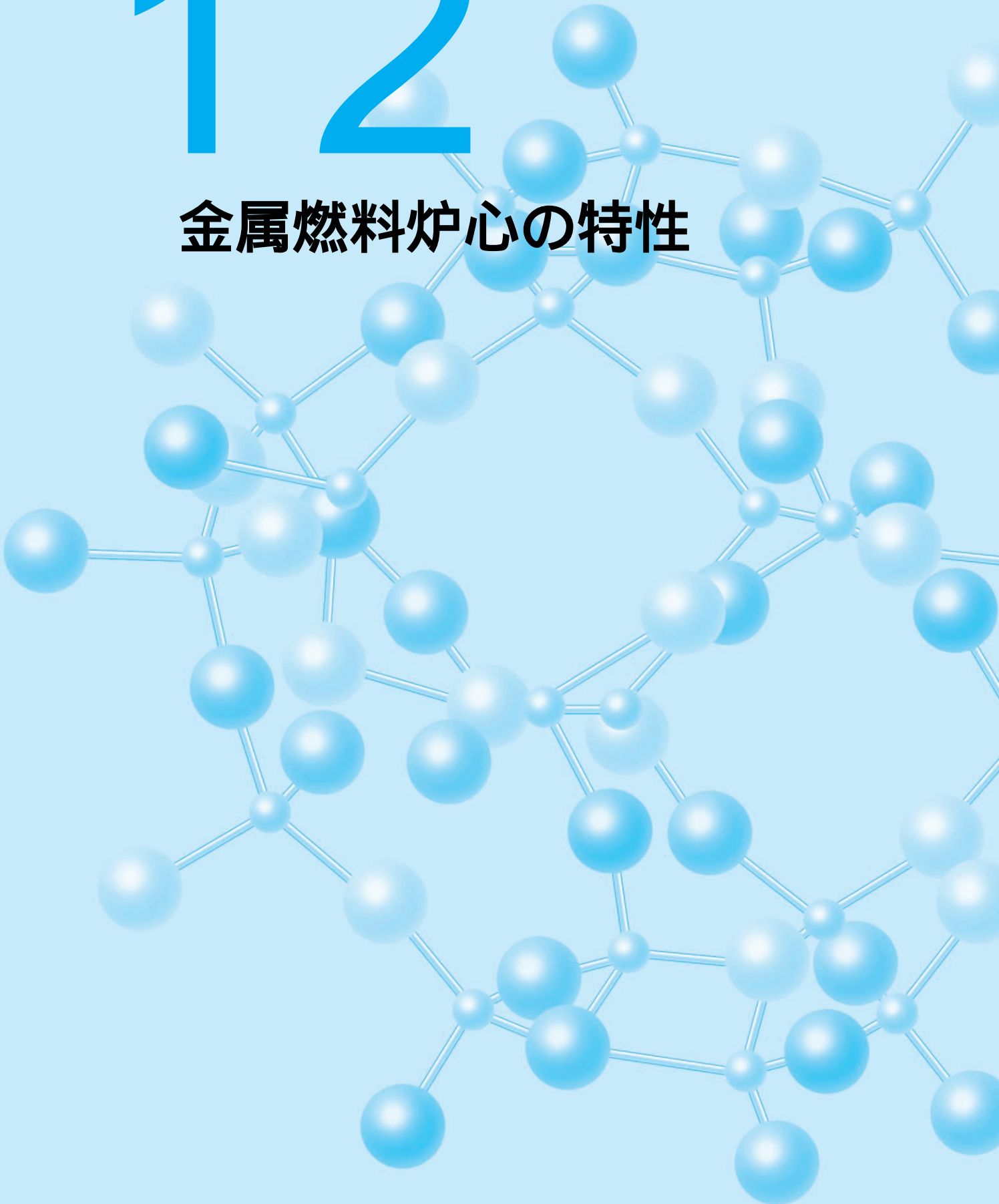


第

12

章

金属燃料炉心の特性



第12章 金属燃料炉心の特性 目次

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

12 - 1	燃烧特性	93
12 - 2	炉心の反応度特性	94
12 - 3	被覆管最高温度と炉心出口温度	96
12 - 4	燃料温度の変化と燃料要素の寿命支配因子	97
12 - 5	金属燃料FBRサイクル導入時のマスバランス	98

横尾 健 86ページに掲載
尾形 孝成 86ページに掲載

12 - 1 燃 焼 特 性

良好な熱伝導を活用するための炉心設計方針のひとつは、出力密度を高くして炉心のコンパクト化および高燃焼度化を図ることである。そのためには、燃料要素の径を細くし、かつ炉心の高さまたは燃料集合体の数を抑えて線出力を高くする。電気出力1000MW相当の大型炉から150MWeの小型炉までについて、最大線出力を500W/cmとした場合の燃焼度と燃焼反応度の評価結果を図12-1-1に示した。

一般に制御棒で制御可能な燃焼反応度^{*1}は約10\$以下とされるが、図12-1-1から、中～大型炉では2領域均

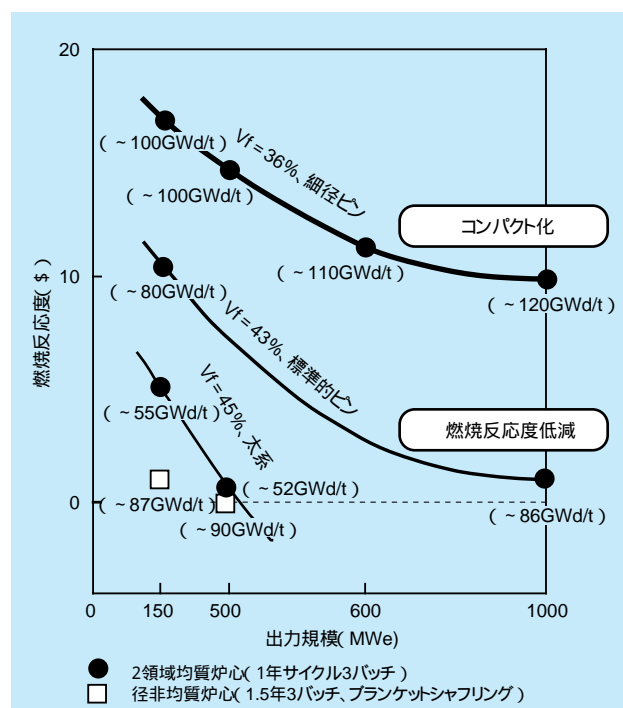


図12-1-1 各出力規模の金属燃料炉心の燃焼反応度と燃焼度 (Vfは燃料体積比を表す。括弧内は取り出し平均燃焼度。)

*1 反応度：炉心の臨界状態からのずれを表す無次元量。単位としてドル(\$)が用いられることがある。1\$の100分の1が1セント(¢)。反応度が正であるとき炉心の出力は上昇し、逆に負のときは出力が下がる。炉心の燃焼が進むと、核分裂性物質の量が減るために反応度が低下するが、この低下量を燃焼反応度と呼ぶ。炉心に挿入される制御棒には、反応度を低下させる働きがある。原子炉の運転中には、制御棒を少しずつ炉心から引き抜くことによって、燃焼反応度を補い、反応度を維持(臨界状態を維持)する。また、燃料や冷却材の温度など、炉心の状態が変化することによっても反応度が変化する。ある炉心の変化が炉心の出力を上昇させる方向に働く場合、正の反応度が加わる、と言う。出力が下がる方向の場合には、負の反応度が加わる、と言う。

質炉心^{*2}でこの制限を満たすことができ、かつ100GWd/tの高燃焼度を達成できることがわかる。一方、小型炉では、炉心からの中性子の漏れが多いため大型炉に比べて炉心の転換率^{*3}が低くなり、燃焼反応度が大きくなる。そのため、上記と同様な燃焼反応度の制限を満たすためには、より太径の燃料要素を用いる必要があり、それにとまって達成できる燃焼度は低くなる。ただし、金属燃料炉心では、核分裂性物質の密度が高いため、同程度の出力規模の酸化物燃料炉心と比べると転換率が高い。そのために、この小型炉において燃焼反応度が不利となる度合いは、金属燃料炉心では比較的小さい。このために炉心の平均出力密度(W/cc)は出力規模によらず同程度とできる。表12-1-1には、電気出力1000MWおよび300MW相当の炉心の特徴の例を示す。ここで、燃焼度に対して高速中性子フルエンス^{*4}が高めであるが、これは、金属燃料中には、中性子を減速する効果の

表12-1-1 金属燃料炉心の仕様と平衡サイクル特性の例

項目	小型炉心(300MWe)		大型炉心(1000MWe)	
運転サイクル期間(年)	1.0	1.5	1.0	1.0
炉心配置(バッチ数)	均質	径非均質	均質	均質
Pu富化度(w/o、内側/外側)	17.0/23.6	25.7	15.7/21.3	12.4/17.4
燃料要素外径(mm)	7.4	7.4	7.1	7.9
集合体ピッチ(cm)	15.8	16.0	15.6	16.7
炉心外接円径×高さ(cm)	180×100	217×120	303×100	325×100
最大線出力(W/cm)	476	329	502	492
燃焼反応度(\$)	10.2	~0.1	9.8	2.1
制御棒必要反応度(\$)	~14	~3	~14	~5
取出平均燃焼度(GWd/t)	95	105	116	85
高速フルエンス($\times 10^{23}$ n/cm ²)	4.02	3.28	4.94	3.91

*2 均質炉心：高速炉においては、ブランケット燃料を炉心外部にのみ配置した炉心を均質炉心と呼ぶ。これに対し、炉心内部にまでブランケット部を混在させたものを非均質炉心と呼ぶ。炉心内部に配置したブランケットを内部ブランケットと呼ぶ。均質炉心の場合、ブランケットを除く炉心部分を、内側と外側の2領域に分け(各々を外側炉心、内側炉心と呼ぶ)、内側炉心の燃料のPu濃度を外側炉心より下げて、炉内の出力分布をできるだけ平坦化することがある。このような炉心は2領域均質炉心と呼ぶ。

*3 転換率：高速炉では、ウラン238などの親物質が中性子を吸収することによって、プルトニウム239などの核分裂性物質が新たに生じる。燃焼した核分裂性物質に対する、新たに生まれた核分裂性物質の割合を転換率と呼ぶ。増殖炉では、ブランケットも含めた炉心全体で転換率が1を超える。その場合には増殖率と呼ぶ。

*4 中性子フルエンス：単位面積あたりの中性子照射量。特にエネルギーの高い中性子によるものを高速中性子フルエンスと呼ぶ。

高い酸素等の軽い原子核が含まれないため、炉内の中性子の平均エネルギーが高くなるためである。

一方、高い転換性能をより積極的に活用する炉心設計方針として、燃焼反応度の大幅な低減によって安全性の向上を図ることが挙げられる。制御棒に必要な反応度の大部分は、燃焼による反応度低下量の補償分で占められる^{*1}。したがって、この反応度を1\$^{*1}以下と非常に小さくしておけば、制御棒が誤って引き抜かれた場合に挿入される反応度が小さくなって、事故の重大性が緩和されることになる。しかし、一般に燃焼反応度の低減を目指した炉心では、経済性の重要な指標である燃焼度を高く設定することが容易ではなく、これらの両立をはかることが炉心設計の課題となる。前出の図12-1-1には、この点に関する評価の結果も合わせて示してある。図12-1-1から、大型炉では、燃料ピンの外径を太くして炉心の中の燃料の体積割合を増加させることによって、燃焼反応度を1\$以下に抑え、かつ燃焼度を90GWd/t程度にまで高められることがわかる。この場合、炉心部の転換率は1.0に近い値となる。一方、小型炉においては、燃焼

反応度を適切な範囲に抑えるためにはかなりの太径化が必要であり、均質炉心では十分な燃焼度が得られなくなる。その場合には、径方向に非均質な炉心^{*2}にして、燃料交換の際に内部ブランケット^{*2}同士で配置変えを行うなど、出力の時間変化を抑え、かつ炉心内の出力分布が平坦となるように一層の工夫を行うことにより、目標の達成が可能となる。前出の表12-1-1には、このような炉心の特性例として、1000MWe均質炉心と300MWe非均質炉心の値も示している。

なお、金属燃料炉心の設計では、通常の炉心設計上の不確かさに加えて、照射中の燃料スラグの変形、再処理工程において核分裂生成物が除去される割合、および燃料スラグ製造の際の製品のばらつき等も炉心の反応度に影響を与えると考えられ、その影響を補うための反応度も制御棒に必要である。当研究所の評価によれば、このような種々の影響を考慮しても、炉心の規模によらず、制御棒が誤って引き抜かれた場合に挿入される上述の反応度を小さく抑え、事故の重大性を緩和することが可能である。

12 - 2 炉心の反応度特性

前出の表12-1-1に燃焼特性を示した300MWeおよび1000MWe炉心における主な反応度特性を、1000MWe酸化燃料炉心の例と比較して表12-2-1に示す。金属燃料炉心の第一の特徴的な点は、酸化燃料炉心と比べて炉内の中性子の平均エネルギーが高いためにドブドラ係数^{*5}、^{*6}が小さいことである。炉内で平均的な燃料要素における定格時の温度分布を図12-2-1に示しているが、金属燃料ではかなり平坦な温度分布となる。これは、金

属燃料では燃料スラグの熱伝導率が高く、しかもボンドナトリウム(11-1節参照)を使用するため、燃料スラグから冷却材への熱の伝達が良好であることによる。このように金属燃料ピンからの熱の除去が速やかであるから、炉心の出力が上昇した際の燃料温度上昇量が小さい。そのため、出力変化に対する反応度係数である出力係数^{*5}の大きさ(絶対値)が小さくなる。ただし、表12-2-1に示したように20%の不確かさを見込んでみても出力係数は負^{*5}であるので、起動時から定格までのすべての運転状態にわたって、原子炉の安定な制御性を保証することは十分に可能である。なお、ゼロ出力から定格出力までの出力上昇を補うために必要な反応度(出力補償反応度)は酸化燃料炉心の数分の1程度である。

表12-2-1に示した燃料温度係数^{*5}は、燃料の熱膨張による炉心高さと燃料密度の変化に対応するものであるが、出力規模、炉心配置、および燃料物質の違いによる差は小さい。なお、金属燃料の熱膨張率は酸化燃料より大

^{*5} 反応度係数：原子炉の状態を表わす量(出力、燃料温度、冷却材温度など)が変化した場合の反応度(*1参照)変化を表わす。対象としている量に応じて、出力係数、燃料温度係数、などと呼ぶ。反応度係数が負であることは、原子炉に生じたある変化(例えば温度上昇)が、反応度を下げる方向、すなわち原子炉出力を下げる方向に作用することを意味する。

^{*6} ドブドラ効果：燃料温度が上昇すると、プルトニウム239などの核分裂性元素よりも他の元素(特にウラン238)による中性子の吸収量が多くなって、反応度が下がる(核分裂の連鎖反応が抑制される)現象をドブドラ効果と呼ぶ。ドブドラ効果に起因する反応度(*1参照)がドブドラ反応度で、その反応度係数(*5参照)をドブドラ係数と呼ぶ。これは、一般には燃料温度係数の一部に含められるが、本編では説明の都合上、燃料温度係数にドブドラ係数は含めていない。

表12-2-1 各種の炉心設計例における反応度特性の比較(平衡サイクル末期、定格時)

反応度係数	300MWe金属燃料炉心		1000MWe均質炉心	
	均質	非均質	金属燃料	酸化物燃料
遅発中性子実効割合(10^{-3})	3.75	3.89	3.78	3.9
燃焼補償反応度(\$)	10.2	- 0.05	2.1	7.3
温度補償反応度(低温 高温, \$)	0.48	0.45	0.49	0.6
出力補償反応度(高温 定格, \$)	0.41	0.26	0.31	2.1
燃料温度係数($\rho /$)	- 0.11	- 0.06	- 0.08	- 0.09
冷却材温度係数($\rho /$)	0.16	0.17	0.21	0.19
炉心径膨張係数($\rho /$)	- 0.16	- 0.15	- 0.19	- 0.20
ドップラ係数(10^{-3}TdK/dT)	- 4.04	- 4.64	- 4.60	- 7.84
出力係数($\rho / \%$ 出力, 20%error)	- 0.19 \pm 0.07	- 0.11 \pm 0.06	- 0.14 \pm 0.08	- 1.44 \pm 0.25

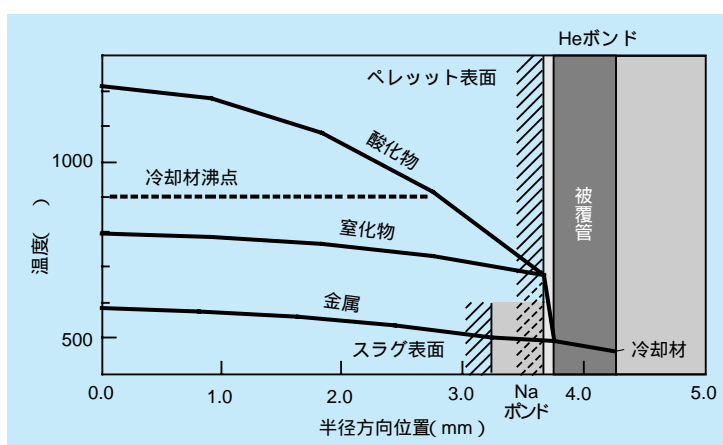


図12-2-1 各種燃料炉心の燃料要素内径方向温度分布 (1600MW炉心)

きいが、出力変化に伴う燃料温度の変化が比較的小さいため、熱膨張量はあまり大きくなりません。さらに、燃料スラグがスウェリングして被覆管と接触した後は、燃料スラグは被覆管に拘束されるため、熱膨張による炉心高さの変化もあまり大きくなりません。炉心の径方向膨張係数は、炉心支持板あるいはラッパ管(図12-2-2参照)の熱膨張に対応する反応度係数であるが、これも炉心配置や燃料物質に対する依存性が小さい。

一方、冷却材温度係数については金属燃料炉心では若干大きな値を示す傾向がある。これは、炉内の中性子の平均エネルギーが高いことに加え、冷却材以外に軽い原子核がないために、冷却材密度変化の影響が相対的に大きくなることに起因している。同様の理由で、沸騰などのために冷却材の一部が無くなった場合に加わる正の反応度(ボイド反応度)が大きくなることが懸念されたが、図12-2-3に示

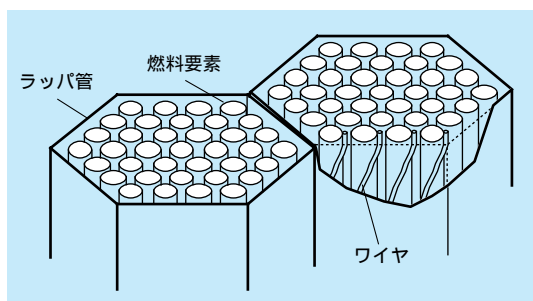


図12-2-2 高速炉の燃料集合体の概念図

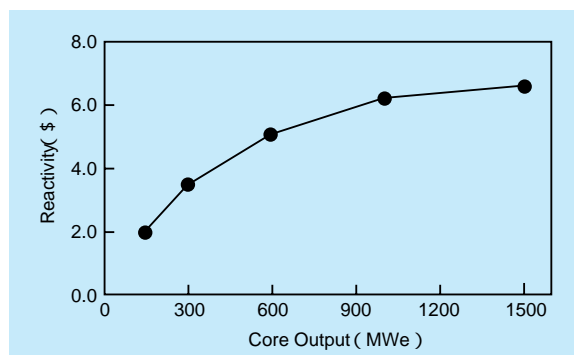


図12-2-3 各出力規模の金属燃料炉心の炉心部ボイド反応度

すように、金属燃料炉心のポイド反応度は、大型炉においても極端に大きくはならない。安全性確保の観点から、「スクラム失敗を伴う冷却材流量喪失型事象（第13章参照）

の際に炉心に加わる反応度の制限値は8%とされるが、その制限値を下回るように金属燃料炉心を設計することが可能である。

12 - 3 被覆管最高温度と炉心出口温度

一般に、FBRの燃料集合体には、前出の図12-2-2に示したようなラッパ管が付けられるため、冷却材の流量を集合体毎に調節することができる。そのため、各々の燃料集合体の発熱量に応じて冷却材流量を適切に配分することによって、冷却材の炉心出口における温度を平坦化して、炉心の発熱の有効利用を図ることができる。一方、図12-3-1に示すように、通常運転時および運転中の異常な過渡変化の際の燃料と構造材の健全性確保ならびに冷却材の沸騰防止などの観点から、被覆管など炉心各部の温度に対して制限値が設定される。そして、炉心および各集合体内の出力分布とその変動を考慮した詳細な熱流動評価を行った上で、最も発熱/流量比が高く温度条件が厳しくなる部分においてもこれらの制限が満たされるように、各集合体の必要流量が定められる。このような設計を熱流設計と呼ぶ。

各燃料集合体の冷却材流量の調節は、燃料集合体下部の冷却材導入部（エントランスノズル）と炉心支持板連結管の開口部の組み合わせを変えることによって行われる。運転中に冷却材流量を調節することは困難であるため、燃料集合体の発熱量が使用期間中で最大となる時点に合

わせた一定の流量を配分する。また、冷却材流量の微調節は技術的に困難であるため、一部の集合体には必要以上の流量が配分される。このような流量配分上の限界から各集合体の間に温度差が生じ、さらに集合体内の出力/流量分布の不整合から高温点ができることになる。この高温点において設計上の各種の不確かさを考慮した場合でも、通常運転時および運転中の異常な過渡変化時の各部の温度が制限値以下となることが要求される。このような従来からの炉心設計の方法は、金属燃料炉心に対しても適用される。

前出の表12-1-1に燃焼特性を示した300MWe径非均質炉心および1000MWe 2 領域均質炉心に対する熱流設計の結果を、表12-3-1 に示す。この設計では、11章で述べた液相形成の制限の観点から、定格時および過渡時の被覆管最高温度を各々620-625 および700 に制限している。そのため、炉心出口温度は約500 と現行の酸化燃料炉心より若干低い値となっている。なお、今後原型炉などにおける実績が反映されて工学的安全係数の合理化がなされると想定した場合、表中に示したように、炉心出口温度を10%程度高く設定できると期待される。

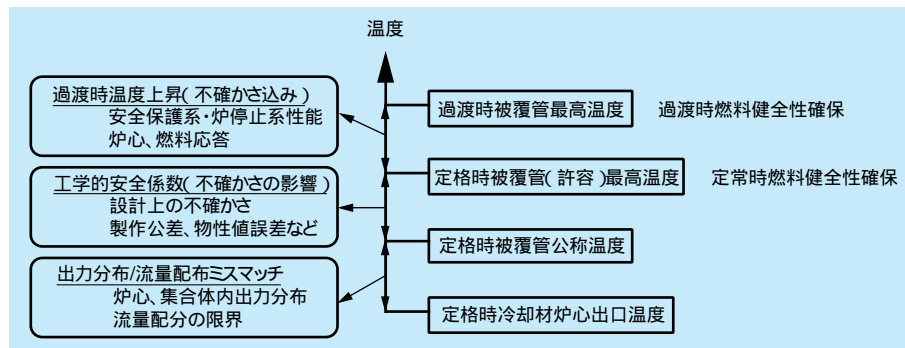


図12-3-1 炉心熱流設計の考え方

表12-3-1 炉心温度評価結果の例(入口温度 = 355)

1000MWe 2 領域均質炉心

300MWe径方向非均質炉心

(工学的安全係数改善を想定)

(液相形成問題の解消を想定)

被覆管最高温度		実効的 工安係数	炉心出口 温度
定格時	過渡時		
620	700	1.244	498
620	700	1.150	511
675	770	1.245	528

被覆管最高温度		実効的 工安係数	炉心出口 温度
定格時	過渡時		
625	700	1.244	499
625	700	1.150	510
675	770	1.245	524

12 - 4 燃料温度の変化と燃料要素の寿命支配因子

前出の表12-1-1に示した炉心の中で線出力が最大となる燃料ピンの各部の温度履歴を、熱流体力設計の結果をもとに、金属燃料挙動解析コードSESAME を用いて解析した。この結果を図12-4-1に示す。SESAMEは設計用の簡易解析に用いることを目的として、当研究所で開発した解析コードである。11-2節で述べたALFUSと異なり、SESAMEには経験的な解析モデルが多く用いられている。大型の1000MWe 2 領域均質炉心の場合、線出力が最大となる燃料ピンは、転換率^{*3}が高い内側炉心^{*2}にあるために、燃料ピンの使用期間中、線出力はあまり下がらない。一方、300MWe非均質炉心の場合では、転換率が低いために、燃料ピンの線出力は燃焼が進むにつれて減少してゆく。燃料スラッグの熱伝導率は、FPガス気泡

の発達(11-2節)にともなって劣化し、気泡が連結して形成される「トンネル」にボンドナトリウムが浸入し始める直前に最も悪くなる。上記の2つの炉心の燃料温度のピークはこの時点で出ており、線出力が最大になる時点には対応しない。

スミア密度を適切な値(~ 75%)とすることによって照射初期の燃料 - 被覆管機械的相互作用を低く抑える設計(11-2節参照)がとられた金属燃料ピンにおいても、炉内での使用を続けるうちに、やがては被覆管にかかる力(応力)や被覆管のひずみが増加して、燃料ピンの健全性が損なわれてくる。被覆管の応力や外径が増加する主な原因には、ガスプレナム(図11-1-1参照)に放出されたFPガスが蓄積して被覆管内のガス圧が高くなること、

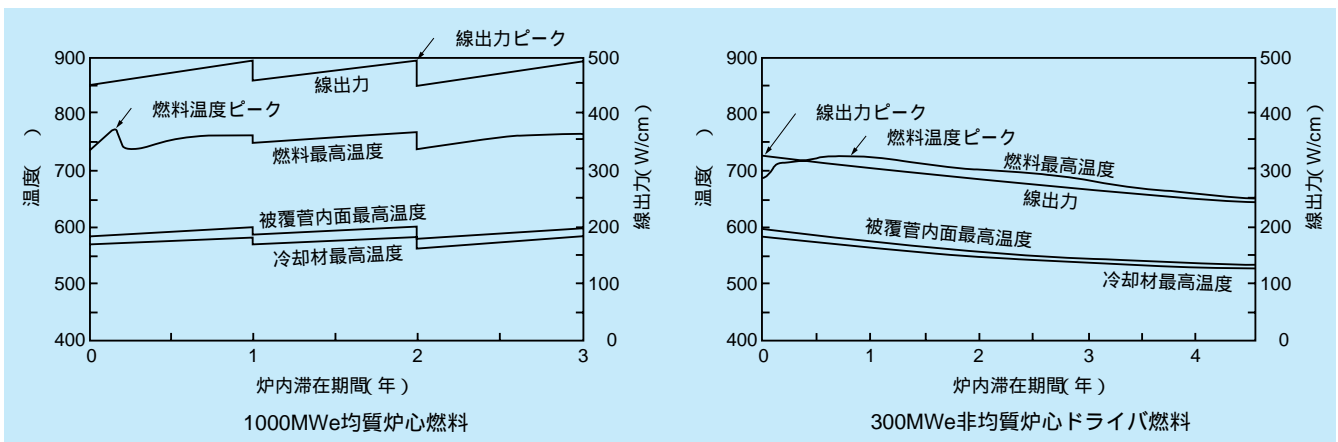


図12-4-1 金属燃料炉心の最大出力燃料要素各部温度履歴評価例

11-2節で述べた固体FPの蓄積によって燃料スラグのスウェリングが増加して燃料 - 被覆管機械的相互作用が大きくなること、核分裂生成物の一部である希土類元素が被覆管と反応して被覆管の有効な厚さが減少すること、の3つがある。これらが金属燃料ピンの寿命を支配する

因子である。図12-4-1に示したような温度や線出力の使用期間中の変動を踏まえて、寿命支配因子の定量的な評価を行い、被覆管の破損に対する余裕が十分となるように燃料ピンを設計することで、使用期間中の燃料ピンの健全性が保たれるようにする。

12 - 5 金属燃料FBRサイクル導入時のマスバランス

近年のウラン価格の安定、FBRのプラントコスト低減策の不確かさなどを反映して、FBRとその燃料サイクルが経済的競争力を持つ時代は来世紀中葉以降になるとの見通しが出てきた。FBRの実用化が大幅に遅れ、これに伴って軽水炉時代が長期化すると、軽水炉で生成される超ウラン元素(プルトニウムとマイナーアクチニド：ネプツニウム、アメリカシウム、キュリウムなど)が大量に蓄積されることになる。さらに、軽水炉の使用済燃料を長期にわたって貯蔵している間に、放射性崩壊によって超ウラン元素の中でも原子番号のより大きなものの割合が増加する。一般に、超ウラン元素は、他の放射性同位元素と比べて放射能が減少する速度が遅いため、放射性廃棄物の処分においては大きな負担となる。本節では、金属燃料FBRサイクルの導入によって超ウラン元素の負担を解消する方策について、あるシナリオを設定して評価した結果を紹介する。

設定したシナリオでは、図12-5-1に示すように一定規模の軽水炉発電が一定期間(今後数十年)継続した後、ある時点から寿命に達した軽水炉を順次FBRで置き換える。軽水炉発電で蓄積されたプルトニウムを含む超ウラ

ン元素は、必要に応じて再処理および乾式群分離によって回収され、FBRの建設時に必要な初装荷燃料と取り替え燃料(燃焼補償分)に用いられる(図12-5-2)。また、FBRの導入が始まると速やかにFBRの燃料サイクルも開始され、超ウラン元素の回収・リサイクルが行われるものとした。ここで、軽水炉としては大型のPWR、FBRの炉心には当研究所で設計した電気出力1,500MWe相当の金属燃料炉心を想定した。軽水炉発電の継続期間や燃焼度などの条件を色々に変えた場合の超ウラン元素の減少速度などの特性を求めて、FBR導入時の超ウラン元素の収支等を解析した。

一例として、総発電量50GWeの軽水炉(燃焼度=48GWd/t)が50年間運転され、それ以降毎年その1/40(軽水炉の寿命を40年としたことに相当)をマイナーアクチニド含有率2%のFBRで置き換えることを想定した場合の解析結果を図12-5-3に示す。図からわかるように、軽水炉発電によって蓄積した超ウラン元素の量は増加することなく順調に減少し、約50年ですべて消費される。また、この間の燃料サイクル全体からの廃棄物中に含まれる超ウラン元素の量は非常に小さく抑えられる。このように、軽水炉発電が長期化した場合でも、最終的に同規模の金属燃料FBRサイクルへの移行がなされるならば、蓄積した超ウラン元素を消費することは十分に可能であると言える。

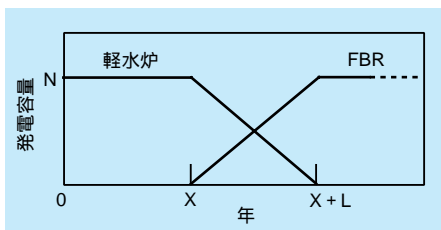


図12-5-1 軽水炉発電から金属燃料FBRサイクルへの移行シナリオ
一定規模(N-GWe)の軽水炉発電を一定期間(X年)継続した後寿命(L)に達した炉を順次FBRでリブレース

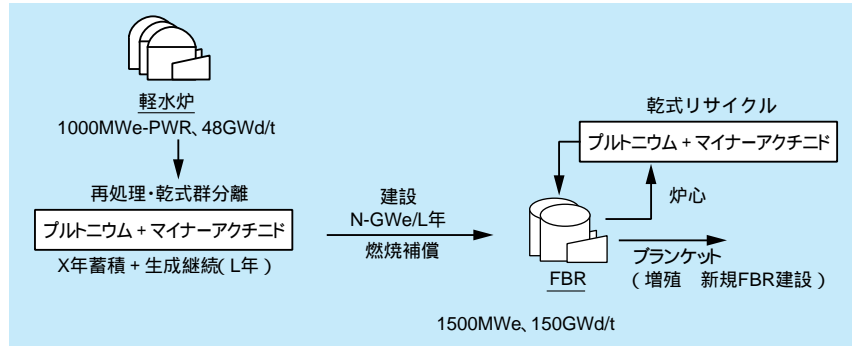


図12-5-2 軽水炉発電から金属燃料FBRサイクルへの移行時のマスフローモデル

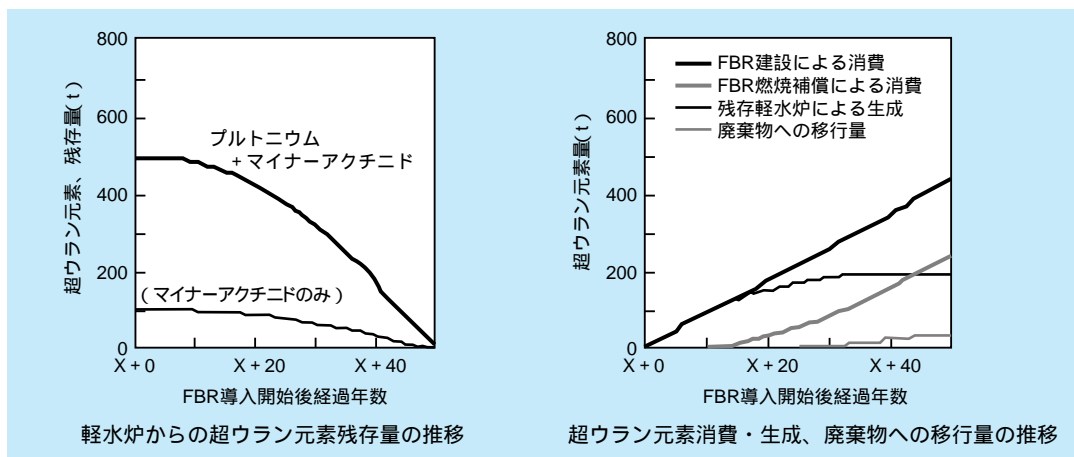


図12-5-3 軽水炉発電で蓄積された超ウラン元素のFBR導入による消費
 (50GWeの軽水炉発電を50年継続し、その後40年でFBRに移行。FBR燃料中のマイナーアクチノイド添加率は2%。)