

JAERI - M  
88-050

改良船用炉の試設計の評価 (2)  
—燃料特性(II); キャラメル燃料(板状燃料)—

1988年3月

安保 則明・横村 武宣

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷機

改良船用炉の試設計の評価(2)  
—燃料特性(II); キャラメル燃料(板状燃料)—

日本原子力研究所原子力船研究開発室  
安保則明 ・ 横村武宣

(1988年2月16日受理)

改良船用炉試設計研究での対象炉型の1つである一体型炉で採用したキャラメル(板状)燃料について、その構造および燃料特性を明らかにするとともに、棒状燃料との比較を行い、キャラメル燃料の総合特性について検討・評価を行った。

Evaluation of the Trial Design Studies for  
an Advanced Marine Reactor (2)

— Fuel Specific Characteristics (II);  
Caramel (Plate-Type) Fuel —

Noriaki AMBO and Takeyoshi YOKOMURA

Office of Nuclear Ship Research and Development  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Toranomom, Minato-ku, Tokyo

(Received February 16, 1988)

As for the CAMEL fuel (plate-type fuel) that was the fuel of the integrated-type reactor which was one of the trial design studies for an Advanced Marine Reactor, its structure and its fuel specific characteristics were studied and compared with a fuel rod (cylindrical fuel), and the total characteristics of the caramel fuel was reviewed and evaluated.

Keywords: Plate-type Fuel, Cylindrical Fuel, Caramel Fuel, Design,  
Marine Reactor

## 目 次

1. 序 言 .....	1
2. 概 要 .....	2
3. 改良船用炉試設計の炉心, 燃料 .....	3
3.1 炉 心 .....	3
3.2 燃 料 .....	3
4. キャラメル燃料の燃料特性 .....	12
4.1 構造および製造方法 .....	12
4.2 照射実績 .....	14
4.3 キャラメル燃料の設計基準 .....	15
4.4 耐負荷変動性能 .....	17
4.5 特徴のまとめ .....	19
5. キャラメル燃料の研究開発項目 .....	32
6. 結 言 .....	35

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Conception .....	2
3. Fuels and Cores of Trial Design Studies for an Advanced Marine Reactor .....	3
3.1 Core .....	3
3.2 Fuel .....	3
4. Fuel Specific Characteristics of Caramel Fuel .....	12
4.1 Structure and Fabrication Method .....	12
4.2 Irradiation Results .....	14
4.3 Design Standard for Caramel Fuel .....	15
4.4 Capability for Load Follow .....	17
4.5 Conclusion of Characteristics .....	19
5. Research and Development Items of Caramel Fuel .....	32
6. Conclusions .....	35

## 1. 序 言

原子力船研究開発室は、昭和58年から60年度にわたり、改良船用炉に関する試設計研究を実施した。これは小型・軽量で安全性、信頼性、経済性の優れた船用炉（改良船用炉）としての適性を有する炉型式を明らかにすることをねらいとし、現状技術に基づく複数の船用炉型式について、同一仕様のもとでの設計研究を行ない、それらの特徴、性能等を明らかにしたものである。

設計の対象とした炉型式は、半一体型（加圧水）炉、一体型（加圧水）炉及び自己加圧一体型（加圧水）炉の3炉型で、それぞれわが国固有の技術及びフランス、西ドイツとの提携技術を基盤技術としている。

昭和61年度には、試設計研究の成果を踏まえて、改良船用炉の研究開発を進めるに当たり、将来の船用炉として最も優れた炉型を選択し、合わせて必要な研究開発課題を明らかにすることを目的として、3つの試設計炉につき、以下の項目からなる比較、検討、評価を行なった。

- (1) 試設計炉
- (2) 燃料特性 (I)丸棒燃料  
      "      (II)キャラメル燃料
- (3) 炉心特性
- (4) 蒸気発生器特性
- (5) 格納特性
- (6) 動特性
- (7) 遮蔽性能 (I) 遮蔽設計の妥当性  
      "      (II) 遮蔽の最適化に関する調査
- (8) 経済性

さらに、船用炉用途に関する調査を実施し、船用炉用途を踏まえた試設計の総合評価を実施し、用途に適合する炉型を明らかにするとともに次のステップで実施する設計研究等の目標性能、研究開発の進め方等を明らかにする。

本研究報告は、これら一連の設計評価研究のうち、(2)燃料特性(II)キャラメル燃料に関するものである。

## 2. 概 要

試設計3炉型4炉心の燃料のうち、一体型炉の燃料型式であるキャラメル（板状）燃料について、その構造および燃料特性を明らかにするとともに棒状燃料との比較をすることによって、キャラメル燃料の特性、特徴を検討、評価する。

特に、キャラメル燃料が優れているといわれる耐負荷変動性能について、その優れている根拠を検討する。

また、キャラメル燃料の許容設計限界や事故時の評価基準の有無および検証方法についても検討する。



### 3. 改良船用炉試設計の炉心、燃料

半一体型炉の評価炉心を含めた4炉心の燃料は、一体型炉が板状燃料（キャラメル燃料）を使用している他は、半一体型炉両炉心および自己加圧一体型炉ともに丸棒燃料としている。

#### 3.1 炉 心

試設計3炉型4炉心（半一体型炉については試設計炉心と最適化設計を行った評価炉心の2炉心がある）の燃料を含めた炉心主要目を表3.1に、炉心構成を図3.1～図3.4に示す。

主要な炉心要目である炉心平均出力密度、炉心平均燃焼度および炉心寿命（燃料交換間隔）は、一体型炉炉心および半一体型炉の評価炉心が高性能であり、燃焼度は約30,000～32,000 MWD/tU、出力密度は約50～61 KW/ℓ、また、炉心寿命が4年である。なお、自己加圧一体型炉は、出力密度が55 KW/ℓと高いが、炉心寿命が3年と短く燃焼度も19,000 MWD/tUという値である。

また、炉心構成で特徴的なのは、全炉心ともに反応度制御方式として制御棒の他に可燃性毒物を採用しており、その材質としてガドリニアを使用していることおよび型式として燃料 $UO_2$ 中にガドリニアを混入する型式だけでなく混入せずにアルミナとガドリニアを混焼した均質型ガドリニアBP棒とする型式を採用していることである。

ケミカルシムによる制御方式は自己加圧一体型炉が採用している。

#### 3.2 燃 料

各炉心の燃料型式は、一体型炉が板状燃料である他は3炉心とも丸棒燃料である。各炉心の燃料板（棒）および燃料集合体の構造を表3.2および3.3に、また燃料集合体内の燃料、制御棒および可燃性毒物の配置を図3.5～3.8に示す。

唯一、一体型炉が採用している板状燃料（キャラメル燃料）の試設計における仕様および特性を以下に示す。

##### (1) 板状燃料の仕様

本炉心に使用する燃料はキャラメル燃料である。即ち、縦21.1×横21.1×厚さ2.5 mmの直方体の $UO_2$ 焼結体をタイル状に並べ、ジルカロイで被覆した板状燃料である。各々の $UO_2$ 焼結体はジルカロイ格子により互いに気密に仕切られている。

13枚のキャラメル燃料板の4周をジルカロイ側板により閉囲し、1体の燃料束を構成する。このジルカロイ側板は燃料板スペーサを兼ね燃料板端部に溶接されており、また、4周のジルカロイ側板も互いに溶接構造で組立てられている。

4体または3体の燃料束により1体の燃料集合体を構成する。それら燃料束を、ジルカロイ角材を介して溶接により組立て、集合体中央部に制御棒挿入の為に十字形通路を形成する。

燃料集合体下部には、ノズルが取付けられており、そのノズルを介して下部炉心板に対して位置決めする。燃料集合体上部には、制御棒ガイドが取付けられ、制御棒ガイド上部にて制御棒駆動装置下部支持板に位置決めする。制御棒ガイド上部には、水流力及び付加加速度による燃料集合体の移動を制限し、熱膨張を吸収する為のスプリングがある。

## (2) 板状燃料の燃料特性

キャラメル燃料は、船用炉用燃料という観点から棒状燃料と比較した場合、以下の様な長所を有している。

- (a) 被覆破損の可能性が少いため、一次冷却水の放射能レベルを低く抑えることができる。
- (b) 負荷変動特性が優れている。
- (c) 剛性が高く、船用炉の特徴である、振動、動揺、衝撃等に強い。

また、燃料集合体は次の様な特徴を持っている。

- (a) 剛性が高く船用炉心に適している。

燃料板は棒状燃料に比べて剛性が高く、燃料集合体も燃料板の溶接により組立てているので剛性が高い。この為、振動、動揺の条件の厳しい船用炉心に適した構造であると共に、燃料交換等の燃料取扱い時の燃料損傷の危険を少なくすることが出来る。

- (b) 燃料集合体毎の一次冷却水の流量配分が確実に行える。

燃料集合体は、前述の如く周囲をジルカロイ側板で囲った閉構造としている為、下部ノズルのダイヤフラムを調節する事により、各燃料集合体毎の流量を、炉心熱水力設計の見地から最適な値に配分する事ができる。

以上の各特性について、次章以降でより詳細に検討する。

表 3.1 炉心主要目

半一体型炉 (試設計)	半一体型炉 (評価炉心)	一体型炉	自己加圧 一体型炉
炉心平均出力密度 33.8 kW/l	61.2 kW/l	50.4 kW/l	55 kW/l
炉心寿命 4年	4年	4年	3年
燃焼度(炉心平均) 18000 MWD/tU	32000 MWD/tU	30400 MWD/tU	19000 MWD/tU
燃焼度(局所最高) 44000 "	62000 "	55200 "	41000 "
燃料型式 丸棒燃料	丸棒燃料	板状(キャラメル) 燃料	丸棒燃料
燃料被覆材 ジルカロイ-4 (ライナ付)	ジルカロイ-4 (ライナ付)	ジルカロイ	ジルカロイ-4 (ライナなし)
燃料集合体数 37体	37体	32体	16体
制御棒型式 クラスタ型	クラスタ型	十字型	クラスタ型
制御棒材質 B <sub>4</sub> C	B <sub>4</sub> C(濃縮)	ハフニウム	B <sub>4</sub> C
制御棒本数 21本	21本	24本	16本
制御棒駆動装置基数 21基	21基	12基(2本を駆動)	16基
燃料濃縮度 第1領域 3.7wt% 第2領域 4.7wt%	第1領域 5.7wt% 第2領域 6.7wt%	第1領域 5.8wt% 第2領域 6.9wt%	第1領域 3.8wt% 第2領域 5.4wt%
制御方式 ①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・燃料内混入タイプ	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・燃料内混入タイプ ・GdBP棒	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・GdBP棒	①制御棒 ②可燃性毒物 ・材質ガドリニア ・GdBP棒 ③ケミカルシム (冷却材中ボロン)
炉心等価直径 158 cm	131 cm	132.9 cm	136 cm
炉心有効高さ 150 cm	121 cm	143.2 cm	125 cm
熱流束熱水路係数 3.36	3.96	4.39	2.1
平均線出力密度 6.1 kW/m	7.1 kW/m	---	13.4 kW/m
最大線出力密度 20.5 kW/m	28.1 kW/m (PCI解析上は 34 kW/m)	---	40.2 kW/m

表 3.2 改良船用炉試設計 4 炉心の燃料構造

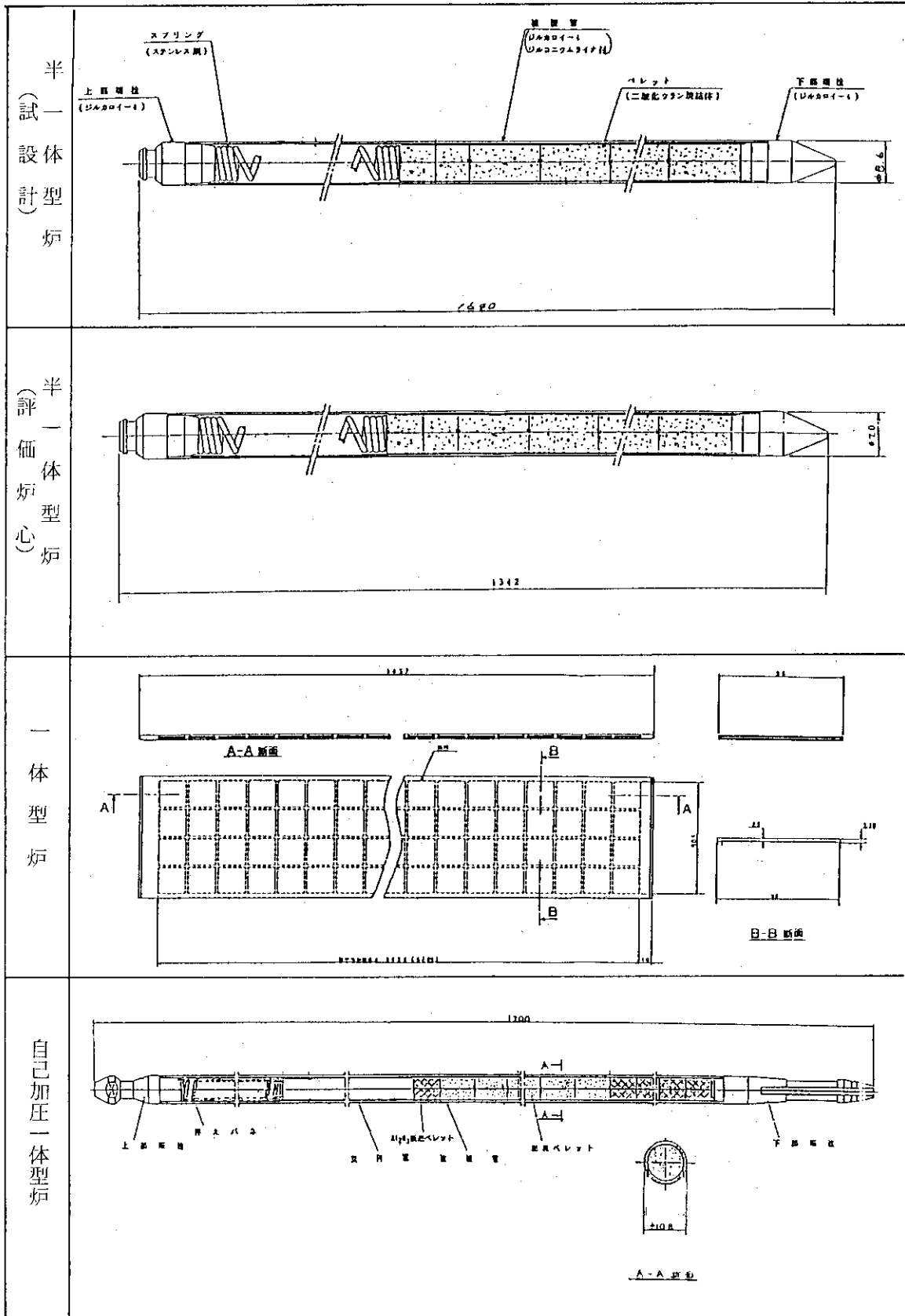


表 3.3 改良船用炉試設計 4 炉心の燃料集合体構造

<p>半 (試 一 設 體 計) 型 炉</p>	
<p>半 (評 一 備 体 炉 心)</p>	
<p>一 体 型 炉</p>	
<p>自 己 加 压 一 体 型 炉</p>	

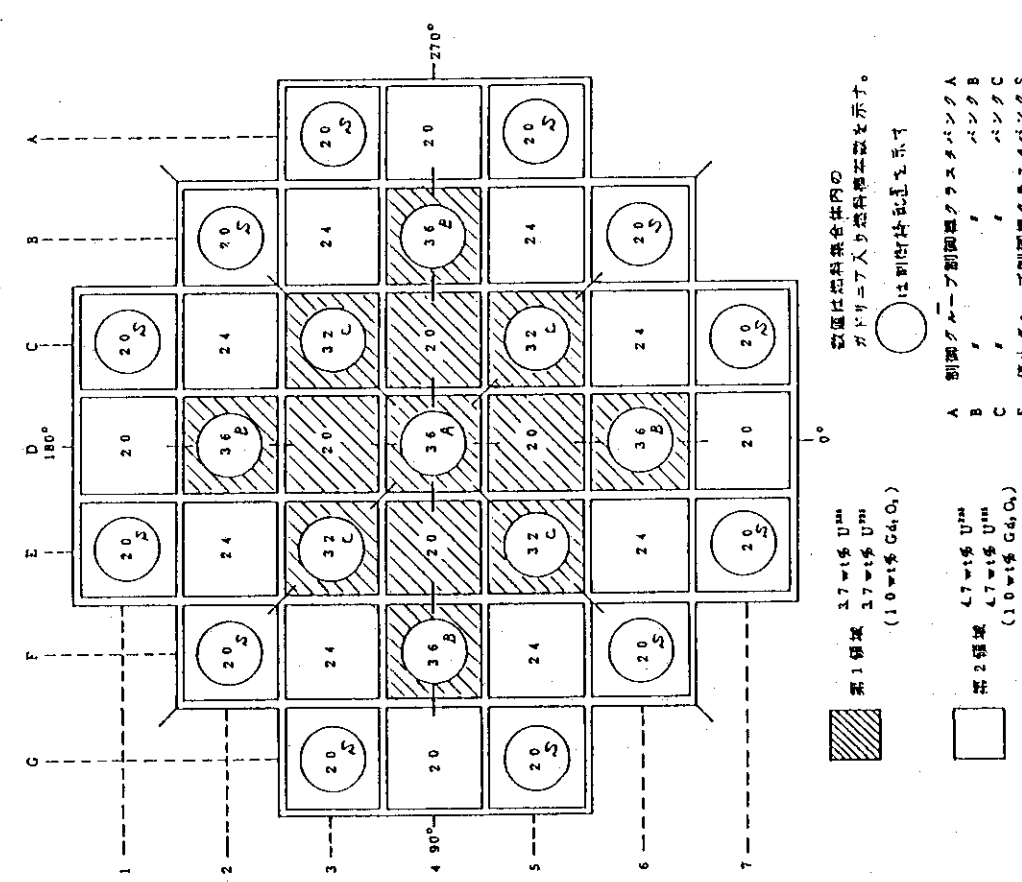
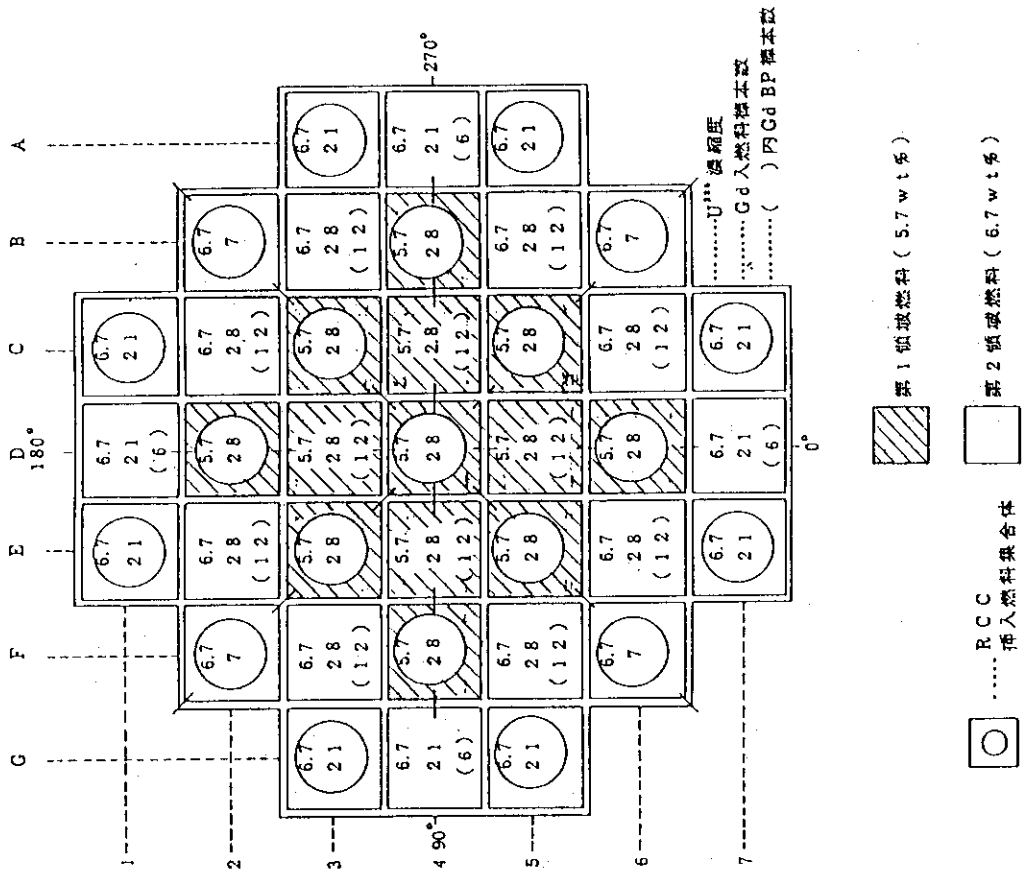


図3.2 半一体型炉 (評価炉心) の炉心構成

図3.1 半一体型炉 (試設計) の炉心構成

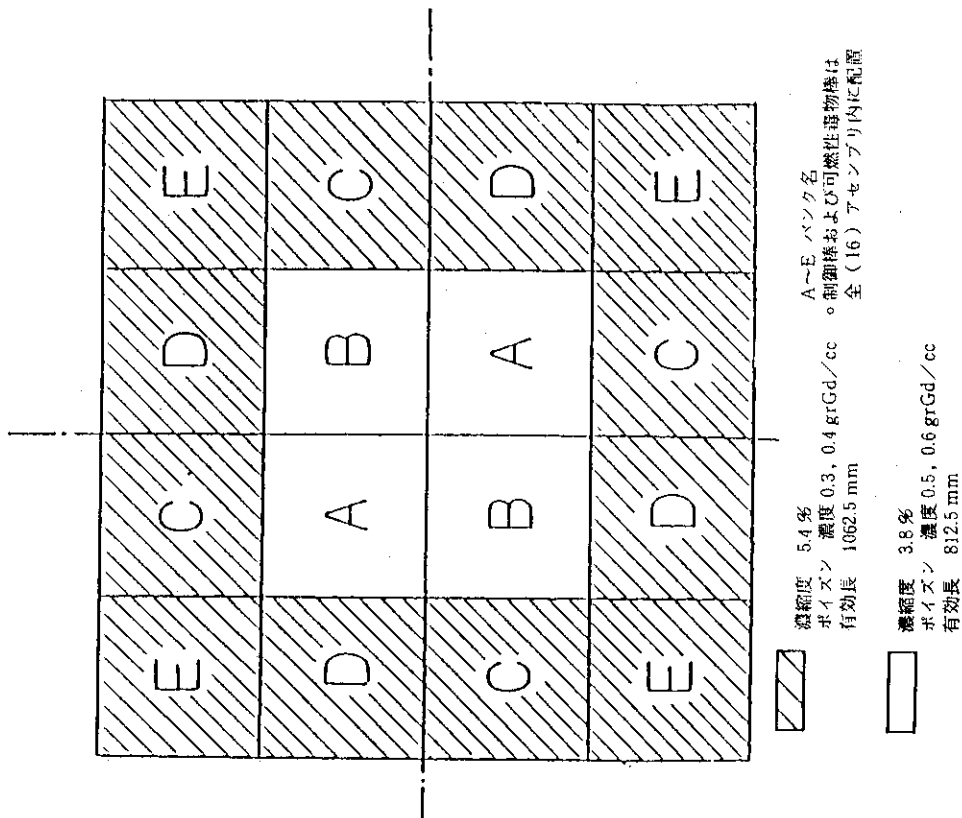


図 3.4 自己加圧一体型炉の炉心構成

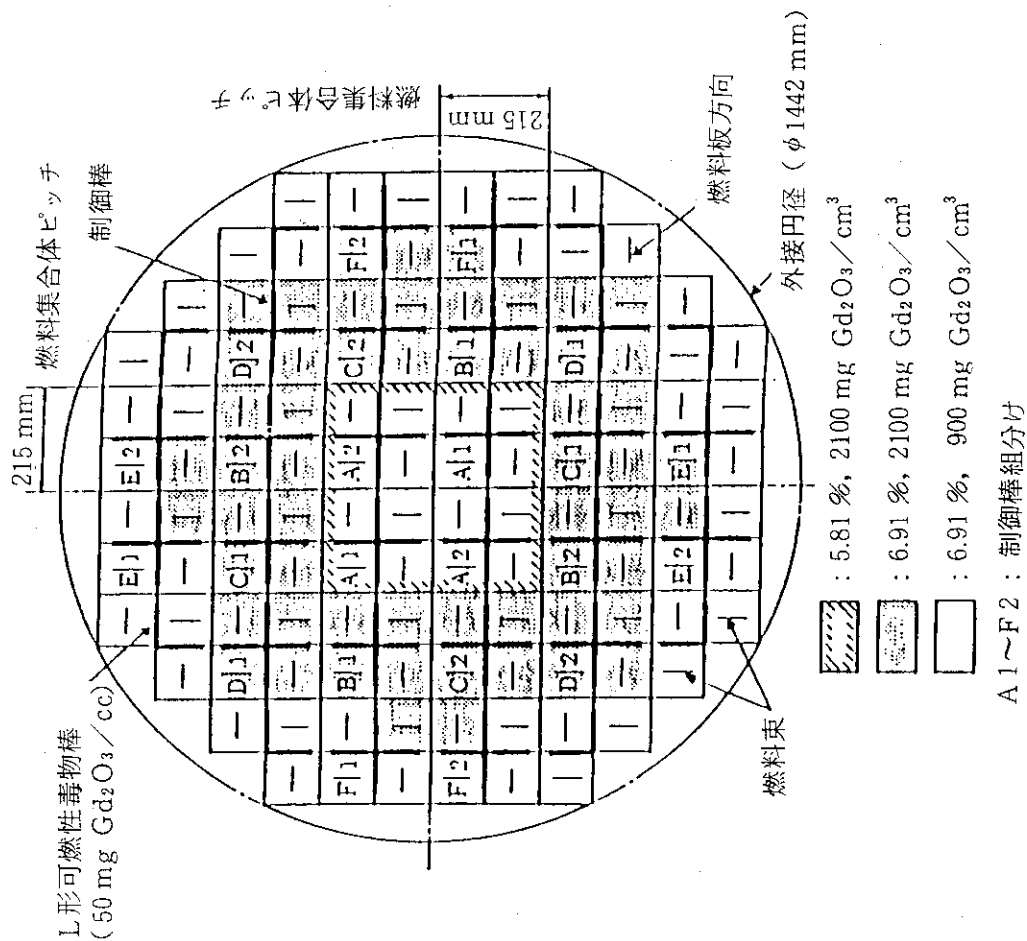


図 3.3 一体型炉の炉心構成

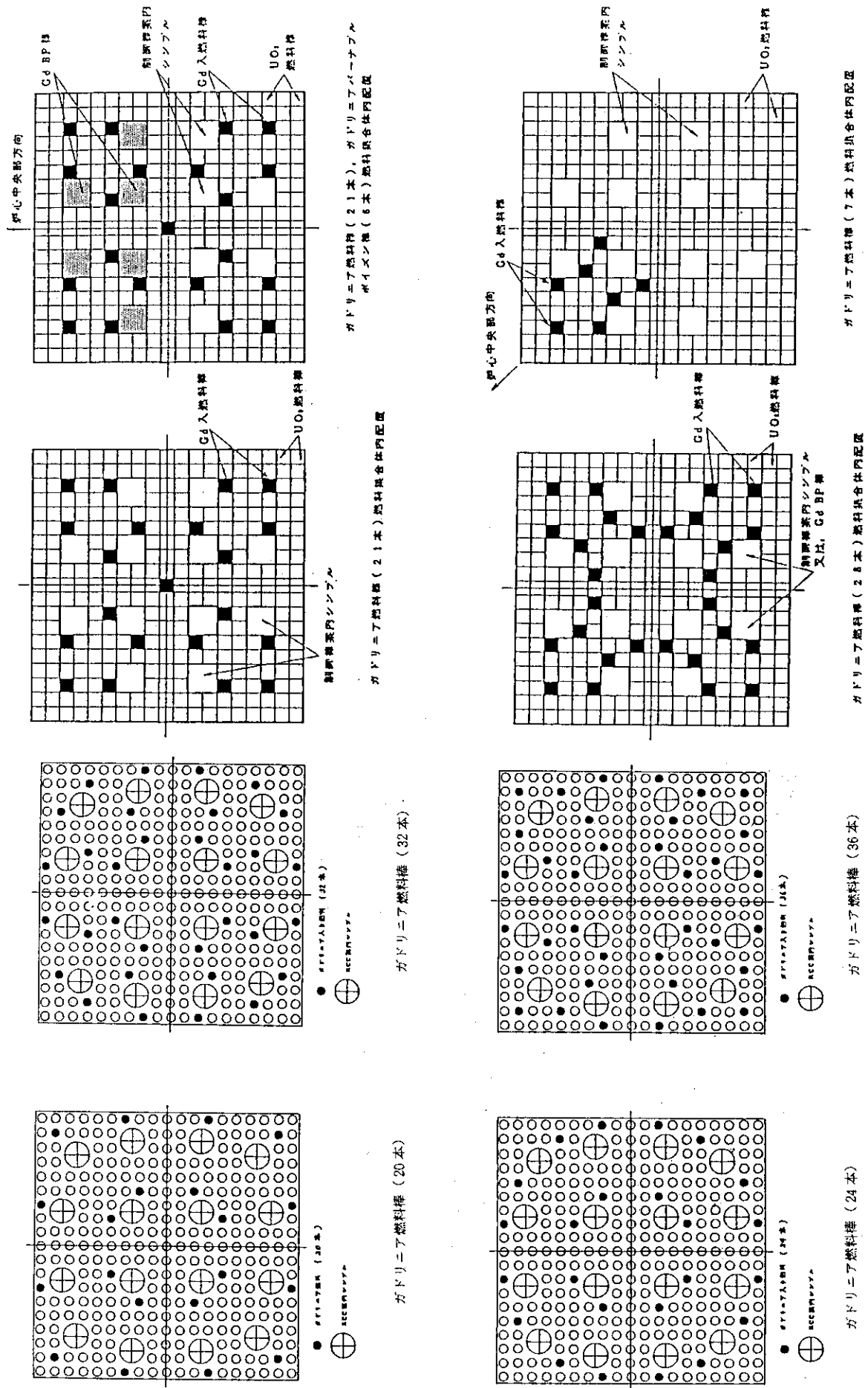


図 3.5 半一体型炉 (試設計) の燃料集合体内配置

図 3.6 半一体型炉 (評価炉心) の燃料集合体内配置





## 4. キャラメル燃料の燃料特性

### 4.1 構造および製造方法

#### 4.1.1 キャラメル燃料の構造

##### (1) 燃料板の構造

燃料板の寸法等は炉心の設計によって異なるが、CASに装荷する場合の燃料板を例にとって述べる。

燃料板は長さ約2000mm，幅約100mm，厚さ5mmであり，その中には直方体の焼結燃料体（縦約20mm×横約20mm×厚さ4mm，この形状から『キャラメル』と呼んでいる）がタイル状に配列されている。

これらキャラメルは縦，横がジルカロイ格子で仕切られ，上下もジルカロイ製薄板で覆われており，それぞれが互いに独立した区画構造となっている。（図4.1）

燃料板についても前述したように，寸法ならびに軸方向および長さ方向のキャラメルの配列個数は，炉心の設計に応じて変わってくる。

##### (2) 燃料集合体の構造

燃料集合体は，（10～20枚の）燃料板が平行に一定間隔（この燃料板間のすきまが一次冷却水流路となる）を保って束ねられて構成される。

燃料集合体は燃料板を一定間隔に固定するためにサイドスペーサーを使用しており，これが燃料板の側面に溶接されている。サイドスペーサーにより束ねられた燃料集合体は，チャンネルボックスの中に入れられている。

CAS炉心の場合，燃料集合体の断面は矩形をしており，これが2体1組で1つのチャンネルボックスの中に組み込まれている。（図4.2）

#### 4.1.2 キャラメル燃料の製造方法

##### (1) 燃料板製造法

燃料板を構成する要素は図4.3に示すように以下のとおりである。

- 1) キャラメル（ $UO_2$ 焼結体）
- 2) 格子（ジルカロイ）
- 3) 被覆板（ジルカロイ）
- 4) 縁板（ジルカロイ）
- 5) 端板（ジルカロイ）

これら要素の製造，製作，組立て，溶接法について以下に述べる。

##### (2) 格子の製作

キャラメルを区画するジルカロイ格子の製作方法として，次の3つの方法が実施されている。

包装式

## 縁巻式

## 格子組立式

以下に上記3方法について述べる。

## 包装式

この方法は、いわゆる“キャラメル”を包装紙で包むようにキャラメルを1個ずつ薄いジルカロイ箔で包み、(図4.4)、これを図4.5のように配列させる方法である。このようにして、隣り合うキャラメルはそれぞれを包むジルカロイ箔(これが格子を形成する)により区画分離される。

## 縁巻式

キャラメルの周囲を2個のジルカロイUピースで囲み、これを点溶接により留める。(図4.6参照)このUピースにより縁巻きされたキャラメルを(1)と同様に配列させる。このようにして縁巻きされたジルカロイUピースにより、キャラメルを区画分離する格子が形成される。

## 格子組立式

ジルカロイの線材で予め格子を組み立て、溶接する。この組み立てられた格子の中にキャラメルを配列する。(図4.7)

## (3) 被覆板、縁板、端板の製作

被覆板、縁板および端板はジルカロイ板材から作る。これら被覆材はすべて拡散溶接が良好に行われるよう、溶接面が精密に研磨される。被覆板は全長にわたって正確に切断され、縁板はフライス盤で切断する。

## (4) 燃料板の組立て

格子で区画され配列されたキャラメル群は、両横を2枚の縁板で、両端を2枚の端板で、そして上下を2枚の被覆板で覆い、溶接で密封され、燃料板が出来あがる。これらの組立ておよび溶接について以下に述べる。

燃料板を構成する被覆材は点溶接により仮留めされる。この点溶接はコンデンサーの放電による特殊な溶接機で行われ、溶接のピッチも自動的に決められる。

点溶接後、燃料板は両横を溶接するため、ローラ抵抗溶接機に送られる。両横は同時に溶接される。このように両横を対称に同時に溶接することによって、拡散溶接時の燃料板の変形を防ぐ。

燃料板の内部を真空に保つため、両端は必ず真空中で閉じなければならない。この溶接は電子ビーム溶接により行われる。

## (5) 拡散溶接

内部を真空に閉じられた燃料板は、拡散溶接機に送られる。拡散溶接の条件は次のとおりである。

温度：800～900℃

圧力：1000 bars

保持時間：2～4時間

## 4.2 照射実績

キャラメル燃料の照射実績については、材料試験炉による照射実験および実際の炉心PAT, CAP, OSIRIS)への燃料装荷による照射によって、かなりの照射実績が得られている。

表4.1に示すように、フランスにおいては1960年代初頭から二酸化ウラン焼結体を用いたキャラメル燃料の開発が着手され、1965年からはカプセル照射が開始された。また、1974年からは分離型PWR PATに、1975年からは一体型PWR CAPの炉心に装荷され、照射実績を重ねていた。さらに、1976年には材料試験炉SILOEを用いて低温、低圧のプール水中での照射試験が行われ、キャラメル燃料の開発段階は、材料試験炉燃料としての要求にも応えられる段階にあった。そこで1977年、OSIRIS炉の全炉心をキャラメル燃料に換装することが決定され、1980年1月にはキャラメル炉心による運転の第1サイクルが開始された。

OSIRIS炉は、1966年10月に供用開始されたプール型材料試験炉であり、当初その炉心は93.5%濃度UA燃料を装荷していた。

以来、OSIRIS炉でのドライバー炉心としてのキャラメル燃料の使用実績は6年間以上にわたるが、ここでは1984年1月までの4年間36運転サイクルまでのデータについて述べる。

### 4.2.1 OSIRISドライバー炉心

#### (1) 炉心仕様

OSIRIS炉の炉心要目を改良船用炉炉心と対照して、表4.2に示す。また、OSIRIS炉心の断面を図4.8に示す。

炉出力は70MWtであり、炉心は38体の標準燃料集合体と6体の制御棒付き燃料集合体(上部がハフニウム、下部が燃料)とで構成されている。

キャラメル燃料の照射実績の評価という観点からこの炉心仕様を見た場合、以下の点が注目値に値する。即ち、OSIRIS炉はスイミングプール型炉であり冷却材圧力が低く、つまり燃料板に働らく外圧が低く、かつ、高比出力であるため、キャラメル燃料の供用条件としては、改良船用炉に比べ厳しいにも拘らず、取出し燃料平均燃焼度は改良船用炉並の値を達成していることである。さらに、それを40,000MWD/tUとすることも当局から認可されており、技術的には何等問題ないことも実証されている。

#### (2) 燃料集合体仕様

OSIRIS用キャラメル燃料の仕様を、改良船用炉用キャラメル燃料の仕様と対照して表4.3に示す。

使用 $UO_2$ キャラメルの密度は $10.30g/cm^3$ であり、改良船用炉用に想定しているものと同じである。

標準燃料集合体用燃料板の構造を図4.9に示す。燃料板は巾81mm、長さ675mm、厚さ2.25mmであり、その中に、縦17.1mm、横17.1mm、厚さ1.45mmのキャラメルが $4 \times 3 \times 4 = 136$ 個並べられている。各キャラメルを独立区画に仕切る機能を果している格子の厚さは、OSIRIS炉心用燃料の場合1.50mmであるが、改良船用炉用燃料の場合はより安全側に2.0mmとしている。

この燃料板 17 枚と、側板、下部ノズルおよび集合体ハンドリング用の上部把みとにより標準燃料集合体が形成されている。

#### 4.2.2 照射実績

OSIRIS 炉は、キャラメル炉心への換装以来、1984年1月24日までに、合計36サイクル（実効全出力日数換算で888日相当）の運転を行った。

取出し燃料平均燃焼度の当初の目標値は20,000MWD/tUであったが、それは第5サイクルで達成されている。このように、低外圧、高比出力というOSIRIS 炉の運転条件下でもキャラメル燃料の性能が良好であることを確認したうえで、次第に取出し燃料平均燃焼度を増加させてきている。そして、1982年時点では30,000MWD/tUに達しているが、それらの燃料集合体の内2体については、1983年10月にそれぞれ41,200MWD/tU および39,600MWD/tUに到達するように、装荷を継続した。

それらの、40,000MWD/tU 燃焼させた燃料集合体について検査を行った結果、性能上何等問題のないことが確認されたため、取出し燃料平均燃焼度を40,000MWD/tUにすることが当局に認可された。そのためには、装荷燃料集合体の濃縮度を高める必要があり、F26サイクル（第34サイクル）からは、濃縮度7.5%の燃料集合体6体が装荷されている。

1984年1月現在までに取出した標準燃料集合体192体についての燃焼度毎のヒストグラムを、図4.10に示す。

全装荷燃料集合体の3/4以上が30,000MWD/tU以上の平均燃焼度を達成し、キャラメル破損率は初期は約 $3 \times 10^{-5}$ 、1984年現在では約 $1 \times 10^{-5}$ である。これは、OSIRIS 炉心全体のキャラメル数約 $10^5$ 個の内1個ということになる。しかも、キャラメル燃料固有の特徴により、炉の運転は殆ど影響を受けていない。

すなわち、破損キャラメルを含む燃料集合体をそのまま装荷して運転を続けても、一度被覆が破損してしまえば、FPガスはそこから洩出してしまい、被覆の膨れは進展しないことと1個の区画の破損が隣接区画には伝播しないことが実証された。

### 4.3 キャラメル燃料の設計基準

#### 4.3.1 通常運転時および運転時の異常な過渡変化時における燃料の許容設計限界

燃料の許容設計限界とは、通常運転時および運転時の異常な過渡変化時において、燃料の設計上満足すべき限界であり、継続して原子炉施設の運転をすることができる限界と定義できる。

また、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針について」では、「運転時の異常な過渡変化」に対する安全評価の判断基準として、燃料関連だけを示すと、以下のように規定している。

- ① 最小限界熱流束比又は最小限界出力比が許容限界値以上であること。
- ② 燃料被覆管は機械的に破損しないこと。
- ③ 燃料ペレットの保有熱量は許容限界値を超えないこと。

これら指針に対して、棒状燃料では具体的にそれぞれの許容設計限界を定めている。また、キ

キャラメル燃料の許容設計限界は、棒状燃料のそれとは必ずしも対応しないが、棒状燃料の許容設計限界の項目に従って、棒状燃料およびキャラメルの燃料の許容設計限界および根拠について、比較して表 4.4 に示す。

キャラメル燃料の燃料中心最高温度の許容値は、燃焼度の関数として表わした技術限界曲線で示される。この技術限界曲線は、キャラメル燃料の照射試験および照射後試験をもとに決定されたものであり、キャラメル燃料の中心温度の運転時の限界温度を示しており、これを超えると被覆損傷を引起し、キャラメル燃料の健全性が損われる可能性がある。

キャラメル燃料においては、中心温度の許容値は、この温度を超えると $UO_2$ 母材から気体状核分裂生成物が放出される点として定義され、多くの照射実験をもとに決められる。

$UO_2$ 母材内に蓄積されていた気体状核分裂生成物が放出されると、キャラメル燃料の内圧が上昇することにより、被覆が変形し、 $UO_2$ と被覆の間にギャップが生じ、 $UO_2$ と被覆のギャップコンダクタンスが低下する。特に気体状核分裂生成物の熱伝達率は悪いので、 $UO_2$ の温度は上昇し、ガスの放出が続く。内圧上昇により、被覆に加わる応力が破断応力に達すると被覆が損傷する。

以上のプロセスにより、技術限界曲線は $UO_2$ の板厚によらず適用できる。

技術限界曲線によれば、許容最高中心温度は燃焼度約 20000MWD/tU までは一定であるが、それ以上の燃焼度（約 60000MWD/tU まで技術限界曲線が定められている）に於いては徐々に低下する。

また、LOCA 時の許容燃料温度も実験から定められているが、それは上述の通常時の許容温度に比べ低くなる。

試設計炉の厚さの燃料の技術限界曲線を比出力と燃料燃焼度の関数として求めたものを、図 4.1.1 に示す。

#### 4.3.2 事故時の安全評価基準

事故時の安全評価基準は、前述の許容設計限界が通常運転時および運転時の異常な過渡変化時に燃料に要求される限界値を示すのに対し、事故時、燃料の安全評価上要求される限界値である。事故時の安全評価に対する判断基準としては、「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針について」において、次のように規定されている。

① 炉心は大きな損傷に至ることなく、かつ、十分な冷却が可能であること。

この基準を受けて、棒状燃料では、冷却材喪失事故（LOCA）、反応度事故等の事故毎に燃料の評価基準を具体的に定めている。

キャラメル燃料については、許容設計限界と同様、事故時の評価基準は、フランスと我国の法規の違い等により棒状燃料とはかなり異なり対応しないが、一応棒状燃料の基準の項目に従って、表 4.5 に比較して示す。事故によっては、控え目な基準を採用しているもの、または、その事故が起こらない様にハード設計で配慮するため基準を定めてないもの等がある。

##### (1) キャラメル燃料の反応度事故時健全性の評価

試設計（一体型炉）では、ハードの構造上起こり得ないので事故解析の対象としていないが、反応度事故（ex. 制御棒飛出し事故）のようなパルス状出力に対するキャラメル燃料の熱的挙動を棒状燃料用コード（FRAP-T：公開コード、板状燃料は取り扱えない）によって当室が概

略検討・解析し、総発熱量と最高燃料エンタルピ等との関係を明らかにする。また、棒状燃料との比較によりその熱的挙動を検討する。

FRAP-Tコードは、板状燃料は取り扱えないため、定常熱伝導に対して、中心温度と表面温度の差が等しくなるよう板厚の $\sqrt{2}$ 倍の直径を持つ棒状燃料棒として取り扱った。また、ギャップ熱伝達率は十分大きな値を与え、ペレット外面と被覆管内面とを等温になるようにした。

計算対象燃料棒は、従来型発電用PWR用燃料棒とキャラメル燃料（板状）を棒状と仮定したキャラメル型燃料棒とした。

総発熱量に関しては、 $100 \sim 300 \text{ cal/g} \cdot \text{UO}_2$ 、パルス幅に関しては、 $20 \sim 200 \text{ msec}$ の範囲で計算した。事故規模と最高エンタルピの関係について全体の概要を把握するのに適当であるよう広範囲に選定した。

また、投入反応度は、NSRRで2.1\$から3.4\$を投入するものとした。

解析の結果を表4.6および図4.12に示すが、PWR燃料棒の場合と比較した結果、以下が明らかになった。

- 1) キャラメル燃料はパルス幅が実炉事故条件程度に長くなると（200ms）、除熱効果が大きくなり、全発熱量の30%程度の除熱が期待できる。
- 2) キャラメル燃料はパルス幅がNSRR 実験条件程度に短い場合は（20ms）、除熱効果は小さくPWR燃料の場合とほとんど同程度である。
- 3) キャラメル燃料はNSRR 実験条件で発熱した場合には、最大燃料エンタルピはPWR燃料より小さくなるが、その差は小さく安全評価基準に含まれる安全余裕範囲内である。ただし、被覆管溶融はPWR燃料より発生しにくい。
- 4) キャラメル燃料の熱的挙動はNSRR 実験条件下では直径によってほとんど影響されない。しかしながら、実炉事故条件下のようにゆるやかなパルスに対しては、直径によって燃料の熱的時定数が影響されるので、熱的等価直径の棒状燃料としたキャラメル燃料モデルの妥当性が問題となり、板状燃料挙動解析コードの開発が必要である。

#### 4.4 耐負荷変動性能

キャラメル燃料の耐負荷変動性能を求めるため、1974年から1978年にかけて材料試験炉OSIRISを利用して出力サイクル試験を実施した。

試験の結果、いずれも燃料板は健全であり、FPガスの放出もなく、キャラメル燃料が優れた耐負荷変動性能を有していることが分った。

これはキャラメル燃料製造後、被覆板応力が圧縮方向プレストレスとなっていることおよび負荷変動時の燃料温度変動巾が小さいことのため、照射中に被覆板に生ずる引張応力が緩和されることによる。

##### (1) 耐負荷変動試験

###### (1) OSIRIS炉のIRENE ループによる試験

IRENEは、OSIRIS炉の中に設けた加圧水ループであり、このループによりキャラメル燃料板3枚を実際の冷却条件で試験した。

このループを用いて燃焼度 30000MWD/tU の燃料に対し出力サイクル試験を行った結果、であることが確認できた。

照射条件および出力サイクル条件を下記に示す。

キャラメル厚さ 4 mm

照射条件 最大比出力 800W/cm<sup>3</sup>

冷却水温度 335 °C

冷却水圧力 140 bars

燃 焼 度 30000MWD/tU

出力サイクル条件

変動範囲 800 ⇄ 265W/cm<sup>3</sup>

変動速度 800 W/cm<sup>3</sup>・分

変動回数 3634回

800W/cm<sup>3</sup>・分という変動速度はCAS 2 G の場合の炉出力変動速度に換算して100 %/分に相当するものである。

## (2) 耐負荷変動性能の評価—棒状燃料との比較

キャラメル燃料に対して行われた耐負荷変動試験を評価するため、棒状燃料に対して行われた同様の試験と比較した。棒状燃料に関する試験として燃料交換後のスタートアップ時または負荷急昇時において、PCI による被覆の破損に関する陸上発電所での負荷変動の経験または試験炉での出力急昇実験を比較の対象とした。

燃焼度、出力変動巾、出力変動率等の試験条件に関する比較から分かることは、

- 1) キャラメル燃料に関する試験は燃焼度、出力変動巾、最高出力、出力変動率の全ての試験条件で棒状燃料の場合を上回っており、しかも結果が良好である。
- 2) 棒状燃料は出力急昇時PCI により被覆管が破損する場合がある (Petten HFR のスタートアップランプ実験、Obligheim炉サイクル3)。
- 3) EPRI が実用炉での経験より推定した出力急昇時の被覆の破損限界線出力および破損限界線出力上昇巾は比較的小さい値である。

以上により、耐負荷変動性能の点でキャラメル燃料は棒状燃料より優れていると言える。

## (2) 耐負荷変動性能が優れている理由

### (1) 被覆板の圧縮方向プレストレス

キャラメル燃料は製造過程において温度が変化するため、UO<sub>2</sub>とジルカロイの熱膨張差により、完成後被覆板は圧縮方向のプレストレス状態となる。

### (2) 燃料温度と耐負荷変動性能

キャラメル燃料が棒状燃料より耐負荷変動性能が優れている理由として、定格出力時の燃料温度が低い点が揚げられる。

そこでCAS炉、PWR原発および”むつ”の燃料について燃料温度(表4.7)と耐負荷変動性能の関係について比較する。

キャラメル燃料は比較的低温であるため、燃焼が進んでもUO<sub>2</sub>のスウェリングがほとんど無いので、被覆とUO<sub>2</sub>の間にギャップを必要としない。一方、棒状燃料はギャップを設けて



いるが、燃焼が進むにつれて被覆管の内外圧差による圧縮方向のクリープとペレットのスウェリングにより、ペレットと被覆管は接触しギャップは無くなる。ギャップのない棒状燃料では負荷変動時、 $UO_2$ の膨張が被覆管の引張応力に直接影響を与えるようになる。

表4.7から分かるように出力を0%から100%まで上昇させた場合、キャラメル燃料の平均燃料温度上昇率は棒状燃料の場合の約4分の1であるので、キャラメル燃料の $UO_2$ 膨張量は棒状燃料の場合より小さい。このため、キャラメル燃料の被覆に作用する引張応力の増加は棒状燃料の場合よりも少ない。

従って、キャラメル燃料の被覆は棒状燃料の場合よりもPCIによる破損の可能性が小さいと考えられる。

#### 4.5 特徴のまとめ

以上述べたキャラメル燃料の概要、許容設計限界、事故時安全性評価基準、耐負荷変動性能等をもとに主としてキャラメル燃料の安全性の特徴についてまとめる。

キャラメル燃料は、健全性を確保するために、被覆破損の可能性を最小限にすると共に、また、万一破損した場合でも、一次冷却水中への核分裂生成物(FP)の放出が可能な限り少なくなるように考慮されている。

以下に、その具体的方策を述べる。

##### (1) 被覆の健全性

###### 1) 低温であることによるもの

キャラメル燃料は、単位燃料当りの冷却面積を充分にとることを目的とした形状で、かつ、ギャップの必要をなくし $UO_2$ が低温になるように設計されている(CASの場合、定格出力時平均温度約390℃)。

棒状燃料では燃焼が進むにつれて、ギャップ、プレナムにFPがたまり、内圧が上昇する。キャラメル燃料では、 $UO_2$ 母材を低温にすることによりFPの移動が妨げられるため $UO_2$ 母材から放出されず、被覆材内部の圧力上昇がない。またスウェリングも殆ど生じない。

この為、ギャップやプレナムを必要とせず、一次冷却水圧力による被覆の座屈は起こり得ない。また、内圧上昇やスウェリングによる被覆の引張変形がほとんどない。

$UO_2$ が低温であり出力変動時の $UO_2$ の膨張収縮が少ないことから、被覆に発生する繰返し応力が低い。また、燃料板は高温高圧にて拡散溶接法により製造されるので、被覆には圧縮方向のプレストレスが働いている。これらの結果、負荷変動時に被覆に生ずる引張応力は緩和され、急激な負荷変動に耐え得る。

###### 2) 区画構造によるもの

$UO_2$ 内部に残留した水分によるジルカロイ被覆の水素化や、 $UO_2$ 製造時に混入した、あるいは核分裂により発生したハロゲンによる被覆材の腐食のように、一箇所に集中的に損傷が起こる現象が考えられる。

キャラメル燃料では、個々のキャラメルを内部格子で仕切り、密閉した区画構造としている。この区画構造の容積は1~2 cm<sup>3</sup>であり、1.5~2 m高さの船用炉心に使用する棒状燃

料の被覆管容積  $100\sim 150\text{ cm}^3$  に比べ、数十分の一となっている。

したがって、上述の様な反応に寄与する水分やハロゲンが少ないので、こうした被覆損傷の危険が少ない。

### 3) 剛性が高いことによるもの

キャラメル燃料は、燃料集合体の構造が単純であり、かつ、剛性が高い。たとえば CAS 用の燃料板は、その断面積が棒状燃料の約 5 倍であり、また、その外枠と各キャラメル間の格子が防撓材の役目をするため、それ自体剛性が高く、さらに、これらの燃料板の端部をサイドスペーサにより一体に溶接した構造の集合体もまた剛性が高い。そして、一次冷却水路間隔はサイドスペーサによって保持されており、スペーサグリットを設ける必要のない単純な構造になっている。

これらの結果、船体振動、水力振動等の振動や衝撃に対して強く、また、燃料板と他との接触部としては、燃料板外枠とサイドスペーサとが溶接されているだけで、可動部分がないため、フレッキング腐食は生じ得ない。

### 4) 工作法によるもの

製作時に生ずる恐れのある被覆のピンホール等の欠陥は、拡散溶接を終了して炉から取り出した時に、内部に侵入した高圧ガスによるふくれにより容易に検出される。また、燃料板は真空中で密閉されるので、湿分除去も自動的に行われる。この様に、品質管理が容易である。

## (2) 被覆損傷時の F P 放出の防止

### 1) 低温であることによるもの

棒状燃料では、被覆損傷時、被覆管内にたまった F P が被覆外に放出されるが、キャラメル燃料では  $\text{UO}_2$  が低温であるために、殆どの F P が  $\text{UO}_2$  母材中に保持されているため、万一被覆損傷があっても、被覆外に放出される F P が少ない。

### 2) 区画構造によるもの

キャラメル燃料では F P の漏洩箇所が局限される。すなわち、各キャラメルが互に隔離された区画に密封されているので、万一被覆にピンホールが発生しても、漏洩する F P はその区画中に含まれるものだけである。この区画構造の容積は、前述の様に棒状燃料の数十分の一である。

前述した理由、すなわち

- ・被覆破損の可能性を最少限にしている。
- ・万一破損した場合でも、放出 F P 量を制限している。

という二つの理由により、キャラメル燃料では通常時の一次冷却水放射能レベルを低く抑えることができる（実績では  $0.02\text{ Ci}/\text{m}^3$  以下）。

また、前述の如く、極めて剛性の高い集合体となっており、振動、衝撃等に強いことは、燃料交換等燃料取扱い時の破損の危険を少なくしている。

以上述べたキャラメル燃料の健全性に関する特徴を図 4.1.3 にまとめた。

なお、以上は通常時の燃料体健全性向上に関する特徴であるが、これらはそのまま事故時の安全性向上にも寄与している。

LOCA時に於いても、燃料の初期温度が低く、蓄積エネルギーが低いため、被覆温度を低く抑えられる。

表 4.1 キャラメル燃料開発経緯（インパイル照射）

	1960	'61	'62	'63	'64	'65	'66	'67	'68	'69	'70	'71	'72	'73	'74	'75	'76	'77	'78	'79	'80	'81	'82	'83	'84	'85	'86
カプセル および ループ																											
PAT (柏川原型炉)	<p>(△キャラメル燃料開発開始 (1960年頃))</p> <p>(・分離型PWR、原子力船乗員訓練のため、出力変動を含め実船の運転状態を繰り返し再現している。)</p> <p>キャラメル燃料装荷 (他の燃料との混合)</p>																										
CAP (改良型原型炉)	<p>(・炉出力～120MWtの一体型PWR ・高出力密度 (炉心平均出力密度～110kW/ℓ))</p> <p>キャラメル燃料装荷 (他の燃料との混合)</p>																										
OSIRIS (材料試験炉)	<p>(・炉出力～70MWtのスィミングプール型材料試験炉 ・低冷却水圧力(～2bars)の下での高出力密度 (炉心平均出力密度～345kW/ℓ))</p> <p>全炉心をキャラメル燃料に換装し、ドライバ炉心として使用</p>																										

\* : 何れも材料試験炉

表 4.2 OSIRIS 炉心仕様

	OSIRIS 炉心	改良船用炉心
炉出力 [MWt]	70	100
炉心平均出力密度 [kw/ℓ]	345	50.4
サイクル寿命 [day]	実効全出力日数 25 標準停止日数 7	実効全出力日数 1108
ウラン装荷量 [kg]	360	3,650
燃料濃縮度 [%]	7	6.76 (炉心平均)
<sup>235</sup> U 装荷量 [kg]	25.2	247
平均比出力 [W/cm <sup>3</sup> ]	1,700	250
最大比出力 [W/cm <sup>3</sup> ]	4,400	1,056 (評価値*1)
燃料集合体数 [体]	標準燃料集合体 38 制御棒付燃料集合体 6	32
燃料の炉内滞在期間	5 ~ 6 [サイクル]	4 [年]
取出燃料平均燃焼度 [MWD/tU]	30,000	30,400
冷却水流量 [m <sup>3</sup> /hr]	5,700	6,120
冷却水圧力 [bars]	2	119
炉内流速 [m/s]	8	2.88

\*1 : 評価値 : キャラメル単位での最高比出力に、キャラメル中の出力分布を考慮したときのその最高点の比出力 (計算誤差等に対する余裕を含め、キャラメル単位最高比出力計算値の 53% 増)。

表 4.3 燃料集合体仕様 (標準燃料集合体)

	OSIRIS 炉心	改良船用炉心
<u>燃 料 板</u>		
UO <sub>2</sub> 密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	10.30	10.30
キャラメル厚さ [mm]	1.45	2.5
キャラメル寸法 [mm]	17.1×17.1×1.45	21.1×21.1×2.5
被覆材	ジルカロイ	ジルカロイ
被覆材厚さ [mm]	0.40	0.40
燃料板厚さ [mm]	2.25	3.30
燃料板巾方向キャラメル数 [個]	4	4
燃料板長さ方向キャラメル数 [個]	34	62
燃料板有効部長さ [mm]	630.9	1,432
<u>燃 料 集 合 体</u>		
燃料集合体当り燃料束 [体]	1	4
燃料束寸法 [mm]	82.4×82.2	102×102
燃料束当り燃料板枚数 [枚]	17	13

表 4.4 キャラメル燃料と棒状燃料の許容設計限界の比較

設計内容	棒状燃料の許容設計限界/その根拠および補足説明	キャラメル燃料の許容設計限界/その根拠および補足説明
熱 的 設 計	<p>最少DNBRは1.3以上</p> <p>W-3相関式で計算し、燃料棒が9.5%信頼度でDNBRに達しないためには最少DNBRを1.3とすればよい。</p>	<p>同 左</p> <p>キャラメル燃料のDNBR相関式は、同一形状、同一条件のデータのみを整理して求めているので実験データとよく合う。したがって、9.5%信頼度、9.5%確率という考え方を導入すれば、最小DNBRは1.3より小さくならぬが、現在は設計処理はせず、かまりの余裕をもたせて1.3としている。</p>
	<p>燃料中心最高温度</p> <p>二酸化ウランの溶解点未満</p> <p>UO<sub>2</sub> 膨脹 → UO<sub>2</sub> 膨脹 → 膨脹による過大応力 → 燃料棒破損</p> <p>UO<sub>2</sub> 流動性 → ペレットの割れを通して膨脹に寄与 → 核的不安定</p> <p>UO<sub>2</sub> 軸方向に移動 → 核的不安定</p>	<p>技術限界曲線以下でもおれに問題ない。逆昇降であればこれを延ばしてもよいとしている。</p> <p>技術限界曲線は、燃料中心温度を基点よりかなり低く抑えている。</p> <p>エンタルピーに対する許容設計限界という考え方はない。すべて、技術限界曲線が包絡する。</p>
	<p>エンタルピー</p> <p>燃料エンタルピーの最大値 外圧支配: 170cal/gUO<sub>2</sub> (非解熱計算)</p> <p>内圧支配: 110cal/gUO<sub>2</sub> ( " )</p> <p>NSSR実験から、燃料棒が破損するしきい値(253cal/gUO<sub>2</sub> (外圧支配) 164cal (内圧支配))を求め、これから、実験の補正(30%)および安全余裕(10cal/gUO<sub>2</sub>)を差し引いたものである。</p>	
機 械 的 設 計	<p>破 損 の 速</p> <p>破損に生じる円周方向引張応力の変化量は過酸化に対して1%以下のジルカロイの照射による延性の低下のため、1%を超える歪が生じると破損の確率が高くなること、実験で得られていることによる。</p> <p>歪は弾性、塑性およびクリープ歪を考慮。</p>	<p>なし</p> <p>キャラメル燃料は、キャラメルのスクウェリングがほとんどないので歪はきわめて少ない。</p>
	<p>燃料棒内圧</p> <p>燃料棒内圧は運転中一次冷却材圧力以下</p> <p>燃料棒内圧 &gt; 一次冷却材圧力 → ペレットと芯間ギャップ増加 → 燃料温度増大</p> <p>燃料棒内圧増加 → Pガス放出増大</p> <p>上記により、最後には破損の破損に至るため</p>	<p>なし</p> <p>キャラメル燃料は技術限界曲線以下であればUO<sub>2</sub>母材からのFPの放出はきわめて少なく、FPによる内圧は問題にならない。</p>
	<p>破 損 応 力</p> <p>破損応力はジルカロイの耐力以下</p>	<p>同 左</p>
	<p>果 務 破 劣</p> <p>果務破劣サイクルは設計疲労寿命以下</p>	<p>同 左</p>
	<p>燃料集合体にかかる荷重</p> <p>6 G</p>	<p>6 Gより高くできる。</p> <p>集合体は、燃料棒をサイドスペース(またはチャンネルボックス側板)に径挿して組み立てられたもので極めて剛性が高い。</p>

表 4.5 キャラメル燃料と棒状燃料の事故時の安全評価基準の比較

ル ー ル 要 求	事 故 事 象	棒 状 燃 料 に 対 す る 基 準	キ ャ ラ メ ル 燃 料 に 対 す る 基 準
<p>炉心は大きな損傷に至ることなく かつ十分な冷却が可能であること</p>	<p>L O C A</p>	<p>1. 燃料芯塊温度：1200℃以下</p> <p>2. 燃料芯塊の酸化量：芯塊管厚さの15%以下</p> <p>3. 燃料の形状の変化を考慮しても崩壊の跡が最長期間にわたって行われることが可能であること。</p> <p>「炉心形状の変化を考慮しても」との要求は、炉心が冠水しているか、または少なくとも炉心の出力密度の高い部分が冠水し、それ以外の部分の冷却も十分であるよう状況が維持できることを示せば満足されたと見ます。</p>	<p>○燃料の温度：LOCA時の技術限界曲線以下</p> <p>上記限界以下であれば芯塊のふくれの発生はない。但し、棒状と同様にふくれを許しても冷却可能形状は確保できると考えられる。</p>
<p>制御棒飛出し事故</p>	<p>制御棒飛出し事故</p>	<p>1. 事故時の燃料出力パルスのうち、ピーク出力エンタルド（ペレット半径方向平均）の最大値は、断熱計算で230cal/gUO<sub>2</sub>を越えないこと。</p> <p>2. 燃料エンタルド（ペレット半径方向平均）の最大値は非断熱計算で230cal/gUO<sub>2</sub>を越えないこと。</p>	<p>○エンタルドの最大値についての基準：なし</p> <p>○反応度印加試験は平っていない。</p> <p>○制御棒飛出しに対する機械的な防止手段を講ずることにより、この種の事故は起こらない様にする。</p>
<p>その他の事故</p>	<p>その他の事故</p>	<p>○具体的基準なし</p> <p>設計者の対応としては、DNBRが1.3を下まわった場合、LOCAと同じ基準を適用している。</p>	<p>○燃料中心最高温度：技術限界曲線以下</p> <p>上記限界以下であれば、芯塊のふくれの発生はない。ただし、棒状と同様にふくれを許しても冷却可能形状は確保できると考えられる。</p>

表 4.6 NSRRパルス照射による燃料エンタルピー解析結果

燃料の種類	投入反応度	発熱量		燃料エンタルピー (最大値)	溶融の有無	
		即発 cal/g·UO <sub>2</sub>	全部 cal/g·UO <sub>2</sub>		燃料	被覆管
キャラメル	2.1 \$	115	160	102	no	no
"	2.6	170	220	153	no	no
"	3.0	240	270	196	no	no
"	3.4	260	320	239	yes	no
PWR	2.1	115	160	119	no	no
"	2.6	170	220	167	no	no
"	3.0	240	270	206	no	yes
"	3.4	260	320	245	yes	yes

表 4.7 定格出力時の燃料温度の比較

炉名 温度	C 厚キ Aさ S4 mm 炉	発 電 用 P W R	棒 レ 状 ト 燃 料 9.5 φ	" む レ 状 ト 燃 料 10.53 φ
炉定格出力時 平均燃料温度 (°C)	390	約 730	約 720	
炉定格出力時 炉心最高燃料温度 (°C)	960	約 1790	約 1770	
平均冷却水温度 (°C)	285	300	275	
(注) 平均燃料温度と 冷却水温度との差 (°C)	105	約 430	約 445	

(注) 炉出力を0%から定格出力まで上昇させた場合の平均燃料温度上昇巾に相当する。

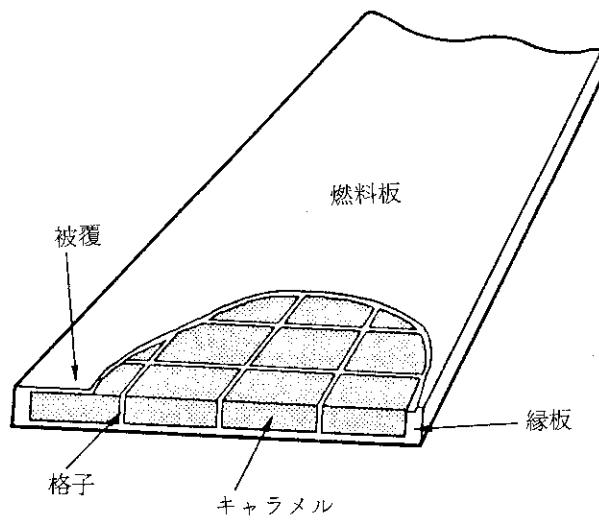


図 4.1 キャラメルおよび燃料板概念図

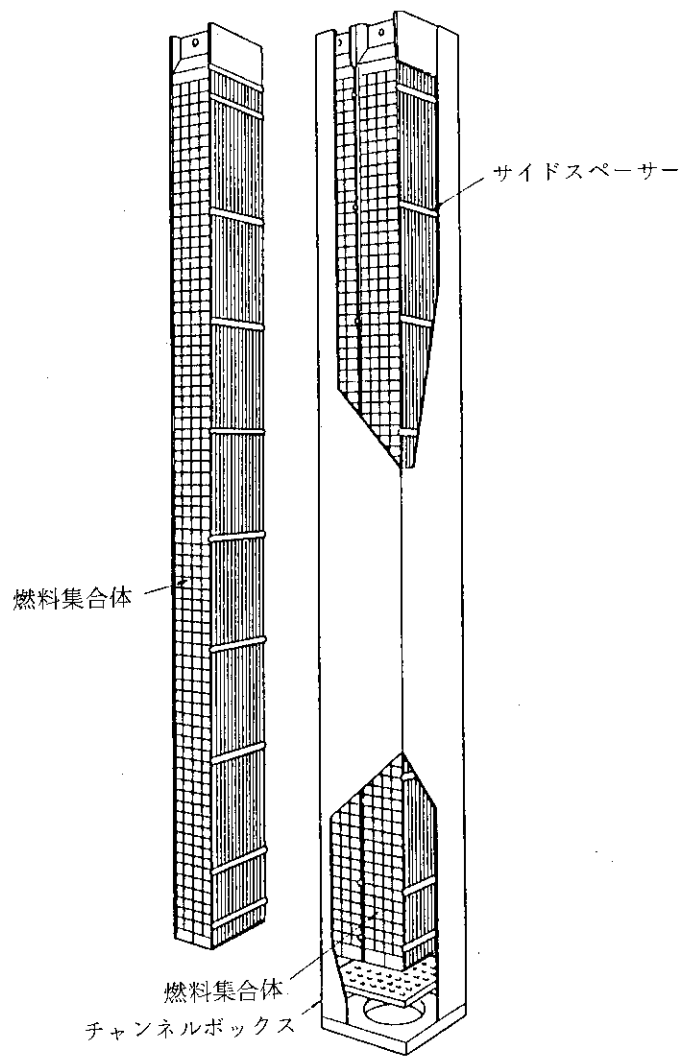


図 4.2 CAS用燃料集合体



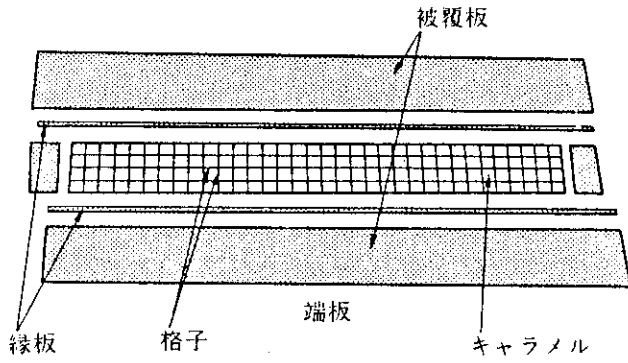


図 4.3 キャラメル燃料燃料板構成要素

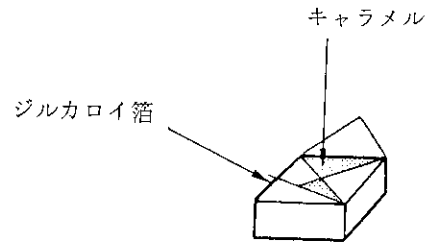


図 4.4 包装式格子

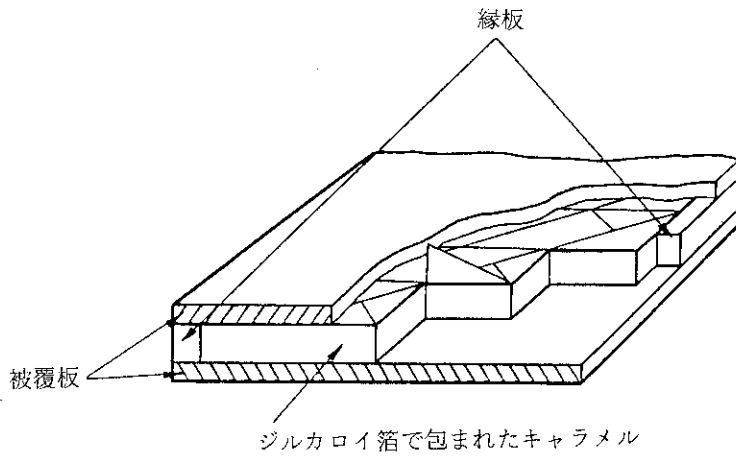


図 4.5 キャラメルの配列

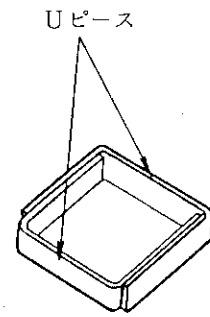


図 4.6 縁巻式格子

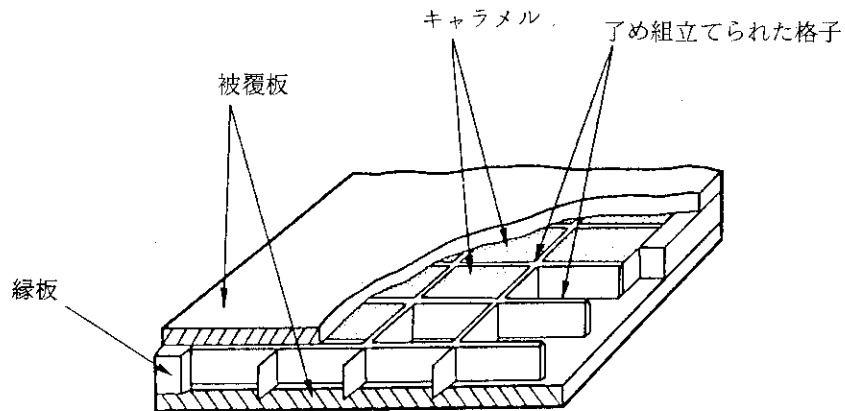


図 4.7 組立式格子

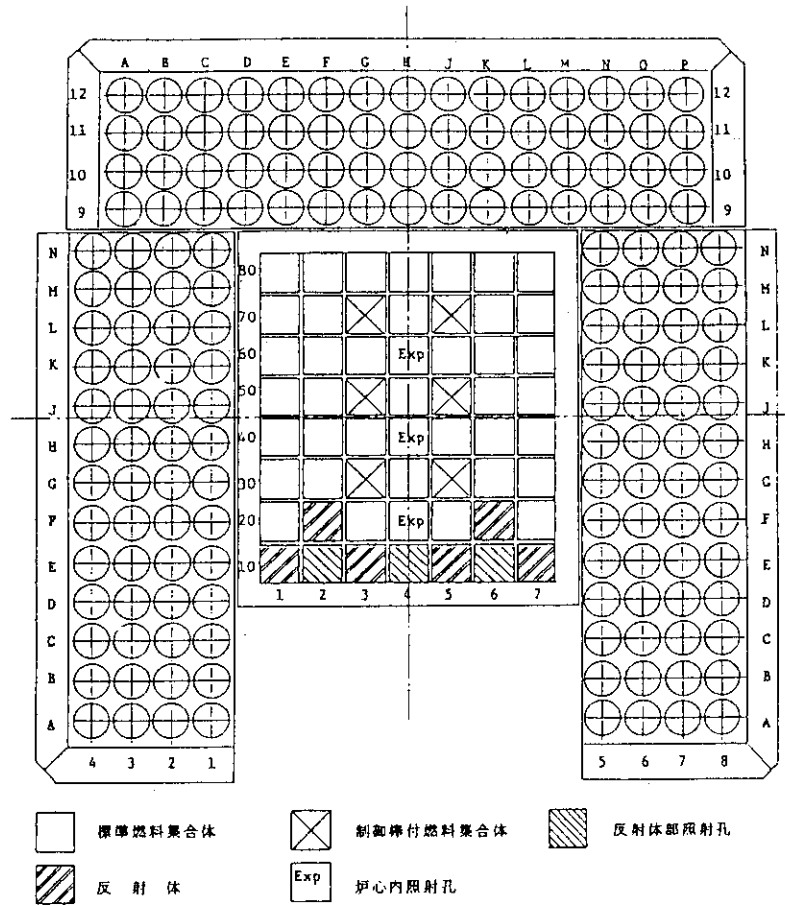


図4.8 OSIRIS炉心断面

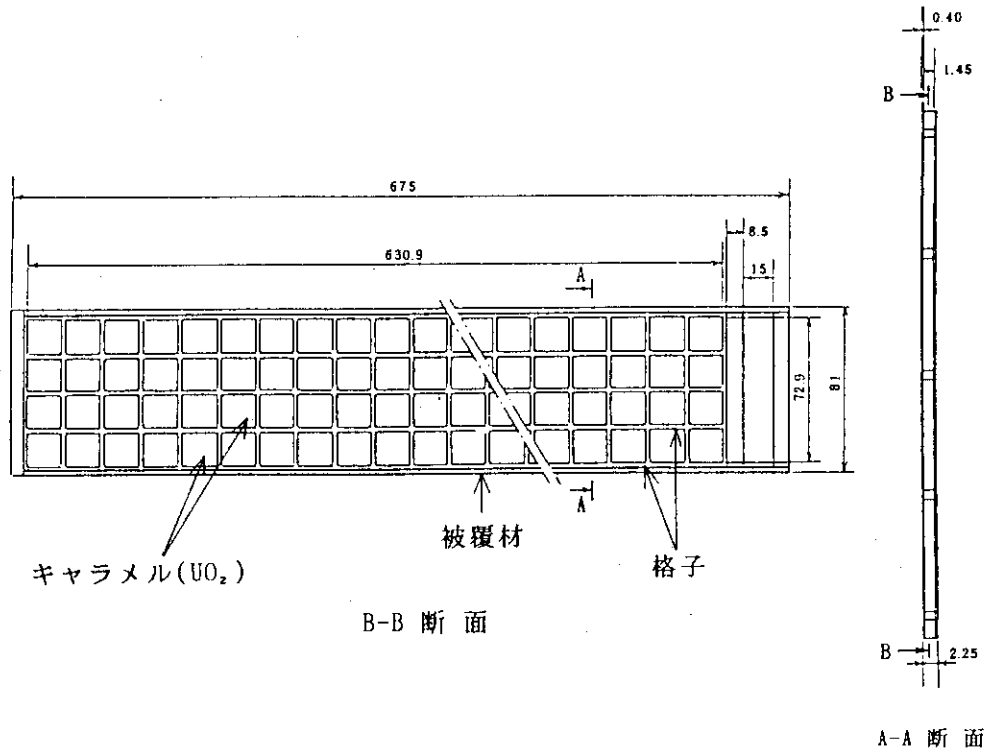


図4.9 標準燃料集合体用燃料板構造図

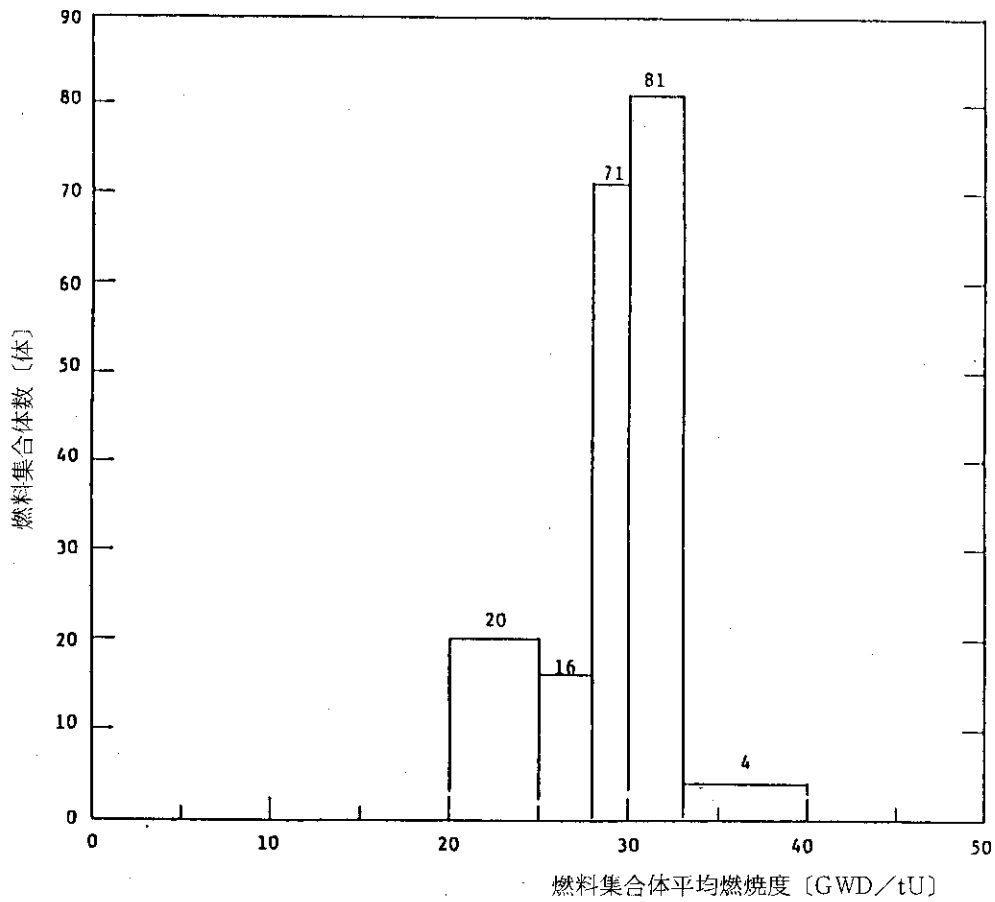


図 4.10 取出し燃料集合体の燃焼度ヒストグラム

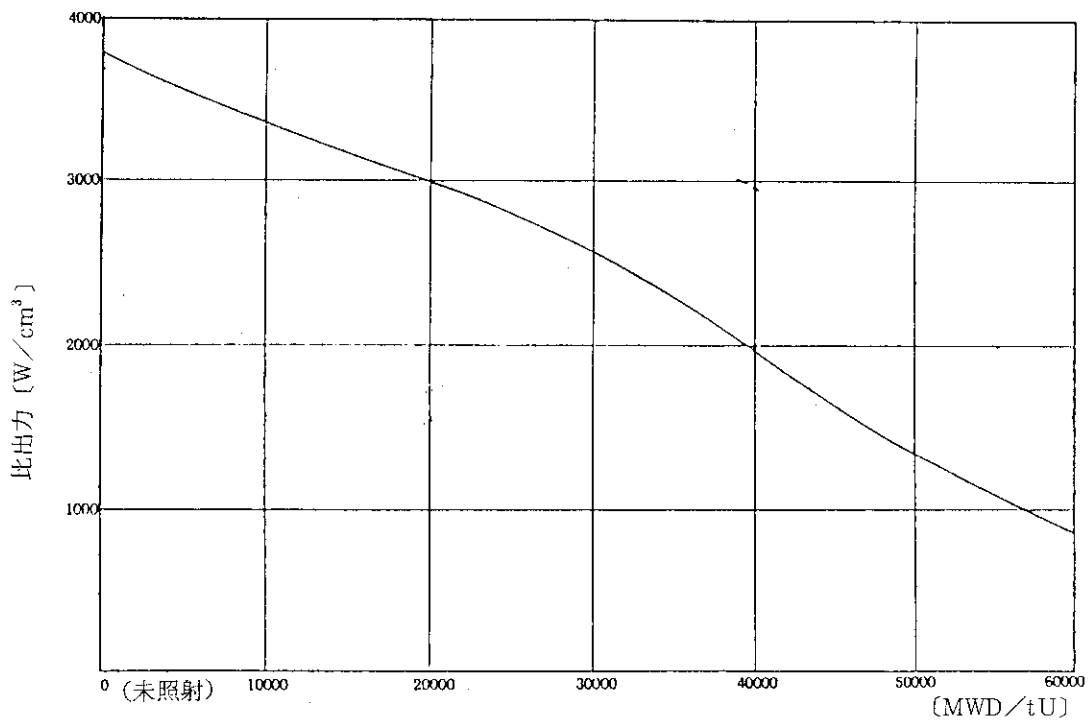


図 4.11 比出力で表わした技術限界曲線

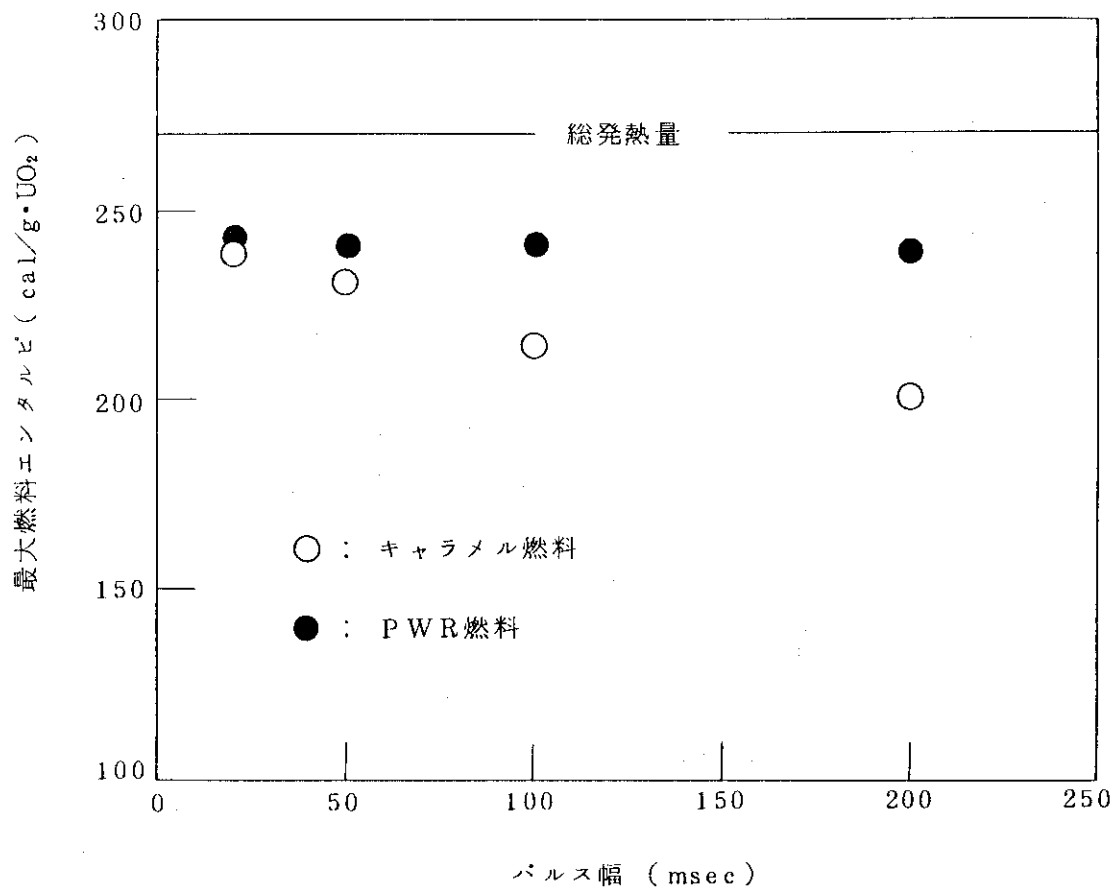


図 4.12 パルス幅と最大燃料エンタルピーの関係

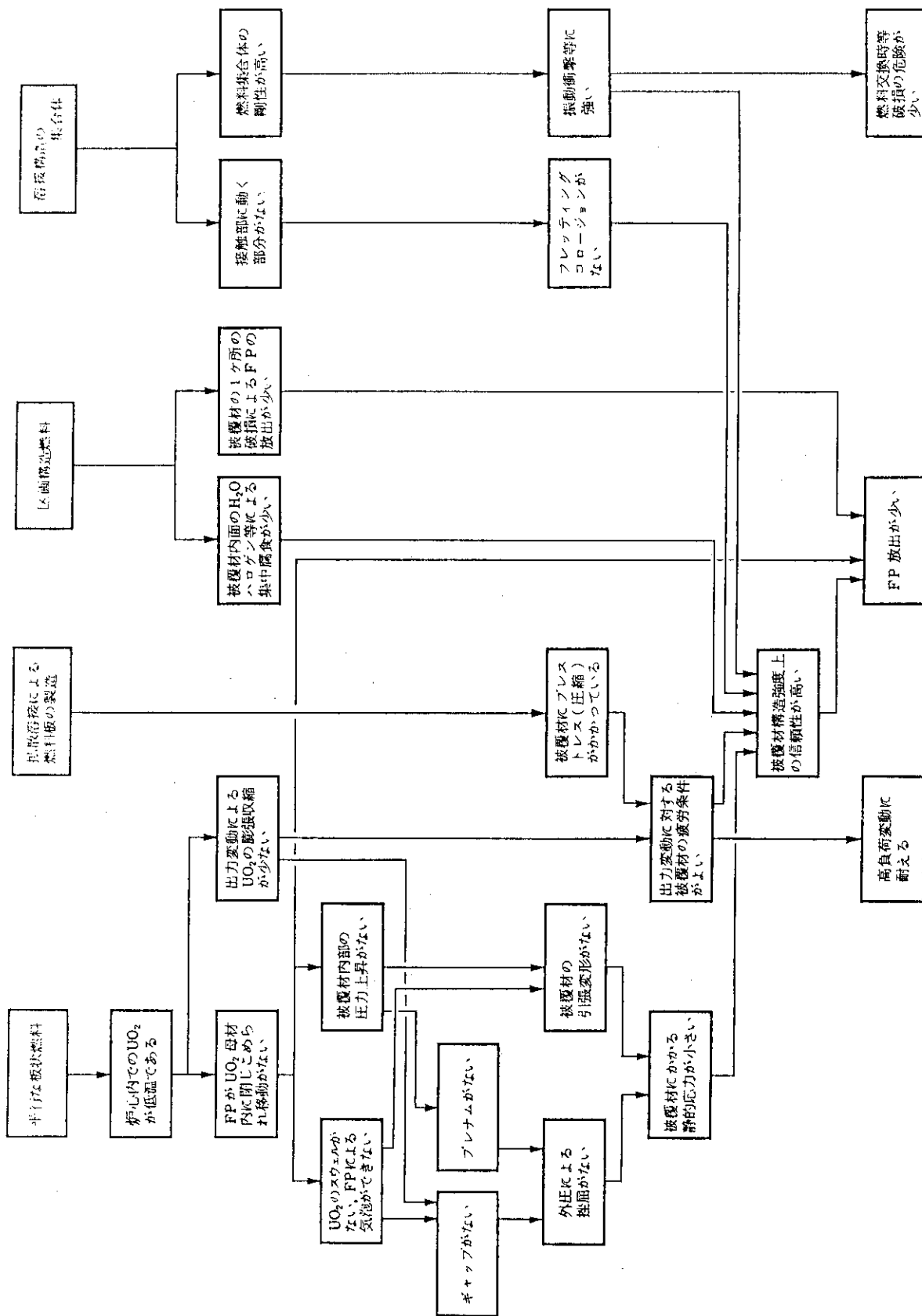


図 4.13 キャラメル燃料の特徴

## 5. キャラメル燃料の研究開発項目

キャラメル燃料の諸性能および安全性については、フランスで実施された実験により実証されているが、我国でキャラメル燃料を実用化するには、それらを確認し、実証することが必要である。

また、今後の改良船用炉の研究開発は、従来実験されている範囲を超える条件を含むため、新たな実験や設計検討などを行う。

さらに、現在、キャラメル（板状）燃料の許容設計限界および事故時の基準が明確ではないところがあり、キャラメル燃料の安全性研究開発としてキャラメル燃料の法規基準の整備あるいはそのための実験・実証を行う必要がある。

### (1) キャラメル燃料の諸性能および安全性の実証に係る実験

フランスで実施された実験をもとにしたキャラメル燃料の諸性能および安全性について、それらを確認し、実証するために、以下の実験を行う。

- ・技術限界確証実験
- ・出力変動サイクル実験
- ・LOCA 時の技術限界確証実験
- ・燃料集合体照射実験
- ・流路閉塞実験

各実験の実験フローを図 5.1 に示す。また、以下にそれぞれの実験について、その実験手法を示す。

#### 1) 技術限界確証実験

キャラメル燃料固有の技術限界曲線を確認するため技術限界を超えて IRENE ループ中で照射し、いくつかのキャラメルが破損した時点で照射を止め、破損キャラメルと健全なキャラメルの燃焼度と破損時燃料中心温度を求める。各キャラメル毎に得られるそれらのデータをグラフ上にプロットし、技術限界曲線以下では破損したキャラメルがないことを示すことにより、技術限界曲線の妥当性を確認する。

#### 2) 出力変動サイクル実験

耐負荷変動性が優れているというキャラメル燃料固有の性能上の特徴を確認するため、改良船用炉の設計条件および試設計炉の特性を考慮した出力変動サイクル数および出力変動パターンにて実験を実施し、燃料損傷が発生しないことを確認する。

本実験には IRENE ループを用いるものとし、同ループの駆動装置により OSIRIS 炉からの距離を周期的に変化させることにより出力変動サイクルを模擬した実験を行う。

#### 3) LOCA 時の技術限界確証実験

OSIRIS 炉心でのベース照射により所要燃焼度に到達した燃料から適当な数の区画を切り出し、それを高周波加熱炉中で種々の温度まで加熱し、加熱温度と被覆材の膨れの有無の関係を求め、各試料の燃焼度毎にグラフ上にプロットし、LOCA 時技術限界曲線以下では被覆

の膨れが発生しないことを示すことにより、同技術限界曲線を確認する。

#### 4) 燃料集合体照射実験

試設計炉に採用されているキャラメル燃料集合体全体としての照射挙動を把握し、その健全性を確認するため、OSIRIS 炉のドライバ炉心にOSIRIS用燃料集合体と同じ外形寸法の燃料集合体を装荷し照射することにより行う。到達燃焼度はキャラメル最高燃焼度で約 55,000MWD/tU となる値とし、燃料破損が生じていないことを確認するとともに、併せて燃料集合体全体としての照射挙動を把握することにより、健全性を確認する。

#### 5) 流路閉塞実験

OSIRIS 炉心で約 30,000MWD/tU まで照射したものをPHEBUS炉のテストループに入る断面寸法に分解した後ループに入れ、LOCA を再現した実験を行い、流路閉塞状況を把握するとともに、可冷却形状を維持し得ることを確認する。

また、改良船用炉炉心の研究開発の方向により、高燃焼度化などを進めることになっているが、そのための燃料としての要件を上記実験を含めて、確認・実証をしていくことも必要である。

### (2) キャラメル燃料の安全性研究開発

IMO 原子力商船安全基準では制御棒逸出による反応度事故、冷却材喪失事故および乗り揚げ・座礁等の海難事故がPPC-4として分類されている。これらの事故のうち、機械的事故と海難事故の場合は、いずれもプラントの冷却能力と炉出力との適合性によって燃料の健全性が支配されるので、一括して熱水流力的事故として把握できる。ここでは、反応度事故に関して燃料の安全性評価に必要なR&D計画を検討する。

事故時燃料の健全性を評価する手法は通常下記の手順で行われる。

1. 事故の想定
2. 事故時燃料挙動の評価
3. 評価基準との照合

このうち、事故の想定は船用炉の設計に基く問題であって、燃料のみによっては決定されないで、今回の検討範囲から除外している。

#### 1) 反応度事故に関する研究開発

##### ① 事故時燃料挙動評価に関する研究開発

本質的には従来の動特性計算の手法がそのまま活用できるものと考えられる。棒状燃料との相違点として、キャラメル燃料にはギャップ熱抵抗がないことが指摘できる。このため、キャラメル燃料炉心の動特性解析及び燃料挙動解析には冷却水の熱水力挙動モデルの開発および冷却水への熱伝達率の評価の二点に関してR&Dが必要となるものと考えられる。

##### ② 評価基準に関する研究開発

現在の棒状燃料に関する評価基準は、燃料エンタルピーの最大値が  $230\text{cal/g} \cdot \text{UO}_2$  を超えないこと、及び圧力バウンダリにかかる圧力が最高使用圧力の1.2倍以下であることの二点である。後者に対しては燃料棒の種類に関係しない基準であるが、前者は棒状燃料に関する基準値であって、キャラメル燃料に対して別に定める必要がある。

しかしながら、この数値は $UO_2$ 燃料の溶融エンタルピに基いて定められた値であるから、同じく $UO_2$ を用いるキャラメル燃料に関して大きな差異が生じるものとは考え難い。ただし、キャラメル燃料の場合、棒状燃料に見られる破損形態の外に、ペレットと被覆材との結合部の解離に起因する燃料エンタルピ上昇の結果、燃料溶融破損が生じることも予想されるので、NSRR等のパルス照射実験による確証は必要であろう。

③ まとめ

研究開発項目を以下に列記する。

- (i) キャラメル燃料炉心体系による二相流流動実験
- (ii) 二相流流動解析モデルの開発
- (iii) 狭幅水路サブクール沸騰実験
- (iv) パルス照射燃料破壊確証実験

ただし、(iii)項は(iv)項の実験によっても実施できよう。また、振動・動揺の影響は現象が早いことから特に考慮する必要はないものと考えられる。ただし、二相流流動に対しては傾斜の効果は考慮する必要がある。

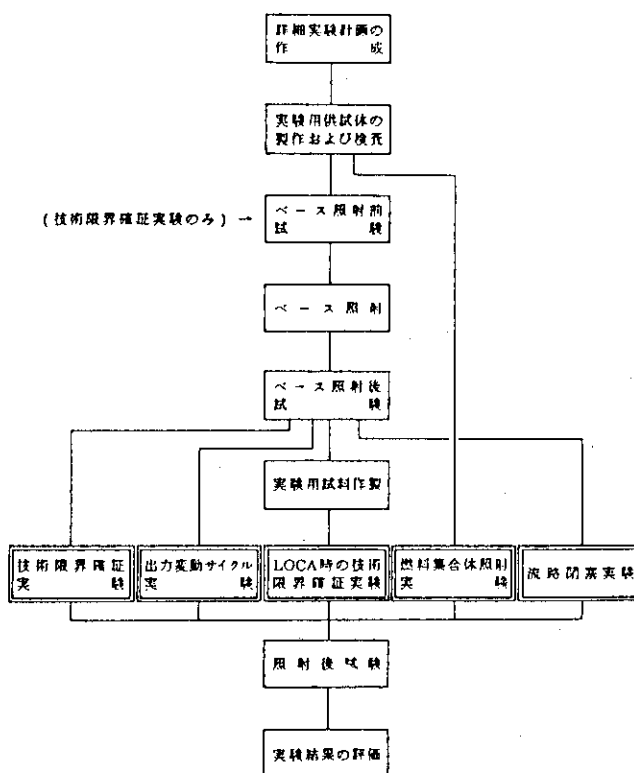


図 5.1 各実験の実験フロー



## 6. 結 言

キャラメル燃料の燃料特性等を棒状燃料と比較した場合のまとめは、以下となる。

- 1) 以下の具体的方策により、被覆の健全性の確保および被覆損傷時のF P 放出の防止が可能となり、負荷変動特性に優れている。
  - ① 板状であることにより冷却面積を大きくとれることなどにより低温である。
  - ② 個々のキャラメルが区画で仕切られている。
  - ③ 剛性が高い。
  - ④ 工作法により、品質管理が容易となり製造時の欠陥を少なくできる。
- 2) 被覆破損の可能性が少ないため、一次水の放射能レベルを低く抑えることができる。
- 3) 燃料の剛性が高く、船用炉の特徴である振動、動揺、衝撃等に強い。

以上の長所があるが、反面、我国における実用例がないなどにより、以下の研究開発および課題があげられる。

- 4) 許容設計限界あるいは事故時の評価基準を明確にする（実証する）。
- 5) 製造コストが高いことが予想される。
- 6) キャラメル燃料の使用限界を確認するとともに、キャラメル燃料炉心の設計限界を検討する必要がある。（高燃焼度における使用限界など）