t$ (円周方向の応力) を考慮することにより、

$$E_c \varepsilon_t = (\sigma_t)_t = \frac{\Delta r_1}{r_1} \times E_c, \quad \Delta r_1 = (\sigma_t)_t \cdot \frac{r_1}{E_c}$$

となる。

ここで、 $(\sigma_t)_t > 0$ ならば、被覆管内面は引張り力がかかっており、内半径は増加するので、接触圧力は減少する。一方、 $(\sigma_t)_t < 0$ ならば、被覆管内面には圧縮力がかかっており、内半径は減少するので、接触圧力は増加する方向となる。

上記 1)~3) の δ に E_c/r_1 を乗じて加算することにより、

$$\delta = \Delta r + 2r_1 \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot \frac{P_2 - r_1 \cdot (\sigma_t)_t}{E_c}$$

$$\frac{E_c}{r_1} \delta = \frac{E_c}{r_1} \Delta r + \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot P_2 - (\sigma_t)_t \quad (5.13)$$

がえられ、この (5.13) 式を (5.12) 式に代入すると P_i は

$$P_i = \left[\frac{\Delta r}{r_1} E_c + \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot P_2 - (\sigma_t)_t \right] \left[\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} + \mu_c + \frac{E_c}{E_f} (1 - \mu_f) \right]^{-1} \quad (5.14)$$

となる。

なお、 $(\sigma_t)_t$ (内面における円周方向熱応力) は、次式で与えられる。

$$(\sigma_t)_t = \frac{E_c}{2(1-\mu_c)} \frac{\alpha_c (T_i - T_o)}{\ln(r_2/r_1)} \left[1 - \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln(r_2/r_1) \right] \quad (5.15)$$

先の (5.14) 式の分母中のポアソン比を無視すれば、

$$P_i \leq \frac{\frac{\Delta r}{r_1} E_c + \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \cdot P_2 - (\sigma_t)_t}{\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}}$$

$$= \frac{\left[\frac{\Delta r}{r_1} E_c - (\sigma_t)_t \right] [r_2^2 - r_1^2] + 2P_2 r_2^2}{r_1^2 + r_2^2}$$

がえられる。ここで、 $\Delta r/r_1 = 2\pi\Delta r/2\pi r_1 = \varepsilon_t$ であり、 $E_c \Delta r/r_1 = E_c \varepsilon_t = \sigma_t$ 、仮定 (降伏応力 (σ_y) をこえない) によれば、 $\sigma_t \leq \sigma_y$ であるから、

$$P_i \leq (P_i)_{\max} = \frac{[\sigma_y - (\sigma_t)_t] [r_2^2 - r_1^2] + 2P_2 r_2^2}{r_1^2 + r_2^2} \quad (5.16)$$

が求まる。

(5.14) および (5.16) 式は, GAPCON および GAPCON-THERMAL-1 が与えているものである。ただし, (5.14) 式の分子中の $(\sigma_1)_i$ の符号は上記の説明でも分るように負でなければならぬが, GAPCON, GAPCON-THERMAL-1 では正となっている。

6 今後の課題

GAPCON-THERMAL-1はGAPCONを基にして、熱中性子炉用燃料棒のギャップ熱伝達率計算に適するよう、特に初期ギャップの大きい場合の計算モデル改良を第1目標として、かなり詳細な改造と、実験データとの照合を行なっているが、さきののべたように、一番の焦点となっているリロケーションのモデル化と、被覆管のクリープのモデル化に成功していない。原著者も認めている通り、今後リロケーションのモデル化、FPガス放出モデルの詳細化、中心溶融によるペレットの体積膨脹と被覆管のクリープ現象のモデル化、などが、今後に残された重要課題であろう。

7 ソースプログラムおよび出力例

原著の付録Cに載せられたソースプログラムをもとにFACOM230-60, CDC 6600用にコンバージョンを行なったものを、マイクロフィルムで収録した。

また、入力と出力の例を巻末に示した。

6 今後の課題

GAPCON-THERMAL-1はGAPCONを基にして、熱中性子炉用燃料棒のギャップ熱伝達率計算に適するよう、特に初期ギャップの大きい場合の計算モデル改良を第1目標として、かなり詳細な改造と、実験データとの照合を行なっているが、さきのべたように、一番の焦点となっているリロケーションのモデル化と、被覆管のクリープのモデル化に成功していない。原著者も認めている通り、今後リロケーションのモデル化、FPガス放出モデルの詳細化、中心溶融によるペレットの体積膨脹と被覆管のクリープ現象のモデル化、などが、今後に残された重要課題であろう。

7 ソースプログラムおよび出力例

原著の付録Cに載せられたソースプログラムをもとにFACOM230-60, CDC 6600用にコンバージョンを行なったものを、マイクロフィルムで収録した。

また、入力と出力の例を巻末に示した。

謝 辞

このプログラムの検討において、燃料ペレットの気孔が熱伝導率に及ぼす効果に関し菊池武雄氏（燃料物性研究室室長）の助言をえた。

参考文献

- 1) G. R. Horn, F. E. Panisko, "User's Guide for GAPCON: A Computer Program to Predict Fuel-to-Cladding Heat Transfer Coefficients in Oxide Fuel Pins," HEDL-TM72-128, September 1972.
- 2) C. R. Hann, "Fuel Rod Gap Conductance and UO_2 Thermal Conductivity - A Study for the Reactor Systems Branch-Directorate of Licensing, USAEC", Battelle, Pacific Northwest Laboratories Report. July 1972.
- 3) A. M. Ross, R. L. Stoute, "Heat Transfer Coefficients between UO_2 and Zircaloy-2", CRFD-1075, June 1962.
- 4) D. S. Duff, D. C. Bullington, R. B. Baker, and L. A. Pember, "A Correlated Fission Gas Release Model for Fast Reactor Fuels", Trans. Am. Nucl. Soc. Vol 15, No 1, June 1972.
- 5) J. P. Hoffman, D. H. Coplin, "The Release of Fission Gas from Uranium Dioxide Pellet Fuel Operated at High-Temperature", GEAP-4596, September 1964.
- 6) J. Roth, E. K. Halteman, "Thermal Expansion of Coprecipitated (U, Pu) O_2 Powders by X-ray Diffraction Techniques, NUMEC-2389-9, Nuclear Materials and Equipment Corp., October 1965.
- 7) J. B. Conway, R. M. Finzel, Jr., and R. A. Hein, "The Thermal Expansion and Heat Capacity of UO_2 to 2200 °C", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol, 6, No 1, P. 153 1963
- 8) D. Geithoff, G. Karsten and K. Bummerer, "Irradiation Performance of Fast Reactor Fuels", International Symposium on Plutonium Fuels Technology, AIME Symposium 1967; Nuclear Metallurgy, Vol. 13, 1968
- 9) T. G. Godfrey, W. Fulkerson, T. G. Kollie, J. P. Moore, and D. L. McElroy, "Thermal Conductivity of Uranium Dioxide and Armco Iron by an Improved Radial Heat Flow Technique", ORNL-3556, June 1964.
- 10) M. F. Lyons, *et al.*, " UO_2 Pellet Thermal Conductivity from Irradiation with Central Melting", GEAP-4624, 1964.
- 11) "Thermal Conductivity of Uranium Dioxide" IAEA Report No 58, 1966.
- 12) A. L. Loeb, "Thermal Conductivity: VIII, A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials", American Ceramic Society, 37, 1954.
- 13) T. Kikuchi, T. Takahashi, and S. Nasu, "Porosity Dependence of Thermal Conductivity of Uranium Mononitride", J. Nucl. Mat., 45

謝 辞

このプログラムの検討において、燃料ペレットの気孔が熱伝導率に及ぼす効果に関し菊池武雄氏（燃料物性研究室室長）の助言をえた。

参考文献

- 1) G. R. Horn, F. E. Panisko, "User's Guide for GAPCON : A Computer Program to Predict Fuel-to-Cladding Heat Transfer Coefficients in Oxide Fuel Pins," HEDL-TM72-128, September 1972.
- 2) C. R. Hann, "Fuel Rod Gap Conductance and UO_2 Thermal Conductivity - A Study for the Reactor Systems Branch - Directorate of Licensing, USAEC", Battelle, Pacific Northwest Laboratories Report. July 1972.
- 3) A. M. Ross, R. L. Stoute, "Heat Transfer Coefficients between UO_2 and Zircaloy-2", CRFD-1075, June 1962.
- 4) D. S. Duff, D. C. Bullington, R. B. Baker, and L. A. Pember, "A Correlated Fission Gas Release Model for Fast Reactor Fuels", Trans. Am. Nucl. Soc. Vol 15, No 1, June 1972.
- 5) J. P. Hoffman, D. H. Coplin, "The Release of Fission Gas from Uranium Dioxide Pellet Fuel Operated at High-Temperature", GEAP-4596, September 1964.
- 6) J. Roth, E. K. Halteman, "Thermal Expansion of Coprecipitated $(U, Pu)O_2$ Powders by X-ray Diffraction Techniques, NUMEC-2389-9, Nuclear Materials and Equipment Corp., October 1965.
- 7) J. B. Conway, R. M. Fincel, Jr., and R. A. Hein, "The Thermal Expansion and Heat Capacity of UO_2 to 2200 °C", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol, 6, No 1, P. 153 1963
- 8) D. Geithoff, G. Karsten and K. Bummerer, "Irradiation Performance of Fast Reactor Fuels", International Symposium on Plutonium Fuels Technology, AIME Symposium 1967; Nuclear Metallurgy, Vol. 13, 1968
- 9) T. G. Godfrey, W. Fulkerson, T. G. Kollie, J. P. Moore, and D. L. McElroy, "Thermal Conductivity of Uranium Dioxide and Armco Iron by an Improved Radial Heat Flow Technique", ORNL-3556, June 1964.
- 10) M. F. Lyons, *et al.*, " UO_2 Pellet Thermal Conductivity from Irradiation with Central Melting", GEAP-4624, 1964.
- 11) "Thermal Conductivity of Uranium Dioxide" IAEA Report No 58, 1966.
- 12) A. L. Loeb, "Thermal Conductivity : VIII. A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials", American Ceramic Society, 37, 1954.
- 13) T. Kikuchi, T. Takahashi, and S. Nasu, "Porosity Dependence of Thermal Conductivity of Uranium Mononitride", J. Nucl. Mat., 45

(1972/73) P. 284-292

- 14) D. B. Scott, "Physical and Mechanical Properties of Zircaloy-2 and Zircaloy-4", WCAP-3629-41, May 1965
- 15) J. A. Cristensen, "Columnar Grain Growth in Oxide Fuels", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 15, No. 1, June 1972
- 16) W. H. McAdams, "Heat Transmission", 2nd. Ed. McGRAW-HILL 1954

PROGRAM GAPCON

```

PROGRAM GAPCON(INPUT,OUTPUT,TAPES=INPUT,TAPE6=OUTPUT)
C
C
C ***** GAPCON-THERMAL-1 1974.JAN. *****
C ---- MAIN PROGRAM ----
C
C GAPVAT IS THE MAIN PROGRAM BASED ON GAPCON TO PERFORM AXIAL
C VOLUME TEMPERATURE AVERAGED GAS MIXING
C
C
C COMMON /BRNGM/ TPREV
C COMMON /POWRAY/ PAVRG,LFUEL,LF,POWER(21),AI(21),NPOW,PTOT,LPMAX
C *PKDWR, IPEAK,DELP,PMAX
C COMMON /BRNGAS/ VOLCC,NIZ,N7Z,N8Z,N9Z,N10Z
C COMMON /BRNGAS/ NKR(20),NXE(20),PHI(20),ENXE(20),ENKR(20)
C COMMON /AXIAL / VOLTX(20),TBAR(20),TGLINE(20),HGX(20),PRESX(20)
C *TAVGXX(20),RDOT(20),RGAPX(20),RDP(20),HFLUX(20)
C *XMOLS(20),FXMOL(6,21),PRESTD(20),SUMOLS(6)
C *FRACTN(20)
C DIMENSION TSR(100),VOLAT(29),FISGR(29),CLCRP(8,20),ZR(7,6),
C *ZCR(7,6)
C DIMENSION TITLE(20),AAC(8,100),ABC(8,100),CF(8,100)
C *RV(8,100),ST(8,100),TABLE(8,100),PHICAP(6,6),CSUBP(6)
C *CON(10),DUM(50),DDUM(50),EKLJ(6),GMWT(6),DELCT(50)
C *DELL(50),OMEGA(6),PCFR(60),Q(60),QIN(60),SIGLJ(6)
C *TS(100),TI(100),VISCOS(6)
C
C REAL N1,N7,NZ,N8,N8Z,N9,N9Z,N10,N10Z,KM,LF,MUF,MTONFI,MTM,KR
C *NKR,NXE,MOL(6),MOLTOT,MOLGAP,MOLEFR(6),MLFR(6),LVOIDZ,LFUEL
C
C EQUIVALENCE (MOLEFR(1),MLFR(1)),(FRACHE,FRACTN(1))
C 1,(FRACAR,FRACTN(2)),(FRACH,FRACTN(3)),(FRACN,FRACTN(4))
C 2,(FRACKR,FRACTN(5)),(FRACKE,FRACTN(6))
C
C DATA PI,CCPIN3,SECDAI,AVDGD,RR,CONEN /
C 1 3.14159,16.387,86400.,6.023E23,22400.,3.2E-14 /
C DATA SDOIT,EF,MUF,EPSIF,EPSIC /
C 1 .016 , .004 , 22.E6 , .30 , .8 , .9 /
C DATA ISTPLM/5/
C DATA WORD1/4HSTOP /
C
C DATA VOLAT/ 0.,0.745.,755.,760.,785.,800.,810.,820.,825.,830.,840.,
C 1 ,850.,855.,890.,920.,940.,955.,975.,985.,1000.,1015.,
C 2 ,1030.,1100.,1160.,1300.,1470.,1690.,2000.,10000./
C
C DATA FISGR/ 0., .0006, .0008, .001 , .002 , .003 , .004 , .005 , .006 ,
C 1 , .007 , .008 , .009 , .01 , .02 , .03 , .04 , .05 , .06 ,
C 2 , .07 , .08 , .09 , .1 , .16 , .2 , .3 , .4 , .5 ,
C 3 , .52 , 1.0 /
C
C DATA ((ZR(I,J),I=1,7),J=1,6)/
C * 75., 7.30, 4.48E4, 1.38E7, .370, 3.24E-6, 9470.,
C * 212., 7.74, 3.48E4, 1.30E7, .400, 3.47E-6, 7360.,
C * 392., 8.38, 2.36E4, 1.21E7, .446, 3.70E-6, 5030.,
C * 572., 9.02, 1.58E4, 1.11E7, .492, 3.87E-6, 3340.,
C * 752., 9.83, 1.21E4, 1.31E7, .492, 3.99E-6, 2560.,

```

PROGRAM GAPCONT

PROGRAM	GAPCONT	DATA	SCBIT	WCAP	PAGE	NO.				
60	C	* 932.0, 10.64,	1.00E4,	9.09E6,	.492,	4.08E-6,	2110.			
		ZTRC-4 DATA BY D.B. SCBIT (WCAP-3629-41)								
		DATA ((ZRA(I,J),I=1,7),J=1,6))								
		* 75.0, 7.45,	4.48E4,	1.38E7,	.370,	3.24E-6,	9470.0,			
		* 212.0, 7.86,	3.48E4,	1.30E7,	.400,	3.47E-6,	7360.0,			
		* 392.0, 8.27,	3.48E4,	1.30E7,	.400,	3.47E-6,	7360.0,			
		* 572.0, 8.27,	3.48E4,	1.30E7,	.400,	3.47E-6,	7360.0,			
		* 752.0, 8.27,	3.48E4,	1.30E7,	.400,	3.47E-6,	7360.0,			
		* 932.0, 8.27,	3.48E4,	1.30E7,	.400,	3.47E-6,	7360.0,			
		DATA ((ST(I,J),I=1,7),J=1,10))								
* 100.0, 8.47,	6.90E4,	2.80E7,	.267,	9.17E-6,	18800.0,					
* 150.0, 8.69,	8.55E4,	2.79E7,	.269,	9.27E-6,	18070.0,					
* 200.0, 8.92,	8.35E4,	2.77E7,	.271,	9.35E-6,	17650.0,					
* 250.0, 9.14,	8.17E4,	2.74E7,	.273,	9.43E-6,	17270.0,					
* 300.0, 9.37,	8.05E4,	2.72E7,	.276,	9.51E-6,	17010.0,					
* 350.0, 9.59,	7.95E4,	2.69E7,	.278,	9.58E-6,	16800.0,					
* 400.0, 9.82,	7.87E4,	2.66E7,	.280,	9.63E-6,	16630.0,					
* 450.0, 10.04,	7.80E4,	2.63E7,	.282,	9.69E-6,	16490.0,					
* 500.0, 10.26,	7.75E4,	2.60E7,	.284,	9.73E-6,	16380.0,					
* 550.0, 10.49,	7.67E4,	2.57E7,	.286,	9.78E-6,	16210.0,					
80	C	DATA ((ST(I,J),I=1,7),J=11,20))								
		* 600.0, 10.71,	7.60E4,	2.53E7,	.288,	9.83E-6,	16060.0,			
		* 650.0, 10.94,	7.56E4,	2.50E7,	.290,	9.90E-6,	15980.0,			
		* 700.0, 11.16,	7.52E4,	2.47E7,	.292,	9.96E-6,	15890.0,			
		* 750.0, 11.39,	7.49E4,	2.44E7,	.294,	10.02E-6,	15830.0,			
		* 800.0, 11.61,	7.45E4,	2.41E7,	.297,	10.08E-6,	15750.0,			
		* 850.0, 11.83,	7.40E4,	2.38E7,	.299,	10.13E-6,	15640.0,			
		* 900.0, 12.06,	7.33E4,	2.34E7,	.301,	10.19E-6,	15490.0,			
		* 950.0, 12.28,	7.22E4,	2.30E7,	.303,	10.25E-6,	15260.0,			
		* 1000.0, 12.51,	7.10E4,	2.26E7,	.305,	10.30E-6,	15010.0,			
* 1050.0, 12.73,	6.89E4,	2.22E7,	.307,	10.36E-6,	14560.0,					
90	C	DATA ((ST(I,J),I=1,7),J=21,23))								
		* 1100.0, 12.96,	6.55E4,	2.17E7,	.309,	10.39E-6,	13840.0,			
		* 1150.0, 13.18,	6.10E4,	2.12E7,	.311,	10.46E-6,	12890.0,			
		* 1200.0, 13.41,	5.55E4,	2.07E7,	.313,	10.49E-6,	11730.0,			
		DATA ((TABLE(I,J),I=1,2),J=1,40))								
		* 0.0, 2.785,	0.3,	2.785,	0.35,	2.628,	0.40,	2.492,	0.45,	2.368,
		* 50.0, 2.257,	0.55,	2.156,	0.60,	2.065,	0.65,	1.982,	0.70,	1.908,
		* 75.0, 1.841,	0.80,	1.780,	0.85,	1.725,	0.90,	1.675,	0.95,	1.620,
		* 1.0, 1.587,	1.05,	1.549,	1.10,	1.514,	1.15,	1.482,	1.20,	1.424,
		* 1.25, 1.424,	1.30,	1.399,	1.35,	1.375,	1.40,	1.353,	1.45,	1.333,
* 1.50, 1.314,	1.55,	1.296,	1.60,	1.279,	1.65,	1.264,	1.70,	1.248,		
* 1.75, 1.234,	1.80,	1.221,	1.85,	1.209,	1.90,	1.197,	1.95,	1.186,		
* 2.00, 1.175,	2.10,	1.156,	2.20,	1.138,	2.30,	1.122,	2.40,	1.107,		
105	C	DATA ((TABLE(I,J),I=1,2),J=41,80))								
		* 2.50, 1.093,	2.60,	1.081,	2.7,	1.069,	2.8,	1.056,	2.9,	1.048,
		* 3.0, 1.039,	3.1,	1.030,	3.2,	1.022,	3.3,	1.014,	3.4,	1.007,
		* 3.5, .9999,	3.6,	.9932,	3.7,	.9870,	3.8,	.9811,	3.9,	.9755,
		* 4.0, .9700,	4.1,	.9649,	4.2,	.9600,	4.3,	.9553,	4.4,	.9507,

```

115 * 4.5 , .9464, 4.6 , .9422, 4.7 , .9382, 4.8 , .9343, 4.9 , .9305, S01
* 5.0 , .9269, 6.0 , .8963, 7. , .8727, 8. , .8536, 9. , .8379, S01
*10. , .8242, 20. , .7432, 30. , .7005, 40. , .6718, 50. , .6504, S01
*60. , .6335, 70. , .6194, 80. , .6076, 90. , .5973, 200. , .5882, S01
DATA (GMW(I),I=1,6) / 4.003, 39.944, 2.016, 28.02, 83.8 ,131.3/ S01
DATA (SIGJ(I),I=1,6) / 2.576, 3.418, 2.915, 3.681, 3.498,4.055/ S01
DATA (EKLJ(I),I=1,6) / 10.2 , 124. , 38. , 91.5 , 225. ,229. / S01
120 C NAMELIST/INPUT/ NP0W,FRDEN,FRSTIN,DSINZ,FRPU02,FR35,FR40,FR41,DFS S01
1 *DVOIDZ,DCI,DCO,VPLENZ,ATMUS,LFUEL,S,XX,ROUF,ROUC,EXIP,TINLET S01
2 *DE,V,PAVRG,POWER,TDAYS,DEL,T,MAX,TFR,TD,DB0,KB,HBC,SIGHF S01
3 *IFLUX,NCLAD,NCON,NFLX,KOOL,FRACHE,FRACAR,FRACH,FRACN,FRACKR S01
4 *FRACXL,NEWK,NEWCL,NEWFLX,LVOIDZ,NON,HGACEL,DTEMP,MINI S01
5 *ZCLAD,ICOF,ISTOR,ICREP,ISWELL,PKP0WR,IPEAK,DELP,PMAX S01
6 *PEKAVG,HG S01
125 C DATA ISTOR,ICREP,IFLUX,NCLAD,NCON,NFLX,KOOL,NEWK,NEWCL,NEWFLX, S01
1 N0H,MINI,ICOF,ISWELL /14*0 / S01
2 *DTEMP/100./,IPEAK/0/,NP0W/10/ S01
130 DATA PMAX,DELP,FRDEN,FRSTIN,DSINZ,FRPU02,FR35,FR40,FR41,DFS,DVOIDZ S01
1 *DCI,DCO,VPLENZ,ATMUS,LFUEL,S,XX,ROUF,ROUC,EXIP,TINLET,DE,V S01
2 *PAVRG,TDAYS,DEL,T,MAX,TFR,TD,DB0,KB,HBC,SIGHF,FRACAR S01
3 *FRACH,FRACN,FRACKR,FRACXL,LVOIDZ,HGACEL,ZCLAD,PKP0WR,HG S01
4 *PEKAVG S01
5 / 46*0.0 / S01
135 C DATA DTEMP/100./,IPEAK/0/,NP0W/10/ S01
DATA POWER/23.,63.,96.,1.21,1.35,1.4,1.35,1.4,1.35,1.21.,96.,63.,23.,10*0./ S01
DATA IPREV / 0.0 / S01
140 C TCW(D,T)=(1.-2.1*D*0**2)*(-1./(.288+0.00252*T))-5.83E-12*T**3) S01
TCW(D,T)=(3.*D-1.)*((1./(.5.75+.0503*T))+2.91E-13*T**3) S01
TCOR(D,T)=-((1.-0.257*.95)*(D/(1.+(1.-D)*.5)))*((38.24/(402.4*T)))+(6.1 S01
1256 E-13*((T+273.)**3)) S01
145 C INITIALIZE AND THE BEGIN CALCULATIONS.
C STP=273./298.
C N0H=1
C T0=0.0
150 C CONTINUE
T0AYS=0.
READ(5,1520) TITLE
IF(TITLE(1).EQ.WORD1) GO TO 1460
KOUNT = 0
ICASE = 0
READ(5,INPUT)
T0 = TDAYS
IF(NCON.LE.0 .OR. NEWK.LE.0) GO TO 110
READ(5,1930) ((CF(I,J),I=1,3),J=1,NCON)
110 IF(NCLAD.LE.0 .OR. NEWCL.LE.0) GO TO 120
READ(5,1940) ((RA(I,J),I=1,7),J=1,NCLAD)
120 IF(NFLX.LE.0 .OR. NEWFLX.LE.0) GO TO 130
READ(5,1950) ((RV(I,J),I=1,2),J=1,NFLX)
130 CONTINUE
IF(ICREP .LE.0) GO TO 140

```

```

170 READ(5,2110) ((CLCRP(I,J),I=1,2),J=1,ICREP)
    NCR=ICREP
140 CONTINUE
C
C
C
    INITIALIZE AND BEGIN EXECUTION
    PRINT INPUT
    CALL POWDIS
    NPOW1=NPOW*1
    FNP0W=NPOW
    LF =LFUEL/FNP0W
    TPLENA=(TINLET+DTEMP-22.)/1.8*273.
    PEKAVG=1.
    HG =1000.
    ITIME =0
    NF ENFLX
    FR38 =1.-FR35
    RSINZ =DSINZ/2.
    RV010Z=OV010Z/2.
    VV010Z= PI*RV010Z**2*LVDI0Z/FNP0W
    FRU02 =1.-FRPU02
    DENSIT=FRPU02*11.46+FRU02*10.97
    FR39 =1.-FR40-FR41
    GAP=OCI-DFS
    RFS=DFS/2.
    RCI=DCI/2.
    RCO=DCO/2.
    VOLGAS=PI/4.*(DCI**2-DFS**2)*LF*VV010Z
150 RV(1,1)=0.
    RV(1,2)=1.
    RV(2,1)=1.
    RV(2,2)=1.
    NF =2
    GO TO 170
160 CALL DEPRES(DENSIT,FR35,FR38,DFS,RV)
170 CONTINUE
    WRITE(6,1530)
    WRITE(6,1540) TITLE
    WRITE(6,1550)
    WRITE(6,1560) FRPU02,FR39,FR40,FR41,FRU02,FR35,FR38,FR0EN,FRSTN,
1 DFS,DSINZ,DV010Z
    WRITE(6,1570) GAP,OCI,DCO,LFUEL,S,XX
    WRITE(6,1580) VPLENZ,TINLET,DTEMP,DE,V,EXTP,PEKAVG,RQUIF,ROUC
    WRITE(6,1590) PAVRG,PKPUMR,DELP,PMAX
    WRITE(6,1600) IDAYS,DELT,IMAX,DBO,KB,HBC
    WRITE(6,1610) ATMOS
    WRITE(6,1630) FRACHE,FRACAR,FRACH,FRACN,FRACKR,FRACXF
    WRITE(6,2090)
180 IF(SIGHF) 180,190,200
    GO TO 210
190 WRITE(6,1970)

```

```

PROGRAM          GAPCONT
GO TO 210
200 WRITE(6,1980) SIGHF
210 WRITE(6,2090)
   IF(IFLUX) 220,220,230
225             220 WRITE(6,1990)
   GO TO 240
227             230 WRITE(6,2000)
228             240 WRITE(6,2090)
229             IF(NCLAD) 250,270,280
230             250 CONTINUE
   IF(ZGLAD,GT,0.) GO TO 260
231             WRITE(6,2010)
   GO TO 290
232             260 CONTINUE
233             WRITE(6,2020)
234             GO TO 290
235             270 WRITE(6,2030)
   GO TO 290
236             280 WRITE(6,2040)
237             290 WRITE(6,2090)
238             IF(NCON) 300,310,320
239             300 WRITE(6,2050)
   GO TO 330
240             310 WRITE(6,2060)
   GO TO 330
241             320 WRITE(6,2070)
242             330 WRITE(6,2090)
243             C
244             C
245             C
246             C
247             C
248             C
249             C
250             C
251             C
252             C
253             C
254             C
255             C
256             C
257             C
258             C
259             C
260             C
261             C
262             C
263             C
264             C
265             C
266             C
267             C
268             C
269             C
270             C
271             C
272             C
273             C
274             C
275             C
276             C
277             C
278             C
279             C
280             C
281             C
282             C
283             C
284             C
285             C
286             C
287             C
288             C
289             C
290             C
291             C
292             C
293             C
294             C
295             C
296             C
297             C
298             C
299             C
300             C
301             C
302             C
303             C
304             C
305             C
306             C
307             C
308             C
309             C
310             C
311             C
312             C
313             C
314             C
315             C
316             C
317             C
318             C
319             C
320             C
321             C
322             C
323             C
324             C
325             C
326             C
327             C
328             C
329             C
330             C
331             C
332             C
333             C
334             C
335             C
336             C
337             C
338             C
339             C
340             C
341             C
342             C
343             C
344             C
345             C
346             C
347             C
348             C
349             C
350             C
351             C
352             C
353             C
354             C
355             C
356             C
357             C
358             C
359             C
360             C
361             C
362             C
363             C
364             C
365             C
366             C
367             C
368             C
369             C
370             C
371             C
372             C
373             C
374             C
375             C
376             C
377             C
378             C
379             C
380             C
381             C
382             C
383             C
384             C
385             C
386             C
387             C
388             C
389             C
390             C
391             C
392             C
393             C
394             C
395             C
396             C
397             C
398             C
399             C
400             C
401             C
402             C
403             C
404             C
405             C
406             C
407             C
408             C
409             C
410             C
411             C
412             C
413             C
414             C
415             C
416             C
417             C
418             C
419             C
420             C
421             C
422             C
423             C
424             C
425             C
426             C
427             C
428             C
429             C
430             C
431             C
432             C
433             C
434             C
435             C
436             C
437             C
438             C
439             C
440             C
441             C
442             C
443             C
444             C
445             C
446             C
447             C
448             C
449             C
450             C
451             C
452             C
453             C
454             C
455             C
456             C
457             C
458             C
459             C
460             C
461             C
462             C
463             C
464             C
465             C
466             C
467             C
468             C
469             C
470             C
471             C
472             C
473             C
474             C
475             C
476             C
477             C
478             C
479             C
480             C
481             C
482             C
483             C
484             C
485             C
486             C
487             C
488             C
489             C
490             C
491             C
492             C
493             C
494             C
495             C
496             C
497             C
498             C
499             C
500             C
501             C
502             C
503             C
504             C
505             C
506             C
507             C
508             C
509             C
510             C
511             C
512             C
513             C
514             C
515             C
516             C
517             C
518             C
519             C
520             C
521             C
522             C
523             C
524             C
525             C
526             C
527             C
528             C
529             C
530             C
531             C
532             C
533             C
534             C
535             C
536             C
537             C
538             C
539             C
540             C
541             C
542             C
543             C
544             C
545             C
546             C
547             C
548             C
549             C
550             C
551             C
552             C
553             C
554             C
555             C
556             C
557             C
558             C
559             C
560             C
561             C
562             C
563             C
564             C
565             C
566             C
567             C
568             C
569             C
570             C
571             C
572             C
573             C
574             C
575             C
576             C
577             C
578             C
579             C
580             C
581             C
582             C
583             C
584             C
585             C
586             C
587             C
588             C
589             C
590             C
591             C
592             C
593             C
594             C
595             C
596             C
597             C
598             C
599             C
600             C
601             C
602             C
603             C
604             C
605             C
606             C
607             C
608             C
609             C
610             C
611             C
612             C
613             C
614             C
615             C
616             C
617             C
618             C
619             C
620             C
621             C
622             C
623             C
624             C
625             C
626             C
627             C
628             C
629             C
630             C
631             C
632             C
633             C
634             C
635             C
636             C
637             C
638             C
639             C
640             C
641             C
642             C
643             C
644             C
645             C
646             C
647             C
648             C
649             C
650             C
651             C
652             C
653             C
654             C
655             C
656             C
657             C
658             C
659             C
660             C
661             C
662             C
663             C
664             C
665             C
666             C
667             C
668             C
669             C
670             C
671             C
672             C
673             C
674             C
675             C
676             C
677             C
678             C
679             C
680             C
681             C
682             C
683             C
684             C
685             C
686             C
687             C
688             C
689             C
690             C
691             C
692             C
693             C
694             C
695             C
696             C
697             C
698             C
699             C
700             C
701             C
702             C
703             C
704             C
705             C
706             C
707             C
708             C
709             C
710             C
711             C
712             C
713             C
714             C
715             C
716             C
717             C
718             C
719             C
720             C
721             C
722             C
723             C
724             C
725             C
726             C
727             C
728             C
729             C
730             C
731             C
732             C
733             C
734             C
735             C
736             C
737             C
738             C
739             C
740             C
741             C
742             C
743             C
744             C
745             C
746             C
747             C
748             C
749             C
750             C
751             C
752             C
753             C
754             C
755             C
756             C
757             C
758             C
759             C
760             C
761             C
762             C
763             C
764             C
765             C
766             C
767             C
768             C
769             C
770             C
771             C
772             C
773             C
774             C
775             C
776             C
777             C
778             C
779             C
780             C
781             C
782             C
783             C
784             C
785             C
786             C
787             C
788             C
789             C
790             C
791             C
792             C
793             C
794             C
795             C
796             C
797             C
798             C
799             C
800             C
801             C
802             C
803             C
804             C
805             C
806             C
807             C
808             C
809             C
810             C
811             C
812             C
813             C
814             C
815             C
816             C
817             C
818             C
819             C
820             C
821             C
822             C
823             C
824             C
825             C
826             C
827             C
828             C
829             C
830             C
831             C
832             C
833             C
834             C
835             C
836             C
837             C
838             C
839             C
840             C
841             C
842             C
843             C
844             C
845             C
846             C
847             C
848             C
849             C
850             C
851             C
852             C
853             C
854             C
855             C
856             C
857             C
858             C
859             C
860             C
861             C
862             C
863             C
864             C
865             C
866             C
867             C
868             C
869             C
870             C
871             C
872             C
873             C
874             C
875             C
876             C
877             C
878             C
879             C
880             C
881             C
882             C
883             C
884             C
885             C
886             C
887             C
888             C
889             C
890             C
891             C
892             C
893             C
894             C
895             C
896             C
897             C
898             C
899             C
900             C
901             C
902             C
903             C
904             C
905             C
906             C
907             C
908             C
909             C
910             C
911             C
912             C
913             C
914             C
915             C
916             C
917             C
918             C
919             C
920             C
921             C
922             C
923             C
924             C
925             C
926             C
927             C
928             C
929             C
930             C
931             C
932             C
933             C
934             C
935             C
936             C
937             C
938             C
939             C
940             C
941             C
942             C
943             C
944             C
945             C
946             C
947             C
948             C
949             C
950             C
951             C
952             C
953             C
954             C
955             C
956             C
957             C
958             C
959             C
960             C
961             C
962             C
963             C
964             C
965             C
966             C
967             C
968             C
969             C
970             C
971             C
972             C
973             C
974             C
975             C
976             C
977             C
978             C
979             C
980             C
981             C
982             C
983             C
984             C
985             C
986             C
987             C
988             C
989             C
990             C
991             C
992             C
993             C
994             C
995             C
996             C
997             C
998             C
999             C
1000            C

```

COMPLETE MIXING OF GASES IS ASSUMED

C
C
C


```

PROGRAM          GAPCONT
340  DO 360 J=1,10
    TEMP =260.+277.7778*(J-1)+273.
    CF(1,J)=(TEMP-273.)*1.8+32.
    CF(3,J)=57.8*TCW2(FRSIN,TEMP)
    IF(FRDEN.GE..95) GO TO 350
    CF(2,J)=57.8*TCM1(FRDEN,TEMP)
    GO TO 360
350  CF(2,J)=57.8*TCW2(FRDEN,TEMP)
360  CONTINUE
    NNN=10
    GO TO 400
370  DO 380 J=1,10
    TEMP =260.+277.7778*(J-1)
    CF(1,J)=TEMP*1.8+32.
    CF(2,J)=57.8*TCOR(FRDEN,TEMP)
    CF(3,J)=57.8*TCOR(FRSIN,TEMP)
380  CONTINUE
    NNN=10
    GO TO 400
390  NNN=NCON
400  WRITE(6,1640) ((CF(I,J),I=1,3),J=1,NNN)
    WRITE(6,1650)
    WRITE(6,1660) (RV(1,J),RV(2,J),J=1,NF)
    WRITE(6,1690)
    WRITE(6,1700) NPOW,MINI,ICDF,ISTOR,ICREP,ISWELL,IPEAK
    WRITE(6,1670)
    IF(NCLAD) 410,430,450
410  DO 420 I=1,7
    DO 420 J=1,6
    AA(I,J)=ZRC(I,J)
    IF(ZCLAD.GT.0) AA(I,J)=ZRA(I,J)
420  CONTINUE
    NN=6
    GO TO 460
430  DO 440 I=1,7
    DO 440 J=1,23
    AA(I,J)=ST(I,J)
440  CONTINUE
    NN=23
    GO TO 460
450  NN=NCLAD
460  CONTINUE
    PO =P
    JCASE=1
470  CONTINUE
    CALL POWDIS
    T =TDAYS*SECDAY
    ANKR=0.
    ANXE=0.
    DO 480 IPOM=1,NPOM
    P =0.5*(POWER(IPOM+1)+POWER(IPOM))
    MTIME=0
    CALL FISGAS(T,PHI(IPOM),P,CONEN,IFLUX,MTIME,NKR(IPOM),NXE(IPOM))
    ANKR=ANKR+NKR(IPOM)
    ANXE=ANXE+NXE(IPOM)
330

```

S01 277
 S01 278
 S01 279
 S01 280
 S01 281
 S01 282
 S01 283
 S01 284
 S01 285
 S01 286
 S01 287
 S01 288
 S01 289
 S01 290
 S01 291
 S01 292
 S01 293
 S01 294
 S01 295
 S01 296
 S01 297
 S01 298
 S01 299
 S01 300
 S01 301
 S01 302
 S01 303
 S01 304
 S01 305
 S01 306
 S01 307
 S01 308
 S01 309
 S01 310
 S01 311
 S01 312
 S01 313
 S01 314
 S01 315
 S01 316
 S01 317
 S01 318
 S01 319
 S01 320
 S01 321
 S01 322
 S01 323
 S01 324
 S01 325
 S01 326
 S01 327
 S01 328
 S01 329
 S01 330
 S01 331

PROGRAM

GAPCONT

480. CONTINUE

C C C SETUP PLENUM MOLE CONTENT

335 XMOLS(NPOM1)=VPLENZ*CCPIN3*ATHOS/RR
FXMOL(1,NPOM1) = FRACHE
FXMOL(2,NPOM1) = FRACAR
FXMOL(3,NPOM1) = FRACH
FXMOL(4,NPOM1) = FRACN
FXMOL(5,NPOM1) = FRACKR
FXMOL(6,NPOM1) = FRACXE

C C BEGIN AXIAL CALCULATIONS

345 ISTOP=ISTPLM
DO 1410 ISTEP=1,ISTPLM
TAVGX =0.
VRLTXS=0.
HGACEL=0.8

350 DO 490 I=1,6
SUMOLS(I)=FXMOL(I,NPOM1)*XMOLS(NPOM1)
490 CONTINUE
DO 1370 IPOM=1,NPOM

C C CALCULATE THE POWER, TCOOL, AND THE NEW NUMBER OF XE AND KR ATOMS IN EACH SEGMENT

355 IOSC = 0
HGOLD = 0.0
DELTAO = 0.0
NKR(IPOM)=ANKR/ENPOM
NXE(IPOM)=ANXE/FNPOM
P = 0.5*(POWER(IPOM+1)+POWER(IPOM))
TCOOL = TINLET+DIEMP*A1(IPOM)
TCOOLC =(TCOOL-32.)/1.8
IF(RSINZ.GT.0.) GO TO 500
WGTI =RHD*(RFS**2-RVOIDZ**2)*PI
WGTS =0.

370 GO TO 510
500 WGTI =RHD*(RFS**2 -RSINZ**2)*PI
WGTS=RHOS*(RSINZ**2-RVOIDZ**2)*PI
WGTF IN GRAMS PER FOOT
510 WGTF=(WGTI*WGTS)*196.64477
PKWPIN=P/12.
RSIN=RSINZ
OSIN=OSINZ
RVOID=RVOIDZ
DVVOID=DVVOIDZ
VVOID=VVOIDZ
OTOT=P*3413.

380 QGRAM IS IN BTU/HR/GRAM OF FUEL
QGRAM=OTOT/WGTF
QQU IS IN BTU/HR/FT3
QQU=QGRAM*RHQ*28316.8466

S01 332
S01 333
S01 334
S01 335
S01 336
S01 337
S01 338
S01 339
S01 340
S01 341
S01 342
S01 343
S01 344
S01 345
S01 346
S01 347
S01 348
S01 349
S01 350
S01 351
S01 352
S01 353
S01 354
S01 355
S01 356
S01 357
S01 358
S01 359
S01 360
S01 361
S01 362
S01 363
S01 364
S01 365
S01 366
S01 367
S01 368
S01 369
S01 370
S01 371
S01 372
S01 373
S01 374
S01 375
S01 376
S01 377
S01 378
S01 379
S01 380
S01 381
S01 382
S01 383
S01 384
S01 385
S01 386

PROGRAM GAPCONT

```

C
390 QOS IS IN BTU/HR/FT3 387 S01
    QOS=GRAM*RHDS*28316.8466 388 S01
    RSINF=RSIN/12. 389 S01
    MTONFT=RHO*VOLCC*12./1.E6 390 S01
    MTM=MTONFT*(FRUU*FRUO2*FRUPU*FRPUO2) 391 S01
    BURNUP=P*.001*TDAYS/MTM 392 S01
    ITER=0 393 S01
    DELR=0. 394 S01
    DELRC=0. 395 S01
    DELRCD=0. 396 S01
    DELRCG=0. 397 S01
    DELRCO=0. 398 S01
    DELRCG=0. 399 S01
    520 CONTINUE 400 S01
    ITER=ITER+1 401 S01
    QVVRAC=P*3413./((PI*(DCO+2.*DELRCO))*12. 402 S01
    HFUX(IPDM)=QVVRAC 403 S01
    QVVRAT=P*3413./((PI*(DCI+2.*DELRC))*12. 404 S01
    QVVRAS=P*3413./((PI*(DFS+2.*DELR))*12. 405 S01
    IF(COOL.GT.0) GO TO 680 406 S01
    IF(DRO) 580,580,530 407 S01
    530 QVVRAB=P*3413./((PI*(DRO))*12. 408 S01
    IF(SIGHF) 540,550,560 409 S01
    540 CALL HTCM(TCOOL,QVVRAB,V,DE,HF,TBSKS) 410 S01
    GO TO 570 411 S01
    550 CALL HTCLM(HF,TCOOL,DE,V) 412 S01
    GO TO 570 413 S01
    560 HF=SIGHF 414 S01
    570 CONTINUE 415 S01
    TBO=TCOOL+QVVRAB/HF 416 S01
    QABLM=(QVVRAC-QVVRAB)/ALOG(QVVRAC/QVVRAB) 417 S01
    DELTB=QABLM*(DRO-DCO)/(24.*KB) 418 S01
    TRI=TBO+DELTB 419 S01
    TCO=QVVRAC/HBC+TRI 420 S01
    GO TO 630 421 S01
    580 IF(SIGHF) 590,600,610 422 S01
    590 CALL HTCM(TCOOL,QVVRAC,V,DE,HF,TCO) 423 S01
    GO TO 620 424 S01
    600 CALL HTCLM(HF,TCOOL,DE,V) 425 S01
    GO TO 620 426 S01
    610 HF=SIGHF 427 S01
    620 CONTINUE 428 S01
    TCO=TCOOL+QVVRAC/HF 429 S01
    630 CONTINUE 430 S01
    TAVGC=TCO+20. 431 S01
    QVVRAT=(QVVRAC+QVVRAT)/2. 432 S01
    ITRY=1 433 S01
    640 TCC=TERP(TAVGC,AA,2,ANN) 434 S01
    ITRY=ITRY+1 435 S01
    DELTC=QVVRAT*(DCO+2.*DELRCO-DCI-2.*DELRC)/(24.*TCC) 436 S01
    TCI=TCO+DELT 437 S01
    TAVGC1=(TCO+TCI)/2. 438 S01
    DEL=ABS(TAVGC1-TAVGC) 439 S01
    IF(DEL-1.) 670,670,650 440 S01
    650 TAVGC=TAVGC1 441 S01
    IF(ITRY-50) 640,640,660

```

PROGRAM GAPCONT

```

445 660 WRITE(6,1470)
      670 CONTINUE
      GO TO 690
      680 TCI=TCOOL
      TCO=TCI-.5*(QOVRA+QOVRAI)*(DCD+2.*DELRCO-DCI-2.*DELRC)/144.
      690 CONTINUE
      QOVRAI=(QOVRA+QOVRAI)/2.
C
C SET UP SYSTEM OF N NODES OF EQUAL THICKNESS RADII IN FEET
      TFS=TCI+QOVRAI/HG
      N=50
      DR=(RFS+DELRC-RV010)/FLDAT(N)/12.
      RD=(RFS+DELRC)/12.
      DO 700 I=1,N
      R IS IN FEET
      RRR=2.*R-DR)*12.
      RATIO=TERP(RRR,RV,2,NF)
      RDR=R-DR
      IF(CDR-GE.RSINF) Q(1)=PI*(R**2-RDR**2)*RATIO*Q00
      IF(CDR-LT.RSINF.AND.P.GT.RSINF) Q(1)=(R**2-RSINF**2)*Q00+(RSINF**
1 2-RDR**2)*Q05)*PI*RATIO
      IF(CDR-LT.RSINF.AND.R.LE.RSINF) Q(1)=PI*(R**2-RDR**2)*RATIO*Q05
      700 CONTINUE
C CORRECT FOR ACCUMULATION OF ERROR IN HEAT GENERATION
      SUMQ=0.
      DO 710 I=1,N
      710 SUMQ=SUMQ+Q(I)
      CORR=QTOT/SUMQ
      DO 720 I=1,N
      720 Q(I)=CORR*Q(I)
      ACC=1.
      QIN(1)=QTOT-Q(1)
      DO 730 I=2,N
      730 QIN(I)=QIN(I-1)-Q(I)
      IME=0
      DO 860 I=1,N
      R=(RFS+DELRC)/12.-DR*FLOAT(I-1)
      RDR=R-DR
      IF(I.GT.1) GO TO 740
      TAV=TFS
      T7=TFS
      GO TO 750
      740 TAV=TT(I-1)
      T7=TT(I-1)
      750 CONTINUE
      DEN=FRDEN
      IF(R.LE.RSINF) DEN=FRSIN
      760 TAVC=(TAV-32.)/1.8
      TAVK=TAVC+273.
      IF(NCON) T770,T80,T800
      770 C=57.8*TCOR(DEN,TAVC)
      GO TO 810
      780 IF(FRDEN.GE..95.OR.R.LE.RSINF) GO TO 790
      C=57.8*TCMI(DEN,TAVK)
      495

```

442 S01
443 S01
444 S01
445 S01
446 S01
447 S01
448 S01
449 S01
450 S01
451 S01
452 S01
453 S01
454 S01
455 S01
456 S01
457 S01
458 S01
459 S01
460 S01
461 S01
462 S01
463 S01
464 S01
465 S01
466 S01
467 S01
468 S01
469 S01
470 S01
471 S01
472 S01
473 S01
474 S01
475 S01
476 S01
477 S01
478 S01
479 S01
480 S01
481 S01
482 S01
483 S01
484 S01
485 S01
486 S01
487 S01
488 S01
489 S01
490 S01
491 S01
492 S01
493 S01
494 S01
495 S01
496 S01

```

PROGRAM          GAPCONT
GO TO 810
790 C=57.8*TCW2(DEN,TAVK)
GO TO 810
800 KK=2
IF(R.LE.RSINF) KK=3
C=TERP(TAV,CF,KK,NNN)
810 CONTINUE
IF(RDR.LT.1.E-20) GO TO 820
TERM=(RDR**2/(R**2-RDR**2)-QIN(I)/Q(I))*ALOG(R/RDR)
GO TO 830
820 TERM=0.
830 IT(I)=TZ+Q(I)/(2.*PI*C)*(5-TERM)
TAVI=(TZ+IT(I))/2.
TTAV=TAV
DIFF=ABS(TAV-TAVI)
IF(DIFF-ACC) 860,860,840
840 TAV =TAVI
IME =IME+1
IF(IME-10) 760,850,850
850 WRITE(6,1920) TTAV,TAVI
860 IME =0
DO 870 I=1,N
TS(I)=(RFS+DELR)-(RFS+DELR-RVOID)*FLOAT(I)/FLOAT(N)
870 CONTINUE
DO 880 I=1,N
BB(I,1)=IT(I)
BB(2,1)=TS(I)
IF(KOUNT.EQ.0) GO TO 900
IF(FRDEN.GE.FRSIN) FRSIN=FRDEN
TSINC=1350.
IF(I.LE.0.) GO TO 890
RETEM=.0001367*ALOG10(I/3600.)+.000480
TSINC=1./RETEM-273.
890 CONTINUE
YSIN =1.8*TSINC+32.
RSIN=TERP(TSIN,BB,2,N)
IF(RSIN.LE.RSINZ) RSIN=RSINZ
DSIN=2.*RSIN
RSINF=RSIN/12.
RVOID=RVOID
RVOID=SORT((RSIN**2)*(FRSIN-FRDEN)/FRSIN+(RVOIDZ**2)*FRDEN/FRSIN)
IF(RVOID.LE.RVOIDZ) RVOID=RVOIDZ
DVOID=2.*RVOID
ELTC =LF-LVOIDZ/FNPDW
VTC =PI*ELTC*RVOIDZ**2
VVOID=(PI*LF*RVOID**2-VTC)
900 CONTINUE
C
C
C
VOLUME AVERAGE THE TEMPERATURE.
TSR(N+1)=RVOID
DO 910 I=1,N
RT=I
910 TSR(I)=(RFS+DELR)-(((RFS+DELR)-RVOID)/FLOAT(N))*((RT-1.0)
VAFR =(TSR(1)**2-TSR(2)**2)*PI*((IFS+IT(1))*5)

```

S01 497
 S01 498
 S01 499
 S01 500
 S01 501
 S01 502
 S01 503
 S01 504
 S01 505
 S01 506
 S01 507
 S01 508
 S01 509
 S01 510
 S01 511
 S01 512
 S01 513
 S01 514
 S01 515
 S01 516
 S01 517
 S01 518
 S01 519
 S01 520
 S01 521
 S01 522
 S01 523
 S01 524
 S01 525
 S01 526
 S01 527
 S01 528
 S01 529
 S01 530
 S01 531
 S01 532
 S01 533
 S01 534
 S01 535
 S01 536
 S01 537
 S01 538
 S01 539
 S01 540
 S01 541
 S01 542
 S01 543
 S01 544
 S01 545
 S01 546
 S01 547
 S01 548
 S01 549
 S01 550
 S01 551

PROGRAM GAPCONT

```

90 920 I=2,N
VAFR=VAFR*(TSR(I)**2-ISR(I+1)**2)*PI*((TT(I)+TT(I-1))*5)
CONTINUE
920 VAVGT=VAFR/((CRFS+DELR)**2-RV0T0**2)*PI
VAVGT=(VAVGT-32.)/1.8
IF(KDUNT.EQ.0) TBAR(IPON)=VAVGT
C
C CALCULATE RADIUS AVERAGED FUEL TEMPERATURE
TEMP=0.0
930 DO 930 I=1,50
TEMP=TEMP+BB(1,I)*(RFS+DELR-RV0ID)/50.
CONTINUE
TAVGF=TEMP/(RFS+DELR-RV0ID)
TAVGFC=(TAVGF-32.)/1.8
RD=(RFS-RV0IDZ)/N
TMF=TM*1.8+32.
RMELT=TEMP(TMF,RR,2,N)
CALL EXPANDCRMELT,RFS,RD,FRDEN,TT,TMF,TFS,FRP002,DELRT,DELCT,DELL,
1 DELM,DELM,RV0IDZ,VOL,VCRAK,L,LLM)
T1300=2372
R1300=TERP(T1300,BB,2,N)
R1700=TERP(3092,BB,2,N)
R1500=TERP(2732,BB,2,N)
IF(KDUNT.GT.0) R1700=RSIN
R1350=TERP(2462,BB,2,N)
VH=PI*R1700**2
VE=PI*(RFS**2-R1350**2)
VC=(R1350**2-R1700**2)
DELBV=(SDOT*VOLUME*FRDEN+SDOTT*VC)*BURNUP/1.E4-(1.-FRDEN)*(.H*VH+
1.5*VC+.3*VL)
IF(DELVB) 940,940,950
940 DELVB=0.
950 CONTINUE
DELRB=DELBV/(3.*PI*RFS)
TAVGC=(TCI+TCO)/2.
ALPHAC=TERP(TAVGC,AA,6,NN)
DELRG=RCI*ALPHAC*(TAVGC-77.)
DELRG=RCO*ALPHAC*(TAVGC-77.)
DELRCC=0.
PREST=ATMOS*14.696*(((TCI+TFS)/2.-32.)/1.8)+273.)/29A.
IF(ISTEP.EQ.1.AND.ITER.EQ.1) PRESTD(1)=PREST
PRESCN=2.0*(EXTP*(RCO+DELRG)**2-PRESTD(ISTEP)*(RCI+DELRG)**2)
IF(ICREP.LE.0) GO TO 960
DELRCC=TERP(TDAYS,CLCRP,2,NCR)
DELRG=DELRG-DELRCC
DELRG=0.
PRESCN=0.
GO TO 970
960 CONTINUE
IF(ICDF.GE.0.0) GO TO 970
EC=TERP(TAVGC,AA,4,NN)
CMU=TERP(TAVGC,AA,5,NN)
DELRP=(RCI+DELRG)/(EC*((RCO+DELRG)**2-(RCI+DELRG)**2))*((PRESTD

```

```

PROGRAM
610 1 (ISTEP)*(RCI+DELR)*2-EXTP*(RCO+DELR)*2*(1.-CMU)+
      2 (PRESTO(ISTEP)-ETP)*((RCO+DELR)*2)*(1.+CMU)
      DELRC =DELR*DELR
      DELRCO=DELR*DELR
      PRES=0.
970 CONTINUE
      DELR =DELR+DELR
      TH =TH
      TH =GAP/2.+DELR-DELR
      IF (ISWELL) 980,1000,1000
980 CONTINUE
      IF (TH.LE.0) GO TO 990
      CALL SMELL(R1300,R1500,R1700,RFS,RVOID,PI,BURNUP,TH,GAP,DELR,
      1 DELRC,DELRB)
      IF (TH.GT.0) GO TO 990
      TH=1.98*(ROUF+ROUC)+1.E-6
990 CONTINUE
      IF (DELRB.LT.DELRB .AND. TH.GT.0) DELRB=DELRB
1000 CONTINUE
      DELR =DELR+DELR
      THR =TH-1.98*(ROUF+ROUC)
      VOLGAP=PI/4.*((DCI+2.*DELR)**2-(DFS+2.*DELR)**2)*LF
      CRUF =1.980*(ROUF+ROUC)
      VRUF =PI*DFS*CRUF*LF
      IF (VOLGAP.LE.VRUF).VOLGAP=VRUF
      VOLGP =VOLGAP+VVOID
      VCOLD =PI*((RFS+2.*DELR)**2-R1350**2)
      VCOOL =PI*(R1350**2-R1700**2)
      VHOT =PI*(R1700**2-RVOID**2)
      VTOT =VCOLD+VCOOL+VHOT
C
C
C INTERPOLATE FISSION GAS RELEASE TABLE IN VOL. AVG. TEMP
      TVOLAV=VAVGIC
      IF (ISTEP.GT.1) GO TO 1030
      F =TEPP(TVOLAV,FISGR,VOLAT,29)
      ROOT(IPOW)=F
C
C
C CALCULATE GAS COMPOSITION
      FILMOL=STP*VOLGAS*CCPIN3*ATMOS/RR
      MOL(1)=FILMOL*FRACHE
      MOL(2)=FILMOL*FRACAR
      MOL(3)=FILMOL*FRACH+W*S*XX*LF/RR*RODT(IPOW)
      IF (MOL.GT.0) MOL(3)=0.
      MOL(4)=FILMOL*FRACN+W*S*(1.-XX)*LF/RR*RODT(IPOW)
      MOL(5)=FILMOL*FRACKR+MOL(IPOW)/AVOGAD*LF*RODT(IPOW)
      MOL(6)=FILMOL*FRACXE+MOL(IPOW)/AVOGAD*LF*RODT(IPOW)
C
C
C CALCULATE MOLE FRACTIONS OF GAS IN THE FUEL PIN.
      XMOLS(IPOW)=0.0
      DO 1010 I=1,6
      XMOLS(IPOW)=XMOLS(IPOW)+MOL(I)
C
C
660 1010 CONTINUE

```

```

665      DO 1020 I=1,6
          FXMOL(I,IPOW)=MOL(I)/XMOLS(IPOW)
          MOLEFR(I) =FXMOL(I,IPOW)
1020      CONTINUE
1030      CONTINUE
          MOLTOT=XMOLS(IPOW)
          MOLGAP=MOLTOT*VOLGAP/VOLGP
          IGAS =(TCI+TFS)/2.
          ABTGAS=(IGAS-32.)/1.8+273.
670      C
          C CALCULATE THERMAL CONDUCTIVITY AND VISCOSITY OF THE GAS
          C
          DO 1040 I=1,6
            TKE =ABTGAS/EKLJ(I)
            OMEGA(I)=TERP(TKE, TABLE,2,80)
1040      CONTINUE
          DO 1050 I=1,6
            VISCOS(I)=2.67E-5*SQRT(ABTGAS*GMWT(I))/(OMEGA(I)*SIGLJ(I)**2)
1050      CONTINUE
          DO 1060 I=1,6
            DO 1060 J=1,6
              PHICAP(I,J)=1./SQRT(8.)/(SQRT(1.+GMWT(I)/GMWT(J)))*(1.+SQRT(VISCOS
              I(I)/VISCOS(J))*(GMWT(J)/GMWT(I))**.25)**.2
1060      CONTINUE
          DO 1070 I=1,6
            IF(I.EQ.3) GO TO 1070
            IF(I.EQ.4) GO TO 1070
            CON(I)=1.9891E-4*(SQRT(ABTGAS/GMWT(I)))/(SIGLJ(I)**2*OMEGA(I))
1070      CONTINUE
          CSUBP(3)=6.947-0.20E-3*ABTGAS+4.808E-7*ABTGAS**2
          CSUBP(4)=6.524+1.25E-3*ABTGAS-1.E-9*ABTGAS**2
          DO 1080 I=3,4
            CON(I)=(CSUBP(I)+1.25*1.987)*VISCOS(I)/GMWT(I)
1080      CONTINUE
          GASKON=0.
          VISMIX=0.
          DO 1100 I=1,6
            DENOM=0.
            DO 1090 J=1,6
              DENOM=DENOM+MOLEFR(J)*PHICAP(I,J)
1090      CONTINUE
          GASKON=GASKON+MOLEFR(I)*CON(I)/DENOM
          VISMIX=VISMIX+MOLEFR(I)*VISCOS(I)/DENOM
1100      CONTINUE
          GK =GASKON*241.9
705      C
          C CALCULATE GAS FRESX(IPOW)SURE IN THE PIN
          ABTCV =(TT(N)-32.)/1.8+273.
          V2 =VVOID
          V1 =PI*((RCI+DELR)**2-(RFS+DELR)**2)*LF
          IF(V1.LE.VRUF) V1=VRUF
          VOLVT=V1/ABTGAS+V2/ABTCV
          PRESX(IPOW)=73.604*MOLTOT/VOLVT
          IF(ISTEP.EQ.1) PRESTO(I)=PRESX(IPOW)
          EMMIX=MOLEFR(1)*4.0+MOLEFR(2)*39.94+MOLEFR(3)*2.016+MOLEFR(4)*28.0
715

```



```

12+MOLEFR(S)*83.80+MOLEFR(6)*131.3
ELL=VISMIX/PRESTO(ISTEP)*SQRT(ABTGAS/EMMIX)
GIPG2=2.1448*ELL
TR=TH-1.98*(ROUF+ROUC)
IF(THR) 1120,1120,1110
1110 HGAS=GK/(TH+GIPG2)*12.
HSOLID=0.
GO TO 1180
1120 CONTINUE
TR =ABS(THR)
EC =TERP(TAVGC,AA,4,NN)
CMU =TERP(TAVGC,AA,5,NN)
YDSTR =TERP(TAVGC,AA,3,NN)
RCI =OCI/2.
RCO =DCO/2.
RSORMC=(RCO+DELRCD)**2-(RCI+DELRCD)**2
RSORPC=(RCO+DELRCD)**2+(RCI+DELRCD)**2
ALOGC =ALOG((RCO+DELRCD)/(RCI+DELRCD))
STREST=ALPHAC*EC*(TCI-TCO)/(2.*(1.-CMU)*ALOGC)*(1.-(2.*(RCO+DELRCD)
1)**2/RSORMC*ALOGC)
PFACE=(TR*EC/(RCI+DELRCD)+PRESCH/RSORMC)/(RSORPC/RSORMC+CMU+EC*(1.-
1MUUF)/EF)
PF =PFACE
PFMAX=((YDSTR-STREST)*RSORMC+PRESCH)/RSORPC
IF(PFACE.GT.PFMAX) PFACE=PFMAX
IF(PFACE.LI.0.0) PFACE=0.0
TFSC=(TFS-32.)/1.8
TFSK=TFSC+273.
IF(NCON) 1160,1140,1130
1130 FK=TERP(TFS,CF,2,NCON)
GO TO 1170
1140 IF(FRDEN.GE..95) GO TO 1150
FK=57.8*TCMI(FRDEN,TFSK)
GO TO 1170
1150 FK=57.8*TCM2(FRDEN,TFSK)
GO TO 1170
1160 FK=57.8*TCOR(FRDEN,TFSK)
1170 CONTINUE
CK =TERP(TCI,AA,2,NN)
KM =2.*FK*CK/(PK+CK)
KMW =KM/57.8
CPFACE=PFACE/14.194
CEE =1.980*EXP(-0.00125*CPFACE)
ROUGH =SQRT((ROUF**2+ROUC**2)/2.)
CROUGH=ROUGH*2.54
HMEYER=TERP(TCI,AA,7,NN)
CZZ =SQRT(CROUGH)
AO =140.2*CZZ-.103
HSOL =CKM*CPFACE/(AO*CZZ*HMEYER)
HSOLID=HSOL*1761.7
HGAS =GK/(CEE*(ROUF+ROUC)+GIPG2)*12.
1180 CONTINUE
TFSR =TFS+460.
TCISR =TCI+460.
AF =RFS+DELR

```

```

775 C AC =RCI+DELRG
      HRAD =.1713E-8/(1./EPSIF+AF/AC*(1./EPSIC-1.))*(IFSR**2+TCISR**2)
      1 *(IFSR+TCISR)
      HGC =HSOLID+HGAS+HRAD
      C BEGIN CONVERGENCE OF HG NOM.
      C
      C DELTA =HGC-HG
      DELHG =HG-HGOLD
      HGOLD =HG
      780 IF(ABS(DELTA/HG).LT.0.01) GO TO 1230
      IF(ITER.GT.35) GO TO 1220
      C
      C TEST FOR SIMILAR SLOPES IN THE CONVERGENCE APPROACH AND
      C IF THE LAST TWO ITERATION HAVE HAD SIMILAR VALUES, USE
      C A DIFFERENT ITERATION SCHEME. GAPAXL CON ENCOUNTER.
      785 C TWO BASIC TYPES AND ARE. (1) OSCILLATING (UNDERDAMPED).
      C OR (2) OVERDAMPED.
      C
      C IF(IOSC.EQ.1) GO TO 1190
      IF(DELTA*DELTA0.LT.0.) IOSC=1
      IF(DELTA*DELTA0.LT.0.) GO TO 1190
      C
      C SINCE THE LAST TWO ITERATIONS HAVE HAD SIMILAR SLOPES,
      C I.E., BOTH POSITIVE OR NEGATIVE, USE AN EFFECTIVE ACCELERATION
      795 C PARAMETER OF 1.4.
      C
      C HG=HGC+0.4*DELTA
      IF(HG.GT.0.) GO TO 1210
      IOSC=1
      800 HG =HGOLD
      C
      C THE SOLUTION IS OSCILLATING ABOUT WHAT SHOULD BECOME THE
      C CONVERGED SOLUTION AND THE CONVERGENCE MUST BE CONSTRAINED
      C TO FORCE A FASTER SOLUTION. THE EFFECTIVE ACCELERATION
      805 C PARAMETER USED IS REDUCED TO HALF OF IT905 ORIGINAL
      C VALUE TO DAMPEN THE OSCILLATION.
      C
      C 1190 CONTINUE
      IF(ITER.LE.5) GO TO 1200
      IF(ABS(DELHG0/DELHG).LT.1.2) HGACEL=0.5*HGACEL
      1200 CONTINUE
      IF(HGACEL.LT.0.1) HGACEL=0.1
      C
      C HG=HG+HGACEL*DELTA
      815 IF((HG+HGC).LT.1000. .AND. ITER.LE.5) HGACEL=0.5
      C
      C CONTINUE
      DELTA0=DELTA
      DELHG0=DELHG
      GO TO 520
      C
      C 1220 CONTINUE
      IF(ISTEP.LE.1) GO TO 1230
      WRITE(6,1680) HG,HGC,ISTEP,IPOM,NPOM
      1230 CONTINUE
      C
      C HGACEL=0.8
      825
      826

```

PROGRAM GAPCONT

```

      IF (CTR-GT.0) PFAGE=0.
      IF (KOUNT.EQ.0) ICASE=ICASE+1
      ICASE=ICASE+1
      IF (DB0.LT.001) GO TO 1232
      TRIC = (T80-32.)/1.8
      TRIC = (T81-32.)/1.8
1232 CONTINUE
      TCDC = (TC0-32.)/1.8
      TCIC = (TC1-32.)/1.8
      TFSC = (TFS-32.)/1.8
      IF (KOUNT.NE.0) GO TO 1240
      VOLTX(IPDM)=VOL DVT
      HGX(IPDM) =HG
      TCLINE(IPDM)=TT(N)
      ROP (IPDM)=RFS+DELR
      RGAPX (IPDM)=TH
      1240 CONTINUE
      IF (ISTEP.LT.ISTOP) GO TO 1360
      IF (MINI.LT.0) GO TO 1320
      IF (MINI.NE.0 .AND. LPMAX.NE.IPDM) GO TO 1320
      WRITE(6,1710) JCASE,IPDM,NPDM
      IF (KOUNT.GT.0) WRITE(6,1890)
      WRITE(6,1540) TITLE
      PEAK=AMAX1(PDMER(IPDM),POWER(IPDM+1))
      WRITE(6,1720) P,PEAK,TDAYS,BURNUP,PHI(IPDM)
      IF (DB0.LT.001) GO TO 1250
      WRITE(6,1730) QDVRAB
      1250 WRITE(6,1740) QDVRAC,QDVRAS,TCOOL,TCOOLC
      IF (DB0.LT.001) GO TO 1260
      WRITE(6,1750) T80,T80C,T81,T81C
      1260 WRITE(6,1760) HF,TC,TC0,TC0C,TCI,TCIC,TFS,TFSC
      IF (TT(N).LT.THF) RMELT=0.0
      DO 1270 I=1,N
      OUM(I)=(TT(I)-32.)/1.8
      OUM(I)=TS(I)*2.54
      1270 CONTINUE
      DO 1280 I=1,N
      PCFR(I)=TS(I)*100./(RFS+DELR)
      1280 CONTINUE
      WRITE(6,1770) (TS(I),TT(I),OUM(I),DUM(I),PCFR(I),I=5,N,5)
      WRITE(6,1780) THF,TH
      PCMELT=100.*RMELT/(RFS+DELR)
      WRITE(6,1790) RMELT,PCMELT
      IF (KOUNT.GT.0) GO TO 1290
      WRITE(6,1800) ROOT(IPDM)
      WRITE(6,1810) TAVGF,TAVGFC
      WRITE(6,1820) DELRT,DELRB,DELR,DELRCI,DELRP,RGAPX(IPDM),PFAGE
      PSOLID=100.*HSOLID/HG
      PGAS =100.*HGAS/HG
      PRAD =100.*HRAD/HG
      1290 CONTINUE
      WRITE(6,1830) HG
      WRITE(6,1840) HSOLID,PSOLID,HGAS,PGAS,HRAD,PRAD
      IF (KOUNT.EQ.0) GO TO 1300

```

S01 827
 S01 828
 S01 829
 S01 830
 S01 831
 S01 832
 S01 833
 S01 834
 S01 835
 S01 836
 S01 837
 S01 838
 S01 839
 S01 840
 S01 841
 S01 842
 S01 843
 S01 844
 S01 845
 S01 846
 S01 847
 S01 848
 S01 849
 S01 850
 S01 851
 S01 852
 S01 853
 S01 854
 S01 855
 S01 856
 S01 857
 S01 858
 S01 859
 S01 860
 S01 861
 S01 862
 S01 863
 S01 864
 S01 865
 S01 866
 S01 867
 S01 868
 S01 869
 S01 870
 S01 871
 S01 872
 S01 873
 S01 874
 S01 875
 S01 876
 S01 877
 S01 878
 S01 879
 S01 880
 S01 881

PROGRAM

GAPCONT

```

882 PCSIN =FRSIN*100. S01
883 POSIN =RSIN/RFS*100 S01
884 PVOID=RV0ID/RFS*100. S01
885 WRITE(6,1900) TSIN,TSINC,PCSIN S01
886 WRITE(6,1910) DSIN,POSIN,DVID,POVID,VAVGT,VAVGTC S01
887 IF(KOUNT.GT.0) GO TO 1350 S01
888 S01
889 S01
890 WRITE(6,1850) (MLFR(I),MOLF(R(I)),I=1,6) S01
891 WRITE(6,2100) XMDTOT,MOLTOT S01
892 WRITE(6,1860) GASKON,GK S01
893 WRITE(6,1870) GIPG2 S01
894 WRITE(6,1880) PRESX(IPDM),VAVGT,VAVGTC S01
895 IECLSDR,GI,0) GO TO 1310 S01
896 CALL HCAP(VAVGTC,CPNM,CPMIN,CPMAX) S01
897 CALL CARL(TSM,YFS,ITT,N,PI,DFS,STORE) S01
898 TEMPK =VAVGTC*273. S01
899 C1=7.84733E-4*(TEMPK**2-298**2)+5643730.*EXP(-37.6946/TEMPK/0.0019 S01
900 186) S01
901 C2=535.285*(1./((EXP(535.285/TEMPK)-1.)-1./((EXP(535.285 /298.)-1.))) S01
902 STOR=(C1+19.145*C2)/270. S01
903 STDRB=STDR*1.8 S01
904 STOREB=STORE *1.8 S01
905 STOREC=STORE*RH0*(DFS**2/4)*PI*2.54**2 S01
906 STOREF=STOREC*12.*2.54/252. S01
907 S01
908 S01
909 S01
910 S01
911 S01
912 S01
913 S01
914 S01
915 S01
916 S01
917 S01
918 S01
919 S01
920 S01
921 S01
922 S01
923 S01
924 S01
925 S01
926 S01
927 S01
928 S01
929 S01
930 S01
931 S01
932 S01
933 S01
934 S01
935 S01
936 S01

1300 CONTINUE
WRITE(6,1850) (MLFR(I),MOLF(R(I)),I=1,6)
WRITE(6,2100) XMDTOT,MOLTOT
WRITE(6,1860) GASKON,GK
WRITE(6,1870) GIPG2
WRITE(6,1880) PRESX(IPDM),VAVGT,VAVGTC
IECLSDR,GI,0) GO TO 1310
CALL HCAP(VAVGTC,CPNM,CPMIN,CPMAX)
CALL CARL(TSM,YFS,ITT,N,PI,DFS,STORE)
TEMPK =VAVGTC*273.
C1=7.84733E-4*(TEMPK**2-298**2)+5643730.*EXP(-37.6946/TEMPK/0.0019
186)
C2=535.285*(1./((EXP(535.285/TEMPK)-1.)-1./((EXP(535.285 /298.)-1.)))
STOR=(C1+19.145*C2)/270.
STDRB=STDR*1.8
STOREB=STORE *1.8
STOREC=STORE*RH0*(DFS**2/4)*PI*2.54**2
STOREF=STOREC*12.*2.54/252.

C CONVERT CPNM TO UNITS OF BTU/(LB-DEG F)
CPNMF=CPNM*270.
WRITE(6,2120) CPNM,CPNMF
WRITE(6,2130) STOR,STORB,STORE,STOREB,STOREC,STOREF
1310 CONTINUE
1320 CONTINUE
IF(KOUNT.GT.0) GO TO 1350
IF(T.LE..001 .OR. FRDEN.EQ.FRSIN) GO TO 1350
KOUNT=1
IF(FRDEN.GE.FRSIN) FRSIN=FRDEN
IF(T.LE..0) GO TO 1330
RETEM=.0001367*ALOG10(T/3600.))+.000480
TSINC=1./RETEM-273.
TSIN =1.8*TSINC+32.
RRSIN=RSIN
GO TO 1340
1330 TSIN=1.E10
ITER=0
GO TO 520
1340 RSIN=TERP(TSIN,BB,2,N)
IF(RSIN.LE.RRSIN) RSIN=RRSIN
DSIN =2.*RSIN
RRVID=RV0ID
RV0ID =SQRT((RSIN**2)*(FRSIN-FRDEN)/FRSIN+(RV0ID**2)*FRDEN/FRSIN)
IF(RV0ID.LE.RRVID) RV0ID=RRVID
DVID =2.*RV0ID
ELTC =LF-LVIDZ/FNPOW
VTC =PI*ELTC*RV0IDZ**2
VVOID =(PI*LF*RV0ID **2-VTC)

```

```

937 S01
938 S01
939 S01
940 S01
941 S01
942 S01
943 S01
944 S01
945 S01
946 S01
947 S01
948 S01
949 S01
950 S01
951 S01
952 S01
953 S01
954 S01
955 S01
956 S01
957 S01
958 S01
959 S01
960 S01
961 S01
962 S01
963 S01
964 S01
965 S01
966 S01
967 S01
968 S01
969 S01
970 S01
971 S01
972 S01
973 S01
974 S01
975 S01
976 S01
977 S01
978 S01
979 S01
980 S01
981 S01
982 S01
983 S01
984 S01
985 S01
986 S01
987 S01
988 S01
989 S01
990 S01
991 S01

ITER=0
GO TO 520
1350 KOUNT =0
1360 CONTINUE
940 TAVGX =TAVGX+TBAR(IPDM)
VOLTXS=VOLTXS+VOLTX(IPDM)
1370 CONTINUE
TAVGXX(ISTEP+1)=TAVGX/FNPDW
VOLTXS=VOLTXS+VPLENZ/IPLENA
TVOLAV=(TAVGXX(ISTEP+1)-32.)/1.8
F =TEPP(TVOLAV,FTSGR,VOLAT,29)
C CALCULATE GAS COMPOSITION
C
IPDM=NPDM
FILMOL=STP*(FNPDW*VOLGAS+VPLENZ )*CCPIN3*ATMDS/RR
MOL(1)=FILMOL*FRACHE
MOL(2)=FILMOL*FRACAR
MOL(3)=FILMOL*FRACH*M*S*XX*LEUEL/RR*F
955 IF(NDH.GT.0) MOL(3)=0.
MOL(4)=FILMOL*FRACN*M*S*(1.-XX)*LFUEL/RR*F
MOL(5)=FILMOL*FRACKR+KRR(IPDM)/AVOGAD*LEUEL*F
MOL(6)=FILMOL*FRACXE+XRE(IPDM)/AVOGAD*LFUEL*F
C CALCULATE MOLE FRACTION OF GAS IN THE FUEL PIN
C
XMDTOT=0.
DO 1380 I=1,6
XMDTOT=XMDTOT+MOL(I)
965 CONTINUE
DO 1390 I=1,6
FXMOL(I,1)=MOL(I)/XMDTOT
MOLEFR(I)=FXMOL(I,1)
1390 CONTINUE
C CALCULATE A NEW AVERAGED PRESSURE FOR THE PIN
PRESTO(ISTEP+1)=73.604*XMDTOT/VOLTXS
XMOLS(NPDM1)=PRESTO(ISTEP+1)*VPLENZ/(73.604*TPLENA)
DO 1400 J=1,6
DO 1401 J=1,6
FXMOL(J,I) = FXMOL(J,1)
RDO(I)=F
1401 XMOLSC(I)=PRESTO(ISTEP+1)*VOLTX(I)/73.604
CONTINUE
980 IF(ISTOP.LE.ISTEP) GO TO 1420
IF(ISTEP.LT.2) GO TO 1410
DELTX=TAVGXX(ISTEP+1)-TAVGXX(ISTEP)
IF(ABS(DELTX)/TAVGXX(ISTEP+1).LT.0.005) ISTOP=1+ISTEP
1410 CONTINUE
C
C RIGIN AXIAL PRINTOUT
C
1420 CONTINUE
WRITE(6,1530)

```

```

PROGRAM          GAPCONT
WRITE(6,1480) JCASE,TDAYS
WRITE(6,1540) TITLE
XL0=-LF*0.5
WRITE(6,1490)
DO 1430 I=1,NPDM
P=(POWER(I)+POWER(I+1))*0.5
XL=XL0+FLDAT(I)*LF
WRITE(6,1500) XL,P,HFLUX(I),
1 RDOT(I),FXMOL(I),I
1430 CONTINUE
C
C PRINT SUMMARY OF AVERAGED TEMP AND PRESSURE
C
WRITE(6,1510) (I,TAVGX(I+1),PRESTO(I+1),I=1,ISTOP)
C
C CHECK TO SEE IF THERE IS ANOTHER TIME STEP TP BE EXECUTED
C
IF(CABS(TDAYS-TMAX)/TMAX.LE.1.0E-4) GO TO 1440
IDAYS=TDAYS+DEL
JCASE=JCASE+1
GO TO 470
1440 CONTINUE
TDAYS=TD
IF(IPEAK.NE.0) GO TO 1450
PAVRG=PAVRG+DELP
IF(PAVRG.LE.PMAX) GO TO 470
GO TO 100
1450 CONTINUE
PKPWR=PKPWR+DELP
IF(PKPWR.LE.PMAX) GO TO 470
GO TO 100
1460 CONTINUE
STOP
1470 FORMAT (10X,END CONVERGENCE IN TCC)
1480 FORMAT (# CASE =#I2,10X,AXIAL SUMMARY#/1H0,10X,TIME AT POWER IN
1 DAYS,#F10.1)
1490 FORMAT (1H0,35X,CLAD#,6X,CENTER#,7X,AVERAGE#,8X,GAP#,8X,RADIA
1L#/,10X,AXIAL#,6X,HEAT#,8X,SURFACE#,6X,LINE#,10X,AVOL,#5X,#C
2DUCTANCE#,5X,HOT#,12X,GAS#,9X,MOLE#/,8X,DISTANCE#,5X,ARATIN
3G#,6X,HEAT FLUX#,6X,TEMP.#,6X,FUEL TEMP.#,4X,BTU/HR-#,7X,GAP#
4,10X,RELEASE#,6X,FRACTION#/,8X,(INCHES)#,4X,(CM/FT)#,6X,BTU/
5HR-FT#,5X,DEG F#,8X,DEG F#,6X,FT2-DEG F#,4X,(INCHES)#,9X,RATE
6#,8X,HELIUM# /)
1500 FORMAT (3X,10(3X,1PE10.3))
1510 FORMAT (#0 AXIAL, VOLUME-TEMPERATURE #,AVERAGED#/10X,#TEM
1PERATURE#,5X,PRESSURE#/5X,#I#,10X,DEG. F#,10X,#PST#/(1X,15,1P2E
215.0))
1520 FORMAT (20A4)
1530 FORMAT (1H1)
1540 FORMAT (1H0,20A4)
1550 FORMAT (58X,*****//58X,## INPUT VALUES ##//,20X,
1#*****//20X,###,91X,##)
2*****//20X,###,10X,F5.3,##
1560 FORMAT (20X,##,8X,FUEL COMPOSITION#,67X,##/20X,##,13X,F5.3,##
1WEIGHT FRACTION PU02#,27X,#FRPU02#,21X,##/20X,##,13X,F5.3,## WEI

```

992 S01
993 S01
994 S01
995 S01
996 S01
997 S01
998 S01
999 S01
1000 S01
1001 S01
1002 S01
1003 S01
1004 S01
1005 S01
1006 S01
1007 S01
1008 S01
1009 S01
1010 S01
1011 S01
1012 S01
1013 S01
1014 S01
1015 S01
1016 S01
1017 S01
1018 S01
1019 S01
1020 S01
1021 S01
1022 S01
1023 S01
1024 S01
1025 S01
1026 S01
1027 S01
1028 S01
1029 S01
1030 S01
1031 S01
1032 S01
1033 S01
1034 S01
1035 S01
1036 S01
1037 S01
1038 S01
1039 S01
1040 S01
1041 S01
1042 S01
1043 S01
1044 S01
1045 S01
1046 S01

PROGRAM GAPCONT

```

      8      #,3X,F10.2,2X,#PSI#)
1830 FORMAT (1H0,19X,#FUEL-TO-CLAD GAP CONDUCTANCE      #,20X,F10.0,2X S01
      1,#RTU/HR-FI2-F#,/)
1840 FORMAT (30X,#COMPONENT DUE TO SOLID-SOLID CONTACT      #,5X,F10.1 S01
      1,2X,#RTU/HR-FI2-F (#,F5.2,1X,#PERCENT),#/,30X,#COMPONENT DUE TO CO S01
      2,NDUCTION THROUGH THE GAS,#,5X,F10.1,2X,#RTU/HR-FI2-F (#,F5.2,1X,#P S01
      3,PERCENT),#/,30X,#COMPONENT DUE TO RADIANT HEAT TRANSFER      #,5X,F10 S01
      4,1,2X,#RTU/HR-FI2-F (#,F5.2,1X,#PERCENT),#/,)
1850 FORMAT (20X,#COMPOSITION OF PIN GAS,#,30X,#COMPOSITION OF GAS,#,# L0 S01
      1,CALLY#/,1H0,28X,F10.6,2X,#MOLE FRACTION HELIUM#,21X,F10.6,# MOLE F S01
      2,RACTION HELIUM#,27X,F10.6,2X,#MOLE FRACTION ARGON#,22X,F10.6,# MO S01
      3,LE FRACTION ARGON#,27X,F10.6,2X,#MOLE FRACTION HYDROGEN#,19X,F10.6 S01
      4,# MOLE FRACTION HYDROGEN#,22X,F10.6,2X,#MOLE FRACTION NITROGEN#, S01
      5,19X,F10.6,# MOLE FRACTION NITROGEN#,27X,F10.6,2X,#MOLE FRACTION K S01
      6,RYPTON#,20X,F10.6,# MOLE FRACTION KRYPTON#,27X,F10.6,2X,#MOLE FRA S01
      7,CTION XENON#,22X,F10.6,# MOLE FRACTION XENON#,)
1860 FORMAT (1H0,19X,#THERMAL CONDUCTIVITY OF FILL GAS,#,5X,F9.7,2X,#CAL S01
      1/SEC-CM-DEG C (#,F6.4,2X,#RTU/HR-FI-DEG F)#)
1870 FORMAT (20X,#TEMPERATURE JUMP DISTANCE,#,13X,F8.6,# INCH#,) S01
1880 FORMAT (20X,#INTERNAL GAS PRESSURE,#,9X,F10.1,2X,#PSI#,/20X,#AVERAG S01
      1E VOLUMETRIC FUEL TEMP.#,2X,F10.2,2X,#DEG F),#,5X,1H(#,F8.2,2X,#DEG S01
      2, CENTIGRADE)#/)
1890 FORMAT (1H0,5X,#CONDITIONS AFTER RESTRUCTURING#,) S01
1900 FORMAT (20X,#SINTERING TEMPERATURE      #,5X,F10.2,2X,#DEG F (#, S01
      1F,7.2,# DEG C),#/,20X,#SINTERED DENSITY      #,11X,F4.1,2X,#PERC S01
      2,ENT TO#,/)
1910 FORMAT (20X,#DIAMETER OF SINTERED FUEL      #,11X,F6.4,2X,#INCH (#, S01
      1F5.2,# PER CENT OF ORIGINAL FUEL DIAMETER),#/,20X,#DIAMETER OF CENT S01
      2,ER MOLE      #,11X,F6.4,2X,#INCH (#,F5.2,# PER CENT ORIGINAL FUEL S01
      3,DIAMETER),#/,20X,#AVERAGE VOLUMETRIC FUEL TEMP. AFTER RESTRUCTURIN S01
      4G,2X,F10.2,2X,#DEG. F),#,5X,1H(#,F8.2,2X,#DEG. CENTIGRADE),#/,) S01
1920 FORMAT (#0 NOCONVERGENCE IN TEMP CLAC AFTER 10 ITERATIONS, ASSUMED S01
      1,TEMP =#,F7.2,# ,CALCULATED TEMP =#,F7.2,/) S01
1930 FORMAT (3E10.4) S01
1940 FORMAT (7E10.4) S01
1950 FORMAT (2E10.4) S01
1960 FORMAT (20X,#,##,8X,#COOLANT IS WATER,#,67X,##) S01
1970 FORMAT (20X,#,##,8X,#COOLANT IS SODIUM,#,66X,##) S01
1980 FORMAT (20X,#,##,8X,#COOLANT NOT SPECIFIED, FILM COEFFICIENT IS #,F S01
      16.0,34X,##) S01
1990 FORMAT (20X,#,##,8X,#FAST FLUX IRRADIATION,#,62X,##) S01
2000 FORMAT (20X,#,##,8X,#THERMAL FLUX IRRADIATION,#,59X,##) S01
2010 FORMAT (20X,#,##,8X,#CLADDING IS ZIRCALOY-2,#,61X,##) S01
2020 FORMAT (20X,1H,#,8X,#CLADDING IS ZIRCALOY-4,#,61X,1H#) S01
2030 FORMAT (20X,#,##,8X,#CLADDING IS 316 STAINLESS STEEL,#,52X,##) S01
2040 FORMAT (20X,#,##,8X,#CLADDING NOT SPECIFIED, PROPERTIES WERE INPUTT S01
      1ED#,35X,##) S01
2050 FORMAT (20X,#,##,8X,#FUEL THERMAL CONDUCTIVITY VALUES DETERMINED FR S01
      1OM DATA OF LYONS, ET AL,#,19X,##) S01
2060 FORMAT(20X,#,##,8X,#FUEL THERMAL CONAVCTIVITY VALUES DETERMINED FRO S01
      1M WARD DESIGN EQUATIONS,#,13X,##) S01
2070 FORMAT(20X,#,##,8X,#FUEL THERMAL CONDUCTIVITY VALUES WERE INPUTTED S01
      1#,37X,##) S01
2080 FORMAT(20X,#,##,8X,#THIS CALCULATION ASSUMES COMPLETE MIXING OF GA S01
      1SES,#,34X,##) S01
1210

```

PROGRAM GAPCONT

```

2090  FORMAL(20X,##,91X,##) S01 1212
2100  FORMAT(27X,10H-----,4X,10H-----,11X,##G/MOLES TOTAL,2X S01 1213
      1,1PE9.3,2X,##IN PIN,34X,E9.3,2X,##LOCAL#) S01 1214
2110  FORMAL(F10.0,E10.0) S01 1215
2120  FORMAL(10X,##NOMINAL HEAT CAPACITY CPNOM=,2X,1PE9.3,2X,##CAL/CDEG S01 1216
      1 K-MOLE),5X,##(,E9.3,## BTU/(LB-DEG F),#) S01 1217
2130  FORMAL(1H09X,##STORED ENERGY ST IBAR,26X,##EBAR=,F9.2,2X,##CAL/GRA S01 1218
      1M,2X,##(,F9.2,## BTU/LB),/10X,##VOLUME AVERAGE STORED ENERGY,2X,## S01 1219
      2E=,F9.2,2X,##CAL/GRAM,2X,##(,F9.2,## BTU/LB),/10X,##STORED ENERGY P S01 1220
      3ER UNIT LENGTH,19X,##EPL=,F9.2,2X,##CAL/CM,2X,##(,F9.2,## BTU/FOOT S01 1222
      4),#) S01 1223
      END

```

```

SUBROUTINE HCAP(TEMP,CPNOM,CPMIN,CPMAX)
DIMENSION TTK(10),CLMIN(10),CLMAX(10)
REAL K1,K2,K3
DATA (TTK(I),I=1,10)/0.0,298.0,500.0,1000.0,1500.0,2000.0,2500.0,3000.0,
X 3100.0,6000.0/
DATA (CLMIN(I),I=1,10)/0.0,0.0,0.02,0.02,0.02,0.03,0.06,0.10,0.10/
DATA (CLMAX(I),I=1,10)/1.0,1.0,1.02,1.02,1.02,1.03,1.06,1.1,
X 1.1 /
C
10 TKEL=535.285
ED=37.6946
K1=19.1450
K2=.000784733
K3=564730.0
R=.001986
TEMP=AVERAGE VOLUMETRIC FUEL TEMPERATURE
TEMPK=TEMP + 273.0
CL=1.0
CPNOM=CL*((K1*TKEL**2*EXP(TKEL/TEMPK))/(TEMPK**2*(EXP(TKEL/TEMPK)
X-1)**2)+(2*K2*TEMPK)+((K3*ED)/(R*TEMPK**2))*EXP(-ED/(R*TEMPK))))
CLN=TEPP(TEMPK,CLMIN,ITK,10)
C1=1.0-CLN
CPMIN=C1*((K1*TKEL**2*EXP(TKEL/TEMPK))/(TEMPK**2*(EXP(TKEL/TEMPK)
X-1)**2)+(2*K2*TEMPK)+((K3*ED)/(R*TEMPK**2))*EXP(-ED/(R*TEMPK))))
C2=TEPP(TEMPK,CLMAX,ITK,10)
CPMAX=C2*((K1*TKEL**2*EXP(TKEL/TEMPK))/(TEMPK**2*(EXP(TKEL/TEMPK)
X-1)**2)+(2*K2*TEMPK)+((K3*ED)/(R*TEMPK**2))*EXP(-ED/(R*TEMPK))))
RETURN
END

```

SUBROUTINE EXPAND

```
SUBROUTINE EXPAND (RMELI,RF5,RD,FRDEN,IT,IMF,TFS,FRUD2,DELRT,  
X DELCT,DELM,DELN,DELN,RVUIDZ,VOL,VCRAX,L,LLM)  
DIMENSION IT(100),DELCT(50),DELL(50)  
TA((1,12))=((11+T2)/2.-32.)/1.8  
DELRT=0.  
FR=FRPU02*100.  
DO 6 I=1,50  
DELCT(I)=0.  
6 DELCT(I)=0.  
DO 1 I=1,50  
RIN=RES-RD*I  
RON=RIN+RD  
2 IF(L.GT.1) GO TO 4  
TAC=TA(VFS,TT(I))  
GO TO 16  
4 TAC=TA(TT(I-1),TT(I))  
16 CONTINUE  
17 CONTINUE  
CS1=2.895E-9*(TAC**2-25.**2)...+ 6.797E-6*(IAC-25.)  
Ravg=(RIN*RON)**.5  
DELCT(I)=CST*Ravg  
DELL(I)=CST*RD  
1 CONTINUE  
3 BIG=ABS(DELCT(I))  
L=L+1  
DO 11 I=2,50  
AB=ABS(DELCT(I))  
IF(AB-BIG) 11,11,12  
12 BIG=ABS(DELCT(I))  
L=L+1  
11 CONTINUE  
21 DO 13 I=1,L  
13 DELRT=DELRT+DELCT(I)  
DELRT=DELRT-DELL(L)/2.+DELCT(L)  
RETURN  
END
```

FUNCTION TEPP

```

C          FUNCTION TEPP(TC,CRF,CRFT,N)
C          TEPP IS A LINEAR INTERPOLATION FUNCTION WHOSE VALUE IS EQUAL TO TH
C          INTERPOLATED VALUE.
C          TC IS THE VALUE OF THE INDEPENDENT VARIABLE
C          CRF-DEPENDENT VARIABLE ARRAY
C          CRFT-INDEPENDENT VARIABLE ARRAY
C          N-NUMBER OF POINTS IN VARIABLE ARRAYS
C          DIMENSION CRF(N),CRFT(N)
C          I=1
C          IF(TC.LT.CRF(1)) GO TO 104
C          DO 100 I=1,N
C          J=1
C          IF(TC-CRF(I)) 101,102,100
C          100 CONTINUE
C          104 TEPP=CRF(I)
C          106 RETURN
C          102 TEPP=CRF(I)
C          RETURN
C          101 TEPP=CRF(I-1)+(CRF(I)-CRF(I-1))*(TC-CRF(I-1))/(CRF(I)-CRF(I-1))
C          RETURN
C          END

```

SURROUTINE SWELL

```

SURROUTINE SWELL(R1300,R1500,R1700,RFS,RVID,PI,BURNUP,TH,GAP,
X DELRT,DELRC,DELRRH)
BFCC=BURNUP/3560.
S1700=14.*BFCC**611/100.
S1500=5.0*BFCC**611/100.
S1300=2.0*BFCC**611/100.
STEMP=0.4*BFCC/100.
S17MAX=.2138
S15MAX=.0764
IF(S1500.GE.S15MAX) S1500=S15MAX
IF(S1700.GE.S17MAX) S1700=S17MAX
DELVRT=PI*(STEMP*(RFS**2-R1300**2)+S1500*(R1300**2-R1500**2)+S1500
X*(R1500**2-R1700**2)+S1700*(R1700**2-RVID**2))
DELRRH=DELVRT/(3.*PI*RFS)
TH=GAP/2-(DELRT+DELRRH)*DELRC
RETURN
END

```

2 S05
3 S05
4 S05
5 S05
6 S05
7 S05
8 S05
9 S05
10 S05
11 S05
12 S05
13 S05
14 S05
15 S05
16 S05
17 S05
18 S05

SUBROUTINE POWDIS

```

SUBROUTINE POWDIS
COMMON /POWRAY/ PAVRG,LFUEL,LF,POWER(21),AI(21),NPOM,PTOT,LPMAX,
X PKPWR,IPEAK,DELP,PMAX
REAL
LF,LFUEL
5 C
C INITIATE THE LOCAL POWMK DISTRIBUTION AND NORMALIZE
C THE RESULT TO 1.0, THUS AINCR REPRESENTS THE .5 OF THE
C AVERAGING TIMES THE INCREMENT WHICH IS 1.0/NPOM. NPOM IS
C THE NUMBER OF REGIONS.
C
10 C
AINCR=.5/FLOAT(NPOM)
NPOM1=NPOM+1
AI(1)=(POWER(1)+POWER(2))*AINCR
LPMAX=1
POLD=(POWER(1)+POWER(2))*5
IF(NPOM.LE.1) GO TO 101
DO 100 I=2,NPOM
P = (POWER(I)+POWER(I+1))*5
AI(I)=AI(I-1)+(POWER(I+1)+POWER(I))*AINCR
IF(P.LT.POLD) GO TO 100
LPMAX=I
POLD=P
100 CONTINUE
101 CONTINUE
AI(21)=AI(NPOM)
IF(AITOT.LE.0.) RETURN 0
C
C RENORMALIZE THE POWER AND AI SUCH THAT AI(1)=1.0.
C
30 C
IF(IPEAK.NE.0) GO TO 300
DO 200 I=1,NPOM
POWER(I)=POWER(I)*PAVRG/AITOT
AI(I) = AI(I)/AITOT
200 CONTINUE
POWER(NPOM+1)=POWER(NPOM+1)*PAVRG/AITOT
GO TO 900
C
C
C
C CALCULATE POWER DISTRIBUTION BASED ON PEAK POWER (KW/FT)
C
300 CONTINUE
PEAK=POWER(1)
DO 310 I=2,NPOM1
PEAK=AMAX1(PEAK,POWER(I))
310 CONTINUE
C
C NORMALIZE THE POWER DISTRIBUTION TO PKPOWER
C
50 C
DO 320 I=1,NPOM1
POWER(I)=POWER(I)*PKPWR/PEAK
AI(I) =AI(I)/AITOT
320 CONTINUE
PAVRG=AITOT*PKPWR/(PEAK)
900 CONTINUE
55 C

```

SUBROUTINE POWDIS

```

PTOT=LFUEL*PAVRG/12.
C
C TEST TO SEE IF TOTAL POWER IS ZERO , IF ZERO ERR OFF
C
C IF(PTOT.LE.0.) RETURN 0
RETURN
END

```

```

57
58
59
60
61
62
63

```


SUBROUTINE FISGAS

```

SUBROUTINE FISGAS(TIN,PHI,P,CONEN,IFLUX,MTIME,NKR,NXE)
C ***REFER *** HEDL-TME72-128 APPENDIX(B-2) FISSON GAS INVENTORY
C
C
5 C SUBROUTINE FISGAS IS USED TO CALCULATE THE AMOUNT
C OF FISSION GAS PRODUCED FOR A GIVEN TIME AND POWER.
C CALCULATION ARE BASED ON TWO MODELS. THE FIERT ASSUMES
C A PRIMARILY FAST SPECTRUM, AND THE SECONDO ASSUMES A
C THERMAL SPECTRUM.
C
10 C
C COMMON /BRNRAY/ VOLCC,N1Z,N7Z,N8Z,N9Z,N10Z
C COMMON /BRNCOM/ TPREV
C DOUBLE PRECISION X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X12,X13,X14,
C *X15,X101, X103,X104, X106,X107,X108,X109,X110,X111,X112,
C *X113,X114, X116,X117,X118
C
C REAL N2,N3,N4,N5,N6,N11,N12,N13,N14,N15,
C *N7Z,N8Z,N9Z,N10Z
C
C REAL N101,N102,N103,N104,N105,N106,N107,N108,N109,N110,N111,
C *N112,N113,N114,N115,N116,N117,N118,N119
C REAL NKR,NXE
C
30 C DOUBLE PRECISION XX,TT , T
C DIMENSION TCX(30),FCX(30),TFX(30),FFX(30),CX(30),FX(30),AX(30),
C *FY(4,20),TY(4,20)
C
C DIMENSION Y(20,20),F(20)
C
35 C DATA DC2,DC3,DC4,DC5,DC6,DC12,DC14,DC15/4,915E-04,3.413E-06,1.365E
C *-05,1.582E-03,1.925E-04,1.188E-06,3.820E-6,2.469E-10/
C
C DATA DC85I,DC85,DC21,DC22,DC23,DC26,DC28,DC31,DC33,DC34,DC35,DC25/
C *4,375E-05,2.042E-09,6.684E-06,4.620E-04,9.964E-07,9.167E-06,2.873E
C *-05,8.370E-05,1.522E-06,7.219E-04,2.092E-05,2.468E-06/
C
C DATA(TCX(I),I=1,15)/
C * 2.70E-24, 36.E-24, 60.E-24, 0., 0., 0., 1110.E-24, 290.E-24,
C * 1350.E-24, 693.E-24, 6.E-24, 0., 170.E-24, 1600.E-24, 597.E-24/
C
C DATA(TFX(I),I=1,25)/
C * 0., 14.E-24, 0., 0., 0., 740.E-24, 0., 950.E-24, 553.E-24,
C * 0., 0., 0., 17.E-24, 10*0.0
C
C DATA(TCX(I),I=16,25)/
C * 180.E-24, 15.E-24, 85.E-24, 5.E-24, 190.E-24, 2.7E-18/
C
C DATA(FCX(I),I=1,15)/
C * 14.E-24, 0., 0., 0., 0., 1.6E-24, 1.6E-24, 6.6E-24,
C * 3E-24, 0., 13.E-24, 0., 2.6E-24/

```

57	S07				
58	S07				
59	S07				
60	S07				
61	S07				
62	S07				
63	S07				
64	S07				
65	S07				
66	S07				
67	S07				
68	S07				
69	S07				
70	S07				
71	S07				
72	S07				
73	S07				
74	S07				
75	S07				
76	S07				
77	S07				
78	S07				
79	S07				
80	S07				
81	S07				
82	S07				
83	S07				
84	S07				
85	S07				
86	S07				
87	S07				
88	S07				
89	S07				
90	S07				
91	S07				
92	S07				
93	S07				
94	S07				
95	S07				
96	S07				
97	S07				
98	S07				
99	S07				
100	S07				
101	S07				
102	S07				
103	S07				
104	S07				
105	S07				
106	S07				
107	S07				
108	S07				
109	S07				
110	S07				
111	S07				

60	C	DATA(FX(I),I=1,15)/	0.1E-24, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 1.6E-24, 1.6E-24, 1.6E-24, 1.4E-24,	S07 57
		* 0., 0., 1.5E-24, 0., 2.6E-24/		S07 58
				S07 59
				S07 60
				S07 61
				S07 62
				S07 63
				S07 64
				S07 65
				S07 66
				S07 67
				S07 68
				S07 69
				S07 70
				S07 71
				S07 72
				S07 73
				S07 74
				S07 75
				S07 76
				S07 77
				S07 78
				S07 79
				S07 80
				S07 81
				S07 82
				S07 83
				S07 84
				S07 85
				S07 86
				S07 87
				S07 88
				S07 89
				S07 90
				S07 91
				S07 92
				S07 93
				S07 94
				S07 95
				S07 96
				S07 97
				S07 98
				S07 99
				S07 100
				S07 101
				S07 102
				S07 103
				S07 104
				S07 105
				S07 106
				S07 107
				S07 108
				S07 109
				S07 110
				S07 111

SUBROUTINE FISGAS

```

DATA FX/30 * 0.0/
C
EN1(A,XX,TT) =A*DEXP(-XX*TT)
EN2(F,AB,8,XX,TT) =F*AB*8*(1.0-DEXP(-XX*TT)) / XX
EN3(CDC,C,XX,TT) =DC*C*(1.0-DEXP(-XX*TT)) / XX
FAC(CXX,TT) = (1.0-DEXP(-XX*TT)) / XX
S07 112
S07 113
S07 114
S07 115
S07 116
S07 117
S07 118
S07 119
S07 120
S07 121
S07 122
S07 123
S07 124
S07 125
S07 126
S07 127
S07 128
S07 129
S07 130
S07 131
S07 132
S07 133
S07 134
S07 135
S07 136
S07 137
S07 138
S07 139
S07 140
S07 141
S07 142
S07 143
S07 144
S07 145
S07 146
S07 147
S07 148
S07 149
S07 150
S07 151
S07 152
S07 153
S07 154
S07 155
S07 156
S07 157
S07 158
S07 159
S07 160
S07 161
S07 162
S07 163
S07 164
S07 165
S07 166

IF(MTIME.GT.0) GO TO 4
N1=N2=N3=N4=N5=N6=N7=N8=N9=N10=N11=N12=N13=N14=N15=0.0
N101=N102=N103=N104=N105=N106=N107=N108=N109=N110 =0.0
N111=N112=N113=N114=N115=N116=N117=N118=N119 =0.0
N1 = N12
N7 = N7Z
N8 = N8Z
N9 = N9Z
N10 = M10Z
4 CONTINUE
IF(IFLUX.NE.0) GO TO 10
DO 5 I=1,25
CX(I)=FCX(I)
GO TO 20
10 DO 15 I=1,25
CX(I)=TCX(I)
15 FX(I)=TFX(I)
20 CONTINUE
DO 25 I=1,15
AX(I)=CX(I)-FX(I)
IF(IFLUX.NE.0) GO TO 35
DO 30 J=1,19
Y(I,J)=FY(I,J)
GO TO 45
35 DO 40 I=1,4
DO 40 J=1,19
40 Y(I,J)=TY(I,J)
45 CONTINUE
I=IIN-TPREV
C
CONVERT POWER FROM KW/FT TO KW/INCH
PFORIN=PI2.
PHI=PFORIN/COMEN*(N1Z*FX(1)+N7Z*FX(7)+N8Z*FX(8)+N9Z*FX(9)
+N10Z*FX(10))
DO 50 I=1,19
50 F(I)=PHI*(FX(10)*N10*Y(1,I)+FX(11)*N11*Y(2,I)+FX(7)*N7*Y(3,I)+FX(9)*
*N9*Y(4,I) )
X1=PHI*CX(1)
X2=PHI*CX(2)+DC2
X3=PHI*CX(3)+DC3
X4=DC4
X5=DC5
X6=DC6
X7=PHI*CX(7)
X8=PHI*CX(8)
S07 115
S07 120
S07 125
S07 130
S07 135
S07 140
S07 145
S07 150
S07 155
S07 160
S07 165

```

SUBROUTINE FISGAS

```

X9=PHI*CX(9)
X10=PHI*CX(10)
X11=PHI*CX(11)
X12=DC12
X13=PHI*CX(13)
X14=PHI*CX(14)+DC14
X15=PHI*CX(15)+DC15
N1=ENI(N1,X1,T)
N2=ENI(N2,X2,T)+EN2(PHI,AX(1),N1,X2,T)
N3=ENI(N3,X3,T)+EN3(DC2,N2,X3,T)
N4=ENI(N4,X4,T)+EN2(PHI,AX(2),N2,X4,T)
N5=ENI(N5,X5,T)+EN2(PHI,AX(3),N3,X5,T)+EN3(DC4,N4,X5,T)
N6=ENI(N6,X6,T)+EN3(DC5,N3,X6,T)
N10=ENI(N10,X10,T)
N11=ENI(N11,X11,T)+EN2(PHI,AX(10),N10,X11,T)
N12=ENI(N12,X12,T)+EN2(PHI,AX(11),N11,X12,T)
N13=ENI(N13,X13,T)+EN3(DC12,N12,X13,T)
N14=ENI(N14,X14,T)+EN2(PHI,AX(13),N13,X14,T)
N15=ENI(N15,X15,T)+EN3(DC14,N14,X15,T)
N7=ENI(N7,X7,T)+EN2(PHI,AX(15),N15,X7,T)+EN3(DC3,N3,X7,T)
N8=ENI(N8,X8,T)+EN2(PHI,AX(7),N7,X8,T)+EN3(DC6,N6,X8,T)
N9=ENI(N9,X9,T)+EN2(PHI,AX(8),N8,X9,T)
X101=PHI*CX(20)
X103=DC85I
X104=PHI*CX(21)+DC85
X106=DC21
X107=DC22
X108=DC23
X109=PHI*CX(22)
X110=DC25
X111=DC31
X112=PHI*CX(23)
X113=DC26
X114=PHI*CX(24)+DC33
X116=DC28
X117=DC34
X118=PHI*CX(25)+DC35
IF(CX(20).LE.1.E-30) GO TO 100
N101=ENI(N101,X101,T)+F(1)*FAC(X101,T)
GO TO 101
100 N101=N101+F(1)*T
101 N102=N102+(F(2)+PHI*CX(20)*N101)*T
N103=ENI(N103,X103,T)+F(3)*FAC(X103,T)
N104=ENI(N104,X104,T)+F(4)+.21*X103*N103)*FAC(X104,T)
N105=N105+(F(5)+PHI*CX(21)*N104)*T
N106=ENI(N106,X106,T)+F(6)*FAC(X106,T)
N107=ENI(N107,X107,T)+F(7)+.18*X106*N106)*FAC(X107,T)
N108=ENI(N108,X108,T)+.82*X106*N106+X107*N107)*FAC(X108,T)
IF(CX(22).LE.1.E-30) GO TO 102
N109=ENI(N109,X109,T)+X108*N108)*FAC(X109,T)
GO TO 103
102 N109=N109+X108*N108*T
103 N110=ENI(N110,X110,T)+F(10)*FAC(X110,T)
N111=ENI(N111,X111,T)+X110*N110)*FAC(X111,T)
IF(CX(23).LE.1.E-30) GO TO 104
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222

```

```

N112=ENI(N112,X112,T)+(X111*N111+X109*N109)*FAC(X112,T)
GO TO 105
104 N112=N112+(X111*N111+X109*N109)*T
105 N113=ENI(N113,X113,T)+F(C13)*FAC(X113,T)
225 N114=ENI(N114,X114,T)+X113*N113*FAC(X114,T)
N115=N115*(F(15)+PHI*CX(24))*N114*T
N116=ENI(N116,X116,T)+F(C16)*FAC(X116,T)
N117=ENI(N117,X117,T)+.3*X116*N116*FAC(X117,T)
230 N118=ENI(N118,X118,T)+F(C18)*.7*X116*N116+X117*N117)*FAC(X118,T)
N119=N119*(F(19)+PHI*CX(25))*N118*T
NKR=N101*N102*N103*N104*N105
NXE=N109*N112*N114*N115*N117*N118*N119
201 KKK=KKK+1
RETURN
END
235

```

S07 222
S07 223
S07 224
S07 225
S07 226
S07 227
S07 228
S07 229
S07 230
S07 231
S07 232
S07 233
S07 234
S07 235
S07 236

```

SUBROUTINE DEPRES(DENSIT,FR10,FR1,DFS,RV)
C ***REFER ... HEDL-TME72-128 APPENDIX(B-4) RADIAL FLUX DEPRESSION
C
5 DIMENSION RV(8,100)
DATA SIG5,SIG8,SIGAD,SIGT5,SIGT8,SIGT10/578.,2.33,0.,586.5,10.8,
  4.2/
EN5=DENSIT*FR10*.002259227
EN8=DENSIT*FR1*.00223079
END=(EN5+EN8)*2.
SGA=(EN5*SIG5+EN8*SIG8+END*SIGAD)
SGT=(EN5*SIGT5+EN8*SIGT8+END*SIGT10)
CAPSA=3.*SGA*SGT/(1.-8.*SGA/SGT)
CAPPA=SQRT(CAPSA)
RV(1,1)=0.
RV(2,1)=1.
DO 10 I=2,11
10 RV(1,I)=RV(1,I-1)+DFS/10.
DO 20 I=2,11
R=RV(1,I)*2.54/4.*CAPPA
20 RV(2,I)=1.+R**2.+R**4./4.+R**6./36.+R**8./576.
RETURN
END

```

S08 2
S08 3
S08 4
S08 5
S08 6
S08 7
S08 8
S08 9
S08 10
S08 11
S08 12
S08 13
S08 14
S08 15
S08 16
S08 17
S08 18
S08 19
S08 20
S08 21
S08 22
S08 23
S08 24

SUBROUTINE HICW

```

SUBROUTINE HICW(T,FLUX,V,D,H,TW)
C *****REFER ..... HEOL-IME72-128 APPENDIX(B-1) HEAT TRANSFER FOR WATER
C
5  DIMENSION ITTB(8,100)
   DATA(ITTB(1,J),J=1,12),/ 32.,203.6,100.,320.6,150.,392.7,
   1200.,453.4,250.,497.0,300.,536.0,350.,565.3,400.,577.3,450.,584.6,
   2500.,585.3,550.,577.2,600.,561.1
C  T = COOLANT TEMPERATURE, F
C  FLUX = HEAT FLUX, BTU/HR/FT2/F
C  TW = TEMP AT CLAD (OR BASKET)
   ITRY = 0
   TF1 = 1
   C=V**8/D**2
6  B=TEMP(TF1,ITTB,2,12)
   H=B*C
   TW = T + FLUX/H
   TF = (TW + T) / 2.
   DIFF = ABS(TF - TF1)
   IF( DIFF - 2. ) 1,1,2
2  ITRY = ITRY + 1
   IF( ITRY-50 ) 3,3,4
3  TF1 = (TF+TF1)/2.
   GO TO 6
4  PRINT 600
600 FORMAT(10X, #ND CONVERGENCE, ITERATION TIME IS 50TIMES OVER
1  FROM HICW#
1  RETURN
   END

```

2 S09
 3 S09
 4 S09
 5 S09
 6 S09
 7 S09
 8 S09
 9 S09
 10 S09
 11 S09
 12 S09
 13 S09
 14 S09
 15 S09
 16 S09
 17 S09
 18 S09
 19 S09
 20 S09
 21 S09
 22 S09
 23 S09
 24 S09
 25 S09
 26 S09
 27 S09
 28 S09
 29 S09
 30 S09


```

FUNCTION TERP(TT, TABLE(L,N))
C
C L = THE INDEX TO THE TABLE
C DIMENSION TABLE(8,100)
5 I=1
IF(TABLE(I,1).GT.TABLE(I,N)) GO TO 110
IF(TT.LE.TABLE(I,1)) GO TO 104
IF(TT.GE.TABLE(I,N)) GO TO 106
10 DO 100 J=1,N
IF(TT-TABLE(I,J)) 101,102,100
100 CONTINUE
104 TERP = TABLE(L,1)
RETURN
106 TERP = TABLE(L,N)
RETURN
15 102 TERP = TABLE(L,J)
RETURN
101 TERP=TABLE(L,J-1)+(TABLE(L,J)-TABLE(L,J-1))*(TT-TABLE(I,J-1))/
(TABLE(I,J)-TABLE(I,J-1))
RETURN
20 110 IF(TT.GE.TABLE(I,1)) GO TO 104
IF(TT.LE.TABLE(I,N)) GO TO 106
DO 120 J=1,N
IF(TT-TABLE(I,J)) 120,102,101
120 CONTINUE
END
S12 2
S12 3
S12 4
S12 5
S12 6
S12 7
S12 8
S12 9
S12 10
S12 11
S12 12
S12 13
S12 14
S12 15
S12 16
S12 17
S12 18
S12 19
S12 20
S12 21
S12 22
S12 23
S12 24
S12 25
S12 26
S12 27

```

SUBROUTINE MOVEAA

```
SUBROUTINE MOVEAA(A,B,N)
DIMENSION A(N),B(N)
DO 100 I=1,N
  B(I)=A(I)
100 CONTINUE
RETURN
END
```

5
S13
S13
S13
S13
S13
S13
S13
S13

2
3
4
5
6
7
8

SUBROUTINE MOVEKA

```
SUBROUTINE MOVEKA(K,IA,N)
DIMENSION IA(N)
DO 100 I=1,N
  IA(I)=K
100 CONTINUE
RETURN
END
```

5
S14
S14
S14
S14
S14
S14
S14

2
3
4
5
6
7
8

SUBROUTINE CARL

```

SUBROUTINE CARL(ISS,TFS,TT,N,PI,OFS,STORE)
DIMENSION AREA(50),TVOL(50),HCAT(50)
DIMENSION ISS(50),IT(50)
REAL K1,K2,K3
DO 10 I=1,N
  AREA(I)=((TSS(I)**2-ISS(I+1)**2)*PI)
  TVOL(I)=(((TFS+IT(I))*5)-32.)/(1.8)+273.
  DO 20 I=2,N
    TVOL(I)=(((IT(I)+IT(I-1))*5)-32.)/(1.8)+273.
    TKEL=535.285
    ED=37.6946
    K1=19.1450
    K2=.000784733
    K3=5643730.0
    R=.001986
    CL=1.0
    STORE=0.
  DO 40 I=1,N
    TEMPK=TVOL(I)
    HCAT(I)=CL*(K2*(TEMPK**2-298.**2)+K3*EXP(-ED/R/TEMPK)
    *K1*TKEL*(1./(EXP(TKEL/TEMPK)-1.))-1./((EXP(TKEL/298.)-1.)))
    STORE=STORE+HCAT(I)*AREA(I)
  40 CONTINUE
  STORE=STORE*4./((PI*OFS**2)
C
C WE NOW HAVE STORE IN CAL/MOLE OF UO2
C NOW CONVERT IT TO CAL/GRAM OF UO2
C
STORE=STORE/270.
RETURN
END

```

S15 2
S15 3
S15 4
S15 5
S15 6
S15 7
S15 8
S15 9
S15 10
S15 11
S15 12
S15 13
S15 14
S15 15
S15 16
S15 17
S15 18
S15 19
S15 20
S15 21
S15 22
S15 23
S15 24
S15 25
S15 26
S15 27
S15 28
S15 29
S15 30
S15 31
S15 32

SUBROUTINE HTCLM

SUBROUTINE HTCLM(CHF,TCOOL,DE,V)

C ***REFER *** HEDL-TME72-128 APPENDIX(B-2) HEAT TRANSFER FOR SODIUM

5 REAL KNA
 KNA=54.306-1.878E-2*TCOOL+2.0914E-6*TCOOL**2
 RHONA=59.566-7.9504E-3*TCOOL-.2872E-6*TCOOL**2 +.06035E-9*TCOOL**3
 CPNA=.34574-.79226E-4*TCOOL+.34086E-7*TCOOL**2
 DEF = DE/12.0
 VF = V * 3600.0
 HF = KNA/DEF*(7.+.025*(DEF*VF**RHONA*CPNA/KNA)**(.8))
 RETURN
 END

S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11
 S11

2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14

GAPCON THERMAL -1 INPUT DATA SHEET

No. DATE / /

TITLE CARD

NO.1	S.A.M.P.L.E	P.R.O.B.L.E.M.		
NO.2				
NO.3				
NO.4				
NO.5				
NO.6				

UNIT :

NO.	FORTRAN NAME	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	REMARKS
1	FRPU02							
2	FR39							
3	FR40							
4	FR41							
5	FRUQ2	1.0						
6	FR35	0.0254						
7	FR38							
8	FRDEN	0.935						
9	FRSIN	0.935						
10	DFS	0.365						
11	DSINZ							
12	DVOIDZ							
13	DCI	0.3735						
14	DCO	0.422						
15	LFUEL	132.						
16	S							
17	XX							
18	VPLENZ	0.5						
19	TINLET	570.						
20	DTEMP	100						
21	DE							
22	V							
23	EXTP	2250.						
24	PEKAVG	1.0						
25	ROUF	0.39E-4						
26	ROUC	0.20E-4						
27	PAVRG	10.						
28	PKPOWR	10.						
29	DELP	4.						
30	PMAX	14.						
31	TDAVS							
32	DELT	100.						
33	TMAX	100.						
34	DBO							
35	KB (real)							
36	HBC							
37	ATMOS	20.						
38	LVOID							
39	FRACHE	1.0						
40	FRACAR							
41	FRACH							
42	FRACN							
43	FRACKR							
44	FRACXE							
45	TM	2790.						
46	SIGHF	25000.						
47	HGACEL							
48	HG	1000.						
49	KOOL	0						
50	IFLUX	1						
51	NCLAD	-1						
52	NCON	-1						
53	NFLX	-1						
54	NOH	1						
55	NPOW	10						
56	MINI	1						
57	ICREP							
58	ICDF	-1						
59	ISWELL	1						
60	ISTOR							
61	IPEAK	1						
62	NEWK							
63	NEWCL							
64	NEWFLX	-1						
65								
66	POWER (1)~(4)	0.35	0.86	1.08	1.175			
67	" (5)~(8)	1.19	1.19	1.19	1.17			
68	" (9)~(12)	1.12	0.78	0.37				
69	" (13)~(16)							
70	" (17)~(20)							
	SUB-CASEの数							
	OUTPUT LIST NO.							
	計算日							
	計算状況							

MEMO

-91-72-

SAMPLE PROBLEM

 * INPUT VALUES *

FUEL COMPOSITION				
0.0 WEIGHT FRACTION PU02	FRPU02	0.94		
0.0 WEIGHT FRACTION PU239	FR39	0.94		
0.0 WEIGHT FRACTION PU240	FR40			
0.0 WEIGHT FRACTION PU241	FR41			
1.000 WEIGHT FRACTION U02	FRU02			
0.025 WEIGHT FRACTION U235	FR35			
0.975 WEIGHT FRACTION U238	FR38			
FUEL DENSITY	FRDEN	0.94		
RESTRUCTURED FUEL DENSITY	FRSDN	0.94		
PELLET DIAMETER	DFS	0.3650		
INITIAL RESTRICTURED FUEL DIAM.	DSIN	0.0		
INITIAL CENTER HOLE DIAMETER	DVOID	0.0		
PELLET-TO-CLAD GAP	GAP	0.0085		
CLAD INSIDE DIAMETER	DCI	0.3735		
CLAD OUTSIDE DIAMETER	DCO	0.4220		
FUEL LENGTH	LFUEL	132.00		
SORBED GAS CONTENT	S	0.0		
FRACTION OF SORBED GAS WHICH IS H ₂	XX	0.0		
PLENUM VOLUME	VPLENZ	0.50		
COOLANT TEMPERATURE	TINLET	570.0		
AXIAL TEMPERATURE GRADIENT ACROSS CORE	DTEMP	100.0		
COOLANT PASSAGE EQUIVALENT DIAMETER	DE	0.0		
COOLANT VELOCITY	V	0.0		
PRESSURE IN CLAD OD	EXTP	2250.0		
LONG. PEAK/AVG FLUX RATIO	PEKAVG	1.000		
FUEL SURFACE ROUGHNESS, ARITH. MEAN	ROUF	0.00004		
CLAD ID SURFACE ROUGHNESS, ARITH. MEAN	ROUC	0.00002		
AVERAGE POWER GENERATION	PAVRG	8.50		
INITIAL PEAK POWER GENERATION	PKPMP	10.00		
POWER INCREMENTS	DELP	4.00		
MAXIMUM POWER GENERATION	PMAX	14.00		
MINIMUM TIME AT POWER	TDAY5	0.0		
TIME INCREMENTS	DELT	100.00		
MAXIMUM TIME AT POWER	TMAX	100.00		
DIAMETER OF AUXILIARY BASKET	DRO	0.0		
BASKET THERMAL CONDUCTIVITY	K9	0.0		
BASKET-TO-CLAD HEAT TRANSFER COEFF.	HBC	0.0		
FILL GAS PRESSURE	ATMOS	20.0		
FILL GAS COMPOSITION				
1.00000 MOLE FRACTION HELIUM				
0.0 MOLE FRACTION ARGON				
0.0 MOLE FRACTION HYDROGEN				
0.0 MOLE FRACTION NITROGEN				
0.0 MOLE FRACTION KRYPTON				
0.0 MOLE FRACTION XENON				
COOLANT NOT SPECIFIED, FILM COEFFICIENT IS 25000.				
THERMAL FLUX IRRADIATION				
CLADDING IS ZIRCALOY-2				
FUEL THERMAL CONDUCTIVITY VALUES DETERMINED FROM DATA OF LYONS, ET AL				
THIS CALCULATION ASSUMES COMPLETE MIXING OF GASES				

FUEL THERMAL CONDUCTIVITY VALUES USED

TEMPERATURE (DEG F)	UNRESTRICTED FUEL	RESTRICTED FUEL
500.	1.265	3.265
1000.	2.315	2.315
1500.	1.818	1.818
2000.	1.532	1.532
2500.	1.371	1.371
3000.	1.298	1.298
3500.	1.295	1.295
4000.	1.354	1.354
4500.	1.472	1.472
5000.	1.648	1.648

THERMAL CONDUCTIVITY
(BTU/HR-FT-DEG F)

FLUX DEPRESSION VALUES USED

DIAMETER (IN)	FLUX RATIO
0.0	1.0000
0.0365	1.0009
0.0730	1.0038
0.1095	1.0085
0.1460	1.0151
0.1825	1.0237
0.2190	1.0342
0.2555	1.0467
0.2920	1.0612
0.3285	1.0778
0.3650	1.0965

**** INPUT OPTIONS ****

NPOM = 10
 MINT = 1
 ICONF = -1
 ISTOP = 0
 ICREEP = 0
 ISWELL = 1
 IPFAK = 1

SAMPLE PROBLEM

LINEAR HEAT RATING (AVG) 10.0000 KW/FT (PEAK = 10.00 KW/FT)
 TIME-IN REACTOR 0.0 DAYS
 BURNUP 0.0 MWD/MTM
 AVERAGE FLUX IN FUEL 4.666E 13 NV
 CLAD OD SURFACE HEAT FLUX 3.089E 05 BTU/HR-FT2
 FUEL SURFACE HEAD FLUX 3.572E 05 BTU/HR-FT2
 COOLANT TEMPERATURE 631.94 DEG F (333.30 DEG C)
 FILM COEFFICIENT 25000.00 BTU/HR-FT2-DEG F
 CLAD THERMAL CONDUCTIVITY 9.50 BTU/HR-FT-DEG F
 CLAD OD TEMPERATURE 644.29 DEG F (340.16 DEG C)
 CLAD ID TEMPERATURE 714.25 DEG F (379.03 DEG C)
 FUEL SURFACE TEMPERATURE 1179.41 DEG F (637.45 DEG C)

RADIUS (INCHES)	TEMPERATURE (DEG F)	RADIUS (CM)	TEMPERATURE (DEG C)	PERCENT OF FUEL RADIUS
0.1643	1439.	0.4172	782.	89.10
0.1460	1696.	0.3708	925.	79.20
0.1278	1943.	0.3245	1062.	69.30
0.1095	2171.	0.2781	1188.	59.40
0.0913	2373.	0.2318	1300.	49.50
0.0730	2543.	0.1854	1395.	39.60
0.0547	2678.	0.1391	1470.	29.70
0.0365	2776.	0.0927	1525.	19.80
0.0182	2835.	0.0464	1557.	9.90
0.0	2855.	0.0	1568.	0.0

MELT TEMPERATURE 5054. DEG F (2790. DEG C)
 MELT RADIUS 0.0 INCH (0.0 PERCENT FUEL RADIUS)
 GAS RELEASE RATE 0.0525
 RADIUS-AVERAGED FUEL TEMPERATURE 2266.1 DEG F (1241.2 DEG C)
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO THERMAL EXPANSION 0.001847 INCH
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO SWELLING 0.0
 TOTAL INCREASE IN FUEL RADIUS 0.001847 INCH
 CHANGE IN CLAD RADIUS DUE TO THERMAL EXP. AND CREEP 0.000443 INCH
 CHANGE IN CLAD RADIUS(PRESSURE) -0.000207 INCH
 HOT GAP (RADIAL) 0.002639 INCH
 FUEL-CLAD INTERFACIAL PRESSURE 0.0 PSI

FUEL-TO-CLAD GAP CONDUCTANCE 759. BTU/HR-FT2-F
 COMPONENT DUE TO SOLID-SOLID CONTACT 0.0 BTU/HR-FT2-F (0.0 PERCENT)
 COMPONENT DUE TO CONDUCTION THROUGH THE GAS 749.4 BTU/HR-FT2-F (98.72 PERCENT)
 COMPONENT DUE TO RADIANT HEAT TRANSFER 14.4 BTU/HR-FT2-F (1.90 PERCENT)
 COMPOSITION OF P1N GAS
 1.000000 MOLE FRACTION HELIUM
 0.0 MOLE FRACTION ARGON
 0.0 MOLE FRACTION HYDROGEN
 0.0 MOLE FRACTION NITROGEN
 0.0 MOLE FRACTION KRYPTON
 0.0 MOLE FRACTION XENON

G/MOLES TOTAL 1.54E-02 IN P1N
 THERMAL CONDUCTIVITY OF FILL GAS 0.0006847 CAL/SEC-CM-DEG C (0.1656 BTU/HR-FT-DEG F)
 TEMPERATURE JUMP DISTANCE 0.000013 INCH
 INTERNAL GAS PRESSURE 821.2 PSI
 AVERAGE VOLUMETRIC FUEL TEMP. 1957.28 (DEG F) (1069.60 DEG. CENTIGRADE)
 NOMINAL HEAT CAPACITY CPNOM= 2.10E 01 CAL/(DEG-K-MOLE) (5.68E 03 BTU/(LB-DEG F)
 STORED ENERGY ST TBAR FBAR= 74.93 CAL/GRAM (134.87 BTU/LB)
 VOLUME AVERAGE STORED ENERGY E= 75.27 CAL/GRAM (135.49 BTU/LB)
 STORED ENERGY PER UNIT LENGTH EPL= 521.21 CAL/CM (63.04 BTU/FOOT)

CASE # 1 AXIAL SUMMARY

TIME AT POWER IN DAYS 0.0

SAMPLE PROBLEM

AXIAL DISTANCE (INCHES)	HEAT RATING (KW/FT)	CLAD SURFACE HEAT FLUX BTU/HR-FT	CENTER LINE TEMP. DEG F	AVERAGE VOL. FUEL TEMP. DEG F	GAP CONDUCTANCE BTU/HR-FT ² -DEG F	RADIAL HOT GAP (INCHES)	GAS RELEASE RATE	MOLE FRACTION HELIUM
6.600E 00	5.084E 00	1.569E 05	1.623E 03	1.273E 03	5.359E 02	3.489E-03	5.253E-02	1.000E 00
1.980E 01	8.151E 00	2.515E 05	2.360E 03	1.686E 03	6.484E 02	3.003E-03	5.253E-02	1.000E 00
3.300E 01	9.475E 00	2.924E 05	2.688E 03	1.859E 03	7.152E 02	2.761E-03	5.253E-02	1.000E 00
4.620E 01	9.937E 00	3.066E 05	2.806E 03	1.922E 03	7.481E 02	2.661E-03	5.253E-02	1.000E 00
5.940E 01	1.000E 01	3.085E 05	2.832E 03	1.938E 03	7.591E 02	2.652E-03	5.253E-02	1.000E 00
7.260E 01	1.000E 01	3.089E 05	2.854E 03	1.957E 03	7.591E 02	2.639E-03	5.253E-02	1.000E 00
8.580E 01	9.918E 00	3.083E 05	2.844E 03	1.959E 03	7.591E 02	2.648E-03	5.253E-02	1.000E 00
9.900E 01	9.622E 00	2.968E 05	2.791E 03	1.933E 03	7.443E 02	2.727E-03	5.253E-02	1.000E 00
1.122E 02	7.983E 00	2.463E 05	2.410E 03	1.740E 03	6.678E 02	3.013E-03	5.253E-02	1.000E 00
1.254E 02	4.832E 00	1.491E 05	1.674E 03	1.334E 03	5.479E 02	3.551E-03	5.253E-02	1.000E 00

AXIAL VOLUME-TEMPERATURE AVERAGED

TEMPERATURE DEG. F	TEMPERATURE PRESSURE PSI
1 1.7654E 03	8.1895E 02
2 1.7601E 03	8.2127E 02
3 1.7601E 03	8.2124E 02

SAMPLE PROBLEM

LINEAR HEAT RATING (AVG) 10.0000 KW/FT (PEAK = 10.00 KW/FT)
 TIME-IN REACTOR 100.0000 DAYS
 BURNUP 5375.63 MWd/MTM

AVERAGE FLUX IN FUEL 4.666E 13 NV
 CLAD OD SURFACE HEAT FLUX 3.089E 05 BTU/HR-FT2
 FUEL SURFACE HEAT FLUX 3.572E 05 BTU/HR-FT2
 COOLANT TEMPERATURE 631.94 DEG F (333.30 DEG C)
 FILM COEFFICIENT 25000.00 BTU/HR-FT2-DEG F
 CLAD THERMAL CONDUCTIVITY 9.50 BTU/HR-FT-DEG F
 CLAD OD TEMPERATURE 644.29 DEG F (340.16 DEG C)
 CLAD ID TEMPERATURE 714.25 DEG F (379.03 DEG C)
 FUEL SURFACE TEMPERATURE 1241.14 DEG F (671.74 DEG C)

RADIUS (INCHES)	TEMPERATURE (DEG F)	TEMPERATURE (DEG C)	RADIUS (CM)	PERCENT OF FUEL RADIUS
0.1643	1509.	820.	0.4172	89.05
0.1460	1773.	967.	0.3708	79.15
0.1278	2026.	1108.	0.3245	69.26
0.1095	2259.	1237.	0.2781	59.36
0.0913	2465.	1351.	0.2318	49.47
0.0730	2638.	1448.	0.1854	39.58
0.0547	2775.	1528.	0.1391	29.68
0.0365	2873.	1579.	0.0927	19.79
0.0182	2933.	1612.	0.0464	9.89
0.0		1623.	0.0	0.0

MELT TEMPERATURE 5054. DEG F (2790. DEG C)
 MELT RADIUS 0.0 INCH (0.0 PERCENT FUEL RADIUS)
 GAS RELEASE RATE 0.0848
 RADIUS AVERAGED FUEL TEMPERATURE 2354.0 DEG F (1290.0 DEG C)
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO THERMAL EXPANSION 0.001955 INCH
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO SWELLING 0.0 INCH
 TOTAL INCREASE IN FUEL RADIUS 0.001955 INCH
 CHANGE IN CLAD RADIUS DUE TO THERMAL EXP. AND CREEP 0.000443 INCH
 CHANGE IN CLAD RADIUS(PRESSURE) -0.000197 INCH
 HOT GAP (RADIAL) 0.002341 INCH
 FUEL-CLAD INTERFACIAL PRESSURE 0.0 PSI

FUEL-TO-CLAD GAP CONDUCTANCE 670. BTU/HR-FT2-F

COMPONENT DUE TO SOLID-SOLID CONTACT 0.0 BTU/HR-FT2-F (0.0 PERCENT)
 COMPONENT DUE TO CONDUCTION THROUGH THE GAS 658.3 BTU/HR-FT2-F (98.23 PERCENT)
 COMPONENT DUE TO RADIANT HEAT TRANSFER 15.5 BTU/HR-FT2-F (2.31 PERCENT)

COMPOSITION OF PIN GAS
 0.932834 MOLE FRACTION HELIUM
 0.0 MOLE FRACTION ARGON
 0.0 MOLE FRACTION HYDROGEN
 0.0 MOLE FRACTION NITROGEN
 0.007977 MOLE FRACTION KRYPTON
 0.059189 MOLE FRACTION XENON

COMPOSITION OF GAS LOCALLY
 0.932834 MOLE FRACTION HELIUM
 0.0 MOLE FRACTION ARGON
 0.0 MOLE FRACTION HYDROGEN
 0.0 MOLE FRACTION NITROGEN
 0.007977 MOLE FRACTION KRYPTON
 0.059189 MOLE FRACTION XENON

G/HOLES TOTAL 1.65E-02 IN*PIN
 THERMAL CONDUCTIVITY OF FILL GAS 0.0005784 CAL/SEC-CM-DEG C (0.1399 BTU/HR-FT-DEG F)
 TEMPERATURE JUMP DISTANCE 0.000009 INCH
 INTERNAL GAS PRESSURE 895.9 PSI
 AVERAGE VOLUMETRIC FUEL TEMP. 2039.03 (DEG F) (1115.02 DEG. CENTIGRADE)

NOMINAL HEAT CAPACITY CPNOM= 2.12E 01 CAL/(DEG K-MOLE) (5.71E 03-BTU/(LB-DEG F))
 STORED ENERGY ST TBAR FBAR= 78.47 CAL/GRAM (141.25 BTU/LB)
 VOLUME AVERAGE STORED ENERGY E* 78.86 CAL/GRAM (141.95 BTU/LB)
 STORED ENERGY PER UNIT LENGTH EPL= 546.04 CAL/CM (66.04 BTU/FOOT)

CASE # 2 AXIAL SUMMARY

TIME AT POWER IN DAYS 100.0

SAMPLE PROBLEM

AXIAL DISTANCE (INCHES)	HEAT RATING (KW/FT)	CLAD SURFACE HEAT FLUX (BTU/HR-FT)	CENTER LINE TEMP. (DEG F)	AVERAGE VOL. FUEL TEMP. (DEG F)	GAP CONDUCTANCE (BTU/HR-FT ² -DEG F)	RADIAL HOT GAP (INCHES)	GAS RELEASE RATE	MOLE FRACTION HELIUM
6.600E 00	5.084E 00	1.569E 05	1.699E 03	1.339E 03	4.589E 02	3.455E-03	8.237E-02	9.346E-01
1.980E 01	8.151E 00	2.515E 05	2.460E 03	1.769E 03	5.654E 02	2.916E-03	8.237E-02	9.346E-01
3.300E 01	9.475E 00	2.923E 05	2.790E 03	1.944E 03	6.279E 02	2.664E-03	8.237E-02	9.346E-01
4.620E 01	9.937E 00	3.086E 05	2.905E 03	2.004E 03	6.604E 02	2.564E-03	8.237E-02	9.346E-01
5.940E 01	1.000E 01	3.085E 05	2.929E 03	2.020E 03	6.702E 02	2.556E-03	8.237E-02	9.346E-01
7.260E 01	1.000E 01	3.085E 05	2.953E 03	2.039E 03	6.702E 02	2.541E-03	8.237E-02	9.346E-01
8.580E 01	9.916E 00	3.059E 05	2.946E 03	2.041E 03	6.647E 02	2.591E-03	8.237E-02	9.346E-01
9.900E 01	9.622E 00	2.968E 05	2.887E 03	2.014E 03	6.552E 02	2.633E-03	8.237E-02	9.346E-01
1.122E 02	7.983E 00	2.462E 05	2.506E 03	1.820E 03	5.808E 02	2.928E-03	8.237E-02	9.346E-01
1.254E 02	4.832E 00	1.490E 05	1.745E 03	1.395E 03	4.687E 02	3.502E-03	8.237E-02	9.346E-01

AXIAL VOLUME-TEMPERATURE AVERAGE

TEMPERATURE (DEG. F)	TEMPERATURE (PSI)
1 2.0390E 03	9.9496E 02
2 1.9117E 03	9.3435E 02
3 1.8651E 03	9.0950E 02
4 1.8450E 03	9.0036E 02
5 1.8384E 03	8.9706E 02

SAMPLE PROBLEM

LINEAR HEAT RATING (AVG) (PEAK = 14.00 KW/FT)
 TIME-IN REACTOR (0.0 DAYS)
 BURNUP (0.0 MW5Y/MT)

AVERAGE FLUX IN FUEL (6.53E 13 NV)
 CLAD OD SURFACE HEAT FLUX (4.318E 05 BTU/HR-FT2)
 FUEL SURFACE HEAT FLUX (4.930E 05 BTU/HR-FT2)
 COOLANT TEMPERATURE (631.94 DEG F (333.30 DEG C))
 FILM COEFFICIENT (25000.00 BTU/HR-FT2-DEG F)
 CLAD THERMAL CONDUCTIVITY (9.59 BTU/HR-FT-DEG F)
 CLAD OD TEMPERATURE (649.21 DEG F (342.89 DEG C))
 CLAD ID TEMPERATURE (746.37 DEG F (396.87 DEG C))
 FUEL SURFACE TEMPERATURE (1210.29 DEG F (654.60 DEG C))

RADIUS (INCHES)	TEMPERATURE (DEG F)	RADIUS (CM)	TEMPERATURE (DEG C)	PERCENT OF FUEL RADIUS
0.1666	1588.	0.4231	865.	90.00
0.1481	1977.	0.3761	1081.	80.00
0.1296	2357.	0.3291	1292.	70.00
0.1111	2709.	0.2821	1487.	60.00
0.0925	3018.	0.2351	1659.	50.00
0.0740	3273.	0.1881	1800.	40.00
0.0555	3471.	0.1410	1910.	30.00
0.0370	3611.	0.0940	1988.	20.00
0.0185	3694.	0.0470	2034.	10.00
0.0	3721.	0.0	2050.	0.0

MELT TEMPERATURE (5054. DEG F (2790. DEG C))
 MELT RADIUS (0.0 INCH (0.0 PERCENT FUEL RADIUS))
 GAS RELEASE RATE (0.2082 2844.4 DEG F (1562.4 DEG C))
 RADIUS AVERAGED FUEL TEMPERATURE (0.002601 INCH)
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO THERMAL EXPANSION (0.0 INCH)
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO SWELLING (0.002601 INCH)
 TOTAL INCREASE IN FUEL RADIUS (0.002601 INCH)
 CHANGE IN CLAD RADIUS DUE TO THERMAL EXP. AND CREEP (0.000458 INCH)
 CHANGE IN CLAD RADIUS (PRESSURE) (-0.000192 INCH)
 HOT GAP (RADIAL) (0.001916 INCH)
 FUEL-CLAD INTERFACIAL PRESSURE (0.0 PSI)

FUEL-TO-CLAD GAP CONDUCTANCE (1057. BTU/HR-FT2-F)

COMPONENT DUE TO SOLID-SOLID CONTACT (0.0 BTU/HR-FT2-F (0.0 PERCENT))
 COMPONENT DUE TO CONDUCTION THROUGH THE GAS (1045.7 BTU/HR-FT2-F (98.90 PERCENT))
 COMPONENT DUE TO RADIANT HEAT TRANSFER (15.4 BTU/HR-FT2-F (1.45 PERCENT))

COMPOSITION OF PIN GAS

COMPOSITION OF GAS	LOCALLY
1.000000	MOLE FRACTION HELIUM
0.0	MOLE FRACTION ARGON
0.0	MOLE FRACTION HYDROGEN
0.0	MOLE FRACTION NITROGEN
0.0	MOLE FRACTION KRYPTON
0.0	MOLE FRACTION XENON

G/MOLES TOTAL (4.58E-04 LOCAL)
 THERMAL CONDUCTIVITY OF FILL GAS (0.0006946 CAL/SEC-CM-DEG C (0.1680 BTU/HR-FT-DEG F))
 TEMPERATURE JUMP DISTANCE (0.000012 INCH)
 INTERNAL GAS PRESSURE (911.5 PSI)
 AVERAGE VOLUMETRIC FUEL TEMP. (2378.91 (DEG F)) (1303.84 DEG. CENTIGRADE)

NOMINAL HEAT CAPACITY CPNOME (2.17E 01 CAL/(DEG K-MOLE)) (5.86E 03 BTU/(LB-DEG F))
 STORED ENERGY ST THAR (FRAM= 93.45 CAL/GRAM (168.20 BTU/LB))
 VOLUME AVERAGE STORED ENERGY (E= 97.48 CAL/GRAM (175.47 BTU/LB))
 STORED ENERGY PER UNIT LENGTH (EPL= 674.96 CAL/CM (81.64 BTU/FOOT))

CASE # 2 AXIAL SUMMARY

TIME AT POWER IN DAYS 0.0

SAMPLE PROBLEM

AXIAL DISTANCE (INCHES)	HEAT RATING (KW/FT)	CLAD SURFACE HEAT FLUX (BTU/HR-FT)	CENTRIF LINE TEMP. (DEG F)	AVERAGE VOL. FUEL TEMP. (DEG F)	GAP CONDUCTANCE (BTU/HR-FT ² -DEG F)	RADIAL HOT GAP (INCHES)	GAS RELEASE RATE	MOLE FRACTION HELIUM
6.600E 00	7.118E 00	2.196F 05	2.098E 03	1.542E 03	6.059E 02	3.173E-03	2.082E-01	1.000E 00
1.920E 01	1.141E 01	3.521F 05	3.121F 03	2.070E 03	8.249E 02	2.425E-03	2.082E-01	1.000E 00
3.300E 01	1.326E 01	4.092F 05	3.528E 03	2.267E 03	9.796E 02	2.075E-03	2.082E-01	1.000E 00
4.620E 01	1.391E 01	4.292E 05	3.675E 03	2.343E 03	1.039E 03	1.945E-03	2.082E-01	1.000E 00
5.940E 01	1.400E 01	4.319F 05	3.709E 03	2.368E 03	1.049E 03	1.921E-03	2.082E-01	1.000E 00
7.260E 01	1.400E 01	4.318E 05	3.721E 03	2.379E 03	1.057E 03	1.916E-03	2.082E-01	1.000E 00
8.580E 01	1.388E 01	4.289F 05	3.715E 03	2.382E 03	1.057E 03	1.923E-03	2.082E-01	1.000E 00
9.900E 01	1.347E 01	4.155F 05	3.637E 03	2.347E 03	1.025E 03	1.989E-03	2.082E-01	1.000E 00
1.122E 02	1.118E 01	3.447E 05	3.146E 03	2.118E 03	8.470E 02	2.433E-03	2.082E-01	1.000E 00
1.254E 02	6.765E 00	2.087F 05	2.125E 03	1.589E 03	6.183E 02	3.230E-03	2.082E-01	1.000E 00

AXIAL VOLUME-TEMPERATURE AVERAGED

I	TEMPERATURE (DEG. F)	PRESSURE (PSI)
1	2.1542E 03	9.0364E 02
2	2.1306E 03	9.1157E 02
3	2.1408E 03	9.1149E 02
4	2.1408E 03	9.1150E 02

SAMPLE PROBLEM

LINEAR HEAT RATING (AVG) (PEAK = 14.00 KW/FT)
 TIME-IN REACTOR 100.0000 DAYS
 BURNUP 7525.88 MWD/MTM

AVERAGE FLUX IN FUEL 6.533E 13 NV
 CLAD OD SURFACE HEAT FLUX 4.317E 05 BTU/HR-FT2
 FUEL SURFACE HEAD FLUX 4.918E 05 BTU/HR-FT2
 COOLANT TEMPERATURE 631.94 DEG F (333.30 DEG C)
 FILM COEFFICIENT 25000.00 BTU/HR-FT2-DEG F
 CLAD THERMAL CONDUCTIVITY 9.59 BTU/HR-FT-DEG F
 CLAD OD TEMPERATURE 649.21 DEG F (342.89 DEG C)
 CLAD ID TEMPERATURE 746.33 DEG F (396.85 DEG C)
 FUEL SURFACE TEMPERATURE 1459.26 DEG F (792.92 DEG C)

RADIUS (INCHES)	TEMPERATURE (DEG F)	RADIUS (CM)	TEMPERATURE (DEG C)	PERCENT OF FUEL RADIUS
0.1670	1880.	0.4242	1027.	89.99
0.1484	2306.	0.3771	1264.	79.99
0.1299	2714.	0.3299	1490.	69.99
0.1113	3081.	0.2828	1694.	59.99
0.0928	3395.	0.2357	1868.	50.00
0.0742	3648.	0.1885	2009.	40.00
0.0557	3842.	0.1414	2117.	30.00
0.0371	3978.	0.0943	2192.	20.00
0.0186	4058.	0.0471	2237.	10.00
0.0	4084.	0.0	2251.	0.0

MELT TEMPERATURE 5054. DEG F (2790. DEG C)
 MELT RADIUS 0.0 INCH (0.0 PERCENT FUEL RADIUS)
 GAS RELEASE RATE 0.3390 3197.0 DEG F (1758.3 DEG C)
 RADIUS AVERAGED FUEL TEMPERATURE 0.003076 INCH
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO THERMAL EXPANSION 0.0 INCH
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO SWELLING 0.003076 INCH
 TOTAL INCREASE IN FUEL RADIUS 0.003076 INCH
 CHANGE IN CLAD RADIUS DUE TO THERMAL EXP. AND CREEP -0.000127 INCH
 CHANGE IN CLAD RADIUS(PRESSURE) 0.001505 INCH
 HOT GAP (RADIAL) 0.0 PSI
 FUEL-CLAD INTERFACIAL PRESSURE 0.0 PSI

FUEL-TO-CLAD GAP CONDUCTANCE 687. BTU/HR-FT2-F

COMPONENT DUE TO SOLID-SOLID CONTACT 0.0 BTU/HR-FT2-F (0.0 PERCENT)
 COMPONENT DUE TO CONDUCTION THROUGH THE GAS 673.2 BTU/HR-FT2-F (97.99 PERCENT)
 COMPONENT DUE TO RADIANT HEAT TRANSFER 20.2 BTU/HR-FT2-F (2.94 PERCENT)

COMPOSITION OF PIN GAS COMPOSITION OF GAS LOCALLY
 0.710905 MOLE FRACTION HELIUM 0.710905 MOLE FRACTION HELIUM
 0.0 MOLE FRACTION ARGON 0.0 MOLE FRACTION ARGON
 0.0 MOLE FRACTION HYDROGEN 0.0 MOLE FRACTION HYDROGEN
 0.0 MOLE FRACTION NITROGEN 0.0 MOLE FRACTION NITROGEN
 0.034078 MOLE FRACTION KRYPTON 0.034078 MOLE FRACTION KRYPTON
 0.255017 MOLE FRACTION XENON 0.255017 MOLE FRACTION XENON

G/MOLES TOTAL 2.17E-02 IN PIN 5.11E-04 LOCAL
 THERMAL CONDUCTIVITY OF FILL GAS 0.0003500 CAL/SEC-CM-DEG C (0.0847 BTU/HR-FT-DEG F)
 TEMPERATURE JUMP DISTANCE 0.000004 INCH
 INTERNAL GAS PRESSURE 1403.5 PSI
 AVERAGE VOLUMETRIC FUEL TEMP. 2716.47 (DEG F) (1491.37 DEG. CENTIGRADE)

NOMINAL HEAT CAPACITY CPNOME= 2.25E 01 CAL/(DEG K-MOLE) (6.08E 03 BTU/(LB-DEG F)
 STORED ENERGY ST TRAR FBAR= 108.77 CAL/GRAM (195.79 BTU/LB)
 VOLUME AVERAGE STORED ENERGY E= 114.68 CAL/GRAM (206.43 BTU/LB)
 STORED ENERGY PER UNIT LENGTH EPL= 794.07 CAL/CM (96.04 BTU/FOOT)

SABINDO PRINTING CO. 1074 2

CASE = 3 AXIAL SUMMARY

TIME AT POWER IN DAYS 100.0

SAMPLE PROBLEM

AXIAL DISTANCE (INCHES)	HEAT RATING (KW/FT)	CLAD SURFACE HEAT FLUX BTU/HR-FT	CENTER LINE TEMP. DEG F	AVERAGE VOL. FUEL TEMP. DEG F	GAP CONDUCTANCE BTU/HR-FT ² -DEG F	RADIAL HOT GAP (INCHES)	GAS RELEASE RATE	MOLE FRACTION HELIUM
6.60E 00	7.11E 00	2.199E 03	2.531E 03	1.907E 03	3.552E 02	2.852E-03	3.384E-01	7.113E-01
1.980E 01	1.141E 01	3.520E 03	3.555E 03	2.447E 03	5.199E 02	2.004E-03	3.384E-01	7.113E-01
3.300E 01	1.326E 01	4.091E 03	3.920E 03	2.624E 03	6.296E 02	1.626E-03	3.384E-01	7.113E-01
4.620E 01	1.391E 01	4.290E 03	4.050E 03	2.691E 03	6.729E 02	1.526E-03	3.384E-01	7.113E-01
5.940E 01	1.400E 01	4.317E 03	4.068E 03	2.700E 03	6.880E 02	1.521E-03	3.384E-01	7.113E-01
7.260E 01	1.400E 01	4.317E 03	4.084E 03	2.716E 03	6.870E 02	1.505E-03	3.384E-01	7.113E-01
8.580E 01	1.388E 01	4.280E 03	4.063E 03	2.706E 03	6.898E 02	1.532E-03	3.384E-01	7.113E-01
9.900E 01	1.347E 01	4.153E 03	4.003E 03	2.685E 03	6.634E 02	1.579E-03	3.384E-01	7.113E-01
1.122E 02	1.118E 01	3.486E 03	3.573E 03	2.484E 03	5.280E 02	2.018E-03	3.384E-01	7.113E-01
1.254E 02	6.755E 00	2.086E 03	2.530E 03	1.934E 03	3.563E 02	2.927E-03	3.384E-01	7.113E-01

AXIAL VOLUME-TEMPERATURE AVERAGED

I	TEMPERATURE DEG. F	PRESSURE PSI
1	2.7499E 03	1.5168E 03
2	2.5428E 03	1.4458E 03
3	2.5007E 03	1.4136E 03
4	2.4913E 03	1.4068E 03
5	2.4895E 03	1.4055E 03

* END OF FORTRAN *