

平成21年6月1日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360454  
 研究課題名（和文） 低減速自然循環沸騰水型炉における起動時の炉心内不安定流動特性に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on Thermal Hydraulic Flow Stability on Reduced Moderation Natural Circulation BWR at Start-Up Stage  
 研究代表者：  
 有富 正憲（ARITOMI MASANORI）  
 東京工業大学・原子炉工学研究所・教授  
 研究者番号：60101002

## 研究成果の概要：

将来型軽水炉として有望視されている低減速自然循環沸騰水型炉の概念の成立性を評価するために、起動時に稠密炉心およびチムニーにおいて発生することが懸念されている熱水力学的諸問題（ガイセリング、密度波振動、チムニー内における二次流れによる流動不安定性）に関して、実験及び解析の両面より検討を行った。ガイセリングおよび密度波振動に関しては、低減速自然循環沸騰水型炉の炉心を模擬した沸騰流路を用いて、発生機構・安定限界を調べるとともに、RELAP5をベースに開発した解析コードを用いて抑止策の検討を行った。また、起動時の低ボイド率条件下において発生することが懸念されているチムニー内の二次流れ現象に関しては、チムニー内流路を模擬した矩形流路を用いて、ボイドや液相の挙動を詳細に追跡することが可能なワイヤー・メッシュ・トモグラフィ（WMT）や超音波パルス・トモグラフィ法（UVT）を用いて、その発生機構を詳細に明らかにするとともに、抑止策の検討を行った。以上より、低減速自然循環沸騰水型炉の最適且つ合理的な起動手順および炉心構造の提案を行った。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2007年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：低減速自然循環沸騰水型、沸騰二相流、ガイセリング、密度波振動、ワイヤーマッシュトモグラフ、SBWR、パルス超音波のドップラー効果、粒子一流体モデル

## 1. 研究開始当初の背景

エネルギー資源の乏しい我が国では、軽水炉から発生する使用済燃料を再処理し、プルトニウムとウランを回収し、再利用することが我が国の原子力基本政策となっている。また我が国では、再処理により回収されるプルトニウムはMOX燃料として軽水炉のプルサーマル運転で消費することが計画されている。低減速自然循環沸騰水型炉は、稠密炉心を採用することで、現行の沸騰水型炉技術をベースに比較的高いウラン燃料有効利用率の達成できると同時に、多数の受動的機器から構成されているため、システムの簡素化が図れるなど高い経済性を有しているが、駆動力が不十分である起動時において、出力上昇時間の短縮化は核燃料効率向上の観点から非常に重要である。また、この概念では狭隘流路が採用されるため、冷却材喪失事故時などに炉心が露出した場合には、現行の緊急炉心冷却装置では再冠水速度が非常に遅くなり、再冠水過程において燃料被覆管温度を1200°C以下に抑えることは困難なことが想定される。そこで、炉心上部に大量の冷却水を保有し、如何なる事故に遭遇しても炉心の冠水状態が維持できることが低減速軽水炉の必須条件となる。炉心上部に大量の冷却水を保有する必要があるため、高いチェムニが必要となり、循環ポンプが無くても十分な自然循環力が確保でき、炉心を十分に冷却することができる。この低減速自然循環沸騰水型炉の概念は、定格運転時には熱水力学的な成立性は十分に見込めるが、低温・低圧条件下の起動運転から核加熱を必要とするため、不安定流動の発生防止や十分な自然循環力の確保など、熱流動特性に関する様々な課題がある。

## 2. 研究の目的

提案する本研究では、低減速自然循環沸騰水型炉における概念の成立性について評価を行うために、以下に示す課題(2.1~2.4)について解明を図ることを目的としている。

### 2.1 起動運転時における炉内流動安定性の実験的解明

研究代表者らは自然循環沸騰水型炉の起動時に炉形状と運転手順によってはガイセリングという不安定流動が発生することを見出し、ガイセリングの発生機構とその特性を解明してきた。本研究では、その成果に基づき、低減速自然循環沸騰水型炉の炉心近傍をモデル化した並列部沸騰流路と単一部非沸騰流路から成る複合流路を用いて、ガイセリングの発生限界に及ぼす炉心有効発熱長

の下流側の非加熱部長さと系圧力の影響を解明し、ガイセリングが回避できる燃料集合体の概念と、安定でかつ合理的な起動手順を提案することを目的とする。併せて、ガイセリングの発生領域に与える系圧力と炉心有効発熱長の下流側の非加熱部長さの影響を調べる実験結果を検討し、炉心入口サブクール度もパラメータとした実験を行い、それらの影響の普遍性を高めることを目的とする。

### 2.2 数値解析を用いた起動運転時における炉内流動安定性の解明

2.1で得られたガイセリングの実験成果を検証するために、RELAP5をベースとして開発した二流体モデルを用いて、ガイセリングの発生限界に及ぼす複合流路形状(C.R.等)と系圧力の関係を明らかにするとともに、ガイセリングを抑止するための最適な起動手順および合理的な炉心構造を提案することを目的とする。

### 2.3 ワイヤー・メッシュ・トモグラフィ(WMT)を用いて炉心およびチムニー部内流動安定性の解明

低減速自然循環沸騰水型炉のチムニーは分割しない構造を採用している。定格運転時には炉心出口ボイド率は80%程度となるため、チムニー内の二次流れによる自然循環駆動力の低下はあまり問題とならないが、起動時の低ボイド率条件下におけるチムニー内の気泡流の二次流れの発生とそれに起因した自然循環駆動力の減少に関しては、低減速自然循環沸騰水型炉の概念の成立性上、実証実験を実施する必要がある。本研究では、ドイツのルッセンドルフ研究所と共同開発を実施しているワイヤー・メッシュ・トモグラフィ(WMT)を用いて、チムニー内流路を模擬した矩形流路内における瞬時・局所のボイド率挙動を調べることを目的とする。また、低減速自然循環沸騰水型炉は、炉心装荷燃料に対する減速材(且つ冷却材)である軽水の割合を少なくした稠密炉心を採用することにより、現行の沸騰水型炉に比べ、高い核燃料有効利用率の達成を可能にしている。しかしながら、稠密炉心を採用することにより、炉心の二相流摩擦損失の増加に伴った熱伝達率の低下が懸念されている。そこで、本研究では、上記で開発したWMTを稠密炉心バンドル用に調整したマイクロWMT( $\mu$ WMT)を用いて、稠密炉心内のボイド率挙動を詳細に解明することにより、炉心限界熱流束特性を明らかにすることを目的とする。

## 2.4 超音波パルス・トモグラフィ法 (UVT) を用いたチムニー部内流動安定性の解明

超音波による流量計測は、計測精度が高く、不透明配管や不透明流体への適用が容易であるため近年注目を集めている。従来の流量計と異なり、非接触測定であるため、流れ場を乱すことなく、既知の配管等にも容易に設置することができるため、工業プラントへの利用が期待されている。本研究では、それらの中でも、流速分布計測の代表である超音波パルス・トモグラフィ法 (UVT) を用いて、低減速自然循環沸騰水型炉におけるチムニー内における流動現象を解明することを目的とする。併せて、起動時に発生し出力上昇過程を妨げる可能性のある二次流れ現象の発生機構を明らかにすることにより、最適且つ、合理的な起動手順およびチムニー構造を提案することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 起動運転時における炉内流動安定性の実験的解明

低減速自然循環沸騰水型炉の炉心近傍をモデル化した並列部沸騰流路と単一部非沸騰流路から成る複合流路を用いて、入口サブクール度、入口流量、系圧力をパラメータとし、ガイセリングの発生領域を明らかにする。また、並列部と単一部の長さ比 C.R. (並列部/単一部) を 0.48, 0.68, 0.94, 1.30, 1.91 に変化させることにより、C.R. がガイセリングの振動特性に与える影響について明らかにする。ただし、各 C.R. において、並列部における加熱部領域は 1.0 m で一定とする。

### 3.2 数値解析を用いた起動運転時における炉内流動安定性の解明

RELAP5 をベースとする二流体モデルを用いた解析コードを開発し、ガイセリングの実験結果のシミュレーションを実施した。解析コードは、一次元ドリフトフラックスモデルを修正した二流体モデルを用いた。本解析コードを本複合流路における境界条件に適応し、ガイセリング発生時における各チャンネルにおける流速変動、上下プレナム入口における圧力およびバルク温度について計算を実施した。

### 3.3 ワイヤ・メッシュ・トモグラフィ (WMT) を用いた炉心およびチムニー部内流動安定性の解明

ワイヤ・メッシュ・トモグラフィ (WMT)

は気相と液相の電気伝導率の違いを利用した二相流計測手法である。電極ワイヤが低減速自然循環沸騰水型炉のチムニー内流路を模擬した矩形流路に格子状に配置され、トランスミッタ電極とレシーバ電極の各交点において、局所的な瞬時電気伝導率を計測し、局所ボイド率を計測する。本研究では、従来の WMT を低減速自然循環沸騰水型炉の起動時の低ボイド率条件下におけるチムニー内の気泡流の二次流れ特性の計測ができるように、サンプリング周波数を 10 kHz に高めた計測システムを開発した (図 1(a))。低減速自然循環沸騰水型炉の稠密炉心内におけるボイド率挙動を明らかにするために、上記の WMT 技術を用いて  $\mu$ WMT を開発した。 $\mu$ WMT は電気伝導率計測のための送受信電極であるガラスエポキシ基盤のプリント配線版を、流れの妨げにならないよう流路壁面に向かい合わせに配置している。銅箔の厚みは 0.035 mm、流路間隙は 1 mm、配線間隔は (0.74×1.5 mm) となっている。本研究では、通常の WMT と同様に、最大サンプリング周波数 10 kHz にて、低減速自然循環沸騰水型炉の稠密炉心を模擬した矩形流路内における瞬時・局所ボイド率挙動を計測した (図 1(b))。



(a) WMT



(b)  $\mu$ WMT

図 1 ワイヤ・メッシュ・トモグラフィ

### 3.4 超音波パルス・トモグラフィ法 (UVT) を用いたチムニー部内流動安定性の解明

UVT を用いて、低減速自然循環沸騰水型炉のチムニー部におけるボイド挙動を解明するためには、UVT による気液二相流流動様式の識別手法を確立する必要がある。本研究では、予備実験として、垂直鉛管を用いた UVT による気液二相流流動様式識別実験を行った。大口径なチムニー内における流速分布を計測するために、著者らは近年非破壊検査等で大きく注目を集めている超音波アレイセンサーに着目し、従来の UVT 計測に適応したアレイセンサーを開発した (図 2 参照)。本研究では、低減速自然循環沸騰水型炉のチムニー部を模擬した矩形流路において、複測定線計測の第一段階として、一般的なりニアアレイトラッキング手法を用いて、ボイド率挙動を計測した。

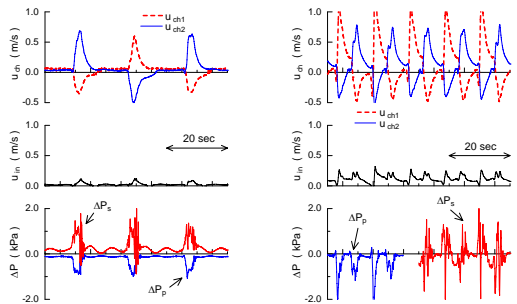


図2 アレイトランスデューサ

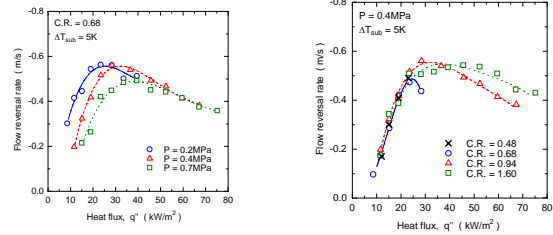
#### 4. 研究成果

##### 4.1 起動運転時における炉内流動安定性の実験的解明

代表的なガイセリング結果を図3に示す。流速変動の周波数解析の結果、逆流現象を伴った間欠型のガイセリング(図3(a))は、過熱液の突沸により生成された蒸気泡が主体的な役割を果たすGriffith型ガイセリング、また、逆流現象を伴った連続型のガイセリング(図3(b))は、通常の沸騰により生成された蒸気泡が主体的な役割を果たすAritomi型ガイセリングであることがわかり、投入熱量条件により二種類に分類できることがわかった。ガイセリング現象の特徴である逆流現象について、逆流量の系圧力の関係、及び逆流量と並列部と単一部の長さ比(C.R.)の関係について調べた結果をそれぞれ、図4(a), (b)示す。投入熱量が $\sim 30 \text{ kW/m}^2$ 以下で発生する可能性が高いGriffith型ガイセリングは系圧力に、投入熱量が $\sim 30 \text{ kW/m}^2$ 以上で発生する可能性が高いAritomi型ガイセリングは、並列部と単一部の長さ比(C.R.)に強く影響を受けることがわかる。また、Aritomi型ガイセリングは、図4(b)の結果より、並列部内の非加熱領域を取り除くことで(C.R. = 0.48), 完全に抑制されることがわかる。以上の結果より、Aritomi型ガイセリングの発生を回避するためには、燃料集合体チャンネルボックスの発熱部下流側の長さを極力短くすることが望ましい。一方、Griffith型ガイセリングに関しては、本実験条件下では完全に抑止することはできなかったが、系圧力を増加させると、1.0 MPa 近傍までは極力沸騰を誘起しない程度の低出力運転をすることを推奨する。



(a) Griffith型ガイセリング (b) Aritomi型ガイセリング  
図3 ガイセリングの分類



(a) 系圧力による影響 (b) C.R.による影響  
図4 ガイセリングの逆流量特性

##### 4.2 数値解析を用いた起動運転時における炉内流動安定性の解明

図5, 6, 7に大気圧下、出口プレナムサブクール度5 Kにおける実験結果と解析結果の比較図を示す。平均総循環流量と投入熱流束との関係(図5)、ガイセリング発生時における単一部非沸騰流路の無次元圧力損失(図6)、及びガイセリングの発生周期の沸騰遅れ時間により整理した結果(図7)、それぞれ実験結果と良い一致を示していることがわかる。

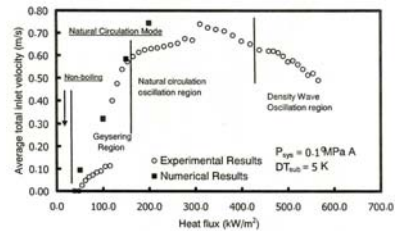


図5 ガイセリングの平均総循環流量特性

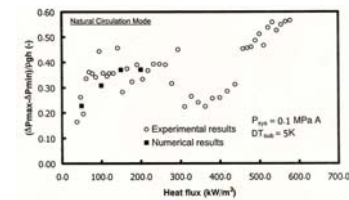


図6 ガイセリングの無次元圧力損失特性

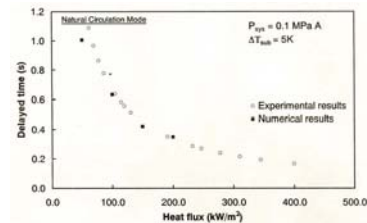


図7 ガイセリング周期の沸騰遅れ時間による整理

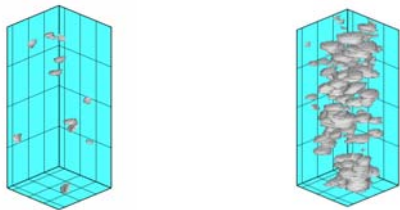
二流体モデルにおける本解析結果は、実験結果に対して良い一致を示していることから、2.1において得られたガイセリング特性、及び最適起動手順、炉心形状の提案に関して、妥当性を示すことができた。しかしながら、二流体モデルを用いて、高精度な数値シミュレーションを行うためには、より高精度な初期値と境界条件を与える必



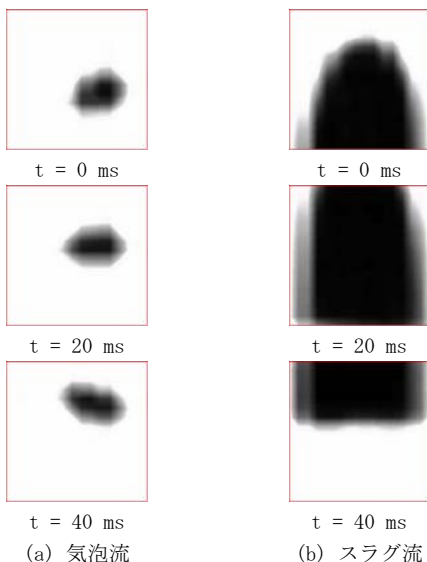
要があり、更に熱伝達係数等に関連した相関式を訂正する必要がある。

#### 4.3 ワイヤ・メッシュ・トモグラフィ (WMT) によるチムニー部内流動安定性の解明

低減速自然循環沸騰水型炉の起動時における低ボイド率条件下において、チムニー内を模擬した矩形流路内におけるボイド率挙動を WMT 計測した代表的な結果を図 8 に示す。本結果より、低ボイド率 (気泡流条件下) では、ボイドは下流側にのみ成長しながら進むため、起動時において発生することが懸念されている二次流れは起こらないことが推察される。また、稠密炉心内のボイド挙動について、 $\mu$ WMT で計測した代表的な結果を図 9 に示す。本結果より、流動が不安定な起動時 (低ボイド率条件下: 気泡流~スラグ流) において、ボイドの下流側への遷移過程は、現行の炉心ギャップにおける遷移過程と変わらないため、稠密炉心の影響による熱伝達率の低下および限界熱流束の低下は起こらないものと推察される。



(a)  $J_G=0.55$  mm/s,  $J_L=0.4$  m/s (b)  $J_G=40$  mm/s,  $J_L=0.8$  m/s  
図 8 チムニー内ボイド挙動



(a) 気泡流 (b) スラグ流  
図 9 稠密炉心内におけるボイド挙動

#### 4.4 超音波パルス・トモグラフィ法 (UVT)

を用いたチムニー部内流動安定性の解明

UVT を用いた垂直鉛管流路内における気液二相流動様式判別結果を図 10 に示す。本結果より、UVT により気液二相流の代表的な流動様式は識別することができた。超音波アレイセンサーを用いて、低減速自然循環沸騰水型炉のチムニー部を模擬した矩形流路内におけるボイド挙動を図 11 に示す。本実験条件は、起動時の二次流れが発生する可能性のある低ボイド率条件である。本結果より、起動時の低出力条件下 (低ボイド率条件下) では、ボイドは必ず下流側に成長しながら遷移していくため、起動時に発生が懸念されている二次流れ現象は発生しないものと推察される。併せて、本結果は 2.1 において提案した最適かつ合理的な起動手順および (チムニーも含めた) 炉心形状に対して一致していることが確認できた。

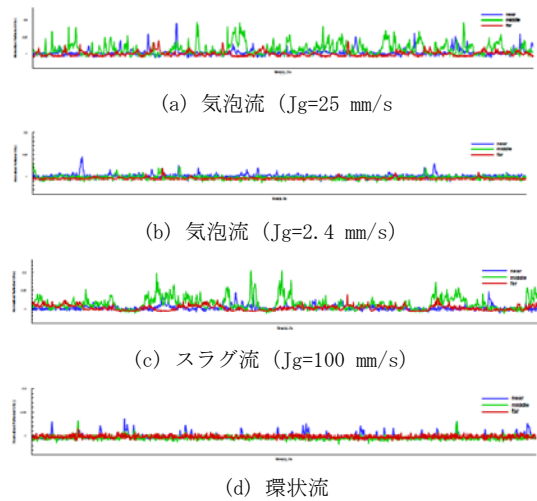


図 10 各流動様式における UVT 結果

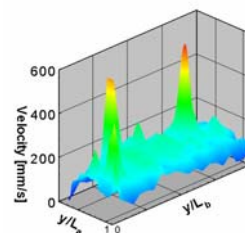


図 11 アレイセンサーによる矩形流路内ボイド挙動

### 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 2 件)

1 N.Watanabe, H.Kikura and M.Aritomi,

Thermal Hydraulic Flow Oscillation Characteristics in Multiformed Channels under Natural Circulation and Low-Pressure Conditions, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 4(2), pp. 160-170(2008). (査読有り)

- 2 H.Murakawa, H.Kikura and M.Aritomi, Application of ultrasonic multi-wave method for two-phase bubbly and slug flows, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 19, pp. 205-213(2008). (査読有り)

[学会発表] (計 10 件)

- 1 D. Ito, H.Kikura, M.Aritomi and M.Mori, Study of ultrasonic velocity profile measurement in vapor-water two-phase flow, *The 6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD6)*, Prague, Czech Republic(2008-9-11).
- 2 D. Ito, H.Kikura, M.Aritomi and H.M. Prasser, Bubble velocity estimation with three-layer wire-mesh sensor, *13th International Symposium on Flow Visualization (ISFV13)*, Nice, France(2008-7-1).
- 3 Yoyok DS PAMBUDI・渡邊紀志・木倉宏成・有富正憲, Flow Oscillation in a Combined of Parallel Channel and Single Channel under Natural Circulation and Low Pressure Condition, 日本実験力学会 2007 年度年次講演会, 埼玉大学東京ステーションカレッジ(2007-8-8).
- 4 Surip WIDODO・川久保政洋・木倉宏成・有富正憲, Experimental Study on PCCS : Effect of Pressure, Non-Condensable Gas Fraction and Wall Temperature Subcooling on Condensation Heat Transfer, 日本実験力学会 2007 年度年次講演会, 埼玉大学東京ステーションカレッジ(2007-8-8).
- 5 因幡徳昭・木倉宏成・有富正憲, サブクール沸騰水中の気泡凝縮挙動に関する基礎研究, 第 12 回動力・エネルギー技術シンポジウム, 東京海洋大学(2007-6-14).
- 6 M.Kawakubo, H.Kikura, M.Aritomi and T. Komeno, Condensation Heat Transfer on a Vertical Tube under Non-condensable Gas Condition, *15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE15)*, 名古屋国際会議所(2007-4-23).
- 7 古関明, 渡邊紀志, 木倉宏成, 有富正憲, 臼井健介, 並列沸騰流路を用いた低圧力下における流動安定性に関する研究, 日本原子力学会 2006 秋の大会予稿集, 札幌, CD-ROM No. N28, (2006-9-28).
- 8 N.FUANGWORAWONG, H.KIKURA, M.

ARITOMI, Flow Regime Identification and Flow Visualization by using Reflected Ultrasonic Intensity, 第 34 回可視化情報シンポジウム, 東京, pp. 355-358(2006-7-24).

- 9 重藤雅貴・木倉宏成・有富正憲・臼井健介, 気液二相流計測のための複合計測システムに関する研究, 第 11 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, 東京, pp.263-264(2006-6-28).
- 10 A.FURUSEKI, N.WATANABE, H.KIKURA, M.ARITOMI and K.USUI, Experimental Study of Thermo-Hydraulic Instability on Two-Phase Flow Oscillation in Parallel Boiling Channels Loop, *The 17th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-17)*, Kanazawa, Japan CD-ROM Paper No.1-E-I-3, PP. 1-4(2006-9-4).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

有富 正憲 (ARITOMI MASANORI)  
東京工業大学・原子炉工学研究所・教授  
研究者番号: 6 0 1 0 1 0 0 2

(2) 研究分担者

木倉 宏成 (KIKURA HIROSHIGE)  
東京工業大学・原子炉工学研究所・助教  
研究者番号: 0 0 3 0 2 9 8 5

秋本 肇 (AKIMOTO HAJIME)

日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部・研究員  
研究者番号: 7 0 3 5 4 7 9 3

(3) 連携研究者

なし