

---

# 3次元核熱結合動特性解析コード (TRAC系コード) 及び統計的安全評価手法 について

原子力エネルギー協議会  
燃料技術WG  
2024年2月8日

## 1. はじめに

---

- BWR事業者・ATENAは、新型燃料であるBWR 10x10燃料の導入に取り組んでいくことを第16回CNO意見交換会（22/12/12）にて表明した。
- 産業界では、10x10燃料の安全評価などで新たに必要となる3次元核熱結合動特性解析コード（以下、TRAC系コードとする）及び統計的安全評価手法の開発をこれまで進めてきた。
- 本説明では、TRAC系コード及び統計的安全評価手法に係る技術の概要を紹介する。

## 2. 説明内容

---

○本説明では、TRAC系コードに共通的な基本事項及び統計的安全評価手法の適用事例として下記の項目を紹介していく。

- TRAC系コードの熱水力保存式（2023年11月30日紹介済み）
- TRAC系コードの構成式
- TRAC系コードの特殊モデル
- TRAC系コードのPIRT
- 統計的安全評価手法

○本日は、下記のトピックについて添付資料に基づき紹介する。

- ✓ TRAC 系コードの構成式

(添付資料) TRAC 系コードの構成式

# TRAC系コードの構成式

TRAC系コード及び統計的安全評価手法に係る共通事項のご説明(第2回 資料)

株式会社グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン  
原子燃料工業株式会社  
東芝エネルギーシステムズ株式会社  
日立GEニュークリア・エナジー 株式会社  
東京電力ホールディングス株式会社

2024/2/8

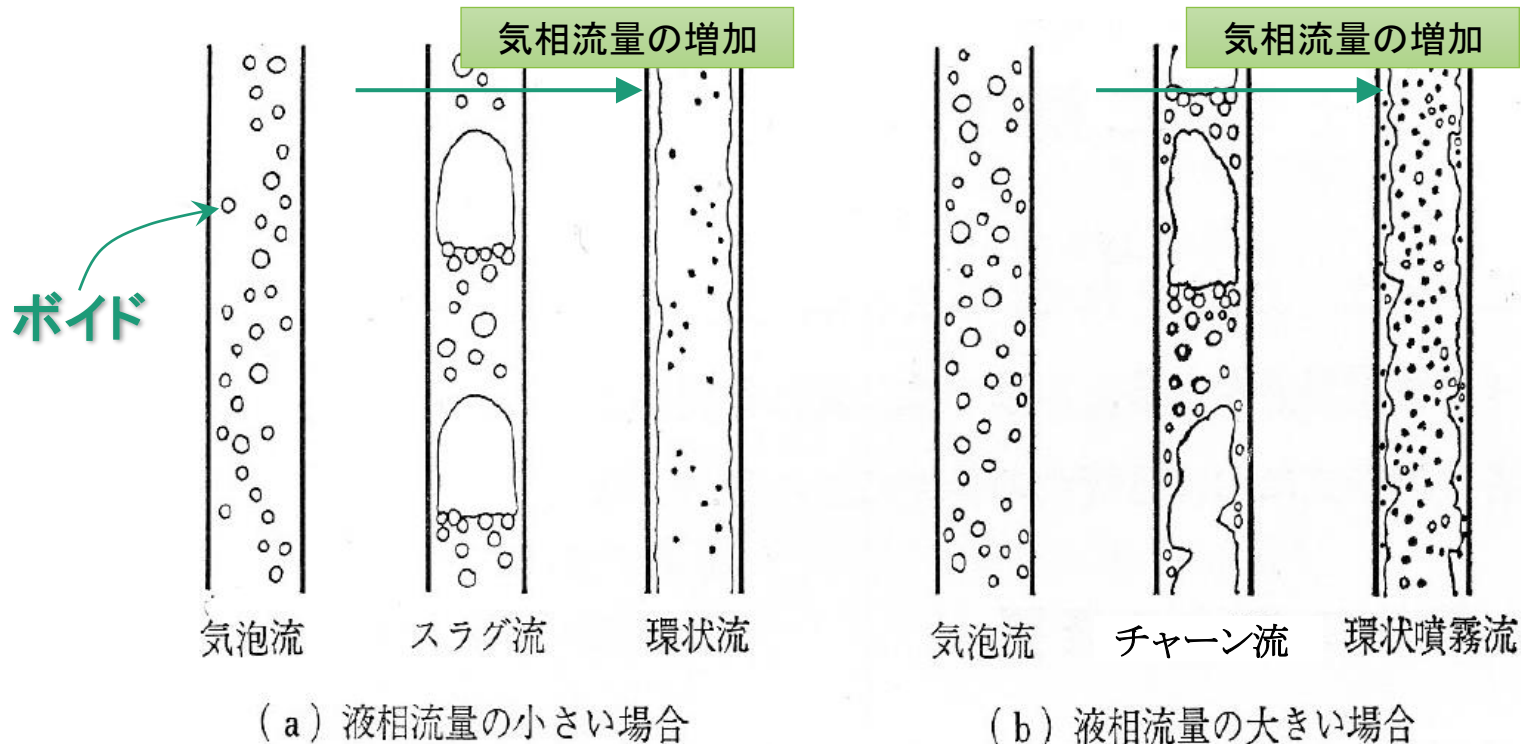
# 内容

- ▶ 界面せん断力のモデル化
- ▶ 熱伝達のモデル化
  - ▶ 壁面熱伝達モデル
  - ▶ 界面熱伝達モデル

## 2相流流動様式

気液2相流は、気液の流量、流れ方向などによってさまざまな**流動様式**をとる。

垂直上昇2相流では気相流量の増加に伴い、下記の3(4)種の流動様式が観察される。



# 界面せん断力のモデル化

# 界面せん断力モデル説明に用いる記号表記(1/3)

## 基本的な物理量

$V, v$	: 速度 [m/s]
$P, p$	: 圧力 [Pa]
$T$	: 温度 [K]
$\alpha$	: 相の存在割合(体積率)[-]
$e$	: 単位体積当たりの内部エネルギー [J/kg]
$h$	: 単位体積当たりのエンタルピ [J/kg], 又は熱伝達係数[W/m <sup>2</sup> -K]
$\rho$	: 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	: 粘性係数[Pa·s]
$g$	: 重力加速度[m/s <sup>2</sup> ]
$j$	: 体積流束又は見かけ速度[m/s]
$\sigma$	: 表面張力[N/m]
$\Gamma, \gamma$	: 単位体積当たりの相変化率 [kg/m <sup>3</sup> /s]
$F, f$	: 各相に作用する単位体積当たりの力 [N/m <sup>3</sup> ]
$q'''$	: 各相に流入する単位体積当たりの熱量 [W/m <sup>3</sup> ]
$q''$	: 熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]
$T, \tau$	: せん断応力テンソル [Pa]
$M, m$	: 単位体積当たりの気液間の運動量移動 [N/m <sup>3</sup> ]
$A$	: 流路断面積 [m <sup>2</sup> ]
$a$	: 界面積濃度又は単位体積当たりの界面の総表面積[1/m]
$t$	: 時間 [s]



# 界面せん断力モデル説明に用いる記号表記(2/3)

## 下添字(物理量に対する付加情報)

$k$	:	相(流体場)を表すインデックス ( $k = g$ : 気相, $k = l$ : 液相, $k = d$ : 分散相, $k = c$ : 連続相)
$i$	:	気液界面に関する項(界面せん断力, 界面熱伝達など)
$w$	:	壁面に関する項(壁面摩擦, 壁面熱伝達など)
$n$	:	法線方向の成分
$T$	:	接線方向の成分
$z$	:	軸方向成分
$annu$	:	環状流に関する項
$bc$	:	気泡/チェーン流に関する項

※ 気相とは蒸気と非凝縮性ガスとの混合ガスを表す。

※ 上記の添字は重複して使用されることがある。

例:  $q'''_{ik}$  → 気液界面( $i$ )を通じて $k$ 相に流入する単位体積当たりの熱量

## 平均化処理を示す記号表記

小文字表記 : 瞬時・局所の物理量

大文字表記 : 時間平均の物理量

$\langle \rangle$  : 流路断面積で平均化した物理量

$\langle\langle \rangle\rangle$  : 各流体場の体積率(ボイド率など)によって重み付け平均化した物理量

([TRAC系コードの保存式で取り扱う流速がこれに当たる](#))

# 界面せん断力モデル説明に用いる記号表記(3/3)

## 解析コード

TRACG : TRACG05 (TRACG ver.5)  
TRACT : TRACT01 (TRACT ver.1)  
TRAC-BF1 : 改良TRAC-BF1 (テプコシステムズ版)/SIMULATE5K  
TRACE : TRACE5.0

# 界面せん断力とは？

- ▶ 気相と液相との界面(=境界面)に作用する力
  - ▶ 界面に作用する抗力(界面に沿うせん断力に起因) + 分散相後流側の圧力低下, 揚力\*などに起因する力\*\*
    - ▶ TRAC系コード
      - ▶ BWR版では流路内における流速分布とボイド率分布との相違の影響を含め, 上記の種々の力の影響を反映したモデル(Andersen-Ishiiモデル)を採用
      - ▶ PWR版では気泡抗力係数だけをモデル化(剛体球相当)
- ▶ ボイド率(軸方向分布)及びその時間変化に影響する支配因子
  - ▶ 核熱結合中性子動特性を通じて原子炉出力, MCPRなどの変化に大きく影響
    - ▶ AOOのほぼ全事象(起動時の制御棒系過渡を除く)
    - ▶ DBA:LOCA時のPCTの第1ピーク, 冷却材流量の喪失など
  - ▶ LOCA時における再冠水期間の2相水位及びPCTに影響

\* 流路内の流速場が一様でなく勾配をもつときに生じる力

\*\* ほかに仮想質量力, 界面張力力などがある

仮想質量力: 加速時の分散相が周囲の連続相に与える力(別途, モデル化)

界面張力力: 界面全体で積分するとゼロとなるため無視できる

# TRAC系コードにおける界面せん断力モデル(1/7)

## ▶ TRAC系コードで取り扱う界面に作用する力

### □ 界面せん断力

$V_r$  及び  $c_i$  のモデル化が重要

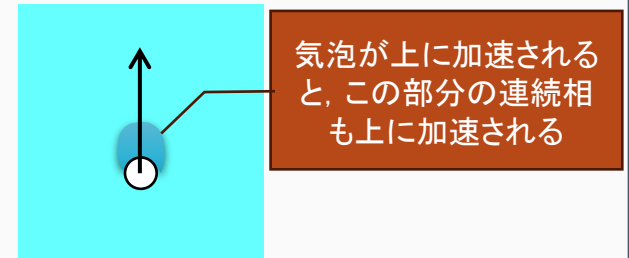
$$\vec{F}_{lg} \approx \vec{F}_D = c_i |\vec{V}_r| \vec{V}_r \quad \begin{array}{l} V_r: \text{気液相対速度} \\ c_i: \text{界面抗力係数} \end{array} \quad (1)$$

- ✓ 流体中の物体の形状抵抗が流速の2乗に比例することに基づく
- ✓  $V_r$  及び  $c_i$  は流動様式ごとに構成式を用いて評価 (PWR版TRAC系コードでは  $V_r$  をコード内で計算する気相速度と液相速度との差として計算するだけ)

### □ 仮想質量力: 分散相(気泡など)が加速時に周囲の連続相に及ぼす力

$$\vec{F}_{VM} = F_{VM} \left( \frac{D\vec{V}_r}{Dt} \right) = k\rho_c \left\{ \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_d \frac{\partial V_r}{\partial z} \right\} \quad (2)$$

- ✓ 係数  $k$  ← 構成式によって評価



# TRAC系コードにおける界面せん断力モデル(2/7)

## ▶ Andersen-Ishiiの界面せん断力モデル(BWR版)\*

□ 界面せん断力モデルの導出に当たって、前頁の界面せん断力の定義式に対し、次を仮定した流れ方向の局所の1次元運動量保存式を考える

- ✓ 相変化なし及び定常条件, 並びに各相及び界面で同一圧力
- ✓ 流路断面積一定, 流体は非加速(仮想質量項を含めない)

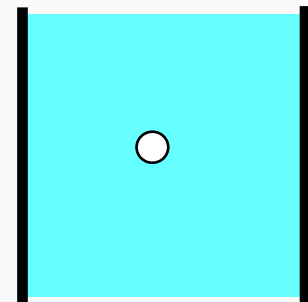
$$\text{気相: } \alpha \frac{\partial p}{\partial z} - \alpha \nabla \cdot \tau_z + \alpha \rho_g g + M_D = 0 \quad (3)$$

$\alpha \frac{\partial p}{\partial z}$  : z方向の圧力勾配に起因する気相への力

$\alpha \nabla \cdot \tau_z$  : 局所に働くせん断応力に起因する力

$\alpha \rho_g g$  : 重力によって気相に働く体積力

$M_D$  : 気泡にかかる局所的な界面抗力



$$\text{液相: } (1 - \alpha) \frac{\partial p}{\partial z} - (1 - \alpha) \nabla \cdot \tau_z + (1 - \alpha) \rho_l g - M_D = 0 \quad (4)$$

\* TRACEコードではやや方法が異なるが、ドリフトフラックスモデルを用いる点は共通

# TRAC系コードにおける界面せん断力モデル(3/7)

## □ 壁面によるせん断力分布への影響に起因する成分 $\langle f_i \rangle$

せん断力  $\tau$  を整理するため、まず混合流の式を求め、その流路面積平均を考える

式(3) + 式(4) 
$$\frac{\partial p}{\partial z} - \nabla \cdot \tau_z + [(1-\alpha)\rho_l + \alpha\rho_g]g = 0 \quad (5)$$

式(5)の流路面積平均 
$$A \frac{\partial p}{\partial z} - \int_A \nabla \cdot \tau_z dA + A[\langle 1-\alpha \rangle \rho_l + \langle \alpha \rangle \rho_g]g = 0 \quad (6)$$



ガウスの発散定理によって 
$$\int_S n_w \cdot \tau_z ds \quad n_w \cdot \text{壁面に垂直な成分}$$

式(5)  $\times \alpha$  を流路面積平均 
$$A \langle \alpha \rangle \frac{\partial p}{\partial z} - \int_A \alpha \nabla \cdot \tau_z dA + A[\langle \alpha(1-\alpha) \rangle \rho_l + \langle \alpha^2 \rangle \rho_g]g = 0 \quad (7)$$

式(6)  $\times \alpha$  - 式(7)

= 気相内の全せん断力

$$\int_A \alpha \nabla \cdot \tau_z dA = \langle \alpha \rangle \int n_w \cdot \tau_z ds - A \Delta \rho g \langle (\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 \rangle \quad (8)$$

流路面積平均した  
気相内の全せん断力

壁面せん断力に起因する成分  
(法線方向のため内積は十分に小さい)

相分布に起因:  $\langle f_i \rangle$

# TRAC系コードにおける界面せん断力モデル(4/7)

- 局所の速度差に起因する界面抗力(形状抵抗)の成分  $\langle M_D \rangle$

$$\text{式(3)} \times (1 - \alpha) - \text{式(4)} \times \alpha \qquad M_D = \alpha(1 - \alpha)\Delta\rho g \qquad (9)$$

⇒ 局所的には、界面抗力は浮力に等しい

$$\text{式(9)の流路面積平均} \qquad \langle M_D \rangle = \int_A M_D dA = A\Delta\rho g \langle \alpha(1 - \alpha) \rangle \qquad (10)$$

- (流路面積平均された)界面せん断力は  $\langle f_i \rangle$  と  $\langle M_D \rangle$  との和

$$\text{前頁の結果から相分布に起因するせん断力} \quad \langle f_i \rangle = A\Delta\rho g \langle (\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 \rangle \qquad (11)$$

$$A \langle F_{lg} \rangle = \langle f_i \rangle + \langle M_D \rangle = A\Delta\rho g \langle \alpha \rangle \langle 1 - \alpha \rangle \qquad (12)$$

# TRAC系コードにおける界面せん断力モデル(5/7)

## • ドリフトフラックス相関式の導入

- ✓ 実現象に基づく2相流の相分布, 流速差などに関わる相関式
  - ✓ 局所的な圧力場の変化による力, 揚力などの影響\*を自然に取り込める
  - ✓ 豊富なボイド率試験データ(相変化なし, 定常)に基づき, 流動様式ごとに作成された相関式
- ✓ 長年にわたる豊富なボイド率予測への適用実績があり, その導入によって2流体モデルでも信頼性の高いボイド率の予測が可能
  - ✓ 相変化なし・定常条件においても, 混合流保存式 + ドリフトフラックス相関式 (= ボイド率 - クオリティ相関) と, 2流体モデル + ドリフトフラックス相関式 (= 界面せん断力) とは活用法(定式化)が本質的に異なる。  
しかし, 2流体モデル + 界面せん断力モデルによる予測の信頼性は高い
- ✓ 適用に当たっては, **ボイド率試験データ**を用いた妥当性確認による裏付けが必要(後述の“BWRへの適用性”を参照)

\* 仮想質量力は別途取り扱う



# TRAC系コードにおける界面せん断力モデル(6/7)

## □ ドリフトフラックス相関式に基づく相対速度 $V_r$ の導入

ドリフト速度の定義

$$V_{gj} = V_g - j \quad (13)$$

分布定数  $C_0$  の定義

$$C_0 \equiv \frac{\langle \alpha j \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle j \rangle}$$

ボイド率  $\alpha$  で式(13)を重み付け平均:  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle j \rangle \quad (14)$

一方, 式(13)の変形によって  $\rightarrow V_r \equiv V_g - V_l = \frac{V_{gj}}{1-\alpha} \quad (15)$

$$j \equiv \alpha V_g + (1-\alpha)V_l$$

気液相対速度について

相分布を考慮し, 重み付け平均  $\rightarrow \langle\langle V_r \rangle\rangle \equiv \frac{\langle \alpha(1-\alpha)V_r \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle 1-\alpha \rangle} \approx \frac{\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle}{\langle 1-\alpha \rangle} \quad (16)$

式(14)を式(16)に代入し,  $\langle j \rangle$ を展開

相分布を考慮した  
気液相対速度  $\langle\langle V_r \rangle\rangle = \frac{1-\langle \alpha \rangle C_0}{\langle 1-\alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \quad (17)$

ここで  $\langle\langle V_g \rangle\rangle \equiv \langle \alpha V_g \rangle / \langle \alpha \rangle$   
 $\langle\langle V_l \rangle\rangle \equiv \langle (1-\alpha)V_l \rangle / \langle 1-\alpha \rangle$

$C_0$  の特性

ボイド率分布  
 $j$ の分布

気相単相流

$$C_0 = 1$$

サブクール沸騰

$$C_0 < 1$$

スラグ/チャン流

$$C_0 > 1$$

# TRAC系コードにおける界面せん断力モデル(7/7)

## □ 界面抗力係数の定式化

式(1)を流路断面積で平均化  $\rightarrow A \langle F_{lg} \rangle \equiv \int_A c_i |V_r| V_r dA = A \langle\langle c_i \rangle\rangle \left| \langle\langle V_r \rangle\rangle \right| \langle\langle V_r \rangle\rangle \quad (18)$

式(18)の左辺に式(12)を代入  $\rightarrow \langle\langle c_i \rangle\rangle = \frac{\Delta \rho g \langle \alpha \rangle \langle 1 - \alpha \rangle}{\left| \langle\langle V_r \rangle\rangle \right| \langle\langle V_r \rangle\rangle} \quad (19)$

$\langle\langle c_i \rangle\rangle \equiv \frac{\langle c_i |V_r| V_r \rangle}{\langle |V_r| V_r \rangle} \approx \frac{\langle c_i |V_r| V_r \rangle}{\left| \langle\langle V_r \rangle\rangle \right| \langle\langle V_r \rangle\rangle}$

式(16)を式(19)に代入  $\rightarrow \langle\langle c_i \rangle\rangle = \frac{\Delta \rho g \langle \alpha \rangle \langle 1 - \alpha \rangle^3}{\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^2} \quad (20)$

$\langle\langle c_i \rangle\rangle$ についてはP.18にて気泡の抗力係数  $C_D$  と更に関係付ける

## □ 界面せん断力の評価式

式(17)及び(18) から

$$\langle F_{lg} \rangle = \langle\langle c_i \rangle\rangle \left| \frac{1 - \langle \alpha \rangle C_0}{\langle 1 - \alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right| \left( \frac{1 - \langle \alpha \rangle C_0}{\langle 1 - \alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right) \quad (21)$$

二つの未知数,  $C_0$  及び  $V_{gj}$  は流動様式ごとに相関式によって与えられる

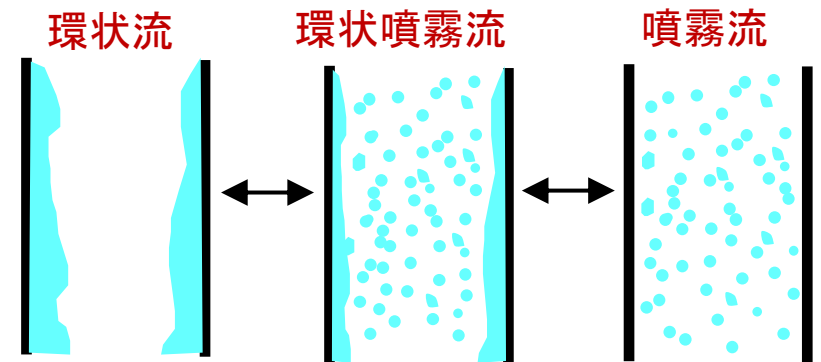
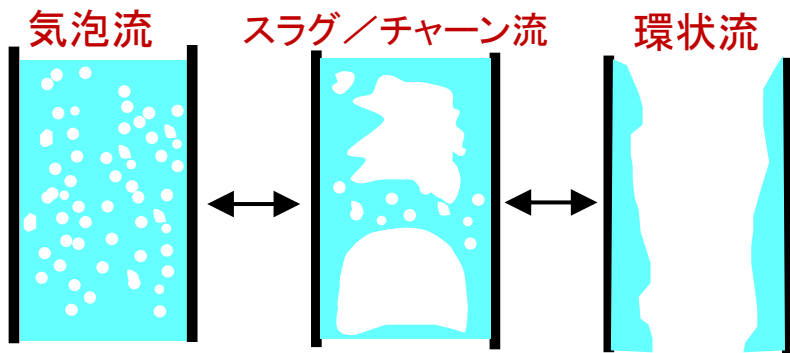
# ドリフトフラックス相関式 $\rightarrow C_0, V_{gj}$ (1/5)

$C_0$ 及び $V_{gj}$ をボイド率試験データに基づく相関式によって流動様式ごとに決定

## □ 2相流流動様式

液相連続相から気相連続相まで

エントレインメント(液滴量)による変化



## □ TRAC系コードの2相流流動様式

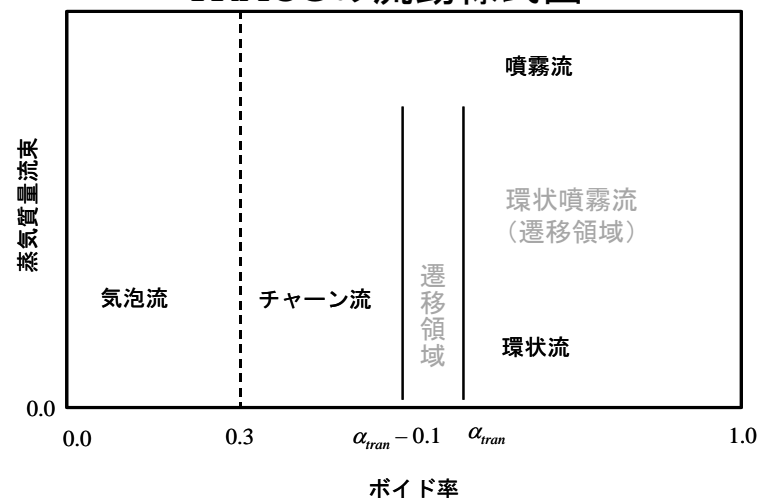
流動様式を次の三つに分類して取り扱う

気泡/チャン流      環状流      噴霧流

各様式間で界面せん断力が不連続にならないように遷移領域を設定

環状噴霧流      チャン/環状流間の遷移域

TRACGの流動様式図



# ドリフトフラックス相関式 $\rightarrow C_0, V_{gj}$ (2/5)

## □ 気泡流／チャーン流

### 分布定数 $C_0$

式(14)から  $\langle j_g \rangle / \langle \alpha \rangle = C_0 \langle j \rangle + \langle \langle V_{gj} \rangle \rangle$

#### Ishiiの式

$$C_0 = C_\infty - (C_\infty - 1) \sqrt{\rho_g / \rho_l}$$

$C_\infty$  : ボイド率及び密度比が0に近づくときの分布定数(ただし, 断熱体系)

#### TRACG及びTRACT

$$C_\infty = 1.288 + 0.105 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \Big|_{P_{ref}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \Big|_P - 0.015 \log_e \left( \frac{G D_h}{\mu_l} \right)$$

(Nikuradseの試験に基づく式を修正)

#### TRAC-BF1

燃料集合体:  $C_\infty = 1.1$  (Ozaki-Hibikiの式)

それ以外:  $C_\infty = 1.393 - 0.015 \log_e \left( \frac{G D_h}{\mu_l} \right)$  (Ishiiの式)

# ドリフトフラックス相関式 → $C_0, V_{gj}$ (3/5)

## □ 気泡流／チェーン流

ドリフト速度  $V_{gj}$

静止流体中の上昇気泡にかかる力のバランスから定式化

浮力と液からの抗力とのつり合い (終速度決定のため)

$$\frac{\pi D_b^3}{6} g (\rho_l - \rho_g) = k_1 \frac{\pi D_b^2}{4} \rho_l V_\infty^2 \quad (22)$$

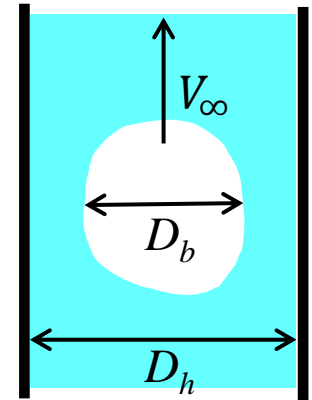
浮力と表面張力とがつり合う  
気泡径 (代表気泡径決定のため)

$$k_2 \frac{\pi D_b^3}{6} g (\rho_l - \rho_g) = \pi D_b \sigma \quad (23)$$

式(22) から  $V_\infty = \sqrt{\frac{2}{3k_1}} \sqrt{\frac{g\Delta\rho D_b}{\rho_l}} = \langle\langle V_{gj} \rangle\rangle \quad (24)$

式(23)から  $D_b = \sqrt{\frac{6}{k_2}} \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} \quad (25)$

式(25)を式(24)に代入すると  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = k \left( \frac{\Delta\rho g \sigma}{\rho_l^2} \right)^{0.25}$  が得られる。ただし,  $k = \sqrt{\frac{2}{3k_1}} \left( \frac{6}{k_2} \right)^{0.25}$



$k$  は試験データなどに基づいて決定

TRACG, TRACT及び  
TRAC-BF1 (燃料集合体以外)

$$\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = 1.53 \left( \frac{\Delta\rho g \sigma}{\rho_l^2} \right)^{0.25} \quad (\text{Zuber-Findlayの式})$$

TRAC-BF1 (燃料集合体)

(Ozaki-Hibikiの式)

# ドリフトフラックス相関式 → $C_0, V_{gj}$ (4/5)

## □ 環状流

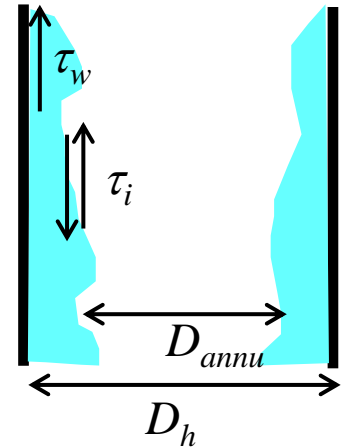
分離流に作用する力のバランスから  $V_{gj}$  を定式化

$$\text{気相部の力のつり合い} \quad -\left(\frac{dp}{dz} + \rho_g g\right) = \frac{\pi D_{annu} \tau_i}{\alpha A} \quad (26)$$

$$\text{液膜内の力のつり合い} \quad -\left(\frac{dp}{dz} + \rho_l g\right) = -\frac{\pi D_{annu} \tau_i}{(1-\alpha)A} + \frac{\pi D_h \tau_w}{(1-\alpha)A} \quad (27)$$

$$\text{ここで 壁面せん断力: } \tau_w = f_w \rho_l \frac{v_l^2}{2} \quad f_w = 0.791(\text{Re}_l)^{-0.25}$$

$$\text{界面せん断力: } \tau_i = f_i \rho_g \frac{v_r^2}{2} \quad f_i = 0.005[1 + 75(1-\alpha)] \quad (\text{Wallisの式})$$



式(14), (16) を式(26), (27)に関連付け, 整理すると

TRACG, TRACT及び TRAC-BF1

**分布定数**  $C_0 = 1 + \frac{1-\alpha}{\alpha+b}$

**ドリフト速度**  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \frac{(1-\alpha)^{3/2}}{\alpha+b} \sqrt{\frac{\Delta\rho g D_h}{0.015\rho_l}}$

ここで  $b \equiv \sqrt{\frac{1+75(1-\alpha)}{\alpha}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$

# ドリフトフラックス相関式 → $C_0, V_{gj}$ (5/5)

## □ 噴霧流

### 分布定数

TRACG, TRACT及び  
TRAC-BF1

$C_0 = 1.0$   
(乱流拡散のため液滴が一様に分布すると仮定)

### ドリフト速度: 液滴にかかる力のつり合いに基づく

TRACG及び  
TRACT  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \sqrt{2}(1-\alpha) \left( \frac{\Delta\rho g \sigma}{\rho_g^2} \right)^{0.25}$  (Ishiiの式)

TRAC-BF1

$$\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \sqrt{2}\alpha^{1.5}(1-\alpha) \left( \frac{\Delta\rho g \sigma}{\rho_g^2} \right)^{0.25} \quad r_d \geq r_{dc}$$

$$\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = 0.5r_d \alpha^{1.5}(1-\alpha) \left[ \frac{(\Delta\rho g)^2}{\rho_g \mu_g} \right]^{1/3} \quad r_d < r_{dc}$$

$$r_d = 0.005 \frac{\sigma}{\rho_g j_g^2} \left[ \frac{\rho_f}{\rho_g} \left( \text{Re}_g \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^2 \right]^{1/3}$$

$$r_{dc} = 2 \sqrt{\frac{2\sigma}{\Delta\rho g}} N_{\mu g}^{1/3} \quad N_{\mu g} \equiv \mu_g / \left[ \rho_g \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho g}} \right]^{1/2}$$

液滴半径  
限界液滴半径

# 界面せん断力モデルの実装(1/5)

## □ 界面抗力係数の整理(気泡の抗力係数との関係)

界面抗力係数  $c_i$  は気泡の抗力係数を用いて次の式で記述される

$$\langle\langle c_i \rangle\rangle = \frac{1}{4} a_i C_D \left( \frac{1}{2} \rho_k \right) \begin{array}{l} \text{気泡流, 環状流} \Rightarrow k = l \\ \text{液滴流} \Rightarrow k = g \end{array} \quad (28)$$

$a_i$ : 界面積濃度  
 $C_D$ : 気泡の抗力係数

式(28)を式(20)及び式(21)に代入して整理すると,

$$\text{気泡抗力係数の評価式} \quad a_i C_D = \frac{8 \Delta \rho g \langle \alpha \rangle \langle 1 - \alpha \rangle^3}{\rho_k \langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^2} \quad (29)$$

界面せん断力評価式

$$\langle F_{lg} \rangle = \frac{1}{8} a_i C_D \rho_k \left| \frac{1 - \langle \alpha \rangle C_0}{\langle 1 - \alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right| \left( \frac{1 - \langle \alpha \rangle C_0}{\langle 1 - \alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right) \quad (30)$$

$$\text{又は, 式(16)及び(17)から} \quad \langle F_{lg} \rangle = \frac{1}{8} \frac{a_i C_D}{\langle 1 - \alpha \rangle^2} \rho_k \langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^2 \quad (31)$$



# 界面せん断力モデルの実装(2/5)

## □ 界面積濃度 $a_i$ のモデル化(気泡/チャーン流)

界面積濃度: 臨界ウェーバ数  $We_c$  を用いて決定

$We$ 数 ≡  
(慣性力/表面張力)

$We_c$ における代表気泡径  $d_{b,c}$  (式(15)参照)

$$\frac{1}{d_{b,c}} = \frac{\rho_l \langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^2}{\sigma(1-\alpha)^2 We_c}$$

一辺が  $D_h$  の立方体流路内に気泡径  $d_{b,c}$  の  
気泡が一つ存在するときのボイド率



$$\alpha = \frac{4/3\pi (d_{b,c}/2)^3}{D_h^3}$$

界面積濃度 = 気泡表面積 / 流路体積

$$a_i = \frac{4\pi (d_{b,c}/2)^2}{D_h^3} = 6\alpha \frac{\rho_l \langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^2}{\sigma(1-\alpha)^2 We_c} \quad (32)$$

## □ 界面せん断力計算式の実装(気泡/チャーン流)

式(32)を界面せん断力評価式(31)に代入

$$\langle F_{lg} \rangle = \frac{3}{4} \alpha \frac{C_D}{We_c} \frac{\rho_l^2}{\sigma} \frac{\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^4}{\langle 1-\alpha \rangle^4}$$

∴ 界面せん断力評価式(気泡/チャーン流)

$$\langle F_{lg} \rangle = \frac{3}{4} \alpha \frac{C_D}{We_c} \frac{\rho_l^2}{\sigma} \left| \frac{1-\langle\alpha\rangle C_0}{\langle 1-\alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right|^3 \left( \frac{1-\langle\alpha\rangle C_0}{\langle 1-\alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right) \quad (33)$$

なお,  $\langle F_{lg} \rangle = c'_i |V_r|^3 V_r$  の表現形をとる

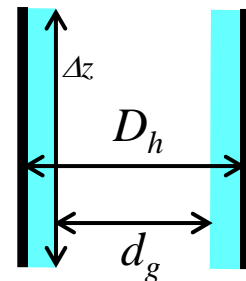
# 界面せん断力モデルの実装(3/5)

## □ 界面積濃度 $a_i$ のモデル化(環状流)

界面積濃度: 厚さ一定の滑らかな円管内液膜を対象にモデル化

気相部の直径  $d_g$  と水力等価直径  $D_h$  とを用いて円管内のボイド率を表す

$$\alpha = \frac{\pi(d_g/2)^2}{\pi(D_h/2)^2} \rightarrow d_g = \sqrt{\alpha} D_h$$



界面積濃度 = 気相部総表面積 / 流路体積

$$a_i = \frac{\pi d_g \Delta z}{\frac{\pi D_h^2}{4} \Delta z} = \frac{4}{D_h} \sqrt{\alpha} \quad (34)$$

## □ 界面せん断力計算式の実装(環状流)

式(34)を界面せん断力評価式(31)に代入

$$F_{lg} = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha} C_D \frac{\rho_l}{D_h} \frac{\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^2}{\langle 1 - \alpha \rangle^2}$$

∴ 界面せん断力評価式(環状流)

$$F_{lg} = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha} C_D \frac{\rho_l}{D_h} \left| \frac{1 - \langle \alpha \rangle C_0}{\langle 1 - \alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right| \left( \frac{1 - \langle \alpha \rangle C_0}{\langle 1 - \alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right) \quad (35)$$

なお,  $F_{lg} = c'_i |V_r| V_r$  の表現形をとる

# 界面せん断力モデルの実装(4/5)

## □ 界面積濃度 $a_i$ のモデル化(噴霧流)

界面積濃度: 臨界ウェーバ数  $We_c$  を用いて決定

気泡/チャーン流と同様の導出  $\rightarrow a_i = 6(1-\alpha) \frac{\rho_g \langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^2}{\sigma(1-\alpha)^2 We_c}$  (36)

## □ 界面せん断力計算式の実装(噴霧流)

式(36)を界面せん断力評価式(31)に代入  $F_{lg} = \frac{3}{4}(1-\alpha) \frac{C_D}{We_c} \frac{\rho_g^2 \langle\langle V_{gj} \rangle\rangle^4}{\sigma \langle 1-\alpha \rangle^4}$

∴ 界面せん断力評価式(噴霧流)

$$F_{lg} = \frac{3}{4}(1-\alpha) \frac{C_D}{We_c} \frac{\rho_g^2}{\sigma} \left| \frac{1-\langle\alpha\rangle C_0}{\langle 1-\alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right|^3 \left( \frac{1-\langle\alpha\rangle C_0}{\langle 1-\alpha \rangle} \langle\langle V_g \rangle\rangle - C_0 \langle\langle V_l \rangle\rangle \right) \quad (37)$$

なお,  $F_{lg} = c'_i |V_r|^3 V_r$  の表現形をとる

# 界面せん断力モデルの実装(5/5)

## □ 気泡抗力係数 $C_D$ のモデル化(これまでの結果の整理)

TRACG, TRACTの場合

気泡抗力係数の計算式(29)に対し,  $V_{gj}$  及び界面積濃度  $a_i$  を流動様式ごとに代入することで気泡抗力係数  $C_D$  を得る

□ 気泡／チャーン流 
$$\frac{C_D}{We_c} = 0.2433(1 - \alpha)^5$$

□ 環状流 
$$C_D = 0.03\sqrt{\alpha}(\alpha + b)^2$$

ここで 
$$b \equiv \sqrt{\frac{1 + 75(1 - \alpha)}{\sqrt{\alpha}}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$$

※  $\alpha > 0.9$  では, 界面積濃度に  $10(1 - \alpha)$  を乗じる。  
これによってボイド率  $\rightarrow 1$  のとき,  $c_i \rightarrow 0$  に一致させるとともに液膜の破断を考慮して, 破断割合に応じた補正を加える。

□ 噴霧流 
$$\frac{C_D}{We_c} = \frac{1}{3}\alpha$$



流動様式ごとに界面抗力係数  $c_i'$  が求まる

# 2相流流動様式に関わる相関式(1/3)

## □ 気泡／チェーン流と環状流との間の遷移条件

### TRACG及びTRACT

遷移条件点 ≡  
それぞれの流動様式の気相体積流束  $V_g$  の交点 ( $V_g$ 連続条件)

$$\frac{\langle\langle j_{g,bc} \rangle\rangle}{\alpha_{tran}} = C_{0,bc} \langle j \rangle + \langle\langle V_{gj,bc} \rangle\rangle = \frac{\langle\langle j_{g,annu} \rangle\rangle}{\alpha_{tran}} = C_{0,annu} \langle j \rangle + \langle\langle V_{gj,annu} \rangle\rangle \rightarrow \text{遷移ボイド率 } \alpha_{tran} \text{ を決定}$$

$$\text{遷移ボイド率 } \alpha_{tran} = \frac{\langle j \rangle + 4 \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}} \left[ (1 - C_{0,bc}) \langle j \rangle + (\langle\langle V_{gj,annu} \rangle\rangle - \langle\langle V_{gj,bc} \rangle\rangle) \right]}{C_{0,annu} \langle j \rangle - (\langle\langle V_{gj,annu} \rangle\rangle - \langle\langle V_{gj,bc} \rangle\rangle)}$$

遷移ボイド率区間

$$\alpha_{tran} - 0.1 < \alpha < \alpha_{tran}$$

### TRAC-BF1

Ozaki-Hibikiの式の導入に伴って遷移条件点の設定法を検討中

- 遷移ボイド率区間では、界面抗力係数  $c_i'$  及び分布定数  $C_0$  について、気泡／チェーン流相関式による計算値と環状流相関式による計算値とを線形内挿する

## 2相流流動様式に関わる相関式(2/3)

### □ エントレインメント割合 (TRACG, TRACT及びTRAC-BF1)

- ✓ 修正Mishima-Ishiiの式に基いて計算

$$E = \frac{X_E - 0.03}{\sqrt{1 + (X_E + 0.1)^2}} \quad \text{ここで } X_E = 10^{-6} (j_g^*)^{2.5} (D^*)^{1.25} \text{Re}_l^{0.25}$$

$$j_g^* = \frac{j_g}{\left[ \frac{\sigma \Delta \rho g}{\rho_g^2} \left( \frac{\rho_g}{\Delta \rho} \right)^{0.667} \right]^{0.25}} \quad D^* = D_{hl} \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\sigma}} \quad \text{Re}_l = \frac{\rho_l j_l D_h}{\mu_l}$$

$E=1$ 近傍で, tanh形に従って1に漸近するように実装 (TRACG, TRACT)

### □ 環状噴霧流の取扱い (TRACG, TRACT及びTRAC-BF1)

- ✓ エントレインメント割合  $E$  に基づいて, 環状流相関式及び噴霧流相関式から界面抗力係数  $c'_i$  を内挿 (TRACG, TRACT及びTRAC-BF1)
- ✓ ドリフトフラックス相関式はエントレインメント割合を用いて補正 (TRACG)

$$\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \frac{(1-\alpha)(1-E)}{\alpha+b} \sqrt{\frac{\Delta \rho g D_h (1-\alpha)(1-E)}{0.015 \rho_l}} + \frac{E(1-\alpha)}{\alpha+E(1-\alpha)} \min \left[ \sqrt{2} \left( \frac{\Delta \rho g \sigma}{\rho_g^2} \right)^{0.25}, \frac{3\sigma}{\rho_g} \left( \frac{(\Delta \rho g)^2}{\mu_g \rho_g} \right)^{1/3} \frac{1}{j^2} \right]$$

$$C_0 = 1 + \frac{(1-\alpha)(1-E)}{\alpha+b} \quad b \equiv \sqrt{\frac{1+75(1-\alpha)}{\sqrt{\alpha}}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$$

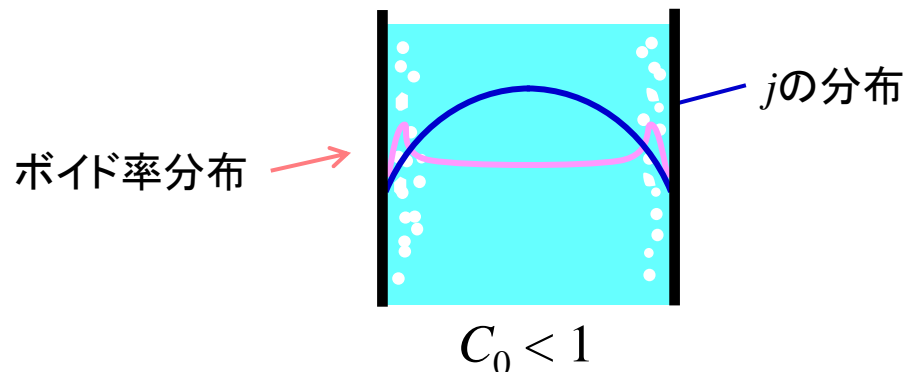
最終的な抗力係数は, 気泡/チャーン流(遷移域を含む)の係数と環状噴霧流の係数との間で内挿

## 2相流流動様式に関する相関式(3/3)

### □ サブクール沸騰領域における $C_0$ の補正 (TRACG及びTRACT)

- ✓ 気泡／チャーン流の分布定数 $C_0$ が蒸気発生点で0に漸近するように、Findlay-Dixによって提案された式で補間 (TRACG, TRACT)
- ✓ Ishiiの式を用いて、気泡／チャーン流の分布定数 $C_{0,bc}$ を次式で補正 (TRAC-BF1)

サブクール沸騰時の分布定数  $C_{0,sub} = C_{0,bc} (1 - e^{-18\alpha})$



# 界面せん断力モデルの沸騰2相流への適用性について

## □ 分布定数 $C_0$ への沸騰の影響(流路断面内の相分布, 流速分布への影響)

- 液単相～気泡流: 影響大, 特にサブクール沸騰領域で顕著な影響 ← 伝熱面からの蒸気泡の発生によって, 液単相→サブクール沸騰→飽和沸騰と変化する過程で相分布と流速分布とが異なる傾向で変化するため
  - サブクール沸騰領域においては $C_0$ を追加的に補正(→ P.28)
- スラグ/チャーン流: 伝熱面からの気泡発生の影響が低下 ← ボイド率(相分布)及び高流速部の流路内分布に対する流路中心の影響が共に大きいため
- 環状流: 相分布及び流速分布の单相気相流との相違が小 ← 大半の蒸気が薄液膜の表面から発生するため

## □ 界面せん断力モデルの沸騰2相流に対する適用性

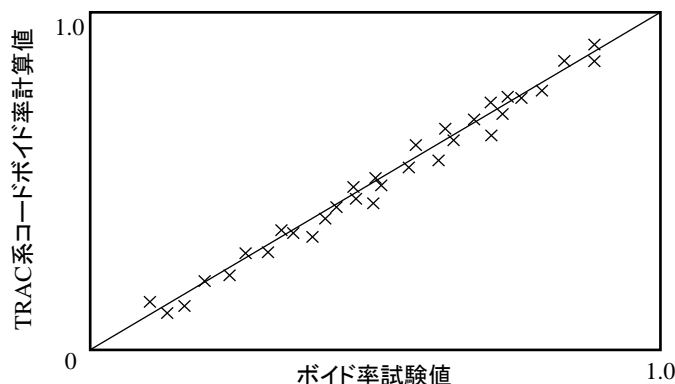
- Ishiiの沸騰を伴うボイド率試験では, サブクール沸騰領域を除いて, 非沸騰流と同様に, ドリフトフラックス相関式で模擬された( $C_0$ の補正なしの状態)
- 沸騰流及び非沸騰流を対象とした広範囲の個別効果試験に対する妥当性確認を通じて適用の有効性が確認されている(次頁参照)



# BWRへの適用性(1/2)

## □ TRAC系コードの界面せん断力モデルのV&V(適格性評価)

- ✓ 広範囲のボイド率試験データに対して妥当性確認
  - ✓ NUPEC管群ボイド試験(8×8模擬燃料集合体)
  - ✓ 海外8×8模擬燃料集合体ボイド率試験
  - ✓ 4×4模擬燃料集合体試験
- ✓ 過渡のボイド率試験データには妥当性確認に使用できるものがない
  - 総合効果試験, BWRプラント起動試験データなどを用いて間接的に確認



妥当性確認時の  
ボイド率比較結果のイメージ

## □ 界面せん断力モデルの適用性

- ✓ 流動様式ごとのドリフトフラックス相関式の適用範囲及び妥当性確認の結果によって適用範囲を決定

# BWRへの適用性(2/2)

## □ NUPEC管群ボイド試験

試験#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
燃料 タイプ	8x8燃料 細径ウォーターロッド(WR) × 2									8x8燃料 太径 WR × 1			
径方向 出力分布													
軸方向 出力分布													

### ● 試験条件

試験ケース数: 548 ケース

- ✓ 非加熱ロッド効果(試験#2,3)
- ✓ 急激な流路面積変化の効果(#5,6)
- ✓ スペーサ効果(#4,12,13)

パラメータ	試験範囲
圧力	1.0 ~ 8.6 MPa
流量	284 ~ 2055 kg/m <sup>2</sup> s
入口サブクール度	21 ~ 126 kJ/kg
出口クオリティ	1 ~ 25 %

# 熱伝達のモデル化

# 熱伝達モデルの説明に用いる記号表記(1/3)

## 基本的な物理量

$a_i$	:	単位体積当たりの界面の面積（界面積濃度） [m <sup>-1</sup> ]
$C_p$	:	定圧比熱 [J/kg/K]
$D_h$	:	水力等価直径 [m]
$D_q$	:	熱的等価直径 [m]
$d$	:	気泡径，液滴径 [m]
$E$	:	単位時間・単位面積当たりのエネルギー輸送量 [W/m <sup>3</sup> ]
$e$	:	内部エネルギー [J/kg]
$G$	:	単位面積当たりの質量流量 [kg/m <sup>2</sup> /s]
$g$	:	重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]
$H$	:	エンタルピ [J/kg]
$h$	:	熱伝達係数 [W/m <sup>2</sup> /K]
$H_{fg}$	:	潜熱 [J/kg]
$j$	:	見かけ速度 [m/s]
$k$	:	熱伝導率 [W/m/K]
$L$	:	代表長さ [m]
$L_B$	:	沸騰長さ [m]
$L_H$	:	加熱長さ [m]
$N_d$	:	液滴数密度 [m <sup>-3</sup> ]
$P$	:	圧力 [Pa]
	:	単位時間・単位面積当たりの熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]
	:	単位時間・単位体積当たりの輸送される熱量 [W/m <sup>3</sup> ]

# 熱伝達モデルの説明に用いる記号表記(2/3)

## 基本的な物理量

$R$	: 局所ピーキングの関数で与えられる限界クオリティ計算因子[-]
$T$	: 温度 [K]
$T_{CHF}$	: 沸騰遷移発生温度 [K]
$T_{min}$	: 最小安定液膜温度 [K]
$t$	: 時間 [s]
$V$	: 速度 [m/s]
$V_{gj}$	: ドリフト速度 [m/s]
$V_r$	: 気液相対速度 [m/s]
$v$	: 比体積 [m <sup>3</sup> /kg]
$x$	: フロークオリティ (-)
$x_e$	: 熱平衡クオリティ (-)
$\alpha$	: ボイド率（相（流体場）の存在割合） [-], 熱拡散率 [m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	: 体積膨張率 [1/K]
$\Gamma$	: 単位時間・単位体積当たりの相（流体場）変化量 [kg/m <sup>3</sup> ·s]
$\delta$	: 境界層の厚さ, 液膜厚さ [m]
$\delta_{min}$	: 最小液膜厚さ [m]
$\varepsilon$	: 輻射率 [-]
$\mu$	: 粘性係数 [Pa·s]
$\rho$	: 密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: 表面張力 [N/m]
$\tau$	: せん断応力 [Pa]

# 熱伝達モデルの説明に用いる記号表記(3/3)

## 下添字(物理量に対する付加情報)

- $k$  : 相(流体場)を表すインデックス  
( $k = g$ : 気相,  $k = l$ : 液相,  $k = f$ : 液膜,  $k = d$ : 液滴,  $k = b$ : 気泡)
- $i$  : 気液界面に関する項(界面せん断力, 界面熱伝達など)
- $w$  : 壁面に関する項(壁面摩擦, 壁面熱伝達など)
- $t$  : 温度境界層に関する項
- $sat$  : 飽和温度に関する項
- $f$  : 飽和水に関する項
- $ld$  : 気泡離脱点に関する項
- $evap$  : 蒸発に関する項

## 上添字

- $T$  : 乱流成分を表す項

※ 気相とは蒸気と非凝縮性ガスとの混合ガスを表す。

※ 上記の添字は重複して使用されることがある。

例:  $q'''_{ik}$  → 気液界面( $i$ )を通じて $k$ 相に流入する単位体積当たりの熱量

## 平均化処理を示す記号表記

- $\langle \rangle$  : 流路断面積で平均化した物理量
- $\langle\langle \rangle\rangle$  : 各流体場の体積率(ボイド率など)によって重み付け平均化した物理量  
(TRAC系コードの保存式で取り扱う流速がこれに当たる)

# 熱伝達の基礎(1/6)

## □ 物質内・物質間の熱移動は次の3現象に起因

### • 伝導

- 固体内の熱的な振動の拡散現象

$$Q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{フーリエの法則})$$

- 分子同士の衝突によるエネルギー拡散(液体内及び気体内の熱伝導)

### • 対流

- 流体塊のマクロな移動に伴って生じる熱移動(沸騰も含まれる)
  - 強制対流と自然対流とに分類される

### • ふく射

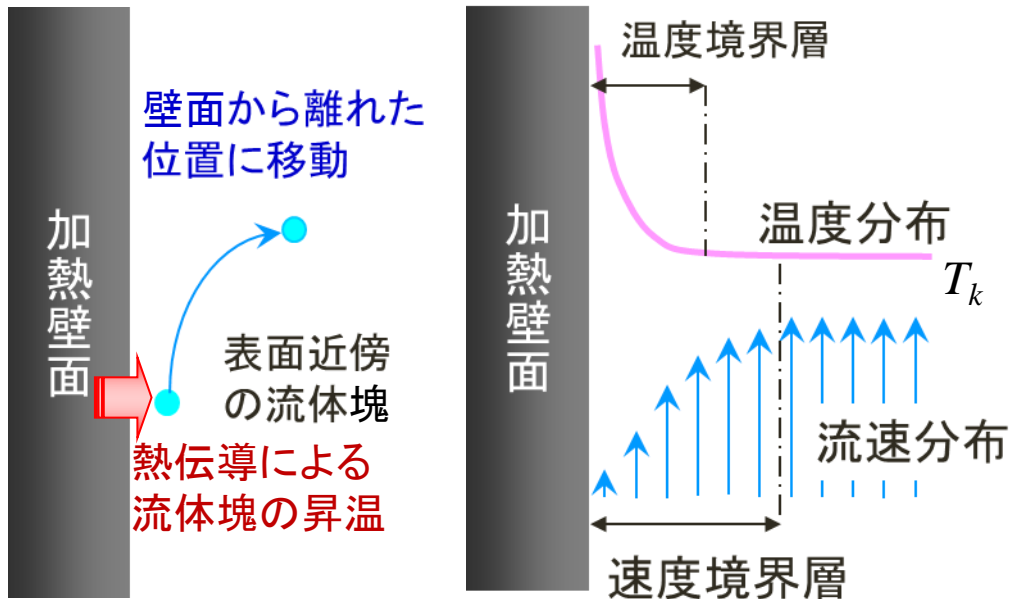
- 固体表面, ガス塊などから射出される電磁波による熱移動
  - 燃料露出後から再冠水までの間に燃料被覆管温度が高温化するとき  
に有意

# 熱伝達の基礎(2/6)

## 対流熱伝達

- 壁面近傍の温度勾配による流体中への熱伝導 → 当該流体の昇温
- 昇温された流体塊の(離れた位置への)移動による熱エネルギー輸送
- 温度境界層の形成
  - 乱流状態では速度境界層及び温度境界層の幅が共に縮小 → 熱伝達向上

対流熱伝達係数:  $h$  (W/m<sup>2</sup>·K)     $Q'' = h(T_w - T_k)$  (ニュートンの冷却則)



ヌセルト数  $Nu \equiv \frac{h}{k/L}$

(対流熱伝達 / 熱伝導)



対流熱伝達の  
大きさの程度を表す



# 熱伝達の基礎(3/6)

## □ 強制対流熱伝達係数と無次元数との関係

$$\text{プラントル数 } Pr \equiv \frac{\mu}{\rho\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (\text{粘性力と熱拡散との比})$$

## □ 平板の層流境界層方程式の相似解から、

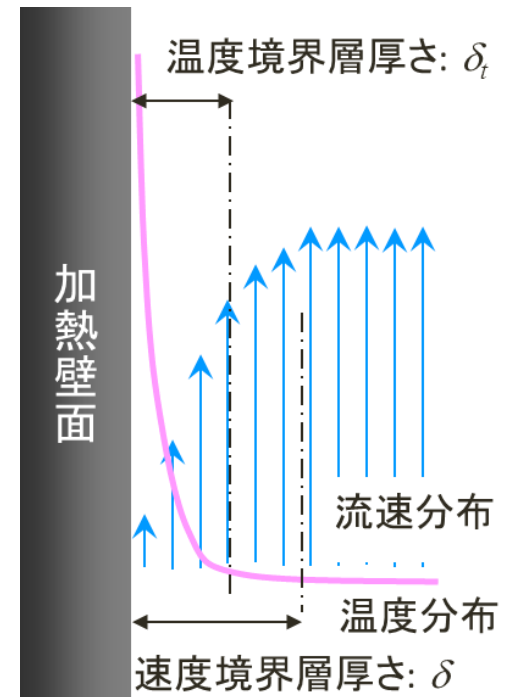
- ✓  $h/k$  ( $Nu$ 数) は温度境界層の厚さ  $\delta_t$  に反比例する
- ✓ 温度境界層厚さと速度境界層厚さ  $\delta$  との比を  $Pr$  数で表す
- ✓ 速度境界層厚さは  $Re$  数に関連付けられる

$$Nu \propto \frac{1}{\delta_t} = \left(\frac{1}{\delta}\right) \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_t}\right) \quad \left(\frac{1}{\delta}\right) \propto Re^m \quad \left(\frac{\delta}{\delta_t}\right) \propto Pr^n$$



$$Nu = C Re^m \cdot Pr^n$$

乱流において境界層薄膜化の影響より層流とは次数が異なる



$$\text{スタントン数 } St \equiv h / C_p \rho V = Nu / (Re \cdot Pr) \quad (\text{対流熱伝達と熱拡散との比})$$

# 熱伝達の基礎(4/6)

## 自然対流熱伝達係数と無次元数との関係

$$\text{グラスホフ数 } Gr = \frac{g\rho^2\beta(T_w - T_t)L^3}{\mu^2} = \frac{\text{浮力}}{\text{粘性}^2} \quad (\text{流れ場における浮力の影響})$$

浮力は体積膨張率を用いて表せる

$$F_{grav} = (\rho_k - \rho_t)g \quad T_k : \text{バルク(各相)の温度}$$
$$\approx \rho\beta(T_t - T_k)g \approx \rho\beta(T_w - T_k)g \quad T_t : \text{境界層内の温度}$$

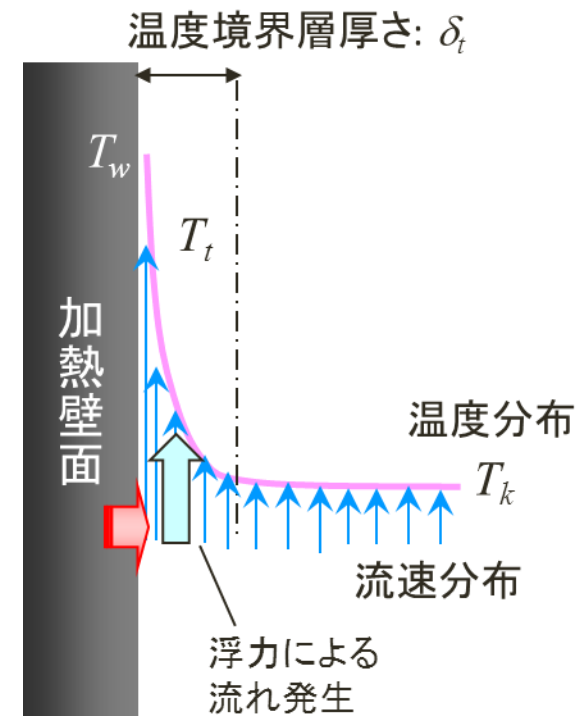
## 層流境界層方程式の相似解から、

- ✓  $h/k(Nu)$ 数は温度境界層の厚さ $\delta_t$ に反比例
- ✓ 温度境界層厚さと速度境界層厚さとの比を $Pr$ 数で表す
- ✓ 速度境界層厚さは、境界層内流れの駆動力である  
浮力に依存し、 $Gr$ 数に関連付けられる



$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^m$$

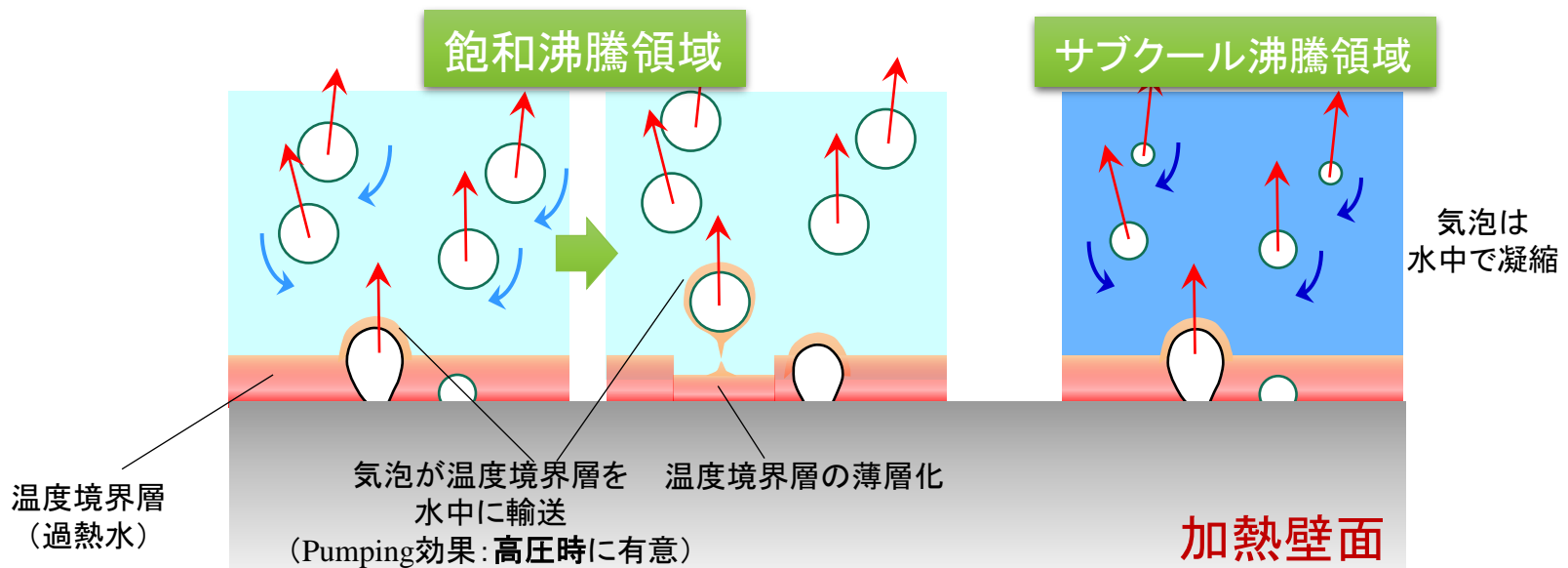
多くの実験相関式で  
用いられる式形



# 熱伝達の基礎(5/6)

## □ 沸騰熱伝達(1)

- **気泡の発生⇒離脱**が熱伝達を大きく促進(**核沸騰熱伝達**)
  - 気泡離脱時の加熱面の**過熱水と周囲の流体との混合**(ポンピング効果)
  - 気泡離脱時の**温度境界層の薄層化**
  - 相変化による潜熱の輸送
- **核沸騰熱伝達係数の整理式**
  - 伝熱面の状態(粗さなど)の影響 ⇒ 理論的導出が困難(→実験ベース)
  - 実験データを無次元数で整理した相関式が多数存在



# 熱伝達の基礎(6/6)

## □ 沸騰熱伝達(2)

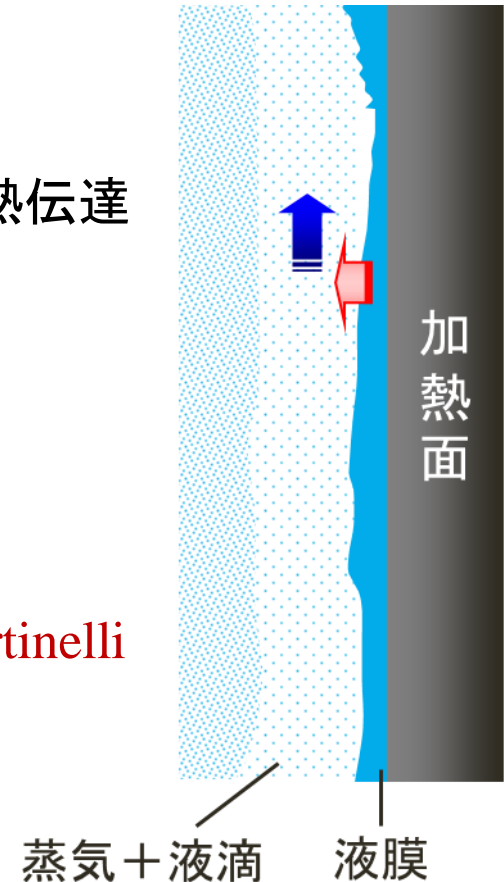
### □ 強制対流蒸発

- ✓ 環状流及び環状噴霧流において支配的な沸騰熱伝達
- ✓ 壁面の薄液膜上における対流と蒸発に起因

### □ 強制対流蒸発における熱伝達係数の整理

- ✓ 熱伝達係数は蒸気クオリティに依存  
(蒸気及び液膜の流速, 液膜厚さが関係する)
- ✓ 单相流の強制対流熱伝達との比をLockhart-Martinelli  
パラメータ  $\chi_{tt}$  で整理

$$\chi_{tt} \equiv \sqrt{\frac{(\Delta P/\Delta z)_l}{(\Delta P/\Delta z)_g}} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.1}$$



$(\Delta P/\Delta z)_l$ ,  $(\Delta P/\Delta z)_g$  は, それぞれの相が流路を単独で流れるとしたときの圧力損失勾配

# 界面熱伝達項，壁面熱伝達項の導出(1/3)

- TRAC系コードのエネルギー保存式における仮定
  - 基礎式における各相の存在割合の導入(時間平均化)
  - 流路面積で平均化した取扱い
  - 1圧力モデル
    - ✓ 気相と液相で時間平均された圧力が等しい
    - ✓ 各相と界面で時間平均された圧力，状態量，流速が等しい
  - 流体内の熱伝導効果を見捨てる(流れ方向)
  - 流体粘性の効果を見捨てる(流れ方向)
  - 乱流成分を陽に取り扱わない
  - 界面せん断力が行う仕事を無視(TRACG・TRACT)
  - 界面における運動エネルギー輸送項を省略(TRACG・TRACT)
    - ✓ 流速自体の大きさと比べて気液相対速度が十分に小さいため，界面における運動エネルギーは無視できない
  - 重力による仕事を無視(TRACG・TRACT)

# 界面熱伝達項，壁面熱伝達項の導出(2/3)

## □ 壁面熱伝達量の導出(TRACG・TRACTの場合)

TRAC系コードのエネルギー保存式(保存形:TRACG・TRACTの場合)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \alpha_k \rho_k \left( e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \right\} + \nabla \cdot \left\{ \alpha_k \rho_k \left( e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \vec{V}_k \right\}$$

$$= -\nabla \cdot (\alpha_k P \vec{V}_k) + \Gamma_k H_k - P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + Q_{kw}''' + Q_{ki}'''$$



時間平均保存式から導出

時間平均されたエネルギー保存式に前頁の仮定を適用

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \alpha_k \rho_k \left( e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \right\} + \nabla \cdot \left\{ \alpha_k \rho_k \left( e_k + \frac{1}{2} V_k^2 \right) \vec{V}_k \right\}$$

$$= -\nabla \cdot \left\{ \alpha_k \left( \vec{Q}''_k + \vec{Q}''_k^T \right) \right\} - \nabla \cdot (\alpha_k P_k \vec{V}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{\tau}_k \cdot \vec{V}_k) + \alpha_k \rho_k \vec{g} \cdot \vec{V}_k + E_k$$

(流れ方向の熱伝達を無視)

粘性応力及び重力による仕事を無視

$$\nabla \cdot \left\{ \alpha_k \left( \vec{Q}''_k + \vec{Q}''_k^T \right) \right\} \approx Q_{kw}''' : \text{壁面より各相に輸送される熱量}$$

次頁で説明

# 界面熱伝達項，壁面熱伝達項の導出(3/3)

## □ 壁面熱伝達量の導出(TRACG・TRACTの場合)

時間平均された界面におけるエネルギー輸送量 (Ishiiの導出を参照※)

$$E_k = \Gamma_k \left( H_{ki} + \vec{V}_{ki} \cdot \vec{V}_k - \frac{V_k^2}{2} \right) + Q_{ki}''' - P_{ki} \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} - \left( \vec{M}_{ki} \cdot \vec{V}_{ki} - \nabla \alpha_k \cdot \vec{\tau}_{ki} \cdot \vec{V}_{ki} + W_{ki}^T \right)$$

界面における運動エネルギーを無視

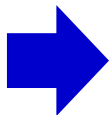
界面せん断力が行う仕事，及び乱流成分を無視

$\Gamma_k H_{ki}$  : 界面における内部エネルギー変化量  $\Rightarrow$  1圧力の仮定から  $\Gamma_k H_i$

$\Gamma_k \left( \vec{V}_{ki} \cdot \vec{V}_k - \frac{V_k^2}{2} \right)$  : 界面における運動エネルギー変化量

$P_{ki} \frac{\partial \alpha_k}{\partial t}$  : 界面において圧力が行う仕事

$\Rightarrow$  1圧力の仮定から  $P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t}$



$$E_k = \Gamma_k H_k + Q_{ki}''' - P \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} \quad (1)$$

$Q_{ki}'''$  : 界面より各相に輸送される熱量

# 熱伝達のモデル化

## －界面熱伝達－



# 界面熱伝達モデル(1/11)

## □ 気液界面間の熱伝達量

$$Q_{gi}''' = a_i h_{gi} (T_g - T_{sat})$$

$a_i$ : 界面積濃度

$$Q_{li}''' = a_i h_{li} (T_l - T_{sat})$$

$h_{gi}$ : 気相界面の対流熱伝達係数

$h_{li}$ : 液相界面の対流熱伝達係数

✓ 界面積濃度及び対流熱伝達係数: 流動様式ごとに計算

界面積濃度はドリフトフラックスパラメータを用いてモデル化

□ 気液界面で熱力学的平衡が成りたつとして, 更に次を仮定

✓ 時間平均・流路面積平均された界面の質量輸送量  $\Gamma_g = -\Gamma_l$

✓ 時間平均・流路面積平均された界面のエネルギー輸送量  $E_g = -E_l$



相変化に伴う質量変化量:

$$\Gamma_g = -\frac{Q_{gi}''' + Q_{li}'''}{H_{fg}}$$

$$H_{fg} = H_g - H_f$$

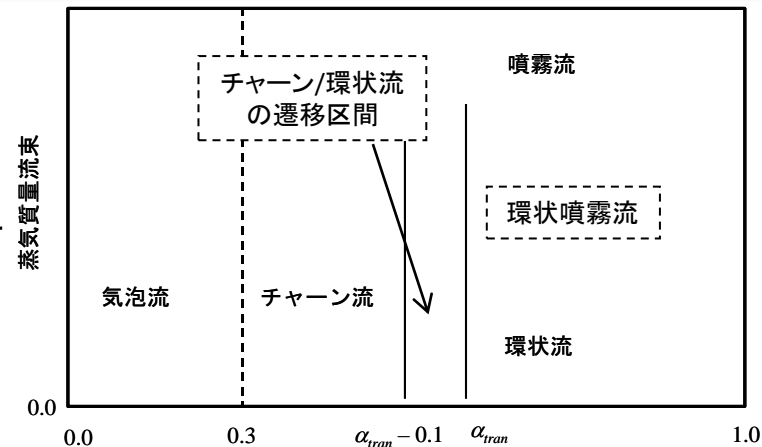
# 界面熱伝達モデル(2/11)

## □ 界面熱伝達モデルに関する流動様式

界面せん断力モデルに関する流動様式と同じ

- ✓ 気泡／チャーン流, 環状流及び噴霧流の三つに分類
- ✓ 気泡／チャーン流と環状流との間に遷移ボイド率区間を設け, その区間の両端の熱伝達係数及びその微係数を3次スプライン補間
- ✓ 環状流と噴霧流間に遷移的に環状噴霧流を設け, エントレインメント割合に応じて熱伝達係数及び界面積濃度を補正
- ✓ 遷移ボイド率及びエントレインメント割合をモデル化

TRACGの流動様式図



# 界面熱伝達モデル(3/11)

## □ 界面熱伝達モデルで用いられるドリフト速度の相関式

✓ 気泡／チャーン流

TRACG・TRAC-BF1・TRACT  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = 1.53 \left( \frac{\Delta\rho g \sigma}{\rho_l^2} \right)^{0.25}$  (Zuber-Findlayの式)

✓ 噴霧流

TRACG・TRAC-BF1・TRACT  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \sqrt{2}(1-\alpha) \left( \frac{\Delta\rho g \sigma}{\rho_g^2} \right)^{0.25}$  (Ishiiの式)

TRAC-BF1は右式を併用  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \frac{3\sigma}{\rho_g} \left[ \frac{(g\Delta\rho)^2}{\mu_g \rho_g} \right]^{1/3} (1-\alpha)j^{-2}$  ;  $1.456 \left( \frac{g\sigma\Delta\rho}{\rho_g^2} \right)^{0.25} \left( \frac{\mu_g^2}{\sigma\rho_g \sqrt{\sigma/g\Delta\rho}} \right)^{-1/12} < j$

⇒ 界面積濃度及び熱伝達係数の計算に用いる気液相対速度の決定に使用  $\langle\langle V_r \rangle\rangle = \frac{\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle}{1-\alpha}$

✓ 遷移ボイド率計算のための環状流側ドリフト速度

TRACG・TRACT  $\langle\langle V_{gj} \rangle\rangle = \frac{(1-\alpha)^{3/2}}{\alpha+b} \sqrt{\frac{\Delta\rho g D_h}{0.015\rho_l}}$   $b \equiv \sqrt{\frac{1+75(1-\alpha)}{\sqrt{\alpha}}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$

⇒ TRACG・TRACTにおいて、遷移ボイド率の計算に限って使用

# 界面熱伝達モデル(4/11)

## □ 界面熱伝達計算時の遷移ボイド率計算に用いる分布定数

✓ 気泡／チャーン流

$$C_0 = C_\infty - (C_\infty - 1)\sqrt{\rho_g / \rho_l} \quad C_\infty : \text{ボイド率が0に近づくときの分布定数}$$

TRACG

$$C_\infty = 1.288 + 0.105 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \Big|_{P_{ref}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \Big|_P - 0.0155 \log_e \left( \frac{GD_h}{\mu_l} \right)$$

(Nikuradseの試験に基づく式を修正)

TRAC-BF1・TRACT

$$C_\infty = 1.393 - 0.0155 \log \left( \frac{GD_h}{\mu_l} \right)$$

(Nikuradseの試験に基づくIshiiの式)

✓ 環状流

TRACG・TRAC-BF1・TRACT

$$C_0 = 1 + \frac{1 - \alpha}{\alpha + b} \quad b \equiv \sqrt{\frac{1 + 75(1 - \alpha)}{\sqrt{\alpha}}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$$

# 界面熱伝達モデル(5/11)

## □ 界面熱伝達モデル(気泡／チャーン流)

### □ 界面積濃度の評価式 (TRACG・TRAC-BF1・TRACT)

界面積濃度はボイド率と代表気泡径 $d_b$ とから得られる  $a_i = \frac{6\alpha}{d_b}$

$We$ 数(慣性力と表面張力の比)に基づき  $d_b = \frac{\sigma We_b}{\rho_l \langle\langle V_r \rangle\rangle^2}$

代表気泡径を評価

両式から, 界面積濃度:  $a_i = 6\alpha \frac{\rho_l \langle\langle V_r \rangle\rangle^2}{\sigma We_b}$

ここで代表気泡径に相当する $We$ 数:  $We_b = 6.5$

- ✓ 代表気泡径, 代表液滴径に相当する $We$ 数について (TRACG)
  - 液滴が分裂する径(最大液滴径)に相当する臨界 $We$ 数は12とされる※
  - 存在する液滴群の径が分布を持つとして, 半分程度の $We$ 数を使用
  - 一方, 気泡群の径は沸騰離脱時の径とも関連し, より複雑な物理的背景をもつ
  - 平均液滴径に対応する $We$ 数の根拠を平均気泡径にも使用

なお, 界面せん断力モデルは, 具体的な気泡径(又は $We$ 数)の値は使用しない

# 界面熱伝達モデル(6/11)

## □ 界面熱伝達モデル(気泡／チャーン流)

### □ 熱伝達係数の計算式 (TRACG・TRAC-BF1・TRACT)

✓ 気相と界面の熱伝達係数: 
$$h_{gi} = \frac{2}{3} \pi^2 \frac{k_g}{d_b} \left[ 2.7 \frac{\mu_l}{\mu_g} \right]$$

- 界面において飽和温度となる球形粒子の熱伝導方程式の解析解に基づく
- 気泡内部の循環流を考慮するため,  $2.7\mu_l/\mu_g$ を導入

✓ 液相と界面の熱伝達係数: 
$$Nu_l = 2 + 0.74 Re_b^{1/2} \quad Re_b \equiv \frac{\rho_l \langle \langle V_r \rangle \rangle d_b}{\mu_l}$$

(修正Lee-Ryleyの式)



$$h_{li} = \frac{Nu_l k_l}{d_b}$$

- 球周りの対流熱伝達の整理式より導出される
- 液滴の蒸発を対象とした試験結果に基づく(噴霧流の界面熱伝達を参照)
- オリジナルの式より第2項に乘じられる $Pr^{1/3}$ を省略 (液相では  $Pr \approx 1$ のため)

# 界面熱伝達モデル(7/11)

## □ 界面熱伝達モデル(環状流)

### □ 界面積濃度の評価式 (TRACG・TRAC-BF1・TRACT)

コントロールボリューム内の液膜割合を定義する  $\alpha_f = 1 - \alpha$

円管内液膜割合で表した界面積濃度  
(界面せん断力モデルと同様の評価)

$$A_i = \frac{4}{D_h} \sqrt{1 - \alpha_f} \quad : \alpha_f > \alpha_{f,\min}$$

コントロールボリューム内の平均液膜厚さ

$$\delta = \frac{D_h}{2} (1 - \sqrt{\alpha})$$

最小安定液膜流れの理論的検討より以下を導出

最小液膜厚さ  $\delta_{\min} = \min \left\{ 0.5 \left( \frac{18\sigma\mu_l^2}{g^2 \rho_l^3} \right)^{0.2}, \left( \frac{6\sigma\mu_l^2}{\rho_l \tau^2} \right)^{1/3} \right\}$  (TRACG・TRACT)

$\delta_{\min} = \left( \frac{18\sigma\mu_l^2}{g^2 \rho_l^3} \right)^{0.2}$  (TRAC-BF1)

最小液膜割合

$$\alpha_{f,\min} = 1 - \left( 1 - \frac{2\delta_{\min}}{D_h} \right)^2$$

ボイド率1に近づくときの界面積濃度

$$A_i = \frac{4}{D_h} \sqrt{1 - \alpha_{f,\min}} \left[ \frac{\alpha_f}{\alpha_{f,\min}} \right] \quad : \alpha_f < \alpha_{f,\min}$$

# 界面熱伝達モデル(8/11)

## □ 界面熱伝達モデル(環状流)

### □ 熱伝達係数の計算式

✓ 気相と界面の熱伝達係数:

TRACG・TRACT  $St \equiv \frac{h_{gi}}{\rho_g C_{p,g} V_g} = 0.02$  ←  $h_{gi} = 0.02 \rho_g C_{p,g} V_g$   
 (Theofanous式に基づく)

TRAC-BF1 以下で評価される単相対流における熱伝達係数の最大値

$$h_{gi} = 0.023 \frac{k_g}{D_{if}} Re_g^{0.8} Pr_g^{1/3} \quad (\text{乱流熱伝達})$$

$$h_{gi} = 4.0 \frac{k_g}{D_{if}} \quad (\text{層流熱伝達}) \quad D_{if} = D_h - 2\delta_f \quad (\text{気相部の直径})$$

✓ 液相と界面の熱伝達係数:

TRACG・TRACT  $h_{li} = 2 \frac{k_l}{\delta}$  薄液膜内の熱伝導方程式の近似解

TRAC-BF1 (Megahedの式)  $h_{li} = \frac{0.0771 C_{p,l} \dot{m}_l (g V_l^{-2})^{1/3}}{\pi D_h (Jax \cdot Re_{film})^{2/3}}$  ←

$$\dot{m}_l = \frac{(1 - Ent)(1 - \alpha) \rho_l V_l \cdot Vol}{\Delta Z}$$

$$Jax = \left[ \frac{C_{p,l} (T_{sat} - T_l)}{h_{fg}} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \right]$$

$$Re_{film} = \frac{4\dot{m}_l}{\mu_l \pi D_h}$$



# 界面熱伝達モデル(9/11)

## □ 界面熱伝達モデル(噴霧流)

### □ 界面積濃度の計算式 (TRACG・TRAC-BF1・TRACT)

コントロールボリューム内の液滴割合を定義する  $\alpha_d = 1 - \alpha$

We数(慣性力と表面張力の比)に基づき  
平均液滴径を評価  $d_d = \frac{\sigma We_d}{\rho_g \langle\langle V_r \rangle\rangle^2}$

一方, 高流量時では初期相対速度で径が決定する  $d_d = \frac{\sigma We_d}{\rho_g j^2}$   
また, 初期相対速度は全体積流束で近似できる

上記二つの式で評価した平均液滴径の最大を取る  $d_d = \frac{\sigma We_d}{\rho_g \max[\langle\langle V_r \rangle\rangle^2, j^2]}$

気泡径と同様に液滴径と  
ボイド率の関係から

$$A_i = 6\alpha_d \frac{\rho_l \max[\langle\langle V_r \rangle\rangle^2, j^2]}{\sigma We_d}$$

ここで,  $We_d = 6.5$ (TRACG・TRACT),  $2.7$ (TRAC-BF1)

※ 液滴径には数値的困難さの観点から, 熱伝達が過大にならないように制限を課す(気泡も同様)

# 界面熱伝達モデル(10/11)

## □ 界面熱伝達モデル(噴霧流)

### □ 熱伝達係数の計算式 (TRACG・TRAC-BF1・TRACT)

気相と界面の熱伝達係数:

(Lee-Ryleyの式)

$$Nu_g = 2 + 0.74 Re_d^{1/2} Pr_g^{1/3}$$



$$h_{gi} = \frac{Nu_g k_g}{d_d}$$

ここで  $Pr_g = \frac{\mu_g C_{p,g}}{k_g}$

$$Re_d \equiv \frac{\rho_g d_d \langle\langle V_r \rangle\rangle}{\mu_g}$$

(TRACG・TRACT)

$$Re_d \equiv \frac{\rho_g d_d \max[\langle\langle V_r \rangle\rangle, j]}{\mu_g}$$

(TRAC-BF1)

- 液滴蒸発の測定結果に基づく(測定範囲  $64 < Re_d < 250$ )
- 球周囲の熱伝達に関する試験データベースに対する妥当性確認より,  
 $20 < Re_d < 2000$  の範囲に対して適用可能とできる

液相と界面の熱伝達係数:

$$h_{li} = \frac{2}{3} \pi^2 \frac{k_l}{d_d} [2.7]$$

- 液滴内部の循環流を考慮するため, 2.7を導入

# 界面熱伝達モデル(11/11)

## □ 界面熱伝達に関する各相関式の適用性

- サブクール領域における界面熱伝達
  - 気泡の凝縮を通じて、界面せん断力と共にボイド率評価に影響する
  - 過渡時の界面熱伝達係数については、過渡時の気泡凝縮及びフラッシングに対する妥当性確認が重要(“BWRへの適用性”参照)
- 気泡／チェーン流における界面熱伝達
  - AOOの範囲では気相と液相がほぼ等温となるため、界面熱伝達は有意ではない(低温時RIAでは、気泡の凝縮が有意となる)
  - 熱伝達係数の計算式は、凝縮、蒸発のそれぞれに対して同じ式を使用すること、液滴を対象とした計算式を気泡に対しても使用することに留意
- 環状流、環状噴霧流、噴霧流における界面熱伝達
  - AOOの範囲では気相と液相とがほぼ等温となるため、界面熱伝達は小さい。LOCAでは、気相が過熱するため液滴蒸発が有意
  - 環状流では、乱流が液膜上の熱伝達係数に対して支配的となるため、TRACG・TRACTとTRAC-BF1の相関式の違いは問題ない

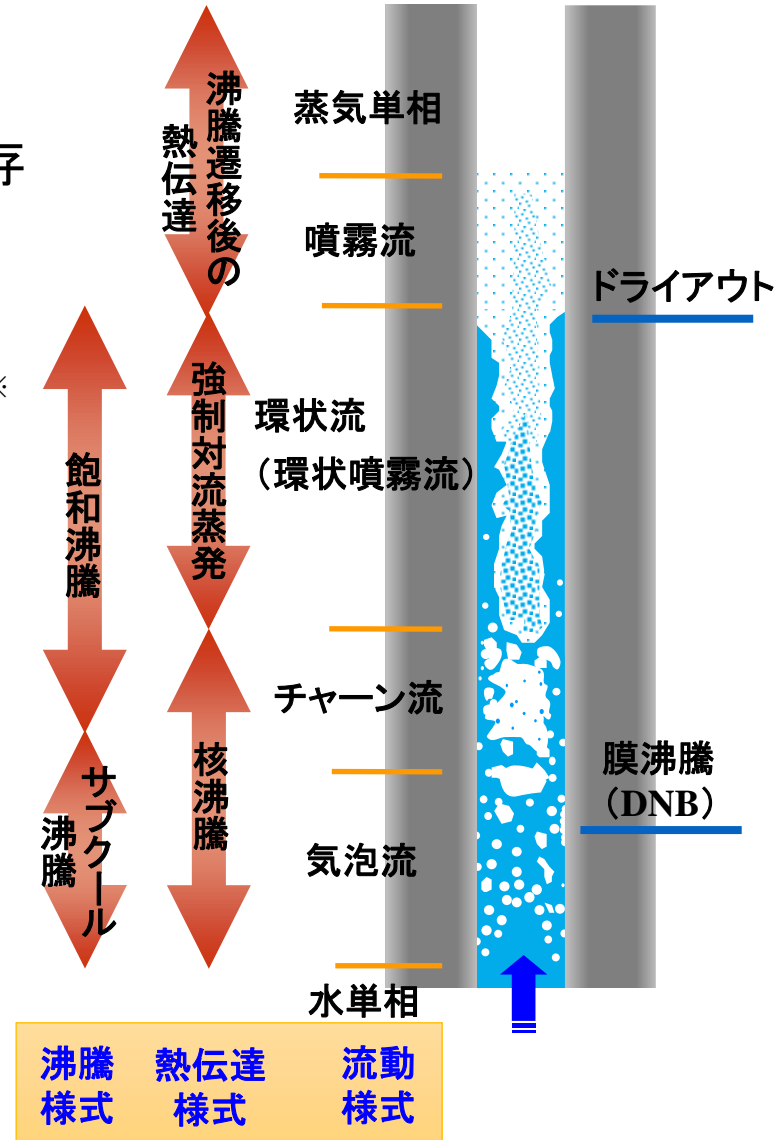
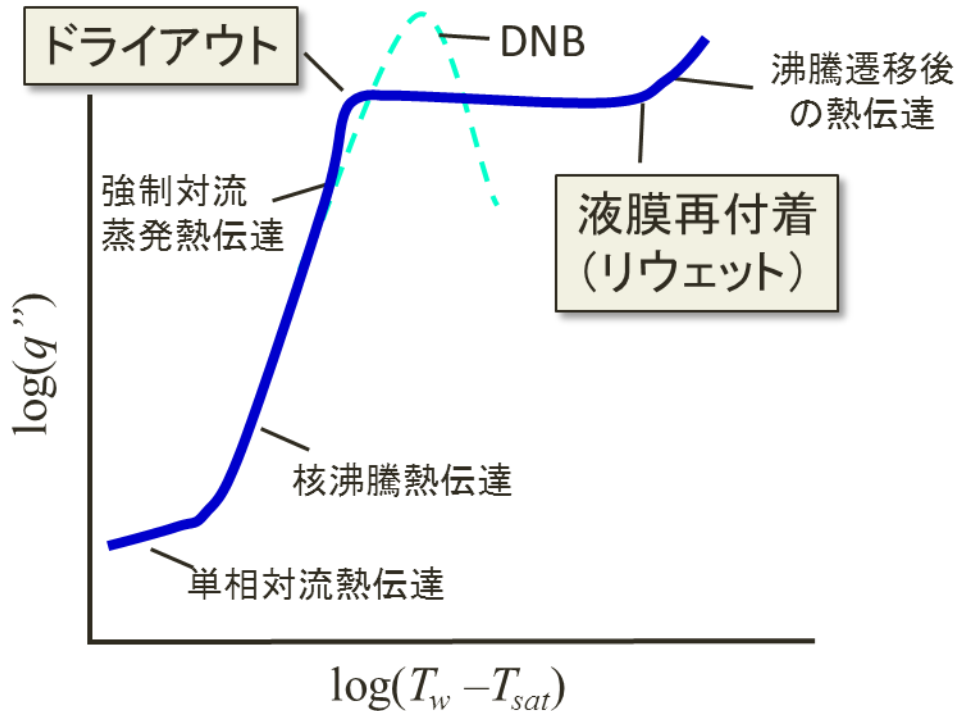
# 熱伝達のモデル化

## －壁面熱伝達－

# 壁面熱伝達モデル(1/14)

## □ 沸騰様式(熱伝達様式)

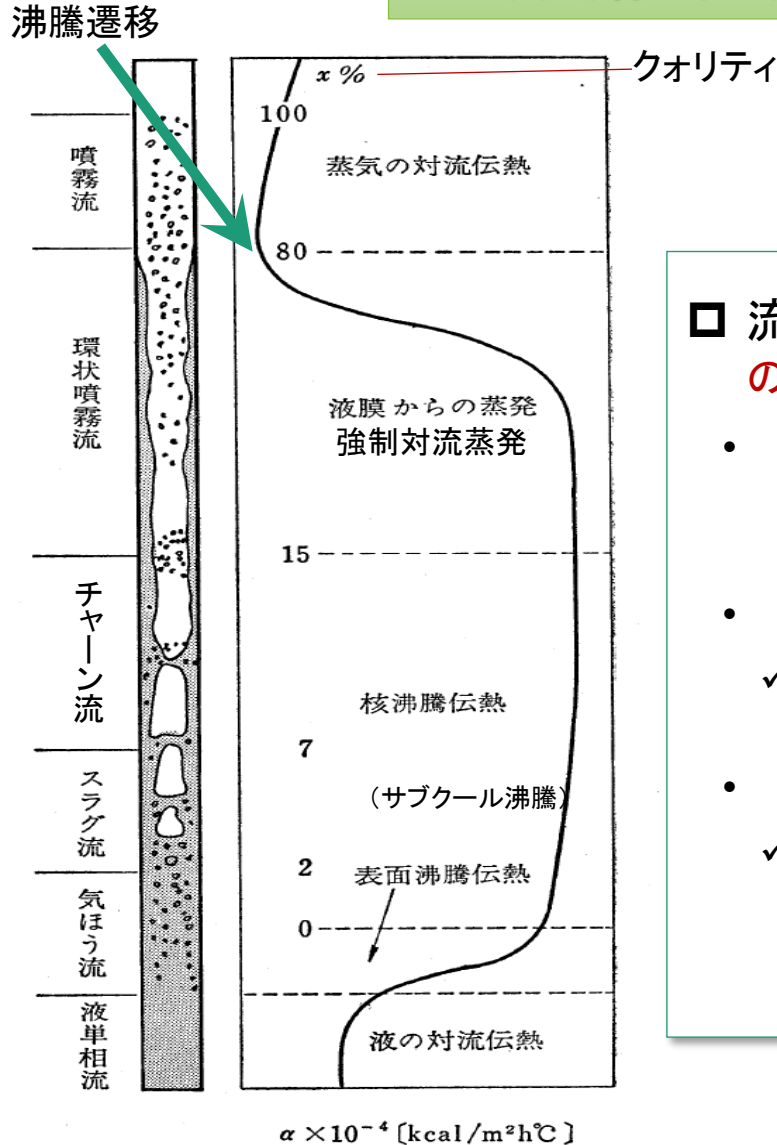
- 壁面熱伝達は沸騰様式, 流動様式などに依存
- BWR定常運転条件における沸騰遷移
  - ドライアウトなどによって沸騰遷移発生
  - リウエット時の熱流束は限界熱流束と同程度※



※Ref.: 日本原子力学会, BWRにおける過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準(2003).

# 壁面熱伝達モデル(2/14)

## 流動様式と熱伝達との関係



□ 流動様式の変化に対応して、熱伝達係数(図中の右図の実線)が変化

- 気泡流, チャーン流などのように、伝熱面上に十分に液が存在する場合 ⇒ 核沸騰が生じ、(液单相流に比べて)熱伝達係数が非常に大
- 環状噴霧流では、壁面上を薄液膜が流れる。
  - ✓ 薄液膜内では沸騰せず、液膜が過熱されることで液膜の表面から蒸発が生じる。熱伝達係数は最大
- 液膜が消失して噴霧流に遷移(沸騰遷移)すると、
  - ✓ 沸騰による除熱効果がなくなり、さらに熱伝導率の小さな蒸気が壁面に接触するため、熱伝達係数が急激に低下し、**伝熱面の温度の急昇**に至る可能性が生じる

# 壁面熱伝達モデル(3/14)

## □ TRAC系コードにおける壁面熱伝達の分類

- ノードごと、燃料棒グループごとの熱水力条件に対応する沸騰様式を決定
- 沸騰様式ごとに相関式を用いて熱伝達係数を計算

### 沸騰様式分類のまとめ (TRACG)

熱水力条件	沸騰遷移前		沸騰遷移後	
	$T_w < T_{sat}$	$T_{sat} < T_w < T_{CHF}$	$T_{CHF} < T_w < T_{min}$	$T_{min} < T_w$
$\alpha = 0$	液単相対流	液単相対流	N/A	N/A
$0 < \alpha < \alpha_{tran}$	液単相対流	サブクール沸騰又は核沸騰	遷移沸騰	膜沸騰 / 噴霧流
$\alpha_{tran} < \alpha < 1$	凝縮	強制対流蒸発	遷移沸騰	膜沸騰 / 噴霧流
$\alpha = 1$	N/A	気相単相対流	気相単相対流	気相単相対流

(沸騰遷移後の沸騰様式分類はPost-BTに基づく)

# 壁面熱伝達モデル(4/14)

## □ 液单相流の対流熱伝達

液相への熱伝達係数を層流, 乱流及び自然対流の係数値の最大値とする

層流熱伝達

TRACG・TRACT・TRAC-BF1

$$Nu_l = 4.0 \quad \longrightarrow \quad h_{lw} = 4.0 \frac{k_l}{D_h}$$

乱流熱伝達  $Nu_l = 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^n$   $Re_l \equiv \frac{G_l D_h}{\mu_l}$   $Pr_l \equiv \frac{C_{p,l} \mu_l}{k_l}$   $\longrightarrow h_{lw} = Nu_l \frac{k_l}{D_h}$

TRACG・TRACT:  $n=0.4$  (Dittus-Boelterの式)

TRAC-BF1:  $n=1/3$  (Colburnの式)

自然対流熱伝達

TRACG・TRACT 
$$h_{lw} = 0.12 k_l \left\{ \frac{-g \rho_l \frac{\partial \rho_l}{\partial T} C_{p,l} |T_w - T_l|}{\mu_l k_l} \right\}^{1/3}$$
 (Fishenden-Saundersの式)

TRAC-BF1 
$$h_{lw} = 0.13 \frac{k_l}{D_h} (Gr_l \cdot Pr_l)^{1/3}$$
 (McAdamsの式)



# 壁面熱伝達モデル(5/14)

## □ 飽和沸騰の対流熱伝達 (TRACG・TRAC-BF1・TRACT)

### □ Chenの式 (核沸騰熱伝達 + 強制対流熱伝達)

#### ✓ 核沸騰熱伝達

- 気泡形成・移動に誘発された擾乱に伴う微視的な熱伝達機構
- プール沸騰熱伝達相関式を、対流の影響に係る抑制因子 $S$ で補正

$$h_{tw} = S \cdot 0.00122 \frac{k_l^{0.79} C_{p,l}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_{sat})^{0.24} (P_w - P_{sat})^{0.75} \quad S = \text{fun}(Re_{TP})$$
$$Re_{TP} = Re_l F^{1.25}$$

#### ✓ 強制対流熱伝達

- 強制対流蒸発による巨視的な熱伝達寄与
- 液膜表面沸騰及び気泡形成に伴う熱伝達増加の効果を因子 $F$ で補正

$$h_{tw} = 0.023 \frac{k_l}{D_h} Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} F \quad (\text{又は自然対流, 層流の熱伝達係数})$$

$$F = 2.35(\chi_{tt}^{-1} + 0.213)^{0.736} : \chi_{tt}^{-1} > 0.10 \quad \chi_{tt} : \text{Lockhart-Martinelli因子 (P.41)}$$

( $F$ : Flow factor)

# 壁面熱伝達モデル(6/14)

## □ サブクール沸騰における熱伝達

### □ サブクール沸騰条件(気泡離脱エンタルピ)

TRACG・TRACT・TRAC-BF1  
(Saha-Zuberの式)

$$h_{ld} = \begin{cases} h_f - 154 \frac{q_w''}{\rho_g V_l} & \frac{G_l D_h C_{p,l}}{k_l} > 70000 \\ h_f - 0.0022 \frac{q_w'' D_h C_{p,l}}{k_l} & \frac{G_l D_h C_{p,l}}{k_l} \leq 70000 \end{cases}$$

### □ 気相及び液相へのエネルギー配分

$$q_w'' = q_l'' + q_{evap}''$$

TRACG・TRACT  
(Rouhani-Bowringの式)

$$q_l'' = \begin{cases} q_w'' & h_l \leq h_{ld} \\ q_w'' \frac{h_f - h_l}{h_f - h_{ld}} \left( 1 + \frac{h_l - h_{ld}}{h_f - h_l} \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right) & h_l > h_{ld} \end{cases}$$

ポンピング因子  

$$\varepsilon = \frac{\rho_l (h_f - h_l)}{\rho_g h_{fg}}$$

TRAC-BF1  
(Lahey Mechanisticモデル)

$$q_{evap}'' = \begin{cases} 0 & h_l \leq h_{ld} \\ q_w'' h_{fg} \left[ \frac{h_l - h_{ld}}{(h_f - h_{ld}) \{ h_{fg} + (h_f - h_l) h_l / h_g \}} \right] & h_l > h_{ld} \end{cases}$$

- ✓ 上記の二つの式は実質的にはほぼ同等の式
- ✓ 高圧から中圧の条件に限り適用が可能(ポンピング因子の導入のため)

# 壁面熱伝達モデル(7/14)

## □ 気相单相流の対流熱伝達

気相への熱伝達係数を層流, 乱流, 自然対流熱伝達の最大値で与える

層流熱伝達

$$\text{TRACG} \cdot \text{TRACT} \cdot \text{TRAC-BF1} \quad Nu_g = 4.0 \quad \rightarrow \quad h_{gw} = 4.0 \frac{k_g}{D_h}$$

乱流熱伝達  $Nu_g = 0.023 Re_g^{0.8} Pr_g^n$   $Re_g \equiv \frac{G_g D_h}{\mu_g}$   $Pr_g \equiv \frac{C_{p,g} \mu_g}{k_g}$   $\rightarrow h_{gw} = Nu_g \frac{k_g}{D_h}$

TRACG・TRACT・TRAC-BF1 :  $n = 1/3$  (Colburnの式)

自然対流熱伝達

$$\text{TRACG} \cdot \text{TRACT} \cdot \text{TRAC-BF1} \quad Nu_g = 0.13 (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad (\text{McAdamsの式})$$

$$\rightarrow h_{gw} = 0.13 \frac{k_g}{D_h} \left\{ \frac{D_h^3 \rho_g^2 g |T_w - T_g|}{\mu_g^2 T_g} \right\}^{1/3} \left( \frac{C_{p,g} \mu_g}{k_g} \right)^{1/3}$$

# 壁面熱伝達モデル(8/14)

## □ 壁面熱伝達モデルの適用性(沸騰遷移前)

### • 単相対流熱伝達(気相及び液相)

#### • 乱流熱伝達(Dittus-Boelter式)

- AOOにおける主な範囲となり, 多くの試験データに対して妥当性が確認されてきた(妥当性確認の範囲:  $Re > 6000$ ,  $0.7 < Pr < 160$ )
- AOOの範囲である高圧条件では,  $Pr$ の次数の違いは問題とならない

#### • 自然対流相関式

- $Gr \cdot Pr > 10^7$ の範囲で妥当性確認がなされている
- TRACG・TRACTは, 自然対流相関式で歴史的背景から気相と液相とで異なる式が用いられるが, 同等な熱伝達係数を計算する式。区別する技術的な理由なし

### • 飽和沸騰の対流熱伝達(Chen式)

- 複数の試験データベースを用いた妥当性確認において, Chenの式はそのほかの相関式と比較して平均偏差が小
- 相関式作成に当たって以下の範囲の試験データベースを利用

$$0.09 < P < 3.48 \Rightarrow 6.9\text{MPaまで拡張される}^{\ast}, \quad 54 < G < 4070 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

# 壁面熱伝達モデル(9/14)

## □ 沸騰遷移に対する判定基準(1)

- 局所CHFを予測するモデル
    - 修正Biasiの式 - 高流量条件
    - 修正Zuberの式 - 低流量条件
- TRACG・TRAC-BF1・TRACT  
で共通に使用
- 限界クオリティに基づくモデル
    - A型燃料用: GEXL相関式 (TRACG・TRACT・TRAC-BF1)
    - B型燃料用: 沸騰遷移相関式 (TRACT)
  - 限界クオリティ(限界出力時のクオリティ)と沸騰長さとの関係  
(飽和沸騰開始高さから計算位置までの高さ)の相関を表す
    - 相関式は異なる軸方向出力分布(下部及び中央ピーク)に対応可能
    - 定常試験データに基づく式であるため過渡への適用性に対する確認が重要
  - 10x10燃料用のGEXL式などでは, 上部ピークの軸方向出力分布にも対応させるため, 沸騰長さに加えて環状流長さをパラメータに追加

# 壁面熱伝達モデル(10/14)

## □ 沸騰遷移に対する判定基準(2)

- 限界クオリティに基づくモデル

### ✓ GEXL相関式のパラメータ例

一部の燃料タイプでは環状流長さが更に加わる

$$x_c = f(L_B, G, P, L, D_q, R)$$

$x_c$ : 限界クオリティ     $L_B$ : 沸騰長さ     $G$ : 単位面積当たりの質量流量

$P$ : 圧力     $L$ : 加熱長さ     $D_q$ : 熱的等価直径     $R$ : 局所ピーキングの関数で与えられる因子

### 限界出力の計算方法

1. 対象の集合体の条件から, 上記モデルで“限界クオリティ対沸騰長さ”曲線を計算
2. 集合体の“クオリティ対沸騰長さ”特性を計算し, 1.の曲線と接する点を限界出力とする

### ✓ GEXL相関式の妥当性確認(TRACG)※

- 実規模燃料模擬試験ループにおける7x7燃料～10x10燃料の試験データに基づく
- 定常への適用: 90%以上の試験データについて±6%以内で予測
- 過渡への適用: 大半のケースで沸騰遷移発生時刻を±0.35s以内で予測するか, 又は試験結果よりも早い時刻を予測

※ Ref. TLR-009 Rev.4, 沸騰水型原子力発電所GETABの概要(1998).  
HLR-007 Rev.4, 沸騰水型原子力発電所 原子炉の熱水力評価法(GETAB)について(1997).

# 壁面熱伝達モデル(11/14)

## □ 最小安定膜沸騰温度 (TRACG)

□ 再冠水時の沸騰曲線の極小点に対応し、壁面がクエンチする条件を与える

修正Shumwayの式 
$$T_{min} = T_{sat} + 3.7 \frac{\rho_l + \rho_g}{\Delta\rho} \frac{h_{fg}}{C_{p,l} Pr_l} \left[ 1 + (1 - \alpha)^2 \right] \left( 1 + 1.5 \cdot 10^{-5} Re_l \right)^{0.15}$$
$$\times \left( 1 - \frac{P}{P_{crit}} \right)^{0.1} \sqrt{\frac{\rho_l k_l C_{p,l}}{\rho_w k_w C_{p,w}}} \quad P_{crit} : \text{臨界圧力}$$

Iloejeの式 
$$T_{min} - T_{sat} = 0.29 \Delta T_{BER} \left( 1 - 0.295 x_e^{2.45} \right) \left[ 1 + \left( 7.37 \times 10^{-2} G \right)^{0.49} \right]$$

Berensonの式を補正 
$$\Delta T_{BER} = 0.127 \frac{\rho_g h_{fg}}{k_g} \left[ \frac{g \Delta \rho}{\rho_l + \rho_g} \right]^{2/3} \left[ \frac{\sigma}{g \Delta \rho} \right]^{1/2} \left[ \frac{\mu_g}{g \Delta \rho} \right]^{1/3}$$

均質核生成相関式 
$$T_{min} = T_c + (T_c - T_l) \sqrt{\frac{\rho_l k_l C_{p,l}}{\rho_w k_w C_{p,w}}} \quad T_c : \text{水の臨界温度}$$

※クエンチにおいては、局所熱平衡クオリティが限界クオリティの97%より低いことも条件となる

# 壁面熱伝達モデル(12/14)

## □ 沸騰遷移後の熱伝達(1) (TRACG)

### □ 膜沸騰熱伝達(低ボイド率)

✓ 蒸気膜における熱伝導 + 輻射

気相への壁面熱伝達

層流対流熱伝達係数を修正Bromleyの式で評価

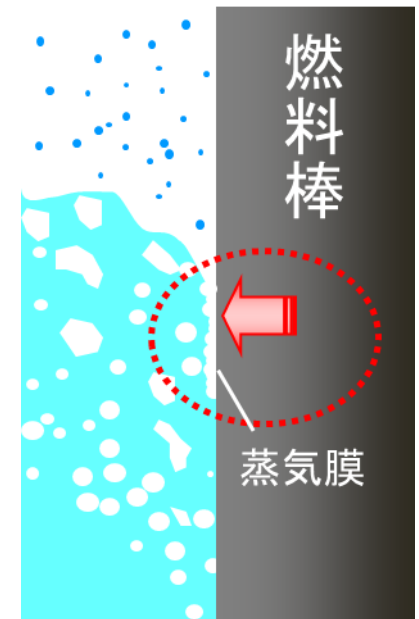
$$h_{gw} = C \left[ \frac{k_g^3 \rho_g^3 (\rho_l - \rho_g)^4 h_{fg}^2 g^4}{\mu_g^4 (T_w - T_{sat})^2 \sigma} \right]^{1/11} \quad C = \frac{4}{3} \left\{ \left( \frac{3n-1}{8} \right)^4 / \left( \frac{3\pi\sqrt{3}}{2} \right)^2 \right\}^{1/11}$$

$n$ は液相と混合流の流速比から求まる

未修正のBromleyの式にKelvin-Helmholtzの不安定性に基づく特性長さ $L_H$ を導入

$$h_{gw} = 0.62 \left[ \frac{k_g^3 \rho_g (\rho_l - \rho_g) h_{fg} g}{\mu_g (T_w - T_{sat}) L_H} \right]^{1/4}$$

RIA解析指針の修正Bromleyの式とは異なる式



液相への壁面熱伝達

$$h_{lw} = \varepsilon_w \frac{\sigma_s (T_w^4 - T_{sat}^4)}{T_w - T_l}$$

$e_w$ : 壁面輻射率

$s_s$ : Stefan-Boltzman定数



# 壁面熱伝達モデル(13/14)

## □ 沸騰遷移後の熱伝達(2) (TRACG)

### □ 膜沸騰熱伝達(高ボイド率)

- ✓ 気相单相の強制対流 + 液滴蒸発

気相への壁面熱伝達係数 (修正Tien-Gonzalesの式)

$$h_{gw} = \frac{k_g}{D_h} \left( 2X - 1 + \frac{(Nu_{SP} + 1)^2}{Nu_{SP} + 1 + 2X} \right) \quad X = \frac{D_h}{2} \sqrt{\frac{\beta h_g}{k_g h_{fg}}}$$

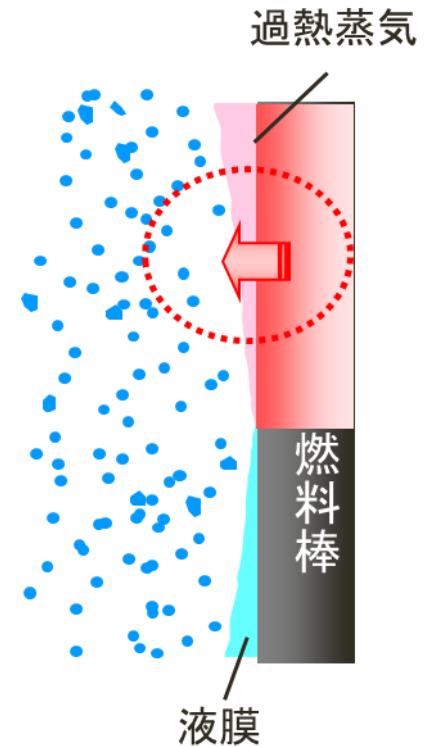
強制対流効果:  $Nu_{SP} = \frac{D_h}{k_g} h_{gw,SP}$   $h_{gw,SP}$ : 単相対流熱伝達係数

蒸気から液滴への  
対流熱伝達係数:

$$\beta \equiv Nu_d k_g N_d \pi d_d$$

$$Nu_d = 2 + 0.74 \left( \frac{d_d \rho_g \langle \langle V_r \rangle \rangle}{\mu_g} \right)^{1/2} Pr^{1/3}$$

$N_d$ : 液滴の数密度



# 壁面熱伝達モデル(14/14)

## □ 遷移沸騰(TRACG)

飽和沸騰熱伝達係数及び沸騰遷移後の熱伝達係数から次のように補間

$$h_{kw} = \gamma h_{kw,NB}(T_{CHF}) + (1 - \gamma) h_{kw,PCHF}(T_{min})$$

$$\gamma = \left( \frac{T_w - T_{min}}{T_{CHF} - T_{min}} \right)$$

$h_{kw,NB}(T_{CHF})$  :  $T_{CHF}$ における飽和沸騰の熱伝達係数  
(Chenの式による核沸騰, 強制対流蒸発の熱伝係数計算値)

$h_{kw,PCHF}(T_{min})$  :  $T_{min}$ における沸騰遷移後の熱伝達係数

# BWRへの適用性－妥当性確認試験(TRACG) (1/3)

## □ 沸騰遷移前の界面熱伝達及び壁面熱伝達

- ✓ 気泡流及び環状噴霧流における界面熱伝達モデル
- ✓ サブクール沸騰及び飽和沸騰における壁面熱伝達モデル



ボイド率に関する種々の個別要素試験において  
界面せん断力モデルも含めて妥当性確認

### ➤ 例: Christensenサブクールボイド試験

- ✓ 単相サブクール水を加熱管(長さ1.27m, 水力等価直径0.018m)に流入
  - ✓ ボイド率挙動に対し, サブクール沸騰及び飽和沸騰における壁面熱伝達モデル, 並びに界面熱伝達モデルの影響が有意
- ✓ ボイド率と熱平衡クオリティの関係について, 測定値と計算値との関係を整理

# BWRへの適用性－妥当性確認試験 (TRACG) (2/3)

## □ 沸騰遷移後の界面熱伝達及び壁面熱伝達

✓ 噴霧流における界面熱伝達モデル

✓ 沸騰遷移後の壁面熱伝達モデル



熱伝達に関する個別要素試験を用いて妥当性確認

(Oak Ridge国立研究所: THTF試験, GE: 炉心スプレイ熱伝達試験 - CSHT試験)

## □ 界面熱伝達, 壁面熱伝達に関するその他の妥当性確認試験

✓ PSTF試験: LOCAによる減圧過渡時の試験容器内圧力及び水位の模擬

∵ 試験で発生するフラッシング量が界面熱伝達に依存

✓ Edwardsブローダウン試験: PSTF試験より更に急な減圧過渡試験

✓ CSHT試験におけるゼロ出力試験: CCFL現象における蒸気凝縮量の模擬

✓ 総合効果試験において, 各熱伝達モデルの適用性を総合的に確認

# BWRへの適用性－妥当性確認試験 (TRACG) (3/3)

## □ 沸騰遷移に対する判定基準

- ✓ 実燃料模擬熱水力試験によって過渡時の限界出力特性について確認
  - バンドル流動振動模擬試験
  - 圧力増加過渡事象及びABWR全ポンプトリップの模擬試験

## 熱伝達モデルの適用範囲 (TRACG)

流動様式, 沸騰様式ごとに使用される個々の相関式の適用範囲及び妥当性確認の実施範囲から適用範囲を決定

目 次 （以下で太ゴシック字部はおおむね作成が完了している項目）

- 1 序
- 2 トピカルレポートの申請範囲
- 3 引用規格及び参考とする規格類
- 4 用語及び定義
- 5 TRACOOの概要
- 6 TRACOOの適用性の評価に係る重要事項
  - 6.1 はじめに
  - 6.2 TRACOOの適用対象及び適用を除外する対象
  - 6.3 PIRT
    - 6.3.1 概要
    - 6.3.2 TRACOOを適用する安全評価対象事象
    - 6.3.3 安全評価の実施方針
    - 6.3.4 注目パラメータの設定
    - 6.3.5 時間領域の分割
    - 6.3.6 物理領域の設定
    - 6.3.7 現象の同定及び重要度のランク付
  - 6.4 評価マトリックス
    - 6.4.1 概要
    - 6.4.2 AOO
    - 6.4.3 DBA
    - 6.4.4 プラント安定性を含む，核熱水力安定性
  - 6.5 TRACOOへの性能要求
- 7 TRACOOの数学モデル
  - 7.1 モジュール構造
    - 7.1.1 コンポーネントモジュール
    - 7.1.2 コンポーネントの接続
    - 7.1.3 制御系
  - 7.2 熱水力モデル
    - 7.2.1 流体場の方程式
    - 7.2.2 差分式
    - 7.2.3 運動量保存式における特別な取扱い
  - 7.3 熱伝導モデル
    - 7.3.1 固体物質中の熱伝導に関する支配方程式
    - 7.3.2 熱伝導方程式の差分化

- 7.4 流動様式マップ
  - 7.4.1 TRACG の流動様式マップの基礎
  - 7.4.2 妥当性確認及び BWR への適用性
- 7.5 構成式に係る数学モデル
  - 7.5.1 界面せん断力
  - 7.5.2 壁面摩擦及び形状損失
  - 7.5.3 臨界流
  - 7.5.4 2 相水位モデル
  - 7.5.5 界面熱伝達
  - 7.5.6 壁面熱伝達
  - 7.5.7 乱流混合及び分子混合
- 7.6 コンポーネントモデル
  - 7.6.1 パイプ
  - 7.6.2 ポンプ
  - 7.6.3 弁
  - 7.6.4 T 字管
  - 7.6.5 燃料チャンネル
  - 7.6.6 ジェットポンプ
  - 7.6.7 気水分離器
  - 7.6.8 ベッセル
  - 7.6.9 熱交換器
  - 7.6.10 境界条件
- 7.7 数値解法
  - 7.7.1 熱伝導方程式の差分化
  - 7.7.2 2 流体熱水力方程式の差分化
- 7.8 3 次元中性子動特性モデル
  - 7.8.1 数学モデルの定式化及び仮定
  - 7.8.2 核定数, 反応度などの中性子動特性に関わる数学モデル
  - 7.8.3 崩壊熱モデル
  - 7.8.4 熱水力モデルとのインターフェース及び実装
  - 7.8.5 ほう素挙動の 3 次元動特性モデル
- 7.9 制御系モデル
  - 7.9.1 制御ブロック
  - 7.9.2 制御系モデルのインターフェース
  - 7.9.3 制御系モデルの解法, 留意点など
- 7.10 反応度印加事象の解析に適用する数学モデル

- 7.10.1 概要
- 7.10.2 壁面熱伝達相関式
- 7.10.3 限界熱流束相関式
- 7.10.4 燃料・被覆管物性値
- 7.10.5 減速材温度反応度フィードバックモデル
- 7.11 過渡的な沸騰遷移の解析に適用する数学モデル
  - 7.11.1 概要
  - 7.11.2 リウエット相関式
  - 7.11.3 修正 Dougall-Rohsenow 式
  - 7.11.4 Groeneveld 5.9 式
- 7.12 物性値など
  - 7.12.1 熱力学及び輸送に関する流体の物性値
  - 7.12.2 材料の物性値
- 7.13 品質マネジメント
  - 7.13.1 品質保証計画
  - 7.13.2 TRAC〇〇のモデル解説に係る品質保証
- 8 TRAC〇〇の適格性評価
  - 8.1 適格性評価の方法
  - 8.2 エレメント1：概念モデルの開発
    - 8.2.1 対象とする実現象の同定
    - 8.2.2 注目システム応答変量の指定
    - 8.2.3 要求すべきモデルの予測性能の指定
    - 8.2.4 システムの分析
    - 8.2.5 概念モデルの開発
  - 8.3 エレメント2：数学的モデル化
    - 8.3.1 概要
    - 8.3.2 数学モデルへの変換
    - 8.3.3 計算モデルへの実装
    - 8.3.4 コード検証
    - 8.3.5 解検証
    - 8.3.6 不確かさの定量化
  - 8.4 エレメント3：物理的モデル化
    - 8.4.1 不確かさ評価済みの実験データベースの調査
    - 8.4.2 実験構想の立案
    - 8.4.3 実験計画の作成
    - 8.4.4 実験データの取得



- 8.4.5 妥当性確認用データベースへの追加
- 8.4.6 実験の不確かさの定量化
- 8.4.7 物理的モデルの検証
- 8.5 エレメント4：シミュレーションモデルの予測性能の判断
  - 8.5.1 妥当性確認実験に対する不確かさの定量化及び統合
    - 8.5.1.1 個別効果試験に基づく妥当性確認**
    - 8.5.1.2 上流側の解析コードの妥当性確認などに基づく不確かさの定量化
    - 8.5.1.3 機器性能評価試験に基づく妥当性確認**
    - 8.5.1.4 総合効果試験に基づく妥当性確認**
    - 8.5.1.5 プラントデータに基づく妥当性確認**
  - 8.5.2 予測による不確かさ拡大の定量化
  - 8.5.3 モデルの予測性能の定量化
  - 8.5.4 要求に対するモデル予測性能の判断
  - 8.5.5 モデル予測性能に対する判断の検証
  - 8.5.6 不確かさを考慮した予測評価の実施
  - 8.5.7 評価プロセスの文書化
- 8.6 結論
- 8.7 品質マネジメント
  - 8.7.1 品質マネジメント計画
  - 8.7.2 TRAC〇〇適格性確認報告書の品質マネジメント
  - 8.7.3 適格性評価の品質マネジメント
- 9 参考文献

#### 補足説明資料 A

- A.1 TRAC系コードに関わる従来の状況及び導入の必要性、適用範囲の補足
  - A.1.1 国内の状況
  - A.1.2 TRAC系コードの導入の必要性
  - A.1.3 TRAC系コードを適用する事象の範囲とトピカルレポートの適用範囲との関係に係る補足
  - A.1.4 TRAC〇〇コードに至る経緯
- A.2 TRAC〇〇と従来手法との比較
  - A.2.1 TRAC〇〇の概要
  - A.2.2 TRAC系コードと従来コードとの比較
  - A.2.3 TRACE 5.0 コードとの比較
- A.3 米国におけるTRAC〇〇の適用実績

- A.3.1 TRACOOの適用に係る背景
- A.3.2 TRACOOの適用に係る概要
- A.3.3 AOO への適用実績
- A.3.4 LOCA への適用実績
- A.3.5 ATWS への適用実績
- A.3.6 核熱水力安定性評価への適用実績
- A.3.7 米国でのトピカルレポート審査
- A.3.8 我が国のトピカルレポート審査との関係

#### 補足説明資料 B

- B.1 TRACOOのPIRTに係る補足
  - B.1.1 概要
  - B.1.2 PIRTの作成法及び作成者
  - B.1.3 TRACOOを適用する事象の説明
  - B.1.4 事象グループの整理
  - B.1.5 時間領域の分割
  - B.1.6 物理領域の設定
  - B.1.7 現象の同定
  - B.1.8 重要度のランク付け

#### 補足説明資料 C

- C.1 TRACOOの適格性評価の実施プロセスに係る補足
  - C.1.1 概要
  - C.1.2 エレメント1：概念モデルの開発
  - C.1.3 エレメント2：数学的モデル化
  - C.1.4 エレメント3：物理的モデル化
  - C.1.5 エレメント4：シミュレーションモデルの予測性能の判断
  - C.1.6 評価プロセスの文書化
  - C.1.7 適格性評価の品質マネジメント