

本資料は2001年11月30日付けで登録区分、
変更する。
[技術情報室]

144/

分置

高速炉の炉心・燃料概念と 経済性の検討

1990年9月

動力炉・核燃料開発事業団

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

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

の
転
載

よう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室



高速炉の炉心・燃料概念と経済性の検討

永井 寛* , 谷山 洋*

要 旨

高速炉の炉心・燃料概念については、その原型炉開発段階においては、ウラン資源の枯渇とそれに対応した高速炉の早期導入が緊急課題であるとの認識に基づき、増殖性ととりわけ倍増時間の短縮を優先した設計が行われてきた。しかしながら、今日の先進国におけるエネルギー需要の鈍化傾向、ウラン価格の安定、軽水炉技術の定着と高度化の中において、高速炉の開発については、我が国においても、ウラン価格の高騰を待つことなく軽水炉と経済性で競合可能とすることが求められており、炉心・燃料概念の設計思想についても、実証炉以降に対しては原型炉段階と大きく異なる方向が指向されている。即ち、燃料サイクル費等のコスト低減を優先した、

- ・燃料の高燃焼度化、長寿命化——低燃焼反応度、太径燃料要素、低出力密度化炉心
- ・集合体大型化
- ・径、軸ブランケット層の削減

などを特長とした炉心・燃料概念の方向である。

そのような概念の代表が、欧州における欧州統一炉（E F R）等の設計例であり、我が国においてもその動向を見極めつつ、大型高速炉の炉心・燃料概念の改良が図られている。

本報告書は、その経済性に優れた高速炉の炉心・燃料概念とはどのようなものを論じたものであり、事業団における大型炉設計研究に関して、動力炉技術開発部 技術開発室側で作成した関連する幾つかのメモを整理し、以下の3テーマに纏めたものである。

- I. 高燃焼度化とその経済効果について
- II. F B R 実用化炉炉心・燃料概念に関する経済性概略評価とその改善方向について
- III. 新型燃料を用いた炉心・燃料概念と経済性の比較

* 動力炉技術開発部 技術開発室

目 次

I. 高燃焼度化とその経済効果について	
1. はじめに	1
2. 高燃焼度化に関する影響評価	1
3. 簡略モデルによる高燃焼度化に関する経済性評価	1
4. まとめ	7
II. FBR実用化炉炉心・燃料概念に関する経済性概略評価とその改善方向について	
1. はじめに	15
2. 現状実用化炉の炉心・燃料概念に基づく燃料サイクル費の見通し	15
3. 経済性改善方策	17
4. リファレンスプラントの炉心・燃料概念の改善	22
5. おわりに	23
III. 新型燃料を用いた炉心・燃料概念と経済性の比較	
1. はじめに	31
2. 新型燃料の照射挙動の特徴	31
3. 経済性評価のための適正な炉心・燃料概念と経済性の概略比較	33
4. まとめ	42

図 表 リ ス ト

(I 章)	
表 I—1	高燃焼度化に関する影響評価 9
図 I—1	集合体長一定とした場合の炉心の高さと燃焼度の関係 11
図 I—2	燃焼度10万MWd/t(取出し平均)あたりの最大内面腐食量評価例 12 (GEのAdamsonの式による評価)
図 I—3	燃焼度10万MWd/t(取出し平均)あたりの最大Na腐食式 13 (PNC式.....改良316鋼)
図 I—4	高燃焼度化とその経済効果 14
(II 章)	
表 II—1	PNC実用化炉, 現行軽水炉(PWR)の炉心・燃料仕様, 性能 25
表 II—2	実用化炉の燃料サイクル費概略評価 26
図 II—1	燃料加工目標コストと研究下記発成果の関連 27
図 II—2	FBR再処理コスト低減見通し 28
図 II—3	改良オーステナイト鋼と比較してのODSのコストアップと 29 燃焼度換算
図 II—4	原子炉出口温度と建設費 30
(III 章)	
表 III—1	設計の観点から見た各種燃料の照射挙動の特徴 44
図 III—1	各種フェライト鋼の10000時間クリープ破断強さの比較 45

I. 高燃焼度化とその経済効果について

1. はじめに

高速炉の経済性を高める最も重要なキーポイントの一つは、燃料の高燃焼度化であり燃焼度15万～20万MWd/t(取出平均)の達成を目標に、動燃では各種研究開発を進めようとしている。高燃焼度化については、本来、それに比例して燃料サイクル費が低減すると思われがちであるが、実際には、高燃焼度化に伴い様々なマイナス要因があり、単純に比例するものではない。たとえば、集合体長を一定とすれば、高い燃焼度の場合の方が絶対的なFPガス放出量が多くなり、プレナム長さを大きくせざるを得ない分、炉心高さが小さくなる。その場合、年間に交換する集合体数そのものは、高燃焼度側の方が有利としても、装荷する集合体数が多くなるため、燃焼度を2倍にしても年間交換集合体数は1/2にはならず、燃料サイクル費も半分にはならない。欧州での評価では、燃焼度が2倍になった時の燃料サイクル費の低減割合は2/3としている。¹⁾(本評価は燃焼度を7万から14万MWd/t程度まで倍増した場合の評価と推定する。)高燃焼度化に伴い装荷集合体が増大するという事は、炉心径の増加となり、建設費にも大きな影響を与える。

高燃焼度化については、現在、炉心材料がネックと考えられ、耐スエリング性と高温強度に優れた炉心材料の開発が進められているが、本報告は、そのような優れた材料が利用できるという前提のもとに、15万～20万MWd/tという高燃焼度化のレベルにおいて影響される様々な高速炉プラントの各種仕様、性能について検討するとともに、経済性に与える影響の大きい因子を抽出し、それを基に燃焼度と経済性の関係性を評価したものである。

2. 高燃焼度化に関する影響評価

表I-1に高燃焼度化することにより影響される各種項目についての問題点、対応策及び経済的な影響度を示す。この中で高燃焼度化に伴う核データの不確かさ等については、今後の研究開発実績を積み重ねることにより、概ね解決されるものと考えられ、経済性に大きな影響を与えることはないものと推定される。しかし、燃焼とともに増大するFPガスや腐食については、本来的に取り除くことの難しい問題であり、技術的な成立性は確保できても、その対応策のために経済的には大きなマイナス効果となる可能性が大きい。

3. 簡略モデルによる高燃焼度化に関する経済性評価

高燃焼度化、例えば取出平均燃焼度を10万MWd/tから20万MWd/tに増大できたとして経済性はどの程度向上するのか、これまでも、燃焼度と燃料サイクル費の関連についての評価が動燃内でもなされてきたが、これまでの評価は、金利計算と加工単価、再処

理単価が燃焼度に応じて一定割合高くなる（技術的根拠は明確でない）として計算したもので、高燃焼度化に伴う影響を炉心設計、プラント設計も含めて総合的、技術的に検討したものではない。

本評価では既に述べた高燃焼度化に伴う問題の中で、特に影響の大きいと判断できる燃焼に伴って増大するFPガスの効果及び被覆管の腐食をパラメータとして、まず、燃焼度と炉心高さの関係を求め、それをもとに、燃料サイクル費、建設費、稼働率等の経済的因子を発電原価換算で比較検討し、燃焼度と経済性の関係を検討する。

(1) 燃焼度と炉心高さの関係評価

1) 評価の考え方

- ① 集合体長については、その増大は燃料サイクル費、建設費に様々に影響するとともに、燃料輸送上の制約を受けるため、ここでは燃焼度によらず一定と仮定する。
(5m程度を想定)
- ② 照射末期の被覆管のフープ応力が同等となるよう、炉心高さとプレナム長さのバランスを取る。(燃料寿命は末期のフープ応力が重要との考え) ----(i)式
- ③ 炉心支持板への遮蔽を同等とする観点から、プレナム長さが増大した場合には、下部遮蔽体を短くする。遮蔽体の減衰効果は、プレナム部の4倍程度と仮定する。
----(ii)式
- ④ プレナム長さ+炉心高さ+下部遮蔽体長さ(プレナム長さで変化)の合計値は①の仮定から一定とする。----(iii)式
- ⑤ 出力密度、被覆管温度は、燃焼により変化しないものと仮定する。
- ⑥ 被覆管初期肉厚は、いずれのケースも同じとする。(0.6mmとして計算)
- ⑦ 燃料要素径、ピンピッチについても、炉心高さによらず同じとする。
(以下に示す評価で、高燃焼度側の方が炉心高さが小さくなり、ピンピッチを小さくできるという考え方もあるが、高燃焼度側の方が燃料要素の膨れは大きくなるため、この様な考え方を採用する。)
- ⑧ 燃焼度と照射期間との関係は、10万Mwd/tが4年に相当するとして計算する。
なお、特に断らない限り、集合体あたりの燃料要素数は一定(271本)とする。

2) 評価式

○炉心高さ と プレナム長さ の関係

$$H \times B \times A_1 \times (T_0 / (T_0 - F \times B)) = P \quad \text{----(i)}$$

○プレナム長さ と 下部遮蔽体長さ の関係

$$(A_2 - P) \times A_3 + A_4 = S \quad \text{----(ii)}$$

○炉心高さ、プレナム長さ、下部遮蔽体長さの合計値(一定)

$$H + P + S = A_5 \quad \text{----(iii)}$$

ここで、

H : 炉心高さ (m)

P : プレナム長さ (m)

- S : 下部遮蔽体長さ (m)
 B : 燃焼度 (MWd/t)
 F : 腐食量 (mm/1万MWd/t)
 T₀ : 被覆管肉厚 (0.6mm)

A₁ ~ A₅については、実用化炉設計研究の成果を参考に以下のように定めた。

- A₁ = 0.067
 A₂ = 1.44
 A₃ = 0.25
 A₄ = 0.3
 A₅ = 2.94

3) 評価結果

図 I-1 に、腐食量として、10万MWd/t あたり、0 μ , 100 μ , 200 μ を設定した場合の燃焼度と炉心高さの関係を示す。図 1 の炉心高さとの関係は、650 $^{\circ}$ Cでの長時間側のクリープ強度が改良 316鋼の 2 倍で、被覆管設計評価温度（肉厚中心）が650 $^{\circ}$ C程度の場合に成立するものであり、現用材の改良316 鋼で同程度の炉心高さとの関係を成立させるためには、被覆管設計評価温度を600 $^{\circ}$ C程度とする必要がある。

照射末期まで線出力、被覆管温度が変わらないとした場合の、316 鋼レベルの外表面腐食、内面腐食の評価例を図 I-2、図 I-3 に示す。フェライト鋼については、まだ十分なデータはないが、FFTFの照射試験では 316鋼と同程度の腐食量との報告がある。これらの図より明らかなようにこれまでの設計で採用されてきた燃料の O/M比1.98程度では、燃焼度10万MWd/t あたりの腐食量は、300 μ を超えてしまうことになる。設計評価上、燃焼度10万MWd/t あたりの腐食量を 100 μ 以下とするためには、O/M比を1.95以下（燃料製造上は、例えば1.93 \pm 0.2 という仕様になる。）、Na中の酸素濃度を3PPM以下に抑えること等の対策が必要となる。これらの対策は技術的に不可能ではないが、燃料製造上あるいはプラント運転上、大きな制約となることは否めない。

腐食対策としては、被覆管肉厚を大きくすることも考えられるが、炉心特性への影響が大きく、また、被覆管の温度や二次応力が大きくなり、燃料寿命に関係してくるため、肉厚の増大による改善効果には限界がある。

(2) 燃焼度と経済性の関係評価

1) 評価の考え方

① 燃料サイクル費

燃焼度と炉心高さの関係は図 I-1 に示した通りであるが、炉心高さが小さくなると相対的に炉心特性上燃料装荷量を増大させなければならないなどのデメリットが生じる。炉心高さをパラメータとしたプラント工学室の評価では、たとえば、炉心高さ 120cmと80cmでは、後者の方が燃料装荷量が 1.2倍多くかつPu富化度も 1.2倍大きくさせることが必要としている。²⁾ここでは、燃焼度増加と炉心高さ低減を

組み合わせた場合を考える必要があるが、単に炉心高さ低減の場合よりも燃焼度増加を加えた場合の方が、この炉心特性上のデメリットは大きくなると考えられる。

高速炉の燃料集合体は、軽水炉と比べ集合体に占める燃料重量割合が小さく（30%前後）、炉心高さの変化が成型加工費に与える影響は必ずしも大きくはないが、ここで検討している炉心の高さの変化による燃料集合体あたりの成型加工費の増減は、炉心の高さを低減した場合の炉心特性上のデメリットによる燃料装荷量の増大（燃料要素の太径化で吸収）及びPu富化度の増大を考慮すると、かなり小さいものとする。Pu価値が高い場合には、高燃焼度側の方が炉心高さは小さいにも拘わらず、Pu富化度が高い分、装荷時と取り出し時のPu量に大きな差が出るため、金利を除いてもなお経済的に不利となる可能性が出てくる。

一方、再処理費についても、高燃焼度短尺炉心の方が、集合体一体あたりの燃料重量は少なくなる可能性があるものの、Pu富化度が高いこと及びFP量が多いことなどを勘案すると、集合体一体あたりで考えた再処理費は、成型加工費と同様、燃焼度により大きく変化しないものと判断する。

以上より、燃料サイクル費については、基本的に集合体数（年間使用数）により比較して良いものと判断する。（金利については、別途検討することとする。）

② 建設費

燃焼度の増大に伴い減少する炉心の高さ分、径方向に集合体を増大することになるが、この場合、炉心径の増大とともに原子炉容器径が増大し、さらに、全体の建屋容積も若干大きくなる。これらの増大量は、炉心径の増大分と同じとしてコストの増加（または低減）を比較する。その他、燃焼度により影響されるプラント設備としては、燃取り系設備の燃料貯蔵槽等が考えられるが、様々な設計の考え方があり、その影響が大きいためここでは比較検討を行わない。

③ 稼働率

定期点検間隔は、基本的に法令により決まることを前提とすれば、燃焼度が稼働率に影響を与えるのは、取り替え燃料集合体数（年間の数量）であると考えられ、比較評価はその点のみを対象にする。

④ 所内負荷率

これまでに述べた集合体の評価条件では、低燃焼度側の方が炉心の高さが大きくなる分、圧損は大きくなると考えるが、全体に低圧損型の集合体を指向すれば、圧損そのものの絶対値が小さくなり、あえて評価するほどの大きな差は生じないものとする。

2) 評価式

発電原価への換算にあたっては、燃焼度10万MWd/tの時の発電原価に占める建設費の割合を50%、燃料サイクル費の割合を25%として評価する。（30年平均に相当）

評価条件は、とりあえず図I-1に示した中の腐食量 $100\mu\text{m}/10\text{万MWd/t}$ のケースとする。

① 燃料サイクル費

○年間集合体取替え数

10万MWd/tの時の装荷集合体を300体とすると、年間取替数(N)は稼働率を80%として、

$$N = 300 \times \frac{H_0}{H} \times \frac{B_0}{4 \times B} \times 0.8$$

ここで、

H_0 : 燃焼度10万 MWd/tの時の炉心の高さ

B_0 : 燃焼度10万 MWd/t

H : 炉心の高さ

B : 燃焼度

となる。

○発電原価の増減

$$\Delta C \text{ サイクル} = 0.25 \times \left[\left(\frac{N}{N_0} \right) - 1 \right]$$

ここで、

N : 年間取替燃料集合体数

N_0 : 燃焼度10万 MWd/tの時の年間取替燃料集合体数

② 建設費

i) 原子炉設備

炉心径の増減量(ΔD)については、燃焼度10万MWd/tの時の炉心径を D_{c0} として次のようになる。

$$\Delta D = \Delta D_{c0} \left[\sqrt[1.45]{\left(\frac{H_0}{H} \right)} - 1 \right]$$

ここで、

D_{c0} : 4 mとして評価

H_0 : 燃焼度10万 MWd/tの時の炉心の高さ

H : 炉心高さ

なお、指数 1.45 は、炉心の高さを小さくした場合の炉心特性のデメリット効果を加えたものである。

○発電原価の増減

原子炉設備の建設費に占める割合を一般的に考えられている15%及び10万MWd/tの時の炉容器径(D_0)を9mとして、発電原価の増減は次式で求まる。(コストは、物量に比例して増減すると考える。)

$$\Delta C \text{ 炉容器} = 0.15 \times 0.5 \times \left[\left(\frac{D_0 + \Delta D}{D_0} \right)^2 - 1 \right]$$

ii) 建屋 (BOP)

原子炉建屋の縦×横を50m×50mとして、BOPの建設費に占める割合を40%として発電原価の増減は、

$$\Delta C_{\text{BOP}} = 0.4 \times 0.5 \times \left[\left(\frac{50m + \Delta D}{50m} \right)^2 - 1 \right]$$

となる。

③ 稼働率

1日に交換可能な集合体数を8体、燃焼度10 MWd/tの時の稼働率を80%とすると、稼働率及びそれに伴う発電原価の増減は次のようになる。

○稼働率 (K)

$$K = \frac{292 + (60 - N) / 8}{365}$$

ここで、

N : 年間交換集合体数

○発電原価の増減

$$\Delta C_{\text{稼働率}} = (K - 0.8) \times 0.5$$

3) 評価結果

評価結果を図I-4に示す。図I-4では燃料サイクル費の金利を考慮していない。この場合の、燃料サイクル費の極少点は、燃焼度17万 MWd/t付近であり、建設費まで含めた場合には、燃焼度13万 MWd/t付近で最少となる。

燃料サイクル費に年8%程度の金利を考慮した場合、図I-4の燃料サイクル費の20万MWd/tの点は上側に8%程度上昇し、建設費も含めた最少点は燃焼度11万 MWd/t前後となる。

燃焼度10万 MWd/tの段階からさらに高燃焼度化(～20万 MWd/t)して、燃料サイクル費を大幅に低減するためには、たとえば、現用改良316鋼の3～4倍の高温強度で、スエリングに加え照射クリープも極めて小さい材料が必要となるが、このような材料は現実には考えられない。現実的には、高温強度は改良316鋼の1.5倍程度が限界と考えられ、その場合、図I-1のような炉心高さとプレナム長さの関係を維持するためには、被覆管の設計評価温度を650℃から数10℃下げざるを得なくなる。温度を徹底的に下げて、プレナム長さを小さくし、高燃焼度化の効果を高めることも考えられるが、内圧の高くなる分、被覆管の膨れ(照射クリープだけでも)が問題となって燃焼度が制限される上に、熱効率の低減等の経済的なマイナス効果が加わるため、経済性向上の上では、必ずしも得策とならないであろう。

また、燃焼度に対応して燃料要素長さ、集合体長さを増大させることが考えられるが、この場合、炉の建設費が増大するだけでなく、輸送容器、加工施設、再処理施設いずれにも経済性で大きな影響があり、集合体長一定とした場合と比べ、高燃焼度化の経済性効果が高く出るとは考えにくい。

4. まとめ

高燃焼度化とその経済効果については、単に燃料サイクルの観点からだけではなく、炉心設計、プラント設計も含めて総合的に評価することが重要である。本報告は、そのような観点から実施したものであるが、結果として、ある程度プラントは高温側の条件で、現状で見通せる材料の条件で評価した場合、建設費まで含めた総合的な経済性の最適点は取出し平均燃焼度で13万 MWd/t付近（ペレットピーク燃焼度で～20万MWd/t）にあることが評価された。

燃焼度13万 MWd/t程度では、なお、軽水炉の燃料サイクル経済に大きく見劣りするという見方もあるが、本報告では検討しなかった安全設計、安全評価等も考慮すれば、図I-4に示した以上に高燃焼度化が不利となる可能性が高い。

燃焼度12万～13万 MWd/tでも、炉心高さの増大、燃料要素の太径化、出力分布の軸方向も含めた平坦化等を積極的に図ることにより、150万kWeクラスの大型高速炉でも炉心を構成する燃料集合体数を250体（271本ピンハンドル）近くまで低減可能であり、燃料寿命6年を達成できる。これは、軽水炉（110万kWeクラスのPWRでは、装荷集合体数は、約200体（264本ピンハンドル））の高燃焼度化した炉心（燃料寿命4～5年）を想定しても、出力あたりの年間交換集合体数、燃料要素数で十分下回ることが可能であり、燃料サイクル費も下回るものと判断する。ちなみに、欧州の評価では、EFRの燃料（燃料要素径：8.65mm、炉心高さ：1.4m）仕様で、ピーク燃焼度20atom%（取出平均で12万～13万 MWd/tに相当）を達成できれば、加工、再処理を商業ベースで行うと仮定して、高速炉の燃料サイクル費は、軽水炉（4.4万 MWd/t）の約0.8倍になるとしている。³⁾

このような観点に立って、今後の研究開発については、炉心・燃料概念の最適化とともに、特に次の項目に重点を置くことが重要と考える。

○炉心材料の開発

高速中性子照射量 $4 \times 10^{23} \text{ m/cm}^2$ の達成を目標に、現状では不確かさの大きい酸化物分散強化型フェライト鋼に開発を絞るのではなく、改良オーステナイト鋼（含む高Ni鋼）についても、さらに改良、開発を重点的に行う。

○腐食の低減

実用化に向けては、高温、長時間の照射でも被覆管の腐食量を極力抑えることが、非常に重要となる。目標として、650℃（肉厚中心）、6年で腐食量100μm以下を達成できるよう、研究開発を進める。

○炉内構造物の中性子照射量制限値の緩和

炉心支持板等の中性子照射量制限値を緩和することにより、燃料集合体的の遮蔽構造を簡素化することは、その分炉心高さを大きく取ることが可能となるなど、経済的効果は極めて大きい。そのため、構造材料の照射試験の拡充とデータの合理的評価見直しを重点課題として取り組む。

(参考文献)

- 1) 第4回日欧燃料専門委員会(1988年9月開催)欧州側資料
- 2) 動燃内部資料(SN9410 87-166)
- 3) 第1回電事連—EFRUG情報交換会合資料,平成2年1月

表 I—1 高燃焼度化に関する影響評価

項目		問題点	対応策	経済的影響度
炉心設計	核的計算精度	高燃焼度での核データの不確かさは、たとえば、10万MWd/tと20万MWd/tとでは現状で2倍程度は異なると考えられる。これは例えば、核的計算誤差が5%から10%になる可能性を意味する。	燃焼の効果については、炉物理実験では評価できず、実際の高燃焼炉で高燃焼度を逐次達成しつつ精度の向上が図られる。	実用化段階においては精度の向上が図られると考えれば、経済的な影響は少ない。
	燃焼反応度	高燃焼度を達成するためには、燃焼に伴う反応度の低減を極力抑えることがまず重要となる。この場合、燃料のPu fissile割合を下げる方向となり、出力密度が低減して炉心体積が増大する。	出力密度の低減そのものは、燃料の長寿命化となり、燃料サイクルまで含めた総合的な経済性でマイナスとならないというのが、今日の一般的見解である。さらに、炉心高さ等について、炉心の大型化に対応した最適化を図る必要がある。	燃焼度が10万MWd/tから20万MWd/tになったとしても、明確な経済的な差異は評価できない。
	集合体出力変動	たとえば、均質二領域炉心で考えた場合、出力平坦化の観点から、内側炉心ではPu fissile割合が相対的に小さく、高燃焼度を目指した炉心では、燃焼とともに集合体出力が増大し、燃料被覆管温度も高くなるため、燃料の寿命が制限されることになる。	燃焼が進んでも燃料集合体の出力変動の少ないような炉心概念を検討する必要がある。ブランケットを著しく増やさずに増殖比を高めるとすると、炉心そのもので増殖することが必要となるが、この場合には燃料集合体の出力が燃焼とともに増大することは避けがたく、原子炉出口温度の低減等の対応が必要となる。	高燃焼度側の方が、出力変動が大きくなりがちであるが、経済性への影響を論じる程のレベルとは考えにくい。
燃料設計	FPガス内圧	燃焼度にほぼ比例してFPによる燃料要素内圧が増大するため、燃料設計上その分プレナム長さを大きく取る必要が出てくる。集合体長が制限されている場合には、炉心高さを小さくすることになり、炉心が横方向に広がる(集合体数が増える)ことになる。	影響を小さくするためには、プレナム長さを本来的に短くすることが重要であり、高温強度に優れた被覆管材料の開発・適用、被覆管温度の低減化等の対策が考えられるが、大きな効果は期待しにくい。	高燃焼度化に比例して燃料サイクル費が低減しない大きな理由はここにある。
	被覆管の腐食	被覆管の内面腐食、外面腐食は、基本的に時間(燃焼度)に比例して増大するため、特に、高燃焼度炉心のように被覆管温度が低減しない条件では、高燃焼度時の腐食量は著しいものとなる。たとえば、肉厚中心温度を650℃とすると、燃焼度10万MWd/tで300μ以上となることもある。	外面腐食の低減策としては、より精度の高い現実的な腐食式を作成するとともに、一次ナトリウム中の酸素濃度の低減(1PPM以下)に努める必要がある。また、内面腐食については、燃料のO/M比の低減、内面コーティング(低コストであることが必要)等により一定程度低減が可能となる。両者共通に効果のある対策は、被覆管温度を低減することである。いずれにしても、高燃焼度化にあつては、腐食量に応じてFPガスの効果以上に設計上プレナム長さを大きく取る必要がある。	腐食量が大きい場合には、温度を下げるか、プレナム長さを大きくしなればならず、経済的影響は大きい。
	燃料と被覆管の機械的相互作用(PCMI)	高燃焼度を達成するためには、低スエリング材を被覆管に使用することになるが、この場合、PCMIが高燃焼度までより厳しくなる可能性がある。	低スエリング材燃料で高燃焼度までの照射実績を得る必要があるが、PCMIについては燃料スミア密度を適切に設定することにより、本質的な問題にならないレベルとすることが可能と判断する。	高燃焼度化した方がより厳しいと推定されるが、経済的な影響は少ないものと判断する。
	燃料要素、集合体の変形	低スエリング材を炉心材料に用いても、照射クリープ等による変形は避けられない。高燃焼度化した場合、高速中性子照射量とその分多くなるため、変形量は大きくなる。	変形が照射クリープによるものだけであれば、燃料要素については、ピンピッチ、内圧、ラップ管については、ラップ管距離、バンドル圧損を適切に設定することにより、主要な寿命制限因子にはならないと考えられる。	ピンピッチ、ラップ管距離は若干の拡張で対応可能と判断でき、経済的影響は少ない。
その他	安全設計	燃焼度に応じて、FPがその分多量に炉心に蓄積されるため、高燃焼度側の方が安全評価上は不利となる。また、燃取系設備等の燃料破損時の対応も設備増加の方向となる。	高燃焼度で炉心に多量のFPが蓄積されるのは止むを得ない。その影響を少なくするためには、燃取系も含め、出来る限り燃料破損を起こさないように、燃料の使用条件、設備対応を設定する必要がある。	経済的影響はかなり大きいものと思われるが、定量的な評価は難しい。

This is a blank page.

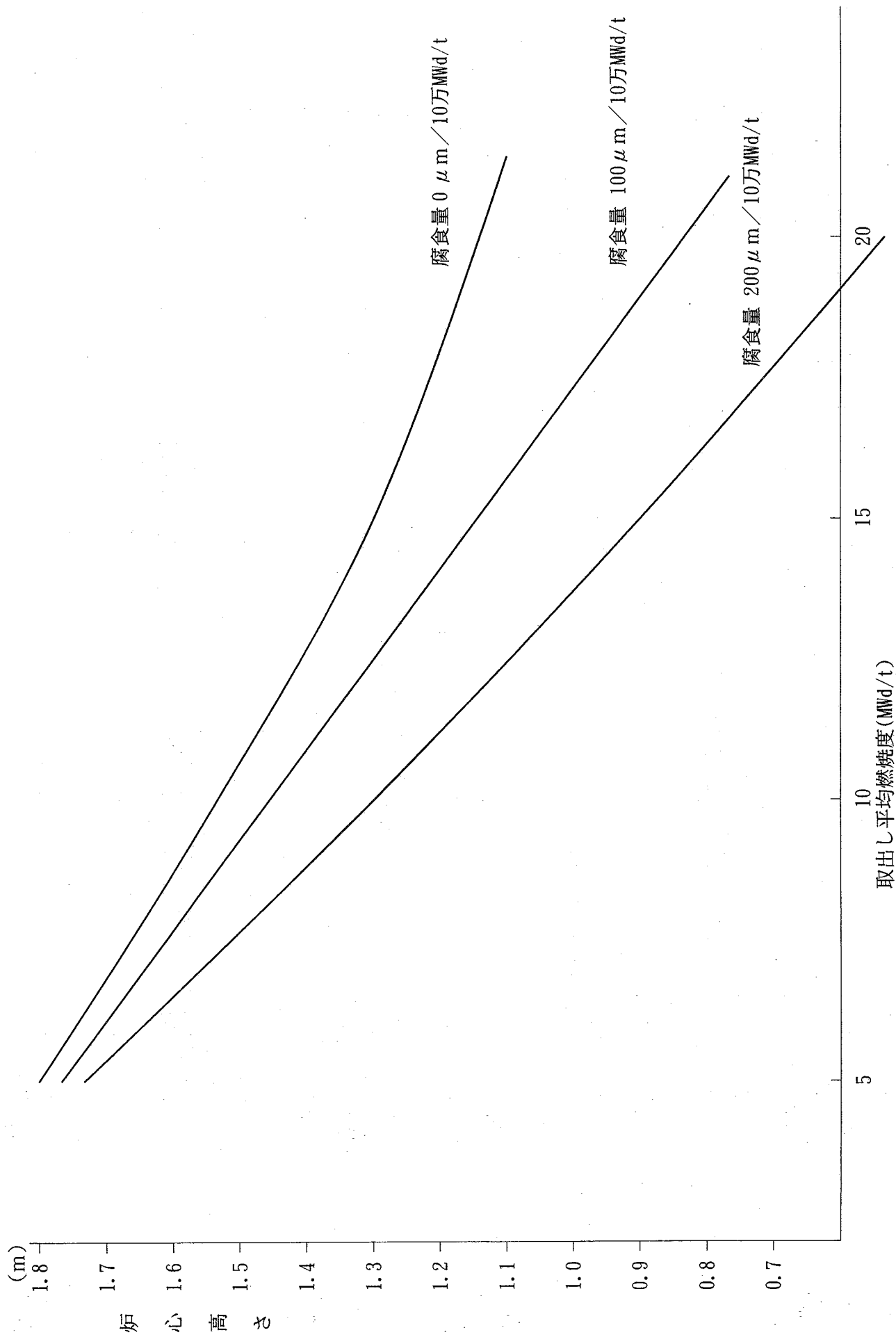


図 I-1 集合体長一定とした場合の炉心の高さ と 燃焼度の関係

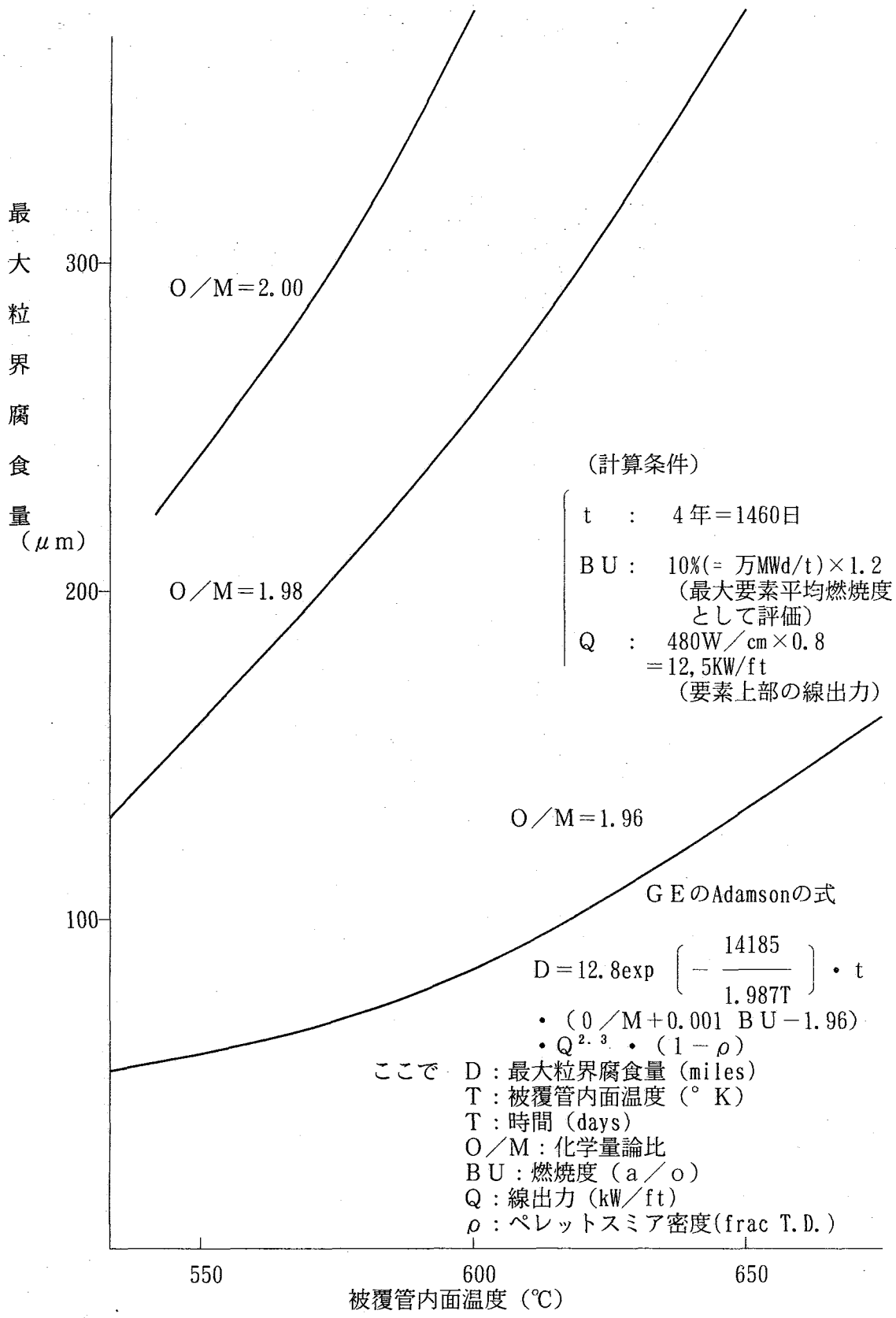


図 I—2 燃焼度10万MWd/t (取出し平均) あたりの最大内面腐食量評価例

(GEのAdamsonの式による評価)

最大Na腐食量

(μm)

Na 腐食式(PNC式)

$$CR = 3.837 \times 10^9 \cdot \exp(-1.875 \times 10^4 / (T + 273)) \cdot O_x \cdot K$$

ここで

CR : 腐食速度 (μm)

T : 使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)

O_x : 酸素濃度 (PPM)

K : 腐食データのバラツキを考慮した安全係数

$t < 5000\text{h}_r$ $k = 2.0$

$t > 5000\text{h}_r$ $k = 1.5$

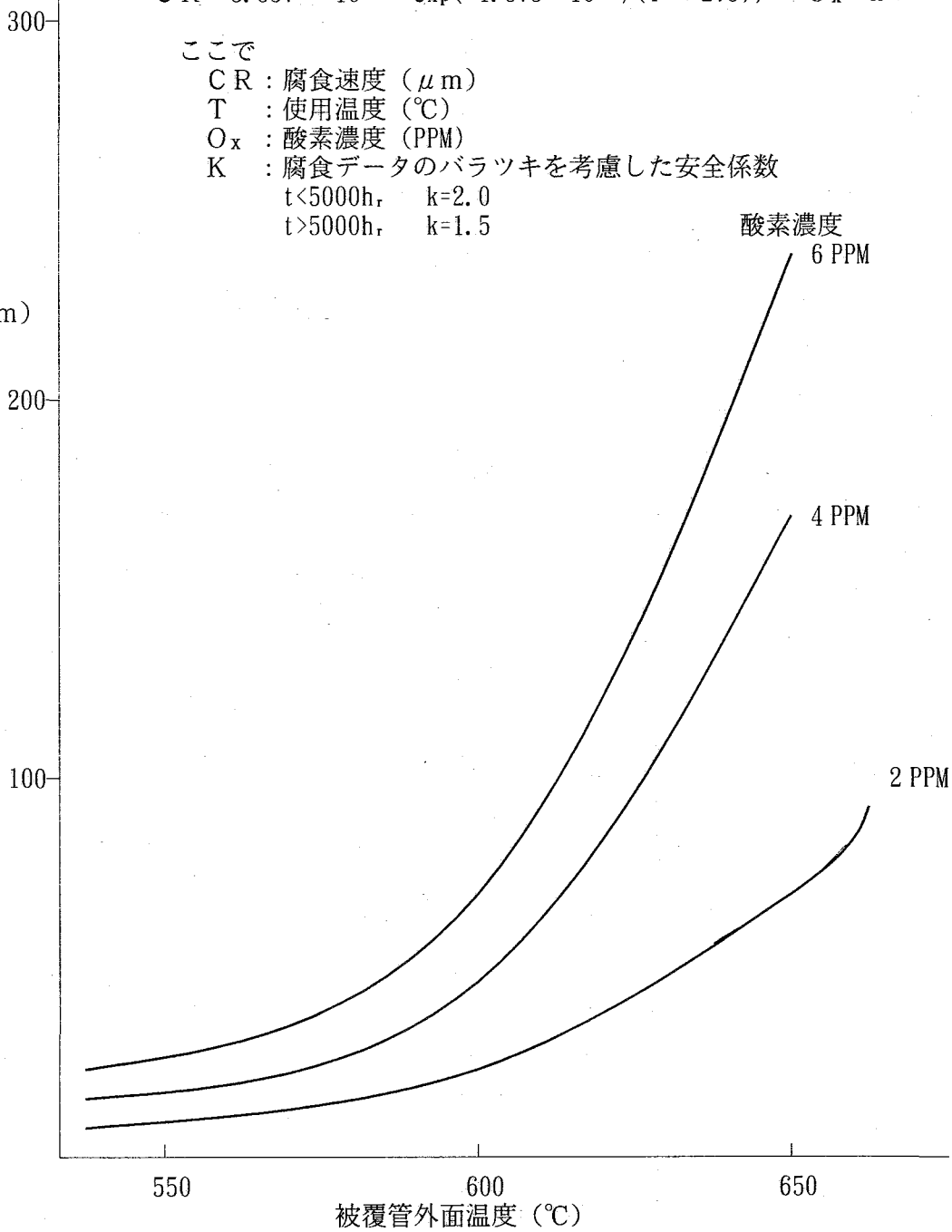


図 I — 3 燃烧度10万MWd/t (取出し平均) あたりの最大Na腐食量評価例
(PNC式……改良 316綱)

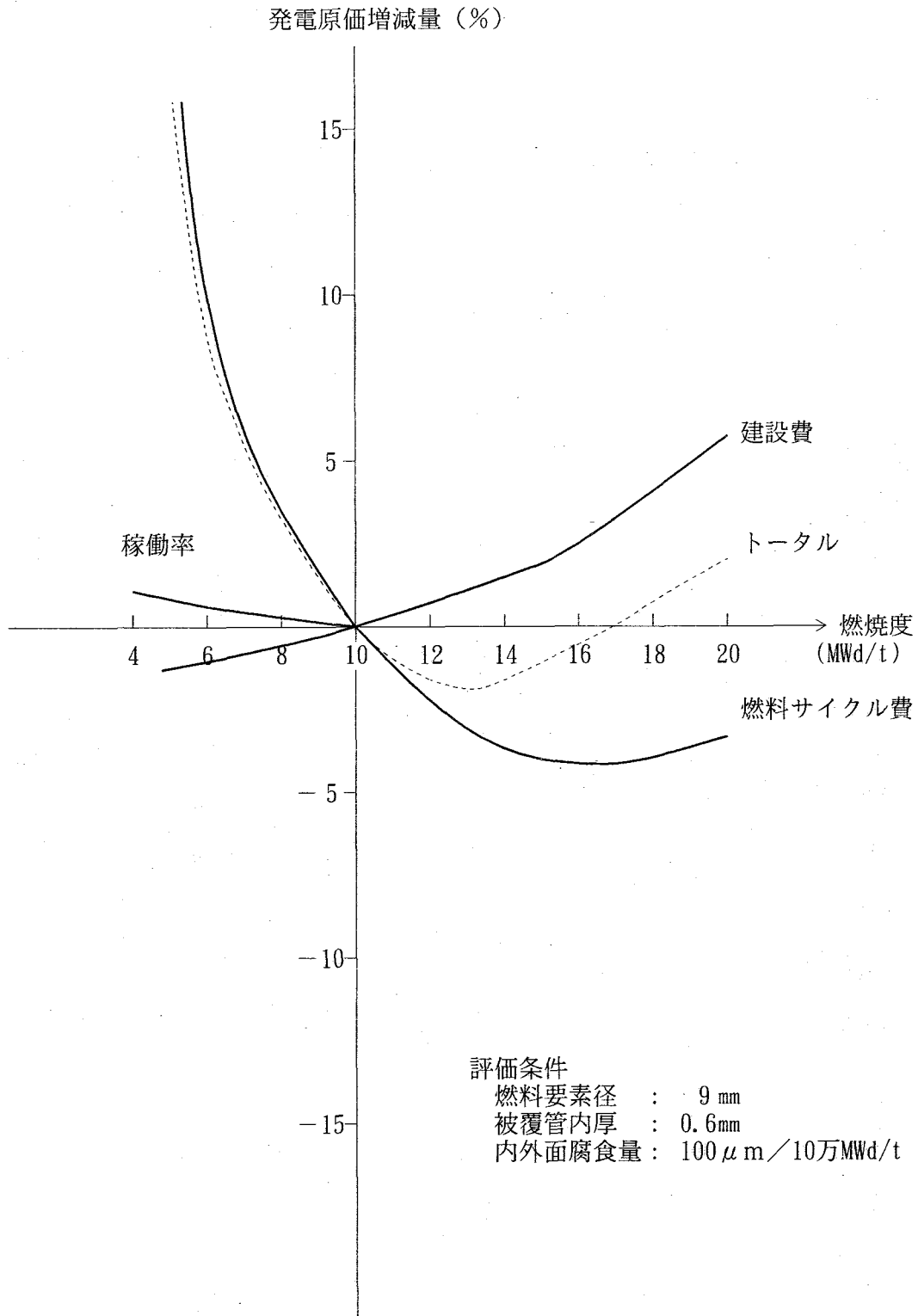


図 I-4 高燃焼度化とその経済効果
 (発電原価換算による評価)

II. FBR 実用化炉炉心・燃料概念に関する 経済性概略評価とその改善方向について

1. はじめに

プラント工学室を中心に実施しているFBR実用化炉の設計研究においては、FBR実用化の開発戦略策定の一環として、同時代の軽水炉を経済性で凌駕できる見通しを示す観点から、二次系削除等の各種新技術、新概念を導入したプラント概念の構築とその成立性の評価検討を進めている。

この中で、炉心・燃料概念については、建設費低減のためにコンパクトな原子炉容器（直径9 m以下）内に収納できるとともに、燃料サイクル費低減のために、集合体最大燃焼度20万 MWd/t（取り出し平均で約16万 MWd/t）を目標に設計検討を進めており、現在、取り出し平均燃焼度で約14万 MWd/tの炉心・燃料概念の成立性を評価している段階である。

本資料は、現状の炉心・燃料概念における経済性、特に燃料サイクル費について概略評価するとともに、その改善方向とそれに基づく研究開発の展開について基本的見解を述べたものである。

2. 現状実用化炉の炉心・燃料概念に基づく燃料サイクル費の見通し

現状実用化炉の炉心・燃料の仕様、性能を現行軽水炉（PWR）及びリファレンスプラントと比較して表Ⅱ-1に示す。

表Ⅱ-1より、実用化炉の年平均で交換する炉心燃料集合体数は約60体、ブランケット集合体は約9体、制御棒は約5体（炉心燃料集合体と寿命が同じとした場合—実際にはかなり難しい。）となる。一方、PWRについては、炉出力を比較のために150万kWeとし（約250体で炉心を構成）、取り出し平均燃焼度を5万 MWd/tとすると、年平均の交換炉心燃料集合体数は、約45体と実用化炉よりかなり少なくなる。

これらの交換体数と、既にPNC内で検討されている「FBR燃料サイクルの課題と展望」の資料¹⁾をもとに、燃料サイクル費を概略評価した結果を表Ⅱ-2に示す。

本評価にあたっては、以下の前提を設けている。

- 酸化物分散強化型フェライト型(ODS)は、従来の316鋼より、被覆管として、2～3倍(1本7万円高いとする)高価なものとして評価する。
- 上記「課題と展望」では加工単価、再処理単価の目標値を軽水炉比3倍、2.5倍としているが、実用化炉の炉心燃料1本あたりの重金属重量は、PWRの1/3.5である等、その仕様は、燃料加工費低減の観点から、なお改善の必要があることを考慮し、加工単価については軽水炉比3.5倍、再処理単価は、上記「課題と展望」で設定されている将来目標値を採用する。
- 輸送費については、実用化炉の燃料集合体の方が、PWRと比べ、径方向は若干小さいものの、全長は大きく、集合体サイズとしては、ほぼ同等と判断できるため、集合体1体の輸送費は軽水炉と同じとする。(熱、遮蔽的には、燃料の局在するFBRの方が厳しくなる可能性が高い。)
- Pu価値については、FBRの初期実用化段階の我が国の状況を考えた場合、商品化されたPuを購入するというよりも、軽水炉を有する電力会社が自前のPuを燃やすという考え方が強いと想定され、価格を燃料費に含めない。(増殖比1.08程度では、Pu価値を金利を含めて計算するとコストアップになる。)
- 金利については、軽水炉と実用化炉とで同じ率、支払い条件(燃料寿命に影響されないとする)とし、計算上は除いて評価する。
- 集合体1体あたりの燃料要素数は特に断らない限り一定(271本)とする。

表Ⅱ-2の概略評価結果からは、ほぼ年間交換集合体数に比例した形でFBR実用化炉の燃料サイクル費の方がPWRを上回っている。高速炉の建設費を現状で見通せる軽水炉比1.2倍を前提として、軽水炉と経済性で競合可能とするための燃料サイクル費の目標を同時代の軽水炉比0.6倍とすると、現状、プラント工学室で検討している仕様、性能では、約1.2倍であり、コスト半減化へ向けての大幅な改善を要することが分かる。〔I章で述べたように、欧州の評価²⁾では、EFRの燃料仕様(燃料要素径:8.65mm、炉心高さ:1.4m)でピーク燃焼度20atom% (取出平均で12万～13万MWd/tに相当)を達成できれば、高速

炉の燃料サイクル費は軽水炉（4.4 万Mwd/t）の約0.8 倍になるとしているが、比較する軽水炉の燃焼度レベル、炉心高さの相違、本評価ではODSのコストアップ分と制御棒のコストを見込んでいること等を考えれば、ここでの軽水炉比 1.2倍という評価はほぼ妥当なものと考えられる。]

3. 経済性改善方策

実用化炉の燃料サイクル費をPWRの 0.6倍とするためには、炉心・燃料概念構築の立場からは、年間交換集合体数を半減させるとともに、集合体の簡素化、低廉な部材の使用等をさまざまな角度から検討する必要がある。

(1) 年間交換集合体数の半減化

集合体数半減化を高燃焼度化だけで考えた場合、現状均質2領域炉心の炉心高さ等の形状が維持できるとしても、単純計算で、ピーク燃焼度40万 MWd/t 以上、ピークフルエンス $10 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ 、 $E > 0.1 \text{ MeV}$ 以上が必要となる。さらに、厳密に考えて、燃焼度が増加した場合のFPガス量、内外面の腐食量の増加を考慮すると、集合体長が変わらないとすれば、プレナムを長く、炉心高さを短くしなければならず、I章の『高燃焼度化とその経済効果について』で述べたように、燃焼度を2倍にしても年間の交換集合体数は、2/3 以下になることはなく、プラントの建設費の増大も加わって、燃焼度を著しく高くしても目標とする経済性を達成しえない。

年間交換集合体数の削減のためには、集合体1体あたりの発熱量を増大させることが基本であり、大幅な経済性向上のためには、高燃焼度化（ピーク燃焼度、ピークフルエンスの増大）だけでなく、

- ① 炉心レベルでの出力の平坦化
- ② 炉心高さの増大
- ③ 燃料要素径の増大

などの対応策を考えることが重要であり、これらをバランスよく最適化して経済性の向上を図る必要がある。

① 出力の平坦化

実用化炉の炉心型式は、現状検討段階では均質2領域であり、取り出し平均燃焼度／ピーク燃焼度比は、0.61前後である。均質炉心より出力平坦化が図れる軸非均質炉

心のこれまでの検討では、取出し平均燃焼度／ピーク燃焼度比で約0.7、同じ取出し平均燃焼度でピークフルエンスは約17%低減可能との結果が得られている。我国におけるこれまでの検討では軸非均質燃料はブランケットを除き燃料のPu富化度は1種類であるが、数種類を許容するなどして径方向、軸方向の平坦化をさらに積極的に図れば、ピーク燃焼度（あるいはピークフルエンス）あたりの取出し平均燃焼度はさらに改善が可能と考えられる。均質炉心に比べ改善率として25%程度を目標とすると、それが達成できれば年間交換燃料集合体数は約25%削減できることになる。

年間交換燃料集合体数を削減するということでは、たとえば均質炉心で中心部と比べ半分近くしか燃えていない最外周燃料集合体を3バッチから4バッチにするという考え方も非常に有効なものとなる。

径方向、軸方向の出力平坦化は、基本的に炉心設計の検討課題であるが、PWR、ATRで行っているような細かなウラン濃縮度（Pu富化度）の調整をFBRに適用した場合の燃料製造上の問題等を検討しておく必要がある。

② 炉心の高さの増大

炉心高さの増大は、その分集合体あたりの出力が大きくなるため、集合体削減に極めて有効である。現状PNC実用化炉においても、集合体長(4.5m)をほとんど変えずに、炉心高さを、たとえば1.2mから1.5mにすることは、プレナム長の増大を考慮しても、軸ブランケット長を上下30cmから10cmにすること等により、十分可能と考えられる。さらに遮蔽計算精度の向上、あるいは炉心支持板、炉容器の中性子照射量制限値の見直しにより、上下遮蔽体長さの短縮を図り、集合体長をほとんど変えずに、さらに炉心高さを増大することも可能と考えられる。

炉心高さを1.2mから1.5mに増大させた場合、装荷燃料集合体数を約20%削減できる。

なお、炉心高さについては、ボイド効果の増大に繋がるとして、チェルノブイリ事故等を配慮し、EFR（欧州統一炉）においてその低減のために現状設計仕様の1.4mを短縮する方向の検討が行われている³⁾が、炉心高さを大きくしても、軸方向あるいは径方向非均質炉心の採用によりボイド効果の低減は可能であり、また、仮に炉心高

さの短縮がボイド効果の低減にもっとも有効であったとしても、それにより、高速炉の利点である増殖性、燃料サイクル費の低減が損なわれることを考慮すると、ボイド効果の低減を炉心高さの短縮で対応することは得策ではない。ボイド効果については、ATWS等が生じないように、各種設備対応等を十分考慮することがまず重要と考える。

③ 燃料要素径の増大

炉心の出力密度を同じとした場合、燃料要素の太径化は高線出力化を意味し、その分燃料要素数、集合体数の削減が可能となる。高線出力化とならない場合でも、同じ燃焼度、フルエンスを達成できれば、要素径の2乗に比例して、燃料寿命が延びるため、年間の交換集合体数としては低減が可能となる。

たとえば、燃料要素径を9mmから10mmとした場合、線出力は同じでも、燃料寿命は24ヶ月×3サイクルから29ヶ月×3サイクルに向上可能となる。

燃料要素の太径化の限界は、炉容器径の制限とともに線出力とそれを規定する出力密度をどう設定するかにより決まってくる。一般に、高燃焼度化を達成するためには、燃焼反応度の関係からPu fissile を低減することが炉心設計の基本となるが、Pu fissile を下げ過ぎると、FBR特有の高い内部転換比により、燃焼とともに線出力が増大するため、Pu fissile の低減には限界がある。低Pu fissile 化による出力密度の低減については、燃料要素径でみて10mm程度が限界と考えられるが、その実現のためには、高線出力化(480W/cm)の達成とそのため部分的な中空ペレットの適用などの炉心設計上の工夫が重要である。

以上の改善策の中で、①の出力平坦化と②の炉心高さの増大により、各々25%、20%集合体数に関する改善が図られれば、現状実用化炉の炉心燃料集合体装荷数を403体から240体程度に低減できる。また、③の燃料要素径の増大により、燃料寿命を24ヶ月×3サイクルから29ヶ月×3サイクルとすることができれば、総合的に見て実用化炉の年間交換集合体数(炉心燃料)は約30体まで低減でき、現状実用化炉の半数となって、ピーク燃焼度、ピークフルエンスを増大させなくてもほぼ目標を達成できることになる。なお、この場合の取出し平均燃焼度は約17.5万Mwd/tとなるが、材料の照射特性を別にしても、内外面の腐食等でこの燃焼度を達成するのは現状技術のレベ

ルでは、かなり難しく、さらに優れた材料特性の実現等を図る必要がある。

これらの改善により、燃料集合体あたりの重金属重量は増加するが、燃料要素長、集合体長に大差なければ、加工費が大きく増大することはなく、軸ブランケットを適切な長さとするれば、再処理費も計算上大きく増大することはない。

建設費に対する影響については、装荷集合体数を大幅に低減でき（2～3列削減可能）、若干の要素太径化、炉心高さ増大にともなう要素間隙の増大を考慮しても、遮蔽体を含む炉心径を1 m近く小さくでき、原子炉容器のコンパクト化が可能となる。また、取扱集合体数が少なくなることから燃取系設備も全体にコスト低減化が可能となる。

(2) 集合体の簡素化、低廉部材の使用

集合体の簡素化については、実用化炉の仕様に沿って考えると、以下のような項目が考えられる。

① 上下反射体への B_4C 充填の見直し、除去

- ・炉心支持板、原子炉容器の許容中性子照射量の再評価、遮蔽計算精度の向上
- ・燃料集合体に付加する方向ではなく、固定遮蔽体の増強の可能性検討

② 溶接箇所での低減

- ・下部プレナムとの接続箇所—かしめ構造の検討
- ・ハンドリングヘッドとラップ管との接続箇所

③ ラップ管構造の簡素化

- ・パッド一体型加工の必要性の見直し
- ・パッドコーディングの必要性の見直し

いずれにしても、実用化炉の設計検討にあたっては、より高性能なものというよりも、過剰な性能は不要—コスト低減—という観点で集合体構造の設定を行ってゆく必要がある。

低廉部材の使用については、ODSと改良オーステナイト鋼（高Ni鋼）、フェライト

／マルテンサイト鋼とのコスト、性能の比較検討を行うことにより、その可能性を以下に考える。

① ODSと改良オーステナイト鋼（高Ni鋼）の比較

ODSについては、なお開発段階にあり、現状の被覆管としてのクリープ強度は、実用化炉の設計使用物性値（MA957の板材データより推定）よりもかなり劣っており、フェライト／マルテンサイト鋼より低いレベルである。将来的に、改良オーステナイト鋼（高Ni鋼）と同レベルのクリープ強度が達成できたとしても、コスト的に改良オーステナイト鋼より数倍高くなると予想されている。

表Ⅱ－1に示したように、ODSのコストが316鋼（＝改良オーステナイト鋼）より、被覆管1本あたり7万円高いとすると、集合体1体あたり約2,000万円のコストアップとなるが、このコストアップ分の燃料サイクル費に占める割合は、約9%となる。このコスト9%を燃焼度の増大で考えると、I章に示したように、燃焼度を2倍にしても、コスト的にはせいぜい1.5倍程度の向上であるから、9%のコストアップは燃焼度13.5%アップに相当する。この関係を改良オーステナイト鋼（高Ni鋼）で今日想定される寿命限界（取り出し平均燃焼度14万 MWd/t—平坦化炉心—、ピークフルエンス $4 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）を基準に図Ⅱ－3に示す。これより、ODS被覆管1本のコストアップが7万円とすると、その取り出し平均燃焼度16万 MWd/tと改良オーステナイト鋼燃料の14万 MWd/tの燃料サイクル費は、ほぼ同等となる。したがって、前述した実用化炉の炉心・燃料概念を大幅に改良した平坦化炉心（取り出し平均燃焼度約17.5万 MWd/t）の燃料サイクル費が高燃焼度化したPWRの0.6倍とした場合、同様な仕様で取り出し平均燃焼度14万 MWd/tを達成できれば、改良オーステナイト鋼燃料でも、PWRの0.8倍程度の燃料サイクル費とすることが可能となる。

② ODSとフェライト／マルテンサイト鋼の比較

ODSの目標強度と現状フェライト／マルテンサイト鋼の強度からは、達成可能な原子炉出口温度で見て、550℃と500℃の差が生じる。この原子炉出口温度の差による経済的効果は、

○熱効率の差：約2%（燃料集合体数で約5%の差）

○建設費の差：約3%（図Ⅱ-4参照）

であり、発電費の中で、建設費、燃料サイクル費の占める割合を50%、25%とすると、上記差は、燃料サイクル費に全て換算したとして約11%となる。既に述べたように、ODS被覆管1本7万円のコストアップは、燃料サイクル費で9%のアップに相当することから、その11%は、ODS被覆管1本あたり、8.5万円のアップ（被覆管1本で12万円程度）に相当する。

原子炉出口温度500℃と550℃では、前者の方がSG等の機器の信頼性が大きいこと、あるいは、材料、構造で簡素化を図れることを考慮すると、ODSが総合的に経済性でフェライト/マルテンサイト鋼より上回るためには、

○クリープ強度：フェライト/マルテンサイト鋼の2倍以上

○被覆管1本あたりのコスト：フェライト/マルテンサイト鋼の2倍以下

を開発目標とする必要がある。いずれにしても、材料の性能はともかく、ODSの製作コストが下がらない場合には、総合的な経済性で、ODSの方が著しく優れているとはいえなくなる。

4. リファレンスプラントの炉心・燃料概念の改善

動燃において、2000年以前の着工を前提にそれまでに見通せる技術の組合せで検討を進めてきたリファレンスプラントについては、その年間交換炉心燃料集合体数は、表Ⅱ-1より明らかなように、85体であり、実用化炉と同じ150万kWeで換算すると127体となる。燃料サイクル費が、集合体数に比例するとすれば、リファレンスプラントでは、150万kWe換算で313億円/年となるが、リファレンスプラントでは、ODSではなく改良オーステナイト鋼を用いること（約10%減）、集合体全長が3.5mと実用化炉より1m短いこと（約10%減）を考慮すると約250億円/年となる。

リファレンスプラントと同時期（2000年頃）の軽水炉の取り出し平均燃焼度は、軽水炉の高燃焼度燃料の開発状況を考えると5万MWd/tを十分達成していると考えられ、その場合、既に述べたように150万kWe換算のPWRの燃料サイクル費は、111億円/年と推定できることから、リファレンスプラントの燃料サイクル費は、軽水炉比2.25倍と計算できる。

リファレンスプラントの段階においても、燃料サイクル費は、同時代の軽水炉を凌駕することが望まれるが、それを達成するためには、改良オーステナイト鋼を使用することを前提とした場合、既に述べたようにその寿命限界と考えられるピークフルエンス 4×10^{23} n/cm², E > 0.1MeVまで高燃焼化し、かつ

- 出力の平坦化（取り出し平均燃焼度／ピーク燃焼度：0.7 以上）
- 炉心高さの増大(1.5m以上)
- 燃料要素の太線化（～10mm）

を積極的に採り入れる必要がある。この条件において、線出力 480W/cmとすると、軽水炉比 0.8倍、430 W/cmで軽水炉比 0.9倍と計算できる（燃料サイクル費の計算条件は、実用化炉と同じとする）。

この場合、炉心は 195体程度の炉心燃料集合体で構成でき、燃料要素の太径化を考慮しても60cm程度炉心径を小さくでき、集合体長が1～1.5 m伸びても建設費の増加とはならない。

5. おわりに

以上述べた点を一言でいえば、燃料サイクル費についても建設費と同様に軽水炉を経済性で上回るためには、物量（＝燃料要素数）で下回っていることが基本的に必要である。

この観点に立って、今後の炉心・燃料概念の検討にあたっては、可能な限り、

- 炉心の平坦化
- 炉心高さの増大
- 燃料要素径の増大

を図った上で、当面の目標として、改良オーステナイト鋼（含む高Ni鋼）に対し、以下の性能を確保することが必要となる。

- ピークフルエンス： 4×10^{23} n/cm², E > 0.1MeV
- 取り出し平均燃焼度：14万Mwd/t（平坦化炉心）
- 年間交換燃料集合体数：150万kWe 級で36体、100 万kWe 級で24体以下
(燃料要素数:271本/1体)

★燃料サイクル費達成レベル：軽水炉比0.8倍

一方、高強度フェライト鋼（含むODS鋼）については、改良オーステナイト鋼を上回る以下の目標を達成することが期待される。

○ピークフルエンス： $6 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{ MeV}$

○取り出し平均燃焼度：17.5万MWd/t以上

○年間交換燃料集合体数：150万kWe級で27体以下

★燃料サイクル費達成レベル：軽水炉比0.6倍

これらの目標については、照射特性（スエリング、照射クリープ）の改善に加え、高温強度並びに内外面腐食性の大幅改善により可能となるものであるが、さらに高温化プラントで実現させるというような条件が付いた場合にはかなり難しくなると考えられ、原子炉出口温度との経済的な最適化が必要となる。また、ODS鋼の開発、内面腐食低減のための内面コーティング開発にあつたては、そのコストが適正なものとなる必要があり、その観点からの開発努力も重要である。

なお、燃料サイクル費についてさらに高いポテンシャルを与える概念として、ベント型燃料、ダクトレス集合体などがあるが、これらについては、安全論理の検討を進めた上で、その結果をみて具体的な炉心・燃料概念の検討を行うべきであろう。

（参考文献）

- 1) 動燃内部資料（SN1450 89-004）
- 2) 第1回電事連—EFRUG情報交換会合資料，平成2年1月
- 3) U. K. Wehmann et al. 'Core Optimization Studies for the European Fast Reactor EFR', Proceedings of International Conference on the Physics of Reactors, April 23-27, 1990, Marseille, France

表Ⅱ—1

PNC 実用化炉，現行軽水炉（PWR）の炉心・燃料仕様，性能

	PNC 実用化炉	軽水炉(PWR) - 現行 -	PNC リファレンス炉
出力，電気/熱	150万kWe/375万kWt	116万kWe/342.3万kWt	100万kWe/251.7万kWt
運転サイクル長さ	2年	1年	15ヶ月
燃料交換バッチ数	3バッチ(フランクットは4バッチ)	3バッチ	3バッチ(フランクットは4バッチ)
稼働率(想定)	90%	78%	87%
増殖比	1.07~1.08		1.08
炉心高さ	120cm	366cm	100cm
上部 フランクット高さ	30cm/30cm	—	20cm/20cm
炉心等値直径		3.37m	3.68m
燃料寿命	6年	3年	4.16年
ピーク燃焼度	約220,000MWd/t	約39,000MWd/t	約14,000MWd/t
取り出し平均燃焼度	140,000MWd/t	33,000MWd/t	91,000MWd/t
高速中性子照射量(ビーク)	$5.1 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$	—	$2.85 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$
最高線出力	470W/cm	431W/cm	430W/cm
燃料要素径	9.0mm	9.5mm	8.3mm
被覆管肉厚	0.6mm	0.57mm	0.45mm
被覆管材質	ODS	ジルカロイ-4	改良オーステナイト鋼
燃料ペレット径	7.62mm	8.19mm	7.22mm
燃料密度(スリ密度)	92%(87.8%)	95%(91%)	92%(87.8%)
集合体構造	ワイヤ-スパー型-ラップ管付	グリッド型-格子配列 (17×17)	ワイヤ-スパー型-ラップ管付
集合体燃料要素数	271本	264本	271本
集合体長さ	4.5m	約4.1m	3.5m
集合体径方向サイズ	対面間距離 185.4mm 対角 " 214mm	214mm×214mm	対面間距離 173.8mm
核分裂性Pu富化度 (ウラン濃縮度)	11.23Wt%(内側) / 14.69Wt%(外側)	(U- ²³⁵) 3.2%	11.09Wt%(内側) / 13.4Wt%(外側)
核分裂性Pu装荷量	6.79t	(U- ²³⁵) 2.3t	4.35t
燃料重量: 炉心/軸方 /径方	53.8t/27.8t / 22.3t	89t	35.5t/14.4t / 14.0t
装荷集合体数	403体(フランクット 78体)	193体	355体
交換集合体数(年平均)	60体(フランクット 9体)	50体	82体(フランクット 16体)
交換燃料要素数 (年平均)	16,260本	13,200本	22,222本
燃料要素1本あたりの 総発熱量	$180 \times 10^4 \text{ kWh}$	$177 \times 10^4 \text{ kWh}$ { 取り出し平均5万 MWd/tの場合 } $268 \times 10^4 \text{ kWh}$	$86 \times 10^4 \text{ kWh}$

表Ⅱ—2 実用化炉の燃料サイクル費概略評価

軽水炉 (PWR)	燃料製作費	輸送費	再処理費, 廃棄物処理費	総額
<ul style="list-style-type: none"> • 150万kWe相当 • 取り出し平均燃焼度 5万MWd/t 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 現状PWRの燃料集合体の製作費は1.1億円/1体。 ○ 高燃焼度化(5万MWd/t)を考慮して15%upで計算する。 1.25億/1体×45体≒56億円 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 新燃料の輸送費(0.4万円/kgHM) 45体で0.8億円。 ○ 使用済燃料の輸送費(6万円/kgHM) 45体で12.5億円。 合計で、約13億円 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 再処理費(18万円/kgHM) 45体で約37億円。 ○ 廃棄物処理費(2.25万円/kgHM) 45体で約4.7億円。 合計で、約42億円 	<p>約111億円</p>
<p>FB実用化炉</p> <ul style="list-style-type: none"> • 150万kWe • 取り出し平均 	<ul style="list-style-type: none"> ○ ODS被覆管1本あたりは、従来の316鋼より7万円高いとして評価。 7万円/1本×271本 ≒1,900万円 +溶接に新技術 ODSによるコストアップ ≒2,000万円 ○ 加工単価(ODS分は除く)は軽水炉より3.5倍高いとして評価(図I—1参照)。 ○ 炉心燃料集合体については、重金属重量/1体≒133.3kgであり、1体あたりのコストは、133.3kg×8.72万円/kg ×3.5 +2,000万円 ≒7,230万円/1体であり、60体で約36億円。 ○ プランケットは、3,000万円/1体、制御棒1億円/1体とする。 合計で約44億円 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 新燃料の輸送費 1体あたり軽水炉と同じとしてプランケットも含め、13億円。 ○ 使用済燃料の輸送費 炉心、プランケット計69体で、約17億円 合計で、約18億円 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 再処理費(炉心燃料, 軸方向プランケット) 単価を軽水炉の2.5倍として評価(図I—2参照)。 60体で、約55億円。 ○ 廃棄物諸多費(炉心燃料, 軸方向プランケット) 単価を軽水炉の3倍として評価。 60体で、約8.2億円。 ○ 径方向プランケットは、1体あたり炉心燃料の半額で計算。 9体で、約5.5億円。 合計で、69億円 	<p>約131億円</p>

* 燃料サイクル費の加工単価は特に設定したものを以外はSNI450 89-004 「FBR 燃料サイクルの課題と展望」に基づく。

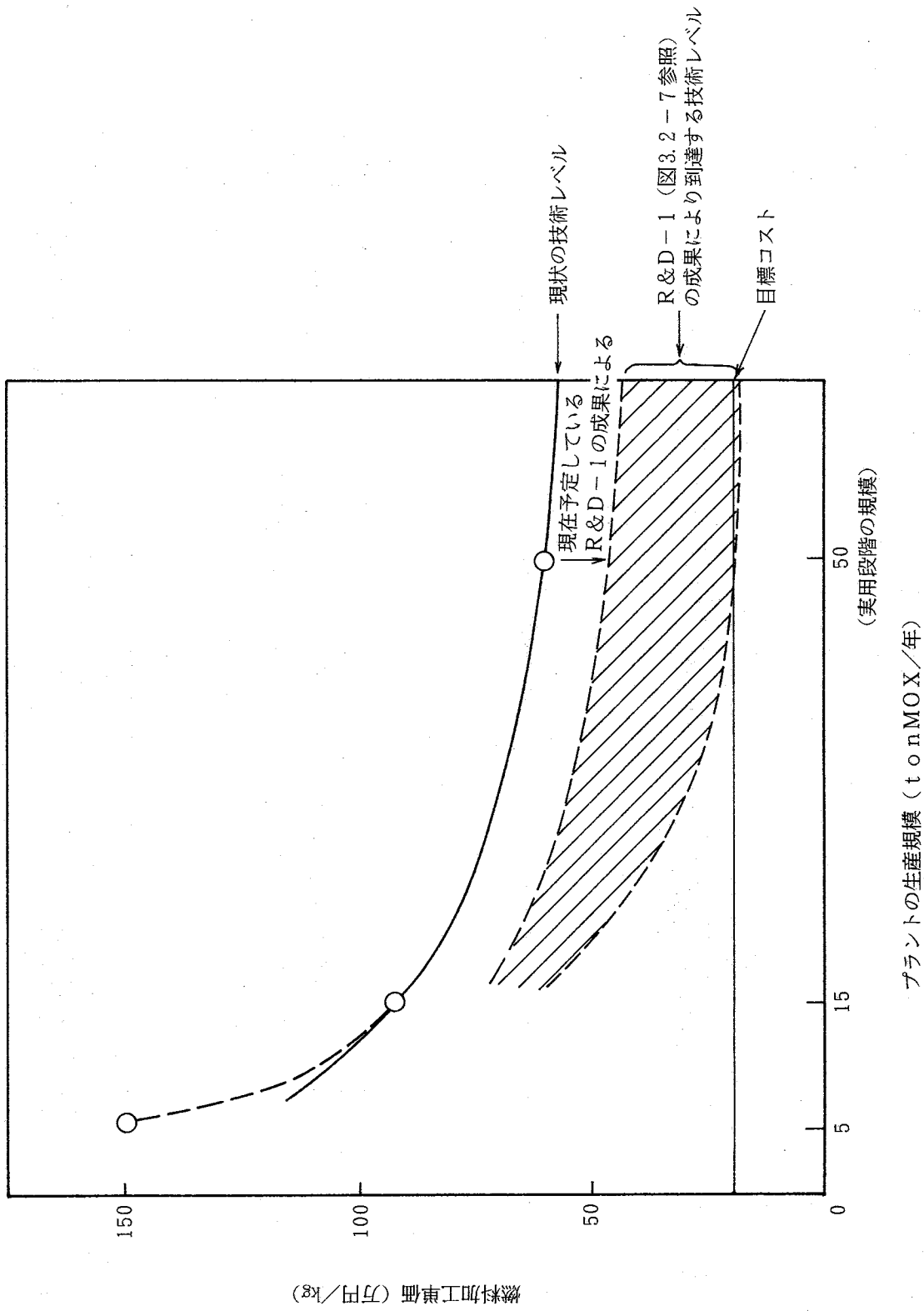


図 II - 1 燃料加工目標コストと研究開発成果の関連

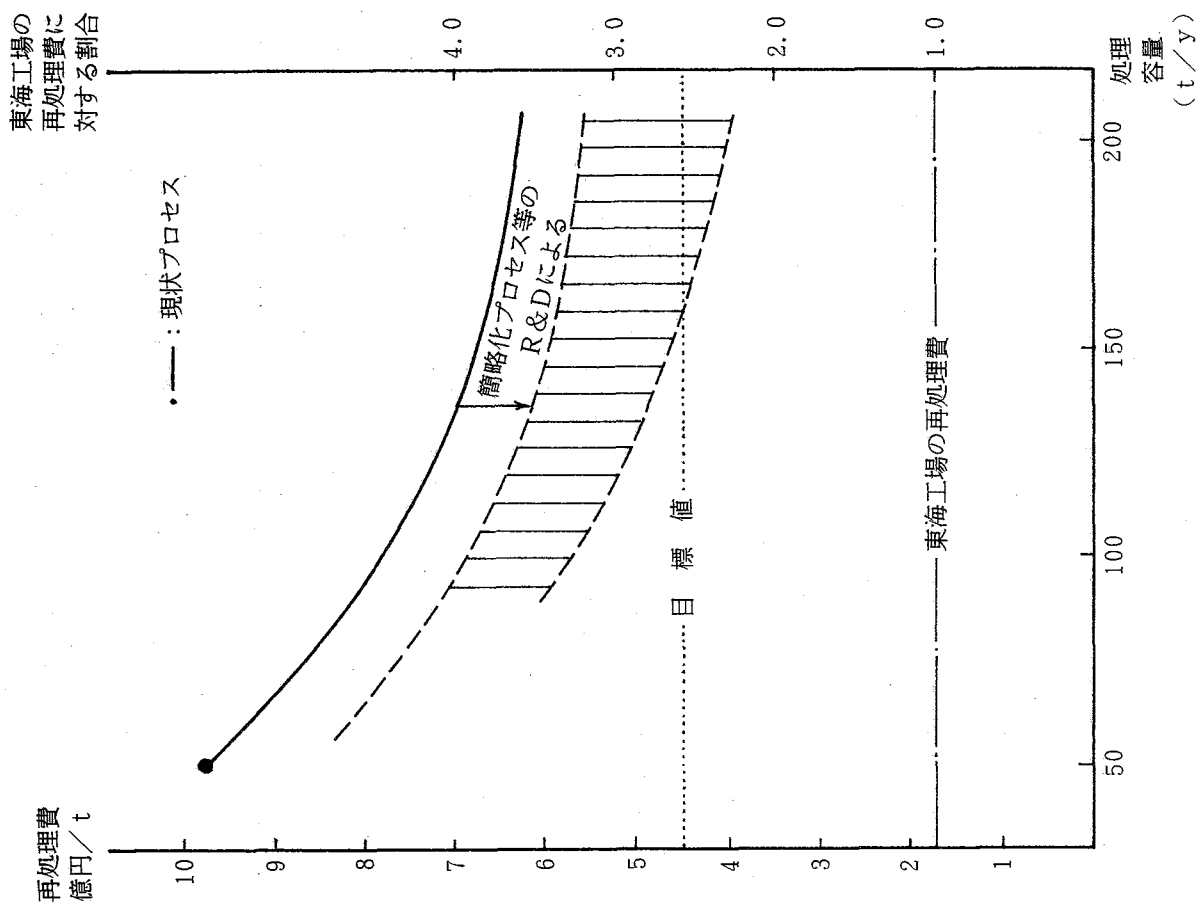


図 II - 2 FBR再処理コスト低減見通し

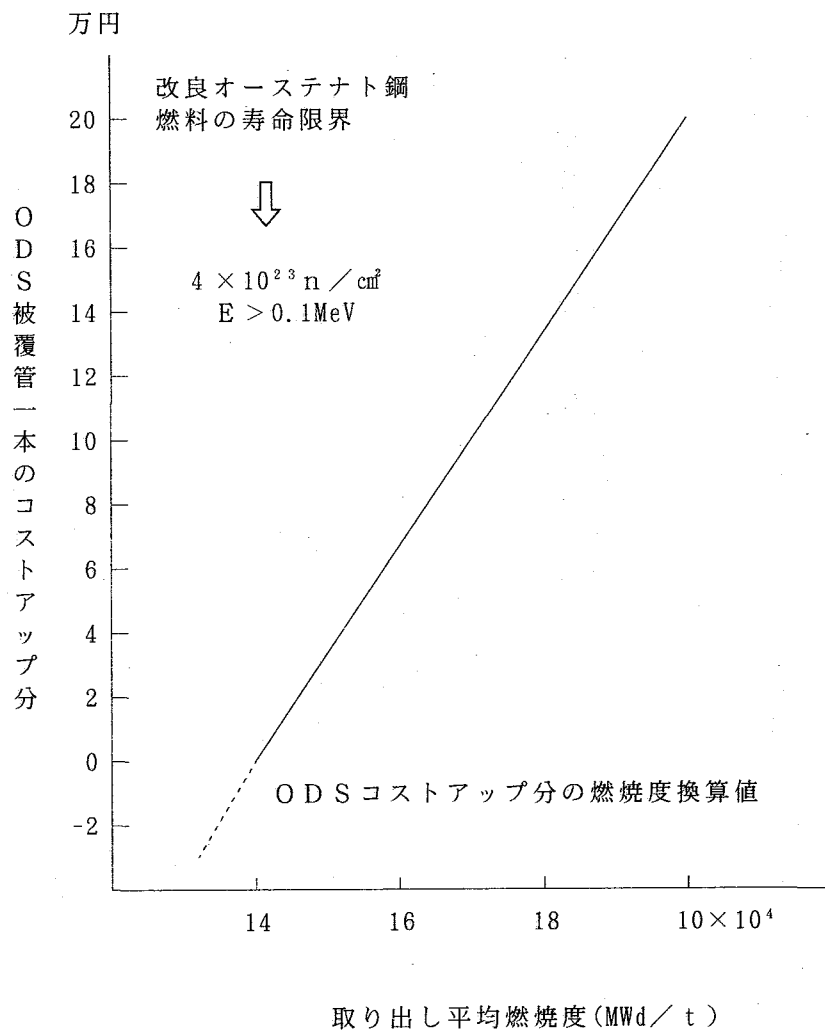
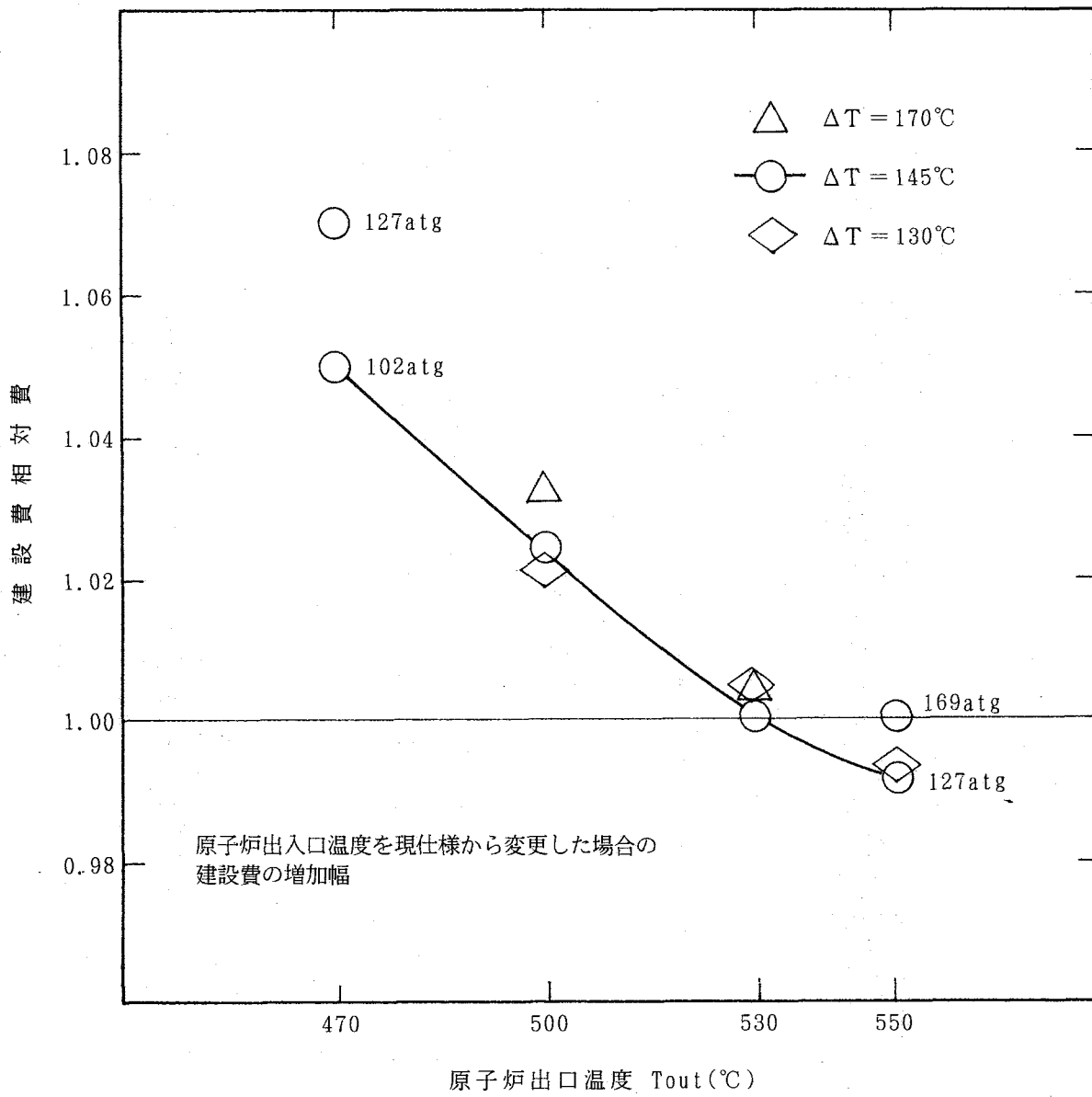


図 II — 3 改良オーステナイト鋼と比較しての
ODS のコストアップとその燃焼度換算



図Ⅱ-4 原子炉出口温度と建設費

Ⅲ. 新型燃料を用いた炉心・燃料概念と経済性の比較

1. はじめに

新型燃料を用いたFBRの設計研究については、FBRの実用化段階を見通して、

- ・各新型燃料の特徴を活かした高性能で経済性（建設費，燃料サイクル費）に優れた炉心・燃料概念の設定
- ・酸化燃料FBRとの総合的な優劣の比較

を行うことを主要な目的としている。

プラント工学室においては、昭和63年度、平成元年度と燃料開発会議の新型燃料分科会の全体調整の基に各種新型燃料に対し、炉心・燃料概念の検討を実施してきた。昭和63年度には100万KWe級、また、平成元年度には150万KWe級の大型炉を検討対象として設計研究を進めてきており、全体的な新型燃料の設計技術の進歩が図られているものの、燃料の照射特性を十分考慮していないこと、燃料仕様の設定が、圧損あるいは増殖比等を基準に定めているため、経済的に最適なものとはいえないことなど、本来的な問題点がなお幾つか残されている。

以下に概念検討に反映すべき各種新型燃料の照射挙動の特徴とそれを採り入れて可能な限り経済的な最適化を図った炉心・燃料概念をベースに経済性の比較検討を試みた。

2. 新型燃料の照射挙動の特徴

表Ⅲ—1に各燃料の設計評価上重要な照射挙動の特徴を示す。これらの特徴を踏まえて、技術的な成立性と経済性の向上を図ったFBR実用化へ向けての炉心・燃料概念検討にあたっての考え方を併せて以下に示す。

① 窒化物燃料

窒化物燃料は、高線出力化が可能でFPガス放出が小さいなどの利点はあるものの、燃料のスエリングが大きくかつ燃料がクリープ変形しにくいいため、PCMIが大きく、それによる被覆管の照射クリープ等による変形も大きくなる。

照射クリープ等による変形については、別添1に示したEBR-IIの照射データから分るように、燃料スミア密度80%程度でも外径増加率 $\Delta D/D$ は、0.48%/atom%となる。この条件で取り出し平均燃焼度20万MWd/tの場合のピーク燃焼度30万MWd/t(約30atom%)の時の外径増加を計算すると $\Delta D/D \approx 17\%$ となる。外径増加 $\Delta D/D$ の制限量は、大型MOX炉の設計研究で採用されている3dw(dw:ワイヤ径)の時で約5%であり酸化燃料の集合体設計条件のままでは、ピーク燃焼度13万MWd/tが限界となり、取り出し平均燃焼度は9万MWd/t以下となる。

一方、別添1のEBR-IIのデータをPCMIの観点から見ると、EBR-IIでの同種の被覆管(316鋼)を用いたMOX燃料要素の照射クリープによる外径増加は、燃焼度10万MWd/tでも0.4%(被覆管スエリングなしでスミア密度85~87%の場合—WSA-3のデータ等)程度であり、別添1のデータは、窒化物燃料の内圧(ガス内圧+PCMI)はMOXの約8倍大きいことを表している。燃料のスミア密度を70%程度に下げた場合は、多少PCMIが低減するものの5倍程度となる。EBR-IIのデータは、相対的に大型炉に比べ、高速中性子照射量/燃焼度の比が小さく、照射クリープによるPCMI緩和が小さく、大型炉では多少割り引いて考える必要がある。いずれにしても燃料被覆管のクリープ寿命が温度と応力で決まることを考慮すると、窒化物燃料はMOXよりも高燃焼度化、高温設計(原子炉出口温度高温化)に適さない燃料であると判断せざるを得ない。

これらにより導かれる窒化物燃料を用いた炉心・燃料概念は、MOX燃料と比べ相対的に高燃焼度化、高温設計に適さないものの、

- ・ 高線出力化が可能なことによる燃料要素の太径化
- ・ FPガス放出が少ないことによるプレナム長短縮と炉心高さの増大

が可能となり、燃料要素体数の削減による燃料サイクル費の低減、原子炉容器のコンパクト化による建設費の低減が可能となる。

なお、この間のプラント工学室の検討では、窒素は全て N^{15} としているが、その濃縮の技術的、経済的見通しを早急に明らかにする必要がある。(装荷重量だけではなく製造工程での使用量も考慮)

② 炭化物燃料

炭化物燃料の照射挙動は、基本的に窒化物燃料と類似している。別添2に示すように、炭化物燃料の方が窒化物燃料よりFPガス放出率は若干高いのに対し、 $\Delta D/D$ （照射クリープ変形等）は逆に小さいなどの相違はあるもののMOXと比べれば、類似したレベルと判断でき、従って設計対応上も窒化物燃料より若干高燃焼度化の可能性があるものの基本的な差異はないと考えられる。

なお、窒化物と同様、PCMI対策として初期ギャップ幅を大きくしてNaボンドとすることが考えられるが、再処理（ピューレックス法）には適さないため、Naボンドは採用困難と判断する。

③ 金属燃料

金属燃料については、米国EBR-IIでの研究開発において3元合金（U-Pu-Zr）でスミア密度を75%程度とすることにより、FPガス放出量を促進し、燃料のスエリングを抑えて、MOX燃料と大差ないPCMIを実現している。低スミア密度を前提とした場合の金属燃料のMOXとの比較の上での設計対応上の特徴は以下の通りと考えられる。

- ・ 低スミア密度（ギャップ幅大）燃料の熱的設計裕度を確保するためにNaボンド型燃料要素とする方向にある。
→ 上部プレナムとなるため燃料要素が長くなる。
- ・ 低スミア密度化により、MOXと同程度のPCMI+ガス内圧となった場合でも低スエリング材を前提としての照射クリープによる燃料要素外径変化は、燃焼度あたりの高速中性子照射量が1.3倍程度多い金属燃料の方がその分不利となる。
- ・ 金属燃料については共晶が大きな問題であり、基本的に低温設計となるため燃料寿命はクリープ損傷よりも要素変形で制限される可能性が高い。

3. 経済性評価のための適正な炉心・燃料概念と経済性の概略比較

①基本的考え方

炉心・燃料概念の検討にあたって、経済性評価に耐えうるレベルとするためには、経済性に影響の大きい各燃料の特徴を明確化し、その特徴を概念検討に的確に反映する必要がある。

欧州統一炉（E F R）等高速炉の経済性を目指した今日的な炉心・燃料設計では、建設費低減の観点からの炉容器径のコンパクト化と燃料サイクル費低減の観点からの燃料要素数（年間使用数）の削減を重視する傾向となっている。具体的には、高燃焼度化、燃料要素の大径化、炉心高さの増大、高性能遮蔽体（反射体）の使用などである。

燃料要素の削減には、高燃焼度化が効果的であるが、燃焼度は炉心材料のスエリング特性等により制限され、材料の問題が解決されたとしても、酸化物燃料では燃焼とともに多量の核分裂生成ガスが燃料ピン内に蓄積されること及び内外面の腐食量が著しくなること等により、制限されることになる。

このような問題に対し、窒化物燃料は、酸化物燃料に比べて重金属密度を高く取れること、優れた熱伝導度により高線出力化が可能であることというこれまで一般に認識されてきた特徴に加え、核分裂生成ガスの放出が少ないこと、内面腐食が本来的に少ないことなど、P C M I が大きいという問題はあっても、酸化物燃料にない優れた特性があり、上記のような経済性向上を指向している欧州では、金属燃料よりも窒化物燃料により魅力を感じるのは十分理解できるところである。

一方、金属燃料については、米国において安全性とのからみで小型高速炉用燃料として検討が進められており、EBR-II等の経験により、燃料の高燃焼度化の見通しも得られつつある。経済的な面で金属燃料の魅力は、加工、再処理が、酸化物燃料よりも極めて低コストで実現できる可能性を有することであるが、実績の全くない状況で、電中研等の発表¹⁾にあるように、加工・再処理の施設規模が、現状原型プラントレベルの酸化物燃料施設の1/8になるといっても、そのデータの信頼性は高くない。

金属燃料については、これまでP C M I、共晶による寿命制限が大きな問題と考えられてきたが E B R - IIにおける研究開発の成果として、燃料の低密度化とZrを加えた3元合金によりかなりの部分解決されてきている。しかしながら、今日のP R I S M炉の設計からも明らかのように、なお、共晶の問題から、原子炉出口温度は、通常の酸化物燃料炉と比べ50～60℃低く設定する必要がある、また、融点が低いため、酸化物燃料と同等の線出力を達成するためにNaボンドを採用する等の対応が必要となる。Naボンドとした場合は、上部プレナムとせざるを得ず、同じ燃料要素長で考えた場合には、その分炉心高さが小さくなる。温度を下げた場合プレナム体積を小さくできるという考え方も可能であるが、内圧を高くした場合には、燃焼度当たりの高速中性子束が酸化物燃料よりも3～4割大きいため、燃料要素の外径変化が著しいものとなり、その面からの寿命制限を受けることになる。炉心高さが小さ

くなっても、出力密度を高くすれば、炉容器径の増大を抑えることができるが、その分燃料要素は細径となり、燃焼度は同じでも燃料寿命は短くなり、燃料サイクル費が増大する。

いずれにしても、金属燃料を大型炉に適用した場合には、酸化物燃料と比べても炉心高さは小さく、燃料要素数（年間平均使用数）が著しく多くなるため、EFRで指向しているような経済性追求の観点からは相反するものとなる。

②概略比較評価

以上述べた基本的な考え方をもとに、これまでの炉心・燃料概念の検討結果²⁾を見直し、酸化物燃料と新型燃料の経済性比較に必要な諸量を概略評価する。

(i)比較にあたっての前提条件

・燃焼度

取出平均燃焼度20万MWd/tとした場合、現状では非現実的な存在感のない設計となってしまうため、ここでは、EFR等の設計を参考にペレットピークで20at%（取出平均燃焼度13万MWd/t程度）で考える。

・集合体高さ

集合体長については、輸送容器、燃料サイクル各施設の取扱い制限値により規定されてくるが、逆にその制限以下であれば、それらのコストは大きく変動しない（部材費は別に検討する必要あり）と考えられる。従って、ここでは、各燃料の集合体長を一定と仮定する。（5m程度で考える。）

・炉心高さ

酸化物燃料の炉心高さを1.5mとし、新型燃料については、FPガス放出率、プレナムの上下位置等から判断する。なお、上下ブランケットは各燃料で同じとする。

・内面腐食

酸化物燃料については、肉厚600 μ に対して当該燃焼度で200 μ とし、窒化物燃料は内面腐食なしと仮定する。金属燃料についても内面腐食なしと仮定する。

・PCMI

窒化物燃料については、EBR-IIの照射試験結果のように、酸化物燃料に比べPCMIの著しいことが知られており、被覆管が照射クリープ(SUS316鋼レベルの変形速度と仮定)だけで変形したとすると、大型炉の照射量/燃焼度比の条件でも、燃料ペレット

が0.5% $\Delta D/D/atom\%$ でスエリング(EBR-II の照射試験結果) するとすると、被覆管のフープ応力は約30Kgf/mm² と計算できる。この値は、酸化物燃料の照射末期の約3倍の大きさであるが、PCMIについては、高Ni鋼のように漸次スエリングする被覆管材料と組み合わせることにより、あるいは、ソフトペレット化により、かなり低減できると考えられる。ここでは、各燃料の傾向を把握する観点から、一応平均的に見て、窒化物燃料の被覆管フープ応力は、酸化物燃料の2倍と仮定して評価する。金属燃料のPCMIについては、酸化物燃料と同等とする。

- FPガス放出率

酸化物燃料、金属燃料については、100%放出、窒化物燃料については、50% 放出で評価する。

- 燃料要素径/ 燃料寿命/ 線出力

150 万KWe 級の検討結果をもとに、以下のように設定する。

(燃料要素径)	酸化物燃料:	9.0mm
	金属燃料	: 7.0mm
	窒化物燃料:	11.5mm
(燃料寿命)	酸化物燃料:	17ヶ月 × 4バッチ
	金属燃料	: 17ヶ月 × 3バッチ
	窒化物燃料:	16ヶ月 × 4バッチ
燃焼度 20万→13万MWd/t	酸化物燃料:	480W/cm
	金属燃料	: 550W/cm
	窒化物燃料:	860W/cm

(ii)主要関係仕様の設定

- 原子炉出口温度

酸化物燃料と金属燃料については、150 万KWe 級の検討結果をもとに 550℃、475℃とする。窒化物燃料については、既に仮定したように、酸化物燃料よりも被覆管の応力が約2倍大きいとして評価することとしており、また、線出力も約2倍大きいと

している。そのため、酸化燃料と同じ燃焼度を達成するには、被覆管最高温度、即ち、原子炉出口温度を下げざるを得なくなる。クリープ寿命の観点からみて、2倍の応力になった分を温度でカバーするとすると約50°C低減させる必要がある。(図III—1参照) また、線出力が2倍大きいと被覆管内面温度で約40°C上昇することになる。これらを合計すると90°Cになるが、窒化物燃料の方が内面腐食が少ないことを考慮すれば、窒化物燃料についても金属燃料と同程度の原子炉出口温度(475°C)とする必要があると判断する。

・炉心高さ

酸化燃料における炉心高さとプレナム長さの関係については、クリープ寿命だけでなく、BDI(→燃料要素外径変化)の点でも制限ぎりぎりに設定されていると仮定すれば、金属燃料では、上部プレナムであること及び高速中性子照射量/燃焼度比が酸化燃料より約1.3倍大きいことから、外径変化率を同程度にするという観点から評価して、酸化燃料で炉心高さが150cmとしたとき、金属燃料の炉心高さは簡略計算で約110cmとなる。

窒化物燃料については、既に述べたように、酸化燃料と比べPCMIが大きくその分外径変化も大きくなるため、ピンピッチを相対的に大きく取る必要がある。ピンピッチを大きくするという事は、炉心設計上、炉心高さを大きくした方が、炉心特性等の面でバランスの取れたものとなる。窒化物燃料の外径変化については、被覆管応力が酸化燃料の2倍という仮定にたてば、低スエリング材を前提として酸化燃料の約2倍になるということであり、ピンピッチ/ピン径比も約2倍に設定する必要がある。この場合、圧損が非常に小さくなり、それによる設計上の制限は無視できるようになる。通常の燃料設計のように酸化燃料と照射末期のガス内圧による被覆管応力が同程度になるように、炉心高さを設定するとすれば、酸化燃料の内面腐食が多いことも考慮して、窒化物燃料の炉心高さは約220cmと計算できるが、上下遮蔽体を多少厚くする必要から、実質200cmという値が相対的に妥当なもの判断できる。

(PCMIが主体の場合のプレナム体積の設定法については、挙動解析コードベースの評価が必要であり、ここではこれ以上の議論は難しい。)

(iii) 経済性関連項目の評価

・ 装荷燃料要素数, 集合体数

炉心全体の平均線出力をピーク値の0.7 (軸非均質を想定), 熱効率を出口温度550 °Cの場合に40%, 出口温度475 °Cの場合に36% と仮定すると150 万KWe 級炉心の各燃料の炉心装荷燃料要素数は, 以下のようになる。

酸化物燃料:79365本

窒化物燃料:29761本

金属燃料 :98386本

燃料集合体数については, 一体あたりの燃料要素数を酸化物燃料で271 本, 窒化物燃料で169 本, 金属燃料で331 本とすれば, 各々以下のようになる。

酸化物燃料:293体

窒化物燃料:176体

金属燃料 :297体

・ 年間使用燃料要素数

上記燃料要素装荷数に燃料寿命を稼働率90% として計算すると, 年間で使用する燃料要素数は以下のよう求められる。

酸化物燃料:12605本

窒化物燃料: 5022本

金属燃料 :20834本

・ 炉心径

集合体ピッチについて, 酸化物燃料で19.5cm, 窒化物燃料で22.7cm, 金属燃料で17.6cmとすると, 上記装荷集合体数を考慮して, 炉心等価直径は, 以下のよう求められる。

酸化物燃料:3.16m

窒化物燃料:3.18m

金属燃料 :3.50m

(iv) 経済性評価

・建設費

炉心径の差がそのまま炉容器径の差になると仮定すると、酸化燃料の場合の炉心径を9mとすれば、窒化物燃料、金属燃料については、約35cm短縮できて8.65mになる。これは、原子炉設備の物量にして約8%の低減であり、関連する原子炉設備費と燃取り系設備費がその割合で低減するとすれば、両者の建設費に占める割合を25%として、建設費の低減率は約2%と求まる。原子炉容器の短縮化は、この他原子炉建屋、空調設備等に影響し、原子炉建屋に関連するBOP設備費の建設費に占める割合を30%と設定すると、原子炉建屋の大きさを縦横50m×50mとして、35cmの短縮は、容積で1.4%の低減となり、そのまま建設費の低減になるとすれば、約0.4%と計算できる。

原子炉出口温度が低減した場合の建設費増加については、これまでの検討で550℃から475℃にすると、建設費が約3.5%増と評価されている。(図Ⅱ-4参照)これは、同じ材料、同じ構造とした場合の結果であり、材料の見直し等により、その差を小さくすることが可能であることを考慮すると、先に述べた酸化燃料に比較して窒化物、金属燃料の場合の炉心径コンパクト化による建設費低減と両燃料の原子炉出口温度低減化による建設費の増大は、ほぼ等しくなるものと考えられる。

以上より、建設費に関する酸化燃料と金属燃料、窒化物燃料の比較では、総合的にみて、明確な差が生じるとは考えにくい。

・燃料サイクル費

燃料サイクル費については、各燃料の年間使用燃料要素数の違いをどう的確に評価するかが重要である。

現状における高速炉燃料の部材費は、QAを重視しているため相対的に割高となっているが、将来的にも、軽水炉と比べ集合体の部材が余分に加わることで、燃料要素が細径であること等から軽水炉より割高となることは避けられない。また、燃料加工において、ペレット焼結工程以降は、基本的に燃料要素数にコストが比例するものと考えら、酸化燃料と金属燃料の加工費の比較にあたっては、その点の評価が重要である。

このような点を特に考慮した場合の概略検討の一例を以下に示す。

(部材費)

高速炉燃料は、軽水炉と比べ、燃料要素の構造は類似しているものの、集合体構造

として、ラップ管、エンドランスノズル等が加わるため、燃料要素あたりの部材費は、将来的にも若干高くなると予想する。これまでの実績から類推して、軽水炉の場合より3割程度高くなるとすると、燃料要素1本あたり約10万円になる。燃料被覆管については、太径の方が値段は安いですが、細径燃料要素の方が、集合体あたりの燃料要素数を多く取れるので燃料要素あたりの集合体部材費は安くなり、燃料1本あたりで計算する部材費は相殺されると考える。

このような前提に立って、年間の部材費は燃料要素数に比例するとして、各燃料の年間の部材費は以下のように計算される。

酸化物燃料：12.6億円

窒化物燃料：5.0億円

金属燃料：20.8億円

(燃料要素数と加工費の関係)

動燃における燃料サイクル費の将来目標は、加工費については軽水炉比で3倍(26.16万円/KgHM)としている。³⁾その値をここで評価した酸化物燃料の年間平均使用量(燃料重金属量)約8tonに掛け合わせると、年間の燃料加工費は20.9億円となる。この60%が部材費以外のコストとすると、その値は12.5億円となる。これを、建設費、操業費という分け方でなく、燃料要素数に比例するペレット焼結工程以降とそれ以前のコストという分け方で考えた場合、この間の実績を基に推定して、前者が3～4割になる。粉末工程については、今後より合理化の進められることを考慮し、燃料要素数に比例するコスト割合を4割と仮定する。この部分だけの酸化物燃料の燃料要素1本あたりのコストは、約4万円となる。金属燃料の加工費については、極めて不確定な要素が大きいですが、金属燃料に最大限有利な条件を選び、酸化物燃料の場合の粉末工程等の6割の部分が無くなった場合に相当するとして、両者の部材費以外の加工費を比較すると以下のようなになる。

酸化物燃料：12.5億円 (燃料要素1本あたり約10万円)

金属燃料：8.3億円 (燃料要素1本あたり約4万円)

[軽水炉の場合で、部材費を除く加工費は、燃料要素1本あたり8～9万円あり、酸化物燃料の設定値は、将来目標としては妥当なものとする。]

一方、窒化物燃料については、酸化物燃料の7割の重金属量であるとして、計算す

ると、

窒化物燃料： 6.5億円

となる。

以上を合計した各燃料の年間の加工費は、以下のようになる。

酸化物燃料： 25.1億円

窒化物燃料： 11.5億円

金属燃料 : 28.3億円

(燃料輸送費)

使用済燃料の輸送費は、輸送する集合体数に比例する(燃料重量ではない)と考えられ、1体あたりのコストを軽水炉と同等の3000万円/体とすると、各燃料の年間の輸送費は、次のように求まる。

酸化物燃料： 14.1億円 ----47体 (271 本/ 体)

窒化物燃料： 9.0億円 ----30体 (169 本/ 体)

金属燃料 : 18.9億円 ----63体 (331 本/ 体)

(再処理費)

この間の新型燃料分科会の検討で用いられた再処理単価を基に各燃料の年間の再処理費を計算する。但し、窒化物燃料については、75%密度燃料の場合を想定する。金属燃料については、酸化物燃料の0.45倍の単価としているが、この条件では、なお不確定な要素の多い金属燃料再処理技術の現状を考えると、金属燃料にかなり有利なものになると判断する。

計算結果は以下の通りである。

酸化物燃料： 36.0億円 --軽水炉比2.5 倍(45 万円/KgHM)×8ton/ 年

窒化物燃料： 21.1億円 -- 同上 ×4.7ton/ 年

金属燃料 : 12.7億円 -- 同上×0.45 ×6.3ton/ 年

(Pu原料費/Pu クレジット)

150 万KWe の計算結果をベースに、年間の各燃料のPu原料費及びPuクレジットの差引は次のように概略考えられる。

酸化物燃料：21.1億円 - 13億円 = 8.1 億円

窒化物燃料：10.2億円 - 9億円 = 1.2 億円

金属燃料 : 14.3億円 - 13億円 = 1.3 億円

以上を合計すると、年間の燃料サイクル費はおおよそ以下のようなになる。

酸化物燃料：83.3億円

窒化物燃料：42.8億円

金属燃料 : 61.2億円

ちなみに、軽水炉(PWR)の110万KWe級の場合の燃料サイクル費について、現状の燃焼度(3.3万MWd/T)、90%稼働率で上記と同様な計算を行うと、年間で129.6億円となる。燃焼度が5万MWd/tに上がった場合には、年間の燃料サイクル費は、濃縮費等が増大すること考慮すると、110億円程度になると想定される。高速炉の場合、軽水炉と比べ、径ブランケット、制御棒などの費用として炉心燃料の2割程度要するが、評価が150万KWe炉心であることを考慮すると、ここで想定した酸化物燃料の燃料仕様でも、高燃焼度化した軽水炉の燃料サイクル費の0.8倍程度を達成できるポテンシャルを有するものと判断する。

4. まとめ

経済性評価等について幾つかの概略検討を行ったが、本検討結果は今後の新型燃料に関する時期ステップの詳細な検討に資することを狙いとしている。

本検討で得られた各新型燃料に関する見解をまとめると以下のようなになる。

(金属燃料)

大型高速炉として考えた場合の金属燃料については、炉心そのものはコンパクト化されるものの、原子炉出口温度を低減せざるを得ず、酸化物燃料と比べて建設費を低減できる可能性は少ない。また、金属燃料の燃料サイクル費については、再処理及び加工の大幅なコスト低減(酸化物燃料の半分以下)を前提とすれば、酸化物燃料よりも優位になるが、年間平均の使用燃料要素数が酸化物燃料の2倍近くあり、大幅なコスト低減は期待しにくい。

(窒化物燃料)

一方、窒化物燃料については、金属燃料と同様に建設費を低減できる可能性は少ないが、

その燃料特性より、PCMIについての問題はあるものの、高線出力で炉心高さを大きくできることから、年間使用燃料要素数を酸化物燃料の40%のレベルまで大幅に低減でき、酸化物燃料よりも大幅に燃料サイクル費を向上できる高いポテンシャルを有すると判断する。

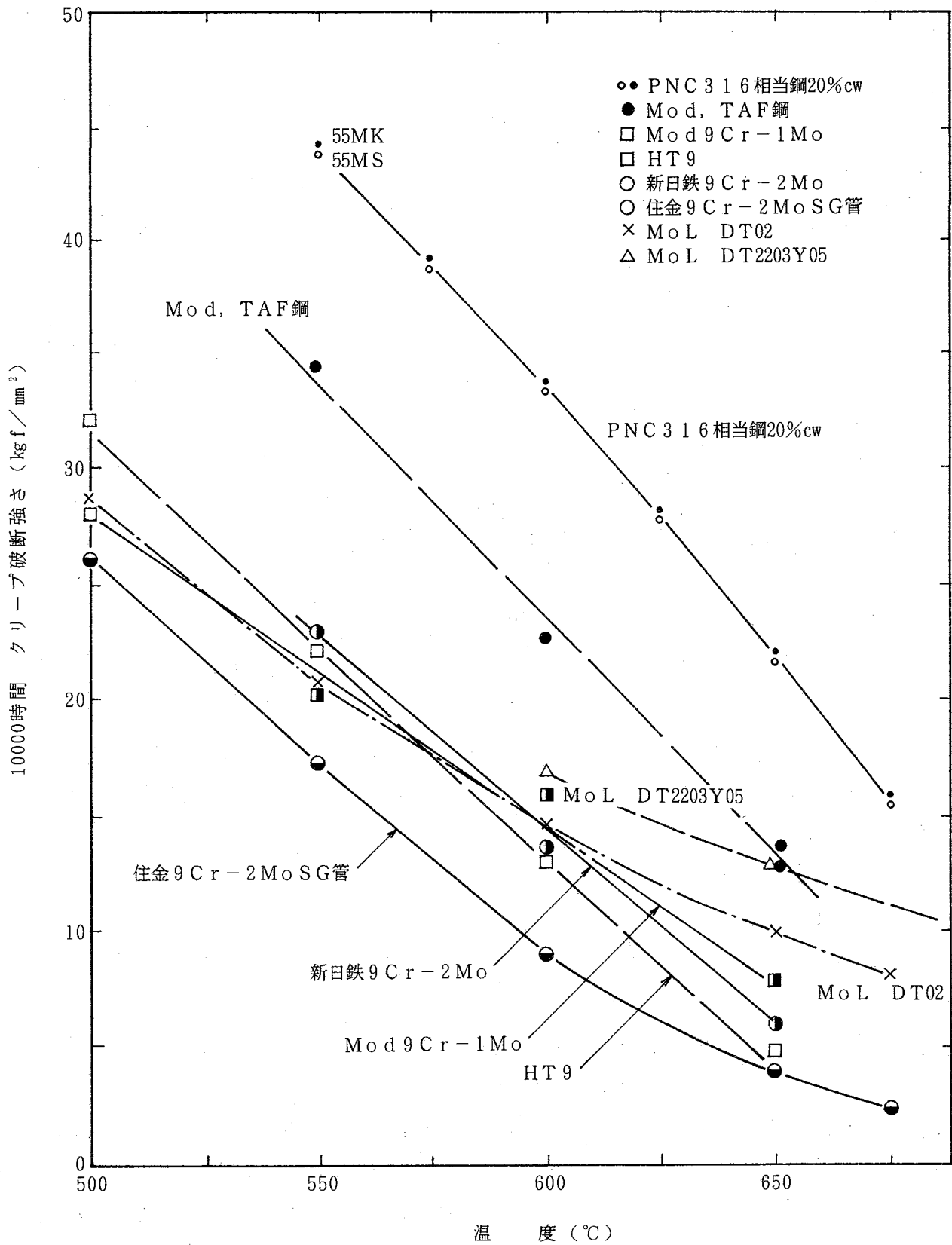
なお、今回の取出平均燃焼度13万Mwd/t相当とした酸化物燃料の条件については、燃料経済性において、高燃焼度化された軽水炉(PWR)の0.8倍を達成できるポテンシャルを有するものと判断するが、さらに、高燃焼度化することは、技術的には可能でも、燃料サイクル費の低減率に比べ、炉容器径の増大あるいは原子炉出口温度の低減など相対的に建設費の増大が上回る傾向になることは、I章の『高燃焼度化とその経済効果について』で述べたところである。

(参考文献)

- 1) 常磐井他, 「FBR金属燃料サイクル技術—その魅力と実現性—」, 原子力工業
第36巻 第6号
- 2) 動燃内部資料
- 3) 動燃内部資料 (S N1450 89-004)

表Ⅲ—1 設計の観点から見た各種燃料の照射挙動の特徴

	酸化物	金属	炭化物	窒化物
F P ガス放出率	高速炉の設計線出力条件では、6～7万MWd/tで100%近い放出率	低スミア密度化(～75%TD)により、酸化物に近い放出率	低スミア密度化(～75%TD)、燃焼度9万MWd/tでも20～30%の放出率	炭化物よりさらに放出率は小さく、燃焼度9万MWd/tでも10%程度
PCMI (燃料と被覆管の機械的相互作用)	初期の燃料スエリングは大きいものの燃料が高温(クリーパーが早い)でF P ガスの大部分を放出してしまいうため、PCMIは小さく、被覆管のクリーパー変形も小さい。	低スミア密度化により酸化物と大差ないPCMI、クリーパー変形レベルを達成	燃料温度が低く、F P ガスを内蔵するため、PCMIによるクリーパー変形は大きい。別添2のデータでは△D/Dは約0.24%/atom% (スミア密度87%)。これは、被覆管内圧(ガス圧+PCMI)がMOXより5～6倍大きいことを示す。	炭化物よりさらにPCMIは厳しく、PCMIによるクリーパー変形が大きい。別添1のデータでは△D/Dは約0.48%/atom%
F C C I (燃料と被覆管の化学的相互作用)	燃料のO/M比に影響されるが、F C C Iは最大100um程度	共晶の問題があり被覆管温度を高くできないう。温度を下ければ問題は少ない。	ほとんど問題ない。	ほとんど問題ない。
溶融限界線出力	～480W/cm程度が設計上の限界	熱伝導度は良いが、融点が高く、低スミア密度化することを考慮すると～600W/cm程度が限界か。	熱伝導度が良く、融点も高いため1000W/cm程度まで達成可能	炭化物燃料と同様に1000W/cm程度まで達成可能



図III-1 各種フェライト鋼の10000時間クリープ破断強さの比較

(別添 1)

1979年モンテレー会議発表論文

Helium-and Sodium-Bonded Mixed-Nitride Fuel Performance

(ヘリウム、Naボンド型混合窒化物の燃料挙動)

の要約

○Naボンドピン

照射した何本かのピンに破損を生じたが、これらはいずれも、シュラウドなしで被覆管肉厚0.53 mm以下のピンである。

(照射後試験結果)

- ペレットスウェリング……半径方向で1.5%/atom%。半径方向の方が軸方向より25%程率が高い。燃焼度が6 atom%を越すと急にスウェリング率が増加する。
- 被覆管歪み量($\Delta D/D$)……ピン直径増加は、PCMIでなく、被覆管のスウェリングによる。
- FCCI……FCCIは、まったく観察されない。また、被覆管の硬度変化も見られない。
- FPガス放出率……0.81~156%。放出率の高いのは、シュラウドなしのピン。

○Heボンドピン

線出力が高く(100 kW/m以上)、被覆管最高温度も高く(670~730℃)で、かつスミア密度の高いピンの場合のみ破損が見られる。それ以外では、8 atom%の燃焼度まで破損は生じていない。

(照射後試験結果)

- 破損ピン……破損ピンは2本(C6-7, C7-21)。破損は、コア中心付近で発生し、軸方向の小クラックであった。
残りの健全ピンを炉内に再装荷して、照射をさらに続けた時、さらに1本(C7-15)破損が発生した。
- 被覆管歪み量($\Delta D/D$)……破損ピンは、いずれもスミア密度の高いピンで発生した。しかし、その外径変化は、最つとも少ないグループに属する。
プロファイルメトリーから、燃料カラムの境界で $\Delta D/D$ が急に増加し、かつペレットの両端でリッジング現象が見られる。被覆直径変化が主にPCMIによることがこれから解かる。
燃焼度と $\Delta D/D$ の関係は $\Delta D/D = 0.48\%/atom\%$ 。(Fig. 5)

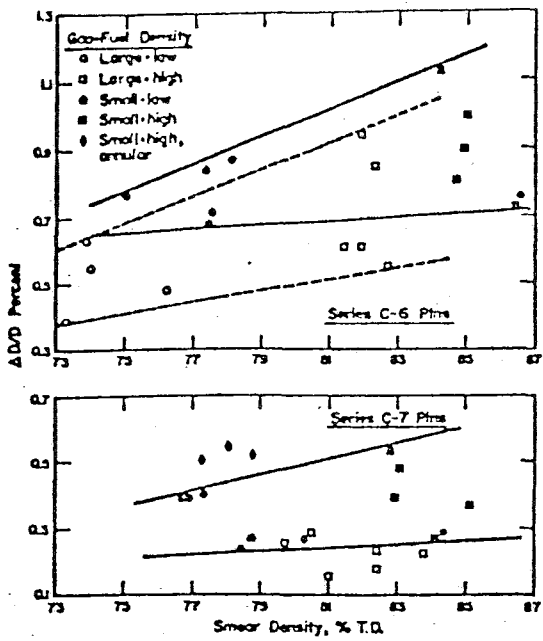


Figure 4 Helium-Bonded Fuel Element Diametral Expansions as a Function of Smeared Density (* Failed Element)

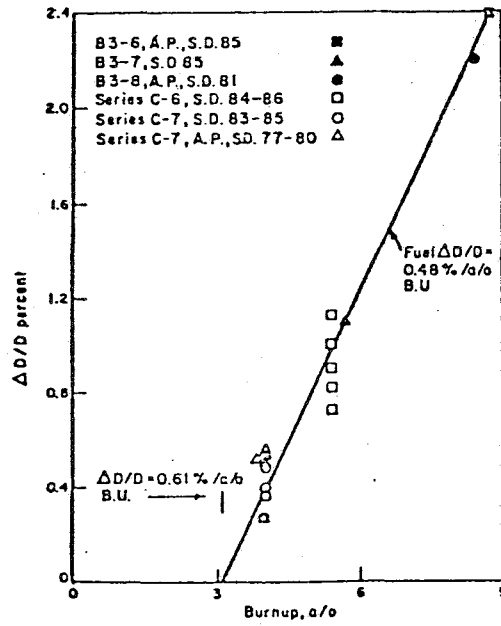


Figure 5 Helium-Bonded Fuel-Element Diametral Expansion as a Function of Burnup

(別添 2)

1979年モンテレー会議発表論文

Design and Performance of Sodium-Bonded Uranium-Plutonium

Carbide Fuel Elements

(Na ボンド型混合炭化物燃料要素の設計, 挙動)

及び Irradiation Performance of Helium-Bonded Uranium-Plutonium

Carbide Fuel Elements

(He ボンド型混合炭化物燃料要素の照射挙動)

の要約

○ Na ボンドピン ⑦⑩

EBR-Ⅱで計113本の燃料ピンが照射された。照射がそれ程進んでいない段階(3 atom %)でPCMIによると思われる破損が生じた。しかし、ピン内にシュラウドチューブを入れるなり、被覆管の材質を強化し、またその肉厚を多くすれば、そのような破損は防げる。

(照射後試験結果)

- 燃料スウェリング……炭化物の組成の中で、 M_2C_3 の多いものの方がスウェリングは小さい。

$$\begin{cases} M_2C_3 \text{のほとんどない場合} : 3.0 \text{ vol \% / at. \%} \\ M_2C_3 \text{の比較的多い場合} : 2.4 \text{ vol \% / at. \%} \end{cases}$$

- シュラウドチューブの挙動……燃料が割れて動くのを防いでいることは明らか。
- ピン変形……内部(PCMI)と外部(スペーサーと被覆管)の両方の機械的相互作用が発生している。

シュラウドなしのピンでは照射初期から変形が生じる(Fig.1)。スペーサー付きのピンでは、ワイヤーによる変形が観察され、破損した1本のピンの破損箇所は、集合体のダクトにワイヤが接触している地点で発生した。

- 被覆管の浸炭……被覆管の炭化の度合は硬度測定で判定。

M_2C_3 の含まれる燃料では、0.11 mmの深さまで硬くなっているが、MCだけの燃料では硬さ変化はほとんど見られない。400℃~600℃の温度範囲では、炭化の度合は、被覆管の材質に無関係。

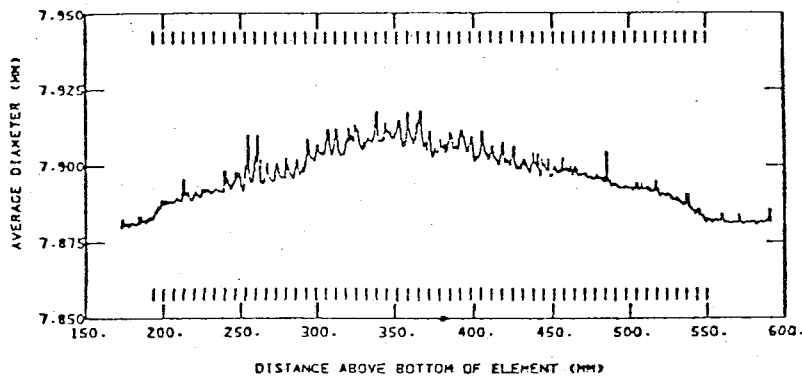


Fig. 1 Average cladding diameter of element K4-1. Vertical ticks at the top and bottom of the plot represent axial locations of pellet interfaces.

- FPガス放出……放出率は3～14%。

○ He ボンドピン ⑦①

EBR-IIで合計171本のHe封入炭化物燃料ピンが照射され、既に一部の燃料ピンの照射後試験が完了している。破損はたった1本に発生しただけであった。Heボンド炭化物燃料ピンの場合、PCMIによる被覆管の歪みが大きい。それと、炭化物組成(M_2C_3 の割合)との相関は明らかで、燃料密度やダイヤメトラルギャップ等のパラメーターとの関連も、今後の照射後試験結果から詳細に明らかとなるだろう。

(照射後試験結果)

- 金相写真……各金相断面写真からは特に異常は見られない。

燃料組成(M_2C_3 の割合)の大きく異なる場合でも、金相写真や α -オートラジオグラフィに差はない。燃料密度81%でダイヤメトラルギャップが0.13mmのピンと各々88%、0.25mmのピンを比べると、前者の方のスミア密度が3%程小さいだけであるのに、空孔の多い領域(Porous Zone)内側直径が46%と後者(63～67%)と比べ大きく異なる。

- FPガス放出……以前行なわれた試験ではHeボンド炭化物燃料のFPガス放出率はスミア密度と逆比例した。K6AとK6Bのシリーズのスミア密度81, 78, 75%のピンのFPガス放出率は、各々8%, 13%, 19%となり、やはり逆比例の関係となることを示した。ガス放出率の絶対値は、以前のテストと比べ少なかったが、これは酸素含有率に関係していると考えられる。

(K6A, K6Bの酸素含有率は500ppm以下。以前のテストでは1100～4400ppm)

- 被覆管歪み量($\Delta D/D$)……最大のトータル歪み量($\Delta D/D$)はスミア密度に直接関係している。燃料組成が(U, Pu)Cだけの場合と(U, Pu) $_2$ C $_3$ の含まれている場合を比較すると(U, Pu)Cだけの場合の方が $\Delta D/D$ はやや大きい。

(Fig. 2)

被覆管の密度測定から得られるスウェリング量は極めて少なかった。

K 6 B : 0.05 ~ 0.08% (フルエンス $\approx 3.8 \sim 3.9 \times 10^{22}$ n/cm²
最高温度 $\approx 560 \sim 575^\circ\text{C}$)

K 6 A : 0.33 ~ 0.38% (フルエンス $\approx 5.1 \sim 5.5 \times 10^{22}$ n/cm²
最 度 $\approx 565 \sim 570^\circ\text{C}$)

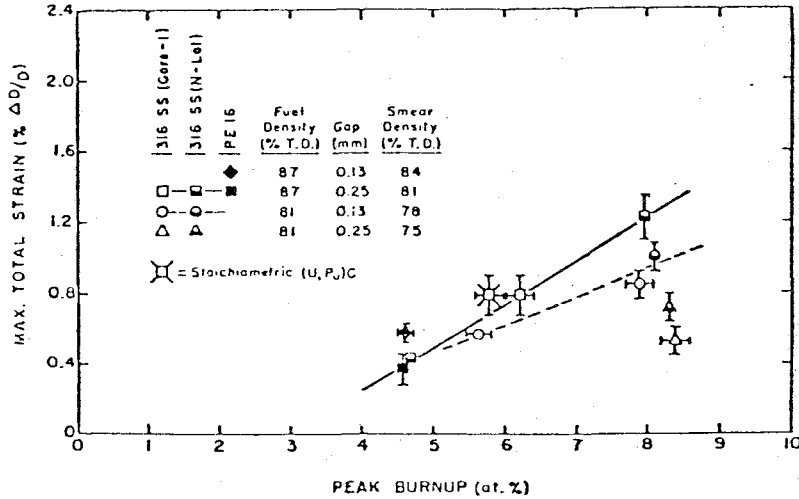


Fig. 2 Maximum cladding strain vs peak burnup for K6A, K6B, K7, and WSA-31 Series helium-bonded carbide fuel elements.

被覆管の直径増加は、大部分 PCMI により発生したもので、プロフィールメータ (Fig. 3) からそれが一層明らかとなる。

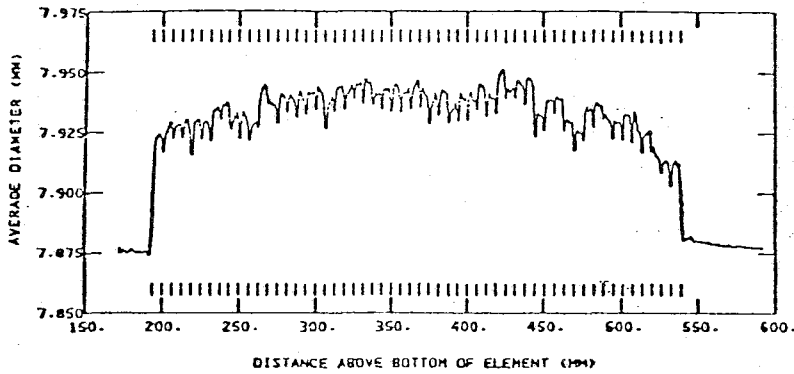


Fig. 3 Profilometry and fuel-pellet-interface positions for element K6A-52

- スタック長変化…… M_2C_3 が少ない方が、焼きしまり量が多く、スタック長の変化は少ない。
- FCCI …… 燃焼が進んでも FCCI はほとんど観察されない。 M_2C_3 を多く含んだ燃料では被覆管に炭化による硬化が見られる。(40 μm 位)

・被覆管の破損……WSA-31-17ピンで破損が発生。WSA-31-17は周辺ピンで、87% T.D.、0.13 mmギャップで被覆管はNimonic PE16である。

破損は15 mmの長さで、燃料カラム中心位置より下方18 mmの所に位置し、ワイヤの真下である。ワイヤは、その破損点では、隣接ピンに接触していた。

LIFE-3コードでは破損原因は明らかにできなかった。被覆管の折出物などから局所高温と関連付けられて破損原因の究明が進められている。

○オーバーパワートランジェント試験結果 ⑭

フレッシュなピン及び照射されたピン(燃焼度6.1, 8.4 atom%)に対し、TREAT炉を用いてオーバーパワートランジェント試験を実施した。結果は、Heボンド、Naボンド(シユラウド付)のどちらの場合も、ギャップが極端に狭い場合を除き、一般にかなり高い健全性を示し、少なくとも酸化燃料と同等レベルと評価して良いことが解った。