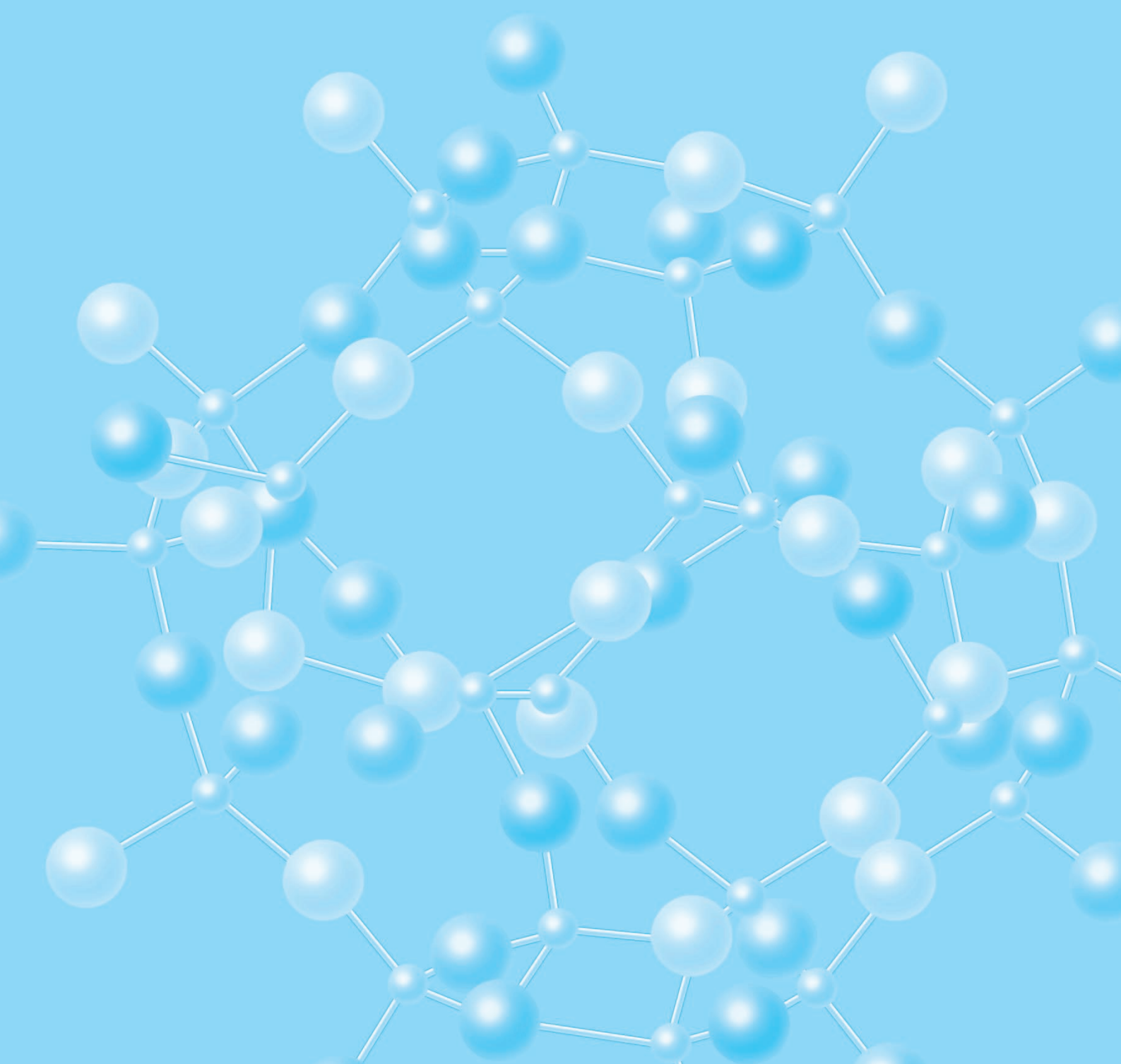


第Ⅱ部

金属燃料FBR

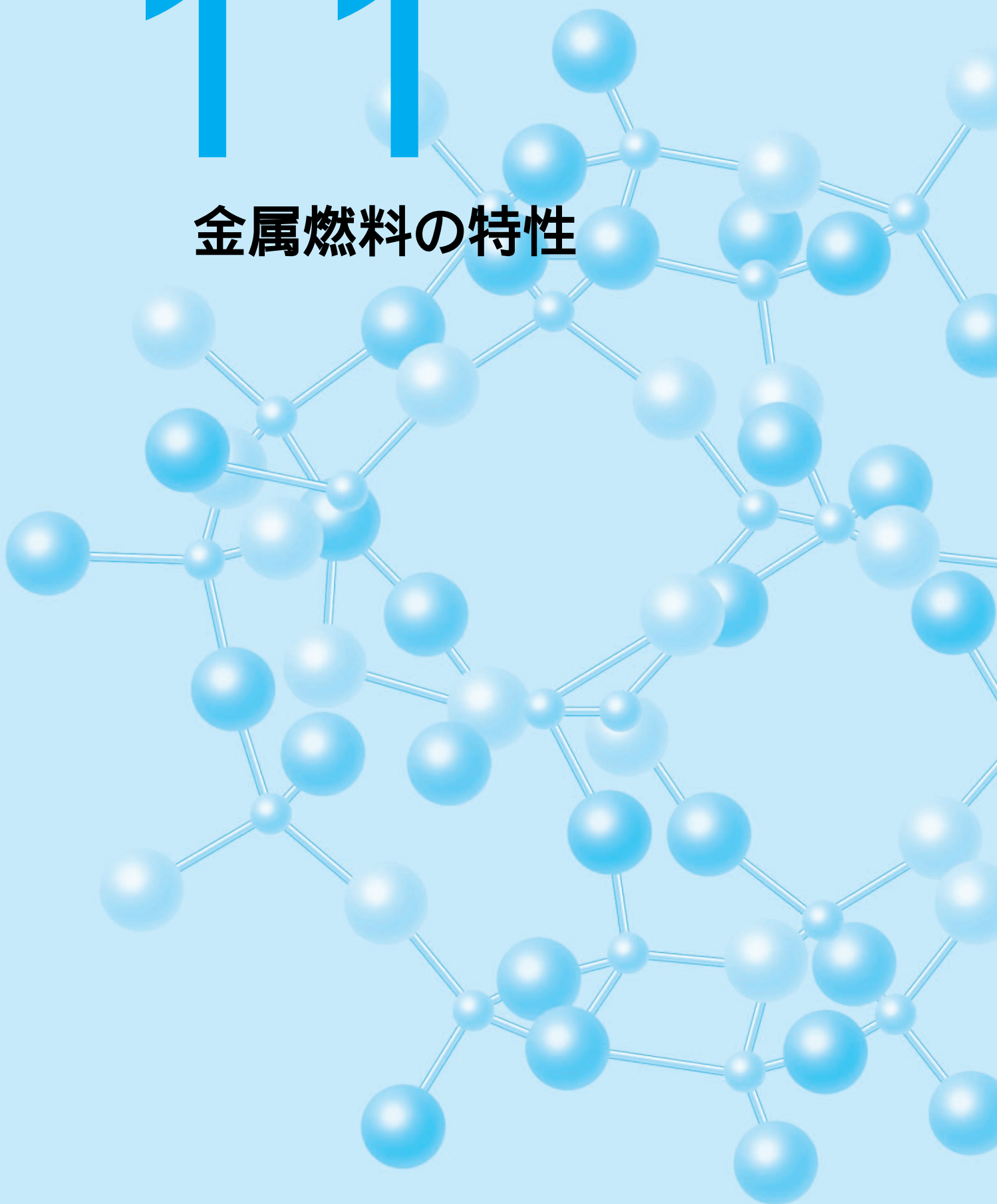


第

11

章

金属燃料の特性



原子力システム部 上席研究員 横尾 健
原燃サイクル部 主任研究員 尾形 孝成

11 - 1 金属燃料とは88
11 - 2 照射中のふるまい88



横尾 健（1982年入所）

軽水炉の炉心核熱流動解析手法の研究、原子力情報センターの情報システム(NICS)や予防保全支援システム(CSPAR)の開発などを行った後、金属燃料FBRと乾式リサイクルの研究に従事。経済的かつ安全な燃料サイクル概念の確立をめざして、主に、燃料・炉心設計と安全評価に関わる解析技術の開発を行ってきた。



尾形 孝成（1987年入所）

入所以来、高速増殖炉用金属燃料の開発研究に従事。特に、照射挙動解析コードの開発および燃料要素の健全性評価を担当。金属燃料と被覆管との共存性に関する実験も行うなど、金属燃料の特性について、実用性評価の観点から幅広く検討している。

第11章 金属燃料の特性

1950年代から60年代にかけて運転が始まった初期のFBR(EBR-、EBR-、Enrico-Fermi、DFR)では金属燃料が使用された。しかし、当時の設計では、燃料合金のスウェリング^{*1}のために被覆管に過大な応力が生じて、低い燃焼度^{*2}で被覆管が破損した。また、融点が比較的低い¹ため、炉心の高温化に対する余裕が小さいと考えられた。そのため、各国における燃料開発の主流は、軽水炉で用いられていた酸化燃料へと移行した。この流れの中にあっても、米国アルゴン国立研究所(ANL)では、実験炉EBR-IIの炉心用燃料として金属燃料の開発を継続し、最適な燃料組成の探索やスミア密度^{*3}の変更など、高燃焼度達成のための設計の改良が行なわれた。その結果、スミア密度を低減したウラン-プルトニウム-ジルコニウム三元合金燃料によって、20万MWd/t^{*2}に近い

実用上十分な高燃焼度を達成するに至った。この燃料開発の成功によって、密度が高く熱伝導が良いという利点を活かして経済性と安全性の向上を図った金属燃料FBRが可能となった。さらに、前章までに述べたコンパクトな乾式再処理プロセスおよび成型加工プロセスを組み合わせて、魅力的な金属燃料FBRサイクルを実現できる可能性が出てきた。

電力中央研究所では早くからこの金属燃料FBRに着目し、1987年には独自の解析システム(燃料挙動解析コード、炉心核熱流動設計コードシステム、プラント過渡解析コード)の開発に着手した。そして、この解析システムを用い、公開文献に発表された燃料物性値や燃料照射データなどを活用して、金属燃料FBRの設計研究を進めてきた。第11、12、および13章では、この研究の成果にもとづいて、燃料の特色を生かした炉心の高性能化や受動的安全性の確保の可能性について述べる。第14章では、軽水炉の使用済燃料に含まれるマイナーアクチニドを金属燃料FBRサイクルに取り込むことによって、軽水炉からの高レベル廃棄物の放射能毒性の低減をはかる方法について紹介し、その技術的課題と解決の見通しについて述べる。

^{*1}スウェリング：核分裂によって生成される元素(核分裂生成物)が燃料体に蓄積することによって燃料体自身が膨らむ現象。ガス状の核分裂生成物の一部は燃料体の内部で気泡を形成するため、特に燃料体を膨らます効果が大きい(ガススウェリング)。

^{*2}燃焼度：核燃料の単位質量あたりに放出されたエネルギーで、燃焼の度合いを表わす。単位としてMWd/tやGWd/tなどが用いられる。燃料物質(ウランやプルトニウム)の始めの量に対する燃焼した量の割合(燃焼率)と同じ意味で用いられることもある。この場合の単位は、例えば原子数パーセント(at%)が用いられる。

^{*3}スミア密度：被覆管の内側を燃料体が占める面積割合。

11 - 1 金属燃料とは

FBR用の金属燃料ピンの概念を、酸化物燃料ピンと比較して図11-1-1に示す。ウランとジルコニウムからなる合金、あるいはこれにプルトニウムを加えた合金を燃料体として用いる。通常、燃料中のジルコニウムの割合は、重量割合で10%とされる。この燃料合金を鋳造法によって数10cmの棒に成型加工したもの(燃料スラグと呼ぶ)

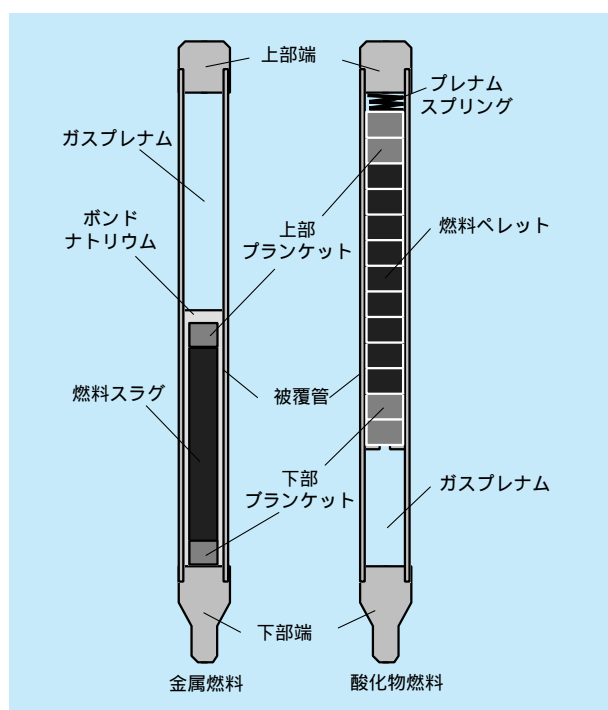


図11-1-1 金属燃料ピンと酸化物燃料ピンの概念図

を必要に応じて積み重ねて使用する。被覆管材には、酸化物燃料ピンと同様に、オーステナイト系またはフェライト系などのステンレス鋼が用いられる。

表11-1-1には、酸化物、金属、および窒化物の3種類のFBR用燃料の代表的な特性を示す。金属燃料は密度が高く熱伝導が良いが、融点は比較的低い。金属燃料ではスミア密度を約75%とするが、この値は他の燃料に比べて低い。これは、後述するように、燃料-被覆管機械的相互作用による被覆管の破損を防止するために、燃料と被覆管との隙間を比較的大きくするためである。また、金属燃料はナトリウムとの共存性が良いため、燃料と被覆管との隙間にナトリウムを充填して(ボンドナトリウムと呼ぶ)、燃料スラグから冷却材への熱の伝達を促進することができる。

表11-1-1 代表的な各種高速炉燃料の比較

	酸化物 (U, 15Pu)O ₂	金属 U-13Pu-10Zr	窒化物 (U, 14Pu)N
燃料要素外径 (mm)	8.5	8.5	8.5
ペレット密度 (g/cc、常温)	11.0	15.8	14.3
スミア密度 (%TD)	87.0	75.0	80.0
炉心平均重金属密度 (g/cc)	3.7	4.7	4.8
炉心高さ (cm)	100.0	80.0	78.0
ボンド材	He	Na	He、Na
熱伝導率 (W/m/K、定格時)	4.0	26.6	19.2
融点 (°C)	2750	1120	2500
照射スエリング	中	大	小
照射クリープ	小	大	小
照射実績	> 100万本	数千本	数百本

11 - 2 照射中のふるまい

ウラン - ジルコニウム合金は米国の実験炉EBR-1の炉心燃料として使用され、1万本以上の使用実績がある。また、ウラン - プルトニウム - ジルコニウム合金燃料は、EBR-1および実験炉FFTFにおいて照射試験が行なわれ、その照射本数は合計約600本に至っている。照射試験では、被覆管温度、線出力*1、スミア密度など、燃

料ピンの仕様や照射条件を様々に変えて行なわれた。これらの試験条件のうち被覆管温度と線出力は、実用炉で期待されるよりやや低い範囲にとどまっているものの、20万MWd/tに近い実用上十分な高燃焼度が達成されている。一連の照射試験によって明らかにされた金属燃料要素の照射下でのふるまいを次に述べる。

燃焼によって生じる核分裂生成物 (FP) のうちガス状のもの (FPガス) が燃料スラグ内部に蓄積して気泡が形成さ

*1線出力：燃料要素の単位長さあたりの出力。線出力密度とも呼ぶ。単位としてW/cmやW/mが用いられる。

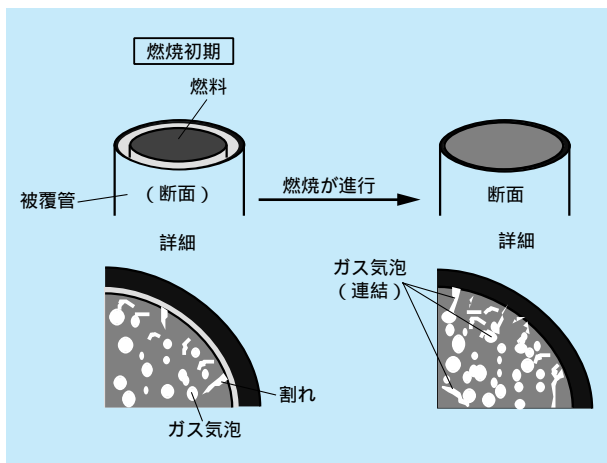


図11-2-1 金属燃料内のFPガス気泡の発達（概念図）

れる。このために燃料スラグの体積増加、すなわちスウェリングが生じる。燃料スラグ中の気泡の割合が増加すると、それらが互いに合体・連結するようになり、燃料スラグの内部から外部へ通じた「トンネル」が形成される(図11-2-1)。FPガスはこのトンネルを通じて燃料スラグの外部へ排出されるようになり、FPガスが燃料スラグ内部に蓄積する速度が減少する。その結果、スウェリングの速度が減り、燃料スラグと被覆管との間の機械的な相互作用(燃料-被覆管機械的相互作用)^{*2}が緩和される。したがって、照射初期の燃料スラグのスウェリングに起因した燃料-被覆管機械的相互作用による被覆管の破損を防止するためには、「トンネル」が形成されるために必要なFPガス気泡の発達を許容する、つまりある程度のスウェリングを許容することが重要である。そのためには、被覆管の内部にスウェリングのための空間を確保すればよい。その空間の大きさは、照射試験結果から被覆管内側面積の20～25%(スミア密度80～75%に対応)とされているが、目標燃焼度、被覆管材料、使用条件などに応じて最適な値が定まるであろう。

当所で開発した金属燃料挙動解析コードALFUSを用いれば、図11-2-2に示すような詳細なスウェリング量の評価と、これにもとづく燃料ピンの応力-ひずみ解析が

^{*2}燃料-被覆管機械的相互作用：例えば、燃料体が被覆管と接触して、しかも燃料体の外径の増加速度が被覆管のそれより速い場合、被覆管は燃料体から力(応力)を受け、その反作用で燃料体は被覆管から圧縮力を受ける。このような燃料体と被覆管との間で生じる機械的な作用を、燃料-被覆管機械的相互作用と呼ぶ。FCMI(Fuel-Cladding Mechanical Interaction)と略称されることもある。燃料体の外径増加の要因のひとつがスウェリングである。

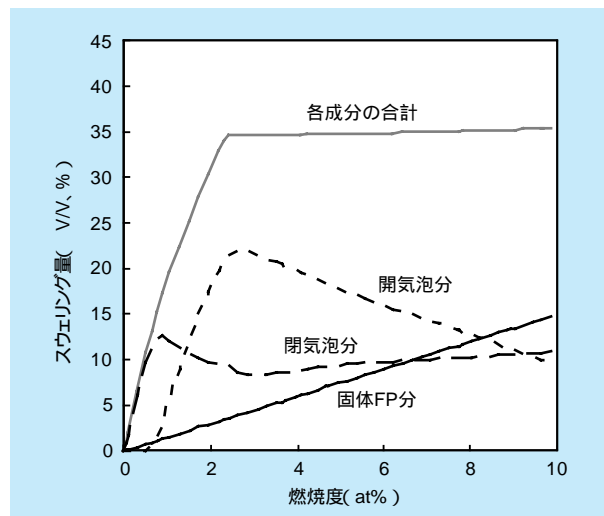


図11-2-2 ALFUSコードによるEBR-1照射燃料の解析結果(燃料合金のスウェリング量の内訳)

可能であり、被覆管の破損に対する余裕を定量的に予測することができる。高燃焼度までの被覆管の健全性を確保するためには、スミア密度を適切な値としたうえで、ガスプレナム部に蓄積するFPガスによる内圧の増加に対して被覆管のクリープ寿命が十分となるように、被覆管肉厚およびプレナム容積を設定すればよい。なお、図11-2-2に示したように、高燃焼度では固体状の核分裂生成物(固体FP)の蓄積によるスウェリングが大きくなり、燃料-被覆管機械的相互作用の大きさが増加する。このような固体FPの効果もALFUSで評価できる。

燃料スラグ内部で核分裂によって発生した熱は、被覆管の外側を流れる冷却材によって除去される。そのため、燃料スラグの中心部と外側との間に温度差が生じる。この温度差によって「熱拡散」と呼ばれる現象が生じ、燃料成分であるジルコニウムやウランが移動する。その結果、初期には均一であった燃料スラグの組成が均一でなくなる。金属燃料ピンの照射中の健全性を評価する場合、この燃料成分の分布を正しく予測して、組成の変化に対応した適切な熱伝導率や融点などの物性値を用いる必要がある。さらに、気泡による熱伝導率の劣化、固体FPが物性値に与える影響、などの評価も重要である。

ウラン、プルトニウム、および被覆管の主要成分である鉄との合金は、組成によっては比較的低い温度(700～650)に融点がある。燃料と被覆管との接触部に形成される反応層に溶融した部分(液相)が生じると、それによって被覆管が侵食される。このため、反応層の各部分の

組成を把握して、最も融点が低い部分でも液相とならない温度を燃料ピンの使用上限とする必要がある。当研究所では、液相が形成される条件を評価する方法を開発するため、ウラン - プルトニウム - ジルコニウム合金と鉄

との反応実験 など実施して基礎的なデータを取得するとともに、熱力学的な解析による反応生成物の予測などを進めている。