

## 論文の内容の要旨

論文題目 超臨界圧軽水冷却高速炉心の設計とサブチャンネル解析  
氏名 向原 民

超臨界圧軽水冷却炉 (SCR) は超臨界火力の技術を用いて軽水冷却炉の技術革新を図った炉心である。この炉心は超臨界圧水を冷却材とし貫流型直接サイクルを採用している。貫流型とは現在の火力発電において広く採用されており、冷却材全量が主給水ポンプにより駆動されるシステムである。これにより、再循環系・気水分離器などが不要になり簡素な設計が可能となる。熱効率も超臨界圧火力発電と同様、40%を超え高い。これらにより、現行軽水炉の改良では到達できない大幅なコストダウンが実現できる可能性がある。

SCR において冷却材流量を減少させ、高い冷却材出口温度の炉心設計をおこなえば、熱効率向上と Balance of Plant (BOP) 系減量によるコスト低減が可能となり、SCR の経済性が向上すると期待される。このように、経済性の面においても最新鋭の火力発電プラントに対抗でき、かつ、将来炉として燃料の増殖も実現可能性をもつ原子炉、大型・高温超臨界圧軽水冷却炉 (SCFR-H) の炉心設計をおこなった。

SCFR-H では、転換比を改善しながら、ボイド時に負の反応度が投入されるよう、径方向非均質炉心を採用している。このため、ブランケット上昇流冷却炉心では、ブランケットから低い温度の冷却材がタービンに流入してくること、燃焼に伴いブランケットにプルトニウムが蓄積しドライバ燃料部の結合が変化することによるパワースイング、ボイド反応度低減のために固定減速材として用いている水素化ジルコニウム層近傍における大きな出力ピークなどの要因により、冷却材平均出口温度が低下しやすい。また、超臨界圧水は擬臨界温度 (25MPa のとき 385°C) を超えると、エンタルピー上昇に対する温度上昇の感度が高い。この影響は高温炉心では顕著に現れる。この結果、被覆表面最高温度が 620 °C と高いにも関わらず、冷却材平均出口温度は 467 °C と低い値となった。

この設計結果を踏まえ、冷却材をブランケット上部から下降流で流すことで冷却するブランケット下降流 SCFR-H 炉心の設計をおこなった。給水の一部が上部ドームから冷却材ガイドチューブを通りブランケットを冷却する。下部プレナムでダウンカマーを流れてきた残りの給水と混合し、その後、ドライバー燃料を上昇流で冷却する。このため、出力の低いブランケットを流れてきた低温の冷却材が直接タービンに流出しない。また、炉心上部では、冷却材密度がブランケットで高くドライバー燃料で低い。炉心下部では反対にブランケットで低くドライバー燃料で高いことから、水素密度の高さ方向への偏りが少なくなり、パワースイングが抑制された。ブランケットでの平均冷却材密度も高いことから、水素化ジルコニウム層における水素密度の高さも緩和され、局所出力ピークも低下した。このように、ブランケット上昇流炉心の主要な欠点が解消され、冷却材平均出口温度は 537 °C、熱効率は 44.6% と大きく改善された。1565 MWe の大きな電気出力でありながら、負のボイド反応度を実現しており安全性の面でも問題がない。SCFR-H の Puf インベントリは 9.63 ton である。これを 1GWe あたりの Puf で比較すると、SCFR-H が 6.2 ton となり、LMFBR の 4.3ton と比べると高いが、取出し燃焼度がほぼ同じである低減速スペクトル炉 RBWR-2 の 5.8ton と比べるとほぼ同程度である。SCFR-H が RBWR-2 に比べてこの点でやや劣るのは、中性子の利用効率が悪くプルトニウム富化度が高いためであると考えられる。ABWR と比較すると、(主蒸気流量/電気出力) の値は約 30% も低い。BOP 系統のサイズやコストを大幅に削減できるものと考えられる。

SCR の冷却システムは貫流直接サイクル型であり、炉心を出た冷却材全量が直接タービンに流入する。また、冷却材入口と出口の冷却材温度差は大きく、SCR の高温炉心においては、入口温度 280°C から出口温度 540°C まで大きく変化する。このため、冷却材出口温度は冷却材流れの不均一さ、局所出力分布、集合体端付近に代表されるサブチャンネル面積の違いなどに大きく影響を受ける。このため、超臨界圧軽水炉、特に高温炉心においては炉心特性評価をおこなう際、サブチャンネル解析により炉心集合体内流動特性を詳細に評価しなければならない。そこで、SCR に適用できるサブチャンネル解析コードを開発した。開発されたコードは、既存のサブチャンネル解析コードである ASFRE-III による PLANDTL ナトリウム流動実験の解析結果と比較して検証をおこなった。冷却材温度分布形状はリファレンスとおおむね一致し、冷却材出口温度のピーク値は 2°C 違うのみで良く一致した。このコードによる計算が妥当であることを確認した。

このコードを用い、超臨界圧水の流動をナトリウムと比較しながら検討した。解析は 37 本ピンバンドル体系でおこなった。ナトリウムが冷却材の場合、冷却材は全チャンネルをほぼ一様に流れる。しかし、超臨界圧水の場合は、集合体周辺部に多くの冷却材が流出した。これは、集合体中央では周辺部に比べて冷却材が熱せられやすいため、先に擬臨界温度に達し、急激に膨張し冷却材密度は減少する。中央部で流速が急激に増大するので、加速圧損、摩擦圧損が大きくなることから、冷却材が集合体周辺部に流出する結果となった。このため、集合体中央部で冷却材温度が高く、集合体端では冷却材温度が低い結果となった。

SCFR-H 体系の不確かさに対する感度解析を行った。その結果、チャンネルボックスと燃料棒とのギャップが燃料棒間ギャップと同じ場合には、チャンネルボックス近傍に冷却材が流出しやすいこと、また、稠密格子のためチャンネル間の冷却材の混合が軽水炉の約 1/10 と小さいことから、不確かさに対する感度が高いことが分かった。これを改善するため、チャンネルボックス-燃料棒ギャップの距離を調節し、またブレード付きグリッドスペーサによって冷却材の混合を促進した。これにより、不確かさに対する感度を LMFBR と同程度まで抑制することができた。

続いて、超臨界圧炉のホットスポット係数を評価する手法を開発した。CRBRP と同程度の不確かさを仮定して計算したところ、超臨界圧水の特徴から冷却材出口温度に対するホットスポット係数はやや高いものの、全体的には LMFBR と同程度であることがわかった。ホットスポット係数

の取り扱いの考え方について、軽水炉 (BWR、PWR) と液体金属冷却炉と比較しながら検討した。軽水炉は沸騰危機を防止するために DNBR や MCPR 基準を定めている。しかし超臨界圧水では伝熱劣化後も被覆管温度の上昇は穏やかであり、かつ数値計算によって被覆管温度を予測できるため、現在の SCR 設計においては用いる必要がない。被覆管にかかる応力による破壊を防止するための基準については、被覆管設計に用いる ASME Section III の設計基準に裕度が含まれているので、不確かさを考慮する必要はない。つまり、SCR において不確かさを考慮すべき制約条件として、燃料溶融の防止と高温下における被覆管の過度の酸化の防止である。燃料溶融を防止する観点からは、高温炉心については最大線出力密度を 38kW/m 程度に抑えることが望ましい。SCFR-H では、熱流束が最大となる炉心高さで擬臨界点を取るため熱伝達率が低下する。被覆管温度が他の炉心と比べて高いため、燃料中心温度が高温になりやすい。高温下における被覆管の過度の酸化を防止する観点から、現在は最高被覆管表面温度を 620°C 以下にするとして設計を行っている。この制約条件を不確かさを考慮して満たすためには冷却材出口温度を下げるのが望ましい。ただし、被覆管の酸化については不明な点が多く、今後実験的に再検討されるべき課題である。

ブランケット下降流炉心では、冷却材はブランケットの熱によってブランケット入口温度 280°C から、ドライバ燃料入口温度は約 330 °C 程度まで熱せられる。冷却材入口温度と出口温度の差がブランケット上昇流冷却炉心に比べて小さいため、冷却材の加速損失が全体的に小さい。このため、熱せられた冷却材が他のチャンネルに流出しにくい。つまり、冷却材に与えられる熱量に対して冷却材流量が適切に配分されないことに起因するホットスポットファクタ (流量配分ミスマッチファクタ) が低下する。また、不確かさを考慮した冷却材・被覆管表面温度は、ホットスポット係数  $f$  を用いて  $T = T_{in} + f \times \Delta T$  のように表わされる。ブランケット下降流炉心の場合には、 $\Delta T$  が小さいことも、下降流冷却炉心がホットスポット係数  $f$  に影響されにくい。

SCFR-H 集合体は比較的均一な集合体であるが、集合体間ギャップに冷却材が存在し、また固定減速材である水素化ジルコニウムがあるなど、完全に均一ではない。今回、サブチャンネル解析コードを開発したことで、集合体冷却材密度分布を求めることができるようになったため、核熱カップリングを考慮した集合体出力分布の解析をおこなった。SCFR-H の集合体の最も大きな出力ピークは水素化ジルコニウム近傍で減速された熱中性子によるものである。このピークは、集合体端の Pu 富化度を大きく低下させることで、水素化ジルコニウムが近傍に存在するかどうかに関わらず、集合体出力ピークを約 1.05 程度に抑えることが可能である。今後、精緻な最適化や、より多くの Pu 富化度を持つ燃料ピンを用いることで、さらに集合体出力ピークを削減できるものと考えられる。集合体核熱カップリングの影響は、SCFR-H が高速炉であり冷却材が少ないことから、約 0.01 程度とほぼ無視できる大きさであった。

まとめて、本研究では、高温超臨界圧軽水冷却高速炉心の概念設計をおこなった。超臨界圧軽水炉のサブチャンネル解析手法を開発し、超臨界圧軽水炉燃料集合体の流動特性を示した。この炉心のホットチャンネル係数を計算し、それを踏まえ、集合体設計において留意すべき点を示した。