

軽水冷却スーパー高速炉に関する研究開発

研究代表者 岡 芳明 学校法人早稲田大学大学院先進理工学研究科共同原子力専攻
 参画機関 学校法人早稲田大学、国立大学法人東京大学、国立大学法人九州大学、
 国立大学法人東北大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構
 研究開発期間 平成22年度～25年度

1. 研究開発の背景とねらい

地球温暖化防止やエネルギー安定供給に貢献するために原子力の技術革新を進める必要がある。超臨界水を冷却材に用いる貫流型の軽水冷却スーパー高速炉（以下スーパー高速炉という。）は、原子炉システムが単純でコンパクト化および高い発電効率という利点に加え、炉心流量が軽水炉よりはるかに少なく圧力損失やポンプ動力の増加が設計上の制約にはならず高速炉心との適合性がよい。

本事業では、火力発電で経験豊富な超臨界圧水冷却を用い、熱中性子炉より高出力密度である高速炉の利点を生かして、安全性と経済性に優れた大型スーパー高速炉の概念と特性を炉心設計と安全解析で明らかにする。開発上の重要課題である炉物理、伝熱流動、材料・冷却材相互作用の試験を行い基盤となるデータベースを構築する。

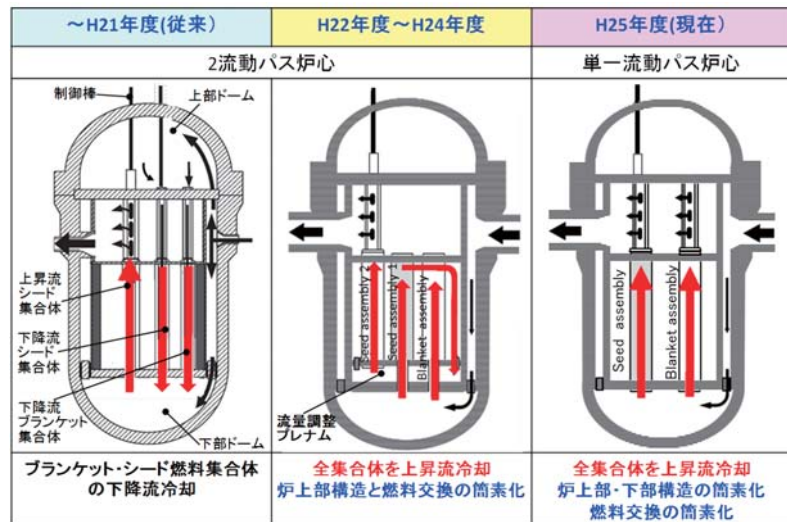


図1 スーパー高速炉の炉内構造と炉内流動方式

2. 研究開発成果

2.1 サブテーマ1：プラント概念の構築

これまでの研究開発の成果¹⁾を踏まえつつ、電気出力100万キロワットクラスの大型炉心を3次元核熱結合炉心計算で設計・改良し、安全解析により設計裕度を明らかにする。

(1) 大型炉設計（炉心設計）

平成24年度は、全ての燃料集合体を上昇流で冷却する2流動パス炉心（図1）を設計改良し、冷却材炉心出口温度、負のボイド反応度特性等の設計目標を満足することを確認した。この流動方式は従

表1 大型炉心の主要諸元（単一流動パス炉心）

項目	単一流動パス炉心	
熱出力/電気出力 [MW]	2337/1006	
炉心実効高さ/炉心等価直径 [m]	2.4/2.47	
燃料棒外径 [mm]	5.5	
燃料棒ピッチ/外径比 (P/D)	1.19	
燃料集合体数	78/37 シード/ブランケット	
平均出力密度 [MW/m ³]	149	
炉心冷却水流量 [kg/s]	1204.6	
冷却材入口/出口温度 [°C]	280.0/501.2	
炉心出口蒸気圧力 [MPa]	25.0	
被覆管表面最高温度 (BOEG/EOEG) [°C]	シード燃料	645.9/646.9
	ブランケット燃料	560.2/646.7
平均線出力密度 (BOEG/EOEG) [kW/m]	シード	11.9/11.8
	ブランケット	3.35/3.94
最大線出力密度 (BOEG/EOEG) [kW/m]	シード	31.7/22.9
	ブランケット	20.1/12.9
平均/最大取出燃焼度 [MWd/kgHM]	53.8/72.7	
Keff (BOC/EOC)	1.0415/1.0034	
冷却水ボイド反応度 (BOEG/EOEG) [%dk/k]	-4.34/-1.05	

来の炉内流動方式に比べ炉内上部構造と燃料交換の簡素化できる特徴がある。平成 25 年度は、流動方式をさらに改良した単一流動パス炉心を設計し、炉心下部構造の簡素化と制御棒の設計自由度を高めた（図 1、表 1）。3 次元乱流解析で被覆管表面最高温度（MCST）を低減する新しい形状

（Triangular prism）のスペーサを考案し、ホットチャンネルに適用して MCST を 20K 程度低減できることを明らかにした（図 2）。

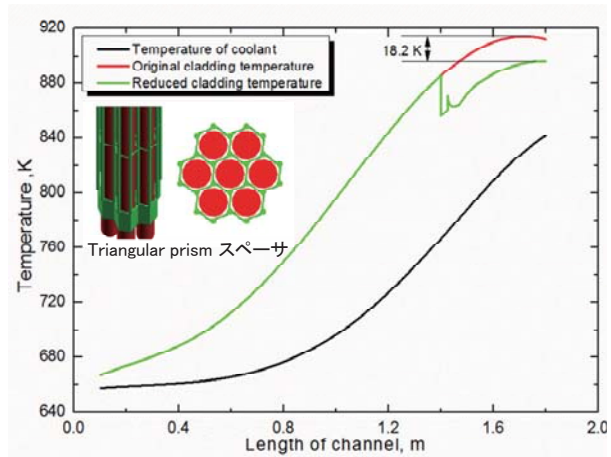


図 2 考案したスペーサによる MCST の低減

(2) 大型炉設計（安全解析）

単一流動パス炉心の事故事象と異常な過渡事象を解析し、安全基準を満たしていることを明らかにした（図 3）。MCST が厳しくなる原子炉冷却材流量の全喪失事象における MCST の低減策として自動減圧系（ADS）作動方式を単一流動パス炉心に適用し、安全余裕が向上することを確認した。

非定常サブチャンネル解析コードを開発し、単チャンネル解析と比較した。MCST を低く評価することがわかり、単チャンネル解析の有効性を確認した。

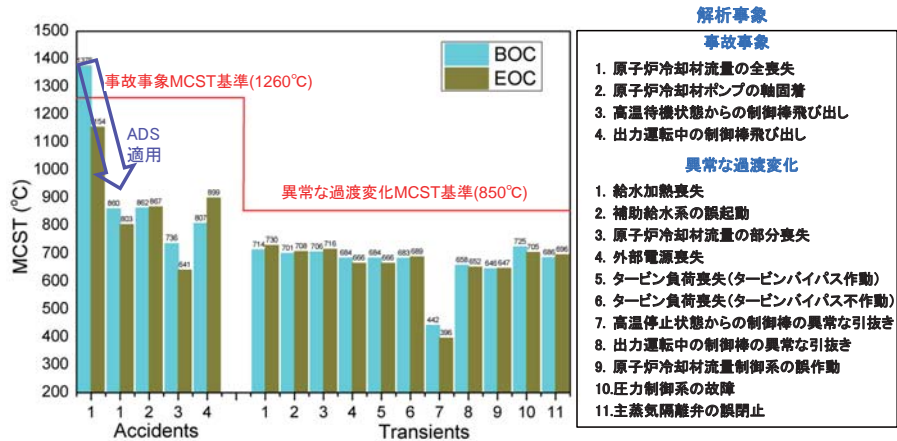


図 3 事故・異常な過渡変化事象の安全解析結果

(3) 原子炉特性考察

MCST 低減のために設置したスペーサ構造物の水力振動を評価した。その結果、水力振動による振幅は $10 \mu\text{m}$ 以下であり、水力振動の観点からは大きな問題にならないことがわかった。

(4) 炉物理解盤実験データ整備

実験炉心に対するモンテカルロ法による詳細解析及び既存の水素含有実験の解析を実施して炉物理解盤データ整備を進めている。

2.2 サブテーマ 2：炉心伝熱流動に関する研究開発

燃料被覆管の健全性評価に重要なサブチャンネル間の乱流混合とクロスフローおよび高エンタルピー領域の伝熱に焦点を置いて基礎データを構築する。

(1) 模擬流体伝熱流動試験

模擬流体を用いた超臨界圧下で 4 本バンドル試験体の伝熱流動試験を行い、バンドル流路における乱流混合およびクロスフローに関する基礎データを得た。乱流混合については、2 流路で構成されたサブチャンネル試験（平成 23 年度実施）の結果と同様に擬臨界点を挟む液体と蒸

気の中の混合係数が定物性の予測式より大きい値を示した。クロスフローについては、2本のヒータピンの加熱量を変えた実験を行い、クロスフローに及ぼす影響を検討した。その結果、クロスフロー量は、加熱量の差が大きいほど大きく、流体の状態が液体と擬似臨界点近傍では、クロスフローの量と向きに違いが生じることを明らかにした(図3)。

(2) 超臨界水伝熱流動試験

スーパー高速炉の健全性を制限するMCSTが発生する高エンタルピー過熱蒸気域を含めて鉛直円管内伝熱流動の基礎データを得た。過熱蒸気域では、熱伝達率の実験値がDittus-Boelterの式より低くなるという(図4)、九州大学で得られたフロンデータと同様の傾向を示すことを明らかにした。

(3) 伝熱流動解析

スーパー高速炉の伝熱流動解析用に拡張したACE-3Dコード(2流体モデルにもとづく熱流体解析コード)をもとに燃料集合体内クロスフロー挙動の予測手法を開発した。4本バンドル実験(九州大学)を解析し、解析手法の予測精度を検証した。

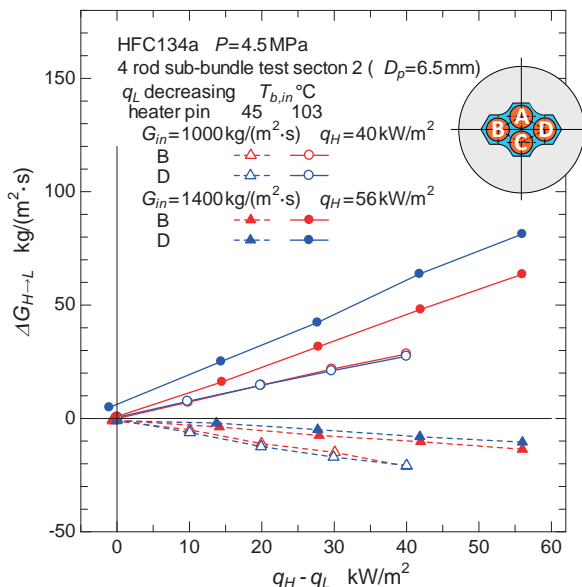


図3 4本バンドル試験体におけるクロスフロー量

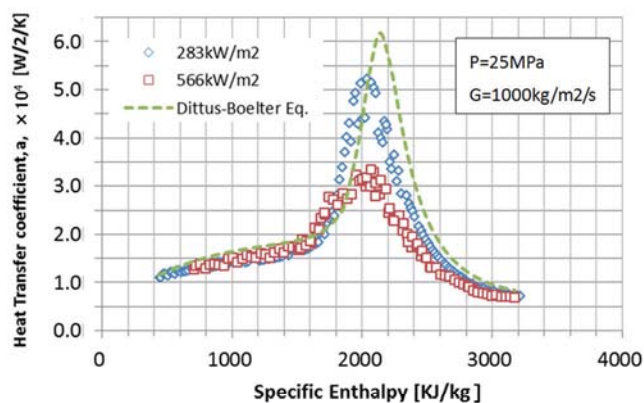


図4 円管内熱伝達率の実験値と既存相関式による計算値との比較

2.3 サブテーマ3：材料・冷却材相互作用に関する研究開発

スーパー高速炉は貫流直接サイクル型の冷却システムである。被覆管材料腐食生成物の溶出・移行特性と被覆管・炉内構造物候補材料の高温水蒸気酸化特性を検討し、基盤となるデータベースを構築する。

(1) 質量移行試験

250°Cから550°Cまでの温度領域で、SUS 316とInconel 625の配管材料と短冊試料の1000時間の質量移行試験を行った。Inconel 625では、230°Cから340°Cの温度域で酸化による質量増大よりも溶出が優先し、質量が減少する(図5)。いずれの材料も、懸念されていた擬臨界温度付近での酸化被膜量増加は少ない。SUS316の酸化被膜量は高温で上昇するが、Inconel625ではその傾向はみられず酸化被膜量もSUS316より少ない。

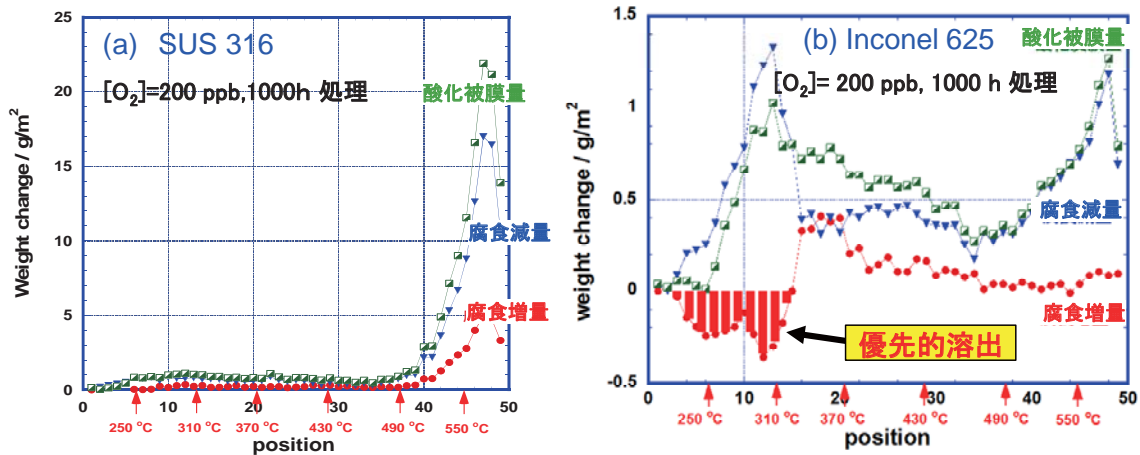


図5 AP-AC法による酸化量評価

(2) 高温水蒸気酸化試験

燃料被覆管の候補材料について、常圧水蒸気中及び超臨界水中における酸化速度を評価した。SUS316L、SUS310S、3種類（基準材料、Ti添加材、Zr添加材）の15Cr-20Ni系鋼の計5種類を供試材とし、温度、溶存酸素濃度、冷間加工度を変数とした。温度・溶存酸素濃度に依らずSUS316L、15Cr-20Ni系鋼、SUS310Sの順に酸化による重量増加が大きかった（図6）。冷間加工度が増すにつれて酸化速度が低下し、特に被覆管形状に加工した15Cr-20Ni系鋼（図7）の外表面で著しく酸化速度が低いことが明らかになった。酸化動力学評価結果に基づいて15Cr-20Ni系鋼の被膜成長予測を行ない、被覆管材として十分な性能を有することが分かった。

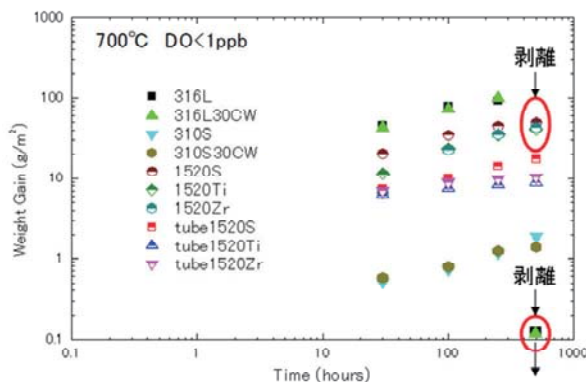


図6 超臨界圧水中の酸化重量変化挙動

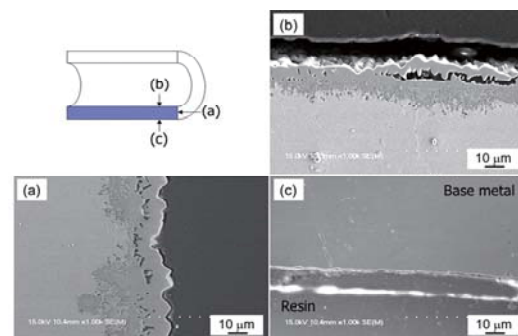


図7 試験片断面SEM観察
(15Cr-20Ni系鋼管材)

3. 今後の展開

業務の3年目として所期の目標を達成した。平成25年度は、最終年度としてこれまでの炉心設計と安全性評価の成果を踏まえて大型スーパー高速炉のプラント概念とその特性を明らかにする。開発上の重要課題である燃料棒チャンネル間のクロスフロー挙動と高温伝熱流動特性、並びに腐食生成物の溶出特性と高温腐食特性について構築された基盤データをまとめる。以上により本研究開発全体の目的を達成する。

4. 参考文献

- [1] Y.Oka *et al.*: “Progress of Super Fast Reactor 2 Project and Studies of Waseda University”, *Proc. of The 6th Int. Sym. SCWR, ISSCWR6-13035*, Shenzhen, China, (March 3-7, 2013).