

高転換型沸騰水炉概念の開発

Development of High Conversion Boiling Water Reactor

軽水炉が電力供給の主力である期間は長期化すると予想されることから、将来的にはウラン資源の有効活用、及び経済性向上に重点をおいた次世代型軽水炉の開発が必要とされている。ここでは、ABWR以後の軽水炉となる次世代型軽水炉用BWRとして、プルトニウムの転換率向上による天然ウラン資源節約に重点をおいた高転換型BWRの炉心概念について紹介する。

本炉心はBWRの特徴である炉心内のボイド(蒸気泡)を活用することにより高転換率を実現するもので、十字型制御棒を用いて炉心構造変更を比較的小さくした場合と、転換率を更に高くするために炉心構造変更を行い、制御棒もクラスター型とした場合について述べる。

山下淳一* Jun'ichi Yamashita
 内川貞夫** Sadao Uchikawa
 持田貴顕* Takaaki Mochida

1 緒言

我が国の軽水炉炉心技術は当初米国から導入されたものであったが、その後国産技術による改良を加え信頼性・安全性の向上に努め、最近では高燃焼度化による燃料経済性の向上に取り組んできた。一方、我が国では軽水炉利用が長期化する見通しであり、図1に示すように21世紀でも軽水炉の需要は増加し、特にウラン・プルトニウム資源の有効活用を目的とした軽水炉の必要性が高まってきている。日立製作所では、このような需要にこたえるため、ABWR(改良型沸騰水型原子炉)以後の軽水炉として、次世代型軽水炉の炉心概念の開発に着手してきた。ここでは、プルトニウムの転換効率向上による天然ウラン資源節約に重点をおいた次世代型軽水炉として、高転換型BWR(沸騰水型原子炉)の考え方と特徴について述べるとともに、日立製作所が開発した炉心概念について紹介する。

2 高転換型BWRの考え方

原子炉の内部では核分裂反応によりウラン235などの核分裂性物質が消費されるが、一方ではウラン238の中性子吸収反応により、プルトニウム239などの新たな核分裂性物質が生成されている。燃焼後の燃料取出し時の核分裂性物質と燃焼初期の核分裂性物質の比を転換率と言うが、現行のBWRでは転換率が0.5程度である。つまり現行BWRでは、燃焼後取り出される核分裂性物質の量は燃焼初期の約半分ではない。そこで、ウラン資源節約とプルトニウム資源を有効活用する手段として、転換率を高くすることが考えられる。高転換型BWRでは、転換率が現行BWRやプルサーマル炉と比べて高く、ウラン資源の節約となるほかにエネルギー資源の多様化によるエネルギーセキュリティの確保の役割を果たすことになる。

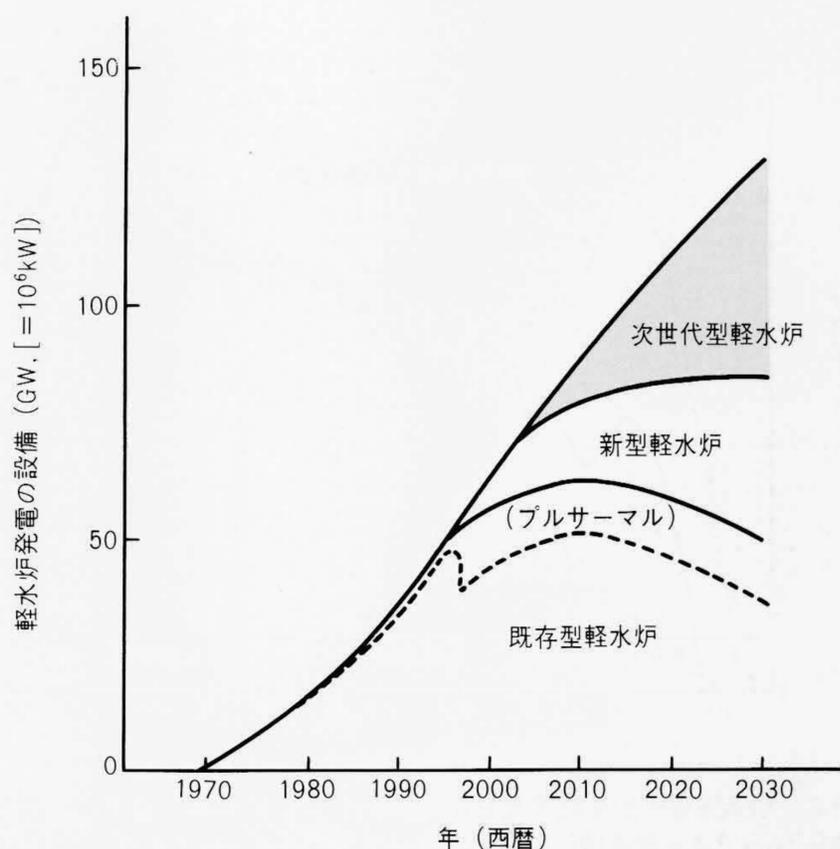


図1 軽水炉発電の設備規模と次世代型軽水炉導入 軽水炉時代は長期化し、順次、新型軽水炉、次世代型軽水炉を導入(通商産業省「21世紀の原子力を考える」から引用)することになる。

また、高転換型BWRは、既存の軽水炉技術の延長上に位置づけられるため、プラントシステムについては現行のBWR、ABWRでの技術成果を踏襲し、圧力容器、格納容器、原子炉システム及びタービンシステムは現行のBWRから大きな変更はない。炉心構成要素は、炉心物理特性を改善するための変更が必要となるが、現行BWRへの改造適用を考えて炉心構成要素の変更を少なくした場合と、転換率向上のために炉心構成要素を大きく変更した場合の二つが考えられる。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士

3 高転換型BWRの特徴

BWRの中性子束エネルギー分布は図2に示すように、熱エネルギー領域(1eV以下)の分布が高いという特徴がある。これは核分裂により生じた高速中性子を、減速材(軽水)により減速し熱エネルギー領域の中性子(熱中性子)にして核反応を持続させるという軽水炉の特徴に基づくものである。

BWRで転換率を高くするには、共鳴エネルギー領域(1eV~1keV)でのウラン238による中性子共鳴吸収を増加して、プルトニウムへ転換する比率を大きくするために、減速材による中性子の減速を小さくする必要がある。減速材による中性子の減速を小さくするには、燃料に対する減速材(水)の量を小さくすればよい。これには二つの方法が考えられる。第一の方法は、水が占める体積を幾何学的に小さくする方法で、これは燃料棒間隔を小さくし燃料棒配列をちゅう(稠)密化することにより達成される。また図3に示すように、燃料棒配列を正方格子から三角格子にする場合には、更に効果的に水対燃料体積比を小さくすることができる。

もう一つの方法は、水を蒸気ボイドに置き換えて水の密度を小さくすることにより、実効的な水対燃料体積比を小さくする方法である。

BWRの場合、炉心部に約40%の蒸気ボイドが発生するため、水の密度を下げて実効的な水対燃料体積比を小さくすることが容易となる。図4は、水対燃料体積比と転換率との関係を示した例である。0.9程度の転換率を得るためには、ボイドを考慮した実効的水対燃料体積比を0.53程度にする必要がある。ボイドがない状態でこれを実現するためには、燃料棒間隔を1mm程度の非常に密な状態にする必要があるが、ボイドがある場合には約2mmにできる。これは、ボイドがあるほうが燃料棒間げき(隙)を極端に小さくすることなく高い転換率が得られることを意味しており、燃料冷却特性、機械特性及び製造面で有効となる。

図5に高転換型BWRでの反応度特性の一例を示す。この図では、出力運転時の炉心平均ボイド率40%から0%、70%にそれぞれ瞬時に変化したときの反応度変化であるボイド反応度差と、出力運転時ボイド率40%から、温度20℃まで炉水温度が低下したときの反応度変化である冷温時出力運転時反応度差が示してある。

BWRでは出力の上昇によるボイド率の増加に対しては、反応度が減少するようにボイド反応度係数を負とする設計にしているが、図5によると、高転換型BWRでも、ボイド率が増加する場合には反応度は減少しており、安全性は確保される。

また、冷温時出力運転時反応度差は、約5%となり、炉停止余裕を確保する上で十分小さな値である。

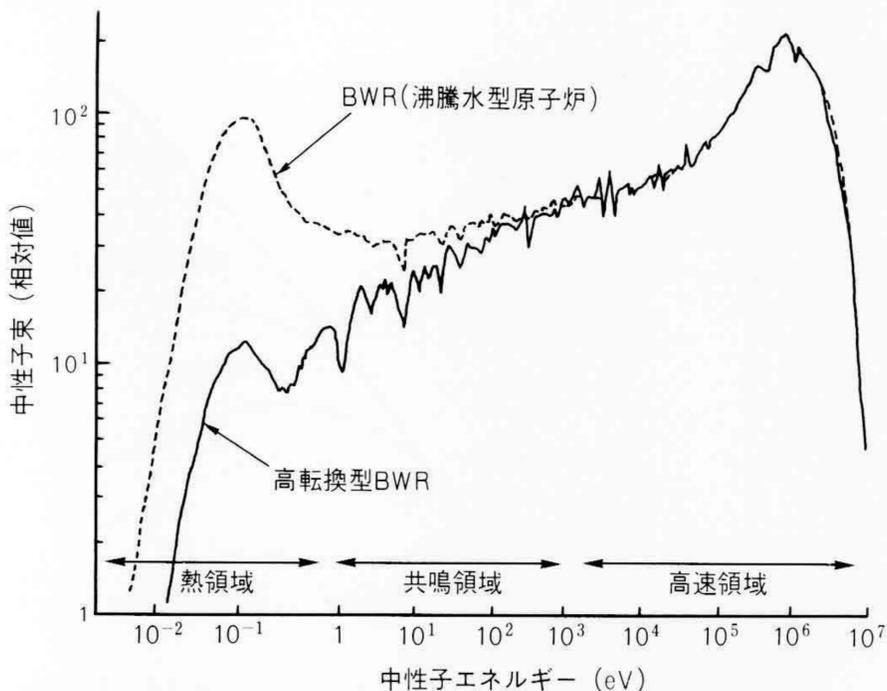


図2 現行BWRと高転換型BWRの中性子エネルギー分布 高転換型BWRでは、熱領域の中性子束が小さく、共鳴領域でのウラン238からプルトニウムへの転換が向上する。

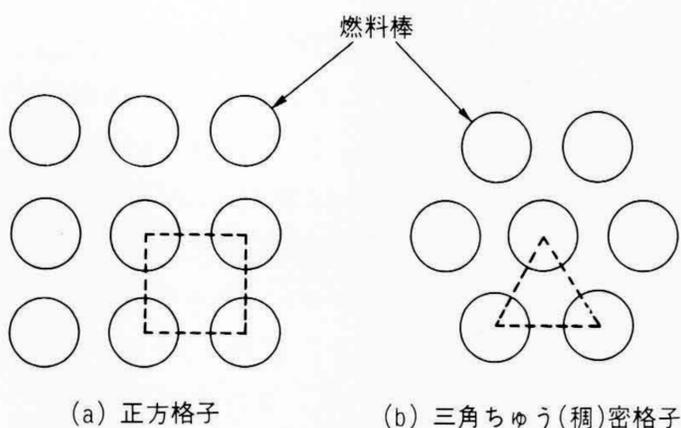


図3 高転換型BWRの燃料棒格子配列 燃料棒格子配列を正方格子から三角ちゅう(稠)密格子に変更することによって、水対燃料体積比を小さくすることができる。

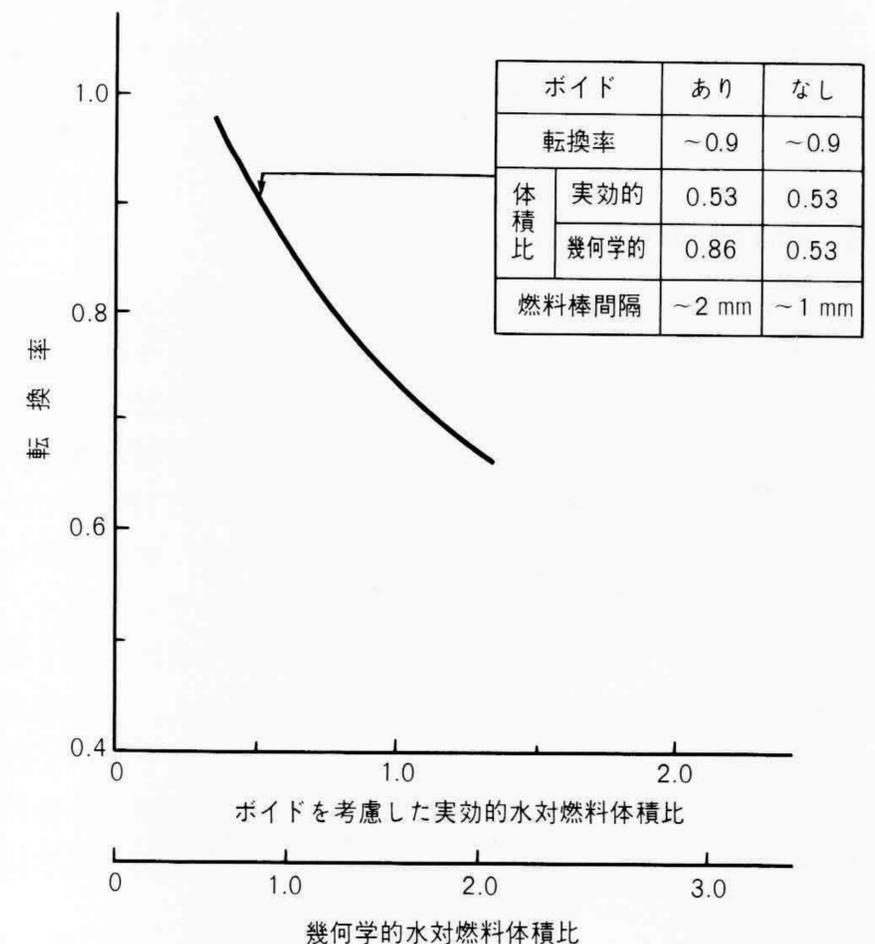


図4 転換率と水対燃料体積比との関係 高い転換率を得る場合、ボイドがあると幾何学的水対燃料体積比を大きくすることができ、燃料棒間隔が極端に小さくなることはない。

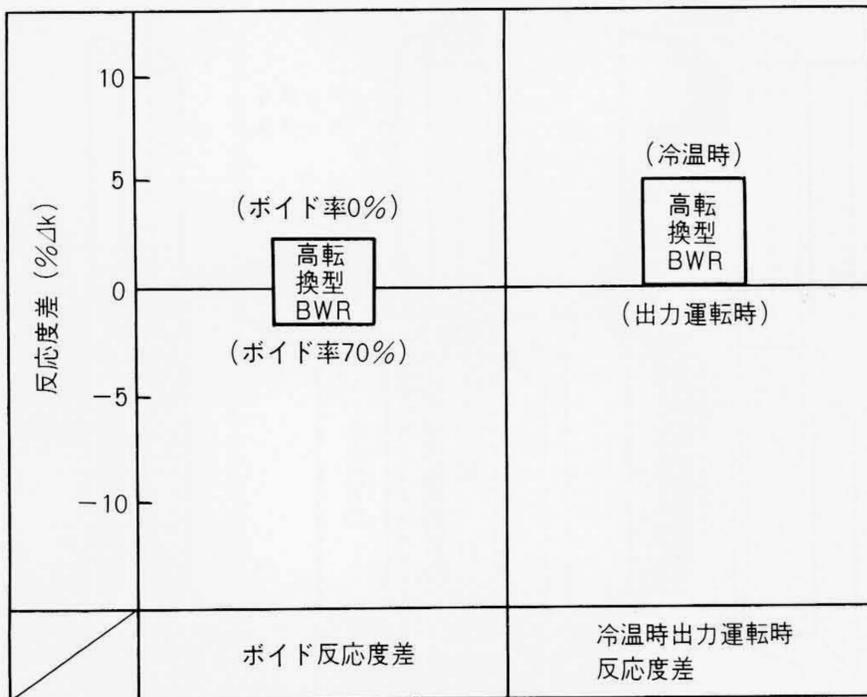


図5 高転換型BWRの反応度特性 高転換型BWRではボイド率の増加により反応度は減少し、ボイド反応度係数は負となる。また、冷温時出力運転時反応度差も炉停止余裕を確保するのに十分小さい値となる。

4 高転換型BWRの炉心概念

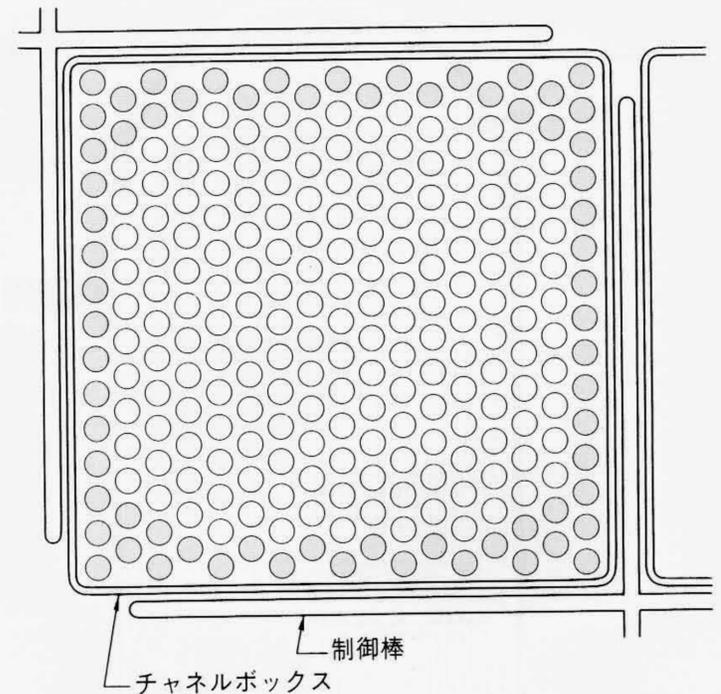
BWRの炉心構成は、外部を正方形のチャンネルボックスで覆った燃料集合体の間に十字型制御棒を挿入するという特徴を持っている。ここでは、日立製作所が開発した高転換型BWRの炉心概念を十字型制御棒を用いた炉心構成の場合と、転換率向上のために炉心構成を変更し制御棒をクラスター型とした場合に分けて示す。

4.1 十字型制御棒を用いる場合

図6に十字型制御棒を用いる場合の高転換型BWR燃料集合体を示す。高転換炉を実現するために、正方断面の燃料集合体内に燃料棒を三角格子形状に配列する。また、燃料集合体を大型化し、チャンネルボックス外側の水領域の占める割合も小さくする。これらにより単位面積当たりの燃料棒本数を現行格子BWRの約2倍にすることができる。したがって、炉心の等価直径を同じとすると、燃料有効長を約 $\frac{1}{2}$ としても燃料棒単位長さ当たりの熱出力を同一にすることができる。また、燃料有効長を短くした場合には、炉心圧力損失を小さくすることができる。燃料としては、プルトニウムを劣化ウラン又は天然ウランに富化した混合酸化物燃料(MOX燃料)を用いる。

炉心の基本仕様をABWRと比較して表1に示す。また、原子炉内構造配置図を図7に示す。本炉心では、ABWRの原子炉圧力容器設計のままで、内部に装荷する燃料集合体と制御棒を大型化し、燃料集合体の支持構造物として制御棒案内管、炉心支持板、上部格子板構造をそれに対応して変更する。その他の再循環系機器、気水分離器などはABWRと同一にすることができる。

また、本炉心では、ホロア付き制御棒を用いる。図8は、高転換型BWRでのホロア付き制御棒の運転法を示したものである。炉停止時には制御棒のアブソーバ部が挿入され、高転



| 記号 | 種類 | 本数 |
|----|------------|-----|
| ○ | Pu高富化度燃料棒 | 175 |
| ○ | Pu中低富化度燃料棒 | 72 |
| 合計 | | 247 |

図6 高転換型BWRの燃料集合体例 正方格子のチャンネルボックス内に燃料棒を三角格子形状に配列し、ちゅう密構造としている。

表1 高転換型BWR炉心(十字型制御棒使用の場合)の炉心基本仕様 高転換型BWRの炉心、燃料、制御棒基本仕様をABWRと比較して示す。

| No. | 項目 | 単位 | 高転換型BWR | ABWR | |
|-----|---------|--------|---------|------------------|------------------|
| 1 | 炉 | 電気出力 | MW | 1,350級 | 1,350級 |
| 2 | | 熱出力 | MW | 3,926 | 3,926 |
| 3 | | 炉心流量 | kg/h | 52×10^6 | 52×10^6 |
| 4 | 心 | 炉心外径 | m | 5.3 | 5.3 |
| 5 | | 炉心有効長 | m | 2.2 | 3.7 |
| 6 | | 燃料集合体数 | 体 | 432 | 872 |
| 7 | | 制御棒本数 | 本 | 205 | 205 |
| 8 | 燃 | 集合体形状 | — | 大型正方 | 正方 |
| 9 | | 集合体間隔 | cm | 22 | 15.5 |
| 10 | | 燃料棒配列 | — | 三角ちゅう密 15×17 | 正方 8×8 |
| 11 | 料 | 燃料棒本数 | 本 | 247 | 62 |
| 12 | | 制御棒形状 | — | 十字長翼型 | 十字従来型 |
| 13 | | 制御棒間隔 | cm | 31 | 31 |
| 14 | | ホロア | — | あり | なし |
| 15 | 制御棒挿入方法 | — | 下部挿入 | 下部挿入 | |

注：略語説明 ABWR(改良型沸騰水型原子炉)

換時には、炉心反応度制御に必要なアブソーバ以外はホロア部が挿入され、水ギャップ部の水が排除される。水が排除された場合には、水対燃料体積比を小さくすることができる。また、ホロアはすべて引き抜くことも可能であり、図8にオ

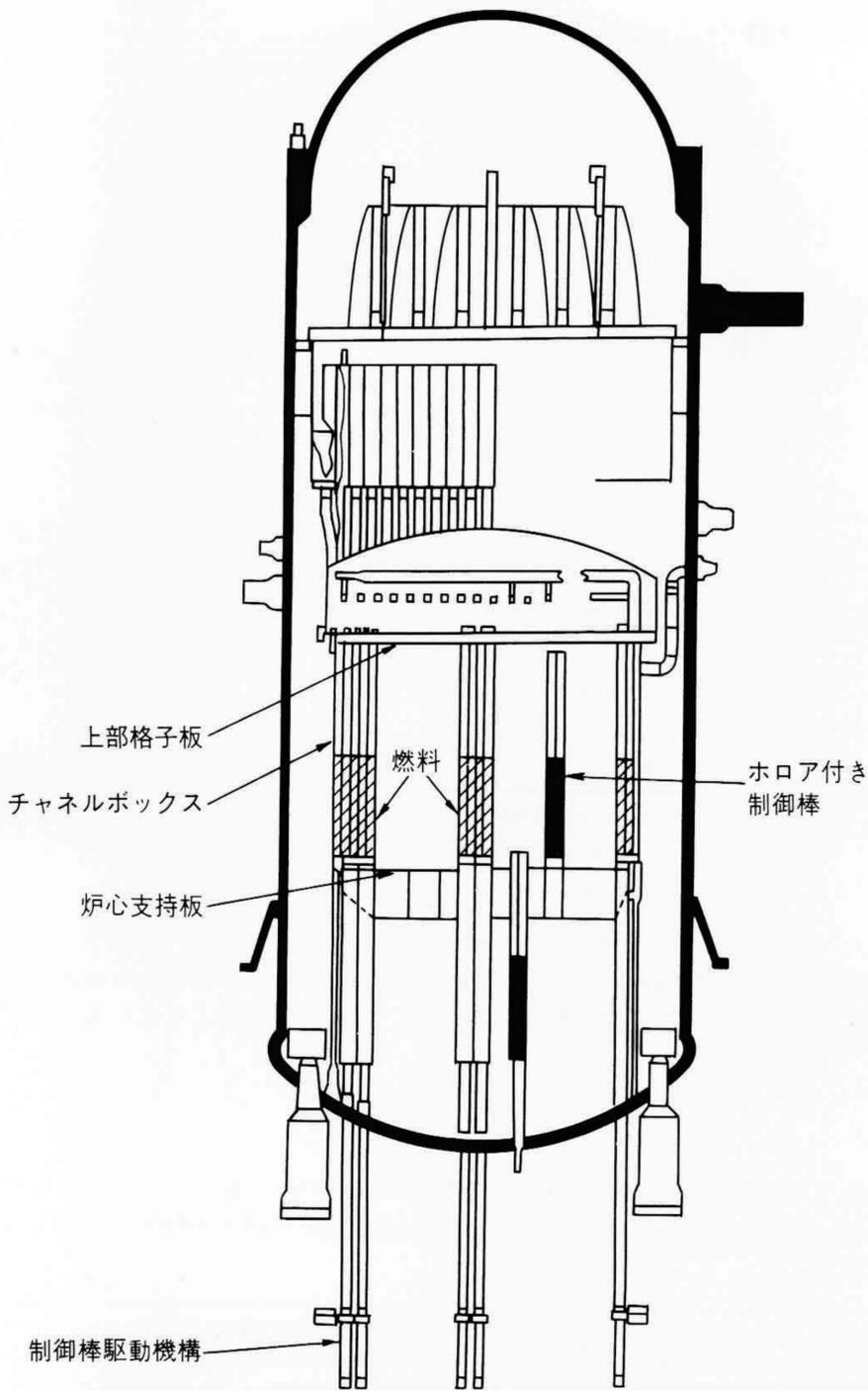


図7 高転換型BWRの原子炉内構造配置図 十字型制御棒を用いる高転換型BWRでは、燃料、制御棒及び炉内構造物の一部をABWRから変更しており、圧力容器などのプラントシステムは同一にできる。

プシオンとして示すように、必要であればサイクル末期で制御棒ホロアを全引抜きとし、水対燃料体積比を増加し、反応度利得を得ることもできる。

4.2 クラスタ制御棒を用いる場合

図9は、炉心基本構成を六角形状とした場合の高転換型BWRで、燃料集合体形状も六角格子となる。燃料集合体1体当たりの大きさは、現行BWRの約2倍に大型化するが、燃料集合体1体中には、現行BWRの約4倍の燃料棒があるため、燃料棒の密度は現行BWRの約2倍となり高密度燃料格子が達成される。このような炉心に用いられる制御棒の形状は、従来BWRで用いていた十字型のものからクラスタ型に変更し、制御棒駆動機構などもこれに応じて変更する必要がある。

この例のように、炉心の基本構成を変更する場合には、新たな制御棒及び制御棒駆動機能が必要となるが、燃料のちゅう密度を高くして水対燃料体積比を小さくすることが容易なため、より高い転換率を達成することも可能となる。高転換型BWRで燃料棒間隔を1.5 mm程度にした例では、転換率は1以上となりプルトニウム増殖炉とする可能性も生まれる。

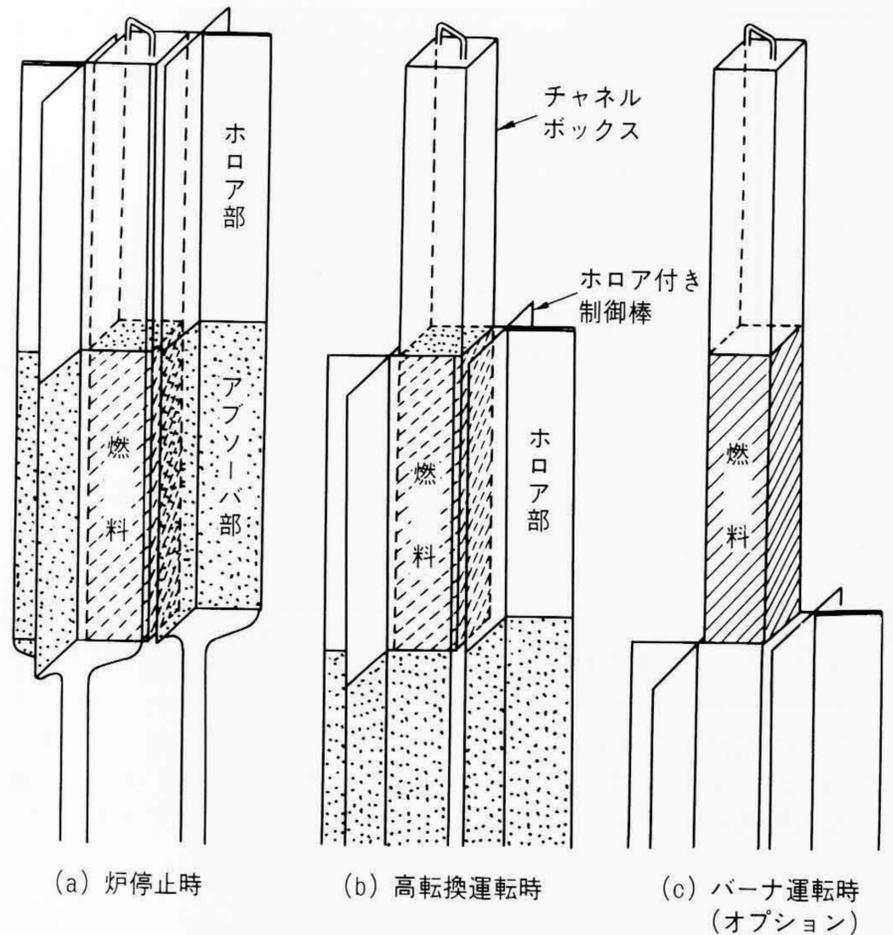
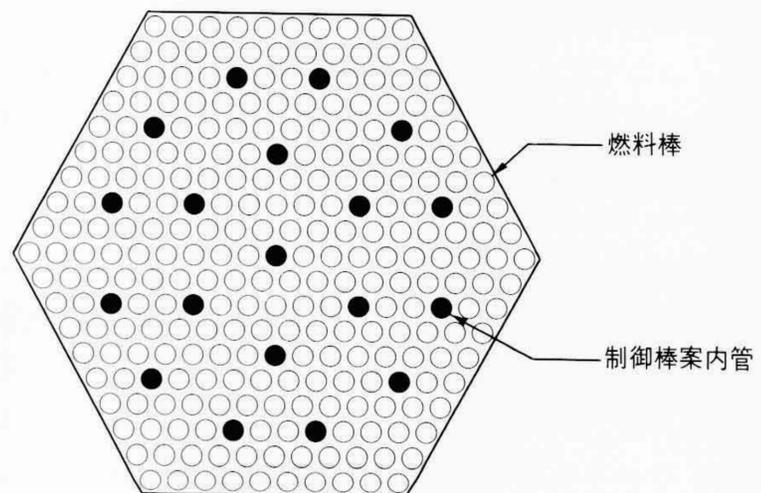


図8 ホロア付き制御棒の運転法(十字型制御棒の場合) 高転換型BWRでは、高転換運転時にはホロア部が炉心に挿入され、水を排除する役目を果たす。また制御棒を全引抜きし、燃焼炉(バーナ)とすることも可能である。



高転換型BWR燃料集合体(六角格子形状)

燃料棒：252本
制御棒：19本

図9 高転換型BWR用六角格子形状燃料集合体では、燃料集合体を六角格子形状とすることもある。

高転換型BWR

5 結 言

本稿では、ABWR以降の軽水炉として期待されている次世代型軽水炉として高転換型BWRを取り上げ、日立製作所で開発した炉心概念について説明した。

高転換型BWRは、BWRの特徴であるボイドを活用して高転換率を実現したもので、炉心概念についても幾つかの候補がある。高転換型BWRを含めた次世代型軽水炉の技術開発は長期間を要するため、導入開始は21世紀初頭になると考えられるが、日立製作所では、これまでに蓄積した軽水炉技術と、電力会社及び原子力関係諸機関の指導を得て、次世代型軽水炉の早期実現に向けて努力していく考えである。