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
(研究期間)平成26年度~28年度

1.研究の背景とねらい

2030 年から 2050 年の間に運転年数 60 年を超える既設軽水炉は、我が国を始め世界で約 270 基に上り、これらのリプレース需要に加え、アジアや中近東の原子力新規導入国などの新設需要 も拡大することが予見される[1]。これらの世界的なニーズに対し、原子力の国際展開を進めるこ とは、世界のエネルギーの安定供給と地球温暖化問題への貢献という観点から極めて重要である [1]。出力規模に関しては多様な電力ニーズがあり、中小型炉のみならず大型炉の開発も必要であ る。苛酷事故時に溶融燃料が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ることで 原子炉容器壁を介して崩壊熱除去が長期的に可能となるシステムを炉心溶融デブリ炉内保持 (Inner Vessel Retention: IVR) と呼ぶが、この IVR 技術の開発は深層防護を強化する観点から も極めて重要な課題である。電気出力 170 万 kW の PWR でシビアアクシデント時における原子炉容 器の外表面熱流束の解析結果[2]によると、その表面熱流束は最大で 1.6 MW/m²にも達しており、 通常の飽和プール沸騰の限界熱流束(Critical Heat Flux、CHF)が 1.0 MW/m²であることを考慮 すれば、IVRを成立させるためには、CHFを大きく向上させる冷却技術の開発が必須である。IVR 時に要求される最も重要な点は、大伝熱面・高熱流束除去を安定して達成できることである。し かしながら、一般にそのような要求に応えられる冷却技術は極めて少ない。一方、森ら[3]は、こ れまでハニカム多孔質体 (HPP) を伝熱面に装着するという革新的な手法により、飽和プール沸騰 の CHF を飛躍的に向上させることに成功している(上向き伝熱面、大気圧・水、非装着時の約2.5 倍:2.5MW/m²)。本手法の最大の特徴は、大伝熱面・高熱流束除去に対応できる点である。一方、 IVR 時には、冷却すべき伝熱面は下向きとなり、そのときの CHF は上向き伝熱面の場合に比して、 大きく低下することが知られている[4,5]。そこで下向き伝熱面であって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、これまで森ら[3]の提案してきた HPP を用いた CHF 向上メカニズムの解明は勿論のこと、伝熱面表面のぬれ[4, 6, 7]やハニカム多孔体内部のぬ れ、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、HPP を用いた伝熱面構造制御による、革新的な炉心溶融デ ブリ炉内保持(IVR)技術を開発するため、(1)HPP 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 HPP 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た。

2. これまでの研究成果

2.1 HPP による CHF 向上メカニズムの検討

本節では、HPP による CHF 向上メカニズムについて提案する毛管限界モデルと実験結果との比較について述べる。図1は、板厚 δ_h と CHF の関係を示す。HPP はセル幅 d_g =1.33mm、壁厚 δ_g =0.46mm、板厚 δ_h を 2、5、10mm に変化させて実験した。図中の〇はプール沸騰の実験結果(以下、条件 A と略記する)、 (公は毛管力の液供給効果抽出の実験結果(以下,条件 B と略記する)、 実線は毛管限界モデルの試算結果である。図1より、HPP の厚さが薄くなると CHF が向上し、最大で裸面の

場合(1MW/m²)の2倍以上に向上することがわかる。さらに B は申請者らの提案する毛管限界モ デルによく一致している。また、全体的な傾向として、A と B は、実験体系が大きく異なるにも 関わらず、比較的よく一致している。以上の結果から、CHF 向上に与える毛管力による液供給効 果の寄与割合は支配的であると考えられる。さらに、図中の□はセル内部の液流入効果抽出実験 装置を用いて、セル内部に液体が δ_h =5mm の場合にセル内部に流入する液体量を別途測定した結 果である。本実験装置は非加熱系であり、伝熱面上で発生する蒸気は N₂ガスを用いることにより 模擬している。HPP のセル内を上昇する N₂ガス量(測定した蒸気量から伝熱面熱流束に換算する) とセル部を流下する液体量を同時測定することで、セル内部に流入する液供給効果を抽出した。 この測定結果から、図1より、 δ_h =5mm の場合には、A において、セル内部に流入する液体はな いと考えられ、A と B の両者とも伝熱面への液供給は毛管力によってのみ行われていると考えら れる。その結果として、 δ_h =5mm の場合に、A と B の q_{CHF} の実測値が同程度となったと考えられ る。また、 δ_h =10mm の場合に、A の場合 q_{CHF} が B よりも大きいのは、セル内に直接流入する液体 給が δ_h =5mm と比して、大きいことに起因していると考えられる。



図1 毛管力による液供給効果抽出実験

2.2 ナノ流体と HPP による CHF の飛躍的な向上

本節ではナノ流体と HPP を組み合わせ飛躍的な CHF 向上効果が得られた結果について述べる。 図 2 は、ナノ流体濃度と CHF の関係を示す。まず、裸面の場合、作動流体が蒸留水の CHF は 1.0 MW/m² (基準)であるのに対し、ナノ流体のみの CHF は 0.001vol.%、0.1vol.%ともに最大 1.7 MW/m² となり、 CHF は裸面に対して約 1.7 倍に向上した。 次に HPP 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/m² (蒸留水を用いた場合の裸面に対して 2.3 倍に向上)、作動流体 がナノ流体の場合、 CHF は 0.001vol.%では最大 2.8 MW/m²で (蒸留水、裸面の場合に対して 2.8 倍向上)、0.1vol.%では最大 3.2 MW/m² (蒸留水、裸面の場合に対して 3.2 倍向上)という結果 を得た。 Φ 30 mm の大伝熱面において 3.2 MW/m²の飽和プール沸騰 CHF はチャンピオンデータ(世 界最高値)である。

2.3 HPP による高温体の急速冷却

原子炉容器が非常に高温になっている場合には、冠水させても膜沸騰となり、冷却されない。 そこで HPP による膜沸騰から核沸騰への迅速な遷移への可能性について実験的に検討を行った。 実験は、裸面(BS)、HPP、ナノ粒子堆積伝熱面(NPDS)、および NPDS+HPP の場合の4種類に関し て行った。図3に横軸に時間、縦軸にTC1 の温度を示す。図3よりBS, NPDS, HPP, NPDS+HPP の 順に核沸騰に遷移するまでの時間が短くなり、NPDS+HPP では固液の接触と同時に激しい沸騰音 が発生し核沸騰域に約25秒で遷移するという興味深い結果を得た。HPP を装着した場合には核沸 騰まで遷移するのに要する時間がBS の場合と比較して約1/10となる。この冷却時間短縮要因と しては毛管力による液供給効果が挙げられる。

2.4 幾何形状・細孔構造が制御された新型 HPP の開発

前節で、提案するモデルの妥当性が確認で きたので、そのモデルを用いて最適な幾何形 状を提案することが可能となった。一方で、 その幾何形状は市販品として入手できないの で、図4で示す3Dプリンタを用いた手法によ り、HPPの幾何形状の制御を試みた。加えて細 孔制御もカーボンファイバを用いた磁場中配 向法を用いて液流の圧力損失の小さい一次元 細孔を作成可能な手法を開発し、新たな HPP の作成に成功した(図5参照)。



図 3 BS, HPP, NPDS, and NPDS+HPP に おける冷却曲線



図4 新型ハニカム多孔体のナノ細孔と蒸気排出孔の制御



2.5 放射線照射効果が CHF に与える影響

図6は、放射線照射効果により強制流動下向き伝熱面のCHFが低下した実験結果を示す。図より明らかなように、放射線を照射するとCHFが1/6にまで低下した。これは従来のプール沸騰の 実験と大きく異なるものの、そのメカニズムは明らかになっていない。一方で、伝熱面上にHPP を設置すると放射線照射効果によるCHFの低減より、HPPによるCHF向上効果の方が上回り、CHF 自体は向上するという結果が得られてた。

2.6 HPP 取り付け方法の検討

HPP 取り付け方法として、フレームサポート法を考案した。またハニカム多孔質体を実機へ取り付ける場合、厚さを10mm程度とする必要があることを明らかにし、ハニカム多孔質体の冷却性能は薄い方が高いため、新規に二層構造ハニカム多孔質体を考案した。

2.7 実機熱流動解析の実施・検討

実機での原子炉圧力容器外面は水-蒸気二相流で冷却するが、構造健全性への悪影響が懸念さ れた流動変動が計算された。流動変動のメカニズムが密度波振動であることを同定し、密度波振 動を抑えるための方法の有効性を定量的に確認した。

3. 今後の展望

今後は、現状で考え得るすべての問題を解決し、モックアップ試験へと進み、実用化を達成したい。具体的にはモックアップ試験の前に以下の課題を解決する必要性がある。

- ① 放射線照射効果による CHF 低下メカニズムの解明および CHF 劣化防止策の提案
- ②HPPによる CHF 向上技術の極限化
- ③HPP による高温物体の急速冷却技術の開発
- ④多孔質体内部の微細孔構造制御による金属 HPP の開発
- ⑤実機水質条件への適用性検証
- ⑥実機施工状態での除熱限界特性評価

<u>4. 参考文献</u>

[1] 次世代軽水炉等技術開発に係る中間評価報告書, 財団法人 エネルギー総合工学研究所.

[2] 青木一義,水口浩司,佐藤寿樹,小此木一成,炉心溶融デブリ対策(IVR)に関する研究(1)原子 炉容器外表面の熱流束評価手法の構築,in: 日本原子力学会「2012年秋の大会」,広島大学 東広 島キャンパス,2012.

[3] 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) (2009) 946-951.

[4] S.G. Kandlikar, A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle and Orientation, Journal of Heat Transfer, 123(6) (2001) 1071.

[5] L. Liao, R. Bao, Z. Liu, Compositive effects of orientation and contact angle on critical heat flux in pool boiling of water, Heat and Mass Transfer, 44(12) (2008) 1447-1453.

[6] T. Takamasa, T. Hazuku, K. Mishima, K. Okamoto, Y. Imai, Surface wettability caused by radiation induced surface activation, (2004).

[7] Y. Takata, S. Hidaka, J.M. Cao, T. Nakamura, H. Yamamoto, M. Masuda, T. Ito, Effect of surface wettability on boiling and evaporation, Energy, 30(2-4) (2005) 209-220.