

革新的な伝熱面構造制御による大型 PWR の IVR 確立

(受託者) 国立大学法人横浜国立大学

(研究代表者) 森 昌司 大学院工学研究院

(再委託先) 国立大学法人東京大学、三菱重工業 (株)

(研究期間) 平成 26 年度～28 年度

1. 研究の背景とねらい

苛酷事故時に熔融燃料を原子炉容器下部プレナムに貯留し、原子炉容器を水没させ崩壊熱除去が長期的に可能とするシステムに炉心熔融デブリ炉内保持 (Inner Vessel Retention : IVR) があるが、IVR を成立させるためには、沸騰冷却の限界 (Critical Heat Flux、以下 CHF と略記) を大きく向上させる冷却技術の開発が必須である。このような背景下、森ら(1)は、ハニカム多孔質体を用いることで、上向き沸騰 CHF を二倍以上向上させる手法を提案している。ただし、IVR 時には、冷却すべき伝熱面は下向きであり、その状態でも高熱流束除熱を達成可能な手法を構築する必要がある。そのためには、これまで提案してきたハニカム多孔質体を用いた CHF 向上メカニズムの解明は勿論のこと、ハニカム多孔質体の幾何形状を理論モデルに基づき最適化し、さらには細孔構造を微細制御することが極めて有効である。以上を踏まえ本プロジェクトでは、ハニカム多孔質体を用いた伝熱面構造制御による、革新的な炉心熔融デブリ炉内保持 (IVR) 技術を確立するため、(1)ハニカム多孔質体を用いた限界熱流束向上メカニズムの検討、(2)飛躍的な限界熱流束向上を目指したハニカム多孔質体の開発、(3)実機条件を模擬したハニカム冷却技術の伝熱特性および(4)ハニカム冷却技術の実機への適用性を実施している。

2. これまでの研究成果

(1)ハニカム多孔質体を用いた限界熱流束向上メカニズムの検討

H26 年度は、飽和プール沸騰の実験装置を設計・製作し測定精度の検証、さらには過去の実験データと比較し、その妥当性を確認した。さらに、ハニカム多孔質体による CHF 向上メカニズムの解明のため、素過程分離の装置も製作し、それから得られる実験データの妥当性も確認した。これ以外に、実機における冷却水中のゴミ微粒子の影響 (目詰まりの影響) を検討するため、図 1 中に示すハニカム多孔質体を伝熱面上に設置し、試験流体にナノ流体を用いて検討を行ったところ、CHF が 3.2 MW/m^2 と $\phi 30 \text{ mm}$ 以上の大伝熱面においてチャンピオンデータとなる高熱流束を除熱できるという興味深い結果を得た。そこで本節では、ナノ流体とハニカム多孔質体を組み合わせた CHF の飛躍的な向上に関する研究成果について特に述べる。実験装置を図 1 に示す。伝熱面は銅円柱ブロックの端面で直径 30 mm であり、ステンレス製フランジと同平面上になるように固定し、銅ブロック内に挿したカートリッジヒーターによって通電加熱させて実験を行った。ナノ流体は蒸留水に平均粒子径 21 nm の二酸化チタンを加え、超音波洗浄器で 2 時間分散させたものとし、ナノ流体の濃度は $0.001 \text{ vol.}\%$ (0.04 g/L)、 $0.1 \text{ vol.}\%$ (4.0 g/L) である。今回用いたハニカム多孔質体は図 1 中に記載の幾何形状で厚さ 1 mm のものを用いた。ナノ流体濃度と CHF の関係を図 2 に示す。まず、裸面の場合、作動流体が蒸留水の CHF は 1.0 MW/m^2 (基準) であるのに対し、ナノ流体の CHF は $0.001 \text{ vol.}\%$ 、 $0.1 \text{ vol.}\%$ とともに最大 1.7 MW/m^2 となり、CHF は裸面に対して 1.7 倍に向上した。次にハニカム多孔質体を伝熱面に装着した場合、作動流体が蒸留水の CHF は最大 2.3 MW/m^2 となり、蒸留水を用いた場合の裸面に対して 2.3 倍に向上した。また作動流体がナノ流体の場合、CHF は $0.001 \text{ vol.}\%$ では最大 2.8 MW/m^2 で、 $0.1 \text{ vol.}\%$ では最大 3.2 MW/m^2

となり、蒸留水を用いた場合の裸面に対してそれぞれ2.8倍、3.2倍に向上した。なお、 $\phi 30$ mmの比較的大きい伝熱面において 3.2 MW/m^2 と極めて大きい CHF は著者らの知る限り報告されていない。ナノ流体を用いた場合の実験前後におけるハニカム多孔質体底部のSEM画像を図3に示す。図3よりハニカム多孔質体底部にもナノ粒子が付着していることがわかる。また付着したナノ粒子層には数十マイクロンのマイクロチャンネル（蒸気排出口）が自己組織的に形成されるという極めて興味深い現象が観察された。以上を勘案し、ナノ粒子とハニカム多孔質体を組み合わせることで飛躍的なCHFの向上は、伝熱面とハニカム多孔質体の隙間をナノ粒子が埋めることで液供給の効果を増大させつつ、マイクロな蒸気排出口が形成され、これらがCHF向上の要因になっているものと考えている。

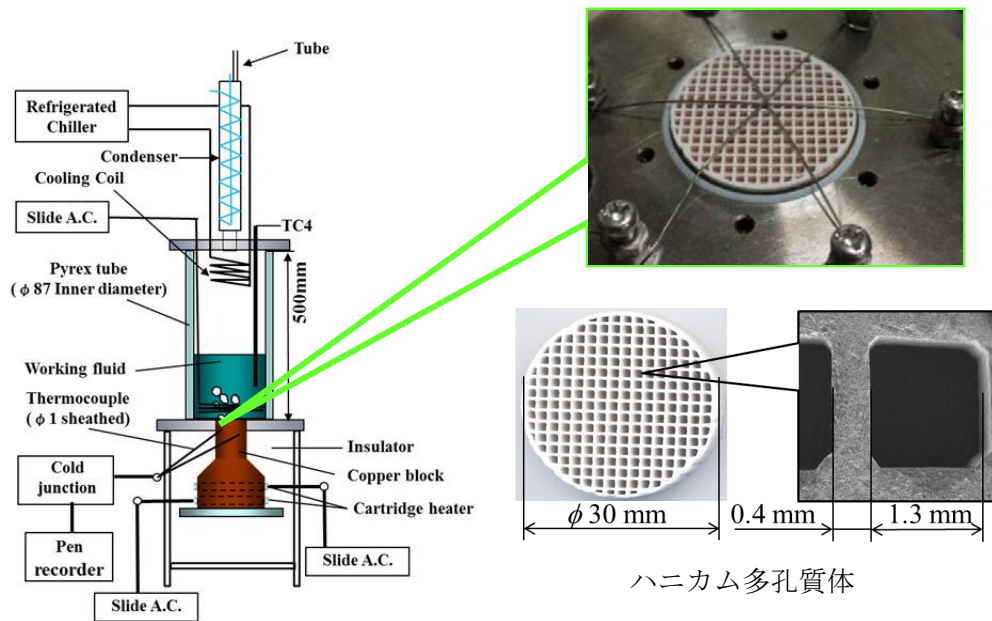


図1 プール沸騰実験装置概要

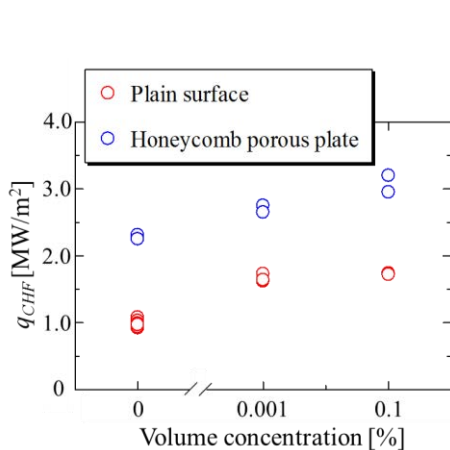


図2 ナノ流体濃度とCHFの関係

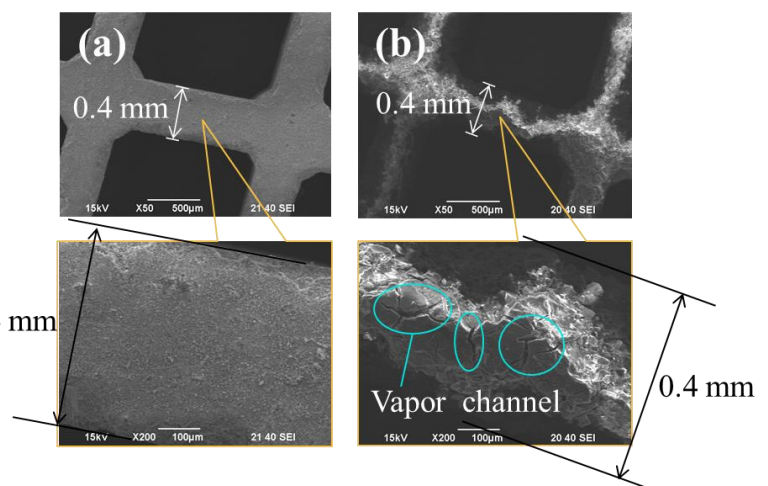


図3 ナノ流体実験後のハニカム多孔質体底部SEM画像

(a) 実験前 (b) 実験後 (nanofluid: 0.1 vol. %).

(2) 飛躍的な限界熱流束向上を目指したハニカム多孔質体の開発

本プロジェクトでは、マクロなハニカム構造とともに、伝熱面に接する部分はナノまたはミクロな細孔構造制御を行ったハニカム多孔質体を開発する予定である。そこで、これまで研究開発してきた3次元樹脂構造体を鋳型とし、これにセラミックス粉体を液中に分散させたスラリーを鋳込む手法により、ハニカム構造の製作を検討する。特にH26年度は、ハニカム構造制作のための基本となる樹脂鋳型の作製、セラミックススラリーの調製、および、樹脂鋳型への鋳込み成形と樹脂除去プロセスの検討を行った(図4)。最終的に、ステレオリソグラフィによりハニカム構造体のネガ構造体の作製できた。

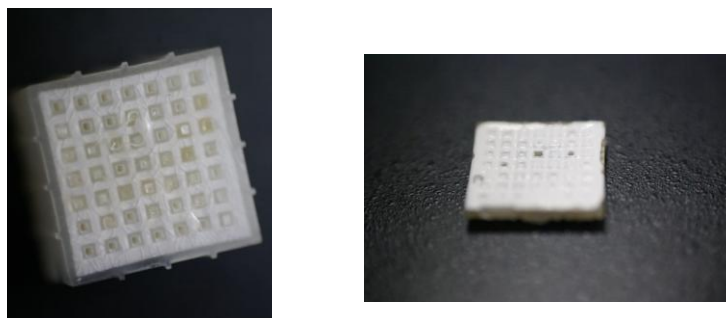


図4 スラリーを注入したネガ構造体

(3) 実機条件を模擬したハニカム冷却技術の伝熱特性

実際のIVR時には強制流動沸騰となるので、それを模擬するため、H26年度は強制流動伝熱実験装置を設計・製作した。設計条件は、最高使用温度:80°C、最高使用圧力:0.1気圧、ポンプ定格流量:50L/min、加熱用ヒータ:2kW、流路断面積:10mm x 40mm、流路長さ:500mm、伝熱面サイズ:30mm x 30mmである。次年度以降、ハニカム多孔質体を用いた実験を実施するとともに、RISA(放射線誘起表面活性)効果を確認するため、ハニカム多孔質体を γ 線照射し、実験的に検討を行う予定である。

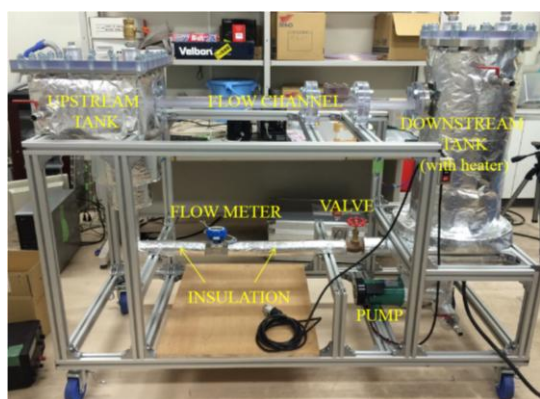


図5 強制流動沸騰実験装置

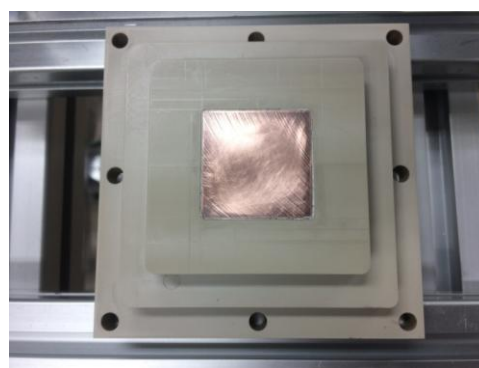


図6 テストセクション詳細

(4) ハニカム冷却技術の実機への適用性

170万kW級大型PWRに対するIVR成立性に関する検討を数値解析的に行うことを目的として、H26年度は熱流動解析条件を検討し、大型PWRでの熱流動成立性に関する予備解析を行った。具体的には、IVR炉内熱流動評価モデルを作成した検証解析を実施し、解析コードの妥当性を確認した。次に同じ計算コードを用いて、非定常解析を実施した。その結果、ハニカム多孔質体がない条件では、角度68.4°位置においてRV溶解破損が発生する結果となった。図7は、ハニカム多

孔質体を設置した条件で角度 68.4° 位置の非定常解析結果を示す。ハニカム多孔質体を設置することで RV layer が残存しており、RV が溶融破損していないことを示唆している。ただし、溶融金属層が接する RV 壁面での残存肉厚は約 1.87 cm となっており、RV 壁面の温度が 800 K 以上となること、原子炉容器内溶融物の重量を考えるとクリープ破損の評価が今後、必要である。

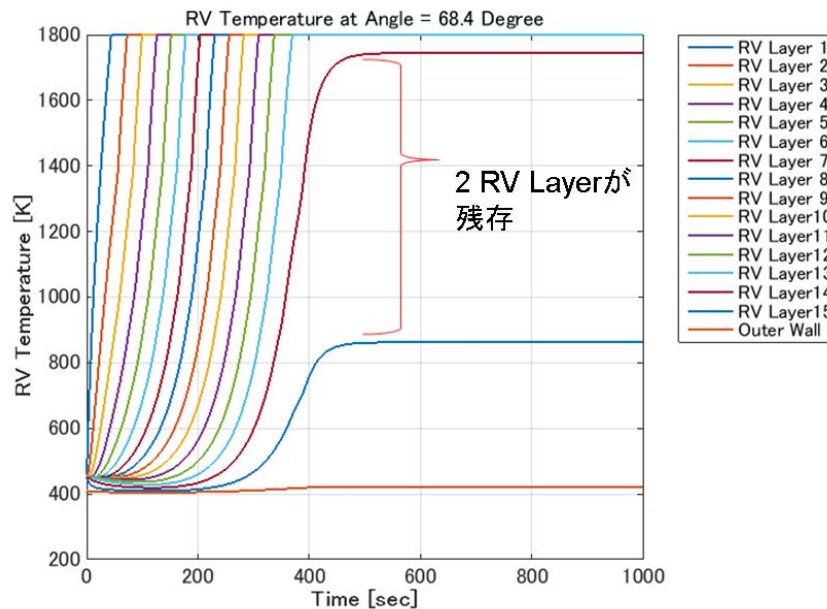


図7 RV 壁面の温度変化 (68.4°)

3. 今後の展望

本プロジェクトでは、原子カプラント安全性向上のための炉心溶融デブリ炉内保持 (IVR) 技術の実現を目指し、ハニカム多孔質体を用いた伝熱面構造制御による、革新的冷却技術を開発する。次年度以降の展望は以下の通りである。

- ・ ハニカム多孔質体による CHF 向上メカニズムを解明し、理論 CHF 発生モデルを構築し、それに基づき形状最適化を行う。一方これまでの実験結果を総合すると、伝熱面およびハニカム多孔質体のぬれ性、特に動的なぬれ性が重要なパラメータになっているという実感を得ている。そこでさらなる CHF 向上を目指すため今後は動的なぬれを定量化し、CHF との関連についても明らかにしていく。
- ・ ハニカム多孔質体の理論モデルをベースに最適な細孔構造を検討し、制御することで新規のハニカム多孔質体を開発する。
- ・ 苛酷事故時に顕在化すると考え得られる RISA 効果と CHF の関連性について実験的に確認する。
- ・ ハニカム多孔質体がある場合においても、RV 壁面残存肉厚が非常に薄くなる箇所があることが明らかになりクリープ破損の評価が必要となることが示された。次年度以降において、溶融燃料の挙動に関する最新の知見を取り入れ、熱伝導計算の精緻化やクリープ評価も併せて行う。

4. 参考文献

- (1) S. Mori, K. Okuyama, Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media, International Journal of Multiphase Flow, 35(10), p. 946–951