稠密バンドル内限界熱流束(1) (出力分布や流動パラメータの影響)

Critical Heat Flux in Tight Lattice Bundles [1] (Effects of Power Distributions and Flow Parameters)

○ 正 呉田 昌俊 (原研) 正 劉 維 (原研)
正 岩村 公道 (原研) 正 秋本 肇 (原研)

M. KURETA, W. LIU, T. IWAMURA and H. AKIMOTO, JAERI, Tokai, Ibaraki

CHF experiments have been conducted using the rod bundles of a narrow triangular arrangement, which simulate the Reduced-Moderation Water Reactor core. The purposes of these experiments are (a) to investigate the parameter effects on critical power, (b) to evaluate the existing correlations, (c) to propose the correlation and (e) to make use of the data for the verification of the numerical analysis code. In this paper, parameter effects on critical power or critical quality were focused as a fundamental understanding. It was found from the comparison between the axially uniform and the double humped power distribution that the critical quality of the double humped one decreases significantly when mass velocity > about 150 kg/m²s.

Key Words: Critical Heat Flux, Tight Lattice Bundle, Boiling Transition, BWR

1. はじめに

日本原子力研究所(原研)では、将来型軽水炉である低減速スペクトル炉(RMWR)の研究開発⁽¹⁾を行っている。本炉心の特徴は、燃料棒を三角格子状に稠密に配置し、炉心内平均ボイド率を従来炉より高く設定することにある。このため、稠密バンドル体系での限界出力の適切な予測が重要であるが、データベースは準稠密のBAPLデータ⁽²⁾に限られていた。原研では稠密炉心の熱設計を適切に行うため、稠密7本バンドル試験体による限界熱流束実験を始めた。本実験の目的は、パラメータ効果の評価、既存式の評価、相関式の提案、解析コードの検証用データベースの構築である。本報では、パラメータ効果に関して記す。

2. 実験

試験体の概略を図1に示す。試験体[A]は、稠密体系の基礎データの取得を目的として製作した軸方向一様分布の7本バンドル試験体である。試験体[B]は、RMWRの軸方向出力分布をモデル化して、主として軸方向出力分布の影響を調べる目的で製作した。限界熱流束実験では、水循環ループに本試験体を組み込んで定常状態における限界値(発熱棒表面に埋め込んだ熱電対温度が急上昇した条件)を測定した。表1、表2に実験条件、および主要な試験体寸法を示す。試験体[A]を用いた軸方向一様発熱の実験では、412点の限界熱流束データを蓄積した。試験体[B]を用いた実験は現在実施中である。

3. 実験結果

(1) 質量速度、軸方向出力分布の影響 図2に、軸方向一

様発熱で得られた限界出力値(■)と非一様発熱で得られた限界出力値(●)とをそれぞれ示す。なお、試験体寸法が異なるため、発熱部出口端で完全蒸発する条件を、参考のため、図2中に実線で示した。一様発熱のデータ(■)は、出口完全蒸発条件近傍を単調に増加し、この傾向は、小口径円管の特性⁽³⁾に類似していた。一方、軸方向非一様発熱試験体(●)では、質量速度が約150 kg/(m²s)以下では、

Fig. 1 Schematic views of the test sections

Table 2 Configuration parameters

	Sym bol	Z-Uniform(2001) Test Sec. [A]	Z-Non-Uniform(2002) Test Sec. [B]	Unit
Rod Diameter	D_{rod}	12.3	13.0	mm
Gap between Rods	s	1.0	1.3	mm
Gap between Rod and Shroud	s'	0.5	0.65	mm
Flow Area	A	0.000241	0.000311	m ²
Hydraulic Equivalent Diameter	D_h	2.35	2.86	mm
Heated Equivalent Diameter	D_h	3.56	4.34	mm
Heated Perimeter Ratio	P_w/P_w	0.66	0.66	-
Radial Peaking Factor	F_R	0.98 - 1.48	1.13 - 1.44	-
Heated Length	L_h	1.8	1.26	m
Axial Peaking Factor	F_z	1	0.19 - 2.19 (12 Steps)	-

Table 1 Experimental conditions

Parameter	Symbol	Experimental Range		Unit
		Z-Uniform(2001) [Test Sec. A]	Z-Non-Uniform(2002) [Test Sec. B] ^{*1}	
Exit Pressure	P_{ex}	1. ~ 8.5	2. ~ 8.5	MPa
Inlet Subcooling	ΔT_{in}	2 - 50	2 - 50	K
Mass Velocity	G	0.0 ~ 2515	100.0 ~ 1381	kg/(m ² s)
Transverse Heat Flux Ratio	k	0.97 - 1.6	1.16 - 1.55	-

*1 Data (Oct. 2002)

Fig. 2 Comparison between uniform and double humped data

Fig. 3 Comparison between uniform and double humped data

出口完全蒸発条件と近い値で限界となるが、約 150kg/(m²s) 以上では、限界出力の質量速度に対する増加率が小さくなる限界出力特性となった。この傾向は、入口水温が高いほど顕著であった。沸騰水型原子炉 (BWR) の場合、バンドル体系の熱流束分布が非一様であるため、限界出力をバーンアウト位置のクオリティ、すなわち限界クオリティで評価することが一般に行われてきた。本報でも、バーンアウト発生位置に着目し、限界クオリティで限界出力を整理することとした。なお、限界出力 Q_{cr} と限界クオリティ x_{cr} は以下の関係がある。

$$Q_{cr} = \sum_{n=1}^N \int_0^{z_{cr}} \pi \cdot D_{n,rod} q_n(z) dz = G \cdot A \cdot h_{fg} (x_{cr} - x_{in})$$

$$x_{in} = \frac{h_f - h_{in}}{h_{fg}} \quad (1)$$

ここで、 x_{in} は水温の顕熱上昇分を表すパラメータであり、入口クオリティと呼ぶことにする。

図 2 の実験値を、限界クオリティで表示した結果を図 3 に示す。一様発熱試験体では、 $G < 1000 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ 程度で、 $x_{cr} > 0.7$ と高いクオリティのまま、質量速度に対して単調減少するが、非一様発熱試験体の場合 (●) は、 $G = 300 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ 以下で、急勾配で限界クオリティが低下する特性となることがわかった。急勾配となる現象の把握が今後の課題である。

Fig. 4 Critical quality as a function of critical power

Fig. 5 Critical quality as a function of exit pressure

(2) 入口クオリティの影響 図 4 に限界クオリティと入口クオリティの関係を示す。図 4 は非一様発熱試験体での結果であるが、一様発熱での結果も図 4 と似ており限界クオリティが入口クオリティのほぼ線形関数として表せることがわかった。なお、 $G = 100 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ では計算上クオリティが 1 以上と計測されたが、この条件では流下液膜による Flooding が限界を決めると考えられる。

(3) 圧力の影響 図 5 に一様発熱試験体での圧力と限界クオリティの関係を示す。非一様発熱試験体での結果は、限界クオリティが図 5 より低い値となるが傾向は似ていた。

(4) 周 (径) 方向出力分布の影響 (中心棒出力/周辺棒出力) 比を変化させ、周 (径) 方向出力比の限界クオリティに及ぼす影響を調べた。軸方向一様発熱試験部では、この比が大きくなるとやや限界クオリティが減少し、軸方向非一様発熱試験体の場合、この変化はわずかであった。

4. まとめ

稠密バンドル試験体を用いた限界熱流束実験を実施し、各種パラメータと限界クオリティの関係を分析した。軸方向非一様発熱の場合、質量速度が $150 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ 程度以上で限界クオリティが急勾配で低下することがわかった。限界クオリティ特性を変える現象の把握が今後の課題である。

参考文献

- (1) T. Iwamura et al, Proceedings of ICAPP (2002)
- (2) B. W. LeTourneau et al., WAPD-TM-1013, (1975)
- (3) 呉田, 機論(B 編), 61-591 (1995), 4109.