

T
SN841-74-26
〈技術レポート〉

(配布限定)

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. -6

[技術情報室]

燃料スウェリングデータの評価

Review of fuel swelling data

1974年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

ナに配布す
なお、この

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

燃料 スウェリングデータの評価
高速炉燃料設計の為の物性データ評価



実施責任者 ※小 泉 益 通
※横 内 洋 二
※古 屋 広 高

要 旨

燃料体のスウェリング現象は物性データと言えるような性質のものではない。したがってスウェリングの実験をしたり、議論したりする場合にいろいろな見方ができる。これはスウェリングを扱う上での難しい点でもある。燃料設計の上で有用な方法はスウェリングを巨視的に扱うやり方であり、F.P. ガスバブルの生成、成長を議論する微視的な取扱いは、現在さかんに研究されているにもかかわらず、まだ信頼を置くに足りず、設計上に反映するには致っていない。ここでは設計に反映できるデータ評価を行なうという立場から、スウェリングを巨視的に扱ったデータだけを評価の対象とした。高速炉燃料の設計にあたって、スウェリングデータ評価から次のデータを推薦する。ラブソディー購入情報より

$$\Delta v/v = 7.213 \times 10^{-6} \tau / 10.58 - 7.213 \times 10^{-6} \tau = 5.936 \times at / 10.58 - 5.936 at$$

$$\tau : \text{MWD/T} \quad at : a/o \text{ B.U.}$$

上式で表わされる $\Delta v/v$ に対して、 $\Delta v/v \pm 0.01$ がデータのバラッキを考慮したスウェリングの範囲になる。ラブソディー照射データは50,000 MWD/Tまでのものであるが、150,000 MWD/Tまで外挿しても問題はないと言える。

目 次

要 約	1
1. 序 論	5
2. 燃料スウェリングに影響を及ぼす諸因子	6
a) 燃焼度による影響	6
b) 燃料温度による影響	8
c) 燃料密度による影響	9
d) 外部拘束力による影響	11
e) 燃料組成による影響	13
3. 固体状F.P.とガス状F.P.のスウェリング	14
4. スウェリング測定法について	15
5. 燃料照射挙動計算コードにおける燃料スウェリングの取扱	17
6. 各スウェリングデータ	21
謝 辞	24
参 考 文 献	25

要 約

燃料体のスウェリング現象は物性データと言えるような性質のものではない。したがってスウェリングの実験をしたり、議論したりする場合にいろいろな見方が出来る。これはスウェリングを扱う上での難しい点でもある。燃料設計の上で有用な方法は、スウェリングを巨視的に扱うやり方であり、F.P. ガスバブルの生成、成長を議論する微視的な取扱いは、現在さかんに研究されているにもかかわらず、まだ信頼を置くには足りず、設計上に反映するには致っていない。ここでは設計に反映出来るデータ評価を行なうという立場からスウェリングを巨視的に扱ったデータだけを評価の対象とした。

高速炉燃料の設計にあたって、スウェリングデータ評価から次のデータを推薦する。

ラブソディー購入情報¹⁾より

$$\Delta v/v = \frac{7.213 \times 10^{-6} \tau}{10.58 - 7.213 \times 10^{-6} \tau} = \frac{5936 \text{ at}}{10.58 - 5936 \text{ at}} \quad (1)$$

τ : MWD/T, at: a/o B.U.

図1にバーンアップに対する燃料スウェリングを示す。

(1)式で表わされる曲線に±1%したものがデータのバラッキも考慮した安全側のデータとなる。このラブソディー照射データは50,000 MWD/T までの測定結果であるが、図2に示す他のデータとの比較から、(1)式をそのまま150,000 MWD/Tまで外挿しても問題はないと言える。

燃料のスウェリングに関し、WH社のR.C. Daniel 等が軽水炉燃料について研究したのが古く、⁽¹⁹⁶²⁾これをGEで設計用にモデル化した。これが図2に示すWAPDデータ²⁾であり、GEAP-4418に報告されている。³⁾同じ頃WAPD-T-1455⁴⁾でM.L. Bleiberg等がDaniel等と同じように初期スウェリング率の0.16% $\Delta v/v / 10^{20} f/cc$ でその後0.7% $\Delta v/v / 10^{20} f/cc$ になるというデータを示した。しかしデータのバラッキはかなり大きいものであった。このM.L. Blaiberg等のデータはBelgonucleaireのR. Godesar等によりモデル化されCOMETHE-IIコードに使用された。⁵⁾これも図2に示す通りである。その後GEのE.L. Zebroski等は高速炉燃料のスウェリングを研究するため一連の実験を行なって、前述のものよりかなり小さいスウェリングデータを得た。1967年にZebroskiは図3に示すデータを報告した。⁶⁾燃料の中心温度をパラメータにし、かなり大きい燃焼度までのデータを得ている。その後1970年に報告されたデータ⁷⁾によると燃料スウェリングは図2に於て、シャドーをつけた範囲に入るとしている。Zebroskiの前のデータはこの範囲内におさまっている。

上記データはいずれも熱中性子束で照射した場合のデータであり、高速炉燃料設計に使用するにはためられる。この点で50,000 MWD/T までのラブソディー炉ドライバー燃料のデータ(図2に示す)はMONTU設計には一番適していると考えられる。しかもラブソディーデータは

Zebroski 等のデータと同一傾向を示し、しかも安全側であり 50,000 MWD/T 以上に外挿することにも問題はない。ラブソデーに関する報告書でも 50,000 MWD/T 以上でスウェリングが加速的に大きくなる可能性は考えられないとしている。

この要約に於ては燃料スウェリングに対して影響を及ぼす因子、すなわち、温度、燃料密度等についてふれるまでには致らなかったが、2章で定性的な議論を行なう。

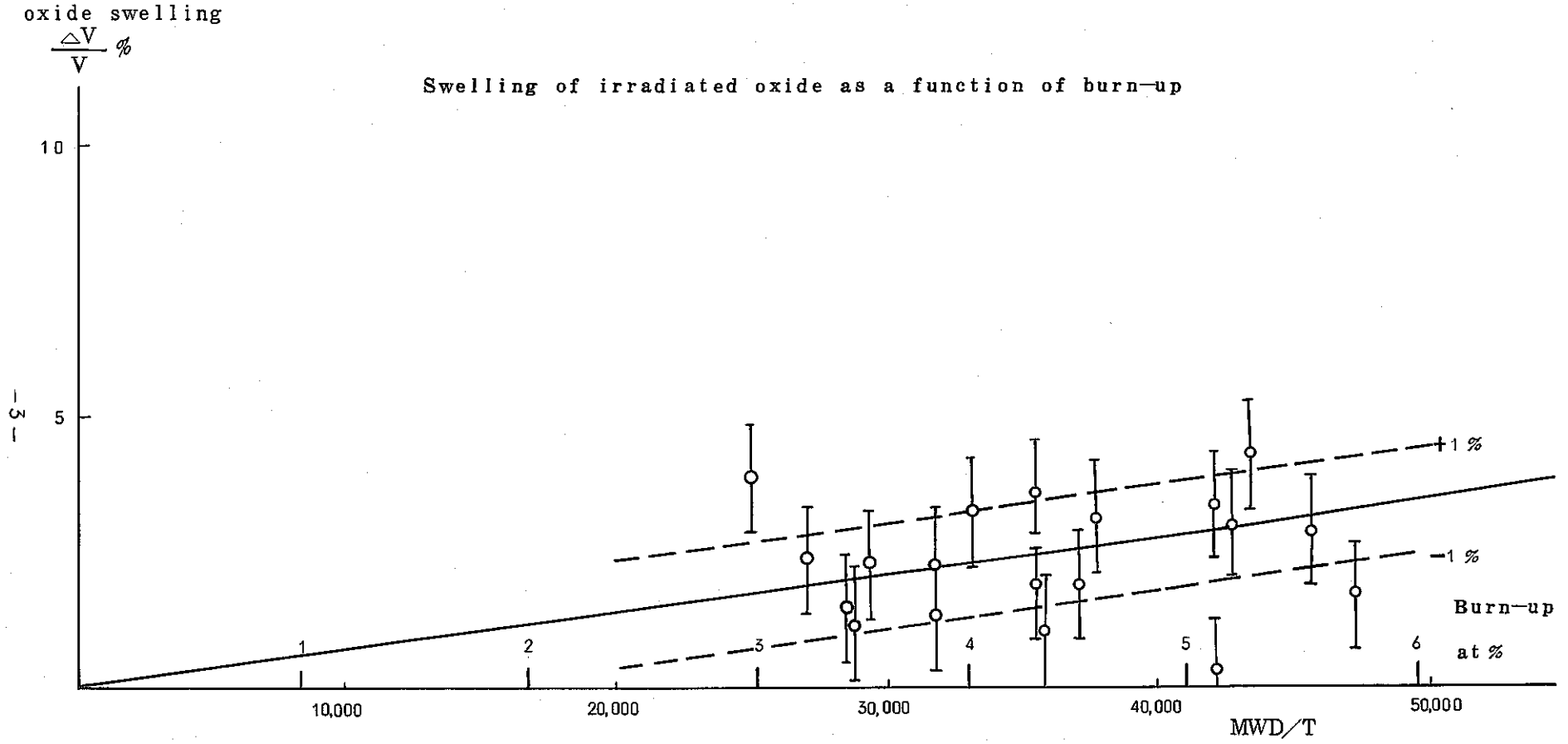


图1 燃 烧 度 MWD/T

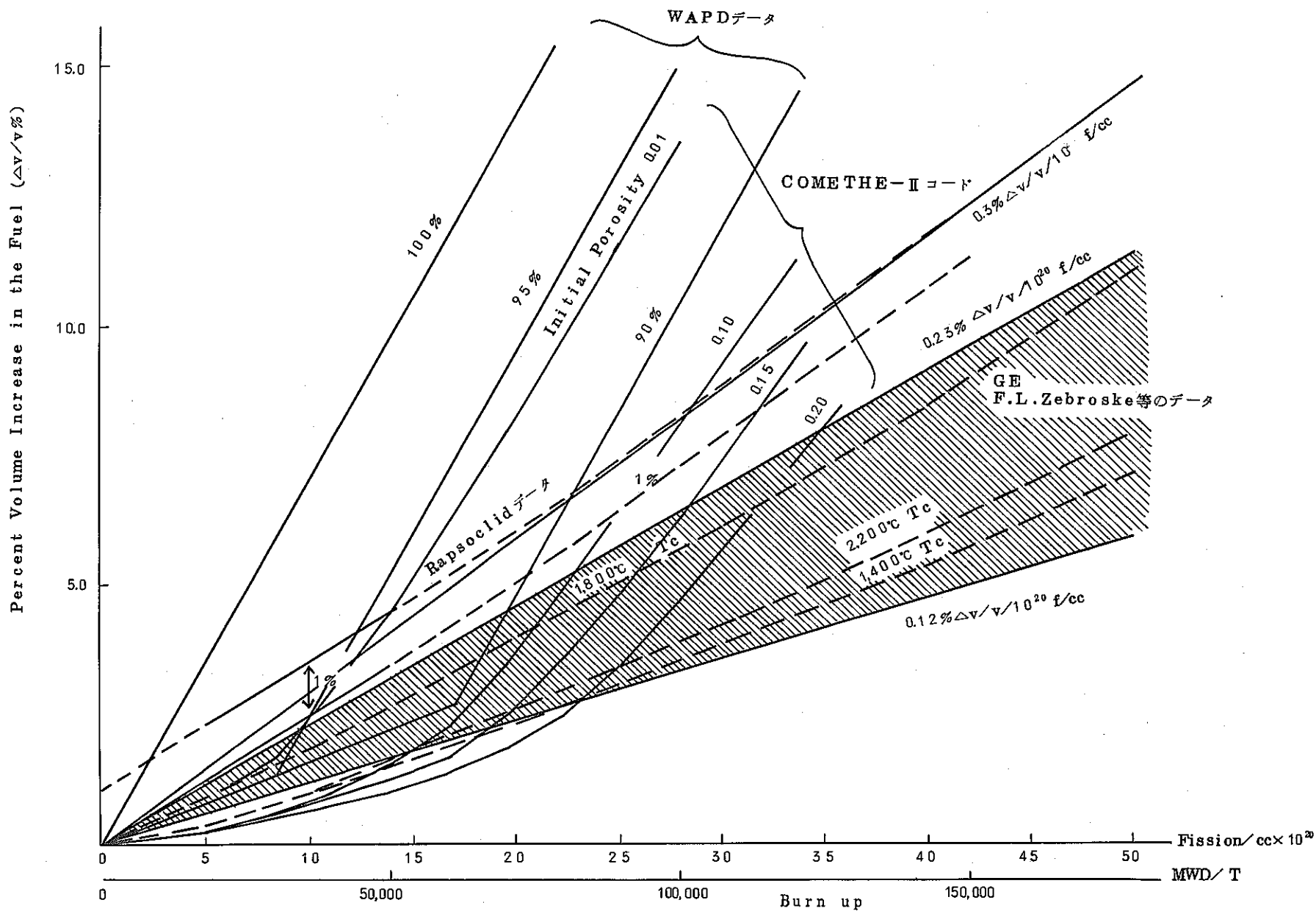


図2 スウェリングデータの比較

1. 序 論

燃料スウェリングを取扱うやり方は大きく2つに分けられる。1つは照射前後の燃料の寸法あるいは体積変化を測定し、巨視的スウェリングを求め、これを燃焼度、温度等の照射条件と関係づけることによって燃料設計の基準を得るやり方であって、いわゆるエンジニアリング的な行き方である。

他の1つは、核分裂生成物が燃料物質を構成する結晶の中で、どのように振舞い、その結果いかなる容積変化を起すのかを追求する。いわば微視的な観点に立った行き方である。

微視的観点に立った行き方においては、スウェリングは最終的に1つの数式に表わされなければならない。また、このスウェリングモデルを実用に供する為には、燃料が置かれている状態を記述する多くの情報を必要とする為、いわゆる燃料ピン挙動計算コードといったものに組み込まなければならない。現在、多くの燃料挙動計算コードが開発されているが、このような微視的観点に立ったスウェリングモデルを使用しているコードはほとんど無い。このことからわかるように多くの研究が為されているにもかかわらず、今だ実用に供し得るような段階にきていない。今回のスウェリング評価では巨視的観点に立ったデータのみにとどめ微視的モデルに対する評価は後に譲る。

2. 燃料スウェリングに影響をおよぼす諸因子

燃料スウェリングは核分裂生成物としての固体および気体 F.P. が、燃料物質の格子定数を増大したり、第二相を形成したり、またガスバブルを形成したりして起る現象である。したがって、燃料の燃焼度に影響されるのは当然である。

F.P. ガスバブルの生成および生長は、F.P. ガス原子あるいは F.P. ガスバブルが燃料中を移動（拡散）するし安さに関係しているため、燃料温度の影響も強く受ける。F.P. ガスの燃料外への放出、いわゆる F.P. ガス放出は燃料スウェリングと裏腹な関係にあり F.P. ガス放出が大きくなると燃料スウェリングは小さくなる。F.P. ガス放出が燃料温度あるいは温度勾配により大きく左右されるという点からも、燃料スウェリングは温度の関数となるはずのものである。

燃料密度、外部拘束力および燃料の機械的性質は相互に関係し合ってスウェリング量を左右する。低密度燃料に含まれる初期ポイドはスウェリングを吸収（緩和）する働きを持つ。特に外部拘束力が強い場合にはこの働きが効果を持つ。

a) 燃焼度による影響

燃料スウェリングデータは普通燃焼度の関数として表わされている場合がほとんどである。燃焼度を表わす単位としては、MWD/T, a/o H.A. および Fission/cc がある。スウェリングデータでは Fission/cc を使用しているものが多いが、MWD/T, a/o H.A. も無いわけではない。これらの単位の間関係は次のようになる。

$$1 \text{ a/o H.A.} = \frac{2.143 \times 10^6}{A} \text{ MWD/T}$$

A : Atomic Weight of Fissile Atom

$$10 \times 10^{20} \text{ Fissions/cc} = 4.06 \times \frac{100}{\% \text{ T.D.}} \text{ a/o H.A.}$$

% T.D. : 燃料の理論密度に対する実密度のパーセント

燃焼度に対してスウェリング量をプロットしたグラフ、図 3, 4 からみてもスウェリング率は照射初期に小さく、照射が進むにしたがって大きくなる傾向にある。後に燃料密度の影響のところ述べるが、初期燃料に含まれるポロシティーがスウェリングを緩和し、照射初期におけるスウェリング率を小さくしていると考えるのが一般的である。

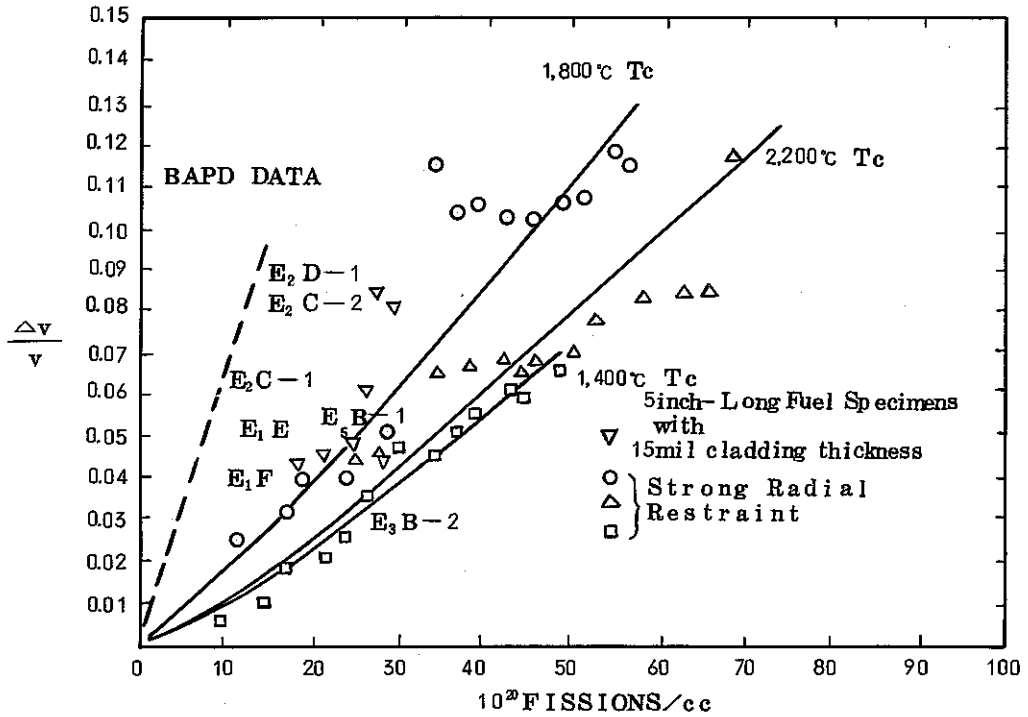


図3 混合酸化物燃料の体積スウェリング

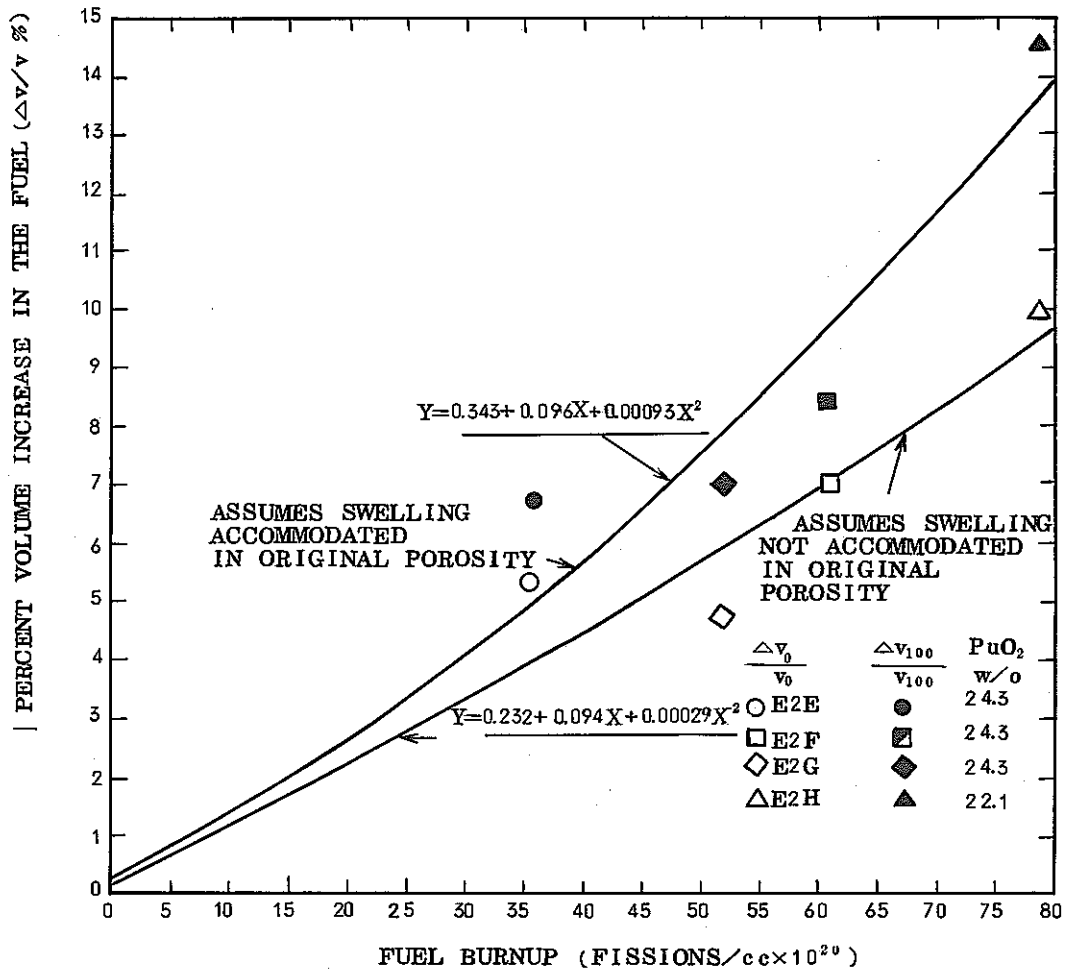


図4 混合酸化物燃料の体積スウェリング

b) 燃料温度による影響

ある温度点で燃料を照射し、その温度に対するスウェリングを示すデータは残念ながらみあたらない。温度の影響について述べているデータは、燃料照射中の中心温度を規定したり、燃料表面温度を規定したものしかない。

図5⁸⁾はR.F. Hilbert等が UO_2 についての高温でのスウェリングを研究する為に行なった実験の結果である。これによると UO_2 のスウェリングは燃料被覆管温度が $1,325^\circ C$ より $1,900^\circ C$ まで変化した時、温度と共に増加する傾向を示している。又、バーンアップに対しては直線関係にある。図6⁹⁾はやはりR.F. Hilbeht等が UO_2 と PuO_2 の燃料径スウェリング率を燃料被覆管温度に対して整理したものである。

Hilbert等の実験は燃料ペレットの外径変化を中性子ラジオグラフィーにより測定して得られたものであり、燃料の密度測定により得られるスウェリング率等とは異なるものである。図7は⁶⁾GEのF.L. Zebroske等が得たデータであるが、これは燃料中心温度をパラメータにし、燃料半径方向に強い外部拘束力をかけ、軸方向のスウェリングを測定したものである。スウェリングが最大となるのは中心温度が $1,800^\circ C$ 前後の時で、これより高温側でも、低温側でもスウェリングは小さくなる。前のHilbert等の実験結果は燃料の組織変化、クラックの生成、消滅等により影響されているとみるべきであるのに対し、Zebroske等のデータは外部拘束力をかけていることから、組織変化、クラック影響のは少なく、物性データとしてのスウェリングをよく表わしているものと云える。

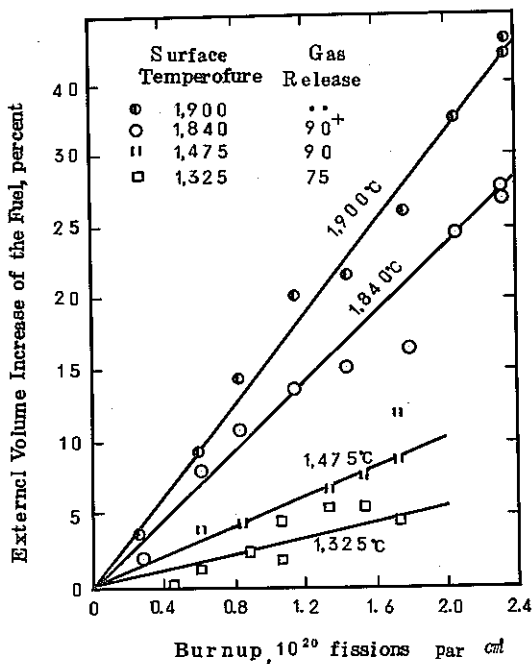


図5 External swelling of UO_2 at high temperature

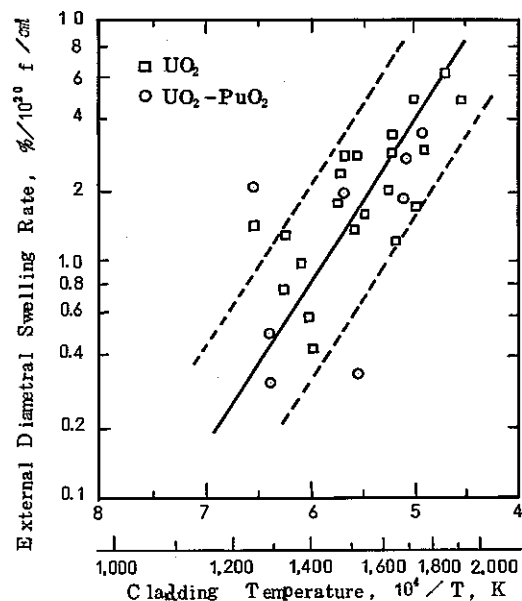


図6 Swelling of oxide fuels in tungsten-rhenium claddings.

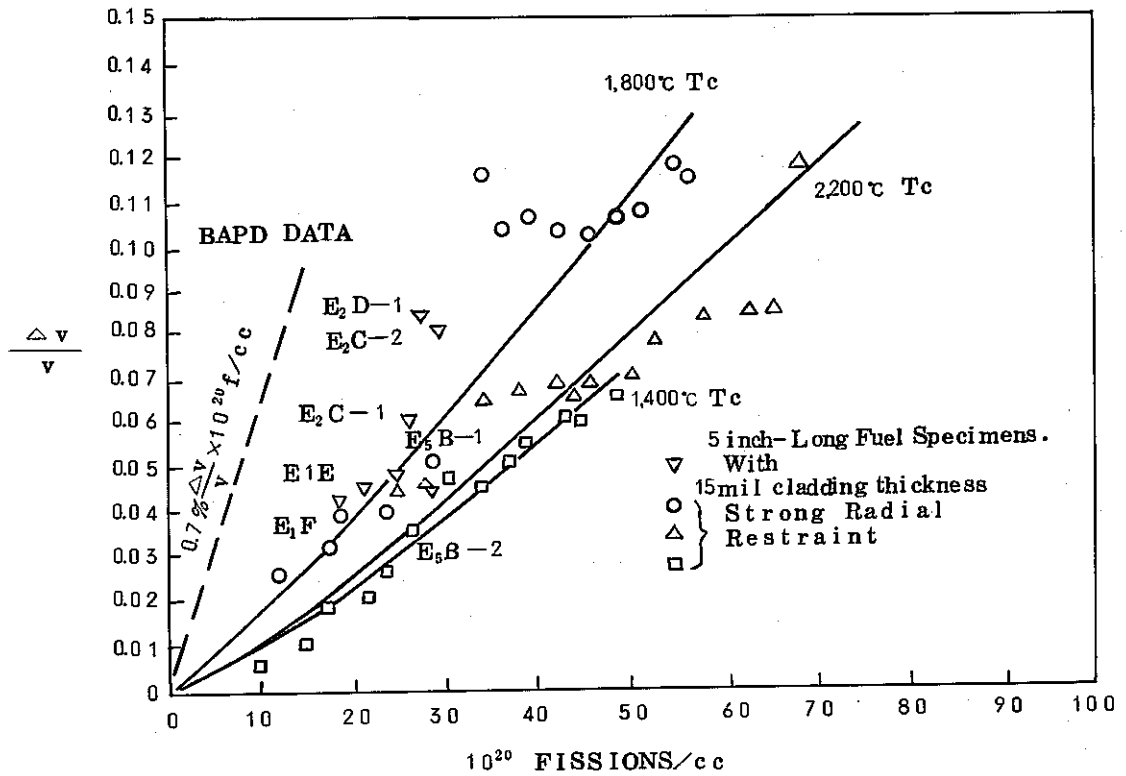


図7 混合酸化物燃料の体積スウェリング

c) 燃料密度による影響

燃料密度とスウェリングの関係については古い実験データしかないが、燃料ペレット中に存在する初期ボイドがスウェリングを吸収し外部に現われるみかけのスウェリングを緩和するというのが一般的見方である。板状燃料の密度またはスマー密度とスウェリングの関係を示す実験として、WH社の UO_2 、 UO_2-ZrO_2 板状燃料およびGE社の照射実験がある。図8はR.C. Daniel 等が示したデータ²⁾であるが、燃料密度を96~98% T.D. の間で変化させてスウェリングを測定している。初期スウェリング率 $0.16\% \Delta v/v / 10^{20} f/cc$ の直線から立ち上がり点が密度により異なっている。すなわち、密度が小さいものほど燃焼度の大きい方にくれている傾向がある。これは密度が小さいほどスウェリングを吸収緩和する。初期ポロシティーが多い為と考えられる。この実験では中心温度が低く、一般に言われている UO_2 燃料の塑性領域以下のものであろうと思われる。

図9はやはりWH社のB.F. Rubin等が13~17 w/o ZrO_2-UO_2 について行なった実験結果¹⁰⁾である。燃料密度は90%と96% T.D. で前のDaniel等のデータよりも密度差が大きく、密度によるスウェリング量の差がはっきりとあらわれている。

ただし90% T.D. のデータに対する直線のひき方にむりがあるようである。低バーンアッ

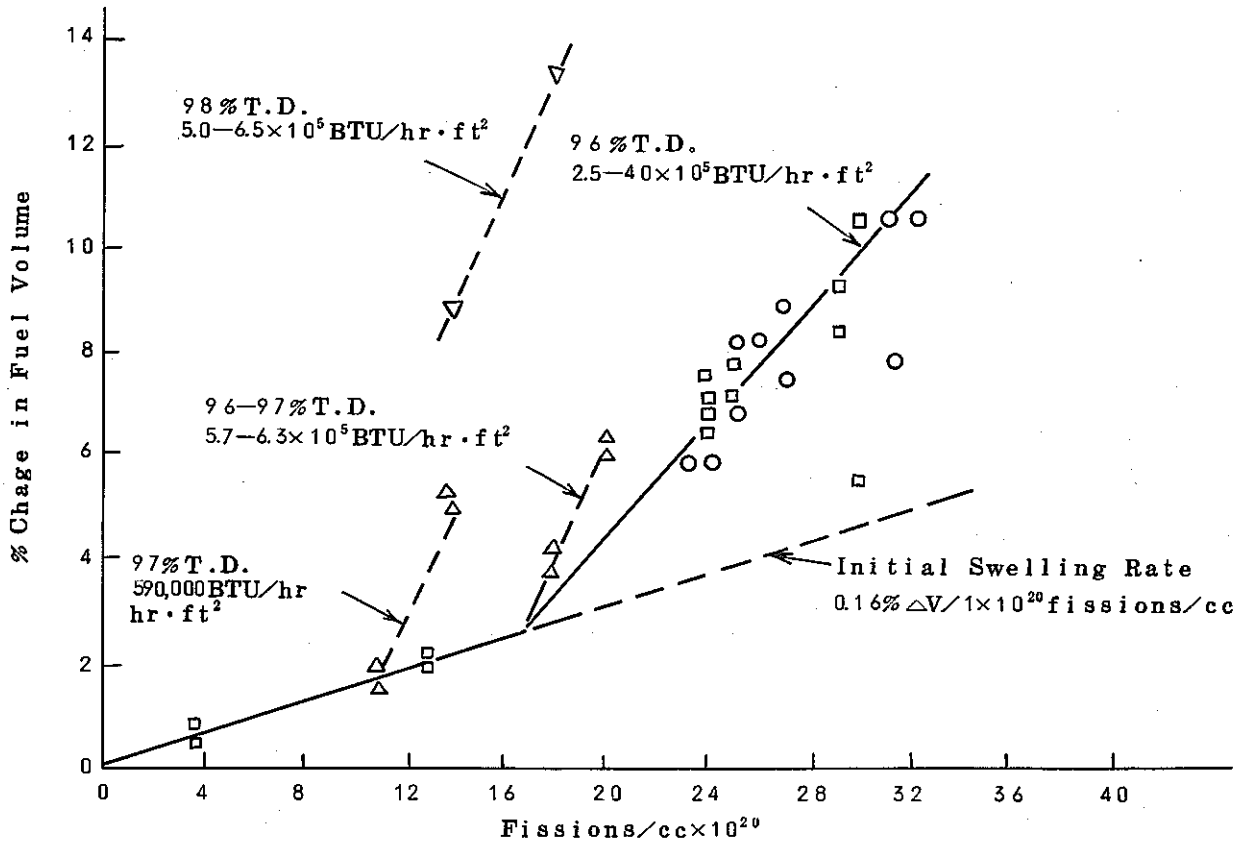


Fig 8 Volume Changes of UO₂ Determined by Density Measurements 12)

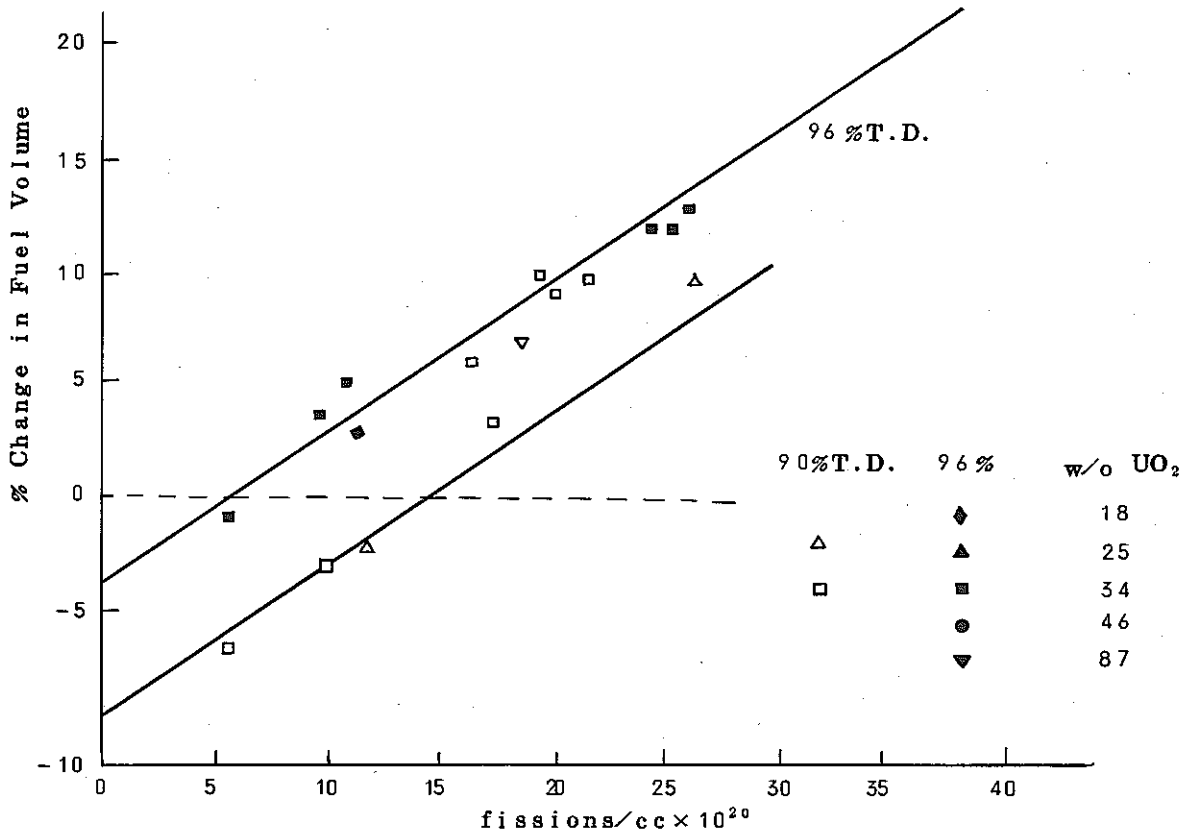


Fig 9 Volume Change of ZrO₂ fuels with Burnup

ブ側でスウェリングが負の方に落ち込んでいるが、データポイントが少なく結論を下すことは出来ない。

図 10 に示すデータは GE の R.E. Skavdahl 等が 20% PuO₂-UO₂ 燃料について得たスウェリングデータ¹¹⁾である。ここに示されているのは燃料ペレット自身のスウェリングではなく燃料被覆管の△Dであることに注意しなければならない。しかし、50,000 MWD/T の時点で燃料スミア密度の影響があるものと考えられる。

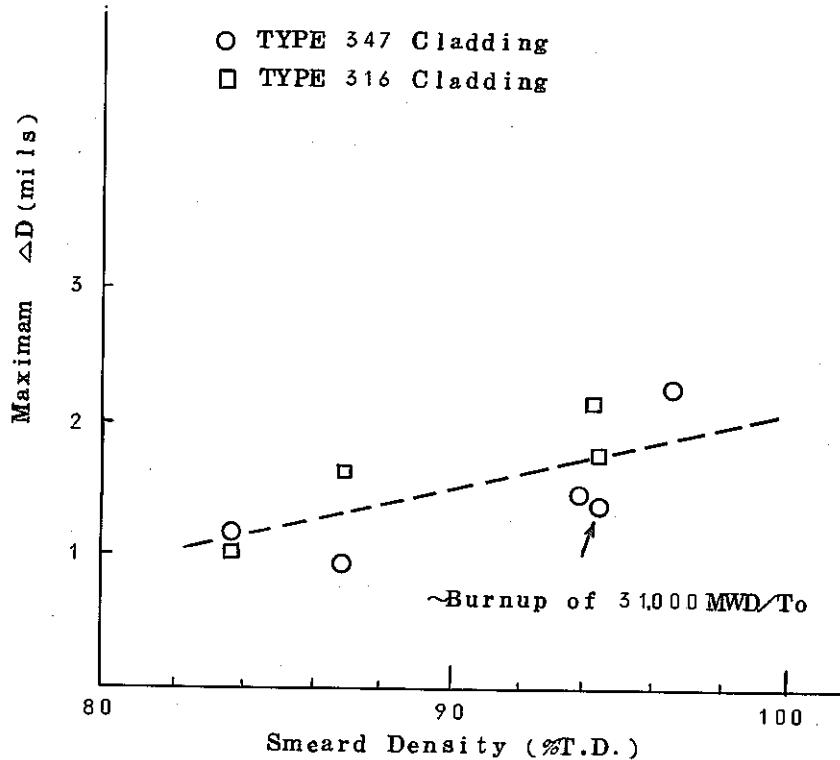


図 10 Effect of Density on Diametral Increases of F₂ Pins for Burnup of Approximately 5×10⁴MWD/Te

d) 外部拘束力による影響

燃料体は一般に外側から圧力を受けながら中性子照射を受けている。外側からの圧力とは、被覆管そのものの材料的強度によるもの、冷却材の圧力が被覆管を介して加わるもの、照射の進行と共にプレナム中に蓄積される F.P. ガスの圧力によるもの、あるいは径方向の熱応力分布に起因してペレットの中心部が外周部によって圧力が加えられるもの、などが考えられる。燃料体は F.P. の蓄積によってスウェリングを起すが、外部拘束力、特に被覆材による拘束力を大にすることによってスウェリング率をある程度低くおさえ得ると云うのが最近では支配的になっている。図 11 は WH の Bleiberg らが行なった板状燃料に関する実験結果¹²⁾である。図から明らかな様に 8~10% H.A. の燃焼度まで被覆材肉厚の差によるスウェリングの差は出ていないが、これ以上の燃焼度では薄い肉厚の試料の方が格段に大きい。

GE では肉厚の厚い特殊な照射用キャプセルを作り (管壁は 0.460 インチ厚のアルミ製) 燃

CLAD THICKNESS		CORE HEAT FLUX BTU/HR-FT	ESTIMATED CENTER TEMPERATURE °P
0.024 IN	$\frac{1}{4}$ IN \times 3 IN \times 0.040 IN	320,000	900
0.015 IN	$\frac{1}{4}$ IN \times 6 IN AND $\frac{1}{4}$ IN \times 1.5 IN \times 0.40 IN	630,000	1,230
0.021 IN	$\frac{1}{2}$ IN \times 3 IN \times 0.040 IN	306,000	900
0.15 IN	$\frac{1}{4}$ IN \times 6 IN AND $\frac{1}{2}$ IN \times 3 IN \times 0.040 IN EXPOSED TO WATCH DURING IRRADIATION	630,000	1,230

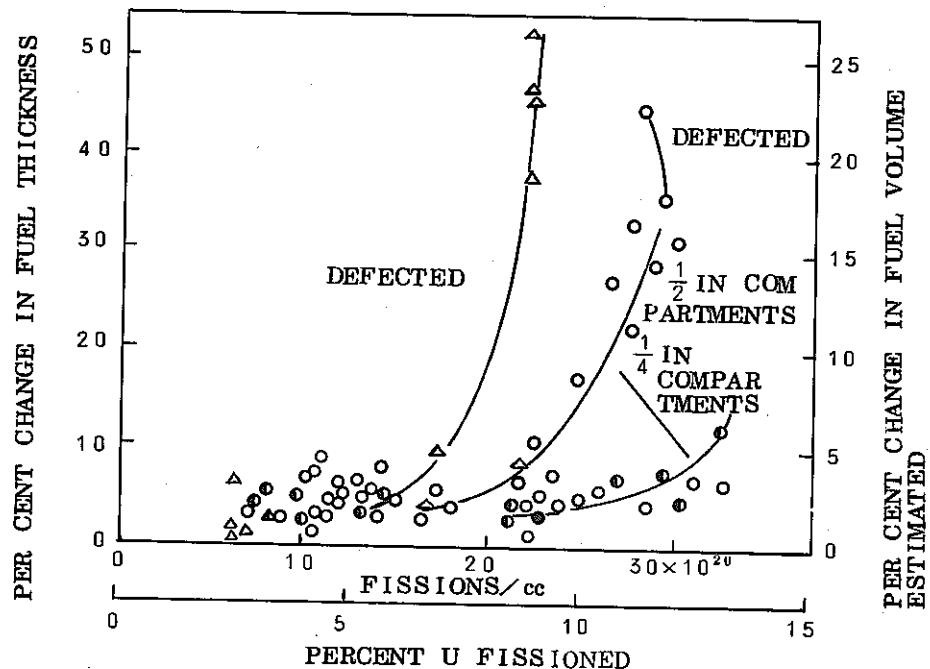


図 11 Change in Fuel Thickness on Irradiation of UO₂ Plates²⁰⁾

焼に併うスウェリングを半径方向には拘束させ、軸方向にのみ向わせる様な実験を行なった。この実験結果は図 3 に示す通りである。図の通り 7.0×10^{20} 程度の燃焼度までのスウェリング率を示しているが、図 8 に示す BAPD のデータの勾配である $0.7\% \Delta v/v / 10^{20} f/cc$ に比較して、外部拘束力を与えた方がはるかに低く、 $0.1 \sim 0.3\% \Delta v/v / 10^{20} f/cc$ となっている。スウェリング率から云えば、GE の値は BAPD の値の半分以下であるが、スウェリング量をそのまま比較する訳にはいかない。BAPD のデータでは燃焼度の低い初期のある期間だけ、主として燃料体の塑性の為にスウェリングの一部が空孔に吸収される効果によって $0.16\% \Delta v/v / 10^{20} f/cc$ 程度の低いスウェリング率を示す領域が存在するからである。GE の実験値を直線によって燃焼度の零の点まで外挿すれば $\Delta v/v = -0.01 \sim -0.02$ となり、即ち $1 \sim 2\%$ 程度のポイドがスウェリングの吸収に有効にきいたと考えられ、この傾向は BAPD の場合と同様であるが、スウェリング率は明らかに外部拘束力によって影響を受けている。

e) 燃料組成による影響

燃料の組成は照射前と照射中とで変化する。スウェリングに対する O/M 比の影響については若干の実験が報告されているが、Pu 濃度および不純物量の効果については殆んど報告されていない。初期の不純物量は高速中性子の核分裂断面積を考慮すれば殆んど問題になりえない。問題はこれらの不純物が直接に、又間接に固溶体、新しい結晶構造を生成したりして燃料固有の物性値をかえることにある。熱伝導度の向上を意図して Mo を混合酸化物に添加したところ燃料温度が低温側に移行し F.P. の空孔利用度が減少したため径方向のスウェリングが逆に増大したという報告¹³⁾もある。Pu 濃度の増減が同様に固有の物性値をかえ、それがスウェリングに影響することは当然予想されることであるが、今のところ有意差があるという報告はない。

3. 固体状F.P.とガス状F.P.のスウェリング

燃料スウェリングは固体F.P.によるものとガス状F.P.によるものとにわけられる。固体F.P.による燃料スウェリングはF.P.ガスによるスウェリングより一桁小さく、重要性もそれだけ小さくなり、研究論文も多くはない。F.P.ガスによるスウェリングは多くの研究者により研究結果が報告されている。

固体F.P.のスウェリングで問題となる点は比較的大きな揮発性を有する元素、Cs等の燃料内移動と固体F.P.が燃料内でどのような化学形態を有しているかの2つである。

Csは燃料内の高温部より低温部の方へ移動し、その場所でのスウェリング量を増す。固体状F.P.の化学形態は体積膨張の大小に影響をおよぼす。固体状F.P.によるスウェリングの研究としてはこれらについて行なわれている。

F.P.ガスによるスウェリングについての研究報告は多くなされており、興味の対象となっているのはF.P.ガス(XeとKr)の燃料内における挙動である。研究の主眼はF.P.ガスバブルの生成、成長、消滅等の機構を明らかにし、スウェリングのモデルを作成することにある。

4. スウェリングの測定法について

スウェリングの定義が確定的でないので、定義によって物性値を測定するような測定法は確立されておらず、各研究にも、スウェリングの測定法についての詳細な記述はない。もっとも一般的な場合は、照射後燃料体の被覆管の上よりノギスまたはマイクロメーターにより、外径の変化を測定しており、この場合は各研究には詳しい測定法の説明がなく、ノギスまたはマイクロメーターの精度も明らかでない。

ダニエルらは UO_2 により、ジルカロイの被覆の板状形燃料を作り、スウェリングの測定を厚みの変化として、マイクロメーターで行なっている。

スウェリング測定のための燃料体の外径の変化の測定にマイクロメーターを使用している方法では、ホットケープ内の作業では作業能率がよくなく、測定箇所も多いことが望ましいが種々制限をうけるので、連続測定と自記記録の行なえるプロファイルメーターが開発され、これによる測定も行なわれている。

プロファイルメーターは定盤上に移動台を取付け、燃料棒を定盤に平行に置き、この燃料棒をはさむようにして、その移動台に電気マイクロメーターを取付けたものであり、定盤上を移動台を移動させながら、燃料体の外径を連続的に測定記録するもので、曲がりも測定することができる。更に、燃料棒を長軸を芯として回転することができ、これにより、真円性 (Ovality) の測定も可能である。

スウェリングを体積変化により表わしている研究も多いが、これについても詳しい測定法についての記述はない。

A.A. Strasser らや W.N. Beck らによると、体積変化の測定を浸漬法で行なっている。浸漬法とは密度測定法のことであるが、被覆材を取りはずし、燃料物質の密度を測定し、体積変化を算出している。この場合も、気孔の取扱いについて問題点があるが、浸漬に使用する液体として有機材の比較的粘度の高いものを用い、中心溶融による大きな開気孔は密度測定とは関係をなくし、核分裂性物質による小さい気孔については、密度を下げるような影響があるようにしてスウェリングの測定を行なっている。体積変化の測定法として考えられるものに、中性子ラジオグラフや X線透過、 r -スキャンを用いる方法もある。これは透過写真の寸法を測定し、体積変化を算出している。

M. Masson らは、超音波を用いて照射下における燃料体の長さ、方向の変化を連続的に測定する方法を開発している。

燃料棒上部にピストンを直結し、シリンダー構造としている。これに炉外より導波管を接続し、燃料棒の外寸変形によるシリンダーの体積変化を炉外からの超音波の共鳴の変化により、外部に信号として取出している。炉外では、炉内と全く同じシリンダーを作り、同じ原理でそのピスト

ンの変化量を超音波で検出し、炉内より得られた信号と比較することにより、炉内燃料体の変化量(寸法)を測定している。また、炉内からの信号のエネルギー量を計算し、ピストンの変化量を計算することにより、測定する方法についての検討も行なっている。

以上、スウェリングに及ぼす影響をどのように取りあげるかによって、各々考えられているようである。燃料体の外寸を問題にする場合は、被覆管の被ったままの状態で行ない、測定法も主として機械的な方法すなわち、ノギス、マイクロメーターが用いられる。プロフィールメーターの方法も原理的にはマイクロメーターによる測定と変りない。超音波による測定は径方向の測定ではなく、長さ方向の測定であり、照射下での測定が可能な点は非常にユニークであるが、得られたデータを取扱う上で燃料体の外径変化との関係や、燃料物質の体積膨脹との関係について詳細なデータがないので、これらのデータの公表が望まれる。

スウェリングを物性値としての取扱いに近い考え方をし取りあげる場合には、測定法として浸漬法、中性子ラジオグラフ、X線透過 γ -スキャンらの方法がとられている。これらいずれの方法によっても、核燃料物質の体積膨脹の測定を行なっているものである。核燃料物質は燃料体としては被覆されて用いられるものであり、Zebroskiらの研究のように被覆管の肉厚によってスウェリングが制止されるといわれていることを考慮に入れると、このようにして得られたデータも物性値として評価することには問題が多い。Zebroskiらによって同一試料をプロフィールメーター、ニュートロンラジオグラフ及び γ -スキャンによって測定されている。試料の燃焼度は、87,100 MWd/Teであり、プロフィールメーターによる径方向のスウェリングは認められず、軸方向のスウェリングがニュートロンラジオグラフでは $\Delta v/v$ が3.78%。 γ -スキャンによる測定では $\Delta v/v$ が4.42%である。

5. 燃料照射挙動計算コードにおける燃料スウェリングの取扱い

現在使われている燃料挙動計算コードで燃料スウェリングをどのように扱っているかについてふれておく。

a) PIPERコード

燃料スウェリングを固体F.P.によるものとF.P.ガスによるものに分けている。

i) 固体F.P.によるスウェリング

ボラタイルなF.P.のうちCsを代表として選び、これの半径方向の分布を考えている。燃料体を半径方向に柱状晶、等軸晶および外周の組織変化をおこしていない領域の3つに分けて、それぞれのCsによるスウェリング率を考える。その他の酸化物および金属状のF.P.によるスウェリング率は3領域において同一としている。図12はこの状態を示している。

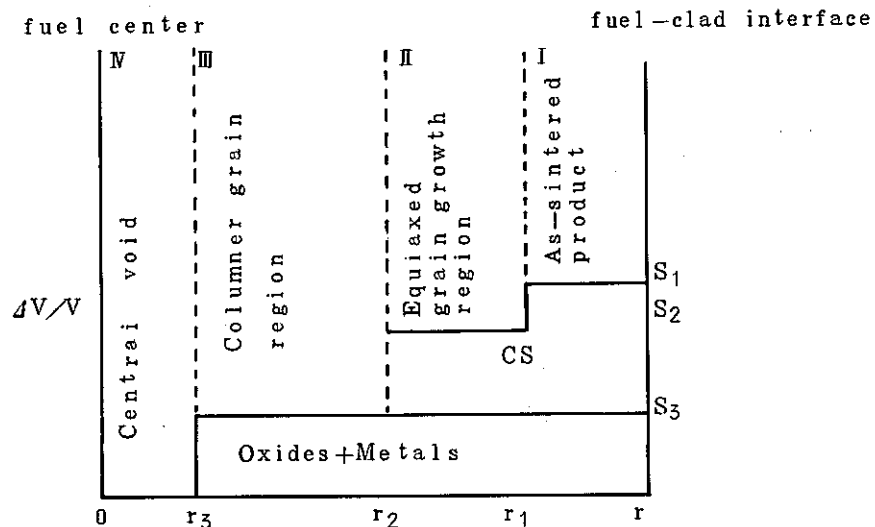


図12 燃料内3領域

$$(\Delta v/v) \text{ 第1領域} = b \cdot S_1 \cdot \frac{r^2 - r_1^2}{r^2} \quad (\%)$$

$$(\Delta v/v) \text{ 第2領域} = b \cdot S_2 \cdot \frac{r_1^2 - r_2^2}{r^2} \quad (\%)$$

$$(\Delta v/v) \text{ 第3領域} = b \cdot S_3 \cdot \frac{r_2^2 - r_3^2}{r^2} \quad (\%)$$

$$(\Delta v/v)_{\text{solid}} = \sum (\Delta v/v)_i \quad i = 1, 2, 3$$

$$s_1 = 0.90, \quad S_2 = 0.71, \quad S_3 = 0.27$$

$$b : \text{Burnup} \quad \text{H.Atom} \quad \%$$

ii) F.P. ガスによるスウェリング

温度の関数としてスウェリングを図13のよう
に与える。すなわちスウェリング率をSとすると、
> 1,700°C S=0% $\Delta v/v$ / % B. U.

$$1,500 < T < 1,700^\circ\text{C} \quad S = 9.5 \times 10^{-3} (1,700 - T)^\circ\text{C}$$

$$< 1,500^\circ\text{C} \quad S = 1.36 \times 10^{-4} T^\circ\text{C} - 0.12$$

ただし、燃焼初期においてスウェリングが小さいことを考慮して、スウェリングの潜伏期間を設けている。

潜伏期間を Bincubation H. A. % 燃焼度までとすると、Bincubation は

$$\text{Bincubation} = A \cdot \rho_0$$

A: 定数 ρ_0 : 燃料体の初期ボイド率

すなわち燃料密度が小さいほど潜伏期間は長くなる。

PIPERによる計算結果を図15に示す。

b) COMETHE-IIコード (Belgonucleaire)⁵⁾

燃料体の巨視的なスウェリングを以下の方程式を解くことにより求める。

$$\Delta v/v = f \cdot \xi_0 \cdot [\exp(-F \cdot \Delta v/v_0) - 1] + \beta_{100} \cdot (1 - \xi_0) \cdot bu$$

ここで $\Delta v/v_0$: 燃料体スウェリング割合

bu : バーンアップ [MWD/MT (heavy metal)]

ξ_0 : 燃料の初期ボイド率

β_{100} : 100% T.D. 燃料のスウェリング率 [MWD/MT (heavy metal)]⁻¹

f : 燃料密度に関する補正係数

F : 形状係数

WAPD-T-1455のスウェリングデータを参考にして、 β_{100} , f, F を決定すると次のようになる。

$$\beta_{100} = 1.60 \times 10^{-6} [\text{MWD/MT (heavy metal)}]^{-1}$$

$$f = 0.149 (\xi_0)^{-0.746}$$

$$F = 100$$

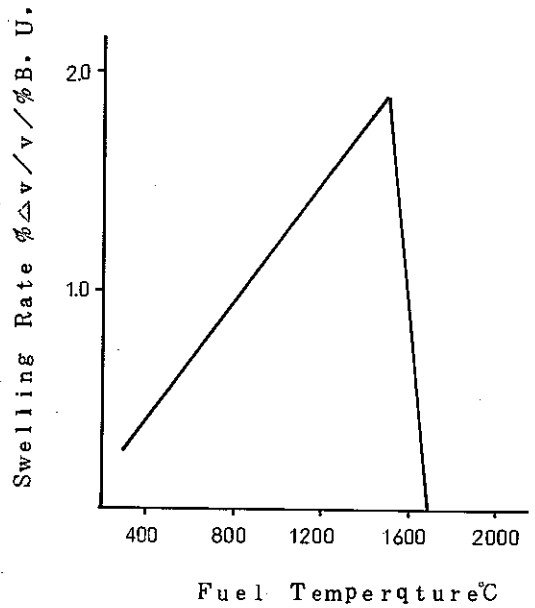


図13 Gaseous Swelling

$\Delta v/v_0$ を燃料初期ポイド率 (ϵ_0) をパラメータとし、燃焼度に対してプロットした結果を図 14 に示す。

スウェリングに対する温度の影響を完全に無視しているのが難点である。

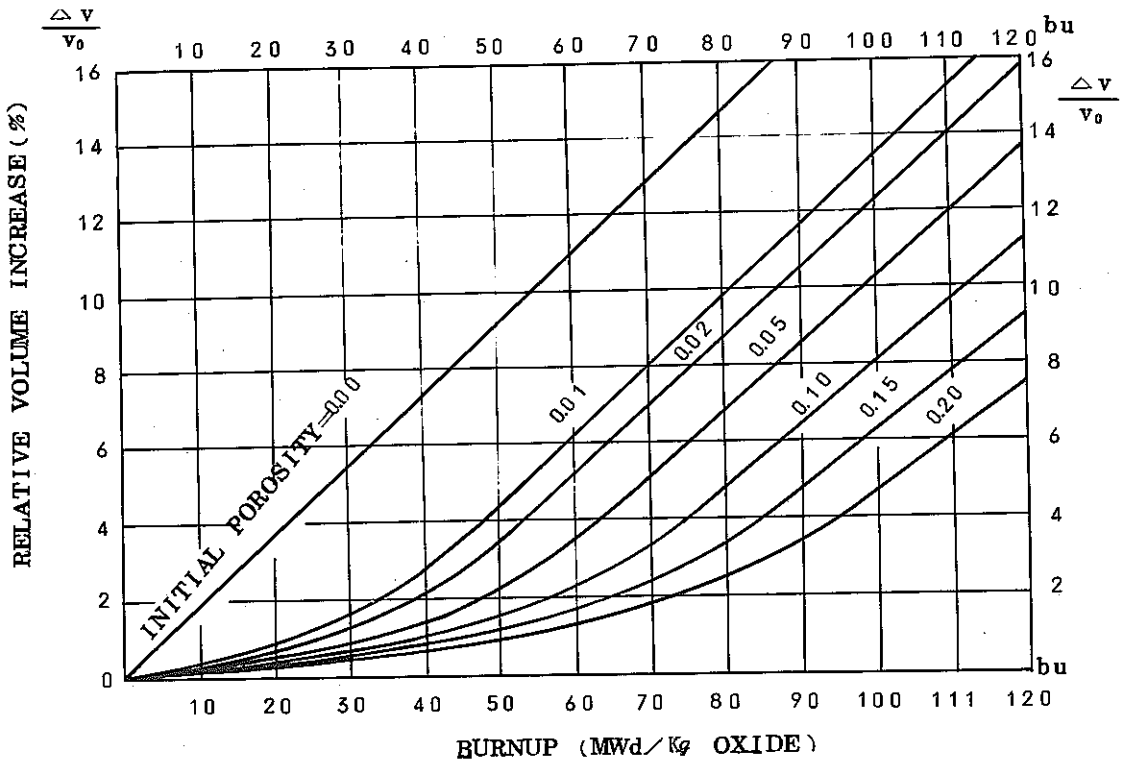


図 14 Oxide fuel swelling

c) LIFE-II (ANL)

i) 固体 F.P. によるスウェリング

単位核分裂当りの体積膨張をデータとしてあたえ (ΔV_s) これに核分裂密度を乗じて単位時間あたりのスウェリングとしている。

ii) F.P. ガスによるスウェリング

LIFE-I で使用しているものと同じものであるが以下の式で計算する。

$$(\Delta v/v)_i^{gas} = \frac{n_i \cdot R \cdot \bar{T}_i}{v_i \cdot (P_i + P'_i)}$$

Δv_i : i 領域の燃料体体積変化

v_i : " 初期体積

n_i : " F.P. ガスモル数

\bar{T}_i : " 平均温度

$P_i = -(\sigma_r^i + \sigma_\theta^i + \sigma_z^i) / 3$: mean stress

P'_i : 燃料体の表面張力に相当する応力 (一定)

R: ガス定数

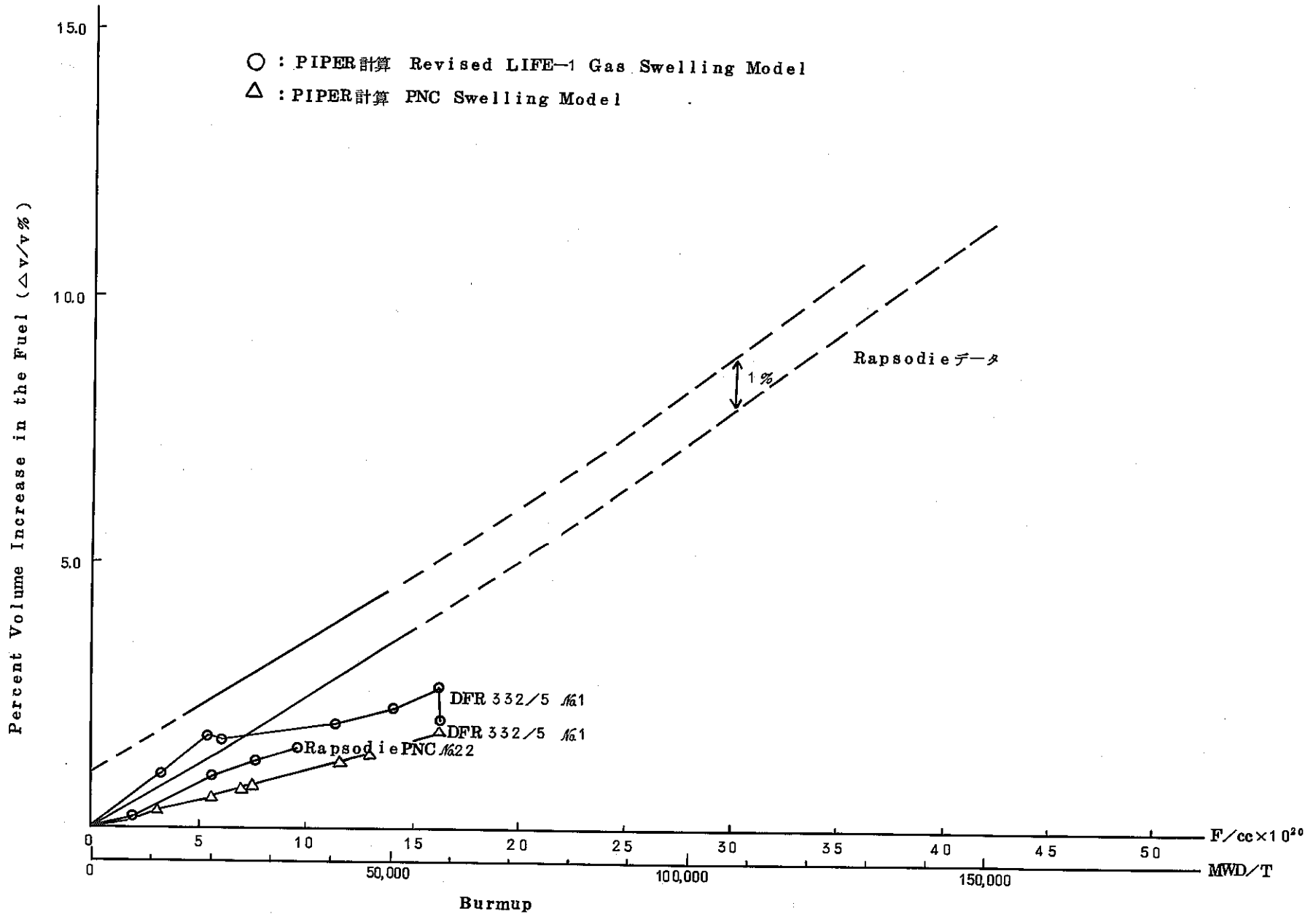
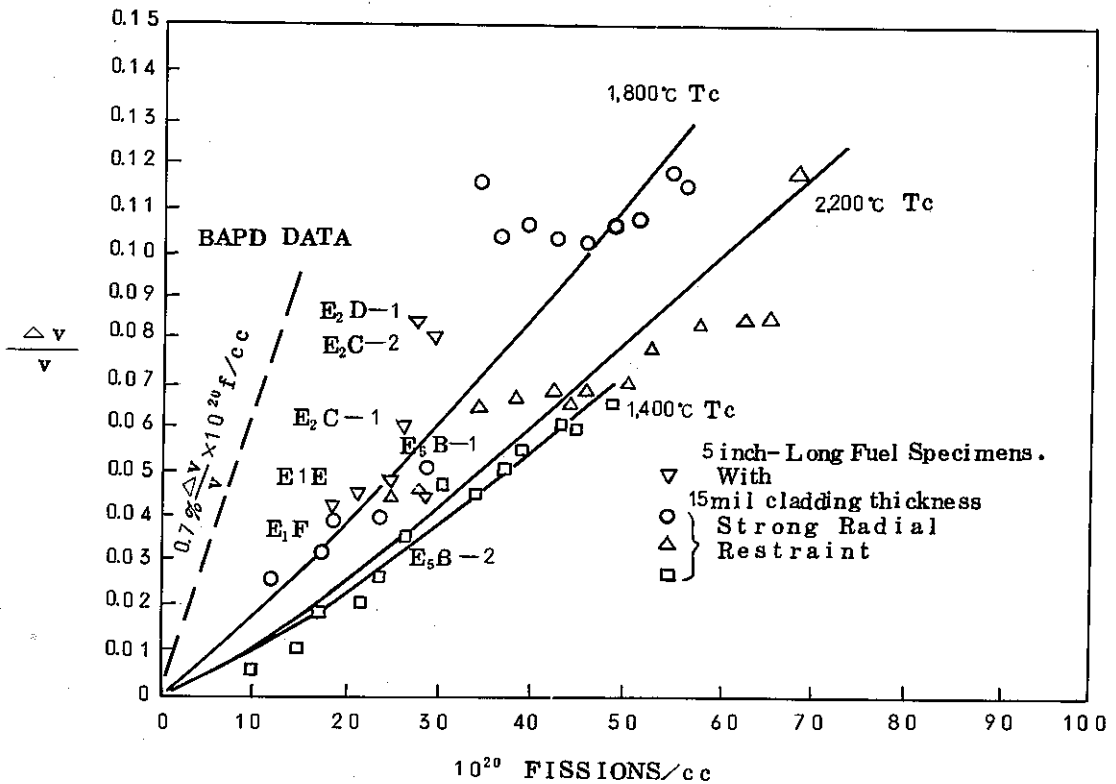


図15 PIPERコードによるスウェリングの計算結果

6. 各スウェリングデータ



照射条件：・熱中性子束 (GETR)

- ・ 20% PuO₂-UO₂ ・ 中実ペレット
- ・ O/M = 1.98~2.00 ・ スミヤ-密度 87.0~96.7% T.D.
- ・ 半径方向に強い外部拘束力をかけ、軸方向のスウェリングを測定した。

結果：・スウェリング率 0.1~0.3% $\Delta v/v / 10^{20}$ fissions/cc

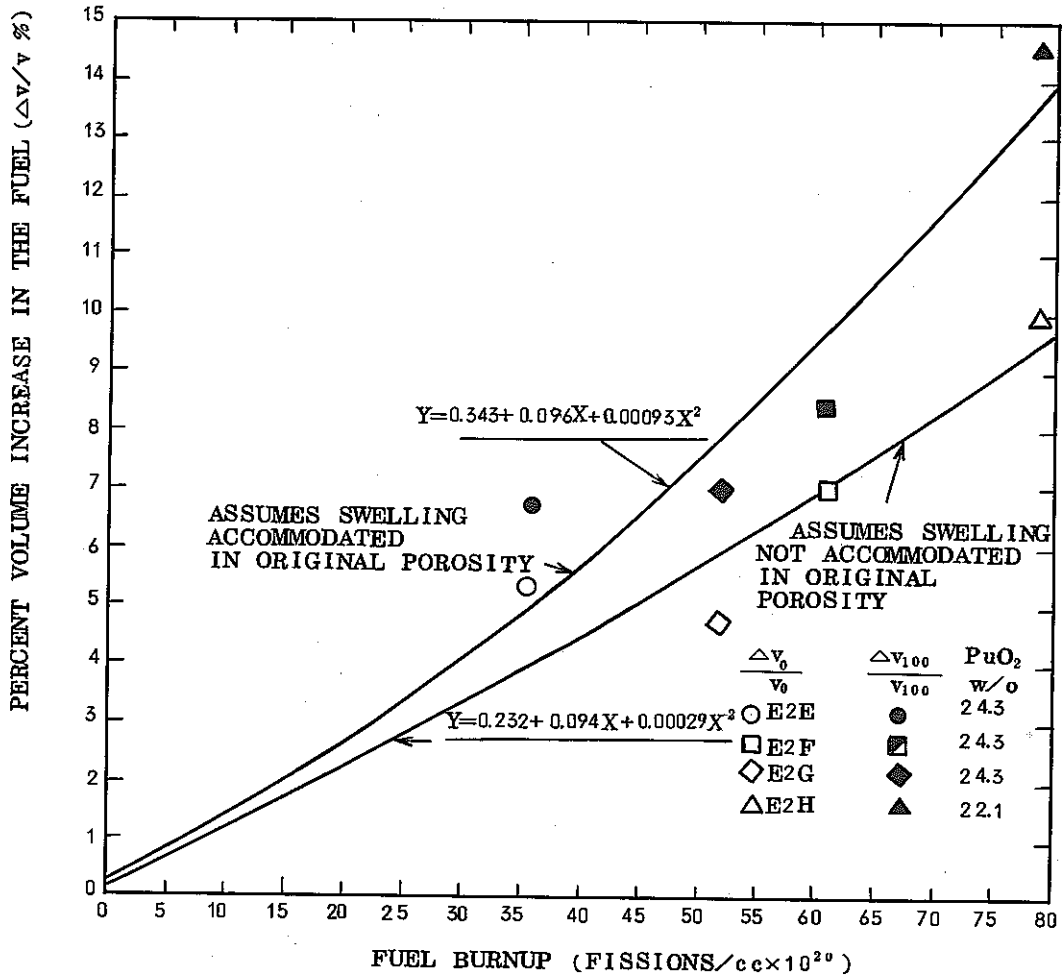
- ・ 中心温度 1,800°C の時のスウェリングが最大
- (2,200°C, 1,400°C では低くなる)

コメント：円柱型燃料ミートのスウェリングデータとしては現在で最も有用なものである。

このデータは外部拘束力の影響を受けているので、設計値としては $0.3\% \Delta v/v / 10^{20} f/cc$ を使えばよい。

F.L. Zebroske et. at. (GE)

AIME Nuclear Metallurgy Symposium (Phoenix 1967)



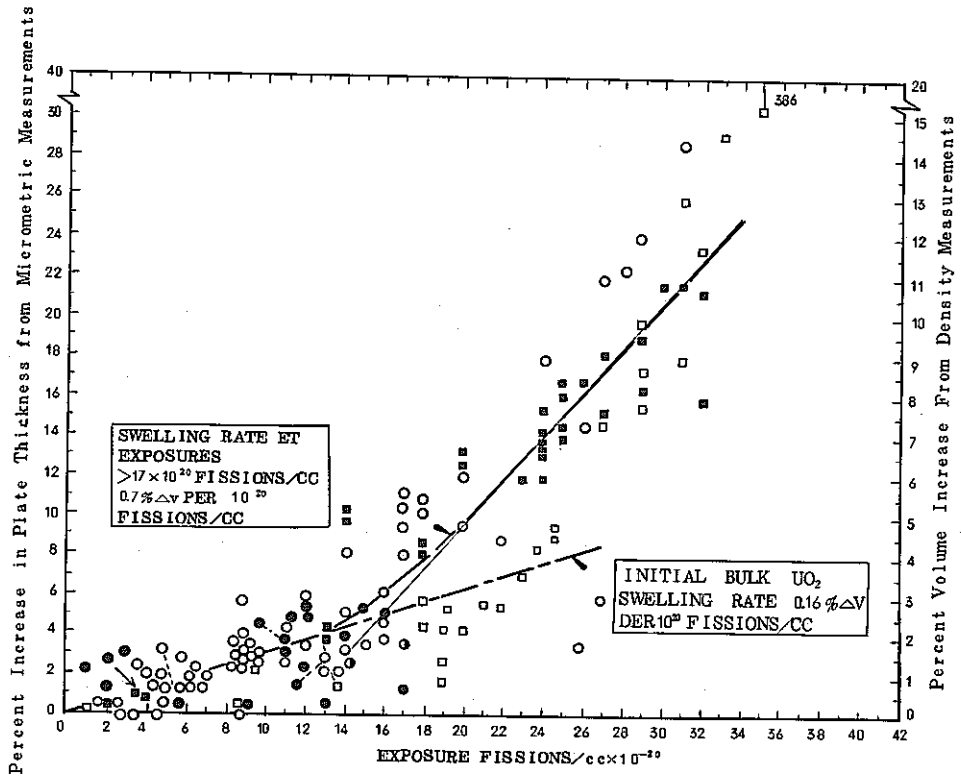
試 料：・混合酸化物

照射条件：・熱中性子束 (MTR) ・ 22.1~24.3 w/o PuO₂-UO₂
 ・ O/M = 1.998~2.000 ・ スミヤ-密度 93.5~96.6% T.D.
 ・ 密度 95.9~98.7% T.D.
 ・ 半径方向に強い拘束力をかけ、軸方向のスウェリングを測定

結 果：・ MTRの条件の制限から、中心温度を従来通り 1,400, 1,800, 2,200°C に保つことが出来ず、温度の影響を測ることに失敗した。
 ・ 初期のポロシテイにスウェリングが吸収されてしまったとすると
 0.10 ~ 0.14% Δv/v / 10²⁰ fission/cc
 ・ 初期のポロシテイにスウェリングが吸収されなかったとすると
 0.12 ~ 0.23% Δv/v / 10²⁰ fission/cc

コメント：GEの以前からの仕事の延長であり、温度保持に失敗していることから見て、B.U. が 80 × 10²⁰ fissions/ss に延びたこと以外特筆すべきものはない。

E.L. Zebroski et al
 GEAP-10028-34 (June 1970)



EFFECTS OF HIGH BURNUP ON OXIDE CERAMIC FUELS

M.L. Bleiberg

R.M. Berman

B. Lus tman

March 1962

WAPD-T-1455

体積変化について

UO₂ のスウェリング

(1) 0.16% Δv/10²⁰ fissions/cc 燃焼度 < 17 × 10²⁰ fissions/ss

実験温度範囲 1340°C ~ 3840°F (726°C ~ 2116°C)

温度の影響は無視出来ると考えられる。

(2) 0.7% Δv/10²⁰ fissions/cc 燃焼度 > 17 × 10²⁰ fissions/cc

実験温度範囲 1600°F (871°C)

1,950 ~ 2,150°F (1,066 ~ 1,177°C)

これについては、実験温度範囲がせまいしデータもバラついているので温度のスウェリングに対する影響については何ともいえない。

スウェリングは、板状燃料の厚み測定と密度測定により行なっている。

謝 辞

この報告書をまとめるにあたり、FBR 本部の金子研究員、大洗工学センターの樫原副主任研究員、鹿倉研究員、それにプル燃開発系の係員の皆様に多大なる御教授を受けました。ここに深く謝意を表する次第です。

参 考 文 献

- 1) SN 241-73-12-3
ラブンデー炉照射情報 (30,000 MWD/T~50,000 MWD/T) 分冊 3
- 2) R.C. Daniel
WAPD-263 (1962)
- 3) GEAP-4418 (1964)
- 4) M.L. Bleiberg
WAPD-T-1455 (1962)
- 5) R. Godesar, M. Guyette, and N. Hoppe
COMETHE-II Computer Code for Predicting the Mechanical and Thermal
Behavior of a Fuel Pin
Nucl. App. & Tech. Vol. 9 Aug. 1970
- 6) F.L. Zebroski et. al. (GE)
AIME Nuclear Metallurgy Symposium (Phoenix 1967)
- 7) F.L. Zebroski et. al. (GE)
GEAP-10028-34 (June 1970)
- 8) R.F. Hilbert et. al.
J. Nucl. Mater. 38 (1971) 26~34
- 9) W. Chubb, R.F. Hilbert, V.W. Storhok and D.L. Keller
Fission Gas Swelling of Refractory Nuclear Fuels
Mater. Sci. Eng., 9 (1972)
- 10) B.F. Rubin et. al (WH)
WAPD-264 (1962)
- 11) R.E. Skavdahl et. al. (GE)
GEAP-5491 (1967)
- 12) M.L. Bleiberg et. al. (WH)
WAPD-BT-18 (1960)
- 13) KFK-662