

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560230

研究課題名(和文) 流動沸騰限界熱流束のサブクール度非線形現象の解明

研究課題名(英文) Investigation of non-linear flow boiling critical heat flux for subcoolings

研究代表者

福田 勝哉 (Fukuda, Katsuya)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10127417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：円管内流動沸騰限界熱流束に関するマルチ相関モデルが、福田らによって提案され、多くの研究者によって種々の条件下で得られた流動沸騰限界熱流束値が、出口サブクール度、出口圧力及び流速に対して明らかにされた。実験データは、そのメカニズムによって複数の領域に分類することができた。本研究では、従来の研究を発展させたもので、サブクール度に対する限界熱流束値に非線形性があること及び極大値が存在することが明らかになった。また、得られた相関式によって実験結果をよくあらわすことができた。

研究成果の概要(英文)：The flow boiling CHF multi-model correlations derived by Fukuda et al., and it was made clear that the flow boiling CHF data for outlet subcoolings, pressures and flow velocities measured by many researchers were divided into some regions for the outlet subcooling as a parameter of outlet pressures. In this research deals with as an extension of previous work, the useful flow boiling heat transfer with the critical heat flux for outlet subcooling and pressure for the heated tubes with the ratio of tube length to diameter values and the flowing water with flow velocities. The correlation curves with three constants versus flow velocities as a parameter of the test tube diameters are derived from corresponding experimental data. The calculated value derived from the corresponding critical heat flux correlations with constants obtained, compared with corresponding datum points to confirm for reasonable accuracy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：プール沸騰 流動沸騰 定常限界熱流束 過渡限界熱流束 非線形性

## 1. 研究開始当初の背景

(1)原子炉の工学的安全性に係る限界熱流束に関する物理モデルは、多く研究されているが、不均質自発核生成を基礎におくメカニズムを流動沸騰CHFに導入ことは、国内外で初めての試みであり、この新しい観点によるCHF機構の研究およびその物理状態の影響についての研究は国内外ともこれまで行われていない。この研究により一般的CHFメカニズム解明の突破口が開けるものと期待できる。たとえば、Mudawarらによって得られた管内流動沸騰CHFに関する実験結果を研究代表者らの物理モデルに基づき分析整理することによって、系圧力及び加熱長さ-管内径比をパラメータとして、限界熱流束の極大値を与えるサブクール度に及ぼす流速の依存性を示すことができた。一般に、流動沸騰CHF点は、サブクール度が増加するにつれ増加することが知られている。しかし、あるサブクール度(最大サブクール度)に達すると、CHFは極大値に達し、サブクール度の増加に伴い急減した後、再び増加するという傾向が見られることが判明した。さらに、その最大サブクール度は、どうもほとんど流速に依存しないようであるということがわかりつつある。すなわち、この最大サブクール度が冷却限界ということにもなる。この傾向は、これまでの継続的研究によって研究代表者らによってはじめて明らかにされたものである。すなわち、ある流速が定めれば、(円管加熱長さ/直径)比が小さくなるに伴い、最大サブクール度は、高くなる。したがって、それに対するCHFも増加することになる。

(2)本研究は、プール沸騰CHFから得られた研究成果を基に管内強制流動沸騰CHFにまで拡張して、より一般的なCHF表示式を構築することを目的とするものであるが、これまで、内外の多くの研究者によってCHFデータが得られている。これらのデータを再構築するためには、従来モデルの他に新しモデルに基づく必要があるが、今だに一般に認められたものではなく、思い切った独創的な発想のもとに研究する必要が

ある。現象を明確にするために、既設の小規模実験装置を一部改良して利用するものである。

## 2. 研究の目的

(1)流動沸騰CHFのサブクール度に対する非線形現象の解明:サブクール度に対する沸騰限界熱流束の傾向に存在する非線形特性については、未解決のままである。出口サブクール度に対する流動沸騰CHFについて、これまでの他研究結果を研究代表者らが詳細に分析することにより、サブクール度に対するプール沸騰及び流動沸騰CHFには極大値が存在し、あるサブクール度以上になれば、限界熱流束が極小値へ遷移することをはじめて明らかにしている。特に流動沸騰CHFは、この傾向が顕著に現れることを示した。このサブクール度に対する限界熱流束の非線形現象の存在は、実験データが証明しているが、そのメカニズムは明かでない。したがって、高熱流束除熱の手段として沸騰冷却を応用する場合、工学的安全性の観点から緊急に解明すべき問題である。定常プール沸騰及び流動沸騰定常CHFのサブクール度に対する非線形特性を明らかにする。

(2)プール沸騰過渡限界熱流束現象の解明:高熱流束エネルギー関連機器の伝熱促進手段として沸騰伝熱を利用する場合、過渡現象によって誘起される制御不能な「沸騰クライシス」に結びつく過渡限界熱流束特性を理解しておく必要がある。発熱体発熱量が過渡的に変化する場合、非常にゆっくりした指数関数状に上昇する発熱量から急激に上昇する発熱量を与えることによって、その過渡的状況を模擬することができる。指数関数状の発熱率変化を与えるのは、物理現象を模擬するための一つのパラメータでもあり、また解析の際、数学的にも取り扱い易い関数であるからである。しかしながら、過渡プール沸騰限界熱流束及び流動沸騰CHFに及ぼす発熱量上昇速度の影響は明らかにされていない。本研究では、広範囲の圧力における過渡プール沸騰及び流動沸騰過渡CHF特性を明ら

かにする。

### 3. 研究の方法

(1) 平円柱発熱体及びリボン発熱体を用いて、180 程度の高サブクール度定常・過渡プール沸騰 CHF データを系統的に収集する。水平細管を用い、流動沸騰定常 CHF 及び流動沸騰過渡 CHF データを系統的に収集する。得られた実験データを分析し、CHF 発生現象の解明を行う。試験液体は、純水を使用する。試験パラメータは、流動沸騰においては、試験円管内径を3種類使用する。試験部の発熱量、出口・入口圧力、出口、入口液温及び流速を変えて実験を行う。プール沸騰においては、3種類の試験発熱体直径のものを使用し、試験部の発熱量、液温（サブクール度）及び系圧力を変えて実験する。管内流動沸騰における HI（流体力学的不安定性モデル）モデルで説明される限界熱流束機構は、従来から円管直径  $D$  及び長さ  $L$  に依存すると言われており、純水中において、円管直径、有効長さ、系圧力およびサブクール度を変え、流動沸騰 CHF を系統的に求める。

(2) 極大 CHF に関わる最大サブクール度表示式の導出: これまでの他研究結果を代表者らが詳細に分析して得た発熱体円管長さ ( $L$ ) と内径 ( $D$ ) との比に対する流動沸騰極大 CHF に対応するサブクール度を示したものである。これまで他研究から得られた実験結果及び本研究によって新たに得られた実験結果を用いて、管内流動沸騰 CHF に関する非線形現象を HI メカニズムと HSN メカニズムを考慮して実験データの再構築を行い、極大 CHF に関わる最大サブクール度及び流速の依存性に関する表示式を作成する。

### 4. 研究成果

広い条件下の出口圧力及び流速における、ねじりテープ挿入管のみならず、平滑管中の

サブクール水流動沸騰 CHF の表示については、半世紀以上にわたり多くの研究がなされ、表示モデルが提示されているが、限られた条件下で相当する実験結果は、それらの表示値に約±30%以上を超える差違を示している。核融合実験炉その他の新技術の進展と共に

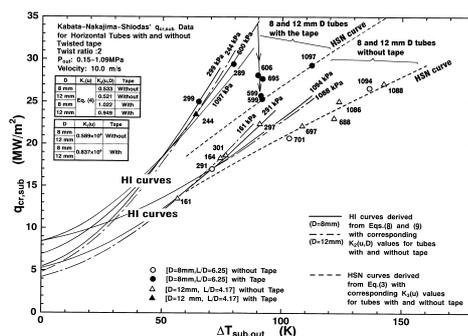


図1 CHF に及ぼすサブクール度の非線形性

確度の高い物理モデルに基づく一般的表示式が期待されている。既存の多くの表示式の不確実性は、それらの CHF 表示式が線形モデルに基づき、機構の異なる CHF による非線形特性が組み込まれていない事に起因していると判断できる。広範囲な条件下の既存のデータベースに基づいて、平滑管内、一定流速において、出口圧力をパラメータとする CHF に対する広範囲の出口サブクール度、 $\Delta T_{sub,out}$ 、の関係が4つの領域に分かれることを先に明らかにしている。特に最小値、最大値をもつ第2領域（低サブクール度域で、サブクール度の増加につれ CHF が増加する領域）に属する CHF データは流速、出口圧力及び管内径、 $D$ 、等に大きく依存し、また、その最大値は出口圧力及び管長と内径の比、 $L/D$  比、に依存する。一方、第4領域（高サブクール度域で、サブクール度の増加につれ CHF が再び増加する領域）の CHF データは流速のみに依存し、出口圧力、 $D$  及び  $L/D$  比に依存しないことを明らかにし、各々の表示式を導出した。第2領域および第4領域の間の狭いサブクール度に存在する第3領域の CHF データは、2つの異なる CHF 機構をもつ第2領域の最大 CHF から第4領域の最小 CHF への遷移過程領域である。但し、管内

に多量の気泡を含む流れをもつ飽和～低サブクール度の第1領域における CHF データは、ここでは対象としない。第2及び第4領域に属する CHF データは、流体力学的不安定性(HI)及び不均質自発核生成(HSN)に基づく CHF と仮定する表示式でそれぞれ良く記述することが出来る。

ここでは、平滑管に対し、先に提示した中、遷移過程及び高サブクール度に対応する非線形サブクール流動沸騰 CHF モデルを、ねじりテープ挿入管中の促進された CHF データの表示に拡張適用する。

Celata ら、Mudawar らおよび Vandervort らによる広範囲な既存のデータベース(管内径: 0.3-12mm, L/D 比: 2.4-96.6, 流速: 4-100m/s, 出口圧力: 0.34-17.2MPa)を基礎として、各々 HI 及び HSN に基づくと仮定し、第2領域及び第4領域のサブクール流動沸騰 CHF 表示式を導出した。

$$q_{cr,sub} = q_{cr,sat} \left[ 1 + K_2(u,D) (\rho_l/\rho_v)^{0.69} (c_{pl}\Delta T_{sub}/L)^{1.5} \right] \quad (1)$$

$$q_{cr,sat} = K_1(u) L \rho_v \left[ \sigma g (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2 \right]^{1/4} \quad (2)$$

$$q_{cr,sub} = K_3(u) \Delta T_{sub}^{0.73} \quad (3)$$

この表示式は、先に導出した非線形サブクールプール沸騰 CHF 表示式と同じ形式のものである。K<sub>1</sub>(u)、K<sub>2</sub>(u,D)及びK<sub>3</sub>(u)はデータベースに基づき定められた。K<sub>1</sub>(u)及びK<sub>3</sub>(u)は、多くのデータベースより次のように導出されている。

$$K_1(u) = 0.130 - 0.156 u + 0.198 u^{0.97} \quad (4)$$

$$K_3(u) = 0.244 \times 10^6 \left( 1 - 0.395 u + 0.681 u^{0.92} \right) \quad (5)$$

K<sub>1</sub>(u)及びK<sub>3</sub>(u)の値は、後述するねじりテープを挿入した管の CHF データベースに基づき定められる。

サブクール流動沸騰 CHF 実験が、ねじりテープを挿入又は挿入しない場合について、Kabata ら(データベース(1))及び Tong ら(デ

ータベース(2))により行われた。前者の CHF データベースは、水平一様加熱管(内径: 8mm 及び 12mm, L/D 比: 6.25 及び 4.17)中にねじりテープ(ねじり比 2)を挿入し、流速(7-10m/s)、出口圧力(0.15-1.2MPa)、入口温度(300-320K)及び出口サブクール度(56-144K)の範囲で、ねじりテープが無い場合と共に求められたものである。後者の CHF は垂直一様加熱管(内径: 2.44mm, L/D 比: 24)中にねじりテープ(ねじり比: 1.93-9.26)を用い、流速(7-10m/s)、出口圧力(0.2-1.1MPa)及び出口サブクール度(56-136K)の範囲で求められたものである。図1は、内径 8mm と 12mm 管(L/D 比: 6.25 及び 4.17)中にねじり比が 2 の、ねじりテープを挿入した場合と挿入しない場合、流速が 10m/s、出口圧力範囲が 0.291-1.097MPa における測定されたサブクール水流動沸騰 CHF を出口サブクール度に対し、各々測定された出口圧力を近傍に付記し図示したものである。

前者のサブクール度に対する CHF の傾向は、第2、第3及び第4領域を含む代表的非線形のサブクール度依存性を示している。ねじりテープを挿入又は挿入しないテスト管の場合の CHF データの各々に相当する出口圧力により異なる(8)式及び(9)式から求まる HI 曲線と出口圧力に依存しない(3)式から求まる HSN 曲線を同図に示した。また、各 HI

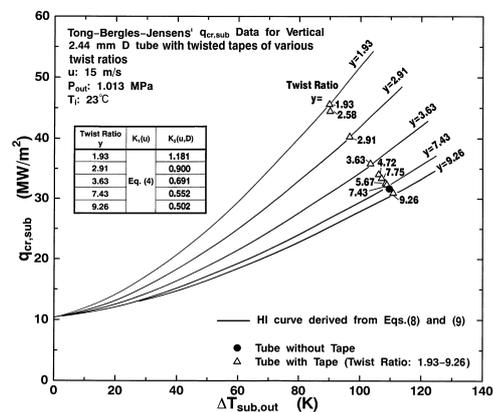


図2 CHF に及ぼすねじり比の影響

曲線及び HSN 曲線における  $K_2$  及び  $K_3$  の値を示す表を図中に示した。

図からわかるように、著しく促進された CHF 値は、明確に第 2、第 3 及び第 4 領域に分離されている。第 2 領域のデータは、管内径と出口圧力に依存する(1)式及び(2)式から求まる相当する HI 曲線と±5%以内で一致した。この HI 曲線に相応する  $K_2$  の値は、平滑管による CHF の相当する HI 曲線に相応する  $K_2$  の値より高い値を示した。また、第 4 領域のデータは、管内径と出口圧力及び L/D 比に依存しない(3)式から求まる HSN 曲線と±5%以内で一致した。この CHF 値の HSN 曲線に相応する  $K_3$  の値は平滑管による CHF 値の HSN 曲線に相応する  $K_3$  の値より高い値を示す。ねじりテープを挿入することによって促進された CHF 値が、平滑管の CHF データと同じ表示式で記述出来ることが明らかに

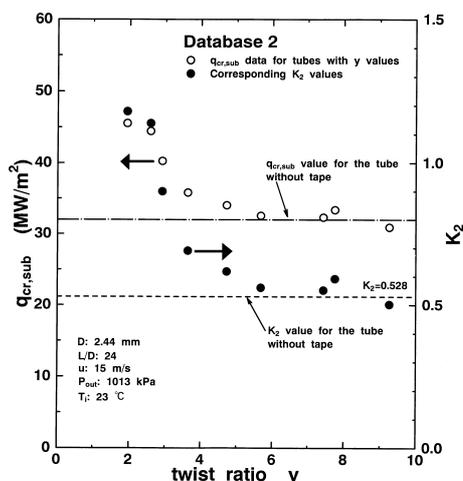


図 3 CHF に及ぼすねじり比の影響

なった。他の条件のデータベースについても同様な結果を得た。第 3 領域の CHF は、HI に基づく第 2 領域の最大となる CHF から、異なる機構の HSN に基づく第 4 領域の最小値への遷移過程で、著しく狭いサブクール度の範囲で起きることがわかった。

データベース(2)では、ねじりテープにより促進されたサブクール水流動沸騰への、ねじり比の影響を考察する CHF データが与えら

れている。

図 2 は 種々のねじり比( 1.93 2.91 2.63 , 7.43 及び 9.26 )のねじりテープをもった一樣加熱管 ( 内径 2.44mm ) を用いて、一定の流速 15m/s , 出口圧力 1.013MPa 及び初期入口水温 23 の条件下で求められたサブクール水流動沸騰 CHF をサブクール度に対する面上に相当するねじり比(y)と共に示したものである。また、各データ点を含む、各 y に相当する HI 曲線の  $K_2$  を与え、式 ( 1 ) 及び(2) から求め、同図に示した。

図 3 は、CHF 及び  $K_2$  に対するねじり比の関係を示したものである。ねじり比が 6 より大きい値では、平滑管を用いて求めた CHF とほとんど差がなく、ねじり比の値が 6 より小さくなると CHF と  $K_2$  が急上昇することがわかる。ねじり比の CHF への影響が、式 (1)及び(2)を用いて良く記述できる。

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 4 件 )

Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda , Sutopo Purwono Fitri, Experimental Study on Thermosyphon for Shipboard High-power Electrics Cooling System, Heat Transfer Engineering , 審査有 , Vol.35 , 2014, 1077-1083.

福田勝哉, 劉 秋生, 未来エネルギーシステムにおける高熱流束除熱に関わる基礎研究 - 除熱限界熱流束について -, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 審査有, 48 巻, 2 号, 2013, 26-33.

Jongdoc Park, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, CHF Phenomena by Photographic Study of Boiling Behavior due to Transient Heat Inputs, Science and Technology of Nuclear Installations, 審査有 , Vol. 2012, 2012, Article ID 248923, doi:10.1155/2012/248923.

Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda , Forced Convection Film Boiling Heat Transfer over a Vertical Cylinder , Heat Transfer Engineering , 審査有 , Vol.32 , 2011, 996-1002.

[ 学会発表 ] ( 計 14 件 )

ミン ハンテツ, 福田勝哉, 劉 秋生, Subcooled pool boiling CHF on horizontal cylinders with different surfaces in a pool of water at pressures due to pre-pressurization

and exponentially increasing heat inputs, 日本機械学会関西支部第89期提示総会講演会講演論文集, No.144-1, 2014年3月18日, 大阪府立大.

李 延涛, 福田勝哉, 劉 秋生, 管内サブクール流動沸騰 CHF に関する実験的研究, 日本機械学会関西支部第89期提示総会講演会講演論文集, No.144-1, 2014年3月18日, 大阪府立大.

Min Han Htet, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Photographic study of subcooled pool boiling CHF for pre-pressurization before each experimental run, the 24th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-24), 2013年11月3日, 山口.

Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Nonlinear characteristics of pool boiling CHF in subcooled water, International Seminar on Subchannel Analysis CFD modeling and verification, CHF experiment and benchmarking (ISACC2013), 2013年8月4日, 西安, 中国.

ミン ハンテツ, 福田勝哉, 劉 秋生, Photographic study of subcooled pool boiling critical heat flux on horizontal cylinders with commercial and rough surfaces, the 21th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-21), 2013年7月31日, 成都, 中国.

Katsuya Fukuda, Akira Sakurai, Prediction for high flow boiling CHF region in the nonlinear CHF's in heated tubes having length to inner diameter ratios with flowing water for outlet subcoolings and pressures, the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-15), 2013年5月16日, ピサ, イタリア.

K. Hata, K. Fukuda, S. Masuzaki and A. Hamura, Computational Study of Twisted Tape Induced Swirl Flow Heat Transfer and Pressure Drop in a Vertical Circular Tube with Various Twisted-Tape Inserts the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-15), 2013年5月14日, ピサ, イタリア.

李 延涛, 福田勝哉, 劉 秋生, 管内におけるサブクール流動沸騰 CHF に関する実験的研究, 日本機械学会関西支部第88期提示総会講演会講演論文集, No.134-1, 2013年3月16日, 大阪工業大.

ミン ハンテツ, 福田勝哉, 劉 秋生, 異なる表面状態の円柱発熱体における定常及び過渡プール沸騰 CHF の写真観察, 日本機械学会関西支部第88期提示総会講演会講演論文集, No.134-1, 2013年3月16日, 大阪工業大.

ミン ハンテツ, 福田勝哉, 劉 秋生, 異なる表面状態の円柱発熱体におけるプール沸

騰 CHF の写真観察, 日本機械学会九州支部第66期講演会講演論文集 No.138-1, 2013年3月13日, 九州産業大.

Yantao Li, Katsuya Fukuda and Qiusheng Liu, Subcooled flow boiling CHF versus outlet subcooling in short tube, Proceedings of 23rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-23), 2012年11月22日, オークランド, ニュージーランド.

Yantao Li, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Steady and transient pool boiling CHF at various pressures in a pool of water, the 4th International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation (ISHTEC2012), 2012年1月7日, 広州, 中国.

Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Akira Sakurai, Subcooled water flow boiling CHF's for flow velocities at outlet pressures in various tubes, the 4th International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation (ISHTEC2012), 2012年1月7日, 広州, 中国.

Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Purwono F. Sutopo, Study on Thermosyphon for Shipboard High Power Electrocs Cooling System, 4th International Symposium on Heat Transfer and Energy Conservation (ISHTEC2012), 2012年1月7日, 広州, 中国.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福田 勝哉 (FUKUDA Katsuya )  
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号: 10127417

### (2) 研究分担者

劉 秋生 (LIU Qiusheng )  
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号: 80294263