

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289354

研究課題名(和文) 沸騰励起高周波振動に伴う燃料集合体の構造健全性に関する基盤研究

研究課題名(英文) Study on integrity of rod-bundle geometry caused by subcooled boiling induced vibration

研究代表者

功刀 資彰 (Kunugi, Tomoaki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40301832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発熱棒の振動現象と壁面との相互作用を明らかにすることを目的とし、プール沸騰体系において発熱棒の近傍にステンレス板の壁を設置し、サブクール状態での核沸騰による発熱棒表面での気泡の挙動と振動特性を調べる実験を行った。壁は、発熱棒の片側だけに設置する「1枚壁」、発熱棒を2枚の壁で挟む「平行壁」、発熱棒の半面を壁で囲う「L字壁」の3種類の配置とした。円柱発熱棒の沸騰励起振動は、実際の原子炉における燃料棒でも起こる可能性のある現象であり、本実験では原子炉内の燃料棒の挙動を解明するための基礎的な研究として壁面を設置した体系での実験を実施した。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate the fundamental phenomena of the SBIV (Subcooled Boiling induced Vibration) of the heater rod installed in the subcooled water, the experiments of subcooled pool boiling by the simplified experimental apparatus under atmospheric pressure were performed. In the experiments, influences by wall existence and due to wall configurations arranged in the three cases: "Single wall," "Parallel walls" and "Corner walls," are used. The important results obtained are as follows: 1) Existence of a wall nearby a heater rod encourages the growth of bubbles in the gap and such bubbles condense in the gap, which leads to larger acceleration of SBIV of the heater rod in the direction perpendicular to the wall; 2) Lower degree of subcooling leads to larger growth of vapor bubbles in the gap, and they move out from the gap to the open space, so this causes a vibration of the heater rod, i.e., the perturbation and condensation of the bubbles induce SBIV of the heater rod.

研究分野：熱工学

キーワード：軽水炉 沸騰 振動 安全性

1. 研究開始当初の背景

PWRやBWRの炉心では安定的な高温高压条件が維持され、これまで沸騰励起振動現象(SBIV: Subcooled Boiling induced Vibration)による燃料損傷の事例報告は無いが、事故時の圧力低下や流量低下、使用済燃料ピットでの流量低下時にSBIVが問題となるのかどうかを評価することは重要である。SBIVはBWR, PWR 何れの炉心体系(図1参照)でも生じる現象であり、従来燃料集合体健全性評価に考慮されてきた流動励起振動(FIV: Flow induced Vibration)よりはるかに高周波となる(図2参照)。また、冷却能を喪失した使用済燃料プール内でも生じる可能性が高く、シビアアクシデントマネジメントにも考慮される事象であるが、これまで安全性評価の盲点となっていた。

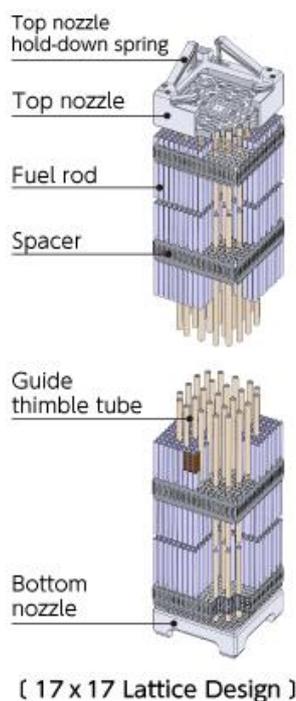


図1 典型的な原子炉燃料体系

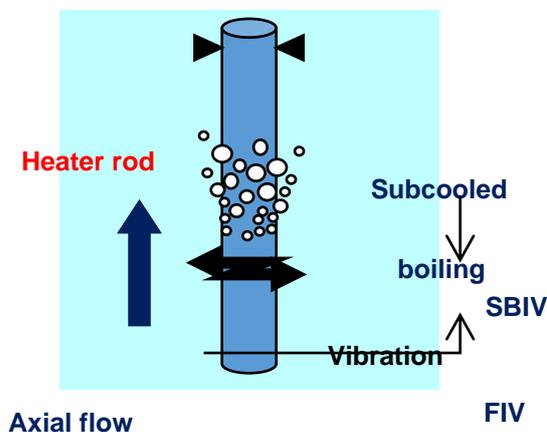


図2 SBIVとFIVの違い

2. 研究の目的

本研究では、これまでほとんど解明されていない強サブクール状態～飽和状態のプール沸騰に起因する燃料棒の振動現象(SBIV)の基礎的知見を実験および数値解析の両面から取得し、運転時および事故時における燃料集合体の構造健全性評価の体系化への寄与を目指す。

3. 研究の方法

発熱棒の振動現象(SBIV)と壁面との相互作用を明らかにするため、プール沸騰体系において発熱棒の近傍にステンレス板の壁を設置し、サブクール状態での核沸騰による発熱棒表面での気泡の挙動と振動特性を調べる実験を行った(図3参照)。壁は、発熱棒の片側だけに設置する「1枚壁」、発熱棒を2枚の壁で挟む「平行壁」、発熱棒の半面を壁で囲う「L字壁」の3種類の配置とした(図4参照)。

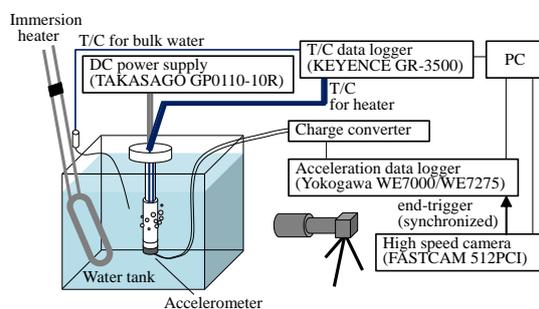
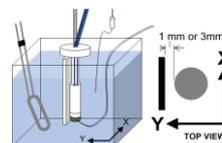
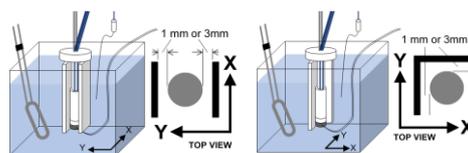


図3 実験装置



(a) 1枚壁体系



(b) 平行壁体系 (c) コーナー壁体系

図4 発熱棒と3種の壁配置の実験体系

また、数値解析では主にサブクールプール沸騰時の気泡成長挙動を直接数値解析可能な非経験的沸騰・凝縮モデルを検討し、高時空間分解可視化観察結果と計算結果を比較することにより、本モデルの妥当性を検証した。

4. 研究成果

平成25年度にSBIV基礎実験装置の構築やカセグレン光学系の導入によって、サブクー

ル水中に設置した模擬燃料棒に見立てた加熱ヒータ面上で沸騰挙動を詳細に観察可能とした。また、模擬燃料棒の振動特性について、加速度計を用いた測定を行い、キロヘルツ・レベルの高周波数の SBIV 振動を示すことを明らかにした(図 5 参照)。

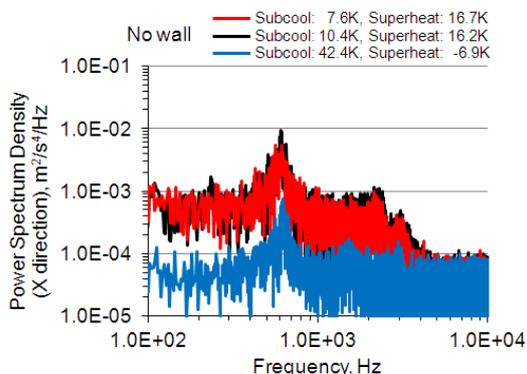


図 5 模擬燃料棒の振動特性

平成 26 年度は、隣接する固体壁との干渉距離とプールのサブクール度をパラメータとした沸騰挙動観察および振動特性を測定し、サブクール度が小さく、干渉距離が短い場合に発生気泡同士の合一が生じ、模擬燃料棒の振動モードが大きく影響され、固体壁へ向かう方向に大きく振動する、SBIV が発生していることを明らかとした。図 6 は 1 枚壁を設置した場合の振動モードを見出した。

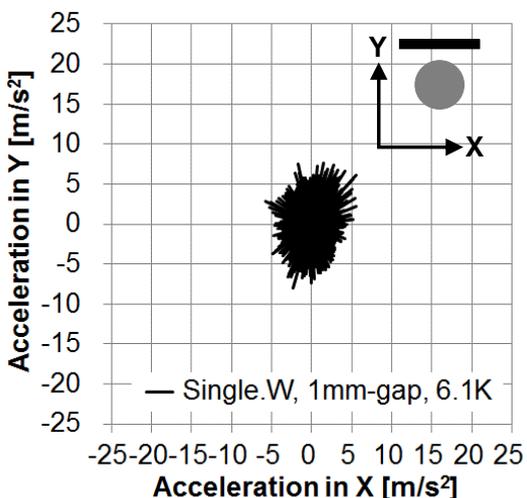


図 6 1 枚壁の場合の振動モード (壁面に垂直方向の振動が誘起されている)

また、L 型の固体壁との干渉挙動についても観察を行い、コーナー部へ向かう振動モードを見出した(図 7 参照)。L 字部分に大きな気泡を生成することも見出した。また、2 枚の固体壁に挟まれた体系についても実験し、固体壁の干渉による SBIV 振動の存在を明らかにした(図 8 参照)。

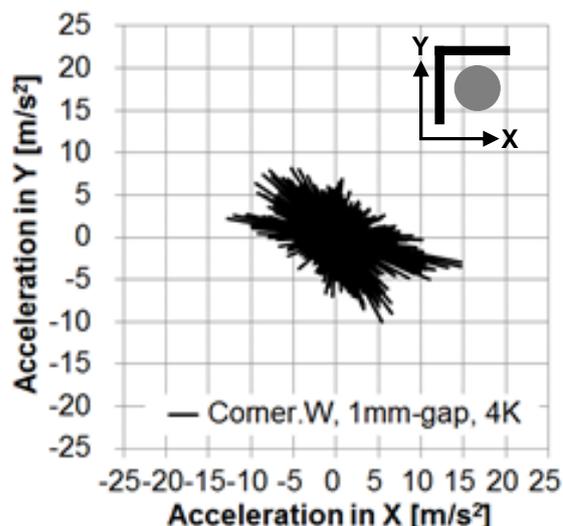


図 7 L 型の固体壁の場合の振動モード (コーナー部へ向かう振動が誘起されている)

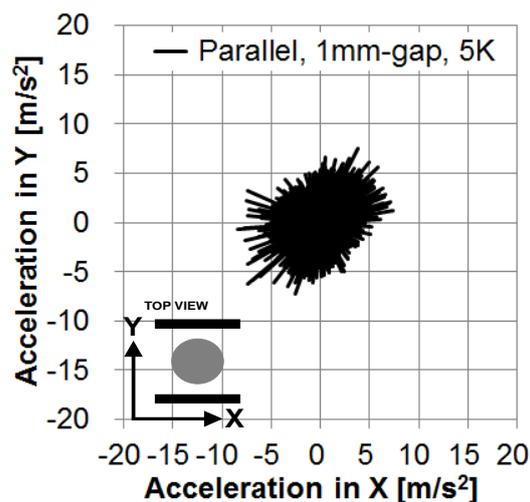


図 8 平行壁の場合の振動モード (振動が誘起されている)

平成 27 年度も気泡挙動の観察を継続し、壁配置の種類に依らず、発熱棒と壁とのギャップが狭い場合には、気泡の合一・成長が促進され、直径 5mm を超えるような大気泡が発生することを確認した(図 9 参照)。図 10 に大気泡 (5mm 長径以上) の発生頻度を示す。大気泡 (5mm 長径以上) の発生頻度は、1 枚壁とコーナー壁で同程度であり、平行壁では倍程度 (平行壁ではギャップからの出口が倍存在することに一致している) であった。これらの発生頻度は、大気圧下で知られている気泡発生頻度と同オーダーであることも分かった。

また、発熱棒に対する壁の配置 (発熱棒との位置関係を変化) によって、サブクール度を変化させた際の気泡の挙動や大気泡発生頻度に違いが生まれることを明らかにした。

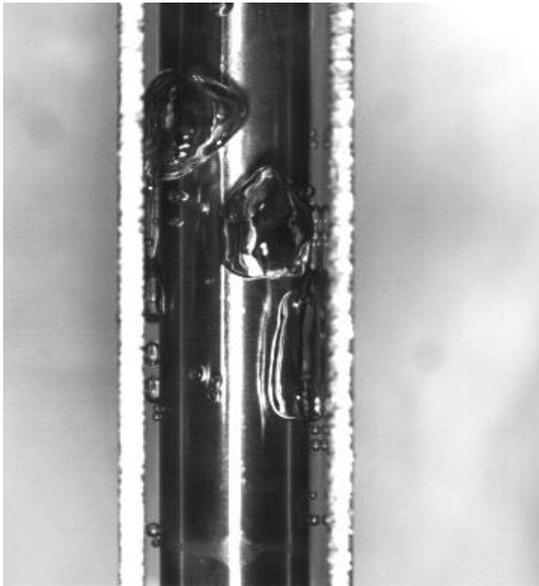


図 9 サブクール度 4K における平行壁ギャップでの大気泡発生の様子

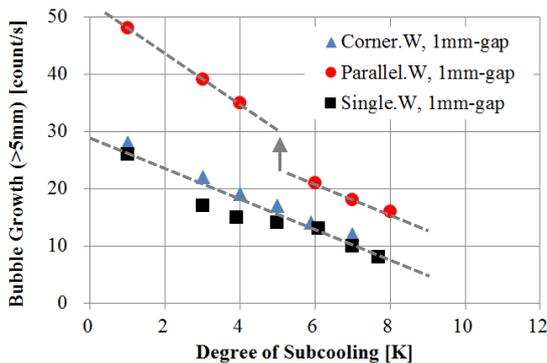


図 10 大気泡 (5mm 長径以上) の発生頻度

振動加速度の測定実験によって、サブクール度が小さい場合には、大気泡の発生・離脱によって大きな振動が励起されることを確認した。さらに、サブクール度を大きくしていくと、加速度の平均二乗変位(RMS)値は極小値をとり、その後は気泡の凝縮による圧力変動により、1000-3000Hz の高周波振動が励起されることが示唆された。また、壁の配置による気泡挙動の違いによって、加速度の RMS 値が極小値をとるサブクール度が変わることを見出した。

円柱発熱棒の沸騰励起振動は、実際の原子炉における燃料棒でも起こる可能性のある現象であり、本実験では原子炉内の燃料棒の挙動を解明するための基礎的な研究として壁面を設置した体系での実験を実施した。本研究当初計画では、燃料棒チャンネル管群体系も視野に入れていたが、基本 SBIV 現象の同定に時間が掛かったこと、数値解析モデ

ルの開発は成功したが、模擬燃料棒の振動連成解析のモデル化は未だ道半ばである。

今後は、壁面を設置した体系での実験をサブクール度や壁の配置などをさらに変化させて実験を行うことによって、発熱棒が壁面から受ける効果をさらに詳細に評価するとともに、数値解析モデルの開発を更に進め、沸騰励起による管群振動連成解析が可能な解析手法を構築し、原子炉炉心により近い管群体系での実験・解析への展開を図る必要がある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Kenji Takano, Yusuke Hashimoto, Tomoaki Kunugi, Takehiko Yokomine, Zensaku Kawara, “Behavior of vapor bubbles generated on a single heater rod partly confined by metallic walls in the subcooled water”, *Multiphase Science and Technology*, 査読有, Vol. 27, Issue 1, 2015 (印刷中)
- ② Kenji Takano, Yusuke Hashimoto, Tomoaki Kunugi, Takehiko Yokomine, Zensaku Kawara, “Subcooled boiling-induced vibration of a heater rod adjacent to a metallic wall”, *Heat Transfer Research*, 査読有, 2016, (印刷中)
- ③ Kenji Takano, Yusuke Hashimoto, Tomoaki Kunugi, Takehiko Yokomine, Zensaku Kawara, “Subcooled boiling-induced vibration of a heater rod located between two metallic walls”, *Nuclear Engineering and Design*, 査読有, 2016 (印刷中)

[国際学会発表] (計 4 件)

- ① Kenji Takano, Tomoaki Kunugi, Takehiko Yokomine, Zensaku Kawara, “Study on Subcooled Boiling-Induced Vibration of Heater Rod in the Vicinity of Structures”, *International Conference on Multiphase Flow*

2013 (ICMF2013), May 26-31, 2013, Jeju, Korea, paper # ICMF2013-1010, 査読有  
② Kenji Takano, Yusuke Hashimoto, Tomoaki Kunugi, Takehiko Yokomine, Zensaku Kawara, “Wall effects on subcooled boiling-induced vibration phenomena of a single heater rod”, First Thermal and Fluids Engineering Summer Conference, Aug. 9-12, 2015, New York, USA, paper# ASTFE-12700, 査読有

③ Kenji Takano, Yusuke Hashimoto, Tomoaki Kunugi, Takehiko Yokomine, Zensaku Kawara, “Subcooled Boiling-Induced Vibration of a Single Heater Rod Confined with Metallic Walls”, 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16), Aug. 30- Sep.4, Chicago, USA, paper# 13294, 査読有

④ Kenji Takano, Yusuke Hashimoto, Tomoaki Kunugi, Takehiko Yokomine, Zensaku Kawara, “Wall Effects on the Subcooled Boiling-Induced Vibration Phenomena of a Single Heater Rod”, 7th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting (7EJTPFGM), Oct. 11-15, 2015, Zermatt, Swiss, 査読有

〔国内学会発表〕（計 2 件）

① 高野賢治, 功刀資彰, 河原全作, 横峯健彦, “サブクール沸騰に誘起される発熱棒振動と気泡挙動”, 日本原子力学会 2013 年春の年会, 平成25年3月26～28日, 近畿大学 東大阪キャンパス, paper# 008, 査読無

② 高野賢治, 橋本祐輔, 功刀資彰, 横峯健彦, 河原全作, “サブクール沸騰に誘起される発熱棒振動に対する壁面の効果”, 日本原子力学会 2014 年春の年会, 平成26年3月26～28日, 東京都市大学 世田谷キャンパス, paper# M08, 査読無

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

功刀 資彰 (KUNUGI, Tomoaki)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40301832

### (2)研究分担者

横峯 健彦 (YOKOMINE, Takehiko)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：40240204