

原子燃料の設計・製造 ①ウラン燃料の設計・製造

Design and Fabrication of Nuclear Fuel ①Design and Fabrication of Uranium Fuel

森 一 麻*

Kazuo Mori

1. 概要

ウラン燃料は、軽水炉以外にもガス炉、新型転換炉 (ATR : Advanced Thermal Reactor) の燃料として、また、高速増殖炉 (FBR : Fast Breeder Reactor) ではブランケット燃料として使用されるが、ここでは日本の発電炉の主流である軽水炉の燃料について述べる。

2. 燃料の構造

軽水炉の燃料は、二酸化ウラン (UO₂) を円柱状に焼結したペレットを外径約10mm、肉厚1mm以下、長さ約4mの管 (被覆管) につめて燃料棒とし、これを正方形に束ねて燃料集合体の形にしている。加圧水型原子炉 (PWR) と沸騰水型原子炉 (BWR) に使

用される代表的な燃料形状を図-1及び図-2に示す。

二酸化ウランの焼結体は、融点が高く相変態がないこと、核分裂で発生する核分裂生成物 (FP : Fission Product) を保持する能力が高いこと (このため、ペレットがFPに対する第一の障壁となる)、化学的に安定なこと等から軽水炉燃料に選択された。ペレットは、直径、高さとも約10mmの円柱形状をしている。

被覆管として用いるのは、中性子の吸収が小さい元素ジルコニウム (Zr) を主成分とし、耐食性、機械的性質に優れたジルカロイと称する合金である。

燃料棒は、UO₂のペレットをジルカロイの被覆管につめ、ヘリウムガス (He) を加圧して封入し、両端に栓 (端栓という) を溶接し、密封構造としている。

したがって、被覆管がFPに対する第二の障壁となる。

燃料棒は、支持格子 (BWRではスペーサという)

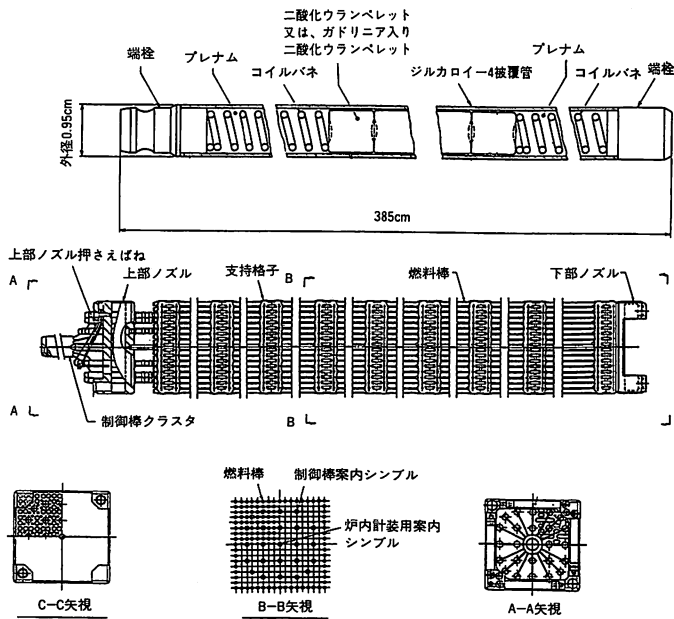


図-1 PWR燃料集合体の構造

* 原子燃料工業(株)PWR燃料事業部燃料技術部長
〒590-04 大阪府泉南郡熊取町大字野田950

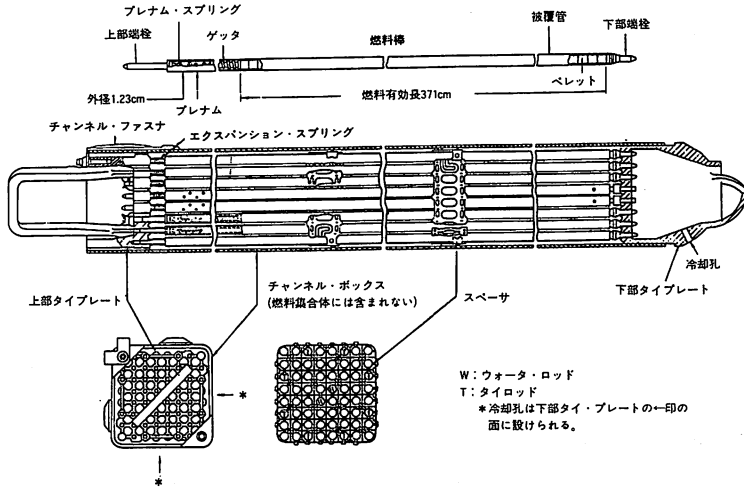


図-2 BWR燃料集合体の構造

を介して正方形に束ねる。PWRでは制御棒案内シンプルの上・下、BWRでは燃料棒自身の上・下にノズル（BWRではタイプレートという）と称するステンレス鋼製部品を取付けて集合体に組み立てる。ノズルは、原子炉内での集合体の位置決め、取扱いの際の掴みの役目をする。なお、PWRとBWRでは同じ働きをする部品でも慣用的に呼称が異なる。

更に、BWRでは、チャンネルボックスというジルカロイ製の正方形の筒を燃料集合体全体にかぶせて原子炉に装荷、使用する。

PWRとBWRの燃料は、原子炉の違いから両者で設計上差がある。両者の比較を表1に示した。

3. 燃料に関する許認可

日本では、燃料の設計について原子炉設置許可申請

書、工事計画認可申請書、燃料体設計認可申請書で記述説明し、それぞれ認可を受ける必要がある。

燃料が寿命中、健全に燃焼するように、設計基準が定められている。この設計基準は、被覆管の応力、歪、疲労や燃料棒の中心温度、内部の圧力等について規定している。具体的には、PWR燃料は参考文献1）、2）BWR燃料は3）、4）に記されている。PWRおよびBWR燃料で、設計基準に差があるように思われるが、基本的には同じと考えてよい。

燃料の設計では、それぞれ各社が開発及び改良し、実証した上で許認可上も認められた計算コードを使用する。各原子炉の燃料設計に使用される計算コードの概要は、原子炉設置許可申請書に記されており、また、主なモデル等は公開資料で知ることができる。これらの計算コードは、適用範囲の拡大、精度向上を目指し

表 1 PWR, BWR燃料の比較

項目	PWR燃料	BWR燃料	説明
燃料形式	17x17正方配列 (14x14, 15x15もあり)	8x8正方配列 (将来 9x9)	BWRの方が外寸小 (全長はほぼ同じ)
燃料	濃縮度は1種類 (ガドリニア入り燃料 では2種類)	濃縮度は数種類、ガドリニア入り燃料も使用 (軸方向でも変化あり)	BWRでは出力平坦化のため多種類使用
被覆管	ジルカロイ-4 歪取焼鈍材：強度大 伸び小	ジルカロイ-2 再結晶化焼鈍材：強度小 ：伸び大	PWRでは冷却材中の水素濃度が高いので水素吸収率の低いジルカロイ-4を使用。 PWRでは圧力が高いので強度を大にしている。
燃料棒 寸法	外径 9.50mm 肉厚 0.57~0.64mm	外径 12.3mm 肉厚 0.86mm	BWR燃料の方が太い
燃料集合体	チャンネルボックスを使用しない	チャンネルボックスを使用	BWRでは冷却材が沸騰するため

て常に改良の努力が払われている。各メーカーが使用する計算コードそのものは公開されていないが、研究所で開発したコードには公開されているものもある。例えば、燃料棒のふるまいを評価する公開コードに、日本原子力研究所が開発したFEMAXI-Ⅲがある。

4. 燃料設計の動向

燃料の設計面では、信頼性向上、経済性向上を目指して、次の様な事項が研究・開発されてきている。

- (1) 燃料の出力軽減
- (2) 燃料トラブルの防止
- (3) 高燃焼度化
- (4) 新型バーナブルアブソーバ
- (5) 高性能化
- (6) 中性子経済向上

以下に、各項目について説明する。

4.1 燃料の出力軽減

燃料の信頼性、余裕度の増加のために原子炉としての出力は増加させても、燃料の出力は下げる努力がなされてきた。このため、燃料集合体内の燃料棒本数を増加させて燃料棒単位長さ当りの出力（線出力密度という）を下げることに及び、燃料集合体内の出力分布を均一にする設計改良がなされてきた。

燃料棒本数の増加は、PWR燃料では、14行14列型、15行15列型から現在は17行17列型が主流となっている。BWR燃料では初期の7行7列型から始まり、現在は8行8列型、更に将来は9行9列型が採用される予定である。

PWRでの燃料集合体内の出力分布は、集合体内部にウランの入っていない制御棒案内シムルが分散・配置されており、また、長期の反応度は冷却材中のホウ酸濃度で調整する（ケミカルシムという）ため平坦化されている。更に、ほとんど沸騰が起こらないため軸方向の冷却材密度の変化は小さく、軸方向出力も平坦に近くなる。このため、集合体内燃料濃縮度は1種類でよい。BWRでは、沸騰が起こるためケミカルシムが利用できず、燃焼による反応度の変化を十字型制御棒で補償する方式であることから集合体内の出力分布が平坦化されにくい傾向にある。更に、冷却材が沸騰するため軸方向の出力分布も平坦でない。この為、集合体内の径方向及び軸方向の燃料濃縮度を変化させて、出力が均一になるように設計する。この集合体内での濃縮度分布に各社工夫をこらしている。更に、最近では燃料を効率的に均一に燃焼させるよう集合体内

部のウォーター・ロッド（Water Rod）の数を増加させたり、その径を大きくしている。これにより、集合体内部の熱中性子量が十分となり、ウランが効率よく燃焼するようになる。

4.2 燃料トラブルの防止

燃料では、被覆管に小さな欠陥が生じてFPが漏れる（これを燃料リークという）ことが最大のトラブルであり、これをなくすための設計改良が実施されてきた。1970年代の水分破損対策、PCI（Pellet Clad Interaction：ペレット-被覆管相互作用）対策（主にBWR）が代表的なものである。燃料リークには至らないが、燃料棒曲り対策（主にPWR）も積極的に実施された。

PWR燃料では冷却材中の異物が最近の最大の燃料リークの原因といわれてきた。異物とは、何らかの原因で原子炉一次系に混入した金属片をいう。異物が燃料集合体内部に万一捕えられると、冷却材の流れで振動し、燃料棒を摩耗・損傷させることがある。これを防ぐために、異物を一次系に入れない管理をするとともに、異物対策燃料が各社で設計・実用化された。異物対策燃料とは、燃料下部で異物を捕集し、集合体内部まで異物が達しないように設計した燃料である。国内では事例がないが、最近ではBWRでもこの原因によるリークが海外で報告されており、異物対策の設計が検討されている。

BWRでは、水垢（Crud）が被覆管に付着し、腐食を加速して起こるCILC（Crud Induced Localized Corrosion）によるリークが海外で多く報告されている。この対策として、被覆管製造工程の熱処理条件最適化が行われている。

4.3 燃料の高燃焼度化

燃料の高燃焼度化とは、長期間燃焼させて多くのエネルギーを単位重量当りの燃料から取り出すことをいう。これは、使用済燃料発生量の低減等の観点から最近世界的に指向されている。PWRでは⁵⁾ 集合体最高燃焼度を48GWd/tまで増加させる許認可が進められており、次に55GWd/t程度に増加させることを目標にしている。BWRでも⁶⁾ 50GWd/tまで増加させる許認可が始まっており、次に60GWd/tを目標にしている。

この高燃焼度化のために、燃料ふるまいデータの収集・評価及び改良燃料の開発が進められている。

燃料ふるまいデータ収集の為に、現行設計の燃料を高燃焼度まで燃焼させて照射後試験を実施し、健全性

を確認することが海外及び日本で行われた。照射後試験とは、燃焼終了後の高放射能を持つ燃料を特殊な施設（ホットセルという）でくわしく非破壊及び破壊試験で調べることをいう。日本では(財)原子力工学試験センターが実施した美浜3号機（PWR）、福島第一3号機（BWR）の燃料信頼性実証試験のデータが公開されている^{7),8)}。その他にも例えば、メーカーとPWR電力の共同研究として大飯1号機で高燃焼度先行使用燃料照射試験が実施された⁹⁾。これらのデータから、燃料の高燃焼度での健全性が確認された。

高燃焼度化する際の検討項目は、多くの文献でPWR、BWRとも被覆管外面の腐食といわれている。同じ腐食でもジルカロイ-4を使用するPWRでは均一腐食（腐食膜厚さがほぼ均一となる腐食）、ジルカロイ-2を使用するBWRではノジュラー腐食（腐食膜厚さが断面で球又はレンズ状となる腐食）という差がある。

被覆管腐食については、各国でそのメカニズム及び耐食性改良の研究が行われている。

耐食性を改良するために大きく分けて二つの方法が研究されている。一つめは、現行の規格（ASTM B353）内で改良するものであり、代表的な物に低錫ジルカロイ-4被覆管やSiemens社のPCA（Prime Candidate Alloy）という名称のジルカロイ-4がある。BWRのノジュラー腐食に対しては、製造工程での熱処理が改良されている。二番目は、新合金の開発であり、特に現在のジルカロイにニオブ（Nb）を添加した合金がPWR用に種々研究されている。Westinghouse（WH）社の商品名Zirloという合金はその代表的なものである。また、二重管と称する外側に耐食性の良い新合金とし、母材は実績のあるジルカロイとした被覆管も研究されている。なお、BWRでも新合金の研究が行われているようであるか、今のところ公開された報告はほとんどない。

4.4 新型バーナブルアブソーバ

バーナブルアブソーバ（BA：Burnable Absorber）とは、サイクル初期における燃料の余剰反応度を抑制するものである。燃料の高燃焼度化のため、燃料濃縮度を増加させるとサイクル初期の余剰反応度が増加し、BAの必要性が増す。BAには、中性子を吸収する能力の高い元素であるガドリニウム（Gd）やほう素（B）が使用される。

PWRでは、従来バーナブルポイズン棒（Burnable Poison Rod）を使用してきたが、これが使用後に放射性廃棄物となるので、使用量を減少させるために最

近ではガドリニア入り燃料も使用するようになった。ガドリニア入り燃料とは、 UO_2 粉末にガドリニア（ガドリニウム酸化物、 Gd_2O_3 ）粉末を添加し、均一混合の後焼結させたペレットをいう。現在は、6 wt%のガドリニア入り燃料が使用されているが、将来は10 wt%程度の濃度を採用する予定である。

BWRでは従来からガドリニアをBAとして使用しているが、燃料の高燃焼度化に対応するため、燃料集合体内のガドリニア入り燃料棒の本数を増した設計にしている。

4.5 高性能化

BWRでは、制御棒で出力制御を行うため、局所的な出力変化が発生し、PCIにより被覆管に過大な局部応力が加わる可能性がある。これを防ぐため、燃料の出力上昇速度をある値以下にする原子炉の“ならし運転”が実施されてきた。この運転上の制限を緩和するため、AZR（Axially Zoned Reactivity）炉心、CC（Control Cell）炉心、ジルコニウムライナー管が採用された¹⁰⁾。AZR炉心及びCC炉心は反応度変化と出力分布を制御するという制御棒の動きを燃料及び装荷パターンに分担させ、制御棒の移動による局所的な出力変化を小さくしたり、移動の回数を少なくするものである。ジルコニウムライナー管とは、被覆管の内面に柔らかい純ジルコニウムを内張りし、PCIを軽減するものである。

4.6 中性子経済向上

原子炉で中性子を有効に利用することは燃料サイクルコストを下げることになる。これを中性子経済と称するが、経済性を高めるために、ジルカロイ製支持格子燃料、軸方向ブランケット燃料、低漏洩装荷パターン等が研究されている。

ジルカロイ製支持格子は、燃料集合体の中心位置にあり、燃料でなく構造材の役目をする支持格子に中性子が吸収されることを少なくするため、材料を従来のインコネルからジルカロイに変更したものである。BWRでは既に国内でも採用されている。PWRでは標準設計としていずれの海外メーカーも本格的に採用しており、日本でも採用に向けての研究が実施されている。

炉心から中性子の漏れを少なくする軸方向ブランケット燃料は、BWRでは既に国内でも採用されている。PWRではアメリカのメーカーは新型燃料の設計に採用し始めている。

燃料の使用法で炉心から中性子の漏れを少なくさせる低漏洩装荷パターンは、現在すでに広くPWR、B

WRで採用されている。

この他、海外では修理の可能な燃料設計が採用されている。これは、リークしている燃料棒のみ健全な燃料棒と交換し、燃料集合体としては更に燃焼させ、燃料を有効利用することを目的としている。しかし、日本では燃料修理の実績は今のところない。

5. 燃料の製造・検査

5.1 燃料の加工

燃料加工メーカは、ウラン濃縮工場でのUF₆の受取りからUO₂への再転換、ペレット加工、燃料棒加工、集合体組立、原子炉サイトへの輸送・搬入までを行う。

燃料加工の工程には、再転換という化学工程、ペレット製造というセラミック焼結工程、燃料棒その他の溶接、部品の精密機械加工が含まれている。

完成した燃料集合体は、専用の輸送容器を用いてサイトまで輸送される。輸送容器は、国内の法規及びIAEAの基準を満足するよう設計されている。

燃料加工工程については、参考文献11)に詳しく説明されている。

5.2 燃料の品質管理

部品完成時、燃料棒完成時、集合体完成時には、顧客（電力会社）及び通産省の立会い検査を受けることになっている。燃料加工にも「電気技術指針」として昭和60年改正発行された「原子力発電所の品質保証指針」が適用され、これに基づいて品質保証活動が実施されている。

燃料加工の特徴は、厳格な品質管理が要求されることである。例えば110万kW級PWRでは原子炉内に約5万本の燃料棒が装荷されており、一本のリークも許されない。このため日本では、単に公差内に入れば良いとするのではなく、ロット内のばらつき減少、工程の時間的な安定性、美観や清浄性も追求してきた。このようないわゆる日本的な品質管理で燃料の信頼性は世界一となっている。

5.3 燃料製造工程における開発

燃料加工では厳重な品質管理以外に臨界管理、ウランの数量管理及び放射線管理を実施する必要がある。加工に関する開発は、燃料の信頼性向上、合理化が主であるが、合理化は、経済的な面ばかりでなく、品質向上及び作業員の被曝を出来る限り少なくすること、上記管理を正確にかつ、迅速に行うことを目的としている。具体的には、種々の工程を機械化、自動化（いわゆるFA化）している。

信頼性向上のために、新しい検査機器や検査方法の開発も行われている。例えば、BWRで用いられているジルコニウムライナー管のライナー厚さを非破壊で測定する測定器は日本独自で開発している。また、多くのQCデータをコンピュータを用いて採取・整理・解析するシステムの開発も行われている。これは、品質管理データの統計的評価・追跡にも役立つ。

加工方法に関する最近の開発事項では、高濃度ガドリニア入りペレットの製造法、ジルカロイ製支持格子の溶接法、大粒径ペレットの製造法等が挙げられる。

6. まとめ

以上軽水炉燃料の設計・加工に係わる最近の開発動向について述べた。現在、国産燃料の健全性は、諸外国の実績をはるかに超えた好成績を示している。これは官庁、電力会社、諸研究機関（大学、原研、動燃等）一体となつての研究開発の積み重ねによる設計改良と、日本的な品質管理の賜物と考えられる。今後ともこの好成績を維持するよう努力してゆく覚悟である。

参 考 文 献

- 1) 原子炉安全専門審査会“加圧水型原子炉に用いられる17行17列型の燃料集合体について” 昭和51年2月16日
- 2) 原子炉安全専門審査会軽水炉安全審査標準化検討会“PWRプラント(3ループ800MWe級)に対する安全審査手引き” 昭和53年2月17日
- 3) 原子炉安全専門審査会“沸騰水型原子炉に用いられる8行8列型の燃料集合体について” 昭和49年12月25日
- 4) 原子炉安全専門審査会軽水炉安全審査標準化検討会“標準化BWRプラント(1,100MWe級)に対する安全審査手引き” 昭和53年8月23日
- 5) 松岡由了“PWR燃料の高燃焼度化” 火力原子力発電 Vol.41, No.3, 335~343 (1990)
- 6) 「燃料高性能化」研究専門委員会“燃料の高性能化研究の現状” 日本原子力学会誌 Vol.31, No.11, 1223~1230 (1989)
- 7) 三島良績 その他12名“沸騰水型原子炉燃料集合体の信頼性実証実験” 同上 Vol.29, No.2, 90~115 (1987)
- 8) 三島良績 その他12名“加圧水型原子炉燃料集合体の信頼性実証試験” 同上 Vol.31, No.10, 1129~1143 (1989)
- 9) Y. Matsuoka, K. Mori, A. Oe, T. Yokoyama “High Burnup Demo Fuel PIE” ENC'90 Transactions, 1990~1994 (1990)
- 10) 榎本聡明“BWR炉心燃料設計の現状と将来展望” 日本原子力学会誌 Vol.26, No.2, 109~116 (1982)
- 11) 原子炉安全研究協会“軽水炉燃料のふるまい(改訂新版)” 平成2年7月