

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

限界熱流束向上に寄与する液供給メカニズムを 2 つの素過程に分離してそれらの効果が限界熱流束に与える影響について検討した実験について述べる。プール沸騰の実験装置を図 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。また、図 2 が示すようにハニカム多孔質体による液供給メカニズムを二つの素過程 ④, ⑤に分離し、それぞれ図 3、図 4 に示すような実験装置を用いて、それぞれの効果の CHF 向上に対する寄与割合を得た。用いたハニカム多孔質体は図 5 中に示す幾何形状をもつ。毛管力による液供給効果抽出実験の結果、図 5 に示すように毛管限界モデルとよく一致していることがわかる。このことは、

提案する毛管限界モデルにより、毛細管現象に起因する限界熱流束向上の現象をよく説明できるということを意味する。さらに ⑤のようなセル内部に直接流入する液供給効果抽出実験の結果、セルへの液供給を考えると限界熱流束予測値は図 6 に示されるように CHF が向上する方向に修正される。毛管限界モデルとの比較からそれぞれの液供給機構の CHF に与える寄与割合を求めることが可能となる。そこで、NA ハニカム多孔質体の最適幾何形状について検討した。壁厚 δ_s を 0.46mm、板厚 δ_b を 1mm とし、セル幅 $d_s=0.2\text{mm}$ の時に、 q_{CHF} は最大で 11MW/m^2 まで向上できることが示唆された。

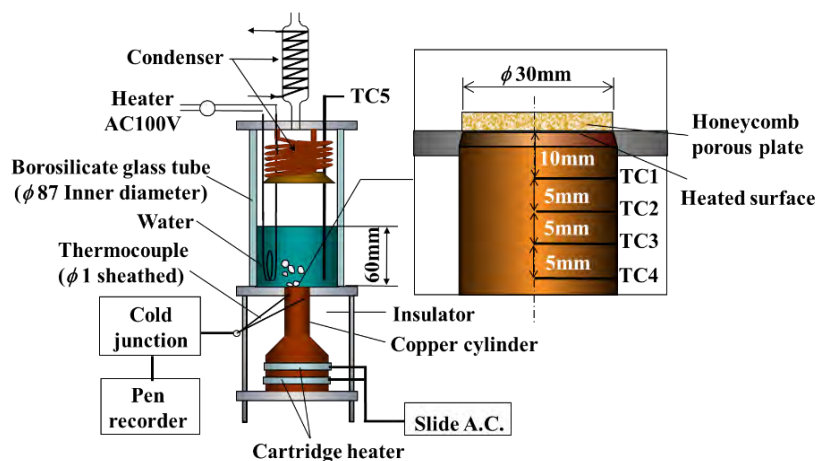


図 1 プール沸騰実験装置概略

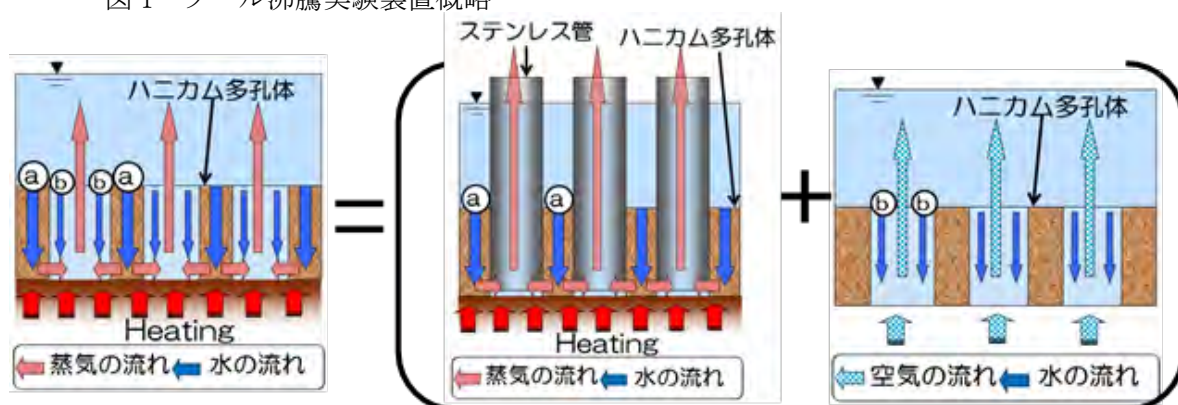


図 2 ハニカム多孔質体による液体供給の素過程分離に関する概念図

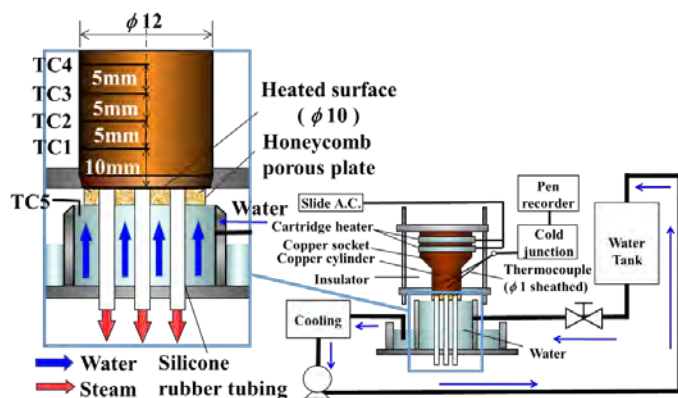


図 3 毛管力による液体供給効果抽出実験装置概略

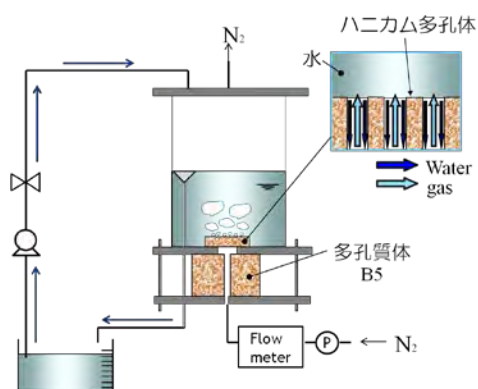


図 4 蒸気排出孔に直接流入する効果抽出実験装置概略

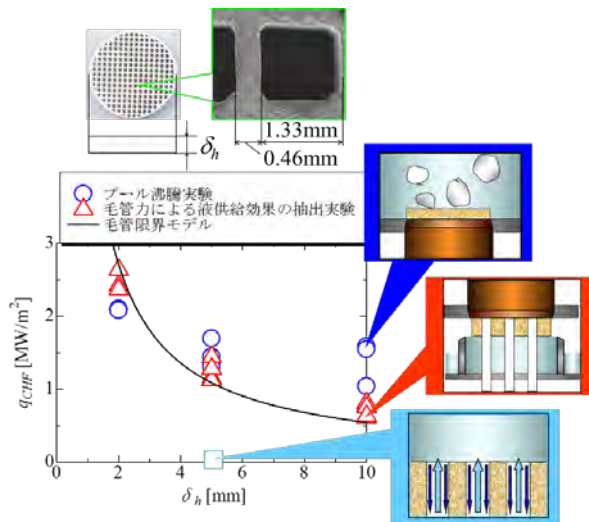


図5 毛管力による液供給効果抽出実験結果

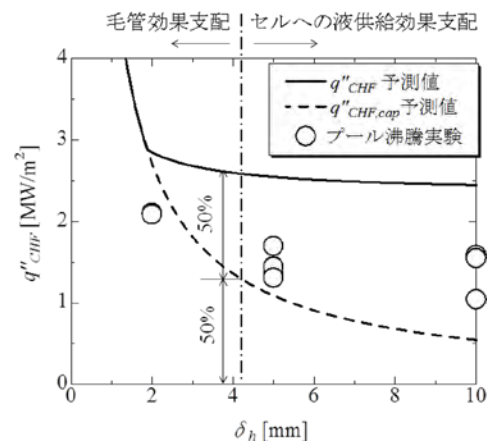


図6 ハニカム多孔質体装着時のプール沸騰実験値、毛管限界モデルによる予測値、および、毛管力による液供給効果とセル内部の液流入効果のどちらも考慮した限界熱流束予測モデルによる予測値の比較

(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

本研究で実現するハニカム多孔質体は、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が必要である。H27 年度はカーボンファイバーを用いた多孔質体内部の細孔構造制御について検討した。昨年度検討した 3D プリントを用いた光造形法で形成した微小樹脂鋳型中に、アルミナと炭素繊維のスラリーを磁場中で鋳込んで成形体を調製した。得られた成形体を空气中で焼成することで、一方向に配向した気孔を有するアルミナハニカム多孔体の作製に成功した。図7に作成したアルミナハニカム多孔質体の SEM 写真を示すが、内部の気孔は連通孔であり、炭素繊維の径に対応した気孔とその間の空隙に対応した寸法を有していることが確認された。

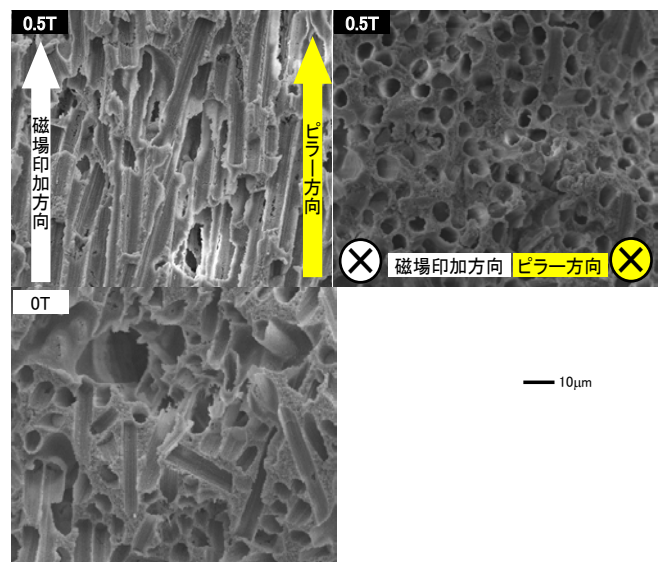


図7 作成したアルミナハニカム多孔質体の SEM 写真

(3) 実機条件を模擬したハニカム冷却技術の伝熱特性

昨年度設計・制作した強制流動沸騰実験装置を用いて強制流動場における沸騰実験を行うとともに、RISA(放射線誘起表面活性)効果が限界熱流束に与える影響について実験的に検討を行った。プール沸騰と強制流動それぞれについてガンマ線あるいは電子線を照射した伝熱面およびそれら放射線を照射したハニカム多孔質体を装着した伝熱面における限界熱流束測定を行った。結果を比較したところ、裸面のプール沸騰においてのみ RISA 効果が確認され、CHF 向上が確認されたものの、強制流動においては CHF 向上が認められず、ハニカム多孔質体を装着した場合においても CHF 向上が認められなかった。なお、図8に示すように強制流動実験装置においては非照射の試

験体上にハニカム多孔質体を設置しただけで、大幅な CHF 向上が観測された。CHF 向上に与える影響は、ハニカム多孔質体、RISA 効果、流動の 3 つの要因が考えられるが、RISA 効果が他の 2 つの要因に比較して、相対的に小さい事がわかった。

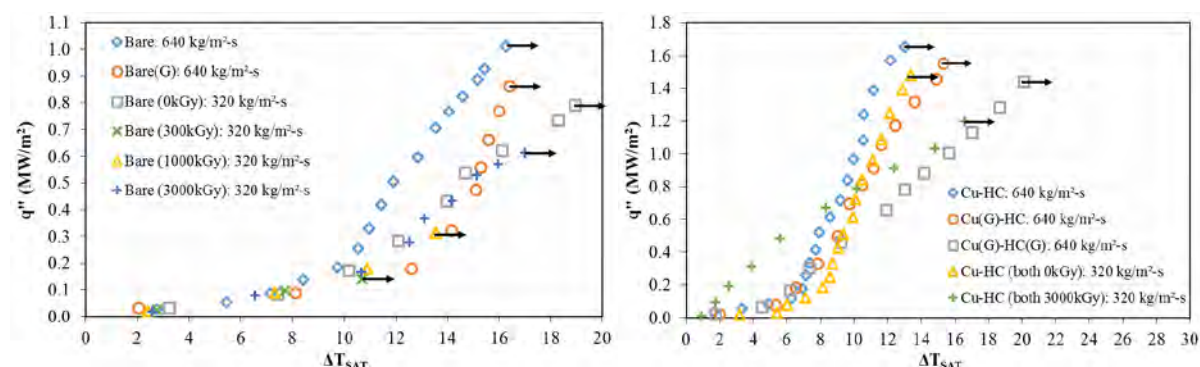


図 8 強制対流沸騰実験における放射線照射前後の沸騰曲線と CHF

(4) ハニカム冷却技術の実機への適用性

ハニカム冷却技術の実機への適用性を施工性、冷却水供給システム、並びに熱流動・構造強度の観点から検討した。実機施工性での概念検討では、3 種類の施工法を検討し、実機へ適用する際の課題を整理した。冷却水供給システムの概念検討では、既存システムの流用や応用により、IVR 冷却水供給システムとして適用可能な見込みを得た。熱流動・構造強度の検討では、原子炉容器外面での二相自然循環冷却での特性評価を RELAP5 により行い、IVR 冷却水供給システムや構造設計に資する解析データを得た。また、昨年度課題として挙げた原子炉容器下部鏡部のクリープ評価を行った。クリープ寿命評価では 1 次元伝熱解析結果に基づく熱的条件及び 2 次元伝熱解析結果に基づく熱的条件の 2 条件での有限要素解析を実施し、その結果をもとにクリープ強度を評価した。ひずみが 20%を超える時点を破断とみなし、破断に至るまでの一次元伝熱解析結果の図を図 9 に示す。クリープ寿命は一ヶ月以上と長く、圧力容器外面が飽和温度に維持されるハニカム冷却技術を使うことで昨年度課題として挙げたクリープ変形は問題とならないことを確認した。

3. 今後の展望

原子力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、下向き伝熱面でも限界熱流束向上効果のあると考えられる二層構造ハニカム多孔質体を用いて、さらなる限界熱流束向上を検討する。

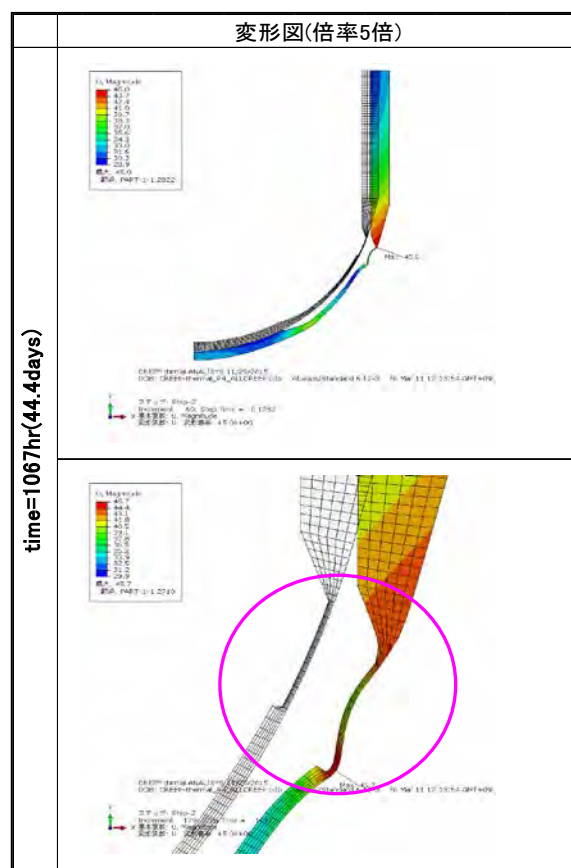


図 9 一次元伝熱解析条件 解析結果 コンター図 (時間：44.4 日経過後)