

一体型船用炉搭載原子力船の安全性に関する研究

— 熱水力特性に関する知的情報データベース・プログラム —

稲坂富士夫*、成合 英樹**、小林 道幸***、村田 裕幸***、
綾 威雄****

Study on Safety of a Nuclear Ship
having an Integral Marine Water Reactor
—Intelligent Information Database Program
concerned with Thermal-Hydraulic Characteristics—

by

Fujio INASAKA, Hideki NARIAI, Michiyuki KOBAYASHI,
Hiroyuki MURATA and Izuo AYA

Abstract

As a high economical marine reactor with sufficient safety functions, an integrated type marine water reactor has been considered most promising. At the National Maritime Research Institute, a series of the experimental studies on the thermal-hydraulic characteristics of an integrated/passive-safety type marine water reactor such as the flow boiling of a helical-coil type steam generator, natural circulation of primary water under a ship rolling motion and flashing-condensation oscillation phenomena in pool water has been conducted. This current study aims at making use of the safety analysis or evaluation of a future marine water reactor by developing an intelligent information database program concerned with the thermal-hydraulic characteristics of an integral/passive-safety reactor on the basis of the above-mentioned valuable experimental knowledge.

* 東海支所 ** 筑波大学 *** 原子力技術部 **** 大阪支所
原稿受付 平成13年1月26日
審査済み 平成13年7月27日

Since the program was created as a Windows application using the Visual Basic, it is available to the public and can be easily installed in the operating system. Main functions of the program are as follows: (1) steady state flow boiling analysis and determination of stability limit for any helical-coil type once-through steam generator design, (2) analysis and comparison with the flow boiling data, (3) reference and graphic display of the experimental data, (4) indication of the knowledge information such as analysis method and results of the study. The program will be useful for the design of not only the future integrated type marine water reactor but also the small sized water reactor.

目次

1. まえがき
2. データベースに取り入れた研究の概要
 - 2.1. 一体型船用炉内蒸気発生器の不安定流動特性
 - 2.2. 一体型船用炉の一次冷却水自然循環特性
 - 2.3. 格納容器内熱水力挙動
3. データベース・プログラムの構築と階層構造
4. 蒸気発生器の流動沸騰特性データベース
 - 4.1. 任意の流動・設計条件に対する静特性解析と流動安定限界値
 - 4.1.1. 解析モデル
 - 4.1.2. 入力データ
 - 4.1.3. 解析結果
 - 4.2. 実験データの解析と考察
 - 4.3. 静特性データベース検索
 - 4.4. 不安定流動データベース検索
 - 4.5. 解析方法、実験装置などに関する情報
5. 船体横揺れ時における一次冷却水自然循環特性データベース
 - 5.1. 自然循環流量・温度変動特性
 - 5.2. 自然対流熱伝達特性
6. 受動安全型格納容器内熱水力挙動データベース
7. あとがき

参考文献

記号

- | | |
|----------|-----------------------------------|
| B_o | : ボイリング数 ($=q / GH_{fg}$) |
| C_{pl} | : 水の定圧比熱 (J/kgK) |
| D | : コイル管内径 (m) |
| D_c | : コイル管巻き径 (m) |
| G | : 二次冷却水質量速度 (kg/m ² s) |
| g | : 重力加速度 (m/s ²) |
| H | : エンタルピー (J/kg) |
| H_{fg} | : 蒸発潜熱 (J/kg) |
| h | : 熱伝達率 (W/m ² K) |
| K | : 式(19)で定義されるパラメータ |

- | | |
|--------------|---------------------------------|
| K_i | : 入口絞り係数 |
| m | : 式(25)で定義される定数 |
| Nu | : ヌセルト数 ($=hD / \kappa$) |
| P | : 圧力 (Pa) |
| P_{cr} | : 臨界圧力 (Pa) |
| Pr | : プラントル数 ($=C_p\mu / \kappa$) |
| ΔP | : 圧力損失 (Pa) |
| q | : 熱流束 (W/m ²) |
| Re | : レイノルズ数 ($=GD / \mu$) |
| Re_C | : 式(17)で定義される
臨界レイノルズ数 |
| Re_q | : 式(3)で定義される定数 |
| Re_{TP} | : 式(28)で定義される定数 |
| Re_σ | : 式(2)で定義される定数 |
| R_{IN} | : 伝熱管内半径 (m) |
| R_{OUT} | : 伝熱管外半径 (m) |
| T | : 温度(°C) |
| x | : クオリティ |
| x_{eq} | : 熱平衡クオリティ |
| X_{tt} | : 式(26)で定義されるマルチネリ・
パラメータ |
| Y | : 式(45)で定義される定数 |
| Z | : 伝熱管入口からの位置 (m) |
| ΔZ | : 伝熱管の区間 (m) |
| α | : ボイド率 |
| γ | : 式(18)で定義されるパラメータ |
| ζ | : 式(33)で定義される定数 |
| θ | : ヘイカルコイル管の巻上げ角 (度) |
| κ | : 熱伝導率 (W/mK) |
| λ | : 管摩擦係数 |
| μ | : 粘性係数 (Pa·s) |
| ρ | : 密度 (kg/m ³) |
| σ | : 表面張力 (N/m) |
| Φ_{ltt} | : 水単相流の二相増倍係数 |
| Φ_{gtt} | : 蒸気単相流の二相増倍係数 |

添え字

<i>ACC</i>	: 加速項
<i>C</i>	: コイル管
<i>DRY</i>	: ドライアウト
<i>DSP</i>	: 熱流束のボイド率への影響が 消滅する位置
<i>FCE</i>	: 強制対流蒸発
<i>f</i>	: 飽和
<i>H</i>	: ヘッド
<i>g</i>	: 蒸気
<i>L0</i>	: 単相流 (飽和水のみ)
<i>l</i>	: 水
<i>NVG</i>	: 正味蒸気発生開始
<i>ONB</i>	: 核沸騰開始
<i>PD</i>	: ポスト・ドライアウト
<i>S</i>	: 直管
<i>SAT</i>	: 飽和
<i>SP</i>	: 単相流
<i>STB0</i>	: 飽和沸騰開始
<i>TP</i>	: 二相流
<i>V</i>	: 入口バルブ部
<i>1</i>	: 一次側
<i>2</i>	: 二次側

1. まえがき

一体型加圧水炉は、原子力第1船「むつ」後の経済性、安全性に富んだ軽量小型の次期船用炉として有望視されており、海上技術安全研究所(海技研)では、1971年以来、一体型船用炉用の蒸気発生器や船体横揺れ時における一次冷却水自然循環などの熱水力特性に関する一連の実験的研究を実施してきた。一方、日本原子力研究所でも、我国が定めた原子力船の開発研究に関する基本計画に従い、原子力船「むつ」の開発によって得られた基礎的技術基盤を基に、改良船用炉の研究開発を進めている^{1), 2)}。

本研究は、海技研が蓄積してきたこれらの貴重な一体型船用炉に関する実験データならびに知見情報を基本とし、さらに本研究と並行して進められた2つの中項目、「脈動流が船用炉の熱水力特性に及ぼす影響の研究」と「受動安全型船用炉の事故時の格納容器内熱水力挙動の研究」に関する新たな知見情報を加えることにより、次世代船用炉の熱水力特性に関する知的情報データベース・プログラムを構築し、日本原子力研究所が開発を進めている改良船用炉を含め次世代船用炉や将来の小型軽水炉の安全解

析・評価、設計に役立てることを目的とする。

本研究のデータベース源は、実験データはもちろんのこと、実験装置や計測法、解析手段、解析結果、およびそれらを通して得られた知見など、研究成果に係わる情報である。これまでは、このような研究成果は、単なる論文や報告書などの形で残されることが多かったが、今後は、データベース・システムとして有効活用を図ることが重要になってくると思われる。本研究では、研究成果の有効活用という面から、プログラム開発言語としてVisual Basicを選択し、研究成果に係わる知見情報を知的情報データベース・プログラムとして構築することにより、Windowsアプリケーションとして広く利用されることを図った。

2. データベースに取り入れた研究の概要

2.1 一体型船用炉内蒸気発生器の不安定

流動特性^{3)~9)}

一体型船用炉は、蒸気発生器(SG)の圧力容器内への内装化、自己加圧方式または加圧器の内装化の採用、主冷却水循環ポンプの圧力容器への直接取り付けなど、炉の軽量小型化および経済性・安全性の高度化を目的としたものである。SG内装化のため、SGはヘリカルコイル式貫流型となっており、高温高压の過熱蒸気を得るため比較的長い蒸発管を有しているが、負荷が減少して過熱部が長くなるとしばしば不安定流動現象を起こすことが知られている。しかしながら、原子力船においては、出入港等操船の要求から広い負荷範囲にわたり安定した蒸気供給が必要となるが、このような条件に対する蒸発管の不安定流動のメカニズムは、十分に明らかにされておらず、その解明が重要な課題となっている。実験に使用した一体型船用炉模擬装置は、日本造船研究協会の概念設計¹⁰⁾に合わせて製作され、伝熱や圧力損失などに関する静特性データ、密度波振動型の不安定流動に及ぼす各種パラメータの影響を調べるための動特性データなど、ほぼ実機スケールに近いものが得られ、静特性解析、不安定流動解析が為された。

2.2 一体型船用炉の一次冷却水自然循環

特性^{11)~15)}

次世代船用炉においては、受動安全性の概念から、事故などで原子炉が停止しても長時間にわたって放出される崩壊熱を一次冷却水の自然循環により除去する方法が取られている。し

かしながら、原子力船の場合の自然循環特性は、炉の動揺や傾斜（浸水、座礁、沈没時）によって大きく影響を受け、各ループの自然循環流量のアンバランスや脈動を引き起こすものと考えられる。

本研究は、船用炉の横揺れ時における一次冷却水の自然循環特性や熱伝達特性を明らかにすることを目的としている。実験は、日本造船研究協会で概念設計¹⁰⁾されたものを高さ方向は実寸大で、断面積は熱出力の比に合わせて縮小した模擬装置を動揺台に搭載し、横揺れ角度、横揺れ周期、ヒーター出力をパラメータとして実施された。

2.3 格納容器内熱水力挙動^{16)~21)}

次世代炉の安全性向上のひとつとして、圧力容器・配管系の漏洩・破断事故時に放出される高温高压飽和水を水張りした格納容器内のプール水によって冷却するという受動的安全の概念が提案されている。また、プール水は二次遮蔽材としても利用することができ、プラントの重量を軽減できるという点で船用炉としてのメリットも大きい。高温高压飽和水が低压のプール水中に放出されると、この一部がフラッシングして蒸気となるが、その蒸気はプール水によって急激に凝縮されることになる。このようなフラッシング、あるいは凝縮といった個々の現象については、これまでに多くの研究が為され、そのメカニズムもほぼ解明されている。しかしながら、この2つの現象が重なって同時進行するフラッシング・蒸気凝縮振動現象に関するメカニズムについては、殆ど明らかにされておらず、水張り式格納容器型原子炉の開発において重要な課題となっている。本研究は、高温・高压水がプール水中に放出された時のフラッシング・蒸気凝縮振動現象の基本的メカニズムを明らかにすることを目的として実施された。

3. データベース・プログラムの構築と階層構造

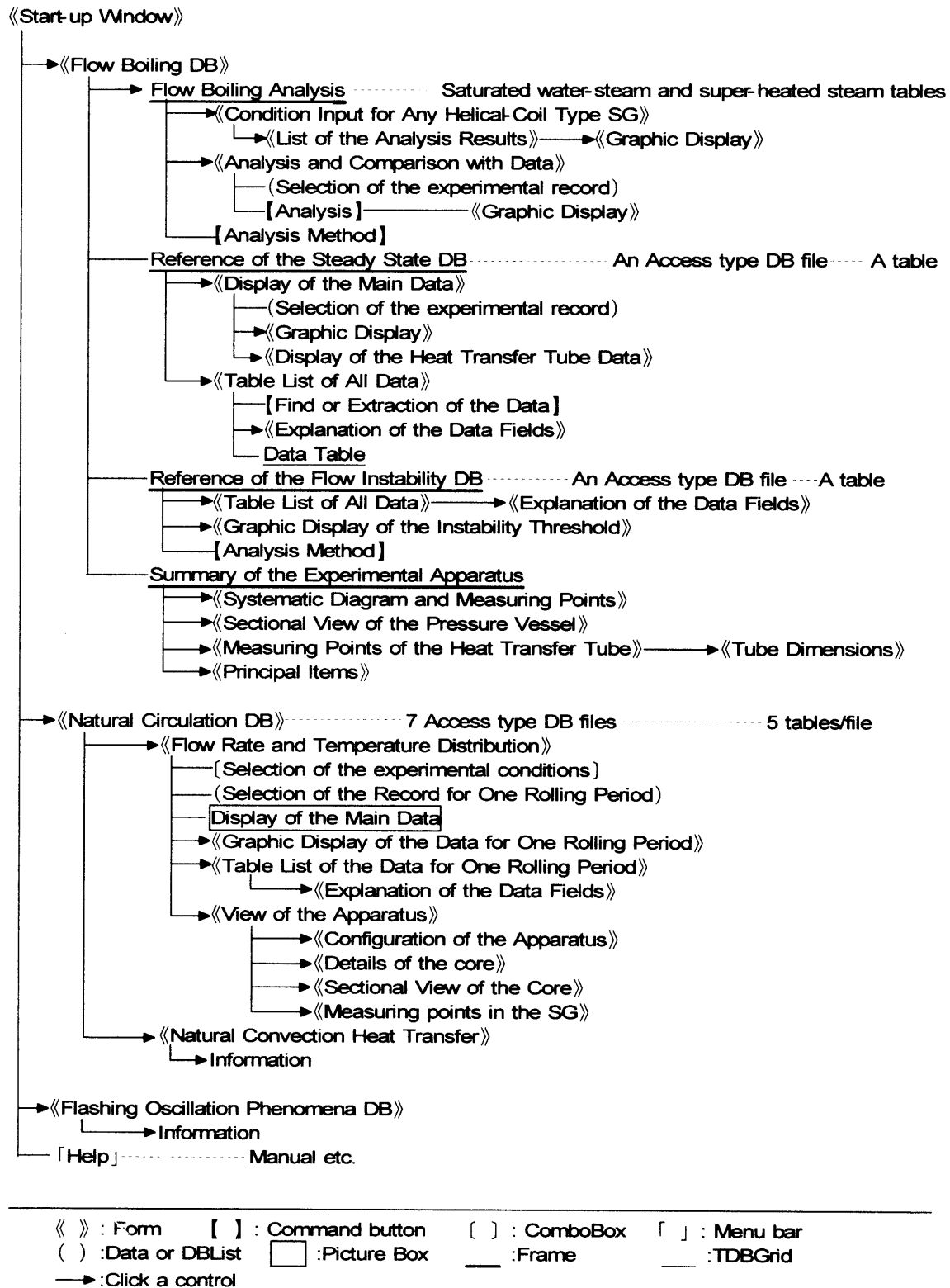
データベース (DB) の構築やデータの知的情報処理に関しては、DB を構築するためのプログラミング技術²²⁾、あるいは認知工学や知識工学を基礎とする知的情報処理²³⁾に見られるように、最近の計算機技術の発達に伴って著しい進歩が見られる。しかしながら本研究では、DB の作成に当たっては、推論や意思決定などの手法は必要なく、解析機能などの研究成果に係わる知見情報を盛り込むことと、その利用の汎用

性を考慮し、プログラム開発言語として Visual Basic を選択し、DB を Windows アプリケーション・プログラムとして構築した。

図-1 に、本プログラムの階層構造と主な機能の概略を示す。図に示したように、プログラムは大きく分けて4つの部分から構成されている。1つ目は、海技研がこれまでに蓄積してきた一体型船用炉内 SG の流動沸騰特性に関する DB (Flow Boiling DB)、2、3番目は、本研究項目と並行して進められた自然循環特性 (Natural Circulation DB) とフラッシング・凝縮振動特性 (Flashing Oscillation Phenomena DB) に関する DB である。ただし自然循環特性 DB 内には、1982 年から 1988 年にかけて実施された自然循環特性に関する実験データおよび知見情報 (Flow Rate and Temperature Distribution) も含まれている。4つ目は、本研究の目的、本プログラムの概要、使用マニュアルなどが盛り込まれたヘルプ機能 (Help) である。各画面における操作マニュアルは、各画面のメニューバーにヘルプ機能として盛り込まれている。

流動沸騰特性 DB は、流動沸騰静特性解析 (Flow Boiling Analysis)、静特性実験データの検索 (Reference of the Steady State DB)、不安定流動実験データの検索 (Reference of the Flow Instability DB)、および実験装置などの概要表示 (Summary of the Experimental Apparatus) の各機能を持っている。解析機能には、SG の任意の設計・流動条件に対する解析、ならびに実験データの解析と比較の2つがあり、それぞれ飽和水-蒸気表および過熱蒸気表プログラムを呼び出し、各物性値が求められるようになっている。データ検索機能は、静特性あるいは不安定流動特性の実験データが収められた Access 形式のデータベース・ファイルとそれぞれリンクさせることにより可能になっているが、直接 Access から本データベース・ファイルを読み込み、データ検索などを行うこともできる。

自然循環特性 DB は、船体横揺れに伴う一次水の流量や温度変動特性 (Flow Rate and Temperature Distribution)、および炉心の自然対流熱伝達特性 (Natural Convection Heat Transfer) に関する情報から構成されている。流量/温度変動特性 DB 部分には、7つの Access 形式のデータベース・ファイルとのリンクによるデータ検索機能、および実験装置や計測点などに関する情報表示機能が含まれている。また熱伝達特性 DB 部分には、文献 15) に基づ



図－1 プログラムの階層構造

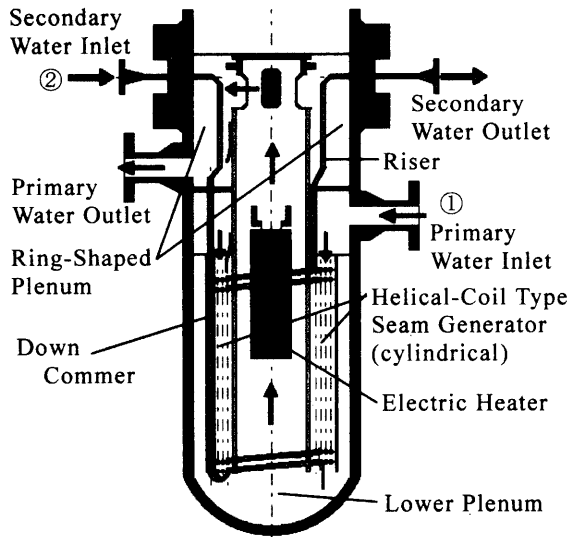


図-2 一体型船用炉模擬装置圧力容器

フラッシング・凝縮振動 DB は、文献 20)、21)を基本に、研究の目的や実験装置、実験結果、解析方法、解析結果などに関する知見情報がテキスト・スタイルで取り込まれている。

プログラムの現バージョンのディストリビューション・ウィザードによる配布ファイルのサイズは、以下のとおりになっており、CD-R やフロッピー・ディスクで配布できるようになっているが、近いうちに海技研のホームページからもプログラムの紹介やダウンロードができるようにする予定である。

・Read-JP.doc	:インストール法 (日本語)	31 kbytes
・Read-EN.doc	:インストール法 (英語)	33 kbytes
・Setup.exe	:セットアップ実行 ファイル	140 kbytes
・Ana-DPSG.CAB	:キャビネット パッケージ	10,057 kbytes
・SETUP.LST	:情報ファイル	13 kbytes

4. 蒸気発生器の流動沸騰特性データベース

4.1 任意の流動・設計条件に対する静特性 解析と流動安定限界値

4.1.1 解析モデル

図-2 に解析対象とするヘリカルコイル式貫流型 SG を内装した一体型船用炉の例として、実験に使用した一体型船用炉模擬装置の圧力容器断面図を示す。一次冷却水は、循環ボ

ンプで昇圧された後、図の①から圧力容器に入り、円筒状の SG 部胴側を上から下へと流れる間に二次系配管内の冷却水と熱交換を行ってから底部のプレナムを通り、炉心を模擬した電気ヒーターで加熱されて上昇し、内部円筒外側の環状プレナムから圧力容器外へと流れる。本装置では、二次系配管（伝熱管）は4本となっており、管内を流れる二次冷却水は図の②から圧力容器内に入り、ダウンコマーを下り、SG 内を下からコイル状に上がり、ライザーを経て通常は過熱蒸気となって圧力容器外へ出て行く。またダウンコマーは、本装置では一次冷却水との伝熱量を小さくするために二重管になっている。

このようなヘリカルコイル伝熱管内を流れる二次冷却水の流動沸騰解析モデルを図-3 に示した。図中、 Z_{ONB} は核沸騰開始位置、 Z_{NVG} は正味蒸気発生開始位置、 Z_{STBO} は飽和沸騰開始位置、 Z_{DRY} は壁面に沿う液膜が消滅するドライアウト点、 Z_{SHO} は過熱蒸気となり始める位置をそれぞれ示している。流動様式は、管入口から Z_{ONB} までは水単相流、 Z_{ONB} から Z_{NVG} までは気泡が加熱面に付着して流れる気泡付着流、 Z_{FCEO} までは気泡またはスラグ流、 Z_{DRY} までは環状または環状噴霧流、 Z_{SHO} までは噴霧流、 Z_{SHO} からは蒸気単相流である。 Z_{FCEO} 点は、流動様式が環状流に変わる点で、伝熱様式も壁面に沿う液膜を通しての対流熱伝達による気液界面での蒸発熱伝達様式になる。 Z_{ONB} から Z_{FCEO} までの核沸騰領域のうち、領域 1、2 は液主流の温度が飽和温度に達していないサブクール沸騰領域である。気泡付着領域 1 は、実質的にボイド率はゼロとみなせるので、本解析では水単相流とし、正味蒸気発生開始位置 Z_{NVG} 点からボイド率は上昇し始めるものとした。

(1) 正味蒸気発生開始位置 Z_{NVG}

本解析では、実質的にボイド率が上昇し始める点 Z_{NVG} の熱平衡クオリティ $x_{eq,NVG}$ は、次の Miropolskii²⁴⁾ の式によって求めた。

$$x_{eq,NVG} = -0.49 \text{Re}_\sigma^{-0.3} \text{Re}_q^{0.7} \left[\frac{P}{P_{Cr}} \right]^{0.15} \quad (1)$$

$$\text{Re}_\sigma = \frac{G}{\mu_l} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (2)$$

$$\text{Re}_q = \frac{q}{H_{fg} \mu_l} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (3)$$

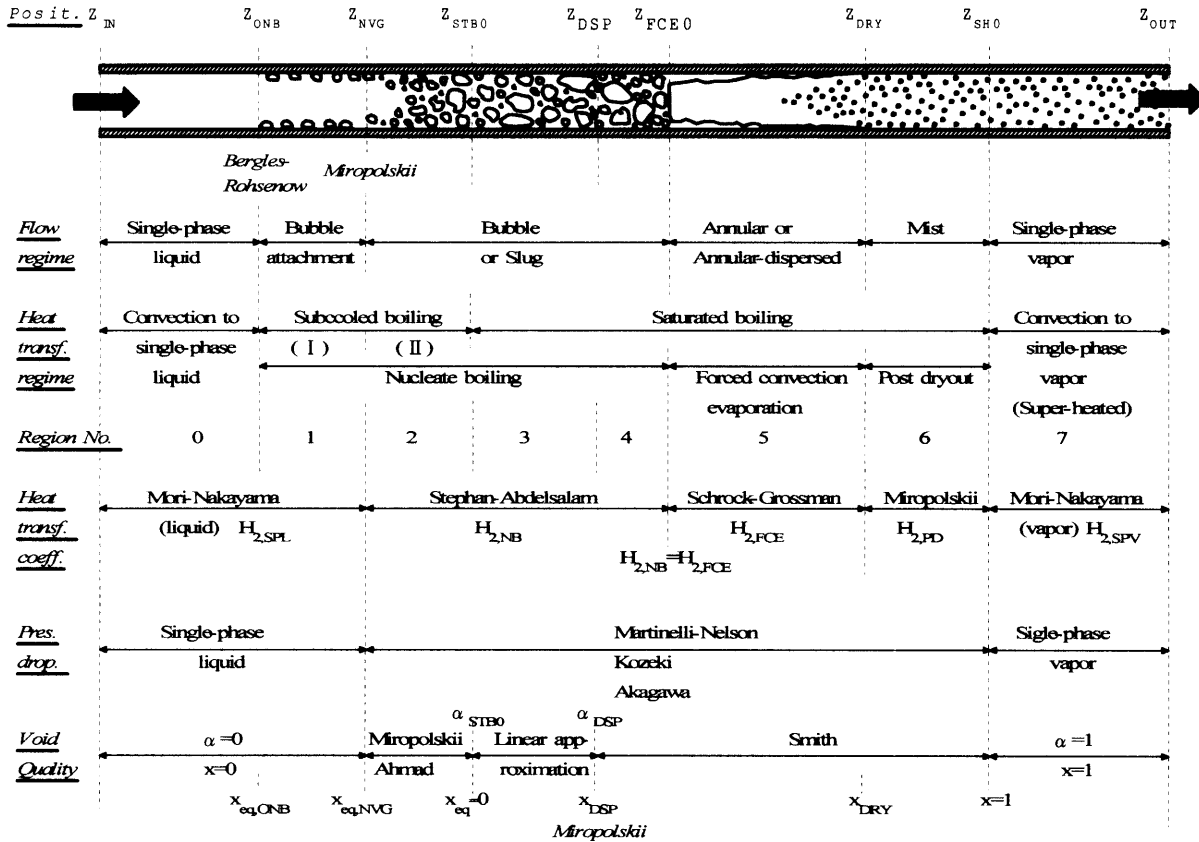


図-3 ヘリカルコイル管流動沸騰解析モデル

ここで、 P は圧力、 P_{cr} は臨界圧力、 G は質量速度、 μ_l は水の粘性係数、 σ は表面張力、 g は重力加速度、 ρ_l 、 ρ_g はそれぞれ水と蒸気の密度、 q は壁面熱流束、 H_{fg} は蒸発潜熱を示す。また、流体の熱平衡クオリティ x_{eq} は次式で定義され、飽和沸騰未満では負の値となる。

$$x_{eq} = \frac{H_l - H_f}{H_{fg}} \quad (4)$$

ここで、 H_l は流体のエンタルピー、 H_f は飽和エンタルピーである。

ちなみに、このような流動特性変化を表す他の相関式には、核沸騰開始位置として Bergles-Rohsenow²⁵⁾の式、気泡離脱開始位置として Levy²⁶⁾の式、正味蒸気発生開始位置として Ahmad²⁷⁾の式などがあるが、本解析対象のように比較的流速が小さく、サブクール沸騰領域も全体の長さに比べて極めて短い貫流型SGの伝熱管に対しては、上式の違いによる水

単相流域の長さ、圧力損失、管内壁面熱流束などへの影響の違いはほとんど無かった。

(2) クオリティとボイド率

● 領域2 (サブクール沸騰II)

飽和沸騰開始位置までのクオリティ x は、熱平衡クオリティ x_{eq} を用い、次の Ahmad²⁷⁾の式によって定められ、

$$x = \frac{x_{eq} - x_{eq,NVG} \exp\left(\frac{x_{eq}}{x_{eq,NVG}} - 1\right)}{1 - x_{eq,NVG} \exp\left(\frac{x_{eq}}{x_{eq,NVG}} - 1\right)} \quad (5)$$

また、ボイド率 α は Moropolskii²⁴⁾の式によって決められる。

$$\alpha = 0.43 \text{Re}_\sigma^{-0.15} \text{Re}_q^{0.35} (P/P_{cr})^{-0.225} \times \left(1 - \frac{x_{eq}}{x_{eq,NVG}}\right)^{1.35} \quad (6)$$

• 領域 3

熱流束のボイド率への影響がなくなる点のクオリティ x_{DSP} は、次の Miropolskii²⁴⁾ の式で与えられるが、その位置 Z_{DSP} は、熱平衡クオリティ x_{eq} が x_{DSP} と等しくなる点として求められる。

$$x_{DSP} = \left\{ 1 + \frac{\rho_l}{\rho_g} \left[0.3 \left(\frac{q}{GH_{fg}} \right)^{-0.2} - 1 \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

その時、領域 3 のクオリティとボイド率は、この間を次のように線形近似することによって定めることとする。

$$x = x_{STB0} + x_{eq} (x_{DSP} - x_{STB0}) / x_{DSP} \quad (8)$$

$$\alpha = \alpha_{STB0} + x (\alpha_{DSP} - \alpha_{STB0}) / x_{DSP} \quad (9)$$

ここで、 x_{STB0} と α_{STB0} は、それぞれ Z_{STB0} におけるクオリティとボイド率を示す。

• 領域 4 ～ 6

本領域においては、クオリティ x は熱平衡クオリティ x_{eq} と等しくなる。またボイド率 α は次の Smith²⁸⁾ の式で与えられる。

$$\alpha = \left\{ 1 + \frac{\rho_g}{\rho_l} \psi \left(\frac{1}{x} - 1 \right) + \frac{\rho_g}{\rho_l} (1 - \psi) \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \times \left[\frac{\frac{\rho_l}{\rho_g} + \psi \left(\frac{1}{x} - 1 \right)}{1 + \psi \left(\frac{1}{x} - 1 \right)} \right]^{0.5} \right\}^{-1} \quad (10)$$

ここで、 ψ は円管に対する定数で 0.4 である。

• ドライアウト・クオリティ x_{DRY}

位置 Z_{DRY} の下流では、加熱面に沿う液膜が消滅（ドライアウト）し、熱伝達率が急激に減少する、いわゆるポスト・ドライアウト領域となるが、ドライアウト・クオリティ x_{DRY}

は、飽和沸騰領域の長さにも影響を与える。本解析では、かなりバラツキがあったが、実験と解析によって求められる飽和沸騰長さの誤差がなるべく小さくなるような x_{DRY} を、次式のように新たにボイリング数 Bo の関数として導いた。

$$x_{DRY} = 0.333 \times 10^4 Bo + 0.667 \quad (11)$$

if $x_{DRY} > 1$ then $x_{DRY} = 1$.

(3) 圧力損失

単相流部においては、重力項と摩擦損失を、二相流部においては、さらに加速損失を考慮した。また、二相流部の摩擦損失が断熱二相流から導き出された相関式に対しては、さらに加熱による影響を加えている。

• 単相流摩擦損失 ΔP_{SP} (領域 0、1、7)

区間 ΔZ に対する単相流摩擦損失 ΔP_{SP} は、次式で与えられる。

$$\Delta P_{SP} = \lambda_C \frac{\Delta Z}{2D} \frac{G^2}{\rho} \quad (12)$$

ここで、 D 、 λ_C はそれぞれコイル管の内径と摩擦係数で、 λ_C は次の Ito²⁹⁾ の式で与えた。

$$\lambda_C = 64 \text{Re}^{-1} \quad \text{for } K \leq 13.5 \quad (13)$$

$$\lambda_C = \frac{1376 \gamma^{0.5}}{(1.56 + \log_{10} K)^{5.73}} \quad \text{for } 13.5 < K \leq 2000 \quad (14)$$

$$\lambda_C = 0.1008 \times 64 \text{Re}^{-1} K^{0.5} (1 + 3.945 K^{-0.5} + 7.782 K^{-1} + 9.097 K^{-1.5} + \dots) \quad \text{for } 2000 < K \leq \text{Re}_C \quad (15)$$

$$\lambda_C = \lambda_S (\text{Re} \gamma^2)^{0.05} \quad \text{for } K > \text{Re}_C \quad (16)$$

where

$$\text{Re}_C = 2 \gamma^{0.32} \times 10^4 \quad \text{for } 15 < \gamma^{-1} < 860 \quad (17)$$

$$\gamma = D/D_C \quad (18)$$

$$K = \text{Re} \gamma^{0.5} \quad (19)$$

ここで、 Re 、 Re_C はそれぞれレイノルズ数および臨界レイノルズ数を、 λ_S は直管の摩擦係数、 D_C はコイル管の巻き径を表す。

• 二相流摩擦損失 ΔP_{TP} (領域 2 ～ 6)

本解析では、以下の 3 つの各相関式を適用し、比較してみた。

• Martinelli-Nelson³⁰⁾ (M-N) 式

本相関式は、Lockhart-Martinelli³¹⁾ の整理方法を管長に沿って一様な加熱を受

ける蒸発管に拡張したものであり、次式で与えられる。

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{Lo}} = (1-x)^{1.75} \Phi_{lt}^2 = R \quad (20)$$

ここで、 ΔP_{TP} 、 ΔP_{Lo} はそれぞれ二相流および単相流(飽和水成分のみが管を満たして流れる時)に対する摩擦損失、 Φ_{lt} は流れが気液とも乱流(本実験範囲)で、液相成分だけの二相流に対する摩擦損失増倍係数(二相増倍係数)を表す。式(20)の関係 R は、図で与えられているが、本解析では数値表として与えた。また、 ΔP_{Lo} はコイル管の摩擦係数を用いて計算される。

・ 修正 Kozeki 式

Nariai ら⁶⁾は、加熱蒸発コイル管に対する Kozeki の二相流実験データ³²⁾を基に、式(20)中の Φ_{lt} と与える修正式として、任意の圧力 P (単位: MPa) に対する値 $\Phi_{lt}(P)$ を次のように与えた。本式は、圧力 1.1 MPa と臨界圧力 P_{cr} (MPa) との間を対数の形で内挿するようになっている。

$$\ln \Phi_{lt}(P) = \ln \Phi_{lt}(1.1) - \ln \left[\frac{\Phi_{lt}(1.1)}{\Phi_{lt}(P_{cr})} \right] \frac{(P-1.1)}{(P_{cr}-1.1)} \quad (21)$$

$$\Phi_{lt}(1.1) = \frac{\Phi_{gt}(1.1)}{X_{tt}^{0.875}} \quad (22)$$

$$\Phi_{lt}(P_{cr}) = \left[(1-x)^{0.875} \right]^{-1} \quad (23)$$

$$\Phi_{gt}(1.1) = 0.895 + (X_{tt} + 0.076)^{0.857} + 1.21 \times 10^m \quad (24)$$

$$m = -0.334 (\log_{10} X_{tt} + 0.668)^2 \quad (25)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.571} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.143} \left(\frac{1-x}{x} \right) \quad (26)$$

ここで、 Φ_{gt} は蒸気単相流の二相増倍係数、 X_{tt} はマルチネリ・パラメータである。

・ 修正 Akagawa³³⁾式

$$\frac{\Delta P_{TP,C}}{\Delta P_{TP,S}} = \frac{1+144 \gamma^{1.61}}{\text{Re}_{TP}^{1.4\gamma}} \quad (27)$$

$$\text{Re}_{TP} = \frac{G(1-x)D}{(1-\alpha)\mu_l} \quad (28)$$

ここで、 $\Delta P_{TP,C}$ 、 $\Delta P_{TP,S}$ は、それぞれコイル管および直管に対する摩擦損失を示しているが、

式(27)は断熱二相流のコイル管に対して導かれたものであるので、Tarasova³⁴⁾が提案した次の加熱要素をさらに加える。

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{TP,C}} = \left[1 + 4.4 \times 10^{-3} \left(\frac{q}{G} \right)^{0.7} \right] \quad (29)$$

加速損失 ΔP_{ACC} (領域 2 ~ 6)

位置 Z_1 から Z_2 の区間 ΔZ における加速損失 ΔP_{ACC} は、次式で求められる。

$$\Delta P_{ACC} = G^2 \left\{ \left(\frac{x_{Z2}^2}{\alpha_{Z2}} - \frac{x_{Z1}^2}{\alpha_{Z1}} \right) \frac{1}{\rho_g} + \left[\frac{(1-x_{Z2})^2}{1-\alpha_{Z2}} - \frac{(1-x_{Z1})^2}{1-\alpha_{Z1}} \right] \frac{1}{\rho_l} \right\} \quad (30)$$

重力項 ΔP_H (領域 0 ~ 7)

$$\Delta P_H = [\rho_g \alpha + (1-\alpha)\rho_l] g \Delta Z \sin \theta \quad (31)$$

ここで、 θ はコイル管の巻上げ角を示す。

(4) 管内壁面熱伝達率

水および蒸気単相流の熱伝達率は、それぞれ Mori-Nakayama³⁵⁾が与えた曲がり管に対する次式(32)~(35)を適用した。

水単相対流熱伝達 (領域 0、1)

$$\text{Nu} = \frac{0.864}{\zeta} K^{0.5} (1 + 2.35K^{-0.5}) \quad \text{for } \text{Re} \leq 2 \times 10^4 \gamma^{0.32} \quad (32)$$

$$\zeta = \frac{2}{11} \left[1 + \left(1 + \frac{77}{4 \text{Pr}^2} \right)^{0.5} \right] \quad (33)$$

$$\text{Nu} = \frac{\text{Pr}^{0.4}}{41} \text{Re}^{5/6} \gamma^{1/12} \left[1 + \frac{0.061}{(\text{Re} \gamma^{2.5})^{1/6}} \right] \quad \text{for } \text{Re} > 2 \times 10^4 \gamma^{0.32} \quad (34)$$

ここで、 Nu 、 Pr はそれぞれヌセルト数、プラントル数を示す。

蒸気単相対流熱伝達 (領域 7)

Eqs. (32) and (33) for $Re \leq 2 \times 10^4 \gamma^{0.32}$

$$Nu = \frac{Pr}{26.2 \left(Pr^{2/3} - 0.074 \right)} Re^{4/5} \gamma^{1/10} \left[1 + \frac{0.098}{(Re \gamma^2)^{1/5}} \right] \quad (35)$$

for $Re > 2 \times 10^4 \gamma^{0.32}$

核沸騰熱伝達（領域 2～4）

本領域に対しては数多くの無次元整理式が公表されているが、本解析では比較的最近提案された広範囲圧力に対する Stephan-Abdelsalam³⁶⁾の式を適用した。

$$Nu = 0.246 \times 10^7 X_1^{0.673} X_3^{1.26} X_4^{-1.58} X_{13}^{5.22} \quad (36)$$

$$X_1 = \frac{q D_B}{\kappa_l T_{SAT}} \quad (37)$$

$$X_3 = \frac{C_{pl} \times 10^{-3} D_B^2 T_{SAT}}{\left[\kappa_l / (\rho_l C_{pl}) \right]^2} \quad (38)$$

$$X_4 = \frac{H_{fg} \times 10^{-3} D_B^2}{\left[\kappa_l / (\rho_l C_{pl}) \right]^2} \quad (39)$$

$$X_{13} = \frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l} \quad (40)$$

$$D_B = 0.146 \times 45 \left(\frac{2\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right)^{0.5} \quad (41)$$

ここで、 κ_l 、 C_{pl} はそれぞれ水の熱伝導率と定圧比熱、 T_{SAT} は飽和温度を示す。

強制対流蒸発熱伝達（領域 5）

次の Schrock-Grossman³⁷⁾の式を適用した。

$$h_{2,FCE} = 170 \frac{\kappa_l}{D} Re^{0.8} Pr^{1/3} \left[Bo + 1.5 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{X_u} \right)^{2/3} \right] \quad (42)$$

$$\frac{1}{X_u} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.1} \quad (43)$$

ここで、 h_2 は管内壁面熱伝達率を示す。

ポスト・ドライアウト域（領域 6）

次の Miropolskii²⁴⁾の式を用いた。

(158)

$$h_{2,PD} = 0.023 \frac{\kappa_g}{D} \left\{ \frac{GD}{\mu_g} \left[x + (1-x) \frac{\rho_g}{\rho_l} \right] \right\}^{0.8} Pr_g^{0.4} Y \quad (44)$$

$$Y = 1 - 0.1 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} - 1 \right)^{0.4} (1-x)^{0.4} \quad (45)$$

(4) 管内壁面熱流束

内壁面熱流束 q は、次の熱伝導式を解くことによって求められる。

$$q = \frac{U(T_1 - T_2)}{\pi D} \quad (46)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{h_1 R_{OUT}} + \frac{1}{\kappa_c} \ln \left(\frac{R_{OUT}}{R_{IN}} \right) + \frac{1}{h_2 R_{IN}} \right] \quad (47)$$

ここで、 T_1 、 T_2 はそれぞれ一次水、二次水の温度、 h_1 、 h_2 はコイル管外壁面と内壁面における熱伝達率、 R_{OUT} と R_{IN} はコイル管の外半径と内半径、 κ_c はコイル管の熱伝導率である。また、 h_1 としては小林ら^{7), 8)}によって得られたコイル管に対する $6,395 \text{ W/m}^2\text{K}$ の値が用いられている。

(5) 解析手順

数値解析は、コイル管入口から 10 mm 刻みに、式(46)、(47)を解くことにより管内壁面熱流束を求め、一次水、二次水のエンタルピー変動を算出し、二次水のエンタルピー値から流動／伝熱様式などを判定し、各相関式を適用することを基本としている。

(6) 流動安定限界値

小林ら^{7), 8)}は、不安定流動が発生したときの実験データを、二相流部長さ L_{ev} と式(48)で定義される入口絞り係数 K_i の2つのパラメータで整理することにより、図-4に示すような安定限界境界図を求めた。図中、横軸の二相流部長さは、蒸発管全長で除して無次元化してある。図に示すように、一般に入口絞り係数を大きくすれば安定領域は広がるが、本解析では、図-4の関係をを用い、求めた二相流部長さから入口絞り係数の安定下限値を計算するようになっている。

$$K_i = \frac{\Delta P_V}{\left(G_2 / 2\rho_l \right)} \quad (48)$$

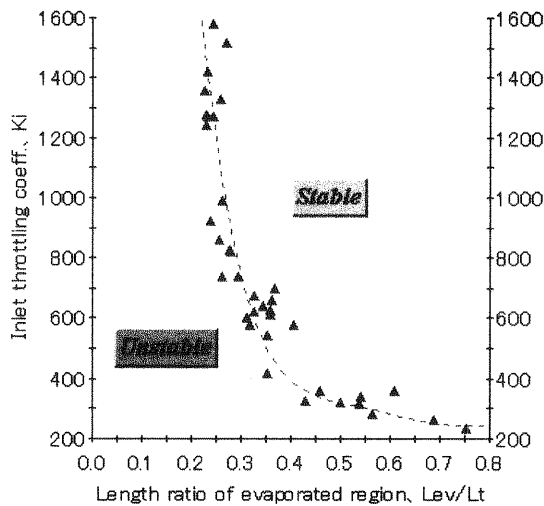


図-4 流動安定限界境界図(その1)

ここで、 ΔP_v は入口バルブ部の圧力損失である。

4. 1. 2 入力データ

図-5に、本プログラムで表示されるデータ入力画面を示した。入力データは、以下の13点である。

流動条件

- 一次冷却水 SG 入口温度 (°C)
- 一次冷却水 SG 入口圧力 (ata)
- 一次冷却水 SG 入口流量 (kg/h)
- 二次冷却水 SG 入口温度 (°C)
- 二次冷却水 SG 入口圧力 (ata)
- 二次冷却水 SG 入口流量 (kg/h·tube)

設計条件

- ヘリカルコイル巻き径 (m)
- コイル管巻上げ角 (度)
- コイル管内径 (mm)
- コイル管外径 (mm)
- コイル管長 (m)
- コイル管熱伝導率 (W/mK)
- コイル管本数

通常二次系ループは、ダウンカマー、ライザーを有しているが、設計条件の違いにより両者の圧力損失や交換熱量は、それぞれ固有の値を持つものと考えられるので、本解析ではこの部分での熱交換はないものと仮定し、コイル管の入口から出口を解析対象とした。二相流部の摩擦損失は、上述した M-N 式、修正 Kozeki 式、修正 Akagawa 式による3つの圧力損失の結果

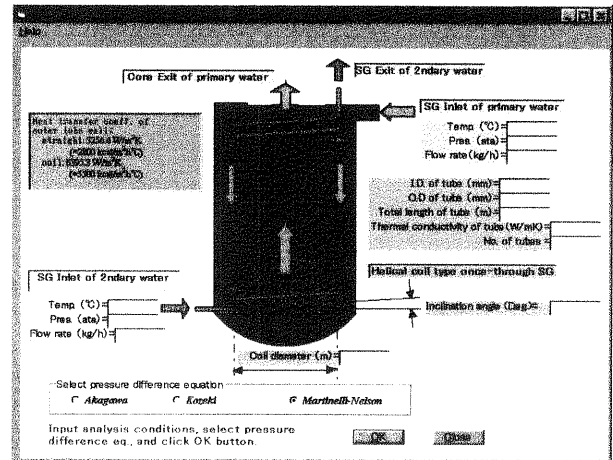


図-5 SGの任意の設計・流動条件入力画面

がそれぞれリストされるようになっているが、入口絞り係数の流動安定下限値を求めるのに必要な二相流部長さを決定するために、3つの式のいずれかを選択するようになっている。二次冷却水の流量入力、単管当たりとなっており、伝熱管の本数を n とすると、単管当たりに伝わる熱量の n 倍が一次側から取られるものとして

4. 1. 3 解析結果

図-6に、日本原子力研究所で工学設計を行った大型船舶用原子炉 MRX (Marine Reactor X) ²⁾ のヘリカルコイル式貫流型 SG に対する解析結果を示す。本 SG の設計では、388本の伝熱管が2系統に分けられているが、解析では、388本の伝熱管を1系統とみなし、次のデータを入力した。

一次側

入口温度	297.5 °C
入口圧力	120 ata
流量	45×10^5 kg/h

二次側

入口温度	185 °C
入口圧力	40 ata
管一本当たりの流量	433 kg/h

コイル管

内径	14.8 mm
外径	19.0 mm
長さ	42 m
本数	388 本
平均コイル巻き径	2.726 m
巻上げ角	0.525 度
熱伝導率 (インコロイ 800)	11.5 W/mK

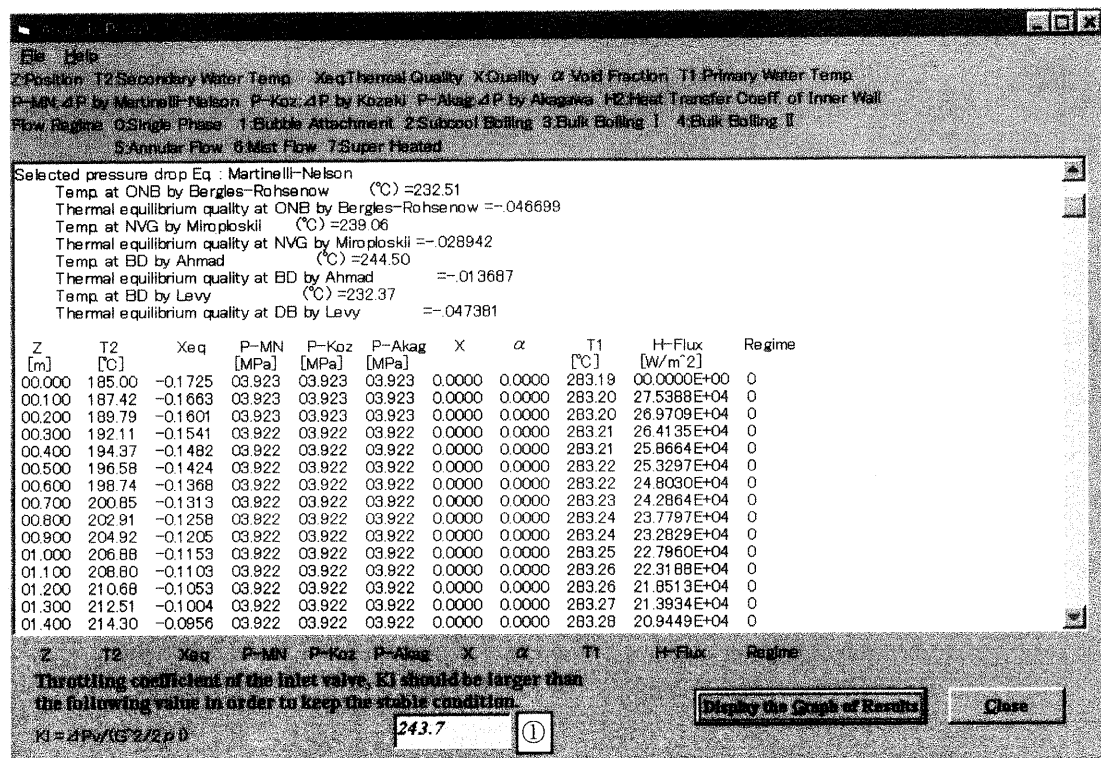


図-6 MRX の解析例(リスト画面)

ただし、設計条件では二次側入口圧力が明記されていないので、二次側出口蒸気圧力 40 ata を入口圧力とした。

図-6 に示したように、解析結果として、入力条件や正味蒸気発生開始点などにおける熱平衡クオリティの他に、管入口から 10 cm おき (Z) に二次側流体の温度 (T2)、熱平衡クオリティ (Xeq)、M-N (P-MN)、修正 Kozeki (P-Koz)、修正 Akagawa (P-Akag) の各式による圧力、クオリティ (X)、ボイド率 (α)、および一次水温度 (T1)、管内壁面熱流束 (H-Flux)、伝熱管内の流動様式 (Regime) がリストされるようになっている。

リスト画面下側中央①には、本解析によって求められた二相流部長さを基に図-4 の関係を用いて、流動安定を保つための入口絞り係数の下限値 (243.7) が表示されるようになっている。また、本解析結果のリストは、画面上方の File メニューによりファイルやプリンターへ出力できるようになっている。画面右下の [Display the Graph of Results] ボタンをクリックすると、解析結果が図-7 のようにグラフ画面として表示される。

本解析の妥当性については、MRX の実験データが実在しないので、次節の「実験条件の解

(160)

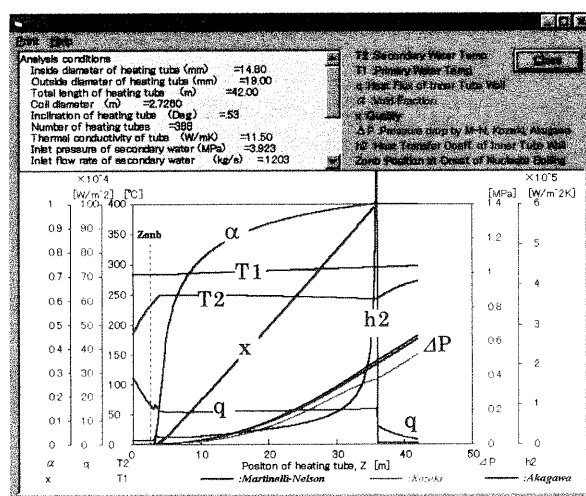
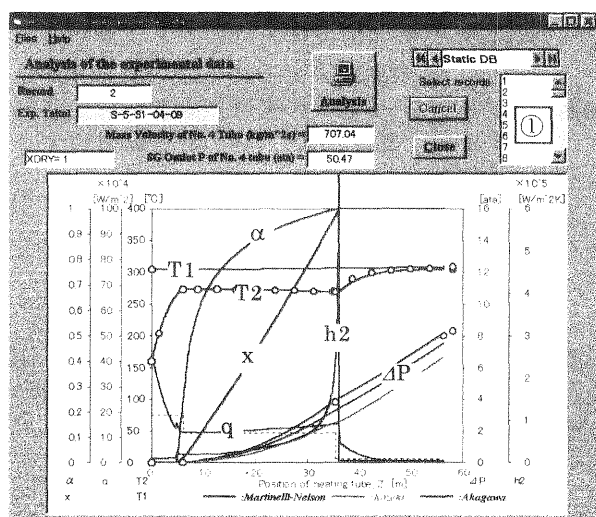
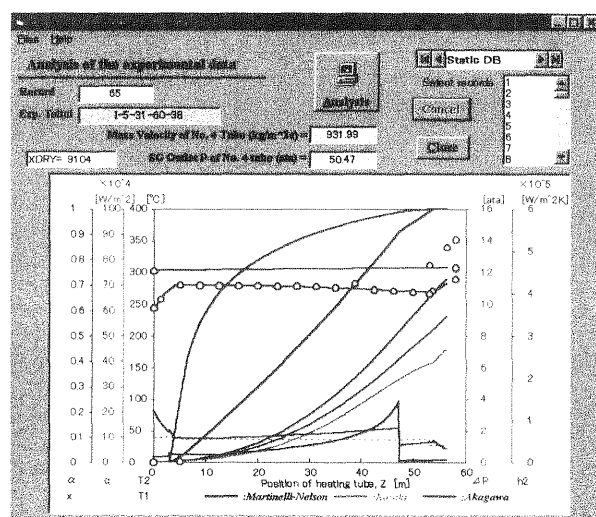


図-7 MRX の解析例(グラフ画面)

析と考察」においてその検討を行うが、二次側流体は、入口から 4 m あたりで飽和沸騰域に入り、35 m 付近から過熱蒸気になること、入口から出口までの圧力損失 (ΔP) は、M-N 式によれば約 0.65 MPa (すなわち、出口蒸気圧力は 3.35 MPa) になること、熱伝達率は過熱蒸気になり始める点を境に急激に増大してから急激に減少することなどがわかる。また図中、ZONB とあるのは、Bergles-Rohsenow²⁵⁾式による核

図-8 実験データの解析例 ($G=707 \text{ kg/m}^2\text{s}$)図-9 実験データの解析例 ($G=932 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

沸騰開始位置を示している。

4.2 実験データの解析と考察

図-8に、解析結果と実験データを比較した例を示す。解析は、画面右上①の DBList コントロールのスクロールによって表示される1から147ケースの実験条件を選択し、[Analysis] ボタンをクリックすれば実行されるが、図-8で選択した実験条件は、1伝熱管当たりの二次水質量流量 W が 409 kg/h (質量速度 $G=707 \text{ kg/m}^2\text{s}$) と比較的高流速条件のものである。横軸には伝熱管入口からの位置が、縦軸には○印の実験データ、ならびに実線の解析結果がそれぞれ示されている。本報告ではカラー表示のものを白黒表示したため、各データの区別がしにくい。一次冷却水温度 ($T1$)、二次側流体の温度 ($T2$)、ボイド率 (α)、クオリティ (x)、3つの圧力損失 (ΔP : それぞれ上から順に Martinelli-Nelson、Akagawa、Kozeki の相関式を用いて予測)、および管内壁面の熱流束 (q)、熱伝達率 ($h2$) が示されている。図中の点線は、実験的に求められた単相部、沸騰部、過熱部に対する平均熱流束を示す。図に見るように、Kozeki、Akagawa 式による圧力損失予測は若干低めの値を与えるが、解析結果は本実験データに対して非常に良い予測結果を与えることがわかる。

図-9は、本実験条件の中で二次側流体が SG 出口において過熱状態に入る最大流量 ($G=932 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $W=539 \text{ kg/h}$) の条件に対して解析したものである。図に見るように、一次水温度、二次水温度、管内平面熱流束、および飽和沸騰部長さに関しては解析結果と実験デー

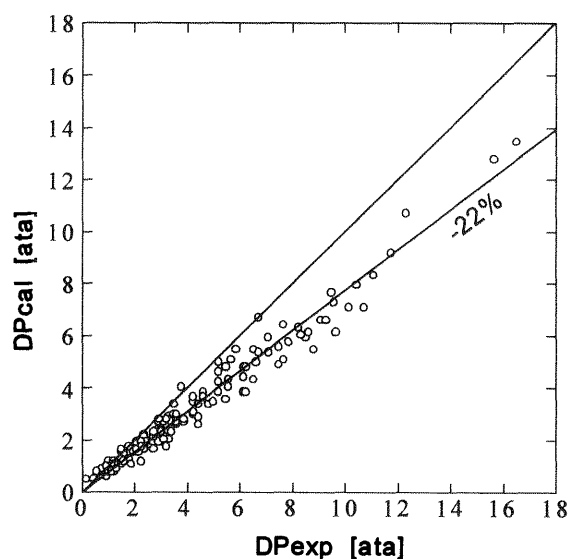


図-10 飽和沸騰部圧力損失の比較

タは非常に良い一致をみる (この結果は、飽和沸騰部長さの推定において若干の誤差が見られるが、全ての実験条件データに対し当てはまる) が、圧力損失に関しては M-N 式による予測値でさえも約 25% 低い値を予測する。過熱蒸気域に入った後の圧力損失の勾配は、実験値、解析値ともほぼ同じなので、飽和沸騰部の圧力損失の予測が小さくなっていることがわかる。図-10には、全実験条件に対し、飽和沸騰部の解析 (M-N 式) によって求めた圧力損失 DP_{cal} と実験値 DP_{exp} の比較を示した。全データに対し、解析で求めた圧力損失は、平均で約 22% 小さい予測を与えることがわかる。図-11には、横軸に二次水の入口流速を取り、縦軸

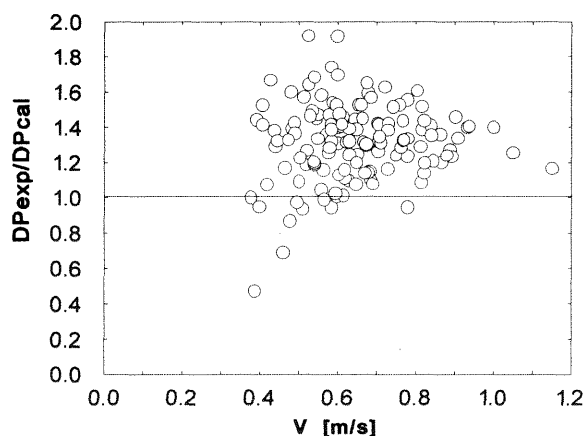


図-11 圧力損失予測誤差の流速依存性

に DP_{exp}/DP_{cal} を取った場合の図を示したが、解析による予測誤差は、全く流速に依存しないことを示している。

予測誤差の原因としては、(1) 二次側流体がコイル状に流れるための遠心力による流体の二次流れの影響、(2) 適用した二相摩擦損失相関式の流速適用範囲外、(3) M-N 式は直管を対象に導かれた二相摩擦損失相関式であるが、コ

イル管の摩擦係数のみを代入することにより、コイル管の二相摩擦損失を予測している、(4) 加速損失式がコイル管にも適用できるかなどが考えられる。先ず(1)については、流速が大きくなるほど遠心力も大きくなり、結果として二次流れの影響も大きくなるが、誤差が流速に依存しないことを考えると、二次流れの影響ではないものと考えられる。(2)については、本解析に適用した3つの相関式は、いずれも流速適用範囲が 0.5 m/s 未満のものであるが、これまでの報告³⁸⁾によると、M-N 式などで代表される相関式を高流速条件に適用した場合には、むしろ圧力損失を過大に見積もってしまうことを考えると、これにも属さない。すると、(3)か(4)のコイル管特有の原因に起因するものと考えられ、二相増倍係数をもっと大きく取る必要があるが、現時点ではその原因がわからないので、本報告では今後の課題としたい。

4.3 静特性データベース検索

基になる Access 形式のデータベース・ファイルには、不安定流動実験に先立ち、熱伝達率や圧力損失などの特性を調べるために取られ

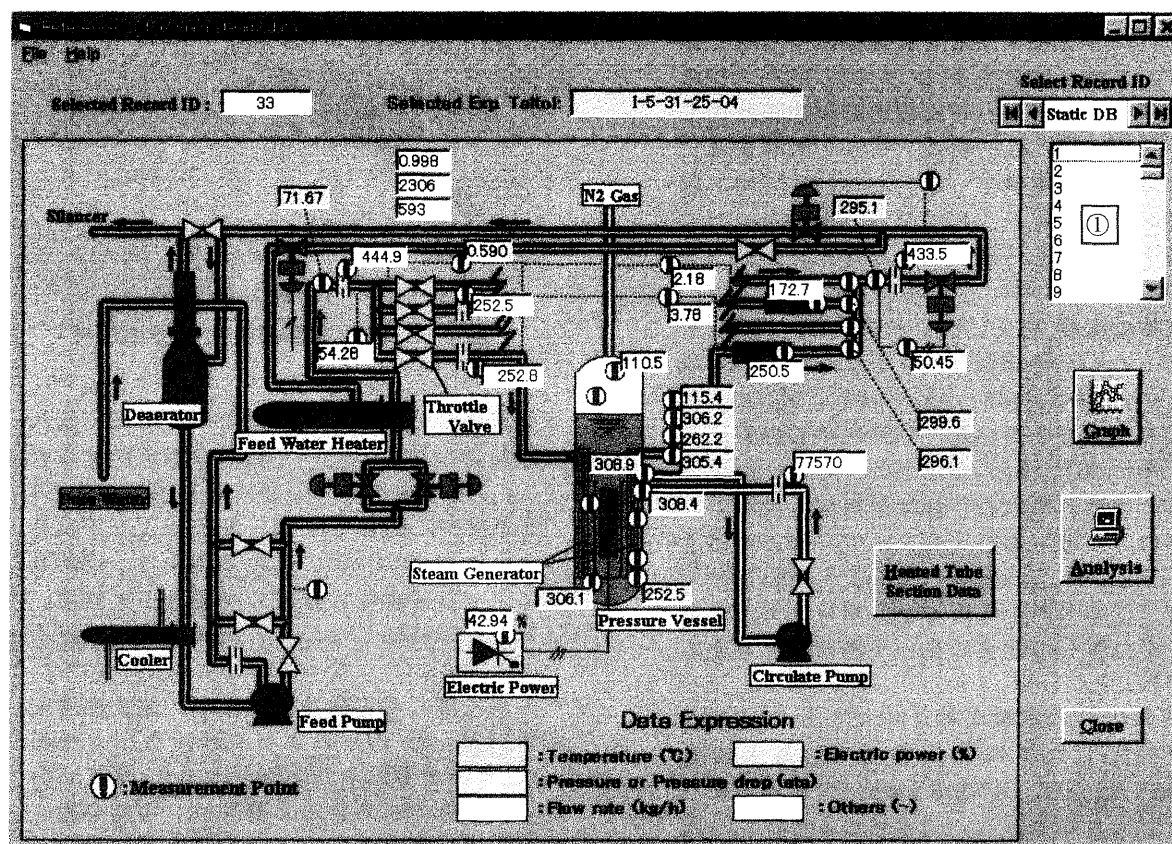


図-12 系統図上における主だったデータの検索画面

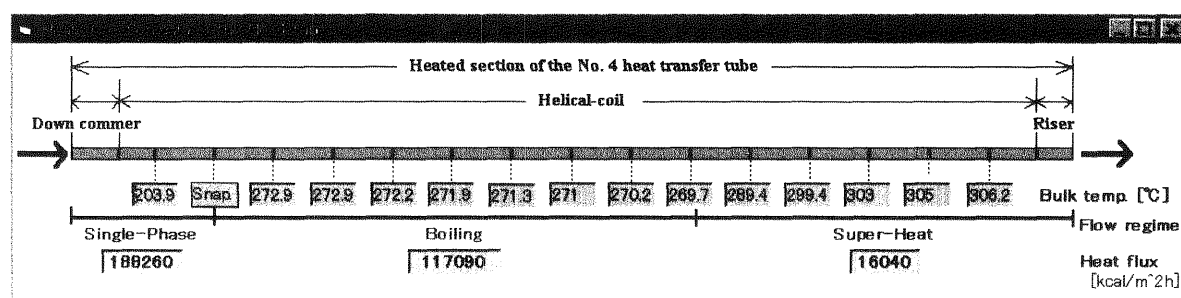


図-13 伝熱管部データ表示画面

た実験データ、および不安定流動実験において不安定流動を起こさなかった実験条件のデータが収められている。本ファイルは、1つのテーブルで構成されているが、テーブルには、147ケースの実験条件(records)に対し187点の直接計測データあるいは計測データから間接的に処理されたデータが収められている(重複有り)。実験パラメータ範囲は、以下の通りである。

- ・一次冷却水流量：80 t/h
- ・一次冷却水ヒーター出口温度：260, 280, 310 °C
- ・二次側 SG 出口蒸気圧力：20, 30, 50 atg
- ・二次冷却水入口温度：70~225 °C
- ・二次冷却水流量：100~500 kg/h

図-12には、187点のうち主だったデータを検索する画面を示した。各データは解釈し易いように実験装置系統図上に表示されるようになっており、DB ファイルと連結されているので、画面右上の①で示した DBList コントロールなどを使って実験条件(record)を選択すると、各データ表示も自動的に切り替わるようになっていいる。また、画面上の「Measurement Point」を示す各マークの上にはしばらくカーソルを放置すると、「Secoandary feed water temperature」といった具合にその測定点の説明がポップアップ・メニューで表示されるようになっていいる。[Heated Tube Section Data] ボタンをクリックすると、図-13に示すように、選択されている実験条件に対する伝熱管内のバルク温度、および水単相部、沸騰部、過熱部の各長さや平均熱流束が表示される。[Graph] ボタンをクリックすると、図-14に示すような伝熱管に沿う一次水温度分布、および二次側流体の温度分布や圧力分布がグラフ表示される。また、[Analysis] ボタンをクリックすると、選択された実験条件に対し、4.2節で述べた解析が為され、データとの比較グラフが表示されるようになっていいる。

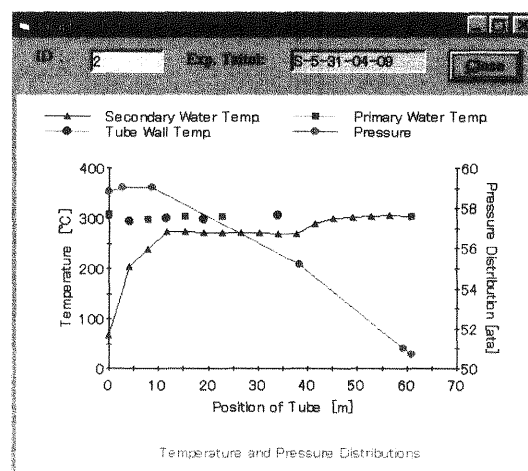


図-14 伝熱管部データのグラフ表示画面

図-15は、全データをテーブル形式で表示した画面を示しており、record(行)が各実験ケースを、field(列)が計測データに対応している。テーブルは、record 番号を基準に、任意の2つの計測データが1つの画面内で参照できるように、3つに分割されている。また、図中のfield名「F2No4」で示したように、各fieldのヘッダーをクリック(そのフィールドはインデックス・フィールドになる)すると、そのfieldデータは昇順に並び替えることができ、インデックス・フィールドに対してはデータの検出([Find] ボタン)や抽出([Extract] ボタン)機能が可能となっている。各フィールドのヘッダー名は、都合上、略式英数字になっているが、例えばヘッダー名「F2No4」の上にカーソルを放置すると、「Feed water flow rate of No. 4 tube [kg/h]」といった具合にポップアップ・メニューでその説明が表示されるようになっていいる。[Explanation of the Fields] ボタンをクリックすると、187点全てのヘッダー名に対する説明が表で表示される。

Date

Move current record

When clicking a header field name of the table, the field is set as an index (Selected Index Field) and then the values of this field will be arranged in order.

(Selected Index Field)
F2No4

Note: Extraction can not be conducted for the indexes of "Num", "Num-Ex", "Date" and "OTN04-Tar".

Current Record Number of ID= **118**

Explanation of the Fields (or leave a mouse pointer on each header field)

Move to a field designate
(for Split1) (for Split2)

Find **Extract** **Close**

F2IN-ALL **P2OUT Head** (out of the selected index of)

Spl0	Split1		Split2					
ID	P2IN-ALL	F2No3	P2OUT-Head	DPSG-N04-I	TISGN	TISGOUT	T2IN	T-PV1
118	165.5	83.13	20.59	1.584	257.9	257.2	175.5	40.06
135	174.6	96.38	20.84	1.692	277.9	277.2	97.13	39.09
63	174.5	90.94	50.57	0.7578	308.4	308.4	225	40.78
87	216.6	121.3	30.78	1.397	277.9	277	118.5	35.72
6	199.2	107.5	50.46	0.7875	308.4	307.6	62.45	34.51
62	348.3	166.9	50.51	2.203	308.4	307.6	227	40.3
80	378.5	191.7	50.3	2.122	297.5	296	151.3	33.31
36	332.3	197	50.38	2.455	308.4	306.6	70.71	34.51
117	403.7	186.9	20.73	5.397	257.7	255.2	176.8	40.06
86	382.4	185.9	30.82	3.844	277.9	275.7	118.5	37.89
35	337.2	190.8	50.51	2.408	308.4	306.9	70.95	34.27
96	424.1	205.5	30.59	4.336	277.2	274.7	121	26.8
134	418.3	211.9	20.86	6.491	277.9	275.2	98.57	38.85
52	432.6	207.3	50.26	3.102	307.1	306.2	149	27.04
5	413.7	214.1	50.45	2.769	308.1	306.4	65.13	35.72
79	461.1	222.3	50.25	2.958	297.2	295.5	152.6	33.55
95	454.5	210.8	30.64	4.855	277.2	274.7	121.5	28.49
125	476	243.3	20.91	7.628	272	269.3	104.4	29.45
51	482.3	241.3	50.31	3.734	307.1	304.9	149	26.8
34	405.9	233	50.44	3.305	308.1	306.4	71.91	33.55
76	495.5	243.9	50.26	3.748	297.5	295	152.3	31.14
21	459	208.5	49.99	3.556	306.9	304.2	62.45	20.53
141	493.3	235.4	20.77	8.55	282.2	279.2	104.1	29.21
15	477.4	235.3	50.37	3.533	307.4	305.4	80	32.34
78	527.7	254.2	50.3	3.794	297.2	295	152.8	33.55
94	516	241.8	30.54	5.978	277	274	121.2	27.98

図-15 テーブルリストによる全データの検索画面

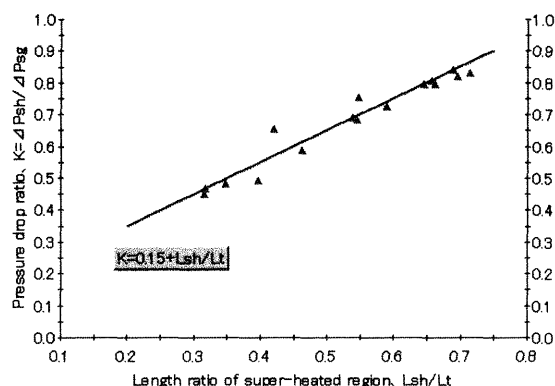


図-16 流動安定限界境界図(その2)

4.4 不安定流動データベース検索

不安定流動実験は、以下のパラメータの幾つかの組み合わせに対し、二次側給水流量を徐々に減少させていくことにより実施された。

一次冷却水流量：80 t/h

一次冷却水出口温度：310℃

二次側 SG 出口压力：20, 30, 50 atg

二次側給水サブクール度：44, 114, 194 K

本 DB は、密度波振動型の不安定流動現象を生

した時の流動条件や不安定流動解析のためにデータ処理された各パラメータの値を基本とし、37実験ケース×18パラメータのデータがAccess形式のmdbファイルに収められており、静特性DBと同じように検索が可能となっている。

また、不安定流動解析結果^{7), 8)}として図-16に示した過熱部長さ比と過熱部圧力損失比の2つのパラメータで整理した流動安定境界図、ならびに前述した図-4の2つの安定境界図が表示されるようになっている。

4.5 解析方法、実験装置などに関する情報

静特性解析については、4. 1 節で述べた解析モデル(図-3)や適用した各相関式が詳細に表示される。不安定流動解析については、図-17に示したような解析モデルと解析方法が表示されるようになっている。また、一体型船用炉模擬装置については、実験装置の系統図と計測点、主要目表、一般説明(テキスト)、および圧力容器断面図、伝熱管の寸法や計測点に関する情報がそれぞれ表示されるようになっている。

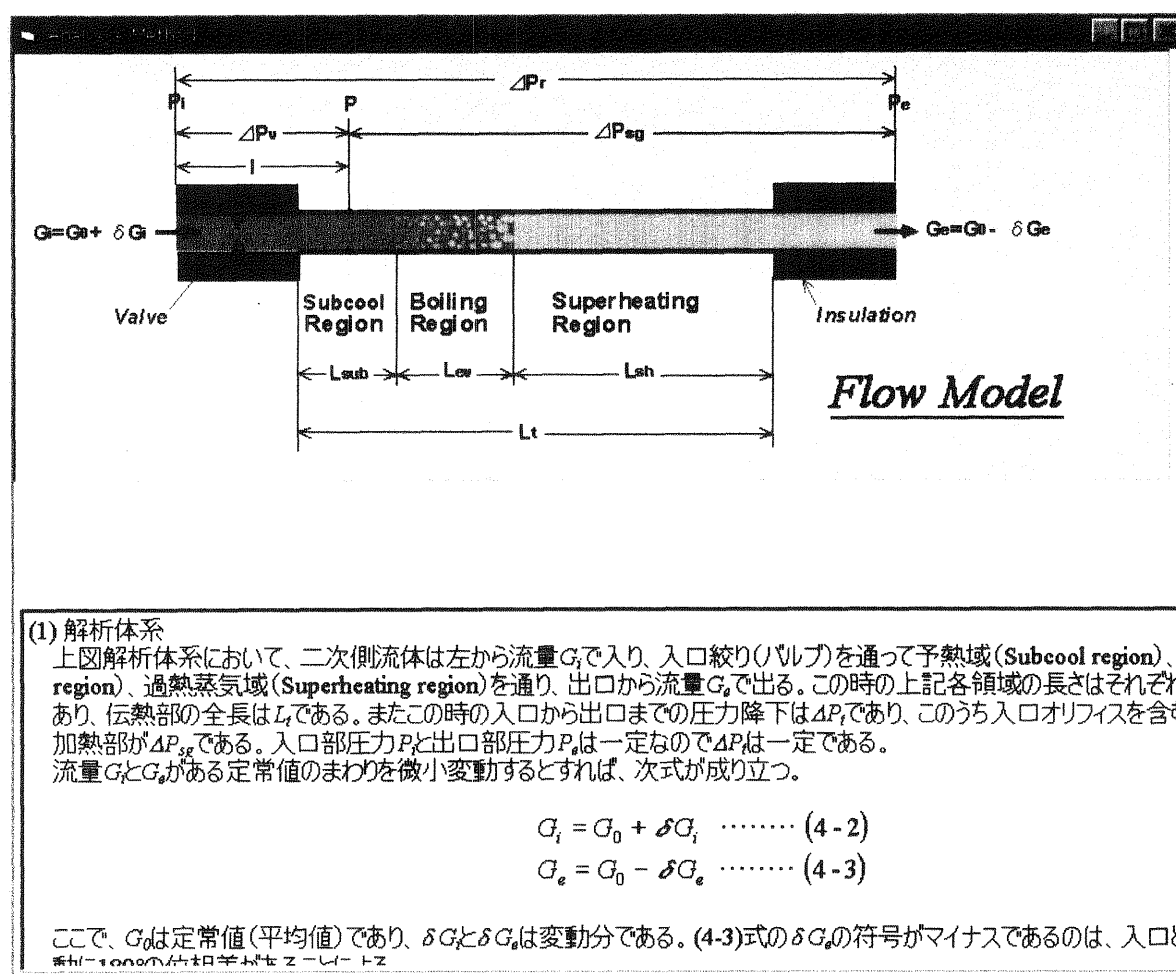


図-17 不安定流動解析手法の表示画面

5. 船体横揺れ時における一次冷却水 自然循環特性データベース

5.1 自然循環流量・温度変動特性

DB に収められているデータは、次のパラメータ(設定目標)範囲で取られたものである。

- ・ 最大横揺れ角：7.5, 15.0, 22.5 度
- ・ 横揺れ周期：5.0, 7.5, 10.0, 14.5, 19.0 sec
- ・ 炉心ヒーター出力：40, 60, 80 kW

実験データは、1つの実験条件が1つのテーブルに対応しており、計35テーブルが3つのAccess形式ファイルに収められている。1つのテーブルは、横揺れ1周期分のデータに対応しており、テーブル内には61 records(1周期分を60分割したサンプリング数)×62 fields(サンプリングデータ数)のデータが収められている。

図-18は、本DBファイルに含まれている62データ中の主だったデータの検索画面を示

している。データは解釈しやすいように実験装置概略図の上に表示されるようになっており、図中①で示したデータコントロールの矢印をクリックすることにより、1周期分のデータが自動的に切り替え表示される。実験条件(テーブル)の切り替えは、②で示したフレーム内の各リストボックスの条件を選択することにより為される。画面中の[Transitional Graph]ボタンをクリックすると、選択されているテーブルに対する1周期分のデータが図-19のようにグラフ表示される。また、[Table List] ボタンをクリックすると、選択されているテーブルの全データがテーブルの形でリストされ、全計測点に関する詳細な説明も表で表示されるようになっている。画面中の③のピクチャボタンをクリックすると、実験装置全体の概観と寸法、炉心寸法、炉心計測点(立面と断面)、SG計測点がそれぞれグラフ表示されるようになっている。

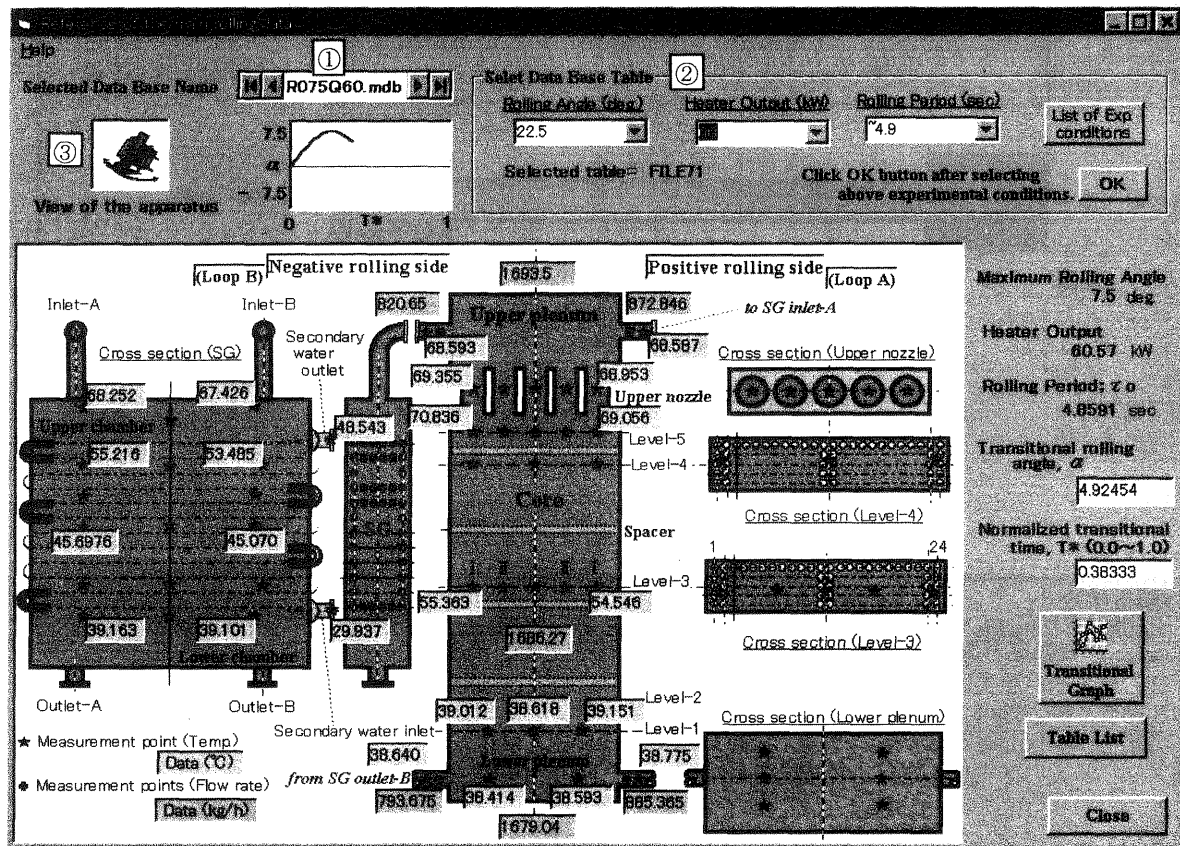


図-18 実験装置図上における自然循環特性 DB 検索画面

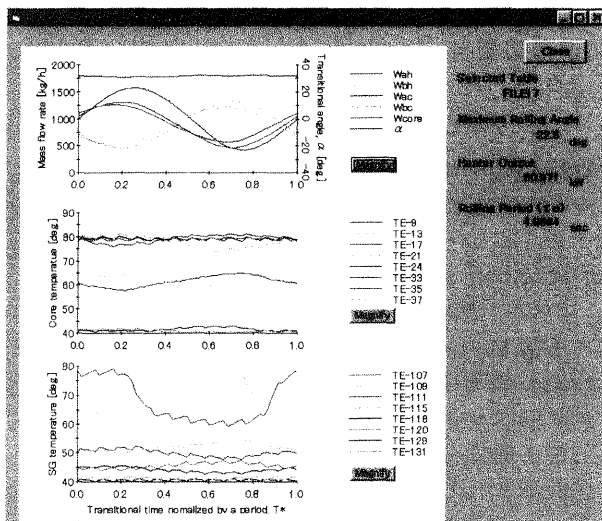


図-19 自然循環特性データのグラフ表示画面

5.2 自然対流熱伝達特性

本 DB は、船体横揺れ時の自然循環実験を基にした炉心の自然対流熱伝達特性に関する研究成果¹⁵⁾を、そのまま Windows Help 形式ファイルとして作成し、画面上に表示できるようにしたものである。文書中の図や表は、ジャンプ・

スポット機能により別の画面として表示されるようになっている。

6. 受動安全型格納容器内熱水力挙動データベース

本 DB では、高温高压水がプール水中に放出された時の熱水力挙動について、現在課題とされている点や研究の目的、実験装置、実験結果ならびに考察、線形解析法、得られた成果などの知見情報が、論文 20)、21)を基に Help ファイルとして作成され、画面上に表示されるようになっている。図-20 には、一例としてフラッシング凝縮振動現象における蒸気泡の不安定振動線形解析に関する情報表示画面を示した。

7. あとがき

次世代船用炉の安全解析・評価、設計に役立てるために、これまでに海上技術安全研究所が積み上げてきた一体型船用炉貫流型蒸気発生器の流動沸騰特性、ならびに受動安全概念に関わる一次冷却水自然循環特性と高温高压飽和水の

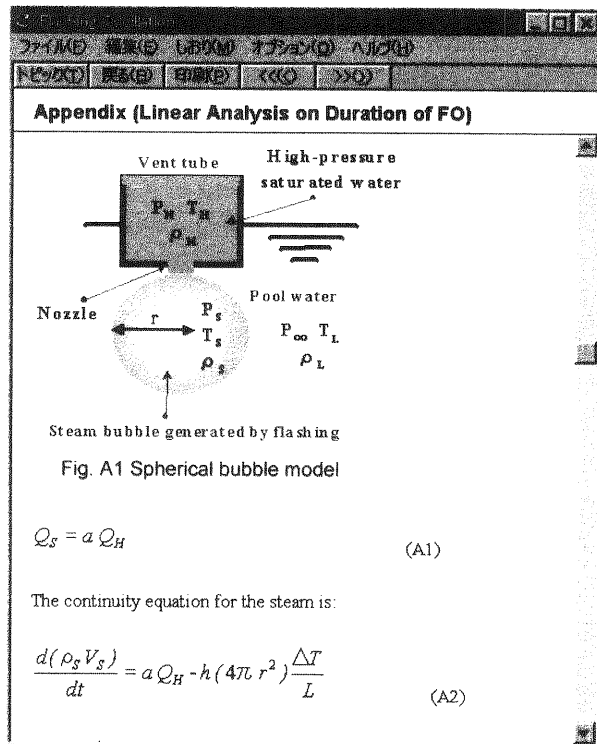


図-20 線形解析手法の表示画面

プール水中における熱水力挙動に関する貴重な知見情報を、Visual Basicを用いることにより、知的情報データベース・プログラムとして構築することができた。^{39)・42)} 基になった情報の多くは、既に発表済みの研究成果であるが、成果に係わる種々の知見情報をデータベースとして有効に活用していくためには、Visual Basicは、有用な開発ツールと考えられる。

現時点では、自然循環やフラッシング・凝縮振動の解析機能など、研究成果に係わる知見情報の全てはデータベース内に取り込まれていないが、今後、ホームページからのダウンロードをはじめ、積極的な本プログラムの利用を図るとともに、情報の追加、修正、保守を行っていききたい。

参考文献

- 1) 「原子力船研究開発の現状」、日本原子力研究所、(1995)
- 2) 「改良船用炉 MRX の工学設計 (中間報告)」、日本原子力研究所原子力船研究開発室、(1996)
- 3) 小林道幸、成合英樹、伊藤泰義、「貫流型蒸気発生器の不安定流動特性 実験記録

第一分冊」、船舶技術研究所原子力技術部、(1984)

- 4) 小林道幸、成合英樹、伊藤泰義、「貫流型蒸気発生器の不安定流動特性 実験記録 第二分冊」、船舶技術研究所原子力技術部、(1984)
- 5) 小林道幸、成合英樹、伊藤泰義、「貫流型蒸気発生器の不安定流動特性 実験記録 第三分冊」、船舶技術研究所原子力技術部、(1984)
- 6) Nariai H., Kobayashi M. and Matsuoka T. "Friction pressure drop and heat transfer coefficient of two-phase flow in helically coiled tube once-through steam generator for integrated type marine water reactor," *J. of Nuclear Sci. and Tech.*, **19-11**, AESJ, (1982), pp. 936-947.
- 7) 小林道幸、松岡猛、成合英樹、横村武宣、伊藤泰義、「一体型船用炉内貫流型蒸気発生器の不安定流動に関する研究 (その1: 一体型船用炉模擬装置による実験)」、船舶技術研究所報告 第21巻 2号 (1984)
- 8) 小林道幸、成合英樹、松岡猛、「一体型船用炉内貫流型蒸気発生器の不安定流動に関する研究 (その2: 不安定流動特性の解析)」、船舶技術研究所報告 第21巻 4号 (1984)
- 9) 松岡猛、成合英樹、小林道幸、「一体型船用炉内貫流型蒸気発生器の不安定流動に関する研究 (その3: 静特性の解析)」、船舶技術研究所報告 第22巻 1号 (1985)
- 10) 入江正彦、「船舶用一体型加圧水炉の概念設計」、日本船用機関学会誌、第7巻 12号 (1972) p. 877.
- 11) 村田裕幸、小林道幸、伊藤功、「一体型船用炉の定傾斜時自然循環特性」、船舶技術研究所報告 第25巻 3号 (1988)
- 12) 村田裕幸、小林道幸、「船用炉の横揺れ時自然循環特性」、船舶技術研究所報告 第26巻 1号 (1989)
- 13) Murata H., Iyori I., Kobayashi M., "Natural Circulation Characteristics of a Marine Reactor in Rolling Motion," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 118, (1990), pp. 141-154.
- 14) 澤田健一、村田裕幸、小林道幸、「一体型船用炉の横揺れ自然循環における炉心部熱伝達特性」、船舶技術研究所報告 第36巻 2号 (1999)
- 15) Murata H., Sawada K., and M. Kobayashi,

- "Experimental Investigation of Natural Convection in a Core of a Marine Reactor in Rolling Motion," *J. of Nuclear Science and Technology*, Vol. 37, No. 6, (2000), pp. 509-517.
- 16) Takamasa T., Yamada K., and Aya I., "OSCILLATION OF HIGH-TEMPERATURE, HIGH-PRESSURE WATER FLASHING INTO POOL WATER," *Proc. of the 10th Pacific Basin Nuclear Conference* (1996), pp. 439-445.
 - 17) 賞雅寛而、近藤宏一、綾威雄、「プール水中における高圧飽和水のフラッシング」、*日本原子力学会誌*、第 39 巻 1 号 (1997)、pp. 78-83.
 - 18) Takamasa T., Tamaura S., Aya I., and Kurabayashi M., "Effect of Nozzle Length on Flashing Oscillation in Pool Water," *Proc. of the 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-8)*, Vol. 3 (1997), pp. 1500-1507.
 - 19) Takamasa T., Tada K., Tamaura S., and Aya I., "Fundamental Study on Flashing Oscillation in Advanced Reactor with Water-Filled Containment," *Proc. of the 6th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-6423)*, (1998)
 - 20) Takamasa T., Tamaura S., and Kurabayashi M., "Flashing Oscillation Phenomena caused by Discharging of High-Pressure Saturated Water into Pool Water," 1st European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, and 36th European Two-Phase Flow Group Meeting, Slovenia (1998)
 - 21) Aya I., Tamura S., Saitoh A., and Takamasa T., "Flashing-Condensation Oscillation Phenomena in Pool Water," 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7300), (1999)
 - 22) Date C. J., 「データベース・システム概論」、第 3 版、藤原譲訳、丸善株式会社、(1984)
 - 23) 斎藤正雄、溝口文雄、「知的情報処理の設計 LISP による知識ベースシステムへのアプローチ」、コロナ社、(1982).
 - 24) Miropolskii Z. L., Shneyerova R. I. and Karamysheva A. I., "Vapor void fraction in steam-fluid mixtures flowing in heated unheated channels," *Proc. of 4th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 5, B4.7 (1970), pp. 1-13.
 - 25) Bergles A. E. and Rohsenow W. M., "The determination of forced-convection surface-boiling heat transfer", *Trans. ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 10, (1964), pp. 951-965.
 - 26) Levy S., "Forced Convection Subcooled Boiling-Prediction of Vapor Volumetric Fraction," *Int J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 10 (1967).
 - 27) Ahmad S. Y., "Axial distribution of bulk temperature and void fraction in a heated channel with inlet subcooling," *Transaction of ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 92, No. 4, (1970), pp. 595-609.
 - 28) L. Smith, "Void Fractions in Two-Phase Flow: A Correlation Based upon an Equal Velocity Head Model," *Proc. Instn Mechanical Engineers*, Vol. 184, (Pt. 1.36), (1969), pp. 647-664.
 - 29) Ito H., "Frictional factors for turbulent flow in curved pipes," *J. Basic Eng.*, Vol. 6, (1959), pp. 123-134.
 - 30) Martinelli R. C. and Nelson D. B., "Prediction of pressure drop during forced circulation boiling water," *Trans. ASME*, Vol. 70, (1948), pp. 709-724.
 - 31) Lockhart R. W., and Martinelli R. C., "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Component Flow in Pipes," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 45, No. 1 (1945).
 - 32) Kozeki M., "Study on two-phase flow and heat transfer in coiled tubes," PhD thesis at Univ. of Tokyo, (1973).
 - 33) Akagawa H., Sakaguchi T. and Ueda M., "Study on liquid-vapor two-phase flow in coiled tube," *Trans. JEME*, Vol. 36, No. 290, (1970).
 - 34) Trasova N. V., Leontiev A. I., Hlopushn V. I., and Orlov V. M., "Pressure Drop of Boiling Subcooled Water and Steam-Water Mixture Flowing," *Proc. of the 3rd Int.J. of Heat Transfer Conf.*, Vol. 4 (1966).
 - 35) Mori Y. and Nakayama W., "Study on forced convection heat transfer in coiled tubes. (Part 2 turbulent flow region)," *Trans. JEME*, Vol. 31, No. 230, (1965), pp. 1521-1532.
 - 36) Stephan K. and Abdelsalam M., referred to Boiling heat transfer and cooling, *JSME* 1989, (1980), p. 49.
 - 37) Schrock V. E. and Grossman L. M., "Forced

- convection boiling in tubes,” Nuclear Sci. Eng., Vol. 12, (1962), pp. 474-481.
- 38) 植田辰洋、「気液二相流」、養賢堂、(1981).
- 39) 稲坂富士夫、「Visual Basic による貫流型蒸気発生器の不安定流動特性データベースの開発」、第71回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1998)、pp. 75-78.
- 40) Inasaka F. and Nariai H, “Intelligent information database of flow boiling characteristics in once-through steam generator for integrated type marine water reactor,” Proc. of Korea-Japan Symp. on Nuclear Thermal-Hydraulic and Safety, (1998), pp. 155-161.
- 41) Inasaka F. and Nariai H, “Intelligent Information Database of the Thermal-Hydraulic Characteristics for a Future Marine Water Reactor,” Proc. of the International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans (N’ocean 2000), (2000), pp. 301-308.
- 42) 稲坂富士夫、成合英樹、村田裕幸、小林道幸、「次世代船用炉の熱流動特性に関する知的情報データベース」、第74回船舶技術研究所研究発表会講演集、(2000)、pp. 365-370.