高転換加圧水炉の概念と技術課題

(日本原子力研究所) 松浦 祥次郎

近年、欧米原子力界の一部において、PWRの格子を稠密化した格子を有する高転換加圧水炉(HCPWR)が核燃料の有効利用の観点から関心を集めている。このHCPWRについて炉物理特性を中心に、炉の概念、開発における技術課題、炉型戦略上の可能性、最近の動向等について解説する。

I. はじめに

原子力開発の初期、1950～60年代において軽水炉をベースとする高転換炉や増殖炉のアイデアがいくつか提案されたことがあった。それらのうち、研究開発がある程度まで実際になされたのは、スペクトル・シフト炉とシード・アンド・ブランケット炉であった。前者は、炉の燃焼初期では中性子スペクトルを硬くして余剰反応度を抑制するとともに親物質(^{238}U)から核分裂性物質(^{239}Pu)への転換を良くしておき、燃焼に応じて中性子スペクトルを軟化させて反応度減少を補うことで高燃焼度を得、燃料有効利用を図ろうとするものであった。一方、後者は ^{233}U – ^{232}Th サイクルの実現を目指したもので、高濃縮Uを用いた増倍係数の高いシード格子と親物質(Th)から成る転換率の高いブランケット格子とを組み合わせて ^{233}U の増殖を図ろうとしたものである。しかし、液体金属高速増殖炉(LMFBR)が世界的に増殖炉開発の本命となるにつれ、軽水型の高転換炉や増殖炉の開発は中止された。

ところが、近年に至って「LMFBRの実用化時期は以前予想されたよりかなり遅れ、2010年以後になるのではないか。一方、LWR時代はかなり永く続くであろう。」との見方が多くなって来た。そして、あらためてLWRにおける核燃料有効利用が熱心に検討されている。

本稿の高転換加圧水炉(High Conversion PWR: HCPWR)*も上述の傾向の中で関心が高まって来たものである。この炉型のアイデアは1960年代初頭にすでに示されたが、ANLでごく基礎的な研究が少なされたのみであった。ここ2,3年前からANSのトランザクションやジャーナルにHCPWR関連の論文が米国、西独、スイスの研究者から投稿されるようになっていたが、炉物理研究者の間で徐々に注目されるようになり、1983年10月のOECD/NEAのCRP(炉物理委

員会)では、1984年会合のトピックスの一つとしてHCPWRを取り上げることが合意されるに至っている。

本稿では、HCPWRとして考えられているのはどんなものか、技術開発上どんな問題が予想されるか、実現すればどんな可能性を有するか、各国の様子はどうか等について、筆者の得た情報の範囲で簡単に説明を試みたい。

II. HCPWRの概念

西独や米国で現在設計研究が進められているHCPWRは、1960年代のように他の型式のFBRの競争者となることを目標としているわけではなく、LMFBR実用化までの燃焼効率の良い中間炉となり、またLMFBR導入初期に予想される経済性の不利を補うパートナーとなることを目標としているように見られる。すなわち、HCPWRの研究開発を推進している人達の基本的な考え方は、次のように要約できるであろう。

- (1) LMFBRの実用化の遅れにより、LWRへの依存がかなり大量で長期にわたる場合、21世紀初頭以後に懸念されるUの供給不足もしくは価格高騰に対して耐性を強化しておくためには、LWRの核燃料利用効率を格段に改良しておくのが一つの有効な方法である。
- (2) このためには、現用のLWR技術との連続性が強く、かつPuの利用効率が現用のものより少な

Concept and Technical Problems of High Conversion PWR: Shojiro MATSUURA.

(1984年 4月23日 受理)

*ヨーロッパではAPWR(Advanced PWR)と呼ばれている。一方、わが国ではPWRの第3次標準化計画にそって開発が進められている改良PWRがAPWRと呼ばれているので、本稿ではHCPWRと記す。

くとも数倍は良い新型 LWR の導入が望ましい。

- (3) このような炉は、LWR の経済性を安定に保つのみでなく、種々の理由から LMFBR の核燃料増殖性を必要十分に高くできなかったり、その経済性が十分に良くならない時に、新型 LWR と LMFBR との組合せによって、全体として核燃料有効利用と経済性を、LMFBR のみのシステムあるいは現用 LWR と LMFBR との組合せシステムより改善できるであろう。

そして、具体的な検討対象として HCPWR が取り上げられているが、その設計における基本方針は次のようにまとめられる。

- (i) 燃料は $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ を用い、U/Pu 転換係数を現用 LWR の約 0.5 から少なくとも 0.9 以上に高める。
- (ii) 現用の PWR プラント設計には大きな変更を加えない。変更は原則として炉心(燃料および

制御棒)に限る。原則として PWR の転用を可能にする。

- (iii) プラントの総合的な運転特性は PWR となるべく変わらないようにする。
- (iv) 安全評価の指針は PWR のものと同等とする。

以上の方針のもとに設計研究が進められている HCPWR の具体例の要目を、西独の Kraftwerk Union AG(KWU)の PWR をベースとしたものについて見てみる⁽¹⁾。PWR 炉心に対する根本的な変更点は、燃料格子の形状と減速材体積対燃料体積比(VR)にある。第 1 図に見られるように、PWR では $\text{VR} \approx 2$ の正方格子を用いているが、HCPWR では稠密六角格子を用いて $\text{VR} \approx 0.5$ としている。そして、転換率と燃焼度を高めるとともに Pu の有効利用を図るため、燃料を約 3%濃縮の UO_2 から富化度約 7.5%の $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ に変更している。これらに伴って炉の主要パラメータが変わる。それらを第 1 表に対比して示す。

$$V_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{UO}_2} \approx 2$$

(a) PWR

$$V_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{PuO}_2\text{-UO}_2} \approx 0.5$$

(b) HCPWR

第 1 図 PWR と HCPWR の燃料格子概念⁽¹⁾

燃料棒の外径は大きく変わらないが被覆管厚が薄くなり、格子が稠密となるので燃料棒周辺にヘリカルフィンが巻かれ、これによって燃料格子間隔が保持される。すなわち、第 2 図に示されるような燃料集合体が用いられる。この集合体の場合は燃料棒を 199 本有しており、511 集合体で炉心が構成される。燃料棒数 439 本の集合体では 235 体が装荷される。いずれの場合も炉心有効直径は PWR とほぼ同じである。

一方、格子の稠密化により冷却材の流路面積が減少

して流水抵抗が増加する。これに対応して燃料長がほぼ半分になくされ、炉心の装荷状態は第 3 図のようになる。しかし、平均出力密度、冷却材流量および出入口温度のバランスをとることで、熱出力は変更していない*。また、主循環ポンプ、蒸気発生器等圧力容器外の

* ただし、第 1 表によれば、HCPWR の方が炉心入口温度は低い。これは蒸気発生器の平均温度が下がること、したがって、電気出力が多少低下する可能性のあることを示している。

第 1 表 PWR と HCPWR の要目比較 (KWU 型)⁽¹⁾

項 目	PWR	HCPWR	主変更	項 目	PWR	HCPWR	主変更
熱出力 (MW)	3,782	3,782		燃料被覆管厚 (cm)	0.072	0.040	○
燃料材	UO ₂	PuO ₂ -UO ₂	○	燃料被覆材	Zry-4	SUS	○
インベントリー (t HM [†])	103.5	121.5		燃料格子ピッチ (cm)	1.43	1.05	○
濃縮度, 富化度 (%)	3.2 ²³⁵ U	7.5 ²³⁹⁺²⁴¹ Pu	○	減速材対燃料体積比	2.00	0.53	○
炉心有効高さ (cm)	390.0	233.0	○	平均熱流束 (W/cm ²)	61	52	
炉心有効直径 (cm)	364.3	370.0		線出力 (W/cm)	206	155	○
平均出力密度 (W/cm ³)	93	151	○	核燃料平均比出力	36.4	31.0	
平均燃焼度 (MWd/t HM [†])	33,000	45,000	○	(W/g·HM [†])			
反応度変化/サイクル (%)	10	2	○	制御要素	61×20	61×7×9 または	○
全出力日数/サイクル	300	290		(Ag-In-		66×3×21	
転換比	0.55	0.95	○	Cd)		(B ₄ C)	
燃料集合体数	193	511 または 235	○	ボロン反応度価値	100	3,250	○
集合体構成 (燃料棒- 吸収棒-構造ピン)	236-20-0	199-12-6 または 439-24-6	○	(ppm/% Δk/k)			
燃料棒間スペーサ	グリット	ヘリカルフィン	○	1 次系圧力 (bar)	158	158	
燃料被覆管外径 (cm)	1.075	0.95		1 次系流量 (kg/s)	18,800	16,500	
				冷却材出入口温度 (°C)	326/291	326/286	

† HM: Heavy Metal

第 2 図 HCPWR の燃料集合体⁽¹⁾

主要施設は変更しないとされている。

燃料集合体の変更に伴って、制御要素の数量と材料が変更される。HCPWR では熱中性子の役割が大きく低下するので、Ag-In-Cd の効果は減退する。したがって、広い中性子エネルギー範囲にわたって効果を有するボロンが制御材として用いられる。ただし、吸収効果はやはり弱くなるので、¹⁰B を 60% 程度まで濃縮したボロンを B₄C として使用し、さらに集合体当りの制御棒数を増加する。なお、圧力容器の制御棒貫通孔の数は不変とするので、1 基の制御棒駆動機構に 3 体ないし 7 体のロッドクラスター (RCC) が結合されることとなる。また、第 1 表に見られるように、ボロン溶液の反応度価値が大きく低下するので、おそらく液体

ポイズンは使用できないであろうと考えられている。

上のよう構成される HCPWR の有する炉特性のうち最も特徴的なものは、その中性子スペクトルである。第 1 表の HCPWR について、中性子スペクトルと中性子発生エネルギー分布の設計計算結果が第 4 図のように得られている。格子が稠密化されて減速材が極端に少なくなったことと、PuO₂-UO₂ (²³⁹Pu + ²⁴¹Pu 7.5%) という熱中性子吸収の強い燃料のため、PWR に見られる熱中性子スペクトルの形は完全に消滅している。このスペクトルは、核分裂中性子スペクトルが低エネルギー側に尾を引いたような形状であり、LMFBR のスペクトルとも異なっている。

一方、中性子の発生、すなわち核分裂反応の約 50%

第3図 PWRとHCPWRの燃料装荷状態⁽¹⁾

いずれも 1 cm^3 , 1 s 当り 1 個の核分裂中性子が発生すると規格化されている。

第4図 HCPWR格子における中性子束と中性子生成率の計算例⁽¹⁾

は $1\text{ eV} \sim 1\text{ keV}$ の共鳴中性子領域で起こっている。また、 100 keV 以上の領域での反応で約20%、熱中性子領域でも約15%の中性子が発生するのは注目される。少なくとも中性子スペクトルと中性子発生分布から見るかぎり、HCPWRは高速中性子炉でも熱中性子

炉でもない新型の中速中性子炉あるいは共鳴中性子炉ともいふべきものである。

U/Pu 転換率については、富化度($\text{PuO}_2/\text{PuO}_2\text{-UO}_2$)をパラメータとしたサーベイ計算結果が第5図のように示されている。転換率は体系の有効増倍係数 k_{eff} および体積比とトレードオフの関係にあることに注意しなければならない。燃焼度は高燃焼燃料と同レベルの値 $45,000(\text{MWd/t})$ を目標としているが、第5図に示されるように転換率が高いことと、核分裂生成物蓄積による反応度減少が中性子スペクトルの中速化で緩和されることで、燃焼を通じての炉心反応度減少はPWRの約1/5に低減される。

米国の Babcock & Wilcox 社の PWR をベースとするHCPWRの設計はKWUのものやや異なるが、基本的な概念と炉特性はほぼ等しいといえる。

Ⅲ. 開発における技術的課題

HCPWRは形態上はLWRとLMFBRとのハイブリッドとも見られるものであるが、炉特性は双方と大きく異なる点が予測される。したがって、その開発において計算による検討だけでは不十分で、実験による確認が必要と考えられる課題がいくつかある。

1. 炉物理的課題

前章第4図で見たように、HCPWRでは共鳴中性子

第5図 有効増倍係数 k_{eff} と転換率 c の体積比依存計算例⁽¹⁾

領域(1 eV~1 keV)の炉物理が極めて重要になる。LMFBR では、この領域の中性子束はかなり低くなり寄与は小さい。一方、LWR では共鳴吸収は重要ではあっても、燃料棒間隔が大きく減速材が多量に存在するので、空間的にも中性子エネルギー面でも核設計計算で単位格子を扱う近似的手法が十分に有効であった。しかも、核反応の割合は熱中子領域に比してかなり小さいものであった。

HCPWR では燃料格子が稠密であるので、LWR におけるような核設計計算上の近似的手法が有効かどうか直には確言できない。しかもこの領域は核燃料の断面積の変化が激しく、かつ核反応全体に占める割合が大きいため、計算精度の検証は十分慎重に行わねばならない。 ^{238}U や ^{240}Pu の高速中性子による核分裂割合が大きく増加する点も HCPWR の特徴であり、高速中子線の吸収と漏洩の評価はより重要になる。一方、全体として中子線の減速がされにくい構造となるだけに、炉心構成上の必要から局所的に減速材の多い場所ができると、そこに面する燃料棒には強い出力ピークが生ずる可能性があり注意を要するであろう。

すでに部分的な臨界実験で計算精度の検証が試みられているが⁽⁵⁾、開発のためにはより広範で詳細な実験が増倍係数、転換比、ボイド反応度係数、温度反応度係数、制御棒価値、出力分布等について必要であろう。特

に反応度係数が運転状態で負であることは、炉の自己安定性を保つため不可避の条件であり、その確認は炉概念成立の可否を制する問題である。

2. 熱水工学的課題

格子の稠密化により、冷却材が流路の壁面にふれる面積が極めて大きくなり、抵抗係数が格段に増すことが根本的な問題である。炉出力および主循環ポンプを変更しないの方針の中で、炉心長、流路断面、流速、圧力損失、流量、熱流束、冷却材温度上昇、抵抗係数等の熱水力パラメータをどうバランスさせるかである。第1表は、これを炉心長半減、線出力および熱流束の低減、流量低減、出入口温度差増加でバランスさせていることを示している。この計算は PWR 用モデルに基づいていると考えられるが、その HCPWR 体系への適合性は実験的に確認されなくてはならないであろう。また、核沸騰限界(DNB)比の評価は安全評価とも関連して重要であり、計算モデルの有効性は実証されなければならない。さらに流動振動、燃料棒の変形等の影響も評価されなくてはならない。

3. 燃料・材料工学的課題

燃料棒については、当然のことながら照射試験による健全性の確認が必要とされよう。すなわち300°C-160 bar の水中で高速中性子成分の多い照射環境下での応力腐食、クリープ、照射脆化、ペレット-被覆相互干渉等が実証的に確認されなければならないであろう。格子が稠密なだけに、出力・冷却能力不整合への対策は、燃料棒変形、クラッド付着の評価を含めて念入りに考えておかねばならない。燃料材の形態は LMFBR に近くなるので、LMFBR の照射経験の活用が考えられる。また、FP ガスによるスエリングや燃料-被覆材化学的干渉による脆化等、LMFBR で問題とされていることは、そのまま HCPWR においても問題となる。なお、HCPWR では燃料被覆材に SUS が考えられているが、ジルカロイ被覆材に相当な実績が蓄積された現状のもとでは、SUS かジルカロイかの選択は慎重な検討対象の一つと考えられる。

炉心構造物、制御棒、压力容器についても、高温・高圧水環境と高速中性子照射との重畳効果による腐食の加速や高速中性子照射による脆化については十分な検討を要する。

4. 安全工学的課題

ここでは冷却材喪失事故時の挙動と冷却能力の確保が最大の問題となる。压力容器が PWR よりかなり高い高速中性子照射を受けることを考えると、加圧下熱衝撃の評価も重要な課題となる。燃料棒にはヘリカル

フィンが巻かれているので流路閉塞は起こりにくいとも考えられるが、事故後の冷却手段の確保は不可避の課題である。また、PWR では想定する必要はないとされている損傷炉心の再臨界の問題を、HCPWR でどう考えるかは、燃料富化度が高いだけに議論の分かれるところとなろう。

Ⅳ. 炉型戦略上の可能性

HCPWR は未だ炉工学的な可能性をサーベイしている段階であり、定量的に炉型戦略上の意味を評価できるわけではない。しかし PWR 利用および LMFBR 開発による技術的蓄積を考えると、今後もし炉概念に根本的欠陥が見つからず、技術的に実現可能なら、適切な開発努力によって2000年前後に実用化するのはさほど困難ではないと思われる。仮に転換比0.9~0.95のものが実現したとすると、一定量のUから得られるエネルギーはPWR に比して4~6倍となると推定される(むろんこのためには、再処理や再加工の燃料サイクルが完結していなくてはならないが)。長期的には LMFBR の導入がなければ核燃料有効利用の最終的解決はないが、上のようにUの利用率が改良されれば、U供給不安に対するPWRの耐性は相当に高くなることは十分予想できる。また、当分の間 LMFBR の増殖比が仮に1.10程度しか得られない場合でも、HCPWR と LMFBR との組合せは、PWR と LMFBR との組合せよりUの必要量は格段に減少できる。

HCPWR は大雑把に言えば、プラントはPWR、燃料は LMFBR の類似物であるので、それぞれとの技術的連続性が高い。これは核燃料サイクルについてもいえる。したがって、LWR システムと LMFBR システムとのブリッジあるいは LMFBR システムへのパイロットとしての役を果すのが、HCPWR が実現するときの役割であろう。

Ⅴ. 他国の動き

(1) 米 国: Virginia State University の Edlund 教授が1975年頃から理論的な炉物理研究を実施している⁽²⁾。DOE や WH 社には特に動きはないようである。近年では、EPRI の支援で B & W 社が Edlund 教授の協力を得て技術的可能性の検討を行い、肯定的な見解を示している⁽³⁾。

(2) 西 独: 政府は「軽水炉は民間で」との立場をとっており、HCPWR には関与していない。しかし、KWU を中心にしてかなり活発な活動をしているようである。炉物理に関する臨界実験についてはスイス連

邦原子炉研究所と PROTEUS-LWHCR 計画を共同で進め⁽⁴⁾、西独内では KWU, KfK, GKSS, Braunschweig 大学が協力して、炉物理、熱水力、安全性に関する理論的解析および熱水力実験を実施している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これまでのところ肯定的結果を得ているが、炉物理、熱水力のパラメータ間にいくつかのトレードオフ関係が認められるので、今後、実験的確認を必要としている。目標として、1990年代前期にライセンス獲得に必要な準備を完了することとしている。

(3) フランス: 詳細は不明であるが、CEA は HC PWR 開発のためのプロジェクトを発足させたと伝えられている。84年3月の第17回原産年次大会におけるスピーチで CEA のルノン長官が、PWR での Pu 利用の考えに触れたのに続いて、「PWR においては、高転換比を目標とする改良型 PWR に関して、設計活動が実施されつつある。」と述べているのは注目に価する。なお、CEA は転換比を1.0以上にする可能性があることを主張しているとの情報もある。

Ⅵ. おわりに

HCPWR は、未だその技術的可能性が実証されているものではない。しかし、少なくとも初期の研究からは肯定的見解がいくつか示されている。今後の LWR の展開における選択として、燃料のワンスルー利用や、PIUS(Process Inherent Ultimate Safety)炉、中小型炉などいくつかの案が唱えられているが、「技術は高度化を目指して進む」との見方からすると HCPWR は興味深いオプションの一つであろう。わが国ではすでに ATR を自主開発しており、中間炉を有さない上記の国々とは事情が異なる。しかし、PWR が相当数稼動しており、今後も増加することを考えると、技術的可能性には注意しておくのが少なくとも必要ではないかと考えられる。

—参考文献—

- (1) OLDEKOP, W., et al.: General features of advanced pressurized water reactors with improved fuel utilization, *Nucl. Technol.*, **59**, 212 (1982).
- (2) EDLUND, M.C.: Physics of the uranium-plutonium fuel cycle in pressurized water reactors, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **24**, 508 (1976).
- (3) UOTINEN, V.O., et al.: Technical feasibility of a pressurized water reactor design with a low water volume fraction lattice, *EPRI NP-1833*, (1981).
- (4) DONNE, M.D., et al.: A critical heat flux correlation for advanced pressurized light water reactor application, *EUR 7057e*, (1982).
- (5) CHAWLA, R., et al.: Comparisons of calculated and measured parameters for a Pu fueled LWHCR lattice, *NUREG/CP-0034*, 902 (1982).