

金属燃料の照射挙動及び
設計評価用モデルに関する調査・研究
(研究報告書)

2000年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

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

Inquires 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

©核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

金属燃料の照射挙動及び設計評価用モデルに関する調査・研究
(研究報告書)

石井 徹哉*1) 浅賀 健男*1)

要旨

実用化戦略調査研究において金属燃料の実用性を検討するため、既存の知見に基づき金属燃料の照射挙動及び設計評価用モデルに関する検討を行うこととした。

これに関し、金属燃料については、主として米国 ANL にて行われた研究により、照射挙動の把握、検討が行われている。

そこで、今回、金属燃料の機械設計を行う上で必要となる以下の項目

- ・被覆管の変形量
- ・燃料の変形量
- ・FP ガス放出量
- ・ボンド Na 液面変化量
- ・FCCI による被覆管減肉量

について、既存知見をもとにした評価手法の検討を行った。

*1) 大洗工学センター システム技術開発部 燃料材料技術開発 Gr

March, 2000

Investigations on the evaluation methods of the irradiation performance of
FBR metallic fuel for the design study

Tetsuya ISHII^{*1)} Takeo ASAGA^{*1)}

ABSTRACT

For the irradiation performance of metallic fuel, many of the analyses were conducted in USA using EBR-I and EBR-II.

In this study, based on the published data and papers on the above results, the appropriate methods to the evaluation of the irradiation performance of FBR metallic fuel for the design study were considered, as the feasibility study for FBR.

The followings are the targets in this work;

- deformation of cladding
- deformation of fuel slug
- FP gas release
- fluctuation of the bonding Na level in the fuel pin
- FCCI

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

目次

1. はじめに	-----	1
2. 被覆管変形量評価方法の検討	-----	2
3. 燃料変形量評価方法の検討	-----	2
3-1. 熱膨張歪み	-----	2
3-2. クリープ歪み	-----	3
3-3. スエリング歪み	-----	3
4. FP ガス放出量評価方法の検討	-----	4
5. プレナム体積減少量評価方法の検討	-----	5
5-1. 燃料スラグの伸び	-----	5
5-2. プレナム体積減少量	-----	5
6. FCCI による被覆管減肉量評価方法の検討	-----	6
6-1. RE の侵入による被覆管の減肉量評価式	-----	6
6-2. 共晶反応による液相形成の際の被覆管の減肉速度	-----	6
6-3. 共晶反応しきい温度	-----	7
7. まとめ	-----	8
参考文献リスト	-----	9

図表リスト

図 1 FP ガス放出率の計算評価例	-----	11
図 2 FP ガス放出率の燃焼度依存性	-----	12
図 3 軸方向伸び量の燃焼度依存性	-----	13
図 4 被覆管減肉量の時間変化	-----	14
図 5 被覆管減肉速度の温度依存性	-----	15

1. はじめに

実用化戦略調査研究では、FBR 実用化時の燃料形態の候補の一つとして金属燃料を位置付け、その実用性評価が進められている。この評価に資するため、照射挙動等に関する既存知見を用いて、金属燃料の設計評価手法の検討を行うこととした。

これに関し、まず、米国 ANL では、金属燃料に関し、MOX ペレット燃料と同様の薄肉円筒形状の被覆管内に、スラグと称される軸方向に非常に長い円柱状の燃料体を一体から数体装荷し、被覆管と燃料スラグとのギャップ部には Na(ボンド Na)を充填、燃料スラグの上部(ボンド Na 液面の上)には、照射中に生じる FP ガスによるガス圧を緩和するためのプレナム空間を設けた燃料ピンを用いての研究開発が進められ、各種の照射試験が行なわれてきた^{1)~10)}。一連の照射試験においては、前述のような構成の燃料ピンにて、10at.%を超える高燃焼度を達成可能であることが確認されている。

そこで、それらの知見をもとに、金属燃料の設計手法を検討することを考えた。ただし今回は、機械設計についてのみ検討することとした。

まず、金属燃料は、MOX ペレット燃料と比較した場合、ボンド Na 液面が変化することでプレナム体積が変化し、その結果プレナムガス圧が変化すると、この点を機械設計の中に取り込むことが必要と考えられる。それ以外に設計上考慮すべき事項は MOX ペレット燃料の場合と同様のものであると考えることから、金属燃料の機械設計に際しては

- ・ボンド Na 液面の変化量
- ・プレナム部に放出された FP ガスによる被覆管への荷重(応力)
- ・燃料スラグの変形と被覆管の変形に伴い被覆管に生じる荷重(応力)

とを評価し、照射期間中に被覆管が健全であることを、被覆管のクリープ寿命分数和が1を超えないことをもって示せば良い。

そこで、今回の検討では、機械設計を行う際に必要となる評価項目として

- ・被覆管の変形量
- ・燃料の変形量
- ・FP ガス放出量
- ・ボンド Na 液面変化量
- ・FCCI による被覆管減肉量

を考え、それらの評価方法を検討することとした。

以下に、検討結果を示す。

2. 被覆管変形量評価方法の検討

ここでは、金属燃料を用いる場合の燃料ピン構造に関し、「もんじゅ」、「常陽」等で用いられている MOX ペレット燃料ピンと同様に、薄肉円筒形状の被覆管が使用されるものとした。

この場合、被覆管の照射中の変形挙動については、MOX ペレット燃料ピンについて考えられていると同様の熱膨張、クリープ、スエリング、及び FCMI 等による塑性変形を想定すればよいと考えられる^{1)~1.10, 2.1~2.4)}。

従って、MOX ペレット燃料ピンの場合と同様に、軸方向の変形は考慮せず、常に円筒形が保持されるよう同心円状に変形し、かつ、被覆管内の径方向の応力一歪分布は考慮しないとのもとに、

- (1) 熱膨張歪み : $\epsilon_{TH,C}$
- (2) 照射クリープ歪み : $\epsilon_{IC,C}$
- (3) 熱クリープ歪み : $\epsilon_{TC,C}$
- (4) スエリング歪み : $\epsilon_{SW,C}$
- (5) 塑性歪み : $\epsilon_{PL,C}$

の 5 要因を考慮し、

$$R_{Cl} = R_{0,Cl} \times (1 + \epsilon_{TH,C} + \epsilon_{IC,C} + \epsilon_{TC,C} + \epsilon_{SW,C} + \epsilon_{PL,C})$$

R_{Cl} : 被覆管内半径、 $R_{0,Cl}$: 被覆管製造時内半径

なお、各歪み ϵ とも、 $\epsilon = \Delta r / R_{0,Cl}$ Δr : 各要因による歪み量 と定義

として被覆管の変形量 (内半径の変化量) を評価することが考えられる。変形要因個々の評価は、被覆管として使用する鋼種に応じた各々の歪評価式を用いて行えばよい。

3. 燃料変形量評価方法の検討

ここでは、金属燃料を用いる場合の燃料ピン構造に関し、米国 ANL 等で研究が進められてきたスラグと呼ばれる軸方向に長い円柱形状の燃料が用いられることとした。

まず、このスラグ燃料については、MOX ペレット燃料ピンと同様の燃料変形挙動の要因を考慮すればよいことが、米国 ANL の経験から明らかとなっている^{2.1~2.4)}。

従って、径方向の変形については、MOX ペレット燃料ピンの場合と同様に

- (1) 熱膨張歪み : $\epsilon_{TH,F}$
- (2) クリープ歪み : $\epsilon_{CR,F}$
- (3) スエリング歪み : $\epsilon_{SW,F}$

の 3 要因を考慮して、

$$R_F = R_{0,F} \times (1 + \epsilon_{TH,F} + \epsilon_{SW,F} + \epsilon_{CR,F})$$

R_F : スラグ外半径、 $R_{0,F}$: スラグ製造時外半径

としてスラグ燃料の変形量 (外半径の変化量) を評価することが考えられる。

以下には、変形要因個々の評価方法を示す。

3-1. 熱膨張歪み

金属燃料は、一般の物質と同様の熱膨張機構を有すると考えられる。従って一般の物質と同様に、金属燃料固有の熱膨張率を一般に用いられている熱膨張評価式に適用し、金属燃料の熱膨張歪量を評価することが考えられる。

3-2. クリープ歪み

クリープ歪みは燃料スラグに圧縮応力が働いた場合に生じるものであり、MOXペレット燃料の場合と同様に、加えられた応力とクリープ特性に応じた歪みが生じると考えられる。また、設計上は、MOXペレット燃料と同様に、被覆管と燃料が接触、即ちFCMIが発生した時点からFCMIが終息するまでの期間のクリープ歪み量を評価すればよいと考えられる。

従って、金属燃料固有のクリープ特性をMOXペレット燃料についてのものと置き換えた上で、MOXペレット燃料と同様の手法によりクリープ歪量を評価することが考えられる。

3-3. スエリング歪み

金属燃料に生じるスエリング歪みは、照射中に生成される固体FPと燃料成分元素との体積差を要因とするもの、即ち固体FPスエリングと、プレナム空間に放出されることなく燃料内に保持されるFPガスによるもの、即ち、FPガススエリングとにより生じると考えられている^{21-24, 3-1-3-13)}。

以下には、各々について評価方法を示す。

(1) 固体FPスエリング²²⁾

金属燃料においても、MOXペレット燃料と同様に、照射中に生成される固体FPと、燃料の成分元素の体積差を要因とする変形、即ち、固体FPスエリングの発生が認められている。

この固体FPスエリングは、MOXペレット燃料と同様に、照射中に形成される固体FPが有する体積と、核分裂した燃料成分が有していた体積とを比較することで評価可能と考えられる。その場合、厳密には、化合物形成や液化等による体積変化を考慮すべきであるが、MOXペレット燃料の場合は、すべて固体状として固体FPスエリング量(率)を算定しても、設計評価上、支障が無いとして取り扱われている。

そこで、金属燃料の場合も、文献2-2)に示されているように、FPの化学形態によらず各々のFP元素のモル体積は単体の場合と同じとし、かつ、Xe, Krを除くすべてのFPが固体FPに含まれるものとし、元素個々に燃料内の存在比とモル体積とを乗じたものの総和と、製造時の燃料の体積とを比較することで固体FPスエリング量(率)を評価することが考えられる。

この場合、例えばU-19wt.%Pu-10wt.%Zr組成の燃料では、ORIGEN-2コードによるFP生成量評価結果に基づくと

$$\text{固体FPスエリング率} = 1.5\% / 1\text{at.}\%$$

との評価となる。ただし、評価の基礎となるFP生成量は、製造時の燃料中のフィッサイル組成、原子炉の中性子スペクトル分布に強く影響を及ぼされるものであることから、ここに示した1.5%/1at.%は参考値である。

(2) FPガススエリング^{22, 3-12, 3-13)}

金属燃料においても、MOXペレット燃料と同様に、固体FPによるもの以外に、プレナム空間に放出されることなく燃料内に保持されるFPガスによるもの、即ち、FPガススエリングの発生が認められている。

このFPガススエリングは、FPガス放出挙動と極めて密接な関連がある。まず、FPガスは、例えば文献2-2)に示されているように、ある程度燃焼が進行して以降(FPガス放出しきい燃焼度と仮称しておく)放出され始めると考えられる。FPガスが放出されない場合、燃料内のFPガス蓄積量は燃焼度に比例する。このとき、FPガスは、一様な大きさのガス気泡として燃料内に均一に分布するわけではないが、MOXペレット燃料の場合には、一様な大きさで均一に分布するとの仮定のもとに、一定の体積歪み(スエリング)が生じるとの評価が行われている。そこで、金属燃料の場合も同様に評価することが考えられる。

この場合、まず、FPガス放出が生じない、即ち、FPガス放出しきい燃焼度を超えない状態では、

(燃料のスエリング量－固体 FP スエリング量) / 燃焼度

として FP ガススエリング率を評価できる。次に、FP ガス放出が生じる場合には、燃料スラグ内の FP ガス量が FP ガス放出率に応じて減少することとなる。従って、FP ガス放出しきい燃焼度を越えた状態では、前出の FP ガススエリング率に燃料スラグ内に残留する FP ガス量の割合を乗じた

$$\text{FP ガススエリング率} \times (1 - \text{FP ガス放出率}) \times \text{燃焼度}$$

として FP ガススエリング量を評価できる。

ここで、例えば文献 2-1) に示されているように、FP ガスは、燃料粒界部で粗大気泡どうしが結合することで形成される経路（開気孔）を通じて放出されると考えられている。この開気孔は、例えば FCMI が生じた場合には、その応力によりつぶれると予想されるが、そのような開気孔部の体積減少は、FP ガススエリング量の減少を意味するものでもある。即ち、FP ガススエリング量は、必ずしも、一定の割合のもとで、常に増加するとは限らないと考えられ、一定の割合のもとに FP ガススエリング量を評価することは過大評価となると考えられる。一方で、FP ガススエリング量は、燃料スラグと被覆管との接触時期、接触時間の長さ、及び接触時の荷重を左右する要因である。従って、FP ガススエリング量を過大に評価することは、被覆管に負の影響を与える方向、即ち保守側の評価となるといえる。

即ち、設計上は、一定の割合のもとに FP ガススエリング量は増加するとの

$$\text{FP ガススエリング率} \times (1 - \text{FP ガス放出率}) \times \text{燃焼度}$$

で示される方法で FP ガススエリング量を評価することが考えられる。

ここで、FP ガス放出しきい燃焼度は明確に把握できていない状況にあるため、あくまで検討例にすぎないが、FP ガス放出しきい燃焼度を A at.%、文献 2-2) に基づき燃焼度 A at.% 到達時のスエリング量を 10% と仮定した場合には、既に示した固体 FP スエリング率参考値 1.5%/1at.% を用いて上述の方法に基づくことで、FP ガススエリング量評価式として以下のものが得られる。

$$\text{Bu} < 0.5\text{at.}\% \quad (10.0 - 1.5 \times A) / A \times \text{Bu}$$

$$\text{Bu} \geq 0.5\text{at.}\% \quad (10.0 - 1.5 \times A) / A \times (1 - \text{FGR}) \times \text{Bu}$$

Bu : 燃焼度[at.%]、 FGR : FP ガス放出率

4. FP ガス放出量評価方法の検討 ^{2-1,2-2,3-6,3-12,3-13)}

ここでは、先の 3. に述べた燃料変形量と密接な関連を有する FP ガス放出量の評価方法の検討結果について示す。

金属燃料では、燃料スラグにある程度のスエリングが生じて以降、燃料スラグ内からプレナム部へ FP ガスが放出され始めることが経験的に判明している。これについては、以下のような見解が例えば文献 2-1) に示されている。

まず、FP ガスは、燃料結晶粒内に気泡や固溶体として存在する。それらが結晶粒内から粒界へと移動する過程で互いに結合しながら気泡として成長していくとともに、粒界に到達した後、粒界において互いに衝突するなどして粗大化することで、粒界とプレナム空間とをつなぐ経路である開気孔が形成され、FP ガスが放出されると考えられている。

このような機構は MOX ペレット燃料にも見られるものであるが、金属燃料では、ガス放出に至るまでの燃料の変形が極めて大きくなることが経験的に知られている。このため、金属燃料実用化に際しては、FP ガススエリングを要因とする過度の FCMI を防止するとの観点から、ガス放出を十分に行えるよう、スミア密度を低くすることが考えられ、主として、70%から 75%程度のスミア密度の燃料ピンについての照射試験が行われてきた。その結果、高スミア側については、85%程度

について試験されたことはあるものの、75%から85%の間については、十分な実験データがない状況となっている。

また、例えば文献2-2)に示されているように(図1)、現時点における知見からは、80%のスミア密度の場合には、75%、85%スミア密度におけるFPガス放出率を直線内挿して得られるものとは異なる割合でFPガスが放出されるとの評価結果がある。しかしながら、FPガス放出挙動のモデル化は、例えば文献2-1)に示されているように、FPガス気泡の拡散係数や燃料内のガス気泡の大きさ等の主要な因子を照射試験結果等に基づき数値解析的に決定せざるを得ない状況にあり、図1の結果を得たようなモデルを、そのまま設計手法として利用することは難しいと考えられる。

そのようなことから、例えば文献3-6)より抜粋した図2に示すように、スミア密度に関係なく照射試験結果を集め、それを包絡するような簡単な評価式を作成し、設計に用いることが考えられる。なお、文献3-6)中には、十分な情報が示されていないことから、この検討の中で評価式の作成は行っていない。

5. プレナム体積減少量評価方法の検討

金属燃料の場合、プレナム体積は、燃料スラグの軸方向伸びや、燃料スラグの径方向スエリングによるギャップの閉塞によるボンドNaの液位上昇の結果、減少する可能性が考えられている。そこで、燃料スラグの軸方向伸び量と、プレナム体積変化量について検討した。

5-1. 燃料スラグの伸び^{1-9, 3-6, 3-14)}

金属燃料では、軸方向への燃料スラグの伸びが顕著に生じるとともに、その伸びは、燃焼進行に伴い、先に示した径方向の変形とは異なる割合で生じることが経験的に得られている。また、現在までの経験からは、燃焼に伴う伸び量の変化の傾向は、Pu濃度により異なるものとなり、Pu濃度が高いほど、小さなものとなることが判明している。

さらに、燃焼開始直後は燃焼進行に伴い比較的急激に燃料スラグは伸びるが、その後は緩やかな割合で伸びるとの傾向にあることも判明している。

このような伸びの機構については明確な考察が得られているわけではないが、FPガス放出が開始された後は燃料スラグの伸びが緩やかになると考えることは可能である。

そのように考えると、例えば、文献3-6)中のU-8Pu-10Zr燃料についてのデータ(図3)を包絡するような簡単な評価式を作成し、設計に用いることが考えられる。なお、文献3-6)中には、十分な情報が示されていないことから、この検討の中で評価式の作成は行っていない。

5-2. プレナム体積減少量

燃料スラグの軸方向の伸び、及び、径方向のスエリングによるギャップ閉塞とにより、ボンドNaの液位が上昇し、プレナム体積が減少する可能性が考えられている。

現在までの経験からは、燃料中に生じるクラックや、FPガス放出経路となるプレナム空間と連結されたFPガス気泡中へNaが侵入することにより、燃料スラグの伸び量、及び、製造時のギャップ部がすべて閉塞されるとの条件を加味して類推される減少量よりも、実際のプレナム体積の減少量は小さくなることが判明している。

ただし、十分な理論的裏付けのもとに、Na侵入の効果を定量評価できる状況には無い。

一方、Na侵入効果を見逃し、かつ、FCMI発生に至る以前から、常にギャップが閉塞されるとする条件を加えてプレナム体積減少量を評価することは、過大評価することになる。しかしながら、

それにより、FP ガス圧は過大に評価することとなり、その結果、被覆管への荷重評価も過大、即ち保守側の評価となる。

そのように考えると、設計上は、ボンド Na の侵入を考慮することなく、常にギャップは閉塞されるものとして、燃料スラグの伸び量に相当する量とギャップ閉塞に相当する量だけ、プレナム体積が減少するものと評価することが考えられる。なお、評価上は、ボンド Na の液位上昇量として求めたものを、別途プレナム体積減少量に換算する方法を採ることが考えられる。

この場合、ボンド Na 液位上昇量評価式としては以下のものが考えられる。

$$\Delta L_{Na} = L_{Fuel} \times (1 - \rho_{SD} + \delta \epsilon)$$

ΔL_{Na} : Na 液位上昇量 [mm]、 L_{Fuel} : 燃料スラグ長 [mm]、

$\delta \epsilon$: 燃料スラグ軸方向伸び量 [-]、 ρ_{SD} : 製造時スミア密度 [-]

6. FCCI による被覆管減肉量評価方法の検討

金属燃料においては、FCMI 時に、被覆管成分と燃料成分とが相互に拡散するとともに、燃料スラグから被覆管へと希土類元素 (RE) が侵入することが知られており、この RE の侵入により、被覆管の実効的な肉厚が減少することが把握できている^{2-1~2-4, 3-1~3-11}。

さらに、高温である場合には、燃料側へと侵入した被覆管成分により、燃料スラグの外周部で共晶反応が生じる可能性が考えられている。炉外において共晶反応を生じさせた試験結果からは、燃料が液相化した場合、液相部と接している被覆管はかなりの速度で侵食されることが把握できている^{2-1~2-4, 3-1~3-11}。

これらは、被覆管の寿命を制限する因子であり、機械設計上、重要な要素となる。

そこで、これらの現象について、その評価式を検討することとした。

6-1. RE の侵入による被覆管の減肉量評価式

燃料内には核分裂により多種の FP が生成、蓄積される。現在までの経験からは、例えば文献 3-11) にあるように、それら FP の中で、希土類元素 (RE) が被覆管中に侵入することにより、被覆管の機械的特性を劣化させることが判明している。

この RE の被覆管への侵入は、被覆管の成分元素の一つである Ni が多いほど、容易に生じるとの傾向が示唆されている。しかしながら、Ni の含有量と RE の侵入速度との間の関係を定式化するには至っていない。また、燃料の組成、即ち、Pu や Zr の含有量と RE の侵入速度との間の関係も、十分には検討しえていない状況にある。

このような状況を考慮すると、現在までに蓄積された RE による被覆管減肉量評価結果を、被覆管の Ni 含有量や燃料の組成に関わらず一括して整理し、RE の侵入速度を求めることが考えられる。

そのような整理により得られたものとして、文献 2-2) 中に示された以下のものがある。

$$\Delta \delta_{FCCI} = (K \times \Delta Bu)^{1/2}$$

$$K = 1.069 \times 10^{13} \times \exp(-20000/T)$$

δ_{FCCI} : 侵食量の増分 [μ m]

ΔBu : FCMI 発生時点からの燃焼度増分[at.%]、 T : 被覆管内表面温度[K]

現時点では、上式を設計に用いることが考えられる。

6-2. 共晶反応による液相形成の際の被覆管の減肉速度

共晶反応による液相化が生じると、比較的短時間で多量の被覆管侵食が生じることが、炉外試験

結果から判明している。

ただし、例えば文献 3-11)に示されているように、侵食速度は徐々に減少し、侵食量に飽和傾向が認められることも判明している(図 4)。このような侵食量の飽和性の要因の一つに、燃料スラグ内から被覆管側へと侵入する元素に、侵入飽和量があるとの推察も行なわれているが、明確な考察を得るまでには至っていない状況にある。

一方、被覆管の組成との関係については、米国の HT9、D9、SUS316 鋼の 3 鋼種間の比較において、データのばらつきがかなり大きいとの問題点はあるが、明確な差を確認するには至っていない状況にある。

このような状況を考慮すると、被覆管の鋼種に関係なく、データを一括して整理することが考えられる。

そのような整理により得られたものとして、文献 3-11)中に示された以下のものがある(図 5)。

$$\Delta \delta_{LIQ} = R \times \Delta t$$

$$R = \exp(11.646 - 15665/T)$$

$\Delta \delta_{LIQ}$: 侵食量増分 [μm]、 Δt : 時間増分 [s]、T: 被覆管内表面温度 [K]

現時点では、上式を設計に用いることが考えられる。

なお、金属燃料ピンは、燃料スラグと被覆管とのギャップ部に Na が充填される構造がとられており、MOX 燃料ピンで見られた Na による被覆管外面腐食と同様の機構による腐食が、金属燃料ピンの被覆管内面に生じる可能性が考えられる。そのため、全被覆管減肉量については、先に示した $\Delta \delta_{FCCI}$ と $\Delta \delta_{LIQ}$ に、Na による内面腐食量 ($\Delta \delta_{Na}$) を加えることが必要と考えられる。この $\Delta \delta_{Na}$ は、MOX 燃料ピン用の外面腐食量評価式をそのまま流用することで評価できると考えられる。

6-3. 共晶反応しきい温度

共晶反応のしきい温度については、現在も研究が進められているが、明確な評価を行っていない状況にある。

例えば、単純には比較できないものの、2 元系合金の相図からは、例えば Pu-Ni 合金 (高 Pu 含有側) や Pu-Fe 合金 (高 Pu 含有側) で 465°C、428°C といった極めて低温で共晶反応が生じる可能性が示唆される。しかしながら、実際には、700°C 程度でも共晶反応が生じなかった例もあり、2 元系合金図からの推測からは、適切な考察を得られないと考えられる。

一方、文献 3-2~3-4)にあるように、3 元系や 4 元系の相図を作成することも試みられているが、研究開発段階にあり、金属燃料の共晶反応しきい温度の検討に使える状況には無い。

このような状況を考慮すると、過去に行われた照射試験中の共晶反応発生の下限条件を、設計上の共晶反応しきい条件とすることが考えられる。

これに関し、まず、米国 ANL にて行なわれた照射済み燃料を用いた炉外試験において、共晶反応が生じた下限温度は、650°C よりも高いとの実績がある³¹¹⁾。一方、例えば文献 1-9)にまとめられているように、米国 ANL にて行なわれた照射試験では、被覆管内表面温度 (BOL 時) 853K、線出力 (BOL 時) 475W/cm の条件で照射した際に、共晶反応が生じることなく 10at.% を超える燃焼度まで照射できたとの実績がある。

これらを考慮すると、現時点においては 650°C を共晶反応しきい温度とし、650°C 超から、被覆管の減肉量評価に $\Delta \delta_{LIQ}$ を加えることが考えられる。

7. まとめ

金属燃料について、機械設計を行う際に必要となる以下の項目について、既存の知見をもとに評価手法の検討を行った。

- ・被覆管の変形量評価方法
- ・燃料の変形量評価方法
- ・FP ガス放出量評価方法
- ・ボンド Na 液面変化量評価方法
- ・FCCI による被覆管減肉量評価方法

検討の結果、各項目について、適切な評価式、もしくは評価式の作成方針を得ることができた。

参考文献リスト

<金属燃料の開発に関して>

- 1-1) 電力中央研究所報告「FBR 新型炉心設計に関する調査報告」T86015 (1986).
- 1-2) 電力中央研究所報告「金属燃料高速増殖炉の設計検討」T88043 (1988).
- 1-3) 電力中央研究所報告「金属燃料 FBR 炉心の設計検討」T91013 (1991).
- 1-4) 電力中央研究所報告「金属燃料炉心における安全性確保の方策と課題」T92007 (1992).
- 1-5) 電力中央研究所報告「1500MWe 級高燃焼度金属燃料炉心および酸化物燃料炉心の特性評価」T97040 (1997).
- 1-6) L.C.Walters and J.H.Kittel, "DEVELOPMENT AND PERFORMANCE OF METAL FUEL ELEMENTS FOR FAST BREEDER REACTORS", Nucl. Tech. vol.48 (1980) 273-280.
- 1-7) L.C.Walters et al., "PERFORMANCE OF METALLIC FUELS AND BLANKETS IN LIQUID-METAL FAST BREEDER REACTORS", Nucl. Tech. vol.65 (1984) 179-231.
- 1-8) B.R.Seidel et al., "RECENT PROGRESS IN THE DEVELOPMENT OF METALLIC FUEL", CONF-900917 (1990).
- 1-9) C.E.Lahm et al., "A DECADE OF ADVANCES IN METALLIC FUEL", CONF-901101--76 (1990).
- 1-10) H.Tsai et al., "IRRADIATION PERFORMANCE OF U-Pu-Zr METAL FUELS FOR LIQUID-METAL-COOLED REACTORS", CONF-950426--4 (1994).

<金属燃料の挙動解析コード開発に関して>

- 2-1) 電力中央研究所報告「金属燃料挙動解析コード ALFUS の開発」T92095 (1993).
- 2-2) 電力中央研究所報告「金属燃料要素における燃料-被覆管機械的相互作用の解析的評価」T97004 (1998).
- 2-3) T.Kobayashi et al., "DEVELOPMENT OF THE SESAME METALLIC FUEL PERFORMANCE CODE", Nucl. Tech. vol.89 (1990) 183-193.
- 2-4) T.Ogata and T.Yokoo, "DEVELOPMENT AND VALIDATION OF ALFUS: AN IRRADIATION BEHAVIOR ANALYSIS CODE FOR METALLIC FAST REACTOR FUELS", Nucl. Tech. vol.128 (1999) (in printing).

<金属燃料の挙動評価に関して>

- 3-1) 電力中央研究所報告「高速炉用金属燃料における燃料合金と被覆管との反応に関する炉外実験」T95030 (1996).
- 3-2) 電力中央研究所報告「高速炉用金属燃料における液相形成温度の評価」T97053 (1998).
- 3-3) 電力中央研究所報告「高速炉用金属燃料における液相形成温度の評価」T97054 (1998).
- 3-4) 電力中央研究所報告「高速炉用金属燃料における液相形成温度の評価」T98028 (1999).
- 3-5) H.Tsai, "FUEL/CLADDING COMPATIBILITY IN IRRADIATED METALLIC FUEL PINS AT ELEVATED TEMPERATURES", CONF-900804--9 (1990).
- 3-6) R.G.Pahl et al., "Steady-state Irradiation Testing of U-Pu-Zr Fuel to > 18% Burnup", CONF-900804--25 (1990).
- 3-7) H.Tsai et al., "BEHAVIOR OF LOW-BURNUP METALLIC FUELS FOR THE INTEGRAL FAST REACTOR AT ELEVATED TEMPERATURES IN EX-REACTOR TESTS", Int. Conf. on fast reactors and fuel cycles (1991) P1.18-1 - 18-10.

- 3-8) R.G.Pahl et al., "Irradiation Experience with HT9-clad Metallic Fuel", Int. Conf. on fast reactors and fuel cycles (1991) P1.19-1 - 19-9.
- 3-9) A.B.Cohen et al., "FUEL/CLADDING COMPATIBILITY IN HIGH-BURNUP U-19Pu-10Zr / HT9-CLAD FUEL AT ELEVATED TEMPERATURES", CONF-921102--29 (1992).
- 3-10) R.G.Pahl et al., "Performance of HT9 clad metallic fuel at high temperature", J.Nucl.Mat 204 (1993) 141-147.
- 3-11) A.B.Cohen et al., "Fuel/cladding compatibility in U-19Pu-10Zr/HT9-clad fuel at elevated temperatures", J.Nucl.Mat 204 (1993) 244-251.
- 3-12) Y.Tsuboi et al., "Mechanistic model of fission gas behavior in metallic fuel", J.Nucl.Mat 188 (1992) 312-318.
- 3-13) T.Ogata et al., "Analytical study on deformation and fission gas behavior of metallic fast reactor fuel", J.Nucl.Mat 230 (1996) 129-139.
- 3-14) G.L.Hofman et al., "Swelling Behavior of U-Pu-Zr Fuel", Metallurgical Trans. 21A (1990) 517-528.

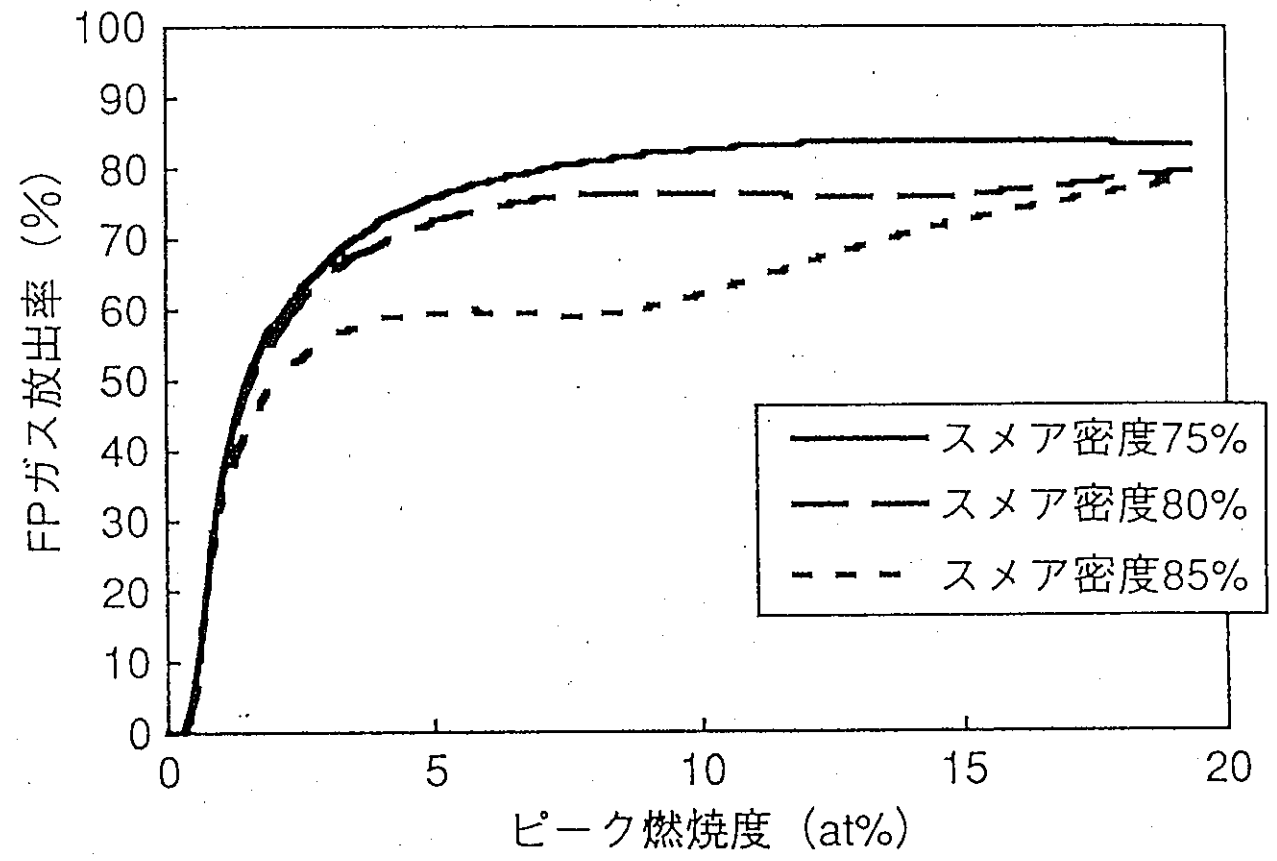


図1 FP ガス放出率の計算評価例²⁻²⁾

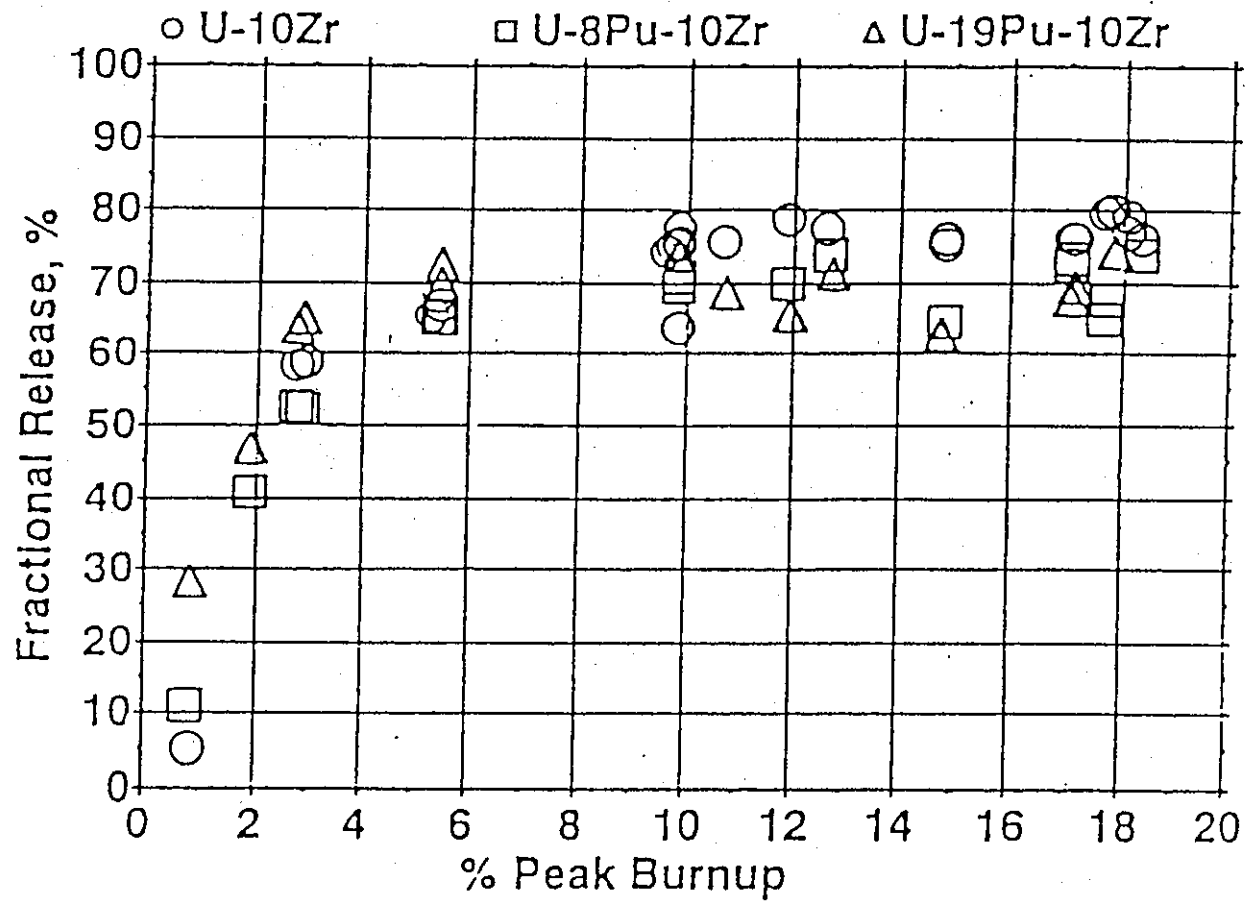
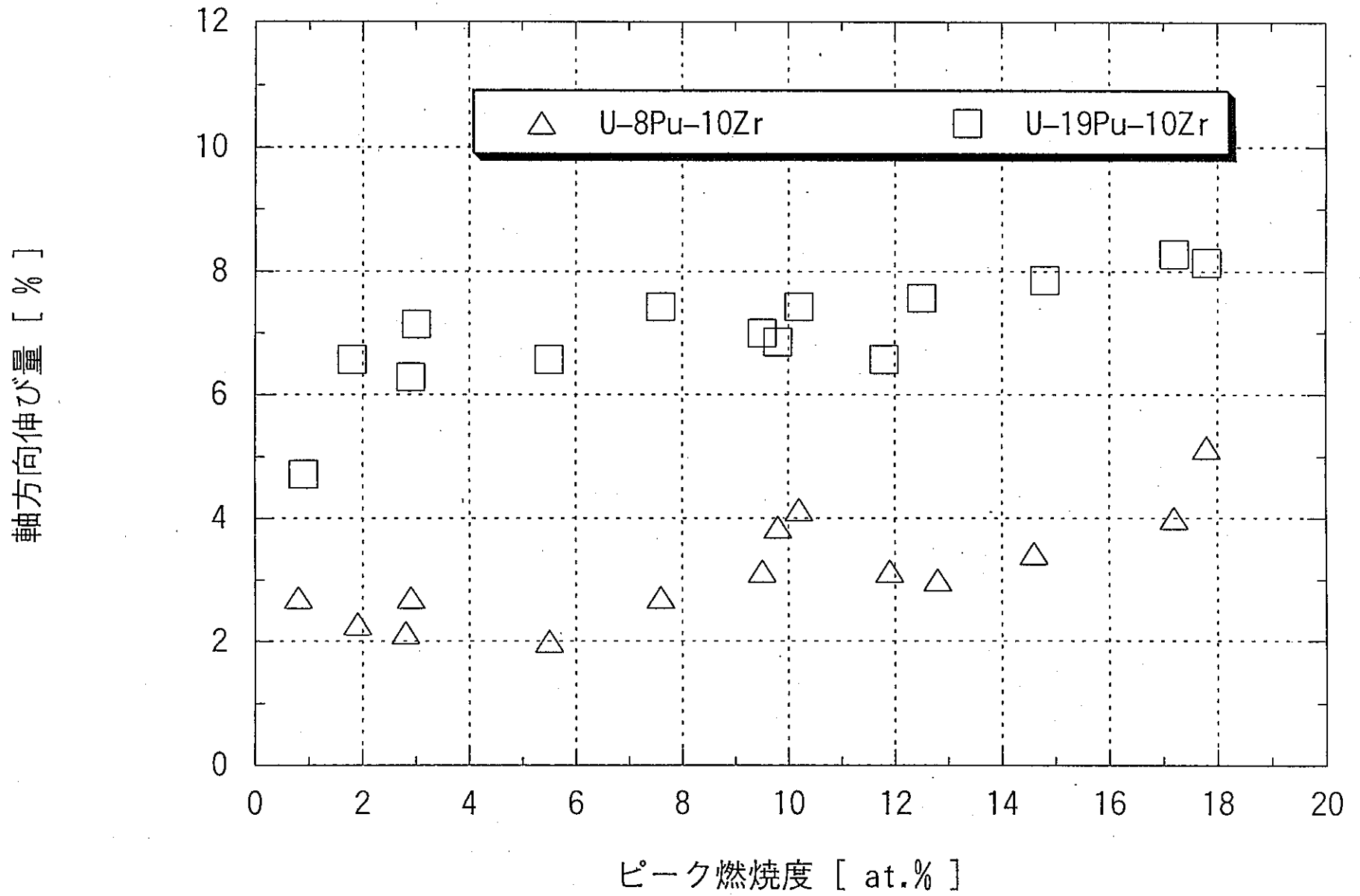


図2 FP ガス放出率の燃焼度依存性³⁻⁶⁾

図3 軸方向伸び量の燃焼度依存性³⁻⁶⁾

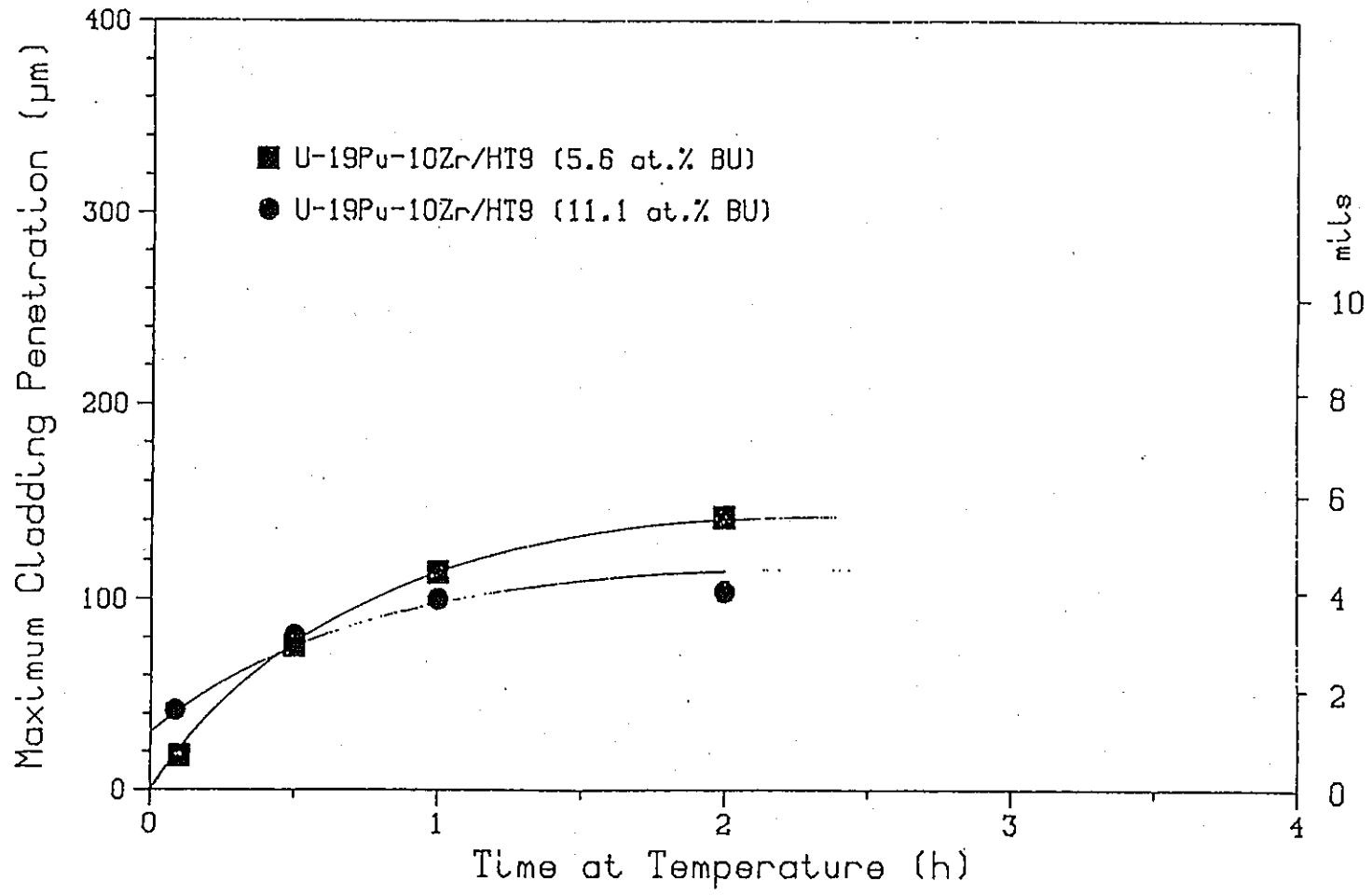


図4 被覆管減肉量の時間変化³⁻¹¹⁾

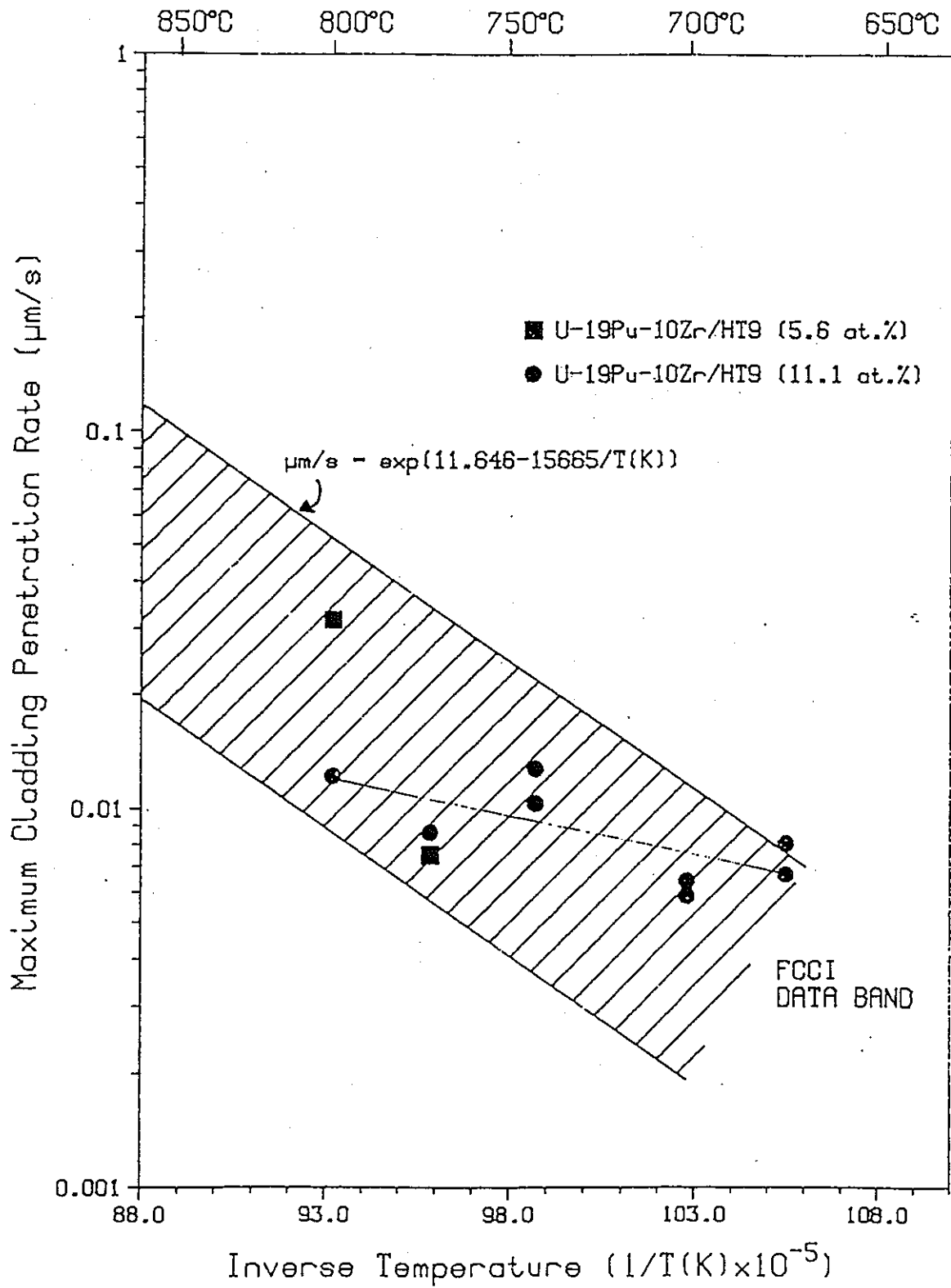


図5 被覆管減肉速度の温度依存性³⁻¹¹⁾