

# 新型燃料の開発状況のまとめ

1989年3月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

## 新型燃料の開発状況のまとめ

鈴木隆平\* 横内洋二\* 小泉益通\*\*

### 要 旨

現在のウラン-プルトニウム混合酸化物燃料（以下、「MOX燃料」と略す。）と比較し将来これに勝るものと期待して、種々の新しい燃料が取り上げられている。そこで、新型燃料をMOX燃料と適切に比較評価するために新型燃料に関する調査・評価を行った。これらの評価は、今後の燃料選択に当たり、どのようにするか政策決定に資するものである。

日本、ヨーロッパにおいては、MOX燃料を基本路線として開発を進めている。但し、ヨーロッパにおいては以前から炭化物、窒化物の研究開発（製造法、物理化学的性質、炉内照射挙動等）が実験室規模で継続されて来ている。今までの調査、研究から仏、英、スイス及び西独では、今後、炭化物燃料から窒化物燃料へ開発の重点を絞って進めようとして計画している。

米国（DOE）においては、MOX燃料を同様に本命として開発してきたが、金属燃料・小型炉を中心路線として進めることを決定し（1985年）、期待通りいかなかった場合には、我が国のMOX、大型実証炉へアクセス出来るオプションを確保したい考えである。

---

\* 動燃事業団大洗工学センター，技術開発部，新炉型サイクル解析室

\*\* 動燃事業団大洗工学センター

Study of New Type Fuels for FBR

Ryuhei Suzuki\*, Youji Yokouchi\*  
and Masumichi Koizuki\*\*

Abstract

New type fuels (metal, nitride and carbide) are expected to be superior to MOX fuel in future. Here, informations about the new fuels are investigated and evaluated for comparing with these of MOX (Mix Oxide) fuel. It is believed that this evaluation can contribute to the decision of policy how they are chosen.

In Japan and Eurpoe, the MOX fuel has been developed as the main FBE fuel. However, the research and development of MC (Mix Carbide) and MN (Mix Nitride) fuel in Europe, which includes the manufacturing process, properties of physical-chemistry, and irradiation behavior, has been continued on a labo-scale since before. In France, U.K., Switzerland, and West Germany, they have a plan of development which puts stress on MN fuel more than MC fuel.

In the United States, DOE had developed MOX fuel as the favorite like Japan, but they decided to advance the development of Metal fuel and small-sized reactor in 1985. If they can't have anticipated results, it is thought to secure the option of being able to access to data of MOX fueled large scale FBR in Japan.

---

\* Advanced Reactor and Fuel Cycle Development Section, Technology Development Division, O-arai Engineering Center, PNC.

\*\* O-arai Engineering Center, PNC.

# 目 次

I. 新型燃料の開発状況のまとめ .....	1
1. はじめに .....	1
2. 各国の政策と展開 .....	1
2.1 米 国 .....	1
2.2 ヨーロッパ .....	2
2.3 日 本 .....	3
3. 新型燃料の開発状況とまとめ .....	3
3.1 新型燃料 .....	3
3.2 動燃における FBR 研究開発計画に基づく実施状況 .....	5
4. 炭・窒化物燃料の選択 .....	5
II. 新型燃料の開発に関する方策 .....	7
1. 新型燃料の開発に関する基本計画 .....	7
2. 新しい展開への背景 .....	7
3. FBR 長期開発計画における新型燃料の取り上げ方とスケジュール .....	7
4. 基本計画への具体的対応 .....	8
付録 A 経済性評価データ .....	11
付録 B スケジュール .....	17
付録 C 我が国における金属燃料に関する研究開発 .....	25

## I. 新型燃料の開発状況のまとめ

### 1. はじめに

現在、MOX燃料と比較し将来これにまさるものと期待して、種々の新しい燃料が取り上げられ、その調査・検討がなされている時期にある。これらは金属燃料、炭化物燃料及び窒化物燃料である。動燃はMOX燃料を主体に開発を進めてきており、更にMOX燃料路線で実用化への努力を進めているが経済性、安全性等の見直しの観点から、米国はMOX燃料から金属燃料へ、ヨーロッパに於いては、炭化物燃料の開発を継続してきたが、より良き物への可能性を求めて、窒化物燃料の開発を進めようとしている。

このような状況にあって、MOX燃料路線の堅持が妥当なのか、或いは新型燃料なるものがより妥当なものとして代わり得るのか、我が国のFBR実用化のスケジュールとも見合わせて、また海外との開発競争にも有利に展開でき、遅れをとらないために、ここ2年位の間にその方向（MOX燃料路線の正当性）を確認しなければならない時期に来ている。

そのため、新型燃料の調査、評価を行い、MOX燃料との比較において、その妥当性を評価し、どのように選択するか政策決定に資するものである。

### 2. 各国の政策と展開

日本、ヨーロッパにおいては、MOX燃料を基本路線として開発を進めている。但し、ヨーロッパにおいては以前から炭・窒化物燃料の研究開発（製造法、物理化学的性質、炉内照射挙動等）が実験規模で継続されて来ている。今迄の調査、研究から仏、英、スイス及び西独では、今後、炭化物燃料から窒化物燃料へ開発の重点をしぼって進めようとして計画している。

米国（DOE）においては、MOX燃料を同様に本命として開発してきたが、金属燃料・小型炉を中心路線として進めることを決定し（1985年）、期待通りいかなかった場合には、我が国のMOX燃料、大型実証炉へアクセス出来るオプションを確保したい考えである。

#### 2.1 米 国

- (1) DOEは、1985年にMOX燃料から金属燃料への政策転換を決めた。理由としては、その優れた固有安全性と革新的な燃料サイクル技術があげられる。特に高温冶金再処理法によるコストの大巾な削減につながるものと期待している。開発計画は別紙の如く進められており、現在第2フェーズの計画（1987～1989年度）が進行中である。
- (2) 第2フェーズに続いて、1990年度から1992年12月にかけてEBR-IIと付属の燃料サイクル施設を改造して、核燃料サイクル実証実験の実施を予定している。
- (3) 1987～1988年にEPRIにおいて米国の電気事業による金属燃料サイクル評価が行われる予

定である。

- (4) PRISM (RI), SAFR (GE) 炉心では金属燃料炉心が採用されている。
- (5) 炭・窒化物燃料の基礎研究は、昭和40年代初期迄には活発に行われたが、その後ロスアラモス研究所で集中的に実験規模で数年前迄続けられていた。

## 2.2 ヨーロッパ

### (1) フランス

- ① MOX燃料を基本路線として進めている。一方炭・窒化物燃料の基礎的研究開発（製造法、物理化学的性質、照射挙動等）を実験規模で並行的に行ってきた。
- ② 但し、再処理（ピューレックス法）が困難であることから炭化物燃料の研究開発を中止し、窒化物燃料開発に重点をおく方針で、現在、MOX燃料製造ラインでの窒化物燃料の製造方法の可能性を確認し、窒化物燃料についての照射挙動等の研究を行っている。

### (2) イギリス

- ① 基本路線はMOX燃料である。
- ② 新型燃料の開発は現在行っていない。炭化物燃料の開発は1970年の末に停止している。理由は、炭化物燃料の被覆管内での破片化と被覆管への浸炭化である。
- ③ 窒化物燃料については経験はないが、2～3年後に取りかかる予定である。
- ④ 金属燃料については、基礎研究（相研究、物性測定）を行ってきたが、実用化については否定的である。（低融点、炉心ブロッケージに致命的）

### (3) 西独

- ① 基本路線はMOX燃料である。
- ② 炭・窒化物燃料の基礎的研究は長年にわたって巾広く継続中である。

### (4) スイス

- ① 炭化物燃料をゾル・ゲル化法により球状燃料の製造、特性試験、照射試験等にしばった研究を継続中である。
- ② 窒化物燃料のゾル・ゲル化法による球状燃料の製造テストを計画中である。

### (5) ソ連

- ① 炭化物燃料、窒化物燃料（Heボンド）の10%燃焼度迄の実用性が確認された。
- ② 将来の方向として、次のことを行う予定にしている。
  - ・ 炭・窒化物燃料の高出力、高燃焼度における照射健全性の確認
  - ・ 設計と試験パラメータの確認
  - ・ Na-Kボンドの燃料ピン特性の解明

## 2.3 日本

- (1) 基本路線は MOX 燃料である。  
新型燃料の採用方策について調査、検討中である。
- (2) 炭化物燃料の基礎的研究は、1960年代から大学、メーカ、原研、動燃において行われた。1970年代に入りMOX燃料が基本路線に取上げられた時点で研究開発は停止されたが、原研は今日迄研究を継続している。
- (3) 窒化物燃料については、1960年代から1970年代頃迄の間、多少行われたのみで、今後は窒化物燃料へ力を入れて行く状況にある。
- (4) 金属燃料については、原子力開発の初期にウラン金属燃料（U，U-A1等）の開発が大学メーカ、原研、動燃において実験規模で行われ、JRR-3のU-A1合金は国内メーカにより製作された。
- (5) 金属燃料の採択の可能性については、調査検討を進める。  
付録Cを参照すること。

## 3. 新型燃料の開発状況とまとめ

### 3.1 新型燃料

#### (1) 炭化物燃料

- ① 現在のところ、MOX燃料に替わり得る可能が薄れてきた。それは、燃料サイクル（再処理、加工等）に係わる分野での困難性のためである。
- ② MOX燃料に比較すると、物性として有利な点はあるが、更に照射特性をつかむ必要がある。
- ③ 再処理（ピューレックス法）において、硝酸に対して難溶であり、更に溶解時に有機化合物（蓚酸プルトニウム）を生成し、プルトニウムの抽出が困難である。
- ④ 燃料が破片化（Fragmentation）すること、燃料被覆管を浸炭し長時間使用しにくい。  
（この点で英は1970年末見切りをつけた。）
- ⑤ 将来課題（700～800 W/cm）
  - イ 15% burn-up迄の照射実証を得ること。
  - ロ 再処理、燃料製造の実用性の実証化。

炭・窒化物燃料の実績は、MOX燃料とは比べものにならない程少ない。特に再処理にはいまだに重要な未解決の問題があり、大量生産への足がかりがまだ得られていない。

#### (2) 窒化物燃料

- ① 物理化学的性質からみれば、他の炭化物燃料、金属燃料、MOX燃料との比較の上では優るところが多く、期待のもてる燃料になりつつある。
- ② そのわりには、あまり研究が進められておらず、各国で小規模な基礎実験が行われてい



たが、炭化物燃料に見切りをつけて、窒化物燃料への転換の計画がヨーロッパにおいて進められている。

- ・ イギリス：2～3年後に研究開発
- ・ スイス：ゲル法による製造法の開発の計画
- ・ フランス：窒化物燃料開発に重点移行

③ 再処理においては、ピューレックス法が応用し得ること。但し、窒化物燃料から生成される<sup>14</sup>Cをどう処理するか目途がっていない。

④ 燃料製造方法として、MOX燃料製造ラインが使用出来る。(炭化物燃料に比較し取扱いが安全である。)

⑤ 将来課題

- イ 高燃焼度(～15万MWD/T)の照射データを得ること。特に物理化学特性、ピン挙動
- ロ 再処理(ピューレックス法)方法の実証化
- ハ 燃料加工におけるMOX燃料製造ラインの応用可能性の実証化
- ニ 窒化物燃料をOptionすることによる経済性、安全性の優位性の評価

(3) 金属燃料

① 原子力開発の初期においては、原子炉に金属燃料が用いられ、広く研究が進められてきたが、融点が低く、熱サイクルによって燃料が伸びる等の高燃焼度にはむかない理由で、1965年以前にセラミック燃料(中心は酸化物)に世界的に転換した。但し、ANLのみはその後研究開発を継続し今日に到っている。

② 金属燃料選択の大きな理由は、優れた固有安全性と革新的な燃料サイクル技術(電解精製法を用いた高温冶金再処理、今までのMOX燃料の再処理コスト、燃料製造コストの $\frac{1}{3}$ ～ $\frac{1}{4}$ 、Puの不拡散性)にある。

③ MOX燃料に比べ：i 密度が高く増殖性が良い、ii 熱伝導度が高く、燃料の保有熱量が小さく、安全性裕度が大きい等の利点を持つが、スウェリングが大きく高燃焼度が得られないという欠点があったが、ANLでは問題を解決し14%高燃焼度を達成する見通しをつけた。

④ 現在は、金属燃料(U-Pu-Zr)の製造と再処理はグローブボックス内での基礎試験段階にあって、照射は少なく、数100本程度である。

⑤ 将来課題

- イ 高燃焼度(15万MWD/T～20万MWD/T)の実証
- ロ 固有安全性の確証
- ハ IFRの再処理技術の実用化への実証
  - イ) 技術プロセスの確証

- ロ) 遠隔操作技術の高度化と実用化
- ハ) 経済性の確認

### 3.2 動燃における FBR 研究開発実施計画に基づく実施状況

#### (1) プル燃

- ・ 金属鑄造法の技術調査, 製造手法の選定とモックアップ試験機の発注 (63.3月末)
- ・ 窒化物燃料の製造法の検討

#### (2) 人形峠

- ・ ウラン金属の製造 (小規模で好結果)
- ・ ウラン合金鑄造のための装置 300g/batch の発注

#### (3) 大洗

- ・ U-Pu-Zr の成分元素の再分布, 被覆管との共晶反応等についての委託研究 (九大)
- ・ 金属燃料の挙動解析コードの開発のための調査
- ・ 炉心特性評価技術の開発, 炉心特性の把握に関するデータの調査
- ・ 安全性評価のための解析コードの整備

## 4. 炭化物燃料 (MC) と窒化物燃料 (MN) の選択

### (1) 選択のための尺度

FBR による発電という目的に対して, 次の 4 点があげられよう。

- ① 経済性 ② 安全性 ③ 社会性 (PA, 核不拡散等) ④ 実現性

以下個別に検討を行う。

#### ① 経済性

##### イ) 炉建設費の優位性

MC と MN の物性, 核特性から, その差はあまりないと考えられるので, 同列と考えられる。(更につめる必要あり)

##### ロ) 燃料サイクル

現在考えられる再処理法について, MC は酸に難溶, 更に有機溶媒に抽出しにくい蓚酸プルトニウムが出来るなど困難性が高く, head process に相当のコストがかかる。

MN は  $^{14}\text{C}$  の問題はあるが, 少々コストがかかっても, MC ほどではない。

燃料加工における取扱いに関しては, MC は MN より酸化反応が激しいので, 不活性ガス下の管理が極めて厳しく, MN は MOX 燃料製造ラインが応用し得る程度であり, MN の方が著しく有利である。

#### ② 安全性

将来, 社会に受け入れられ, これに耐え得る安全上のポイントは何で, どの程度の高さで

あるべきかを明らかにしておくことがまず第一である。

まず、固有の安全炉心の燃料として、MCかMNということになれば、概して同じ位とすべきであろうか、更に折目正しい評価が必要。

また、燃料サイクルの面からいえば、取り扱いの点からMNの方が、火災、破壊等に対して抵抗性が高く有利である（これは、将来世界中で燃料加工工場が数多く稼働したときは重要）

③ 社会性

核不拡散性、安全上から来る一般公衆の取り扱いに関する容認性等であろうが、ほぼ同等か、取り扱い安全ではMNが有利である。

④ 実現性

両者の目的達成のための達成可能の度合（技術、安全、経済、スケジュールへの合致性）というべきものである。

MC ・現在の再処理法に適しにくい。

・燃料の被覆材との両立性が良くない（浸炭性）

以上のような点から、ヨーロッパ（イギリス、フランス、西独、スイス）では見切りをつけた。

MN ・ $^{14}\text{C}$ が生成される。再処理の際、除去する技術装置をつけるetcが必要である。

・Oxideのように、MCより楽に取り扱える。

・ヨーロッパにおいて研究開発の重点をMCよりMNにおいた。

(2) 動燃としては、MNに重点をおくべきであり、MCはだめ押しとして paper 調査のレベルにとどめておくべきであろう。

## Ⅱ. 新型燃料の開発に関する方策

### 1. 新型燃料の開発に関する基本計画

本件については、昨年12月に基本計画が打ち出され、MOX燃料との比較において、新型燃料の実用化の可能性の評価を行うこととし、今後10年程度の期間を目途としている。……(基本計画書参照)

### 2. 新しい展開への背景

現在、新しい展開を模索しはじめたが、その背景には次のようなものがある。

- (1) MOX燃料が基本路線であるが、経済性が思うように向上していない。
- (2) 原子力産業が好転せず、FBRの実用化が遅延している。
- (3) 米国が、MOX燃料から金属燃料に転換(1985年)し、実証化を進めており、我が国への協力を要望している。
- (4) ヨーロッパにおいては、MOX燃料を基本路線としているが、一方実験規模で研究開発を進めてきた、炭・窒化物燃料のうち、炭化物燃料に見切りをつけ、窒化物燃料の開発に力を入れようとしている。
- (5) PAの関点から、一応安全な設計への要望が高まっている。このような点から、MOX燃料の実現化を期待しながら、より良きものへの模索と、国際競争での有利な立場を保つことへの優慮がある。

### 3. FBR長期開発計画における新型燃料の取り上げ方とスケジュール

- (1) MOX燃料を用いたFBRの実用化時期は、現在のところ2030年頃におかれている。
- (2) 若し、新型燃料に転換するようになれば、どの時期に実用化が期待出来るのか、ウランセキュリティから制約があり、2030年を大きく遅れこむのは日本にとって極めて不利。遅れこんでも2040年頃と考えるのが妥当であろうか。
- (3) 従って、新型燃料の実用化の開発のスタートは1997年頃(10年間の実施計画の終了時期1996年)が妥当であろう。(実用時期迄30年)
- (4) 実用化という時点(1997年頃)で、新燃料の選択は一種。即ち、MOX燃料とMX燃料(金属か窒化物)(図-1参照)

この時点での予想

米 国 :	金属	[	MOX	]	窒化物	[	MOX	]	二国間の共同
日 本 :	金属	[	MOX	]	窒化物	[	MOX	]	開発体制
ヨーロッパ :	金属	[	MOX	]	窒化物	[	MOX	]	

(5) 以上のようなシナリオを確証する方法として

(a) 第一フェーズの新型燃料の比較評価

S. 62～64年度末

MOX+MX 1 + MX 2 にしぼる (例えば, MOX 燃料と金属燃料と窒化物燃料)

(b) 第二フェーズ

S. 65～68年度末

MOX+MX → 2種にしぼる (例えば, MOX と金属燃料 or 窒化物燃料)

(c) 第三フェーズ

S. 69～71年度末

1種 or 2種にしぼる

#### 4. 基本計画への具体的対応 (第一フェーズのみ)

MOX 燃料との比較において, 新型燃料の実用化の可能性の評価の具体的内容について, 次の事が考えられる。

(1) 優位性の評価

将来 (実用時期 2030 年頃) FBR の燃料として, MOX と比較して優位なものはあるのか, どの程度優位なのかをまずあきらかにする。

(2) 評価方法としての尺度

(a) 経済性 (b) 安全性 (c) 実現性 (d) 社会性等があげられる。

以上を評価するとき, 比較の条件として, 次のような条件が必要になる。

◦ 炉の規模 100 万 kW

◦ 燃料サイクル規模……………

MOX 加工	100 t/Y
FBR — 再処理	100 t/Y

(a) 経済性

炉の燃料として, MOX, 金属 (M), 炭化物 (MC), 窒化物 (MN) を用いた場合の発電コスト (概念設計レベル) を評価する。

(イ) 炉側のコスト

◦ 炉の建設費: 各コンポーネントのコスト

以上を出すための必要パラメータの抽出と値の収集と評価

(ロ) 燃料サイクルコスト

◦ 燃料加工コスト 100 t/Y 規模

- 再処理コスト 100 t/Y 規模

以上を出すための必要パラメータの抽出と値の収集と評価

注：コスト評価方法については、現在方法手段について検討中

(b) 安全性

(イ) FBR の実用期において、社会的に受け入れられる安全性の高さの項目設定(どこまで固有安全性を取り入れるのか)

(ロ) 上記設定項目について、比較し優劣が判断し得る安全上(核特性、物理・化学的特性等)のパラメータの抽出と値の収集と優劣の評価

即ち各々の燃料を用いた場合の安全性設定項目(炉側：燃料サイクル側)に対しての優劣の比較

(c) 実現性

(イ) 技術的面で困難性の有無と実現化の難易度と可能性

(ロ) FBR 実用化の時期(2030～2040年)に間に合うかのスケジュール上の問題

(d) 社会性

(イ) PA：安全に関することになるが、各々の燃料が用いられた場合の総合的社会評価

(ロ) 核不拡散性

(e) 核燃料サイクル諸量上の優位性

(イ) 天然ウランの節約

(ロ) Pu 需給バランス

以上の項目について、最終的に答えが得られるようなプロセスを明確にし、必要なパラメータを導きだし、各項の評価を行うこと。

(3) 総合評価と精度

(a)～(e)にわたる5項目から総合評価が得られよう。但し、評価の精度は企業化判断レベル(概念設計レベル：±20～25%)とする。

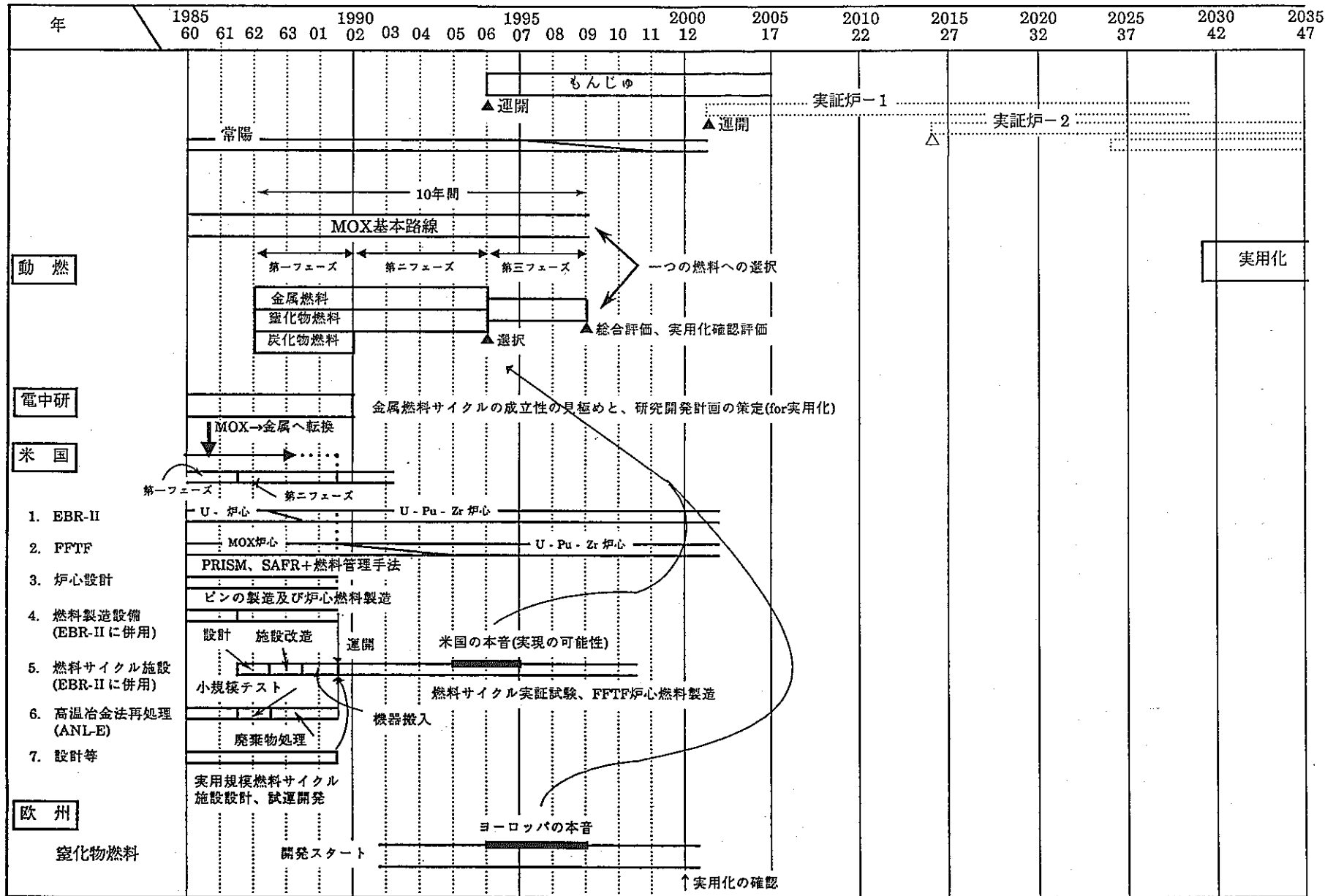


図1 新型燃料開発スケジュール(案)

付 録 A

経 済 性 評 価 デ ー タ



経 済 性 評 価 デ ー タ
-----------------

表1 金属燃料と酸化物燃料との燃料サイクルコスト比較

(a) Pu Start-upの燃料サイクルコスト (mills/kWh)

項 目	金 属 燃 料			酸 化 物 燃 料		
	1モジュール	4モジュール	集中立地 <sup>3)</sup>	1モジュール	4モジュール	集中立地 <sup>3)</sup>
施 設 費	2.76	0.69	0.27	8.27	2.07	0.36
運 転 維 持 費	2.50	1.18	0.94	4.12	1.28	1.02
燃 料 費 <sup>1)</sup>	0.82	0.72	0.72	1.02	0.95	0.95
そ の 他 <sup>2)</sup>						
合 計	9.64	5.44	4.66	16.99	6.65	4.4 <sup>4)</sup>

(b) U Start-upの燃料サイクルコスト (mills/kWh)

項 目	金 属 燃 料			酸 化 物 燃 料		
	1モジュール	4モジュール	集中立地 <sup>3)</sup>	1モジュール	4モジュール	集中立地 <sup>3)</sup>
施 設 費	2.76	0.69	0.27	8.27	2.07	0.36
運 転 維 持 費	2.50	1.18	0.94	4.12	1.28	1.02
燃 料 費	2.40	2.10	2.10	3.10	2.80	2.80
そ の 他						
合 計	10.57	6.57	5.90	18.11	8.20	6.18

(出所: RI) 広井-1987

注) 1) fissile charge: \$16/gPu fissile, 2006年U価格

2) ① ハードウェア, ブランケット, ② 廃棄物処理, ③ デコミ, ④ 初期炉心製作,  
⑤ 制御・しゃへい製作etc.の費用

3) 200 ton/yのプラント

4) RIへの問い合わせでは 4.89

表2 金属燃料と酸化物燃料との発電コスト比較

(mills/kWh)

金 属		酸 化 物	
Pu 起 動	U 起 動	Pu 起 動	U 起 動
29-57	30-58	30-61	32-63

(出所: RI) 広井-1987

表3 SAFR と PRISM との比較

	SAFR	PRISM
モジュール規模	350 MWe	138 MWe
プラント構成 (130万kW級)	(1原子炉+4-IHX+2SG+1タービン)×4=1400MWe	{3(1原子炉+2-IHX+1SG)+1タービン}×3=1245MWe
原子炉	プール型	プール型
原子炉入口/出口温度	675°F/950°F	610°F/875°F
蒸気条件	過熱蒸気サイクル	飽和蒸気サイクル
燃料	金属燃料	金属燃料
安全システム	固有安全性重視	固有安全性重視
発電コスト	38 mills/kWh	37-45 mills/kWh

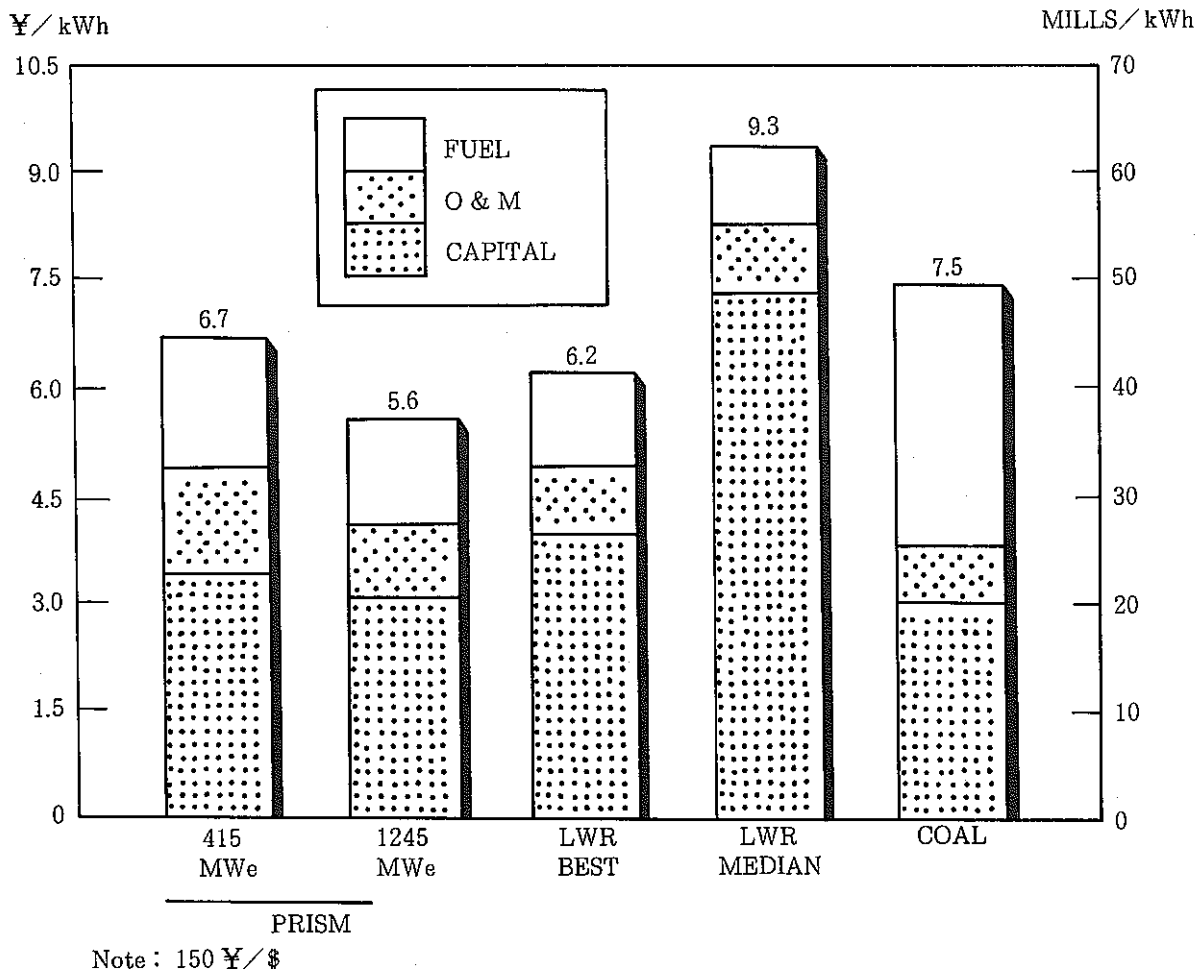


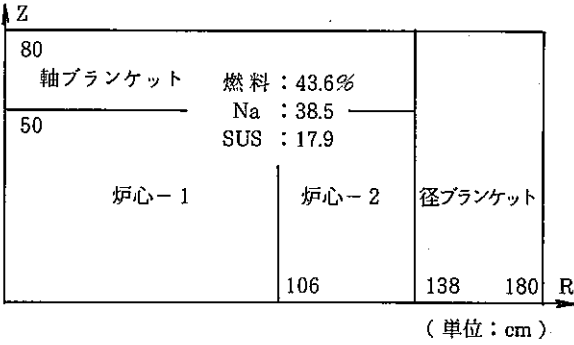
図1 発電コスト比較(1986\$)(出所:GE)

INHERENT SAFETY	COMPARABLE
LINEAR POWER RATING	METAL 90 % GREATER
PEAK FUEL BURNUP	OXIDE MORE AGGRESSIVE (50 % GREATER)
FUEL LIFETIME	OXIDE 2.5 TIMES METAL (RESULT OF DERATING AND MORE AGGRESSIVE BURNUP)
CORE HEIGHT	OXIDE 50 % GREATER
FUEL PIN BUNDLE $\Delta P$	OXIDE TWICE METAL
CORE DIAMETER	SAME
REACTOR VESSEL	OXIDE 11 ft LONGER (30 % DUE TO MORE AGGRESSIVE BURNUP)
FISSILE LOADING	OXIDE 35 % GREATER
HEAVY METAL LOADING	OXIDE 35 % GREATER
FAST NEUTRON FLUENCE	OXIDE GREATER
EURNUP REACTIVITY LOSS	OXIDE GREATER BUT ACCEPTABLE

図2 金属燃料炉心と酸化物燃料炉心の比較 (SAFR) (出所: RI)

核特性評価データ

表4 炭化物と窒化物燃料高速炉の核特性



項目	(Pu, U) N	(Pu, U) C
Keff (BOL)	1.04533	1.05263
Pu/(Pu+U) w/o	14.28	15.04
燃焼反応度損失 $\Delta k/k/yr$	0.0088	0.0122
増殖比：トータル	1.3950	1.3596
：炉心	0.9698	0.9406
：ブランケット	0.4252	0.4190

$^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu} = 58.4/26.4/11.3/3.9$

日本原子力学会に発表 (1988 春, 原研)

図3 検討対象炉心のR Zモデル

表5 解析ケース

表6 燃料寿命

ケース	パラメータ	燃焼日数/サイクル	燃交パターン	燃焼日数
ケース 1	レファレンス	148日	5 バッチ	740日
ケース 2-1	燃焼日数/サイクル	207.2日	5 バッチ	1036日
ケース 2-2		266.4日	5 バッチ	1332日
ケース 3-1	燃交パターン	148日	7 バッチ	1036日
ケース 3-2		148日	9 バッチ	1332日

	燃焼日数/サイクル	炉心取出平均燃焼度
MOX	148 日	80,000 MWd/t
M	238 日	92,000 MWd/t
MN	372 日	123,000 MWd/t
MC	328 日	114,000 MWd/t

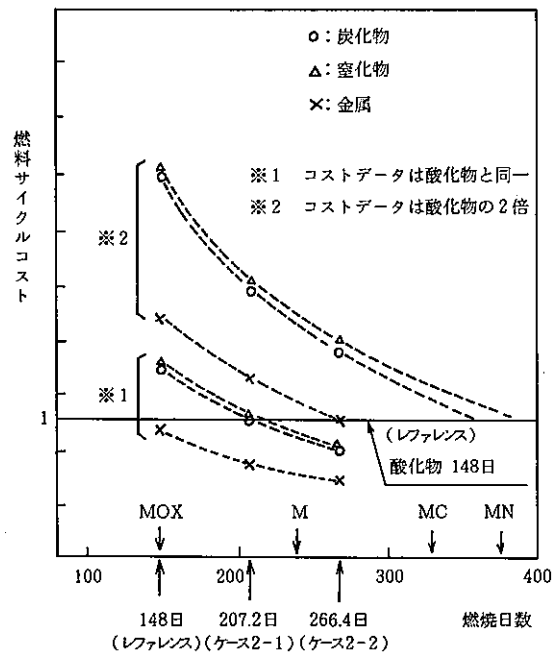


表7 増殖特性

	原子炉倍増時間 (年)	増殖比(*)
MOX	59.37	1.114
M	40.63	1.167
MN	17.14	1.375
MC	18.56	1.347

日本原子力学会に発表 (1988 春, 動燃)

図4 燃料サイクルコスト

(\*) BOEC と EOEC の平均

## 物性データ

表 8 物性値の比較表

物性値 \ 種類	酸化物 <sup>(1)</sup>	金属 <sup>(2)</sup>	炭化物 <sup>(3)</sup>	窒化物 <sup>(3)</sup>
組成	$(U_{0.8}Pu_{0.2})O_2$	U-15Pu-10Zr	$(U_{0.8}Pu_{0.2})C$	$(U_{0.8}Pu_{0.2})N$
結晶構造	fcc	bcc	fcc	fcc
理論密度 (g/cm <sup>3</sup> )	11.06	15.8	13.58	14.32
重金属密度 (g/cm <sup>3</sup> )	9.75	14.2	12.93	13.52
スミア密度 (% T. D.)	87	75	75 ~ 80	75 ~ 80
実効重金属密度 (g/cm <sup>3</sup> )	8.48	10.65	9.70 ~ 10.34	10.14 ~ 10.82
融点 (°C)	2790	1155	2330	2780 ± 20
熱伝導度 (W/cm °C)	0.02 (1500°C)	0.26 (~600°C)	0.22 (1500°C)	0.20 (1500°C)
熱膨張率 (1/°C)	13.9 × 10 <sup>-6</sup> (1000°C) 17.1 × 10 <sup>-6</sup> (1500°C) 20.3 × 10 <sup>-6</sup> (2000°C)	17.6 × 10 <sup>-6</sup>	11.9 × 10 <sup>-6</sup> (1000°C)	8.8 × 10 <sup>-6</sup> (1000°C) 10.0 × 10 <sup>-6</sup> (1500°C)
スエリング {% (ΔV/V) / (10GWD/t)}	0.5 ~ 2.1 (標準 1.1)	17 ~ 30* (標準 17)	1.3 ~ 2.0 (標準 2.0)	1.8

\* U-19Pu-10Zr についてのデータである。

## 参 考 文 献

- (1) “高速原型炉燃料集合体及び炉心構成要素設計用物性値集”  
PNC SN 241 85-23 (1985)
- (2) J. H. Kittel et al, “Plutonium and plutonium Alloys as Nuclear Fuel Materials”, Nucl. Eng. Des. 15 (1971) 373-440
- (3) H. Matzke, “Science of Advanced LMFBR Fuels”, North-Holland Physics Publishing, 1986

付 録 B

ス ケ ジ ュ ー ル

表1 金属燃料を用いたFBR研究開発の進め方(案)

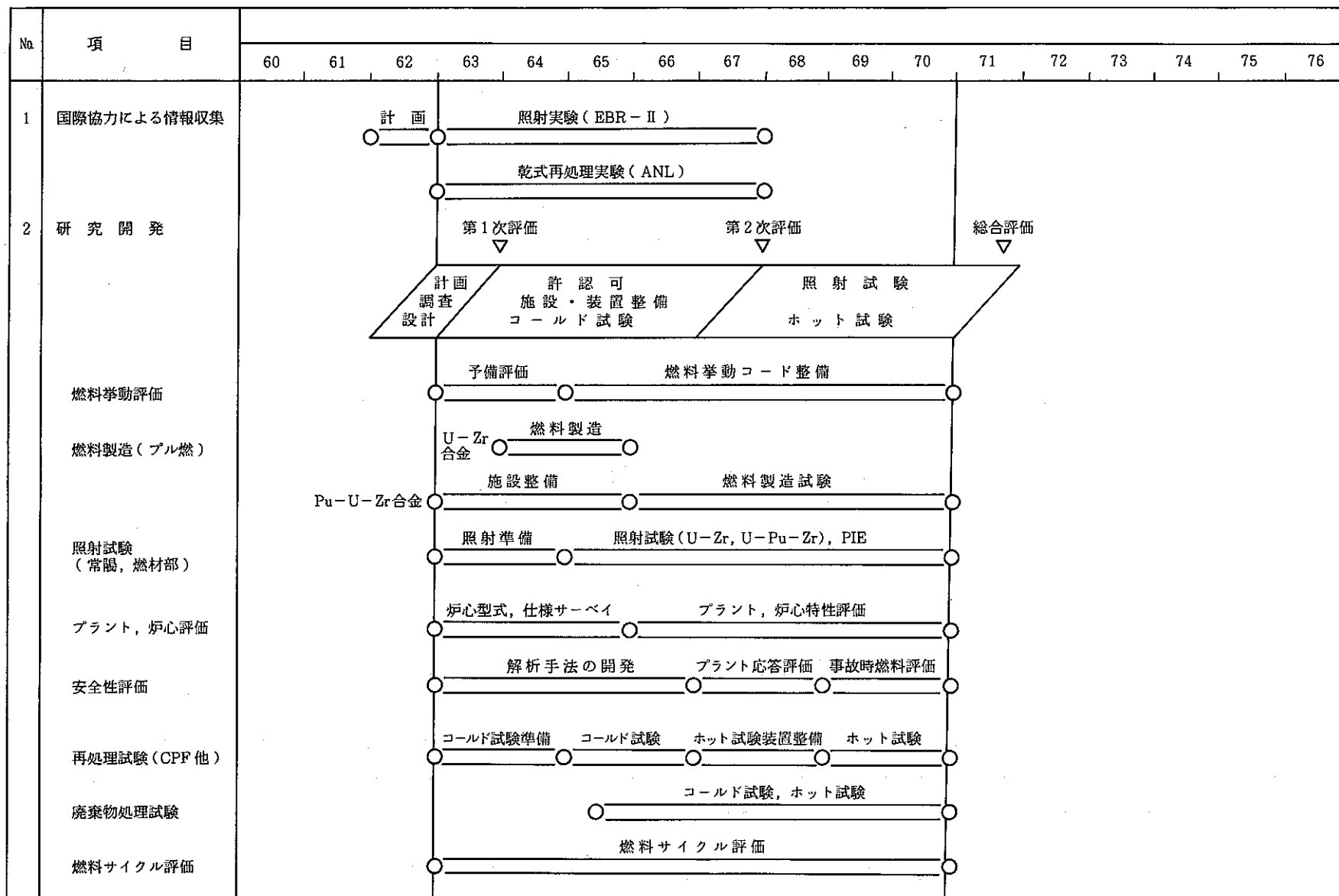
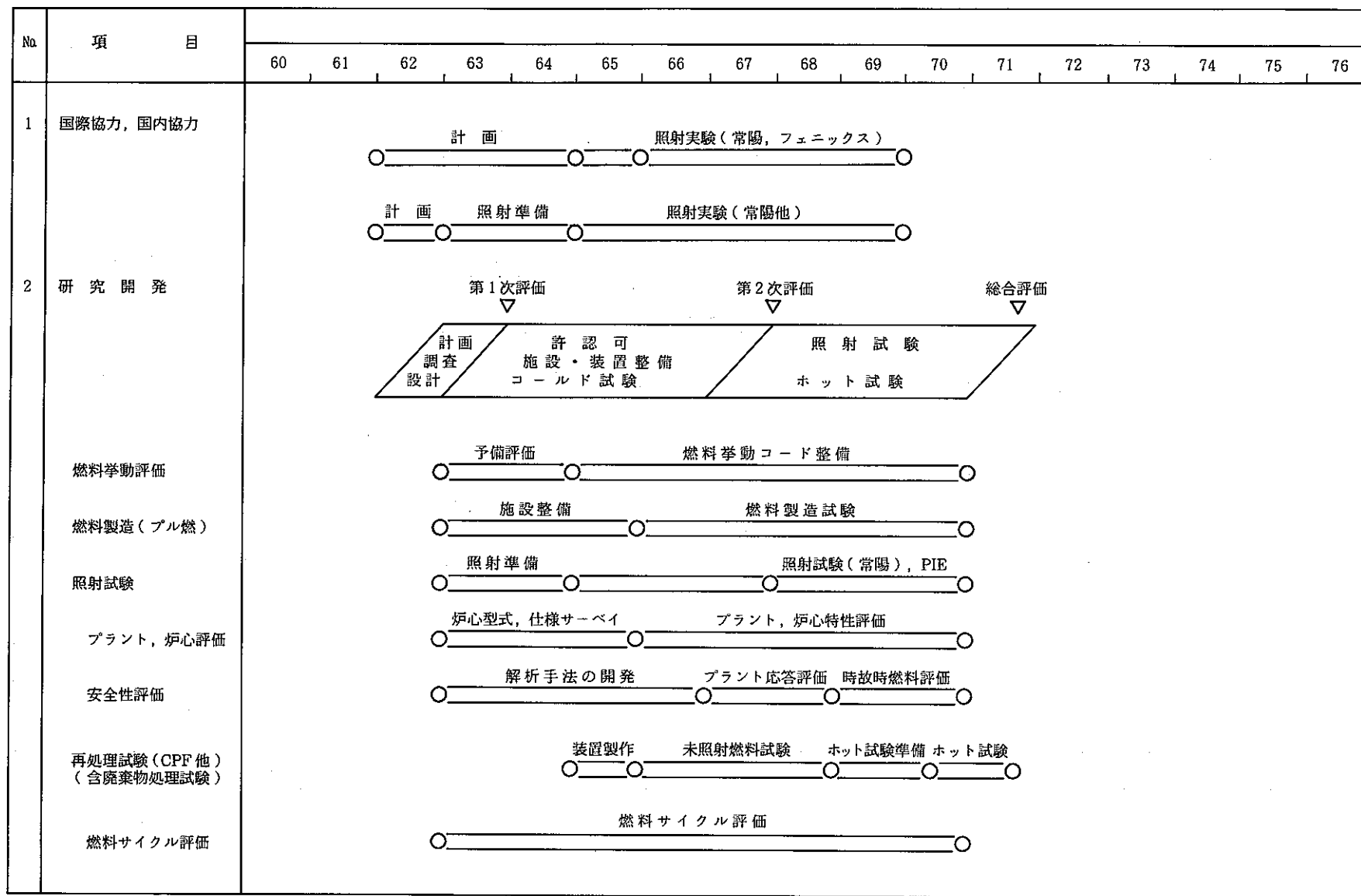


表2 炭，窒化物燃料を用いたFBR研究開発の進め方(案)





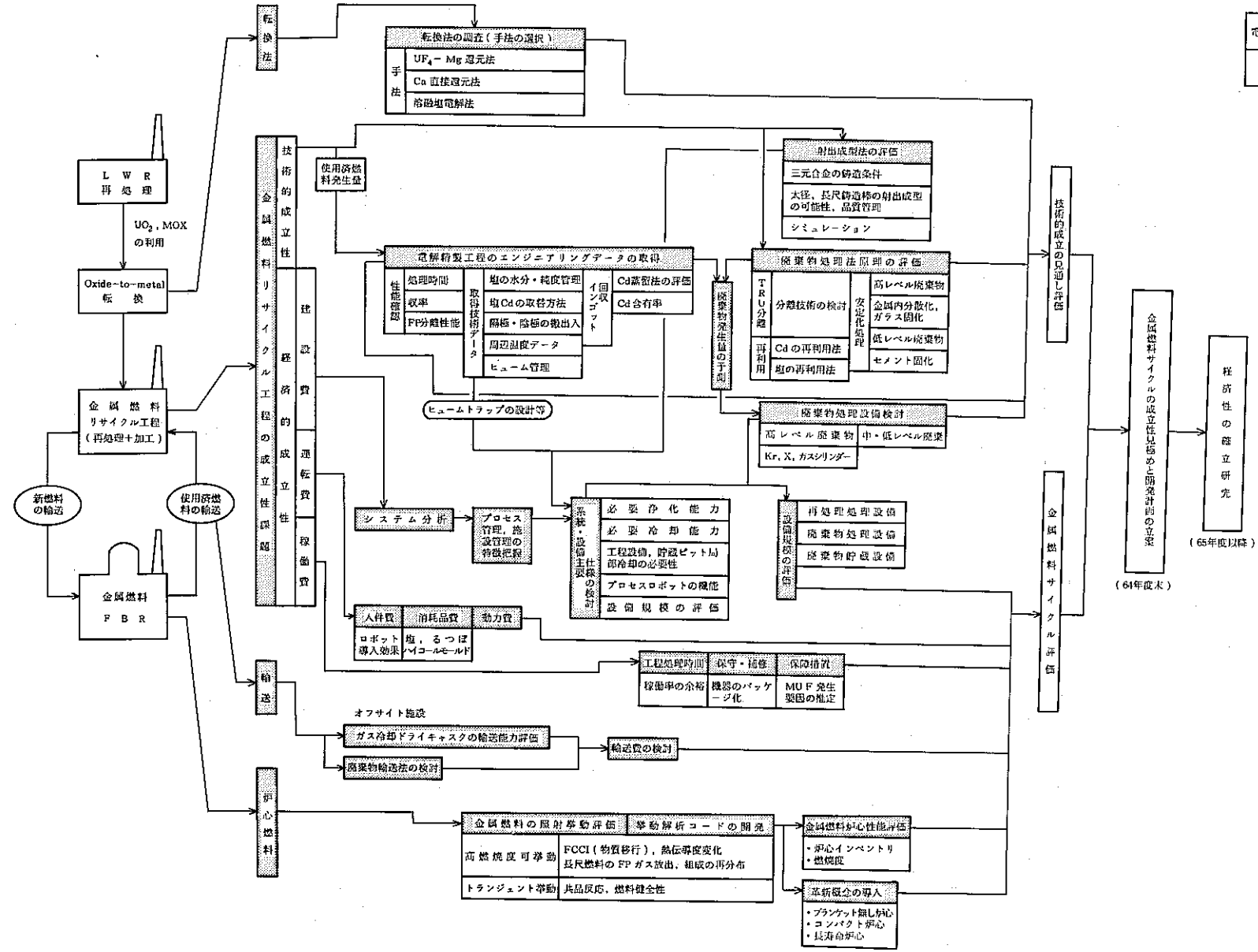
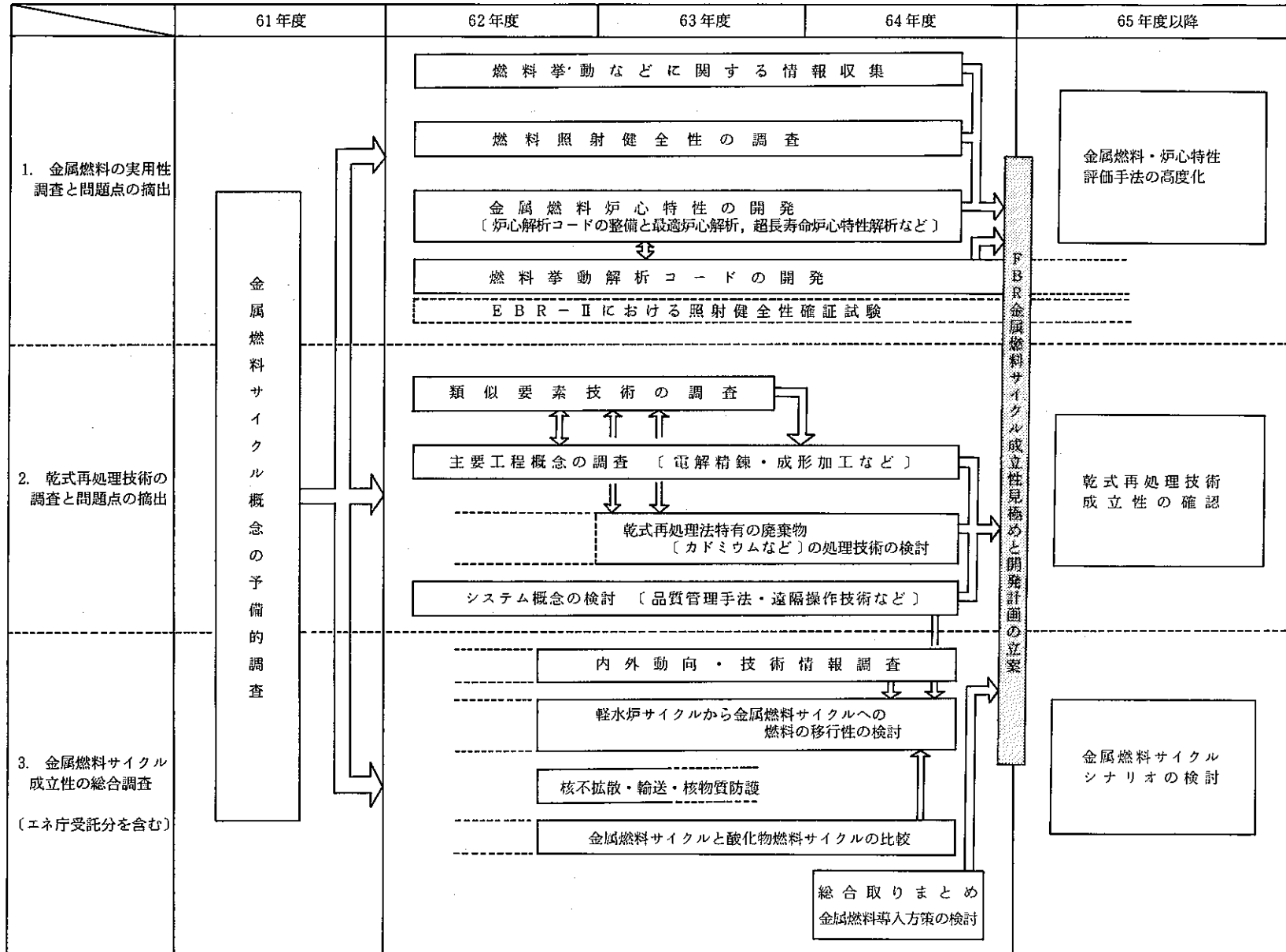
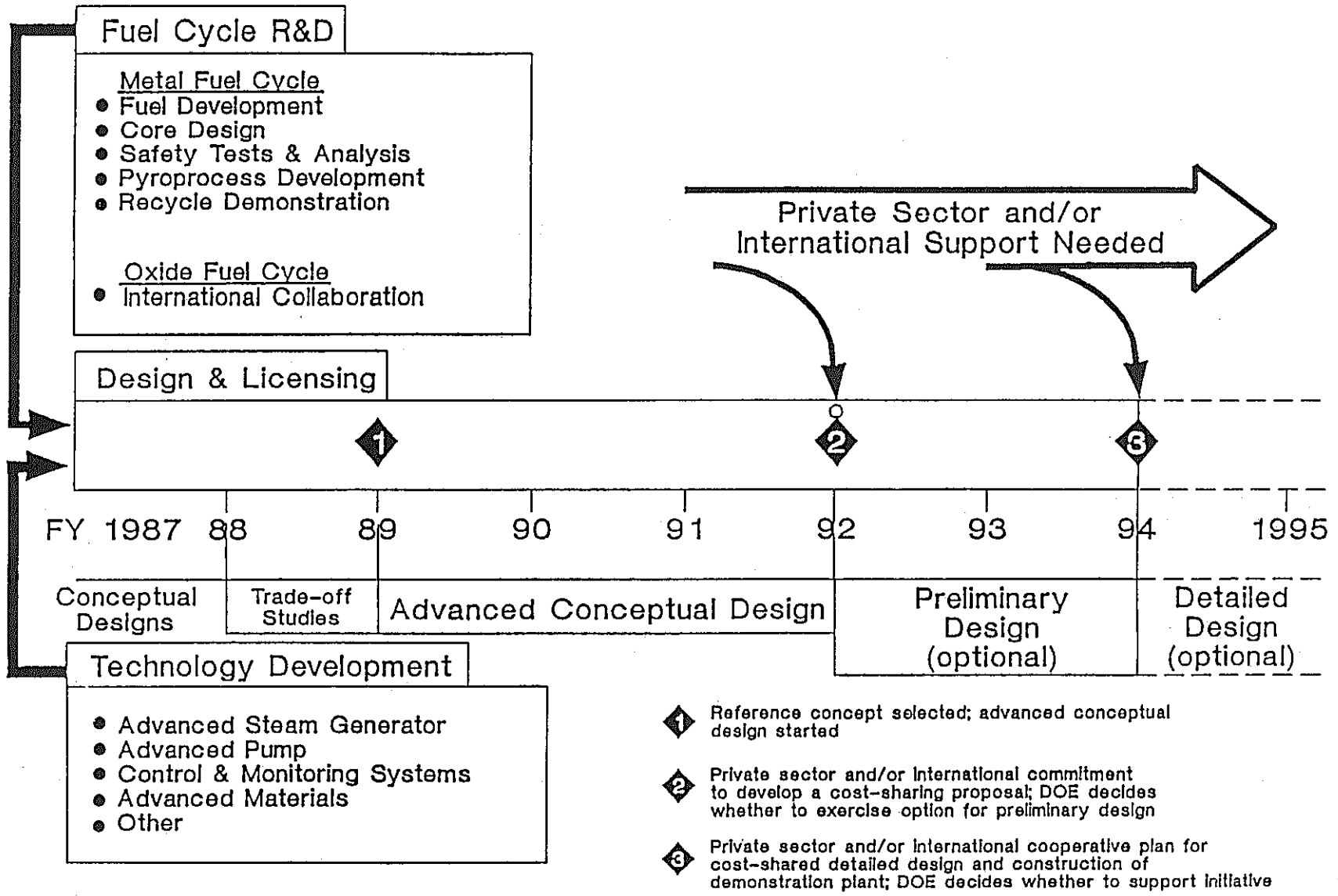


図1 乾式再処理技術の検討課題

表3 FBR 金属燃料サイクルの成立性評価のための調査・研究スケジュール





November 23, 1987

2 Advanced Lmr Program Schedule

表4 米国の金属燃料開発計画

項目	年	S. 60		61		62		63		64		65		66		67		68	
	暦年	'85		'86		'87		'88		'89		'90		'91		'92		'93	
全体計画	米会計年度	第1フェーズ				第2フェーズ													
炉心・燃料開発		<p>ATWS試験終了(U燃料)      ATWS試験(U-Pu-Zr燃料)</p> <p>U炉心      U-Pu-Zr炉心</p> <p>10%燃焼度      14%燃焼度(ゴール)</p> <p>照射開始      U-Pu-Zr炉心転換開始      10%燃焼度      燃料サイクル実証試験開始      燃料サイクル実証試験終了</p> <p>(FFTF)      MOX炉心      U-Pu-Zr炉心</p> <p>9%燃焼度燃料×2本      14%燃焼度燃料×2本</p> <p>PRISM, SAFR炉心設計      燃料管理手法</p>																	
燃料サイクル開発		<p>燃料製造設備</p> <p>燃料製造設備 (EBR-IIに併設)      試験用ピンの製造      試験用ピン及びEBR-II炉心燃料の製造</p> <p>燃料サイクル施設 (EBR-IIに併設)      設計      施設改造      機器搬入      燃料サイクル実証試験, FFTF炉心燃料製造</p> <p>高温冶金法再処理技術 (ANL-E)      パイロットスケール試験装置      エンジニアリングスケール試験装置</p> <p>      フィージビリティ研究      小規模試験      廃棄物処理</p> <p>設計等      実用規模燃料サイクル施設設計, 装置開発</p>																	

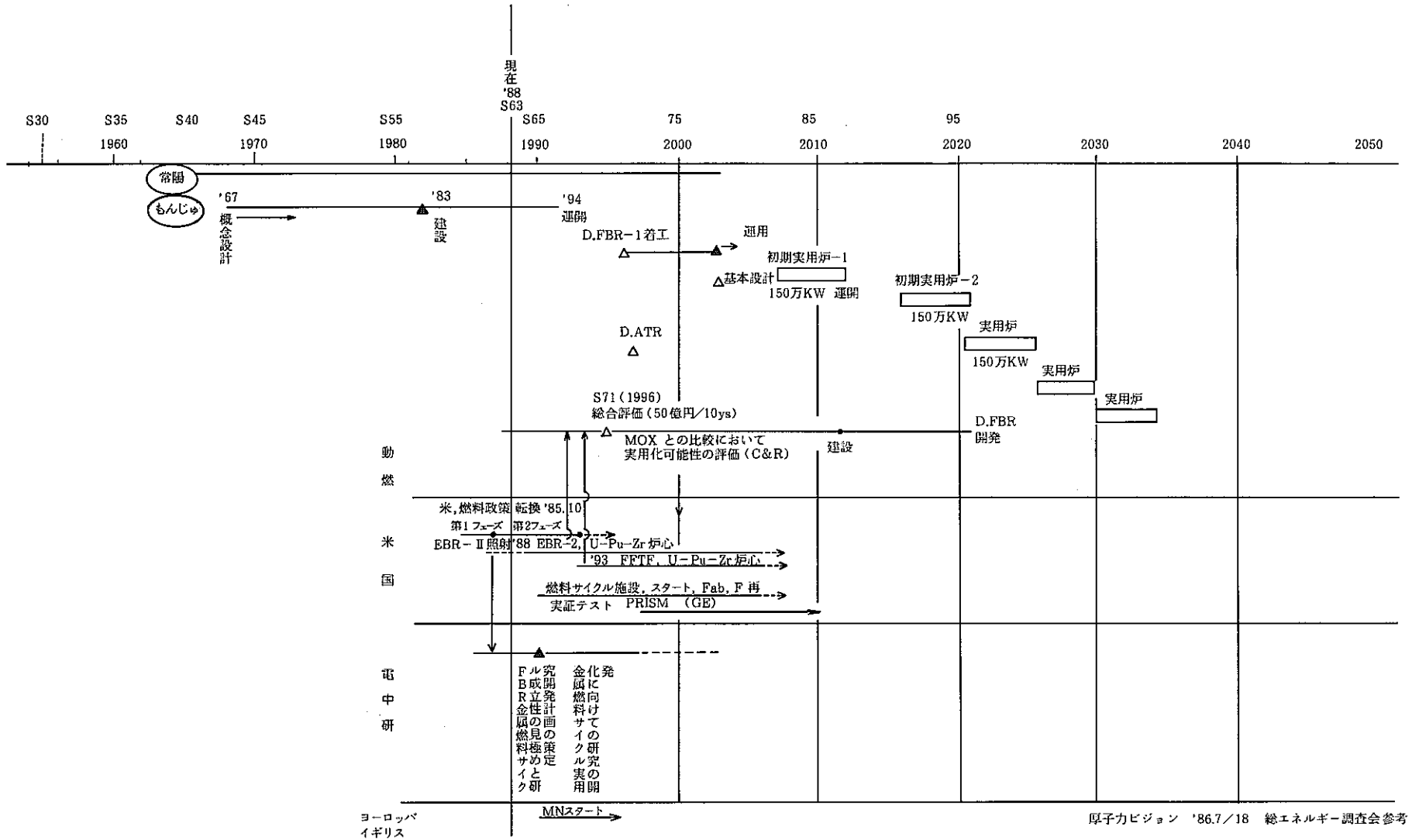


図3 新型燃料スケジュールまとめ

## 付 録 C

我が国における金属燃料に関する研究開発

## 我が国における金属燃料に関する研究開発

### 1. 動 燃

- (1) 63年度より10年間程度の計画で金属、チッ化物、炭化物燃料に関する技術評価のための情報収集と研究開発を実施し、MOX燃料との比較により新型燃料実用化の可能性の評価を行う予定。
- (2) 本研究は原研と協力して行われる予定で、動燃が工学的な部分、原研が基礎的な部分を分担する。動燃は金属とチッ化物に重点を置く。
- (3) 予算規模は63年度1億円（科技厅の査定段階）程度で、10年間では約50億円（うち金属燃料30億円）である。
- (4) 研究体制は、企画部が全体システムをとりまとめ、研究開発本部、核燃料部、再処理部がそれぞれの専門に応じてR&Dを行う。
- (5) 研究内容は炉心設計、燃料照射挙動、燃料製造、再処理、廃棄物処理、経済性評価など燃料サイクル全体をカバーしているが、燃料製造と再処理に比較的重点を置いたものとなる。
- (6) 研究項目とスケジュールを図2に示す。

### 2. 原 研

- (1) 炭化物、チッ化物燃料に関する基礎的な研究を以前から継続中である。
- (2) 63年度より、上記に金属燃料を加え、動燃との協力により研究を行う。
- (3) 原研としては、炭化物、チッ化物の基礎研究は今後2年程度で終了（その後は「常陽」における照射試験に移行する予定）するため、今後は金属に重点が移る。
- (4) 内容は、大洗のプルトニウム燃料研究室（材料試験炉）において燃料物性、照射後試験等を高速臨界集合体（FCA）において炉物理特性、NSRR炉において安全性研究（過出力試験）等の基礎研究を考えている。
- (5) 予算規模は中長期計画のとおりであり、63年度0.8億円程度（金属燃料は0.3億円）、10年間で約12億円（同8.4億円）程度である。

### 3. 電中研

- (1) 60年12月より、EPRIとの共同研究の1つとして金属燃料サイクルの研究を開始。EPRIのバックアップはANL（DOE）。
- (2) 本共同研究で、電中研は金属燃料の特長の大型炉心への適用性評価、再処理・燃料成型加工技術の調査と基礎データの収集、廃棄物処理法を検討し、EPRI（ANL）は炉心・燃料の照射挙動、乾式再処理プロセス全般を検討をしている。
- (3) 予算規模は62年度2億円、63年以降5年間で約25億円程度である。

- (4) 研究体制は、FBRプロジェクトチームが全体をとりまとめ、狛江研究所、メーカ、大学がそれぞれの専門に応じてR&Dを行う。また、研究計画全体の評価のために、電力、動燃、原研、大学、メーカ委員を含むワーキンググループを置いている。
- (5) 研究項目とスケジュールを図3に示す。

#### 4. 通産省

- (1) 金属燃料サイクルに関するフィージビリティ調査を開始するにあたって委託先を電中研とすることに対して電事連に打診があった。
- (2) 予算は62年度0.4億円、63～65年（3年間）で2億円程度である。ただし、63年度の予算のメドがつかなければ62年度の委託はない。
- (3) 検討中の調査項目候補としては、湿式（ピューレックス法）と乾式（高温冶金法）の再処理の経済性比較、米国の金属燃料サイクル技術移転に関する核不拡散政策上の課題と技術の公開性、PRISM・SAFRの炉心設計などであり、電中研ではEPRIを通してしかるべき米国の技術コンサルタントを使って調査することを考えている。

#### 5. 原 電

- (1) 61年度より、米国における設計（PRISM・SAFR）の調査を実施中（63年度まで）。
- (2) 62年度に、大型炉心のMOXから金属燃料炉心への互換性の検討を実施中。